10 New Insights in Climate Science 2021

気候変動について今伝えたい、10の重要なメッセージ2021

futurearth
Research. Innovation. Sustainability.

The Earth League

WCRP
World Climate Research Programme

タイトル：「気候変動について今伝えたい、10の重要なメッセージ」

制作：フューチャー・アース、アース・リーグ、世界気候研究計画

レイアウト・グラフィック： Cultivate Communications

翻訳協力：公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES）、国立研究開発法人 国立環境研究所、小林夏海様、
フューチャー・アース国際事務局日本ハブ

引用方法（原文）： Future Earth, The Earth League, WCRP (2021). 10 New Insights in Climate Science 2021. Stockholm
https://doi.org/10.5281/zenodo.5639539

目次

はじめに 7

1 温暖化を1.5℃で安定させることはまだ可能だが、世界中で早急かつ抜本的な行動が必要である 9

2 メタンと一酸化二窒素の排出量が急速に増加しており、地球は2.7℃の温暖化に向かっている 12

3 大規模な森林火災 - 気候変動によって、火災の規模が新たな次元に達し、甚大な影響を及ぼしている 15

4 気候変動のティッピングエレメント（地球環境の不可逆的な激変をもたらす事象）がインパクトの大きなリスクをもたらす 20

5 グローバルな気候変動対策は公正でなければならない 24

6 家庭の行動変化への支援は、気候変動対策において重要だが見落とされがちである 27

7 政治的課題がカーボンプライシングの有効性を阻害する 31

8 自然に根差した課題解決はパリ協定の達成のために重要だが、細かい点にも注意が必要である 34

9 海洋生態系のレジリエンスを高めるためには、気候変動に適応した保全と管理、そしてグローバルなスチュワードシップが必要である 37

10 気候変動の緩和策は、人々の健康と健全な環境にとって複数の直接的なメリットがあることから、必要なコストを正当化することができる 42

定義 46

参考文献 48

謝辞 51

はじめに

「一言で言えば、地球の状態は壊れている」
国連（UN）のアントニオ・グテーレス事務総長が2021年の「地球の現状」でこのように言及しました[1]。この1年間、COVID-19のパンデミックが世界を襲っている間に、シベリア、米国西部、ギリシャなどでは、大規模な森林火災が発生し、サイクロンが東南アジアや南太平洋の一部に壊滅的な被害を与え、前例のない激しい冬の嵐が米国南部のテキサス州で長時間の停電を引き起こし、ヨーロッパの多くの地域で壊滅的な洪水が発生しました。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の最新報告書は、気候変動の原因や影響について残されていた疑問を解消したといえます。また、2018年のIPCC特別報告書では、気候変動がどのように互いに強く関係し、人間や生態系の健全性に対する脅威を増幅するのかが示されています。過去1年間の気候変動研究をまとめた本研究では、このような観点から地球のシステムの複雑さを解析し、10の関連する項目が強調されました。それぞれの項目は、他のすべての項目と本質的につながっています。

この報告書が示すように、パリ協定の目標である産業革命以前のレベルからの地球の気温上昇を最大1.5℃に抑えることは、まだ可能です。しかし、そのためには、大幅な脱炭素化を含むすべてのセクターの変革と、低所得国の気候変動に対応した移行を支援するとともに、排出量の多い国が責任を負うために、世界が協調し、抜本的な対策を講じる必要があります。構造的、政治的、個人的、あらゆるレベルにおいて、衡平性を優先し、設計・実施される、的を絞った対策が早急に必要です。最大の責任は、裕福な先進国が化石燃料から脱却し、クリーンなエネルギー、輸送、産業、住宅への世界的な移行を支援することです。このことは、数十年間にわたって気候危機への対応が不十分であったことからも明らかです（1990年のIPCC第1次報告書以降、化石燃料の排出量が約60%増加しています）[2]。

最も望ましい成果は、地球温暖化を1.5℃未満に抑えることですが、これは最も困難なシナリオでもあります。この閾値を超えると、生態系が回復不能なほど劣化し、温室効果ガスである二酸化炭素（CO_2）、メタン（CH_4）、一酸化二窒素（N_2O）の排出量がさらに増加するという負のフィードバックが生じ、気候システムに悪影響を及ぼし、最も脆弱な人々に壊滅的な影響を与えることになります。実際に、大規模な火災など、私たちがすでに経験している多くの極端な現象が激化し、気候システムの重要な構成要素の閾値を超える確率が高くなり、地球システムのあらゆる側面に壊滅的な影響を及ぼすと予測されています。

CO_2の排出量を大幅に削減するだけでなく、CH_4やN_2Oなどの他の温室効果ガスの排出量の増加や、その他の気候現象を形成する要因にも対処しなければなりません。実際、1.5℃目標に対するすべての温室効果ガスの残りの予算は、火災や北極圏の永久凍土の融解、生態系の劣化の加速など、追加的な温暖化要因を考慮して修正する必要があるかもしれません。海洋生態系の劣化を目の当たりにし、この劣化がより広範に気候システムに影響を与えていること、すなわち、海洋生態系の蓄熱能力、CO_2排出量の増加を抑制する能力に影響を与えていることを考えると、海洋をグローバル・コモンズとして認識し、保護するための新しいアプローチとガバナンスの規模を拡大することが必要です。

粒子状物質（PM2.5）の汚染は、化石燃料の燃焼が主な原因であり、一部の地域では森林火災の悪化によってさらに深刻化し、何百万人もの早死にをもたらし、COVID-19の死者数の増加にも繋がっています[3,4,5]。さらに、森林伐採は、地球温暖化の影響を悪化させるだけでなく、新たな感染症にも関係しています。

共通の利益をもたらす戦略を活用することは、パリ協定の1.5℃目標に沿ったライフスタイルへの公正な移行を促進するための重要な方法です。さらに、気候変動に対処することは、短期的にも長期的にも複数の利益をもたらすことになります。実際、8月に行われたグローバル・コモンズ・アライアンスの調査では、G20諸国の市民の大半がグローバル・コモンズを憂慮しており、83%がコモンズの保護と再生のためにもっと努力したいと考えていることがわかっています[6]。そして、森林破壊を食い止めるための自然に根差した課題解決（NbS）の実施や、森林伐採を止めるためのその他の戦略は、炭素貯留を保護することで気候変動の緩和に貢献するだけでなく、健康リスクの低減にも寄与しています。多くの大規模経済圏では、大気汚染の減少によるコスト削減だけで、短期的にも緩和策のコストを相殺できると推定されています。世界保健機関（WHO）の大気汚染に関するガイドラインを満たすことで、世界の寿命が170億年延びると予想されています[7]。

課題は巨大ですが、人間には意欲さえあれば大きな課題を克服する能力があります。私たちは、問題に関する知識や経済的な要因、あるいは技術によって制限されるのではなく、他の障害によって制限されています。それは構造的、社会的、文化的、そして特に政治的なもので、パリ協定の目標を達成するために必要な実施のペースと規模を阻害しています。地球を相互に連結した不可欠なコモンズとしてとらえることは、声なき声を聞き、力を失った人々に力を与え、思慮深い資源配分を通じて、より大きな衡平性を構築し、正義を重視した気候変動対策に取り組むための意思決定の指針となるでしょう。本報告書は、壊滅的な気候変動を回避するための行動が必要であり、緊急であり、可能であるという科学からの最新のメッセージを明確にまとめたものです。

一部の用語の定義と参考文献は本報告書の最後に記載しています。

この報告書は、論文 Martin et al. (2021): Ten New Insights in ClimateScience 2021 – A Horizon Scan. In Global Sustainability. https://doi.org/10.1017/sus.2021.25 の概要です。この報告書の記述は、特定の出典から引用するものを除き、すべてこの論文に基づくものです。

1 温暖化を1.5℃で安定させることはまだ可能だが、世界中で早急かつ抜本的な行動が必要である

この章の要点

- 地球全体の残余炭素予算（今後排出可能なCO_2の総量）の試算によると、地球温暖化を1.5℃以内に抑えるためには、毎年平均20億トンのCO_2（2020年の世界排出量の5%）削減が必要であることがわかりました。この削減ペースは、正味排出量がゼロになるまで維持されなければなりません。（2040年頃まで）
- 地球温暖化を1.5℃以内に抑えるために必要な炭素予算は、すでに超過されている可能性があります。
- もしこの前例のない排出量削減ができなければ、温暖化は1.5℃を超える可能性が高く、大規模な炭素除去技術が必要になります。
- COVID-19パンデミックで見られた短期的な排出量減少は、1.5℃目標達成に向けた脱炭素化への全体的な影響としては極めて限定的なものでした。
- 電力セクターは短期的な脱炭素化のために最大のチャンスを提供していますが、すべての経済セクターが温室効果ガス（GHG）排出を大幅に削減する必要があります（例：メタン – 2章参照）。

詳細

最大でも1.5℃の温暖化を超えないという目標のためには、地球全体の残余炭素予算で見ると、CO_2の世界の年間排出量を毎年平均20億トン（2 $GtCO_2$）削減する必要があります。（偶然にも、これはCOVID-19パンデミックによって2020年の排出量削減レベルが2019年と比較してマイナス7%となったレベルに近いです。温暖化を1.5℃以内に抑えるためには、メタンや一酸化二窒素などのCO_2以外の温室効果ガスの排出も厳しく削減する必要があります。（詳しくは2章参照）

1.5℃の目標達成に必要な炭素予算を維持することはまだ可能かもしれませんが、世界経済とインフラに前例のないほど急速かつ大規模な変化がない限り、その可能性は極めて低いでしょう。再生可能エネルギーへのシフトなど供給側の変化は、需要の変化と共に実施される必要があります。太陽光や風力エネルギー技術の継続的な進歩と共に、需要側の削減と合わせて低炭素発電を導入すれば、すぐに新たな電力需要を十分に満たすことができます（詳しくは6章を参照）。しかし、既存の、また現在提案されている炭素集約的なインフラの残留排出量だけで、炭素予算を十分に超過してしまいます。したがって、計画中の化石燃料を使うプロジェクトを廃止することが必要です。さらに、経済的に意味があっても炭素集約的なインフラであれば早期に廃止することも必要です。同時に、様々な緩和策を駆使して、あらゆるセクターで大幅な削減を実施する必要があります。低炭素電力の生産へ急速にシフトすることで、他のセクターの電化もこれらのセクターが脱炭素化するためのより現実的な選択肢となります。

どのような温度目標であっても、気候を安定させるためには社会の深い変革が必要です。私たちはこのプロセスを始めるまで非常に時間をかけてしまいました。今すぐにでも、前例のない規模で一貫して排出量を削減しない限り、温暖化を1.5℃の目標値内に抑えることはもはや不可能です。実際、地球の気温を1.5℃のレベルで安定させるために必要な抜本的な対策を含むシナリオのほとんどは、気温が一旦、この目標を超えると予測しており、世界の排出量を何年にもわたってマイナスにするために、実証されていない炭素除去技術を膨大な規模で展開することが必要となります。一時的にでも1.5℃を超えると、海洋やその他の地球システムの構成要素に不可逆的な影響を与える可能性があり、また極端な気象現象がさらに頻繁に発生するようになります（詳細は3章、4章を参照）。

背景

温暖化とは、現在の（複数年にまたがる）地球の気温と1850年から1900年を基準とした気温レベルとの間の変化と定義されます。自然変動により、年や場所によって温暖化がより進む（または進まない）ことがありますが、パリ協定で定められた上限は、長期的な世界平均値を参照しています。現在の推定によると、温暖化によってすでに世界の気温は2020年時点で1.2℃上昇していると言われています。パリ協定では1.5℃を目標に設定しましたが、その理由は、このレベルを超えると、その影響や負のリスクが受け入れがたいほど大きくなるという科学的なコンセンサスが高まっているためです。このような評価は、将来のモデリングと、既に起きている温暖化の影響に関する観測の両方に基づいています。さらに、温暖化が1.5℃を超えると、不可逆的な変化が起こる可能性が非常に高まります。

最近の研究では、50%の確率で1.5℃を超えないとされる残余炭素予算は440GtCO_2であることが示されています。より多くのデータを収集し、基礎的な科学に関する理解を深め、モデルの改良を続ければ、このような不確実性は減少していきます。しかし、様々な変数の全てにおいて大きな不確実性があり、これらの最新の推定値においてさえ炭素予算が残っていない可能性がわずかにあることが分かっています。これは、たとえ今日、排出量がゼロになったとしても、温暖化が1.5℃を超えるということを意味しています。

! これらが意味すること

グローバルなレベルにおいて、意思決定者にとって求められるのは：

- 産業革命以前の気温から1.5℃以内に温暖化を抑えるためには、温室効果ガスの排出を削減するために、全てのセクターにおいて前例のない行動を直ちにとること。
- 積極的な中期目標（例：2030年までに温室効果ガス50%削減）と2040年までのネットゼロの実現という野心的な目標の両方を設定すること。

国・地方レベルでは：

- 脱炭素化と持続可能な開発のためには、カーボンフリーの資源を活用した広範かつ深化した電化が重要な戦略となる。
- 経済的に妥当なものであっても、炭素集約的なインフラを廃止しなければならない。
- 炭素除去技術の多様なポートフォリオを迅速に開発し、規模を拡大しなければならないが、排出削減の代わりとして利用してはならない。
- 小規模でも即時の需要削減は、（石炭発電所などの）炭素集約的なエネルギー生産の廃止を可能にすることで、排出量に大きな影響を与えることができる。

440 $GtCO_2$
1.5℃目標内に収めるために2020年以降排出できるCO_2の総量。（50%確率）

2 $GtCO_2$
残余炭素予算内に収めるために必要な年間排出削減量。

10年
現在（2020年）の排出量レベル（約40$GtCO_2$）を続けた場合、1.5℃目標に向けた炭素予算を使い切るまでの残りの年数。

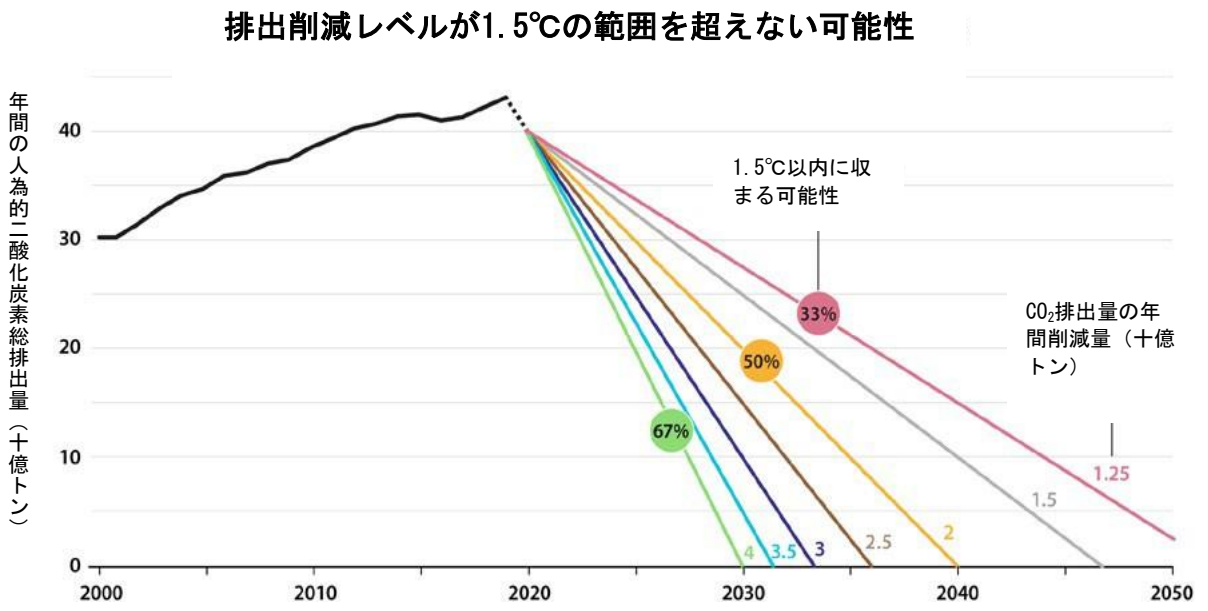


図1. 世界全体の二酸化炭素排出量を直線的に削減した場合、産業革命以前のレベルに対して1.5℃以内の温暖化に抑えられる確率。

2 メタンと一酸化二窒素の排出量が急速に増加しており、地球は2.7℃の温暖化に向かっている

この章の要点

- **CO_2よりもはるかに強力な温室効果ガスであるメタンと一酸化二窒素の排出量の急激な増加は、CO_2レベルの上昇による影響をより悪化させ、合計すると今世紀中に世界を2.7℃温暖化させる勢いです。**
- **メタン排出量の削減は、今後25年間の気候変動を抑制する重要な手段です。すぐに利用可能で低コストの対策（「これらが意味すること」参照）により、2030年までにメタン排出量を半減することができ、長期的に地球温度を安定させるためには、CO_2における緩和や除去の努力と手を携えて取り組む必要があります。**
- **COVID-19のパンデミックでエアロゾル排出量が急激に減少した際、地球はわずかに温暖化したことから、これまでの化石燃料燃焼から排出される冷却効果をもつエアロゾルが温室効果ガス排出による温暖化の一部を打ち消してきた事実が浮き彫りになりました。エアロゾル排出量の減少は、大気の質を改善し、何十億もの人々の健康に寄与する一方で、短期的には地球温暖化を悪化させます。**

詳細

地球温暖化を1.5℃に抑えるためには、CO_2以外の強力な温室効果ガスも見落としてはなりません。特にメタンと一酸化二窒素は排出量が急増しており、2℃を大きく超える温暖化への道筋を示しています。

メタンは天然ガスの主成分で、産業革命前からの地球温暖化の約20%を占めています。メタンの排出量は2020年に過去最高となり、2000年のレベルを6%上回りました。人為的な一酸化二窒素の排出量は、過去30年間で30%増加しています。両ガスとも農業部門からの排出が、この大きな伸びの主な原因となっています。また、埋立地での廃棄物処理や化石燃料の採掘による漏出もメタンの主な発生源となっています。

