

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究
(S-10-3)

平成24年度～平成28年度

Identification of Critical Climate Risks by Climate Change

東京工業大学
国立研究開発法人海洋研究開発機構(平成24年度～25年度)
筑波大学
東京大学
北海道大学

〈研究協力機関〉
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立極地研究所

平成29年5月

環境省
総合環境政策局総務課環境研究技術室
環境保健部環境安全課環境リスク評価室
地球環境局総務課研究調査室

クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究

(S-10-3)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに (研究背景等)	.....	ii
2. 研究開発目的	.....	ii
3. 研究開発の方法	.....	ii
4. 結果及び考察	.....	iii
5. 本研究により得られた主な成果	.....	v
6. 研究成果の主な発表状況	.....	vii
7. 研究者略歴	.....	xi
II. 成果の詳細		
(1) クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究 (東京大学)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	2
4. 結果及び考察	.....	5
5. 本研究により得られた成果	.....	1 5
6. 国際共同研究等の状況	.....	1 6
7. 研究成果の発表状況	.....	1 7
8. 引用文献	.....	2 2
(2) 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計と テーマ全体の総括 (東京工業大学)	.....	2 5
要旨	.....	2 5
1. はじめに	.....	2 5
2. 研究開発目的	.....	2 6
3. 研究開発方法	.....	2 6
4. 結果及び考察	.....	2 9
5. 本研究により得られた成果	.....	4 2
6. 国際共同研究等の状況	.....	4 3
7. 研究成果の発表状況	.....	4 3
8. 引用文献	.....	4 8
(3) 健康分野における気候変動リスク推計 (筑波大学)	.....	4 9
要旨	.....	4 9
1. はじめに	.....	4 9
2. 研究開発目的	.....	5 0
3. 研究開発方法	.....	5 0
4. 結果及び考察	.....	5 2
5. 本研究により得られた成果	.....	5 9
6. 国際共同研究等の状況	.....	6 0
7. 研究成果の発表状況	.....	6 0
8. 引用文献	.....	6 6
(4) 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と 地球物理学的臨界現象の総括 (東京大学)	.....	6 7

要旨	.....	67
1. はじめに	.....	67
2. 研究開発目的	.....	68
3. 研究開発方法	.....	68
4. 結果及び考察	.....	81
5. 本研究により得られた成果	.....	82
6. 国際共同研究等の状況	.....	82
7. 研究成果の発表状況	.....	82
8. 引用文献	.....	87
(5) 海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計	.....	88
(北海道大学)		
要旨	.....	88
1. はじめに	.....	88
2. 研究開発目的	.....	89
3. 研究開発方法	.....	89
4. 結果及び考察	.....	91
5. 本研究により得られた成果	.....	100
6. 国際共同研究等の状況	.....	101
7. 研究成果の発表状況	.....	101
8. 引用文献	.....	104
(6) 気候変動リスクの不確実性に関する統計学的評価	.....	106
(国立研究開発法人海洋研究開発機構)		
要旨	.....	106
1. はじめに	.....	107
2. 研究開発目的	.....	107
3. 研究開発方法	.....	107
4. 結果及び考察	.....	108
5. 本研究により得られた成果	.....	110
6. 国際共同研究等の状況	.....	111
7. 研究成果の発表状況	.....	111
8. 引用文献	.....	112
III. 英文Abstract	.....	113

課題名 S-10-3 クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究

課題代表者名 梶 信次郎（国立大学法人 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 梶研究室 教授）

研究実施期間 平成24～28年度

累計予算額 387,135千円（うち平成28年度：70,067千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード クリティカル、地球物理学的臨界現象、気候変動リスク推計、特性評価、極端現象

研究体制

- (1) 地球物理学的な臨界現象のリスク推計（国立大学法人東京大学）
 - (2) 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計とテーマ全体の総括（国立大学法人東京工業大学）
 - (3) 健康分野における気候変動リスク推計（国立大学法人筑波大学）
 - (4) 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と地球物理学的臨界現象の総括（国立大学法人東京大学）
 - (5) 海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計（国立大学法人北海道大学）
 - (6) 気候変動リスクの不確実性に関する統計学的評価（国立研究開発法人海洋研究開発機構）
- ※サブテーマ(6)は、代表者帰国により平成26年度以降はサブテーマ(4)と合併した。

研究協力機関

国立研究開発法人海洋研究開発機構、国立極地研究所

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

COP16（気候変動枠組条約第16回締約国会議）では、世界全体で平均気温上昇を工業化以前と比べ「2℃」以内に抑えるという目標のもと、様々な行動が実施されている。目標達成に向けた国際的な排出緩和を進める枠組みの議論や地球規模課題の気候変動リスクに対してどのような行動・対策を実行すべきかを議論するためには、社会の価値判断を網羅的に考慮した適切なリスク分析・評価を構築する必要がある。地球環境研究総合推進費戦略的研究「温暖化影響総合予測プロジェクト（JFY2005～2009）」において、日本及びアジア地域に対する温暖化影響の包括的な研究が実施され、洪水や土砂災害、高潮、熱波による事象解析及び被害コスト、森林や農業分野における影響評価や被害コストの定量的な評価が示されたが、国際的合意形成への寄与や日本の交渉ポジション、国民の気候変動問題への理解の深化に貢献するためには、地球規模の定量的な評価およびそれらのリスク管理戦略を構築・提示する必要がある。それらの学際的な科学的知見は、このリスク管理戦略の構築の基礎となるものであり、とくにクリティカルな事象の気候変動リスクの分析は、現時点で利用可能な最大限の包括的・中立的な科学的知見に基づくべきであり、その不確実性を明示的に示すことが求められている。本テーマは、人類が回避すべきと考えられる温暖化影響の候補について、それぞれが発現する温度上昇レベル、悪影響の規模や性質などを、制約条件や不確実性を含めて網羅的に評価した結果を提示する。気候変動によって生じ得る事象の中でも、特に地球物理学的な臨界現象に注目して、その発生メカニズムと起こりやすさ、地球全体の気候変化との関係を、気候モデルや古気候を参考に明らかにし、気候変動リスクの特性評価研究を実施する。その上で、各気候変動リスクにおける数値シミュレーション結果と過去の気

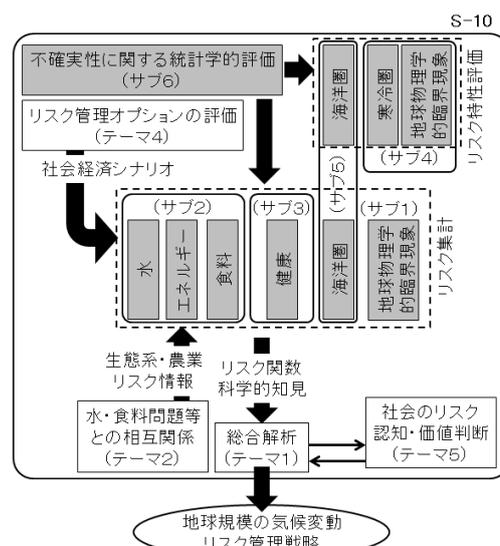


図1 サブテーマ間および他テーマとの関係

候変動リスクに関連する統計データを用いて気候変動レベルごとの影響関数を作成し、排出シナリオごとに求められる将来推計値から求められる気候変動リスクを推計・分析する(図1)。

2. 研究開発目的

本テーマの最終目標は、人類が回避すべきと考えられる温暖化影響の候補について、それぞれが発現する温度上昇レベル、悪影響の規模や性質などを、不確実性を含めて網羅的に評価した結果を用いて気候変動リスクの特性評価研究を実施し、その上で、各気候変動リスクにおける数値シミュレーション結果と過去の気候変動リスクに関連する統計データを用いて気候変動レベルごとの影響関数を作成し、排出シナリオごとに求められる将来推計値から求められる気候変動リスクを推計・分析することである。

これにより、従来の影響評価で十分とは言えなかった将来の不確実性を考慮した気候変動リスクの特性評価研究とそのリスク推計を定量的に実施し、地球規模課題の気候変動リスクに対する行動の意思決定に資することを可能とする。具体的には、気候変動によって生じ得る事象の中でも、特に地球物理学的な臨界現象に注目し、気候モデルによる数値実験結果や古気候を参考にしつつそれらの現象を列挙し、その発生メカニズムと起こりやすさ、地球全体の気候変化との関係を明らかにする。さらに、気候モデル結果や過去の社会影響のデータを用いて、気候変動によって生じ得る海水面の上昇、各地域の気温や降水量の変化とその極端現象の発生頻度の変化等を踏まえて、全球平均気温を指標として表現されるような気候変動レベルごとに生じ得る社会への影響を、水、食料、エネルギー、健康等の分野に関して列挙し、各分野の気候変動リスクの大きさを推計する。この結果に基づき、地球規模の気候変動レベルごとの影響関数を作成し、排出シナリオごとに求められる将来推計値から求められる気候変動リスクを制約条件や不確実性を含めて推計・分析することで、本戦略課題テーマ全体の目標である気候変動リスク管理戦略構築の一翼を担う。

次にサブテーマ間の連携について述べる。

サブテーマ(1)は、サブテーマ(4)による気候変動リスクの特性評価、特にグリーンランド氷床や西南極氷床の融解や北極海夏季海水の消失に関する知見の総括を援用し、将来の不確実性を考慮したリスク推計を実施した。また、サブテーマ(2)と共同でリスクインベントリに関する知見の取り纏めと、さらにリスク推計情報の海面上昇による影響評価や確率情報の開発を実施した。加えて、サブテーマ(2)では、テーマ2より得られる生態系・農業リスク情報やテーマ4より得られる社会経済シナリオから、それぞれ水・エネルギー・食料等の分野と健康分野における将来の不確実性を考慮した気候変動リスクを推計した。また、平成26年度より、サブテーマ(1)に代わりサブテーマ(2)がテーマ3の総括を担った。サブテーマ(3)は、サブテーマ(2)の農業・食料分野と連携して農作物の将来予測に基づく低栄養の影響を評価した。サブテーマ(4)は、寒冷圏を中心とした温暖化に伴う長期的な地球物理学的臨界現象について影響評価を実施し、南極氷床融解、海洋深層循環、溶存酸素などへの影響を示した。サブテーマ(5)は、サブテーマ(4)と協働して、数千年間の超長期的な海洋循環の変動に伴うリスク特性評価を実施し、メタンハイドレートの崩壊、無酸素領域の拡大、海洋生物生産への影響を示した。サブテーマ(6)は、気候変動に伴って生じ得る地球物理学的な臨界現象について、その発生の閾値、規模などの不確実性に関する統計学的評価を実施することを目的とした。

3. 研究開発の方法

(1) 地球物理学的な臨界現象のリスク集計

本プロジェクトでは、排出シナリオ(代表的濃度シナリオ(RCP; Representative Concentration Pathways)に対応させたもの)やS-10で開発した戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性を導き、洪水や熱ストレスなどの今世紀既に発現している現象とティッピングエレメントとを直接的あるいは間接的に比較できるような知見の提供を目指している。ティッピングエレメントのリスク推計は、IPCCの報告書や既存文献から導いたティッピングポイントの幅を用いて、RCPとS-10で開発した戦略シナリオの昇温量からティッピングエレメントの出現可能性について評価した。

上記の評価手法の検証のため、気温上昇に伴う豪雨やアジアモンスーン弱化の影響を評価した。豪雨への影響は降水強度と気温の関係に、アジアモンスーンへの影響は季節進行の変化に着目して、観測データとGCMデータを用いて現在の検証と将来の影響を評価した。

(2) 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計とテーマ全体の総括

今後想定される将来の気候変動が、数十年スケールの水循環に関する極端現象(主に洪水や熱帯低気圧等)や数百年スケールのティッピングの発現を通して、水資源逼迫や洪水氾濫被害、熱帯低気圧による沿岸災害等の分野において、どのような影響や被害を社会に及ぼすかについて、気候変動レベル(全球平均気温上昇量等)毎のリスク関数・影響関数として推計した。また、それら影響の金銭評価について文献調査をまとめた。加えて、既存の統合評価モデルを用いて最新気候および社会経済シナリオを考慮した経済影響評価を行った。最後に、テーマ1、テーマ2、テーマ3で共同して作成を進めてきたリスクインベントリ表の各リスク項目について、どのリスク

項目が特に注目すべき深刻なリスクであるかを明らかにするため、各リスク項目の「影響の重要性」と「確信度」をエキスパート判断し、リスクマトリックスを作成した。

(3) 健康分野における気候変動リスク推計

基本的に、2014年に発表された世界保健機関の報告書で扱われた健康アウトカムについて、その推計方法を踏襲してS-10の枠組みで拡張を行った。熱関連超過死亡については、サブテーマ(3)の代表者、本田が開発したリスク関数モデルを用いて推計した。このモデルは、グリッドごとに通常GCMで得られる日最高気温の分布と、通常社会経済シナリオ構築の際に必ず推計がなされる死亡率のみを用いて全球の推計を世界で初めて可能にしたものである。低栄養、マラリア、下痢性疾患、沿岸洪水死亡については、世界保健機関の報告書執筆者がそれぞれ開発した方法を許可を得て使用した。

(4) 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と地球物理学的臨界現象の総括

南大洋を領域とした高解像度海洋大循環モデルを用いて、氷期と温暖気候(二酸化炭素濃度倍増気候)における南極海洋と棚氷の底面融解速度を求めた。大気海洋結合モデルMIROCにおいて大気二酸化炭素濃度を産業革命前の濃度から年1%で増加させ、産業革命前の二酸化炭素濃度の2倍と4倍になった時点で固定した気候学的条件のもとで海洋深層循環の応答を解析した。また、オフライン海洋物質循環モデルを用いて、この気候下に置ける溶存酸素の変動を計算した。国際プロジェクトであるAMOCMIP(AMOCモデル相互比較プロジェクト)に参加し、AMOCMIPで用意されたグリーンランド融解水のフォーシングを大気海洋結合モデルMIROCに与え、融解水流入に対するAMOCの応答について解析を行った。CFRAM(Climate Feedback-Response Analysis Method)を大気海洋結合モデルMIROCへ導入し、様々な物理プロセスの極域温暖化への寄与を定量化した。

(5) 海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計

数千年間の超長期的な海洋循環の変動に伴うリスク特性評価では、基本的に、サブテーマ(4)と連携し、大気CO₂濃度を産業革命前のCO₂濃度から年1%で上昇させ、2倍と4倍の濃度になった時点で固定した2つの気候学的条件のもとで、メタンハイドレートの崩壊、および、それに伴う溶存酸素の評価、および、海洋中の炭素循環・窒素循環・生物生産の評価を行った。また、今世紀末までのリスク評価では、CMIP5のマルチ気候モデルを用いて、貧酸素水塊の将来変化のメカニズムを調べるとともに、現在の資源量分布と温暖化予測モデルの出力データを用いて簡易的に将来の水産資源量変動を推定するハビタットモデルを開発し、200種の水産資源生物に対し、5つの気候モデル4つの温暖化シナリオのもとで、温暖化後の資源量分布について計算・評価を行った。

(6) 気候変動リスクの不確実性に関する統計学的評価

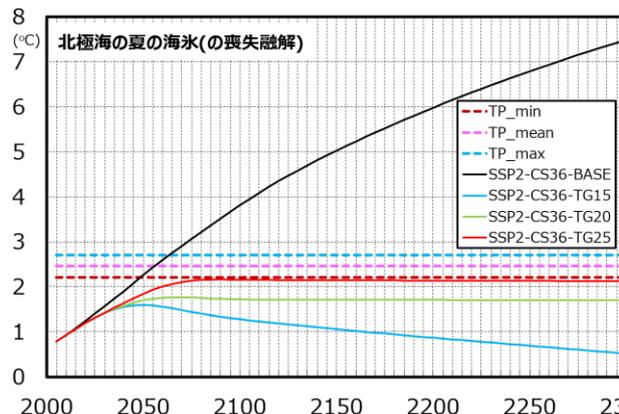
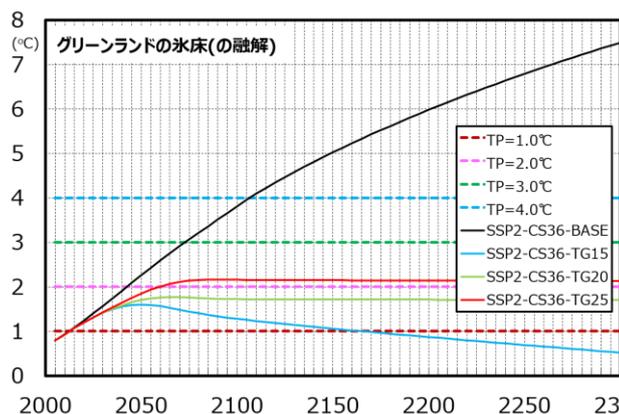
CMIP3マルチモデルアンサンブルを含め、最新のアンサンブル(例、CMIP5、PMIP3)のスキルと信頼性について解析した。他のサブテーマと連携することにより氷床モデルを走らせるための境界条件を作成する手法の確立を支援し、地球生物化学過程の不確実性を調べるためのEMICアンサンブル実験を設定した。また、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋開発研究機構が開発されたMIROC系列のモデル結果を活用して、マルチモデルアンサンブルを拡張し、様々な異なるシナリオ、特に古気候との比較が可能なシナリオのもとでのアンサンブルの振る舞いを調べた。集約された古気候データセットとマルチモデルアンサンブルを比較することにより、アンサンブルのバラつきを制約するとともに、アンサンブルのバラつきをもたらすキーパラメータを調査した。開発した不確実性解析手法を利用し、様々なMIROC系列のモデル(および他のモデルの結果)においてアンサンブルの広がりをもたらすプロセスを評価し(特に古気候データに見られる急激な気候変動と比較)、適正な分布を持つモデルアンサンブルを抽出した。

4. 結果及び考察

(1) 地球物理学的な臨界現象のリスク集計

リスク集計の結果を示す前にまずティッピングエレメントに関する知見を整理した。ティッピングエレメントとは、いわゆる地球温暖化に伴う気候変動が進行して、あるティッピングポイントを過ぎた時点で、不連続といっても良いような急激な変化が生じて、結果として大惨事を引き起こすような気候変動の要素を指す。ティッピングポイントに達してからティッピングエレメントが発現するのに10年程度から数百年まで時間スケールに差があることやこれらの急激な変化が必ずしも悪い面ばかりではなく経済効果が期待される場合もある。

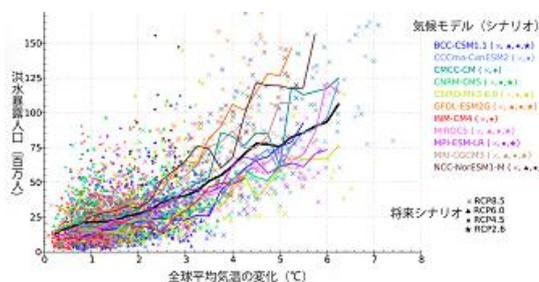
ティッピングエレメントのリスク推計は、排出シナリオ(RCP)やS-10で開発した戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性を示すことで、ティッピングエレメントが発現するかどうかを評価した。ここでは、グリーンランド氷床の融解と北極海夏季海水の消失の2つのティッピングエレメントについて示す。図(1)-1にあるように、BaU(SSP2)ではどちらもティッピングポイントを今世紀中あるいは来世紀初頭に超過するが、パリ協定などで議論されている1.5~2.0°Cの昇温量を目指せば、グリーンランド氷床の融解についてはティッピングポイントの幅にほぼ既に入力しているが、北極海夏季海水消失についてはティッピングポイントの幅に入らない。このような情報は政策決定者や国民が主体的に判断をする材料になり得る。一方、1.5°C目標では今世紀半ばに気温が下降し始め、ティッピングポイントを再び下回る予想もあり、このような現象に関する知見がまだ不足していることが今後の課題だ。



図(1)-1 グリーンランド氷床の融解(左)と北極海夏季海水の消失(右)のティッピングポイント(TP)の幅とS-10戦略シナリオ(目標気温が(赤)1.5°C、(緑)2.0°C、(水色)2.5°Cと(黒)BaU(SSP2))との関係性。縦軸は産業革命からの全球平均昇温量(°C)。

(2) 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計とテーマ全体の総括

最新のSSPおよびRCPシナリオを用いた洪水暴露人口(図(2)-1)と洪水暴露GDPの将来変化を推計した。また、食料リスクのひとつである低栄養に起因する健康被害量を推計した。ティッピングに関するリスク推計として、サブテーマ(1)と共同で、ティッピングエレメントの発現可能性とグリーンランド氷床と北極海夏季海水が2100年までにティッピングポイントを超える確率を推定した。加えて、グリーンランド氷床融解のティッピングポイントを考慮した長期的な全球沿岸域暴露推計を行った。水分野のうち特に水資源、熱帯低気圧、海面上昇による影響に焦点を置き、最新シナリオにおける経済影響を推計した。また、気候変動リスクの全体像の把握とクリティカルなリスクの同定に向けて、テーマ1で作成されたリスクインベントリへ「確信度」と「影響の重要性」の情報を追加したリスクマトリックスを作成した。

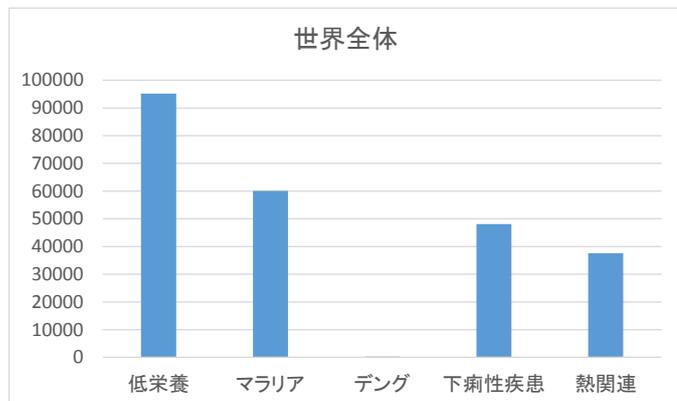


図(2)-1 洪水暴露人口と全球平均気温変化。細線は各気候モデル・シナリオの毎年の値(記号)を気候モデルごとに集計したもの、太線(黒)はその平均を示す。Hirabayashi et al.(2013) Nature Climate Changeの図を一部改変したもの。

(3) 健康分野における気候変動リスク推計

上記世界保健機関の報告書の内容をまとめると以下の図(3)-1ようになる。世界全体で見ると、低栄養が最も大きな影響を受け、マラリア、下痢性疾患が続く。これらは基本的に小児に最も大きな影響を及ぼす。一方、熱関連疾患は、先進国において唯一の大きな死亡影響であった。2015年以降、これらの推計をRCP、SSPごとに推計した。

(a)



(b)



図(3)-1 気候変動による追加的死亡数(SRES A1B、2030)。熱関連死亡は50%適応を仮定。

(4) 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と地球物理学的臨界現象の総括

気候と棚氷底面融解速度との関係が、単に海水温が上がることによって棚氷底面融解速度が上昇するというような線形な関係になっておらず、南極沿岸での海水生産の減少により低温・高塩分・高密度の水塊形成量が

減少することで、沖合にある暖かい海水がより棚氷に近づきやすくなることによって棚氷底面融解速度が大きく上がっていたことが分かった。大西洋子午面循環 (AMOC) の強度は大気CO₂濃度に対して応答が大きく異なることが明らかになった。2xCO₂実験では大気CO₂濃度が上昇している期間AMOCが約5Sv減少するが、それ以降徐々に回復して1000年後以降は現在気候とほぼ同程度になる。4xCO₂実験では大気CO₂濃度の上昇が止まった後もAMOCは減少し続け、最初の300年で約5Svまで減少した後は積分期間の最後まで回復することはなかった。また、グリーンランド氷床からの融解水流入の影響も重要であることが示された。南大洋底層水の流量はどちらの実験においても最初の500年は弱まるが、その後回復して産業革命前よりも強くなる。溶存酸素は水温上昇に伴う溶解度の低下と海洋の循環の変動により初期500年ではほぼ全球的に減少し、全球平均で約10%減少する。しかし500年以降は南大洋から酸素が回復し、最終的に全球平均の溶存酸素濃度は産業革命前より高くなった。この回復は南大洋の深層循環が回復することに伴い酸素を多く含む表層水が中深層へ運ばれることで引き起こされる。一方、表層では水温上昇に伴う溶解度の低下が支配的な要因として働く為に溶存酸素濃度は減少する為、貧酸素水塊は表層で拡大し中層では減少した。北極の気温増幅メカニズムを理解するには、季節によって支配的に働くプロセスが異なることが系統的に示された。年平均ではアルベドフィードバックが支配的に北極の温暖化に寄与しているが、アルベドフィードバックを介して海洋に吸収されたエネルギーが秋・冬に大気に放出されて温暖化を引き起こす。また、雲の温室効果も無視できないことがわかった。

(5) 海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計

メタンハイドレートの減少速度は2000-3000年後に最も速くなり、定常に達するのに1万年以上かかることが分かった。最終的にメタンハイドレートは、2xCO₂と4xCO₂実験でそれぞれ約30%と65%減少する。4xCO₂実験のとき、全球平均の溶存酸素は約3000年かけて25%減少し、貧酸素域([O₂] < 60μmol)の体積は現在の約2倍に増加する結果が得られた。特に太平洋において貧酸素域の拡大に大きな影響を与えることが明らかとなった。また、北大西洋子午面循環 (AMOC) の最大流量は、4xCO₂実験で半分程度に減少するが、輸出生産は10%程度減少する程度である。リン酸塩の収支解析の結果、高緯度を除いて、表層では、風成循環変動が大きく影響し、AMOC減衰の影響はそれほどないことが明らかになった。

温暖化後の水産資源は、使用する気候モデルなど評価ケースにより局所的な結果は異なるが、全ての評価ケースで、水温の上昇による効果により、低～中緯度帯で大きな減少率があらわれている。生物種毎に見ると、環境変動が大きい浅海域にのみ生息する生物種・生息域が限定される沿岸種などマイナーな生物種に特に大きな影響があらわれることがわかった。全球平均した際の影響については、全ての評価ケースで減少となり、高排出シナリオでは-11～-19%、低排出シナリオで-7～-9%の資源減少がみられた。

(6) 気候変動リスクの不確実性に関する統計学的評価

古気候の再現性のマルチモデルでの調査に関して、最終氷期最盛期の平均気温偏差および完新世中期の最も暑い月の温度偏差に関するテイラー図を作成した。最終氷期最盛期については総じて好結果が得られ、亜大陸規模の詳細な変動パターンを捉えるのは未だに難しいものの、全球的な平均的变化に加えて、全体的な海陸コントラストや極域の温暖化増幅など広範囲における変化の観測パターンをモデルにより再現できることが示唆された。対照的に、完新世中期については芳しくない結果となり、モデルは観測された変化をまったく再現できなかった。また、最近の観測データに照らして、最近の気候を対象とした結合モデルの新しいアンサンブル (CMIP5) を評価した。その結果、CMIP5の結合モデルアンサンブルは全体的に幅広い規模で信頼性が高く、CMIP3のものと極めてよく似た特徴を有していることが判明した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ サブテーマ(1)では、地球物理学的な臨界現象のリスク推計においては、これまでティッピングエレメントをどのように取り扱うか非常に困難であったが、この研究を通してどれくらいの不確実性をティッピングエレメントのティッピングポイントや遷移期間が取るのかを明確にし、それによって排出シナリオや戦略シナリオ(例えば、昇温量を2°Cに抑えるなど)との関連付けを可能とし、将来の影響人口などの影響評価を行うことができるようになった。
- ・ サブテーマ(2)では、将来の複数シナリオ下での全世界の洪水流量と氾濫を、世界で初めて推計した。洪水リスクを、単に物理的な水循環の量として表現するにとどまらず、洪水暴露人口というインデックスによって表現したことや、洪水リスク情報を温室効果ガス排出削減目標に組み入れるために、気温上昇と全球洪水リスクとの関係性の提示を初めて行ったことも、これまでにない特徴である。
- ・ 水分野(水資源、熱帯低気圧、海面上昇)における気候変動の経済影響に関する文献調査を行い、それらの推計値を比較した。これにより、これらの分野における経済影響推計方法の科学的信頼性についての比

較検討が進展したと共に、影響推計に用いる関数やモデル・シナリオの違いが、推計値にどの程度の差異を与えうるかが整理された。また、既存の統合評価モデルの分野別影響関数に、最新の気候シナリオ・社会経済シナリオを入力した場合、推計値にどの程度の不確実性幅が生じるかが示された。

- ・ サブテーマ(3)では、全球に適用できるモデルを作成することが求められた。これまでは気候の相違によって全球の熱関連死亡予測は困難と考えられていたが、S-4で開始され、S-8、S-10と改善が加えられたモデルにより、将来の年間死亡率と日最高気温の分布という、どの将来予測でも推計される情報のみによって熱関連死亡の将来予測を可能にしたことは、この分野における大きな進歩である。マラリア、デング熱のモデルも、気象変数と1人あたりGDPという入手可能な変数によって高い精度の予測が可能となった。
- ・ これまでGCMで考慮されていなかった棚氷底面融解について、気候変動に対する海洋循環の変化を通じた棚氷底面融解の応答メカニズムについて理解することが可能になった。簡略化モデルを用いて主に行われてきた長期実験を大気海洋結合モデルで行うことで、海洋深層循環の応答が大気CO₂濃度に対して大きく依存し、グリーンランド氷床の融解水の流入の影響も重要であることを明らかにした。また、溶存酸素についても100年スケールの変動と1000年スケールの変動が異なる可能性が示唆された。
- ・ メタンハイドレートの分解量の推定はこれまでほとんど行われておらず、本研究により、溶存酸素に対するメタン放出の影響は数千年に及ぶことが示され、特に太平洋における貧酸素水塊拡大に大きな影響があることが初めて示された。また、大西洋子午面循環が半分程度弱体化しても、生物生産はやや弱化する程度であることが示された。
- ・ 将来の気候の不確実性の減少につながった。また、過去の気候変動情報に記録されている、非常に速い(短い時間スケールの)気候変動について、何がそれらの急激な温暖化および寒冷化を駆動しているのかは現在も未解決の課題であるが、我々の研究はその解明に貢献している。

(2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・ 健康分野における気候変動リスク推計においては、世界保健機関の気候変動による健康影響予測の一つとして採択された。またEU、OECDが準備している影響評価でも同モデルが用いられている。環境省「気候変動による将来影響予測等報告書(光化学オキシダント)等」に、本研究で開発された熱関連超過死亡モデルが用いられた。
- ・ 健康分野における気候変動リスク推計においては以下の貢献があった。上記WHOの報告country profilesは、WHOとUNFCCCの共同プロジェクトであり、その情報は2015年に開催されたCOP21に情報として提供された。このこともCOP21における政策合意に貢献したものである。また、環境省による政府の機構変動適応計画に向けて、気候変動分野別検討委員会において、健康に関しては、本研究成果である動物媒介感染症、下痢性疾患の結果などをもとにして検討が行われた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ これまで実施したティッピングエレメントに関する包括的な知見の整理と定性的かつ定量的なリスク推計は、これまでほとんど知見が無かったため、IPCCの特別報告書や第6次評価報告書への記載が期待される。さらに今後の気候変動枠組み条約締結国会議(COP)において情報発信をすることで、日本のプレゼンスを示すとともに、合意に向けた重要な資料として採用されることが十分予想される。特に定量的評価はこれまで不可能とされてきた面もありそのため考慮の外に置かれてきたが、今後は次世代を考えた政策決定をするうえで、重要な基礎情報の一つになり得ることを示すことができた。
- ・ 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計では、全球平均気温上昇量と洪水暴露人口・洪水暴露GDPとの関係を領域別に分析し、洪水暴露人口・暴露GDPが将来大きく増加する可能性がある地域を示した。このような研究を通じて、将来の洪水被害軽減という観点から見た場合の緩和策や適応策の導入が特に重要となる地域を明らかにすることで、地球温暖化の緩和策や適応策に関わる政策の立案・実施へと今後役立つことが期待される。
- ・ 以前のWHO報告書がIPCCの第4次報告書に引用されたように、RCP、SSPごとに将来の予測が行われたS-10の成果は、今後IPCCの1.5°C特別報告書や第6次評価報告書などに活用され、それに基づいて行政が将来計画を立てることが期待される。
- ・ 海水準予測において不確定性の大きな原因であると考えられている南極棚氷底面融解について、モデルを用いて評価することが可能になった。また、気候システムの中核を担う海洋循環が大気CO₂濃度に対して大きく異なることを示した。これらは将来の大気CO₂濃度安定化レベルを決定する上で重要な知見を与えると考えられる。
- ・ メタンハイドレート約1000GtCの崩壊は、数千年後に起こり、人間活動が放出する分をそれだけ減らさなければ

ばならないことを意味する。温暖化やメタンハイドレートの崩壊に伴う、海洋中の酸素が現象は、貧酸素水塊の拡大を招き、海洋中層のみに生息するような希少種に対する生物多様性に深刻な影響を与える。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi: *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL053872, (2012)
“Can the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity?”
- 2) 岩崎明希人, 楠原啓右, 井芹慶彦, 鼎信次郎: *水工学論文集*, Vol. 57, No.4, I_1585I_1590 (2013)
「北西太平洋域を対象とした三種の台風リスク推計モデルの作成及び比較」
- 3) A. Abe-Ouchi, F. Saito, K. Kawamura, M. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter: *Nature*, 500, 190-193, doi:10.1038/nature12374, (2013)
“Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume”
- 4) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, R. Ohgaito, A. Paul, and A. Abe-Ouchi: *Climate of the Past*, Vol.9, 811-823, (2013)
“Skill and reliability of climate model ensembles at the Last Glacial Maximum and mid-Holocene”
- 5) Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae : *Nature Climate Change*, 3, 816-821, (2013)
“Global flood risk under climate change”
- 6) Y. Honda, M. Kondo, S. Kovats, S. Hales, H. Kim and Y.-L. Guo: *Impacts World 2013 Conference Proceedings*. Potsdam : Potsdam Institute for Climate Impact Research, pp:275-281. DOI: 10.2312/pik.2013.001, (2013)
“Will the global warming alleviate cold-related mortality?”
- 7) T. Yokohata, J.D. Annan, M. Collins, H. Shiogama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M. Abe, M.J. Webb and J.C. Hargreaves:, *Climate Dynamics*, 41, 2745-2763, doi:10.1007/s00382-013-1733-9, (2013)
“Reliability and importance of structural diversity of climate model ensembles”
- 8) 石田裕之, 小林翔太, 鼎信次郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦, 田中朱美: *土木学会論文集B1(水工学)*, 70, 4, I_463-I_468 (2014)
「最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定」
- 9) 岩崎明希人, 井芹慶彦, W.H. Lim, 鼎信次郎: *土木学会論文集B1(水工学)*, 70, 4, I_469-I_474 (2014)
「熱帯低気圧による全球経済的損失の将来推計」
- 10) Y. Honda, M. Kondo, G. McGregor, H. Kim, Y.-L. Guo, Y. Hijioka, M. Yoshikawa, K. Oka, S. Takano, S. Hales and R. S. Kovats: *Environmental Health and Preventive Medicine*, 19(1), 56-63, (2014)
“Heat-related mortality risk model for climate change impact projection”
- 11) Z.W. Kundzewicz, S. Kanae, S.I. Seneviratn, J. Handmer, N. Nicholls, P. Peduzzi, R. Mechler, L.M. Bouwer, N. Arnell, K. Mach, R. Muir-Wood, G. R. Brakenridge, W. Kron, G. Benito, Y. Honda, K. Takahashi and B. Sherstyukov : *Hydrological Sciences Journal*, 59, 1, 1-28 (2014)
“Flood risk and climate change: global and regional perspectives”
- 12) M. Yoshimori, M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama and T. Ogura: *Climate Dynamics*, 42(5-6), 1613-1630, (2014)
“Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM”
- 13) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka, A. Abe-Ouchi: *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2014GL060483. (2014)
“Ocean oxygen depletion due to decomposition of submarine methane hydrate”
- 14) H. Ishida, S. Kobayashi, S. Kanae, T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui, A. Tanaka, Y. Honda: *Environmental Research Letters*, 9, pp9 (2014)
“Global-scale projection and its sensitivity analysis of the health burden attribution to childhood undernutrition under the latest scenario framework for climate change research”
- 15) S. Yoshikawa, J. Cho, H. G. Yamada, N. Hanasaki, and S. Kanae: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4289-4310, doi:10.5194/hess-18-4289-2014. (2014)
“An assessment of global net irrigation water requirements from various water supply sources to

sustain irrigation: rivers and reservoirs (1960-2050)”

- 16) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae and T. Oki: *Hydrological Sciences Journal*, doi:10.1080/02626667.2014.888067/ (2015)
 “Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate”
- 17) A.G.Y. Gasparrini, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, J. Schwartz, A. Tobias, S. Tong, J. Rocklöv, B. Forsberg, M. Leone, M. De Sario, M.L. Bell, Y.L. Guo, C.F. Wu, H. Kan, S.M. Yi, M.S.Z.S. Coelho, P.H. Saldiva, Y. Honda, H. Kim, B. Armstrong: *The Lancet*, 386, 991, p369-375 (2015)
 “Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multi-country study”
- 18) de Boer, B., A. M. Dolan, J. Bernales, E. Gasson, H. Goelzer, N. R. Golledge, J. Sutter, P. Huybrechts, G. Lohmann, I. Rogozhina, A. Abe-Ouchi, F. Saito, and R. S. W. van de Wal: *The Cryosphere* 9, 881-903, doi:10.5194/tc-9-881-2015 (2015)
 “Simulating the Antarctic ice sheet in the late-Pliocene warm period: PLISMIP-ANT, an ice-sheet model intercomparison project”
- 19) Seposo XT, Dang TN, Honda Y. : *Int J Environ Res Public Health* 2015 Jun 16;12(6): 6842-57 (2015)
 “Evaluating the Effects of Temperature on Mortality in Manila City (Philippines) from 2006-2010 Using a Distributed Lag Nonlinear Model”
- 20) Gasparrini A et al.: *The Lancet* 2015 Jul 25; 386(9991): 369-75 (2015)
 “Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multi-country study”
- 21) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: *Global Biogeochem. Cycles*, 29, doi:10.1002/2015GB005181 (2015)
 “Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming”
- 22) Gasparrini A et al. *Environ Health Perspect* 2015 Nov; 123(11): 1200-7 (2015)
 “Temporal Variation in Heat-Mortality Associations: A Multi-Country Study”
- 23) Tiratas Suwathep, Wee Ho Lim, Yoshihiko Iseri, Shinjiro Kanae: *Hydrological Research Letters*, Vol. 9, No. 4, pp. 103-106 (2015)
 “Generalized method to estimate value of urban assets for natural disaster risk assessment at the macro scale”
- 24) Tran ND et al.: *Global Health Action* 2016 Jan, 13; 9:28738 (2016)
 “Characterizing the relationship between temperature and mortality in tropical and subtropical cities: a distributed lag non-linear model analysis in Hue, Viet Nam, 2009-2013”
- 25) Shigemitsu, M., N. Gruber, A. Oka and Y. Yamanaka: *Global Biogeochem. Cycles*, 30, doi:10.1002/2015GB005297 (2016)
 “Potential use of the N₂/Ar ratio as a constraint on the oceanic fixed nitrogen loss”
- 26) C Imai, A.G. Barnett, M Hashizume and Y. Honda: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13,5, 454 (2016)
 “The Role of Influenza in the Delay between Low Temperature and Ischemic Heart Disease: Evidence from Simulation and Mortality Data from Japan”
- 27) Gasparrini, Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Tobias, A. Zanobetti, J.D. Schwartz, M. Leone, P. Michelozzi, H. Kan, S. Tong, Y. Honda, H. Kim and B.G. Armstrong: *Am J Epidemiol* 183,11, 1027-1036 (2016)
 “Changes in susceptibility to heat within the summer: a multi-country analysis”
- 28) X.T. Seposo, T.N. Dang and Y. Honda: *Glob Health Action* 9,31500 (2016)
 “EFFECT MODIFICATION IN THE TEMPERATURE EXTREMES BY MORTALITY SUBGROUPS AMONG THE TROPICAL CITIES OF THE PHILIPPINES”
- 29) C.F.S. Ng, M. Boeckmann, K. Ueda, H. Zeeb, H. Nitta, C. Watanabe and Y. Honda: *Global Environmental Change* 39, 234-243 (2016)
 “Heat-related mortality: Effect modification and adaptation in Japan from 1972 to 2010”
- 30) 木口雅司, 井芹慶彦, 鼎信次郎, 沖大幹: *土木学会論文集G(環境)*, 72(5), I_241-I_246 (2016) 「将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性」
- 31) 井芹慶彦, 宮崎千尋, Lu Gao, 吉川沙耶花, 鼎信次郎: *土木学会論文集G (環境)*, Vol. 72, No.5, I213-I221 (2016)

「複数の将来気候シナリオと社会経済シナリオを入力した統合評価モデルFUNDの水分野影響関数による経済被害推計値の特性分析」

- 32) Bakkerl, P., A. Schmittner, J.T.Lenaerts, A. Abe-Ouchi, D. Bi, M. R. van den Broeke, W.-L. Chan, A. Hu, R.L. Beadling, S.J. Marsland, S.H. Mernild, O.A. Saenko, D. Swingedouw, A. Sullivan, and J. Yin: *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12,252–12,260, doi:10.1002/2016GL070457 (2016)
“Fate of Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting”
- 33) Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, and A. Laîné: *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-017-3523-2, (2017) “The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium.”
- 34) ZW Kundzewicz, V Krysanova, R Dankers, Y Hirabayashi, S Kanae, FF Hattermann, S Huang, PCD Milly, M Stoffel, PPJ Driessen, P Matczak, P Quevauviller, H-J Schellnhuber: *Hydrological Sciences Journal*, 6, 1, 1–14 (2017)
“Differences in flood hazard projections in Europe-their causes and consequences for decision making”
- 35) Shigemitsu, M., A. Yamamoto, A. Oka and Y. Yamanaka: *Global Biogeochem. Cycles*, in revision (2017)
“One possible uncertainty in CMIP5 projections of low-oxygen water volume in the Eastern Tropical Pacific”
- 36) Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kushara, H. Hasumi, R. Ohgaito: *Journal of Climate* (2017 in press)
“Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO₂ doubling”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae, and T. Oki: AGU fall meeting, San Francisco, USA, (2012)
“Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate”
- 2) M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi: 3rd International Conference on Earth System Modeling, Hamburg, Germany (2012)
“Multi-model feedback analysis in LGM and increased CO₂ experiments.”
- 3) M. Kiguchi, Y. Shen, A. Champathong, P. Petvirojchai, N. Aranyabhaga, N. Sukhanthamat, B. Archevarahuprok, S. Apipatanavis, N. Junjaroen, S. Kanae and T. Oki: Knowledge for the Future” IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Swedish Exhibition & Congress Centre, Gothenburg, Sweden, (2013)
“Future water stress under a warming climate over the Indochina Peninsula”
- 4) Y. Honda, M. Kondo, E. Minakuchi, M. Kayaba, K. Nakazawa, K. Sugimoto, Y. Kim, H. Kim, Y.-L. Guo and M. Hashizume: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013) “Effect of absolute humidity on heat-mortality relation in Japan.”
- 5) S. Kanae, Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe and H. Kim: The 6th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Seoul, Korea, (2013)“Global flood risk in the last decades of the 21st century under the latest emission scenarios”
- 6) Y. Iseri and W.H. Lim: ICA-RUS/CCRP-PJ2 International Workshop 2013, Tokyo, Japan, (2013)
“Climate change risks on food shortage, floods and tropical cyclones”
- 7) R. Bhattarai, K. Yoshimura, M. Kiguchi, K. Noda, S. Nakamura and T. Oki: Japan Geoscience Union Meeting 2014, Yokohama, Japan, (2014)
“Interior flood damage in Japan: Present and future”
- 8) T. Yokohata, K. Nishina, K. Takahashi, M. Kiguchi, Y. Iseri, T. Sueyoshi, M. Yoshimori, K. Iwase, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, Y. Honda, N. Hanasaki, Y. Masaki, A. Ito, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada, S. Emori and T. Oki: AGU fall meeting 2014, U54A-05, Sun Francisco, USA, (2014)
“Visualization of the chains of risks under global climate change”
- 9) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka and A. Abe-Ouchi: Ocean Science Meeting, Hawaii, USA, (2014)
“Estimations of methane hydrate inventory loss and its potential impact on dissolved oxygen”
- 10) M. Shigemitsu, A. Yamamoto, A. Oka and Y. Yamanaka: IMBER Open Science Conference, Bergen, Norway,

(2014)

“Climate-driven variability and anthropogenic trend of oceanic suboxia”

- 11) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka and A. Abe-Ouchi: Ocean Science Meeting, Hawaii, USA (2014)
“Estimations of methane hydrate inventory loss and its potential impact on dissolved oxygen.”
- 12) SAITO Fuyuki, Kunio TAKAHASHI, Ayako ABE-OUCHI.: International Symposium on Contemporary Ice-Sheet Dynamics: ocean interaction, meltwater and non-linear effects, Cambridge, United Kingdom (2015) “Development of a numerical ice-sheet/ice-shelf model IcIES: numerical exercises in ice-sheet simulation”
- 13) T. Obase, A. Abe-Ouchi, K. Kusahara and H. Hasumi: 第5回極域科学シンポジウム(2014)
“Modelling Antarctic ice shelf melting under LGM and doubled CO2 climate using ice shelf-ocean model and climate model”
- 14) Y. Honda, M. Hashizume, H. Kim, H. Kan, Y.L.L. Guo, K. Ueda, M. Bell: Twenty-sixth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Seattle, USA, (2014)
“Relation of external causes with temperature and climate”
- 15) Kiguchi, M., Iseri, Y., Tawatari, R., Kanae, S., Oki, T.: American Geophysical Union 2015 Fall meeting, H41A-1283, San Francisco, USA, (2015)
“Uncertainty of tipping elements on risk analysis in hydrology under climate change”
- 16) Tawatari, R., C. Miyazaki, Y. Iseri, M. Kiguchi and S. Kanae: American Geophysical Union 2015 Fall meeting, NH51C-1915, San Francisco, USA, (2015)
“Global projection of coastal exposure associated with sea-level rise beyond tipping points”
- 17) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W. H. Lim, C. Miyazaki, S. Kanae and T. Oki: American Geophysical Union 2015 Fall meeting, PA31B-2162, San Francisco, USA, (2015)
“Visualizing interconnections among climate risks”
- 18) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: 26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015, Praha, Czech Republic, (2015)
“Global oxygenation by enhanced deep convection in the Southern Ocean under millennial-scale global warming”
- 19) 柴野良太, 山中康裕, 重光雅仁: 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張, 千葉 (2015)
「温暖化による北太平洋域の水産資源に対する影響評価」
- 20) Y Honda Y, H Kim: Our Common Future under Climate Change, Paris, France, (2015)
“Climate change impact on heat-related mortality under some RCP scenario”
- 21) Y. Iseri, W.H. Lim, T. Suwathep, C. Miyazaki, Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae: Tokyo Conference on International study for disaster risk reduction and resilience, Tokyo, Japan, (2015)“Risk of flooding at the global scale under climate change”
- 22) 横島徳太・田中克政・仁科一哉・高橋潔・江守正多・木口雅司・本田靖・岡田将司・井芹慶彦・眞崎良光・山本彬友・重光雅仁・吉森正和・末吉哲雄・岩瀬健太・花崎直太・伊藤昭彦・櫻井玄・飯泉仁之直・西森基貴・W.-H. Lim・宮崎千尋・岡本章子・鼎信次郎・沖大幹: 日本地球惑星科学連合 連合大会 2016年大会 (2016)「気候変動リスクの部門間相互作用の可視化」
- 23) 木口雅司・井芹慶彦・鼎信次郎・沖大幹: 第24回地球環境シンポジウム(2016)
「将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性」
- 24) 柴野良太, 山中康裕, 重光雅仁: 日本海洋学会2016年度春季大会, 東京大学, 東京 (2016)
「温暖化に伴う水産資源への影響評価」
- 25) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: AGU fall meeting (2016)
“Multimillennium changes in dissolved oxygen under global warming: results from an AOGCM and offline ocean biogeochemical model”
- 26) Y Honda: Adaptation Futures 2016, Rotterdam, the Netherlands, 12 May, (2016)
“Is adaptation to a warming world effective? – Difficulty in implementing heat-health warning system even in developed countries”
- 27) Y Honda, XT Seposo, DT Ngoc, M Hashizume, H Kim: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, (2016)

“Negative risk of cold on lag 0 day in distributed lag pattern can be due to preceding mortality peak before the temperature trough”

28) Ryunosuke Tawatari, Yoshihiko Iseri, Masashi Kiguchi, Shinjiro Kanae: American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, GC21E-1145, (2016)

“Global Coastal Exposure due to Sea-level Rise beyond Tipping Points with Multiple Warming Pathways”

7. 研究者略歴

課題代表者: 鼎 信次郎

1971年生まれ、東京大学大学院工学系研究科にて博士(工学)取得

国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系教授

研究分担者

1) 沖 大幹

1964年生まれ、東京大学大学院工学系研究科にて博士(工学)取得

現在、国連大学上級副学長、国立大学法人東京大学生産技術研究所教授

2) 本田 靖

1955年生まれ、東京大学大学院医学系研究科にて博士(医学)取得

現在、国立大学法人筑波大学体育系教授

3) 阿部 彩子

1963年生まれ、スイス連邦国立工科大学地球科学科にてPh.D.取得

現在、国立大学法人東京大学大気海洋研究所教授

4) 山中 康裕

1964年生まれ、東京大学大学院理学系研究科にて博士(理学)取得

現在、国立大学法人北海道大学大学院地球環境科学研究院教授

S-10-3 クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究

(1) 地球物理学的な臨界現象のリスク推計

国立大学法人東京大学生産技術研究所

沖 大幹

<研究協力者>

木口 雅司

平成24～28年度累計予算額：70,610千円（うち平成28年度：12,750千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、プロジェクト全体の中で、リスク分析を担当した。リスク分析は気候変動によって生じ得る事象の特性評価とそれがもたらす社会への影響の推計からなる。気象変動リスクの特性評価研究では、気候変動によって生じ得る事象の中でも、特に、海洋の熱塩循環（THC; Thermohaline circulation）の変化、グリーンランドなど極地の氷床の大規模融解等、気候変動に伴って生じる確率は高くなくともいったん生じると深刻な影響が懸念されている、地球物理学的な臨界現象に注目し、気候モデルによる数値実験結果や古気候を参考にしつつそれらの現象を列挙し、その発生メカニズムと起こりやすさ、地球全体の気候変化との関係を明らかにした。ここで述べる地球物理学的な臨界現象とは、何十年に1回以下という非常に稀な事象であるが、一度発災すると社会への影響ははるかに甚大である事象であり、これらのリスクの特性評価研究は、対象事例が少ないこともあり、明らかにされていなかった。

気候変動の推計研究では、気候モデル結果や過去の社会影響のデータを用いて、気候変動によって生じ得る海水面の上昇、各地域の気温や降水量の変化とその極端現象の発生頻度の変化等を踏まえて、全球平均気温を指標として表現されるようないわゆる気候変動レベルごとに生じ得る社会への影響を、水、食料、エネルギー、健康等の分野に関して列挙し、各分野の気候変動リスクの大きさを推計した。

最終的に、本テーマは、気候変動リスク推計値を提供し、気候変動に対して人間－自然系の陸面システムの応答の検討（テーマ2）や、気候変動リスク戦略検討（テーマ1）に貢献した。また、テーマ5のリスクコミュニケーションに対し、気候変動レベルごとの気候変動リスクの整理された知見を提供した。

[キーワード]

ティッピングエレメント、ティッピングポイント、降水強度、水関連災害、アジアモンスーン変動

1. はじめに

COP16（気候変動枠組条約第16回締約国会議）では、世界全体で平均気温上昇を工業化以前と比べ「2℃」以内に抑えるという目標のもと、様々な行動が実施されている。目標達成に向けた国際的な排出緩和を進める枠組みの議論や地球規模課題の気候変動リスクに対してどのような行動・対策を実行すべきかを議論するためには、社会の価値判断を網羅的に考慮した適切なリスク分析・評価を構築する必要がある。地球環境研究総合推進費戦略的研究「温暖化影響総合予測プロジェクト（JFY2005～2009）」において、日本及びアジア地域に対する温暖化影響の包括的な研究が実施され、洪水や土砂災害、高潮、熱波による事象解析及び被害コスト、森林や農業分野における影響評価や被害コストの定量的な評価が示されたが、国際的合意形成への寄与や日本の交渉ポジション、国民の気候変動問題への理解の深化に貢献するためには、地球規模の定量的な評価およびそれらのリスク管理戦略を構築・提示する必要がある。それらの学際的な科学的知見は、このリスク管理戦略の構築の基礎となるものであり、とくにクリティカルな事象の気候変動リスクの分析は、現時点で利用可能な最大限の包括的・中立的な科学的知見に基づくべきであり、その不確実性を明示的に示すことが求められている。

2. 研究開発目的

本テーマは、人類が回避すべきと考えられる温暖化影響の候補について、それぞれが発現する温度上昇レベル、悪影響の規模や性質などを、制約条件や不確実性を含めて網羅的に評価した結果を提示する。気候変動によって生じ得る事象の中でも、特に地球物理学的な臨界現象に注目して、その発生メカニズムと起こりやすさ、地球全体の気候変化との関係を、気候モデルや古気候を参考に明らかにし、気候変動リスクの特性評価研究を実施する。その上で、各気候変動リスクにおける数値シミュレーション結果と過去の気候変動リスクに関連する統計データを用いて気候変動レベルごとの影響関数を作成し、排出シナリオごとに求められる将来推計値から求められる気候変動リスクを推計・分析する。

