

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略  
(S-10-2)

平成24年度～平成28年度

Adaptive Land-water-ecosystems Use Strategy for the Climate Risk Management

国立研究開発法人国立環境研究所  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構  
農業環境変動研究センター  
茨城大学

<研究協力機関>  
静岡大学  
神戸大学

平成29年5月

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

気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

(S-10-2)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに (研究背景等)	.....	i
2. 研究開発目的	.....	i
3. 研究開発の方法	.....	ii
4. 結果及び考察	.....	iv
5. 本研究により得られた主な成果	.....	viii
6. 研究成果の主な発表状況	.....	ix
7. 研究者略歴	.....	x
II. 成果の詳細		
(1) 陸域統合モデルの開発と土地、水、生態系の最適利用戦略の研究 (国立研究開発法人国立環境研究所)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	1
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	3
4. 結果及び考察	.....	7
5. 本研究により得られた成果	.....	26
6. 国際共同研究等の状況	.....	27
7. 研究成果の発表状況	.....	27
8. 引用文献	.....	34
(2) 陸域生態系の最適利用に向けたモデル開発と分析 (国立研究開発法人国立環境研究所)	.....	35
要旨	.....	35
1. はじめに	.....	35
2. 研究開発目的	.....	36
3. 研究開発方法	.....	36
4. 結果及び考察	.....	40
5. 本研究により得られた成果	.....	65
6. 国際共同研究等の状況	.....	66
7. 研究成果の発表状況	.....	66
8. 引用文献	.....	70
(3) 水資源の最適利用に向けたモデル開発と分析 (国立研究開発法人国立環境研究所)	.....	71
要旨	.....	71
1. はじめに	.....	71
2. 研究開発目的	.....	72
3. 研究開発方法	.....	72
4. 結果及び考察	.....	74
5. 本研究により得られた成果	.....	82
6. 国際共同研究等の状況	.....	83
7. 研究成果の発表状況	.....	83
8. 引用文献	.....	87
(4) 土地利用モデルの開発と水資源・生態系との相互作用の分析 (茨城大学)	.....	88
要旨	.....	88
1. はじめに	.....	88

2.	研究開発目的	89
3.	研究開発方法	90
4.	結果及び考察	93
5.	本研究により得られた成果	102
6.	国際共同研究等の状況	103
7.	研究成果の発表状況	103
8.	引用文献	104
(5) 作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター)		105
	要旨	105
1.	はじめに	106
2.	研究開発目的	106
3.	研究開発方法	106
4.	結果及び考察	107
5.	本研究により得られた成果	115
6.	国際共同研究等の状況	115
7.	研究成果の発表状況	116
8.	引用文献	122
III.	英文Abstract	123

課題名 S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

課題代表者名 山形与志樹（国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター主席研究員）

研究実施期間 平成24～28年度

累計予算額 350,276千円（うち平成28年度：65,664千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 陸域統合モデル、生態系サービス、水資源、土地利用、作物生産性

#### 研究体制

- (1) 陸域統合モデルの開発と土地、水、生態系の最適利用戦略の研究（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (2) 陸域生態系の最適利用に向けたモデル開発と分析（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (3) 水資源の最適利用に向けたモデル開発と分析（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (4) 土地利用モデルの開発と水資源・生態系との相互作用の分析（国立大学法人茨城大学）
- (5) 作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター）

#### 研究協力機関

国立大学法人静岡大学、国立大学法人神戸大学

## 研究概要

### 1. はじめに（研究背景等）

将来の気候変動は、人間社会と生態系に大きな影響を与える。気候変動に対する適応策・緩和策を立案するためには、我々が土地・水資源・生態系をいかに効果的に利用するかということが非常に重要な課題であるが、地球環境システムにおいて土地・水資源・生態系が果たす役割、それぞれの間の相互作用までを考慮した研究は、十分に行われていない。特に、効果的な気候変動適応策の検討に必要な森林の保全や水資源ダムなどの費用対効果に関する分析、気候変動緩和策から土地利用への影響の評価、土地・水資源・生態系の環境制約を考慮した土地利用シナリオの構築など、グローバルレベルでの陸域モデリング研究には、まだ多くの課題が残されている。

IPCC第五次評価報告書で利用されたRCP (Representative Concentration Pathways, 代表的濃度経路) シナリオや、最新の社会経済シナリオであるSSP (Shared Socioeconomic Pathways, 共通社会経済シナリオ) は、成り行きシナリオにおいて、気候変動が水資源・生態系・農作物・土地利用などに与える影響が考慮されていないため、シナリオで示されている農地の拡大や都市の成長などの実現可能性についての検証が必要である。一方、低炭素シナリオでは、地球規模のバイオマスエネルギー利用が想定されているが、食料生産の持続可能性との関係などを検討する必要がある。

### 2. 研究開発目的

テーマでは以下の成果を目標とした研究に取り組む。まず、気候変動影響下における、生態系・水資源・土地利用・作物成長を評価できるそれぞれのモデルの開発及び改良を行う。さらに、これらを結合することで、気候変動影響下における土地・水・生態系間の相互作用を、不確実性を含めて定量的に評価するグローバルな陸域統合モデルを開発し、各種シナリオについてシミュレーション分析を行う。また、気候変動対策（緩和・適応）と持続可能性とのトレードオフやシナジー関係を、定量的かつ地理的に評価し、土地・水・生態系利用にかかわるクリティカルなリスク要因を分析し、気候変動影響下での適応的管理の視点から利用戦略について検討する。

本テーマで得られた個別モデルや陸域統合モデルのシミュレーションの結果を用いて、テーマ1におけるリスク管理戦略の構築や、テーマ3における生態系や社会の脆弱性分析に情報を提供する。また、本テーマでのモデル開発に際して、テーマ3で検討される気候変動リスク情報とテーマ4で構築される社会経済シナリオを利用する。

また、本プロジェクトの基礎となっているリスクトレードオフの枠組みに沿って、気候変動による

生態系への正負の影響、そして気候変動対策実施に伴う波及影響を評価する生態系モデルを開発し、最適管理に向けた各種分析を行う。

陸域生態系、水資源などの影響を考慮した土地利用の最適戦略を検討するために、土地利用モデルの開発を行うとともに、その土地利用モデルと他の陸域モデルの統合を行うように改良を行う。また、様々なケースにおいて土地利用の不確実性や影響を検討や、最適戦略検討の土地利用シナリオの提供を行う。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 陸域統合モデルの開発と土地、水、生態系の最適利用戦略の研究

サブテーマ2で開発された陸域生態系モデルVISIT、サブテーマ3の水資源モデルH08、サブテーマ4の土地利用モデルTeLUM0、サブテーマ5の作物モデルPRYSBI2は、それぞれ全球の陸面を0.5-1度の解像度で計算を行う数値モデルであり、それぞれ独立に開発された最先端の数値モデルであるが、気候変動と、陸域生態系・水資源・作物・人間による土地利用は、お互いに様々な影響を及ぼし合う。そこでサブテーマ1では、各サブテーマで独自に開発された陸域生態系・水資源・作物・土地利用モデルを結合させた「陸域統合モデル」を開発し、気候変動シナリオシミュレーションを行うことにより、様々な分析を行った。また、将来の緩和策の有効性に関して検討するため、バイオ燃料作物モデルを用いて、炭素回収貯留を伴うバイオマス燃料利用（Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS）のポテンシャル評価を行なった。

国別のShared Socioeconomic Pathways (SSP) 1-3をダウンスケールすることで0.5度グリッド別の人口・GDPシナリオを推計する。対象期間は2010～2100年とする。まずは人口・GDPをダウンスケールする手法を開発した。具体的には、文献レビューの結果を踏まえ、次の点を満たす手法を開発した：(i)統計理論に基づくmodel ensemble手法であること、(ii)土地被覆、交通網、都市人口といった社会経済活動を説明する多数の補助データが考慮できること；(iii)空間効果（都市間の相互作用や各都市からのスピルオーバー）が考慮できること；(iv)SSPシナリオの仮定と整合的なダウンスケールが可能なこと。(i)と(ii)を満たすために、補助データの効果を捉えることのできるサブモデルを多数生成し、それらをmodel ensembleするというアプローチをとることとした。(iii)を満たすために都市間のグローバルな経済波及とローカルな空間波及を考慮することのできる統計モデルを組み込んだ。また各都市からその周辺へのスピルオーバーを推定するためのモデルも別途組み込んだ。(iv)を満たすために、シナリオ毎に都市の拡大と縮退のパラメータを導入した。開発したモデルを実データに適用することで、人口・GDPシナリオをダウンスケールする。その結果と各シナリオの仮定との整合性を、視覚化等を通して検証する。次に既存のグリッド別シナリオとの比較などにより、我々の推計結果の有用性を検証した。