人間の活動によるエアロゾルの排出—つまり化石燃料の燃焼時の硫黄や窒素の微粒子の排出—は、全体的には気候を冷却する効果があります。これは温室効果ガスの排出による温暖化を部分的に打ち消しているのです。エアロゾルの排出量は今後減少すると予想されていますが、その程度は公害防止政策に左右されます。エアロゾルの排出量の減少は大気の質を向上させ、世界中の何十億もの人々の健康に貢献しますが、地球温暖化を悪化させることになります。短期的にはこのことは、COVID-19のパンデミックの際にはっきりと示されました。つまり、国家的なロックダウンの間、冷却効果をもつエアロゾルの排出量が減少した結果、2020年5月には世界で0.03℃、北半球の高緯度地域では最大で0.3℃の気温上昇が見られたのです。

全体として、主にメタンと一酸化二窒素の排出量の増加とエアロゾルの減少のために、CO_2以外の要因が過去20年間でますます気候を温暖化させたと言えます。CO_2以外の温室効果ガスの増加とエアロゾルの減少が続けば、残余炭素予算を減少させることになります。

良いニュースは、容易に入手可能で低コストの対策により、2030年までに予測される人為的なメタン排出を45%以上削減できることです。メタンは大気中での寿命が短いため、メタン排出源に対処することで、気候変動に急速な影響を与えることができるのです。

「容易に解決できる」選択肢としては、化石燃料採掘時の漏出を減らすことや廃棄物処理技術の向上などがあり、これだけでも2040年代までに0.3℃の温暖化を回避できる可能性があります。また、食品・農業分野では、窒素の利用効率の向上、反芻動物のメタン排出を抑制する飼料のさらなる改良と導入、肉を控えた健康的な食事の推進、食品廃棄物の削減など、需要と供給のオプションが混ざり合った、一酸化二窒素とメタンの排出削減の解決策があります。これらの解決策には、健康と環境に対する利点もあります。

背景

地球温暖化は、正と負の両方の気候駆動力を生み出す人間活動によって引き起こされています。全体として、現在の正味の地球温暖化の約21%は、CO_2以外の要因によって引き起こされています。それには、他の温室効果ガスやその前駆物質、あるいはブラックカーボンなどの温暖化効果をもつエアロゾルの排出などがあります。地球温暖化を引き起こすCO_2以外の要因は、主に化石燃料の燃焼と、農業活動を含む土地利用から生じています（全ての内訳は図2を参照）。この20年間、強力な温室効果ガスであるメタンや一酸化二窒素の排出量が増加したことが主な原因で、温暖化効果はますます高まっています。これは、CO_2の上昇レベルの影響を悪化させています。メタンと一酸化二窒素の人為的な排出が増え続ければ、残余炭素予算が減少し、CO_2の純排出量がゼロになっても地球の気温が安定することはないでしょう。

! これらが意味すること

国・地方レベルで、政府および民間企業の意思決定者にとって求められるのは：

- 化石燃料部門からの漏出メタン排出を、規制（例えばサプライヤーの認証）や、生産・輸送・流通システム等における漏出検知・修復の新たな技術のための投資を通じて、削減すること。
- 廃棄物の発生源での分別、リサイクル、エネルギー回収を伴う焼却、バイオガス回収を伴う嫌気条件下での消化を促進することにより、埋立地からの純排出量を削減すること。
- 食品廃棄物を削減し、土地や家畜の管理を改善するための幅広い政策ポートフォリオを通じて、食品・農業部門からのメタン排出を抑制すること。例えば、排出量の少ない原料・飼料の使用を促進し、稲作における水管理を改善し、健康で肉を控えた食事を奨励するなど。
- 例えば、窒素施用のタイミングの改善や家畜の糞尿の管理の改善などを通じて、窒素肥料の使用を制限し、その効率的な使用を促進することによって、農業における一酸化二窒素の排出を削減すること。

46%
CO_2以外の温暖化要因の割合（冷却要因で相殺されるため、正味の温暖化は21%）

0.03℃
COVID-19の排出制限による短期的な地球温暖化

45%
容易に入手可能で低コストな対策により、2030年までに可能となるメタン排出削減量（「これらが意味すること」参照）

気候の温暖化・寒冷化に寄与する人為的な要因

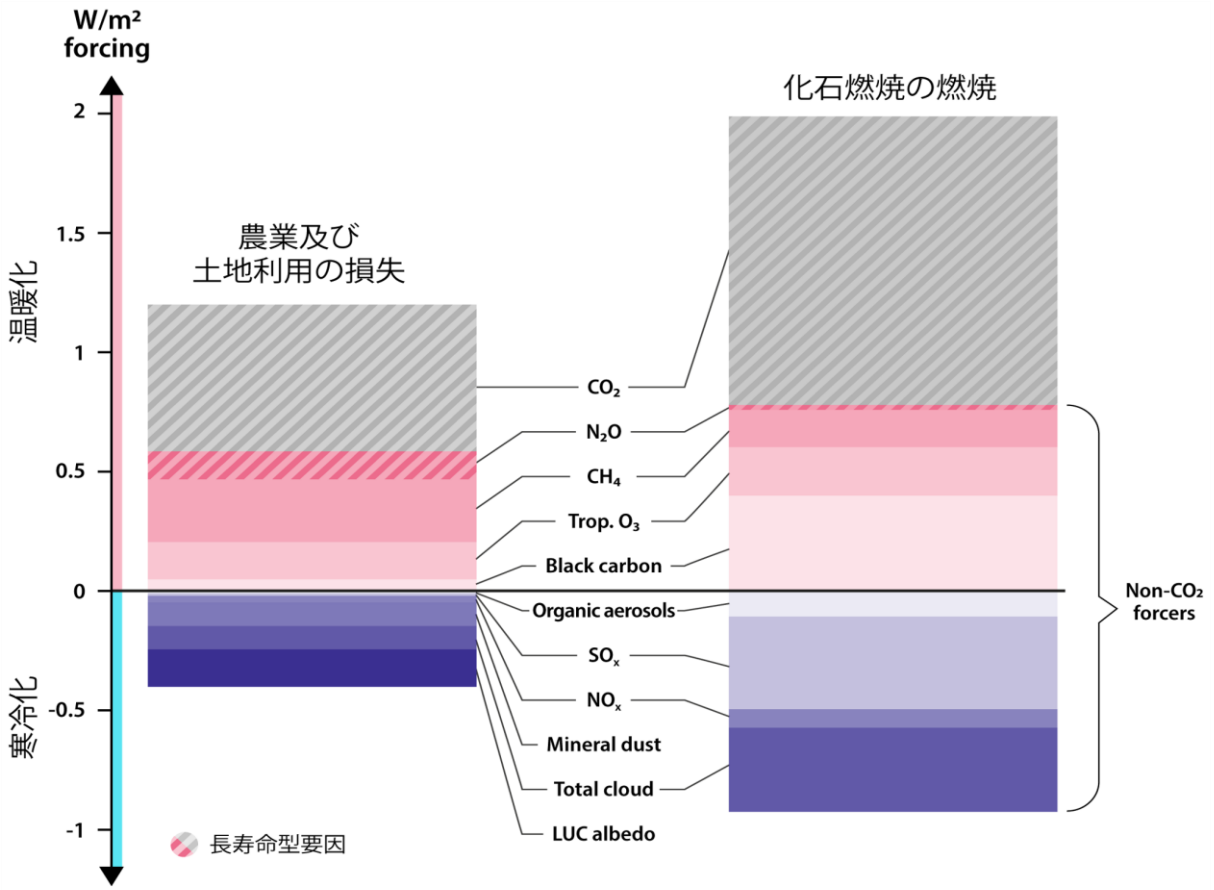


図２．地球温暖化および地球寒冷化に寄与する現在の人為的要因。農業活動を含む土地利用による要因（左列）、化石燃料の燃焼による要因（右列）と、直接的・間接的な発生源で区分している。大気中のガスには長寿命型と短寿命型がある（参考文献は Martin et al. 2021 参照）。略号は CO_2-二酸化炭素、N_2O-一酸化二窒素、CH_4-メタン、Trop. O_3- 対流圏オゾン；SO_X-硫酸塩エアロゾル；NO_X-窒素酸化物；LUCアルベド-土地利用変化による地表の反射率の変化。

3 大規模な森林火災– 気候変動によって、火災の規模が新たな次元に達し、甚大な影響を及ぼしている

この章の要点

- 私たちは極端な大規模森林火災（メガファイア）の頻度と強度が高まる新しい時代に突入しています。このような火災は人為的な気候変動によって誘発され、確実に悪化している可能性が高いです。
- 高緯度から低緯度まで、非常に多様な地域でいくつかのメガファイアが観測されており、通常、過去に森林火災が起こったことがない生態系にまで影響を及ぼしています。
- メガファイアが生物群系（バイオーム）全体に影響を与え、動植物にかつてないほどの影響を与える可能性があります。世界遺産に登録されたオーストラリアのゴンドワナ多雨林群のような火に敏感な生態系でもさらなる脅威が生じています。
- メガファイアによって放出される大量の温室効果ガスは、火災–気候フィードバックを加速し、さらに壊滅的な森林火災の可能性を高める状態を維持し、さらに悪化させます。
- メガファイアによる大量の煙とエアロゾルは、対流圏と成層圏の長距離に渡る輸送により、広い範囲に影響を及ぼす可能性があります。
- 火災レジームの悪化（より頻繁な火災やより激しい火災）は、農村部や都市部における呼吸器系や循環器系の健康、出産、精神衛生に対するリスクを増大させます。

詳細

人為的な気候変動によって火災レジームが激しくなっているというこれまでの警鐘が正しかったことを新たな科学的進歩が証明しています。火災の範囲はより広がり、より破壊的になり、火災シーズンの期間が長期化しています。さらに利用可能な可燃物も変化しているため、火災の頻度と強度が増加しています。制御されないまま広範囲に広がり、極端な強度に達するメガファイアは、今後ますます頻繁に発生すると考えられています。メガファイアは温室効果ガスとエアロゾルの排出を引き起こし、それは影響を受けるバイオームにとって前例のない規模に達し、局所から大陸のスケールで大気質に影響を与えます。

2021年に北米西部で発生した森林火災は、極端な熱波が原因となっていたように、火災やメガファイアの原因が人為的な影響によるものであることが、研究者によってより明確に示されるようになりました。カリフォルニア、オーストラリア、地中海沿岸、カナダ、北極といった多様な地域や国で、現代では前例のない規模の火災が発生しており、人間の影響であることを示す証拠が見つかっています。火災リスクを高める気象現象、つまり極端な干ばつ、酷暑、雷、頻繁に起きる強風について、少なくとも中程度の確信度で人間の影響であると関連付けることが現在では可能になっているのです。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書（AR6）第1作業部会（WG1）は、「主に気温の上昇と降水量の減少により、人が住むすべての大陸で火災が発生しやすい気象条件が将来増加する」と、中程度から高い確信度で予測しています[7]。火災によって温室効果ガスが放出され、火災に好都合な乾燥した条件を促進するという気候-炭素循環フィードバックで正（加速）のループが存在することが中程度の確信度で考えられています[8]。

近年の火災は、人々の健康に大きな影響を及ぼしています。森林火災の煙は呼吸器に影響を与えることが知られており、さらに心血管、死亡率、出産、精神衛生に影響を与えるということが示されています。また、森林火災の煙は地域や遠方の大気環境にも影響を及ぼします。2019-2020年のオーストラリアの森林火災はニュージーランドと南米に影響を与え、シベリアの森林火災による煙は北米に影響を及ぼしました。現在の評価では、世界で年間677,000人以上が森林火災により死亡していると推定されており、最も多いのは北極圏、東南アジア、中央・西アフリカ、アマゾンとなっています[9]。

気候の変化により、メガファイアの発生は、火災が発生しやすい生態系だけに限られるものではなくなります。例えば、熱帯林における水分の変化は、より大規模な火災を促進する可能性があります。火災レジームの変化は、世界の生物多様性、地域の人々の健康、そして地球規模の気候システムに対して重要な影響を与えるでしょう。

背景

森林火災は、世界中の多くの生態系に本来存在している特徴であり、多くの植物種が繁殖するための必須条件でもあります。森林火災の発生やその規模には、天候、植生構造（可燃物の有無）、地勢（または地形）、土地や火災の管理方法、火を（故意または偶然に）つける人間の存在など、多くの要因が影響します。森林火災は、オーストラリアのサバンナのような生態系ではほぼ毎年、オーストラリアの温帯林では10年間に何度も（現在では頻度が増加している可能性があります）、手つかずの熱帯雨林や北米やシベリアの北方林といった生態系では、100年単位で稀に発生します（100-300年間隔）。シベリアの北方林では、通常の火災では林床のみを焼き、立木は生き続けます。森林全体を焼くような極端な干ばつ条件（クラウンファイア：樹冠火、森林の樹冠まで燃える現象です）は、かつては10-15年ごとに発生し、シベリアでは300-1000万ヘクタールが被害を受けていました。気候変動は火災の頻度と深刻さに影響を与え、火災の発生する年が極端になっています。

! これらが意味すること

グローバルなレベルにおいて、意思決定者にとって求められるのは：

- より頻繁で破壊的なメガファイアのリスクを減少させるために、あらゆる手段を講じて地球温暖化を抑制すること。

地域レベルにおいて、政府にとって必要なのは：

- 地域や状況に応じた土地管理方法を含め、多様な影響を受ける生態系を考慮した火災管理計画を見直し適応すること。

国や地方レベルにおいて、政策立案者にとって必要なのは：

- 1.5℃目標に向けた炭素予算に、メガファイアとそれによる温室効果ガス排出への影響を含めること。
- 気象条件と森林火災の監視・予測システムを導入し、火災による壊滅的な影響への適応を支援すること。
- 火災が開墾の技術として使用されている場合、違法な森林伐採を規制し、罰則を与えることにより保護手段を提供すること。
- 火災が発生しやすい森林地域で燃焼する物質を意図的に削減する森林可燃物の処理などの森林管理手法を、場所ごとのバイオームや気候条件に適応させること。

・先住民のコミュニティと協力し、文化的な火入れなどの伝統的な土地管理手法に再び取り組むことを検討すること。

・火災の影響を受けたコミュニティの回復力を高める（インフラの計画、建設、改良の際に増加する火災リスクを考慮する）こと。

・室内における空気清浄機の使用など、森林火災によるPM2.5への曝露を低減し、人々の健康を守るための技術を検討すること。

・低コストセンサーの使用を含む大気汚染の監視を強化し、大気汚染レベルについて人々に知らせるため、より良い予測技術を開発すること。

9,000種

（オーストラリアにおける全ての種の3分の1以上にあたる）植物に加え、21の絶滅危惧種を含む脊椎動物832種が2019/20年のオーストラリアの火災地域で影響を受けました。

0.67ギガトン

2010年から2019年にかけて、主に火災が原因で純減したアマゾンのバイオマスの炭素ストックの量。アマゾンが炭素の吸収源から放出源に変わることに繋がります。

35%増

前年全体（2019年）と比較して 2020年の最初の8カ月間に北極圏の森林火災から放出されたCO_2の量。

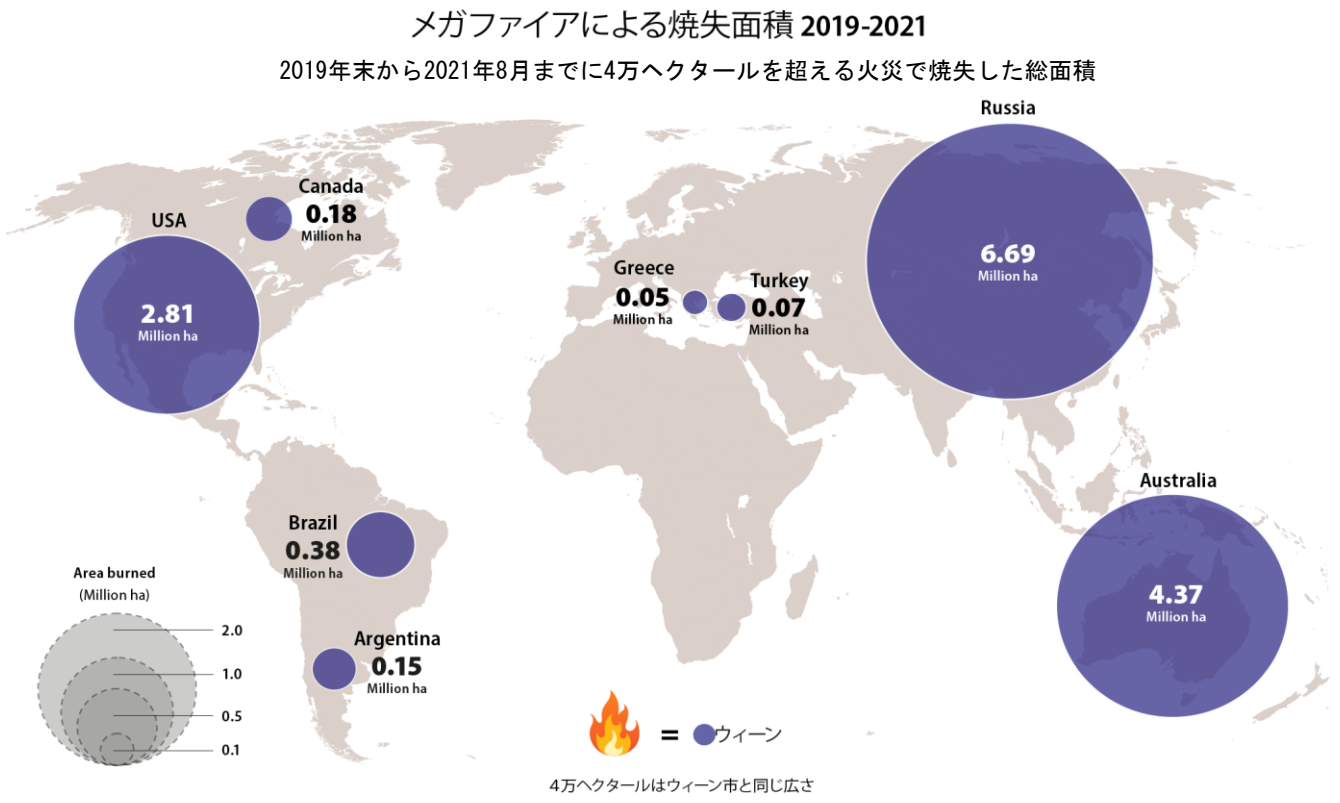


図3. 2019年11月から2021年8月の間に4万ha以上の森林火災を累積したもの。4万ヘクタールは100万ヘクタールの4%。

メガファイアがメタンの排出を促進する可能性

火災レジームが激化すると、生態系に壊滅的な影響を与えます。火災の発生頻度や強度の増加は、生物多様性を脅かし、メタン（CH_4）を含む温室効果ガスの排出を増やす可能性があります。アマゾン地域での森林破壊に伴う2019年と2020年における森林火災の増加は、CH_4の排出を著しく増やし、生態系の劣化による追加の間接排出を含まないCH_4の直接排出が年間0.5-7.0メガトンに達しました（火災発生シーズンの厳しさによります）[10]。2019年と2020年に北極圏で発生した前例のない森林火災は、燃焼による直接的な排出だけでなく、永久凍土の融解が促進されたことによる間接的な排出も重大なCH_4排出の要因となっています[11]。火災活動の加速と温室効果ガスの排出による気候-炭素循環フィードバックは著しく増加すると予想されますが、このことは気候結合モデルにおいても、1.5℃の目標値内に収めるために必要な世界全体の温室効果ガス予算を推算する際の国際的検討事項においても、現在十分に考慮されていません。

