

McKinsey
Global Institute

アジアにおける 気候変動リスクと 対応策

Future of Asia



November 2020

マッキンゼー・グローバル・ インスティテュート

マッキンゼー・グローバル・インスティテュート(MGI)は、マッキンゼー・アンド・カンパニーのビジネスと経済に関する研究部門として、1990年の設立以来、各業界のリーダーに対し経営・政策に関する意思決定のための知見を提供することを目的に活動してきた。

MGIのリサーチ手法は、経済学の分析ツールとともに各業界のビジネスリーダーのビジネス知見を活用しつつ、経済学と経営理論を組み合わせたものである。MGIは、「マイクロからマクロへ」と呼ばれる方法論によりマイクロの産業トレンドを精査することで、事業戦略や公共政策に影響を与えるマクロ経済の潮流への理解を深めている。リサーチの対象は20カ国以上の国と30以上の産業にわたり、焦点を当てるテーマは、生産性と経済成長、天然資源、労働市場、金融市場の進化、テクノロジーとイノベーションが経済に与える影響、都市化の6つである。最近のレポートでは、デジタルエコノミー、人工知能と自動化が雇用に及ぼす影響、収入の不平等、生産性向上の課題、男女不平等などの解消による経済効果、グローバル競争の新時代、中国における変革、デジタルおよび金融のグローバルライゼーションを取り上げている。

MGIは、マッキンゼー・アンド・カンパニーのジェームス・マニーイカ(James Manyika)、スヴェン・シュミット(Sven Smit)、ジョナサン・ウーツェル(Jonathan Woetzel)のディレクター3名が率いており、シュミットとマニーイカはMGIの共同議長も務める。マイケル・チュウイ(Michael Chui)、スーザン・ルンド(Susan Lund)、アヌー・マドガカー(Anu Madgavkar)、ジャン・ミシュク(Jan Mischke)、シュリ・ラーマスワミ(Sree Ramaswamy)、ヤーナ・レメス(Jaana Remes)、ジョンミン・ソン(Jeongmin Seong)、ティルマン・タッケ(Tilman Tacke)がMGIのパートナーを務めている。マカラ・クリシュナン(Mekala Krishnan)はMGIのシニアフェローである。プロジェクトチームは、MGIのパートナーを筆頭にシニアフェローのグループがリードし、世界各地のマッキンゼー・アンド・カンパニーのコンサルタントが参加する。チームは、マッキンゼー・アンド・カンパニーのパートナー陣、および産業やマネジメントの専門家から成る世界的なネットワークを活用する。

MGIカウンスルは、世界各地のマッキンゼーのオフィスや産業別研究グループのリーダーらで構成され、メンバーにはマイケル・バーシャン(Michael Birshan)、アンドレ・カデナ(Andrés Cadena)、サンドリーヌ・デビヤール(Sandrine Devillard)、アンドレ・ドウア(André Dua)、ケイリン・エリングラッド(Kweilin Ellingrud)、タレク・エルマズリ(Tarek Elmasry)、ケイティ・ジョージ(Katy George)、ラヤット・グプタ(Rajat Gupta)、エリック・アザン(Eric Hazan)、アチャ・リーク(Acha Leke)、ゲイリー・ピンカス(Gary Pinkus)、オリバー・トンビー(Oliver Tonby)、エックカート・ヴィントハーゲン(Eckart Windhagen)がいる。カウンスルメンバーのサポートのもと、リサーチのアジェンダを策定し、インパクトの高いリサーチを遂行し、得られた所見を世界中の意思決定者らに共有する。また、ノーベル賞受賞者を含む世界屈指のエコノミストもリサーチアドバイザーとして参加している。

本レポートの趣旨は、ビジネスリーダーや政策立案者が、世界経済に大きな影響を与える要因を理解し次なる成長の波に備えるための支援を行う、というMGIの使命に合致している。MGIのリサーチは、マッキンゼー・アンド・カンパニーのパートナーが資金を提供して実施しており、企業、政府その他のいかなる組織に委託されたものでもない。MGIの詳細とレポートのダウンロードについては<http://www.mckinsey.com/mgi> をご覧いただきたい。

アジアにおける 気候変動リスクと 対応策

Future of Asia

2020年11月

著者

ジョナサン・ウーツェル | 上海
オリバー・トンビー | シンガポール
メカラ・クリシュナン | ボストン
山田唯人 | 東京
スヴァジョイ・セングプタ | デリー
ディコン・ピナー | サンフランシスコ
ルスラン・ファクトディノフ | モスクワ
渡邊 哲 | 東京

序文

世界はいまだCOVID-19のパンデミック(世界的大流行)への対応に追われているが、それ以外の重大な世界的リスクにも、見過ごすことなく対処していく必要がある。気候変動対策を講じなかった場合の社会的・経済的影響は非常に大きく、アジアは、場合によっては他の地域よりも深刻な影響を受ける可能性がある。本レポートでは、アジアにおける気候変動による物理的影響を検証する。現在および今後30年におけるリスクを洗い出し、事例を検証しながら、気候変動による物理的影響が社会経済的リスクを増大させる仕組みを解明し、影響の大きさと発生確率を推計する。さらに、マクロ分析とミクロ分析に基づいて、アジアにおいて有効な適応策や緩和策を提示する。本レポートが、世界中の意思決定者にとって、気候変動の物理的リスクをよりの確に評価し、適応し、低減するための一助となれば幸いである。

今回の調査は、Future of Asiaシリーズ、そして気候変動関連の調査の一つであり、アジアで増大しつつある気候変動リスクへの理解を深めることを目的としている。MGIは、1970年代初頭から現在に至るまで、数多くの案件を通じて環境の持続可能性に関わる問題に取り組んでおり、2020年4月には「Addressing climate change in a post pandemic world」を発表している。このレポートは、MGIが2020年1月に発行したグローバルレポート「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」の地域版である。当レポートの調査は、MGIのディレクターで上海オフィス所属のJonathan Woetzel、同シニアフェローでボストンオフィス所属のMekala Krishnanの主導のもと、マッキンゼーのシニアパートナーでシンガポールオフィスに所属し、マッキンゼー・アジアのチェアマンも務めるOliver Tonby、マッキンゼーのグローバルサステナビリティ・プラクティスのリーダーでサンフランシスコオフィス所属のDickon Pinner、マッキンゼーのパートナーで、アジアにおけるサステナビリティプラクティスのリーダーを務める東京オフィス所属の山田 唯人、デリーオフィスのパートナー Suvojoy Sungupta、アムステルダムオフィスのパートナー Godart van Gendtの協働により行われた。プロジェクトチームは、Ruslan Fakhrutdinov、渡邊 哲、Erica Zhuang、Youting Leeをリーダーとし、Brian Cooperman、David Carmona、Peter De Fordがモデリング、分析、データサポートを実施した。なお、この分析は2020年上期に行ったもので、COVID-19による影響は加味していない。

マッキンゼーは数多くの気象学者を擁しているが、気候研究機関ではない。そのため、ウッドウェル気候研究センター(Woodwell)と共同作業を行った。同研究所は、気候変動の物理的影響を科学的に分析し、1985年以来、気候科学に特化した研究を続けている。同所の科学者らは、主要な科学雑誌に広く研究成果を発表し世界中の政策立案者に対する証言を行っており、各種媒体で頻繁に引用されている。手法論の設計や検証結果は、異常気象のモデリングの専門家でオックスフォード大学気候変動研究所のリサーチフェローのLuke Harrington博士が第三者の立場から審査し、検証結果には同氏の見解が反映されている。最終的な設計の選定および気候災害がもたらす影響の解釈はWoodwellが行い、Woodwellの科学者が調査結果を地図上で表しデータを視覚化した。さらに当該調査では、世界資源研究所(WRI)の水リスク地図(Water Risk Atlas)も活用した。

また、貴重な情報を提供してくれたマッキンゼーおよびMGIの現日の同僚であるSameer Ahmed、Aaron Bielenberg、Poonam Bhandarkar、Brodie Boland、Antonio Castellano、Megan Conor、Peter Cooper、Kaushik Das、Angus Dawson、Will Glazener、Stephan Görner、Andrew Grant、Apollo Guan、Alastair Hamilton、Sonam Handa、Claudia Kampel、Joshua Katz、Grace Lam、Timo Leenman、Johanna von der Leyen、Yunzhi Li、Cady Liang、Junjie Ma、Peter Mannion、Ketav Mehta、Raphaële Moeremans、Michele Perlman、Carter Powis、Jianfei Ren、Greg Santoni、Jeongmin Seong、Suyin Soon、Sophie Underwood、瓜生田 義貴、Maarten van der Velden、Steven Vercammen、Antonio Volpin、Dean Walter、Magdalena Włodarczak、Wei Xin、Hao Xu、Jane Zhouにも感謝の意を表したい。

本レポートは、MGIのシニアエディターであるAnna Bernasek、編集ディレクターPeter Gumbel、プロダクションマネージャーJulie Philpot、デザイナーのMarisa Carder、Laura Brown、Patrick Whiteが制作を担当した。また、本レポートの制作に協力しサポートしてくれた、マッキンゼーの同僚であるDennis Alexander、Tim Beacom、Nienke Beuwer、Nura Funda、Cathy Gui、Kate Hegarty、Deadra Henderson、Kristen Jennings、Karen P. Jones、Lauren Meling、Rebeca Robboyにも、感謝の意を表したい。

本レポートの調査は、MGIの他の調査と同様、マッキンゼーの視点を反映し独立的に実施されたものであり、企業、政府およびいかなる組織からも報酬を受けたものではない。本レポートに関するご意見・ご感想は MGI@mckinsey.com までお寄せいただきたい。

ジェームス・マニーイカ (James Manyika)

マッキンゼー・グローバル・インスティテュート 共同議長兼ディレクター
マッキンゼー・アンド・カンパニー シニアパートナー
サンフランシスコ

スヴェン・シュミット (Sven Smit)

マッキンゼー・グローバル・インスティテュート 共同議長兼ディレクター
マッキンゼー・アンド・カンパニー シニアパートナー
アムステルダム

ジョナサン・ウーツェル (Jonathan Woetzel)

マッキンゼー・グローバル・インスティテュート ディレクター
マッキンゼー・アンド・カンパニー シニアパートナー
上海

2020年11月



Ravaged thatch house after typhoon
© Michael Hall/The Image Bank/Getty Images

目次

概要	vi
エグゼクティブサマリー	1
1. アジアの気候変動リスク	31
2. ミクロの視点から見た気候変動リスク	49
国別ダッシュボード	75
3. 有効な気候変動対策その1: 適応策	87
4. 有効な気候変動対策その2: 緩和策	97
テクニカルノート	119
参考文献	137

アジアにおける気変動リスクと対応策

アジアは、気候変動問題の最前線に立たされている。アジアには、風水害のリスクが高い海拔の低い沿岸部の都市が多くあり、極端な降水現象や干ばつが予想される地域も存在する。そのため、適応策や緩和策を講じなければ、アジアの社会・経済の気候変動に対する脆弱性はますます増すことになる。MGIが2020年1月に発行したグローバルレポート「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」では、世界各地に気候変動によるリスクがすでに存在し増大していることを明らかにした。当レポートでは、アジアに焦点を当て、今後30年間で気候変動リスクがどのように変化するかについて検証し、有効な適応策と緩和策を提示している。気候科学では、多くの場合、CO₂(二酸化炭素)濃度が比較的低水準(RCP2.6)から高水準(RCP8.5)までのシナリオが用いられるが、当レポートでは、物理的リスクの特性を理解することに焦点を当てているため、高排出量で特段対策のないシナリオであるRCP8.5を主に取り上げ、脱炭素化が進まなかった場合に生じ得る物理的リスクを検証した。さらに、気候モデルを経済予測と関連づけることで、気候変動が極限に達し物理的限界に近くなった場合の影響を表すミクロなケースを検証している。そして、それぞれのケースについて、6つの指標に基づいて地理空間的評価を行い、アジア16カ国における社会経済的影響を評価した。その結果、以下の点が明らかになった。

アジアでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動による社会経済的影響は世界の平均を上回るほど深刻化する恐れがある。 RCP8.5シナリオでは、2050年には、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口は世界規模で12億人に達する見込みで、少なくともその半分をアジアが占めることになる。2045年から2055年にかけてアジアで致命的な熱波が起こる確率は80%まで上昇する。極端に高い気温や湿度により屋外労働ができなくなることによるアジアのGDP損失の規模は、2050年には世界の年間GDPの三分の二以上を占めるようになる。また、2050年にかけて1年の間に発生する河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産のうち、75%以上がアジアに集中している。

アジアの中でも、気候変動に晒されるリスクや必要となる対応策は地域により異なる。「フロンティアアジア(Frontier Asia)」「アジア新興国(Emerging Asia)」「アジア先進国(Advanced Asia)」「中国」から成るMGIの「4つのアジア(Four Asias)」のフレームワークに基づいて検証を行った結果、1人当たりGDPが比較的低い地域、つまりフロンティアアジアとアジア新興国は、気候変動による影響を最も受けやすいことが分かった。RCP8.5シナリオでは、2050年にかけての気温や湿度の上昇に伴う労働損失時間の割合は、アジア先進国と中国は2~5パーセントポイントであるのに対し、フロンティアアジアとアジア新興国は7~12パーセントポイントと非常に高くなっている。

システムが限界に達しロックオン効果(波及効果)が発生することにより、気候変動の社会経済的影響は増大する。 オーストラリアの約三分の一の地域では、1年当たりの森林火災の発生危険日数が20日以上増加し、年間5日以上森林火災の危険に晒される資産の割合は、現在の44%から2050年には60%まで高まる見通しである。また、東京では、何も適応策をとらない状態で100年に一度級の台風が起きた場合、不動産やインフラの被害総額は2050年には2倍以上の142億ドルに達する可能性がある。

アジアで適応策の実行スピードと規模が増すにつれ、インフラ投資など様々な機会が生まれる。アジアでは、2030年にかけて毎年1.7兆ドルのインフラ投資が見込まれており、気候変動リスクを将来のインフラ設計に組み込む絶好の機会が存在する。有効な適応策としては、リスクの低減や資産の保護、耐性の強化、民間からの資金調達、新しいデータドリブンなアプローチによる気候変動リスクの評価などが挙げられる。対策を講じるための資金調達力を確保するための仕組みの整備と、連鎖的に拡大する気候変動リスクの特性に対応することも重要となる。

リスクの増大を防ぐためには緩和策を講じる必要がある。アジアは、世界人口の多くを占め、GHG(温室効果ガス)排出量に占める割合は約45%となっており、今後10年間の世界の電力総投資額の半分を占めている。そのため、アジアは、グローバルでの適応策の実行を主導する立場にあると言える。アジアにおいて有効な緩和策としては、現在アジアで90%を占めている石炭火力発電から再生可能エネルギー発電へのシフト、アジアの総排出量の三分の一以上を占める産業部門における脱炭素化の推進、アジアのCO₂排出量に占める割合が10%でCH₄(メタン)の排出量に占める割合が40%以上を占める農業・林業の改革、そして、世界のGHG排出量に占める割合が30%以上の交通・建築物分野における脱炭素化の推進が挙げられる。

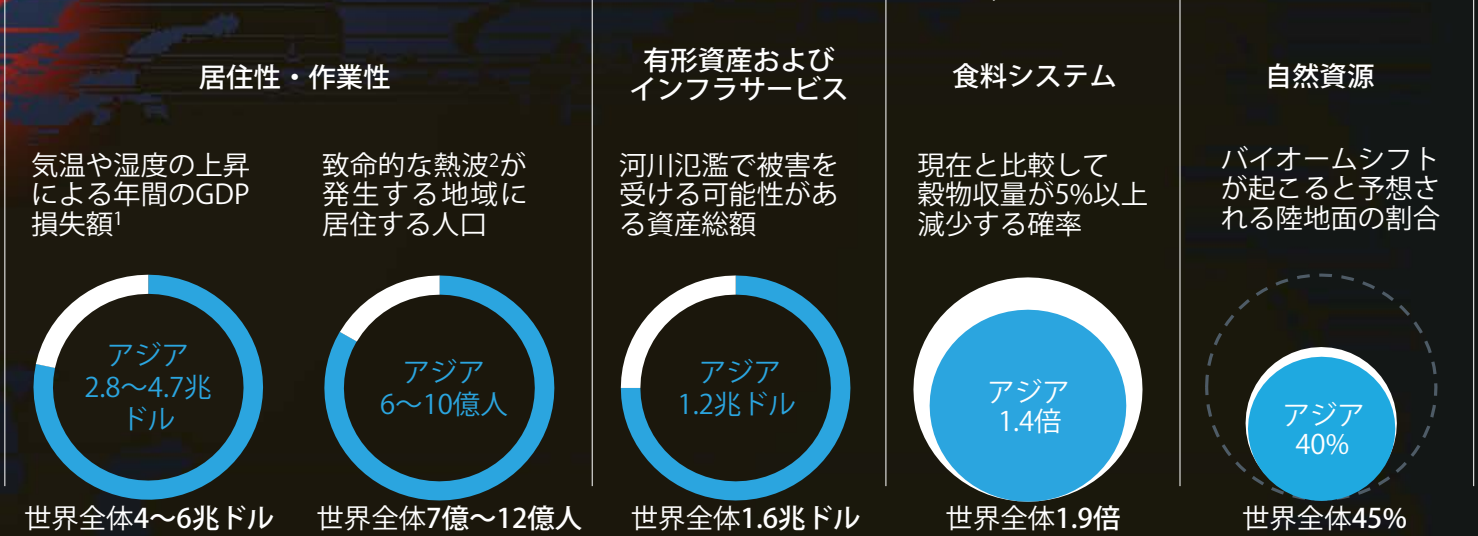
ただし、これらを実現するためには、コストの上昇、失業、特定の地域への影響といった潜在的リスクを管理する必要がある。例えば、インドの石炭産業の場合、再生可能エネルギー発電設備への投資が拡大することで電気料金が上昇する可能性や、石炭火力発電所の作業員が再生可能エネルギー発電所に移れず失業する可能性もある。中国の場合、電力の需要が特に大きい鉄鋼業の事業運営に支障が出ないよう、再生可能エネルギー発電への移行期に十分な電力量を確保することが重要となる。インドネシアでは、農業の脱炭素化と食糧安全保障の両方を実現する必要がある。日本では、電気自動車の初期費用の負担を軽減するためのインセンティブや制度を設けることで、電気自動車の普及拡大につなげることが可能となる。

アジアの国々が適応策や緩和策の実行に際して直面する課題は非常に多いが、克服することは可能である。実際、アジアの国々はすでに協働してこれらの課題に取り組んでいる。このような取り組みを推進・加速させていくことで、人々の生命や生活を守るだけでなく、長期的に持続可能な成長と繁栄につなげることができる。

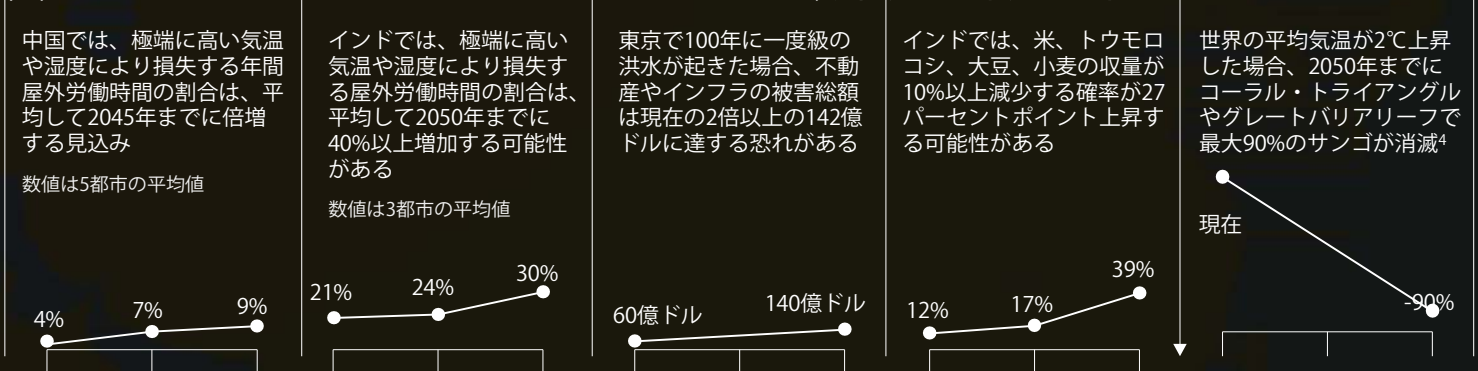
気候変動がアジアに与え得る影響とは

アジアでは、何からの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動により2050年までに様々な面で世界の平均を上回るほどの深刻な影響を受ける恐れがある

適応策を講じない場合に社会経済システムが気候変動より受ける直接的な影響; 2050年



(例)気候変動に対する適応策を講じない場合の物理的リスクの推移; 現在、2030年、2050年³の比較



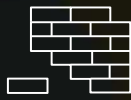
アジアでは、適応策を講じるスピードをさらに加速させ、規模を拡大していく必要がある
アジアで検討すべき適応策:



リスクの評価と対応力の強化



人や資産の保護



耐性の強化



リスクの低減



資金調達・保険制度の整備

リスクの増大を防ぐには緩和策の実施が不可欠である
アジアで検討すべき緩和策:

石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行

90%

アジアの電力部門のCO₂排出量に占める石炭火力の割合

産業部門の脱炭素化

~80%

世界の鉄鋼・セメント業界のCO₂排出量に占めるアジアの割合

農業・林業の改革

20%

世界のメタン排出量に占めるアジアの農業部門の割合

日常生活の電化による自動車や建築物の脱炭素化

33%

世界のGHG排出量に占めるアジアの運輸・建築物分野の割合

1 気温や湿度が上昇することにより損失する実労働時間の割合に基づき算出

2 致命的な熱波は3日間の平均最高湿球温度が34℃を超える状態と定義。一般的に、人が生存可能な湿球温度の限界値は35℃と考えられており、大都市ではヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える熱波が生じる可能性があることから、湿球温度34℃を閾値に設定した。これらの予測は、将来的な大気エアロゾルの挙動や都市部のヒートアイランド効果、またはクーリングアイランド効果に起因する不確定要素に左右される。なお人口の幅は、国際連合(UN)世界人口推計および国際連合(UN)世界都市化予測による人口予測の幅に基づいており、人口の推移については高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている

3 現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義

4 Heron et al., Impacts of Climate Change on World Heritage Coral Reefs :A First Global Scientific Assessment, Paris, UNESCO World Heritage Centre (2017年)

エグゼクティブサマリー

地球は1万年以上にわたり比較的安定した気候条件を維持してきたものの、その状況は一変し、アジアは気候変動問題の最前線に立たされている。気候科学の知見によると、適応策や緩和策が講じられなかった場合、熱波や洪水、森林火災といった過酷な災害の発生頻度と深刻度が増大し(「コラム1: 気候変動リスクについて」参照)、アジアは場合によっては他の地域に比べより深刻な影響を受ける可能性がある。したがって、アジアがさらに経済発展を遂げ世界の経済成長の牽引力となるためにも、気候変動は対処すべき重要な課題となる。

アジアは、これらの課題に対応し、気候リスクがもたらす機会をとらえるうえで極めて有利な立場にある。なぜなら、アジアの多くの地域でインフラ整備や都市の開発が現在進行中であり、高まり続ける気候変動のリスクに耐えられる構造を構築できるからである。それに加えて、中国や日本などアジアの主要経済国は、電気自動車から再生可能エネルギーに至るまで、気候変動の適応・緩和に必要な技術で世界をリードしている。ただし、克服すべき大きな課題が存在する。まず、適応策や緩和策には莫大な投資が必要となる。そして、産業部門全体の脱炭素化への移行といった大きな変化を推進するのは決して容易ではない。しかし、イノベーション精神と決断力を発揮できれば、アジアは、世界共通の課題の一つである脱炭素化への取り組みにおいて世界をリードしていくことができるだろう。

本レポートでは、アジアの気候変動による物理的リスクを定量化している。アジア各国における気候変動リスクの特性とその影響を「4つのアジア」(フロンティアアジア、アジア新興国、アジア先進国、中国)に分類し、検証する。さらに、6つのケーススタディと地理空間分析を通じてアジアの気候変動リスクを検証するとともに、適応や緩和によりリスクに対応する道筋を示すことも目的としており、アジアの政策立案者やビジネスリーダーに向け適応策・緩和策を提言する。

54%

本レポートの調査対象
16カ国の人口が世界人口に
占める割合

気候変動リスクについて

気候変動により新たに重大なリスクがもたらされ、そのリスクは日増しに高まっている。リスクは、物理的リスク(気候変動による物理的影響に関連するリスク)、移行リスク(脱炭素社会への移行に伴う影響に関連するリスク)、賠償責任リスク(気候変動による損害や被害の補償に関連するリスク)の3つに分類される¹。本レポートでは、物理的リスクに焦点を当てる。

本レポートは、MGIが2020年1月に発行したグローバルレポート「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」の分析や手法に基づいている。調査手法の詳細な説明については同レポートをご参照いただきたい。

気候変動の物理的リスクは確率的なものである。なぜなら、その根底にある気候災害自体が確率的な性質を持っているためである。例えば、1年間で特定の規模の洪水が起こる回数、あるいは特定の温度を上回る日数は確率的に予測できる。ここで言う気候災害とは、自然や社会経済のシステムに影響を与える可能性のある、気候に起因する物理的現象(不定期・突発的な災害、あるいは日常的災害)を指す。気候変動はこれらの確率が変わることを意味する。そのため、マッキンゼーでは、標準の手法に従い、「統計的な期待値」、つまり各災害について統計上期待される平均的な影響を示す。また、「テールリスク(確率は低いものの発生すると非常に大きな損失をもたらすリスク)」の規模についても報告する。例えば、100年に一度級の台風など、発生確率は低くても影響度が大きい事象について年間ベースで評価する。

ここでは、考察の対象を、内在する物理的リスク、すなわち適応策や緩和策をとらなかった場合のリスクに限定することで、リスクの様相を把握し、対応策が必要な部分を明らかにする。なお、考察の対象期間は、現在から2030年、2030年から2050年の2つとする。本レポートでは、気候モデルによる温暖化予測に基づき、気候がどのように変化してきたのか、今後どのように変化していくのか、気候変動によりどのようなリスクや不確実性が新たに出現するのか、そして、どうすればこれらのリスクや不確実性に適切に対処できるのかを示す。気候科学では、通常、CO₂濃度が比較的低水準(RCP(代表的濃度経路)2.6)から高水準(RCP8.5)までのシナリオが用いられるが、今回の調査は、固有のリスクを理解して問題の様相を把握し、対応策が必要な部分を明らかにすることに焦点を当てているため、高排出量で特段対策のないシナリオであるRCP8.5を採用し、脱炭素化が進まなかった場合の物理的リスクを評価する²。

主な不確実性としては、排出経路、温暖化のペース、気候モデルの精度と自然変動、直接的・間接的な社会経済的影響の度合い、対応策などが挙げられる。災害の予測については、「より悪影響を及ぼす結果」の発生可能性として不確実性を捉える傾向があり、直接的な物理的リスクに関連して生じ得るノックオン効果のモデリングが難しいことから、マッキンゼーのアプローチでは控え目な推計値となっている³。

本レポートでは、アジアに焦点を当て、気候変動の物理的リスクを社会経済的影響に関連づけるため、気候変動が極限に達し物理的限界に近くなった場合の影響を

示す6つのケースを検証している。ここでは、アジアの様々な産業や地域を対象とし、MGI独自の「ミクロからマクロへ」と呼ばれる方法論を用いている。また、「居住性・作業性」「食料システム」「有形資産」「インフラサービス」「自然資源」の5つのシステムに基づくフレームワークを使用して、アジアの気候変動が直接的・間接的に与え得る影響を定量化する。ケーススタディは、気候変動リスクの7つの特性(「増大」「空間的」「非正常」「非線形」「連鎖」「逆進性」「準備不足」)を明らかにした調査結果をまとめたグローバルレポートをベースとしている。

さらに本レポートでは、地理空間データを用いて、アジア16カ国における今後30年間の気候変動に関する見解を示す(バングラデシュ、インド、パキスタン、インドネシア、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム、オーストラリア、日本、ニュージーランド、韓国、中国)。

5つのシステムから成るフレームワークについては、以下の6つの指標に基づいて検証を行った。(1)居住性・作業性 - 致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口の割合、極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間が年間総実労働時間に占める割合、および水ストレス(水の年間供給量に占める需要量の割合として算出)、(2)食料システム - 主要作物の収量変化率(年間)⁴、(3)有形資産および(4)インフラサービス - 1年の間に河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合、(5)自然資源 - バイオームシフトの発生が予想される陸面の割合⁵(調査手法の詳細についてはテクニカルノートを参照)。

¹ 詳細については「Climate change:What are the risks to financial stability? Bank of England」を参照

² RCP8.5シナリオを選択した背景や分析手法に関する詳細については、「Climate risk and response:Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「テクニカルノート」を参照。また、Christopher R. Schwalm, Spencer Glendon, and Philip B. Duffy, "RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions," Proceedings of the National Academy of Sciences (2020年8月)も参照いただきたい

³ Naomi Oreskes and Nicholas Stern「Climate change will cost us even more than we think」New York Times (2019年10月23日)、「Climate risk and response:Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」McKinsey Global Institute (2020年1月)参照

⁴ 主要作物には、米、トウモロコシ、大豆、小麦が含まれる

⁵ 「バイオーム」とは、特定の地域に生育・生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

地球の温暖化が進み過酷な災害の発生頻度や深刻度が増大するにつれ、アジアは他の地域に比べ、より深刻な影響を受ける可能性がある

オーストラリアにおける森林火災、日本や韓国、中国における台風、インドやパキスタン、バングラデシュにおける熱波は、深刻度が増し続ける災害の中で科学的に予測可能な、ほんの一例に過ぎない。本レポートでは、アジア全域の気象災害とその社会経済的影響について検証するとともに、4つの類型に分けて検証を行った(「4つのアジア」)。類型ごとに気候のプロファイルや気候変動リスクの度合い、その対応策も異なり、1人当たりGDPが低い国ほど気候変動による影響を受けやすいことが明らかになった。

2050年には、アジア各地で平均気温が上昇し、致命的な熱波や極端降水現象、台風、干ばつの発生確率が高まり、水供給量が変化する

RCP8.5シナリオに基づき、アジアにおける主な気候災害について以下にまとめた。また、今後数十年間にわたり気候災害の強度が増す、あるいは発生頻度が増すとされる地域をマップで表した(図表E1)。主なポイントとして以下のことが挙げられる。

- アジアでは、2050年には産業革命以前に比べ平均気温が2℃以上上昇し、中国の一部地域やオーストラリア、インド亜大陸などでは気温が大幅に上昇すると予想されている¹。
- インドやバングラデシュ、パキスタンの一部の都市は、人間の生存限界値を超える熱波が発生する最初の地域になると予想されている²。
- 2050年にかけて、日本の東部、中国の中央部と東部、韓国の一部地域、インドネシアなどで極端降水現象の発生頻度が3~4倍以上増すと予測されている³。
- 2040年には、台風による極端降水現象の発生頻度が、中国の沿岸部、韓国、日本を含むアジアの一部地域で3倍にまで増加する見込みである⁴。
- 2050年にかけて、干ばつに襲われる期間の割合はオーストラリアの南西部で80%以上、中国の一部地域では40~60%以上にまで増える見込みである⁵。
- 2050年にかけて、オーストラリアの多くの地域で地表水の年平均利用可能量が大幅に減少する見通しである⁶。一方で、中国の一部地域では水の利用可能量が20%以上増え、インド亜大陸の一部地域についても増加する見通しである。

¹ 産業革命以前は1880年から1910年として定義

² CMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)より日平均最大表面温度および日平均相対湿度の予測値を用いて、Woodwell Climate Research Centerがモデル化。各モデルはERA-Interimのデータセットを用いて独立的にバイアス修正を行った。致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義されている(湿球温度34℃)。湿球温度は、ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ温度と定義する。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用している。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35℃と考えられており、大都市では湿球温度34℃の熱波がヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4~5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、大気中エアロゾルや都市のヒートアイランドあるいはクールアイランド現象に起因する不確実性も含まれおり、エアロゾルの普及率は考慮していない

³ 極端降水現象とは、1950年から1981年にかけて50年に一度(つまり年2%の確率)の頻度で起きるとされていた現象を指す。WoodwellがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)のメディアン予測を用いてモデル化

⁴ 1981年から2000年にかけて年1%程度の確率で起こるとされていた極端降水現象を指す。Coupled Hurricane Intensity Prediction System(CHIPS)を用いてWoodwellがモデル化(Kerry Emanuel, The Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS), MIT(2019年))。台風のモデリングが可能な期間は1981~2000年(ベースライン)および2031~2050年(将来)。これらは世界のハリケーンや台風など強い熱帯低気圧の主な発生地域のうちの一つのモデリング結果であり、インド亜大陸を含むその他の地域はモデリングしていない

⁵ WoodwellがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)のメディアン予測を用いてモデル化し、補正式のPalmer Drought Severity Index(PDSI)を適用した。予測結果は大気中のCO₂濃度の上昇を考慮して修正した

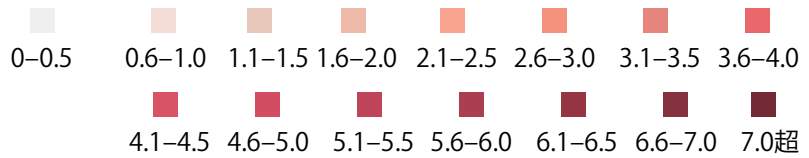
⁶ 6つの基本的CMIP5モデルに基づくWorld Resources InstituteのWater Risk Atlas(2018年)より引用。ローデータセットの基準期間は、2020年、2030年および2040年を中心とした20年である。1998~2017年、および2041~2060年のデータは、基準データセットに示す60年トレンドから線形予測した。これは地表水の利用可能量を算出するためのモデルで、水の需要の変化は考慮していない

アジアでは気候災害が深刻化する見込み

RCP8.5シナリオに基づく

例示

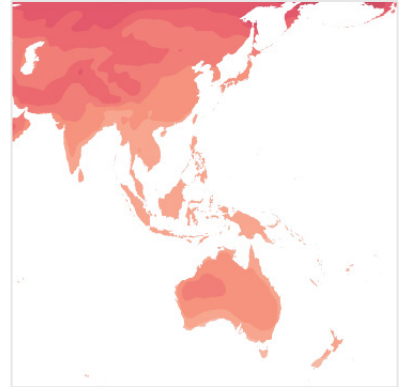
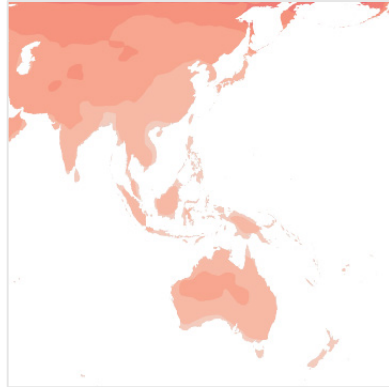
上昇を続ける年平均気温
°C¹; 産業革命以前の気温との差



現在

2030年

2050年



極端降水現象

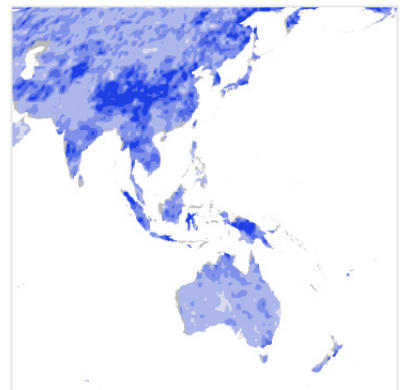
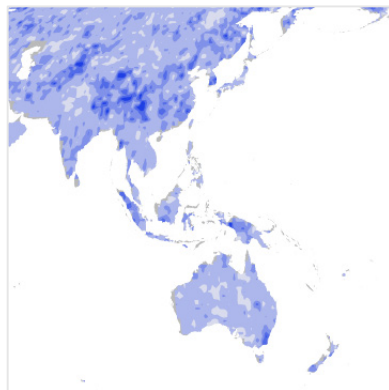
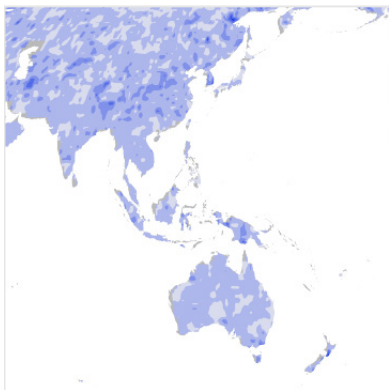
50年に一度級の極端降水現象が発生する確率の変化; 1950~1981年との比較²



現在

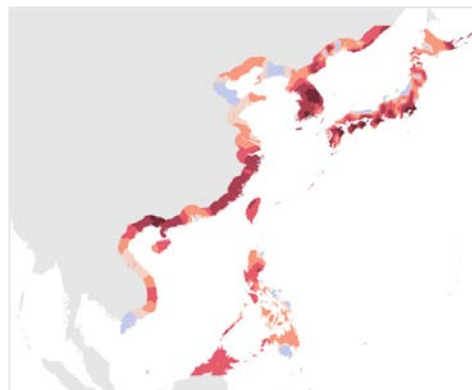
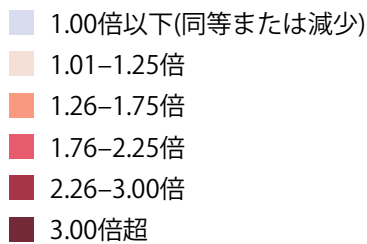
2030年

2050年



台風(降水)

2040年に100年に一度級の台風が発生する確率の変化; 1981~2000年との比較³



アジアでは気候災害が深刻化する見込み(続き)

例 示

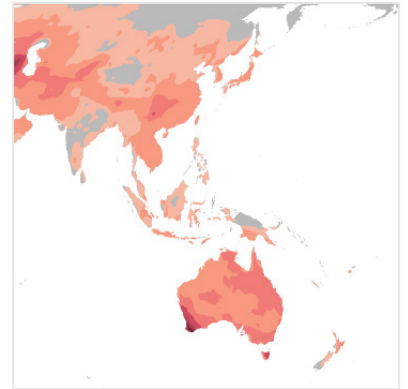
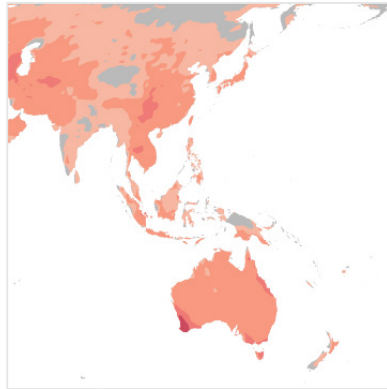
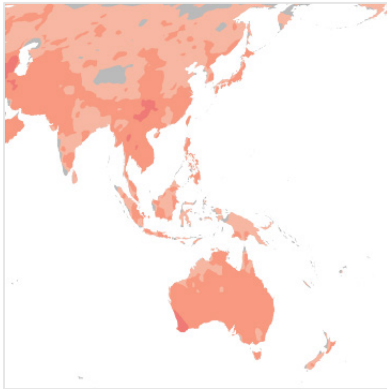
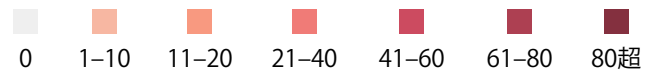
現 在

2030年

2050年

干ばつの発生頻度

%; 10年間で干ばつ⁴の状態となる割合



致命的な熱波の発生確率

%; 年間発生確率⁵



例 示

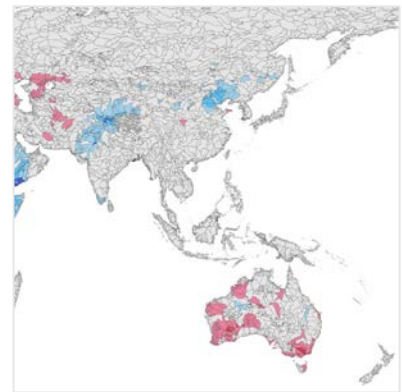
現 在

2030年

2050年

水供給量

%; 2018年と比較した地表水の変化⁶
(マップの境界線は水域を表す)



1. KNMI Climate Explorer (2019年)より、第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の全モデル群の平均を使用。産業革命以前は1880~1910年と定義
 2. CMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)のメディアン予測を用いて、Woodwell Climate Research Centerがモデル化したもの
 3. 台風のモデリングが可能な期間は1981~2000年(ベースライン)および2031~2050年(将来)。これらは世界のハリケーンや台風など強い熱帯低気圧の主な発生地域のうちの一つのモデリング結果であり、インド亜大陸を含むその他の地域はモデリングしていない
 4. 3ヵ月のローリング平均を使用して測定。3ヵ月単位のPalmer Drought Severity Index (PDSI)の平均値が-2未満の状況を干ばつ状態と定義。PDSIは、温度と降水量に基づく干ばつ指標で、過去の平均との差異に基づいて算出する。指数は、通常、+4(干ばつの深刻度が極めて低い)から-4(干ばつの深刻度が極めて高い)の範囲となる。Woodwell Climate Research CenterがCMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)のメディアン予測を用いてモデル化し、補正式のPalmer Drought Severity Index (PDSI)を適用した。予測結果は大気中のCO₂濃度の上昇を考慮して修正した
 5. 致命的な熱波とは、3日間の最高湿球温度が34℃を超える状態として定義。湿球温度は、ある空気塊を一定気圧に保ちながら、その空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで断熱的に冷却した場合に、その空気塊が持つ温度と定義。一般的に、人が生存可能な湿球温度の限界値は35℃と考えられており、大都市ではヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える熱波が生じる可能性があることから、湿球温度34℃を閾値に設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4~5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、将来的な大気エアロゾルの挙動や都市のヒートアイランド現象あるいはクーリングアイランド現象に起因する不確実性が伴う。CMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)より日平均最大表面温度および日平均相対湿度の予測値を用いて、Woodwell Climate Research Centerがモデル化
 6. 6つの基本的CMIP5モデルに基づくWorld Resources InstituteのWater Risk Atlas (2018年)より引用
- 注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: KNMI(オランダ王立気象研究所)のClimate Explorer(2019年)より、Woodwell Climate Research Center: Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS)モデル (Kerry Emanuel, MIT, 2019)を適用、World Resources Institute Water Risk Atlas (2018年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

アジアでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動による社会経済的影響は世界の平均を上回るまで深刻化する恐れがある

アジアは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、世界の他の地域に比べ気候変動リスクに晒される度合いが非常に高い(図表E2)⁷。RCP8.5シナリオでは、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口は、2050年には6億~10億人に達する見通しである。その数は世界規模では7億人~12億人であり、その大半をアジアが占める。また、2045年から2055年にかけてアジアで致命的な熱波が起こる確率は、80%まで上昇する⁸。極端に高い気温や湿度により屋外労働ができなくなることによる、2050年にかけてのアジアのGDP損失額は年平均で2.8兆~4.7兆ドルに上る見込みである。これは、極端に高い気温や湿度の環境下では疲労が蓄積しやすくなり、こまめに休憩をとる必要があるためである。なお、アジアのGDP損失額は、世界の年間GDPの三分の二以上に相当するものとなる⁹。また、2050年にかけて、1年の間に発生する河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の総額は1.2兆ドルに達し、これは世界全体の資産の約75%に相当する¹⁰。

6億~10億人

アジアで致命的な熱波に 襲われる確率がゼロではない 地域に居住する人口

⁷ 本レポートでは、アジアの人口とGDPの約95%を占めている16カ国を分析対象としている。分析対象の16カ国で、世界の人口の54%、世界のGDPの三分の一を占めている

⁸ 2030年から2050年にかけて致命的な熱波に晒される人々の割合は、UN World Population ProspectsおよびUN World Urbanization Prospectsによる予測値に基づいており、人口の推移については高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている。算出された割合は概算である。年間発生確率をXパーセントと想定し、2030年または2050年を中心とする10年間の各年に適用する。まず、この10年間に熱波が発生しない累計確率を10のべき乗で表す。10年間に熱波が1回以上発生する累計確率は、1からその数を引いた数字となる

⁹ レンジの下限域は、今日の産業構成が継続することを想定しており、上限域はIHS Markitの「Economics & Country Risk」の分野別移行予測に基づいている。ドルベースの影響額は、各産業における気温や湿度の大幅な上昇に伴う労働損失時間の割合をGDPに乗じて算出した(コンセンサス予想では気候変動に伴うGDP損失は考慮しないと想定)。ここでは、ノックオン効果を含めるため、投入産出票の後方連関の乗数を使用した

¹⁰ 河川氾濫により被害を受ける可能性のある資産の推計には、現行の規模の洪水防御対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、SSP2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用した

その他のシステムについては、気候変動リスクに晒される度合いは他の地域に比べて低いとはいえ、2050年にかけて、ある程度高まる見通しである。食料システムについては、1年間の農作物の収量が5%以上減少する確率は、世界全体の1.9倍と比較して、2050年までに1.4倍増加する可能性がある。自然資源については、2050年にかけてアジアにおいて気候区分が変わる陸面の割合は40%と予測されており、世界平均の45%を下回っている¹¹。

図表E2

アジアにおける気候変動による影響は、世界の他の地域と比較して「人」「有形資産」「GDP」の面で大きく、「食料システム」「自然資源」の面では小さい

RCP8.5シナリオに基づく

2050年までの第1波のインパクト

居住性・作業性

極端に高い気温や湿度により労働生産性が低下するリスク¹から想定される年間のGDP損失額

致命的な熱波²の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口

有形資産・インフラ

2050年にかけて発生する河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の年間総額³

世界全体 **4~6兆ドル**



世界全体 **7~12億人**



世界全体 **1.6兆ドル**



食料システム

現在と比較して1年間の穀物収量⁴が5%以上減少する確率

世界全体 **1.9倍** アジア **1.4倍**

自然資源

生態系や地域住民の生活に影響を及ぼすバイオームシフト⁵の発生が予想される陸面の割合

世界全体 **~45%** アジア **~40%**

1. 極端に高い気温や湿度が発生し得る地域で、年間の屋外労働時間に与える影響から生じるリスクとして定義。極端に高い気温や湿度により労働時間が削減される主な理由は2つある。一つは、熱中症予防のためにこまめに休憩をとるため、もう一つは人間は暑さへの自己防衛反応として疲労を感じるためである。ここでの数値の幅は、各国のセクター別の移行ペースに基づく
2. 致命的熱波とは3日間の平均最高湿球温度が34℃を超える状態と定義する。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は35℃と考えられており、大都市では、ヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える熱波が生じる可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。これらの予測には、将来的な大気エアロゾルの挙動や都市のヒートアイランド現象あるいはクーリングアイランド現象に起因する不確実性が伴う。人口の幅は、国際連合(UN)世界人口推計および国際連合(UN)世界都市化予測による人口予測の幅に基づいており、人口の推移については高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている
3. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、BAUシナリオ(RCP8.5、SSP2)および現行規模の高潮対策を想定し、世界資源研究所(WRI)のオンラインツール「世界河川洪水解析システム」(WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019)より、洪水による国レベルの都市災害のリスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
4. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WoodwellがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、収量の増加ではなく、収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照
5. バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

資料: Rubel and Kottke (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

¹¹ 「バイオーム」とは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

1兆～ 1.5兆 ドル

極端に高い気温や湿度により屋外労働ができなくなることによる2050年にかけての中国の年平均GDP損失額

アジアの各地域を、気候のプロファイルや気候変動リスクの度合い、対応策に基づいて「フロンティアアジア」「アジア新興国」「アジア先進国」と「中国」の類型に分類

今回、マッキンゼーでは、以前のFuture of Asiaの関連調査で定義した「4つのアジア(Four Asias)」のフレームワークに基づいてアジア16か国を分類した¹²。国や各国内の地域によっても気候変動による影響は異なるが、特に4つのアジア間では大きく様相が異なる。ここでは、「4つのアジア」のフレームワークを使用して、気候災害とその社会的影響、および考えられる対応策について明示している。ただし、カテゴリーにより災害の組み合わせや強度は異なるため、それぞれに合った対策フレームワークを策定する必要がある。

「フロンティアアジア(Frontier Asia)」には、バングラデシュ、インド、パキスタンが含まれる。これらの国々では、気温や湿度が急激に上昇し、「居住性・作業性」に大きな影響が出る恐れがある。2050年には平均気温は2～4℃上昇する見通しで、致命的な熱波の発生確率が高くなる可能性がある。さらに、これらの国々では、極端降水現象が2050年にかけて20世紀後半に比べ頻発する一方で、干ばつの発生頻度は減少する可能性がある。気候変動は、農作物の収量にも大きなマイナスの影響を及ぼす。例えば、主要4作物(米、トウモロコシ、大豆、小麦)の収量が10%以上減少する確率は、現在から2050年にかけてインドでは12%から39%に、パキスタンでは40%から53%に上昇する見通しである¹³。その一方で、これらの主要4作物の収量が10%以上増加する確率は、現在から2050年にかけてインドでは17%から5%に、パキスタンでは38%から27%に減少する見通しである。

「アジア新興国(Emerging Asia)」には、カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナムなどの東南アジア諸国が含まれる。これらの国々は、フロンティアアジアに比べ低い水準になる可能性はあるが、2050年にかけて気温や湿度が急激に上昇し、極端降水現象が頻発する可能性がある。また、これらの国では屋外労働への依存度が高いことから「作業性」に大きな影響が出る恐れがある。

「アジア先進国(Advanced Asia)」には、日本、韓国、オーストラリア、ニュージーランドが含まれる。これらの国々は、フロンティアアジアやアジア新興国に比べて、多くの面で気候変動による影響は少ない。アジア先進国については、短期的には気候変動の恩恵を受けられる可能性が高く、農作物の収量が増加する見通しである。ただし、一部の国では水供給量の減少や干ばつが大きな課題となる。日本と韓国の一部地域では、台風や極端降水現象のリスクも上昇する見込みである。また、バイオームシフト(生物群系の変化)、つまり気候区分が変わる陸面の割合が増える可能性が高い。

中国は、国土が広大なため気候的多様性が高いが、それでもなお国土全体で気温の上昇が見込まれている。極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間の割合は、国全体で2020年の4%から2030年には最大6%、2050年には最大8.5%まで上昇する見込みである。これにより、極端に高い気温や湿度による2050年にかけての中国のGDP損失は1.5%から2～3%に増加し、これは年平均で1兆～1.5兆ドルに相当する。アジア先進国と同様に、農作物については、短期的には気候変動の恩恵を受けられる可能性が高く、統計的な期待収量とその変動ともにプラスの影響が見込まれている。しかし、アジアや世界のサプライチェーンで重要な役割を果たしている中国の多くの地域で極端降水現象や台風の頻発することで、インフラやサプライチェーンが被害を受けるリスクは増大する。

¹² マッキンゼーのFour AsiasフレームワークはマッキンゼーのFuture of Asiaの研究を通じて開発された手法に基づいており、規模(GDPおよび人口)、経済発展、域内統合・貿易、グローバル連結性の指標を反映している。本レポートでは、世界の人口の54%、世界のGDPの三分之一を占めるアジア16か国(オーストラリア、バングラデシュ、カンボジア、中国、インド、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、ミャンマー、ニュージーランド、パキスタン、フィリピン、韓国、タイ、ベトナム)を検証している。広範な調査では、対象を広げて実施するが、ここではデータの入手可能性の観点から16か国を対象を絞っている。Four Asiasに関する詳細については、「The future of Asia: Asian flows and networks are defining the next phase of globalization, McKinsey Global Institute (2019年9月)」を参照のこと

¹³ 収量の変化は、1998年～2017年の期間の平均収穫量と比較して測定されている

1人当たりGDPが比較的低い国や地域、つまりフロンティアアジアとアジア新興国は、気候変動による影響を最も受けやすい(図表E3)。これらの国々は、屋外労働や自然資源への依存度が高く、気候的にも物理的限界に近い傾向があり、迅速に適応策を講じるための資金が不足している。

84億 ドル

100年に一度の規模の洪水がホーチミンで発生した場合のノックオン効果による最大被害額

気候変動が進行しシステムが限界値を超えると、社会経済的影響は増大する

ここでは、6つのケーススタディを通じて、気候変動がアジアの5つの社会経済システムに与える影響について検証を行った。「居住性・作業性」については、極端に高い気温や湿度が、中国とインドの都市部の人口および屋外労働への依存度が高い産業にもたらす意味合いを検証した。「食料システム」については、アジアの6つの主要穀倉地帯の年間収量が減少する確率を作物ごとに推計している(米、トウモロコシ、大豆、小麦)。「有形資産・インフラ」については、17種類のインフラ資産の気候災害に対する脆弱性を検証し、東京における洪水とオーストラリアにおける森林火災の影響について深掘りしている。「自然資源」については、3つの自然資源システム(氷河、海、森林)に対する気候変動の潜在的影響を検証している。

気候変動リスクは6つのケーススタディすべてにおいて高まっており、グローバル分析で特定した特性(「増大」「空間的」「非定常」「非線形」「連鎖」「逆進性」「準備不足」)が確認された。例えば、農業に関して言えば、農作物の収量が増えている地域もあれば減っている地域もある。また、そのリスクは非定常、つまり変化し続けることも明らかになっている。例えば、1998年から2017年の間にアジアにおいてトウモロコシと小麦の収量が15%変化する確率は百分の一であったが、2050年までには、その確率はトウモロコシについては二十分の一、小麦については三十三分の一に上昇する見通しである。また、東京の洪水被害について分析した結果、気候変動リスクは非線形的な影響をもたらすことが明らかになっており、100年に一度級の洪水による浸水深の平均は2050年までに1.7倍となるが、不動産やインフラへの被害の増加率はそれを30%以上上回ることが分かった。

気候変動による直接的な影響は局所的なものであるが、相関する社会経済システムにより、地域や業界、金融システムの枠を超えてノックオン効果や連鎖的被害が生じる可能性がある。さらに、経済活動の中心的役割を担っている人々や資産が影響を受け、それらの地域の経済・金融システムが他の地域と相互に連結している場合、ノックオン効果はさらに大きくなる。ホーチミン市に関する分析では、100年に一度級の洪水がもたらすインフラ被害額は2050年には5億~10億ドル規模に拡大する見込みである。また、このような直接的影響以外のノックオン効果による被害額も大きくなると推定されており、16億~84億ドルにまで膨れ上がる可能性がある¹⁴。

今回、極端な暑さの影響の分析対象となったインドと中国については、経済的に脆弱な層ほど大きな影響を受け、リスクの逆進性が強いことが明らかになった。どのケーススタディを見ても、適応策を講じるスピードをさらに高め、規模を広げていく必要があることは明らかである。現在、アジアでは、極端な高温や高潮などの気候災害に対する適応策が十分に進められていない。適応策を実行するためには、膨大なコストと難しい選択が求められる。さらに、東京やムンバイ、ジャカルタなどの大都市では、海面の上昇とともに、水害対策として防波堤を新設するためのコストも増加することになると考えられる。

気候変動とCOVID-19のパンデミックには共通点が多い(「コラムE2: 気候変動リスクに備えるためにアジアがCOVID-19のパンデミックから学ぶべきこと」参照)。気候変動とCOVID-19はいずれも社会経済的な影響をもたらす、「連鎖」「非定常」「非線形」そして「逆進性」という特性を持っている。これらの特性があるがゆえに、世界の最も脆弱な層が深刻な影響を受けることになるのである。

¹⁴ Jonathan Woetzel/Dickon Pinner, Hamid Samandari, Hauke Engel, Mekala Krishnan, Brodie Boland, and Peter Cooper, Can coastal cities turn the tide on rising flood risk?, McKinsey & Company (2020年4月20日)

気候変動リスクに備えるためにアジアが COVID-19 のパンデミックから学ぶべきこと

PCOVID-19のパンデミックと気候変動リスクは、どちらも物理的なダメージを及ぼし、社会・経済に大きな影響を与える¹。そしていずれも連鎖的、非定常的、非線形的で逆進性が強い。

ある意味、今回のパンデミックを通じて、気候変動が進み需給やサプライチェーンの混乱などに波及するような外生的なショックが重なった場合にどのようなことが起きるのかを知ることができたと言える。

パンデミックや気候変動リスクに対応するためには、システムの短期的なパフォーマンスの最適化から長期的なレジリエンスの確保に至るまで、抜本的な変化が必要となる。医療システムや物的資産、インフラサービス、サプライチェーンおよび都市は、すべて非常

に狭い範囲で機能するように計されている。しかし、気候変動は変化し続け、物理的仮定が陳腐化する恐れがある。そのため、製造拠点やインフラ、都市部の設計について新たな手法を取り入れる必要がある。それに加え、アジアは、成長の勢いを維持するために2030年にかけて毎年1.7兆ドルを投資する必要に迫られている²。

COVID-19、気候変動ともに世界的な脅威である。気候変動に対応するためには、長期にわたり地域間の連携を推進していく必要がある。大規模な連携プロジェクトにより、国境を超えた資源の動員、脱炭素化コストの最小化、イノベーション活動の促進が可能となる。すでに、地域間の排出量取引やカーボンプライシング制度、アジアのカーボンバンク、技術投資ファンドといった新た

なアイデアに関する議論が活発化している。

パンデミックをきっかけに、人々は優先事項を再考し、持続可能な社会を実現するための投資に関わる議論をせざるを得ない状況に置かれている。実際に、多くの人が持続可能性の観点から景気回復につながる投資を行う必要があると考えている³。例えば、アントニオ・グテーレス国連事務総長は、各国政府に対し、企業が環境に優しいグリーンジョブを創出し持続可能かつ包括的な成長を実現できるよう、支援を呼びかけている。すでに中国は、経済回復に向けて動き出しており、25の省が総額7兆ドルの新型インフラ整備への投資計画を発表している。この計画には再生可能エネルギー、EV、スマートシティインフラなどへの投資が含まれる⁴。

¹ Dickon Pinner, Matt Rogers, and Hamid Samandari, Addressing climate change in a post-pandemic world, McKinsey & Company (2020年4月7日)

² インフラ投資は、交通(道路、鉄道、航空路、航路)、エネルギー、通信、水・衛生(ダム、灌漑、治水対策工事を含む)の4つの分野の設備投資として定義。アジア開発銀行(ADB)による推計。ADB, Meeting Asia's infrastructure needs (2017年)

³ How a post pandemic stimulus can both create jobs and help the climate, McKinsey & Company (2020年5月)

⁴ Helen Ding and Wee Kean Fong, 4 investment areas to stimulate China's economy after COVID-19, World Resources Institute (2020年4月)

アジアの主要国では、気温の上昇により居住性と作業性が損なわれ、逆進性の影響が現れる恐れがある

分析の結果、1人当たりGDPの水準が低い国ほど、極端に高い気温や湿度の影響を受けやすいことが明らかになった。今回は、中国とインドについてケーススタディを行い、人々の生命や生活にどのような影響が出るかを検証した。

中国では、猛暑に晒される可能性が高まり、2030年には、猛暑や致命的な熱波により1,000万～4,500万人が影響を受ける¹⁵。その中で、平均的な人が、2025年から2035年の間に致命的な熱波を1回以上経験する確率は、現在の0%から約25%にまで上昇する可能性がある(エアコンの有無は考慮していない)。2050年には、猛暑や致命的な熱波の影響を受ける人の数は1.1億から2.5億人にまで増加し、2045年から2055年の間に致命的な熱波を1回以上経験する確率は35%にまで上昇する。また、極端に高い気温や湿度により損失する屋外労働時間の割合は、国全体で2020年の4%から2030年には6.5%、2050年には9%まで上昇する見込みである。

¹⁵ Jonathan Woetzel, Kimberly Henderson, Mekala Krishnan, Haimeng Zhang, and Grace Lam, Leading the battle against climate change: Actions for China, McKinsey & Company (2020年)。致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義されている(湿球温度34℃)。ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ温度を湿球温度と定義する。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用している。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35℃と考えられており、大都市では湿球温度34℃の熱波がヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4～5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、大気中エアロゾルや都市のヒートアイランドあるいはクールアイランド現象の影響に関する不確実性も含まれおり、エアコンの普及率は考慮していない

さらに、人口密度が高い上位10市のうち5市については、2050年には、屋外労働損失時間の割合が現在の水準からさらに5%以上増加する可能性がある。

インドでは、極端に高い気温や湿度により損失する屋外労働時間の割合が2050年には30%に達し、現在の水準から40%以上増加する見込みである。さらに、人口密度が高い上位5市のうち3市については、2050年には、屋外労働損失時間の割合が現在の水準からさらに5%以上増加する可能性がある¹⁶。

30%

2050年にかけて極端に高い
気温や湿度により損失する
屋外労働時間の割合

中国とインドは、2050年にかけて、極端に高い気温や湿度により大きな社会経済的影響を受けるが、いずれも所得が低い層ほど影響は深刻化する。これにはいくつかの理由がある。1つ目の理由としては、低所得層ほど、農業、鉱業、建設業など、屋外労働者の割合が高い産業で働いていることが挙げられる(GDP成長率に対するこれらの産業の寄与度は高く、現時点で中国は約16%、インドは26%となっている)。2つ目の理由としては、適応策を講じるためにはそれなりの資金が必要になるが、低所得層がそのような資金を確保することは難しいことが挙げられる。2030年には、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない都市部に居住する人口は約1.6億~2億人に達する見通しである¹⁶。そのうち、約8,000万~1.2億人がエアコンのない家に住んでおり、その多くが、家計が厳しくエアコンを購入できる状況にはない。3つ目の理由として、様々な気候災害により生活に影響が及ぶことが挙げられる。例えば、インドの農業は、極端に高い気温や湿度だけでなく、収量の減少というダメージも受ける可能性がある。

適応策としては、エアコンを持っていない人たち向けに、早期警告システムや避暑シェルターを設けることが考えられる。また、屋外労働者の作業時間をずらしたり、都市で日射反射率を高めたりする方策を講じることも可能である。しかしそれには、コスト以外の課題もある。適応策が、人々の日常生活を大きく変えるものであったり、低リスク地域への移動を伴うものである場合には、実行が困難になる可能性がある¹⁷。

気候変動によりアジアの農作物の収量の変動が増大し、価格が高騰する恐れがある

今回の調査では、マクロ分析を実施して、気候変動がアジア全体の食料システムに与える影響を定量化した。ケーススタディ分析では、中国、インド、東南アジア、インド亜大陸、オーストラリアおよびニュージーランド、日本および韓国の6つの主要穀倉地帯を対象とし、各作物の収量への影響を検証した¹⁸。その結果、トウモロコシは2030年までに収量が減少するリスクが高まり、米と小麦は収量の変動が増大し、大豆は気温上昇の恩恵を受け収量が増加する見通しであることが明らかになった。

本分析では、2030年および2050年にかけて、収量が現在に比べ10%以上減少あるいは増加する確率を検証した¹⁹。その結果、地域特有の気候や作物構成によっては、他の地域に比べ大きな影響を受ける可能性があることが判明した。気候変動により、一部の穀倉地帯や農作物の収量が必ずしも減少するわけではないものの、収量の変動が増大し農家の収入が不安定になる可能性がある。さらに、豊作でも凶作でもマイナスの影響がある。豊作になれば農作物の買い取り価格が下落し、凶作になれば食糧不足に陥り価格が高騰する。過去には、期末在庫がほんの

¹⁶ Will India get too hot to work?, McKinsey Global Institute (2020年11月)

¹⁷ 致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義されている(湿球温度34°C)。ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ温度を湿球温度と定義する。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用した。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35°Cと考えられており、大都市では湿球温度34°Cの熱波がヒートアイランド現象により35°Cの限界値を超える可能性があることから、湿球温度34°Cを閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4~5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、大気中エアロゾルや都市のヒートアイランドあるいはクールアイランド現象の影響に関わる不確実性も含まれおり、エアコンの普及率は考慮していない

¹⁸ 凶作となる確率を推計するために、AgMIP(Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) モデルライブラリから収穫モデルを採用し、気候モデルのアウトプットを各グリッドセルモデルの収穫高に換算。ここでは、アジアの6つの主要穀倉地帯のグリッドセルに焦点を当て、使用可能な1998年から2060年までの全気候モデルを用いて各作物の収穫高の確率分布を各グリッドセルに表す。本分析では、アジアを6つの地域(中国、インド、東南アジア、インド亜大陸、オーストラリアおよびニュージーランド、日本および韓国)に分けた後に、それぞれの地域で収量が最も多い地域を分析した。選択した収穫モデルの特性上、分析結果には、鉄砲水や単発的な猛暑といった異常気象は考慮していない。収穫モデルは、すべて大気中のCO₂濃度の上昇に伴いCO₂施肥効果も高まる、という想定に基づいている。この想定に関わる不確実性は、収量の過大評価あるいは凶作となる確率の過小評価につながる可能性がある