#### (2) 陸域生態系の最適利用に向けたモデル開発と分析

陸域生態系で営まれる諸過程のうち、物質循環や生態系サービスに関係するものをできるだけ詳細に扱うモデルの1つであるVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) の開発と応用研究を行った。気候変動がもたらすリスク分析のためにVISITモデルを用いた一連の分析を行った。ここでは5種類のSSP (1-5) に基づく土地利用変化データ、4種類のRCP (2.6、4.5、6.0、8.5)、そして各RCPに対応した5種類の気候モデル (GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL、MIROC-ESM-CHEM、NorESM) に基づくシミュレーションを行い、その出力結果を解析した。ここではモデル推定値のうち以下の6指標に注目した。①植生バイオマス：生態系の炭素貯留および産物の供給サービスに関係、②土壌有機炭素：生態系の炭素貯留および土壌形成による基盤サービスに関係、③純一次生産量：生態系の供給サービスおよび基盤サービスに関係、④正味CO<sub>2</sub>収支：生態系の気候調節サービスに関係、⑤土壌流出：土壌形成による基盤サービスおよび炭素ストック減少リスクに関係、⑥火災放出：火災による被災リスクおよび大気へのCO<sub>2</sub>放出に関係。国際モデル相互比較プロジェクトであるISI-MIPに参加し、第1フェーズの出力データから緯度60度以北の高緯度域およびモンスーンアジア地域を対象に詳細な解析を行った。

気候変動対策の実施に伴う生態系影響の評価も実施した。バイオ燃料の大幅な増産による化石燃料への代替、さらには地中埋設による隔離 (BECCS) の実効性が要検討課題として浮上しており、それに伴う各種影響評価を行った。別の温暖化対策として、破滅的な影響を回避するための緊急措置として気候工学 (ジオエンジニアリング) に関する検討も実施した。

#### (3) 水資源の最適利用に向けたモデル開発と分析

地球の水循環と人間の水利用を統合的にシミュレーションすることができる全球水資源モデルH08

を大幅に拡張し、特に灌漑農地、工業用水、生活水の需要を推定するモデルを加えることにより、気候変動や社会変化に関する様々なシナリオについて21世紀中の地球水資源の持続可能性に関する見通しを得た(Hanasaki et al., 2013a,b)。また、国際研究プロジェクトInter Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)の開発した実験設定に従ってH08を運用することにより、気候シナリオ・気候モデル・影響モデルの不確実性を効果的に定量化する国際的な取り組みに貢献した(Schewe et al., 2014; Masaki et al., 2017)。

#### (4) 土地利用モデルの開発と水資源・生態系との相互作用の分析

土地利用戦略の検討と、土地利用モデルの開発について複数の段階に分けて研究を進めた。まず、農耕地土地利用モデルの開発を行った。農耕地モデルは、サブモデルとして農産物国際取引サブモデル、農耕地分配サブモデルからなる。また、農耕地のマネージメントモデルの開発も同時に行った。簡易作物モデルと社会経済データ、および統合評価モデルでの農産物価格を用いて、経済的に合理的な施肥の推定を行うことで、反収の将来推計を行うモデルを開発した。全世界の各地点において、穀物売上高と肥料投入費用が最大となる肥料投入量を求めた。

次に、バイオ燃料用作物の農耕地土地利用モデルの構築をおこない、シナリオの作成を行った。本モデルは、食用・飼料用作物の収量分布としてはサブテーマ5にて作成された収量マップを使用した。

上記に続き、その他の土地利用モデルとそれを用いたシナリオをおこなった。おもに、牧草地と森林および森林の利用に関するモデルである。牧草地は統合評価モデルによる予測値をもとに、ダウンスケールするものであるが、その際には陸域生態系モデルのVISITによる結果を用いた。これらの条件に基づき、牧草地の空間詳細シナリオの作成を行った。農耕地、牧草地のシナリオを用い、森林の分布の推移を求めた。この森林の分布を求めたのち、人間が経済活動として利用する森林のシナリオと、伐採量のシナリオの作成を行った。

以上のように、開発された土地利用モデルにより、土地利用の不確実性解析を行った。土地利用に与える影響は、放射強制力の不確実性、気候モデルの不確実性、社会経済(人口・GDP)の不確実性、食料需要予測モデルの不確実性といったさまざまな要因がある。リスク戦略を検討するうえで、どの不確実性が大きな影響を与えているのかを把握する必要がある。そこで、放射強制力を4種類(RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)と、気候モデルを5種類(HadGEM, GFDL, IPSL, MIROC, NorESM)、社会経済シナリオを3種類(SSP1, SSP2, SSP3)、食料需要のモデルを3種類(AIM, GRAPE, MARIA)を用いた。このすべての組み合わせの計算を行い、どの要素が土地利用に影響を与えるのか検討を行った。また、バイオ燃料作物の影響に関して考察を行うために、その生産がどのような地域で行われているのか検討と考察を行った。

#### (5) 作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析

まず、国連農業食料機関(FAO)の国別統計収量データおよび衛星データ(NOAA/AVHRR)由来の純一次生産量を元にした世界作物収量データベース、および気象再解析値をイーストアングリア大学気候研究ユニット(CRU)の月別観測値で補正した広域作物モデル用日別気象フォーシング(GRASP Forcing Data)を、それぞれ開発した。次に、既存の作物成長モデルSWATを改良した広域作物モデルを、この作物収量データベースと気象フォーシングを用いて、ベイズ推定によるキャリブレーションを行うことにより、気候モデルのグリッドスケール(約100km格子間隔)における空間平均的な作物生産性の環境応答を予測するモデル(広域作物モデルPRYSBI2を開発した。さらに、このPRYSBI2を、(3)の水資源モデルH08と結合し、全球の流域スケールで水資源-作物生産性間の相互作用を取り扱うことのできる結合モデル(CROVER)を開発した。

PRYSBI2およびCROVERモデルにおける将来予測に当たっては、5つの全球気候モデルGCM(GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M)、4つの温室効果ガス排出シナリオRCP(2.6, 4.5, 6.0および8.5)ならびにSSP1~3の社会経済シナリオを与えた計算を行った。またPRYSBI2モデルにおける適応策導出のために、上記各ケース(Normal)のほか、温室効果ガス濃度を2000年値に固定した場合(CO2 Constant) およびGDPを2000年の値に固定した場合(GDP Constant)のほか適応策として、栽培期間を気候変化に合わせて変更できる品種を選択・変更した場合(Adapt)、前後1ヶ月の間で、最適な播種日を選んだ場合(Change Planting Day)、必要な灌漑を常時行った場合(Maximum Irrigation)の予測を行った。ここで土地利用変化について、PRYSBI2を用いた解析では全ての計算において2000年に固定しているが、CROVERを用いた解析では、2100年までの将来期間の灌漑シナリオを、直近20年の回帰直線による外挿で作成した。

## 4. 結果及び考察

## (1) 陸域統合モデルの開発と土地、水、生態系の最適利用戦略の研究

### a. 陸域統合モデルの開発と気候変動リスク評価

気候・水資源・陸域生態系・作物・土地利用モデルを結合させた「陸域統合モデル」による将来予測実験を行い、土地-水-生態系間の相互作用についての分析を行った。将来予測実験は、気候シナリオとして、2度安定化を目指すRCP2.6と、成り行きシナリオに近いRCP8.5を与えた。気候シナリオとしてはISIMIPによって提供された4気候モデルの結果を利用することにより、気候予測の不確実性を考慮した。水資源モデルによって計算した灌漑供給量は、将来増加する傾向にある。土壌水分は、気候シナリオを計算する気候モデルの違いによっても結果が異なるが、RCP2.6に比べて、気温上昇の大きいRCP8.5の方が、土壌水分の減少幅が大きい。作物収量の計算では、PRYSBI2において施肥効果を考慮し、将来の国別GDPの増加に応じて、技術発展による収量増加の効果を考慮して計算を行ったところ、穀物収量は、RCP2.6では増加傾向にあるが、RCP8.5では気候変化の影響によって、21世紀には収量が低下する。将来の土地利用は、穀物収量が多いほど、農地の増加は少なく済む。このため、将来の穀物面積の変化では、RCP2.6にくらべて、穀物収量の少ないRCP8.5で、穀物面積の変化が大きくなる。さらに、生態系正味生産量は、20世紀後半で、RCP2.6に比べてRCP8.5で少なくなる。気候変化と土地利用変化の影響によって、生態系が正味で吸収する二酸化炭素量は、RCP2.6に比べてRCP8.5でより小さくなり、温暖化を加速する正のフィードバックが働く可能性があることが、陸域統合モデルによる分析によって示された。

