

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・GDP の推計は、社会経済活動が今後の地球環境に及ぼしうる影響を予測するとともに気候変動に適応した持続可能な発展を検討する上で重要となる。実際に、国際研究コミュニティにおいては、持続可能社会（SSP1）、中庸の道（SSP2）、分断化社会（SSP3）といったあり得べき複数の社会経済シナリオを想定し、今後の気候変動が各シナリオ下で及ぼしうる影響を詳細に分析している。しかしながら、こういった将来シナリオの開発にあたっては、全球を対象地域とすることが優先され、通常、国別あるいは世界を数地域に分割した地域別での定量化が行われる。従って、例えば都市や地域のようなローカルなスケールでの議論にそれらを活用することは必ずしも容易ではない。

そこで、国別の将来人口・GDP シナリオ（SSP1～3；2100 年まで）を空間詳細化（ダウンスケール）することで 0.5 度グリッド別のシナリオを推計した。ダウンスケールは次の手順で実施した：(i) 各国内における各都市の人口成長シェアが一定という仮定の下で 2100 年までの都市別の将来人口を推計する；(ii) (i)で得られた都市別の将来人口に加えて都市領域（2002 年；出典：MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)) と都市領域（2009 年；出典：Natural Earth (<http://www.naturalearthdata.com/>)) を各グリッドの重みとして与えた上で、国別の将来人口・GDP をグリッド別に配分する。(ii)では通常の比例配分と空間統計モデルによる配分を各々適用した上で両結果を平均化した。(i)で得られた都市別人口は図 3-1-1-①-a_1 に例示する通りである。この図より、例えば我が国における郊外部の都市人口減少などが捉えられていることが確認できる。

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。図 3-1-1-①-a_4 より、中央アフリカの主要都市周辺における人口集中傾向が確認できる。この傾向は、非グローバル化シナリオである SSP3 で特に顕著であった。また SSP1 ではヨーロッパの主要都市周辺においても顕著な人口集中がみられた。これは、グローバル化に伴って同主要都市の重要性が増すためと考えられる。対照的に、既に人口が過密であるインドでは全域で比較的均一な人口成長がみられた。加えて北米や南米のような人口分布の変化が小さい地域もみられた。こうした各国内の人口成長パターン（均一化や主要都市への人口集中など）を捉えることができる点はダウンスケールを用いることの利点の一つといえよう。

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。図 3-1-1-①-a_6 より、全球的な経済成長が今後見込まれていることが確認できる。1980～2000 年において最も経

済水準の高いヨーロッパ諸国と同水準の経済発展がアジア諸国の広い範囲で見込まれている点は興味深い。GDP シナリオ間の差異は、人口シナリオ間の差異に比べて大きい。例えば SSP1 では、グローバル化の結果としてアジア／アフリカ諸国が特に急激に経済成長しているが、非グローバル化シナリオである SSP3 においてこの傾向は小さい。また、人口とは対照的に、主要都市周辺への GDP の集中はみらなかった。むしろ、GDP は主要都市の間の空隙地域でも大きく成長しており（例えば SSP1 のアメリカ合衆国内）、今後、各国内の経済活動が広域化するとの示唆を得た。

このように人口や GDP の空間分布はシナリオに応じて大きく変化しうる。従って、今後現実化した未来がどのシナリオに近いかを見極めながら、気候変動に柔軟に適応していくことが必要となる。特に、人口と GDP の両方の急激な成長が見込まれるアジア諸国においてこの点は重要といえよう。

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。

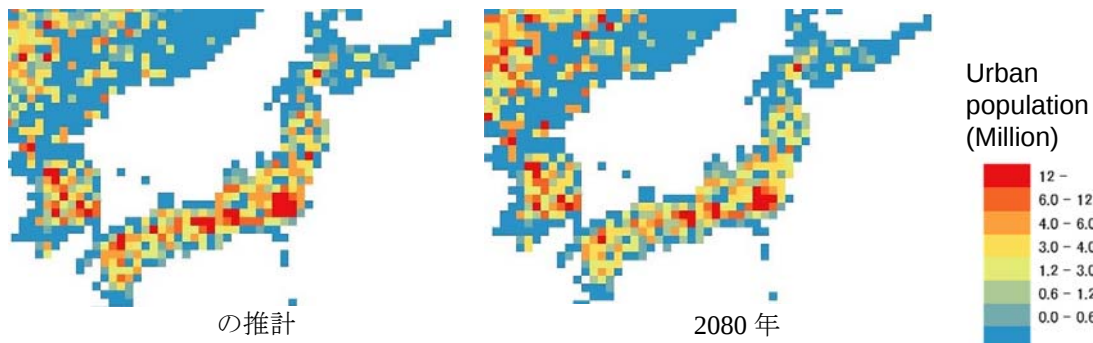


図 3-1-1-①-a_1：都市別人口(グリッド別集計後)

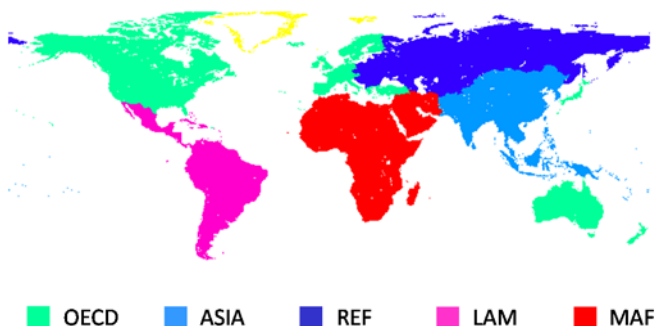


図 3-1-1-①-a_2 SSP シナリオの世界 5 地域区分（3 章～5 章の影響・対策評価における世界 5 地域区分も同じ 5 地域区分を用いている。）

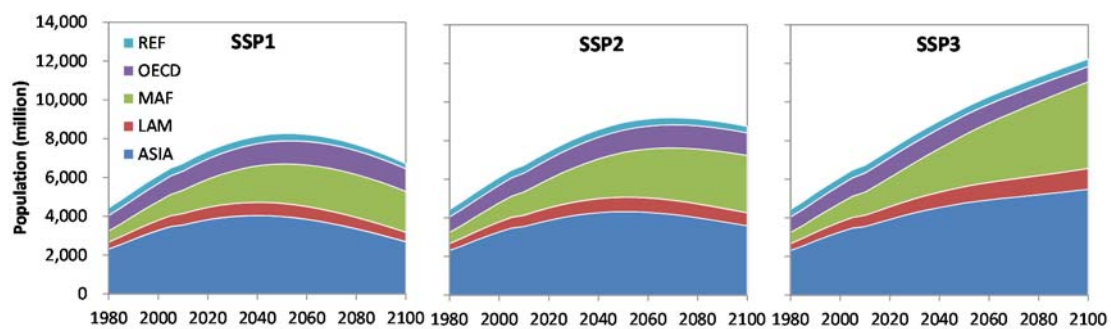


図 3-1-1-①-a_3 : SSP 地域別人口シナリオ
(SSP Database Version 0.9.3, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)

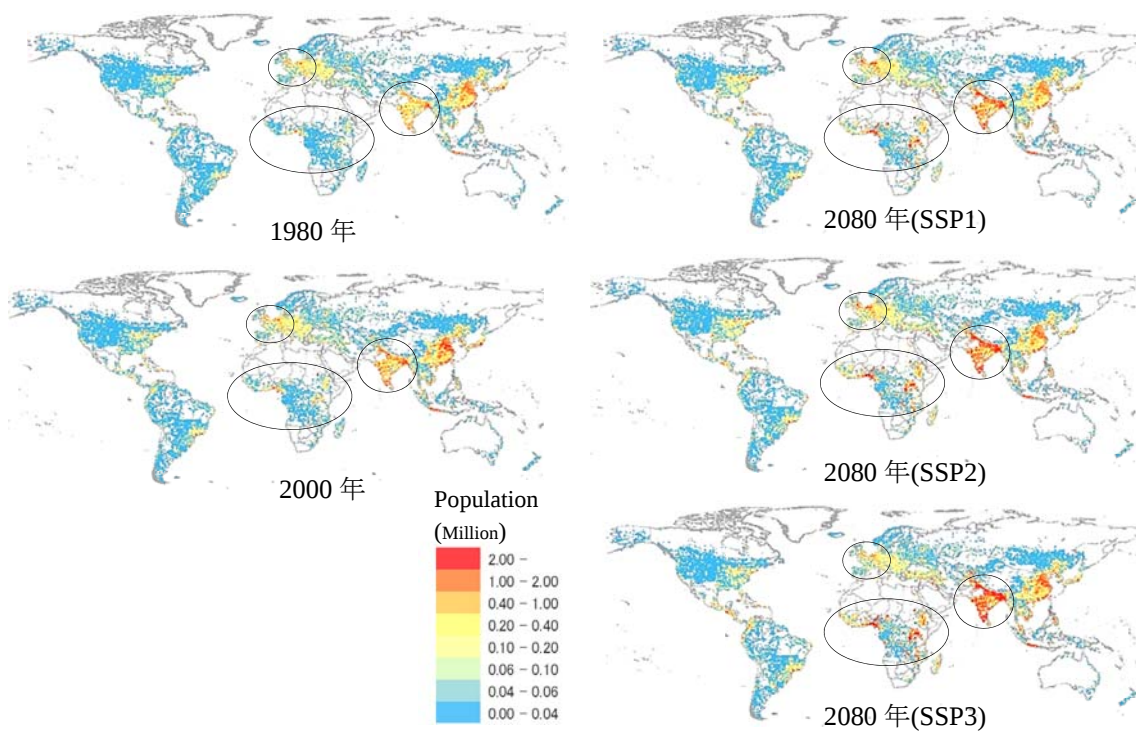


図 3-1-1-①-a_4 : 人口シナリオ

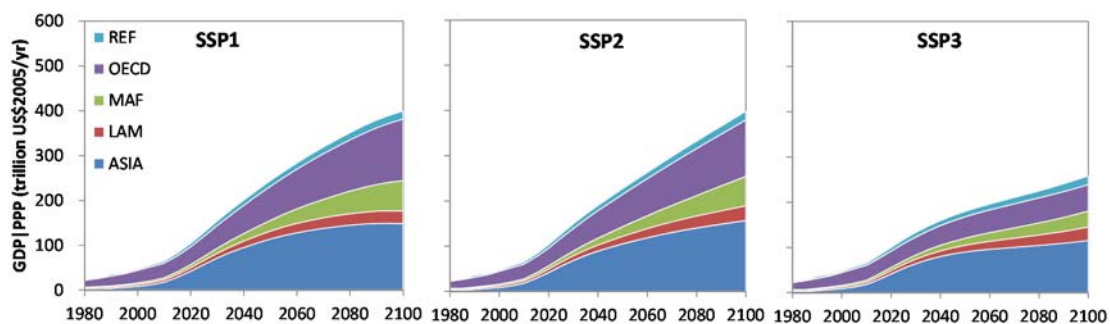


図 3-1-1-①-a_5 : 地域別 GDP シナリオの推計
(SSP Database Version 0.9.3, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)

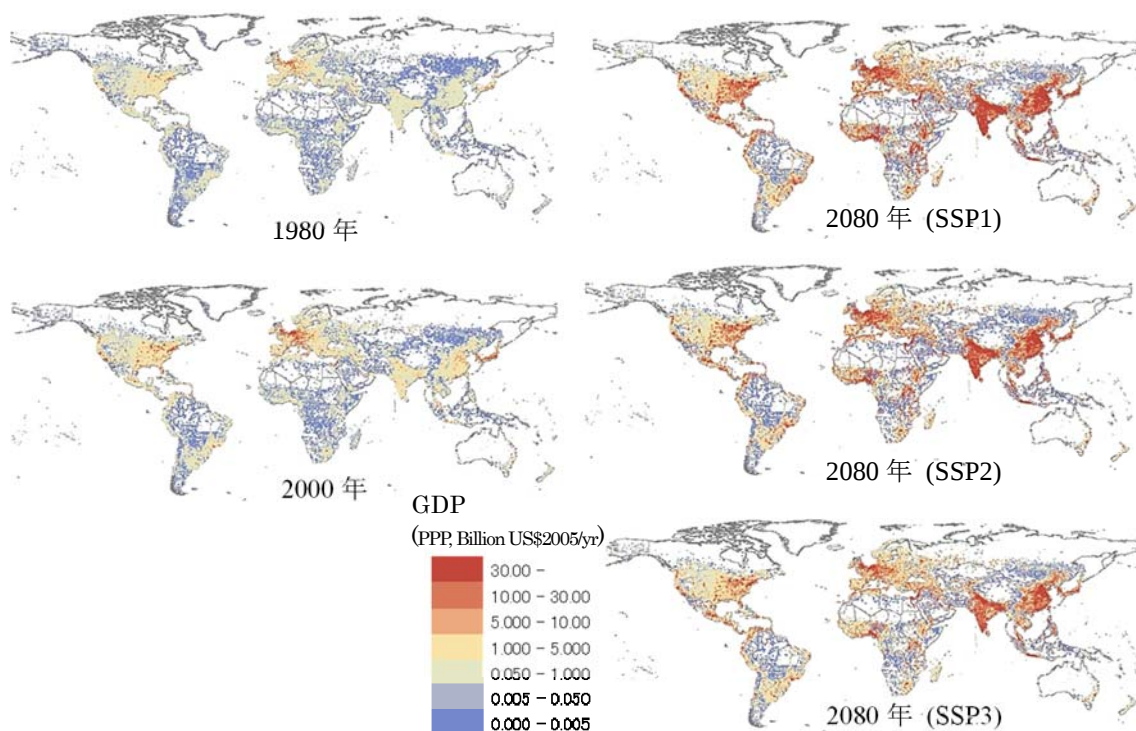


図 3-1-1-①-a_6 : GDP シナリオの推計結果

b.土地利用のダウンスケーリング

土地利用は、食料・繊維・木材・エネルギー等の生産要素として社会・経済と密接な関係にある重要な要素である。特に食料に関しては、20 世紀から常に人類を養いうる供給が可能なのかの議論がなされており、この問いに対する解答は見つかっていない。人口の増加と気候変動により、土地の有限性が社会・経済の制限要因となることも考えられる。また、食料増産などを目的とした開発、土地利用変化は、植生の変化を伴うだけでなく、施肥や灌漑など地球環境を考える上で重要な窒素や水の循環に影響を与えると同時に、地表のアルベドの変化や、土地利用および土地利用変化に伴うエアロゾル等発生により気候への影響も及ぼす。一方で、食料等の植物由来の生産は気候変動の影響を強く受ける。この

ように、土地利用・土地利用変化は気候変動の問題を考える上で重要な要素であり、これまで国や、国より広域な地域に集約した形で土地利用の予測が行われてきた。しかし、気候変動の影響を受ける農業気象の観点からみても、社会・経済変化の影響を受ける農業経営的な観点からみても、農地利用を想定した生産要素としての重要性については、国内の格差が小さくない。ましてや、国よりも大きい地域では、その地域内における格差が無視出来ない。そのために、国や地域の集計値としてではなく、より詳細な空間スケールでの土地利用・土地利用変化を考える必要がある。さらに、土地利用が気候変動に与える影響や、気候変動から受ける影響を考える上では、その変化が他の社会的要因よりも緩やかであるため、長期の検討が必要である。長期の土地利用・土地利用変化を検討するためには、グローバル化が進み、食料や木材等の資源がさかんに輸出入される 21 世紀においては、地域別に切り離して扱うのではなく、全世界を同時に対象とする必要がある。気候変動と土地利用と社会経済の関係を検討するためには、空間詳細化とグローバル化の双方の要件をみたす必要がある。現在の技術では、空間詳細なレベルからの積み上げによって全世界（全球）の土地利用を予測することは様々な要因により困難である。そこで、全球レベルの土地利用予測と、土地利用ダウンスケールを組み合わせることにより、空間詳細な土地利用シナリオを作成するアプローチが選ばれる。その中でも農地の分布が最も重要な要素となる。

全球を対象とした国・地域別の土地利用予測モデルと、空間詳細化を行う土地利用ダウンスケールモデルは密接に関連したものでなければならない。この二つのモデルが異なる前提のもとで構築されているならば、二つのモデルで何らかの要素（例えば食料価格や生産量など）に矛盾をきたすことになるためである。このような矛盾が大きくなると、現実性を欠いた結果となる。そこで、次のような仮定をおいて二つのモデルを構築した。まず、ダウンスケールにあたって、食料等の価格や、所得などは国の中で一定とした。つまり、ダウンスケールモデルでは国・地域別の土地利用予測モデルで推定された国・地域別値を用いる。次に農地の供給に関しては空間詳細な要素（穀物反収や傾斜など）をもとに推定を行うことである。予測モデルでは国・地域別の土地利用情報の他に、国別の人口・GDP、作物モデルによるメッシュの穀物収量、GTOPO30 による緯度経度 30 秒メッシュの傾斜の情報を用いて農地面積の予測を行う。またダウンスケールモデルは農地の供給に関する情報を元にダウンスケールを行う。これにより、予測モデルの前提とダウンスケールモデルの前提を一致させることができ、空間詳細な土地利用シナリオに矛盾をきたしにくいものとなる。

SSP2 における農地の分布を図 3-1-1-①-b_1 に示す。本モデルでは、空間詳細なデータを用いたダウンスケールによって土地利用シナリオを作成するため、国・地域内での差が示されている。この結果は、AIM モデルによる世界 17 地域の土地利用予測をダウンスケールリングして得られたものである。AIM モデルではアメリカや EU、CIS が一つの地域となるが、各地域の中でも農地としての利用が増加する場所と減少する場所があることがわかる。

いずれの地域も、農地としての利用率が高い場所と低い場所の差が大きくなる傾向が見て取れる。一方、地域間の比較では、増加する食料需要にともない穀物の価格は上昇するが、それ以上に所得が上昇する国としない国とで違いがでる。先進国は総じて穀物価格の上昇が大きいため、農地としての利用が拡大する傾向が見られる。インドなどは所得の向上が大きいため、農地としての利用が減少する結果となった。このことは、土地利用の主要因の一つには貿易があることが示唆された。

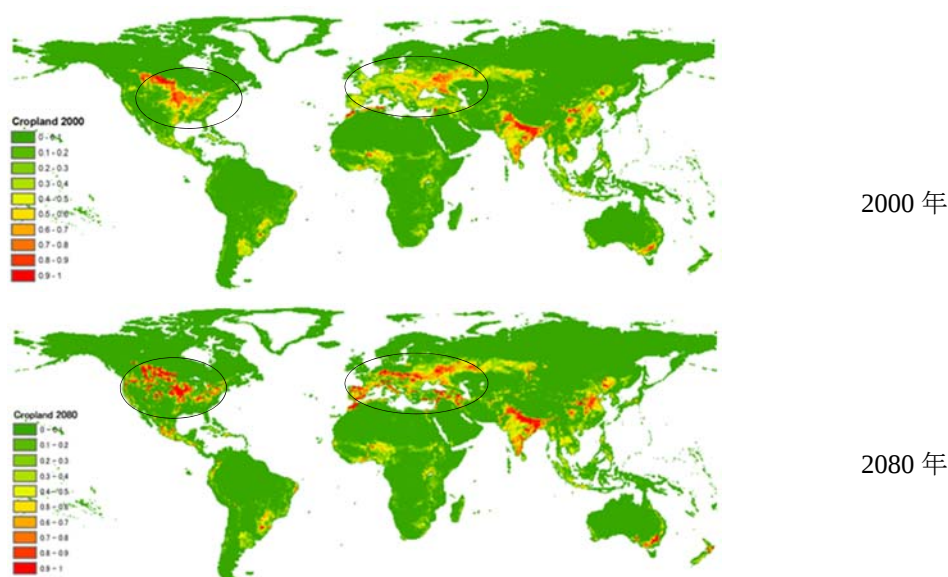


図 3-1-1-①-b_1：土地利用シナリオの推計結果(農地の割合：SSP2)

なお、このようなして作成された土地利用シナリオは、農業被害のリスク分析にあたっては、作物別収量に農地面積を掛け合わせて作物別生産量を計算するために用いられた。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>

世界人口の増加と食肉需要の増加、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、直近の 20 年間（1989－2008 年）に達成できた主要作物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ）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 경우가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、コムギ、ダイズについて、生産性と主要生産国での同時不作確率の将来変化について検討を行った。

<評価方法>

まず、全球で過去の作物生産性のデータベースを構築し、そのデータに基づいて作物生産性環境応答モデルのパラメータ値を推定した。そのうえで、気候と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。さらに推計した収量に基づいて将来の同時不作確率を推計した。なお推計は、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（3 シナリオ：SSP 1、2、3）に関する 60 ケースについて実施した。

生産性データベースでは、国連食糧農業機関（FAO）の国別生産性統計値と衛星観測（NOAA/AVHRR）から得られた純一次生産量、栽培地域分布、栽培暦を組み合わせ推定され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）について利用可能である。このデータベースを用いて、広域作物生産性環境応答モデル（PRYSBI-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、3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 と灌漑設備率などと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。

さらにメッシュ収量推計値から集計した国平均生産性の時系列について、同じ期間の複数の時系列間の同期関係をカーネルコピュラにより記述し、主要 5 ヶ国国間での収量時系列の同時不作確率を現在と将来について推定した。生産性や生産量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。

<指標の一覧>

1. 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。また、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の向上に頼らざるを得ない。こうした理由から重要な指標。
2. 同時不作確率：対象作物の主要生産国 5 ヶ国で国平均収量が同じ収穫年に平年収量よりも減少する確率を示す。食料価格の高騰に関連する指標。

a-1. 生産性

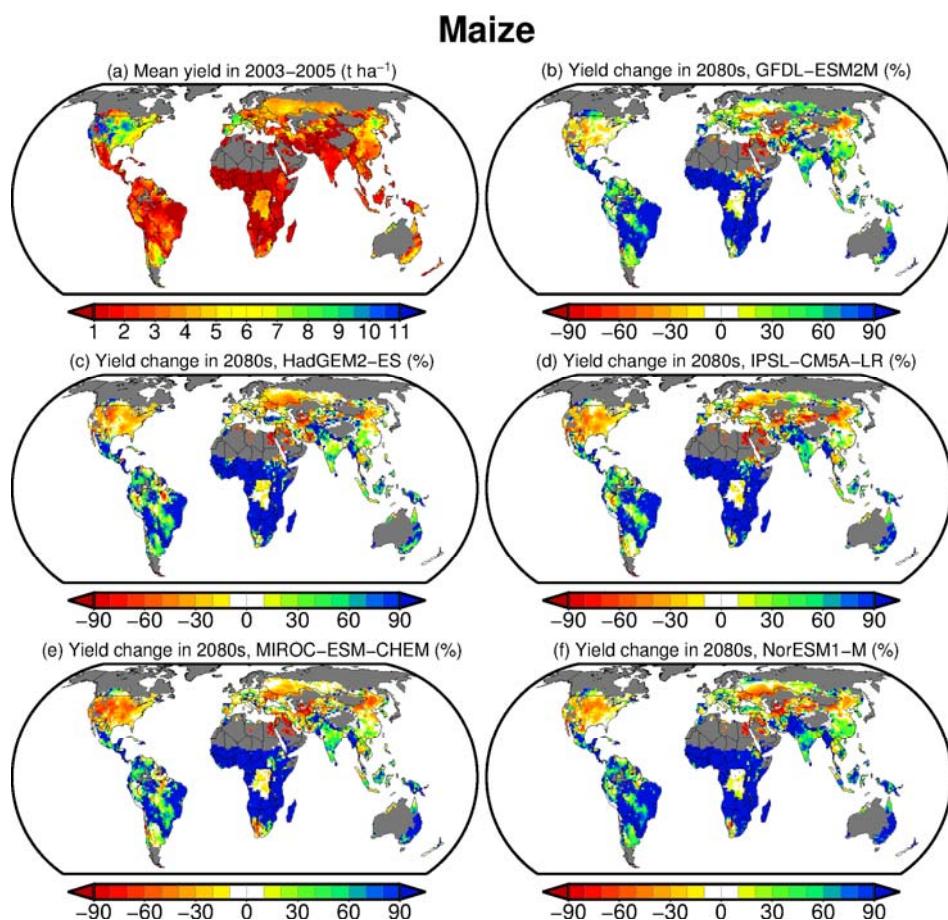


図 3・1・1・②・a_1 (a) 現在 (2003–2005) のトウモロコシ生産性の平均値。(b–f) RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代頃 (2070–2099 年) における (a) に対する生産性変化。生産性は技術発展により顕著に増加しているため、長期間 (例：1981–2000) の平均値ではなく、直近 3 年間の平均値を基準値として使用した。灰色の地域は現在、ほとんど作物が栽培されていない地域。

Rice

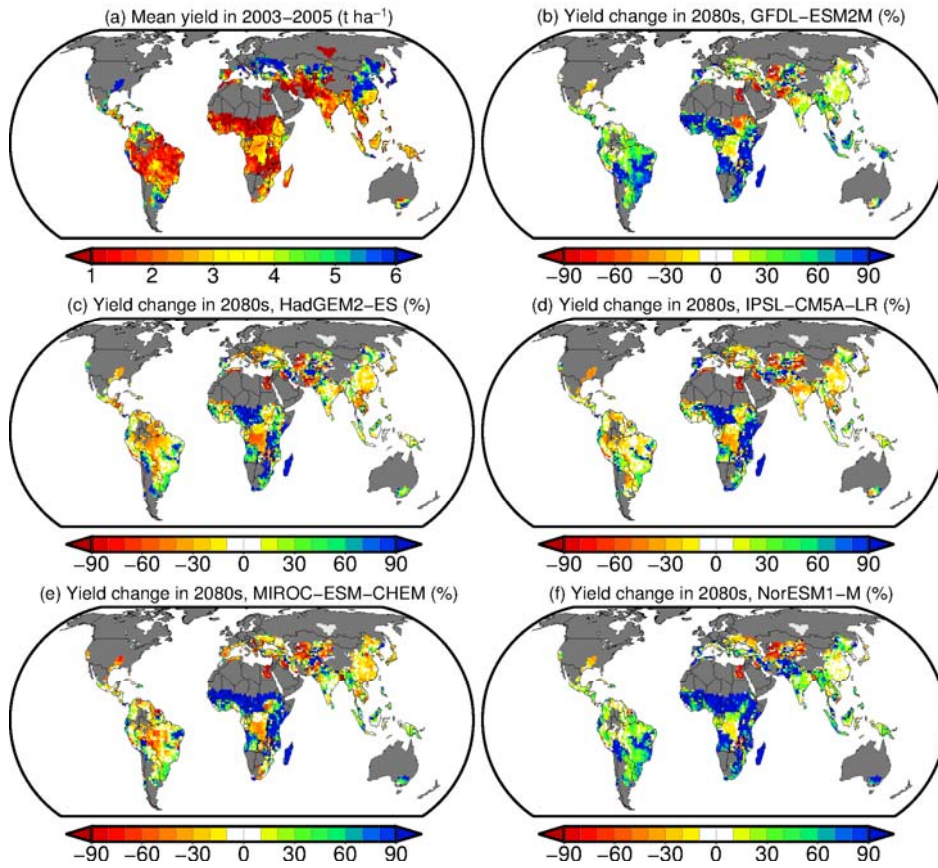


図 3-1-1-②-a_2 (a) 現在 (2003–2005) のコメ生産性の平均値。(b–f) RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代頃 (2070–2099 年) における (a) に対する生産性変化。

Wheat

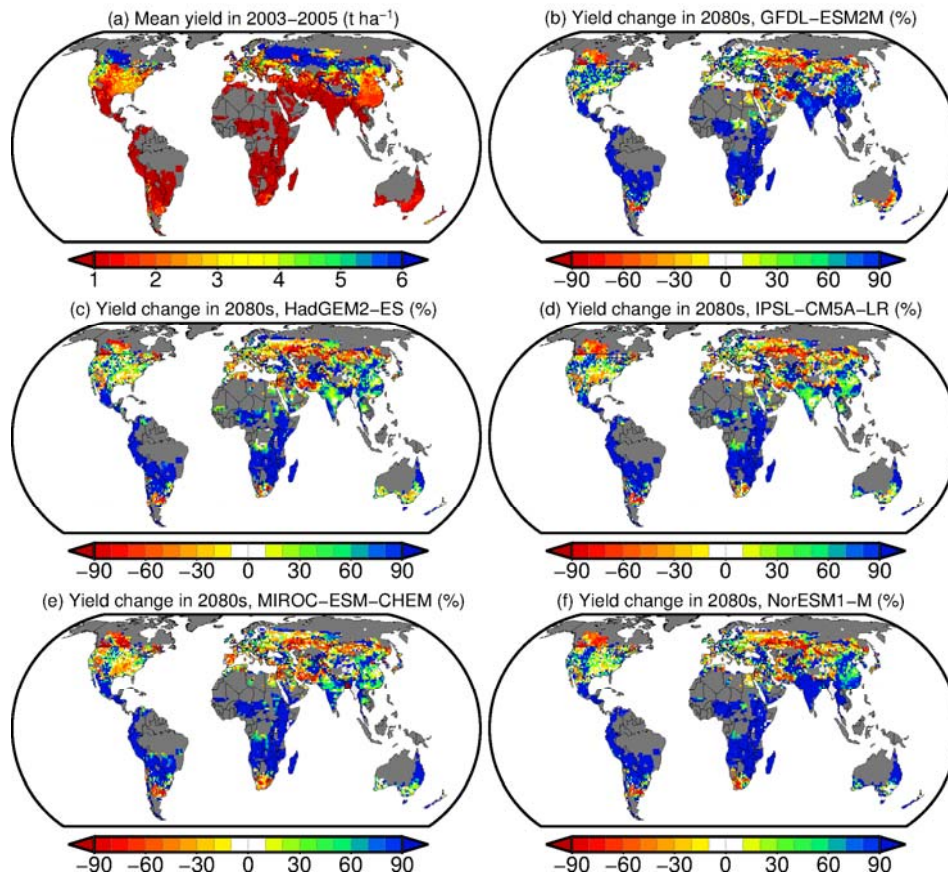


図 3-1-1-②-a_3 (a) 現在 (2003-2005) のコムギ生産性の平均値。(b-f) RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代頃 (2070-2099 年) における (a) に対する生産性変化。

Soybean

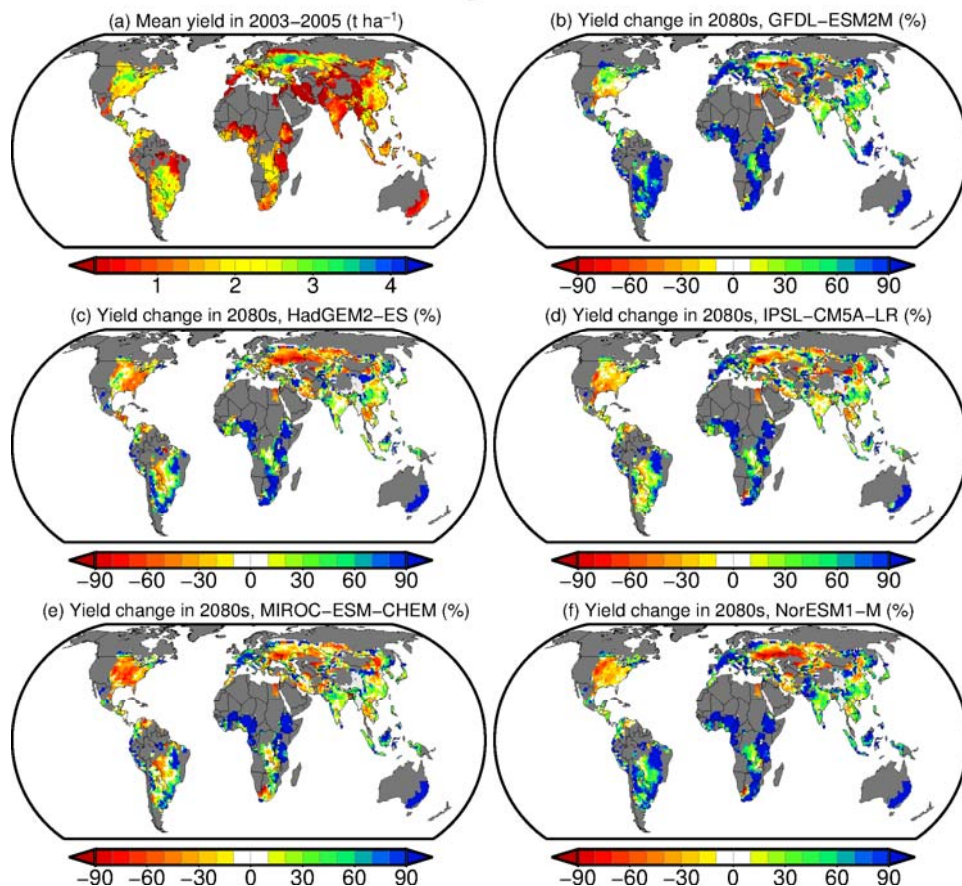


図 3・1・1-②-a_4 (a) 現在 (2003-2005) のダイズ生産性の平均値。(b-f) RCP8.5 および SSP2 シナリオ下での 2080 年代頃 (2070-2099 年) における (a) に対する生産性変化。

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。

現在、いずれの作物でも生産性は先進国ないしは中・高緯度で高い傾向にある (図 3・1・1-②-a_1、図 3・1・1-②-a_2、図 3・1・1-②-a_3、図 3・1・1-②-a_4)。しかしながら、2080 年代頃の生産性の変化は作物により異なる。RCP8.5/SSP2 シナリオでは、トウモロコシ生産性は米国と東アジア、東欧などで低下するが、南米、アフリカ、南アジア、東南アジア、オーストラリアでは増加が見込まれる (図 3・1・1-②-a_1)。トウモロコシの生産性変化についての気候モデル間の差異は他の作物に比べると小さい。コメ生産性は米国、中央アジアで低下するが、アフリカでは増加する (図 3・1・1-②-a_2)。南米や中国南部、南アジア、中南米については気候モデル間の差異が大きい。コムギ生産性は北米、東欧、中央アジア、南米の南部で低下するが、南米の北部、アフリカなどでは増加する (図 3・1・1-②-a_3)。

しかしながら、オーストラリアや東アジアについては気候モデル間の差異が大きい。ダイズ生産性は米国と東欧で低下し、アフリカやオーストラリアでは増加する（図 3・1・1・②-a_4）。南米やインドについては気候モデル間の差異が大きい。なお、ここでは SSP2 の結果を示したが、SSP1 では開発途上国でより大きな生産性の増加が見られ、SSP3 では SSP1 や 2 よりも相対的に小さな生産性の増加に留まる。生産性変化の空間パターンは SSP 間でほぼ同じである。作物間で程度の差はあるが、いずれの作物でも生産性の増加要因には、まず、大気中の二酸化炭素濃度の上昇による光合成効率の上昇（施肥効果）が挙げられる。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。経済発展による収量増加は現在の開発途上国で相対的に大きい。一方、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、ここで示した生産性への影響は、正と負の両方の影響が反映された結果である。

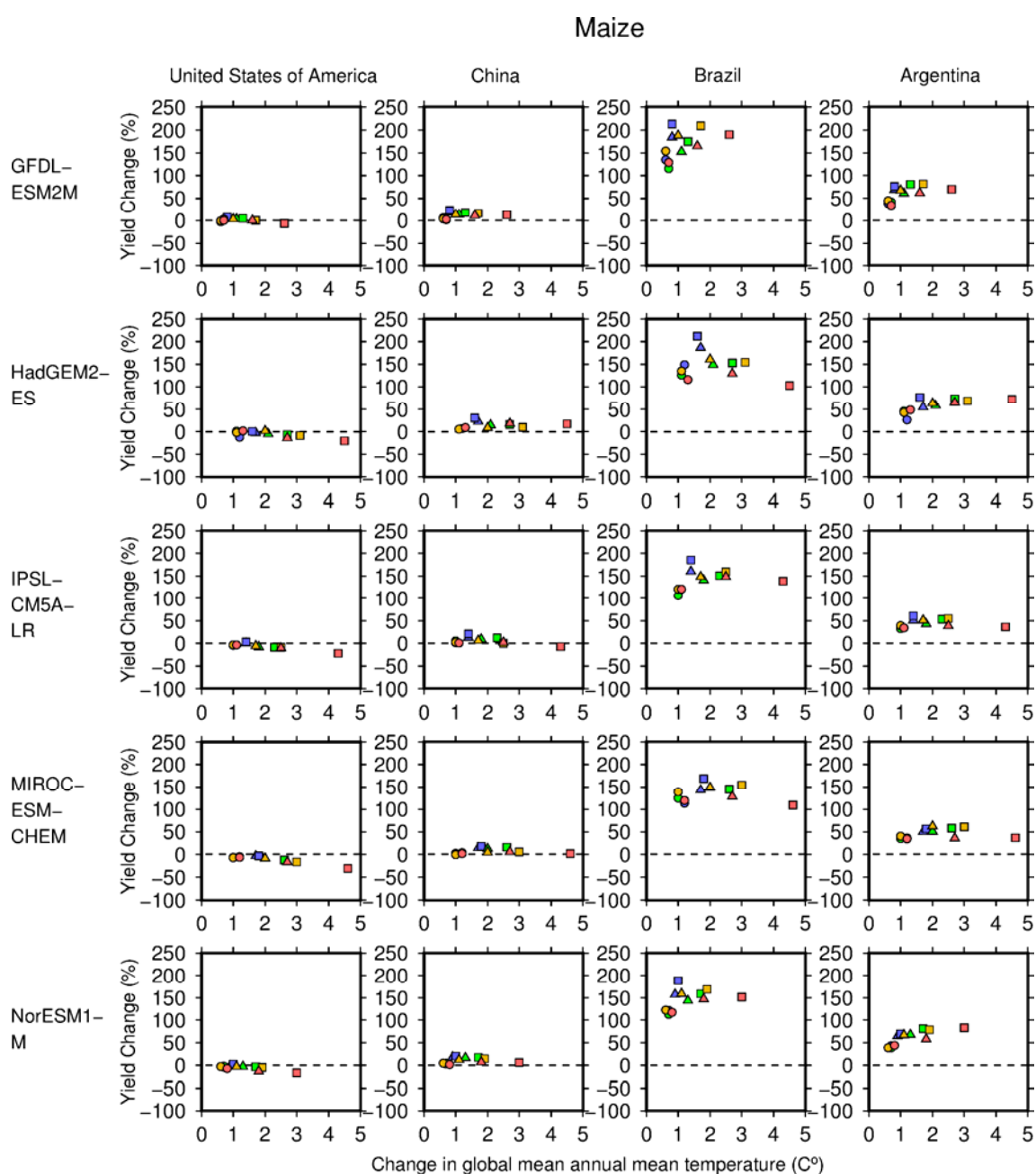


図 3-1-1-②-a_5 主要生産国におけるトウモロコシ生産性の将来変化率と全球平均気温の上昇との関係。全球平均気温は 1981-2000 年に対する各年代（2020s：2010-2039 年、2050s：2040-2069 年、2080s：2070-2099 年）の平均値の差で示している。生産性の変化は 2003-2005 年に対する各年代の平均値の変化割合で示している。シンボルの形は年代（○：2020s、△：2050s、□：2080s）、シンボルの色は排出シナリオ（青：RCP2.6、緑：RCP4.5、オレンジ：RCP6.0、赤：RCP8.5）を示す。

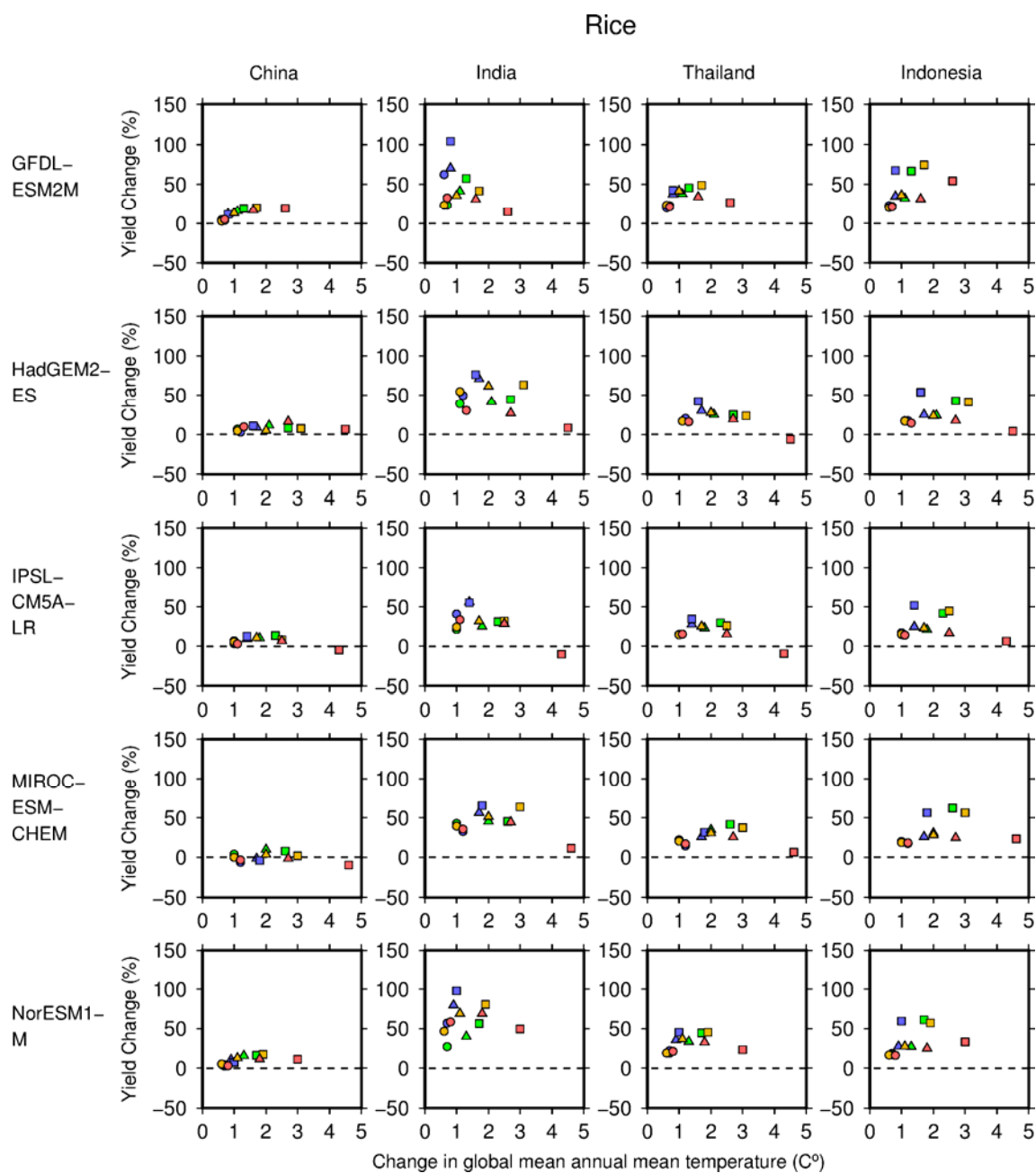


図 3・1・1-②・a_6 主要生産国におけるコメ生産性の将来変化率と全球平均気温の上昇との関係。シンボルの形は年代（○：2020s、△：2050s、□：2080s）、シンボルの色は排出シナリオ（青：RCP2.6、緑：RCP4.5、オレンジ：RCP6.0、赤：RCP8.5）を示す。

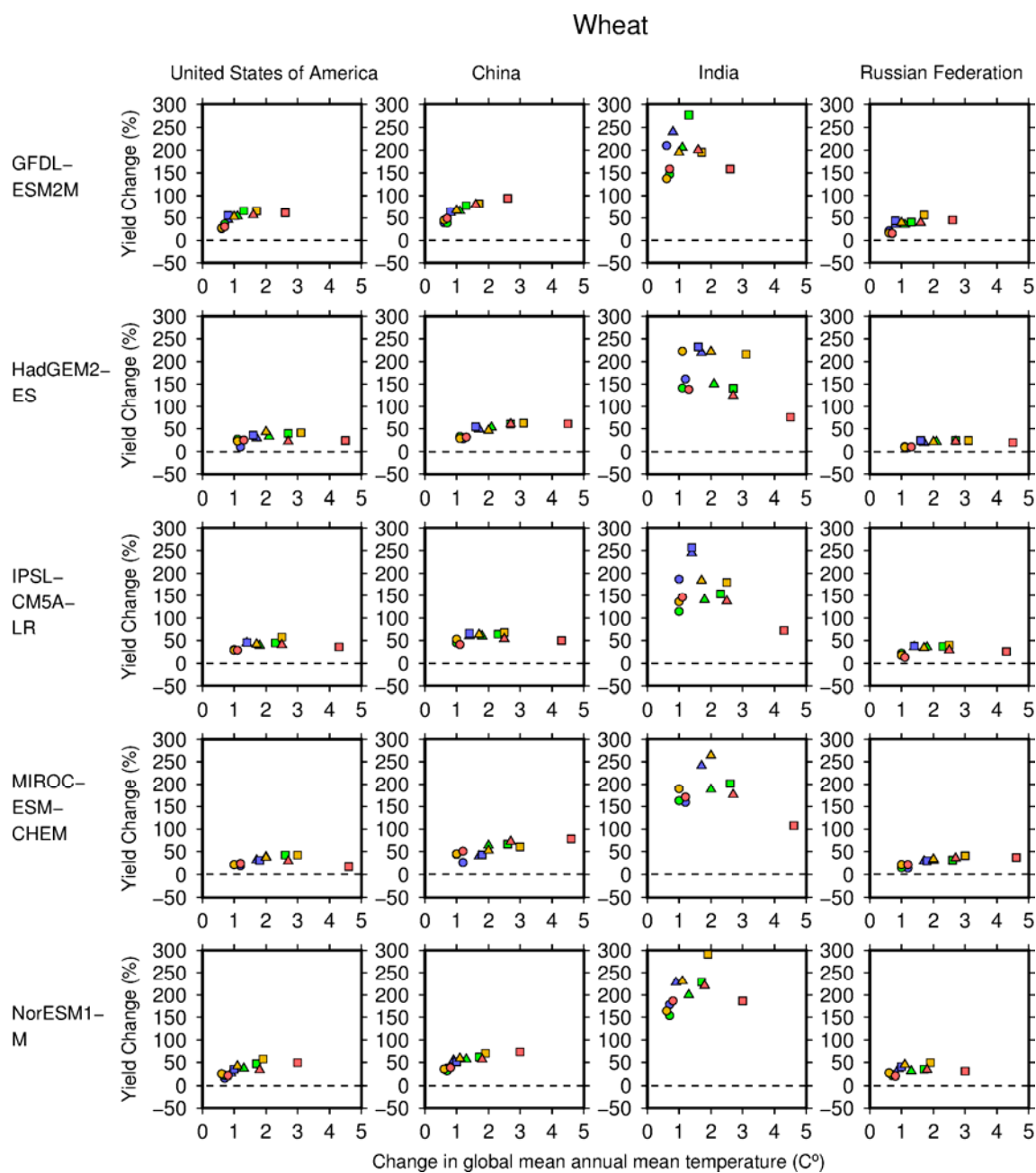


図 3-1-1-②-a_7 主要生産国におけるコムギ生産性の将来変化率と全球平均気温の上昇との関係。地域による春コムギと冬コムギの栽培分布を考慮したうえでの両者の平均を示す。シンボルの形は年代（○：2020s、△：2050s、□：2080s）、シンボルの色は排出シナリオ（青：RCP2.6、緑：RCP4.5、オレンジ：RCP6.0、赤：RCP8.5）を示す。

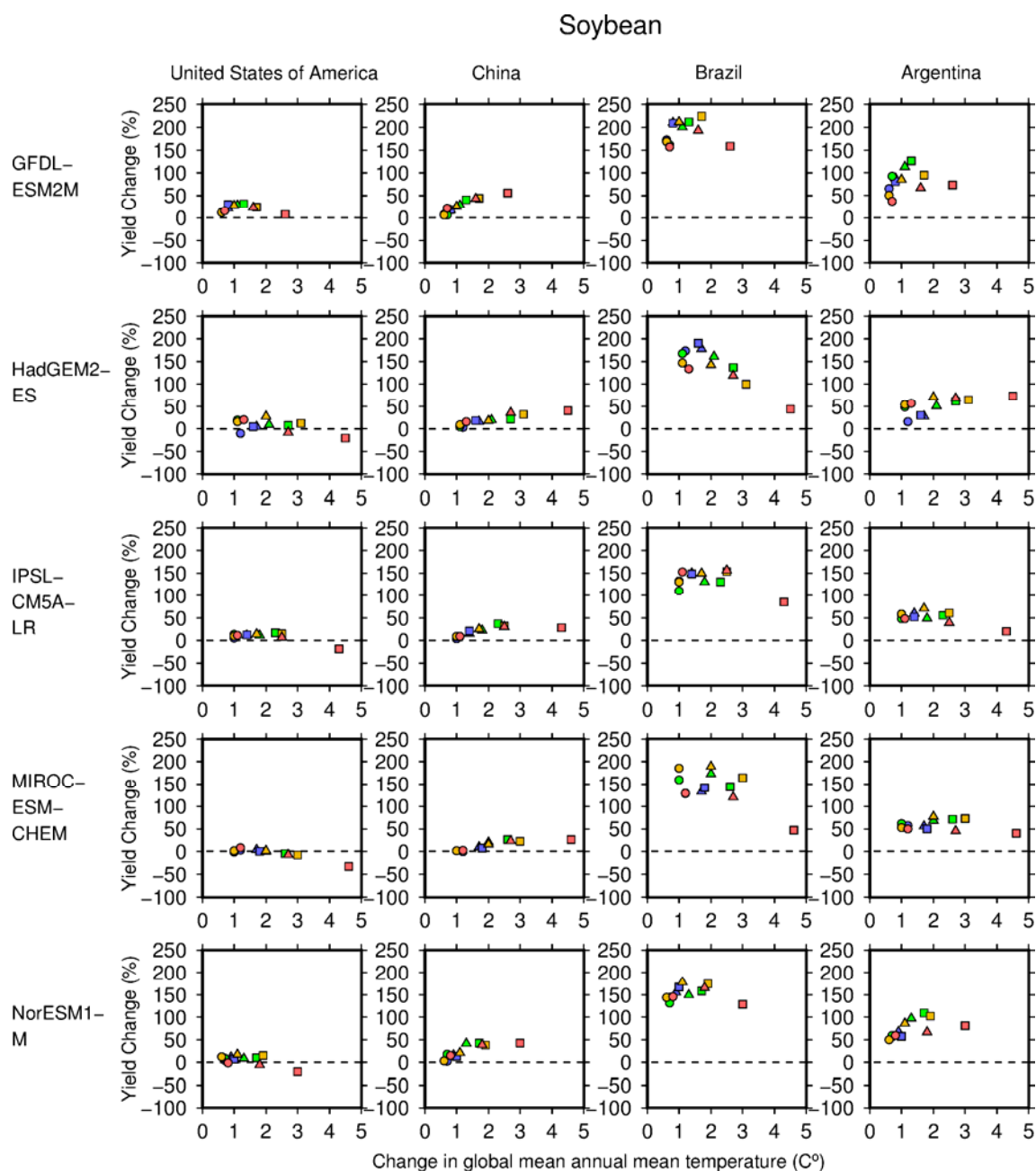


図 3-1-1-②-a_8 主要生産国におけるダイズ生産性の将来変化率と全球平均気温の上昇との関係。シンボルの形は年代（○：2020s、△：2050s、□：2080s）、シンボルの色は排出シナリオ（青：RCP2.6、緑：RCP4.5、オレンジ：RCP6.0、赤：RCP8.5）を示す。

