

### 3. 評価結果 (分析ケース別・その他)

#### 1) 分析ケース別

##### (1) 影響評価

##### ① 前提条件

##### a. 人口・GDP のダウンスケーリング

将来の人口や GDP を空間詳細な単位毎に推計することは、気候変動への適応や緩和を都市・地域スケールで議論する際に重要となる。IPCC は Sustainable (SSP1)、Middle of the Road (SSP2)、Fragmentation (SSP3) といった複数シナリオ下での将来人口・GDP を推計している。しかしながら、SSP は国別シナリオであり、それらを都市・地域スケールの議論に応用するためには、より空間詳細な単位毎にダウンスケール (空間詳細化) する必要がある。

そこで本研究では、まず人口・GDP をダウンスケールするための手法を新規開発する。次に、その手法を用いて SSP1~3 の国別人口・GDP シナリオ (2100 年まで) を 0.5 度グリッド別にダウンスケールする。

ダウンスケールの精度は、一般に「データ (我々の場合人口・GDP) の空間詳細な分布を説明する補助的データが活用できたかどうか」に強く依存する。そこで本研究では、人口・GDP の空間分布を特に良く説明すると示唆される i) 都市別人口 (出典: SEDAC: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/>)、ii) 都市領域 (出典: MODIS: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>)、及び iii) 主要道路網 (出典: Natural Earth: <http://www.naturearthdata.com/>) を活用しながら 2100 年までのダウンスケールを実施することとした。

補助的データのうち、i) 将来の都市別人口については、各都市の人口成長のシェアが一定という仮定の下で、将来の国別都市人口シナリオ (SSP) をダウンスケールすることで推計した。また各都市の成長/衰退が周辺地域に及ぼす影響を考慮するために、人口規模の大きな都市に近接している場合に値が大きくなる iv) 都市化ポテンシャルも補助的データとして用いることとした。2080 年の都市化ポテンシャルを図 3-1-1-①-a\_1 にプロットした。この図より、例えば SSP1 では北京周辺やロンドン・パリ周辺がより高い都市化のポテンシャルを持つことや、SSP2 と SSP3 の都市化ポテンシャルは比較的類似した分布傾向を持つことなどが確認できる。

補助的データを活用したダウンスケール手法は多岐にわたる。ここでは精度の良さが数多くの研究で示されてきた *dasymetric mapping* と空間統計手法 (人口・GDP の空間構造を明示的にモデル化して推計を行う手法) を各々適用し、それらのアンサンブル平均 (各モデルから得られた推計結果の加重平均のこと。加重は国レベルで評価した各モデルの精度を元に与えた) をとることでダウンスケール推計値を与えることとした。なお、アンサンブル平均をとることは、ダウンスケールの不確実性の影響を抑える有効な手段の一つとして知られている。

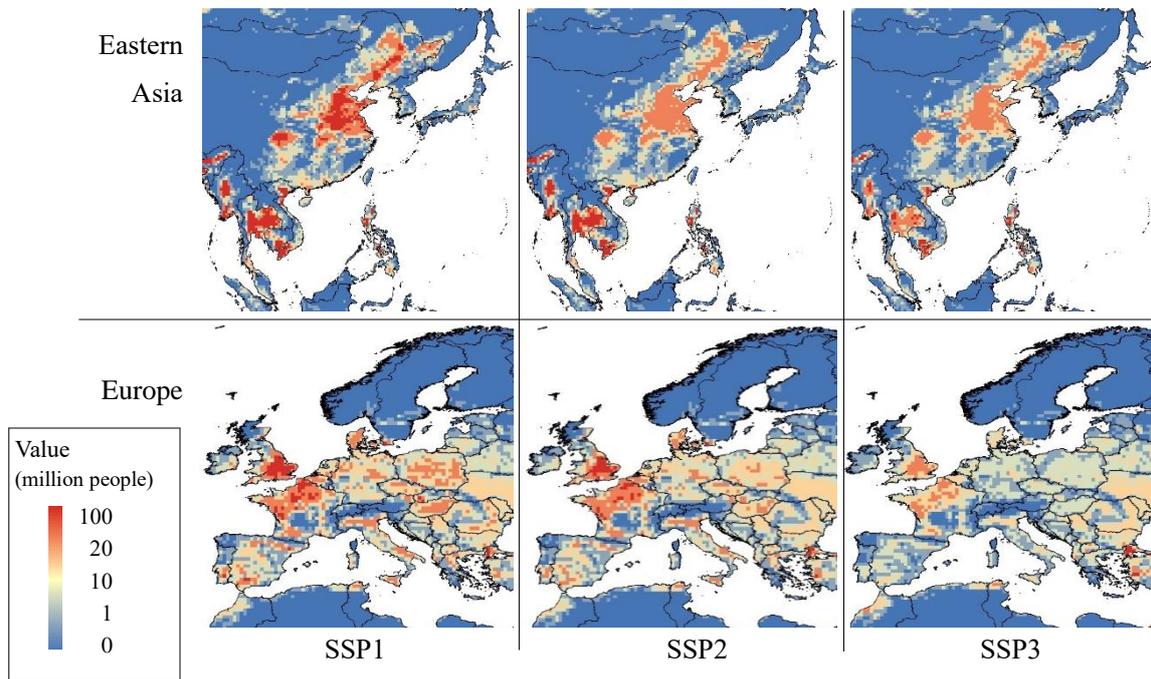


図 3-1-1-①-a\_1 東アジアとヨーロッパでの都市化ポテンシャル (近隣都市の人口の加重和。重みは各都市までの距離の指数減衰関数で与えた)の推計結果 (2080 年)

SSP1～3 の国別人口シナリオを世界 5 地域区分 (図 3-1-1-①-a\_2) し、各地域別に集計したものを図 3-1-1-①-a\_3 に、ダウンスケール結果を図 3-1-1-①-a\_4 に示す。グローバル化シナリオである SSP1 ではヨーロッパの主要都市部の人口が大きくなっており、グローバル化に伴う都市間交流がヨーロッパの都市人口を増加させるとの示唆を得た。一方で、非グローバル化 (fragmentation) シナリオである SSP3 では、中央アフリカの主要都市部やインド全域で人口がより大きくなっていることが確認できる。以上のように、人口の空間分布はシナリオに応じて変化することを確認した。

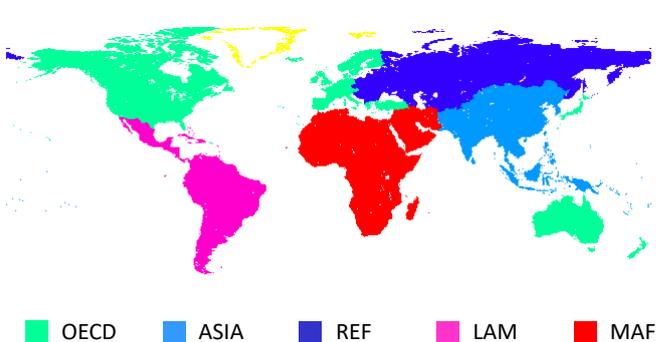


図 3-1-1-①-a\_2 SSP シナリオの世界 5 地域区分 (3 章～5 章の対策評価における世界 5 地域区分も同じ 5 地域区分を用いている。OECD、ASIA(アジア)、REF(東欧・旧ソ連)、LAM(ラテンアメリカ)、MAF(中東・アフリカ))

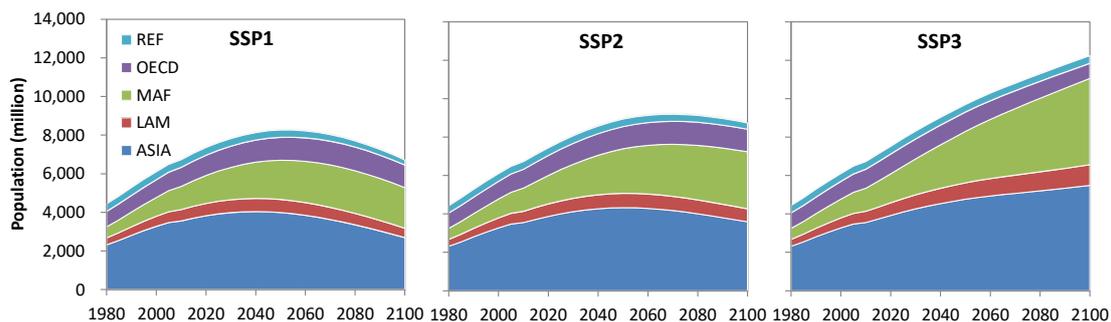


図 3-1-1-①-a\_3 : SSP 地域別人口シナリオ  
 (SSP Database Version 0.9.3, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)

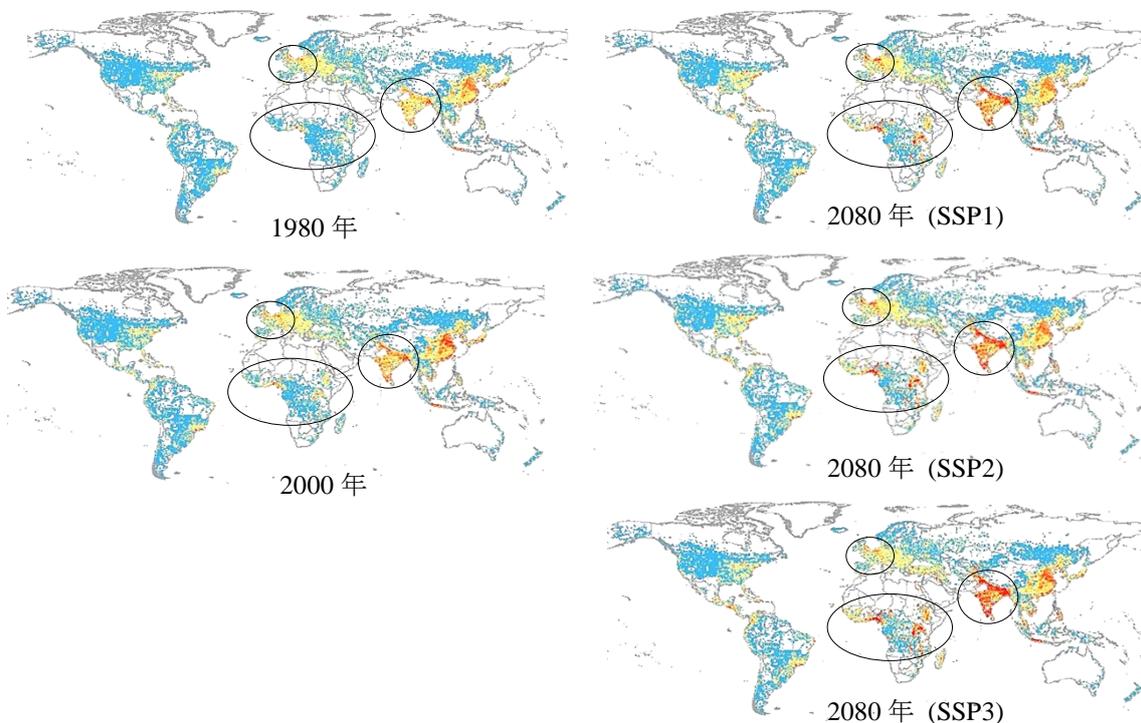


図 3-1-1-①-a\_4 人口シナリオの推計結果

次に、人口と同様に SSP1~3 の国別 GDP シナリオを世界 5 地域別に集計したものを図 3-1-1-①-a\_5 に、そのダウンスケール結果を図 3-1-1-①-a\_6 に示す。各 SSP 下で GDP 推計結果には、大きな差異が見られた。SSP1 では、現状ではそれほど経済成長していない非都市部も含めた広域で、より大きな経済成長がみられた。この傾向は、アジア/アフリカで特に顕著となった。

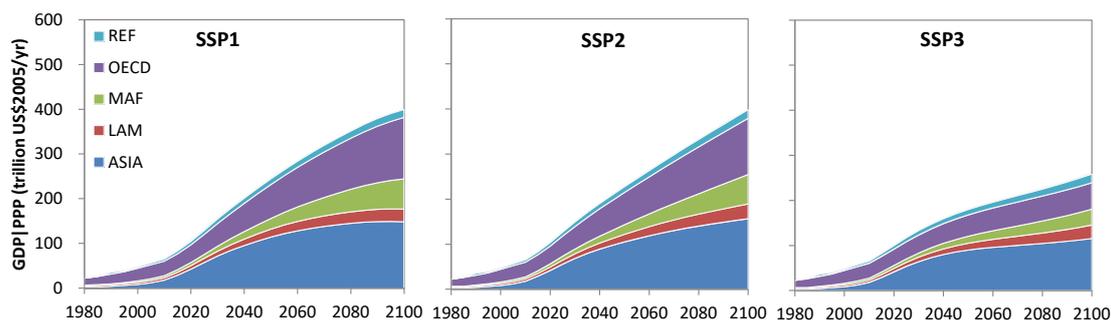


図 3-1-1-①-a\_5 地域別 GDP シナリオの推計  
(SSP Database Version 0.9.3, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)

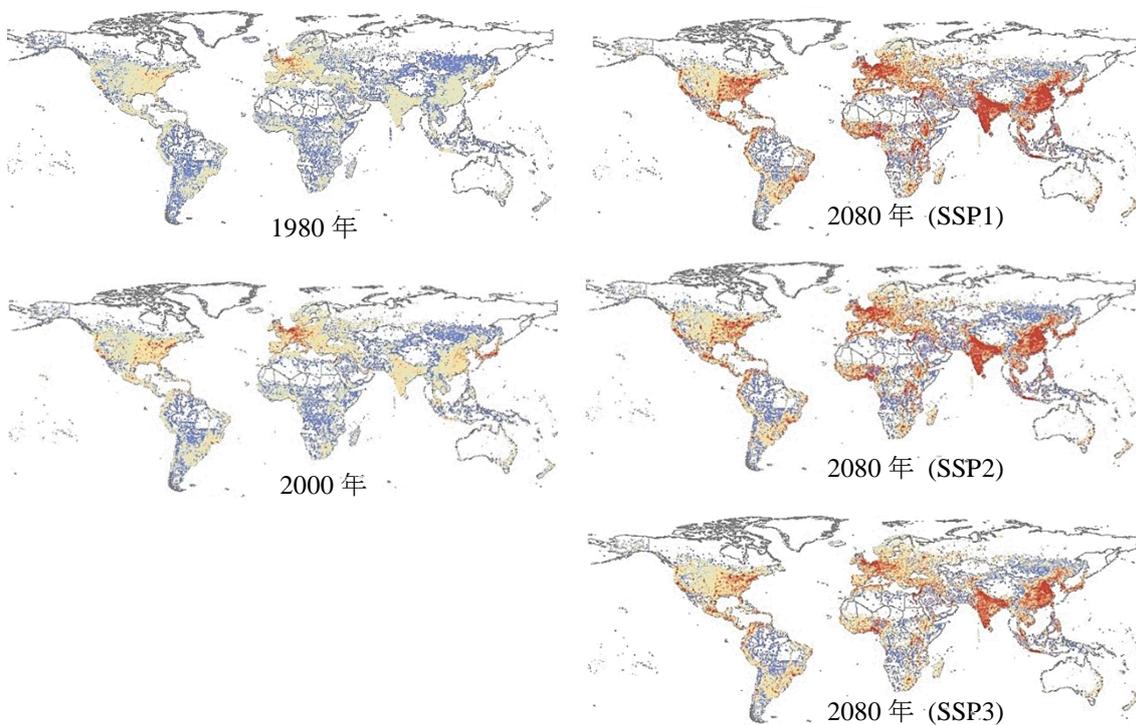


図 3-1-1-①-a\_6 GDP シナリオの推計結果

なお、このようにして作成された人口シナリオは、健康被害のリスク分析にあたっては、グリッド別の熱ストレス死亡・マラリア流行リスクの変化を計算するために用いられた。水文水資源部門については、一人当たり水資源量の計算のために用いられた。洪水被害については、洪水被害人口の変化の計算のために用いられた。また、GDP シナリオは、作物収量計算の際に技術水準の説明変数として用いられた。また、洪水被害については、洪水被害資産額の変化の計算のために用いられた。

b. 土地利用のダウンスケーリング

陸域統合モデルにおける土地利用は統合評価モデル AIM から得られる食料、飼料等の農

産物の需要量と、人口・GDP が外生変数となっている。モデルの基本は、農産物に対して収穫逓減の仮定を設定した他国二財のリカード国際交易モデルである。収穫一定のリカードモデルでは、比較優位により生産は特化するが、収穫逓減の仮定の下では生産量が増加するに伴って優位性は低下するため完全に特化することは無い。この収穫逓減は地理的条件によって発生する。生産量を増加させるために農地面積を拡大すると、採算性の低い土地での農業となるからである。農業の地理的条件には土地の規模に依存する M 過程 (M は「機械」が由来) と呼ばれるものと、土地の規模によらない BC 過程 (B は「生物」、C は「化学」が由来) がある。BC 過程は農作物の成長に関する要素、つまり単位面積当たりの収量と関連する。この単位面積当たりの収量の評価は、PRYSBI2 によって行われた、全世界の収量分布を用いている。一方、M 過程については一人当たり GDP、農産物価格および土地の傾斜角に依存するとしている。これは一人当たり GDP が高くなる、もしくは農産物価格が低下すると大規模な農業を行わなければ採算が取れなくなるが、傾斜角の大きい土地では大規模化が困難となる。そのため傾斜地では採算性が低下する。農地面積が拡大すると、単位面積当たりの収量が低い土地や、傾斜角の大きい土地での農業がおこなわれることになる。この影響を収穫逓減の効果としてモデルに組み込んでいる。そのため、農産物価格や生産量については、統合評価モデルの地域ごとに予測される。地域ごとに求められた農地面積は、収穫逓減と同じ論理に従い、単位面積当たり収量、傾斜角によって空間配分される。この空間配分のためのパラメータは、現在の農地分布と、穀物価格、GDP、人口、土地の傾斜角によって求めている。そのため、経済発展によって傾斜度が大きい地域での農業がおこなわれなくなり、平坦で単位面積当たりの収量が高い土地での農業が残ることになる。また、全世界の経済成長率と比較して低い経済成長率の地域は農地面積が拡大するという特徴を有する。本モデルで使用した入力データ、モデルパラメータは次の通りである。

表 3-1-1-①-b\_1 入力データおよびモデルパラメータ

	変数	作成	備考
入力データ	人口	AIM	RCP、SSP シナリオごとに作成。
	GDP		
	農作物需要		
	農作物収量分布	PRYSBI2	RCP、SSP、気候モデルの結果を利用。
パラメータ	農業適正度		農地分布、傾斜角 (1km メッシュ)、農作物収量分布 (PRYSBI2: 0.5 度メッシュ)、人口、GDP (AIM17 地域) を使用して作成。

今回、作成した土地利用シナリオは、GDP や人口などの基礎的な経済指標のほかに、農作物需要が必要となるため、統合評価モデルによって作成されたシナリオとのうち、緩和シナリオを除いた RCP-SSP シナリオとなる。その一覧を示す。

表 3-1-1-①-b\_2 作成された土地利用シナリオ

	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
SSP1	○	○	—	—
SSP2	○	○	○	—
SSP3	—	○	○	—
SSP4	○	○	—	—
SSP5	○	○	—	—

この 11 種類の社会経済シナリオに対し、農作物収量モデル PRYSBI2 が使用した 5 種類の地球システムモデル (GFDL、HadGEM、MIROC、IPSL、NorESM) の気候データに基づく農作物収量分布ごとにシナリオの作成を行った。このため、55 種類の土地利用シナリオとなる。

作成された土地利用シナリオは、全世界の農地面積については統合評価モデルによる全世界の農作物の需要に強い影響を受ける。その一方で、農地の分布については、各地域の経済 (GDP および人口) の発展や、気候変化に伴う農作物の収量分布に強い影響を受ける。この様子を次の図に示す。

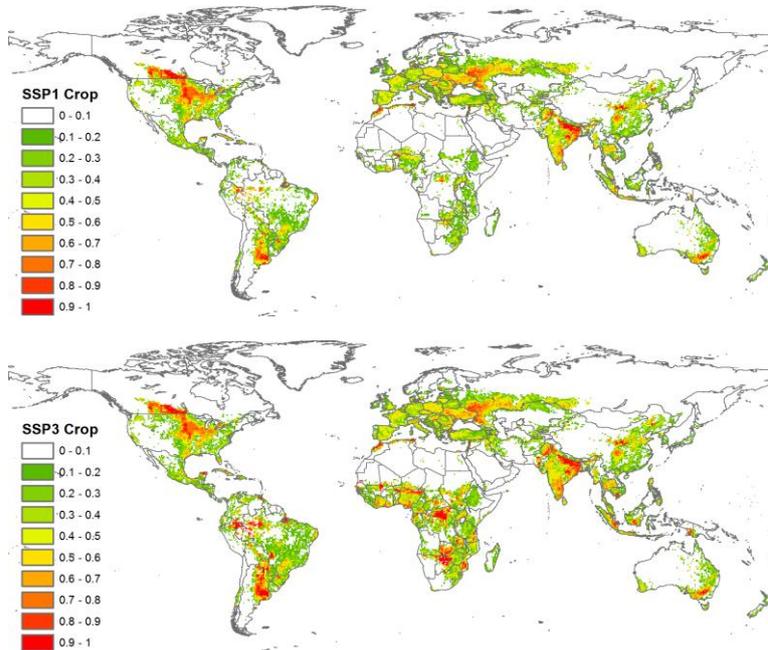


図 3-1-1-①-b\_1 SSP1 と SSP3 における農地分布の違い (上: SSP1、下: SSP3。ESM は MIROC、RCP は 4.5 を使用)

SSP シナリオにてその不確実性が大きい広い発展途上国においては、農業の国際競争力に影響を与えるため大きな不確実性を伴うものとなる。一方、先進国ではその差は大きくないことがわかる。ただし、不確実性については、気候モデルの差や、放射強制力の違いによる農作物収量分布も大きな影響を与えている。

なお、このようなして作成された土地利用シナリオは、陸域生態系のリスク分析では、農地面積シナリオだけでなく、森林等のその他の土地利用のシナリオもあわせて、純一次生産、土壌炭素ストック、植生炭素ストック、土壌流出、森林火災リスク等の計算に用いられた。

## ② 項目別結果

### a. 農業被害

#### <背景>

世界における人口増加とそれにより推測される食肉需要の増加、そしてバイオ燃料需要の増加を背景に、今世紀半ばから今世紀末にかけて穀物需要の大幅な増加が見込まれている。機関による差はあるものの世界の穀物需要量は 2050 年に 2005 年の約 2 倍になると見込まれている。収穫面積の増加なしにこの供給目標を達成するためには年あたり 2.4%の生産性増加が必要だが、過去 20 年間 (1989~2008 年) に達成できた主要作物 (トウモロコシ、コメ、ダイズ、コムギ) の生産性増加率は 0.9~1.6%/年と目標値を下回っている。こうした逼迫傾向にある長期の穀物需給の下で、気候変動が穀物生産に与える影響をより定量的に見積もり、想定される技術発展が供給目標を達成するうえで十分かどうかを検討する必要がある。

#### <本項目の重要性>

農業は人間に食料を供給するだけでなく、飼料穀物を一部の畜産に提供するほか、一部の国ではエネルギー原料の供給源として機能している。穀物、とりわけトウモロコシ、コメ、コムギから得られるカロリーは実に農業由来カロリーの 57%に相当する。また、開発途上国では収入の大部分を農業に依存するケースが多く、気候変動がもたらす農業への悪影響は自給的な生産者の収入を悪化させ、持続可能な発展、貧困・貧栄養状態の改善を遅らせる可能性がある。近年、開発途上国でも食料輸入量が増加傾向にあり、農業への気候変動リスク影響は世界的に取り扱う必要が高まっている。そこで、主要穀物であるトウモロコシ、コメ、ダイズ、コムギについて、その生産性の将来変化について検討を行った。

#### <評価方法>

これまでに構築した全球作物生産性データベースに基づいてパラメータ値を推定することで、特に過去の生産性変動の再現に優れた作物生産性環境応答モデル (PRYSBI2) を用い、気候シナリオおよび社会経済のシナリオを入力条件として将来の生産性変化を推計した。推計は、温室効果ガス排出経路 (4 シナリオ: RCP 2.6、4.5、6.0、8.5)、気候モデル (5GCM: GFDL-ESM2M、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、HadGEM2-ES、NorESM1-M)、社会経済 (5 シナリオ: SSP 1~5) に関する 100 ケースについて実施した。ただし、ここで図示するのは SSP1~3 についてである。

これまでに開発してきた、作物別の生産性が約 120km のメッシュごとに過去 25 年間

(1982～2006 年) について利用可能な作物生産性データベースを用いて、改良された広域作物生産性環境応答モデル (PRYSBI-2.2。以下、モデルと呼ぶ) のパラメータのうち、品種や栽培管理などにより特に不確実性が高いと考えられたパラメータ値の確率分布をメッシュごとにマルコフ連鎖モンテカルロ法で推定し、パラメータ値の不確実性を考慮しつつモデルのキャリブレーションを行った。次に、4つの排出シナリオとバイアス補正した5つの気候モデル出力値、5つの社会経済シナリオに対応する栽培技術の変化をモデルに入力し、現在、作物が栽培されている地域を対象に、メッシュ別に将来の作物生産性を推計した。技術水準はモデルの中で使用されている技術係数値で代表され、高温や低温、乾燥、肥料や農薬の不足などによる作物生長の阻害を緩和する。将来の技術係数値を推計する際には、過去の国別 GDP と、灌漑設備率などのキャリブレーションにより得られた技術係数値との経験的な関係を SSP 別の GDP シナリオに適用した。

作物生産性と全球平均気温との関係を整理する際には、一人当たり GDP 水準が技術発展や食料需給を通じて国別の作物生産性に影響を与えることから、他のセクターのように矩形で示した地域ではなく、作物ごとに主要生産国 4 か国を選択して解析を行った。さらに、3つの適応策 (栽培期間を気候変化に合わせて変更できる品種の選択 (品種選択; Adapt)、前後 1 ヶ月の間での最適な播種日の選択 (播種日選択; Change Planting Day)、必要な灌漑の常時実施 (灌漑強化; Maximum Irrigation)) を仮定し、気候変動の影響、特に悪影響がどの程度改善されるかを他の幾つかの実験と併せて定量的に評価した。

#### <指標の一覧>

1. 作物生産性: 対象作物の単位面積あたり生産量 (収量) を示す。これまでの作物生産量の増加の大部分は生産性の向上により達成されてきたこと、および栽培面積の拡大が難しい地域では、生産量を増加させる方策を生産性向上に頼らざるを得ない。こうした理由から、農業・穀物生産分野では最も重要な指標である。選択肢第一版と異なるのは、コムギを春コムギと冬コムギに分けて解析したことである。

また、適応策を行わず各 GCM/RCP/SSP シナリオに忠実に添った場合 (Normal) に比べ、栽培期間を気候変化に合わせて変更できる品種を選択・変更した場合 (Adapt)、前後 1 ヶ月の間で、最適な播種日を選んだ場合 (Change Planting Day)、必要な灌漑を常時行った場合 (Maximum Irrigation) の予測を表示し、その改善効果を示した。また温室効果ガス濃度を 2000 年値に固定した場合 (CO<sub>2</sub> Constant) および GDP を 2000 年の値に固定した場合 (GDP Constant) も併せて表示し、適応策の有効性を評価した。

a-1. 作物生産性

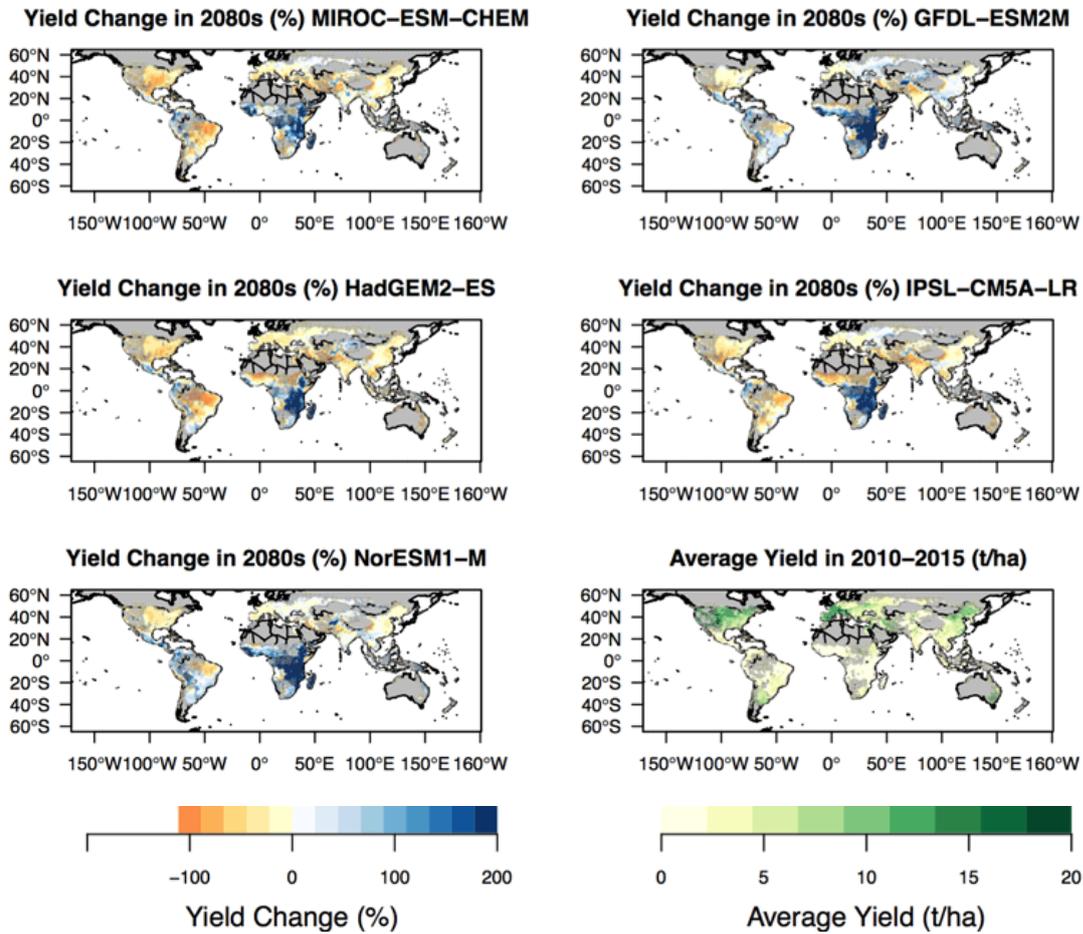


図 3-1-1-②-a\_1\_1 トウモロコシについて、図右下に示す生産性の現在 (2010~2015) 平均値に対する RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代の生産性変化率で、灌漑の程度は現在推定されるものと同程度を仮定した。現在年代において、収穫面積がゼロとされている地域は図示していないほか、現在収量の推定値が観測収量の変動をうまく捉えることができていないことが分かっている地域 (RMSE が収量絶対値の 50%以上) は灰色の網掛けをしている。

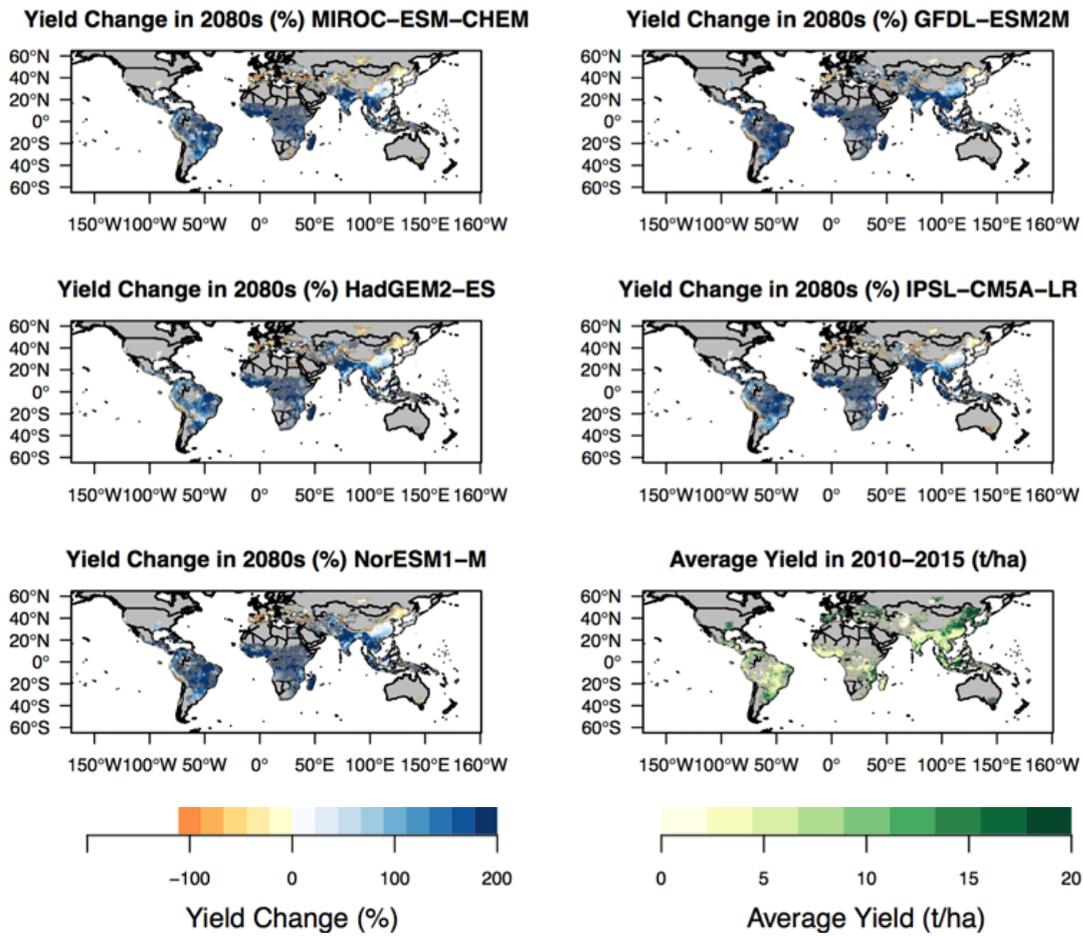


図 3-1-1-②-a-1\_2 コメについて、図右下に示す生産性の現在 (2010～2015) 平均値に対する RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代の生産性変化率で、灌漑の程度は現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。

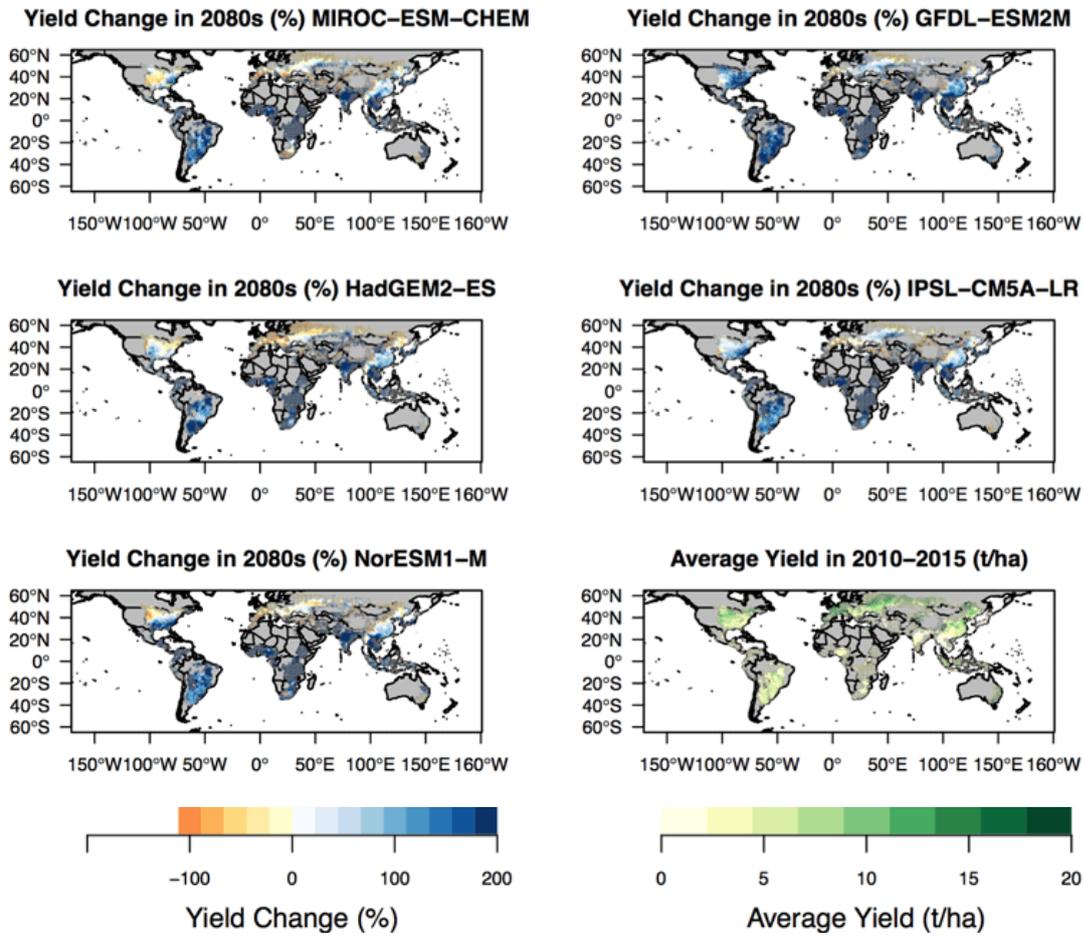


図 3-1-1-②-a-1\_3 ダイズについて、図右下に示す生産性の現在 (2010~2015) 平均値に対する RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代の生産性変化率で、灌漑の程度は現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。

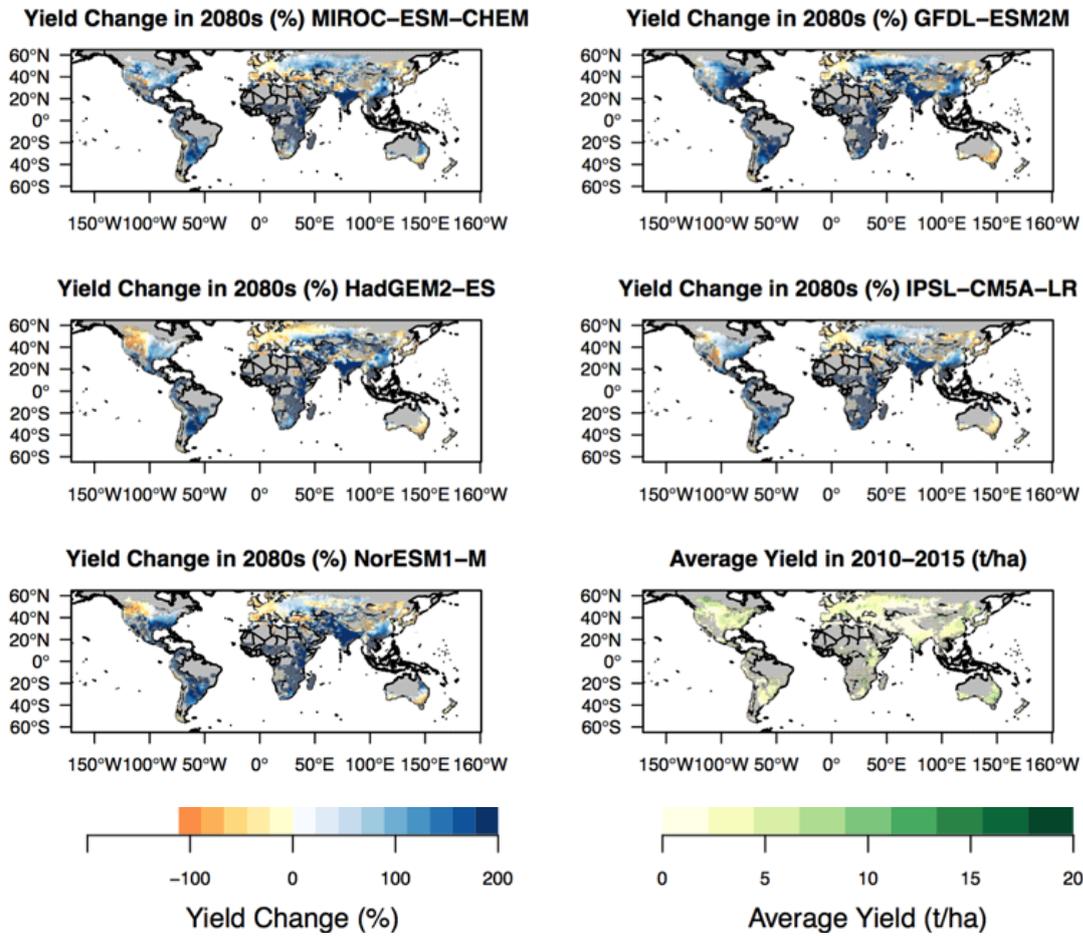


図 3-1-1-②-a-1\_4 春コムギについて、図右下に示す生産性の現在 (2010~2015) 平均値に対する RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代の生産性変化率で、灌漑の程度は現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。

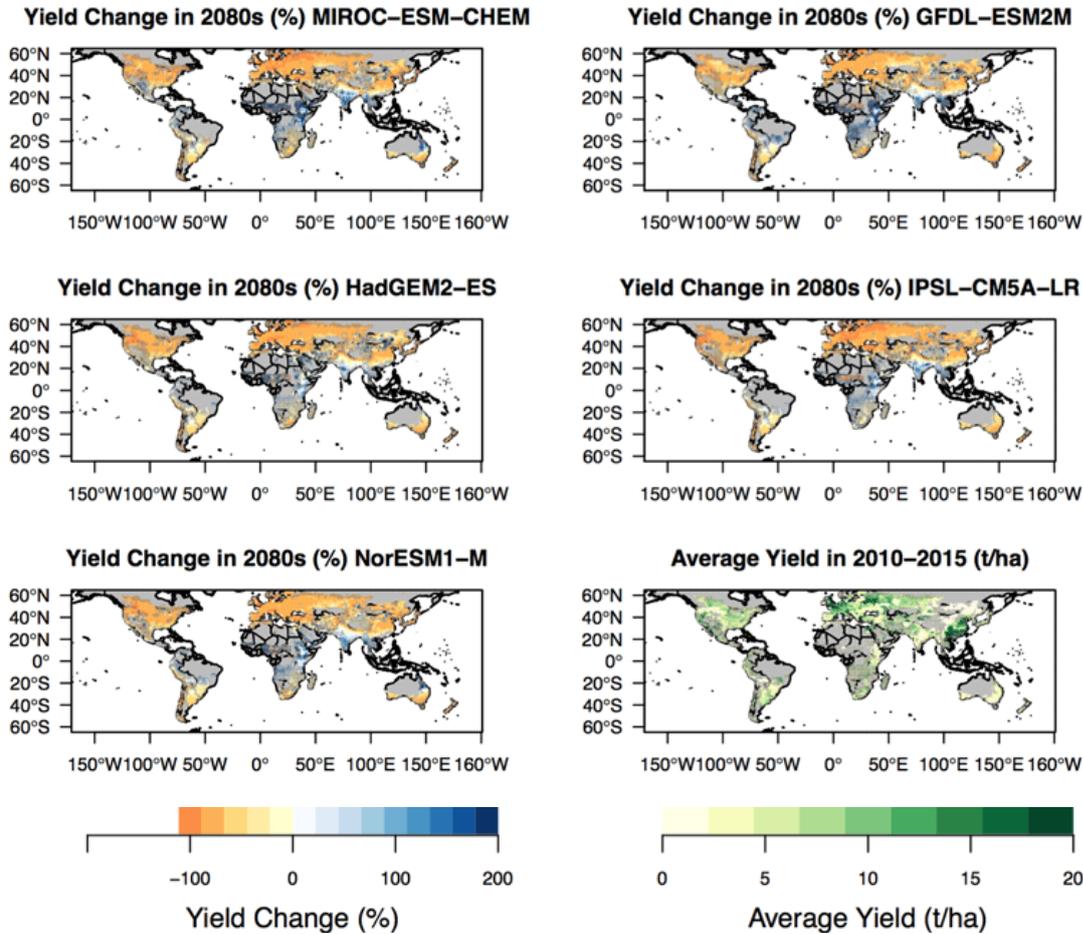


図 3-1-1-②-a-1\_5 冬コムギについて、図右下に示す生産性の現在 (2010～2015) 平均値に対する RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代の生産性変化率で、灌漑の程度は現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。

いずれの作物でも、RCP8.5/SSP2 シナリオでは、多くの場合、主要生産国である米国で生産性が低下し、アフリカの多くで増加する。南米の生産性変化は気候モデル間の不確実性が大きい場合がある。

いずれの作物でも現在年代の生産性は、先進国、中国および中・高緯度地域で高い傾向にある (図 3-1-1-②-a-1\_1～5) が、2080 年代頃の生産性の変化は作物により異なる。RCP8.5/SSP2 シナリオでのトウモロコシ生産性は、米国やインド、欧州等で低下するが、アフリカと南米の一部で増加が見込まれる (図 3-1-1-②-a-1\_1)。気候モデル間の差異は、中南米で大きい。コメ生産性は中央アジアで低下するが、中国南部～東南アジア～南アジアにかけての地域、南米およびアフリカ等、世界の栽培地域の多くで増加する (図 3-1-1-②-a-1\_2)。気候モデル間の差異はおおむね小さいが、GFDL-ESM2M では他の GCM と若干、異なる傾向にある。ダイズ生産性は米国と東欧の一部で低下する可能性があるものの、アフリカ、南米、インド、東南アジアやオーストラリアでは増加する (図 3-1-1-②-a-1\_3)。中国では、気候モデル間の差異が大きい。コムギのうち春コムギの生産性は、中国でモデル間の差異が大きい

がアフリカ、インドおよび南米では一致して増加する (図 3-1-1-②-a-1\_4)。ただし春コムギの栽培面積や収量は、冬コムギに比べて小さく、栽培地も限られる傾向にあることに留意が必要である。冬コムギの生産性は、東南アジア、インド南部、南米の一部およびアフリカで増加する場合があるものの、北米、欧州～中央アジア、南米南部等の主産地で大きく低下する (図 3-1-1-②-a-1\_5)。中国やオーストラリアについては、気候モデル間の差異が大きい。ここで冬コムギでは、過去の解析において気候変動と農業技術係数 (農業の技術の程度を表すパラメータ) との関係が明確でなかったため、気温上昇に伴う生産性の増加がない。従って、気候変動の影響を技術係数の増加によって補完できていないことに、留意が必要である。

なお、ここでは SSP2 の結果を示したが、SSP1 ではアフリカでのトウモロコシ等、開発途上国でより大きな生産性の増加が見られた。これに対し SSP3 では、SSP2 に近い結果となっている。いずれにせよ、生産性変化の空間パターンは SSP 間でほぼ同じである。

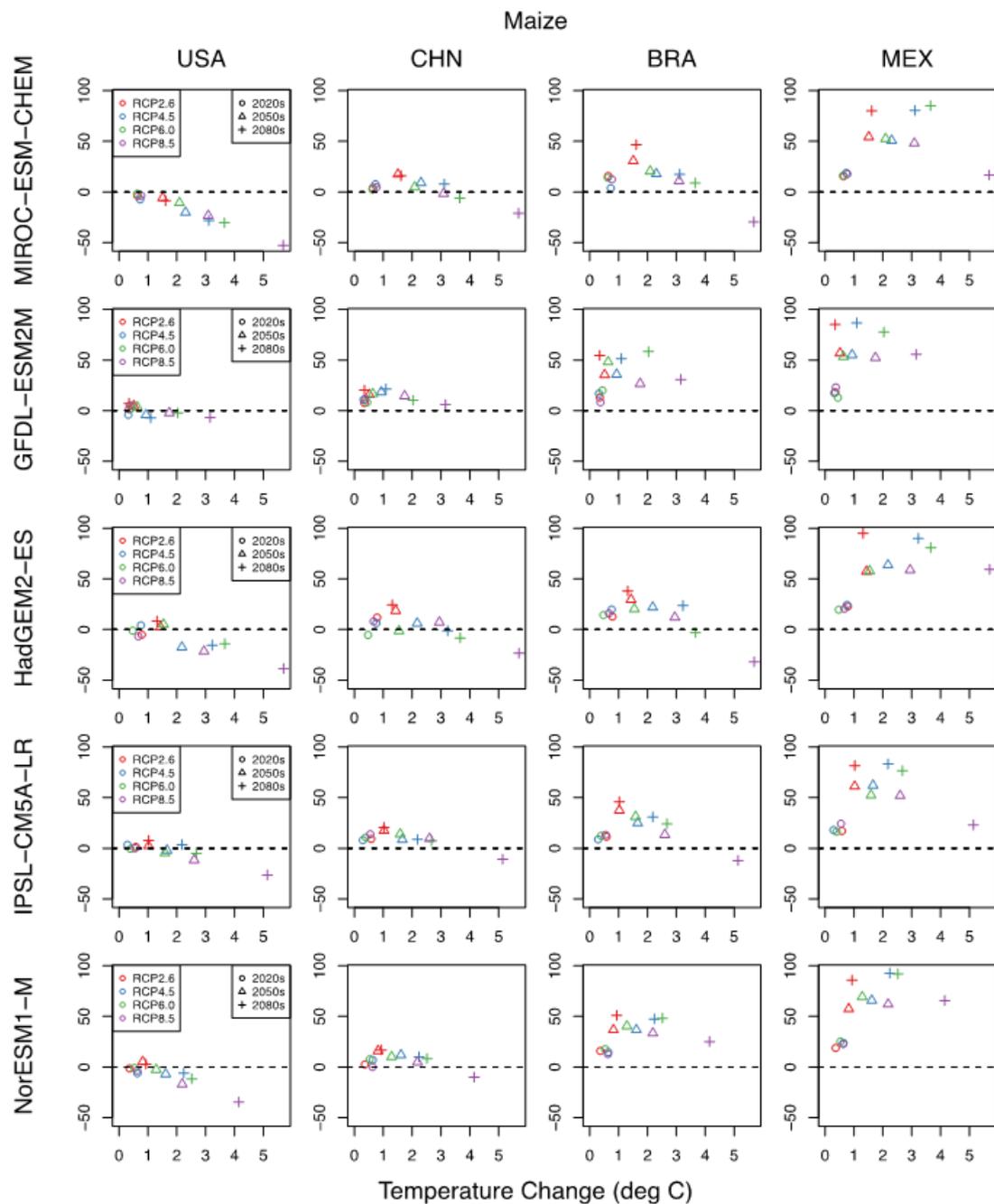


図 3-1-1-②-a\_1\_6 主要生産国におけるトウモロコシ生産性の将来変化率 (%) と各 GCM の全球平均気温上昇度 (°C)。国別に 2000 年代の収穫面積で重み付け平均した生産性の各年代平均値 (○は 2020s, △は 2050s, +は 2080s) を、RCP 別 (赤 = RCP2.6、青 = RCP4.5、緑 = RCP6.0、紫 = RCP8.5) に示している。縦並びは気候シナリオを得た 5 つの GCM を、横並びは国別で左から米国、中国、ブラジルおよびメキシコである。

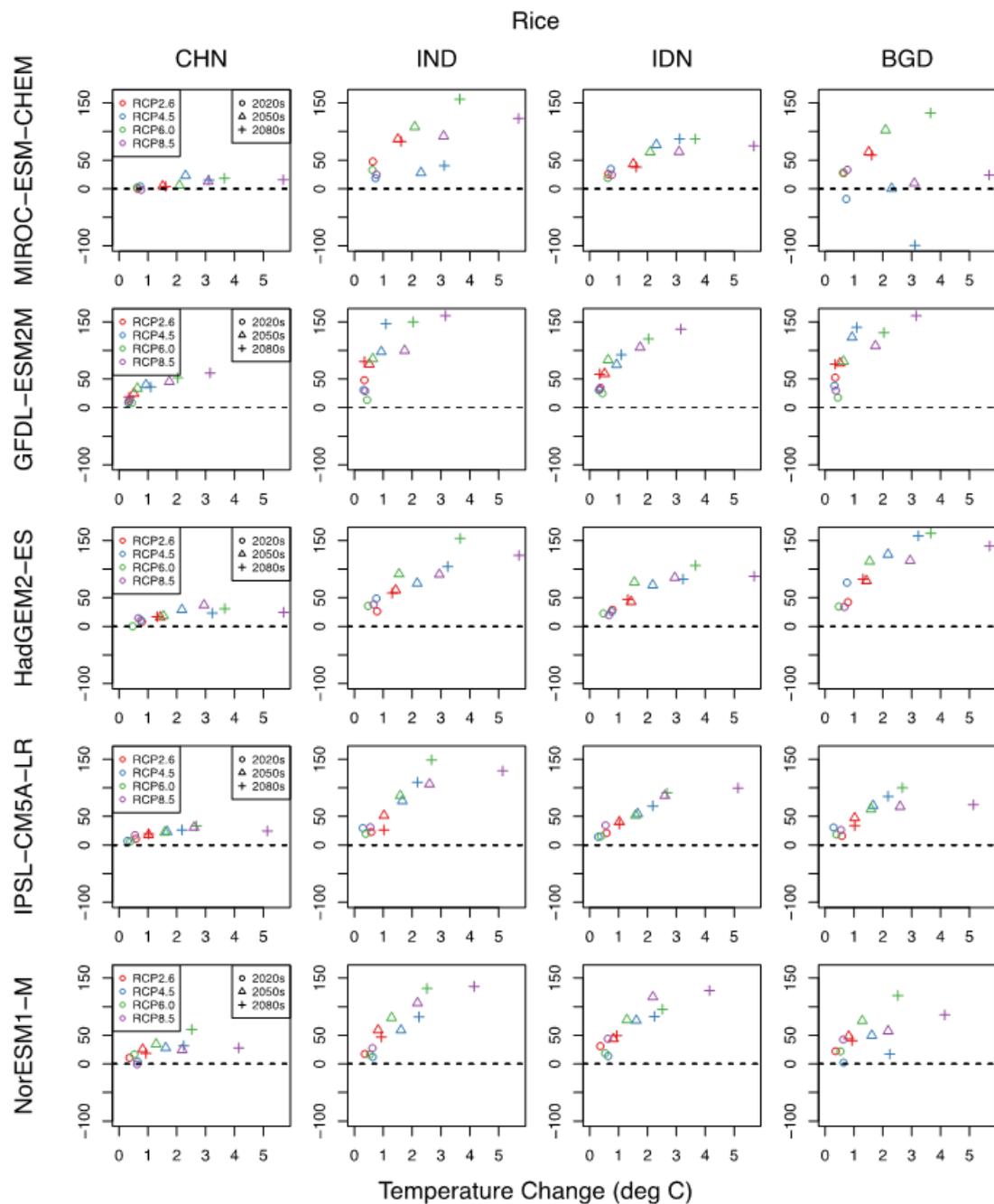


図 3-1-1-②-a\_1\_7 主要生産国におけるコメ生産性の将来変化率 (%) と各 GCM の全球平均気温上昇度 (°C)。国別に 2000 年代の収穫面積で重み付け平均した生産性の各年代平均値 (○は 2020s、△は 2050s、+は 2080s) を、RCP 別 (赤 = RCP2.6、青 = RCP4.5、緑 = RCP6.0、紫 = RCP8.5) に示している。縦並びは気候シナリオを得た 5 つの GCM を、横並びは国別で左から中国、インド、インドネシアおよびバングラデシュである。

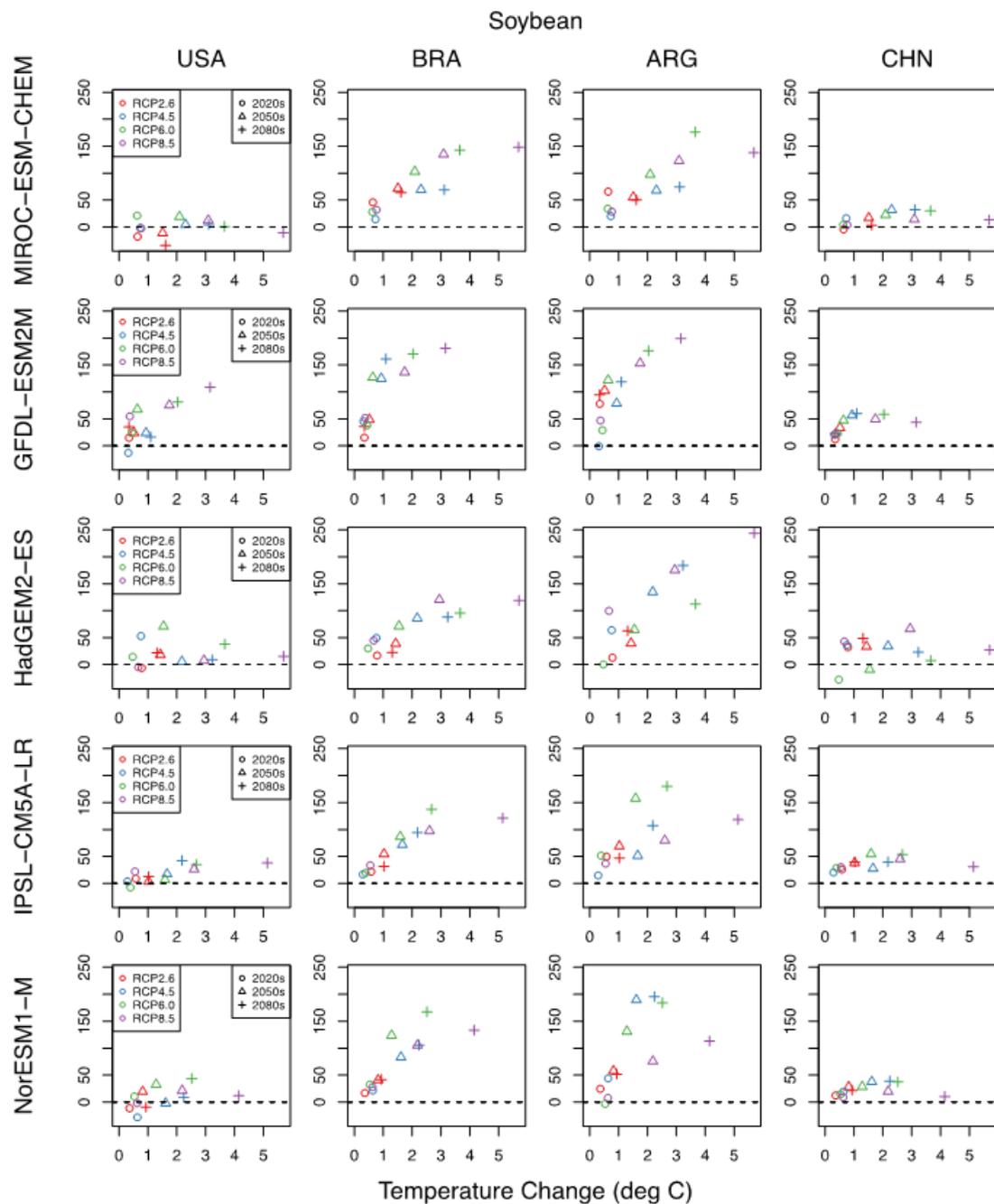


図 3-1-1-②-a\_1\_8 主要生産国におけるダイズ生産性の将来変化率 (%) と各 GCM の全球平均気温上昇度 (°C)。国別に 2000 年代の収穫面積で重み付け平均した生産性の各年代平均値 (○は 2020s、△は 2050s、+は 2080s) を、RCP 別 (赤 = RCP2.6、青 = RCP4.5、緑 = RCP6.0、紫 = RCP8.5) に示している。縦並びは気候シナリオを得た 5 つの GCM を、横並びは国別で左から米国、ブラジル、アルゼンチンおよび中国である。

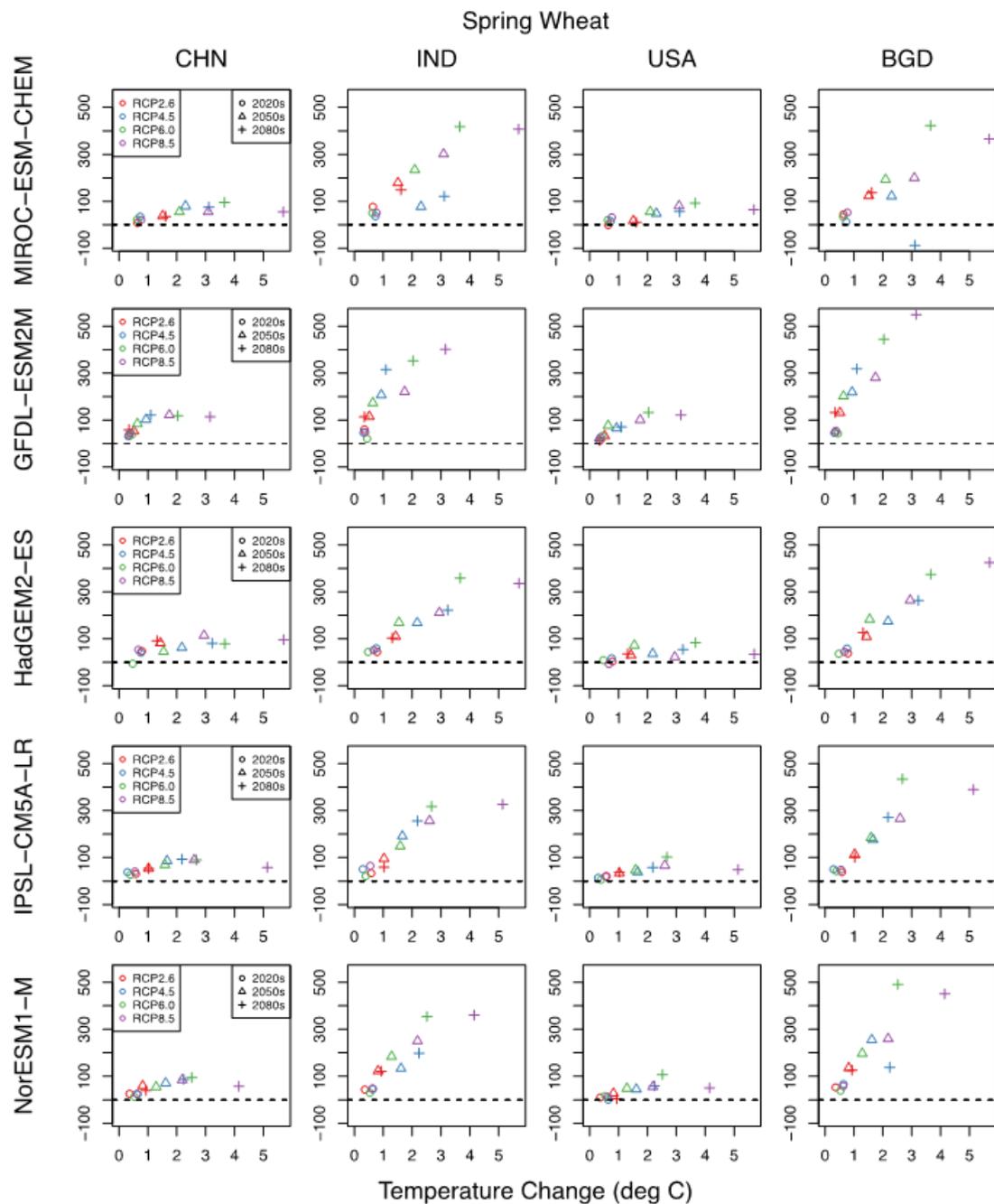


図 3-1-1-②-a\_1\_9 主要生産国における春コムギ生産性の将来変化率 (%) と各 GCM の全球平均気温上昇度 (°C)。国別に 2000 年代の収穫面積で重み付け平均した生産性の各年代平均値 (○は 2020s、△は 2050s、+は 2080s) を、RCP 別 (赤 = RCP2.6、青 = RCP4.5、緑 = RCP6.0、紫 = RCP8.5) に示している。縦並びは気候シナリオを得た 5 つの GCM を、横並びは国別で左から中国、インド、米国およびバングラデシュである。

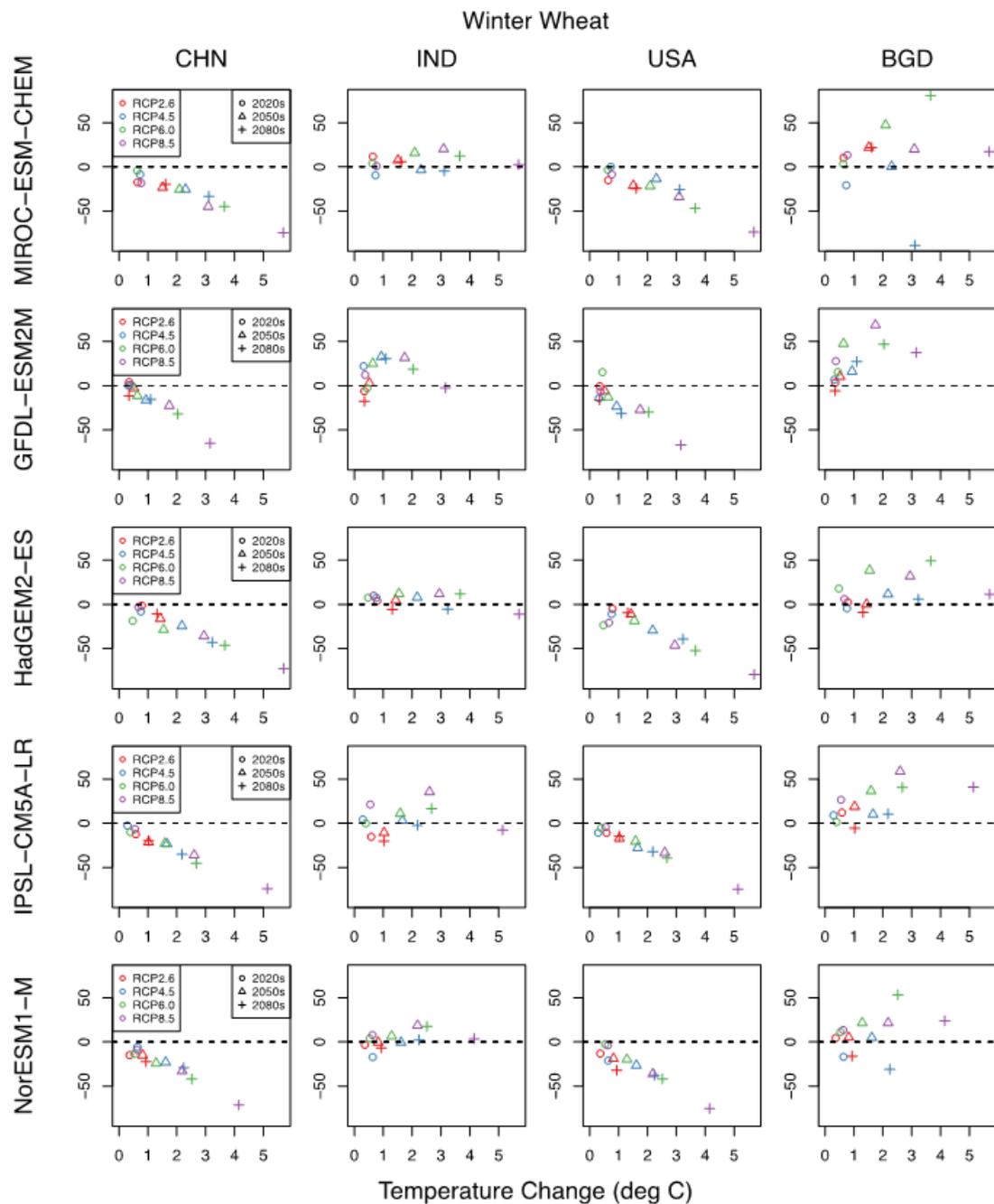


図 3-1-1-②-a-1\_10 主要生産国における冬コムギ生産性の将来変化率 (%) と各 GCM の全球平均気温上昇度 (°C)。国別に 2000 年代の収穫面積で重み付け平均した生産性の各年代平均値 (○は 2020s、△は 2050s、+は 2080s) を、RCP 別 (赤 = RCP2.6、青 = RCP4.5、緑 = RCP6.0、紫 = RCP8.5) に示している。縦並びは気候シナリオを得た 5 つの GCM を、横並びは国別で左から中国、インド、米国およびバングラデシュである。

米国や中国では、大気中の温室効果ガス濃度上昇による施肥効果や技術発展による作物生産性への好影響が、次第に気温上昇の悪影響を緩和しきれなくなる。開発途上国では生産性が向上するが、全球平均気温が 3°C 以上の上昇になると、好影響が悪影響を緩和しきれ

### ず、生産性が低下し始める。

まず全般的な傾向として、生産性の変化は春コムギを除き、米国と中国ではやや増加か減少、その他の開発途上国では比較的大きな増加傾向、という点で共通している。トウモロコシではメキシコ (図 3-1-1-②-a-1\_6)、コメではインド、インドネシア、バングラデシュ (図 3-1-1-②-a-1\_7)、ダイズでは南米のブラジルとアルゼンチン (図 3-1-1-②-a-1\_8)、春コムギのインド、バングラデシュ (図 3-1-1-②-a-1\_9) および冬コムギのバングラデシュで、特に気温上昇が 3°C 程度までは増加傾向が明瞭である (図 3-1-1-②-a-1\_10)。これらの国では大気中の温室効果ガス濃度の上昇による施肥効果に加え、現在の生産性の水準が相対的に低いため、経済成長に伴う技術発展により生産性は将来、増加するケースが多い。

今回の解析では、第 1 版と異なり米国と中国の将来変化傾向が類似してきていることが挙げられる。細かく見ると中国では冬コムギを除き 3°C までは微増傾向、米国では、ダイズは GCM による相違があるものの増加するケースが多く、トウモロコシは逆に減少傾向が比較的強い。またコムギでは米国、中国とも、春コムギはやや増加するものの冬コムギが気温上昇により大きく減少する。おおまかには米国で約 2°C、中国では約 3°C 以上気温が上昇すると、施肥効果や技術発展による好影響が気温上昇による生育期間の短縮や光合成による炭酸同化効率の低下などの悪影響を緩和しきれなくなる、と考えられる。また現在の開発途上国のブラジルでも、施肥効果の寄与が大きいダイズでは生産性の伸びは大きいのに対して、技術進展の寄与が大きいトウモロコシでの伸び率は小さく、気温上昇に対する頭打ちも早い。いっぽう同じトウモロコシでも、メキシコでは 2°C までの生産性向上が著しい。

これまで食料安全保障の観点から、コメを除き、世界貿易量に影響する生産量の大きい主要国を対象にその影響を明らかにしてきたが、今後は気温上昇に関連して、わずかな気温上昇で作物生産性に好影響をもたらす可能性があり、また今後、栽培面積が増大することが見込まれる高緯度地域での解析が課題となる。

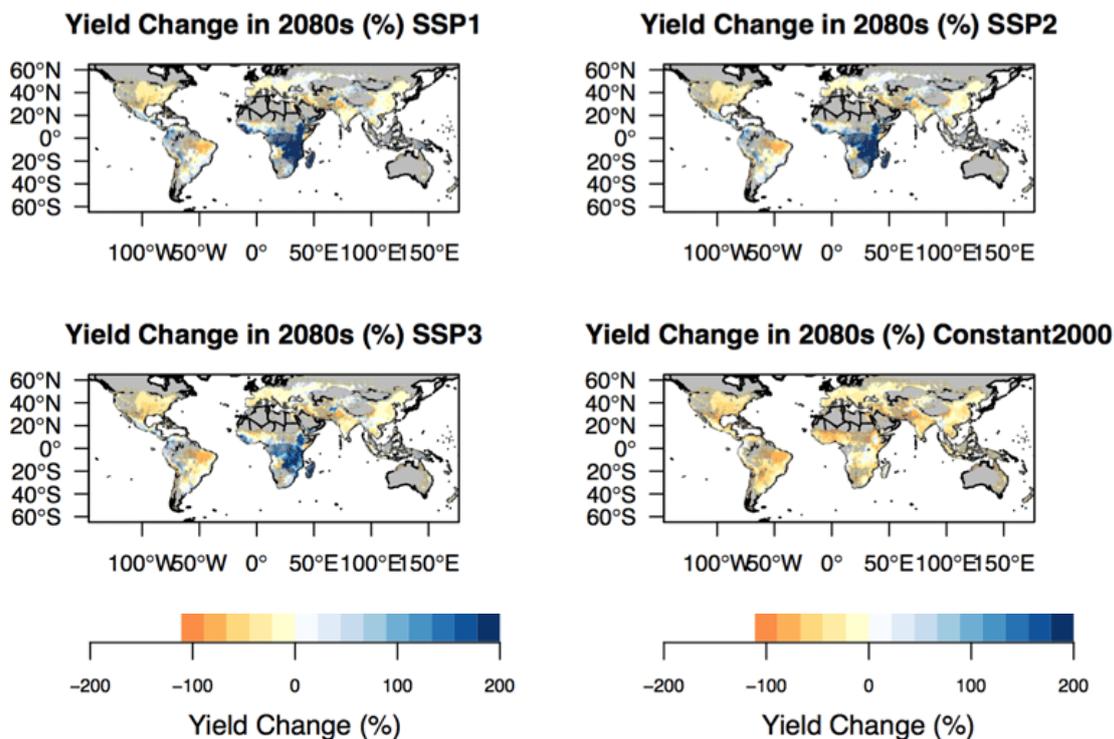


図 3-1-1-②-a-1\_11 SSP 別に見た現在 (2010~2015 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間のトウモロコシ生産性の変化率分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均で、灌漑の程度は、現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a\_1 に同じである。なお図右下の Constant2000 は、GDP を 2000 年の値に固定したもので、農業技術の進歩がないと仮定した場合の収量予測値である。

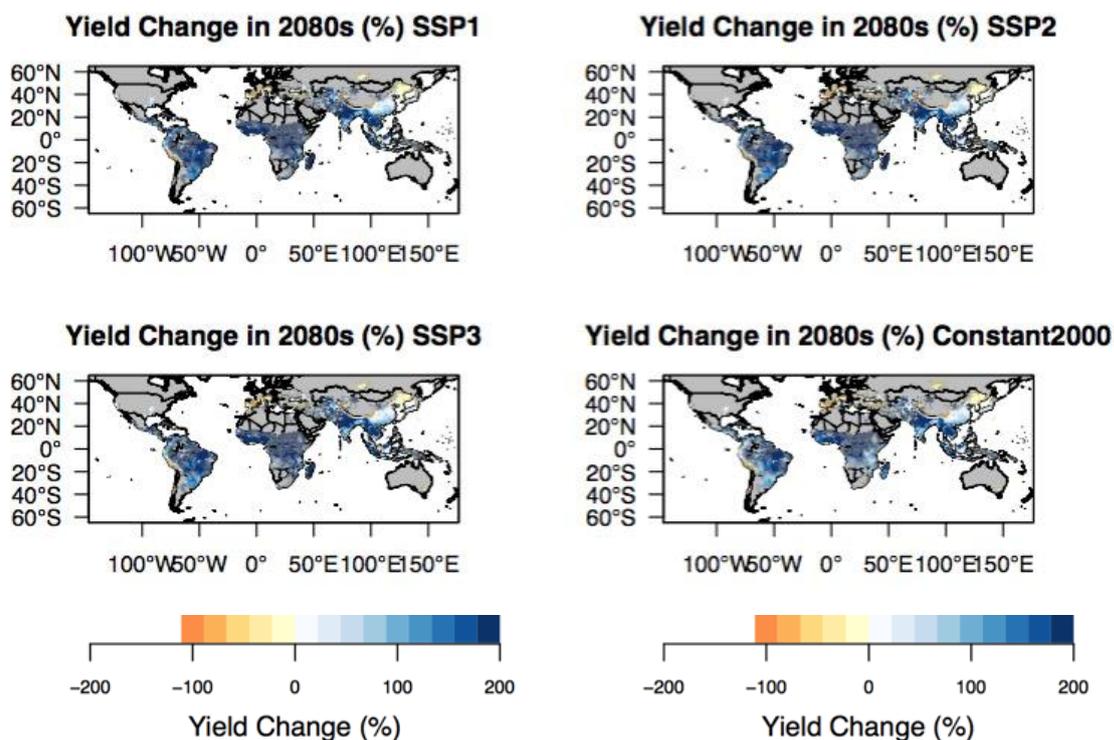


図 3-1-1-②-a-1\_12 SSP 別に見た現在 (2010~2015 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間のコメ生産性の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均で、灌漑の程度は、現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。なお図右下の Constant2000 は、GDP を 2000 年の値に固定したもので、農業技術の進歩がないと仮定した場合の収量予測値である。

