

「IPCC海洋・雪氷圏特別報告書」 ハンドブック

背景と今後の展望

「IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書」ハンドブック

背景と今後の展望

目次

はじめに

編集に当たって

第 1 章: イントロダクション

変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書について

IPCC インベントリータスクフォース共同議長／IGES 上席研究員 田辺清人……………2

第 2 章: 雪氷圏に関するブリーフィング・ノート

不可逆的で止めることができない雪氷圏の減少: ティッピング・ポイントに近づいているのか、もはやそれを超えてしまっているのか?

IGES 自然資源・生態系サービス領域主任研究員 ビナヤ・ラズ・シバコティ……………7

第 3 章: 主執筆者インタビュー

「動き始めた眠れる巨人」

国立極地研究所副所長／国際北極環境研究センター 榎本浩之……………16

「雪氷圏の変化は温暖化の重要な証拠の一つ」

芝浦工業大学工学部土木工学科教授 平林由希子……………34

第 4 章: Frequently Asked Questions (FAQs)

報告書に関する質問集 日本語版……………40

はじめに

2019年12月

(公財)地球環境戦略研究機関(IGES)研究顧問

甲斐沼美紀子

2018年10月にIPCC1.5°C特別報告書¹が公表された後、同報告書第1章の主執筆者として関与した経緯もあり、様々な機会に、1.5°C特別報告書の含意についてお話する機会を頂いてきました。

その機会ごとに、報告書のキーメッセージとして、気候変動はすでに、世界中で、人々の暮らしや生態系に影響を与えていること、0.5°Cの気温変化による影響の差は有意であること、(例:2°C上昇では暖水性サンゴの99%以上が死滅。1.5°Cでは70~90%の死滅に留まる。サンゴ礁には9万種の生物が住む)、気温上昇を1.5°C以下に抑えることは不可能ではないが、社会のすべての面において、これまでにないトランジションを必要とすること、また、持続可能な開発目標などの、世界の他の目標を達成することと歩調を合わせて、1.5°C目標を達成することは可能であること、を伝えてきました。

私は緩和の専門家として、普段はどのように対策を進めて行ったらよいかを考えています。今回皆様方にハンドブックとしてお示しする「海洋・雪氷圏」は、私の専門分野とは異なるのですが、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書」(以下、IPCC海洋・雪氷圏特別報告書)をベースに、どのようなメカニズムで影響が発生しているかという情報を盛り込んでいます。

温暖化は嘘だとか、対策が必要だとしても多額のコストがかかる、というような温暖化対策に後ろ向きの発言をよく耳にします。しかし今回、IPCC海洋・雪氷圏特別報告書は、自然科学が示すところで、温暖化によって増えた熱エネルギーの90%以上が海洋に蓄えられている、それが台風の巨大化に影響している、また、日本の冬の寒波は、北極海で海氷が融けるために、冬の温度が高くなり、それが大陸の気圧配置に影響して、日本に寒波をもたらす原因の一つになっているなど、貴重な話を読み、また専門家から聞くことができました。

海洋については、海の酸性化と関連して、プランクトンが減少し、それが食物連鎖を通じて漁獲

¹ 正式名称は「気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から1.5°Cの地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス(GHG)排出経路に関するIPCC特別報告書」

高が減少し、人間にも影響を与えてきているとのこと。北大西洋に分布するタイセイヨウサケの減少や、日本近海での魚の減少なども温暖化と関連しており、今後も影響が顕れてくるとの説明もありました。また、サンゴ礁の白化などの原因を、自然科学としてわかりやすく説明頂き、温暖化対策の必要性を再認識しました。

以前はハイエイタス(1999年頃から2010年頃までの温暖化の停滞期)が話題になり、温暖化は起きていないとの主張もありました。しかし、現在では、表層海洋で増加した熱エネルギーが中深層に輸送されたことが原因と考えるのが一般的になってきています。

一つ問題を難しくしているのは、現在顕れている海洋と雪氷圏の変化の大部分は、地球の気候に対する今までの人間の影響の結果であるものの、変化が顕れてくるまでには時間がかかり、また、元に戻すにも時間がかかるということです。これ以上の変化が起きて手遅れにならないうちに、今すぐに対策を採らないと、将来世代に禍根を残すことになりかねません。取りうる対策は、ただ一つ、今すぐに対策を行うこと。その一言に尽きます。

IGESは、アジア太平洋地域を中心として世界の持続可能な開発を推進するための戦略研究機関として、発足以来、温暖化対策を重点活動分野のひとつとしており、特にIPCCの活動に関しては、各国の温室効果ガス排出量及び吸収量の計算と報告の実施のための国別温室効果ガスインベントリーに関するタスクフォース(TFI)の活動をIGESの技術支援ユニット(TSU)がサポートするなど重要な役割を果たしてきています。今回の特別報告書は、1.5°Cの地球温暖化で抑え込むことの意義について、自然科学の側面からもその必要性・緊急性をはっきりと示すものとして受けとめるべきものであり、このハンドブックが今後の温暖化対策のあり方について皆様の理解の一助になることを期待しています。

編集に当たって

本ハンドブックは、IGES の研究活動ならびに関係機関からの協力をもとに、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」に関する最新の知見を取りまとめたものです。様々な角度からの分析・関連資料を掲載しており、同報告書の総合的な理解に資する内容となっています。

具体的な構成内容は次の通りです。第 1 章(イントロダクション)では、IPCC が同報告書を作成するに至った背景を、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)での議論や IPCC の足跡とともに振り返ります。第 2 章(ブリーフィング・ノート)では、IGES 研究員が専門的知見をベースに、同報告書の概要を解説しています。第 3 章(主執筆者インタビュー)では、実際に同報告書の作成に携わった 2 名の IPCC 関係者へのインタビューを収録しています。第 4 章(Frequently Asked Questions: FAQs)では、IPCC が発表した同報告書に関する FAQs(よくある質問と回答集)の日本語翻訳版を通じて、同報告書の意義や主要メッセージ、今後の地球温暖化対策への影響等を明らかにしています。

本ハンドブックの作成にあたり、関係機関から多くの協力を頂きました。環境省からは、「平成 31 年度国際低炭素社会推進研究調査等委託業務」の一環として、主執筆者へのインタビューを行う機会を頂きました。国立極地研究所並びに芝浦工業大学には、実際に主執筆者インタビューを設定させて頂きました。また、IPCC 第 2 作業部会事務局からは、FAQs の翻訳への許可を頂きました。

IGES では、甲斐沼美紀子(巻頭言)、田辺清人(第 1 章)、ビナヤ・ラズ・シバコティ(第 2 章)、甲斐沼美紀子、津久井あきび(第 3 章)、山ノ下麻木乃、森秀行(第 4 章)の各氏に執筆・翻訳・協力頂きました。また、本ハンドブックの編集を北村恵以子が、表紙デザインを青木正人が担当しました。加えて、国外からも同報告書への理解を深めたいとの要望が多数寄せられたことを踏まえ、第 2 章(ブリーフィング・ノート)、第 3 章(主執筆者インタビュー)について、英文にて IGES ホームページにて公開しています。翻訳・監訳を、河津恵鈴、伏見エマが担当しました。

このハンドブックが、これを手に取って下さる皆様の理解の一助となれば幸甚です。改めまして、関係機関の皆様、そして作成に尽力頂いた IGES 関係者に深く御礼申し上げます。

総合監修
IGES 戦略マネージメントオフィス
石川智子

第 1 章

イントロダクション

変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する

IPCC 特別報告書について

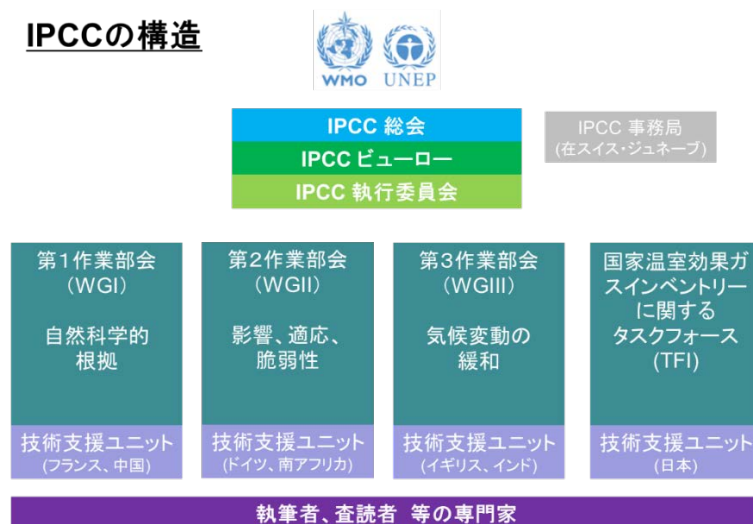
IPCC インベントリータスクフォース共同議長／IGES 上席研究員 田辺清人

「それは最悪の時代であった。しかしまた、それは最良の時代でもあった。なぜなら私たちにはまだチャンスがあるのだから。」海洋(特に北極域)の現状について、国際的に著名な海洋学者 Sylvia Earle 女史は、おそらく Charles Dickens の「二都物語」を意識しながらそう語ったとされる。

2019 年 9 月 20 日、モナコでの IPCC 第 51 回総会の開会セッションに臨まれたモナコ大公 Albert II 殿下は、Sylvia Earle 女史の言葉を引用しつつ開催国代表としての挨拶をされた。それは、会場に集まった各国政府代表団や気候変動に関する政府間パネル(IPCC)議長団及び関係者への励ましであるとともに、数日後には承認されるであろう「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書(IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)」とそれが国際社会に及ぼす影響への期待でもあったろう。気候変動と海洋の問題についてとりわけ強い関心を持つモナコは、この特別報告書のスコーピング(報告書の概要・構成の検討)をするための会議を 2016 年 12 月に開催し、また、その最終承認のための IPCC 第 51 回総会(第 2 回第 1,2 作業部会共同セッション)を招致したのである。

この海洋・雪氷圏に関する特別報告書は、IPCC の第 6 次評価報告書(AR6)作成期間(第 6 次評価期間:AR6 サイクル)における 4 つめの主要な報告書であり、既に完成している 1.5°C 特別報告書、及び、気候変動と土地に関する特別報告書と補完関係をもつものと位置づけられる。作成は、第 1 作業部会(Working Group I)と第 2 作業部会(Working Group II)の協働により進められた。この稿では、IPCC が同報告書を作成することになった背景を振り返る。

IPCCの構造



IPCC 報告書の種類

IPCC が作成する報告書(IPCC Report)には、大別して以下の 3 種類がある。

(1) 評価報告書(Assessment Report)

気候変動に関する科学的・技術的評価を総合的にまとめる報告書。通常、各作業部会(Working Group I, II, III)が作る報告書 3 巻とそれらをまとめる統合報告書から成る。

(2) 特別報告書(Special Report)

気候変動に関わる特定の問題に関して評価を行う報告書。通常、取り上げる問題の内容に応じて、作業部会のいずれかが単独あるいは共同で作成を担当する。

(3) 方法論報告書(Methodology Report)

温室効果ガスインベントリー作成のための方法論(温室効果ガス排出量・吸収量の算定方法)を提示する報告書。インベントリータスクフォースが作成を担当する。

AR6 サイクルにおける特別報告書のテーマ選定

IPCC 第 5 次評価報告書(AR5)の統合報告書が承認され AR5 に関わる作業のすべてが完了してから 4 カ月後の 2015 年 2 月、ケニアのナイロビで開催された IPCC 第 41 回総会は、IPCC の将来の方針等を議論した。同総会は、AR5 と同様に第 6 次評価報告書(AR6)も 5～7 年かけてじっくりと作成すること、そしてその間、いくつかの特別報告書を作成することにより AR6 作成プロセスを補強することを決定した。これを受けて、IPCC 事務局は IPCC 加盟国政府やオブザーバー国際機関に対して、AR6 作成期間(第 6 次評価期間:AR6 サイクル)において IPCC が作成すべき特別報告書のテーマについて提案するよう要請した。

それから約 1 年後、2016 年 4 月に再びケニアのナイロビで開催された IPCC 第 43 回総会には、各国政府や国際機関から提案されたおよそ 30 の様々なテーマが提示された。

IPCC による報告書の作成は、スコーピングから、各国政府などからの推薦に基づく執筆者の選定、世界中の専門家や政府によるレビュー、各作業部会や IPCC 総会による最終承認に至るまで、厳密に定められた手続きに従って実施される。1つの報告書を作成するためには、膨大な労力と時間が必要である。このため、5～7 年の間に作成できる報告書の数には限りがある。基幹報告書である第 6 次評価報告書や、インベントリータスクフォースによる方法論報告書を除けば、AR6 サイクルの間に特別報告書として作成できる報告書は 3 つが限度である。

およそ 30 の様々な提案のすべてを受け入れるのは不可能ながら、なるべく幅広く提案を受け入

れるため、内容の近いテーマをまとめる努力がなされた。その結果、「雪氷圏への気候変動の影響」「気候変動と海洋」「南極と南海域：海洋と気候変動」「海洋における気候変動の証拠、影響、それへの適応」「凍結した世界において気候変動がもたらす世界的・地域的変化」「海水面上昇と氷河溶解」など複数の提案が、それぞれの内容のすべてあるいは一部を「変化する気候下での海洋・雪氷圏」というテーマに包摂でき、1つの特別報告書でカバーできるという案が支持された。そして、このテーマは、特別報告書作成の妥当性を検討する上でのいくつかの基準を満たしていることも確認され、AR6 サイクルにおいて作成すべき特別報告書の1つと決定された。

海洋・雪氷圏特別報告書の作成を後押しした国際社会の動向

「土地利用、土地利用変化及び林業(LULUCF)」（2000年）という「土地」を主要テーマとした先例があった「気候変動と土地」に関する特別報告書と違い、「海洋」や「雪氷圏」を主要テーマとする特別報告書は、長い IPCC の歴史の中でも先例がない。もちろん、過去の評価報告書の中には気候変動と海洋や雪氷圏に関する科学的知見の評価が含まれているが、それらを主要テーマとして正面から取り上げるのは、今回の特別報告書が初めてである。

IPCC のこの新たな取り組みの背景として、気候変動に関する国際政治・国際交渉の近年の動向、特に海洋についてのここ数年の国際社会の動きを無視することはできない。画期をなす一連の変化があったのは、2015年だったと言えるだろう。この年、パリ協定を議論した気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)の期間中に「The Because the Ocean Initiative」が23カ国により立ち上げられた。彼らはその宣言の中で、海洋が地球上の生命を支えていることや海洋が地球の気候システムにおいて重要な役割を果たしていることを指摘し、CO₂排出や気候変動の影響に対する海洋のレジリエンスを強化するよう国際社会が必要な行動をとることを強く促した。同宣言はさらに、IPCC が気候変動と海洋に関する特別報告書を作ることを支持した。(当時、IPCC は特別報告書のテーマ案を集めている最中であり、その中に「気候変動と海洋」というテーマ案も含まれていた。) この「The Because the Ocean Initiative」はその後もワークショップを開催するなど国際社会への働きかけを強め、その文脈で、2019年12月のCOP25を「Blue COP」(海洋に特に注目するCOP)とすることを開催国のチリが宣言するに至っている。

2015年はまた、パリ協定、持続可能な開発目標(SDGs)を記載した持続可能な開発のための2030アジェンダ、仙台防災枠組、などが採択された年でもある。こうした国際社会の変化を背景として、海洋・雪氷圏に関する特別報告書は作成されたのである。

今後

2019年9月23日、ニューヨークの国連本部で「国連気候行動サミット2019」が開催されている頃、6,400km離れたモナコでは、IPCC 第51回総会(第2回第1,2作業部会共同セッション)が最終日を迎えていた。本来ならサミット終幕時までには特別報告書は承認されているはずだっ

たが、議論は長引き徹夜となった。ニューヨークのサミット参加者たちは、遥か東方で延々と続く議論にどのような思いを馳せていたのだろうか。サミット終幕には間に合わなかったものの、予定より一日遅れて、特別報告書は承認され、12月の「Blue COP」への重要なインプットとなった。これを今後の政策・行動にどう活かすか、政策決定者たちの反応を、世界は注視している。

なお、もちろん、変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する科学的な考察がこの特別報告書をもって終了したわけではない。関連研究・論文の不足から、十分な評価をすることができなかった問題については、AR6 など今後作成される IPCC 報告書の中で、さらに考察が進められていくはずである。