### b. バイオマスエネルギーのポテンシャル評価

2℃目標達成のためには将来での排出量を負にする技術の利用が必要であることが、統合評価モデルによる研究の多くによって示されている。コスト・技術的観点から、統合評価モデルは、ネガティブ・エミッション技術としてBECCSの利用を多くのシナリオにおいて仮定している。将来の気候変化を2℃以下に抑えることを想定したRCP2.6では、2005年時点の全球の農地面積は約16億haであるが、2100年時点で約21億ヘクタールまで増加し、その増加分の83%がバイオ燃料作物栽培に利用されるシナリオとなっている。

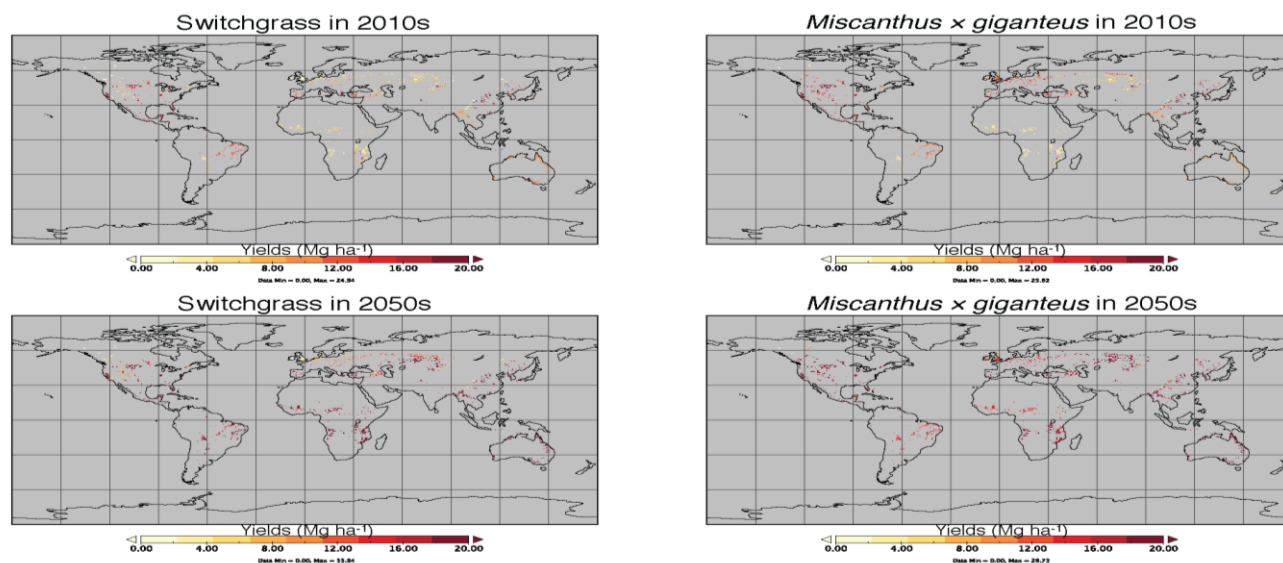


図1： 第二世代バイオ燃料作物の収量空間分布

本研究では、プロセスベース作物モデルを改良することにより、第一世代・第二世代バイオ燃料作物の単収量 (t/ha) を、全球的に精度よく推定することが可能となった。(図1) また、肥料投入や灌漑利用を考慮し、作物モデルを用いてバイオ燃料作物の終了を計算することにより、第一世代・第二世代バイオ燃料作物を利用した場合のBECCSポテンシャル評価を行なった。具体的には、RCP2.6シナリオにおけるバイオ燃料作物生産のための空間詳細な土地利用シナリオと、シナリオにおけるBECCS利用量(エネルギー需要を満たすために必要なバイオ燃料作物)を用い、シナリオが想定しているBECCSを達成するために必要なバイオ燃料作物の単収量 (t/ha) と、作物モデルによって計算した単収を比較した。

これらの結果より、劣化土壌域のバイオ燃料ポテンシャルを考慮しても、RCP2.6シナリオが必要とするBECCSを達成するためには、想定の倍以上のバイオ燃料作物に利用する土地面積が2050年ごろに必

要であることがわかった。生産性の高い土地をバイオ燃料作物利用として転換する場合、土地利用変化による更なる炭素排出によりBECCSにおける吸収量をキャンセルすると考えられ、BECCS利用による炭素バランスを達成するためには、食料作物生産利用による土地利用との競合が起こる可能性が示された。(Kato and Yamagata, 2014)

### c. 人口・GDPのダウンスケールによるグリッドデータの作成

将来の土地利用シナリオを分析・評価するためには、空間詳細な社会経済状態の情報が必要となる。そのため、人口・GDPをダウンスケールする手法を開発に取り組み、(i) model ensemble手法に基づいて(ii)土地被覆、交通網、都市人口といった補助データや(iii)空間効果(都市間の相互作用や各都市からのスピルオーバー)を考慮して、かつ(iv)各SSPの仮定にも整合した手法の開発に成功した。

(Murakami and Yamagata, 2017)

この手法によりダウンスケールされたSSP1, 2, 3の人口・GDPシナリオをヨーロッパとアジアでの比較を図2に示す。さらに、我々の推計人口(SSP2; 2080年)とNOAA(アメリカ大気研究センター)が公開しているシナリオとを比較解析した結果、われわれの手法の方が将来の都市シナリオにおける空間分布をより高精度に表現可能であることがわかった。尚、本研究で推計したグリッド別GDP(2080年; SSP1-3)データは「Global dataset of gridded population and GDP scenarios

(<http://www.cger.nies.go.jp/gcp/population-and-gdp.html>)」で公開され関連分野の研究者によって国際的に利用されつつある。

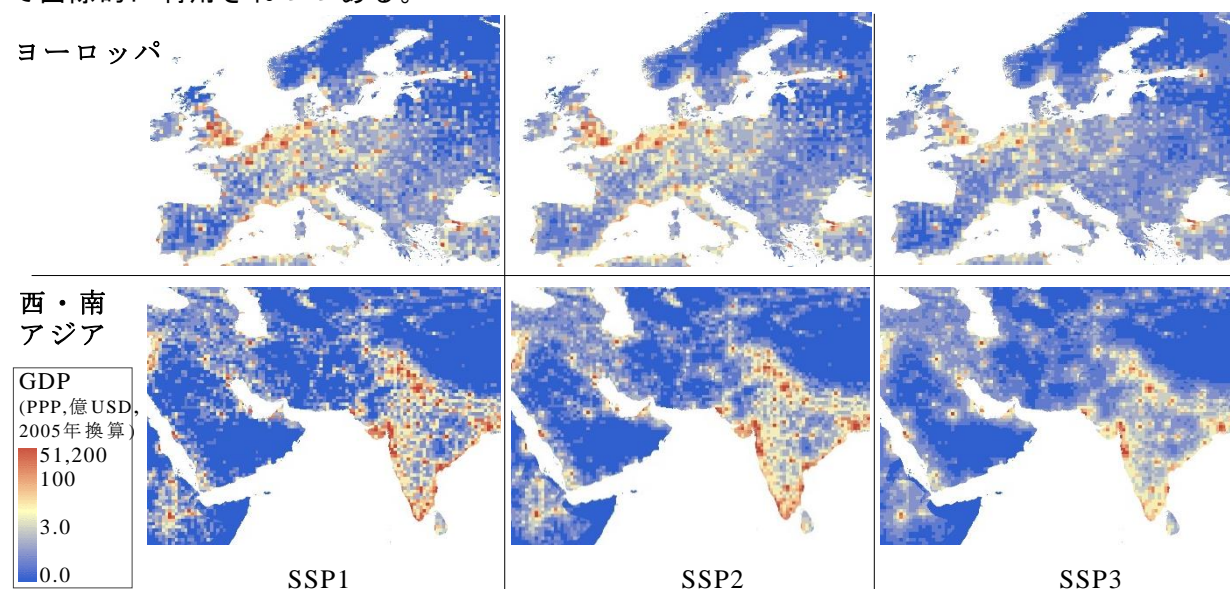


図2：グリッド別GDPシナリオ(2080)の比較(SSP1, 2, 3)