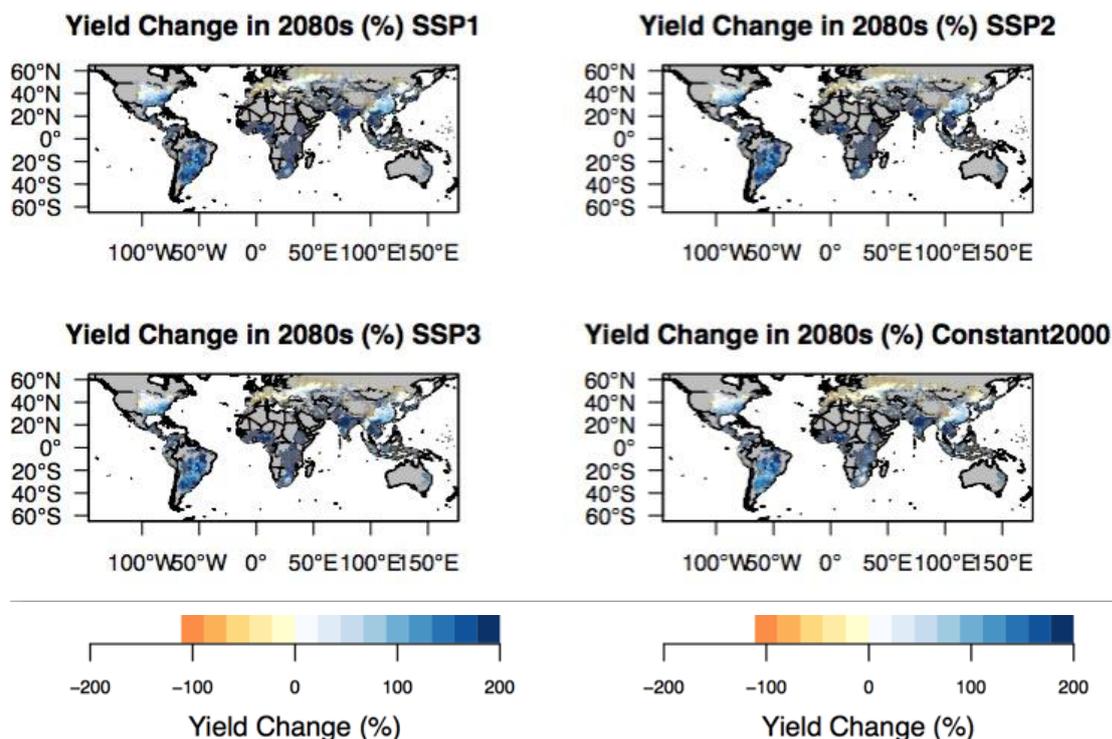


図 3-1-1-②-a-1\_13 SSP 別に見た現在 (2010~2015 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間のダイズ生産性の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均で、灌漑の程度は、現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。なお図右下の Constant2000 は、GDP を 2000 年の値に固定したもので、農業技術の進歩がないと仮定した場合の収量予測値である。

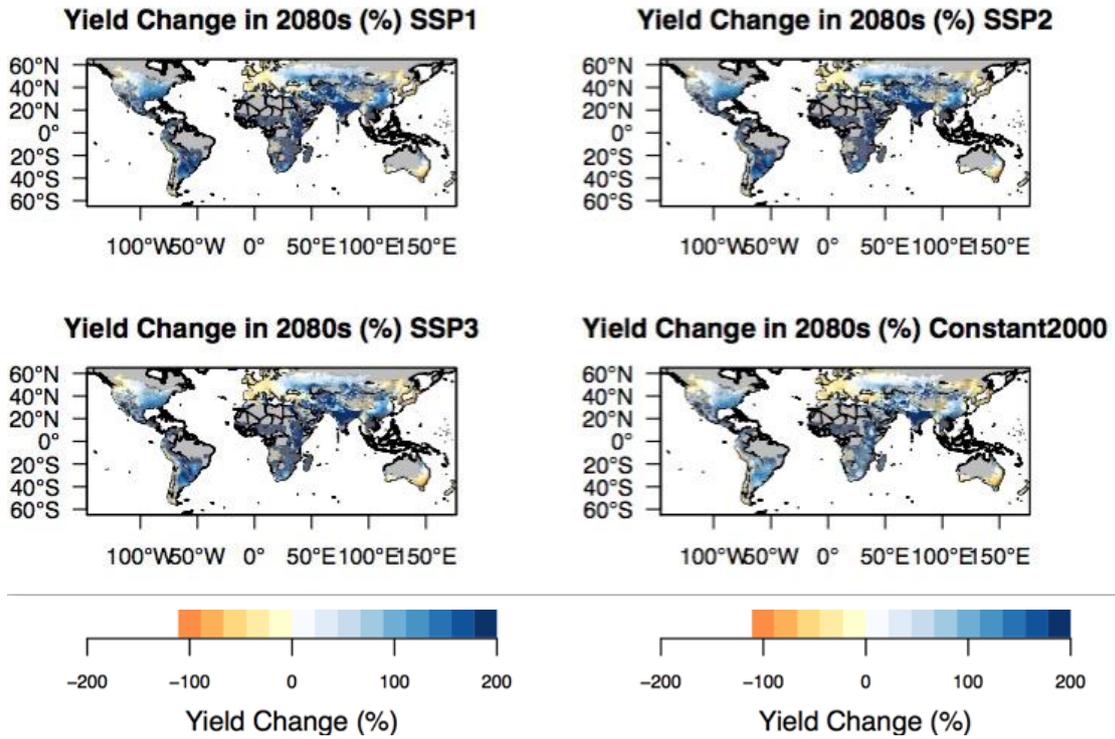


図 3-1-1-②-a-1\_14 SSP 別に見た現在 (2010~2015 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の春コムギ生産性の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均で、灌漑の程度は、現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。なお図右下の Constant2000 は、GDP を 2000 年の値に固定したもので、農業技術の進歩がないと仮定した場合の収量予測値である。

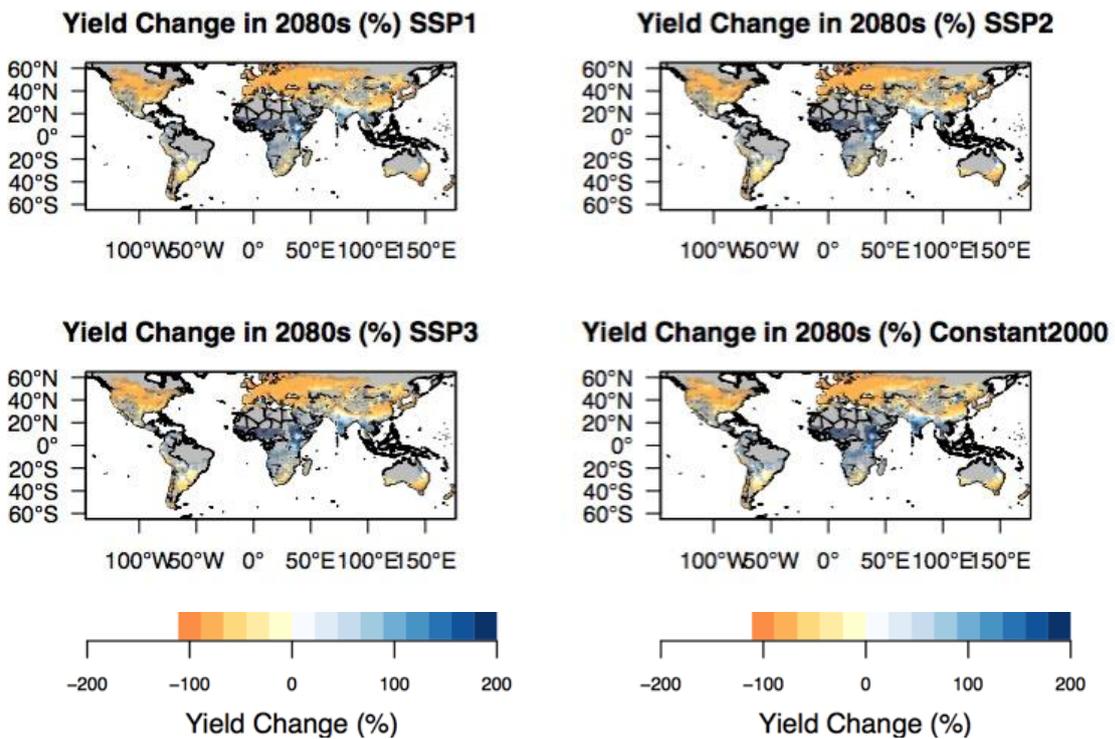


図 3-1-1-②-a-1\_15 SSP 別に見た現在 (2010~2015 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の冬コムギ生産性の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均で、灌漑の程度は、現在推定されるものと同程度を仮定した。図のマスクや網掛けについては、図 3-1-1-②-a-1\_1 に同じである。なお図右下の Constant2000 は、GDP を 2000 年の値に固定したもので、農業技術の進歩がないと仮定した場合の収量予測値である。

いずれの作物でも作物生産性影響に対する社会経済 (SSP) シナリオ由来の不確実性は小さい。アフリカのトウモロコシ生産性は経済成長により大きく向上することが期待される

RCP8.5 における 5 つの GCM による作物生産性影響のアンサンブル平均値を、3 つの SSP シナリオ (1、2、3) について比較したところ、予測された影響の空間パターンには SSP 間でほぼ同じとなり、SSP 間で生産性影響の程度が少し変化するケースはあまり多くない。GDP を 2000 年の値に固定した場合、トウモロコシでは将来の生産性が世界の主要地域で低下し、アフリカでの増加が見られる各 SSP ランと異なる傾向にあり、アフリカでの増加が見られない。つまり、GDP 上昇による技術進展が生産性向上に大きく寄与している、他の作物では生産性増減の地理分布は GDP の変化の有無に依存せず、おおむね一致している。

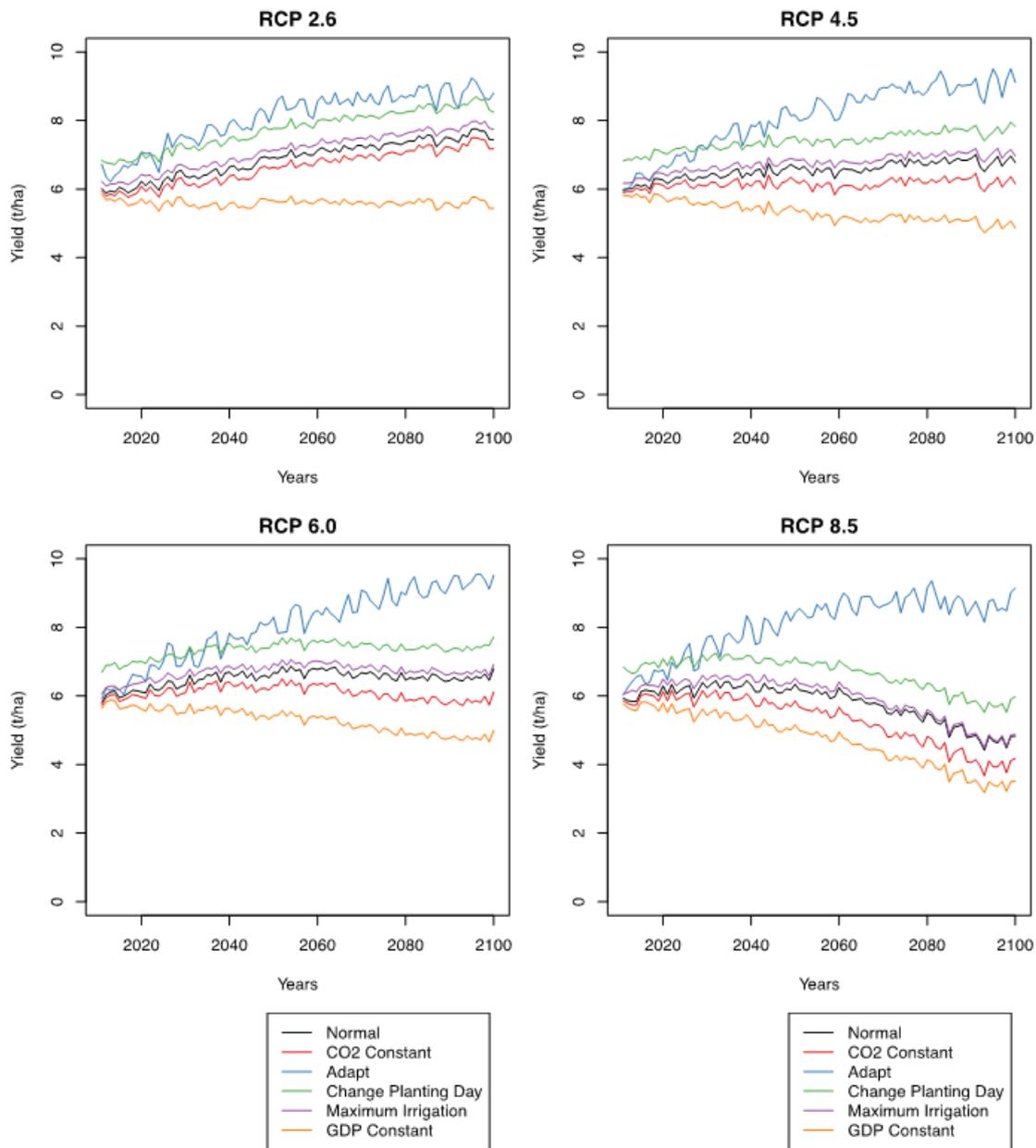


図 3-1-1-②-a-1\_16 RCP 別に見た、現在の作物面積で重み付けした全球平均トウモロコシ収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各 GCM 気候シナリオ予測を平均したもの。適応策を行わず各 GCM/RCP/SSP シナリオに忠実に添った場合 (Normal)、温室効果ガス濃度を 2000 年値に固定した場合 (CO<sub>2</sub> Constant) および GDP を 2000 年の値に固定した場合 (GDP Constant) のほか適応策として、栽培期間を気候変化に合わせて変更できる品種を選択・変更した場合 (Adapt)、前後 1 ヶ月の間で、最適な播種日を選んだ場合 (Change Planting Day)、必要な灌漑を常時行った場合 (Maximum Irrigation) の予測を併せて表示した。

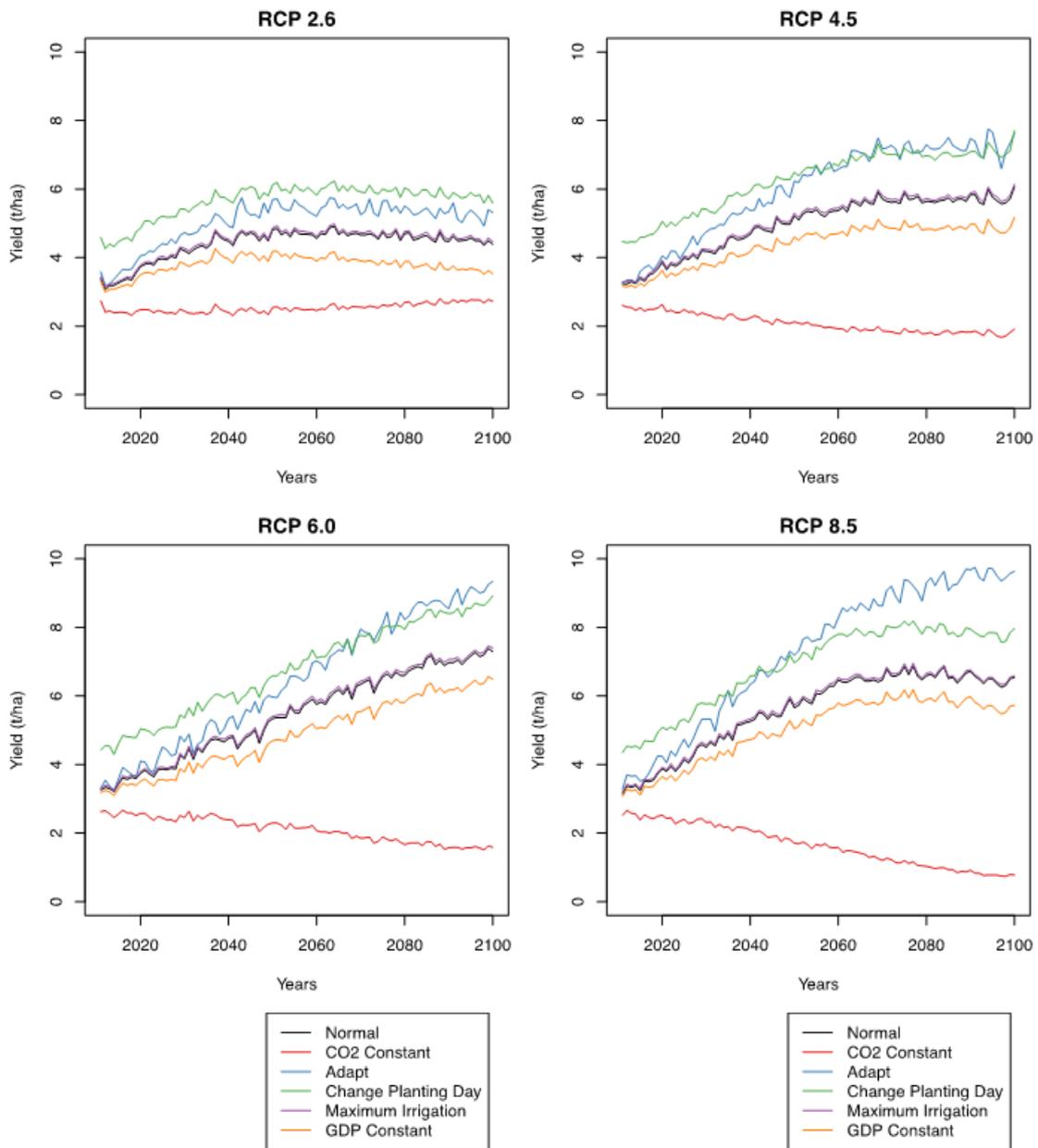


図 3-1-1-②-a-1\_17 RCP 別に見た、現在の作物面積で重み付けした全球平均コメ収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各 GCM 気候シナリオ予測を平均したもの。各々の変動線の意味は図 3-1-1-②-a-1\_16 に同じである。

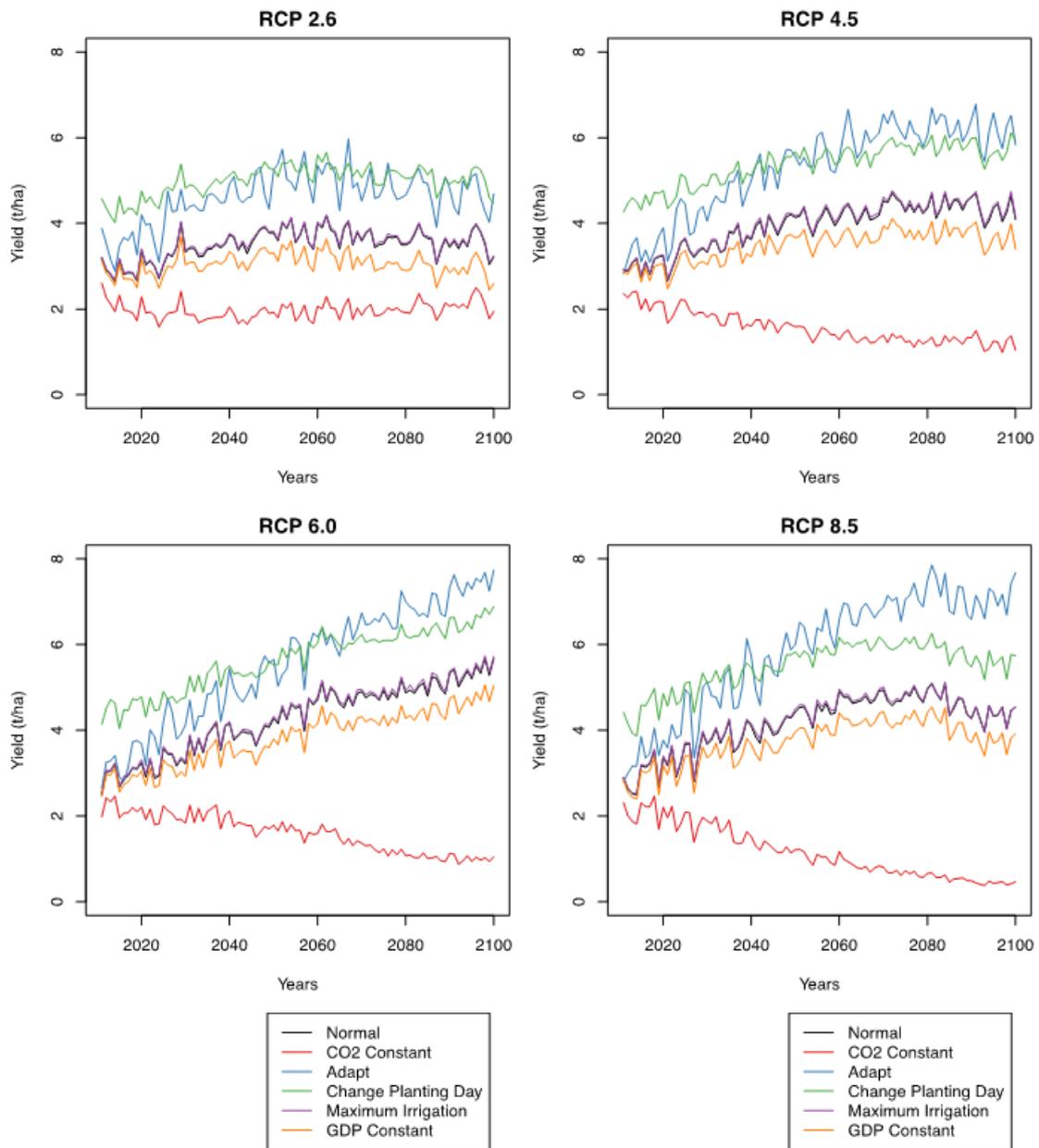


図 3-1-1-②-a\_18 RCP 別に見た、現在の作物面積で重み付けした全球平均ダイズ収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各 GCM 気候シナリオ予測を平均したもの。各々の変動線の意味は図 3-1-1-②-a\_16 に同じである。

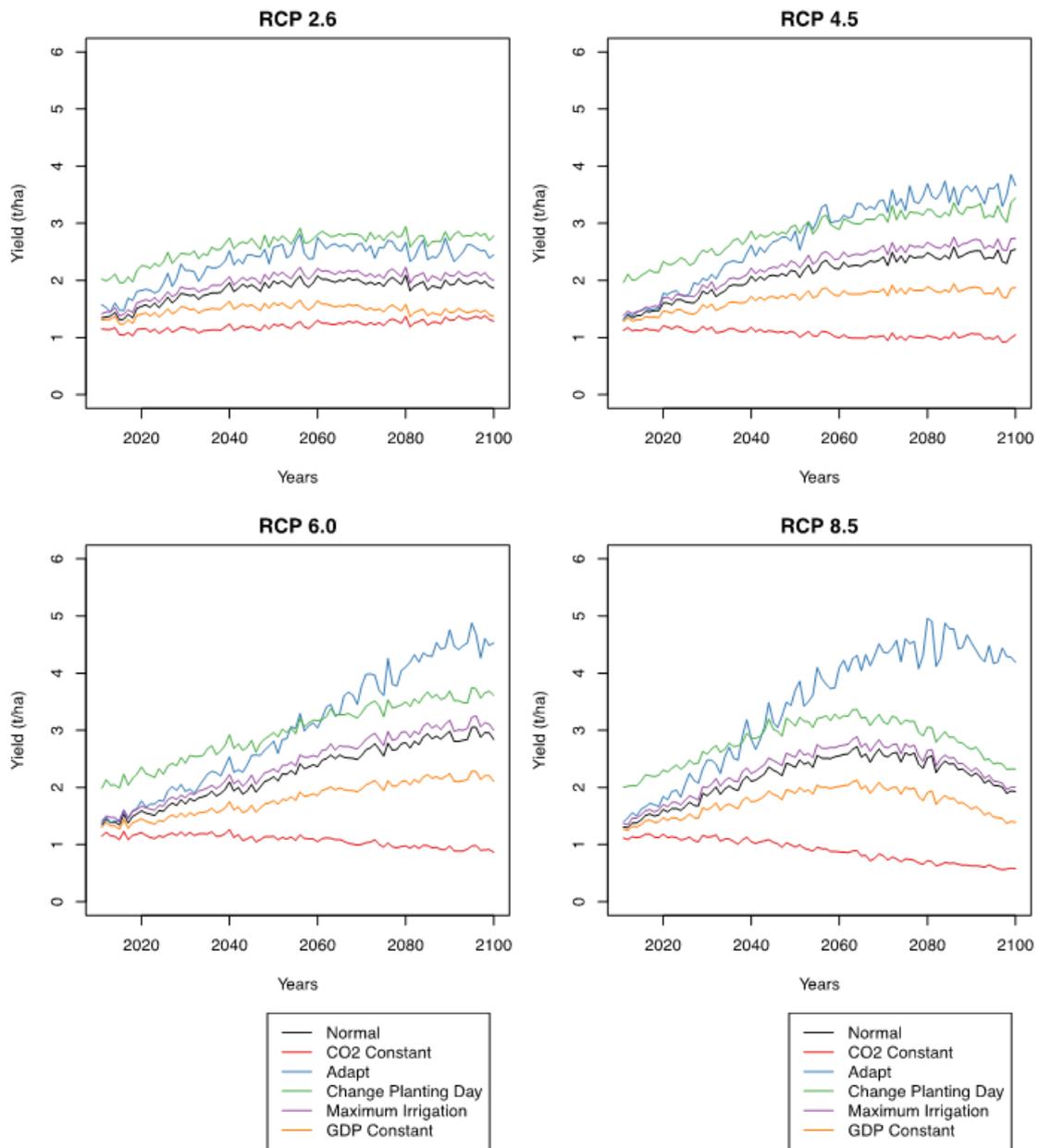


図 3-1-1-②-a-1\_19 RCP 別に見た、現在の作物面積で重み付けした全球平均春コムギ収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各 GCM 気候シナリオ予測を平均したもの。各々の変動線の意味は図 3-1-1-②-a-1\_16 に同じである。

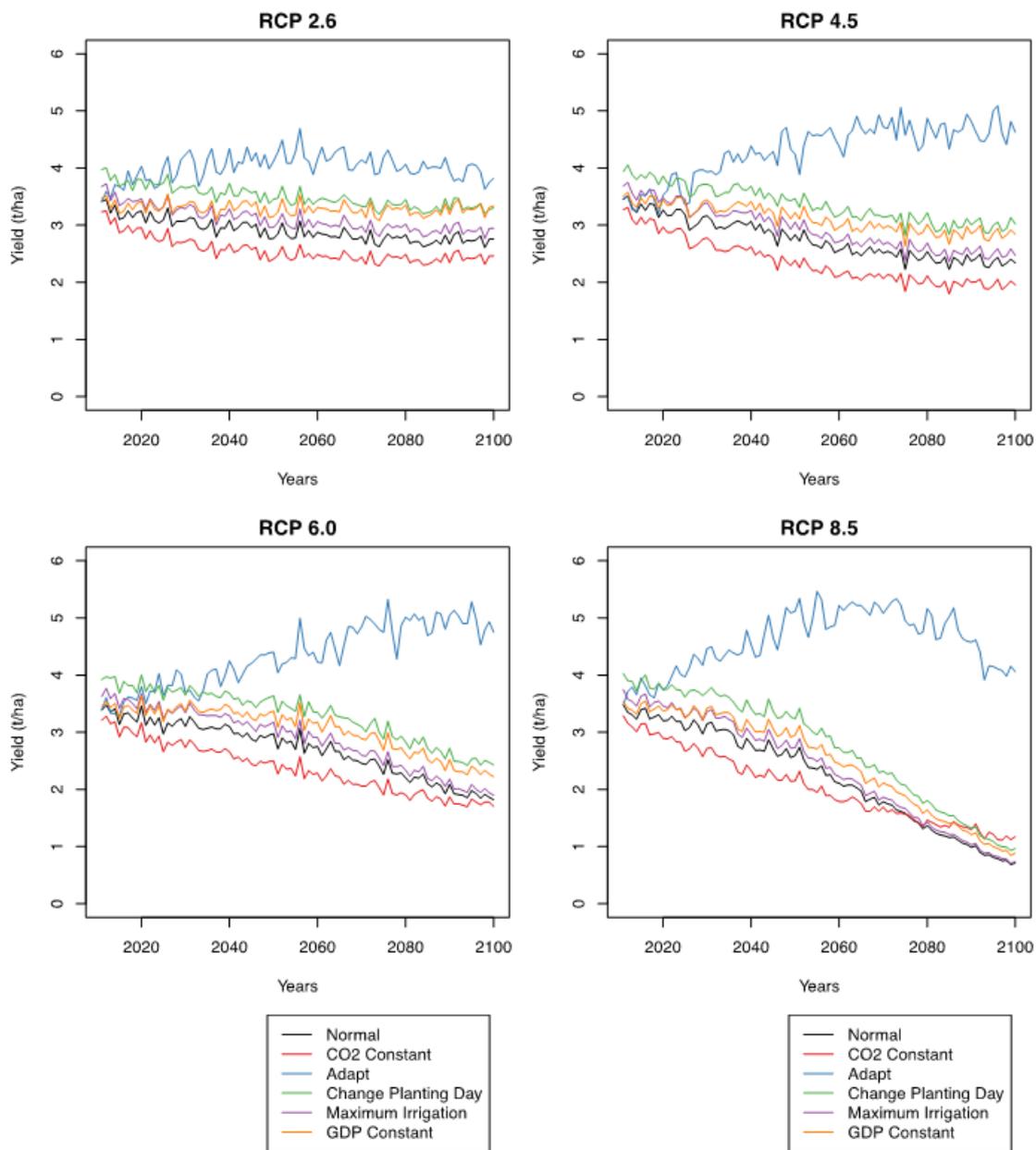


図 3-1-1-②-a-1\_20 RCP 別に見た、現在の作物面積で重み付けした全球平均冬コムギ収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各 GCM 気候シナリオ予測を平均したもの。各々の変動線の意味は図 3-1-1-②-a-1\_16 に同じである。

**適応策として品種変更等による十分な日射日照の確保が最重要であるほか、コメでは播種日の変更も有効である。**

いずれの作物においても、ほとんどのケースでの最も効果的な適応策として、温度上昇による生育期間の短縮による吸収日射量の減少を排除する、つまり高温による生育期間の短縮がない品種への変更 (Adapt) が有効である。これにより増収量が大きくなるか、または減収量が小さくなり、この傾向は特に冬コムギで顕著である。その次に、シミュレーション上

で最適な播種日を選択する (Change Planting Day) ことが有効で、その適応効果は気温上昇度が小さい近未来年代で大きい。作物別では、コメで最も有効で、その次にダイズ、春コムギとなる。これらの効果に比べると、コムギ類でも灌漑による適応 (Maximum Irrigation) の可能性は小さく、元来、灌漑農業が中心のコメのほか、ダイズでも生産性の改善効果はあまり見られない。

これまでのことをまとめると、作物間で程度の差はあるが、ここで示した生産性への影響はいずれの作物でも、正と負の両方の影響が反映された結果である。作物生産性の増加要因には、まず、大気中の温室効果ガス濃度の上昇による光合成効率の上昇 (施肥効果) が挙げられ、その効果は特にダイズで大きい。加えて、高温や低温、乾燥、栄養欠乏、病虫害による生育ストレスが、想定される経済発展 (SSP) の下での技術発展により緩和される効果が挙げられる。経済発展による生産性増加は、アフリカ等、現在の開発途上国で大きく、特にトウモロコシでは顕著である。一方、作物生産性の低下要因として気温上昇による生育期間の短縮、高温による光合成効率の低下、蒸発散量の増加による土壌水分量の低下などが挙げられるが、適応策を行うことにより改善する場合もあることを、今回初めて示すことが出来た。特に、生産性の低下要因としての気温上昇による生育期間短縮が起こらないような品種の導入により、麦類やトウモロコシにおける将来の減収、特に冬コムギにおける RCP8.5 で想定される大幅な生産性低下をある程度カバーできることが示された。

## b. 陸域生態系被害

### <背景>

陸域には熱帯多雨林からツンドラ・砂漠まで環境に応じた様々な生態系が成立しており、その中には都市緑地や農地のような人工的な生態系も含まれる。陸域のうち、自然生態系により被覆される割合は約 85%であり、残りの約 15%も大部分が農業生態系で占められている。人間社会は、そこから供給される産物や環境調整作用に多少の差はあれ依存している。一方で、生態系は大気組成や気候条件のようなグローバルな変化だけでなく、森林破壊のようなローカルな変化の影響を受けており、その程度は年々深刻化していると考えられる。生態系は非常に複雑性・不均質性が高いシステムであり、その予測は現在でもなお大きな不確実性が残されている。

### <本項目の重要性>

生態系は生物と環境の相互作用の上に成り立っており、そこで営まれる様々なプロセスから人間社会にもたらされる公益的機能は生態系サービスと総称されている。気候変動により生態系サービスが変質・劣化することで、人間社会の持続可能性基盤は深刻な影響を受けることが危惧されているため、その不確実性を含めた予測は重要である。ここでは生態系サービスのうち、重要度が高くかつプロセスモデルで推定可能な、基盤サービス (生産力と炭素ストック)、調整サービス (CO<sub>2</sub> 吸収と土壌安定化)、そして負のサービスとも言える野

外火災について複数シナリオに基づく検討を実施した。

#### <評価方法>

生態系で行われる諸プロセスの推定には陸域生態系モデル VISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases) を使用した。これは陸域生態系における水・炭素・窒素の循環を比較的シンプルなコンパートメントモデルを用いて表現しており、特に大気-陸域間の微量ガスの交換を定量的に扱うことに主眼を置いている。そのため、陸域生態系による温室効果ガス (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O) の交換速度を推定することが可能であり、またその結果として生じる生態系への炭素ストックを推定する。各プロセスには温度・水分などの環境条件への依存性が設定されており、環境変化に対する生態系応答をシミュレートすることができる。ここでは、5種類の SSP シナリオによる土地利用変化、3種類の RCP シナリオによる大気中温室効果ガス濃度変化、5種類の気候モデルによる将来気候シナリオ、に基づく計 55 ケースの計算を実施し解析を行った。対象とした地域は、各指標について明瞭な変化が認められた地域や、現在の気候下でその指標が大きな値を示す地域について、それぞれ 4 地域とした。

#### <指標の一覧>

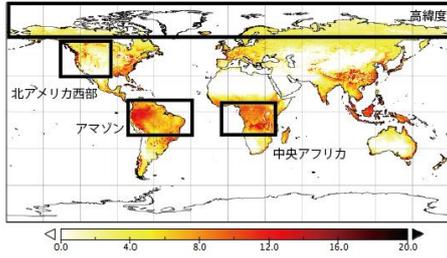
本項では以下の 6 指標を扱う。

1. 生産力 (植生の純一次生産): 生態系のバイオマス生産能力を示す
2. 植生バイオマス: 植生の木材などに貯留されている炭素量を示す
3. 土壌炭素プール: 土壌中に貯留されている炭素量を示す
4. 生態系純生産 (正味 CO<sub>2</sub> 収支): 大気から陸域生態系に年間に正味で吸収・放出された CO<sub>2</sub> 量を示す
5. 土壌流出: 水の移動に伴う土壌流出 (エロージョン) で不安定化される量を示す
6. 野外火災: 森林などで発生する火災による CO<sub>2</sub> 放出量を示す

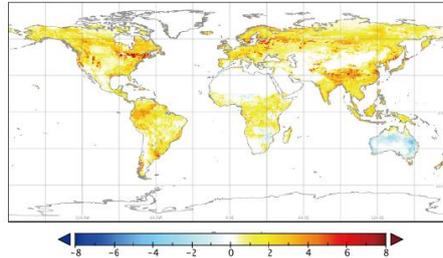
一般的には、1. 生産力、2. 植生バイオマス、3. 土壌炭素プールは高い値を示した方が生態系から多くの機能・サービスがもたらされたとと言える。4. 生態系純生産は、正味 CO<sub>2</sub> 収支であるため正の値が高いほど、大気から CO<sub>2</sub> を吸収固定する機能が高いと言える (逆に負の値は大気への放出)。ただし、十分に成熟した生態系では光合成と呼吸が均衡に近づくため、正味 CO<sub>2</sub> 収支はゼロに近い値を取る点には注意が必要である。5. 土壌流出と 6. 野外火災は、値が高いほど多くの土壌不安定化や生態系攪乱が起こっていることを示し、生態系の劣化や構造変化の指標になると考えられる。

b-1. 生産力 (植生の純一次生産)

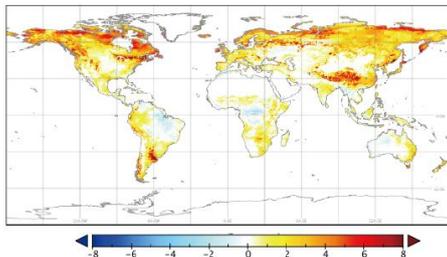
(a) 平均純一次生産 [Mg C/ha/yr] (1986-2005)



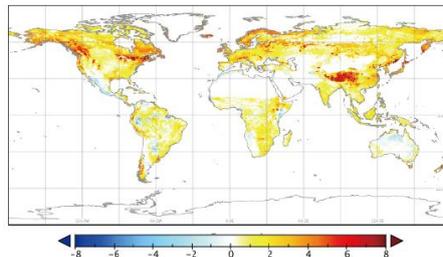
(b) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s GFDL-ESM2M



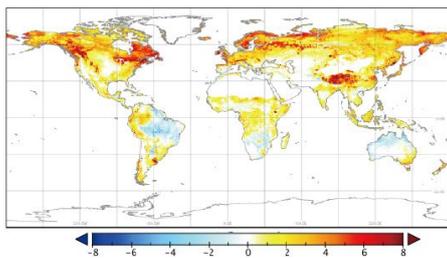
(c) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s NorESM1-M

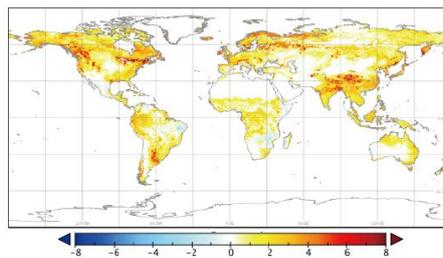


図 3-1-1-②-b-1\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の生産力の平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの生産力の変化幅。

高緯度地域を中心として陸域植生の生産力が増加する。

現在の陸域生態系では、赤道付近の熱帯多雨林が高い生産力を示し、乾燥方向および温度低下の傾向に沿って生産力は減少する。RCP4.5 シナリオのもとでは、温度上昇により成育期間が延びる高緯度 (例えば北米北部、シベリア) や高地 (例えばチベット高原) で生産力の増加が顕著である。オーストラリアなどの半乾燥地や一部の熱帯多雨林では減少傾向が見られる場合もある。

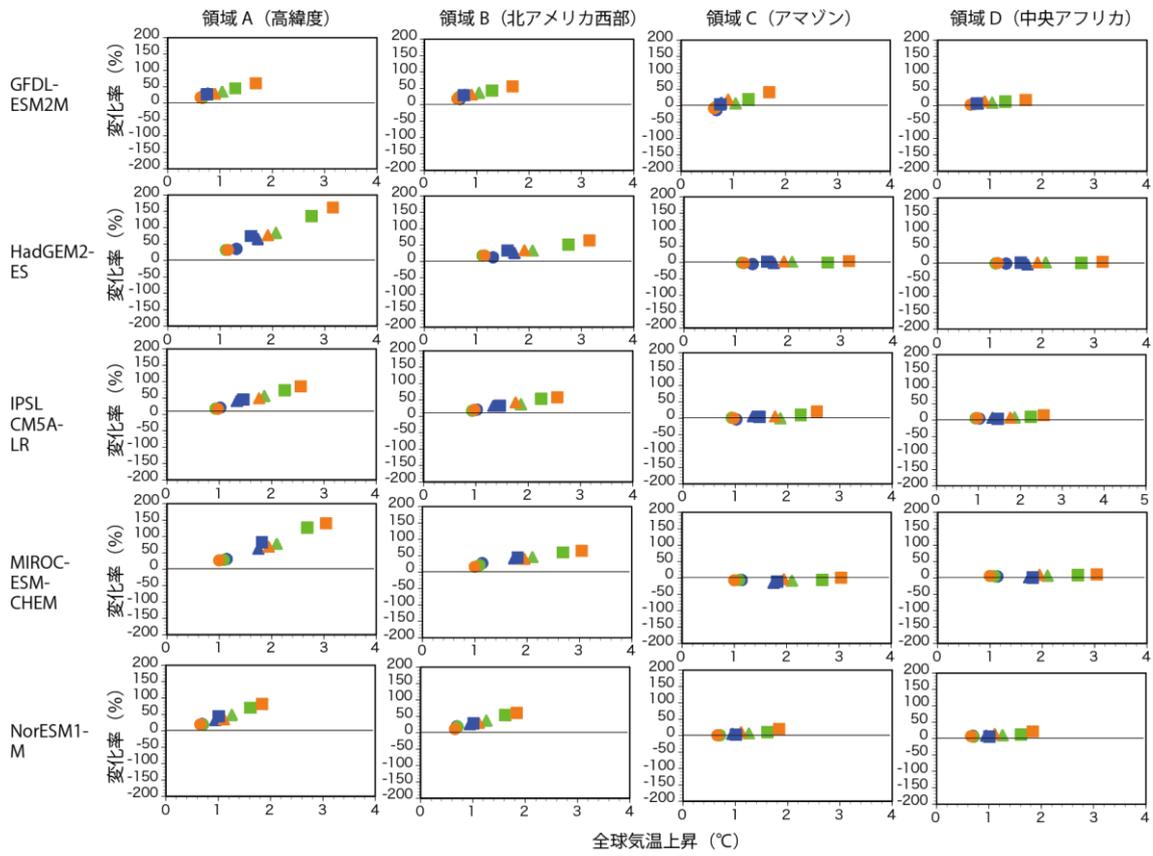


図 3-1-1-②-b-1\_2 領域 A～D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する生産力の現在からの変化率。生産力の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。

### 温度上昇に伴って陸域植生の生産力が増加する

いずれの領域でも、温度上昇幅にほぼ比例して生産力の増加が予測された。高緯度帯領域 A では、21 世紀末に向かって 4°C 以上の温度上昇が見込まれる場合もあり増加幅が大きく、高温による生産力の減退は見られていない。中緯度帯である北アメリカ西部領域 B についても大きな増加が見られた。もともと高温の低緯度に位置するアマゾン領域 C や中央アフリカ領域 D では増加幅は大きくない。GCM 間で関係性の強さ (傾き) は多少の差があった。また、RCP 間での傾きの明らかな差は見られなかった。

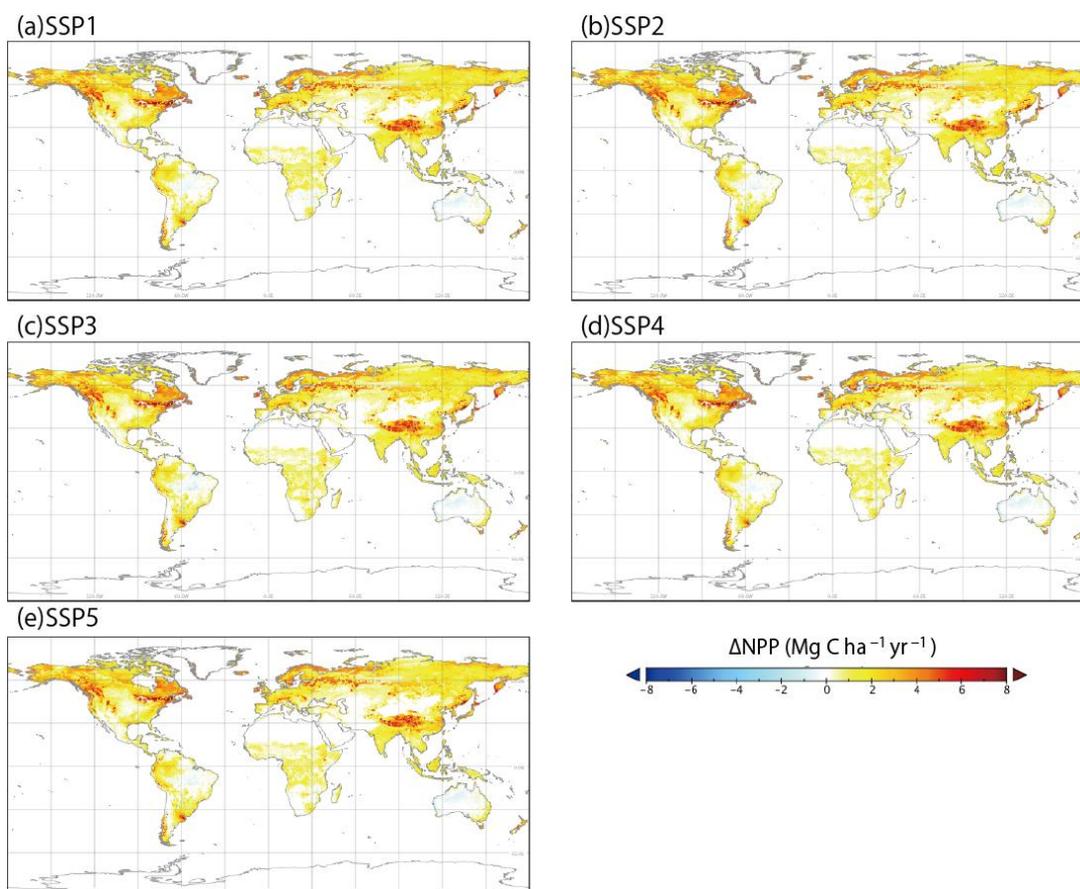


図 3-1-1-②-b-1\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の純一次生産変化の分布。RCP4.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

**陸域植生の生産力変化は SSP には大きく依存しない。**

SSP 間で異なる土地利用変化を与えており、耕作地転換に伴う生産力変化が生じている地域もあるが、生産力は植生の種類よりも日射や温度・降水など植物に利用可能な資源を規定する気候条件で決まる要素も大きく、全体として SSP 間での差は顕著では無かった。

b-2. 植生バイオマス

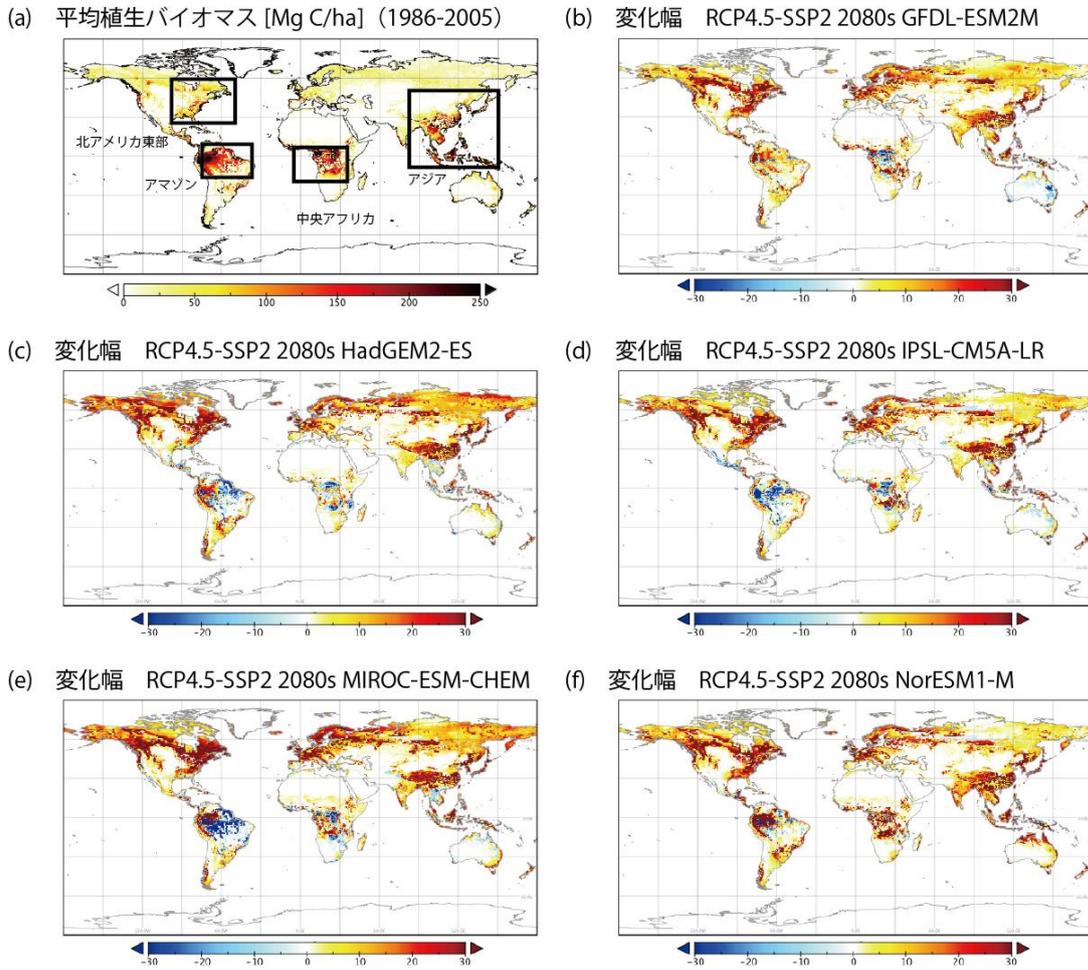


図 3-1-1-②-b-2\_1 (a) 現在 (1986～2005 年) の植生バイオマスの平均値、(b)～(f) 2080 年代 (2070～2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの植生バイオマスの変化幅。

中高緯度の森林域を中心として陸域植生のバイオマスが増加する。

現在の陸域生態系では、熱帯・温帯の森林が大きなバイオマス炭素プールとなっており、草本が優占する草原や沙漠のバイオマスはもともと少ない。RCP4.5 シナリオのもとでは、温度上昇による成育期間の延長と CO<sub>2</sub> 施肥効果を受ける亜寒帯林や温帯林でバイオマスの増加が顕著である。熱帯林では地域によって減少傾向が見られる場合もある。

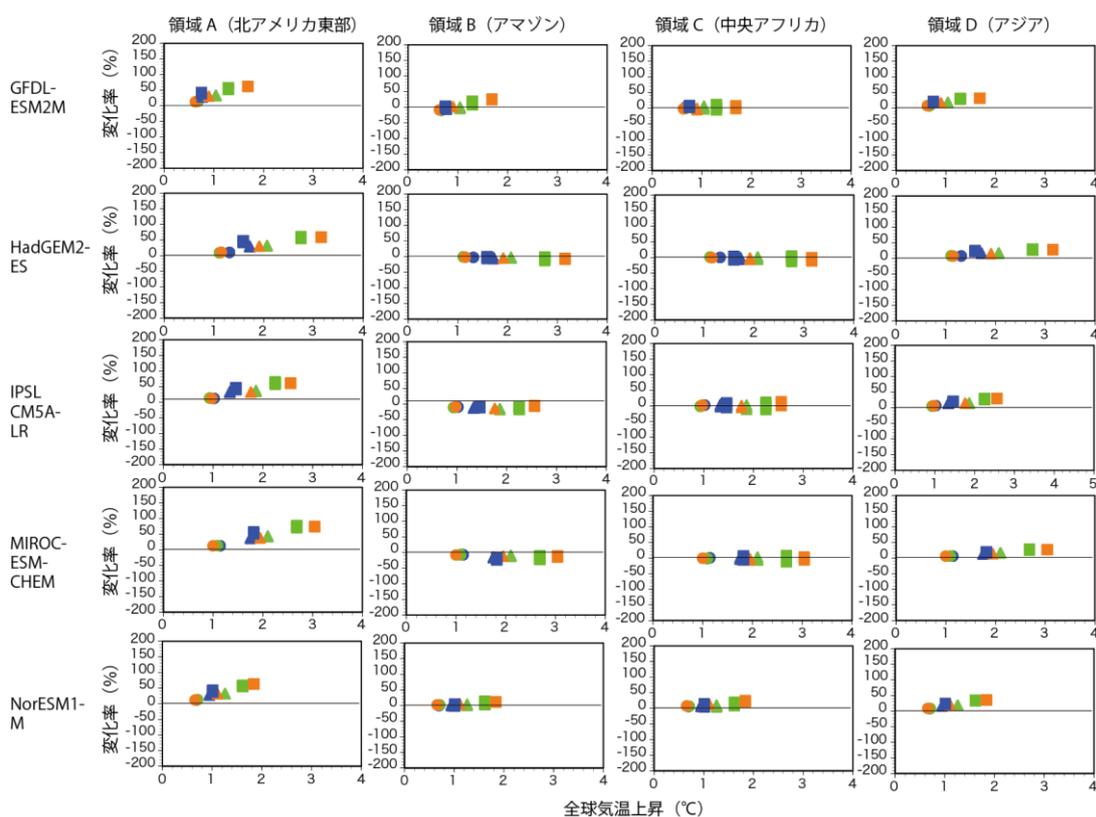


図 3-1-1-②-b-2 領域 A～D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する植生バイオマスの現在からの変化率。バイオマスの各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。

### 温度上昇に伴って陸域植生のバイオマスが増加する

グローバルには温度上昇に伴って植生バイオマスが増加する緩やかな傾向が見られた。現在、落葉広葉樹などが分布する温帯を主とする北米東部領域 A では関係性が強く、21 世紀末時点にはバイオマスが 50%以上増加になる場合もあった。アマゾン領域 B では温度上昇にかかわらず GFDL 気候下を除き、バイオマス増加の応答が低かった。現在、バイオマスが高い熱帯雨林を含む中央アフリカ領域 C では減少する地域と増加する地域があり、全体としてバイオマスはほとんど変化しなかった。一方、熱帯と温帯を両方含むアジア領域 D では中程度のバイオマス増加が見込まれた。

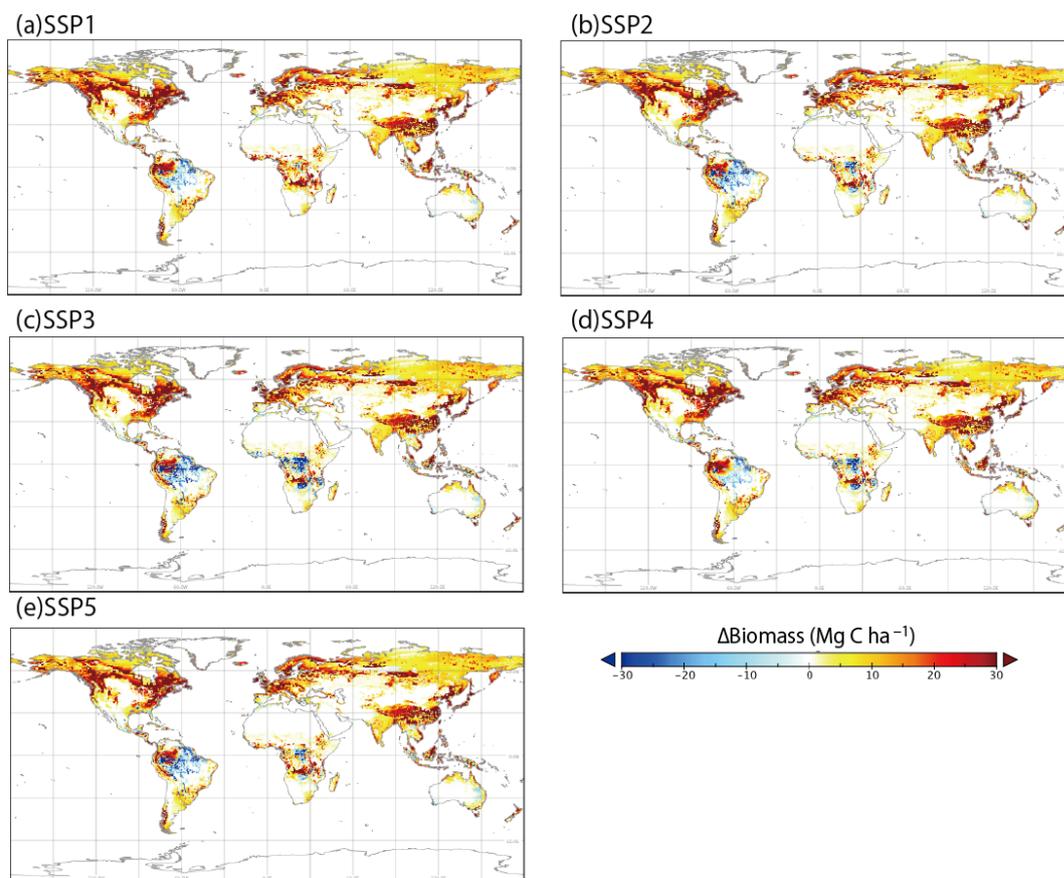


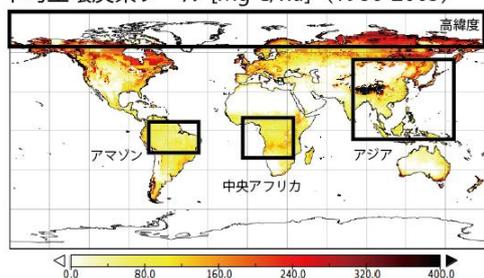
図 3-1-1-②-b-2\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の植生バイオマス変化の分布。RCP4.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

**植生バイオマスの変化は熱帯で SSP 間の差が見られる。**

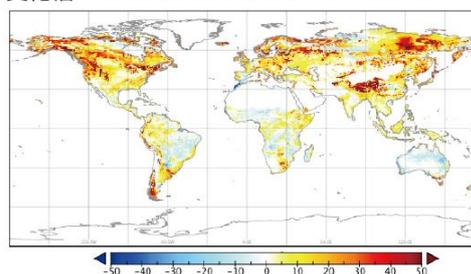
SSP 間で異なる土地利用変化を与えており、気候変動に加えて森林減少が進む地域では局所的なバイオマスの低下が見られる場合もある。ここでは中央アフリカで若干の減少傾向が見られ、SSP3、SSP2、SSP1 の順に低下傾向が強くなっていた。アジアでは増加傾向を示したものの、SSP3 では SSP1 に比べてその傾向が弱まっていた。

### b-3. 土壌炭素プール

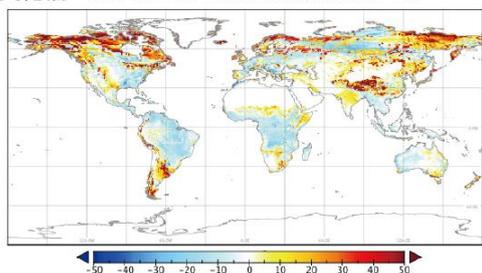
(a) 平均土壌炭素プール [Mg C/ha] (1986-2005)



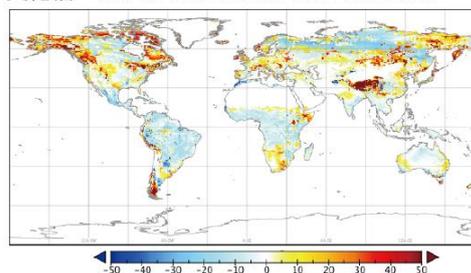
(b) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s GFDL-ESM2M



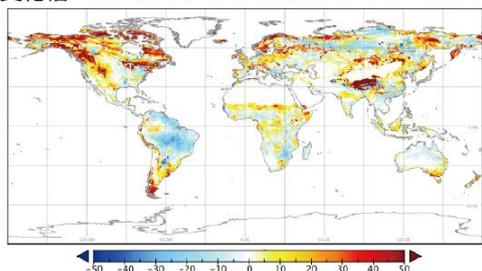
(c) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s NorESM1-M

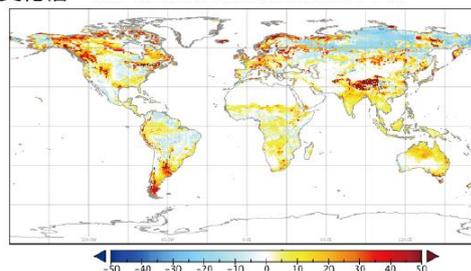


図 3-1-1-②-b\_3\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の土壌炭素の平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの土壌炭素の変化幅。

#### 高緯度地域を中心として陸域土壌炭素が減少する。

現在の陸域生態系では、低温により微生物分解が抑制されている高緯度域や高地で土壌有機炭素の貯留量が大きい傾向がある。RCP4.5 シナリオのもとでは、多くの GCM で昇温幅が大きいシベリアなどの高緯度域で炭素貯留量の減少傾向が見られた。低緯度域は、GCM によって増加する地域と減少する地域が分かれていた。土壌炭素量は、分解だけでなく植物からの枯死物供給量にも間接的に影響を受ける。土壌炭素の減少は、大気への CO<sub>2</sub> 放出だけでなく、保水力やローカルな栄養塩の流亡につながる。

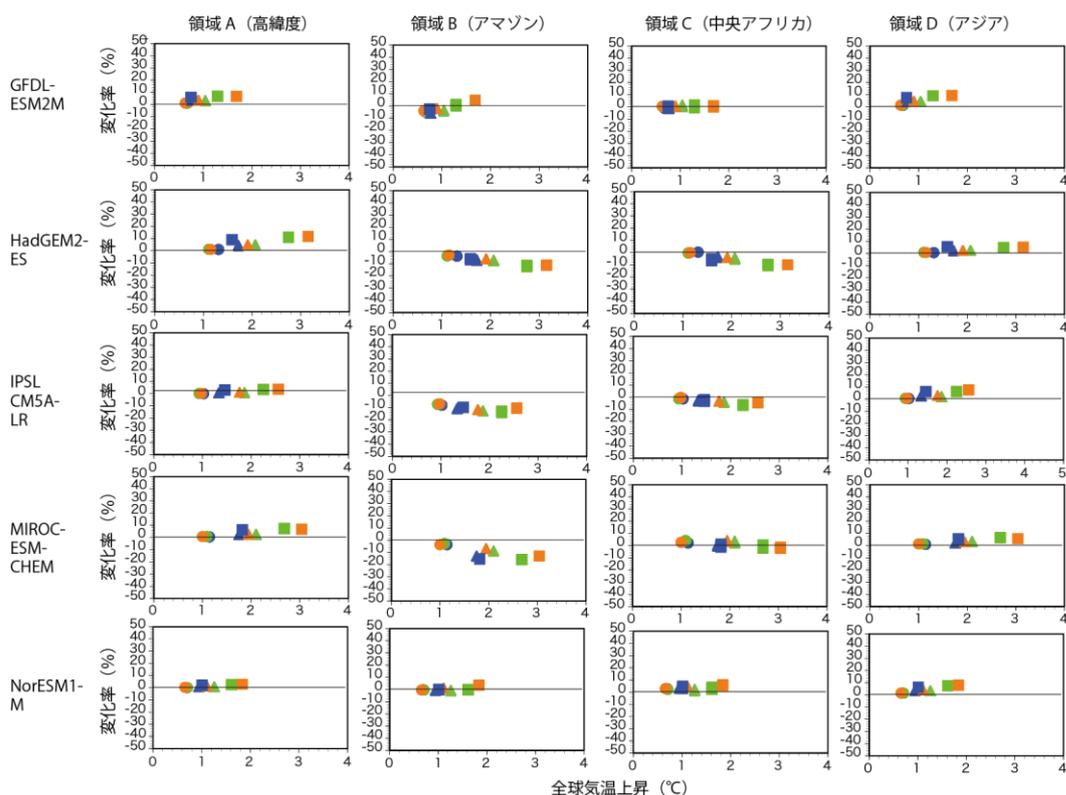


図 3-1-1-②-b-3\_2 (a) 領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する土壌炭素の現在からの変化率。土壌炭素の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%)を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。

**温度上昇に伴って陸域の土壌炭素が地域によって増加または減少する。**

グローバルには温度上昇に伴って土壌炭素プールが増加する緩やかな傾向が見られたが、地域によるその関係性の強さのばらつきは生産力のものより大きかった。高緯度領域 A では、NorESM1-M の場合のように、温度上昇にもかかわらず土壌炭素の総量に増加がほとんど見られない場合もあった。アマゾン領域 B では温度上昇幅と土壌炭素増加幅の関係は GCM によって分かれ明らかな傾向は見られなかった。中央アフリカ領域 C ではほとんど変化がない、あるいはわずかに減少した。アジア領域 D では概ね緩やかに土壌炭素は増加していた。

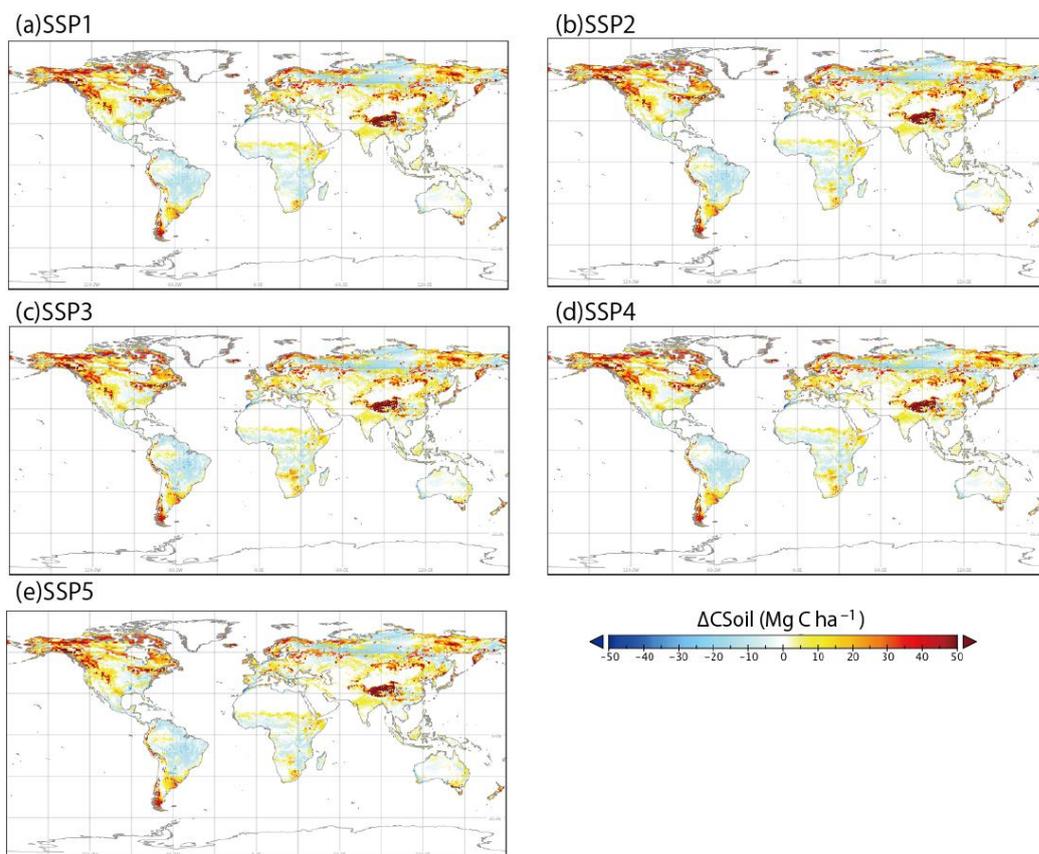


図 3-1-1-②-b-3\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の土壤炭素の分布。RCP4.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

**土壤炭素の変化は耕作地において SSP 間の差が見られる。**

SSP 間で異なる土地利用変化を与えており、それは土壤流出の強度を変えることで耕作地における土壤炭素ストックに影響を与える。土壤炭素はベースとなる総ストックが大きく、変化は長い期間をかけて進行するという特徴があり、ここでは SSP 間の差は地域スケールでは小さかった。

b-4. 生態系純生産 (正味 CO<sub>2</sub> 収支)

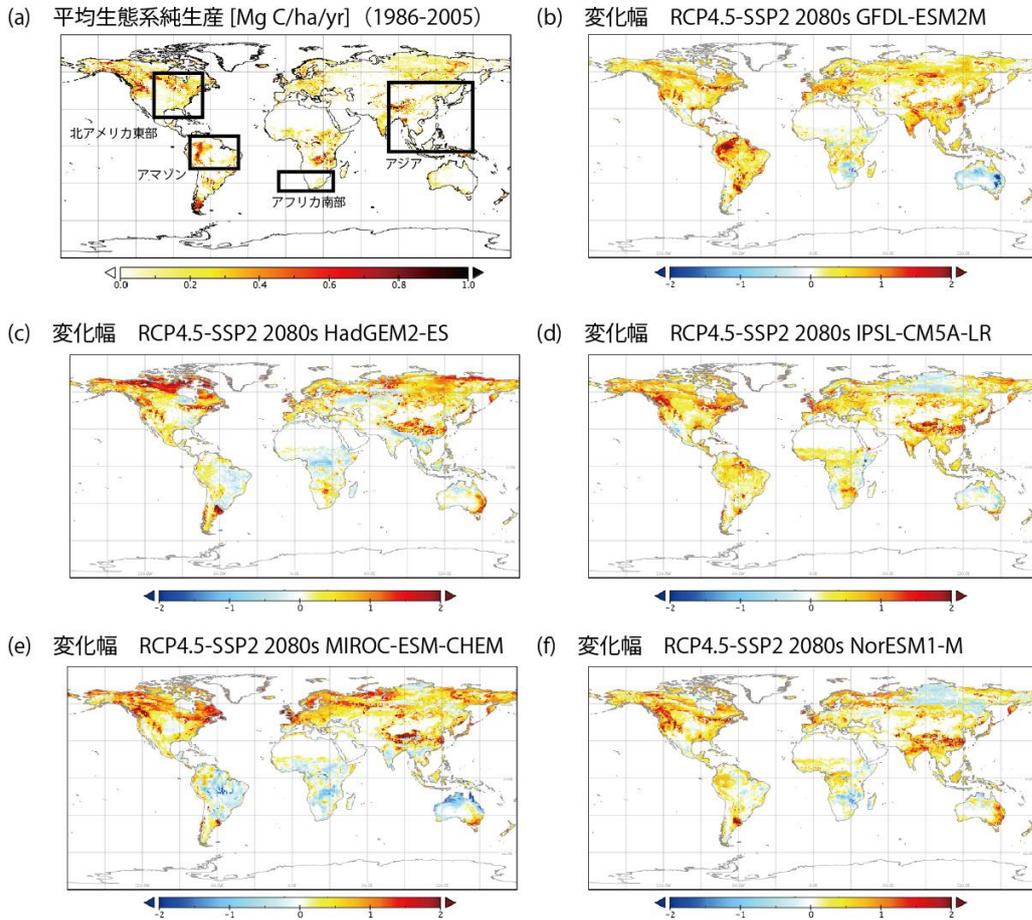


図 3-1-1-②-b\_4\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の純生態系生産 (正味 CO<sub>2</sub> 収支) の平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの純生態系生産の変化率 (%)。

**中高緯度では CO<sub>2</sub> 吸収が増加し低緯度では不確実性が大きい。**

現在の陸域生態系は、全体的には炭素のシンクとなっているが、気候条件や土地利用 (過去の履歴を含む) の影響によりその空間分布は不均質である。RCP4.5 シナリオの下では、ヨーロッパからシベリアおよび北アメリカの大部分で正味 CO<sub>2</sub> 吸収が増加した。ただし、温度上昇が顕著な周極域の一部では減少する場合もあった。熱帯の変化は気候シナリオ間で差が見られ、現在よりも吸収量が減少する場合も見られた。

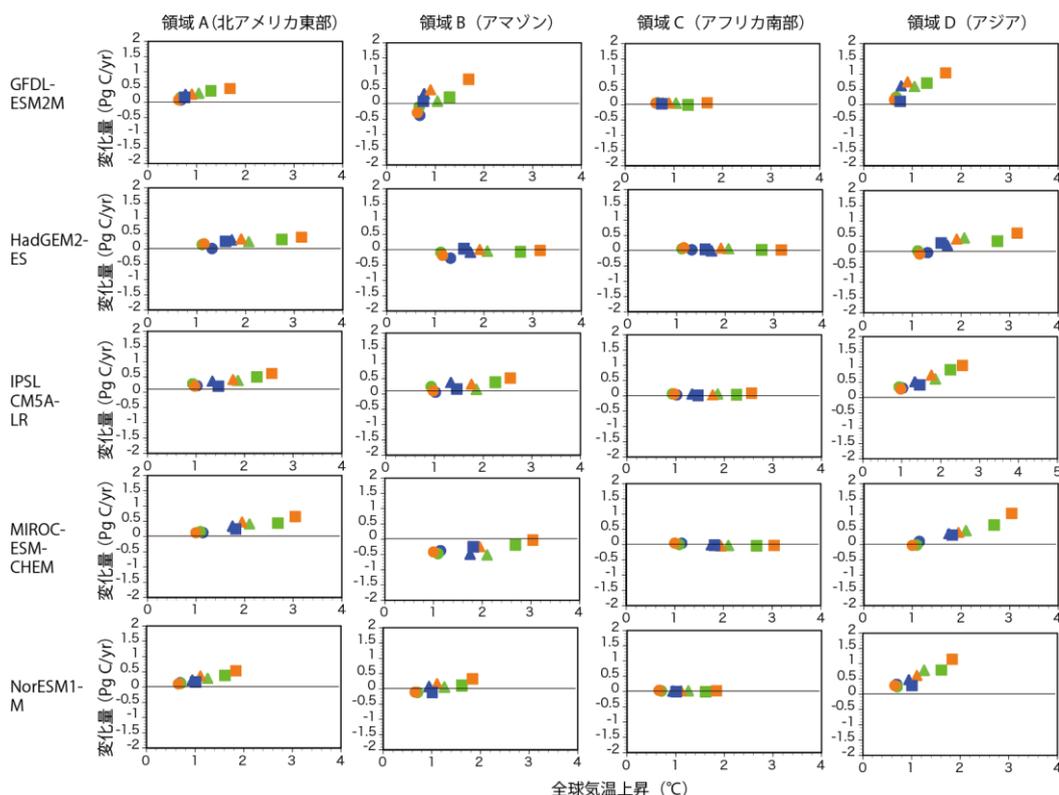


図 3-1-1-②-b-4\_2 領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する純生態系生産の現在からの変化幅。純生態系生産の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化幅 (Pg C/年) を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。正味 CO<sub>2</sub> は現在の絶対値が小さいため、相対的な変化率でなく変化の絶対量を示していることに注意。

**温度上昇に伴って中高緯度の陸域の正味 CO<sub>2</sub> 吸収が増加する。**

北アメリカ東部領域 A では温度上昇に伴い正味吸収量が増加する傾向があった。アマゾン領域 B では温度上昇に対して明確な傾向が見られず、HadGEM や MIROC の場合では温度への応答がほとんど無かった。アフリカ南部 (サバンナ地帯) 領域 C においても温度上昇に対する明確な傾向は見られなかった。アジア領域 D では、どの GCM でも吸収が増加する傾向にあったが、温度に対する応答幅には差も見られた。