<参考：IPCC 第 6 次評価期間に作成される報告書>

- IPCC1.5°C特別報告書 (SR15)： 2018 年 10 月完成
- GHG インベントリー方法論に関する 2019 年改良版報告書： 2019 年 5 月完成
- 気候変動と土地に関する特別報告書 (SRCCL)： 2019 年 8 月完成
- 変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する特別報告書 (SROCC)： 2019 年 9 月完成
- 第 6 次評価報告書 (AR6) WG1 報告書： 2021 年 4 月完成予定
- 第 6 次評価報告書 (AR6) WG3 報告書： 2021 年 9 月完成予定
- 第 6 次評価報告書 (AR6) WG2 報告書： 2021 年 10 月完成予定
- 第 6 次評価報告書 (AR6) 統合報告書： 2022 年 4 月完成予定

第2章

雪氷圏に関するブリーフィング・ノート

本ブリーフィング・ノートは、「IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書」のうち、特に雪氷圏に関する部分に焦点を置いて解説したものです。

ブリーフィング・ノート

不可逆的で止めることができない雪氷圏の減少：

ティッピング・ポイントに近づいているのか、もはやそれを超えてしまっているのか？

ビナヤ・ラズ・シバコティ

IGES 自然資源・生態系サービス領域主任研究員

1. 雪氷圏¹と海洋

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、第6次評価報告書(AR6)作成期間(第6次評価期間:AR6 サイクル)における一連の特別報告書の3冊目となる、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書(IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)」を公表しました。この報告書は、進行中の地球温暖化に伴う海洋・雪氷圏の状況と予見される変化、これらの変化が生態系と人々にもたらすリスクと機会、及び将来のリスクを軽減するための緩和・適応・ガバナンスに関するオプションを評価しています。

この報告書は、海洋と雪氷圏という二つの地球システムの変化と影響に焦点を当てています。海洋と雪氷圏とが、将来の気候の行方を左右する決定的な役割を果たします。地球の表面の大部分(約4分の3)は海洋に覆われており、氷床と氷河が地球上の陸域の約10%を占めています。海洋は膨大な量の熱(気候システム内の余剰熱(extra heat)の90%)とCO₂(産業革命以降放出された量の3分の1)を吸収しています。凍結地域は温暖化する環境に非常に敏感です。また、雪氷圏の喪失は、雪・氷・永久凍土のフィードバックの変化を通じて気候変動を加速させます。

この報告書は、地球温暖化や気候変動による多様な影響と、それらのさらなる進行がもたらす事象に関する警告です。最も重要なことに、これらの変化は主として人為的な影響の帰結によるものです。

2. 広範にわたる氷河と氷塊の縮小と消失

雪氷圏は、他の地域よりも早く温暖化しています。この報告書は、地球温暖化によって引き起こ

¹ 雪氷圏とは、地球システムのコンポーネントとして定義され、地表面と地下部分、及び海面に凍結した状態で存在しており、雪・氷河・氷床・棚氷・氷山・海氷・河川・湖沼の氷・永久凍土・凍土が含まれる。

される氷河の広範囲にわたる縮小と氷塊の消失について「確信度が非常に高い」としています。雪氷圏の環境の変化は、極域・海に浮かぶ氷塊・低山域から高山域まで、あまねく見ることができます。また、個々の氷河が大きく縮小・消失しています。

ここ数十年で積雪被覆の厚さ・範囲・期間が減少しています。積雪被覆の期間は、ほぼすべての地域、特に低山域で、10年のうちに平均して5日(確からしい変動幅は0~10日)減少しています。平均積雪量は、アンデス南部・コーカサス・中央ヨーロッパで最も下げ幅が大きく(年間マイナス850 kg/m² 未満)、アジアの高山域での下げ幅が最も少なく(年間マイナス150±110 kg/m²) になったと推定されています。すべての山岳地域(カナダ及びロシアの北極圏・スバールバル諸島・グリーンランド・南極大陸を除く)の氷河の質量変化は、2006年から2015年の間に年間123±24 Gtであった可能性が非常に高くなっています。

3. 永久凍土の劣化と地球温暖化の加速

報告書は、過去10年間にわたって観察されてきた永久凍土融解に関し憂慮される事実を掲載しています。これには、永久凍土が薄くなっていることと、地中の氷が減っていることが含まれます。今世紀以降、広範囲にわたる永久凍土の融解が予測されています。永久凍土の融解は、積雪被覆及び北極域の海氷面積の減少に伴い、地表面気温の上昇によって短期的(2031年から2050年)に継続すると予測され、それは河川流出及び局所的なハザードに不可避の結果をもたらします。RCP8.5のシナリオ²の下では、2100年までに永久凍土の69±20%が減少する可能性があります。

永久凍土は、高山域及び極域に広く分布しています。例えば、主な高山域は、世界の永久凍土面積の27~29%、360~520万km²に相当します。最悪のケースであるRCP8.5シナリオの下で永久凍土の減少が続くと、2100年までに数百から数千億トンの永久凍土炭素がCO₂やメタンとして大気中に放出され、気候変動を悪化させる可能性があります。北極及び寒帯の永久凍土には、1,460~1,600ギガトン(Gt)の有機炭素が含まれており、これは大気中の炭素のほぼ2倍に相当します。永久凍土の劣化は、現在必要とされている、また将来計画されている温室効果ガス排出削減量に、新たなレベルの挑戦を加える可能性があります。

4. 南極およびその周辺の雪と氷が、将来の海面水位の上昇に大きく影響する

全球の雪氷圏に関する予測には悲観的なものがありますが、南極大陸が将来の地球規模の気候と海面水位の上昇(SLR)の重要な鍵を握っています。グリーンランドと南極の氷床では、21世

² 代表的濃度経路(RCP)8.5: (工業化以前と比較して)放射強制力が、21世紀末までに8.5W/m²の数値に上昇する「高位参照シナリオ」のこと。

紀、またそれ以降にかなりの勢いでその質量の消失が進むと予測されます。現在は、グリーンランドの氷床が海面水位の上昇に大きく寄与していますが、南極大陸は急速な後退の結果、21世紀の終わりまでにそれ以上の寄与をする可能性があります。ただし、南極の海氷の予測は、1979年から2018年にかけての衛星観測による海氷被覆が有意な傾向を示さなかったため、確信度が低いとされています。他方、全体的な消失については、2012年から2016年の消失(-199±26 Gt yr⁻¹)は、2002年から2011年の数値(-82±27 Gt yr⁻¹)や1992年から2001年の数値(-51±73 Gt yr⁻¹)よりも大きくなっています。海面水位の上昇に関しては、2012年から2016年の南極及びグリーンランドの氷床からの合計寄与分は1.2±0.1 mm/年で、2002年から2011年の数値と比して29%増加し、1992年から2001年のものと比して、実に最大で700%増となっています。

長期観測に一貫性がないこと、また海氷の厚さに関するデータが十分に揃っていないことが、これまでの傾向を十分に理解する上での障壁になっています。また、(オゾンや温室効果ガスなどの)複数の人為的起源の排出や、(海洋・大気・それらに隣接(曝露)した氷床などの)複雑なプロセスも、南極に関する信頼度の高い予測の障壁となっています。特に、空中リモートセンシング・フィールド測定・船舶による観測データは、南極海の氷上での積雪の変化を評価するにあたり、時間的にも空間的にも十分ではありません。ただ、データや科学的知見は十分ではありませんが、南極での長期的な変化が顕れる可能性は残っています。特に海面水位の上昇などへの大きなインパクトが想定されるため、南極の氷床崩壊の潜在的な影響に細心の注意を払う必要があります。今まであまり取り上げられてきていませんでしたが、南極大陸が温暖化する環境においてどう変わっていくのかは、この報告書の最も重要なメッセージの一つであろうと考えられます。

5. 緩和努力を行ったとしても、雪氷圏の加速的な変化とその結果生じる影響をすぐに止めることはできない

この報告書は予測される変化を明確に描いており、その変化は、温室効果ガスの高排出シナリオ(例:RCP8.5 など)の下で悪化するとしています。温室効果ガスの削減は、凍土や海氷が融けるスピードを遅らせるには有効ですが、多くの変化は避けることができません。例えば、高山域では、どの排出シナリオを取ったとしても、2031年から2050年までに冬季の積雪の深さが平均10～40%低くなる可能性があるとして予測されます。同様に、多くの氷河は将来の排出に関係なく消滅すると予測されます。特に、グリーンランドと南極の氷床が融解するとの予測が現実になった場合、永久凍土からの高いレベルの(メタンなどの)排出、侵食や地盤の沈下、さらには海面水位の上昇といった、次々と生じる影響を止めることができなくなると予測されます。この悲観的な予測は、雪氷圏の持続性について非常に厳しい現実を突きつけるとともに、解決に向けた機会の窓が非常に狭くなっていることを示唆しています。

6. 雪氷圏における変化の不可逆性—最も不穏な警告

雪氷圏の環境が、かつてない形で劣化し続けていることは明らかです。これは、失ったものが戻ってこないという事実を突きつけます。証拠は限られているものの、最近の南極氷床の質量の減少は、数十年から数千年にわたって不可逆的である可能性が高いとされています。対策を講じることで大気中の温室効果ガス濃度を抑制できる可能性がある緩和策とは異なり、雪氷圏の融解と劣化を回復することは人為的なコントロールを超えます。失われた氷塊の回復には数百年から数千年かかる可能性があります。のみならず、氷や永久凍土がひとたび融けてしまうと、さらに温度が上がる、さらに融解が進むといった悪循環のループが生じてしまいます。人類にとって雪氷圏のない環境は未知の領域です。雪氷圏の縮小を食い止めることができないのであれば、せめて融解のプロセスを少しでも遅くするためにどれだけ速やかに、また、いつまでに何ができるのかが問われています。

7. 現在及び将来の変化は、人・社会・生態系に関するリスクと脆弱性に関し何を意味しているのか？

失われつつある雪氷圏の広範に及ぶ影響は、海面水位の上昇など雪氷圏以外の場所に顕れることがほとんどで、本質的に全球的な課題を提示します。もし地球上に雪氷圏がなくなったら、地球は今まで経験したことのない敵対的な気候へと完全にシフトしてしまうでしょう。影響は広範に及び、非常に複雑な対策を余儀なくされるでしょう。

この報告書は、海面水位の上昇、災害リスクの高まり、そして山岳地帯・北極圏・極域など雪氷圏の環境に依存している人々の生計が失われることで脆弱性が増加することを警告しています。海面水位の上昇はすべての RCP シナリオで 2100 年を超えて続くと予測されています。高排出シナリオ(RCP8.5)の場合、南極氷床(の融解)による海面水位の上昇への影響が大きくなります。熱帯低気圧の強大化と降水量の増加により、海面水位の上昇・高波・沿岸部での浸水被害が生じることが予測されます(確信度が高い)。100 年に 1 回の割合で発生していた局地的な海面水位の上昇が、2100 年までにほとんどの場所で少なくとも 1 年に 1 回の割合で発生することが予想され、とりわけ海拔の低い巨大都市や小島嶼(小島嶼開発途上国を含む)においては、2050 年までに 1 年に 1 回の割合で発生することになると予測されます。

氷河・永久凍土・氷塊などの雪氷圏が不安定になると、氷河の雪崩・流出・崩壊の速度と規模が大きくなります。多くの高山域では、氷河の縮小と永久凍土の融解が斜面の安定性を低下させ、氷河湖の数と面積が増加すると予測されます。氷河湖の決壊・積雪上への(まとまった)降雨による洪水・地滑り・雪崩が、今までにない新たな場所や異なる季節にも発生すると予測されます。その結果、氷河と永久凍土に関連した地滑り・斜面崩壊・氷河湖の決壊が増加します。氷

河の縮小と永久凍土の減少による山岳斜面の不安定化とインフラの不安定化は、コミュニティと自然生態系の双方に新たな脅威をもたらします。

氷河の縮小と積雪の変化はすでに、ヒンドークシュヒマラヤや、熱帯アンデスといった幾つかの高山域での農業収量の局所的な低下をもたらしています。積雪或いは氷河によって水が貯えられた高山域での河川の流量は、すべての排出シナリオの下で変化すると予測されます。RCP8.5の下では、特に乾季のアジアの高山域において、2100年までに氷河からの流水量が減少し、その結果、流域の流水量が10%若しくはそれ以上減る可能性があると考えられています。

永久凍土の融解と降雪の減少は、北極及び山岳地帯の水文や自然発火に影響を及ぼし、その結果、植生と野生生物とにインパクトを与えます。北極と高山域の雪氷圏の縮小は、特に先住民の食料安全保障・水資源・水質・生計・健康と福祉・インフラ・交通・観光とレクリエーション・人間社会の文化に、主に負の影響を与えます。将来の雪氷圏の変化は、高山域及び極域の陸地や淡水の生態系を改変させ、種の分布に大きな変化を与え、生態系の構造と機能を変化させ、そして結果的に(そこにある)世界的に見てもユニークな生物多様性の消失をもたらします。標高の低い場所に生息する種が標高の高い場所へと避難し、個体数を増やし、生息域を変え、氷河が縮小し雪のない季節が長くなっていくのに伴い、新しい地域に定着するという可能性もあります。他方で、とりわけ氷河や雪に依存する個体の喪失率が上がることで、多くの高山種の個体数が減少します。なお、新たに開けた地域で植物が育つことで、土壌の炭素を部分的に補充できると予測されますが、永久凍土の融解などからの長期にわたる炭素放出の量とは比較できるレベルではありません。

8. この報告書は、変化している状況に対処・適応する適切な選択肢や解決策を提供しているのか？

この報告書は、主として緩和分野において、今すぐに、タイムリーで、野心的で、かつ協調的な行動をとることが何にも増して重要であり、少なくとも現在顕れている状況を少しでも遅らせることができるよう人々の注意を喚起し、また適切な行動をとるよう奨励しています。同様に、長期のリスクに対処するために、野心的な排出削減と、持続的でより野心的な適応行動とを調整することも必要であるとしています。

報告書は、人工的なあるいは自然を利用した適応策、先住民やその土地に根差した知見など、現在知られているすべての適応策の利用を強調しています。海面水位の上昇など、統合的かつ連鎖的な対応が必要なケースでは、すべての対策が重要かつ相乗的な役割を持っています。提案された適応策は普遍的なものもあれば、コミュニティごとに、或いはコミュニティの中であっても異なる場合もあります。予防的アプローチを強化していくことは有効ですが、現在行われてい

る工学的リスク低減アプローチは、ハザードの質が変わった場合にあまり効果的でない可能性があります。一方で、インフラのレトロフィット(改造)や再設計は効果的である可能性があります。例えば、そうした対策を講じることにより、2100年までに永久凍土の融解やそれに起因する気候変動の影響から生じるコストを半減できる可能性があります。

しかし、海面水位の上昇のケースのように、ほとんどの適応策は、低排出経路を取った場合であっても、今世紀末よりかなり前に適応の限界³に達する可能性があります。(生物物理・地理・金融・技術・社会・政治・制度的な観点から)適応の限界に到達してしまうかどうかは、排出シナリオや、それぞれの文脈固有のリスク許容度に依存します。例えば、世界中の低地のほとんどは、海面水位の上昇により、2100年以降、適応の限界に直面する可能性があります。また、高排出シナリオの下では、物理的な対策に関する技術的な限界や、生態系をベースにした適応策に関する生物物理的な限界が生じる場合があります。技術ないしは生物物理学的な限界に達する前に、経済的・社会的制約が適応を不可能にしてしまう可能性もあります。海面水位の上昇のように、対策の選択と実施が、社会に対してガバナンスの課題や、難しい社会的選択を突きつけることもあります。これら予見される課題を克服するために、本報告書では、現時点の適応策について、その土地に根差した適切な決定・分析手法をとり、不確実性に対応できるように具体的にデザインされ、土地利用計画・参加型意思決定・紛争解決アプローチ・社会的脆弱性や公平の追求など柔軟な対応ができるように設計されることが重要と示唆しています。

今あるリスクの低減(短期的な適応)が、レジリエンスを構築する長期的な計画と一致する場合、極域での気候変動への対応はより効果的です。しかし、短期的な適応策に重点を置くことは成功する可能性を低くします。適応戦略の策定には、例えば水の利用可能性・アクセス・管理を一体的に支援し強化するなど、統合的な計画が不可欠です。

革新的な変化(transformative change)に向けたガバナンスなどの高度に野心的な適応策は、多くの場所でリスクを軽減する可能性があります。こうした便益は場所によっても異なり、また、急速な変革の中でどの程度有効かも異なります。例えば、革新的な護岸保護策を講じることで、21世紀中の洪水リスクを2~3桁減らせる可能性があります。これへの投資額は年間数百から数千億米ドルの間になると見込まれています。

また、短期の計画を含む現時点のガバナンスのアレンジと、海洋・雪氷圏で予見される長期的な影響、そしてそれらの社会的帰結との間との時間的尺度の違い(時間的隔たり)が、対応を難しくしています。気候変動影響に対応するガバナンスシステムは、能力的に、今後ますます増えていくと予想されるリスクの規模に十分に対処できるほど迅速でも、また確実でもありません。高

