

# 海洋・雪氷圏特別報告書 (SROCC) を読んで

村井重夫\*

## 1章 報告書の枠組みと文脈

2013年にIPCCから気候変動に関する第5次評価報告書(AR5)<sup>1)</sup>が発表されており、2021年には第6次評価報告書が発表される予定である。この間に第6次評価書<sup>2)</sup>に先駆けて、「1.5℃」と「土地利用」と「海洋・雪氷圏」に関する3つの特別報告書が発表された。図1の「海洋・雪氷圏特別報告書」<sup>3)</sup>(SROCC: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)(2019年)では、高山・極地・海面上昇・海洋生態系等に関して、観測された変化と影響・予測される変化とリスク・海洋や雪氷圏に対する対策について評価し、政策決定者へのメッセージを発信している。2015年に締結されたパリ協定の目標「気温上昇を1.5℃に抑える努力を追求する」に応える有用な評価になっている。

SROCCが対象にする海洋と雪氷圏の構成要素は図2に示すような熱・水・CO<sub>2</sub>の移動を通した

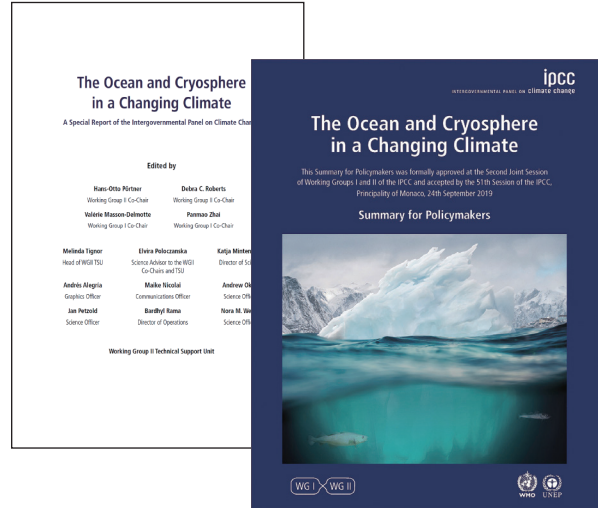


図1. 海洋・雪氷圏特別報告書(SROCC)(2019年)  
(左:全文表紙, 右:政策決定者向け要約の表紙)

地球システムの変化である。SROCCでは、観測による影響把握とモデルによる予測を行い、必要な対策を提言している。予測では、将来の温室効果ガスの代表的濃度経路(RCP: Representative Concentration Pathway)を主にRCP2.6とRCP8.5