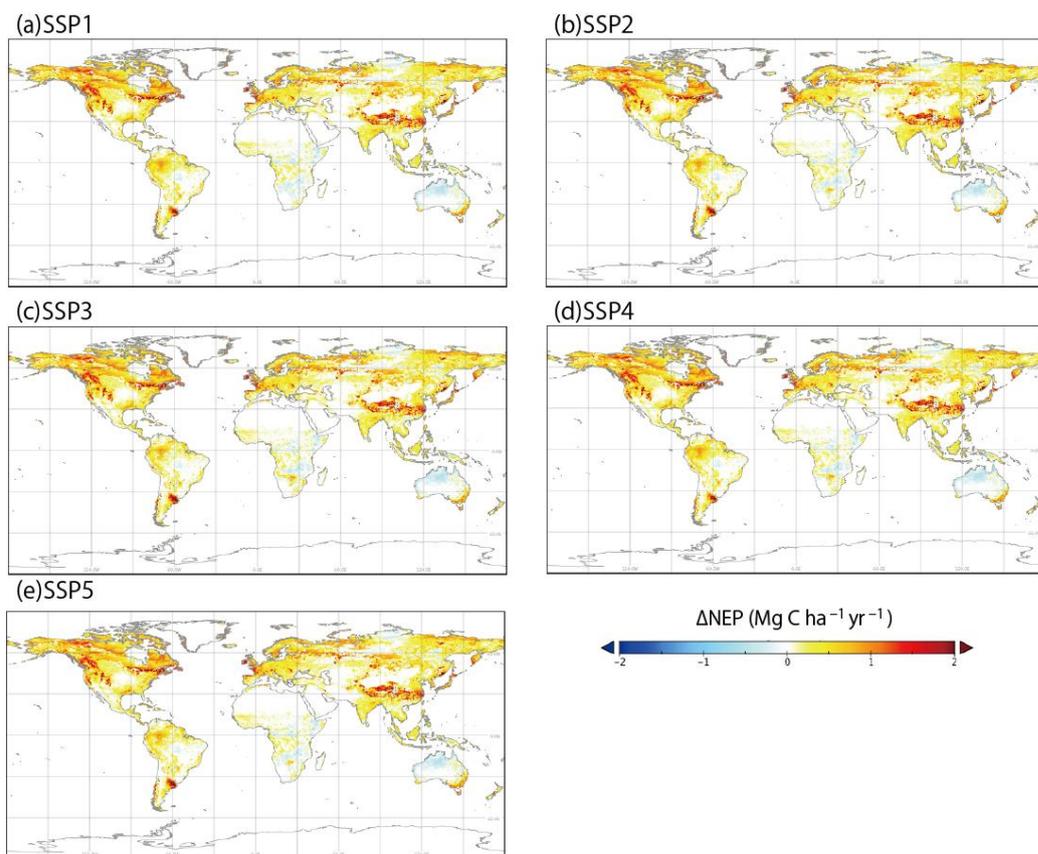


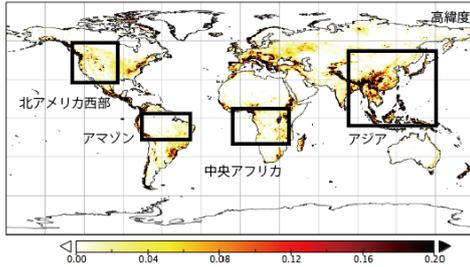
図 3-1-1-②-b-4\_3 SSP別の現在 (1986～2005年) と2080年代 (2070～2099年) の間の正味CO<sub>2</sub>収支の分布。RCP4.5における5GCM予測を用いた推定結果の平均。

**陸域生態系の正味CO<sub>2</sub>収支がSSPの差により受ける影響は小さい。**

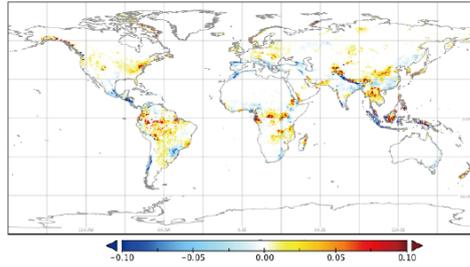
SSP間の土地利用変化の差は、自然植生と耕作地の違いをもたらすが、正味CO<sub>2</sub>吸収の強さに顕著な影響をもたらしていた地域は見られなかった。

b-5. 土壌流出

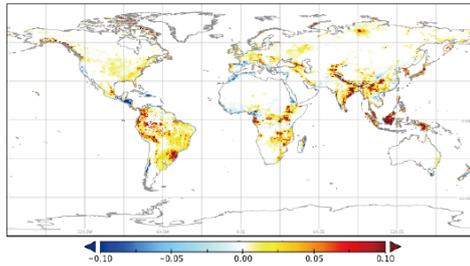
(a) 平均土壌流出 [Mg C/ha/yr] (1986-2005)



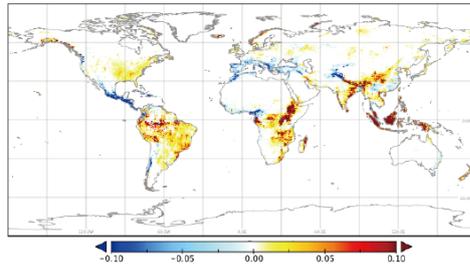
(b) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s GFDL-ESM2M



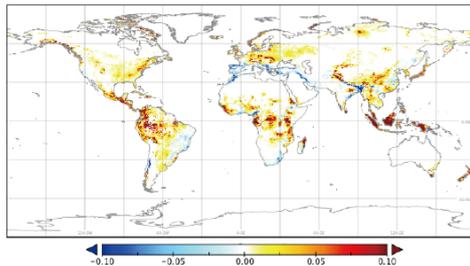
(c) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 RCP4.5-SSP2 2080s NorESM1-M

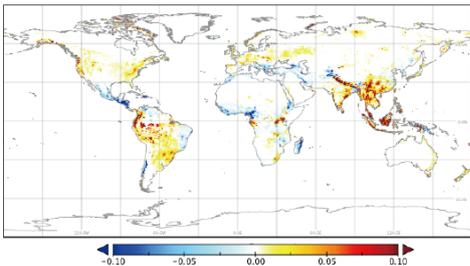


図 3-1-1-②-b\_5\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の土壌流出の平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの土壌流出の変化率 (%)。

低緯度山岳域を中心として土壌流出量が増加する。

現在の土壌流出は、多雨地・植被の少ない耕作地・急峻地形の山岳地で多い傾向がある。RCP4.5 シナリオの下では、耕作地の植林が進む中国の一部地域や、降水の減少が予測される地中海沿岸などで減少傾向が見られた。一方、降水量の増加が見込まれる熱帯湿潤地域では土壌流出が増加し、土壌が不安定化する傾向があることが予想された。

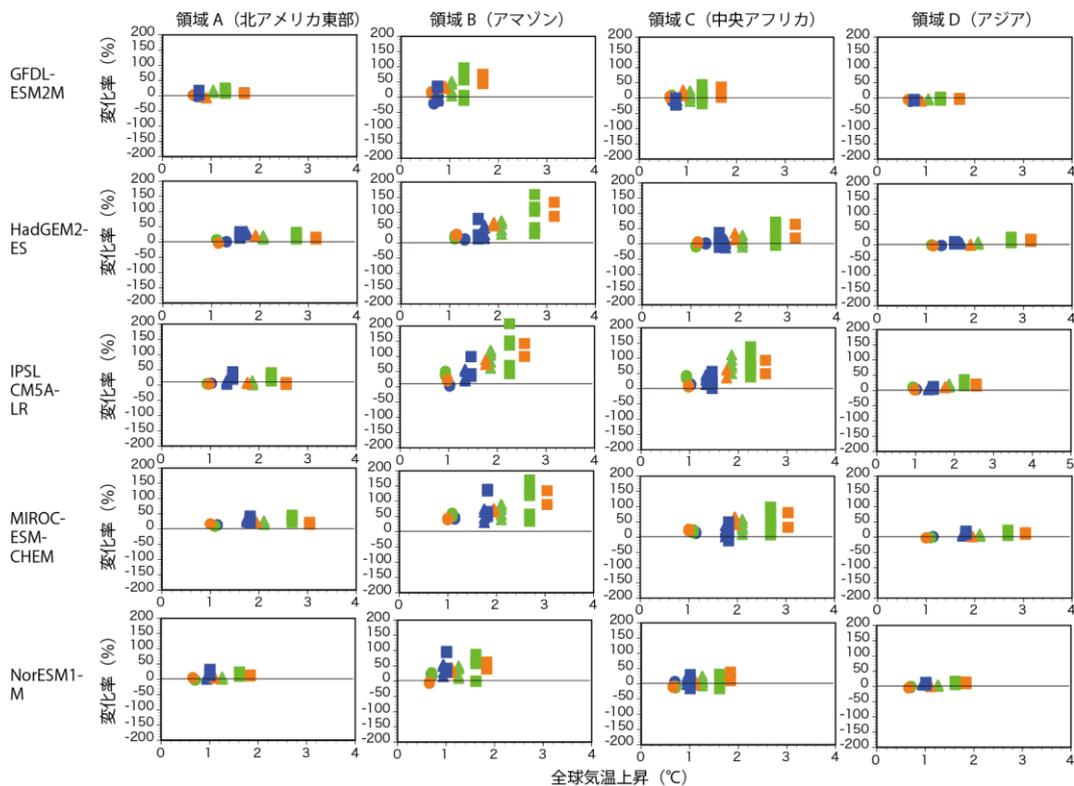


図 3-1-1-②-b\_2 領域 A～D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する土壌流出の現在からの変化率。土壌流出の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。複数 SSP (RCP によって異なる) の結果を示している点に注意。

### 温度上昇に伴って陸域からの土壌流出が増加する。

いずれの領域でも、将来的に土壌流出が増加し、また温度上昇幅との関係が見られた。これは温度の直接的な効果というよりは、並行して進む降水量変化を反映していると考えられる (モデル内では温度は土壌流出に影響を与えないため)。グローバルには土壌流出は 21 世紀中に +20～30% 増加することが見込まれた。北アメリカ東部領域 A では 21 世紀中に +40～80%、中央アフリカ領域 C とアマゾン領域 B では 100% に達する増加幅が見られる場合もあった。もともと降水量が多く急峻地も多いアジア地域領域 D での増加幅は相対的に緩やかであった。

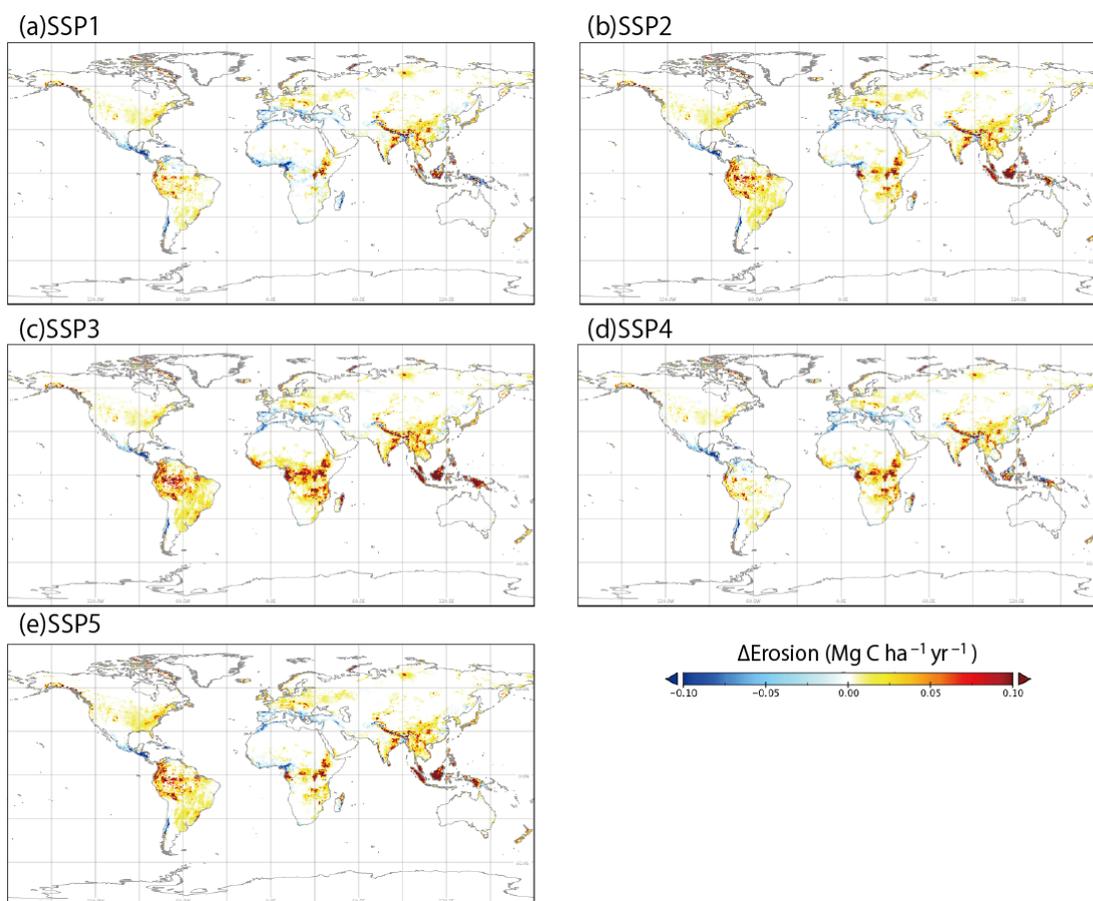


図 3-1-1-②-b-5\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の土壌流出の分布。RCP4.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

**土壌流出は耕作地転換が進む SSP の下でより進行する傾向がある。**

耕作地は、土壌保全などの対策を講じない条件では、自然植生より植被が少ないため 2 桁のオーダーで土壌流出が進みやすいとされており、耕作地転換が進む SSP 条件ではより土壌流出の進行が大きくなる傾向がある。アフリカ中央部では SSP1 より SSP3 の方で土壌流出が激化しており、またヨーロッパでは SSP1 の方が SSP3 より低下傾向 (降水減少によるもの) が強まる傾向が示された。土壌流出の増加は、生態系や耕作地における生産力の基盤となる地力低下につながる。

b-6. 野外火災

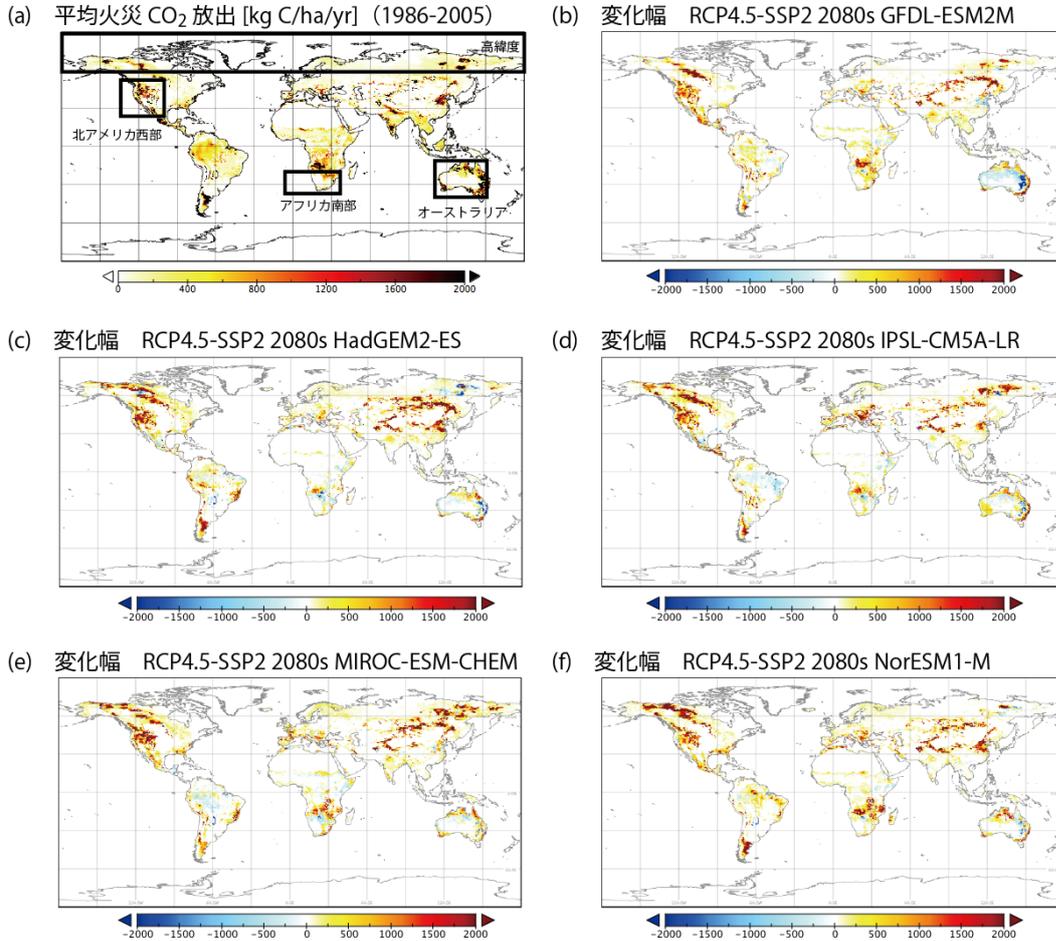


図 3-1-1-②-b-6\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の火災放出の平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年)、RCP4.5 および SSP2 シナリオでの各 GCM の現在気候からの火災放出の変化率 (%)。

亜寒帯林や半乾燥地を中心として野外火災が増加する。

現在の陸域生態系では、熱帯半乾燥地や亜寒帯林 (特に降水量の少ない東シベリアや北アメリカ北部など) で火災の発生とそれに伴う CO<sub>2</sub> 放出が大きい傾向がある。将来的には、温度上昇に伴う乾燥化や植生成長による燃料増加が生じる地域で火災増加が見込まれた。アフリカ南部、オーストラリア東部、北アメリカ西部のように現在の火災が多い地域では、さらなる火災の激化が予想される。

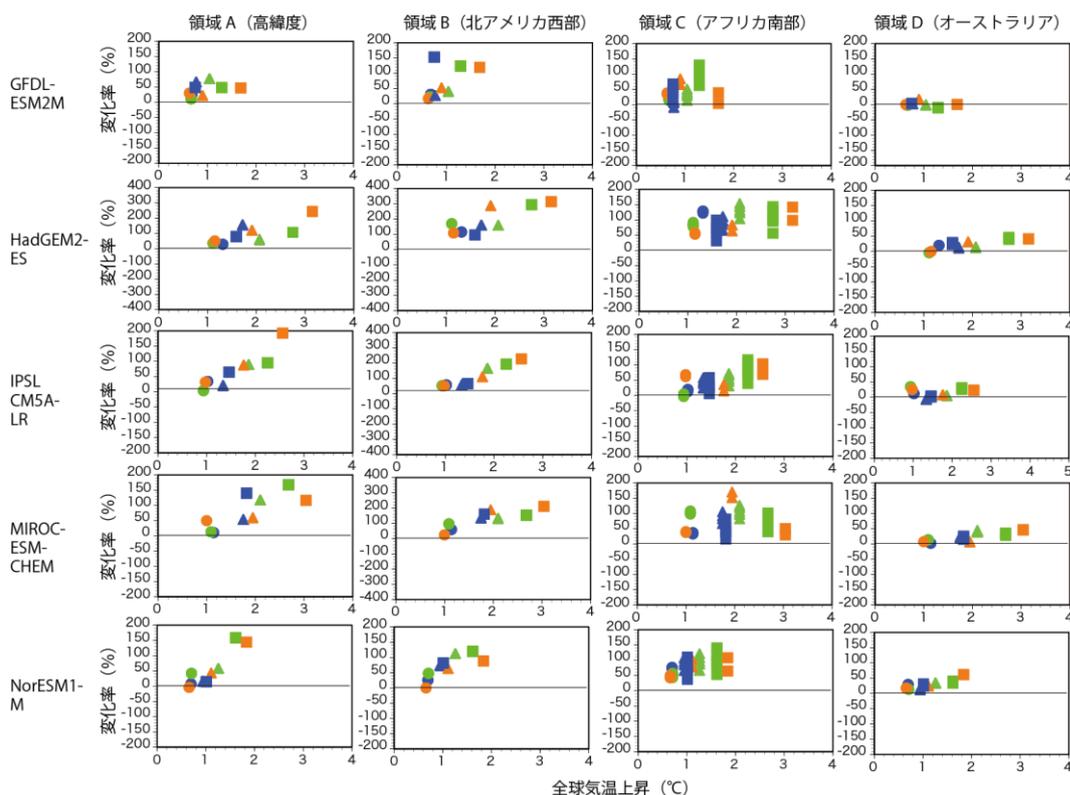


図 3-1-1-②-b\_2 領域 A～D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する野外火災放出の現在からの変化率。野外火災放出の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオ (青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する (● = 2020 年代、▲ = 2050 年代、■ = 2080 年代)。

**温度上昇に伴って陸域の火災とそれに伴う CO<sub>2</sub> 放出が増加する。**

グローバルに、そして多くの地域で温度上昇に伴う火災放出の増加 (燃焼面積や可燃物の増加、降水減少による乾燥化による) が見られた。高緯度域 A や北アメリカ西部領域 B、アフリカ南部領域 C では平均温度が 2°C 以上増加した時点で火災起源 CO<sub>2</sub> 放出が +100% 以上増加する場合もあった。オーストラリア領域 D では、一部では大きな増加が認められたが、局所的に減少している地域もあり、全体としては比較的緩やかな増加となった。GCM によって関係の強さに多少の差が見られたが、RCP 間での差は明瞭では無かった。火災の増加は、生態系だけで無く、災害として人間社会に影響を与える場合もある。

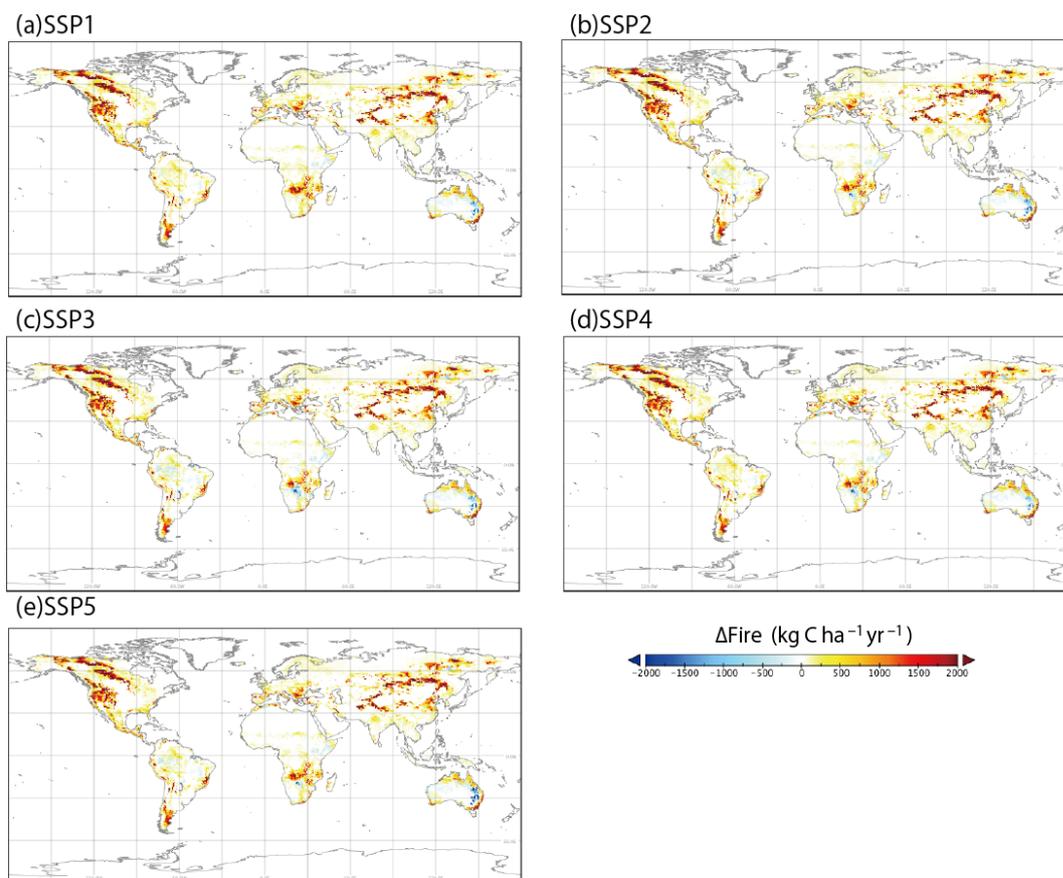


図 3-1-1-②-b\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の野外火災の分布。RCP4.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

### 野外火災は SSP の影響をほとんど受けない。

野外火災は自然のプロセスで進む要因が大きく (防火・消火活動などは今回は考慮されていない)、土地利用の差として扱われた今回の解析では SSP 間の差はほとんど見られなかった。土地利用が進むアフリカなど一部の地域では、SSP によって植生の可燃物の量が変わるため、SSP 間の差が見られる場合もあった。より高い信頼度で人為影響を考慮するには、防火林の設置など詳細な条件を与える必要がある。

### c. 水文水資源被害

#### <背景>

水は社会に不可欠の資源である。人類は河川や湖沼からの表層水や地下水を水資源として利用している。いずれも降水を起源とし、地上での蒸発散や流出などの水文過程を経て、その分布や量が決まっている。地球温暖化は降水量や蒸発散量の変化を通じて、河川や湖沼への流出量や地下水への涵養量を変化させる。

水利用は農業・工業・生活に用途が分けられる。工業・生活用水の利用は社会が低所得から高所得へと移る時期に急増するため、特に発展途上国などで今後大幅に増大すると見込

まれている。農業用水はほとんどが灌漑に利用されている。よって、農業用水の増減は灌漑農地の変化に左右されるが、地球温暖化に伴う気温の上昇による蒸発の増加や、旱魃の長期化によって灌漑需要の増大も懸念されている。

#### <本項目の重要性>

農業用水の逼迫は食料生産性に、工業・生活用水の逼迫は経済・産業活動に悪影響を与えるため、水資源量・水利用量の世界的な分布とその変化を把握し、両者のバランスを分析することは、気候変動リスクを検討するうえで極めて重要である。

#### <評価方法>

温暖化の水資源への影響を評価するためには、水資源量と水利用量、およびそれらのバランスについて評価する必要がある。まず、温暖化に伴う水資源量、つまり流出量や涵養量の変化を推定するには、基本的に地上での水文過程を解いて推定するのが一般的である。本節では全球水資源モデル H08 を利用してこの計算を実施した。次に、将来の水利用の変化については、例えば発電量と工業用水量がおおむね比例することなど、経験的事実を組み合わせた世界の長期予測がいくつか発表されている。ただし、不確実性が大きいいため、本節では人口を水利用の代替変数として利用した。ここでは、3 種類の SSP シナリオによる人口変化、4 種類の RCP シナリオによる大気中温室効果ガス濃度変化、5 種類の気候モデルによる将来気候シナリオ、に基づく計 60 ケースの計算を実施し解析を行った。

#### <指標の一覧>

1. 河川流量: 河川流量は世界の水資源量を表す最も基本的な指標である。前項で述べた通り、人間の水資源は表層水と地下水に分かれるが、長期的かつ広域的に合計すると、これらは河川流量と合致する (詳細は割愛する)。
2. Falkenmark 指標 (一人当たり水資源量) および水ストレス人口: 一人当たり水資源量は水利用を加味して地域の水資源量を捉えるためによく利用される指標である。水資源量を一人当たりで示すことにより、人口が多ければ基本的に水利用量が大きくなることを取り込むことができる。Falkenmark は一人当たり水資源量が  $1700\text{m}^3/\text{year}$  を下回る地域で水が逼迫することを経験的に見出した (Falkenmark and Rockström, 2004)。その後、 $1000\text{m}^3/\text{year}$  など閾値がいくつか追加されたが、本報告書では  $1700\text{m}^3/\text{year}$  を採用する。閾値を下回る地域に住む人口を対象となる地域について足し合わせた数を水ストレス人口と呼ぶ。ここで注意が必要なのは、水利用には地域差が大きく、人口だけで水利用量の大きさを表現しえないことである。例えば、日本とロシアは人口が同程度であるが、気候も国土面積も水利用形態も全く異なり、生活・工業・農業用水の利用量は大きく異なっている。一人当たり水資源量はあくまでも各国の相対的な順位を見たり、同一地域内の水資源量変化の符号を検討したりすることにのみ利用すべきである。

c-1. 河川流量

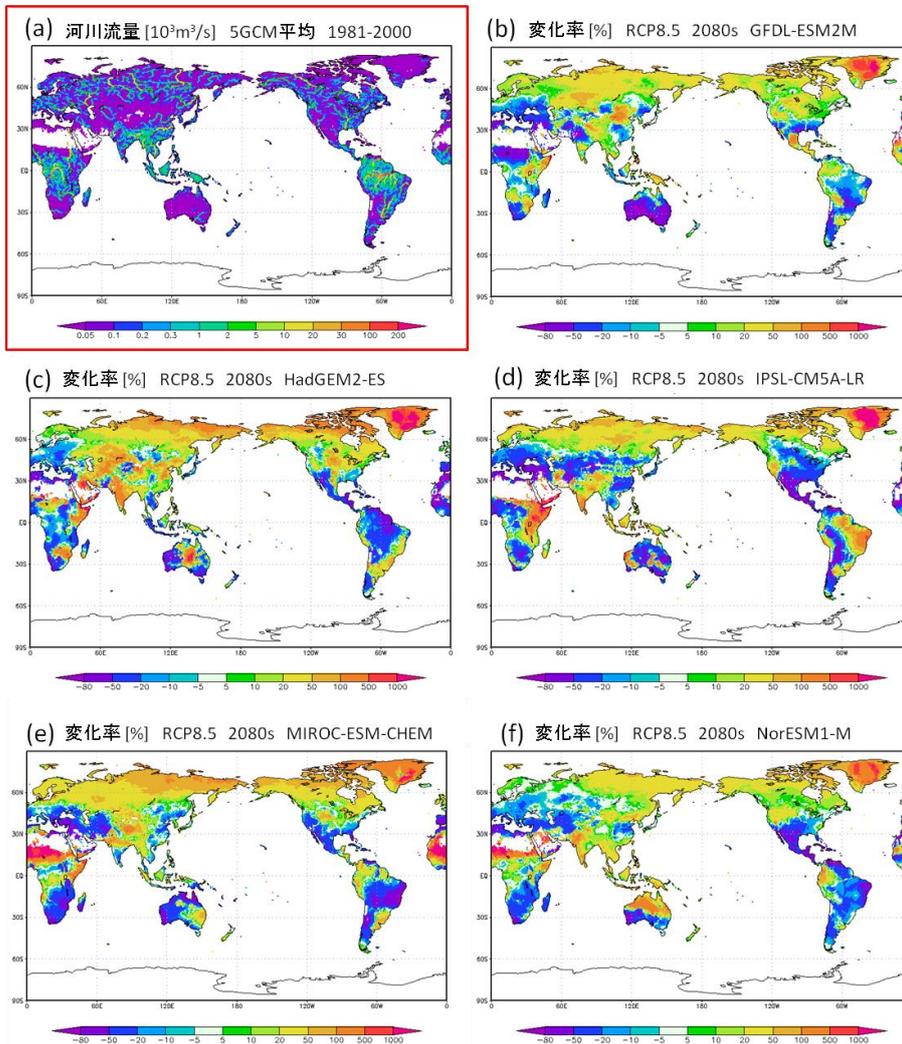


図 3-1-1-②-c\_1 (a) 現在 (1981-2000 年) の河川流量の 5GCM 平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの河川流量の変化率 (%)

**RCP8.5 シナリオでは北米南西部や地中海沿岸からカスピ海にかけての地域で河川流量が大きく減少し、北半球の高緯度で大きく増加する。**

現在気候 (1981-2000 年平均) において、河川流量は南米やアフリカ、東南アジアの赤道付近の熱帯雨林で大きい (図 3-1-1-②-c\_1 (a))。一方で、アフリカ北部、北米南西部、中央アジア、オーストラリア、地中海沿岸の乾燥・半乾燥地域では小さい。なお、アフリカ北部は極度に乾燥しているため、図 3-1-1-②-c\_1 (a) では白抜きして示されている。

河川流量は年代が進み、温暖化が進行するにつれて、現在と比べて減少する地域と増加する地域に分かれていく。RCP8.5 シナリオの場合、2080 年代には現在の半乾燥地である北米南西部 (メキシコからアメリカのカリフォルニア州・テキサス州にかけて)、地中海沿岸からカスピ海にかけての地域で現在から大きく河川流量が減少する (図 3-1-1-②-c\_1 (b)-(f))。

この原因は主にこれらの地域の降水量の減少や蒸発の強化による流出の減少による。一方で、北半球の高緯度（シベリアとカナダ北部、南アジアから東アジアにかけて）の大部分で増大する。この原因は主にこの地域の降水量の増加による。なお、これ以外の地域では GCM 間のばらつきが非常に大きい。例えば、南米の北部は HadGEM2-ES の予測がおおむね減少を示すのに対し、IPSL-CM5A-LR の予測はおおむね増加を示している。は他の 3 つの GCM では流域内での増減を示す地理的なパターンに大きな差異がみられる。

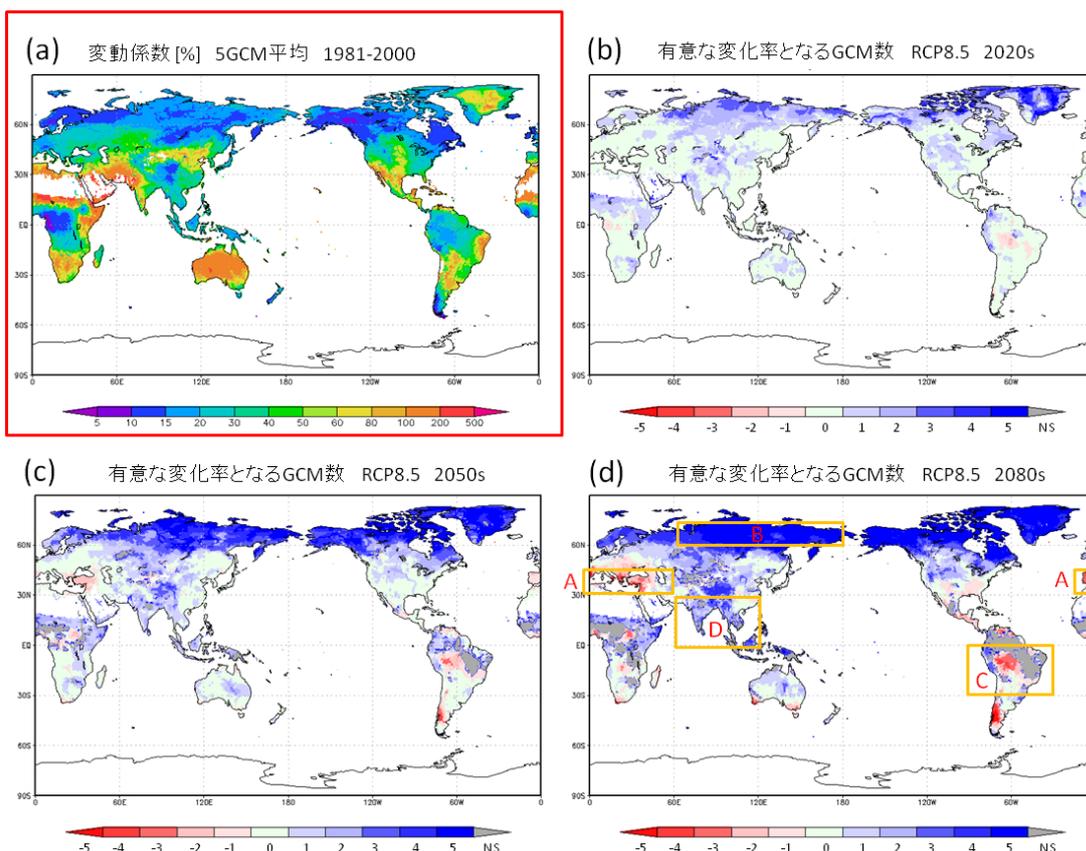


図 3-1-1-2-c\_2 (a) 河川流量の変動係数。すなわち、各 GCM による現在期間（1981-2000 年）の標準偏差を同期間の平均値で除した後、5GCM の平均を取ったもの。(b)-(d) RCP8.5 シナリオにおいて、河川流量の現在からの変化（各年代平均）が標準偏差以上となった GCM の数。

**河川流量の北半球の高緯度での増加と地中海沿岸およびブラジル中央部での減少が各 GCM 共通の傾向。**

現在気候（1981-2000 年平均）において、河川流量の年々変動（標準偏差を平均値で除した変動係数として表示）は、北半球の高緯度および温帯で小さく、乾燥・半乾燥地域で大きい（図 3-1-1-2-c\_2 (a)）。

河川流量の変化が年々変動を上回る地域は年代が進み、温暖化が進行するにつれて増加する。北半球の高緯度（図 3-1-1-2-c\_2 (d) の B）および南・東南アジア地域（同 D）で見られる増加と地中海沿岸およびブラジル中央部（図 3-1-1-2-c\_2 (d) の A および C）で見られ

る減少は、5つのGCM内での一致度が高い(図3-1-1-②-c\_2(b)-(d))。

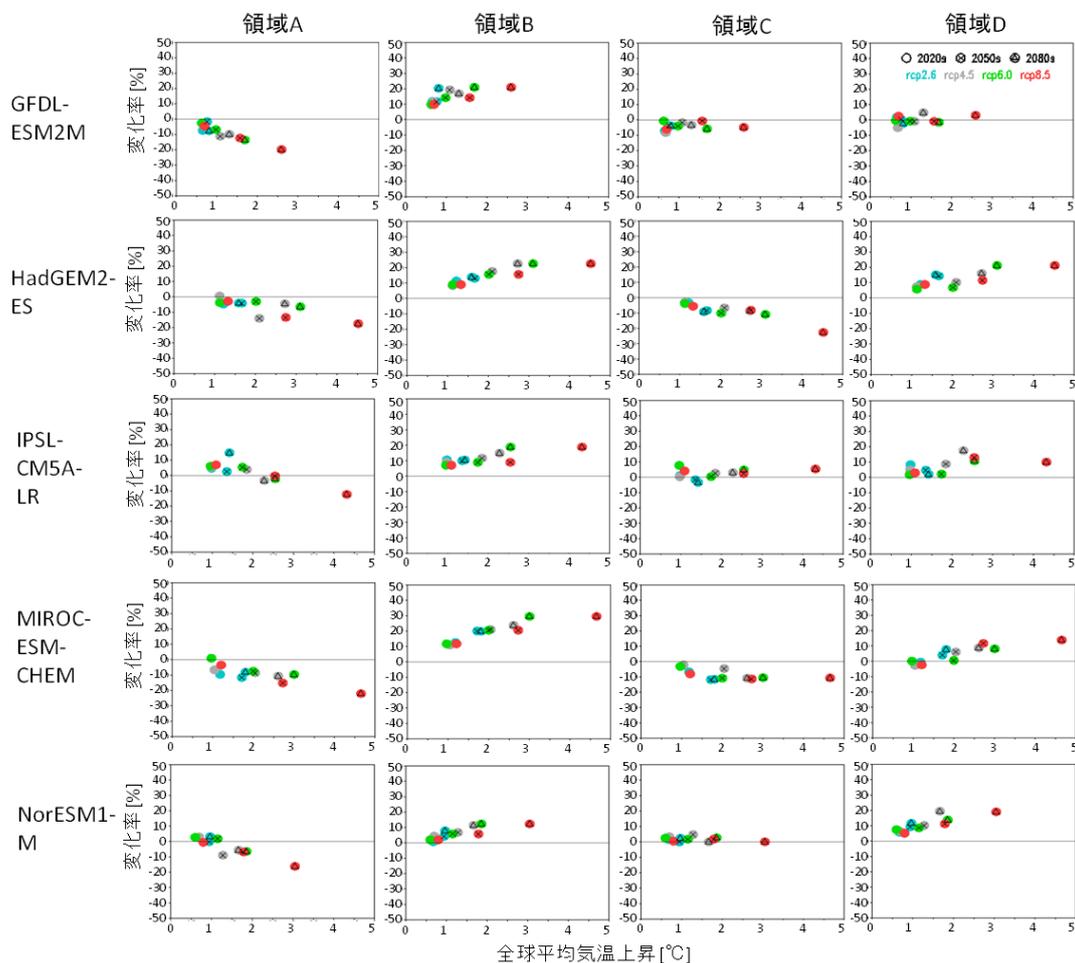


図 3-1-1-②-c\_3 図 3-1-1-②-c\_2 (d)の領域 A-Dにおける、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する河川流量の現在からの変化率。河川流量の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代(2020年代、2050年代、2080年代)、色がRCPシナリオに対応する。

**河川流量の変化は気温の変化とおおむね比例する場合が多い。**

図 3-1-1-②-c\_3 には、図 3-1-1-②-c\_2 (d) 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河川流量の現在からの変化を示した。河川流量が現在に比べて増加する北半球の高緯度 (B) および南・東南アジア地域 (D) では程度の違いがあるものの、気温の変化が大きくなるにつれて河川流量の変化も大きくなる。ブラジル中央部 (C) では明瞭な関係が見られないものの、地中海沿岸 (A) ではやはり同様の比例関係が見られた。これらから、全球平均気温上昇度は河川流量の変化の程度を示す代替指標となることが示される。ただし、図 3-1-1-②-c\_3 から読み取れるように、GCM により相関関係の強さやその傾きが大きく異なることには注意が必要である。また、図 3-1-1-②-c\_2 に示された通り、GCM によって変化の符号が異なる地域が多いことにも注意が必要である。

c-2. Falkenmark 指標および水ストレス人口

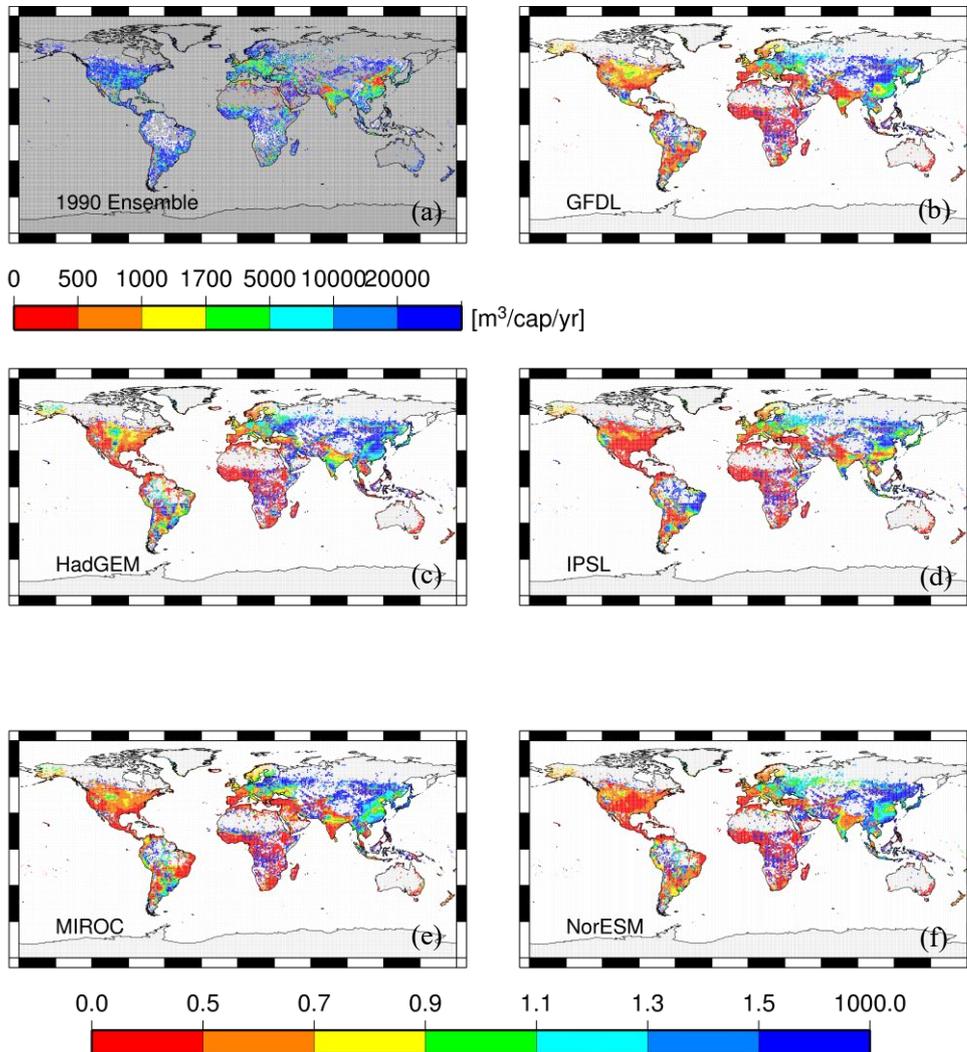


図 3-1-1-②-c\_4 (a) 現在 (1981-2000 年) の一人当たり水資源量の 5GCM 平均値、(b)~(f) 2080 年代 (2070-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの河川流量の変化率 (%)

**RCP8.5 シナリオでは一人当たり水資源量は東アジアを除いた多くの地域で減少する。**

現在気候 (1981-2000 年平均) において、一人当たり水資源量は北米・南米の大部分や東南アジアなど  $10000m^3/人$  となり、大きい。一方でインド亜大陸西部や南部、中国東北部、中近東・北アフリカの一部など  $1700m^3/人$  以下となり、小さい (図 3-1-1-②-c\_4 (a))。なお、アフリカ北部やシベリアなど、人口密度が非常に低い地域は、図 3-1-1-②-c\_4 (a) ではグレーで示されている。

一人当たり水資源量は年代が進んで、温暖化が進行し、人口が変動するにつれて、現在と比べて減少する地域と増加する地域に分かれていく。RCP8.5 シナリオの場合、現在と比べ

て 2080 年代には世界の多くの地域で一人当たり水資源量が減少する (図 3-1-1-②-c\_4 (b)-(f))。これは水資源量 (河川流量) の変化 (図 3-1-1-②-c\_1 (b)-(f)) と一部を除いて対応していないことから分かる通り、主に人口の増加による。一方で、北東アジアや中央ヨーロッパの大部分で増大する。この原因はこの地域の人口が減少に転じるのに加え、流出量が増加する (図 3-1-1-②-c\_1 (b)-(f)) ことによる。なお、増減のパターンは GCM 間でおおむね一致するものの、変化率については GCM 間のばらつきが非常に大きい。例えば、北米中部は GFDL-ESM2M が 30%未満の減少を示すのに対し、NorESM1-M や IPSL-CM5A-LR では 50%以上の大きな減少を示している。

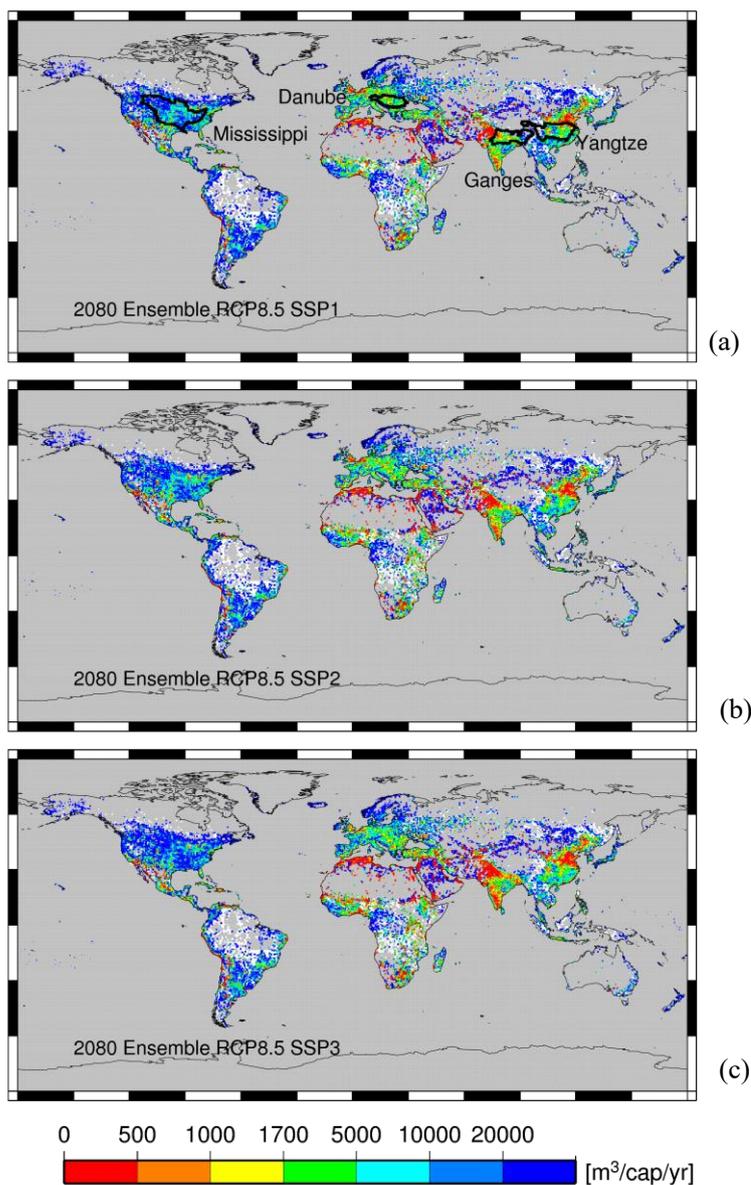


図 3-1-1-②-c\_5 (a)-(c)SSP1,2,3 の 2080 年代 (2070-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの一人当たり水資源量 (m³/人)

### 一人当たり水資源量は人口増加の大きい SSP3 で小さくなる傾向がある

一人当たり水資源量は、水資源量を人口で除して求めるため、人口増加が大きいシナリオほど値が小さくなる。2080 年代において、例えばアフリカ中央部において、人口増加の大きい SSP3 の一人当たり水資源量が、SSP1 に比べて小さくなるのが見られる (図 3-1-1-②-c\_5)。一人当たり水資源量、およびこれをもとにした Falkenmark 指標による水ストレス人口は人口シナリオの依存性が高いことに留意すべきである。

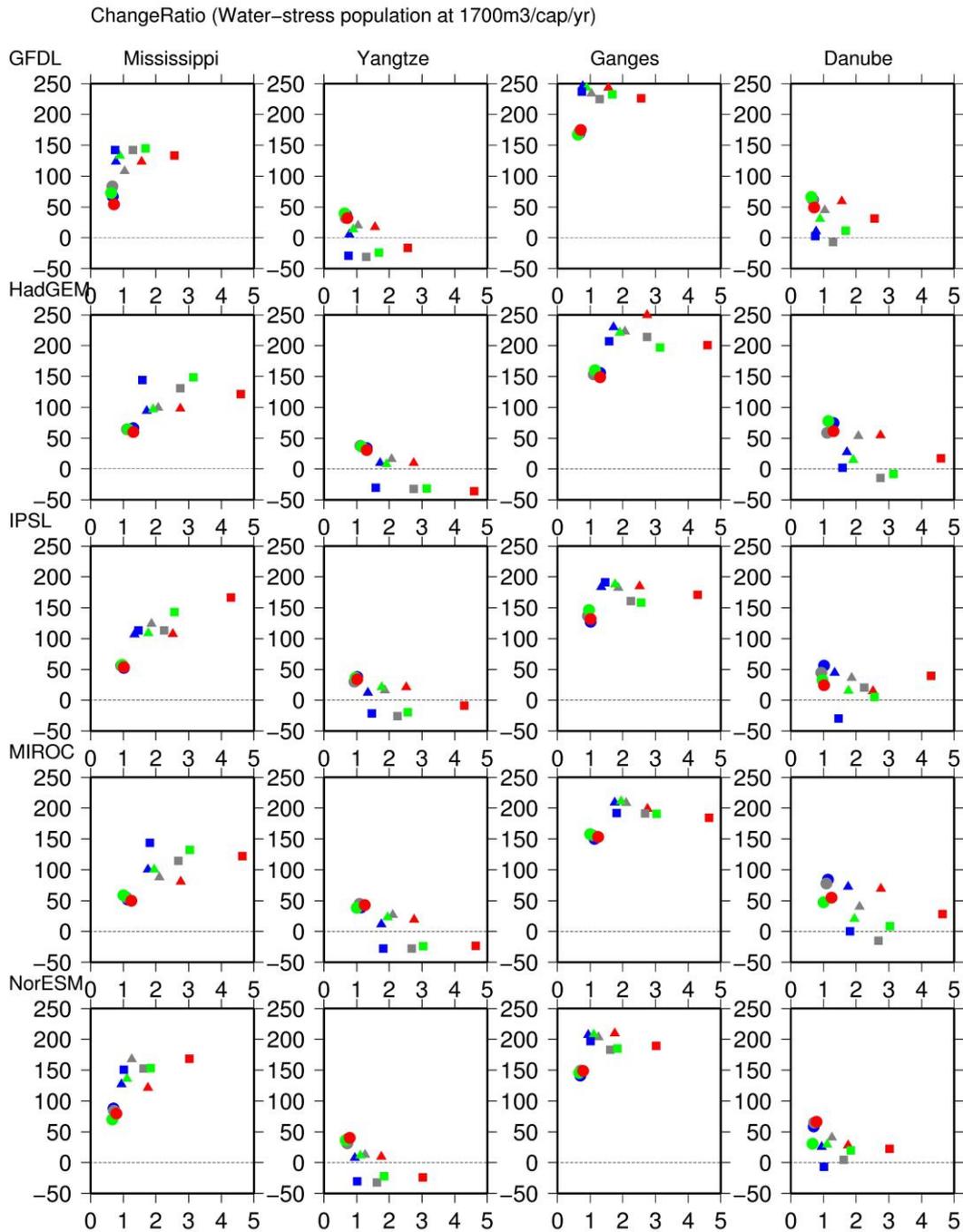


図 3-1-1-②-c\_6 ミシシッピ、長江、ガンジス、ドナウ川における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する水ストレス人口の変化率 (%)。河川流量の各年代平均値を流域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークと色の凡例は図 3-1-1-②-c\_3 を参照のこと。人口は SSP2 シナリオである。

水ストレス人口の変化は気温の変化と対応して見える場合もあるが、無関係である。

図 3-1-1-②-c\_6 には、ミシシッピ川、長江、ガンジス川、ドナウ川における、各 GCM の

全球平均気温上昇度に対する水ストレス人口の現在からの変化を示した。前述した通り、水ストレス人口は人口の増減にも強く依存し、図 3-1-1-②-c\_6 のように気温上昇だけを説明変数にした図においては、解釈には特に注意が必要である。図 3-1-1-②-c\_6 のミシシッピ川と長江において、同じマーク（年代）間において類似の値を示すことに端的に表される通り、水ストレス人口は RCP や気温上昇に対して感度を持たない。なお、全体として気温上昇に対する水ストレス人口の増減が対応するよう見えるのは、各年代の人口が変わっているからである。すなわち、ミシシッピ川と長江では、○（2020 年代）、△（2050 年代）、□（2080 年代）と時間が進むにつれて人口がそれぞれ増加、減少している。2050 年代（△）に人口がピークを迎えるガンジス川では 2050 年代に水ストレス人口もピークがある。

#### d. 洪水・沿岸被害

##### <背景>

洪水は気候に関連した、最も主要な災害のひとつである。毎年の洪水による損失は数百億ドルに達し、死者数は数千人と言われている。洪水による経済的損失及び死傷者の数は、地球温暖化（や気候システムの内部変動）による気候変化によって将来増加する可能性がある。しかし、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ている。しかしながら 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。そこで本稿では、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。

また、IPCC 第五次評価報告書では気温上昇に伴う海面水位の上昇が予測されていると共に、熱帯低気圧強度が将来増大する可能性も述べられている。そこで、選択肢最終版では、上記の河川洪水に加えて地球温暖化が沿岸部に与える影響も評価するため、熱帯低気圧および海面上昇に対する経済影響の推計を行った。

##### <本項目の重要性>

地球温暖化で極端降水の強度と頻度が多くの地域で増加する可能性が IPCC 第五次評価報告書で指摘されている。極端降雨は洪水を引き起こし得るが、洪水は社会経済に大きな被害を及ぼす場合があるため、地球温暖化が洪水被害に与え得る影響が懸念される。従って、気候変動のリスク管理を行う上で、地球温暖化による洪水被害の変化を見積もる事は重要である。そこで本項目では、洪水暴露人口と洪水暴露 GDP という二つの指標を用いて、将

来の洪水被害の変化を推計する。

世界の多くの地域において沿岸部は資産が集積しているが、熱帯低気圧の強化や海面上昇は、それら資産の損失や人命に関わる影響を与えうる。従って、熱帯低気圧の強度変化や海面上昇によって地球温暖化が沿岸部に与える影響を評価する事は重要だと考えられる。そこで、沿岸部の経済被害に着目し、熱帯低気圧及び海面上昇の経済影響推計を行う。

#### <評価方法>

洪水暴露人口と洪水暴露 GDP を指標として、将来の洪水リスクを評価する。本研究では、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（注1）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。

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。

熱帯低気圧及び海面上昇の経済影響はそれぞれ、統合評価モデルFUNDの影響関数を用いて推計を行う。FUNDで使われている熱帯低気圧の影響関数は、Narita et al. (2009)に基づくものである。海面上昇の影響関数はTol (2002)で示されたものが用いられており、その関数にはFankhauser (1994)で提案された費用便益式が組み込まれている。なお、計算の不安定化をできるだけ避けるため、各GCMの全球平均気温および社会経済シナリオは、11年移動平均した値を影響関数への入力に利用している。

なお、熱帯低気圧経済影響と海面上昇経済影響についても、洪水暴露人口・暴露GDPと同様に、分析ケースに従ったシナリオ（4通りのRCPシナリオ×5つの気候モデル×3通りの

SSP シナリオによる人口および GDP) の組み合わせに対して評価を行う。即ち、計 60 ケースの将来像に対する計算を行う。ただし、熱帯低気圧経済影響と海面上昇経済影響の推計対象は、FUND で用いられている 16 地域の世界区分に従い、その地域毎に推計する。

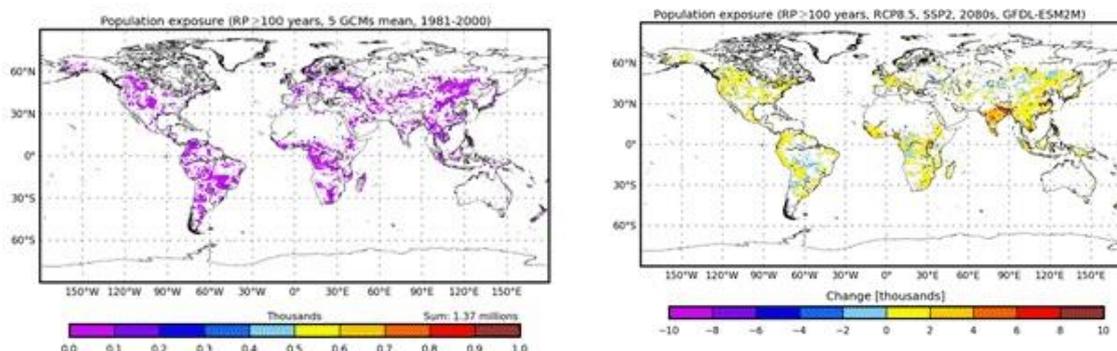
#### <指標の一覧>

本項では以下の四つの指標を扱う。

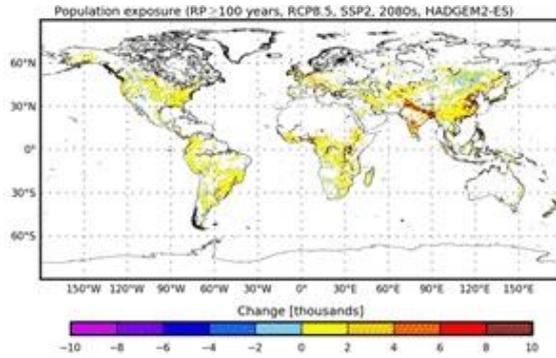
1. 洪水暴露人口: 洪水リスクのポテンシャルが高い人の数を示す (堤防等の洪水防御施設の効果は考慮していない)。洪水暴露人口は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所におけるその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計することで算出する。
2. 洪水暴露 GDP: 洪水による経済被害のポテンシャルを示す。洪水暴露 GDP は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所のその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計し、その合計値に、該当する国の一人あたり GDP を掛けた値として算出する。
3. 熱帯低気圧経済影響: 熱帯低気圧による経済被害額の推計値を表す。なお、熱帯低気圧経済影響を推計するための関数のパラメータは、過去の災害統計 (EM-DAT) に記載されている経済被害額を基に調整されているため、この式を用いた熱帯低気圧経済影響の推計は、過去の災害統計値に基づいたものである。なお、本研究での解析では、経済影響は全て該当年の全球 GDP に対する被害額の比で示している。
4. 海面上昇経済影響: 海面上昇による経済被害額の推計値を表す。推計される海面上昇経済影響は過去の災害統計等に基づいたものではなく、文献から設定した土地の価値 (乾燥地および湿地の価値) や防護コスト、移住コストに基づいて推計された値となる。なお、熱帯低気圧経済影響と同様に、経済影響は全て該当年の全球 GDP に対する被害額の比で示している。

#### d-1. 洪水暴露人口

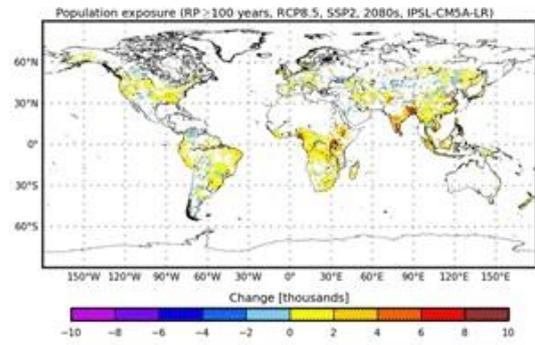
(a) 5 つの GCM における洪水暴露人口の平均 (b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



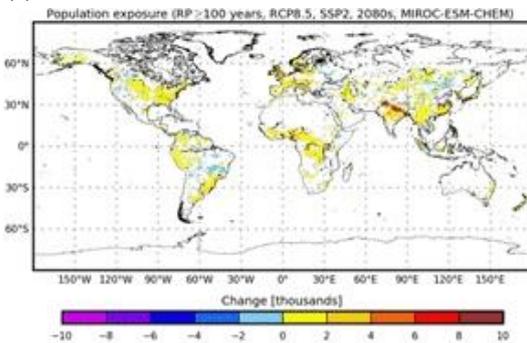
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

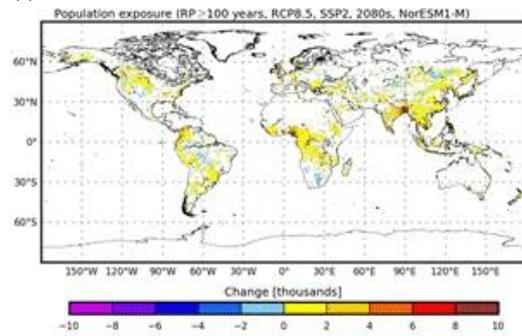
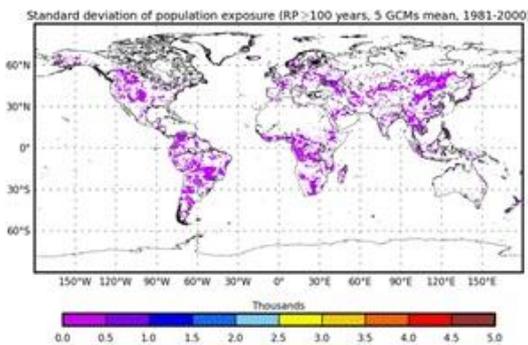


図 3-1-1-②-d-1\_1 (a) 現在 (1981~2000 年) の洪水暴露人口の平均値。(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099) での各 GCM の現在気候からの洪水暴露人口の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

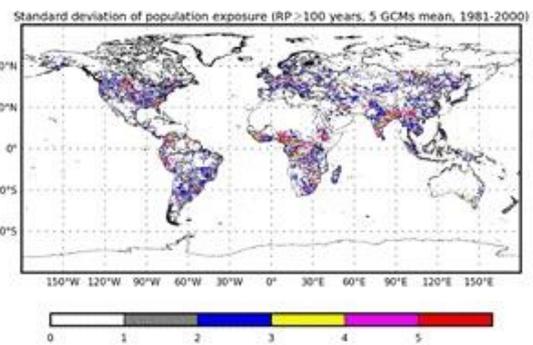
**将来気候ではアジアの大部分、アフリカの低緯度域、南アメリカ等で洪水暴露人口が増加。**

現在気候では、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、現在気候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。

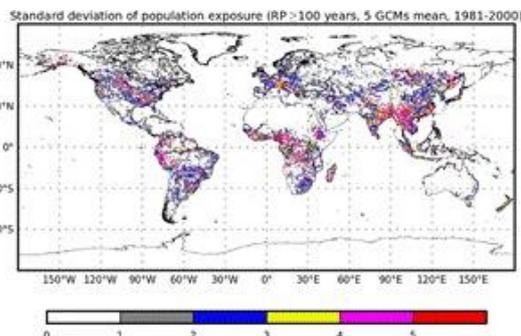
(a) 標準偏差 (現在期間) 5GCM 平均 1981~2000



(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

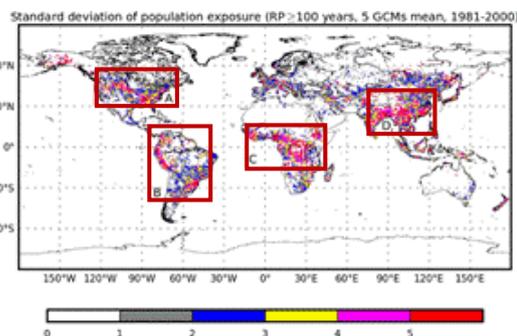


図 3-1-1-②-d-1\_2 (a) 現在期間 (1980~2000) における 5 つの GCM の洪水暴露人口の標準偏差の平均。各 GCM の現在期間の標準偏差以上の平均値変化 (将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値) を示した GCM の数 (b) 2020s、(c) 2050s、(d) 2080s。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

**RCP のレベルが上がる程、アジア、アフリカ低緯度域、北アメリカ北部、南アメリカにおいて洪水暴露増加を示す GCM 数が増加。**

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、現在からの変化率が大きい領域 A、B、C、D(図 3-1-1-②-d-1\_2) について詳しく見ていきたい。

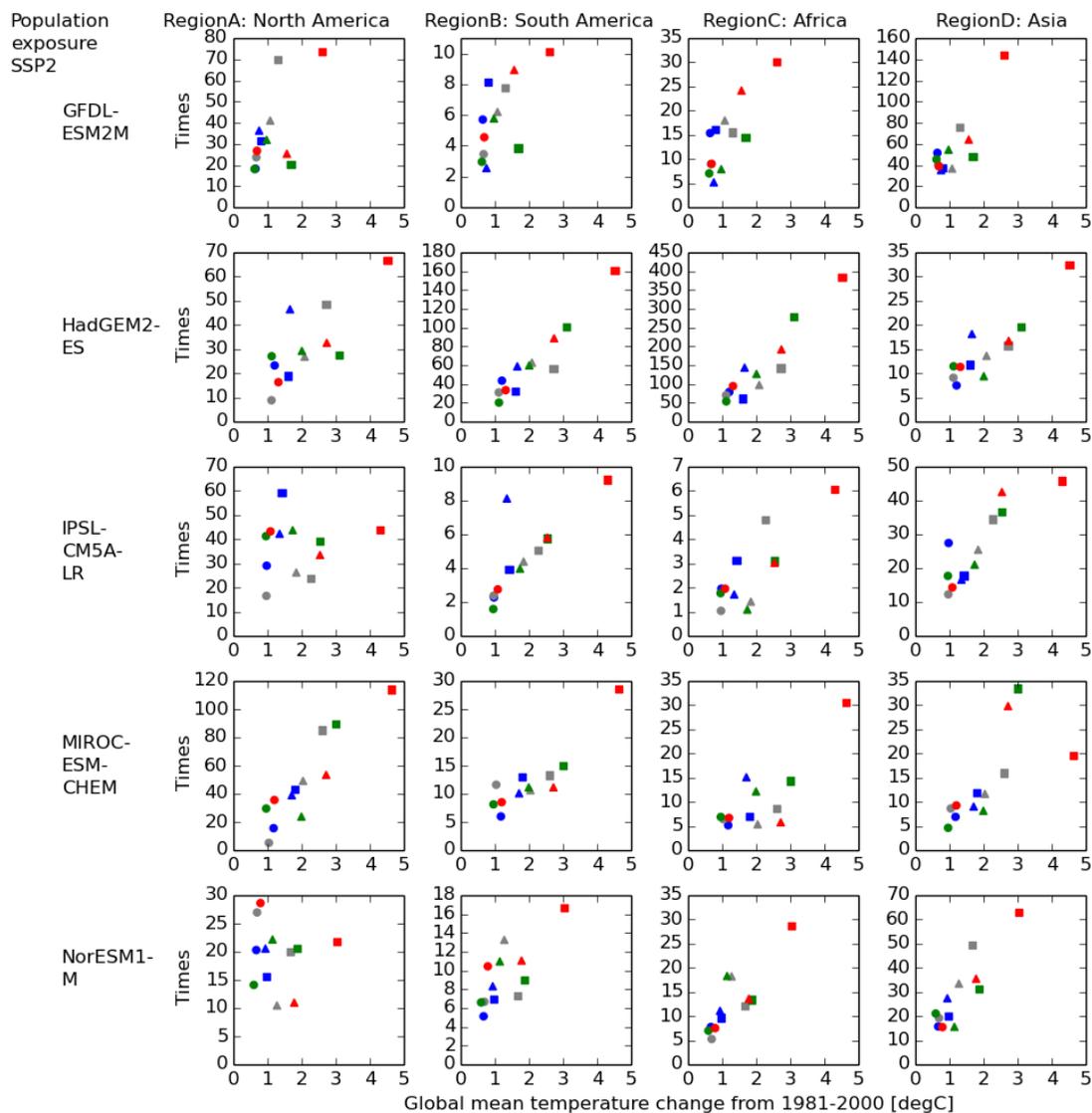


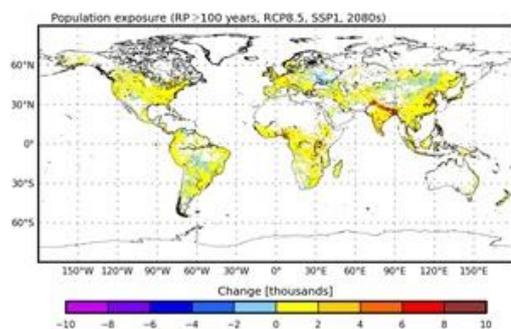
図 3-1-1-②-d-1\_3 図 3-1-1-②-d-1\_2 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する洪水暴露人口の現在からの変化率。洪水暴露人口の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオ (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) に対応する。社会経済シナリオは SSP2 として洪水暴露人口を計算している。シミュレーション結果における気候の内部変動により、30 年平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。

全球平均気温の上昇に従って洪水暴露人口は増加する傾向がある。また、北アメリカ北部、アジアは洪水暴露人口の変化率が大きい。

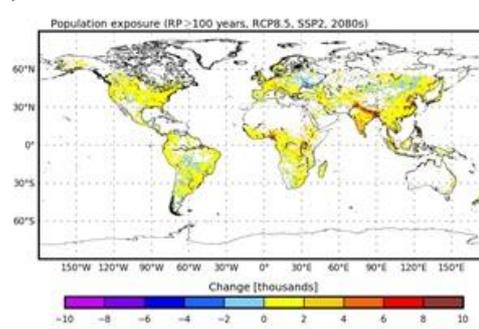
GCM によってばらつきはあるものの、4 つのどの領域においても全球気温の上昇に従って洪水暴露人口は増加する傾向がみられる。特に、北アメリカ北部 (領域 A) およびアジア (領域 D) は、洪水暴露人口の増加率が非常に大きい。特に RCP8.5 では、2060 年代、2080 年代にはこれら二つの領域では洪水暴露人口が十~数十倍との推計結果となっている。なお、

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  $14 \pm 10$  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となる可能性が推察される。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

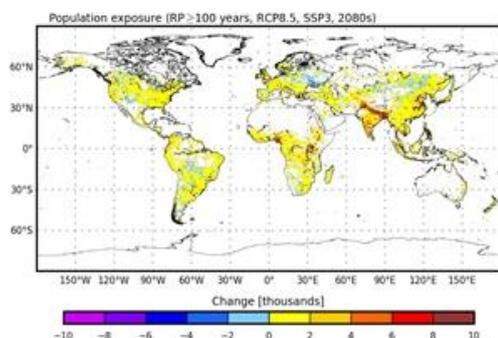


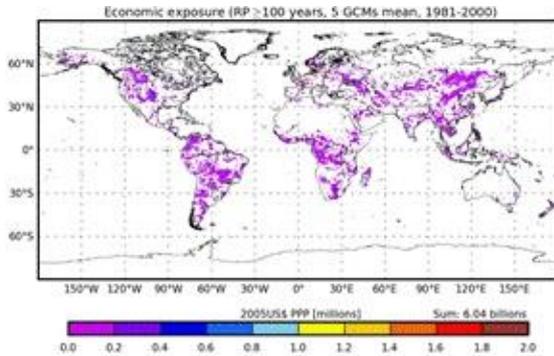
図 3-1-1-②-d-1\_4 現在期間から 2080 年代 (2070~2099) への洪水暴露人口の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には 5 つの GCM を用いている。また、RCP8.5 を用いており、(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。

**SSP1 が洪水暴露人口の増加幅が最も小さく、次いで SSP2、SSP3 の順に洪水暴露人口が増加。**

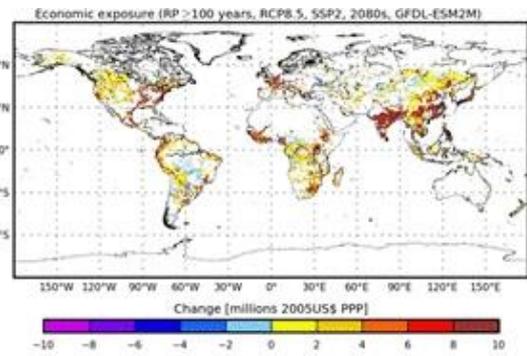
(a)、(b)、(c) に示したどのシナリオにおいても、洪水暴露人口の変化幅の空間分布は似ている。また、洪水暴露人口の増加幅を見ると、SSP1 (32.3 百万人) < SSP2 (40.9 百万人) < SSP3 (55.5 百万人) となっている。また、各 SSP シナリオとも、南アジアで大幅な洪水暴露人口の増加がみられる領域がある。ユーラシア大陸やラテンアメリカの一部では、洪水暴露人口が減少する領域がみられるものの、世界全体としては洪水暴露人口はどの SSP シナリオであっても増加の予測である。

d-2. 洪水暴露 GDP

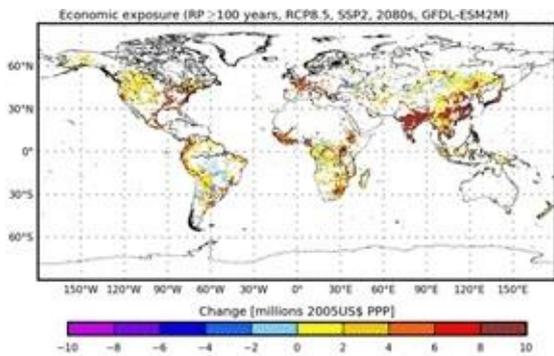
(a) 5つの GCM における洪水暴露 GDP の平均



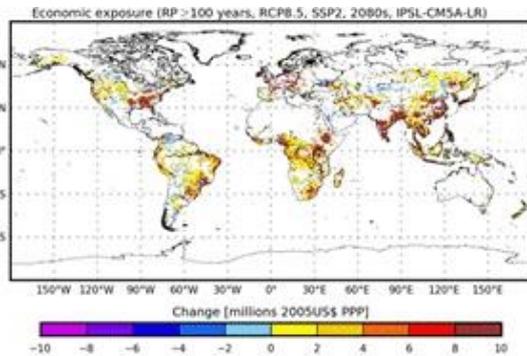
(b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