米国などの先進国では、大気中の二酸化炭素濃度の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。中国などの開発途上国では生産性が向上するが、全球平均気温が 3℃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。

増加割合は国により大きく異なるが、図 3・1・1-②-a_5 と図 3・1・1-②-a_8 に示した主要生産国では、トウモロコシとダイズのいずれでも、大気中の二酸化炭素濃度の上昇による施肥効果と技術発展により、生産性は将来、増加する場合が多い。高緯度地域ではわずかな気温上昇であれば、作物生産性には好影響をもたらす場合もある。しかしながら、米国では約 2℃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り、GCM によっては次第に生産性が低下し始める。一方、中国やブラジル、アルゼンチンではどちらの作物も約 3℃までの気温上昇では生産性が増加し、それ以上、気温が上昇すると生産性の伸び率は低下し始めるが、現在に比べれば、なお生産性は高い。これは、先進国では経済発展における技術発展が相対的に緩やかなため、気温上昇の生産性への悪影響を緩和しきれなくなる一方、発展途上国では現在の生産性の水準が相対的に低いために技術革新による生産性が伸びる余地が大きく、より大きな気温上昇の悪影響を相殺できるためである。トウモロコシとダイズとやや異なり、米国のコメやコムギは 1～2℃の気温上昇までは生産性が向上し、それ以上の気温上昇で生産性が低下する傾向が見られる（図 3・1・1-②-a_6、図 3・1・1-②-a_7）。

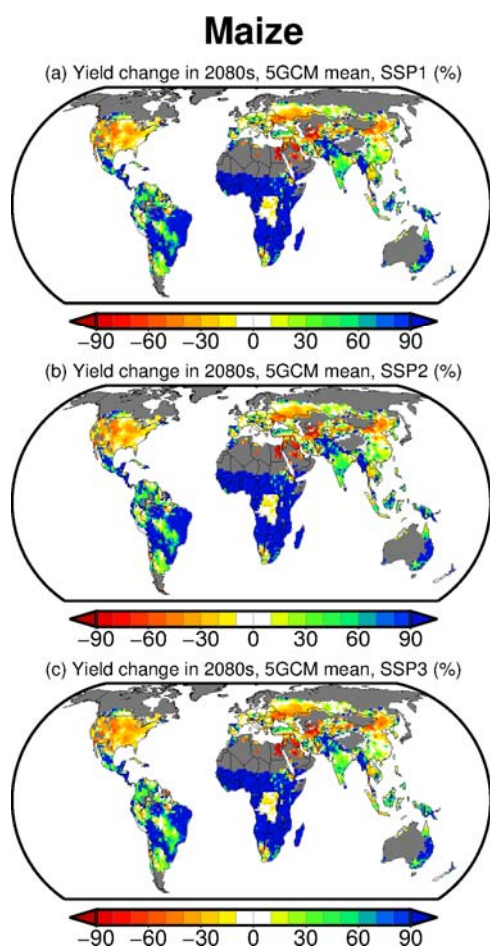


図 3・1・1-②-a_9 現在（2003－2005）のトウモロコシ生産性に対する、2080 年代頃（2070－2099 年）の RCP8.5 における 5 つの GCM に基づく生産性変化割合の平均値。(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3。

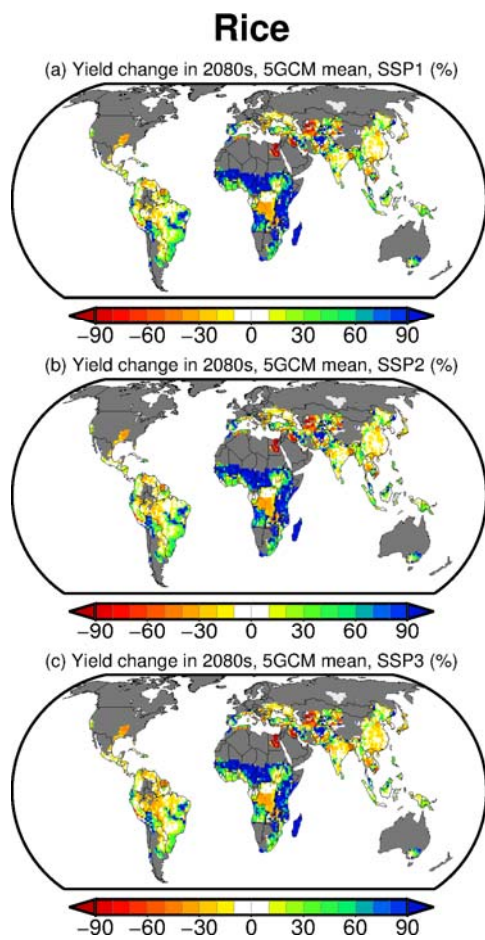


図 3・1・1・②-a_10 現在（2003－2005）の
 コメ生産性に対する、2080年代頃（2070－2099
 年）の RCP8.5 における 5 つの GCM に基づく
 生産性変化割合の平均値。(a) SSP1、(b) SSP2、
 (c) SSP3。

Wheat

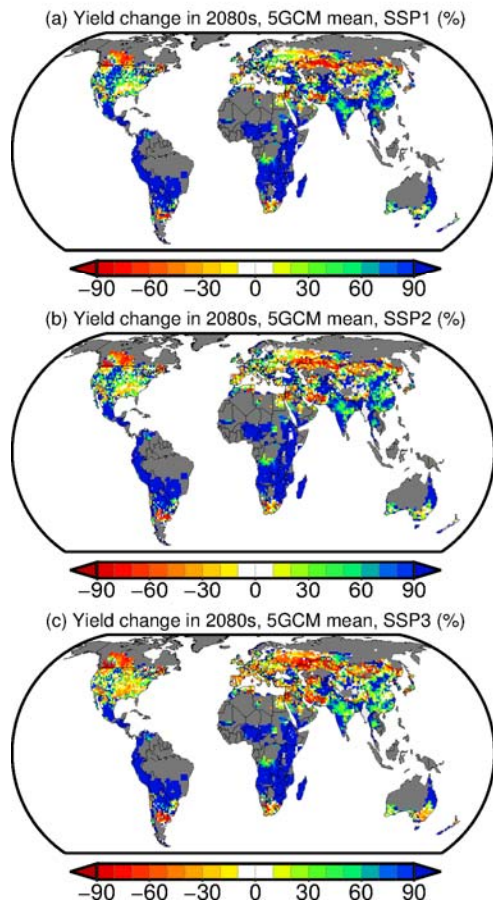


図 3-1-1-②-a_11 現在 (2003-2005) のコムギ生産性に対する、2080年代頃 (2070-2099年) の RCP8.5 における 5つの GCM に基づく生産性変化割合の平均値。(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3。

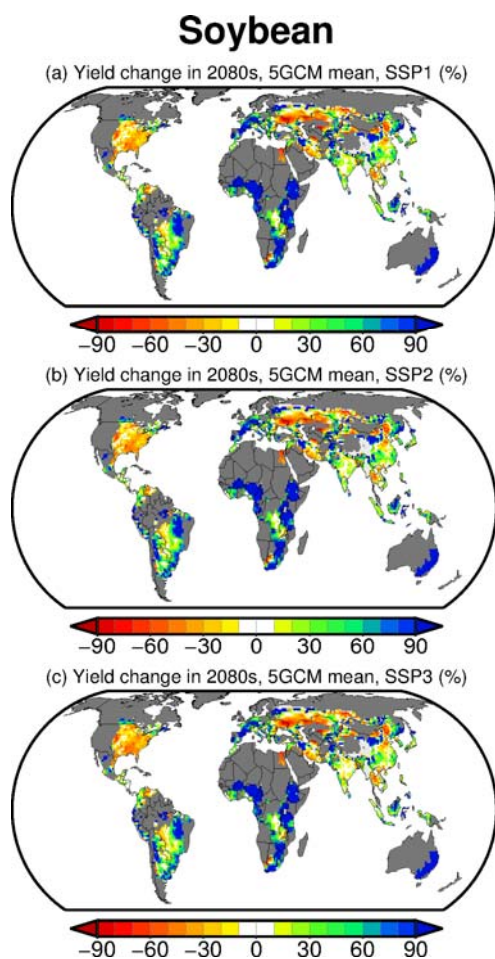


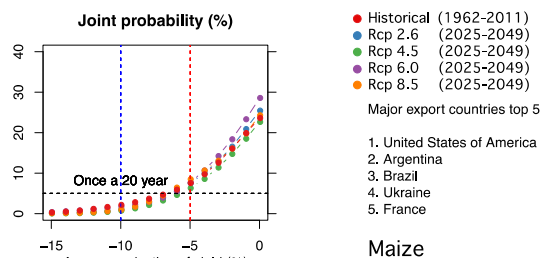
図 3-1-1-②-a_12 現在 (2003-2005) のダイズ生産性に対する、2080 年代頃 (2070-2099 年) の RCP8.5 における 5 つの GCM に基づく生産性変化割合の平均値。(a) SSP1、(b) SSP2、(c) SSP3。

いずれの作物でも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。

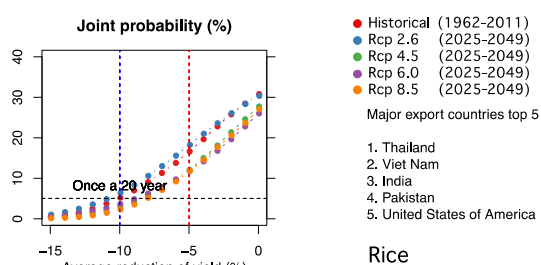
RCP8.5 における 5 つの GCM による生産性影響のアンサンブル平均値を、3 つの SSP シナリオ (1、2、3) について比較したところ、予測された影響の空間パターンには SSP 間でほぼ同じとなった。オーストラリアのコムギや中国南部のコメなどのように、SSP 間で生産性影響の程度が少し変化する場合もあるが、そうしたケースはあまり多くない。SSP に対する生産性変化の依存性が見られる場合は、経済発展が著しい SSP1 の生産性低下が最も小さく、経済発展が相対的に緩やかな SSP3 の収量低下が最も大きい傾向にある。SSP2 の生産性低下は SSP1 と SSP2 の間に位置する。

a-2. 同時不作確率

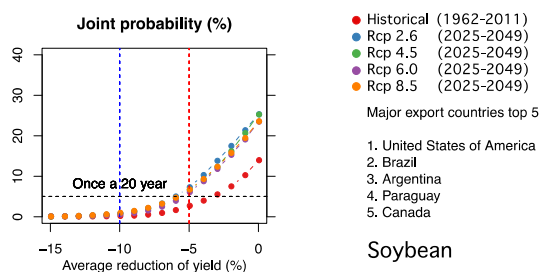
(a) トウモロコシ



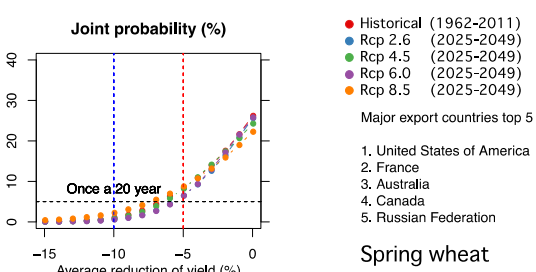
(b) コメ



(c) ダイズ



(d) 春コムギ



(e) 冬コムギ

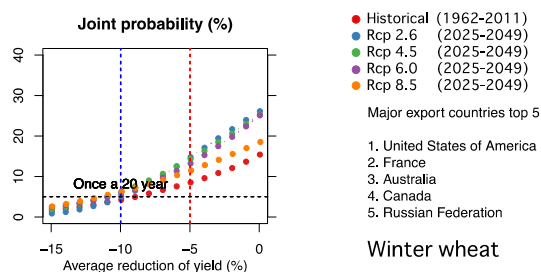


図 3・1・1・②・a_13 主要輸出国 5 カ国の同時不作確率。横軸は 5 カ国の連続する 2 年間の収量変動 (%) の平均を表し、縦軸はその確率 (%) を示す。収量変動は、各国の収量時系列に対して局所回帰を行い、その回帰曲線からの偏差 (%) から求めた。過去 (historical) と将来 (RCPs) のいずれでも 5 つの気候モデルの結果の平均である。すべて SSP2 についての結果を示す。

ダイズでは、複数の主要生産国で同時に不作になる確率が将来、増加する。

トウモロコシ (図 3-1-1-②-a_13 (a)) では、将来のどの気候シナリオにおいても、過去と比べて主要輸出国の同時不作の確率は変わらなかった。コメ (図 3-1-1-②-a_13 (b)) では、RCP4.5、6.0、8.5 では、将来における同時不作の確率はわずかに減少することが予測された。ダイズ (図 3-1-1-②-a_13 (c)) では、どの RCP シナリオでも、将来における同時不作の確率は増加することが予測された。春コムギ (図 3-1-1-②-a_13 (d)) では、将来の気候シナリオと過去とでは同時不作の確率は変わらなかった。冬コムギ (図 3-1-1-②-a_13 (e)) では、どの RCP シナリオでも、将来における同時不作の確率はやや増加することが予測された。上記の図では SSP2 の結果のみを示しているが、SSP 間では大きな差は見られなかった。上記の図において、平均 5%と 10%の減少率に縦線を入れているが、主要輸出 5 カ国の 2 年間の平均収量が 5%減少するという現象は、実はインパクトが大きい。例えば、2006 年と 2007 年に起こったコムギの同時不作でさえ主要輸出 5 カ国の平均収量減少率はわずか約 3.5%である。作物により減少率とその経済的なインパクトは異なるが、ダイズでは平均 5%の同時不作確率が 2 倍近くに増加している。

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（CO₂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（CO₂、CH₄、N₂O）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、3 種類の SSP シナリオによる土地利用変化、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。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 CO₂ 収支）：大気から陸域生態系に正味で吸収・放出された CO₂ 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）の量を示す
6. 野外火災：森林などで発生する火災による CO₂ 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言える。4. 生態系純生産は、正味 CO₂ 収支であるため正の値が高いほど、大気から CO₂ 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 CO₂ 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）

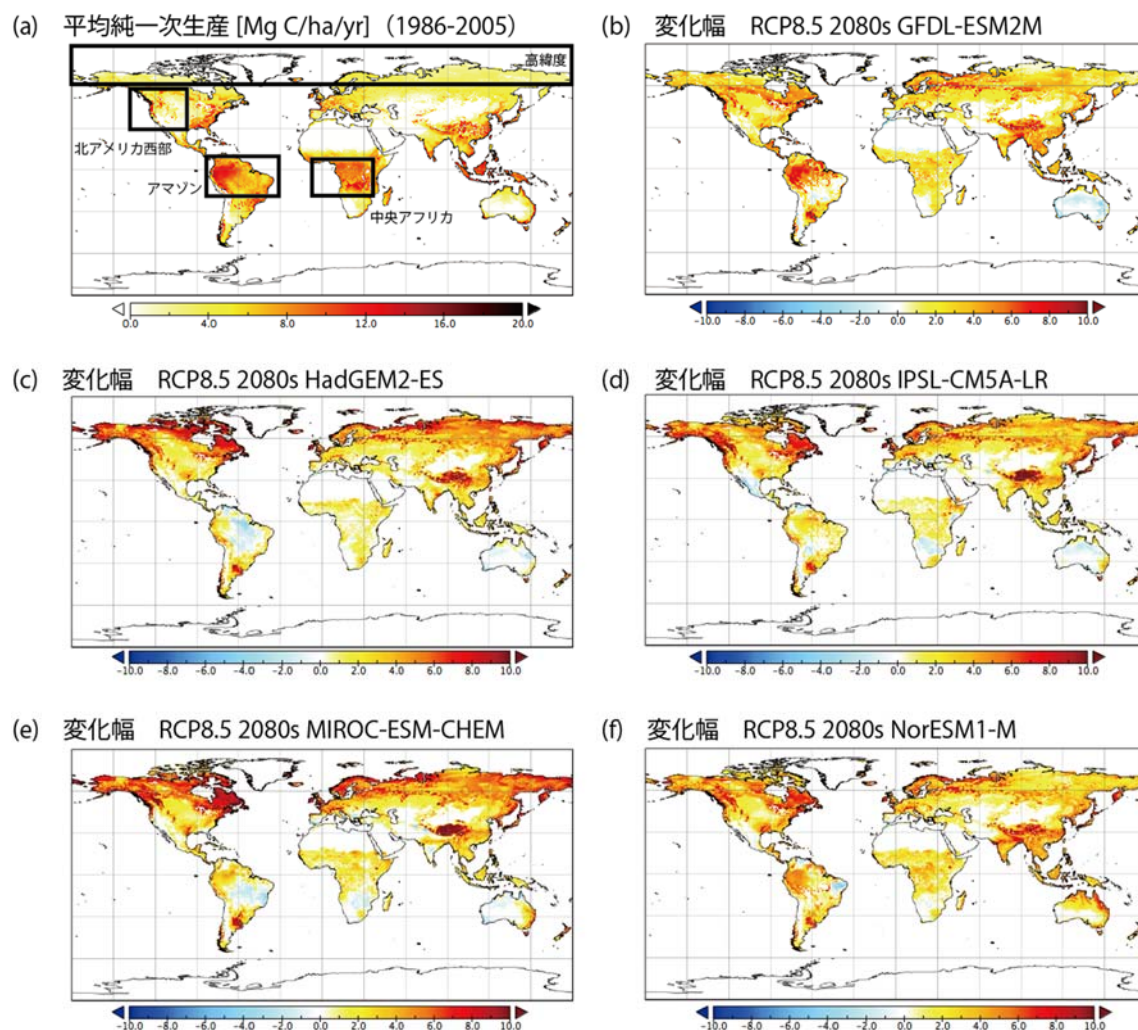


図 3-1-1-②-b_1 (a) 現在（1986-2005 年）の生産力の平均値、(b-f) 2080 年代（2070-2099 年）、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの生産力の変化幅

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度に沿って生産力は減少する。RCP8.5 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。半乾燥地では減少傾向が見られる場合もある。

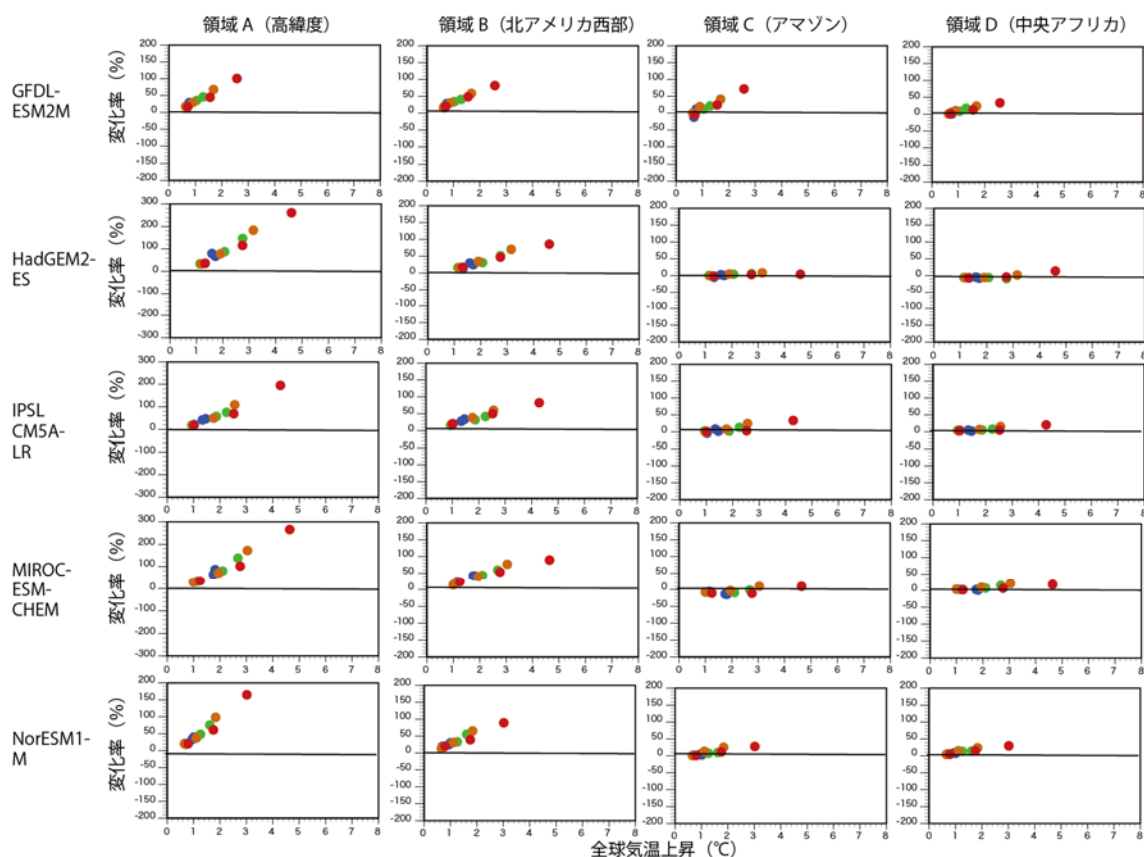
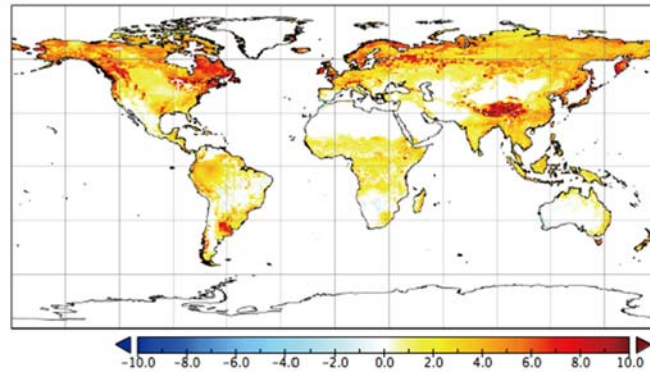


図 3・1・1・②・b_2 (a) 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する生産力の現在からの変化率。生産力の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオに対応する (青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。

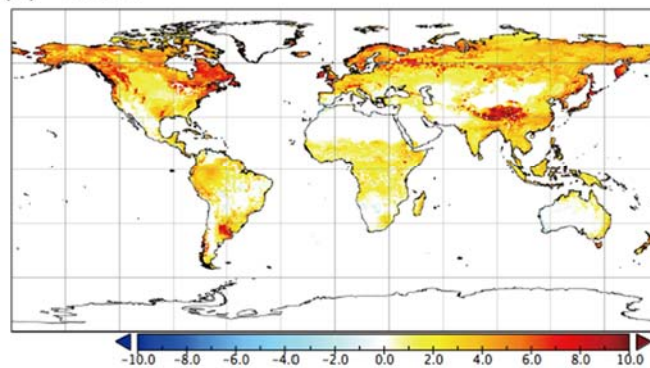
温度上昇に伴って陸域植生の生産力が増加する

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 8℃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に領域 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) は多少の差違があった。また、RCP 間での傾きの明らかな差は見られなかった。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

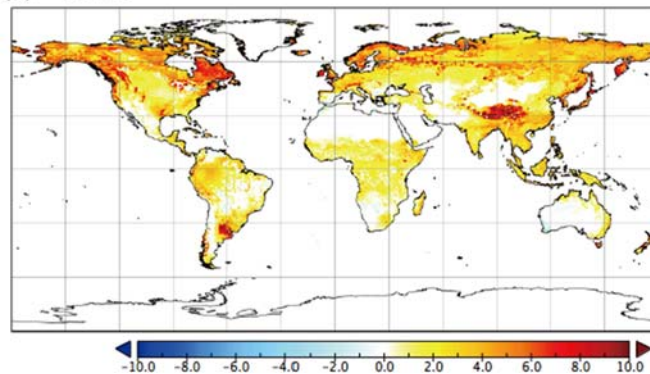


図 3・1・1-②-b_3 SSP 別の現在（1986-2005 年）と 2080 年代（2070-2099 年）の間の純一次生産変化の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

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、生産力は日射や温度・降水など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

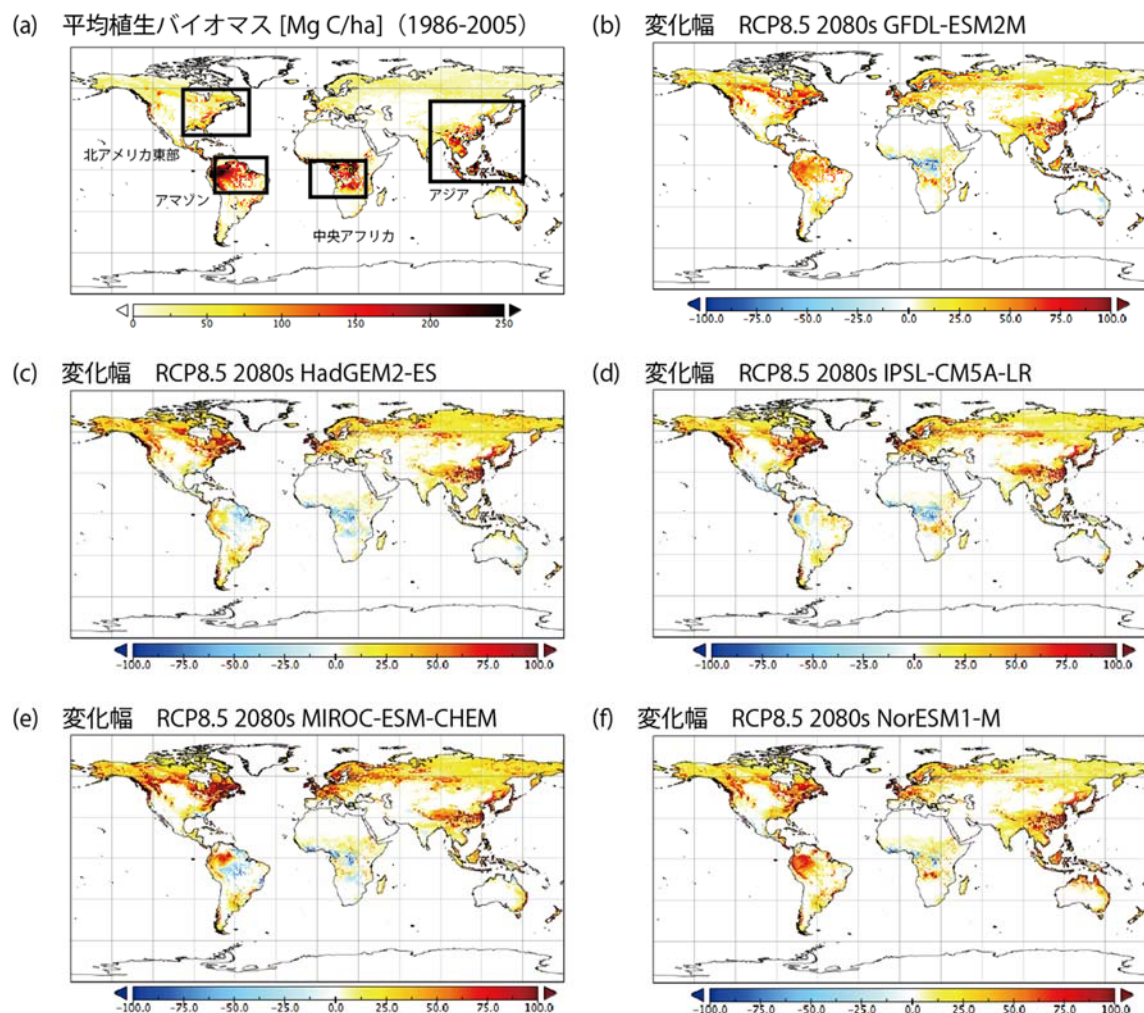


図 3-1-1-②-b_4 (a)現在(1986-2005 年)の植生バイオマスの平均値、(b-f) 2080 年代 (2070-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの植生バイオマスの変化幅。

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。RCP8.5 シナリオのもとでは、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。

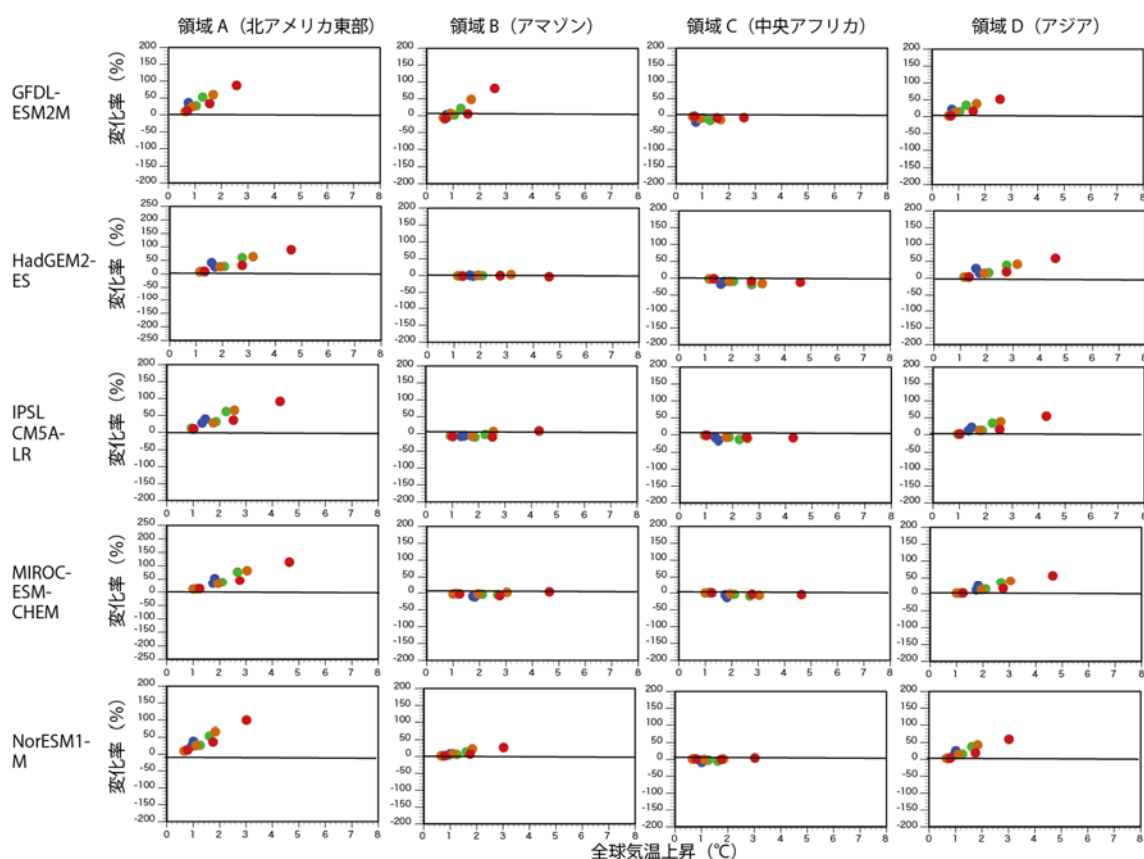


図 3-1-1-②-b_5 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する植生バイオマスの現在からの変化率。バイオマスの各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオに対応する (青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。

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。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倍増以上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、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。

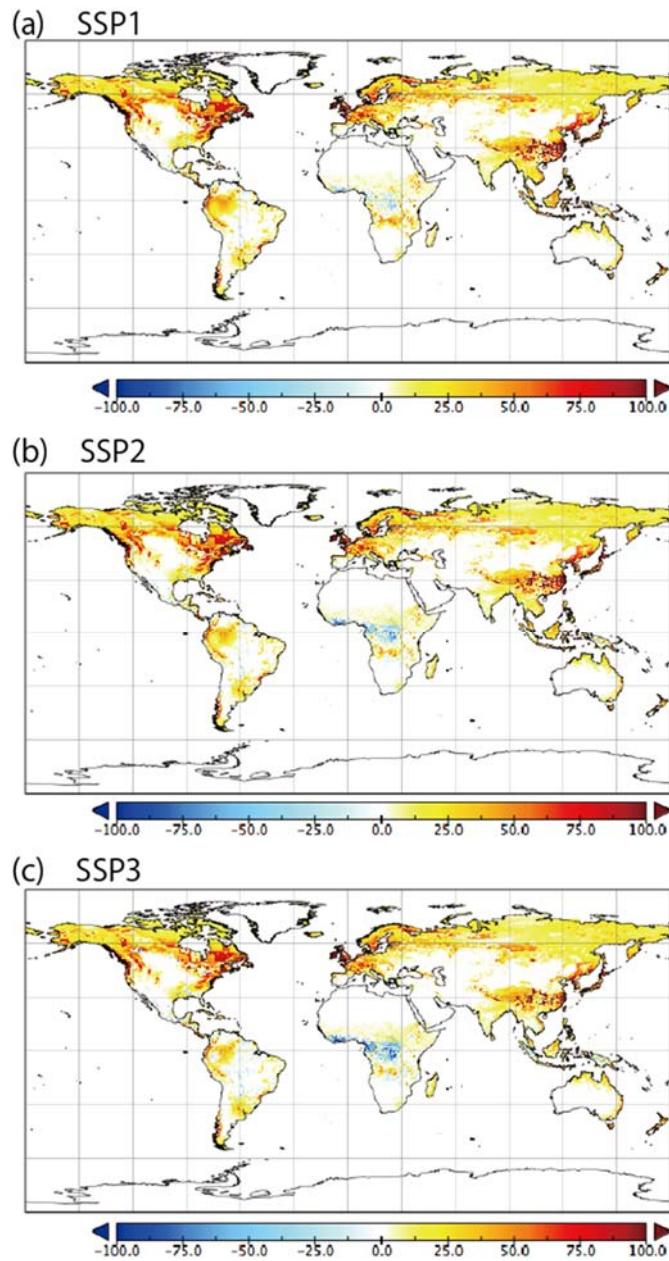


図 3・1・1-②-b_6 SSP 別の現在（1986–2005 年）と 2080 年代（2070–2099 年）の間の植生バイオマスの分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

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、森林減少が進む地域では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現状傾向が見られ、SSP3、SSP2、SSP1 の順に低下傾向が強くなっていた。アマゾンや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

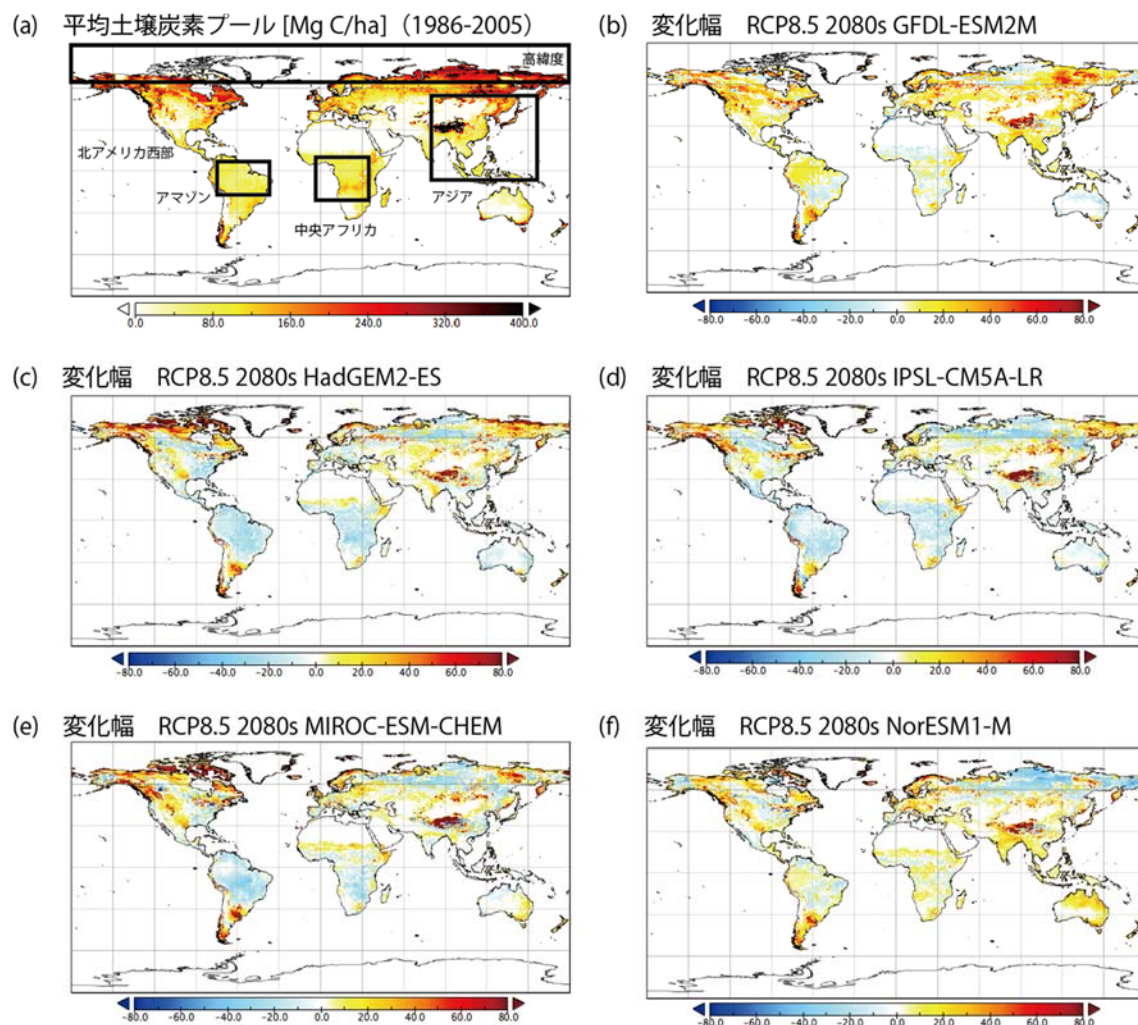


図 3-1-1-②-b_7 (a)現在(1986-2005年)の土壌炭素の平均値、(b-f)2080年代(2070-2099年)、RCP8.5シナリオでの各GCMの現在気候からの土壌炭素の変化幅。

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。RCP8.5シナリオのもとでは、多くのGCMで昇温幅が大きい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。土壌炭素の減少は、大気へのCO₂放出だけでなく、ローカルな栄養塩の流亡につながる。

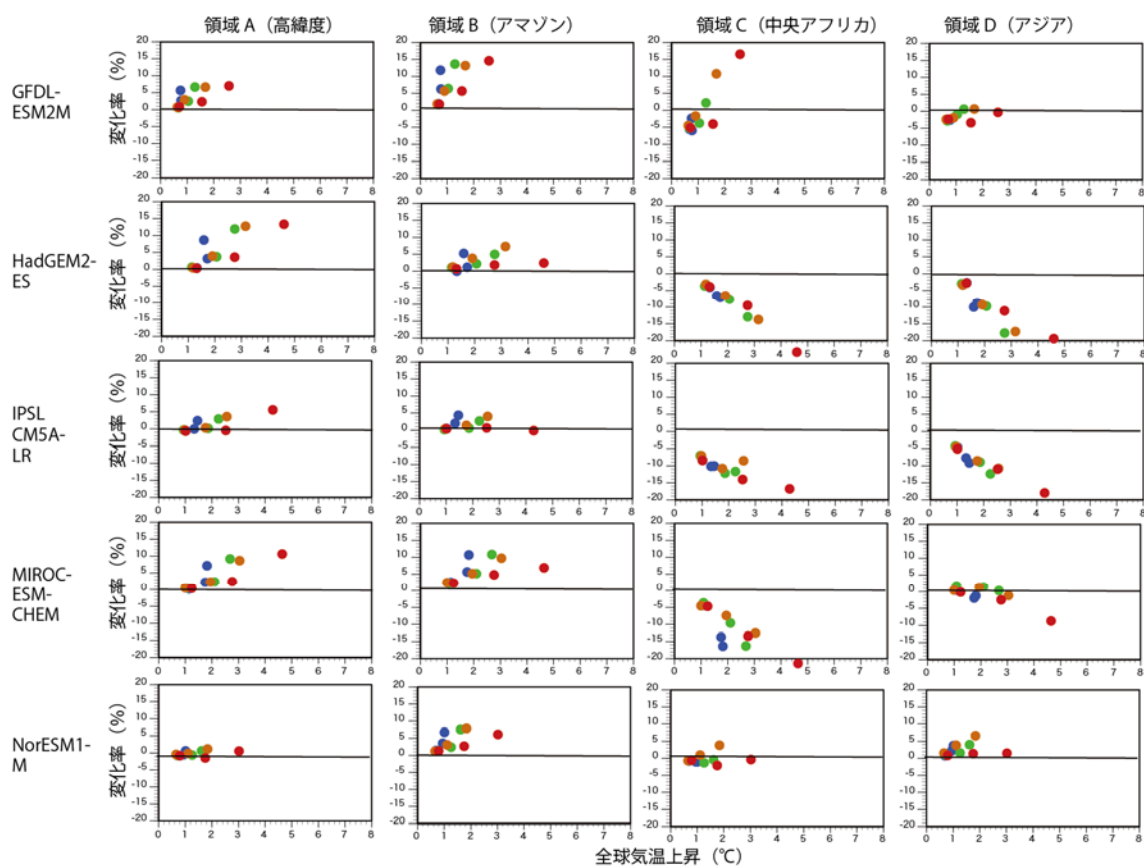


図 3・1・1・②-b_8 (a) 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する土壤炭素の現在からの変化率。土壤炭素の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオに対応する (青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。

温度上昇に伴って陸域の土壤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壤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壤炭素の総量に増加が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壤炭素増加幅の間には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壤炭素は増加していた。

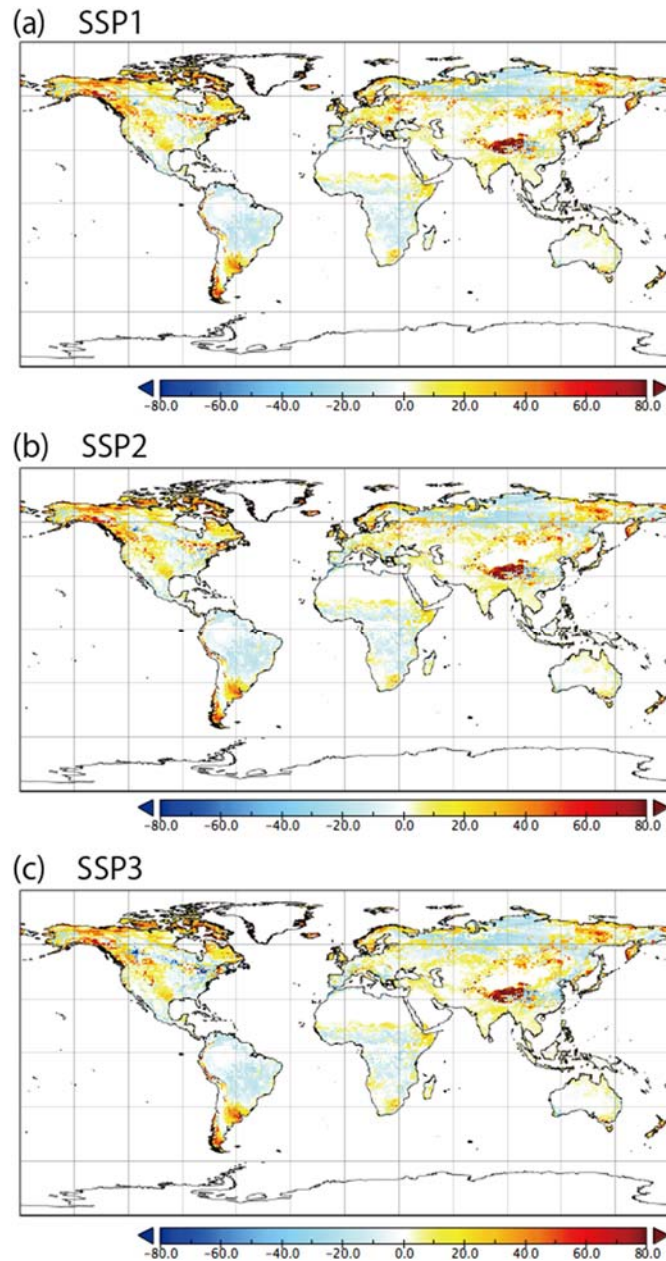


図 3・1・1-②-b_9 SSP別の現在（1986–2005年）と2080年代（2070–2099年）の間の土壌炭素の分布。RCP8.5における5GCM予測を用いた推定結果の平均。

土壌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、それは土壌流出の強度を変えることで土壌炭素ストックに影響を与える。ここでは東ヨーロッパなどで SSP1 よりも SSP3 で土壌炭素の増加傾向が抑制される傾向が見られた。

b-4. 生態系純生産（正味 CO₂ 収支）

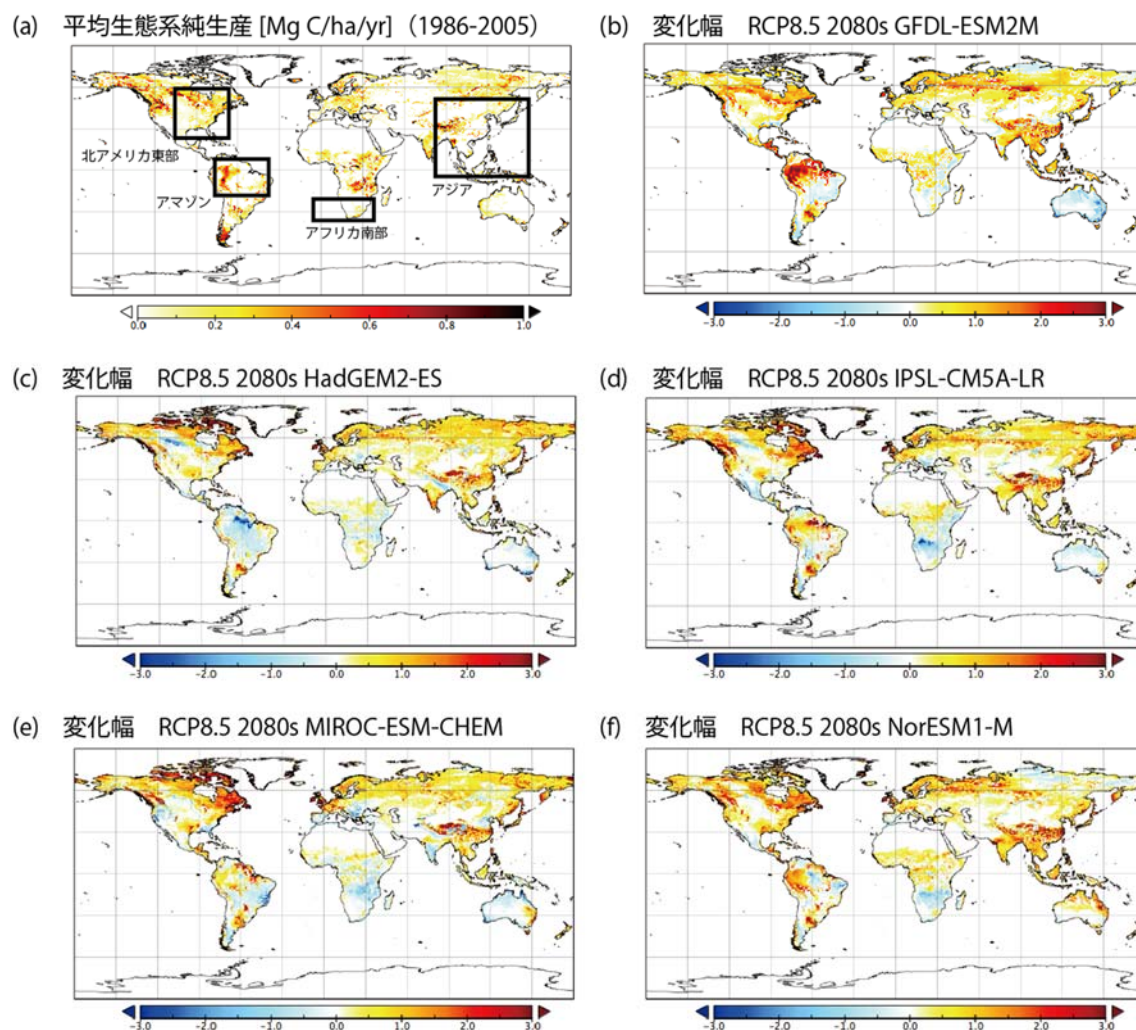


図 3-1-1-②-b_10 (a)現在 (1986–2005 年) の純生態系生産 (正味 CO₂ 収支) の平均値、(b–f) 2080 年代 (2070–2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの純生態系生産の変化率(%)。

中高緯度では CO₂ 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の影響によりその空間分布は不均質である。RCP8.5 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 CO₂ 吸収が増加した。ただし、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た。

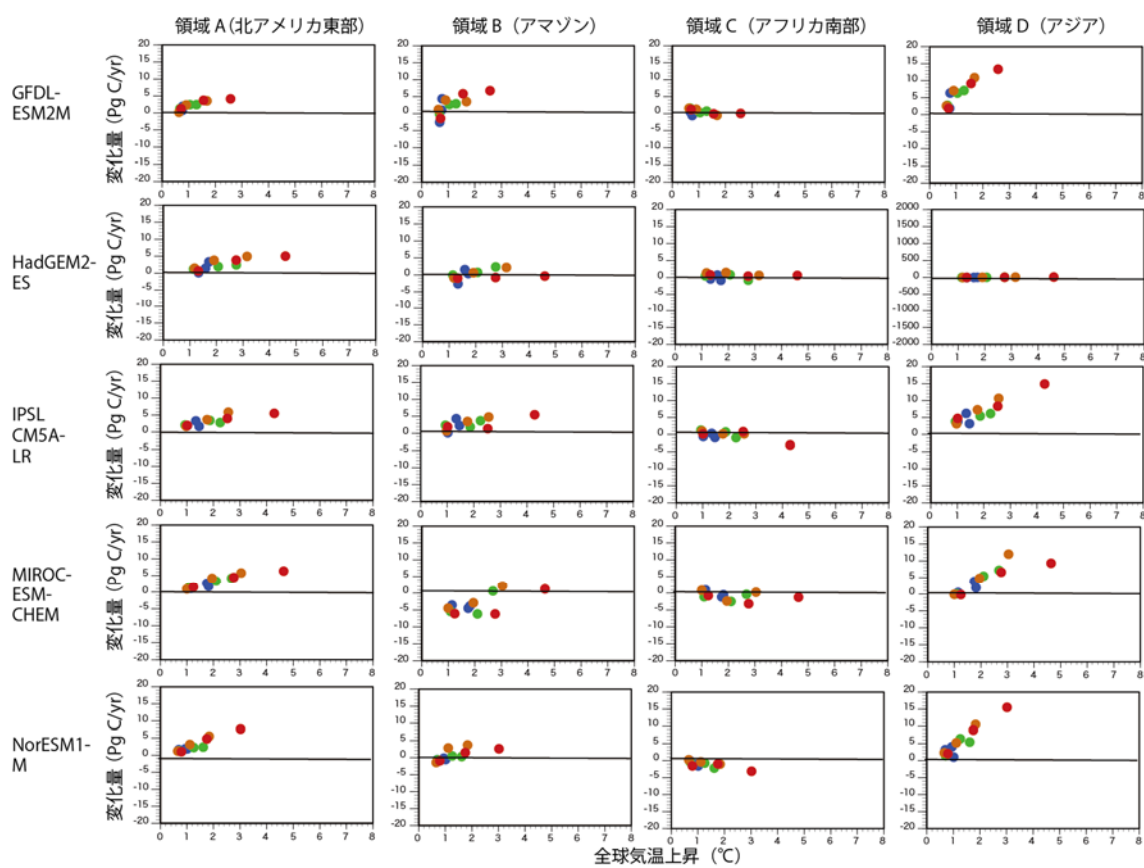


図 3・1・1・②・b_11 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する純生態系生産の現在からの変化幅。純生態系生産の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化幅 (Pg C/yr) を算出した。色が RCP シナリオに対応する (青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。正味 CO₂ は現在の絶対値が小さいため、相対的な変化率でなく変化の絶対量を示していることに注意。