スポットライト：メガファイアの事例

オーストラリア

記録的な暑さと干ばつが発生した後、オーストラリアでは2019-2020年に50万ヘクタールを超える過去最大の単発火災を含む前例のない規模の深刻な火災が発生しました。これらの火災により、合計で715（517-867の範囲）メガトンのCO_2が総量として直接的に排出されたと推定されます。さらに、これらのメガファイアは、オーストラリア南部と東部のバイオーム全体に影響を与え、動植物に前例のない影響を及ぼしました。この火災は森林火災に適応したサバンナやユーカリ林だけでなく、より火災に敏感な生態系にも影響を与え、世界遺産に登録されているゴンドワナ雨林にも脅威を与えました。

北極圏とシベリア

北極圏やシベリアでは、北極の気温上昇と乾燥に伴う雷により、広い範囲で火災が発生しました。2019年には、シベリアとロシア北極圏でポルトガルの面積を超える約1000万ヘクタールが燃えました。2020年にも深刻な火災が発生し、約1400万ヘクタールが焼失しました。2021年にも深刻な火災が発生しています。北極圏とシベリアの森林火災を合わせると、2019年には総量で約175メガトンのCO_2（グロス）が、2020年には総量で約250メガトンのCO_2（グロス）が放出されています。

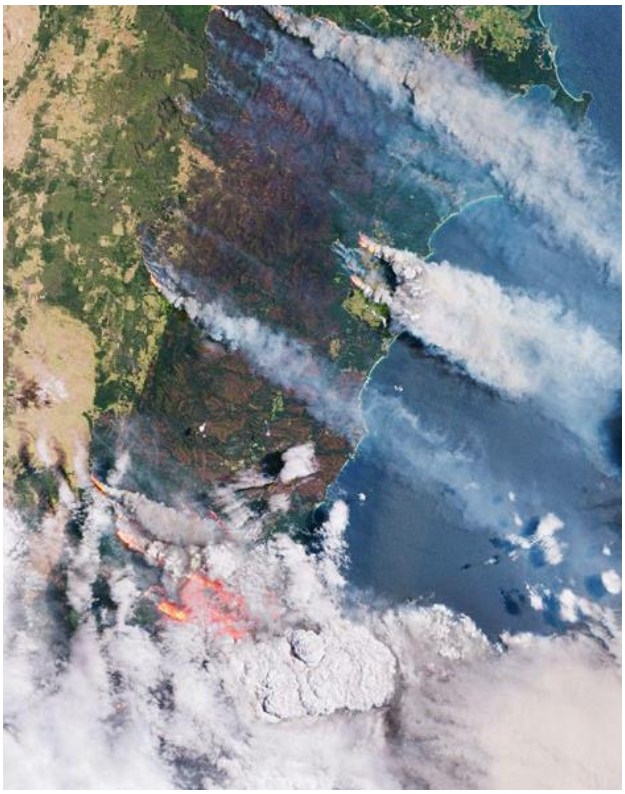
ブラジル

世界最大の湿地帯であるブラジルのパンタナールでは、2020年の焼失面積がそれまでの10年間に比べ245%増加しました。その理由は、（降雨が前年比50%減少したことによる）極端な乾燥と、牧草地の整備や農業用地の確保を目的とした合法・非合法な森林伐採による人為的な焼畑が激化したことです[12]。その結果、115 メガトンのCO_2（グロス）と524トンの有害微粒子PM2.5の排出に繋がりました。多くの動物や植物の種も影響を受け、その多くが希少種や固有種となっています。パンタナール地域の脆弱な生態系は回復しないかもしれないと懸念されています。

米国

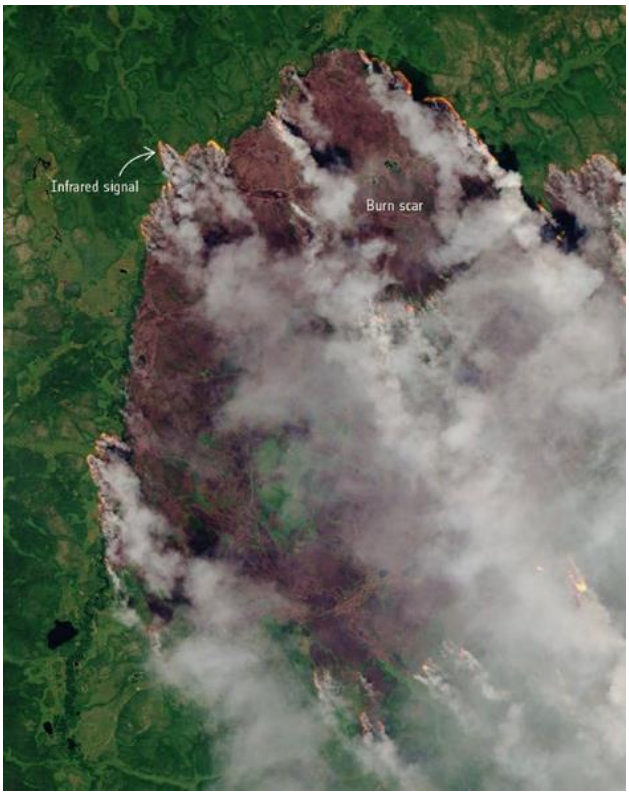
2018年以降、米国南西部では過去最悪の火災が発生しています。カリフォルニア州のメガファイアは数カ月にわたって燃え続け、2020年まで観測史上最大となる7つの森林火災を引き起こしました。最大のメガファイアである8月の複合火災は、異なるタイプの森林や低木林を40万ヘクタール以上燃やしました。このように非常に広い範囲で火災が多発すると、そのほとんどが希少種や固有種である動植物の回復が脅かされることになります。アメリカ西海岸では、これらの火災によって放出された煙は人間の健康にとって危機的なレベルに達し、サンフランシスコは数日間オレンジ色の空に覆われました。煙は北半球を横断し、火災によるエアロゾル粒子は遠くドイツでも確認されました。2020年のカリフォルニア州とオレゴン州の森林火災は、1年間で少なくとも総量で例年より30メガトン多いCO_2（グロス）の排出に繋がりました。

衛星画像

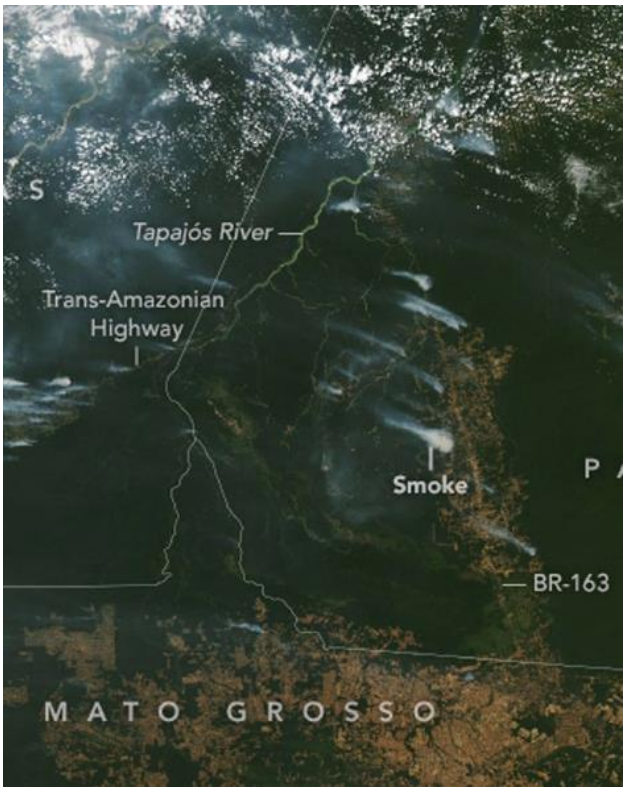


画像1： 2019年12月31日、オーストラリア東海岸で燃えている森林火災。焦げ茶色の部分は焼失した植生で幅約50km、長さ約100km。出典：European Space Agency (ESA), contains modified Copernicus Sentinel data(2019), processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO

画像2： 2020年8月19日、アメリカ西海岸のカリフォルニア州で燃える森林火災。出典：European Space Agency(ESA), contains Copernicus Sentinel data (2020), processed byESA, CC BY-SA 3.0 IGO



画像3： 北極圏に近いシベリア（ロシア）のサハ共和国で発生した森林火災。出典：European Space Agency (ESA), contains Copernicus Sentinel data (2021),processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO



画像4： 2020年8月1日、ブラジルのアマゾンで発生した森林火災。出典：NASA Earth Observatory, image acquired by Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on NASA's Aqua satellite.

4 気候変動のティッピングエレメント（地球環境の不可逆的な激変をもたらす事象）がインパクトの大きなリスクをもたらす

この章の要点

- IPCC第６次評価報告書には、多くの変化（特に海洋、氷床及び世界の海面水位における変化）は、100年から1000年の時間スケールで、不可逆的であるリスクが高く（「背景」を参照）、これらの変化は包括的なリスク評価にとって重要であると書かれています。
- いくつかの重要な気候変動のティッピングエレメント（地球環境の不可逆的な激変をもたらす事象）の不安定化は、もうすでに観察され始めています。
- この不安定化の主な要因は、多くの場合、地球温暖化にあります。しかし、アマゾンの熱帯雨林の劣化や森林伐採など、土地被覆の変化における人間の直接的な影響は、同等またはさらに強い要因となる可能性があります。
- いくつかのティッピングエレメント、例えば氷床融解や海流の変化だけでなく、熱帯雨林の森林破壊などは相互に影響を及ぼします。最近の研究によると、ティッピングエレメント間の相互作用により、予想されていたよりも低いレベルの地球温暖化で転換が起こりうることが示されました。

詳細

IPCCは、「大規模な特異事象」に関するリスク評価を20年間かけて継続的に強化してきました。最新の報告書（IPCC第６次評価報告書第1作業部会）では、これまでよりも強化された評価で、気候システムのティッピングエレメントの非線形変化によるリスク（「背景」を参照）と、不可逆的な長期的に避けられない変化、人為的気候変動と直接的な人為的圧力による結果であると認識しています。ティッピングエレメントの変化は、高い不確実性（可能性やタイミング、あるいはその両方について）の影響を特に受けますが、社会や生態系に対する大きなリスクにも関連しています。このように影響が大きく不確実性の高いリスクは、IPCC第6次評価報告書では「発生する見込みが低いが、インパクトが大きい結果」（著者が明示的に述べているように、確率が必ずしも低いことがわかっているわけではなく、単に十分に制約されていない場合でも）と記されています。結果の深刻さは大きく、長期的であり、自然と社会の存在に関わるリスクに関連しています。

「スポットライト」に示されている主なティッピングエレメントに関連するリスクには以下のものがあります：

- **氷床崩壊の進行から**：2100年までに壊滅的な2メートルの海面上昇、2150年までにさらに破壊的な5メートルの海面上昇（IPCC第6次評価報告書第１作業部会報告書9.6.3.3で可能性が否定されていません）。また長期的に、同程度の海面上昇が避けられません。例として、2℃の温暖化のピーク後、2000年に渡り2-6メートルの海面上昇が予想されています（IPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書の9.6.3.5およびCross Chapter Box 12.1）。
- **主要な大西洋循環の減速または停止から**：気象パターンの急激な変化。例えば、ヨーロッパは大西洋の海洋循環による熱輸送に大きく依存しています。
- **大西洋循環の位置のシフトから**：モンスーン循環に影響を与える水循環のシフト、特にアマゾン全体の降雨パターンに影響する熱の再分配の変化（全体的な降雨量が増加するか減少するかは不明）。
- **アマゾンの気候状態の変化から**：地域の気候条件へのフィードバック（例えば、熱帯雨林の森林消失は大気との水蒸気交換の変化につながります）および主要な炭素吸収源としてのアマゾン流域の永久喪失の可能性。

最近発表された多くの研究結果は、IPCCの評価を確認および改善し、さらに、いくつかの気候のサブシステムがすでに安定性を失ってきている兆候、また臨界点（ティッピングポイント）に向かっていることを示しています。

それぞれのティッピングプロセス（地球環境の不可逆的な激変をもたらす過程）からのリスクに加えて、科学によって包括的な更なるリスクの階層が特定されました。このような連鎖に関与している可能性があります。つまり1つのティッピングプロセス（例えば、グリーンランドの氷床融解）が別のプロセスの引き金になります（この場合、融け水の流れ込みによる大西洋循環の減速）。したがって、各ティッピングエレメントからのリスクに加えて、それらの相互作用によって状況は悪化し、全体的なリスクが深刻化します（急激な変化は、それらが別々に起きる場合よりも（より低い平均気温で）より簡単に生じる可能性があります。

背景

地球温暖化と直接的な人為的圧力は、気候システムの主要な構成要素に大きな変化をもたらします。地球温暖化のレベルに比例する段階的な変化に加えて、一部の要素はさまざまな時間スケールで劇的に非線形的に遷移するリスクに直面しており、多くの場合、長期間にわたって正常な状態に戻れません。気候システム内のこのような事象をティッピングエレメントと呼びます。

実際の遷移は、数100年から1000年（氷床の融解・崩壊）、数10年から数100年（海流の減速・再構成）、または数年から数10年（特に、アマゾンの熱帯雨林の森林破壊のように、人間活動が直接的に影響する場合）とそれぞれに展開する可能性があります。

ティッピングエレメントの難点は、相互作用の複雑な性質によって、地球温暖化がどれくらい進行すると起こるかが正確にわからないということにあります。注意したいのは、臨界点を超えると現実的に後戻りができなくなる可能性です。地球の平均気温が再び下がったとしても、自己強化の機能により、さらなる氷床融解、森林崩壊、またはその他の変化を元のシステムが認識されなくなるまで引き起こす可能性があるのです。

! これらが意味すること

国際、国内、地方のすべてにおいて、気候変動交渉の実務担当者と意思決定者にとって必要なのは：

- 気候変動のティッピングエレメントによる影響の大きいリスクを認識し、リスク評価に可能性とタイミングに関する残りの不確実性を組み込むこと。
- 予防原則を適用し、より野心的な気候保護を目指すこと。このアプローチは、高い安全裕度が必要である原子力事故のような他社会的リスクへのアプローチに類似する。
- アマゾンの熱帯雨林の一部など、人間活動が直接的な引き金となる可能性がある地域では、関係者は臨界点に到達するリスクを回避するために可能な限りの対策を講じる必要がある。

IPCCの「懸念の理由」（「アンバーダイアグラム※」）の大規模な特異事象に対する科学に基づくリスク評価の経時変化　（※気温上昇とリスクレベルの関係を色調変化で表した図）

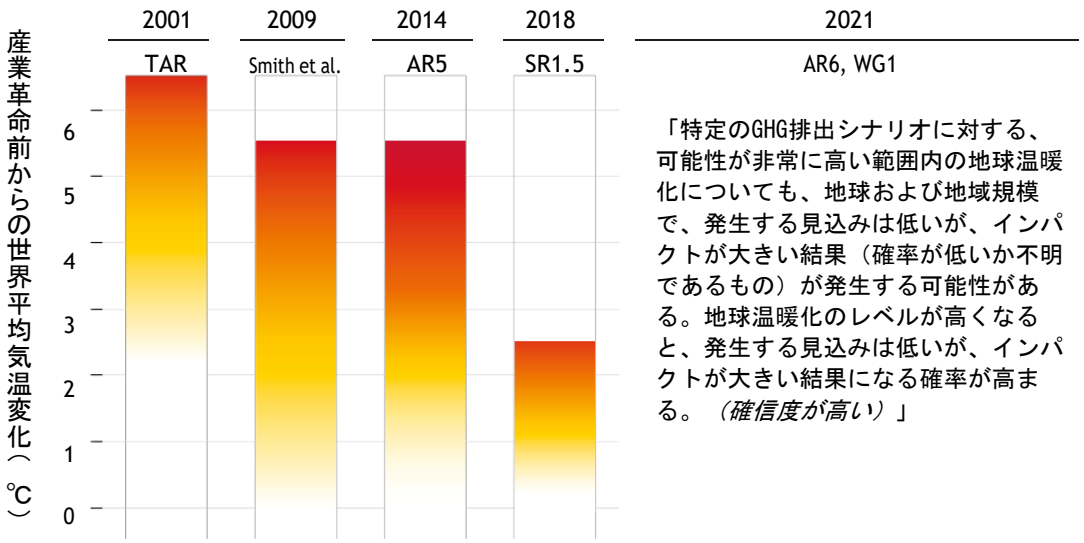


図4. IPCCの懸念の理由「（アンバーダイアグラム）」の大規模な特異事象に対する科学に基づくリスク評価の経時変化。最初の「アンバーダイアグラム」はIPCC第1次評価報告書[13]に基づいており、2番目はSmith et al. (2009)[14]、3番目はIPCC第5次評価報告書[15]を参照しており、最後の「アンバーダイアグラム」は1.5℃に関するIPCCの特別報告書[16]による。引用は、IPCC第６次評価報告書の「アンバーダイアグラム」（通常は第2作業部会報告書に掲載されるが、本レポート作成時点で未公開）に代わるもの。