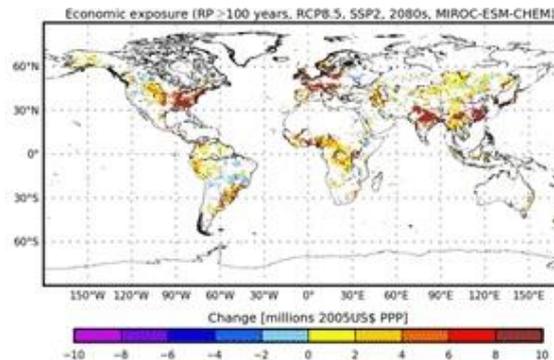
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

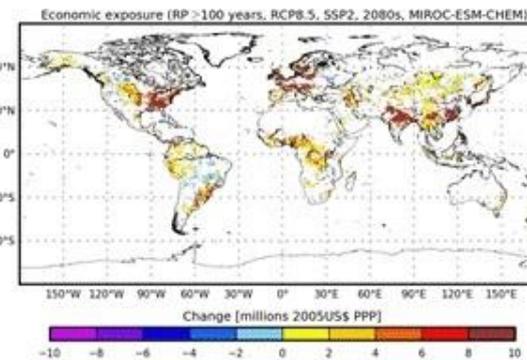


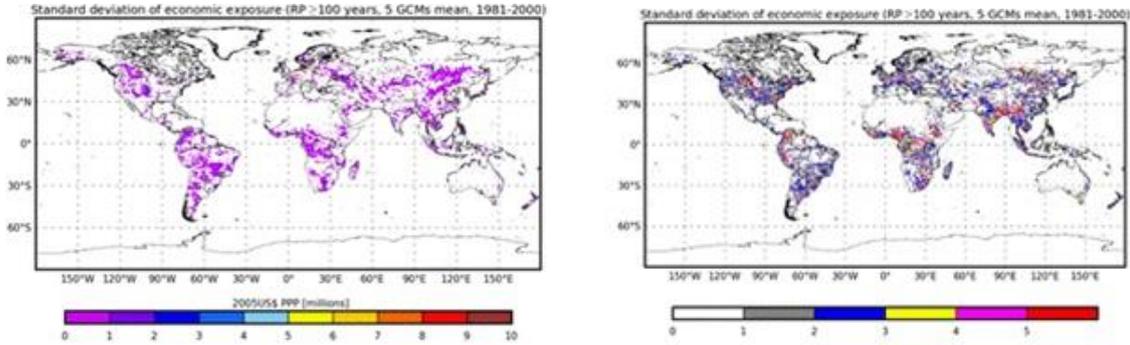
図 3-1-1-②-d-2\_1 (a) 現在 (1981~2000 年) の洪水暴露 GDP の 5GCM 平均値。(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099)、における各 GCM の現在気候からの洪水暴露 GDP の変化幅。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

将来気候ではアジア、アフリカ低緯度域、南アメリカ等で洪水暴露 GDP が増加。

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

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。

(a) 標準偏差 (現在期間) 5GCM 平均 1981~2000 (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

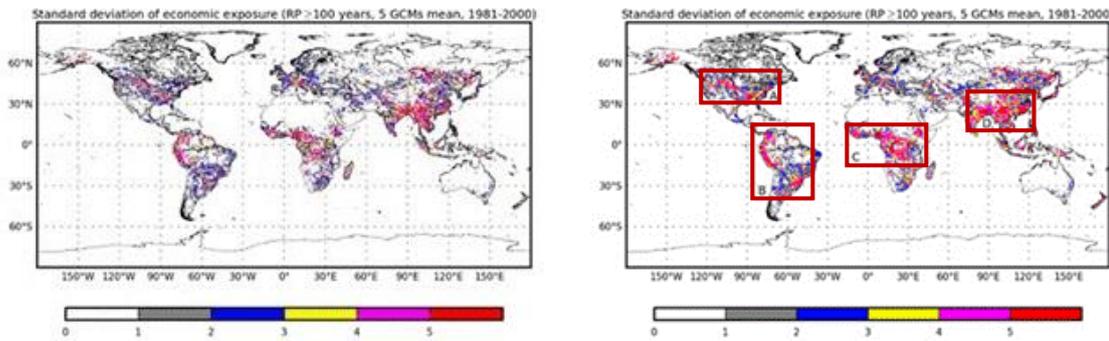


図 3-1-1-②-d-2\_2 (a) 現在期間 (1980~2000) における 5 つの GCM の洪水暴露 GDP の標準偏差の平均。各 GCM の現在期間の標準偏差以上の平均値変化 (将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値) を示した GCM の数 (b) 2020s, (c) 2050s, (d) 2080s。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

**RCP のレベルが上がる程、アジア、アフリカ低緯度域、北アメリカ北部、南アメリカにおいて洪水暴露 GDP の増加を示す GCM 数が増加。**

洪水暴露 GDP の将来変化の基本的な傾向は、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。

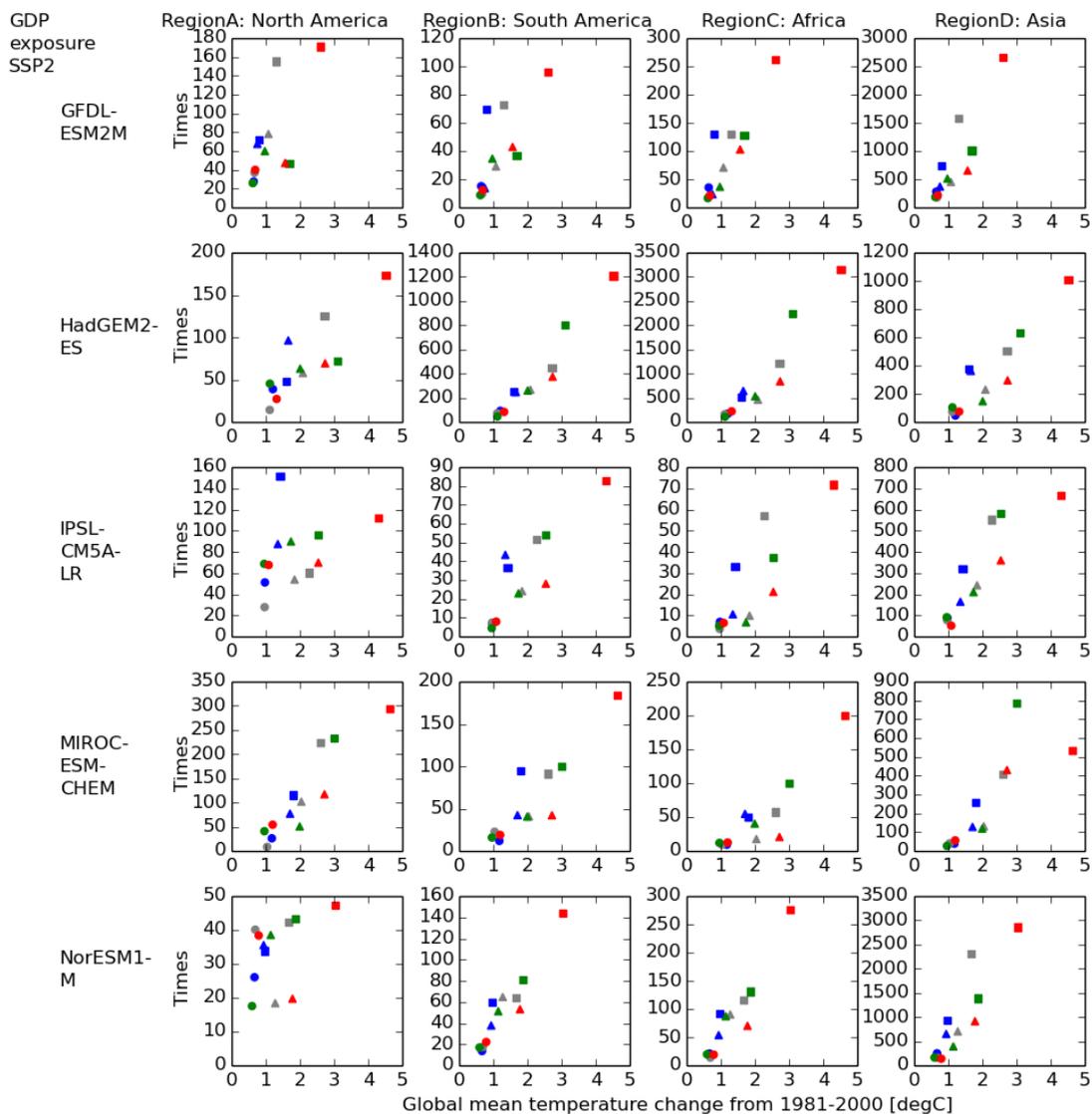


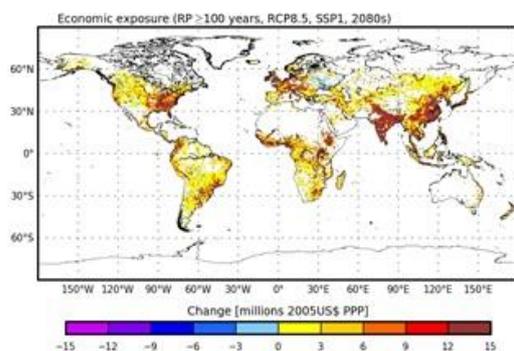
図 3-1-1-②-d-2\_3 図 3-1-1-②-d-2\_4 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する洪水暴露 GDP の現在からの変化率。洪水暴露 GDP の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代, △: 2050 年代, □: 2080 年代)、色が RCP シナリオ (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) に対応する。社会経済シナリオは SSP2 として洪水暴露人口を計算している。シミュレーション結果における気候の内部変動により、30 年平均しても小さくないランダム誤差が残っていることに注意が必要。

**全球平均気温の上昇に従って洪水暴露 GDP は増加する傾向がある。アジアは洪水暴露 GDP 化率が著しい。**

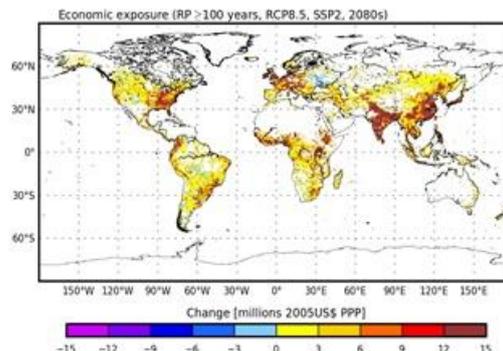
GCM によってばらつきはあるものの、4 つのどの領域においても全球気温の上昇に従って洪水暴露 GDP は増加する傾向がみられる。全体的な傾向として、洪水暴露人口と比べて洪水暴露 GDP は、気温上昇と変化率との関係がより明瞭である。また、アジア (Region D) は、温度上昇に伴って洪水暴露 GDP の著しい上昇がみられ、数百倍~千倍以上の変化率を示している。なお、洪水暴露 GDP の推計は将来の洪水暴露人口にその国の一人当たり GDP

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。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

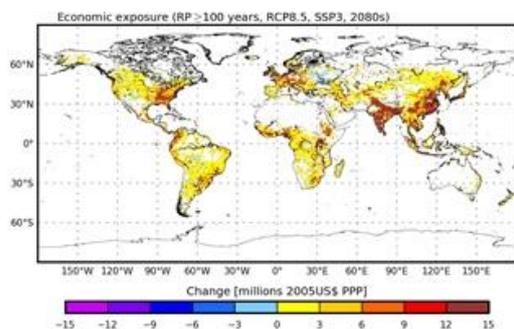


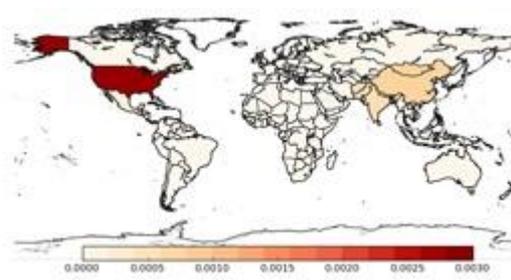
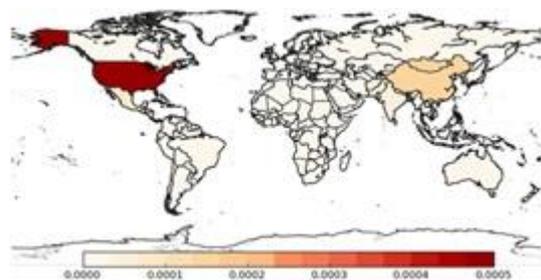
図 3-1-1-②-d\_2\_4 現在期間から 2080 年代 (2070~2099) への洪水暴露 GDP の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には 5 つの GCM を用いている。また、RCP8.5 を用いており、(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。

**SSP1 が洪水暴露 GDP の増加幅が最も大きく、SSP3 がもっとも増加幅が小さい。**

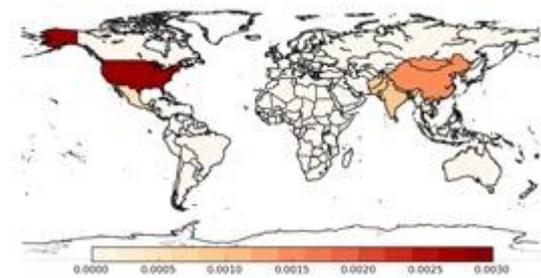
洪水暴露 GDP の増加幅は、SSP1 (19,420 億 2005 US\$ PPP) > SSP2 (16,374 億 2005 US\$ PPP) > SSP3 (8,640 億 2005 US\$ PPP) となっている。また SSP1 と SSP3 を比較すると、インド、中国では SSP1 が SSP3 より広範囲に渡って洪水暴露 GDP の増加が見られる。また、全球的に見ても洪水暴露 GDP が減少する地域はほとんど見受けられない。なお、SSP3 は洪水暴露 GDP の増加幅が比較的小さいが、人口増加が大きいいため洪水暴露人口の増加幅は大きく、洪水被害 GDP が小さいからといって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。

### d-3. 熱帯低気圧経済影響

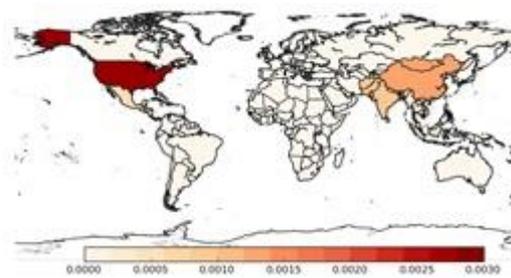
(a) 熱帯低気圧経済被害の 5GCM 平均 (1986 ~2005) (b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



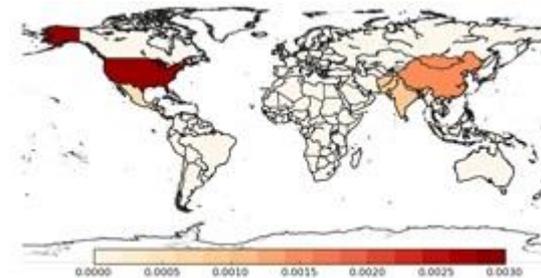
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

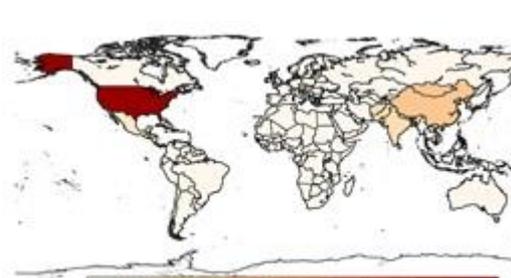


図 3-1-1-②-d-3\_1 (a) 現在 (1986~2005 年) の熱帯低気圧経済影響の平均値。経済影響は全球 GDP 比で示している。(b)~(f) 2080 年代 (2070~2099 年) での各 GCM の熱帯低気圧経済影響の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

#### 熱帯低気圧経済影響は増加し、将来の増加幅は USA で最も大きい。

図 3-1-1-②-d-3\_1(a) より現在期間では、熱帯低気圧経済被害は USA が最も大きい値を示している。

また、USA よりは値がかなり小さいものの、中国周辺地域および日本・韓国域も現在期間において比較的大きな被害を示している。また、図 3-1-1-②-d-3\_1 (b)~(f) より USA が被害の将来増加幅が最も大きい。また、現在期間で比較的大きな経済影響を示していた中国周辺地域でも被害の増加が見られる。また、南アジア域は現在期間でやや大きな被害を示しており、将来における被害の増加も見受けられる。全般的な傾向として、GCM の違いによる変化の傾向の違いは比較的小さい。

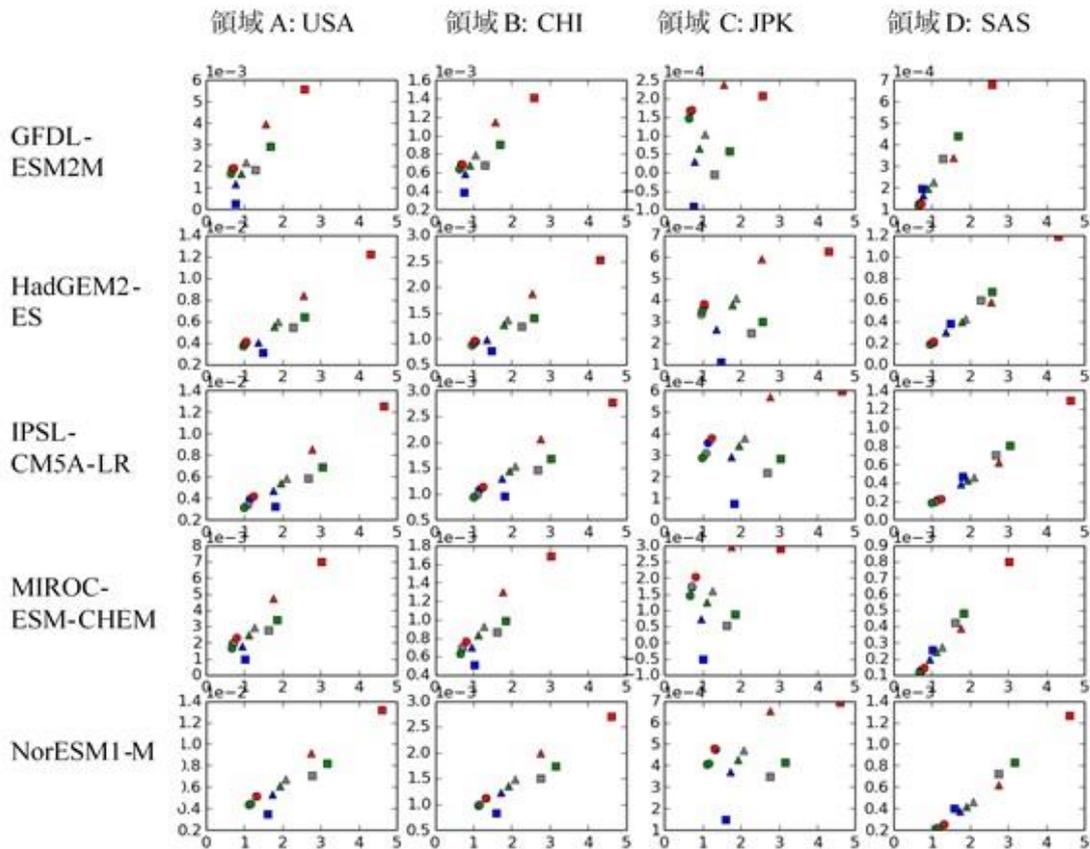


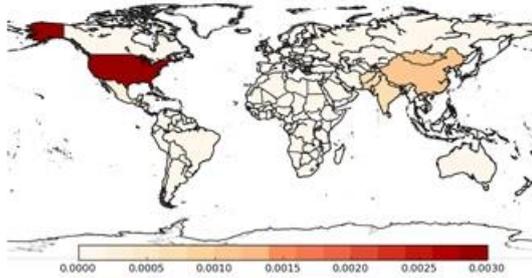
図 3-1-1-②-d-3\_2 各 GCM の全球平均気温上昇度に対する熱帯低気圧経済影響の現在からの変化量。熱帯低気圧経済影響 (全球 GDP 比) の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化量 (将来の平均値 - 現在の平均値) を算出した。マークが年代 (●: 2020 年代、▲: 2050 年代、■: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6、緑: RCP4.5、橙: RCP6.0、赤: RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP2 としている。

USA: United States of America, CHI: China, Hong Kong, North Korea, Macau, Mongolia, JPK: Japan, South Korea, SAS: Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, India, Nepal, Pakistan, Sri Lanka

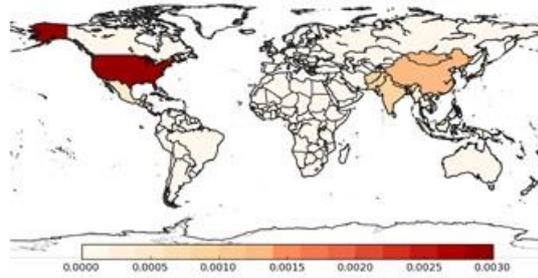
**RCP8.5 では、年代が進むにつれて気温上昇に対して被害が増加する関係がどの 4 地域でも明確だが、RCP2.6 では年代が進むにつれて被害が減少する。**

図 3-1-1-②-d-3\_2 より RCP8.5 では、年代が進むにつれて気温上昇に対して被害が増加する関係がどの 4 地域でも明確に見られる。一方 RCP2.6 では、年代が進むにつれて被害が必ずしも増加する訳ではない。むしろ RCP2.6 では例えば 2020 年代と 2080 年代を比較すると、一人当たり GDP の増加によって、熱帯低気圧影響関数における脆弱性を表す項が小さくなり、その結果将来は全球 GDP 比で見た場合の被害が小さくなっている。また、RCP4.5 では、2020 年代と 2050 年代で比較すると被害が大きくなる傾向があるが、2050 年代と 2080 年代を比べると、被害が同程度または被害が減少するという傾向を示している場合が多い。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

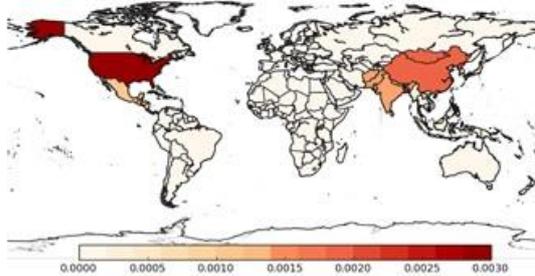


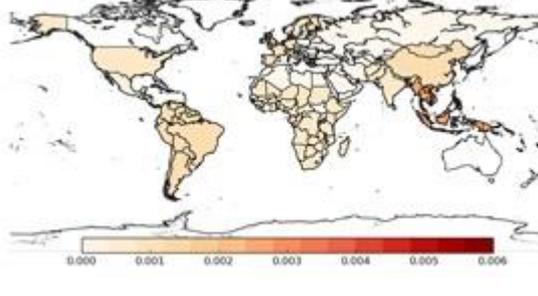
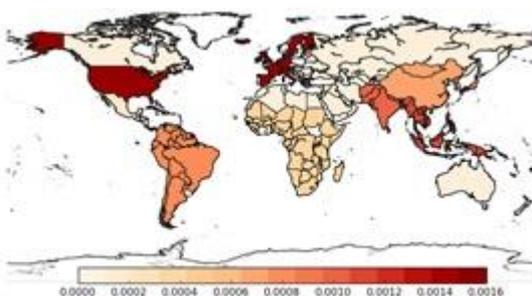
図 3-1-1-②-d-3\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の熱帯低気圧被害の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均を用いている。

**社会経済シナリオは SSP3 の場合が最も被害が大きい傾向がある。**

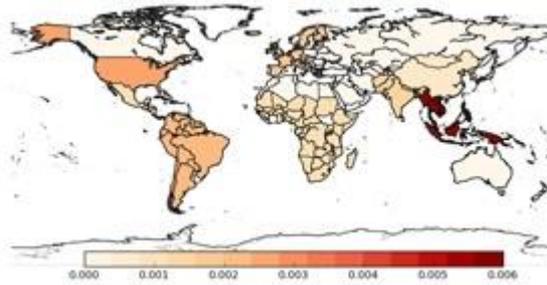
SSP1 と SSP3 を比べると、例えば中国周辺域、南アジア域で、SSP3 は SSP1 より顕著に大きな被害を示している。また、USA においても同様の傾向が見られた。これは、SSP3 と比べて SSP1 は一人当たり GDP が大きく、SSP3 の場合よりも適応が進む社会が想定されるためと考えられる。

d-4. 海面上昇経済影響

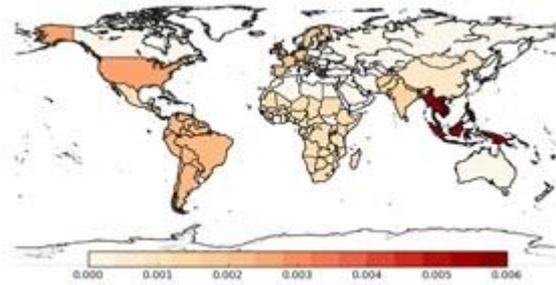
(a) GCM 海面上昇経済被害の 5GCM 平均 (1986~2005) (b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



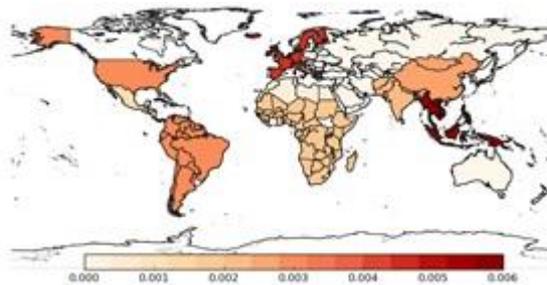
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

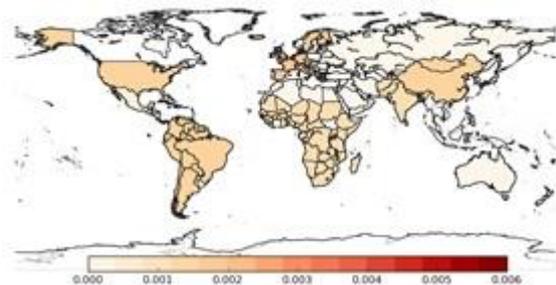


図 3-1-1-②-d-4\_1 (a) 現在 (1986～2005 年) の海面上昇経済影響の平均値。経済影響は全球 GDP 比で示している。(b)～(f) 2080 年代 (2080～2089) での各 GCM の現在気候からの海面上昇経済影響の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

**海面上昇影響は多くの地域で将来増加し、東南アジア域で増加幅が大きい。**

図 3-1-1-②-d-4\_1 より、現在期間では USA および西ヨーロッパ域が他地域より被害の値が大きく、南アジア域でもやや高い値を示している。将来 (2080 年代) の変化幅を見ると、3 つの GCM (HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM) が東南アジア域で大きな増加幅を示している。現在期間での海面上昇影響が大きな値を示している USA、西ヨーロッパ域における将来の被害の変化幅は、東南アジア域よりは小さいものの、比較的大きな増加を示している。

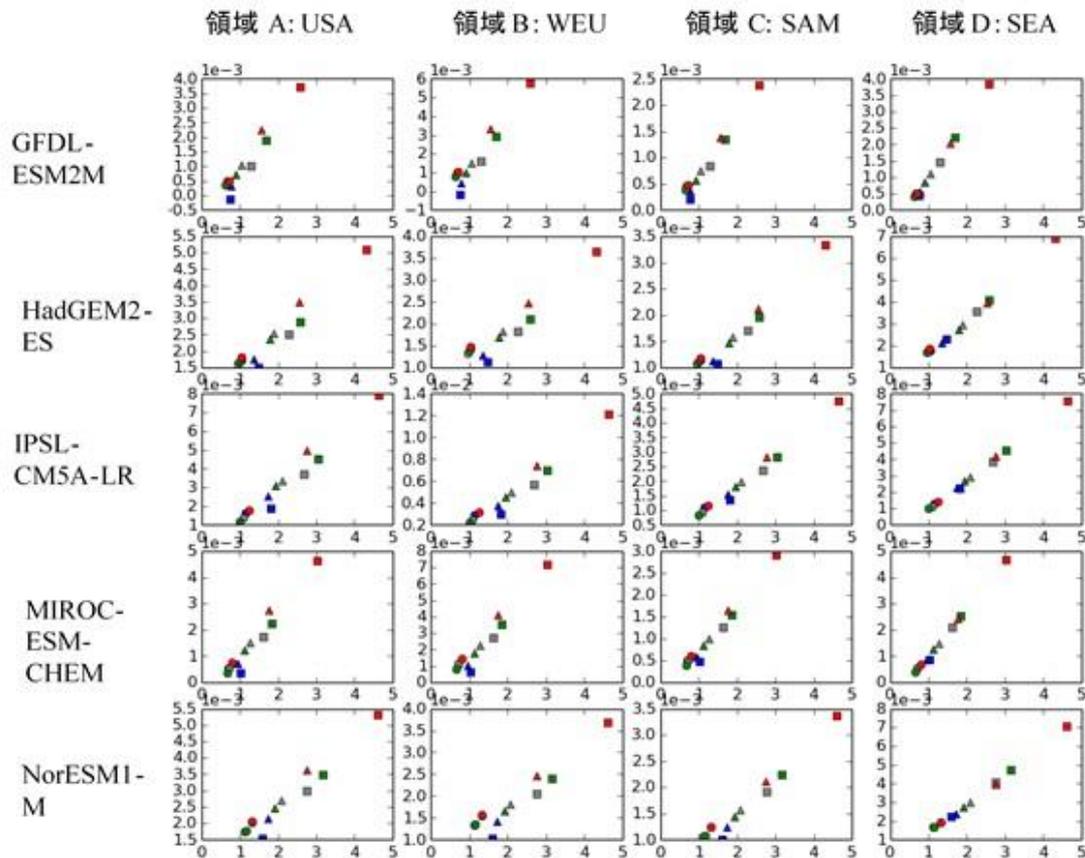


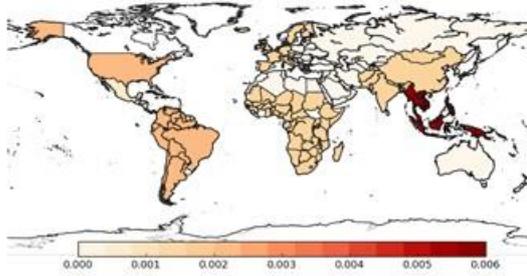
図 3-1-1-②-d-4\_2 各 GCM の全球平均気温上昇量 (横軸) に対する海面上昇経済影響 (縦軸) の現在からの変化量。海面上昇経済影響 (全球 GDP 比) の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化量 (将来の平均値－現在の平均値) を算出した。マークが年代 (●: 2020 年代、▲: 2050 年代、■: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6、緑: RCP4.5、橙: RCP6.0、赤: RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP2 を用いている。

USA: United States of America, WEU: Andorra, Austria, Belgium, Cyprus, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Liechtenstein, Luxembourg, Malta, Monaco, Netherlands, Norway, Portugal, San Marino, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom, SAM: Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, French Guiana, Guyana, Paraguay, Peru, Suriname, Uruguay, Venezuela  
SEA: Brunei, Cambodia, East Timor, Indonesia, Laos, Malaysia, Myanmar, Papua New Guinea, Philippines, Singapore, Taiwan, Thailand, Vietnam

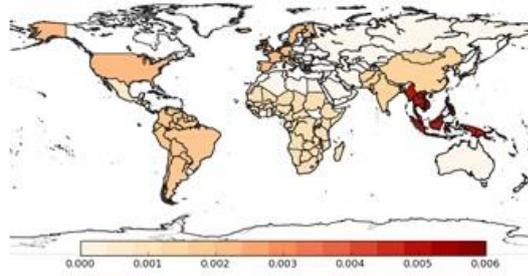
**排出量の高いシナリオ (RCP6.0, RCP8.5) では気温上昇に伴い海面上昇被害が明瞭に増大。**

図 3-1-1-②-d-4\_2 より RCP6.0, RCP8.5 では、年代が進むにつれて被害が増加する傾向が明瞭に見られる。また、RCP8.5 は RCP6.0 より被害増加が顕著であり、RCP8.5 では 2050 年代で RCP6.0 の 2050 年代と同程度の被害に達している。RCP4.5 では、年代が進み気温が上昇するにつれて、被害が増加する傾向があるものの、増加は比較的緩やかであり、2050 年代と 2080 年代を比べた場合の被害の増加もあまり大きくない。また、RCP2.6 では、年代が進んでも被害はほとんど増加しない (または減少する)。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

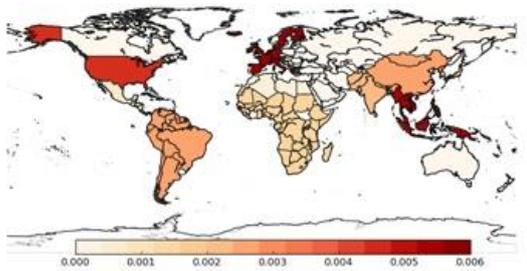


図 3-1-1-②-d-4\_3 SSP 別の現在 (1986~2005 年) と 2080 年代 (2070~2099 年) の間の海面上昇被害の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均を用いている。

**SSP3 は SSP1、SSP2 と比べて被害の増加が大きい。**

現在期間における海面上昇被害の大きい USA、西ヨーロッパ域に着目すると、適応があまり進まない社会が想定される SSP3 は SSP1、SSP2 と比べて海面上昇被害の増加が大きい。但し、被害の推計に用いた関数は、世界を 16 地域に分けて各地域に一つ与えられる関数であり、人口や資産の詳細な空間分布を用いて計算された被害ではないという事は注意する必要がある。

e. 健康被害

<背景>

医学・科学技術の発展や生活レベルの改善とともに、特に先進国では健康を享受できる人口が増加してきた。しかしながら、一方で社会移動の高速化などの社会経済的要因の変化により、健康問題の構造が変化しつつある。気候変動も、その健康問題の構造変化に寄与していることが 2004 年に発表された WHO の包括的な健康被害報告書でも明らかにされている。そこでは、1961 年~1990 年をベースラインとして、2000 年における気候変動によってどのような影響を受けたかが記載されており、特に小児の低栄養、下痢性疾患などが大きな問題であり、途上国の影響が大きいことが指摘されてきた。その後、WHO の新たなプロジェクトが開始され、以前は不可能であった疾病の将来予測も可能となるなど、進歩は見られているものの、依然として多くの健康影響の評価はできていない。

<本項目の重要性>

健康は、水、生態系、農業などとならんで主要なセクターとして IPCC などでも取り上げられてきた。セクター横断的な分析では金銭換算された影響が用いられることが多いけれども、金銭は、人類が健康に生活できる手段の一つとして用いられるものであり、実は集団としてみた場合の人類の健康状態、その破綻としての死亡や疾病 (災害後の精神的な負荷も含む) 状況こそが本来必要な評価の指標である。

ここでは、そのような健康影響のうち、途上国のみならず先進国でも今後大きな影響を受けると考えられている熱関連死亡と、感染症でもっとも大きな問題と考えられているマラリアに関して、複数シナリオに基づく検討を行った。

#### <評価方法>

気温と死亡の関連は、基本的にある気温で死亡リスクが最低になり、気温がそれより高くなっても低くなっても死亡リスクが増大する。死亡リスクが最低となる気温を至適気温と呼び、至適気温を超えた気温において、至適気温でのリスクとの差をとれば、それが熱による超過死亡となる。

我々は、この超過死亡のリスク関数を作成し、また至適気温における死亡数の推定方法を年次死亡数から推定する方法も開発して、将来気候および地域の人口、死亡数の情報が得られれば、その地域の超過死亡数を計算できるようなモデルを開発した (Honda et al. 2014)。その際、自動的適応として至適気温が温暖化に伴って高温側に移動することもモデル化した。本研究では、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を用い、適応ケース 1 として 10 年間に 0.1°C、適応ケース 2 として 0.2°C の 2 通りを想定し、計 120 ケースの将来像に対して、超過死亡数の将来変化を推定する。

マラリアはハマダラカによって媒介される原虫疾患である。従って、蚊が棲息できる環境および原虫の成育に影響を与える環境、すなわち気温と降水量はマラリアの流行に重要な関わりを持つ。一方で、社会経済的な状況も流行を左右する。これらのことから、スウェーデンのチームが世界のマラリア流行地のデータを用いて、ある地域がマラリア流行地域であるかどうかを気温、降水量、GDP から推定するロジスティック回帰モデルを構築した [Beguin et al. ]。モデル式は以下のようになる。

$$\text{マラリア流行} \sim T_{\min} + P_{\max} + \text{sqrt}(GDP_{\text{pc}})$$

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、 $GDP_{\text{pc}}$  は一人あたり国内総生産である。モデルから、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。

我々は、新たなデータに基づいてこの関数を再計算し、パラメータを求めた。本研究では、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を用い、計 15 ケースの将来像に対して、流行地域の分布

を推定した。

<指標の一覧>

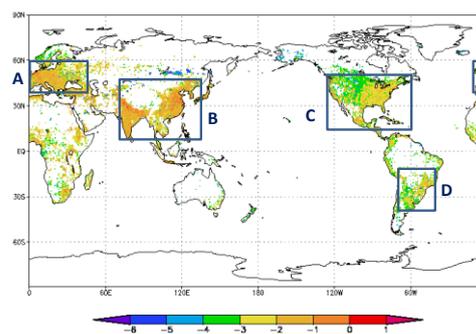
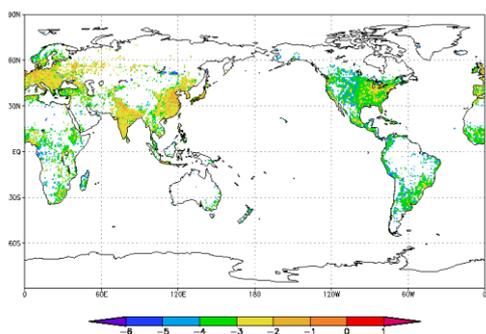
本項では以下の二つの指標を扱う。

1. 熱関連超過死亡数密度: 各グリッドにおいて、至適気温を超えた場合に、リスク関数に応じて発生する日別の超過死亡数を合計して年間の値を求めた。その数をグリッドの面積でわること、単位面積あたりの超過死亡数、すなわち超過し母数密度とした。
2. マラリア流行地域: 各グリッドが、感染地域である確率 0.5 を超えた場合に流行地域とし、それ以外を非流行地域とした。

e-1. 熱関連超過死亡数密度

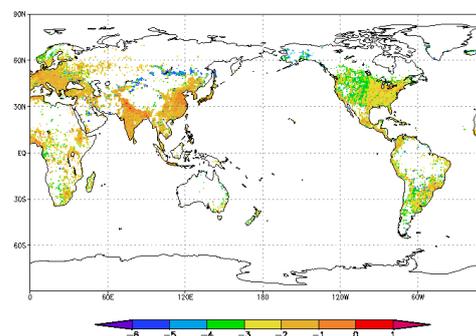
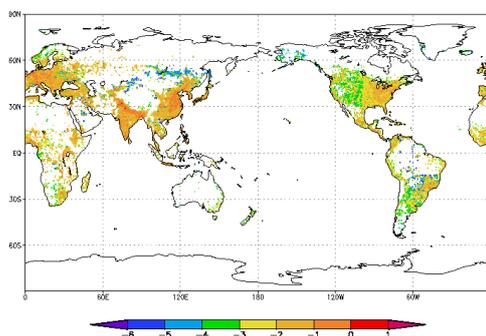
e-1-1. 熱関連超過死亡数密度 (適応ケース 1)

- (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

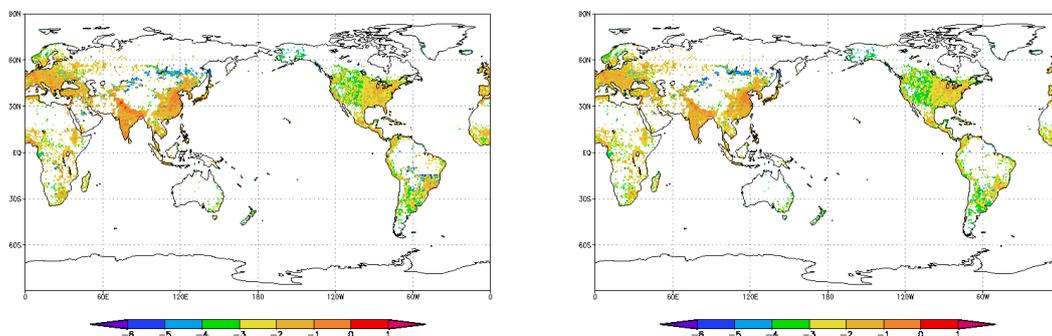
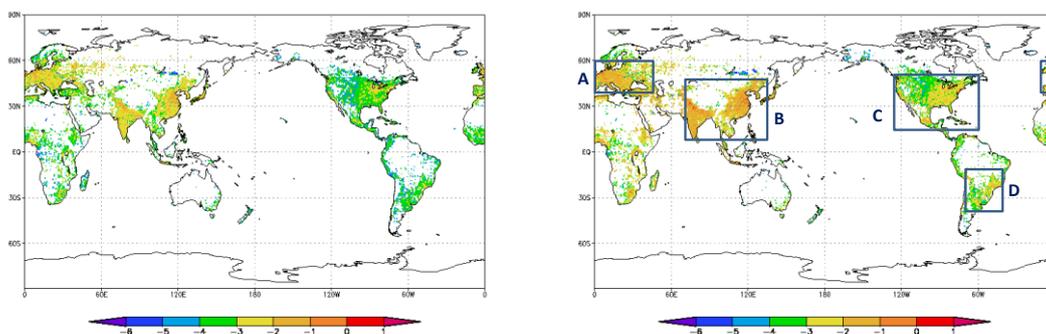


図 3-1-1-e-1\_1 (a) 現在 (1981~2000 年) の熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>)の平均値。(b)~(f) 2080 年代 (2081~2090) での各 GCM の超過死亡数密度。(a)~(f) について 1 グリッドは 0.5°であり、グリッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 をとり表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

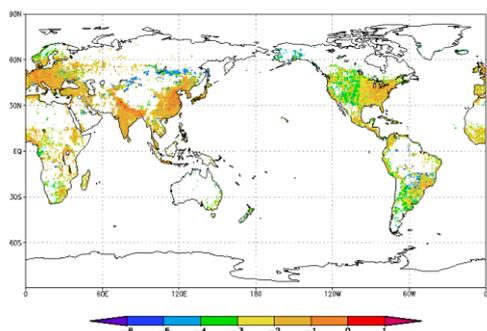
注: (b) で選択した 4 地域の緯度経度情報を示す。A (西経 10°~東経 45°、北緯 36°~60°)、B (東経 69°~東経 135°、北緯 7°~50°)、C (西経 125°~60°、北緯 15°~50°)、D (西経 72°~40°、南緯 15°~39°)

e-1-2. 熱関連超過死亡数密度 (適応ケース 2)

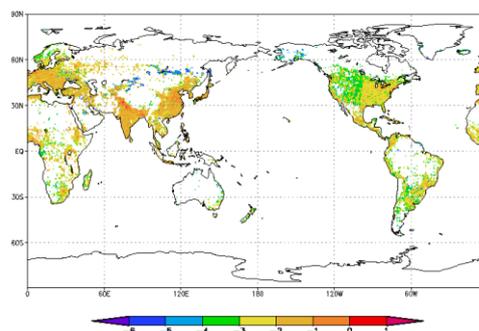
(a) 現状 (1981 年~2000 年) 5GCM の平均 (b) 2080s 超過死亡数密度 GFDL-ESM2M



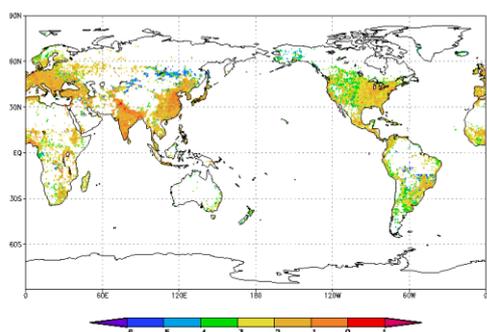
(c) 2080s 超過死亡数密度 HadGEM2-ES



(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

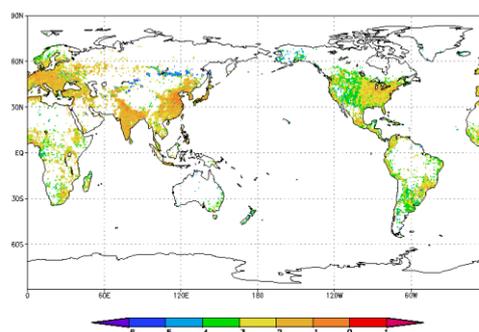
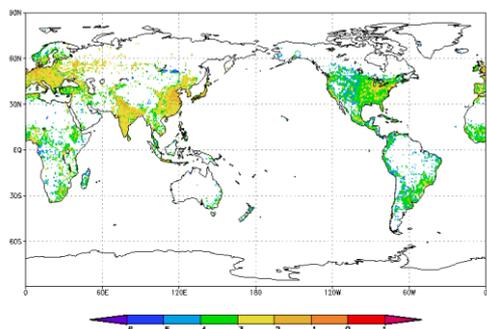


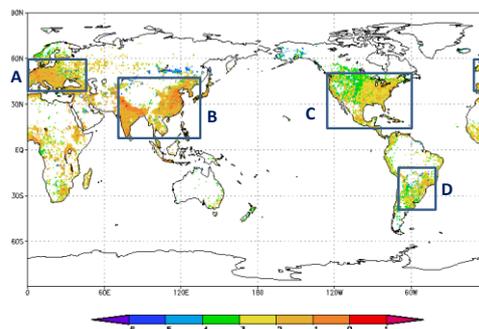
図 3-1-1-e-1\_2 (a) 現在 (1981~2000 年) の熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>) の平均値。(b)~(f) 2080 年代 (2081~2090) での各 GCM の超過死亡数密度。(a)~(f) について 1 グリッドは 0.5°であり、グリッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 をとり表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

e-1-3. 熱関連超過死亡数密度 (適応なし)

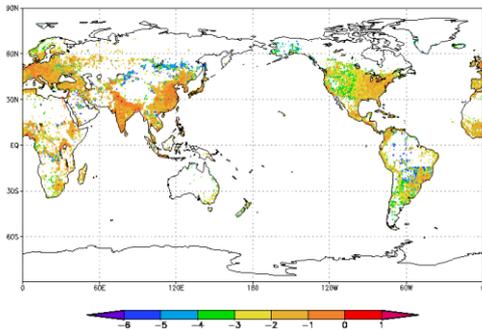
(a) 現状 (1981 年~2000 年) 5GCM の平均



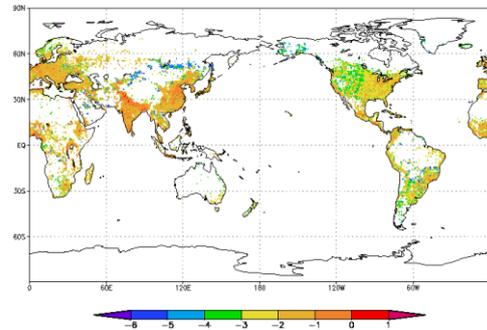
(b) 2080s 超過死亡数密度 GFDL-ESM2M



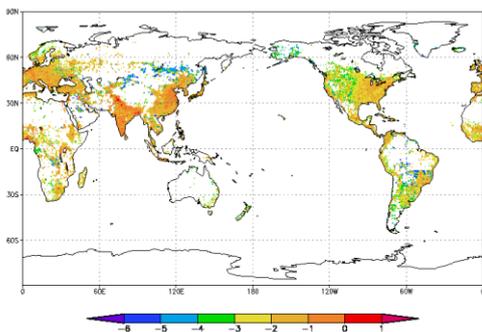
(c) 2080s 超過死亡数密度 HadGEM2-ES



(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

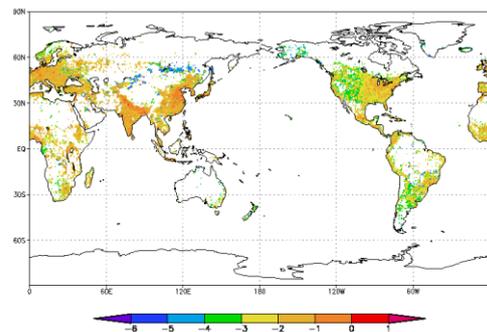


図 3-1-1-e-1\_3 (a) 現在 (1981~2000 年) の熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>) の平均値。(b)~(f) 2080 年代 (2081~2090) での各 GCM の超過死亡数密度。(a)~(f) について 1 グリッドは 0.5°であり、グリッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 をとり表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

**RCP8.5 シナリオではほぼすべての地域で熱関連超過死亡数が大きく増加する。**

図 3-1-1-e-1\_1~3 は、グリッドごとの超過死亡数を示しているため、現在気候 (1981 年~2000 年) でも、先進国であるヨーロッパや北米を含むほぼすべての地域で熱関連超過死亡が認められている。なお、将来予測においても超過死亡数の少ない部分 (濃い青の部分) が存在するが、これはもともとの超過死亡数が少なかったことによるものであり、現状と比べて少なくなっているところはモンゴル近辺以外ほとんど無い。RCP8.5 シナリオでは、GCM による相違はあるものの、ほぼすべての地域で超過死亡数が増加する。特に、人口の多い中国、インドではその増加が著しい。

人口が多いところ、人口密度が高いところでは超過死亡数も多くなる。相対的な影響の強さを評価したい場合には単位人口あたりの影響を用いるが、超過死亡数の大きさ自体がその地域への対策上の負荷となること、その負荷を健康被害間、あるいは農業など他の影響と

の間での比較から政策上の優先順位を決定することになるため、ここでは単位人口あたりではなく、絶対数で表している。

ここで、影響の大きい4つの領域 A、B、C、D(図 3-1-1-e-1\_1(b)) について、詳しくみていきたい。

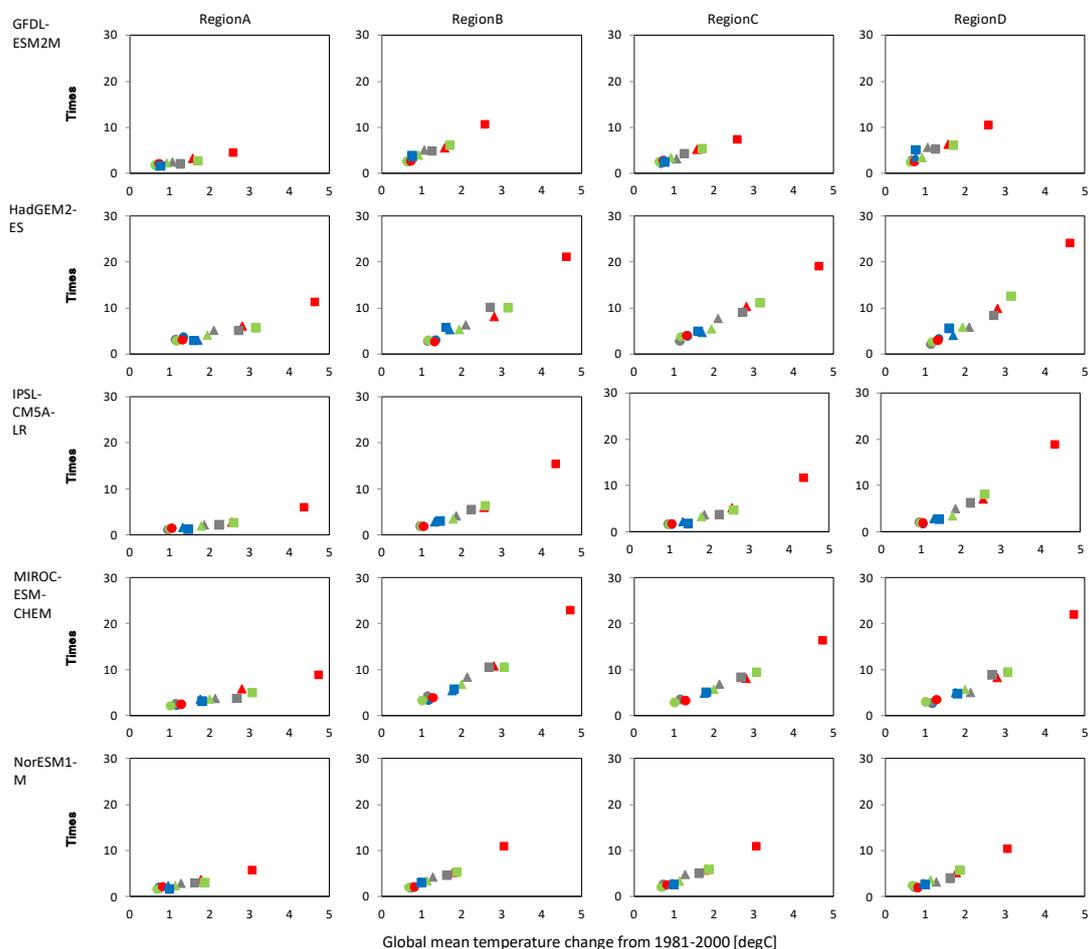


図 3-1-1-e-1\_4 図 3-1-1-e-1\_1 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>) の現在からの変化率。熱関連超過死亡数密度の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの比率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP2 として熱関連超過死亡数密度を計算している。

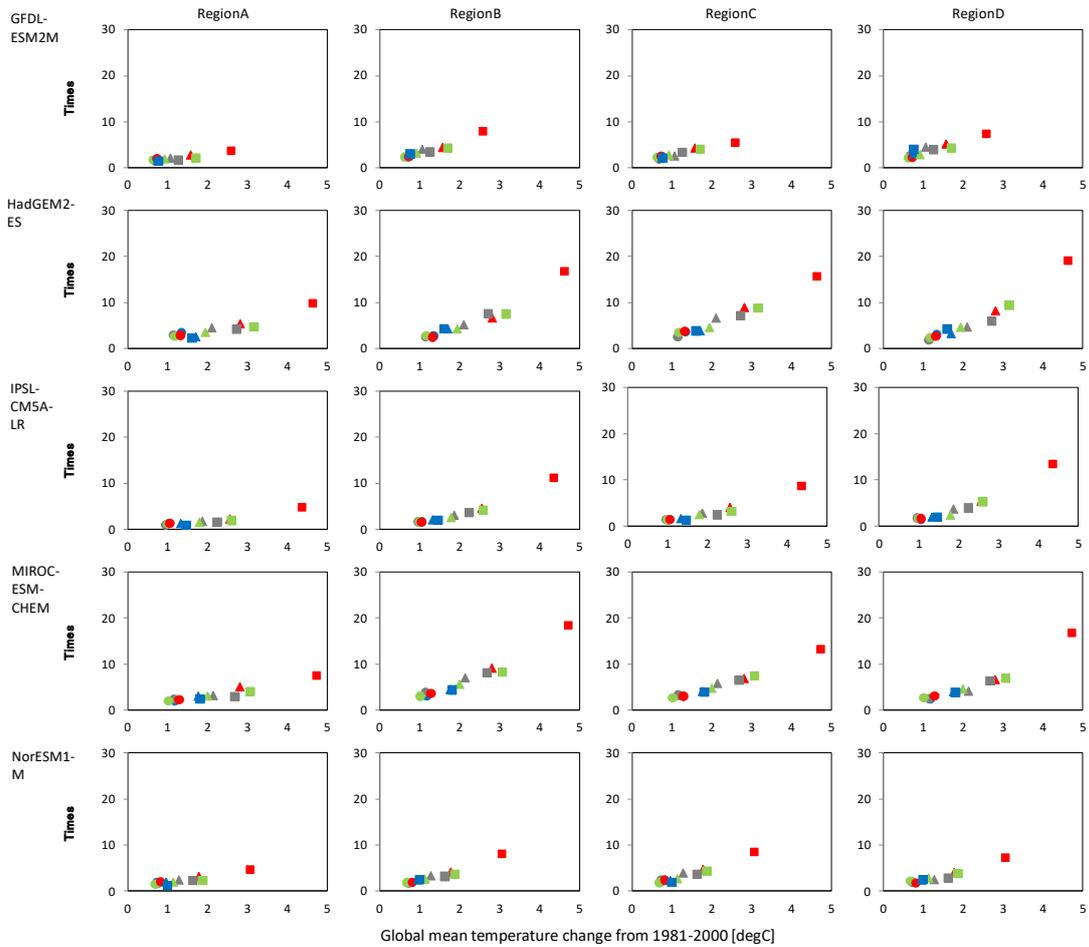


図 3-1-1-e-1\_5 図 3-1-1-e-1\_2 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>) の現在からの変化率 (適応ケース 2)。熱関連超過死亡数密度の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの比率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP2 として熱関連超過死亡数密度を計算している。

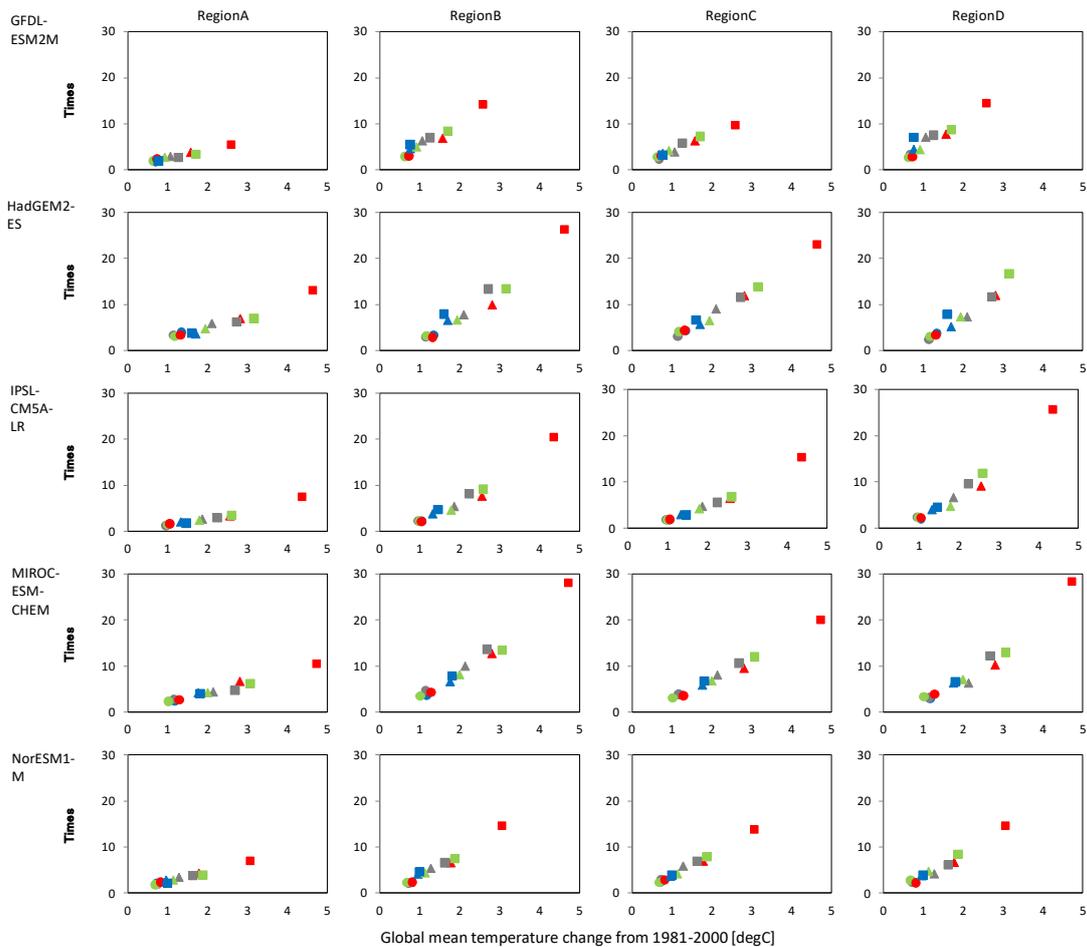


図 3-1-1-e-1\_6 図 3-1-1-e-1\_3 の領域 A~D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する熱関連超過死亡数密度 (人/km<sup>2</sup>) の現在からの変化率 (適応なし)。熱関連超過死亡数密度の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの比率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6、灰: RCP4.5、緑: RCP6.0、赤: RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP2 として熱関連超過死亡数密度を計算している。

すべての地域で気温の上昇と共に熱関連超過死亡数が増加する。

影響の大きい4つの領域 A、B、C、D(図 3-1-1-e-1\_1(b)) について、年次別比較を行った(図 3-1-1-e-1\_4~6)。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、RCP4.5、RCP6.0 の相違に比べると RCP8.5 は突出して死亡数が高い。

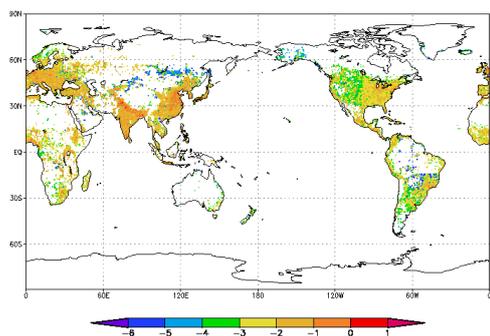
例えば RCP8.5 の場合、適応ケース 2 の熱関連超過死亡数は、適応なしと比較すると、伸び率で半分程度の場合もある。

気候予測の不確実性に比べると SSP による相違は小さい。

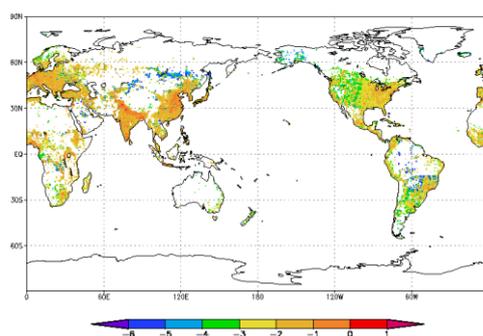
次に SSP による相違について検討した。図 3-1-1-e-1\_7、3-1-1-e-1\_8 は 5 モデルの結果を平均した 2080 年代の RCP8.5 について熱関連超過死亡数を示す。SSP ごとに同様の分布を示しており、大きな違いは見られない。

さらに、2080 年代の RCP による違い (図 3-1-1-e-1\_1~3) を鑑みると、気候予測の不確実性の幅と比較して SSP による相違は相対的に小さい。適応ケースによる相違もやはり SSP 間では小さい。

(a) SSP1 (適応ケース 1)



(b) SSP2 (適応ケース 1)



(c) SSP3 (適応ケース 1)

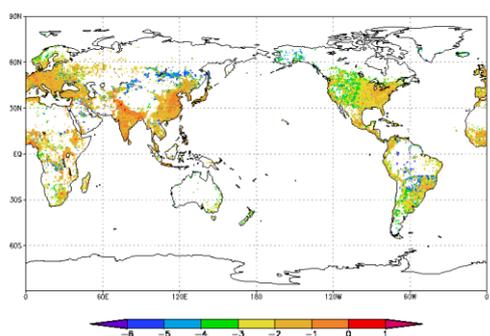
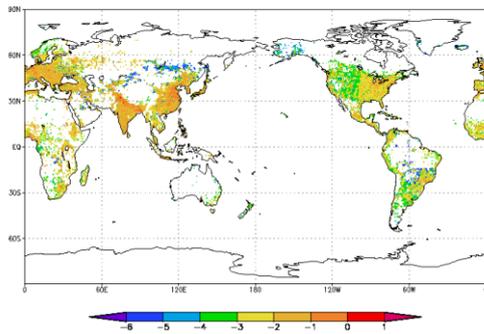
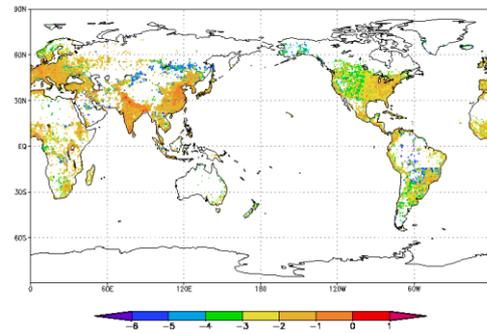


図 3-1-1-e-1\_7 5 モデルの結果を平均した 2080 年代の熱関連超過死亡数密度 (適応ケース 1)。RCP8.5 を用いており (a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。図 3-1-1-e-1\_1 と同様、1 グリッドの面積は  $0.5^\circ$  であり、グリッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 で表示している。

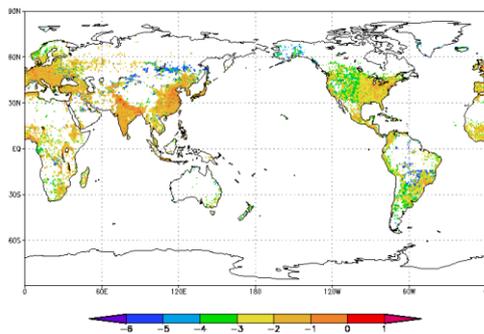
(a) SSP1 (適応ケース 2)



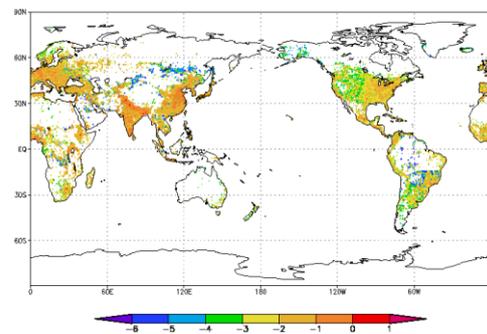
(a) SSP1 (適応なし)



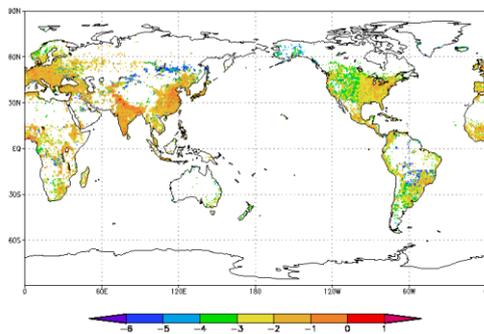
(b) SSP2 (適応ケース 2)



(b) SSP2 (適応なし)



(c) SSP3 (適応ケース 2)



(c) SSP3 (適応なし)

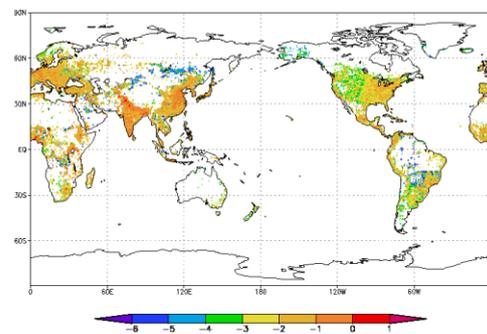


図 3-1-1-e-1\_8 5 モデルの結果を平均した 2080 年代の熱関連超過死亡数密度 (左: 適応ケース 2、右: 適応なし)。RCP8.5 を用いており (a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3 の結果を示している。図 3-1-1-e\_1 と同様、1 グリッドの面積は  $0.5^\circ$  であり、グリッド当たりの超過死亡数密度について LOG10 で表示している。

e-2. マラリア流行地域

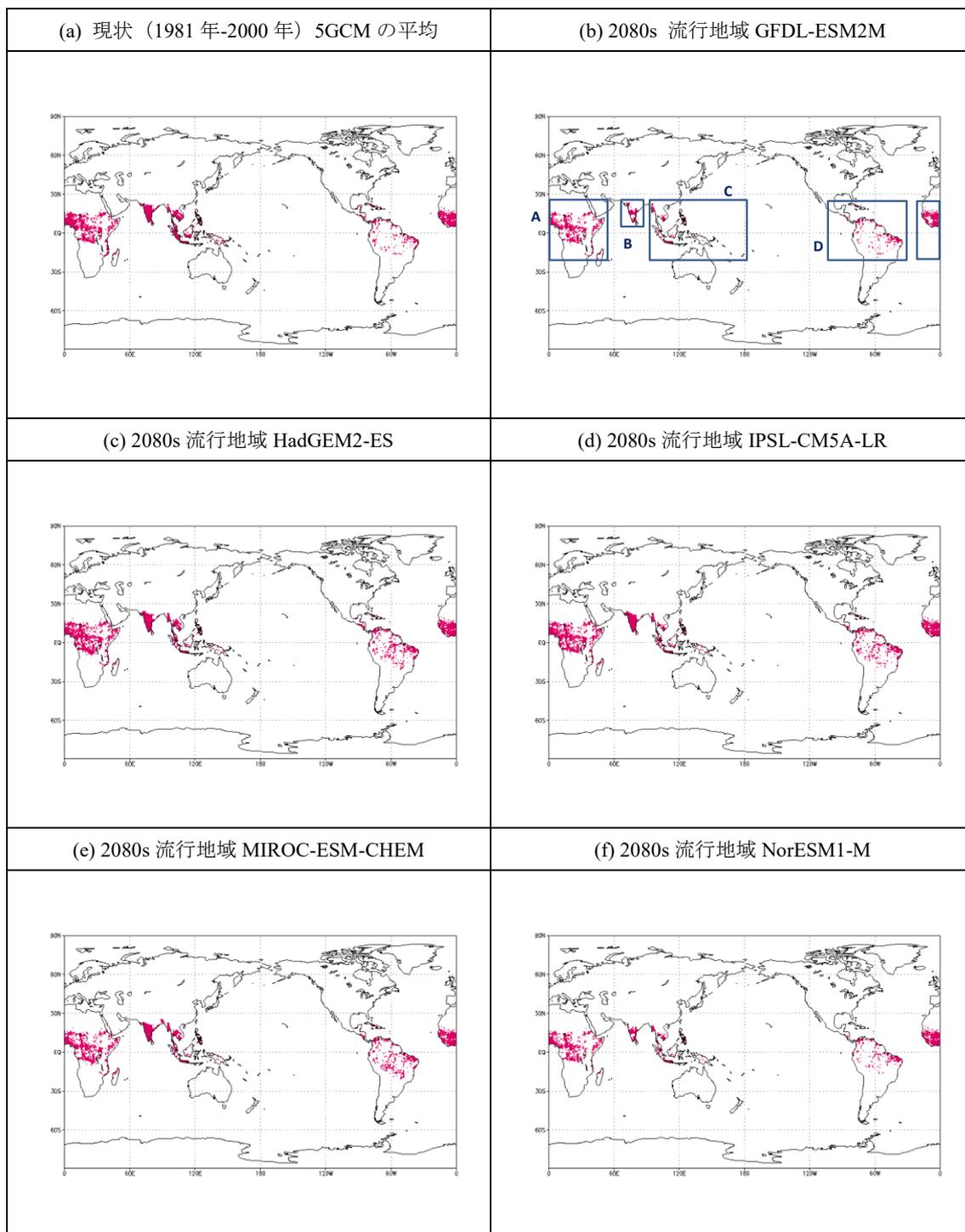


図 3-1-1-e-2\_1 (a) 現在 (1981-2000 年) の流行地域の予測値。(b)~(f)2080 年代(2081-2090)での各 GCM の流行地域。(a)~(f)について 1 グリッドは  $0.5^\circ$  であり、マラリア流行地域 (グリッド) を表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

注:(b)で選択した 4 地域の緯度経度情報を示す。A (西経  $25^\circ$ ~東経  $55^\circ$ 、南緯  $20^\circ$ ~北緯  $25^\circ$ )、B (東経  $65^\circ$ ~東経  $92.5^\circ$ 、北緯  $5^\circ$ ~ $25^\circ$ )、C (東経  $94^\circ$ ~ $180^\circ$ 、南緯  $20^\circ$ ~北緯  $25^\circ$ )、D (西経  $105^\circ$ ~ $33^\circ$ 、南緯  $20^\circ$ ~ $25^\circ$ )

### RCP8.5 シナリオで流行地域が減少する。

図 3-1-1-e-2\_1 は、RCP8.5 において、いずれの GCM を前提とした場合でも流行地域が減少傾向にあることを示している (図 3-1-1-e-2\_1(a) が示すように先進国では現状においても経済水準が高いことから流行地域は存在していない)。地域別には、北緯 25 度から南緯 25 度に含まれるアフリカ中部地域、インド、東南アジア、南アメリカに流行地域が残るが、その面積は縮小傾向にある。この理由の一つは国内総生産の増加である。なお、ここで注意すべき点は、将来は縮小傾向にあると言っても、それは気候変動の影響がよい方向に働いたからではなく、経済発展の影響の縮小圧力の方が気候変動の拡大圧力よりも大きいからである。将来、気候変動がない場合に比較すると、ある場合の方がマラリア流行地域の面積は大きい。

ここで、影響の大きい 4 つの領域 A、B、C、D (図 3-1-1-e-2\_1(b)) について、詳しくみていきたい (図 3-1-1-e-2\_2)。どの領域にも共通する傾向は、すべての RCP で流行地域は概ね縮小傾向にあるものの、RCP2.6、4.5、6.0、8.5 と温暖化が深刻になるにつれて、縮小幅が小さくなってゆく。このことは、上述のように、温暖化はマラリア地域を拡大する傾向を持つことを意味する。その傾向が顕著に表れているのが **Region B** である。HadGEM2-ES と MIROC-ESM-CHEM の二つでは RCP8.5 の場合、将来にわたって流行地域が拡大傾向にある。

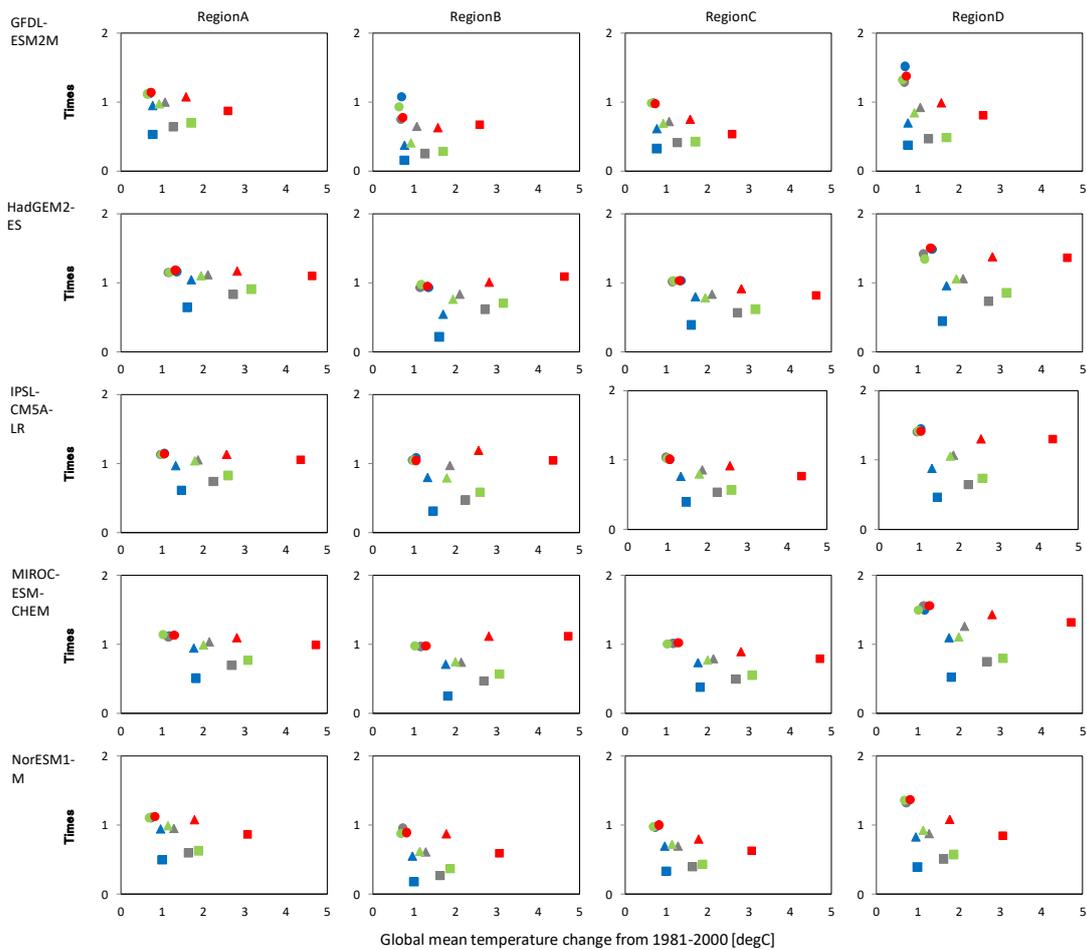


図 3-1-1-e-2\_2 図 3-1-1-e-2\_1(b)の領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対するマラリア流行地域 (グリッド数) の現在からの変化率。マラリア流行地域の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの比率 (将来の平均値/現在の平均値) を算出した。マークが年代 (○:2020 年代、△:2050 年代、□:2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青:RCP2.6、灰:RCP4.5、緑:RCP6.0、赤:RCP8.5) する。社会経済シナリオは SSP としてマラリア流行地域を計算している。