¹⁹ 収量の変化は、1998年-2017年の期間の平均収穫量と比較して測定されている

少し減少しただけで食糧価格が高騰した例もある。実際、2008年には世界の穀物生産量にほとんど変化は見られなかったものの、穀物価格は100%上昇した²⁰。

中国では、降雨パターンと気温の変化により農作物の収量の変動が大きくなる見込みである。米、小麦、トウモロコシの収量分布が変わり、2030年にかけては気象災害の深刻化に伴い供給不足となる可能性が高い。ただし、2050年を境に状況は一変し、豊作に転じる見込みである²¹。大豆については、2030年までと2050年までのいずれの期間においても、収量が大きく変動するリスクは低い。世界の穀物生産量に占める中国の割合は非常に大きいため(米:約30%、トウモロコシ:23%、大豆:5%、小麦:17%)、同国の作物収量の変動が増大することにより大きなノックオン効果が生じる可能性がある²²。

フロンティアアジアでは、インドが最も大きな影響を受ける。2030年および2050年にかけて、4つの主要作物すべてにおいて収量が10%以上増加する可能性はなく、逆に10%以上収量が減少するリスクが高まる可能性がある。インドはアジアで2番目に農作物の生産量が多い国であり、中国などその他の主要穀倉地帯で同時に不作が生じた場合、価格の高騰や食糧不足につながる可能性がある。同様に、バングラデシュとパキスタンも、主要4作物すべてにおいて収量が10%以上減少する可能性が高い。また、2050年までに両国の米とトウモロコシの収量が10%以上増加する確率は減少する見込みである。

アジア新興国については、2050年までに米やトウモロコシ、大豆の収量が10%以上変化する確率(10%以上増加あるいは減少する確率)が上昇することが明らかになった。アジア新興国がアジア全体の生産量に占める割合は、米が約26%、トウモロコシが10%であるため、価格に大きく影響する可能性がある。

ただし、アジア先進国については、主に大豆と米の収量が増加する見込みで、気候変動による恩恵が期待できる。例えば、日本では、灌漑用水の温度上昇により稲作期間が長くなる。これにより、今よりも柔軟に作期を調整できるようになり、冷夏による北部地域の農作物への影響を低減できる。

26%

アジア全体の米の生産量に
占めるアジア新興国の
生産量の割合

アジアが収量の減少および収量変動の増大のリスクに対応する手段としては、遺伝子編集、灌漑インフラへの投資、播種期の変更、土壌侵食の防止や緑化などが挙げられる。また、より強靱な食料システムを構築するために、官民が連携して幅広く研究することも考えられる。その例として、非生物学的および生物的ストレスへの耐性の高い農作物の生産を可能にする技術の研究などが挙げられる。農作物の収量が15%以上減少するリスクは、供給過剰による価格の下落をうまく利用して世界の期末在庫を35~40%の水準に引き上げることで相殺できる。

有形資産やインフラサービスは、東京の洪水やオーストラリアの森林火災などの気候災害の脅威に晒される可能性が高まる

エネルギーや水、交通、通信を含め、検証対象となったすべてのインフラにおいて、気候変動によるリスクが上昇することが明らかになった。気候災害の影響に対する脆弱性はインフラにより異なる。交通インフラの場合、空港の滑走路が数ミリ浸水しただけでも大きな影響が出る恐れがある。鉄道や道路は熱波よりも水害による被害を受けやすい。これは、信号システムは水に弱く、少量でも水に晒されると影響が出るためである。また、道路が数センチでも冠水すると車の流れは30%遅くなる。ここではアジアにおける深刻な気候災害の例として、東京における洪水とオーストラリアにおける森林火災のリスクを詳しく見ていく。

²⁰ FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

²¹ 2030年および2050年にかけての中国における気候変動による様々な影響を検証。これは、農作物の収量にプラスの影響もマイナスの影響ももたらし得る気候要因の特性を考慮したものである。例えば、中国で気候災害が深刻化することで2030年にかけて米と小麦の収量は減少するものの、大気中のCO₂濃度が上がることで施肥効果が高まり、2050年にかけて収量が増加する。トウモロコシについては、2030年から2050年にかけて温暖化がさらに進み降水量が増加することで(気温の上昇よりも影響力が大きい)、収量は現在から2030年までの期間に比べ増加する

²² United States Department of Agriculture (USDA), Foreign Agricultural Service

東京については、現在および2050年時点で100年に一度級の集中豪雨と河川氾濫、高潮が同時に起き洪水が発生した場合の複合的事象による影響を推計した(図表E3)²³。その結果、気候変動リスクの非線形な特性が明らかになった。洪水による東京の浸水深の平均は2050年には1.7倍になるが、不動産やインフラへの被害は2.2~2.4倍となり、浸水深の増加率を30%上回る。現在、100年に一度の確率で起きる異常気象は、2050年には頻発化し、集中豪雨は28年に一度、高潮は32年に一度、河川氾濫は71年に一度の確率で起きようになる²⁴。水害リスクの低減対策は、河道拡幅、河床掘削、堤防整備などの河川整備と、ダムや治水施設などの洪水調節機能の強化に大別される。いずれの対策においても、地域社会や自然環境への影響を考慮する必要がある。

オーストラリアについては、森林火災により、交通からエネルギーに至る様々なインフラが大きな被害を受けることが明らかになった。2050年には、国土面積の30%で森林火災の発生危険日数が年間20日以上に増加する見込みである(図表E4)²⁵。現時点では、森林火災の発生危険日数が多いエリアは主にオーストラリア中部の乾燥地帯に集中しているが、2030年および2050年にかけて植物や人口の密度の高い地域にも広がっていく。これは、引き金事象の発生頻度が増すことで、森林火災のリスクが大幅に高まることを意味する(森林火災はしばし人間の行動により引き起こされる)。また、ニューサウスウェールズ州など人口や資産が最も集中している地域においても、森林火災の発生危険日数が大幅に増加する。例えば、森林火災の発生危険日数が年間10日以上地域に居住する人口の割合は、現在の26%から2050年には46%にまで上昇する。また、森林火災の発生危険日数が多い地域の範囲は、2030年および2050年にかけて、資産密度が高い地域にまで広がり、今後、森林火災の被害を受ける資産が増加する。オーストラリアでは、森林火災の発生頻度が高まることで、その危険に晒される日数が年間5日以上となる資産の割合が、現在の44%から2030年には56%、2050年には60%まで増加する恐れがある。エネルギーインフラ(電力の送配電網など)は、森林火災の発生確率が低いエリアに設置することは困難であるため、非常に脆弱である。その他の脆弱なインフラには、交通(空港、鉄道、道路など)や通信(基地局、電波塔、ケーブルなど)が含まれる。増大する森林火災の発生リスクに対応するためには、1) 予防、2) 検知、3) 抑制、4) 修復、5) 再生のリスクマネジメントのライフサイクルに沿って対策を講じる必要がある。

²³ 東京は、洪水を引き起こす河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫に対する脆弱性が高い。最悪のシナリオをシミュレーションするため、洪水の原因となる集中豪雨、高潮と河川氾濫のデータを基に24時間にわたる複合洪水事象をモデル化した。複合洪水事象とは、100年に一度級の集中豪雨、河川氾濫と高潮が同時に起きた場合の洪水事象を指す。100年に一度級の集中豪雨、河川氾濫、高潮に関する値は様々なデータソースを活用して個別に算出しているが、互いに確率的な影響が全くないわけではない。例えば、高潮と集中豪雨の発生確率を個別に算出した場合よりも、集中豪雨が発生していることを条件つけた場合の方が巨大な高潮の発生確率は高くなる。したがって、洪水リスクの過小評価を避けるため、集中豪雨、河川氾濫と高潮をまとめてモデル化し、100年に一度級の洪水現象に関する現実的な推計を行った。詳細については「テクニカルノート」を参照

²⁴ 積雪量の減少が見込まれるため、2050年において河川氾濫が大幅に増えることはない想定

²⁵ これまで観測された森林火災の大半を考慮し(79%)、火災気象指数が高い日数として定義。気候条件(降水量、気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節)に基づいて森林火災のリスクを予測しているが、引き金事象や可燃物の蓄積状況は考慮していない。そのため、過去に起きた森林火災に関するマップと火災危険日数のマップは一致していない。手法の詳細な説明については「テクニカルノート」を参照

図表E3

東京の洪水は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動の影響により2050年までに発生頻度が増し、深刻度も高まると予想される

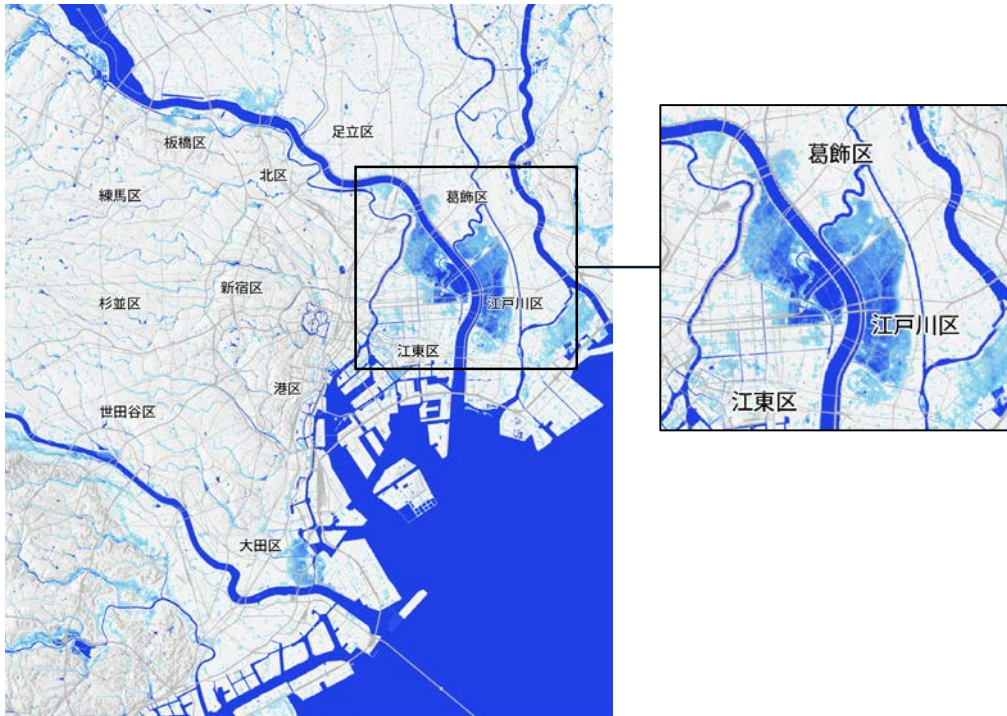
RCP8.5シナリオに基づく

東京で100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の複合気象事象により洪水が発生した場合の影響



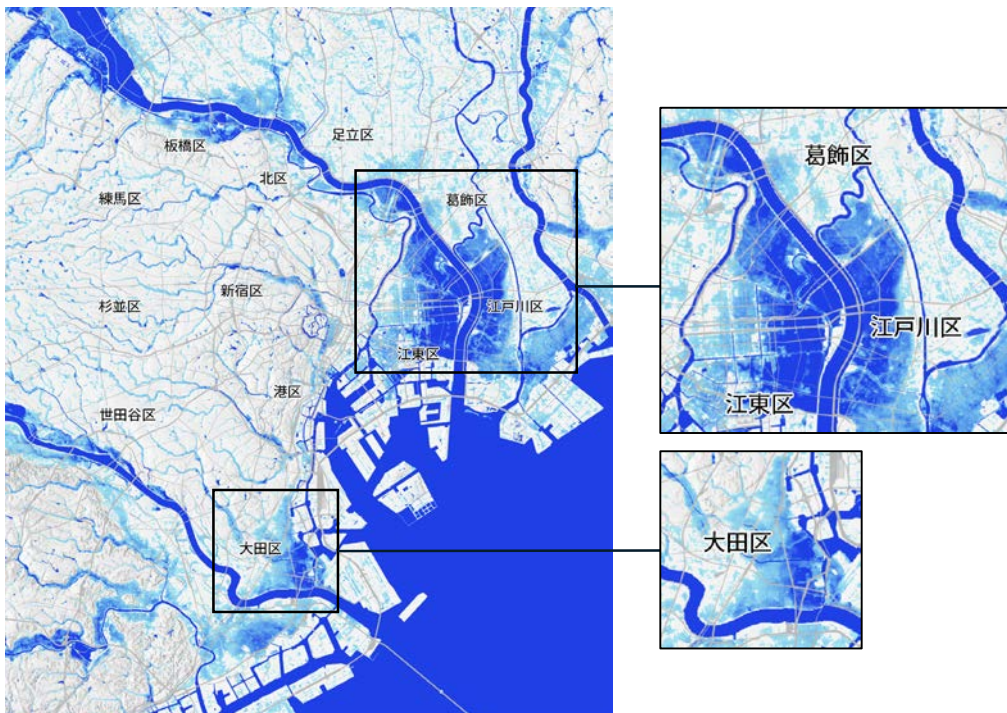
100年に一度級の異常気象: 現在

現在、100年に一度の確率で起きるとされている異常気象は、2050年には頻発化し、集中豪雨は28年に一度、高潮は32年に一度、河川氾濫は71年に一度の確率で起きるようになる



100年に一度級の異常気象: 2050年

2050年時点で100年に一度の確率で起きる異常気象は、現在に換算すると484年に一度級の集中豪雨、307年に一度級の高潮、152年に一度級の河川氾濫となる

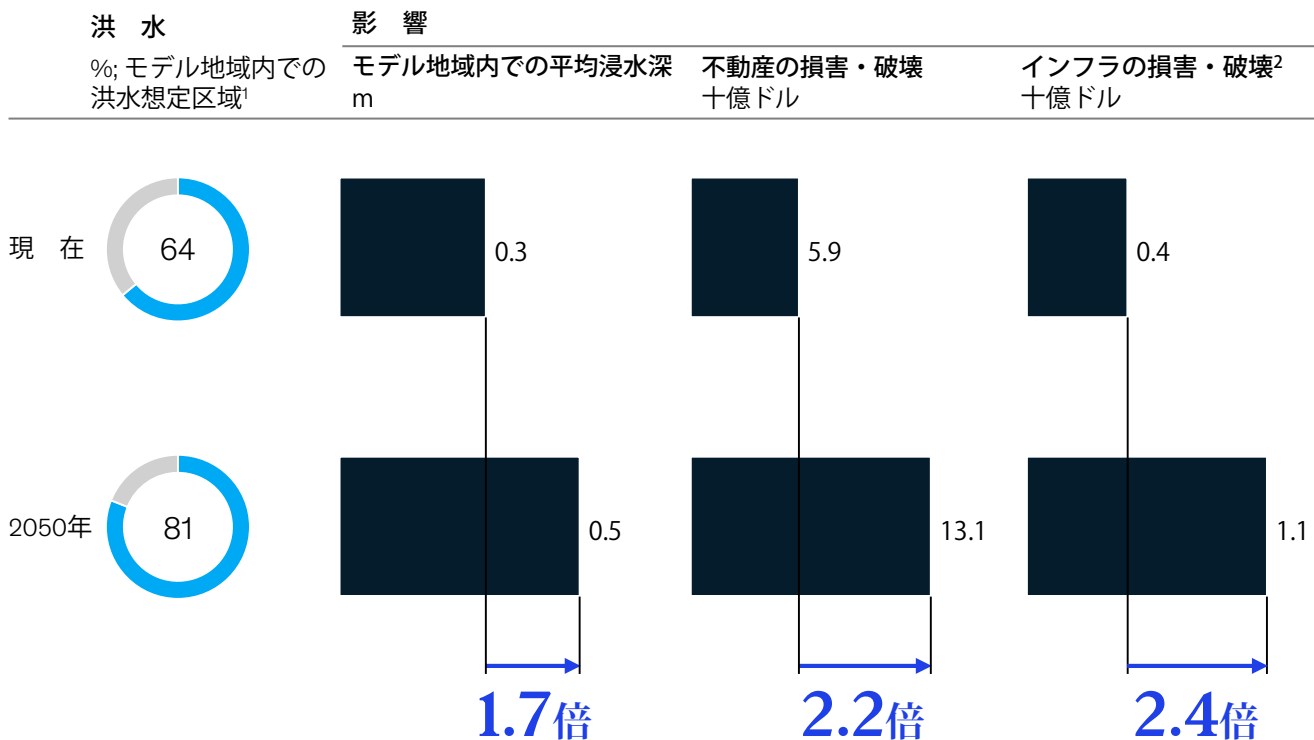


図表E3(続き)

東京の洪水は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動の影響により2050年までに発生頻度が増し、深刻度も高まると予想される(続き)

RCP8.5シナリオに基づく

東京で100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の複合気象事象により洪水が発生した場合の影響



1. グリッドの浸水深が0.01mを超える場合を洪水と定義

2. 複数のインフラ資産(変電所、発電所、データセンター、病院など)に対する損害を推計

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。最悪のシナリオをシミュレーションするため、洪水の原因となる集中豪雨、高潮と河川氾濫のデータを基に24時間にわたる複合洪水事象をモデル化した。複合洪水事象とは、100年に一度級の集中豪雨、河川氾濫と高潮が同時に起きた場合の洪水事象を指す。100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の値は、様々なデータソースを使用してそれぞれ個別に算出しているが、これらの気象事象は独立して発生するものではない。したがって、洪水リスクの過小評価を避けるため、集中豪雨と河川氾濫、高潮をまとめてモデル化し、100年に一度級の洪水現象に関する現実的な推計を行った。詳細については「テクニカルノート」を参照

資料: 欧州委員会、Woodwell Climate Research Center、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

60%

オーストラリアで2050年にかけて
森林火災の危険に晒される日数が
年間5日以上となる資産の割合

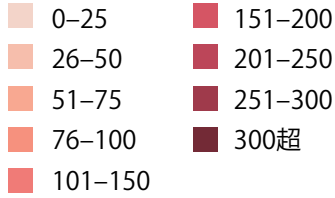
図表E4

オーストラリアの森林火災は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、2030年および2050年までに発生頻度がさらに高まると予想される

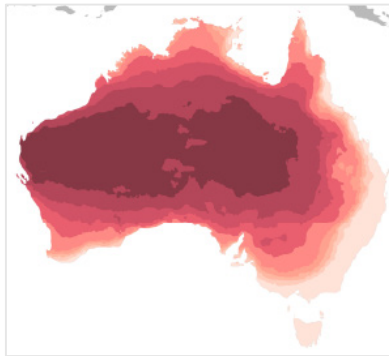
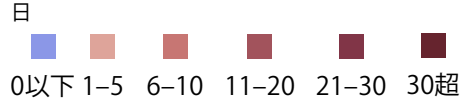
RCP8.5シナリオに基づく

年間の森林火災の発生危険日数

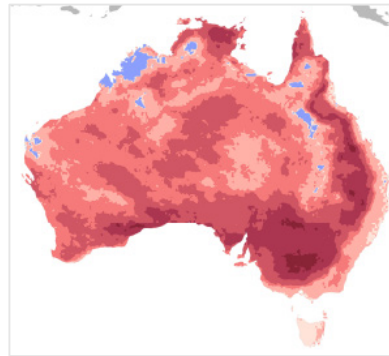
現在



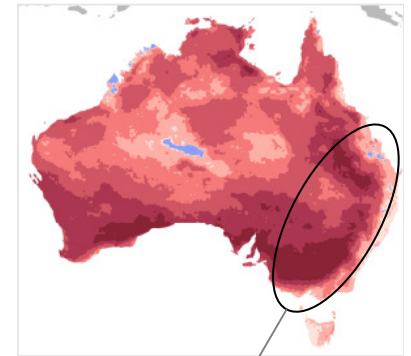
発生危険日数の変化



現在から2030年にかけて



現在から2050年にかけて



オーストラリアで人や資産が最も集中している地域

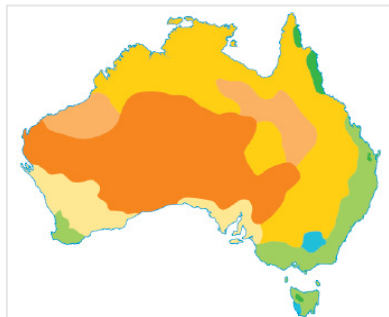
同国の30%の地域で、1年当たりの森林火災の発生危険日数が20日以上増加

現在のオーストラリア

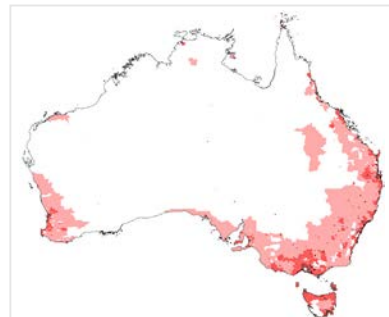
植生域



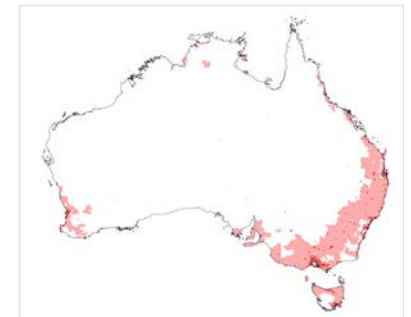
現在の密度



資本ストック²



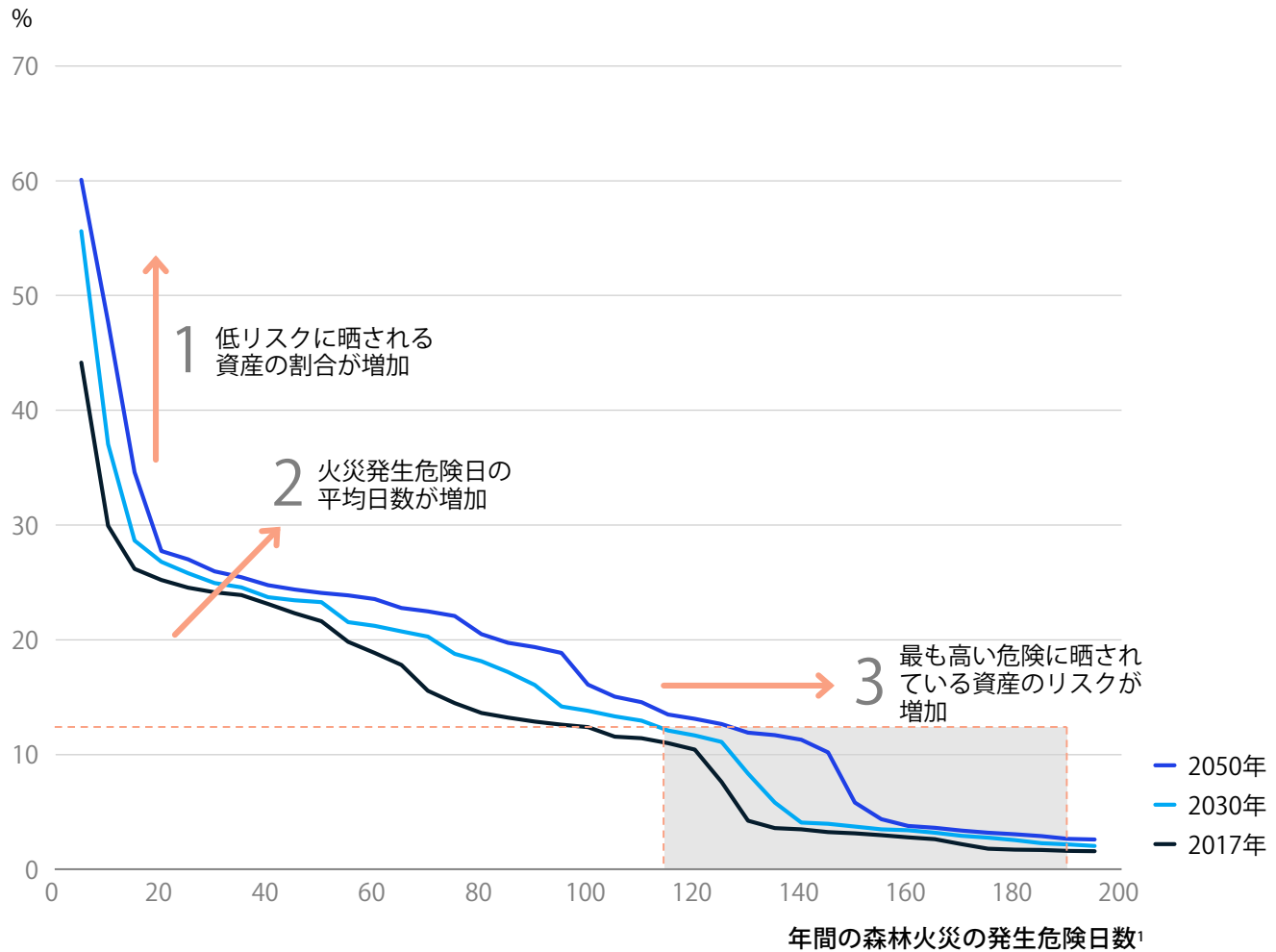
人口



ニューサウスウェールズ州など、オーストラリアで人や資産が最も集中している地域においても森林火災の発生危険日数が急増する可能性がある

オーストラリアの森林火災は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、2030年および2050年までに発生頻度がさらに高まると予想される

森林火災による被害を受ける可能性がある資産の割合(累積)²



森林火災発生危険日の年間平均日数
資産額に基づく加重平均

	1	2	3
	少なくとも年間5日、森林火災の危険に晒される資産の割合(%)	総資産に基づき加重	最も高い危険に晒されている上位10%の資産に基づき加重
現在	44	28	154
2030年	56	32	164
2050年	60	37	178

1. 火災気象指数(FWI)が、過去に観測された森林火災の大半(79%)と同程度に高い日を火災発生危険日として定義。火災気象指数は、世界中で使用されている火災の危険度を表す指標で、降水量や気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節に基づいて算出する

2. 資本ストック額に基づく

注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: Australian Geography Teachers Association、Geoscience Australia、国連人道問題調整事務所(OCHA)、Woodwell Climate Research Center、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

47%

低所得国の国富に占める
自然資源の割合

気候変動により、氷河や海洋システムなどの自然資源やそれぞれが果たす役割に大きな影響が出ている

アジア太平洋地域は、自然資源が豊富で世界最大の自然の宝庫と言われ、地球上で最大規模かつ多様な生態系を有している。世界銀行によると、新興国の国富の47%は自然資源が占めているという(OECD諸国は3%程度)²⁶。アジア太平洋地域は、新興国が含まれる地域として世界で2番目に大きく、何十億人もの人々が自然資源による社会的・経済的恩恵を受けている。

しかし現在、アジアの自然資源は、気候変動により枯渇や絶滅の危機に晒されている。例えば、ヒンドークシュ山脈ヒマラヤ地域では、氷河が、2030年には約10~25%、2050年には一部の地域で20~40%消失すると予想されている²⁷。また、世界の平均気温が2℃上昇した場合、2050年にはコーラル・トライアングルやグレートバリアリーフで最大90%のサンゴが死滅してしまう²⁸。すでに、地球温暖化による海水温の上昇により漁業にも影響が出ており、1930年から2010年にかけて日本海での漁獲量は35%減少している²⁹。さらに、沿岸部の自然の防護壁そして炭素の貯蔵・隔離の場ともなっている世界全体のマングローブ面積の約半数を占める東南アジアのマングローブは、2050年には約35%減少する見込みで、世界的に大きな損失となる³⁰。

アジアが直面する自然資源課題が深刻化するほど、資金調達手段を拡充する必要性はより一層高まる。例えば、国レベルで、自然資源プログラムへの公的資金配分や、民間部門を巻き込むための優遇措置や市場メカニズムの整備、自然資源の消費や環境負荷に対する環境税の導入を検討する必要がある。

気候変動に対し緩和策をとらない場合には、適応策を講じるスピードをさらに加速させ、規模を拡大していく必要がある

気候科学の知見によると、今後10年間で温暖化が進むことは不可避で、アジアの社会・経済に影響が出ることは間違いない³¹。そのため、政策立案者やビジネスリーダーは、この課題に対処するための適応戦略を策定する必要がある。ただし、ここには数多くの機会が存在する。例えば、アジアの多くの地域では、大規模なインフラ整備が進行中であるため、気候変動のリスクに耐えられる構造を設計できる。アジア開発銀行によると、アジアが現在の成長率を維持するためには、2030年にかけて年間1.7兆ドルを投資する必要があるという³²。

今回、アジア全域の約50の適応事例を検証し、5つの適応策「リスクの評価と対応力の強化」「人や資産の保護」「耐性の強化」「リスクの低減」「資金調達・保険制度の整備」を特定し詳述している(図表E5)。

ほとんどの意思決定シナリオで、何を今すぐ実行し何を後回しにするのか、あるいはどこに投資するのか、どこでマネージド・リトリート(災害による被害に晒される危険性のある土地から住居・農地・道路などを安全な場所に移動させること)に取り組むべきかといった難しい選択を迫られる。同様に、今すぐに投資するのか、それとも必要に迫られるまで待つのか、あるいは、気候変動に適応するうえでどこまで耐性を高めるべきなのか、例えば、2030年あるいは2050年のどちらの時点の気候変動の影響を想定して耐性を強化するのかなどについても、厳しい選択を迫られることになる。

²⁶ World Bank, The Changing Wealth of Nations 2018: Building a Sustainable Future, Washington, DC:World Bank (2018年)

²⁷ J. M.Maurer et al., "Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years," Science Advances, Volume 5, Number 6(2019年6月); Philippus Wester et al., eds., The Hindu Kush Himalaya Assessment:Mountains, Climate Change, Sustainability and People, Cham, Switzerland:Springer (2019年)

²⁸ Scot F. Heron et al., Impacts of Climate Change on World Heritage Coral Reefs :A First Global Scientific Assessment, Paris, UNESCO World Heritage Centre (2017年)

²⁹ Christopher M. Free et al., "Impacts of historical warming on marine fisheries production," Science, Volume 363, Number 6430 (2019年3月)

³⁰ Luke M. Brander et al., "Ecosystem service values for mangroves in Southeast Asia: A meta-analysis and value transfer application," Ecosystem Services, Volume 1, Issue 1, pp. 62–69 (2012年)

³¹ H. Damon Matthews et al., "Focus on cumulative emissions, global carbon budgets, and the implications for climate mitigation targets," Environmental Research Letters, Volume 13, Number 1 (2018年1月); David Archer, "Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time," Journal of Geophysical Research:Oceans, Volume 110, Issue C9 (2005年3月); H. Damon Matthews and Susan Solomon, "Irreversible does not mean unavoidable," Science, Volume 340, Issue 6131 (2013年4月)

³² インフラ投資は、交通(道路、鉄道、航空路、航路)、エネルギー、通信、水・衛生(ダム、灌漑、治水対策工事を含む)の4つの分野の設備投資として定義。Meeting Asia's Infrastructure Needs, ADB (2017年)

図表E5

アジアでは気候災害の種類により適応策は異なる

検証したユースケースの数¹

低 高

■ 当該の気候災害には関連のない対策

A、B、Cの事例については詳細後述

適応策		居住性・作業性		食料システム		有形資産およびインフラサービス			
		極暑による影響	水ストレス	干ばつ	河川・内水氾濫	海面上昇・高潮	暴風雨・台風	竜巻などの突風	森林火災
リスクの評価と対応力の強化	リスク認識を向上	ハザードマップで適切なリスクレベルを反映							C
	リスクを勘案	気候変動のストレステストおよびその結果の開示を義務づけ	A						
	報告体制を強化	リスクを開示、および資産評価や投資に関する意思決定についての透明性を向上							
	計画および監視	気象・気候災害およびその影響に対する早期警告システムを導入	A			E			
人や資産の保護	資産の管理体制を強化	物理的な資産およびインフラの耐災害性を強化				J			C
	グリーンインフラを整備	自然およびエコシステムによる防御を構築・復活					H		
	グレーインフラを整備 ²	気象災害の深刻度を軽減および期間を短縮する人工物を建造						G	
耐性の強化	バックアップ機能を強化	重要な投入要素の代替やバックアップとなるものを特定		B, I	F		D		
	分散化	干ばつや害虫に強い品種のトウモロコシを活用							
リスクの低減	既存のリスクを管理	耐災害性の強化では対応できない立地にある有形資産の移転を実施	A						
	将来のリスクを低減	今後整備するインフラ資産の立地条件を慎重に検討					K		
資金調達・保険制度の整備	公的資金や開発援助融資を活用	気候変動対応型農業の促進に向け、農業補助金の活用および資金調達手段を改善							
	民間からの投資を誘致	重要インフラの運用資金としてグリーンボンドを発行							
	保険へのアクセスを拡大	気候変動の影響を受ける地域の農家を対象とした気候変動保険を提供			L				

アジアでは気候災害の種類により適応策は異なる(続き)

適応策のケーススタディ

A. インド: アーメダバードは人口約700万人の都市。2010年5月の致命的な熱波で1日で300人(合計1,344人)が死亡したことを受け、同市は、極暑対策の実行、調整、評価の枠組みとして高温警報システムやクールルーフ戦略などのヒート・アクション・プラン(HAP)を策定した

B. インド: 乾燥地帯にあるラダック地方では灌漑に氷河融解水を利用しているが、気候変動の影響により同地方の自然の氷河が縮小している。エンジニアのソナム・ワンチュク氏のアイデアにより、冬の間(それまでは利用していなかった)雪や氷から溶けた水を収集し、農家が灌漑水を最も必要とする春まで「氷のストウパ」の形で貯蔵している

C. オーストラリア: ビクトリア州教育・訓練省は、森林火災と危機管理対策の本格的かつ包括的な見直しを開始した。重要なプロジェクトの一つとして「School Bushfire Protection Project」が挙げられる。これは、学校の生徒や職員を森林火災から実践的かつ適時に保護できるよう、対策の強化を図ることを目的とした取り組みである。コンソーシアムには、火災リスクのモデル化、絶滅危惧種の評価、森林火災が発生しやすい地域のエンジニアリングソリューションの専門家名を連ねている

D. バングラデシュ: 気候変動により河川氾濫や高潮の被害が激化している。パプナ地区にある人口2,500人の村、Charbhanguraの農家は、毎年、田畑が浸水するたびに農作業ができなくなる状況にあった。そこで、水生植物をベースとして野菜を育てる浮遊農場を作り、そこで野菜の水耕栽培を行う戦略をとった。浮遊農場の周りには魚が生息し、野菜畑は川岸とロープでつながれている

E. 日本: 気候変動により洪水の発生確率が上昇するため、東京メトロは、衛星降水観測データを活用して都内の地下鉄への氾濫水の流入を防ぎ浸水被害を最小化し、乗客の安全を守るために設備強化や避難誘導などの緊急時の対応力向上を図るなど、様々な対策を講じて地下鉄の運行への影響を最小限に抑えるよう努めている

F. 中国: この10年間で、水不足の深刻化と農業生態系で頻発する干ばつにより、雲南省および広西チワン族自治区の農作物の収量に大きな被害が生じた。農業従事者は、科学者の支援のもと、参加型でトウモロコシの育種を行い、現在のハイブリッド品種より干ばつや害虫に対する耐性が高く、収量、農業形質、旨味に優れた新種のトウモロコシを保存、改良、開発している

G. フィリピン: 2015年、IOM(国際移住機関)とユニセフ(国連児童基金)は、2013年にフィリピンを襲ったスーパー台風ハイエンで甚大な被害を受けた地域の一つである東サマール州を対象として、防災ネットワークの整備促進プログラムを立ち上げた。このプログラムでは、2つの目的に応じた避難所を建設する計画があり、洪水や台風、地震などの自然災害の避難所として、また避難所として使用されていない時には地域活動の多目的施設として利用する予定となっている

H. ベトナム: エビの養殖池の開発により、ここ30年間でマングローブが半減した。マングローブは、暴風雨や海面上昇、浸食に対する自然の防波堤としての役割を果たす。マングローブへの影響を軽減するため、オランダ開発機構(SNV)および国際自然保護連合が合同でMAMプロジェクトを立ち上げ、マングローブ林の復元と保護を図るとともに、小規模エビ養殖業者の生計と復元力の向上にも努めている

I. 韓国: 地球温暖化が進むにつれて土壌の浸食や水不足が深刻化し、農作物の収量が減少している。屋内垂直農場のスタートアップ企業であるNextOn社は、韓国中部に位置する忠清北道で使用不可となった高速道路用トンネル(急カーブが危険とされ2002年に閉鎖)を政府から借り受け、地下空間に奥行き2,000フィート(約610m)の縦型(垂直式)の植物工場を設置。サラダ用の葉野菜やイチゴなどを栽培している

J. マレーシア: クアラルンプールでは鉄砲水が増加しており、ほぼ毎年発生している。そのためマレーシア政府は、河道拡幅、道路トンネルの設置、貯水池への導水ルートの確保などの治水対策を講じている。これらの取り組みにより、治水容量が300万立方メートル増え、ほぼすべての洪水に十分対応可能となる

K. インドネシア: 首都ジャカルタは、海面上昇などにより2050年までにその大部分が水没する危機に瀕している。2019年、インドネシア政府は首都をジャワ島からボルネオ島に移転する計画を発表した。新首都は政治の中心となるが、ジャカルタは引き続きビジネスと経済の中心を担う

L. タイ: タイ北東部の農家は、異常気象などの影響により大幅な収入減少に苦しんでいた。そこで損害保険ジャパン日本興亜(現・損害保険ジャパン)は、天候インデックス保険の販売を開始した。この保険は、気温や降水量などの天候指標があらかじめ定められた条件を満たした場合、あるいは異常気象が発生した場合に農家に保険金が支払われるというものである

1. 合計50件を調査。複数の対策を有するケースもある

2. グレーインフラとは、地域やインフラ、人の気候災害に対する適応力を強化するための技術やエンジニアリングのソリューションを指す

資料: マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

広く見ると、アジアは世界で最も貧困人口の割合が高く、貧困層は気候変動に対して非常に脆弱である。したがって、アジアにとっては、最も脆弱なコミュニティを守り、彼らの声を意思決定に反映することが極めて重要になり、気候変動の逆進性を助長しないよう適応策を慎重に検討する必要がある。例えば、適応策のための資金を地域や個人から調達する必要がある場合、最も脆弱な人々は、資金を用意できないというリスクをさらに負うことになりかねない。

これらの5つの適応策はアジアの国々と非常に関連しており、中にはすでに展開されているものもあるが、さらに規模を拡大させていく余地がある。適応策の詳細について以下に示す。

リスクの評価と対応力の強化

適応策を効果的に推進するには、深刻化する気候変動リスクを把握し追跡し続ける必要がある。新たなマインドセットを醸成し、常に変化し続け空間的(局所的に顕在化)で連鎖的、逆進的かつ非線形的な影響をもたらす気候変動リスクをモデル化し検証するためのツールや能力を構築するためには、思い切った措置を講じる必要がある。計画や戦略を策定する際には、気候変動リスクを高度にモデル化し、移行リスクや賠償責任リスク、物理的リスクを評価することが重要となる。

アジアでは多くの企業や公的機関がリスク評価に着手している。例えば、気候変動により洪水の発生確率は上昇するため、東京メトロは、衛星降水観測データを活用して都内の地下鉄への氾濫水の流入を防ぎ浸水被害を最小化し、乗客の安全を守るために設備強化や避難誘導などの緊急時の対応力向上を図るなど、様々な対策を講じ、地下鉄の運行への影響を最小限に抑えるよう努めている³³。しかし、他にもできることはまだまだたくさんある。組織は、気候変動リスクを考慮してオペレーティングモデルをカスタマイズし、必要なツールや能力を構築するための新たなマインドセットの醸成に向け、確固たる姿勢で取り組むことが重要である。

人や資産の保護

アジアの多くの国々が、既存インフラを活かしてどのような適応策をとるべきか、あるいはどのようにして最も脆弱な層を保護すべきかなど、同様の課題に直面している。そのため、国や地域の枠を超えてアジア全体でベストプラクティスを共有し、互いの経験から学び、それぞれの状況に適した施策を講じる機会が存在する。

人や資産を保護するための対策としては、物理的な資産およびインフラの耐災害性を強化するなど資産の管理体制を強化する、自然資源あるいは「グリーン」インフラ(自然環境や生態系の復元など)、そして建物の基礎部分のかさ上げや防災シェルターの設置など、災害被害を減らすための「グレー」インフラの両方を整備・強化することなどが挙げられる。例えば、クアラルンプールでは毎年鉄砲水が発生しているが、マレーシア政府は、河道拡幅、道路トンネルの設置、貯水池への導水ルートの確保などの治水対策を講じている。これらの取り組みにより、治水容量が300万立方メートル増え、ほぼすべての洪水に十分対応可能となる³⁴。

耐性の強化

資産の強化とともに、資産や地域社会の耐性も強化する必要がある。その手段としては、代替またはバックアップ機能の整備、あるいは資源の分散化(多様化)などが挙げられる。気候変動への耐性強化のベストプラクティスは大きな便益をもたらす。例えば、中国西南部の雲南省と広西チワン族自治区の農村地域は、ここ10年間で、水供給システムへのプレッシャーの高まりや干ばつの頻発により農作物の収量が著しく減少した。しかし、耐性強化プロジェクトを通じて、干ばつや害虫に対する耐性を向上させたトウモロコシの品種が開発された。また、インドのラダック地方は、ヒマラヤ山脈の雪解け水を灌漑用水として活用していたが、氷河の減少により、確保できる水の量が減ってしまった。そこで、雪解け水を貯蔵しておくための設備が設けられ、1年を通じて灌漑用水を確保できるようになった³⁵。

³³ Using Radar to Scan rainclouds in 3D to Protect Subways from Flooding, The Government of Japan

³⁴ Special Unit for South-South Cooperation, Kuala Lumpur, Malaysia, UNDP

³⁵ Ice stupas: Water conservation in the land of the Buddha, India water portal (2015年)

2015年、IOM(国際移住機関)とユニセフ(国連児童基金)は、2013年にフィリピンを襲ったスーパー台風ハイエンで甚大な被害を被った地域の一つである東サマール州を対象とした、防災ネットワークの整備促進プログラムを立ち上げた³⁶。このプログラムでは、災害に強い施設づくりの支援も行っており、フィリピン全土で継続・反復可能な手法を整えるため、世界各地のベストプラクティスを取り入れながら、フィリピンの建設技術や入手可能な建材を考慮して設計を行った。

リスクの低減

今回検証した50のケーススタディを見る限り、アジア全域において、適応策としてリスクの低減を採用しているところは少なかった。この点については再考の余地があるだろう。場合によっては、資産の移転や改修が適切なこともある。アジアの一部の地域は非常に高い気候変動リスクに晒されており、オーストラリアでは、ニューサウスウェールズ州など人口や資産が最も集中している地域では、森林火災の発生危険日数が大幅に増加する可能性がある。

大規模なリスク低減策の一例としては、インドネシア政府が2019年に発表した首都移転が挙げられる。現在の首都であるジャカルタは2050年に一部地域が水没すると言われている³⁷。

移転や防護措置に関する意思決定を下す際には、どの地域や資産にどのくらい投資するのか、今すぐ実行するのか、あるいは先延ばしをするのかを検討する必要がある。また、持ち家がある人や地域社会への影響と、災害後の復興費用や被災者の生活再建支援金などの負担を、天秤にかけて検証する必要もある。アジアは世界で最も貧困人口の割合が高く、貧困層は気候変動に対して非常に脆弱である。したがって、アジアでは、最も脆弱なコミュニティを守り、彼らの声を意思決定に反映させることが極めて重要になる。

資金調達・保険制度の整備

アジアではインフラ整備のニーズが増大しているため、適応策のための資金調達が非常に重要になる。アジア開発銀行は、アジアが成長の勢いを維持し、貧困を撲滅し、気候変動に対応するためには、2030年にかけてインフラ整備に毎年1.7兆ドルを投資する必要があると推計している。そのうち、気候変動リスクへの対応に関わる投資の割合は約2% (年間400億ドル)と推計されている³⁸。資金調達的手段としては、官民が連携し、共同出資などにより経済的負担や機会を共有することも考えられる。また、政府は、融資・保証制度を通じて民間投資を促進し、適応策に必要な資金を調達あるいは民間の関与を強化することもできる。アジア開発銀行が2008年に設立した気候投資基金(CIF: Climate Investment Funds)は、同行の気候変動プログラムおよびアジア太平洋地域における気候変動対策のための譲許的融資の大きな資金源となっている。CIFは民間部門からの資金調達を順調に進めており、本レポート執筆時点で運用資産は約16億ドルに達している。政府や国際開発金融機関(MDB)、民間部門からの資金調達については、支援者がCIFに対して約束した財源を活用している³⁹。

増大し続ける気候変動リスクの影響を抑制するためには、保険制度が特に重要となり、ここにも民間部門を巻き込む機会が存在する。アジアのOECD加盟4カ国のうち3カ国、およびアジアのOECD非加盟国のほとんどは、保険普及率がOECD諸国の平均を下回っている⁴⁰。保険が不足あるいは適切な保険がない場合には、気候変動に対する耐性が弱まることになる。

1.7兆 ドル

アジアにおける2030年にかけてのインフラ投資額の推計

³⁶ Building safe spaces for the community, UNICEF Philippines and International Organization for Migration (2018年)

³⁷ Paige Van de Vuurst and Luis E. Escobar, "Perspective: Climate change and the relocation of Indonesia's Capital to Borneo," *Frontiers in Earth Science* (2020年1月)

³⁸ Meeting Asia's infrastructure needs, ADB (2017年)

³⁹ ADB Climate Change and Disaster Risk Management Division, Country fact sheets, second edition, ADB and the Climate Investment Funds(2016年)

⁴⁰ Insurance indicators: Penetration, OECD

適切な保険制度を通じてリスクについて適切なシグナルを送り、特定の地域の開発を避けるよう注意喚起するなど、行動変容を促すことができる。パラメトリック型保険や大災害債券(CATボンド)などは、気候災害への備えを提供し、経済的な被害を最小限に抑え、災害発生後の早期復旧を支援するものである。これらの商品により脆弱層を守ることができる。アジアにおける取り組みの一つとして、損害保険ジャパン日本興亜(現損害保険ジャパン)が2015年にタイで販売を開始した天候インデックス保険が挙げられる⁴¹。この保険は、気温や降水量などの天候指標があらかじめ定められた条件を満たした場合、あるいは異常気象が発生した場合に農家に保険金が支払われるというものである。

45%

アジアが世界のGHG排出量に占めるシェア

アジアは世界的な脱炭素化に向けて中心的な役割を担っており、リーダーとなる機会が存在する

気候変動に対し適応策を講じることは重要であるが、それだけでは不十分である。気候科学の知見によると、温室効果ガスの純排出量をゼロにする以外、温暖化やリスクの増加を食い止める方法はない⁴²。アジアは排出量を削減する緩和策において重要な役割を担っている。なぜなら、世界のGHG排出量に占めるアジアの割合は、ここ30年間で約25%から約45%に増加しているためである⁴³。パリ協定では、2100年の世界的な平均気温上昇を産業革命以前と比較して2°C未満に保つとともに、1.5°Cに抑える努力をすることを目標としている。気温上昇を1.5°Cより低く抑えるためには、カーボンバジェット(炭素予算)を全世界で2018年の水準の570GtCO₂⁴⁴に抑える必要がある⁴⁰。これを実現するためには、2030年までに排出量を2010年比で50~55%削減し、2050年には排出量ゼロを達成する必要がある⁴⁵。アジアは世界全体の排出量の多くを占めており、経済成長に伴い排出量が増加する可能性があることから、アジアが下す決断によって世界の排出削減パスが決まるといっても過言ではない。

アジアにおける緩和策に関する機会と課題の分析を、4つの国の業界レベルでの脱炭素化への取り組みのケーススタディに基づいて行った(インドの石炭火力発電、中国の鉄鋼業、インドネシアの農業・林業、日本の交通業)。これらのケーススタディでは、「4つのアジア」と、各地域の脱炭素化において重要な役割を果たす可能性のある(つまり炭素排出量の多い)国や業種をカバーする。ここでは、現在の脱炭素化のトレンドを把握し、新たな技術の可用性や適用性を含めた脱炭素化に向けた最良の機会を特定し、脱炭素化に伴うコストや移行リスクの程度を理解することを目的としている。鉄鋼業界における水素活用技術のように、分野によっては、脱炭素化を進めるために大規模展開が可能な新技術への継続投資が不可欠となる場合もある。また、技術によっては、実現や大規模展開が可能でも、その他の課題やリスクに対処する必要があるものもある。

幸いなことに、アジアは、様々な理由から、気候変動への適応策や緩和策の推進を主導していくうえで有利な立場にある。その一つがインフラ整備の大きな機会の存在である。フロンティアアジアとアジア新興国は、経済発展に取り組むと同時に、インフラに関わるニーズや排出量削減機会のシナジー効果を追求できる(クリーンエネルギー投資による雇用創出や持続的経済発展など)。ステークホルダーは、官民パートナーシップ(PPP)や気候変動要因を考慮した新たな

⁴¹ Climate Resilience and the Role of the Private Sector in Thailand: Case Studies on Building Resilience and Adaptive Capacity, BSR (2015年9月)

⁴² 「排出量実質ゼロ」とは、GHGの発生源を排除する、GHGを排出する技術を排出量ゼロの技術に置き換える、あるいは人為的な排出量と森林等の吸収源による除去量との均衡を達成することで、年ベースでのGHG排出量をゼロにすることを意味する。気候変動による不可避な温暖化(ゼロエミッションコミットメント、またはZEC)や気候安定化、排出量実質ゼロ、および炭素予算の仕組みについては、H. Damon Matthews et al., "Focus on cumulative emissions, global carbon budgets, and the implications for climate mitigation targets," Environmental Research Letters, Volume 13, Number 1(2018年1月)、H. Damon Matthews and Ken Caldeira, "Stabilizing climate requires near zero emissions," Geophysical Research Letters, Volume 35, Issue 3 (2008年2月)、Myles R. Allen et al., "Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne," Nature, Volume 458, Issue 7242 (2009年4月)を参照

⁴³ AR5GWP20に基づく

⁴⁴ マッキンゼーの分析は、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の調査データに基づいており、2018年1月1日時点の残炭素予算(570GtCO₂)を使用している。この予算内に収めることで、気温の上昇幅を1.5°C未満に抑えられる確率は66%となる。IPCCの手法やその他の炭素予算の推計値との違い(420GtCO₂の場合は気温上昇を1.5°C未満に抑える確率が66%、580GtCO₂の場合は50%となるなど)については、Myles R. Allen et al., Special report: Global warming of 1.5°C, IPCC (2018年)およびKimberly Henderson, Dickon Pinner, Matt Rogers, Bram Smeets, Christer Tryggstad, and Daniela Vargas "Climate math: What a 1.5-degree pathway would take," McKinsey Quarterly (2020年4月)を参照

⁴⁵ Kimberly Henderson, Dickon Pinner, Matt Rogers, Bram Smeets, Christer Tryggstad, and Daniela Vargas, "Climate math: What a 1.5-degree pathway would take," McKinsey Quarterly (2020年4月)

計画立案アプローチを模索することもできる。さらに広く見れば、数多くの世界最大規模のイノベーター企業がアジアに拠点を置いており、世界の研究開発費総額のほぼ半分をアジアが占めている。

過去10年間にわたり、テクノロジー企業の売上高やベンチャーキャピタル投資額、研究開発費、特許出願件数の伸び率に対する寄与度は、アジアが最も大きい⁴⁶。アジア諸国は、互いに連携して取り組むことで、気候変動リスクを管理し、気候変動への世界的な対応において主導的な役割を果たすことができる。

アジアには主に4つの脱炭素化機会が存在する(図表E6)。具体的には、石炭から再生可能エネルギーへの移行、産業部門における脱炭素化の推進およびCO₂の回収・利用・貯留(CCUS)技術の高度化、農業・林業の改革、日常生活の電化による自動車や建築物の脱炭素化、である。これらの機会は、炭素排出量が多い業種にも存在する。ただし、大きな課題も存在する。例えば、石炭の場合、再生可能エネルギーに移行する際には、新設されたばかりの石炭火力発電所に投じられた莫大な資金を考慮する必要がある。次にそれぞれの機会について詳しく見ていきたい。

90%

アジアの電力部門のCO₂排出量に占める石炭火力の割合

石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行

アジアは、再生可能エネルギーの生産能力がクリティカルマスに達しており、スケールメリットによるコストダウンが可能であることから、脱炭素化に向けて大変重要な役割を果たす立場にある。そのため世界に大きな影響を与える可能性があり、2040年には世界の電力インフラ関連投資額に占めるアジアの割合は約50%になる見込みである。また、アジアの電力部門は域内のCO₂排出量の約35%を占めており、そのうちの90%を石炭火力発電所が占めている(世界全体での石炭火力発電所の排出割合は70%)。

再生可能エネルギーへの移行はすでに進んでいる。例えば、中国は、すでに世界最大規模の再生可能エネルギー市場となっており(世界全体の2,500GW規模の発電容量のうち750GW以上を占めている)、再生可能エネルギーへの投資額は世界全体の投資額の47%を占めている⁴⁷。ただし、電力部門で脱炭素化が進むかどうかは、国内の発電所の耐用年数と電力需要の見通し次第である。中国やインドなどのアジア主要国では、運転年数の浅い石炭火力発電所が大半を占めており、今後も石炭火力発電所の建設が予定されている。新設したばかりの発電所を廃止して、増大し続ける電力需要に再生エネルギーだけで対応するためには、膨大な投資が必要となる。また、再生エネルギーの生産能力を大幅に拡大させ、太陽光や風力などが足りない場合でも需給バランスを維持するための対策を講じる必要がある。石炭火力発電所をバイオマス発電所やCCS(CO₂回収・貯留)付帯発電所に改修することも可能であるが、資本費が高く、安定した量のバイオマスを確保しづらいことから、実行に移すことは難しい。

インドの石炭火力発電所のケーススタディでは様々なシナリオを検証した。その中で最も野心的なシナリオでは、2050年には電力部門の排出量が現在の1,070MtCO₂から500MtCO₂に半減すると想定しているが⁴⁸、これを実現するためには、亜臨界圧の石炭火力発電所(約110GW規模)をすべて廃止する必要がある。また、太陽光・風力発電と蓄電池の併用を含む大規模な先行投資と、耐用年数が来る前に設備を停止・閉鎖するためにアセットオーナーに支払う補償料が必要となり、2050年までにその総額は基準ケースを約3,100億ドル上回る規模に達する⁴⁹。また、有効な対策がとられなかった場合には、どのシナリオにおいても、再生可能エネルギーの導入に必要な資本的支出により電力価格が高騰するリスクや、石炭火力発電所で働く作業員が再生可能エネルギーを含む成長分野に転職できず職を失うリスクなどにも対応する必要がある。

⁴⁶ Oliver Tonby, Jonathan Woetzel, Noshir Kaka, Wonsik Choi, Jeongmin Seong, Brant Carson, and Lily Ma, How technology is safeguarding health and livelihoods in Asia, McKinsey & Company (2020年5月) 参照

⁴⁷ Renewable capacity statistics 2020, International Renewable Energy Agency (2020年3月)、BloombergNEF, BP statistical review of world energy 2019, BP (2019年)

⁴⁸ The Global Energy Perspective Reference Case では、再生可能エネルギーの台頭、電動化の進展、気候変動や脱炭素化に対する認識の変化といった、エネルギーを取り巻く環境の大きな変化を示している。この見通しは、石油・ガス、自動車、再生可能エネルギー、基材などの分野に関する数百人のマッキンゼーのエキスパートの知見に基づいて考察したものである。マッキンゼーのEnergy Insights チームは、このグローバルネットワークを活用して、多様な知見を一つの基準ケースとしてまとめた。本レポートでは、この基準ケースを McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年) としている

⁴⁹ McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)

図表E6

アジアでは、炭素排出量が多い主なセクター全体に独自の脱炭素化機会が存在する

アジアでの温室効果ガス(GHG)の年間総排出量

低 高

MtCO₂e¹; 2016年

国名 ²	セクター別							総排出量		
	電力	産業	農業	森林伐採	運輸(自動車)	建築物	廃棄物処理	CO ₂	CO ₂ 以外	GHG
中国	4,023	7,732	1,689	4	970	628	1,017	10,338	5,726	16,064
インド	1,060	1,327	1,912	34	288	141	758	2,249	3,271	5,520
インドネシア	181	742	456	1,115	147	26	237	1,630	1,274	2,904
日本	484	422	64	0	244	118	31	1,214	148	1,363
オーストラリア	188	512	290	10	111	15	88	441	773	1,215
パキスタン	43	183	470	0	50	19	90	192	662	854
韓国	279	233	37	0	153	53	46	675	127	803
タイ	93	220	186	15	92	7	59	320	352	672
ミャンマー	7	44	226	321	5	4	28	345	289	635
ベトナム	78	209	193	3	42	12	60	233	364	597
マレーシア	106	199	24	52	73	5	46	288	218	506
フィリピン	54	77	176	1	38	6	81	130	304	435
バングラデシュ	34	76	226	5	12	9	71	86	348	434
ニュージーランド	3	19	111	1	18	2	18	37	134	171
合計	6,634	11,995	6,061	1,561	2,242	1,046	2,631	18,178	13,992	32,170

主要統計データ	電力業界はGHG全体の約20%以上を排出。アジアで電力業界が排出するGHGの約90%は石炭発電に由来(世界では約70%)	アジアで産業部門が排出する単位GDP当たりのGHGは、世界と比べて約60%高い。世界の鉄鋼・セメント業界のCO ₂ 排出量全体の約8割をアジアが占めている	アジアの農業と森林伐採は、GHG全体の20%以上を排出している。農業は世界のメタン排出量の約20%を占めている	アジアの運輸分野や建築物は世界全体のGHGの三分の一を占めている
脱炭素化を見込める主要領域	電源構成の石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行。アジア地域での再生可能エネルギーの生産能力をクリティカルマスまで高めて規模を拡大し、コストダウンを図る(2040年までに、世界の電力投資の約50%がアジアで実施される見込み)	産業部門における脱炭素化の推進およびCO ₂ の回収・利用・貯留(CCUS ³)技術の高度化。アジアの産業部門は世界最大規模であることから(中国だけで世界の鉄鋼生産の約50%を占める)、CCUSへの迅速な投資や大規模な炭素貯蔵を実現できる可能性あり	農業・林業の改革。世界の主要な穀倉地帯(米の約90%、トウモロコシと小麦の30%以上はアジアで生産)であることから、大規模に森林再生を実施できる可能性あり(約45GtCO ₂ を吸収可能)	日常生活を電動化することによる自動車や建築物の脱炭素化。アジアは、特に電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV) ⁴ などの脱炭素化技術で世界をリードしている(世界のEV/バッテリー市場で圧倒的なシェアを獲得し、政府主導でFCVの普及拡大を推進している国もある)
アジアにおける課題(例)	運転年数の浅い石炭火力発電所が大半を占めている。脱炭素化は国の発電所の稼働年数に大きく依存する。アジアで新設した発電所を廃炉し脱炭素化するには、莫大な設備投資が必要となる	世界の鉄鋼・セメント業界で圧倒的なシェアを占めている。脱炭素化を加速し、かつ世界の生産需要を満たすには、新たなソリューション(CCUS、水素・バイオエネルギーなど)を拡張する必要がある	農業への依存度が高い。脱炭素化に向け、農業手法を変革(森林伐採の停止など)すると同時に、アジアの人々の生活にとって不可欠な食料産業を保護する必要がある	インフラへの莫大な投資が必要。ICEからBEV/FCVへ移行するうえで、大規模なインフラ整備が必要となる

1. 温室効果ガス。CO₂以外の温室効果ガスの排出量は、IPCC第5次報告書(AR5)より地球温暖化係数の20年間累積値(WP20)によりCO₂eに換算
 2. このヒートマップはアジア地域最大のCO₂排出国を示すことを目的としているため、カンボジアとラオスは含まれない。この14カ国で、同地域のGHG総排出量の95%以上を排出している
 3. CO₂の回収・利用・貯留
 4. EV: 電気自動車、FCV: 燃料電池自動車
 注記: 端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない

資料: EDGAR (2008年、2015年)、FAOSTAT (2015年)、Global Energy Perspective 2019: Reference Case, McKinsey Energy Insights(2019年)、マッキンゼー1.5Cシナリオ分析、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

産業部門における脱炭素化の推進およびCO₂の回収・利用・貯留(CCUS)技術の高度化

世界最大規模であるアジアの産業部門は、アジア最大のGHG排出源であり、アジア全体のGHG排出量の35%以上を占めている⁵⁰。また、アジアにおける産業部門のGDP当たりのGHG排出量は、世界の平均を約60%上回っている⁵¹。さらに、現在、世界の鉄鋼・セメント業界のCO₂排出量全体の約8割をアジアが占めている⁵²。したがって、世界の産業部門で脱炭素化を推進するためには、これら2つの業界の事業構造を転換する必要がある。それにはいくつかの手段が考えられる。その一つとして、炭素集約度の高い中間財の需要量と消費量を減らし、エネルギー利用の効率化と電動化を進めることが挙げられる。また、バイオエネルギーや水素などの新たなエネルギー源の活用や、CCUSへの投資なども考えられる。

中国の大手鉄鋼メーカーは既に水素活用技術への投資を進めており、グリーン水素のコストは2030年から2040年の間に30%下がり、石炭に対するキャッシュコストの競争力が増すと推定されている⁵³。鉄鋼業やセメント業などの重工業にはCCUSが最適と考えられる。アジアは、炭素貯留のポテンシャルが非常に高く、中国の陸上および海上のCO₂貯蔵容量は3,088ギガトン規模と推計される⁵⁴。しかし、鉄鋼業とセメント業で脱炭素化を実現するためには、新たな技術への大規模な投資が必要となる。中国の鉄鋼業のケーススタディでは、石炭の需要量が減り、エネルギー効率が向上し、EAF(電炉)によるスクラップ利用が進むという野心的なシナリオを想定した場合、中国の鉄鋼業のCO₂排出量は、2020年の1,720MtCO₂から2030年までに440MtCO₂まで減少すると推計されている。新たな技術の中でも、EAFを利用した水素による製鉄法が最も適していると考えられ、鉄鋼業で大規模な脱炭素化を実現するための長期的なソリューションとして、すでに検討が進められている。

ここでは、グリーン水素を利用した製鉄プロセスの今後の見通しと導入時期に影響を及ぼすいくつかの外的要因を特定した⁵⁵。これらには、再生可能エネルギー由来の発電量の拡大や、産業レベルでのグリーン水素の利用可能性の向上、素材の切り替え、新たな生産技術の導入、水素ベースの鉄鋼生産に対する需要、資金調達や資本へのアクセスが含まれる。

20%

世界のメタン排出量に占める
アジアの農業部門の割合

農業・林業の改革

農業・林業は、アジアにおけるCO₂排出量の10%、メタン(CH₄)排出量の40%以上を占めている。そのため、農業の脱炭素化を進め森林破壊を防ぐことにより大きな排出量削減機会が生まれる。しかも、アジアの農業は世界全体のCH₄排出量の約20%を占めている。農業・林業で排出量を削減するための主な戦略としては、動物性たんぱく質から植物性たんぱく質への移行の推進、農業技法の改善(乾田直播栽培の導入促進、水田の水管理の高度化、米生産のための施肥法の改良など)、持続可能な森林経営の推進(森林伐採の中止、森林再生の規模拡大など)が挙げられる。ある試算によると、2016年時点でアジアの樹木被覆地面積の1年当たりの減少率は約6万3,000km²で、これはスリランカの面積にほぼ匹敵する。森林破壊を食い止めるためには、規制の策定・実行、農家に対する機会費用の補償といった優遇措置を含め、様々な施策を組み合わせる必要がある。また、アジアの森林再生のためには、大規模な資金を動員する必要がある。森林の再生可能面積は約9,000万ヘクタールで、約45GtのCO₂を吸収できる⁵⁶。大規模な森林再生を実現するためには、各国政府が協調して持続可能な森林経営につながる土地活用施策をとることが重要になる。

インドネシアの農業のGHG排出量の主な3つの要因である稲作、糞尿管理、腸内発酵に基づいて、6つの費用対効果の高い排出削減対策を特定した(対策は、食生活の見直しなどの消費者の行動変容に関わるものというよりは農業生産に関するものがほとんど)。インドネシアでは稲作が持つ社会的影響が大きいため、3つは稲作に関する施策、残りの3つの施策は食肉生産に