温度上昇に伴って中高緯度の陸域の正味 CO₂ 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、IPSL 以外の GCM では増加する傾向にある一方で、IPSL 気候下では現在での放出が推定されており、将来的に吸収に転じることで相対的に符号が逆方向への応答という結果が出る場合も見られた。

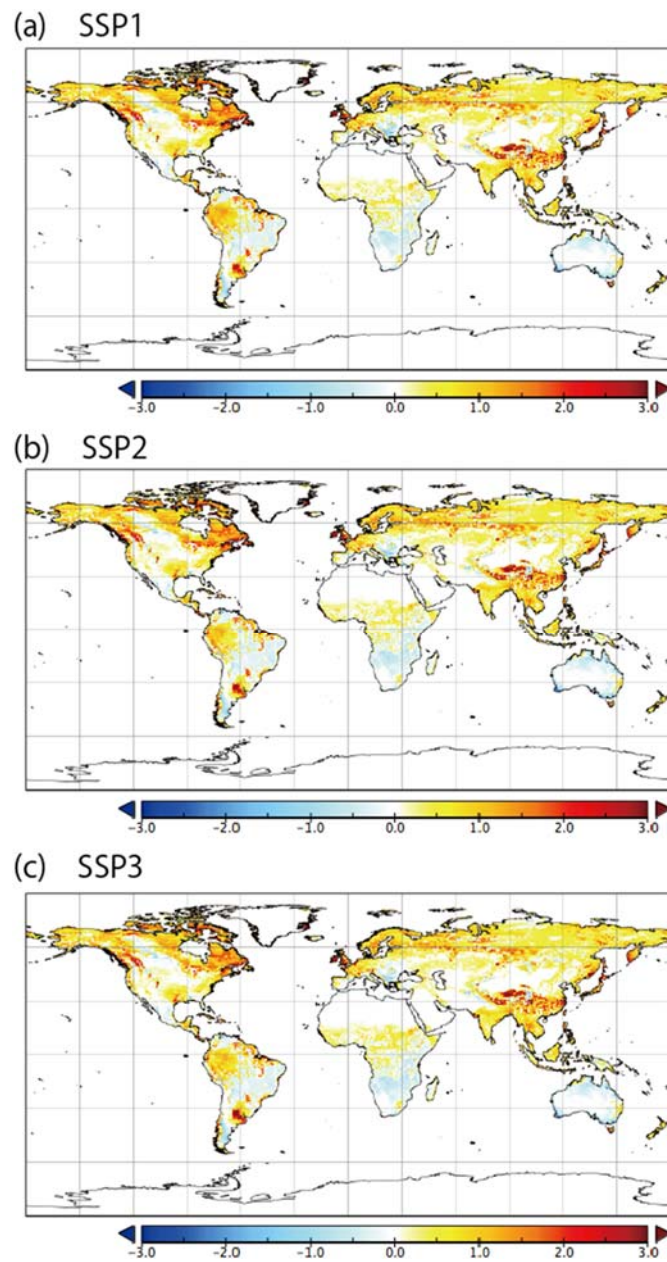


図 3・1・1・②-b_12 SSP 別の現在（1986–2005 年）と 2080 年代（2070–2099 年）の間の正味 CO₂ 収支の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

陸域生態系の正味 CO₂ 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 CO₂ 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

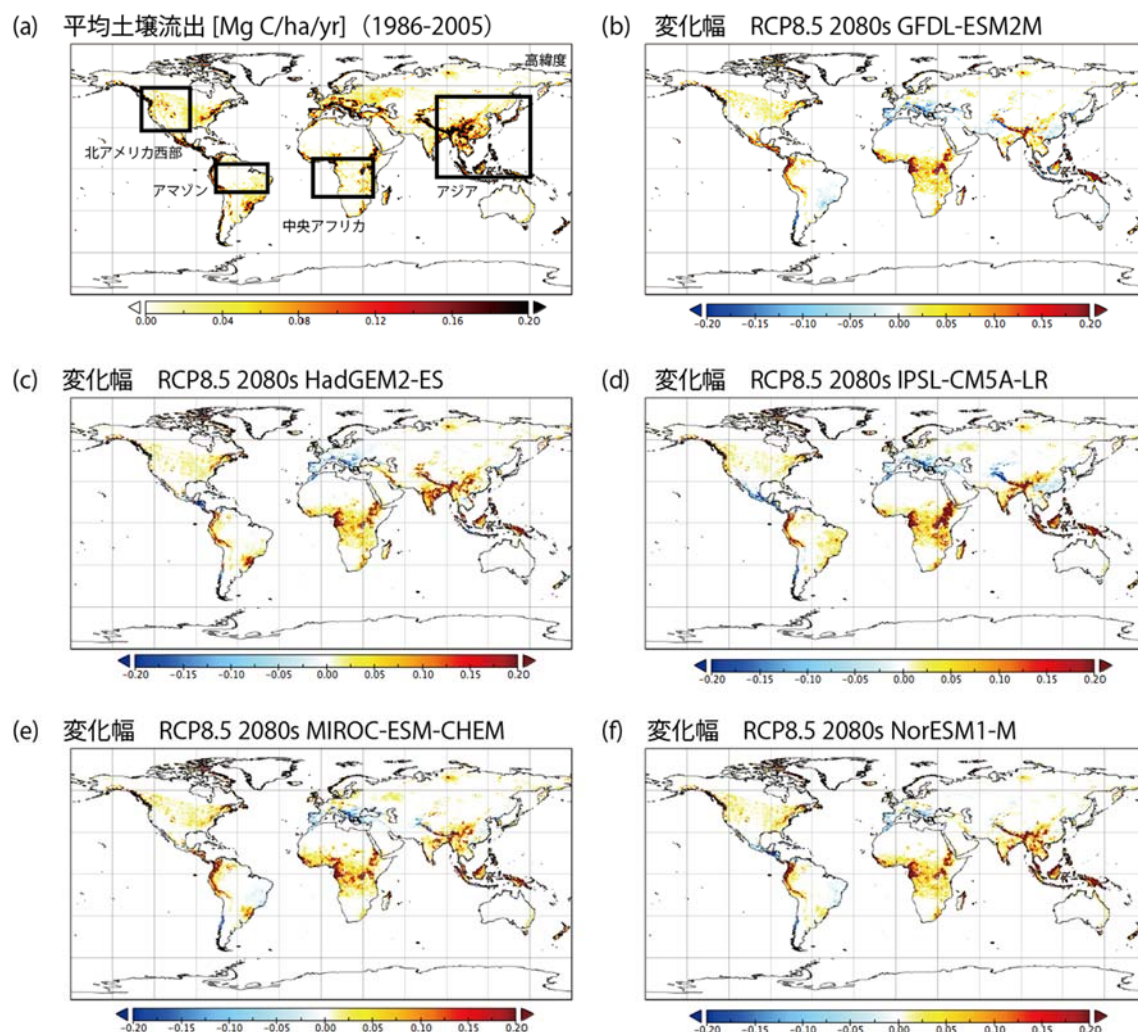


図 3-1-1-②-b_13 (a)現在(1986-2005年)の土壌流出の平均値、(b-f)2080年代(2070-2099年)、RCP8.5シナリオでの各GCMの現在気候からの土壌流出の変化率(%)。

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・急峻地形の山岳地が多い傾向がある。RCP8.5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の増加が予想された。

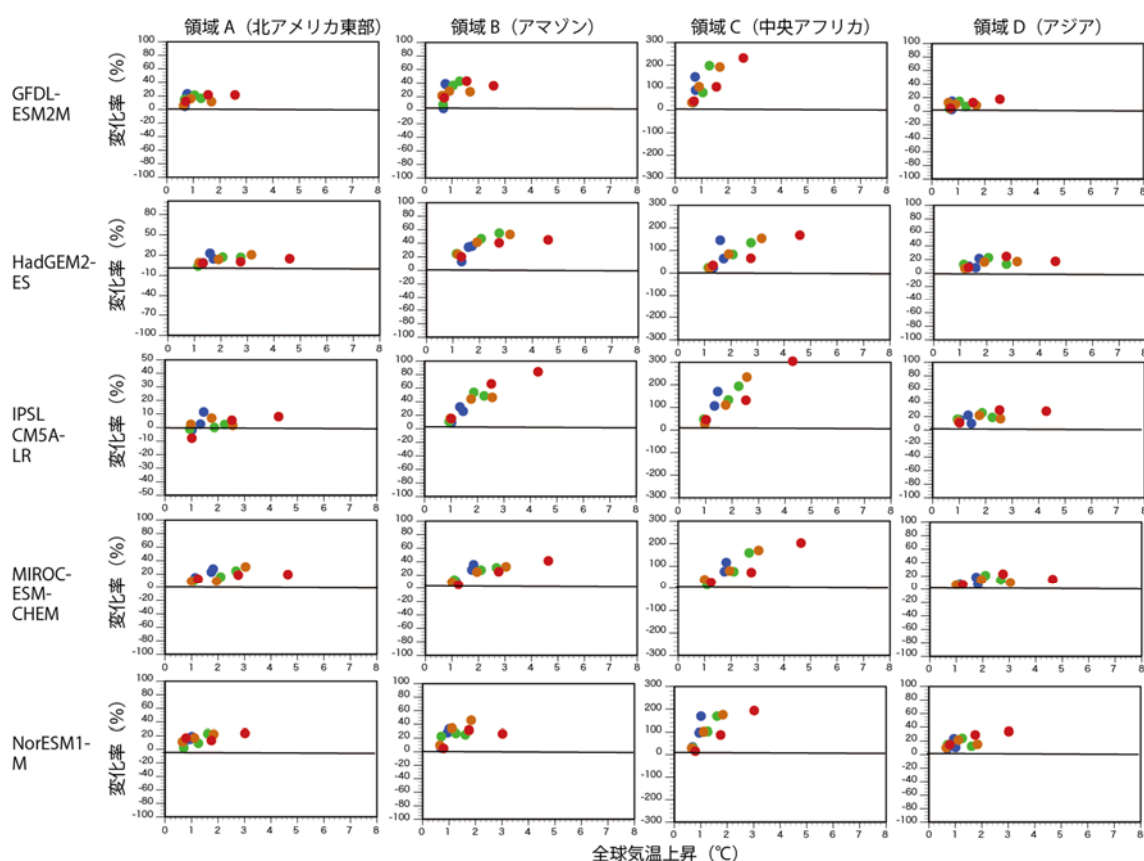
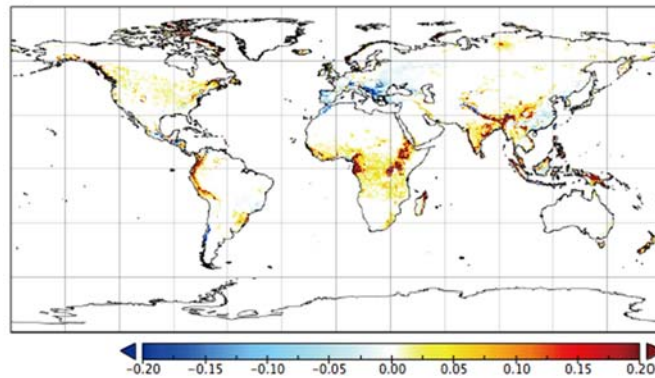


図 3-1-1-②-b_14 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する土壌流出の現在からの変化率。土壌流出の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率(%)を算出した。色が RCP シナリオに対応する(青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。

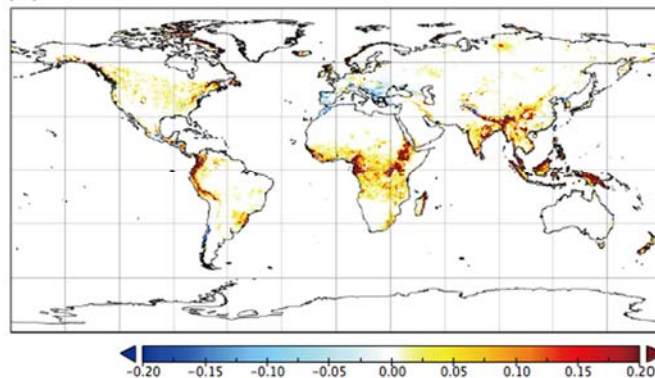
温度上昇に伴って陸域からの土壌流出が増加する

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 とアマゾン領域 B では 21 世紀中に+40~80%、中央アフリカ領域 C では 180%に達する増加幅が見られる場合もあった。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。

(a) SSP1



(b) SSP2



(c) SSP3

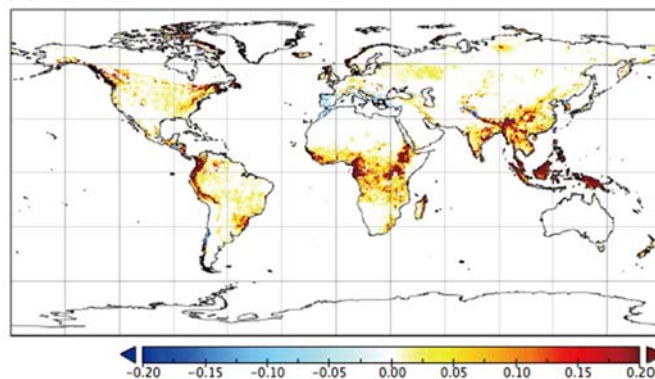


図 3-1-1-②-b_15 SSP 別の現在（1986–2005 年）と 2080 年代（2070–2099 年）の間の土壌流出の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

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

耕作地は自然植生より 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。

b-6. 野外火災

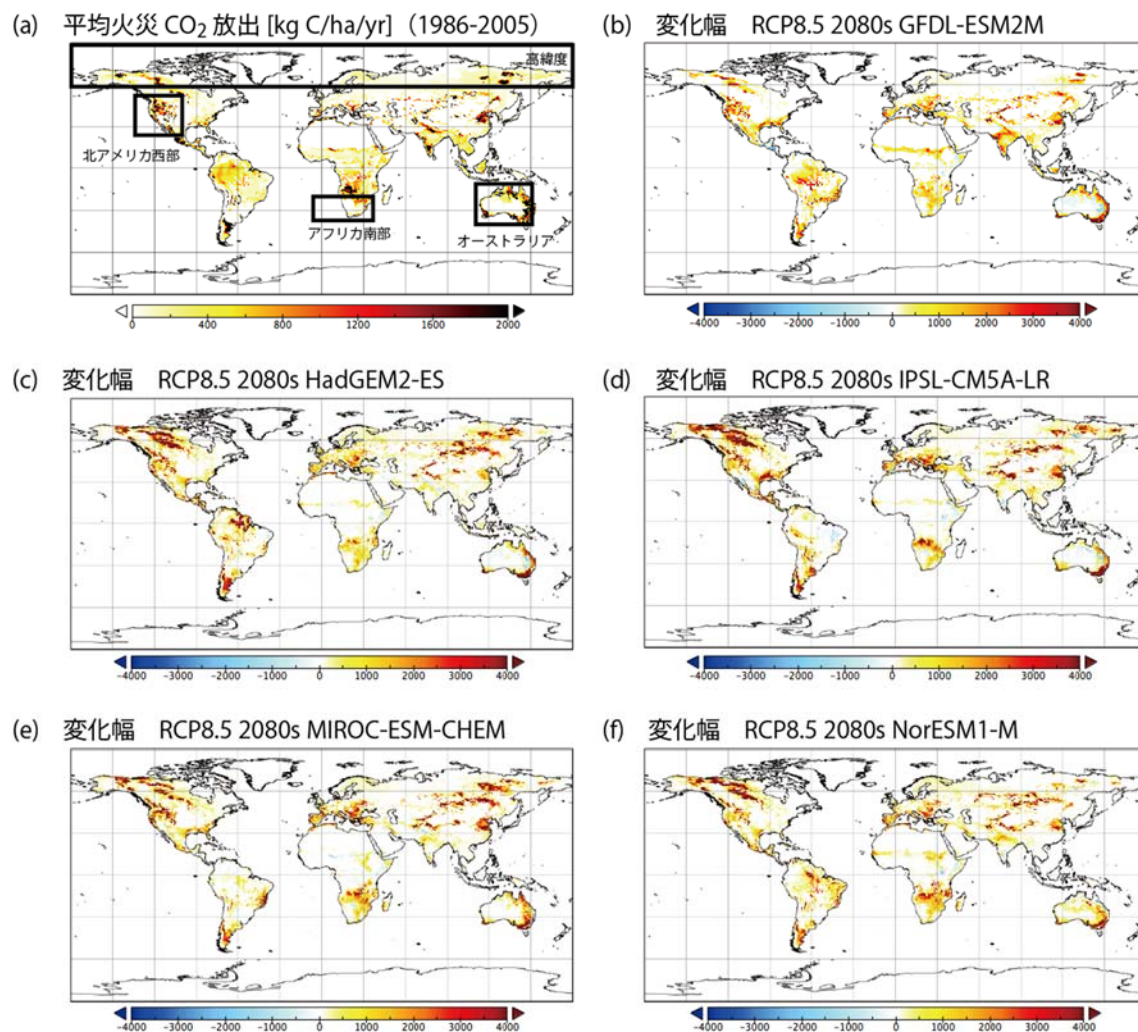


図 3-1-1-②-b_16 (a)現在(1986-2005年)の火災放出の平均値、(b-f)2080年代(2070-2099年)、RCP8.5シナリオでの各GCMの現在気候からの火災放出の変化率(%)。

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（特に東シベリアなど）で火災の発生とそれに伴う CO₂ 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。

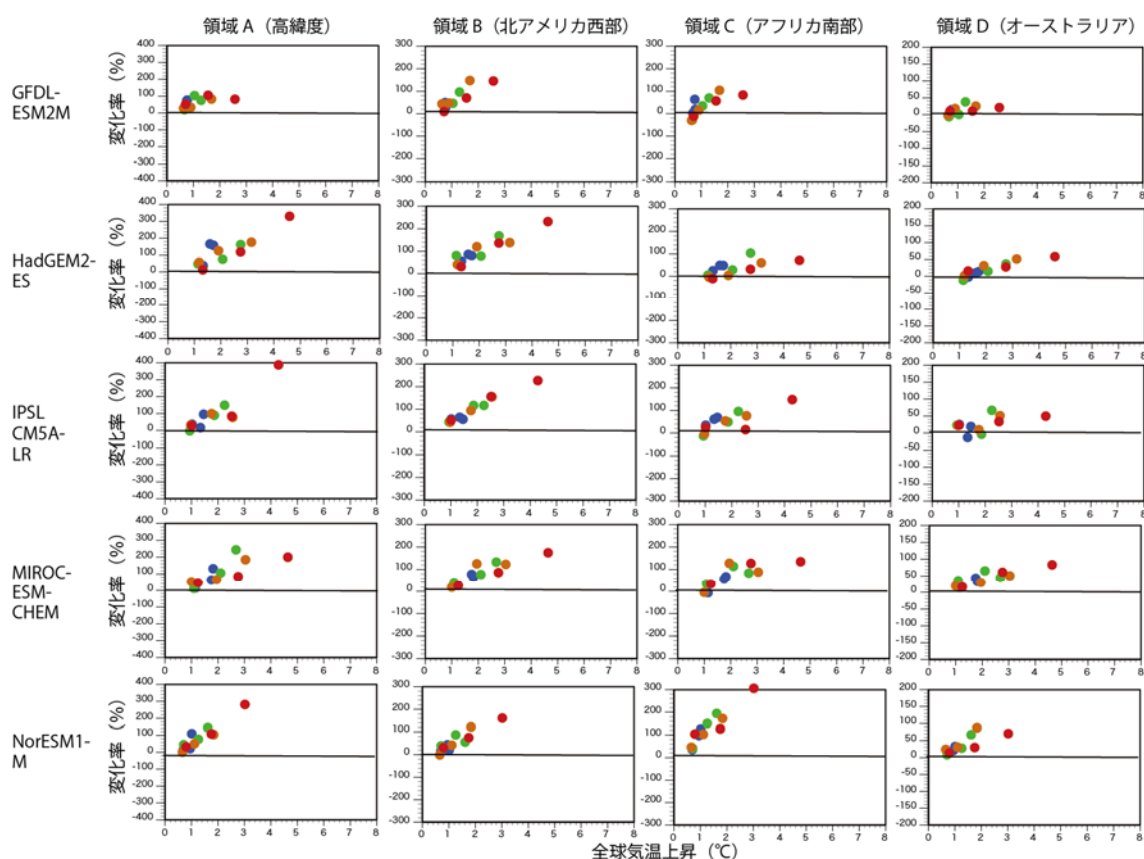


図 3-1-1-②-b_17 領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する野外火災放出の現在からの変化率。野外火災放出の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率 (%) を算出した。色が RCP シナリオに対応する (青=RCP2.6、緑=RCP4.5、橙=RCP6.0、赤=RCP8.5)。

温度上昇に伴って陸域の火災とそれに伴う CO₂ 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 4℃以上増加した時点で火災起源 CO₂ 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。

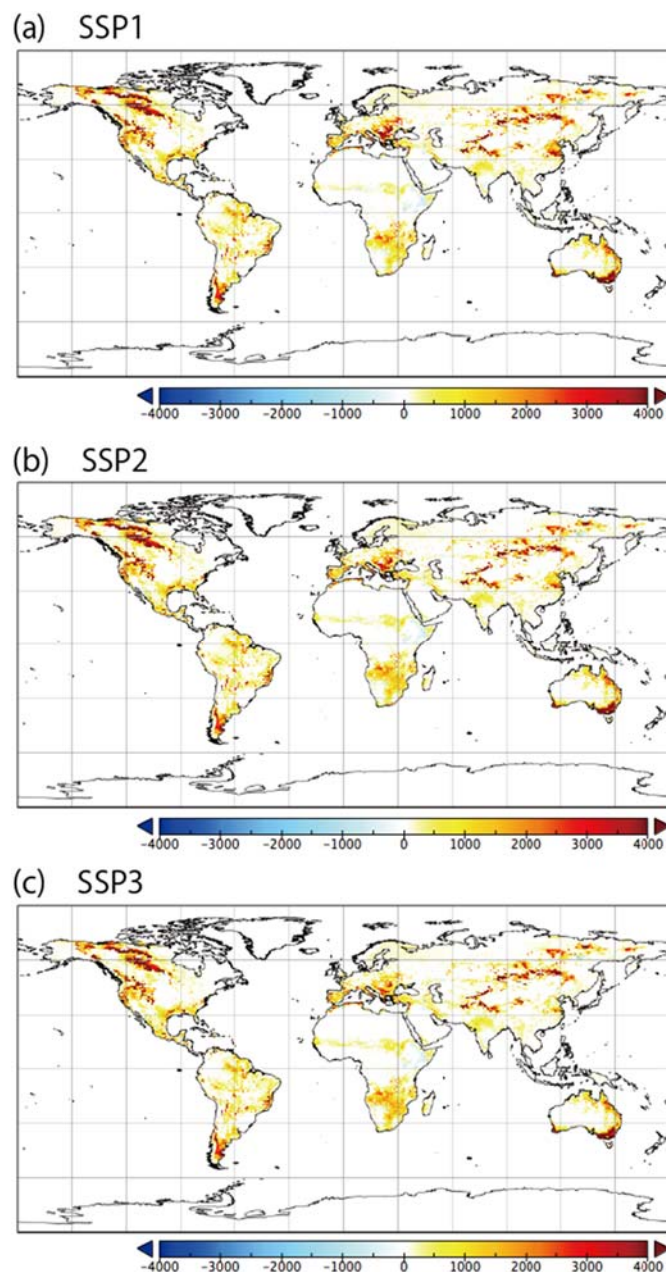


図 3・1・1-②-b_18 SSP 別の現在（1986–2005 年）と 2080 年代（2070–2099 年）の間の
 野外火災の分布。RCP8.5 における 5GCM 予測を用いた推定結果の平均。

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（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。このような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

1700m³/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、1000m³/year など閾値がいくつか追加されたが、本報告書では 1700m³/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よりのみ利用すべきである。

c-1. 河川流量

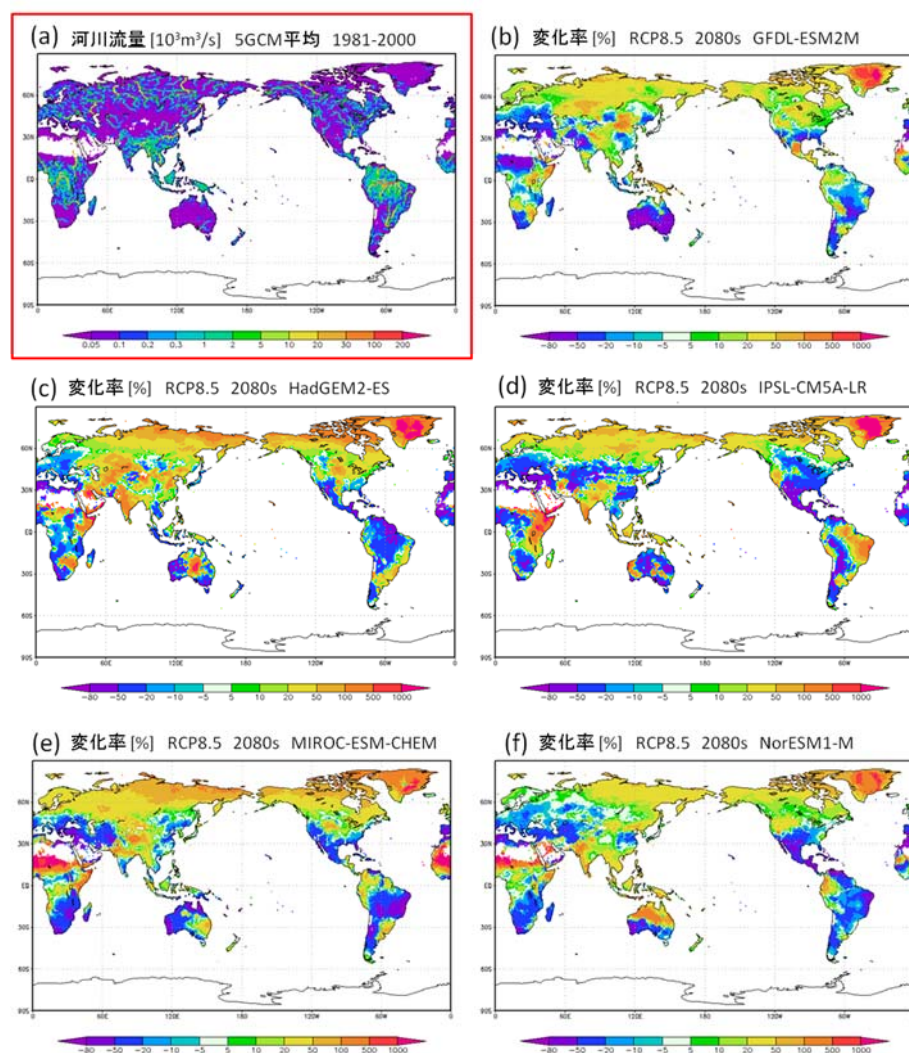


図 3-1-1-②-c_1 (a)現在（1981-2000 年）の河川流量の 5GCM 平均値、(b-f) 2080 年代（2070-2099 年）、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの河川流量の変化率(%)

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 の予測がおおむね増加を示すのに対し、IPSL-CM5A-LR の予測はおおむね減少を示している。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。

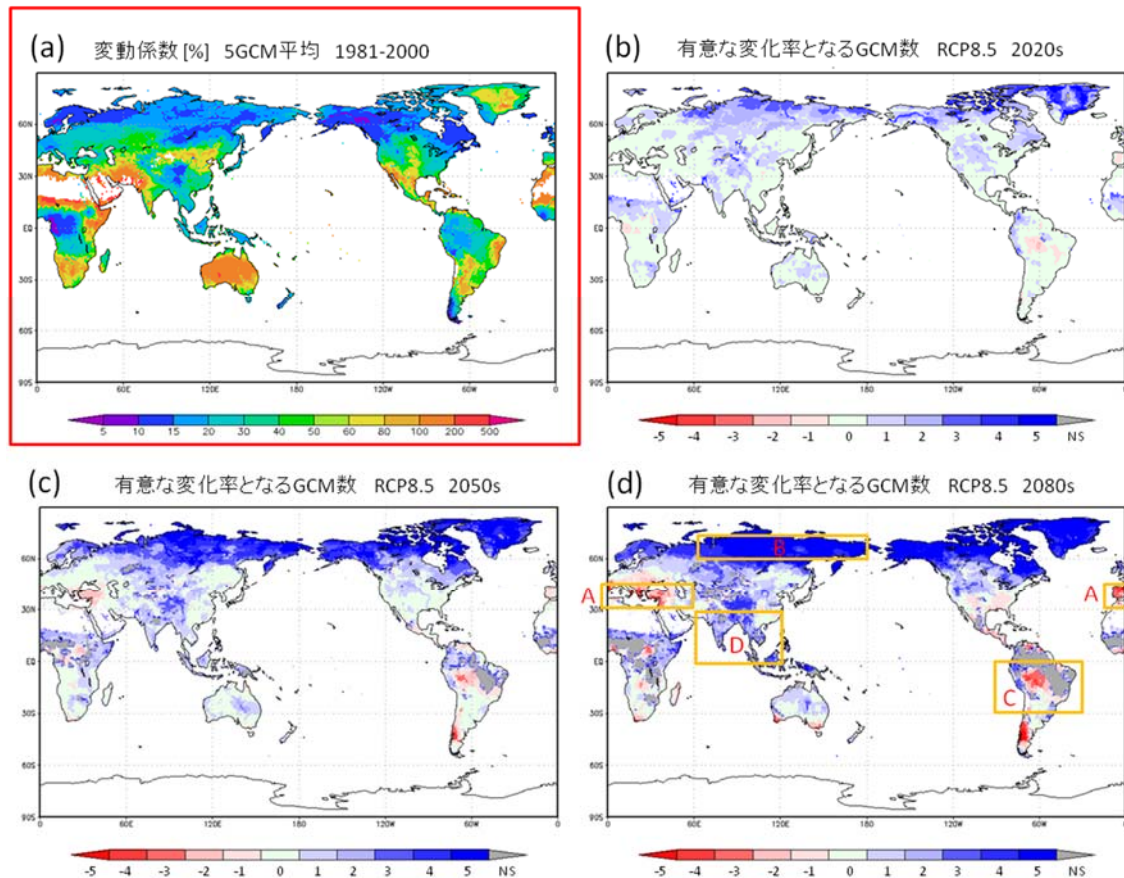


図 3-1-1-②-c_2 (a)河川流量の変動係数。すなわち、各 GCM による現在期間（1981-2000 年）の標準偏差を同期間の平均値で除した後、5GCM の平均を取ったもの。(b-d) RCP8.5 シナリオにおいて、河川流量の現在からの変化（各年代平均）が標準偏差以上となった GCM の数。

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)）。

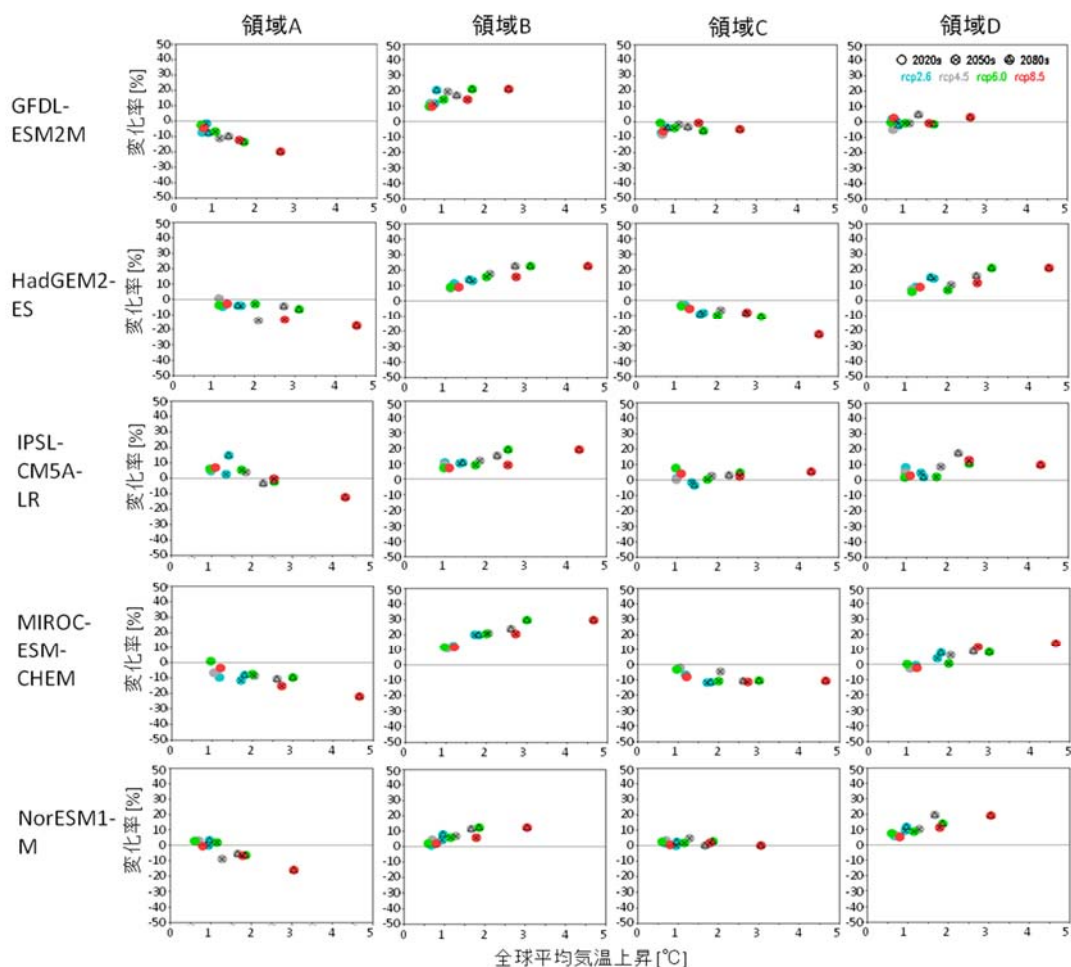


図 3-1-1-②-c_3 図 3-1-1-②-c_2 (d)の領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する河川流量の現在からの変化率。河川流量の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代（2020 年代、2050 年代、2080 年代）、色が RCP シナリオに対応する。

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

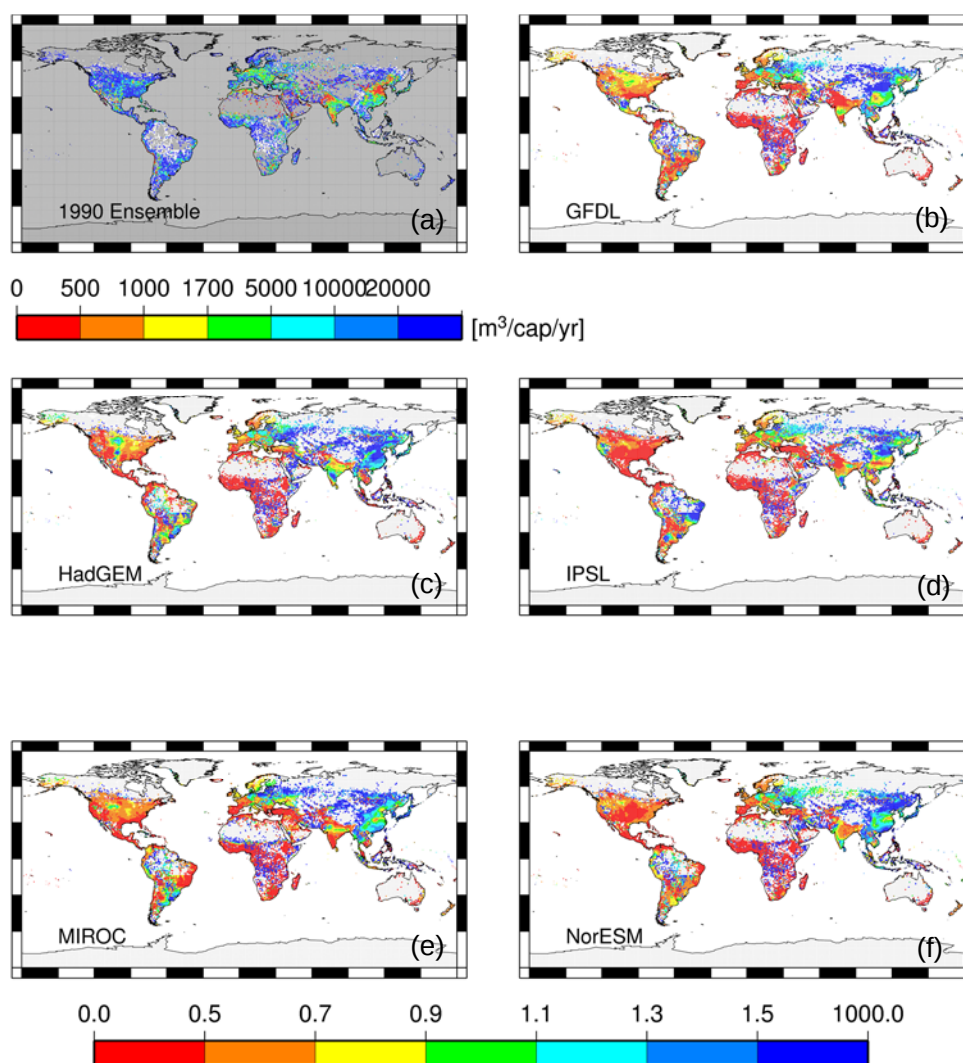


図 3-1-1-②-c_4 (a)現在(1981-2000年)の一人当たり水資源量の5GCM平均値、(b-f)2080年代(2070-2099年)、RCP8.5シナリオでの各GCMの現在気候からの河川流量の変化率(%)

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 10000 m³/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 1700m³/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。

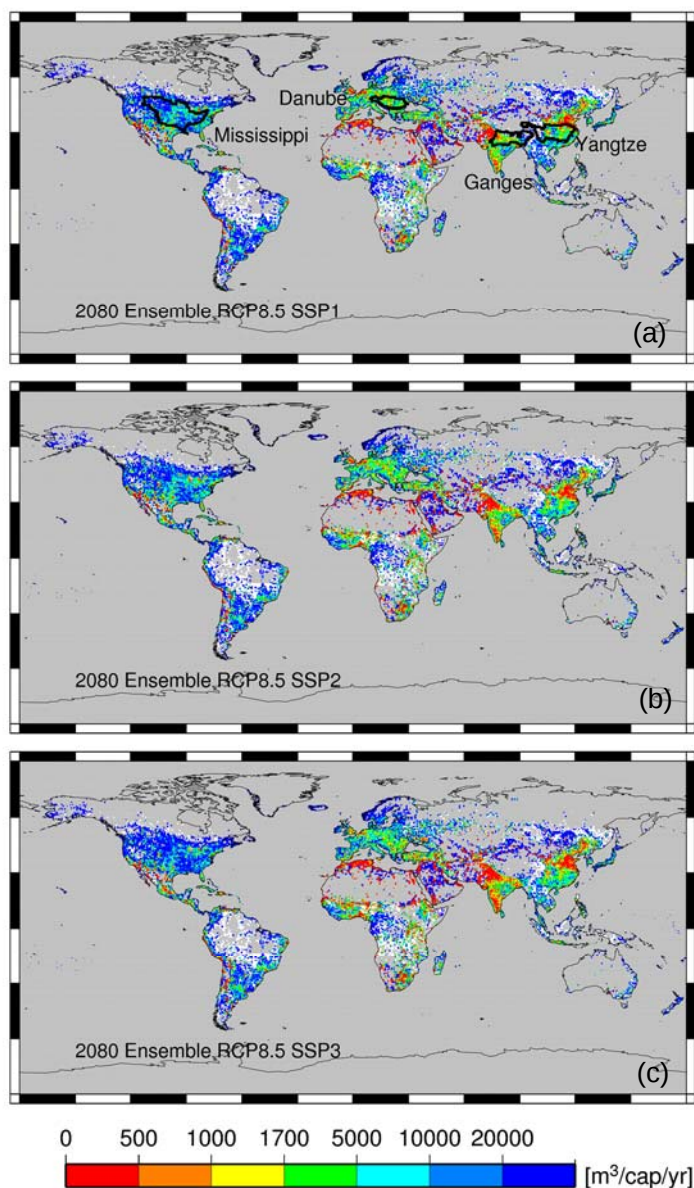


図 3-1-1-②-c_5 (a-c)SSP1, 2, 3 の 2080 年代 (2070-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの一人当たり水資源量 (m³/人)

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。

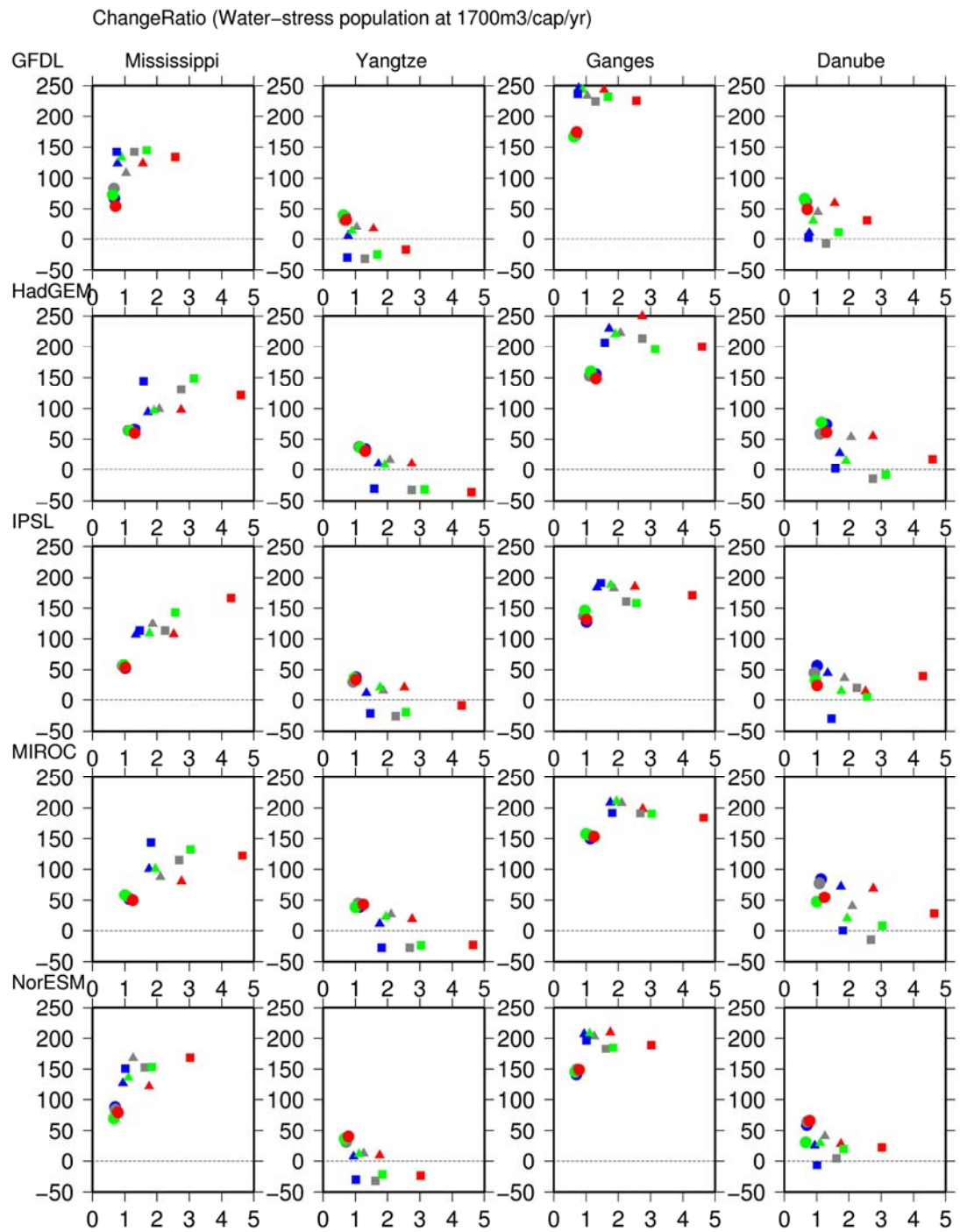


図 3-1-1-②-c_6 ミシシッピ、長江、ガンジス、ドナウ川における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する水ストレス人口の変化率 (%)。河川流量の各年代平均値を流域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークと色の凡例は図 3-1-1-②-c_3 を参照のこと。人口は SSP2 シナリオである。

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に見えるのは、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、将来の経済社会シナリオ（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、将来の経済社会シナリオ（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。

<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。

<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 シナリオの下で 5 つの気候モデルから推定された将来気候それぞれに対して、3 通りの SSP シナリオによる人口および GDP 変化を用い、計 60 ケースの将来像に対して、二つの指標(洪水暴露人口と洪水暴露 GDP)の将来変化を推定する。具体的には、4 通りの RCP のもとで 5 つの気候モデルから推定された計 20 通りの将来気候の下で全球水資源モデル(H08)を介して計算された流出量を、高空間解像度の河川・氾濫モデル(CaMa-Flood; Yamazaki et al., 2011)に入力する。これにより、全球規模で浸水深を計算し、各浸水した地点（グリッド）における浸水深と人口・GDP を基に、洪水暴露人口・洪水暴露 GDP の算出をそれぞれ行う。なおここで、洪水は「現在気候において、100 年に 1 度の超過確率を持つ河川流量（以降、「現在気候の 1/100 洪水」と呼ぶ）」と定義する。将来の洪水頻度の変化は、現在気候の 1/100 洪水が将来気候では何年に 1 度生じるか、という超過確率の変化として計

算される。なお本解析で用いたような比較的低解像度の GCM では、一般的に熱帯低気圧の再現性はあまり良くない事が指摘されている。従って、熱帯低気圧起因の洪水は、本解析では十分に考慮できていない点は注意する必要がある。

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。

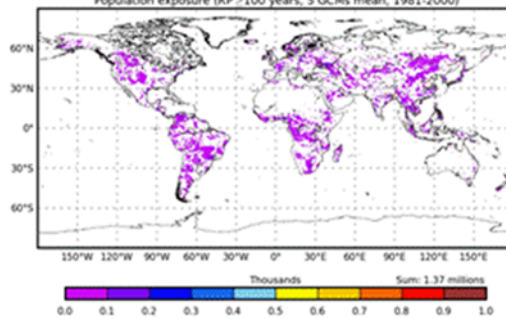
<指標の一覧>

本項では以下の二つの指標を扱う。

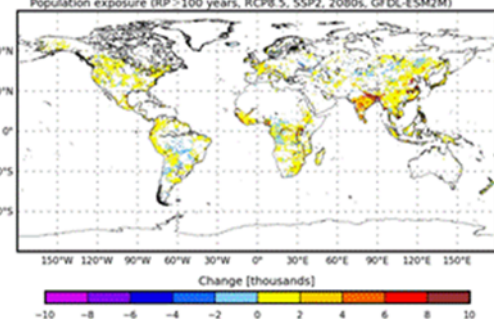
1. 洪水暴露人口：洪水リスクのポテンシャルが高い人の数を示す（堤防等の洪水防御施設の効果は考慮していない）。洪水暴露人口は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所におけるその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計することで算出する。
2. 洪水暴露 GDP：洪水による経済被害のポテンシャルを示す。洪水暴露 GDP は、ある年に浸水深が現在気候の 1/100 洪水を超えた場合に、同じ場所のその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計し、その合計値に、該当する国の一人あたり GDP を掛けた値として算出する。

d-1. 洪水暴露人口

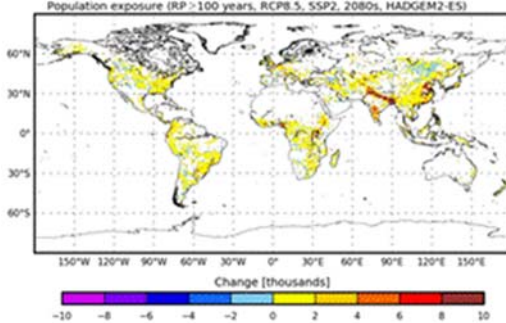
(a) 5つのGCMにおける洪水暴露人口の平均



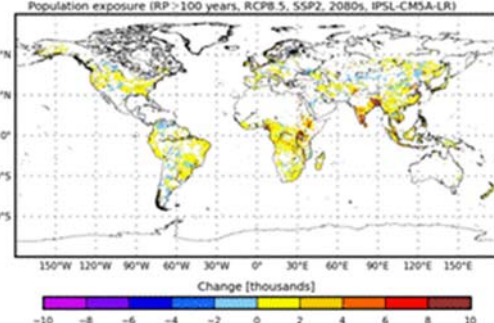
(b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



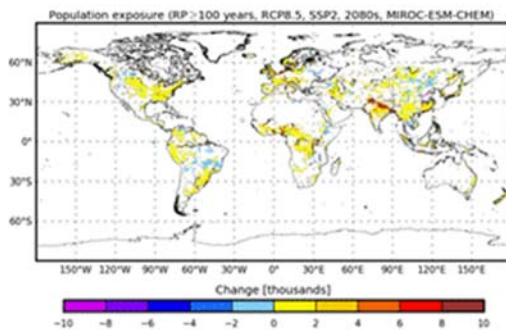
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

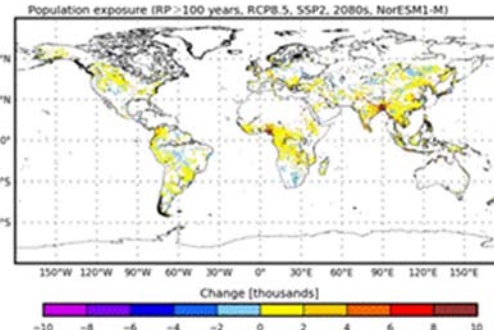


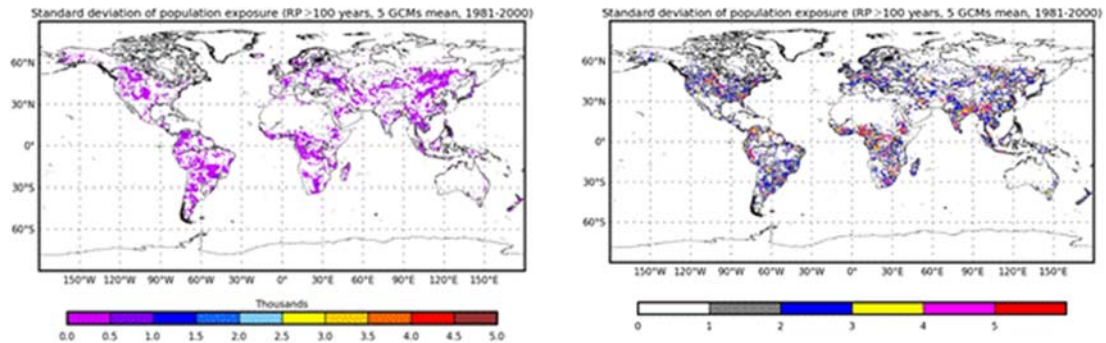
図 3-1-1-②-d_1 (a) 現在 (1981-2000 年) の洪水暴露人口の平均値。(b-f)2080 年代 (2070-2099)での各 GCM の現在気候からの洪水暴露人口の変化幅 (将来期間と現在期間平均値の差)。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