**SSP による相違は大きい。**

次に SSP による相違について検討した。図 3-1-1-e-2\_3 は 5 モデルの結果を平均した 2080 年代の RCP8.5 についてマラリア流行地域を示す。SSP ごとに大きな違いが認められる。上記 RCP による違いでも述べたように、GDP が予測式で考慮されていることから、経済発展を反映した SSP による相違が大きくなる。

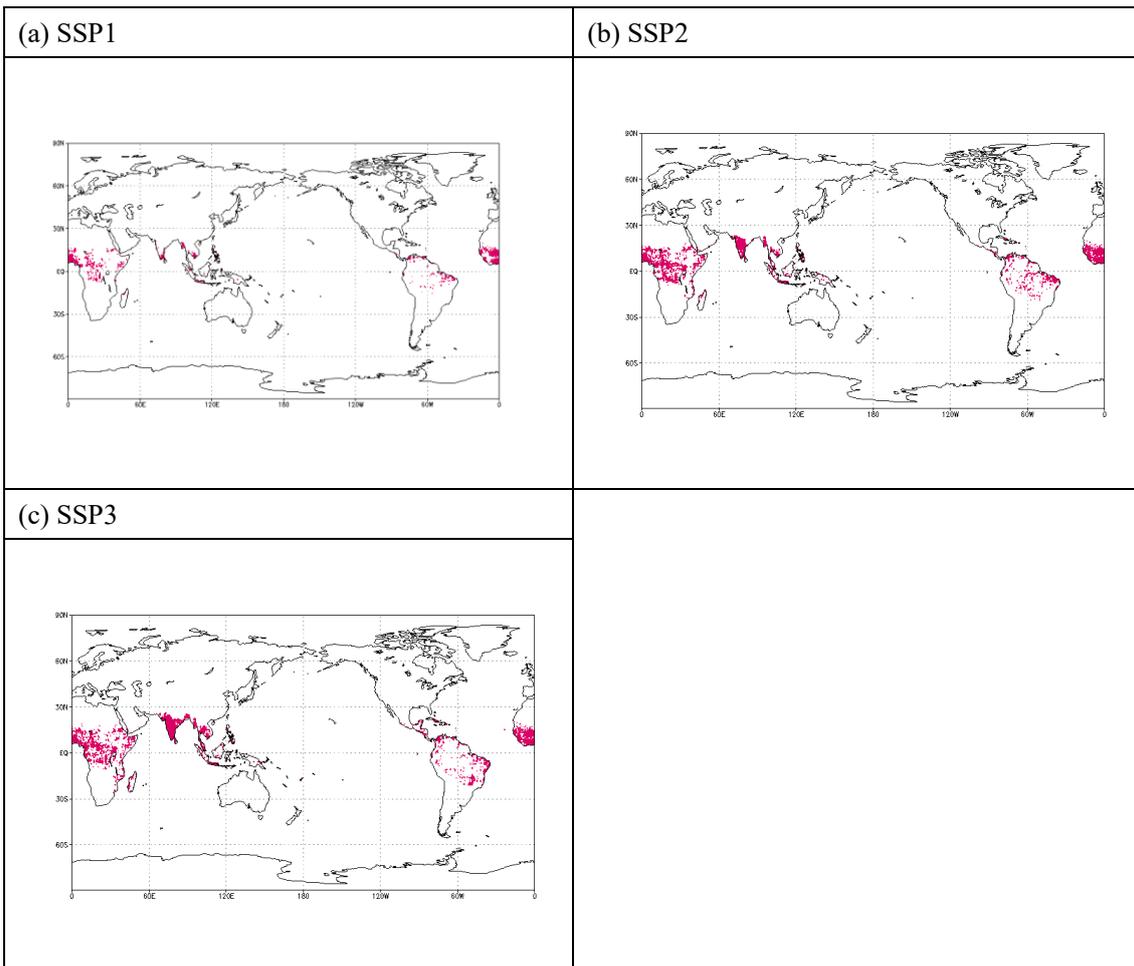


図 3-1-1-e-2\_3 5モデルの結果を平均した2080年代のマラリア流行地域。RCP8.5を用いており(a)SSP1、(b)SSP2、(c)SSP3の結果を示している。

図 3-1-1-e-2\_1と同様、1グリッドの面積は0.5°であり、マラリア流行地域を表示している。

#### f. 海洋・海洋生態系

##### <背景>

海洋は、物理的な海水の循環と生物活動を介した化学物質の循環により、多種多様な物理・化学的な環境条件を擁している。その多様な環境条件が、それらに適応した海洋生態系を構成し、生物多様性を生み出している。したがって、海洋・海洋生態系を予測することは、物理・化学的な環境条件及びそれらの相互作用を正確に予測する必要があることを意味し、現在でもかなり大きな不確実性を有している。

##### <本項目の重要性>

海洋の多様な環境条件が、気候変動により影響を受けると、元々の環境に適応していた生態系が影響を受け、生物多様性の損失が生じ、生態系サービスの低下がもたらされることが懸念されている。したがって、海洋・海洋生態系を変質・劣化させる可能性のある気候変動による影響を、不確実性を含めて予測することは重要である。ここでは生態系サービスのう

ち、供給サービスである魚類資源に影響を与える可能性のある「貧酸素水塊体積の変動」及び「輸出生産の変動」、また魚類資源量に対する気候変動による影響を簡易的に指標化した「資源量指数 (発生頻度指数)」評価について検討する。

#### <評価方法>

CMIP5 マルチ気候モデルによって予測された「溶存酸素」及び「輸出生産」を用いて、それらの将来変動が魚類資源に影響する可能性のある海域を不確実性を含めて抽出する。また「資源量指数」においては複数の環境要因による応答を比較するため、前述の「溶存酸素」・「輸出生産」に加え「ポテンシャル水温」を使用して評価・抽出を行う。「溶存酸素」及び「輸出生産」の評価に対しては、これらの変数を出力している 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。この評価では各気候モデルについて 4 つの RCP シナリオのうち利用できる予測結果を用いたため、計 30 ケースについて、溶存酸素と輸出生産を推定した。「資源量指数」の評価に対しては、上記に加え「ポテンシャル水温」を出力している気候モデルのうち 4 つの RCP シナリオが全て利用できる 5 つの気候モデル (GFDL-ESM2G、GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、NorESM1-ME) を用いた。こちらでは計 20 ケースについて、資源量指数を推定した。他の影響分野で用いられている気候モデル (MIROC-ESM-CHEM) では溶存酸素の予報がなされていなかったため、それ以外の気候モデルを用いることにした。その際、なるべく多くの気候モデルの結果を利用することにしたため、他の影響分野で用いられている気候モデルの「数と種類」がここでは異なっている。

#### <指標の一覧>

ここでは以下の 3 指標を扱う。

1. 貧酸素水塊体積: 魚類が生息できなくなる溶存酸素濃度 ( $30 \mu\text{M}$ ) 以下の体積を示す。貧酸素水塊は深さ約 100~1000m に広がり、そこでは魚類を含めた海洋生物が生息できない環境となる。貧酸素水塊体積が増加 (減少) すると、魚類の生息域が減少 (増加) し、魚類の潜在的な生息域変動を把握する上で当該指標は重要である。また、貧酸素水塊に存在する資源量は表層 (100m 以浅) に比べて少ないものの、希少性が高い海底生物なども存在するため生物多様性の観点からも当該指標は重要となる。
2. 輸出生産: 海洋表層で生産され、水深 100m を通過する有機炭素のフラックスを示し、表層の海洋生態系の活性を表す一つの指標としてみることができるものである。輸出生産と漁獲量が相関することが指摘されており、輸出生産の変動は魚類資源量にも影響しうる。具体的には、輸出生産が減少 (増加) すると魚類資源量が減少 (増加) する可能性がある。そのため、当該指標は魚類資源量を把握する上で重要である。

3. 資源量指数 (発生頻度指数): 気候変動に伴う水温・溶存酸素・餌場環境の変動による水産資源量の変動を指標化・推定する。推定する生物種は、水産生物データベース (FishBase: <http://www.fishbase.org>, SeaLifeBase: <http://www.sealifebase.org>) にて公開されており、生理パラメータ・ヒストリカル資源重量データなどが入手可能な 200 種の生物種を選定した。公開されている各魚種の「資源量指数 (発生頻度指数)」分布と「ポテンシャル水温」・「溶存酸素濃度」・「輸出生産」の分布から評価魚種の好適環境プロファイルを構築し、気候変動後の「発生頻度指数」分布を推定する。人類の重要な食料供給源のひとつである水産生物に対する気候変動の影響を評価するうえで、当該指標は重要な指針となる。

f-1. 貧酸素水塊体積

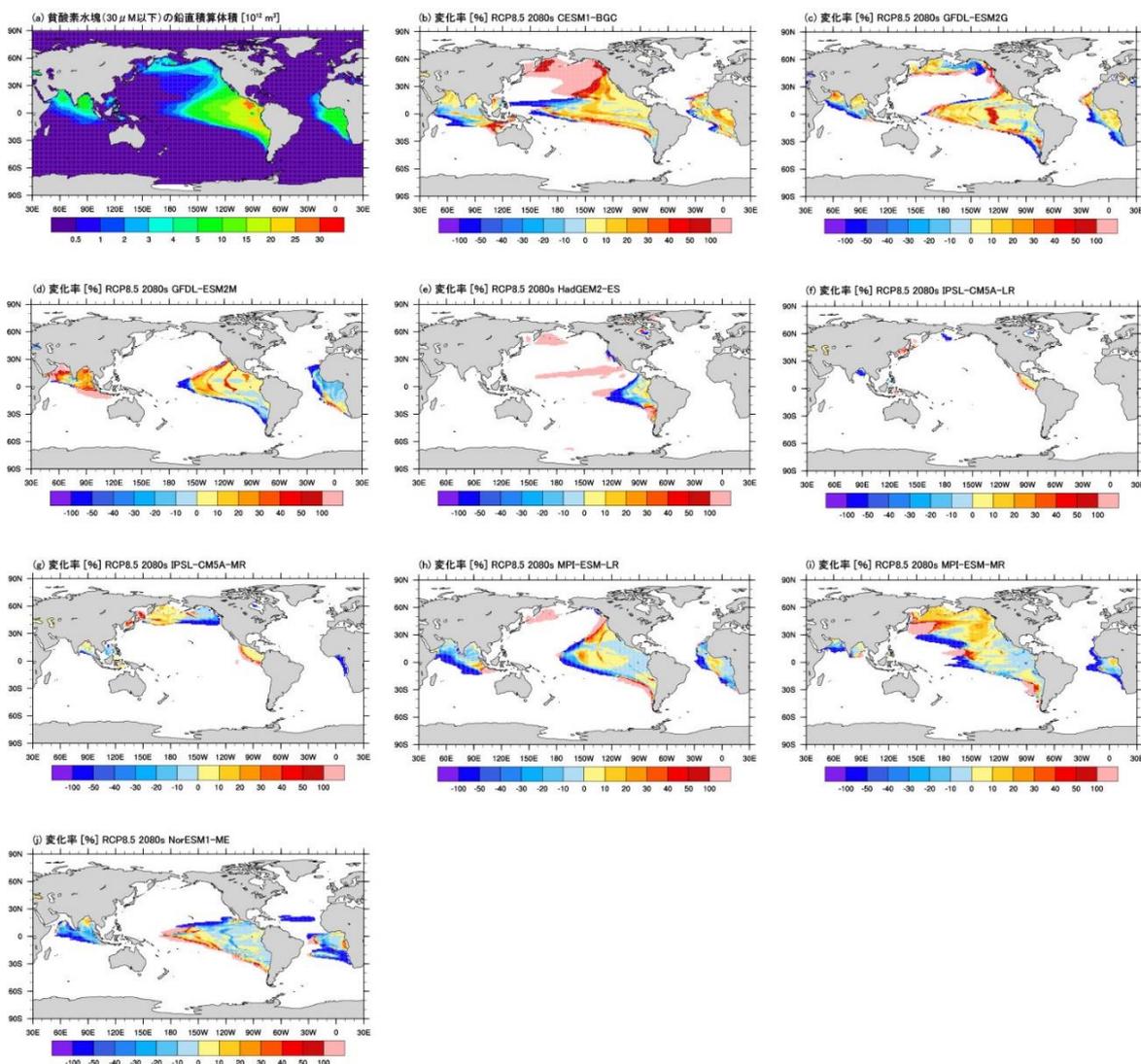


図 3-1-1-②-f-1\_1 (a) 現在 (1981-2000 年) の貧酸素水塊 ( $30 \mu\text{M}$  以下) の水柱内体積の 9GCM 平均値 ( $10^{12} \text{ m}^3$ ), (b)~(j) 2080 年代 (2080-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの貧酸素水塊の水柱内体積の変化率 (%)

RCP8.5 シナリオでは、ベーリング海西部で貧酸素水塊体積が大きく増加する GCM が多く、それ以外の場所では GCM によりその変動の仕方は大きく異なる

現在気候 (1981-2000 年平均) において、貧酸素水塊体積は北部インド洋、東部赤道太平洋及び東部赤道大西洋で大きい (図 3-1-1-②-f-1\_1(a))。この中で東部赤道大西洋では  $30\mu\text{M}$  以下の溶存在酸素濃度の水塊は現在観測されていないことから (図省略)、用いた GCM による再現が上手くいっていない海域であると言える。

RCP8.5 シナリオの場合、年代が進むにつれて現在からの変化率が大きくなり、また、現在から減少する海域と増加する海域が徐々に二極化する傾向がある。2080 年代には、ベーリング海西部において貧酸素水塊体積が増加する GCM が多いが、それ以外の海域では、各 GCM における二極化の傾向が異なるため、GCM 間でのばらつきが非常に大きい。これらの傾向は、その他の RCP シナリオでも概ね同じであったが、特にベーリング海西部では、中位・低位安定化シナリオで傾向が異なる GCM も見られた。

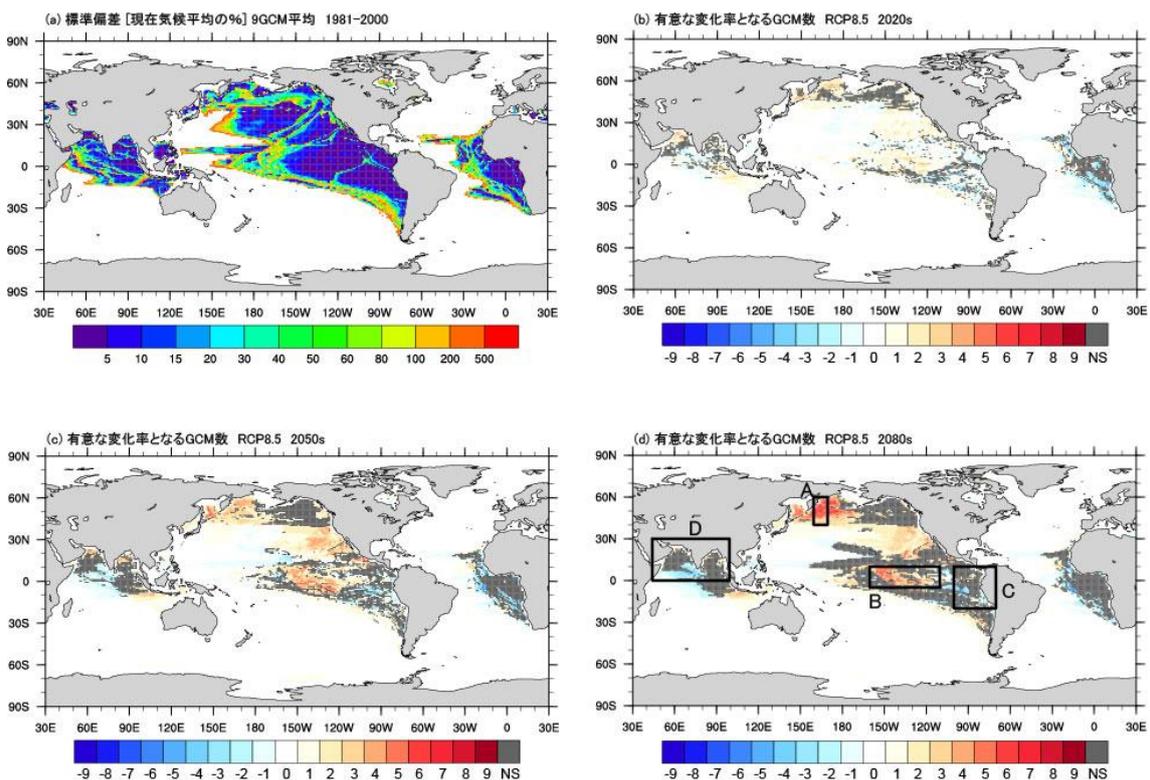


図 3-1-1-②-f-1\_2 (a) 各 GCM にて現在 (1981-2000 年) の貧酸素水塊 ( $30\mu\text{M}$  以下) の水柱内体積の標準偏差 ( $\sigma$ ) を 20 年平均値のパーセンテージで示した値 (変動係数) の 9GCM 平均値、(b)~(d) RCP8.5 シナリオにおいて、貧酸素水塊の水柱内体積の現在からの変化量 (各年代平均) が  $\pm 1\sigma$  以上となる GCM 数。NS は  $+1\sigma$  以上の GCM と  $-1\sigma$  以下の GCM があることを示す。2020s (2020-2039 年)、2050s (2050-2069 年)、2080s (2080-2099 年)。

ベーリング海西部と赤道太平洋中央部での増加が各 GCM 共通の傾向

貧酸素水塊体積の年々変動は、現在既に大量の貧酸素水塊が存在する北部インド洋、東部赤道太平洋及び東部赤道大西洋で小さく、そこから離れるにつれて大きくなる傾向がある(図 3-1-1-②-f-1\_2(a))。年々変動の標準偏差以上の変化量となる海域は 2050 年代までは年代がすすむにつれて増加するものの、2080 年代にかけてはベーリング海西部と赤道太平洋中央部でのみ増加し、GCM 間での一致度が高いのはこれらの海域のみである。一方、現在既に大量の貧酸素水塊が存在している海域では、年代が進むにつれて GCM 間のばらつきが大きくなっていく傾向がある。

ここで、現在からの変化量の GCM 間での一致度が最も高いベーリング海西部 (領域 A) 及び比較的高い赤道太平洋中央部 (領域 B)、さらに現在既に大量の貧酸素水塊が存在するが、その将来変動は不確実性の大きい東部赤道太平洋ペルー沖 (領域 C) 及び北部インド洋 (領域 D) について詳しく見てみることにした (図 3-1-1-②-f-1\_2(d))。

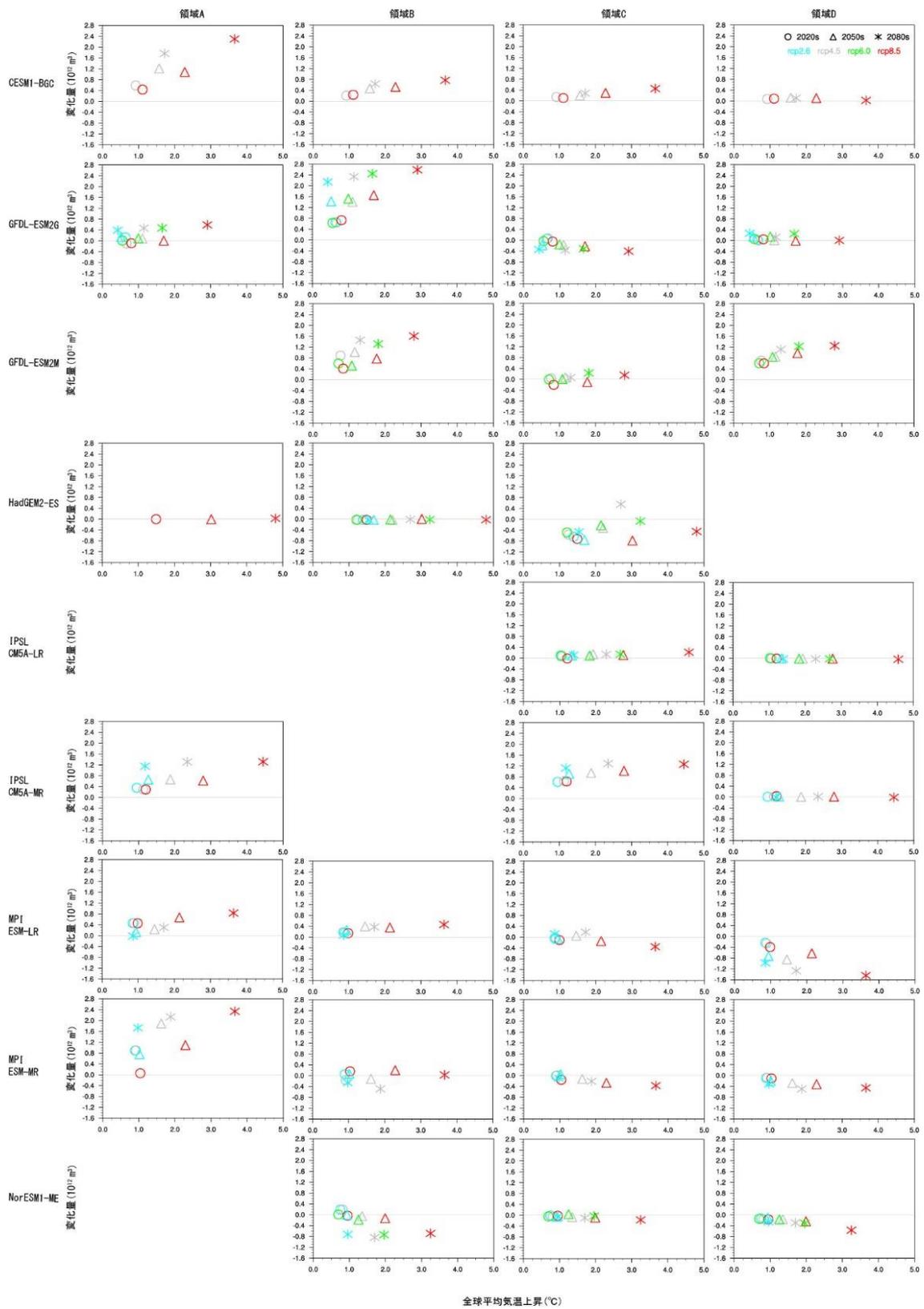


図 3-1-1-②-f-1\_3 図 3-1-1-②-f-1\_2(d)の領域における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する貧酸素水塊体積の現在からの平均変化量。貧酸素水塊体積の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化量を算出した。マークが年代（2020年代（2020–2039年）、2050年代（2050–2069年）、2080年代（2080–2099年）、色が RCP シナリオに対応する。なお、当該領域に貧酸素水塊が存在しない GCM または RCP シナリオは示していない。

**温度上昇に伴ってベーリング海西部での貧酸素水塊体積が増大、また赤道太平洋中央部においても多くのモデルで増大する。しかし、東部赤道太平洋ペルー沖及び北部インド洋ではモデル間の不確実性が大きい**

ベーリング海西部に貧酸素水塊が存在している GCM は、温度上昇に伴って貧酸素水塊体積が増大する。また、赤道太平洋中央部においても、温度上昇に伴い貧酸素水塊が増大するモデルが多く見られた。東部赤道太平洋ペルー沖及び北部インド洋ではモデル間の不確実性が非常に大きく、約半分のモデルにおいて貧酸素水塊は増大し、残り半分では減少する。全領域において、RCP4.5、6.0 及び 8.5 シナリオのもとでは、貧酸素水塊体積が増大しようと減少しようと、温度上昇と比例して変化する傾向がほとんどの場合で見られた。しかし、RCP2.6 シナリオにおいては温度上昇に比例しない場合が見られた。

## f-2. 輸出生産

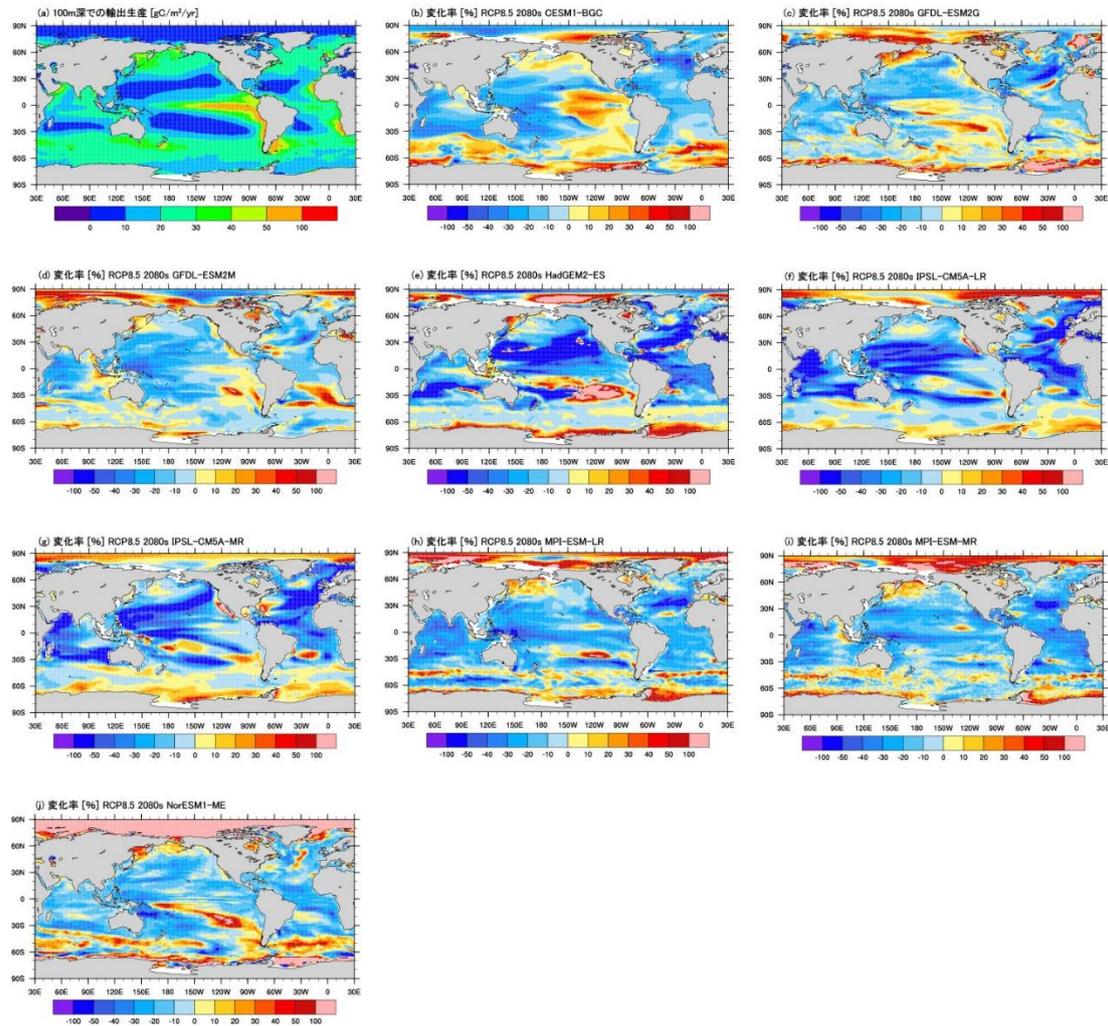


図 3-1-1-②-f-2\_1 (a) 現在 (1981-2000 年) の 100m 深における輸出生産の 9GCM 平均値 ( $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ )、(b)~(j) 2080 年代 (2080-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの輸出生産の変化率 (%)

### 輸出生産は北半球の亜熱帯域で大きく減少し、南北両極域で大きく増加する

現在気候 (1981-2000 年平均) において、輸出生産は南北両半球の亜寒帯域及び各海盆の東部熱帯域で高く、南北両極域及び亜熱帯域で低い (図 3-1-1-②-f-2\_1(a))。

RCP8.5 シナリオの場合、年代が進むにつれて現在からの変化率が大きくなり、また、現在から減少する海域と増加する海域が徐々に二極化する傾向がある。2080 年代には、北半球の亜熱帯域で特に大きく減少し、南北両極域で大きく増加する。南半球の亜熱帯域では、増加する GCM 及び減少する GCM もありばらつきがかなり大きい。これらの傾向は、その他の RCP シナリオでも概ね同様であったが、中位・低位安定化シナリオにおいて、北極域で減少傾向、北部太平洋・大西洋で増加傾向のある GCM も見られた。

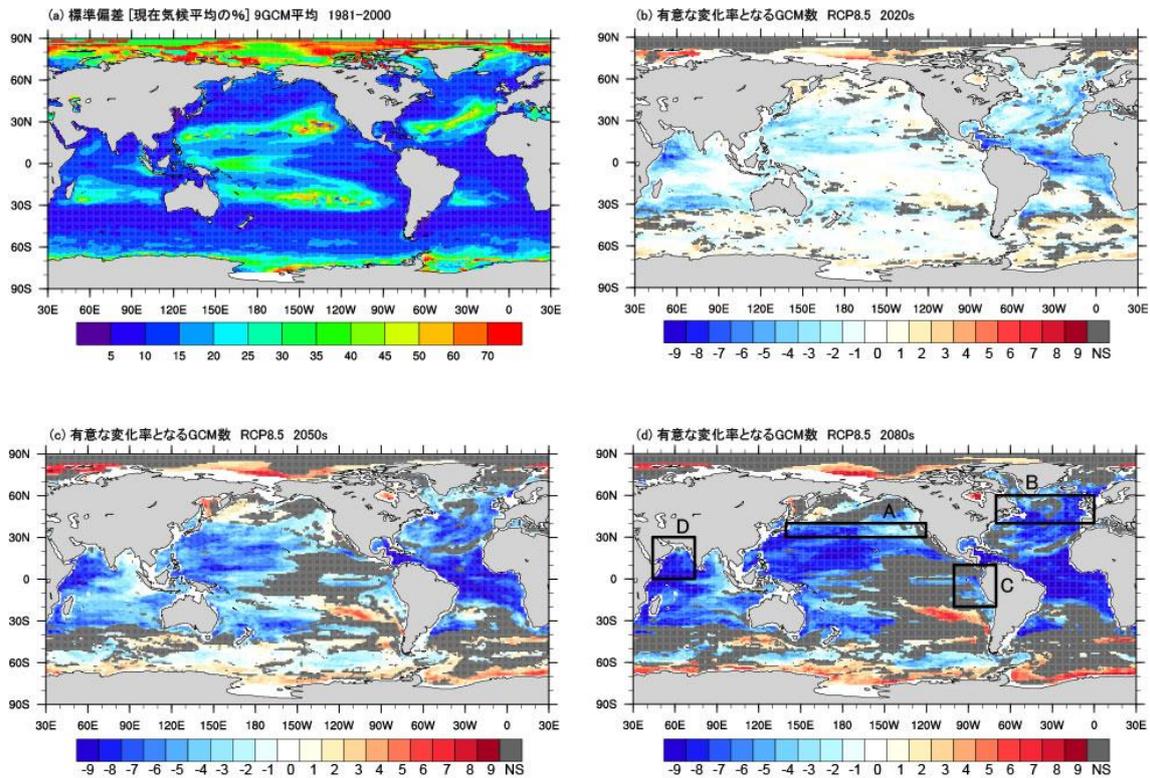
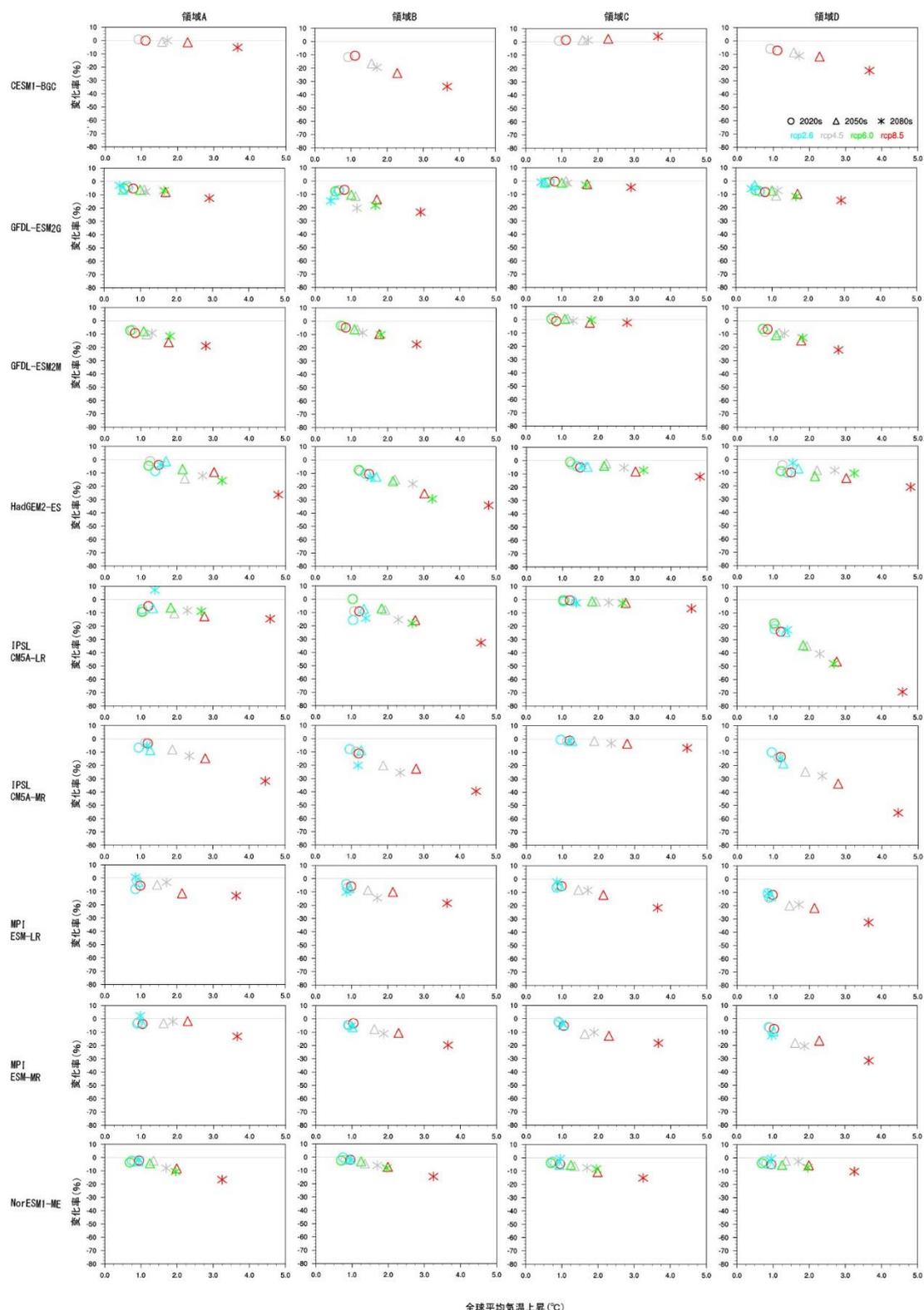


図 3-1-1-②-f-2\_2 (a) 各 GCM にて現在 (1981-2000 年) の輸出生産の標準偏差 ( $\sigma$ ) を 20 年平均値のパーセンテージで示した値 (変動係数) の 9GCM 平均値、(b)~(d) RCP8.5 シナリオにおいて、輸出生産の現在からの変化量 (各年代平均) が  $\pm 1\sigma$  以上となる GCM 数。NS は  $+1\sigma$  以上の GCM と  $-1\sigma$  以下の GCM があることを示す。2020s (2020-2039 年)、2050s (2050-2069 年)、2080s (2080-2099 年)。

### 北半球の亜熱帯及び北大西洋亜寒帯域での減少と、南北両極域での増加が各 GCM 共通の傾向

輸出生産の年々変動は、現在輸出生産の小さい亜熱帯域及び南北両極域で大きく、現在輸出生産が大きい海域では小さい (図 3-1-1-②-f-2\_2(a))。年々変動の標準偏差以上の変化量となる海域は年代がすすむにつれて増加するものの、GCM 間でのばらつきが東部赤道太平洋、南半球の亜熱帯から亜寒帯域で大きくなっていく。

ここで、現在からの変化量の GCM 間での一致度が高く、重要な漁場でもある太平洋北部 (領域 A)、大西洋北部 (領域 B)、アラビア海周辺 (領域 D)、及び GCM 間での一致はそれほど高くないものの重要な漁場の一つである東部赤道太平洋ペルー沖 (領域 C) (図 3-1-1-②-f-2\_2(d)) について詳しく見てみることにした。



全球平均気温上昇(°C)

図 3-1-1-②-f-2\_3 図 3-1-1-②-f-2\_2(d) の領域における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する輸出生産の現在からの変化率。輸出生産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 (2020-2039 年)、2050 年代 (2050-2069 年)、2080 年代 (2080-2099 年)、色が RCP シナリオに対応する。

## 温度上昇に伴って重要な漁場である太平洋北部、大西洋北部およびアラビア海周辺では輸出生産が減少

重要な漁場である領域 A、B、D において、温度上昇に伴って輸出生産は減少する。領域 C においても、温度上昇に伴い輸出生産が増加するモデル、ほとんど変化のないモデルがあるものの大半のモデルで輸出生産が減少する。全領域において、RCP4.5、6.0 及び 8.5 シナリオのもとでは、温度上昇と比例して輸出生産が変化する傾向がほとんどの場合で見られた。しかし、RCP2.6 シナリオにおいては温度上昇に比例しない場合も見られた。GCM 間での関係性の強さには差異が見られるものの、同一モデル内の RCP4.5、6.0 及び 8.5 間での差はあまり見られない。

### f-3. 資源量指数

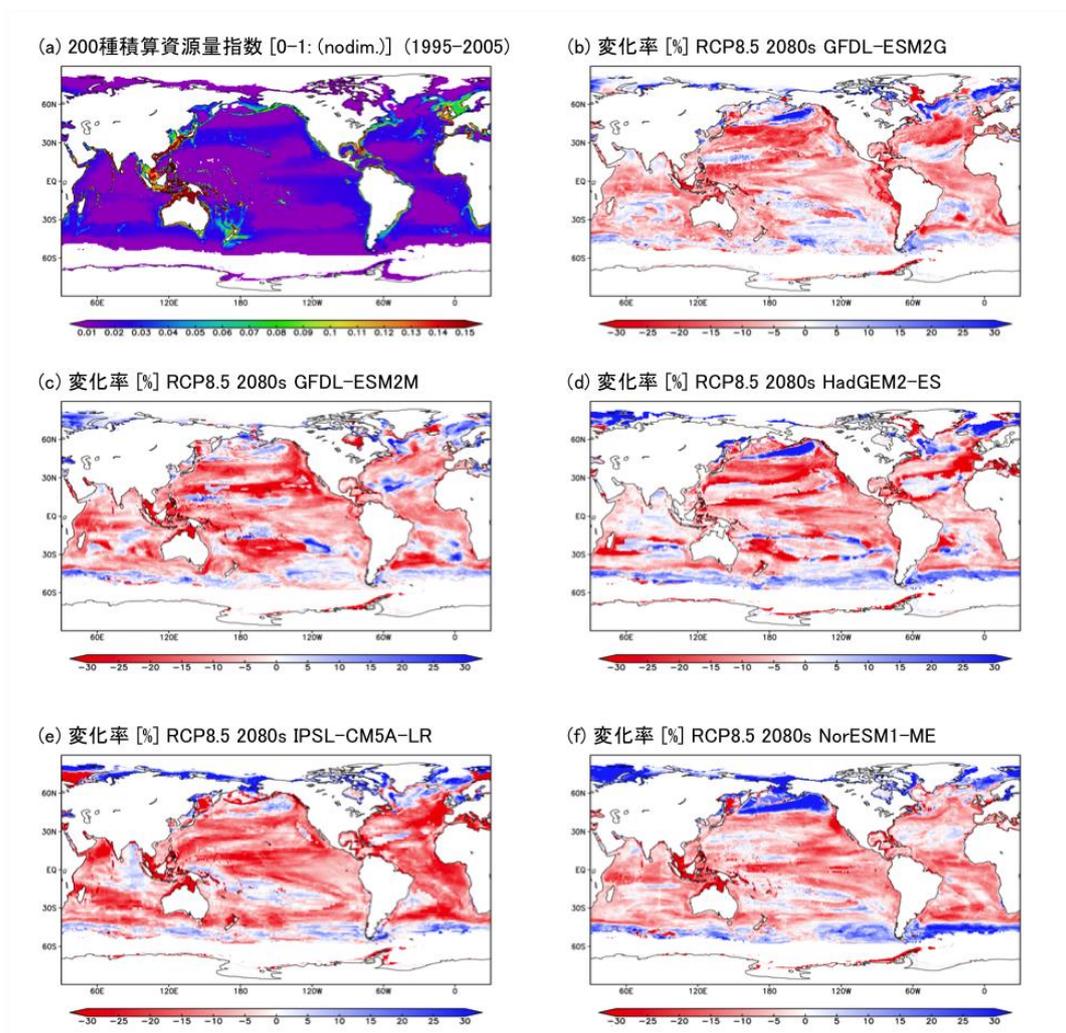


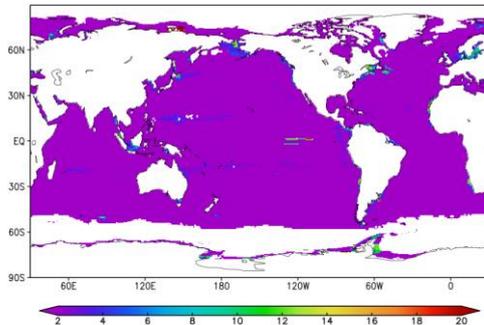
図 3-1-1-②-f-3\_1 (a) 各 GCM にて現在 (1995-2004 年) の 200 種の資源量指数を積算・正規化を行った資源量指数の 5GCM 平均値、(b)~(f) 5GCMs における、現在の資源量指数から 2080 年代 (2080-2098 年) までの変化率。気候シナリオは全て RCP8.5 のものを示す。

## 温度上昇とそれに伴う環境変動により、全ての気候シナリオで水産資源の減少し、その影響は低緯度域程大きく減少

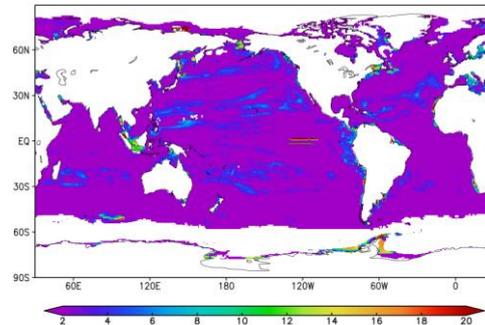
今回評価した4つの気候シナリオ(4RCPs)において、全球平均での資源量の減少がみられた。評価機関である1990年代から2090年代にかけて、RCP2.6においては5つの気候モデル(5GCMs)平均で7.9%、RCP8.5においては14.6%の減少となった。また、変動幅にはGCM間で結果に大きな差が生じる(図3-1-1-②-f-3\_1)。5GCMsにおいて、主に温度上昇の影響により低緯度域程大きな資源量の減少がみられる。

生物種毎の生息特性によっても応答の違いが多くみられた。沿岸生物種平均として5GCMsを平均してみると大きな減少幅を示す種が数多く存在している。特に深度帯・緯度帯などを含む生息適領域の小さい、ローカルな種程大きな温暖化リスクを示している。逆に中緯度から高緯度帯まで広く分布している種など広範な環境に適応している種については、環境変動に対しても資源量を維持、若しくは微増する傾向にある。これは深度帯・緯度帯など生息領域の大きい生物種の方が生息環境に対する適応能力が高いためであり、生息環境が限定されている生物種には気候変動に伴って大きな影響があると考えられ、生物多様性の観点で深刻な問題である。また広範囲に分布している生物種についても、生息緯度帯が2~5°程北上(南下)するものも多く、全体の資源量としては維持していても漁場の移動に伴う国家単位の漁業リスクは懸念される。

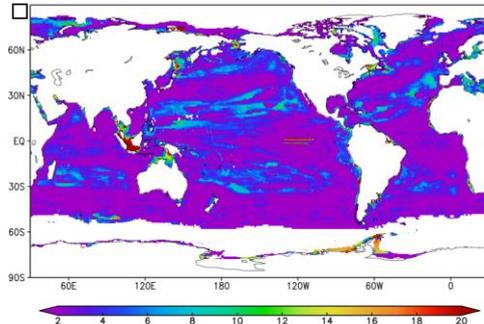
(a) 変動係数 [%] RCP8.5 現在(1995-2005)□



(b) 変動係数 [%] RCP8.5 2020s□



(c) 変動係数 [%] RCP8.5 2050s□



(d) 変動係数 [%] RCP8.5 2080s□

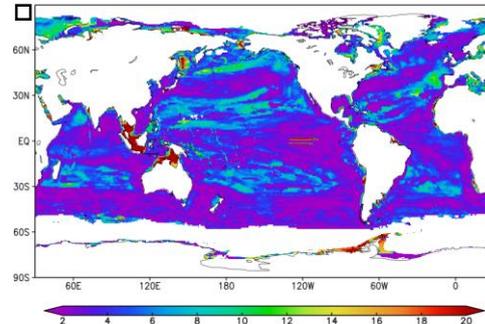


図 3-1-1-②-f-3\_2 (a) 現在 (1995-2005 年) における 5GCM 間の資源量の標準偏差 ( $\sigma$ ) を年平均値に対する比率(変動係数)分布、(b)~(d)2020s (2020-2039 年)・2050s (2050-2069 年)・2080s (2080-2099 年)における同分布

### 資源量変動の不確実性は環境変数と生息種に強く依存し、海域によって大きく異なる

将来の水溫分布については局所的な変動や、GCM 間の違いが他の変数に比べて小さいためモデル間の水溫変動に伴う影響には大きな差はなかった。一方、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、資源量の微増から大幅な減少まで違いが大きく現れた。これは 3 章 1)(1)②f-1 及び f-2 項で述べたような、溶存酸素濃度や輸出生産に対する GCM 間で領域によっては分布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ている (図 3-1-1-②-f-3\_2)。

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~オーストラリア北部では大きな不確実性が現れる。これらの領域別の応答についてより詳しく述べる。

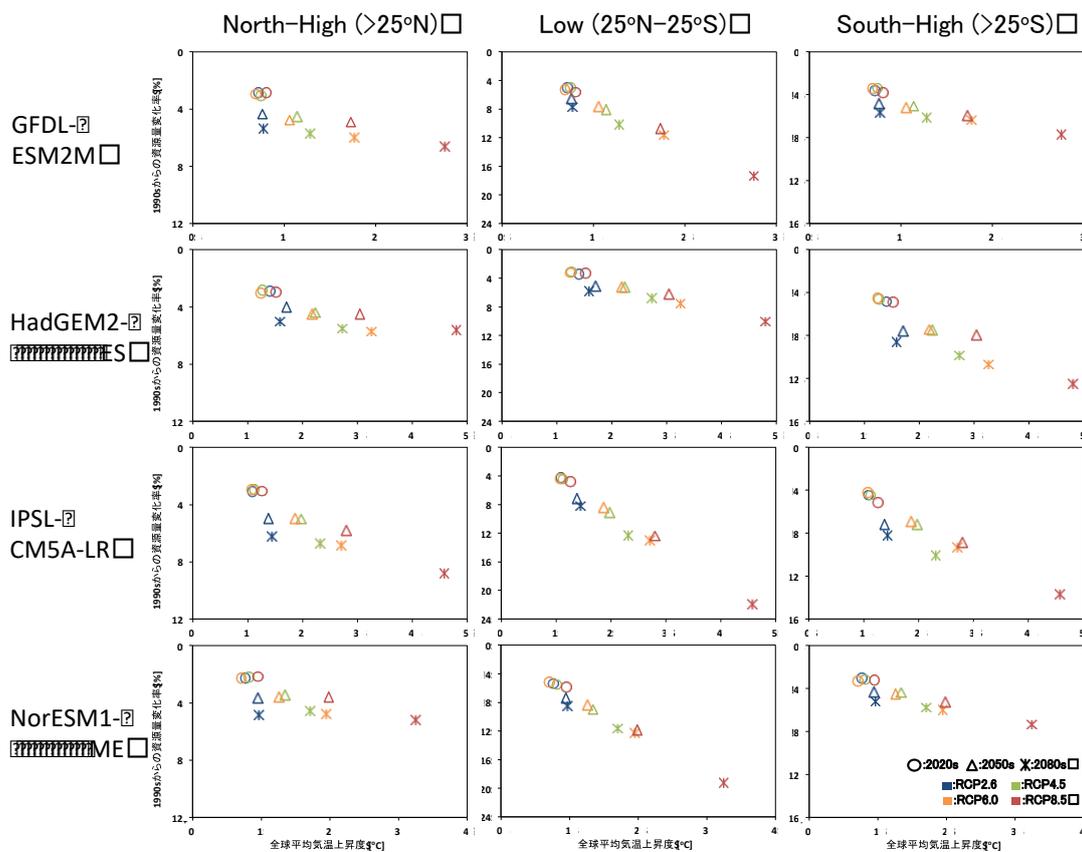


図 3-1-1-②-f-3\_3 北半球高緯度帯(>25°N:North-High)、低緯度帯(25°N-25°S:Low)、南半球高緯度帯(>25°S:South-High)の3領域における、4GCMの全球気温上昇度(1980-2000年比)[°C]に対する資源量の現在からの変化率。資源量指数の各年代平均値を領域平均し、現在気候(1995-2005)から2020年代(2020-2039)・2050年代(2050-2069)・2080年代(2080-2098)までの変化率[%]として算出した。

**資源量変動は低緯度ほど大きく減少するが、領域・GCM別には生物種固有の特性により応答が異なる**

前述の通り、概ねして低緯度帯で大きく・高緯度帯で小さい減少を示しており、この減少幅には領域平均での応答が異なっている(図 3-1-1-②-f-3\_3)。ここで南半球の方が比較的推定減少幅が大きいのは、想定した生物群に南半球に生息するものに比較的low緯度・沿岸に生息するものが多いことによる。またGCM別の推定結果をみると、GCMによっては領域による応答に殆ど差がみられていなかったり、気候シナリオによる感度が低いものがあることがわかる。これは推定を行っている200種それぞれの生物種固有の特性によるものである。各魚種の好適環境は、現在生息している海洋環境の平均場から定義され、固有の閾値から生物量は大きく減少する。このため許容を越える急激な環境変動には群集の移動も間に合わないが、ある程度の変動であれば領域に関係なく分布域の変動で対応し、生物量を維持する。更に詳細に調べるため、我が国の周辺海域に注目しての推定結果について述べる。

## 我が国の資源量は、沿岸生物種と東北以北に分布する種に高い環境リスク

我が国は広範な排他的経済水域 (EEZ) をもち、現在は種・量ともに豊富な水産資源が分布している。我が国の EEZ を例とし、同領域に主に分布する 20 種の水産生物 (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) を例として評価を行った。5GCMs 平均として、全ての水産生物において RCP8.5 においては減少がみられたが、EEZ 内の環境リスクは種によって全体のものとは異なっている。EEZ 内に生息南限を有し、ベーリング海など北方に現在分布している種 (ニジマス・サケ・スルメイカ) には、2080 年代までにそれぞれ 41%・39%・24%減少と、全球で評価されるもの (それぞれ 20%・18%・2%減少) よりも大きな環境リスクがあらわれた。その一方、EEZ 内に生息域北限を有し、東シナ海など現在南方にも多く分布する種 (クロダイ・サワラ・マサバなど) は全球で評価されるものよりも、EEZ 内の環境リスクが少なくあらわれた。また、日本沿岸にのみ生息するような固有沿岸生物種 (マアジ・イカナゴ) については、その生息適領域の狭さから高い環境リスクがあらわれた。

今回評価した資源量変動比を、過去の漁獲データと合成させることにより、漁獲量ポテンシャルとして、我が国にどの程度の気候変動リスクがあるのかを評価した。5GCM 平均、RCP8.5 を想定した場合、大きく資源量を減少させる種は変動比と同じく北部に分布する種が大きく減少するものと推定された (カルフォルニアマイワシ: 703k ton・スケトウダラ:561k ton・サンマ:221k ton 減少)。20 種平均した場合の、我が国の資源量減少幅は RCP8.5 においては平均 28%減少、また積算資源重量の変動幅は 2399k ton 減少と見積もられた。これらのリスクは、RCP2.6 においてはそれぞれ 18%減少、1487k ton 減少となることから、気候シナリオの選択によって今後のリスクをほぼ半減させる可能性があることがわかった。ただし本推定では前述の通り、沿岸種など生息領域によっては GCM 間のばらつきが大きいことから、不確実性の高い結果となっている。

コラム1: 気候変動リスクの包括的な把握とリスク相互作用の評価

### 気候変動リスクの包括的な把握

ICA-RUS では、気候変動が引き起こすリスクを包括的に明らかにすることが重要な目標の一つである。このため、人類の選択肢第一版では、幅広い分野の専門家が独自のリスク分析を行う (3 章~4 章) ことに加え、プロジェクト参画者が幅広く文献調査を行うことにより、気候変動リスクを包括的に把握する試みを行った。社会が「被害を避けたい」と望むであろう対象を幅広く想定し、気候変動リスクを食料・水・エネルギー・産業・社会・災害・健康・生態系・地球科学的臨界現象の 8 部門に分類することによりまとめた一覧表 (インベントリー) を作成した。また、気候変動リスクの間の因果関係についても、プロジェクト参

画者が文献調査を行うことで包括的な一覧表を作成し、これをグラフ理論にもとづく「ネットワーク図」で表現した。図 3-1-1-②-コラム 1\_1 は、食料部門に関わる気候変動リスクの因果関係を示している。ここではリスク項目の間の因果関係が矢印でつながれており、因果関係の数が大きいリスク項目ほど、大きな形で示されている。

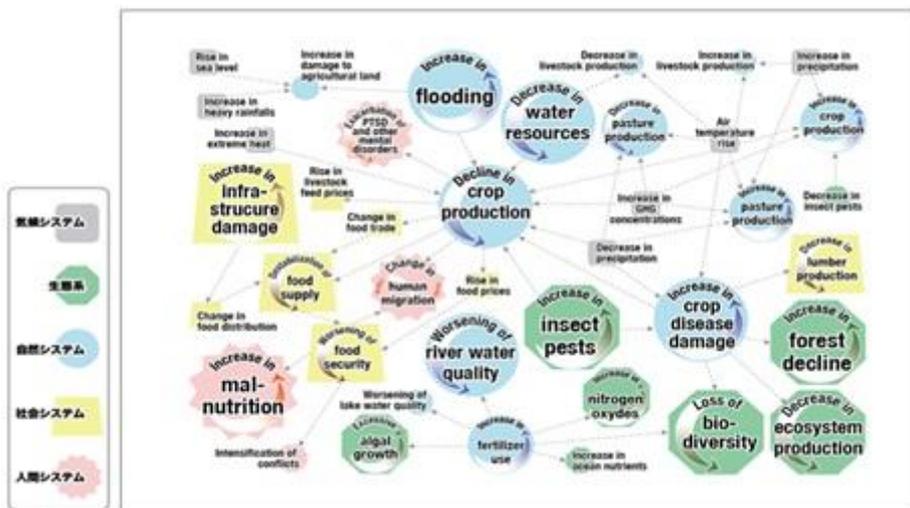


図 3-1-1-②-コラム 1\_1 気候変動リスクの因果関係を表したネットワーク図。食料部門に関わる因果関係を図示。気候変動リスクの種類 (気候・生態系・自然・社会・人間) ごとに表現する。因果関係の数によって、項目を大 (8 以上)、中 (4 以上)、小 (3 以下と、気候システム変化に関わる項目) で示す。

人類の選択肢第一版では上記のような図を基に、気候変動リスクの因果関係を示す事はできた。しかし気候変動のリスク管理を行うためには、リスクの因果関係を知るだけでは十分ではなく、様々に提示されたリスク項目の内、どれが特に注目すべき・避けるべきリスクなのかを明らかにする必要がある。そこで人類の選択肢第二版では重要なリスクを同定する為に、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、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事を試みた。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。その結果から、図 3-1-1-②-コラム 1\_2 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きい場合を示している)。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、北極の海水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 3-1-1-②-コラム 1\_2 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、

- 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
- 判定値の妥当性に関する専門家会合での確認
- 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死
	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 3-1-1-②-コラム 1\_2 影響の重要性と確信度 (横軸) のリスクマトリックス

## (2) 対策評価

### ① 基本的な考え方

<背景>

温暖化の対策オプションは、省エネルギー、化石燃料から低炭素エネルギーへの転換など、エネルギー需給に着目した技術対策にはじまり、植林、産業構造の変化、ライフスタイルの変革、および気候変動後の状態に対応する適応策、さらに太陽放射強制力の制御までさまざまな手段が考えられる。では、これらのオプションをどのように導入すべきなのか。また、今知られている対策の導入で十分なのか。2015年12月に採択されたパリ合意では、「21世紀中の大気温の上昇を産業革命前から十分に 2°C 以下に抑えること」がうたわれ、さらに

上昇を 1.5°C 以下に抑制する、という野心的な目標も言及された。しかしここにはいくつかの問題がある。第 1 に、温暖化の進行、影響、対策と効果も、時と場所で同じではない。第 2 に、長期的な温暖化の進行と対策は費用が掛かるので「現在と将来の間の費用の分担」という仮想的な相手を扱わねばならない。第 3 に、対策の実施には確実にコストがかかる一方、温暖化の影響や対策の効果には不確実性が付きまとう。現実の社会経済は時に突発的で不合理な出来事で損失が発生する一方、予期せぬ技術開発が大きく社会を変革することもある。

では、どのような行動を今取るべきなのか。長期計画の策定で重要なのは、将来の姿を「正しく予言する、しない」ではなく、不確実性を見据えたうえであくまで現時点での行動を決めることである。たとえば、著名な経営学者であるドラッカーは、以下のように指摘する。「意思決定は現在にのみ行われる。長期計画立案時に直面する問題は、明日何をすべきかということではない。不確実な明日の準備として、今日何をすべきかということである。問題は、将来何が起こるかということではない。現時点での検討、行動に何を考慮し、どれだけのタイムスパンで考え、今日の決定のためにどのように取入れるかということである。」「長期計画は、現在の意思決定の未来性を扱うものであり、将来の意思決定を行うものではない。不確実な将来に備えるために現在しなければならないことは何かという問題を扱うのが長期計画である。」

長期的な問題に対する意思決定は、ありうる複数の未来に対する現時点での選択肢を合理的に描くことであり、運命論的な未来を描くことではない。モデル構築とシミュレーションはこのような視点から意思決定支援ツールとして用いられてきた。モデルアプローチの利点は、構造や仮定が明示されるため自己矛盾や論理的な破綻を排除できること、評価結果が定量的に示され帰結や前提条件の吟味が可能なことにある。反面、現在の知識の範囲を出ず、未知の革新的な発明や構造的な変革は想定できないこと、定量化できない情報の扱いに限度があることは当然とはいえずやむを得ない。

ICA-RUS におけるリスクへの対応「戦略」策定の考え方は第 1 章、第 2 章に示されたが、ここでは具体的な対策と戦略の評価を定量的に行うための道筋を示す。

#### <目的>

本節では、これまでに示された予想される温暖化の影響に対して、今わかっている方策のもとで、人類が今どのような道を選ぶべきなのか、その判断となる情報を統合的かつ定量的に示すことにある。具体的には、温暖化対策の実施に当たって予想される次のような疑問に答えようとするものである。

- どのような技術導入の戦略 (エネルギー技術、炭素回収隔離、適応策、ジオエンジニアリングなど) をとるべきなのか。
- 社会・経済への影響はどの程度なのか。費用と便益の分配への影響はどのように見積もられるのか。(GDP、消費変化の地域差)

- 予想される食糧需要変化の下で、食糧生産と競合せずに農作物、森林をエネルギー利用できるのか。
- 世界各国の産業はどのように変化していくのか。
- 科学的知見やコストなど将来の不確実性にどう対応すべきなのか。

これらは、決して経済とエネルギーだけの問題ではなく、自然科学的な温暖化の進行と影響、新たな技術開発など、多くの分野の相互作用を念頭に置いて初めて答えられるものである。

#### <方法>

#### D) マルチモデルアプローチとマルチシナリオアプローチについて

本テーマでは、複数のモデルの相互比較により戦略策定を行うマルチモデルアプローチおよび複数の将来社会経済ベースラインシナリオを設定し温暖化政策を評価するマルチシナリオアプローチを採用した。本研究では、以下の異なる特徴を持つモデル群を用いた。

##### i) MARIA-14 モデル (東京理科大学)

構成: 長期通時的非線形最適化型モデル、エネルギー、経済、土地利用、温暖化影響をすべて一体で解く。経済活動はマクロ部門に集約。最終エネルギーサービス需要は一人当たり所得の関数として内生され、割引効用現在価値の最大化を行う。

特徴: 世界は最大 23 地域に分割されており、詳細なエネルギー技術、核燃料サイクル、水素合成技術のほか、バイオマス燃料が食糧需給と競合しないための土地利用変化を生産化するブロックを持つ。土地利用変化による土壌からの炭素放出や穀物残渣の燃料利用やダイズ滓の飼料転換なども含む。温暖化ブロックは DICE モデルに準拠する簡易な構成である。いくつものバージョンがあり、例えば多段階意思決定モデルのために拡張されたものもある。今回は、SSP に合わせ 14 地域に集約した MARIA-14 モデルを用いる。

##### ii) EMEDA-MER モデル (上智大学)

構成: 多部門多地域応用一般均衡モデル。各年の均衡資本蓄積を逐次的に導出する動学モデル。

特徴: EMEDA (Evaluation Model for Environmental Damage and Adaption) は世界経済を対象とした応用一般均衡モデルであり、温暖化ガス排出とその気候への影響、気候変動による被害、および温暖化ガス排出削減費用も組み込まれている。世界を複数地域に分割し、また、一つの地域ごとに産業もまた分割され、国内的市場均衡と世界市場の均衡が同時に達成されるモデルとなっている。長期的な気候変動の世界経済への影響を分析するために、毎年の均衡を積み重ねる形での動学化を行ういわゆる逐次均衡型のモデルである。国内と世界の市場均衡と均衡価格が整合的に与えられる特徴を持つ。複数主体による協力解のほか、利己的に決定するゲーム論的解の計算を実行可能である。今回、市場為替レートで GDP を表現する

EMEDA-MER モデルを用いる。

iii) GRAPE モデル (エネルギー総合工学研究所)

構成: GRAPE (Global Relationship to Protect the Environment) モデルは、最新バージョンでは、エネルギー・経済・土地利用モジュールを結合したモデルと気候変動モジュールのソフトリンクにより、累積温室効果ガス排出量制約を仮定した場合のシミュレーションを行うことが可能な構造としている。長期通時的最適化型モデルとして定式化され、経済および気候モジュールは非線形性を考慮されている。

特徴: 気候モジュールは、炭素およびエネルギーの海洋移流・拡散、濃度および温度フィードバックを含む陸域炭素収支、太陽放射等を考慮したエネルギーバランス等を含む、全球 1 次元構造の簡易モデルであるが、その他の部分のシミュレーションでは世界を 15 地域に分割して、超長期的な気候システム変化に関する分析を可能な構造としている。時間解像度は気候モジュールは 1 年、その他モジュールは 5 年としている。エネルギーモジュールは資源供給、転換、および最終需要についての詳細なシミュレーションが可能な構成となっている。

iv) AIM モデル (国立環境研究所)

構成: AIM/CGE は世界全体を 17 地域、43 部門に区分した応用一般均衡モデルである。エネルギー部門をより適切に記述するために、発電部門などが詳細に扱われている。また、食料とバイオエネルギーの土地利用競合等を統合的に描くために農業部門、土地利用も詳細に記述されている。生産者行動は、入れ子構造の CES 関数を用いた生産関数と利潤最大化を基にし、消費者行動は Stone-Geary の効用関数とその最大化により記述する。各地域の資本投資量は外生的に決定し、貯蓄と資本のバランス関係より貯蓄率が内生的に決まる。AIM/CGE モデルは逐次動学型モデルであり、前年の資本を次年に引き継ぐ。モデルの詳細な式体系は Fujimori et al. (2012) を参照されたい。

特徴: さらに様々な環境モデル、エネルギー技術モデル、地域モデルと連携させたシミュレーションが可能であり、目的に応じてモデルを選択してシミュレーションを行う。今回は、逐次最適化型多部門多地域経済モデルとエネルギー技術モデルを組み合わせた AIM/CGE モデルを用いる。

これらの各モデルは、次図のように共通情報と独自の情報を提供する。

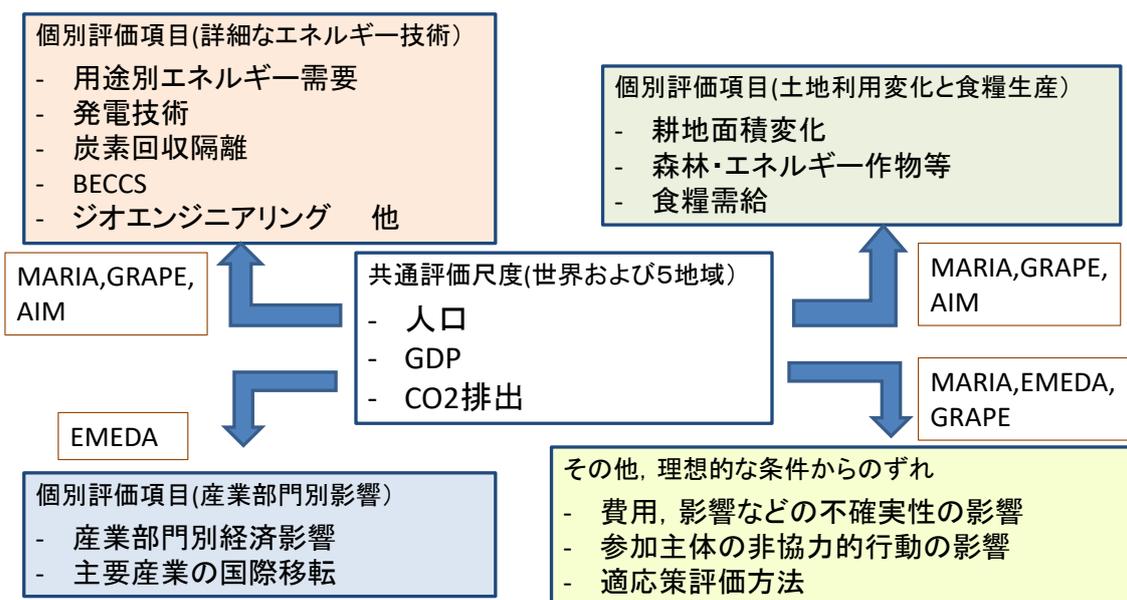


図 3-1-2-①\_1 各モデルの提供する情報のフロー

いずれのモデルも人口は外生変数として与え、経済活動や CO<sub>2</sub> 排出量などは内生的に算出する。ただし、

5. EMEDA のみはエネルギー需給を直接計算せず、経済活動に換算係数を乗じて CO<sub>2</sub> 排出量を導く構成となっている。
6. GRAPE、MARIA は割引現在価値の最大化による通時的最適化を行う。従って 2100 年時点での濃度制約あるいは温度制約に対して、途中時点での CO<sub>2</sub> 排出経路や長期設備計画は内生的に得られる。反面、計算量は増え、また解は割引率の仮定による影響を受けやすい。
7. AIM、EMEDA は各時点ごとの最適化計算を行う。従って CO<sub>2</sub> 排出経路を時点ごとの制約として与える必要がある。逐次最適化モデルでは計算量は少なくでき、また比較的近視眼的な行動が仮定されるため割引率の仮定の影響は小さい。

という差異がある<sup>1</sup>。

このようなマルチモデルアプローチを用いる理由は下記のとおりである。

第 1 に評価対象が広く学際的な視点が必要なため、単一のモデルではすべての分野をカバーできない。具体的には、資源・環境制約を考慮したエネルギー技術の導入、経済活動への地域的・時間的な影響、地域間の協調と競合、バイオマス利用拡大の際の土地利用変化と食糧需給との競合などを考慮しなければならない。詳細な情報を扱おうとすれば個別分野に特化したモデルが要求され、複数分野を包括する学際的なモデルでは、どうしても何らか

<sup>1</sup> なお、応用一般均衡モデルの解は数理計画法で計算されるものの、元来は評価関数のない「連立方程式の解」である。このため通時的最適化による「長期計画」とは基本的なアプローチの違いがある。(今野、山下「非線形計画法」日科技連、1978 他)

の構造の簡略化が必要となる。また AIM のように、一つのプロジェクトの中に複数の異なる分野と構成のモデルを持ち、相互にデータ交換しつつ全体的な整合性を保とうとする大規模なアプローチも近年多くなっている<sup>2</sup>。

第2に、地球温暖化対策では、意思決定プロセスそのものにいくつかの立場がある。モデル構築もこれに沿って異なる方法論が開発されてきた。例えば、企業の投資意思決定のように、所与の需要を満たすためにどのような具体的技術を採用すべきなのか（ボトムアップアプローチ）と、望ましい社会の状態、例えば消費効用の最大化のために社会の各主体はどのような行動を選択していくのか（トップダウンアプローチ）という接近法の違いがある<sup>3</sup>。また、社会の複数主体のゲーム論的な相互認識行動など、人間の行動表現にはさらに柔軟な定式化も考えられる。

このように、人間が主役の意思決定問題では立脚点がそもそも多様である。しかし、もしそれら多様なアプローチで共通性の高い知見が得られるとすれば、それはロバストな結論と言って良く、多くの立場から支持されるものとなろう。また結果が分かれる場合には、その点の解明と含意の解釈に時間を割く必要が生じよう。

## II) SSP-RCP シナリオについて

次に、本レポートで用いたマルチシナリオアプローチにおいて想定する将来の社会像について述べる。

本レポートのマルチシナリオアプローチでは、5つの SSP シナリオ（2章2節参照）のうち SSP1（持続可能社会）、SSP2（中庸型社会）、SSP3（分断型社会）を将来の社会像として想定した。SSP シナリオは、社会・経済の将来像だけでなく気候変動やその影響評価のためのプラットフォームを提供する目的で開発され、2016年に公開された。本研究ではこの SSP 策定に参加している情報提供者の一つである AIM のデータベースに基づき、まず BAU ケースについて①地域別 GDP、②地域別人口、③地域別最終エネルギー需要、④地域別 CO<sub>2</sub> 排出量、という基本的な変数についてモデル間でできるだけ一致するよう各モデルが調整を行い、そのうえで一次エネルギー供給や電源構成、土地利用等の計算を行い ICA-RUS 全体の整合性をはかることとした。

SSP シナリオは温暖化政策を積極的には導入しないベースラインとしての社会像であるが、温暖化政策時の社会経済影響はベースラインごとに異なる。例えば、ベースラインで社会の持続可能性意識が高まり、省エネルギー・低炭素化社会が世界共通である程度実現していれば、その先の温暖化対策の導入は容易になると考えられるし、逆に世界が分断化されいづれも化石燃料依存から脱却できない社会では、厳しい温暖化ガス排出抑制政策の導入は

<sup>2</sup> 他方、Nordhaus の DICE モデルのようにエネルギーを持たない簡素な構成のモデルも、簡便な評価ツールとして広く用いられている。<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/>

<sup>3</sup> 近年では、両方のアプローチを統合的に扱うモデルが主流となりつつある。本テーマでも、MARIA、GRAPE、AIM がこのタイプとなっている。

厳しい費用負担を招くであろう。

本研究では、まず世界の他の研究と合わせるため、異なる温暖化目標に対する対策実施費用の比較をそれぞれの SSP シナリオごとに評価する。これを本研究では分析ケースと呼ぶ。ここでは、SSP1～3 に対して分析ケースとしては 1. 成り行きケース (BAU)、2. RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6 の放射強制力制約ケースの合計 3 × 3 ケースに対して計算を行う。さらにその後 ICA-RUS 独自の戦略ケースとしてさらに異なるケースを想定する。ケース間、モデル間の比較により共通性の高い知見と相違点を探ることとする。

表 3-1-2-①\_2 SSP-RCP 分析ケースの計算

		SSP-1				SSP-2				SSP-3			
		MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM	MARIA	EMEDA	GRAPE	AIM
分析ケース	BAU	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP4.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	RCP2.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(注 1) 基準となる排出経路は、気候感度 (CS) = 3.0 を仮定して与えられている。

(注 2) いずれのモデルも BAU でも放射強制力は 8.5W/m<sup>2</sup> に到達せず、RCP6.0 と BAU の差は小さい。AIM は BAU においても RCP6.0 に達しない。

各モデルの提供する情報は極めて莫大なものとなる。ここでは特に指標を絞り、これらを中心に評価を行う。その後、各 RCP シナリオや後述の戦略シナリオに対する計算を行い、結果の比較を行うことで望ましい戦略の在り方を模索することとする。

なお、モデルはいずれも多地域の相互依存性を扱うが、地域の分割パターンはモデルにより異なる。そのため、ここでは SSP が用意する地域分割の一つである次の世界 5 地域への集約化を行い比較もこの 5 地域で行う。ただし、この場合も例えば OECD のように歴史的に加盟国が変化しているなど、国の地域分割を統一させられない制約は残る。

表 3-1-2-①\_3 SSP シナリオの世界 5 地域及び世界合計

地域 (略号)	地域の主要国	地域 (略号)	地域の主要国
ASIA	中国、インド、そのほかアジア各国	OECD	米国他 OECD 30 か国
LAM	ブラジル他ラテンアメリカ諸国	REF	旧ソ連・東欧 (現 EU 加盟国を除く)
MAF	中東およびアフリカ諸国	WORLD	世界合計

#### <指標の一覧>

ここでは、下記の 6 指標を中心に戦略評価を行う。

#### a. GHG 排出・削減経路

温暖化対策を実施した際に、どのような経路で GHG が削減されるか。早期に削減策がとられるか、それとも時間を経て急速な削減策がとられるか、いずれが合理的な選択であるか。CO<sub>2</sub>だけでなくメタンなど非 CO<sub>2</sub>-GHG も積極的な削減が必要となるかもしれない。ここで、モデルにより CO<sub>2</sub> 排出量の扱いにやや差異がある点に注意が必要である。主要な人為起源の温暖化ガスとして、化石燃料起源 CO<sub>2</sub>のほか土地利用変化起源の CO<sub>2</sub>、メタンなど非炭素温暖化ガスがあるが、これらを化石燃料起源および土地利用からの純放出分を一度等価 CO<sub>2</sub> に換算するモデル (GRAPE、AIM)、エネルギー起源と初期値からの土地利用変化分を計上し、非温暖化ガスの初期値からの変化分に対して放射強制力変化に変換するモデル (MARIA)、温暖化ガス排出は経済活動からの変換係数により求めるモデル (EMEDA) がある。このため、初期値の評価に差異が生じる。そこで、ここではモデル比較の簡便化のため、AIM の地域別排出量を初期値として、各モデルの変化分をこの値から累積させることとした。

#### b. GDP および消費の損失

温暖化対策の社会経済への影響として最も直截的な指標は GDP の低下である。長期モデルでは、通常、貿易収支を考慮して米ドルに換算して評価を行うが、さらに時点間の物価水準の変化を考慮した実質額 GDP (GDP-MER) と、国間の物価水準の差を考慮した購買力平価による値 (GDP-PPP) が用いられる。前者は国際貿易や国際収支バランスの表現に不可欠であり、後者は特定地域の生活水準変化の評価に有用である。また、GDP は定義から消費と投資に分配される。GDP 成長のみが目的であれば、消費を減らしより多くを投資に回すことで達成できることになる。逆に、人々の満足度は消費の関数と考えられるものの現時点で消費のみに偏れば、将来世代は生産も消費も困難になってしまう。そのため、消費の推移と損失の時間的な経路も社会の姿の指標として用いられる。いずれも、世界平均でなく地域差への着目も重要である。