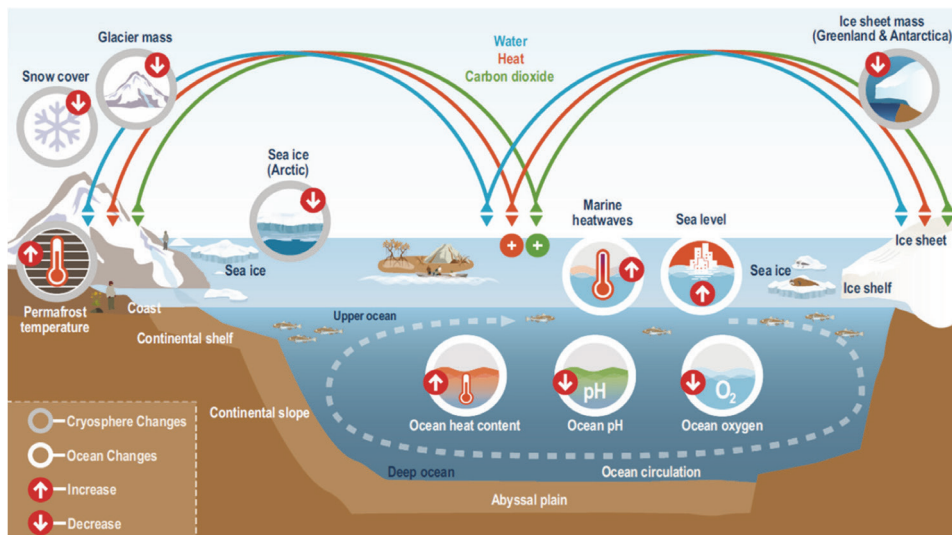


図2. 海洋・雪氷圏の主な構成要素と変化<sup>4)</sup>  
熱・水・CO<sub>2</sub>の移動を通した地球システム。

\*元地球環境産業技術研究機構(RITE)CO<sub>2</sub>貯留研究グループリーダー

のケースについて想定し、気候変動を評価している。RCP2.6は2100年の温暖化を2°C以下にする確率が3分の2になるケース、RCP8.5は気候変動対策なしで現状の温室効果ガスが継続的に排出されるケースである。前者では2100年に地球大気の上層からの放射強度が1750年基準で2.6 Wm<sup>-2</sup>増えることを、後者では8.5 Wm<sup>-2</sup>増えることを想定し、第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project, Phase5)で計算した結果や海洋-大気結合モデル(AOGCM)による計算成果などを使って、海洋や雪氷圏の気候変動を評価している。

## 2章 高山地帯の気候変動

高山地帯では、氷河の減少・積雪の範囲や期間の減少・永久凍土の温度上昇等が観察されている。例えば、2006-2015年に山岳地域の氷河は年間123 ± 24Gt減少した。21世紀の氷河の減少を3つのRCPのケースについて予測したCMIP5の計算結果の一部を図3に示す。図3(a)は世界の氷河全体の質量が2015年と比較して2100年までに相対的に何%に減少するかを示している。想定している気候変動はRCP2.6, RCP4.5, RCP8.5のケース、用いた氷河モデルは4~6種類、モデル計算の数は46~88、3色の線が平均値、濃淡の色が標準偏差±1である。図中にはこれらの氷河の融解によって生じる2015~2100年の海面上昇等価量(SLE)を3つのケースについて示している。図2(m)はカナダと米国の西部地域の氷河についての結果である。

2100年までの世界の氷河の質量減少は、RCP2.6では18%、RCP8.5では36%であり、カナダと米国西部では60%と85%である。南極とグリーンランド以外の地域では質量減少の比率は大きい、海面上昇への寄与は小さい。ただし、河川の流れには影響を与えている。

高山地帯の積雪は、RCP8.5のケースでは2081~2100年までに2005年対比50~90%の減少が、また、永久凍土の面積は69 ± 20%の減少が予測

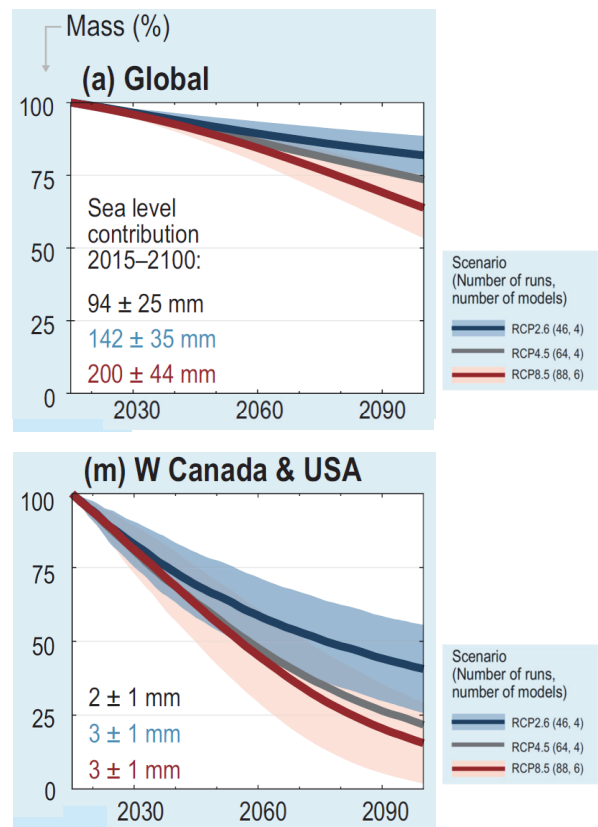


図3. 氷河の消失予測(2015年比)  
(a) 世界平均, (m) カナダ西部と米国(SROCC<sup>3)</sup>の図CB6.1から抜粋)

されている。

これらの気候変化は、水の供給、食料生産、地滑り、雪崩、洪水、地盤沈下などを引き起こし、ツンドラ、森林、湖沼、河川などの生態系に影響する。引いては、世界で約6.7億人が生活しているこの地域の人々の生活にとってリスクになると予測される。