⁵⁰ McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)、Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) (2015年)、FAOSTAT, FAO (2015年)

⁵¹ AR5GWP20iに基づく

⁵² McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)

⁵³ The future of hydrogen: Seizing today's opportunities, Organisation for Economic Co-operation and Development (2019年6月)

⁵⁴ Xiaochun Li et al., "CO₂ point emission and geological storage capacity in China," Energy Procedia, Volume 1, Issue 1 (2009年2月)

⁵⁵ Christian Hoffmann, Michel Van Hoey, and Benedikt Zeumer, Decarbonization challenge for steel, McKinsey & Company (2020年)

⁵⁶ Jean-Francois Bastin et al., "The global tree restoration potential," Science, Volume 365, Issue 6448 (2019年7月)

関するものとなっている⁵⁷。世界の削減費用と比較したところ、6つの対策のうち4つはコスト低減につながる事が明らかになった⁵⁸。

そこで最も大きな問題となるのが、森林破壊と汚染を進行させる一方で、域内の何十億人もの人々の命や生活を支えてきた現在の持続性の低い農法を、低炭素型農法に移行させることである。例えば、インドネシアでは、農業部門のGDPへの貢献率は13%で、国全体の就業人口に占める農業就業者の割合は30%となっている。そのうち小規模家族経営農家が全体の約93%を占めており、世帯年収に占める農業収入の割合は約50%となっている⁵⁹。

インドネシアで脱炭素化を推進するためには、農業改革だけでなく、二酸化炭素の吸収源の整備にも取り組む必要がある。なぜなら、インドネシアでは、持続性の低い農法により森林面積が大きく減少してしまったためである。同国は、パーム油生産のための森林伐採やアブラヤシ栽培により約40%の森林が失われており、1970年代以降、主に持続性の低い水産養殖やアブラヤシ栽培により40%のマングローブが失われている。

インドネシアは、脱炭素化を推進するために、より持続性の高い農法の導入を検討する一方で、人々の生活に不可欠な食料産業を守る必要もある。したがって、森林破壊を食い止めるための主な対策としては、森林火災や伐採を防ぐための法執行の強化に加え、荒廃した森林の再生に向けた取り組みなどが考えられる。

30%

世界全体のCO₂排出量に
占めるアジアの交通・
建築物分野の割合

日常生活の電動化による自動車や建築物の脱炭素化

アジアの運輸分野や建築物が世界全体のCO₂排出量に占める割合は30%超となっている⁶⁰。その一方で、アジアは、電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV)などの脱炭素化技術で世界をリードしている。運輸分野における脱炭素化の取り組みとしては、内燃機関車(ICE)の燃費向上、EV/FCVの普及拡大、走行距離の削減などが挙げられる。中国は、すでに世界最大の乗用車のEV市場であり、プラグインハイブリッド車(PHEV)とバッテリー式電気自動車(BEV)の売上高は世界全体のほぼ半分を占めている⁶¹。また、アジア各国の政府も、FCVの普及拡大に向けた支援策を展開している。例えば、日本政府が定めた「水素基本戦略」では、2030年度までに、FCバスについては1,200台程度、FCVについては80万台程度の普及を目指すとしている。

ICEからBEV/FCVへの移行を推進するうえで大きな課題となるのが、大規模なインフラ整備である。日本のケーススタディでは、運輸分野では、ICEの燃費向上や商用車部門でのBEVの普及拡大、公共交通機関やカーシェアリングなどの利用促進による走行距離の削減を通じて、2016年から2030年にかけて年間約70MtCO₂の排出量の削減が可能であることが明らかになった。これにより、日本は、パリ協定に基づいた2030年までの削減目標を達成できる。ただし、運輸分野で脱炭素化を推進するためには、電動化技術の展開やEV充電ステーションといったインフラ整備のために、2030年にかけて約1,200億ドルの投資が必要となる⁶²。また、電動化が進むことで、バッテリー需要が急増し供給が追いつかず、成長が鈍化する恐れもある。加えて、自動車の電動化に伴い、車の所有者は、購買行動や意思決定の判断基準を変える必要に迫られる。現在、ICEとBEVはほぼ同等の価格となっているが、BEVは購入時の初期費用が高いことが普及を阻む壁となっている。この壁を取り払うため、政府や自動車メーカーは、優遇措置(助成金、減税、特別仕様のナンバープレートの交付など)や画期的な購入資金サポートプログラムを提供する必要がある。

⁵⁷ 削減費用はマッキンゼーの分析から導出されたものでインドネシア固有のものではないが、各対応策の参考値になると考えられる

⁵⁸ Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices, McKinsey and Company (2020年4月)

⁵⁹ "Indonesia: Share of economic sectors in the gross domestic product (GDP) from 2008 to 2018," Statista (2020年)、
"Employment in agriculture (% of total employment) (modeled ILO estimate)," World Bank (2019年)

⁶⁰ AR5GWP20に基づく

⁶¹ China Association of Automobile Manufacturers (CAAM); The Electric Vehicle World Sales Database, EV Volumes

⁶² 詳細については、マッキンゼーの「Meeting Japan's Paris Agreement targets—more opportunity than cost(パリ協定の目標実現に向けた日本の脱炭素化の道筋)」(2020年)を参照

電動化は、自動車の脱炭素化に最も有望な方策であるが、建築物の脱炭素化にも有効である。一般的に、暖房・給湯システムは、主要排出源の一つである化石燃料への依存度が高いため、アジアではこれらの設備を電動化することで脱炭素化を進めることができる。また、地域冷暖房を導入したり、水素やバイオガスをガスグリッドに注入して調理や暖房に活用したりすることによっても、建築物の排出量を削減できる。

アジアの多くの国々が、すでに気候変動への適応や緩和に関わる課題の解決に取り組んでいる。こうした取り組みを積み重ね、ベストプラクティスを共有し、支援を強化していくことで、アジアは、世界が直面している最大の課題の一つである気候変動問題において、リーダーとしての存在を示すことができる。本レポートがその道筋を照らす一助となれば幸いである。目に前にある課題は大きいですが、それ以上の機会が存在すると我々は考える。



Malaysians walking through flooded streets.
© Teh Eng Koon/AFP/Getty Images

1. アジアの気候変動 リスク

気候変動に対する脆弱性の兆候はアジア全域に広がりつつあり、現時点で重大なリスク要因となっている。この兆候は今後10年以上にわたり増大し続ける可能性がある。本レポートでは、気候変動リスクの度合いを把握するため、物理的リスク、つまり、気候変動による物理的影響に関連するリスク、および人やコミュニティ、自然資源や有形資産、経済活動を含む社会経済的システムに与え得る影響に焦点を当てる(「コラム1: マッキンゼーの調査手法」参照)。ここでは、世界の人口の54%、世界のGDPの三分之一を占めるアジア16カ国の、現在および2050年にかけてのリスクを検証する。分析対象国は以下の通り: オーストラリア、バングラデシュ、カンボジア、中国、インド、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、ミャンマー、ニュージーランド、パキスタン、フィリピン、韓国、タイ、ベトナム。さらに、「4つのアジア(Four Asias)」のフレームワークを使用して、気候変動リスクの様々なパターンや考えられる対応策を明示する。

2.3°C

RCP8.5シナリオで緩和策を講じなかった場合の2050年にかけての気温の上昇幅
(産業革命以前と比較)

アジアでは地球温暖化の進行により気候災害が深刻化している

地球の気温は過去140年以上にわたり上昇し続けている。何千年もの間相対的に安定していた地球の平均気温は、地域によって大きな差があるものの、産業革命以前に比べ1.1°C上昇している⁶³。現在の地球温暖化のペースは、地質学的時間スケールでも前例がないほど加速し続けている。RCP8.5シナリオでは、緩和策を講じなかった場合、世界の気温は2050年には産業革命以前に比べ2.3°C上昇すると予測されており(気候モデルにより約2.0~2.8°Cまでの開きがある)、アジアの気温は1.5~5.0°C上昇するとされている⁶⁴。

地球温暖化の主な原因は、温室効果ガス(GHG)の大気中の濃度の増加である。18世紀半ば以降、人間は約2.5兆トンのCO₂を排出し、大気中のCO₂濃度は約280ppmvから415ppmvに増加している。気候科学の知見によると、1850年以降に観測された温暖化の98~100%は大気中のGHG濃度の増加によるもので、約75%はCO₂が直接的な原因であるとされている⁶⁵。

地球温暖化に伴いアジアが直面する様々な気候災害の影響は、地域によって異なる可能性がある。すでに気候科学者により、気候変動が異常気象の頻度や強度に与える影響に関する証拠が明らかにされつつある。2017年に中国湖南省で発生した大洪水では、被災者は780万人、甚大なインフラ被害を含む経済損失は35.5億ドルに上った⁶⁶。さらに、研究者は、気候変動により洪水の発生確率が倍増しており、オーストラリアにおける森林火災の発生確率については、2019年から2020年に発生したような大規模森林火災のリスクは、1900年から少なくとも30%以上上昇しているとしている(火災気象指数に基づいて測定)⁶⁷。

⁶³ Goddard Institute Surface Temperature (GISTEMP), NASA (2019年)および Nathan J. L.Lenssen et al., "Improvements in the GISTEMP uncertainty model," Journal of Geophysical Research:Atmospheres, Volume 124, Number 12 (2019年6月)

⁶⁴ Michael Prather et al., "Climate system scenario tables," in Climate Change 2013:The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY:Cambridge University Press (2014年)

⁶⁵ Karsten Haustein et al., "A real-time Global Warming Index," Scientific Reports (2017年11月)、Richard J. Millar and Pierre Friedlingstein, "The utility of the historical record for assessing the transient climate response to cumulative emissions," Philosophical Transactions of the Royal Society A, Volume 376, Number 2119 (2018年5月)

⁶⁶ Yin Sun et al., "Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961," Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 100, Number 1(2019年1月)

⁶⁷ Geert Jan van Oldenborgh et al., "Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change," Natural Hazards and Earth System Sciences (2020年3月)

マッキンゼーの調査手法

本レポートでは、気候変動が人間や有形資産、自然界に与える影響を検証している。なお、マッキンゼーは、気候科学者を含め数多くの気象学者を擁しているが、気候研究機関ではない。ここでは、気候科学データを使用して物理的リスクを検証し、ステークホルダーへの意味合いを導出することに焦点を当てている。本レポートで実施した気候学的分析の大半はウッドウェル気候研究センター(旧WHRC。以降、Woodwell)によるもので、そのほか、一般公開されている気候科学データを活用している。なお、Woodwellでは、最も広く使用され綿密な評価プロセスを経た気候モデルを活用して気象事象の発生確率を推計している。

マッキンゼーの分析は、大気中の温室効果ガスの濃度を主要データとする気候モデルに基づいている。主要モデルとして、代表濃度経路(RCP)で表されるRCP2.6からRCP8.5まで4つのシナリオを想定している。RCP8.5のシナリオでは、世界の平均気温は2050年までに産業革命以前の気温を2.3℃上回るとしている一方、RCP4.5のシナリオでは1.8℃上回るとしている¹。また、RCP4.5のシナリオでは、2080年には世界の気温が2.3℃上昇するとしている。

RCP8.5シナリオについては、石炭消費量を過大に見積もっているため、今世紀後

半の排出量の予測値が高すぎるという批判もある。しかし、本レポートの検証対象期間が2050年までであること、そしてこのシナリオから、今後20~30年間の気候変動の「固有リスク」を評価することが可能であることから、本レポートではRCP8.5のシナリオを採用している²。「固有リスク」とは、適応策や緩和策を講じなかった場合のリスクを指す。これについて検証することで、問題の大きさと対策の規模を把握することができる。

主な調査方法は以下の通りである。

ケーススタディ

気候変動の物理的リスクを社会経済的影響と関連づけるため、気候変動が極限に達し物理的限界に近くなった場合の影響を示す6つのケースを検証している。ここでは、様々な産業や地域を対象とし、MGI独自の「ミクロからマクロへ」の手法を用いている。気候災害は、「居住性・作業性」「食料システム」「有形資産」および「インフラサービス」「自然資源」の5つのシステムに影響を及ぼすことが分かっている。

ケーススタディでは、気候変動による社会経済システムへの直接的なリスクが、災害の深刻度と発生確率、人間、有形資産、自然資源など様々な資源に及ぼす影響や、

これらの資源の災害への耐性(建物の浸水防止対策がとられているかなど)により決定づけられることを示す。そのうえで、気候変動の物理的リスクの特性や、これらのリスクを管理するための対応策を明示する。

地理空間分析

本レポートでは、地理空間データを用いて、アジアにおける今後30年間の気候変動に関する見解を示している。上記の5つのシステムのそれぞれについて、気候変動の影響度指標を次のように特定している。**居住性・作業性** – 致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口の割合、極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間が年間総実労働時間に占める割合、および水ストレス(水の年間供給量に占める需要量の割合として算出)、**食料システム** – 主要作物の収量変化率(年間)³、**有形資産**および**インフラサービス** – 1年の間に河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合、**自然資源** – 気候区分が変わる陸面の割合(バイオームシフト)⁴。ここでは様々な災害の影響を評価しているが、すべての国について十分な粒度と量の根拠あるデータを収集することは難しく、内水氾濫や台風など一部の気候災害の潜在的な影響については評価できなかった。

¹ Ben Kirtman et al., "Near-term climate change: Projections and predictability," in Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

² RCP8.5シナリオを選択した背景や分析手法に関する詳細については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。また、Christopher R. Schwalm, Spencer Glendon, and Philip B. Duffy, "RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions," Proceedings of the National Academy of Sciences (2020年8月)も参照いただきたい

³ 主要作物には、米、トウモロコシ、大豆、小麦が含まれる

⁴ 「バイオーム」とは、特定の地域に生育・生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

ここでは、標準的な手法に基づき、数十年間にわたる気候的挙動の平均として将来を定義している。特に明記しない限り、現在の気候状態は、1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。また、特に明記しない限り、予測値はWoodwellによるCMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)の分析に基づくものとする⁵。

なお、国別分析において、「有形資産」と「インフラサービス」は、いずれも物的資産に関わるものであるため、1つのカテゴリーに統合して評価している。収集できるデータ量には限りがあり、地域単位でインフラへの影響を高い精度で評価することは困難であるため、多くの場合、各災害の被害に遭った地域の人口、物的資本ストックあるいはGDPのベースライン値と比較して相対的尺度から検証を行っている。

本レポートでカバーしていないこと、あるいは意図していないこと

本レポートは、気候変動の物理的リスクとその影響を把握することを目的としているため、取り上げていない事項もある。

- 気候モデルの有効性を評価するのではなく、気候科学に関する文献から最善の手法を取り入れ、主な不確実性を特定している。

- 気候変動により恩恵がもたらされる地域や業種の詳細な調査は行っていない。
- 適応策・緩和策についてボトムアップの詳細な費用便益果分析は行っていない。
- 気候変動の直接的な影響によるノックオン効果を解明しようと試みてはいるものの、社会経済システムの複雑さゆえに限界があることも事実である。そのため、本分析で取り上げていないノックオン効果が生じる可能性がある。
- 本レポートではリスクの評価を行っており、予測や決定論的予測は行っていない。気候は経時的な気象パターンを統計的にまとめたもので、確率的な性質を持っている。そのため、マッキンゼーでは、標準の手法に従って、統計上期待される平均的な影響を示している。

不確実性を考慮したマッキンゼーの手法

気候変動の物理的リスクを理解するうえでの最も大きな課題の一つとして、「不確実性の幅」が挙げられる。リスクは因果の連鎖から生まれる。CO₂の排出は、世界や地域の気候変動に影響を与え、干ばつや海面上昇など特定の気候災害のリスクを高める。そして、それにより不作やインフラの破壊など物的被害のリスクが高

まり、最終的には経済的損害を被るリスクも高まる。ここでは、他の分析と同様に、因果の連鎖に関する仮説に基づいて分析を行っている。連鎖を追究すればするほど、モデルの不確実性は高まる。

マッキンゼーは、リスク管理の観点から、気候変動の固有リスク、すなわち適応策や緩和策をとらなかった場合のリスクについて、今後30年間の見通しを意思決定者に提示するための手法を開発した。これとは別に、ケーススタディを通じて、どのような適応策をとることでリスクを低減できるかについても取り上げている。この手法は、ステークホルダーが気候変動の影響の度合いを把握し必要な対策を検討するうえで有効であると考ええる。主な不確実性としては、排出経路と温暖化のペース、気候モデルの精度と自然変動、直接的・間接的な社会経済的影響の度合い、適応策・対応策などが挙げられる。災害の予測については「より悪影響を及ぼす結果」の発生可能性として不確実性を捉える傾向があり、直接的な物理的リスクに関連して生じ得るノックオン効果のモデリングが難しいことから、マッキンゼーのアプローチでは控え目な推計値となっている⁶。

⁵ 本調査に使用した外部機関の災害データには、WRIのAqueduct Global Flood Analyzerの河川氾濫原に関するデータ、WRIのWater Risk Atlasの水ストレスに関する予測データ、Franz Rubel and Markus Kottek, "Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification," Meteorologische Zeitschrift, Volume 19, Number 2(2010年4月)におけるバイオームの変化に関するデータが含まれている

⁶ 詳細については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute(2020年1月)」を参照

RCP8.5シナリオに基づき、2030年および2050年にかけてのアジアにおける主な気候災害について、以下にまとめた⁶⁸。

- **平均気温⁶⁹**: RCP8.5シナリオでは、アジアの気温は、2050年には産業革命以前に比べ2℃以上上昇すると予測されている。ただし、上昇の度合いやペースは地域によって異なる(図表1)⁷⁰。気候科学の知見によると、中国の一部地域、オーストラリアやインド亜大陸などでは気温が大幅に上昇するとされている。気温上昇による影響は、今後数十年にわたり深刻度を増していく。
- **致命的な熱波⁷¹**: 致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義されている⁷²。RCP8.5シナリオでは、インド、バングラデシュ、パキスタンの一部の都市が、人間の生存限界値を超える熱波が起きる最初の地域になると予想されている(図表2)⁷³。
- **極端降水現象⁷⁴**: RCP8.5シナリオでは、日本の東部、中国の中央部と東部、韓国の一部地域とインドネシアなどでは、1950年から1981年において50年に一度の確率で起きるとされていた極端降水現象の発生頻度が、2050年までには3~4倍以上に増加すると予測されている(図表3)。
- **台風⁷⁵**: アジアでは、気候変動により台風の発生頻度が増加する可能性は低いが、平均的な台風の深刻度が高まる可能性がある(したがって、強烈な台風が増加する)。また、1981年~2000年にかけて年1%程度の確率で起こるとされていた強烈な台風による極端降水現象は、2040年には中国の沿岸部、韓国、日本を含むアジアの一部地域で3倍にまで増加する見込みである(図表4)。

⁶⁸ 標準的な手法に基づき、数十年間にわたる気候的挙動の平均として将来を定義。現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。特に明記しない限り、予測値はWoodwellによるCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)の分析に基づくものとする

⁶⁹ KNMI(オランダ王立気象研究所)のClimate Explorer(2019年)より、CMIP5の全モデル群の平均を使用

⁷⁰ 産業革命以前は1880年から1910年として定義

⁷¹ WoodwellがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)より日平均最大表面温度および日平均相対湿度の予測値を用いてモデル化した。各モデルはERA-Interimのデータセットを用いて独立的にバイアス修正を行った。大気エアロゾルの濃度が高ければ、気温上昇リスクは冷却効果により相殺される

⁷² ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ湿度を湿球温度と定義する。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用した。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35℃と考えられており、大都市では湿球温度34℃の熱波がヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4~5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、将来的な大気中エアロゾルや都市のヒートアイランドあるいはクールアイランド現象の影響に関わる不確実性も含まれおり、エアコンの普及率は考慮していない。世界419都市の分析を行った結果、都市部とその近郊の日中の平均気温の差は+1.5℃±1.2℃で外れ値は最大7℃高かった。Shushi Peng et al., "Surface urban heat island across 419 global big cities," Environmental Science & Technology, Volume 46, Issue 2 (2012年1月)。今日のモデル上で特定地域における致命的な熱波の発生可能性がゼロではない場合でも、CMIP5モデルでは当該地域で高い大気中エアロゾルレベルの出現が少ないことを考慮し、ゼロとカウントする。詳細については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」McKinsey Global Institute(2020年1月)の「テクニカルノート」を参照

⁷³ いくつかの研究では、世界の一部地域で、短期間で湿球温度が35℃を超える事象が何度も確認されており、極端に高い気温や湿度に晒される確率が1979年以降、倍増していることが明らかになっている。Colin Raymond, Tom Matthews, and Radley M. Horton, "The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance, Science Advances (2020年5月8日)参照

⁷⁴ WoodwellがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)のメジアン予測を用いてモデル化した

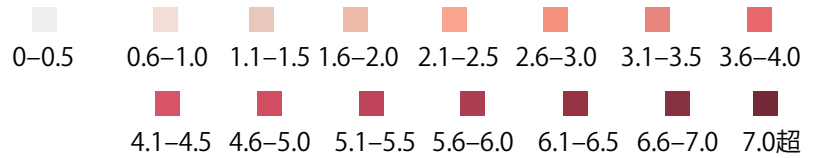
⁷⁵ Coupled Hurricane Intensity Prediction System(CHIPS)を用いてWoodwellがモデル化した。(Kerry Emanuel, The Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS), MIT(2019年))。台風のモデリングが可能な期間は1981~2000年(ベースライン)および2031~2050年(将来)。これらは世界のハリケーンや台風など強い熱帯低気圧の主な発生地域のうちの一つのモデリング結果であり、インド亜大陸を含むその他の地域はモデリングしていない

図表1

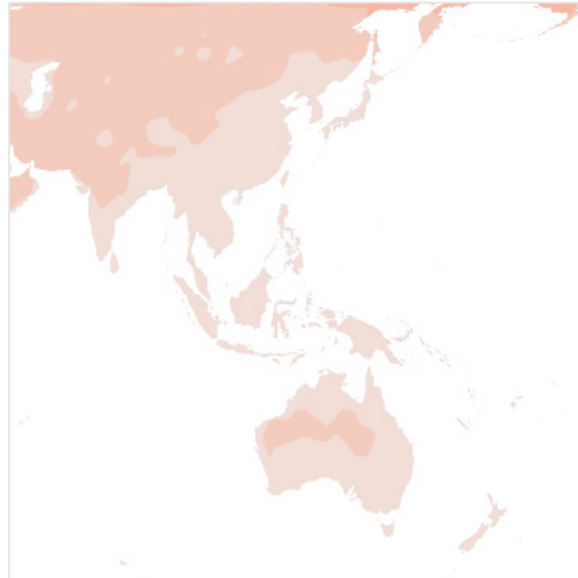
アジアの多くの地域で平均気温が上昇し続ける見込み

RCP8.5シナリオに基づく

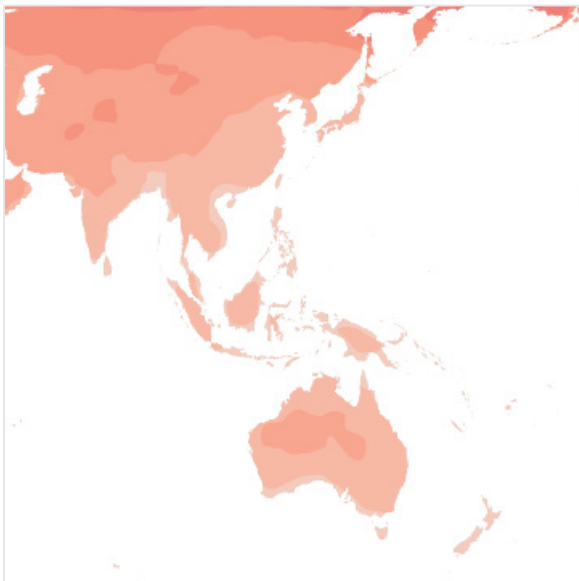
上昇を続ける年平均気温
°C; 産業革命以前の気温との差



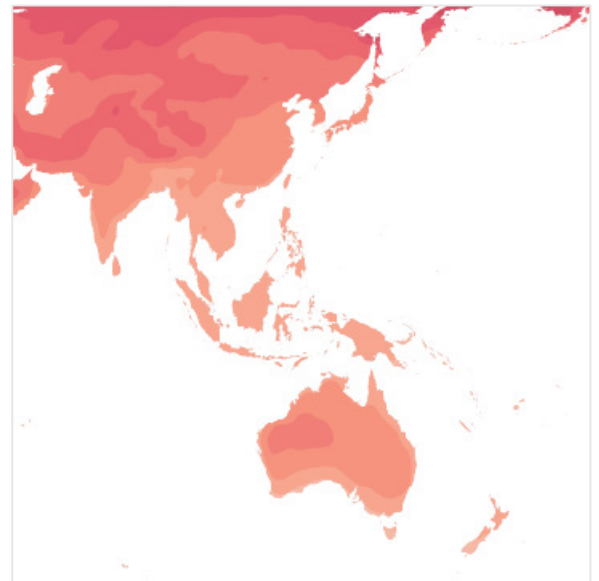
現在



2030年



2050年



1. KNMI Climate Explorer (2019年)より、CMIP5の全モデル群の平均を使用

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

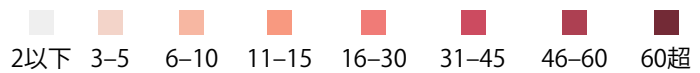
資料: KNMI Climate Explorer (2019年)、Woodwell Climate Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

図表2

アジアの一部地域では致命的な熱波の発生確率が上昇する見込み

RCP8.5シナリオに基づく

致命的な熱波¹の発生確率
%/年



現在



2030年



2050年



1. 致命的な熱波とは、3日間の最高湿球温度が34℃を超える状態として定義。湿球温度は、ある空気塊を一定気圧に保ちながら、その空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで断熱的に冷却した場合に、その空気塊が持つ温度と定義。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は35℃と考えられており、大都市では、ヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える熱波が生じる可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4～5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、将来的な大気エアロゾルの挙動や都市のヒートアイランド現象あるいはクーリングアイランド現象に起因する不確実性が伴う。CMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)より日平均最大表面温度および日平均相対湿度の予測値を用いて、Woodwell Climate Research Centerがモデル化

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響) McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: KNMI Climate Explorer (2019年)、Woodwell Climate Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

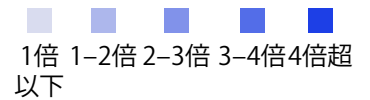
図表3

アジアの一部地域では極端降水現象の発生頻度が3～4倍になる見通し

RCP8.5シナリオに基づく

極端降水現象

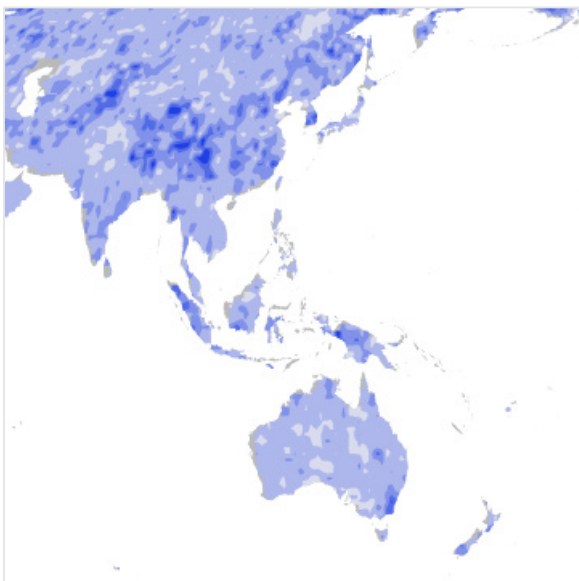
50年に一度級の降水現象が発生する頻度の変化; 1950～1981年との比較¹



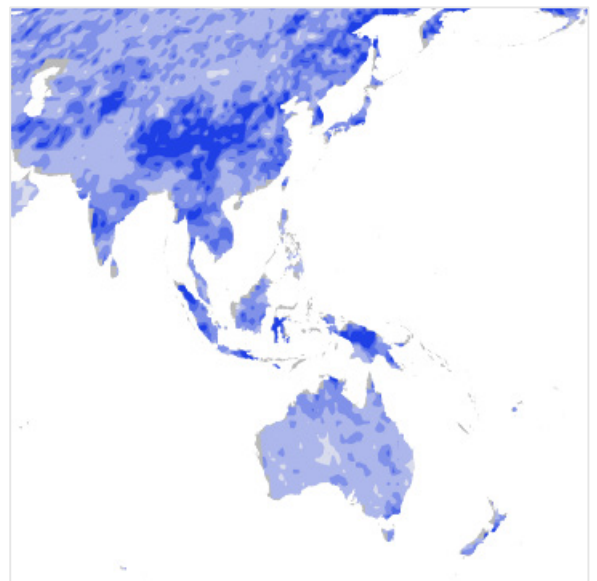
現在



2030年



2050年

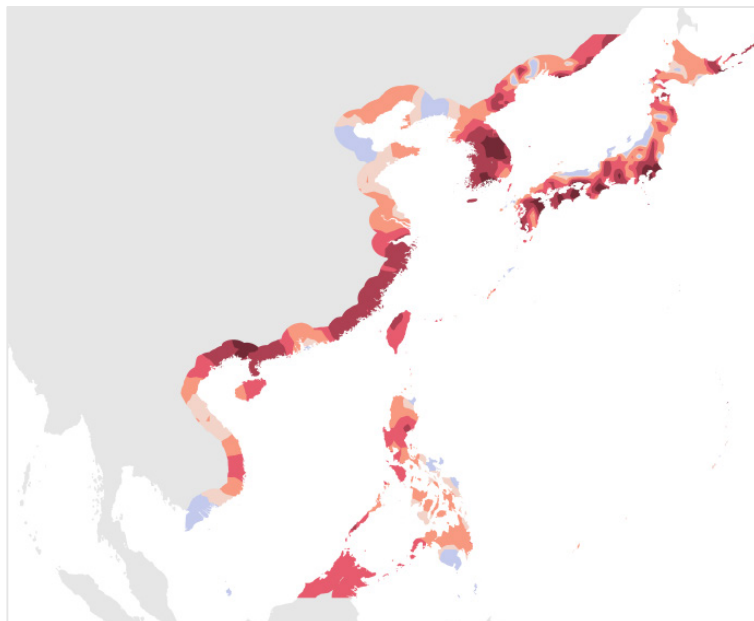


1. Woodwell Climate Research CenterがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)のメディアン予測を用いてモデル化
注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している
資料: Woodwell Climate Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

台風(降水):

2040年に100年に一度級の台風が発生する頻度; 1981~2000年との比較¹

- 1.00倍以下(同等または減少)
- 1.01-1.25倍
- 1.26-1.75倍
- 1.76-2.25倍
- 2.26-3.00倍
- 3.00倍超



1. 台風のモデリングが可能な期間は1981~2000年(ベースライン)および2031~2050年(将来)。これらは世界のハリケーンや台風など強い熱帯低気圧の主な発生地域のうちの一つのモデリング結果であり、インド亜大陸を含むその他の地域はモデリングしていない

注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: Woodwell Climate Research Center: Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS)モデル (Kerry Emanuel, MIT, 2019)を適用、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

- **干ばつ⁷⁶**: 温暖化が進むにつれ、多くの地域が長期間にわたり干ばつによる影響を受けると予測されている(図表5)。2050年にかけて、干ばつに襲われる期間の割合は、オーストラリアの南西部で80%以上、中国の一部地域では40~60%以上にまで増える見込みである。
- **水供給量の変化⁷⁷**: 利用可能な再生可能水量は、降雨パターンや蒸発を含む様々な要因の影響を受ける(図表6)。オーストラリアのいくつかの地域では、2050年にかけて地表水の年平均利用可能量が大幅に減少する見通しである。一方、中国の一部地域では水の利用可能量が20%以上増改し、インド亜大陸の一部地域についても増加する見通しである。

⁷⁶ WoodwellがCMIP5の計20のGlobal Climate Models(GCM)のメディアン予測を用いてモデル化し、補正式のPalmer Drought Severity Index(PDSI)を適用した。予測結果は大気中のCO₂濃度の上昇を考慮して修正した

⁷⁷ 6つの基本的CMIP5モデルに基づくWorld Resources InstituteのWater Risk Atlas(2018年)より引用。ローデータセットの基準期間は、2020年、2030年および2040年を中心とした20年である。1998~2017年、および2041~2060年のデータは、基準データセットに示す60年トレンドから線形予測した。これは地表水の利用可能量を算出するためのモデルで、水の需要の変化は考慮していない

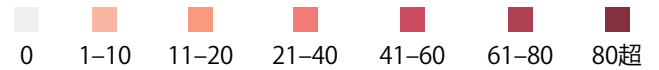
図表5

干ばつは、発生頻度が上昇する地域もあれば低下する地域もある

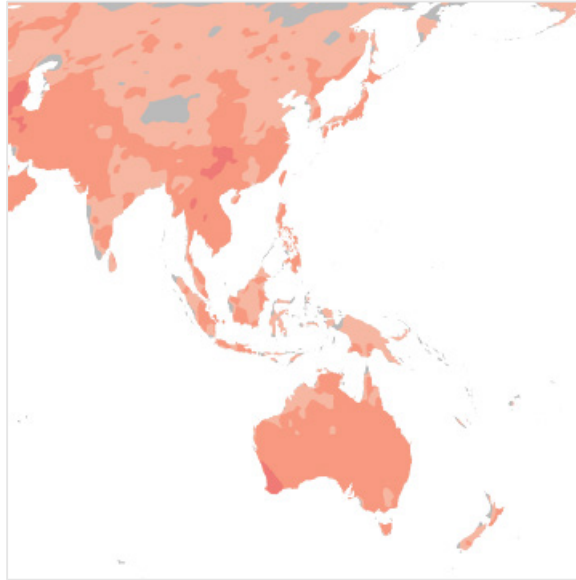
RCP8.5シナリオに基づく

干ばつの発生頻度:

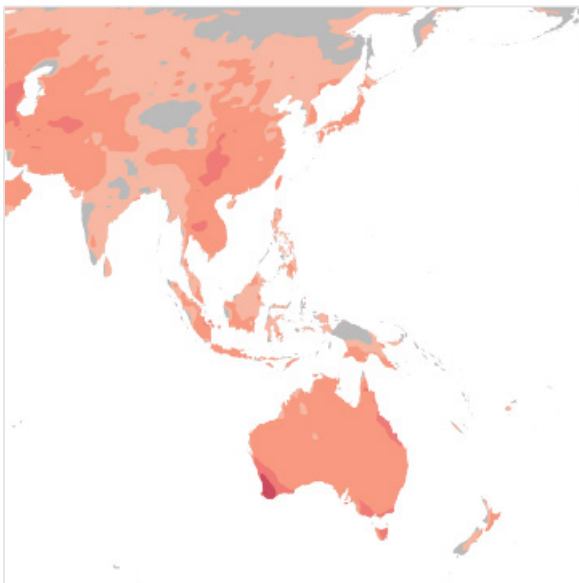
%¹; 10年間で干ばつの状態となる割合



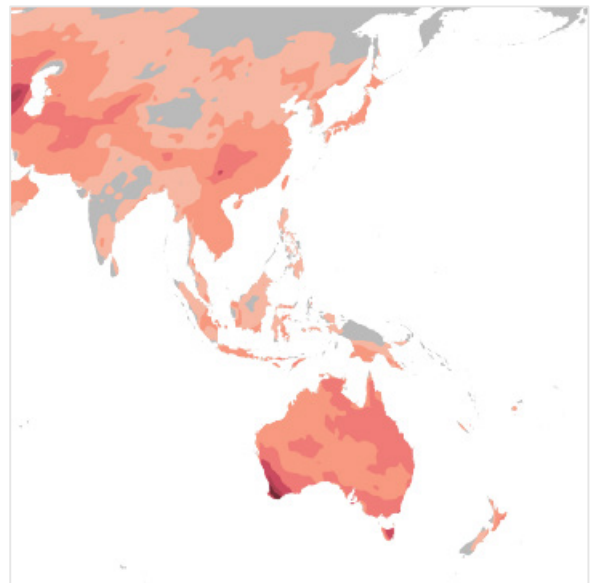
現在



2030年



2050年



1. 3ヵ月のローリング平均を使用して測定。3ヵ月単位のPalmer Drought Severity Index (PDSI)の平均値が-2未満の状況を干ばつ状態と定義。PDSIは、温度と降水量に基づく干ばつ指標で、過去の平均との差異に基づいて算出する。指数は、通常、+4(干ばつの深刻度が極めて低い)から-4(干ばつの深刻度が極めて高い)の範囲となる。Woodwell Climate Research CenterがCMIP5の計20のGlobal Climate Models (GCM)のメディアン予測を用いてモデル化し、補正式のPalmer Drought Severity Index (PDSI)を適用した。予測結果は大気中のCO₂濃度の上昇を考慮して修正した

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: Woodwell Climate Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

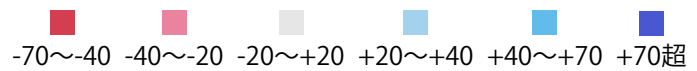
図表6

水供給量は、増加する地域もあれば減少する地域もある

RCP8.5シナリオに基づく

水供給量:

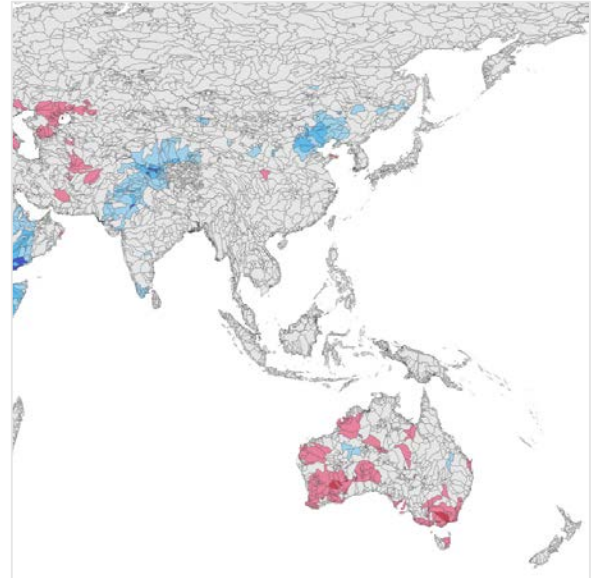
%¹; 2018年と比較した地表水の変化
(マップの境界線は水域を表す)



2030年



2050年



1. 6つの基本的CMIP5モデルに基づくWorld Resources InstituteのWater Risk Atlas(2018年)より引用

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: 世界資源研究所(WRI) Water Risk Atlas (2018年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

アジアは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、世界平均を上回るほどの社会経済的影響を受ける可能性がある

ここでは、地理空間データを用いて、アジア16カ国における今後30年間の気候変動に関する見解を示す。これらの国々はアジアの人口とGDPの約95%を占めている。分析フレームワークの5つのシステムについて6つの指標を検証した。

システムと指標は以下の通り:

- **居住性・作業性:** 致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口の割合、極端な高温多湿下での屋外労働時間が年間総実労働時間に占める割合、水の年間供給量に占める年間需要量の割合から算出した水ストレス⁷⁸
- **食料システム:** 4つの主要農作物の収量の年次変動⁷⁹
- **有形資産およびインフラサービス (併せて検証):** 1年の間に河川氾濫により被害を受ける可能性のある資産の割合⁸⁰
- **自然資源:** 「バイオームシフト(生物群系の変化による気候区分の変化)」の発生が予想される陸面の割合⁸¹

これらの指標を適用した結果、16カ国すべてが、2050年にかけて少なくとも1つの指標において気候変動による直接的影響が増すことが明らかになった。また、12カ国については、3つ以上の指標において気候変動による直接的影響が増すことも判明した。さらに、ほとんどの国において、極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間の年間総実労働時間に占める割合や、河川氾濫による被害を受ける資産の割合、バイオームシフトが生じる陸面の割合が増加する見込みである。

マッキンゼーによる分析の結果、アジアでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動による社会経済的影響は、他の地域に比べ深刻化することが明らかになっている(図表7)⁸²。RCP8.5シナリオにおいては、2050年には、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口は6億~10億人に達する見通しである。2045年から2055年にかけてアジアで致命的な熱波が起こる確率は80%に上昇する⁸³。その数は世界規模では7億人~12億人となる見込みで、その大半をアジアが占めることになる。また、同時期に、極端に高い気温や湿度による実労働時間の減少により生じるアジアのGDP損失額は2.8兆~4.7兆ドルに上り、世界の1年間のGDPの三分の二以上を占める。また、2050年にかけて、1年の間に発生する河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の総額は1.2兆ドルに達する。これは世界全体の資産の約75%に相当する。その他のシステムについては、気候変動リスクに晒される度合いは他の地域に比べ低いとはいえ、2050年にかけてある程度高まる見通しである。食料システムについては、1年間の穀物収量が5%以上減少する確率が2050年には1.4倍増加する可能性があり、世界では1.9倍増加すると見込まれている。自然資源については、2050年にかけてアジアでバイオームシフトの発生が予想される陸面の割合は40%と予測されており、世界平均の45%を下回る見込みである。

⁷⁸ 水ストレスは、水の年間供給量に占める需要量の割合として算出。今回の分析では、水の需要は安定的に推移し、人口増加やGDP成長率の影響ではなく、気候変動のみの影響を測定できると想定。予測の精度に関わる懸念から、乾燥した降雨量の少ない地域は対象外とした

⁷⁹ 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WoodwellがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化

⁸⁰ 河川氾濫により被害を受ける可能性のある資産の推計には、現行の規模の洪水防御対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、SSP2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用した

⁸¹ 「バイオーム」とは、特定の地域に生育・生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

⁸² 本レポートでは、アジアの人口とGDPの約95%を占める16カ国を分析対象としている(オーストラリア、バングラデシュ、カンボジア、中国、インド、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、ミャンマー、ニュージーランド、パキスタン、フィリピン、韓国、タイ、ベトナム)。この16カ国で世界の人口の54%、世界のGDPの三分の一を占める

⁸³ World Urbanization Prospectsによる予測値に基づく。人口の推移については、高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている。算出された割合は概算である。年間発生確率をX%と想定し、2030年または2050年を中心とする10年間の各年に適用する。まず、この10年間に熱波が発生しない累計確率を10のべき乗で表す。10年間に熱波が1回以上発生する累計確率は、1からその数を引いた数字となる

図表7

アジアにおける気候変動による影響は、世界の他の地域と比較して「人」「有形資産」「GDP」の面で大きく、「食料システム」「自然資源」の面では小さい

RCP8.5シナリオに基づく

2050年までの第1波のインパクト

居住性・作業性

極端に高い気温や湿度により労働生産性が低下するリスク¹から想定される年間のGDP損失額

致命的な熱波²の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口

有形資産・インフラ

2050年にかけて発生する河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の年間総額³

世界全体 **4~6兆ドル**



世界全体 **7~12億人**



世界全体 **1.6兆ドル**



食料システム

現在と比較して1年間の穀物収量⁴が5%以上減少する確率

世界全体 **1.9倍** アジア **1.4倍**

自然資源

生態系や地域住民の生活に影響を及ぼすバイオームシフト⁵の発生が予想される陸面の割合

世界全体 **~45%** アジア **~40%**

1. 極端に高い気温や湿度が発生し得る地域で、年間の屋外労働時間に与える影響から生じるリスクと定義。極端に高い気温や湿度により労働時間が削減される主な理由は2つある。一つは、熱中症予防のためにこまめに休憩をとるため、もう一つは人間は暑さへの自己防衛反応として疲労を感じるためである。ここでの数値の幅は、各国のセクター別の移行ベースに基づく
2. 致命的熱波とは3日間の平均最高湿球温度が34℃を超える状態と定義する。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は35℃と考えられており、大都市では、ヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える熱波が生じる可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。これらの予測には、将来的な大気エアロゾルの挙動や都市のヒートアイランド現象あるいはクーリングアイランド現象に起因する不確定性が伴う。人口の幅は、国際連合(UN)世界人口推計および国際連合(UN)世界都市化予測による人口予測の幅に基づいており、人口の推移については高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている
3. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、BAUシナリオ(RCP8.5、SSP2)および現行規模の高潮対策を想定し、世界資源研究所(WRI)のオンラインツール「世界河川洪水解析システム」(WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019)より、洪水による国レベルの都市災害のリスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
4. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WoodwellがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、収量の増加ではなく、収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照
5. バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

資料: Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

気候のプロファイル、気候変動リスクの度合い、および対応策に基づいてアジアの各地域を「4つのアジア」に分類

40億人という人口や、さまざまな政治や経済システム、デモグラフィクスを考慮して、分析対象の16カ国を4つのグループに分類した。これらのグループは、マッキンゼーのFuture of Asiaの研究を通じて定義されたもので、規模(GDPおよび人口)、経済発展、域内統合・貿易、グローバル連結性の指標を反映したものとなっている⁸⁴。国や国内の地域によっても気候変動による影響は異なるが、特に4つのアジア間では大きく様相が異なる。

「4つのアジア(Four Asias)」は以下のように定義されている。:

- **フロンティアアジア(Frontier Asia)**には、バングラデシュ、インド、パキスタンが含まれる。これらの国々では域内統合が進んでおらず、世界中の貿易パートナーや投資家が進出しており、急速に都市化が進んでいる。
- **アジア新興国(Emerging Asia)**には、カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナムが含まれる。これらの国々は、域内で移動する物・資本・人が多く、労働力の源泉となっており、文化的多様性が高い。
- **アジア先進国(Advanced Asia)**には、オーストラリア、ニュージーランド、日本、韓国が含まれ、卓越した技術力と豊富な資金力を有している。
- **中国**は、規模や特性の観点から、その他のアジアと分けて検討するに値する。中国はアジア経済の中心的存在であり、近隣諸国のコネクティビティとイノベーションの推進役を担っている。

この「4つのアジア」のフレームワークを使用して、気候災害とその社会的影響、および考えられる対応策を示す(図表8)。

フロンティアアジア(バングラデシュ、インド、パキスタン)では、急速に都市化が進んでおり、いずれの国も、気温や湿度が急激に上昇し「居住性・作業性」に大きな影響が出る恐れがある。例えば、2050年には、その他のアジアに比べ致命的な熱波の発生確率が高くなる可能性がある。マッキンゼーでは、フロンティアアジアにおいて、致命的な熱波の年間発生確率が約20%の地域に居住する人口は、2050年には5億~7億人に達すると推定している。気温と湿度の上昇に伴い、より多くこまめに休憩を取る必要があるため、屋外で作業可能な時間にも影響が出る。また、労働損失時間がGDPに与える影響は、2050年にかけて年平均で7~13%相当と推定している。さらに、これらの国々では、極端降水現象が2050年にかけて20世紀後半に比べ頻発する一方で、干ばつの発生頻度は減少する可能性がある。世界資源研究所(WRI: World Resources Institute)の分析によると、河川氾濫により被害を受ける資産の割合は、2050年にかけて現在の0.5%から3%に上昇し、被害総額は8,000億ドルに達する見込みである⁸⁵。気候変動は、農作物の収量にも大きなマイナスの影響を及ぼす。例えば、主要4作物(米、トウモロコシ、大豆、小麦)の収量が10%以上減少する確率は、現在から2050年にかけてインドでは12%から39%に、パキスタンでは40%から53%に上昇する見通しである。その一方で、これらの主要4作物の収量が10%以上増加する確率は、現在から2050年にかけてインドでは17%から5%に、パキスタンでは38%から27%に減少する見通しである。さらに、フロンティアアジアでは、現在から2050年にかけて、気候区分が変わる陸面の割合が増加する見込みである。

⁸⁴ マッキンゼーのFour Asiasフレームワークは、マッキンゼーのFuture of Asiaの研究を通じて開発された手法に基づく。Four Asiasに関する詳細については、「The future of Asia: Asian flows and networks are defining the next phase of globalization, McKinsey Global Institute(2019年9月)」を参照のこと

⁸⁵ 被害を受ける可能性がある資産額は想定される損害額を表し、気候災害による被害額に発生頻度を乗じて算出

図表8

Four Asiasの分類毎に異なる社会経済的影響を特定

RCP8.5シナリオに基づく

■ リスクが減少 ■ リスクが横ばいで推移またはわずかに上昇 ■ リスクがある程度上昇 ■ リスクが大幅に上昇

アジアの国々 ¹	居住性・作業性		水ストレス ³	食料システム	有形資産/ インフラサービス	自然資源
	致命的な熱波の年間発生確率が0%を超える地域に居住する人口の割合 ²	年間で極端な高温多湿の影響を受ける屋外労働時間の割合		主要4作物の年間収量が10%以上減少する確率 ⁴	年間で河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合 ⁵	気候区分が変わる陸面の割合 ⁶
フロンティアアジア						
バングラデシュ	■	■	■	■	■	■
インド	■	■	■	■	■	■
パキスタン	■	■	■	■	■	■
アジア新興国						
カンボジア	■	■	■	■	■	■
インドネシア	■	■	■	■	■	■
ラオス	■	■	■	■	■	■
マレーシア	■	■	■	■	■	■
ミャンマー	■	■	■	■	■	■
フィリピン	■	■	■	■	■	■
タイ	■	■	■	■	■	■
ベトナム	■	■	■	■	■	■
アジア先進国						
オーストラリア	■	■	■	■	■	■
日本	■	■	■	■	■	■
ニュージーランド	■	■	■	■	■	■
韓国	■	■	■	■	■	■
中国	■	■	■	■	■	■

Four Asiasの分類毎に異なる社会経済的影響を特定(続き)

■ リスクが減少 ■ リスクが横ばいで推移またはわずかに上昇 ■ リスクがある程度上昇 ■ リスクが大幅に上昇

	居住性・作業性		食料システム	有形資産/インフラサービス	自然資源	
	致命的な熱波の年間発生確率が0%を超える地域に居住する人口の割合 ²	年間で極端な高温多湿の影響を受ける屋外労働時間の割合	水ストレス ³	主要4作物の年間収量が10%以上減少する確率 ⁴	年間で河川氾濫により被害を受ける可能性のある資産の割合 ⁵	気候区分が変わる陸面の割合 ⁶

2018年から2015年にかけての潜在的影響の差分(パーセントポイント)

リスクが減少	n/a	n/a	0未満	0未満	0未満	n/a
リスクが横ばいで推移またはわずかに上昇	0.0-0.5	0.0-0.5	0-3	0-10	0-0.1	0-5
リスクがある程度上昇	0.5-5.0	0.5-5.0	3-7	10-20	0.1-0.5	5-10
リスクが大幅に上昇	5.0超	5.0超	7超	20超	0.5超	10超

- 本レポートでは、アジアの人口とGDPの約95%を占めている16カ国を分析対象としている。対象国は次の通り: オーストラリア、バングラデシュ、カンボジア、中国、インド、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、ミャンマー、ニュージーランド、パキスタン、フィリピン、韓国、タイ、ベトナム。この16カ国で世界の人口の54%、世界のGDPの3分の1を占めている
- 致命的な熱波とは3日間の平均最高湿球温度が34°Cを超える状態と定義する。一般的に、人が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35°Cと考えられており、大都市ではヒートアイランド現象により湿球温度34°Cの熱波が湿球温度35°Cの限界値を超える可能性があることから、湿球温度34°Cを閾値に設定した。予測には将来的な大気エアロゾルの挙動や都市のヒートアイランド効果またはクーリングアイランド効果に起因する不確実性が伴う。
- 水ストレスは、水の年間供給量に占める需要量の割合として算出。今回の分析では、水の需要は安定的に推移し、気候変動のみの影響を測定できると想定。予測の精度にかかわる懸念から、乾燥した、降雨量の少ない地域は対象外とした
- 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使ってモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照のこと。予測精度を確保するため、一部の分析については国をグループ化して実施
- 河川氾濫による被害を受ける資本ストックの推計には、現行の規模の高潮対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP 8.5、SSP 2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用。リスク値は、「期待値」つまり確率加重したバリュエーション・アット・リスクに基づき算出
- バイオームシフトの基準に沿って算出。バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

注記:RCP 8.5シナリオをベースとしている理由については、Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Research Center、World Resources Institute Aqueduct Global Flood Analyzer (2019年)、World Resources Institute Water Risk Atlas (2018年)、McKinsey Global Institute分析等々含む

アジア新興国(カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム)は、フロンティアアジアと同様、気温と湿度が上昇する見通しで、GDPに与える影響は、2050年にかけて年平均で8~13%相当と推定される。また、極端降水現象と洪水が頻発し、これらの災害により深刻な社会経済的影響を受ける可能性がある。WRIの分析によると、河川氾濫により被害を受ける資産の割合は2050年にかけて現在の0.7%から1.5%に上昇し、被害総額は2,200億ドルに達する見込みである。ただし、干ばつの発生頻度は減少する見通しである。農作物については収量の変動幅が大きくなり、年間収量が10%以上減少する確率は、現在から2050年にかけて2%から8%に上昇し、同期間に年間収量が10%以上増加する確率は5%から1%に減少する見込みである。

アジア先進国(オーストラリア、ニュージーランド、日本、韓国)は、フロンティアアジアやアジア新興国に比べ多くの面で気候変動による影響は少ない。また、前述のように、RCP8.5シナリオでは、アジアの一部の国では水供給量の減少や干ばつが大きな課題となる。実際に、オーストラリアの南西部では、2050年にかけて干ばつ期間の割合が80%を超える見込みである。また、バイオームシフト、つまり気候区分が変わる陸面の割合が増える可能性も高い。例えば、RCP8.5シナリオでは、日本と韓国では、1901年~1925年の期間と比較して、2050年には平均27パーセントポイントのバイオームが変化する見込みである。また、前述のように、日本と韓国の一部地域では台風や極端降水現象のリスクも上昇する見込みである。農作物の収量については特に目立ったリスクの上昇は見られず、むしろ2050年にかけて年間収量が10%以上増加する確率が上昇する可能性があり、オーストラリアとニュージーランドの場合、現在の21%から45%に増加する見通しである。

中国は、国土が広大なため気候的な多様性が高いが、それでもなお国土全体で気温の上昇が見込まれている。さらに、中国東部は、致命的な熱波を含む異常高温の脅威に晒される危険性が高い。また、中国中部、北部、西部では、極端降水現象が頻発する恐れがある。極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間の割合は、国全体で2020年の4%から2030年には最大6%、2050年には最大8.5%まで上昇する見込みである。これにより、極端に高い気温や湿度による2050年にかけての中国のGDP損失は1.5%から2~3%に増加し、これは年平均で1兆~1.5兆ドルに相当する。中国では、2050年にかけて、気候区分が変わる陸面の割合が1901年~2025年のベースラインに比べ約27パーセントポイント増える見込みである。農作物については、短期的には気候変動の恩恵を受ける可能性が高く、統計的な期待収量とその変動ともにプラスの影響が見込まれている。中国における農作物の期待収量は、2050年には、現在に比べ約2%増加する見通しである。年間収量が10%以上減少する確率は、現在から2050年にかけて5%から2%に減少し、年間収量が10%以上増加する確率は、1%から約12%に増加する見通しである。

「4つのアジア」は、いずれも上述のリスク領域に特に留意して、気候変動リスクを管理するための措置を講じる必要がある。フロンティアアジアとアジア新興国、および中国は、現在、インフラの開発・整備を行っている段階で、都市化が急速に進んでいる。これらの国々は、資本や都市計画に関する意思決定の際には、気候変動リスクを考慮する必要がある。例えば、労働集約的な製造業の中国からの撤退が進み、アジア新興国に流れていくことが考えられるため、これらの国々は気温や湿度の上昇や洪水がこれらの産業に与える影響について検討する必要がある。域内貿易と世界貿易における中国の役割や様々な業種や地域の潜在的リスクを考慮すると、中国に拠点を置く企業はサプライチェーンのレジリエンス向上に特に注意を払う必要がある。

気候変動の知見によると、アジアでは、すでに干ばつや森林火災、台風、洪水などの気候災害が頻発し、深刻化している。そして、何らかの適応策や緩和策が講じられない限り、この傾向は今後さらに強まり、リスクも増大していく。その社会経済的影響は大きく、例えば2050年には、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口は、6億～10億人まで増加する。次章では、アジアの6つのケーススタディを取り上げ、気候変動が経済や社会にもたらす影響、気候変動の物理的リスクの特性、そして必要となる適応策を示す。



Australian wildfires.
© Andrew Merry/Moment/Getty Images

2. ミクロの視点から見た 気候変動リスク

本章では、気候災害が社会経済システムに与える影響について取り上げる。具体的には、アジアにおける6つのケーススタディを通じて、業種や地域、市場固有のリスクについて検証する。これらのケースは、極限的な気候に晒されるリスク、および現時点での物理的・生物学的システムの限界値への近接度に基づいて選択した。各ケースは、地域の地理的特性やリスクに晒されているシステムに特化したものとなっており、世界全体の「平均的な」環境状態やリスクの度合いを表すものではない。前述の通り、これらのケースはRCP8.5のシナリオをベースとしている。ここでは、最新のケースを通じて気候変動の影響を明らかにすることで、今後、気候変動のリスクが上昇する可能性がある領域でリスクを評価する手法を示す。

ケーススタディでは、国や業種を超えて、気候変動リスクにより直接影響を受ける5つのシステムをカバーしている(図表9)。取り上げるケースは以下の通りである。

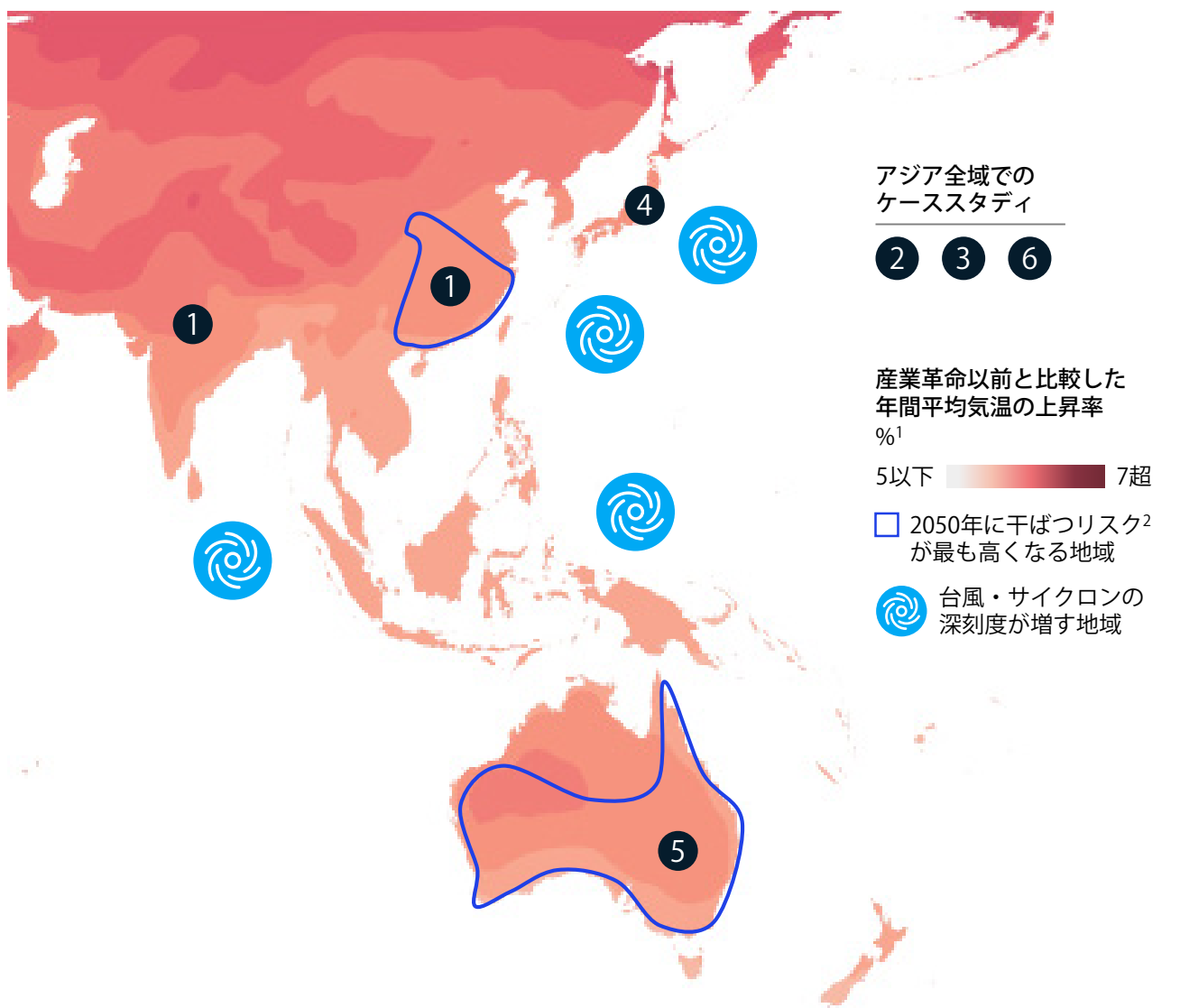
- **居住性・作業性:** 極端に高い気温や湿度が、中国とインドの都市部の人口、および屋外労働への依存度が高い産業にもたらすリスクを検証
- **食料システム:** アジアの6つの主要穀倉地帯の年間収量が減少する確率を作物ごとに推計(米、トウモロコシ、大豆、小麦)
- **有形資産・インフラ:** 17種類のインフラ資産の気候災害に対する脆弱性を検証し、東京における河川氾濫とオーストラリアにおける森林火災の影響について深掘りして検証
- **自然資源:** 3つの自然資源システム(氷河、海、森林)に対する気候変動の潜在的影響を検証

本章の最後に、マクロ分析とミクロ分析の結果を組み合わせ、気候変動の社会経済的影響を国別にまとめたダッシュボードを提示する。

図表9

アジアの地域およびシステムをまたいで気候変動が及ぼす影響について
6つのケーススタディを検証

RCP8.5シナリオに基づく



居住性・作業性

① アジアは暑すぎて働けなくなるのか(インド、中国)

食料システム

② アジアの穀倉地帯の収量は減少するのか

③ 気候ストレスにより、アジアのインフラにひずみや破損が生じる可能性はあるか

有形資産およびインフラサービス

④ 沿岸都市は増大する洪水リスクに対応できるのか

⑤ オーストラリアの資本ストックは森林火災のリスクが増えるのか

自然資源

⑥ 気候変動は自然資源の破壊を加速させる恐れがあるのか

1. KNMI Climate Explorer (2019年)より、CMIP5の全モデル群の平均を使用

2. 干ばつリスクは、パルマ干ばつ指数(PDSI)により、干ばつ状態にある期間に基づき定義

注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: KNMI Climate Explorer (2019年)、Woodwell Climate Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

ケーススタディを通じて気候変動の物理的リスクについて 7つの特性を特定

ケーススタディ分析では、アジアの特定の国あるいは地域が直面する気候変動の物理的リスクの度合いを明らかにしている。気候変動の物理的リスクについては7つの特性が特定されている。これらの特性は、グローバルレポートで検証した9つのケースから導出されたもので、本レポートで検証したアジアの6つのケースについても確認された⁸⁶。7つの特性は以下の通りである。

- **増大:** 6つのケースすべてにおいて、気候変動による物理的リスクは、2030年、さらに2050年にかけて高まり続ける。
- **空間的:** 気候災害は局所的に発生するため、地理的エリアを定義したうえで物理的リスクの直接的影響を検証する必要がある。例えば、追加的な適応策がとられなかった場合には、気温が急激に上昇するリスクや度合いが高まり、その影響は深刻化する。インドと中国では、極端に高い気温や湿度により屋外労働時間が減ることで、他の地域よりも労働生産性が大幅に落ち込む可能性がある。
- **非定常:** 地球温暖化の進行とともに、物理的リスクも変化し続ける、あるいは非定常となる。例えば、アジアにおいて1990年から2017年の間にトウモロコシや小麦の収量が15%変化する確率は百分の一であったが、2050年にかけては、その確率はトウモロコシについては二十分の一、小麦については三十三分の一まで上昇する見通しである。
- **非線形:** 人間システム、物理システム、あるいは生態システムがほとんど機能しない、あるいは破綻して全く機能しなくなってしまうほどの災害が起きた場合、その社会経済的影響は非線形化する。それは、これらのシステムが、過去の気候条件に合わせて経時的に進化してきた、あるいは最適化されてきたためである。例えば、極端に高い気温や湿度は、屋外で働く人々に影響を及ぼし命の危険にさらすこともある。東京では、2050年にかけて100年に一度級の水害による平均浸水深は現在の1.7倍となるが⁸⁷、不動産やインフラの被害は浸水深の増加率をさらに30%上回るほどになる。
- **連鎖:** 気候変動が与える影響は局所的なものにとどまるとはいえ、相互連結した社会経済システムによりノックオン効果が生じる可能性がある。ホーチミン市に関する分析では、100年に一度級の洪水がもたらすインフラ被害額は2050年には5億~10億ドル規模に拡大する見込みである。また、このような直接的影響以外のノックオン効果による被害額も大きくなると推定されており、16億~84億ドルにまで膨れ上がる可能性がある⁸⁸。
- **逆進性:** どのケースにおいても、所得が低い地域が最も大きな影響を受ける。これらの地域は、屋外労働や自然資源への依存度が高く、迅速に適応策をとるための財政的手段も少ない。
- **準備不足:** 適応策を講じるスピードをさらに高め、規模を広げていく必要がある。現在、アジアでは、極端な高温や高潮などの気候災害に対する適応策が十分に進められていない。適応策を実行するためには、膨大なコストと難しい選択が求められる。さらに、東京やムンバイ、ジャカルタなどの大都市では、海面の上昇とともに、水害対策として防波堤を新設するためのコストが増加することになると考えられる。