3. 研究開発方法

大規模な氷床融解・流出や海洋の大循環の大規模な変化等、気候変動に伴って生じる確率は高くなくとも一旦生じると深刻な影響が懸念されている地球物理学的な臨界現象について、将来だけでなく過去の大規模な変化による影響も含めた既存評価手法の調査を通じてその手法開発を行い、影響評価を実施した。その中でも地球物理学的な臨界現象による影響評価の一つとして地球水循環に大きく影響する降水強度の変化に関する影響を評価する手法について検討するため、気候変動に伴う気温上昇による豪雨の影響評価とその影響評価を行う際に利活用するGCMの最適推計手法を検討するため、GCM等の水循環のトレンドや変化の表現性の評価に注力して推進した。また、影響評価手法検討の一環として、アジアモンスーン域の水関連災害の被害額の算定し、さらにティッピングエレメントの具体例としてアジアモンスーンの弱化について知見の深化を目指した。具体的には例えば、GCM等の水循環のトレンドや変化の表現性についての研究では、オフライン陸面水文モデル（VIC; variable infiltration capacity）による最良推定値、新しいマルチセンサ衛星データ（Pan et al. 2012¹⁾）、20世紀再解析（20CR）を含む複数の地球気象再解析データを用いて、CMIP5（第5期結合モデル相互比較プロジェクト）の気象モデルにより算定される水循環の

トレンドや急激な変化の表現性を解析した。

本サブテーマは、すべてのサブテーマが着目すべき地球物理学的な臨界現象をテーマ会合を通じて議論の上設定し、サブテーマ（2）と連携して効率的なサブテーマ間連携の構築を図った。また、気候変動によって生じるリスクを網羅的・総合的に捉えることなどを目的として、テーマ2主導のもと、テーマ1と共同で気候変動リスクのインベントリ（目録）の作成を行った。「気候変動リスクインベントリ」とは、気候変動に伴うリスク（被害や利益）項目や、リスク項目間の因果関係が列挙されているものである。テーマ3はリスクインベントリの作成に関して主に、エネルギー、安全、経済・サービス、海洋生態系、地球システム、に関わる分野の文献調査を担当した。なおリスクインベントリ表では、地球システムに関わるリスクとして地球物理学的な臨界現象に着目しており、これに関する文献調査とリスク項目の抽出を、サブテーマ（4）、サブテーマ（6）と共同して行った。また、サブテーマ（1）はサブテーマ（2）と連携してテーマ3の総括班として、サブテーマ（2）～（6）にそれぞれ属する専門家へ、インベントリ作成の際の担当箇所の配分等も行った。更に、各サブテーマの専門家が文献調査を通じて抽出したリスク項目の集約・整理をサブテーマ（2）と共同で行うと共に、テーマ1、テーマ2との情報交換や調整を行うことで「気候変動リスクインベントリ」の作成に貢献した。以下では、前半部分について述べる。後半部分については、サブテーマ（2）で紹介する。

（1）ティッピングエレメントのリスク推計

本プロジェクトでは、排出シナリオ（代表的濃度シナリオ（RCP; Representative Concentration Pathways）に対応させたもの）や戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性を導き、洪水や熱ストレスなどの今世紀既に発現している現象とティッピングエレメントとを直接的あるいは間接的に比較できるような知見の提供を目指している。Lenton et al. (2008)²⁾やIPCC AR5 (IPCC, 2013³⁾)で紹介されているティッピングエレメントに関するティッピングポイントやその遷移期間に関する論文を調べ、ある幅を持ったティッピングポイントとその遷移期間を抽出する。それを用いて排出シナリオや戦略シナリオとの関連性を導出する。

まずRCPとティッピングエレメントとの関連性について述べる。Lenton et al. (2008)やIPCC AR5 (IPCC, 2013)で紹介されているティッピングエレメントに関するティッピングポイントやその遷移期間に関する論文を調べ、ある幅を持ったティッピングポイントとその遷移期間を抽出した。ここでは、RCPシナリオ(2.6、4.5、6.0、8.5)の全球平均気温の平均値(Zickfeld et al., 2013⁴⁾; IPCC, 2013)と、「北極海の夏の海氷(の喪失)」、「グリーンランドの氷床(の融解)」のティッピングポイント(IPCC, 2013)を用いて発現年を図にした。「北極海の夏の海氷(の喪失)」のティッピングポイントは、IPCC (2013)がComiso and Nishio (2008)⁵⁾やMassonnet et al. (2012)⁶⁾を引用し、1986～2005年(産業化以前と比べて約0.6℃高い)と比べて1.6～2.1℃をティッピングポイントとした。一方、「グリーンランドの氷床(の融解)」のティッピングポイントは、IPCC (2013)で2つの論文が示されているが、元論文と値が異なったため、IPCC (2013)で述べられている産業化以前と比べて約1.0～4.0℃の昇温値を用いた。各RCPでティッピングエレメントが発現しない場合は、「回避」と記した。

次に戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性について述べる。RCPとの関連性の調査と同様に、戦略シナリオ「TG15CS36」、「TG20CS36」、「TG25CS36」と「BaU (SSP2)」の全球平均気温の上限値、平均値、下限値と「北極海の夏の海氷(の喪失)」、「グリーンランドの

氷床（の融解）」のティッピングポイント（IPCC, 2013）を用いて発現年を推計した。そのうち、「グリーンランドの氷床（の融解）」や「北極海の夏の海氷（の喪失）」と戦略シナリオ「TG15CS36」、「TG20CS36」、「TG25CS36」および「BaU（SSP2）」との関連性を示した。

（２）気温上昇による豪雨の影響評価とその影響評価に利活用するGCMの最適な推計手法の検討

IPCC（2007）⁷⁾などで予測されている気候変動に伴う気温の上昇による豪雨の強化について、アジアモンスーン域の中でも特に水関連災害の多いバングラデシュについて解析を行った。研究手法はUtsumi et al.（2011）⁸⁾を参考にした。最初に現在気候におけるバングラデシュ全域の降水量と地上気温の関係の解析には、バングラデシュ気象局の34地点における日単位の地上観測値を用いた。これらの観測地点のうち観測期間の十分に長い地点を抽出し、7つの行政区分単位として解析を行った。その結果、全国で24地点の観測地点のデータを選択した。また対象とする期間は1950年～1999年である。まず各地区それぞれについて対象全期間から降水が観測された日のデータを抽出する。本稿では各タイムステップで降水が観測された場合、それを「降水イベント」と呼ぶこととする。各降水イベントについて、降水イベントの発生日の日平均気温を、1℃幅の気温ビンに分類する。こうして作成された気温ビンごとに降水量の99パーセンタイル値を計算した。次に、将来気候データとして用いるGCM（MIROC5、RCP8.5）の信頼性を評価するため、日平均気温において現在気候シミュレーションの値とバングラデシュ気象局の観測値を用いてバイアス補正を行った。最後にバイアス補正された将来気候データを用いて上述した現在気候における観測値を用いて解析手法を用いて気温ビンごとに降水量の99パーセンタイル値を計算した。

次に、その影響評価に利活用するGCMの最適な水系手法の検討について、述べる。地球温暖化によって地球水循環は促進され、その結果として水文気象の極端現象の頻度や強度は変化すると考えられている。陸面では降水強度は蒸発フラックスによって制限され、それはまた有効根圏土壌水分量や大気の水蒸気含有量によって制限されている。近年の観測に基づく1982年から2008年についての解析は1982年から1997年にかけて全球陸面蒸発散量は年次増加し、その後は減少を示す。この減少は特にアフリカとオーストラリアにおける土壌水分保持量の増加によって説明しうる。CMIP5の全球気候モデルによってエネルギーによる制限から水による制限といった変化が同様に表現されているかが重要な問題である。本研究では、オフライン陸面水文モデル（VIC; variable infiltration capacity）による最良推定値、新しいマルチセンサ衛星データ（Pan et al. 2012）、20世紀再解析（20CR）を含む複数の地球気象再解析データを用いてCMIP5の気象モデルにより算定される水循環のトレンドや急激な変化の表現性を解析した。主要な解析対象としては大きな河川流域を用いたが、熱帯域や中緯度のように緯度帯も考慮した。データの均一性を評価するためにBai-Perron構造変化点検出法を適用し、均一な時区間について水収支のトレンドを算定し相互比較した。それぞれのデータセットについて変化点の相対的なタイミングを分析した。特に蒸発散の変化は温度と降水量の同時系列を用いて分析された。

（３）アジア域における将来社会経済シナリオを用いた水関連災害リスク

本研究で使用した気候変化シナリオは、用意されている4つの代表的濃度経路（RCP）シナリオのうち、2100年における1750年に対するおおよその合計放射強制力が約 8.5Wm^{-2} となるもの（RCP8.5）を用いた。2100年までの昇温量はおよそ 3.5℃ である。将来の第5期結合モデル相互比較計画（CMIP5、Taylor et al.（2012）⁹⁾）に提出された予測シミュレーション実験結果のうち、Hirabayashi et al.（2013）¹⁰⁾で用いられた大気大循環モデル（GCM）からRCP8.5シナリオの実験結果のある7

つのGCMを用いた。そのGCMの実験結果から得られる流出量を河川モデルに入力することで、将来のシミュレーションが可能となる。本研究では、Yamazaki et al. (2011)¹¹⁾で開発された河川氾濫モデル (CaMa-Flood) へGCMから得られた流出量をダウンスケールして入力し、河川流量、氾濫面積および浸水深を得た。この詳細な手法はHirabayashi et al. (2013)に記載されているので参照されたい。

一方の社会経済シナリオは、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) において実施された「脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究 (ALPS)」(本間ら、2011¹²⁾) が策定した人口、経済成長に関する長期の見通しを用いた。ALPSは、これまでの奇跡的とも言える高度経済成長から、先進国を中心に次第に緩やかなる経済成長へと変化していくシナリオA (中位技術進展シナリオ) と、奇跡的とも言える技術革新が今後も継続し一人当たりGDP成長も大きく成長するシナリオB (高位技術進展シナリオ) の2つの長期見通しを公開しており、そのうち本研究では、シナリオAを用いた。これらのデータは国別値であり空間分布は示されていない。そこで空間解像度が5分の人口分布 (History Database of the Global Environment⁶⁾) から分布情報を引用し、それに対して国別値の比を乗することで、ALPSシナリオを用いた本研究を可能とした。

土地利用データは、国土地理院と千葉大学が各国の国家地図作成機関と協力して衛星プロダクトMODISデータを用いて作成した地球地図土地被覆全球版 (GLCNMO) を用いた。空間解像度は30秒であるが、本研究では洪水による経済リスク推計のため、18秒にダウンスケールするとともに、21種類ある元の分類を4種類 (森林、森林及び耕作地、耕作地、都市、その他) に再分類した。

土地利用が異なれば同じ浸水深でも被害額が異なる。これまで土地利用ごとの浸水深-被害関数が提案されてきた (たとえばJongman et al. 2012¹³⁾)。本研究でもこの異なる土地利用を考慮するため、Sato et al. (2014)¹⁴⁾によって提案された浸水深を関数とする被害額算定手法を基本として用いた。Sato et al. (2014) では楽観的シナリオと悲観的シナリオを提案しているが、本研究では楽観的シナリオを用いた。また、浸水深が1m以下の場合は被害をゼロと仮定した。

上述したデータおよびシミュレーション結果を用いて、洪水リスクは、曝露対象となる人口分布に基づく資産、災害外力となる洪水浸水深、そして脆弱性となる浸水深-被害関数を用いて評価した。人口分布に基づく資産とは、上述した人口分布データに、ALPSのシナリオAによって提供される2000年および2100年の一人当たりGDPを乗ずることで推定した。また、洪水外力である洪水浸水深は年最大浸水深を用いた。その結果、各グリッドにおいて、人口分布、一人当たりGDP、浸水深-被害関数から、被害額が求められる。

(4) アジアモンスーンの季節進行への影響

ティッピングエレメントの一つで、日本の気候にも大きな影響を持つ夏季インドモンスーン循環の弱体化について、これまでの知見を整理し、将来の変化について考察を行った。インド亜大陸におけるこれまで雨量の増加あるいは減少に関する研究はされているが、季節進行に関する研究は少なく、今後将来どうなるかについての研究はさらに少ない。そこで、これまでの観測雨量とGCMから得られる将来の雨量を用いて、雨季の開始、終了とその期間のこれまでの変化と将来変化を調べた。

4. 結果及び考察

(1) ティッピングエレメントのリスク推計

ティッピングエレメントのリスク推計について述べる前に、まずティッピングエレメントに関する知見の整理の結果を示す。ティッピングエレメント（Tipping element）とは、いわゆる地球温暖化に伴う気候変動が進行して、あるティッピングポイント（臨界点）を過ぎた時点で、不連続といっても良いような急激な変化が生じて、結果として大惨事を引き起こすような気候変動の要素を指す。Lenton et al. (2008) で取り上げられているティッピングエレメントは、表(1)-1（木口ほか、2015¹⁵⁾）のとおりである。このうち、「北極海の夏の海氷（の喪失）」と「グリーンランドの氷床（の融解）」は21世紀のうちにティッピングポイントに到達する可能性が高く、「西南極氷床（の不安定化、融解）」、「大西洋熱塩循環（の減速）」、「エルニーニョ・南方振動（の振幅増大）」、「夏のインドモンスーン（循環の弱体化）」、「サヘル・西アフリカモンスーン地域（の植生割合増大）」についてもティッピングポイントに近づいて急激な現象が観察される可能性がある。ただし、急激といっても、10年程度で遷移する可能性のある「北極海の夏の海氷（の喪失）」や「夏のインドモンスーン（循環の弱体化）」、「サヘル・西アフリカモンスーン地域（の植生割合増大）」などもあれば、「グリーンランドの氷床（の融解）」や「西南極氷床（の不安定化、融解）」のように数百年以上かけて変化すると想定されるものもあり、まさに地球物理学的時間スケールで「急激」、と言えよう。

ティッピングエレメントによる急激な変化は、必ずしも悪い面ばかりではない。たとえば、「北極海の夏の海氷（の喪失）」は固有の生態系への影響という悪い面もあれば北極海航路という必ずしも悪いとは言えない面もある。また、「サヘル・西アフリカモンスーン地域（の植生割合増大）」は湿潤化に伴う従来乾燥地に適応した種が失われるなどの悪影響が考えられるが、植生割合が増加しCO₂吸収が増加するといった具合である。最新のIPCC第5次評価報告書（AR5）第1作業部会（WG1）報告書（IPCC、2013）では、「ティッピングエレメント」という言葉を使用せず、「急激あるいは非線形な遷移」とした。また、そのような急激あるいは非線形な遷移は、気象現象だけに限らず、地球システムを構成するその他の現象としても生じることが明示的に扱われている。

表(1)-1 Lenton et al. (2008) で取り上げられているティッピングエレメントとその想定される影響

	ティッピングエレメント	想定される影響
①	北極海の夏の海氷（の喪失）	温暖化の促進、生態系への影響
②	グリーンランドの氷床（の融解）	海面の上昇
③	西南極氷床（の不安定化、融解）	海面の上昇
④	大西洋熱塩循環（の減速）	地域的な寒冷化、海面水位変動、熱帯収束帯の移動
⑤	エルニーニョ・南方振動（の振幅増大）	東南アジア等における早魃
⑥	夏のインドモンスーン（循環の弱体化）	降水量減少、乾燥化、早魃
⑦	サヘル・西アフリカ モンスーン地域（の植生割合増大）	湿潤化
⑧	アマゾンの熱帯林（の植生割合の減少）	生物多様性の喪失、降水量の減少
⑨	北方林（の植生割合の減少）	植物群落の入れ替わり

ティッピングエレメントが議論されるようになったのは、自然科学的な気候変動推計では数学的なbifurcation（分岐）のアナロジーで、ある定常状態から別の定常状態へと比較的短時間のうち

に気候システムが遷移する可能性もある、と考えられるのに、地球温暖化の損益を算出するような統合評価モデル（IAM）などでは排出量と地球温暖化の進展と想定被害とが比較的連続的に滑らかに変化するように取り扱われているからのようだ。また、一般的にティッピングエレメントという言葉が使われる場合には、一旦別の安定状態に変化してしまったら、温暖化レベルを多少減らしても元には戻らない、不可逆である、という意味を含んでいることが多いが、ティッピングエレメントが必ずしも不可逆であるとは限らない。同様に、微少な変化要因に対して元に戻そうとするフィードバック機構が働かず元にはもどらない不安定な状態、を含意することも多い。

ティッピングエレメントは、ティッピングポイントを一旦過ぎてしまったらこの世の終わりを迎えてしまうようなこれまでに経験したことのない大惨事をもたらす、という印象もあり、criticalな事象、と呼ばれることもある。しかし、表(1)-1の右欄に書いたような影響だとすると、海面上昇の速度や極端な旱魃の頻度が従来想定されているよりもさらに増大するという点は問題だが、人類1万年の歴史で経験したことがまったくない影響というわけでもない。

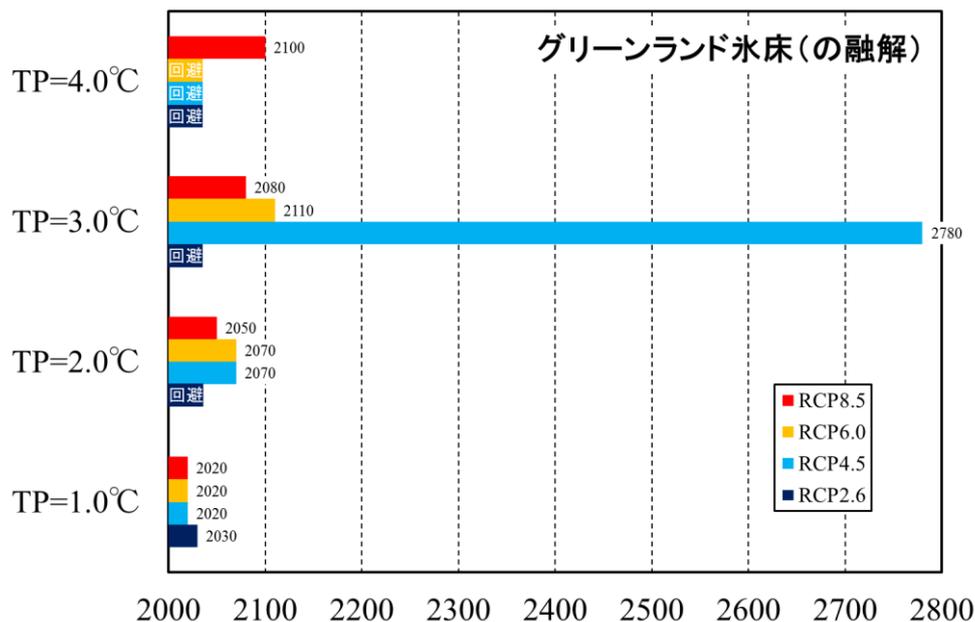
古気候学では、気候プロキシやモデル計算による古気候復元から、ティッピングエレメントの理解に挑戦している。過去の海水準復元によれば、2014年とほぼ同じCO₂濃度であった300万年前には海水の熱膨張を含めて6m以上高かったことが示されており（Dutton et al., 2015¹⁶⁾）、南極氷床モデルを用いて、2100年までに1m以上、2500年までに15m以上の海面上昇への寄与のポテンシャルがあることが指摘されている（DeConto and Pollard, 2016¹⁷⁾）。また最終氷期（Last Glacial Period）が約1万年前に終了した後、ヤンガードリアス期と呼ばれる非常に短期間で約7.7℃以上下降した（Alley et al., 1993¹⁸⁾）時期があった。原因は大西洋熱塩循環の弱화가有力であったが、北米大陸への地球外飛来物（彗星や隕石）による説（Kennett et al., 2009¹⁹⁾）が最近では有力だ。その後、後氷期への移行期、日本で縄文海進と呼ばれる全球で温暖な時期があり、日本周辺では現在より約1～2℃高く、2～3m海水準が高かった。

一方で、将来のティッピングエレメントの発現について、モデルを用いた知見が発表されつつある。大西洋熱塩循環の弱化については、CMIP5を用いて過去の再現及び今世紀末（モデルによっては2300年）までの発現が多くのモデルで示されている（Weaver et al., 2012²⁰⁾）。また、これまで指摘されている13個のティッピングエレメントのこれまでの既往文献から得られるティッピングポイントと過去2万年前から2500年までの気温経路を示し、パリ協定で合意された目標全球昇温量1.5～2℃でどのティッピングエレメントが発現するかを表現した（Schellnhuber et al., 2016²¹⁾）。それによれば、西南極氷床（の不安定化、融解）、グリーンランドの氷床（の融解）、北極海の夏の海氷（の喪失）、アルプス氷河（の消失）、サンゴ礁（の死滅）が、パリ協定の枠組みでも発現する可能性があるとして指摘している。

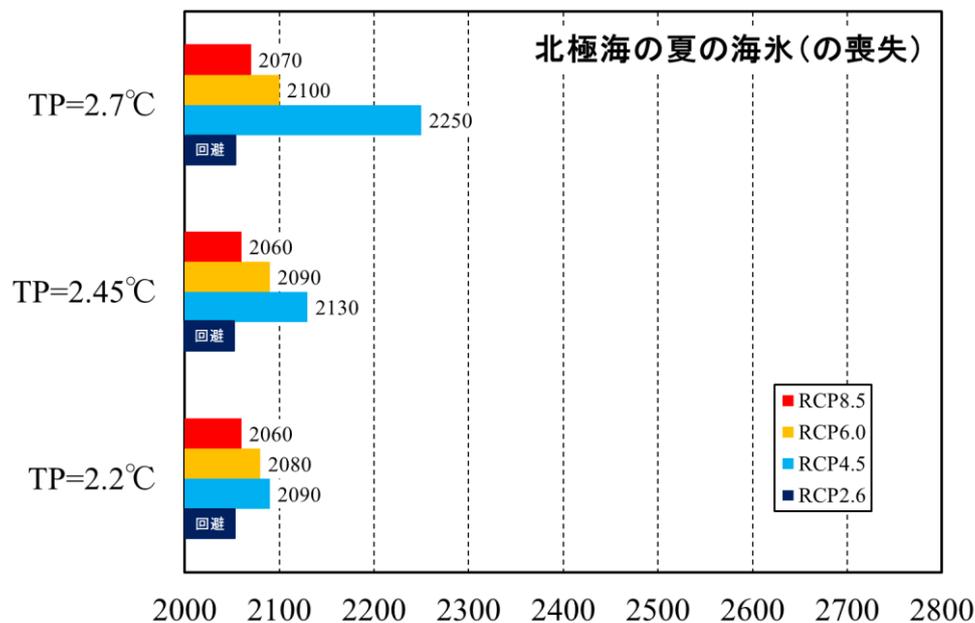
Lenton and Schellnhuber (2007)²²⁾は、今世紀中に生じる地球温暖化によって誘発される可能性のある、政策関連性の高いティッピングエレメントを示した。それによれば、今世紀中にはティッピングポイントに達しないものがある一方、北極海の夏の海氷の喪失やグリーンランド氷床の融解は、産業革命以降の全球平均気温が1～2℃程度上昇すると発生するとされ、その閾値の取り方が正しいとするならば、今世紀中にティッピングポイントに達する可能性が高いことが予想される（これら2つのティッピングエレメントのティッピングポイントについては、Lenton and Schellnhuber (2007) 以降の議論も含め、別途取り上げる。）。現在すでに産業革命以降1℃弱上昇している地球は、気温上昇がたとえ止まっても融解が止まらない領域に入りつつあることが言え

るだろう。そういった中で、新たな国際枠組を議論する上で温度上昇の目標をどのように設定するかが重要となる。しかしLenton and Schellnhuber（2007）で指摘しているようにその温度上昇幅にはまだ不確実性も大きく、また政策決定者が判断するに足る知見を研究者は提供できていない。つまり、その現象が起きた際にどれくらいの損害を受けるかをまだ定量的に示すことが困難であり、政策決定者は地球温暖化による被害と被害軽減のための投資との比較を可能とする知見を得ていないのである。

(a)



(b)

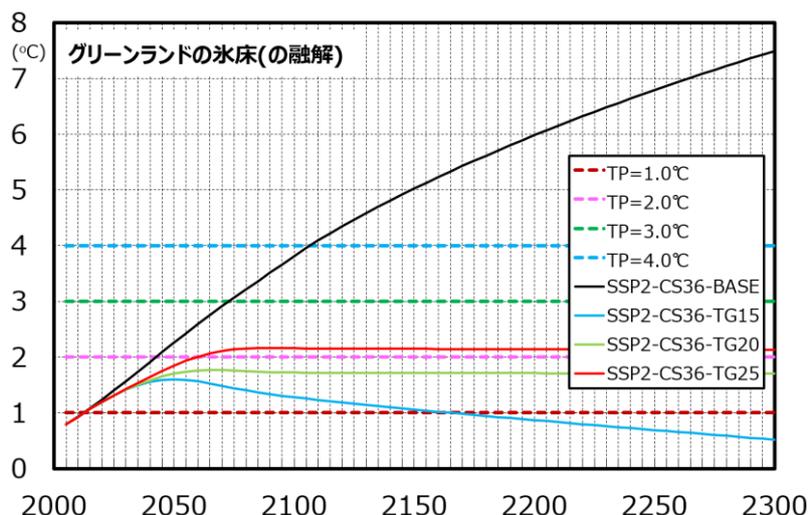


図(1)-1 ティッピングポイントから推計されたティッピングエレメント（(a)グリーンランド氷床の融解と(b)北極海の夏の海氷（の喪失））の発現年。縦軸は設定したティッピングポイントの昇温値。TPはティッピングポイントを指す。

次に、リスク推計の結果について述べる。本プロジェクトでは、排出シナリオ（代表的濃度シナリオ（RCP; Representative Concentration Pathways）に対応させたもの）やS-10独自戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性を導き、洪水や熱ストレスなどの今世紀既に発現している現象とティッピングエレメントとを直接的あるいは間接的に比較できるような知見の提供を目指している。

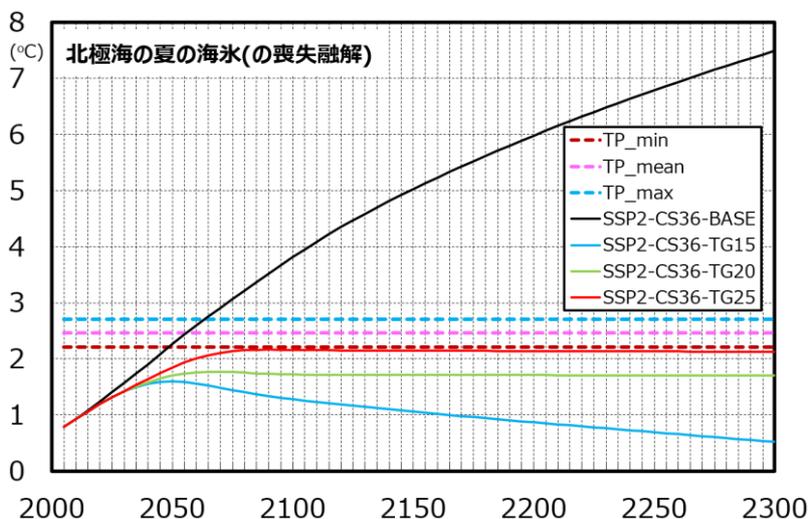
まずRCPとティッピングエレメントとの関連性について述べる。Lenton et al. (2008) やIPCC AR5 (IPCC 2013) で紹介されているティッピングエレメントに関するティッピングポイントやその遷移期間に関する論文を調べ、ある幅を持ったティッピングポイントとその遷移期間を抽出した。ここでは、RCPシナリオ (2.6、4.5、6.0、8.5) の全球平均気温の平均値 (Zickfeld et al. 2013; IPCC, 2013) と、「北極海の夏の海氷 (の喪失)」、「グリーンランドの氷床 (の融解)」(表(1)-1を参照) のティッピングポイント (IPCC 2013) を用いて発現年を図にしたのが図(1)-1である。「北極海の夏の海氷 (の喪失)」のティッピングポイントは、IPCC (2013) がComiso and Nishio (2008) やMassonnet et al. (2012) を引用し、1986～2005年 (産業化以前と比べて約0.6℃高い) と比べて1.6～2.1℃をティッピングポイントとした。一方、「グリーンランドの氷床 (の融解)」のティッピングポイントは、IPCC (2013) で2つの論文が示されているが、元論文と値が異なったため、IPCC (2013) で述べられている産業化以前と比べて約1.0～4.0℃の昇温値を用いた。各RCPでティッピングエレメントが発現しない場合は、「回避」と記した。「グリーンランド氷床の融解」は、RCP2.6の時ティッピングポイントが下限値を取る場合、2020年に発現するとなっているが、ティッピングポイントの平均値や上限値では発現しないなど、ティッピングエレメントのティッピングポイントの不確実性が示された。IPCC (2013) ではティッピングポイントが複数の文献値を列記されているが、複数の文献から生じる不確実性をどのように反映させるかが、今後の課題である。

次に戦略シナリオとティッピングエレメントとの関連性について述べる。RCPとの関連性の調査と同様に、戦略シナリオ「T15CS36」、「T20CS36」、「T25CS36」と「BaU (SSP2)」の全球平均気温と「北極海の夏の海氷 (の喪失)」、「グリーンランドの氷床 (の融解)」(表(1)-1を参照) のティッピングポイント (IPCC, 2013) を用いて発現年を推計した。そのうち、「グリーンランドの氷床 (の融解)」と戦略シナリオ「T15CS36」、「T20CS36」、「T25CS36」および「BaU (SSP2)」との関連性を示したのが図(1)-2、「北極海の夏の海氷 (の喪失)」と戦略シナリオ「T15CS36」、「T20CS36」、「T25CS36」および「BaU (SSP2)」との関連性を示したのが図(1)-3である。「グリーンランドの氷床 (の融解)」はティッピングポイントが下限値を取る場合、どの戦略シナリオで既にティッピングポイントを超えていることになるが、2220年頃にT15CS36では全球平均気温は下限値を下回る。一度ティッピングポイントを超えてその後下回る場合どのようになるのかは、これまで研究がほとんど無いため、よく分かっていない。一方で、ティッピングポイントが産業革命以降の全球平均気温上昇2℃とした場合、T15CS36、T20CS36ではその温度に達することは無さそうである。一方で、T25CS36だと、2060年頃にティッピングポイント到達が見込まれる。より厳しい目標の緩和水準を取ることでティッピングポイント到達の時期を遅らせることが出来るが、ティッピングポイントを超えた場合でも実際の問題 (大きな海面上昇とその被害) が生ずるのは数百年～数千年先になるため、この超過年を遅らせる効果の意義をどう解釈するかは議論が残る。また、一度ティッピングポイントを超えた後に再び下回る場合の現象についての知見が不足している。



図(1)-2 グリーンランドの氷床(の融解)のティッピングポイントの幅と戦略シナリオ(目標気温が(赤)1.5°C、(緑)2.0°C、(水色)2.5°C)と(黒)BaU(SSP2)との関係性。縦軸は産業革命からの全球平均昇温量(°C)。

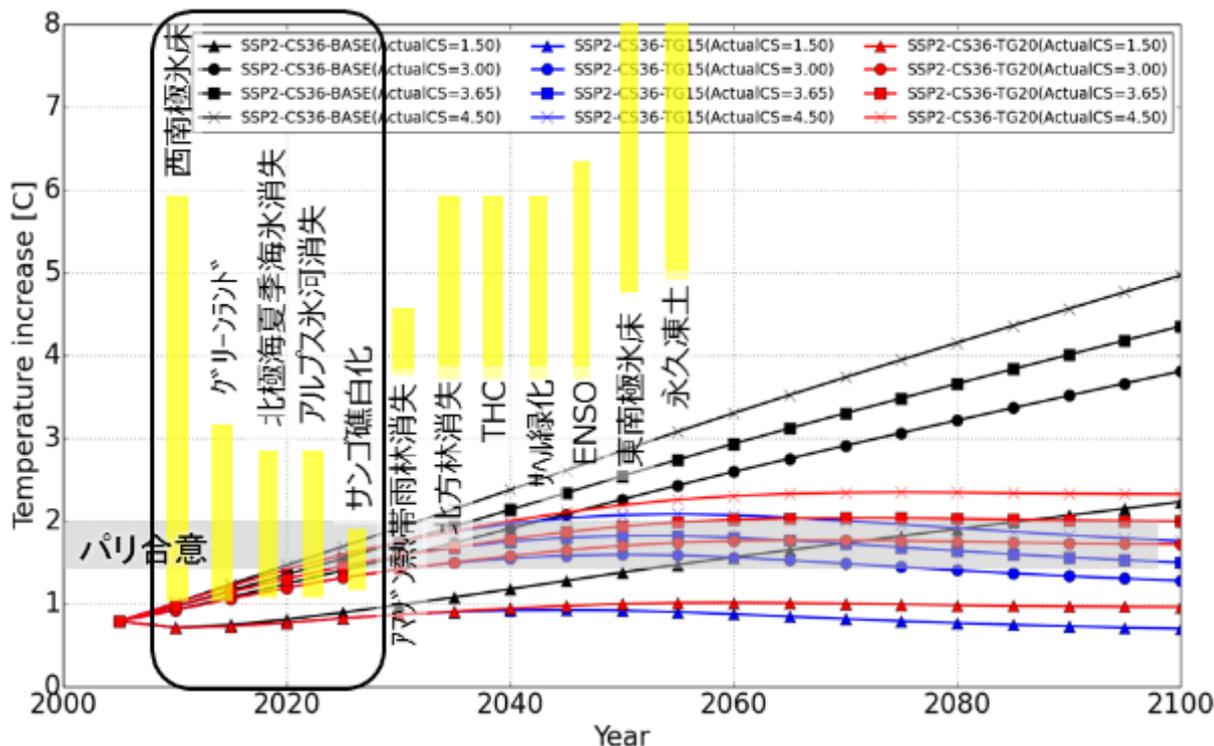
次に「北極海の夏の海氷(の喪失)」と3つの戦略シナリオとの関連性について述べる。3つの戦略シナリオのいずれの場合もティッピングポイントを超えることはなく、発現しない。一方、当然であるが、BaU(SSP2)では2050~2065年ごろにティッピングポイントの上限値と下限値を超過し、発現すると考えられる。



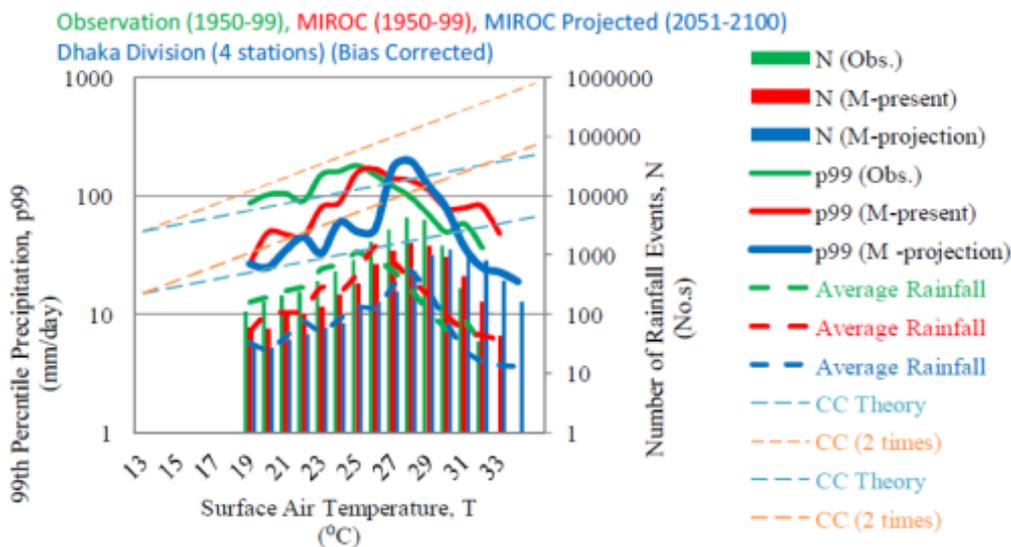
図(1)-3 北極海の夏の海氷(の喪失)のティッピングポイントの幅(下限値と上限値とその中間)と戦略シナリオ(目標気温が(赤)1.5°C、(緑)2.0°C、(水色)2.5°C)と(黒)BaU(SSP2))との関係性。縦軸は産業革命からの全球平均昇温量(°C)。

これまでティッピングエレメントが将来発現する可能性については、幅のあるティッピングエレメントを用いて、将来気候シナリオに基づいた大気大循環モデル(GCM; Global Circulation Model)などの全球平均気温あるいは特定のティッピングエレメントについては局地の気温上昇量がそれを超過するかで示されてきた(図(1)-4)。GCMが本来持つ不確実性の低減については、複数の大気大循環モデルを用いることで説明されてきた(Schellnhuber et al. (2016)、木口ほか(2016)²³⁾)。しかし、政策決定者や国民がより主体的な選択をするためには、幅がある値のみならず直接的な

数値や情報も重要である。



図(1)-4 S-10プロジェクトが作成した戦略シナリオ (SSP2-CS36) と各ティッピングエレメントのティッピングポイント (Schellnhuber et al. 2016を改変) との合成図から示される生起可能性。



図(1)-5 ダッカ地区の日降水量の99パーセンタイル値と気温の関係。Nは降水イベントの数、p99は99パーセンタイル値、Average Rainfallは平均降水量である。CC TheoryとはClausius-Clapeyronの式に基づく値。

本プロジェクトでは、不確実性が当然含まれるが、より分かりやすい情報として確率情報を付加することを目指しており、地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢第一版でも将来の課題と

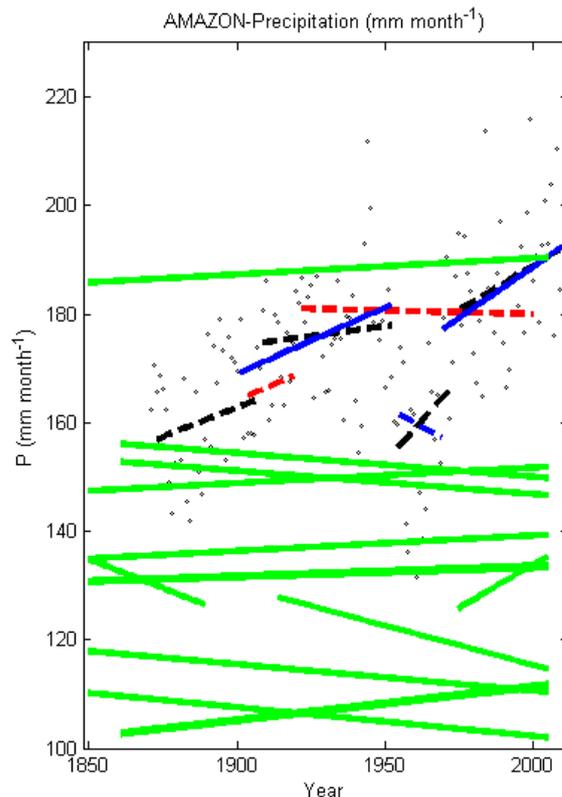
して示唆していた。依然不確実性を含むが、将来のティッピングエレメントの生起可能性を確率情報に付加した成果をサブテーマ（2）と共同で推進した。成果については、サブテーマ（2）で紹介する。

（2）気温上昇による豪雨の影響評価とその影響評価に活用するGCMの最適な推計手法の検討
地球物理学的な臨界現象による影響評価の一つとして地球水循環に大きく影響する降水強度の変化に関する影響を評価する手法について検討するため、気候変動に伴う気温上昇による豪雨の影響評価を実施した。アジアモンスーン域の中でも特に水関連災害の多いバングラデシュを対象として、気候変動に伴う気温上昇による豪雨の強化について解析を行った。その結果、観測値から得られた日降水量99パーセンタイル値は、Clausius-Clapeyron (C-C) の式を用いた理論上の値とその2倍の間に約25度までは正の関係を持つが、その後負の関係となることが分かった（図(1)-5）。このことは、Utsumi et al. (2011)における他の地域の結果と一致する。一方、将来気候においては、気温の上昇と99パーセンタイル値は28℃まで正の関係を持つがそれ以上では負の関係となっており、両者の関係が正から負へ遷移する点が現在気候に比べて2~3℃上昇していた。また、遷移点における99パーセンタイル値の大きさも17%増加していた。この傾向はダッカ地区以外でもChittagong地区（バングラデシュ南東部）を除き見られ、特にRajshahi地区（バングラデシュ南西部）では45%も増加していることが分かった。

地球物理学的な臨界現象による影響評価を行う際に活用するGCMの最適な推計手法を検討するため、H25年度はGCM等の水循環のトレンドや変化の表現性を評価し、解析した。その結果、CMIP5の水収支には地域的変動はあるものの大きなバイアスが存在していることが分かった。例えば、アマゾン川流域では1850年から2005年における降水量のトレンドは観測値では+2.7mm/yearであるが、CMIP5算定値では+/- 0.77 mm/yearの幅をもつ（図(1)-6）。このような大きな不確実性はこの地域における将来の予測性が低いことを示唆する。検出された変化点の72%は人工的な観測網の変化に起因することが20CRの均一性の総合的解析により示された。基本的なメカニズムを解明するために自然起因の気候関連の変化点については、今後の課題である。

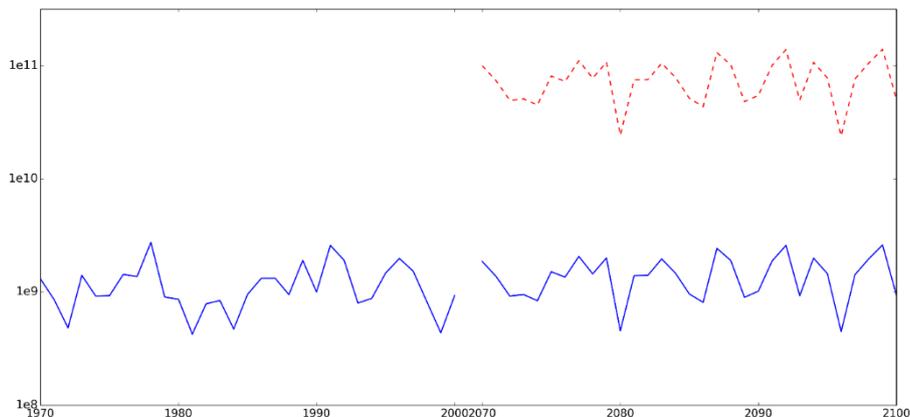
（3）アジア域における将来社会経済シナリオを用いた水関連災害リスク

ここでは、簡単に結果を述べる。本研究では、将来社会経済シナリオを用いて、現在と21世紀末における洪水リスクが推定された。将来社会経済シナリオはALPSのシナリオAを採用した。CMIP5の予測シミュレーション実験結果（RCP8.5）の流出量を河川氾濫モデルCaMa-Floodに入力



図(1)-6 アマゾン川流域の年間雨量の時系列。黒点は20世紀の再解析（20CR）。（緑線）CMIP5、（黒線）20世紀再解析、（青線）GPCC、（赤線）EU-WATCHにおけるKendall-Theil法による漸近線。信頼度95%以上は実線、それ以外は点線。

し、洪水リスクを評価するために必要な河川流量や氾濫面積、浸水深が得られた。その浸水深データを被害割合に換算する関数を用いて、最終的に洪水リスクが各グリッドで推定された。



図(1)-7 ダッカにおける洪水被害額の年々変動。単位は米ドル。

21世紀末における洪水頻度は、アジアのほぼ全域で増加傾向、氾濫面積はスリランカやバングラデシュ、ラオス、ミャンマーで約1.4～1.6倍となる一方、日本、台湾、タジキスタン、キルギスではほぼ変わらない傾向であった。被害額の推定では、経済発展の影響が非常に大きく気候変動による影響は大変小さいが、適応策を考える際に区別して評価する重要性を示した。

今後の課題として、被害額を減少させるための適応策のコストを推定し、被害額と適応策コスト、そして緩和コストを勘案して統合的な緩和・適応策の実施策定に向けた研究を実施する必要性が示された。

(4) アジアモンスーンの季節進行への影響

モンスーン循環の弱化は、雨をもたらす恩恵によって生活が成り立っているモンスーンアジア域において大変大きな問題となってくる。特に季節進行の変化は、農家の農事歴をも変えることを示唆しており、今後気候変動によってどのように変化するかあるいはこれまで変化してきているのかを示すことは意義がある。そこで、インド亜大陸を研究対象とし、

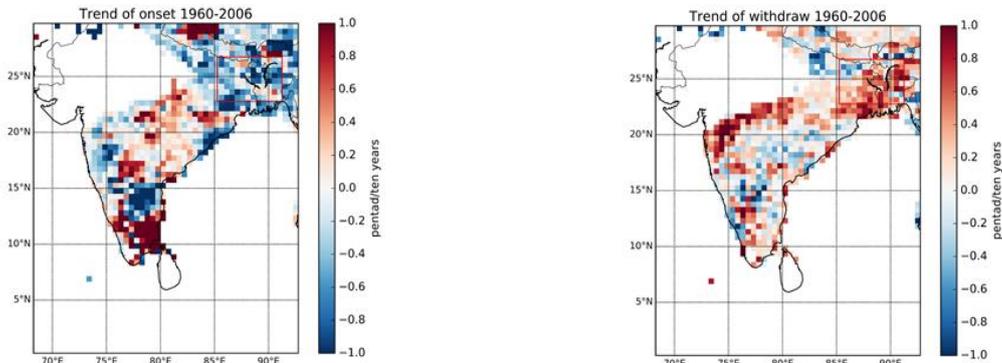
- ・観測データ；APHRODITE (Yatagai et al., 2012²⁴⁾)、1951～2007年、日雨量
- ・将来予測データ；CMIP5 (Taylor et al., 2012)、2071～2100年、日雨量、RCP8.5

を用いて、解析を行った。これまでの変化として、雨季の開始と終了 (Matsumoto, 1997) について、図(1)-8に示す。1960～2006年における年あたりの変化量を示す。これによれば、雨季の開始はインド亜大陸北東部で早くなっており、雨季の収量はインド大陸北東部で遅くなっている。つまり、雨季の期間が長くなっていることが分かった。

次に、将来予測データを用いた解析を示す。GCMデータを用いる前に、本研究領域での再現性を確認した。CMIP5から取得した13個のGCMを用いて、1976～2005年におけるRoot mean square error (RMSE)、Nash-sutcliff efficiency coefficient (NSE)、そしてPearson product-moment correlation coefficients (R) を計算し、評価した。

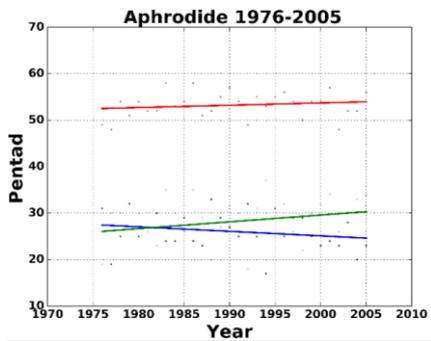
このうち、再現性の高かった、CCSM4、GFDL-CM3、GFDL-ESM2G、immcm4、NorESM1-Mの5個のGCMをこの解析で用いることとした。これらのGCMを用いて、雨季の開始、終了と期間の変化を示したのが、図(1)-9となる。各GCMの結果の増減に関する方向性は必ずしも一致しなかった

が、過去の雨季の開始が早まっていることと終了が遅くなっていることが、将来予測データでも継続していくことが示された。

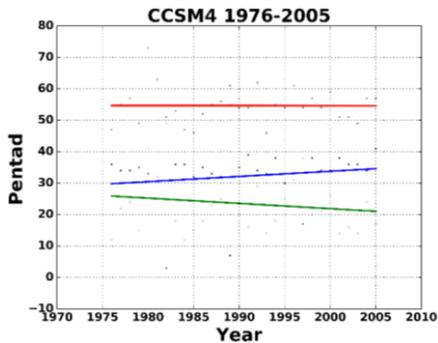


図(1)-8 インド亜大陸における雨季の開始と終了の1960～2006年にかけての年あたりの変化量。単位は、Pentad/year。

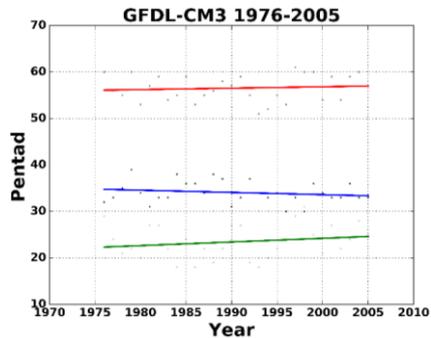
(a)



(b)

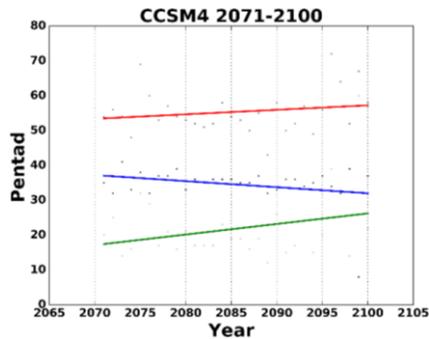


(d)

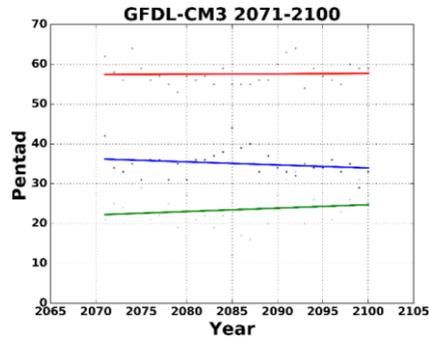


(f)

(c)

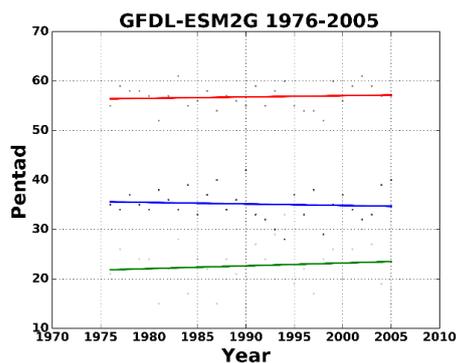


(e)

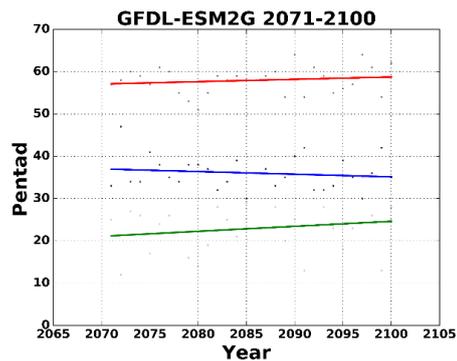


(g)

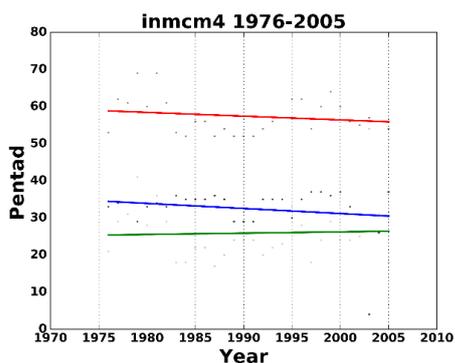
図(1)-9 雨季の開始、終了、期間について、過去（1976～2005年）と将来（2071～2100年）の傾向。(a)APHRODITE、ccsm4の(b)過去と(c)将来、GFDL-CM3の(d)過去と(e)将来。



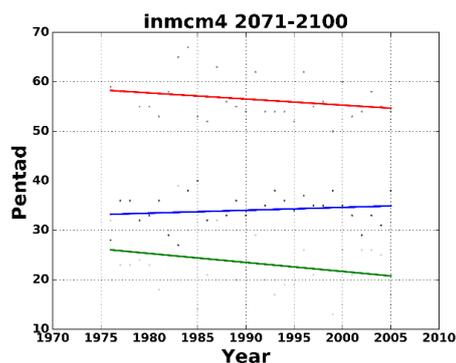
(h)



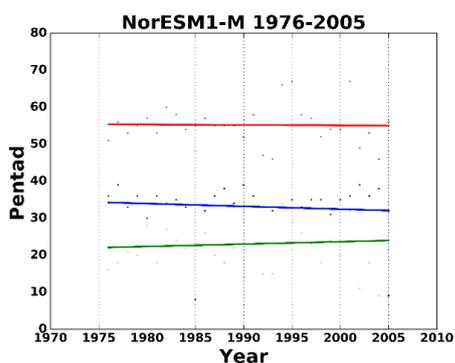
(i)



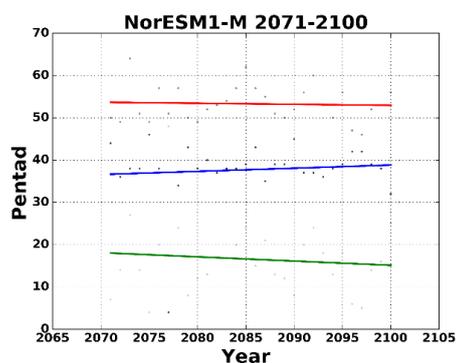
(j)



(k)



(j)



(k)

図(1)-9 (続き) 雨季の開始、終了、期間について、過去 (1976~2005年) と将来 (2071~2100年) の傾向。GFDL-ESM2Gの(f)過去と(g)将来、immcm4の(h)過去と(i)将来、NorESM1-Mの(j)過去と(k)将来。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ (1) では、地球物理学的な臨界現象のリスク推計においては、これまでティッピングエレメントをどのように取り扱うか非常に困難であったが、この研究を通してどれくらいの不確実性をティッピングエレメントのティッピングポイントや遷移期間が取るのかを明確にし、それによって排出シナリオや戦略シナリオ (たとえば昇温量を 2°C に抑えるなど) との関連付けを可能とし、将来の影響人口などの影響評価を行うことができるようになった。また、包括的なティッピングエレメントに関する知見を定性的かつ定量的に示すことが可能となった。また、夏季の北極海海氷の消失やグリーンランド氷河の融解、インドモンスーンの弱化に関するさらに深掘りし

た知見の集積は、今後のティッピングエレメントに関する研究に貢献する。

一方で、気候変動下で指摘されている豪雨の増加が大気の飽和水蒸気量変化率を用いて説明される可能性を示し、高温度域での降水継続時間減少の気温依存性について、研究の道筋を示すことができた。この結果は、将来の臨界現象のリスク集計を実施するための手法開発に貢献した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ (1) および (2) による自然災害に対する脆弱性の推計は、IPCCなどの場で活用され、今後の各国政府や国連などにおける防災対策、地球温暖化対策の指針作りに重要な役割を果たすと考えられる。また、サブテーマ (1) での成果は、ティッピングポイントが100年以上先の現象をどのように取り扱うかの検討やその現象の位置づけなど、政策決定に大きく貢献するものである。さらに、適応策の基本計画策定において、定量的評価が不能でもすれば考慮されることもなかったティッピングエレメントについて、RCPシナリオや戦略シナリオとの紐付けを通じて、他の影響評価との比較が可能となり、またその定量化の実施も可能とすることができたことは、今後の環境政策においてより将来世代を考慮した判断を可能とするような材料を提供することになる。

最終年度に開催した一般公開シンポジウムでの「ティッピングエレメント」という題目での講演は、環境省の市民への環境政策の浸透の一助になったと考えている。さらに2017年3月に実施したS-14との合同会合でも、ティッピングエレメントの発表を行ったことで、S-14では直接取り扱うことはないが、より多くの場での議論を促すことになった。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマのメンバー（沖）は、IPCC 第5次評価報告書の執筆に参加している（沖：第2作業部会の統括執筆責任者）。本サブテーマを含むS-10の研究成果は同報告書に参照された。

タイ国とはJICAとJSTが支援する地球規模課題対応国際科学技術プログラム(SATREPS)案件「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築」（2009～2013年度）と「タイ国における統合的な気候変動適応戦略の共創推進に関する研究」（2016～2020年度）を、カセサート大学、王立灌漑局、気象局、天然資源環境省環境政策計画局をカウンターパートとして、IPCCなどで指摘されているローカルな知見やグッドプラクティスに関する研究を中心に推進している。これらの研究には、S-10で得られたティッピングエレメントに関する知見を取り込んでおり、タイ政府政策立案機関あるいは実施機関へのインプットや共同研究を通じたキャパシティ開発を行ってきている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. Kiguchi, S. Miyazaki, W. Kim, S. Kanae, T. Oki, J. Matsumoto and T. Satomura: IAHS

Publication, 359, 239-245, (2013)

“The heat flux from the land surface during the pre-monsoon season in the inland region of Thailand.”