## 3章 極地地域の気候変動

北極圏の海水は2100年に向けて減少している。1982~2017年の観測結果や、CMIP5によるヒストリカルシミュレーションの結果では、海水が最も少ない季節の9月には海水面積が図4に示すように10年間に約30%減少している。また、RCP2.6, 4.5, 8.5のケースについて2100年までの予測を行った結果では、4 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>以下になることが示された。海水が5年連続10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>以下になる、いわゆる「無氷状態」は、RCP8.5の温暖化ケースでは2050年頃に現実化すると予測さ

れている。ただし、RCP2.6 のケースでは海水がなくなることはない。

北極圏の春季積雪量は、1986~2005年と比較して1967年以降10年間に積雪面積が約13%の速さで減少している。また、永久凍土の温度は、2007~2016年の10年間で寒冷なモニタリングサイトで0.39℃上昇している。2100年までに、積雪面積はRCP2.6のケースで約 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 、RCP8.5のケースで約 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 減少し、永久凍土の面積はそれぞれ約 $4.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ と約 $11 \times 10^6 \text{ km}^2$ 減少すると予測されている。これらの変化で、積雪面積は温帯域の気温上昇や太陽光の反射量に、永久凍土は地表の沈下や河川流量の変化などに影響を与える可能性がある。図5は北極圏において気候変動の影響を受けている陸域の模式図である。

永久凍土は大規模な有機炭素の貯蔵庫であり、温暖化によってCO<sub>2</sub>やメタンを大気に放出する可能性がある。深さ3mまでの土壌には1,035 GtCの炭素が含まれている。その他、3m以深のエドマ地帯（氷塊含有地層）にある約400 GtCの炭素や、北極海の海底永久凍土の炭素などがある。そ

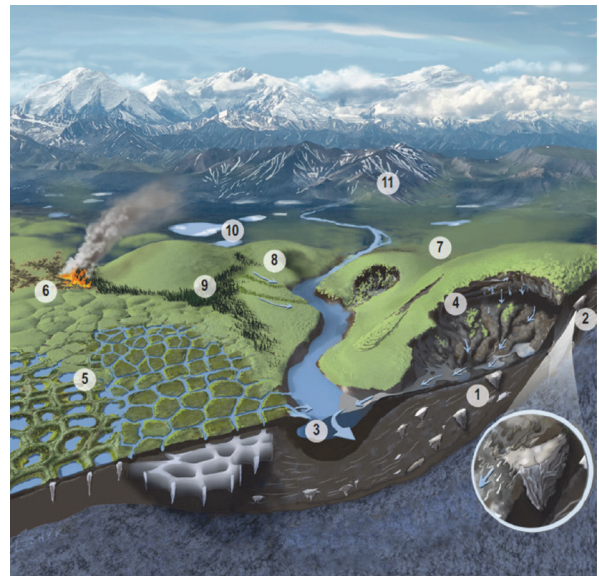


図5. 北極圏で影響を受けている陸域

①永久凍土層（エドマ地層では氷塊を含む）、②地中水、③河川放出、④急激融解、⑤地表水、⑥火災、⑦ツンドラ、⑧シュラブ、⑨北方林、⑩湖水、⑪季節性積雪（SROCC<sup>3)</sup>の図3.10から抜粋）

の総量は大気中のCO<sub>2</sub>の約2倍に相当する。これらの炭素が山火事や地層崩壊などによる急激な変化によって大気中にどれだけ放出されているかについては明らかになっていない。

南極においては、西南極と南極半島の氷床が2077~2016年に185 Gt/年減少した、これは1997~2006年と比べて約3倍の速度である。アムンゼン海のエンバイアメント（湾形成部）やウイルクスランド（東南極）では氷の流れが加速している。南極氷床の質量損失は、RCP2.6とRCP8.5のケースで、2100年には0.04 mと0.12 mの海面上昇を引き起こすと予測されている。なお、グリーンランド氷床の質量損失は、それぞれ0.07 mと0.15 mと予測されている。