⁸⁶ ケーススタディの詳細については第2章を参照

⁸⁷ 100年の一度級の集中豪雨、河川氾濫と高潮が同時に起き、洪水・浸水(河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫)が発生した場合の影響をモデル化

⁸⁸ Jonathan Woetzel, Dickon Pinner, Hamid Samandari, Hauke Engel, Mekala Krishnan, Brodie Boland, and Peter Cooper, Can coastal cities turn the tide on rising flood risk?, McKinsey & Company (2020年4月)

1,000万～ 4,500万人

中国で2030年までに致命的な熱波に晒される人数

気温の上昇によりアジア主要国の労働時間が減少し、域内で逆進性の影響が現れる

第1章で述べたように、アジアの一部地域は、数年後には、気温・湿度ともに上昇する見込みである。ここでは、中国とインドの居住性と作業性への影響について詳しく検証する。

中国では、猛暑に晒される可能性が高まり、2030年には、猛暑や致命的な熱波により1,000万～4,500万人が影響を受ける⁸⁹。その中で、平均的な人が、2025年から2035年の間に致命的な熱波を1回以上経験する確率は、現在の0%から約25%にまで上昇する可能性がある(エアコンの有無は考慮していない)。2050年には、猛暑や致命的な熱波の影響を受ける人の数は1.1億から2.5億人にまで増加し、2045年から2055年の間に致命的な熱波を1回以上経験する確率は35%にまで上昇する。気温が上がるほど、そこに住み続けることは難しくなる。適応策としては、エアコンの普及率を現在の60%からさらに高めることが考えられる⁹⁰。ただし、エアコンが普及すると排出量が増加することになるため、慎重に検討する必要がある⁹¹。

極端に高い気温や湿度が常態化すると、労働生産性が低下し、屋外労働時間が短くなる。これにより中国の労働者人口の半分以上が影響を受けることになる(そのうちの26%が農業就業者)⁹²。また、中国では、非農業就業者の約28%が部分的に屋外労働に従事している。極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間の割合の平均は、2020年の4%から2030年には最大6.5%、2050年には最大9%にまで上昇する見込みである(図表10)。一部の都市部は、より深刻な影響を受ける可能性が高い。広州、深圳、武漢、東莞、南京では、極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間の割合は、平均して5パーセントポイント以上上昇する見込みである。

インドでは、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に居住する人口は、2030年までに1.6億～2億人まで増えると予測されている(そのうち8,000万人～1.2億人がエアコンを持っていないと推計)⁹³。エアコンの普及率を考慮しない場合、その数は2050年には3.1億～4.8億人まで増加し、現在の成長率では、その時点の総人口にまで達する可能性がある⁹⁴。気温と湿度の上昇とともに、労働者は熱中症予防のため、より多くこまめに休憩をとることになるため、労働生産性は低下する。これにより、屋外労働損失時間が年間総実労働時間に占める割合は、平均して2030年までに約15%増加すると推計されている(屋外労働損失時間の割合は現在の21%から24%に増加)(図表11)⁹⁵。

⁸⁹ Jonathan Woetzel, Kimberly Henderson, Mekala Krishnan, Haimeng Zhang, and Grace Lam, Leading the battle against climate change: Actions for China, McKinsey & Company (2020年)。致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義されている(湿球温度34℃)。ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ温度を湿球温度と定義する。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用している。一般的に、人間が生存可能な湿球温度の限界値は湿球温度35℃と考えられており、大都市では湿球温度34℃の熱波がヒートアイランド現象により35℃の限界値を超える可能性があることから、湿球温度34℃を閾値として設定した。この状況下では、健康な人が十分に水分補給を行い日陰で休息している状態でも、約4～5時間後には熱中症で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇するとされている。これらの予測には、大気中エアロゾルや都市のヒートアイランドあるいはクールアイランド現象の影響に関わる不確実性も含まれおり、エアコンの普及率は考慮していない

⁹⁰ The Future of Cooling in China, International Energy Agency, Paris (2019年)

⁹¹ エアコンに関する詳細な検討については、「Will India get too hot to work?」McKinsey Global Institute (2020年11月)

⁹² People's Republic of China Ministry of Human Resources and Social Security, "Distribution of the workforce across economic sectors in China from 2009 to 2019," Statista (2020年6月)

⁹³ Will India get too hot to work?, McKinsey Global Institute (2020年11月)

⁹⁴ 人口の幅は、国際連合(UN)世界人口推計および国際連合(UN)世界都市化予測による人口予測の幅に基づいており、人口の推移については高位ならびに低位の推計を行い、都市部と世界全体の人口の推移をベースとしている

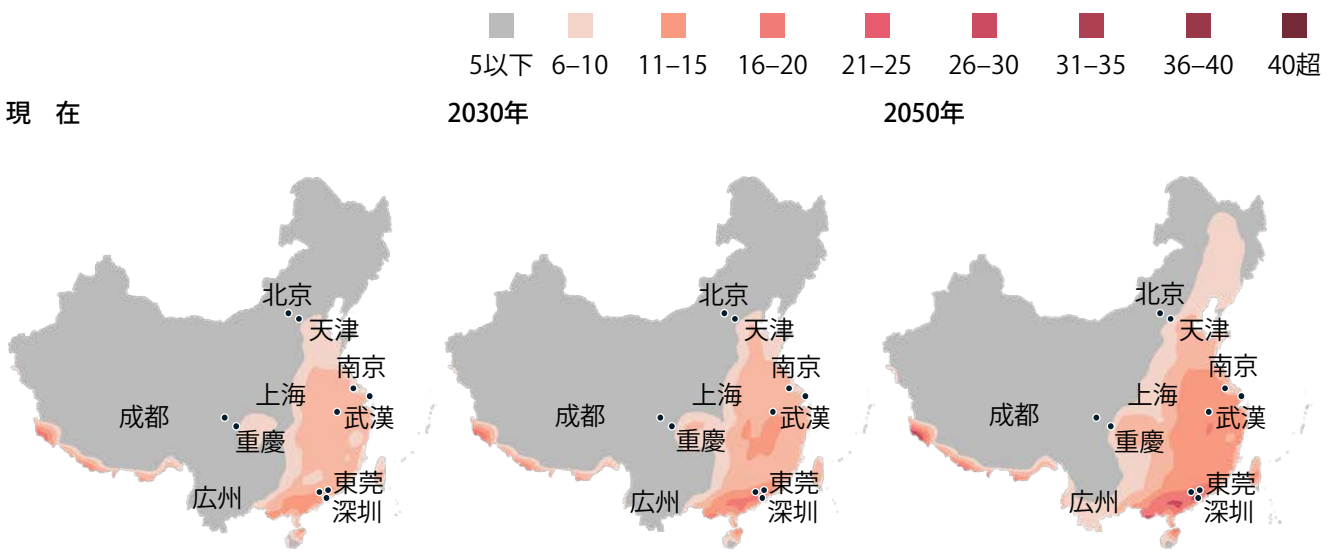
⁹⁵ 労働損失時間は、以下の手法に基づき算出。John P. Dunne et al., "Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming," Nature Climate Change, Volume 3 (2013年2月)、Josh Foster et al., "A New Paradigm To Quantify The Reduction Of Physical Work Capacity In The Heat," Medicine & Science in Sports & Exercise, Volume 51, Issue 6S (2019年6月)

図表10

中国では、極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間の割合が現在の4%から2050年には9%にまで上昇する見込み

RCP8.5シナリオに基づく

%; 極端に高い気温や湿度により実質的に失われる労働時間¹の割合



1. 減少する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

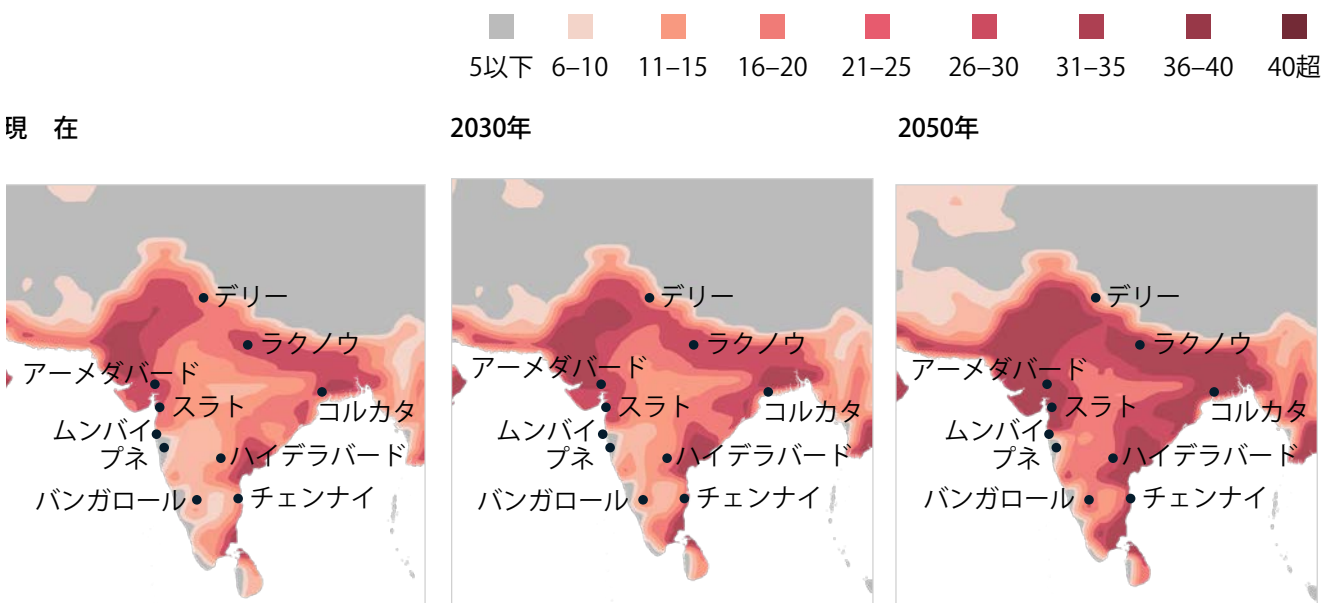
資料: Woodwell Climate Research Center, McKinsey Global Institute CityScope Database, McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

図表11

インドでは、極端な高温多湿の影響を受ける地域が拡大し、深刻度も増すと予測されており、それに伴い減少する労働時間の割合も増える見られる

RCP8.5シナリオに基づく

極端に高い気温や湿度により実質的に失われる労働時間¹の割合



1. 減少する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩時間に加え労働生産性の低下も考慮して算出した
注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: Woodwell Climate Research Center, McKinsey Global Institute CityScope Database, McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

そのような状況下では、エアコンなどの冷却装置を持っていない都市部の貧困層や屋外労働者は特に大きな影響を受ける。そして、いくつかの大都市では、2030年、2050年にかけて熱波による影響が深刻化する。例えば、2050年には、インドで最も人口密度が高い上位5市のうち3市(コルカタ、チェンナイ、バンガロール)では、極端に高い気温や湿度による屋外労働損失時間が年間総実労働時間に占める割合は、5~10パーセントポイント上昇する見通しとなっている。

中国、インドともに、所得が低い層ほど大きな影響を受ける。これにはいくつかの理由がある。1つ目の理由としては、低所得層ほど、農業、鉱業、建設業など屋外労働の割合が高い産業で働いていることが挙げられる。GDP成長率に対するこれらの産業の寄与度は高く、現時点で中国は約16%、インドは26%となっている。2つ目の理由としては、適応策を講じるためにはそれなりの資金が必要になるが、低所得層がそのような資金を確保することは難しいことが挙げられる。3つ目の理由は、様々な気候災害により生活に影響が及ぶためである。例えば、インドの農業は、極端に高い気温や湿度による労働時間の損失だけでなく、収量の減少というダメージを受ける可能性もある。

気候変動リスクの逆進性は、国単位だけでなく、アジアの地域単位でも見られる。マクロ分析を行った結果、1人当たりGDPが比較的低い国や地域は気候変動による影響を最も受けやすいことが明らかになった(「コラム2: 最も深刻な気候変動リスクに晒されるアジアの後発開発途上国」参照)。

各地で連携して適応策を展開することで、極端に高い気温や湿度によるリスクを抑えることができる。湿球温度の上昇による固有のリスクを考えると、インドと中国は、共に能力や知識を構築し、適応するための技術やインフラに積極的に投資し、屋外労働に依存しない経済への移行を支援することを検討する必要がある。暑さ対策から政府の政策に至るまで、様々な方策が考えられる。

インド政府は、すでに暑さ対策を講じている。インド環境・森林・気候変動省は、2019年3月に「India Cooling Action Plan」を策定し、世界の主要国として初めて暑さ対策に関する国策を発表した⁹⁶。また、取り組みは国レベルだけでなく地域レベルでも進められている。

能力と知識の構築は、すべてのステークホルダーにとって重要な第一歩となる。これにより意思決定者は、猛暑のリスクの度合いを定量化し、気候的要因と経済的要因に基づいてリスクの見通しを立てることが可能となる。さらには、湿度の影響を熱波の予測や政策に盛り込み、リスクの高い地域やコミュニティの支援に重点を置いた能力開発や知識開発に投資することもできるようになる。

屋外労働への依存率を下げ適応策への投資を進めることで、労働時間が失われることによる経済的リスクを大幅に軽減できるだけでなく、熱波が生活に与える影響も低減できる可能性がある。意思決定者は、気候変動に適応するための技術やインフラに投資することで、猛暑による直接的な影響を軽減できる。選択肢としては、一つは空調技術などの能動的な暑さ対策、もう一つは、従来の建物設計や代替冷却装置、都市部での日射反射率を高める方策を含む受動的な暑さ対策、という大きく2つに分けられる。インドと中国では、気温と相対湿度の両方が上昇し続けているという事実が十分な暑さ対策を講じるうえで大きな課題となっており、ステークホルダーが受動的な冷却手段によりリスクに対応するには限界がある。蒸発冷却器や階段井戸など従来の冷却方式の多くは気化熱を利用しているが、湿度が高い環境では冷却効果が急速に低下する。都市部に住む最貧困層に対しては、空調完備の緊急避難所を設置するだけでなく、貧困層に空調設備付きの住宅を手の届きやすい価格で提供するための制度を整えることも考えられる。さらに、気候変動の影響をこれ以上悪化させないためには、温室効果ガスを大量に排出する現在の冷却技術の改善に取り組む必要がある。

⁹⁶ Radhika Lalit and Ankit Kalanki, How India is solving its cooling challenge, Rocky Mountain Institute(2019年)、India Cooling Action Plan, Government of India, Department of Environment, Forests, and Climate Change (2018年)

最も深刻な気候変動リスクに晒されるアジアの後発開発途上国

1人当たりGDPが比較的低い国や地域、つまりフロンティアアジアとアジア新興国は、気候変動による影響を最も受けやすい(図表12)。これらの国や地域は屋外労働や自然資源への依存度が高く、迅速に適応策をとるための財政手段が少ない。

分析を行った結果、極端に高い気温や湿度により、アジアの後発開発途上国の作業性が著しく損なわれることが明らかになった。RCP8.5シナリオでは、2050年にかけて気温や湿度の上昇に伴う労働損失時間の割合は、アジア先進国と中国は2~5パーセントポイントであるのに対し、フロンティアアジアとアジア新興国は7~12パーセントポイントと非常に高い¹。フロンティアアジアおよびアジア新興国の2018年から2050年にかけてのアジアのGDP成長率への寄与度は、35%を上回り、何百人もの人々の収入が増加する見込みである。そのため、有効な対応策を講じることが急務となっている。

図表12

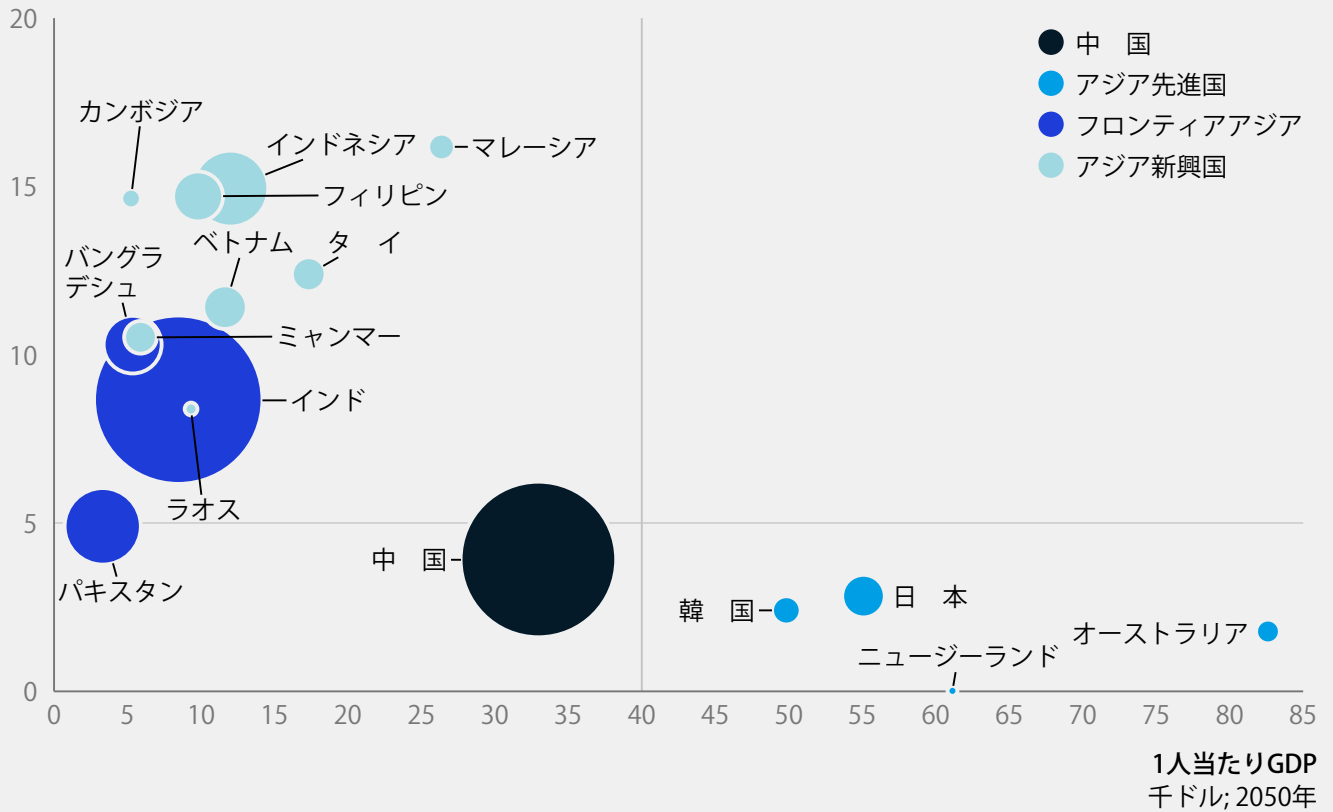
極端に高い気温や湿度により、アジアの後発開発途上国はさらに深刻な影響を受けると見られる

RCP8.5シナリオに基づく

極端高い気温や湿度が年間実労働時間に与える影響

パーセントポイント; 2018年から2050年にかけての変化¹

○ 円の大きさ = 人口²; 2050年



1. 極端に高い気温や湿度が発生し得る地域で、年間の屋外労働時間に与える影響から生じるリスクと定義。極端に高い気温や湿度により労働時間が削減される主な理由は2つある。一つは、熱中症予防のためにこまめに休憩をとるため、もう一つは人間は暑さへの自己防衛反応として疲労を感じるためである。
 2. 国際連合(UN)世界人口推計(2019年)、出生率中位シナリオ
 注記: RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: IHS Real GDP data、国際連合(UN)世界人口推計(2019年)、Woodwell Climate Research Center、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

¹ これらの数値は、国全体の地域平均を表している。範囲は、年間平均よりも暑い年と年間平均よりも涼しい年を考慮している

政府は、労働時間の見直しや、暑さ対策を考慮したまちづくり条例による基準の制定といった直接的な取り組みや、暑さ対策に関する計画策定やマルチステークホルダーの連携・協働の義務づけといった間接的あるいは橋渡しの取り組みを通じて適応策を推進することができる。建設業など、投光器を使って夜間作業ができる業種では、労働時間の調整が比較的しやすい。一方、農業などの場合は夜間に働くことは難しく、あまりにも早い時間からの労働は、文化的・経済的な問題を引き起こす恐れがある。もし、真夜中の2時や3時から人々が働き始めた場合、社会全体に影響が出る。通勤時間やライフスタイルの変更が余儀なくされ、通学時間や店の営業時間も変更する必要が出てくる。そのためステークホルダーは、対応策を包括的に検討する必要がある。

気候変動により農作物の収量の変動が増大し、 価格が高騰する恐れがある

アジアは世界の農作物の収量において大きな割合を占めており、米は90%、トウモロコシは約30%、大豆は10%、小麦は40%を占めている⁹⁷。今後、気温の上昇とともに、台風や洪水などの過酷な災害が収量に重大な影響を与えることが予測される。アジアは生産拠点が一部地域に集中しているため、食料システムの気候変動に対する脆弱性は高い。例えばインドでは、小麦の生産量の88%が北部の5つの州に集中している⁹⁸。中国では、全体生産量の約57%を占める、穀物の最大生産地である8つの省が東部に集中している⁹⁹。

本分析では、中国、インド、東南アジア、インド亜大陸、オーストラリアおよびニュージーランド、日本および韓国の6つの主要穀倉地帯を特定し、気候変動が農作物の収量に与える影響を定量化した¹⁰⁰。ここでは、ここではWoodwellの科学者と協働して、慢性的な気候変動現象の発生確率が上昇した場合の2030年および2050年にかけての収量変動率を推計している(図表13)¹⁰¹。

本分析では、気候変動により複数の穀倉地帯が同時に影響を受け、一部の農作物の収量に悪影響が出るのが明らかになった。トウモロコシについては、2030年および2050年までに収量が15%以上減少する確率は現在の1%から5%に上昇する。米については2030年まではほとんど変化は見られないが、2050年には収量が5%以上減少する確率は1.5倍になる。小麦についても収量が大きく変動する見込みである。収量が15%以上変化(15%以上増加あるいは減少)する確率は増加する見込みで、2050年には、収量が減少する確率は現在比で2パーセントポイント、凶作となる確率は5パーセントポイント増加する。その一方で、その他の農作物については収量が増加する可能性がある。大豆栽培に適した温度は日中で約30℃とトウモロコシの適温よりも高いため、気温上昇による恩恵を享受できる¹⁰²。また、米についても、気候変動による灌漑用水の温度の上昇により栽培期間が延び、収量が増加する可能性がある。

⁹⁷ USDA 2019–20、収穫年度別の年間生産量

⁹⁸ Statistical Year Book India 2017, Government of India, Ministry of Statistics and Programme Implementation (2017年)

⁹⁹ China Statistical Yearbook 2018, National Bureau of Statistics of China (2017年)、“Grain production in China in 2018, by region,” Statista, (2019年10月)

¹⁰⁰ 本分析は、「Will the world's breadbaskets become less reliable?, McKinsey Global Institute (2020年5月)」に基づいている

¹⁰¹ 凶作となる確率を推計するために、AgMIP モデルライブラリの収穫モデルを使用して、気候モデルのアウトプットを各グリッドセルモデルの収穫高に換算。ここでは、使用可能な1998年から2060年までの全気候モデルを用いて各作物の収穫高の確率分布を各グリッドセルに表す。本分析では、アジアの6つの主要穀倉地帯のグリッドセルに焦点を当てる。選択した収穫モデルの特性上、分析結果には、鉄砲水や単発的な猛暑といった異常気象は考慮していない。収穫モデルはすべて大気中のCO₂濃度の上昇に伴い、CO₂施肥効果も高まるという想定に基づいている。この想定に関わる不確実性は、収量の過大評価または凶作となる確率の過小評価につながる可能性がある。また、ここでは、CO₂濃度の増加に伴う植物の生長への潜在的なプラスの効果(CO₂施肥)を考慮している。ただし、CO₂濃度が上がると農作物のタンパク質や微量栄養素の含有量が減少し、今までと同じ量の栄養素を摂取するには食べる量を増やす必要がある(これについては本分析では考慮していない)。また、関連性のある要素として、降水量や給水量が増えると一般的に収量は増えるが、それにも限界がある

¹⁰² High temperature effects on corn, soybeans,” Farm Progress (2012年)

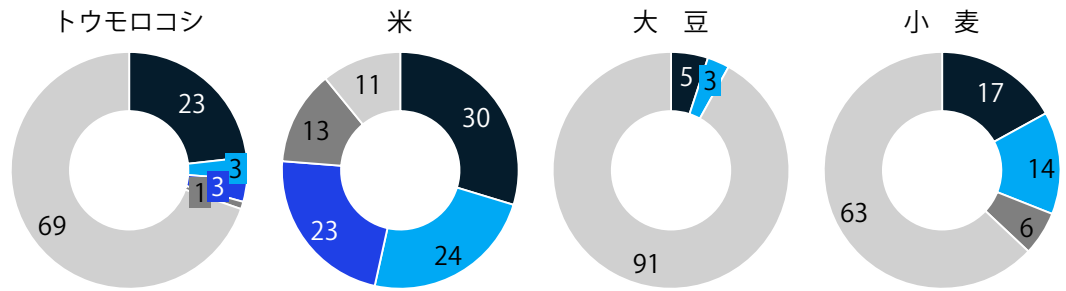
図表13

気候変動が農作物の収量に与える影響は作物により異なる

RCP8.5シナリオに基づく

世界の穀物生産量に占める地域別の割合
%; 年間平均生産量 2019~20年

- 中国
- インド
- アジア新興国¹
- その他アジア
- アジア以外



アジアの穀物収量(%; 各年の確率)

■ 減少 ■ 増加

アジアの穀物収量が減少する確率

減少率	現在	2030年	2050年	中国	インド	アジア新興国 ¹	その他アジア	アジア以外
55%以上減少	26	26	35	11	9	17	21	27
10%以上減少	6	8	15	2	0	2	6	12
15%以上減少	1	0	5	0	0	0	1	1

アジアの穀物収量が増加する確率

増加率	現在	2030年	2050年	中国	インド	アジア新興国 ¹	その他アジア	アジア以外
5%以上増加	32	17	26	14	10	22	18	17
10%以上増加	5	1	9	1	1	3	1	2
15%以上増加	0	0	1	0	0	0	0	0

1. アジア新興国(Emerging Asia): カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム
 注記: 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WoodwellがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。一部の地域では、収量が2030年にかけては増加し、2050年にかけては減少する(またはその逆)傾向が見られる。これは、地域特有の気候条件の組み合わせにより生じる。例えば中国では、2030年にかけては降雨量に比べ気温の上昇率が高くなる可能性があるためトウモロコシの期待収量は減少するが、2050年にかけてはその状況が逆転し、気温の上昇に比べ降雨量の増加率が高くなる可能性があるため、トウモロコシの期待収量は増加する。端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない

資料: Woodwell Climate Research Center、米国農務省(USDA)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

分析の結果、地域の気候や作物構成によっては、他の地域に比べ大きな影響を受ける可能性があることが判明した(図表14)。中国では、降雨パターンと気温の変化によって農作物の収量の変動が大きくなる見込みである。米、トウモロコシ、小麦は、2030年にかけて、災害の深刻化に伴い供給不足となる可能性が高まる。ただし、2050年を境に状況は一変し、豊作に転じる¹⁰³。大豆については、2030年までと2050年までのいずれの期間においても収量が大きく変動するリスクは低い。世界の穀物生産量に占める中国の割合は非常に大きいため(米:約30%、トウモロコシ:23%、大豆:5%、小麦:17%)、同国の作物収量の変動が増大することにより大きなノックオン効果が生じる可能性がある¹⁰⁴。

フロンティアアジアでは、インドが最も大きな影響を受ける。2030年および2050年にかけて、4つの主要作物は、すべて、収量が10%以上増加する可能性はなく、逆に10%以上収量が減少するリスクが高まる可能性がある。また、インドのGDP成長率に対する農業の寄与度は15%であるため、収量減少が経済にもたらす影響は大きい。インドはアジアで2番目に農作物の生産量が多い国である(2019年から2020年の年間生産量に占める割合は米が27%、小麦が37%)。さらに、インドやその他の地域で同時に不作が生じた場合には、価格の高騰や食糧不足につながる可能性がある。同様に、インド亜大陸(バングラデシュおよびパキスタン)も、主要4作物すべてにおいて収量が10%以上減少する可能性が高い。また、2050年までに米と小麦の収量が10%以上減少する確率は、10%以上上昇する。さらに、2050年までに両国の米とトウモロコシの収量が10%以上増加する確率は減少する見込みである。

アジア新興国については、2050年までに米やトウモロコシ、大豆の収量が10%以上変化する確率(10%以上増加あるいは減少する確率)が上昇することが明らかになった。アジア新興国がアジア全体の生産量に占める割合は、米が約26%、トウモロコシが10%であるため、価格に大きく影響する可能性がある。

アジア先進国(オーストラリア、ニュージーランド、日本、韓国)では、気候変動に伴い、2030年および2050年にかけて一部の作物の収量が増加する。例えば、日本では、灌漑用水の温度上昇により稲作期間が長くなる。これにより、今よりも柔軟に作期を調整できるようになり、冷夏による北部地域の農作物への影響を低減できる。

したがって、一部の穀倉地帯あるいは農作物については、気候変動により必ずしも収量が減るわけではないことが明らかになった。ただし、収量の変動が増大し、農家の収入が不安定になる可能性はある¹⁰⁵。さらに、豊作でも凶作でもマイナスの影響がある。豊作になれば農作物の買い取り価格が下落し、凶作になれば食糧不足に陥り価格が高騰する。過去には、期末在庫がほんの少し減少しただけで食糧価格が高騰した例もある。実際、2008年において世界の穀物生産量にほとんど変化は見られなかったが、穀物価格は100%上昇している¹⁰⁶。

¹⁰³ 2030年および2050年にかけての中国における気候変動による様々な影響を検証。これは、農作物の収量にプラスの影響もマイナスの影響ももたらし得る気候要因の特性を考慮したものである。例えば、中国で気候災害が深刻化することで2030年にかけて米と小麦の収量は減少するものの、大気中のCO₂濃度が上がることで施肥効果が高まり、2050年にかけて収量が増加する。トウモロコシについては、2030年から2050年にかけて温暖化がさらに進み降水量が増加することで(気温の上昇よりも影響力が大きい)、収量は現在から2030年までの期間に比べ増加する

¹⁰⁴ USDA、2019年から2020年の国別の農作物の年間生産量に基づく

¹⁰⁵ アフリカについても同様のことが言える。詳細については「How will African farmers adapt to changing patterns of precipitation?」, McKinsey Global Institute(2020年5月)を参照

¹⁰⁶ FAOSTAT, FAO

図表14

気候変動による影響は、農作物や地域により異なると見られる

RCP8.5シナリオに基づく

現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加 アジア全体の収量¹に占める地域別の割合 □ 5%超 □ 15%超

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
アジアの穀倉地帯: 穀物の収量が年間 10%以上減少する 確率 %	中国	現在	11	2	7	12
		2030年	15	7	1	20
		2050年	8	6	3	14
	インド	現在	28	9	27	34
		2030年	29	11	29	50
		2050年	42	27	39	77
	アジア新興国 ²	現在	10	3	10	該当なし
		2030年	8	2	5	該当なし
		2050年	19	6	18	該当なし
	パキスタン、 バングラデシュ	現在	45	43	該当なし	43
		2030年	44	42	該当なし	54
		2050年	49	54	該当なし	54
オーストラリア、 ニュージーランド	現在	28	32	該当なし	23	
	2030年	33	32	該当なし	28	
	2050年	22	27	該当なし	28	
日本、韓国	現在	13	4	4	6	
	2030年	5	1	0	0	
	2050年	5	0	0	0	
アジアの穀倉地帯: 穀物の収量が年間 10%以上増加する 確率 %	中国	現在	9	0	4	11
		2030年	4	0	15	12
		2050年	14	9	36	18
	インド	現在	34	8	39	9
		2030年	24	4	32	6
		2050年	20	4	26	4
	アジア新興国 ²	現在	2	3	11	該当なし
		2030年	1	6	5	該当なし
		2050年	0	6	10	該当なし
	パキスタン、 バングラデシュ	現在	38	35	該当なし	24
		2030年	39	29	該当なし	16
		2050年	30	18	該当なし	24
オーストラリア、 ニュージーランド	現在	29	30	該当なし	22	
	2030年	32	33	該当なし	37	
	2050年	47	47	該当なし	44	
日本、韓国	現在	7	2	11	2	
	2030年	23	20	37	35	
	2050年	38	52	72	86	

1. 2019~2020年の年間収量

2. アジア新興国(Emerging Asia): カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム

注記: 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WoodwellがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。一部の地域では、収量が2030年にかけては増加し、2050年にかけては減少する(またはその逆)傾向が見られる。これは、地域特有の気候条件の組み合わせにより生じる。例えば中国では、2030年にかけては降水量に比べ気温の上昇率が高くなる可能性があるためトウモロコシの期待収量は減少するが、2050年にかけてはその状況が逆転し、気温の上昇に比べ降水量の増加率が高くなる可能性があるため、トウモロコシの期待収量は増加する。端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない

資料: Woodwell Climate Research Center、米国農務省(USDA)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

より強靱な食料システムを構築する手段として、例えば、非生物のおよび生物的ストレスへの耐性が高い農作物の生産を可能にする技術について、官民が連携して幅広く研究することなどが考えられる。研究対象としては、従来育種や遺伝子編集、その他の生物学的または物理学的アプローチなどが考えられる。稲作について考えられる適応策としては、灌漑インフラへの投資の拡大、水の効率的利用技術の導入、播種時期の変更などが挙げられる。また、大豆の収量を上げ生産を安定させるために、干ばつや洪水への耐性が高い品種を新たに開発することも考えられるだろう。トウモロコシについては、暑さに強い品種の開発や、土壌侵食の防止、日差しから作物を守るための緑化などが主な適応策として挙げられる。農作物の収量が15%以上減少するリスクは、供給過剰による価格の下落をうまく利用して世界の期末在庫を35~40%の水準に引き上げることで相殺できる。

有形資産やインフラサービスは、洪水や森林火災などの災害により大きな脅威に晒される可能性がある

エネルギーや水、交通、通信を含め、検証対象となった17種類のインフラすべてにおいて、気候変動によるリスクが上昇することが明らかになった(図表15)。

気候災害の影響に対する脆弱性はインフラにより異なる。交通インフラの場合、空港の滑走路が数ミリ浸水しただけでも大きな影響が出る恐れがある。鉄道や道路は水害による被害を受けやすい。これは、信号システムは水に弱く、少量でも水に晒されると影響が出るためである。また、道路が数センチでも冠水すると車の流れは30%遅くなる。

通信インフラは比較的気候災害の影響を受けにくい。携帯電話基地局やケーブルは強風に弱い。インド政府の試算によると、2019年に発生した巨大サイクロン「ファニ」によるインドのオディシャ州の通信インフラの被害総額は700万~1,100万ドル規模に上るとい¹⁰⁷。貯水池や井戸、帯水層などの水インフラは、干ばつの長期化により影響を受ける。また、河川氾濫や内水氾濫、高潮氾濫により、汚水処理施設や給水処理システムに被害が及ぶ可能性もある。ベトナムのホーチミン市では、14ヵ所の汚水処理施設のうち12ヵ所は、2050年までに予測される通常規模および大規模な洪水による浸水想定区域内にある¹⁰⁸。電力システムも気候災害の影響を受けやすい。極端な暑さにより、発電効率が下がるだけでなく、エアコンの利用が増えることでピーク負荷が増す。次のセクションでは、東京の洪水浸水リスクとオーストラリアの森林火災リスクについて詳しく検証する。

洪水による東京の浸水深の平均は2050年には現在の1.7倍になるが、不動産やインフラへの被害は2.2~2.4倍となり、浸水深の増加率を30%上回る

都市部で大規模な洪水が発生した場合、インフラや不動産に深刻な被害が生じる。東京は、洪水を引き起こす河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫に対する脆弱性が高い。ここでは、ワーストケースシナリオのシミュレーションを行い、洪水リスクの過小評価を防ぐために、100年に一度級の集中豪雨と高潮、河川氾濫が同時に起き、洪水が発生した場合の複合的な事象を分析している¹⁰⁹。現在、100年に一度の確率とされている異常気象も、2050年には頻発化し、集中豪雨は28年に一度、高潮は32年に一度、河川氾濫は71年に一度の確率で起きようになる¹¹⁰。東京では、想定される浸水範囲や浸水深が2050年にかけて大幅に拡大する見込みである(図表16)。モデル化の対象となった地域内の浸水想定区域は2050年には現在の64%から81%に拡大し、平均浸水深は現在の0.28mから、1.7倍の0.48mに増える見込みである。また、現時点での不動産の直接的な被害額は59億ドルに達すると推計されている。もし、このまま何らかの適応策が講じられなかった場合には、この被害額は2050年には131億ドルにまで膨れ上がり、インフラ

¹⁰⁷ Nirmalya Behera, "Cyclone Fani demolishes mobile infra, losses could touch Rs 800 cr," Business Standard (2019年5月11日)

¹⁰⁸ Ho Chi Minh City adaptation to climate change, ADB (2013年)

¹⁰⁹ ワーストケースシナリオのシミュレーションを行うために、集中豪雨、高潮と河川氾濫のデータを基に24時間の複合洪水事象をモデル化した。複合洪水事象とは、100年に一度級の集中豪雨、河川氾濫と高潮が同時に起きた場合の洪水事象を指す。100年に一度級の集中豪雨、河川氾濫、高潮に関する数値は様々なデータソースを活用して個別に計算しているが、確率的な影響が全くないわけではない。例えば、高潮と集中豪雨の発生確率を個別に算出した場合よりも、集中豪雨が発生していることを条件づけた場合の方が巨大な高潮の発生確率は高くなる。したがって、洪水リスクの過小評価を避けるため、集中豪雨、河川氾濫と高潮をまとめてモデル化し、100年に一度級の洪水現象に関する現実的な推計を行った。詳細については「テクニカルノート」を参照

¹¹⁰ 積雪量の減少が見込まれるため、2050年において河川氾濫が大幅に増えることはない想定

の直接被害額も現在の4億ドルから11億ドルまで増加する見通しで、現在の2.2～2.4倍となる見込みである。

水害リスクの低減対策は、河道拡幅、河床掘削、堤防整備などの河川整備と、ダムや治水施設などの洪水調節機能の強化に大別される。いずれの対策においても、地域社会や自然環境への影響を考慮する必要がある。

東京都は、耐越水、耐浸透、耐侵食といった機能だけでなく、耐震性も備えた高規格堤防（スーパー堤防）の整備を含め、様々な洪水対策を打ち出している。高規格堤防は、従来の堤防に比べ10mと高さがあり、幅も約300mと広い。また、高規格堤防は、人口密度が高い都市部に適しており、省スペースでの設置が可能で多くの機能を備えている。さらに、従来の堤防に比べ河川へのアクセスが容易になり、都市部に生態系を取り戻すことも可能になる。例えば、東京の荒川の高規格堤防では、河川に面していない反対側の斜面を公園や高層建築物の土地として有効活用しており、隅田川の高規格堤防では、幅の広い堤防に遊歩道と超高層ビルが整備されている¹¹¹。気候モデルでは、東京の洪水・浸水被害が激化することが予測されているため、洪水の潜在的影響を評価し対策を講じることが重要になる。また、浸水に対する資産の脆弱性に応じて、比較的风险が低い場所にインフラを移すことも検討する必要がある。

131億ドル

東京で100年に一度級の洪水が発生することによる2050年にかけての不動産の直接的な被害額

¹¹¹“Case study: Tokyo—Super levees,” in Good practice guide: Climate change adaptation in delta cities, C40 Cities (2016年)

図表15

アジアのインフラ資産は、洪水や台風、森林火災などの気候災害に対して脆弱である

RCP8.5シナリオに基づく

リスク: ここでは、気候災害の危険に晒されることにより2030年までに各インフラ資産が損失を受ける可能性と定義¹

リスクは(ほとんど)なし



気候災害	影響を受ける可能性が高い国	電 力																	
		運 輸			通 信				発 電				送配電 ² 水						
		空 港	鉄 道	道 路	河 川	港 湾	³ 無線インフラ	⁴ 固定インフラ	データセンター	⁵ 原子力発電所	風力発電所	太陽光発電所	水力発電所	送配電網	⁶ 変電所	⁷ 水インフラ	⁸ 水処理システム	⁹ 汚水処理システム	
海面上昇・高潮	バングラデシュ、中国、インド、東南アジア					A													B
河川・内水氾濫 ¹⁰	バングラデシュ、インド、東南アジア	C	D	E															
台風などの暴風雨	中国、日本、フィリピン、韓国	C				A	F												B
竜巻などの突風 ¹¹	バングラデシュ、中国、インド、日本、フィリピン						F												
干ばつ	オーストラリア									G	G							H	
高温(空気と水)	中国、インド																		
森林火災 ¹²	オーストラリア、ミャンマー																		

アジア全域において、インフラ資産は、洪水や台風、森林火災などの 気候災害に対して脆弱である(続き)

A. 港湾は、当然のことながら、あらゆる種類の沿岸洪水のリスクに晒されている。通常、港湾は小規模な海面上昇に対しては柔軟な防護能力があり、容易に対応できる。しかし、台風などの強力な暴風雨は依然として重大なリスクとなる。西ベンガルのダイヤモンド港などインドの主要港の一部では、海面が急速に上昇し、港湾が危険に晒されている。また低地も沿岸洪水の被害を受ける可能性が高く、海岸付近や河川デルタ地帯に居住する何百万人もの人々の生活に影響が及ぶ。世界最大規模の港を擁する上海(年間の貨物取扱量: 6.47億トン)では、今後深刻化する高潮などの気候災害への対策に要する費用は4.0~6.5億ドルに上ると想定されている

B. 污水処理施設は水域に隣接しているところが多く、海面上昇や暴風による高潮の影響を強く受ける。ベトナムのホーチミン市の污水処理施設は、今後、通常規模および大規模な洪水による浸水の被害を受ける可能性があると見られている。同市の14カ所の污水処理施設のうち12カ所は、2050年にかけて予測されている通常規模および大規模な洪水による浸水想定区域内にある

C. 空港は多くが水域付近に位置しているため、大規模降雨による洪水や暴風による高潮の被害を受けるリスクが高い。2018年、大阪湾内の人工島に建設された関西国際空港が台風21号(Jebi)により大きな被害を受けた。滑走路が浸水し、空港業務の完全復旧には17日間を要したことから、多数の航空会社が地域経済やフライトの欠航を余儀なくされ、多額の損失を被った

D. 鉄道は、洪水により運行停止となる危険性がある。特に信号システムに被害が及ぶと、鉄道の信頼性に大きな影響が生じる。2019年、台風19号(Hagibis)が日本に甚大な被害をもたらした。この台風による洪水で10本(12両編成)の新幹線が部分的に浸水し、廃車を余儀なくされた

E. 道路は、大規模洪水や大量の水の流れにより深刻な被害を受ける。2017年8月のモンスーン豪雨によりバングラデシュの国土の三分の一以上で深刻な洪水災害が発生し、1,214kmの道路、100本の橋と排水溝、ディナジプールとダッカを結ぶ15kmの鉄道が被害を受けた

F. 携帯電話基地局は強風による被害を受けやすい。2019年に発生した巨大サイクロン「ファニ」により、インドのオディシャ州の通信インフラは総額710万~1,140万ドルにも上る被害を受けた

G. 風力発電所は干ばつには強い。一方で、定期的に冷却水を必要とする火力発電所は、深刻な水不足が生じると被害を受ける可能性がある。インドでは、2013~17年の間に、水不足が原因で61カ所もの石炭火力発電所が閉鎖されている

H. 水インフラやその関連設備は、干ばつの影響を非常に受けやすい。インドのチェンナイは、2年間にわたるモンスーン期に十分な降雨がなかったため、2019年に同市の4つの主要貯水池のうち3つが渇水し、何百万人もの人が安定した水の供給を受けられない事態が発生した

I. 太陽光パネルは、高温になり過ぎると発電効率が下がり、気温が1℃上昇すると0.1~0.5%発電量が低下すると言われている

J. 電力送配電には、高温による2つの複合リスクがある。気温が上昇すると空調の利用率が上がり、負荷が増大する。同時に、熱によりグリッドの効率が低下する。2014年、インドのウッタル・プラデーシュ州では、気温が47℃まで上昇し、電力需要が州の電力容量の8,000MWを大幅に上回る11,000MWに達したことにより大停電が発生し、送風機、市の給水ポンプ、エアコンが使用できない状況に陥った

K. 送配電網は、森林火災に対して極めて脆弱である。2019年に発生したオーストラリアの森林火災では、数千キロにわたるネットワークに被害が及び、5千本以上の電柱が損壊し、交換が必要となった

1. 損失は、インフラ資産の稼働停止、損害、破壊と定義
2. 電力の送配電
3. 基幹変電所および電波塔
4. 地上および地下ケーブルを含む
5. 原子力、ガス、石油を含む
6. 大型変圧器(トランス)を含む
7. 貯水池、井戸、帯水層
8. 浄水場、淡水化施設、排水システム
9. 污水処理施設、放流設備
10. 内水氾濫とは、河川や海の活動とは無関係に、局地的な大雨などにより発生する洪水を指す
11. 大雨および暴風の両方からの影響を含む
12. 森林火災は、主に干ばつにより引き起こされる派生的なリスク

資料:アジア開発銀行(ADB)、Asia Research & Engagement、Business Standard、Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)、McKinsey Global Institute (2020年1月)、Energy Networks Australia、India Climate Dialogue、インド政府、米エネルギー経済・財務分析研究所(IEFFA)、Railway Technology、Economic Times、The Weather Channel、ユニセフ(UNICEF)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

図表16

東京の洪水は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動の影響により2050年までに発生頻度が増し、深刻度も高まると予想される

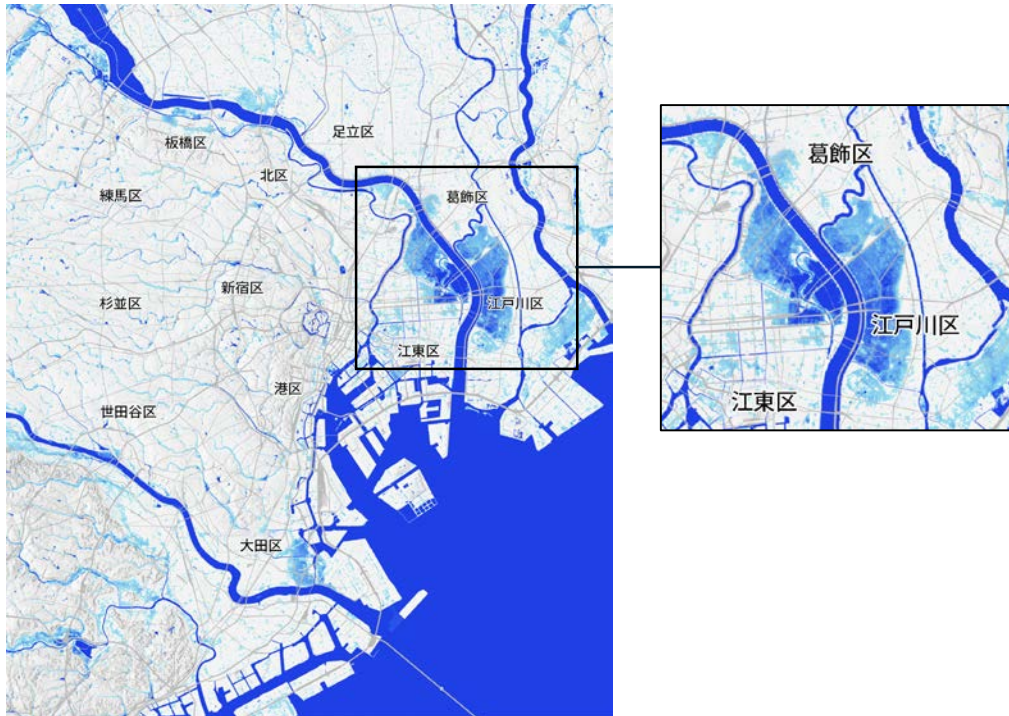
RCP8.5シナリオに基づく

東京で100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の複合気象事象により洪水が発生した場合の影響



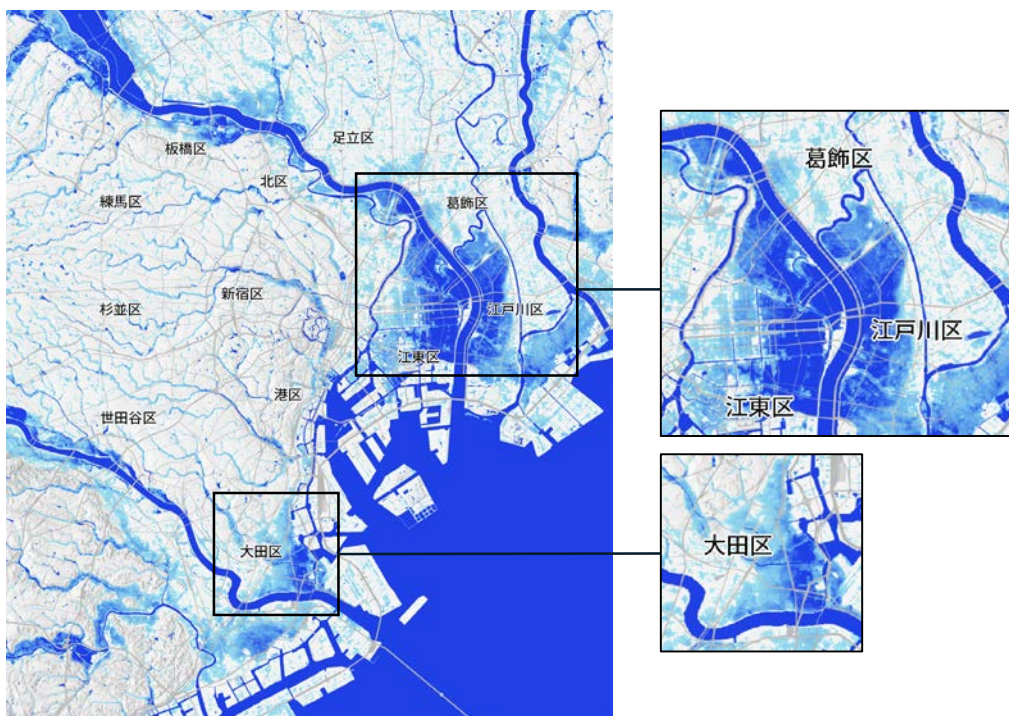
100年に一度級の異常気象: 現在

現在、100年に一度の確率で起きるとされている異常気象は、2050年には頻発化し、集中豪雨は28年に一度、高潮は32年に一度、河川氾濫は71年に一度の確率で起きようになる



100年に一度級の異常気象: 2050年

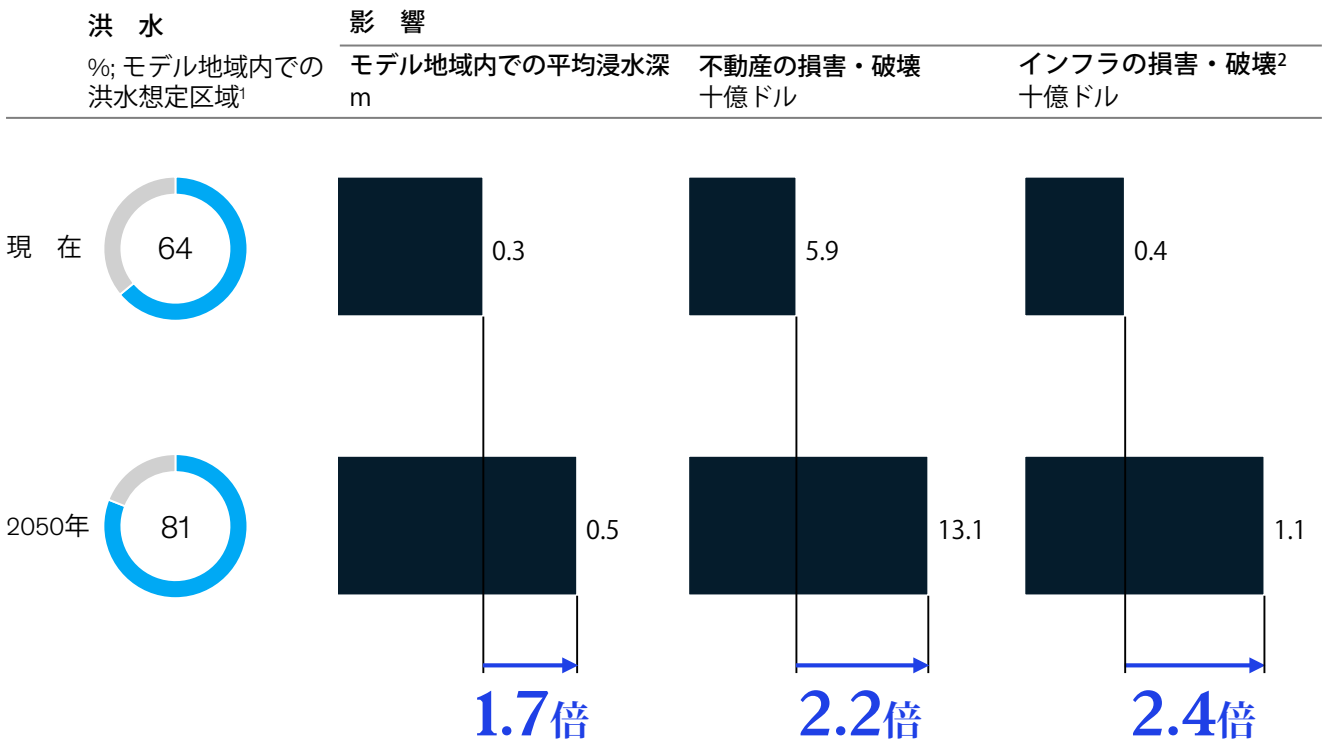
2050年時点で100年に一度の確率で起きる異常気象は、現在に換算すると484年に一度級の集中豪雨、307年に一度級の高潮、152年に一度級の河川氾濫となる



図表16(続き)

東京の洪水は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動の影響に RCP8.5シナリオに基づくより2050年までに発生頻度が増し、深刻度も高まると予想される(続き)

東京で100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の複合気象事象により洪水が発生した場合の影響



オーストラリアの約三分の一の地域では、1年当たりの森林火災の発生危険日数が20日以上増加する

森林火災は、インフラに大きな被害を及ぼす可能性がある。オーストラリアでは深刻な森林火災が増加しており、2019年から2020年までに4,600万エーカー(7万2,000平方マイル)以上を消失している。死者数は34名に上り、少なくとも3,500棟の住宅と何千棟もの建物が被害を受けた¹¹²。気候科学の知見によると、気候変動により、2019年から2020年にかけてオーストラリア南東部で壊滅的な森林火災が発生する確率は、少なくとも30%上昇したとされている¹¹³。ケーススタディでは、2030年および2050年にかけて、森林火災の発生危険日数(森林火災気象指数)がどの程度増加するかを検証した(図表17)¹¹⁴。

火災の発生は、火災リスクが増大する条件だけでなく、引き金事象や可燃物の蓄積状況による影響を受ける。Woodwellの科学者は、気候変動の影響を受ける降水量、気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節をモデル化している。ここでは引き金事象や可燃物の蓄積状況は考慮せず、気候条件に基づいて火災発生リスクを検証しているため、実際の火災発生率とは異なる可能性がある。そのため、過去に起きた森林火災に関するマップと火災危険日数のマップは一致していない。

¹¹²2019–2020 Australian Bushfires, Center for Disaster Philanthropy (2020年)

¹¹³Geert Jan van Oldenborgh et al., "Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change," Natural Hazards and Earth System Sciences (2020年3月)

¹¹⁴火災気象指数(FWI)が、過去に観測された森林火災の大半(79%)と同程度に高い日を火災発生危険日として定義。火災気象指数は、世界中で使用されている火災の危険度を表す指標で、降水量や気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節に基づいて算出する。手法の詳細な説明については「テクニカルノート」を参照

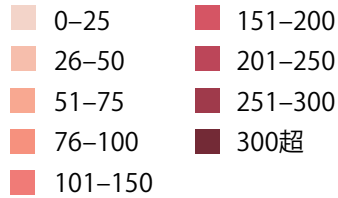
図表17

オーストラリアの森林火災は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、2030年および2050年までに発生頻度がさらに高まると予想される

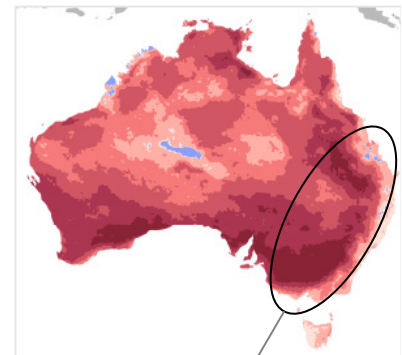
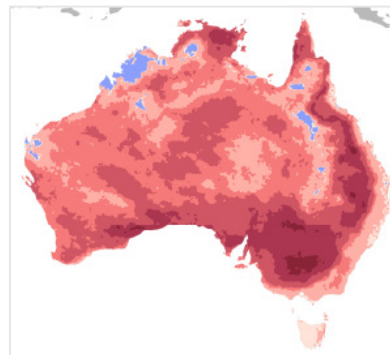
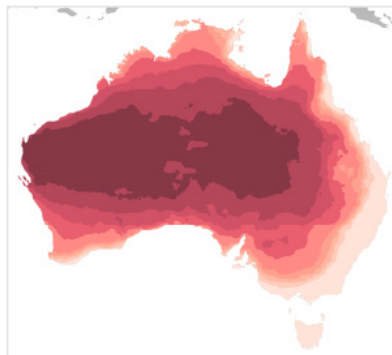
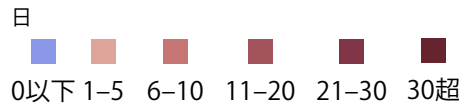
RCP8.5シナリオに基づく

年間の森林火災の発生危険日数

現在



発生危険日数の変化

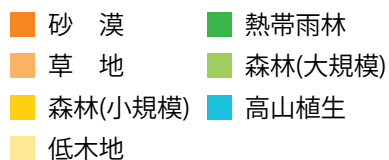


オーストラリアで人や資産が最も集中している地域

同国の30%の地域で、1年当たりの森林火災の発生危険日数が20日以上増加

現在のオーストラリア

植生域

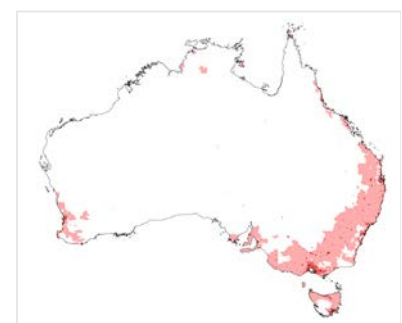
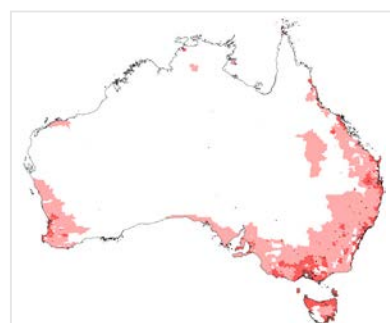
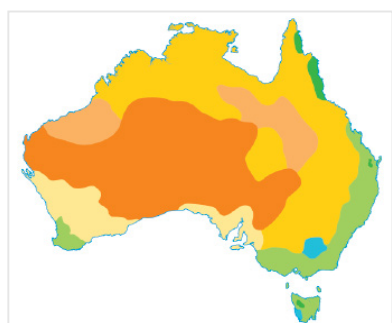


現在の密度



資本ストック²

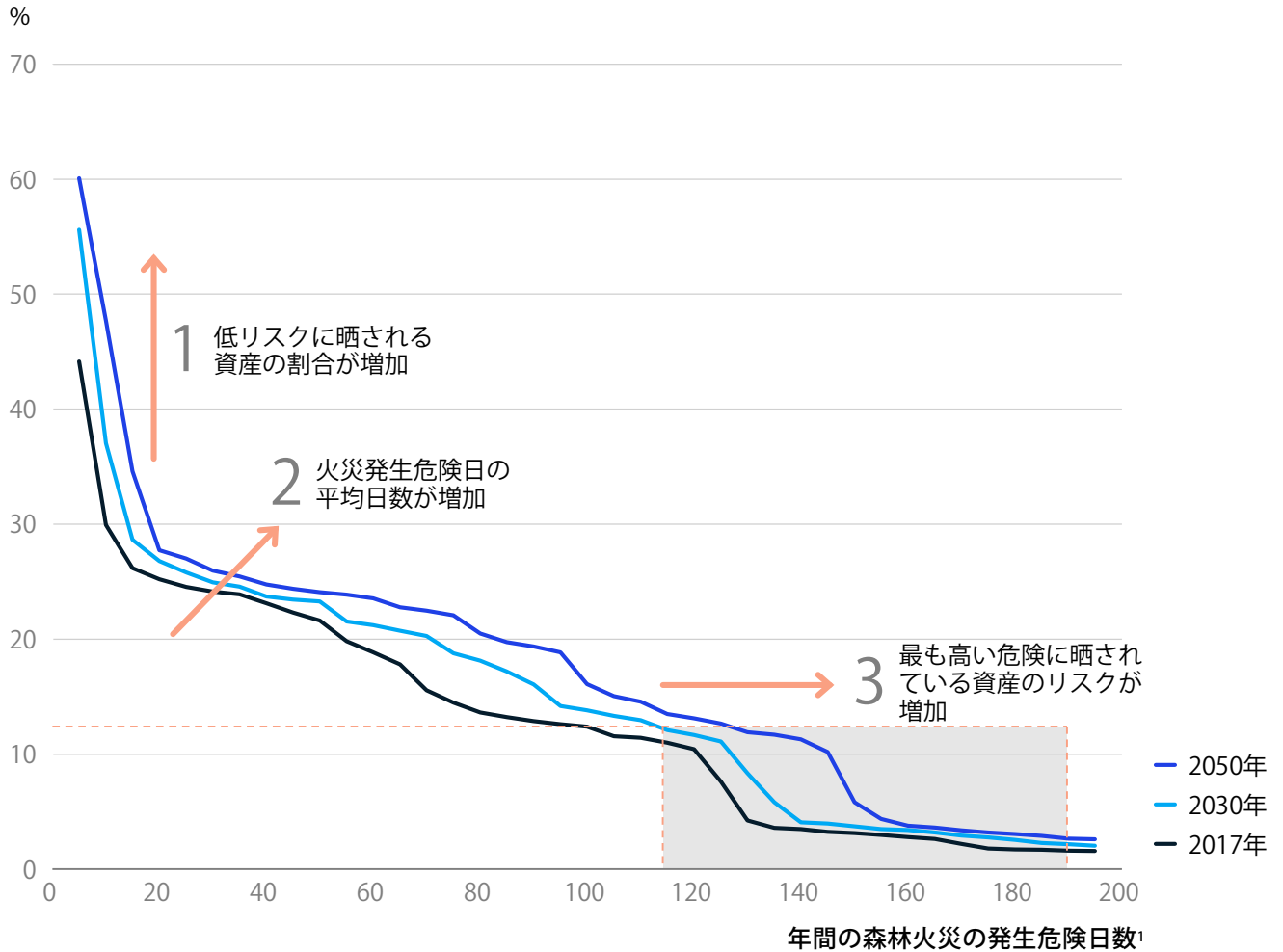
人口



ニューサウスウェールズ州など、オーストラリアで人や資産が最も集中している地域においても森林火災の発生危険日数が急増する可能性がある

オーストラリアの森林火災は、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、2030年および2050年までに発生頻度がさらに高まると予想される