- 2) R. C. Sarker, M. Kiguchi, N. Utsumi, K. Oki, and T. Oki : The 57th conference on Hydraulic Engineering, Vol. 69, No. 4, I_127-I_132, (2013)

“The relationship between extreme precipitation and surface air temperature in Bangladesh.”

- 3) Y. Yamane, M. Kiguchi, T. Hayashi, A.M. Dewan and T. Terao: Journal of Disaster Research, 8(6), 1052-1060, (2013)

“Characteristics of damages of severe local storms based on field surveys in Bangladesh.”

- 4) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae and T. Oki: Hydrological Sciences Journal, doi:10.1080/02626667.2014.888067/ (2015)

“Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate”

- 5) M. KIGUCHI, J. MATSUMOTO, S. KANAE and T. OKI: Front. Earth Sci., 4:42 (2016)

“Pre-monsoon rain and its relationship with monsoon onset over the Indochina Peninsula”

- 6) 木口雅司、井芹慶彦、鼎信次郎、沖大幹：土木学会論文集G(環境), 72(5), I_241-I_246 (2016).

「将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 木口雅司、井芹慶彦、宮崎千尋、田渡竜乃介、山本彬友、伊藤昭彦、鼎信次郎、沖大幹：環境情報科学、44、1、29-35 (2015).

「ティッピングエレメント」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 木口雅司, Yanjun Shen, 鼎信次郎, 沖大幹, 第8回南アジアおよびインドシナにおける自然環境と人間活動に関する研究集会 (2012)

「温暖化気候下における社会経済および気候の将来水ストレスに対する影響評価」

- 2) M. Kiguchi, F. Murata, T. Terao, T. Hayashi, and T. Oki: 26th Conference on Severe Local Storms, Nashville, USA, (2012)

“Observational study during the pre-monsoon season over northeast Bangladesh.”

- 3) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae, and T. Oki: AGU fall meeting, San Francisco, USA, (2012)

“Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate.”

- 4) 木口雅司：京都大学防災研究所一般共同研究集会25K-09「第9回南アジアおよびインドシナにおける自然環境と人間活動に関する研究集会ーインド亜大陸東部・インドシナの自然災害と人間活動ー」 (2013)

「インド亜大陸北東部における夏季モンスーン期の降水変動」

- 5) M. Kiguchi, Y. Shen, A. Champathong, P. Petvirojchai, N. Aranyabhaga, N. Sukhanthamat, B.

- Archevarahuprok, S. Apipatanavis, N. Junjaroen, S. Kanae and T. Oki: "Knowledge for the Future" IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Swedish Exhibition & Congress Centre, Gothenburg, Sweden, (2013)
- “Future water stress under a warming climate over the Indochina Peninsula.”
- 6) M. Kiguchi, R.C. Sarker, N. Utsumi, K. Oki and T. Oki: IGU Kyoto Regional Conference 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, (2013)
- “The relationship between extreme precipitation and surface air temperature in Bangladesh.”
- 7) C. M. R. Mateo, N. Hanasaki, D. Komori, K. Yoshimura, M. Kiguchi, A. Chanpathong, D. Yamazaki, T. Sukhapunnaphan and T. Oki: "Knowledge for the Future" IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Swedish Exhibition & Congress Centre, Gothenburg, Sweden, (2013)
- “A simulation study on modifying reservoir operation rules: tradeoffs between flood mitigation and water supply.”
- 8) F. Murata, T. Hayashi, T. Terao, M. Kiguchi, Y. Yamane, H. Asada, J. Matsumoto, A. Habib and H.J. Syiemlieh: IGU Kyoto Regional Conference 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, (2013)
- “Rainfall at Cherrapunji, India and its relation to floods in Bangladesh.”
- 9) R. Bhattarai, K. Yoshimura, M. Kiguchi, K. Noda, S. Nakamura and T. Oki: Japan Geoscience Union Meeting 2014, Yokohama, Japan, (2014)
- “Interior flood damage in Japan: Present and future”
- 10) T. Yokohata, K. Nishina, K. Takahashi, M. Kiguchi, Y. Iseri, T. Sueyoshi, M. Yoshimori, K. Iwase, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, Y. Honda, N. Hanasaki, Y. Masaki, A. Ito, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada, S. Emori and T. Oki: AGU fall meeting 2014, U54A-05, San Francisco, USA, (2014)
- “Visualization of the chains of risks under global climate change”
- 11) M. Kiguchi, T. Hayashi, T. Terao, F. Murata, Y. Yamane, A. Fukushima and M. Tanoue: MAHASRI International Workshop "Asiam monsoon Hydroclimate -Review of MAHASRI and Beyond-", Nagoya, Japan, (2015)
- “MAHASRI research activities in South Asia”
- 12) Kiguchi, M., Iseri, Y., Tawatari, R., Kanae, S., Oki, T. : American Geophysical Union 2015 Fall meeting, H41A-1283, San Francisco, USA, (2015)
- “Uncertainty of tipping elements on risk analysis in hydrology under climate change”
- 13) Tawatari, R., C. Miyazaki, Y. Iseri, M. Kiguchi and S. Kanae: American Geophysical Union 2015 Fall meeting, NH51C-1915, San Francisco, USA, (2015)
- “Global projection of coastal exposure associated with sea-level rise beyond tipping points”
- 14) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W. H. Lim, C. Miyazaki, S. Kanae and T. Oki: American Geophysical Union 2015 Fall meeting, PA31B-2162, San Francisco, USA, (2015)
- “Visualizing interconnections among climate risks”
- 15) 横畠徳太・田中克政・仁科一哉・高橋潔・江守正多・木口雅司・本田靖・岡田将司・井芹

慶彦・眞崎良光・山本彬友・重光雅仁・吉森正和・末吉哲雄・岩瀬健太・花崎直太・伊藤昭彦・櫻井玄・飯泉仁之直・西森基貴・W.-H. Lim・宮崎千尋・岡本章子・鼎信次郎・沖大幹：日本地球惑星科学連合 連合大会 2016年大会（2016）

「気候変動リスクの部門間相互作用の可視化」

- 16) 木口雅司・井芹慶彦・鼎信次郎・沖大幹：第24回地球環境シンポジウム（2016）
「将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性」
- 17) B. C. Dissanayakke・木口雅司・沖大幹：京都大学防災研究所共同研究一般研究集会28K-04
「第11回南アジアにおける自然環境と人間活動に関する研究集会」（2016）
「インド亜大陸東北部における降水現象の季節推移の変動について」
- 18) M. Kiguchi, M. Hatono, H. Ikeuchi, Y. Hirabayashi, S. Kanae, and T. Oki : International workshop for climate variability and related studies over North East Indian subcontinent, Nagoya, Japan, 2017
“Study on the water related disaster risks using a future socio-economic scenario in Asia“
- 19) B. C. Dissanayakke, M. Kiguchi, and T. Oki : International workshop for climate variability and related studies over North East Indian subcontinent, Nagoya, Japan, 2017
“Historical and future trends in Indian summer monsoon onset, withdrawal and duration in north eastern part of the Indian subcontinental region“
- 20) 寺尾徹・村田文絵・山根悠介・木口雅司・福島あずさ・田上雅浩・林泰一・松本淳：日本地理学会2017年春季学術大会（2017）
「英領インド気象局日降水量データを活用したインド亜大陸北東部における降水特性変動の解析」

（3）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 東京大学生産技術研究所一般公開（2012年6月1～2日、参加者約5,300名）にて成果紹介
- 2) 国際ワークショップ「地球システムの不確実性、不安定性、および不可逆性」（2013年3月11～13日、（独）海洋研究開発機構横浜研究所三好記念講堂、約40名）
- 3) 東京大学生産技術研究所一般公開（2013年5月31日～6月1日、参加者約5,300名）にて成果紹介
- 4) 東京大学生産技術研究所一般公開（2014年6月6～7日、参加者約5,300名）にて成果紹介
- 5) 東京大学生産技術研究所一般公開（2015年6月5～6日、参加者約5,300名）にて成果紹介
- 6) 東京大学生産技術研究所一般公開（2016年6月3～4日、参加者約5,300名）にて成果紹介

（5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表(2013年6月6日、於東京大学)
- 2) 讀賣新聞（2014年4月1日、全国版、「IPCC横浜総会」）
- 3) 日刊工業新聞（2014年7月16日、全国版「「気候変動」リスク対応急げ ～長期視野で対策を～」）

- 4) 日経エコロジー（2014年9月号、「IPCC第5次評価報告書」）
- 5) 東京新聞（2016年6月9日、全国版「1910年のパリ大洪水 ～想定外 常に意識を」）

（6） その他

<受賞>

- 1) 水文・水資源学会賞

授賞機関：（一社）水文・水資源学会、受賞年月日：2013年9月26日

受賞対象：沖大幹著『水危機 ほんとうの話』．新潮社、336ページ（2012）

- 2) 「科学技術への顕著な貢献2013 （ナイスステップな研究者）」

授賞機関：文部科学省、受賞年月日：2013年12月19日

受賞対象：沖大幹（水文学の研究開発を通じた世界規模での社会への貢献と知識の普及）

- 3) 「AGU（アメリカ地球物理学連合） Fellow」

授賞機関：AGU（アメリカ地球物理学連合）、受賞年月日：2014年12月17日

受賞対象：沖大幹（数値モデリングと科学的分析を通じた水文、気候、そして持続可能性にまたがる学際的な研究とリーダーシップに対して）

<アウトリーチ（講演等）>

- 1) 沖大幹（2012）2011年・タイ・チャオプラヤ大洪水の現状と今後、日本学術会議 風水害土砂災害第3回分科会
- 2) 沖大幹（2012）水危機 ほんとうの話、「水の知」（サントリ）サイエンスバー
- 3) 沖大幹（2012）水危機 ほんとうの話、神戸大学先端膜工学研究推進機構 平成24年度先端膜工学研究推進機構秋季講演会
- 4) 沖大幹（2012）水危機 ほんとうの話、異業種交流会「志翔会」
- 5) 沖大幹（2012）水危機 ほんとうの話、新科学技術推進協会講演会
- 6) 沖大幹（2013）水危機 ほんとうの話<世界の水と日本の水>、さいたま・水とみどりアカデミー
- 7) 沖大幹（2013）気候変化に適応した治水対策、国土交通省国土交通大学校研修
- 8) 沖大幹（2013）2011年タイ洪水の概要とその後の対策、中部企業連絡会主催 企業防災フォーラム
- 9) 沖大幹（2013）「水の惑星」に生きる人類の未来を守るために、河合塾特別企画講演会
- 10) 沖大幹（2013）水危機 ほんとうの話、新宿区消費者団体連絡会 総会記念講演
- 11) 沖大幹（2013）水危機 ほんとうの話、東京ガス環境月間講演会
- 12) 沖大幹（2013）水危機 ほんとうの話、横浜JFEエンジ講演会
- 13) 沖大幹（2013）水危機 ほんとうの話、日本工営講演会
- 14) 沖大幹（2013）気候変動の影響は水を通じて社会に影響?!、横浜市横浜気候変動シンポジウム
- 15) 沖大幹（2013）水から考える持続性～水危機 ほんとうの話～、旭リサーチセンター 持続可能社会と企業研究会
- 16) 沖大幹（2013）水災害への影響を知る－洪水や干ばつ、地球温暖化はどうなるのか?－IPCCの最新科学的知見と日本からの貢献－ 文科省
- 17) 沖大幹（2013）地球規模水文学の視点、日本技術士会

- 18) 沖大幹 (2013) 気候変動の水分野への影響、グリーンフォーラム
- 19) 沖大幹 (2014) 気候変化に適応した治水対策、国土交通省国土交通大学校研修
- 20) 沖大幹 (2014) 気候変動の土木分野への影響評価と国や世界の取り組み、建築学会 気候変動による災害防止タスクフォース
- 21) 沖大幹 (2014) 気候変動の行き着くところ、鹿島建設主催全社環境委員会「2014年度環境講演会」
- 22) 沖大幹 (2014) 水危機 ほんとうの話、橋本総業主催HAT建築設備セミナー
- 23) 沖大幹 (2014) 水と気候変動のゆくえ、BL Tech主催第9回オートアナライザーシンポジウム
- 24) 沖大幹 (2014) 気候変動と水の未来、日建連環境政策部会講演会
- 25) 沖大幹 (2014) 水危機 ほんとうの話、八ッ場ダムをストップさせる東京の会
- 26) 沖大幹 (2014) 世界の水、日本の水、国土交通省水資源部主催「水を考えるつどい」
- 27) 沖大幹 (2014) 世界の水、日本の水、全水道水情報センター主催「水に関するお話し」
- 28) 沖大幹 (2014) IPCC第2作業部会第5次評価報告書、環境省研究調査室主催「IPCC第5次評価報告書等の勉強会」
- 29) 沖大幹 (2014) IPCC第2作業部会第5次評価報告書、一般財団法人生産技術研究奨励会RC70「水・地球環境問題特別研究会」
- 30) Oki, T. (2014) Integrated Water Resources Management in Changing World, 3rd Sultan Qaboos Academic Chairs' Symposium "Managing Water Resources for Sustainable Development."
- 31) 沖大幹 (2014) IPCC第2作業部会第5次評価報告書、RITE主催地球温暖化対策国際戦略技術委員会
- 32) 沖大幹 (2014) WG2: 気候変動影響・適応に関する講演 ① (水資源影響等)、エネルギー・資源学会 平成26年度第1回講習会
- 33) 沖大幹 (2014) 世界の水、日本の水、西大和学園スーパーサイエンス&スーパーグローバル講演会
- 34) Oki, T. (2015) Integrated Water Resources Management in Changing World, "High-level Stakeholders Seminar on Water, Climate Change and Sustainable Development, Vibrant Gujarat Global Investors Summit" hosted by Government of Gujarat, India.
- 35) 沖大幹 (2015) 地球をめぐる水と未来、大倉学芸振興会学術講演
- 36) 沖大幹 (2015) 世界の水、日本の水、霞ヶ浦問題協議会主催霞ヶ浦女性教室
- 37) Oki, T. (2015) Water security, 7th World Water Forum
- 38) 沖大幹 (2015) 気候変動と水資源マネジメント、日本気象学会主催2015年夏季大学講義
- 39) 沖大幹 (2015) 気候変動と日本の今後のあり方、港ユネスコ協会主催「気候変動時代の水害と水不足」
- 40) 沖大幹 (2016) 気候変動を踏まえた『想定外』の自然外力への対応について、国土交通省九州地方整備局主催新たなステージに対応した防災・減災に関するシンポジウム
- 41) 沖大幹 (2016) 水と気候変動と途上国支援、日本ユニセフ協会主催第15回国際協力講座
- 42) 沖大幹 (2016) 水から考える持続性、取手市民大学特別講座「明るい未来を拓く先端知」
- 43) 沖大幹 (2016) 気候変動リスクの総合管理とその対策について、環境省主催気候変動問題

の最前線～動き出した世界とこれからの日本～

- 44) 沖大幹 (2016) 水の未来ーグローバルリスクと日本、一般財団法人生産技術研究奨励会RC70「水・地球環境問題特別研究会」
- 45) 沖大幹 (2016) 水から考える持続性、都立西高等学校特別講演
- 46) 沖大幹 (2016) 水の未来ーグローバルリスクと日本、エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会主催SPEED研究会
- 47) 沖大幹 (2016) 水の未来ーグローバルリスクと日本、有限会社イズ主催第39回異業種勉強会
- 48) 沖大幹 (2016) 水の未来ーグローバルリスクと日本、第6回水循環基本法フォローアップ委員会

<アウトリーチ (委員等) >

- 1) 沖大幹、日本ユネスコ国内委員会自然科学小委員会委員、文部科学省
- 2) 沖大幹、水政策アドバイザー、熊本県庁
- 3) 沖大幹、気候変動による水資源への影響検討会 委員(座長)、国土交通省水管理・国土保全局水資源部
- 4) 沖大幹、エネルギー戦略協議会 環境ワーキンググループ構成員、内閣府
- 5) 沖大幹、中央環境審議会 地球環境部会 気候変動影響評価等小委員会 委員、環境省
- 6) 沖大幹、社会資本整備審議会 河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会 委員、国土交通省
- 7) 沖大幹、関東地方河川技術懇談会委員、国土交通省
- 8) 沖大幹、国土審議会委員、国土交通省
- 9) 沖大幹、首都圏広域地方計画改定に関する有識者懇談会委員、国土交通省
- 10) 沖大幹、関東地方ダム等管理フォローアップ委員会委員、国土交通省
- 11) 沖大幹、荒川水系荒川河川整備計画策定に係る有識者会議委員、国土交通省
- 12) 沖大幹、2020年以降の気候変動枠組における適応のあり方に関する懇談会委員、環境省地球環境局
- 13) 沖大幹、「水資源分野における気候変動への適応策のあり方検討会」委員、国土交通省 水管理・国土保全局
- 14) 沖大幹、文京区地球温暖化対策地域推進協議会 委員、文京区
- 15) 沖大幹、地球温暖化対策国際戦略技術委員会委員、公益財団法人 地球環境産業技術研究機構
- 16) 沖大幹、技術参与(環境エネルギー科学技術研究担当)、文部科学省
- 17) 沖大幹、総合科学技術・イノベーション会議専門委員、内閣府
- 18) 沖大幹、低炭素社会戦略センター低炭素社会戦略推進委員会委員、国立研究開発法人科学技術振興機構

8. 引用文献

- 1) Pan, M., Sahoo, A. K., Troy, T. J., Vinukollu, R. K., Sheffield, J., and Wood, E. F. (2012) Multisource estimation of long-term terrestrial water budget for major global river basins. *J. Climate*, 25, 3191-3206, doi:10.1175/jcli-d-11-00300.1.

- 2) Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., and Schellnhuber, H. J. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol.105, 1786-1793.
- 3) IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 4) Zickfeld, K., Eby, M., Weaver, A. J., Alexander, K., Crespin, E., Edwards, N. R., Eliseev, A. V., Feulner, G., Fichefet, T., Forest, C. E., Friedlingstein, P., Goosse, H., Holden, P. B., Joos, F., Kawamiya, M., Kicklighter, D., Kienert, H., Matsumoto, K., Mokhov, I. I., Monier, E., Olsen, S. M., Pedersen, J. O. P., Per-rette, Philippon-Berthier, M. G., Ridgwell, A., Schlosser, A., von Deimling, T. S., Shaffer, G., Sokolov, A., Spahni, R., Steinacher, M., Tachiiri, K., Tokos, K. S., Yoshimori, M., Zeng, N., and Zhao, F. (2013) Long-term climate change commitment and reversibility: An EMIC intercomparison. *J. Climate*, 26, 5782-5809.
- 5) Comiso, J. C., and Nishio, F. (2008) Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *J. Geophys. Res.*, 113, C02S07.
- 6) Massonnet, F., Fichefet, T., Goosse, H., Bitz, C. M., Philippon-Berthier, G., Holland, M. M., and Barriat, P.-Y. (2012) Constraining projections of summer Arctic sea ice. *The Cryosphere*, 6, 1383-1394, Doi:10.5194/tc-6-1383-2012.
- 7) IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- 8) Utsumi, N., Seto, S., Kanae, S., Maeda, E. E., and Oki, T. (2011) Does higher surface temperature intensify extreme precipitation?, *Geophys. Res. Lett.*, 38(16), L16708, doi:10.1029/2011GL048426.
- 9) Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012) An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- 10) Hirabayashi Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., and Kanae, S. (2013) Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, 3, 816-821, doi:10.1038/nclimate1911.
- 11) Yamazaki et al. (2011) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., and Oki, T. (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, 47, W04501, 10.1029/2010WR009726.
- 12) 本間隆嗣, 秋元圭吾, 徳重功子, 和田謙一. (2011) 社会経済要因の分析に基づいた将来の社会経済シナリオの策定. 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 27-4.
- 13) Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P.D., Feyen, L., and Ward, P.J. (2012) Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3733-3752.
- 14) Sato, T., Yamazaki, D., Lim, W. H., Koirala, S., and Kanae, S. (2014) Modeling the impact of sea level rise to potential flood damage in the Mekong. *J. Japan Soc. Civil Engineers, Ser. B1*, 70(4),

I_103-I_108.

- 15) 木口雅司, 井芹慶彦, 宮崎千尋, 田渡竜乃介, 山本彬友, 伊藤昭彦, 鼎信次郎, 沖大幹. (2015) ティッピングエレメント. 環境情報科学, 44, 29-35.
- 16) Dutton, A., Carlson, A. E., Long, A. J., Milne, G. A., Clark, P. U., DeConto, R., Rahmstorf, S., and Raymo, M. E. (2015) Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*, 349, aaa4019, doi:10.1126/science.aaa.4019.
- 17) DeConto, R. M. and Pollard D. (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591-597, doi:10.1038/nature17145.
- 18) Alley, R. B., Meese, D. A., Shuman, C. A., Gow, A. J., Taylor, K. C., Grootes, P. M., White, J. W. C., Ram, M., Waddington, E. D., Mayewski, P. A., and Zielinski, G. A. (1993) Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event. *Nature*, 362, 527-529, doi:10.1038/362527a0.
- 19) Kennett, D. J., Kennett, J. P., West, A., Mercer, C., Que Hee, S. S., Bement, L., Bunch, T. E., Sellers, M., and Wolbach, W. S. (2009) Nanodiamonds in the Younger Dryas boundary sediment layer. *Science*, 323, 94, doi:10.1126/science.1162819.
- 20) Weaver, A. J., Sedláček, J., Eby, M., Alexander, K., Crespin, E., Fichfet, T., Philippon-Berthier, G., Joos, F., Kawamiya, M., Matsumoto, K., Steinacher, M., Tachiiri, K., Tokos, K., Yoshimori, M., and Zickfeld, K. (2012) Stability of the Atlantic meridional overturning circulation: A model intercomparison. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20709, doi:10.1029/2012gl053763.
- 21) Schellnhuber H. J., Rahmstorf, S., and Winkelmann, R. (2016) Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate3013.
- 22) Lenton T. M., and Schellnhuber, H. J. (2007) Tipping the scales. *Nature Reports Climate Change*, doi:10.1038/climate.2007.65.
- 23) 木口雅司, 井芹慶彦, 鼎信次郎, 沖大幹, (2016) 将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性. 土木学会論文集G(環境), 72(5), I_241-I_246,
- 24) Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., and Kitoh, A. (2012) APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bull., American Meteorol. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-11-00122.1.

(2) 水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計とテーマ全体の総括

国立大学法人東京工業大学

<研究協力者>

鼎信次郎

井芹慶彦・吉川沙耶花

平成24～28年度累計予算額：87,979千円（うち平成28年度：18,143千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

水循環に関する極端現象（洪水や熱帯低気圧等）が、水資源逼迫や洪水氾濫被害、熱帯低気圧による沿岸災害、食料生産等に対して、社会・経済的にどのような影響や被害を及ぼしてきたかについて、気候変動レベルごとの影響関数・被害関数を作成し、リスク推計を行った。この際、影響や被害の程度（risk）を、自然現象としての災害の程度（hazard）、自然現象の影響を受けやすい人口や土地の配置・規模（exposure）、その国の発展度など被害の受けやすさ受けにくさ（vulnerability）の三要因で説明可能となるように情報を整理する。具体的には、過去数十年から最大百年程度にわたる気温・降水量・河川流量等の観測データおよび過去再現数値シミュレーションの出力（hazard）と、人口や土地利用データおよび国の発展度等に関する資料（exposure と vulnerability）、さらには過去の災害統計データや農業生産データ等（結果としての被害あるいは risk）の組み合わせで影響関数を表現した。また、気候モデルの出力を用いて将来推計も行った。次に、水分野のうち特に水資源、熱帯低気圧、海面上昇による影響に焦点を置き、それら各分野の経済影響推計に関する文献の調査・整理を行った。その調査から統合評価モデルFUNDから水分野影響関数を抽出し、最新の気候・社会経済シナリオを用いた経済的影響推計を行った。最後に、テーマ1、テーマ2、テーマ3で共同して作成を進めてきたリスクインベントリ表の各リスク項目について、どのリスク項目が特に注目すべき深刻なリスクであるかを明らかにするため、各リスク項目の「影響の重要性」と「確信度」をエキスパート判断し、リスクマトリックスを作成した。

[キーワード]

洪水・沿岸リスク、エネルギー・食料リスク、ティッピングリスク、リスクマトリックス、金銭評価

1. はじめに

カンクン合意では平均気温上昇を工業化以前と比べ2度以内に押さえるという目標が言及されているが、2度がどのようなリスクをもたらすかは必ずしも明らかでなく、加えて、各国の現時点での排出削減目標では2℃以上になることも想定されるが、その場合のリスクも明らかではない。

また、既存のIPCCレポート（たとえばAR4の第2巻）を見ると、このような気候変動レベル毎のリスク推計がすでに存在するかのような錯覚を受けるかもしれないが、実際はそのようなものは存在しない、あるいは不十分であった。たとえばIPCC第4次報告書では、自然現象の極値変化の他には、単純な指標である水ストレス人口などを載せているに過ぎない。将来の洪水や干ばつが社会に与える影響さえ、推計されていない。IPCC 極端現象に関する特別レポート（SREX）でも

最も苦労したのが、これら人間社会に関わる将来の被害・影響推定が存在しないことであった。IPCC第5次報告書でも苦労するポイントとなるだろうと予想されていた。しかし、これらの被害や影響が気候変動レベルと共にどのように推移するかを算定するための様々な数値モデルや様々なデータ・資料は揃いつつある。社会的にその推計が強く求められていると同時に、プロジェクト開始時には研究実施に好機であった。

2. 研究開発目的

今後想定される将来の気候変動が、数十年スケールの水循環に関する極端現象（主に洪水や熱帯低気圧等）や数百年スケールのティッピングの発現を通して、水資源逼迫や洪水氾濫被害、熱帯低気圧による沿岸災害等の分野において、どのような影響や被害を社会に及ぼすかについて、気候変動レベル（全球平均気温上昇量等）毎のリスク関数・影響関数として推計、表現することを目的とした。また、それら影響の金銭評価について文献調査をまとめた。加えて、既存の統合評価モデルを用いて最新気候および社会経済シナリオを考慮した経済影響評価を行った。また、平成26年度よりサブテーマ（1）に代わりサブテーマ（2）がテーマ3の総括を担うこととなった。

3. 研究開発方法

（1）洪水によるリスク推計

最近の極端気候に関するIPCC特別レポート（IPCC SREX レポート）の中では、「全体として、河川洪水の変化予測は信頼性が低い。証拠は限られており、地域的な変化の要因は複雑なため、信頼性が低い。」と記されている。これは、その当時、地球温暖化時の洪水の変化とそのリスクを世界全体で解析した研究がごくわずかであったことが理由である。その後、Hirabayashi et al. (2013) では、11個の気候モデルから推定された将来気候それぞれに対して、洪水暴露人口の将来変化を推計し、その変化の一致度等が調べられた。しかし、Hirabayashi et al. (2013) では、将来の社会経済シナリオ（SSPs; Shared-Socioeconomic Pathways）は考慮されていない。Hirabayashi et al. (2013) の枠組みを基として、将来の社会経済シナリオ（SSPs）を考慮しつつ、洪水暴露人口に加えて洪水暴露GDPの推計を行った。

ここでは、4通りのRCPシナリオの基で5つの気候モデルから推定された将来気候それぞれに対して、3通りのSSPシナリオによる人口およびGDP変化を用い、計60ケースの将来像に対して、二つの指標（洪水暴露人口と洪水暴露GDP）の将来変化を推定する。具体的には、4通りのRCPのもとで5つの気候モデルから推定された計20通りの将来気候の下で全球水資源モデル（H08）を介して計算された流出量を、高空間解像度の河川・氾濫モデル（CaMa-Flood; Yamazaki et al. 2011）に入力する。これにより、全球規模で浸水深を計算し、各浸水した地点（グリッド）における浸水深と人口・GDPを基に、洪水暴露人口・洪水暴露GDPの算出をそれぞれ行う。なおここで、洪水は「現在気候において、100年に1度の超過確率を持つ河川流量（以降、「現在気候の1/100洪水」と呼ぶ）」と定義する。将来の洪水頻度の変化は、現在気候の1/100洪水が将来気候では何年に1度生じるか、という超過確率の変化として計算される。なお本解析で用いたような比較的低解像度のGCMでは、一般的に熱帯低気圧の再現性はあまり良くない事が指摘されている。従って、熱帯低気圧起因の洪水は、本解析では十分に考慮できていない点は注意する必要がある。

本項では、洪水暴露人口および洪水暴露GDPを以下のように定義する。

1. 洪水暴露人口: 洪水リスクのポテンシャルが高い人の数を示す (堤防等の洪水防御施設の効果は考慮していない)。洪水暴露人口は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所におけるその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計することで算出する。
2. 洪水暴露 GDP: 洪水による経済被害のポテンシャルを示す。洪水暴露 GDP は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所のその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計し、その合計値に、該当する国の一人あたり GDP を掛けた値として算出する。

また、将来強い雨が増えた場合や、現在において堤防やダムのような洪水防御施設の整備が不十分な国でGDPが将来大きく増加した場合等には、それに応じて将来は洪水防御施設の充実が図られる可能性が考えられるが、そのような効果は本項で用いた手法では考慮されていない。また、本項で行った洪水暴露人口・暴露GDPの推計方法では、洪水発生時（発生前）における人々の避難行動についても考慮されていない。従って、これらの要因を考慮した場合と比べて、本研究で推計した洪水暴露人口・暴露GDPは大幅な将来変化（増加）を示しうる点は注意する必要がある。

（2）食料のリスク推計

栄養不足はあらゆる食料リスクの中でも最も深刻な問題の一つである。栄養不足による影響が特に深刻なのは子どもであり、5歳以下の子どもの疾病負荷の3分の1は低栄養に起因するものであると言われている（Black et al. 2008）。ここでは、健康被害を包括的に評価するためWorld Health Organization (WHO)を中心に世界で広く使用され始めている Disability-Adjusted Life Years (DALYs) という幼年期の栄養不足に起因する人間の健康被害量を評価する指標に着目する。Murray et al. (2002) の定義によると、DALYs (障害調整生命年) とは、死亡が早まることによって失われたであろう寿命 (生命年) の概念を、健康でない状態、すなわち障害によって失われた「健康」寿命換算の年数を含めることで拡張した健康ギャップ指標である。子どもの発育不良人口割合から健康被害量を推定するモデルを構築し、将来の健康被害を評価した。ここでは、発育不良とは5歳以下の子どもの低身長人口の割合を指すこととする。発育不良の将来推定にはLloyd et al. (2011) のモデルを使用する。将来の栄養不足人口の推定には、国立環境研究所 (テーマ1) で計算された食料消費量 (長谷川ら、2013) の結果を用いた。

（3）ティッピングに関するリスク推計

1) 2100年までにティッピングポイントを超える確率の推定

サブテーマ (1) と共同で、ティッピングエレメントの発現可能性とグリーンランド氷床と北極海夏季海氷が 2100 年までにティッピングポイントを超える確率を推定した。また、ティッピング時の海面上昇への影響評価も行った。ティッピングポイントを超える確率についての詳細な手法は、以下である。まず、気候感度が対数正規分布であると仮定し、気候感度の確率密度関数を求める。次に、AD-DICE の戦略ケース別気温シナリオ TG15, TG20, BAU (Actual; 1.5, 3.0, 3.65, 4.5, policy CS; 3.65, 社会経済シナリオ; SSP2) にまず着目する。各気候感度 (Actual= 1.5, 3.0, 3.65, 4.5) とそれに対応する戦略ケースでの 2100 年時昇温量との関係から、気候感度と 2100 年時昇温量との回帰式を作成する。作成した回帰式を用いて、最初に得た気候感度の確率密度関数を 2100 年時

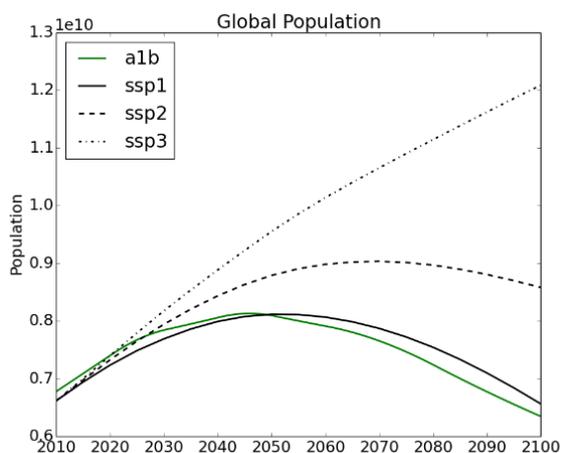
昇温量の確率密度関数に変換する。そして、対象とするティッピングエレメントのティッピングポイントの範囲を文献から定め、ティッピングポイントはその範囲で一様分布していると仮定しその累積分布を作成する。最後に、得られたティッピングポイントの累積分布と、2100年時昇温量の確率密度関数との結合分布を作成する。結合分布の積分値を該当するティッピングエレメントが2100年時までにティッピングポイントを超過する確率とみなす。上記の手法に基づき、2通りの工業化前比の目標温度水準（1.5℃と2.0℃）とBAU（reference）の3つのシナリオに対して、グリーンランド氷床と北極海夏季海氷が、それぞれのティッピングポイントを2100年までに超過する確率を推定した。

2) ティッピングエレメント（氷床融解）を考慮した長期海面上昇による全球沿岸域暴露推計

ティッピングポイントを超える確率を調べる事は政策判断に有用だと考えられる一方で、ティッピングポイントを超えた場合の影響を調べることも重要である。そこで、グリーンランド氷床融解のティッピングポイントを考慮した長期的な全球沿岸域暴露推計を行った。ティッピングエレメントを考慮した長期海面上昇量予測には半経験的モデル（Mengel et al. 2016）を使用した。このモデルはある気温 T における平衡状態海面 Seq が存在すると仮定し、現在の海水面 S がその状態に到達するまでに反応時間 τ が必要となることを模した式である。本計算では海面上昇の要因を、ティッピングエレメントであるグリーンランド氷床、南極氷床に加え、海水の熱膨張、氷河・冠氷の4つの要素に分け、各要素のパラメータを先行研究（平衡状態海面：Levermann et al. 2013、反応時間：Mengel et al. 2016、Levermann and Winkelmann 2016）から引用することで将来の全球平均海面上昇量予測を行った。ただし2.5℃目標では気温上昇が最大2.5℃（産業化以前比）であるため、Lenton et al. (2008) を参考に、超過する可能性のあるグリーンランドのティッピングポイント1.6℃（0.8-3.2℃、95%信頼区間、産業化以前比）（Robinson et al. 2012）のみをこの計算中におけるティッピングポイントとし、この気温以下ではグリーンランド氷床からの海面上昇寄与は無いものと仮定した。また、温度目標別の将来気温シナリオには、AD-DICEを用いてS10で作成された気温経路を用いた。

（4）リスクの金銭換算

水分野のうち特に水資源、熱帯低気圧、海面上昇による影響に焦点を置き、それら各分野の経済影響推計に関する文献の調査・整理を行った。その調査から統合評価モデルFUNDから水分野影響関数を抽出し、最新の気候・社会経済シナリオを用いた影響推計を行った。また、水資源の将来変化による経済影響に関する既存研究を渉猟することにより、その不確実性や既存手法の問題点を整理した。具体的にはまず、統合評価モデルFUNDのversion3.8nより、熱帯低気圧、水資源、海面上昇の三分野の影響関数をまず抽出する。なお、様々提案されている統合評価モデルの内、FUNDは分野別の影響関数



図(2)-1 SRESA1B及びSSP1、SSP2、SSP3における2010年～2100年の全球人口シナリオ

が充実しているため、本研究ではFUNDを対象として影響関数の抽出を行っている。影響関数の入力となる将来の全球平均気温としては、国立環境研究所から提供された、CMIP5（Climate Model Intercomparison Project Phase 5）における5つのGCMにおける4つの各RCP毎の全球平均気温上昇量を利用した。将来のGDPおよび人口シナリオとしては、SSP1、SSP2、SSP3におけるGDPおよび人口シナリオを、FUNDモデルで定義された16地域毎に集計したものを、影響関数の入力として用いた。また、FUNDモデルに予め用意されているSRESシナリオの内、温暖化影響評価でしばしば利用されるA1Bシナリオにおける全球平均気温および、GDP・人口シナリオも影響関数への入力として用いた。図(2)-1には例として、A1BおよびSSP1、SSP2、SSP3における全球の人口シナリオを示している。本研究では、SRESA1Bシナリオおよび、5GCM×4RCP×3SSP = 60シナリオ（以降単に60シナリオと呼ぶ）を、それぞれ水資源・熱帯低気圧・海面上昇の3つの影響関数に入力し、将来推計値を比較した。

（５）リスクマトリックスの作成

テーマ1、テーマ2、テーマ3で共同して作成を進めてきたリスクインベントリ表の各リスク項目について、どのリスク項目が特に注目すべき深刻なリスクであるかを明らかにするため、各リスク項目の「影響の重要性」と「確信度」をエキスパート判断で調べた。具体的には、S-10に参画している各分野の専門家による会合や文献調査に基づいて、各分野の専門家が各リスク項目の「確信度」と「影響の重要性」を三段階（A: 高（大）、B: 中（中）、C: 低（小））でエキスパート判断し、得られた「確信度」と「影響の重要性」からなるリスクマトリックスを作成するを試みた。各リスク項目の「確信度」は文献の多さや一致度、マルチモデル評価を行っているかといった視点等から判断した。一方「影響の重要性」は、各リスクの「影響の大きさ、発生時期、持続性、一様性・公平性、適応可能性、生起可能性」を総合的に考慮して判断した。

４．結果及び考察

（１）洪水によるリスク推計

1) 洪水暴露人口

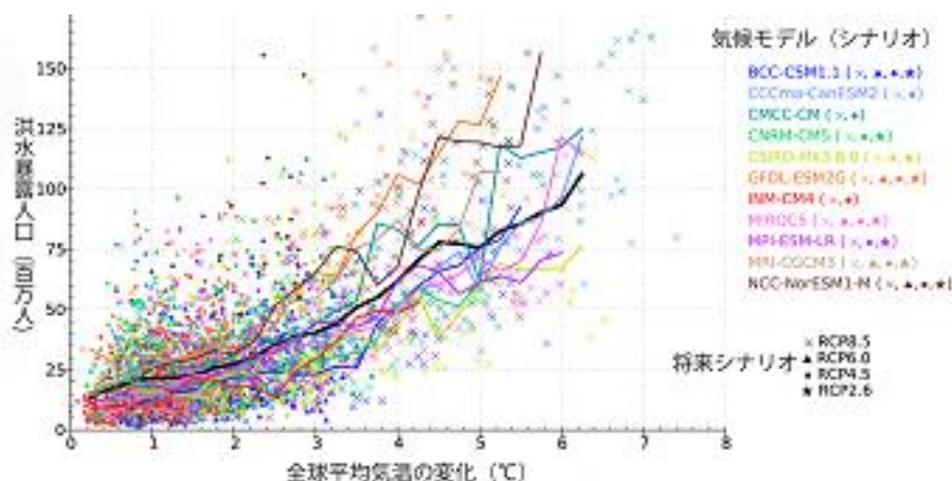
11の最新気候モデル出力と最先端の河川・氾濫モデルを用いて2100年までの世界の洪水リスクの見通しを示した成果を、Nature Climate Changeに発表した（Hirabayashi et al. 2013）。この研究では、複数の全球気候モデルを用いて、複数の将来気候シナリオに対して、洪水に将来暴露される人口を、全球気温変化の影響関数として示した（図(2)-2）。

次に、Hirabayashi et al. (2013) の枠組みに基づき、将来の社会経済シナリオを考慮した洪水暴露人口を示す。図(2)-3は、現在期間（1981～2000年）における洪水暴露人口の平均値と、将来期間（2070～2099年）での各GCMの現在気候からの洪水暴露人口の変化幅を示す。現在期間では、アジアの大部分、アフリカ低緯度域、南アメリカ、北アメリカ北西部で洪水暴露人口が比較的多く見られる。将来期間については、現在期間で洪水暴露人口が多く見られる地域の大部分において、将来期間の洪水暴露人口の増加が見られる。また、インド北部で洪水暴露人口の大きな増加が見受けられる。

図(2)-4は、現在期間における5つのGCMの洪水暴露人口の標準偏差の平均と各GCMの現在期間の標準偏差以上の平均値変化（将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値）を示したGCM

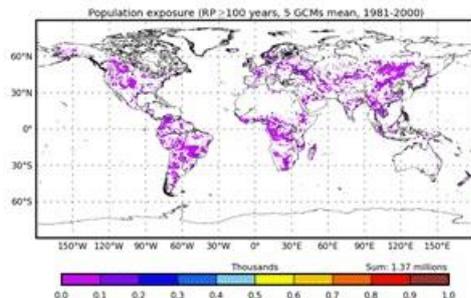
の数を示す。現在期間においては、アジアやアフリカ低緯度域、南アメリカ、北アメリカ北西部等で、洪水暴露人口についての標準偏差の平均値は高い値を示している。2020年代では4つ以上のGCMが洪水暴露人口の増加を示している地域は比較的少ないが、2040年代になると、4つ以上のGCMが洪水暴露人口の増加を示している地域が2020年代と比べて大きく増加している。また、アジア、南アメリカの沿岸域、北アメリカ北部といった地域において、5つ全てのGCMが洪水暴露人口の増加を示している地域が2080年代には比較的広範囲に見られる。ここで、図(2)-4dで示す現在からの変化率が大きい領域A、B、C、Dについて詳しく見ていきたい。GCMによってばらつきはあるものの、4つのどの領域においても全球気温の上昇に従って洪水暴露人口は増加する傾向がみられた。特に、北アメリカ北部（領域A）およびアジア（領域D）は、洪水暴露人口の増加率が非常に大きい。特にRCP8.5では、2060年代、2080年代にはこれら二つの領域では洪水暴露人口が十～数十倍との推計結果となっている。なお、将来における洪水暴露人口の増加には人口増加の影響も寄与しているが、本研究で解析方法の参照としたHirabayashi et al. (2013)によると、人口を2005年時に固定して将来の洪水暴露人口を推計した場合であっても気温上昇に伴って洪水暴露人口は増加し、RCP8.5では全球の洪水暴露人口が20世紀から21世紀にかけて14±10倍になると推計されている。従って、特に上記の二つの領域では、例え人口増加を考慮しない場合であっても大きな洪水暴露人口の増加が起こる可能性が推察される。

図(2)-6は、社会経済シナリオごとの現在期間から2080年代（2070～2099）への洪水暴露人口の変化幅を示す。図(2)-6a、b、cに示したSSP1からSSP3のどのシナリオにおいても、洪水暴露人口の変化幅の空間分布は似ている。また、洪水暴露人口の増加幅を見ると、SSP1（32.3百万人）< SSP2（40.9百万人）< SSP3（55.5百万人）となっている。また、各SSPシナリオとも、南アジアで大幅な洪水暴露人口の増加がみられる領域がある。ユーラシア大陸やラテンアメリカの一部では、洪水暴露人口が減少する領域がみられるものの、世界全体としては洪水暴露人口はどのSSPシナリオであっても増加の予測であるということが明らかとなった。

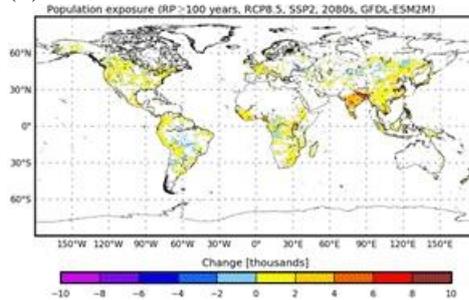


図(2)-2 洪水暴露人口と全球平均気温変化。細線は各気候モデル・シナリオの毎年の値（記号）を気候モデルごとに集計したもの、太線（黒）はその平均を示す。Hirabayashi et al. (2013)の図を一部改変したもの。

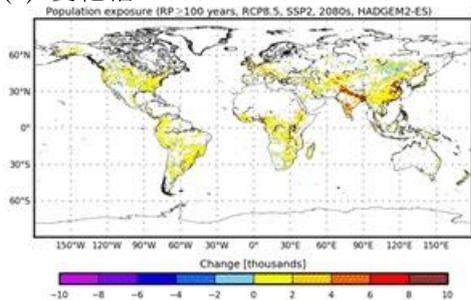
(a) 5つのGCMにおける洪水暴露人口の平均



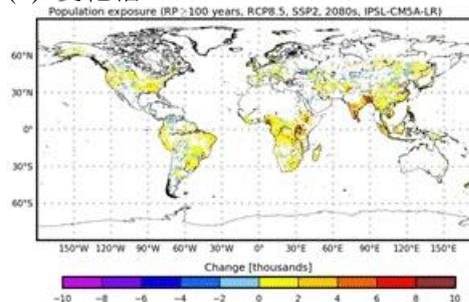
(b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



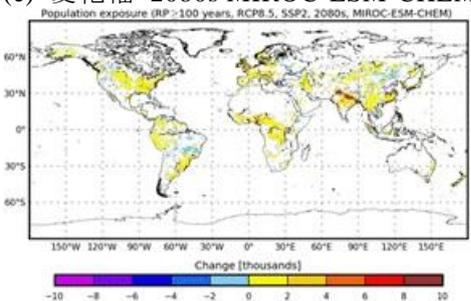
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



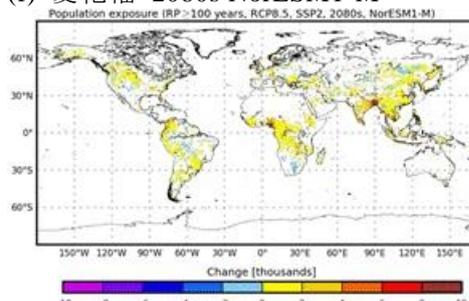
(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM

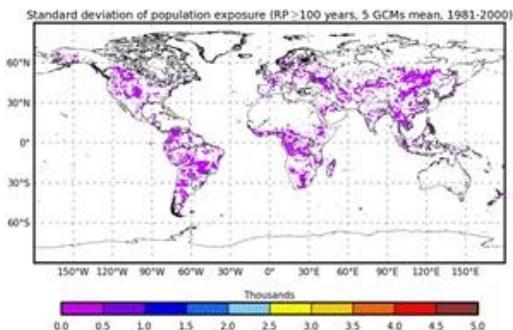


(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

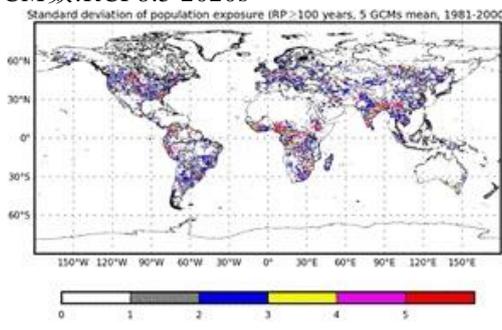


図(2)-3 (a) 現在期間(1981~2000年)の洪水暴露人口の平均値。(b)~(f) 2080年代(2070~2099)での各GCMの現在気候からの洪水暴露人口の変化幅(将来期間と現在期間平均値の差)。将来シナリオはRCP8.5およびSSP2を用いている。

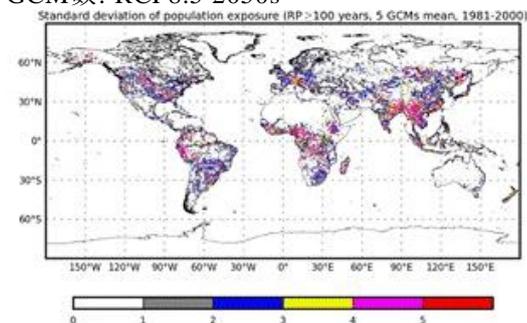
(a) 標準偏差 (1981~2000年) 5GCM平均



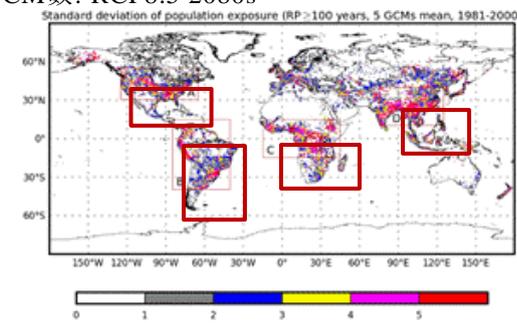
(b) 標準偏差以上の平均値変化を示した GCM数:RCP8.5 2020s



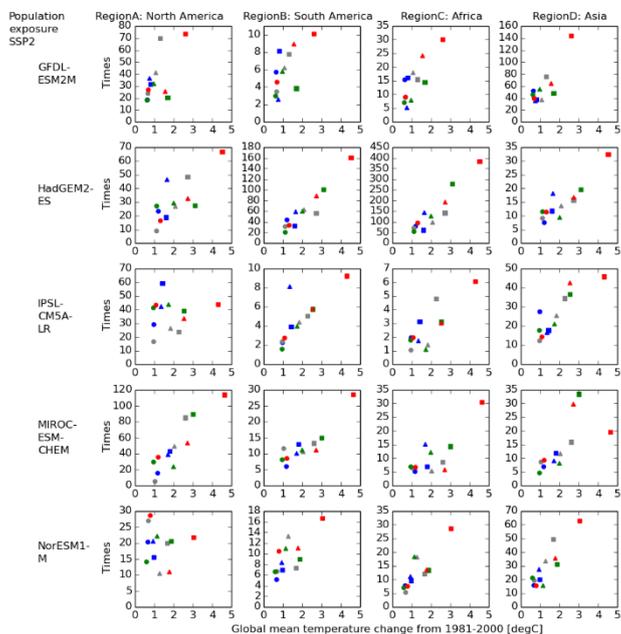
(c) 標準偏差以上の平均値変化を示した GCM数: RCP8.5 2050s



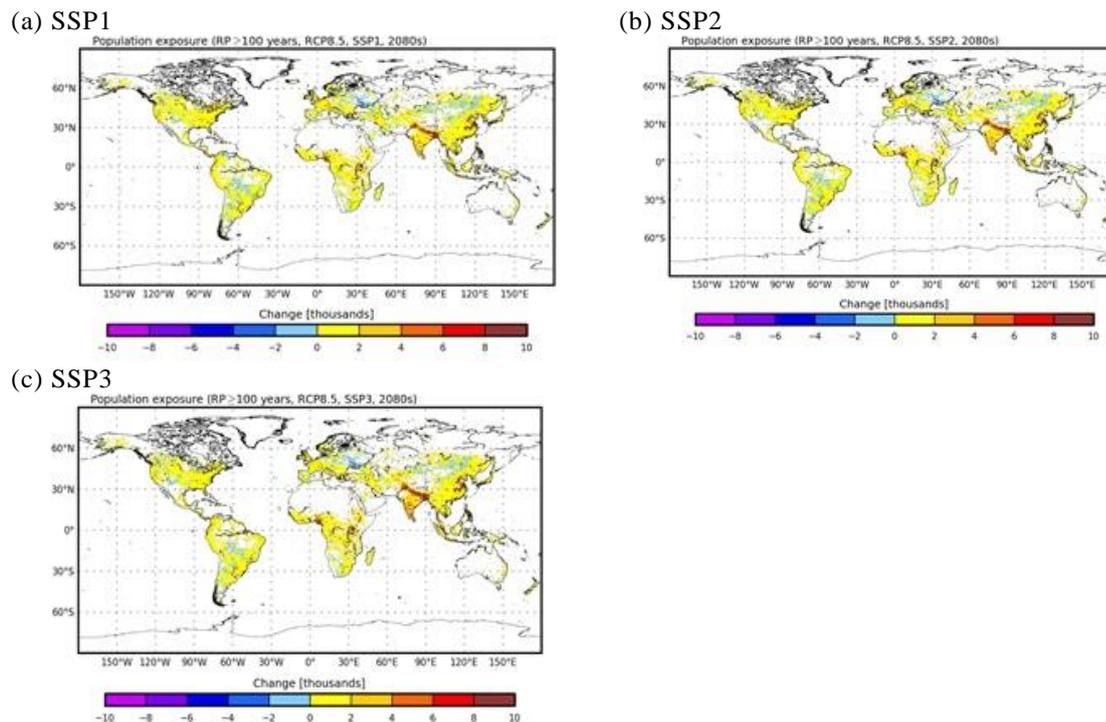
(d) 標準偏差以上の平均値変化を示した GCM数: RCP8.5 2080s



図(2)-4 (a) 現在期間 (1980~2000) における 5 つの GCM の洪水暴露人口の標準偏差の平均。各 GCM の現在期間の標準偏差以上の平均値変化 (将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値) を示した GCM の数 (b) 2020s、(c) 2050s、(d) 2080s。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。