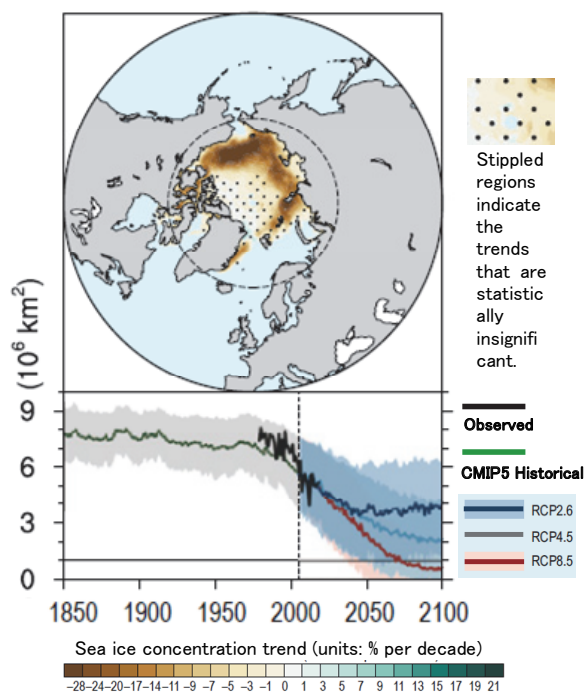


図4. 北極圏の海水面積（9月、1982~2017年）（SROCC<sup>3)</sup>の図3.3から抜粋）

#### 4章 海面上昇とその影響

上述したように氷河や氷床が融解して海面上昇を引き起こしているが、世界の平均海面レベル（GMSL：Global mean sea level）は潮位計や高度計の観測によって、1901~1990年の期間では1.4 mm/年、1970~2015年では2.1 mm/年、1993~2015年では3.2 mm/年、2006~2015年では3.6 mm/年の速さで増加している。2006~2015



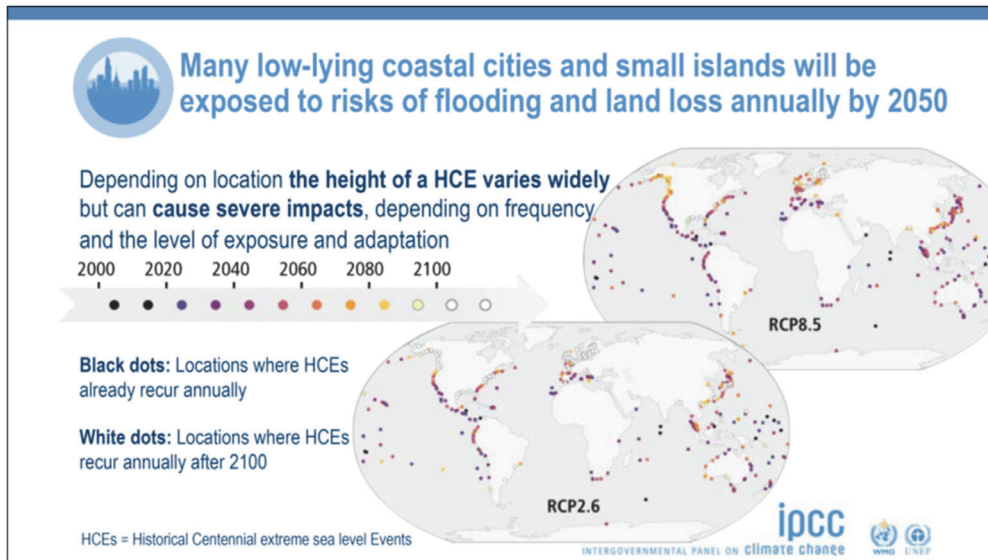


図 6. 海面水位上昇の予測<sup>5)</sup>

RCP2.6 と RCP8.5 の温暖化で 100 年に 1 度の極端な海面上昇にさらされるリスクを評価した地点、各地点の色はリスクにさらされる時期を示す、黒色はすでに毎年発生、白色は 2100 年以降に発生する場所。

年の海水面レベルには、氷河や氷床が約 50%、海洋の熱膨張が約 40%、その他、陸域の貯水量変化などが寄与している。2100 年の海面レベルは 1986~2005 年と比較して RCP2.6 のケースで 0.43 m、RCP8.5 のケースで 0.84 m 上昇し、2100 年以降も上昇が続くと予測されている。