森林火災による被害を受ける可能性がある資産の割合(累積)²



森林火災発生危険日の年間平均日数
資産額に基づく加重平均

	1	2	3
	少なくとも年間5日、森林火災の危険に晒される資産の割合(%)	総資産に基づき加重	最も高い危険に晒されている上位10%の資産に基づき加重
現在	44	28	154
2030年	56	32	164
2050年	60	37	178

1. 火災気象指数(FWI)が、過去に観測された森林火災の大半(79%)と同程度に高い日を火災発生危険日として定義。火災気象指数は、世界中で使用されている火災の危険度を表す指標で、降水量や気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節に基づいて算出する

2. 資本ストック額に基づく

注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない。RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)」の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: Australian Geography Teachers Association、Geoscience Australia、国連人道問題調整事務所(OCHA)、Woodwell Climate Research Center、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

46%

オーストラリアで森林火災の発生危険日数が年間10日以上の地域に居住する人口の2050年にかけての増加率

オーストラリアの国土面積の30%で、森林火災の発生危険日数が年間20日以上に増加する見込みである¹¹⁵。また、森林火災の発生危険日数が多いエリアは、現在はオーストラリア中部の人口密度が低い地帯に集中しているが、将来的には人口や植物の密度が高い地域にも広がっていく。これは、人為的な原因や可燃物の蓄積が増え、引き金事象の発生確率が高まることで、2030年および2050年にかけて森林火災リスクが大幅に高まることを意味する。森林火災の発生危険日数が年間10日以上に地域に居住する人口の割合は、現在の26%から2050年には46%にまで上昇する¹¹⁶。

さらに図表17では、適応策がとられなかった場合に、森林火災の被害を受ける資産が増加することを示している。例えば、森林火災の危険に晒される日数が年間5日以上となる資産の割合は、2030年には現在の44%から56%、2050年には60%まで増加する恐れがある¹¹⁷。また、1年当たりの森林火災の発生危険日数(資産価値に基づく加重平均)は、現在の28日から2050年には37日に増加する可能性がある。そして、気候変動のリスクが最も高い資産のうち10%については、森林火災の危険に晒される可能性のある年間の日数が現在の154日から2050年には178日に増加する見込みである。この変化は、ニューサウスウェールズ州など人口や資産が集中している一部の地域に大きな社会経済的影響をもたらす。ニューサウスウェールズ州は、2019年から2020年の間に発生した森林火災で、死者数・建物ともに最も大きな被害を受けた。被害を受けた建物の多くは農舎で、農地が灰に覆われてしまったことに加え、これまでにない厳しい干ばつに襲われたことで復旧は困難を極めた。2030年および2050年にかけては、森林火災の発生頻度と強度が増すことにより脆弱なインフラのリスクが高まり、社会経済的な影響はさらに深刻化する恐れがある。例えば、存在するすべてのコミュニティにとって重要な資産である送配電網などのエネルギーインフラは、森林火災に対して最も脆弱である。その他の脆弱なインフラには、交通(空港、鉄道、道路など)や通信(基地局、電波塔、ケーブルなど)がある。

アセットオーナーは、増大する森林火災の発生リスクに対応するため、1) 予防、2) 検知、3) 抑制、4) 修復、5) 再生のリスクマネジメントのライフサイクルに沿って対策を講じる必要がある。過去に起きた火災による被害を考えると、予防は非常に重要である。アセットオーナーは、補強(電線類の地中化など)や移転により、既存資産を強化できる。例えば、アドバンストアナリティクスを活用してリスクが発生する確率とリスクコストを高い精度で評価し、気候変動リスクを今後の資本計画やビジネスケース、設計基準に反映させることができる。また、モニタリング(資産の周辺環境の温度、湿度、風速、植生など)によりリスクを検知することも可能である。さらに、森林火災が発生した場合に備えて消防計画を立てておく必要がある。例えば、送配電事業者は、重要負荷のために外部のバックアップ電源を確保し、消防計画(情報伝達、運用手順など)を整える必要がある。また、アセットオーナーは、(まだ発生していない場合でも)火災発生後の復旧計画を立てておくことも忘れてはならない。

オーストラリアの各州政府は、森林火災のリスク増大への対策を進めている。例えば、ビクトリア州の2017年～2020年の気候変動適応計画には森林火災への対策が盛り込まれており、同州の教育省(DEECD: Department of Education and Early Childhood Development)は、森林火災と危機管理対策の本格的かつ包括的な見直しを行っている。DEECDが新たに立ち上げたSBPP(School Bushfire Protection Project)は、森林火災リスクが高い場所にある学校の生徒や職員の防災対策の強化を図ることを目的としており、森林火災が発生しやすい地域の火災リスクのモデル化や、絶滅危惧種の評価、エンジニアリングソリューションの専門家を集め、火災時の安全性を高め、森林火災のリスクを低減し、学校の被害を最小限に抑えるための対策を検討している。しかし、オーストラリア全土で災害リスクが増大していることを考えると、適応策をさらに加速させ、規模を拡大していく必要がある。

¹¹⁵ 気候条件(降水量、気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節など)に基づいて森林火災のリスクを予測しているが、引き金事象(人為的な原因など)や可燃物の蓄積状況(森林、農地など)は考慮していない。例えば、気候条件だけで考えればオーストラリアの中央部は森林火災のリスクが高いが、人口密度が低く可燃物の蓄積も少ないため、実際の発生件数は少ない

¹¹⁶ オーストラリアの人口分布は現状のまま推移すると想定

¹¹⁷ 今回の分析ではWoodwell Climate Research CenterおよびGeoscience Australia's National Exposure Information Systemの地理空間データを活用(気候災害や資産に関するデータを含む)

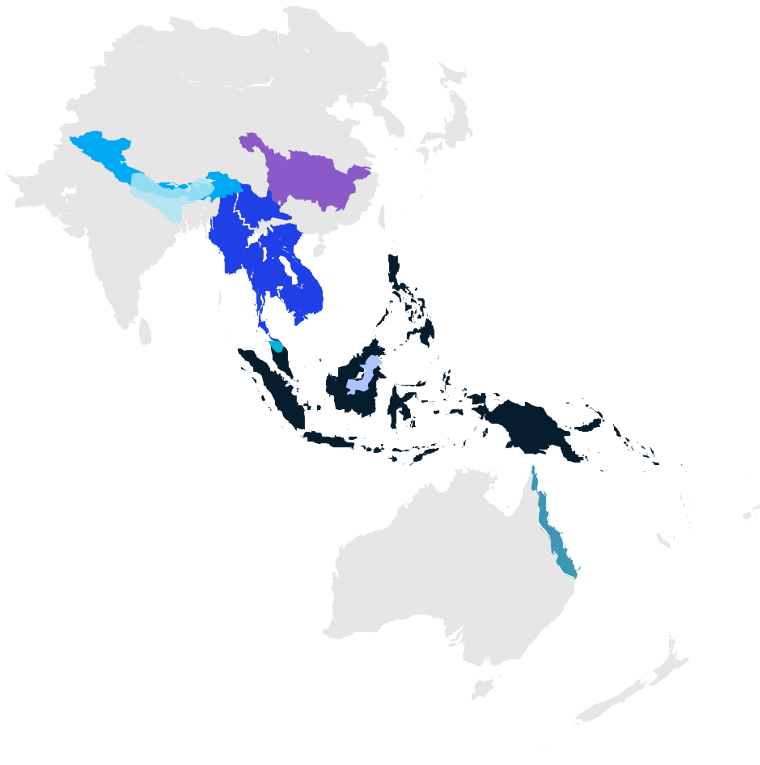
気候変動により、自然資源やそれぞれが果たす役割に 大きな影響が出ている

アジア太平洋地域は、自然資源が豊富で、地球上で最大の規模かつ多様な生態系を有しており、これらは社会や経済の発展に欠かせないものである。世界銀行によると、自然資源が国富に占める割合はOECD諸国では3%程度であるのに対し、低所得国では47%となっている(図表18)¹¹⁸。

図表18

アジア太平洋地域の多様な生態系は、この地域の社会的・経済的活動にとって 極めて重要なものである

アジア太平洋地域における7つの主要生態系



コーラル・トライアングル

世界で発見されているサンゴの種類のうち76%が生息。この天然資源が1億2千万人の生活を支えている

ヒマラヤ山脈

世界の動植物の種類のうち10%が生息・生育。ヒンドゥークシュ地域に住む2.4億人以上の水源地となっている

大メコン圏

1997～2008年の間に1,231種の新種生物が発見された。世界最大の内水面漁業を営む(年間14～39億ドル)

ヒマラヤ山麓地帯

全植物の30%と爬虫類の40%は、この地域に固有のもの。10億人の水源地となる

グレートバリアリーフ

世界の魚種の10%が生息。50億ドル規模の観光資源である

ハート・オブ・ボルネオ

世界の生物多様性の6%が生息。12億ドル規模の観光資源である

長江

ジャイアントパンダとユキヒョウの生息地。中国の水資源の40%を占める

注記: この地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響), McKinsey Global Institute (2020年1月)、世界自然保護基金(WWF)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

¹¹⁸World Bank, The Changing Wealth of Nations 2018:Building a Sustainable Future, Washington, DC:World Bank (2018年)

人間の活動は、自然資源を枯渇させ、生態系サービスを急速に劣化させる。これらの活動の中には、森林を伐採して農地に変える土地利用の転換が含まれているが、社会経済的な利益を生み出さず自然資源を奪うだけの活動もある。気候変動により、平均地表面温度や海水温、降水パターン、海水中の酸素濃度、酸性度などの地球物理学的条件が、自然システムが適応できないほど速いスピードで変化するため、自然資源が枯渇し、生態系サービスの劣化が進む。このような環境の変化が適応能力の限界を超えた場合には、自然資源や生態系サービスは非線形的に劣化してしまう¹¹⁹。このようなリスクの大きさを把握するために、氷河、海洋、森林、そして適応策と緩和策がとられなかった場合の劣化の程度を評価した(図表19)。

図表19

気候変動により、すでに絶滅の危機に瀕しているアジア太平洋地域の自然資源の劣化が激化する

RCP8.5シナリオに基づく

気候変動が2050年までにアジア太平洋地域に与える影響

氷河融解



20~40%縮小

ヒンドークシュ山脈
ヒマラヤ地域の氷河が
20~40%消失

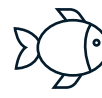
海洋の温暖化



最大90%消滅

世界の平均気温が2℃
上昇した場合、コーラ
ル・トライアングルやグ
レートバリアリーフで最
大90%のサンゴが消滅

海洋の酸性化



8%減少

魚が従来の季節行動とは
異なる時期に高緯度に移
動するため、漁獲量が8%
減少

注記: RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している

資料: 政府間科学-政策プラットフォーム(IPBES)(2018年)、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)、MGI future of Asia report、MGI global climate risk report、世界自然保護基金(WWF)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

ヒンドークシュ山脈ヒマラヤ地域では、2050年には氷河が20~40%減少し、約7.5億人が影響を受ける

ヒンドークシュ山脈ヒマラヤ地域には、西はアフガニスタンから東はミャンマーまで8つの国が含まれる。同地域の氷河は灌漑用水や水力発電、その他の経済活動に利用されており、域内の2.4億人の住民を含む約7.5億人の生活を支えている。しかし、2000年以降、ヒマラヤ地域の氷河の融解速度が倍増しており、ここ40年間で四分の一以上が消失している¹²⁰。同地域内の氷河は、2030年には約10~25%、2050年には一部の地域で20~40%消失すると予想されており、これにより大洪水の危険性が高まっている¹²¹。その主な原因となっているのが気候変動である¹²²。チベット高原では、氷河融解による河川の流出量が5%以上増加し、海面が年間0.2m上昇するなど水文環境の変化が生じている¹²³。ブラマプトラ川の源流を含む世界の45%の氷河からの流出量は既にピークを超えているが、22%の氷河が溶けてできた水溜りからの流出量は増加すると予測されている。ガンジス川とインダス川は、それぞれ2050年と2070年にピーク流量に達すると見込まれている¹²⁴。また、モンスーン期前の流量は減少する見込みで、灌漑用水や水力発電、生

¹¹⁹ Virginia R. Burkett et al., "Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: Case studies and policy implications," *Ecological Complexity*, Volume 2, Number 4 (2005年12月)

¹²⁰ J. M. Maurer et al., "Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years," *Science Advances*, Volume 5, Number 6 (2019年6月)

¹²¹ Philippus Wester et al., eds., *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*, Cham, Switzerland: Springer (2019年)

¹²² Damian Carrington, "Himalayan glacier melting doubled since 2000, spy satellites show," *Guardian* (2019年6月19日)

¹²³ Tandong Yao et al., "Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions," *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Volume 39, Number 4 (2007年11月). Guoqing Zhang et al., "Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009)," *Remote Sensing of Environment*, Volume 115, Number 7 (2011年7月)

¹²⁴ Matthias Huss and Regine Hock, "Global-scale hydrological response to future glacier mass loss," *Nature Climate Change*, Volume 8, Number 2 (2018年1月)

態系サービスに影響が出る恐れがある。天候が不安定になり、降水量が減少し、熱波が頻発することで、河川の流量が大きく変動する可能性がある¹²⁵。

このような変化は、特に河川への依存度が高い農村地域に深刻な影響を及ぼす恐れがある。洪水のリスクは、その地域に住む人々に差し迫った脅威をもたらす。また、農業など気候資源に大きく依存する産業も脅威に晒される可能性がある¹²⁶。世界で13番目に水ストレスが高く(主に水資源の管理体制に関わる問題と需要増加が原因)、その他の水ストレスが高い17カ国の総人口の3倍もの人口を抱えるインドでは、影響がより深刻化する恐れがある¹²⁷。

40%

コーラル・トライアングルでは、40%以上のサンゴがここ40年で消滅している

海洋の温暖化は、域内の何億人もの人々の生活を支える海洋生物の生命を脅かしている

気候変動により、海洋の温暖化が進み、酸素濃度が低下し、酸性化が進んでいる。1950年から2009年までの間に、平均海面水温は、インド洋では0.65℃、太平洋では0.31℃上昇している¹²⁸。海洋の温暖化により海洋熱波の発生頻度やその持続期間が増加しており、炭素を吸収する海藻・海草の藻場が失われる可能性がある。また海洋の温暖化は、海水中の酸素消費の原因にもなる。大気中の二酸化炭素が増えると、海の二酸化炭素の吸収量が増え、海水の酸性化が進む。現在まで、海は、人間活動により放出された二酸化炭素の約30%を吸収しており、表面海水のpH(水素イオン濃度指数)は産業革命以前に比べ約0.1低下している。温暖化は、過去6,500万年において前例のない速さで進んでいる¹²⁹。

海面水温の上昇に伴い、海洋の二酸化炭素吸収能力は低下している¹³⁰。また、海洋の温暖化や貧酸素化、酸性化により、海水の循環パターンなどに変化が生じている。魚類や動物プランクトンは高緯度の海域に移動し、新たな生息環境に適応するために行動を変化させている¹³¹。これにより、伝統的な漁業へのマイナスの影響も深刻になっており、1930年から2010年の間に日本海での漁獲量は35%減少している¹³²。

サンゴは、ごくわずかな水温の変化でも大きな影響を受ける。オーストラリアの年間50億ドル規模の観光産業を支えているグレートバリアリーフでは、1998年以降、サンゴ礁の大規模な白化現象が4回確認されており(2016年から2017年の間にサンゴ礁の半分以上が白化して死滅)、水温の上昇に伴い、2035年にかけては10年に2回、今世紀半ばには年に1回の周期でこの現象が発生する可能性がある¹³³。また、海洋の温暖化は、インド太平洋地域のコーラルフィッシュの半数以上が生息するコーラル・トライアングル(サンゴ三角地帯)のサンゴ礁生態系を消滅させ、沿岸地域にさらに影響が及ぶ恐れがある。この地帯では、ここ40年間で40%以上のサンゴが消滅している。気候科学の知見によると、現在の傾向が続けば、沿岸の地域の人々の食料源としてのサンゴ礁生態系の能力は、2050年には50%、2100年には80%低下し、1億2千万人以上の人々に影響が出るとされている¹³⁴。

¹²⁵ Philipus Wester et al., eds., *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*, Cham, Switzerland: Springer (2019年)

¹²⁶ Arun Bhakta Shrestha et al., eds., *The Himalayan climate and water atlas: Impact of climate change on water resources in five of Asia's major river basins*, CIMOD, GRID-Arendal, and CICERO (2015年)

¹²⁷ Insights, "17 countries, home to one-quarter of the world's population, face extremely high water stress," blog entry by Rutger Willem Hofste, Paul Reig, and Leah Schleifer (2019年8月6日)

¹²⁸ Ove Hoegh-Guldberg et al., "The ocean," in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects*, Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

¹²⁹ Ocean acidification in the IPCC Special Report: Global warming of 1.5°C, Ocean Acidification International Coordination Centre (2018年10月)

¹³⁰ P. Ciais et al., "Carbon and other biogeochemical cycles," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker et al., eds., Cambridge, UK, and New York, NY: Cambridge University Press (2013年)

¹³¹ Issues brief: The ocean and climate change, International Union for Conservation of Nature (2017年), Ove Hoegh-Guldberg et al., "The ocean," in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects*, Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

¹³² Christopher M. Free et al., "Impacts of historical warming on marine fisheries production," *Science*, Volume 363, Number 6430 (2019年3月)

¹³³ Heron et al., *Impacts of Climate Change on World Heritage Coral Reefs: A First Global Scientific Assessment*, Paris, UNESCO World Heritage Centre (2017年)

¹³⁴ Ecological footprint and investment in natural capital in Asia Pacific, WWF and ADB (2012年)

20%

インドネシアの1990年以降の
森林減少率

森林は気候変動の影響を受けており、2050年までにアジアのマングローブの三分の一以上が破壊される可能性がある

森林は、経済資源や生態系サービスの供給源であり、海洋と同様に炭素の重要な吸収源として機能している。現在、生物圏は、化石燃料の消費による二酸化炭素排出量の約30%を吸収しており、その大部分を森林やマングローブが吸収している。アジア太平洋地域における一次林産物の価値は、2016年時点では年間約900億ドルと推定されていた¹³⁵。しかし、アジアは世界全体の人口の61%を占めているにもかかわらず、森林は世界全体の17%と非常に少ない。特に東南アジアでは森林破壊のスピードが速く、1990年以降、森林面積は、インドネシアでは20%、ミャンマーでは19%減少している。森林破壊の原因は主に人為的なものであるが、気候変動によりさらに深刻化する¹³⁶。気候変動と、風、雪氷、火災、干ばつ、昆虫、病原体による森林攪乱との関連性については様々な研究が行われている。その研究により、気候変動が森林攪乱の引き金あるいは深刻化の要因となっている可能性が高いことが明らかになっており、研究報告書の57%は、気候変動が攪乱プロセスに直接影響を与えていることに言及するものであった¹³⁷。また、森林攪乱が気候変動に影響を与える場合もある。森林火災は大量の二酸化炭素を大気中に排出するため、気候変動の速度を速めてしまう。

樹木は成長するまでに長い時間を要するが、成長後は数十年にわたり生き続ける。そのため、通常の気候変化と異常気象の両面からのリスクに晒される可能性がある¹³⁸。

様々な生態系やその相互関係を理解することは難しく、対応策の有効性を確認できるまで長い時間がかかることから、自然資源の保護や適応は複雑なものとなっている。一般的に自然資源について考えられる対応策としては、介入による重要な生態系機能の維持、生態系の適応力向上、効果的なモニタリングの仕組みの整備、自然のプロセスを空間計画や地域開発に取り込んだグリーンインフラへの投資などがある。自然資源がすでに失われている場合には、経済の多様化によりコミュニティを適応させることができるかもしれない。

保護策と適応策を実行するためには、公的資金と民間資金を動員することが重要となる。そのためには協働が不可欠である。例えば、民間部門は資金と技術力を提供し、公共部門は投資の仕組み作りやリスク低減の支援を行うことができる¹³⁹。

公共部門については、主に2つの重要な役割が考えられる。一つ目の役割は、予算の一部を環境プログラムに直接割り当てることである。例えば、中国の退耕還林政策では、土壌保全のための補助金を給付している。二つ目の役割は、民間資本を巻き込むためのインセンティブや経済的な仕組みを整備することである。例としては以下のようなものが挙げられる。

- 規制に適合した自然資源の取引を奨励し、自然資源の活用や投資のレベルに応じて上限を設け、民間の資源利用者間の取引を許可。コンサベーション(自然環境保護)バンクを通じて、環境に影響を与え得るプロジェクトに対して排出権を販売し、売上げを自然資源の保護活動に充てる。
- 自然資源のオフサイト受益者と所有者との間の取引条件を設定。民間の水の利用者から上流集水域の農家に対して費用を支払うことなどが考えられる。
- 消費者が価格プレミアムを支払う意思がある商品・サービスについて、エコラベル認証制度を導入。生態系と生物多様性の経済学(TEEB)は、エコラベル製品の世界市場は2050年には1.9兆ドルにまで拡大すると推計している¹⁴⁰。

¹³⁵ Forests and FSC in Asia Pacific, Forest Stewardship Council Asia Pacific (2016年)

¹³⁶ Ecological footprint and investment in natural capital in Asia Pacific, WWF and ADB (2012年)

¹³⁷ Rupert Seidl et al., "Forest disturbances under climate change," Nature Climate Change, Volume 7, Number 6 (2017年6月)

¹³⁸ Marcus Lindner et al., "Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems," Forest Ecology and Management, Volume 259, Number 4 (2010年2月)

¹³⁹ The Marine Socio-Economics Project (MSEP): Valuing the environment in economic terms, New Economic Foundation (2011年)

¹⁴⁰ The Marine Socio-Economics Project (MSEP): Valuing the environment in economic terms, New Economic Foundation (2011年)

- グリーンプロジェクトに要する資金を調達するための環境インパクトボンドの発行など、画期的な金融商品を展開¹⁴¹。中国は世界第2位のグリーンボンド発行体であり、2018年時点で発行総額は312億ドルに達している¹⁴²。
- カーボンオフセットプログラムを導入し、その売上げを脱炭素化プロジェクトの資金として活用。2005年に国連気候変動枠組条約(UNFCCC)において議論されたREDD+プログラムは、先進国が、途上国の森林伐採から得た利益に応じてカーボンオフセットの権利を購入し、その売上げを途上国の森林の保全・回復に投資する仕組みである¹⁴³。インドネシアは、森林減少対策を通じて480万トンの二酸化炭素排出量(CO₂e)を削減するための10億ドルの資金援助を約束したノルウェー政府から、2017年にその一部を受け取っている¹⁴⁴。

商業的利益が得られる自然資源プロジェクトについては、公的部門が補助金や減税などのインセンティブ制度を整え、民間投資を支援することができる。エコツーリズムはこの種のイニシアチブの一般的な方式であり、それにより生態系を保護し地域コミュニティの収入を確保できる。その一例として、タイの象の保護施設が挙げられる。

また、自然資源の価値向上策を検討することもできる。環境に値段をつけることは不可能に思えるが、値段をつけなければ、ステークホルダーが自然資源は無限であると勘違いしてしまう恐れがある。自然資源の貨幣価値を算出して自然破壊に伴うコストを明らかにし、自然システムの重要性をステークホルダーに伝えることで、その保護・回復・適応のための投資を誘引できる。研究により、自然資源の価値の推計についてはいくつかの方法があることが明らかになっている。社会的、経済的、環境的正義を促進する英国のシンクタンクのニューエコノミクス財団は、自然資本の環境の総経済価値(TEV)を算出するためのフレームワークを導入した。TEVとは、人間の生産活動や消費活動に直接役立つ利用価値と、目に見えにくく経済的な生産活動や消費活動に直接的な影響はないものの人間の幸福に影響を与え得る非利用価値を組み合わせたものである。

また、自然資源を体系的に管理するための独立した機関を置くことも考えられる。管理機関では、環境価値に関する認識のずれや、自然資源の乱用に対する罰則や執行体制の不備、経済よりも環境を優先させるインセンティブの不足など、自然破壊の根本原因に対処するだけでなく、長期的かつ総合的な自然資源スチュワードシップを推進することも可能である。その例として、米国環境保護庁(USEPA)がある。同庁は、政府から独立した機関で、議会で可決された環境法に従って規制を制定・施行する権限を与えられている。また、環境関連対策のための予算やデータを所有、管理、報告している。

一例としては、ニュージーランドで導入された、人々が自然資源を利用することで得られる「利用価値」と利用しなくてもその資源を守ることで発生する「非利用価値」を特定するための包括的なフレームワークが挙げられる(「コラム3: ニュージーランドの自然資源管理制度について」を参照)。

¹⁴¹ Atlanta: First publicly offered environmental impact bond, Quantified Ventures (2019年)

¹⁴² China green bond market 2018, Climate Bonds Initiative and China Central Depository & Clearing Company (2019年)

¹⁴³ National REDD+ strategies in Asia and the Pacific: Progress and challenges, ADB (2010年)

¹⁴⁴ Indonesia, Values and priorities, Climate and forest cooperation, Royal Norwegian Embassy in Jakarta (2020年)

ニュージーランドの自然資源管理制度について

ニュージーランドは、世界銀行が発表した石油産出国を除く国々の国民1人当たりの自然資源ランキングで1位となっている¹。ニュージーランドのGDPの約20%は、農業や食品製造業、観光業、水道事業など、自然資源への依存度が高い産業が占めている²。しかし、気候変動と人間活動の複合的な影響により、ニュージーランドの陸域および水圏の生態系が脅威に晒されている。農業活動からのメタン発生を中心としたCO₂換算排出量は1990年から2016年の間に20%増加し、2001年から2016年の間に湿地は約13%縮小した³。

2017年以降、公共部門および民間部門は、財務の視点から自然資源の価値を評価し保護するなど、自然資源の保全に向けた取り組みを推進している。

ニュージーランドでは、総経済価値 (TEV: Total Economic Value) のフレームワークに基づいて自然資源を評価している⁴。同国の自然資源のTEVは3,000億ドルと推計されており、取り組みの進捗状況を把握するうえで有効なベンチマーク指標の一つとなっている⁵。

2019年に設立されたAotearoa Circleは、公共・民間部門のリーダーが、ニュージーランドの自然資源の現状を調査し自然の保全や復元に関する施策を優先的に推進する自主的な取り組みである。創設メンバーには、Air New Zealand、Auckland Airport、環境省、Westpacが名を連ねている。同Circleでは、2030年までにニュージーランドの持続可能性と環境の統合的向上につながる包括的な財政システムを構築することを目指している。また、水圏

生態系や生物多様性の保全・復元に向けた計画の策定も行っている⁶。

2019年に設立された気候変動委員会 (CCC: Climate Change Commission) では、環境や持続可能性に関わる課題を精査し、政府に対し助言を行っている。2020年前半には、パリ協定により求められている国別約束草案 (NDC: Nationally Determined Contribution) のレビューを行い、見解を提示している⁷。

これらの取り組みは、すべて、環境的責任や環境意識向上のための施策や能力、データ、資金調達を含む、環境の持続可能性の向上に向けた包括的なアプローチにつながっている。さらに、これらの取り組みは、地域全体の環境問題に対処するための青写真となる可能性も秘めている。

¹ About us, The Aotearoa Circle (2019年)

² New Zealand Government Statistics (2019年)

³ New Zealand's Environmental Reporting Series: Environment Aotearoa 2019, New Zealand Ministry for the Environment and Stats NZ (2019年)

⁴ Natural capital and the Living Standards Framework, The Treasury of New Zealand (2018年)

⁵ "Natural capital monetary estimates:2007-16," Stats NZ (2018年)

⁶ Sustainable Finance Forum interim report, The Aotearoa Circle (2019年)

⁷ Who we are, Climate Change Commission (2020年)

気候災害は、社会経済システムにリスクをもたらし、アジアでは業種や場所に関係なく影響を受ける可能性がある。本章で詳述した6つのケーススタディでは、2030年までにその影響は顕在化し、適応策や緩和策がとられなければ、2050年までにさらに拡大することが明らかになった。物理的な面においても生物学的な面においても、限界値に最も近い領域ほど大きな影響を受ける。

今回のケーススタディでは、中国とインドでは気温と湿度の大幅な上昇により居住性・作業性が大きく変化することが予想され、アジアの主要穀倉地帯はプラスとマイナスの両方の影響を受けることが分かった。また、オーストラリアの森林火災や日本の洪水により、インフラ被害は拡大し、自然資源への圧力がさらに増すことになる。プラスの面としては、政府、ビジネスリーダーやその他のステークホルダーがすでに取り組みを始めていることが挙げられるが、増大し続けるリスクに対応するためには、更なる推進が必要となる。次章では、適応策の指針となる5つの主な戦略を紹介する。

国別ダッシュ ボード

オーストラリア	76
中国	78
インド	80
日本	82
ベトナム	84



オーストラリアでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、RCP8.5シナリオに基づく
 特に水不足や森林火災などの影響により、2030年および2050年にかけて
 社会経済的影響が深刻化する恐れがある

居住性・作業性

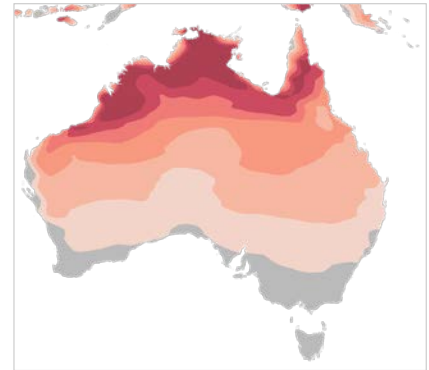
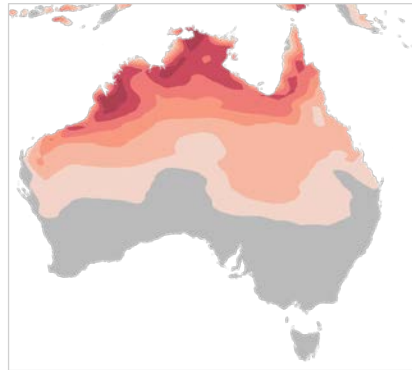
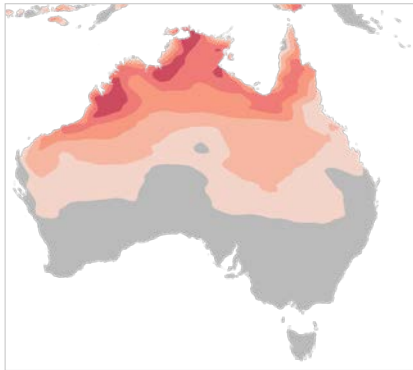
極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間¹が年間総実労働時間に占める割合
 %



現在

2030年

2050年

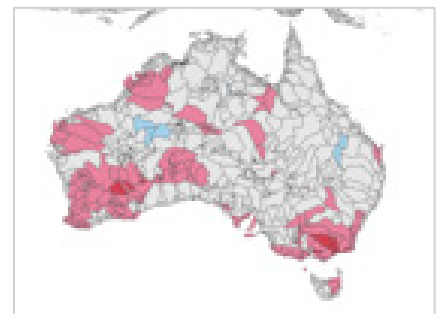
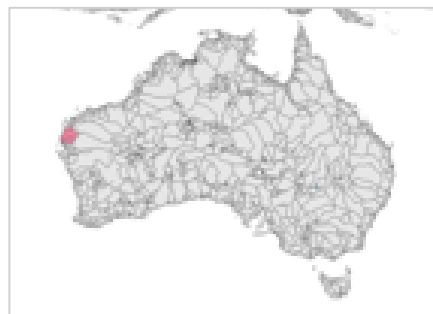
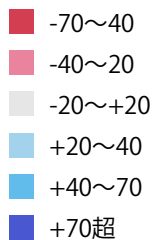


2030年までに、屋外労働時間の
1.0%を損失する可能性がある
 (現在は0.7%)

2050年までに、その割合は
3%まで拡大する可能性がある

2018年と比較した地表水の変化(マップの境界線は水域を表す)

%



食料システム(オーストラリアとニュージーランドを合算)

現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
穀物の収量が 10%以上減少 する確率 % ²	現在	28	32	-	23	オーストラリアの主要農産物である小麦は、収量減少の確率が高まることが予想される(一方でCO ₂ の施肥効果により、収量増加の確率の方が高くなることも考えられる)
	2030年	33	32	-	28	
	2050年	22	27	-	28	
穀物の収量が 10%以上増加 する確率 % ²	現在	29	30	-	22	
	2030年	32	33	-	37	
	2050年	47	47	-	44	

オーストラリアでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に水不足や森林火災などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある(続き)

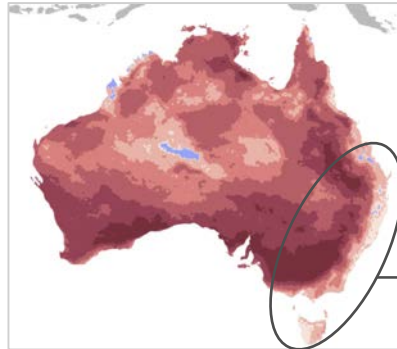
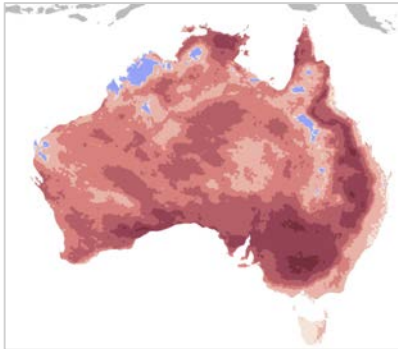
有形資産およびインフラサービス
年間の森林火災の発生危険日数³



現在からの変化

2030年にかけて

2050年にかけて

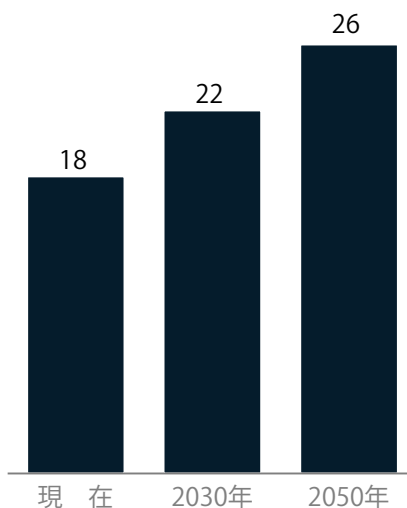


森林火災の危険に晒される日数が少なくとも年5日となる資産の割合は、現在の44%から**2050年までに60%**に増加する見通し

オーストラリアで人や資産が最も集中している地域

自然資源

気候区分が変わる陸面の割合
%⁴



世界の平均気温が2℃上昇した場合、2050年までにコーラル・トライアングルやグレートバリアリーフで**最大90%**のサンゴが消滅

1. 損失する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
 2. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照。予測精度を確保するため、一部の分析については国をグループ化して実施
 3. 火災気象指数(FWI)が過去に観測された森林火災の大半(79%)と同程度に高い日を火災発生危険日として定義。火災気象指数は、火災の危険度を表す指標として世界的に使用されており、降水量、気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度と季節に基づいて算出する
 4. バイオームシフトの基準に沿って算出。バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している
 注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: FV model Risklayer, RCP8.5 ensemble CC model with 50mm/hr drainage, CATDAT、IHS Markit Economics and Country Risk、Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)(2019年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

中国では、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度、降雨などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある

居住性・作業性

極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間¹が年間総実労働時間に占める割合



現在

2030年

2050年



2030年までに、屋外労働時間の**6.5%**を損失する可能性がある
(現在は4%)

2050年までに、その割合は**9%**まで拡大する可能性がある

食料システム

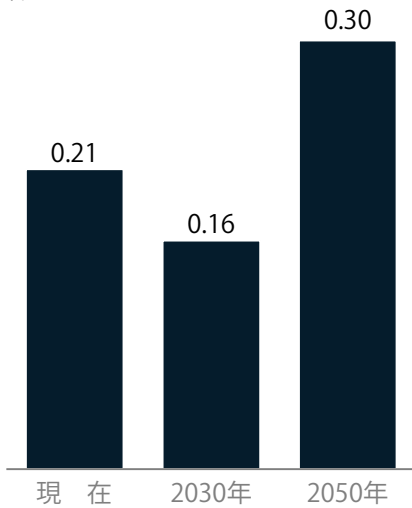
現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
穀物の収量が10%以上減少する確率 % ²	現在	11	2	7	12	トウモロコシ、米、小麦は2030年までは収量減少の確率が高まるが、2050年にかけてはその確率は低下する ³ 。大豆の収量減少リスクは低下する
	2030年	15	7	1	20	
	2050年	8	6	3	14	
穀物の収量が10%以上増加する確率 % ²	現在	9	0	4	11	どの穀物についても、2050年にかけて収量増加の確率が高まる
	2030年	4	0	15	12	
	2050年	14	9	36	18	

中国では、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度、降雨などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある(続き)

有形資産およびインフラサービス

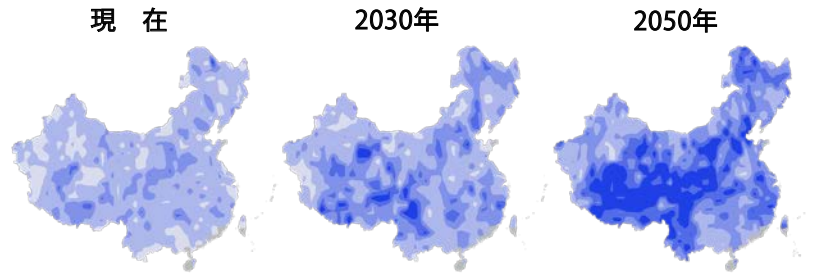
河川氾濫によって被害を受ける可能性がある資産の割合(年間)
%⁴



極端降水現象

50年に一度級の降水現象が発生する確率の変化;
1950~1981年との比較

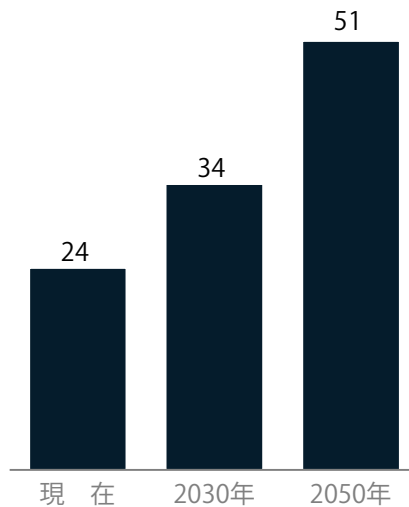
■ 1倍以下 ■ 1-2倍 ■ 2-3倍 ■ 3-4倍 ■ 4倍超



2050年までに、
5日間の平均雨量は
25%増加

自然資源

気候区分が変わる陸面の割合
%⁵



1. 損失する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
 2. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照。予測精度を確保するため、一部の分析については国をグループ化して実施
 3. 気候変動による影響が多方向(プラスおよびマイナス)である理由として、2050年までに(2030年と比較して)温暖化の更なる進行に伴い降水量が大幅に増加することや、大気中のCO₂濃度が上がることで施肥効果が高まることなどが挙げられる
 4. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、現行の規模の高潮対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、共有社会経済パス: SSP 2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
 5. バイオームシフトの基準に沿って算出。バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している
 注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: FV model Risklayer, RCP8.5 ensemble CC model with 50mm/hr drainage, CATDAT, IHS Markit Economics and Country Risk, Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)(2019年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

インドでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある

居住性・作業性

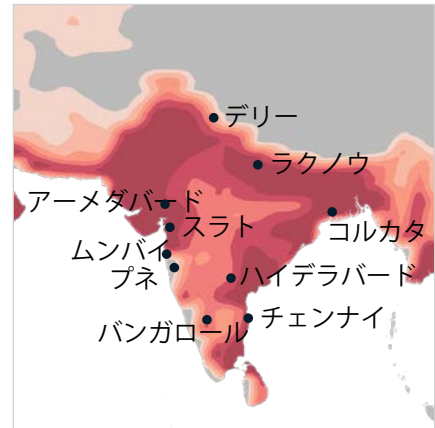
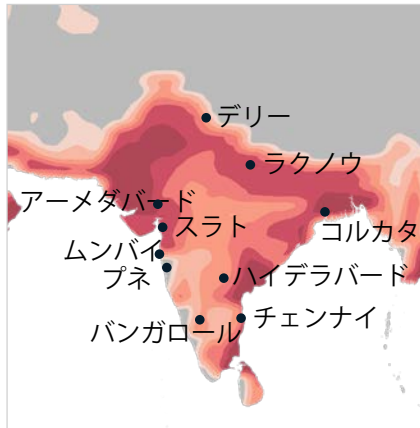
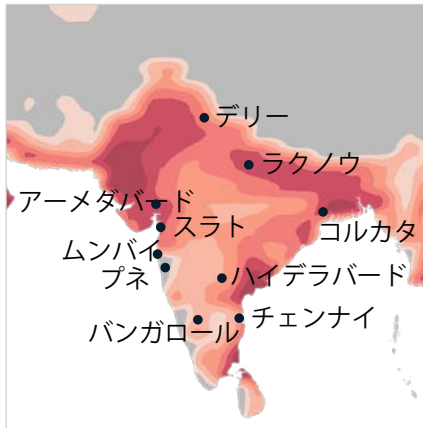
極端な高温多湿に晒される屋外労働時間¹の年間総実労働時間に占める割合、%



現在

2030年

2050年



2030年までに、屋外労働時間の
24%を損失する可能性がある
(現在は21%)

2050年までに、その割合は
30%まで拡大する可能性がある

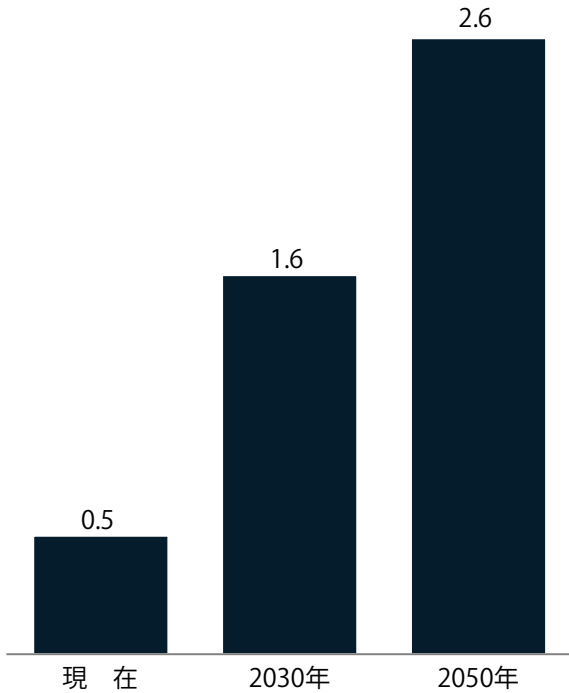
食料システム

現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
穀物の収量が10%以上減少する確率 % ²	現在	28	9	27	34	どの穀物についても、2030年および2050年にかけて収量減少の確率が高まる
	2030年	29	11	29	50	
	2050年	42	27	39	77	
穀物の収量が10%以上増加する確率 % ²	現在	34	8	39	9	どの穀物についても収量分布は悪化傾向となり、収量増加の確率は低下する
	2030年	24	4	32	6	
	2050年	20	4	26	4	

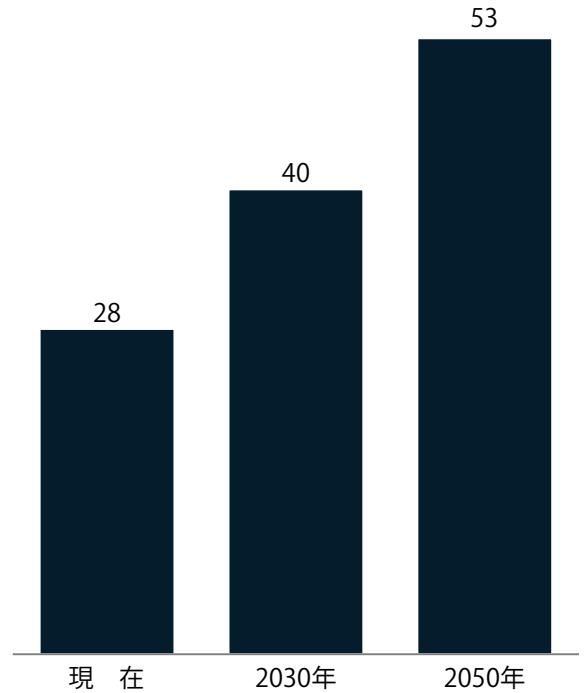
インドでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある(続き)

有形資産およびインフラサービス
河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合(年間)
%³



極端な降水現象(50年に一度級)が**2%以上増加**する主要都市(ムンバイ、プネ、コチ、コーリコードなど)

自然資源
気候区分が変わる陸面の割合
%⁴



インド人を含む**約7.5億人**の水源となっているヒンドークシュ・ヒマラヤ地域の氷河が、2050年までに**20~40%**消失する可能性がある

1. 損失する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
 2. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照。予測精度を確保するため、一部の分析については国をグループ化して実施
 3. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、現行の規模の高潮対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、共有社会経済パス: SSP 2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
 4. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、現行の規模の高潮対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、SSP 2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
 注記: RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: FV model Risklayer, RCP8.5 ensemble CC model with 50mm/hr drainage, CATDAT, IHS Markit Economics and Country Risk, Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)(2019年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

日本では、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に洪水や台風の影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある

居住性・作業性

極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間¹が年間総実労働時間に占める割合 %



現在

2030年

2050年



2030年までに、屋外労働時間の
3%を損失する可能性がある
(現在は2%)

2050年までに、その割合は
4%まで拡大する可能性がある

食料システム

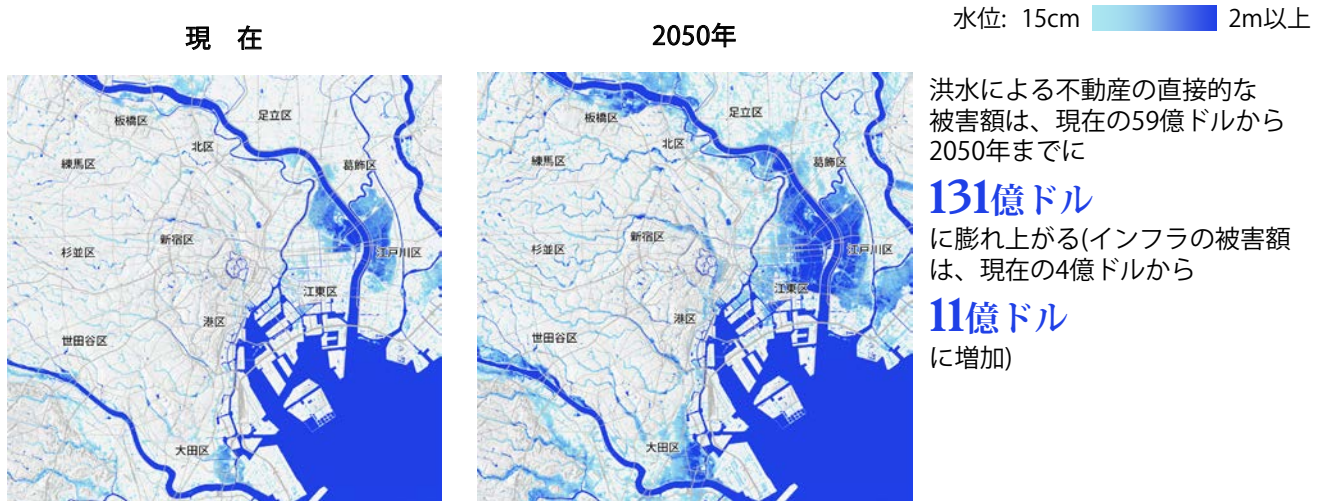
現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
穀物の収量が10%以上減少する確率 ²	現在	13	4	4	6	日本の主食である米は、収量減少の確率が低下し、期待収量が大幅に増加する
	2030年	5	1	0	0	
	2050年	5	0	0	0	
穀物の収量が10%以上増加する確率 ²	現在	7	2	11	2	
	2030年	23	20	37	35	
	2050年	38	52	72	86	

日本では、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に洪水や台風の影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある(続き)

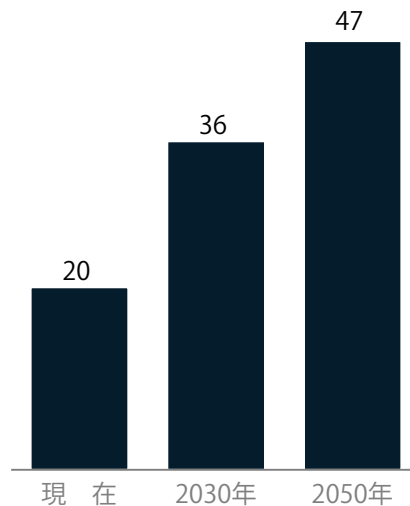
有形資産およびインフラサービス

東京で100年に一度級の集中豪雨、高潮、河川氾濫の複合気象事象により洪水が発生した場合の影響



自然資源

気候区分が変わる陸面の割合 %³



1. 損失する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
 2. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照
 3. バイオームシフトの基準に沿って算出。バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: FV model Risklayer, RCP8.5 ensemble CC model with 50mm/hr drainage, CATDAT, IHS Markit Economics and Country Risk, Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI) 世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)(2019年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

ベトナムでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度、洪水などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある

居住性・作業性

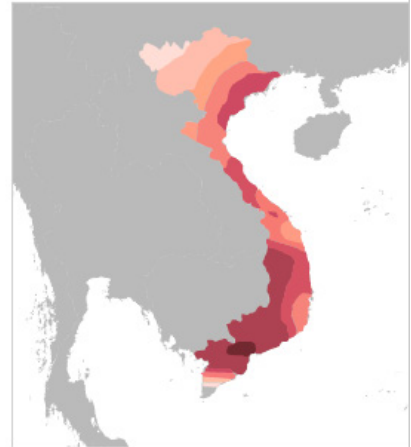
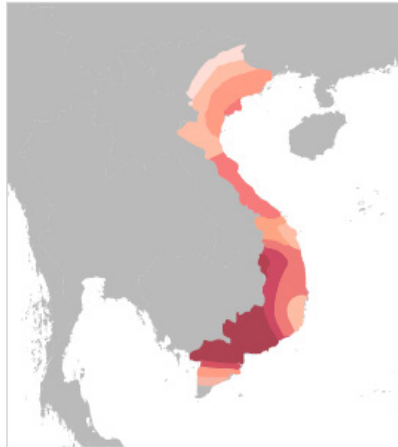
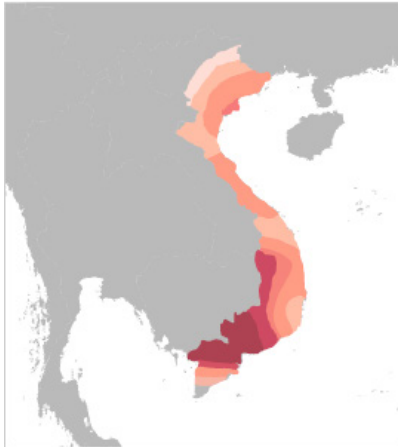
極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間¹が年間総実労働時間に占める割合 %



現在

2030年

2050年



2030年までに屋外労働時間の
27%(現在は22%)を損失する
可能性がある

2050年までに、その割合は
33%まで拡大する可能性がある

食料システム(アジア新興国の8カ国²全体)

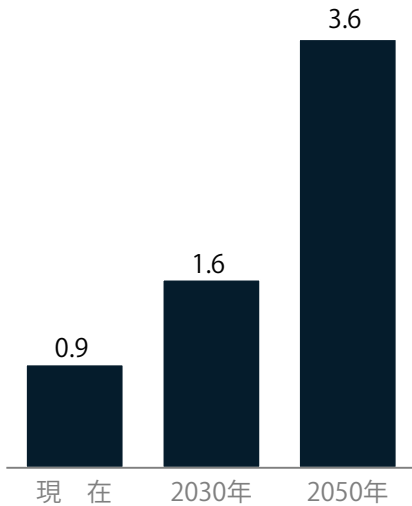
現在と比較した収量 ■ 減少 ■ 増加

		トウモロコシ	米	大豆	小麦	
穀物の収量が10%以上減少する確率 % ³	現在	10	3	10	-	トウモロコシは、2030年まではほとんど影響を受けないが、2050年にかけては収量減少の確率が高まる。
	2030年	8	2	5	-	
	2050年	19	6	18	-	
穀物の収量が10%以上増加する確率 % ³	現在	2	3	11	-	米は、2050年までに収量増加および収量減少の確率が共に高まる(収量分布がフラット化)
	2030年	1	6	5	-	
	2050年	0	6	10	-	

ベトナムでは、何らかの適応策や緩和策を講じない限り、気候変動、特に極端に高い気温や湿度、洪水などの影響により、2030年および2050年にかけて社会経済的影響が深刻化する恐れがある(続き)

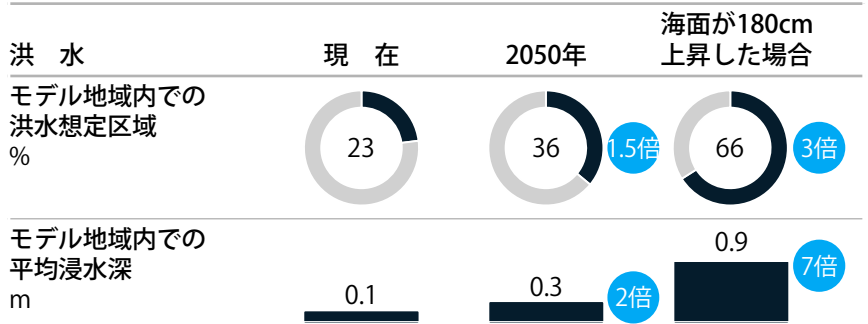
有形資産およびインフラサービス

河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合(年間)
%⁴



100年に一度級の洪水がホーチミン市に与える影響

● 現在との比較

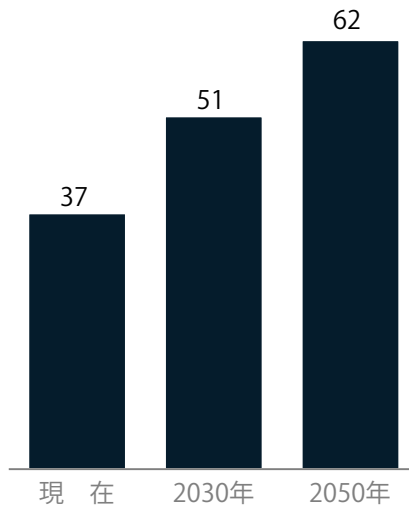


洪水による不動産の直接的な被害額は、現在の15億ドルから2050年までに**84億ドル**に膨れ上がる

(インフラの被害額は、現在の3億ドルから**10億ドル**に増加)

自然資源

気候区分が変わる陸面の割合
%⁵



1. 損失する労働時間は、気候モデルのアンサンブル平均である平均年に基づき、休憩に加えて労働生産性の低下も考慮して算出した
 2. カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム
 3. 米、トウモロコシ、大豆、小麦。収量の内訳は、WHRCがAgMIPアンサンブルの低窒素投入型農業モデルの中央値を使用してモデル化。本分析では気候変動リスクを検討しているため、(収量の増加ではなく)収量が減少する確率のみに焦点を当てている。気候変動がもたらし得る恩恵については本文を参照。予測精度を確保するため、一部の分析については国をグループ化して実施
 4. 河川氾濫により被害を受ける資産の推計には、現行の規模の高潮対策を想定し、WRI Aqueduct Flood Analyzer 2019のBAUシナリオ(RCP8.5、共有社会経済パス: SSP 2)下の国レベルの都市部の自然災害リスク指標を使用。リスク値は、期待値つまり確率加重したバリュー・アット・リスクに基づき算出
 5. バイオームシフトの基準に沿って算出。バイオームとは、特定の地域に生息する植物や動物で自然に形成される生物群系を指す。ここでは、ケッペンの気候区分を使用してバイオームの変化を示している

注記: これらの地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: FV model Risklayer, RCP8.5 ensemble CC model with 50mm/hr drainage, CATDAT, IHS Markit Economics and Country Risk, Rubel and Kottek (2010年)、Woodwell Climate Research Center、世界資源研究所(WRI)世界河川洪水解析システム(Aqueduct Global Flood Analyzer)(2019年)、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析



Storm shelter with mother and child, Manila, Philippines
© Rouelle Umali/Xinhua News Agency/Getty Images

3. 有効な気候変動対策

その1: 適応策

気候科学の知見によると、今後10年間で温暖化が進むことは不可避であるとされている¹⁴⁵。温室効果ガスの濃度が現在の水準にとどまったとしても、地球温暖化による気温の上昇により海水温が上昇するため、今後10年間にわたり気温と海面は上昇し続ける。つまり、社会や経済が気候変動の影響を受けることは間違いなく、政府やビジネスリーダーは深刻化あるいは頻発化する気候災害による被害を補うための適応策をとる必要がある。様々なリスクが増大しているアジアではこれが特に重要となる。

現在アジア諸国は様々な課題に直面している。しかしその一方で、気候変動リスクに適応するうえでアジアは極めて有利な立場にある。なぜなら、アジアの多くの地域で現在も大規模なインフラ整備が進行中で、気候変動のリスクに耐えられる構造を設計できるためである。アジア開発銀行によると、アジアが現在の成長率を維持するためには、2030年にかけて年間1.7兆ドルを投資する必要があるという¹⁴⁶。気候変動のリスクを踏まえてインフラを整備することで、耐久性を上げ、潜在的被害を低減できる。また、アジアではすでに災害や気候変動への適応策が推進されているため、その経験から学び、新たに有効な適応策を生み出すこともできる。例えば、バングラデシュでは、1991年に壊滅的なサイクロンに見舞われ10万人以上の死者が出たが、20年後に同規模のサイクロンが発生した際には十分な備えができていた。そのため、沿岸に建設されたサイクロンシェルターに約200万人が避難し、3,000人の死者が出たものの20年前に比べその数を大幅に抑えることができた¹⁴⁷。

本章では、「リスクの評価と対応力の強化」「人や資産の保護」「耐性の強化」「リスクの低減」「資金調達・保険制度の整備」など、アジアにおける主な適応策について取り上げる。ただし、その内容はこれらの対策を断定するものではなく、あくまでもアジアにおいて有効と思われる適応策に関する指針を示す。効果的な適応策を実行するためには、ベストプラクティスの共有や域内の資金調達メカニズムの構築支援など、ステークホルダー間の連携が不可欠となる。適応策については、何を今保護し何を後回しにするのか、あるいはどこに投資するのか、どこから撤退するのかといった難しい選択を迫られる。また、上述した連鎖的に拡大する気候変動リスクの特性を考慮することも重要となる。本章では、50の適応策事例から得た学びについて説明し、上述した5つの適応策への意味合いを総合的に考察する。

5つの適応策はアジアの国々との関連性が高く、すでに展開されているものも含めさらに規模を拡大させていく余地がある

今回、アジアのGDPおよび人口の90%以上を占める主要14カ国における約50の適応策のケーススタディを実施した結果、マッキンゼーがグローバルの研究を通じて特定した5つの適応策（「リスクの評価と対応力の強化」「人や資産の保護」「耐性の強化」「リスクの低減」「資金調達・保険制度の整備」）の有効性が確認された（図表20）¹⁴⁸。この中にはすでに実施されているものもあるが、規模を拡大あるいは加速化させる余地がある。

¹⁴⁵H. Damon Matthews et al., "Focus on cumulative emissions, global carbon budgets, and the implications for climate mitigation targets," *Environmental Research Letters*, Volume 13, Number 1 (2018年1月). David Archer, "Fate of Fossil Fuel CO₂ in geological time," *Journal of Geophysical Research*, Volume 110 (2005年3月). H. Damon Matthews & Susan Solomon, "Irreversible does not mean unavoidable," *Science* Volume 340, Issue 6131 (2013年4月)

¹⁴⁶インフラ投資は、交通(道路、鉄道、航空路、航路)、エネルギー、通信、水・衛生(ダム、灌漑、治水対策工事を含む)の4つの分野の設備投資として定義。Meeting Asia's Infrastructure Needs, ADB (2017年)

¹⁴⁷Saleemul Haq, *Adapting to climate change: A challenge and an opportunity*, World Resources Institute (2010年)

¹⁴⁸Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)、McKinsey Global Institute(2020年1月)

図表20

アジアでは気候災害の種類により適応策は異なる

検証したケースの数¹

低 高

■ 当該の気候災害には関連のない対策

A、B、Cの事例については詳細後述

適応策	例	居住性・作業性		食料システム		有形資産およびインフラサービス			
		極暑による影響	水ストレス	干ばつ	河川・内水氾濫	海面上昇・高潮	暴風雨・台風	竜巻などの突風	森林火災
リスクの評価と対応力の強化	リスク認識を向上								C
	リスクを勘案	A							
	報告体制を強化								
	計画および監視	A			E				
人や資産の保護	資産の管理体制を強化				J				C
	グリーンインフラを整備					H			
	グレーインフラを整備 ²						G		
耐性の強化	バックアップ機能を強化		B, I	F		D			
	分散化								
リスクの低減	既存のリスクを管理	A							
	将来のリスクを低減					K			
資金調達・保険制度の整備	公的資金や開発援助融資を活用								
	民間からの投資を誘致								
	保険へのアクセスを拡大			L					

アジアでは気候災害の種類により適応策は異なる(続き)

適応策のケーススタディ

A. インド: アーメダバードは人口約700万人の都市。2010年5月の致命的な熱波で1日で300人(合計1,344人)が死亡したことを受け、同市は、極暑対策の実行、調整、評価の枠組みとして高温警報システムやクールルーフ戦略などのヒート・アクション・プラン(HAP)を策定した

B. インド: 乾燥地帯にあるラダック地方では灌漑に氷河融解水を利用しているが、気候変動の影響により同地方の自然の氷河が縮小している。エンジニアのソナム・ワンチュク氏のアイデアにより、冬の間(それまでは利用していなかった)雪や氷から溶けた水を収集し、農家が灌漑水を最も必要とする春まで「氷のストウパ」の形で貯蔵している

C. オーストラリア: ビクトリア州教育・訓練省は、森林火災と危機管理対策の本格的かつ包括的な見直しを開始した。重要なプロジェクトの一つとして「School Bushfire Protection Project」が挙げられる。これは、学校の生徒や職員を森林火災から実践的かつ適時に保護できるように、対策の強化を図ることを目的とした取り組みである。コンソーシアムには、火災リスクのモデル化、絶滅危惧種の評価、森林火災が発生しやすい地域のエンジニアリングソリューションの専門家が名を連ねている

D. バングラデシュ: 気候変動により河川氾濫や高潮の被害が激化している。パプナ地区にある人口2,500人の村、Charbhangaの農家は、毎年、田畑が浸水するたびに農作業ができなくなる状況にあった。そこで、水生植物をベースとして野菜を育てる浮遊農場を作り、そこで野菜の水耕栽培を行う戦略をとった。浮遊農場の周りには魚が生息し、野菜畑は川岸とロープでつながれている

E. 日本: 気候変動により洪水の発生確率が上昇するため、東京メトロは、衛星降水観測データを活用して都内の地下鉄への氾濫水の流入を防ぎ浸水被害を最小化し、乗客の安全を守るために設備強化や避難誘導などの緊急時の対応力向上を図るなど、様々な対策を講じて地下鉄の運行への影響を最小限に抑えるよう努めている

F. 中国: この10年間で、水不足の深刻化と農業生態系で頻発する干ばつにより、雲南省および広西チワン族自治区の農作物の収量に大きな被害が生じた。農業従事者は、科学者の支援のもと、参加型でトウモロコシの育種を行い、現在のハイブリッド品種より干ばつや害虫に対する耐性が高く、収量、農業形質、旨味に優れた新種のトウモロコシを保存、改良、開発している

G. フィリピン: 2015年、IOM(国際移住機関)とユニセフ(国連児童基金)は、2013年にフィリピンを襲ったスーパー台風ハイエンで甚大な被害を受けた地域の一つである東サマール州を対象として、防災ネットワークの整備促進プログラムを立ち上げた。このプログラムでは、2つの目的に応じた避難所を建設する計画があり、洪水や台風、地震などの自然災害の避難所として、また避難所として使用されていない時には地域活動の多目的施設として利用する予定となっている