## (2) 陸域生態系の最適利用に向けたモデル開発と分析

複数シナリオを用いたシミュレーションに基づき、生態系に生じうる影響・リスクを評価したところ、植物の純一次生産はいずれのシナリオでも概ね増加していたが、主に熱帯域やモンスーンアジアで降水量の増加に伴う土壌流出の増加が見られ、逆に地中海沿岸のように降水量が減少する可能性が高いとされる地域では土壌流出の減少傾向が見られた。

複数のモデルとシナリオに基づくシミュレーション結果の解析により、不確実性を考慮した気候変動影響・リスク評価を行った(Friend et al. 2013; Nishina et al. 2014)。陸域生態系における土壌と植生バイオマスの炭素ストックは、異なるシナリオと生態系モデルを通じて概ね増加する傾向が見られたが、その量的な応答感度には大きな差が見られた。複数のシナリオを通じて温度分布と土壌有機炭素ストックの関係を見ることで、モデル間の差を明確にした。RCP、気候モデル、生態系モデルの組合せにより異なる推定結果が得られることが分かったので、それぞれの寄与率を分散分析の手法により分離した。土壌有機炭素の差違においては、ばらつきのおよそ半分は生態系モデル間の差違に起因するとする結果が得られた。ISI-MIPでは複数の気候シナリオを用いた評価が行われたが、温室効果ガス排出が少ないシナリオ(RCP2.6)でも、植生には30%以上のバイオマス変化など大きな影響を引き起こされる可能性が高いことが示唆された。このような研究結果は、将来の気候変動予測の高精度化を促し、高緯度域の生態系における適応を検討する際にも有用と考えられる。

バイオ燃料増産シナリオで設定された5億ヘクタールの土地利用は、主に熱帯・亜熱帯の自然植生



をバイオマス燃料栽培に転換することで行われた。そのため、生態系モデルを用いた評価によると、それらの地域では本来の植生バイオマスが大幅に失われ、それは中高緯度の植生成長促進による増加分を大幅に打ち消す規模であった。気候工学による対策実施の影響評価も行ったが、温度上昇の抑制により、生態系からの呼吸放出は、対策なしの場合に比べると抑制され、結果的に生態系への正味炭素吸収が増加する結果となっていた。

### (3) 水資源の最適利用に向けたモデル開発と分析

全球水資源モデルH08を大幅に拡張することにより、世界で最も詳しく、包括的な地球水資源の温暖化影響評価を実施し、水循環学の有力な国際論文誌に発表した (Hanasaki et al. 2013)。水は人間と社会に欠かせない資源の一つである。世界の研究者が共同作業して作った最新の気候シナリオ (将来想定) と社会経済シナリオを使って、起こり得る5つの世界の様相について詳しいシミュレーションを行い、21世紀の世界の水資源と水利用について調べた。ここで、温暖化によって将来の気温や降水がどれくらい変わるかという気候シナリオは将来の水資源量の見通しに、人口や経済活動、技術が今後どれくらい変わるかという社会経済シナリオは将来の水利用の見通しに大きな影響を与える。図3は、5つの世界の様相それぞれについて、2050年頃は今より水逼迫に関する指標が改善するか (指標が大きくなると改善)、悪化するか (指標が小さくなると悪化) を示したものである。まずSSP3 (分裂の世界) を見ると、アジアやアメリカを含む多くの地域が濃い赤で示されている。これは現在よりも水逼迫がひどく悪化し、必要な時に必要な量の水が得にくくなることを示している。次にSSP1 (持続可能な世界) を見ると、アフリカ以外のほとんどのところは白く示されている。これは、現在から水逼迫が悪化しないことを示している。ここで、SSP1~SSP5の全てでアフリカの指標が悪化するの、温暖化の影響に加え、人口や経済活動の伸びにより、現在は非常に少ない水利用量の急増が避けられないことが原因である。5つの世界の様相のうち、持続可能を目指すSSP1では21世紀中の水逼迫を現在くらいで抑えられること、それ以外では水逼迫が現在よりも悪化することから、温暖化と持続可能社会転換への地球規模の対応が重要だということが示唆された。

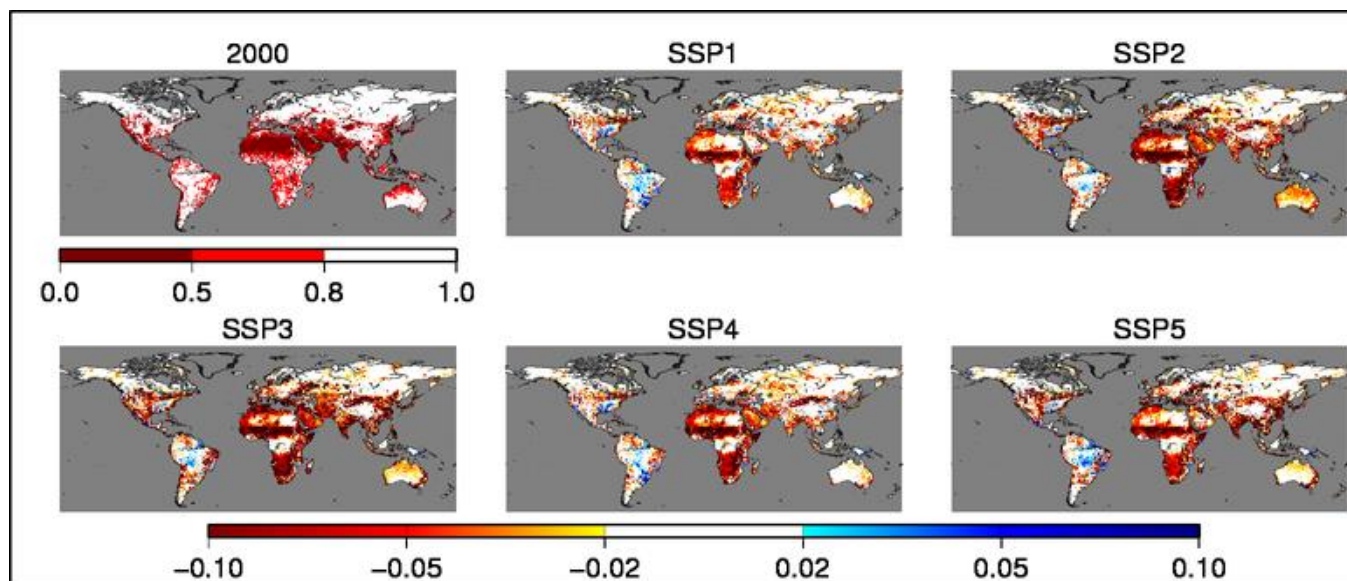


図3 水逼迫に関する指標。指標は「必要な時に必要な量の水が得られるか」を0から1の間の値で示している。左上の1枚は2000年のときの指標。赤が濃い (値が小さい) ほど、水逼迫が大きいことを示す。残りの5枚は気候政策を取った場合のSSP1~SSP5の2050年頃の指標の値を2000年のときと比較したもの。赤 (値が負) は水逼迫が悪化することを、青 (値が正) は改善することを示す。白は水逼迫が現在と変わらないことを示す。図はHanasaki et al. 2013を改変して作成した。

### (4) 土地利用モデルの開発と水資源・生態系との相互作用の分析

農耕地土地利用モデルでの計算を行った結果、農耕地面積は経済の発展 (賃金の上昇) に伴って減少する傾向がある。一方で穀物価格の上昇は農耕地面積の増加を促す。経済の発展に伴って傾斜地の農耕地が優先的に放棄され、穀物価格の上昇によっては、平たん地での農耕地利用率が上昇する傾向がある。その結果、先進国では全世界の中で相対的に経済成長が低いため、農業が盛んになる傾向が見られる。一方、インドや中国など、経済が発展し穀物換算の食料需要の増加が見込まれる地域では、

農耕地の面積はむしろ減少する方向になることがわかった。また、一つの地域の中においても、農耕地面積が2000年の時点で大きい地域では農地面積が増加する、または農地面積の減少が小さいが、農耕地面積が少ない地域では、農地面積の増加が少ない、または農地面積の減少が大きく、現在以上に差が大きくなることが示された。これは、農村部の収入格差が大きくなることを示しているため、重要な知見である。施肥のシナリオでは、南アフリカの中央では、トウモロコシの耕作地への肥料投入量は最も高く100kg/haと推定されたなどの結果を得た。HadGEM2-ES気候モデルシナリオとRCP6.0シナリオをもとに予測した窒素肥料投入量は、作物収量や作物価格、肥料価格により異なることがわかった。