#### c. エネルギー需給

エネルギー需給は温暖化対策の重要な指標である。一次エネルギー供給、利用形態である二次エネルギー変換、最終エネルギー消費の 3 種が指標として用いられる。一次エネルギーは、石炭、天然ガスなどエネルギー源別に、二次エネルギーは電力、ガソリン、など消費形態に、最終消費は産業用、輸送用など用途別に分類される。MARIA、GRAPE、AIM などエネルギー消費を明示するモデルは、いずれもこの 3 形態間のフローを扱う。

#### d. 技術オプション

温暖化対策技術オプションとしては、まず温暖化の緩和策がある。上記 3 エネルギー指標のそれぞれの対策、すなわち低炭素あるいは無炭素エネルギー源の利用拡大、エネルギー変換効率の向上、最終エネルギー消費の節減あるいは利用効率の向上、が以前から知られてい

る。このような利用形態への技術導入に対し、燃料の燃焼時に発生する二酸化炭素<sup>4</sup>を回収し、そのまま地中や海中に貯留する CCS、大気中の二酸化炭素を直接・間接的に回収し隔離する DAC、さらに大気圏に硫酸などを散布し太陽エネルギーを遮ったり、反射を促進したりする SRM などのジオエンジニアリングも対策として検討されている。他方、温暖化後の世界への適応策も技術オプションに数えられる。例えば海面上昇に対する防波堤の嵩上げや、高温に強い農作物品種の導入がこれにあたる。ただし、適応技術は詳細かつ個別的な提案が多く地球レベルでモデル評価する段階ではなく、モデル評価に導入するには至らなかった。

#### e. 土地利用と食糧需給

温暖化対策の一つに、エネルギー作物や森林などバイオマスを利用する技術が期待されている。さらに、バイオマス燃焼時に発生する CO<sub>2</sub> を CCS と組み重ねる BECCS は、大気中の二酸化炭素を削減するオプションとなる。しかし、温暖化対策としてのバイオマスのエネルギー利用を拡大すると莫大な耕地面積が必要となり、食糧生産と競合する懸念がある。また、農業自体も気候変動により大きな影響を受ける。そのため、土地利用と食糧需給は、3章 1)(1)②a. 農業影響と相互比較しつつ検討する必要がある。ここでは、農業と生態系評価(テーマ2)から SSP×RCP×主要作物(トウモロコシ、コメ、ダイズ、春コムギ、冬コムギ)別の収率変化データを受け取り、土地利用変化と農作物生産、食糧需給を内生的に計算する MARIA、GRAPE、AIM の3モデルが評価を行う。ただし、いずれも簡易化されており、グリッドごとの詳細な気候変動の影響を評価するものではない。

#### f. 産業部門・地域別影響

社会経済への影響を見る際、合計値、あるいは平均値のようなマクロ指標だけでなく、地域間や世代間への分配という公平性の指標も重要な意味を持つ。また、政策策定にあたっては、GDP をさらにブレイクダウンした産業部門ごとの変化も大きな意義を持つ。この産業部門別影響の評価には貿易を考慮した多地域・多部門モデルが必要であるが、今回は EMEDA がこれを提供する。多地域多部門モデルは変数が急増するため、逐次計算型で構成されることが多い。またエネルギー技術フローを内生化するモデルは極めて例が少なく、今回の報告では用いられない。

### ② 項目別結果

#### a. GHG 排出・削減経路

本報告では BAU から RCP2.6 に至る 5 通りの温暖化対策ケースの計算を行っている。ただし、以下の図では、ケース別モデル結果の表示に「モデル名称 + RCP シナリオ(または BAU)」を用いる。

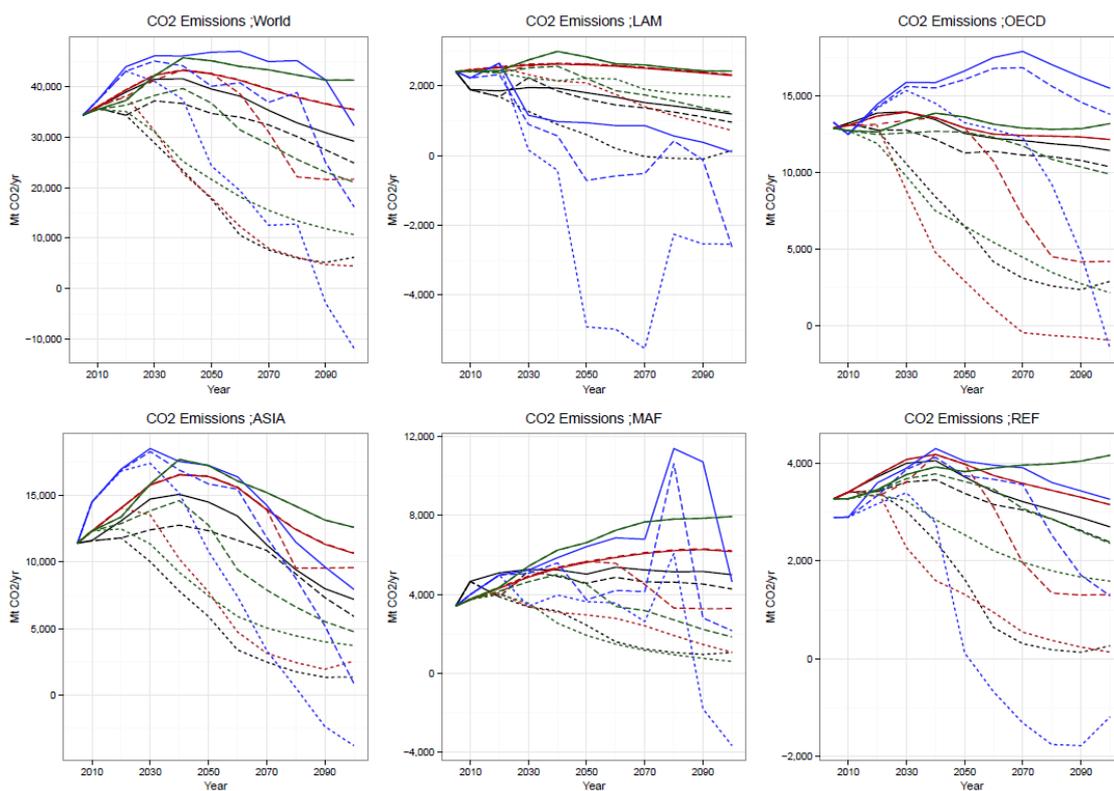
---

<sup>4</sup> セメント製造業や鉄鋼業の製造時に出る二酸化炭素も CCS の対象になりうる。

各モデルとも BAU では世界合計、5 地域別排出経路いずれもほぼ整合的である。温暖化対策を厳しくするに従い、モデルが示す経路は次第に多様化する。

SSP1~SSP3 の世界全体および 5 地域別の CO<sub>2</sub> 排出経路を、図 3-1-2-②-a\_1~3 に示す。BAU と RCP6.0 ケースはほぼ重なっている。BAU における CO<sub>2</sub> 排出については、比較的モデル間で一致した傾向を示している。ただし、分断化社会である SSP3 では、21 世紀末にかけモデル間にやや大きい差異が生じている。RCP4.5、RCP2.6 においては、おおむね各モデルが 2080 年付近まで類似した傾向を示す。その後、GRAPE は RCP2.6 ケースにおいて大きめの「負の排出」すなわち大規模植林や BECCS による排出以上の吸収源の導入を与えている点が注目される。

詳細に見ると、RCP2.6 において MARIA が比較的早期からの CO<sub>2</sub> 排出削減を実施する。GRAPE、AIM は削減行動がやや遅いもののその後急速な削減となる経路を示す。地域別の CO<sub>2</sub> 排出量のモデル比較をみると、RCP2.6 ではモデル間の乖離は広がる傾向にある。LAM、MAF では SSP3 の RCP2.6 において GRAPE が急増と急減を示すが、これは負の排出量技術導入との相互作用と考えられる。



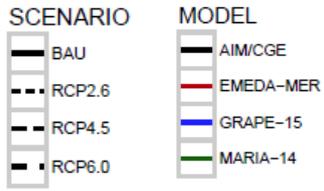


図 3-1-2-②-a\_1 SSP1 における CO<sub>2</sub> 排出経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million t-CO<sub>2</sub>)

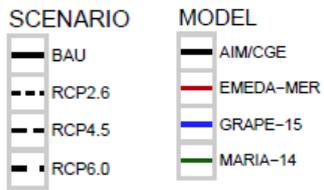
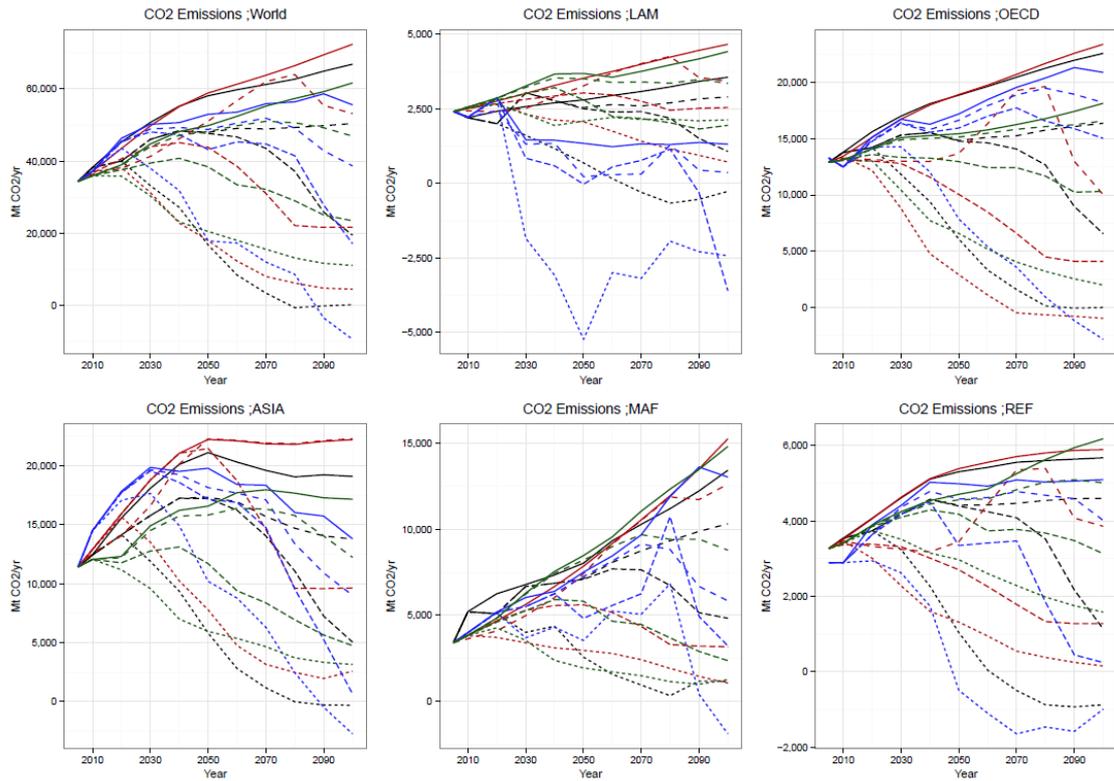


図 3-1-2-②-a\_2 SSP2 における CO<sub>2</sub> 排出経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million t-CO<sub>2</sub>)

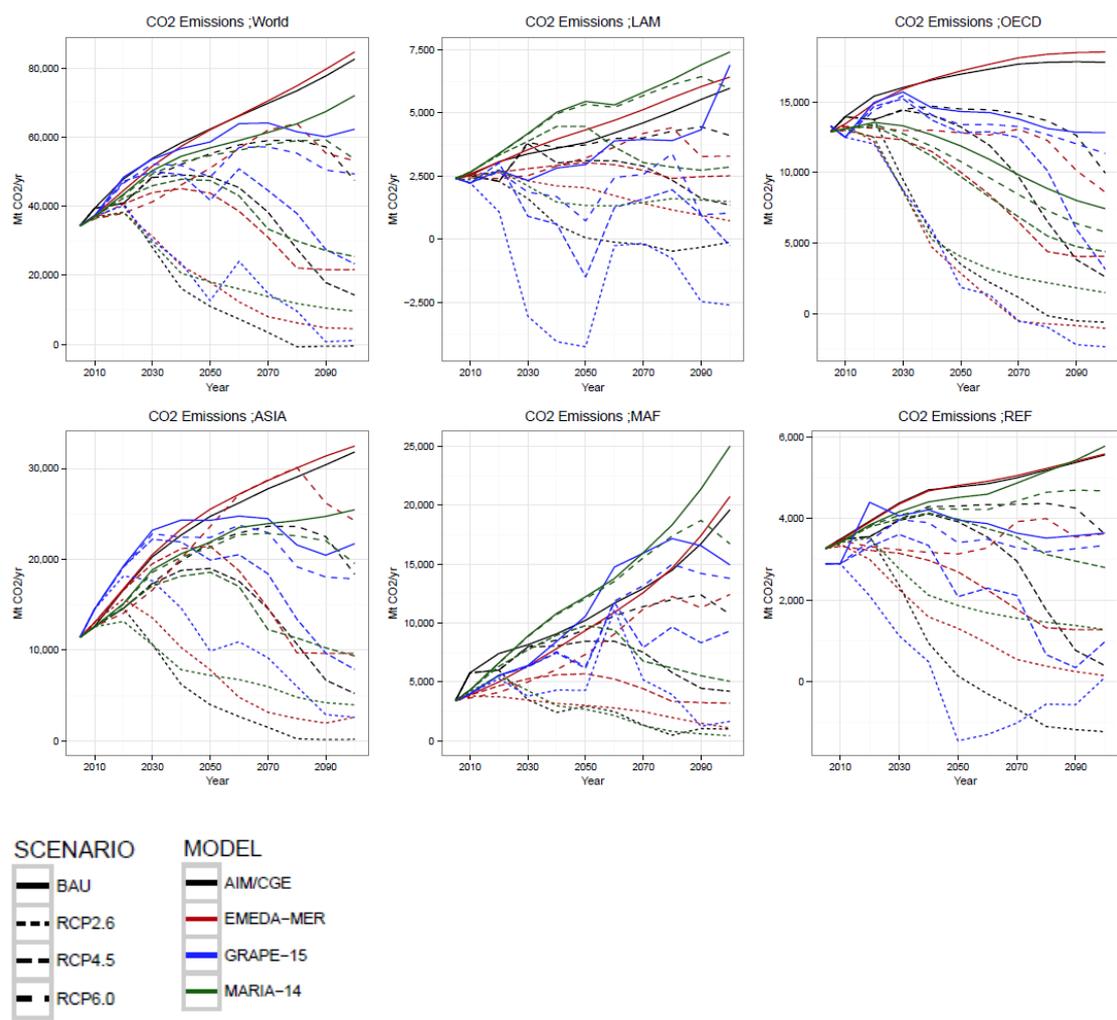


図 3-1-2-②-a\_3 SSP3 における CO<sub>2</sub> 排出経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million t-CO<sub>2</sub>)

b. GDP および消費の損失

b-1. GDP-MER 推移のモデル別比較

各モデルとも BAU では世界合計、5 地域別 GDP 成長経路いずれもほぼ整合的な結果を与える。ただし、SSP1、SSP3 における REF 地域ではモデル間の差が大きい。

図 3-1-2-②-b-1\_1~3 に、SSP1~SSP3 における各モデルの RCP ケース別 GDP-MER 地域別推移を示す。SSP3 では OECD 地域に明らかな他 SSP シナリオとは異なる傾向が見られる。REF 地域では比較的経済成長率の低い SSP1、SSP3 においてややモデル間の差があり、パラメータのチューニングの限界を示唆している。しかし REF 以外ではいずれの SSP でも比較的各モデルは類似した傾向を示している。

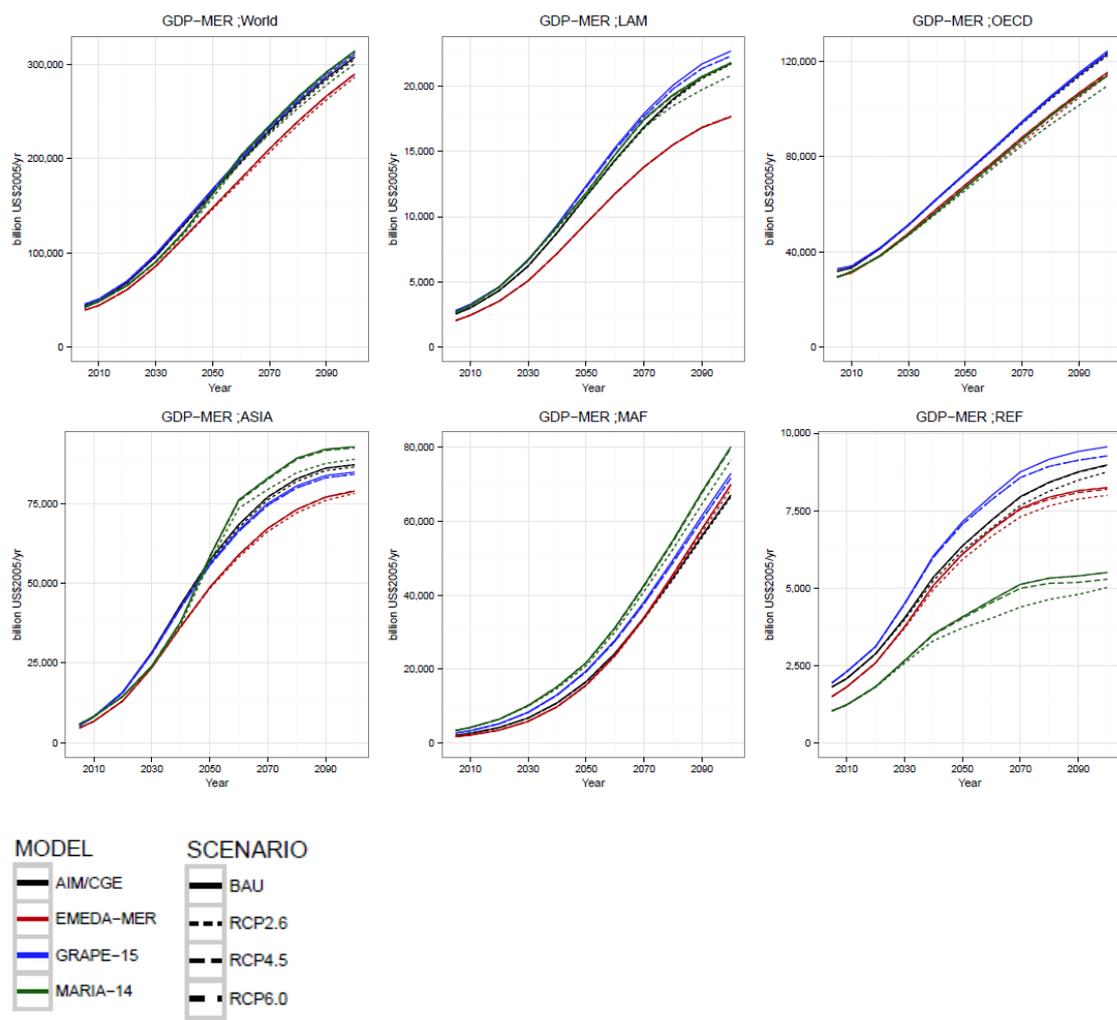


図 3-1-2-②-b-1\_1 SSP1 における GDP 経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million USD)

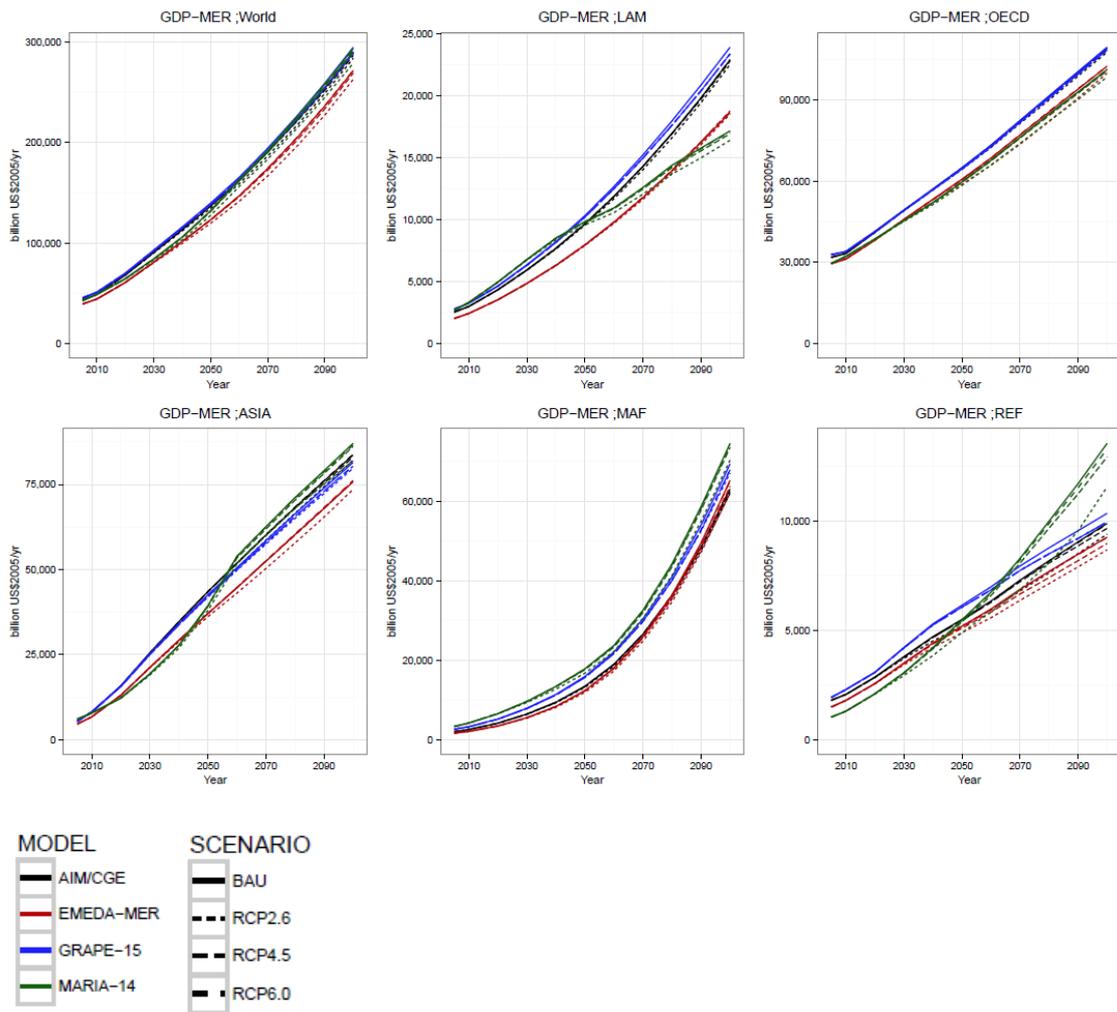
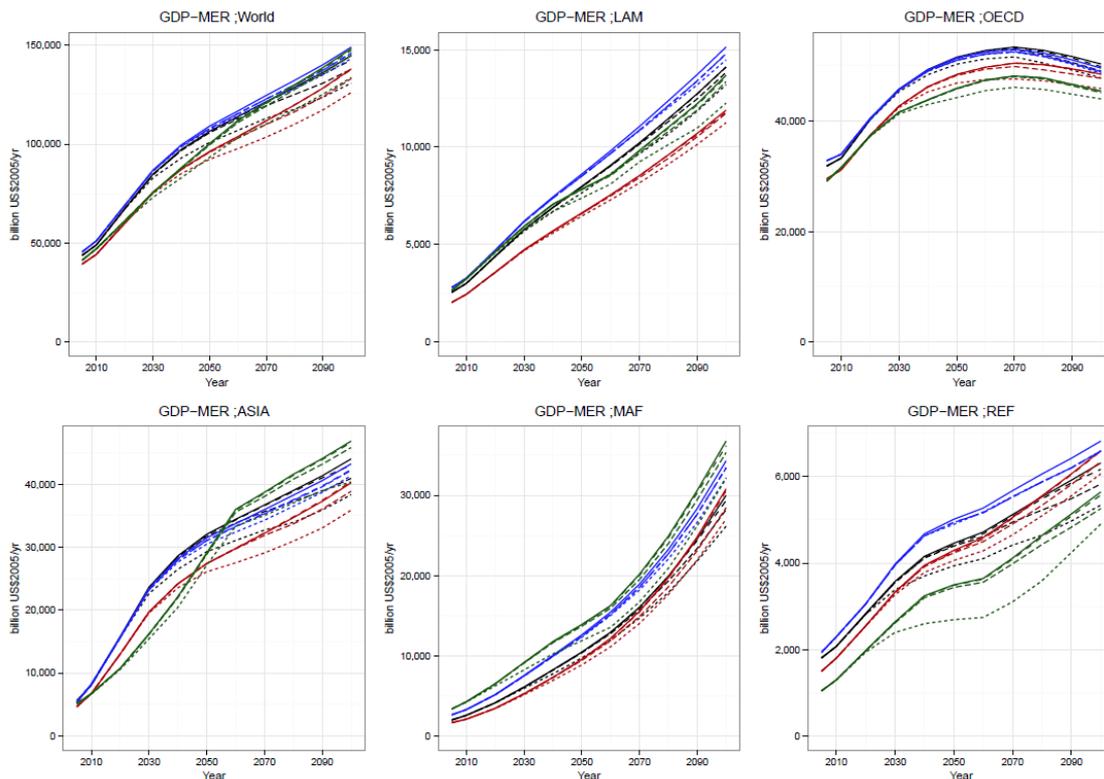


図 3-1-2-②-b-1\_2 SSP2における GDP 経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million USD)



傾向の明確な RCP2.6 で比較すると、

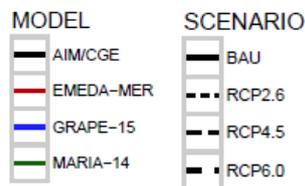


図 3-1-2-②-b\_1\_3 SSP3における GDP 経路 (BAU、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0) (million USD)

### b-2. GDP-MER の RCP ケースにおける損失

温暖化政策による経済評価は、規制が厳しくなるにつれモデル結果間にやや乖離が現れる。地域別では広がりが増大する。この傾向は IPCC-AR5 でも現れている。

BAU からの RCP ケースによる GDP-MER の損失を、図 3-1-2-②-b-2\_1~4 に示す。明らかに、RCP4.5 まではいずれのモデルでも温暖化政策による GDP 損失は極めて小さい。傾向の明確な RCP2.6 で比較すると、SSP1 では MARIA と GRAPE で差が増大しているものの、GDP 損失は GRAPE で 1%、EMADA、AIM が約 1.5%、MARIA で 4.5%にとどまる。この差は SSP2 では EMEDA 4%、MARIA 5%に、EMEDA と GRAPE も各々2.5%と 2%に増大する。さらに SSP3 では EMEDA 9%、MARIA 10%、GRAPE も 4%と同様の傾向を示す。この差は、図 3-1-2-②-b-2\_4にある IPCC-AR5-WG3 の GDP 損失評価幅が 430~480ppmV ケースにおいて 2%~15% (図中では 12%) と広がることと比較すると、本 ICA-RUS マルチモデルは

比較的収束した結果を示したといえる。

地域別に見た場合、温暖化制約により途上国で損失が拡大する傾向がある。特に RCP2.6 における GDP 損失には明らかな地域差があり、OECD など先進国で小さく、REF で大きい。SSP3 ではこの傾向は顕著である。旧ソ連・東欧地域は化石燃料資源も多く、経済活動としても依存度が高いことから厳しい炭素削減政策は経済活動へも大きな影響を及ぼすことが示される。また途上国地域ほど経済的損失が大きいことは、温暖化対策の先進国から発展途上国への制度的援助あるいは技術移転が必須であることを示唆している。

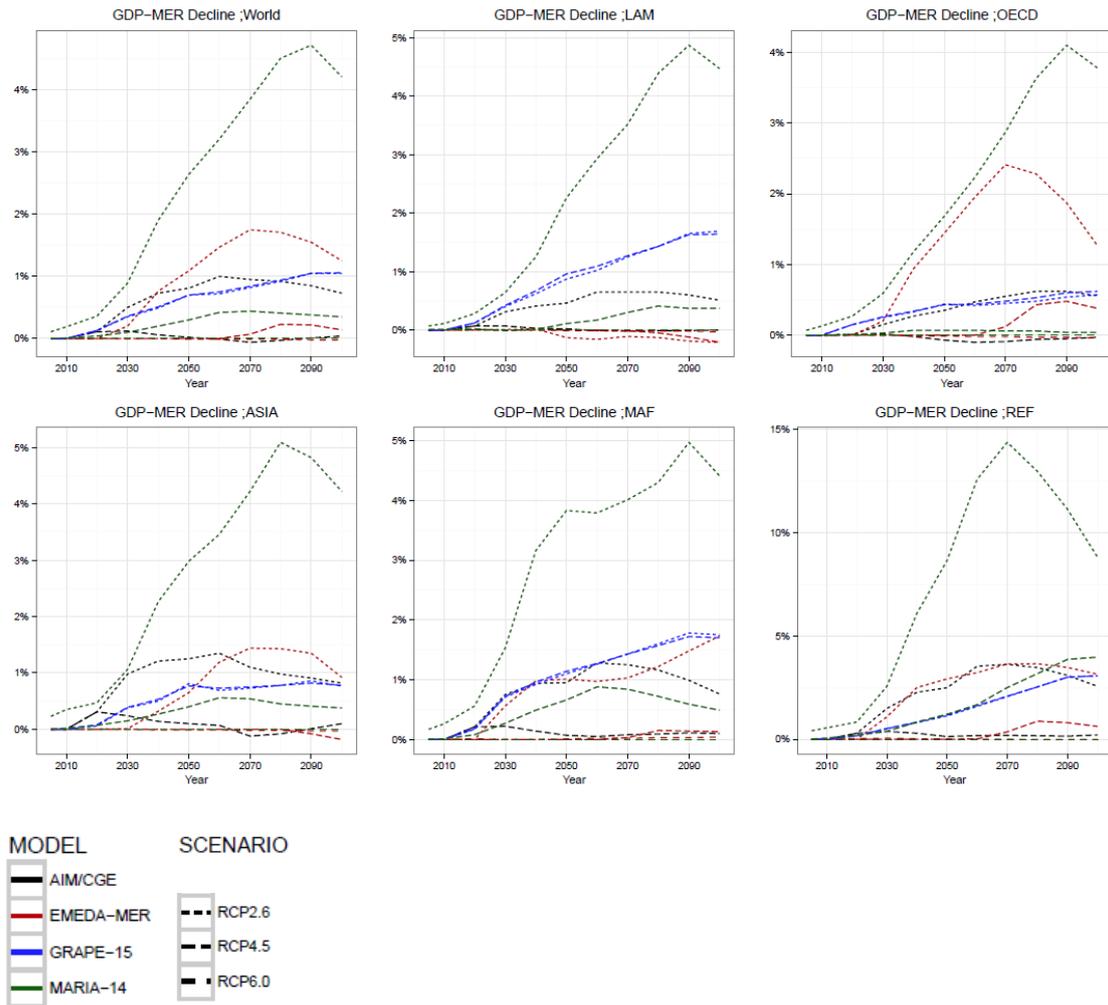


図 3-1-2-②-b-2\_1 SSP1 における BAU からの GDP 損失 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

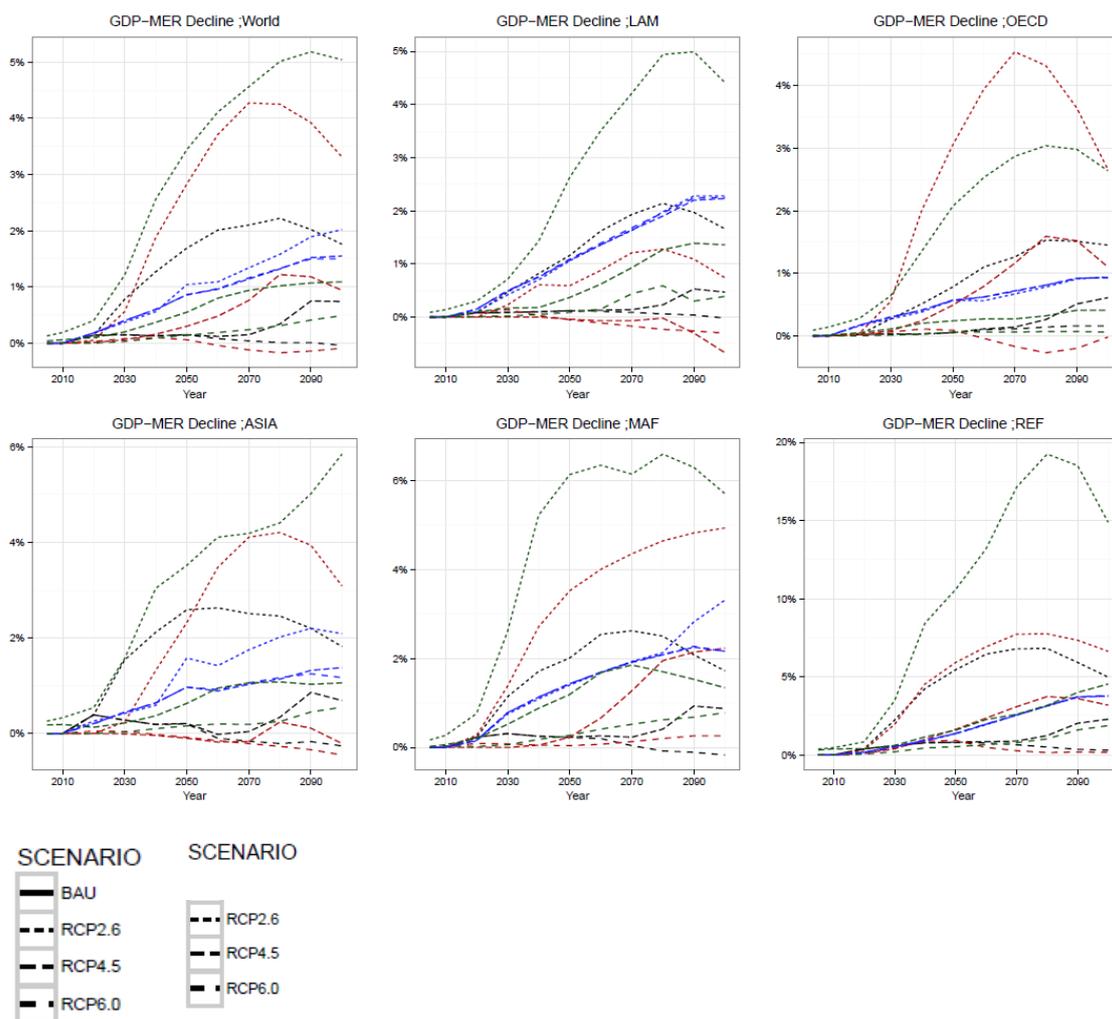


図 3-1-2-②-b-2\_2 SSP2におけるBAUからのGDP損失 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

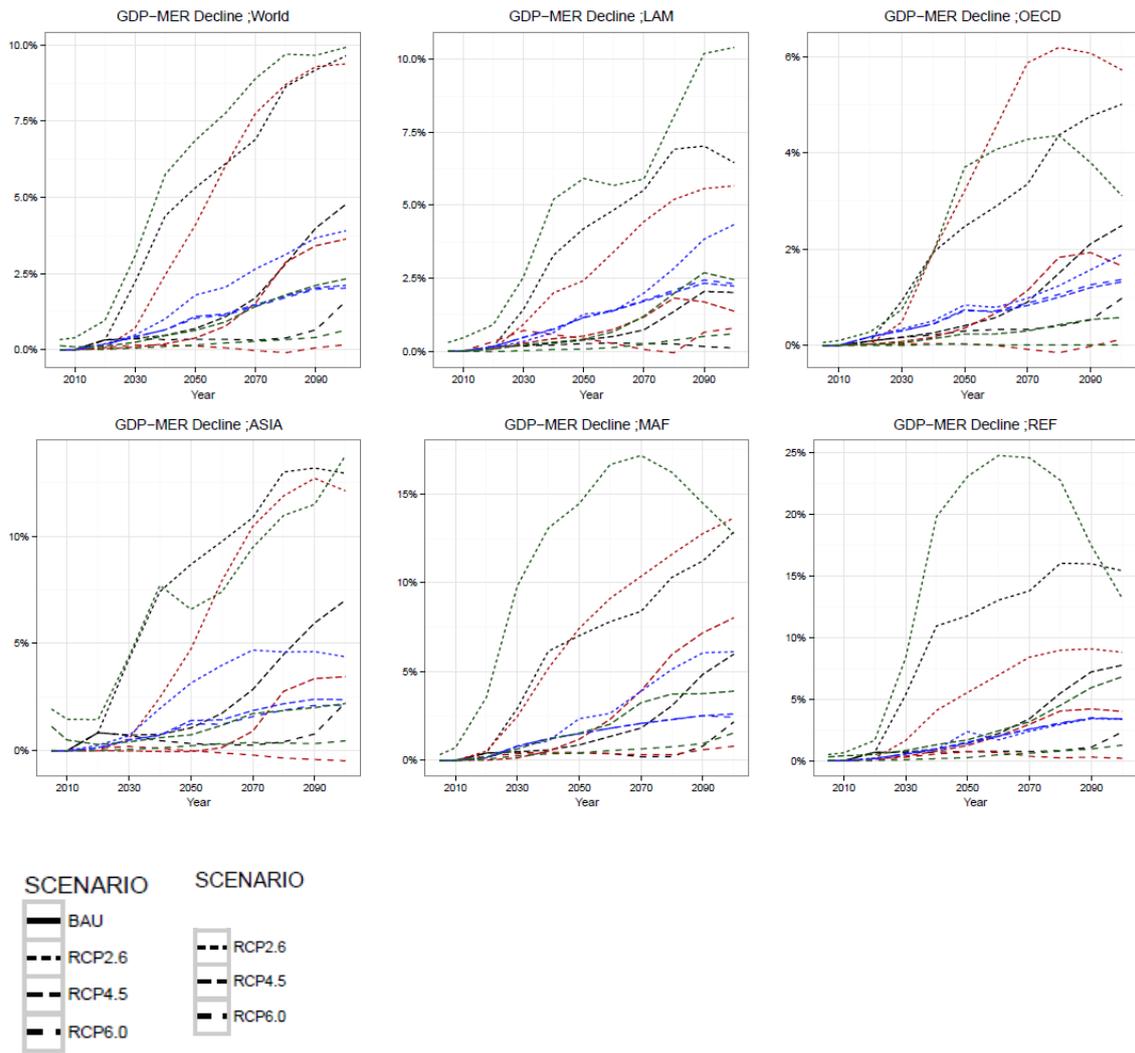


図 3-1-2-②-b\_3 SSP3におけるBAUからのGDP損失(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

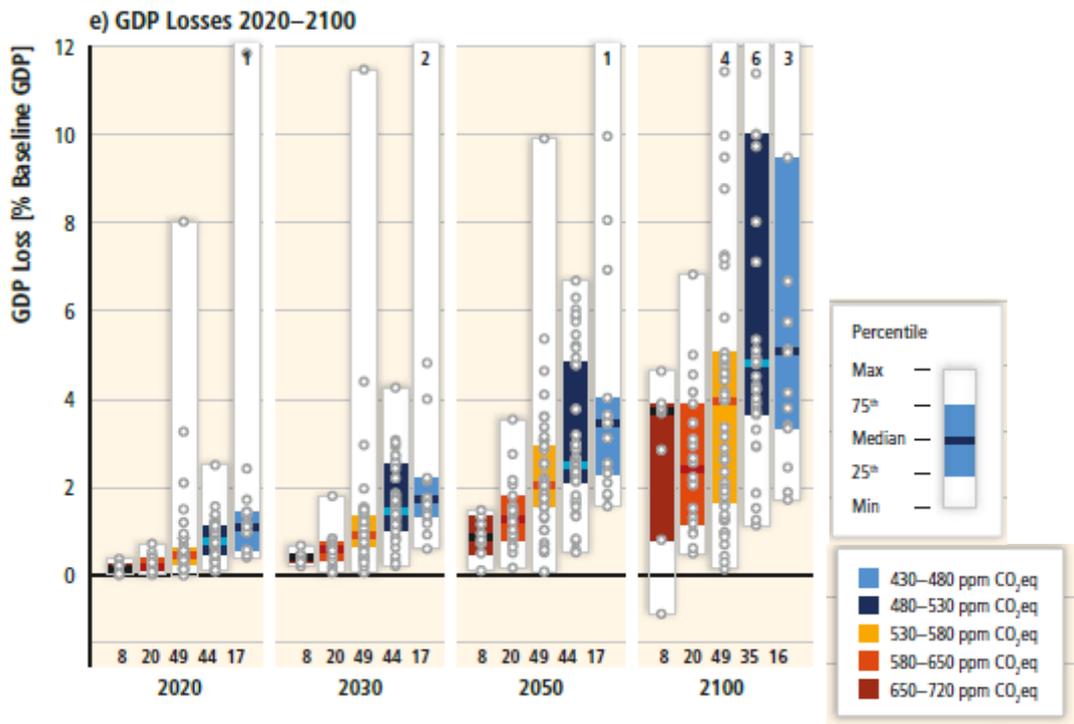


図 3-1-2-②-b-2\_4 IPCC-AR5-WG3 に示された GDP 損失の評価幅<sup>5</sup>

### b-3. 消費額の損失

消費額損失への影響も IPCC-AR5 での評価の広がり と 整合的である。

人々への効用変化の推移を見るうえで、消費額がしばしば経済影響指標として用いられる。ここでは図 3-1-2-②-b-3\_1~3 に消費額の損失を SSP シナリオ別に与える<sup>6</sup>。

傾向は GDP-MER 損失とほぼ同様であるが、SSP1 では MARIA が 4.5% と高めの損失を示すのに対し、EMEDA、AIM、GRAPE は世界全体ではほぼ類似した 1.5% 程度の損失を示す。ただし EMEDA は LAM では異なる傾向を示す。しかし SSP1 では損失の幅は比較的小さい。SSP2 では 4 モデルが世界全体では比較的類似した損失を示し、その値は 4.4-5% 程度となる。また、REF 地域で損失が増大し 10% 付近の値となるが、これは化石燃料異存のシナリオのためと考えられる。SSP3 では損失の地域間格差が増加する。世界全体では今世紀末に 7-7.5% の消費損失となるが OECD では 6% 以下であるのに対し、これ以外の地域では ASIA および MAF で EMEDA と MARIA が 15% 前後の損失を示す。REF では MARIA が 15% に達するが GRAPE は 5% 以下にとどまる。EMEDA はこの中間の値をとる。このように、SSP3 からの RCP2.6 は、地域差が大きくなるだけでなく特に化石燃料に依存するところの大きい地域でモデル間の評価も乖離する傾向が分かる。SSP3 での消費額の損失の拡大は世界的な格差の

<sup>5</sup> IPCC-AR5-WG3 Figure 6.21 (P.450), 2014。この図の注には、430~480ppmvCO<sub>2</sub>eq. の場合に、グラフにはプロットされていないが最大 15% の GDP 損失を示したモデルの存在が記されている。

<sup>6</sup> GRAPE は 2005 年時点の消費額を出力しないため、初期値が 0 となっている。

拡大を示唆するものであり、温暖化対策導入の難しさを示唆している。

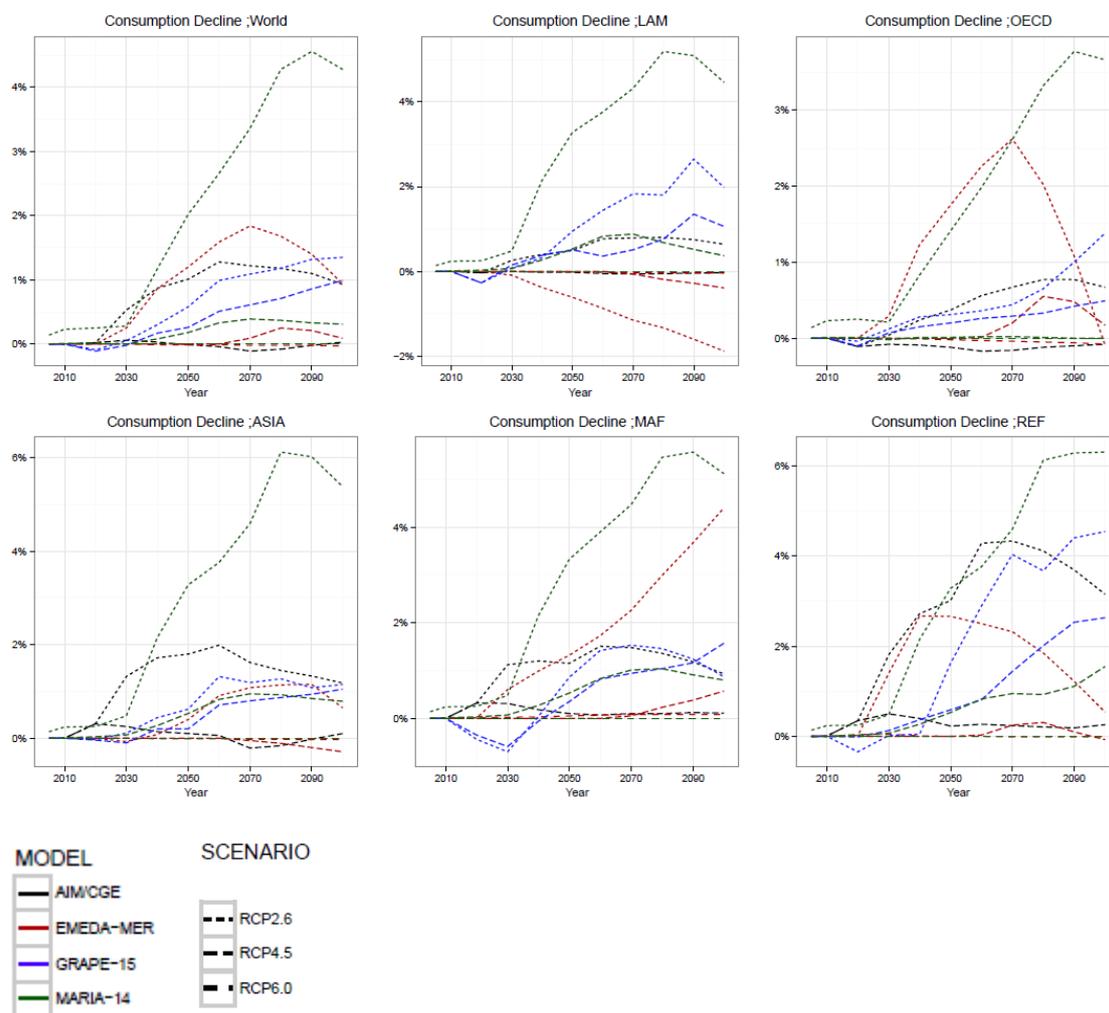


図 3-1-2-②-b-3\_1 SSP1におけるBAUからの消費額損失率 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

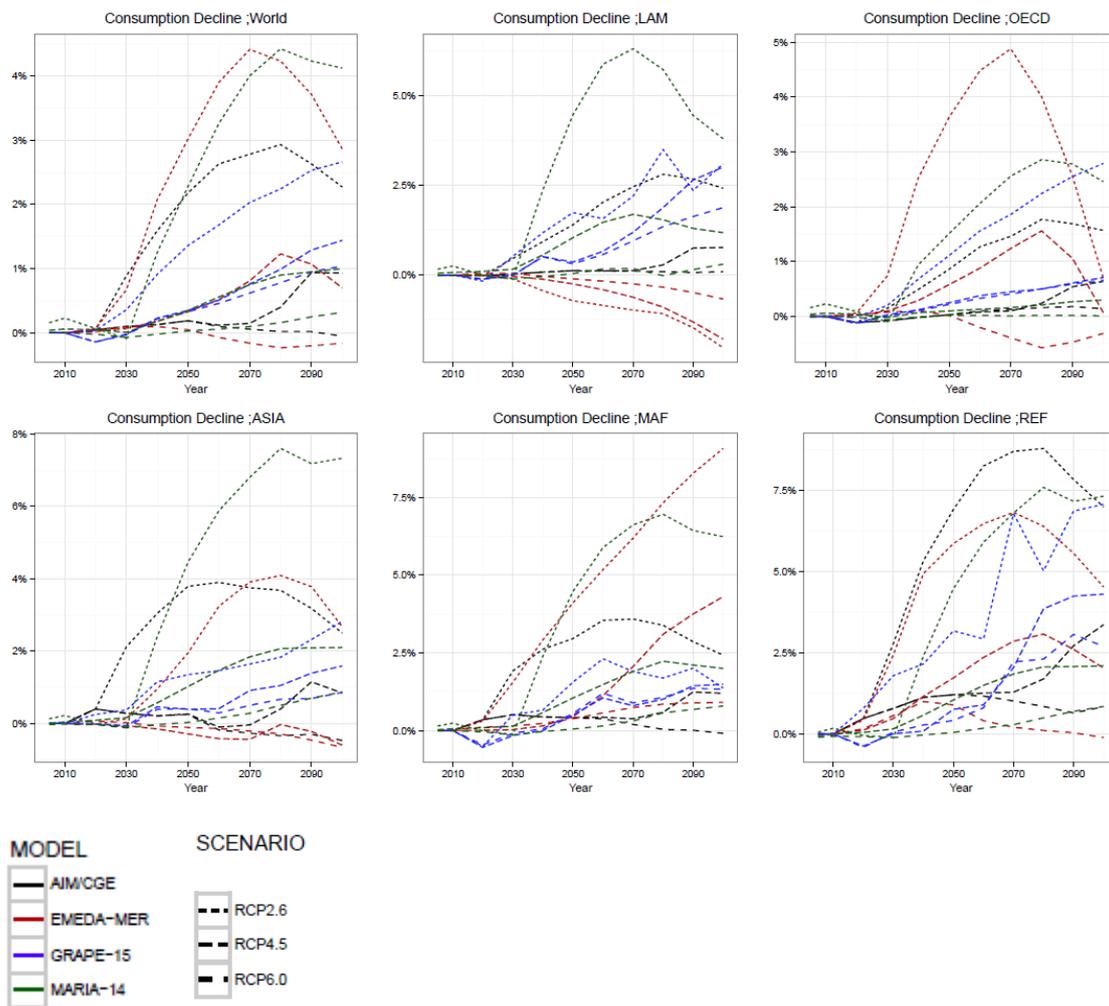


図 3-1-2-②-b-3\_2 SSP2におけるBAUからの消費額損失率 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

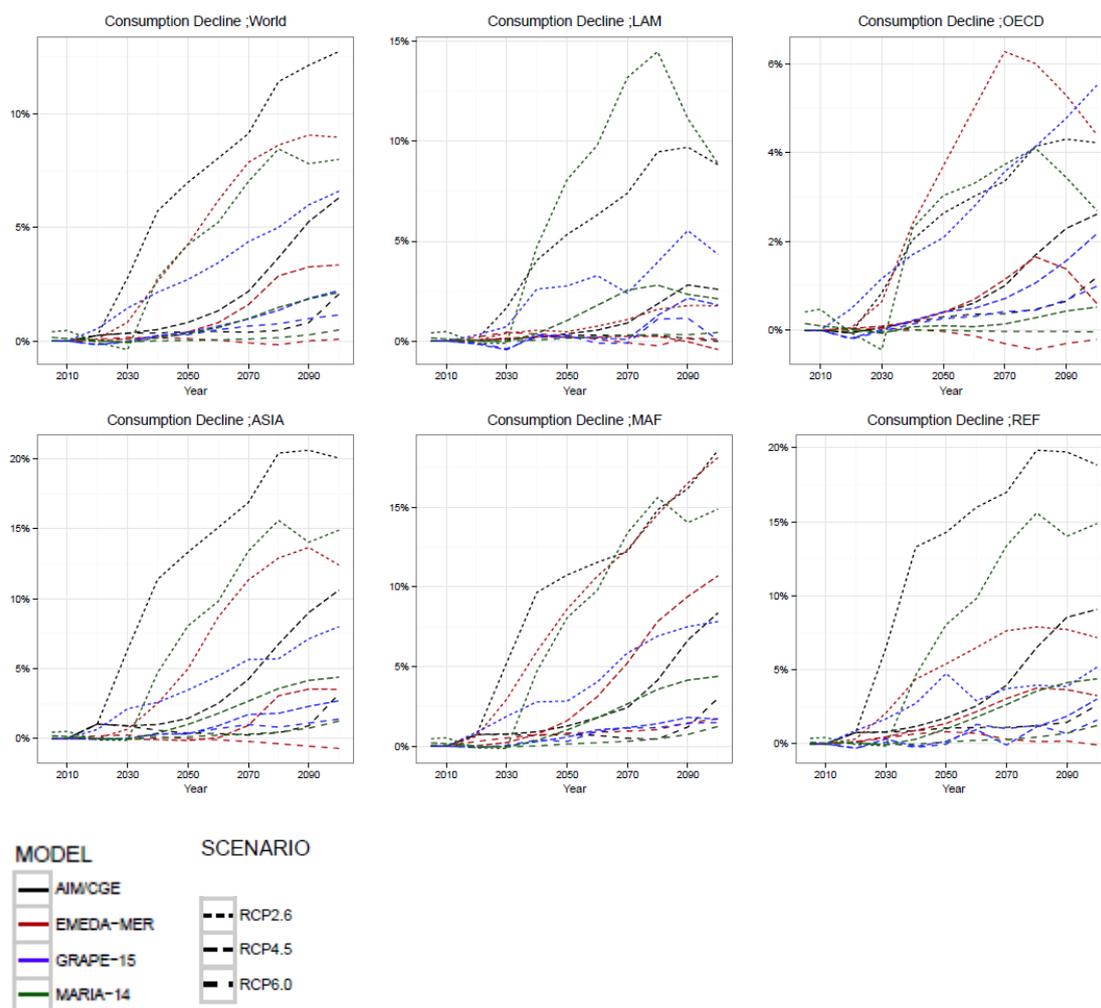


図 3-1-2-②-b-3\_3 SSP3におけるBAUからの消費額損失率 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0)

IPCC-AR5-WG3 に収録された世界全体の消費額の損失のモデル分布は 430~480ppm ケースで中央値 5%前後、損失幅 2%~11%に広がっており、本研究の結果の幅は中央値よりもやや下に集まっている。

### c. エネルギー需給

#### c-1. 最終エネルギー消費推移のモデル別結果

最終エネルギー消費は世界合計ではモデル間で整合的であるが地域別にみると温暖化制約が厳しくなるにしたがってモデル間の乖離が生ずる。すなわち世界の地域別エネルギー消費構造の変化の柔軟性については仮定による差が大きく、柔軟性が高いほど経済的損失も低くなる傾向はみられる。

エネルギー消費の詳細なシナリオ別変化については、次の項目 d. で技術構成と合わせ論じられる。ここでは、マクロなエネルギー消費の変化のみ示すこととする。図 3-1-2-②-

c-1\_1~3 に、SSP1~SSP3 の最終エネルギー消費のモデル別・地域別比較を示す。世界全体ではいずれのモデルもよく整合しているが、SSP1 においてやや地域ごとに見た場合モデル間の差異が大きくなる傾向が見られる。モデルの特徴については、図 3-1-2-②-c-4~6 の最終エネルギー需要の温暖化対策による低下率でより明らかになる。なお、EMEDA はエネルギー物量単位での結果をもたない。

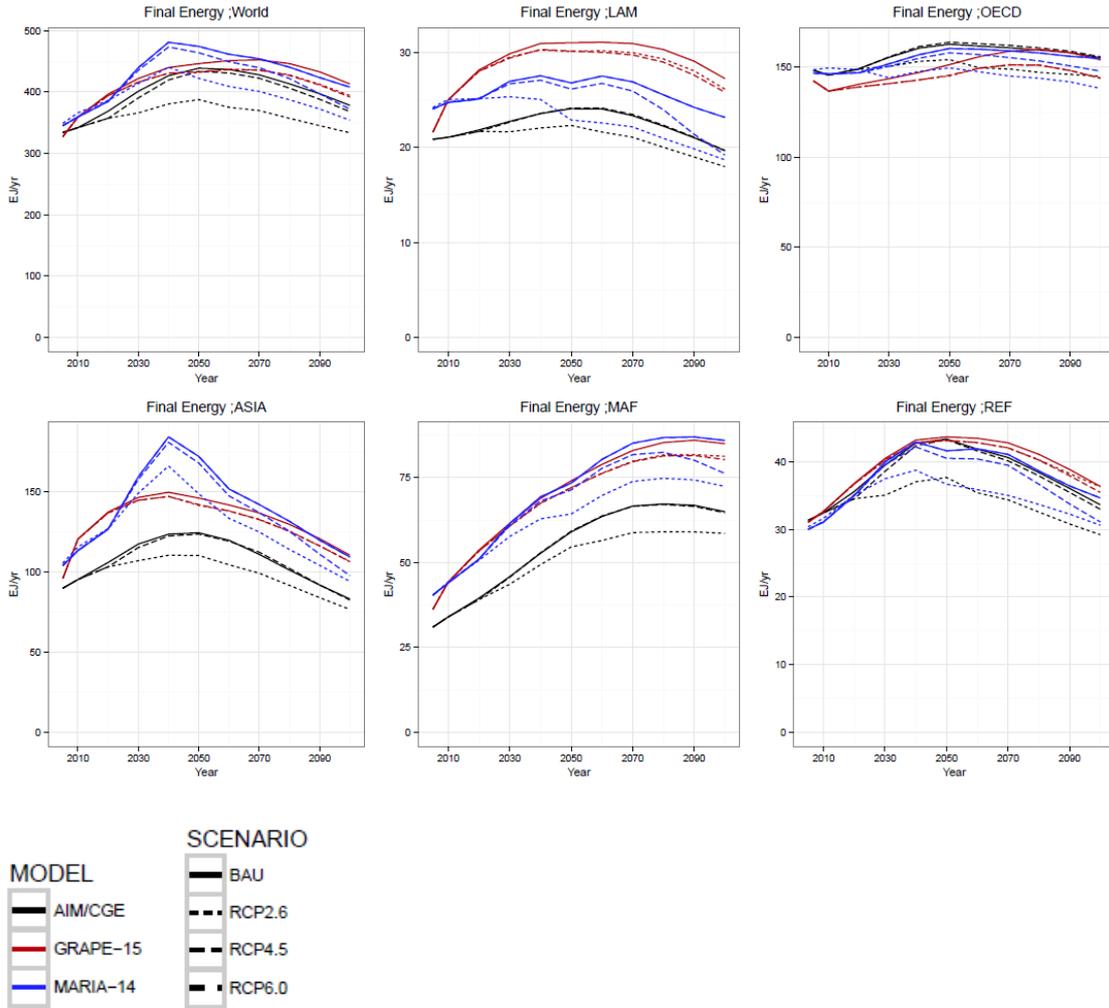


図 3-1-2-②-c-1\_1 最終エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP1)

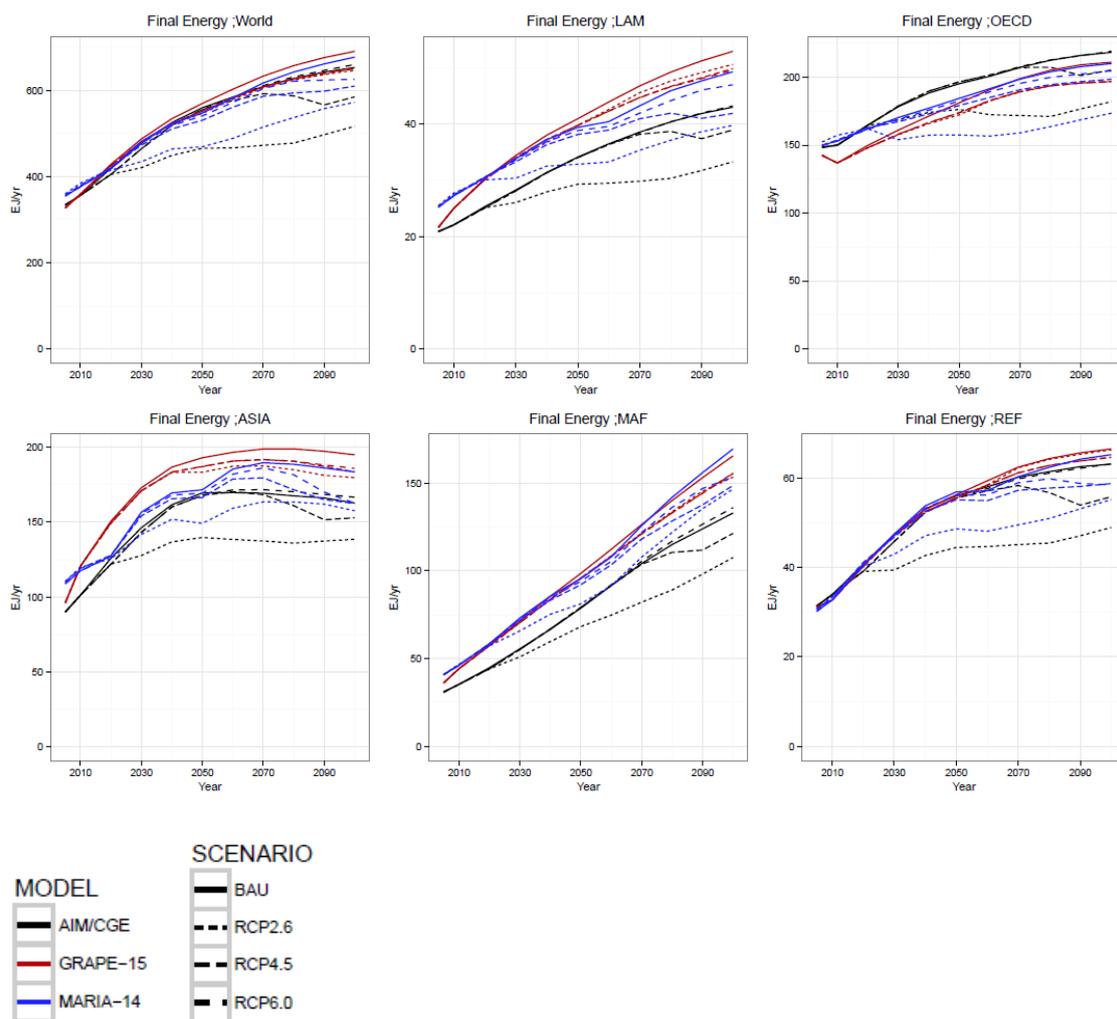


図 3-1-2-②-c-1\_2 最終エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP2)

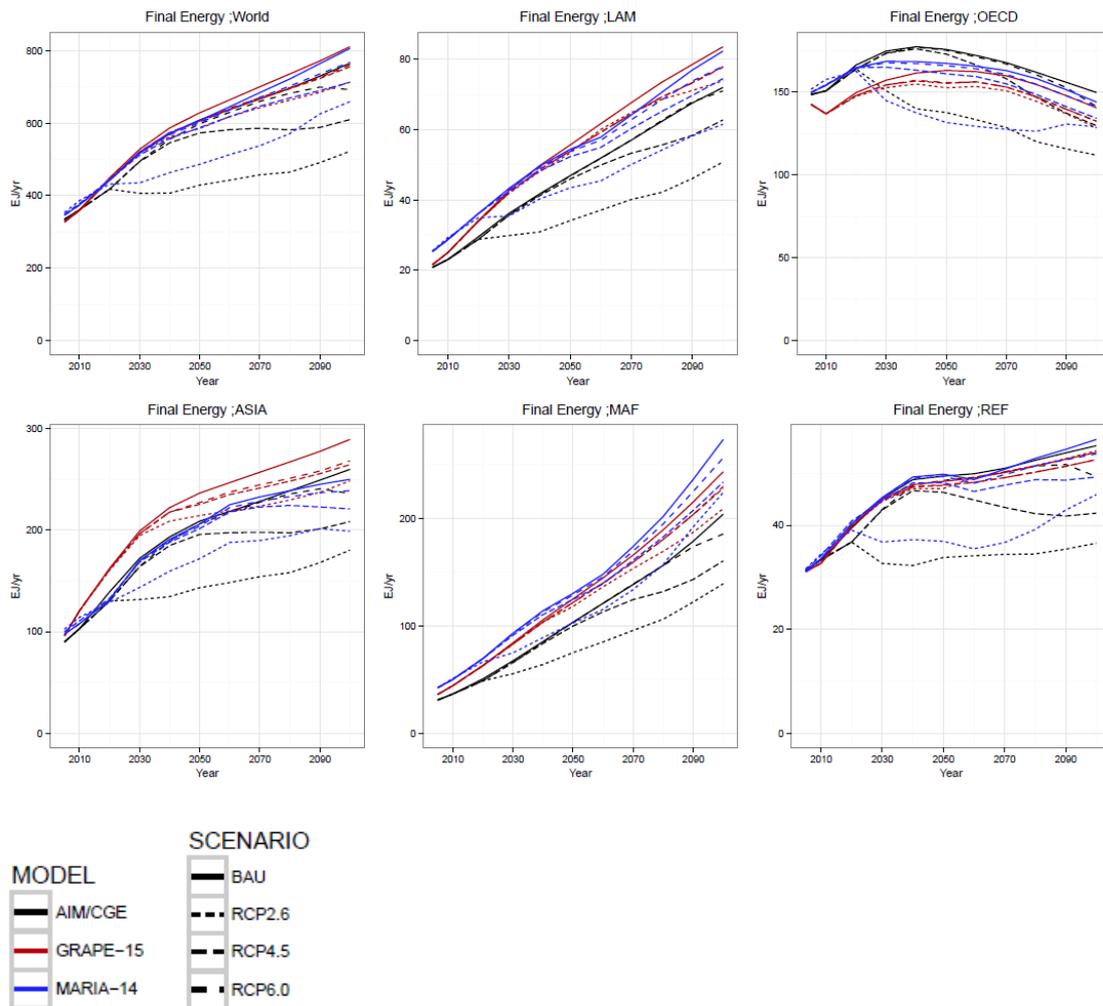


図 3-1-2-②-c-1\_3 最終エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP3)

最終エネルギー需要は、温暖化政策が厳しくなるにつれ削減率が拡大するが、RCP2.6を取り上げた場合、GRAPE では SSP1～SSP3 において世界全体でそれぞれ約 4.6%、約 7%、約 12%、MARIA では同じく 13%、15%、18%と次第に増加する傾向を見せる<sup>7</sup>。ベースラインが持続可能志向であるほど、省エネルギーへの要求も小さくなることは明らかである。同じ RCP2.6 を達成するのに省エネルギーを主とするかエネルギー供給を主とするかは、モデルにより異なる、言い換えれば、同じ目標を達成するのにいくつかのオプションがあることも示唆されている。

MARIA は、次に述べる一次エネルギー供給では 2020 まで変化がないものの最終エネルギー需要ではむしろ RCP2.6 で増加を示す。これは完全予見型モデルにおいては将来の温暖

<sup>7</sup> MARIA が 2005 年で 0 を初期値としないのは、シミュレーションの初期時点が 1997 年になっているためである。また ASIA で 2020 年までの生産性の伸びが大きいいため、GDP で見られたのと同様、シミュレーションの初期では温暖化対策の際ここに世界の生産が集中する傾向が見られる。

化規制を見越した行動がとられるため、化石燃料利用変化の行動が遅れても導入リードタイムの短い太陽光発電および風力発電の導入を早める行動が早めにとられる結果である。

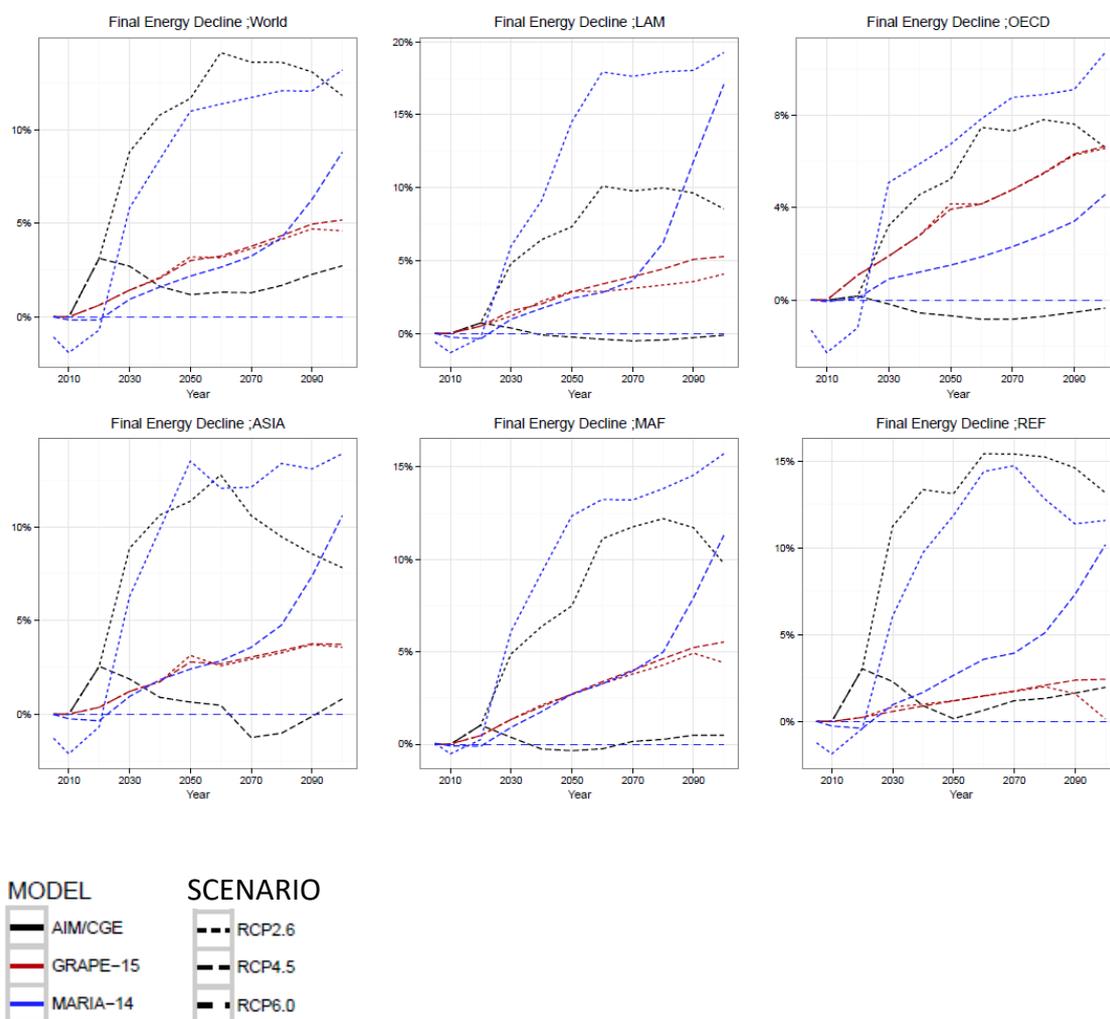


図 3-1-2-②-c-1\_4 最終エネルギー需要低下率のモデル・地域別比較 (SSP1)

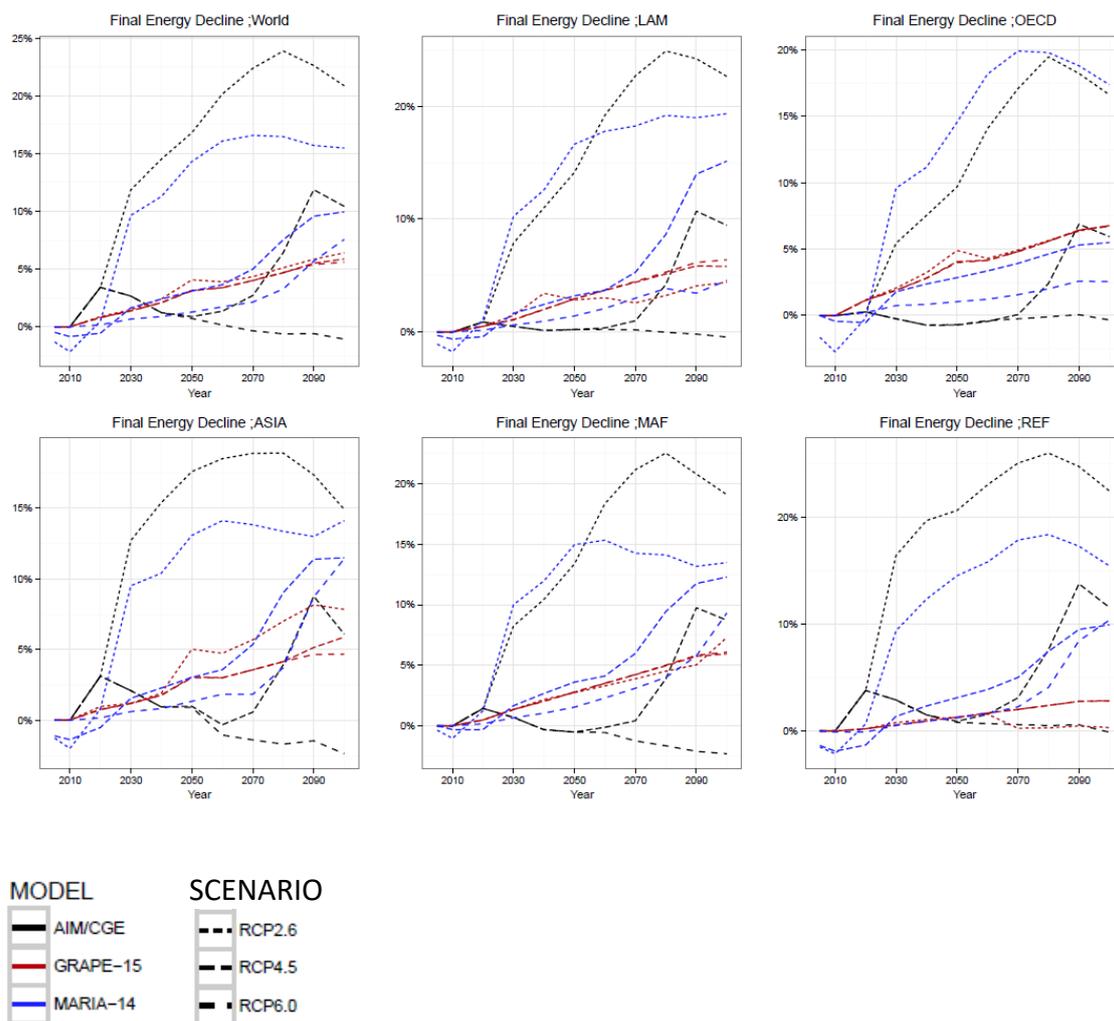


図 3-1-2-②-c-1\_5 最終エネルギー需要低下率のモデル・地域別比較 (SSP2)