H. ベトナム: エビの養殖池の開発により、ここ30年間でマングローブが半減した。マングローブは、暴風雨や海面上昇、浸食に対する自然の防波堤としての役割を果たす。マングローブへの影響を軽減するため、オランダ開発機構(SNV)および国際自然保護連合が合同でMAMプロジェクトを立ち上げ、マングローブ林の復元と保護を図るとともに、小規模エビ養殖業者の生計と復元力の向上にも努めている

I. 韓国: 地球温暖化が進むにつれて土壌の浸食や水不足が深刻化し、農作物の収量が減少している。屋内垂直農場のスタートアップ企業であるNextOn社は、韓国中部に位置する忠清北道で使用不可となった高速道路用トンネル(急カーブが危険とされ2002年に閉鎖)を政府から借り受け、地下空間に奥行き2,000フィート(約610m)の縦型(垂直式)の植物工場を設置。サラダ用の葉野菜やイチゴなどを栽培している

J. マレーシア: クアラルンプールでは鉄砲水が増加しており、ほぼ毎年発生している。そのためマレーシア政府は、河道拡幅、道路トンネルの設置、貯水池への導水ルート確保などの治水対策を講じている。これらの取り組みにより、治水容量が300万立方メートル増え、ほぼすべての洪水に十分対応可能となる

K. インドネシア: 首都ジャカルタは、海面上昇などにより2050年までにその大部分が水没する危機に瀕している。2019年、インドネシア政府は首都をジャワ島からボルネオ島に移転する計画を発表した。新首都は政治の中心となるが、ジャカルタは引き続きビジネスと経済の中心を担う

L. タイ: タイ北東部の農家は、異常気象などの影響により大幅な収入減少に苦しんでいた。そこで損害保険ジャパン日本興亜(現・損害保険ジャパン)は、天候インデックス保険の販売を開始した。この保険は、気温や降水量などの天候指標があらかじめ定められた条件を満たした場合、あるいは異常気象が発生した場合に農家に保険金が支払われるというものである

1. 合計50件を調査。複数の対策を有するケースもある

2. グレーインフラとは、地域やインフラ、人の気候災害に対する適応力を強化するための技術やエンジニアリングのソリューションを指す

資料: マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

5億～ 10億ドル

100年に一度級の洪水が
ホーチミンで発生した
場合の2050年にかけての
インフラ被害額

リスクの評価と対応力の強化

気候変動リスクは、空間的(局所的に顕在化)で連鎖的、逆進的かつ非線形的な影響をもたらす。そのため、気候変動リスクの大きさと脆弱性の度合いを適切に分析することが重要になる。例えば、ホーチミン市では、100年に一度級の洪水による影響がより深刻化する可能性があるため、インフラ被害額は大きくなると予測される。RCP8.5シナリオでは、インフラ被害額は現在の2億～3億ドルから2050年には5億～10億ドルに拡大する見込みである¹⁴⁹。このように増大し続ける逆進的な影響から、今後考えられる気候変動を考慮して定期的に投資の見直しを行い、高度な確率モデリング手法を活用して計画を策定する必要があることが分かる。都市部については、気候変動リスクを都市計画の重要な要素として捉える必要がある。サプライチェーン拠点や資本配分についての確かな意思決定が求められる企業についても同様のことが言える。本レポートは物理的リスクに焦点を当てているが、包括的な戦略を策定する際には、物理的リスクだけでなく、一部の業種に大きな影響をもたらす可能性がある移行リスクや賠償責任リスクの評価も行う必要がある。

アジアでは、すでに多くの企業や公的機関がリスク評価に着手している。その一例として、東京メトロは、衛星降水観測データを活用して都内の地下鉄への氾濫水の流入を防ぎ浸水被害を最小化し、乗客の安全を守るために設備強化や避難誘導などの緊急時の対応力向上を図るなど、様々な対策を講じて地下鉄の運行への影響を最小限に抑えるよう努めている¹⁵⁰。またもう一つの例として、1日で300人の死者を出した2010年の熱波を受けてインドのアーメダバード行政区が導入したヒートアクションプランが挙げられる¹⁵¹。インドで初めて策定された同プランには、極端な暑さがもたらす危険に対する住民の意識を高める方策も盛り込まれている。現在は、7日間の予報に基づく早期警戒情報システムの整備やクールルーフによる日射反射率向上対策に取り組んでおり、熱波期間中に水や経口補水タブレットを配布する体制も確立されている¹⁵²。

しかし、できることはまだまだたくさんある。民間企業や公的機関の意思決定の際に情報システムやサイバーシステムが考慮されるようになったのと同様に、気候変動も重要な意思決定の要素として捉える必要がある。組織は、気候変動リスクを考慮した新たなマインドセットを取り入れ、リスクを診断するために必要なツールや能力を構築し、気候変動のリスクを踏まえて意思決定を下すために、思い切った措置を講じる必要がある。

本レポートで示している通り、十分な根拠に基づいて定量的にリスクを把握することは難しい。企業や地域社会は気候変動リスクの評価を始めているが、まだやるべきことはたくさんある。理解が不十分であるがために、リスクの高い地域のリスクの高い資産への資本流入を促してしまったり、ステークホルダーが準備不足に陥る可能性を高めてしまったりする場合もある。その結果、金融市場や社会経済システム全体のリスクや潜在的な影響を大幅に増大させることになる。しかし同時に、気候変動は機会を伴うものでもあるため、検討する必要がある。その機会の例としては、新たな農地や観光地などの物的環境の変化や、気候変動リスクを管理するための新たな技術やアプローチなどがある。

最も大きな課題の一つとして、誤ったモデルを用いてリスクを定量化することが挙げられる。これは、資本配分の意思決定に活用する財務モデルから構造設計に使われるエンジニアリングモデルまで、多岐にわたる。すでに述べたように、グローバルおよび地域レベルの気候モデルや、排出経路の根底にある前提、そして気候災害による潜在的な物理的・経済的損害の導出には不確実性を伴う。

¹⁴⁹ Jonathan Woetzel, Dickon Pinner, Hamid Samandari, Hauke Engel, Mekala Krishnan, Brodie Boland, and Peter Cooper, Can coastal cities turn the tide on rising flood risk?, McKinsey & Company (2020年4月)

¹⁵⁰ Using Radar to Scan rainclouds in 3D to Protect Subways from Flooding, The Government of Japan

¹⁵¹ Kim Knowlton et al., "Development and implementation of South Asia's first heat-health action plan in Ahmedabad (Gujarat, India)," International Journal of Environmental Research and Public Health, Volume 11, Issue 4 (2014年4月)

¹⁵² 日射反射率とは、太陽光に含まれる近赤外線領域の光を反射する能力を表す。例えば、都市部については、外壁や道路の色を白など遮熱効果の高い色に塗り替えるなどして、日射反射率を高めることなどが考えられる。Thomas R. Knutson, Fanrong Zeng, and Andrew T. Wittenberg, "Multimodel assessment of regional surface temperature trends:CMIP3 and CMIP5 twentieth century simulations," Journal of Climate, Volume 26, Number 22(2013年11月)、Markus Huber and Reto Knutti, "Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance," Nature Geoscience, Volume 5, Number 1(2012年1月)、Ron L. Miller et al., "CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2," Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Volume 6, Number 2(2014年6月)

これらの不確実性の影響を無視することはできないが、過去の比較的安定した気候や経済データに基づく現行の気候モデルに依存し続けると、「モデルリスク」はさらに高まる。

人や資産の保護

第1章で示した分析結果によると、アジアでは、2050年には、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではない地域に住む人口は6億～10億人となり、1年間に発生する河川氾濫で被害を受ける世界の資産のうち約75%をアジアが占める見通しである。このことから、人や資産を守ることが重要となる。

人や資産を保護するための対策としては、自然資源あるいは自然環境や生態系の復元などの「グリーン」インフラ、そして建物の基礎部分のかさ上げや防災シェルターの設置など災害被害を減らすための「グレー」インフラの強化などが挙げられる。

2015年、IOM(国際移住機関)とユニセフは、2013年にフィリピンを襲ったスーパー台風ハイエンで甚大な被害を被った地域の一つである東部サマールを対象として、防災ネットワークの整備促進プログラムを立ち上げた。同プログラムでは、災害に強い施設の建設を支援し、世界各地のベストプラクティスを取り入れながら、フィリピンの建設技術や入手可能な建材を考慮した設計を行い、フィリピン全土で継続・反復可能な手法を構築した¹⁵³。

また、日本の精密加工装置・加工ツールのメーカーである株式会社ディスコでは、従業員の避難訓練や、工場を守る外周防潮堤の設置、非常用発電機の設置、物流体制の再設計、さらに食料の備蓄を行っている。これらの対策は、2018年に豪雨により同社の広島工場が浸水被害に遭った際に有効性が証明された。過酷な状況に晒されたにも関わらず1日で操業を再開したのである¹⁵⁴。クアラルンプールでは毎年鉄砲水が発生しているが、マレーシア政府は、河道拡幅や道路トンネルの設置、貯水池への導水ルートの確保などの治水対策を講じている。これらのプロジェクトにより治水容量が300万立方メートル増え、1年間で発生するほぼすべての洪水に対応できるようになった¹⁵⁵。

既存のインフラや資産の保護対策には、自然資源やグリーンインフラの開発も含まれる。例えば、マングローブは、台風や海面上昇、土壌浸食に対する天然バリアとして機能し、炭素を貯蔵・隔離できる。さらに、マングローブの生態系は、多くの水生生物や陸生生物の生息地となっており、沿岸地域社会の生活を支える収入源となっている。したがって、政策立案者にとっては、マングローブの破壊を食い止め、再生を促進することが大きな課題となる。ベトナムでは、エビの養殖池の開発により、ここ30年間でマングローブが半減している¹⁵⁶。

このような問題を解決するため、いくつかの国際的な取り組みが進められている。2012年、ドイツ連邦共和国環境・自然保護・建設・原子炉安全省(BMUB)は、MAM(Mangroves and Markets)プロジェクトを立ち上げた。このプロジェクトは、マングローブを保護・再生しつつ、収穫量を伸ばしていけるような持続可能なエビ養殖のバリューチェーンを構築することを目的としており、2019年8月までにメコンデルタの約1万2,600ヘクタールのマングローブを保護し、80ヘクタールを再生している¹⁵⁷。

¹⁵³ Building safe spaces for the community, UNICEF Philippines and International Organization for Migration (2018年)

¹⁵⁴ Corporate report 2018, DISCO Corporation (2018年)

¹⁵⁵ Special Unit for South-South Cooperation, Kuala Lumpur, Malaysia, UNDP

¹⁵⁶ Nguyen Thi Bich Thuy, Case study: Reduced climate change resilience—the need for a new model, SNV Netherlands Development Organization (2019年8月)

¹⁵⁷ MAM-II: Scaling up ecosystem-based adaptation in the Mekong Delta, SNV Netherlands Development Organization

耐性の強化

地域社会や企業、政府機関が異常気象時の混乱を最小限に抑えるために役立つ、代替あるいはバックアップ機能を整備することで、気候変動リスクへの耐性を高めることができる。生産者の場合には、技術革新に加え、投入物や生産ライン、事業分野の多様化が必要になることも考えられる。

耐性強化のための代替機能の整備の一例として、中国西南部の雲南省と広西チワン族自治区が挙げられる。これらの地域は、ここ10年間で、水供給システムへのプレッシャーの高まりや干ばつの頻発により農作物の収量が著しく減少した。しかし、耐性強化プロジェクトを通じて、干ばつや害虫に対する耐性を向上させたトウモロコシの品種が開発された。また、インド西部のマハーラーシュトラ州では、数十年間にわたり続いた大規模な干ばつにより水系が危機的状況にあり、多くの地区で農産物の収量が激減していた。そこで、Tata Trustsが水源の洗浄・回復に取り組む非営利団体のBharatiya Jain Sanghatanaに資金援助を行い、これにより土壌が改善され、地下水位が回復し、収量が増加した¹⁵⁸。

耐性強化を目的とした技術革新の事例もある。インドのラダック地方は、ヒマラヤ山脈の雪解け水を灌漑用水として活用していたが、氷河の減少により、確保できる水の量が減ってしまった。そこで、教育者でありエンジニアでもあるソナム・ワンチュク氏は、雪解け水を貯め1年を通して灌漑用水を供給する「アイス・ストウパ」と呼ばれる人口氷河を設計・構築した¹⁵⁹。一方、バングラデシュの農家は、夏のモンスーンに伴う洪水による被害に直面していたが、川の水位の変化に応じて上下する「浮遊農場」を普及させることで、天候に関係なく農作物を安定的に生産できるようになった¹⁶⁰。

リスクの低減

今回検証した50のケーススタディを見る限り、適応策を採用しているところは少なかったが、リスクを管理するためには重要な手段となる。前述の適応策の中には、気候変動の影響が大きくなるほど適応が難しくなるものもあるため、意思決定者は、地域社会が直面する気候変動リスクを低減するための策を講じる必要がある。例えば、海面上昇や水災害の頻発化で影響を受ける地域の範囲が広がるほど、そこに住む人々も影響を受け、時間とともに適応コストが増大していく。さらに、保護対策や適応策をとりたくても立地条件を満たす土地が見つからないなど、技術上あるいはその他の制限に直面する可能性もある。難しい選択を迫られる場合や、好ましい解決策が見つかったとしても実現が難しい場合もある。このような状況の場合、人や資産を移すことが最適となる場合もある。もう一つの例として、新たにインフラや資産を整備する際には、入念に計画を立て、それらを災害に強い土地に設置することが挙げられる。これは、今後、大規模なインフラ開発が進むことが見込まれるアジアでは特に重要となる。例えば、海拔の低い土地ほど海岸防護にかかる費用は膨大になる¹⁶¹。

移転や防護措置に関する意思決定を下す際には、どの地域や資産にどれくらい投資するのか、今すぐ実行するのか、あるいは先延ばしするのかを検討する必要がある。

また、持ち家がある人や地域社会への影響と、災害後の復興費用や被災者の生活再建支援金などの負担を、天秤にかけて検証する必要もある。アジアは世界で最も貧困人口の割合が高く、貧困層は気候変動に対して非常に脆弱である。したがって、アジアでは、最も脆弱なコミュニティを守り、彼らの声を意思決定に反映させることが極めて重要になる。アセットオーナーは、費用便益分析を活用して、物理的な耐性強化が適切な対策なのか否かを判断することができる。場合によっては、資産の移転や改修が適切な対応策となる場合もある。

¹⁵⁸ Defeating drought, Tata Trusts (2019年)

¹⁵⁹ Ice stupas: Water conservation in the land of the Buddha, India Water Portal (2015年)

¹⁶⁰ Floating gardens in Bangladesh: Technical brief, Practical Action, The Schumacher Centre for Technology and Development (2006年)

¹⁶¹ Nicholas Stern, The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge, UK: Cambridge University Press (2007年)

大規模なリスク低減策の一例としては、インドネシア政府が2019年に発表した首都移転が挙げられる。現在の首都であるジャカルタは2050年に一部地域が水没するとされており、カリマンタン(ボルネオ島)への移転が計画されている¹⁶²。

資金調達・保険制度の整備

アジアではインフラ整備のニーズが増大しているため、適応策のための資金調達が非常に重要になる。アジアが成長の勢いを維持し、貧困を撲滅し、気候変動に対応するためには、インフラ整備に毎年1.7兆ドルを投資する必要がある。アジア開発銀行は、そのうち約2%(年間400億ドル)は域内で増大する気候変動リスクへの適応策に投じる必要があると推計している¹⁶³。

国連環境計画(UNEP)および気候変動適応グローバル委員会(GCA)は、今後数十年間で世界の国々が適応策を講じるために必要となる資金額を試算しているが、発展途上国については2016年時点で年間1,400億~3,000億ドル、さらに2050年にかけては年間2,800億~5,000億ドルまで拡大するとしている¹⁶⁴。またGCAは、2020年から2030年にかけて気候変動に適応するために必要となる資金を1.8兆ドルと試算しており、これは、同期間の総固定資本形成の推計額の1%未満に相当する¹⁶⁵。投資対象としては、早期警戒システムの強化、新設インフラの耐性強化、収量拡大に向けた乾地農法の改善、マングローブの保護、水資源管理能力の強化などが挙げられる。

これらはあくまでもグローバルな推計値であり、実際のコストは、国や地域社会、企業単位で発生するものであるため、それぞれが置かれている経済的状况によっては資金調達が難しくなる場合もあることに留意する必要がある。

1.7兆ドル

アジアで必要となる1年当たりのインフラ投資額の推計

¹⁶² Paige Van de Vuurst and Luis E. Escobar, "Perspective: Climate change and the relocation of Indonesia's capital to Borneo," *Frontiers in Earth Science* (2020年1月)

¹⁶³ Meeting Asia's infrastructure needs, ADB (2017年)

¹⁶⁴ Anne Olhoff et al., The adaptation finance gap report, UNEP DTU Partnership (2016年)

¹⁶⁵ Manish Bapna et al., Adapt now: A global call for leadership on climate resilience, Global Commission on Adaptation (2019年9月)

官民連携(PPP)や国際機関との連携を含め、すべてのステークホルダーが役割を担う必要がある。民間部門には、水、農業、エネルギー、運輸など気候変動の影響を受けやすい資産を数多く保有している分野がある。そして民間部門は、資本資源だけでなく、技術力や革新能力の面でも重要な役割を果たしている¹⁶⁶。一方、公的部門は、WRIが示唆しているように、リスクの低減(大きなリスクを伴う初期投資への関与など)や投資の誘導、官民双方の利益の最大化(最小限のコストで最大の経済的・環境的利益を創出するなど)を通じて、民間資本の流入を促すことができる¹⁶⁷。

政府機関は、直接的あるいは間接的な介入手段を活用できる。直接的な介入手段としては、融資や保証などによる民間投資の促進が挙げられる。間接的な介入手段としては、民間参入を促す法規制の制定、プロジェクトの資金調達のための債券市場の創設、気候変動対策に特化した多国間基金の創設などがある¹⁶⁸。

最近では、気候変動適応支援のための画期的な金融商品が数多く登場しており、企業や政府機関は、ナイル川デルタの洪水防止策やグレートバリアリーフの保全策の資金調達のために気候変動債を発行している。例えば、地方債に大災害債券(CAT ボンド)を組み込むことで、評価が困難な気候変動リスクを気にすることなく地方債を保有できるようにするなど、投資を促す画期的な手法が導入されている。

アジア開発銀行が2008年に設立した気候投資基金(CIF: Climate Investment Fund)は、同行の気候変動プログラムおよびアジア太平洋地域における気候変動対策のための譲許的融資の大きな資金源となっている。CIFは民間部門からの資金調達を順調に進めており、本レポート執筆時点で運用資産は約16億ドルに達している。政府や国際開発金融機関、民間部門からの資金調達については、支援者がCIFに対して約束した財源を活用している¹⁶⁹。投資先の一例としては、カンボジアの雨水を集水利用した点滴灌漑方式による高付加価値作物栽培プロジェクトが挙げられる。このプロジェクトを通じて、農家は、用水路や湖、河川や地下貯水池から水を引き込む必要がなくなり、1年を通じて灌漑用水を確保できるようになる¹⁷⁰。

保険も気候変動に適応するための重要な手段の一つである。研究者によると、現在、保険でカバーされている損害は50%程度で、アジアは過小保険の状態にあるという。保険モデルによると、発生確率が1%以上の異常気象が起きた場合、過小保険の割合は最大60%となり、発生確率が0.4%の異常気象が起きた場合は、70%にまで跳ね上がる¹⁷¹。

経済協力開発機構(OECD)の2018年の発表によると、OECD諸国の保険加入率は平均8.9%であったが、アジア太平洋地域のOECD加盟国4カ国のうち韓国を除く3カ国は平均値にも達していなかった。また、アジアのOECD非加盟国のほとんどについても、同様に保険普及率はOECD諸国の平均を下回っていた¹⁷²。

¹⁶⁶ Developing a private sector portfolio, ADB and the Climate Investment Funds (2016年)

¹⁶⁷ A once in a generation opportunity, World Resources Institute (2012年)

¹⁶⁸ Climate change adaptation and the role of the private sector, Climate Action Network Europe (2013年)

¹⁶⁹ ADB Climate Change and Disaster Risk Management Division, Country fact sheets, second edition, ADB and the Climate Investment Funds(2016年)

¹⁷⁰ ADB and the Climate Investment Funds, Developing a private sector portfolio (2016年)

¹⁷¹ Lucia Bevere et al., "Natural catastrophes and man-made disasters in 2018: Secondary perils on the frontline, Swiss Re Institute, Sigma, Number 2 (2019年), Global modeled catastrophe losses, AIR Worldwide (2018年11月)

¹⁷² "Insurance indicators: Penetration," OECD

衝撃を緩和する機能を持つ保険がなければ、災害後の復旧・復興活動は困難になり、ノックオン効果が生じやすくなる¹⁷³。また、保険が不足あるいは適切な保険がない場合には、気候変動に対する耐性が弱まることになる。適切な保険制度を通じて、リスクについて適切なシグナルを送り、特定の地域の開発を避けるよう注意喚起するなど、行動変容を促すことができる。パラメトリック型保険や大災害債券(CAT ボンド)などは、気候災害への備えを提供し、経済的な被害を最小限に抑え、災害発生後の早期復旧を支援するものである。

アジア太平洋地域における取り組みの一つとして、日本の保険会社である損害保険ジャパン日本興亜(現損害保険ジャパン)が2015年にタイで販売を開始した天候インデックス保険が挙げられる¹⁷⁴。この保険は、気温や降水量などの天候指標があらかじめ定められた条件を満たした場合、あるいは異常気象が発生した場合に農家に保険金が支払われるというものである。

保険における一つの課題として保険料があり、気候変動リスクが高まるほど高額になる恐れがある。リスクの低減や移転、あるいは保険料の助成がなければ、特定の地域の一部のリスク層は保険に加入することが難しくなり、補償の格差がますます広がることになる。そのため、(一定の状況下ではすでに提供されているが)リスクや経済価値を適切に評価したうえで公的助成金を付与するなど、画期的なアプローチが必要となる。特にリスクの高い地域を対象とする保険については、慎重に検討する必要がある。一つのアプローチとしては、リスクを適切に反映した保険料を設定し、低所得層でも手が届くようにバウチャープログラム(目的を限定して個人に補助金を支給)を設けることなどが挙げられる。

また、保険業界は、保険期間に関するミスマッチも解消する必要がある。例えば、自家所有者は保険料をずっと変わらないものとして捉えているが、保険会社は災害や被害の深刻化に応じて、毎年保険料を見直す可能性が出てくる。これは、保険料負担が増加し続けているサプライチェーンについても同じことが言える。そして、民間保険と公的保険のトレードオフ、個人の場合は自家保険をいつかけるべきかを慎重に検討する必要がある。また、特に災害が多い地域に関しては、新たな建築基準法や屋外労働時間に関する規則の策定など、リスクを大幅に低減する形で保険引受の可否を判断する必要も出てくる。これは、耐火性建築物を増やすために各都市が定めている消防規則に似たもので、一定の条件を満たさない限り、保険の適用を受けられないとするものである。

気候科学の知見によると、今後10年間で温暖化が進むことは不可避であるため、政策立案者やビジネスリーダーは適応策を講じなければならない。本章では、意思決定者が考慮すべき重要な施策について概説したが、適応策だけでは十分ではない。気候科学の知見によると、気候変動リスクの増大を防ぐためには緩和策の実施も不可欠であるという。世界全体で有効な緩和策が実施されれば、適応策の必要性が少なくなる可能性もある。本レポートの最終章では、緩和策のケーススタディを検証し、アジア諸国が検討すべき対応策を示し、克服すべき実行上の課題やリスクを取り上げる。

¹⁷³ Goetz von Peter, Sebastian von Dahlen, and Sweta C. Saxena, Unmitigated disasters? New evidence on the macroeconomic cost of natural catastrophes, BIS Working Papers, number 394 (2012年12月)

¹⁷⁴ Climate Resilience and the Role of the Private Sector in Thailand: Case Studies on Building Resilience and Adaptive Capacity, BSR (2015年9月)



Boy charging electric car.
© Michael H/DigitalVision/Getty Images

4. 有効な気候変動対策

その2: 緩和策

気候変動が不可避である今、適応策を講じることは重要であるが、気候変動リスクの増大を防ぐには十分とは言えない。気候科学の知見によると、温室効果ガスの純排出量をゼロにする以外、温暖化やリスクの増加を食い止める方法はない¹⁷⁵。アジアは排出量を削減する緩和策において重要な役割を担っている。なぜなら、世界のGHG排出量に占めるアジアの割合は、ここ30年間で約25%から約45%に増加しているためである¹⁷⁶。排出削減のための国際的な枠組みであるパリ協定では、2100年の地球の平均気温上昇を、産業革命以前に比べて2℃未満に保つとともに、1.5℃に抑える努力をすることを目標としている¹⁷⁷。気温上昇を1.5℃より低く抑えるためには、カーボンバジェット(炭素予算)を全世界で2018年の水準の570GtCO₂に抑える必要がある¹⁷⁸。これを実現するためには、2030年までに排出量を2010年比で50~55%削減し、2050年には排出量ゼロを達成する必要がある¹⁷⁹。アジアは世界全体の排出量の多くを占めており、経済成長に伴い排出量が増加する可能性があることから、アジアが下す決断によって世界の排出経路が決まるといっても過言ではない。

オーストラリアや中国、インド、インドネシア、日本、韓国などのアジア主要国は、すでに、2030年、および2030年以降のGHG排出削減目標を設定している。これら6カ国はアジアの全排出量の約90%を占めている。例えば、オーストラリアは、2030年までに2005年比でGHG排出を26~28%削減するという目標を掲げている¹⁸⁰。また、中国政府は、2020年9月に、2030年までに排出量を減少に転じさせ、2060年までにカーボンニュートラルを達成するという目標を打ち出した。日本や韓国などその他の国々も中国に続き同様の目標を発表している¹⁸¹。

¹⁷⁵ 「排出量実質ゼロ」とは、GHGの発生源を排除する、GHGを排出する技術を排出量ゼロの技術に置き換える、あるいは人為的な排出量と森林等の吸収源による除去量との間の均衡を達成することで年ベースでのGHG排出量をゼロにすることを意味する。気候変動による不可避な温暖化(ゼロエミッションコミットメント、またはZEO)や気候安定化、排出量実質ゼロや炭素予算の仕組みについては、H. Damon Matthews et al., "Focus on cumulative emissions, global carbon budgets, and the implications for climate mitigation targets," *Environmental Research Letters*, Volume 13, Number 1(2018年1月)、H. Damon Matthews and Ken Caldeira, "Stabilizing climate requires near zero emissions," *Geophysical Research Letters*, Volume 35, Issue 3 (2008年2月)、Myles R. Allen et al., "Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne," *Nature*, Volume 458, Issue 7242 (2009年4月)を参照

¹⁷⁶ AR5GWP20iに基づく

¹⁷⁷ Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change (2015年)

¹⁷⁸ マッキンゼーの分析は、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の調査データに基づいており、2018年1月1日時点の残炭素予算(570GtCO₂)を使用している。この予算内に収めることで、気温の上昇幅を1.5℃未満に抑えられる確率は66%となる。IPCCの手法やその他の炭素予算の推計値との違い(420GtCO₂の場合は気温上昇を1.5℃未満に抑える確率が66%、580GtCO₂の場合は50%となるなど)については、Myles R. Allen et al., Special report: Global warming of 1.5°C, IPCC (2018年)および"Climate math: What a 1.5-degree pathway would take" *McKinsey Quarterly* (2020年4月)を参照

¹⁷⁹ "Climate math: What a 1.5-degree pathway would take," *McKinsey Quarterly* (2020年4月)

¹⁸⁰ AR5GWP100iに基づく

¹⁸¹ "South Korea joins Japan in making 2050 carbon neutral pledge", *Nikkei Asia* (2020年10月28日)

アジアにおける緩和策に関する機会と課題の分析を、4つの国の業界レベルでの脱炭素化への取り組みのケーススタディに基づいて行った(インドの石炭火力発電、中国の鉄鋼業、インドネシアの農業・林業、日本の交通業)。ここでは、現在の脱炭素化のトレンドを把握し、新たな技術の可用性や適用性を含めた脱炭素化に向けた最良の機会を特定し、脱炭素化に伴うコストや移行リスクの程度を理解することを目的としている。鉄鋼業界における水素活用技術のように、分野によっては、脱炭素化を進めるために、大規模展開が可能となる新技術への継続投資が不可欠となる場合もある。また、技術によっては、実現や大規模展開が可能でも、その他の課題やリスクに対処する必要があるものもある。

各分野の脱炭素化の可能性を検証したところ、技術によっては、すでに運用可能で高い収益が期待できるものもあるが、初期投資額が大きいことから、既存の減価償却資産の耐用年数が長い場合は特に、加速的に展開することは難しい。例えば、インドでは、太陽光発電所のMWh当たりの運営費(OPEX)はすでに石炭火力発電所と同等の水準に達しており、2030年までには石炭火力発電所を20%下回る水準になると予想されている¹⁸²。しかし、財政的な観点から見て、石炭火力発電所が耐用年数を迎える前に再生可能エネルギーへの転換を進めるには、根拠としてまだ不十分である。さらに、脱炭素化の取り組みは、既存の生産拠点やサプライチェーンに大きな影響をもたらす。OEMは新たな能力の構築やオペレーションの転換を余儀なくされる。例えば、日本の自動車メーカーの多くは、電気自動車用のバッテリーを確保すべく、バッテリーサプライヤーとの合併事業の設立などを進めている。また、脱炭素化の取り組みは、貧困・脆弱層の生活にも影響を及ぼす。例えば、新たな農法への転換に伴い、新たなサポートや能力開発が必要になる場合もある。脱炭素化に伴うリスクを考えると、インセンティブや助成金を通じて普及促進を図り、大きな影響を受ける貧困・脆弱層の能力構築や財政支援により移行リスクを抑えることが不可欠となる。

幸いなことに、アジアは、様々な理由から、気候変動への適応策や緩和策の推進を主導していくうえで有利な立場にある。その一つとしては、電力を中心としたインフラ整備の大きな機会が挙げられる。アジアの政策立案者は、経済発展に取り組むと同時に、インフラに関わるニーズや排出量削減機会のシナジー効果を追求できる。アジアには数多くの世界最大規模のイノベーター企業が拠点を置いており、世界の研究開発費総額のほぼ半分をアジアが占めている。さらに、過去10年間にわたり、テクノロジー企業の売上高やベンチャーキャピタル投資額、研究開発費、特許出願件数の伸び率に対する寄与度は、アジアが最も大きい¹⁸³。アジアは、この勢いに乗って、緩和策に有用な高度な技術ソリューションを開発・提供することができる。

¹⁸² McKinsey Global Energy Perspective 2020:Reference case

¹⁸³ Oliver Tonby, Jonathan Woetzel, Noshir Kaka, Wonsik Choi, Jeongmin Seong, Brant Carson, and Lily Ma, How technology is safeguarding health and livelihoods in Asia, McKinsey & Company (2020年5月) 参照

マッキンゼーは、2030年および2050年までの主な排出源とCO₂削減対策に基づき、アジアの脱炭素化を促進するための4つの主要な施策を特定した(図表21)。これらの取り組みは世界のどの国にとっても重要であるが、アジアでは特に重要となる。アジアで検討すべき主な脱炭素化の施策として以下が挙げられる。

- **石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行:** アジアは、再生可能エネルギーの生産能力がクリティカルマスの達しており、脱炭素化に向けて大変重要な役割を果たす立場にあるため、世界に大きな影響を与える可能性がある。2040年には世界の電力インフラ関連投資額に占めるアジアの割合は約50%になる見込みで、電力需要の拡大に伴い、再生可能エネルギーのコストダウンが進む可能性がある。
- **産業部門における脱炭素化の推進およびCO₂の回収・利用・貯留(CCUS)技術の高度化:** 世界最大規模であるアジアの産業部門は、アジア最大のGHG排出源であり、アジア全体のCO₂排出量の35%以上を占めている¹⁸⁴。さらに、現在、世界の鉄鋼・セメント業界のCO₂排出量全体の約8割をアジアが占めている¹⁸⁵。したがって、世界の産業部門で脱炭素化を推進するためには、これら2つの業界の事業構造を転換する必要がある。
- **農業・林業の改革:** 農業・林業は、アジアにおけるCO₂排出量の10%、メタン(CH₄)排出量の40%以上を占めている。そのため、農業の脱炭素化を進め、森林破壊を防ぐことにより、大きな排出量削減機会が生まれる。アジアは世界最大の穀倉地帯で、米の収量は世界全体の約90%、トウモロコシと小麦については30%以上を占めている。また、森林再生の大きなポテンシャルが存在することから、農業・林業の脱炭素化に取り組むことで、排出量を大幅に低減できる可能性がある。
- **日常生活の電化および自動車や建築物の脱炭素化:** アジアの運輸分野や建築物が世界全体のCO₂排出量に占める割合は30%超となっている¹⁸⁶。その一方で、アジアは、電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV)などの脱炭素化技術で世界をリードしている。

しかしながら、上記を実現するには大きな課題がいくつかあり、アジア固有のものも含まれる。例えば、石炭の場合、再生可能エネルギーに移行する際には、新設されたばかりの石炭火力発電所に投じられた莫大な資金を考慮する必要がある。本章では、各施策とケーススタディについて詳しく説明する。そして最後に、日本に焦点を合わせてこれらの知見を総括し、CO₂の排出量が多い部門が削減すべき排出量を含む低減策を提示する。

¹⁸⁴ McKinsey Global Energy Perspective 2019:Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)。EDGAR 2015、FAOSTAT、FAO (2015年)

¹⁸⁵ McKinsey Global Energy Perspective 2019:Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)

¹⁸⁶ AR5GWP20に基づく

図表21

アジアでは、炭素排出量が多い主なセクター全体に独自の脱炭素化機会が存在する

アジアでの温室効果ガス(GHG)の年間総排出量

低 高

MtCO₂e¹; 2016年

国名 ²	セクター別							総排出量		
	電力	産業	農業	森林伐採	運輸(自動車)	建築物	廃棄物処理	CO ₂	CO ₂ 以外	GHG
中国	4,023	7,732	1,689	4	970	628	1,017	10,338	5,726	16,064
インド	1,060	1,327	1,912	34	288	141	758	2,249	3,271	5,520
インドネシア	181	742	456	1,115	147	26	237	1,630	1,274	2,904
日本	484	422	64	0	244	118	31	1,214	148	1,363
オーストラリア	188	512	290	10	111	15	88	441	773	1,215
パキスタン	43	183	470	0	50	19	90	192	662	854
韓国	279	233	37	0	153	53	46	675	127	803
タイ	93	220	186	15	92	7	59	320	352	672
ミャンマー	7	44	226	321	5	4	28	345	289	635
ベトナム	78	209	193	3	42	12	60	233	364	597
マレーシア	106	199	24	52	73	5	46	288	218	506
フィリピン	54	77	176	1	38	6	81	130	304	435
バングラデシュ	34	76	226	5	12	9	71	86	348	434
ニュージーランド	3	19	111	1	18	2	18	37	134	171
合計	6,634	11,995	6,061	1,561	2,242	1,046	2,631	18,178	13,992	32,170

主要統計データ	電力業界はGHG全体の約20%以上を排出。アジアで電力業界が排出するGHGの約90%は石炭発電に由来(世界では約70%)	アジアで産業部門が排出する単位GDP当たりのGHGは、世界と比べて約60%高い。世界の鉄鋼・セメント業界のCO ₂ 排出量全体の約8割をアジアが占めている	アジアの農業と森林伐採は、GHG全体の20%以上を排出している。農業は世界のメタン排出量の約20%を占めている	アジアの運輸分野や建築物は世界全体のGHGの三分の一を占めている
脱炭素化を見込める主要領域	電源構成の石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行。アジア地域での再生可能エネルギーの生産能力をクリティカルマスまで高めて規模を拡大し、コストダウンを図る(2040年までに、世界の電力投資の約50%がアジアで実施される見込み)	産業部門における脱炭素化の推進およびCO ₂ の回収・利用・貯留(CCUS ³)技術の高度化。アジアの産業部門は世界最大規模であることから(中国だけで世界の鉄鋼生産の約50%を占める)、CCUSへの迅速な投資や大規模な炭素貯蔵を実現できる可能性あり	農業・林業の改革。世界の主要な穀倉地帯(米の約90%、トウモロコシと小麦の30%以上はアジアで生産)であることから、大規模に森林再生を実施できる可能性あり(約45GtCO ₂ を吸収可能)	日常生活を電動化することによる自動車や建築物の脱炭素化。アジアは、特に電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV) ⁴ などの脱炭素化技術で世界をリードしている(世界のEV/バッテリー市場で圧倒的なシェアを獲得し、政府主導でFCVの普及拡大を推進している国もある)
アジアにおける課題(例)	運転年数の浅い石炭火力発電所が大半を占めている。脱炭素化は国の発電所の稼働年数に大きく依存する。アジアで新設した発電所を廃炉し脱炭素化するには、莫大な設備投資が必要となる	世界の鉄鋼・セメント業界で圧倒的なシェアを占めている。脱炭素化を加速し、かつ世界の生産需要を満たすには、新たなソリューション(CCUS、水素・バイオエネルギーなど)を拡張する必要がある	農業への依存度が高い。脱炭素化に向け、農業手法を変革(森林伐採の停止など)すると同時に、アジアの人々の生活にとって不可欠な食料産業を保護する必要がある	インフラへの莫大な投資が必要。ICEからBEV/FCVへ移行するうえで、大規模なインフラ整備が必要となる

1. 温室効果ガス。CO₂以外の温室効果ガスの排出量は、IPCC第5次報告書(AR5)より地球温暖化係数の20年間累積値(WP20)によりCO₂eに換算
 2. このヒートマップはアジア地域最大のCO₂排出国を示すことを目的としているため、カンボジアとラオスは含まれない。この14カ国で、同地域のGHG総排出量の95%以上を排出している
 3. CO₂の回収・利用・貯留
 4. EV: 電気自動車、FCV: 燃料電池自動車
 注記: 端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない
 資料: EDGAR (2008年、2015年)、FAOSTAT (2015年)、Global Energy Perspective 2019: Reference Case, McKinsey Energy Insights(2019年)、マッキンゼー1.5Cシナリオ分析、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行

アジアの電力部門は域内のCO₂排出量の約35%を占めており(世界全体での電力部門の排出割合は約30%)、そのうちの90%を石炭火力発電所が占めている(世界全体での石炭火力発電所の排出割合は70%)¹⁸⁷。そして、2040年には世界の電力インフラ関連投資額に占めるアジアの割合は約50%になる見込みで、アジアはエネルギー部門で緩和策を主導する立場にある¹⁸⁸。アジアでは、経済のさらなる発展や人口の拡大、気候変動に伴うエアコン需要の高まりにより、エネルギー需要の増加が見込まれている。好材料としては、再生可能エネルギーへの移行が進んでいることが挙げられる。例えば、中国はすでに世界最大規模の再生可能エネルギー市場となっており(世界全体の2,500GW規模の発電容量のうち750GW以上を占めている)、再生可能エネルギーへの投資額は世界全体の投資額の47%を占めている¹⁸⁹。

アジアにおける石炭火力発電から再生可能エネルギー発電への移行の機会と課題を理解するために、インドの電力部門を詳しく検証した。インドでは、石炭火力発電は発電量全体の約75%、電力部門のCO₂排出量全体の90%以上を占めている。そして、同国のエネルギー需要は2050年には中国を上回るとされている¹⁹⁰。そのためインドでは、多くの人が利用できるよう料金を低く抑えることで増大するエネルギー需要に対応し、石炭火力への依存度を下げることが今後数十年の課題となる。

マッキンゼーのEnergy Insightsの基準ケースによると、太陽光発電や風力発電の急成長に伴い、インドにおける石炭火力発電の割合は2030年には60%、2050年には20%にまで減少する見込みである¹⁹¹。それでもなお、石炭は3番目に大きなエネルギー源であり続ける。

ここでは、2030年および2050年にかけて垂限界圧の石炭火力発電所を廃止するという2つのシナリオを検証し、CO₂排出量および必要となる投資額への潜在的な影響を推計する。

50%

2040年にかけて世界の 電力インフラ関連投資額に 占めるアジアの割合

¹⁸⁷ McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)、EDGAR 2015、FAOSTAT、FAO (2015年)、“Climate math: What a 1.5-degree pathway would take,” McKinsey Quarterly (2020年4月)

¹⁸⁸ 既存の法規制の影響のみを考慮して分析のベースラインを示す World Energy Outlookの現行政策シナリオに基づく。ただし、具体的な法規制に落とし込まれていない目標の影響は含まれていない。World Energy Outlook 2019, International Energy Agency (2019年)

¹⁸⁹ International Renewable Energy Agency, Renewable capacity statistics 2020 (2020年3月)、BloombergNEF; BP, BP statistical review of world energy 2019 (2019年)

¹⁹⁰ The Global Energy Perspective Reference Case では、再生可能エネルギーの台頭、電動化の進展、気候変動や脱炭素化に対する認識の変化など、エネルギーを取り巻く環境の大きな変化を示している。この見通しは、石油・ガス、自動車、再生可能エネルギー、基材などの分野に関する数百人のマッキンゼーのエキスパートの知見に基づいて考察したものである。マッキンゼーのEnergy Insights チームは、このグローバルネットワークを活用して、多様な知見を一つの基準にまとめた。World Electricity Statistics, Enerdata (2020年)

¹⁹¹ McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights (2019年)

亜臨界圧の石炭火力発電所の発電容量(150GW)の約三分の一(約50GW)は運転開始から20年以上経過しており、耐用年数の半分を過ぎている。2030年までに耐用年数に達し廃止される発電所(約20GW)を差し引いても、これらの設備のうち半分強(約30GW)が残ることが見込まれる。これを踏まえ、以下のシナリオを検証した。

- **シナリオ1:** 2030年までに亜臨界圧の石炭火力発電所(30GW規模)を廃止(2050年までに90GW規模の設備を廃止)。ここでは、現時点で運転開始から20年以上経過している発電所を2030年までに廃止すると想定する(2030年から2050年は現在から2030年に比べ倍の期間であるため、2050年にかけてはさらに60GW規模の設備を廃止すると想定)。
- **シナリオ2:** 2030年までに亜臨界圧の石炭火力発電所(60GW規模)を廃止(2050年までに112GW規模の設備を廃止)。ここでは、現時点で運転開始から10年以上経過している発電所のうち60GW相当を2030年までに廃止し、残り(約50GW規模)を2050年までに廃止すると想定する。

シナリオ1では、2030年までの排出量の削減効果は約170MtCO₂となり、シナリオ2の場合は340MtCO₂になると推計している(図表22)¹⁹²。また、2017年のインドの電力部門のCO₂排出量(1,000MtCO₂以上)と比較すると、いずれのシナリオにおいても2030年までのCO₂排出量の増加を大きく抑えることができる。2050年には、基準ケースでも2030年に比べCO₂排出量は削減されるが、シナリオ1、2ともに排出削減量はそれを大きく上回る。特にシナリオ2では、2017年と比較して約50%のCO₂排出量の削減が期待できる。

インドは、太陽光発電や風力発電にバッテリー貯蔵や揚水発電などを組み合わせた再生可能エネルギーのハイブリッドシステムの導入に向け、すでに動き出している。マッキンゼーのEnergy Insightsモデルでは、再生可能エネルギーのハイブリッドシステムの均等化発電原価(LCOE)は、2030年には石炭火力発電所のOPEXとほぼ同等になるとしている。また、どちらのシナリオでも、再生可能エネルギーの普及拡大に伴うスケールメリットにより、GWh当たりの平均OPEXはさらに向上する。

ただし、そこには多くの課題がある。再生可能エネルギーへの移行を加速させることで気候変動の恩恵を得られることは明らかであるが、移行を成功させるには膨大なコストと社会経済的影響を管理する必要がある。

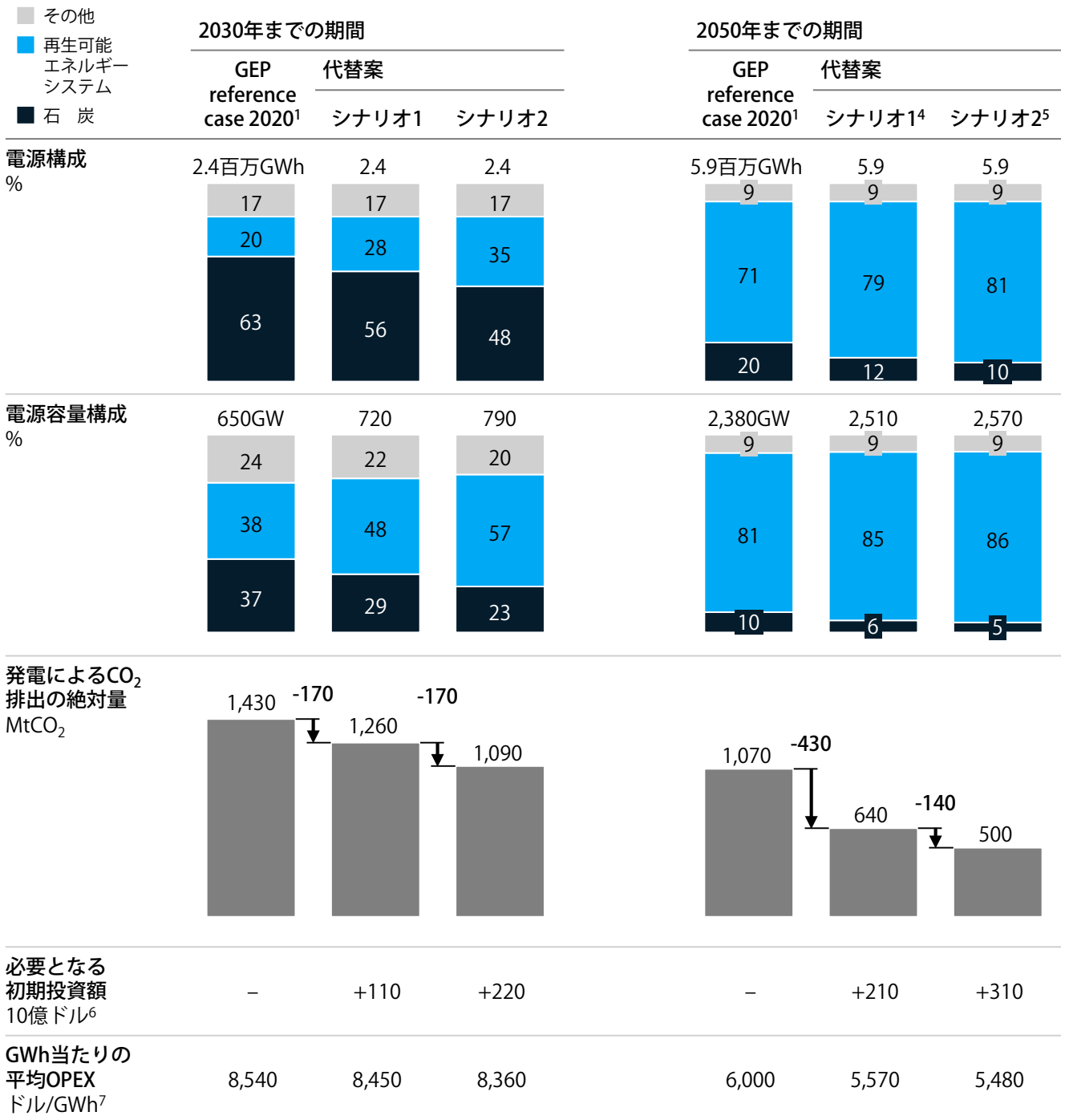
まずは、投資の必要性を検討する必要がある。いずれのシナリオでも、再生可能エネルギー発電(太陽光および風力)、蓄電池、既存発電所の廃止を含め、莫大な初期投資が必要になる¹⁹³。シナリオによっては、2030年までにマッキンゼーのEnergy Insightsの基準ケースと比較した初期投資の累積増分が1,100億~2,200億ドルに達する可能性もある。またシナリオ1、2ともに、現在から2050年までの間に、基準ケースと比較して2,100億~3,100億ドルの追加投資が必要となる。この数字には、再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵システムを導入するための設備投資(CAPEX)だけでなく、耐用年数が来る前に石炭火力発電所を休廃止するためにアセットオーナーに支払う補償料(総費用の15~20%相当と想定)も含まれる。増分コストは、再生可能エネルギーや蓄電池のコストが下がるにつれ減少すると思われるが、石炭火力発電所の廃止と再生可能エネルギーの普及拡大を進めるためには、早期の休廃止に関わる財政負担を軽減するための政府による財政的なインセンティブや支援が不可欠となる。

¹⁹² McKinsey Global Energy Perspective – Reference Case 2020

¹⁹³ 2030年と2050年の各シナリオの平均的な発電所工事着工時期として2025年と2040年の再生可能エネルギー関連の設備投資額を推計。100MW規模の石炭火力発電所を再生可能エネルギー発電所に置き換えるためには、138MWの貯蔵システムが必要になると想定。石炭火力発電所の休廃止にかかる物理的コスト(GW当たり約1.15億ドルと想定)は、目指す姿を実現するために必要となる環境修復の度合いや発電所の所在地、設備やスクラップについて想定される残存価額など、様々な要因によって決まる。石炭火力発電所の休廃止に伴う財務コスト(GW当たり約3.5億ドルと想定)には、廃炉予定の石炭火力発電所の残りの耐用年数を基にした現行価値の試算額(補償するべきコスト)が含まれている

図表22

インドの石炭産業を脱炭素化させる代替シナリオにより排出量の大幅な削減につなげることができるが、膨大な初期投資が必要となる



1. マッキンゼーGlobal Energy Perspective reference case(2020年): 再生可能エネルギー、電動化、気候変動や脱炭素化に対する認識の変化など、エネルギーを取り巻く環境の大きな変化を提示
 2. 2030年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに30GW廃止すると仮定
 3. 2030年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに60GW廃止すると仮定
 4. 2050年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに90GW廃止すると仮定
 5. 2050年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに112GW廃止すると仮定
 6. ベースラインのケース(GEP reference case 2020)に対する増分初期投資額。シナリオ1では、2030年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに30GW廃止(2050年までに90GW廃止)。シナリオ2では、2030年までに石炭の亜臨界圧発電をさらに60GW廃止(2050年までに112GW廃止)
 7. 石炭・太陽光・風力発電毎のGWh当たりの加重平均OPEX
 注記: 端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない
 資料: McKinsey Energy Insights、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

いずれのシナリオでも、莫大な投資が必要になるだけでなく、電気料金の上昇や労働需要の変化といった移行リスクが高まる恐れがある。

エネルギー価格については、再生可能エネルギーの導入拡大により収益性が高まり、GWh当たりのOPEXは低減するが、上述のように再生可能エネルギー発電への移行には莫大な初期投資が必要となるため、電気料金が上昇する恐れがある。代替シナリオで想定されている収益だけでは初期投資をカバーすることはできないため、電気料金の上昇を回避するには政府の支援が必須となる。

雇用面でも大きな影響が想定される。インドでは、2019年時点で直接的・間接的に炭鉱業界で働く人の数は50万人に上る。再生可能エネルギーへの投資によっても雇用は創出されるが、石炭関連産業で働く人々の再雇用は難しいと思われる。例えば、インドの炭鉱地域の多くは風力発電に適していない。それでも、2030年および2050年までに、石炭の輸入量を減らす(インドでは消費量の約20%を輸入品に頼っている)、あるいは労働者の再就職支援のための教育や研修を行うことで、雇用への影響を軽減できる¹⁹⁴。

そして、技術面でも克服すべき課題がある。例えば、高性能で安定性の高い電力供給システムを設計することが重要となる(日々あるいは季節的な日照や風況の変化に関わる課題への対処など)。そのためには、既存のネットワークと再生可能エネルギー設備を統合し、電力負荷(発電量のバランス調整または周波数制御を含む)や電圧の平準化、予備力の確保のための補助的サービスを開発するための投資が必要となる。再生可能エネルギーへの移行に関わるその他の技術的なソリューションとして、石炭火力発電所をバイオマス発電所やCCS(CO₂改修・貯留)付帯発電所に改修することも可能である。しかし、資本費が高く、世界的に見ても安定した量のバイオマスを確保しづらいことから、実行に移すのは難しい。これらの課題やリスクに対応するためには、民間部門だけでなく、政府の関与と後ろ盾が不可欠である。

18%

中国のCO₂排出量に占める
鉄鋼業のシェア

産業部門における脱炭素化の推進およびCO₂の回収・利用・貯留(CCUS)技術の高度化

産業部門は、アジア最大のGHG排出源であり、アジア全体のCO₂排出量の35%以上を占めている¹⁹⁵。そして、アジアにおける産業部門のGDP当たりのGHG排出量は、世界の平均を約60%上回っている¹⁹⁶。2016年時点では、産業部門の中でも鉄鋼・セメント業界がアジア全体の排出量に占める割合が約70%と高くなっている。ここでは、中国の鉄鋼業界の脱炭素化の取り組みについて詳しく見ていく。

中国の鉄鋼業界は世界の粗鋼生産の50%近くを占めており¹⁹⁷、世界のCO₂排出量に占める割合は約18%となっている。しかし、需要は減少傾向にあり、都市化の減速や不動産市場の飽和化により、2030年には建設部門の鋼材需要は減少する見込みである¹⁹⁸。

中国の鉄鋼メーカーは、2019年には生産量の89%を占めていた、大量に石炭を使用する従来の塩基性酸素転炉(BOF)から、環境に優しい電気炉(EAF)による製鉄への移行を進めている。2020年現在、中国におけるEAFの平均CO₂排出量は粗鋼1トン当たり0.6~0.7トンで、BOFの2.0トンを下回っている。しかし、石炭の価格が安いことから、EAFの生産シェアが66%のEUや75%の米国に比べると、EAFの導入スピードは遅い¹⁹⁹。それでも、現状のまま推移した場合、中国のEAFの導入率は2030年には2017年の10%未満から約18%に、2050年には50%に達する見込みである²⁰⁰。

¹⁹⁴ Worldometer (2016年)

¹⁹⁵ McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights, 2019: EDGAR 2015、FAOSTAT 2015

¹⁹⁶ AR5GWP20に基づく

¹⁹⁷ Steel Institute VDEh, 2017、McKinsey Basic Materials Institute

¹⁹⁸ China Iron and Steel Association、World Steel Association、McKinsey BMI China Steel Demand Model

¹⁹⁹ Shaohui Zhang et al., "Integrated assessment of resource-energy-environment nexus in China's iron and steel industry," Journal of Cleaner Production, Volume 232, pp. 235-49 (2019年9月)

²⁰⁰ マッキンゼーのBMI China Steel Demand Model

脱炭素化を目指すためには、EAFや再生可能エネルギーの導入に加え、銑鉄の代わりに鉄スクラップを使用するなど、より環境に優しい素材を取り入れる必要がある。世界的な分析によると、銑鉄生産のための化石燃料の燃焼の割合は72%であるが、鉄スクラップの利用は進んでいる。中国における鉄スクラップの供給量は、製品やインフラの切り替えが進むことで、2015年の163 Mtから2030年には355Mtに増加すると予想されている²⁰¹。さらに、中国政府は鉄スクラップの輸入解禁を検討している²⁰²。

将来的には、グリーン水素、バイオマスを利用した金属資源回収やCCUSなどの技術も鉄鋼業の脱炭素化に大きく寄与する可能性がある。これらの技術は、現時点では大規模展開の段階には至っていないが、2030年以降に実現する可能性がある。

石炭の代わりに水素を利用することで、大気汚染源となる銑鉄の代替となるHDRI(水素活用還元鉄)を製造できる。水素は、その製造方法により、主にグレー水素とグリーン水素の2つに分けられる。グレー水素は、炭化水素の中でも主に天然ガスから生産される水素を指す。グレー水素の技術は成熟化しており、天然ガスの埋蔵量が少ない中国以外の地域の様々な産業分野で活用されている。グリーン水素は、再生可能エネルギー由来の電力を利用して水を電気分解して生成される水素であるが、現時点での水素の生産量は少ない。

バイオマスを利用した金属資源回収は、バイオマスを燃料として使用するため、石炭の消費量を削減できる。バイオマスの原料は、主に「木材・農業残渣」と、砂糖やサトウキビ、熱分解されたユーカリなどの「バイオマス作物」の2つに分けられる。バイオマスの利用は森林破壊を伴わないため、CO₂排出量を大幅に削減することができる。しかし、バイオマス資源の賦存量は地域によって偏りがあり、中国での利用率は低い。

CCUSの脱炭素化のポテンシャルは非常に大きいものの、技術的にまだ成熟していない。中国は、地理的にCCUSのポテンシャルが非常に高い。深部塩水性帯水層の3,066ギガトンの貯蔵容量を含め、中国の陸上および海上のCO₂貯蔵容量は3,088ギガトンと推計されている²⁰³。しかし、CO₂の長期貯留に関しては課題があり(回収したCO₂を指定場所まで安全に運ぶ手段、廃棄物を次世代に残すこと、漏出の危険性などの副次的影響)、この技術は現段階ではまだ大規模には展開されていない。

脱炭素化コストと排出量削減ポテンシャルを検証したところ、2030年までに、炭素集約度の高い素材の需要量の低減やエネルギー利用の効率化、鉄スクラップの利用拡大やEAFの導入などを通じて、業界の事業構造を継続的に転換していくことが脱炭素化の鍵となることが示唆されている(マッキンゼーのBMI China Steel Demand Modelに基づく)(図表23)²⁰⁴。現状のまま推移した場合、これにより、CO₂排出量を現在の約1,720MtCO₂から2030年にかけて年間370MtCO₂削減できる。EAFの本格導入シナリオでは、440MtCO₂の排出量削減が可能となる。2050年までに鉄鋼業の脱炭素化を実現するためには、グリーン水素やCCUS技術の発展、HDRI-EAFコストの低減も重要となる²⁰⁵。

²⁰¹ マッキンゼーのBMI China Steel Demand Model

²⁰² "China urged to end steel scrap import ban," Argus Media (2019年11月5日)

²⁰³ Xiaochun Li et al., "CO₂ point emission and geological storage capacity in China," Energy Procedia, Volume 1, Issue 1 (2009年2月)

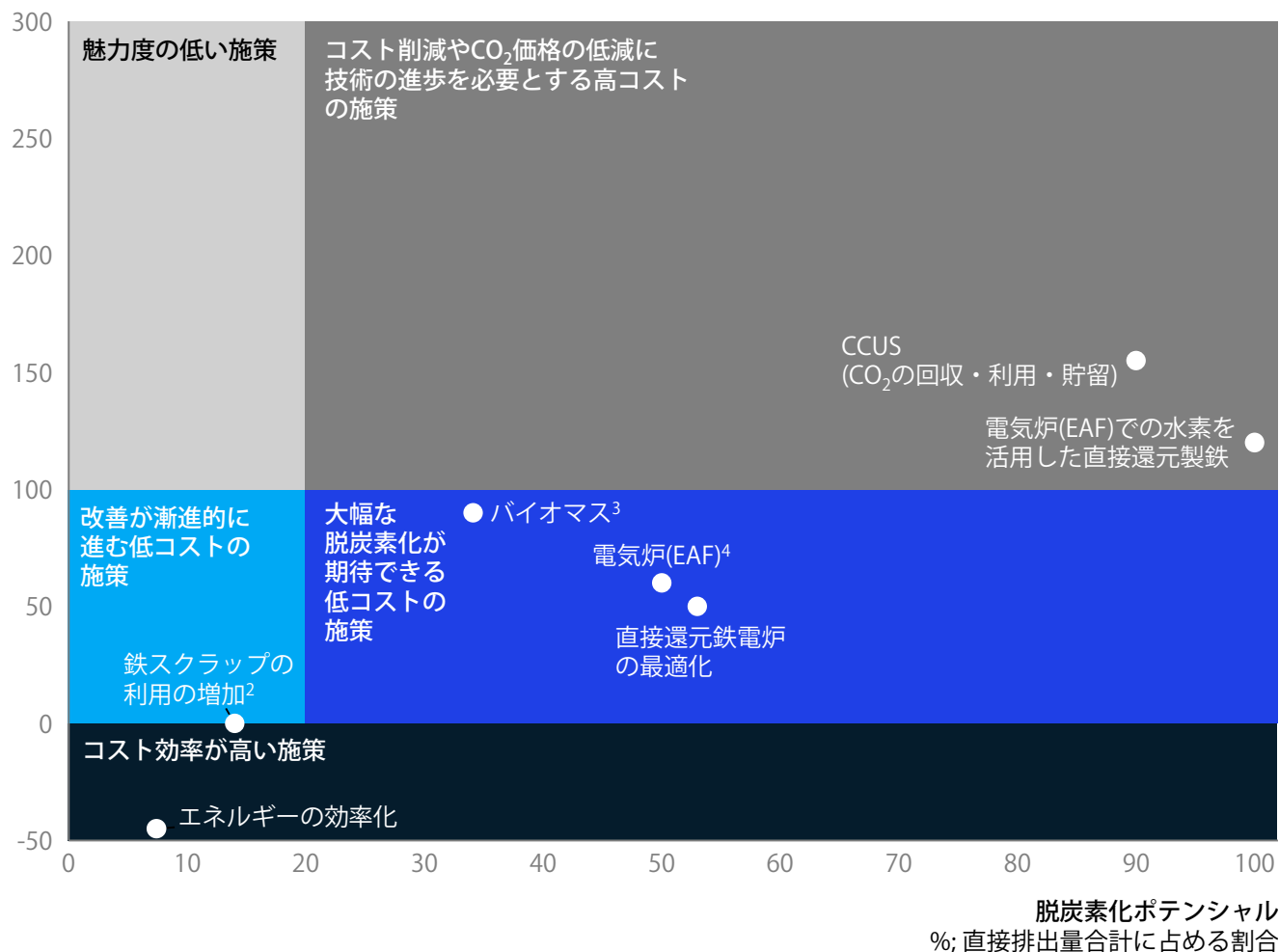
²⁰⁴ 脱炭素化対策のCAPEXとOPEXの両方を含む

²⁰⁵ 水素活用還元鉄(HDRI)を利用したEAFをベースとする製鉄プロセス

図表23

中国の鉄鋼業界における脱炭素化に向けた施策の中には多額のコストを要するものがあり、更なる技術の進化が求められる

脱炭素化に必要なコスト¹
ドル/tCO₂



- 高炉-転炉法(BF-BOF)に対する排出量削減コスト
- 鉄スクラップの利用増加による脱炭素化コストは、鉄鋼石と鉄スクラップの価格差により異なる
- 石炭火力発電所の改良を行わない場合のポテンシャル。35%の脱炭素化ポテンシャルは、石炭火力発電所の燃料に占めるバイオマスの割合が最大の場合に実現。バイオマス燃料のみで稼働しているバイオマス発電所の脱炭素化ポテンシャルは100%となる
- スクラップの供給状況による。業界全体のポテンシャルが50%となる可能性は低い

新しい技術が大規模に展開し運用可能にするためにはそれぞれ独自の課題があり、生産量を維持しつつ、これらの課題を克服していかなければならない。EAFやバイオマスを利用した生産方法への移行には脱炭素化の大きなポテンシャルがあるが、図表23に示したように莫大なコストを伴う。さらに、CCUSやグリーン水素などの次世代技術にはさらに大きなコストがかかる。これらの技術を導入するためには早期に設備投資を行う必要があるが、利益率が圧迫されている鉄鋼業界にとっては容易なことではない。また、前述のように、中国の場合、大量の水素を安定的に供給することは難しい。CCUSについても、税制優遇措置などの直接的な支援なしには、経済的に実現困難となる。さらに、政策の多くがCCUSの「貯留」に関わる技術に特化しており、「貯留」と同様にCCUSを大規模に展開し経済的に実現可能な水準に高めるうえで重要な「回収」「輸送」に関わる技術に関する政策は少ない。

水素関連技術の中でも、EAFを利用した水素による製鉄法が最適と考えられ、鉄鋼業で大規模な脱炭素化を実現するための長期的なソリューションとして検討が進められている。しかし、導入するにあたり様々な課題やリスクがある。マッキンゼーでは、グリーン水素を利用した製鉄プロセスの今後の見通しと導入時期に影響を及ぼすいくつかの外的要因を特定した²⁰⁶。これらには、再生可能エネルギー由来の発電量の拡大、産業レベルでのグリーン水素の利用可能性の向上、素材の切り替え、新たな生産技術の導入、水素ベースの鉄鋼生産に対する需要、資金調達や資本へのアクセスが含まれている。

40%

アジアにおける農業と森林破壊によるメタン排出量の割合

農業・林業の改革

農業と野焼きや伐採による森林破壊によるCO₂の排出量はアジア全体の10%以上、CH₄の排出量は40%を占めている。また、インドと中国のCH₄排出量はアジア全体の半分以上を占めている。

農業分野における主な排出量削減策として、食生活の見直し(反芻動物由来のたんぱく質の摂取量を減らすことで飼育頭数を減らし、メタン排出量を削減する)や、乾田直播栽培の導入、水田の水管理の高度化などが挙げられる²⁰⁷。

牛肉とラム肉はGHGの排出量が最も多く、生産過程での排出量は鶏肉や魚の10倍以上となっている。その原因は、腸内で発酵を行う牛や羊の消化機能にある²⁰⁸。牛肉やラム肉の消費量を減らし、炭素発生量の少ないたんぱく源(主に豆類、家禽類、魚類)で代用することが、排出削減目標を達成するうえで最も効果的な対策と言える²⁰⁹。

持続可能な林業とは、木を伐採した後に植林を行い、樹木被覆地面積を現在の水準で維持することとして定義されており、大気中のCO₂を吸収し温暖化を食い止めるために極めて重要となる。ある試算によると、2016年時点でアジアの樹木被覆地面積の1年当たりの減少率は約6万3,000km²で、これはスリランカの面積にほぼ匹敵する。一方、森林の再生可能面積は約9,000万ヘクタールで、約45GtのCO₂を吸収できる²¹⁰。持続可能な林業を推進するためには、市街地、農地、森林や様々な用途を考慮して慎重に土地の活用方法を定める必要がある。同時に、農業・林業はこの地域の雇用を支える重要な産業でもあるため、雇用への影響を最小限に抑えながら緩和策を講じていく必要がある。国際労働機関(ILO)によると、就業者全体に占める農業・林業就業者の割合は中国で25%、インドで40%、インドネシアで30%となっている。ここでは、インドネシアの食料サプライチェーンと森林管理について詳しく見ていく。

農業・林業は、インドネシアの経済成長や経済発展において重要な役割を果たしている。農業部門のGDPへの貢献率は13%で、国全体の就業人口の三分之一を農業就業者が占めている²¹¹。また、2016年の国全体のGHGの総排出量における農業からの排出量の割合は約15%で、森林破壊による排出量の割合は39%であった²¹²。農業の主な排出要因は、稲作や、堆肥管理、腸内発酵で、これらは農業のGHG排出量全体の65%を占めている²¹³。農業と森林伐採には関連性があり、主にパーム油生産のための違法な火入れや伐採などが挙げられる。インドネシアでは、2001年から2018年までの間に樹木被覆地面積が2,560万ヘクタール、つまり16%減少している²¹⁴。そして、インドネシアの農業も例外なく気候変動のリスクに晒されている。

²⁰⁶ Christian Hoffmann, Michel Van Hoey, and Benedikt Zeumer, Decarbonization challenge for steel, McKinsey & Company (2020年)

²⁰⁷ 稲作については、別の場所で苗を育て、浸水した水田に移植する方法が一般的であるが、乾田直播栽培では、乾いた田んぼに直接種を蒔く。これにより、田んぼに水を引く期間を1カ月短縮でき、メタンを生成する微生物の活動を抑制し、排出量を削減できる。世界で最も広く使われている連続灌漑による稲作と比較して水田からのメタン発生量を抑制できる方法がいくつかある。AWD (Alternate Wetting and Drying) と呼ばれる間断灌漑管理による節水水稻栽培技術や単期落水などである。これらの方法では、亜酸化窒素の排出量が増える恐れがあるが、メタンの排出量を抑えることでその影響を相殺できる

²⁰⁸ 腸内発酵とは、微生物で炭水化物を単純な分子に分解し、動物の血流に吸収されやすくする消化過程を表す

²⁰⁹ Justin Ahmed, Elaine Almeida, Daniel Aminetzah, Nicolas Denis, Kimberly Henderson, Joshua Katz, Hannah Kitchel, and Peter Mannion, Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices, McKinsey & Company (2020年4月)

²¹⁰ Jean-Francois Bastin et al., "The global tree restoration potential," Science, Volume 365, Issue 6448 (2019年7月)

²¹¹ "Indonesia: Share of economic sectors in the gross domestic product (GDP) from 2008 to 2018," Statista (2020年),

"Employment in agriculture (% of total employment) (modeled ILO estimate)," World Bank (2019年)

²¹² McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case, McKinsey Energy Insights, 2019; Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), 2008, 2015, FAOSTAT, FAO, 2015)

²¹³ FAOSTAT, FAO, 2019.