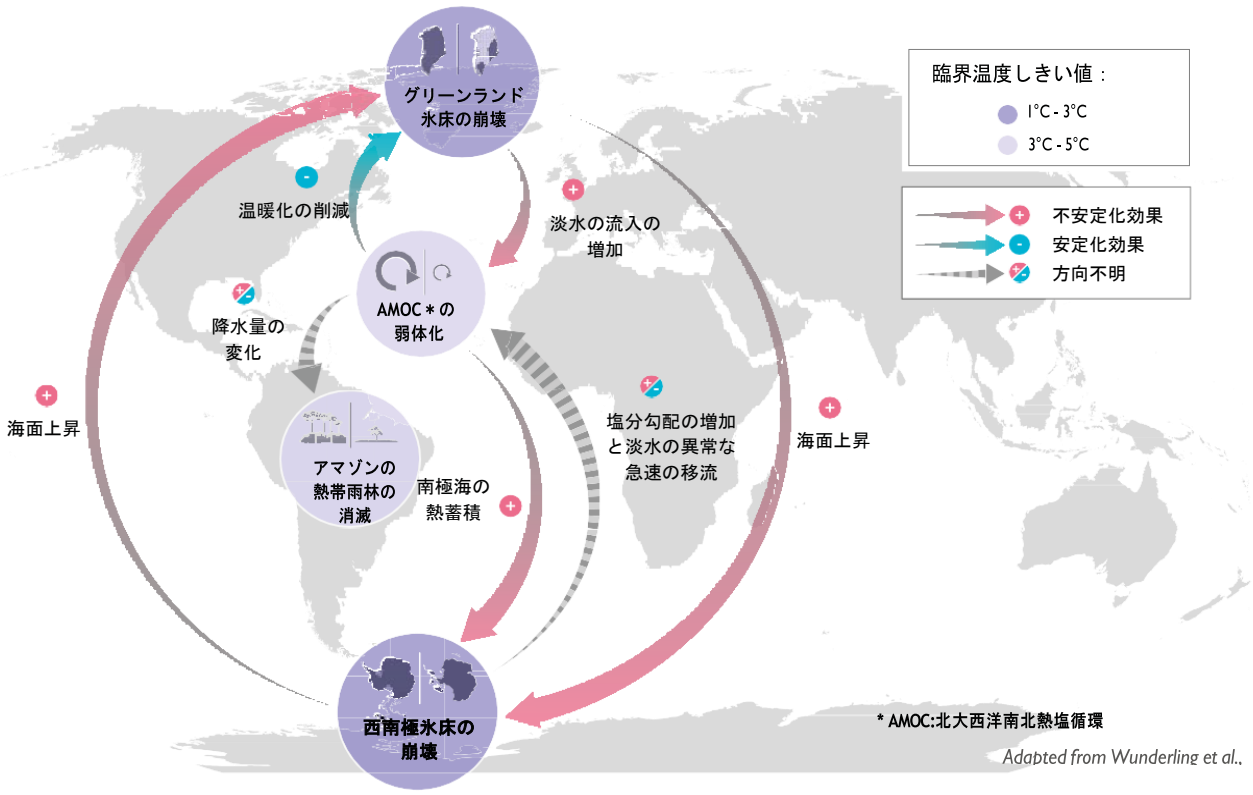


図5. グリーンランドと西南極氷床、大西洋南北熱塩循環（AMOC）、アマゾン熱帯雨林の4カ所での気候変動「ティッピングエレメント」の物理的相互作用（Martin et al. 2021の参考文献を参照）。

スポットライト：主な気候の「ティッピングエレメント」

グリーンランド

融雪水の流出と溢流氷河からの氷の放出により、グリーンランド氷床の消失が加速しています。表面の融解は、さらに大気が温暖化するにつれて進行します。氷の流出量は1985年から1999年に比べて現在14%増加していますが、一方この増加の要因は地域ごとに異なり、未来の進行を予測することが困難です。

西南極

観測とモデリングによると、氷の弱体化および/または氷の接地線の後退が始まると、自己強化的な氷の喪失と海面上昇につながりうるプロセスが存在します。過去には、グリーンランド氷床からの融解水が世界の平均海面を上昇させ、南極氷床の後退に直接影響を及ぼしてきたこともありました。

大西洋海洋循環

先史時代の気候の研究と現在の海面と塩分の観測とを組み合わせると、主要な大西洋の海洋循環システムが過去数十年で著しく弱まり、少なくともここ1000年で最も弱いことがわかっています。海面水温と塩分観測の最近の統計分析によると、この低下が一時的な弱体化ではなく、循環の安定性の喪失の兆候であるという懸念もあります。

アマゾン

世界最大の熱帯雨林であるアマゾン熱帯雨林は、地球の炭素吸収源と水の循環ポンプとして重要な役割を果たしています。アマゾン流域の南東部は、森林火災の影響を含まずとも、炭素放出源へと変わっています（詳細については、8章を参照）。観測によると、降雨量の変化はアマゾン内の植生区分に影響を及ぼしますが、気候変動だけでは流域全体の立ち枯れを引き起こすことはほとんどありません。しかし、人為的な森林劣化（アマゾン流域の17%で、以前の推定よりも高い）と森林破壊（すでに18%）と組み合わせて、気候変動はアマゾン熱帯雨林の一部で気候状態のシフトを引き起こす可能性があります。

5 グローバルな気候変動対策は公正でなければならない

この章の要点

- 気候変動対策は公正な移行を支えるものでなければなりません。そうでなければ、低中所得国の生活水準の向上を遅らせ、世界中で弱者に負荷をかけることになるからです。
- 貧困国の公正で衡平な低炭素発展に向けて：
  - 世界人口の上位1%の富裕層が排出量を30分の１に減らすことが必要であり、それにより、
  - 下位50%の貧困層が排出量を3倍まで増やすことが可能になります。
- 正義に基づく気候変動対策は一般の人々に受け入れられ易く、実施の可能性が高まります。

詳細

グローバルな気候変動対策は、世界各国の社会集団間や世代間で顕著化する不平等や不正義に取り組むよう策定されなければなりません。炭素予算の公正な配分には、世界人口の上位1%の富裕層が現在の排出量を少なくとも30分の1に減らす必要があります。その一方で、下位50%の貧困層の1人当たり排出量は平均して現在の約3倍まで増やすことが可能になります。このためには、既存の生産・消費インフラを脱炭素化し、低炭素型のライフスタイルを進める必要があります。こうした移行を促すための目標とインセンティブは、各国の状況により必然的に二分化したプロセスで進められることとなり、 相対的に対応能力の高いG20諸国が先行して積極的に取り組む必要があります。正義に基づく気候変動対策はより広く受け入れられ易く、すべての人々に利益をもたらす効果的な実施の可能性が高まります。

最も脆弱な人々は、気候変動の影響を不公平な形で受けるのみならず、気候変動緩和の取り組みからの著しい悪影響を受ける危険にさらされています。例えば、課税や環境費用の料金への転嫁などの形で家庭用エネルギー、水、食料等の基本的な財やサービスのコストを引き上げる政策は、富裕層よりも低所得者層への影響が相対的に大きくなり、逆進的な分配効果をもたらします（第7章を参照）。高炭素排出の経済セクターを縮小し低炭素経済を拡大しようとする政策と実施プロセスは、労働者のスキルアップや雇用創出策と組み合わせない限り、高炭素排出セクターに従事する労働者の生計を脅かす可能性があります。また、バッテリーや太陽光発電パネルといった低炭素技術に必要な鉱物資源は、多くの場合、貧困国において環境や社会に悪影響を及ぼす方法で採掘されている傾向にあります。さらに、低中所得国では気候変動対策の推進

により生活水準の向上が遅れる可能性があります。より貧しい国や人々の間では、気候変動に対応する能力が低い傾向にあります。

サハラ以南のアフリカをはじめ多くの途上国では、これまでインフラ開発が進んでいないため、資源効率が高く気候変動にレジリエントなインフラシステムへのリープフロッグ（一足飛び）が可能かもしれません。実現のためには緩和、適応、そして開発の優先順位のバランスをとることが重要ですが、そうした能力の低い途上国を支援する政治的・経済的な仕組みが必要です。例えば、富裕国は貧困国の低炭素投資に貢献すべきです。こうした変化のためには、現状を打破し、世界全体に広がる不平等とその背景にある構造を変革することが必要です。

国際的な気候変動対策の野心（さらなる取り組み）は脆弱な社会にコベネフィット（相乗便益）を確保することが可能であり、またそうでなければなりません。さらに、基本的な財へのアクセスを損なうものであってはなりません。公正で野心的な気候変動対策を行うには、世界全体の炭素予算の公正な配分に基づく過去、現在そして将来の排出の権利が守られなければなりません。

背景

１人当たりのカーボンフットプリントについては、各国間そして各国内においても大きな格差が生じています。例えば、1990年−2015年の累積炭素排出量（消費ベース）に注目すると、世界の上位10%の富裕層が52%の排出量を占めているのに対し、下位50%の貧困層はわずか7%のみでした。この間、上位10%の富裕層のカーボンフットプリントは増加しており、この層の排出量を抑制する緩和政策の欠如が明らかになっています。

1970年代以降、世界のカーボンフットプリントは増加の一途をたどっているにもかかわらず、その分布における不均衡が縮小する傾向にあることは注目に値します。これは、中国の経済成長と、所得水準（GDP：国内総生産）とカーボンフットプリントの間の強い相関関係が一因となっています。すべての人々の福利を追求し、開発・気候アジェンダを推進しながら、気候変動を緩和するにあたり、GDPとカーボンフットプリントをデカップリングする（切り離す）ことが大きな課題となります。富裕国が政策決定や社会・経済的進捗評価を行う際には、GDP成長という指標に代わって環境・社会的な目標・指標を重視することが望ましいであろうという証拠が積みあがっています。

気候変動の影響は、温室効果ガスの排出に殆ど寄与していない脆弱な人々や国々に及んでおり、今後も影響を及ぼし続けます。G20諸国による温室効果ガス排出量は世界全体の約78%を占めており、今後数十年間の世界の排出量の動向を大きく左右することになります。

富裕国による現在の対策や公約は気候危機に取り組むには未だ不十分であり、実際の排出量の少ない貧困国が気候変動による負の影響をより強く受けるという不均衡についての責任をとっていません。その顕著な例が、パリ協定の下で各国が決定する貢献（NDC）に基づくG20諸国の短期的なコミットメントであり、これはネットゼロ削減目標を達成するには不十分なものです。

！これらが意味すること

グローバルなレベルにおいて、交渉担当者・意思決定者にとって重要なのは：

- 炭素化に伴う負の影響を回避するための資源の再配分と富裕国から貧困国へ資金の移転を行うために、CO2排出の価格付け（炭素価格付け）を戦略的に活用すること（第7章を参照）。
- 分散型再生可能エネルギーの導入・運用にかかる低廉なコストと簡易なインフラ技術要件の利点を活かして、低中所得国が低炭素で気候変動にレジリエントなインフラに直接リープフロッグできるよう支援すること。
- 温室効果削減発展権アプローチ[17]や1人当たり累積排出量均等化アプローチ[18]等を通じて、貧困削減に資する公正な世界の負担分担システムを構築すること。
- 炭素予算の配分における格差是正という観点に立ち、各国の気候変動対策における野心・目標の協議を仕切り直す（リセットする）こと。
- すべての人々の福利追求と開発・気候アジェンダの推進を同時に優先して進めるために、GDPとカーボンフットプリントのデカップリングを行い、成長の達成方法に関する概念を再構築すること。

国・地方レベルにおいて、政府にとって重要なのは：

- 最富裕国では、利用可能な最善の気候科学（パリ協定遵守とネットゼロ目標の達成またはそれ以上）に整合するのみならず、衡平の実現に向けたより積極的な政策を策定すること。そのためには、1人当たりの消費ベース排出量（ライフスタイル・カーボンフットプリント）を、2030年までに約2-2.5トン（CO_2換算）／年にまで削減する必要がある。
- カーボンフットプリントの大きい贅沢品や活動に重税を課す政策を策定すること。
- 低炭素社会への移行が配分や公正さに与える潜在的な影響について、慎重かつ高度な分析を行うこと。
- 排出削減政策が分配に逆進的な影響を及ぼす場合、理想的には人々の排出削減に直接資する手段により、弱者層の受ける逆進的な影響を相殺すること。

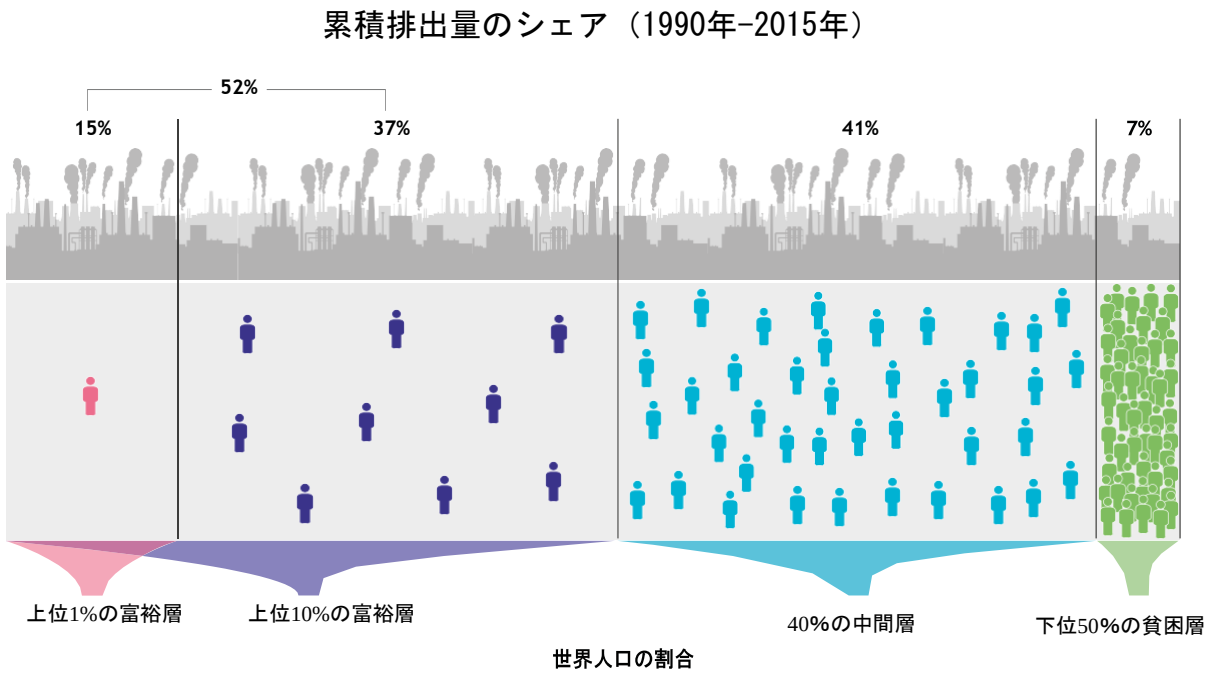


図6. 富の観点から見る1990年から2015年における世界人口に対する温室効果ガスの累積排出量シェア
Gore, T. et al. (2020)[19] "Summary of headline findings from Oxfam and SEI's new research" 図から引用。

6 家庭の行動変化への支援は、気候変動対策において重要だが見落とされがちである

この章の要点

- 気候変動に立ち向かうには、効率化と脱炭素化戦略を補完するよう、特に富裕層におけるライフスタイルを変えることが重要です。
- 消費の拡大という現在の趨勢の維持に固執することは、脱炭素化のための供給側の取り組みの成果（例：太陽光発電の普及）を危機にさらすことになります。
- 個人の行動変化がより大きな意味を持つためには、これと相乗効果を持つ公共部門とビジネス部門の変化と組み合わされる必要があります。
- 1.5℃目標と整合したライフスタイル（すなわち「1.5℃ライフスタイル」）は、すべての人々に「良い生活」をもたらすことができます。
- 1人当たりの炭素排出量の上限と下限を設定した「消費回廊（consumption corridors）」が、目安として活用されるべきです。

詳細

家庭は、その消費パターンを通じて、世界のCO_2排出量の多くに直接・間接的な影響を与えています。現在の気候変動戦略では、このような需要側をターゲットにすることが見落とされており、供給側と需要側の取り組みをよりバランス良く行う必要があります。1.5℃目標を達成するためには、2030年までに世界の家庭からの平均CO_2排出量を少なくとも半減させる必要があり、富裕層にある家庭には非常に厳しい削減が求められます（例：EUにおける上位10%の富裕層は、排出量を90%近く削減する必要があります）。途上国と先進国の家庭では炭素排出量に顕著な差があり、また、各国内においても富裕層とそうでない家庭では顕著な差があることを前提とすると、気候正義と衡平性の理念に基づいた対応が必要となります（第5章を参照）。衡平性もさることながら、これら富裕層にある消費量の多い世帯の行動変化は需要側の気候緩和策において非常に重要です。

家庭レベルでの新しい価値観や行動変化を促すことは、システム全体に影響を及ぼす可能性があります。食、住居、移動といった排出集約型の消費領域には特に注目する必要があります。1.5℃ライフスタイルに必要な変化を起こすためには、（家庭だけではなく）公共部門とビジネス部門の変化も合わせて必要になります。こうした（公共部門・ビジネス部門の変化とともに家庭の変化が進む）プロセスは、脱炭素社会に向けた進捗を加速させる好循環をもたらすことが示唆されています。低炭素エネルギーや低炭素交通への移行など、システム全体の変化により、1.5℃ライフスタイルが求める厳しい炭素予算内で、良好な生活の質の維持が可能になります。