図(2)-5 図(2)-5 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する洪水暴露人口の現在からの変化率。洪水暴露人口の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオ (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) に対応する。経済社会シナリオは SSP2 として洪水暴露人口を計算している。シミュレーション結果における気候の内部変動により、30 年平均しても小さくないランダム誤差が残っていることに注意が必要。



図(2)-6 現在期間から 2080 年代 (2070~2099) への洪水暴露人口の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には 5 つの GCM を用いている。また、RCP8.5 を用いており、(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。

2) 洪水暴露GDP

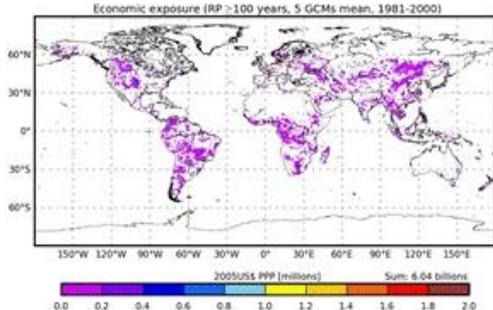
基本的な傾向として、現在期間における洪水暴露GDPの空間分布 (図(2)-7) は、洪水暴露人口の空間分布と似ている。一方、将来期間については、洪水暴露GDPと洪水暴露人口とで空間分布に違いが見られる。具体的には、洪水暴露人口についてはインド北部で大きな増加がみられたが、洪水暴露GDPについては例えば、南および東アジア (特にインド、中国)、南アメリカの一部地域で、洪水暴露人口と比べて洪水暴露GDPが大きく増加している。

洪水暴露GDPの将来変化 (図(2)-8) の基本的な傾向は、洪水暴露人口の場合とほぼ同様である。即ち、2020年代では4つ以上のGCMが洪水暴露GDPの増加を示している地域は比較的少ない。一方2080年代になると、4つ以上のGCMが洪水暴露GDPの増加を示している地域が2020年代と比べて大きく増加している。また、アジア、南アメリカの沿岸域、北アメリカ北部といった地域において、5つ全てのGCMが洪水暴露GDPの増加を示している地域が2080年代には比較的広範囲に見られ、その範囲は洪水暴露人口と比べて少し広い傾向にある。

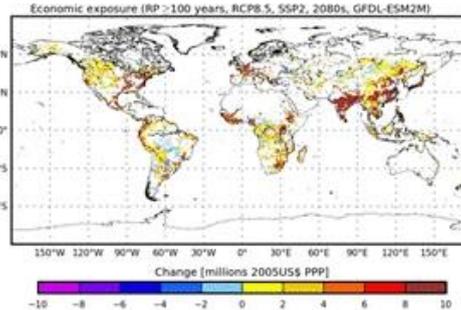
また、GCMによってばらつきはあるものの、4つのどの領域においても全球気温の上昇に従って洪水暴露GDPは増加する傾向がみられる (図(2)-9)。全体的な傾向として、洪水暴露人口と比べて洪水暴露GDPは、気温上昇と変化率との関係がより明瞭である。また、アジア (図(2)-8dの領域D) は、温度上昇に伴って洪水暴露GDPの著しい上昇がみられ、数百倍~千倍以上の変化率を示している。なお、洪水暴露GDPの推計は将来の洪水暴露人口にその国の一人当たりGDPを掛けて計算されるが、GDPは人口より高い増加率を示す傾向があるため、一人当たりGDPが将来大きく増加し、その結果洪水暴露GDPは洪水暴露人口と比べてより大きな変化率となっている。

図(2)-10に示す洪水暴露GDPの増加幅は、SSP1 (19,420億2005 US\$ PPP) > SSP2 (16,374億2005 US\$ PPP) > SSP3 (8,640億2005 US\$ PPP) となっている。またSSP1とSSP3を比較すると、インド、中国ではSSP1がSSP3より広範囲に渡って洪水暴露GDPの増加が見られる。また、全球的に見ても洪水暴露GDPが減少する地域はほとんど見受けられない。なお、SSP3は洪水暴露GDPの増加幅が比較的小さいが、人口増加が大きいいため洪水暴露人口の増加幅は大きく、洪水被害GDPが小さいからといって必ずしも将来の被害が小さいと考えられる訳ではない事には注意する必要がある。

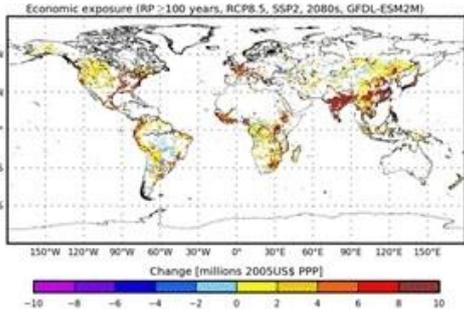
(a) 5つのGCMにおける洪水暴露GDPの平均



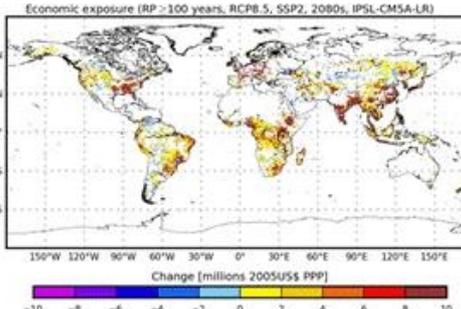
(b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



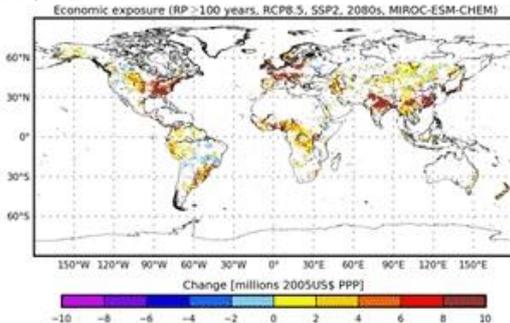
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



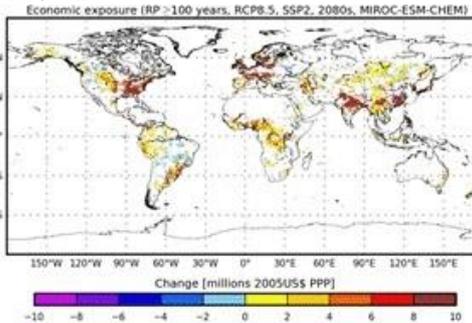
(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



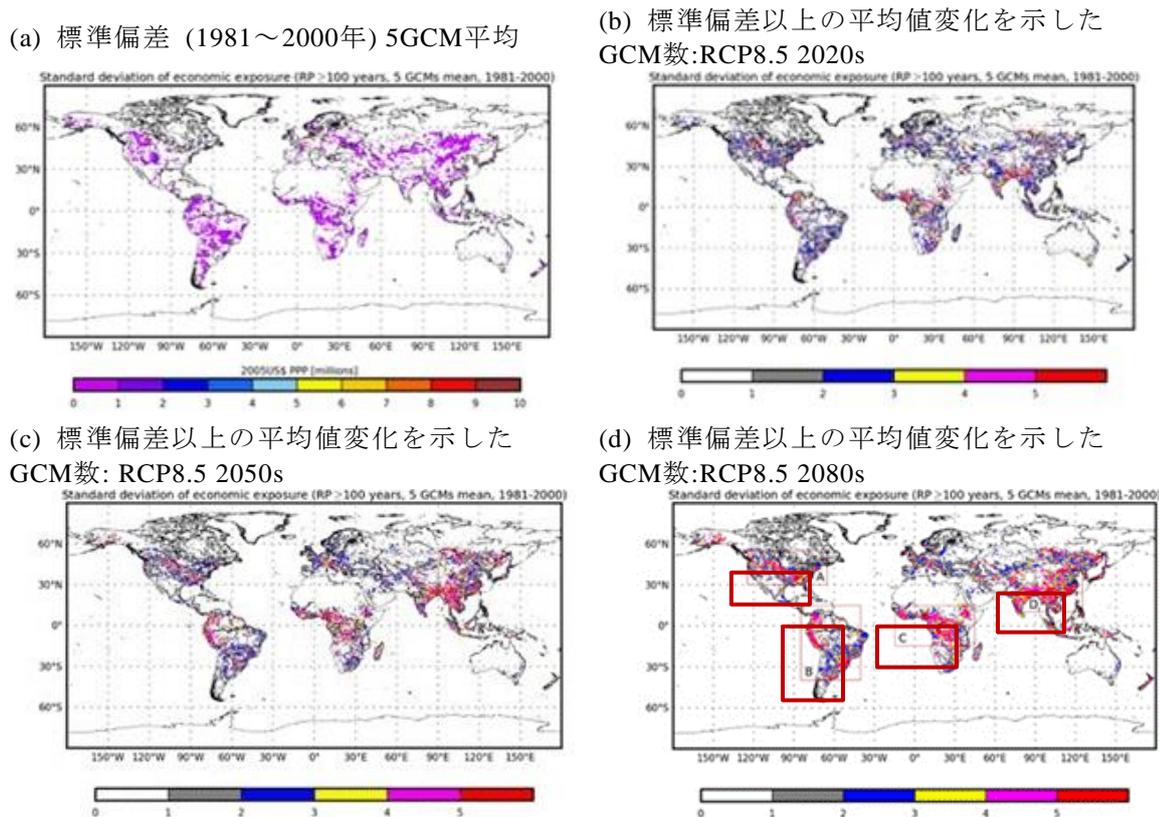
(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



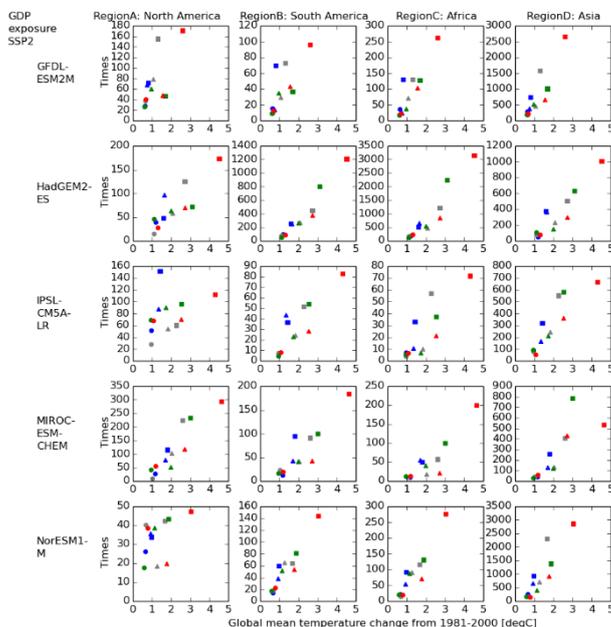
(f) 変化幅 2080s NorESM1-M



図(2)-7 (a) 現在 (1981~2000年) の洪水暴露 GDP の5GCM 平均値。(b)~(f) 2080年代 (2070~2099年)、における各GCMの現在気候からの洪水暴露GDPの変化幅。将来シナリオはRCP8.5およびSSP2を用いている。

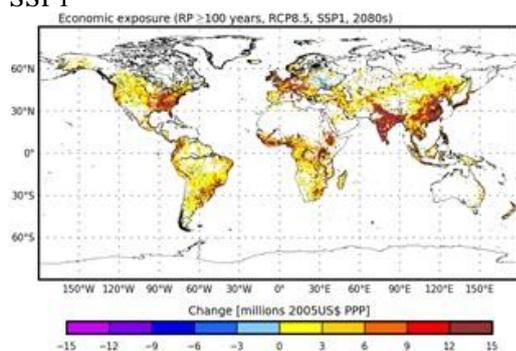


図(2)-8 (a) 現在期間(1980~2000年)における5つのGCMの洪水暴露GDPの標準偏差の平均。各GCMの現在期間の標準偏差以上の平均値変化(将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値)を示したGCMの数 (b) 2020s、(c) 2050s、(d) 2080s。将来シナリオはRCP8.5およびSSP2を使用。

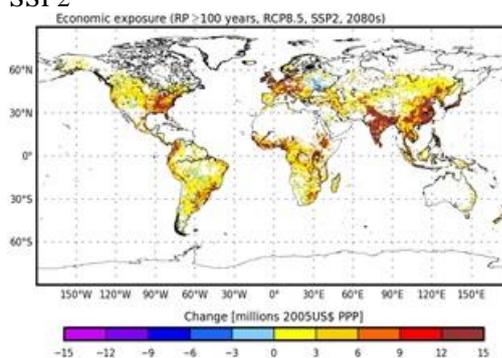


図(2)-9 図(2)-8の領域A~Dにおける、各GCMの全球平均気温上昇度に対する洪水暴露GDPの現在からの変化率。洪水暴露GDPの各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代(○: 2020年代、△: 2050年代、□: 2080年代)、色がRCPシナリオ(青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5)に対応する。社会経済シナリオはSSP2として洪水暴露人口を計算している。

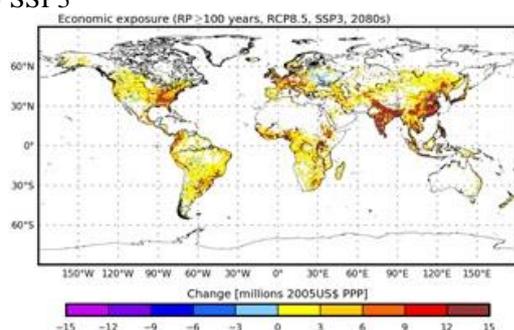
(a) SSP1



(b) SSP2



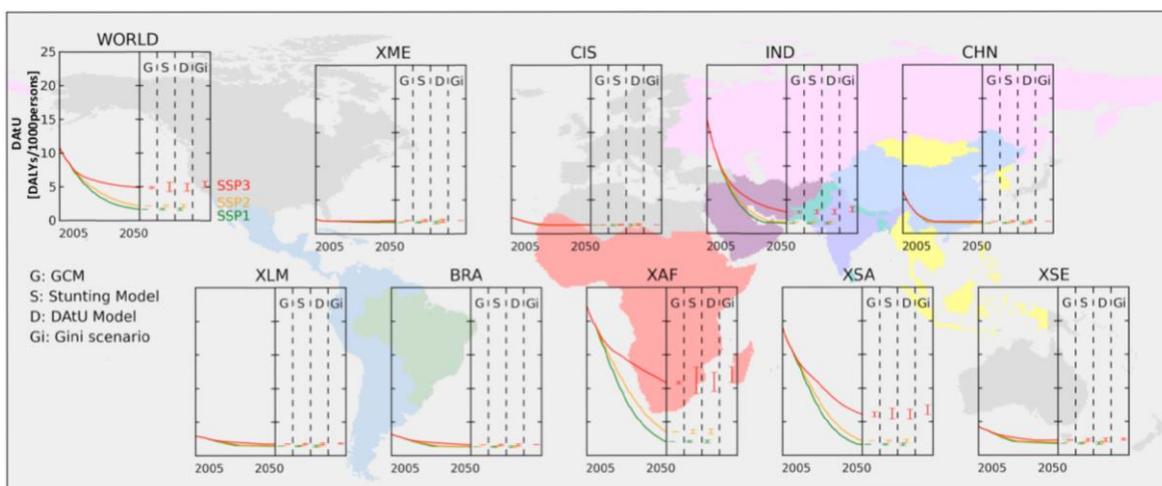
(c) SSP3



図(2)-10 現在期間から 2080 年代 (2070~2099 年) への洪水暴露 GDP の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には 5 つの GCM を用いている。また、RCP8.5 を用いており、(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。

(2) 食料のリスク推計

図(2)-11は、2005年から2050年の地域別千人あたりの健康被害量を対数スケールで示したものである。2005年時点でサハラ以南アフリカ、南アジア地域を中心に健康被害量の多さが目立つ。SSP1シナリオでは2050年には全ての地域で値が1以下、つまり2005年のCISやラテンアメリカ地域の水準以下になっている。一方で、SSP3シナリオでは中国や旧ソ連、ラテンアメリカは2050年に低水準に落ち着くものの、サハラ以南アフリカを中心とする複数の地域では高い水準の被害量が残ってしまう結果となった。2050年SSP3の気候モデル間のばらつきと比較すると、これら地域において比較的ばらつきが大きく、将来の降水量推定値の差異が結果の不確実性の一因として考えられる。ただし、インドや南アジア地域以外にも変動係数が高い水準を示す地域が複数確認されるが、他の地域では健康被害量のばらつきは非常に小さい。また、SSP1シナリオではインドや南アジア地域においても結果にほとんどばらつきが見られないことから、降水量だけではなく農業適応策を含む社会経済条件や、その他気候条件も将来の健康被害量に大きな影響を持つと考えられる。



図(2)-11 2005、2050年のシナリオ別、地域別千人あたりDAU(自然対数). 単位はDALYs/1000人. シナリオはSSP1・SSP2・SSP3シナリオを示す。2050年の値には12の気候モデルの不確実性を表した(GCM(G)、成長阻害モデル(S)、健康被害モデル(D)、ジニ係数(Gi)による不確実性を示す)。Ishida et al. (2014)の図4より。

(3) ティッピングに関するリスク推計

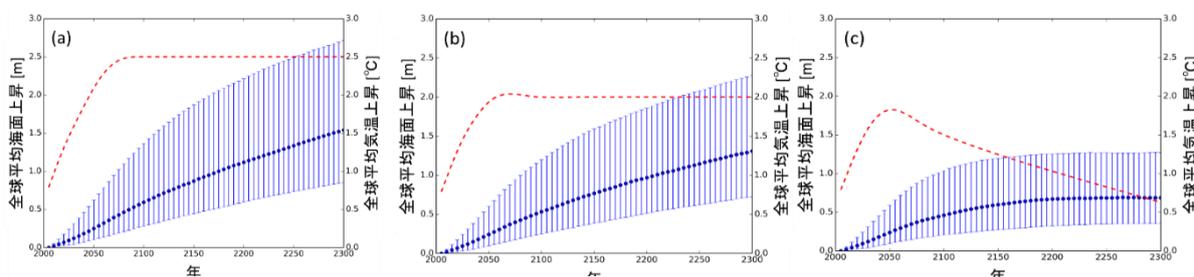
1) 2100年までにティッピングポイントを超える確率の推定

グリーンランド氷床のティッピングポイントを超過する確率は、BAUと工業化前比の目標温度水準を低く設定した場合とで大きく異なった。具体的には、BAUの場合は、2100年までにティッピングポイントを超過する確率は84%だが、工業化前比の目標温度水準をパリ合意で設定された1.5℃、2.0℃の場合、それぞれ21%と35%であった。また、北極海夏季海水がティッピングポイントを超過する確率も、グリーンランド氷床の場合と同様に、BAUと工業化前比の目標温度水準を低く設定した場合とで、大きく異なった。具体的には、BAUの場合は、2100年までにティッピングポイントを超過する確率は90%だが、工業化前比の目標温度水準をパリ合意で設定された1.5℃、2.0℃の場合、それぞれ13%と28%であった。これらの計算結果はティッピングに関する従来からの議論では不足していた、定量的な情報を提供する事に資する点で有用だと考えられるが、本計算は複数の仮定と制約(気候感度の確率分布やティッピングポイントの確率分布の仮定、気温上昇量は統合評価モデルの出力を用いておりGCM出力は利用していない)に基づいて算定されたものである点には、注意が必要である。

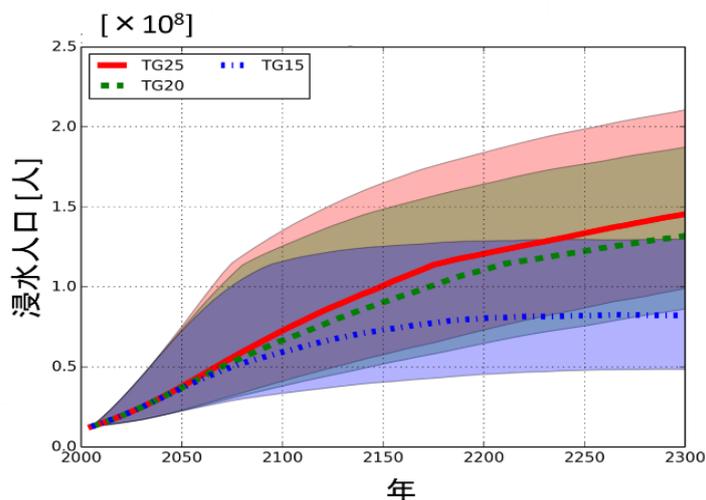
2) ティッピングエレメント(氷床融解)を考慮した長期海面上昇による全球沿岸域暴露推計

将来海面上昇量はグリーンランドのティッピングポイントを超えるか否かで大きく異なる。まず、それぞれ気温が2.5℃目標、2.0℃目標、1.5℃目標に従った場合の海面上昇量予測を行った(図(2)-12)。その結果、全球平均海面上昇量の中央値は、2100年時点では2.5℃目標で0.59m、2.0℃目標で0.53m、1.5℃目標で0.46mとなり十数cmの差であった。しかし2100年以降、気温が比較的安定してからも海面は上昇を続け、2300年時点では2.5℃目標で1.54m、2.0℃目標で1.31m、1.5℃目標で0.68m(0.20m)となり1.5℃目標と2℃目標の間には約60cmもの上昇量の差が生じうる事が分かつ

た。この差は主にティッピングポイントを超えたグリーンランドの氷床が急激に融解してしまうことによるものであると考えられる。この予測された海面上昇を用いて浸水人口を推定したものが図(2)-13である。図中の赤緑青の線はそれぞれ2.5℃、2.0℃、1.5℃目標に従った暴露の年推移を表している（中央値、2005年比、範囲は5-95パーセンタイル）。社会シナリオはSSP2、標高にはNOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）が提供しているGLOBE（Global Land One-km Base Elevation）DEM、人口にはオークリッジ国立研究所が提供するLandscanの2000年時点人口分布を用い、海水位以下となる内陸は取り除いてある。グラフから浸水人口年推移を見ると、2050年から2100年頃までに、人口が密集している沿岸域低地の影響で比較的急な増加傾向にあることがわかる。2050年ごろから徐々に海面上昇量予測と同様に1.5℃目標と2.0℃、2.5℃目標の差が大きくなり始め、1.5℃目標と2.0℃目標間の浸水人口の差は、2100年時点で730万人（0.12%ポイント）、2300年時点で5000万人（0.81%ポイント）と差が拡大していることが見て取れる。



図(2)-12 青：グリーンランド氷床のティッピングポイント（1.6℃（産業化以前比）（Robinson et al. 2012））を考慮した将来海面上昇量推移予測（5-95パーセンタイル）、（a）SSP2-CS36-TG25、（b）SSP2-CS36-TG20、（c）SSP2-CS36-TG15の気候シナリオを用いている。赤：気温推移（産業化以前比）



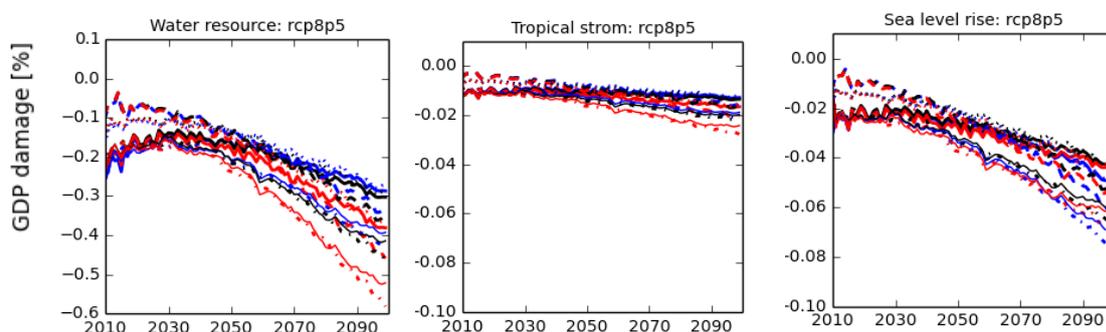
図(2)-13 グリーンランド氷床のティッピングポイント（1.6℃（産業化以前比）（Robinson et al. 2012））を考慮した海面上昇による、将来浸水人口予測（5-95パーセンタイル）、赤線：CS36-TG25、緑破線：CS36-TG20、青鎖線：CS36-TG15の気候シナリオを用いている。（産業化以前比）。社会経済シナリオにはSSP2を使用。

(4) リスクの金銭換算

水分野のうち特に水資源、熱帯低気圧、海面上昇による影響に焦点を置き、それら各分野の経済影響推計に関する文献の調査・整理を行った。熱帯低気圧経済影響に関する既存研究では、将来の適応の効果は、熱帯低気圧経済被害の推計式に、明示的には考慮されていなかった。また、調査した文献では、気候変動と社会経済変化による21世紀末頃の熱帯低気圧被害額は、200～600億USD前後と推計されている。また、水資源の既存研究についても整理した。各文献の対象年が異なるため、一概には言えないが1℃～4℃気温上昇するにつれ、全球での被害額は470億～840億USDであった。アメリカのみの推計では、0.0014～3270億USDと全球と比較し、かなり幅も広く、全球推計値よりもはるかに高い値を示すものもあった。水資源の経済影響に関する既存研究は、経済学分野で広く用いられる一般均衡理論に基づき水道料金の価格競争の理論から推定されており、その水道料金はすべて自由競争であると仮定されている。水道料金が自由競争である地域は、アメリカカリフォルニア、オーストラリアシドニーなどまだまだその事例は少ない。また、これらの推定は、工業・家庭用水にのみ着目しており、多くの文献で水消費の約80%を使用する灌漑水に関する言及は特になかった。10個の文献のうち明確に推定式が記載されている文献はわずか4つであることから各推定値はかなり不明瞭な部分が多いということがわかった。

次に、統合評価モデルのひとつであるFUNDモデルを用いて、60シナリオ(5GCM×4RCPs×3SSPs)を水資源・熱帯低気圧・海面上昇の計三つの影響関数にそれぞれ入力し、2010年～2099年における各分野の全球被害の推計値を求めた。なお、被害の大きさは、その年の全球GDPに対する被害の割合(%)として計算した。その結果、RCP2.6では、三分野とも2099年まで被害はほぼ横ばいであった。一方、RCP8.5ではどの三分野においても2099年にかけて被害が増加していた。RCP8.5での2099年時における三分野の被害を比較(図(2)-14)すると、水資源が最も被害が大きく、全球GDPの0.3～0.6%となった。また、2099年時における熱帯低気圧影響は約0.01～0.03%弱、海面上昇影響は全球GDPの約0.04～0.08%となっていた。

また、図(2)-15には、2099年におけるRCP8.5 & SSP3でのGDP被害をFUNDの16地域別に示す。これより、水資源影響はFSU(旧ソビエト地域)で大きく、海面上昇影響はUSA、CHI、SEA(東南アジア)で大きく、熱帯低気圧影響はUSA、CHIで大きな値が推計されていることが見て取れる。

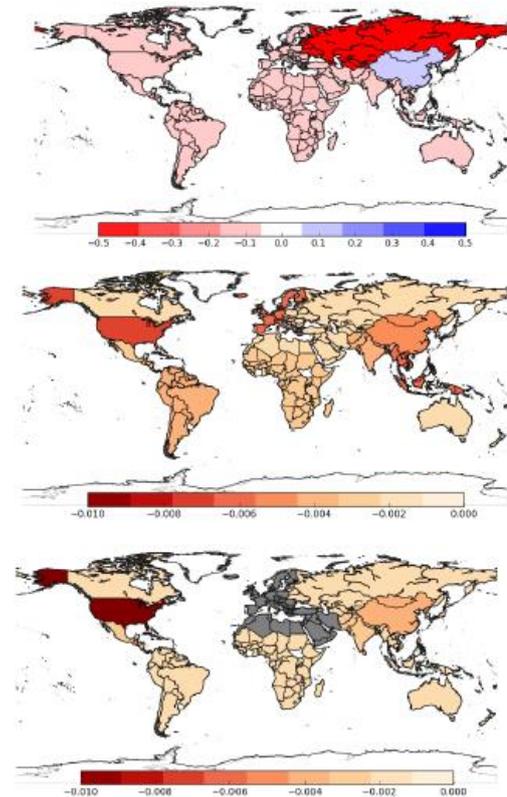


図(2)-14 2010年～2100年におけるRCP8.5での水資源、熱帯低気圧、海面上昇の経済影響。GDP被害は、その年における全球GDPに対するパーセントで示している。図中の線種は各GCMに対応。青線、黒線、赤線はそれぞれSSP1、SSP2、SSP3を表す。

次に、上記の全球規模での推計結果を、FUND影響関数で該当分野の全球規模影響推計を行っている文献と比較した。FUND影響関数を用いた既往文献では、水資源影響は全球GDPの0.6%程度（Tol（2002）による2100年頃の値）、0.3%程度（Waren et al. 2006による2℃前後上昇時の値）、0.2%程度（Tol 2013による2100年頃の値）となっており、本研究の値と大よそ近い値であった。一方、熱帯低気圧影響はNarita et al.（2009）による2100年の推計値は全球GDPの0.006%であり、本研究の推計値（RCP8.5で0.02%前後）はそれより大きな値となっている。なお本研究では、RCP2.6の場合についても熱帯低気圧影響の推計値は0.01%弱であり、Narita et al.（2009）より高い値となっている。また、海面上昇影響についてはWarren et al.（2006）における2℃上昇時の推計値は全球GDPの0.01%程度であり、本研究より小さな値となっている。また、Tol（2013）では熱帯低気圧および海面上昇影響の推計値は現在から2100年にわたって小さな値（全球GDPの0.01%に満たない程度）となっていた。

また、FUND関数を使わずに影響推計を行った研究としては例えばMendelsohn et al.（2012）では、気候変動下での2100年における熱帯低気圧被害はGWP（Gross World Product）の0.02%と予測しており、本研究でのFUND影響関数による推計はそれと同程度のオーダーの推計結果となっている。一方、Hinkel et al.（2014）では海面上昇を考慮した沿岸洪水被害の推計を行い、適応を考慮しない場合の沿岸洪水被害は、RCP8.5で全球GDPの1.2～9.3%に達し、適応を考慮した場合はそれより二、三桁小さい値になると述べている。これより、適応を考慮した場合のHinkel et al.（2014）における沿岸洪水被害推計値はFUND影響関数による海面上昇被害とオーダーとしては大よそ同程度であると言える。次に、2099年における4つのRCPと3つのSSPでの全球被害推計値の相違を調べた。その結果、RCP2.6とRCP8.5での被害を比べると、RCP8.5はRCP2.6の大よそ3～5倍程度の被害となっていた。また、RCPを固定（例えばRCP8.5）してSSP1、SSP2、SSP3の被害を比べると、水資源と熱帯低気圧被害はSSP2 > SSP1 > SSP3となっており、海面上昇被害はSSP1 > SSP2 > SSP3となっていた。なお、水資源と熱帯低気圧被害はSSP1とSSP2の相違は小さく、それら2つとSSP3との相違が比較的大きかった。

ここでは、最新の気候シナリオと社会経済シナリオの組み合わせの下で、FUNDの水分野影響関数による経済影響推計値を分析し、以下の知見が得られた。



図(2)-15 2099年における、RCP8.5 & SSP3におけるGDP被害。GDP被害は全球GDPに対する割合[%]で表示。図は順に（上）水資源被害、（中）海面上昇被害（下）熱帯低気圧被害を使用。井芹ら（2016）より。

1. 本研究の対象としたどの三分野においても社会経済シナリオによらず、RCP2.6では被害がほぼ横ばいである一方、RCP8.5では21世紀末にかけて被害が増加。
2. 21世紀末における三つの社会経済シナリオ（SSPs）間の被害の大きさは、水資源及び熱帯低気圧影響はSSP2 > SSP1 > SSP3、海面上昇影響の場合はSSP1 > SSP2 > SSP3。

また、影響関数の特徴を調べると、熱帯低気圧影響関数については、気温上昇による熱帯低気圧の強化は考慮されているものの、将来気候化における熱帯低気圧の進路や発生数の変化は考慮されていない。また、熱帯低気圧は例えばハリケーン・カトリーナのように甚大な経済損失を伴う被害を生じる場合がある。そのような（基本的には稀に生じると考えられる）甚大な被害を引き起こす熱帯低気圧被害については、現在の関数形で表現できているとはいえ、今後の更なる改良が望まれる。FUNDの水資源影響関数については、Downing et al. (1995; 1996) を基に関数が作成されており、関数作成に利用されている情報が古い。更に、関数の係数の絶対値が大きい旧ソビエト地域の被害推計値が全球被害値の大部分を占めるとともに、中国・香港・北朝鮮・マカオ・モンゴル地域の係数が他地域の係数と逆符号であり、将来は必ず利益が増加する式形となっている。従って、水資源影響関数については式のパラメータの信頼性の検討や最新の情報によって関数が更新・改良される事が望まれることがわかった。

（5）リスクマトリックスの作成

図(2)-16に示す「確信度」と「影響の重要性」からなるリスクマトリックスを作成した（この表では、マトリックスの縦軸は影響の重要性が大の場合を示している）。このマトリックスの例えば左列に着目する事によって、確信度がA（高）かつ影響の重要性がA（大）のリスクとして、熱中症や熱関連死亡の増加、沿岸部の塩水化、森林火災の増加、海洋の酸性化、北極の海氷の季節的消滅などの項目が抽出されている事が分かる。図(2)-16に示したリスク項目は、本プロジェクトに参画したメンバーの専門分野に近い範囲の項目に限られるという面は注意する必要があるが、

1. 各リスク項目に対する「確信度」と「影響の重要性」の A、B、C 判定と、リスクマトリックスの作成
2. 判定値の妥当性に関する専門家会合での確認
3. 判定根拠に関する簡易なメタデータの作成

といったプロセスを経る事で、多数存在するリスク項目の中から、どの項目が気候変動リスクとして重要かを、ある程度透明性のある形で明らかにした事には意義がある。また、このような形でエキスパート判断のプロセスが透明化・定量化され、エキスパート判断に関わるメタ情報・数値情報が残る事により、新たな知見が追加された場合に判定を見直したり、抽出された項目や判定の妥当性をプロジェクト外部者からの意見も交えて更新したりといった事も効率的に行う事が可能となる。即ち、本研究で行った重要なリスク同定の枠組みは、多数存在する気候変動リスクの中からどれがリスク管理上重要なのかを判断するための材料となりうる最新の知見を提供するものであると共に、その知見を今後も更新し続ける事へも繋げる事ができるものである。

	確信度 高	確信度 中	確信度 低
影響の重要性 大	熱中症や熱関連死亡の増加	エネルギー供給の不安定化	西南極氷床の崩壊
	河川水温の上昇	洪水の増加	熱帯雨林の大規模枯
	湖沼水温の上昇	河川流量の減少	永久凍土の炭素放出
	沿岸部の塩水化	河川流量の増加	
	島嶼地域への悪影響	土壌水分の減少	
	土壌流出の増加	土壌水分の増加	
	藻類などの繁茂	地下水量の減少	
	害虫の増加	作物生産量の減少	
	森林火災の増加	食料価格の上昇	
	生物多様性の低下	インフラ被害の増加	
	漁獲量の減少	居住地の移動	
	海洋の酸性化	紛争の激化	
	海洋炭酸カルシウムの溶解	海洋表層栄養塩の増加	
	海洋生態系生産量の増加	海洋表層栄養塩の減少	
	海洋生態系生産量の減少	グリーンランド氷床の大規模な縮小	
	北極海水の季節的消滅	海洋深層循環の停止	

図(2)-16 影響の重要性と確信度(縦軸)のリスクマトリックス

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ(2)では、将来の複数シナリオ下での全世界の洪水流量と氾濫を、世界で初めて推計した。洪水リスクを、単に物理的な水循環の量として表現するにとどまらず、洪水暴露人口というインデックスによって表現したことや、洪水リスク情報を温室効果ガス排出削減目標に組み入れるために、気温上昇と全球洪水リスクとの関係性の提示を初めて行ったことも、これまでにない特徴である。

水分野(水資源、熱帯低気圧、海面上昇)における気候変動の経済影響に関する文献調査を行い、それらの推計値を比較した。これにより、これらの分野における経済影響推計方法の科学的信頼性についての比較検討が進展したと共に、影響推計に用いる関数やモデル・シナリオの違いが、推計値にどの程度の差異を与えうるかが整理された。また、既存の統合評価モデルの分野別影響関数に、最新の気候シナリオ・社会経済シナリオを入力した場合、推計値にどの程度の不確実性幅が生じるかが示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ(1)および(2)による自然災害に対する脆弱性の推計は、IPCCなどの場で活用され、今後の各国政府や国連などにおける防災対策、地球温暖化対策の指針作りに重要な役割を果たすと考えられる。

水・エネルギー・食料等の分野における気候変動リスク推計では、全球平均気温上昇量と洪水

暴露人口・洪水暴露GDPとの関係を領域別に分析し、洪水暴露人口・暴露GDPが将来大きく増加する可能性がある地域を示した。このような研究を通じて、将来の洪水被害軽減という観点から見た場合の緩和策や適応策の導入が特に重要となる地域を明らかにすることで、地球温暖化の緩和策や適応策に関わる政策の立案・実施へと今後役立つことが期待される。

また、リスクインベントリ表の情報を基にリスクの大きさとその発生確率について整理すると共に、将来シナリオや気温上昇量が、水分野に与え得る影響の大きさを調査・推計した。これら重要なリスクの整理や影響調査・推計は、我々が選択する将来のシナリオ（環境政策や気温抑制目標）が、人間社会や生態系・地球システムに与え得る影響の大きさ・深刻さについて、現時点では未だ大きな不確実性がある一方で示唆を与え得るものであり、今後の環境政策の立案・選択の一助へとつながる事が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

本プロジェクトで得られたいくつかの研究結果が、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書中のいくつかの章で本文への引用文献もしくは図表の一部として使用されている。IPCCは、地球温暖化に関して最も多くの専門家の科学的知見を集約し、かつ国際的に広く認められた報告書であるため、ここに引用されるということは大変な名誉であり、本プロジェクト成果の社会への展開・実装としては十分に大きな意義をもつと言える。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 井芹慶彦, 鼎信次郎: 土木学会論文集G(環境), 69, 5, I_61-I_66 (2013)
「自己組織化マップによる熱帯低気圧の経路・強度パターンの抽出」
- 2) 岩崎明希人, 楠原啓右, 井芹慶彦, 鼎信次郎: 水工学論文集, Vol. 57, No.4, I_158-I_159 (2013)
「北西太平洋域を対象とした三種の台風リスク推計モデルの作成及び比較」
- 3) Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae: Nature Climate Change, 3, 816–821, (2013)
“Global flood risk under climate change”
- 4) A. Khajuria, S. Yoshikawa, S. Kanae: The 57th conference on Hydraulic Engineering, Vol. 69, No. 4, I_145-I_150, (2013)
“Estimation and prediction of water availability and water withdrawal in India”
- 5) M. Kiguchi, S. Miyazaki, W. Kim, S. Kanae, T. Oki, J. Matsumoto and T. Satomura: IAHS Publication, 359, 239-245, (2013)
“The heat flux from the land surface during the pre-monsoon season in the inland region of Thailand”
- 6) 石田裕之, 小林翔太, 鼎信次郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦, 田中朱美: 土木学会論文集B1(水工学), 70, 4, I_463-I_468 (2014)
「最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定」
- 7) 岩崎明希人, 井芹慶彦, W.H. Lim, 鼎信次郎: 土木学会論文集B1(水工学), 70, 4, I_469-I_474 (2014)

「熱帯低気圧による全球経済的損失の将来推計」

- 8) Z.W. Kundzewicz, S. Kanae, S.I. Seneviratn, J. Handmer, N. Nicholls, P. Peduzzi, R. Mechler, L.M. Bouwer, N. Arnell, K. Mach, R. Muir-Wood, G. R. Brakenridge, W. Kron, G. Benito, Y. Honda, K. Takahashi and B. Sherstyukov : *Hydrological Sciences Journal*, 59, 1, 1–28 (2014)
“Flood risk and climate change: global and regional perspectives”
- 9) H. Ishida, S. Kobayashi, S. Kanae, T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui, A. Tanaka, Y. Honda: *Environmental Research Letters*, 9, pp9 (2014)
“Global-scale projection and its sensitivity analysis of the health burden attribution to childhood undernutrition under the latest scenario framework for climate change research”
- 10) S. Yoshikawa, J. Cho, H. G. Yamada, N. Hanasaki, and S. Kanae: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4289-4310, doi:10.5194/hess-18-4289-2014.(2014)
“An assessment of global net irrigation water requirements from various water supply sources to sustain irrigation: rivers and reservoirs (1960–2050)”
- 11) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae and T. Oki: *Hydrological Sciences Journal*, doi:10.1080/02626667.2014.888067/ (2015)
“Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate”
- 12) 井芹慶彦, 藤村和正, 村上雅博, 岡田将治, 鼎信次郎: *流域圏学会誌*, 第3巻, 第1号, pp.23-32 (2015)
「領域気候モデルとバイアス補正手法に起因する不確実性が早明浦ダム貯水量将来変化の推定に与える影響」
- 13) Tiratas Suwathep, Wee Ho Lim, Yoshihiko Iseri, Shinjiro Kanae: *Hydrological Research Letters*, Vol. 9, No. 4, pp. 103–106 (2015)
“Generalized method to estimate value of urban assets for natural disaster risk assessment at the macro scale”
- 14) Somchit Amnatsan, Yoshihiko Iseri, Aki Yanagawa, Sayaka Yoshikawa, Kaoru Kakinuma, Shinjiro Kanae: *Journal of Japan Society of Civil Engineering*, Ser. B1, Vol. 72, No.4, I_7–I_12 (2016)
“Monthly reservoir inflow forecasting in Thailand: A comparison of ANN-based and historical analogue-based methods”
- 15) Masashi Kiguchi, Jun Matsumoto, Shinjiro Kanae and Taikan Oki: *Frontiers in Earth Science*, 4, 42, 1-13 (2016)
“Pre-Monsoon Rain and Its Relationship with Monsoon Onset over the Indochina Peninsula”
- 16) Nobuyuki Utsumi, Hyungjun Kim, Shinjiro Kanae, Taikan Oki: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 18, 10,522–10, 537 (2016)
“Which weather systems are projected to cause future changes in mean and extreme precipitation in CMIP5 simulations?”
- 17) 井芹慶彦, 宮崎千尋, Lu Gao, 吉川沙耶花, 鼎信次郎: *土木学会論文集G (環境)*, Vol. 72, No.5, I213-I221 (2016)

「複数の将来気候シナリオと社会経済シナリオを入力した統合評価モデルFUNDの水分野影響関数による経済被害推計値の特性分析」

- 18) 木口雅司, 井芹慶彦, 鼎信次郎, 沖大幹: 土木学会論文集G (環境), Vol. 72, No.5, I241-I246 (2016)

「将来の気候変動下におけるティッピングエレメントのティッピングポイントの超過可能性」

- 19) ZW Kundzewicz, V Krysanova, R Dankers, Y Hirabayashi, S Kanae, FF Hattermann, S Huang, PCD Milly, M Stoffel, PPJ Driessen, P Matczak, P Quevauviller, H-J Schellnhuber: Hydrological Sciences Journal, 6, 1, 1-14 (2017)

“Differences in flood hazard projections in Europe—their causes and consequences for decision making”

- 20) 井芹慶彦, 鼎信次郎: 土木学会論文集G (環境) (受理済み)

「時間周波数解析を用いた地域気候モデル日降水量のバイアス補正と種々のバイアス補正手法との比較」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) C.D. Bulter eds.: Climate change and global health. DOI:10.1079/9781780642659.0054, pp. 54-64 (2014)

“Chapter 6. Climate extremes, disasters and health” (authors: Y. Honda, T. Oki, S. Kanae and C.D. Bulter)

- 2) 木口雅司, 井芹慶彦, 宮崎千尋, 田渡竜乃介, 山本彬友, 伊藤昭彦, 鼎信次郎, 沖大幹: 環境情報科学, 44, 1, 29-35.

「ティッピングエレメント」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 木口雅司, Yanjun Shen, 鼎信次郎, 沖大幹, 第8回南アジアおよびインドシナにおける自然環境と人間活動に関する研究集会 (2012)

「温暖化気候下における社会経済および気候の将来水ストレスに対する影響評価」

- 2) M. Kiguchi, Y. Shen, S. Kanae, and T. Oki: AGU fall meeting, San Francisco, USA, (2012)

“Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate”

- 3) 井芹慶彦, 楠原啓右, 岩崎明希人, 鼎信次郎: 水文・水資源学会2013年度研究発表会, 神戸 (2013)

「確率台風モデルによる台風暴露人口の将来予測と台風データの統計解析」

- 4) Y. Iseri and S. Kanae: The 6th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Seoul, Korea, (2013)

“Classification of observed typhoons from their track and intensity”

- 5) Y. Iseri, K. Kusuhara, Y. Imada, T. Sato, W.H. Lim, A. Iwasaki and S. Kanae: International Joint Conference of 11th Asia Flux, International Workshop, 3rd HESSS, and 14th Annual Meeting of KSAFM, Seoul, Korea, (2013)

- “Use of stochastic typhoon model for estimating future change of population exposed by typhoon winds in the western north pacific region”
- 6) Y. Iseri and W.H. Lim: ICA-RUS/CCRP-PJ2 International Workshop 2013, Tokyo, Japan, (2013)
“Climate change risks on food shortage, floods and tropical cyclones”
 - 7) A. Iwasaki, K. Kusuhara, Y. Iseri, W.H. Lim and S. Kanae: The 6th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Seoul, Korea, (2013)
“Development and comparison of typhoon risk models in the western north pacific region”
 - 8) A. Iwasaki, Y. Iseri, W.H. Lim and S. Kanae: The International Conference on the Preservation and Rehabilitation of Urban Water Environment for Asian Core Program of NRCT, JSPS and ERDT, Thailand, (2013)
“Parameterization of tropical cyclones risk models in different geographical regions and future projection in 2100”
 - 9) S. Kanae, Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe and H. Kim: The 6th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Seoul, Korea, (2013)
“Global flood risk in the last decades of the 21st century under the latest emission scenarios”
 - 10) S. Kanae, T. Sato, W.H. Lim, S. Koirala, M. Roobavannan, Y. Hirabayashi and D. Yamazaki: American Geophysical Union (AGU) 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, (2013)
“Flood risk projection for large river basins with delta in Southeast Asia”
 - 11) M. Kiguchi, Y. Shen, A. Champathong, P. Petvirojchai, N. Aranyabhaga, N. Sukhanthamat, B. Archevarahuprok, S. Apipatanavis, N. Junjaroen, S. Kanae and T. Oki: "Knowledge for the Future" IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Swedish Exhibition & Congress Centre, Gothenburg, Sweden, (2013)
“Future water stress under a warming climate over the Indochina Peninsula”
 - 12) W.H. Lim, M.L. Roderick, G.D. Farquhar and S. Kanae: The 6th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Seoul, Korea, (2013)
“A new model of pan evaporation under steady state conditions”
 - 13) W.H. Lim, M.L. Roderick, G.D. Farquhar and S. Kanae: International Joint Conference of 11th Asia Flux International Workshop, 3rd HESSS, and 14th Annual Meeting of KSAFM, Seoul, Korea, (2013)
“Development of a new model of pan evaporation”
 - 14) T. Sato, D. Yamazaki, W.H. Lim and S. Kanae: The International Conference on the Preservation and Rehabilitation of Urban Water Environment for Asian Core Program of NRCT, JSPS and ERDT, Bangkok, Thailand, (2013)
“Impact of sea level rise to the damage due to extreme flood in the Mekong basin”
 - 15) Y. Iseri and S. Kanae: Japan Geoscience Union Meeting 2014, (2014)
“Relationships between heavy rainfall in East/Southeast Asia and track, intensity, duration patterns of tropical cyclones”
 - 16) 鼎信次郎 : RECCA公開シンポジウム・第38回高知大学アカデミアセミナー 温暖化する高

- 知県での産業振興と地域・人のつながりー課題の先進県から課題解決の先進県へー (2014)
「水：世界と日本と高知」
- 17) 井芹慶彦、藤村和正、岡田将治、村上雅博、鼎信次郎：第4回流域圏学会総会・学術研究発表会、P-12 (2014)
「台風による降雨の将来変化が高知県鏡川宗安寺地点の流量に与える影響」
- 18) Y. Iseri, W.H. Lim, T. Suwathep, C. Miyazaki, Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae: Tokyo Conference on International study for disaster risk reduction and resilience, Tokyo, Japan, (2015)
“Risk of flooding at the global scale under climate change”
- 19) 井芹慶彦、藤村和正、村上雅博、岡田将治、鼎信次郎：流域圏学会 (2015) 総会・学術研究発表会、B02 (2015)「気候変動が流域圏の水循環に与える影響の評価～高知県山間部を例として～」
- 20) 横畠徳太・田中克政・仁科一哉・高橋潔・江守正多・木口雅司・本田靖・岡田将司・井芹慶彦・眞崎良光・山本彬友・重光雅仁・吉森正和・末吉哲雄・岩瀬健太・花崎直太・伊藤昭彦・櫻井玄・飯泉仁之直・西森基貴・W.-H. Lim・宮崎千尋・岡本章子・鼎信次郎・沖大幹：日本地球惑星科学連合 連合大会 2016年大会 (2016)
「気候変動リスクの部門間相互作用の可視化」
- 21) Kanae S., Yoshikawa S., Gao L., Kakinuma K.: Workshop on Land Surface Model Development for the Coming Decade, IIS, Japan (2016) “Challenge towards long-term prospect of global water assessment”
- 22) 井芹慶彦、鼎信次郎：第24回地球環境シンポジウム講演集，首都大学東京. (2016)
「時間周波数解析を用いた地域気候モデル日降水量のバイアス補正と種々のバイアス補正手法との比較」
- 23) 井芹慶彦，北村颯生，岩崎明希人，鼎信次郎:水文・水資源学会2016年度研究発表会，福島. (2016)
「階層ベイズモデルによる熱帯低気圧の全球経済損失推計」
- 24) Lu GAO, Sayaka YOSHIKAWA, Yoshihiko ISERI, Shinjiro KANAE：水文水資源学会2016年度総会・研究発表会，福島 (2016)
“Economic assessment of increasing water resources: cost and benefit analysis of seawater desalination”
- 25) Sayaka Yoshikawa : Including water management in large scale studies of the water cycle, Gif-sur-Yvette, France (2016)
“Efficacy of adaptation measures to future water scarcity on a global scale”
- 26) 吉川沙耶花：平成28年度水文研究集会，秋田(2016)
「将来の水資源に関するトピック」
- 27) Gao L., Yoshikawa S., Iseri Y., Kanae S.: American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, GC42B-04 (2016)
“The economic feasibility of seawater desalination over the global scale: assessment of the production cost development and national water price until 2050”.