森林土地利用モデルによる伐採の分布について大きな変化はないことが示された。これは、収量の変化が、肥料投入量などの社会経済変化の影響を含む穀物などとなり、木材は気候の変化のみに依存しているためである。今回の方法では、丸太の生産は統合評価モデルの値を利用したため、地域内での生産のみを考えたが、今後はメッシュ単位での輸送を考慮した空間詳細伐採モデルが必要となるであろう。

土地利用戦略を検討するために、全世界の土地利用の不確実性の検討を行った。特に、農耕地に関して分析を行った。不確実性分析は2010年から2100年の全世界の農耕地面積の推移を要素ごとに比較した。社会経済（人口・GDP）と食料需要のモデルが不確実性に与える影響が大きいことが、その他の要因も同等のレベルで不確実性を有する。これは、土地利用シナリオの不確実性は、放射強制力、気候モデル、社会経済シナリオ、食料需要予測の組み合わせにより、様々に変化しうることになる。一方、この不確実性はどの地域が最も大きいのか分析を行ったところ、アメリカなどの先進国の不確実性は小さく、アフリカなどの発展途上国の不確実性が非常に大きいことが判明した。これは、経済の発展の不確実性がアフリカで非常に大きいことが要因である。また、先進国の不確実性は気候モデルや放射強制力の不確実性が大きく影響している。食糧生産の多くは先進国で行っていることから、社会経済のシナリオ以外の不確実性縮小も食料問題においては重要であることが分かった。

#### （５）作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析

まず国連食糧機関FAO等による統計収量データの収集のほか、衛星データ由来の純一次生産量（NPP）および作物別栽培暦を用いた推定により、1.125°（約120km）の空間解像度で世界作物収量データベースを作成した（Iizumi et al., 2014）。この推定収量の年変動成分を被説明変数、生育期間平均の気温と土壌水分量のそれぞれの偏差を説明変数として重回帰分析を行った結果、全球では、トウモロコシとダイズの収量の年々変動は土壌水分量で良く説明される地域が多く、コメとコムギの収量の年々変動は気温で良く説明される地域が多いことが明らかになった（Iizumi et al., 2013）。また従来、観測気象値に比べれば系統的な誤差（バイアス）があった気象再解析値をバイアス補正することにより、広域作物モデル用の日別気象フォーシングデータを開発した（Iizumi et al., 2014）。

次に、上記3.（５）により構築し、ベイズ推定によりモデルのキャリブレーションを行った広域作物モデルについて、収量データがあるグリッドで推定されたパラメータ値と緯度や経度、標高、GDPなどとの経験的な関係（重回帰式）を利用し、モデルパラメータ値を収量データがないグリッドにも空間内挿することで、主要4作物を対象とする広域作物モデルPRYSBI2を完成させた（Sakurai et al., 2014）。複数の気候シナリオと適応策を用いて将来の食料生産（作物収量）の見通しを示した結果、いずれの作物においても、ほとんどのケースでの最も効果的な適応策として、温度上昇による生育期間の短縮による吸収日射量の減少を排除する、つまり高温による生育期間の短縮がない品種への変更（Adapt）が有効であることがわかった。この品種適応により増収量が大きくなるか、または減収量が小さくなり、この傾向はトウモロコシのほか、特に冬コムギで顕著であった。その次には、シミュレーション上で最適な播種日を選択する（Change Planting Day）ことが有効で、その適応効果は気温上昇度が小さい近未来年代で大きく、作物別では、コメで最も有効で、その次にダイズ、春コムギであった。

このPRYSBI2と水資源モデルの結合に当たっては、まずアムール川流域を対象としてプロトタイプを構築し、さまざまな割合の灌漑農地拡大シナリオを設定し、将来の灌漑水需給と作物生産量について段階的な灌漑面積拡大による応答分析を行い、天水農地に灌漑を導入することの気候変動適応策として有効性と限界を示した（Okada et al., 2015）。その上で、全球に拡張したこの結合モデル（CROVER）を用い、全球スケールで結合モデルと非結合モデルを比較し、結合による作物収量の再現性の向上を評価した。次いで、将来の気候および灌漑面積率シナリオを導入した、食料生産に与える影響評価を行った。その結果、現行の灌漑農地分布を基にした将来のトウモロコシ収量は、多くの地域で減収し、

その減収割合は中央アジアで最も大きく、次いで北アメリカや東アジアで大きかった。次に、現行の土地利用、および灌漑農地の拡大シナリオにおける結果を比較した場合、南アジアやヨーロッパでは、灌漑面積拡大による灌漑適応策により減収量は低減されたが、中央アジアでは灌漑農地の拡大により、逆に減収率が大きくなる結果となった。またコメについても、現行の灌漑農地を前提とした場合、多くの地域で今世紀末にかけて減収することが予測されたが、灌漑面積率シナリオを導入した結果、東南・南アジアにおいては、灌漑面積拡大により増収する効果が見込まれた。一方、東アジアでは灌漑面積の拡大が減収に働くことが予測された。

このように本研究では、複数の予測される気候・土地利用変化の条件下での、世界の主要作物への影響と灌漑面積拡大による影響適応効果の将来の見通しを示した。特に灌漑による適応策は、流域の気候・土地利用変化やそれに付随する水資源環境の変化に依存する灌漑設備の新規導入は食料生産の気候変化リスクに対する適応策として常に有効的とはいえないことを、定量的に示した。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

気候・陸域生態系・水資源・作物・土地利用のモデルを結合した「陸域統合モデル」の開発によって、これまで独立にモデル開発され分析されてきたプロセスに関し、様々な相互作用を考慮可能な新たなモデルを完成させることができた。

人口・GDPのダウンスケールに関しては、人口・GDPの分布を説明しうる多数の補助的データを活用しながら、空間効果を考慮して、かつ各SSPの仮定にも整合的に人口・GDPを推計する統計的ダウンスケール手法の開発に成功した。また開発した手法を実データに適用することで、既存のグリッド別推計よりも直観に整合的であり、かつ高精度なグリッド別人口・GDPシナリオ（2010～2100年）の推計に成功した。さらに推計データを、ウェブページを通して一般に公開した。空間詳細人口・GDPシナリオは気候変動への適応・緩和を都市・地域のスケールで議論する上で重要なデータであり、今回公開したデータセットは、今後幅広い研究者に利活用されることが期待できる。

陸域生態系モデルを用いた分析により、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇、気候変動、土地利用変化の複合的な影響に関する系統的な解析を行うことに成功した。気候変動の正負の影響に加えて、対策実施に伴う影響を評価することで陸域最適利用の検討に有用な成果をもたらした。推定不確実性に関する詳細な解析を行うことで、排出と気候のシナリオ、生態系モデルによる寄与を分離し、今後の推定精度向上に資する重要な示唆をもたらした。複数の生態系指標について影響を比較検討することで、注目する要素や視点によって気候変動影響の評価結果が変わりうることを示した。影響評価モデルに関する国際相互比較プロジェクトに参加し、計算結果を提出しただけでなく、主著論文を執筆することで解析を主導し独自の貢献を果たした。

自然水循環と人間水利用を統合的に計算することのできる全球水資源モデルに、あらたに工業用水、生活用水、包蔵水力、バイオ燃料作物の灌漑需要を計算する機能が加わり、より総合的に地球水循環のシミュレーションをすることができるようになった。

土地利用に関するシナリオの提供を他の研究者に行い、その利用により気候変動の影響を考慮した研究の発展に寄与したことである。また、土地利用モデルの不確実性分析により、どのような地域で不確実性が大きいかわかされたため、研究を重点的に行う地域への指摘を行うことができた。

気候変動が作物生産に与える影響について、さまざまな適応策を用いた場合の将来変化を示した。特に品種改良による増収可能性や、一般に増収効果があるとされた灌漑適応におけるその限界を示したことに本研究の特徴がある。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない」

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)：複数セクター影響モデル相互比較プロジェクトでは、様々なセクターに関わる気候変動影響を評価することが目的であるが、ISI-MIP推進事務局との共同研究を通して、本研究で開発した人口・GDPのダウンスケール手法を活用し、ISIMIPに貢献するための方法を検討している。