1.5℃ライフスタイルを定義する上で参考になるのが「消費回廊（consumption corridors）」という概念です。これは、1人当たりの排出量の下限を適切な生活水準を維持する絶対的な前提条件により、そして上限を気候目標達成に向けた世界の排出目標によりそれぞれ設定するものです。全世界の人口をこの上限・下限の幅の中に移行させることで何十億もの人々の生活が大きく改善される一方、裕福で消費量の多いエリート層には大きな変化が求められます。

COVID-19パンデミックは、（議論の余地がないわけではありませんが）家庭の行動に急速に大きな変化を促しました。このことは、行動を変える必要があると一般に認識されるような世界的な危機があれば、需要側の変容によって1.5℃ライフスタイルを実現できる可能性を示しています。さらに重要なことは、地域においても地球規模においても、こうした需要側の行動変容に伴う負担が衡平に分担されるように、供給側の対策を決定する際に民主的なプロセスが採用されることです。

背景

家庭のカーボンフットプリントは、国や地域、社会グループの間でも、またそれぞれの内部でも、大きな差があります（排出量の世界的な不均衡については第5章を参照）。主にエネルギー供給の変化やCO_2除去技術の普及といった供給側の解決策とは異なり、需要側の解決策には、製品、サービス、プロセスの最終利用者である家庭が関与します。需要側の解決策は、地球規模での気候変動緩和の取り組みに向けた超学際的（transdisciplinary）かつボトムアップの行動により強化されるものです。

! これらが意味すること

グローバルなレベルにおいて、意思決定者にとって必要なのは：

- 民主的なプロセスを経て衡平な「消費回廊」を定義し、需要側の変化に伴う負担を排出量の多い消費エリート層に負わせること。

国・地方レベルにおいて、政府にとって求められるのは:

- 1.5℃目標を達成するための国の政策を、1.5℃と整合したライフスタイルに必要なインフラの構築など、具体的な施策に転換すること。
- 決定的に重要である食、移動、住居の領域における解決策に特に注意を払うこと。
- 脱炭素に向けた移行を相乗的に促すために、政策とインフラを通じて家庭の消費パターンに変化を与えること。

50%（またはそれ以上）
需要側の解決策によりもたらされる世界の炭素排出削減の割合

75%
人々の生活により良い影響を追加的に与えることができる需要側の解決策の割合

2.5トン
2030年までに軌道に載せなければならない家庭消費に係る1人当たり炭素排出量（2020年の半分）

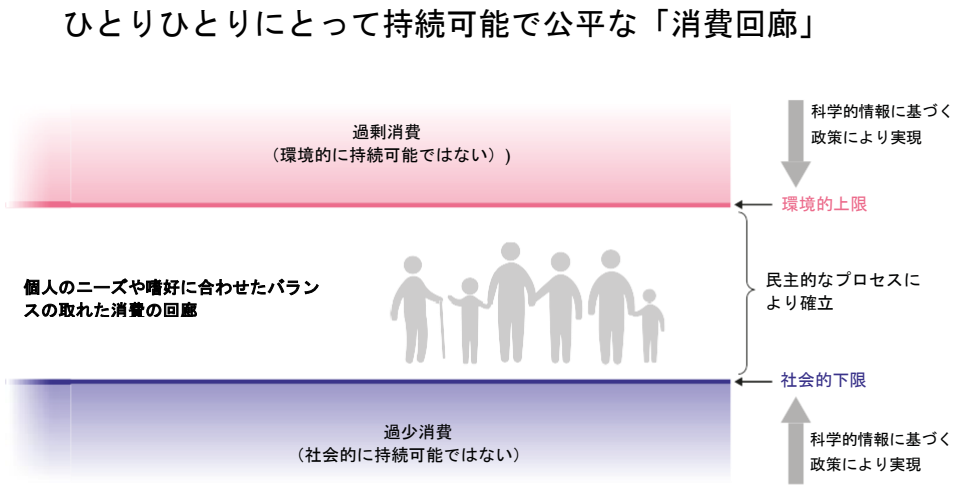
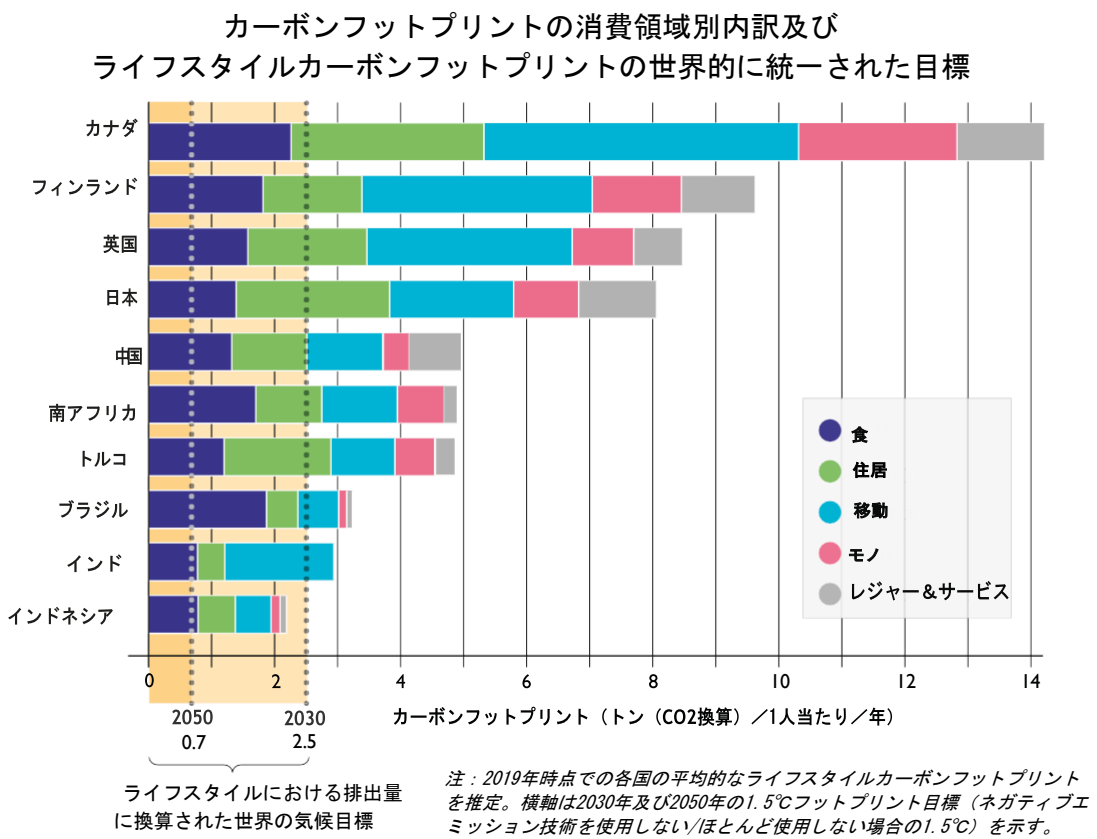


図7.　消費回廊の概念図[20]。

Inspired by: Akenji et al. 2021



注：2019年時点での各国の平均的なライフスタイルカーボンフットプリントを推定。横軸は2030年及び2050年の1.5℃フットプリント目標（ネガティブエミッション技術を使用しない/ほとんど使用しない場合の1.5℃）を示す。

図8.　世界の気候目標に対する各国の現在のカーボンフットプリント[20]。

3つの主要領域における排出量削減に向けた取り組み

移動

必要なフットプリント削減量は、過剰消費となっている先進国では少なくとも72%。

個人の自動車による移動

必要な個人の自動車による移動は、CO_2排出の最大要因のひとつです。電気自動車への切り替えに依存することは希少資源を利用することであり、新しいインフラ投資により車を使う移動（及びすべての関連する負の外部性）を固定化（ロックイン）します。需要側の解決策を支援する政策には、公共交通への投資と補助金増額、通勤の必要性を減らす都市・農村開発、自転車通行スペースの確保、個人の自動車使用に対する混雑税導入とその対象範囲拡大等があります。

食

必要なフットプリント削減量は、過剰消費となっている先進国では少なくとも47%。

植物由来の食生活への切り替え

食領域で必要な変化を達成するための最善の方法は、肉や乳製品の消費を大幅に削減し、食品廃棄物の発生を最小限に抑えることです。需要側の解決策を支援する政策には、肉や乳製品の生産に対する補助金撤廃、植物由来の食料生産に対する財政的・規制による支援、コミュニティや都市部でのガーデニング（市民農園や都市農業）促進等があります。

住居

必要なフットプリント削減量は、過剰消費となっている先進国では少なくとも68%。

低炭素住宅は、住宅の効率化・充足化により実現できる

断熱改修、暖房の効率化、再生可能エネルギーへの切り替えといった脱炭素戦略は、1人当たりの居住面積を減らすという需要側の解決策を伴う必要があります。需要側の解決策を支援する政策には、（1人当たりの居住面積に基づく）累進的な固定資産税、小規模住宅を奨励する規制や税制、さらなる（人工物による）土壌被覆の一時停止や上限設定等があります。

7 政治的課題がカーボンプライシングの有効性を阻害する

この章の要点

- カーボンプライシング（炭素の価格付け）は、まだ大幅な排出削減をもたらしていません。
- カーボンプライシングを効果的なものとするためには、炭素価格を短期的に引き上げる必要があります。また、部門別の設定を行い、より大きな政策パッケージの一部となる必要があります。
- 広く受け入れられるために、カーボンプライシングの枠組みは衡平性と正義を考慮する必要があります。

詳細

カーボンプライシング政策は着実に導入が進められています。2020年には世界の排出量の22%をカバーしています。しかし、そのうち40米ドル/トン（CO_2換算）以上の価格が付いているのは3.76%に過ぎません。カーボンプライシングリーダーシップ連合の炭素価格ハイレベル委員会は、パリ協定における目標との整合性を図るため、2020年までにCO_2の価格を40–80米ドル/トンにすることを提言しました[21]。これまでのところ、世界規模でのカバー範囲が限られていること及び一般的に価格水準が低いことから、炭素価格が温室効果ガスの排出軌道に与える影響はわずかなものに留まっています。

その原因として、いくつかの経済的・政治的課題が指摘されています。カーボンプライシングは、将来的には利益だけをもたらすと考えられていますが、短期的には消費者にコストを生み出します。そのため、企業と消費者の両方から反対意見が出て、政治的に受け入れ難いものとなってしまうことが多いのです。その結果、気候変動対策としての実質的な効果が得られないくらい価格が低く設定されてしまうことが多く起こります。気候変動のリスクを適切に考慮することができず、全体の炭素予算を超過してしまう危険が生じています。このような状況を回避するためには、むしろ、短期的には炭素価格を十分に引き上げて迅速かつ大幅な排出削減を実現し、その後、時間をかけて価格を引き下げていくべきという研究もあります。

世界共通の炭素価格が議論されていますが、炭素取引の新たなグローバルメカニズムを創設するパリ協定第6条ルールの最終決定が容易でないことは、このアプローチが政治的に困難であることを示しています。部門ベースの炭素価格と国境税調整は解決策の一部となり得ますが、国境税調整政策は、特に一部の中低所得国に対して貿易上の新たな政治的・経済的課題を提起することになります。さらに、衡平性について慎重に考慮することも重要です。

また、カーボンプライシングにはメカニズムとしての本質的な限界もあります。カーボンプライシングには逆進性があり、貧しい世帯は、エネルギー使用量が少なくても、富裕層より影響を受ける可能性があります。これは、低所得者層に利益をもたらすよう炭素税からの税収を再分配する施策によって調整が可能です。また、カーボンプライシングの効果を制限するもうひとつの要因は、世界の排出量の大部分が大規模なインフラの維持・利用によるものということです。すなわち、ロックイン効果や長いリードタイムにより、価格弾力性が低くなります。さらに、カーボンプライシングは、主に効率改善や燃料転換を促すものであり、脱炭素化への効果は限定的であることが明らかになっています。したがって、カーボンプライシングは、緑の移行（green transitions）のための数ある手法のうちのひとつとしてのみ捉えられるべきです。

背景

「汚染者負担」の原則を適用し、気候変動の負の外部性を内部化するために、学界や政策立案者は長年にわたってカーボンプライシングを提唱してきました。カーボンプライシングには、排出された炭素1トンあたりに価格を課す炭素税や、炭素排出枠を取引する排出量取引制度（ETS）などの形態があります。経済学者は、政府が設定した削減目標を達成する方法を企業が柔軟に決定できることから、カーボンプライシングは効率的であると考えています。

! これらが意味すること

グローバルなレベルにおいて、意思決定者にとって必要なのは：

- 世界全体の排出量のより多くの部分に炭素価格を適用し、大幅な脱炭素化を促すために十分に高い価格を設定すること。
- 世界共通の一律な炭素価格を追求するのではなく、経済的・政治的状況の多様性を認識すること。部門ベースのカーボンプライシングは、潜在的な競争の問題に対処することが可能。
- カーボンプライシングを効果的なものとするために、カーボンオフセットの利用を慎重に管理し、化石燃料への補助金を迅速に削減すること。

これらのことは、国レベルでも非常に重要です。

国レベルにおいて、政府がすべきことは:

- 炭素税からの税収を、他の税金の引き下げ、公共財や気候変動対策のための資金調達などに、透明性のある公正な方法で使用または還元することで、逆進性の影響を回避し、（カーボンプライシングを）受け入れやすいものとすること。
- 変革的な脱炭素化の推進に向けた気候政策の「バンドル（政策手段を束ねたもの）」のひとつとしてカーボンプライシングを進めること。

137米ドル/トン
現在世界各国で実施されている国内炭素価格のうち最も高い額。

61カ国
カーボンプライシングを導入している国の数。

800以上の企業
社内炭素価格を採用している企業数。

22%
炭素価格によってカバーされている世界の排出量の割合。

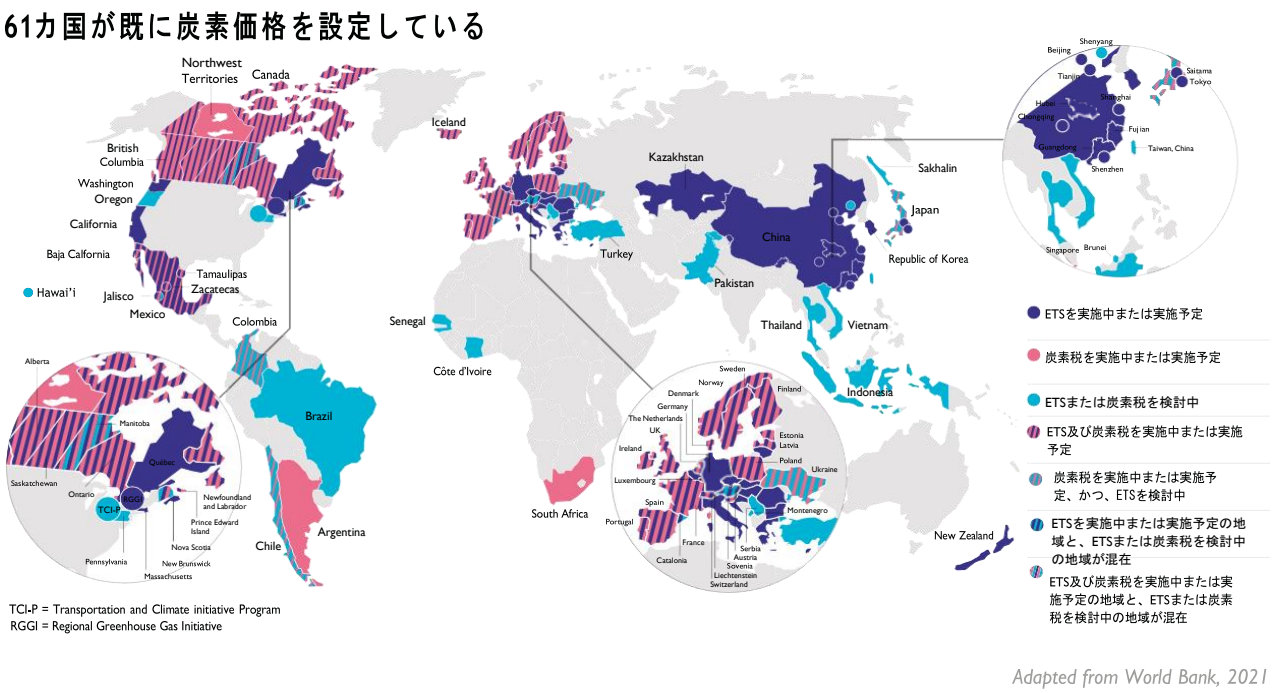


図9.　炭素税、排出量取引制度（ETS）、またはその両方を組み合わせて、炭素に対する価格制度を導入している、または導入を計画している地域・国[22]。

スポットライト：重要なカーボンプライシングの枠組み

EU ETS

EU ETSは、EUの排出量の約40%をカバーしています[23]。EUはまた、炭素価格が設定されていない国からの輸入品に課金を行う「炭素国境調整メカニズム」を導入する予定です[24]。

China ETS

世界最大の排出国である中国は、2021年にETSを開始し、電力部門を中心に国内排出量の40%をカバーしています[25]。

CORSIA

2015年の航空排出権協定（CORSIA：国際民間航空のためのカーボンオフセット及び削減スキーム）は、2025年に142-174メガトン（CO_2換算）というカーボンオフセットの新たな需要を生み出すとされています[26]。

パリ協定第6条

パリ協定では、2つの新しい市場メカニズムが創設されます。第6条2項では、各国が排出量削減を取引する枠組み（すなわち「国際的に移転される緩和成果」）を作り、第6条4項では、京都議定書に基づくクリーン開発メカニズムと同様の「持続可能な開発メカニズム」を通じて、各国がベースラインと比較した排出削減量を購入できるようになります。両メカニズムのルールについては、現在も交渉中です。