- 28) Ryunosuke Tawatari, Yoshihiko Iseri, Masashi Kiguchi, Shinjiro Kanae: American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, GC21E-1145, (2016)
“Global Coastal Exposure due to Sea-level Rise beyond Tipping Points with Multiple Warming Pathways”
- 29) Nozomi Ando, Sayaka Yoshikawa, Shinjiro Kanae: American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, GC43C-1189 (2016)
“An Assessment of Global Electric-Sector Water Demands to 2100 under the Latest Scenarios”
- 30) Sayaka Yoshikawa, Yoshihiko Iseri, Shinjiro Kanae: American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, GC43C-1186 (2016)
“How much will be economic impact of climate change on water resources? A Meta-Analytic Review of previous literature”
- 31) Kiguchi, M., M. Hatono, H. Ikeuchi, Y. Hirabayashi, S. Kanae, and T. Oki : International workshop for climate variability and related studies over North East Indian subcontinent, Uji, Japan, (2016)
“Study on the water related disaster risks using a future socio-economic scenario in Asia”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 東京人 (2015年1月号、「知の最前線がここにある! 東京工業大学大学院理工学研究科 鼎信次郎」)

(6) その他

<受賞>

- 1) 2014年度水文・水資源学会論文賞
受賞機関：(一社)水文・水資源学会、
受賞年月日：2014年9月26日
受賞対象：鼎信次郎 ほか5名 (Hirabayashi et al. (2013) : Global flood risk under climate change. Nature Climate Change に対して)
- 2) 第60回土木学会水工学講演会アウトスタンディングディスカッション賞
受賞機関：公益社団法人 土木学会
受賞年月日：2016年8月1日
受賞対象：吉川沙耶花

8. 引用文献

必要に応じて文中に記載した。

(3) 健康分野における気候変動リスク推計

国立大学法人筑波大学

本田靖

平成24～28年度累計予算額：31,519千円（うち平成28年度：5,697千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

全球を対象として将来のリスクを推計するというS-10の目的に沿って、影響規模が大きいと報告されているアウトカム、すなわち熱関連超過死亡、動物媒介感染症、低栄養、下痢性疾患、沿岸洪水について健康影響の将来推計をおこなうことが本サブテーマの目的であった。

その目的に沿う世界保健機関（WHO）のプロジェクトの一翼を担い、S-4、S-8で開発した熱関連超過死亡のモデルを更に発展させて全球に適用可能なモデルとし、将来の影響予測を行った。他のアウトカムについてはWHOのプロジェクトのメンバーに協力を依頼した。たとえば、マラリアのモデルにおいては、最も寒冷な月の平均気温と最も降水量が多い月の平均降水量、社会経済的因子として国内総生産を説明変数として、マラリアの流行地かどうかを判別した。低栄養では、気候変動による農業生産の減少による小児への影響を、低身長として評価するとともに、その究極の影響としての死亡も評価した。その成果として、WHOから2014年に報告書が出版された。主な結果としては、(1) 全世界を対象にした場合、低栄養による死亡影響がもっとも大きく、マラリアがそれに次ぐ；(2) 熱関連死亡は、適応が全く起こらなければ低栄養に匹敵する影響が起こるが、適応が起こることが考えられるため、それよりは影響が小さくなると考えられる；(3) 日本を含む先進国では、熱関連死亡が最も大きな問題である。

COP21に向けて、WHOは上記報告書の更新を行い、国別に影響を報告した。2014年の報告書がSRES A1Bに基づくものであったのに対し、この国別影響はRCP、SSPごとの影響を予測した。

厳密には健康影響ではないが、熱ストレスによる健康影響を防ぐために労働時間の短縮が必要となるので、その労働生産性のロスも上記国別報告書に含められた。

[キーワード]

熱関連超過死亡、マラリア、下痢性疾患、低栄養、沿岸洪水

1. はじめに

世界保健機関（WHO）が2004年に出版したComparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Factorsという書籍の第20章が地球温暖化の影響にあてられていた。この報告は、包括的な温暖化の健康影響リスク評価をおこなった最初のものと考えられている。1961-1990年に比較して、2000年にはすでに166,000人の死亡が温暖化によって起きていることなど、その概要が、2005年にNatureに紹介され、健康影響の重要性が世界に認識されるに至っている。

しかしながら、上記報告はいくつかの問題点をかかえていた。たとえば、熱関連超過死亡は、

気候によって異なることから、精度高く全球予測を行うことは困難であった。このような問題点に対応するため、2009年にWHOは、近年の進歩を取り入れた影響評価プロジェクトを開始した。申請者は、S-4の研究が評価され、気温関連の直接影響評価の担当としてこのプロジェクトに参加した。まさにこの目的は、S-10の目指す全球的なリスク評価であった。影響の大きい低栄養や下痢性疾患などを含むこのWHOプロジェクト全体を出発点として取り込み、新たな知見を加えてリスク評価を行うことがこのサブテーマの目的であった。

上記プロジェクトの成果は、2014年にWHOから報告書として結実した(<http://www.who.int/globalchange/resources/countries/en/>)。ただし、将来の社会経済シナリオとしてはSRES A1Bのみを用いていた。その後、COP21を成功に導くべく、WHOは国別の予測を、2015年春に発表した。ここでは、RCPとSSPに基づいた将来予測がなされた。S-10を終えるにあたり、このWHOの成果を含め、S-10の枠組みで行われた研究について以下に述べる。

2. 研究開発目的

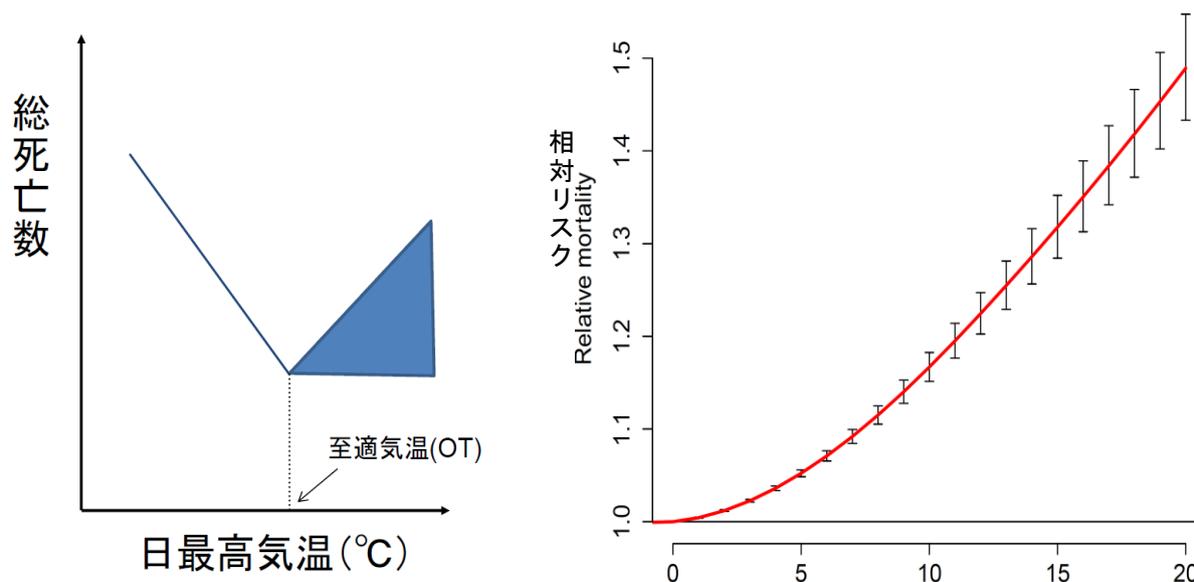
複数の健康アウトカム、すなわち熱関連超過死亡、動物媒介感染症、低栄養、下痢性疾患、沿岸洪水について全球レベルで気候変動リスクを推計する。なお、健康を守るためには熱ストレスに対して労働時間を短縮することで対処することが必要となる。この労働生産性のロスについても将来予測の報告を集める。

3. 研究開発方法

健康に関する影響については、基本的に上記2014年、2015年のWHOの報告に準ずる。

(1) 熱関連超過死亡

気温と死亡との関連は、図(3)-1(a)のようにV字型を示し、死亡数の最も低い気温、すなわち至適気温が存在する。この至適気温を超えると死亡数が上昇するが、その死亡数と至適気温における



図(3)-1 気温と死亡の関連。(a)は模式図、(b)は最終的なリスク関数。

死亡数との差を熱関連超過死亡と定義する。

日本、韓国、中国、台湾、欧州、米国のデータを用いた検討で、我々は世界で初めてこの至適気温が日最高気温の84パーセンタイル値で近似できることを示した。この関連を用いて全球の熱関連超過死亡数を予測した。その際に用いたリスク関数は図(3)-1(b)である。ここでは、x軸を日最高気温－至適気温としてある。

なお、ここ数十年の温暖化によって至適気温が高温側にシフトしていることが観察されており、これを自動的適応と呼ぶ。

(2) 職場における熱関連影響

職場における熱関連影響に関しては、既にKellstrom et al.によって報告された方法での計算結果を示す。すなわち、気温、湿度、輻射熱などから測定されるWBGT (wet-bulb globe temperature = 湿球黒球温度) によって、生理学的に熱負荷のかかる状況の判定を行い、労働衛生上許可されない場合には労働不可能と判定して、逸失労働時間が計算された。

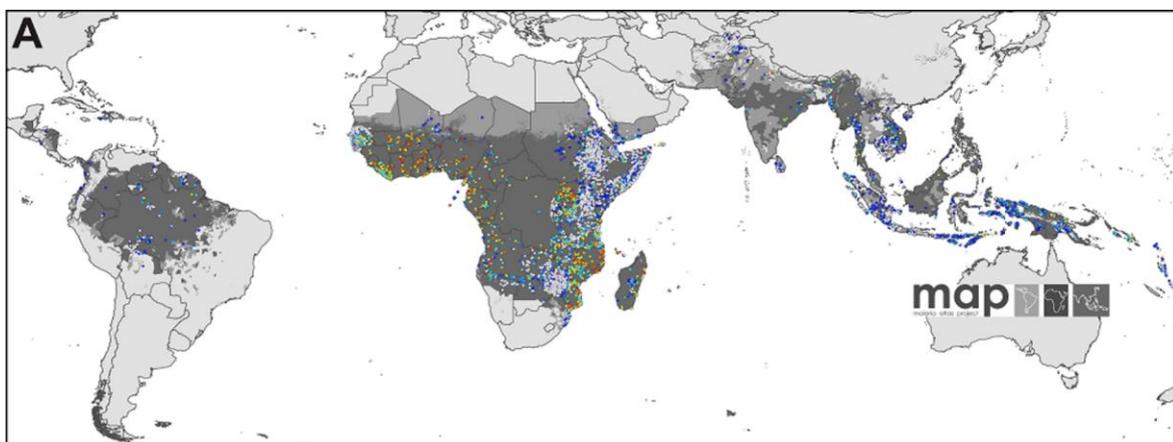
(3) 下痢性疾患

下痢性疾患のリスクに関しては、上記WHO報告書で用いられた気温と下痢性疾患の罹患率の線形回帰式について、新たな報告を含めた検討を行った。その結果、これまでの値を用いてよいと考えられた。

ここでは上記WHO報告書に引用されている結果を示す。

(4) マラリアの気候変動リスク評価

上記WHO報告書におけるマラリアの気候変動リスク評価が使用していた全球のマラリア流行地図が更新された (図(3)-2) ので、これに伴うリスク関数の再計算を行った。その式は、



図(3)-2 熱帯熱マラリアの流行地図。濃い灰色が安定的な流行地域。それ以外は非流行地とした。

$$\text{logit(マラリア流行)} = -4.21 + 0.22 * T_{\min} + 0.00067 * P_{\max} + -0.23 * \text{sqrt(GDPpc)}$$

ただし、 T_{\min} は1961年～1990年について月平均気温の年間最低値、 P_{\max} は同観察期間について平均降水量の月別最大値、 GDPpc は一人あたり国内総生産である。この式により、その地域が流行地である確率が計算できるので、その値が0.5を超えた場合にその地域を流行地と判断した。

(5) 低栄養

低栄養に関しては、International Food Policy Research Institute (IFPRI) で開発された農産品とその貿易の世界政策分析モデル (IMPACT) から低栄養の予測値を得た。このモデルでは、食糧以外に社会経済的な低栄養の要因も考慮に入れ、まずは5歳未満の小児の低身長 の頻度を推定し、低身長と死亡の関連に関する文献から死亡数の予測を行った。

(6) 沿岸洪水

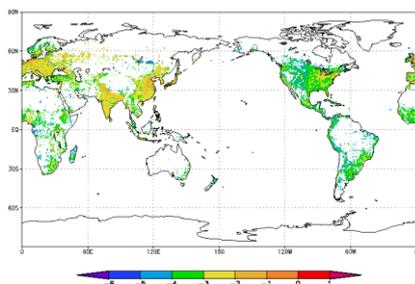
沿岸洪水では、高潮による死亡予測の全球モデルを用いた。気候変動に伴う海面上昇による、沿岸洪水の被害を受ける将来の人口予測は、Dynamic Interactive Vulnerability Assessment (DIVA) global modelによって行った。国ごとの高潮による死亡数はEM-DATで推計されたものを用いた。経済発展の影響は、Human Development Indexを用いてモデル化した。

4. 結果及び考察

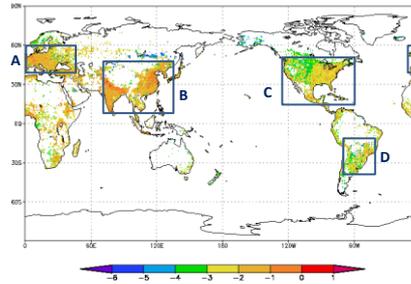
(1) 熱関連死亡

図(3)-3に自動的適応が起こらなかった場合の熱関連超過死亡数密度 (人/km²) を示す。現状と比較すると、すべてのGCMで熱関連超過死亡数が増加していることがわかる。

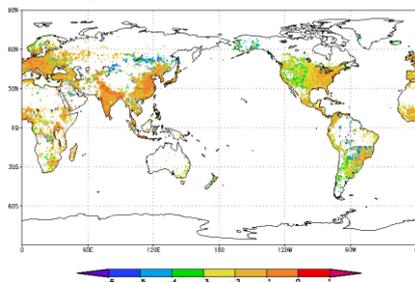
(a) 現状 (1981年～2000年) 5GCMの平均



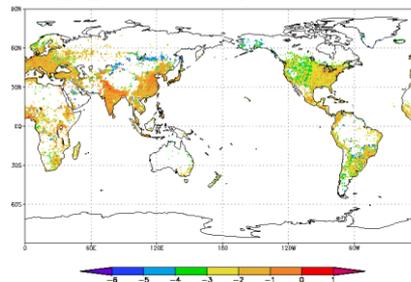
(b) 2080s超過死亡数密度GFDL-ESM2M



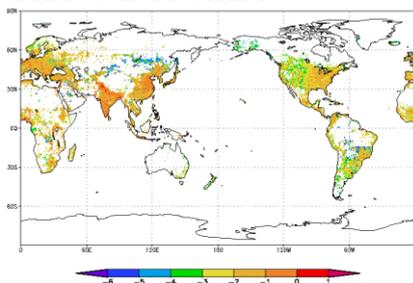
(c) 2080s超過死亡数密度HadGEM2-ES



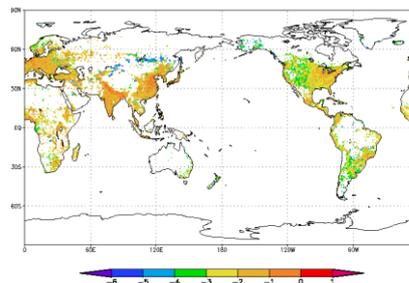
(d) 2080s超過死亡数密度IPSL-CM5A-LR



(e) 2080s超過死亡数密度
MIROC-ESM-CHEM

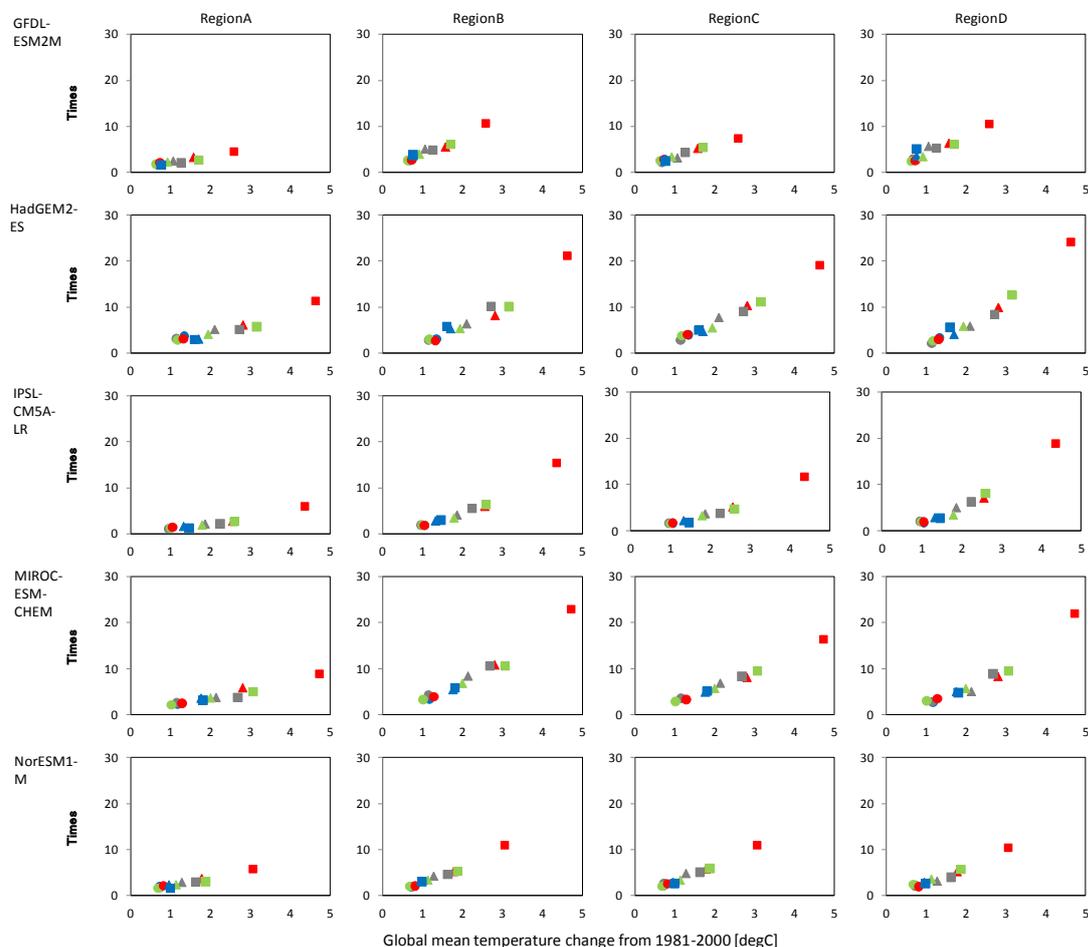


(f) 2080s超過死亡数密度NorESM1-M



図(3)-3 (a) 現在 (1981～2000年) の熱関連超過死亡数密度 (人/km²) の平均値。(b)～(f) 2080年代 (2081～2090) での各 GCM の超過死亡数密度。(a)～(f) について 1 グリッドは 0.5°であり、グ

リッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 をとり表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。



図(3)-4 各GCMの全球平均気温上昇度に対する熱関連超過死亡数密度 (人/km²) の現在からの変化率。マークが年代(○: 2020年代、△: 2050年代、□: 2080年代)、色がRCPシナリオに対応(青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5)する。社会経済シナリオはSSP2。

次に、図(3)-3パネル(b)に示した、影響の大きい4つの領域A、B、C、Dについて、詳しく評価したものが図(3)-4である。年次が進むにつれて熱関連超過死亡数が増加する傾向は共通である。気温上昇と共にどの領域の変化率が大きいかについてはGCMで予測に相違があるが、総じて近未来ではRCPによる相違は小さく、年次が進むにつれて相違が大きくなっていくようである。特に、RCP2.6、RCP 4.5、RCP 6.0の相違に比べるとRCP8.5は突出して死亡数が高い。

例えばRCP8.5の場合、適応ケース2の熱関連超過死亡数は、適応なしと比較すると、伸び率が半分程度の場合もある。

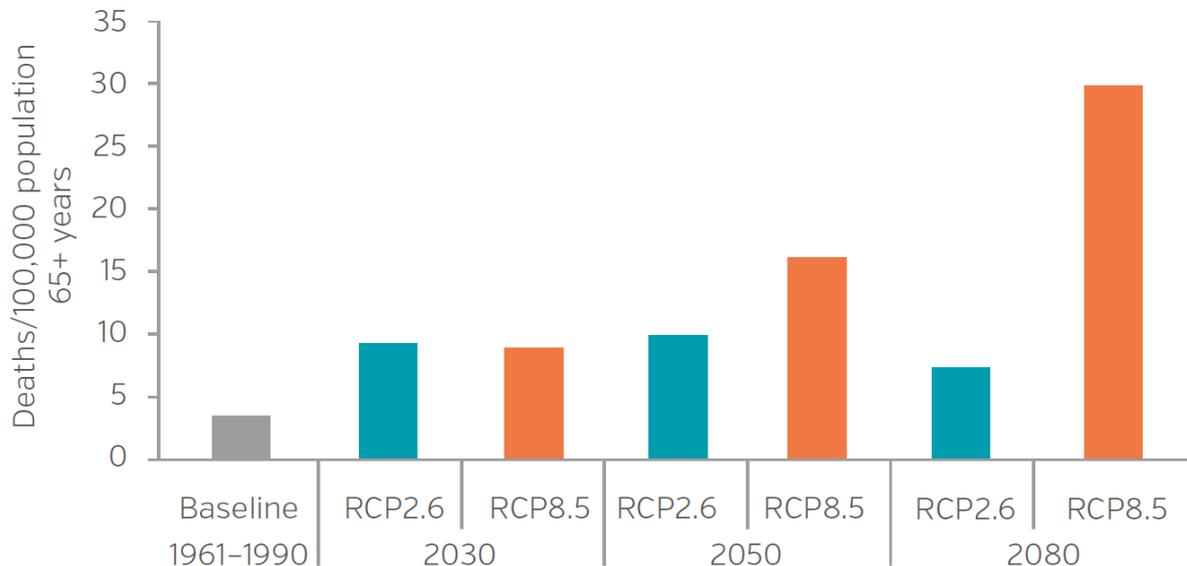
ここで、上記WHOの国別報告からも将来予測の結果を示す。

図(3)-5は中華人民共和国の例であるが、RCP2.6であれば死亡数はほぼ横ばいであるが、RCP8.5では死亡数が激しく増加する。

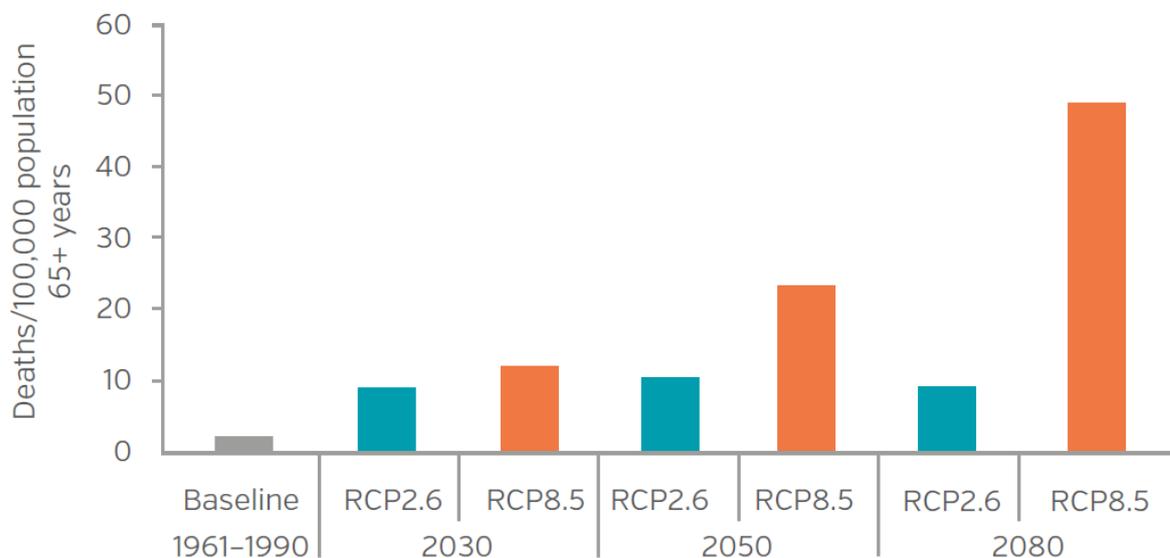
2014年のWHO報告書には、明示的には示されていないが、熱関連死亡に関する特徴が浮き彫り

になっている。一つは、熱関連死亡の多くは高齢者であるのに対し、低栄養、下痢性疾患、マラリアは主に小児が犠牲になることである。もう一つは図(3)-6に示すように、先進国においては、WHO報告書で扱われた死亡影響のうち、熱関連超過死亡のみが大きな影響を与えることである。

(a) バングラデシュ



(b) 中華人民共和国



図(3)-5 65歳以上の熱関連超過死亡数。(a)バングラデシュ、(b)中華人民共和国

(2) 職場における熱関連影響

図(3)-7は、バングラデシュと中華人民共和国のKjellstrom et al.による将来予測である。重労働の職場であればバングラデシュでは最大30%以上、中華人民共和国でも10%以上もロスがあると推計されている。後者で高い割合を示すのは、農業人口が多いことが原因ではないかと考えられる。

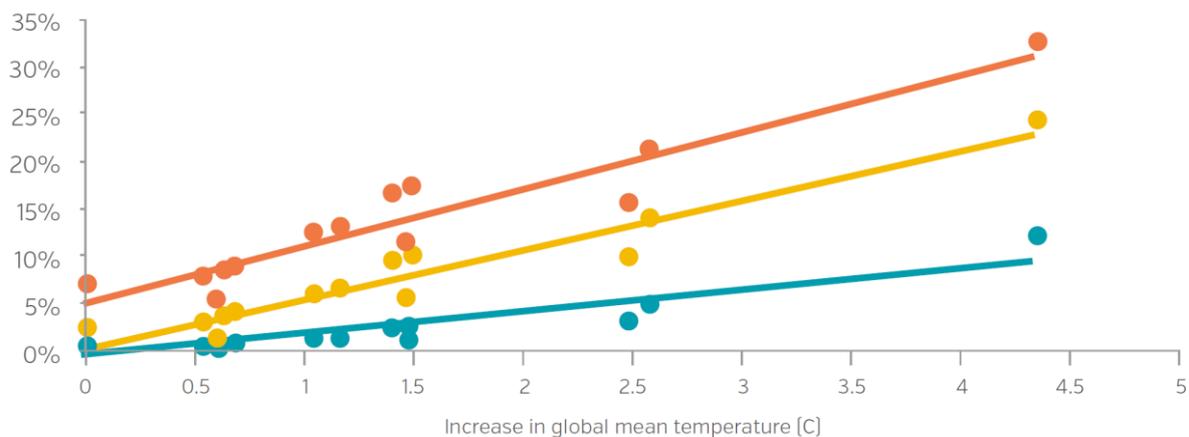


図(3)-6 気候変動による追加的死亡数 (SRES A1b、2030)

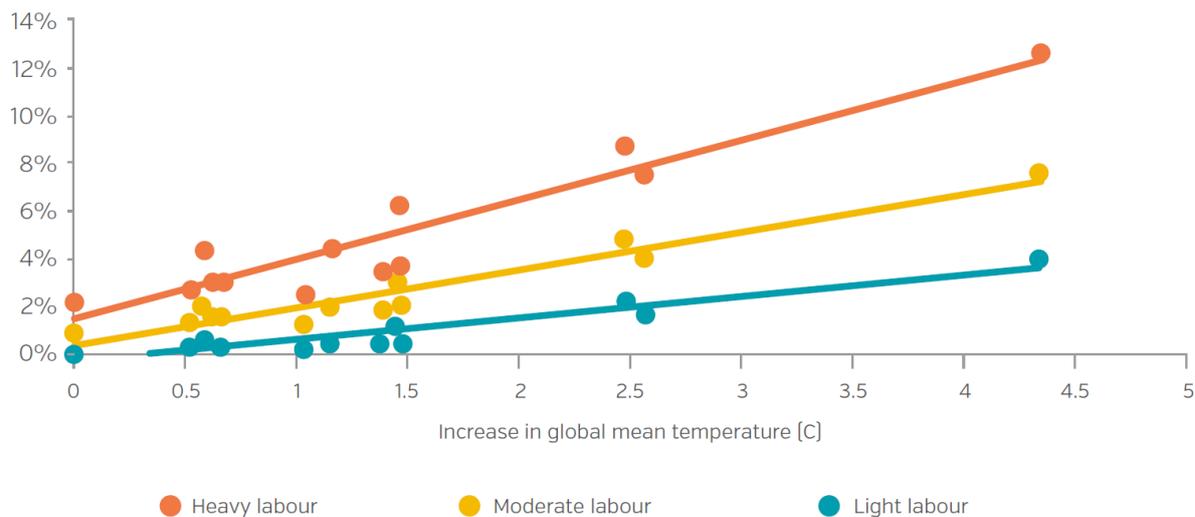
(3) 下痢性疾患

図(3)-8は、2014年のWHO報告書に報告された下痢性疾患の状況である。(a)が死亡数、(b)は粗死亡率で、年次とともに減少している。しかしながら、その理由は経済発展により下痢性疾患が減少するためであり、気候変動が起こらない場合に比べると、やはり気候変動が起こった場合の方が死亡数は多くなることに留意する必要がある。

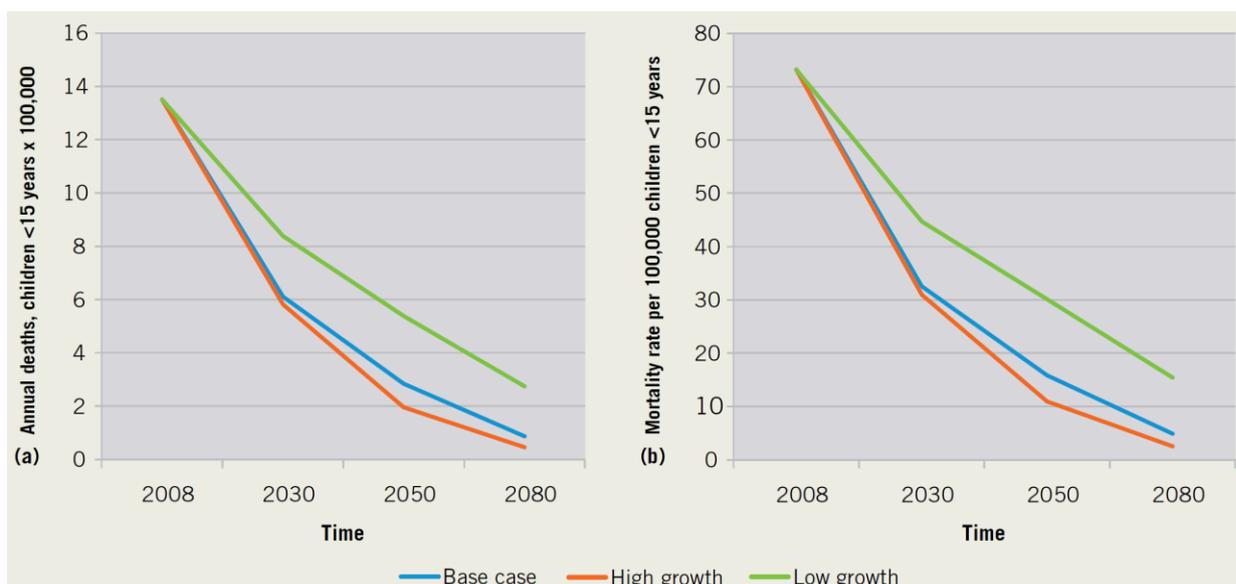
(a) バングラデシュ



(b) 中華人民共和国



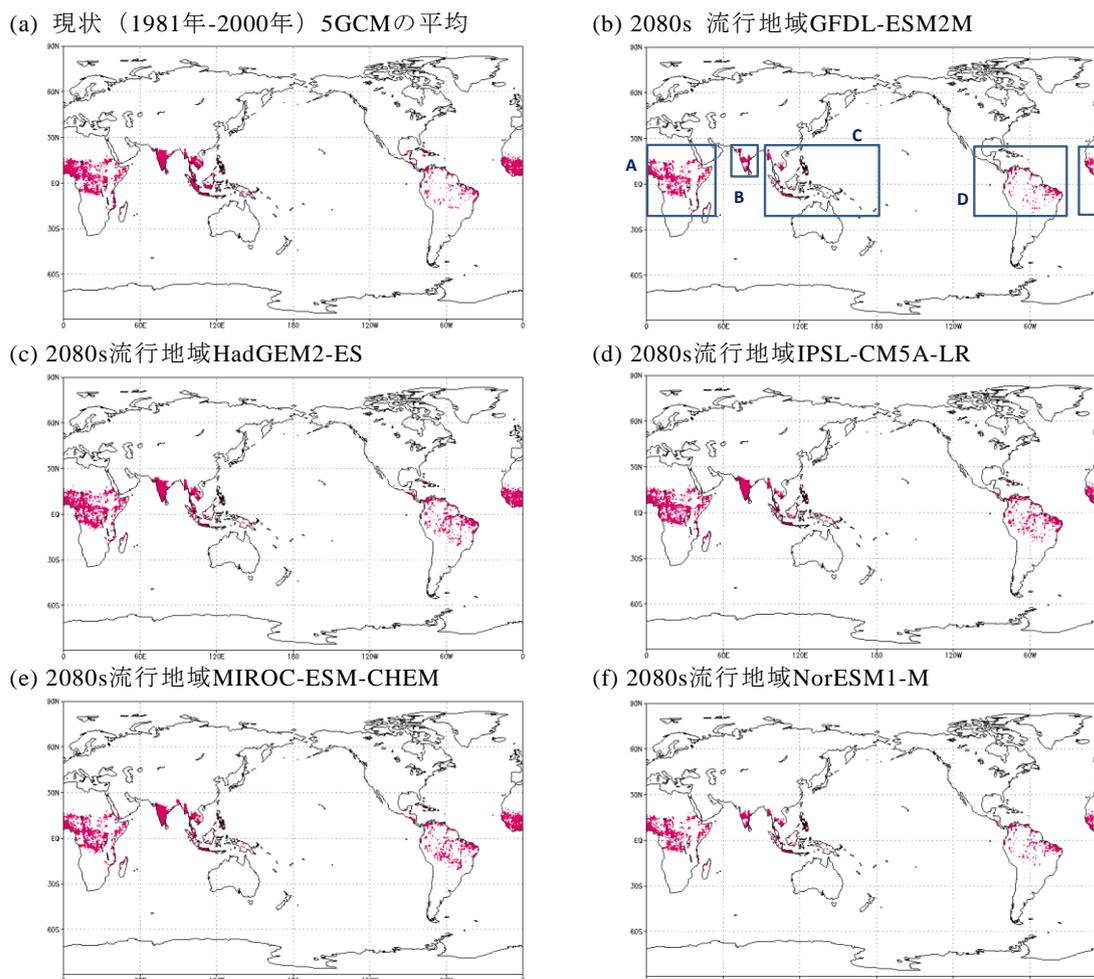
図(3)-7 年間でみた日別労働時間ロス。(a)バングラデシュ、(b) 中華人民共和国

(<http://www.climatechip.org/>)

図(3)-8 年間の下痢性疾患。(a)死亡数、(b)粗死亡率

(4) マラリア

図(3)-9に流行地の分布を示す。(a)は現状であり、(b)から(f)はSSP2のもとでの、それぞれ異なるGCMによる2080年代の将来予測である。これからわかるように、流行地域は縮小傾向を示す。



図(3)-9 (a) 現在（1981－2000年）の流行地域の予測値。(b-f)2080年代（2081-2090）での各GCMの流行地域。(a)～(f)について1グリッドは 0.5° であり、マラリア流行地域（グリッド）を表示している。なお、将来シナリオはRCP8.5およびSSP2を用いている。

しかし、そのことは、上記の下痢性疾患と同様、気候変動の影響が小さくなることを表しているのではなく、GDP増加による経済発展が大きいため流行地域が縮小しているのであって、同じようにGDPが増加する、気候変動なしの場合と比較すると流行地域は大きくなっている。

早期に適応行動を開始すれば、患者数・死亡者数を減少させることが可能であることから、GDP増加を待つ戦略では、それまでに多くの犠牲者を出すことになる。なお、図には示していないが、上記の数式から明らかなように、GDPの相違を受けてSSPによる差は大きくなる。

(5) 低栄養

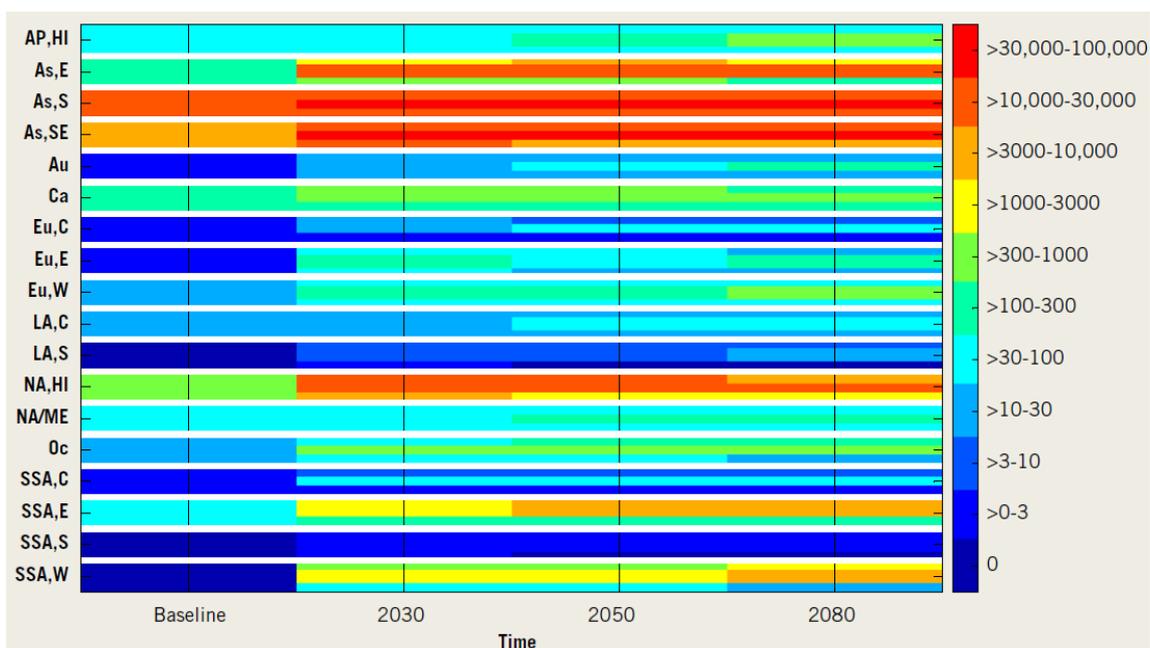
図(3)-10に低栄養による予測死亡数を示す。2030年には、低成長の場合、12万人以上もの5歳以下の小児が犠牲になるという結果であり、WHOの報告書で扱った死因の中では最も影響が大きい。もちろん、現在でも低栄養によって死亡する小児は存在するので、将来に向かって早急に対策を講じる必要があるものと考えられる。



図(3)-10 気候変動によって増加する5歳以下の低栄養による死亡数。L:低成長、B:基本ケース、H:高成長。

(6) 沿岸洪水

沿岸洪水は、同じ規模の高潮であっても、都市部に上陸するか人口の希薄な地域に上陸するか、また先進国か途上国かによって影響の大きさが大きく異なり、その予測は非常に困難である。そのため、WHOの2014年報告書でも、結果は判定的な形で行われた。図(3)-11に地域別の影響を示す。



図(3)-11 高潮による地域レベルの年間平均死亡数。注：各地域において、3本の水平な帯が描かれており、上から(i) 気候変動なし、適応なし (ii) 気候変動あり、適応なし、(iii) 気候変動あり、

適応あり。

地域名は以下のように省略されている。

AP,HI – Asia Pacific, high income; As,E – Asia, east; As, S – Asia, south; As,SE – Asia, south-east; Au – Australasia; Ca – Caribbean; Eu,C – Europe, central; Eu,E – Europe, eastern; Eu,W – Europe, western; LA,C Latin America, central; LA,S – Latin America, southern; NA,HI – North America, high income; NA/ME – North Africa/Middle East; Oc – Oceania; SSA,C – sub-Saharan Africa, central; SSA,E – sub-Saharan Africa, eastern; SSA,S – sub-Saharan Africa, southern; SSA,W – sub-Saharan Africa, western.

WHOの国別報告書では、死亡ではなく、影響人口がRCPレベルと適応の有無に分けて予測されている。2070年から2100年における状況を、RCP2.6とRCP 8.5、適応の有無に分けて予測したバングラデシュと中華人民共和国の例を示す。

(a) バングラデシュ

Severity of climate change scenario	RCP2.6	Without Adaptation		With Adaptation	
		Without Adaptation	With Adaptation	Without Adaptation	With Adaptation
↓	RCP8.5	2,598,400	14,100	7,226,600	21,600
	RCP2.6				

(b) 中華人民共和国

Severity of climate change scenario	RCP2.6	Without Adaptation		With Adaptation	
		Without Adaptation	With Adaptation	Without Adaptation	With Adaptation
↓	RCP8.5	9,640,000	2,400	23,195,200	6,100
	RCP2.6				

図(3)-12 沿岸洪水影響人口、(a) バングラデシュ、(b) 中華人民共和国 (2070-2100年)。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ (3) では、全球に適用できるモデルを作成することが求められた。これまでは気候

の相違によって全球の熱関連死亡予測は困難と考えられていたが、S-4で開始され、S-8、S-10と改善が加えられたモデルにより、将来の年間死亡率と日最高気温の分布という、どの将来予測でも推計される情報のみによって熱関連死亡の将来予測を可能にしたことは、この分野における大きな進歩である。マラリア、デング熱のモデルも、気象変数と1人あたりGDPという入手可能な変数によって高い精度の予測が可能となった。

更に、IPCC第4次評価報告書では、SRESシナリオでしか健康の影響予測がなされていなかったが、健康分野における気候変動リスク推計において、今回、世界で初めてRCP&SSPシナリオによる影響予測を行った。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

健康分野における気候変動リスク推計においては、世界保健機関の気候変動による健康影響予測の一つとして採択された。またEU、OECDが準備している影響評価でも同モデルが用いられている。環境省「気候変動による将来影響予測等報告書（光化学オキシダント）等」に、本研究で開発された熱関連超過死亡モデルが用いられた。

上記WHOの報告country profilesは、WHOとUNFCCCの共同プロジェクトであり、その情報は2015年に開催されたCOP21に情報として提供された。このこともCOP21における政策合意に貢献したものである。また、環境省による政府の機構変動適応計画に向けて、気候変動分野別検討委員会において、健康に関しては、本研究成果である動物媒介感染症、下痢性疾患の結果などをもとにして検討が行われた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

以前のWHO報告書がIPCCの第4次報告書に引用されたように、RCP、SSPごとに将来の予測が行われたS-10の成果は、今後IPCCの1.5℃特別報告書や第6次評価報告書などに活用され、それに基づいて行政が将来計画を立てることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

2011年より、韓国のHo Kim教授による韓国、台湾、日本の共同研究が開始され、本サブテーマのメンバー（本田）が日本の代表となった。その成果は、熱関連死亡の全球予測で用いられたモデルとして結実した。その後、共同研究には中華人民共和国も加わり、HEATAグループと呼ばれるようになった。このHEATAグループが、London School of Hygiene and Tropical Medicineのグループを中心とするヨーロッパ、南米、北米のグループと合併した新たな共同研究の枠組みが形成され、多くの成果が発表されている。その最たるものが紙上発表にあるLancet論文であり、国際環境益学会の2016年最優秀論文賞を受賞した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Y. Honda, M. Kondo, S. Kovats, S. Hales, H. Kim and Y.-L. Guo: Impacts World 2013 Conference

- Proceedings. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 275-281. DOI: 10.2312/pik.2013.001, (2013)
 “Will the global warming alleviate cold-related mortality?”
- 2) Y. Honda, M. Kondo, G. McGregor, H. Kim, Y.-L. Guo, Y. Hijioka, M. Yoshikawa, K. Oka, S. Takano, S. Hales and R. S. Kovats: *Environmental Health and Preventive Medicine*, 19(1), 56-63, (2014)
 “Heat-related mortality risk model for climate change impact projection”
 - 3) H. Ishida, S. Kobayashi, S. Kanae, T. Hasegawa, S. Fujimori, Y. Shin, K. Takahashi, T. Masui, A. Tanaka, Y. Honda: *Environmental Research Letters*, 9, 9 (2014)
 “Global-scale projection and its sensitivity analysis of the health burden attribution to childhood undernutrition under the latest scenario framework for climate change research”
 - 4) A. Gasparrini, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, J. Schwartz, A. Tobias, S. Tong, J. Rocklöv, B. Forsberg, M. Leone, M. De Sario, M.L. Bell, Y.L. Guo, C.F. Wu, H. Kan, S.M. Yi, M.S.Z.S. Coelho, P.H. Saldiva, Y. Honda, H. Kim, B. Armstrong: *The Lancet* 386, 9991, 369-375 (2015)
 “Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multi-country study”
 - 5) Seposo XT, Dang TN, Honda Y. : *Int J Environ Res Public Health* 2015 Jun 16;12(6): 6842–57 (2015)
 “Evaluating the Effects of Temperature on Mortality in Manila City (Philippines) from 2006-2010 Using a Distributed Lag Nonlinear Model”
 - 6) Lim et al.: *Int J Biometeorol* 2015 Out 59: 1405–1412 (2015)
 “Economic status and temperature-related mortality in Asia”
 - 7) Gasparrini A et al. *Environ Health Perspect* 2015 Nov; 123(11): 1200–7 (2015)
 “Temporal Variation in Heat-Mortality Associations: A Multi-Country Study”
 - 8) Kim Y et al.: *Environ Health Perspect* 2016 Jan; 124(1): 75–80 (2016)
 “Suicide and Ambient Temperature in East Asian Countries: A Time-Stratified Case-Crossover Analysis”
 - 9) Tran ND et al.: *Global Health Action* 2016 Jan, 13; 9:28738 (2016)
 “Characterizing the relationship between temperature and mortality in tropical and subtropical cities: a distributed lag non-linear model analysis in Hue, Viet Nam, 2009-2013”
 - 10) C Imai, A.G. Barnett, M Hashizume and Y. Honda: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13,5, 454 (2016)
 “The Role of Influenza in the Delay between Low Temperature and Ischemic Heart Disease: Evidence from Simulation and Mortality Data from Japan”
 - 11) Gasparrini, Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Tobias, A. Zanobetti, J.D. Schwartz, M. Leone, P. Michelozzi, H. Kan, S. Tong, Y. Honda, H. Kim and B.G. Armstrong: *Am J Epidemiol* 183,11, 1027-1036 (2016)
 “Changes in susceptibility to heat within the summer: a multi-country analysis”
 - 12) X.T. Seposo, T.N. Dang and Y. Honda: *Glob Health Action* 9, 31500 (2016)
 “EFFECT MODIFICATION IN THE TEMPERATURE EXTREMES BY MORTALITY SUBGROUPS AMONG THE TROPICAL CITIES OF THE PHILIPPINES”

- 13) C.F.S. Ng, M. Boeckmann, K. Ueda, H. Zeeb, H. Nitta, C. Watanabe and Y. Honda: Global Environmental Change 39, 234-243 (2016)
“Heat-related mortality: Effect modification and adaptation in Japan from 1972 to 2010”
- 14) Xerxes Seposo, Tran Ngoc Dang, Yasushi Honda: International Journal of Environmental Research and Public Health, accepted (2017)
“How does ambient air temperature affect diabetes mortality in tropical cities?”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) S. Kovats, S. Hales and S. Lloyd eds.: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. World Health Organization, 17-25 (2014)
“Chapter 2. Heat-related mortality” (authors: Y. Honda, M. Kondo, G. McGregor, H. Kim, Y.L. Guo, S. Hales, S. Kovats)
- 2) C.D. Bulter eds.: Climate change and global health. DOI:10.1079/9781780642659.0054, pp. 54-64 (2014)
“Chapter 6. Climate extremes, disasters and health” (authors: Y. Honda, T. Oki, S. Kanae and C.D. Bulter)

(2) 口頭発表（学会等）

<学会発表>

- 1) 本田 靖, 水口 恵美子, 萱場 桃子, 杉本 和俊, 中澤 浩一, 近藤 正英, 上田 佳代, 小野 雅司, 第77回日本民族衛生学会総会 (2012)
「2010年における熱関連死亡」
- 2) Y. Honda: New estimations, Perspectives in Environmental Health & Toxicology (Joint International Conference by KSOT and KSEH), Seoul, Korea, (2012)
“Climate change impact on health.”
- 3) Y. Honda, K. Sugimoto, K. Nakazawa, Y.-L. Guo, and H. Kim: Twenty fourth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Columbia, USA, August, (2012)
“Seasonal trend of mortality and influenza epidemic in Tokyo.”
- 4) C. Kim, Y.-H. Lim, Y. Honda, M. Kim, Y. E. Yi, and H. Kim: Twenty fourth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Columbia, USA, (2012)
“Investigating heat effect in temperature-mortality association study -attributable deaths in Seoul, South Korea 2000 to 2009.”
- 5) Y.-H. Lim, H. Kim, Y. Honda, Y.-L. L. Guo, and B.-Y. Chen: Twenty fourth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Columbia, USA, (2012)
“Temperature effects on mortality in 15 Asian cities.”
- 6) 本田靖, 水口恵美子, 萱場桃子, 杉本和俊, 中澤浩一, 近藤正英, 上田佳代, 小野雅司: 第78

回日本民族衛生学会総会 (2013)

「地球温暖化に伴う熱関連死亡の適応パターン – 平坦化型適応はおこっているか –」

- 7) Y. Chung, Y.-H. Lim, Y. Honda, Y.-L. Guo, M. Hashizume, B.-Y. Chen and H. Kim: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Time-varying high temperature effects on mortality for 15 cities in East Asia.”
- 8) J.-H. Eum, H.-K. Cheong, M. Ha, H. Kim, Y. Honda, M. Hashizume, J. Kim, C. T. Kim, Y. Kim, K. Inape and C. Imai: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Impact of climate variability on the low birth weight in Papua New Guinea.”
- 9) Y. Honda, M. Kondo, E. Minakuchi, M. Kayaba, K. Nakazawa, K. Sugimoto, Y. Kim, H. Kim, Y.-L. Guo and M. Hashizume: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Effect of absolute humidity on heat-mortality relation in Japan.”
- 10) Y. Honda (Invited presentation) JSPS-AASPP/GRENE Joint International Symposium on Water and Health in Urban Area, Hue City, Vietnam, (2013)
“Climate change impact on health and its adaptation.”
- 11) C. Imai, M. Hashizume, H.-K. Cheong, H. Kim, Y. Honda, J.-H. Eum, C. T. Kim, J. Kim, Y. Kim and T. Fengthong: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“The impacts of global and local climates on dengue fever in Lao PDR and Cambodia.”
- 12) C. T. Kim, H. Kim, H.-K. Cheong, M. Hashizume, Y. Honda, J. Kim, Y. Kim, J.-H. Eum, C. Imai and B. Badrah: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Global climate change and waterborne diseases in Mongolia.”
- 13) J. Kim, H.-K. Cheong, H. Kim, Y. Honda, M. Ha, M. Hashizume and K. Inape: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“The impact of local and oceanic climate variability on the incidence of childhood pneumonia in Papua New Guinea.”
- 14) Y. Kim, H. Kim, Y. Honda, Y.-L. Guo, B.-Y. Chen, Y.-H. Lim and N.-K. Kim: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Suicide and ambient temperature in East Asia.”
- 15) Y. Kim, H. Kim, H.-K. Cheong, M. Hashizume, Y. Honda, J. Kim, C. T. Kim, J.-H. Eum and C. Imai: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“Comparative study of the relationship between regional climate factors and local weather in Western Pacific countries.”
- 16) Y.-H. Lim, Y. Honda, Y.-L. Guo, B.-Y. Chen, Y. C. Hong, S.-M. Yi, H. Kim and N.-K. Kim: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)

- “Population adaptation to heat waves and cold spells in East Asia.”
- 17) I. Ohn, Y.-E. Yi, Y.-H. Lim, Y. Honda, Y.-L. Guo, B.-Y. Chen and H. Kim: Twenty fifth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Basel, Switzerland, (2013)
“The effect of temperature change on mortality in 3 East Asian cities.”
- 18) 本田靖、近藤正英、橋爪真弘：第84回日本衛生学会総会（2014）
「呼吸器疾患死亡はインフルエンザ流行の代理変数となるか？」
- 19) Y. Honda, M. Hashizume, H. Kim, H. Kan, Y.L.L. Guo, K. Ueda, M. Bell: Twenty-sixth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Seattle, USA, (2014)
“Relation of external causes with temperature and climate”
- 20) X. Seposo, Y. Honda: Twenty-sixth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Seattle, USA, (2014)
“A Distributed Lag Non-Linear Time Series Analysis of the Relationship between Temperature and Mortality in the National Capital Region in the Philippines, 2006-2010”
- 21) 本田靖：日本リスク研究学会第27回大会（2014）
「温暖化の健康リスク－世界保健機関の報告から」
- 22) 本田靖：土木学会第42回環境システムシンポジウム（2014）
「健康影響と適応策」
- 23) T. Yokohata, K. Nishina, K. Takahashi, M. Kiguchi, Y. Iseri, T. Sueyoshi, M. Yoshimori, K. Iwase, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, Y. Honda, N. Hanasaki, Y. Masaki, A. Ito, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada, S. Emori and T. Oki: AGU fall meeting 2014, U54A-05, Sun Francisco, USA, (2014)
“Visualization of the chains of risks under global climate change”
- 24) Honda Y, Kim H.: Our Common Future under Climate Change, Paris, France, (2015)
“Climate change impact on heat-related mortality under some RCP scenario”
- 25) Yasushi Honda, Kiyoshi Takahashi, Minoru Yoshikawa, Kazutaka Oka, Saneyuki Takano, Ho Kim, Yue-Leon Guo.: Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, (2015)
“Projection of heat-related excess mortality using new climate and population scenarios”
- 26) Emiko Minakuchi, Yasushi Honda.: Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, (2015)
“THE ASSOCIATION BETWEEN EXTERNAL CAUSES OF DEATH AND HIGH TEMPERATURE IN SIX PREFECTURES IN JAPAN.”
- 27) Sari Kovats, Joacim Rocklov, Yasushi Honda, Simon Lloyd.: Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, (2015)
“GLOBAL RISK ASSESSMENT OF THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON SELECTED CAUSES OF DEATH IN 2030s AND 2050s”
- 28) Yoonhee Kim, Antonio Gasparrini, Masahiro Hashizume, Yasushi Honda, Ben Armstrong.: Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, (2015)
“EFFECT OF REDUCED ELECTRICITY CONSUMPTION ON HEATRELATED MORTALITY