本研究で作成した気候変動リスクの包括的な一覧表（気候変動リスクインベントリ）およびリスク

連鎖のネットワーク図は、デザインの専門家と協力することで、直感的でわかりやすい図にすることを心がけた。これらの情報を提供することで、多くの人々が気候変動リスクの全体像を把握する上で役立つことが期待できる。

サブテーマ2で開発された陸域生態系モデルを用いて、全球およびアジア地域の炭素収支に関する広域評価が行われ、それはグローバル炭素プロジェクト（GCP）への貢献を通じて、IPCC第5次評価報告書に引用される成果をもたらした。また、気候変動影響評価モデルの相互比較プロジェクトへの参加を通じて、複数モデルによる推定不確実性を考慮した影響評価に貢献し、同じくIPCC第5次評価報告書に引用される成果となった。

本研究により開発され、国際的な研究枠組みである農業モデル比較改良プロジェクト（AgMIP）にも採用された全球作物モデル等により、食料生産分野における適応策の有効性と限界を定量的に評価できるようになり、食糧増産が急務となる発展途上国などに対する適応策立案の支援に資することが可能となった。

本研究が直接貢献した9編の論文がIPCC第5次評価報告書から引用された。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) AD.Friend, W.Lucht, TT. Rademacher, RM.Keribin, R. Betts, P. Cadule, P.Ciais, DB. Clark, R. Dankers, P.Falloon, A. Ito, R. Kahana, A. Kleidon, MR. Lomas, R.K. Nishina, S. Ostberg, R. Pavlick, P.Peylin, S.Schaphoff, N.Vuichard, L.Warszowski, A. Wiltshire: Woodward FI.: Proceedings of the National Academy of Science USA. 111(9), 3280-3285 (2013)  
“Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub>.”
- 2) N.Hanasaki, S.Fujimori, T.Yamamoto, S.Yoshikawa, Y.Masaki, Y. Hijioka, M. Kainuma, Y. Kanamori, T. Masui, K. Takahashi, and S. Kanae: Hydrol. Earth Syst. Sci., 17(7), 2393-2413 (2013)  
“A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways—Part2: Water availability and scarcity”
- 3) T.Iizumi, M. Okada and M. Yokozawa : Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013JD020130(2014)  
“A meteorological forcing data set for global crop modeling: Development, evaluation, and intercomparison”
- 4) T. Iizumi, M. Yokozawa, G. Sakurai, M. I. Travasso, V. Romanerikov, P. Oettli, T. Newby, Y. Ishigooka and J. Furuya : Global Ecology and Biogeography, 23, 3, 346–357 (2014)  
“Historical changes in global yields: Major cereal and legume crops from 1982 to 2006”
- 5) T. Iizumi, H. Sakuma, M. Yokozawa, J.J. Luo, A. J. Challinor, M. E. Brown, G. Sakurai, and T. Yamagata : Nature Climate Change, 3, 904–908(2013)  
“Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production”
- 6) E. Kato and Y. Yamagata: Earth’s Future, 2, 421-439 (2014)  
“BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions”
- 7) D. Murakami and Y. Yamagata: Environmental Research Letters (2017)  
“Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling”
- 8) G.Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori and M. Yokozawa: Scientific Reports, 4(4978), 1-5 (2014)  
“How much has the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> directly affected past soybean production?”
- 9) K. Nishina, A. Ito, D.J. Beerling, P. Cadule, P. Ciais, D.B. Clark, P. Falloon, A.D. Friend, R. Kahana, E. Kato, R. Keribin, W. Lucht, M. Lomas, T.T. Rademacher, R. Pavlick, S. Scahphoff, N. Vuichard, L. Warszawski, and T. Yokohata: Earth System Dynamics, 5, 197-209 (2014)  
“Quantifying uncertainties in soil carbon responses to changes in global mean temperature and precipitation”
- 10) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai, N. Hanasaki, T. Sakai, K. Okamoto and M. Yokozawa: J. Adv. Model. Earth System. 7, 1409-1424 (2015)  
“Modeling irrigation-based climate change adaptation in agriculture: Model development and evaluation in Northeast China”

- 11) K.Nishina, A. Ito, N. Hanasaki and S. Hayashi: Earth System Science Data, 9, 149-162, (2017)  
 “Reconstruction of spatially detailed global map of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  and NOuction of spatially detailed global ma”  
 他49件

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 飯泉仁之直、農林水産省海外食料需給レポート（平成26年7月31日）、2p（2014）  
 「2014年のエルニーニョ発生による世界の穀物収量への影響の見通し」
- 2) 西森基貴、JATAFFジャーナル、4, 5, 68（2016）  
 「気候変動による食料生産変動の影響予測に向けて」  
 他16件

(2) 主な口頭発表(学会等)

134件

7. 研究者略歴

課題代表者：山形 与志樹

東京大学教養学部広域科学科卒業、博士（学術）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所  
 地球環境研究センター 主席研究員

研究分担者

- 1) 横畠 徳太  
 北海道大学理学部卒業、北海道大学理学研究科、博士（理学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員
- 2) 伊藤 昭彦  
 名古屋大学農学部卒業、筑波大学生物科学研究科、博士（理学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員
- 3) 花崎 直太  
 東京大学工学部土木工学科卒業、東京大学工学系研究科社会基盤学専攻修了、博士（工学）、国立環境研究所社会環境システム研究領域研究員、現在、同地球環境環境センター主任研究員
- 4) 木下 嗣基  
 東京大学工学部卒業、東京大学 工学系研究科、博士（工学）、現在、茨城大学農学部教授
- 5) 西森 基貴  
 筑波大学第一学群自然科学類卒業、筑波大学地球科学研究科、博士（理学）、現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域影響予測ユニット長

## S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

### (1) 陸域統合モデルの開発と土地、水、生態系の最適利用戦略の研究

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室

山形与志樹・横畠徳太

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所 加藤悦史（平成24年4月～平成26年9月）、村上大輔

神戸大学 瀬谷創

平成24年～28年度累計予算額：150,236千円（うち平成28年度：26,261千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

気候変動の適応策・緩和策のために、土地・水資源・生態系を効果的に利用することが重要であるが、地球環境システムにおいて土地・水資源・生態系が果たす役割、それぞれの間の相互作用までを考慮した研究は、十分に行われていない。本研究では、サブテーマ2～5で開発された全球の陸域生態系・水資源・作物・土地利用モデルを全球気候モデルに結合させた「陸域統合モデル」を開発した。気候予測の不確実性を考慮し、様々なシナリオのもとで将来予測シミュレーションを行うことで、陸域生態系、水資源、作物、土地利用の間の相互作用や、気候変動とのフィードバックプロセスについて分析を行った。また、バイオ燃料作物モデルを用いた分析を行い、将来の低炭素シナリオを実現するために想定された既存の土地利用シナリオ（RCP2.6）では、エネルギー供給を満たすことができるようなバイオ燃料作物の生産が難しいこと明らかとなり、食料作物生産利用による土地利用との競合が起こる可能性が示された。

また、本サブテーマでは社会経済シナリオ Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 1-3の国別人口・GDPシナリオを0.5度グリッド毎にダウンスケールした。具体的には、まずは補助変数（土地被覆、交通網、都市人口など）、空間効果（都市からの波及効果など）、各シナリオの仮定などを考慮して人口・GDPをダウンスケールする手法を開発した。次に、同手法を用いて人口・GDPをダウンスケールし、その結果を既存のグリッド別シナリオと比較することで、その有用性や妥当性を検討した。

さらに、気候変動リスクに関する包括的な情報を提供することがS10プロジェクトの目的の一つであるが、サブテーマ1が中心となり、プロジェクト研究者による文献調査の結果を取りまとめ、気候変動リスクの一覧表を作成し、リスク連鎖をわかりやすく可視化した。

#### [キーワード]

陸域統合モデル、ダウンスケールリング、リスクトレードオフ、土地利用シナリオ、持続可能性

### 1. はじめに

将来の気候変動は、人間社会と生態系に大きな影響を与える。気候変動に対する適応策・緩和策を立案するためには、我々が土地・水資源・生態系をいかに効果的に利用するかということが