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 :

(d) 標準偏差以上の平均値変化を示した GCM 数 :

RCP8.5 2050s

RCP8.5 2080s

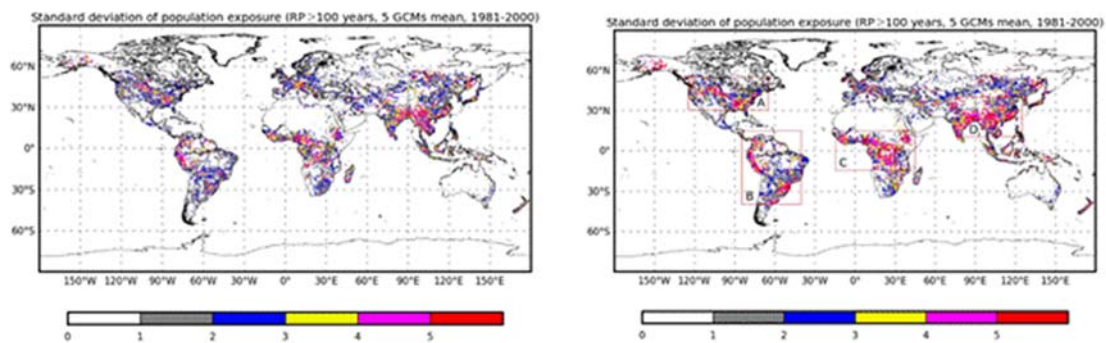


図 3-1-1-②-d_2 (a)現在期間(1980-2000)における 5 つの GCM の洪水暴露人口の標準偏差の平均。各 GCM の現在期間の標準偏差以上の平均値変化(将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値)を示した GCM の数 : (b)2020s、(c)2050s、(d)2080s。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

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_2 (d)）について詳しく見ていきたい。

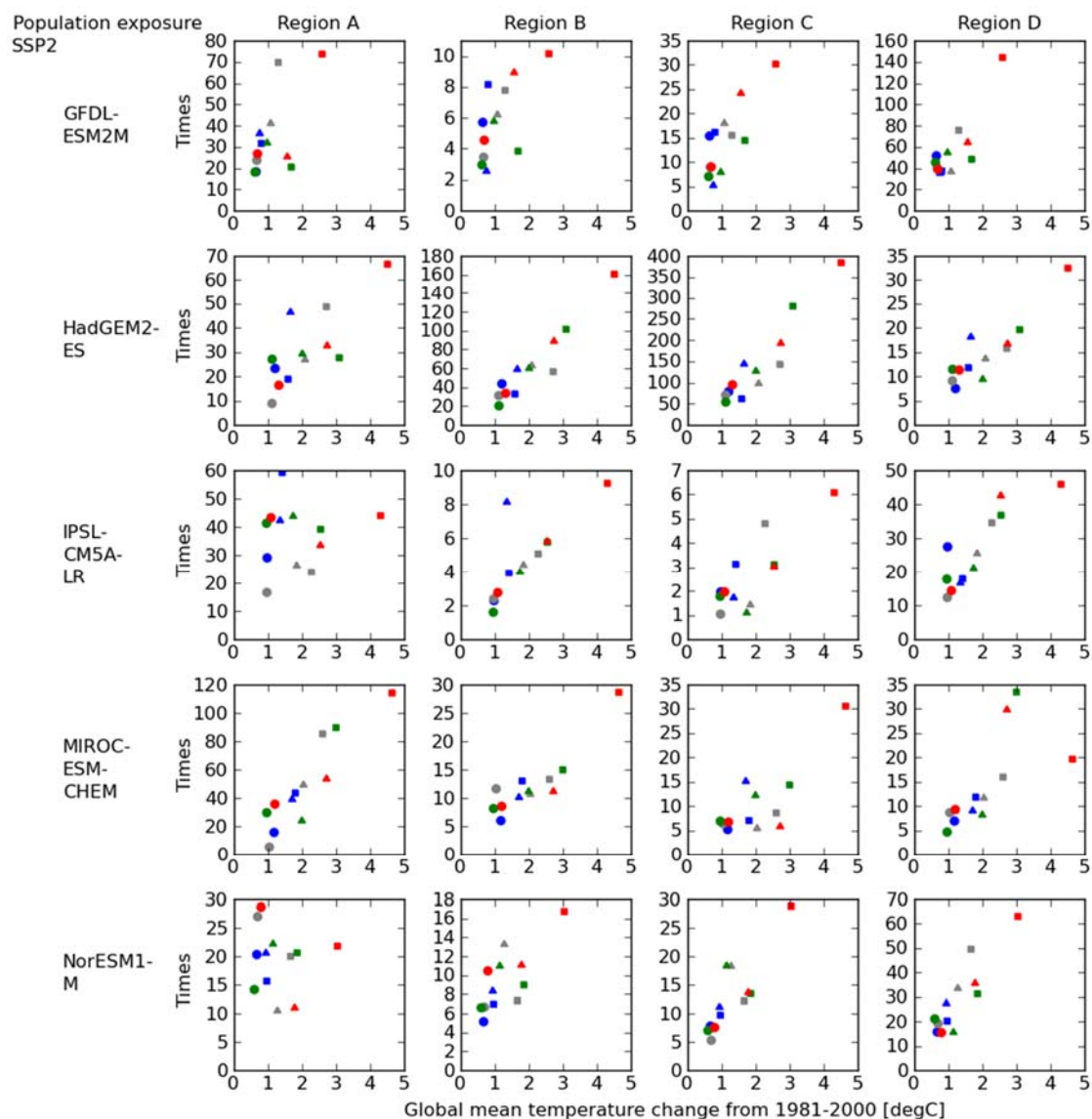
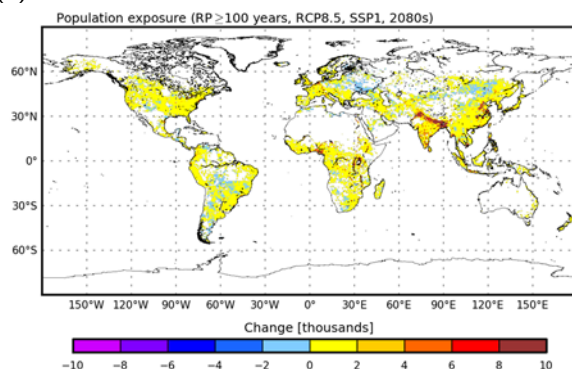


図 3-1-1-②-d_3 図3-1-1-②-d_2の領域A-Dにおける、各GCMの全球平均気温上昇度に対する洪水暴露人口の現在からの変化率。洪水暴露人口の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率(将来の平均値/現在の平均値)を算出した。マークが年代(○: 2020年代、△: 2050年代、□: 2080年代)、色がRCPシナリオに対応(青: RCP2.6, 灰: RCP4.5, 緑: RCP6.0, 赤: RCP8.0)する。経済社会シナリオはSSP2として洪水暴露人口を計算している。シミュレーション結果における気候の内部変動により、10年平均しても小さくないランダム誤差が残っていることに注意が必要。

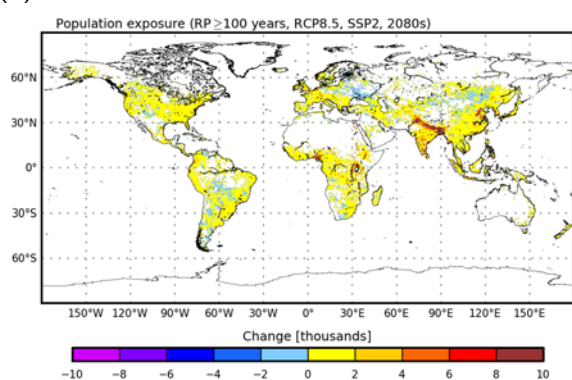
全球平均気温の上昇に従って洪水暴露人口は増加する傾向がある。また、北アメリカ北部, アジアは洪水暴露人口の変化率が大きい

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 ± 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

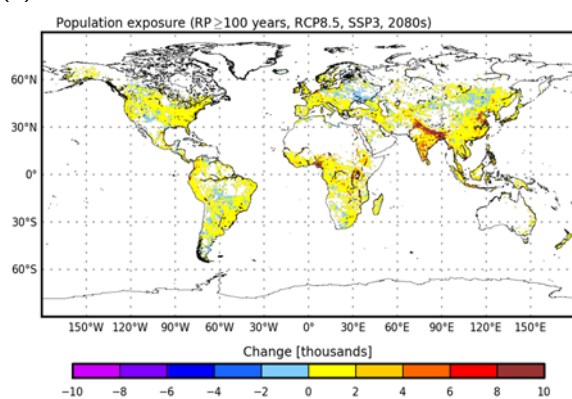


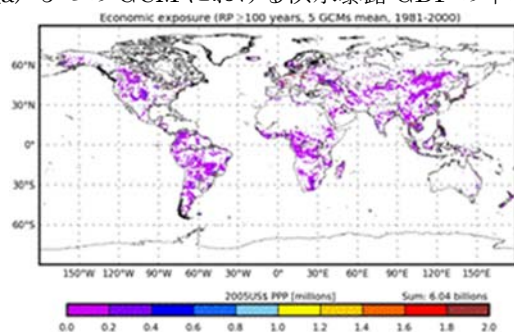
図 3-1-1-②-d_4 現在期間から2080年代(2070-2099)への洪水暴露人口の変化幅(将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には5つのGCMを用いている。また、RCP8.5を用いており、(a)SSP1、(b)SSP2、(c)SSP3の結果を示している。

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

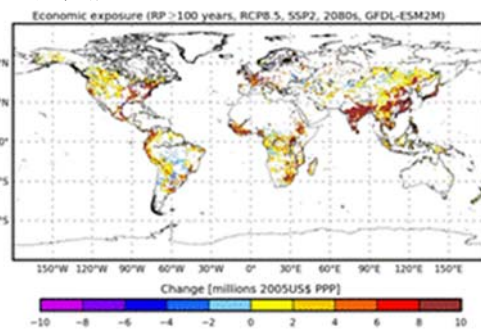
(a)、(b)、(c)に示したどのシナリオにおいても、洪水暴露人口の変化幅の空間分布は似ている。また、洪水暴露人口の増加幅を見ると、SSP1(32.3 百万人) < SSP2(40.9 百万人) < SSP3(55.5 百万人)となっている。また、各 SSP シナリオとも、南アジアで大幅な洪水暴露人口の増加がみられる領域がある。ユーラシア大陸やラテンアメリカの一部では、洪水暴露人口が減少する領域がみられるものの、世界全体としては洪水暴露人口はどの SSP シナリオであっても増加の予測である。

d-2. 洪水暴露 GDP

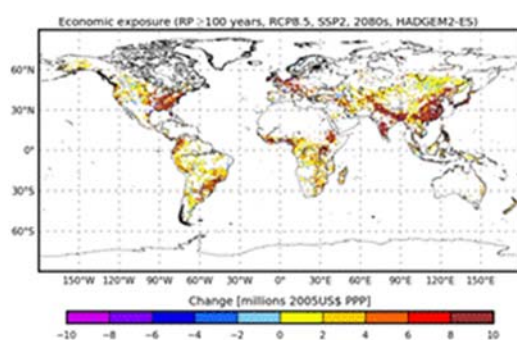
(a) 5つの GCM における洪水暴露 GDP の平均



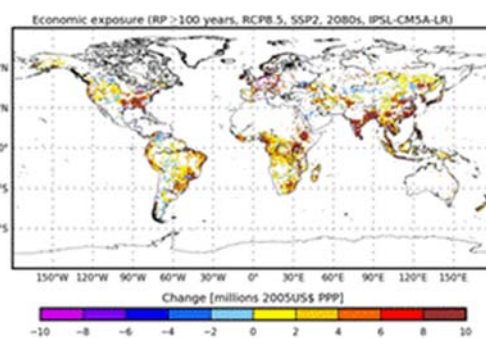
(b) 変化幅 2080s GFDL-ESM2M



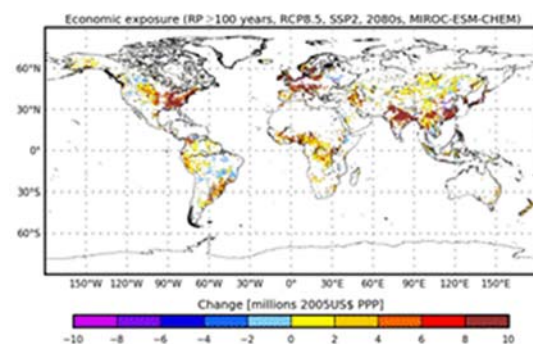
(c) 変化幅 2080s HadGEM2-ES



(d) 変化幅 2080s IPSL-CM5A-LR



(e) 変化幅 2080s MIROC-ESM-CHEM



(f) 変化幅 2080s NorESM1-M

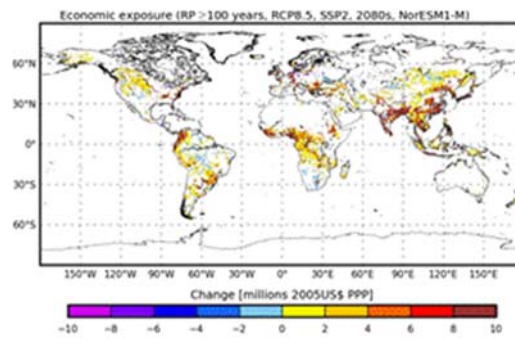
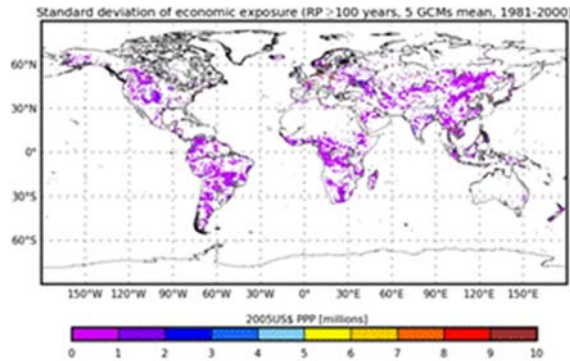


図 3-1-1-②-d_5 (a)現在(1981-2000年)の洪水暴露 GDP の 5GCM 平均値。(b-f)2080年代(2070-2099)、における各 GCM の現在気候からの洪水暴露 GDP の変化幅。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

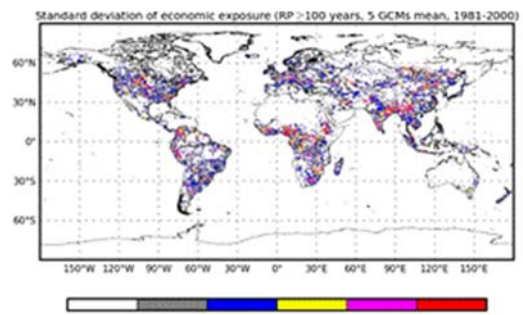
将来気候ではアジア、アフリカ低緯度域、南アメリカ等で洪水暴露 GDP が増加

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）、南アメリカの一部地域で、洪水暴露人口と比べて洪水暴露 GDP が大きく増加している。

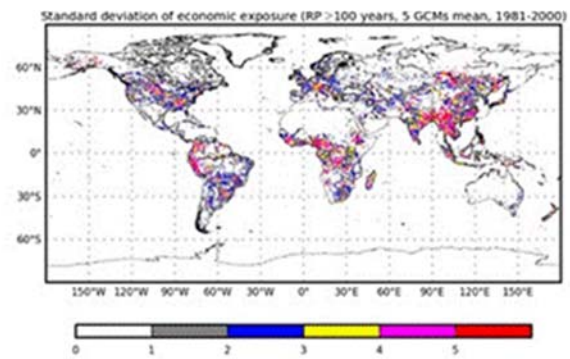
(a) 標準偏差（現在期間）5GCM 平均 1981-2000



(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

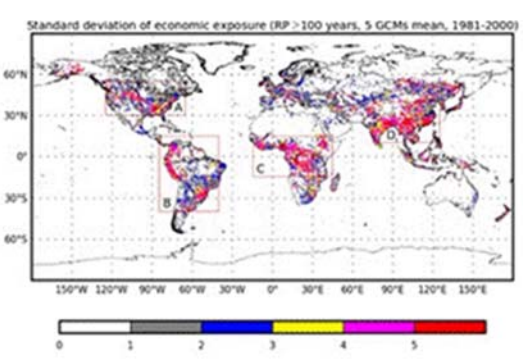


図 3-1-1-②-d_6 (a)現在期間(1980-2000)における 5 つの GCM の洪水暴露 GDP の標準偏差の平均。各 GCM の現在期間の標準偏差以上の平均値変化(将来期間の平均値から現在期間の平均値を引いた値)を示した GCM の数 : (b)2020s、(c)2050s、(d)2080s。将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

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。

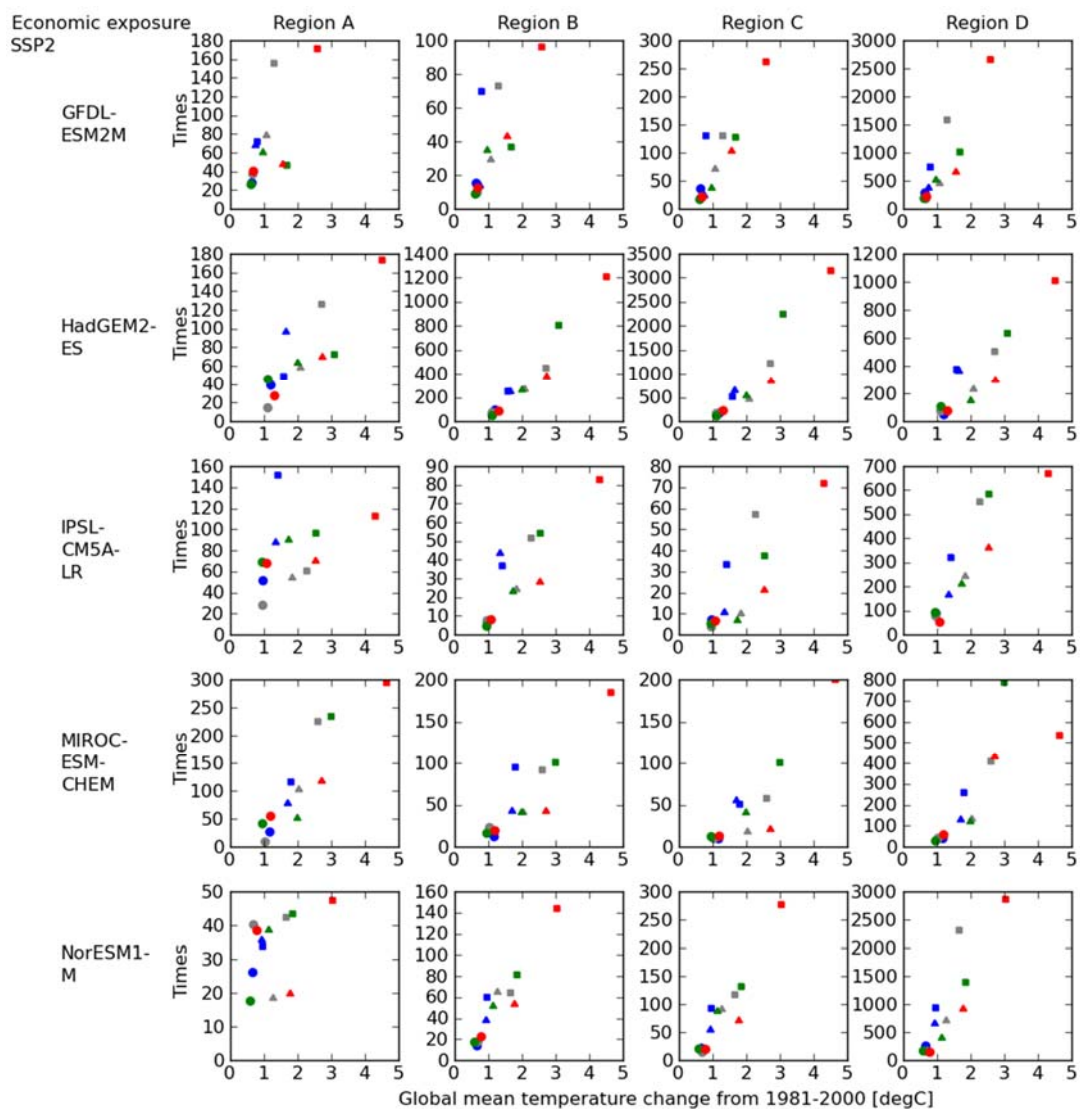
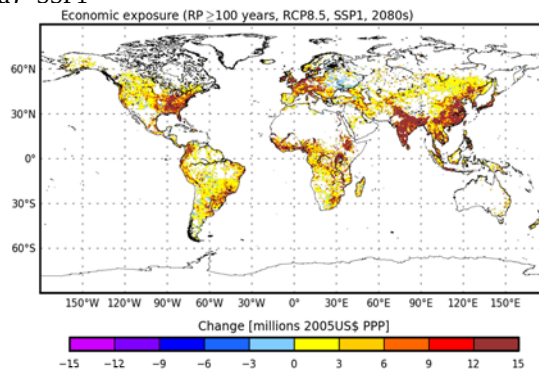


図 3-1-1-②-d_7 図 3-1-1-②-d_6 の領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する洪水暴露 GDP の現在からの変化率。洪水暴露 GDP を各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代 (○: 2020 年代、△: 2050 年代、□: 2080 年代)、色が RCP シナリオに対応 (青: RCP2.6, 灰: RCP4.5, 緑: RCP6.0, 赤: RCP8.0) する。経済社会シナリオは SSP2 として洪水暴露人口を計算している。シミュレーション結果における気候の内部変動により、10 年平均しても小さくないランダム誤差が残っていることに注意が必要。

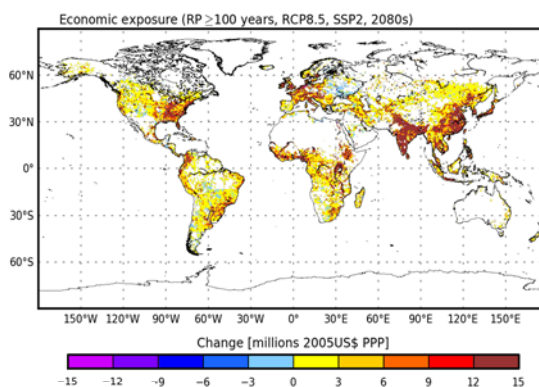
全球平均気温の上昇に従って洪水暴露 GDP は増加する傾向がある。アジアは洪水暴露 GDP 変化率が著しい

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

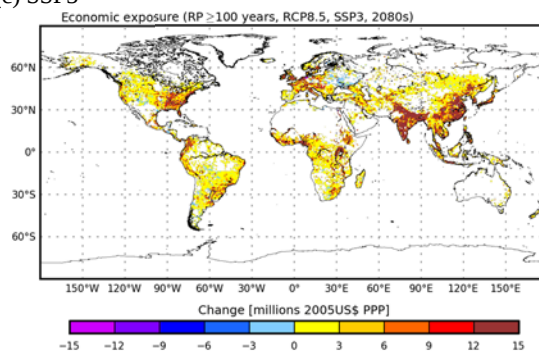


図 3-1-1-②-d_8 現在期間から2080年代(2070-2099)への洪水暴露GDPの変化幅(将来期間と現在期間平均値の差)。将来期間および現在期間の平均値の計算には5つのGCMを用いている。また、RCP8.5を用いており、(a)SSP1, (b)SSP2, (c)SSP3の結果を示している。

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(19420億2005US\$PPP) > SSP2(16374億2005US\$PPP) > SSP3(8640億2005US\$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、人口増加が大きいため洪水暴露人口の増加幅は大きく、洪水暴露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。

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として IPCC などでも取り上げられてきた。セクタ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）。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 60 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。

<指標の一覧>

熱関連超過死亡数：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。

e-1. 熱関連超過死亡数

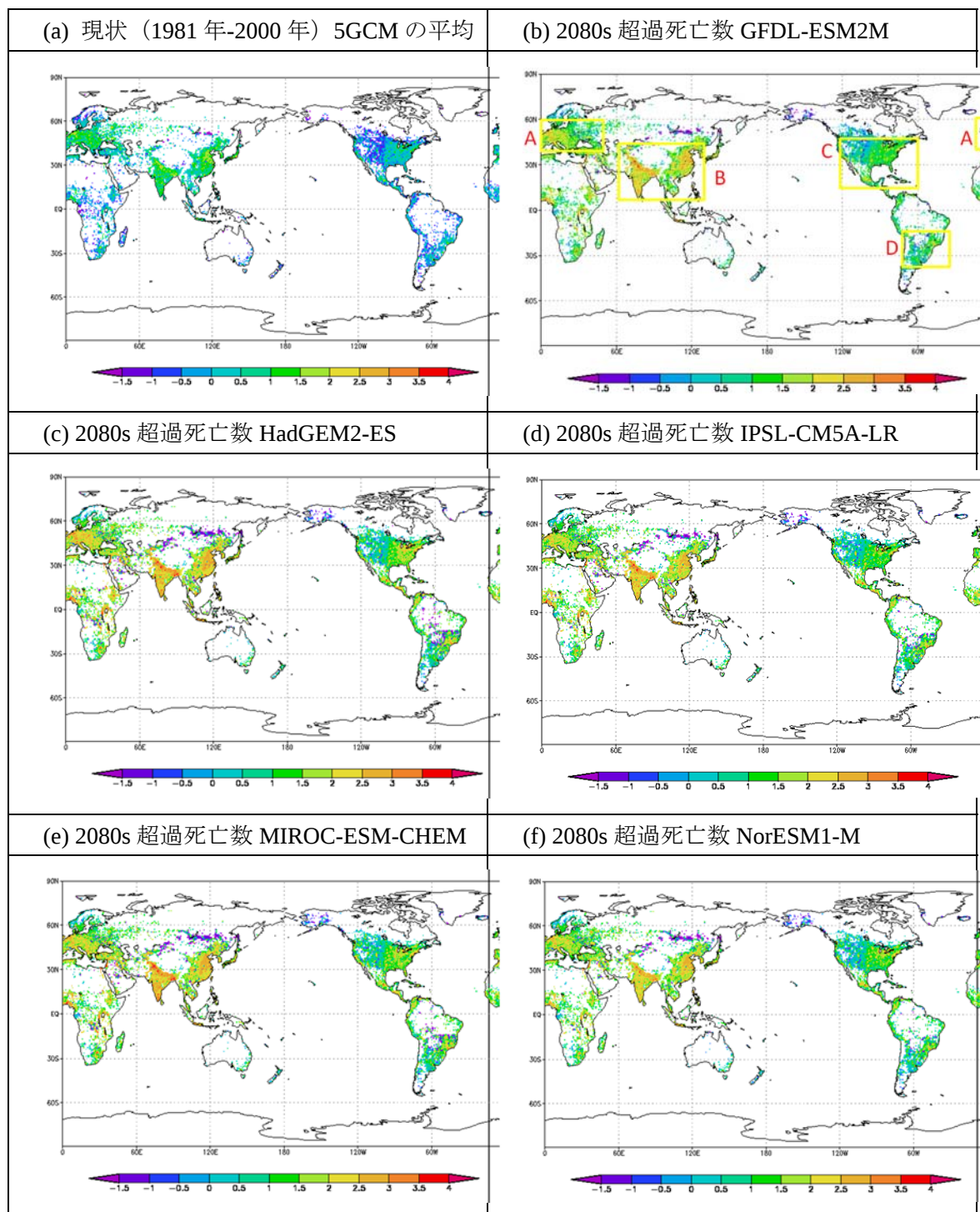


図 3-1-1-②-e_1 現在（1981－2000 年）の熱関連超過死亡数の平均値。(b-f)2080 年代（2070-2099）での各 GCM の超過死亡数。(a)～(f)について 1 グリッドの大きさは $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ であり、グリッド当たりの超過死亡数（人／年）について LOG10 をとり表示している。なお、将来シナリオは RCP8.5 および SSP2 を用いている。

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°)

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3-1-1-②-e_1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3-1-1-②-e_1(b))について、詳しくみていきたい。

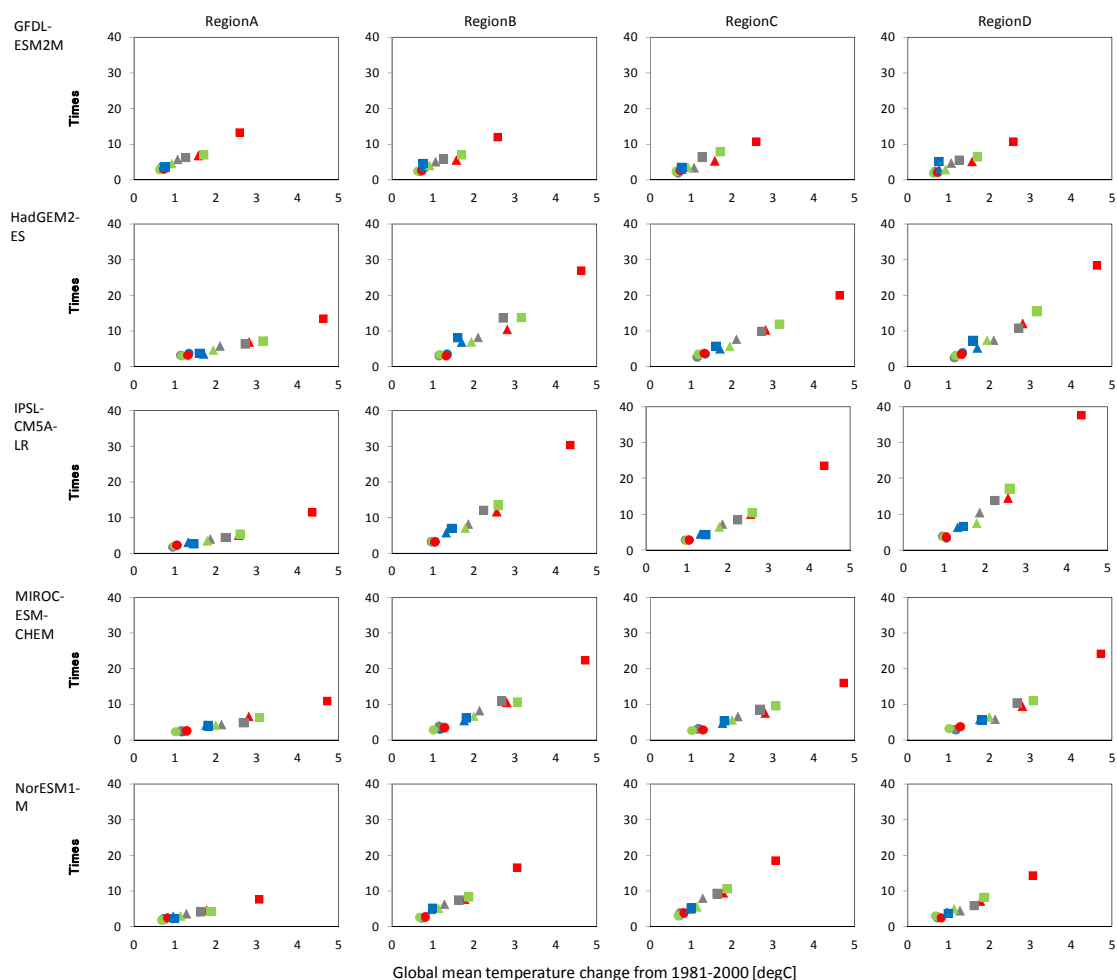


図 3-1-1-②-e_2 図 3-1-1-②-e_1 の領域 A-D における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する熱関連超過死亡数の現在からの変化率。熱関連超過死亡数の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの比率（将来の平均値／現在の平均値）を算出した。マークが年代（○：2020 年代、△：2050 年代、□：2080 年代）、色が RCP シナリオに対応（青：RCP2.6、灰：RCP4.5、緑：RCP6.0、赤：RCP8.5）する。社会経済シナリオは SSP2 として熱関連超過死亡数を計算している。

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 3-1-1-②-e_1 (b)）について、年次別比較を行った（図 3-1-1-②-e_2）。モデルによらず、熱関連超過死亡数が増加している。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。

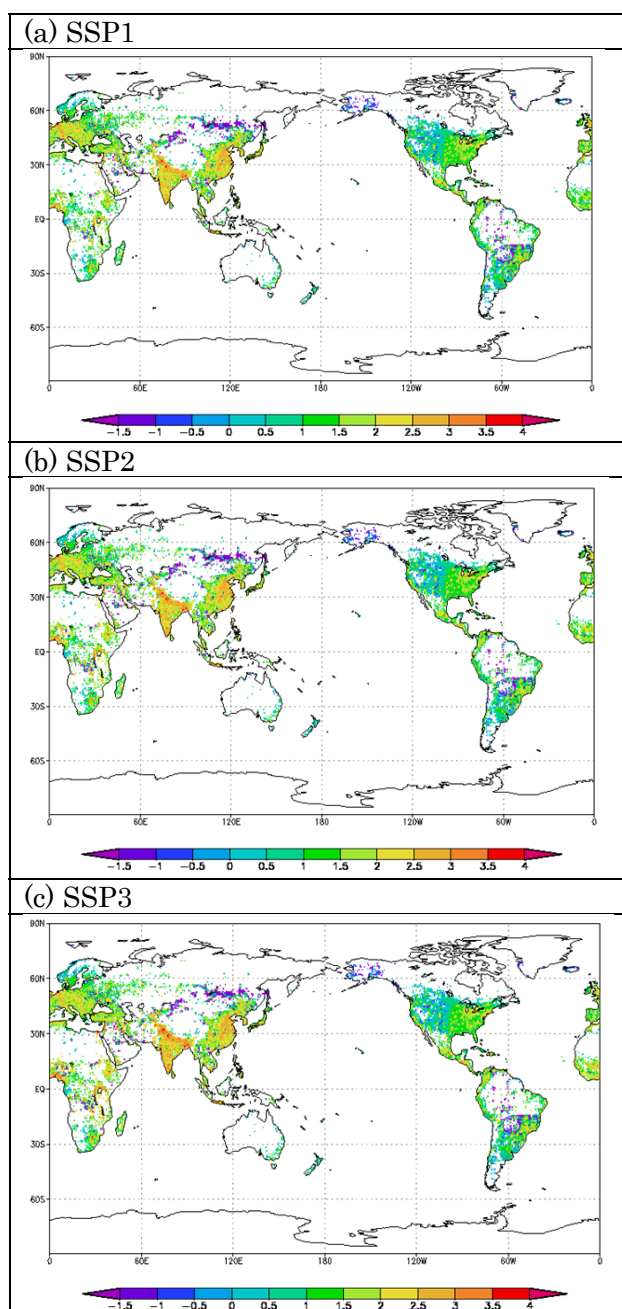


図 3-1-1-②-e_3 5モデルの結果を平均した 2080 年代の RCP8.5 について熱関連超過死亡数。RCP8.5 を用いており (a)SSP1、(b)SSP2、(c)SSP3 の結果を示している。図 3-1-1-②-e_1 と同様、1 グリッドの大きさは $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ であり、グリッド当たりの超過死亡数 (人/年) について LOG10 で表示している。

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 3-1-1-②-e_3 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、図 3-1-1-②-e_3 と同じく 2080 年代・RCP8.5 について、SSP2 を前提とし、5 モデルの結果を平均せずに個別に示した図 3-1-1-②-e_1 と図 3-1-1-②-e_3 を比べてみると、気候予測の不確実性の幅 (図 3-1-1-②-e_1 の(b)~(f)の違い) と比較して SSP 間の相違 (図 3-1-1-②-e_3 の(a)~(c)の違い) が相対的に小さいことが分かった。

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」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。ここでは、「溶存酸素」及び「輸出生産」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。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。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。

< 指標の一覧 >

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。
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す。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。

f-1. 貧酸素水塊体積

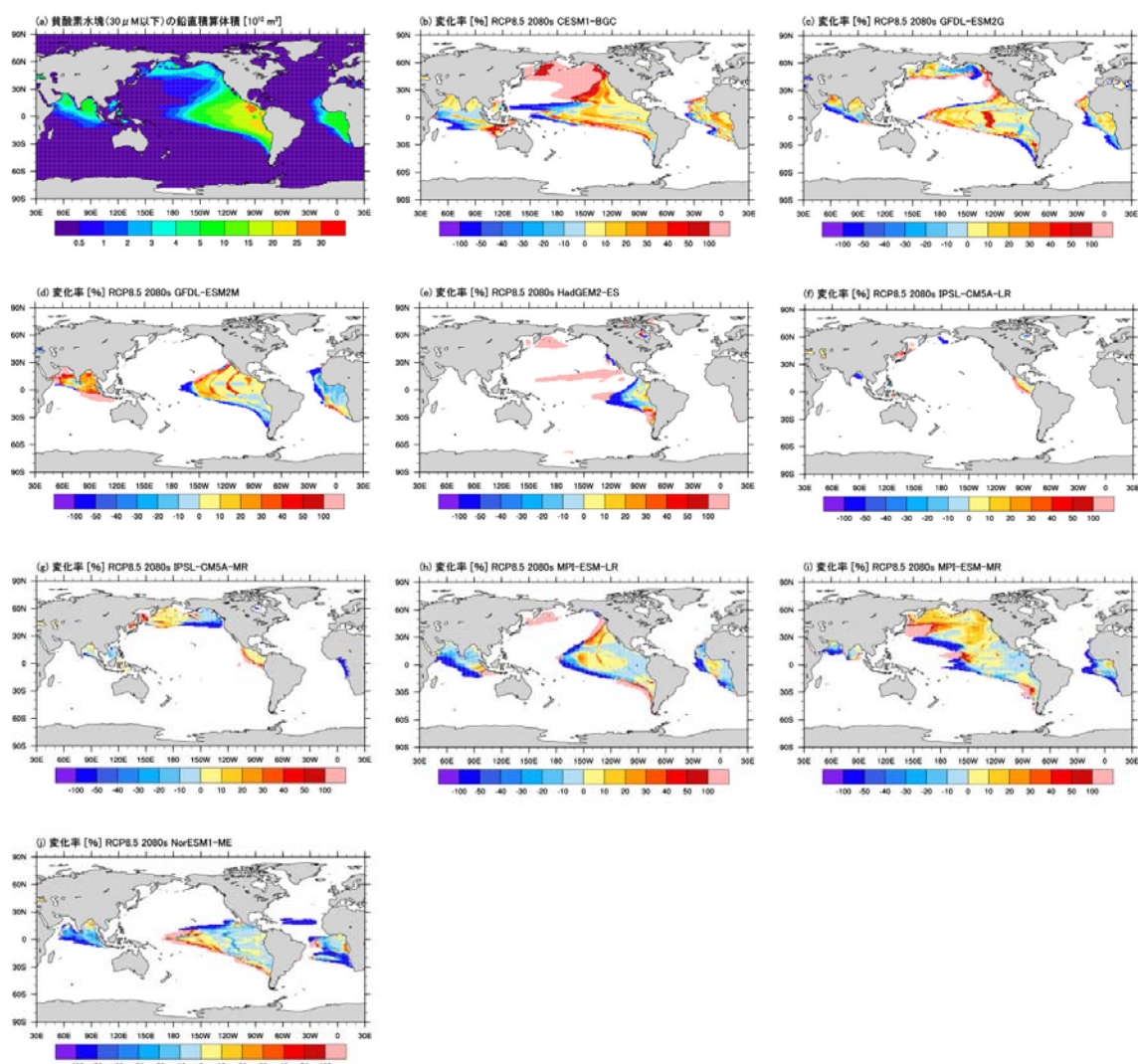


図 3-1-1-②-f_1 (a)現在 (1981-2000 年) の貧酸素水塊($30 \mu\text{M}$ 以下)の鉛直積算体積の 9GCM 平均値 (10^{12} m^3)、(b-j)2080 年代 (2080-2099 年)、RCP8.5 シナリオでの各 GCM の現在気候からの貧酸素水塊の鉛直積算体積の変化率 (%)

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 (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。

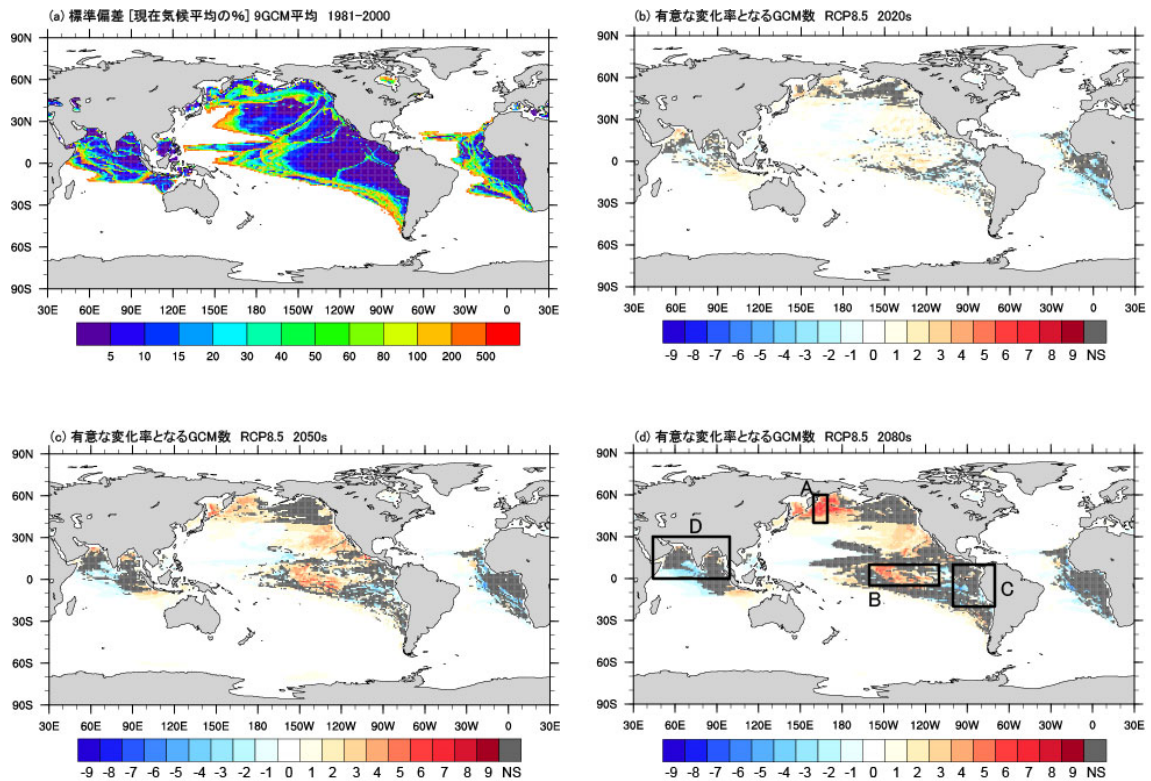


図 3-1-1-②-f_2 (a)各 GCM にて現在 (1981-2000 年) の貧酸素水塊($30\mu\text{M}$ 以下)の鉛直積算体積の標準偏差 (σ) を 20 年平均値のパーセンテージで示した値 (変動係数) の 9GCM 平均値、(b-d) RCP8.5 シナリオにおいて、貧酸素水塊の鉛直積算体積の現在からの変化量 (各年代平均) が $\pm 1\sigma$ 以上となる GCM 数。NS は $+1\sigma$ 以上の GCM と -1σ 以下の GCM があることを示す。2020s (2020-2039 年)、2050s (2050-2069 年)、2080s (2080-2099 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_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_2 (d))。

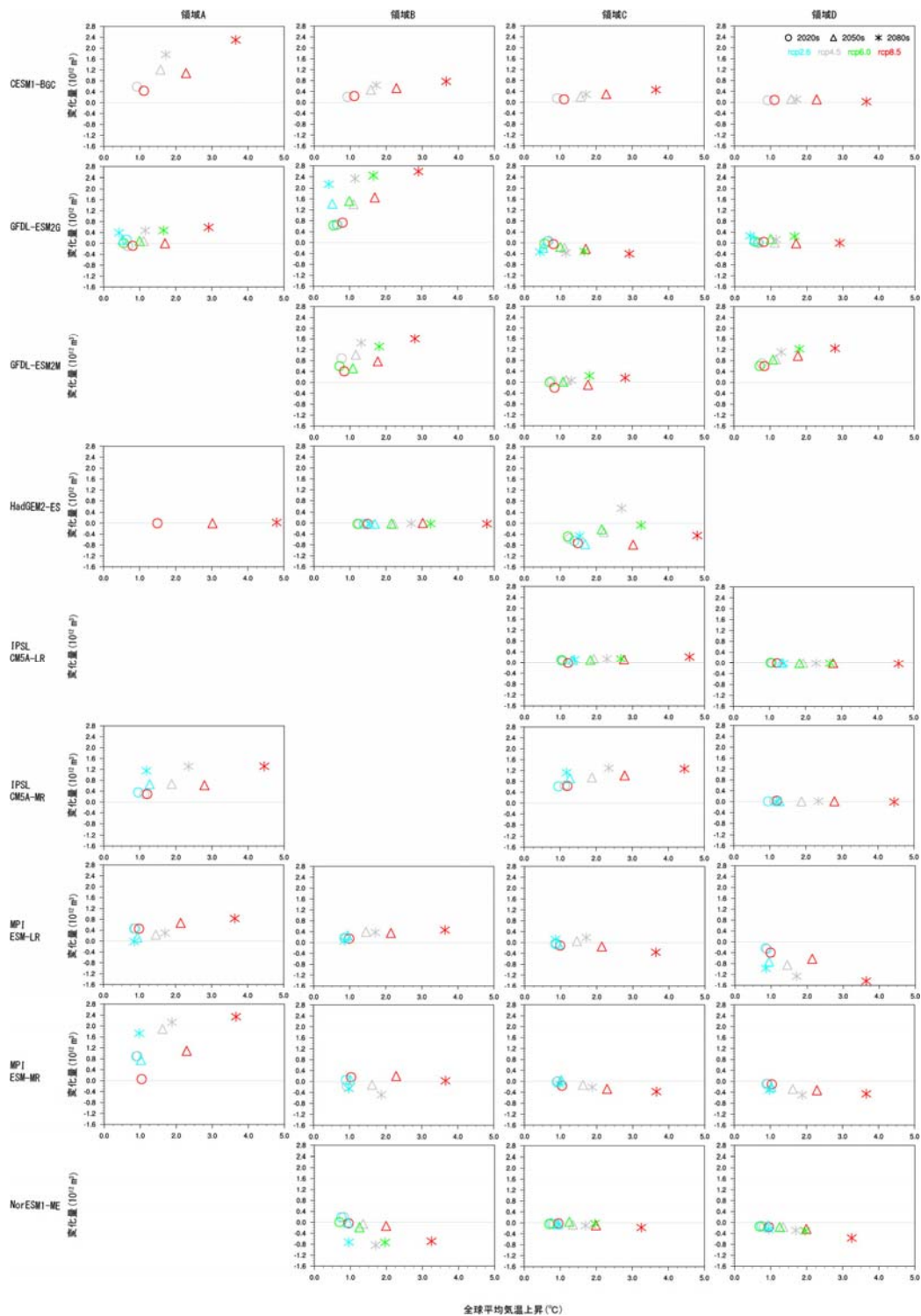


図 3-1-1-②-f_3 図 3-1-1-②-f_2 (d)の領域における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する貧酸素水塊体積の現在からの平均変化量。貧酸素水塊体積の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化量を算出した。マークが年代 (2020 年代 (2020-2039 年)、2050 年代 (2050-2069 年)、2080 年代 (2080-2099 年))、色が RCP シナリオに対応する。なお、当該領域に貧酸素水塊が存在しない GCM または RCP シナリオは示していない。

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

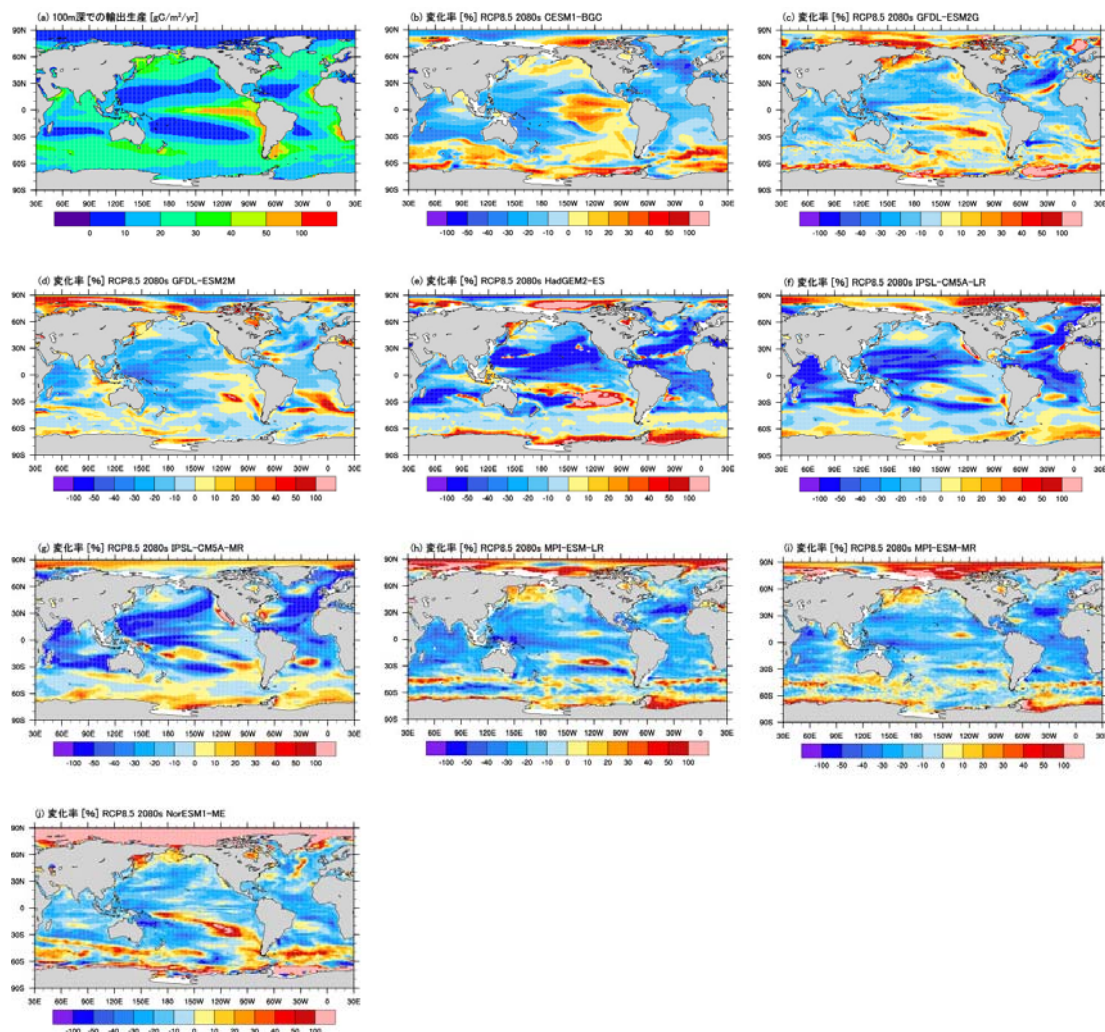


図 3-1-1-②-f_4 (a)現在(1981-2000年)の100m深における輸出生産の9GCM平均値($\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$)、(b-j)2080年代(2080-2099年)、RCP8.5シナリオでの各GCMの現在気候からの輸出生産の変化率(%)

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_4(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。