AFTER FUKUSHIMA NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT IN JAPAN”

- 29) Chris Fook Sheng, Melanie Boeckmann, Kayo Ueda, Hajo Zeeb, Hiroshi Nitta, Chiho Watanabe, Yasushi Honda.: Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, (2015)
 “EFFECT MODIFICATION BY PREFECTURE CHARACTERISTICS ON THE DECLINE OF HEAT-RELATED MORTALITY IN JAPAN, 1972 TO 2010”
- 30) 本田靖: 第74回公衆衛生学会, 長崎 (2015)
 「わが国における熱関連死亡数の将来予測」
- 31) 本田靖: 第54回日本生気象学会, 名古屋 (招待講演) (2015)
 「熱関連死亡の将来予測」
- 32) 本田靖: 第80回日本民族衛生学会, 弘前 (2015)
 「気温と死亡との関連を評価するモデルにおける交絡」
- 33) Honda Y.: Adaptation Futures 2016, Rotterdam, the Netherlands, 12 May, (2016)
 “Is adaptation to a warming world effective? - Difficulty in implementing heat-health warning system even in developed countries”
- 34) Yasushi Honda, Xerxes T. Seposo, Tran Ngoc Dang: Conference of International Society for Environmental Epidemiology and International Society of Exposure Science Asia Chapter 2016, Sapporo, Japan, June, (2016)
 “Difference between the cold effect and the heat effect in evaluating the short-term weather-mortality relation”
- 35) Yasushi Honda, Xerxes Seposo, Dang Tran Ngoc, Masahiro Hashizume, Ho Kim.: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, (2016)
 “Negative risk of cold on lag 0 day in distributed lag pattern can be due to preceding mortality peak before the temperature trough”

<招待講演>

- 1) Honda Y.: Muntinpula, the Philippines, 21-24 Sep, (2016)
 “Heat-related mortality: Impact and adaptation, ASIAHORC symposium”
- 2) Honda Y.: CWB-APCC Workshop on Climate Service for Health, Taipei, Taiwan, 12-13 Oct, (2016)
 “Heat-related mortality: Impact of climate change and adaptation”
- 3) Honda Y.: Dasan Conference, Jeju, Korea, November 7-9, (2016)
 “New aspect of climate change impact on heat-related mortality”
- 4) 本田 靖: 日本国際保健医療学会, 久留米, 12月3日 (2016)
 「熱関連死亡の将来予測と適応策」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 本田靖: 平成27年度茨城大学・茨城県・茨城産業会議連携講演会, 水戸 (2015)
「気候変動による熱ストレスへの影響」 (共催: 茨城大学, 茨城県, 茨城産業会議, 2015年11月11日, 水戸京成ホテル, 観客約100名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

<受賞>

- 1) 国際環境疫学会2016年最優秀論文賞 (紙上発表のLancet論文に対して)

<アウトリーチ (講演等) >

- 1) 本田靖 (2013) 都市における気候変動緩和策と適応策—熱関連死亡を防ぐために、地域の気候変動適応策推進に向けた日米セミナー
- 2) Y. Honda (2013) Climate change impact on health and its adaptation, JSPS-AASPP/GRENE Joint International Symposium on Water and Health in Urban Area, Hue City, Vietnam

<アウトリーチ (委員等) >

- 1) 本田靖, 気候変動サイエンス・ベース研究会 委員, 環境省

8. 引用文献

必要に応じて文中に記載した。

(4) 寒冷圏を中心とした気候変動リスクの特性評価と地球物理学的臨界現象の総括

国立大学法人東京大学

阿部 彩子

<研究協力者>

山本彬友・Wing-Le Chan・

Dian Handiani・Alexandre Laine

国立大学法人北海道大学

吉森正和

国立研究開発法人海洋研究開発機構

齋藤冬樹

国立極地研究所

末吉哲雄

平成24～28年度累計予算額：104,454千円（うち平成28年度：20,715千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

このサブテーマは、ここ百年で人為的に起こす環境変化が数千年から1万年先でも影響をもたらすような寒冷圏の地球物理学的臨界現象について扱った。具体的には、全球の気候変化に伴い長期（数百年から数千年程度）の時間スケールで応答する（1）棚氷底面融解を考慮した南極氷床の変化、（2）極で沈み込む海洋深層循環の長期変化、（3）グリーンランド氷床の融解水流入が海洋深層循環に与える影響、（4）海洋深層循環の変化が陸上気温や海洋物質循環に与える影響と、比較的短期の時間スケールで応答する（5）北極気温増幅のメカニズムについて調べた。どの程度の放射強制力で、不可逆性やどの程度のcommitted change をするのか、その閾値や規模を把握することは長期的な気候の安定レベルをどの程度にすべきかを議論する前提として非常に重要である。これらの特性を調べるため、氷床力学モデル・棚氷モデル・海洋物質循環モデルなど各コンポーネントモデルの開発を行った。また、長期的な変動についてはこれまで簡略化モデルを用いて研究が行われてきたが、より複雑な大気海洋結合モデルを用いて多数例のシナリオや試行を考えた長期スケールの数値実験を行うことで、氷床や海洋が長期で不可逆になる性質の有無とそのメカニズムや、不可逆になるとするとその閾値の決まり方を左右するメカニズム、可逆としてもその変化の時間スケールや性質についてより信頼性の高い評価を行うことが可能となった。問題が千年以上の長期にわたり現在と質的に異なる性質であることから過去の気候に関する情報や知見を多く取り入れ、過去の気候のシミュレーションによるモデルの検証や現象の性質の把握を行った。なお、長期の時間スケールの海洋圏の影響評価は、海洋圏における気候変動リスクと関連するために、一部をサブテーマ（5）と共同実施した。

[キーワード]

氷床融解、棚氷底面融解、海洋深層循環、極域気温増幅、海洋物質循環

1. はじめに

全球の気候変化に伴う南極やグリーンランド氷床の変化や極で沈み込む深層海洋循環の長期変化は、大気組成やそれに伴う放射強制力変化が一定になってもなおゆっくり変化を続けてしまう性質があるからcommitted change（長期に避けられない変化）やirreversibility（不可逆な変化、一

度変化すると元に戻らない)をもたらす可能性がある。このような長期的な変化についての閾値や規模を把握することは、長期的な気候の安定レベルをどの程度にすべきかを議論する前提として非常に重要である。たとえば、グリーンランド氷床と西南極氷床の完全な融解はそれぞれ約7.3m、約5mの海面上昇をもたらす。これらの氷床は、たとえ気温変化があってもすぐには起こらないが、安定性や不可逆性の理解については不確実性が大きいと考えられており、海面変化が1メートルも起これば全世界の人口の密集する沿岸地域への影響は多大であることが懸念されている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次評価報告書では、大陸氷床の急速な力学的流れによる海面上昇への寄与の明確な予測は含めずに21世紀の海面上昇幅を18~59cmと予測したが、一方、最近の半経験的方法による推定では1~2m程度の予測が目立つ。こうした差異を狭めていくには、物理過程の理解を深める必要がある。本研究では、大陸氷床の動的特性を把握することを一つの目的とする。

大西洋深層海洋(子午面)循環は低緯度から高緯度へ熱を運び、ヨーロッパだけでなく周辺の海水分布やグリーンランドの気候にも大きな影響を与える。一方で海水分布は地球のエネルギー収支や北極域の生態系や人間圏、北極海航路などに影響を与え、また、炭素循環をはじめとする地球化学サイクルにとっても重要である。本研究では、地球規模の気候変動を起こしうるこのシステムに注目し、その動的特性を把握することも目的の一つとする。

こうした氷床や海洋循環、気候全体の変化の幅やメカニズムは、過去の気候変動から知見が得られたり、規定されたりする可能性が高い。こうした情報を利用することによって、単なる類推としてではなく、物理過程の理解を経由して将来の変化幅や安定性、不可逆性を議論していくことが可能と考えられ、これも本研究の目的とする。

2. 研究開発目的

本研究では、将来の気候変動による地球規模のリスク評価に向けて、海面高度化に大きく寄与する大陸氷床の変化、地球全体に熱や物質を輸送し、氷床とも相互作用する海洋大循環(特に大西洋子午面循環)の振る舞い、また北極域における気温増幅などについてプロセスやメカニズムの理解を進め、不確実性を考慮して対象とするシステムの動的特性を把握する。動的特性には、氷床や子午面循環の不可逆性(irreversibility)、可逆の場合には回復するための時間スケールの数値モデルによる検証なども含む。また、密接な連携によりテーマ3内において、水循環や炭素循環などの地球化学サイクルを研究するためのデータ提供などを行い、これらにも貢献する。

3. 研究開発方法

(1) 極域・寒冷圏の温暖化メカニズムと不確実性

極域・寒冷圏の温暖化予測の信頼性評価や臨界現象の生起を論じるには、これらの地域での温暖化メカニズムやそれを支配するプロセスの特定が必要である。本研究では、北極域で働いている温暖化を増幅、抑制するプロセスの寄与を診断(以降、フィードバック解析)することにより、北極域が地球平均に比べて著しく温暖化する理由やその不確実性について調べる。これまで行ってきたフィードバック解析に比べて、より地域的かつ詳細な解析を必要とするため、マルチモデルではなく、日本の代表的気候モデルの1つである大気海洋結合モデルMIROCを中心に行う。

これまでのフィードバック解析は、主に地球全体の放射エネルギーの収支に注目しており、地

球平均気温の変化や気候感度の解析には非常に有効であった。一方で、地域的な地上気温変化のメカニズム解析には大きな制約があった。そこで、新しい気候フィードバック解析手法を導入することにより、様々な物理プロセスの極域温暖化への寄与を定量化する。具体的には、Lu and Cai (2009) により提案された解析手法、CFRAM (Climate Feedback-Response Analysis Method) を大気海洋結合モデルMIROCへ導入し、精度を検証した上で適用する。この手法は、放射効果のみを調べる従来の解析と異なり、個々の物理プロセスの役割が、地表面温度と大気温度それぞれへの寄与として表現されるため、北極の地上気温変化を決めるプロセスを特定し、鉛直に気温変化が異なる理由などを理解するのに有効であり、そのため、不確実性をもたらすより具体的な要因を調べるのに役立つと考えられる。

一方で、北極域の気温上昇量は、地球平均気温上昇量によって強く規定されることがわかっている。このことは、北極域の気候影響、不確実性、臨界現象の生起、温暖化の対応策を論じる上で、非常に重要な意味を持つ。たとえば、北極域の温暖化予測の不確実性には気候感度の不確実性が大きく寄与することが言える。こうした極域外と極域内のつながりは、大気海洋の熱輸送を通じて生じると考えられるが、その相互作用についてはよくわかっていない。そこで、数値実験を行うことにより、極域外での温暖化がどのように極域内の温暖化を引き起こし、またそれが極域内のどのようなプロセスによって増幅、抑制するのかを調べる。さらに、同様の実験において南極域との比較を行うことにより、極域・寒冷圏全体を統一的に議論する。

(2) 高解像度海洋モデルを用いた南極棚氷底面融解量の見積もり

近年の衛星観測によって南極氷床が縮小する傾向にあることが相次いで報告されている。南極氷床の変動には海洋との相互作用が重要である。すなわち南極では氷床と岩盤の接地面が海面下にある部分が多いため(図1下段)、海上に張り出した氷床(棚氷)の下へ暖水が入って底部から融解し、その速度は現在の南極では平均的におよそ年間1m、大きいところでは年間数十mに達する。海水温の上昇といった気候条件の変化によって棚氷の融解速度が上昇すると棚氷が薄くなり、急激な接地線の後退や氷床流動の加速というメカニズムが働くので、棚氷の底面融解の速度が南極氷床の安定性(tipping point)に大きく影響していると考えられる。しかしながら、長期の気候変化に対して棚氷底面融解の速度がどのように応答するものなのかがよく分かっていなかった。過去および将来の気候変化が南極海洋の変化を通して南極の棚氷底面融解に与える影響を調べるために、南大洋を領域とした高解像度海洋大循環モデルを用いて、氷期と温暖気候(二酸化炭素濃度倍増気候)における南極海洋と棚氷の底面融解速度を求めた。

(3) 棚氷底面融解速度変化に伴う南極氷床変動

気候条件の変化によって棚氷の融解速度が上昇すると、氷床が失われ急激に接地線(grounding line)が後退したり流動が加速したりするメカニズムが働くので、棚氷の底面融解の速度が南極氷床の安定性(tipping point)に大きく影響していると考えられる。この棚氷底面融解速度変化による氷床変動を調べるため、棚氷と接地線移動の力学を入れた氷床モデルIcIESを用いて予備的な数値実験を行った。この実験では棚氷底面融解による質量収支を陽に扱ったうえで、氷床の基本的な応答を理解するため水平-鉛直2次元の系で、南極氷床を模した理想的な地形を境界条件に使った。

(4) 氷床棚氷モデルIcIESの改良と南極氷床長期積分

氷床棚氷モデルIcIES の開発を進める。二次元流動方向などの理想的な設定、および現実的な南極氷床設定での長期積分を運用できるよう開発改良を行う。氷床モデルには様々な階層の複雑性を持った方式が考えられるが、その中でもIcIES の改良方針は、ティッピングポイントを議論する上で重要な、海洋との相互作用や気候変動によって生じる境界条件の変化に対する、氷床棚氷境界（grounding line）の後退過程が適切に表現でき、同時に長期積分と不確実性の研究ができるモデルにすることである。現段階ではそれを満たすには 氷床モデルに grounding line のパラメタリゼーションの導入を行うことが最も有効であると考えられる。棚氷過程やgrounding line過程は非線形の数値計算が必要であり、計算誤差や計算結果への影響への評価も重要であり、同時にすすめる。

(5) 理想的な長期温暖化に対する大西洋子午面循環の応答

大気海洋結合モデルMIROCを用いて理想的な温暖化実験を行い、ティッピングエレメントの1つとして知られる大西洋子午面循環（AMOC）の変動について調べた。大気二酸化炭素濃度を産業革命前の濃度から年1%で増加させ、産業革命前の二酸化炭素濃度の2倍と4倍になった時点で増加を停止させた。その後、二酸化炭素濃度は固定し続け、最終的に2000年間積分を行った。Yamamoto et al. (2014, GRL) にも用いられた実験では、南大洋に大きな温暖偏差があるため、今年度はこれを解消するための変更を行ったモデルを用いて実験した。この変更では、南大洋の渦熱輸送を補う水平海洋混合に関わる係数を大きくし、雲の日射透過過剰を解消する極小の熱フラックス補正を行った。

(6) オフライン海洋物質循環モデルの開発と温暖化に対する溶存酸素の長期変動

(5) で得られた長期温暖化実験の結果を用いて海洋物質循環の変動を計算するためにサブテーマ(5)と連携し、オフライン海洋物質循環モデルの開発を行った。Oka et al. (2008) のオフライントレーサーモデルにSchmittner et al. (2008) の海洋物質循環モデルを組み込み、生態系(NPZD)、炭素循環、窒素循環、溶存酸素などの計算が可能になった。大気海洋結合モデルMIROC3.2により計算された現在気候における水温や流速場などをオフライン海洋物質循環モデルに与え4000年スピニアップを行い、炭素循環や窒素循環についてドリフトが起きないことを確認した。また、観測値と比較する事でモデルの再現性についても確認した。(5) で大気海洋結合モデルMIROCを用いて行なった温暖化実験(2xCO₂実験と4xCO₂実験)で得られた水温や流速場等を、開発したオフライン海洋物質循環モデルに与えて2000年間積分を行った。温暖化の影響を切り分ける為に、それぞれ水温、海洋循環、生物ポンプのみを変えた感度実験も行った。生物に大きな影響があり、ティッピングエレメントの1つとして知られている溶存酸素の変動について解析を行った。これまで1000年スケールの海洋物質循環の変動は簡略化モデルを用いて主に行われてきた。大気海洋結合モデルを用いることで長期変動に対しても妥当性の高い結果が得られると考えられる。

(7) グリーンランド氷床融解水の流入に対する大西洋子午面循環（AMOC）の応答

大西洋子午面循環（AMOC）は低緯度から高緯度へ熱を運び、ヨーロッパだけでなく周辺の海

氷分布やグリーンランドの気候にも大きな影響を与えるため、地球温暖化に対する応答を知ることが重要である。これまでに大気海洋結合モデルを用いて温暖化に対するAMOCの応答が数多く調べられているが、グリーンランド氷床の融解水流入の影響についてはほとんど考慮されていない。国際プロジェクトであるAMOCMIP(AMOCモデル相互比較プロジェクト)に参加し、AMOCMIPで用意されたグリーンランド融解水のフォーシングを大気海洋結合モデルMIROCに与え、融解水流入に対するAMOCの応答と表層気温の変化について解析を行った。MIROCにRCP4.5とRCP8.5の2つのCO₂シナリオを与えて2006年から2300年まで積分した。Lenaerts et al. (2015)に習い、シナリオごとにCMIP5マルチモデル平均の夏季対流圏の気温に応じた融解水の年平均流出量を算出し、MIROCに与えた。融解水の年平均流出量には過去の流量が含まれており、MIROCで計算された1971年から2000年の平均流量を元にしたgGrISmeltと領域モデルや観測値などを元にしたrGrISmeltの2種類を与えた。

4. 結果及び考察

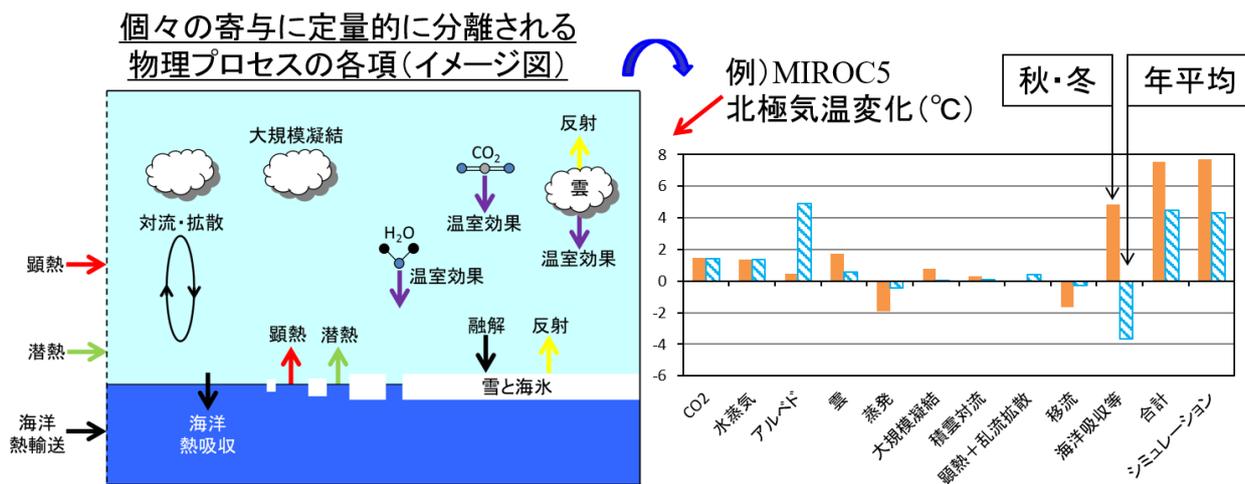
(1) 極域・寒冷圏の温暖化のメカニズムと不確実性

極域・寒冷圏の気候変動に寄与するフィードバック解析を行うために、3章(1)で述べたCFRAM法をMIROCモデルに導入し適用することによって、個々のフィードバックプロセスの寄与を定量的に評価するだけでなく、地表付近での気温上昇が対流圏上層より大きくなる理由などについても分析が可能になった。また、放射に関するプロセスの寄与の評価については、独自手法の開発として、従来大気上端についてのみ適用されてきた放射カーネル法を、大気各層に適用することによって、CFRAMによる既存実験データや長期積分データの解析負荷を大幅に軽減することに成功した。これらに関する結果は、Yoshimori et al. (2014a, 2014b)に出版した。また、Lu and Cai (2009)やYoshimori et al. (2014a)では、長期の気候応答を考える際に非常に有効である海氷などが極端に減少した平衡状態の気候応答を解析対象にしたが、季節性を考慮しなかったこととそこに至るまでの過渡的な応答に関する情報については制限があるため、Yoshimori et al. (2014b)では、より現実的な過渡応答シナリオに注目した解析も行った。この研究から、北極の気温増幅メカニズムを理解するには、季節によって支配的に働くプロセスが異なることが系統的に示された。たとえば、図(4)-1(特に右)では、年平均ではアルベドフィードバックが支配的に北極の温暖化に寄与しているが、アルベドフィードバックを介して海洋に吸収されたエネルギーが秋・冬に大気に放出されて温暖化を引き起こすことが示されている。また、雲の温室効果も無視できないことを示している。

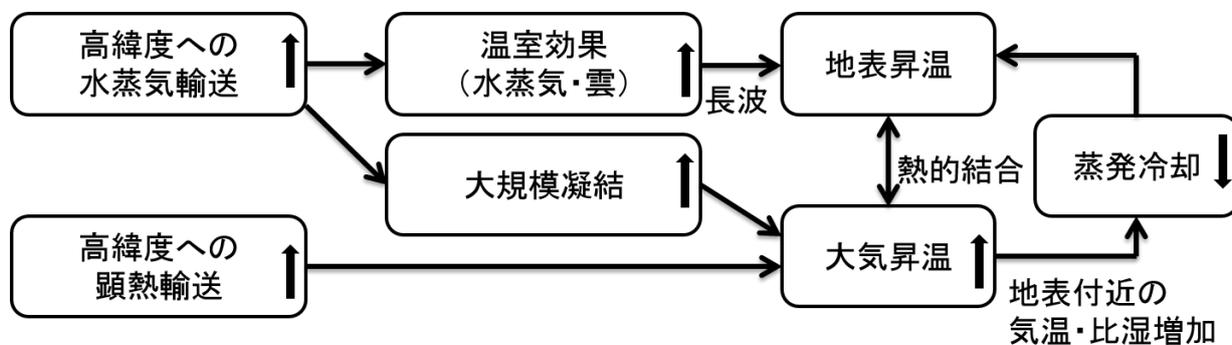
地球温暖化対策を考える場合には、全球気温変化量を参照して議論されることが多い。しかし、北極域の気候影響やそれが引き金となって起こる地球物理学的臨界現象の生起を考える場合には、全球平均気温変化と北極域の温暖化の結びつきをしっかりと理解しておく必要がある。本研究では、数値実験を通して、北極域から遠く離れた海面水温の上昇と北極域の海氷や海面水温の変化の北極温暖化に対する相対的寄与を調べた。その結果、CO₂がローカルに北極域の温暖化を引き起こす効果よりも、CO₂が引き起こした遠隔地域の温暖化によって、北極域が昇温する効果の方が大きいことがわかった。この際、冬季の非常擾乱を通して水蒸気が高緯度に多く運ばれ潜熱の輸送が増加する一方、北極の温暖化自体は輸送されてくる乾燥静的エネルギーを減少させることが示された。さらに、CFRAM解析により、モデルにおける大気熱輸送と北極域の各物理プロセス間

の関係や相互作用を明らかにした。図(4)-2では、大気熱輸送が高緯度の温暖化に与える影響についてプロセス間の関係を含めて示している。特に、潜熱輸送は、水蒸気や雲の温室効果を通して冬季に北極の温暖化を促進する効果があることが明確に示された。このことから、大気の全熱輸送（乾燥静的+潜熱）の増減は、必ずしも北極温暖化増幅における大気熱輸送の果たす役割を示さず、乾燥静的と潜熱エネルギーの効果は分けて考える必要があることが確認された。この結果は、先行研究で示された大気熱輸送と北極温暖化増幅の間にある負の相関に関して重要な解釈の転換を迫るものであり、全球平均気温変化と北極域の温暖化の結びつきの理解を深めた。図(4)-3は、熱輸送などによって引き起こされた北極の温暖化がどのようにそれ自体を増幅、抑制するか、本研究によって確認されたことを示したものである。

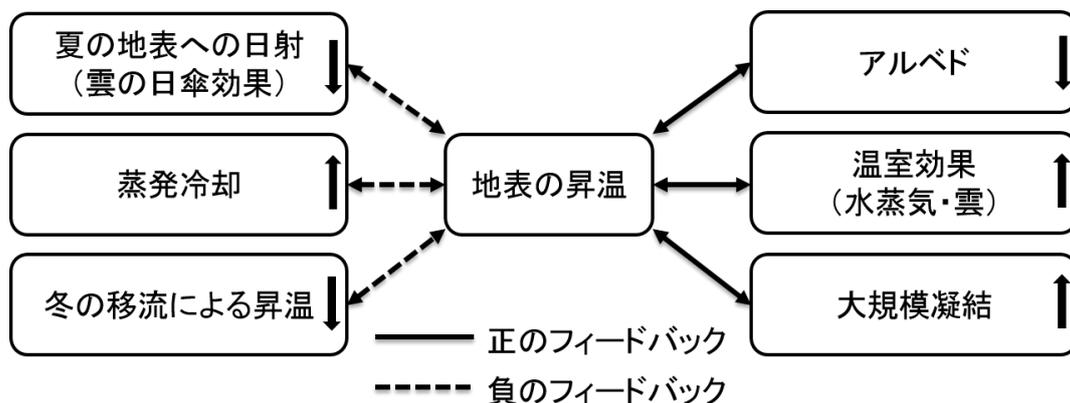
図(4)-4は、平衡応答において南極域の温暖化が北極域の温暖化よりも小さくなる要因を調べた結果である。この結果から、雲の短波領域の放射フィードバックが南大洋で著しく負になっていることが原因であることがわかる。これは、混合相雲のふるまいに起因していることがわかっており、こうした雲の物理過程の扱いが全球規模での大気温度構造に影響を与えることを示唆している。現状ではモデルにおける混合層雲の扱いには不確実性が大きく、今後、力を注いで改良していく必要があることを同時に示している。



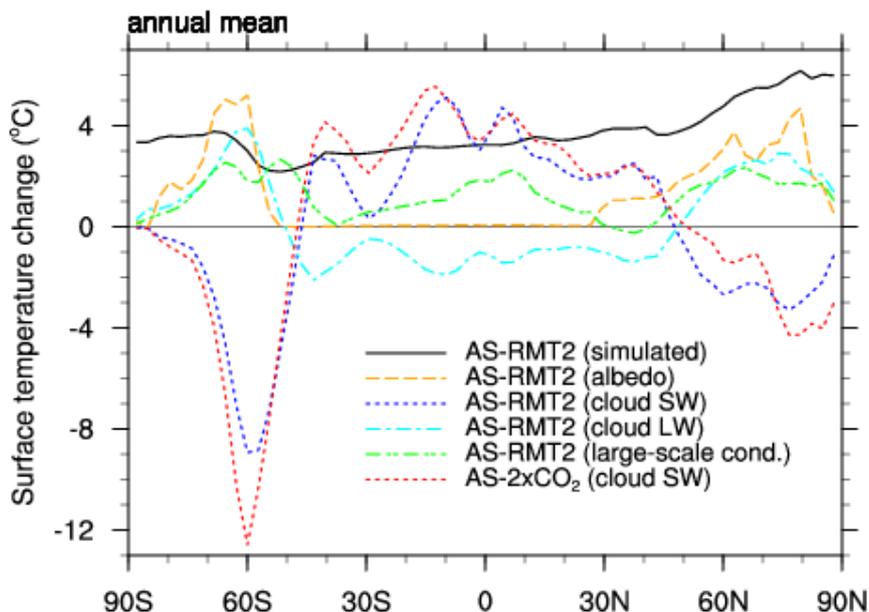
図(4)-1 本研究で用いたフィードバック解析の模式図(左)と結果(右)。Yoshimori et al. (2014b) のデータを使用して作図。



図(4)-2 低緯度から高緯度への遠隔影響の模式図。上向きと下向きの矢印はそれぞれ増加と減少を表す。主な過程のみ図示。Yoshimori et al. (2017、Fig. 13) を邦訳。



図(4)-3 地表面温度の上昇から引き起こされるフィードバック過程の模式図。上向きと下向きの矢印はそれぞれ増加と減少を表す。主な過程のみ図示。Yoshimori et al. (2017、Fig. 14) を邦訳。

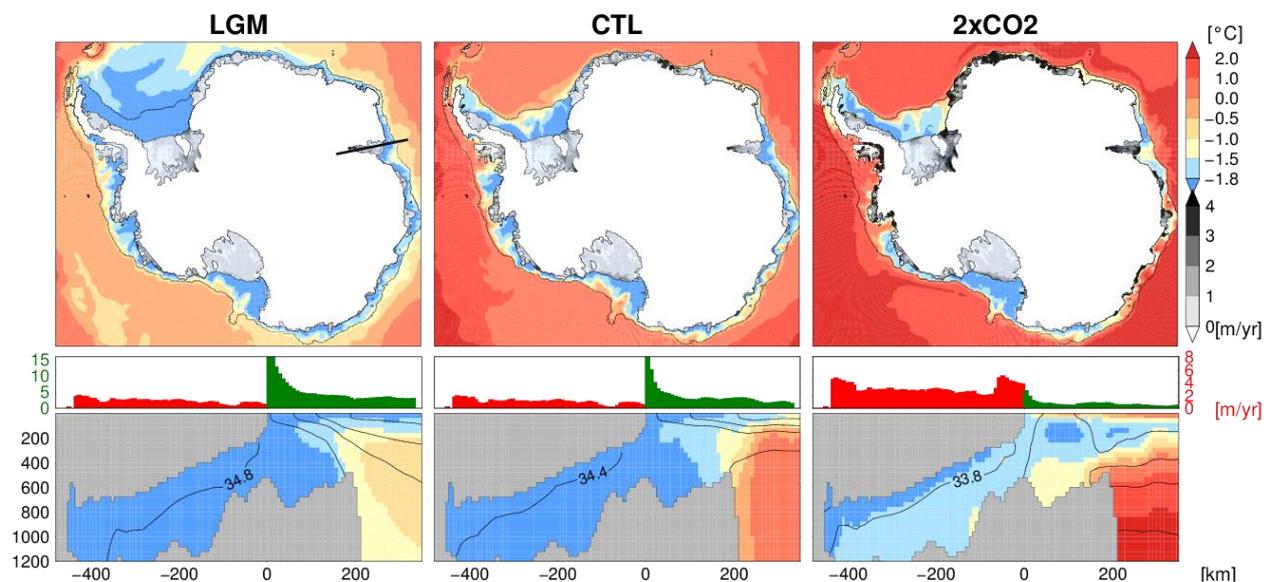


図(4)-4 CO₂倍増実験 (AS-2xCO₂)と低緯度 (40S-40N) のみの温暖化が高緯度に与える実験 (AS-RMT2) における各プロセスの昇温への寄与。主要項についてのみ表示。黒線 (simulated) は、全プロセスの寄与に相当。Yoshimori et al. (2017、Fig. 12) より転載。

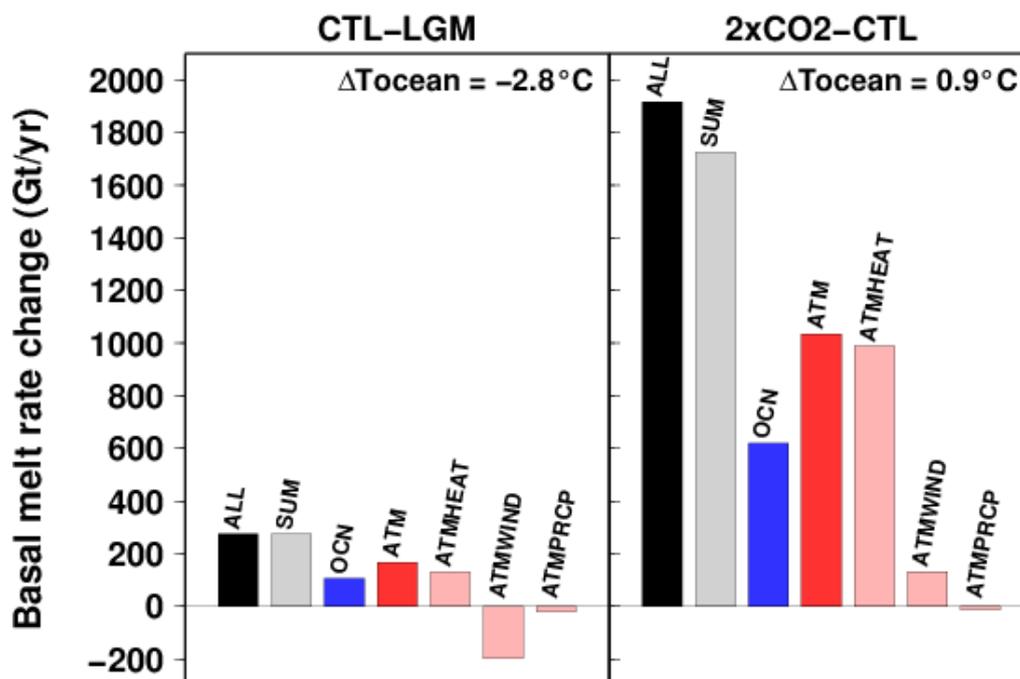
(2) 高解像度海洋モデルを用いた南極棚氷底面融解量の見積もり

過去および将来の気候変化が南極海洋の変化を通して南極の棚氷底面融解に与える影響を調べるために、南大洋を領域とした高解像度海洋大循環モデルを用いて、氷期と温暖気候（二酸化炭素濃度倍増気候）における南極海洋と棚氷の底面融解速度を求めた。氷期と二酸化炭素倍増気候を領域モデルで再現するために、大気海洋結合モデルMIROCで計算された大気海洋の気候値をモデルの境界条件として用いた。その結果、氷期と温暖気候の2つの気候変化の間では、南極域の海水温の変化量は同程度にもかかわらず、南極の棚氷底面融解速度の総量は、温暖気候での増加量

が、氷期気候での減少量よりもきわめて大きくなるという結果になった（図(4)-5上段）。このことは、気候と棚氷底面融解速度との関係が、単に海水温が上がることによって棚氷底面融解速度が上昇するというような線形な関係になっていないことを示している。それぞれの実験における海洋循環場を解析した結果、南極の大陸棚沖の大陸棚深度の海には比較的暖かい海水が存在しているということがすべての気候において共通していた（図(4)-5上段）。しかし、氷期気候と現在気候では、多くの南極沿岸の大陸棚域で海氷生産によって生成される低温・高塩分・高密度の水塊が活発に形成されているために、棚氷に暖かい水が近づきにくく棚氷底面融解の速度が小さく保たれていることが分かった（図(4)-5下段左・中央）。その一方で温暖気候では、南極沿岸での海氷生産が大きく減少するほど大気温度が上がるために、南極沿岸での低温・高塩分・高密度の水塊形成量が減少することによって、大陸棚より沖合にある暖かい海水がより棚氷に近づきやすくなることによって棚氷底面融解速度が大きく上がっていたことが分かった（図(4)-5下段右）。大気条件と海洋条件を切り分けた感度実験からも、大気条件を変えるだけで、氷期と温暖気候の棚氷底面融解速度変化量の半分が説明できることがわかり、気候変化に対して、大気条件による南極沿岸での水塊形成量を通じた棚氷底面融解速度への重要性が改めて示された（図(4)-6）。以上の結果は、気候変化に対する棚氷底面融解速度変化の応答は、海水温の変化によって生じるだけでなく、大気の変化によって海洋の水塊形成が変わることを通して、暖かい海水がより棚氷に近づきやすくなることによって生じることを示すものである。本研究成果は、*Journal of Climate*誌に受理され、2017年出版予定である。



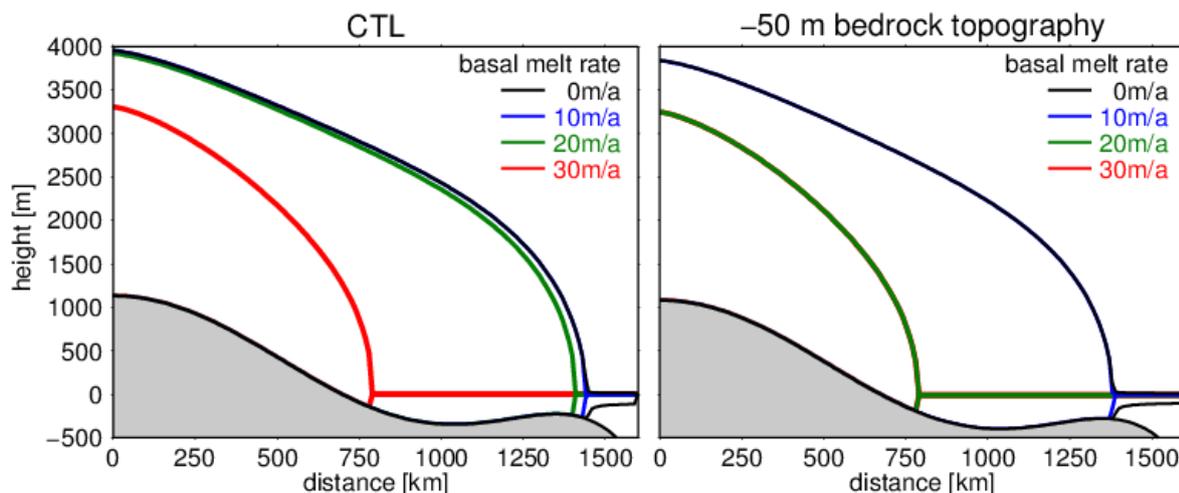
図(4)-5 (上段) 領域海洋モデルで計算された、氷期 (LGM)、現在気候 (CTL)、二酸化炭素濃度倍増気候 (2xCO₂) における南極域の500m深さの海水温と、棚氷底面融解速度の分布。海洋中の黒実線は大陸棚境界を示す。(下段) 東南極アメリー棚氷付近における海洋水温 (色) と海洋密度 (等値線) の南北断面図 (上段、LGMの黒線における断面)。断面図の上の棒グラフはそれぞれ棚氷底面融解速度 (赤)、海氷生産量 (緑) を示す。(Obase et al, in press.のFig. 6とFig. 9を編集)



図(4)-6 モデルで計算された、南極全体での年間の棚氷底面融解量の変化量（ALL）と、棚氷底面融解量の変化量に対する海洋条件（OCN）、大気条件（ATM）からの寄与を示したグラフ。棚氷底面融解量の変化は、氷期に比べて二酸化炭素倍増気候の方が1桁近く大きいことと、その内訳は大気条件の変化要因（ATM）によって半分強が説明されることを示している。（SUMはOCNとATMの和、ATMHEAT、ATMWIND、ATMPRCPは大気の熱的条件、風条件、降水量条件を示している。）（Obase et al, in pressのFig.12）。

（3）棚氷底面融解速度変化に伴う南極氷床変動

大きな氷床（図(4)-7左、黒線）を初期条件として、一様の棚氷底面融解速度の分布に対する氷床の定常解を計算した。その結果、標準実験では棚氷底面融解速度が年間20m以下であれば、氷床の接地線は海底地形の盛り上がる部分に存在できるが、年間30mを超えると氷床が後退するという結果が得られた（図(4)-7左）。氷床の定常解が数百キロにわたって不連続に存在するのは、氷床の接地線は氷床の上流部から見て上り坂となる位置には力学的に安定して存在できないためである。同じ地形の形状で、大陸棚深度を50m深くした地形を用いた実験では、氷床後退が生じる棚氷底面融解速度のしきい値が年間20mであった（図(4)-7右）。以上の結果は、氷床後退のしきい値が棚氷底面融解速度という気候条件と大陸棚深度という地形条件によって規定されており、ひとたびしきい値をこえると水平距離数百キロにわたる不可逆的な氷床後退が生じうることを示している。さらに、大陸棚深度に対して氷床後退のしきい値が異なるという結果は、南極大陸の地形深度が高い東南極と低い西南極の間で、同じ気候変化に対しても氷床の安定性のしきい値が異なるというを示唆している。



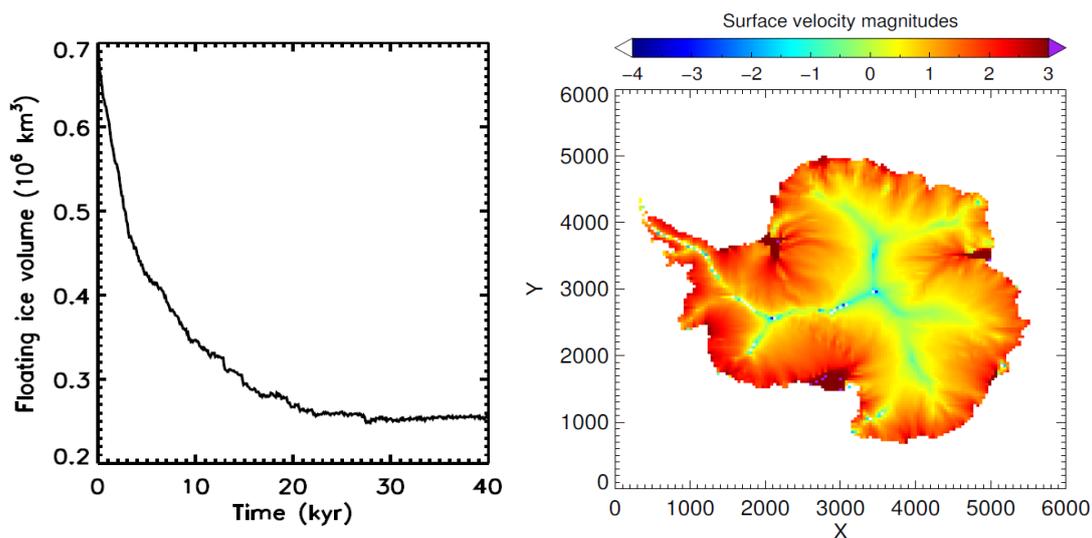
図(4)-7 氷床モデルIcIESを用いた予備的な数値実験の結果。氷床の後退が生じる棚氷底面融解速度のしきい値が標準実験（左図）では年間30mだが、大陸棚深度が50m低い地形（右図）では、年間20mの棚氷融解速度で氷床が後退することを示す。

（4）氷床棚氷モデルIcIESの改良と南極氷床長期積分

棚氷流動速度分布は氷床モデル内で非線形の行列方程式を解くことで実装されている。そのため、原理的にはある収束判定条件のもとでの繰り返し計算で解を得ることになる。既存の棚氷モデルでも同様であるが、収束条件や打ち切り誤差などが氷床モデル時間発展の再現に与える影響はこれまで陽に触れられたことはほとんどない。氷床モデル計算ではこの棚氷速度分布計算が最も計算負荷の高い部分であり、長期積分を行うためには必要な精度ぎりぎりまで計算回数を少なくするのが望ましい。そこで非線形方程式の繰り返し回数とそれによる速度分布の精度、さらにその長期積分への影響を理想的な地形および南極氷床設定で評価した。その結果、水平解像度40 kmの南極氷床設定の場合、4回の繰り返し計算で最低限実用に耐える計算結果になることが判明した。

その設定を用いて南極氷床の長期積分を行ったところ、実用的には問題のない時間内（約一日）で40000年程度の計算が可能になった。ただし棚氷速度分布や氷厚分布に非現実的な振動が一部見られ、より安定な計算を可能とするためにも、また棚氷海洋相互作用を精度よく議論するためにも棚氷端の境界条件の取り扱いを改良することが必要であることがあきらかになった。

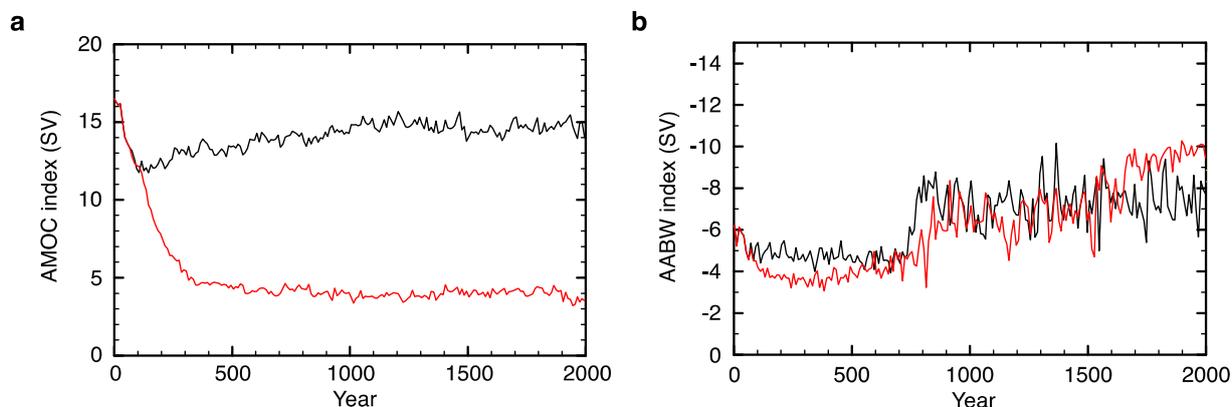
数値計算を安定化させる手段をいくつか検討した。不安定は棚氷速度計算のところで起こっているが、実は速度から氷厚の時間変動を計算するところで不安定を増幅するような形で起こっていることが分かった。フラックスを用いた中央差分から、上流差分、あるいはフラックス項を移流項と非移流項に分解して上流差分にする方法などを導入し安定化を図った。その結果数値的により安定化することが確認された。また定常解の氷厚分布に縁辺部に局所的に数100m程度の違いがあることが明らかになった。氷床変動の再現実験を解釈する上で注意が必要である。



図(4)-8 南極氷床設定下での計算例。左は40000年の棚氷部分の体積の時間変動。右は最終状態での表面速度の大きさの水平分布。

(5) 理想的な長期温暖化に対する大西洋子午面循環の応答

2000年後の全球平均気温は $2xCO_2$ 実験で $4.3^\circ C$ 、 $4xCO_2$ 実験で $8.4^\circ C$ 上昇し、先行研究と整合的な結果となった。AMOCの変動については $2xCO_2$ 実験と $4xCO_2$ 実験で大きな違いが見られた(図(4)-9)。 $2xCO_2$ 実験では大気 CO_2 濃度が上昇している期間AMOCが約 $5Sv$ 減少するが、それ以降徐々に回復して1000年後以降は現在気候とほぼ同程度になる。一方、 $4xCO_2$ 実験では大気 CO_2 濃度の上昇が止まった後もAMOCは減少し続け、最初の300年で約 $5Sv$ まで減少した後は積分期間の最後まで回復することはなかった。このようなAMOCの極端な弱化は海洋による極向きの熱輸送を減少させ、高緯度域を寒冷化させるなど、全球気候に大きな影響を与える。一方、南大洋底層水の流量はどちらの実験においても最初の500年は弱まるが、その後回復して産業革命前よりも強くなる。このような応答はEMICでは数例報告されてきたが、大気海洋モデルを用いた研究としては確認された。

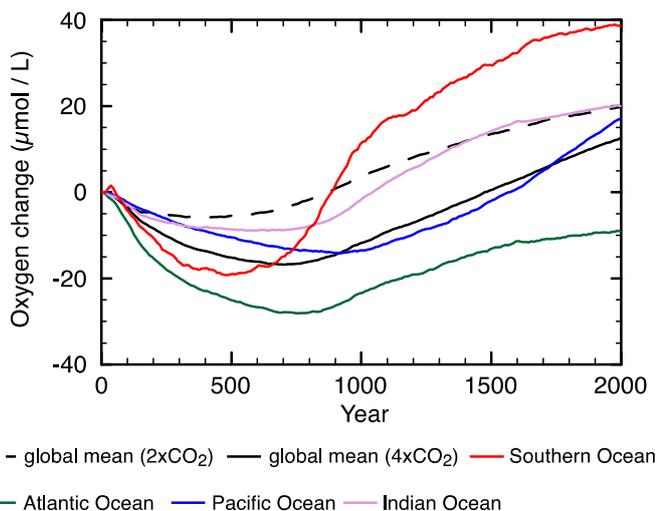


図(4)-9 MIROCによって計算された (a) 大西洋子午面循環と (b) 南大洋底層水の流量の時系列。理想的な温暖化実験の結果: $2xCO_2$ (黒線)、 $4xCO_2$ (赤線)。

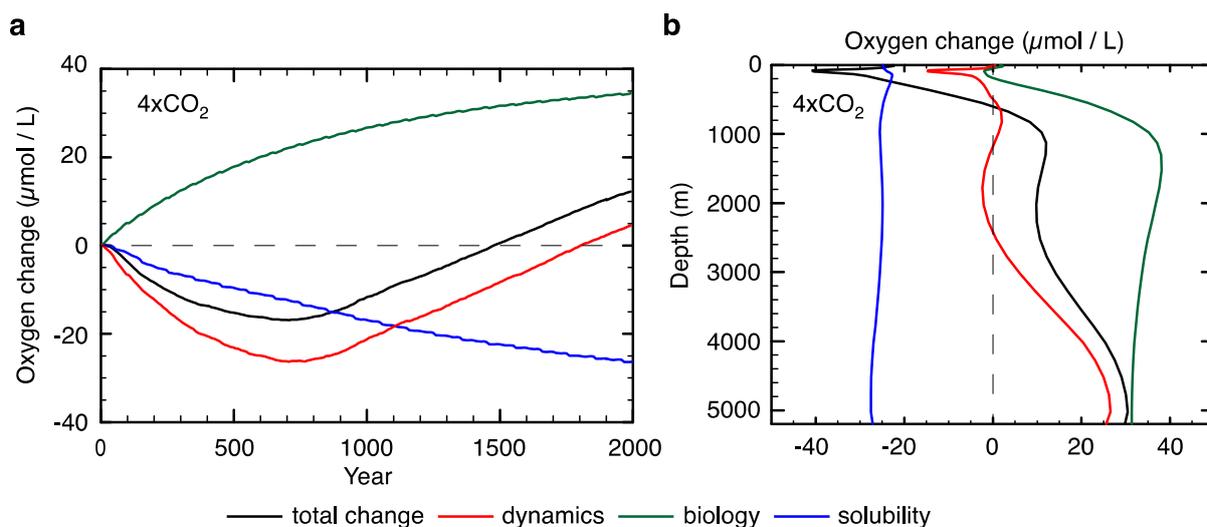
(6) オフライン海洋物質循環モデルの開発と温暖化に対する溶存酸素の長期変動

現在気候場において炭素循環や窒素循環、溶存酸素についてドリフトが起きていないことと、基礎生産量、硝酸塩濃度、溶存無機炭素、アルカリ度、酸素濃度などの分布について観測値をよく再現していることを確認した。また生態系モデルに鉄制限と最適栄養塩取り込み過程を導入したことで、南大洋・北太平洋・熱帯域に見られていた基礎生産量や全炭酸のバイアスが改善されることを確認した。溶存酸素の分布は現在のモデルでは再現性が高くないことが知られており、本研究で開発したモデルもCMIP5のモデルと同程度の振る舞いである。

溶存酸素は水温上昇に伴う溶解度の低下と海洋の循環の変動（成層化やAMOCの弱化）により初期500年ではほぼ全球的に減少し、全球平均で約10%減少する。しかし500年以降は南大洋から酸素が回復し、最終的に全球平均の溶存酸素濃度は業革命前より $13\mu\text{mol/L}$ 高くなった（図(4)-10）。感度実験の結果から、この溶存酸素の回復は南大洋の深層循環が回復することに伴い酸素を多く含む表層水が中深層へ運ばれ、深層水が各海盆に広がることで引き起こされることが分かった。一方、表層では水温上昇に伴う溶解度の低下が支配的な要因として働く為に溶存酸素濃度は減少する（図(4)-11）。その為、貧酸素水塊は表層で拡大し中層では減少した。