8 自然に根差した課題解決はパリ協定の達成のために重要だが、細かい点にも注意が必要である

この章の要点

- 自然に根差した課題解決（Nature-based Solutions、以下NbS）は、気候、生態系、社会に複数の便益をもたらしますが、他のセクターでの脱炭素化の取り組みを置き換えたり、遅らせたりしてはなりません。
- さらなる温暖化に伴い、地球システムのフィードバックは生態系をますます不安定にし、NbSの長期的な緩和の実現性を損なう可能性があります。
- 生物多様性を保護するために今NbSに投資することで、NbSは気候変動に対して強くなり、長期的な炭素吸収源としての機能が強化されます。
- NbSの将来性は多くの場合、発展途上国および土地の権利が限られていることが多い先住民が住む地域にあります。これらの状況では、効果的な分散型ガバナンスと強力な規制および財務が困難になる可能性があります。
- NbSを「国が決定する貢献（National Determined Contributions: NDC）」にうまく組み込み、政策と直接資金を効果的に実施するには、炭素隔離に加えて、生物多様性、生態系サービス、地域の生活を含む包括的な指標と監視、報告、検証（monitoring, reporting and verification: MRV）が必要です。

詳細

最近の調査結果は、CO_2除去の次に有効な取り組みであるNbSが、洪水調節、干ばつに対するレジリエンスの向上、生物多様性の保全、社会経済的発展、人間の健康と福祉の改善などのプラスな効果を通し、気候適応とリスク軽減に大きく貢献していることを強調しています。詳しいNbSのメリットについては、第 10章を参照してください。

NbSに対する1つの期待、残留排出量のオフセットは、科学的議論の出題テーマです。温暖化を1.5°Cに制限するシナリオは、30-40年以内の完全な脱炭素化、農業の炭素排出源から吸収源への移行、十分なCO_2除去、自然生態系のレジリエンスの維持などの重要な仮定に基づいています。

適切に設計されたNbSは、化石燃料の段階的廃止を遅らせる手段としてではなく、さまざまな持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）に貢献できる追加的・補助的な対策として極めて重要な役割を果たします。また、さらなる温暖化は地球システムのフィードバックを変化させ、生態系を不安定にするリスクがあります。これは、NbSの長期的な緩和への貢献と、人々や地球への便益を損なう可能性があります。明らかにこれは脱炭素化をより急速に実施し、保護と再生を通じて生態系のレジリエンスを強化する必要性を浮き彫りにしています（第9章を参照）。

COP26では、締約国はNbSの成功の中心となる衡平性と手続き的公正についての疑問に対処する機会があります。累積排出量は主に先進国からの排出ですが、NbSによる炭素節約は、権利の不安定な先住民コミュニティが占める地域、つまり後発開発途上国での実現性が高いとされています。十分な管理・制度が整っていない場合、NbSによる脱炭素化の責任を脆弱なコミュニティが負ってしまう危険性があります。

背景

NbSは、気候変動、生物多様性の喪失、社会的不平等などの社会的課題に対するシステムに基づいたアプローチです。言い換えると、自然または改変された生態系を保護、回復、そしてより適切に管理するアクションです。調査によると、NbSは、他のアプローチと比較して、比較的低コストですぐに活用できる二酸化炭素除去の機会を提供できます。またそれ以上に、適切に設計されたNbSは、気候変動の緩和と適応、生物多様性の保全、および地域の生活に複数の便益をもたらすことができます。しかし、緩和調整のもとで、UNFCCCの締約国は、炭素をほとんど除去せず、地域の生活と生態系（特に非森林の生態系）を危険にさらしているにもかかわらず、非在来種の植林の拡大にますます投資しています。

! これらが意味すること

パリ協定を履行するには、NbSを含む適切に設計されたCO_2 除去と並行して、迅速な排出削減が必要である。COP26は、NbSの指標とMRVを調整すること等により、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）と生物多様性条約の目標と手順を調整する機会である。

グローバルレベルで、COP26の締約国に提案されたのは：

- NbSがさらにNDCに含まれるようになるため、パリ協定の第6条に基づいて明確な報告ガイドラインを設定すること。これらは、気候、生物多様性、生計の結果に関する包括的なパフォーマンス指標、および科学に基づいた透明性のあるMRVに基づく必要がある。
- 金融緩和におけるNbSの少ないシェアと、適切な多国間金融およびガバナンス構造の欠如に取り組むこと。

国および地方レベルでは、政策立案者がしなければならないことは：

- NbSを管理して、脱炭素化の責任が脆弱なコミュニティに課されないようにする。

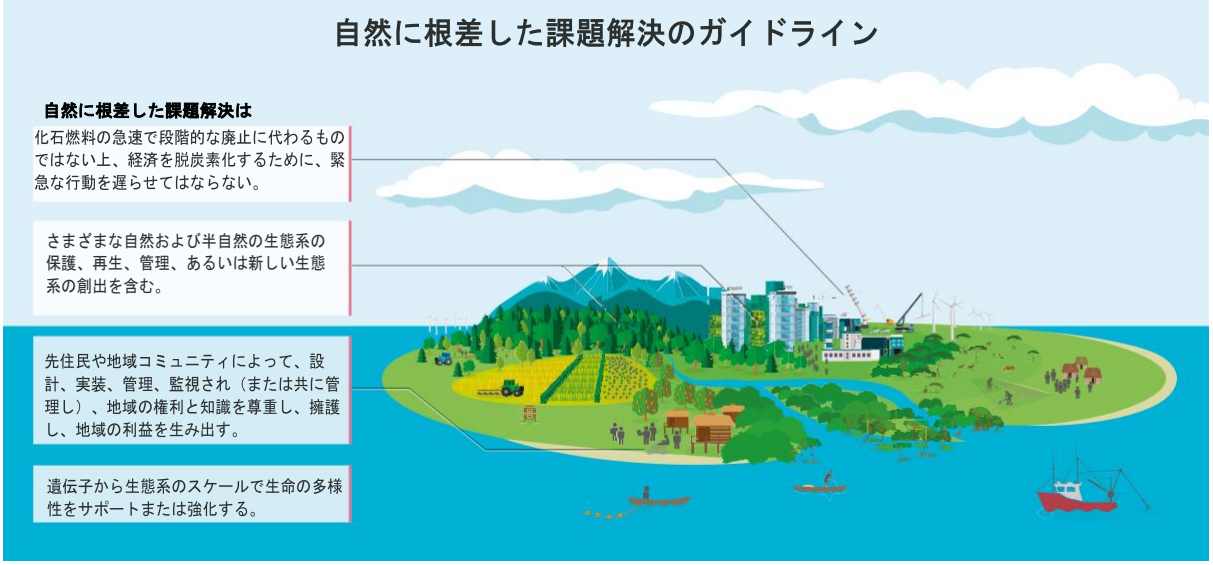


図10. 自然に根差した課題解決の4つのガイドライン[27]。

異常気象は森林の気候緩和の実現性を脅かす

- 森林火災は強度と頻度により極端化し、今では普段森林火災が発生しにくい地域でも森林火災が起きています。通常の森林火災は、CO_2排出量に関して「ネットゼロ」であると見なされることがありますが（排出されるCO_2は再成長する植生によって吸収されるため）、非常に広い領域での大規模な森林火災がより頻繁に発生するようになり（第3章を参照）、生態系の劣化により、CO_2排出量と植生の吸収のバランスが変化する可能性があります。
- 2015/2016年のエルニーニョなどの出来事は、長期にわたる異常な干ばつを引き起こし、大規模な損害を与える火災を引き起こしました。これにより、異常気象の2、3年後でもアマゾンの一部の地域、特に人為的活動によって改変された森林の植物の致死率が上昇したままでした。
- アマゾンのほとんどの地域での大気との炭素の総計バイオーム交換は依然として炭素吸収源として機能しますが、他の環境変化に関連する火災の影響により、すでに大部分が大気への効果的な炭素源になっています。特にアマゾン盆地の南東部は、火災の影響がなくとも、炭素排出源です。ここでは乾季の気温の大幅な上昇、降水量の減少、森林破壊が特に深刻な問題となっています。

これらの効果は、火災が発生しやすい森林やその他の植生の気候緩和の実現性を減少します。 CO_2排出量に対する森林関連のNbSの影響を検討する際には、これを考慮に入れる必要があります。アマゾンの場合、森林火災は、流域の一部で気候状態を劣化した状態にシフトする引き金となる可能性があります（第4章を参照）。

9 海洋生態系のレジリエンスを高めるには、気候変動に適応した保全と管理、そしてグローバルなスチュワードシップが必要である

この章の要点

- 海は、地球の気候を調節する重要な役割を担っています。海洋堆積物や植生など、実質的な炭素貯留（「ブルーカーボン」）を持つ海洋を炭素吸収源として保護することは、気候変動の緩和に向けた重要な行動なのです。
- 加速する気候変動やその他の人為的な圧力によって脅かされる海洋生態系を保護するには、統合され、状況に応じた、革新的な解決策が必要です。
- 海洋のレジリエンスを築くために、以下のような統合的なガバナンスの重要性が認識されつつあります。
  - 地域から世界まですべてのレベル、そして民間部門が参加する。
  - 明確な目標、強力な行動、グローバルなスチュワードシップを提供する。
- 世界の海洋保護区（MPA）ネットワークを拡大する際に、気候変動に適応するための対策として、気候変動からの避難地、変化のホットスポット、移動の回廊、生物多様性の保護区に加え、損傷し回復が必要な地域に対処することを含める必要があります。

詳細

海洋生物の多様性は、人間の社会に不可欠なサービスと便益を提供する生態系（「健全な海洋」）が十分に機能するための基盤です。IPCC 第6次評価報告書の第1作業部会による最新の予測では、海洋温暖化、海洋熱波、海洋酸性化、北極・南極の氷床融解など、気候に起因するいくつかの人為的圧力は、あらゆる排出シナリオの下で悪化し続けることが示されています[8,28]。海洋生物の改善や回復は、気候変動やその他の人為的な圧力が緩和された場合にのみ可能なのです。

効果的に調整された複数のレベルの保護によって、海洋は、独自の生物多様性の保全、水産物の供給、炭素貯蔵という3つのメリットを提供するのです。2050年までに海洋生態系の主要な構成要素を大幅に回復させることは非常に困難ですが、最近の知見では、これはまだ達成可能であることが示されています。そのためには、生態系の保全と管理について、統合的で的を絞った革新的な新しい解決策が緊急に必要です。海洋のストレス要因は一般に単独では発生しないため、累積的影響に対処する管理戦略が必要です。これには、人間を含む生態系内の主要な相互作用を考慮した、累積影響評価と生態系に基づく管理が含まれます。

効果的な保全管理は、柔軟かつ反復的で、さまざまなレベルで調整され、生態系と気候の動態の変化や社会規範に対応する海洋ガバナンスによって導かれるべきです。これは、効果的な生物多様性保全と海洋生態系の回復に不可欠な要件です。政策決定は、包括的で適応性があり、スケジュール、行動、目標に関して明確な目標を設定し、海洋のグローバルなスチュワードシップを促進する必要があります。過去に成功した目標や行動には、採取の禁止や制限、絶滅危惧種に関する法律、生息地の保護と復元、外来種や汚染の抑制などがあります。

もう一つ必要な管理要素は、気候変動が海洋種、生態系、管理目標、保全活動にどのような影響を及ぼすかを考慮し、気候変動に配慮した保全に努めることです。それは、海洋保護区の世界的なネットワークにレジリエンスを持たせ、気候変動への適応を可能にします。

これは、変化がほとんど予測されない気候上の避難地、環境変化が激しく、種の入れ替わりがあり激しい進化の可能性がある地域、生物多様性の繁栄と絶滅のおそれがあるホットスポット、移動する種の回廊などを組み込むことで機能します。海洋保護区ネットワークを拡大し、現在ほとんど保護されていない主に国の排他的経済水域（43%）と公海の一部（6%）を含む21%の海洋をネットワークで保護した場合、生物多様性の最大潜在利益の90%を得ることができます。

海洋生態系に対する人為的な圧力を抑制し、回復の努力を行った場合、ほとんどの海洋種と生息地は、撹乱のない状態に戻るか、持続可能な漁業を可能にするのに、10年から30年を要します。

背景

世界最大の生態系である海洋は、地球と気候システムの重要な要素です。その最も重要な機能には、熱の緩衝、炭素の貯留、食料の供給などがあります。現在、世界の動物性タンパク質消費量の約17%が海洋から供給されており、世界の食糧需要の拡大に伴い、その量は増加すると考えられています。SDG14（「海の豊かさを守ろう」）は、海洋を保全し、その資源の持続可能な利用を確保することを目指しています。SDG14の進捗を調査する指標の多くは、我々が目標達成の軌道に乗っていないことを示しています。例えば、海洋ゴミや海洋酸性化の増加、2020年までに海洋保護区ネットワークを10%に拡大することの失敗、グローバルな海洋ガバナンスシステムに適応するための国連海洋法条約に反映されている国際法をまだ完全に実行していない国が複数あることなどです。国連「持続可能な開発のための海洋科学の10年」（2021年−2030年）は今、SDG14や「健全な海洋」に依存するその他のSDGsを達成するための機会を各国に提供しています。

! これらが意味すること

グローバルレベルで、意思決定者にとって必要なのは:

- 以下のことによって、世界の海洋保護区（MPA）ネットワークを戦略的に強化すること。（現在の国際的な取り組みでは、世界の海洋保護区ネットワークを7.3%から30%に拡大することを目指している。）
  - 多様な生息地と海洋生物圏が適切に代表されるようにすること。
  - 生息地間の連結と種の移動を可能にする回廊を含むこと。
- 国際的に協調した取り組みが必要な、国の管轄権を超えたブルーカーボンストック（例：深海底堆積物）を保護すること。

・海洋管理と保全において増大する課題を克服するために、以下のようなマルチレベルの海洋ガバナンスシステムを開発すること。

・海洋が全体として相互に関連していることを認識している。

・時間的、空間的に急速に変化する海洋の動態に対して首尾一貫し、応答性と適応性を持ち、不確実性があっても迅速な意思決定ができる。

地域・地方レベルで、政府にとって重要なのは：

・持続可能な管理および修復の取り組みにおいて、以下のような重要な特徴を考慮すること。

・社会生態学的な動態を基礎とし、海洋の健康を人間の健康へとつなげる、状況に応じた科学的根拠に基づく解決策であること。

・加速する圧力に対処し、生物多様性や海洋生態系の健全性の保護と資源利用のバランスをとること。これらの取組は、以下のような情報に基づくものでなければならない。

・海洋空間計画、生態系に基づく管理、気候変動に配慮した保全。

・現在、断片化され断絶されがちな海洋ガバナンスを、再帰的で包括的な重層的ガバナンスシステムに移行させることで、より多くの情報に基づいた長期的な政策と、政策レベルを超えた異なるスケールでの関係者間の協力の強化を促進する。

93%

人間活動による温室効果ガスの排出が増加した結果、地球の気候システムにおける過剰な熱の93%が海洋に取り込まれている。人為的な温室効果ガス排出の約4分の1は海洋に取り込まれている（陸上でさらに4分の1）。

7.3%

海洋保護区ネットワークを介して世界の海の7.3%が保護されており、生物多様性愛知目標に2.7%未達。2021年秋には、新たな目標を設定する斬新な枠組みが採択される見込み。

17%

世界の動物性タンパク質消費の17%は海洋から供給されており、地球温暖化によりその供給が脅かされている。高排出ガスシナリオでは、一部の地域で魚類資源が最大40%減少すると予測される。

34.2%

魚類資源の34.2%が乱獲されている。

ローカルからグローバルまで、海洋スチュワードシップのためのマルチレベルのガバナンス

	Local	National	Regional	Global
一般的な行動	文脈に応じた政策へのインプット、イノベーション、コミュニティの関与を促進。	強力な法律と順応的管理の採用	統合的な政策と管理フレームワークの実施	社会的規範を反映した包括的な目標とターゲットの合意
海洋保護区に向けた例	ローカルな海洋保護区の設計、モニタリング、共同管理	気候変動に強い海洋保護区ネットワークの計画、動的で生態系に基づいた管理	国境を越えた海洋保護区の接続性と移動の回廊	国連SDGs、ポスト2020年生物多様性目標（2030年までに海洋保護区30%）

Source of map: Marine Protection Atlas

図11. 海洋ガバナンスがさまざまなレベル（ローカル、ナショナル、リージョナル、グローバル）でどのように機能すべきかと海洋保護区を実施しながらどのように機能しうるかの例。

自然に根差した課題解決としての保護と修復を通じた海洋生態系の回復力を強化する

海洋堆積物や沿岸植生に蓄積・固定される炭素であるブルーカーボンを取り込むことは、気候変動に配慮した保全に大きく貢献します。ブルーカーボンの保護は、生物多様性の保護と同時に、自然に根差した課題解決と気候変動緩和のための重要な行動です。オーストラリアにあるブルーカーボン資源だけでも、全世界で年間約230億米ドルの気候緩和コストを節約していますが、ブルーカーボン資源は、地球温暖化やその他の人為的圧力によって危機にさらされています[29]。海洋堆積物が保護されていないため、海底トロールや海底採掘などの人的撹乱に対してカーボンストックが非常に脆弱になります。海洋堆積物には、毎年、海洋が吸収する大気中CO_2総量の約15-20%に相当する約1.47ギガトンの水中のCO_2が固定されています。

スポットライト：海洋は悲惨な状態にある

気候変動やその他の人為的な圧力は、海洋とその健全さを脅かし続けてきました。これらの圧力の中には、海洋温暖化、海洋熱波、酸性化、海洋汚染、貧酸素化、開発、採鉱などがあります。これらの圧力のほとんどは、生息地を劣化させたり、多様な海洋生物種に直接影響を与えたりして、海洋食物網、ひいては食糧安全保障を脅かしています。現在、1,300種以上の海洋生物が絶滅の危機に瀕しており、魚類資源の34.2%が乱獲され、ほとんどの海域で上記のような圧力の影響が累積し、脆弱な海洋生物の生息地の3分の1から半分が失われています。例えば、栄養塩の量を減らすことにより、汚染（富栄養化-栄養塩の増加により藻類が過剰に繁殖すること）や毒素等の軽減に向けた努力がなされてきましたが、多くの圧力は海洋生態系を脅かし続けるでしょう。そのひとつが、海洋温暖化と海洋熱波です。どちらも、サンゴの白化など生息環境の悪化に寄与しています。IPCC 第6次評価報告書 の第1作業部会によると、海洋表面の約 83%は、低排出シナリオのもとでも 21世紀に温暖化が続く可能性が非常に高いです[30] 。海洋熱波は、海洋表面の温度が異常に高くなる期間が長く、頻繁に発生しているだけでなく、1980 年代から倍増し、より激しく、長く続くようになってきています。IPCC 第6次評価報告書の第1作業部会は、この傾向が将来もほとんどの排出シナリオで続く可能性があることを示しています[28]。さらに、高い信頼性を持つ予測では、すべての排出シナリオにおいて、沿岸域と外洋域の両方で海洋の酸性化が継続することを示しています[30]。海洋のpHの低下である海洋酸性化は、大気中のCO_2を海洋が吸収することにより起こります。もし、CO_2の排出が削減されなければ、大気中のCO_2を取り込む海洋の能力はもはや有効ではなく、地球温暖化をさらに激化させることになるでしょう。