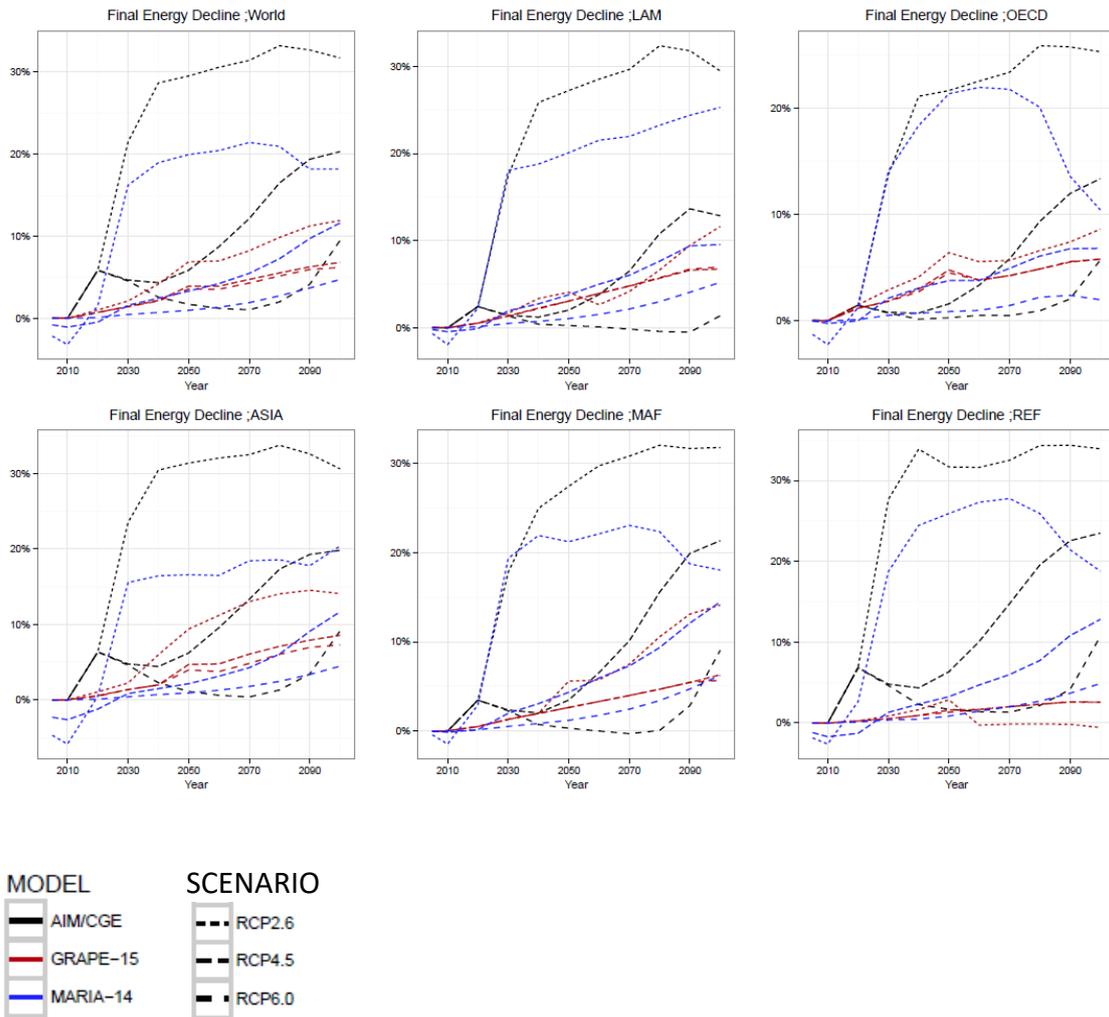


図 3-1-2-②-c-1\_6 最終エネルギー需要低下率のモデル・地域別比較 (SSP3)

### c-2. 一次エネルギー供給

一次エネルギー供給は BAU ではやはり化石燃料が優位となる。温暖化制約を厳しくするとモデル間の差異が顕在化するがこれは対策導入の技術的選択肢の広がりでもある。

図 3-1-2-②-c-2\_1~3 に SSP1~SSP3 シナリオの世界および地域別の一次エネルギー供給のモデル別・RCP ケース別推移を示す。最終エネルギー需要では BAU において比較的モデル間で一致した動きを見せるのに対し一次エネルギー供給は RCP ケース間、モデル間でかなり異なる挙動を示す。AIM、MARIA とも温暖化対策を厳しくするにつれ供給が急激に減少する。

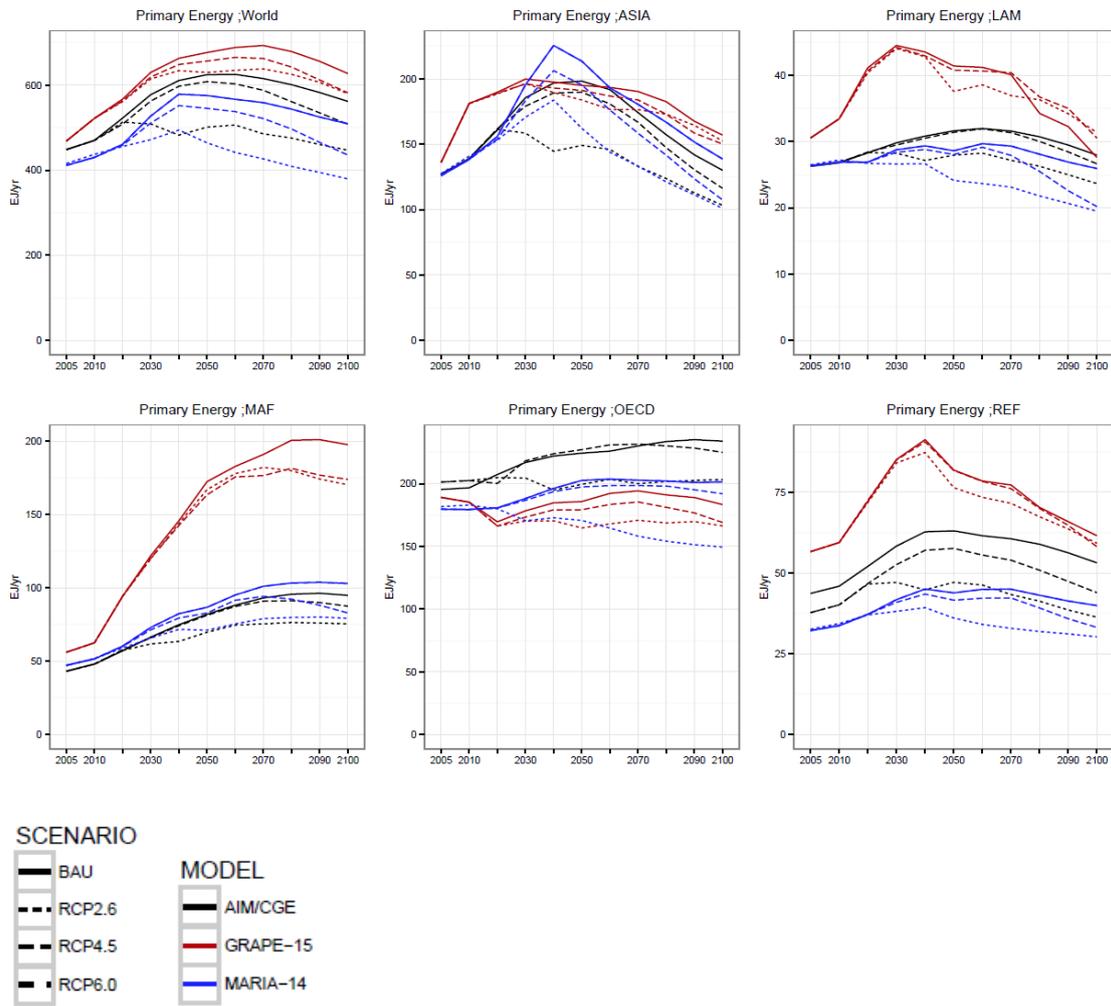


図 3-1-2-②-c-2\_1 一次エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP1)

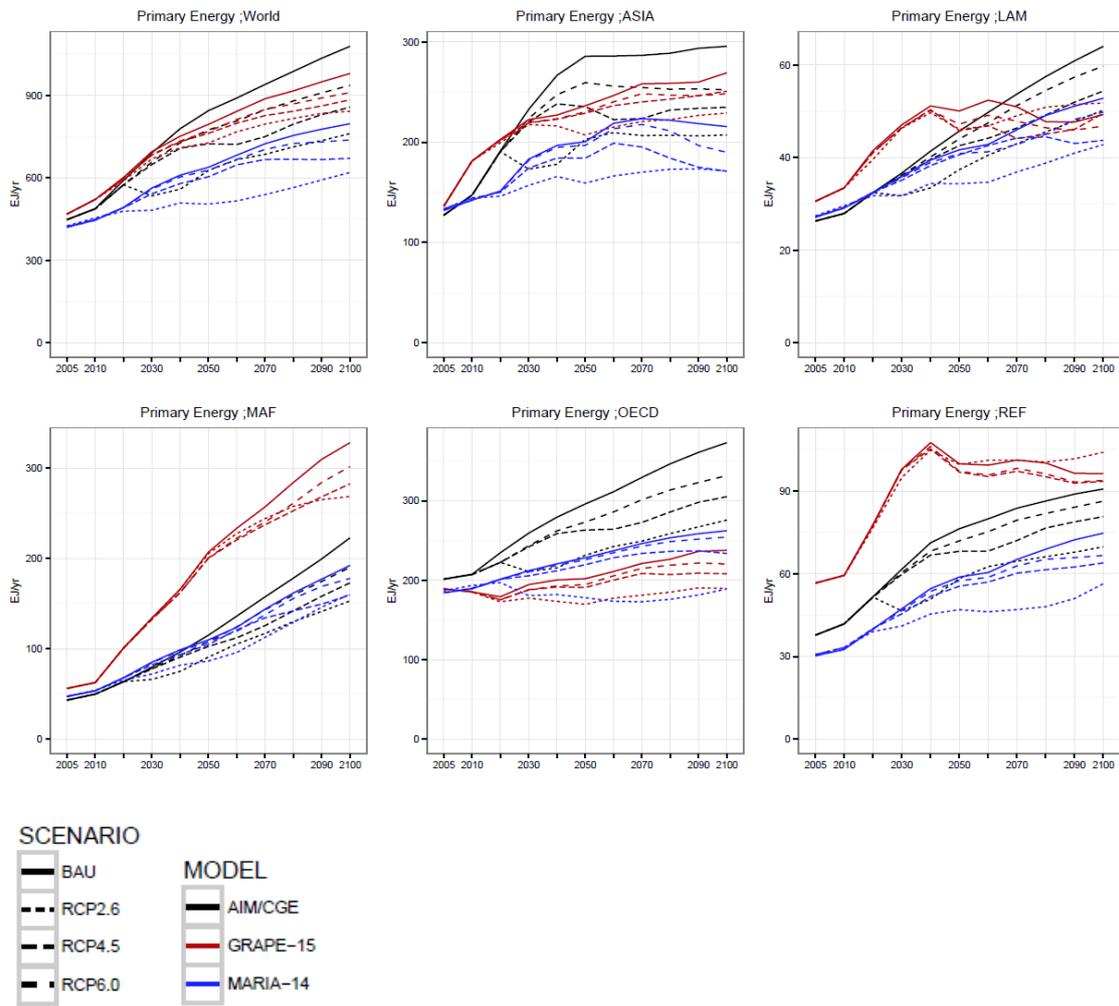


図 3-1-2-②-c-2\_2 一次エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP2)

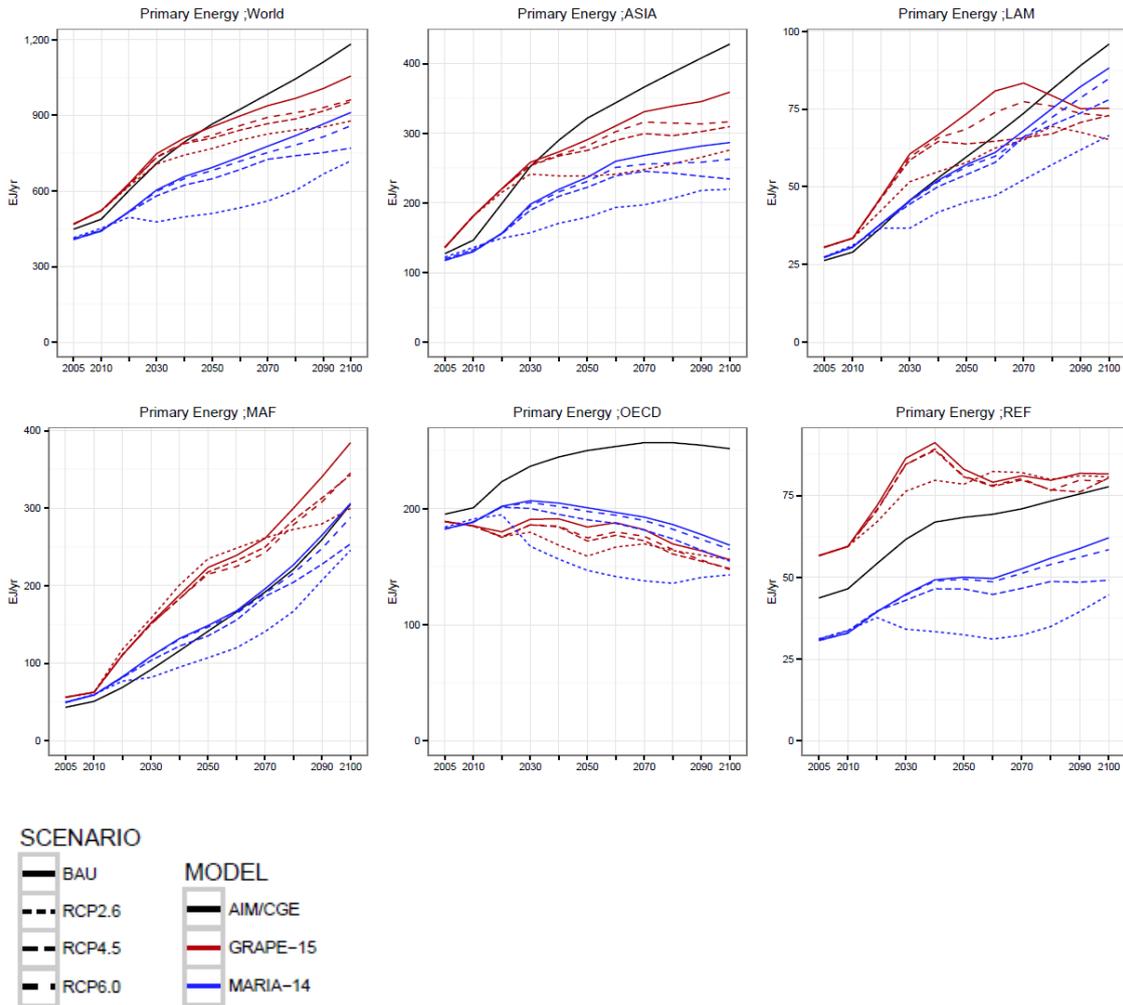


図 3-1-2-②-c-2\_3 一次エネルギー需要のモデル・地域別比較 (SSP3)

図 3-1-2-②-c-2\_4~6 に示す一次エネルギー構成では、BAU から RCP2.6 と温暖化対策を厳しくするに従い、構成が大きく変化する様子を見て取れる。2040 年以前はなお化石燃料が主役である一方、RCP2.6 ではすでに石炭利用は減少している。その後 RCP2.6 では非化石燃料が急速に増えるが、BAU では化石燃料増加が続く。21 世紀半ば以降は化石燃料 + CCS および BECCS が導入されていくが、その規模はモデルにより幅があることが分かる。RCP2.6 ケースに着目すると、GRAPE と MARIA では特に BECCS と原子力の導入について代替的な関係のあることが分かる。また AIM は非バイオマス再生可能エネルギーの増加が大きい。このように、将来の資源と技術の利用可能性や技術コストのシナリオの設定に依存するものの、ここからの知見としては知識の不確実性というよりも多様な選択の可能性があることに注目すべきである。

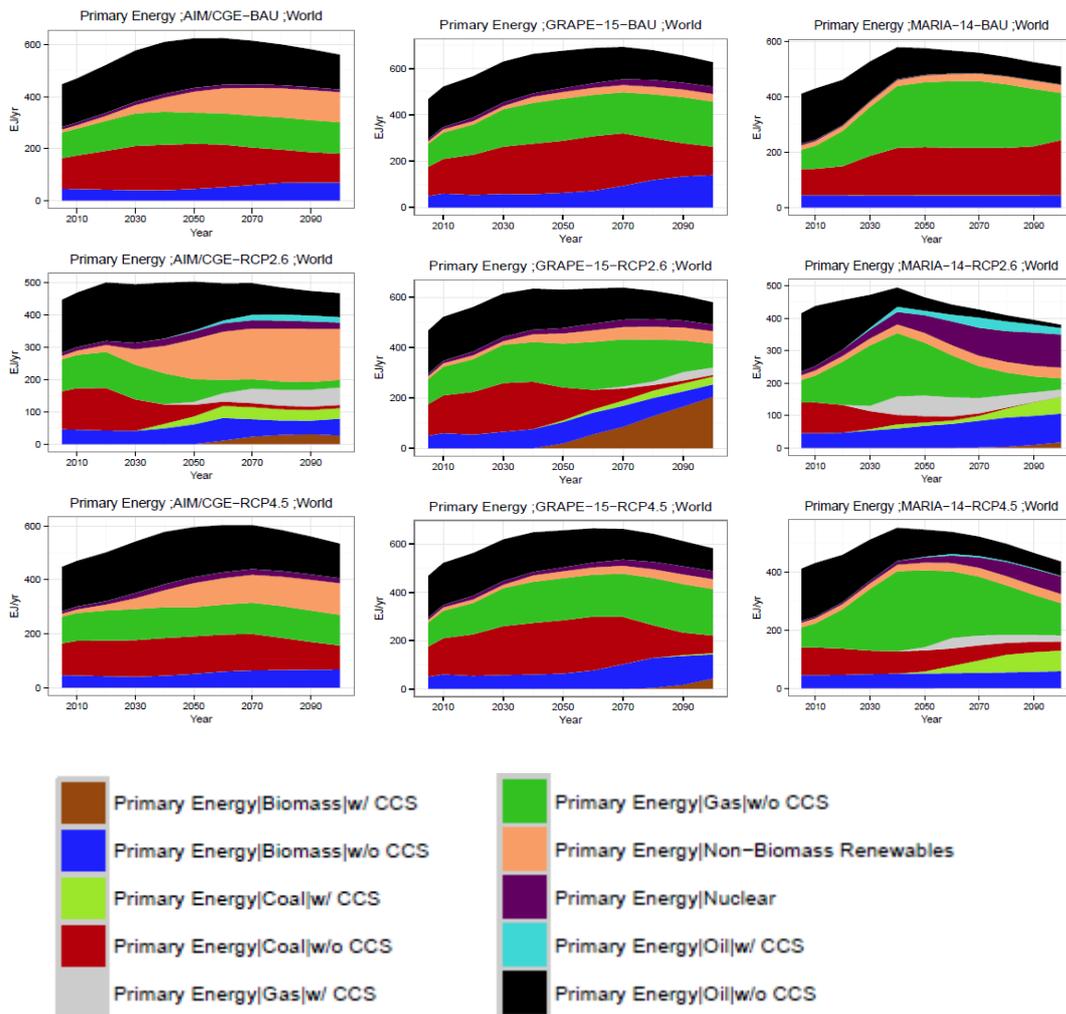


図 3-1-2-②-c-2\_4 一次エネルギー構成 (世界全体) のモデル比較 (左: AIM、中: GRAPE、右: MARIA) SSP1

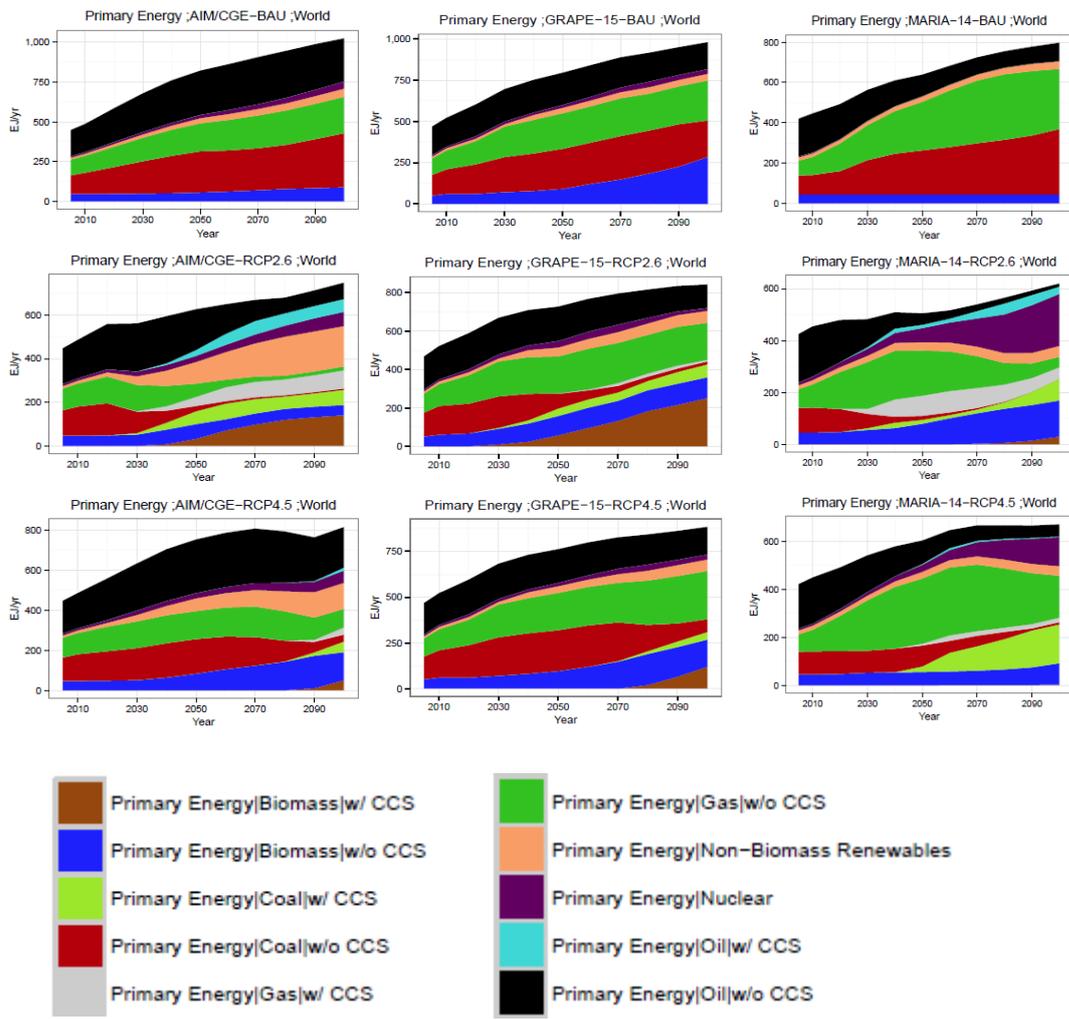


図 3-1-2-②-c-2\_5 一次エネルギー構成 (世界全体) のモデル比較 (左: AIM、中: GRAPE、右: MARIA) SSP2

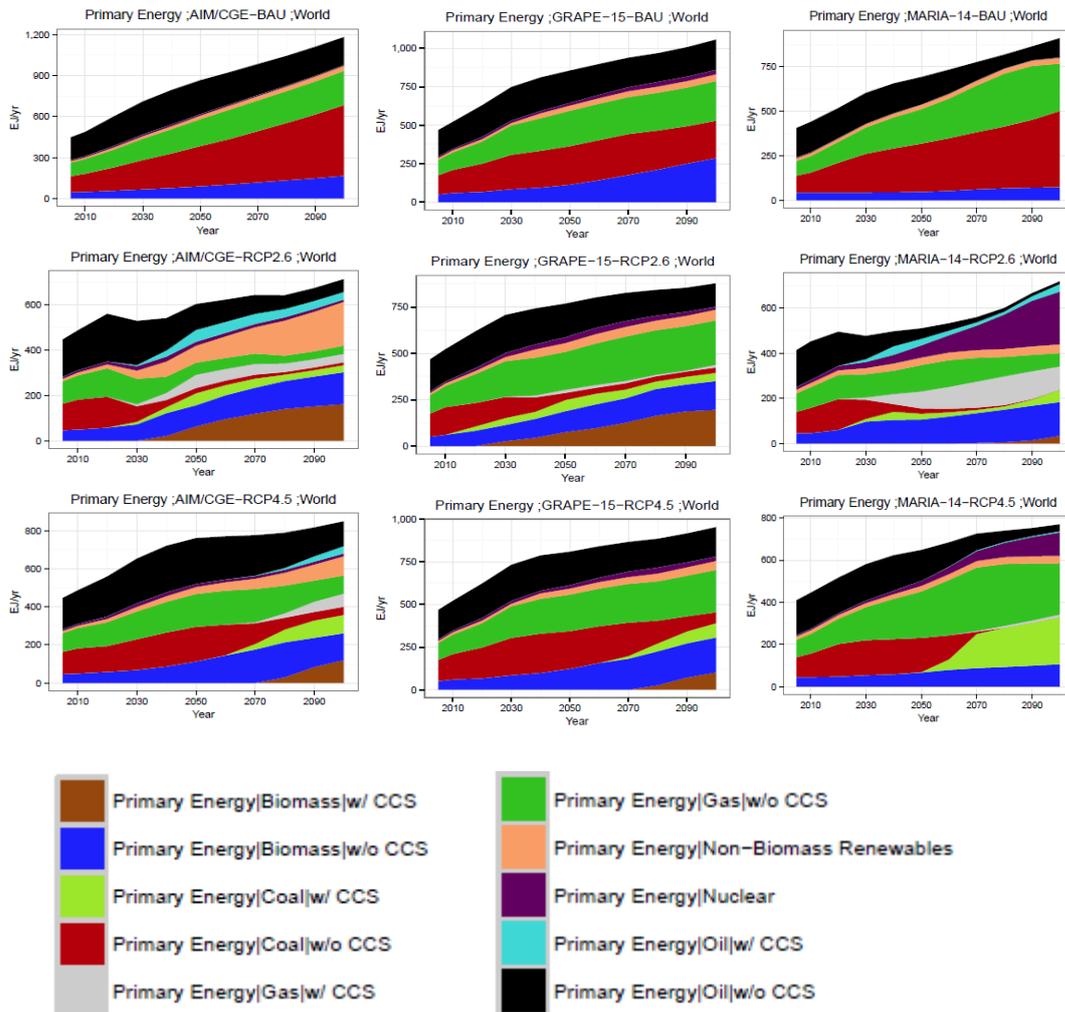


図 3-1-2-②-c-2\_6 一次エネルギー構成 (世界全体) のモデル比較 (左: AIM、中: GRAPE、右: MARIA) SSP3

最終エネルギーが初期条件ではほぼ一致しているのに対し、一次エネルギーは初期時点からややモデル間の不一致がある。これは、一部のエネルギー変換機器の定義に差があるためである。例えば、原子力発電所では一次エネルギー投入の計算の際、IEA では 33%の効率を仮定して一次エネルギー換算しているのに対し、IPCC-SRES では、100%を採用した。その後、IAMC などモデル比較プロジェクトでは 100%を用いるケースが多いが、なお 33%評価も用いられる。例えば、今回、MARIA-14 バイオマス燃料及び化石燃料以外の一次エネルギー源の変換効率は基本的に 100%としている<sup>8</sup>。

<sup>8</sup> 原子力や地熱などの燃焼によらない熱源の一次エネルギー換算係数は便宜的なものであるため、これらへの依存度が高くなると、見かけ上一次エネルギー需要が急増するなど誤解を招きやすい。この点は以前から知られており、IPCC-SRES では、最終エネルギー消費をシナリオ基準に取り上げた理由の一つである。

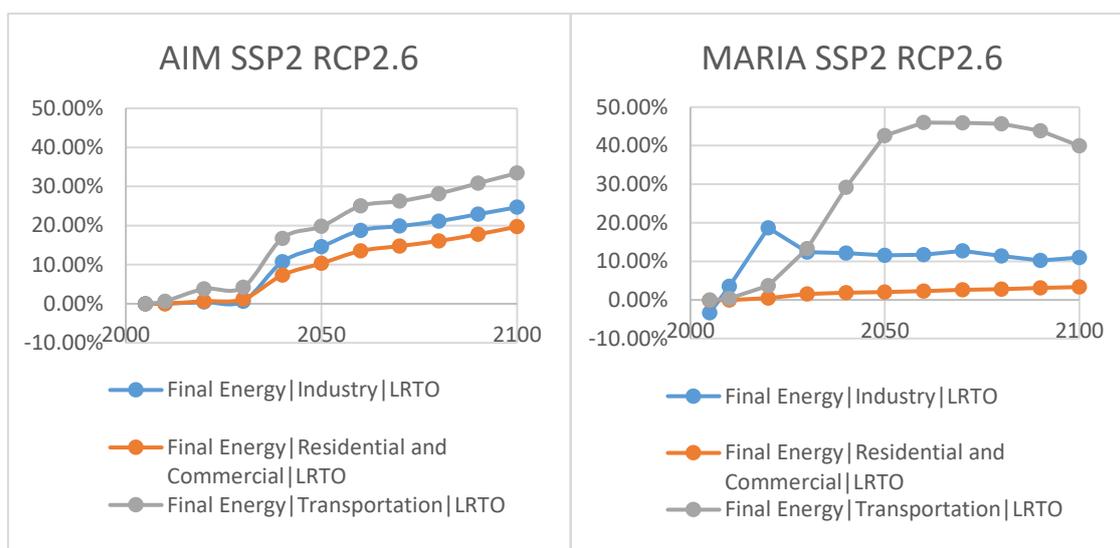
#### d. 技術オプション

技術オプションの比較については、具体的なエネルギー構成を出力している、AIM, GRAPE, MARIA の3モデルを中心に実施した。分析対象は SSP2 のリファレンスケースと RCP2.6 相当ケースである。

##### d-1. 最終消費の省エネ率

省エネルギー率の将来想定には幅があるが、輸送部門では大きな削減が想定される。

図 3-1-2-②-d-1\_1 は AIM, GRAPE 及び MARIA における省エネ率 (RCP2.6 の最終需要/BAU の最終需要) である。各セクターを統合した省エネ率としては、AIM では 2100 年に約 23%, GRAPE では 6%, MARIA では 2100 年で約 15%となっている。産業・民生での削減は運輸による削減と比べると低くなっており、2100 年に向けて 0.03%から 18%の削減であるが、運輸部門においては 21%から 40%の省エネとなっている。



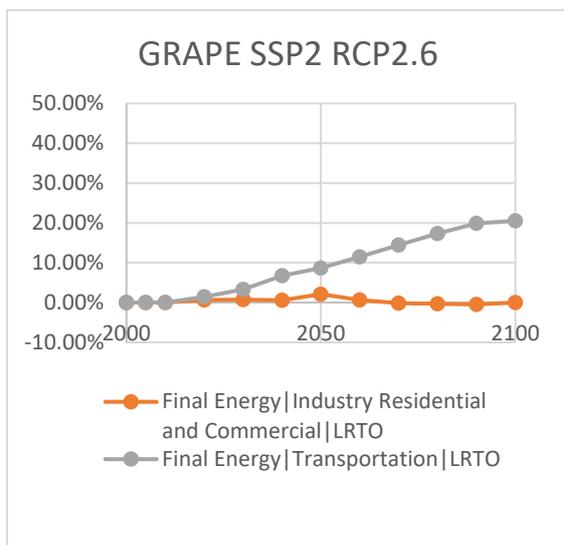


図 3-1-2-②-d-1\_1 セクターごとの BAU シナリオに対する省エネ率

#### d-2. 一次エネルギーの低炭素化

**2100 年に向け化石燃料のシェアは連続的に減少するがあるが、低炭素化の選択肢には幅がある。**

図 3-1-2-②-d-2\_1 に各モデルの RCP2.6 相当シナリオにおける一次エネルギー構成の変化を示す。

各モデルとも、21 世紀末に向け化石燃料のシェアを徐々に小さくしていくが、CCS を含めると化石燃料のシェアは 2100 年においても 36%から 48%程度利用されている。

AIM では、バイオマス以外の再生可能エネルギーが 21 世紀末に向け急速にシェアを高め、CCS 付きの化石燃料およびバイオマスのシェアも 2030 年以降増大する。GRAPE については、2030 年から 2040 年以降 BECCS およびバイオマス以外の再生可能エネルギー比率が増えているが、運輸での化石燃料利用のため、CCS なし化石燃料利用もある程度のシェアを維持している。MARIA では、2050 年にむけて CCS ありの化石燃料の比率を急速に高め、CCS なしのバイオマスも増加していく。一方、バイオマス以外の再生可能エネルギーは増加せず、2050 年以降では原子力が急増し、21 世紀末では CCS ありのバイオマス (BECCS) の利用も 9%ほどではあるが利用される。

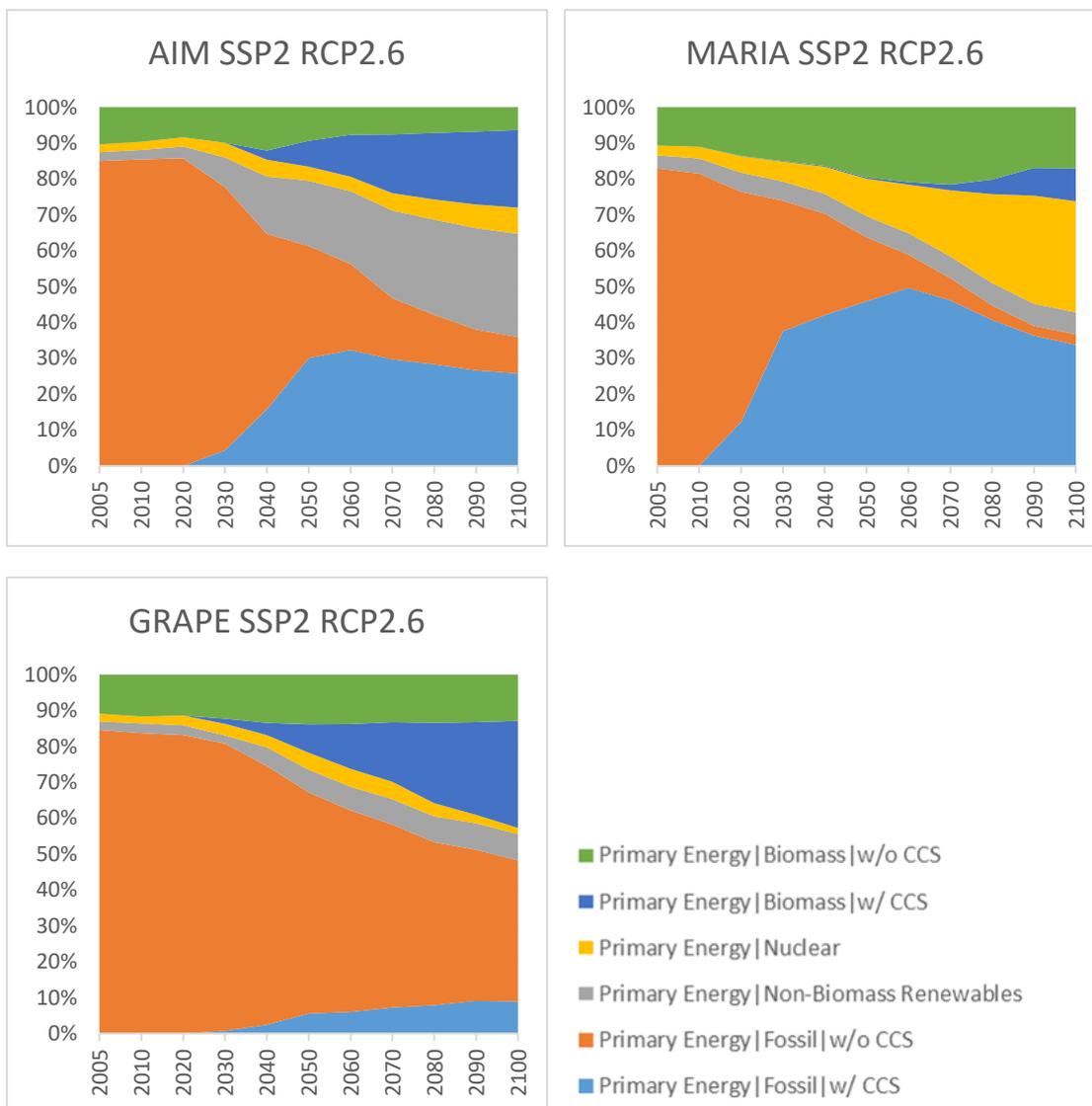


図 3-1-2-②-d-2\_1 一次エネルギー構成

### d-3. 電源構成

電源構成には幅があり、太陽光・風力、バイオマス、原子力のいずれを主流とするかは社会の選択の問題となる。

図 3-1-2-②-d-3\_1 に各モデルの電源構成を比較して示す。2100年頃の総電力については、AIM>MARIA>GRAPE となっている。どのモデルにおいてもリファレンスケースよりも電力消費が増加しており、とくに MARIA において顕著である。これは、産業や民生の熱源、あるいは運輸燃料の低炭素化の目的で電化が促進されていることに対応すると考えられる。

また、ポテンシャルは大きいですが、出力変動の問題がある太陽光・風力については、各モデルの電源のシェアはさまざまである。2100年でのそのシェアは、AIM では50%、GRAPE では16%であるが MARIA では6%と限定的となっている。原子力については AIM、GRAPE、

では 2100 年において約 14-17%の発電シェアと限定的である一方、MARIA では 66%と非常に大きな利用となっている。一方、BECCS による発電シェアはモデル間で大きく異なり、GRAPE では 2100 年に 45%と大きい、AIM では 14%、MARIA では 8%と限定的である。

このように、技術構成については差異があるが、電力部門については CCS なしの化石燃料利用はほとんどなくなり、AIM, GRAPE とも 2060 年以前にエミッションをゼロ以下にしているという点は共通である。ここで、GRAPE については、CCS なし天然ガス火力が 2100 年においても 3%程度残っているが、この CO<sub>2</sub> 排出は、BECCS によるネガティブエミッションで相殺されている。すなわち、電力は CO<sub>2</sub> 削減において重要な部門であるということは各モデルの共通傾向である。

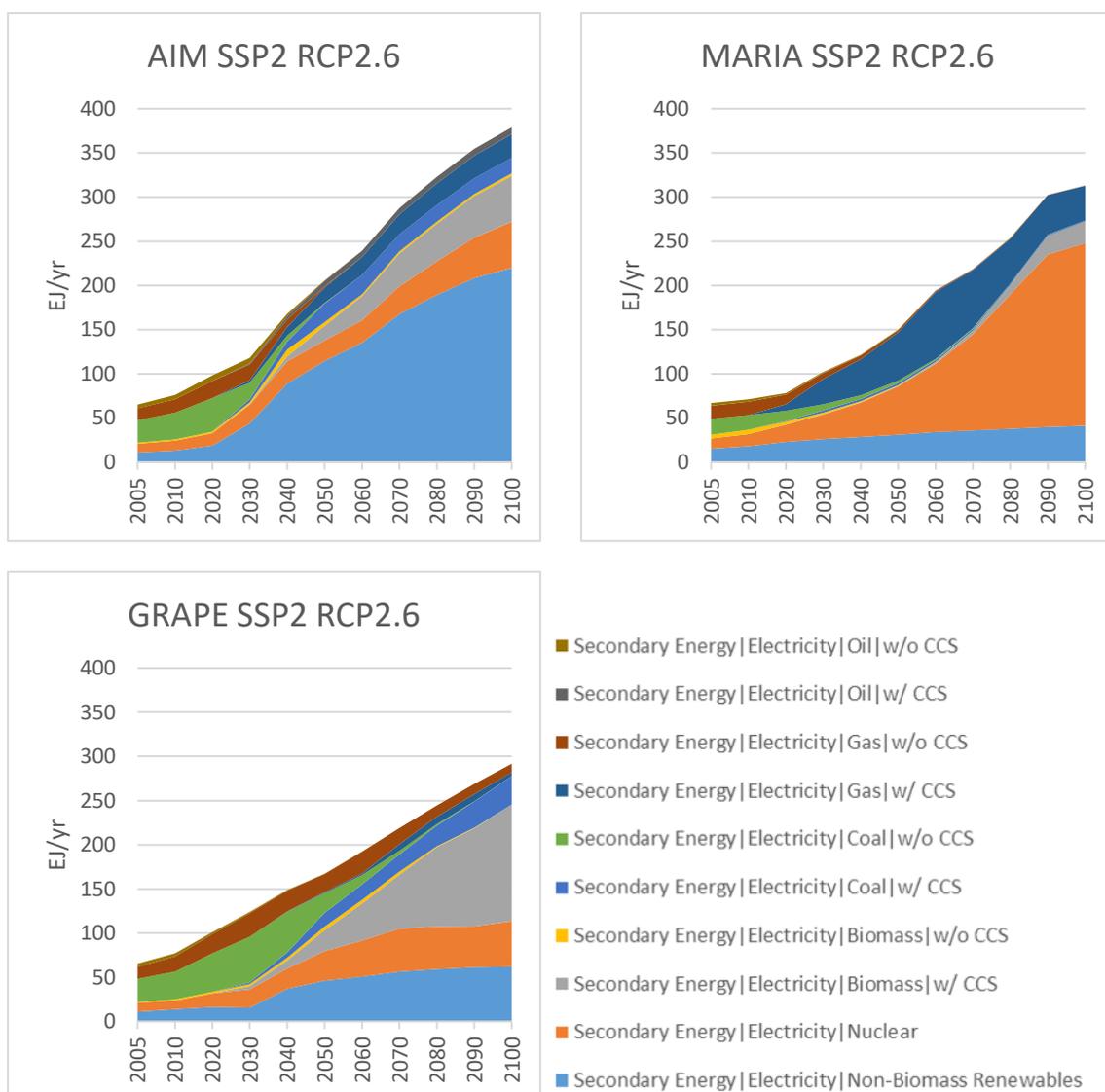


図 3-1-2-②-d-3\_1 電源構成

#### d-4. 炭素バランスと CCS

いずれのモデルも CCS は大規模に導入しており、導入規模はオーダーで一致する。ただし導入時期の仮定に違いがあり、MARIA では 2030 年の早期に 11 GtCO<sub>2</sub>/yr 年の貯留量となり、その後漸増し 2100 年に約 18 GtCO<sub>2</sub>/yr 年となる。一方、AIM, GRAPE では 2030 年での貯留量は約 1.5 GtCO<sub>2</sub>/yr 年であるが、2050 年以降大きく増加し、2100 年においてそれぞれ約 22 GtCO<sub>2</sub>/yr 年, 36 GtCO<sub>2</sub>/yr 年となっている(図 3-2-2-①-d-4\_1)。CCS の内分けとして、BECCS の導入量はモデル間で差が大きく、2100 年において MARIA では CCS による回収貯留量のうち 10%が BECCS であるが、AIM では 47%、GRAPE では 72%と大きな割合を占める。

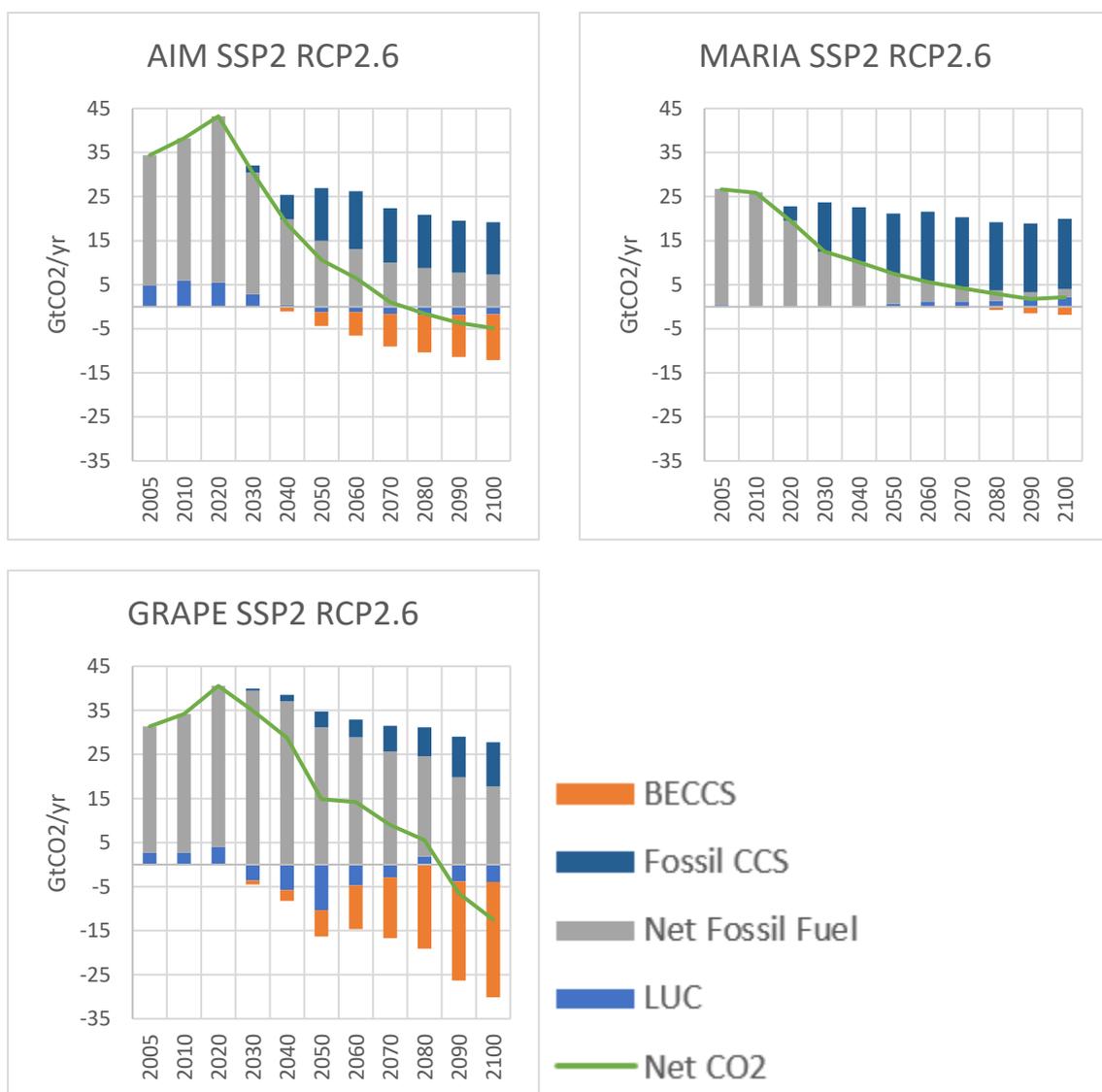


図 3-1-2-②-d-4\_1 人為 CO<sub>2</sub> 排出・吸収バランス

人為的二酸化炭素排出量のピークアウトについてはモデル間で差があり、MARIA では

2005年での早期のピークアウトとなっているが、21世紀後半のBECCSの導入量が多いAIMおよびGRAPEでは2020年がピークとなっている(図3-1-2-②-d-4\_2)。排出経路の全体的な傾向は似ているが、2050年断面で見ると、MARIA:7.5 GtCO<sub>2</sub>、GRAPE:16 GtCO<sub>2</sub>であり、対策の進展速度には差異がある。2080年以降ネットではほぼゼロエミッションあるいはネットネガティブエミッションという傾向は共通であるが、2100年でのネット人為CO<sub>2</sub>排出量は経路の違いより、MARIAではネットで排出側となっているが、AIMとGRAPEではネットネガティブエミッションとなっている。

#### d-5. その他技術

##### より厳しい条件下では、水素利用などより高コストな対策が利用され、経済性に影響を与えうる。

これまで述べて来たとおり、CO<sub>2</sub>削減の主要な対策は、省エネルギー、再生可能エネルギー、原子力、CCSである。RCP2.6のような厳しい排出制約を実現しようとする場合、モデル間によって重点的に導入する項目に差はあるものの、全ての技術が一定以上の規模で導入されている。

制約がさらに厳しい場合、産業熱源や輸送用燃料の不足分を水素で補うケースが出てくる。MARIAにおいては、図3-1-2-②-d-5\_1に示すよう水素で補う。この水素製造には原子力による電気分解法および高速増殖炉核熱を利用した水蒸気改質による水素合成が用いられており、これは高コストなため経済的損失も増えることになる。SSP1ではBAUでも原子力発電が拡大するため、BAUでも余剰電力を用いて21世紀半ばころ水素が製造される。これは3-1-2-②-b.で述べたMARIAのGDP損失がやや高めに出る一因となっていると考えられる。GRAPEの場合、今回の計算条件では顕著ではないが、より厳しい二酸化炭素排出制約、あるいは、バイオマスCCSを利用しないとといった厳しい技術制約のもとでは同様の応答をする場合がある。

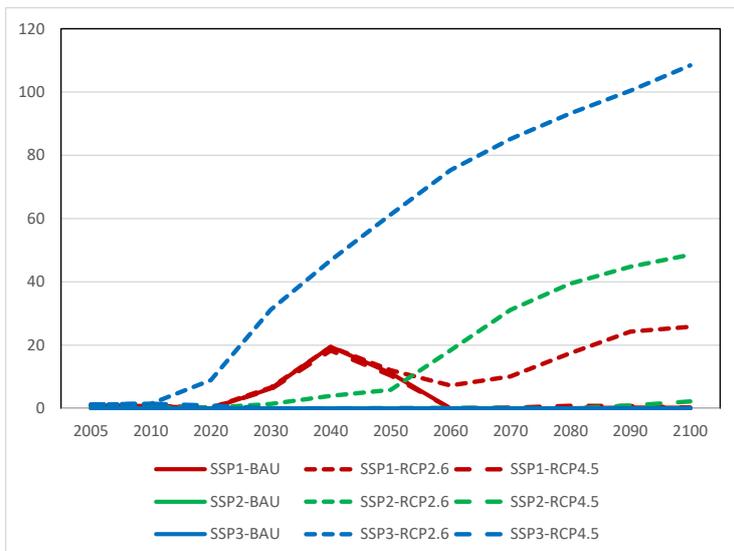


図 3-1-2-②-d-5\_1 MARIA による SSP 各ケースにおける水素供給

#### d-6. エネルギー技術についてのまとめと今後の課題

低炭素化を推進する上では、様々な選択肢があり、モデルごとに技術構成は異なる。その傾向を表 3-1-2-②-d-6\_1 に定性的にまとめる。

同じ温暖化対策目標に対して実行可能解が単一ではなく幅があるということは、言い換えれば社会の選択には多様な選択の余地が残っているということでもある。

表 3-1-2-②-d-6\_1 モデル間の技術利用の特徴比較

	AIM	GRAPE	MARIA
太陽・風力	◎総電力の半分程度利用。	○それぞれ総電力の15%程度まで導入可。	△ 総電力の数%
原子力	○ 2100 年に 2005 年の 5 倍程度の発電量	○ 2100 年に 2005 年の 5 倍程度の発電量	◎ 2100 年に 2005 年の 20 倍程度の発電量
省エネルギー	◎基準の 23%	△基準の 6%	○基準の 15%
CCS	◎CCS は着実に導入するも、火力発電自体は漸減	◎運輸での化石燃料利用を打ち消すため、BECCS が大きく利用される	◎早期の CCS 発電、CO2 削減での大きな役割

(◎、○、△については、イメージをつかむための主観的な指標)

技術オプションの比較については、具体的なエネルギー構成を出力している、MARIA、GRAPE の 2 モデルを中心に実施した。分析対象は SSP2 のリファレンスケースと RCP2.6

相当ケースである。

#### e. 土地利用と食糧需給

穀物生産の収率を SSP シナリオと温度上昇 RCP ケースごとに ICA-RUS 全体で統一の基準を用いたので、国ごとには各モデルとも基本的に同じデータを用いている。世界全体では生産量はシナリオ、温暖化対策によってあまり変わらない。しかし地域ごとに見た場合、穀物生産パターン、食糧需要の想定、バイオマスエネルギーとの競合のため、結果としてモデル間の結果には相違がある。

食糧需給は、社会経済活動の最も基本的な要因である。ことに、現在 8.5 億人いるといわれる栄養不足人口の存在と、他方いずれの国でも農業は決して高い利益率を誇る産業ではなく、農業保護に補助金が必要な状況の存在といういわば「ねじれ」のある状況の下では、今後のバイオマスエネルギー利用の拡大、さらに BECCS の導入に対してなんらかの条件を課すものといえる。

ここでは、MARIA、GRAPE、AIM のモデルが提供するシミュレーション結果において、どのような傾向が共通してみられ、またどのような差異が存在するかをみる。ただし、MARIA は主要 4 穀物 (コメ、コムギ、トウモロコシ、大豆) を扱い、GRAPE はコメ、コムギに加えトウモロコシ等を含むその他の穀物を扱うが油脂植物に分類される大豆を含まない。そのためコメ、コムギ以外については生産量や耕地面積、収率の直接的な比較はできない。AIM は食用と飼料用の分類しか持たないため、穀物別の比較ができない。ここでは、そのような留保条件の下で、生産や耕地面積が温暖化政策の下でどのように推移するかを中心に論じることとする。

#### e-1. 穀物生産の推移

図 3-1-2-②-e-1\_1~3 に、各 SSP シナリオに対する世界全体および地域別の穀物生産の推移をシナリオ別に示す。上記のように穀物種類の範囲がモデル間で異なること、世界全体では穀物需要に対する想定の違いからモデル間に大きな差がある。しかしなお、RCP シナリオによる全体的な生産量変化はきわめて小さいこと、しかし地域別にみるといずれのモデルも温暖化とともに大きな変化を示すことが見て取れる。これは、食糧需要そのものが人口と所得でほぼ決まる一方、収率が作物・地域・温暖化の進行により大きく変化することを反映している。ことに、REF 地域における AIM モデルの温暖化対策の強弱による生産量の差は極めて大きくなっている。

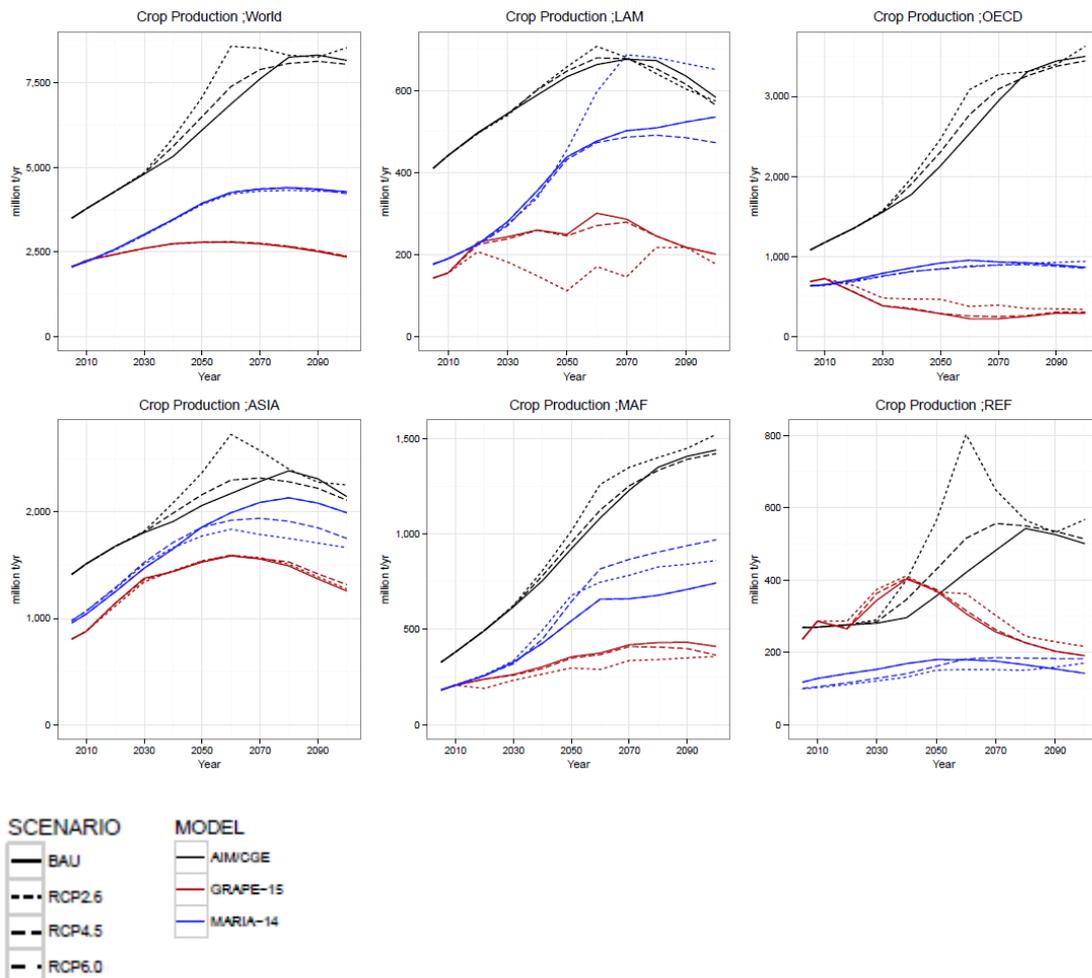


図 3-1-2-②-e-1\_1 SSP1における世界農作物生産のモデル別・地域別推移 (穀物乾燥重量 10 億 t/年)

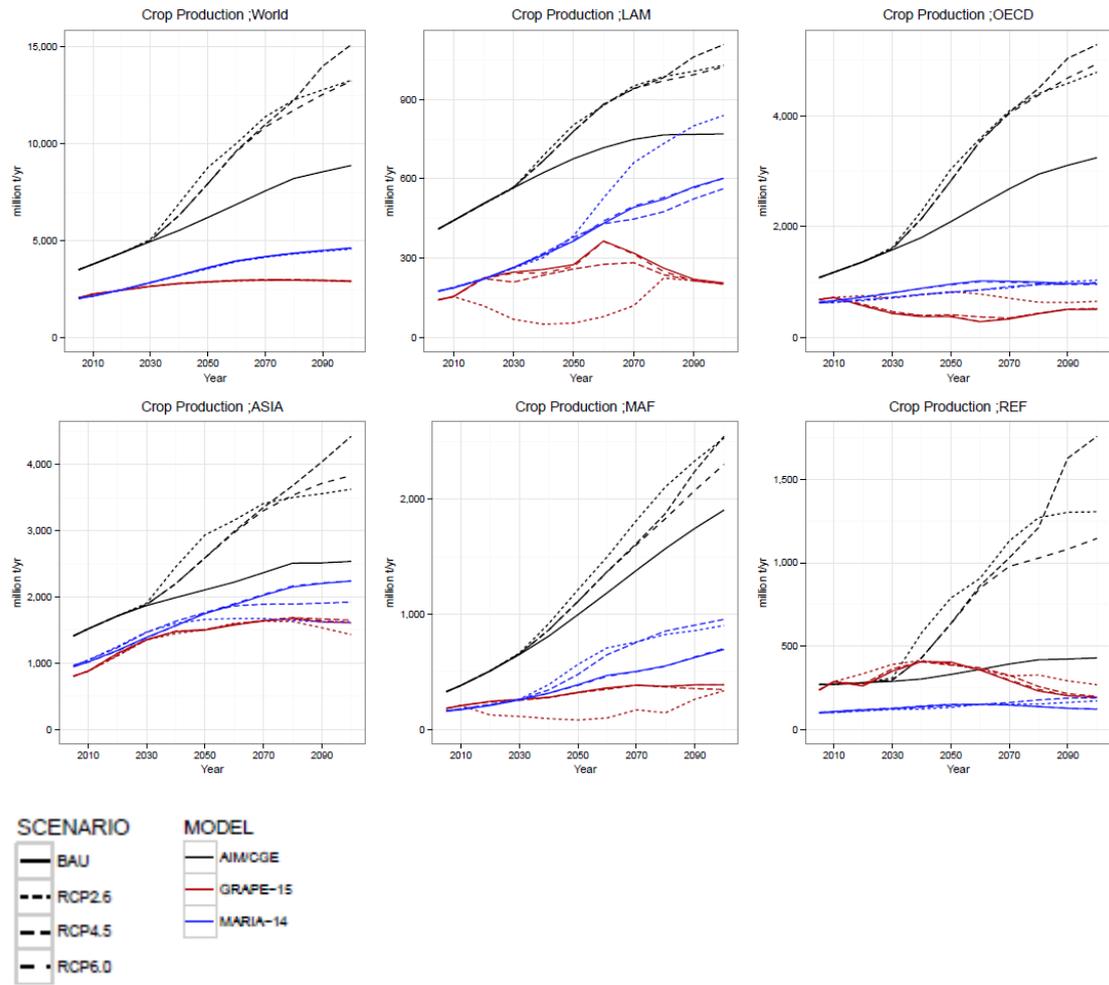


図 3-1-2-②-e-1\_2 SSP2における世界農作物生産のモデル別・地域別推移 (穀物乾燥重量 10 億 t/年)

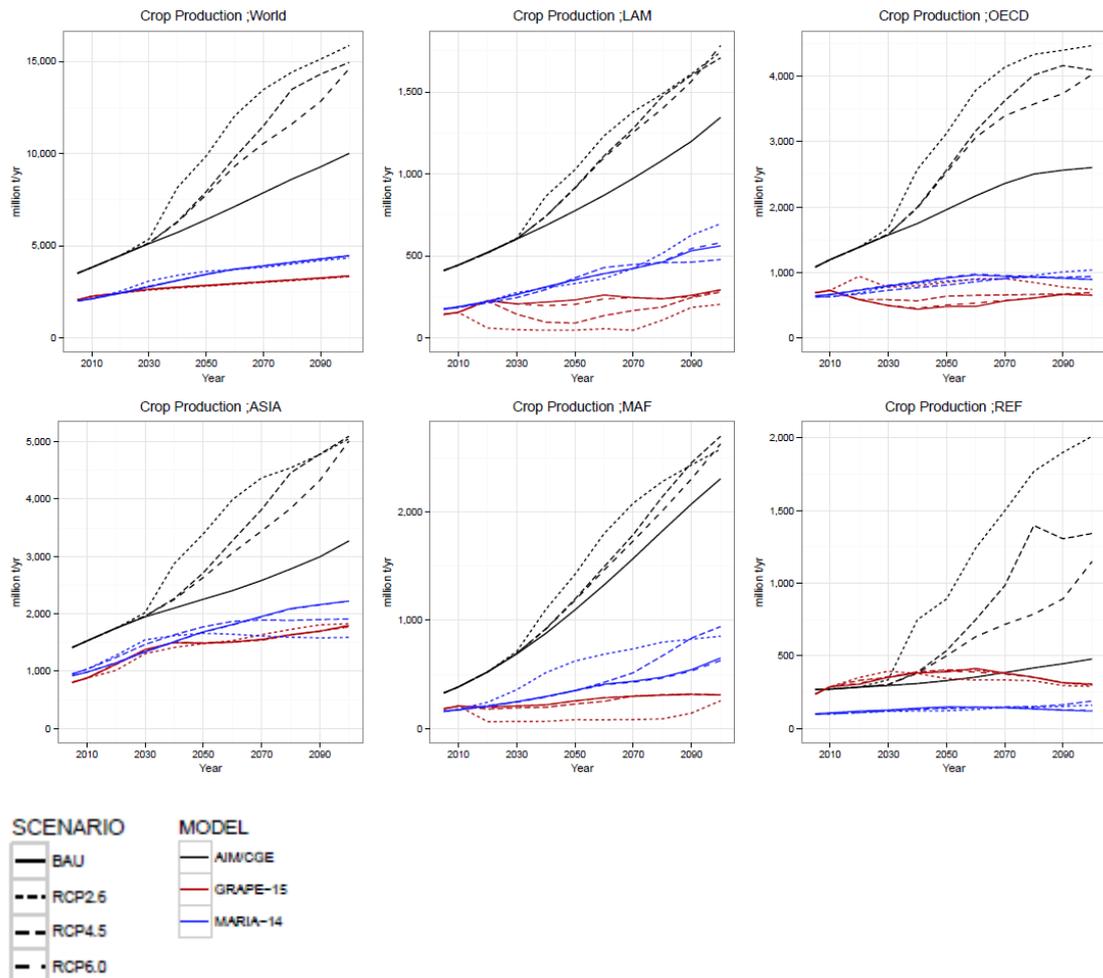
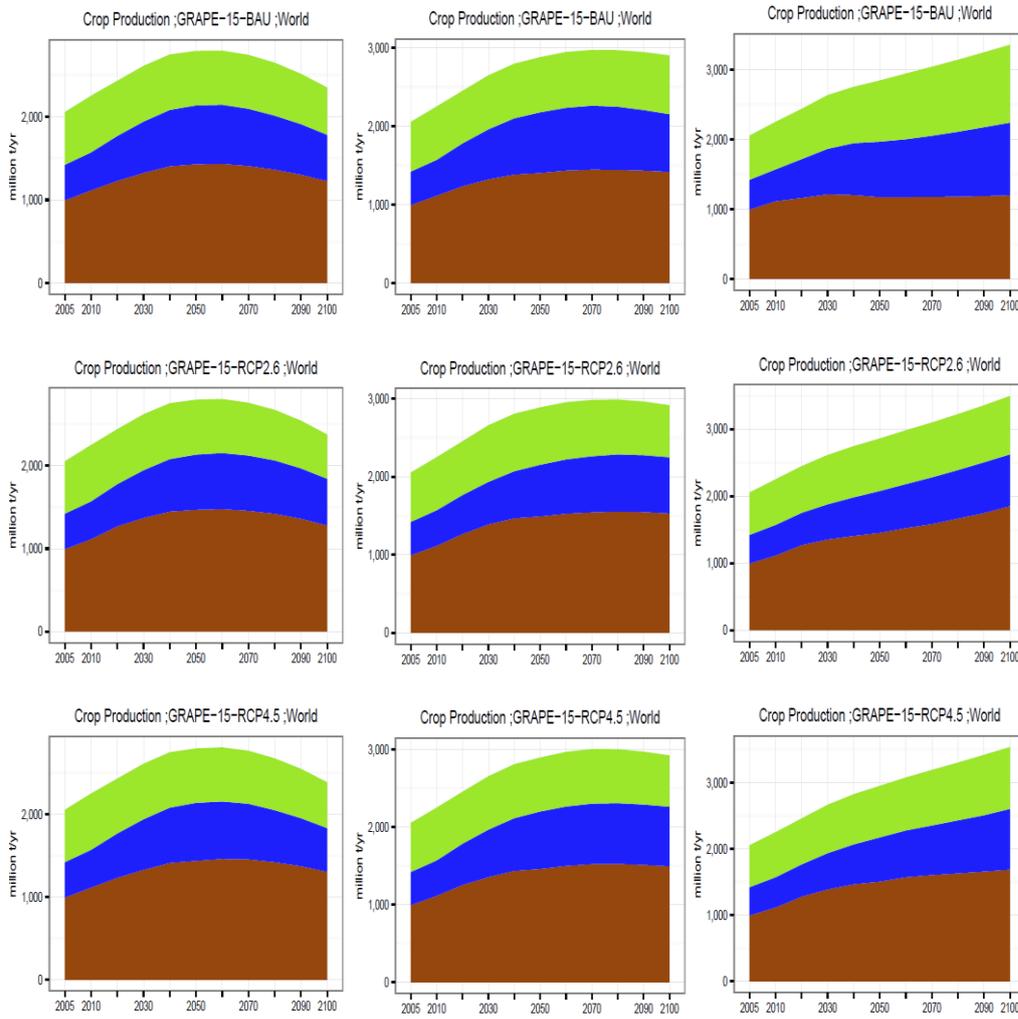


図 3-1-2-②-e-1\_3 SSP3における世界農作物生産のモデル別・地域別推移 (穀物乾燥重量 10 億 t/年)

さらに世界全体のモデル別穀物別生産推移を SSP シナリオ別に図 3-1-2-②-e-1\_4~5 に示す。ここでは、モデル間の作物評価の定義の差のためモデル間比較よりも SSP 間の差に着目されたい。



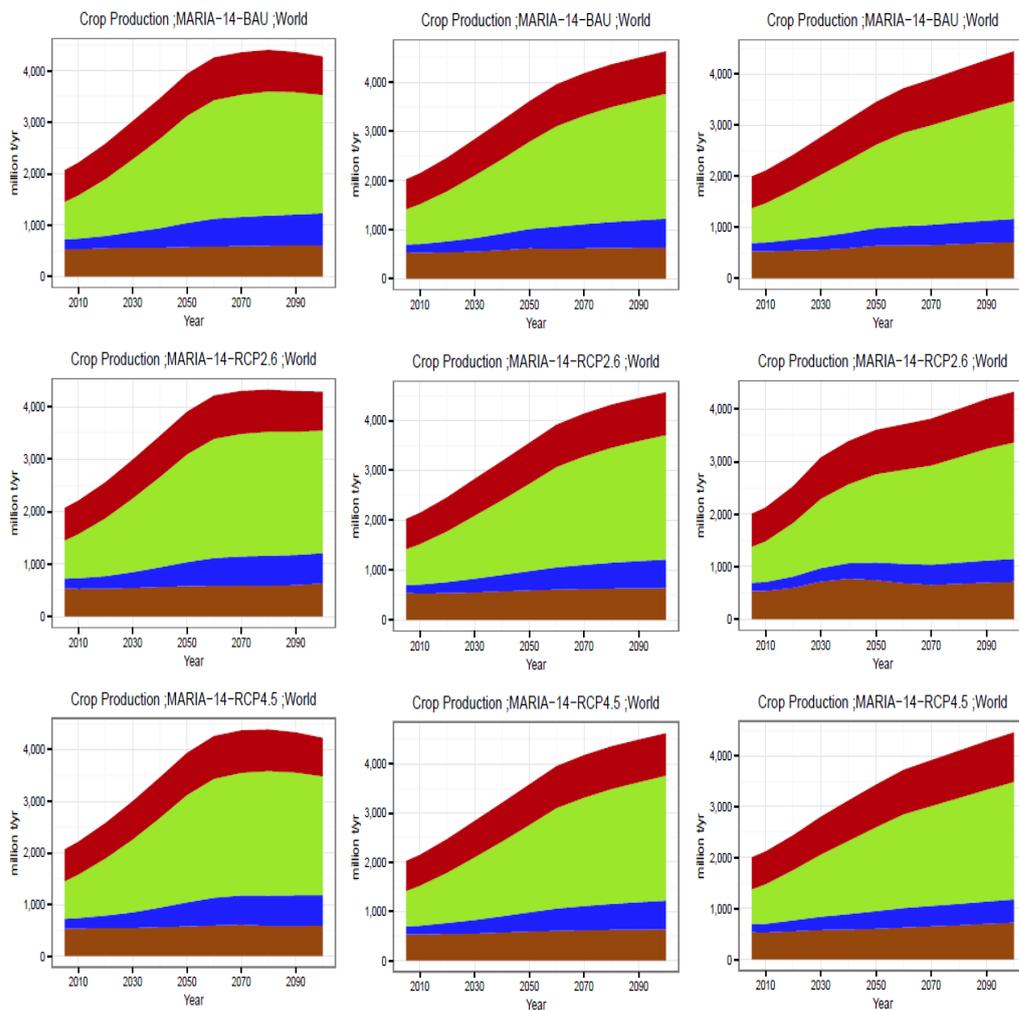
a: SSP1

b: SSP2

c: SSP3

■: 雑穀 (トウモロコシ含む) ■: コメ ■: コムギ

図 3-1-2-②-e\_1\_4 世界全体の作物種別生産の推移 (GRAPE)



a: SSP1

b: SSP2

c: SSP3

■: 雑穀 (トウモロコシ含む) ■: コメ ■: コムギ ■: ダイズ

図 3-1-2-②-e\_1\_5 世界全体の作物種別生産の推移 (MARIA)

e-2. 平均主要穀物収率の推移

穀物生産と土地利用のモデル間の直接比較は困難であるが、世界全体では食糧需給とバイオマスイネルギー利用の拡大は両立可能に見える。世界平均では MARIA は肥沃効果が温暖化による障害を上回るが GRAPE では両者はほぼ相殺する。

世界の平均収率 (単位面積あたりの収量) の比較には留意点がある。同じ穀物でも、農法や土壌条件、気候の違いにより、収率には地域差が大きい。そのため世界の地域別生産のシェアが変化すると見かけ上平均収率も変化する。今回、土地利用と食糧需給を含む GRAPE、MARIA は国ごとには共通する食糧生産収率シナリオを用いているが、需要と生産に関してはモデルごとに範囲、結果とも異なる。また、農業に対しては安全保障の観点がかかせないため、ある耕地でどのような作物を生産するかは、経済性と政策要因の両方が影響する。ここでは、作物平均収率についてモデル比較を行う。図 3-1-2-②-e\_2\_1~3 に SSP シナリオご

との作物の平均モデル別・地域別収率の推移を比較する。このように、国別には同一の指標を用いていても地域ごとの生産割合と需要に変化があることから、特に地域間での際は大きい。ただし、世界全体では温暖化対策を行うと収率にはややマイナスの影響を持つことが示されている。これはCO<sub>2</sub>による肥沃効果が温暖化による障害を上回ったためとなる。

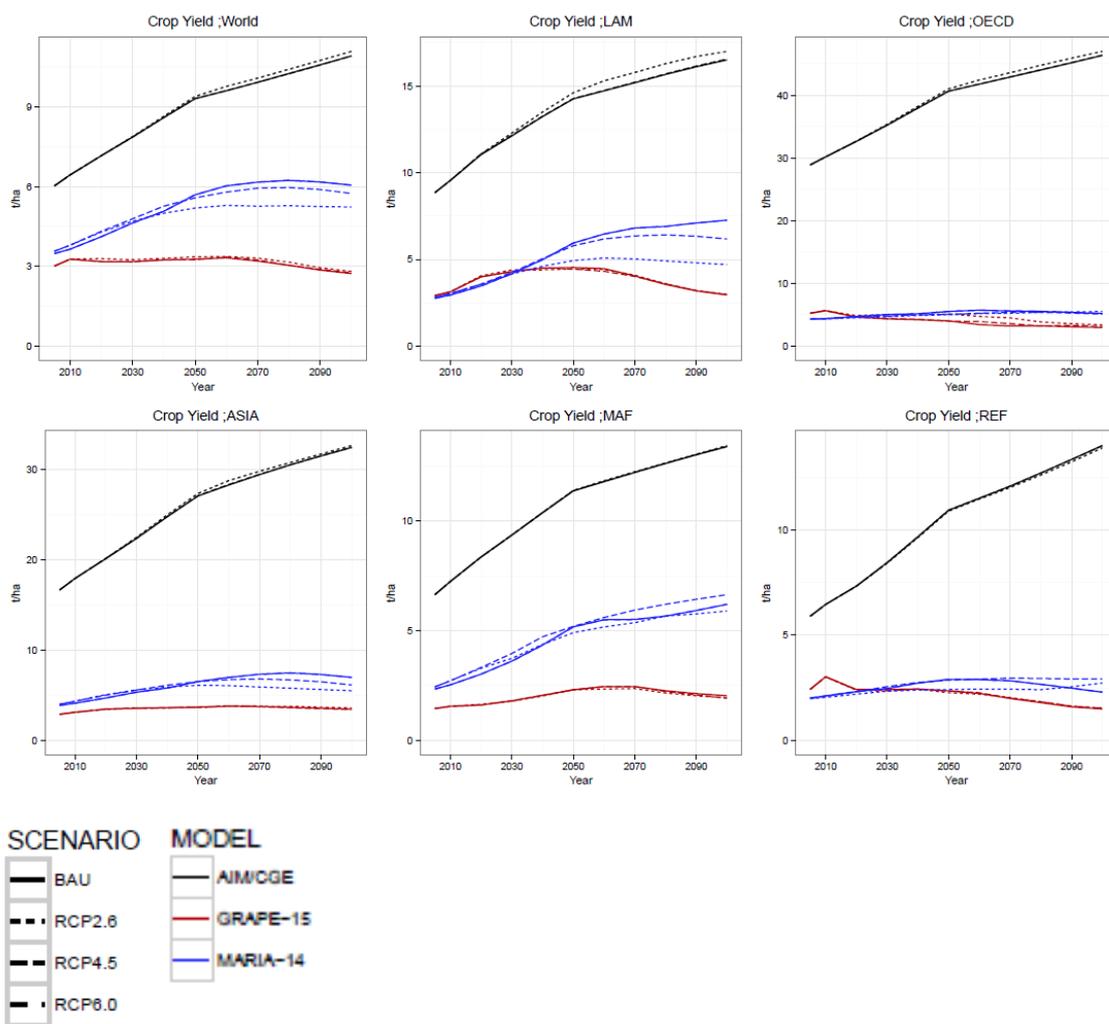


図 3-1-2-②-e-2\_1 作物平均の地域別収率と温暖化シナリオによる変化 (SSP1)