図(4)-10 全球平均（黒線）と各海盆（カラー）における溶存酸素の時系列変化。



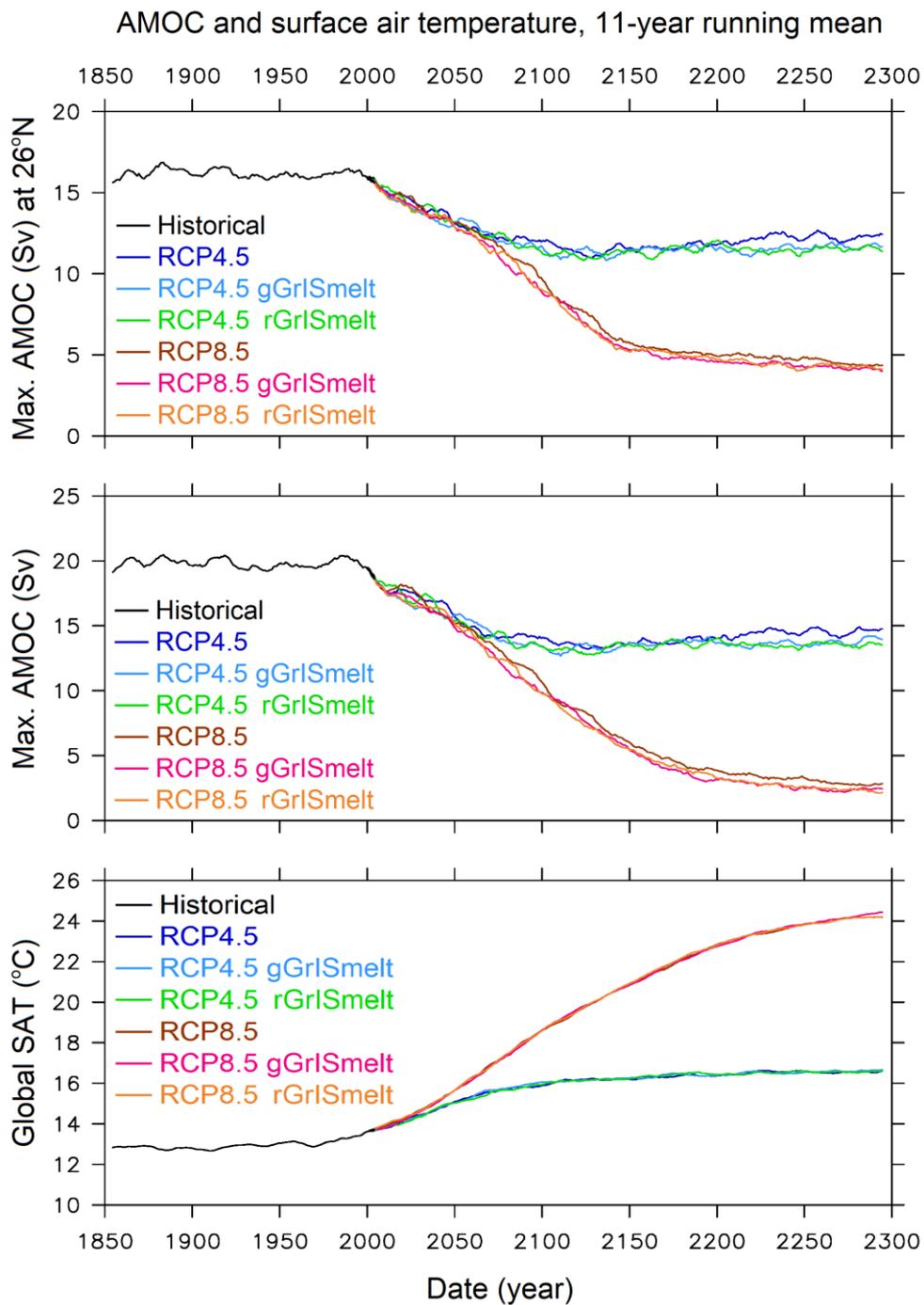
図(4)-11 酸素変化量に対する各プロセスの寄与（黒線：総変化量，赤線：海洋循環，青線：溶解度：緑線：生物）。 $4x\text{CO}_2$ 実験における (a) 時系列変化と (b) 2000年後の鉛直分布。

南大洋における深層循環の応答を調べる為に、深層水形成域における成層構造の変化を調べた。初期500年において、南大洋では温暖化に伴う降水量の増加や海氷の減少により淡水フラックスが増加する。その影響で成層化が進み、深層循環は弱まる。しかしその後、海水面の温度は結氷点近くであるにもかかわらず、中深層の水温は他の海域からの移流等の影響で徐々に温まる為に成層が不安定化する。500年頃から塩分駆動の成層化の効果より水温駆動の不安定化が支配的になることで深層循環が回復し、1000年以降では現在よりも強くなる。このような南大洋の深層循環の回復とそれに伴う酸素の回復は簡略化モデルを用いた先行研究ではほとんど報告されておらず、大気海洋結合モデルで計算することで初めて明らかになった。この結果はYamamoto et al (2015)としてGlobal Biogeochemical Cycleに出版された。

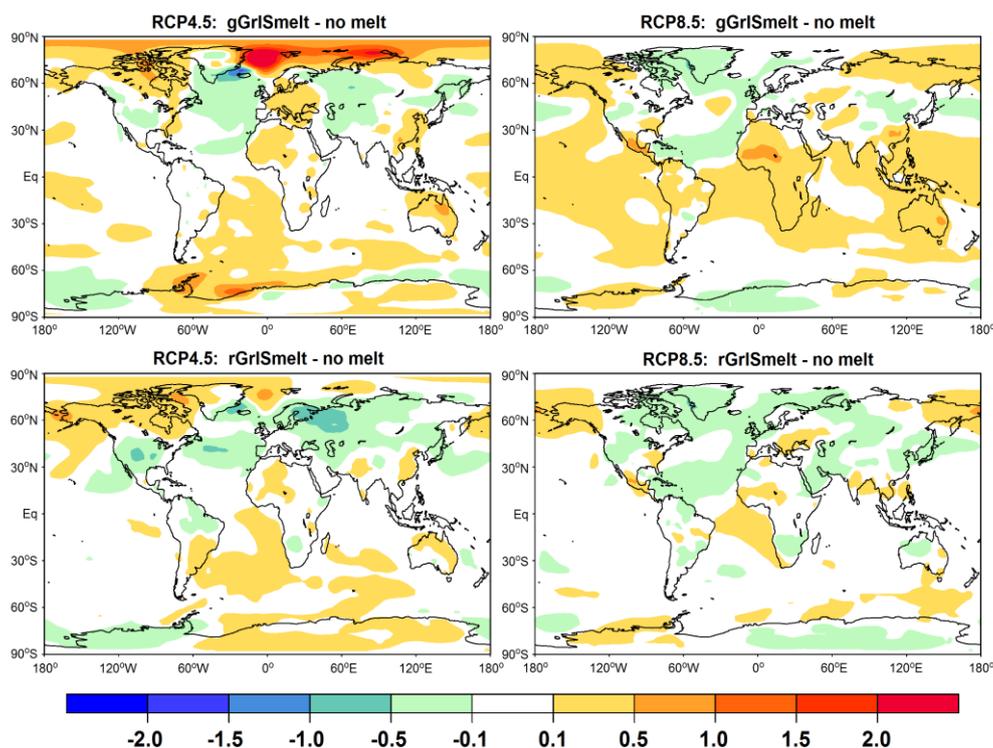
(7) グリーンランド氷床融解水の流入に対する大西洋子午面循環 (AMOC) の応答

RCP4.5において融解水の流入を考慮しない場合、AMOCは2100年頃までに4-5Sv弱化し、2200年以降は1-2Sv回復する(図(4)-12、上中段)。一方、融解水の流入を考慮した場合、2100年までの弱化については大きな変化がないが、2200年以降の部分的な回復が起きなかった。RCP8.5において融解水の流入を考慮しない場合、2200年までに3-4Svまで大幅に減少しその後2300年まで回復することはなかった。融解水流入を考慮した場合ではAMOCはやや弱化するが、既に非常に弱まっているためにRCP4.5で見られた差よりも小さくなった。また、AMOCのセルの深さやAABWの流量についても融解水流入を考慮した場合としなかった場合で大きな変化は見られなかった。したがって本研究の結果から、グリーンランド氷床の融解水流入の影響は大気CO₂の増加の影響と比較して小さいものであるが、この効果は無視できるものではなく、AMOC弱化を引き起こすことが明らかとなった。一方で、将来のCO₂レベルがRCP8.5よりはるかに低くなる場合、融解水流入がAMOCの停止を引き起こす可能性が低いことを示唆された。

融解水の流入を考慮した場合と考慮しない場合で、全球平均気温の違いはほとんど見られなかった(図(4)-12、下段)。しかしながら地域的には影響があり、RCP4.5においては融解水流入によりGIN Seaでの温暖化と北大西洋北部での寒冷化を引き起こす(図(4)-13)。特にRCP4.5のgGrLSmeltではこれらの場所に加えて、南大洋の大西洋セクターにおいても顕著な温暖化が見られた。



図(4)-12 融解水流入がある場合とない場合のAMOCの時系列（上、中段）と全球平均表層気温（下段）。上段は26°N、水深500m以深での最大値。中段は緯度、深度に関係なく最大値を示す。各線はそれぞれのシナリオを示している。

Change in surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$), averaged over last 50 years

図(4)-13 融解水流入がある場合とない場合の表層気温の差。左図はRCP4.5、右図はRCP8.5シナリオ。上段はgGrLSmelt、下段はrGrLSmeltの場合。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ(4)では、これまで放射効果という尺度で地球平均として評価されてきた個々のフィードバックプロセスの温度変化への寄与について、極域についての評価を可能とした。この新たな手法によって季節ごとの解析が可能となり、季節性の強い北極域の応答を統合的に理解することにつながった。

様々な気候場における南極の棚氷底面融解量を計算し、海氷生成や海洋循環の変化についても解析を行うことで、気候変動に対する海洋循環の変化を通じた棚氷底面融解の応答メカニズムについて理解することが可能になった。

気候変動に対する1000年スケールの海洋深層循環の応答はコンピュータ資源の制約からこれまで簡略化モデルを用いて研究が行われてきた。近年のコンピュータパワーの増加により、より詳細な大気海洋結合モデルで長期実験が可能になった。その結果、海洋深層循環の応答が大気 CO_2 濃度に対して大きく依存し、グリーンランド氷床の融解水の流入の影響も重要であることを明らかにした。また、溶存酸素についても100年スケールの変動と1000年スケールの変動が異なる可能性が示唆された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ（4）で得られた結果から、気候変動影響の中でも脆弱性および臨界現象の面から特に重要な極域寒冷圏の将来予測の改良や飛躍的な進展につながる。海水準予測において不確定性の大きな原因であると考えられている南極棚氷底面融解について、モデルを用いて評価することが可能になった。また、気候システムの中核を担う海洋循環が大気CO₂濃度に対して大きく異なることを示した。これらは将来の大気CO₂濃度安定化レベルを決定する上で重要な知見を与えると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマのメンバー（阿部、吉森）は、IPCC 第5 次評価報告書の執筆に参加している（阿部：第1作業部会の主執筆者、吉森：第1作業部会の執筆協力者）。本サブテーマを含むS-10の研究成果は同報告書に参照された。

本サブテーマのメンバー（阿部、Chan）は国際プロジェクトであるAMOCMIP（AMOCモデル相互比較プロジェクト）に参加している。大気海洋結合モデルMIROCで行なった淡水流入実験の結果を提出し、その結果はBakker et al. (2016) としてGeophysical Research Lettersに出版され、Journal Highlightsとして取り上げられた。

本サブテーマのメンバー（阿部、山本）は国際プロジェクトであるLongrunMIP（長期積分モデル相互比較プロジェクト）に参加している。大気海洋結合モデルMIROCで行なった長期温暖化実験の結果を提出し、その結果について論文として投稿する準備を進めている。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi : Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2012GL053872, 2012
 “Can the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity?.”
- 2) 阿部彩子, 斎藤冬樹, 吉森正和, 小室芳樹, 大石龍太, 渡部雅浩, 大垣内るみ, 高橋邦夫, 鈴木香寿恵, 川村賢二, 野沢徹 : 天気, 60(11), 901-908 (2013)
 「2011年度春季大会シンポジウム「変動する地球気候の鍵－南極・北極－」の報告: 5.気候変化における北極と南極の応答と役割: 過去と将来」
- 3) A. Abe-Ouchi, F. Saito, K. Kawamura, M. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter: Nature, 500, 190–193, doi:10.1038/nature12374, 2013
 “Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume.”
- 4) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, R. Ohgaito, A. Paul, and A. Abe-Ouchi : Climate of the Past, Vol.9, 811-823, 2013
 “Skill and reliability of climate model ensembles at the Last Glacial Maximum and mid-Holocene.”
- 5) T. Yokohata, J.D. Annan, M. Collins, H. Shioyama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M.

- Abe, M.J. Webb and J.C. Hargreaves; *Climate Dynamics*, 41, 2745-2763, doi:10.1007/s00382-013-1733-9, 2013
 “Reliability and importance of structural diversity of climate model ensembles.”
- 6) M. Yoshimori, M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama and T. Ogura: *Climate Dynamics*, 42(5-6), 1613-1630, 2014a
 “Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM.”
- 7) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka, A. Abe-Ouchi: *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2014GL060483. (2014)
 “Ocean oxygen depletion due to decomposition of submarine methane hydrate”
- 8) de Boer, B., A. M. Dolan, J. Bernales, E. Gasson, H. Goelzer, N. R. Golledge, J. Sutter, P. Huybrechts, G. Lohmann, I. Rogozhina, A. Abe-Ouchi, F. Saito, and R. S. W. van de Wal: *The Cryosphere* 9, 881-903, doi:10.5194/tc-9-881-2015 (2015).
 “Simulating the Antarctic ice sheet in the late-Pliocene warm period: PLISMIP-ANT, an ice-sheet model intercomparison project”
- 9) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: *Global Biogeochem. Cycles*, 29, doi:10.1002/2015GB005181 (2015).
 “Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming”
- 10) Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, M. Watanabe, A. Oka, and T. Ogura: *J. Climate*, 27(16), 6358-6375 (2014b)
 “Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of MIROC GCM”
- 11) Dome Fuji Ice Core Project Members: Kawamura, K., A. Abe-Ouchi, H. Motoyama, Y. Ageta, S. Aoki, N. Azuma, Y. Fujii, K. Fujita, S. Fujita, K. Fukui, T. Furukawa, A. Furusaki, K. Goto-Azuma, R. Greve, M. Hirabayashi, T. Hondoh, A. Hori, S. Horikawa, K. Horiuchi, M. Igarashi, Y. Iizuka, T. Kameda, H. Kanda, M. Kohno, T. Kuramoto, Y. Matsushi, M. Miyahara, T. Miyake, A. Miyamoto, Y. Nagashima, Y. Nakayama, T. Nakazawa, F. Nakazawa, F. Nishio, I. Obinata, R. Ohgaito, A. Oka, J. Okuno, J. Okuyama, I. Oyabu, F. Parrenin, F. Pattyn, F. Saito, T(akashi) Saito, T(akeshi) Saito, T. Sakurai, K. Sasa, H. Seddik, Y. Shibata, K. Shinbori, K. Suzuki, T. Suzuki, A. Takahashi, K. Takahashi, S. Takahashi, M. Takata, Y. Tanaka, R. Uemura, G. Watanabe, O. Watanabe, T. Yamasaki, K. Yokoyama, M. Yoshimori, and T. Yoshimoto: *Science Advances*, 3(2), doi:10.1126/sciadv.1600446 (2017)
 “State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modelling”
- 12) Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, and A. Laîné: *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-017-3523-2 (2017)
 “The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium”
- 13) Bakkerl, P., A. Schmittner, J.T.Lenaerts, A. Abe-Ouchi, D. Bi, M. R. van den Broeke, W.-L. Chan, A. Hu, R.L. Beadling, S.J. Marsland, S.H. Mernild, O.A. Saenko, D. Swingedouw, A. Sullivan,

and J. Yin: *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12,252-12,260, doi:10.1002/2016GL070457 (2016)

“Fate of Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting”

- 14) Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kushara, H. Hasumi, R. Ohgaito: *Journal of Climate* (in press)

“Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO₂ doubling”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 吉森正和：日本気象学会2013年度春季大会シンポジウム要旨集，変化する地球環境と気象学の役割，24-29 (2013)

「気候感度の不確実性と地球温暖化予測」

- 2) 吉森正和，阿部彩子：図説 地球環境の事典，朝倉書店 (2013)

「古気候からみた気候感度の推定と気候フィードバック」

- 3) J. Hargreaves, K. Keller and T. Edwards: *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(32), 280 (2013)

“Examining Risks, Extreme Events, and Abrupt Changes.”

- 4) V. Masson-Delmotte, M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J.F. González Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao and A. Timmermann: In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker,T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

“Information from paleoclimate archives.”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 吉森正和，渡部雅浩，阿部彩子，塩竈秀夫，小倉知夫，日本気象学会2012年秋季大会 (2012)
「MIROC GCMにおける北極域温暖化増幅プロセスの診断について」

- 2) M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi: 3rd International Conference on Earth System Modeling, Hamburg, Germany (2012)

“Multi-model feedback analysis in LGM and increased CO₂ experiments.”

- 3) M. Yoshimori, M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama, and T. Ogura: the 3rd symposium on Polar Science, Tachikawa, Japan (2012)

“Contributing processes to Arctic temperature amplification for a range of forcing in MIROC GCM.”

- 4) 山本彬友，山中康裕，岡頭，阿部彩子：2013年度日本地球惑星科学連合大会 (2013)

「温暖化による全球メタンハイドレートインベントリー減少の見積もり」

- 5) 吉森正和：日本気象学会 2013 年度春季大会シンポジウム (2013)

- 「気候感度の不確実性と地球温暖化予測」
- 6) 吉森正和, 渡部雅浩, 阿部彩子, 塩竈秀夫, 小倉知夫: 2013年度日本地球惑星科学連合大会 (2013)
「MIROC気候モデルにおけるフィードバックプロセスの北極域温暖化増幅への寄与」
 - 7) 吉森正和, 阿部彩子: 2013年度日本地球惑星科学連合大会 (2013)
「LGMマルチモデルシミュレーションから見た気候感度推定の可能性について」
 - 8) 吉森正和, 阿部彩子, 渡部雅浩, 岡頭, 小倉知夫: 日本気象学会秋季大会 (2013)
「MIROC GCMにおける北極域温暖化増幅プロセスの季節性について」
 - 9) A. Yamamoto, A. Abe-Ouchi, and Y. Yamanaka: ICA-RUS international symposium, Yokohama, Japan (2013)
“Estimation of decrease in global inventory of methane hydrate associated with future climate change.”
 - 10) M. Yoshimori: International Arctic Science Committee/Atmosphere Working Group, Tokyo, Japan (2013)
“On mechanisms of Arctic amplification in MIROC GCM.”
 - 11) M. Yoshimori, M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama, and T. Ogura: The third international symposium on the Arctic research (ISAR-3), Tokyo, Japan (2013)
“Contributing processes to Arctic temperature amplification for a range of forcing in MIROC GCM.”
 - 12) M. Yoshimori, M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama and T. Ogura: European Geosciences Union, Vienna, Austria (2013)
“Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC3 GCM.”
 - 13) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka and A. Abe-Ouchi: Ocean Science Meeting, Hawaii, USA (2014)
“Estimations of methane hydrate inventory loss and its potential impact on dissolved oxygen.”
 - 14) 横畠 徳太, 仁科 一哉, 木口 雅司, 井芹 慶彦, 末吉 哲雄, 吉森 正和, 山本 彬友, 本田 靖, 花崎 直太, 伊藤 昭彦, 眞崎 良光, 重光 雅仁, 飯泉 仁之直, 櫻井 玄, 岩瀬 健太, 高橋 潔, 江守 正多, 沖 大幹: 日本地球惑星科学連合大会, 横浜 (2014)
「気候変化によって生じるリスク連鎖の評価」
 - 15) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, K. Takahashi and Y. Yamanaka: 第5回極域科学シンポジウム (2014)
“The importance of the Antarctic Ocean on ocean oxygen depletion associated with global warming”
 - 16) T. Obase, A. Abe-Ouchi, K. Kusahara and H. Hasumi: 第5回極域科学シンポジウム (2014)
“Modelling Antarctic ice shelf melting under LGM and doubled CO₂ climate using ice shelf-ocean model and climate model”
 - 17) 山本彬友、阿部彩子、重光雅仁、高橋邦生、山中康裕: 日本海洋学会2015年度春季大会(2015)
「温暖化に伴うウェッデル海における深層対流の発達と溶存酸素の増加」

- 18) 山本彬友, 山中康裕, 岡頭, 阿部彩子: 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張, 千葉 (2015)
「メタンハイドレート分解に伴う溶存酸素減少への潜在的影響」
- 19) 山本彬友, 阿部彩子, 重光雅仁, 岡頭, 高橋邦生, 大垣内るみ, 山中康裕: 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張, 千葉 (2015)
「千年スケールの温暖化に対するウェッデル海における深層対流の発達を引き起こす全球的な溶存酸素の増加」
- 20) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: 26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015, Praha, Czech Republic (2015)
“Global oxygenation by enhanced deep convection in the Southern Ocean under millennial-scale global warming”
- 21) 山本彬友, 阿部彩子, 重光雅仁, 岡頭, 高橋邦生, 大垣内るみ, 山中康裕: 日本海洋学会2016年度春季大会, 東京 (2015)
「南大洋における深層循環の回復と全球的な深層溶存酸素の回復 GCMを用いた長期温暖化実験の結果」
- 22) Saito, F., Abe-Ouchi, A. and Takahashi, K.: PALSEA2 2015 Meeting: Data-Model Integration and Comparison. Chiba, Japan (2015)
“Development of numerical ice-sheet model (IcIES) and its application of Antarctic and Greenland ice sheets”
- 23) SAITO Fuyuki, Kunio TAKAHASHI, Ayako ABE-OUCHI.: International Symposium on Contemporary Ice-Sheet Dynamics: ocean interaction, meltwater and non-linear effects, Cambridge, United Kingdom (2015)
“Development of a numerical ice-sheet/ice-shelf model IcIES: numerical exercises in ice-sheet simulation”
- 24) 齋藤冬樹, 高橋邦生, 阿部彩子: 雪氷研究大会, 松本, 長野 (2015)
「氷床棚氷モデルIcIESの開発と南極氷床に関する感度実験」
- 25) Yoshimori, M. and Abe-Ouchi, A.: Fourth International Symposium on the Arctic Research (ISAR-4), 富山 (2015)
“The effect of remote forcing and local feedback on the Arctic warming amplification under the elevated atmospheric CO₂ concentration”
- 26) 吉森 正和, 阿部 彩子: 日本気象学会春季大会, つくば (2015)
「理想化数値実験における熱・水蒸気輸送の高緯度温暖化への寄与」
- 27) 吉森 正和, 阿部 彩子: 日本地球惑星科学連合大会, 幕張 (2015)
「CO₂増加実験において大気の高緯度熱と水蒸気の輸送が北極の温暖化に及ぼす効果」
- 28) 横島 徳太, 仁科 一哉, 高橋 潔, 江守 正多, 田中 克政, 木口 雅司, 井芹 慶彦, 本田 靖, 岡田 将司, 眞崎 良光, 山本 彬友, 重光 雅仁, 吉森 正和, 末吉 哲雄, 岩瀬 健太, 花崎 直太, 伊藤 昭彦, 櫻井 玄, 飯泉 仁之直, 西森 基貴, 沖 大幹: 日本地球惑星科学連合大会, 幕張 (2015)
「気候変動リスク連鎖の構造と全体像の可視化」

- 29) SAITO Fuyuki and Ayako ABE-OUCHI: 2016年度日本地球惑星科学連合大会 (2016),
“Development of a numerical ice-sheet/ice-shelf model IcIES and its performance on the
MISMIP(+) experiments”
- 30) 山本彬友, 阿部彩子, 山中康弘: 2016年度日本地球惑星科学連合大会 (2016)
「温暖化に伴う海洋炭素循環の長期変動」
- 31) 山本彬友, 阿部彩子, 重光雅仁, 岡顕, 高橋邦生, 大垣内るみ, 山中康弘: 2016年度日本地球惑星科学連合大会 (2016)
「地球温暖化に伴う溶存酸素の長期変動」
- 32) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: AGU fall meeting (2016)
“Multimillennium changes in dissolved oxygen under global warming: results from an AOGCM and offline ocean biogeochemical model”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

<受賞>

1) 日本気象学会賞

受賞機関: 公益社団法人 日本気象学会、受賞年月日: 2014年5月22日

受賞題目: 阿部彩子 (氷期・間氷期サイクルの機構解明に関する研究)

2) 猿橋賞

授賞機関: 一般財団法人 女性科学者に明るい未来をの会、受賞年月日: 2012年5月7日

受賞研究題目: 阿部彩子 「過去から将来の気候と氷床の変動メカニズムの研究」

”Investigating the Mechanism of the Climate and Ice Sheet Change from the Past to the Future”

<アウトリーチ (講演等) >

1) 阿部彩子 (2012) 過去から将来の気候と氷床の変動メカニズムの研究、猿橋賞受賞記念講演

2) 阿部彩子 (2012) 地球規模の気候と氷床の変動のしくみを科学する、福井県・大野高校

3) 阿部彩子 (2012) 氷期サイクルの謎とそのモデリングの現状、東工大GCOE会議講演

4) 吉森正和 (2013) 氷期・間氷期から探る地球温暖化. 名古屋大学水循環研究センター 公開講演会『地球環境変動—気候変化からハビタビリティまで—』

8. 引用文献

必要に応じて文中に記載した。

(5) 海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計

国立大学法人北海道大学

山中 康裕

<研究協力者> 柴野 良太・重光 雅仁

山本 彬友 (平成24-25年度)

平成24～28年度累計予算額：70,391千円（うち平成28年度：12,762千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

テーマ3が担当するリスク分析のうち、気候変動に伴って生じ得る海洋圏での地球物理学的な臨界現象について、その特性評価とそれがもたらす社会への影響を、中程度複雑地球システムモデル（EMIC）タイプの気候モデル、および、海洋物質循環・生態系モデルを用いて推計した。具体的には、北大西洋深層水形成に伴う熱塩循環（THC）等の海洋循環の変化など、地球温暖化（海洋酸性化を含む）による、（1）陸上の気温や降水量の変化、（2）海洋中深層における栄養塩循環・炭素循環（pH分布）・溶存酸素分布などの物質循環の変化、（3）海洋生態系（特に植物プランクトンの基礎生産）の変化について、その発生メカニズム、閾値、規模、不確実性を把握した。また、海洋物質循環としての臨界現象と考えられる海底メタンハイドレート層よりメタン放出について、炭素循環（pH分布）・溶存酸素分布に注目した、その発生メカニズム、閾値、規模、不確実性を把握した。そのことにより、気候変動レベル毎の長期（数百年～数千年程度）の時間スケールにおける海洋圏の影響評価を行う。また、中期（数十年～百年程度）の時間スケールにおける、水産資源や漁獲量を大まかにポテンシャルとして把握し、さらに、国別のそれらのポテンシャルや水産経済的評価を行った。研究期間前半では、計算機資源の制約のもとで、対象とする地球物理学的な臨界現象やそれに伴う海洋物質循環・生態系の影響に適したモデルの組み合わせを行い、予備的実験によって、現象とその要因に注目した影響評価に関して、大まかな全体像を把握した。研究期間後半では、用いるモデル・手法を改良することで精緻化するとともに、古気候現象のアナロジーの検討や、気候変動レベルを変えた実験を行うことで、閾値、規模、不確実性等にも注目した影響評価を実施した。また、西暦2100年まで、国別のそれらのポテンシャルや水産経済的評価を導入し、社会への影響を推計した。なお、長期の時間スケールの海洋圏の影響評価は、寒冷圏を中心とした気候変動リスクと関連するため、サブテーマ（4）と共同実施した。

[キーワード]

地球物理学的な臨界現象、メタンハイドレート、海洋溶存酸素、海洋生物生産、水産資源

1. はじめに

海水の深層-表層間における交換時間スケールは約千年である。よって、大気中二酸化炭素濃度が安定化してから長期間、二酸化炭素濃度が相対的に低い表層水が深層水と交換するのに伴い、海洋は人為起源二酸化炭素を吸収し続ける。大気中二酸化炭素濃度の安定化レベルによって異なるが、人為起源二酸化炭素の年間吸収量は相対的に小さいものの長期間となるため、海洋は最終

的に数千PgC 程度吸収する能力がある。同時に、水温・二酸化炭素濃度が相対的に高い表層水が深層に広がるにつれ、深層における貧酸素領域が拡大する。これに熱塩循環（THC）の弱化が加わる。深さ1km以浅は、中層循環や風成循環に伴う鉛直循環（エクマン循環）が卓越し、それに伴う物質循環が存在する。海洋表層の生態系は中層循環や風成循環に対しても応答する。また、大陸棚における貧酸素領域拡大やpH 低下は、直接的に海陸大陸棚や沿岸湧昇域の海洋生態系に深刻な影響を与える可能性がある。西暦2100年までの海洋生態系短期応答に関しては、海洋表層での成層強化によるローカルな応答として理解されている。一方、中長期間の海洋物質循環や生態系の応答は、中深層循環やエクマン循環を考える必要があり、EMIC（中程度複雑地球モデル）による研究はいくつかあるが、不確実性を含めた定量的な議論が行われていない。海底水温が3℃上昇すると、海底メタンハイドレート層よりメタンが約千PgC放出され、大気に直接放出されずに海水中に溶存すると示唆されている。その量を酸化するのに必要な酸素は現在の海洋深層水に溶けている溶存酸素総量に匹敵するので、大規模な無酸素領域が発生する可能性がある。また、海洋による人為起源二酸化炭素の吸収総量を約千PgC に減少させる。

西暦2100 年までの時間スケールでは、水産資源への影響を評価する必要があり、特定の海域や魚種に注目するのではなく、水産資源や漁獲量をだまかにポテンシャルとして把握する手法が開発されている。

2. 研究開発目的

本研究は、古気候のアナロジーの検討を含め、海洋の臨界現象や発生メカニズム、閾値、規模、不確実性を把握すること、および、水産資源の全球的な将来影響について気候モデルのアンサンブルデータを用いて、不確実性を考慮して影響評価することを目的とする。

3. 研究開発方法

（1）温暖化に対するメタンハイドレートの分解とその溶存酸素への影響

温暖化によるメタンハイドレートの分解量を推定する為に、まず大気海洋結合モデルMIROC3.2の温暖化実験で計算された底層の水温変化を用いて堆積層中の熱拡散を計算した。MIROCに与えた大気CO₂濃度は産業革命前のCO₂濃度から年1%で上昇させ、2倍と4倍の濃度になった時点で固定し、2000年積分を行なった。2000年以降では温暖化実験の最後の100年の平均水温を与え続けて熱拡散を計算した。得られた堆積層中の温度変化をメタンハイドレートの全球インベントリーと分布を推定する伝達関数¹⁾に与え、温暖化に対するメタンハイドレートの分解速度を計算した。また、先行研究との整合性や分解速度の地域差、不確実性などを確認した。

メタンハイドレート分解に伴う海洋へのメタン放出が引き起こす溶存酸素の減少について、オフライン海洋物質循環モデルを用いて計算した。サブテーマ（4）と連携し²⁾のオフライントレーサーモデルに³⁾の海洋物質循環モデルを組み込み、生態系（NPZD）、炭素循環、窒素循環、酸素などの計算が可能になった。また水中でのメタンの酸化反応についてもオフラインモデルに導入した。大気海洋結合モデルMIROC3.2により計算された水温や流速場を境界条件としてオフライン海洋物質循環モデルに与え各トレーサーを計算する。これに加え、温暖化に対するメタンハイドレートの分解速度から得られたメタンフラックスを海洋の最下層で与え、酸素減少の地域差や貧酸素域への影響、不確実性などを調べた。

(2) 2100年までの温暖化による貧酸素水塊体積予測の不確実性の把握

温暖化による海水温上昇や海洋循環場変化に伴い生じると考えられる貧酸素水塊体積の予測の不確実性を調べるため、以下の研究方法の開発を行った。

1) 貧酸素水塊内における N_2/Ar 比を計算するモデルの開発

貧酸素水塊内において、海洋表層で生産された有機物を「溶存酸素」ではなく「硝酸塩」を酸化剤として用い分解する生物地球化学的過程（脱窒）の現在場における速度は正確に分かっていない⁴⁾。そこで、貧酸素水塊内の脱窒速度を見積もるため、海洋大循環モデル内で貧酸素水塊内における N_2/Ar 比を予報するモデルを開発し、観測データと比較することにより脱窒速度を見積もることとした。

2) CMIP5マルチ気候モデルを用いた貧酸素水塊体積予測の不確実性の高い海域の抽出

CMIP5マルチ気候モデルによって予測された「溶存酸素」及び「100m深を通過する有機炭素輸送量（輸出生産）」を用いて、貧酸素水塊体積の予測の不確実性が高い海域を抽出することにした。ここでは、「溶存酸素」及び「輸出生産」を提出している9つの気候モデル（CESM1-BGC、GFDL-ESM2G、GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-MR、NorESM1-ME）を用いた。過去再現実験及び温暖化予測実験（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0およびRCP8.5シナリオ）の結果について、産業革命前実験のデータを用いてドリフト補正を行うとともに、マルチモデル解析を容易にするため $1^\circ \times 1^\circ$ の解像度データを作成した。また、作成した溶存酸素データを用いて、水産資源だけでなく海洋中層の生物多様性にとっても重要となる貧酸素水塊（ここでは、 $30 \mu M$ 以下を貧酸素水塊と定義）の水柱内層厚データを作成した。その後、各モデルに対して産業革命前実験の1860から2099年まで「貧酸素水塊の水柱内層厚」及び「輸出生産」データを20年毎に平均値を計算し、その標準偏差を算出した。それから、現在（過去再現実験の1980-1999年の結果の平均）から将来（温暖化予測実験の2080—2099年の結果の平均）までの各変数の変化量が、前述の標準偏差以上に変化したモデルの数を数えると同時に、その変化の符号が一致する場所および一致しない場所を抽出し、一致しない場所を予測の不確実性が高い海域とした。

3) 単一モデルを使用した貧酸素水塊体積の将来変化を決定する機構の特定

地球システム統合モデル（MIROC-ESM）による過去再現実験及び温暖化予測実験（RCP4.5およびRCP8.5シナリオ）における海洋の物理場（1850年～2099年）⁵⁾を用いて、海洋物質循環モデルをオフライン計算する手法を開発した。そのオフラインモデルを用いて、貧酸素水塊体積の将来変化を決定している機構を特定した。当該実験により、CMIP5時にはMIROC-ESMで予報されていなかった溶存酸素の将来予測結果を得た。

4) 単一モデルで特定された貧酸素水塊体積の将来変化を決定する機構が「CMIP5マルチ気候モデルによる貧酸素水塊体積の将来変化予測の不確実性」に影響しうるかの調査

1-2)と同様の方法を用いて、9つの気候モデルの流速データを作成した。ここでは、1-3)で特定された機構の各モデルにおける温暖化応答の違いによって「CMIP5マルチ気候モデルにおける貧酸素水塊体積予測の不確実性」を説明することが可能かどうかを調べた。使用したデータは、貧酸素水塊体積の将来変化と東部赤道太平洋における東西流速の将来変化を用いた。

（３）温暖化による北大西洋子午面循環（AMOC）の減衰が輸出生産に与える影響の把握

温暖化によるティッピングエレメントの一つと言われている北大西洋子午面循環（AMOC）の減衰が、水産資源に影響する可能性のある「輸出生産」に与える影響を調べた。ここでは、気候モデル（MIROC）によって実施された「産業革命前条件による実験（コントロール実験）」及び「大気二酸化炭素濃度を年率1%で産業革命前の4倍にした長期温暖化予測実験（4×CO₂実験）」の海洋物理場*を用いて、1-3) で使用したオフラインモデルによる温暖化予測実験を行った。長期温暖化予測実験の海洋物理場は、AMOCが半分程度に減少した時点における物理場を用いることとした。（*サブテーマ（4）より提供）

（４）水産資源の将来予測モデルの開発と水産資源の評価

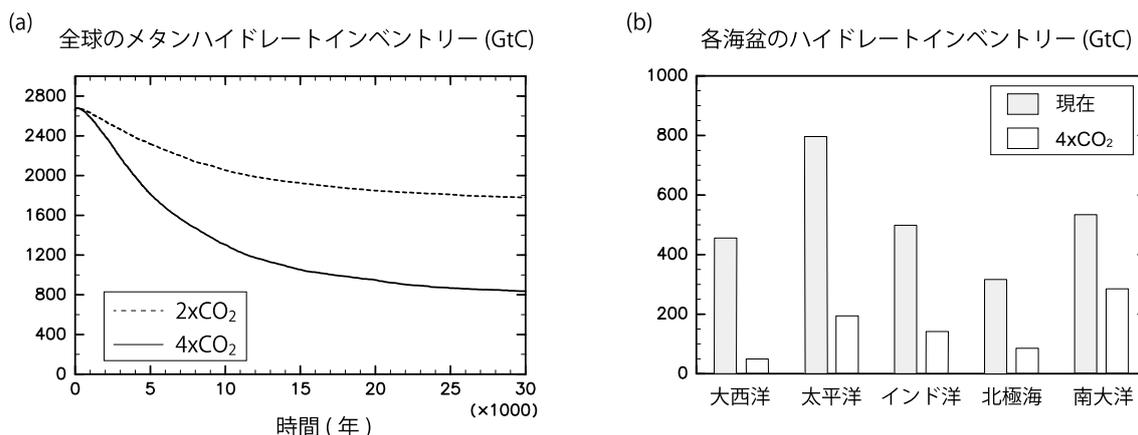
将来の温暖化が水産資源量に与える影響を評価するため、先行研究^{6,7)}を参考にしたハビタットモデルを開発した。このモデルは現在の資源量分布と温暖化予測モデルの出力データを用いて簡易的に将来の水産資源量変動を推定するもので、推定を行う生物種や使用する環境変数を目的・状況に応じて変更することが可能であり、拡張性が高い。モデルの開発およびその評価実験には、水産資源量データとしてAquamaps、温暖化予測モデルとしてMIROC-ESMの生息深度水温と鉛直積算一次生産量を用いて評価した。資源評価データが比較的豊富であり、生息特性の異なる、日本近海の水産資源11種（マサバ・マダラ・マアジ・スルメイカ・スケトウダラ・ウルメイワシ・カタクチイワシ・マダイ・キダイ・サワラ・ヒラメ）を選別し2100年までの温暖化に伴う分布変動を推定した。

さらにハビタットモデルを用いて、200種の水産資源生物に対し5つの気候モデル（GFDL-ESM2G、GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、NorESM2-ME）×4つの温暖化シナリオ（RCP2.6、4.5、6.0、8.5）という多様な実験設定による温暖化後の資源量分布について計算・評価を行った。解析に用いたデータは資源量分布とパラメータはAquamaps、Fishbase、Sealifebaseより、気候モデルデータはCMIP5によって公開されているデータを使用した。本研究にて開発したハビタットモデルは、各生物種の資源量分布と物理環境分布を照合することにより、各環境変数の「好適環境プロファイル（ P_{env} ）」を構築、温暖化の物理環境変動後の資源量分布に対する指標としている。ここでは P_{env} 自体の変動、すなわち各生物種自身の環境変動に対する適応の効果は考慮せず、単純に P_{env} は現在の分布から変動しないものとして計算を行った。使用する物理環境変数は、生息域の海底深度・深度100mにおける輸出生産・ポテンシャル水温・溶存酸素濃度の4つを使用し、評価期間は1995年~2098年までとした。ポテンシャル水温と溶存酸素濃度については、各生物種の生息深度帯の平均環境として計算した。全球規模にて得られた推定結果を用いて、日本近海に生息する20種の水産資源生物（クロダイ、ロウニンアジ、サンマ、カタクチイワシ、ウルメイワシ、マダラ、ヒラメ、マサバ、スケトウダラ、スルメイカ等）に対しポテンシャル資源重量データを掛け合わせることで2098年までの資源重量としての気候変動リスクを評価した。また、別途予備実験として気候変動に対して水産生物自身が最大限適応した場合には、リスクがどの程度軽減されるかについて簡易評価を行った。この適応能力に対する実験では、評価種が気候変動に対する順応期間（ A_p ）を設定し、 $A_p=10yr.$ 、 $A_p=50yr.$ 、そして適応なしの3ケースの感度実験を行った。

4. 結果及び考察

(1) 温暖化に対するメタンハイドレート分解とその溶存酸素への影響

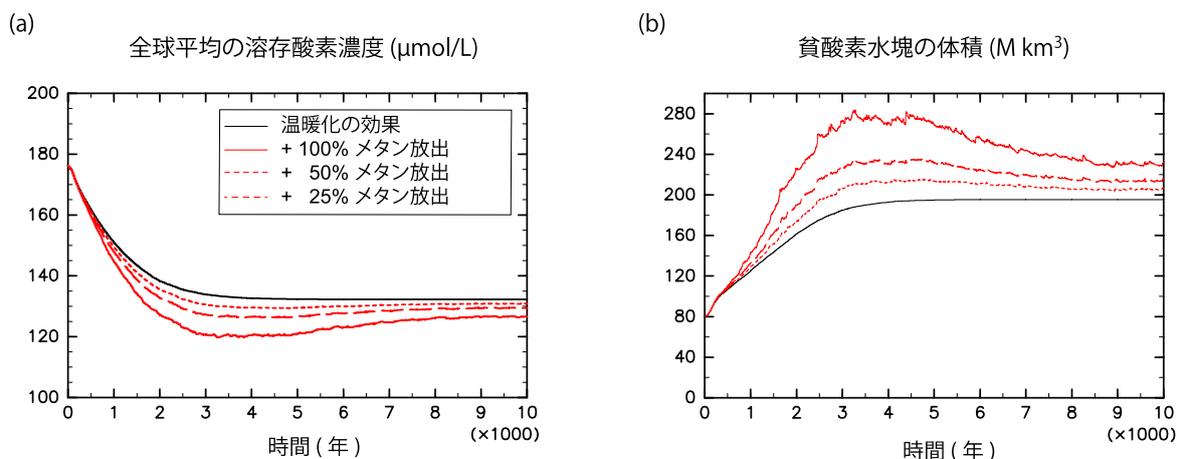
先行研究¹⁾を用いて得られた全球インベントリーは2680GtCとなり現在の推定値（500-2500 GtC⁸⁾をよく再現している（図(5)-1a）。太平洋は溶存酸素が低く堆積層表層に堆積する勇氣物量が多いため、現在気候においてメタンハイドレートが多く存在するという特徴についても再現されている（図(5)-1b）。次にMIROC3.2で計算された2xCO₂実験と4xCO₂実験の水温を与えた場合、メタンハイドレートの減少速度は2000-3000年後に最も速くなり、定常に達するのに1万年以上かかることが分かった。この時間スケールは主にメタンハイドレートが存在する海底下数百メートルまで熱が拡散するのに要する時間で、先行研究と整合的である。最終的に2xCO₂と4xCO₂実験でそれぞれ約30%と65%減少する。海域別に見るとインベントリーの多い太平洋においてメタンハイドレートの分解が最も多く、水温の上がりにくい南大洋において分解量が少ない。また、polar amplificationにより水温上昇が大きい北極海では局所的に大きな分解速度が見られた。1200GtCのメタンが海底から放出されて海水中で酸化された場合、全海洋中の酸素がなくなる可能性があるが、この量のメタンハイドレートが分解するのに約8000年かかる。現在の海洋循環では大気からの酸素供給時間スケールが2000年程度であることを考えると、全球無酸素は引き起こされないことがわかった。しかし、メタンハイドレートの分解量が多い太平洋などでは溶存酸素が大きく減少する可能性があるため、海洋物質循環を用いて影響評価を行なった。



図(5)-1 (a)全球メタンハイドレートインベントリーの時系列変化。破線は2倍CO₂実験、実線は4倍CO₂実験をそれぞれ示す。(b)現在気候（グレー）と4倍CO₂（白抜き）気候における各海盆のメタンハイドレートインベントリー

溶存酸素減少に対する温暖化とメタンハイドレート分解の影響を比較する為に、まず温暖化の影響について計算した（図(5)-2）。この実験では開発したオフライン海洋物質循環モデル、大気海洋結合大循環モデル（MIROC3.2）で計算された産業革命前の気候場を用いてスピニアップし、温暖化の影響については海洋表層の酸素溶解度の計算に4xCO₂実験のSSTを与えて計算した。その結果、全球平均の溶存酸素は約3000年かけて25%減少し（図(5)-2a）、貧酸素域（[O₂] < 60 μmol）の体積は現在の約2倍に増加する結果が得られた（図(5)-2b）。これらの結果は先行研究⁹⁾の結果と整合的である。次に温暖化の影響に加え、メタンハイドレート分解の影響も加えて計算を行った。メタンハイドレートの分解によって生じたメタンガスのうち、どの程度が海底から海洋に放出されるかについては大きな不確実性が伴うため、割合を変えて感度実験（100, 50, 25%）を行った。

その結果、メタン放出の影響は数千年間にわたり溶存酸素を減少させることが分かった。減少のピークは約3000年後になるため、温暖化による影響にメタン放出の影響が重なりあうあうことが示された。全球平均の溶存酸素濃度に対しては最大（100%放出ケース）で約17 $\mu\text{mol/L}$ と温暖化の影響の半分程度となった。一方、貧酸素域の体積への影響については100（50）%放出ケースで温暖化の影響と同じ（半分）程度となり、大きな影響があることが示された。現在気候において溶存酸素濃度が低く、貧酸素域が主に存在する太平洋においてメタンハイドレートが多く分解する為、特に太平洋において貧酸素域の拡大に大きな影響を与えることが明らかとなった。貧酸素海域の拡大は魚などの高次生物の生息域の減少やへい死を引き起こすと考えられているため、温暖化に伴うメタンハイドレートの分解は気候だけでなく、溶存酸素の減少を通じて生態系に対しても大きな影響を与えることが明らかとなった。



図(5)-2 (a)4倍 CO_2 実験における全球平均の溶存酸素濃度と(b)貧酸素域($[\text{O}_2] < 80 \mu\text{mol/L}$)の体積の時系列変化。黒線は温暖化による溶解度減少による変化、赤線はメタン放出の効果を加えた場合の変化を示す。メタンハイドレートの分解によって生じたメタンのうち、海洋へ放出したメタンの割合を100（実線）、50（破線）、25（点線）%とした場合の結果を示す。

(2) 2100年までの温暖化による貧酸素水塊体積予測の不確実性の把握

1) 貧酸素水塊内における N_2/Ar 比を用いた脱窒速度の見積もり

貧酸素水塊内における N_2/Ar 比の観測結果をモデルでよく再現するためには、52TgN/yr程度の脱窒速度が必要なことを明らかにした。この値は、これまで高めに見積もられた報告値（150TgN/yr）¹⁰⁾の1/3程度であるが、近年報告されている報告値（38-80TgN/y）^{4),11),12)}とほぼ一致するものであり、近年の低めに見積もられた値が尤もらしいことを確認した。

2) CMIP5マルチ気候モデルによる貧酸素水塊体積予測の不確実性の高い海域の抽出

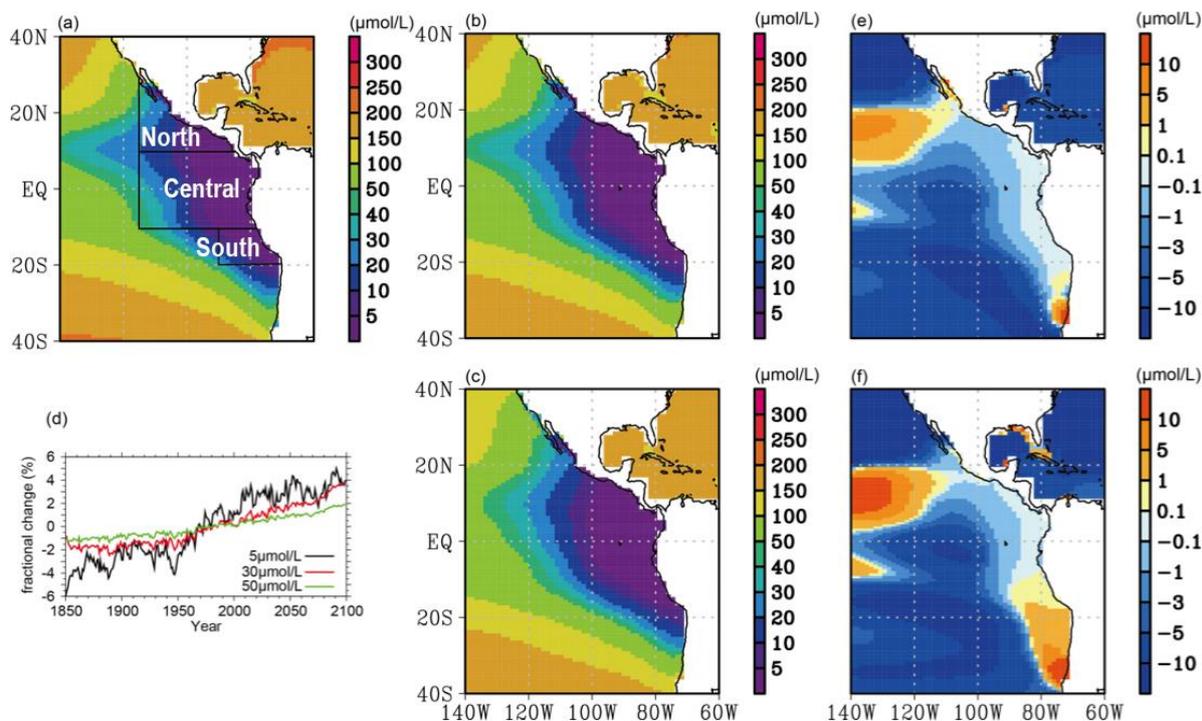
RCPの各シナリオにおいて、1980年代から2020年代、2050年代、2080年代にかけて「貧酸素水塊体積の増加を示すモデル」および「輸出生産の減少を示すモデル」の数が増える海域が多くなる。しかし、貧酸素水塊体積については「増加を示すモデル」と「減少を示すモデル」の両方が存在する海域が、インド洋北部および東部赤道太平洋で次第に広がっていく。これは、これらの海域での貧酸素水塊体積の将来予測の不確実性が高いことを意味する。また、輸出生産については、インド洋北部ではどのモデルも明確な減少傾向を示すものの、東部赤道太平洋では貧酸素水塊体積の予測同様、「増加を示すモデル」と「減少を示すモデル」の両方が存在す

る海域が広がっていく。表層から輸出された有機物（輸出生産）が、貧酸素水塊の存在する海洋中層で酸素を消費しながら分解される。したがって、インド洋北部での貧酸素水塊体積予測の不確実性は、当該海域の貧酸素水塊近傍に物理過程によって供給される酸素量のモデルによる違いによって主に引き起こされている可能性がある。一方、東部赤道太平洋の貧酸素水塊体積予測の不確実性は、物理過程によって供給される酸素量のモデルによる違いに加え、海洋表層で生産された有機物の輸送量の変化のモデルによる違いの両方によって引き起こされていることが示唆された。このことから、東部赤道太平洋は温暖化による将来予測の不確実性が高い海域であることが分かった。現在、東部赤道太平洋は全海洋の貧酸素水塊の7割以上が存在していること¹¹⁾から、気候モデルによる貧酸素水塊体積の将来予測の不確実性がどのような機構によって引き起こされているのかを明らかにすることは、今後の温暖化予測を精緻にしていくためには必要不可欠である。

3) 単一モデルを使用した貧酸素水塊体積の将来変化を決定する機構の特定

東部赤道太平洋には現在最も多量の貧酸素水塊が存在し、「2-2の結果」より当該海域における貧酸素水塊体積の将来予測の不確実性が最も高い。そこで、単一モデル（MIROC-ESM）を用いて当該海域における温暖化時の酸素濃度変化を決定している機構を詳しく調べた。

東部赤道太平洋における貧酸素水塊体積は、MIROC-ESMの物理場を用いたオフライン計算の結果、1850-1949年は20年変動を繰り返しながらほぼ一定、1950-2099年にかけて増大することが分かった（図(5)-3）。その要因となっている機構を明らかにするために、東部赤道太平洋において溶存酸素の収支解析を行った。収支解析を行った領域は、図(5)-3aに示している北部（North）、中央部（Central）および南部（South）である。



図(5)-3 RCP8.5 シナリオにおいて計算された(a)から(c)の期間における時間平均・深度平均(170-1200 m)された酸素濃度 (μ mol/L) : (a) 1850-1949, (b) 2040-2059, (c) 2080-2099. (e, f)(a)

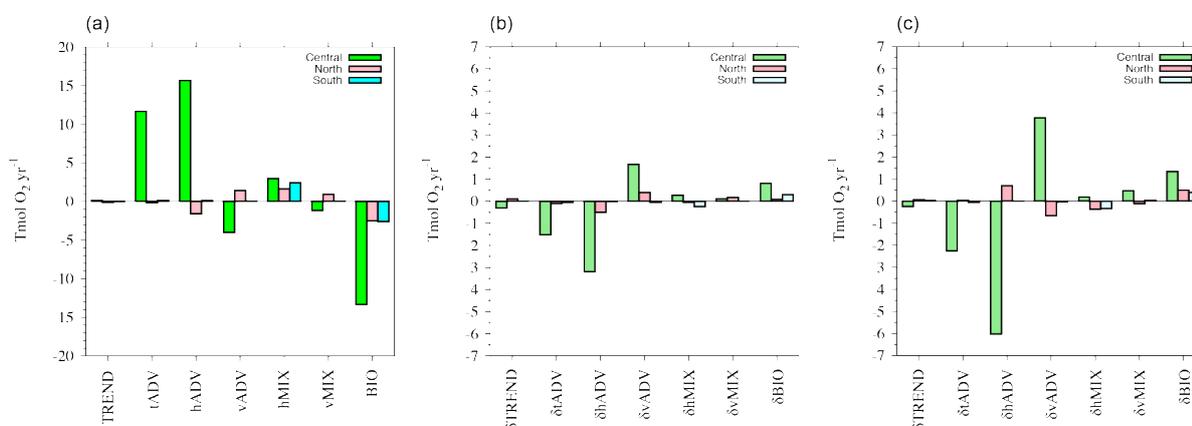
から(b)、(c)への濃度変化。(d) 東部赤道太平洋での貧酸素水塊体積 ($5, 30, 50 \mu\text{mol/L}$) の変化割合 (%)。各濃度に対する体積変化は、1850-2099年の平均で規格化している。