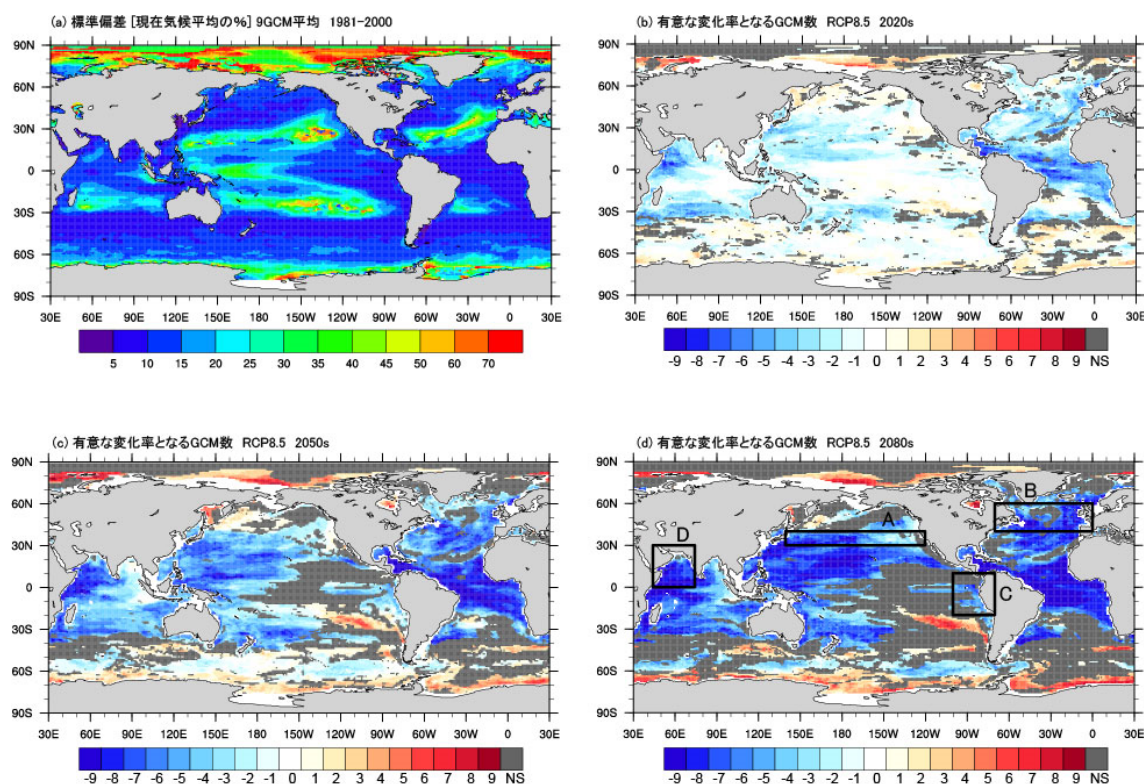


図 3-1-1-②-f_5 (a)各 GCM にて現在（1981-2000 年）の輸出生産の標準偏差（ σ ）を 20 年平均値のパーセンテージで示した値（変動係数）の 9GCM 平均値、(b-d) RCP8.5 シナリオにおいて、輸出生産の現在からの変化量（各年代平均）が $\pm 1\sigma$ 以上となる GCM 数。NS は $+1\sigma$ 以上の GCM と -1σ 以下の GCM があることを示す。2020s（2020-2039 年）、2050s（2050-2069 年）、2080s（2080-2099 年）

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_5 (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_5 (d)）について詳しく見てみることにした。

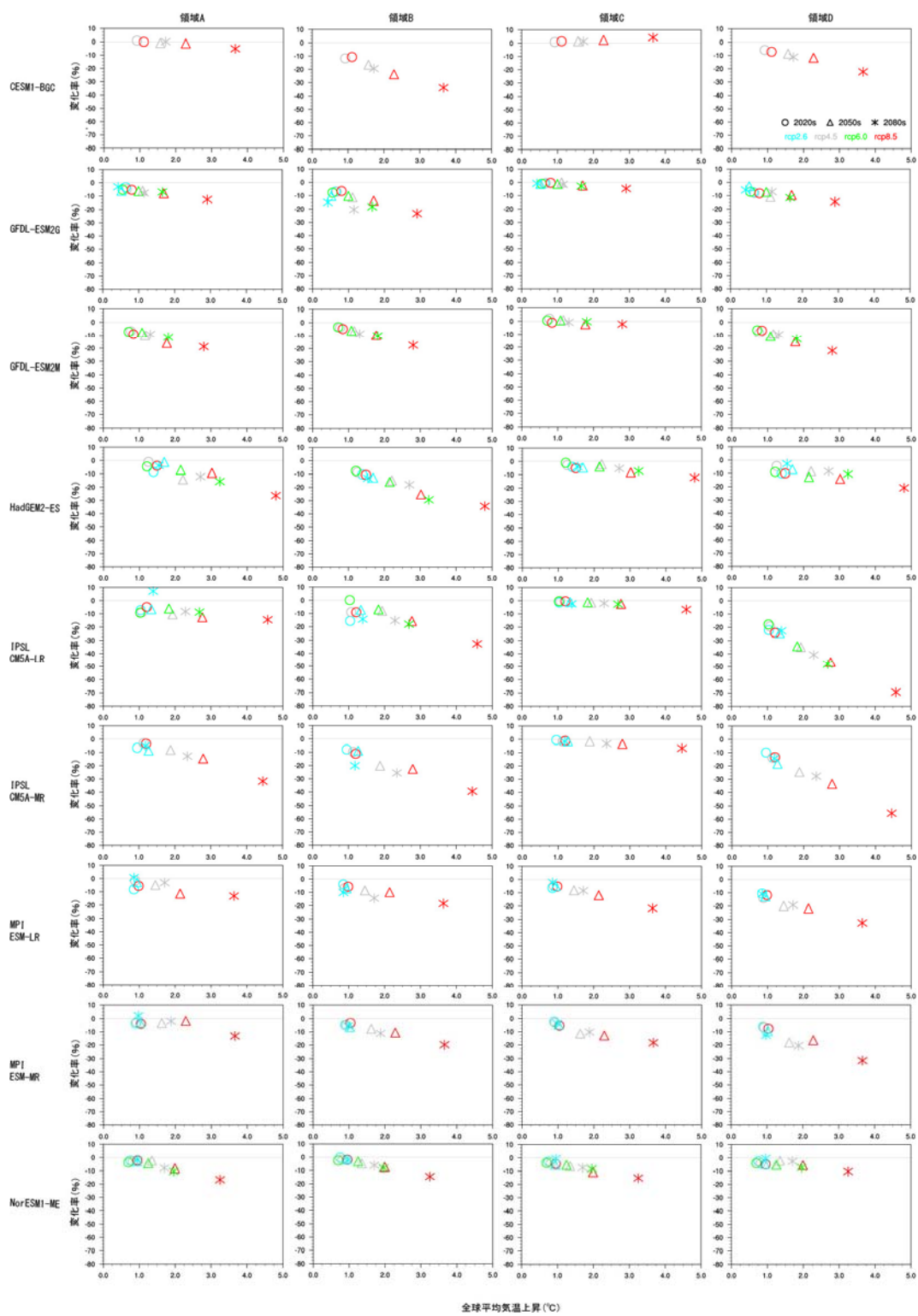


図 3-1-1-②-f_6 図 3-1-1-②-f_5 (d)の領域における、各 GCM の全球平均気温上昇度に対する輸出生産の現在からの変化率。輸出生産の各年代平均値を領域平均し、現在気候からの変化率を算出した。マークが年代（2020年代（2020-2039年）、2050年代（2050-2069年）、2080年代（2080-2099年））、色が RCP シナリオに対応する。

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。

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、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）が、表 3-コラム 1_1 である。表 3-コラム 1_1 では、ICA-RUS で独自の定量分析を行っている項目、本報告書で分析結果を記載している項目も示した。

気候変動リスク相互作用の評価

気候変動によって生じる様々な影響は、お互いに密接に関係している。このような気候変動リスクの相互作用について検討を行うことも、ICA-RUS の重要な目標の一つである。私たちは、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-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。気候システムの変化によって、作物生産性の減少など、自然システムの変化が生じる。これらの変化は、食料供給の不安定化や食料安全保障の悪化など、社会システムの変化をもたらす。これらの変化はさらに、栄養不足の増加や移住の増加など、人間システムに影響を及ぼす。なお、ここでは、場所によっては気候変動によって作物生産性が増加するなど、気候変動による好影響も示されている。今後はこのようなリスクの相互作用までを考慮した定量化を行い、リスクのトレードオフ構造について明らかにすることで、気候変動のリスク管理戦略の構築に貢献する予定である。

表 3・コラム 1_1 ICA-RUS に参画する専門家の文献調査によってまとめた、気候変動リスクの包括的な一覧表（図 1 に示す 5 つのカテゴリ（自然、社会、人間、生態系）に分類して表示した。ICA-RUS で独自の定量分析を行っている項目を○、そのうち本報告書で分析結果の記載がある項目を◎で示す。）

部門	リスク項目	定量分析	部門	リスク項目	定量分析
食料	作物生産量の減少	◎	社会	島嶼地域への悪影響	
	作物生産量の増加	◎		文化遺産の損傷	
	牧草生産量の減少	○		居住地の移動	
	牧草生産量の増加	○		紛争の激化	
	家畜生産量の減少		災害	洪水の増加	◎
	家畜生産量の増加			土砂災害の増加	
	病害の増加			家屋被害の増加	
	農地被害の増加			海難事故の増加	
	漁獲量の減少	◎	健康	水難事故の増加	
	漁獲量の増加	◎		熱中症や熱関連死亡の増加	◎
	肥料利用の増加	○		寒冷関連死亡の減少	○
	食料流通の変化	○		下痢の増加	
	食料貿易の変化	○		低栄養の増加	
	食料価格の上昇	○		水媒感染症の増加	
	飼料価格の上昇	○		食料媒介疾患の増加	
	食料供給の不安定化	○		動物媒介感染症の増加	○
	食料安全保障の悪化	○		動物媒介感染症の減少	○
水資源	河川流量の減少	◎		人間媒介感染症の増加	
	河川流量の増加	◎		PTSDなどの精神疾患の増悪	
	土壌水分の減少	◎		呼吸器疾患の増加	
	土壌水分の増加	◎	生態系	生態系生産量の減少	◎
	河川水温の上昇			生態系生産量の増加	◎
	河川水質の悪化			土壌流出の増加	◎
	沿岸部の塩水化			土壌有機物の減少	◎
	湖沼水温の上昇			藻類などの繁茂	
	湖沼水質の悪化			窒素酸化物放出の増加	◎
	地下水質の悪化			森林火災の増加	○
	地下水量の減少	◎		森林の衰退と枯死	○
	水資源の減少	◎		植生帯の変化	
	水資源の増加	◎		マングローブ林や湿原の減少	
	水需要の増加	○		害虫の増加	
	水処理費用の増加			害虫の減少	
	水価格の上昇			生物多様性の低下	
	水安全保障の悪化	○		生物多様性の向上	
エネルギー	水力発電効率の低下	○	地球科学的 臨界現象	海洋生態系生産量の減少	◎
	水力発電効率の向上	○		海洋生態系生産量の増加	◎
	火力発電効率の低下			海洋表層栄養塩の増加	○
	原子力発電効率の低下			海洋表層栄養塩の減少	○
	冷房需要の増加			海洋炭酸カルシウムの溶解	○
	暖房需要の減少			海洋溶存酸素の減少	◎
	エネルギー需要の増加			海洋生物生息域の変化	◎
	エネルギー価格の上昇			海洋生物多様性の低下	○
	エネルギー供給の不安定化			北極海水の消滅	
産業	エネルギー安全保障の悪化			グリーンランド氷床の縮小	◎
	インフラ被害の増加			西南極氷床の崩壊	◎
	観光産業への悪影響			海洋深層循環の停止	○
	木材生産量の減少	○		ツンドラの消失	○
	木材生産量の増加	○		北方林の消失	○
	北極海航路の出現			サハラ緑化	
				熱帯雨林の大規模枯死	○

（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。仮に、対策を導入すれば、例えば近年の国際的な温暖化緩和目標となっている「2℃制約」を実現できるとしても、これらの対策の導入戦略の評価はさほど簡単ではない。第1に、温暖化の進行自体には疑いはないとしても、温暖化の影響も対策実施の効果も、時と場所で同じではない。第2に、温暖化も対策も長期的な問題であるので、「現在の世代と将来世代の間の費用の分担」という交渉相手のいない問題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。さらに、温暖化のリスク回避の対策をとること自体が、新たなリスクを生むこともある。予期せぬ障害のため計画が不十分にしか実行できなかったり、新たな科学的知見により中途段階で計画の見直しが行われる場合もある。

このように、対策の実施に当たっては空間的・時間的な多様性と不確実性の中で、実効性がある論理的な矛盾がなく、かつ社会が受容可能な方法を探さねばならない。

長期計画を策定するにあたり重要なのは、その計画が、将来の不確実性を念頭に置いたうえで、現時点での意思決定により策定されたものであると認識することである。

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。」¹

また、バーゲルマンも次のように主張する。「予測を検討するに当たって、結果は不確実であるという視点を失わないことが重要である。未来はわからないものである。予測は意思決定を助けるものであり、未来そのものではない。」²このように、意思決定の補助材料としての「予測」は、複数の未来に対する現時点での「戦略」であり、運命論的な未来を描くことではない。そのため、将来ありうる様々な姿を論理的かつ網羅的に描くことが不

¹ P.F.Drucker, "Technology, Management and Society", Harvard Business School, 1970

² RA. バーゲルマン、「ハーバードで教える R&D 戦略」、1987（和訳 日本生産性本部 1994）

可欠である。このような視点から、古くからモデル構築とシミュレーションが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整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
- 国際的な取り決めが十分に機能しないと結果はどう変わるのか

<方法>

1. 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、IPCC-第 2 次評価報告書まで用いられた単一のモデルによる評価ではなく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。これは、IPCC 第 3 次評価報告書の評価ベースとして作成された「新排出シナリオ特別報告書」³以降、この分野で広く用いられている方法である。本研究では、以下の異なる特徴を持つモデル群を用いた。

(1) MARIA-14 モデル（東京理科大学）

³ IPCC, “Emissions Scenarios”, (Nebojsa Nakicenovic eds.), Cambridge University Press, 2000

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化され、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内生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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 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整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)⁴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。

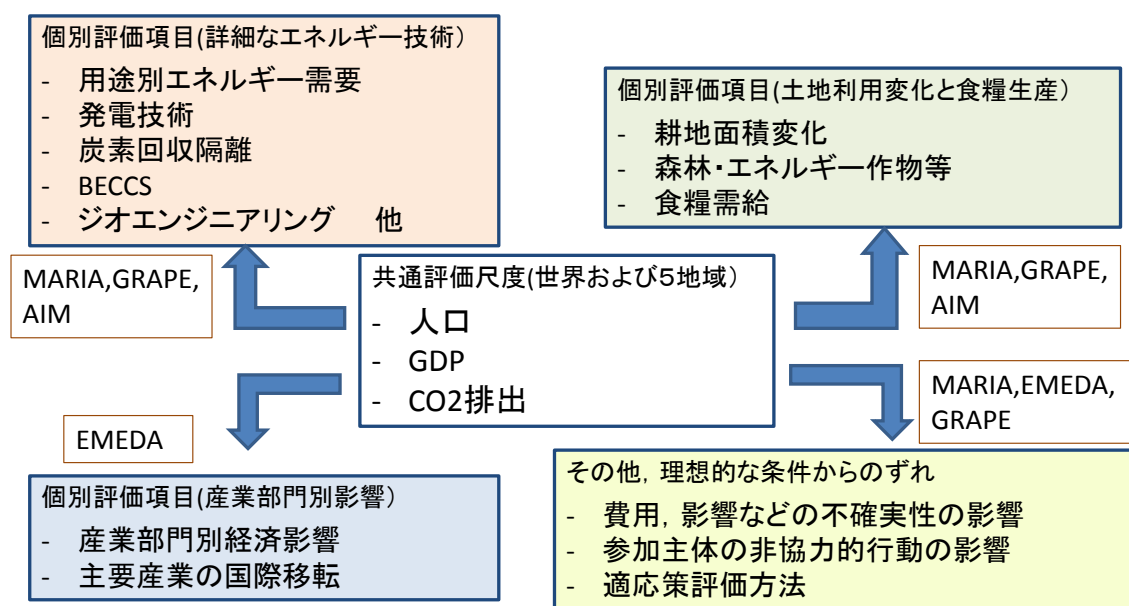


図 3-2-1-①_1 各モデルの提供する情報のフロー

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 CO2 排出量などは内生的に算出する。ただし、

- ① 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 CO2 排出量を導く構成となっている。

⁴ Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y. (2012) AIM/CGE [basic] manual, Discussion paper series, 2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, N.I.E.S

- ② 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 CO2 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。
- ③ AIM、EMEDA は各時点ごとの最適化計算を行う。従って CO2 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。⁵

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、単一のモデルですべてをカバーできない。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。例えば、バイオマスエネルギー技術の導入戦略策定には経済的視点と技術的視点だけでなく、農学的視点が必要となる。CCS における地下貯留の導入ポテンシャル評価には地質学的視点が必要となる。このように、戦略策定にはきわめて広い分野の相互影響を扱わねばならない。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。⁶

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。⁷ また、さらに、社会の複数主体のゲーム論的な相互認識行動や時として不合理に見える選択など、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、社会的な選択問題では、天体の動きに代表される自然科学のモデルと異なり、立脚点がそもそも多様である。しかし、温暖化対策の策定にあたり、そのような多様

⁵ 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)

⁶ 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/>

⁷ 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。

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。

このような背景を踏まえ、本節では、以下のモデルが参加した。なお、今回の評価では、適応、ジオエンジニアリングの分析は行っていない。適応、ジオエンジニアリングの分析は ICA-RUS でのリスク管理の「戦略」の検討の手順（2 章 1 節・図 2-1_1）では STEP3 に相当し、研究期間後期（2015～16 年）に取り組むことを予定している。

2. SSP-RCP シナリオについて

次に、本報告書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。

本報告書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）を将来の社会像として想定している。SSP シナリオは、本来社会・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である。そのため国別やグリッド別の詳細な情報を提供する目的で開発されている。しかし、2014 年 12 月の時点では、社会・経済に関する公開情報はなお国別 GDP、人口のみであり、エネルギー需給や温暖化ガス排出量については提供に至っていない。そのため、ここでは、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 CO2 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うこととした。

SSP シナリオは温暖化政策を積極的には導入しないいわばベースラインの社会像を与えるものである。温暖化政策導入時の社会経済影響は、当然、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環境意識が高まり、世界共通の省エネルギー・低炭素化社会が実現していれば、温暖化対策の導入は容易になると考えられるし、逆に世界が地域ごとに分断化されそれぞれが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厳しい費用負担を招くであろう。

そこで、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ととする。これを本研究では分析ケースと呼ぶ。

ここでは、目標として、SSP1-5 に対して分析ケースとしては 1.成り行きケース(BAU)、2. RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6 の放射強制力制約ケースの合計 5×5 ケース、さらに後述する戦略ケースでは異なる想定の場合を設定し比較することで実施することとした。

本研究では、マルチシナリオのもとでマルチモデルアプローチを行い、さらに様々な温暖化対策シナリオのもと評価を行うが、現時点では、表 3-1-2-①_1 の計算が終了している。(GRAPE は SSP-1,2,3 のベースラインと SSP2-RCP4.5, SSP2-RCP2.6 相当の試算結果を提供)

表 3-1-2-①_1 SSP-RCP 分析ケースの計算状況

		SSP-1	SSP-2	SSP-3	SSP-4	SSP-5
分析 ケ ー ス	BAU	M&E&A	◎	◎	M&A	M&A
	RCP8.5	M&E&A	M&E&A	M&E&A	M&A	M&A
	RCP6.0	M&E&A	M&E&A	M&E&A	M&A	M&A
	RCP4.5	M&E&A	M&E&A&G	M&E&A	M&A	M&A
	RCP2.6	M&E&A	◎	◎	M&A	M&A

(注1) A:AIM/CGE モデル E:EMEDA-MER モデル M:MARIA-14 モデル G:GRAPE-15
モデル

◎はすべてのモデルが提供

(注2)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3)SSP-5 を除き BAU でも放射強制力は 8.5W/m² に到達しない。RCP8.5 は、SSP-5 以外では実質的な温暖化抑制ケースの意味を持たない。

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。本研究では表 3-1-2-①_1 の行列の計算を行っているが、この結果、SSP-5 を除き BAU においても RCP8.5 の放射強制力に至らないこと、RCP6.0 と BAU の結果が極めて近いことから、表 3-1-2-①_2 にまとめたように、SSP-2 と SSP-3 を対象に、最も高排出となる BAU、最も低排出となる RCP2.6 および中間的な RCP4.5 の 3 ケースについて述べることとする。

表 3-1-2-①_2 本報告で取り上げるモデルシミュレーション結果

		MARIA-14	EMEDA-MER	GRAPE-15	AIM/CGE
SSP-2	BAU	○	○	○	○
	RCP4.5	○	○	○	○
	RCP2.6	○	○	○	○
SSP-3	BAU	○	○	○	○
	RCP4.5	○	○		○
	RCP2.6	○	○		○

なお、先に述べたよう各モデルの構成はそれぞれ異なっているため、RCP シナリオの計算手順もモデルによって異なる。例えば、逐次計算型のモデルでは時点ごとの CO₂ 排出経路を与える必要があるのに対し、通時型最適化モデルでは最終時点における累積排出量や放射強制力を制約とすることになる。

また、各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も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 地域への分割を採用し、モデル比較の際もこの 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が残る。今回は「中庸」SSP-2と「分断化社会」SSP-3 ケースについて結果を論じることとする。

表 3-1-2-①_3 SSP シナリオの世界5地域

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 OECD30 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5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か。CO₂だけでなくメタンなど非 CO₂-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 CO₂ 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 CO₂のほか土地利用変化起源の CO₂、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 CO₂ 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、2 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⁸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 CDR、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いため、ここでは直接は扱わない。

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 CO₂ 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 節 1 項の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、MARIA、GRAPE、AIM の 3 モデルが温暖化対策としての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。ただし、エネルギー経済モデルに組み込まれたモデルであるだけに簡易化されており、例えば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。そのため詳細な検討は農業モデル研究と慎重にすり合わせる必要がある。

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

⁸ 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。

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、前述のように、ここでは SSP-2 と SSP-3 における BAU、RCP2.6 および中間的な RCP4.5 の場合について示すこととする。

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。

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。SSP-3 ではやや世紀末にモデル間の乖離が生じる

世界全体の CO₂ 排出経路について、図 3-1-2-②-a_1 に SSP-2 および SSP-3 の結果を示す。BAU における CO₂ 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。これに対し、分断化社会である SSP-3 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。もともと前述の各 SSP の性格付けからも示唆されるよう、BAU においては地域分断型社会である SSP-3 は SSP-2 に対して 30-40%程度 CO₂ 排出量が多くなる。RCP4.5、RCP2.6 においては、おおむね各モデルが類似した傾向を示す。中で、GRAPE が SSP-2 における 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 CO₂ 排出削減を実施する。排出量の経路は下に凸な形状を示し、負の排出量に至るのは 21 世紀末であるのに対し、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。

SSP-2 および SSP-3 各シナリオにおける地域別の CO₂ 排出量のモデル比較を図 3-1-2-②-a_2 に示す。ここで、これらの排出量は、あくまで「どこで」削減を行ったかを示すものであり、「誰がどれだけ」削減を行ったかを直接示すものではない点に注意が必要である。排出権取引や CDM など、自国よりもより低コストで削減可能な地域が他にあれば、そこと共同して削減を行う制度があるためである。

初期値においてモデル間に不一致があるが、これは、①モデルによって化石燃料起源以外の CO₂ 排出および土地利用変化、森林および吸収源の見積もりと扱いにやや差があること、②2005 年時点が必ずしもモデルの初期値ではないことによる。2005 年時点からの変化量に着目すると、モデル間の整合性は RCP シナリオごとでは比較的整合的なパターンを与えているといえる。地域別に見た場合、傾向としてはモデル間でほぼ同様のパターンを示すものの、初期値においてずれが発生している。これは、上述の化石燃料起源以外の排出量の取り扱いに加え、各モデルの地域分割が厳密には一致していないためである。このず

これは、温暖化対策の社会経済影響を国あるいはさらに細分化する際には重要な問題となるが、地域別の変化傾向を見る場合には先と同じく本質的な問題とはならないと考えられる。

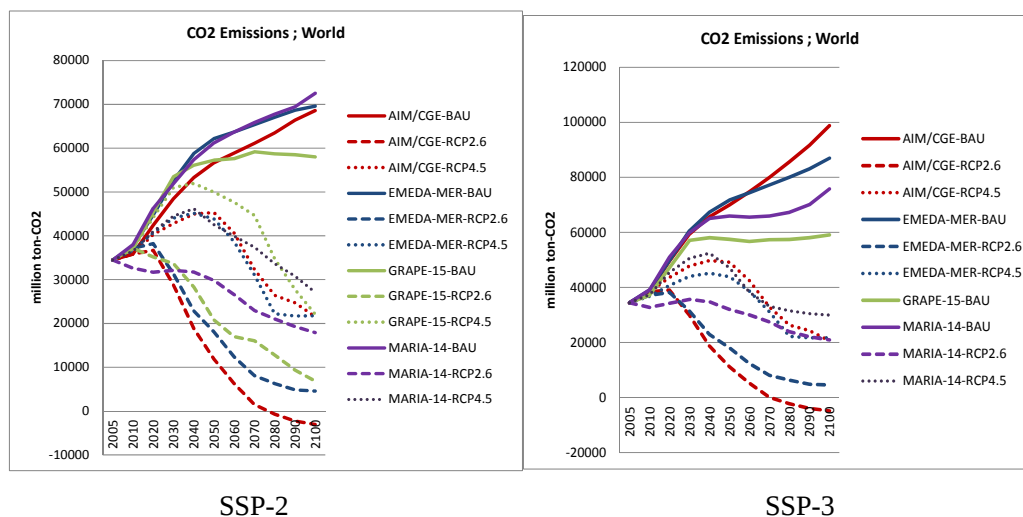
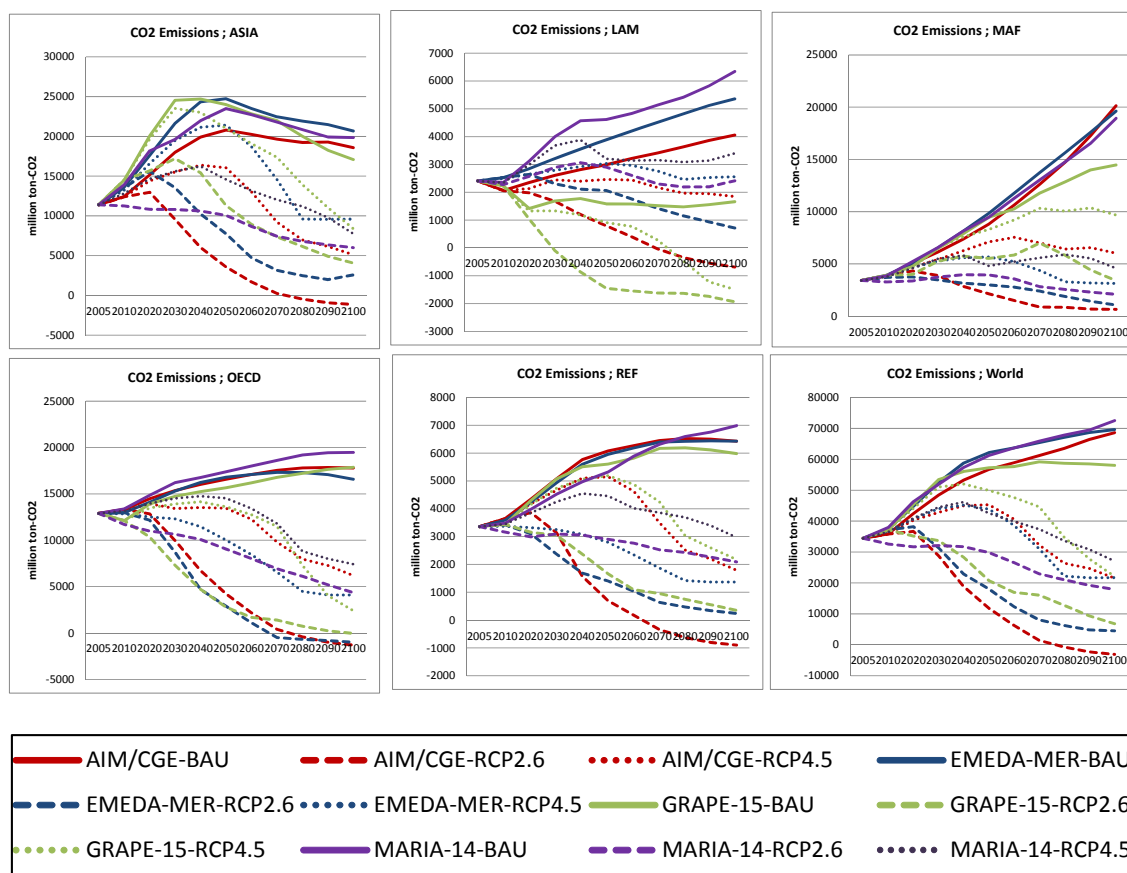
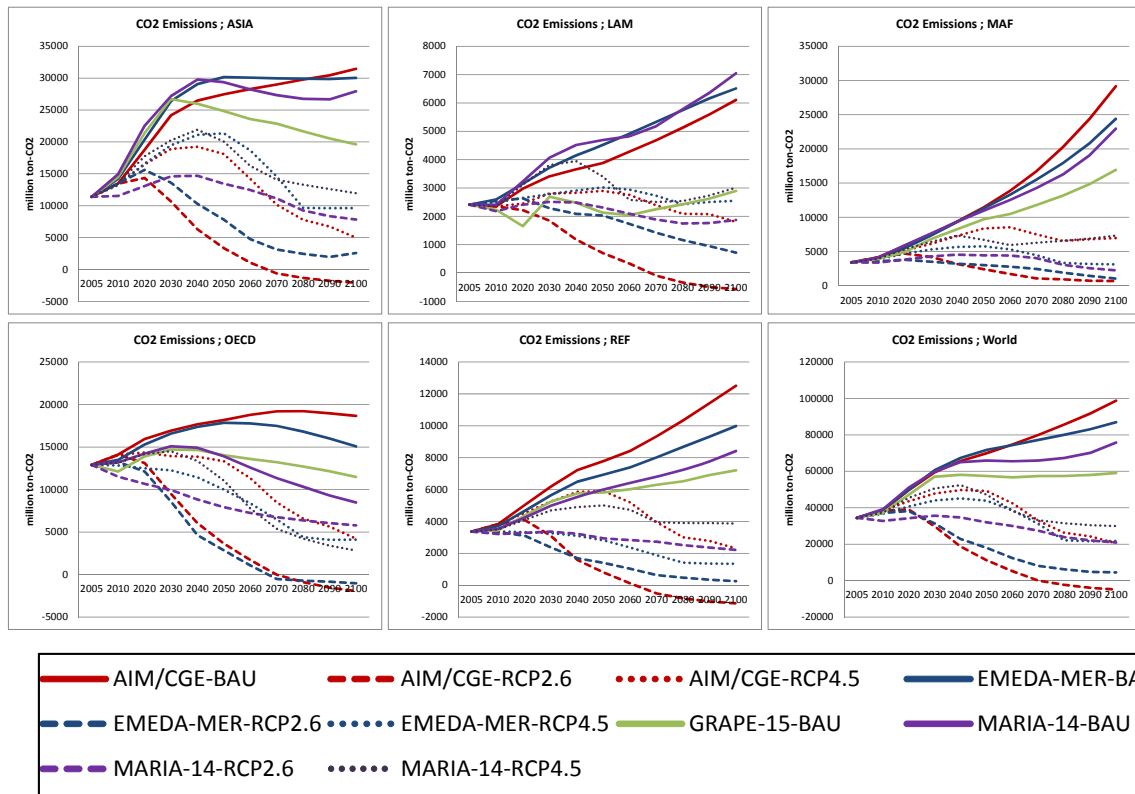


図 3-1-2-②-a_1 CO2 排出経路の総括(BAU、RCP2.6、RCP4.5) (million t-CO2)



(a) SSP-2



(b) SSP-3

図 3-1-2-②-a_2 SSP-2 および SSP-3 における地域別 CO2 排出のモデル比較

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。

図 3-1-2-②-b_1 に SSP-2 における各モデルの RCP 別 GDP-MER の地域別推移を示す。

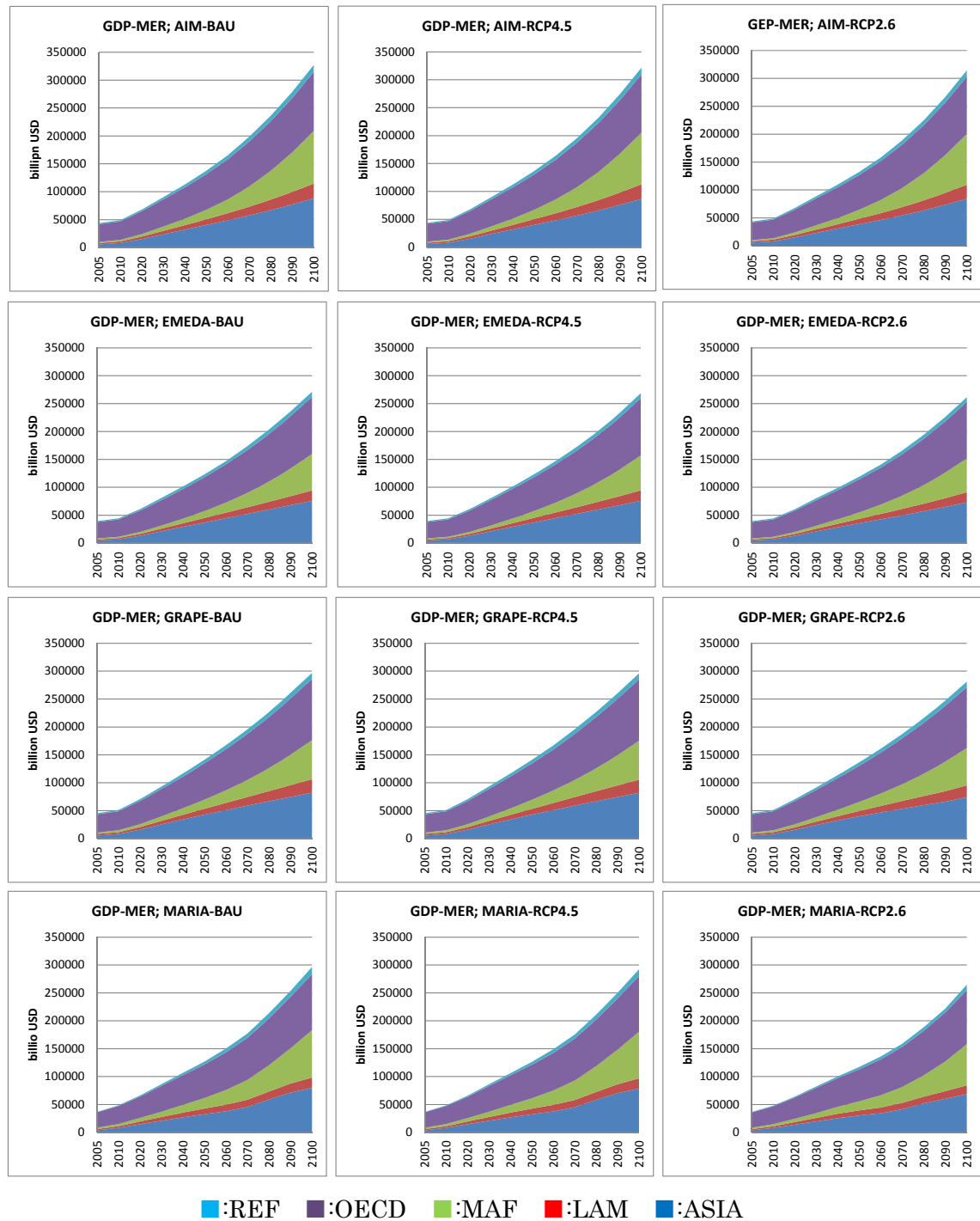


図 3-1-2-②-b_1 SSP-2 シナリオにおける GDP-MER のモデル=RCP ケース別推移
(billion US\$)

また、図 3・1・2・②-b_2 には同様に SSP-3 シナリオにおける RCP ケース別 GDP 地域別推移を示す。SSP-3 では、AIM、EMEDA、MARIA の 3 モデルが RCP ケース間のシミュレーション結果を与えている。いずれの場合も、モデル間、RCP 間でも判然とするほどの差異は見られず、温暖化対策による地域間格差の拡大は顕著ではないといえる。

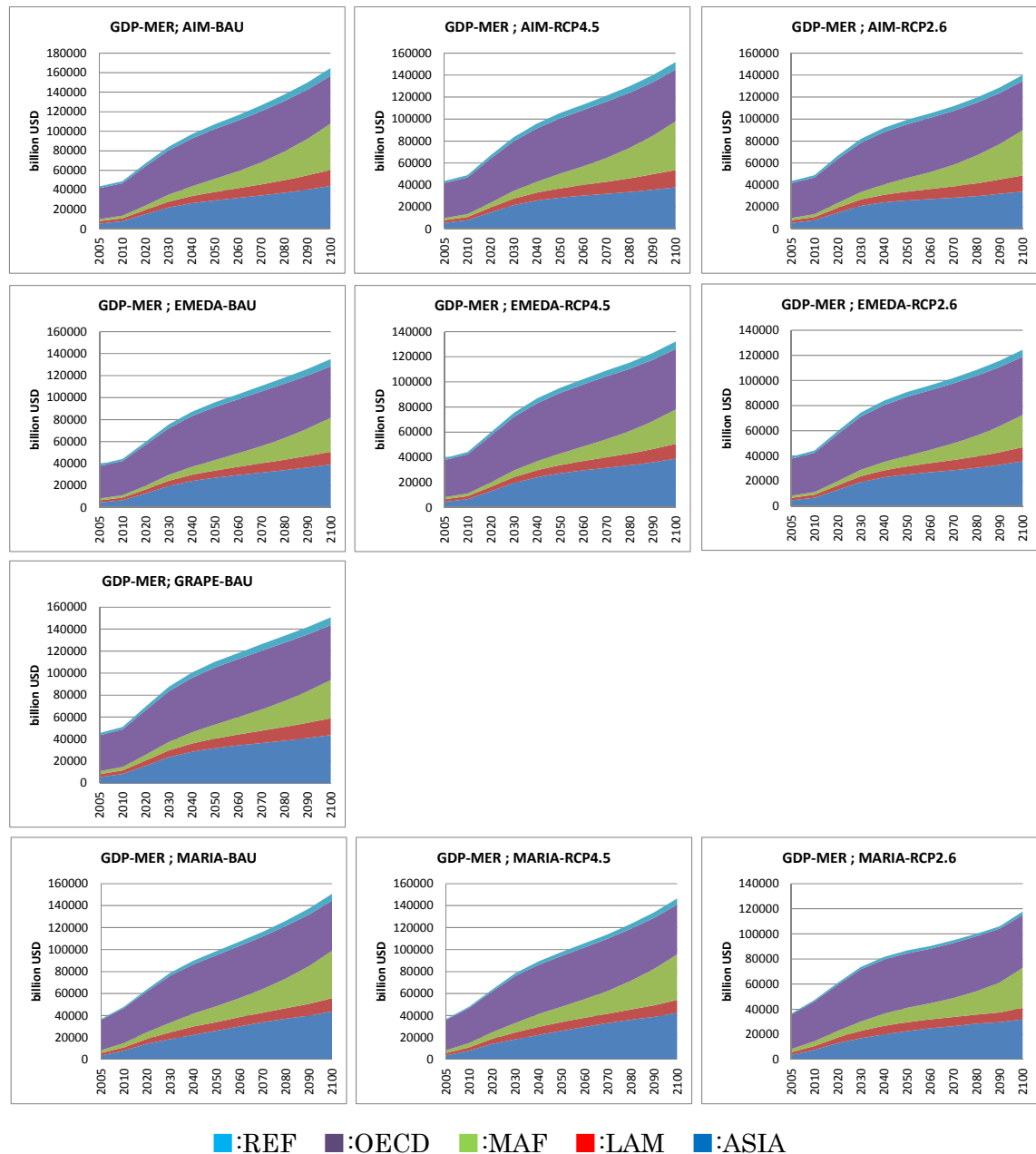
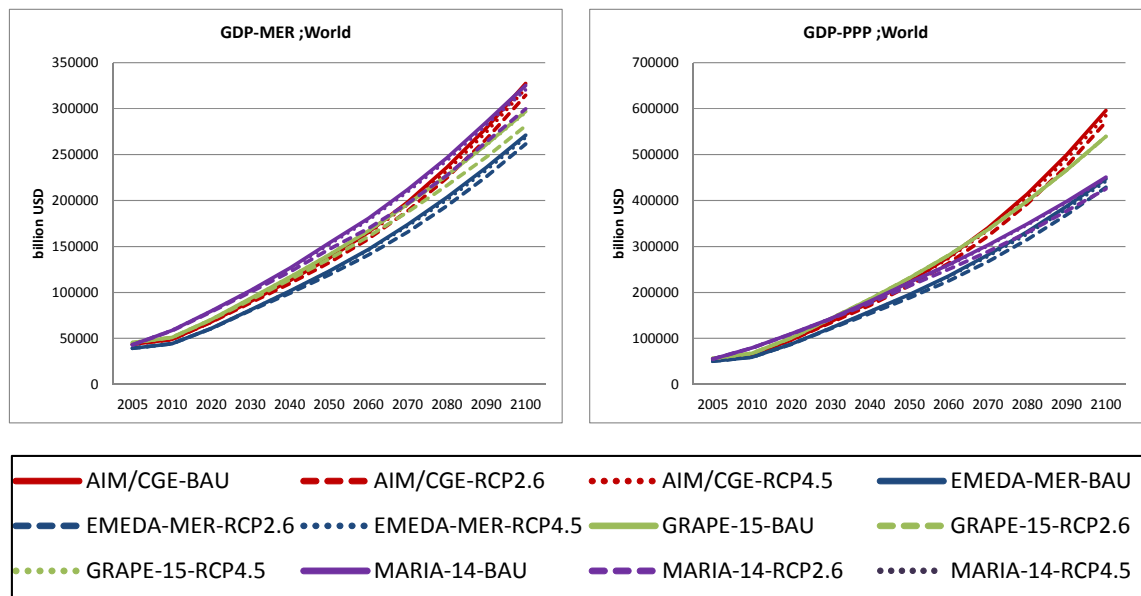


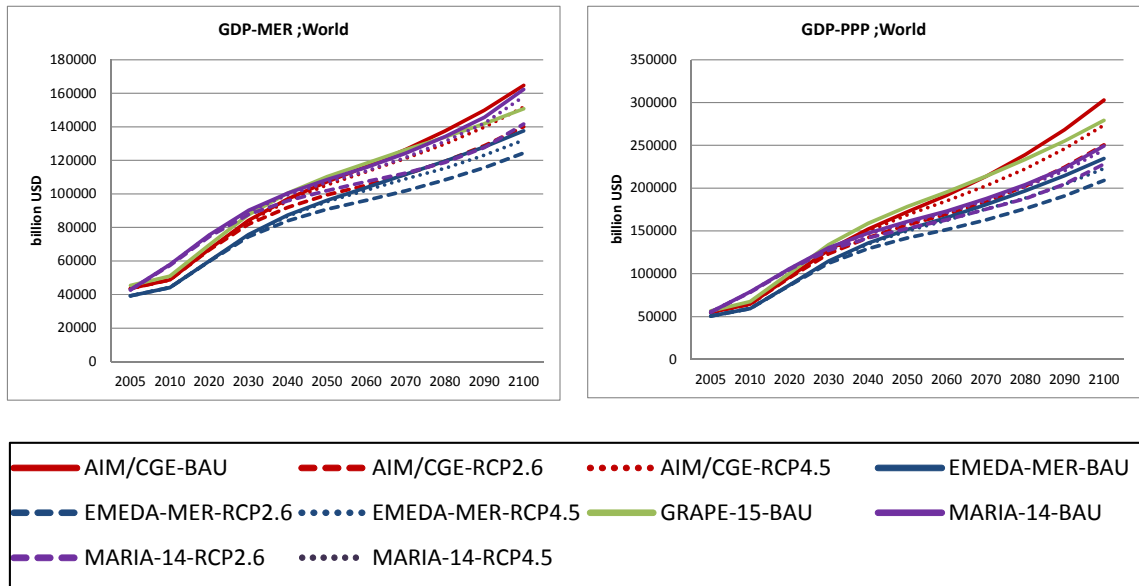
図 3・1・2・②-b_2 SSP-3 シナリオにおける GDP-MER のモデル=RCP ケース別推移
(billion US\$)

b-2 GDP-MER、GDP-PPP の世界合計値モデル間比較

ここでは、GDP については、開放経済の評価に適切な実質額(GDP-MER)と国内消費の評価に向くとされる購買力平価(GDP-PPP)の 2 種類の評価を RCP ケース間の比較をモデル間比較と合わせて行う。

図 3-1-2-②-b_3、図 3-1-2-②-b_4 に SSP-2 および SSP-3 における世界全体の GDP-MER と GDP-PPP の経路を示す。これを見ると、GDP-MER では判然としなかった RCP ケース間シミュレーション結果が、やや GDP-PPP では明瞭になっているように見える。この点は、次の損失率比較で明確になる。





a.GDP-MER 世界合計値

b.GDP-PPP 世界合計値

図 3-1-2-②-b_4 SSP-3 シナリオにおける GDP-MER と GDP-PPP のモデル=RCP ケース間比較

b-3 GDP-MER および GDP-PPP 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のが乖離する。地域別ではモデル結果の広がりが拡大する。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 および GDP-PPP の損失を、SSP-2 について図 3-1-2-②-b_6 に、SSP-3 について図 3-1-2-②-b_7 に示す。

GDP-MER の場合、RCP-2.6 において MARIA が 8%近い大きな損失を示すが、このほかのモデルは 5%前後にとどまる。これに対し、RCP-4,5 ではいずれのモデルも 2%前後で一致している。RCP2.6 という負の排出を必要とする可能性のある強い GHG 排出制約のもとでは、排出削減コストの仮定に依存する部分が次第に大きくなることが示唆される。例えば、後述するエネルギー技術のように、再生可能エネルギーの導入規模とコストの設定は、RCP4.5 では影響が小さいものの、RCP2.6 ではクリティカルに影響することが予想される。

SSP-2 における結果は、図 3-1-2-②-b_5 にある IPCC-AR5-WG3-Chapter6 に示された 2100 年時点の GDP 損失幅が 2%~12%であることと比較するとほぼ同様の幅を示しているといえる。

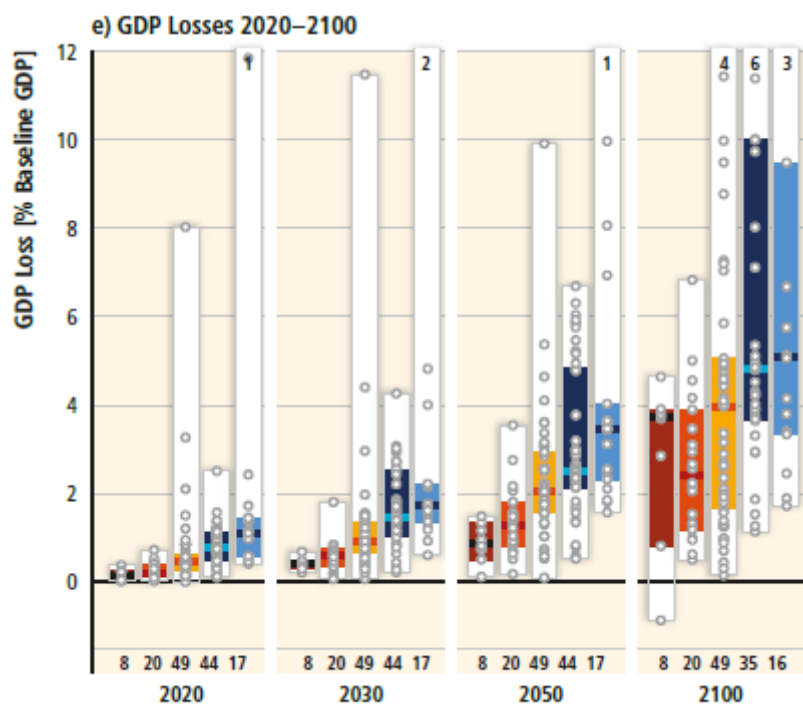
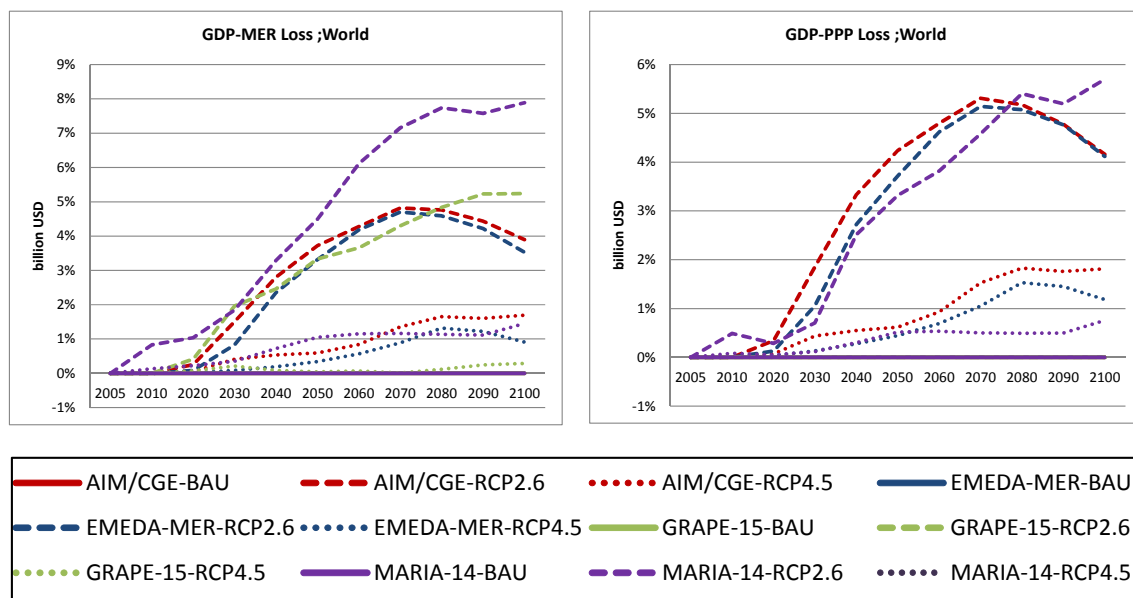


図 3-1-2-②-b_5 IPCC-AR5-WG3 に示された GDP 損失の評価幅⁹

なお、RCP4.5 ではいずれのモデルも類似した傾向を示し、GDP-MER との差異は小さい。

SSP-3 シナリオでも傾向は同様であるが、損失は全体的に SSP-2 よりも高くなる。これは、分断化社会を表す SSP-3 では緩和、適応とも困難とされており、石炭など既存の化石燃料に依存するシナリオとなっていて BAU の CO₂ 排出量は SSP-2 よりも高い。そのため放射強制力制約を課すと SSP-2 よりも大幅な削減が要求される。SSP-3 における損失の高さは、このシナリオの特性を反映した結果といえる。GDP-MER ではモデル間の乖離が SSP-2 に比べ縮小し、GDP-PPP の損失においては、MARIA よりもその他のモデルが大きな損失を示す点が注目される。