世界の海面レベルは、氷河の融解や海洋の不均一な熱膨張などによって地域によって異なっており、気候変動の影響を受けている。とくに、沿岸部の局所的な海面は、人為的な地盤沈下を受けるほか、波や潮位や風や気圧などの影響も受ける。100 年に 1 度の極端な海面上昇イベント（HCE：Historical Centennial extreme sea level Events）が、沿岸都市や小島嶼で発生する頻度を RCP2.6 と RCP8.5 について予測した結果を図 6 に示す。都市型環礁島や北極圏では RCP2.6 でも 2100 年には海面上昇のリスクは高く、計画的な適応策が必要であると提言している。

## 5 章 変化する海洋と海洋生態系

海洋の物理的・化学的变化を図 7 に示す。海洋の 0~700 m と 700 m~2000 m の層では、熱容量が 1993~2017 年の間に 6.28 ZJ/年と 3.86 ZJ/年の速さで増えている。1969~1993 年と比較して、

いずれの水深でも 2 倍以上の速さで温暖化が進んでいる。将来の予測としては、2100 年までに RCP2.6 のケースでは 1970 年以降の観測値と比較して約 3 倍、RCP8.5 のケースでは約 6 倍になる可能性が高い。その時点の海面レベルは 1986~2015 年と比較して約 0.15 m と 0.3 m 高くなる。一方、世界の海面の平均水温は 1986~2015 年と比較して約 0.7℃ と 3℃ 高くなると予測される。

海洋の温暖化によって起こる極端な変化の 1 つに海洋熱波（Marine Heat Wave）がある。海洋の表面層水温が 1 年の特定時期に数日~数ヶ月間、その地域で 99 パーセント以上以上の稀な高温になる事象である。2011~2016 年には西オーストラリア、北西大西洋、東北太平洋、黄海/東シナ海などで観測され、1982 年から 2016 年の間に倍増し、約 2.5 熱波日/年から 5 熱波日/年になった。それに伴って熱帯サンゴの白化も 6 年に 1 回発生している。将来の予測としては、2100 年までに RCP2.6 のケースでは 1986~2005 年と比較して海洋熱波の日数は約 4 倍、RCP8.5 のケースでは約 10 倍になる可能性が高い。

海洋の温暖化によって起こる変化として酸素濃度の低下がある。海洋表面温度が上がると大気中の酸素の溶解度が低下するとともに、温暖化した

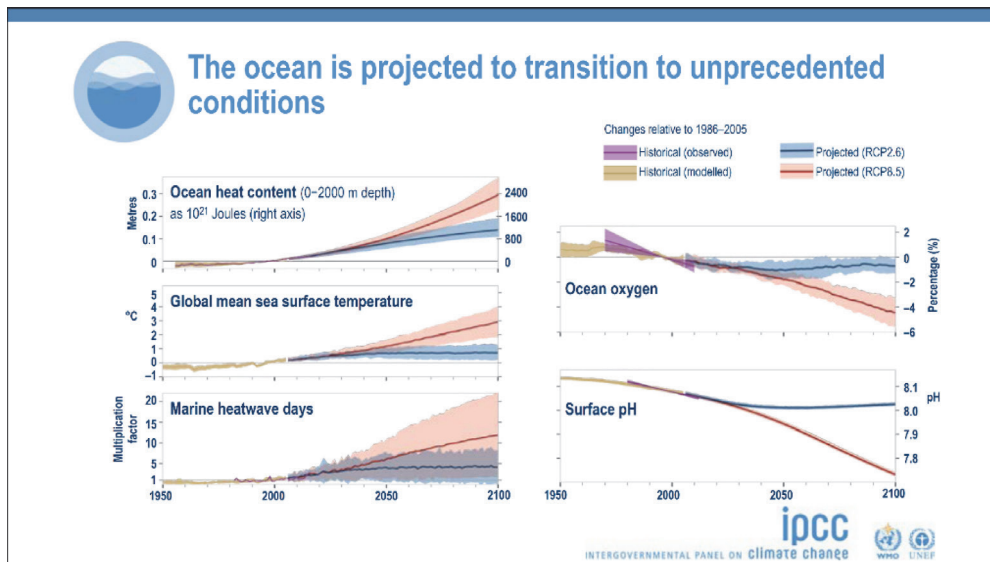


図7. 海洋の物理的・化学的特性の変化と予測<sup>5)</sup>

海水の熱容量 (0-2000 m), 海洋表面温度, 海洋熱波 (日数), 酸素濃度, 酸性度 (pH), 1986~2005 年比較, RCP2.6 と 8.5 のケース