貧酸素水塊体積がほぼ一定の期間 (1850-1949) の中央部では、赤道潜流 (hADV) によって輸送された酸素が、表層から降ってくる有機物の分解に使用される酸素 (BIO) とほぼつりあっていることが分かった (図(5)-4)。貧酸素水塊体積が増加する期間においては、赤道潜流による酸素供給 (δhADV) が減少していく。表層から降ってくる有機物の分解に使用される酸素 (BIO) も減っていくが、赤道潜流による酸素供給 (δhADV) の減少にはおいつかず、正味の酸素濃度の時間変化 (δTREND) は減少し、中央部において酸素濃度が低下していくこととなる。

一方、貧酸素水塊体積がほぼ一定の期間 (1850-1949) の北部および南部では、水平的な混合 (hADV) によって主に酸素が供給され、それが表層から降ってくる有機物の分解に使用される酸素 (BIO) とほぼつりあっている。温暖化が進むにつれて水平的な混合による酸素供給は低下するものの、表層から降ってくる有機物の分解に使用される酸素 (BIO) も同程度低下するため、これらの海域における酸素濃度はそれほど変わらないか、むしろ増加する。

これらのことから、東部赤道太平洋における貧酸素水塊体積が温暖化とともに増加する主な原因となっている機構は、赤道潜流によって輸送される酸素量の低下であり、当該海域における貧酸素水塊体積予測に対して重要な要因となっている事が明らかになった。

なお、RCP4.5シナリオの元で計算した結果もほぼ同様の結果を示す。

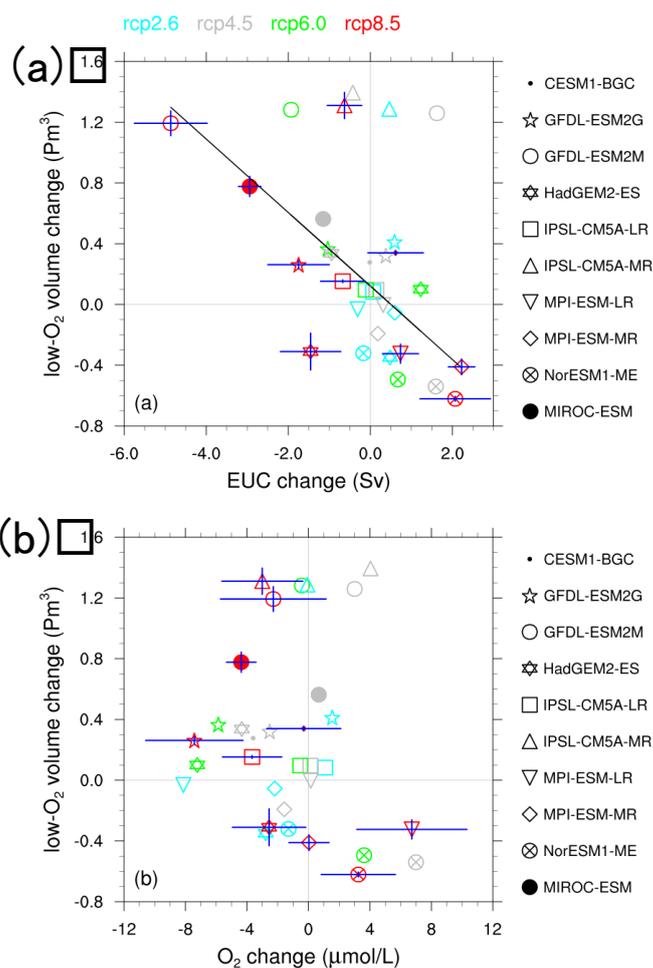


図(5)-4 (a) RCP8.5シナリオで計算された1850-1949の期間における時間平均・深度平均 (170-1200 m) した酸素の時間変化速度 (Tmol O₂/year)。中央部 (Central)、北部 (North) および南部 (South) (図(5)-3aに示された領域) でそれぞれ計算した結果。(b)、(c)1950-2039、2060-2079の期間における時間平均・深度平均した酸素の時間変化速度 (Tmol/year) から1850-1949のものを差し引いた値を示す。ここで、TRENDは正味の時間変化項、tADVは水平および鉛直の移流による時間変化項、hADVは水平移流による時間変化項、vADVは鉛直移流による時間変化項、hMIXは水平混合による時間変化項、vMIXは鉛直混合による時間変化項、およびBIOは生物過程による時間変化項を示す。 δ は酸素の時間変化項のそれぞれの期間における差を示している。

4) 単一モデルで特定された貧酸素水塊体積の将来変化に重要な赤道潜流の温暖化に対する応答が

「CMIP5マルチ気候モデルによる貧酸素水塊体積の将来変化予測の不確実性」に影響しうるかの調査

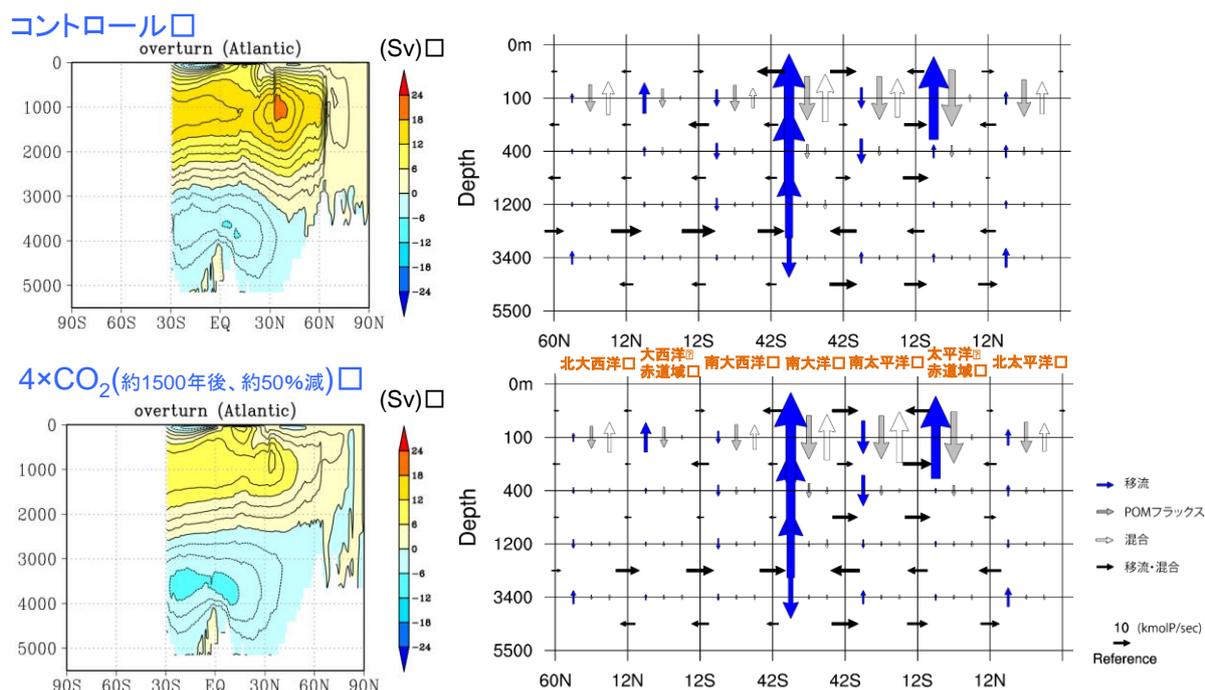
CMIP5モデルにおいて、現在（1980–1999年）から2080年代（2080–2099年）までの赤道潜流の変化量と貧酸素水塊体積の変化量との関係を調べた。図(5)-5aに示すとおり、温暖化の程度の大きいRCP6.0・RCP8.5シナリオでは赤道潜流の流量が増えるモデルほど貧酸素水塊体積が減る傾向があり、減少するモデルほど体積が増える傾向がある。このことは、モデルによって温暖化に対する赤道潜流流量の応答の仕方が異なり、そのことが貧酸素水塊体積の将来予測の不確実性につながっていることを示す。一方、温暖化が抑制されたRCP2.6・RCP4.5シナリオでは赤道潜流流量がそれほど変わらないにもかかわらず、RCP6.0・RCP8.5シナリオと同程度に貧酸素水塊体積の将来予測がモデルによってばらつく。これは、東部赤道太平洋の貧酸素水塊境界付近における「酸素の渦輸送の温暖化に対する応答」がモデルによって異なっているためであると考えられる。赤道潜流の流量変化ではなく酸素濃度変化によっても影響される可能性があるため、また、図(5)-5bで、赤道潜流に相当する東向き流速がある場所における酸素濃度の平均の変化と貧酸素水塊体積の変化量との関係を調べた。しかし、有意な関係は温暖化の程度の大きいRCP6.0・RCP8.5シナリオにおいて見出せなかったため、濃度変化による影響はそれほど大きくないと言えそうである。現在CMIP5に提出されているアウトプットだけでは、各モデルの酸素収支解析はできないため、このような定性的な解析しかできないが、貧酸素水塊体積の将来予測の不確実性の一要因として赤道潜流の温暖化応答の違いがあるということを提案することができた。CMIP6では、各モデルの収支解析ができればさらに理解が深まると考えられる。



図(5)-5 (a)1980年代から2080年代にかけての赤道潜流の流量変化（EUC change）と貧酸素水塊体積変化（low-O₂ volume change）の関係（ $r=-0.72$ ）、(b) 1980年代から2080年代にかけての赤道潜流の酸素の平均濃度変化（O₂ change）と貧酸素水塊体積変化の関係。ここでは、西経115度の南緯5度から北緯5度の0-1000mにおいて東向きの流れを赤道潜流と定義した。

（3）温暖化による北大西洋子午面循環（AMOC）の減衰が輸出生産に与える影響の把握

「コントロール実験」と「4×CO₂実験」における水深100mにおける輸出生産の結果を比べた。「コントロール実験」では全球積算で11.3GtC/yrであったが、「4×CO₂実験」では10.3GtC/yrとAMOCの最大流量が半分程度に減少しているにも関わらず、輸出生産がそれほど減少することはなかった。AMOCの減少により輸出生産を支える栄養塩の循環がどのように変わるのかを調べるため、両実験におけるリン酸塩の収支解析を行った（図(5)-6）。その結果、AMOCの減衰により大西洋深層でのリン酸塩輸送は20～60%程度減少するが、表層では高緯度を除き、風成循環変動のほうが大きく影響し、AMOC減衰の影響はそれほどないことが分かった。



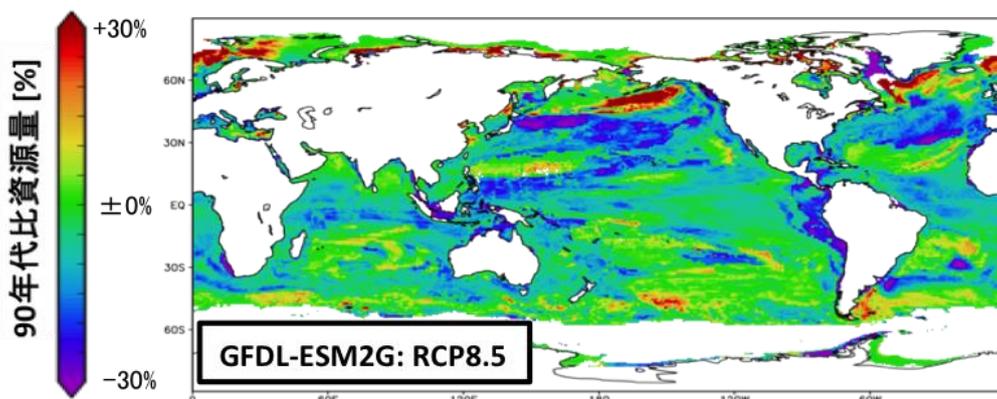
図(5-6) 海洋大循環に沿ったリン酸塩収支の「コントロール実験」と「4×CO₂実験」の比較

(4) 水産資源への影響の評価

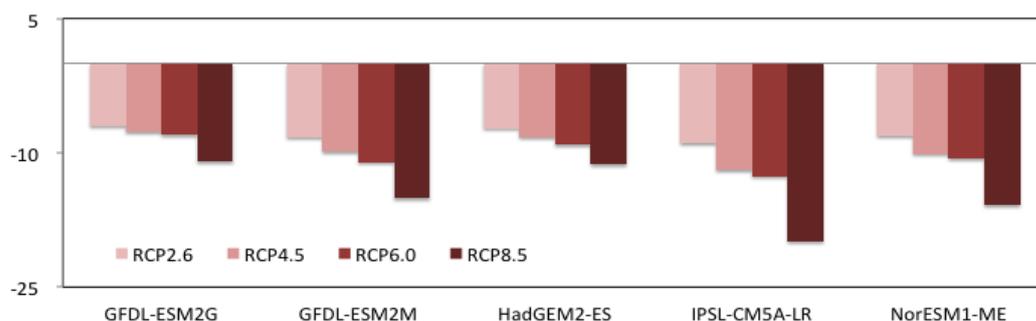
本研究で開発したハビタットモデルを用いることにより、簡易的に温暖化後の資源量分布や増減比を評価することができるようになった(図(5-7))。使用する気候モデルなど評価ケースにより局所的な結果は異なるが、全ての評価ケースで低～中緯度帯で大きな減少率があらわれた。その一方で、気候モデルによって幅があるもののアラスカ湾や北極海周辺などの高緯度帯では資源量の維持あるいは増加がみられた。これらの分布変動の要因は水温の上昇による効果が大きい。生物種毎に見ると、環境変動が大きい浅海域にのみ生息する生物種・生息域が限定される沿岸種などマイナーな生物種程、気候変動に対するリスクが高いことがわかった。その一方で広い緯度帯や深度帯などに生息適正を持つ種については、局所的には減少するものの種としての資源量は比較的変動が緩やかであった。これは広範な生息領域を持つ種程、適応能力が高いことを示している。ただし生息緯度帯が2~5°程度移動する種も確認されたため、漁場変動に伴う国家単位の漁業リスクが懸念される。全球平均した際の影響については、全ての評価ケースで減少となることがわかった(図(5-8))。高排出シナリオでは-11~-19%、低排出シナリオで-7~-9%の資源減少がみられた。

沿岸域をはじめとするローカルな影響にはGCM間にばらつきが大きく現れた。これは前述の各項で述べたような、溶存酸素濃度や輸出生産の評価が領域によって推定値にばらつきが大きいことによる。アラスカ湾周辺やアラビア湾周辺などでは、特にモデル間の推定にばらつきが大きく資源量の推定誤差も大きくあらわれた。また生物種毎の応答感度が異なるのは上記に述べた通りであるが、GCMの応答の違いに対してもこの違いは現れている。そのため沿岸生息種など生息域が限定されている種程、これらの影響を強く受ける結果となり、ローカルな生物種には推定誤差が大きくなる傾向となっている。特に比較的多様な生物種が生息し、沿岸生物種が多い東南アジア

ア～オオーストラリア北部では大きな不確実性が現れた。

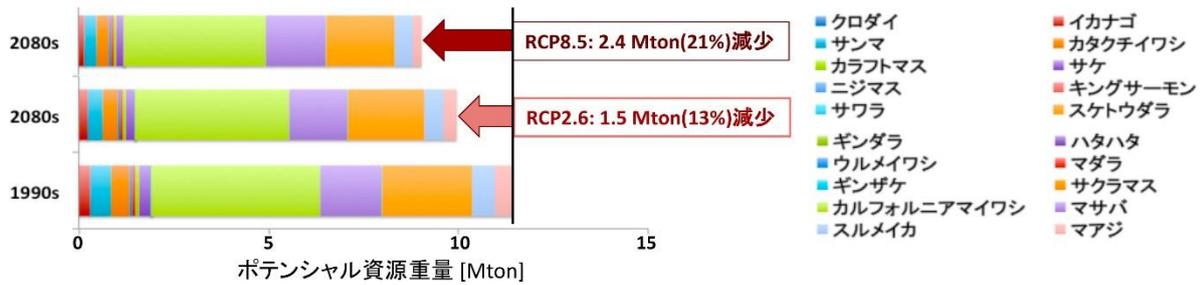


図(5)-7 水産生物に対する温暖化の影響GFDL-ESM2G×RCP8.5による2090年代における1990年代と比較した資源量変動比。



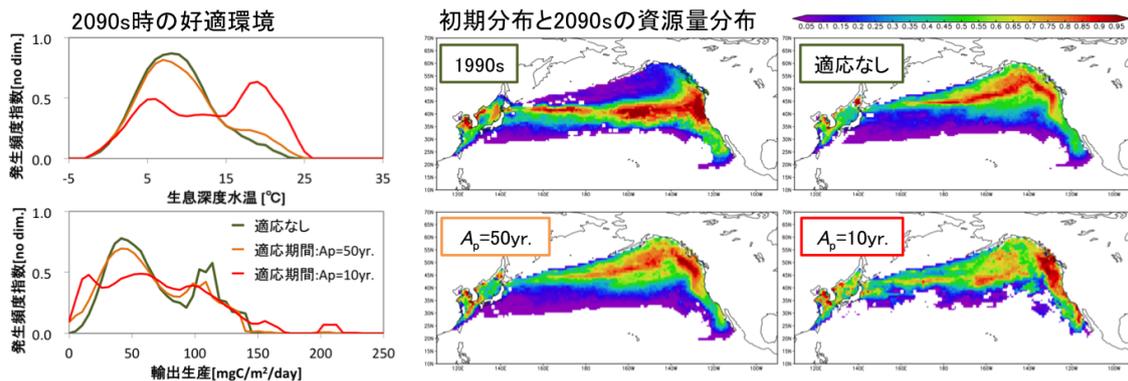
図(5)-8 各評価ケースにおける推定結果5つの気候モデル×4つの温暖化シナリオにおける評価結果。

日本近海に生息する20種の水産資源生物（クロダイ・イカナゴ・ギンダラ・ハタハタ・サンマ・カタクチイワシ・ウルメイワシ・マダラ・カラフトマス・サケ・ギンダラ・サクラマス・ニジマス・キングサーモン・カルフォルニアマイワシ・マサバ・サワラ・スケトウダラ・スルメイカ・マアジ）に注目し、ポテンシャル資源重量としての気候変動リスク評価を行った。20種積算として、高排出シナリオ（RCP8.5）では約21%、低排出シナリオ（RCP2.6）で約13%の資源減少がみられており、これは資源重量に換算するとそれぞれ2.4Mton、1.5Mtonに相当する（図(5)-9）。このことから、気候変動シナリオの選択によってはほぼ半減できる可能性があることがわかった。RCP8.5における評価結果について種別の応答を見ると、我が国のEEZ中において比較的北方に分布しているような種（ニジマス:41%減少・サケ:39%減少・スルメイカ:24%減少）では大きなリスクが確認された。これは資源量の減少とともに、分布が北方へ移動しEEZから外れてしまったことによることも影響している。その一方で比較的南方に分布する種（クロダイ・サワラ・マサバなど）については比較的リスクは軽度であった。



図(5)-9 日本近海(EEZ)における、1990年代から2080年代の20種の水産資源生物に対するポテンシャル資源重量[Mton]への影響。

環境適応実験のために行った、異なる好適パラメータを簡易的に与えた感度実験では、温暖化に従って好適水温プロファイルが高温適応型へ変遷していく様子が確認できた(図(5)-10)。順応による好適水温の変動は種によって異なるが、例えばサンマでは順応期間： $A_p=10\text{yr}$ の高適応型では沿岸性と外洋性に異なる好適水温が現れるケースもみられた。10種類×4RCPsの評価では、評価なしに比較して適応ありのものは、適応の速度と温暖化の速度の差に応じて影響の緩和傾向がみられた。



図(5)-10 サンマを例とした適応評価ケース毎の2090年代の好適環境プロファイルと資源量分布。異なる適応パラメータを与えた高排出シナリオ(RCP8.5)における適応後(2090年代時)の好適環境プロファイルとその時のサンマの推定分布。分布図の左上は初期分布である1990年代時を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ(5)のメタンハイドレートの分解量の推定はこれまでほとんど行われてこなかった。本研究により、分解量の推定に加え、その地域的分布が初めて示された。またメタンハイドレート分解によるメタン放出が引き起こす溶存酸素の減少の見積もりは、これまで北極海でのみ行われ、その時間スケールは100年スケールに限られていた。本研究から、溶存酸素に対するメタン放出の影響は数千年に及ぶことが示され、特に太平洋におけるsuboxic、hypoxicの拡大に大きな影響があることが初めて示された。また、現在の海洋において実際存在する過程(脱窒および窒素固定)、さらにより現実的な植物プランクトンの栄養塩取り込み過程(OU kinetics)をモデルに実装

したことなどにより、温暖化実験における生態系、物質循環プロセス、水産資源分布の変動をより詳細に明らかにする手がかりが得られた。

海洋圏における気候変動リスクの特性評価と推計においては、現在最大の貧酸素水塊体積が存在する東部赤道太平洋において、温暖化に伴う当該体積の将来変動が、物理過程による酸素供給と有機物の分解（生物過程による酸素消費）の微妙なバランスによって決まるメカニズムを明らかにした。当該メカニズムの温暖化に対する応答の違いが、複数気候モデル間の予測結果の違い（不確実性）を生み出していることを初めて明らかにした。また、ティッピングエレメントの一つである大西洋子午面循環の地球温暖化による減衰が輸出生産にどのような影響を与えるかについて、海洋大循環に沿っての栄養塩循環像変化を視覚化することで初めて明確にした。その結果は、大西洋子午面循環が半分程度弱化しても、生物生産はやや弱くなる程度であることが示された。

また、資源量評価のためのハビタットモデルの開発、それを用いて温暖化後の資源量を評価することに成功した。また異なる気候モデル・温暖化シナリオ間でどの程度の差異があるのかについて初めて明らかにした。世界及び②本近海の水産資源量は、温暖化に伴って、最大20%程度の減少となるが、モデルやシナリオ間での不確実性も大きいことも示された。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ（5）については、メタンハイドレート約1000GtCの崩壊は、人間活動が放出する分をそれだけ減らさなければならないことを意味する。これは今世紀中など喫緊に対策をしなければ、数千年後に起こってしまうので、決して遠い未来の話ではない。同様に、海洋中の酸素が減り、海洋生態系などに深刻な影響を与えることが示された。貧酸素水塊体積や輸出生産の将来変動は、水産資源だけでなく、海洋中層のみに生息するような希少種に対する生物多様性にも影響する。の将来変動は、水産資源だけでなく海洋内部の生物多様性にも影響するため、その将来予測は水産業や生物多様性保全のための環境政策のあり方を検討する上で有益な情報になると考えられる。

また、将来のポテンシャル漁獲量の評価や高リスク海域の推定は、水産業保全のための環境政策のあり方を検討する上で有益な情報となる。開発したハビタットモデルは、高リスク生物種・領域、温暖化シナリオ・気候モデル間の結果の差異に関する包括的な情報を提供できる。得られた、資源量分布評価は、高リスク領域の特定・緩和策の影響検討など環境政策選択において大きな意義をもつ。また気候モデルによる分布の差異を評価することで、その不確実性についても明瞭化することが出来た。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka, A. Abe-Ouchi: Geophysical Research Letters, doi:10.1002/2014GL060483. (2014)
“Ocean oxygen depletion due to decomposition of submarine methane hydrate”
- 2) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: Global Biogeochem. Cycles, 29, doi:10.1002/2015GB005181 (2015).
“Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming”
- 3) Shigemitsu, M., N. Gruber, A. Oka and Y. Yamanaka: Global Biogeochem. Cycles, 30, doi:10.1002/2015GB005297 (2016).
“Potential use of the N_2/Ar ratio as a constraint on the oceanic fixed nitrogen loss”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 重光雅仁、山中康裕：月刊海洋、海洋出版株式会社、548, 281-290 (2016)
「海洋生態系モデル (Marine Ecosystem Model:MEM) の概要」
- 2) 重光雅仁：季刊環境研究、公益財団法人日立財団、182, 123-149 (2017)
「海のデッドゾーンー貧酸素水塊ー温暖化の影響と予測の不確実性ー」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 重光雅仁, Nicolas Gruber, 岡頭, 田中伸一, 山中康裕：2013年度日本地球惑星科学連合大会 (2013)
「深海底で起こる脱窒指標としての N_2^* の利用可能性」
- 2) 重光雅仁, Nicolas Gruber, 岡頭, 田中伸一, 山中康裕：2013年度日本海洋学会秋季大会(2013)
「Potential use of N_2^* as a constraint on the oceanic fixed nitrogen budget」
- 3) 山本彬友, 山中康裕, 岡頭, 阿部彩子：2013年度日本地球惑星科学連合大会, (2013)
「温暖化による全球メタンハイドレートインベントリー減少の見積もり」
- 4) M. Shigemitsu, A. Yamamoto, and Y. Yamanaka: ICA-RUS international symposium, Yokohama, Japan, (2013)
“Oxygen and carbon trends in the Atlantic over the 21st century projected by a 3D ocean biogeochemical model.”
- 5) A. Yamamoto, A. Abe-Ouchi, and Y. Yamanaka: ICA-RUS international symposium, Yokohama, Japan, (2013)
“Estimation of decrease in global inventory of methane hydrate associated with future climate change.”
- 6) A. Yamamoto, Y. Yamanaka, A. Oka and A. Abe-Ouchi: Ocean Science Meeting, Hawaii, USA,

- (2014)
- “Estimations of methane hydrate inventory loss and its potential impact on dissolved oxygen.”
- 7) M. Shigemitsu, A. Yamamoto, A. Oka and Y. Yamanaka: IMBER Open Science Conference, Bergen, Norway, (2014)
- “Climate-driven variability and anthropogenic trend of oceanic suboxia”
- 8) 重光雅仁、山本淋友、岡頭、山中康裕：日本海洋学会秋季大会（2014）
「地球温暖化が東部赤道太平洋の貧酸素水塊に及ぼす影響」
- 9) 柴野良太、山中康裕、重光雅仁：水産海洋学会研究発表大会（2014）
「北太平洋域の水産資源に対する温暖化による影響評価」
- 10) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, K. Takahashi and Y. Yamanaka: 第5回極域科学シンポジウム（2014）
- “The importance of the Antarctic Ocean on ocean oxygen depletion associated with global warming”
- 11) 山本彬友、阿部彩子、重光雅仁、高橋邦生、山中康裕：日本海洋学会2015年度春季大会（2015）
「温暖化に伴うウェッデル海における深層対流の発達と溶存酸素の増加」
- 12) 山本彬友、山中康裕、岡頭、阿部彩子：日本地球惑星科学連合2015年大会，幕張，千葉（2015）
「メタンハイドレート分解に伴う溶存酸素減少への潜在的影響」
- 13) 山本彬友、阿部彩子、重光雅仁、岡頭、高橋邦生、大垣内るみ、山中康裕：日本地球惑星科学連合2015年大会，幕張，千葉（2015）
「千年スケールの温暖化に対するウェッデル海における深層対流の発達が引き起こす全球的な溶存酸素の増加」
- 14) 柴野良太、山中康裕、重光雅仁：日本地球惑星科学連合2015年大会，幕張，千葉（2015）
「温暖化による北太平洋域の水産資源に対する影響評価 (Impacts of global warming on fish resources in North Pacific)」
- 15) Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito and Y. Yamanaka: 26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015, Praha, Czech Republic, (2015)
- “Global oxygenation by enhanced deep convection in the Southern Ocean under millennial-scale global warming”
- 16) 山本彬友、阿部彩子、重光雅仁、岡頭、高橋邦生、大垣内るみ、山中康裕：日本海洋学会2016年度春季大会，東京（2015）
「南大洋における深層循環の回復と全球的な深層溶存酸素の回復 GCMを用いた長期温暖化実験の結果」
- 17) 柴野良太、山中康裕、重光雅仁：2015年度水産海洋学会研究発表大会，釧路，北海道（2015）
「温暖化に伴う水産資源への影響評価」
- 18) 重光雅仁、ニコラスグルーバー、岡頭、山中康裕：2015年度海洋生態系モデルシンポジウム，東京大学，千葉（2015）
「海洋大循環モデルによるN₂/Ar比の再現」
- 19) 柴野良太、山中康裕、重光雅仁：2015年度海洋生態系モデルシンポジウム，東京大学，千葉

(2015)

「地球温暖化に伴う水産資源への影響評価：ハビタットモデルを用いて」

- 20) 柴野良太, 山中康裕, 重光雅仁: 日本海洋学会2016年度春季大会, 東京大学, 東京 (2016)
「温暖化に伴う水産資源への影響評価」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 環境サイエンスカフェ「シリーズ：気候変動の影響（４）」（主催：日立財団、2016年1月27日、サロン・ド・富山房 Folio、観客43名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

<受賞>

- 1) 2013年度北海道大学研究総長賞
受賞機関：北海道大学、受賞年月日：2013年3月15日
受賞対象：山中康裕（S10-3等の研究活動を通し、優れた功績を上げた教員として顕彰）

<アウトリーチ（講演等）>

- 1) 山中康裕（2013）気候変動と北海道、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)公開シンポジウム
「地球温暖化問題について考えよう！最新の科学と温室効果ガス排出量監視の取りくみ」

<アウトリーチ（委員等）>

- 1) 山中康裕, 報告書「温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート」専門家委員会委員, 環境省・文部科学省・気象庁
2) 山中康裕, 環境審議会地球温暖化対策部会長, 北海道

8. 引用文献

- 1) Piñero, E., M. Marquardt, C. Hensen, M. Haeckel, and K. Wallmann: Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine, sediments using transfer functions, *Biogeosciences*, 10, 959–975, doi:10.5194/bg-10-959-2013., 2013.
- 2) Oka, A., S. Kato, and H. Hasumi: Evaluating effect of ballast mineral on deep-ocean nutrient concentration by using an ocean general circulation model, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB3004, doi:10.1029/2007GB003067, 2008.
- 3) Schmittner, A., A. Oschlies, H. D. Matthews, and E. D. Galbraith: Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual CO₂ emission

- scenario until year 4000. AD, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB1013, doi:10.1029/2007GB002953, 2008.
- 4) Eugster, O. and Gruber, N.: A probabilistic estimate of global marine N-fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles* 26: doi: 10.1029/2012GB004300, 2012.
 - 5) Watanabe, S., et al.: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev.*, 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.k 2011.
 - 6) Cheung, W. W. L., V. W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson, D. Pauly: Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10, 235-251, 2009.
 - 7) Cheung, W. W. L., J. R. Watson, D. Pauly: Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497, 365–368, 2013.
 - 8) Milkov, A. V.: Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there?, *Earth Sci. Rev.*, 66, 183–197, doi:10.1016/j.earscirev.2003.11.002., 2004.
 - 9) Shaffer, G., S. M. Olsen, and J. O. P. Pedersen: Long-term ocean oxygen depletion in response to carbon dioxide emissions from fossil fuels, *Nat. Geosci.*, 2, 105–109, doi:10.1038/ngeo420, 2009.
 - 10) Codispoti, L. A., Jay A. Brandes, J. P. Christensen, A. H. Devol, S.W. A. Naqvi, Hans W. Paerl, T. Yoshinari: The oceanic fixed nitrogen and nitrous oxide budgets: Moving targets as we enter the anthropocene? *Scientia Marina*, 65, No S2, 2001.
 - 11) DeVries, T., Deutsch, C., Rafter, P. A, Primeau, F.: Marine denitrification rates determined from a global 3-D inverse model. *Biogeosciences*, 10, 2481-2496, 2013.
 - 12) Somes, C. J.; Oschlies, A.; Schmittner, A.: Isotopic constraints on the pre-industrial oceanic nitrogen budget. *Biogeosciences*, 20, 5889-5910, 2013.
 - 13) Bianchi, D., Dunne, J. P., Sarmiento, J. L., and Galbraith, E. D.: Data-based estimates of suboxia, denitrification, and N₂O production in the ocean and their sensitivities to dissolved O₂. *Global Biogeochem. Cy.*, 26, doi:10.1029/2011GB004209, 2012.

(6) 気候変動リスクの不確実性に関する統計学的評価

国立研究開発法人海洋研究開発機構

Julia Hargreaves

<研究協力者>

James Annan・末吉哲雄

平成24～25年度累計予算額：22,181千円（平成26年度以降、サブテーマ（4）と合併へ）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

政策決定の場では、気候変動によって人類が直面する地球規模のリスクの確率的推定が必要とされる。本プロジェクトの主な目的は、こうしたリスク評価を利用しやすい形で提供することである。これまでの研究で、大きな変化が一度起こると一世代の時間スケールでは不可逆な現象が多くあることが示されてきた。こうした特徴は、閾値を持つような気候システムの振る舞いや大気中に長期にわたって存在し続ける二酸化炭素の特性などによる。さらに深刻な問題は、気候システムの「慣性により、将来の変化を直前に避けることができないことである。したがって、生じうるリスクに早期に警告を与えることが非常に重要である。そうしたリスク評価をする際、情報の根拠となるのはモデルによる気候の将来予測である。しかし、そのためにはまずモデルの信頼性やその幅が十分に示される必要がある。我々は、確率的予測をするための基礎として、気候モデル比較プロジェクト（CMIP）のマルチモデルアンサンブルの評価に関する研究を行った。その結果、大規模なスケールではアンサンブルの信頼性は高いが、より地域的なスケールになると少し低くなることがわかった。本サブテーマでは、気候システムの変化によって生じる地球規模のリスクを考える。そのいくつかはすでに避けることができないか、あるいは一世代の時間スケールでは不可逆であるかもしれない。これまでの研究を拡張する形で、最新のマルチモデルアンサンブルを中心に解析を行い、古気候も含めた様々な気候状態を考え、不確実性を低減させていくことを目標にする。気温や降水量といった気候要素の変化に加えて、大陸氷床の融解などによる海面上昇は社会に非常に重大な影響を与える。また、気候システムの長期の安定性を決める要因である海洋による炭素の吸収も喫緊の課題である。これら2つのトピックに関しても他のサブテーマとの密接な連携や共同研究などを通して進めた。サブテーマ代表者帰国により、平成26年度以降からサブテーマ（4）と合併して研究を進めることとなった。

[キーワード]

マルチモデルアンサンブル、気候システムの慣性（コミットメント）

1. はじめに

気候変動予測には、主に排出シナリオとモデルの2つの不確実性がある。前者は化石燃料をいくら燃やすかなど基本的に政治や社会の「選択」に依存し、後者は不確実性を減らし知見を改善するという本質的に気候「科学」の課題である。こうして改善された科学的知見は、例えば、どの程度の排出量が地球の温度上昇を2℃に抑えるかなど、政策決定の基礎になる。モデルの不確実性は主に数値モデルの格子間隔より小さなサブグリッド・スケールの物理過程（たとえば雲や対

流過程など)の表現に由来する。CMIPのマルチモデルには様々な定式化が適用されているが、このアンサンブルが将来の気候変動の不確実性を正しく表現している保証はない。現在の気候モデル(CMIP3/PMIP2、PMIP=古気候モデリング相互比較プロジェクト)は、観測記録や最終氷期最盛期の復元された気候から判断すると、全球規模では比較的正確に現実を再現している。しかし、環境リスクの適切な評価には、モデルを少なくとも大陸スケールで検証する必要がある。人間社会に最大のリスクをもたらす気候変動は、急に起こる影響の大きな変化あるいは長期間持続する不可逆な変化である。気温や降水量の変化をはじめ、海洋循環の変化や氷床の融解がこれにあたる。

2. 研究開発目的

本研究では、最新のマルチモデルアンサンブルであるCMIP5/PMIP3データを様々な時空間スケールで評価し、アンサンブルが一貫した結果を示す現象に注目する。また、サブテーマ(4)と(5)と協力して中程度に複雑な地球システムモデル(EMIC)を利用して確率的予測を行う。過去の気候データを用いアンサンブルを制約し、予測ツールと気候推定の信頼度を高める。これまでの研究が最終氷期最盛期を考慮しつつも大半が近過去が中心だったのに対し、PMIP3は様々な過去の時代のマルチモデル実験データを提供するため、モデルの性能の理解を深められる。サブテーマ(4)と(5)との連携を通して、海水準変動と海洋深層循環および海洋酸性化を中心に研究する。海水準変動は重要なリスクと考えられ、今世紀末までには最大で2m、次の数世紀間には6mに及ぶといった予測もある。海洋酸性化は生物多様性や漁業にとっての懸念事項であり、惑星のアルベドの人工的管理といった地球エンジニアリングでは防ぐことができない。

3. 研究開発方法

古気候のシミュレーションは、放射強制力や他の境界条件の変化に対する気候システムの応答についてのシミュレーションに用いる気候モデルの性能を比較、評価するよい機会となる。そこで、海面温度のデータ(MARGO Project Members、2009年)に加えて包括的に収集した地表温度データ(Bartlein他、2011年)を含めて、モデルの予測能力を新たに評価した。第3次古気候モデリング相互比較プロジェクト(PMIP3)の中から現在適切なデータが利用できる2つのモデルによる実験の結果も分析に含めた。またPMIP2の完新世中期(6千年前)実験のマルチ(大気海洋結合)モデルアンサンブルと入手可能な指標データセットを利用して同様の分析を行った。

更に、最終氷期の古気候記録に見られる急激な気候変化に重点的に取り組んだ。急激な気候変化のきっかけとなり得るようなフォーシングに対する気候モデルの感度の妥当性を評価するため、(a)マルチモデル解析、(b)単一モデルによるアンサンブル(英国Bristol大学との共同研究)の二つの観点から検討を行った。

具体的には(a)マルチモデル解析では、異なる複雑さを持つ複数の気候モデルにおいて、氷床の融解水を想定した海洋への淡水供給に対する海洋循環の応答を解析した。これらの解析においては、将来予測に使われる一般的な比較的解像度の高いフル版のGCM(大気海洋結合大循環モデル)(高解像度の大気海洋陸面結合モデル)を3種類(MIROC、HadCM3、CCSM)、多くの実験が可能な比較的解像度の低い簡易GCMが1種類(FAMOUS)、そして中程度の複雑さを持つモデル(UVic)を解析対象とした。各モデルについて、産業革命前(PI:1850年)と最終氷期最大期最

盛期（LGM：Last Glacial Maximum, 21ka；17kaはLGMと似た気候条件だった）という二つの初期条件を準備し、それぞれ北大西洋への淡水供給としては3通りの条件（淡水供給なし、0.1Svで500年間淡水供給、1Svで100年間淡水供給）で実験を行った。

(b) 単一モデルによるアンサンブルについては、最新の統計学的手法を用いてモデルのパラメーター値を一定の幅で変化させ、現在の気候値を再現しつつもFovの値（海洋循環の多重解の数を決めると考えられている南大西洋南端における淡水輸送量）が小さい、あるいは負の値となるような観測と整合するアンサンブルメンバーを得た。これらのアンサンブルの淡水供給に対する応答については今後詳細な解析を行い、将来のAMOC弱体化/停止の可能性を定量化する予定である。

4. 結果及び考察

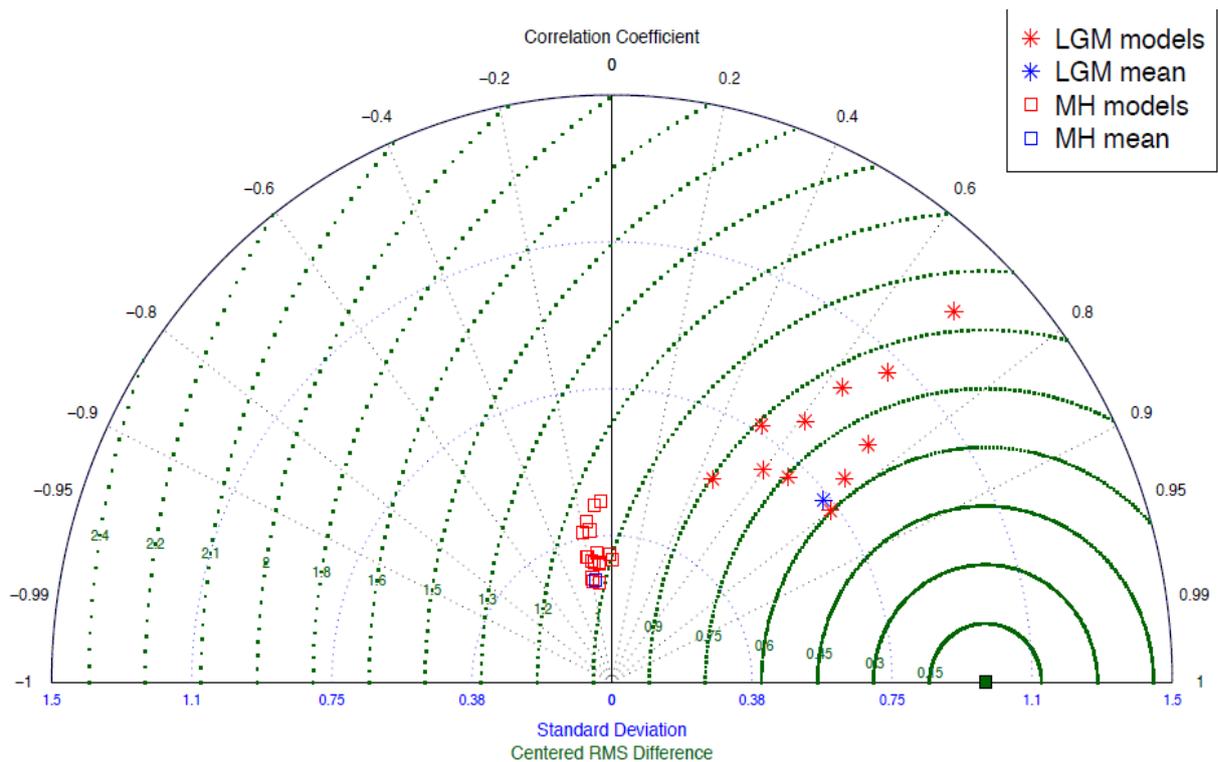
古気候の再現性のマルチモデルでの調査に関して、最終氷期最盛期の平均気温偏差および完新世中期の最も暑い月の温度偏差に関するテイラー図を作成した結果を図(6)-1に示す。図(6)-1において、原点からの距離はフィールドの標準偏差を示し、基準点からの距離はモデルとデータ間の平均二乗偏差の差の中央値を示す。またパターン相関は方位角座標により示されている。モデルの統計値は観測誤差を考慮して補正した。すべての結果はデータフィールドの標準偏差を用いて正規化した。分析結果は完新世中期に関してはモデルとデータの間には不一致があるが、最終氷期最盛期に関してはモデルに気候の状態を再現する性能がある程度あることを示しており、有望な結果が得られた。

分析の結果、最終氷期最盛期については総じて好結果が得られ、亜大陸規模の詳細な変動パターンを捉えるのは未だに難しいものの、全球的な平均的变化に加えて、全体的な海陸コントラストや極域の温暖化増幅など広範囲における変化の観測パターンをモデルにより再現できることが示唆された。対照的に、完新世中期については芳しくない結果となり、モデルは観測された変化をまったく再現できなかった。この問題の原因としては、完新世中期についての全球的な放射強制力の年平均偏差のデータが非常に少ないため、データが入手できた一部の範囲での限定的な地域の変化パターンが結果の大半を占めていたことが考えられる。しかしこのスケールでのモデルとデータの不整合に関する根本的な原因は不明である。指標の調整の信頼性が高ければ、データ-モデル間の比較における代表値の測定ミスやモデルの気候フィードバックの欠落も不整合の原因として考えられる。

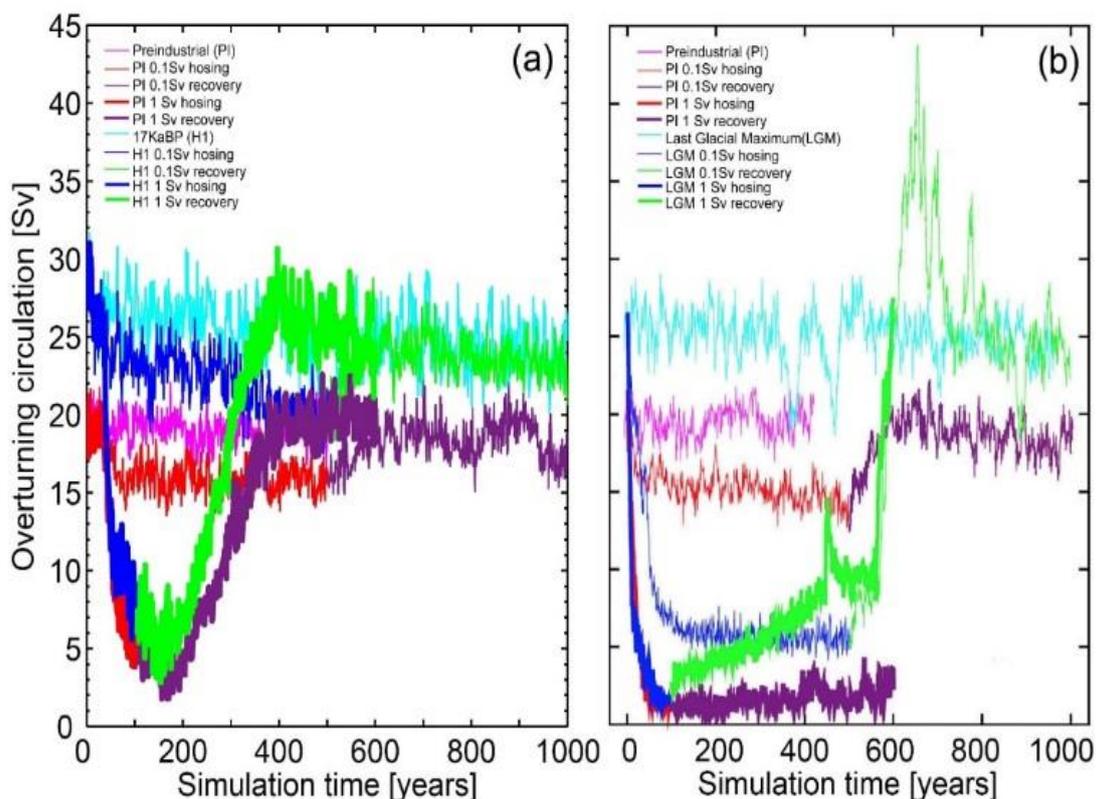
また、最近の観測データに照らして、最近の気候を対象とした結合モデルの新しいアンサンブル（CMIP5）を評価した。その結果、CMIP5の結合モデルアンサンブルは全体的に幅広い規模で信頼性が高く、CMIP3のものと極めてよく似た特徴を有していることが判明した。

北大西洋淡水供給実験に対する気候モデルの応答を調べた結果に関して、図(6)-2にはHadCM3（左図）とMIROC（右図）での実験結果の時系列を示す。初期条件ではほぼ同じ子午面循環強度を示しているにもかかわらず、淡水供給に対する応答が異なっていた。いずれのモデルも初期条件を産業革命前（PI：1850年）とした場合、0.1Svに対しては同様の応答を示すが、より大きな淡水供給が与えられた場合にはMIROCはHadCM3よりも感度が高く、AMOCの弱体化がより早い段階で生じ、淡水供給を止めて500年後も回復していなかった。初期条件を最終氷期最盛期（LGM：Last Glacial Maximum, 21ka；17kaはLGMと似た気候条件だった）とした場合、HadCM3では淡水供給に対する応答はPI条件から開始する場合と似通っているが、MIROCではPI条件と比較して明らか

により感度が高く、0.1Svの淡水供給に対してより強い応答を示していた。観測データからはAMOCによって南大西洋に入る淡水flux (Fov) は負値をとるべきと示唆されるが、一般にモデルの結果は正值を取る傾向にある (Weber et al., 2007)。HadCM3とMIROCの結果からもこの傾向と同様、PI条件とLGM条件の両方でFovは正の値になり、両モデルが単一の安定状態を持つことを示唆していた。淡水供給のフォーシングに対する現在の海洋の感度について我々の結果が意味するところを理解すべく、現在も追加の解析を継続中である。また、単一モデルによるアンサンブルについては、初期的な解析によると、いくつかのパラメータのごく小さな違いによって、似たような現在気候の再現性を持つモデル間で淡水供給に対する劇的に異なる応答が得られた。淡水は北大西洋の北緯50°~70°の領域に加えられ、シミュレーションの100年目から淡水供給を開始し、400年目に終了するよう設定した。0.3 と 0.4Sv の場合のみに急激かつ完全なAMOCのシャットダウンが起き、いずれの場合も約150年かけてAMOCが回復していた。一方、海洋表層の粗度長に関連し大気海洋間の熱・水・運動量の交換に影響するパラメータを一つ選び、その値を微小に変化させ、僅かながら変更を加えたモデルを用いた実験も行った。モデルは加えられた淡水供給フラックスに対して大幅に敏感になり、結果として二つの安定状態を持っていた。フォーシングを停止した後も、モデルはAMOCがほぼ停止した状態に留まっていた。



図(6-1) 最終氷期最盛期の平均気温偏差および完新世中期の最も暑い月の温度偏差に関するテイラー図



図(6)-2 北大西洋淡水供給実験に対する気候モデルの応答 ((a) HadCM3, (b) MIROC)。横軸は経過年数、縦軸は北大西洋の子午面循環の最大強度を示している。2種類の初期条件（産業革命前と最終氷期最盛期）と3種類の淡水供給条件（供給無し、0.1Sv、1Sv）による結果の違いを示す。色はそれぞれ実験の種類を示し、両モデルで共通である。淡水供給量1Svの場合は淡水供給（hosing）を100年間行った後、淡水供給なしで500年間実験を継続（recovery）した。同様に0.1Svの場合は500年間hosingを行った後で500年間recoveryを行った。hosingとrecoveryは異なる色で示している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

将来の気候の不確実性の減少につながった。また、過去の気候変動情報に記録されている、非常に速い（短い時間スケールの）気候変動について、何がそれらの急激な温暖化および寒冷化を駆動しているのかは現在も未解決の課題であるが、我々の研究はその解明に貢献している。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本成果によって気候変動予測の不確実性を定量化し、その低減を試みることは、政策上も重要で

ある。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(2) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi : Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2012GL053872, 2012
“Can the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity?.”
- 2) J. C. Hargreaves, J. D. Annan, R. Ohgaito, A. Paul, and A. Abe-Ouchi : Climate of the Past, Vol.9, 811-823, 2013
“Skill and reliability of climate model ensembles at the Last Glacial Maximum and mid-Holocene.”
- 3) T. Yokohata, J.D. Annan, M. Collins, H. Shiogama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M. Abe, M.J. Webb and J.C. Hargreaves:, Climate Dynamics, 41, 2745-2763, doi:10.1007/s00382-013-1733-9, 2013
“Reliability and importance of structural diversity of climate model ensembles.”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) J. Hargreaves, K. Keller and T. Edwards: Eos, Transactions American Geophysical Union, 94(32), 280, 2013
“Examining Risks, Extreme Events, and Abrupt Changes.”

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

9. 引用文献

必要に応じて文中に記載した。

Identification of Critical Climate risks by Climate Change

Principal Investigator: Shinjiro KANAE

Institution: Tokyo Institute of Technology
2-12-1-M1-6 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550
Japan
Tel: +81-3-5734-2190 / Fax: +81-3-5734-3577
E-mail: kanae@cv.titech.ac.jp

Cooperated by: Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, University of Tsukuba, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Hokkaido University.

[Abstract]

Key Words: Critical, Tipping elements, Climate change risks, Characteristic evaluations, and Extreme phenomenon

Identification of critical risks by climate change is one of the crucial process for climate change risk management. Theme 3 of S-10 examined climate change risks. Subtheme (1) had done the risk analysis of geophysical tipping elements. Using range of tipping point of tipping elements provided by previous studies including Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report, we analyzed relation with emission scenario (RCP) and S-10 strategic scenario and made it possible to provide both qualitative and quantitative information to society. Moreover, we analyzed impact assessments of heavy rainfall, flood/drought, and Asian monsoon on climate change for evaluation of risk analysis method we used. Subtheme (2) performed risk analysis for several important sectors (such as flood risk, coastal exposure, food and energy risk, tipping risk) and overall analysis for Theme 3. Our results of flood risk reveal that the global exposure to floods would increase depending on the degree of warming, but interannual variability of the exposure may imply the necessity of adaptation before significant warming. The coastal exposure indicated that exceeding tipping point for Greenland ice sheet would largely increase coastal exposure in millennial scale, implying significance of limiting temperature increase below tipping point. As overall analysis for Theme3, we created risk-matrix which included levels of confidence and significance of the risks in association with a comprehensive map of the risks under climate change created by Theme 1 of this project. Subtheme (3) dealt with health impact of climate change. The outcome included heat-related excess mortality, undernutrition, malaria, diarrheal diseases and mortality from coastal flooding. In addition, labor productivity loss due to heat stress avoidance was also addressed. The largest impact was attributable to undernutrition, with more the

100,000 deaths/year in 2050s, followed by heat-related mortality and malaria. Diarrhea and malaria mortality will decrease, but climate change will hinder the trend and should be avoided. Subtheme (4) investigated the risks in the cryosphere and tipping elements which associated with climate change. We found: the intrusion of warm water onto the continental shelves, linked to sea ice production and climate change, is crucial in determining the basal melt rate of Antarctic ice shelves, the degree of Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) weakening is sensitive to atmospheric CO₂ concentration, and dissolved oxygen in the deep ocean potentially recovers and overshoots after the initial decrease. In subtheme (5), the following risks in the ocean were investigated associated with climate change in the view-point of mid and longtime ranges, and we found: large part of methane hydrate under the ocean floor will collapse and dissolved oxygen will depress on a timescale of thousands of years, impact of THC on biological production was estimated to relatively small, and fishery resources on 2080s in the world and around Japan were estimated to 10-20% decreases compared with the present levels. Our theme results could be helpful to assist policy choices on which temperature target would be rigorous to adopt and what risks should be considered for adaptation and mitigation against climate change.