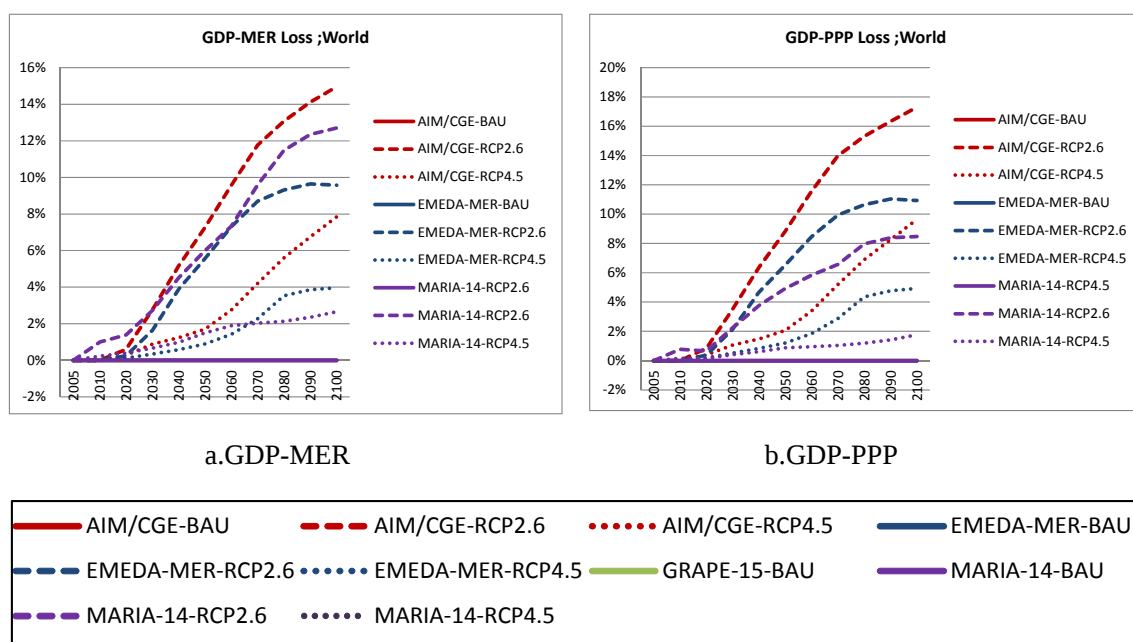
⁹ IPCC-AR5-WG3 Figure6.21 (P.450), 2014。この図の注には、430-480ppmvCO₂eq.の場合に、グラフにはプロットされていないが最大 15% の GDP 損失を示したモデルの存在が記されている。



a.GDP-MER

b.GDP-PPP

図 3-1-2-②-b_6 SSP-2 シナリオにおける GDP-MER および GDP-PPP の RCP による損失



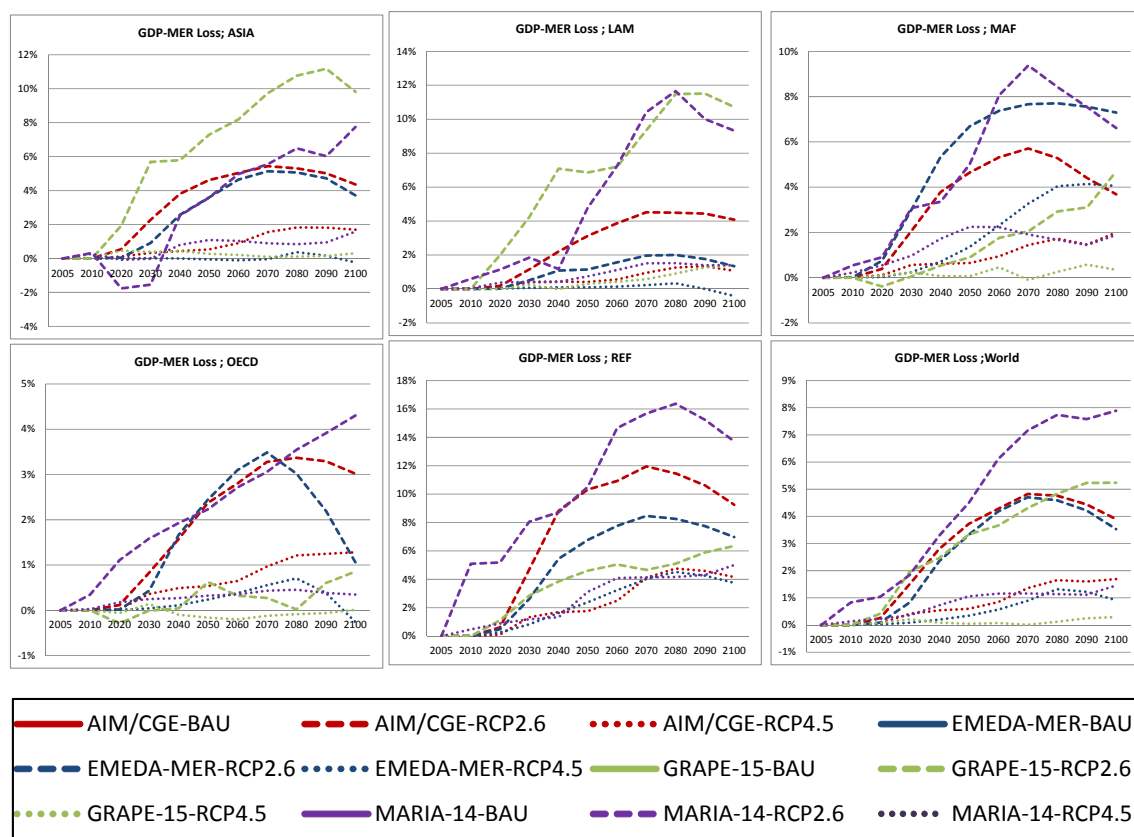
a.GDP-MER

b.GDP-PPP

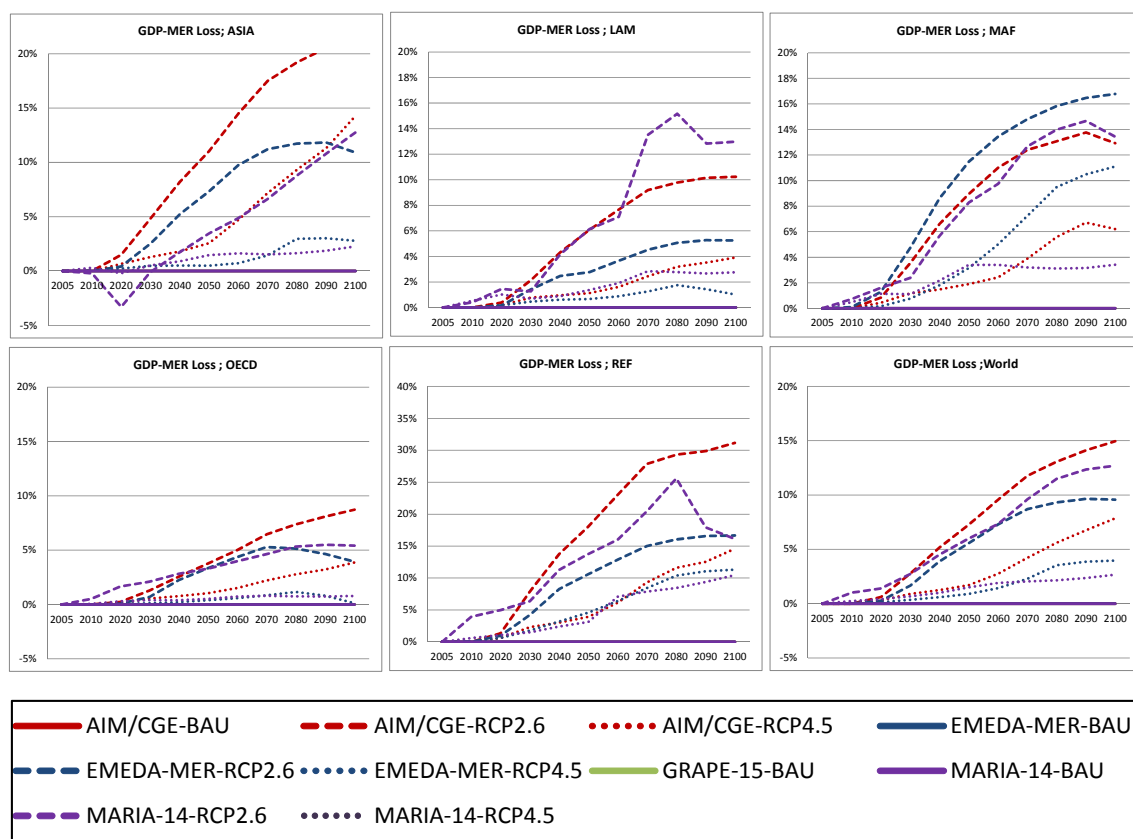
図 3-1-2-②-b_7 SSP-3 シナリオにおける GDP-MER および GDP-PPP の RCP による損失

図 3-1-2-②-b_8 には地域別の GDP-MER 損失の推移を示す。RCP-2.6 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、MAF で極めて大きく LAM、

ASIA がこれに次ぐ。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唆される。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。これに対し、RCP4.5 ではいずれのモデルも各地域とも類似した結果を示しており、各地域とも 5% 付近の損失を示している。



SSP-2



SSP-3

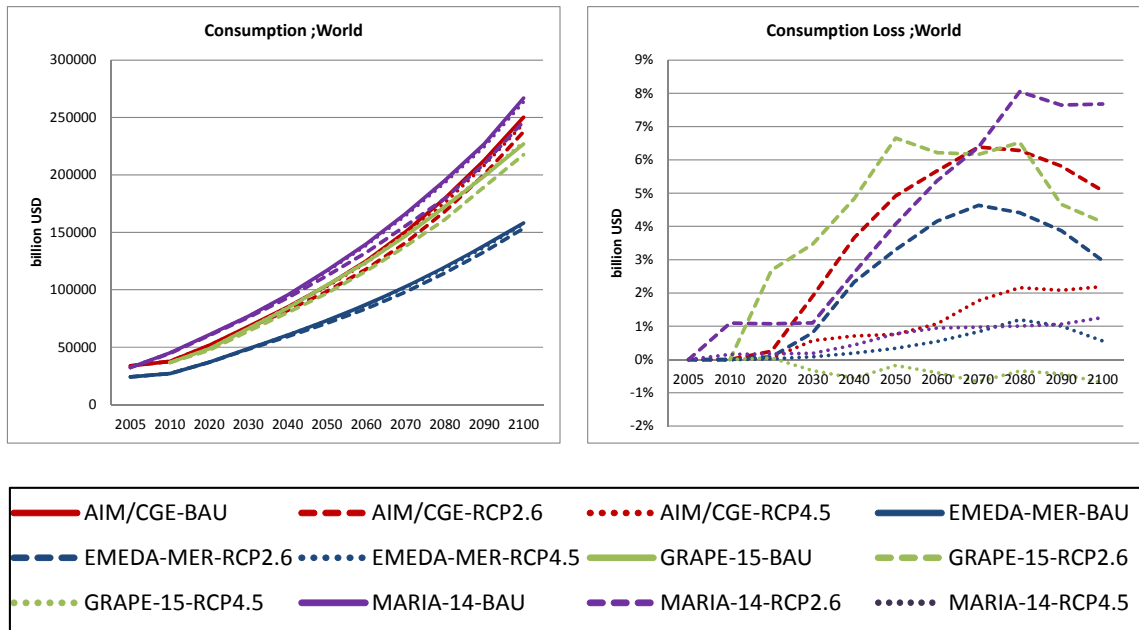
図 3-1-2-②-b_8 GDP-MER 損失率の地域別推移 RCP ケース別・モデル別結果

b-4. 消費額の推移と損失

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。図 3-1-2-②-b_9、図 3-1-2-②-b_10 には消費額の推移と損失を SSP シナリオ別に与える。¹⁰

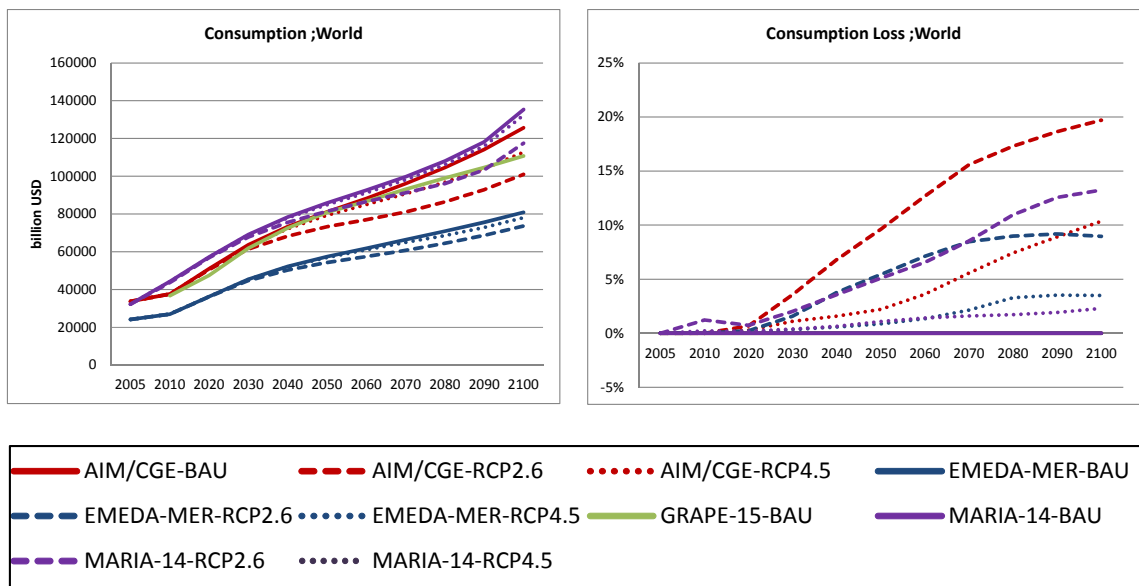
¹⁰ GRAPE は 2005 年時点の消費額を出力しないため、初期値が 0 となっている。



a.消費額

b.BAU からの消費の損失

図 3-1-2-②-b_9 SSP-2 シナリオにおける消費額(GDP-MER)の推移と損失のまとめ



a.消費額

b.BAU からの消費の損失

図 3-1-2-②-b_10 SSP-3 シナリオにおける消費額(GDP-MER)の推移と損失のまとめ

SSP-2 シナリオの場合、推移は GDP-MER と類似しているが、損失を見ると MARIA と他モデルの差は 21 世紀後半にのみ現れており、傾向としては GDP-PPP とほぼ同様の推移をしている点が見て取れる。SSP-3 では AIM が最も大きい損失を示す。しかし損失の絶対

値はいずれのモデルも SSP-3 において高い値となる、かつ増加を続けている。

GDP 損失と同様に、IPCC-AR5-WG3 に収録された消費額の損失のモデル分布を図 3-1-2-②-b_11 に示す。温暖化対策を厳しくするにつれ経済影響が急増する傾向は同様であり、中央値 5%前後、損失幅 2%~11%に広がる。これは SSP-2 における本研究の結果の幅とほぼ同程度である。ただし、SSP-3 における結果はこの図よりもさらに高い損失を示している。

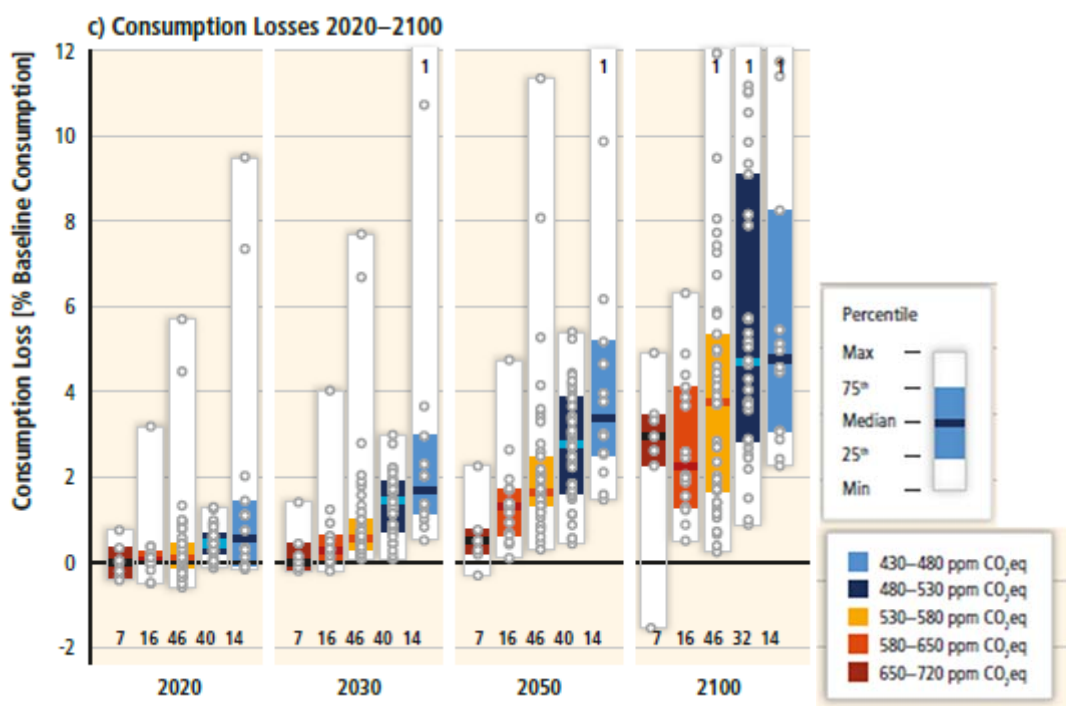
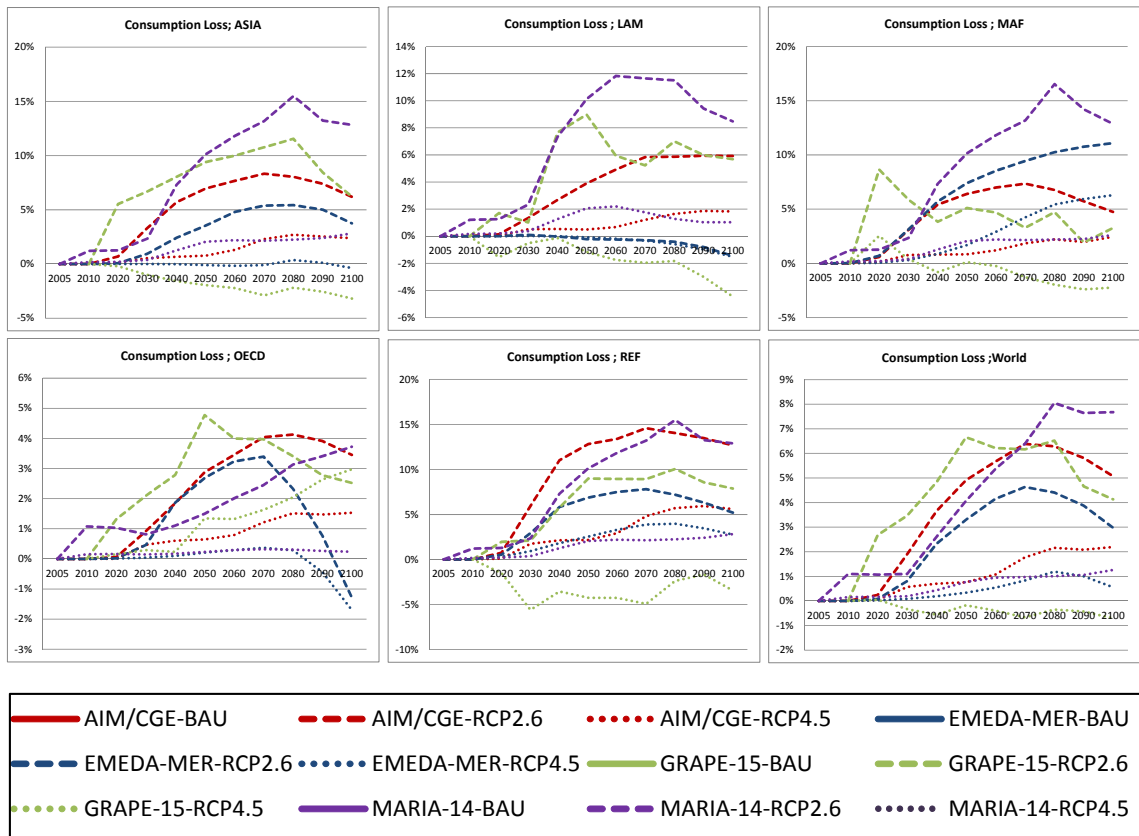


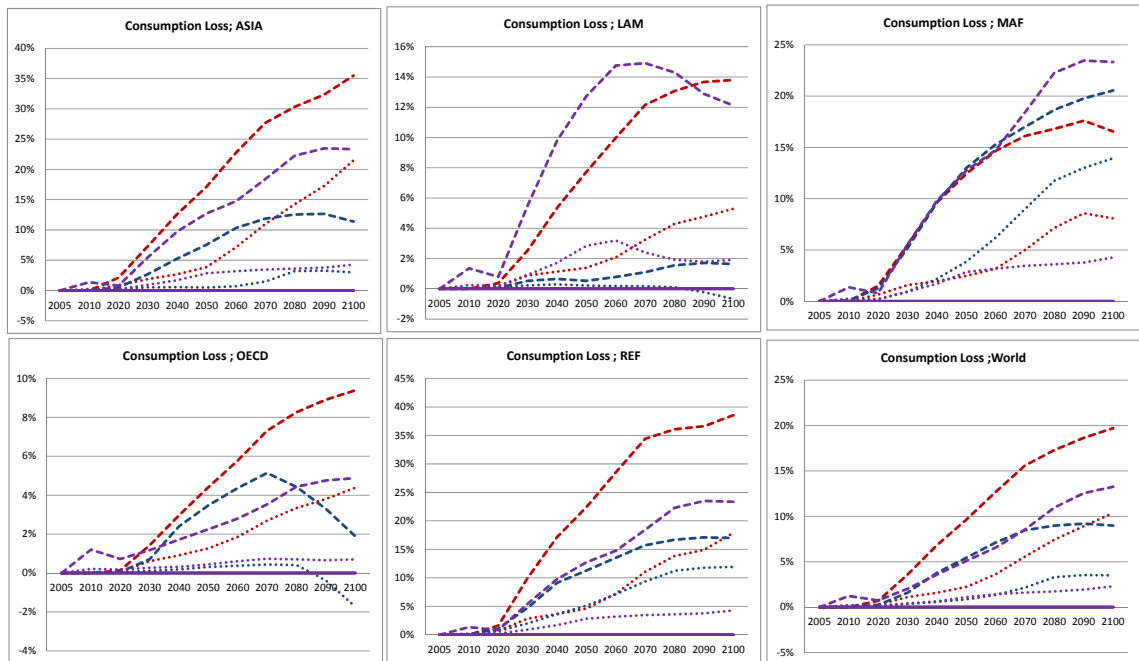
図 3-1-2-②-b_11 IPCC-AR5-WG3 に示された消費額損失の評価幅¹¹

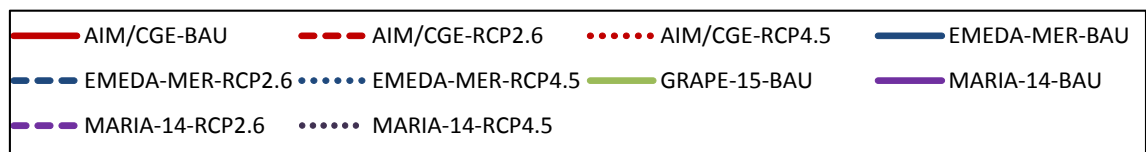
消費損失の地域別比較を図 3-1-2-②-b_12 に示す。RCP2.6 では、SSP-3 において AIM が高めの消費損失を示す。RCP2.6 におけるモデル間の差異はやはり化石燃料依存地域及び発展途上地域である MAF、REF において大きい。しかしながら平均的な消費損失は REF 以外は各モデルとも比較的近い値となっており、ここでも化石燃料資源依存国の構造的な転換とその支援の必要性が示唆されている。

¹¹ IPCC-AR5-WG3 Figure6.21 (P.450), 2014



SSP-2





(b)SSP-3

図 3-1-2-②-b_12 消費額損失率の地域別推移 RCP ケース別・モデル別結果

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。

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 および図 3-1-2-②-c_2 には、SSP-2、SSP-3 の最終エネルギー消費のモデル別・地域別比較を示す。

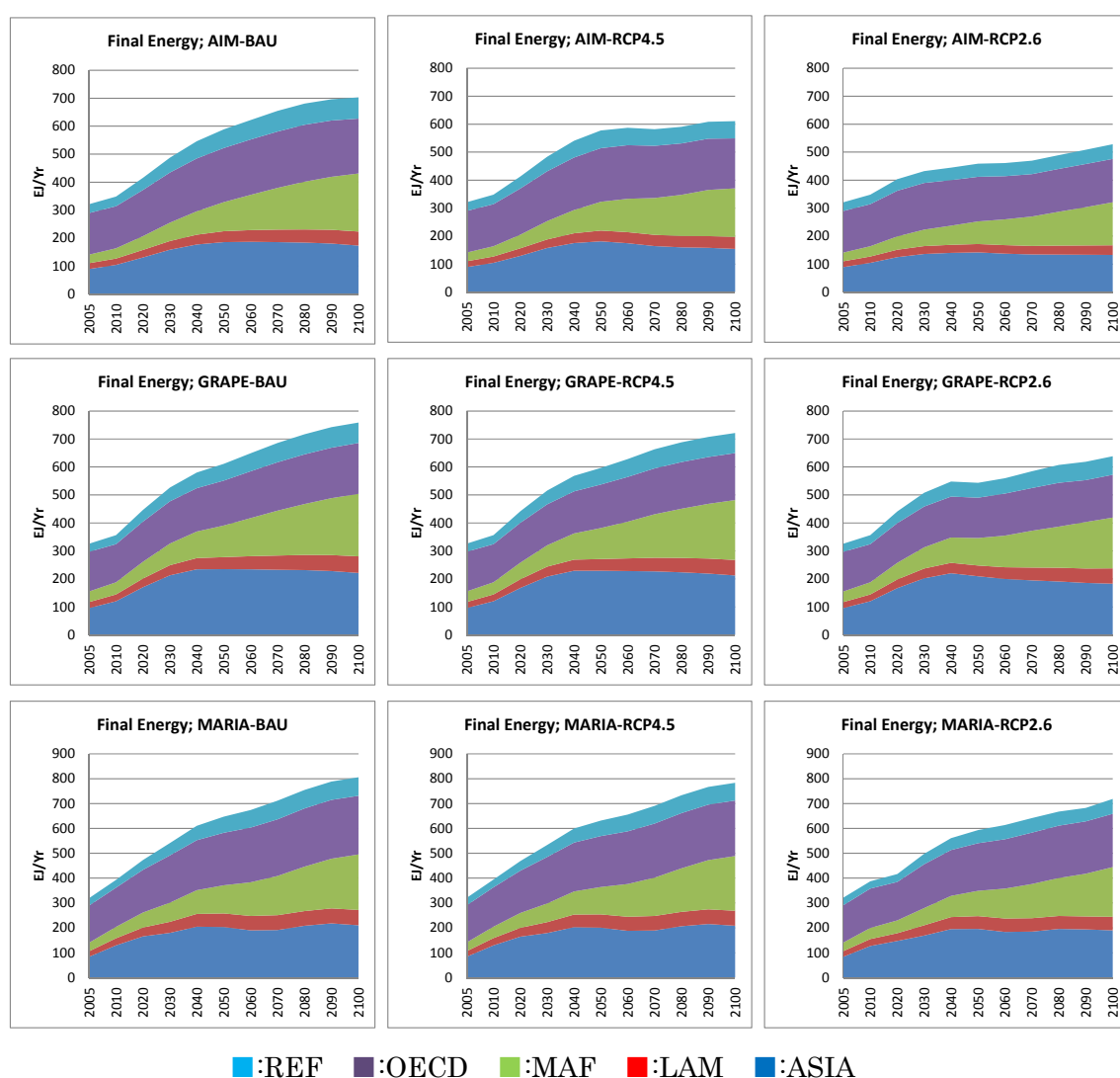


図 3-1-2-②-c_1 SSP-2 における最終消費エネルギーのモデル別・地域別推移(EJ/Year)

SSP-2 においては傾向の差は判然とはせず、いずれの地域もどの RCP にたいしても増加している。またモデル間の差異も明確ではなく、類似している。

これに対し、SSP-3 では RCP4.5 と RCP2.6 において、21 世紀半ばころの飽和傾向が観察される。ことに、REF 地域における RCP-2.6 での最終消費エネルギーの低下はこの図からもうかがえる。

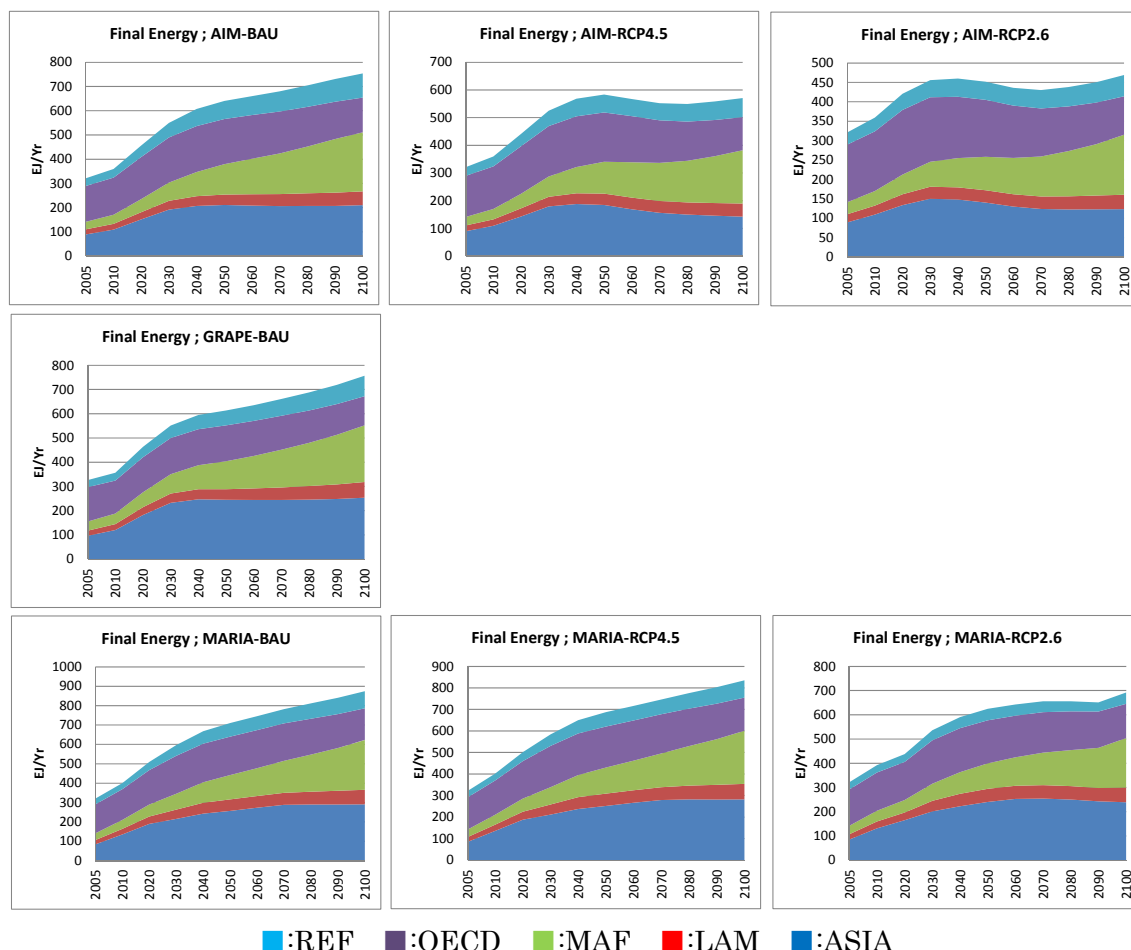


図 3-1-2-②-c_2 SSP-3 における最終消費エネルギーのモデル別・地域別推移(EJ/Year)

図 3-1-2-②-c_3、図 3-1-2-②-c_4 には、それぞれ SSP-2 および SSP-3 における世界合計および地域別の最終消費エネルギーのモデル=RCP 間で総合的に比較する。BAU においては最終消費エネルギー需要の推移はいずれのモデルでもほぼ同様の挙動を示している。

全体的に、AIM は RCP に対して最終エネルギー需要が比較的大きく変化する傾向がある。これは、前述のように地域区分が必ずしも同一ではないこと、またエネルギーサービスの所得弾性値の設定など、経済活動とエネルギー需要の関係の設定の差異であると解釈できる。

SSP-3 でも傾向は同じであるが、AIM は世界合計で最終エネルギー消費がほとんど横ばいになる点が注目される。

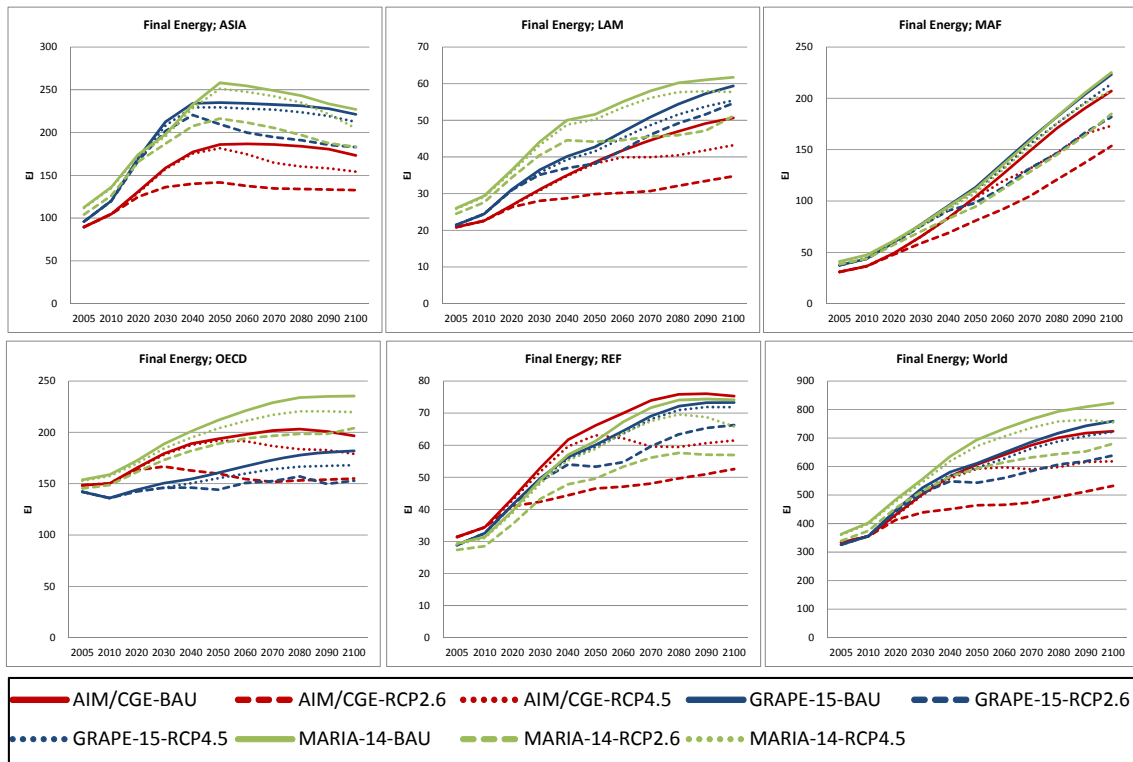


図 3-1-2-②-c_3 最終消費エネルギー需要(EJ/Year)の地域別推移モデル比較(SSP-2)

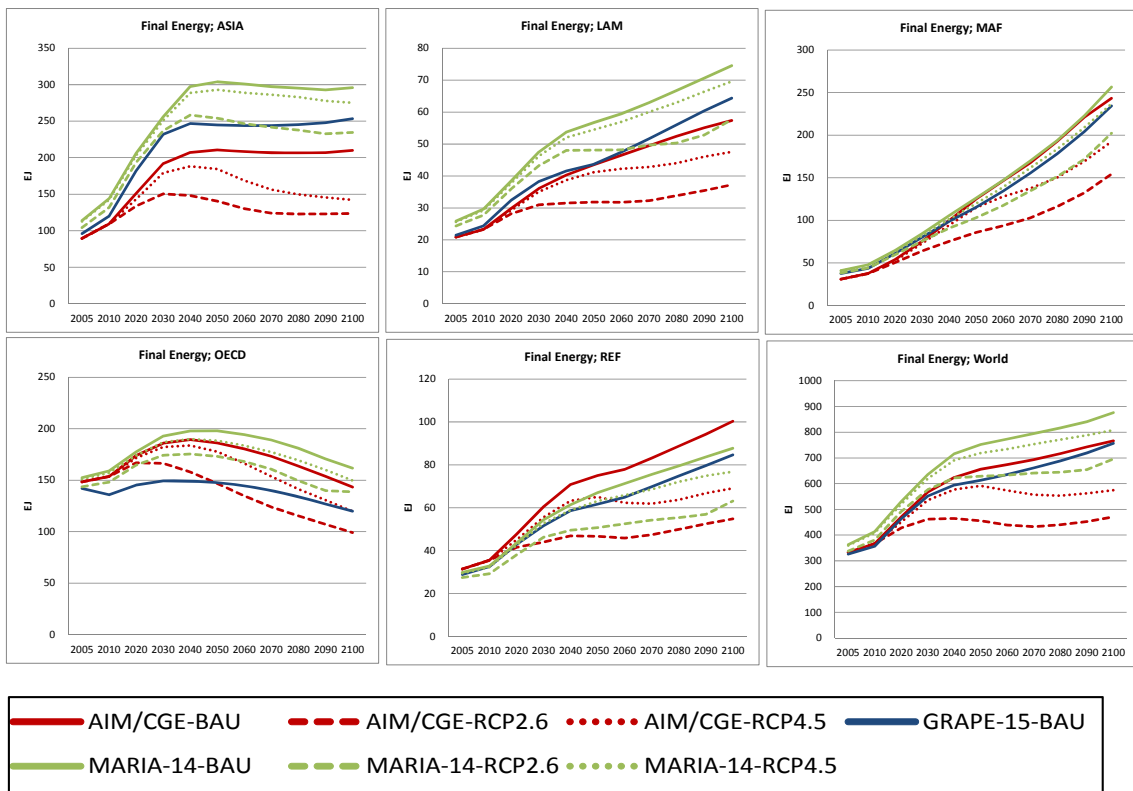
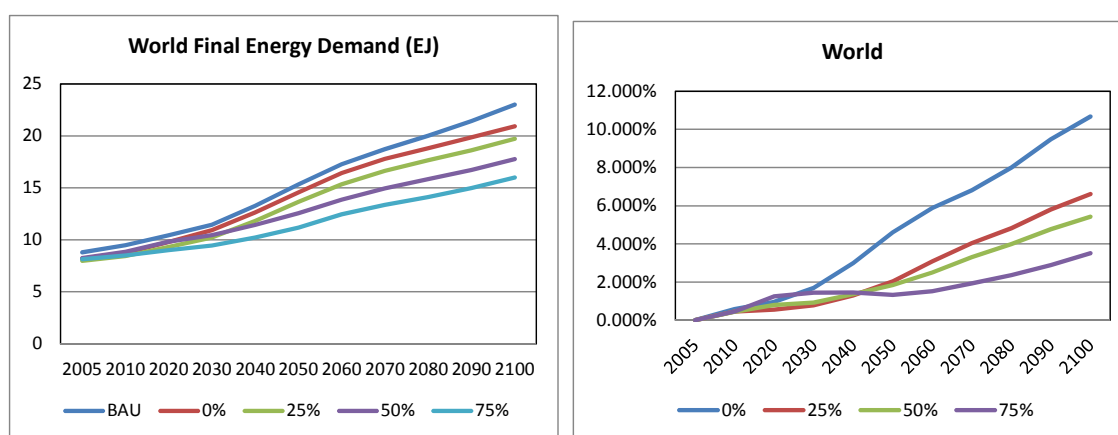


図 3-1-2-②-c_4 最終消費エネルギー需要(EJ/Year)の地域別推移モデル比較(SSP-3)

最終消費エネルギーの温暖化政策に対する柔軟性の違いは、b.項で述べた経済的損失のモデル間の違いと対応している。AIM/CGE が温暖化政策の厳しさに対して比較的最終消費エネルギーが柔軟に変化するのに対し、MARIA-14 ではやや柔軟性が低いと仮定されている。GDP-MER でみると経済的損失は前者が小さく後者で大きく現れる傾向が観測される。このことは、図 3-1-2-②-c_5 の MARIA12 の試算結果で検証できる。図 3-1-2-②-c_5 では、SSP-2 RCP2.6 シナリオに対し、GDP1%の追加支出で輸送用エネルギー最終消費を 75%、50%、25% 削減可能とする場合、および削減不可能な場合を MARIA で計算し、GDP-MER の損失がどのように変化するかを示したものである。最終消費エネルギーが柔軟に変化すると明らかに経済損失は大きく緩和されていることが明らかである¹³。



世界最終エネルギー消費

(b) 世界 GDP-MER の BAU からの損失率

図 3-1-2-②-c_5 MARIA-14 による最終消費エネルギーの柔軟性と GDP 損失率の変化

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「戦略」の広がりでもある。

図 3-1-2-②-c_6、図 3-1-2-②-c_7 に SSP-2 シナリオおよび SSP-3 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。図 3-1-2-②-c_8、図 3-1-2-②-c_9 には世界全体での一次エネルギー構成の RCP ケースによる変化をモデル別に比較する。

¹² ここでは検証のため MARIA 4 地域縮約版を用いた。なお MARIA-14 では日本を基準として GDP1%の追加支出で 35%の削減が可能とする設定が用いられている。

¹³ 最終エネルギー需要のうち、輸送用燃料需要と民生用電力需要は過去急速に拡大した。特に前者は、2 度にわたる石油危機や湾岸戦争、さらに 2008-2009 の石油価格の高騰に対しても、増加のトレンドは継続された。これをそのまま将来に延長すれば柔軟性は小さいと見ざるを得ず、将来の強力な温暖化対策の下では需要の構造的も大きく変化すると見れば高い柔軟性の仮定も現実性を持つ。いずれが正しいかは、現時点で決めることはできず、将来社会の不確実性の一つとして試してみるべきであろう。

最終エネルギー需要が図 3-1-2-②-c_1、図 3-1-2-②-c_2 にあるよう、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。ことに、図 3-1-2-②-c_8,図 3-1-2-②-c_9 の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。これは、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が、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。

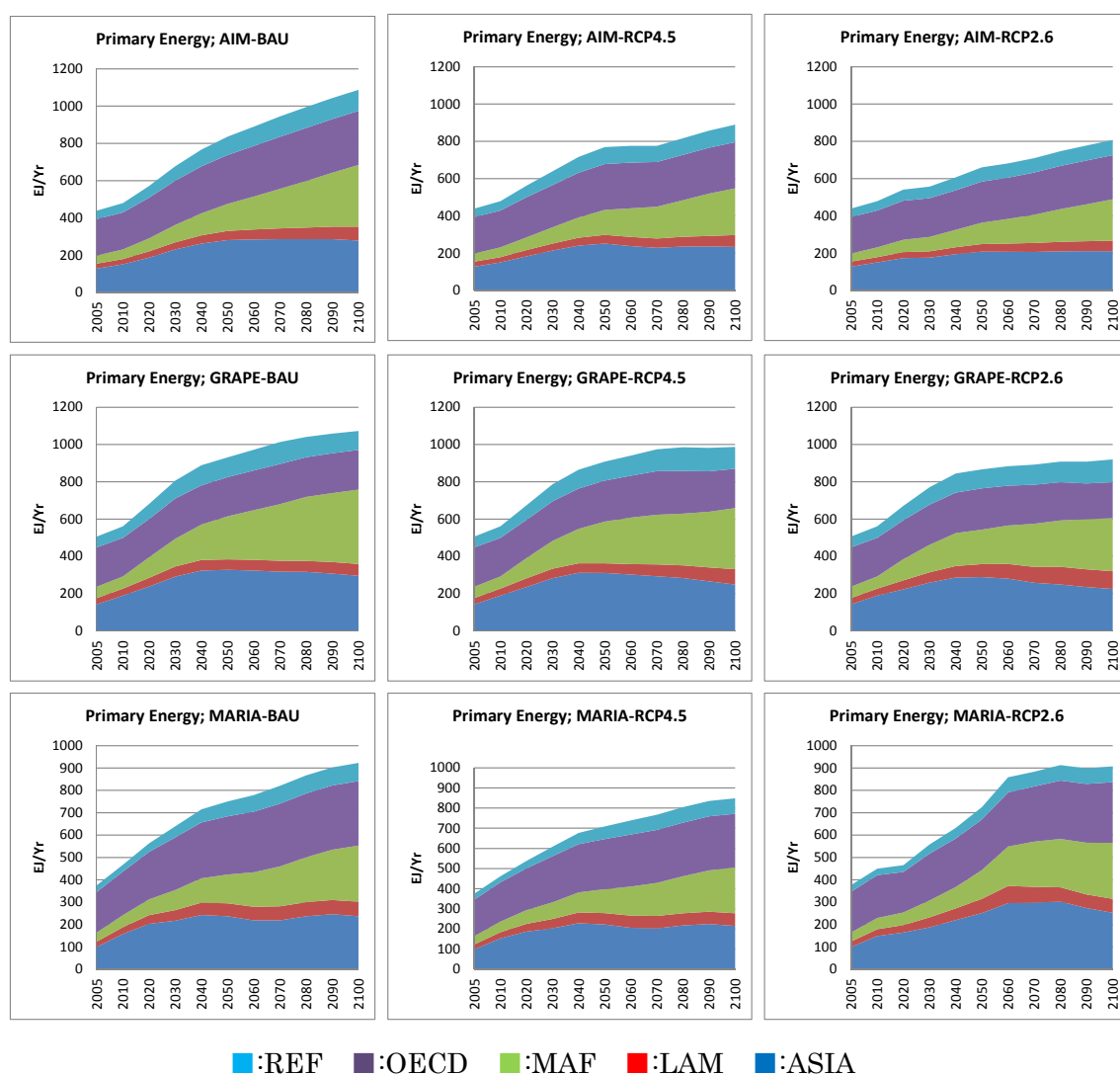


図 3-1-2-②-c_6 SSP-2 における一次エネルギー供給のモデル別・地域別推移(EJ/Year)

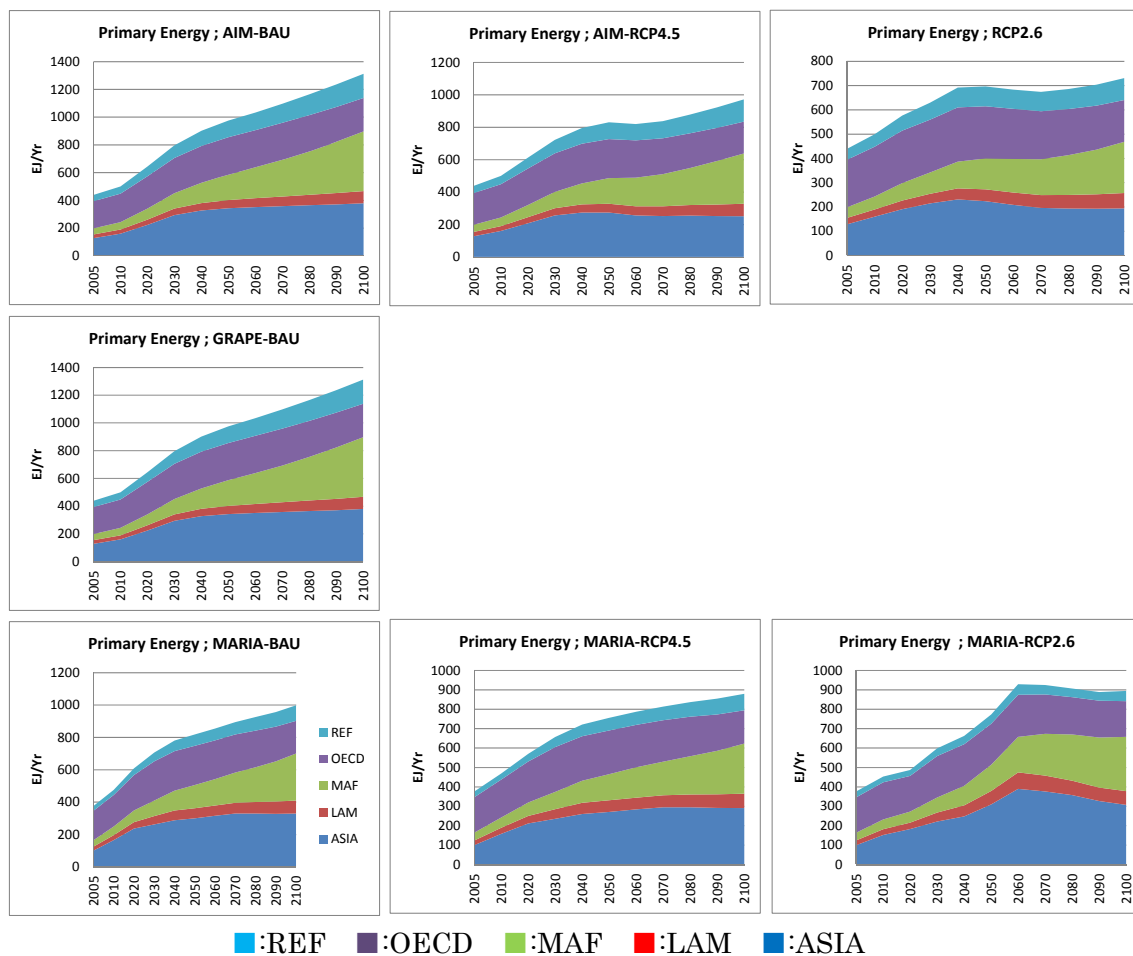


図 3-1-2-②-c_7 SSP-3 における一次エネルギー供給のモデル別・地域別推移(EJ/Year)