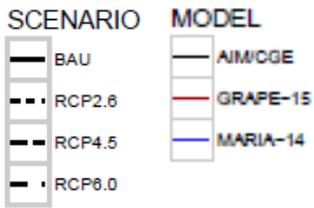
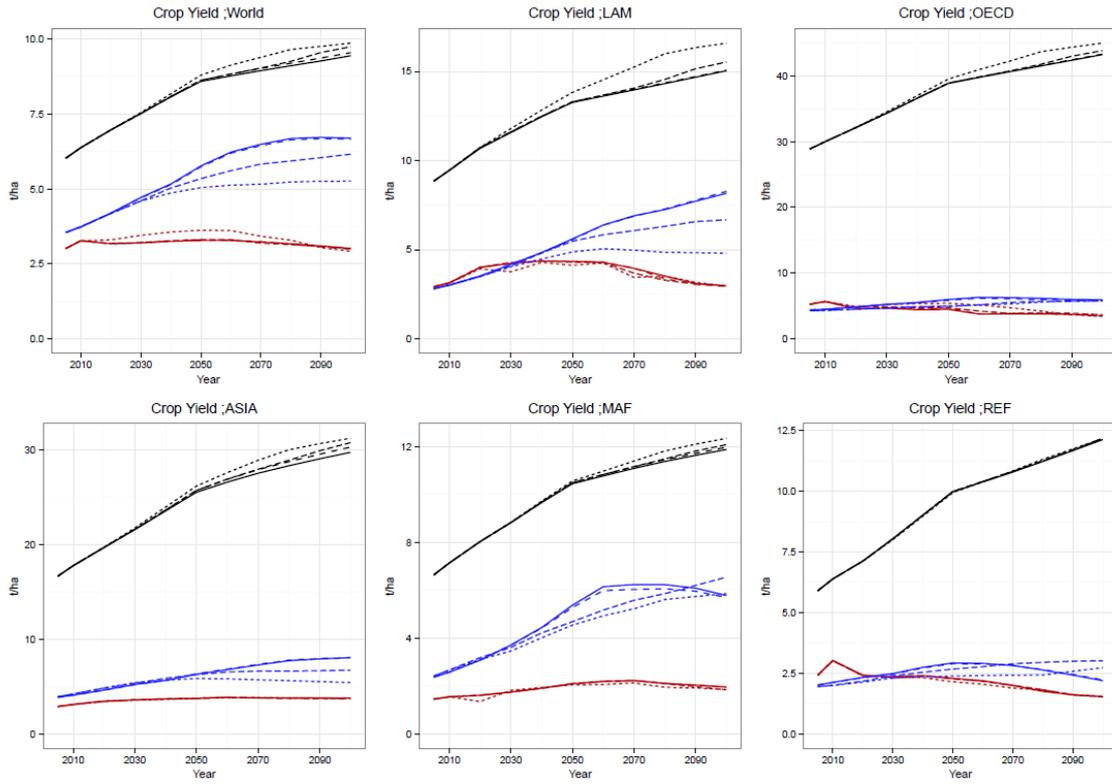


図 3-1-2-②-e-2\_2 作物平均の地域別収率と温暖化シナリオによる変化 (SSP2)

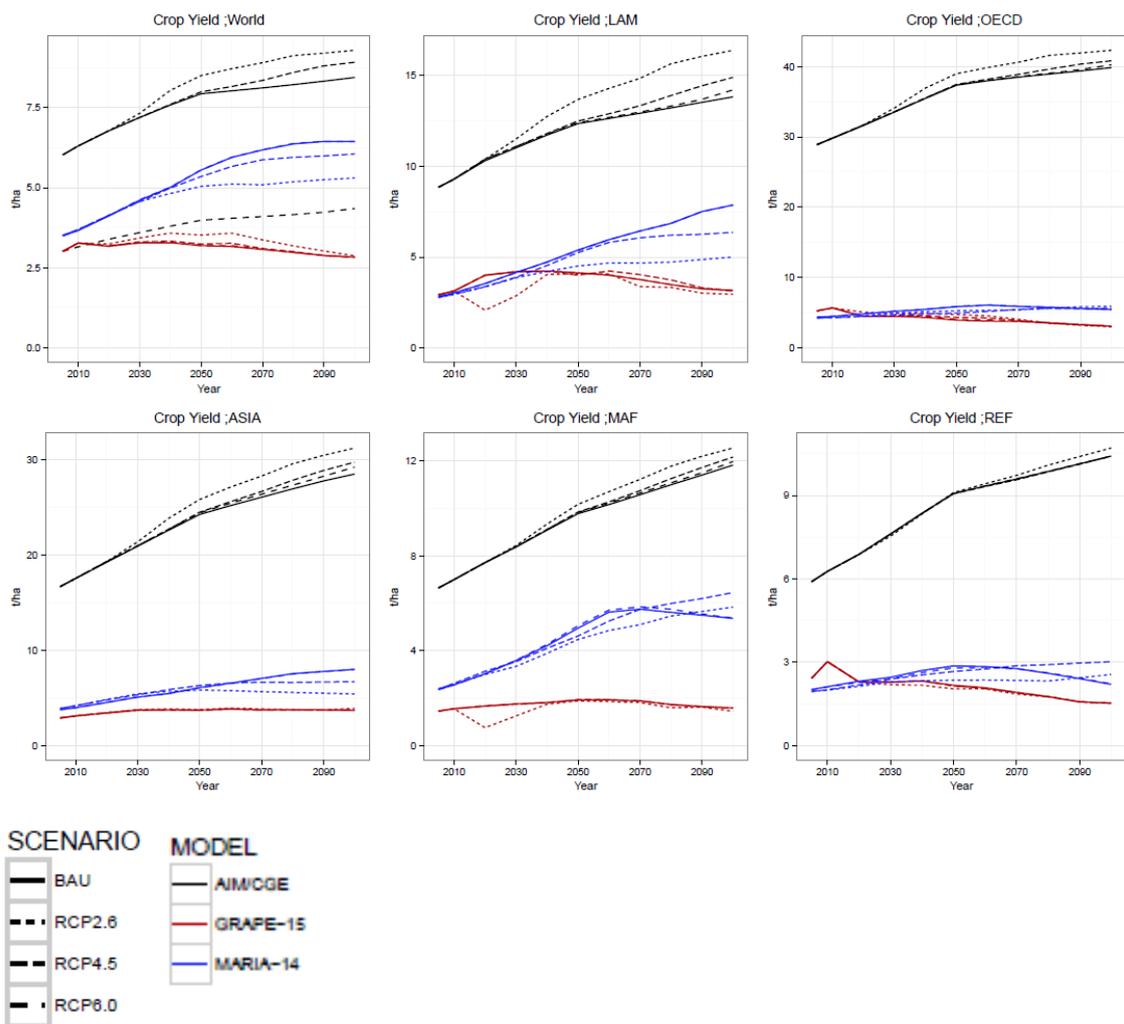


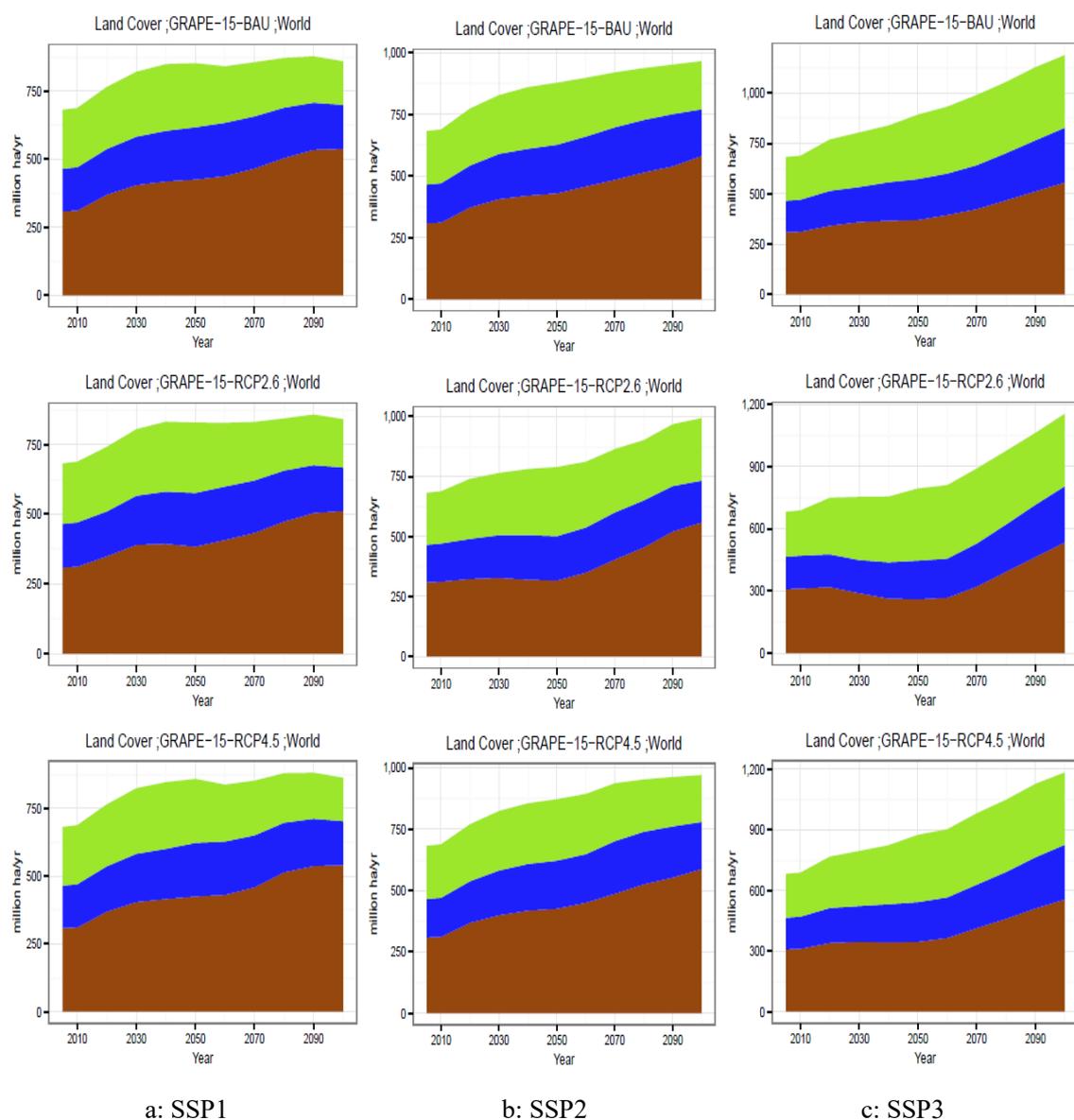
図 3-1-2-②-e-2\_3 作物平均の地域別収率と温暖化シナリオによる変化 (SSP3)

### e-3. 耕地面積の推移

必要な耕地面積は増加傾向ではあるが、温暖化対策時でも必ずしも急速な拡大は必要とされていない。ただしこれは収率の仮定に依存する。

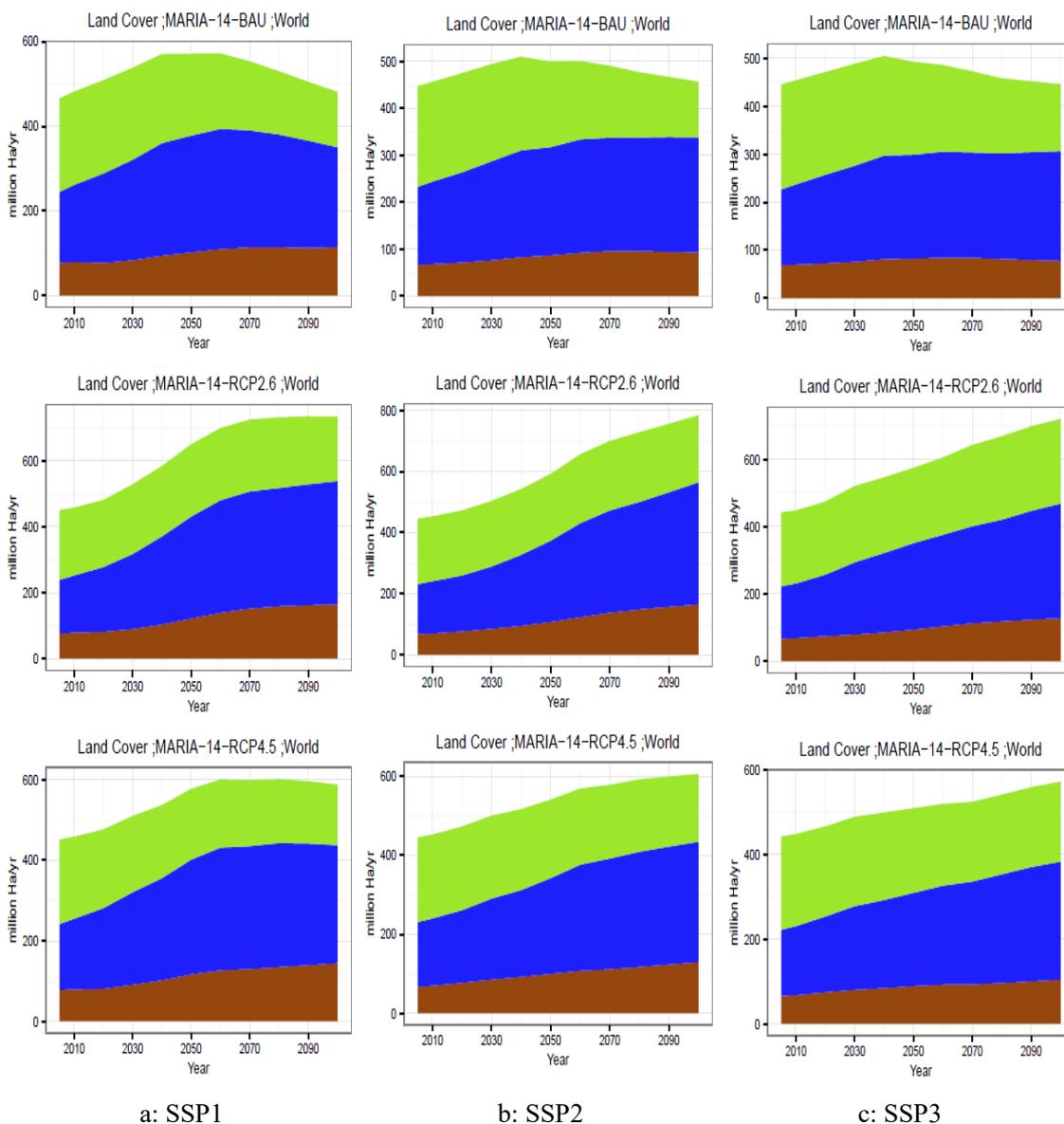
図 3-1-2-②-e-3\_1~2 に各 SSP シナリオにおけるモデル別全世界の耕地面積の推移を示す。前述のように、モデルによって扱う作物が異なり直接的な比較はできないので、耕地面積の BAU からの変化について注目する。BAU ケースから、バイオマスエネルギー利用の拡大が見込まれる温暖化対策を厳しくした RCP4.5~RCP2.6 のケースの間で、SSP2、SSP3 ともさほど大きな耕地面積の変化は発生していないといえる。特に GRAPE、MARIA の 2 モデルはほぼ一致した推移を示している。このことは、温暖化政策によるバイオマス利用の拡大、さらに BECCS が導入されネガティブエミッションが導かれる RCP2.6 ケースにおいても、食糧生産への影響は小さいことを示唆している。ただし、これは収率の仮定に依存するところが大きく、もし収率の成長が飽和するなど悲観的なシナリオを与えれば結果が大きく変

わかることは言うまでもない。



■: 雑穀 (トウモロコシ含む)   ■: コメ   ■: コムギ

図 3-1-2-②-e-3\_1 GRAPEにおける SSP シナリオ・RCP 別穀物生産耕地面積の推移 (10 億 ha)



■: トウモロコシ ■: ダイズ ■: コメ ■: コメ  
 図 3-1-2-②-e-3\_2 MARIAにおける SSP シナリオ・RCP 別穀物生産耕地面積の推移 (10 億 ha)

f. 産業部門・地域別影響

**RCP2.6 のもとでは、各産業部門の付加価値が大きく減少し、RCP4.5 でも若干減少した。アジアについては輸出や輸入など貿易構造の変化もみられた。**

具体的な政策評価の上では、産業部門別の影響が経済構造の変化を見るうえで極めて重要であるが、多地域・多部門の長期評価モデルの開発例は限られている。実際、今回参加した GRAPE と MARIA は経済活動をマクロ 1 部門しか持たず、AIM も今回エネルギー技術とマクロ経済モデルが評価結果を提供している。そのため、この産業部門別影響は EMEDA と YANO の 2 モデルが評価可能であるが、世界の貿易バランスを扱えるのは EMEDA のみであるので、ここでは EMEDA モデルの結果について述べる。

地域別のマクロ経済への影響評価において、EMEDA では AIM など他のモデルとおおよそ似た傾向の結果が得られた。温暖化政策の世界経済への影響については、より詳細な経済構造、具体的には、付加価値でみた各排出ケースの部門別影響、低炭素ケースにおける地域別の産業構造変化の推移、そしてアジア地域における各部門の貿易構造の変化に関する結果に注目した。これにより、部門の集計によって見逃される恐れのある各部門の個別の影響について、どのように影響の違いが生じ、またどのように地域経済が変化するかみることができる。

本節では、共通社会経済シナリオ (SSP) および代表的濃度シナリオ (RCP) の代表的シナリオにそって、EMEDA で行った部門別の経済影響評価のシミュレーションの結果を示す。SSP については、SSP2 シナリオに固定し、GHG 排出削減を行わないリファレンスケースに加え、RCP については RCP2.6、RCP4.5 および RCP6.0 の場合の結果を示す。各 RCP シナリオにおける GHG の排出パスの計算には RCP Database を用い、分析の際、気候感度は 3.0°C に固定している。

EMEDA は、地域については世界を 8 地域に分割し、それぞれの地域について 8 産業に分割した分析を行っている。表 3-1-2-②-f\_1 に示すように、以下の分析では、分析ケースの量が過大になるのを避けるために、農業、製造業、サービス業の主要 3 部門に注目している。また、産業については、第一次産業、第二次産業、第三次産業に分解し、地域については、表 3-1-2-②-f\_2 に示すように IIASA の分類に合わせて 5 地域に統合している。

貿易については、相互関係が膨大に発生するので、アジア貿易に限定してその結果を示した。

なお、シミュレーション開始年は 2004 年で、最終年は 2100 年、1 年刻みのシミュレーションとなっている。ただし、他のモデルの比較を用意するために、ここでは 2005 年と 2010 年以降の 10 年おきのデータを示している。また、金額表示の場合、単位は 2004 年の 10 億米国ドルとなっている。

表 3-1-2-②-f\_1

**EMEDA部門と3産業・3部門との対応表**

Sectors (EMEDA)	3産業	3部門
Agriculture	第一次産業	農業
Forestry		
Fishing		
Extraction	第二次産業	製造業
LightMnfc		
HeavyMnfc		
TransComm	第三次産業	サービス業
OthServices		

表 3-1-2-②-f\_2

**EMEDA地域とIIASA5地域との対応表**

Regions (EMEDA)	Regions (IIASA)
Japan	OECD
USA	
OECD8 (EU25_WEurope)	REF
FSU_EEurope	ASIA
China	
OAsiaOceania	LAM
OAmerica	MAF
Africa	

## f-1. 産業構造への影響

### f-1-1. RCP 別付加価値・増加率

**今世紀後半における付加価値のプラス傾向は、サービス業が最も高く、農業が相対的に低い傾向が見られた。**

まず、RCP の変化が各部門の付加価値に与える影響を見てみよう。図 3-1-2-②-f\_1\_1 では、リファレンスと比べて、各部門の付加価値が各年でどれだけの差になっているかの比率が現れている。したがって、リファレンスはゼロである。全体としての傾向をまず見てみよう。RCP6.0 では、今世紀後半に、温暖化被害の緩和でリファレンスレベルよりもより付加価値水準の高い状況が現れている。一方、RCP2.6 では、当初、リファレンスレベルより大きく下がるものの、のちに急激な回復傾向が表れている。これは、今世紀後半に、GHG 排出削減の実質的な効果が現れることによるもので、RCP2.6 シナリオが持っている長期的優位性を示している。

産業別に見ると、今世紀後半におけるプラス傾向は、サービス業が最も高く、農業が相対的に低い。サービス業の回復が見られるのは、先進国における温暖化被害の緩和が大きい可能性が考えられる。

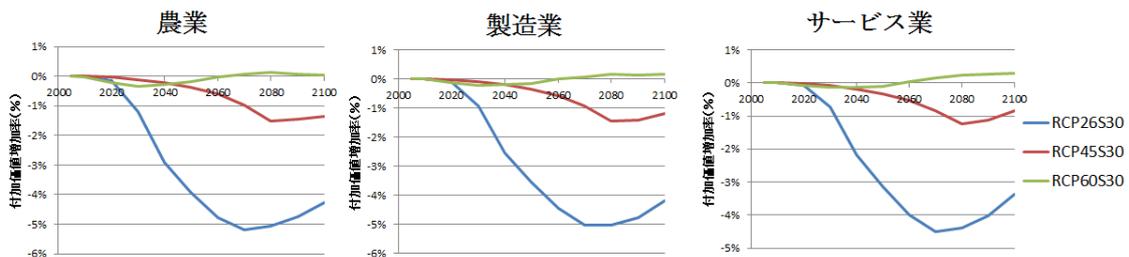


図 3-1-2-②-f\_1\_1 RCP 別付加価値増加率推移

### f-1-2. 地域別付加価値成長率

**RCP2.6 では高経済成長の主役がアジアからアフリカに移行する傾向があった。**

地域別の影響について、経済成長率の視点で RCP2.6 シナリオを見たのが図 3-1-2-②-f\_1\_2 である。全体としての特徴は、アジアの高い成長率の急激な低下と、その一方でのアフリカにおける高成長の持続である。一方、先進国は低い成長率に収束する。アジアの急速な低下は、SSP シナリオの設定を直接に反映している。特に中国が急速な成長ののちに成熟化し、その後は先進国と同様に成長率が急速に低下すること、さらには人口成長率の低下の影響が強い。

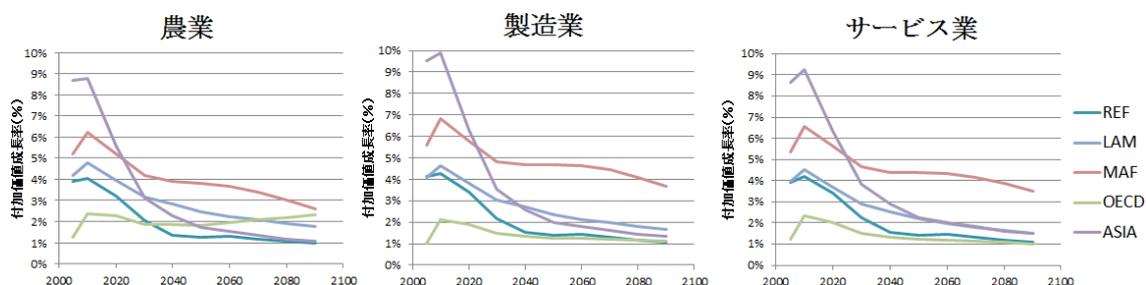


図 3-1-2-②-f-1\_2 地域別付加価値成長率推移

### f-1-3. 地域別産業構造の変化

#### RCP2.6 シナリオでは第二次産業の主役はアジアからアフリカに移行した。

RCP2.6 シナリオにおける地域別の産業構造の変化を産業別の付加価値率で表した図 3-1-2-②-f-1\_3 で見ると、現在の先進国と途上国の差がよくわかる。第一次産業については、先進国ではもともと比率が小さく、現在比率の高いアジアやアフリカも、世紀末に向かって持続的にその比率を低下させている。第二次産業については、アフリカが今世紀末にかけてその比率を高めるのに対して、アジアでは成長率が鈍化し、比率も低下させている。また、第三次産業は先進国が一貫して高い水準を維持している。

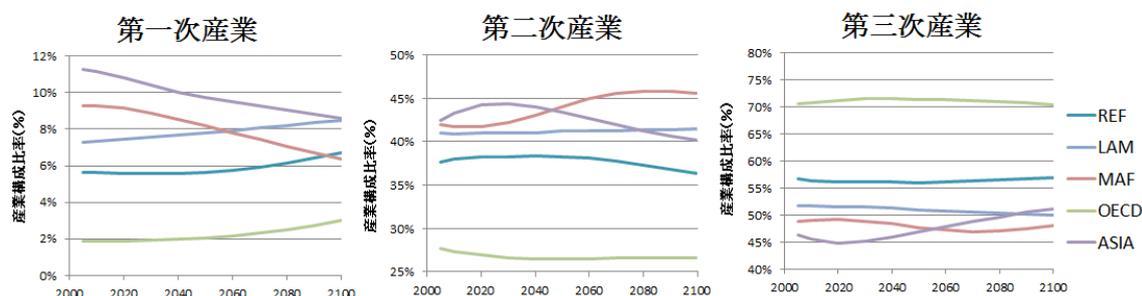


図 3-1-2-②-f-1\_3 地域別産業構造の変化

### f-2. アジア貿易への影響

既に述べたように、EMEDA は世界貿易を含む一般均衡モデルになっており、気候変動に関わる経済への影響を、貿易構造への影響としても捉えることができる。8 地域、8 部門モデルであるために、シミュレーションでは、64 の貿易経路の情報を毎年排出するが、それにシナリオ別の影響を加えると膨大なパターンになってしまうため、ここではアジアからの輸出、アジアへの輸入について注目し、温暖化影響、対策との関係を見ることにしよう。ただし、この場合のアジアは、日本、中東、旧ソ連、オセアニアを除くアジアである。なお、社会的シナリオについては SSP2 シナリオをベースにしている。RCP などその他の想定は、部門別影響の項目に記載したものと同一である。

#### f-2-1. 農業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

**強力な温暖化対策のもとではアジアの農業部門の輸出が回復し、純輸出が大きく増加する傾向がみられた。**

リファレンスの場合と比べた農業部門の輸出・輸入・純輸出の変化をそれぞれの増加率で見たのが図 3-1-2-②-f-2\_1 である。まず、輸出から見ると、特徴的な動きは、RCP2.6 の場合、今世紀後半からの回復傾向が鮮明に現れていることである。すなわち、強力な温暖化対策によって、アジアの農業の回復が強まり、輸出が増加するのである。これに対して、アジアの農産物の輸入は、放射強制力の低下により一貫して減少している。これは、アジアの産業構造が農業を含む第一次産業から第三次産業にシフトすることが図 3-1-2-②-f-1\_3 で現れていることからわかるように輸入自体は増加しているが、大幅な GHG 削減に伴う排出削減費用の負担による GDP 減少のため、その輸入が減少してしまうからだと考えられる。この輸入の減少は輸出の減少を上回るため、結果として、アジアの農産物の純輸出は一貫して増加している。また、この純輸出の増加が RCP2.6 において最も顕著に表れていることは特筆すべき点である。

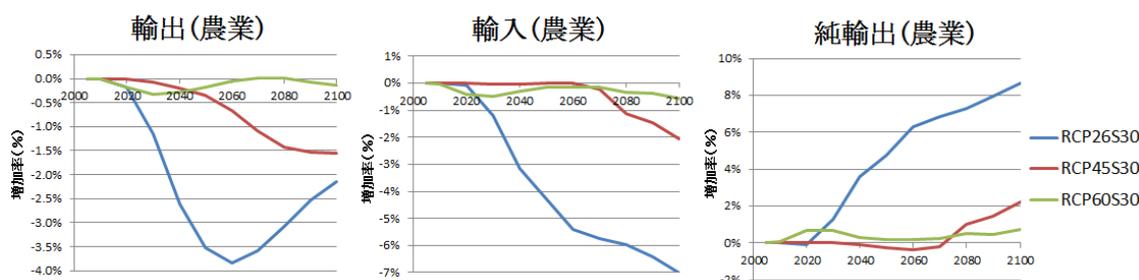


図 3-1-2-②-f-2\_1 農業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

f-2-2. 製造業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

**強力な温暖化対策のもとでアジアの製造業部門の純輸出は大きく減少したが、今世紀後半には強い回復傾向もみられた。**

製造業の貿易変数の増加率の変化については、図 3-1-2-②-f-2\_2 に表されている。製造業については、RCP2.6 の今世紀末における輸出、輸入の回復傾向が農業よりはっきりとみられる。特に、RCP6.0 ではリファレンスと比較して輸出も輸入も今世紀後半において増加している。また、純輸出についても、すべてのシナリオについて今世紀後半の回復傾向の顕著さが読み取れ、RCP6.0 に加え RCP4.5 においてもプラスの純輸出の変化がみられる。つまり、アジアの製造業の貿易でみると、放射強制力の低下による好影響が大きい。

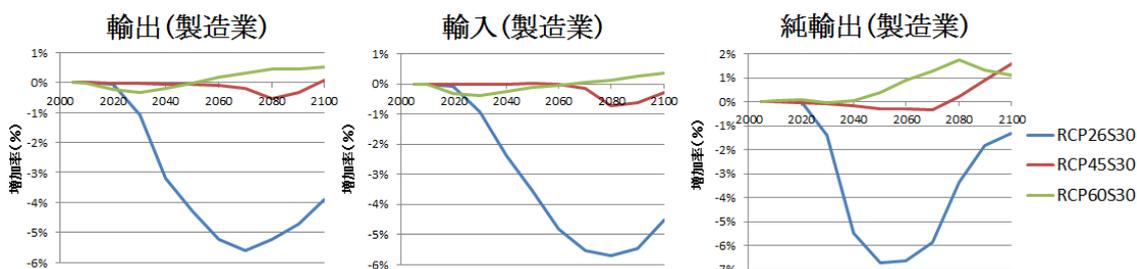


図 3-1-2-②-f-2\_2 製造業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

### f-2-3. サービス業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

強力な温暖化対策のもとでアジアのサービス業部門の純輸出は大きく減少したが、今世紀後半には若干の回復傾向もみられた。

サービス業の貿易変数の増加率の変化については、図 3-1-2-②-f-2\_3 にあるが、基本的に製造業と同じ動きとなっている。輸出も輸入も純輸出も今世紀後半に回復傾向にある。細かくみると、輸入については RCP6.0 だけでなく RCP4.5 においても今世紀末に増加率がプラスとなっており、製造業よりさらに強い回復傾向がみられる。一方で、純輸出については、輸入の回復傾向が強いため、製造業と比較して回復が弱く、RCP4.5 については一貫して増加率がマイナスとなっている。

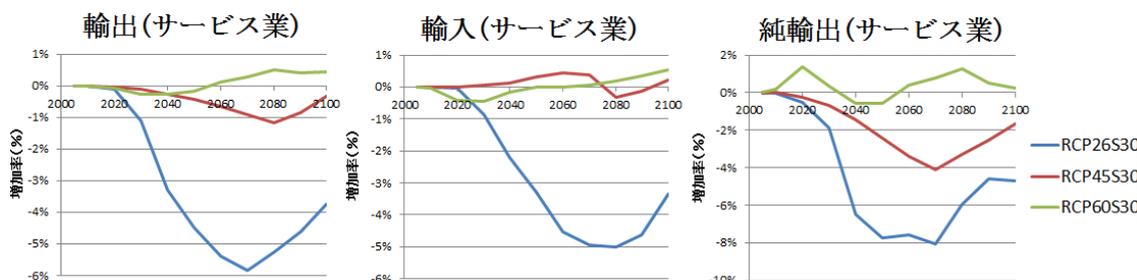


図 3-1-2-②-f-2\_3 サービス業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

### コラム1: 割引の考え方: 双曲割引

将来の便益や効用を現在の価値に換算することを割引 (discount) という。その標準的な方法としては指数割引を用いることになっている。これに対峙する方法としてしばしば挙げられるのが双曲割引という考え方である。本コラムではこれについて考えてみたい。

将来のある時点  $t$  における便益を  $X_t$  として、その価値を現在 ( $t=0$ ) に換算 (現在価値換算という) したものを  $Y_0$  としよう (ここで「便益」をどのような単位で測るかという議論があるが、ここではそうした議論は脇において、貨幣的単位でもあるいは非貨幣的単位でもよいものとする)。  $Y_0 = D_t X_t$  と書く時、この  $D_t$  が割引を表す係数となっている。割引という言葉からわかるように  $D_t < 1$  である。

次に、この  $D_t$  を分解することを考えよう。時点  $t=1$  の便益  $X_1$  の現在価値は  $D_1 X_1$  であり、

時点  $t=2$  の便益  $X_2$  の現在価値は  $D_2 X_2$  である。しかし、時点  $t=2$  の便益の現在価値換算は時点  $t=1$  における、その時点での現在価値に一旦直して、それをさらに時点  $t=0$  の価値に直すということもできよう。そのような換算の考え方をする場合、

$$D_2 X_2 = D_1 \times (X_2 \text{ の } 1 \text{ 期前への換算})$$

と考えることになる。同様に  $t=3, 4, \dots, T$  と時点を先に延ばしていくと、一般的に次のように言える。

$$\text{時点 } T \text{ の現在価値換算割引係数 } D_T = d(0) \times d(1) \times d(2) \times \dots \times d(T-1)$$

ここで、 $d(t)$  は時点  $t+1$  からその 1 期手前 (時点  $t$ ) への価値換算の係数である (これは瞬時割引係数と呼ばれる)。また、 $t=1$  については  $D_1 = d(0)$  である。さらに、すべての  $t$  について  $d(t) < 1$  であることに注意すれば、

$$d(t) = \frac{1}{1+r(t)} \quad \text{ただし、} r(t) > 0$$

であると書ける。この  $r(t)$  は時点  $t+1$  からその 1 期前 (時点  $t$ ) への価値換算の割引率を表している (これは瞬時割引率と呼ばれる)。

以上の準備のもと、次のような具体例を考えよう。今日 ( $t=0$ ) 100 円をもらうのと、明日 ( $t=1$ ) 110 円をもらうのとを比較して、前者を選ぶ人がいたとする。この人にとって、110 円の現在価値は 100 円よりも低いことになる。すなわち、 $100 > d(0) \times 110$  である。これは、 $d(0) < 100/110$  であると言ってもよい。

この人に対して、30 日後に 100 円をもらうのと、31 日後に 110 円をもらうのとを比較して、どちらがよいかと尋ねたとしよう。上記の現在価値換算の式を使えば、この比較は次のようになる。

$$30 \text{ 日後の } 100 \text{ 円の現在 } (t=0) \text{ 価値} = d(0) \times d(1) \times \dots \times d(29) \times 100$$

$$31 \text{ 日後の } 110 \text{ 円の現在 } (t=0) \text{ 価値} = d(0) \times d(1) \times \dots \times d(29) \times d(30) \times 110$$

上記の比較はつまるところ、100 と  $d(30) \times 110$  の大小関係で決まることがわかる。これは、言い換えれば、30 日経った時点を想定し、その時点での現在価値換算で比較するということである。このように論理的に考えれば、30 日後と 31 日後の比較は、結局今日と明日の比較と同じであると考えることができ、比較結果は  $100 > d(30) \times 110$  となるはずである、と言える。さらにいうと、30 日後の選好が今日の選好と変わらない限り、 $d(0) = d(30) = d$  (一定) となっているはずであると言える。これは、

$$D_t = d^t \text{ あるいは、 } D_t = \frac{1}{(1+r)^t} \text{ (} r \text{ は定数)}$$

となっていることを意味する。これがいわゆる指数割引である。

しかし、現実にはこのようになっていないことがしばしばある。今日と明日の比較では今日の100円を選ぶにも関わらず、30日後と31日後の比較では31日の110円を選ぶという人が少なからずいる、ということが知られている。たしかに、今日と明日という時間の差は大きい、30日後と31日後は大した差ではないように感じ、そうであれば、110円のほうがうれしい、という感覚はそんなにおかしくない感覚かもしれない。このような選好は  $100 < d(30) \times 110$  となっていることを意味する。 $d(0)$ との関係で見れば、 $d(30) > d(0)$  となっていることがわかる。上記で導入した瞬時割引率を使えば、 $r(0) > r(30)$  となっている。すべての時点  $t$  について同様のことが起きるとすると、 $r(t) > r(t+1)$  となっていることになる。このように  $r(t)$  が時間と共に減少する現象を「一般双曲割引」と呼ぶ。すべての  $t$  に対して、 $r(t) > 0$  であることを思い出せば、具体的な関数形の一例としては次のものが考えられる。

$$r(t) = \frac{\beta}{1+\alpha t}$$

この場合、現在価値換算割引係数としては、

$$D_t = \frac{1}{(1+\alpha t)^{\beta/\alpha}}$$

となっていることがわかる (連続系に直して導出することができるが詳細は省略)。 $\alpha = \beta$  の場合 (狭義の) 双曲割引と呼ぶ。 $D_t$  が時間に対して文字通り双曲線の形をしているからである。このほかにも一般双曲割引にはいろいろなバリエーションが考案されている。

どのようなバリエーションであれ、双曲割引の根本は、今日と明日の比較による選好と  $t$  日後と  $t+1$  日後の比較による選好が異なるということ、さらにいうと、 $t$  日後が来た時点で選好が変わってしまう、ということである。こうした選好の逆転を本人が予見でなかったとすれば、その思考は極めて短絡的、場当たりの的であると言わざるを得ないし、予見できていたとすれば、極めて不合理な思考回路であると言わざるを得ない。しかし、それもまた、現実であり得ることであろう。

指数割引を用いることは意思決定者の時間軸上の選好が合理的であると仮定していることを意味する。これに対して、双曲割引を用いるということは、意思決定者はそもそも不合理で短絡的だと仮定していることになる。モデル計算などでどちらを用いるかについて、正解は無い。しかし、その寄って立つ前提や論理が根本的に異なるということには注意が必要である。

## コラム2: 気候変動の不確実性と意思決定

現在の気候モデルによる全球平均気温変化予測には大きな不確実性があり、そのことが緩和策コストの見積りの大きな不確実性要因となっている。そのため気温変化予測の不確実性を低減するための努力が行われている。これまで、気候モデルによる過去気候再現実験データと実際の観測データの比較結果から、気候モデルの将来予測を補正し、不確実性を低減する研究が行われ、過去の観測データの蓄積によって、不確実性低減が進むことが示されてきた。一方、将来の観測データが今後追加されることによって、いつまでに、どれだけ不確実性が低減できるかは調べられてこなかった。そこで、我々は、気候モデルの将来予測実験データを疑似観測データと考えることで、将来の観測データの蓄積による不確実性削減(ASK 法という予測補正手法を用いる)の効果を推定する方法を開発し、世界で初めて「将来予測の不確実性低減に関する現実的な予測」を提示した。

図 3-1-1-コラム 2\_1 に、地上気温観測データの蓄積によって、2090 年代の気温変化予測の不確実性を、いつまでに何%狭められるかを示す。14 の気候モデルの実験データを順番に疑似観測データだと考えて ASK 法を適用し、その結果を平均したものである。2029 年までの観測データを用いた場合は、観測データで補正した予測が 2090 年代の疑似観測データ(“正解”)から外れてしまう場合がある。一方、2039 年までの観測データが得られれば、2090 年代の疑似観測を含むように補正した不確実性幅が収束するようになり、もともとの気候モデルの 2090 年代気温変化予測の不確実性幅に比して 2090 年代地上気温変化予測の不確実性幅を約 70%低減できることがわかった。

では、前もって気温変化予測の幅がいつまでにどれだけ減らせるかが分かったのなら、緩和政策にはどのようなオプションがもたらされ、それによって緩和コストをどれだけ低減できるのだろうか。これはどのような考え方に基づいて行うのが合理的なのだろうか。

例えば翌日に運動会を控え、当日の天気の可能性が晴、曇、雨の 3 通りあるとしよう。主催者としては弁当の準備をどうすべきだろうか。自分で全部作れば安上がりになる。理想は「将来の完全情報を得て、これに基づいて決める」状況である。これはしばしば **Learn Then Act (LTA)** と呼ばれる。また、明日の天気が確率でしかわからないなら、期待値にもとづいて無駄が最小になるよう準備をしたり(期待効用最大化)、最悪の場合(雨)に備えて準備したり、あるいはどの天気になっても損害が最小になるよう準備をするか(後悔値最小化)など、いくつかの選択肢がある。不足が出れば急きょ高い弁当を買いに出れば良いというわけである。長期的意思決定では、しばしば期待効用最大化の基準をもちいて評価を行う。これは意思決定を一度だけ行うので単一段階意思決定となる。

さらに、中間的な方法がある。当日深夜になれば天気が確定するとわかれば、それまでにどの天気になっても対応できるように作業を進め、確定した時点で合わせて決めるというもの。これを **Act Then Learn (LTA)** あるいは **Learning By Doing** とも呼ぶ。多段階で意思決定を行ったことになる。合理的ではあるが、準備が制約されるのでもちろん ATL に

は及ばない。しかし当日になってみれば、どの天気になっても単一段階の意思決定よりは過不足は小さく費用は抑えられるだろう。

この場合、翌日の天気について情報の価値はどのように計算すればよいだろうか。それぞれの天気に対する最小の費用はLTAの場合の $C^*(k)$  ( $k = \text{晴、曇、雨}$ ) である。事前に単一の決定を行ったときの各天気に対する費用を $C_0(k)$  とすると、両者の差が情報の価値となる。平均的には、その天気が起こる確率を掛けたもの、すなわち $\sum_k \{ C_0(k) - C^*(k) \} P(k)$ が事前情報の価値となろう。ATLでも、実際に起こった天気 $k$ ごとに費用 $C_A(k)$ がえられるから、やはり同じ式の途中段階で情報を得ることの価値の平均値 $\sum_k \{ C_0(k) - C^*(k) \} P(k)$ を計算できる。

ここで次の2点に注意したい。まず完全な情報を求めるあまり最終決定をあまり先延ばしすると、かえって事態に対応できなくなりがちなことである。第2に、途中段階で完全な予測ができなくとも、不確実性の範囲を絞りこめれば、やはり情報に価値がある。上の例では、夜中に晴または曇か、曇または雨かまで2択にできれば、たとえば飲み物の注文を減らすなど対応を絞り込めよう。

この様子を図3-1-1-コラム2\_2に示す。ICA-RUSでは、統合評価モデルを用い、将来の不確実性を8通りと設定し2040年代には不確実性を8択から3択に減らせ、さらに次の10年で3択を2択にまで絞れる場合に、どれほど費用期待値を減らせるかを試算してみた。この結果、情報が完全ならその価値は2°C目標なら3.9%、しかし2.5°C目標なら0.8%にとどまること、上記の不完全情報でも価値は2°C目標なら2.2%、しかし2.5°C目標なら0.75%と得られることを導いた。

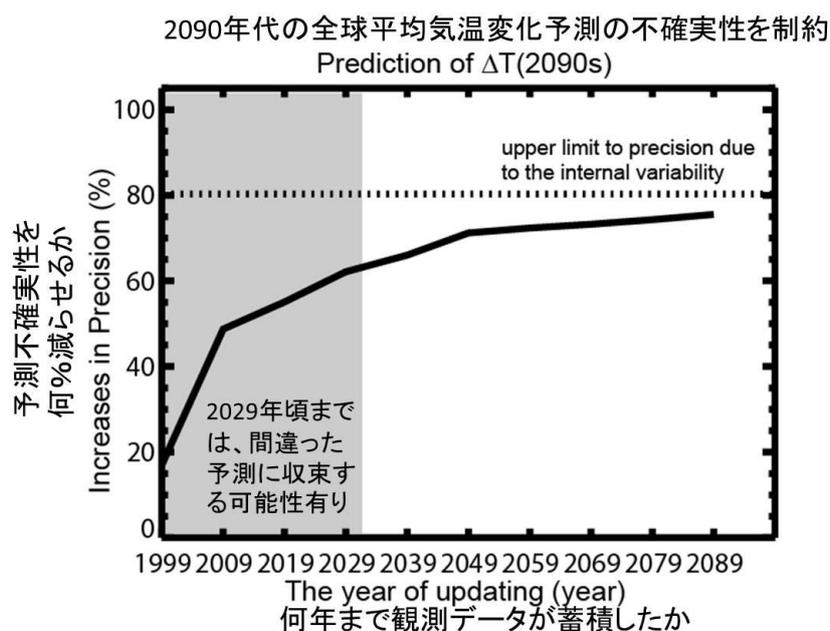


図 3-1-1-コラム 2\_1 地上気温観測データの蓄積によって、いつまでに全球平均気温変化予測不確実性を何%狭められるか。横軸は、何年まで観測データが蓄積したか。縦軸は、ASK法を

用いない 2090 年代気温変化予測の不確実性幅に対して、ASK 法が何%不確実性幅を狭められたかを示す。点線は、気候システム内のランダムな自然のゆらぎがあることによる不確実性低減の上限であり、ASK 法ではこの上限を超えて不確実性を低減することはできない。2029 年までは、ASK 法により補正された予測は外れる場合があるが、2039 年以降 (2039 年までの観測データが揃うのは 2040 年) は“正解”にむかって収束し、約 7 割の不確実性が減る。

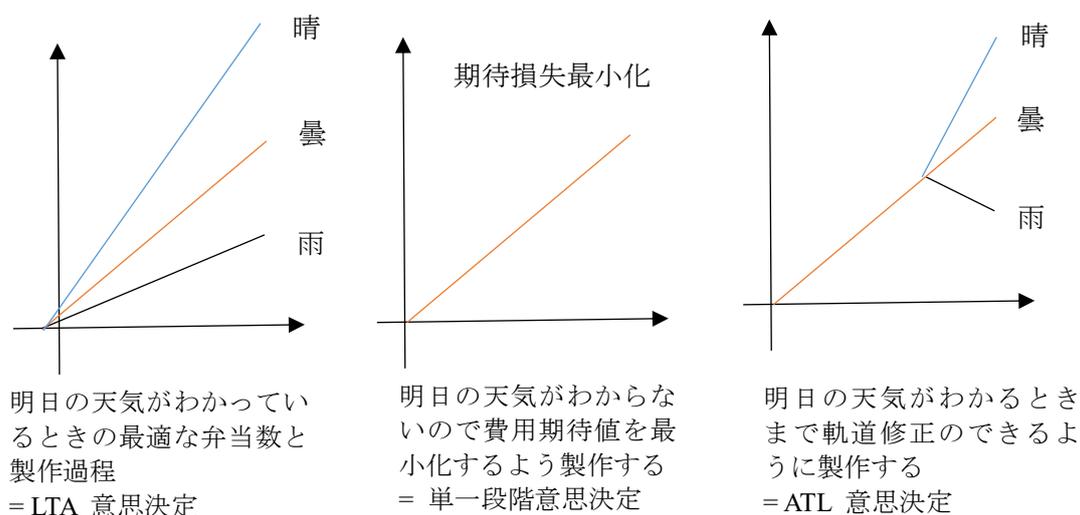


図 3-1-1-コラム 2\_2 将来が不確実な場合の意思決定プロセス

### コラム3: 適応と気候工学

本節では緩和策、すなわち温室効果ガス排出量を削減して、気候変動の度合い自体を低減する手法を中止に議論をしてきているが、人類社会の取り得る地球温暖化問題への対応は、緩和策以外にも存在する。パリ協定で謳われている 2°C ないしは 1.5°C に気温上昇を抑える目標は、統合評価モデル分析の結果で SSP によっては達成が難しいことが分かってきている。仮に緩和策が成功しても気温は上昇し気候は変動するので、被害や影響を最小限に抑えるための適応策が、重要な役割を担うことになる。また達成する場合でも CCS 付きバイオマス発電などによる大量の負の排出に依存することになり、これらの規模が大きくなればなるほどその失敗の可能性も増えてくる。また、確率は低いものの気候感度が非常に高い可能性も否定できない。以上を踏まえると、気候工学 (ジオエンジニアリング) の中の太陽放射管理 (SRM) の検討も必要になるかもしれない。

適応については、わが国では、2015 年にパリで開催された気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21) の会期中に適応計画が報告された。COP21 で締結され、2016 年 11 月に発効したパリ協定においても、適応能力を拡充し、レジリエンスを強化し、脆弱性を低減させる世界全体の適応目標を設定するとしている。しかしながら、適応策の計画、評価は容易ではない。どの分野の影響かによって適応策の手法は大きく異なる。また、同じ分野における

適応策でも、地域によって費用や効果は大きく異なる。また、どの程度の被害を対象とするかによって適応策の強度が大きく変化する。日本では、ようやく適応計画ができた段階であるが、韓国では、国全体を対象とした適応計画は2010年に作成され、地方における適応のための行動計画が作成されている。また、中国でも適応国家戦略が実施されるなど、適応策に関して日本は出遅れているといつてよい。適応計画を受けて、気候変動適応情報プラットフォームが作成されるなど、ようやく情報整備が整いつつあるという状況である。

一方、世界の各地域や影響を受ける分野について、網羅的に被害の大きさや適応策の費用とその効果を明らかにした研究は見られない。このため、この環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-10 においても、当初は温暖化適応策に関するメタ分析を行い、その結果を統合評価モデルに入力することを計画していたが、既存研究や各国の適応計画の収集と整理に止まってしまった。

SRM についても一定の検討を行った。SRM は意図的かつ大規模に気候システムに介入して気候を冷やす手法であり、特に成層圏エアロゾル注入がよく知られている。気候変動の予測に用いられる気候モデル・地球システムモデルを用いた研究などによって地球全体の気温が下がることが確かめられてきているが、一方で(短・中期的な)オゾン層破壊、降水分布の変化など、副作用のリスクも見出されてきている。

SRM に関心が集まる理由の一つは、(副作用などを無視した)実施コストである。欧米のマスコミではよく年間10億ドルで世界の気候を変えることができるとの報道もあるほどで、世界の富豪なら一人でもできるという指摘もあった。しかし、大規模工学プロジェクトのコスト見積もりは楽観的になる場合があり、こうした初期的な見積もりの扱いには気を付けなければならない。そこで SRM の代表例である成層圏エアロゾル注入について過去のコスト推計を再解析した。殆どの推計でデータの利用の仕方に非整合性が見つかり、コストが過小評価されていることが明らかになり100億ドルのオーダーであることが分かった。技術開発を必要としない現状の戦闘機を利用した場合、このコストは数十倍に増える可能性がある。(なお、成層圏エアロゾル注入のコストは、補正後でも緩和策に比べて大幅に安いことに注意されたい。)また他の研究で SRM の単位エアロゾル投入量あたりの放射強制力減少についても大きな不確実性があることが分かってきている。

実施コスト以外の副作用についても、科学的な進展が見られる。気候工学の副作用は導入量に非線形に比例して上昇すると考えられる。その場合、その不確実性も導入量を抑えることで減少すると考えられる。最近の研究によって SRM を抑制的に導入しても温暖化リスクを一定程度減少させることができることが分かってきた。

SRM については、(コストが上限に近い場合でも)大国であれば単独実施が可能であり、一国が気候を変えてしまう可能性すら指摘されている。仮に抑制的に SRM を用いようとした場合でも、既得権益が形成されてしまい、SRM の導入が相当量まで進んでしまう可能性もある。もちろん、そもそも人間が地球全体の気候を変えることが許されるのかという倫理的な問いも残されており、技術が社会の声を無視し勝手に進歩し実施につながってしまう

ないように、ガバナンスの枠組構築が早急に望まれる。

2) その他

(1) 21世紀を超えて顕在化するリスク (ティッピングエレメント)

① 総論

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 3-2-1-①\_1(木口ほか, 2015) 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) 」に関し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の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 CO<sub>2</sub> 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 3-2-1-①\_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旱魃

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、旱魃
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
⑦	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
⑧	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 3-2-1-①\_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 CO<sub>2</sub> 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., 2015)、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, 2016)。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°C 以上下降した (Alley et al., 1993) 時期があった。原因は大西洋熱塩循環の弱体化が有力であったが、北米大陸への地球外飛来物 (彗星や隕石) による説 (Kennett et al., 2009) 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°C 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体化については、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) までの発現が多くモデルで示されている (Cheng et al., 2013)。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°C 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., 2016)。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指摘している。

政策決定者、ひいては社会が最も関心があるのは、そのようなティッピングエレメントがどれくらい発生する可能性があり、その経済被害はどれくらいなのか、と考えられる。しかし、ティッピングエレメントの発現が突然ではなく緩やかに発生するなどの特性から、これまでなかなか研究が進んでいなかったが、DICE などに簡易ではあるものの組み込むことで評価しようという動きもある。

統合評価モデルにティッピングエレメントを組み込んだ初期の例としては、Nordhaus and Boyer (2000) が挙げられる。Nordhaus and Boyer (2000) では、Nordhaus (1994) によるエキスパート調査に加えて、その後得られた知見 (Broecker, 1997; Dansgaard et al., 1993; Taylor et al., 1993; Stocker and Schmittner, 1997 が Nordhaus and Boyer (2000) で引用されている) を考慮して、気候変動による "Catastrophic impact" への支払い意思額を推定する事で、DICE99 にティッピングエレメントの被害関数を組み込んでいる。Hope (2006) は、IPCC 第 3 次評価報告書を参照しつつ Discontinuity による被害を推計する関数を PAGE 02 に組み込んでおり、これがティッピングエレメントの被害を推計する関数にほぼ相当する。その関数は、ティッピングに関する複数の特性値 (ティッピングポイントを越える気温の下限、気温上昇とティッピングポイントを超える確率の関係、ティッピングエレメントによる GDP 損失) を確率的に定め、その特性値を基にティッピングによる GDP 損失が起きる時期や GDP 損失の大きさが推計される。なお PAGE02 では、ティッピングポイントを超えると同時にティッピングエレメントによる全影響 (GDP 損失) が発生するように関数が設定されていたが、PAGE09 (Hope, 2011) ではティッピングポイントを超えた後、時間とともにその影響が大きくなるように被害関数が改良されている。これら統合評価モデルでは一つのティッピングポイントしか考慮されていないが、Lenton and Ciscar (2013) で議論されているように、最新の知見を参照して複数のティッピングポイントを考慮する事や、高解像度の影響評価モデルを用いて各ティッピングエレメントの影響を詳細に調べる事も重要である。

また、最新の研究では、ティッピングエレメントに関するパラメータを確率的に与える要素を DICE に組み込んで動的な最適化を行う DSICE というモデルを用いて、ティッピングエレメントが炭素税に与える影響が分析されている (Lontzek et al., 2015; Cai et al., 2015)。Lontzek et al.(2015) では、DSICE で用いるティッピングエレメントに関わる特性値を確率的に定めるための基準値を Kriegler et al.(2009) によるエキスパート調査を参照して設定し、ティッピングエレメントが最適な炭素税に与える影響を調べている。その結果、Lontzek et al.(2015) では、ティッピングを考慮すると、現在 (2005 年時) の最適な炭素税が 50%近く上昇し、ティッピングによる影響の遷移時間が短くその影響も大きい場合を想定すると、炭

素税が約 200%増加すると述べている。

以下では、ICA-RUS で独自の定量分析を実施している 3 つのティッピングエレメントについて、その最新知見を紹介する。一つ目は、Lenton *et al.*(2008) ではティッピングエレメントとして取り上げられていないが近年注目されつつある、海洋堆積物中のメタンハイドレート分解とその結果生ずる海洋溶存酸素変化である。二つ目は Lenton *et al.*(2008) でも取り上げられているグリーンランド氷床である。なお、どちらの現象についてもその生起・継続の時間スケールが数百年～数千年にわたることから、3 章 1 節のような分析ケース別の分析とはなっていないことには注意が必要である。三つめは特に島嶼国で喫緊の課題となっている海面上昇を引き起こす事象についてまとめた。

## ② メタンハイドレート

大きな炭素リザーバーとして知られている海洋堆積物中のメタンハイドレートは温度上昇により分解する。温暖化の影響が海洋堆積物中にまで到達するのに数千年程度かかる為に、メタンハイドレート分解に伴う海底からのメタンガス放出は時間スケールの長いティッピングエレメントの 1 つとして知られている (Lenton *et al.* 2008)。

海底から放出されたメタンガスのほとんどは海水中に溶けて CO<sub>2</sub> に酸化される。酸化により生じた CO<sub>2</sub> の一部が大気に放出、もしくは海洋の CO<sub>2</sub> 吸収を抑えるために温暖化を引き起こすと考えられている。Archer *et al.* (2009) では、温暖化への影響は全球平均で 0.5°C 程度と比較的小さいが、その影響は数千年持続することが示された。一方、酸化により海水中の溶存酸素が減少するが、この影響はこれまで見積もられてこなかった。そこで、ICA-RUS の分析では、溶存酸素の減少について、温暖化の影響とメタン放出の影響を比較した。

分析の方法としては、メタンハイドレートの分布とインベントリー (貯蔵量) を推定するモデルを Piñero *et al.* (2013) を元に作成し、MIROC の温暖化実験の結果を用いてインベントリーの減少を計算した。MIROC に与えた CO<sub>2</sub> 濃度は、産業革命前の CO<sub>2</sub> 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させ、2000 年以上積分した。温暖化とメタンガス放出に伴う溶存酸素減少を推定する為に、Schmittner *et al.* (2008) を元にしたオフライン海洋物質循環モデルを使用した。ここでは現在の海洋循環の元で、海面水温のみ 4 倍 CO<sub>2</sub> 実験に変えた場合の溶存酸素減少を計算している。そのため、温暖化による海洋循環の変化については考慮していない点に注意する必要がある。

<結果>

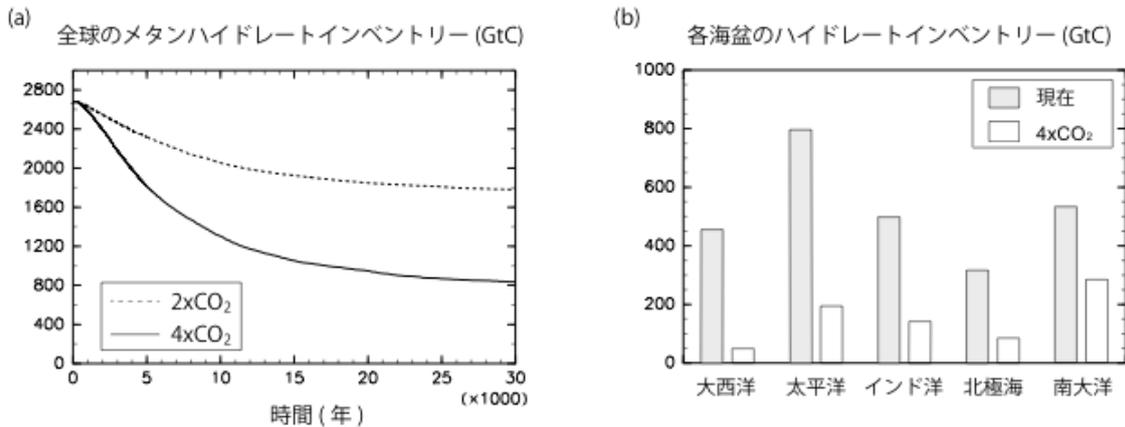


図 3-2-1-②\_1 (a) 全球メタンハイドレートインベントリーの時系列変化。破線は 2 倍 CO<sub>2</sub> 実験、実線は 4 倍 CO<sub>2</sub> 実験をそれぞれ示す。(b) 現在気候 (グレー) と 4 倍 CO<sub>2</sub> (白抜き) 気候における各海盆のメタンハイドレートインベントリー。

### 主に太平洋でメタンハイドレートの分解が起こる

メタンハイドレートのインベントリーは 4 (2) 倍 CO<sub>2</sub> 実験において 1 万年以上かけて約 70 (35) %減少する (図 3-2-1-②\_1(a))。この遅い分解は主に堆積層中の遅い熱拡散によって引き起こされる。太平洋は溶存酸素が低く堆積層表層に堆積する有機物の量が多い為に、現在気候においてメタンハイドレートが多く存在する。そのため、太平洋においてメタンハイドレートの分解が最も多い (図 3-2-1-②\_1(b))。

### 現在の海洋循環では全球的な無酸素は引き起こされない

1,200GtC のメタン放出が起きた場合、酸化により全海洋中の溶存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 8,000 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 2,000 年程度である事を考えると、全球無酸素は引き起こされないことが分かった。ただし温暖化により著しく海洋循環が弱化した場合、海洋中の溶存酸素を著しく減少させると考えられる。

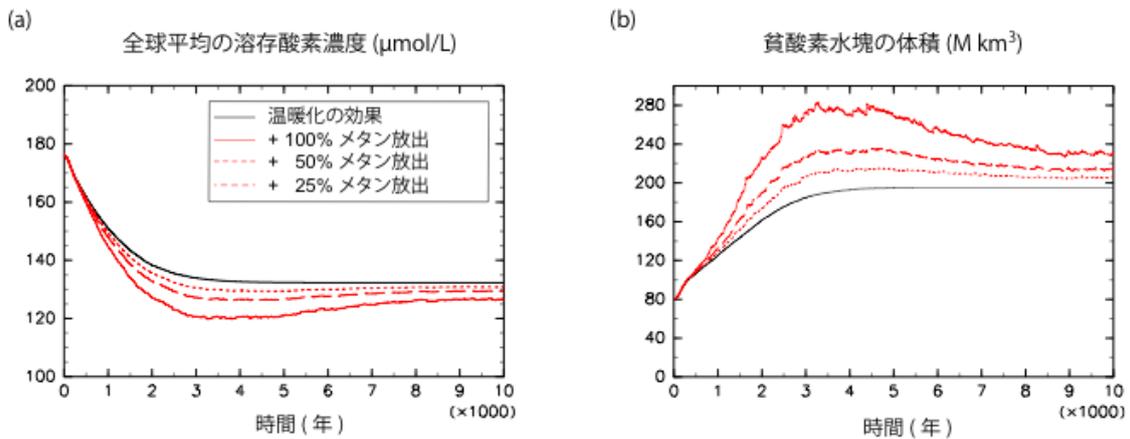


図 3-2-1-②\_2 (a) 4倍 CO<sub>2</sub> 実験における全球平均の溶存酸素濃度と (b) 貧酸素域([O<sub>2</sub>] $<$ 80 $\mu$ mol/L) の体積の時系列変化。黒線は温暖化による溶解度減少による変化、赤線はメタン放出の効果を加えた場合の変化を示す。メタンハイドレートの分解によって生じたメタンのうち、海洋へ放出したメタンの割合を 100 (実線)、50 (破線)、25 (点線) %とした場合の結果を示す。

### メタン放出は貧酸素域の拡大を引き起こす

4 倍 CO<sub>2</sub> 実験において海面水温上昇による溶解度の減少により、全球平均の溶存酸素は約 3,000 年かけて 44  $\mu$ mol/L 減少し、貧酸素水塊の体積は約 110Mkm<sup>3</sup> 増加して現在の約 2 倍になる (図 3-2-1-②\_2、黒線)。メタン放出は約 3,000 年後にピークになるため、温暖化の効果と重なり合い、その影響は数千年続くことが示された。全球平均の溶存酸素濃度に対して、50%放出ケースでは 7 $\mu$ mol/L の減少となり、温暖化の影響の約 1/6 になった (図 3-2-1-②\_2、赤線)。一方、貧酸素域は 0%メタン放出ケースで約 40Mkm<sup>3</sup> 増加し、温暖化の影響の約 1/3 となった。現在の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の分解とメタン放出が起こるため (図 3-2-1-②\_3)、メタン放出は全球平均の溶存酸素減少に比べて貧酸素域の拡大に大きな影響を与える。貧酸素域の拡大は魚等の高等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為、海洋生物にとって重要である。

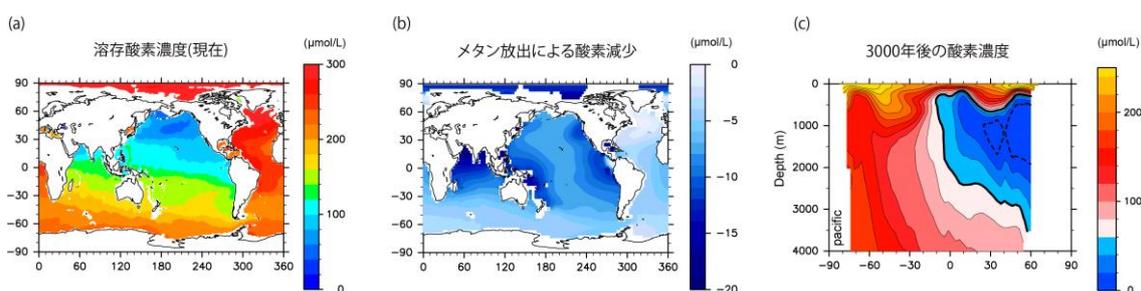


図 3-2-1-②\_3 (a) 水深 2,000m における現在の溶存酸素濃度。(b) 4 倍 CO<sub>2</sub> 実験の 3,000 年後における水深 2,000m でのメタン放出による酸素減少量 (50%放出ケース)。(c) 3,000 年後における太平洋の溶存酸素濃度 (横軸: 緯度, 縦軸: 水深)。青色は[O<sub>2</sub>] $<$ 80 $\mu$ mol/L の貧酸素域を示す。

### ③ 氷雪圏

氷床は大陸規模の陸上起源の氷体である。大気・海洋・固体地球などの外のシステムに対する非線形性の応答のため非可逆性が強く、時間スケールの長いティッピングエレメントの一つとして知られている (Lenton et al. 2008)。

将来の地球温暖化による海水準上昇が懸念されているが、氷床変動による寄与は不確定性が大きい要素の一つであり、環境変化に対する氷床の典型的な変化の時間スケールが数百から数千年程度と気候システムの中でも長い、ひとたび後退するとどんどん後退が進むメカニズムが存在していて、場所によって関わるプロセスや後退の条件や速度も違ってくる。

グリーンランド氷床は、産業化前比で夏の気温が 2 度くらい上昇するとほとんど消えてし

まい、一度融解すると気温を 1.5 度くらい低くしないと元に戻らない。

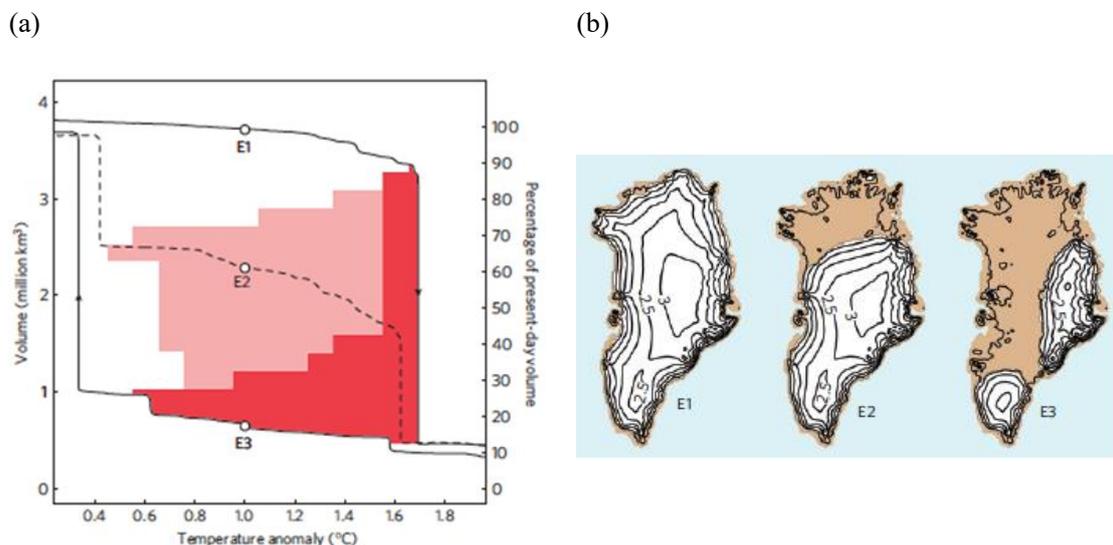


図 3-2-1-③\_1 (a) 夏のグリーンランド地域の気温変化に対する体積の応答。各温度状態に対して 3 種類の平衡解が存在する。(b) (a) の図の 3 種類の平衡解の代表として E1、E2、E3 の状態のときの平衡氷床形状を示す。ピンク色の範囲の氷床は、E2 のような中くらいの大きさの氷床に最終的になり、赤色の範囲の氷床は E3 のようなほとんど氷床のない状態に行き着く。グリーンランドは東に山脈が存在するので最後まで山の上に氷床が残ってこのような分布になる。

氷床の非可逆性に影響を及ぼす要素の一つが、大陸の上の (大陸性) 氷床の縁辺での融解の性質である。融解量は気温が高いほど大きく、概ね標高が低いほど融解量が大きく、という関係にある。従って氷床の融解が増え、氷厚が減少、標高が低くなりさらに融解が増加、という変化が増幅される構造となっている。氷床領域変化にともなうアルベドの変化も同様の性質を持つ。融解が増加することにより氷よりアルベドの低い地面となり、結果的に気温上昇、融解増加という効果になる。これは、かつて氷期に欧米を覆った北半球の氷床や現存するグリーンランド氷床の非可逆性にとって重要な性質である。Robinson et al. (2012) は気候・氷床結合モデルを用いてグリーンランド氷床が全融解に進むために必要な温度上昇を産業化以前と比べて 1.6 度 (0.8~3.2 度の範囲) と推定した。図 3-2-1-③\_1 は、E1 のような大きな氷床の状態から出発した場合、グリーンランドの夏の気温が 1.6 度以上上昇すると限界 (ティッピング) に達したごとく氷床は後退してしまい、いったん E3 のような小さい氷床から出発した場合は、グリーンランドの夏の気温偏差が 0.4 度以下にならないと、元の E1 のような氷床にならないことを示している。全融解にかかる時間は、ティッピングポイントをわずかに超える程度 (2 度付近) では数万年に達するが、4 度以上上昇の場合は数千年程度となる。

西南極氷床など海洋に着床した氷床では、温暖化すると海洋による融解で棚氷が解けて内陸氷床からの大規模な流動が起こって後退が一気にすすむというメカニズムがあるが、十

分に説明されていない。

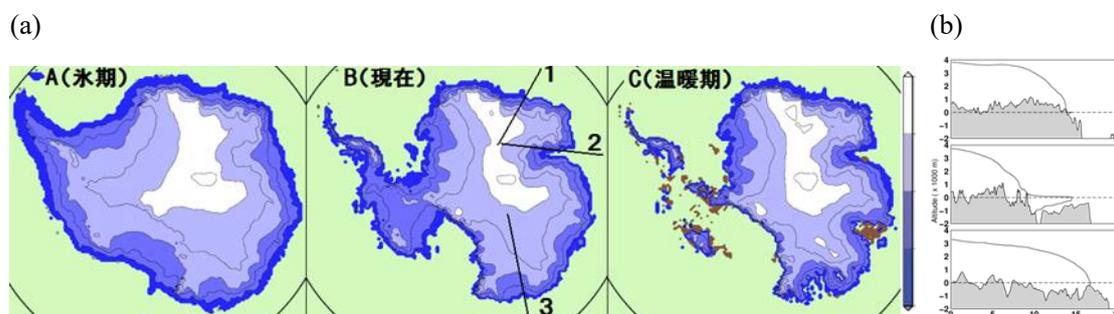


図 3-2-1-③\_2 (a) 南極氷床の A 氷期、B 現在、C 温暖期のモデル計算結果。C のように温暖になると西南極 (図の左の部分) 全体や東南極の一部 (図の下部分) が後退し、基盤は海面下になると予想される。(b) 現在の B の図の 1、2、3 の断面を上から下に示す。1 は比較的基盤が高く氷床が融けたら高原状の基盤地形になるが、2 や 3 は、海面下か海面すれすれに位置していて、海洋氷床相互作用による非可逆的な後退が起こりやすい。

西南極氷床は現在氷床下の基盤高度が海水準以下であり、また、たとえ氷床が消失し荷重が小さくなっても基盤高度は海水準よりはるかに下にあり、「海洋性氷床」と分類される。このような海洋性氷床では、氷床の非可逆性に影響を及ぼす要素としては、海洋に着床している (海洋性) 氷床と棚氷系の流動の性質によるものが重要である。氷床の接地線 (grounding line) とは着床領域と棚氷の境界、内陸から流動した氷が浮力に負けて浮きはじめるところである。氷の流動の性質は接地線を境に大きく異なる。着床した領域は氷底面と地面境界に生じる抵抗力で速度がある程度小さく保たれているが、棚氷では氷底面と海の境界に抵抗力はほとんどなく、流動速度が数十倍、百倍程度まで大きくなる。この速度の極端な変化は接地線付近のごく狭い領域 (氷厚の数倍程度の水平距離) でおこる、局所的な現象である。氷床変動は海水準変動への寄与という観点で考えられることが多いが、このためには氷厚の変化だけでなく、着床した領域の変化、すなわち接地線の変化を精度よく再現することが重要である。氷床は中心部に向かうほど厚いため、アイソスタシー (地殻均衡) の関係で基盤の地形は逆に中心部に向かうほど深くなっていることがほとんどである (アイソスタシーとは地殻への荷重と浮力の釣り合いのことであり、一般に氷床の荷重が増える (氷が厚くなる) とそれに応じて地殻が沈む)。そのため、ひとたび海洋性氷床の接地線が後退を始めると海水が基盤の深みに入ってたちまち浮力で氷床を押し上げ棚氷の早い流動で一気に氷が流出して後退がどんどん進むということが考えられる。接地線は棚氷側面からの力、内陸からの力などの微妙な釣り合いでその位置が保たれているため、接地線位置での僅かな変動が、はるか内陸までの急激な後退を引きおこし、一度後退すると、成長までには長い時間がかかる (Schoof, 2007)。地球温暖化で海洋の温度が上昇すると棚氷の下の海洋は棚氷や接地線を解けやすくしてしまうので、棚氷の厚さが変化することで力の均衡が崩れ、内陸からの大規模な流動を引きおこす。このため、海洋氷床性の後退が一気に進みやすいのだ。ただし、この後退にかかる時間がどのくらいであるかを予測するにはまだわから

ないことが多い。このような海洋氷床間の相互作用は現在もっとも注目されている過程であり、観測とモデリング研究の連携が急務となっている。

#### ④ 海面上昇への影響

将来的に臨界点を持つと考えられるティッピングエレメントのうち、海面上昇へ影響があるとされているものはグリーンランド氷床、西南極氷床、大西洋熱塩循環である。その中でも、将来特にその影響が顕著となると考えられているグリーンランド氷床と西南極氷床について、以下にその詳細を述べる。

グリーンランド氷床の融解は、ひとたび気温がティッピングポイントを超えると、標高と気温に対するセルフフィードバックと陸面露出による反射能の減少により、不可逆となると考えられている (Ridley et al., 2010、Robinson et al., 2012、Solgaard and Langen, 2012)。その融解が始まるティッピングポイントは、0.9-4.6°C の全球平均気温上昇 (産業化以前比) と予測されており (Gregory and Huybrechts, 2006、Rae et al., 2012、Fettweis et al., 2013、Robinson et al., 2012)、この気温を超えるとグリーンランド氷床は数百から数千年規模で融解を続け、最終的には 7.2m 全球平均海面上昇相当量の氷を失う (Church et al., 2010)。

一方、西南極氷床は、海面下に存在する部分の氷が比較的温かい海水により削られ、氷の接地面が内陸へ後退していくことでより不安定となり、崩壊が急速かつ不可逆的に進むと考えられている (Oppenheimer and Alley, 2004、Joughine et al., 2014、Rignot et al., 2014、Feldmann and Levermann, 2015)。その崩壊が始まるティッピングポイントは 3-5°C の全球平均気温上昇 (1980-1999 年平均比) (Lenton et al., 2008) と言われており、西南極氷床が完全に崩壊した場合、3.3-6.0m の全球平均海面上昇を生じる (Alley and Whillans, 1991、Lythe et al., 2001、Bamber et al., 2009)。

以上のような氷床のティッピングポイント超過による長期タイムスケールの海面上昇は、潮汐や低気圧により生じる短期タイムスケールの海面上昇、河口域の水位を底上げし続け、極端現象の生起確立を上昇させてしまうと考えられる (Nicholls et al., 2011)。