³ 適応の限界とは、仮に適応行動を取ったとしても許容不可能なリスクからアクターの目的(またはシステムのニーズ)が確保され得ないポイントを示す。

山域及び北極では、規模・セクター・政策領域をまたがる気候リスク及び非気候リスク(アクセスの困難さ・人口や居住の動向・地域活動による地盤沈下など)の相互作用により、適応を協調的に進めていくことが大きな困難に直面しています。

9. 今後の課題

この報告書は、温室効果ガス排出の影響により地球温暖化とそれに伴う変化がますます進行しているという点において、以前の評価(IPCC 第 5 次評価報告書など)と、最近の特別報告書(1.5°C特別報告書(SR15)、及び気候変動と土地に関する特別報告書(SRCCL))とを補強するものです。地球温暖化の影響が最も顕れやすい雪氷圏での変化は、将来の海面水位の上昇、複数のフィードバック、そこに暮らす人々の生計と生態系への影響、そして気候全体に大きな意味を持っています。報告書は、南極大陸での氷の融解や、氷河縮小など、特定の重要なスポットでの将来のシナリオを描写するまでには至っていないものの、2100 年時点、そして次の何世紀かの範囲で、地球上に存在する雪氷圏が止めることのできない、不可逆的な損失を被る可能性があることを警告しています。また、将来において、状況が大きく変わってしまうとのシグナルを出しています。この報告書は、変化を遅らせることで将来へのわずかな希望が無くなってしまふ、また、行動を起こさないことが壊滅的な結果を引き起こしてしまうと指摘しています。

IPCC は科学的な厳密さと信頼性を維持すべく、確信度(confidence levels)や可能性(likelihoods)という表現を採用していますが、すべての予見される変化は、提案された確信度にかかわらず、それらが将来より高いリスクを伴う限り、等しく重要であると取り扱うことが賢明です。予見される変化が予見通りに発生するかどうかの科学的な保証はありませんが、他方、変化や影響がより早く顕れる可能性があります。温室効果ガスの排出を削減するための積極的なアプローチは、多くの気候リスクを緩和するのみならず、適応努力を容易にするためにも重要です。雪氷圏の変化が不可逆的であることは、野心を強化し、緩和並びに適応行動を強化することが重要であることの証左でもあります。

長期的な適応行動の設計・実行には、協調的な取り組みが不可欠です。適応への技術・資金・社会的制限などにより、選択肢は限られていますが、不確実性に対処し、柔軟な調整を行おうとする意思決定分析手法に焦点を当てた統合的なアプローチは、短期的な結果を目的としたスタンドアローンのアプローチよりも優れていると言えます。適応の限界に近い状況を回避できるかが最大の関心事ではありますが、大きな課題は、変化する気候の下で、社会がどれだけ速く変化(transform)できるかということです。

知識やデータのギャップの存在ゆえに、予測には多くの不確実性があります。ゆえに、今後の評価については、発表された科学論文のみならず、グレースポットでの体系的なモニタリングを進

めるなど範囲を拡大していく必要もあると思われます。

第 3 章

主執筆者インタビュー

「IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書」第 1 章の主執筆者である榎本浩之国立極地研究所副所長と、第 2 章の主執筆者である平林由希子芝浦工業大学工学部土木工学科教授に、同報告書の背景や主要メッセージについて伺いました。

(聞き手: 甲斐沼美紀子 IGES 研究顧問)

「動き始めた眠れる巨人」

榎本浩之 国立極地研究所副所長／国際北極環境研究センター
IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書¹ 第 1 章主執筆者

甲斐沼: 先生は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の海洋・雪氷圏特別報告書で第 1 章の執筆を担当されたと伺いましたが、この報告書で特に伝えなかったことを教えて頂けませんか？

榎本: 雪氷圏や海洋の変動がすでに進んでいること、今後の大きな変化が予想されること、そして自然科学と人文・社会科学が合わさって示されているメッセージです。

私は自然科学が専門で、IPCC でいうと、第一作業部会(WGI、自然科学)の研究成果については良く知っていましたが、第二作業部会(WGII、影響、適応、脆弱性)、第三作業部会(WGIII、緩和)については、詳しくは知りませんでした。今回の報告書では、各章に WGI、WGII、WGIII の研究者が入っており、一から内容の検討を行っていきました。苦労もありましたが、いろいろ教えてもらうことも多かったです。

甲斐沼: 私は逆に、WGIII については良く知っており、WGII は国立環境研究所で一緒に仕事をしている方々がいらっしやるのである程度分かっているつもりですが、WGI のことはほとんど知らないという状況です。今回この報告書を拝見させて頂いて、非常に重要な自然科学の結果が書かれており、大変勉強になりました。

榎本: 自然科学と人文・社会科学との間で、理解し合える部分も多くありましたが、この二つの間の壁を痛感することもありました。完全には交わらなくて、まだ途中のプロセスの部分もありますが、一定の成果を上げています。

私は長年、南極や北極観測をしてきており、2016 年からは北極圏の自然変化とそこに住む人や社会を視野に入れた人文・社会科学の研究者も入ったチームを組んで活動しています。私にはこのような研究交流の経験があったので、今回の報告書でも自然科学と人文・社会科学と一緒に仕事をするに関して、ある程度準備がありました。北極圏プロジェクトを例にとれば、北極圏に住む先住民について、また、北極圏での日本の産業について、人文・社会科学からのアプローチも行っています。ある意味、IPCC を凝縮したようなものです。

甲斐沼: 日本の産業と関わっているとは、どのようなことなのでしょう？

¹ 正式名称は「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」

榎本: 航路、水産業、資源開発などです。

また、報告書に関して言えば、今回はほとんど、自然科学の海洋と雪氷圏、高山において、人文・社会科学の視点から何が言えるかがかなり入ったように思います。自然科学と人文・社会科学との両方の視点から温暖化問題を捉えていくことが重要だと認識しました。

甲斐沼: 自然科学だけでなく、人文・社会科学の視点からも捉えていくことが重要ということでしょうか？

榎本: 海洋・雪氷圏特別報告書が対象としている地域について、例えば、海洋は非常に広い世界です。雪氷圏にはヒマラヤやアンデスなどが含まれます。南極・北極も、普段の生活の地域から離れています。海も日本近海だと身近な話題ですが、地球全体の海がどうなっているのか、という話になると、かなり普段の意識から遠いと思います。

私はそれら離れた地域で起きていることとの関わりを多くの人たちに身近な問題として知ってもらいたいと思います。南極・北極も、ヒマラヤもアンデスも地球の一部です。こうした思いを、報告書を書きながらひしひしと感じていました。

一方、報告書では時間スケールも延ばして 2100 年まで、さらに一部 2300 年までを対象として表示しています。普段の生活で話題にするのは、先週の天気はどうであった、また、今年の夏は暑かった、などの時間範囲が中心です。他方、10 年先はどうなっているのか、まして、2030 年や、2050 年や、2100 年がどうなっているのかについては、もうあまり自分とは関係ないと思われるかもしれませんね。

甲斐沼: そうですね。自分とは関係ないと言われる人もかなりいらっしゃると思います。

榎本: 時間的に離れたところまでどこまで気持ちを共有できるか、ということで、この報告書では頑張って 2300 年まで時間を延ばしました。今、グレタ・トゥーンベリさんの活動をきっかけに、人間が温室効果ガスを出しているということが、将来の気候変動に関係してくると、世界の若者が立ち上がっています。温暖化は自分たちの子どもたち、その子どもたち、またその子どもたち...の世代に、時間を超えて影響します。今から対策をしないと間に合わないということを、この報告書では示そうとしています。

個人的にも、南極や北極の研究をしていると、「どこか遠い世界のこと」とよく言われるのですが、「いや、身近な世界です。そこで暮らしている人と共通の世界として考える課題です」と答えています。

海洋・雪氷圏特別報告書はかなり厚みがあるので、多くの方に報告書のメッセージを伝えることが、なかなか難しいところもあるのですが、今日のような機会を通して知って頂ければよいと思っています。「時間と地域を超えて、身近なものとして皆さん一緒に考えましょう」と伝えるのにこれが良い機会になればと思います。また、自然科学と人文・社会科学とを、普段はそれほど一

緒に考える機会があまりないので、つないでいきたいと考えています。

甲斐沼： ありがとうございます。

榎本： 報告書は第 1 章から第 6 章で構成されています。第 1 章は構成と背景、第 2 章は高山地域、第 3 章は極域、第 4 章は海面水位上昇並びに低海拔の島嶼、沿岸域及びコミュニティへの影響、第 5 章は海洋、海洋生態系及び依存するコミュニティの変化、そして第 6 章は極端現象、急激な変化及びリスク管理について記述されています。

全体に共通なものはクロス・チャプター・ボックスとしてまとめられています。どの章もお互いに関連していますが、その中でも「リスク」を、人文・社会科学と自然科学を通した共通テーマとして取り扱いました。また、クロス・チャプター・ボックス 2 で、紙面を割いて共通の概念を説明しています。

また、「コミュニティ」という言葉も随所に出てきます。IPCC は政府間パネルなので、政策決定者へ情報を提供するという役割がありますが、政府のみならずコミュニティでもいろいろやってみようということです。community-based(地域に根差した)という言葉があります。まだ完全に浸透していないところもあるのですが、community-based とは何か、また実例などが紹介されています。北極圏でも community-based management や、community-based experiment などが重要です。

私も極地研の研究者向けに、この報告書の説明をしました。その際、是非自分の専門・関心以外のところも読むように、と勧めています。

報告書はそれぞれの章に分かれているため、自分の専門のところだけをダウンロードして、そこだけ読みにいかれる方もいらっしゃると思いますが、自分の専門から離れたところにも、読むべきことが書かれているということを伝えています。これが、海洋・雪氷圏という地域や現象を超えて考えるという、もう一つ強調したいところです。

報告書の特徴として、このように IPCC の WGI、WGII、WGIII に跨って執筆されたこと、全編を通じて「リスク」や「コミュニティ」が随所に書かれていることが挙げられます。自然科学と人文・社会科学の両方の視点が、地球温暖化の理解と解決には不可欠です。

甲斐沼： 人間が出した温室効果ガスによる温室効果で地球に蓄えられた熱エネルギーの 90%以上が海洋に蓄えられているとの記述があります。地上の気温上昇も問題となっていますが、これが地球で増えた熱の 10%以下の影響で、残りの 90%以上が海洋に蓄えられているとすれば、海洋への影響が非常に大きいのではないかと危惧しています。近年の台風の大型化もこの海洋に蓄えられた熱エネルギーが影響しているのでしょうか？ 海洋に蓄えられた熱を取り除くことも難しいと思われるので、今後も、大型台風が来るのではないかと心配です。

榎本： 海に蓄積されたエネルギーの放出は要注意です。9 月 25 日にこの報告書が出された

すぐ後に、台風 19 号が来て、温暖化の影響や海洋の環境変化との関係が話題になりました。

台風への影響については、研究者の間でもまだ考えがまとまっていません。背景としては、台風が発生しやすい高温の海水温域が日本のそばまで来ていて、普段よりも海水温が高くなっています。台風が発生しやすい高温の海水温域という点では、影響していると言うことができます。一つ一つの事例については、他の要素も関わってきており、これはそうだ、これは違うということはいけないのですが、強力な台風が発生しやすい時代に入ってきていると言うことができます。

甲斐沼： 去年も西日本で大型の台風の影響があり、今年も多くの被害が東日本を中心に発生しました。これが毎年続くようであれば、とても心配です。

榎本： このような大型台風が、たまに起きるという時代ではなく、常に起こり得るとい時代に入ってきていると言えます。背景は、海の影響です。

甲斐沼： 台風 19 号について言えば、ニュースでは最初、「10 年に 1 回の台風」という報道をしていましたが、その後「今までにない台風」という報道に変わりました。降水量や最大風速が観測史上初を記録しました。来年も「観測史上初の」台風がやって来る可能性はあるのでしょうか？

榎本： あると思います。なじみの薄い言葉かと思いますが、報告書の海面上昇のところ、historical centennial events、短縮形で HCE という言葉が使われています。centennial(百年)ということで、歴史上、100 年に 1 回しか起こらなかった事象が、2100 年には多くの地域で、1 年に 1 回起こるようになるという記述があります。低地に位置している巨大都市や小島嶼国の多くで、2050 年までに 100 年に 1 回起こるような事象が、毎年起こるようになるという予想ですが、このようなまれにしか起きない現象が日常的に起きることは要注意です。

今回の台風 19 号について、通常台風が発生する海水温は 26°C から 27°C の間なのですが、日本近海は 10 月になっても 26°C から 27°C の間でした。従来であれば、発生した台風は北上するに従って勢力が衰えるはずなのですが、海水温が高いので、エネルギーを持ったまま北上して、巨大な台風となっていました。

私は、背景には温暖化の影響があると考えています。報告書では様々なところで、IPCC などの表現で、確信度(confidence level)を使った表現がされています。「確信度が高い」や、「確信度が非常に高い」などのように使われています。レベルはいろいろありますが、確信度は高くなってきています。これまでも温暖化と台風の関係について言われているかもしれませんが、証拠と観測が揃って、よりよく見えるようになった、ということが言えます。

甲斐沼： IPCC の場合は確信度(confidence level)で科学的に正確に表現することが求められます。また、可能性(likelihood)も使われます。「起こる可能性が高い」や、「ほぼ確実」といった表現が使われます。例えば「可能性が非常に高い」は、90~100%の確率ということです。たと

え可能性が非常に高くても、確率で表現していると、まだそれほど切迫感がないように受け止める方がいらっしゃるように思います。「90%以上起きる可能性がある」といっても、「まだ10%は起きない可能性がある」ということで、あまり真剣に受け入れられないように思います。どうでしょうか？

榎本： 避難勧告と似ていて、「避難勧告は出ているが、まあ大丈夫だろう」と思われがちです。今回の台風19号の一つの教訓として、「災害が発生する可能性がより高まったので、避難したほうがよい」という避難勧告に対し、すぐに反応することの重要性を経験したことがあると思います。

IPCCも様々な形で警鐘を鳴らしています。しかし、まだ遠い先の話だと思われたり、また、「まあ、起きても何とかなるさ」と思われたりするふしもありますが、こうした警鐘に反応することが求められていると言えます。

甲斐沼： 温暖化について懐疑的な方もおられますが、温度が高くなっていることは観測事実としてあるのではないのでしょうか？

榎本： グローバルな変化とローカルな変化が組み合わさって作用してくるので、不確かな部分もあるかも知れませんが、気温や海水温は実際に高くなっています。私も東京に住んで9年になるのですが、なぜこんなに気温が高いのだろと思って、温度計を持って街の中を車で走ったことがあります。40℃近くまで上がっているのは異常ですね。これだけではローカルな話かもしれませんが、ヨーロッパなど世界各地で高温が起きており、グローバルな変化が進行しています。

甲斐沼： 埼玉県の熊谷市など、40℃を超したところもあります。10月の終わりなのに、台風が来るというのも異常に思うのですが。

榎本： 極地研からは富士山が良く見えるのですが、昨日(10月24日)、今年初めて雪化粧を見ました。10月23日が初冠雪で、昨年より26日遅れとのことでした。これはローカルというより、より大きなスケールの変化の反映かと思います。

「海洋に蓄えられた熱の影響で台風が強力化しているのか」という質問ですが、背景としては温暖化の影響で、証拠が揃ってきたと言えます。報告書が出た時の最初の記者発表でも言及されましたが、「見えるようになった」ということが書かれています。いろいろな危険性が書かれていて、その中に、より目の前に見えるような形で顕れ始めてきたという表現で書かれています。南極などもそうなのですが、前から言われていたことであつたにもかかわらず、証拠が足りなかったのが、証拠が揃ってきて、予想の中に組み込まれたということも言えます。

甲斐沼： 南極の氷の不安定性についてはどうでしょうか？ 前から言われていましたが、なかなか確たる証拠がなかったと聞いています。

榎本: 1980年代に、西南極の氷の不安定性についての出版物もあり、話題にはなっていました。今までは、理論上はあり得るが、過去においても将来にもないだろうという認識が多かったかと思います。また、モデル上で可能性を示すにとどまるのではとも言われていました。それが最近になって現実的になってきています。証拠も集まってきていて、予測に入れて検討されています。大きな要素になってきたという状況です。