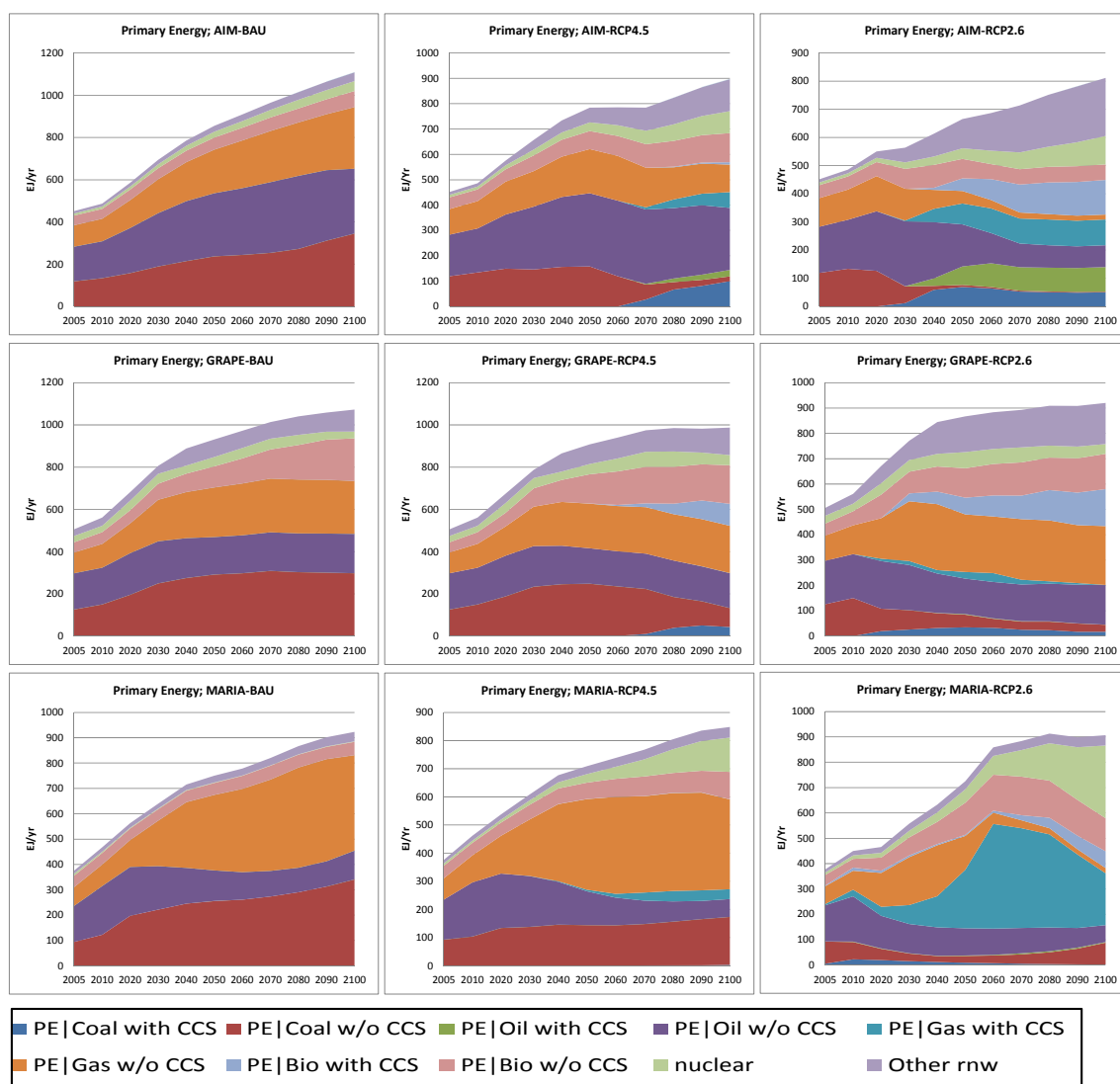


図 3-1-2-②-c_8 SSP-2 における一次エネルギー供給構成のモデル別推移(EJ/Year)

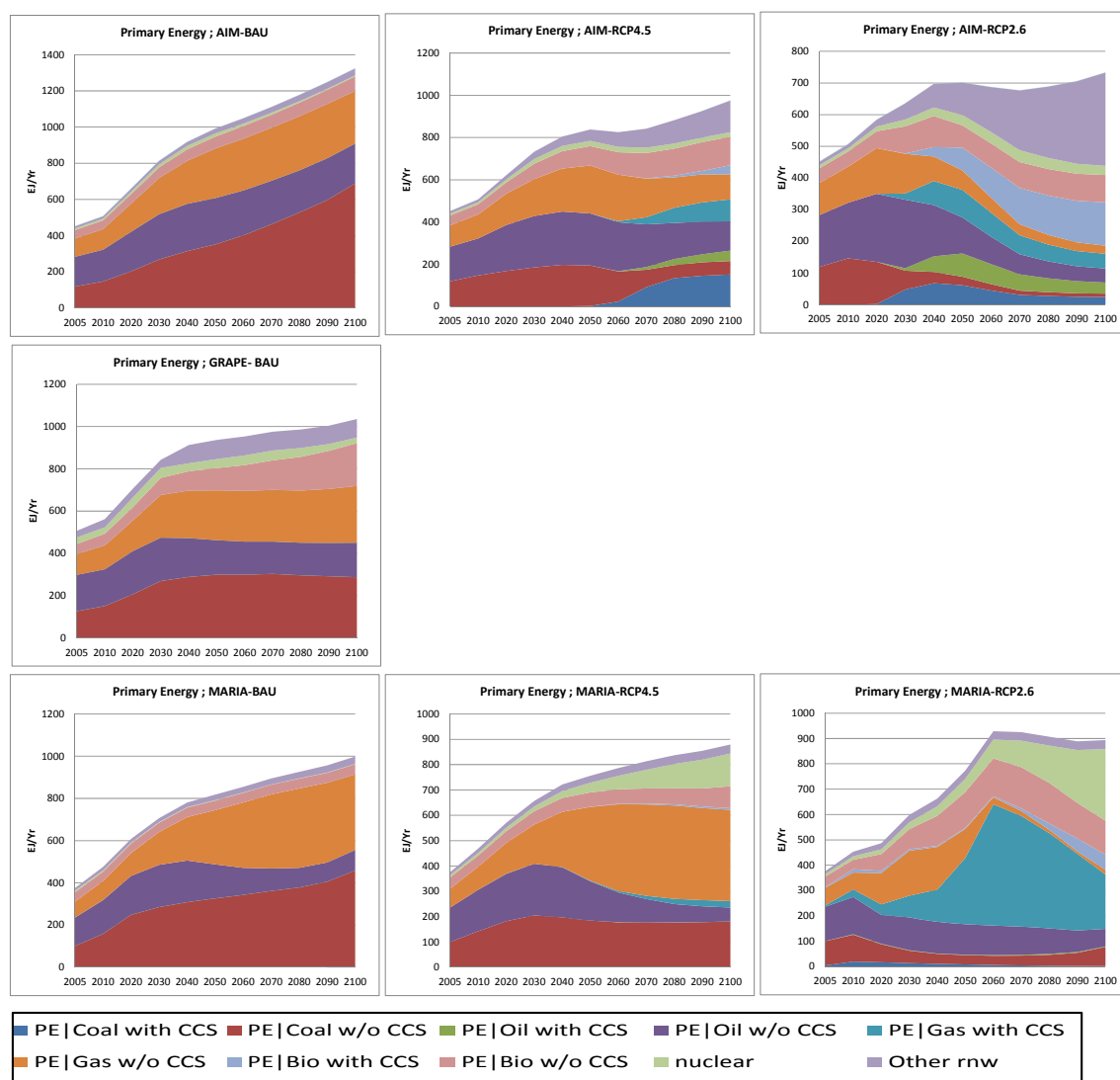


図 3-1-2-②-c_9 SSP-3 における一次エネルギー供給構成のモデル別推移(EJ/Year)

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。¹⁴

¹⁴ 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

SSP-2 と SSP-3 における一次エネルギー供給(EJ/Year)世界合計値および地域別のモデル間推移モデル比較を図 3・1・2・②-c_10 と図 3・1・2・②-c_11 に示す。

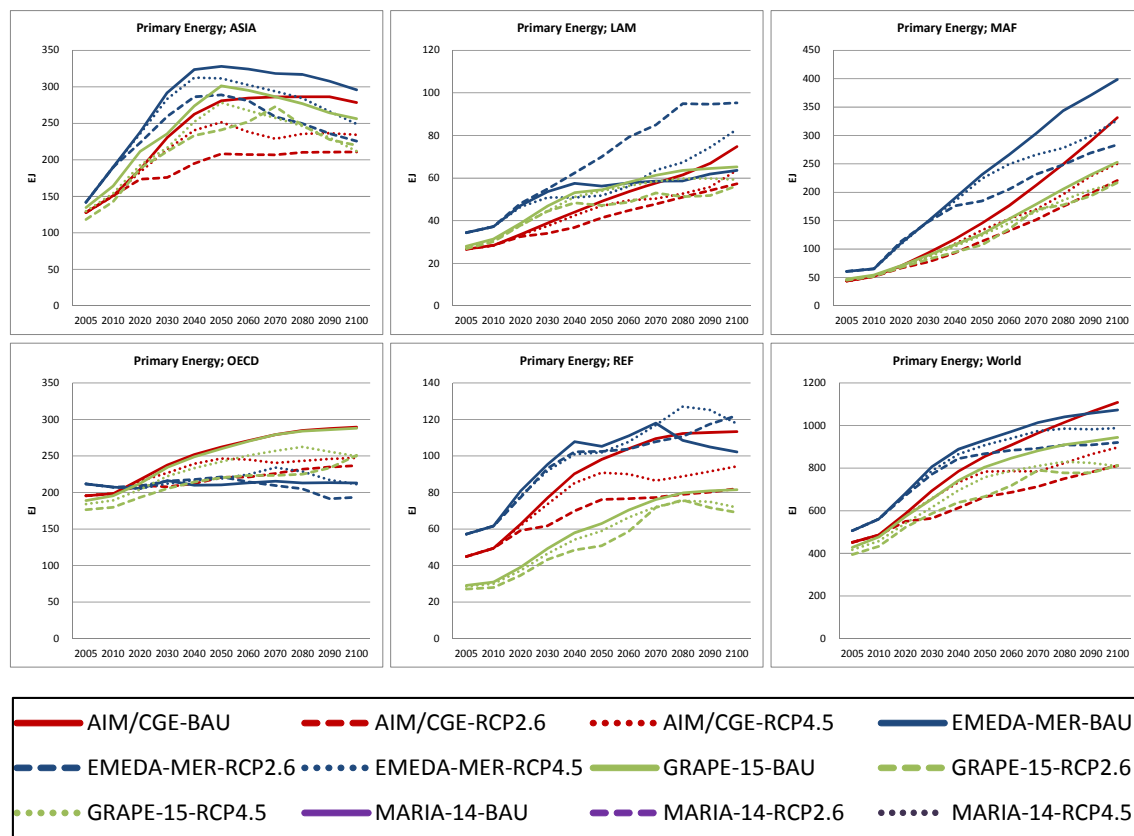


図 3・1・2・②-c_10 一次エネルギー供給(EJ/Year)のモデル間地域別推移モデル比較(SSP-2)

をシナリオ基準に取り上げた理由の一つである。

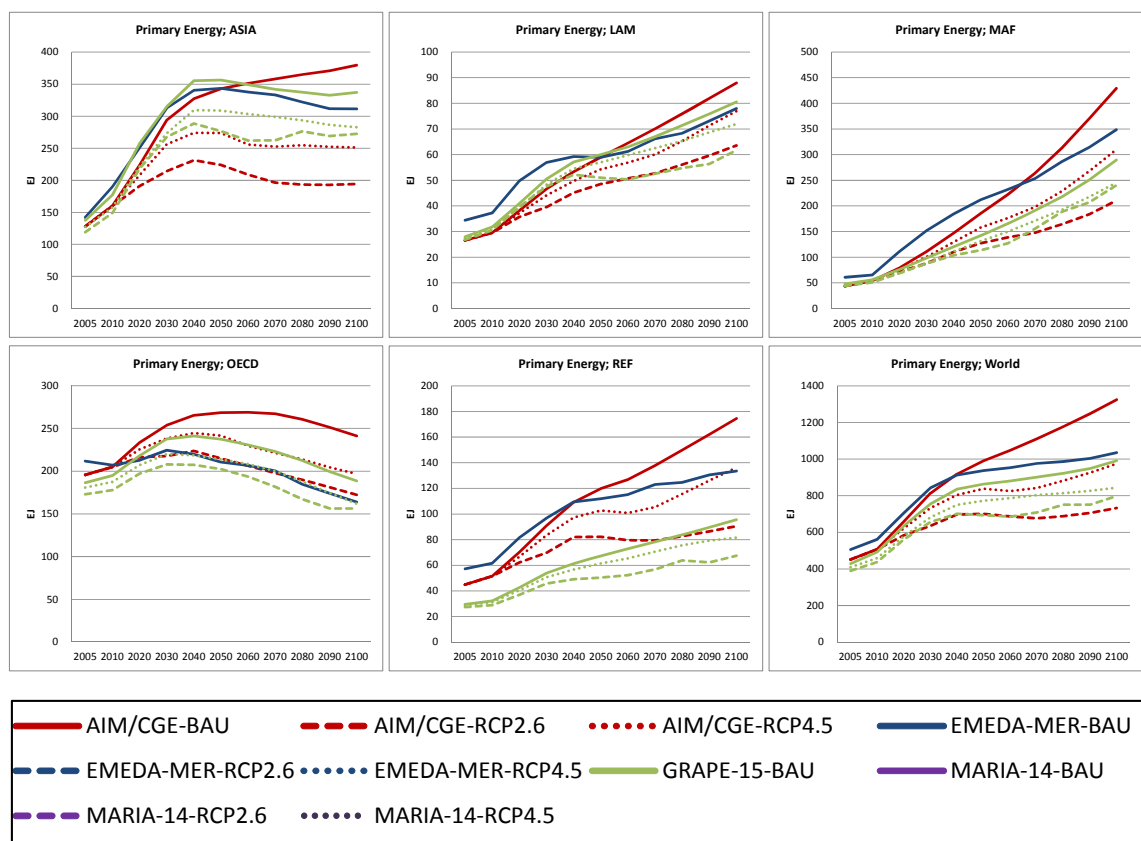


図 3-1-2-②-c_11 一次エネルギー供給(EJ/Year)のモデル間地域別推移モデル比較(SSP-3)

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、MARIA、AIM、GRAPE 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り、特に輸送部門のの差が大きい。

図 3-1-2-②-d_1 は MARIA 及び AIM における省エネ率（RCP2.6 の最終需要/BAU の最終需要）である。民生・運輸は 2100 年に向けて約 2 割、産業は 2~3 割の削減を行っている。AIM の方が省エネがやや大きく、とくに運輸部門では 4 割以上の省エネとなっている。

GRAPE については、部門の構成が異なるため、単純な比較はできないが、2100 年において、トータルで 10%程度の削減となっている。

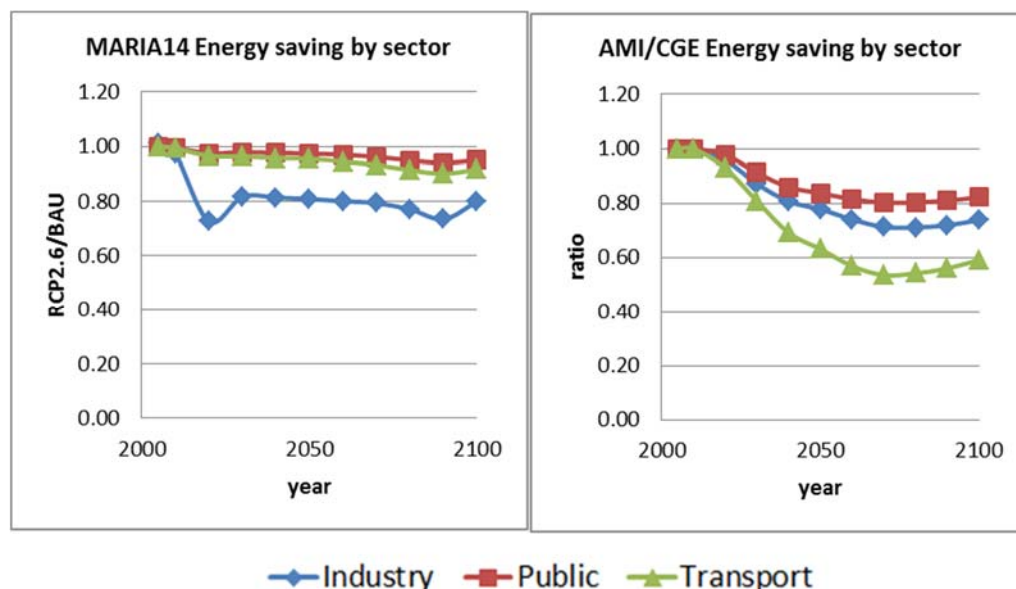


図 3-1-2-②-d_1 セクターごとの省エネ率（左図：MARIA、右図：AIM）

d-2 一次エネルギーの低炭素化

2050 年までは化石燃料が主流であるが、その後の「戦略」には幅がある。

図 3-1-2-②-d_2 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。MARIA と AIM は、2050 年にむけて、CCS ありの化石燃料の比率を急速に高めている。その後、AIM が再生可能エネルギーの比率を着実に増やしていくのに対し、MARIA では再生可能エネルギーの比率は頭打ちとなり、2070 年以降原子力の比率が急増している。GRAPE については、21 世紀末に向けて再生可能エネルギー比率が増えているが、その一部に BECCS 発電が含まれるためもあり CCS なし化石燃料もある程度のシェアを維持している。

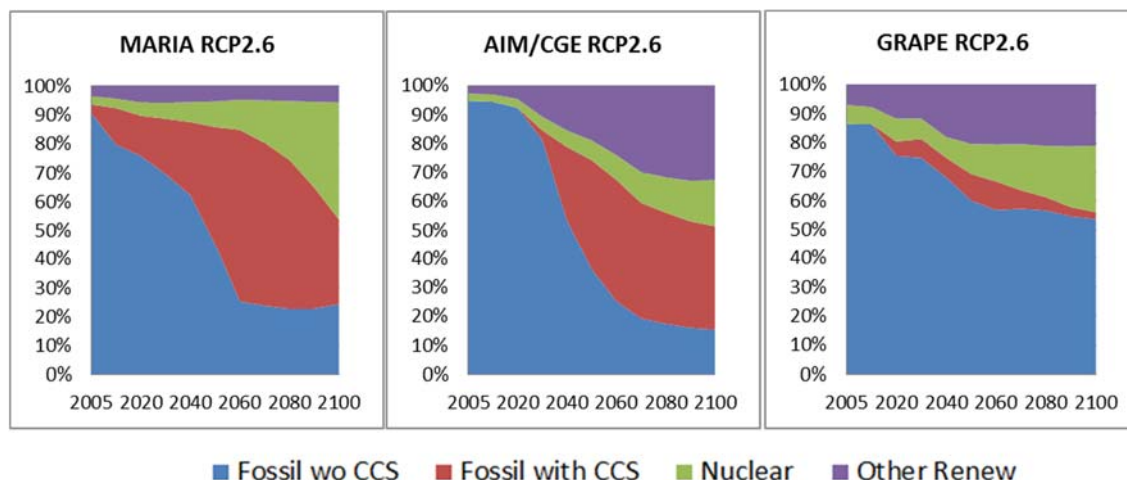


図 3-1-2-②-d_2 一次エネルギー構成（左：MARIA、中：AIM、右 GRAPE）

d-3 電源構成

電源構成には幅があり、原子力と太陽光、風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 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、MARIA>AIM>GRAPE となっている。いずれもモデルにおいても、リファレンスケースよりも電力消費が明らかに増加している。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、各モデルとも電源のシェアを限定している。その大きさは AIM>GRAPE>MARIA となっている。原子力については MARIA が最も野心的な導入量となっている。

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 2050 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（オレンジ）が 10%程度残っているが、この CO2 排出は、BECCS で相殺されている。すなわち、電力は CO2 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。

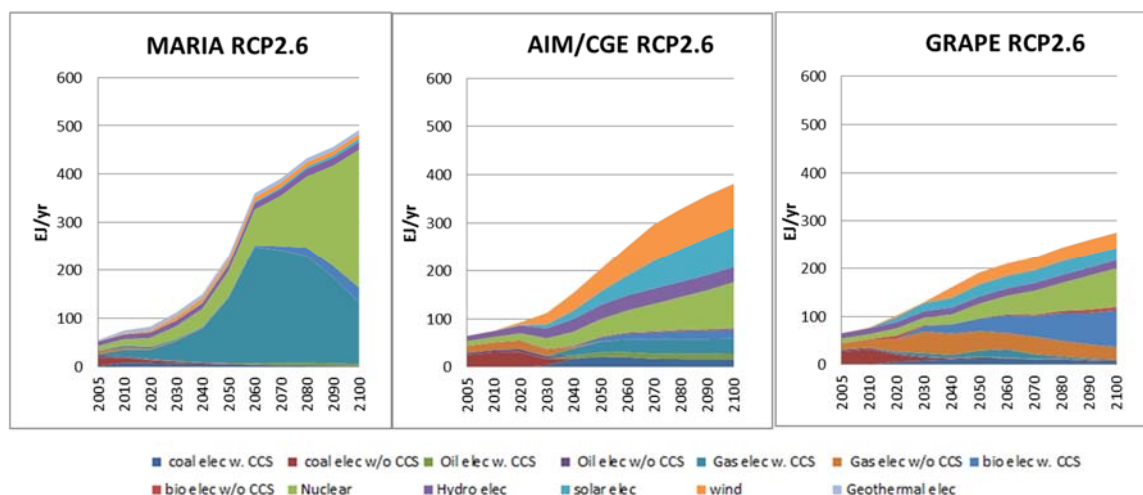


図 3-1-2-②-d_3 電源構成（左：MARIA、中：AIM、右 GRAPE）

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は一致する。BECCS の導入量はモデル間の差がかなり大きい。

図 3-1-2-②-d_4 によれば、いずれのモデルも二酸化炭素排出量は 2010 年～2020 年にはピークアウトをしている。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：6Gt、AIM：15Gt、GRAPE:17Gt であり、対策の進展速度には差異がある。2100 年にネットではほぼゼロという傾向は共通である。

CCS については、今世紀後半に 20Gt/yr 前後という規模は概ね共通である。2050 年前後においては MARIA が最も積極的である。

図 3-1-2-②-d_5 はバイオマス CCS の導入量の時間変化である。バイオマス CCS の導入については GRAPE が最も積極的であり、2030 年以降急速に導入が進んでいる。2100 年の時点において、総発電量の 27%がバイオマス CCS であり、回収する CO₂ は約 15Gt である。他の 2 モデルについては、GRAPE よりは導入量が少ないが、それでも 2050 年以降着実に導入が進められており、ネット CO₂ 排出の削減に寄与している。

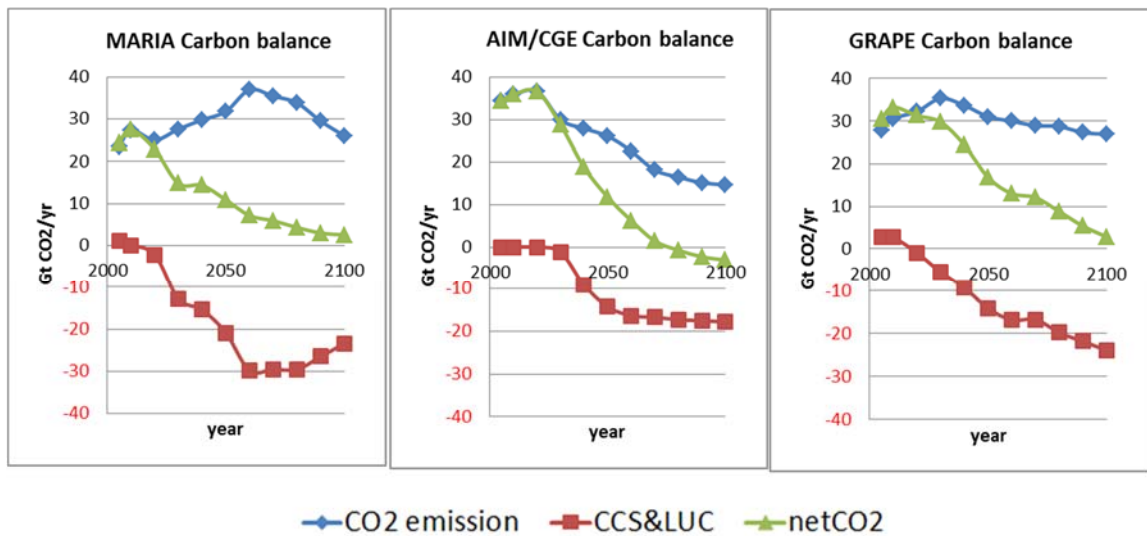


図 3-1-2-②-d_4 炭素バランス（左：MARIA、中：AIM、右：GRAPE）
CCS&LUC は CCS と土地利用変化の和

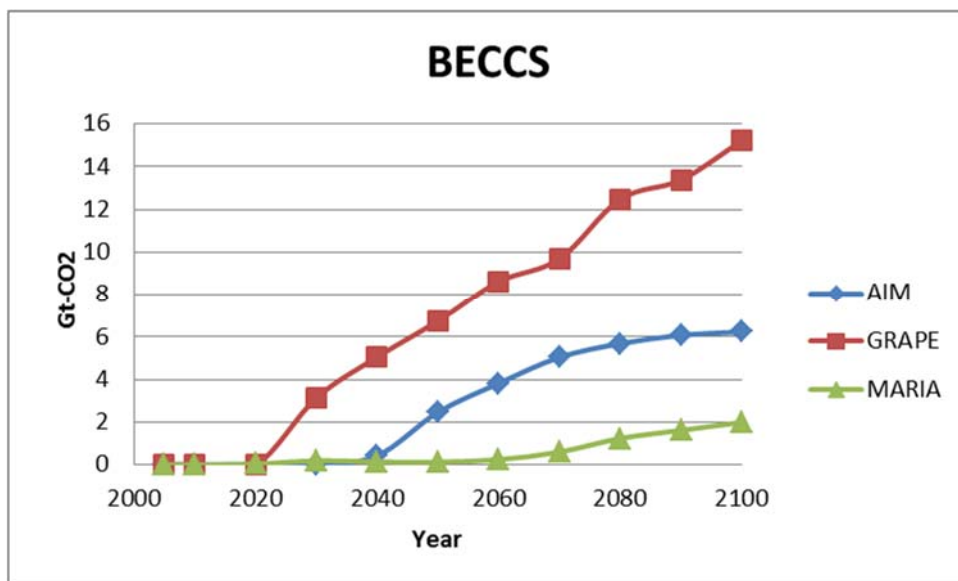


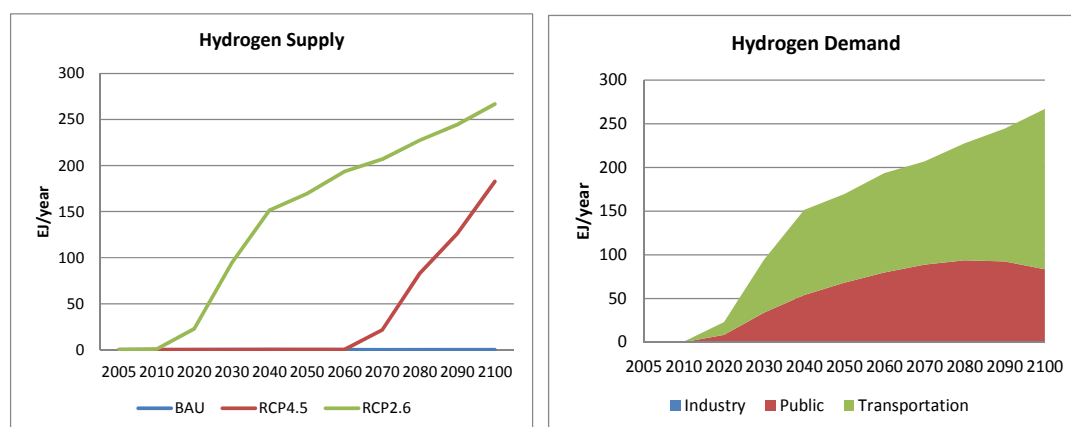
図 3-1-2-②-d_5 バイオマス CCS の導入量

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、CO₂ 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_6 に示すよう輸送用バイオマス起源流体燃料の不足分を水素で補う。この水素製造には原子力による電気分解法が用いられており、これは高コストなため経済的損失も増えることになる。これが、b で前述した MARIA の GDP 損失が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。



(a) MARIA-14 SSP-2 における水素供給量 (b) SSP-2 RCP2.6 における水素需要量

図 3-1-2-②-d_6 MARIA-14 による SSP-2 ケースにおける水素供給と水素需要

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「戦略」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_1 に定性的にまとめる。その違いが生じる理由については、各モデルの制約条件をもう少し詳細に比較する必要がある、今後の課題である。

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_1 モデル間の電源構成の特徴比較

	MARIA	AIM	GRAPE
太陽・風力	△ それぞれ総電力の 数%に制限	◎ それぞれ総電力の 20%程度まで導入可	○ それぞれ総電力の 15%程度まで導入可
原子力	◎ 2100 年に 2005 年の 30 倍	○ 2100 年に 2005 年の 10 倍程度	○ 2100 年に 2005 年の 10 倍弱
省エネルギー	○ 基準の 2 割減程度	◎ 基準の 3 割程度	○ 基準の 1 割減程度
CCS	◎ 2050 年までの電力 は CCS 火力が中心	○ CCS は着実に導入す るも、火力発電自体 は漸減	○ CCS は着実に導入す るも、火力発電自体 は漸減

(◎、○、△、×については、イメージをつかむための主観的な指標)

e.土地利用と食糧需給

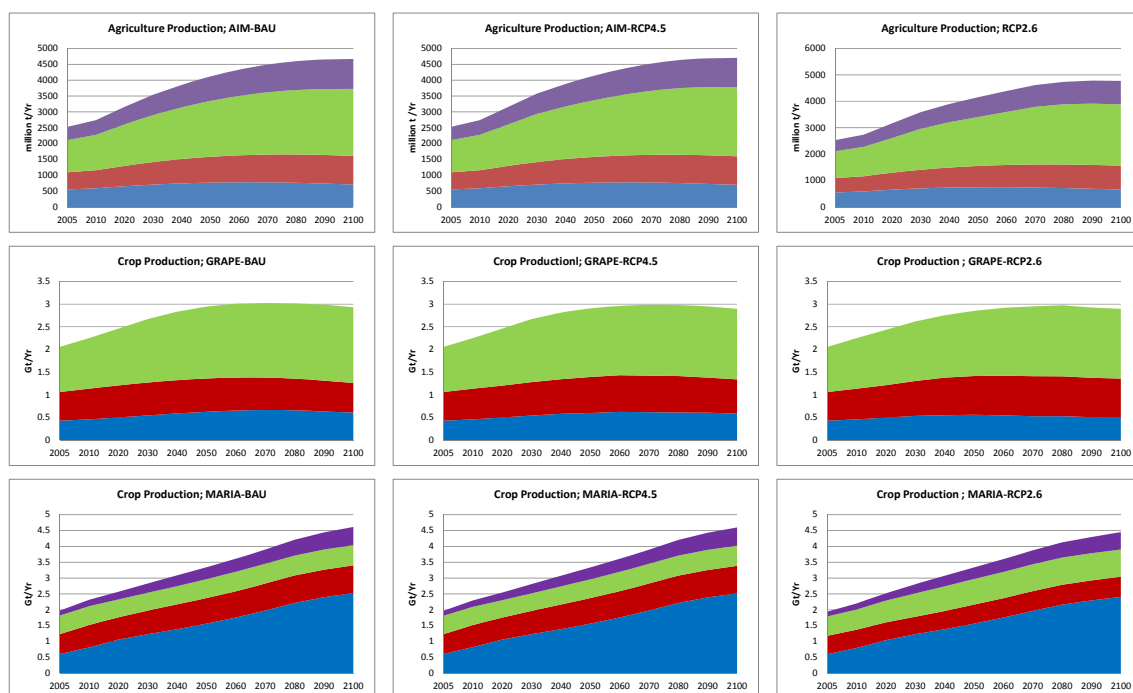
炭素削減政策の間で、耕地面積、食糧生産、食糧需要に大きな変化は見られず、温暖化対策と食糧生産の間の競合は小さいとみられる。ただしこれは収率の仮定に依存するところが大きい。

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ず、AIM はコメ、コムギに加えトウモロコシ・大麦などの粗粒穀物とともに、ダイズ等を含む油脂植物を扱う。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。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。

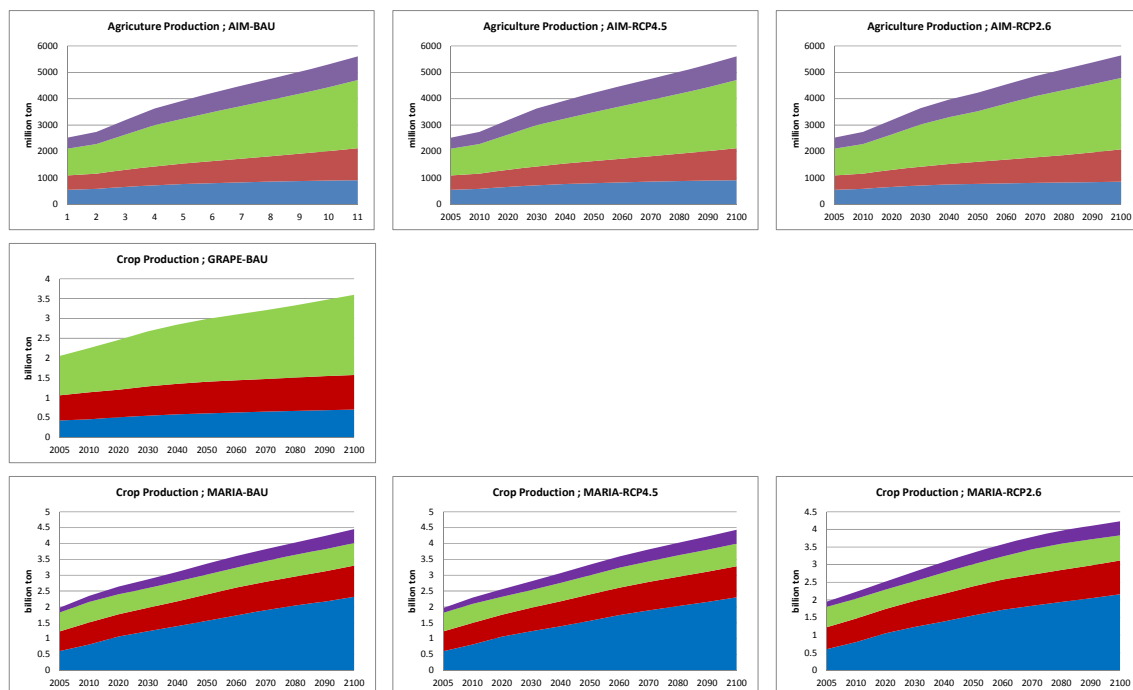
e-1. 穀物生産の推移

図 3・1・2・②-e_1、図 3・1・2・②-e_2 に、SSP-2 と SSP-3 に対する世界全体の穀物生産の推移をモデル別・シナリオ別に示す。モデルごとに扱う農作物の種類が異なるため単純な比較はできないものの、パターンとしてはモデル内では類似していること、また RCP シナリオによって大きな変化は見られないことが見て取れる。



■ : コメ ■ : コムギ ■ : トウモロコシ ■ : ダイズ(AIM では油脂植物全般)

図 3-1-2-②-e_1 SSP-2 における世界農作物生産のモデル別・RCP シナリオ別推移
(穀物乾燥重量 10 億 t/年)



■ : コメ ■ : コムギ ■ : トウモロコシ ■ : ダイズ(AIM では油脂植物全般)

図 3-1-2-②-e_2 SSP-3 における世界農作物生産のモデル別・RCP シナリオ別推移
(穀物乾燥重量 10 億 t/年)

MARIA は SSP-3 ケースにおいてやや RCP2.6 で減少を見せる。これは、MARIA が比較的 RCP2.6 において GDP の減少が大きく、穀物需要の低下を意味するためである。

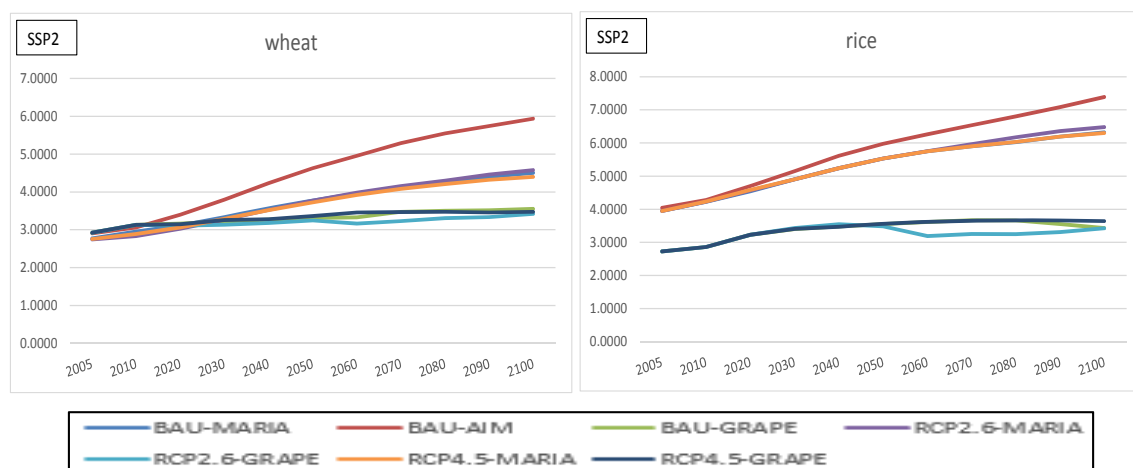
e-2. 平均主要穀物収率の推移

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エネルギー利用の拡大は両立可能に見える。ただし収率の成長の仮定に依存する。

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。他方、農業に対しては安全保障の観点から欠かせないため、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。このため、将来の世界全体の食糧需要に対してはある程度過去のトレンドの延長で推計が可能であるが、生産の地域分布に関しては幅が発生する。特に、一部の途上国では生産の拡大と生産技術の進展が著しいため、世界平均収率のシミュレーションには幅が生じやすい。ここでは、現時点でモデル間の比較が可能なコムギとコメについてモデル比較を行う。

図 3-1-2-②-e_3、図 3-1-2-②-e_4 に SSP-2 および SSP-3 におけるコムギとコメの収率の推移を示す。コムギは、BAU においても 3 モデルが異なる推移を示している点が注目される。ただし温暖化政策による違いはきわめて小さい。これは、コムギの場合、温暖化政策の有無、あるいは気候変動よりも施肥など農法に依存するところを重視しているためと考えられる。そのため、モデルによる仮定の差が明確に表れたものといえる。

なお、GRAPE のコメの収率のみほかのモデルとは差異がある。ただし、コメの耕地面積は他のモデルとほぼ同じである。これは、生産穀物重量と、収穫穀物重量ではなく精米後の出荷量の相違である。



(a)コムギ

(b)コメ

図 3-1-2-②-e_3 SSP-2 における世界平均穀物収率の推移 (乾燥穀物重量 t/ha)

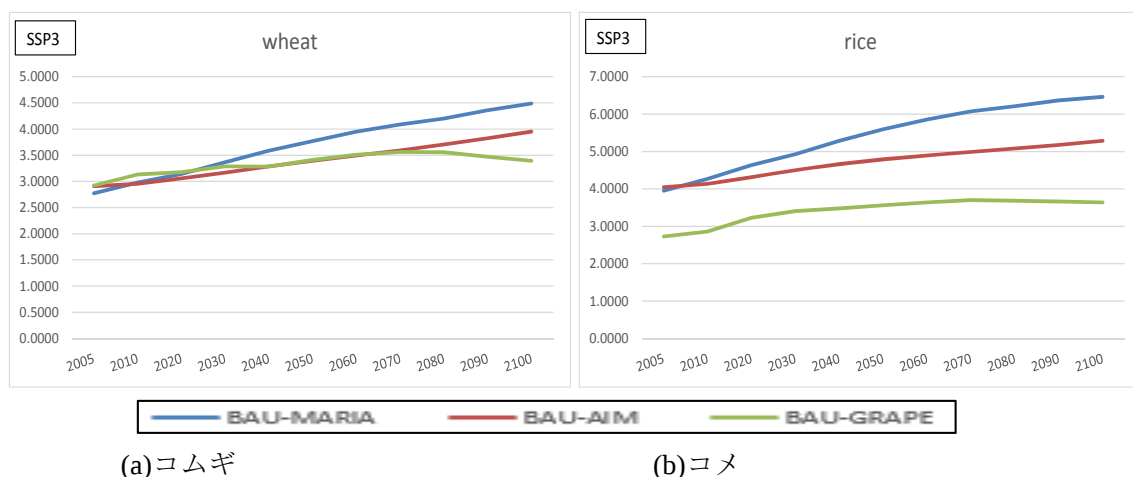


図 3-1-2-②-e_4 SSP-3 における世界平均穀物収率の推移 (乾燥穀物重量 t/ha)

穀物生産の平均的な収率の地域別推移を図 3-1-2-②-e_5、図 3-1-2-②-e_6 に示す。世界全体では安定的な収率の推移を示している。しかし各地域で作物ごとの収率は漸増傾向であっても、作物ごとの生産シェアは市場条件で変化するため、平均的な推移は必ずしも安定的になるとは限らない。図では GRAPE にこの傾向が現れている。気候条件、市場条件の下でどのような作付と生産がなされるかはその国の農業政策など政治条件にも左右されるため、費用最小化のみでは将来予測に十分ではない点に留意が必要である。

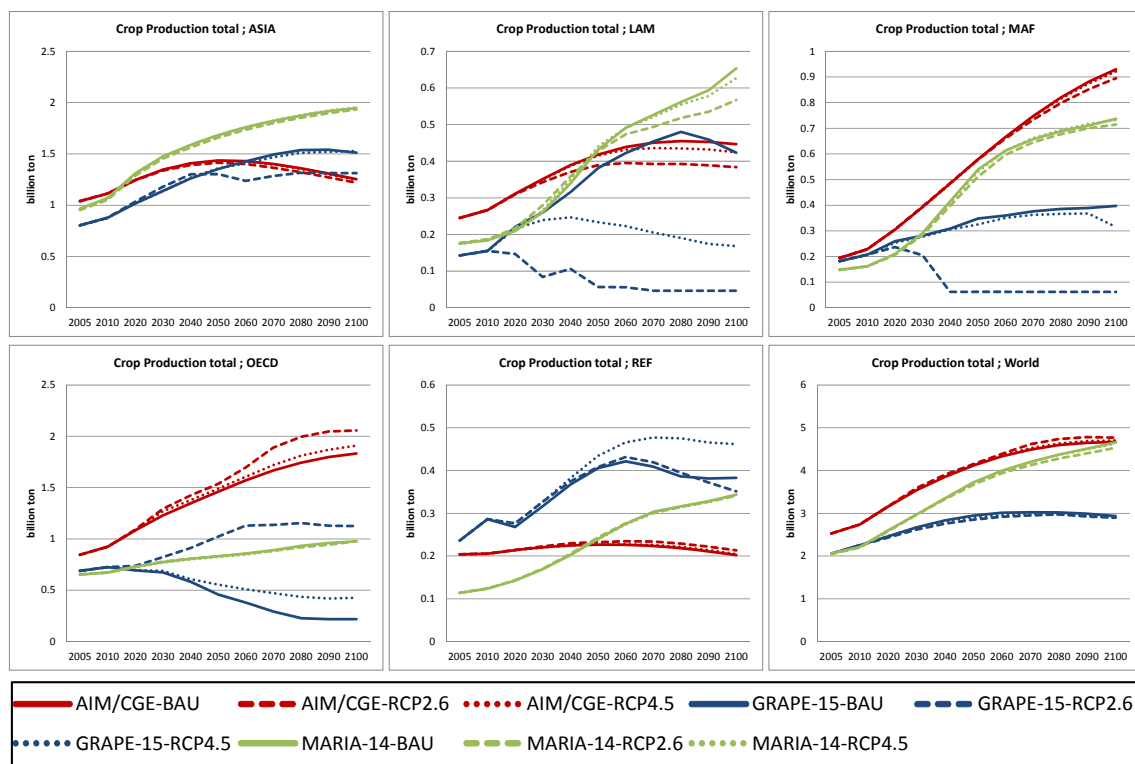


図 3-1-2-②-e_5 地域別農作物平均収率の推移(ha あたり乾燥 t) : SSP-2

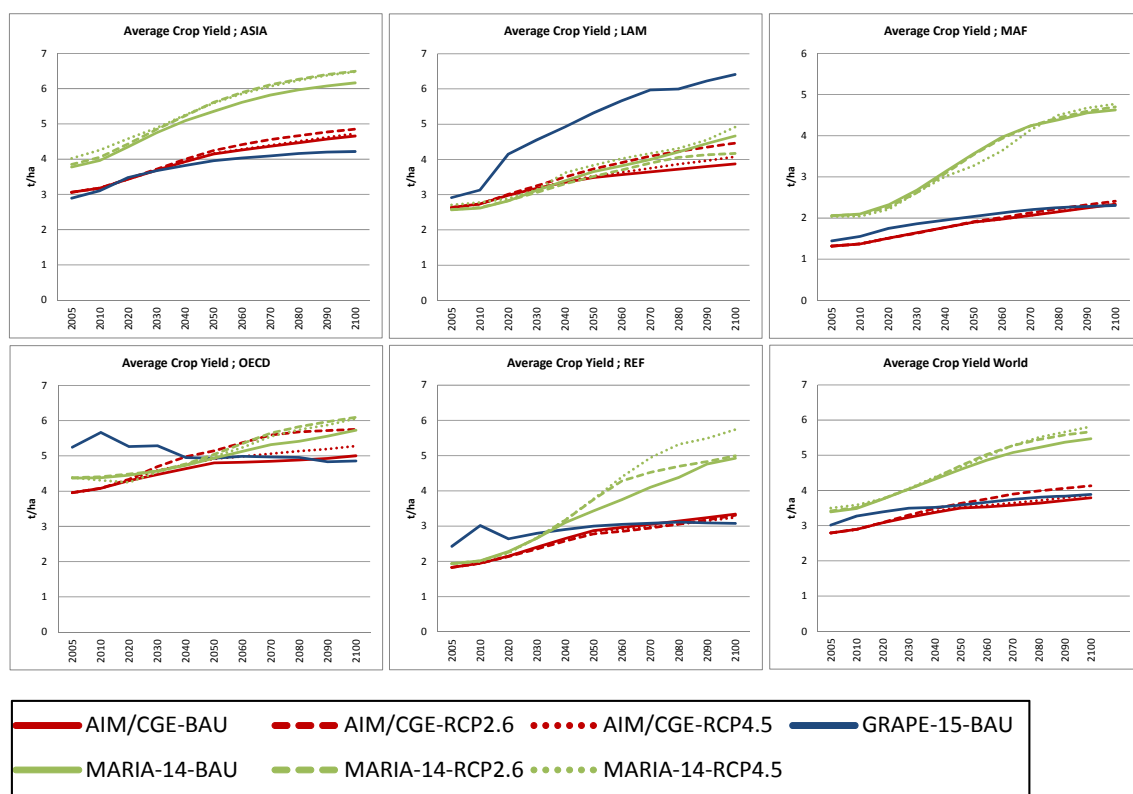


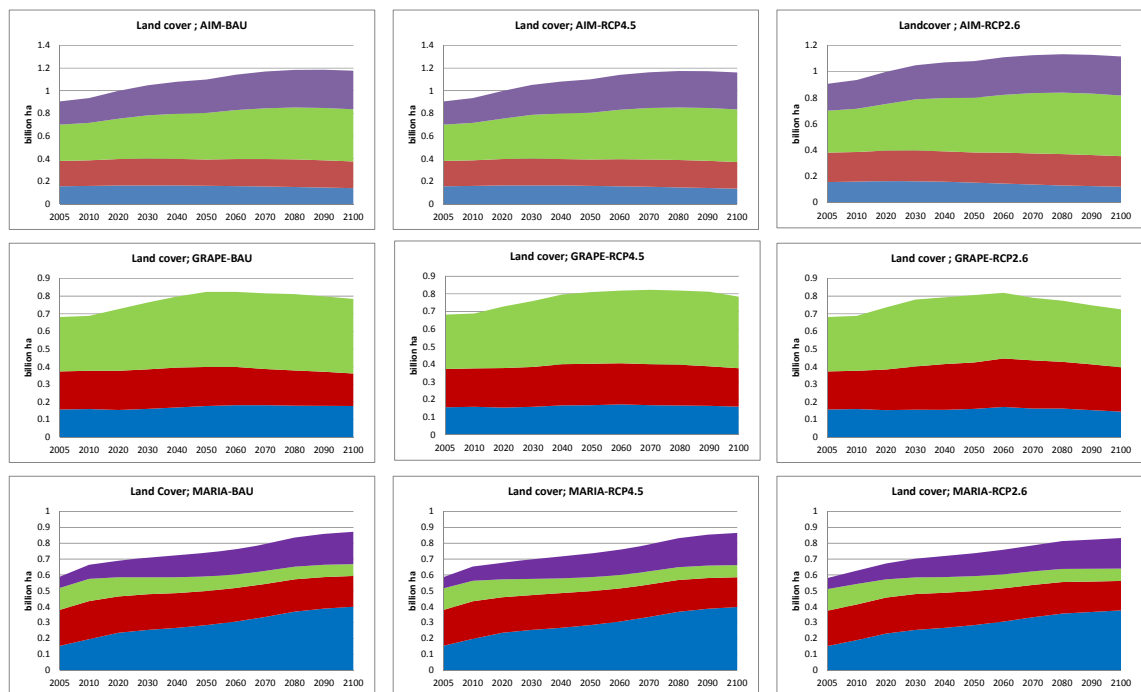
図 3-1-2-②-e_6 地域別農作物平均収率の推移(ha あたり乾燥 t) : SSP-3

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。

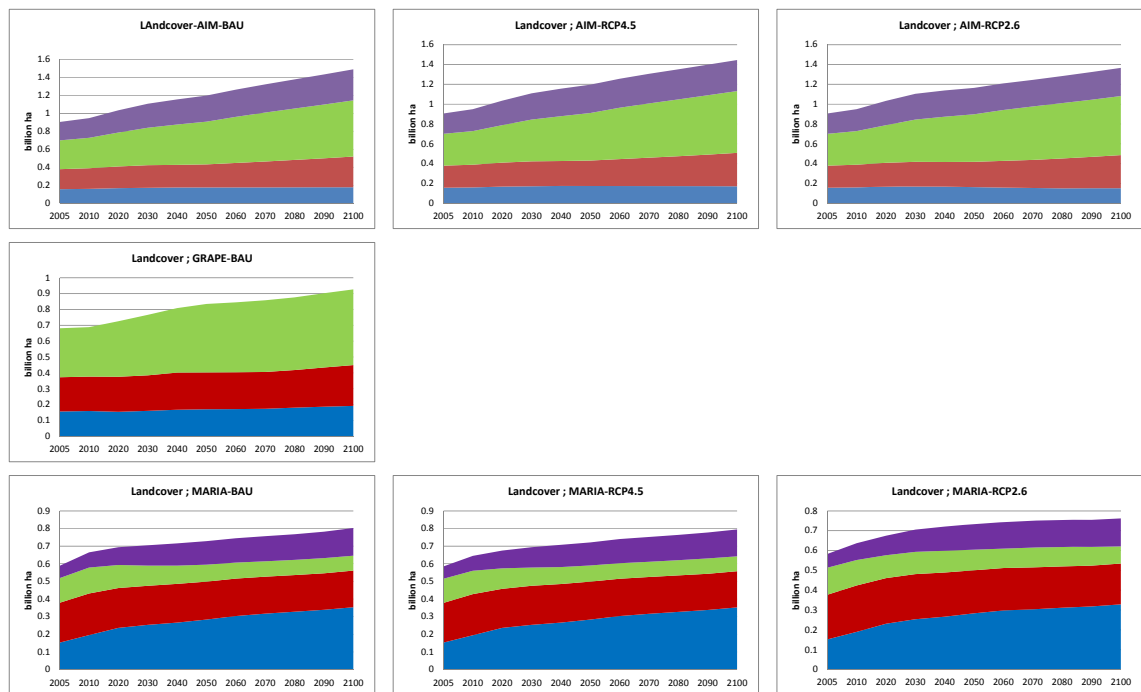
図 3-1-2-②-e_7、図 3-1-2-②-e_8 に SSP-2 および SSP-3 の耕地面積の推移を示す。