また、海洋への圧力は累積的に作用します。その一例が、海洋の貧酸素化です。温暖化と過剰な栄養塩の付加により、1960年頃から海洋の酸素濃度は明らかに低下し、酸素極小層の拡大や沿岸域での貧酸素化（水柱中の酸素が非常に少なくなる現象）（「デッドゾーン」）がより頻繁に起こるようになりました。貧酸素化が将来どのように発生するかを予測することは、そのメカニズムの解明が限定的であるため困難です。例えば、沿岸の貧酸素化は、人為的な栄養塩の付加が少なければ減少する可能性があります[8] が、貧酸素化した堆積物から溶け出した栄養塩が藻類の繁殖を助長し、水柱の酸素をさらに減少させる可能性があります。

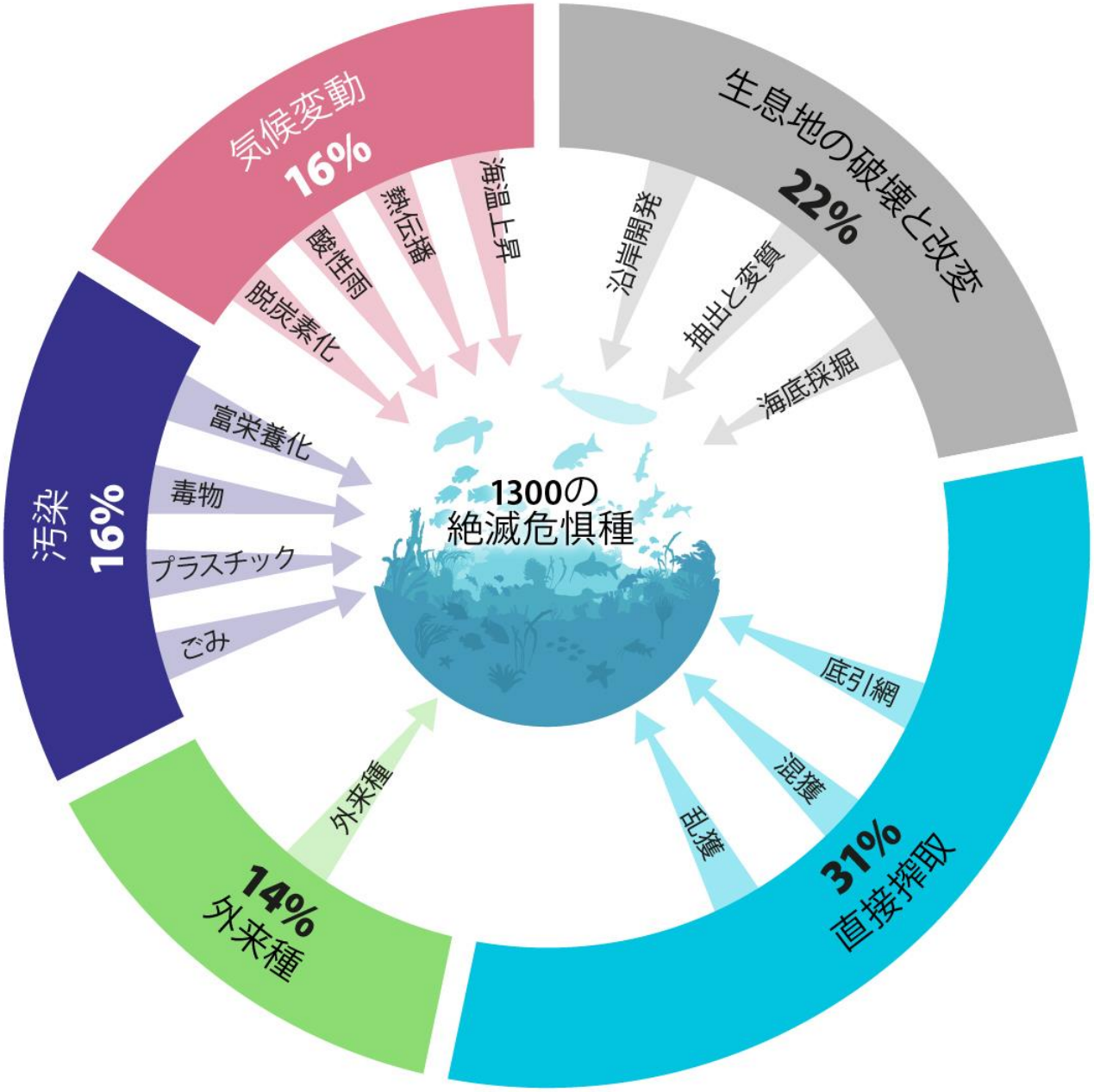


図12.　気候変動を含む様々な人為影響により脅かされている海洋の絶滅危惧種の割合（文献はMartine et al. 2021を参照）。矢印は各圧力を示し、中央の丸は代表的な海洋生態系を示す。

10 気候変動の緩和策は、人々の健康と健全な環境にとって複数の直接的なメリットがあることから、必要なコストを正当化することができる

この章の要点

- **緩和による人間の健康や自然への恩恵は、緩和の効果が明らかになる前に発生します。**
- **健康への恩恵は、緩和政策のコストよりも高い経済的価値があります。**
- **すべてのセクターで迅速な排出削減が必要です。適切な政策を採用することで、健康やより広い環境面で大きな違いをもたらすことができます。**
- **健康のコベネフィットの価値は、緩和政策や技術の迅速な拡大を正当化し、ゼロエミッション経済への進展を加速させることができます。**

詳細

人為的な気候変動の原因となる温室効果ガスの大量排出がさらに増すことで、人間の健康や自然環境の健全性への悪影響が懸念されています。（再生可能エネルギー、アクティブトランスポート（自転車や徒歩などの人力による移動）、NbSなどにかかる）緩和費用の試算額は、緩和によって救われた命、病気の減少、自然界の保護・回復の経済的価値の総計と比べて、同等あるいはそれよりも低いです。言い換えれば、緩和への投資は十分に行う価値があり、長期的には地域社会や国のコストを削減することになります。生物多様性の損失は、生態系および生態系が人類にもたらす寄与の損失につながります。

これらの損失には、作物収量や漁獲量の減少、洪水や浸食による損失、潜在的な新しい医薬資源の喪失などが含まれています。さらに、人間の健康と自然に対するコベネフィット(便益)の多くは、緩和への投資が行われた直後にもたらされます（例えば、メタンの排出量を削減する場合）。

排出削減のための投資を直ちに行わなければ、気候変動による健康への影響リスクに最もさらされている人々（その多くはすでに健康格差の拡大に直面しています）を十分に保護し、回復力を強化することはできないでしょう。迅速な行動を怠れば、低・中・高所得国間だけでなく、国内でも社会的格差が拡大します。ある産業では雇用が失われ、他の産業では雇用が増加するなど、管理すべきトレードオフが存在します。重要なことは、より汚染のない、健全な社会への移行は、多様で文脈に応じたアプローチの重要性を考慮しなければならないということです。このことは、利益の分配が利益の大きさと同じくらい重要であることを示しています。

背景

低・中所得国を含め、保健医療データや経済データの利用可能性が向上したことにより、気候変動の緩和とそれに伴う健康上のコベネフィットに関する科学が強化されてきました。健康への影響の要因に対する理解が進んだ結果、技術的効率の向上によるエネルギー消費量の増加から、人間の活動が人間と自然の健康に与える影響を認識するシステムアプローチへと移行しています。
現在までに、すべての政策において地球の健康を確保するために、交通、農業、林業、食品生産、エネルギー、産業、生活様式の転換を促す意思決定者を支援するための、すべてのセクターに関連する事例があります。

推進要因と解決策は次第によく知られるようになってきていますが、経済的利益についてはまだ必ずしも十分に理解されていません。健康へのコベネフィットの指標を体系的に定義するフレームワークを開発し、研究間での比較を可能にし、経済の中でどのように一貫して反映させることができるかを理解するためには、さらなる研究が必要です。

! これらが意味すること

グローバルレベルで、意思決定者にとって必要なのは:

- 健康リスクの発生を抑えるだけでなく、政策立案時に健康上の利点をよりよく活用するために、PhiAPアプローチを採用すること。
- 低・中・高所得国において、気候変動緩和への投資拡大による健康へのコベネフィットおよび関連する経済的節約についての認識を高めること。
- 緩和行動（または不作為）の健康コストと便益を評価するために、各国を支援すること。

国レベルで、政府に求められるのは：

- 健康に害を与え、自然システムに害を与え、温室効果ガスの排出を増加させる活動（例：輸送やエネルギーを含むインフラ整備に対する従来のアプローチ）への直接的および間接的な支援を停止すること。その代わりに、健康と気候の緩和を組み込んだアプローチを取ること。
- 健全な生態系を促進し、公衆衛生リスクを下げ、トレードオフを最小限に抑えながらコストを削減できるよう、緩和策と適応策の介入策を慎重に設計すること。
- 森林、草原、湿地、農地の保全、回復、再自然化、管理の改善に投資すれば、2030年までに推定23.8GtCO_2の累積排出量を削減することができます[31]。（第9章を参照）

個人が考慮するべきことは：

- 例えば、エネルギー消費を抑えるために家の断熱をしたり、自然に害を与えないものから購入したり、選択肢があれば持続可能なエネルギーや食品を提供する企業を選ぶなど、すぐにできる行動をとること。
- 心臓血管系疾患を予防し、気候変動の原因となるメタンの排出を減らすために、肉の消費を減らすこと。（主な裕福な国で適用される。）
- 健康や環境を維持するために、徒歩や自転車、公共交通機関を利用したアクティブトラベルを行うこと。カーシェアリングは、従来の所有権に代わる良い選択肢です。

6.67百万人

大気汚染に起因する年間死亡者数。

100万トンのメタン削減毎に：

- オゾンによる年間早死者数1430人を防ぐことができます。
- 小麦は年間 55,000トン、大豆は年間 17,000トン、トウモロコシは年間 42,000トン、コメは年間31,000トン、収量を増加させます。
- 猛暑による世界全体の年間約4億時間（約18万年）の労働損失を回避できます[35]。

2.2年

世界保健機構（WHO）のガイドラインを上回る、PM2.5による平均寿命短縮の年数。

23.8 GtのCO$_2$

排出量削減を 2030年までに 、森林、草原、湿地、農地の保全・回復・管理の改善により実現できます。

研究内容

ブラジル、中国、ドイツ、インア、南アフリカ、イギリス、アメリカでは、緩和への投資により、以下の軽減効果があることが示されました。

–2040年までに、大気汚染関連死118万人

–食料摂取関連死586万人

–運動不足による死亡115万人

70%

抗がん剤の70%は自然または天然の物質からヒントを得たものです[34]。

交通機関	より良い都市計画を通じた、移動距離の短縮、自動車使用の削減、より多くのアクティブトラベルと、残存車両の電動化は、大気汚染、騒音公害、交通事故、運動不足の軽減を通じて健康に貢献します。
農業、林業、食品	生物多様性の損失を防ぐことは、人間の健康や世界の重要な生態系を守ることにつながります。気候変動の緩和は、気候変動による農作物の栄養価の低下を防ぐことにもなる。赤肉の摂取を減らすことで、心血管疾患と関連のメタン排出を減らすことができます。
エネルギー	様々なシナリオにおいて、規模や状況に応じて、再生可能エネルギーやバイオエネルギーへの転換は、緩和コストを上回る健康関連の共便益をもたらすことが定量的に評価されています。炭素回収・貯留技術の規模拡大の可能性については、十分な証拠がありません。
産業分野	物質フローの変化、効率の向上、生産方法や技術の変化は、健康関連の経済的なコベネフィットと関連しています。
ライフスタイル	断熱材への投資、化石燃料からの投資撤退、持続可能性の原則に沿った総合的選択など、個人のライフスタイルの選択は、健康や生態系のコベネフィットをもたらす可能性があります。これらの選択は、政策設定に強く影響されます。

図13. 人間と自然の健康に対する改善が、主要なセクターに求められている政策によって達成されうる例。

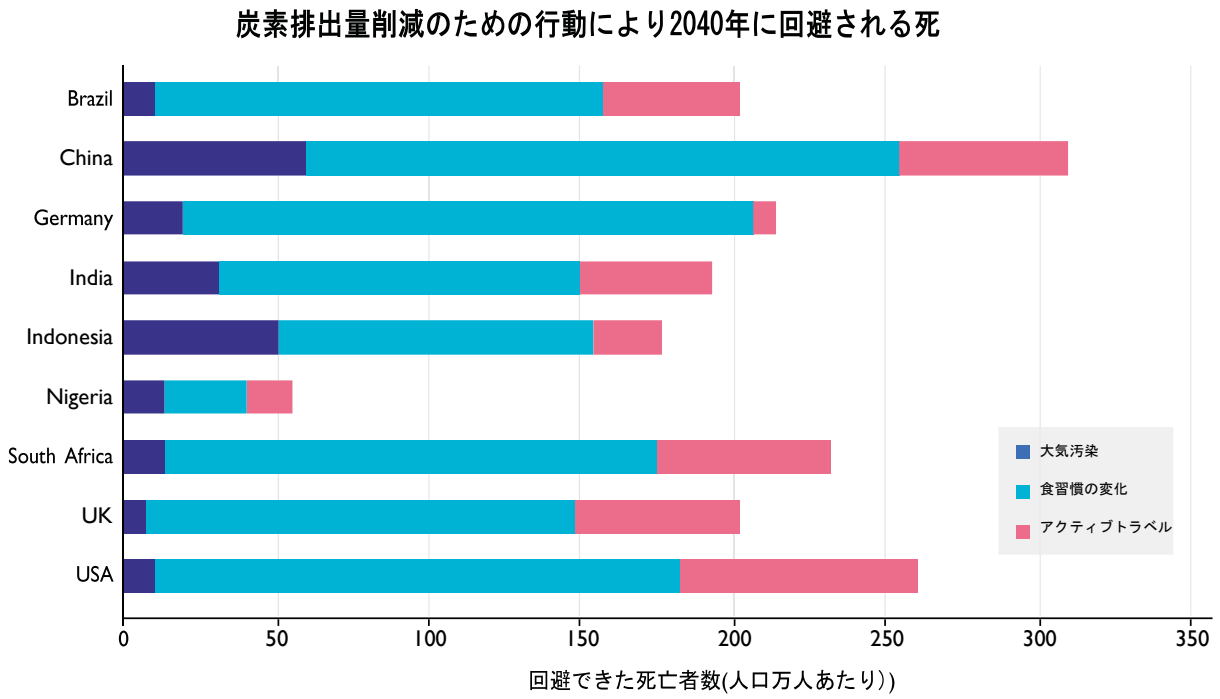


図14. すべての気候政策に健康を統合することに基づいて、2040年までに回避できる早死者数。
Adapted from Hamilton et al. (2021).[32]

イギリス・ロンドン

ロンドンの交通量の少ない地域に都市計画を導入したところ、自動車の所有と利用が減少し、身体活動の大幅な増加、怪我の減少、路上犯罪の減少が見られました。これは、低コスト（プランターとカメラの設置）で、公平で拡大できる介入であり、6ヶ月で30万人以上をカバーし、健康と気候に有望な見通しをもたらします[36, 37, 38]。

オーストラリア・ニューサウスウェールズ州

オーストラリアの農家が、気候変動緩和策の一環として環境再生型農法に取り組んだところ、生態系のコベネフィットが得られたと報告されました。調査に参加したオーストラリアの農家は、環境再生型農法に移行してから、化学肥料や殺虫剤を使わなくなり、燃料費が削減されたため、従来の農法に比べてコストが80%減少したと推測しています[39]。

ベルギー・フランドル

ベルギーのシグマ・プランは、水の安全性を向上させる長期的なランドスケープ・プロジェクトです（このプランでは、地域社会や近隣の都市において、異常気象からの回復力を高めるために洪水を制御しています）。水の安全性と同時に、河川の自然やレクリエーション施設、地域経済の発展にも焦点を当て、人間と自然の健康に直接NbSを提供しています。

定義

※原文アルファベット順表記

バイオーム(Biome)：
バイオームとは、特定の植生、気候、野生生物によって特徴づけられる広大な地域のことです。陸上バイオームの例としては、森林や草原が挙げられます。湖や川は淡水バイオーム、サンゴ礁や河口域は海洋バイオームの一例です。

カーボンフットプリント(Carbon footprint)：
家庭のカーボンフットプリント（家庭のCO_2 排出量とも呼ばれる）は、家庭の消費によって直接排出される温室効果ガス（GHG）の量と、間接的に誘発されるGHG排出量（CO_2 換算（以下の定義参照）で表示）と定義されています。

カーボンプライシング（Carbon pricing）：
カーボンプライシング（炭素価格付け）とは、ある量のCO_2 や他の温室効果ガスを排出または貯留することに対して経済的な価格を設定することです。通常、米ドル/トン CO_2換算（または他の通貨）で示されます。これは、CO_2換算（以下の定義参照）1トンあたりの米ドル価格を指しています。