甲斐沼: 海の中に入った熱はもう取り出せないと思うのですが、取り出せないとすれば、影響がずっと続くのではないのでしょうか？

榎本: 影響は長く続くと思います。一方で、その復元は可能という話題もあります。例えば、北極と南極の海氷は両方とも減っています。大切なのは、その現象が、可逆的(reversible)か不可逆的(irreversible)かということです。また、可逆的であってもヒステリシス(hysteresis: 履歴現象)となるという考えもあります。磁石を使って説明すると、磁場を与えると磁石になり易い物体は磁化しますが、その後磁場を取り除いても、元の状態には戻らず、ある程度の磁場の影響が残ります。元に戻すには、逆の大きな磁場を与える必要があります。戻すのに大きな力がいるということです。ある形に向かって行く時と、戻ってくる時で別ルートを通って戻ってくるという考えもあります。海水温に影響していると思われる海氷の分布でいうと、北半球は、今後、温度を下げる事ができたら、来た道と同じ道を通ってまっすぐ戻ってくるという考えがあります。温度が2℃上がれば海洋が何%減り、2℃下げれば海洋が何%増える、といったように、同じだけの海氷の質量が行ったり来たりして、来た道と同じだけ戻っていきます。

甲斐沼: 2℃下げなければいけないのですね？ それも難しいですね。

榎本: 温度の変化と氷の変化が比例するということです。努力すれば、努力しただけ戻ってきます。

他方、南半球の氷は、元に戻そうと思っても戻らないという予測があります。相当に頑張れば戻ってきますが、かなり大きな回り道をして戻ってきます。上がった分を下げたら元に戻るかというとそうではありません。但し、大きな時間をかければ戻ってくると言えます。

甲斐沼: 大きな時間とは、何世紀というスケールでしょうか？ 100年や200年といったスケールでしょうか？

榎本: 海氷の場合は数十年というスケールもあります。陸上の氷が海に出してしまう場合は、数100年など、もっと多くの時間がかかります。

また、元に戻ったように見えるところと、根本的に元に戻るのが難しいところがあります。これも

モデル計算なので、本当に起きるかどうかは、まだ証拠不足です。元に戻すことはできると思いますが、その努力が大変なものになります。

甲斐沼: 元に戻すには努力が大変なのですね。

榎本: 1.5°C上がったので、では 1.5°C下げたらすぐに同じ状態に戻るかと言えば、そうではありません。別の変化経路で時間をかけて戻ってくる可能性があります。まず 1.5°Cに抑えること自体が挑戦ですが。

甲斐沼: 影響ですが、海洋の熱の影響で台風の強度が大きくなる、即ち、暴風雨が強くなるという現象が起こる可能性があるとのことですが、熱の影響以外でどのようなことがあるのでしょうか？ 海洋酸性化と酸素がなくなることの影響があると書かれていますが、どうでしょうか？

榎本: 酸性化については、北極海でかなり話題になっています。酸性化のためにカルシウムの殻ができなくなるという影響があり、それが生態系の食物連鎖に影響します。カルシウムで殻を作っているプランクトンが少なくなって、それを食べる魚に影響が出て、人間の食料にも影響します。北極ではすでに報告されています。また、南の海ではサンゴ礁への影響も大きいです。

甲斐沼: 酸素が無くなるというメカニズムが良くわからないのですが、説明して頂けませんか？

榎本: 今回の海洋・雪氷圏報告書では貧酸素についての言及も慎重に行われています。

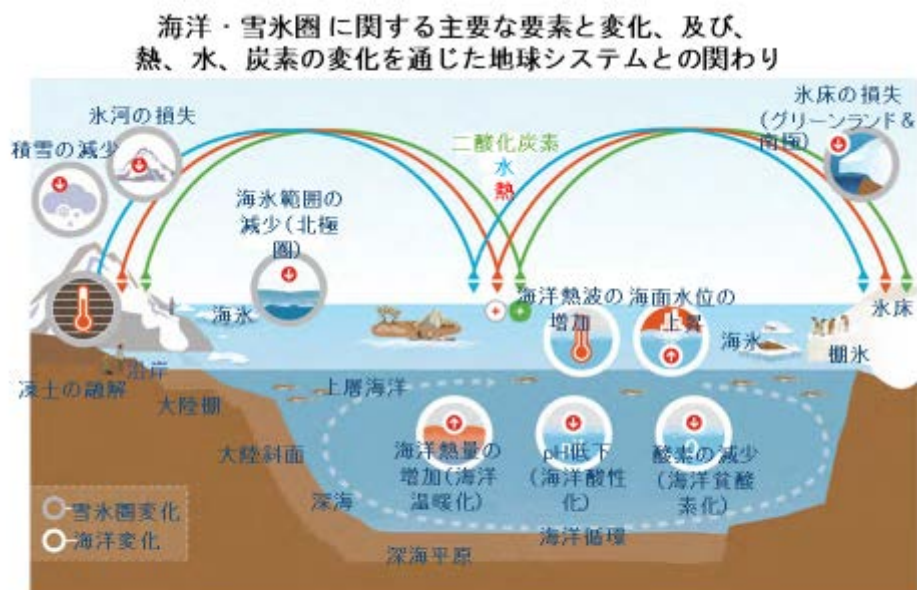
甲斐沼: 陸上の場合は、二酸化炭素濃度が上がっているのに、酸素濃度は下がっています。酸素濃度は下がっていますが、人間生活に影響が出るほど下がっている訳ではありません。海の場合は、上層の酸素を下層に運ぶ必要があり、その循環が止まると下層での酸素の供給がなくなるということですが、どうなのでしょう？ 琵琶湖では、今年観測史上初めて、全層循環が観測されなかったとのことですが、温暖化と関係があるのでしょうか？

榎本: 仕組みは琵琶湖も海洋も一緒に、循環が衰えてしまうと、上層と下層とが混ざらなくなります。酸素があるのは表面だけになりますが、上からは酸素が降りていかず、他方下から上がってくるはずの栄養塩が上がってこない。これにより生態系がダメージを受けます。

これには太平洋の温暖化と、海水温上昇と、海洋熱波(marine heatwave)が影響しています。表面に暖かい水があるせいで、安定した成層になっています。暖かい、軽い水が表面を覆っていて動かない。下に降りて行かない。下からも上がってこない。それが海洋循環に影響していて、貧酸素化を起こします。これが今回報告書に取り上げられています。

政策決定者向け要約(SPM)でも、貧酸素化が、海水温が上がっていること、海水の pH が下

がっていること(酸性化)と一緒に、主な影響の一つとして挙げられています。



甲斐沼： これまで、海水温上昇や、酸性化の話はよく聞いていたのですが、海洋熱波について、もう少し教えていただけますか？

榎本： 海洋熱波は、IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) から新たに付け加わってきた話題です。海洋熱波については、海洋研究者にさえ、まだ完全に普及していると言えませんし、用語は知られていても定義が異なっていたりします。海洋表面の温度の現象についてもそれほど知られているわけではなく、ましてや一般の人には用語すら普及していないと思います。「夏になったら熱波での熱中症に注意とよく言われますが、それと海洋熱波とはどう違うのですか」という質問を受けたりします。

甲斐沼： 確かに、私もそのレベルです。

榎本： 「陸上の熱波や寒波などとはどう違うのか」という質問をよく受けます。気温に関しては熱波と言います。海洋熱波というのは新しい用語で、検索しても、論文は出てきますが、用語の定義について詳しいものは少ないです。報告書に掲載されている IPCC の用語集 (glossary) の中でも、2 行ほど簡単に書いてあるだけです。私もこの 1 カ月の間に複数の方から、「海洋熱波とは何ですか」という質問を受けました。

大気中で 4~5 日またはそれ以上にわたって高温が続くのが熱波ですが、海でも同じようなことが起きます。海洋熱波とは、「統計的に、その場所にとって異常な温度。何℃超えたら熱波と

いうのではなくて、その場所ごとに、普段の平年値の90%の範囲から超えるような異常な水温がある程度長く(2~3日)続いた時のこと」と説明されています。新しい定義と新しい用語を決めて、世界中を見直してみたら、結構起きているということがわかりました。また、今後頻繁に起きる可能性があると言われてはいますが、今回どの地域が危ないかがわかりました。RCP8.5(このままの温室効果ガス排出量が続き、2100年に2.6~4.8℃気温が上昇するシナリオ)と、RCP2.6(2℃以下に抑えるシナリオ)の両者を比べている部分があります。対策したらこうですよ、しなければこうですよ、という違いが書かれています。

地図ではこのように表されています。

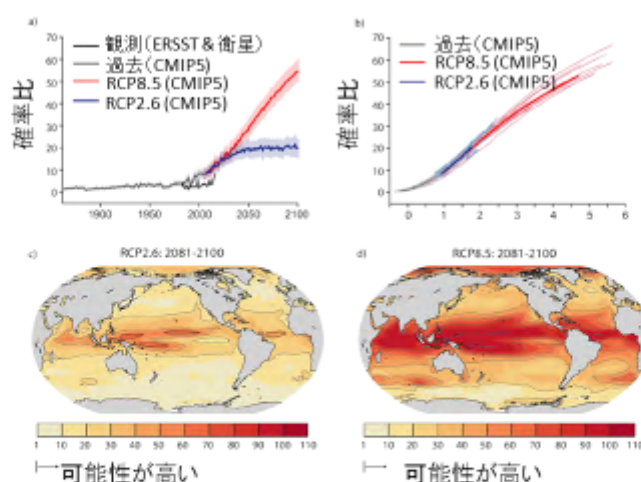


図6.4: 海洋熱波の確率比の世界的・地域的変化(出典: IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書、図6.4)

(注: 確率比: 海洋熱波日数が1850-1900年から変化した割合)

甲斐沼: 珊瑚礁の白化もこの海洋熱波の影響なのでしょう。それとも別のことが原因なのでしょう。

榎本: 同じ第6章にサンゴ礁の白化に関する図があります。酸性化とも関係があると思います。

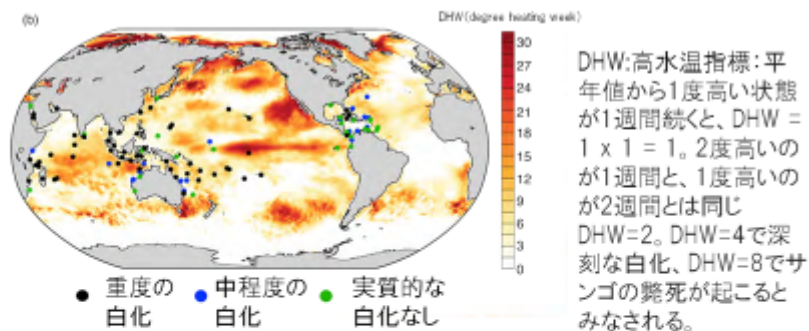


図6.3: 最近の海洋熱波と観測された影響の例。
 (b) 2015~2016年の記録的な温暖化の年と、同年のサンゴの大規模な白化の範囲。
 (出典: IPCC海洋・雪氷圏特別報告書、図6.3)

ところで、海洋熱波でサケが取れなくなったとか、普段来るはずの魚が来なくなったという深刻な被害が各地で報告されています。大気現象や海水温の現象について、今までたくさんの報告が書かれてきました。今関心は、それによって生物がどうなるかに向いています。アラスカでは、去年・今年と、サケが全然取れなくなって、危険状態だという報道がされていました。タスマニアやオーストラリアの海岸線でも、海洋熱波による生態系への影響が観測されています。物理的現象から、生態系への影響に関心が移ってきています。

甲斐沼: 以前から問題になっていますが、海面上昇についてはどうでしょうか？

榎本: 今回の報告書の中でまず注目されたのが、1.1mという数字であったと思います。1.1mというのは、2100年までの海面上昇予測の範囲の最大値ですが、今までの予測より10cm以上大きくなっています。

「なぜ予測が急に大きくなったのか」と聞かれました。グリーンランド氷床と山岳氷河の縮小は前から言われており、それが加速しています。さらに大きな要因として、南極氷床が融けるかもしれないと言われています。グリーンランドでも言われていますが、温度が上がって氷が水になる、つまり融けることと、割れて流れ出すというダイナミクスと、その組み合わせとがあります。

南極は十分寒いので融けないだろうと言われていました。ほとんどの氷床の消失は氷が末端で割れて起きてくるのですが、それほど温度も上がっていないから、急激な変化はないと思われていたのです。しかし実は、海と接している底面からの影響が顕著になってきています。それが氷床の不安定さを招いています。底面が融けて薄くなると、海に接しているところでは浮力が勝って

浮かび上がるので、下に隙間ができて、さらに不安定になります。つまり、ドミノ倒しのように、融ける、薄くなる、不安定になる、さらに不安定になる、という連鎖が起きるのではないかというアイデアが出てきました。それが、アイデアだけでなく、実際に起きている証拠が集まってきています。それが marine ice sheet instability (MISI) です。海に接している氷床 (ice sheet) の不安定理論です。今回これがかかなり憂慮され、真剣に考えなければならなくなっています。

Instability という不安定性にスイッチが入ってしまうと、急速に氷がなくなります。これは、おそらく 2100 年ぐらいまで影響がある可能性があります。他方、その先もどうか、と問われるとまだわかりません。

甲斐沼: IPCC 第 3 次評価報告書のときに、南極は海面上昇に影響するのではなく、逆の作用があるとされていました。

榎本: 南極氷床は当面は増加する積雪により質量も増加して海面上昇に対してマイナスに働く。長期的に見れば南極大陸上の雪も融け出すので、プラスに働くということだったかと思います。

甲斐沼: 第 4 次評価報告書では、逆に影響すると予想が変化しました。第 3 次評価報告書の時は、南極大陸に降る雪が増加して積もり、また、大陸の上なので海面上昇にはつながらないのではと言われていました。実際には、積もった雪の下の方が融け出して、不安定になって、南極の氷床が流れ出しているということでしょうか？

榎本: 第 3 次評価報告書の時は、南極はまだまだ十分冷たいので、降ってくる雪を蓄えていて融けることはない。貯めていく一方だと言われていました。ただ、将来すごく温暖化して、雪が融けるような事態が来たら、降ってきた雪が融けて流されるということもあり得るとも言われていました。

甲斐沼: 「将来」の時代がもう来たのでしょうか？

榎本: 以前は氷床表面が融解して流出するという将来を想定していたのですが、表面が流れ出す以外にも、底面が融ける、薄くなる、不安定となる、(変化が) 見えてくるという仕組みについて、実際に証拠が集まってきて、IPCC の報告書でも記述されるようになったということです。

MISI が働いて氷床の変化が予想されているのは、主に西南極です。さらに東南極の一部でも同様の危惧があります。日本の昭和基地がある東南極の地域は、実は雪が積もっている方が多いです。日本の基地周辺のデータだけを見ていると雪は増えているのですが、やはり日本の観測隊が活動する東南極の氷河域を含め、南極全体で見ると氷床質量が減っています。

氷河の増減に関して言えば、プラス(増加)のところもあるのですが、マイナス(減少)の方が大きくなってきています。昔はプラスだと言われていました。また、マイナスがあるかもしれないけれ

ど、やっと打ち消すぐらいという時代もありました。新しい知見では、打ち消すどころか、全体で言うところと減ってきているというもので、「減っている」という理解が結構顕著になってきました。

甲斐沼: 南極には西南極と東南極があるのですか？

榎本: 経度 0 の線で切って、一方を西南極、もう一方を東南極と言います。南極には、南北はありませんが、東西はあります。西南極側にある南極半島でよく、棚氷が割れて流れ出している映像が報道されています。ここも割合で見ると不安定な地域です。棚氷はもともと浮いているので、融けても海面水準には影響ありません。ただ、浮いている部分の後ろに山から下りてくる氷河があり、その氷の流出増加につながることは危惧されます。

西南極の氷の下の基盤は、広域が海面下です。ということは、氷が薄くなり浮かび始めると、氷の下に海水が侵入し、融解が起き、さらに浮力により氷が流動、崩壊しやすくなり不安定になります。ずっと内陸でも基盤が海面下なので変化が止まりません。

東南極の方はほとんどの基盤が水面上の地面です。氷河が後退した地域に地表面が出てきて、海とのコンタクトはなくなります。東南極でもツェン氷河域は基盤が海底下になっており、西南極と同様の条件になっていて、減少の加速が心配されています。

グリーンランド氷床は中間的で、現在の末端域は基盤が水面下のところがあり、海洋の影響が及びます。ここに南極と同じプロセスが発生すると氷床の減少が加速します。グリーンランドの表面には融けているところもあります。また末端が割れて崩壊しているところもあり、二つの要素が働いています。グリーンランドでこの数年間起きていることが、南極でも起こり始めています。