非常に重要な課題であるが、地球環境システムにおいて土地・水資源・生態系が果たす役割、それぞれの間の相互作用までを考慮した研究は、十分に行われていない。特に、気候変動緩和策が土地利用に及ぼす影響の評価、土地・水資源・生態系の環境制約を考慮した土地利用シナリオの構築など、グローバルレベルでの陸域モデリング研究には、まだ多くの課題が残されている。IPCC第五次評価報告書で利用されたRCP (Representative Concentration Pathways, 代表的濃度経路)シナリオや、最新の社会経済シナリオであるSSP (Shared Socioeconomic Pathways, 共通社会経済シナリオ)は、成り行きシナリオにおいて、気候変動が水資源・生態系・農作物・土地利用などに与える影響が考慮されていないため、シナリオで示されている農地の拡大や都市の成長などの実現可能性についての検証が必要である。一方、低炭素シナリオでは、地球規模のバイオマスエネルギー利用が想定されているが、食料生産の持続可能性との関係などを検討する必要がある。

また、社会経済シナリオSSPは5つのシナリオ (SSP1=Sustainability, SSP2=Middle of the road, SSP3=Fragmentation, SSP4=Inequality, SSP5=Conventional development) で構成され、各シナリオ下での人口・GDPはSSP Public Databaseで無償公開されている

(<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>)。SSPは国別シナリオであるが、実際には、より空間詳細なシナリオが必要となる場合も多い。例えば気象災害リスクを地域毎に評価するためには地域別のシナリオが必須である。また各都市の炭素排出量やエネルギー消費量を評価するためには都市別のシナリオが不可欠となる。近年では、都市レベルでの緩和策・適応策立案への活用を目的としたThe World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT)や緩和・適応に向けて各都市における研究者の連携を深めようというUrban Knowledge Action Networkといった都市・地域レベルでの政策検討が注目を浴びており、都市・地域の緩和策・適応策の立案にも役立つような空間詳細な社会経済シナリオの推計が求められている。

## 2. 研究開発目的

サブテーマ2から5で開発された、生態系・水資源・土地利用・作物成長を評価できるモデルを結合することで、気候変動影響下における土地・水・生態系間の相互作用を、不確実性を含めて定量的に評価するグローバルな陸域統合モデルを開発し、各種シナリオについてシミュレーション分析を行う。また、気候変動対策（緩和・適応）と持続可能性とのトレードオフやシナジー関係を、定量的かつ地理的に評価し、土地・水・生態系利用にかかわるクリティカルなリスク要因を分析し、気候変動影響下での適応的管理の視点から利用戦略について検討する。

また、社会経済シナリオSSPによって提示されている、国別人口・GDPシナリオをダウンスケール（空間詳細化）するための手法の開発し、この開発手法を用いて0.5度グリッド別人口・GDPシナリオ（1980～2100年）の推計を行う。SSP1-3を対象シナリオとする。手法開発パートでは、まずは我が国のデータに適用して複数のダウンスケール手法を比較することで、手法開発の道筋を立てる。ここでの結果、及び既存研究レビューの結果を元に、SSP1-3を精度良くダウンスケールのための手法を開発する。次に、本研究で開発した手法を用いて国別人口・GDPをダウンスケールし、各SSPの各仮定に整合した推計結果が得られるかどうかを検証する。また、推計されたグリッド別人口・GDPの精度を検証する。さらに、我々のグリッド別人口・GDPシナリオの特徴や妥当性を、既存のグリッド別シナリオとの比較によって明らかとする。最後に推計されたグリッド別の将来人口・GDPデータを一般に公開する。

さらに、S10プロジェクトでは、人々が気候変動リスクの全体像を把握することができるために、気候リスクに関する包括的な情報を提供することも重要な研究テーマである。水資源、食料、生態系、土地利用に関する将来の気候変動リスクの分析を行うS10テーマ2のサブテーマ1が中心となり、気候変動リスクに関する包括的な情報をとりまとめ、効果的に気候変動リスクの全体像を提示する方法論について研究を進める。

### 3. 研究開発方法

サブテーマ1ではサブテーマ2-5で開発した生態系、水資源、作物、土地利用のモデルを結合した「陸域統合モデルの開発と気候変動リスク評価」、将来の最適な土地利用戦略を評価するための「バイオ燃料作物のポテンシャル評価」、S10プロジェクトにおいて気候変動リスク評価を行う研究グループにデータ提供を行った「人口・GDPのダウンスケールによるグリッドデータの作成」、将来の気候変動リスクを網羅的に評価する「気候変動リスクインベントリの作成とリスク連鎖の可視化」の4つのテーマに関して、以下の通りに研究開発を行った。

#### a. 陸域統合モデルの開発と気候変動リスク評価

サブテーマ2で開発された陸域生態系モデルVISIT、サブテーマ3の水資源モデルH08、サブテーマ4の土地利用モデルTeLUM0、サブテーマ5の作物モデルPRYSBI2は、それぞれ全球の陸面を0.5-1度の解像度で計算を行う数値モデルであり、それぞれ独立に開発された最先端の数値モデルであるが、気候変動と、陸域生態系・水資源・作物・人間による土地利用は、お互いに様々な影響を及ぼし合う。例えば、将来の気候変動は、人間が利用可能な水資源に影響を及ぼす。水資源の変化は、作物生産性の変化に影響を及ぼす。作物生産性の変化は、食糧供給や人間による土地利用のあり方に大きなインパクトを与える。土地利用の変化は、陸域生態系における植物による二酸化炭素吸収に影響を与え、気候の変化に大きな影響を及ぼす。テーマ2の各サブテーマで独自に開発されたモデルを結合することにより、このような複雑な相互作用をモデルで表現することができる。

そこで、サブテーマ1では、気候・陸域生態系・水資源・作物・土地利用モデルの間で、それぞれのサブモデルが出力する変数をやり取りすることで、サブモデルの間の相互作用を表現しつつ時間発展をする「陸域統合モデル」を開発し、様々な分析を行なった。気候モデルとしては、IPCC第一作業部会のこれまでの報告書で利用されて来た全球気候モデルMIROC5.0 (Watanabe et al. 2010, J. Climate 23, 6312-6335) を利用する。ただし、全球気候モデルMIROCは大気・陸面・海洋を記述するモデルが結合されたモデルであるが、陸域統合モデルでは、計算コストを節約するため、MIROCのうち陸面過程を記述するモデル (MATSIRO, Nitta et al. 2014, J. Climate 27, 3318-3330) だけを利用する。大気・海洋モデルを利用すると、計算に時間がかかる上に、気候状態を安定させるために長期的な積分が必要となるためである。全球気候モデルをベースに、生態系・水資源・作物・土地利用モデルの結合を行なった。陸域統合モデルにおけるモデルの結合方法は、以下の通りである。独立に開発されたモデルを結合させるため、様々な問題点を解決した。

**気候・陸域生態系・水資源モデルの結合**：1～2年目の研究で、気候・陸域生態系・水資源モデルの結合を行なった。具体的には、気候（陸面）モデルにおいて、陸面のエネルギー収支、土壌温度と水分の計算の後に、**陸域生態系モデルVISIT (Ito and Inatomi 2012, Biogeoscience 9,**



759-773) を呼び出すコーディングを行なった。陸面モデルの計算間隔は1時間で、VISITは月に一回呼び出される。VISITは、あるグリッドの計算結果を別のグリッドで必要としないため、各グリッドで時間発展する計算を行なっている。この一方で、VISIT以外のモデルでは、時間ステップごとに、全球グリッドの計算を行う。このため、VISITの計算方法を、時間ステップごとに全球グリッドの計算を行えるようにコードの変更を行なった。さらに、実験に応じて様々な境界条件を外部ファイルから自由に与えることができるように、コードの変更を行なった。この一方で、人間による水利用を記述する水資源モデルH08 (Hanasaki et al. 201) は、日々陸面モデルの結果に影響を及ぼすため、陸面エネルギー収支、土壌温度と水分、河川の計算において、一日ごとに人間による水利用（灌漑のための河川からの取水、灌漑による土壌水分の増加、貯水池操作による河川水量の変化）を計算する。MIROC3.2にH08を組み込んだモデル (Pokhrel et al. 2012, J. Hydrometeorology 13, 255-269) を参考に、MIROC5.0にH08の組み込みを行なった。