²¹⁴ Global Forest Watch, World Resources Institute (2020年)

インドネシア政府は、2015年、国連気候変動枠組条約に対し2020年以降の温暖化対策目標を定めた「約束草案」を提出した。その中で、インドネシアは、2030年までに排出量を29%削減し、国際支援を受けた場合には41%削減するという目標を掲げている²¹⁵。しかし、排出量の大幅削減を実現するクリーンテクノロジーが不足している農業の場合、このような目標を達成するのは難しい可能性がある。また、農業は他の産業に比べて統合が進んでおらず、93%の農家の平均耕地面積は0.6ヘクタールと小さい。このように細分化されていると様々なステークホルダーの関与が求められるため、変革を推進することが難しくなる²¹⁶。さらに、農業部門は、温暖化対策目標のほかにも、生物の多様性や栄養必要量、食糧安全保障、農民や農村の生活などといった優先事項が複雑に絡み合っている。

インドネシアの農業のGHG排出量の主な3つの要因である稲作、堆肥管理、腸内発酵に基づいて、費用対効果の高い6つの排出削減施策を特定した(施策は、食生活の見直しなど消費者の行動変容に関わるものというよりは農業生産に関するものがほとんど)²¹⁷。インドネシアでは稲作が社会経済に与える影響が大きいため、施策のうち3つは稲作に関するもの、残りの3つは食肉生産に関するものとなっている(図表24)²¹⁸。世界の削減費用と比較したところ、6つの施策のうち4つはコスト低減につながる事が明らかになった²¹⁹。なお、多額のコストを伴う排出削減策(ゼロエミッション型農業機械など)は考慮していない。また、ここでは農業に焦点を当てているが、インドネシアが脱炭素化目標を達成するためには、廃棄物管理や炭素吸収源の強化など、その他の産業にも取り組みを拡大していく必要があることに留意すべきである(「コラム4: インドネシアの農業分野以外における脱炭素化に向けた取り組み」参照)。

インドネシアでは、農業分野からのGHG排出量の大半が稲作によるものである。稲作における脱炭素化のための最も効果的な施策として、「稲作の施肥法の改良」「水田の水管理の高度化」「乾田直播栽培の導入」の3つが挙げられる。

その中でも最も有効な施策は、施肥法の改良である。なぜなら、水田の温度が高い湛水土壤は、メタン生成菌にとっては理想的な環境であり、そのほとんどが大気中に放出されるためである²²⁰。施肥法を改良することで、稲作からのメタンの排出量を約40%削減できる²²¹。硫酸アンモニウムなどの硫酸根肥料や、石膏などの硫酸系土壌改良材は、水田のメタン生成菌を抑制するため、メタンの排出量を減らすことができる。

²¹⁵ National Action Plan for greenhouse gas emissions reduction (RAN-GRK), Republic of Indonesia, Presidential Decree number 61/2011 (2011年)。地球温暖化係数の100年値を適用

²¹⁶ Prashanti Gandhi et al., "Which industries are the most digital (and why)?", Harvard Business Review, hbr.org. (2016年4月1日)

²¹⁷ コストはグローバルコストカーブに基づく。インドネシアの実コストは異なる可能性があるが、グローバルコストカーブはインドネシアがとり得る緩和策を示している

²¹⁸ 削減費用はマッキンゼーの分析から導出されたものでインドネシア固有のものではないが、各対応策の参考値になると考えられる

²¹⁹ Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices, McKinsey and Company (2020年4月)

²²⁰ Ronald L. Sass, "CH₄ emissions from rice agriculture," in IPCC good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories, IPCC(2003年)

²²¹ Bruce A. Linquist et al., "Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis," Field Crops Research, Volume 135 (2012年8月)

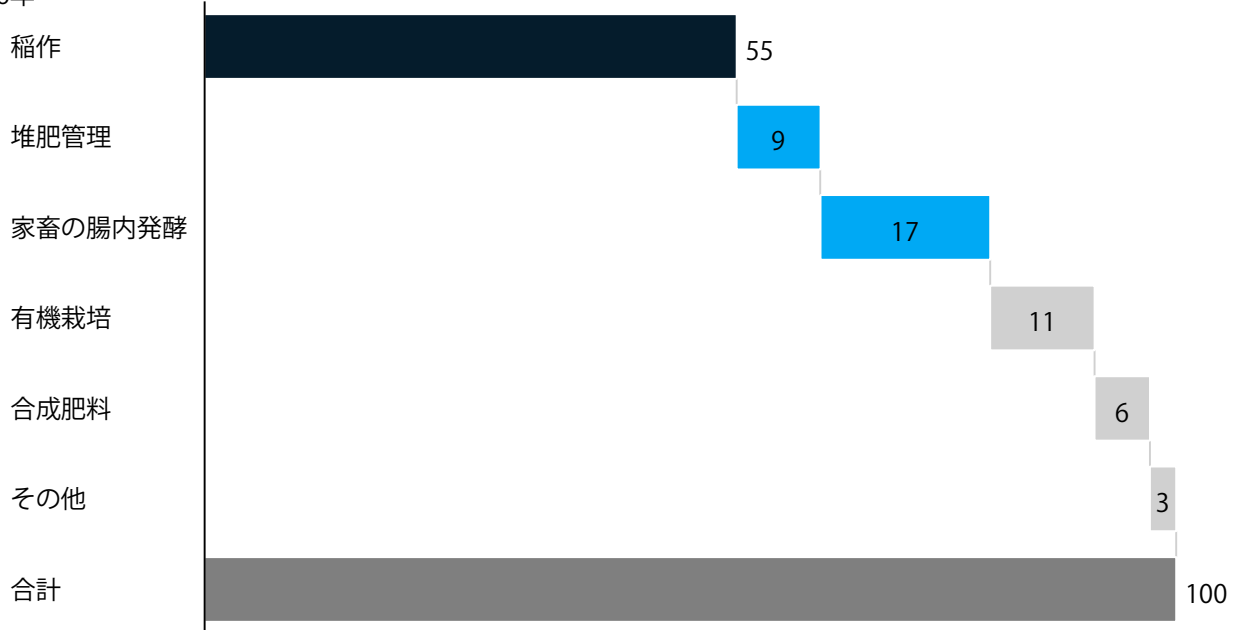
図表24

GHG排出を抑制する農法は、インドネシアを脱炭素化に導くだけでなく大幅なコスト削減にも貢献する可能性がある

事例: インドネシアの農業、森林伐採

■ 米
■ 動物性たんぱく質

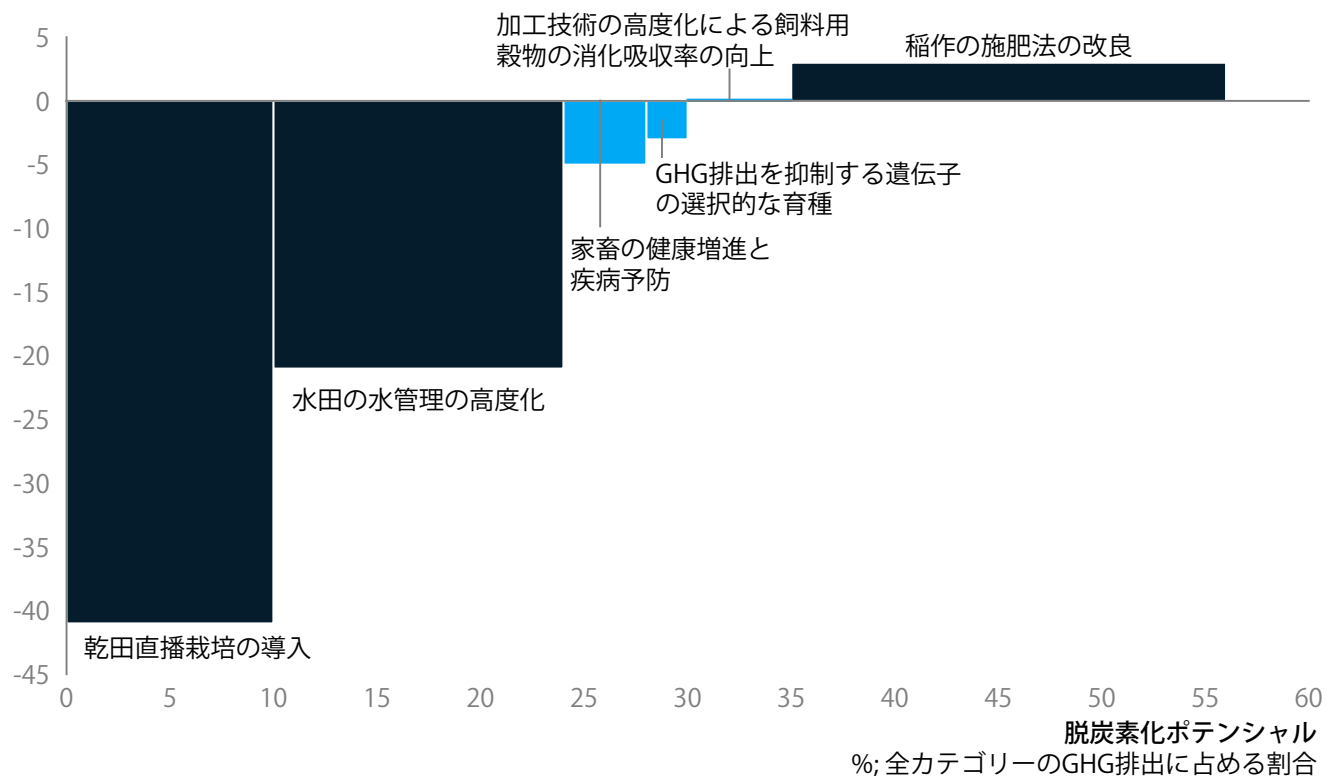
インドネシアの農業(エネルギーを除く)におけるGHG排出構造
%; 2016年



インドネシアの農業分野で排出量が最も多い要素に対し、GHG削減ポテンシャルが高くコスト効率に優れた6つの施策を特定

グローバルGHG排出量削減費用

PCC第5次評価報告書(AR5)による地球温暖化係数20年間累積値; ドル/tCO₂e



1. AR5による地球温暖化係数20年間の累積値。詳細は、Reducing emissions through improved farming practices, McKinsey & Company (2020年4月)を参照

注記: 端数処理を行っているため、合計は必ずしも100にはならない

資料: FAOSTAT(2019年)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

世界で最も広く使われている連続灌漑による稲作と比較して、水田からのメタン発生量を抑制できる方法がいくつかある。AWD (Alternate Wetting and Drying)と呼ばれる間断灌漑管理による節水稲栽培技術や単期落水などである。これらの方法では亜酸化窒素の排出量が増える恐れがあるが、メタンの排出量を抑えることでその影響を相殺できる。ただし、課題として、支払いや資金調達の仕組み(一般的に灌漑施設の料金は定額制で水の使用量は関係ないため、水の使用量を減らす金銭的なインセンティブがほとんどない)や、域内の降雨パターン(雨が多すぎると田んぼが乾かない)、田んぼの特性(水量を調整するために田んぼを均平にする必要がある)などがある。田んぼを均平にすると、水がまんべんなく行き渡るだけでなく、入水作業にかかる時間や必要となる水の量を減らすこともできるため、レーザーレベラー(圃場を均平にする作業機)の導入が進むことで状況が大きく変わる可能性がある。インド北部のウッタル・プラデーシュ州では、レーザーレベラーにより農業用水の使用量を25%削減し、エネルギー消費を抑えることができた²²²。さらに、水の価格設定政策を通じて水の管理を強化できる可能性もある。

また、乾田直播栽培の導入を進めることで、湛水期間(田んぼに水を張り貯めておく期間)を短縮し、メタン生成菌の活動を抑え、1ヘクタール当たりの排出量を約45%削減できる²²³。

食肉生産は、インドネシアの農業部門において2番目に大きいGHG排出源である。畜産における脱炭素化のための最も効果的な施策として、「GHG排出量を抑制する遺伝子の選択的な育種」「家畜の健康増進」「飼料用穀物の消化吸収率の向上」の3つが挙げられる。

その中でも最も有効な施策は、GHG排出量を抑制する遺伝子の選択的な育種である。反芻動物の腸内発酵に焦点を当てた遺伝子の選択的な育種を行うことで、2050年までに排出量を大幅に低減できる可能性がある²²⁴。研究により、反芻動物のメタン排出量の約20%は遺伝的要因が関与していることが明らかになっている²²⁵。ある家畜については、メタン発生効率を高めるために選択交配を行うことで、メタン生成量が約20%減ったという。

また農家は、家畜の健康増進を通して、生産性を高め、疾病による死亡率を下げるができる。より健康かつより少ない頭数で世界の動物性たんぱく質の予測需要量に対応できれば、腸内発酵や牧草地の排泄物、堆肥管理によるGHG排出量を抑えることが可能となる。

さらに、飼料用穀物の消化吸収率を高めることでも排出量を削減できる。蒸煮フレーク処理などの加工技術により、大型反芻動物の穀物のデンプン消化率を高めることができる。

インドネシアにおいて、農業や林業、土地活用の改革を推進し2100年の地球の平均気温上昇を産業革命以前に比べ1.5℃に抑えるという目標を達成するためには、他の地域と同様に、食生活や食品廃棄量、食品の製造工程、森林や天然の炭素吸収源の管理方法などについて大きく見直す必要がある。食生活の見直しや食品廃棄量の削減は個人レベルで取り組むことができ、排出量を大幅に低減できる。また土地活用と炭素吸収源の管理も、農業や都市化による土地転換の影響を抑えるうえで極めて重要となる。

²²² Travis J. Lybbert et al., "Targeting technology to increase smallholder profits and conserve resources: Experimental provision of laser land-leveling services to Indian farmers," *Economic Development and Cultural Change*, Volume 66, Number 2 (2018年1月), M. L. Jat et al., *Laser land leveling: A precursor technology for resource conservation*, Rice-Wheat Consortium technical bulletin series 7, Rice-Wheat Consortium for the Indo-Gangetic Plains (2006年)

²²³ Debashis Chakraborty et al., "A global analysis of alternative tillage and crop establishment practices for economically and environmentally efficient rice production," *Scientific Reports*, Volume 7 (2017年8月)

²²⁴ 腸内発酵は、牛や羊、ヤギ、バフファローなどの反芻動物の消化の過程の一つである。消化管や反芻胃内の微生物は、食べた物を分解・発酵させ、副産物としてメタンを生成する

²²⁵ Jan Hartger Mathijs Harmsen, *Non-CO₂ greenhouse gas mitigation in the 21st century*, Utrecht University (2019年), M. J. Bell et al., "Effect of breeding for milk yield, diet and management on enteric methane emissions from dairy cows," *Animal Production Science*, Volume 50, Number 8 (2010年8月), Lower methane production through breeding, Viking Genetics

そこで最も大きな課題となるのが、炭素発生量が多く持続性の低い現行の農法から低炭素型農法への移行である。これまでの農法は、森林破壊と汚染を進行させる一方で域内の何十億人もの人々の命や生活を支えてきた。インドネシアでは小規模家族経営農家が全体の約90%を占めており、世帯年収に占める農業収入の割合は約50%と農業への依存度が高い²²⁶。そのため、農業で生計を立てている人々や食料の価格への影響を考慮した脱炭素化対策をとる必要がある。対策として、例えば、新しい農法を取り入れるための教育やインセンティブ制度の整備、必要となる設備投資の支援などが考えられる。食生活の見直しと食品廃棄物の削減を実現するためには、消費者の行動変容を促す取り組みも重要となる。

コラム4

インドネシアの農業分野以外における脱炭素化に向けた取り組み

インドネシアでは、廃棄物もGHD排出源の一つで、2016年には同国のGHD総排出量の8%を占めていた¹。廃棄物のうち約75%は有機物で、その約三分の一は生ゴミである²。また、固形廃棄物の30%は回収・処理されていない。回収された廃棄物は埋立地に運ばれるが、その半分近くがトラックなどで直接乗り入れて投入するオープンダンプ式の埋立地となっている。インドネシア政府はこれらの課題に対応するための取り組みを進めており、固形廃棄物管理に関わる国家戦略および方針として、「2025年までに廃棄物の発生量を30%削減し、70%の廃棄物を適正処理する」という目標を定めている³。廃棄物管理をさらに強化するために、公的資金を活用して、一般競争入札に廃棄物管理に関わる評価基準を組み込むなど、サーキュラーエコノミーのビジネスソリューションの導入を促進することも可能である。都市においては、廃棄物の回収の仕組みや、廃棄物処理・リサイクル設備、マテリアルバンクのようなインフラを整備し、資源を効果的に循環させていく必要がある⁴。

インドネシアには世界第3位の面積を持つ熱帯雨林があるが、2001年から2018年までの間に樹木被覆地面積が2,560万ヘクタール、つまり2000年比で16%減少しており、これは10.5GtのCO₂排出量に相当する。主な要因はパーム油生産のための森林伐採やアブラヤシ栽培で、森林消失面積の約五分の二を占めている⁵。インドネシアのジョコ・ウィドド大統領は、この問題に対応するために、2019年にアブラヤシプランテーションの拡張および森林伐採に関するモラトリアムを恒久化し、約6,600万ヘクタールの天然林と泥炭地における新規開発を禁止した⁶。森林破壊を食い止めるためには、規制の策定・実行、農家に対する機会費用の補償などの優遇措置を含め、様々な施策を組み合わせる必要がある。

¹ AR5GWP20に基づく

² Budi Triyono et al, Study on Utilization of Indonesian Non-Recycled Municipal Solid Waste as Renewable Solid Fuel (2017年)

³ OECD Green Growth Policy Review of Indonesia 2019, OECD (2019年)

⁴ Ellen MacArthur Foundation, Completing the picture: How the circular economy tackles climate change (2019年9月)、Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices, McKinsey and Company (2020年4月)

⁵ Global Forest Watch, World Resources Institute (2019年)

⁶ Tabita Diela, "Indonesia has just made its moratorium on forest clearance permanent," World Economic Forum (2019年8月14日)

²²⁶ インドネシアの農家の平均耕地面積は0.6ヘクタール。"Indonesia: Share of economic sectors in the gross domestic product (GDP) from 2008 to 2018, Statista (2020年)、Employment in agriculture (% of total employment) (modeled ILO estimate), World Bank (2019年)

75%

アジアの運輸分野のCO₂排出量に占める自動車のシェア

電動化による自動車や建物の脱炭素化

アジアは世界の建築物・運輸分野のGHG排出量の30%を占めており、電動化は脱炭素化の重要な対策となる²²⁷。域内の運輸分野のCO₂排出量のうち約75%を自動車が占めているが、アジアは電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV)などの脱炭素化技術で世界をリードしている。特にEVやバッテリー生産で圧倒的な世界シェアを誇っており、FCVの普及拡大のための支援策も数多く実施している。自動車の脱炭素化対策としては、内燃機関車(ICE)の燃費向上、EVおよびFCVの普及拡大、走行距離の削減などが挙げられる。

中国はすでに世界最大の乗用車EV市場となっており、プラグインハイブリッド車(PHEV)とバッテリー式電気自動車(BEV)の売上高は世界全体のほぼ半分を占めている²²⁸。政府による施策の例としては、日本政府が定めた「水素基本戦略」があり、2030年度までに、燃料電池バス(FCバス)については1,200台程度、FCVについては80万台程度の普及を目指すとしている。

もう一つの重要な対策として、建築物の電動化が挙げられる。一般的に、暖房・給湯システムは主要排出源の一つである化石燃料への依存度が高いため、アジアではこれらの設備を電動化することで脱炭素化を進めることができる。また、地域冷暖房を導入したり、水素やバイオガスをガスグリッドに注入して調理や暖房に活用したりすることによっても建築物の排出量を削減できる。電動化技術はすでに幅広く展開されており、費用対効果が高いことも実証されている。しかし、初期投資額が高いことや投資回収期間が長いこと、さらに市場の非効率性に対する懸念から、消費者や企業の行動の妨げとなっている可能性がある²²⁹。さらに、既存の(費用対効果が低い)設備の平均耐用年数が数十年に及ぶこともあるため、多くのアセットオーナーは電動化に消極的になり、本格的な導入を進めることが難しくなっている。

ここでは、日本の運輸分野における脱炭素化の取り組みについて詳しく検証する。日本は、2030年と2050年の排出削減目標を達成するために大きな課題に直面している。日本は、GHG排出量を2030年に26%、2050年に80%削減することを目標として掲げているが、日本の排出量の33%は、脱炭素化技術が現時点ではまだ成熟していない、あるいは費用対効果が低く「削減困難」とされている産業分野が占めている。運輸分野は2016年時点で日本のGHG排出量の16%(209MtCO₂e)を占めており、電力、産業に次いで3番目に多く、そのうち80%を自動車が占めている²³⁰。運輸分野で効果的な脱炭素化対策として、以下の3つが挙げられる。

- **内燃機関車(ICE)の燃費向上:** 車両構成比を大幅に変えることなくICEの燃料消費量を減らす手段として、燃費向上が考えられる。2000年から2017年の間に、新型ガソリン車の平均燃費は年率3.4%向上し、燃料消費量は減少している。日本政府は、乗用車の新燃費基準を策定し、2030年度の目標値を25.4km/Lとし、2017年の実績値から2.8km/Lの改善を目指している²³¹。
- **EVおよびFCVの普及拡大:** 自動車からの排出量を削減するうえで最も効果的な対策として、EVやFCVの普及拡大が挙げられる。次世代自動車(ハイブリッド車、クリーンディーゼル車、EV、FCV、天然ガス自動車)のシェアは伸び続けている(2010年の150万台から2018年には1,090万台に増加)²³²。ただし、現時点ではフルハイブリッド車の人気が高く、EVおよびFCVのシェアは低い(2018年の販売台数は、EVは30万台、FCVは2,000~3,000台)。日本でEVを普及させるためには、商用車、乗用車の順にコスト削減を進めていく必要がある。2030年には、BEVの走行台数は約260万台に達する見込みで、新車販売台数の15%をBEVが占めるようになる(図表25)²³³。BEVについては、2020年後半には小型車・中型車、2030年以降にはSUVなどのその他の車種の総所有コスト(TCO)がICEと同等になる。日本では平均年間

²²⁷ AR5 GWP20に基づく

²²⁸ China Association of Automobile Manufacturers (CAAM); The Electric Vehicle World Sales Database, EV Volumes

²²⁹ 建築物の省エネ化に関する詳細については、「Resource revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs,」McKinsey Global Institute(2011年11月)を参照(McKinsey.com)

²³⁰ 地球温暖化係数の100年値を適用して非CO₂排出量をCO₂eに転換

²³¹ 日本政府「乗用車の2030年度燃費基準」(2019年)

²³² 日本自動車工業会

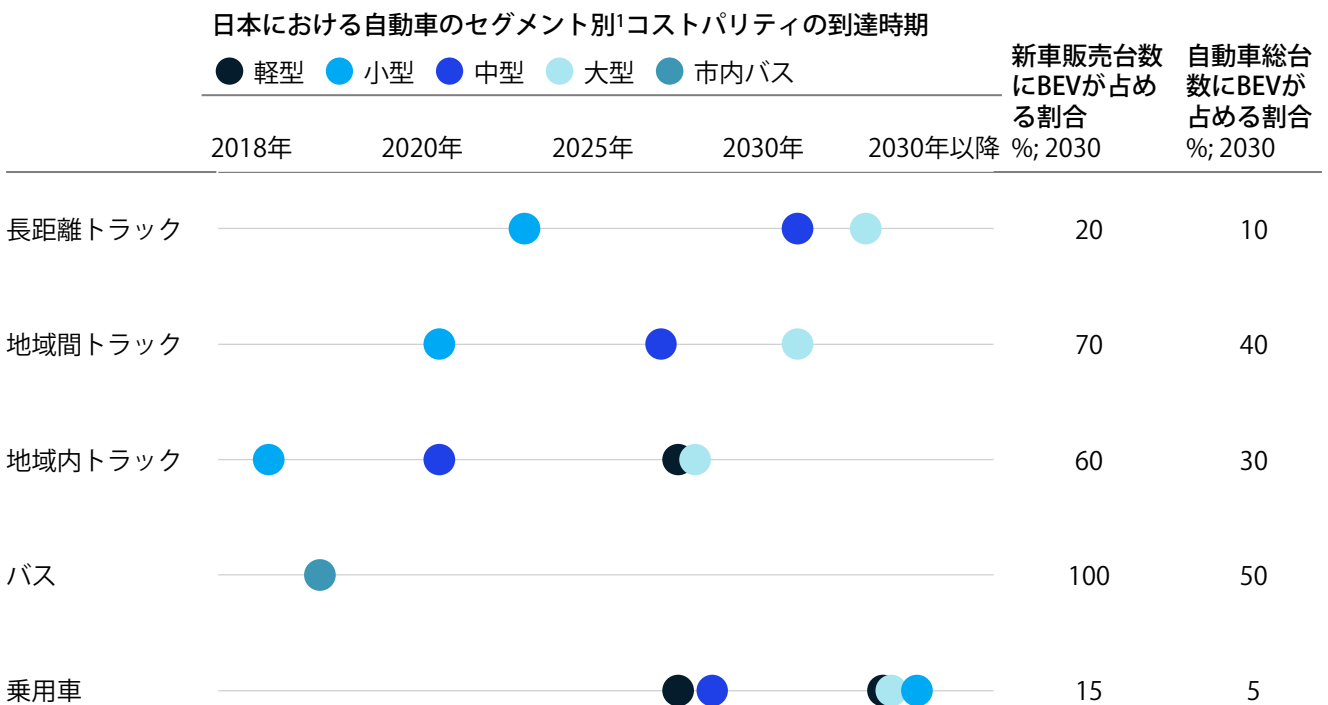
²³³ 詳細については、マッキンゼーの「Meeting Japan's Paris Agreement targets—more opportunity than cost(パリ協定の目標実現に向けた日本の脱炭素化の道筋)」(2020年3月)を参照

走行距離が短くBEVの燃費改善効果が出にくいいため、時期としては欧州諸国に比べて遅くなる²³⁴。トラックについては2030年より前にTCOがICEと同等になると予想している。また、2030年にはBEVバスの登録台数は約4万8,000台に達し、バスの新規登録台数に占める割合は87%となる見込みである。電動化の動きはグローバルな取り組みと一致しており、特に長距離輸送車や大型車セグメントでは、FCVの価格競争力が増していく見込みである。燃料電池トラックのTCOは、2040年には電動トラックと同等の水準になる可能性がある²³⁵。

- － **走行距離の削減**: 2018年のICEの走行距離は前年比で1.2%増加したが、調査によると、人口減少や公共交通機関の充実、カーシェアリングなどの要因により、2030年には3%減少するとされている。

図表25

日本では、バッテリー式電気自動車(BEV)の商用車については、2030年までにそのほとんどのセグメントでコストパリティを達成し、その後に乗用車のセグメントが追随すると見られる



1. 自動車の最大総車重量に基づく

資料: Decarbonization Pathway Optimizer by McKinsey Sustainability Insights、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

²³⁴Nathaniel Bullard, "Electric car price tag shrinks along with battery cost," Bloomberg (2019年4月12日)

²³⁵Steven Loveday, "Why electric cars don't like cold temperatures, and how to fix it," Inside EVs (2019年2月6日)

マッキンゼーでは、運輸分野のこれら3つの脱炭素化対策の削減効果を、2030年までの排出削減目標(300 MtCO₂e)のうち70MtCO₂e(23%)相当と試算している²³⁶。ICEの燃費向上については、BEVがコストパリティに達する前に非BEVの燃料消費量が2025年までに1km当たり年率約2%減少すると想定した場合、34MtCO₂eの削減効果が期待できる。EVの普及拡大は30MtCO₂eの削減につながる可能性がある²³⁷(BEV乗用車の販売台数が260万台、BEVトラックが270万台、電動バスが4万8,000台に伸びると想定)。また、走行距離の削減による効果は6MtCO₂eと想定されている。

脱炭素化技術の多くは、費用対効果が高いものの、既存技術に比べて初期投資額が高い。運輸分野の場合、電動化や充電設備のコストを含め、2016年から2030年にかけて毎年約1,200億ドルの設備投資が新たに必要になると推計されている。

上述の対策は、2030年にかけて日本の運輸分野の脱炭素化に大きく貢献すると思われるが、日本がパリ協定で示した「2050年までに2013年度比で80%削減」という目標を達成するためには、抜本的な対策と構造改革が必要となる。過去10年間の技術進歩のスピードを踏まえると、現時点で2050年までの脱炭素化施策を個別詳細に予測することは不確実性の高さから困難である。しかし、次の2つの技術が重要になることは確実と言える。

- **中・大型自動車の電動化:** 中型・大型自動車セグメントについては、2030年時点でEVが依然として比較的高コストである可能性がある。そのため、2030年以降に成功裏に展開できるかどうかは、これからの10年間でバッテリーおよび燃料電池性能の改善、コスト削減、およびサプライチェーン強化の進展に左右される。
- **水素関連技術:** FCVの中でも長距離輸送車両セグメントにおいて初期的には高い採算性が期待されるが、長期的にBEVに対してどこまで価格競争力を高められるかについては見通しが立てづらい²³⁸。水素供給について既存のエネルギーコストと同等の競争力を実現することが課題となるが、日本は国家水素戦略を策定している数少ない国の一つである。

事業構造の転換は、自動車メーカーやサプライヤー、関連産業プレーヤーを含む運輸分野の主要ステークホルダーにいくつかの課題をもたらす。最大の課題としては、バッテリー需要の急増に対応するために必要となるOEMやサプライヤーによるサプライチェーンや生産ラインの拡充が挙げられる。実際に、多くの自動車メーカーが需要増に備えるべくバッテリーの確保に取り組んでいる。日本の自動車メーカーも、多くがバッテリーサプライヤーとの合併事業によりバリューチェーンのカバレッジを広げている。例えば、トヨタは、世界の車載用リチウムイオン電池市場で大きなシェアを持つパナソニックと合併事業を立ち上げている。また、自動車の電動化に伴い、車の所有者は、購買行動や意思決定の判断基準を変える必要に迫られる。現在、ICEとBEVはほぼ同等の価格となっているが、BEVは購入時の初期費用が高いことが普及を阻む壁となっている。この壁を取り払うため、政府や自動車メーカーは、優遇措置(助成金、減税、特別仕様のナンバープレートの交付など)や画期的な購入資金サポートプログラムを提供する必要がある。EVの普及を促進するためには、充電ステーションの拡充も不可欠となる。前述の投資のほかにも、充電ステーションを設置する事業用地の確保や、充電のしやすさ、様々な車種のEVの展開など、対処すべき重要な課題は多くある。また、EVの普及に伴い、ガソリンの消費量は減少していくと考えられるため、燃料小売業者など従来の関連産業プレーヤーも変化への対応を迫られる。

²³⁶ 商業輸送(トラック)の需要増加が見込まれることから、排出量は12MtCO₂e増加し、2030年の運輸分野全体の排出量は151MtCO₂eになると推定される。これは2016年比で28%(58 MtCO₂e)減となる

²³⁷ バッテリー価格を大幅に低減することで可能となる

²³⁸ Steven Loveday, "Why electric cars don't like cold temperatures, and how to fix it," Inside EVs (2019年2月6日)

最後に、脱炭素化に関わる固有の課題に国レベルで対処し、パリ協定の目標達成を目指すための事例を紹介したい。なお、ここでは日本の事例を取り上げる(「コラム5:日本における脱炭素化の取り組み」)。

アジアは気候変動による多くのリスクに直面しているが、すでに展開されている適応策や緩和策の規模を拡大あるいは加速化させる余地がある。インドのエネルギー部門の近代化や、中国の鉄鋼業における新たな製鉄方法の導入、インドネシアの農業改革、あるいは日本における自動車の電動化など、いずれにおいても、アジアには、排出量を削減し、回避不能な気候変動に備え、世界をより持続可能な未来へと導くための資源と能力を備えていると言える。

日本における脱炭素化の取り組み

脱炭素化に関わる意思決定は非常に複雑である。本分析では、これを踏まえたうえで、350以上の脱炭素化技術の総保有コストを基に、2016年から2030年にかけてのシステムコストを最小化するように最適化し、パリ協定の目標を達成するために、最も費用対効果の高い対策を特定した。TCOについては、核技術単体コストのみを考慮し、関連するインフラ整備のコストについては別途評価している。なお、ここでは、現行の技術や政策が変わらず維持された場合の2030年の日本を展望するのではなく、様々な課題に適切に対処した場合に考えられるパリ協定の目標達成に向けた道筋と技術ミックスを検証することを目的としている。本レポートでは、この分析を通じて国が取り組むべき改革の

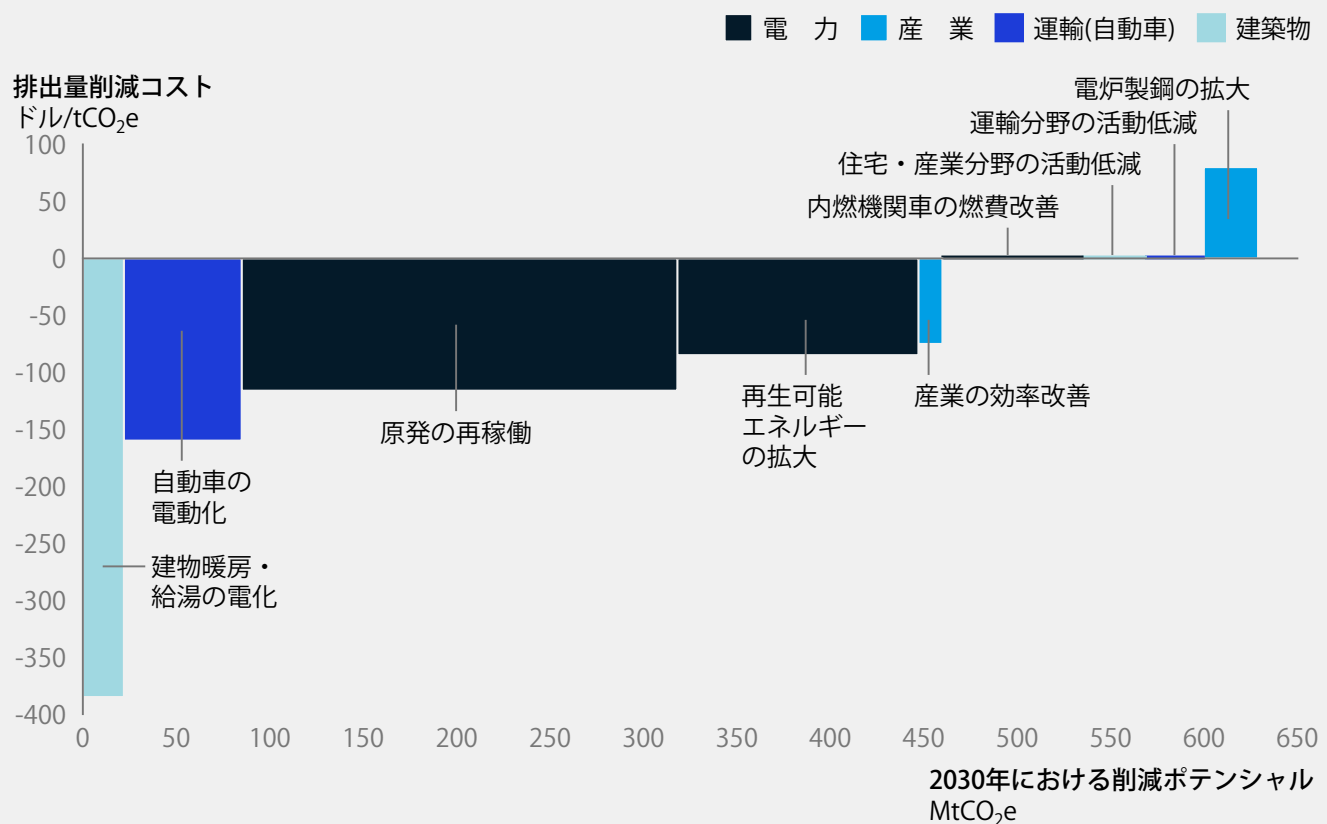
種類と解消すべき課題の規模を示す。ここでは、経済的コストの最適化に焦点を当てているが、日本政府およびその国民は、経済的コスト以外の要素も考慮したうえで最適な脱炭素化対策を選択する必要がある。

日本は、パリ協定に基づき、GHG排出量を2013年度の1,407MtCO₂e比で2030年までに26%、2050年までに80%削減する目標を掲げている¹⁾。しかし、日本のGHG排出量の33%は、脱炭素化技術が現時点ではまだ成熟していない、あるいは費用対効果が低く「削減困難」とされている産業部門で占められている。エネルギー生産によるCO₂排出量は、OECDの中で最も多い部類に入る。本分析により、

日本の2030年の排出量削減目標のうち、95%はコストニュートラル、あるいはライフタイム使用コストの削減につながる施策により達成可能であることが明らかになった(図表26)。つまり、これらの施策により、初期投資コストや、ライフサイクルを通じて必要となるコストを含むTCOの削減につなげることができるのである。これを可能にしているのは、温室ガスの削減に関連する主要なテクノロジーのコストを急激に低下させているグローバルトレンドである。具体的には、バッテリー式電気自動車(BEV)やヒートポンプ、再生可能エネルギーによる発電などの普及が挙げられる。

図表26

2030年の日本のGHG排出量削減目標は8つの施策で達成可能



資料: Decarbonization Pathway Optimizer by McKinsey Sustainability Insights、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

¹⁾ 「Meeting Japan's Paris Agreement targets – more opportunity than cost(パリ協定の目標実現に向けた日本の脱炭素化の道筋)」(2020年3月)

本分析では、電力、産業、運輸、建築物の4つの分野を中心に、2016年から2030年の間に排出量を300MtCO₂e削減するうえで最も費用対効果の高い対策を特定し、限界削減費用曲線(MACC)で示している。MACCは、特定の技術の排出削減ポテンシャルと排出量削減コストを表している。なお、排出削減コストは、CO₂排出量1トン当たりの既存技術と脱炭素化技術のTCOとの差を表している。分析の結果、脱炭素化目標に最も大きく寄与する3つの施策を特定した。

- ゼロエミッション電源の導入拡大(174MtCO₂eの年間排出量削減)は、2030年の目標達成において最も重要である。日本における原子力発電の将来の方向性はいまだ不透明で議論が続けられているが、単純に脱炭素化の観点から見た場合、原発の再稼働(112MtCO₂e)は、経済合理性が高く、かつ排出量削減規模が大きい施策と言える。また、原発の再稼働の次に、太陽光や陸上風力などの再生可能エネルギーの大規模導入(62MtCO₂e)も、他のどの産業の施策よりも高い排出量削減のポテンシャルを有している。
- 建築物(11MtCO₂e)、運輸(30MtCO₂e)、産業(15MtCO₂e)分野におけるエネルギー需要機器の電化、および運輸(34MtCO₂e)、産業(6MtCO₂e)の効率改善も重要な施策となる。
- 建築物、産業、運輸分野において化石燃料への依存度を低減しエネルギー需要を減らすことも、脱炭素化に大きく貢献する。

インフラ投資のコストは、ここでは分けて考慮しており、排出削減コストには含まれていない。試算結果によれば、必要なインフラ投資の規模は合理的な範囲にとどまっており、再生可能エネルギー導入のビジネスケースを覆すレベルには至らない。

最も重要なインフラ投資は主に以下の通りとなる。

- BEVの充電設備の設置: 2030年までに、540万台のBEVに対し約330万台の充電器を配備するためには、90億ドルの投資が必要となる。これは、540万台のBEVの合計車両購入コスト(2,250億ドル)の4%に過ぎない。
- 電力需要の増加に対応するための系統増強: 電力需要分野の電化によるピーク電力需要の増加に対応するためには、主に配電系統において約70億ドルの系統増強投資が必要となる。
- 変動性電源の増加に対応するための系統増強: 2016年から2030年にかけて、系統増強のために必要となる追加投資は、原発フル再稼働シナリオにおいては270~690億ドル、原発停止シナリオにおいては640億ドルと試算される。
- 電力需給バランスを維持するための蓄電システムの構築: 2030年までに15~25GWの蓄電池を導入するためには、約40億~80億ドルの投資が必要となる。

実際の技術導入投資とインフラ投資を合わせると、原発に関するシナリオによっては、現状の技術ミックスを維持する場合の必要投資額と比較して、2016年から2030年にかけて2,700~3,290億ドルの追加投資が必要と試算される。これは、年間平均で190~240億ドルの追加投資となり、日本の年間GDPの0.5%に相当する。

日本は、パリ協定に基づき、2050年までに2013年比で排出量を80%削減するという長期目標を掲げているが、この目標を達成するためには、より抜本的な施策が必要となる。そこで重要な施策として、「中・大型自動車の電動化」「洋上風力発電」「電力の長期貯蔵」「水素関連技術」「二酸化炭素回収・利用・貯留技術(CCUS)」「高温熱の電化」の6つを特定した。



Forestation to protect the environment, China.
© Loonger/iStock/Getty Images

テクニカルノート

本レポートは、気候変動により生じるリスクを理解することを目的としている。「テクニカルノート」では、分析の前提条件とアプローチについて概説している(図表A1)。

本レポートで行われている気候学的分析の大半はウッドウェル気候研究センター(以降、Woodwell)によるもので、手法論の設計や検証結果は、オックスフォード大学気候変動研究所のシニアサイエンティストが第三者の立場から審査している。最終的な設計の選定および気候災害がもたらす影響の解釈はWoodwellが行った。

まずは、「気象」と「気候」の違いを理解することが重要となる。「気象」とは、特定の場所における1日あるいは1週間など短い期間の気温、風速、曇量、降水量などの大気の挙動として定義されている。「気候」とは、経時的・空間的な気象パターンを統計的にまとめたもので、確率的な性質を持っている。したがって、「気候」は合理的で信頼できる精度で予測できるのに対して、「気象」はカオス系のモデルの理論的制約があるため、2週間以上先は予測できない²³⁹。本レポートでは、想定される気候変動のみを検証しており、考察の対象期間は現在から2030年、2030年から2050年としている(ケーススタディにより対象期間は異なるが、その場合は明示している)。また、ここでは、標準的な手続きに従って、数十年間にわたる気候的挙動の平均として将来を定義している。なお、現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している²⁴⁰。

²³⁹ Klaus Hasselmann, "Is climate predictable?," in *The Science of Disasters: Climate Disruptions, Heart Attacks, and Market Crashes*, Armin Bunde, Jürgen Kropp, and Hans Joachim Schellnhuber, eds., Berlin, Germany: Springer (2002年). Jaana Sillmann et al., "Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities," *Weather and Climate Extremes*, Volume 18 (2017年12月)

²⁴⁰ See Gerald A. Meehl et al., "Decadal prediction: Can it be skillful?," *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 90, Number 10 (2009年10月)

図表A1

以下の手法を適用して、気候災害から気候リスクを割り出した

気候災害を評価
h = 確率

概要:
高温が原因となる物理的環境の変化。災害の確率(p)、深刻度(s)で測定

災害が発生する確率(p)

災害の深刻度(s)

災害の種類:
突発的(台風などの暴風、風害、洪水、森林火災)および慢性的災害(熱ストレス、干ばつ、海面上昇)

例:
沿岸部の不動産に被害を与えるハリケーン

災害のリスクに晒されている度合いを評価
E(s)

概要:
気候災害リスクに晒される人、資産、経済活動

対象:
人、資産、経済活動

例:
沿岸部の不動産は、高潮災害のリスクに晒されている
屋外労働に従事する人は、熱ストレスのリスクに晒されている

気候災害への脆弱性を評価
v(s)

概要:
ある気候災害の単位に対して、リスクに晒されている単位当たりの影響・被害

種類:
生理学的(例:異なる温度の状況下で労働生産性に与える影響の割合)
生態学的(例:異なる温度の状況下で農作物の収量に与える影響の割合)
物理的(例:Xフィートの洪水で被害を受ける資産の割合)

例:
労働生産性

適応策を実施しなかった場合の直接的影響を評価

概要:
気候変動が社会経済システムに与える直接的な影響
過去の推移に沿ってリスクが増加し、脆弱性は現在のみと想定
計算式: $\sum p(s) \times E(s) \times v(s)$

影響を受ける社会経済システムの種類
居住性・作業性
食料システム
有形資産
インフラサービス
自然資源

例:
洪水で不動産が損傷
熱ストレスで労働生産性が低下することによるGDP損失

適応策のコスト、有効性、実行容易性を評価

概要:
気候災害に対する脆弱性やリスクの低減に必要な適応策を評価
適応策の実施に要するコストおよび当該適応策では対処できない残存リスクについても考慮

適応策の種類:
「人や資産の保護」、「耐性の強化」、「リスクの低減」、「資金調達・保険制度の整備」など4種類の適応策を特定

例:
インフラの強化、沿岸地域の保護、バックアップ電源の確保、クールシェルターの設置など

資料: マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

気候災害の推定方法

本レポートでは、気候モデルに基づいて予測を行っている。気候モデルとは、大気、海洋、陸圏、生物圏および雪氷圏について約100km x 100kmの解像度でシミュレーションを行う物理学に基づく複雑な計算モデルである。本レポートで使用している気候モデルは、世界の28の主要科学研究所が独自に開発・所有・運用している、Global Climate Models(GCM)や地球システムモデル(ESM)と呼ばれる60の気候モデル群である²⁴¹。世界気候研究計画(World Climate Research Programme)では、CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project 5: 第5期結合モデル相互比較計画)においてこれらのモデルを活用して標準化された実験を行い、排出量の違いによる気候の変化への影響を検証している²⁴²。CMIP5モデル群の予測値は、今日の気候研究で最も広く利用されており、1,500以上の論文で検証されている²⁴³。

マッキンゼーでは、地域気候モデルの予測値も活用している。これは、GCMを基に、これをさらに精緻化して気候変動が各地域の気候に及ぼす影響を高い精度でシミュレーションする動的モデルである。これにより、複雑な地形を持つ地域についても将来の気候を高い精度で検証することが可能となる。

気候変動に対する農業システムの反応のモデル化については、コロンビア大学地球研究所がNASAやアメリカ合衆国農務省(USDA)、ポツダム気候影響研究所など様々な機関と連携して取り組んでいるAgMIP(農業モデルの相互比較と改良プロジェクト)による農業モデル群を活用した²⁴⁴。また、その他の外部機関の予測値(水ストレスに関する世界資源研究所の予測値など)も活用している。気候変動によるオーストラリアの1年当たりの森林火災の発生危険日数の変化や東京の洪水・浸水被害のモデリングに関する詳細は本テクニカルノートの末尾に示している。

気候予測には、マルチモデルアンサンブルの平均値または(分析の要件によっては)中央値、つまり、選択したすべてのモデルの平均予測値を採用している。これは、全モデル群の予測値の平均を採用することで最も精度の高い予測を行えるということが論理的にも経験的にも実証されているためである²⁴⁵。

排出経路と温暖化のペース

気候変動の影響に関する研究には不確実性が内在するため、多くのシナリオが作成されている。その中でも、温室効果ガスの大気中濃度に関するシナリオは最も多く作成されている。気候予測は、将来の温室効果ガスの大気中濃度の変動を考慮して行う必要がある。人間活動による温室効果ガスの排出量を予測することは本質的に不可能であるため、気候研究コミュニティは、RCP(代表的濃度経路)シナリオとして知られている、将来の温室効果ガスの大気中濃度に関する4つの標準化されたシナリオを作成した²⁴⁶。これらは、2005年から2100年にかけての温室効果ガスの大気中濃度の推移パターンを示すものである(比較的低下水準(RCP2.6)～高水準(RCP8.5))。RCPシナリオは、本来、将来予測される多様な排出経路のサンプリングを行うために設計されたものである。各RCPシナリオは、独立したモデリングチームによって作成され、一貫性のある社会経済的パラメータは想定されていない。

²⁴¹ CMIP Phase 5 (CMIP5), World Climate Research program, wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5. 本レポートで使用しているモデルは次の通り: ACCESS1-0, ACCESS1-3, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDLES2M2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5B-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, MRI-ESM1およびNorESM1-M

²⁴² Karl E. Taylor, Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl, "An overview of CMIP5 and the experiment design," Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 93, Number 4 (2012年4月)

²⁴³ Gregory Flato et al., "Evaluation of climate models," in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

²⁴⁴ Cynthia Rosenzweig et al., "The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies," Papers in Natural Resources, 2013, Cynthia Rosenzweig et al., "Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5C and 2C assessments, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Volume 376, Issue 2113 (2018年5月)

²⁴⁵ アンサンブルに含まれるすべてのモデルは、気候システムの特定の要素に特化したものであり、すべての要素を高い精度で評価できるものは存在しない。そのため、すべてのモデルを活用したマルチモデルの予測を行っている。さらに、複数のモデルを組み合わせることで偶然誤差を排除している

²⁴⁶ Detlef P. van Vuuren et al., "The Representative Concentration Pathways: An overview," Climatic Change, Volume 109, Issue 1-2 (2011年11月)

将来の温室効果ガスの排出量の不確実性は、将来の気温の長期にわたる(例えば今世紀末までなど)不確実性の大きな要因ではあるが、本レポートの考察の対象期間(2030年および2050年まで)においては、それほど大きな影響はない。本レポートで詳述しているように、今後10年間の温暖化の影響は主に過去の排出量と気候システムの物理的慣性により決定され、それ以降は、CO₂の累積排出量との相関関係により決定づけられる。脱炭素化には長い時間を要し、脱炭素化対策を集中的に進めるシナリオにおいても、今後30年間の累積排出量は大きくなる。4つのRCPシナリオで想定している今後20年の地球温暖化の進行度合いの差はほとんどなく、2050年にかけてもその差はそれほど大きくはならない。ただし、RCP2.6シナリオはCCS(二酸化炭素回収・貯留)なしでは実現不可能であり、気候モデルのある要素について差がほとんどないからといって、その他すべての要素においても差がないとは言い切れない。

本レポートでは、RCP8.5シナリオに基づいて分析を行っている。RCP8.5は、温暖化ガスの排出量が多く、特段の対策をとらなかった場合のシナリオである²⁴⁷。同シナリオを採用することで、脱炭素化対策をとらなかった場合の物理的リスクの特性を理解することが可能となる。

RCP8.5シナリオについては、石炭消費量を過大に見積もっているため、今世紀後半の排出量の予測値が高すぎるという批判もある。しかし、本レポートでは、2050年までを検証対象期間としており、今後20~30年間の気候変動の「固有リスク」、つまり脱炭素化に向けた追加的措置が講じられなかった場合の物理的リスクの評価が可能になることから、RCP8.5のシナリオを採用している²⁴⁸。

この選択に関する3つの重要ポイントは以下の通りである。

- RCP8.5シナリオは、起点である2005年から、実際の温室効果ガスの排出量に最も近い値を示している(今後についても、過去10年間の排出量の推移とほぼ一致している)²⁴⁹。他のRCPシナリオでは実際よりも低いCO₂濃度を想定しているのに対して、RCP8.5シナリオでは現実とほぼ同じCO₂濃度を想定している。
- 脱炭素化対策をとらなかった場合でも、再生可能エネルギー源と化石エネルギー源の相対的コストの変化により、今後数十年間で、エネルギー関連CO₂排出量は過去のトレンドラインと比較して緩やかに減少すると予測されている²⁵⁰。一方、永久凍土の融解や森林火災の頻発といった生物学的フィードバックによる排出量は増加する見込みである。現行のCMIP5モデルでは、これらのフィードバックの影響は考慮されていないため、外因的要素として考慮する必要がある。生物学的フィードバックに関する最近の文献によると、フィードバックの影響により、近い将来、1.5°C目標のカーボンバジェットは100GtCO₂、2.0°C目標のカーボンバジェットは150GtCO₂減少すると推定されている²⁵¹。
- 次世代のCMIP6気候モデルの初期推計によると、本レポートで使用した現行モデル(CMIP5)に比べCO₂が気候システムに与える影響を大きく評価しており、CMIP5モデルでは温暖化を過小予測している可能性があることを示唆している²⁵²

²⁴⁷ Christopher R. Schwalm, Spencer Glendon, and Philip B. Duffy, "RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions," Proceedings of the National Academy of Sciences (2020年8月)

²⁴⁸ Justin Ritchie and Hadi Dowlatabadi, "The 1000 GtC coal question: Are cases of vastly expanded future coal combustion still plausible?" Energy Economics, Volume 65 (2017年6月)、Justin Ritchie and Hadi Dowlatabadi, "Why do climate change scenarios return to coal?" Energy, Volume 140, Part 1(2017年12月)、Keywan Riahi et al., "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview," Global Environmental Change, Volume 42 (2017年1月)、Keywan Riahi, Arnulf Grubler, and Nebojsa Nakicenovic, "Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization," Technological Forecasting and Social Change, Volume 74, Issue 7 (2007年9月)、Detlef P. van Vuuren et al., "The Representative Concentration Pathways: An overview," Climatic Change, Volume 109, Issue 1-2 (2011年11月)

²⁴⁹ K. J. Hayhoe et al., "Climate models, scenarios, and projections," in Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I, D. J. Wuebbles et al., eds., Washington, DC: US Global Change Research Program (2017年)

²⁵⁰ World Energy Outlook 2019, International Energy Agency (2019年)

²⁵¹ Jason A Lowe and Daniel Bernie, "The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response," Philosophical Transactions of the Royal Society A, Volume 376, Number 2119 (2018年5月)

²⁵² Stephen Belcher, Olivier Boucher, and Rowan Sutton, Why results from the next generation of climate models matter, Carbon Brief (2019年3月)

これらの要素を踏まえ、2030年から2050年にかけてのベースケースとしてRCP8.5シナリオを採用した。2100年にかけての気候変動リスクの検証が目的である場合は、複数の排出経路を検討する必要があるが、今回の考察対象期間は2050年までの30年間であるため、RCP8.5を「固有リスク」を理解するうえで最適な指標とした。

気温上昇を2℃以下に抑えるという2015年のパリ協定の目標を達成するためには、今後40～50年で排出量実質ゼロを実現する必要がある。これを実現できた場合、本レポートで予測した影響がそのまま現実になることはないと考えられる。また、「現状通り」と「2℃」目標の間の排出経路においては、2050年にかけての気温上昇幅はRCP8.5のシナリオが示す2℃よりも低くなり、2℃に達するのは2050年以降となる。つまり、本レポートで予測した影響が顕在化するのには2050年以降となり今世紀後半に先延ばしされることを意味するが、回避することはできない。

別の言い方をすれば、気温上昇を2℃以下に抑えることを目標とした場合、ここで予測している2050年の影響が最も深刻な影響となり(ただし、顕在化するのには2050年以降)、1.5℃に抑えることを目標とした場合は、予測している2030年の影響が最も深刻な影響(ただし、顕在化するのには2030年以降)となる。例えば、RCP8.5シナリオでは、2050年にかけての世界の平均気温の上昇幅を2.3℃と予測している一方で、RCP4.5シナリオでは1.8℃と予測しており、2.3℃上昇するのは2080年としている²⁵³

考察対象地域の気候災害の推計方法

本レポートでは、特定の地域の将来の気候に関する変数に関わる問いに答えることを目的としている。GCMは大陸あるいは地球規模のものであるため、地域や下位地域レベルで気候を予測するためのツールが必要であった²⁵⁴。そこで、BCSD(Bias-Correction and Spatial Disaggregation)として知られる統計的手法を用いた。BCSDは、GCMの予測値の精度を高め、地域レベルでの気候研究に役立つことが実証されている²⁵⁵。また、「ある年に地域Yで深刻度Xの熱波はどのくらいの確率で発生するのか」などといった問いに答えるため、さらに別の手法を用いた。発生確率の定量化については、協働した科学者がブートストラップ法と呼ばれる統計手法を用いてバイアス補正を行ったモデルアンサンブルから確率分布を導出した²⁵⁶。

²⁵³Michael Prather et al., "Climate system scenario tables," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

²⁵⁴Stanley L. Grotch and Michael C. MacCracken, "The use of general circulation models to predict regional climatic change," *Journal of Climate*, Volume 4, Number 3, pp. 286–303 (1991年3月)

²⁵⁵Nurul Nadrah Aqilah Tukimat, "Assessing the implementation of bias correction in the climate prediction," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 342 (2018年4月)、Jie Chen et al., "Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology," *Climatic Change*, Volume 153, Issue 3 (2019年4月)、Martin Aleksandrov Ivanov, Jurg Luterbacher, and Sven Kotlarski, "Climate model biases and modification of the climate change signal by intensity-dependent bias correction," *Journal of Climate*, Volume 31, Number 16 (2018年8月)、Gerhard Krinner and Mark G. Flanner, "Striking stationarity of large-scale climate model bias patterns under strong climate change," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Volume 115, Number 38 (2018年9月)、Patricio Velasquez, Martina Messmer, and Christoph C. Raible, "A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states," *Geoscientific Model Development preprint* (2019年7月)

²⁵⁶Beran Efron, "Bootstrap methods: Another look at the jackknife," *The Annals of Statistics*, Volume 7, Number 1, pp. 1–26 (1979年1月)、Manfred Mudelsee, "The bootstrap in climate risk analysis," in *In Extremis: Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology*, Jurg P. Kropp and Hans Joachim Schellnhuber, eds., Heidelberg, Germany: Springer (2011年)、Barbara Hennemuth et al., *Statistical methods for the analysis of simulated and observed climate data: Applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation*, Climate Service Center, CSC report number 13 (2013年)、Andrew C. Parnell, "Climate time series analysis: Classical statistical and bootstrap methods," *Journal of Time Series Analysis*, Volume 34, Issue 2 (2013年3月)

気候災害に伴う物理的な気候リスクの推定方法

マッキンゼーは、気候変動による直接的な影響やノックオン効果を評価することにより気候変動の物理的リスクを特定し、その影響を回避するための適応策を示している(図表A1)。気候変動による物理的リスクの大きさは以下の要因に左右される。

- **気候変動による直接的な影響:** 気候変動の直接的な影響の度合いは、「気候災害の規模と発生確率」「気候災害の影響を受ける資産、人口、経済活動の規模」「気候災害に対する脆弱性」の3つの要素により決定される(直接的な影響 = 災害 × リスク × 脆弱性)。ここでは、様々な深刻度の災害を評価してその影響を検証している。ここで取り上げたケーススタディと国別のリスク評価では、気候災害と災害リスクが今後どのように推移していくかを示している。ケーススタディでは、予測されるトレンドに沿ってリスクは増大すると想定した(インドの場合は、産業構成の変化やエアコンの普及率の向上など)。同様に、地理空間的評価についても人口やGDPは増加すると想定している。ただし、今回の分析では、地理空間的・時系列データに限界があるため、これらの変数の地理空間分布が経時的に一定になることを前提とした。また、浸水深により資産の被害度はどのように変化するのか、などといった「被害関数」を特定することで、各システムの気候災害に対する脆弱性を評価した。被害関数は、一般に公開されている学術文献や外部のデータソースから収集した。ここでは、生理学的(熱ストレスが人間の生産性に与える影響など)、生態学的(干ばつが農業の生産性に与える影響など)、物理的(建物の洪水に対する脆弱性など)な被害関数を検討している。さらに、気候災害による直接的な影響を受けるシステムとして「居住性・作業性」「食料システム」「有形資産」「インフラサービス」「自然資源」を特定している。これにより、気候変動が経済生産高や資産、および人々の生活にどのような影響を与えるかを評価している。

システムがほとんど機能しない、あるいは破綻して全く機能しなくなってしまうほどの気候災害が起きた場合、その影響は非線形化する。例えば、人間の場合、深部体温を37℃に保つことで身体を正常に機能させることができるとされているが、これを0.06℃超えると仕事のパフォーマンスが落ち、3℃上昇すると重度の熱中症にかかり、5℃上昇すると死に至る恐れがある。分析の一環として、ケーススタディでは、物理的、社会的、経済的システムの限界を検証し、潜在的な影響を評価している。