変化のメカニズムとしては共通で、どの時代にどれが起きるかは、グリーンランドの変化が先行しています。

甲斐沼: グリーンランドが先行しているということは、北極の方が気温の上昇が大きいということと関係があるのでしょうか？

榎本: そうですね。北極の気温は全球平均の2~3倍で上がっています。その影響があります。早い温暖化の原因は、アイスアルベド・フィードバック(ice-albedo feedback)というメカニズムです。雪氷は太陽光を反射するので、反射している限り温まらない。これが、水面や地面が出てくると、地球の表面の一番反射率の高いものから低いものになるので、どんどん光を吸収し始め、吸収すると水温が上がって、氷をさらに融かす、というサイクルが始まってしまいます。それが北極で起きており、雪氷と反射率に関わったプロセスによって早く温暖化してしまう、と言われていきます。雪が降っている期間が短くなって、海氷もどんどん減って、海が顕れ始めます。それが、今北極が温暖化している大きな要因です。基本的には、アルベド・フィードバックが効いていると言えます。この温暖化がグリーンランド氷床に変化を起こしています。

南極は規模が大きく、なかなか動き出さなかったので、「眠れる巨人」と言われていました。

甲斐沼： 逆に、動き出すと大きいということですね。

榎本： 北極と南極はよく比較されます。氷床、海氷、そして温暖化の話などについてです。

北極の氷が減っているとずっと言ってきたのですが、2050年にはゼロになる、といった予想も出ています。一方で南極はというと、質量もそうですが、海氷面積も右上がりが増えていてみました。

北極では、海氷も減っており、氷床も融けているのですが、南極の方は、氷床が増えており、海氷も増えています。これによって「本当は温暖化していないのではないか」、「南半球は温暖化していないのではないか」、「温暖化の影響は出ていないのではないか」などと言われてきました。

実は、南極の海氷増加は、2015～2016年あたりをピークに、その後急激に減少に転じています。また、2016、2017、2018年の3年間に過去最低記録を出してしまいました。まだ3年しかデータがないので、この報告書の中では、短期の揺らぎなのか、気候変動の影響なのか、人為起源の温暖化によるものなのか、まだ分からないとしていますが、現象は注意して見ていく必要があります。

また、南極の海氷が増加から減少に転じた途端、この3年間のうちに、北極で30年以上かけて減ってきた面積よりも大きな面積が減ってしまったという報告があります。南極氷床と南極の海氷は、変化し始めた途端に、一気にすごく大きな影響が出てきています。

南極氷床に関して、東南極の日本の昭和基地がある辺りでは雪が降っています。西南極のうち、今話題になっている場所でも雪がたくさん降っているので、表面だけ見ていると、どんどん雪が積もっています。ですが、それよりも大量の面積が底面で減っています。表面だけ見ていると気が付かないのですが、底面まで入れて、全層の質量では減っていることが分かってきました。表面だけではなく、底面も考えていく必要があります。

甲斐沼： 永久凍土の融解によるメタンの放出や、氷床・棚氷の融解によるアルベドの変化などで、温暖化は加速すると言われていています。どの程度のリスクがあるのでしょうか？

榎本： 永久凍土の融解についてはよく聞かれます。融解ということと、凍土の温度の上昇(permafrost temperature increase)ということを考える必要があります。永久凍土の温度が上がっています。まだ融けるには至っていないけれども、融ける直前まで温度が上がってきているところが多いと言うことができます。

甲斐沼： 2100年には温度が上がって融けるということでしょうか？融けて、メタンが放出され、温暖化が加速されるという現象が起きると考えてよいのでしょうか？

榎本： 永久凍土ですが、すでに融け始めているところからはメタンガスが放出していて、クレータ

一が出来ています。クレーターは、メタンガスが発生して、それが爆発した跡と考えられています。

甲斐沼: 今でもすでに起こっているという事でしょうか？

榎本: 融けているところもありますし、まだ融けていないけれどもその危険性が迫ってきているところもあります。

甲斐沼: メタンは CO₂ に比べて温室効果が大きいので、(メタンは CO₂ に比べて約 25 倍の温室効果がある)、温暖化がさらに加速されるということでしょうか？

榎本: 凍土から出るメタンは CO₂ 以上に温暖化を加速してしまうということで、メタン・ボム (methane bomb)、「メタン爆弾」と言われています。爆弾が永久凍土に埋まっているようなもので、これが爆発つまり大量に放出されて、連鎖でさらに放出し始めると、温暖化が急速に加速され、止めることができません。

最初に紹介した Box 1.1, Figure 1 を使って説明します。この図に海洋熱波 (marine heatwave) という用語や、永久凍土の融解 (permafrost thaw) という用語が書かれています。

甲斐沼: ところで、ティッピングポイントについても教えて頂けませんか？

榎本: ティッピングポイントは、転換点や臨界点と呼ばれ、変化が進み、別の状態に移行してしまい元の状態に戻れなくなることを言います。北極海の海氷はティッピングポイントが近い、ティッピングポイントを超えたなどと言われています。後者では、もう戻れないところに来てしまった、という言い方をします。

ただ、本当に戻れないかというところでもないという予測も出ています。CO₂ を減らすことができれば、海氷はまた結氷して、凍り始めて昔の形に戻る、という計算結果も出ています。

甲斐沼: 今、気温が高くなっていますが、以前の気温に戻ったらということでしょうか？

榎本: まずそこを変えてあげないと元には戻れません。

甲斐沼: 1.5°C に気温上昇を抑えるといっても、1.5°C にずっと保っていたのでは、海氷は戻らないということでしょうか？

榎本: はい、今のコンディションのままではだめです。

ティッピングポイントについては、定義やリストがいろいろ出ています。例えば、ドイツの研究所の資料などにティッピングポイント・リストがあり、世界中で想定されるティッピングポイントがまとめら

れています。植物、陸上の乾燥、海氷の融解、積雪の減少など、いろいろなものがまとめられています。

報告書の第1章にティッピングポイントを説明している図があります。

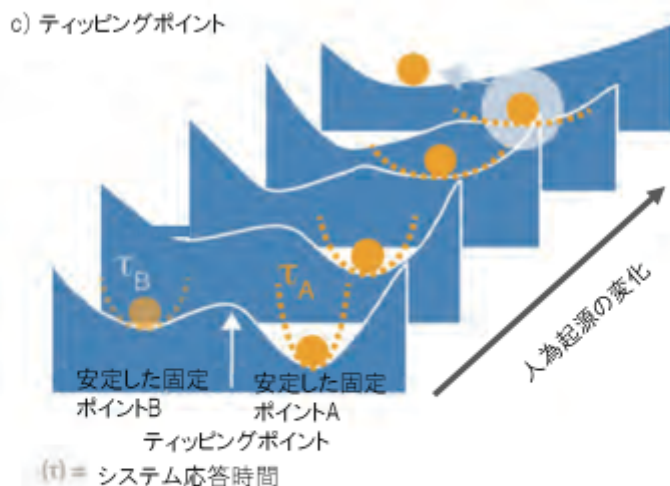


図1.1: 海洋・雪氷圏の変化に関連する重要な概念の概略図:(c)転換点と、例えば人為的变化に対応した時間経過による行動の変化(出典:Lentonら、2008年)。2つの最小値は2つの安定した固定点を表し、不安定な固定点を表す最大値で区切られ、ティッピングポイントとして機能する。ボールはシステムの状態を表し、点線は固定点の安定性と小さな摂動に対するシステムの応答時間を示す。
(出典:IPCC海洋・雪氷圏特別報告書、図1.1)

ある範囲までは揺れている状態ですが、変化が進むと、この範囲から出て、戻ってこれなくなる状態に移ってしまいます。

次の図では、線形の外因に対して、赤いところはどんどん追隨していく。戻ってこようと思えば戻ってこれられます。それに対して、緑のところは、あるところを超えるまでは変化せず我慢していますが、急に爆発してしまう。ここを超えるかどうかはティッピングポイントだと書いてあります。ここを超える前であれば、まだ戻ってこれますが、これを超えてしまうと、戻ってこれられません。ここを超えないように、超える前に、どうにか制御できれば、というのが勝負です。それが、もう遅いのではないかという危惧が出され、9月25日の海洋・雪氷圏特別報告書の記者発表の時の Hans-Otto Pörtner 博士(IPCC WGII 共同議長)の発言にもありました。

a) システムの動的応答

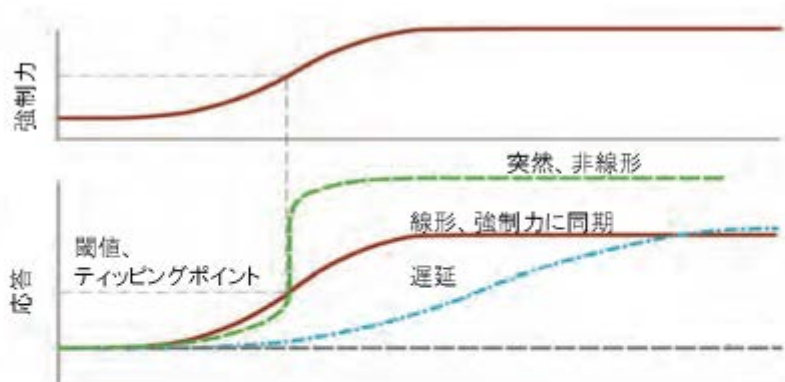


図1.1: 海洋と雪氷圏の変化に関連する重要な概念の概略図。(a)段階的な外因に対するシステムの異なる応答(線形、遅延、突然、非線形)。(出典:IPCC海洋・雪氷圏特別報告書、図1.1)

甲斐沼: ティッピングポイントに関して、海洋大循環が止まってしまうという話も聞きますが、どうなのでしょう？

榎本: 海には、速く流れる表面の海流とは別に、3,000~4,000m より深い層の深層海流があります。グリーンランド北東沖では海水の成長とともに、塩分の濃い、重く冷たい海水が生まれます。この重い海水は深く沈んで南下し、南極付近の低層水と混じって地球規模で循環し、一周するのに1,500~2,000年かかると言われています。

この循環が止まってしまうと、海洋における赤道を超えた熱輸送が減るので、北半球は寒冷化し、南半球は温暖化されると言われています。一方で暑いだけの地域、もう一方で寒いだけの凍てつく地域ができます。

この海洋大循環の一つで、大西洋と北極にまたがる大きな流れを大西洋子午面循環 (Atlantic Meridional Overturning Circulation: AMOC) と言います。AMOC が弱くなったことが観測で示されています。弱さがすごく加速したかということそこまで顕著ではないのですが、但し警戒が必要との記述です。この海洋大循環による熱の移動は、地球の気候をコントロールする重要な役割をもっています。

グリーンランド氷床では大量の融解水が海洋に出てきます。海洋表面に淡水が来ると、海洋の循環を止めてしまいます。大気の温度上昇と、陸上の氷の融解と、海の表面水温と、海洋循環が全部つながってきます。

甲斐沼: 日本への影響についてはどうでしょうか？ 自分事でない、なかなか意識が向かな

いということもあるかと思いますが。北極や南極は自分とは縁の遠い世界のように思ってしまうがちですが、日本ではどのようなことが起こっているのでしょうか？

榎本：一つ気になっているのは、この間のような台風がこれから頻繁に来るのかどうかです。気象災害が気になります。これまで経験したことのないような大雨や暴風が、頻繁に起こり得る事態が予想されます。

台風の数は減るかもしれないが、強度は大きくなるという研究結果があります。強力で、凶暴な台風が増えてくるという予想です。それが台風に関する懸案事項の一つです。

先日の台風が東京湾に最接近した時間帯は、たまたま干潮の時間帯であったため、沿岸地域では高潮の被害を免れたという話がありました。場合によってはもっと大きな被害が起こった可能性もありました。今後海面が上昇すると、影響が増えると予想されます。

また、北極の海氷が減ってきている結果、大気循環が変わって、日本の冬の寒波や大雪に影響してきています。日本は熱帯域と北極に挟まれた中緯度帯に位置しているため、北極の気候変動の影響が日本の天候に現れることがあります。

甲斐沼：それもよく言われることですが、「こんなに冬が寒いのが、温暖化していないのではないか」という質問を受けます。昨年冬は寒波が襲ってきたのですが、冬寒いという現象も温暖化の中で、説明できるのですね。

榎本：全部がこのせいかという、そうとは言えないケースもあるかと思いますが、北極海で海氷が融けるために、冬の温度が高くなってきている。さらにそれが大陸の気圧配置に影響して、日本に寒波をもたらす原因の一つになっていると思います。

今回のところでは、対流圏を通じた影響は、中程度の確信度(middle confidence)ということになっています。成層圏や、全球的な影響については、最先端の研究例がありますが、まだ証拠が多くありません。成層圏を通じての影響は、解明と、IPCC の高い信頼度に至るのにはもう少し時間が必要なようです。

北極海では、冬でも、雪ではなくて雨が降って、海も氷が張らなくなっています。「誰が氷を減らしたのか」ということで、温暖化が問題となってきます。

甲斐沼：他にはどのような影響が懸念されるのでしょうか？

榎本：ヒマラヤなどでは氷河の融ける水が生活と大きく関わっています。温暖化の影響が cascading impact として、時間差を持って現れることが考えられています。例えば温暖化によって氷河融解が増加すると、まず低高度の氷河が融解し、河川水量が増えます。大量融解が進むと洪水の危険があります。さらに融解が進むと氷河分布は高所だけになり、またその面積も縮小してしまっています。この時期には融解水は少なくなり、山岳地域の融解水に生活水を依存し

ていた地域では水不足などが起こります。また、この水不足に起因した生活基盤や産業の不安定化や争いが起こる可能性もあり、生活できないと移住を余儀なくされることもあり、社会も不安定になることが予想されます。

海はこれまで見えないところで頑張ってきました。しかし、海からの影響が見え始めています。今までに経験していない新しい状態に突入する可能性があり心配です。

甲斐沼： 自然科学からの興味深い示唆をたくさん頂きありがとうございました。「眠れる巨人」が起きてしまったら、もう元には戻れないという話は強烈でした。今日はどうもありがとうございました。

インタビュー実施日：2019年10月25日／場所：国立極地研究所

「雪氷圏の変化は温暖化の重要な証拠の一つ」

平林由希子 芝浦工業大学工学部土木工学科教授
IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書 第2章主執筆者

甲斐沼: まず、海洋・雪氷圏特別報告書で、平林先生が特に伝えたかったことを教えて頂けますか？

平林: 雪氷圏の変化は温暖化の重要な証拠の一つであり、雪氷圏を観察すると温暖化の影響をよく知ることができます。雪氷圏という言葉はあまり聞き慣れない方もいるかもしれませんが、氷河・雪・凍土が顕著な景観的特徴を持つ地域を指します。降水量などの気象現象は短時間で変化しますが、雪氷圏は本来非常に長期的にゆっくりと変化します。このような地域で氷河後退などの現象が確実に見えるということは、温暖化が実際に起こっていることを示しています。

私はこの報告書の中で、ハイマウンテンと呼ばれる標高が高い地域における影響評価を担当しました。これらの地域において氷河の融解が実際に観測されており、その結果として、氷河がある河川流域では水資源の絶対量が変化しています。氷河が融解すると一時的に水の量が増えますが、氷河の融解が続いて小さくなると、逆に水量は減少します。この変化は生活用水の多くを氷河由来の水に依存している下流の地域に特に大きな影響を及ぼします。一時的な水量の増加は洪水などの災害を引き起こす一方、ピークを超えた後の水量の減少は水力発電による電力量の低下、食料生産や水供給の不安定化を引き起こします。

日本はハイマウンテンには含まれていませんが、同様の現象は日本の積雪山岳地帯にも当てはまります。冬季の積雪は春先に雪解け水として私たちの生活に恩恵をもたらしています。しかし、積雪量の減少は水資源の減少につながり、稲作等の農業が影響を受ける可能性があります。また、雪ツーリズムに依存する地域の経済に負の影響をもたらします。例えば、報告書で引用されている論文では、過去にオリンピックが開催された地域のいくつかでは今後の開催が困難になると報告されています。

人間社会だけでなく生態系への変化も懸念されています。特に、冬に毛の色が変化するウサギやキツネなどの動物類、雷鳥などの鳥類の個体数や高山植物の生態にも影響が出ると考えられています。