表面層が成層を形成し, その下層における有機物の内部呼吸による酸素含有量の減少が重なって, 海洋から溶存酸素が減る。水深 0~1000 m では, 1970~2010 年の間に酸素が 0.2~2.1% 減少している。将来の予測としては, 2100 年までに RCP2.6 のケースでは 1986~2005 年と比較して水深 100~600 m の溶存酸素は約 1%, RCP8.5 のケースでは約 4% 減少する。

海洋の炭素吸収量の時間変化が IPCC の第 5 次報告書によって明らかになり, 大気から海洋への CO<sub>2</sub> の取り込み量は, 1980 年代前半の 1.2 PgC/年 から, 2010~2015 年には 2 PgC/年に増加している。その量は世界の CO<sub>2</sub> 排出量の 20~30% であり, 水深 1000 m で増加している。CO<sub>2</sub> の増加によって海洋表層の pH (水素イオン濃度) は, 15 年以上の記録がある地点で 0.017~0.027 低下している。将来の予測としては, 2100 年までに RCP2.6 のケースでは 2006~2015 年と比較して海洋表層の pH は 0.039, RCP8.5 のケースでは 0.289 低下する。RCP8.5 のケースでは, 北大西洋の水深 500 m 以上の海底の 20% 以上で, pH が 0.2 以上低下すると予測されている。pH の低下は炭酸カルシウムの飽和状態を低下させ, アラゴナイトなどの溶解によって生態系に影響を与える可能性がある。

地球システムモデル (ESM: Earth System Model) では, pH, 海水温, 溶存酸素, 上層の栄養塩濃度 (N, P, Fe), 純 1 次生産量の順で気候変動の影響が出現してくると予測している。将来の予測としては, 2100 年までに RCP2.6 のケースでは海洋面積の 30% 以上で, RCP8.5 のケースでは 60% 以上で海洋生態系の変化が現れてくる。また, 純 1 次生産量は, RCP2.6 のケースでは 1986~2005 年と比較して 4.3%, RCP8.5 のケースでは 15% 減少する。その結果, 最大漁獲可能量は, それぞれ約 5%, 約 22% 減少すると予測されている。

海洋生態系の変化は, 深海底のバイオマス, 沿岸の藻場や昆布場やサンゴ礁やマングローブ, 岩礁, 東部境界湧昇システム (EBUS: Eastern Boundary Upwelling Systems) 等において顕著になると予測されている。その一例として, 海洋熱波は大規模なサンゴの白化現象を引き起こし世界的にサンゴ礁の劣化を招いている。SR1.5<sup>6)</sup> では, Schlessner ら<sup>7)</sup> のシミュレーションに基づき, 「サンゴ礁は 1.5℃ では 70~90% 減少し, 2℃ では 99% 以上の減少が予測される」と結論づけている。SROCC でも図 8 に示すように, 現在すでにリスクが高い状態にあり, サンゴ礁再生の研究も開始