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、SSP-2、SSP-3 とともに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ることは言うまでもない。



■ : コメ ■ : コムギ ■ : トウモロコシ ■ : ダイズ(AIM では油脂植物全般)

図 3-1-2-②-e_7 SSP-2 における穀物生産耕地面積の推移(10 億 ha)



■ : コメ ■ : コムギ ■ : トウモロコシ ■ : ダイズ(AIM では油脂植物全般)

図 3-1-2-②-e_8 SSP-3 における穀物生産耕地面積の推移(10 億 ha)

e-4. 2050 年代および 2100 年代における作物収率、収穫面積、生産量のモデル間比較

モデル間では穀物需要の想定に差があるため結果に広がりが見られるものの、収率変化で見るとモデル間の幅は小さく、影響評価の結果と整合的である。

これまで見たように、食糧需給、作物収率の増加率の設定にはモデル間で異なった仮定が存在するが、2050 年および 2100 年の時点で、現在からどのような変化を示すか収穫面積の変化とともに表 3-1-2-②-e_1 から表 3-1-2-②-e_4 に示す。また、これら収率の設定と影響評価モデルによる予測との差異を示すため、3 章 1 節 1 項の農業被害の推定に用いたモデル（PRYSBI-2）の結果も同時に示す。

表 3-1-2-②-e_1 コメの 2010 年代に対する変化

モデル	SSP (BAU)	収穫面積 (2050s)	収穫面積 (2090s)	収率 (2050s)	収率 (2090s)	生産量 (2050s)	生産量 (2090s)
AIM	SSP2	1.0	0.9	1.3	1.4	1.3	1.3
AIM	SSP3	1.1	1.1	1.3	1.4	1.4	1.6
GRAPE	SSP2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4	1.4
GRAPE	SSP3	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5
MARIA	SSP2	1.5	2.0	1.3	1.5	1.9	2.9
MARIA	SSP3	1.5	1.7	1.3	1.5	1.9	2.7
PRYSBI-2	SSP2			1.2	1.3		
PRYSBI-2	SSP3			1.2	1.2		

表 3-1-2-②-e_2 コムギの 2010 年代に対する変化

モデル	SSP (BAU)	収穫面積 (2050s)	収穫面積 (2090s)	収率 (2050s)	収率 (2090s)	生産量 (2050s)	生産量 (2090s)
AIM	SSP2	1.0	1.1	1.4	1.5	1.4	1.6
AIM	SSP3	1.1	1.4	1.3	1.4	1.5	2.0
GRAPE	SSP2	1.0	0.9	1.1	1.1	1.4	1.4
GRAPE	SSP3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.5
MARIA	SSP2	0.9	0.8	1.3	1.5	1.1	1.2
MARIA	SSP3	0.9	0.9	1.3	1.6	1.2	1.4
PRYSBI-2	SSP2			0.9	0.8		
PRYSBI-2	SSP3			0.9	0.9		

表 3-1-2-②-e_3 トウモロコシ (MARIA, PRYSBI-2)、粗粒穀物 (AIM)、その他穀物 (GRAPE)の 2010 年代に対する変化

モデル	SSP (BAU)	収穫面積 (2050s)	収穫面積 (2090s)	収率 (2050s)	収率 (2090s)	生産量 (2050s)	生産量 (2090s)
AIM	SSP2	1.2	1.4	1.3	1.3	1.6	1.9
AIM	SSP3	1.4	1.8	1.1	1.2	1.6	2.1
GRAPE	SSP2	1.4	1.4	1.0	1.1	1.4	1.5
GRAPE	SSP3	1.4	1.5	1.0	1.1	1.4	1.7
MARIA	SSP2	0.7	0.6	1.5	1.9	1.0	1.1
MARIA	SSP3	0.7	0.6	1.5	1.8	1.0	1.1
PRYSBI-2	SSP2			1.2	1.3		
PRYSBI-2	SSP3			1.2	1.2		

表 3-1-2-②-e_4 ダイズ (MARIA, PRIYSBI-2)、油脂植物 (AIM) の 2010 年代に対する変化

モデル	SSP (BAU)	収穫面積 (2050s)	収穫面積 (2090s)	収率 (2050s)	収率 (2090s)	生産量 (2050s)	生産量 (2090s)
AIM	SSP2	1.3	1.5	1.2	1.3	1.7	2.0
AIM	SSP3	1.3	1.5	1.2	1.3	1.6	2.0
GRAPE	SSP2	1.7	2.2	1.1	1.2	1.9	2.7
GRAPE	SSP3	1.5	1.7	1.1	1.2	1.7	2.1
MARIA	SSP2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.8	1.8
MARIA	SSP3	1.5	1.6	1.5	1.5	2.2	2.5
PRYSBI-2	SSP2			1.2	1.3		
PRYSBI-2	SSP3			1.2	1.3		

2050 年代の食糧需給の観点からは、現在の 2 倍以上の生産量が必要となる作物は MARIA SSP3 のダイズ以外はなく、収率で見た場合では作物全体のモデル平均値は SSP2 では 2050 年代で現在の約 1.3 倍、SSP3 では約 1.2 倍の設定となっている。この値は、影響評価モデルによる作物生産性予測と整合したものであり、統合評価モデルの設定による食糧需給はこれら収率変化とある程度の農地面積拡大によって達成していることがわかる。

e-5. 地域別穀物生産の推移

世界合計での穀物生産にシナリオ間の差は小さいが、地域別にみるとモデル間の差は大きい。

「どこで」「何を」作るのが最適かは、気候と需要だけでなく収率や土地利用コストなど多くの要因に左右される。

図 3・1・2・②-e_9、図 3・1・2・②-e_10 に地域別の穀物生産推移のモデル計算結果の比較を SSP-2 および SSP-3 の間で比較する。上述の通り、各モデルで穀物のカバレッジなどに相違があるため、モデル間の時間断面での数値比較には注意が必要である。世界全体では RCP シナリオによる大きな変化は見られないが、RCP2.6 では地域間の生産の増減は GRAPE-15 モデルで大きな値を報告している。モデルごとのカバレッジの違いに注意は必要なもののこのような地域での生産分担については経済性と影響評価の双方から実行可能性の幅がなお残っていることが示唆されている。

世界全体ではシナリオごとに比較的安定的に推移しており BAU と RCP2.6 シナリオの間の差は大きくない、しかし地域別生産の推移を見ると、モデル間に差がある。例えば、旧ソ連地域(REF)および OECD-BAU では上昇、横ばい、下降と別れている。OECD では RCP2.6 ケースになると MARIA と GRAPE がほぼ同様の推移を示す。SSP-2 中南米(LAM)では、RCP2.6 シナリオで GRAPE が生産の低下を示している。

<全体共通>

食糧需給・土地利用変化とバイオマスエネルギー利用の拡大が両立するのにかについては、従来から懸念されてきたことであつた。ここまでの評価では、食糧需給・土地利用変化を簡易化し資源制約を明示的に扱ってモデル化している AIM、GRAPE、MARIA,はいずれも両立について肯定的な結果を与えている。この結果をより詳細なグリッド別分析評価を行うテーマ 2 の結果と相互比較することで、全体的な首尾一貫性のもとの戦略評価が可能となろう。

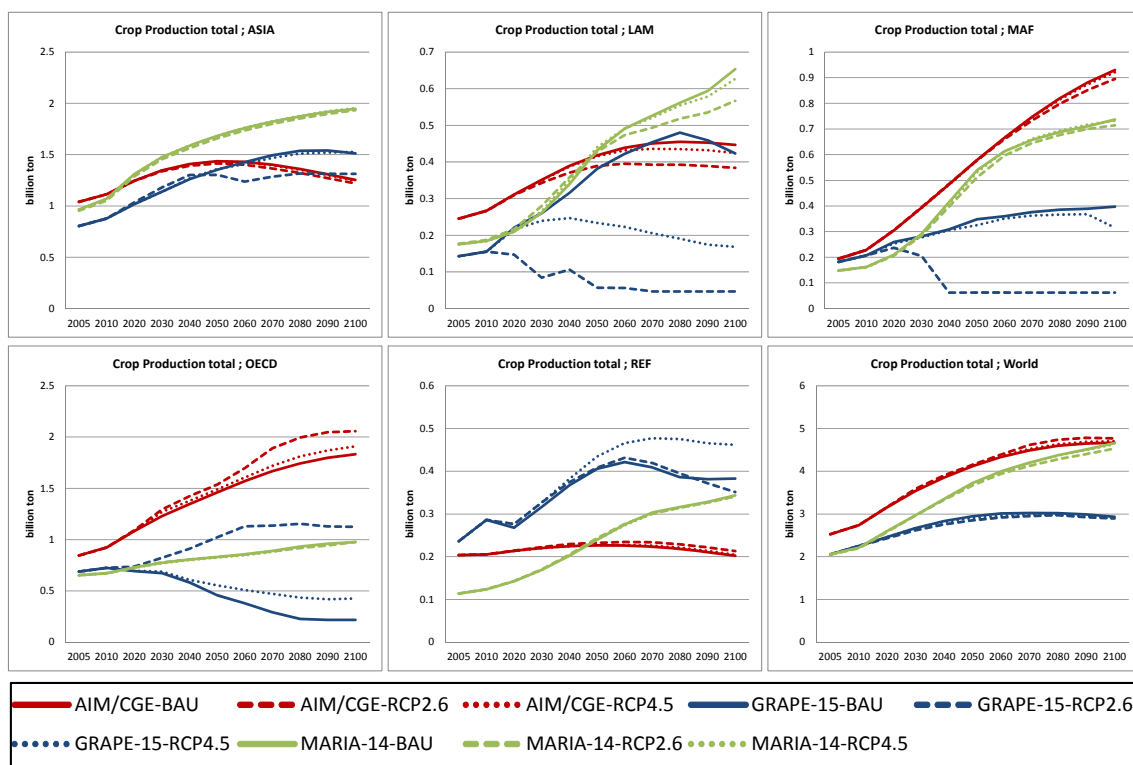


図 3-1-2-②-e_9 SSP-2 における穀物生産の地域別推移モデル比較 (10 億 t/年)

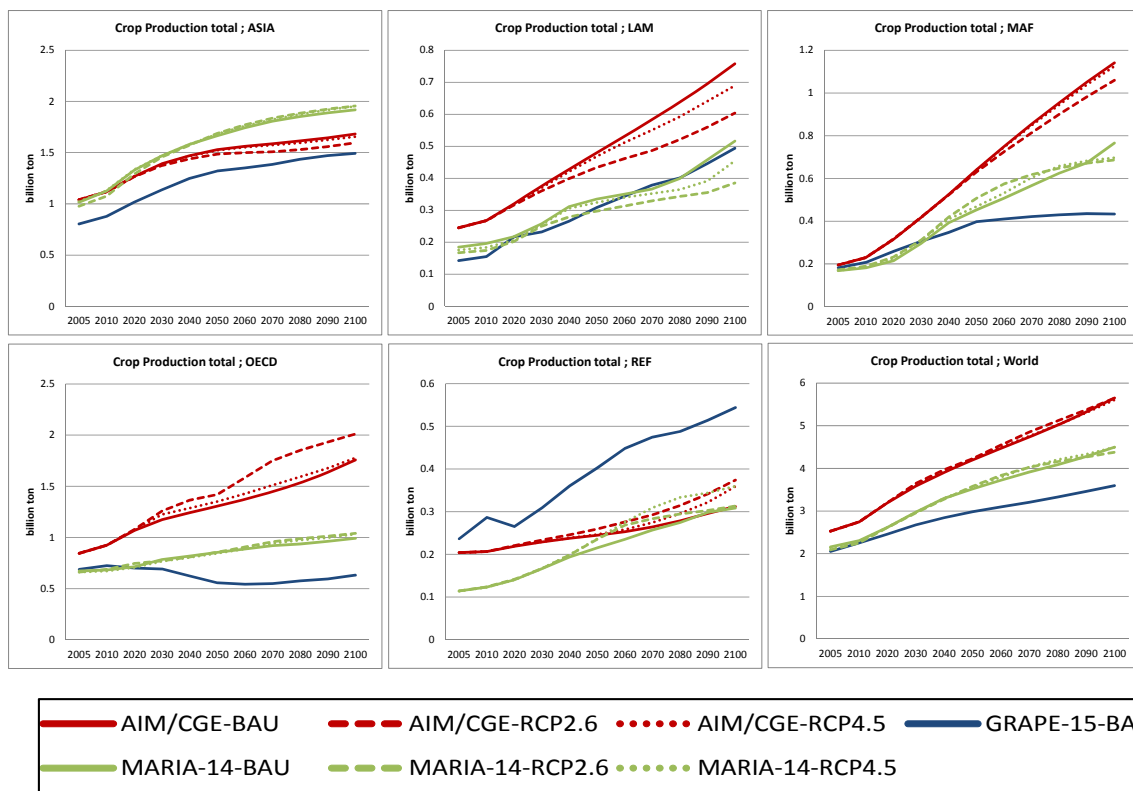


図 3-1-2-②-e_10 SSP-3 における穀物生産の地域別推移モデル比較 (10 億 t/年)

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℃ 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	
LightMnfc		製造業
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)	
FSU_EEurope	REF
China	ASIA
OAsiaOceania	
OAmerica	LAM
Africa	MAF

f-1. 産業構造への影響

(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 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。

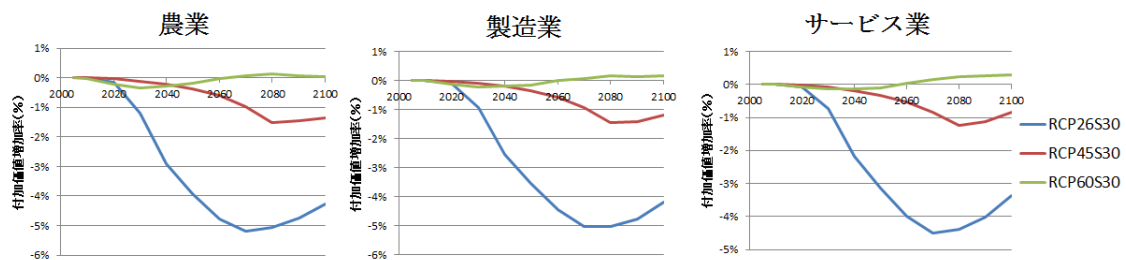


図 3-1-2-②-f_1 R C P 別付加価値増加率推移

（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_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。

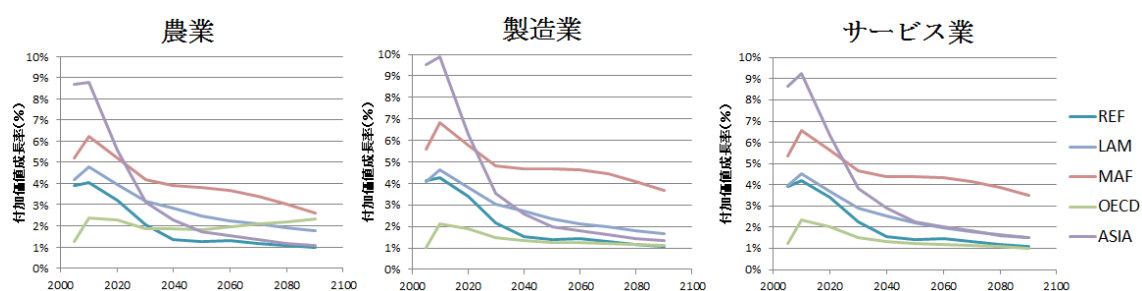


図 3・1・2・②-f_2 地域別付加価値成長率推移

（３）地域別産業構造の変化

RCP2.6 シナリオでは第 2 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_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。

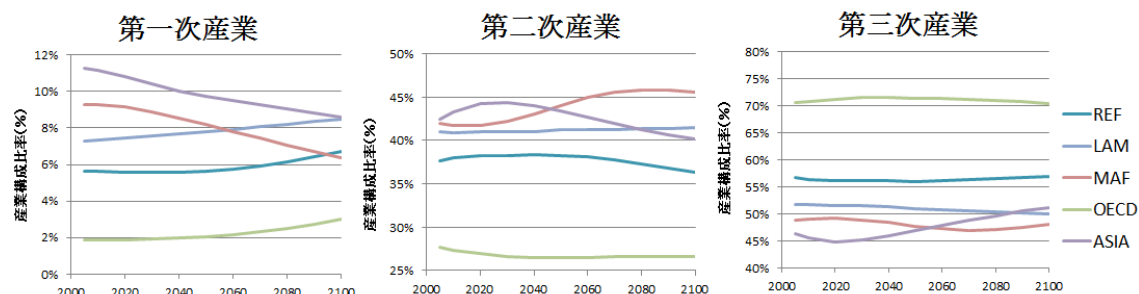


図 3・1・2・②-f_3 地域別産業構造の変化

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。

(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_4 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 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。

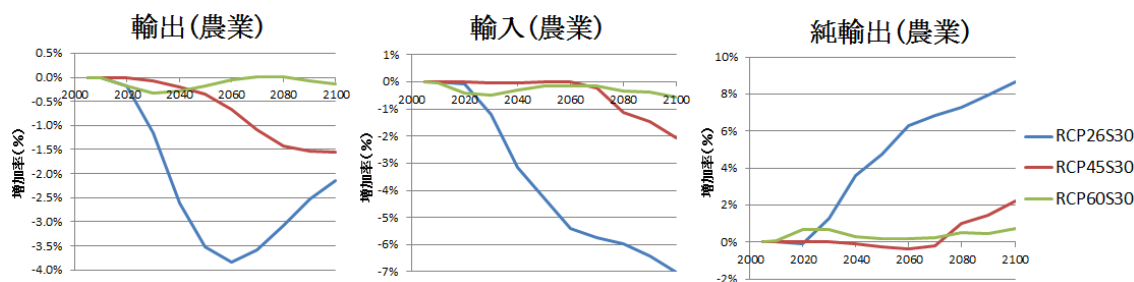


図 3-1-2-②-f_4 農業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

（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_5 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。

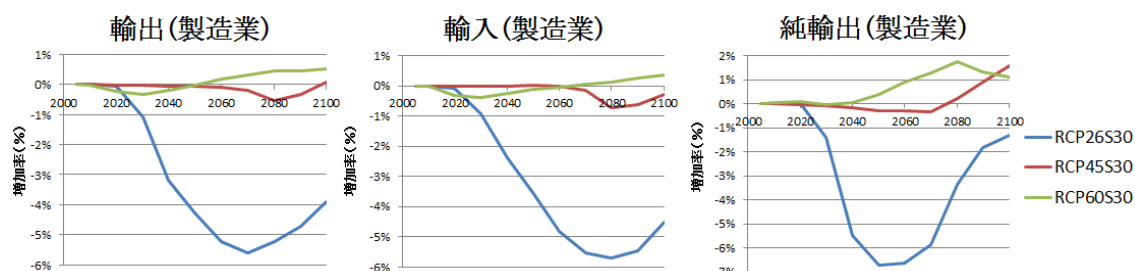


図 3-1-2-②-f_5 製造業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

（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_6 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。

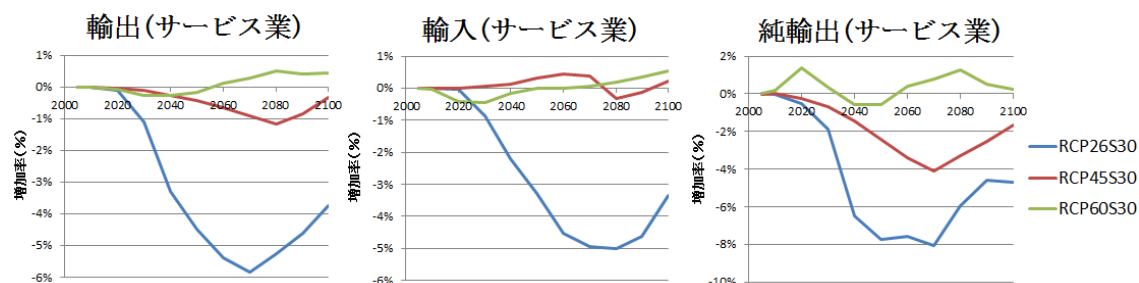


図 3-1-2-②-f_6 サービス業の輸出・輸入・純輸出の RCP 別増加率

コラム 2：統合評価モデルの評価関数

環境や資源、エネルギーと社会経済影響など、異分野間の相互影響を総合的に評価するツールとして、統合評価モデルは広く用いられている。統合評価モデルには、さらに長期的な最適計画を求めようとする通時最適化モデルと、空間的な分布や産業部門間のやりとりの均衡状態を探る静学的モデルがの 2 つのタイプに分かれる。温暖化政策評価のためにどのようなモデルを用いて分析するかは、分析結果の解釈と政策オプションの意味合いを考える上で、極めて重要な「選択肢」であると言える。このコラムでは、上記 2 タイプのうち、前者の通時最適化型の統合評価モデルで使われる評価関数（経済学の用語では社会厚生）について考えてみたい。¹⁵

通時最適化を行う統合評価モデルで使われる評価関数は多くの場合、次のような形をしている。

$$D0 \times u(C0) + D1 \times u(C1) + \dots + Dt \times u(Ct) + \dots + DT \times u(CT) \quad \dots \textcircled{1}$$

ただし、 $Dt = (1+\rho)^{-t}$ 、 $u(z) = (z^{1-\eta} - 1)/(1-\eta)$

ここで、 t は時点を表す。また、 Ct は時点毎の消費（あるいは享受したフローの経済価値）を表す。 u は時点毎の消費から得られる満足度や便益を表し、瞬時効用と呼ばれる。 Dt は割引係数、さらに ρ は時間選好率（あるいは時間割引率）と呼ばれるものである。なお、理論上は T は無限と考えるが、数値計算上はそういうわけには行かないので、ある特定の値を仮定することになる。

この①の形は、時点毎の経済活動を効用なるものに直し、かつ、時間に応じた重み付け（割引）をして足し合わせたものとなっている。時点 t を連続的な変数として考える場合は、

$$\int u(Ct) \exp(-\rho t) dt \quad \dots \textcircled{2}$$

という積分の形と等価である。

この①ないし②（以下②は省略）の形には、ポイントが 3 つある。まず、瞬時効用の関数 u が時点によらない（ u_t という形になっていない）こと（ポイント 1）。次に、時点毎に分離された瞬時効用の重み付け足し算になっている（掛け算などになっていない）こと（ポイント 2）。最後に、その重み付け Dt が時間 t に関して指数関数になっていること（ポイント 3）である。

なぜこのような形なのかという点に関しては、経済理論として大変難しい議論がある。『ICA-RUS レポート 2013』（2013 年 3 月）の『コラム 6 割引の考え方』（20 頁）では、この形が導出される背景が簡単に述べられているので参照されたい。ただし、そこでは、①以外の形ではなぜいけないのかという点について説明はなされていないため、ここで若

¹⁵ 本書 3 章 1 節 2 項対策評価では 4 つの統合評価モデルが使用されている。うち 2 つ（MARIA-14 および GRAPE-15 は前者の通時最適化型モデルであり、残る EMEDA と AIM/CGE は静学的最適化を繰り返し行うので後者のタイプに属する。両者はそれぞれ異なる特長を持つ。

干の補足を加える。

ポイント 1、2 を満たす評価関数を採用する理由は、端的に述べるならば、それが現実的であるため、あるいはそれが経済の実態に合っているためではなく、経済理論の構築上、十分に解明されている数学の理論を使えるためである。さらに、ポイント 3 を仮定する理由には、時間整合性という概念が関係している。時間整合性とは、ある時間の断面（たとえば $t=0$ ）で見て、そこから将来を考えたときと、時間経って実現したある時点（ $t>0$ ）から将来を考えたときとが、互いに整合性を持っているという性質である。ポイント 1、2 を満たす評価関数が時間整合性を持つためには、割引係数 D_t が時間 t に関して指数関数となっている必要があるということが知られており、それゆえポイント 3 の仮定が必要となる。

しかしながら、現実の社会は、必ずしも時間整合性を持った人々のみで構成されているとは限らない。時間整合性を仮定することのメリット（確立された経済・数学理論の活用可能性）を犠牲にしたとしても、社会・経済の実態により即した仮定を置くことが優先される場合もある。その一例が双曲割引と呼ばれるもので、割引係数 D_t について、指数関数に代えて次のような形式を仮定するものである。

$$D_t = (1+\alpha t)^{-\beta/\alpha} \quad (\alpha, \beta \text{ は定数})$$

こうした割引の場合は、しばしば選好逆転現象が発生する。選好逆転現象とは、例えば「今日 100 円もらうのと明日 110 円もらうのと、どちらが好ましいか？」という問いに対して「今日」と答える人が、「30 日後に 100 円もらうのと 31 日後に 110 円もらうのと、どちらが好ましいか？」という問いに対しては「31 日後」と答えてしまうような現象である。ここで挙げた例の場合、目先の利得に釣られやすい性質、と言い換えることもできる。

上記のような選好逆転現象を示す人も、実際には決して少なくはないであろう。そうした意味で、①の割引係数を双曲割引に置き換えたものを評価関数（社会厚生）として使ったとしても、現実的でないとは言えない。むしろ、現実により忠実なモデルとも言える場合もあるだろう。それでも、こうした時間整合性の無い評価関数を採用することは、経済理論としては躊躇せざるを得ない。まず、こうした評価関数を使うと、モデルが動的計画法では解けなくなる上に、時間が進むごとに問題を解き直さなくてはならなくなる。時点毎に毎回異なった解が出てくるため、その経済的意味合いが不明になってしまう。一言で、「人間の意思決定は非合理的である」と解釈するなら、それでいいかもしれない。しかし、それでは、そもそも評価関数を導入してそれを最大化する、という「合理的行動」の仮定が意味をなさなくなってしまう。我々はこうした実情、現実と理論の関係を深く理解した上で、モデル分析の描く政策オプションの意味合いを考えないといけないのである。

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心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。

まず、社会経済は変化する気候に適応して、生じる被害を軽減することができる。例えば海面上昇に対しては、オランダが歴史的に行ってきたように、堤防を構築して高くなる水位から都市を守るという対応が考えられる。また、人工的に気候を改変し、気候変動の影響を和らげることも考えられる。この気候工学という手法は太陽放射管理（SRM）と二酸化炭素除去（CDR）の二つに大別される。本節のシナリオ分析でも大きな役割を果たす CCS 付きバイオマス発電（BECCS）は CDR の一種類である。

不確実性の大きい新たな対策

本節で適応と SRM は定量的評価の対象になっていないが、その背景には科学的な不確実性が非常に大きいことがある。具体的にコストを例に不確実性を見てみよう。

適応のコスト推計で特に有名なのが世界銀行と UNFCCC によるものである。2030 年時点の推計は、UNFCCC によれば農林水産業、水の供給、健康、沿岸域、インフラの影響に対する適応の費用は 280-670 億ドル／年になるという。世界銀行はさらに極端現象の影響も加えて推計し、2050 年時点の推計で 700-1000 億ドル／年というコストを得た（2014 年に公表された IPCC の第 5 次評価報告書第 2 作業部会の貢献のまとめによる）。この推計自体多くの幅があるが、一部のセクターのみしか対象としておらず、また（適応は発展途上国の分析が重要になるが）データ不足など、多くの問題点が山積している。したがって本当のコストの不確実性はこれより大きいと思われる。

SRM については、特に関心の高い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った。例えば、航空機による運搬コストは概ね高度に比例するが、これまでの見積もりでは成層圏に至らない高度が想定されており、過度に楽観的な運搬費用が適用されていた。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が、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。）

以上のように、適応と SRM の分野の研究はまだ発展途上である。IPCC でも指摘されているように科学的知見は不足しており、確度の高い情報は不足しているのである。また、科学的知見の不足はコストに限らず、潜在的な効果の大きさや、副作用など、様々な側面についても共通といえる。

ガバナンスの必要性

適応と気候工学は（中身は異なるが）適切なガバナンスが必要という点で共通性がある。

気候変動の影響はアフリカや南アジアの貧しい国々までにも及び、上述した適応のコストを誰が負担するかは大きな問題である。実際、現状で先進国や開発支援機関が提供できる金額は、必要量に比べて少ないと考えられている。また外部からの資金だけでなく、それを適切に管理する国内の仕組みも必要である。アフリカ等の内戦状態にある国が適応計画を立案し、実施できるかについては、大きな疑問符が付く。

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。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わないように、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)¹⁶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）¹⁷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300年程度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CO₂吸収が増加するといった具合である。最新のIPCC第5次評価報告書（AR5）第1作業部会（WG1）報告書（IPCC, 2013）¹⁸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。

¹⁶ Lenton T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., and Schellnhuber, H. J. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol.105, 1786-1793.

¹⁷ 木口雅司・井芹慶彦・宮崎千尋・田渡竜乃介・山本彬友・伊藤昭彦・鼎信次郎・沖大幹, ティッピングエレメント. *環境情報科学*, 44, 29-35, 2015.

¹⁸ IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

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
⑧	アマゾンの熱帯林（の植生割合の減少）	生物多様性の喪失、降水量の減少
⑨	北方林（の植生割合の減少）	植物群落の入れ替わり

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

ティッピングエレメントは、ティッピングポイントを一旦過ぎてしまったらこの世の終わりを迎えてしまうようなこれまでに経験したことのない大惨事をもたらす、という印象もあり、**critical** な事象、と呼ばれることもある。しかし、表 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。

ここで、ティッピングエレメントの一つである「アマゾンの熱帯林（の植生割合の減少）」について、国立環境研究所の伊藤昭彦主任研究員のレビュー（木口ほか, 2015）を紹介したい。南米・アマゾン川流域は活発な生態系機能と豊かな生物多様性で知られているが、植生と気候との間のバランスが崩れることにより大規模な森林枯死（ダイバック）が発生し

うることを示した研究 (Cox et al., 2000) ¹⁹は大きな衝撃を与えた。気候変動に伴う熱帯収束帯の移動などの寡雨要因により、乾燥ストレスが強まることで熱帯雨林が疎林・草原などに劣化し、さらに蒸散で大気に戻る水分量が減少して乾燥化が進むループに陥る、というのがその理由である。これは、ダイバックがある程度以上に進行すると不可逆的に森林が回復困難となるティッピングエレメントの1つであることを意味する。この現象が発生すると、地域住民が利用可能な木材・生物多様性などの生物資源や水資源が大きく失われ、大気調節などの生態系サービスも損なわれて、地域社会の存続に深刻な影響が及ぶことが容易に想像される。広大な熱帯多雨林を擁するアマゾン川流域は、グローバルなエネルギー・水・炭素の循環においても重要な役割を果たしており、その間接的影響は大陸スケールに及ぶことが予想される。

その一方、ダイバックの発生予測には大きな不確実性が残されている (Malhi et al., 2009) ²⁰。まず、枯死が生じるほど激しいアマゾン川流域の乾燥化は全ての気候モデルで予測されているわけではなく、発生を予測するモデルでも設定条件によって結果が大きく分かれる予測不確実性があることが示唆されている。これは現在の植生モデルの環境応答性、森林火災発生とその後の植生回復の予測、気候モデルにおける大気-陸面間フィードバックの強さなど、複雑な要因が絡むためである。そのため IPCC 第5次評価報告書 (AR5) 第2作業部会 (WG2) 報告書 (IPCC, 2014) ²¹の Table4-3 などでは、アマゾン・ダイバックの発生リスクはせいぜい中程度 (亜寒帯林より低い) とされている。さらに、ダイバックが発生する以前に、伐採・土地利用転換などの直接的人間活動によって甚大な森林減少が生じる可能性も指摘されている。現在、現地政府や国際的機関の監視・保全活動により森林減少の速度は鈍化しているとされるが、今後の人口増加や経済活動の如何によっては森林資源の枯渇が進行する危険性もある。つまり、単なる気候変動影響の指標としてだけでなく、人間活動を含めた総合的な地球変動の指標としてもアマゾン川流域の森林状況を注視していくべきだろう。

以下では、ICA-RUS で独自の定量分析を実施している2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)

¹⁹ Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, G.D., Spall, S.A. and Totterdell, I.J. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187.

²⁰ Malhi, Y. Aragão, L.E.O.C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C., and Meir, P. (2009) Exploring the likelihood and mechanisms of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106, 20610–20615.

²¹ IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

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。

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_2 に酸化される。酸化により生じた CO_2 の一部が大気に放出、もしくは海洋の CO_2 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)²²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)²³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_2 濃度は、産業革命前の CO_2 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)²⁴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_2 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。

²² Archer, D., Buffett, B., and Brovkin V. (2009) Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106, 20596-20601.

²³ Piñero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M., and Wallmann, K. (2013) Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. *Biogeosciences*, 10, 959–975.

²⁴ Schmittner, A., Oschlies, A., Matthews, H. D., and Galbraith, E. D. (2008) Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual CO_2 emission scenario until year 4000 AD. *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB1013.

<結果>

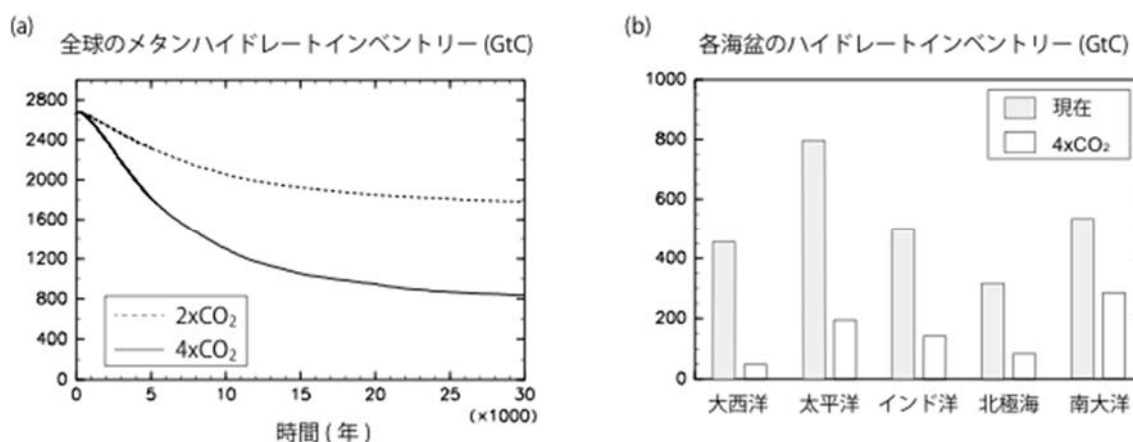


図 3-2-1-②_1 (a) 全球メタンハイドレートインベントリーの時系列変化. 破線は 2 倍 CO₂ 実験, 実線は 4 倍 CO₂ 実験をそれぞれ示す. (b) 現在気候(グレー)と 4 倍 CO₂ (白抜き) 気候における各海盆のメタンハイドレートインベントリー

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 CO₂ 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.

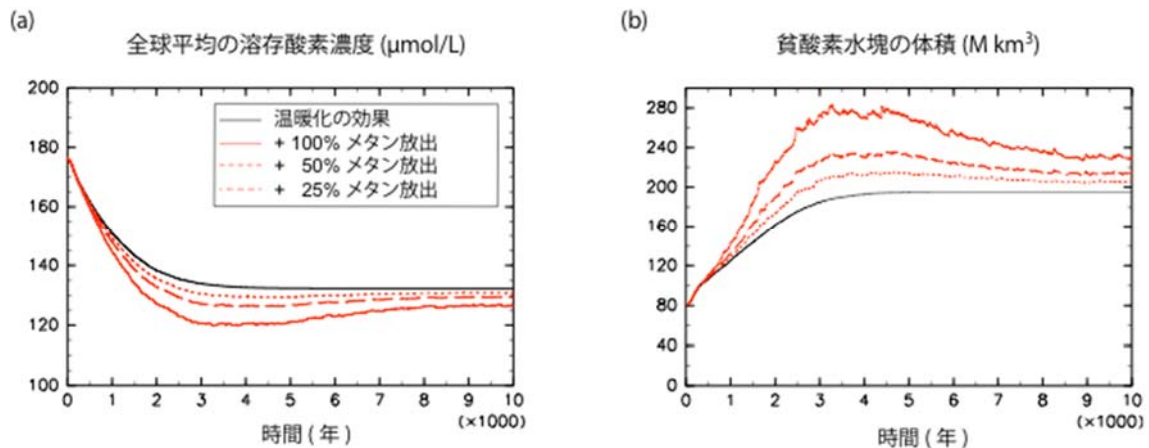


図 3-2-1-②_2 (a) 4 倍 CO₂ 実験における全球平均の溶存酸素濃度と (b) 貧酸素域 ([O₂] < 80 μmol/L) の体積の時系列変化。黒線は温暖化による溶解度減少による変化，赤線はメタン放出の効果を加えた場合の変化を示す。メタンハイドレートの分解によって生じたメタンのうち，海洋へ放出したメタンの割合を 100(実線)，50(破線)，25(点線)%とした場合の結果を示す。

メタン放出は貧酸素域の拡大を引き起こす

4 倍 CO₂ 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 μmol/L 減少し，貧酸素水塊の体積は約 110 M km³ 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 3000 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 μmol/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 40 M km³ 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。

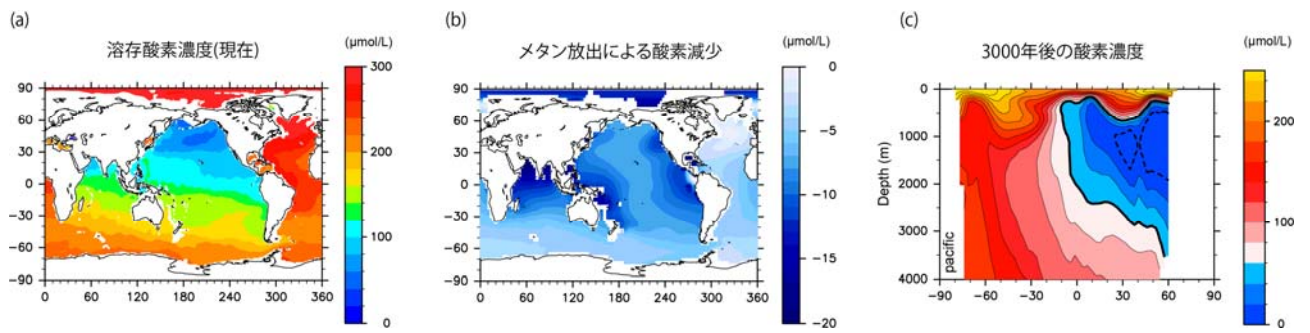


図 3・2・1・②_3 (a)水深 2000m における現在の溶存酸素濃度. (b)4 倍 CO_2 実験の 3000 年後における水深 2000m でのメタン放出による酸素減少量(50%放出ケース). (c) 3000 年後における太平洋の溶存酸素濃度(横軸: 緯度, 縦軸: 水深). 青色は $[\text{O}_2] < 80 \mu\text{mol/L}$ の貧酸素域を示す.

③雪氷圏

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。

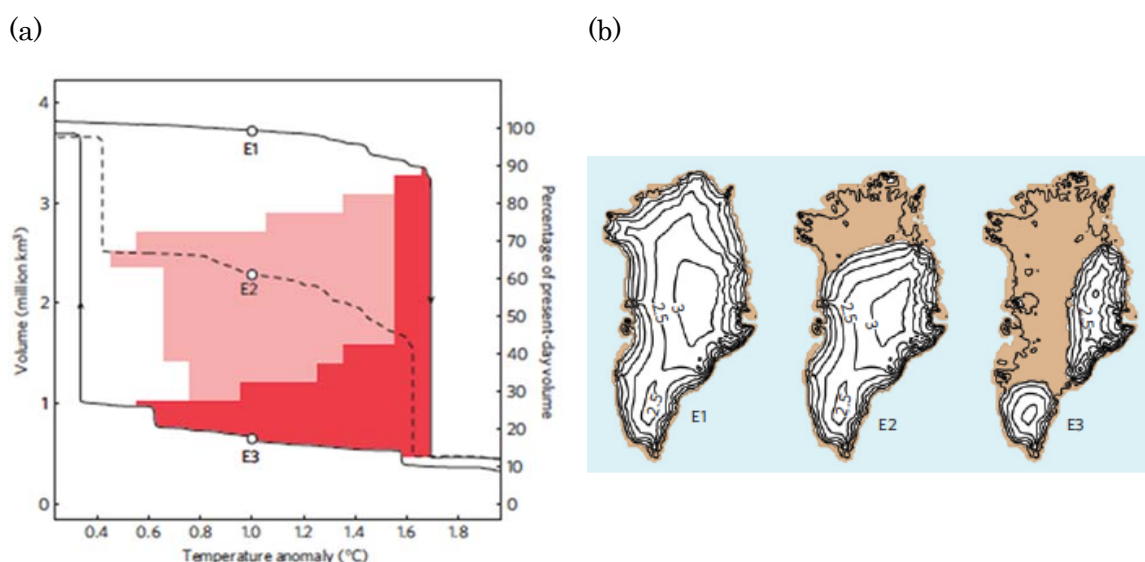


図 3-2-1-③_1 : (a) 夏のグリーンランド地域の気温変化に対する体積の応答。各温度状態に対して3種類の平衡解が存在する。(b) (a) の図の3種類の平衡解の代表として E1、E2、E3 の状態のときの平衡氷床形状を示す。ピンク色の範囲の氷床は E2 のような中くらいのおおきさの氷床に最終的になり、赤色の範囲の氷床は E3 のようなほとんど氷床のない状態に行き着く。グリーンランドは東に山脈が存在するので最後まで山の上に氷床が残ってこのような分布になる。

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多い、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)²⁵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もとの 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、tipping point 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、十分に解明されていない。

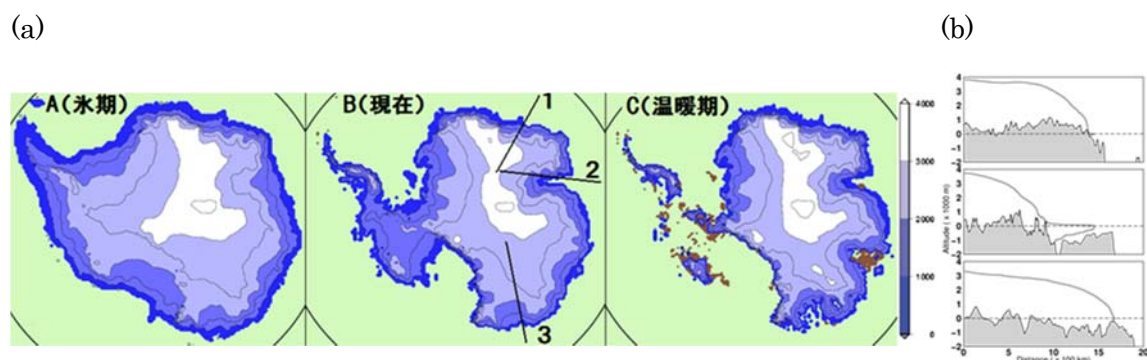


図 3-2-1-③_2 : (a) 南極氷床の A 氷期、B 現在、C 温暖期のモデル計算結果。C のように温暖になると西南極（図の左の部分）全体や東南極の一部（図の下部分）が後退し、基盤は海面下になると予想される。(b) 現在の B の図の 1、2、3 の断面を上から下に示す。1 は比較的基盤が高く氷床が融けたら高原状の基盤地形になるが、2 や 3 は、海面下か海面すれすれに位置していて、海洋氷床相互作用による非可逆的な後退が起こりやすい。

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

²⁵ Robinson, A., Calov, R. and Ganopolski, A. (2012) Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. Nature Clim. Change, 2, 429-432.

(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、すなわち接地線的位置の変化を精度よく再現することが重要である。氷床は中心部にむかうほど厚いためアイソスタシーの関係で基盤の地形は逆に中心部にむ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(地殻均衡)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）²⁶。地球温暖化で海洋の温度が上昇すると棚氷の下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。

²⁶ Schoof, C. (2007) Ice sheet grounding line dynamics: Steady states, stability, and hysteresis. *J. Geophys. Res.*, 112, F03S28.

(2) クロスカットイシュー

① バイオマスによるネガティブ・エミッション技術のポテンシャル評価

世界の人為起源 CO₂ 排出量が増加傾向を示す中で、産業化以前からの全球平均気温上昇を 2℃以下とする目標を達成するためには、今世紀末に向けて人為起源の CO₂ 排出をゼロさらにはマイナスにする必要がある。このため、2℃目標達成に向けた社会経済シナリオの多くでは、バイオエネルギー利用に伴う炭素回収貯留（バイオマス CCS）や植林などのネガティブ・エミッション技術を大規模に用い、大気中の CO₂ を除去をすることが前提となっている。

大規模バイオマス CCS によって大気中の CO₂ 濃度を大幅に削減するためには、バイオ燃料作物を広域にわたり栽培する必要があり、食料作物のための農地との競合、森林伐採の拡大など土地利用を介したトレードオフ構造やリスクを把握しておく必要がある。2℃目標シナリオの一つである IMAGE モデルによる RCP2.6 の気候変動と土地利用において、必要とされるバイオマス CCS による CO₂ 回収量が達成可能かどうか、またバイオ燃料作物拡大による土地利用変化に伴う炭素排出量が整合的であるかどうか、プロセスベースのモデルを利用して空間詳細な評価を行った。バイオ燃料作物の生産性は、作物の種類や肥料・灌漑利用などの農地管理によって影響を受けるため、これらを考慮した評価を行う必要がある。また、実証プラントで現在利用可能とされた技術に加え、エネルギー・コスト的には費用が高い技術も考慮してバイオマス CCS 実現可能量の評価を行ったところ、食用作物による第一世代バイオ燃料作物（サトウキビ、トウモロコシ、ナタネなど）の利用では達成が困難であることが明らかになった。第二世代バイオ燃料作物（多年生 C₄ 草本植物）の利用では、高肥料投入かつ高 CO₂ 回収技術を用いた場合のみ 2℃目標への必要量が達成可能であった。しかし、大量の肥料投入により新たに発生する温室効果ガスである N₂O 排出量の再評価、さらに CO₂ 高回収技術のコスト・エネルギー効率の改善が課題となる。これらの課題がクリアできない場合、2℃目標へ向けたバイオ燃料作物を用いたバイオマス CCS によるネガティブエミッションを達成するためには、シナリオが前提としている以上の農地拡大を行わなければならない、食料との競合や森林伐採による CO₂ 排出が避けられない可能性がある。

今回詳細な評価対象とした IMAGE モデルによる RCP2.6 シナリオでは、2050 年時点でバイオマス CCS に利用されるバイオマスの一次エネルギーは約 65 EJ yr⁻¹、炭素回収量は約 1.6 Pg C yr⁻¹ であり、2100 年ではそれぞれ約 125 EJ yr⁻¹、3.1 Pg C yr⁻¹ となる。それにとともに、バイオ燃料作物向け農地は 2050 年では 2.4 億 ha、2100 年では 4.5 億 ha まで拡大している。ICA-RUS の対策評価として用いた AIM、GRAPE、MARIA の各統合評価モデルでは、RCP2.6 レベルの気候対策をする場合、バイオマス CCS により 2050 年時点でそれぞれ 0.7 Pg C yr⁻¹、1.8 Pg C yr⁻¹、0.04 Pg C yr⁻¹、2100 年時点は 1.7 Pg C yr⁻¹、4.2 Pg C yr⁻¹、0.5 Pg C yr⁻¹ の炭素回収貯留が考慮されている。特に AIM、GRAPE モデルでは、IMAGE モデルと同様に大規模バイオマス CCS の導入が考えられているが、AIM では 2100 年のバイオ燃料作物

向け農地は 1.6 億 ha とそれほどの拡大はない。また GRAPE では詳細なバイオ燃料作物の設定は考慮されていないなど、今後はこれらのモデルにおいても土地利用を介した、炭素・水・エネルギー・食料などのトレードオフを生態系の制約、技術・コスト的な制約の両面から見ていく必要がある。

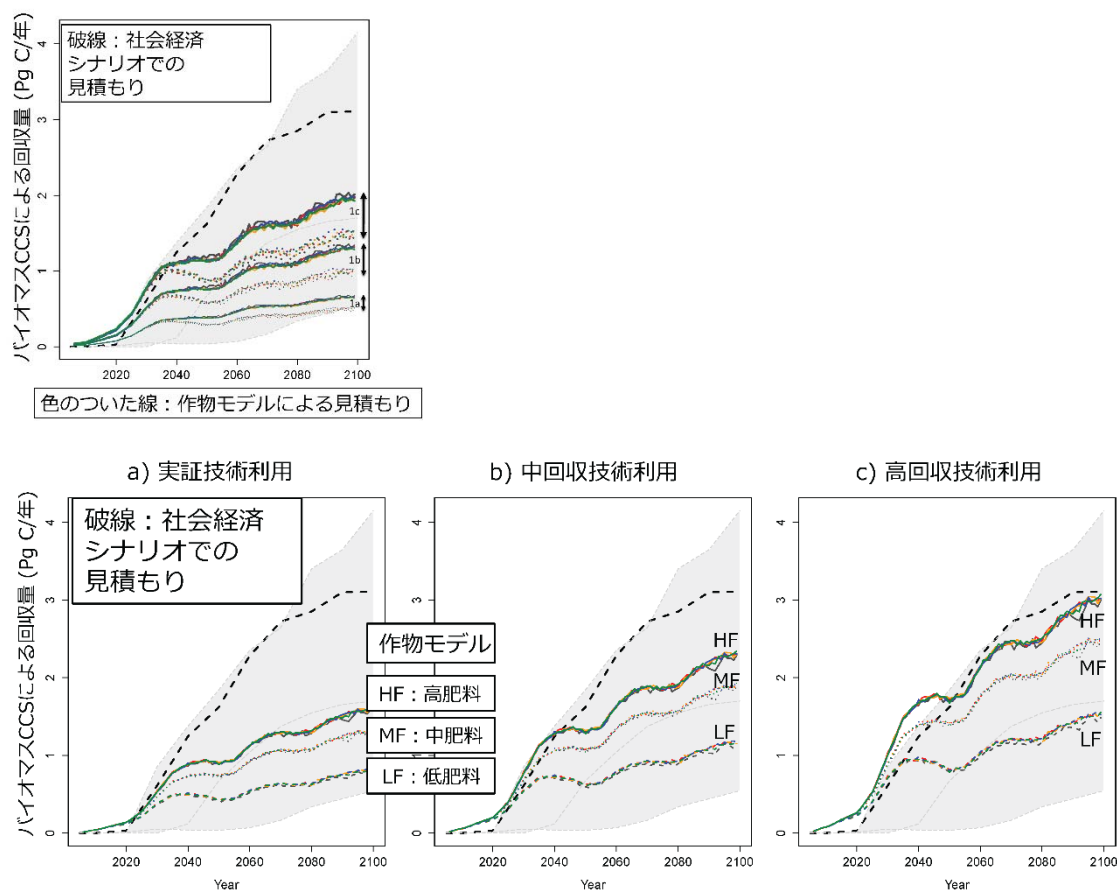


図 3-2-2-①_1 第一世代バイオ燃料作物を利用した場合のバイオマス CCS 可能量。(下) 第二世代バイオ燃料作物を利用した場合の可能量。破線は IMAGE モデルによる社会経済シナリオでの見積り、グレー領域は ICA-RUS 対策評価モデルが SSP2 で RCP2.6 レベルの対策をした場合のバイオマス CCS 利用量の幅を示す。a) 実証技術利用シナリオ：燃焼前 CO₂ 回収による可能量、b) 中回収技術利用シナリオ：燃焼前回収+50%燃焼後回収による可能量、c) 高回収技術利用シナリオ：燃焼前回収+100%燃焼後回収による可能量。