今回この報告書の執筆に関与して、今後、温暖化がどのような環境の変化をもたらすのかを正確に伝えていく必要があると感じました。

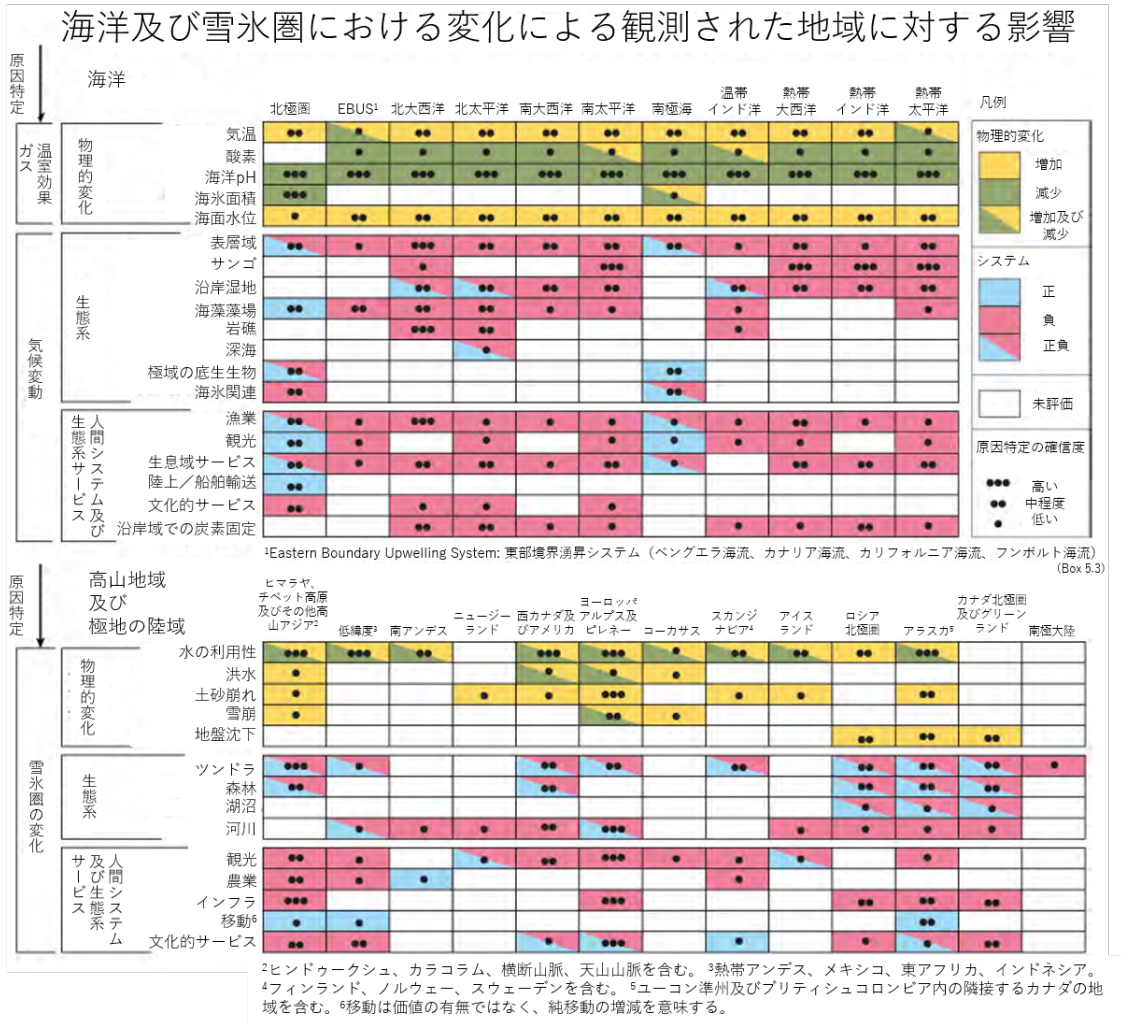
甲斐沼: 平林先生は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第51回総会に出席され、IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書の政策決定者向け要約(SPM)が承認されるプロセスにご出席さ

れたとのことですが、承認プロセスではどのようなことが主に議論されたのでしょうか？特に興味を持たれた議論などありましたら教えてください。

平林： ハイマウンテンにおける影響評価を主に担当し、SPM2 に表の形でまとめました。この表では、ハイマウンテン、海洋、極地の 3 つの地域ごとに、それぞれ関連する論文をレビューし、影響の確信度、その影響の正負についてまとめました。複数の著者が分担してレビューをしたので、確信度や影響の正負の決定方針について綿密な認識統一と調整が行われました。その後の SPM 会合では、各国の代表を交え議論しました。

表のなかで「評価無し」という白地の部分がありますが、ここは影響が見られないのではなく、ほとんどの場合、根拠となる英語論文が存在しないことを意味します。例えば、ハイマウンテンはスペイン語圏やアジアにも多く存在しますが、現地語がわかる主執筆者(LA)の助けも借りてできるだけ探したものの、査読付きの論文が未執筆の場合が多く、結果に含めることができませんでした。「評価無し」とすることで各国での対策が取りにくくなるという意見もありましたが、根拠のないデータを提示することもできず、表現方法に非常に苦労しました。

英語論文の不足は日本も例外ではありません。例えば、第 2 章の図 2.2 は山岳地域における年間平均地表気温の傾向を示していますが、日本のデータは 1 つしかありませんでした。山岳地域における気温データはきちんと計測されていると思うのですが、最新の変化についての英語論文が存在せず、反映できずとても残念でした。



出典: IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書 SPM 図 2 を和訳

図1: 海洋及び雪氷圏の変化により既に観測されている地域影響

甲斐沼: 「雪氷圏」という言葉はなじみがないのですが、具体的にどの地域を指すのでしょうか?

平林: 今回の報告書では、氷河・雪・凍土が顕著な景観的特徴を持つ地域と定義しています。ただし、極域は別の章で詳しく説明されているので、私の執筆した第 2 章には含まれていません。また日本の山岳地帯のように、冬季のみの積雪地域は逆に対象地域が多すぎてしまうため含まれず、夏季でも凍土や積雪がある地帯のみが対象となっています。

甲斐沼: 雪氷圏の変化として、「氷河・氷床の減少」、「氷で覆われた部分の減少」、「気温の増加」などが挙げられていますが、今回の報告書で、新たに分かったこと、あるいは確信度が上がった事象はありますか?

平林: IPCC の第 5 次評価報告書 (AR5) と比較すると、地域ごとの変化により焦点が置かれ、前回より多くの項目について、詳細な地域ごとの影響評価が行われました。山岳地域など水循環の上流域における変化は、下流域における水資源や農業生産に既に影響が出ている地域もあり、これらの研究結果に関する論文も引用されました。

甲斐沼: ヒマラヤなどの山岳地帯では、氷河が近年融けているとの報道がありますが、どのような影響が出ているのでしょうか？ 今後の影響も含めて教えてください。

平林: ネパールやブータンにおける氷河の融解は水資源の減少につながると危惧されていますが、それに関して、実は詳しいことはまだわかっていません。氷河が融けているのか、降水量が減っているのか、その根拠がまだ不足しています。今回の報告書で引用されている論文は、雪氷圏からの影響がわかるものに限定されています。

甲斐沼: 海洋への影響としては、「海洋熱波」、「海面上昇」、「海洋熱エネルギーの増加」、「酸性化」、「貧酸素化」などが挙げられています。我々の生活にどのような影響があるのか、具体的に教えてくださいませんか？

平林: 海面上昇の原因として、4 分の 1 程度は氷河の融解に起因します。例えば、海面が 1m 上昇したとしたら、25cm 程度は雪や氷が融けたことによるもので、残り 4 分の 3 は海洋が温まることによる膨張に起因するものです。日本は海に囲まれた島国であり、海面上昇は大きな影響があると言えます。

甲斐沼: このままでは 2100 年に海面が最大で 1.1m 上昇することですが、日本にはどのように影響するのでしょうか？

平林: 今までの研究の中で、海面上昇が 1m を超える予測がされたことはありませんでした。今回の報告書で初めて 1.1m という値が出てきたので、メディアで大きく取り上げられています。この 1.1m という数値は、正確には予測期間中の最大値です。しかし、21 世紀末の期間平均でも約 85cm は上昇すると予測されていて、実際にこれだけ上昇した場合、それだけ高潮や高波の影響が世界の各地で大きくなります。

また、日本では砂浜が減少すると言われています。河川と海洋は繋がっており、海面上昇は河川水位上昇を同時に引き起こし、河川流域での水害被害のリスクも高めます。先の台風 19 号では本川の流量の増加により、本川に接続する支流が流れ込めず逆流し、堤防決壊、氾濫等が相次ぎました。これは背水現象 (バックウォーター現象) とよばれる現象で、テレビでも大きく取り上げられ一般的に広く知られるようになりました。同じことが海洋と河川の接続部でも起こ

ると考えられます。

甲斐沼: 報告書には、貧酸素化は今後 100 年以上続くと書かれています。日本海でも貧酸素化の進行が懸念されています。今後さらに温暖化が進み低層水形成が完全に停止した場合に、約 100 年で日本深海層は無酸素化するという見積りもなされています(荒巻、2018)。そうなる生態系にも影響が現れると思われるのですが、どうでしょうか？

平林: 貧酸素に関しては、気候変動の影響のほかに、河川からの栄養塩の増加等物質循環に起因する場合もあり、どの要素がどの程度影響しているかまだ分かっていません。そのため、気候変動による影響度については確信度が低めに記載されています。

甲斐沼: 報告書の FAQ(頻繁に尋ねられる質問)の 6.1 に、「急激なリスクに対処する方法があるのか」との問いがあります。私は、この質問への回答は、究極には「排出量を減らすしかない」だと思うのですが、いかが思われますか？

平林: 海洋と雪氷圏の変化は、時間スケールという意味でも空間スケールという意味でも非常に大きく、温暖化が進行した場合の影響は深刻であることが報告されました。おっしゃるとおり、排出量を減らすことが重要だと思います。

甲斐沼: 最後に、平林先生がこれからなされたいと考えているトピックについて教えてください。

平林: 持続可能な開発目標(SDGs)と気候政策とのシナジーとトレードオフについて、もっときちんと書くべきだと考えています。今回の報告書でも幾つかの部分で試みているのですが、うまく入り切っていません。研究も少ないです。

今回この報告書に関与して、この点をもっと進めなければならないと感じました。例えば、各大陸についてシナジーとトレードオフが描けるとよいと思っています。

甲斐沼: 素晴らしいですね。とても楽しみです。本日はどうもありがとうございました。

インタビュー実施日:2019 年 10 月 28 日/場所:芝浦工業大学

第 4 章

Frequently Asked Questions (FAQs)

報告書に関する質問集 日本語版

Frequently Asked Questions (FAQs):

報告書に関する質問集 日本語版

FAQ 1.1: 海洋と雪氷圏の変化は、地球上の私たちの生活にどのように影響するのか？

海洋と雪氷圏は地球上の気候と気象を調整し、食料と水を供給し、経済・貿易・輸送を支え、文化を形成し、私たちの福祉に影響を与える。地球の海洋と雪氷圏の最近の変化の多くは人間の活動の結果であり、すべての人の生活に影響を及ぼす。温室効果ガス(GHG)の排出を大幅に削減すれば、数十億人の人々への悪影響を減らし、環境の変化に適応しやすくなる。教育を改善し、科学的知識と先住民の知識及び地域の知識を組み合わせることで、コミュニティが今後の課題にさらに取り組めるようになる。

海洋と雪氷圏(地球の凍結部分の総称)は、地球の気候と生命を与えるプロセスに不可欠である。

海洋と雪氷圏の変化は自然に発生するが、現在起こっている地球規模の変化の速度・大きさ・広がり、数千年以上にわたって観察されてきたものとは異なっている。過去数十年間に観察された海洋と雪氷圏の変化の大部分は、地球の気候に対する人間の影響の結果であることを示す証拠がある。

私たちは誰もが、気候や天気を規定している海洋及び雪氷圏の役割から恩恵を受けている。海洋は、産業革命以来、人間が化石燃料の燃焼から放出した二酸化炭素の約3分の1と、地球システム内の余剰熱の大部分(90%以上)を吸収してきた。このように海洋は、人類や生態系が陸上で経験する温暖化を遅らせている。雪と氷の反射面は、地球が吸収する太陽のエネルギー量を減らす。この効果は雪と氷が融けるにつれて減少し、北極圏全体の温度上昇の増幅に寄与する。また、海洋と雪氷圏は、海から来る雨と雪、そして山域・極域の雪と氷河からの融解水によって、水資源を提供することで生命を支えている。

現在20億人近くが沿岸部に居住し、約8億人が海拔10m未満の土地に住んでいる。海洋は、沿岸住民の食料・経済・文化・福祉を直接支えており(FAQ 1.2を参照)、さらに多くの人々の生計は、食料・貿易・輸送を通じて海と密接に結びついている。魚介類はヒトの食事の非穀類タンパク質の約17%を占め、国際的な輸出入の少なくとも80%が海運を利用している。しかし海洋は、沿岸住民とインフラ、特に低平地沿岸域にハザード(危険)ももたらす。これらの地域の人々は、ますます熱帯低気圧・海洋熱波・海面水位の上昇・沿岸洪水・地下水資源への塩水侵入にさらされている。

高山域と北極圏では、約 7 億人が雪氷圏と密接に関わりながら生活している。多くの先住民を含むこれらの人々は、生計・食料と水の安全保障・移動や輸送・文化を、雪や氷河、及び海氷に依存している(FAQ 1.2 参照)。また彼らは、決壊洪水・地滑り・海岸浸食など雪氷圏の変化に伴うハザード(危険)にもさらされている。極域及び高山域の変化は、世界の他の地域の人々にも広範な影響を及ぼす(FAQ 3.1 参照)。

気候システムの温暖化は海面水位の上昇につながる。氷河と氷床の融解によって海水量が増加する上に、海洋が吸収する熱により海が膨張して面積が大きくなるからである。現在の海面は、1900 年よりもすでに約 20 cm 高くなっている。海洋システムの応答が遅いため、海面は今後も数世紀から数千年にわたって上昇し続ける。地球温暖化が止まっても、氷床の融解と海洋の昇温を止めるには数世紀以上かかることになる。

北極圏と高山域での温暖化の進行は、氷河とグリーンランド氷床の急激な表面融解を引き起こしている。永久凍土の融解は、土壌・人間のインフラ・北極沿岸を不安定にし、大量のメタンと二酸化炭素が大気中に放出されることによって、気候変動をさらに悪化させる可能性がある。北極圏の海氷が広範囲に消失したことで新しい輸送ルートが開けているが、同時に重要な種の生息地が減少し、先住民文化の生計に影響が出ている。南極では、氷が暖かい海水と直接接している場所で氷河と氷床が急速に消失し、海面水位の上昇にさらに寄与している。

海洋生態系は、温暖化・貧酸素化・酸性化という気候変動に起因する 3 つの主なストレス要因によって世界的に脅かされている。海洋熱波は表層海のいたる所で発生しており、海が温まるにつれて、より頻繁に、より激しくなっている。これらは、例えばサンゴ礁や魚の個体群などを危険にさらす病気や大量死を引き起こしている。海洋熱波は、陸上で発生する熱波よりもはるかに長く継続し、温水域から離れることができない生物にとって特に有害である。

海洋が温暖化すると、海が保持できる酸素の量が減るだけでなく、海洋が層化する傾向がある。その結果、海洋生物を支えるために必要な酸素が深海へ運ばれる量が少なくなる。また、海洋に吸収された溶存二酸化炭素が水分子と反応すると、海水の酸性度が高くなる。それにより、炭酸塩鉱物で作られるサンゴ・甲殻類・プランクトンなどの海洋生物の貝殻や骨格が溶解されてしまう。これらの気候変動によるストレス要因は、乱獲・過剰な栄養負荷(富栄養化)・プラスチック汚染といった他の人為的影響と並行して発生している。海洋への人間の影響が弱まらずに続く場合、海洋の健全性とサービスの低下によって、世界経済の損失額は 2050 年までに 4,280 億米ドル/年、2100 年までに 1 兆 9,790 億米ドル/年に上ると予測されている。

海洋と雪氷圏の変化による将来的リスク及び影響の速度と強度は、今後の GHG 排出量に大き

く依存する。排出量を抑制すればするほど、海洋と雪氷圏の変化を遅らせ制限することができ、将来的リスクと影響が軽減される。しかし人類は、今後数世紀にわたって続く海面水位の上昇など、過去の排出によって引き起こされる変化の影響にもさらされている。教育を改善し、科学的知識と共に地域の知識や先住民の知識も利用すれば、コミュニティが避けられない変化に適応し、今後の課題に対応するのに役立つ状況固有の選択肢を策定しやすくなる。

FAQ 1.2: 海洋と雪氷圏の変化は、持続可能な開発目標(SDG)の達成にどう影響するのか？

海洋と雪氷圏の変化は、国連の SDGs を達成する能力に影響を与える。SDGs の進展は、将来の海洋と雪氷圏の変化を軽減する気候変動対策や、避けられない変化への適応を支援する。SDGs と、環境変化へのコミュニティの適応を支援する対策との間にはトレードオフがあるが、GHG の排出を制限すれば、効果的な適応と持続可能な開発のための選択肢が増える。

SDGs は、人間、地球及び繁栄のための行動を支援する目的で、2015 年に国連によって採択された(FAQ 1.2、図 1)。17 の目標と 169 のターゲットは、2030 年までに貧困と飢餓に終止符を打ち、地球を保護し、ジェンダー及び社会的・経済的不平等をなくすことを目指している。