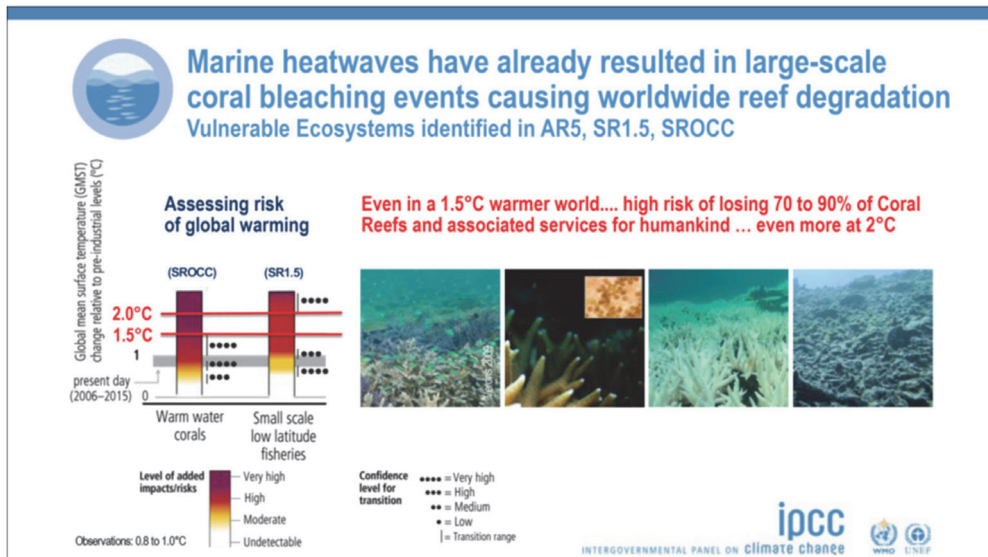


図 8. 温水系サンゴへの温暖化の影響<sup>5)</sup>

2006～2015年の全球表面温度で、海洋熱波は既に大規模なサンゴの白化現象を引き起こし、非常に高いリスクへの移行レベルにある。

されている。しかし、海洋温暖化や酸性化のほかに、海面上昇・暴風雨強化・陸域流出物増大など影響もあり、サンゴ礁の回復は遅い。

## 6章 極端な現象, 急激な変化, リスクの管理

極端な現象としては、熱帯サイクロン、温帯低気圧、低気圧に伴う海面水位異常、海洋熱波、極端なエルニーニョとラニーニャ、極端な海洋の10年変動などがある。また、急激な現象や、不可逆な摂動や、ティッピングポイント（臨界点）到達などの変化としては、大西洋子午線逆転循環（AMOC：Atlantic Meridional Overturning Circulation）の崩壊や、亜極域ジャイア（SPG, subpolar gyre）の変化などが注目されている。これらの事象と気候変動との関連が調査され、複合事象や連鎖的な影響によって、社会的・環境的なリスクになる可能性が検討されている。

複合した連鎖事象としては、インドネシア・スルー（ITF：Indonesian Trough Flow）の評価がある。ITFは太平洋からインド洋へ、過去20年間、低塩分の水や海洋熱の輸送を増加しており、モザンビーク海峡を経て大西洋にまで熱量や生物化学的特性を送りこんでいる。その発端となっている太平洋貿易風の風力の変動はCMIP5の気候

変動モデルでは将来予測できないことから、自然現象の内部変動ではないかと推定されている。

社会的・環境的に極めて大きな事象としては、AMOCの評価が注目されている。メキシコ湾流の北上や、北極海の海水減少など大西洋周辺の気候への影響が大きいため、海洋循環の大規模な観測も行われているが、AMOCの変化を定量的に示す証拠は不十分である。AR5<sup>1)</sup>のモデル評価では、北緯30°における流れが2100年には1850～1900年と比較してRCP2.6のケースで11%、RCP8.5のケースで34%減少すると予測され、21世紀中にAMOCが急激に変化して、崩壊する可

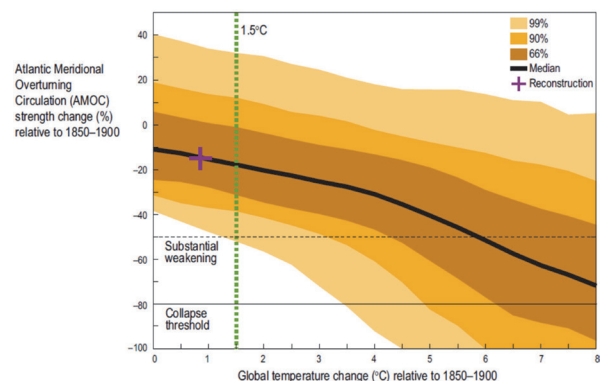


図 9. 世界平均気温上昇に伴う AMOC 強度の変化<sup>3,8)</sup>  
RCP4.5 と RCP8.5 のケースで 2006～2300 年の各 10,000 回のモデル実験の結果（北緯 26°，500m 以下，1850～1900 年比）