- **適応コスト:** ここでは、適応策を大きく「人や資産の保護」「耐性の強化」「リスクの低減」「資金調達・保険制度の整備」に分類している。ここでは、まず、更なる適応策が講じられることがなく、歴史的に見て高い水準でリスクが上昇し続け、リスクに対する脆弱性は現在と変わらないとの前提に基づいて固有リスクを評価している。次に、適応策に加え、可能な場合には、気候変動リスクに適応するために必要となるコストとリスク低減策の検証を行った。

ケーススタディの選定および地理空間的なリスク分析の方法

気候変動の物理的リスクを社会経済的影響に結び付けるため、気候変動が極限に達し、物理的限界に近くなった場合の影響を示す6つのケースを検証した。ケーススタディの選定にあたっては、想定される気候災害の直接的な影響に関する文献や専門家へのヒアリングの結果に基づいて、気候災害、産業分野、地域の組み合わせを考案した。気候災害は、「居住性・作業性」「食料システム」「有形資産」「インフラサービス」「自然資源」の5つのシステムに影響を与えるため、これらのシステムを反映し、生理学的、人為的、または生態学的な閾値への近接性に基づいて6つのケースを選定した。これらのケースは、気候変動リスク分析の最新の事例と言える。ケースごとに上述の手法を適用して直接的な影響を定量化するとともに、考えられる適応策を提示している。

地域の地理空間的なリスク評価については、アジアのGDPと人口の95%以上を占める16カ国を、気候変動による影響を受ける5つの社会経済システムに関する6つの指標に基づいて分析した²⁵⁷。ここでは、気候災害(確率論的な災害の深刻度の評価や深刻度ごとの災害の発生確率の評価を含む)やリスク、耐性に関する地理空間データを活用している。またグリッドセルレベルでの分析を行い、災害に関するデータをそのリスクや被害関数と組み合わせで評価した。さらに、グリッドセルの値を国と地域の数値と組み合わせで評価した。ここでは、気象を予測するのではなく、気候変動による影響を定量化することを目的としている。

今回の分析では、気候変動による直接的な影響のみを推計しており、ノックオン効果は考慮していない。可能な場合には、国レベルの分析結果をまとめ、様々な気候変動リスクに関するアジア全体の知見を導出している。

評価に用いた指標の詳細については、本レポートの第1章に示している。したがって、ここでは分析に用いた気候災害データと気候モデルについて取り上げる。今回の分析では、想定される一連の気候災害を検証対象としており、以下のように定義・評価している。

致命的な熱波は、木陰で風に当たっており、健康で、十分な水分補給を行い、暑熱馴化している人でも熱射病で死に至る恐れがあるレベルにまで深部体温が上昇してしまう状況が3日間連続して続く現象として定義している(ある空気塊を一定気圧に保ちながらその空気塊の中に水を蒸発させることにより飽和に達するまで冷却した場合に、その空気塊が持つ温度を湿球温度と定義)。3日間単位で最も温度が高い6時間の湿球温度の平均を閾値として採用した。これは、Stullの理論(2011年)に基づいて計算している²⁵⁸。人間が生存可能な湿球温度の限界値は一般的に35℃とされているため、34℃を限界湿球温度とした。この温度下では、健康な人の場合、日陰で休んでいる状態の生存限界値は4~5時間である。都市部では、著しいヒートアイランド効果により、湿球温度34℃の熱波が35℃の限界値を超える可能性があり、適応策をとらない限り熱波による死亡率は高まることになる²⁵⁹。

²⁵⁷ 指標には、極端に高い気温や湿度によるGDP損失の規模、致命的な熱波に襲われることで命の危険に晒される人口の割合(居住性・作業性)、農産物の不作リスク(食料システム)、河川氾濫により被害を受ける可能性がある資産の割合、主要4作物(米、小麦、大豆、トウモロコシ)の年間収量が15%以上減少する確率、気候区分が変わる陸面の割合(自然資源)が含まれる

²⁵⁸ Roland Stull, "Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 50, Issue 11, pp. 2267-69 (2011年11月)

²⁵⁹ 健康な人の場合、湿球温度が35℃で、日陰で休んでいる状態の生存限界値は5時間程度である。詳細については、Steven C. Sherwood and Matthew Huber, "An adaptability limit to climate change due to heat stress," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Volume 107, Number 21, pp. 9552-5(2010年5月) 参照

致命的な熱波の予測はCMIP5のマルチモデルアンサンブルに基づいており、各モデルはERA-Interimのデータセットを用いて独立的にバイアス補正を行った²⁶⁰。具体的には、2021年から2040年にかけての致命的な熱波の発生確率を、CMIP5アンサンブルから抽出した20のGCMで算出し、独立的にバイアス補正を行った。20のGCMによる20年分の単年観測では400年分のサンプルデータしか得られないため、ブートストラップ法によりサンプルサイズを1,000年分に増やした。このように、ロバストなサンプルサイズを確保したうえで、致命的な熱波の発生確率を1年単位で拠点ごとに算出した。乾燥地が大気状態に与える影響に関するMIROCモデル群のバグを考慮し、MIROCモデルあり・なしの両方で分析を行ったが、MIROCモデルを使わなくても同様の結果が得られた²⁶¹。最終的には、致命的な熱波の1年当たりの発生確率が1%未満のグリッドセルはすべて排除した。予測には、将来的な大気エアロゾルの挙動や、都市部のヒートアイランド現象あるいはクーリングアイランド現象に起因する不確実性が伴う。大気エアロゾルの濃度が高ければ、冷却効果が生じ、気温上昇リスクは相殺される。大気エアロゾルあるいは大気汚染物質は太陽光を反射・吸収するため、人工被覆域の気温を低下させる²⁶²。

現在、致命的な熱波の年間発生確率がゼロではないとされている地域は、大気中のエアロゾル濃度が高い(詳細についてはインドのケーススタディを参照)。しかし、CMIP5気候モデルでは、エアロゾルの濃度は十分に考慮されていない。そのため、CMIP5気候モデルで、特定の地域について致命的な熱波の年間発生確率がゼロではないとされていたとしても、ここでは0%に設定している。これとは別に、都市部のヒートアイランド効果に起因する不確実性も存在する。世界419都市の分析を行った結果、都市部とその近郊の日中の平均気温の差は $+1.5^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ で、外れ値は最大 7°C 高かった²⁶³。

調査の結果、インドの多くの都市では、夏季にヒートアイランド強度がマイナスとなり、モンスーン前の暑い季節には、都市部の気温が周辺よりも低くなることが明らかになった。この原因としては、都市部は周辺に比べ大気中のエアロゾル濃度と植被率が高い(モンスーン後に農地として活用される荒地が大半を占めている)ことが挙げられる。これらはインド亜大陸のほとんどの地域に当てはまるが、北部の多くの都市については、ヒートアイランド強度がプラスになるという統計的に有意な結果が得られた。インド北部は、どこよりも早く 35°C の閾値を超える熱波が発生すると予想されており、大気中のエアロゾル濃度が減少すると、現在進行中の人為的な冷却効果が低下する可能性があるため、 34°C の熱波が 35°C になる危険性が高まる²⁶⁴。

極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間が年間総実労働時間に占める割合は、1日12時間の労働時間のうち、これらの気候災害により損失した時間の割合の平均に基づいて算出している。極端に高い気温や湿度により労働時間が削減される主な理由は2つある。一つは、熱中症予防のためにこまめに休憩をとるため、もう一つは人間は暑さへの自己防衛反応として疲労を感じ生産性が低下するためである。気温の予測は、CMIP5のマルチモデルアンサンブルの予測値の平均に基づいており、各モデルはERA-Interimのデータセットを用いて独立的にバイアス補正を行った。労働時間の損失の計算は、Dunneら(2013年)の手法により、Fosterら(2019年)の経験的データで修正したISOによる暑熱への曝露回避に関する基準を用いて行った²⁶⁵。GDP損失については、極端に高い気温や湿度のリスクに晒されていることが明らかである「農業」「鉱業・採石業」「建設業」のGDPに労働時間の損失が与える影響を算出した。つまり、「労働時間がX%減少した場合、産業別GDPはX%減少する」というような予測を立てている。その他の産業(特に観光業)も極端に高い気温や湿度によるリスクに晒されているため、これらの予測値は過小評価になっている場合がある。レンジの下限域は、今日の産業構成が継続することを

²⁶⁰ Jurg Schmidli et al., "Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods," *International Journal of Climatology*, Volume 26, Number 5, pp. 679–89 (2006年4月)に基づいてLOCI手法を活用してバイアスを補正

²⁶¹ Geert Jan van Oldenborgh et al., "Extreme heat in India and anthropogenic climate change," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 18, Number 1, pp. 365–81 (2018年1月)

²⁶² Geert Jan van Oldenborgh et al., "Extreme heat in India and anthropogenic climate change," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 18, Number 1, pp. 365–81 (2018年1月)

²⁶³ Shushi Peng et al., "Surface urban heat island across 419 global big cities," *Environmental Science & Technology*, Volume 46, Issue 2 (2012年1月)

²⁶⁴ Hiteshri Shastri et al., "Flip flop of day-night and summer-winter surface urban heat island intensity in India," *Scientific Reports* Volume 7 (2017年1月)

²⁶⁵ John P. Dunne et al., "Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming," *Nature Climate Change*, Volume 3, pp. 563–66 (2013年2月). Josh Foster et al., "A new paradigm to quantify reduction of physical work capacity in the heat," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Volume 51, Number 6, p. 15 (2019年)

想定しており、上限域は IHS Markit の「Economics & Country Risk」の分野別移行予測に基づいている。これらの予測値の潜在的な不確実性のレンジを評価するために、アンサンブルモデルのスプレッドから予測値の平均の変動幅を検証し、75パーセンタイルと25パーセンタイルの範囲のアンサンブル予測を用いて同様の分析を行った。これは、「平年より暑い年」あるいは「平年より寒い年」と比較することで、「平年」値への潜在的な影響を把握することを目的としている。極端に高い気温や湿度に晒される屋外労働時間が年間総実労働時間に占める割合に変化がなく、2030年にかけてのモデルの不確実性のレンジ内に収まっている国については、予測値がロバストではない可能性がある。2050年にかけてのすべての国の予測値はロバストである。

農作物に関する調査についてはAgMIPの予測値を使用し、収量の推移は1998年～2017年までの平均収量と比較して定量化した。AgMIPのアンサンブル予測は、物理的空間分解能と作物生産量の相関関係を示す値としては優れているが、国別分析を行うことはできなかった(つまり、小規模な国や作物の収量が極めて少ない大国については根拠のある予測を出すことはできなかった)。その代わりに、各地の主要穀倉地帯を特定し、その収量の推移を定量化した。また、農作物については、利用可能なすべてのGCMと非潜在収量モデルの予測値の平均を活用した。さらに、窒素制限とCO₂施肥効果を考慮してすべての予測を行った。なお、農作物の栄養価の低下までは考慮していない。CO₂施肥効果は一定ではないため、予測値が過小評価になっている場合がある。

水ストレスと水供給量の変化は、水源地における再生可能水の年平均供給量の増減率を使用して算出した。利用可能な再生可能水量は、水源地の年間降水量と、水系から水源地への水の流出量の相関である。水供給データは、CMIP5アンサンブルの予測値とGLDAS-2 NOAH v.3.3水文モデルを組み合わせた世界資源研究所(WRI)のものを引用している。本データは、6つの基本的CMIP5モデルに基づくWRIのWater Risk Atlas(2018年)によるものである。ローデータセットの基準期間は、2020年、2030年および2040年を中心とした20年である。1998～2017年、および2041～2060年のデータは、基準データセットに示す60年トレンドから線形予測した。各国の水ストレスの地理空間分析については、気候変動による影響のみを切り分けて検証するため、水需要は現在の水準で推移すると想定した。

洪水分析には、WRIの最新のAqueduct Global Maps 3.0データを使用した。データの入手可能性の問題から、ここでは河川氾濫のみを検討した。河川氾濫とは、流域面積が少なくとも10,000km²以上の河川の氾濫による洪水を意味する。また、データの入手可能性の問題から都市部の資産のみを検証対象とし、開発が進んでいる範囲と進んでいない範囲を示した土地利用図を活用してリスクを評価した。評価方法の詳細については世界資源研究所(WRI)のAqueduct Floods Methodologyを参照していただきたい。ここでは、重要なポイントのみを取り上げている。

各確率年の河川氾濫レイヤーの計算には、GLOFRISモデルを使用した²⁶⁶。GLOFRISは、地球規模の水文モデルであるPCRaster Global Water Balance(PCR-GLOBWB)と河道から氾濫原への氾濫水の流出経路のスキームを組み合わせて、長期的な視点から、いくつかの気候条件下で氾濫流量や洪水位のシミュレーションを行っている。EU-WATCH(European Union Water and Global Change)プログラムとISI-MIP(Inter-sectoral Impact Model Intercomparing Project)の気象情報データセットをPCR-GLOBWBに適用し、1950年から2099年までの様々な期間の検証を行った。PCR-GLOBWBの予測値に基づいて極値統計を適用し、現在(1960~1999年のシミュレーション結果に基づく)と将来(2010~2049年、2030~2069年、2060~2099年)の気候について、洪水の確率年(2年、5年、10年、25年、50年、100年、250年、500年、1,000年)ごとにグリッドセル当たりの氾濫原の水量を算出した。次に、その水量を洪水浸水量モデルのインプットとして5フィート×5フィートの洪水量を30インチ×30インチの解像度の浸水深マップに変換した。

各影響指標は、災害(河川氾濫)、リスク(都市部の資産)および脆弱性に関するデータを用いて、洪水の確率年(2年、5年、10年、25年、50年、100年、250年、500年、1,000年)ごとに算出した。影響は、気候災害の発生確率と影響の関係を表す曲線を用いて、年間被害額期待値(以降、EAD)あるいはリスクに落とし込んだ。なお、この曲線は、X軸が洪水の発生確率(確率年)、Y軸が影響度となっている。曲線の下部分はEADを表しているが、その面積を求める前に、洪水防御を考慮する必要がある。洪水防御は、曲線に垂直線を追記するかたちで表している²⁶⁷。洪水防御の垂直線より右側(つまり、小規模な洪水による被害)はすべて防御されているため、被害額はゼロになると想定し、垂直線より左側の面積を求めるかたちでEADを算出した。

標準の分析で用いた洪水防御レベルはFLOPROSを使ってモデル化した。洪水防御レベルは、(当該確率年について)洪水防御施設で防御し得る最大規模の洪水を想定している。例えば、10年洪水防御レベルでは、10年に一度級(あるいはそれ以下)の洪水による資産の被害を防ぐものとする。FLOPROSでは、国ごとに洪水防御レベルを推計している。国や河川流域など比較的広い領域については、領域内の各地域のEADをすべて足して洪水防御レベルの平均を推計した(河川については河川流域に入っている地域のみEADを使用)。次に、洪水防御レベルの様々な数値を使用して何度か計算を行い、被害率曲線を作成しEADを推計した。推計値が実際のEADと一致した場合には、その洪水防御レベルを当該領域の標準とした。

自然資源のリスクについては、ケッペンの気候区分を使用して気候区分が変化した陸面の割合を指標とし、降水量や気温など気候統計データの年平均値に基づいて特定の領域を評価した。完全な相似ではないものの、生態系の種類はケッペンの気候区分と非常に密接な相関関係にあるため、気候区分の変化は生態系へのストレスや変化を示す適切な指標と言える²⁶⁸。

²⁶⁶ Aqueduct Floods Methodology, World Resources Institute (2020年)

²⁶⁷ 確率年ごとの洪水防御は確率に変換してから計算に反映させた(1/確率年の洪水防御)

²⁶⁸ 気候区分の変化に関するデータは、Franz Rubel and Markus Kottek, "Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification," *Meteorologische Zeitschrift (Contributions to Atmospheric Sciences)*, Volume 19, Number 2(2010年4月)から引用

気候変動のモデリング手法: 東京の洪水

東京の現在および将来の洪水リスクは、LISFLOOD-FP洪水モデルVer.5.9を使用して推計した²⁶⁹。LISFLOOD-FPは広範囲で検証されており、アメリカ地質調査所(USGS)が実施したいくつかの局所的かつ詳細な洪水被害に関する調査と比較しても、遜色のない結果が得られている²⁷⁰。Wingら(2017年)は、解像度30mの米国本土のLISFLOOD-FPモデルの予測値を、解像度1~10mの標高データを利用したUSGSの洪水リスク推定値と比較した。LISFLOOD-FPモデルは、USGSの9つの調査での100年に一度級の洪水による被害の推計結果とのヒット率が80%以上となっており、1つの洪水ベンチマーク調査を除いて、重要成功指数(CSI)の範囲は60~90%であった²⁷¹。そのため、解像度30mでの計算効率と広い空間規模でも洪水リスクを高い精度で推計できることを考慮し、LISFLOOD-FPモデルを使用して東京の洪水リスクのモデリングを行った。

東京は、洪水を引き起こす河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫に対する脆弱性が高い。そこで、最悪シナリオのシミュレーションを行うために、集中豪雨と高潮、河川氾濫をインプットとして、24時間の複合洪水事象をモデル化した(図表A2)。複合洪水事象とは、100年の一度級の集中豪雨と河川氾濫、高潮が同時に起きた場合の洪水事象を指す。後述の通り、100年に一度級の集中豪雨と河川氾濫、高潮に関する数値は、様々なデータソースを活用して個別に計算しているが、確率的な関係が全くないわけではない。高潮と集中豪雨の発生確率を別々に算出した場合よりも、集中豪雨が発生していることを条件づけた場合の方が巨大な高潮の発生確率は高くなる²⁷²。

したがって、洪水リスクの過小評価を避けるため、集中豪雨と河川氾濫、高潮をまとめてモデル化することで、100年に一度級の洪水現象に関する現実的な推計を行っている。ただし、同時確率分布を使用した計算は行っていないため、洪水を引き起こす氾濫(河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫)を個別にシミュレーションした2050年については、追加で3つの洪水モデルを実行した。この分析により、東京各地における洪水発生に影響を及ぼす要因を特定した。

²⁶⁹P. D.Bates and A. P. J. De Roo, "A simple raster-based model for flood inundation simulation," *Journal of Hydrology*, Volume 236, Issues 1–2, pp. 54–77 (2000年9月)

²⁷⁰Jeffrey Neal et al., "How much physical complexity is needed to model flood inundation?," *Hydrological Processes*, Volume 26, Issue 15(2012年7月)。Tom J. Coulthard et al., "Integrating the LISFLOOD - FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: Implications for modelling landscape evolution," *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 38, Issue 15 (2013年12月)。Oliver E. J.Wing, "Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States," *Water Resources Research*, Volume 53, Issue 9 (2017年9月)

²⁷¹ヒット率は、モデルがベンチマークデータに含まれる浸水セルの数をどの程度の精度で予測できたかを表す。基本的に、ヒット率は、バリデーションデータがモデルによってどれだけ過小評価されているかを示すもので、ヒット率が低ければ低いほど、過小評価されていることになる。CSIは、過小評価と過大評価の両方を考慮しているため、通常、ヒット率よりも低くなる

²⁷²S. F. Kew et al., "The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine delta," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, August 2013, Volume 13, Issue 8 (2013年8月)

図表A2

2050年に東京で100年に一度級の洪水が発生した場合の 集中豪雨、高潮、河川氾濫のパターンはそれぞれ異なる

RCP8.5シナリオに基づく

2050年に100年に一度級の気象災害が発生した際のイメージ例

水位: 15cm  2m以上

集中豪雨



高潮



河川氾濫



注記: RCP8.5シナリオをベースとしている理由については、「Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts(気候変動リスクとその対応策 物理的リスクと社会経済的影響)」、McKinsey Global Institute (2020年1月)の「付録: テクニカルノート」を参照。標準的な手法に基づき、数十年間にわたる気候的挙動の平均として将来を定義。現在の気候状態は1998年から2017年の平均、2030年は2021年から2040年の平均、2050年は2041年から2060年の平均として定義している。これら地図に示されている境界線や名称は、マッキンゼーが正式に承認または認識したことを意味するものではない

資料: Woods Hole Research Center、McKinsey/United Nations (disputed boundaries)、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート分析

モデルを実行する際に必要となるいくつかのインプットについて以下に詳述する。

- **標高データ:** 最終的な標高ラスタデータは、国土地理院の5mメッシュ(標高)のラスタデータをメインとしている²⁷³。なお、5mメッシュのラスタデータの欠損部分は、国土地理院の10mメッシュのラスタデータで補足している。これらのデータを組み合わせ、解像度25mのラスタデータを構築した。
- **洪水対策:** 洪水の発生確率は、標高データの前処理ではなく、洪水モデルのシミュレーションの結果となるようにした。ここでは、国土交通省の海岸保全施設データで特定された海岸保全施設の整備基準を標高ラスタデータに変換している²⁷⁴。海岸保全施設の整備基準が示されていない場合は、Hoshinoら(2016年)のデータを用いて設定した²⁷⁵。河川堤防については、まず5mメッシュの標高ラスタデータで堤防をトレースして標高データに落とし込み、堤防の整備基準を抽出し、25mメッシュの標高ラスタデータに変換した。この抽出方法の場合、必ずしも堤防の天端高を捉えているわけではないため、モデルを繰り返し実行して堤防の越流決壊地点の標高が5mデータと一致するかどうかを確認し、誤差のある部分を補正した。また、水門はすべて閉じていると仮定し、周辺の堤防の標高を使用して標高ラスタデータに落とし込んだ。なお、水門は、上述の反復的な標高補正プロセスで特定した。
- **浸透能および雨水排水システム:** 土壌への浸透数値は、アメリカ合衆国農務省(USDA)のSCS-CN(Soil Conservation Service Curve Number)法とJaafarら(2019年)のグローバル・カーブナンバー・データを活用して算出した²⁷⁶。国土技術政策総合研究所によると、東京の雨水排水システムは基本的に時間50ミリ降雨を基準に設計されているため、都市に分類されている地域についてはこの浸透能を適用した。
- **降水量:** 発生頻度に基づく出水時雨量分布を用いて24時間100年確率降水量を適用した。この分布は、同じ確率年で降雨継続期間ごとに暴風雨による降水量をネスト化したもので、設計やエンジニアリングの枠組みにおける有用性の高さから選択している²⁷⁷。降雨継続期間ごとの降水量は、東京都建設局の中小河川における今後の整備のあり方検討委員会の調査結果から引用した²⁷⁸。2050年の100年確率降水量は、3つのGCMに基づく解像度0.22°の地域気候モデル「REMO2015」のアウトプットを用いて、RCP8.5シナリオ下で、過去(1971~2000年)に起きた100年確率の降雨が2035~2064年の期間で発生する確率の変化を推計して算出した。また、地域頻度分析を実施してL-モーメント法を用いて一般化極値分布(GEV)を推定し、アウトプットをモデル化した²⁷⁹。次に、3つのモデルから算出された過去の100年確率の降雨の将来の発生確率の中央値に、モデルのアウトプットではなく、観測された降水量を割り当てた。この分析を通じて、1971~2000年の間に100年に一度の確率で発生していた降雨は、2035~2064年には28年に一度の割合で発生する可能性があることが明らかになった。モデルのアウトプットには降水量のバイアスが含まれている可能性があるが、パーセントイルに基づいた手法で極端降水現象の発生確率の変化を評価することで、バイアスが将来の極端降水減少の発生確率の変化の推計に与える影響を軽減している。最後に、降水量は経時的に変化するが、洪水モデルでは空間的に一定量で推移するとしている。

²⁷³ 「5mメッシュおよび10mメッシュの数値標高モデル」、国土地理院(2020年)

²⁷⁴ 「海岸保全施設データ」、国土交通省 国土政策局 国土情報課(2012年)

²⁷⁵ Sayaka Hoshino, "Estimation of increase in storm surge damage due to climate change and sea level rise in the Greater Tokyo area," *Natural Hazards*, Volume 80, Issue 1 (2016年1月)

²⁷⁶ Mockus, V., and A. Hjelmfelt, "Estimation of direct runoff from storm rainfall," in *SCS National Engineering Handbook*, Washington, DC: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1972年), Hadi H. Jaafar, Farah A. Ahmad, and Naji El Beyrouthy, "GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design," *Scientific Data*, Volume 6 (2019年)

²⁷⁷ Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual, US Army Corps of Engineers (2000年)

²⁷⁸ 「東京都内の中小河川における今後の整備のあり方について」、中小河川における今後の整備のあり方検討委員会、東京都建設局(2012年)

²⁷⁹ Armelle Recca Remedio et al., "Evaluation of new CORDEX simulations using an updated Köppen-Trewartha Climate Classification," *Atmosphere*, Volume 10, Issue 11 (2019年11月), J. R.M. Hosking and J. R.Wallis, *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*, Cambridge, UK: Cambridge University Press (2005年)

- **河川氾濫**: 過去に100年に一度の割合で発生した河川氾濫に関する数値は、国土交通省の水文水質データベースの量水標データから算出した²⁸⁰。河川氾濫に関する数値の起点はピーク時水位よりも低く、シミュレーション中盤の2時間でピーク時水位に達し、その後は減少に転じている。数値の起点と終点は、量水標の記録に含まれる過去に発生した洪水から推計した。河床地形データを入手できなかったため、過大評価を避けるために河川氾濫に関する数値から河川水位を算出した。将来の河川氾濫に関する数値は、降水量と同様に極値解析により推計しているが、ここではISI-MIP(Inter-sectoral Impact Model Intercomparing Project)の流量データを使用している²⁸¹。ここでの分析には、4つの水文モデルのデータを使用した。これらのモデルはそれぞれ4つのGCMに基づいており、合計16の異なるモデルを実行した。ここでは、将来の降水量の推計方法と同様に、RCP8.5シナリオに基づいて、16のモデルから算出したパーセンタイル値の中央値を採用している。この分析を通じて、1971～2000年の間で100年に一度の確率で発生していた河川氾濫は、2035～2064年には71年に一度の割合で発生する可能性があることが明らかになった。大規模な河川氾濫の発生確率は極端降水現象ほど高くはならないことが判明しており、これは過去の文献の内容とも一致している。世界各地でISI-MIPを用いて計算された大規模な河川氾濫の発生確率は、ISI-MIPモデルで使用されたGCMによる降水量の予測値に比べてばらつきが大きい。最近のISI-MIPの研究によると、RCP8.5シナリオにおいては、21世紀末にかけてアジア、アフリカ、南米の一部の地域では、過去に30年に一度の割合で発生していた河川氾濫による5日間のピーク流量は増加するが、欧州や北米、南米のその他の地域では減少することが明らかになった²⁸²。また、RCP8.5シナリオでは、5日間の最大降水量は、21世紀末にかけて南アメリカ、アフリカ、オーストラリア南西部の一部の沿岸地域を除き地球全体で増加する²⁸³。そのため、降水量の増加に伴い大規模な河川氾濫による流量も同じ水準で増加すると想定することはできない。また、高解像度の水文モデルを用いて日本の将来の河川流量をモデル化したある調査から、東京で過去(1971～2003年)に100年に一度の割合で発生していた河川氾濫の発生確率は、近い将来(2015～2039年)には1.3倍、21世紀後半(2075～2099年)には約1.1倍に上昇し、1時間当たりの流量も増えることが明らかになった²⁸⁴。ただし、ここではRCP6.0シナリオに類似したSRES A1Bシナリオを使用しているため、本レポートで示されている結果とは異なる可能性がある。
- **海面と高潮**: 現在の高潮は、Hoshinoら(2016年)およびRuiz Fuentes(2014年)のデータを用いて推計した²⁸⁵。2050年の海面と高潮に関する推計値は学術文献から引用した。Hoshinoら(2016年)は、RCP6.0に類似するSRES A1Bシナリオを用いて、2100年には東京湾の高潮水位は0.2mから0.5mに上昇すると推計している。そのため、RCP8.5シナリオを想定した場合、将来の高潮の数値は過小評価となる。Hoshinoら(2016年)のデータによると、図表8に示した9カ所の高潮水位の平均上昇幅は0.31mとなっている。Moriら(2019年)による将来の高潮の推計では、1951～2000年と比較して気温が4℃上昇すると想定している²⁸⁶。CMIP6のScenario Model Intercomparison Projectのデータによると、2050年にはRCP8.5シナリオでは1960～2000年と比較して気温は2℃上昇するとしている²⁸⁷。したがって、Moriら(2019年)が推計した高潮水位の上昇幅の半分の値は、2050年にかけての高潮水位の上昇幅とほぼ一致する。例えば、東京における気温が4℃上昇した場合の高潮水位の上昇幅は約0.3mであるため、2050年にかけての上昇幅は0.15mとなる。ここでは、Hoshinoら(2016年)のデータに基づいて2050年にかけての高潮水位の上昇幅を低めに0.15mとしている。この数値

²⁸⁰ 「水文水質データベース」、国土交通省(2020年)

²⁸¹ Lila Warszawski et al., Research design of the intersectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP). Proceedings of the National Academy of Sciences, accepted (2013年)

²⁸² Rutger Dankers et al., "First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble," Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 111, Number 9

²⁸³ Collins, Matthew et al., "Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility," in Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press (2014年)

²⁸⁴ Yasuto Tachikawa et al., "Prediction of effects of climate change on river flow in Japan," Proceedings of JSCE B1 (Water Engineering), Volume 67, Issue 1 (2011年)

²⁸⁵ M. J. Ruiz Fuentes, Storm surge barrier Tokyo Bay: analysis on a system level and conceptual design, Delft University of Technology (2014年)

²⁸⁶ Nobuhito Mori et al., "Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model," Coastal Engineering Journal, Volume 61, Issue 3, 295-307 (2019年)

²⁸⁷ Brian C. O'Neill et al., "The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6," Geoscientific Model Development, Volume 9, Issue 9 (2016年9月)

(0.15m)に、Koppら(2014年)の補足表7に示されているRCP8.5シナリオの2050年の潮高の基準である海面上昇幅の50パーセンタイル値(0.28m)を加算した²⁸⁸。RCP8.5シナリオでの2050年の東京の潮高の基準は、それぞれ海面上昇幅の5パーセンタイル(0.11m)と95パーセンタイル(0.46m)となる。RCP8.5シナリオでの2050年の世界の海面上昇幅の50パーセンタイル値は0.29mで、東京湾の海面上昇幅とほぼ一致している。

- **氾濫原の摩擦係数またはマンニングのn値(粗度係数):** 土地被覆に基づいてモデルドメインの各ピクセルに摩擦係数を割り当てた。高解像土地被覆データはJAXAのものを、摩擦係数はアメリカ農務省の分析結果を適用している²⁸⁹

²⁸⁸Robert E. Kopp et al., "Probabilistic 21st and 22nd century sea - level projections at a global network of tide - gauge sites," *Earth's Future*, Volume 2, Issue 8 (2014年8月)

²⁸⁹ALOS/ALOS-2 Science Project and Earth Observation Priority Research: Ecosystem Research Group, Earth Observation Research Center, High-resolution land use and land cover map of Japan (2014-2016)/ Version 18.03, Japan Aerospace Exploration Agency (2018年3月). National Resource Conservation Service, USDA, "Manning's n values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas," (2016年)

気候変動のモデリング手法: オーストラリアの森林火災

火災リスクは、森林火災気象指数(FWI)を使用して評価している²⁹⁰。FWIは、カナダ山林局により開発された指標で、世界的に使用されている²⁹¹。FWIの計算には、降水量、気温、風速、相対湿度、積雪量、緯度、季節といった気象場が必要となる²⁹²。FWIは、着火のしやすさと延焼可能性に基づいて、火災の強度を1日単位でゼロから無限の範囲で定量化したもので、150を超えることは非常に稀であるが、数字が大きいほど火災気象リスクが大きいことを意味する²⁹³。

リスクの観点から、FWIの評価は、対象地域の過去の値(FWIおよびこれまでの焼失面積)と比較することによって初めて可能となる。ここでは、対象地域ごとにFWIを危険等級で分類している²⁹⁴。これらを使用して、過去に発生した火災に関するFWIの有意な閾値を特定し、火災シーズンのみを使用している²⁹⁵。空間によっては、危険等級が同じでもFWIが異なる場合があるため、地域間での比較がしやすくなっているが²⁹⁶、火災の危険等級に基づいて将来の火災リスクを評価する前に予測精度を検証する必要がある。この検証は、FWIが特定の危険等級を超えた場合に発生した過去の火災の割合を定量化した検出確率(POD)に基づいて行う。

ここでは、アジア太平洋地域の国ごとに過去のPODを算出しており、2001年から2013年の日次のFWIとこれまでの焼失面積を用いた回顧的バリデーションを行っている。過去のFWIについては、欧州中期予報センター(ECMWF)が管理する約80kmの空間分解能での全球大気再解析であるERA-Interimプロダクトの気象データを使用している²⁹⁷。なお、これまでの焼失面積は、GFED4(Global Fire Emissions Database Version 4)に基づいている²⁹⁸。GFED4は、衛星画像から得られたグローバルなプロダクトであり、火災による炭素排出量に加え、0.25度間隔のグリッドで、ピクセル単位で1日当たりの焼失面積を集計している。

PODが高い場合は、FWIによる焼失面積、つまり火災リスクの予測精度が高いことを意味する。アジア太平洋地域でPODが高かった国はオーストラリアとミャンマーのみであった(それぞれ79%と86%)。ミャンマーを例に挙げると、過去に発生した火災の86%はFWIが危険な臨界点を超えた時に発生していた。ここでは「高い」の危険等級を使用しているが、「非常に高い」と「極限的に高い」も評価した。ただし、それらのPODは常に「高い」のPODを下回っていた。「高い」の危険等級を示すFWIの閾値は、オーストラリアで24、ミャンマーで5であった。危険等級、つまりPODを判断する際、ここでいう「火災」とは、1日の焼失面積が最小閾値を超えたピクセル数を表す(50haを使用)。過去に発生した火災は、複数のピクセルで複数日にわたり発生している可能性がある。

²⁹⁰ Bedia, Joaquín. et al., "Seasonal predictions of Fire Weather Index: Paving the way for their operational applicability in Mediterranean Europe," *Climate Services*, Volume 9 (2018年); Francesca Di Giuseppe et al., "The potential predictability of fire danger provided by numerical weather prediction," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 55, Issue 11 (2016年11月)

²⁹¹ Francesca Di Giuseppe et al., "The potential predictability of fire danger provided by numerical weather prediction," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 55, Issue 11 (2016年11月)

²⁹² Francesca Di Giuseppe et al., "The potential predictability of fire danger provided by numerical weather prediction," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 55, Issue 11 (2016年11月), B. D.Lawson and O. B.Armitage, *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service (2008年). <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/29152.pdf>.

²⁹³ B. D.Lawson and O. B.Armitage, *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service (2008年). Claudia Vitolo, Francesca Di Giuseppe, and Mirko D'Andrea, "Caliver: An R package for CALibration and VERification of forest fire gridded model outputs," *PLOS ONE*, Volume 13, Issue 1 (2018年1月). Claudia Vitolo et al., "A 1980–2018 global fire danger re-analysis dataset for the Canadian Fire Weather Indices," *Scientific Data*, Volume 6 (2019年2月)

²⁹⁴ Claudia Vitolo, Francesca Di Giuseppe, and Mirko D'Andrea, "Caliver: An R package for CALibration and VERification of forest fire gridded model outputs," *PLOS ONE*, Volume 13, Issue 1 (2018年1月). C. E.Van Wagner, *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*, Canadian Forestry Service, Forestry technical report 35 (1987年)

²⁹⁵ Claudia Vitolo, Francesca Di Giuseppe, and Mirko D'Andrea, "Caliver: An R package for CALibration and VERification of forest fire gridded model outputs," *PLOS ONE*, Volume 13, Issue 1 (2018年1月)

²⁹⁶ Claudia Vitolo et al., "A 1980–2018 global fire danger re-analysis dataset for the Canadian Fire Weather Indices," *Scientific Data*, Volume 6 (2019年2月)

²⁹⁷ D. P. Dee et al., "The ERA - Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 137, Issue 656, Part A (2011年4月)

²⁹⁸ Louis Giglio, James T. Randerson, and Guido R. van der Werf, "Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth - generation global fire emissions database (GFED4)," *JGR: Biogeosciences*, Volume 118, Issue 1 (2013年3月)

オーストラリアとミャンマーの火災リスクは、火災発生危険日数の変化に基づいて定量化した。ここでは、「高い」の危険等級のFWIの閾値を適用して火災発生危険日数を算出している。それ以外については、過去およびRCP8.5シナリオでの将来の気象データを、3つのGCM (HadGEM2-ES、MPI-ESM-LR、NorESM1-M)に基づく22kmの地域気候モデルのCORDEX地域で採用されている標準プロトコル「REMO2015」から引用している²⁹⁹。なお、FWIは、気温、風速、相対湿度、24時間降水量など、現地正午の気象条件に基づいて算出されたものである。REMO2015のアウトプットは、降水量が1時間単位になっているなど、時間分解能が非常に粗い。しかし、火災リスクを判断する際に地域気候モデルの時間的・空間的な一貫性を保てることから、REMO2015の日平均データを使用してFWIを計算している。

火災発生危険日数を算出する前に、中央値を使用したバイアス補正を行っている³⁰⁰。1998～2017年のERA-InterimとFWIの危険等級「高」のパーセンタイル値に相当するREMO2015の実現値の間のバイアスを使用して、そのREMO2015実現値を調整している。次に、これらのバイアス補正值(3つのREMO2015実現値の中央値)を使用して1998年から2017年の火災リスクを定量化した。バイアス補正後の1998～2017年の火災発生危険日数の差(相対的バイアス)は、オーストラリアでは0.5%、ミャンマーでは3.4%であった。GCMごとのREMO2015実現値については、将来の火災リスクを1998年～2017年のベースライン期間と比較した、2021年～2040年、2041年～2060年の将来期間における火災発生危険日数の変化として定量化した。最終的にマップ化された値は、3つの実現値の中央値となっている。将来の火災リスクは、差異の関係で調整係数の効果が相殺されるため、中央値を使用したバイアス補正に比べ不確実性が高い。

²⁹⁹ Armelle Reca Remedio et al., "Evaluation of new CORDEX simulations using an updated Köppen–Trewartha Climate Classification," *Atmosphere*, Volume 10, Issue 11 (2019年11月), J. R.

³⁰⁰ Douglas Maraun, "Bias correcting climate change simulations—a critical review," *Current Climate Change Reports*, Volume 2, Issue 4 (2016年12月)



Wind turbines at sunset.

© Narumon Bowonkitwanchai/Moment/Getty Images

参考文献

A

Ahmed, Justin, Elaine Almeida, Daniel Aminetzah, Nicolas Denis, Kimberly Henderson, Joshua Katz, Hannah Kitchel, and Peter Mannion, *Agriculture and climate change: Reducing emissions through improved farming practices*, McKinsey & Company, April 2020.

AIR Worldwide, *Global modeled catastrophe losses*, November 2018.

Allen, Myles R. et al., *Special report: Global warming of 1.5°C*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

Allen, Myles R. et al., "Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne," *Nature*, April 2009, Volume 458, Issue 7242.

ALOS/ALOS-2 Science Project and Earth Observation Priority Research: Ecosystem Research Group, Earth Observation Research Center, *High-resolution land use and land cover map of Japan [2014-2016] / Version 18.03*, Japan Aerospace Exploration Agency, March 2018.

The Aotearoa Circle, *Sustainable Finance Forum interim report*, 2019.

Archer, David, "Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, March 2005, Volume 110, Issue C9.

Asian Development Bank, *Ho Chi Minh City adaptation to climate change*, 2013.

Asian Development Bank, *Investing in natural capital for a sustainable future in the Greater Mekong Subregion*, 2015.

Asian Development Bank, *Meeting Asia's infrastructure needs*, 2017.

Asian Development Bank, *National REDD+ strategies in Asia and the Pacific: Progress and challenges*, 2010.

Asian Development Bank and the Climate Investment Fund, *Developing a private sector portfolio*, 2016.

Asian Development Bank Climate Change and Disaster Risk Management Division, *Country fact sheets, second edition*, Asian Development Bank and the Climate Investment Funds, 2016.

Asuncion, Ruben Carlo, and Minsoo Lee, *Impacts of sea level rise on economic growth in developing Asia*, ADB Economics Working Paper Series number 507, Asian Development Bank, January 2017.

B

Bank of England, *Climate change: What are the risks to financial stability?* <https://www.bankofengland.co.uk>, November 2020.

Bapna, Manish et al., *Adapt now: A global call for leadership on climate resilience*, Global Commission on Adaptation, September 2019.

Bastin, Jean-Francois et al., "The global tree restoration potential," *Science*, July 2019, Volume 365, Issue 6448.

Bates, P. D., and A. P. J. De Roo, "A simple raster-based model for flood inundation simulation," *Journal of Hydrology*, September 2000, Volume 236, Issues 1–2, pp. 54–77.

Bedia, Joaquín et al., "Seasonal predictions of Fire Weather Index: Paving the way for their operational applicability in Mediterranean Europe," *Climate Services*, January 2018, Volume 9, pp. 101–10.

Belcher, Stephen, Olivier Boucher, and Rowan Sutton, *Why results from the next generation of climate models matter*, Carbon Brief, March 2019.

Bell, M. J. et al., "Effect of breeding for milk yield, diet and management on enteric methane emissions from dairy cows," *Animal Production Science*, August 2010, Volume 50, Number 8.

Bevere, Lucia et al., "Natural catastrophes and man-made disasters in 2018: 'Secondary' perils on the frontline," *Swiss Re Institute, Sigma*, 2019, Number 2.

BP, *BP statistical review of world energy 2019*, 2019.

Burkett, Virginia R. et al., "Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: Case studies and policy implications," *Ecological Complexity*, December 2005, Volume 2, Number 4.

C

C40 Cities, "Case study: Tokyo—Super levees," in *Good practice guide: Climate change adaptation in delta cities*, 2016.

Center for Disaster Philanthropy, 2019–2020 Australian Bushfires, 2020.

Centre for Research on Epidemiology of Disasters, Natural disasters 2018, 2019.

Chakraborty, Debashis et al., "A global analysis of alternative tillage and crop establishment practices," *Scientific Reports*, August 2017, Volume 7.

Chen, Jie et al., "Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology," *Climatic Change*, April 2019, Volume 153, Issue 3.

Ciais, Philippe et al., "Carbon and other biogeochemical cycles," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press, 2013.

Climate Action Network Europe, *Climate change adaptation and the role of the private sector*, 2013.

Climate Bonds Initiative and China Central Depository & Clearing Company, *China Green Bond Market 2018, 2019*.

Collins, Matthew et al., "Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

Coulthard, Tom J. et al., "Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: Implications for modelling landscape evolution," *Earth Surface Processes and Landforms*, December 2013, Volume 38, Issue 15, pp. 1897–906.

D

Dankers, Rutger et al., "First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, March 2014, Volume 111, Number 9, pp. 3257–61.

Dee, D. P. et al., "The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, April 2011, Volume 137, Issue 656, Part A, pp. 553–97.

Di Giuseppe, Francesca et al., "The potential predictability of fire danger provided by numerical weather prediction," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, November 2016, Volume 55, Issue 11, pp. 2469–91.

Diaz, Delavane B., "Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM)," *Climatic Change*, July 2016, Volume 137, Issue 1–2, pp. 143–56.

Ding, Helen, and Wee Kean Fong, *4 Investment Areas to Stimulate China's Economy After COVID-19*, World Resources Institute, April 2020.

Dunne, John P. et al., "Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming," *Nature Climate Change*, February 2013, Volume 3, pp. 563–66.

E

Efron, Beran, "Bootstrap methods: Another look at the jackknife," *The Annals of Statistics*, January 1979, Volume 7, Number 1, pp. 1–26.

Ellen MacArthur Foundation, *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*, 2019.

Emanuel, Kerry, *The Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS)*, MIT, 2019.

F

Farm Progress, *High temperature effects on corn, soybeans*, 2012.

Flato, Gregory et al., "Evaluation of climate models," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

Forest Stewardship Council Asia Pacific, *Forests and FSC in Asia Pacific*, 2016.

Foster, Josh et al., "A new paradigm to quantify the reduction of physical work capacity in the heat," *Medicine & Science in Sports & Exercise*, June 2019, Volume 51, Issue 6S.

Free, Christopher M. et al., "Impacts of historical warming on marine fisheries production," *Science*, March 2019, Volume 363, Number 6430.

G

Gandhi, Prashanti et al., "Which industries are the most digital (and why)?" *Harvard Business Review*, April 1, 2016.

Giglio, Louis, James T. Randerson, and Guido R. van der Werf, "Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4)," *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, March 2013, Volume 118, Issue 1, pp. 317–28.

Government of India, Department of Environment, Forests, and Climate Change, *India Cooling Action Plan*, 2018.

Government of India, Ministry of Statistics and Programme Implementation, Statistical Year Book India 2017, 2017.

Grotch, Stanley L., and Michael C. MacCracken, "The use of general circulation models to predict regional climatic change," *Journal of Climate*, March 1991, Volume 4, Number 3, pp. 286–303.

H

Haq, Saleemul, Adapting to climate change: A challenge and an opportunity, World Resources Institute, 2010.

Harmsen, Jan Hartger Mathijs, Non-CO2 greenhouse gas mitigation in the 21st century, Utrecht University, 2019.

Hasselmann, Klaus, "Is climate predictable?," in *The Science of Disasters: Climate Disruptions, Heart Attacks, and Market Crashes*, Armin Bunde, Jürgen Kropp, and Hans Joachim Schellnhuber, eds., Berlin, Germany: Springer, 2002.

Haustein, Karsten et al., "A real-time Global Warming Index," *Scientific Reports*, November 2017.

Hayhoe, K. et al., "Climate models, scenarios, and projections," in *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment (NCA4), Volume I*, D. J. Wuebbles et al., eds., Washington, DC: US Global Change Research Program, 2017.

Henderson, Kimberly, Dickon Pinner, Matt Rogers, Bram Smeets, Christer Tryggstad, and Daniela Vargas, "Climate math: What a 1.5-degree pathway would take," *McKinsey Quarterly*, April 2020.

Hennemuth, Barbara et al., Statistical methods for the analysis of simulated and observed climate data: Applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation, Climate Service Center, CSC report number 13, 2013.

Heron, Scott F. et al., *Impacts of Climate Change on World Heritage Coral Reefs: A First Global Scientific Assessment*. Paris, UNESCO World Heritage Centre, 2017.

Hillen, M. et al., "Coastal defence cost estimates: Case study of the Netherlands, New Orleans and Vietnam," *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Delft University of Technology, April 2010.

Hoegh-Guldberg, Ove et al., "The ocean," in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects*, Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

Hoffmann, Christian, Michel Van Hoey, and Benedikt Zeumer, *Decarbonization challenge for steel*, McKinsey & Company, 2020.

Hoshino, Sayaka et al., "Estimation of increase in storm surge damage due to climate change and sea level rise in the Greater Tokyo area," *Natural Hazards*, January 2016, Volume 80, Issue 1, pp. 539–65.

Hosking, J. R. M., and J. R. Wallis, *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.

Huber, Markus, and Reto Knutti, "Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance," *Nature Geoscience*, January 2012, Volume 5, Number 1.

Huss, Matthias, and Regine Hock, "Global-scale hydrological response to future glacier mass loss," *Nature Climate Change*, January 2018, Volume 8, Number 2.

I

India Water Portal, *Ice stupas: Water conservation in the land of the Buddha*, 2015.

Insights, "17 countries, home to one-quarter of the world's population, face extremely high water stress," blog entry by Rutger Willem Hofste, Paul Reig, and Leah Schleifer, August 6, 2019.

International Energy Agency, *The future of cooling in China*, 2019.

International Energy Agency, *Southeast Asia Energy Outlook 2019*, 2019.

International Energy Agency, *World Energy Outlook 2019*, 2019.

International Renewable Energy Agency, *Renewable capacity statistics 2020*, March 2020.

International Union for Conservation of Nature, *Issues brief: The ocean and climate change*, 2017.

Ivanov, Martin Aleksandrov, Jurg Luterbacher, and Sven Kotlarski, "Climate model biases and modification of the climate change signal by intensity-dependent bias correction," *Journal of Climate*, August 2018, Volume 31, Number 16.

J

Jaafar, Hadi H., Farah A. Ahmad, and Naji El Beyrouthy, "GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design," *Scientific Data*, 2019, Volume 6.

Jat, M. L. et al., *Laser land leveling: A precursor technology for resource conservation*, Rice-Wheat Consortium technical bulletin series 7, Rice-Wheat Consortium for the Indo-Gangetic Plains, 2006.

K

Kew, S. F. et al., "The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine delta," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, August 2013, Volume 13, Issue 8.

Kirtman, Ben et al., "Near-term climate change: Projections and predictability," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

Knowlton, Kim et al., "Development and implementation of South Asia's first heat-health action plan in Ahmedabad (Gujarat, India)," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, April 2014, Volume 11, Issue 4.

Knutson, Thomas R., Fanrong Zeng, and Andrew T. Wittenberg, "Multimodel assessment of regional surface temperature trends: CMIP3 and CMIP5 twentieth century simulations," *Journal of Climate*, November 2013, Volume 26, Number 22.

Kopp, Robert E. et al., "Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites," *Earth's Future*, August 2014, Volume 2, Issue 8, pp. 383–406.

Krinner, Gerhard, and Mark G. Flanner, "Striking stationarity of large-scale climate model bias patterns under strong climate change," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, September 2018, Volume 115, Number 38.

Lalit, Radhika, and Ankit Kalanki, *How India is solving its cooling challenge*, Rocky Mountain Institute, 2019.

Lawson, B. D., and O. B. Armitage, *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, 2008.

Lenssen, Nathan J. L. et al., "Improvements in the GISTEMP uncertainty model," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, June 2019, Volume 124, Number 12.

Li, Xiaochun et al., "CO₂ point emission and geological storage capacity in China," *Energy Procedia*, February 2009, Volume 1, Issue 1, pp. 2793–800.

Lindner, Marcus et al., "Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems," *Forest Ecology and Management*, February 2010, Volume 259, Number 4.

Linquist, Bruce A. et al., "Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis," *Field Crops Research*, August 2012, Volume 135.

Lowe, Jason A., and Daniel Bernie, "The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, May 2018, Volume 376, Number 2119.

Lybbert, Travis J. et al., "Targeting technology to increase smallholder profits and conserve resources: Experimental provision of laser land-leveling services to Indian farmers," *Economic Development and Cultural Change*, January 2018, Volume 66, Number 2.

Maraun, Douglas, "Bias correcting climate change simulations—a critical review," *Current Climate Change Reports*, December 2016, Volume 2, Issue 4, pp. 211–20.

Matthews, H. Damon, and Ken Caldeira, "Stabilizing climate requires near zero emissions," *Geophysical Research Letters*, February 2008, Volume 35, Issue 3.

Matthews, H. Damon, and Susan Solomon, "Irreversible does not mean unavoidable," *Science*, April 2013, Volume 340, Issue 6131.

Matthews, H. Damon et al., "Focus on cumulative emissions, global carbon budgets, and the implications for climate mitigation targets," *Environmental Research Letters*, January 2018, Volume 13, Number 1.

Maurer, J. M. et al., "Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years," *Science Advances*, June 2019, Volume 5, Number 6.

McKinsey & Company, *Addressing climate change in a post-pandemic world*, April 2020.

McKinsey & Company, *How a post-pandemic stimulus can both create jobs and help the climate*, May 2020.

McKinsey & Company, *Meeting Japan's Paris Agreement targets—more opportunity than cost*, 2020.

McKinsey Energy Insights, *McKinsey Global Energy Perspective 2019: Reference case*, 2019.

McKinsey Global Institute, *Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts*, January 2020.

McKinsey Global Institute, *The future of Asia: Asian flows and networks are defining the next phase of globalization*, September 2019.

McKinsey Global Institute, *How will African farmers adapt to changing patterns of precipitation?*, May 2020.

McKinsey Global Institute, *Resource revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*, November 2011.

McKinsey Global Institute, *Will India get too hot to work?*, November 2020.

McKinsey Global Institute, *Will the world's breadbaskets become less reliable?*, May 2020.

Meehl, Gerald A. et al., "Decadal prediction: Can it be skillful?," *Bulletin of the American Meteorological Society*, October 2009, Volume 90, Number 10.

Millar, Richard J., and Pierre Friedlingstein, "The utility of the historical record for assessing the transient climate response to cumulative emissions," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, May 2018, Volume 376, Number 2119.

Miller, Ron L. et al., "CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, June 2014, Volume 6, Number 2.

Mockus, V., and A. Hjelmfelt, "Estimation of direct runoff from storm rainfall," in *SCS National Engineering Handbook*, Washington, DC: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972.

Mori, Nobuhito et al., "Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model," *Coastal Engineering Journal*, 2019, Volume 61, Issue 3, pp. 295–307.

Mudelsee, Manfred, "The bootstrap in climate risk analysis," in *In Extremis: Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology*, Jurgen P. Kropp and Hans Joachim Schellnhuber, eds., Heidelberg, Germany: Springer, 2011.

N

National Bureau of Statistics of China, *China Statistical Yearbook 2018*, 2017.

Neal, Jeffrey et al., "How much physical complexity is needed to model flood inundation?," *Hydrological Processes*, July 2012, Volume 26, Issue 15, pp. 2264–82.

New Economic Foundation, *The Marine Socio-Economics Project (MSEP): Valuing the environment in economic terms*, 2011.

New Zealand Ministry for the Environment and Stats NZ, *New Zealand's Environmental Reporting Series: Environment Aotearoa 2019*, 2019.

Nguyen Thi Bich Thuy, Case study: reduced climate change resilience—the need for a new model, SNV Netherlands Development Organisation, August 2019.

O

Ocean Acidification International Coordination Centre, *Ocean acidification in the IPCC Special Report: Global warming of 1.5°C*, October 2018.

Olhoff, Anne et al., *The adaptation finance gap report*, UNEP DTU Partnership, 2016.

O'Neill, Brian C. et al., "The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6," *Geoscientific Model Development*, September 2016, Volume 9, Issue 9.

Oppenheimer, Michael et al., "Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities," in *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, Hans-Otto Pörtner et al., eds., Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.

Organisation for Economic Co-operation and Development, *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities*, 2019.

Organisation for Economic Co-operation and Development, *OECD Green Growth Policy Review of Indonesia 2019*, 2019.

P

Parnell, Andrew C., "Climate time series analysis: Classical statistical and bootstrap methods," *Journal of Time Series Analysis*, March 2013, Volume 34, Issue 2.

Peng, Shushi et al., "Surface urban heat island across 419 global big cities," *Environmental Science & Technology*, January 2012, Volume 46, Issue 2.

Practical Action, *Floating gardens in Bangladesh: Technical brief*, The Schumacher Centre for Technology and Development, 2006.

Prather, Michael et al., "Climate system scenario tables," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker et al., eds., New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

Q

Quantified Ventures, Atlanta: First publicly offered environmental impact bond, 2019.

R

Raymond, Colin, Tom Matthews, and Radley M. Horton, "The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance," *Science Advances*, May 2020.

Remedio, Armelle Reca et al., "Evaluation of new CORDEX simulations using an updated Köppen–Trewartha Climate Classification," *Atmosphere*, November 2019, Volume 10, Issue 11.

Republic of Indonesia, *National Action Plan for greenhouse gas emissions reduction (RAN-GRK)*, Presidential Decree number 61/2011, 2011.

Riahi, Keywan, Arnulf Grubler, and Nebojsa Nakicenovic, "Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization," *Technological Forecasting and Social Change*, September 2007, Volume 74, Issue 7.

Riahi, Keywan et al., "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview," *Global Environmental Change*, January 2017, Volume 42.

Ritchie, Justin, and Hadi Dowlatabadi, "The 1000 GtC coal question: Are cases of vastly expanded future coal combustion still plausible?," *Energy Economics*, June 2017, Volume 65.

Ritchie, Justin, and Hadi Dowlatabadi, "Why do climate change scenarios return to coal?," *Energy*, December 2017, Volume 140, Part 1.

Rosenzweig, Cynthia et al., "The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies," *Papers in Natural Resources*, 2013.

Rosenzweig, Cynthia et al., "Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5C and 2C assessments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, May 2018, Volume 376, Issue 2113.

Royal Norwegian Embassy in Jakarta, *Project Support*, 2020.

Rubel, Franz, and Markus Kottek, "Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification," *Meteorologische Zeitschrift (Contributions to Atmospheric Sciences)*, April 2010, Volume 19, Number 2.

Ruiz Fuentes, M. J., *Storm surge barrier Tokyo Bay: Analysis on a system level and conceptual design*, Delft University of Technology, 2014.

S

Sass, Ronald L., "CH₄ emissions from rice agriculture," in *IPCC good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*, IPCC, 2003.

Schmidli, Jurg et al., "Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods," *International Journal of Climatology*, April 2006, Volume 26, Number 5, p. 679–89.

Schwalm, Christopher R., Spencer Glendon, and Philip B. Duffy, "RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, August 2020.

Seidl, Rupert et al., "Forest disturbances under climate change," *Nature Climate Change*, June 2017, Volume 7, Number 6.

Shastri, Hiteshri et al., "Flip flop of day-night and summer-winter surface urban heat island intensity in India," *Scientific Reports*, January 2017, Volume 7.

Sherwood, Steven C., and Matthew Huber, "An adaptability limit to climate change due to heat stress," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May 2010, Volume 107, Number 21, pp. 9552–5.

Shrestha, Arun Bhakta et al., eds., *The Himalayan climate and water atlas: Impact of climate change on water resources in five of Asia's major river basins*, CIMOD, GRID-Arendal, and CICERO, 2015.

Sillmann, Jaana et al., "Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities," *Weather and Climate Extremes*, December 2017, Volume 18.

SNV Netherlands Development Organisation, *MAM-II: Scaling up ecosystem-based adaptation in the Mekong Delta*, <https://snv.org>, November 2020.

Stern, Nicholas, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

Stull, Roland, "Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, November 2011, Volume 50, pp. 2267–9.

Sun, Yin et al., "Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961," *Bulletin of the American Meteorological Society*, January 2019, Volume 100, Number 1.

Survey Committee on How to Prepare for the Future of the Nakagawa River in Tokyo, *How to prepare for the future of the Nakagawa River in Tokyo*, Tokyo Metropolitan Construction Bureau, 2012.

T

Takashi, Sakakibara, *Current Status and Future of Urban Stormwater Management on Wastewater System in Japan*, National Institute for Land and Infrastructure Management of Japan, 2010.

Tata Trusts, *Defeating drought*, 2019.

Taylor, Karl E., Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl, "An overview of CMIP5 and the experiment design," *Bulletin of the American Meteorological Society*, April 2012, Volume 93, Number 4.

Tonby, Oliver, Jonathan Woetzel, Noshir Kaka, Wonsik Choi, Jeongmin Seong, Brant Carson, and Lily Ma, *How technology is safeguarding health and livelihoods in Asia*, McKinsey & Company, May 2020.

The Treasury of New Zealand, *Natural capital and the Living Standards Framework*, 2018.

Triyono, Budi et al., *Study on Utilization of Indonesian Non-Recycled Municipal Solid Waste as Renewable Solid Fuel*, 2017.

Tukimat, Nurul Nadrah Aqilah, "Assessing the implementation of bias correction in the climate prediction," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, April 2018, Volume 342.

U

UNICEF Philippines and International Organization for Migration, Building safe spaces for the community, 2018.

United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris Agreement, 2015.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual, 2000.

V

van de Vuurst, Paige, and Luis E. Escobar, "Perspective: Climate change and the relocation of Indonesia's capital to Borneo," *Frontiers in Earth Science*, January 2020.

van Oldenborgh, Geert Jan et al., "Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, March 2020.

van Oldenborgh, Geert Jan et al., "Extreme heat in India and anthropogenic climate change," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, January 2018, Volume 18, Number 1, pp. 365–81.

van Vuuren, Detlef P. et al., "The Representative Concentration Pathways: An overview," *Climatic Change*, November 2011, Volume 109, Issue 1–2.

van Wagner, C. E., Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System, Canadian Forestry Service, Forestry technical report number 35, 1987.

Velasquez, Patricio, Martina Messmer, and Christoph C. Raible, "A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states," *Geoscientific Model Development* preprint, July 2019.

Viking Genetics, Lower methane production through breeding.

Vitolo, Claudia, Francesca Di Giuseppe, and Mirko D'Andrea, "Caliver: An R package for CALibration and VERification of forest fire gridded model outputs," *PLOS ONE*, January 2018, Volume 13, Issue 1.

Vitolo, Claudia et al., "A 1980–2018 global fire danger re-analysis dataset for the Canadian Fire Weather Indices," *Scientific Data*, February 2019, Volume 6.

von Peter, Goetz, Sebastian von Dahlen, and Sweta C. Saxena, Unmitigated disasters? New evidence on the macroeconomic cost of natural catastrophes, BIS Working Papers, number 394, December 2012.

W

Warszawski, Lila et al., "The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, March 2014, Volume 111, Number 9.

Wester, Philippus et al., eds., *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*, Cham, Switzerland: Springer, 2019.

Wing, Oliver E. J. et al., "Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States," *Water Resources Research*, September 2017, Volume 53, Issue 9, pp. 7968–86.

Woetzel, Jonathan, Kimberly Henderson, Mekala Krishnan, Haimeng Zhang, and Grace Lam, *Leading the battle against climate change: Actions for China*, McKinsey & Company, 2020.

Woetzel, Jonathan, Dickon Pinner, Hamid Samandari, Hauke Engel, Mekala Krishnan, Brodie Boland, and Peter Cooper, Can coastal cities turn the tide on rising flood risk?, McKinsey & Company, April 2020.

World Bank, *The Changing Wealth of Nations: Measuring Sustainable Development in the New Millennium*, Washington, DC: World Bank, 2011.

World Resources Institute, *A once in a generation opportunity*, 2012.

World Wildlife Fund and Asian Development Bank, *Ecological footprint and investment in natural capital in Asia Pacific*, 2012.

Y

Yao, Tandong et al., "Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions," *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, November 2007, Volume 39, Number 4.

Yasuto, Tachikawa et al., "Prediction of effects of climate change on river flow in Japan," *Proceedings of JSCE B1 (Water Engineering)*, 2011, Volume 67, Issue 1.

Z

Zhang, Guoqing et al., "Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009)," *Remote Sensing of Environment*, July 2011, Volume 115, Number 7.

Zhang, Shaohui et al., "Integrated assessment of resource-energy-environment nexus in China's iron and steel industry," *Journal of Cleaner Production*, September 2019, Volume 232, pp. 235–49.

Zhu, Chunwu et al., "Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries," *Science Advances*, May 2018, Volume 4, Number 5.

MGIの関連文献



Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts (気候変動リスクとその対応策: 物理的リスクと社会的影響) (2020年1月)

本レポートでは、1年間にわたる学際的研究の結果に基づいて、「今後30年間で気候変動は世界の社会経済システムにどのような影響を与えるのか」という問いに対する解を提示している。



The future of Asia: Decoding the value and performance of corporate Asia (2020年6月)

本資料では、規模は拡大しているものの利益率はグローバル平均を下回っているアジアの企業が、COVID-19危機下で新たに直面する課題について取り上げている。



Addressing climate change in a post-pandemic world (2020年4月)

本記事では、経済的・環境的な耐久性の向上を今後の復興政策の中心に据えた場合の、新型コロナウイルス (COVID-19) 危機、気候変動対策に与える意味合いを取り上げている。



How technology is safeguarding health and livelihoods in Asia (2020年5月)

本記事では、アジアにおけるCOVID-19への早期対応を可能にした政府や企業による技術を活用した6つの介入策について取り上げている。



Decarbonization of industrial sectors: The next frontier (2018年7月)

本レポートでは、産業部門からの排出量を削減するためには、企業、政府、その他のステークホルダーによる投資と連携が不可欠であることを示している。



The future of Asia: Asian flows and networks are defining the next phase of globalization (2019年9月)

本資料では、アジアの次の100年について討議している。アジアは世界最大の経済圏であり、地域統合が進むにつれ、グローバル化は新たなフェーズに突入する可能性がある。


www.mckinsey.com/mgi


MGI ポッドキャストはiTunesまたはwww.mckinsey.com/mgi/publications/multimedia/からダウンロードして視聴いただけます。


表紙画像: Getty Images

McKinsey Global Institute
November 2020
Copyright © McKinsey & Company
Designed by the McKinsey Global Institute

www.mckinsey.com/mgi

 @McKinsey_MGI

 @McKinseyGlobalInstitute

 @McKinseyGlobalInstitute



All paper used for
MGI publications
meets the mark of
responsible forestry
and contains 100%
postconsumer waste.