SDG 13(気候変動に具体的な対策を)は、気候条件の変化が世界的な懸念事項であることを明確に認識している。気候変動はすでに地球の海洋と雪氷圏に広範な変化を引き起こしている(FAQ 1.1)。これらの変化は、食料・水・健康の安全保障に影響を与えており、SDG 2(飢餓をゼロに)、SDG 3(すべての人に健康と福祉を)、SDG 6(安全な水とトイレを世界中に)及び SDG 1(貧困をなくそう)の達成に影響を及ぼしている。気候変動が地球の海洋と雪氷圏に与える作用は、SDG 14(海の豊かさを守ろう)と SDG 15(陸の豊かさを守ろう)の環境目標にも影響を及ぼし、他の多くの SDGs にもさらなる影響をもたらしている。

SDG 6(安全な水とトイレを世界中に)は、海洋と雪氷圏の変化による影響を受ける。山岳氷河が融解すると、当初は水量が増加するが、氷河の縮小が進むにつれて、氷河から供給される、何百万人も山岳住民や下流のコミュニティ・都市にとって不可欠な水の量も減少し続ける。これらの人々は高山域からの水供給に、飲用・衛生・灌漑、そしてエネルギー(SDG 7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに)も依存している。水の安全保障は、海水温の上昇によって引き起こされる降雨の規模と季節性の変化によっても脅かされており、一部の地域では激しい嵐や洪水のリスクが、他の地域ではより深刻または頻繁な干ばつのリスクが高まっている。それ以外の影響としては、現在進行中の海面水位の上昇により塩水がさらに内陸に侵入し、一部の沿岸住民の飲料水と灌漑用水が汚染されていることなどがある。このような脅威に対処するには、水供給の信

頼性向上を目的とした、雨・融解水・河川流量を管理する新たなインフラが必要になる可能性がある。これらの行動によって洪水のリスクならびに異常降雨や氷河融解による決壊に起因する健康への悪影響が軽減すれば、SDG 3(すべての人に健康と福祉を)にも有益に働くと考えられる。

気候変動が海洋と雪氷圏に与える影響は、SDG 2(飢餓をゼロに)で取り上げられている食料安全保障の進展にも多くの意味を持つ。海洋温暖化による降雨パターンの変化は、一部の地域では乾燥を促進し、他の地域にはより多くの(またはより激しい)降雨をもたらす。山岳地域では、確実に生育する作物と家畜の生産維持において、これらの変化がさまざまな課題をもたらしている。将来の気候条件によりよく適応する作物や家畜の品種開発の面で適応の機会がいくつか見つかるかもしれないが、この対応オプションは気候変動の急速な進行という課題に直面することになる。北極圏では、非常に急速な温度上昇・海氷の縮小・積雪被覆の減少・永久凍土の劣化によって、重要な食料源の生息地と移動パターンが制限されている(SDG 2 飢餓をゼロに)。これらの食料源にはトナカイや海洋哺乳類(SDG 15 陸の豊かさを守ろう;SDG 14 海の豊かさを守ろう)が含まれ、北部先住民コミュニティの多くが依存している主食の狩猟機会の減少を招いている。

気温の上昇、ならびに海洋の養分・酸性度・塩分の変化は、SDG 14(海の豊かさを守ろう)を様変わりさせている。一部の魚種の量と分布が変わり、古からの漁労による漁獲が変わる一方で、魚群の生息範囲が移動し、新たな沿岸域及び外洋域で漁獲できるようになる可能性がある。

海洋の変化は、小島嶼開発途上国や沿岸の都市及びコミュニティにとって懸念事項である。SDG 2(飢餓をゼロに)に関連して、海産物供給量の減少とそれに関連するリスクのみならず、SDG 3(すべての人に健康と福祉を)、SDG 8(働きがいも経済成長も)、SDG 9(産業と技術革新の基盤をつくろう)、SDG 11(住み続けられるまちづくりを)を含む複数の SDGs と関連する形で、そこに住む人々の生活・生計・福祉も脅威にさらされている。例えば、海面水位の上昇と海洋の温暖化は、沿岸の住宅やインフラの浸水・熱帯暴風雨の激化・観光業など既成産業の衰退・文化遺産やアイデンティティの喪失などを引き起こすおそれがある。コミュニティや沿岸インフラが改善すればこれらの変化に適応しやすくなる。また、保健セクターや他の救急サービスによる災害対応がより効果的かつ迅速になれば、それらの影響を受けた人々を支援できる。ある状況においては、重要なサービス(場合によってはコミュニティ)を移転することが最適な対応であったり、一部の人々にとっては、故郷からの移住が唯一の実行可能な対応であったりすることもある。

革新的な(transformative)適応と緩和が推進されなければ、気候変動によって 2030 年の SDGs 達成に向けた進展が損なわれ、気候変動に強い開発経路(CRDPs)を長期的に実施することがより困難になる可能性がある。地球温暖化の軽減(緩和)が、海洋と雪氷圏の変化の速度と範囲を制限し、効果的な適応と持続可能な開発のための選択肢を増やす最良の可能性を提

供する。SDG 4(質の高い教育をみんなに)、SDG 5(ジェンダー平等を実現しよう)、SDG 10(人や国の不平等をなくそう)が進展すれば、海洋と雪氷圏の変化に対する人々のリスクの要素となっている脆弱性が緩和される。また SDG 12(つくる責任つかう責任)、SDG 16(平和と公正をすべての人に)、SDG 17(パートナーシップで目標を達成しよう)は、持続可能な開発の達成に必要な適応と緩和の規模を推進するのに役立つ。海洋と雪氷圏の避けられない変化への適応をサポートする社会的・物理的インフラに投資すれば、SDGs 達成のためのイニシアチブに人々が参加できるようになる。現在及び過去の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の取り組みでは、CRDPs の特定に重点が置かれてきた。適切な投資に支えられた適応・緩和戦略を実施すること、ならびに気候変動ハザードにさらされる頻度と脆弱性が高まることに対して SDG イニシアチブが貢献できるという可能性を理解した上で、CRDPs で特定された適応・緩和戦略を適切な投資によって実施することは、SDGs の進展の基礎を作ることができる。



FAQ 1.2、図 1:国連 2030 年持続可能な開発目標(SDGs)

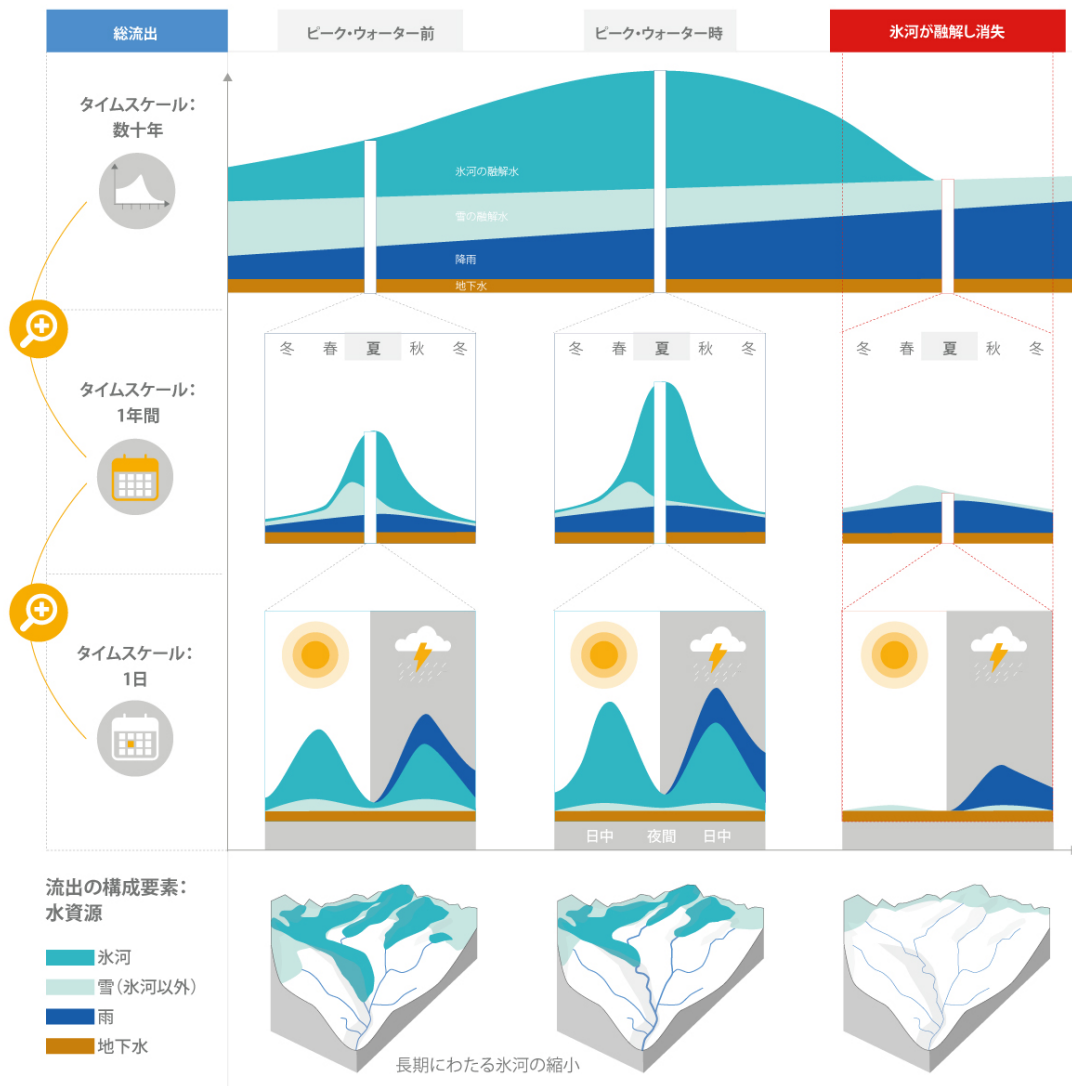
FAQ 2.1: 氷河の縮小は下流域への河川流出にどのように影響するのか？

氷河は、農業用水や飲料水など、氷河の近くと氷河から離れた地域両方の人間コミュニティを支える水を供給している。気温が上昇すると山岳氷河が融解し、水の利用可能性が変化する。氷河が溶けると、当初は氷河から離れた下流域への水量が増加するが、氷河の縮小が進むにつれて水供給量は減少し、農場や村・都市は貴重な水資源を失うおそれがある。

氷河融解は河川流出に影響を及ぼす可能性があり、氷河の近くだけでなく、山岳地域から遠く離れた人間コミュニティが利用できる淡水資源にも影響する。温暖化した気候に対応して氷河が縮小すると、長期氷河貯留から水が放出される。氷河の融解速度が速く、通常よりも多くの水が氷河から下流域に流れるため、当初は氷河流出量が増加する。しかし数年または数十年後に「ピーク・ウォーター」と呼ばれる転換点が訪れ、それ以降は氷河流出量、つまり下流への水量が減少する(FAQ 2.1; 図 1)。氷河からのピーク・ウォーター流出量は、当初の年間流出量を50%以上上回る可能性がある。この余分な水は、水力発電や灌漑などさまざまな用途に活用できる。しかし転換点を超えると、氷河が縮小し続けるにつれて追加の水量も着実に減少し、最終的には氷河が消失したり、氷河が存続できる寒冷域の高地まで後退した時点で時点で止まる。その結果、下流のコミュニティはこの貴重な追加の水源を失うことになる。河川流出の総量は、主に降雨・融雪・地下水・蒸発量によって決まる。

さらに氷河の減少によって、氷河からの水が集まる河川で最も多くの水を利用できる時期や時間も変わる可能性がある。中緯度または高緯度では、冬の雪がなくなり氷河の氷が融け続ける夏に氷河流出量が最大になり、一日のうちでは、気温と日射が最大になる日中に最も多くなる(FAQ 2.1、図 1)。ピーク・ウォーターが起きると、氷河の融解速度がより速くなり、一日の最大流出量も大幅に増加する。アンデス山脈の一部などの熱帯地域では、季節による気温の変動が小さく、年間を通じた氷河流出の量と時期は主に雨季と乾季に左右される。

氷河が下流域での河川流出量に与える影響は、氷河からの距離によって決まる。氷河の近く(例:数 km 以内)では、当初は年間氷河流出量が増加し、ピーク・ウォーターを境に減少に転じる。これが水供給量に大きな影響を及ぼし、氷河からの一日の最大流量が増えることで洪水が発生するおそれがある。氷河から離れた地域では、氷河縮小が総河川流出量に与える影響は小さいか無視できるほどである。しかし山岳地域の氷河からの融解水は、河川流出量が少なくなる暑く乾燥した年や季節には重要な水源になる。またそれによって、氷河から数百 km 離れた地域でも、年ごとの総河川流出量の変動が小さくなる。降雨・蒸発・地下水・融雪など水循環の他の要素は、気候の変化に伴う氷河流出量の変化の影響を相殺または強化する。



FAQ 2.1、図 1: 大規模な氷河被覆(例:>50%)のある河川流域からの氷河縮小に伴う流出量変化の概略図。氷河・雪(氷河以外)・雨・地下水など異なる水源からの相対流出量を表示。タイムスケールは以下の 3 つ: 流域全体からの年間流出量(一番上)、一年間の流出量変動(中央)、夏の晴れた日と雨の日における一日の流出量変動(一番下)。ピーク・ウォーターの前、最中、後で流出量の季節変動と日変動が異なっていることに留意。氷河における当初の負の年間質量収支は、最終的に氷河が融解して消失するまで負の度合いが増大する。本図は概略図であるため永久凍土は対象にしておらず、各水源の正確な分配は河川流域によって異なる。

FAQ 3.1: 極域の変化は世界の他の地域にどのように影響するのか？

北極と南極の気候変動は、極域以外の地域に住む人々に以下の 2 つの形で影響を及ぼす。1 つ目は、極域の物理的変化と生態的变化が、世界全体に社会経済的影響をもたらすことである。2 つ目は、北極と南極の物理的変化が、地球規模の気候と海面水位にとって重要なプロセスに影響を与えることである。

社会と経済に対するリスクの中で特に重要な側面は、食料供給・輸送・非再生資源へのアクセスである。極域海洋での漁業は地域的及び世界的な食料安全保障を支えており、世界中の多くの国の経済にとって重要である。しかし気候変動によって北極と南極の海洋生息地が変化し、極域の種や生態系が物理的変化に耐えたり適応したりする能力に影響を及ぼしている。このことは、いつ、どこで、どの程度の魚が取れるかを左右する。影響は、地域によって、または気候変動の度合いや人々の対応の効果によっても異なる。一部の極域漁業では最も進んだ管理が行われているが、科学者たちは、既存の予防的かつ生態系ベースの管理アプローチを修正し、海洋生態系や漁業への気候変動による影響に対応できるようスコープを拡大することを模索している。

北極圏を通る新たな輸送ルートは、スエズ運河やパナマ運河を通る従来の輸送路よりも距離が短いためコスト削減につながる。船舶の交通量はすでに増加しており、海水面積がさらに減少すると北極航路へのアクセスが向上するため、今後数十年間でより実現可能になると予測されている。北極海における海運の増加は、世界貿易、極北諸国、そしてこれまでの海運回廊と強く結びついた経済に社会経済的・政治的影響を及ぼし、同時に北極圏の環境リスクも高めている。また北極海の海水面積が減少すれば、沖合の石油資源や陸上での資源抽出をサポートする港へのアクセスが拡大する。

極域は、いくつものプロセスを通じて地球規模の気候に影響を与えている。春の雪と夏の海水面積が減少すると、地表面がより多くの熱を吸収する。北極圏での変化(主に海水の消失)が継続すると、中緯度の天候に影響を及ぼす可能性があるという証拠が増えている。北極圏の気温が上昇するにつれて北部地域の永久凍土の炭素貯蔵量が減少し、二酸化炭素やメタンが地表から大気に放出されると地球温暖化への寄与が大きくなる。

極域の氷床と氷河の融解は海面水位の上昇を引き起こし、沿岸域やその大きな人口と経済に影響を及ぼす。現在、グリーンランド氷床(GIS)と極域氷河は、南極氷床(AIS)よりも海面水位の上昇に大きく寄与している。しかし、AIS では氷の消失が加速し続けている。浮遊氷棚の下の融解が進んでいることが主な原因で、それによって氷河の流れが加速している。21 世紀後半以降の南極からの氷の消失量を予測するのは依然として困難だが、将来の海面水位の上昇に大きく

寄与すると予想される。

南極大陸を取り囲む南極海は、深海の水が表層まで上昇するという観点から世界的に主要な区域である。表層で冷たく高密度になった水は、再び深海へと戻っていく。それによって人間が作り出した大量の熱と溶存炭素が数十年から数世紀以上にわたって貯蔵され、大気中の地球温暖化の速度を遅らせている。この海洋循環の強度が将来的にどう変化するかについては、これまでのところ限られた確実性でしか予測することができない。