気候上の避難地（Climate refugia）：
気候上の避難地は、周囲の環境と比較して、気候変動の影響を自然の力で和らげることができる地域のことです。

消費回廊（Consumption Corridors）：
消費回廊とは、1.5℃目標に対して、基本的ニーズを満たすための最低限必要な炭素消費と、炭素予算や他の要因を基に許容できる最大消費を設定し、個人がそれぞれのライフスタイルを選択できる範囲を定義するために用いられる概念です。

CO_2換算（CO_2 equivalent（CO_2eq））：
CO_2 換算は、異なる温室効果ガスの放射強制力（下記の定義参照）を比較するために使用されます。これは、地球温暖化係数（GWP）から計算され、温室効果ガスが吸収する熱量が、同じ質量のCO_2 が吸収する熱量の何倍かに相当するかを示すものです。　CO_2eqは、ある一定期間における、特定の温室効果ガスの温室効果をCO_2に換算して示されます（GWPとガス量の積）。

火災レジーム（Fire regime）：
火災レジームとは、ある地域で長期間にわたって発生する山火事や森林火災のパターン、頻度、強度のことです。

地球規模の炭素予算（Global carbon budget）：
（残りの）地球規模の炭素予算は、特定の確率で与えられた地球気温上昇を超えないように、二酸化炭素（CO_2）の累積排出量の上限を設定するものです。2020年以降、1.5℃目標を達成するための地球規模の炭素予算は、現在460GtCO_2しかないと推定されています。

ギガトンCO_2（$GtCO_2$）：

ギガトン（Gt）は、質量の単位です。1ギガトンCO_2は、10億トンCO_2です。（約2億頭の象に相当）

国が決定する貢献（NDC）：

UNFCCCのホームページを引用します。「国が決定する貢献（NDC）は、パリ協定とこれらの長期目標の達成に向けた中核をなすものです。NDCsは、各国の排出量を削減し、気候変動の影響に適応するための各国の努力を具現化したものです。」

放射強制力（Radiative forcing）：

温室効果ガス、その他の汚染物質、その他の要因が地球の放射収支に及ぼす直接的な影響を放射強制力という。メタンによる熱放射の吸収のような温暖化もあれば、雲形成に影響を与えるエアロゾルのような寒冷化もあり得ます。

持続可能な開発目標（SDGs）：

2015年に国連加盟国が採択した17の「持続可能な開発目標」であり、「現在そして未来の人類・地球の平和や繁栄を目指した方向性」を示すことを意図しています。

1.5度目標（The 1.5°c target）：

2015年のパリ協定では、長期的な地球温暖化を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求しました。

ティッピングエレメント（Tipping element）：

ティッピングエレメントとは、様々な時間スケールで劇的かつ非線形な遷移を起こすリスクに直面する気候システムの構成要素であり、多くの場合、長期間にわたって正常な状態に戻るチャンスはありません。

参考文献

Except when specifically stated otherwise, all statements in this report refer to the article:

Martin et al. (2021): Ten New Insights in Climate Science 2021 – A Horizon Scan. In Global Sustainability. https://doi.org/10.1017/sus.2021.25

Other References

1. Guterres, A. (2020): The State of the Planet. United Nations. Web Video. Available online at: https://media.un.org/en/asset/k1d/k1d3crd7w0, checked on 10/15/2021.
2. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., et al. (2020): Global Carbon Budget 2020. InEarth System Science Data, 12(4), pp. 3269–3340. DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020.
3. Chen, G., Guo, Y., Yue, X., et al. (2021): Mortality risk attributable to wildfire-related PM2·5 pollution: a global time series study in 749 locations. In The Lancet Planetary Health, 5(9), pp.e579-e587. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00200-X.
4. Lee, K., and Greenstone, M. (2021): Air Quality Life Index - Annual Update 2021. Edited by Energy Policy Institute at the University of Chicago (Air Quality Life Index). Available online at https://aqli.epic.uchicago.edu/reports/, checked on 10/7/2021.
5. Wu X., Nethery R. C., Sabath M. B., Braun D., and Dominici F. (2020): Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regressionanalysis. In Science Advances, 6(45), eabd4049. DOI: 10.1126/sciadv.abd4049.
6. Gaffney, O., Tcholak-Antitch, Z., Boehm, S., Barthel, S., Hahn, T., Jacobson, L., Levin, K., Liverman, D., Stoknes, P. E., Thompson, S., and Williams, B. (2021): The Global Commons Survey: Attitudes to planetary stewardship and transformation among G20 countries. Editedby Global Commons Alliance. Available online at https://globalcommonsalliance.org/ wp-content/uploads/2021/08/Global-Commons-G20-Survey-full-report.pdf, checked on10/15/2021.
7. Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., and Zhou, B. (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the SixthAssessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis,M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T.Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (Eds.), Cambridge University Press.
8. Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S.; Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., and Zickfeld, K. (2021): Global Carbon and other BiogeochemicalCycles and Feedbacks. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T. Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (Eds.), Cambridge University Press.

9. Roberts, G., and Wooster, M. J. (2021): Global impact of landscape fire emissions on surface level PM2.5 concentrations,air quality exposure and population mortality. In Atmospheric Environment, 252, pp. 118210. DOI: 10.1016/j. atmosenv.2021.118210.

10. Covey, K., Soper, F., Pangala, S., Bernardino, A., Pagliaro, Z., Basso, L., Cassol, H., Fearnside, P., Navarrete, D., Novoa, S., Sawakuchi, H., Lovejoy, T., Marengo, J., Peres, C. A., Baillie, J., Bernasconi, P., Camargo, J., Freitas, C., Hoffman, B.,Nardoto, G. B., Nobre, I., Mayorga, J., Mesquita, R., Pavan, S., Pinto, F., Rocha, F., De Assis Mello, R., Thuault, A., Bahl,A.A., and Elmore, A. (2021): Carbon and Beyond: The Biogeochemistry of Climate in a Rapidly Changing Amazon. In Frontiers in Forests and Global Change, 4, pp. 11. DOI: 10.3389/ffgc.2021.618401.

11. Natali, S. M., Holdren, J. P., Rogers, B. M., Treharne, R., Duffy, P. B., Pomerance, R., and MacDonald, E. (2021): Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. In Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(21). DOI: 10.1073/pnas.2100163118.

12. Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., Li, X., Crowell, S., Wu, X., Doughty, R., Zhang, Y., Liu, F., Sitch, S., and Moore, B. (2021): Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. In Nature Climate Change, 11 (5), pp. 442–448. DOI: 10.1038/s41558-021-01026-5.

13. IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of theIntergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge.

14. Smith, J. B., Schneider, S. H., Oppenheimer, M., Yohe, G. W., Hare, W., Mastrandrea, M. D.; Patwardhan, A., Burton, I., Corfee-Morlot, J., Magadza, C. H. D., Füssel, H.-M., Pittock, A. B., Rahman, A., Suarez, A., and van Ypersele, J.-P.(2009): Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". In PNAS, 106 (11), pp. 4133–4137. DOI: 10.1073/pnas.0812355106.

15. IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-mental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K.,Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge.

16. IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte,V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., and Waterfield, T. (Eds.). In Press.

17. Baer, P. (2013): The greenhouse development rights framework for global burden sharing: reflection on principles and prospects. In WIREs Climate Change, 4 (1), pp. 61–71. DOI: 10.1002/wcc.201.

18. van den Berg, N. J., van Soest, H. L., Hof, A. F., den Elzen, M. G. J., van Vuuren, D. P., Chen, W., Drouet, L., Emmerling, J., Fujimori, S., Höhne, N., Kőberle, A. C., McCollum, D., Schaeffer, R., Shekhar, S., Vishwanathan, S. S., Vrontisi, Z., andBlok, K. (2020): Implications of various effort-sharing approaches for national carbon budgets and emission pathways. In Climatic Change, 162 (4), pp. 1805–1822. DOI: 10.1007/s10584-019-02368-y.

19. Gore, T., Alestig, M., and Ratcliff, A. (2020): Putting climate justice at the heart of the COVID-19 recovery. Oxfam Media Briefing, Oxfam. Available online at https://www.oxfam.org/en/research/confronting-carbon-inequality, checked on 10/13/2021.

20. Akenji, L., Bengtsson, M., Toivio, V., Lettenmeier, M., Fawcett, T., Parag, Y., Saheb, Y., Coote, A., Spangenberg, J. H., Capstick, S., Gore, T., Coscieme, L., Wackernagel, M., and Kenner, D. (2021): Towards A Fair Consumption Space for All. Hot or Cool Institute, Berlin. Available online at https://hotorcool.org/1-5-degree-lifestyles-report/, checked on 12/7/2021.

21. High-Level Commission on Carbon Prices (2017): Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. Edited by World Bank, Washington, D. C. Available online at https://www.carbonpricingleadership.org/report-of-the-highlevel-commission-on-carbon-prices, checked on 10/7/2021.

22. World Bank (2021): State and Trends of Carbon Pricing 2021. World Bank, Washington, D. C. Available online at: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620, checked on 12/7/2021. License: CC BY 3.0 IGO.

23. European Union (2021a): EU Emissions Trading System (EU ETS). Edited by European Union. Available online at https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en#tab-0-0, checked on 10/7/2021.

24. European Union (2021b): Carbon Border Adjustment Mechanism. Edited by European Union. Available online at https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en, checked on 10/7/2021.

25. ICAP (2021): China National ETS. Edited by ICAP. Available online at https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_ etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems%5B%5D=55, checked on 10/7/2021.

26. ICAO (2018): Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), Frequently Asked Questions(FAQs), https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Update_9Aug18.pdf, checked on 12/10/2021

27. Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C., House, J., Srivastava, S., and Turner, B. (2021): Getting the message right on nature-based solutions to climate change. In Global Change Biology, 27 (8), pp. 1518-1546.DOI: 10.1111/gcb.15513.

28. Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L. Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A., and Yu, Y. (2021): Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte,V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T. Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (Eds.), Cambridge University Press.

29. Bertram, C., Quaas, M., Reusch, T. B. H., Vafeidis, A. T., Wolff, C., and Rickels, W. (2021): The blue carbon wealth ofnations. In Nature Climate Change, 11 (8), pp. 704–709. DOI: 10.1038/s41558-021-01089-4.

30. Lee, J. Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., and Zhou, T. (2021): Future Global Climate: Scenario-42Based Projections and Near-Term Information. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai,P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell,

31. K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T. Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (Eds.), Cambridge University Press.

32. OECD (2020): Biodiversity and the economic response to COVID-19: Ensuring a green and resilient recovery. Editedby OECD. Available online at https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/biodiversity-and-the-economic- response-to-covid-19-ensuring-a-green-and-resilient-recovery-d98b5a09/, checked on 10/7/2021.

33. Hamilton, I., Kennard, H., McGushin, A., Höglund-Isaksson, L., Kiesewetter, G., Lott, M., Milner, J., Purohit, P., Rafaj., Sharma, R., Springmann, M., Woodcock, J., and Watts, N. (2021). The public health implications of the ParisAgreement: a modelling study. In The Lancet Planetary Health, 5(2), e74–e83. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30249-7.

34. Murray, J. L., Aravkin, A. Y.; Zheng, P. et al. (2020): Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. In The Lancet. 396 (10258), pp. 1223-1249. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2.

35. IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Brondizio, E. S., Settele, J., Díaz, S., and Ngo, H. T. (Eds). IPBESsecretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. DOI: 10.5281/zenodo.3831673.

36. United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (2021): Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Edited by United Nations Environment Programme. Nairobi. Available online at https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions, checked on 10/7/2021.

37. Goodman, A., Urban, S., and Aldred, R. (2020): The Impact of Low Traffic Neighbourhoods and Other Active TravelInterventions on Vehicle Ownership: Findings from the Outer London Mini-Holland Programme. In Findings. DOI: 10.32866/001c.18200.

38. Aldred, R., and Goodman, A. (2020): Low Traffic Neighbourhoods, Car Use, and Active Travel: Evidence from the Peopleand Places Survey of Outer London Active Travel Interventions. Findings. In Findings. DOI: 10.32866/001c.17128.

39. Laverty, A. A., Goodman, A., and Aldred, R. (2021): Low traffic neighbourhoods and population health. In BMJ 372. DOI:10.1136/bmj.n443.

40. Gosnell, H., Charnley, S., and Stanley, P. (2020): Climate change mitigation as a co-benefit of regenerative ranching:insights from Australia and the United States. In Interface Focus, 10 (5), p. 20200027. DOI: 10.1098/rsfs.2020.0027.

Acknowledgements

The making of this report has been led by Future Earth, The Earth League and the World Climate Research Programme (WCRP). We also gratefully acknowledge support from Arizona State University (ASU), GERICS Climate Service Center Germany (an institution of Helmholtz-Zentrum Hereon), European Space Agency, (ESA), Global Land Programme (GLP), Integrated Global Risk Project (IGRP), Global Carbon Project (GCP), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) and Future Earth's Knowledge-Action Networks for a) Health, and b) Systems of Sustainable Consumption and Production.

We acknowledge the work of the following individuals in their respective capacities:

Editorial Board

Mercedes Bustamante, University of Brasilia, Brazil

Deliang Chen, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Sweden

Helen Cleugh, WCRP Joint Scientific Committee (JSC) & Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia

Fatima Denton, United Nations University Institute for Natural Resources in Africa, Ghana

Kristie Ebi, Center for Health and the Global Environment (CHanGE), University of Washington, USA

Eleanor Fisher, The Nordic Africa Institute, Uppsala, Sweden

Huang-Hsiung Hsu, Anthropogenic Climate Change Center, Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica, Taipei

Johan Rockström, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Lizzie Sayer, International Science Council, France

Peter Schlosser, Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, Arizona State University, USA

Detlef B. Stammer, Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN), University of Hamburg, Germany

Editor-coordinators

Clea Edwards, The Earth League & Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, Arizona State University, USA

Helmke Hepach, The Earth League & Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg, Germany

Erik Pihl, Future Earth Global Secretariat, Sweden

Chapter lead authors, coordinators

Insight 1:

H. Damon Matthews, Concordia University, Montreal, Canada

Joeri Rogelj, Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis, Austria

Aaron Redman, Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, Arizona State University, USA

Insight 2:

Nadine Mengis, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany

Sophie Hebden, Future Earth Global Secretariat, Sweden

Insight 3:

Rachael Nolan, Hawkesbury Institute for the Environment, Western Sydney University, Australia

Helmke Hepach, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Germany

Insight 4:

Jonathan F. Donges, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany; Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, Sweden

Maria A. Martin, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Insight 5:

Milena Büchs, University of Leeds, School of Earth and Environment, UK

Clea Edwards, Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, Arizona State University, USA

Insight 6:

Sylvia Lorek, Sustainable Europe Research Institute and ZOE Institute for Future-Fit Economies, Germany

Aaron Redman, Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, Arizona State University, USA

Insight 7:

Jessica F. Green, University of Toronto, Canada

Erik Pihl, Future Earth Global Secretariat, Sweden

Insight 8:

Sabine Fuss, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Germany; Humboldt University of Berlin, Germany

Juliana Gärtner, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Insight 9:

Heike Lotze, Dalhousie University, Nova Scotia, Canada

Helmke Hepach, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Germany

Insight 10:

Kathryn Bowen, Melbourne Climate Futures, Melbourne Law School, Victoria, Australia; Melbourne School of Population and Global Health, University of Melbourne, Victoria, Australia

Giles B. Sioen, Future Earth Global Secretariat, Japan; National Institute for Environmental Studies, Japan

Contributing authors

Olga Alcaraz Sedra, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain

Ana Bastos, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany

Nico Bauer, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Christoph Bertram, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Thorsten Blenckner, Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, Sweden

Paulo M. Brando, University of California, USA

Tanya Brodie Rudolph, South Africa Centre for Sustainability Transitions (CST), University of Stellenbosch, South Africa

Purnamita Dasgupta, International Centre for Integrated Mountain Development, Nepal

Felix Kwabena Donkor, Faculty of Social Sciences, Department of Geography, University of Education-Winneba, Ghana

Hongbo Duan, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Carlos M. Duarte, Red Sea Research Center (RSRC), and Computational Biosciences Research Center (CBRC), King

Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia

Anja Engel, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany

Andrew Gettelman, National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA

Cécile A.J. Girardin, University of Oxford, UK

Nicholas R. Golledge, Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, New Zealand

Michael R. Grose, CSIRO, Australia

Masahiro Hashizume, The University of Tokyo, Japan

Marina Hirota, Federal University of Santa Catarina, Brazil

Satoshi Kojima, Institute for Global Environmental Strategies, Japan

Sharachchandra Lele, Centre for Environment & Development, ATREE, Bengaluru, India

Darren McCauley, Erasmus University of Rotterdam, Netherlands

Desta Mebratu, South Africa Centre for Sustainability Transitions (CST), University of Stellenbosch; Addis Ababa University Institute of Technology, Ethiopia

Stefan Rahmstorf, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Colleen E. Reid, University of Colorado Boulder, USA

Marielle Saunois, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE-IPSL (CEA-CNRS-UVSQ), Université Paris-Saclay, France

Joachim H. Spangenberg, Sustainable Europe Research Institute (SERI) Germany, Cologne, Germany

Thomas N.S. Sterner, University of Gothenburg, Sweden

Nicola Stevens, University of Oxford, UK

Kirsten Thonicke, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany

Hanqin Tian, International Center for Climate and Global Change Research, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, USA

Ricarda Winkelmann, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany; University of Potsdam, Germany

futurearth
Research. Innovation. Sustainability.

Custodian organizations

BELMONT FORUM

UNESCO
UNITED NATIONS
Educational, Scientific, Cultural Organization

International Science Council

UN environment
United Nations Environment Programme

The Earth League

Sponsors

GERICS
Climate Service Center Germany
An institution of Helmholtz-Zentrum Hereon

ASU Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory
Arizona State University

PIK
Potsdam Institute for Climate Impact Research

International Institute for Applied Systems Analysis
IIASA www.iiasa.ac.at

Stockholm Resilience Centre
Sustainability Science for Biosphere Stewardship
Stockholm University

IGES
Institute for Global Environmental Strategies

清華大学地球系统科学系
Department of Earth System Science, Tsinghua University

University of Exeter | Global Systems Institute

WCRP
World Climate Research Programme

Sponsors

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

UNESCO
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Intergovernmental Oceanographic Commission

International Science Council