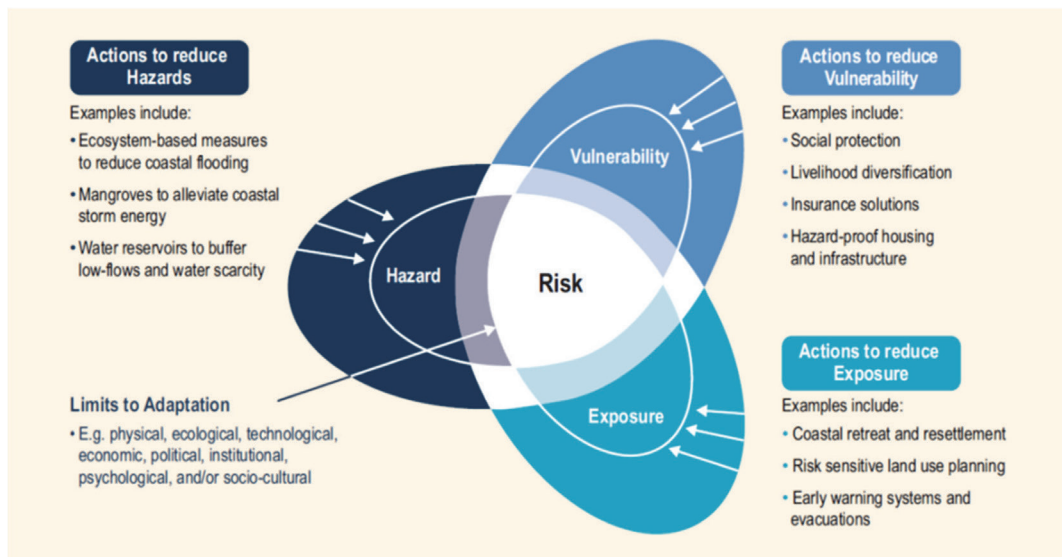


図 10. 適応によるリスク低減の選択肢<sup>9)</sup>  
ハザード・脆弱性・暴露を低減する行動の関係

能性は非常に低いとされた。しかし、2016年の Bakker ら<sup>8)</sup>の報告によると、グリーンランドの水床の融解を考慮に入れたモデル評価では、図9に示すような AMOC 強度の変化率と気温上昇の関係が得られた。この関係から、RCP8.5 のケースでは、AMOC 弱体化の可能性は 2090~2100 年には 37%、2290~2300 年には 74% (4~100%) になり、AMOC 崩壊の可能性は 44% であると推定している。ただし、RCP4.5 のケースでは、2090~2100 年に AMOC の弱体化は 18% になるが、その後、安定化するのので、長期的な CO<sub>2</sub> 削減策によって、AMOC 崩壊を回避できると示唆している。

海洋や雪氷圏の極端な現象や急激な変化によるハザードは、社会的インフラの脆弱性や暴露確度など気候以外の要因と組み合わせさせて、リスクを生んでいる。リスク低減のためには、図10に示すような、マングローブによる沿岸防護、災害に強い住宅とインフラの整備、リスクに配慮した土地利用計画推進などの適応策が必要であると指摘している。もちろん、本報告で紹介した「変化する気候下での海洋と雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」(SROCC) では、全章を通して気候変動の駆動要因になっている温室効果ガスの削減が緩和策としては不可欠であると述べている。

### 参考文献

- 1) AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- 2) AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)
- 3) SROCC: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- 4) SROCC Figure TS 2: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/IPCC-SROCC-TS\\_2.jpg](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/IPCC-SROCC-TS_2.jpg)
- 5) SROCC COP25 full presentation: SBSTA-IPCC special event: Unpacking the new scientific knowledge and key findings in the SROCC, COP25, Madrid, 5 December 2019 [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/0\\_SROCC\\_COP25\\_all.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/0_SROCC_COP25_all.pdf)
- 6) SR1.5: Special Report on Global Warming of 1.5°C <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>
- 7) Schleussner, et.al. 2016: Differential climate impacts for policy-relevant limits to global

- warming: the case of 1.5 °C and 2 °C, <https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016>, 2016.
- 8) Bakker, et.al. 2016: Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting, <https://doi.org/10.1002/2016GL070457>
- 9) SROCC Figure TS 4: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/IPCC-SROCC-TS\\_4.jpg](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/IPCC-SROCC-TS_4.jpg)