FAQ 4.1: 海面水位の上昇が避けられないことは、沿岸域のコミュニティにどのような課題をもたらし、コミュニティはどのように適応できるのか？

世界的な気候の変化に伴い、海面の上昇は、高潮・暴風雨・洪水と相まって、沿岸と島のコミュニティをますます危険にさらしている。堤防や護岸を建設したり、マングローブやサンゴ礁など自然の特徴を維持したりすることで、それらのリスクから守ることができる。また、海を埋め立てたり、建物を洪水に適応させたりすることも可能である。ただし、すべての対策には限界があり、限界に達した場合は、最終的に移転を余儀なくされることもある。今日行う選択は、沿岸の生態系やコミュニティが将来の海面水位の上昇(SLR)にどう対応するかに影響を与える。GHG 排出量を削減すれば、リスクが軽減されるだけでなく、適応オプションも増えることになる。

世界平均海面水位(GMSL)は上昇しており、今後数世紀にわたって上昇し続ける。多くの人々、資産及び重要な資源は世界中の低平地沿岸域に集中しているため、持続可能な開発に向けた野心が危険にさらされている。多くの沿岸域コミュニティは海面水位の上昇の影響を検討し始めており、極端現象(例えば、高潮・熱帯低気圧)による沿岸洪水・海岸浸食・塩害など、海面水位の上昇により悪化する沿岸域ハザードに対処するための対策が講じられている。しかし多くの沿岸域コミュニティは、今日の極端な海面水位(ESLs)にまだ十分適応できていない。

海面水位の上昇に関する科学的証拠は明白である。世界平均海面水位は、1901年から1990年の間に年間1.5 mm 上昇し、2005年から2015年の間には年間3.6 mm に加速した。世界のGHG 排出が緩和されなければ(RCP8.5)、2100年までに0.61~1.10 m に上昇する可能性があり、2 m 以上上昇する可能性も排除できない。またGHG 排出レベルや南極氷床(AIS)の応答によっては、2300年までに3 m 以上上昇する可能性もある(いずれも不確実性が高い)。排出量緩和の取り組みが非常に効果的だったとしても、前世紀にはまれであった極端な海面水位(ESL 事象)は2100年以前に一般的になり、2050年以前でも多くの場所で見られるようになる。野心的な適応を行わなければ、沿岸の暴風雨や極端な高潮のようなハザードの複合的影響によって、低平地(low-lying)沿岸域での洪水の頻度と深刻度が劇的に増大する。

海面水位の上昇や適応の文脈は地域や地方によって異なるため、海面水位の上昇に関連するリスクを緩和するには現地の実情に応じてさまざまな形を取ることになる。堤防や護岸のような「ハードプロテクション」は、2m 程度までの海面水位の上昇には効果的にリスクを軽減できるが、いずれ限界に達するのは避けられない。この種の対策は、多くの沿岸都市や一部の小さな島々のように、人口密度が高い低平地沿岸域では利益がコストを上回るが、一般的に、貧しい地域ではそれを講じる財政的余裕がない。マングローブ・海草藻場・サンゴ礁など健全な沿岸生態系を維持すると、「ソフトプロテクション」や他の方策が可能となる。例えば、海岸線の建築物を高くすることによって海面水位の上昇に「適応」することができる。また、土地をかき上げ(upwards building)したり、海域を埋め立てたり(outwards building)することで海から土地を取り戻すことができる。リスクが極めて高く効果的に軽減できない沿岸地域の場合、海岸線からの「後退」がリスクを排除する唯一の方法であることもある。沿岸域ハザードや海面水位の上昇にさらされている地域では、新規開発を避けることでさらなるリスクを回避できる。

保護対策や適応・事前措置を講じる財政的余裕がない、またはそのような対策がもはや実行不可能あるいは効果的ではない場合は後退が不可避である。低地の島に住む数百万人の人々がこの可能性に直面している。それには、小島嶼開発途上国(SIDS)や、人口密度は高いが集中的に開発されていないデルタ地帯、沿岸部の農村・町、そして海氷の融解や前例のない気象変化にすでに直面している北極圏の人々が含まれる。それによって独特の文化や生活様式は壊滅的な影響を受ける。このように海面水位の上昇に関する社会的選択を行う場合、厳しいトレードオフは避けられず、困難ではあるが、公正かつ公平な結果をもたらすプロセスを制度化することが極めて重要である。

海面水位の上昇にどのように対応するかについて現在行われている選択は、将来どの程度、海面水位の上昇にさらされ被害を受けるかの道筋に大きな影響を与える。協調的な排出削減が遅れると、海面水位の上昇が加速するにつれてリスクも徐々に増加する。従って、地球規模の気候レジリエンスと持続可能な開発の展望は、沿岸域の国・都市・コミュニティが、GHG の削減や海面上昇への適応に関し、緊急かつ持続的で地域に適した行動をどうとって行けるかに大きく依存している。

FAQ5.1: 海洋生物は気候変動の影響をどのように受けているのか？

気候変動は、海洋生態系・経済・社会に大きな影響を及ぼしている。特に海洋の自然資源に依存して生きているサンゴ礁のような海洋生物や、漁業など海洋における人間活動にとって深刻な脅威となっている。地球温暖化を 1.5°C 未満に抑えることで、気候変動によるリスクを軽減することができる。

北極から南極まで、また海面から深海の深遠まで、地球の海の大半の生物は人為的な気候変動による昇温をすでに経験している。多くの場所では辛うじて測定できる程度の上昇かもしれないが、それ以外の場所、特に海表面近くでは、温暖化によって海洋の生物・植物・微生物がすでに劇的な影響を受けている。海水中での化学的変化と密接に関連していることから、利用可能な酸素の量が減少し(海洋貧酸素化と呼ばれるプロセス)、海水中の溶存二酸化炭素の増加によって海洋酸性化が引き起こされている。乱獲や汚染など、気候以外の人間の活動による影響も偏在している。これらのストレス要因とその複合的影響は、海洋のほぼすべての生物・食物連鎖・生態系に有害である可能性が高く、一部はより大きなリスクにさらされている(FAQ5.1、図1)。将来の気候変動を抑えるために十分な行動を取らない限り、人間社会が受ける影響は深刻なものになる。

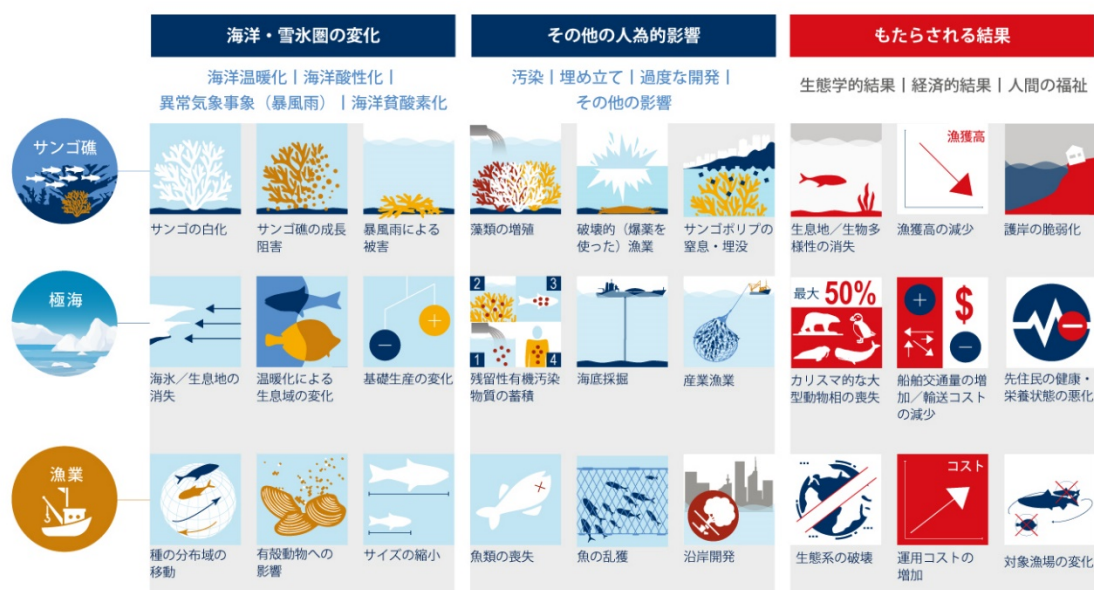
暖水性サンゴ礁は多種多様な海洋生物の生息地であり、熱帯における漁業や他の海洋システム、そして人間システムにとっても極めて重要である。暖水性サンゴ礁は、水温が通常範囲より 1°C~2°C 高い状態で持続すると死亡率が高くなるため特に脆弱である。2015 年から 2017 年の間に多くの熱帯の海でそのような状況が発生し、サンゴが依存している藻類を放出してしまったことで大規模なサンゴの白化が起きた。白化によって大量のサンゴが死亡すると、サンゴ礁が回復するまで通常少なくとも 10~15 年かかる。気候変動の他の影響には、海面水位の上昇・酸性化・サンゴ礁の侵食などがある。一部のサンゴ種は他の種よりも耐性があり、影響も区域によってさまざまだが、将来の気候変動によってサンゴ礁がさらに劣化することは不可避であると考えられる。そうになると、多くの島や低平地の沿岸の防護が失われたり、サンゴ礁が育んでいる高度な生物多様性が喪失されたりするなど、海洋・沿岸生態系も深刻な影響を受けることになる。サンゴの生息域は深海や低温の海域にもあり、サンゴ礁の影響を理解するにはさらなる研究が必要である。冷水性サンゴはより低温の環境にあるため白化のリスクにはさらされていないが、海洋酸性化や他の海洋変化によって弱体化したり成長が阻害されたりする可能性がある。

魚など移動性の種は、より好ましい地域に移動することで気候変動に対応でき、好ましい水温または酸素レベルを求めて極地や深海に移動する。そのため、さまざまな気候変動シナリオのもとで予測される将来の総漁獲量の減少は、摂氏 1°C の昇温ごとに約 4% (最大 340 万トン) という緩やかなものとなっている。ただし地域差が激しく、気候変動のレベルが高い熱帯地域では、今

世紀末までに現在の漁獲レベルの半分が失われる可能性がある。一方、極地の漁獲レベルはわずかに増加するかもしれないが、現在乱獲や他のストレス要因によって激減している魚群が、モデルで想定されるように極域に移動できない可能性があるため、増加の程度は不確実である。

極海では、海氷上または海氷下での生活に適応した種が、気候変動による生息地喪失によって直接的な脅威にさらされている。北極海と南極海には、微小プランクトンから魚類、オキアミ、海底性無脊椎動物、さらにはクジラ、アザラシ、ホッキョクグマ、ペンギンに至るまで、豊かで多様な生物が生息している。海水温度の上昇に伴ってより暖水性の種の生息範囲が拡大すると、現在の複雑な相互関係が変化する可能性がある。また酸性化が有殻動物に及ぼす影響や、氷がなくなった海域での人間活動の増加(例:船舶輸送)により、これらの影響が増幅するおそれがある。

気候変動の影響には、極域での潜在的漁獲レベルの増加など人間にメリットをもたらすものもあるが、そのほとんどは、生態系や経済、社会、特に天然資源に大きく依存する場合に破壊的結果をもたらす。ただし国際社会が一丸となり、政府間の取り組みによって世界の地球温暖化を1.5°C以下に制限すれば、気候変動の影響を大幅に緩和することができる。



FAQ5.1、図 1: この FAQ で論じられた、サンゴ礁・極海・漁業に対する気候変動(温暖化・酸性化・暴風雨・貧酸素化)の影響とそれがもたらす結果、ならびに人間が及ぼす影響の概略図。

FAQ 6.1: 気候変動に関連する海洋と雪氷圏の急激な変化のリスクにどのように対処できるのか？

GHG 排出量を削減すると、極端現象の発生や急激な変化が起きる可能性を低下させることができる。急激な変化は人間のタイムスケールでは元に戻せない可能性があり、ティッピング・ポイント(転換点)として自然のシステムに新たな状態をもたらす。コミュニティが気候変動のこのような影響から生じるリスクを軽減するには、自らを守るか、新たな環境に適応するかの二択である。最後の手段として影響を受けた地域から撤退することも可能である。残存するリスクの管理には、多様な専門知識を活用し、さまざまな対策を考慮するガバナンス体制が最も適している。

気候変動は、極端現象に影響を及ぼし、海洋と雪氷圏の急激な変化を引き起こす可能性があるとして予測されている。いずれの現象も、地球温暖化や海面水位の上昇(SLR)など気候変動による他の遅発性の影響を増大させるおそれがある。加えて、急激な変化がティッピング・ポイント(転換点)となり、急激な変化が起こる前の状態に戻ることなく、海洋や雪氷圏、さらにそれらの生態系や気候システム全体に新たな状態をもたらす可能性もある。

海洋で急激な変化が起きる可能性は、全地球の海洋循環の重要な要素である大西洋子午面循環(AMOC)の遮断と関連している。AMOC の減速は世界中に影響を及ぼし、サヘル地域で降雨が減少して作物生産が妨げられたり、アジアの夏季モンスーンが弱まったり、大西洋周辺で地域的海面水位の上昇が増大したり、ヨーロッパで冬の暴風雨が増加する可能性がある。西南極氷床(WAIS)の崩壊は、地球規模の気候のティッピング・ポイント(転換点)の1つとみなされており、棚氷が崩壊して氷が海に流れ込むとそのような事象が引き起こされる可能性がある。一般的に、急激な気候現象が発生する可能性を評価するのは困難だが、それらは物理的に説明できる現象であり、生態系や社会に大きな影響を与え、不可逆的な結果を招くおそれもある。

GHG 排出量を削減することは、地球温暖化を許容可能なレベルに抑制し、極端現象や急激な変化の発生を減少させるための主要な対策である。また、緩和に加えて、多様な対策やリスク管理の戦略も講じれば、将来のリスクへの適応を支援することができる。急激な変化に関連する将来のリスクは、地域の実情や事象そのものが持つさまざまな特性に強く影響され、状況に応じて異なる進展を見せる。適応の際の要点の1つは、極端現象が既知の影響を単純に増幅するのか、あるいはティッピング・ポイント(転換点)と関連した全く新たな状況を引き起こすのかという点である。もう1つの要点は、極端現象または急激な変化が他の事象とは無関係に単体で起きるのか、他の事象と結びついて連鎖反動的に起きるのか、あるいは複数の事象が同時に起きる複合的リスクの一部として発生し、影響を増幅し合う可能性があるのかという点である。それらによる影響は、極端現象の発生そのものによるものだけでなく、現象にさらされる程度の高まりや脆弱性の変化によって、食料・水・エネルギー供給の確保の低下を伴うなど、大きく悪化する

ることとなる。

海洋と雪氷圏における極端現象と急激な変化を効果的に管理するには、利用可能なあらゆるリソースとガバナンスアプローチを用いる必要があり、具体的には、土地利用と空間計画、先住民の知識と地域の知識などが挙げられる。また生態系へのリスク管理には、生態系の保全・持続可能な資源利用・生態系サービスの価値の認識などが含まれる。さらに、地域からの撤退、新たな状態への適応、防護という3つの主なアプローチがあり、単独または組み合わせて実施することで、コミュニティがこれらの現象に適応することを可能にする。すべてに利点と制約があり、実現可能かどうかはそれぞれの状況やコミュニティの適応能力によって決まる。ただし、複合的事象がもたらすより大きなリスクへの対処には、多様な戦略と制度的変革の利点を統合した革新的ガバナンスのみが有効である。リスク削減アプローチを制度的慣行と包摂的意思決定に組み込み、政府機関その他ステークホルダーの諸能力を活用すれば、極端現象を管理しやすくなる。また生活様式や生計手段を変えることで、新たな状態への適応をさらに支援できる可能性がある。

* 本版は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による Frequently Asked Questions(©IPCC)の IGES 仮訳である。IGES は、翻訳の正確性について万全を期しているが、日本語版と原典の英語版との間に矛盾がある場合には、英語版の記述・記載が優先する。

「IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書」ハンドブック
背景と今後の展望

2019 年 12 月発行

公益財団法人 地球環境戦略研究機関(IGES)
〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口 2108-11
Tel: 046-855-3700 / Fax: 046-855-3709
E-mail: iges@iges.or.jp
URL: <http://www.iges.or.jp/>

IGES は、アジア太平洋地域における持続可能な開発の実現を目指し、実践的かつ革新的な
政策研究を行う国際研究機関です。

Copyright © 2019 Institute for Global Environmental Strategies. All rights reserved.