**作物・土地利用モデルの結合**：3～5年目の研究で、作物・土地利用モデルをさらに結合した。**作物モデルPRYSBI2 (Sakurai et al. 2014, Scientific Reports, 4, 4978)** は、日々の地表気温・湿度・土壌水分・温度を利用して、作物成長を計算する。気候+水資源モデルで陸面エネルギー収支、土壌温度と水分の計算を行なった後に、PRYSBI2によって作物成長を計算し、積算温度が閾値を超えた時点で、単位面積当たりの収量が計算される。作物としては春冬小麦、トウモロコシ、大豆、コメの5種の計算が可能である。積算温度の閾値や、過去の収量増加をもたらした技術変化を表すパラメータは、収量の観測データを再現できるように、グリッドごとに統計的に決められた値を用いる。過去の技術係数の変化を、国ごとのGDPの関数として表現し、同じ関数を用いて、将来の技術係数の変化を表現する。一方**土地利用モデルTeLUM0 (Kinoshita et al. in preparation)** は、過去のグリッド収量を用いて、作物収穫量の高い場所を優先的に農地として利用するように、人間による土地利用変化を計算する。陸域統合モデルにおける土地利用モデルは、PRYSBI2によって計算された過去10年の収量を利用して、一年ごとにグリッドの耕作地・自然植生の割合と、耕作地、牧草地などの間の土地利用遷移割合（グリッドにおける、ある土地利用から別の土地利用へ遷移する面積割合）を計算する。陸域統合モデルのうち、気候・生態系・水資源・作物モデルは、0.5-1度のグリッドで計算を行うが、土地利用モデルは、まず世界17地域での経済計算を行い、その結果を0.5度のグリッドでの耕作地-自然植生割合にダウンスケールしている。このため、気候・生態系・水資源・作物モデルの間の変数交換はメモリ上で行い、一つの計算プログラムの中で、サブルーチンを通して変数の受け渡しを行う（「オンライン結合」と呼ぶ）。この一方で、土地利用モデルは独立した実行モジュールとして、気候・生態系・水資源・作物結合モデルが計算してファイルに書き込んだ作物収量の結果を読み込み、耕作地・自然植生割合を計算してファイルに書き込み、これを気候・生態系・水資源・作物結合モデルが読み込む、という形での結合を行う（「オフライン結合」と呼ぶ）。陸域統合モデルは、環境研究所の大型計算機SX-ACEを利用（CPU30コアを利用）し、1年あたり40分程度で計算が可能である。結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）や部門横断影響評価モデル相互比較プロジェクト（ISMIP）で提供されている様々な境界条件を利用し、過去再現実験および将来予測実験を実行可能な形に、モデルを整備した。

## b. バイオマスエネルギーのポテンシャル評価

産業化以前から以前の気温上昇を2度以下に抑えるシナリオにおいて、21世紀終わりごろまでに二酸化炭素排出を負にする必要性が議論されている。この負の排出を達成するための有力な方法として、炭素回収貯留を伴うバイオマス燃料利用(Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)が社会経済シナリオの中でしばしば用いられる。しかし、大規模BECCSによるバイオ燃料利用の増加がどのような帰結をもたらすかについては、土地利用を介した多様な相互作用を考慮した解析が必要となる。

IPCC 第5次報告書では、4つの濃度経路シナリオのうち、産業化以降の全球平均気温上昇を2°Cに抑えることを目指した最も排出削減を行うシナリオがRCP2.6である。RCP2.6では、2°C目標の達成のため大規模なBECCSが用いられており、21世紀末には人為的化石燃料利用によるCO<sub>2</sub>排出は正味でマイナスとなる(CO<sub>2</sub>を大気から吸収する)シナリオである。このような大規模BECCSを達成するためには、現状の土地利用を変化させ、バイオエネルギー作物を広域に栽培する必要がある、RCP2.6シナリオの農地は2100年には約21億ヘクタール(現在の全農地は15億ヘクタール)まで達し、増加する農地の83%がバイオエネルギー作物に利用されるシナリオとなっている。2°C目標を達成するための社会経済シナリオの多くでは、RCP2.6と同様に大規模なBECCS利用が仮定されているが、実際の生態系における実現可能性は、十分に検討はあまりされていない。そこで我々は、RCP2.6で仮定されているバイオエネルギー作物の土地利用の下で実現可能なBECCS量を、気候変動、二酸化炭素濃度の変化、肥料投入量等を考慮し、作物モデルによる推定をおこなった。まず、RCP2.6のバイオ燃料作物生産に用いる農地とBECCSのシナリオを利用し、仮定されているBECCS達成に必要なバイオ燃料作物の単収変化を逆算した。これに対し、プロセスベースの作物モデル(SWAT)を利用し、将来の全球的なバイオ燃料作物の収量を計算することで、達成可能なBECCSのボトムアップ評価を行い、さらにBECCSに伴う土地利用変化によって生じる二酸化炭素排出量も評価する。収量および二酸化炭素排出量の推定において、前述のISI-MIPによりバイアス補正がなされた5つのCMIP5 GCM出力気候変動予測データとして用いる。

## c. 人口・GDPのダウンスケールによるグリッドデータの作成

### c-1. 全球を対象としたダウンスケール手法の開発

文献レビューの結果を踏まえ、以下の4点を満たす人口・GDPのグローバルダウンスケール手法を開発することとした：

- i. 精度の良さが期待できること
- ii. 土地被覆、交通網、都市人口といった社会経済活動を説明しうる補助的データを考慮
- iii. 空間効果(都市間の相互作用や各都市からのスピルオーバー)を考慮
- iv. SSPシナリオの仮定と整合的なダウンスケールを考慮

Yamagata et al. (2015)での手法比較の結果を踏まえ、(i)を満たすために統計手法とModel ensemble手法をベースとしたダウンスケール手法を開発することとした。(ii)を満たすために、都市面積、農地面積、道路密度、空港位置、海岸線、都市別人口の各補助データを0.5度グリッド毎に整備し、各データを説明するためのサブモデルを開発する。またそれらをModel ensembleでそれらを結合してモデルの頑健性を向上させる。(iii)を考慮するために空間統計学と呼ばれる分野

のモデルを応用することで、空間的な波及効果を明示的にモデル化する。最後に(iv)を満たすために都市の拡大／縮退を調整するためのパラメータを導入し、それらをシナリオ毎に与える。

### c-2. 人口・GDPの推計

上記で開発した手法を用いて1980～2100年の人口・GDPを0.5度グリッド毎にダウンスケールする。結果として得られる人口分布とGDP分布が集約型の都市成長(SSP1)、中庸的な都市成長(SSP2)、拡散型な都市成長(SSP3)という各シナリオの仮定に整合しているかをマッピング等により確認する。

次に推計結果の精度を検証する。同検証には0.5度グリッド毎の実測人口・GDPデータが必要であるが、ともに全球データは見つけることができなかった。Socio-Economic Data and Application Center (SEDAC) は全球を対象とした空間詳細な人口データはSEDACが公開しているものの、同データは各国の行政境界毎の人口統計を足し合わせて作成されており、データの解像度は国毎に異なる。そこで、人口統計の解像度が十分であると目視で判断された次の国のSEDACデータを実測値とみなして精度検証することとした：アメリカ合衆国、フランス・スペイン・ポルトガル、日本。

次に我々の推計結果を、既存の空間詳細版SSPであるJones and O'Neill (2016) と比較する。それにより、我々が推計したグリッド別人口・GDPデータの有用性を検証する。

最後に、推計した人口・GDPシナリオを公開するためのwebページを作成し、推計データを公開する。

### d. 気候変動リスクインベントリの作成とリスク連鎖の可視化

気候変動が人間や生態系に及ぼす影響の性質は様々であり、人間や生態系にとって好ましくない悪影響(被害)をもたらす一方で、時期や場所によっては、好影響(利益)をもたらすこともある。S10プロジェクトでは、利用可能なあらゆる科学的知見を利用することで、気候変動が引き起こすリスク(もたらされる被害や利益)を網羅的に明らかにし、地球規模の気候変動リスク管理の構築に貢献することが、重要なひとつの目標である。このための活動が「リスクインベントリ」の作成である。私たちは地球規模の気候変動によって地球上で生じるあらゆるリスクをリストアップし、データベースを作成した。気候変動によって生じる影響は様々な部門にわたり、その時空間スケールも様々であるが、それらは互いに密接に関連している。このため、気候変動によって生じるリスクを、ある特定の地域においてだけでなく、地球規模で評価することが重要である。これまでの研究では、ある特定の国において生じる気候変動リスクについては、様々な形でまとめられてきた(例えば 英国気候変動リスク評価、UKCRA 2012など)。この一方で、気候変動によって生じると考えられるリスクについての最新の知見は、IPCC第5次評価報告書にまとめられているが、基本的には部門ごとにまとめられており、様々な部門にわたるリスクの全体像や、部門の間のリスクの関係性が、必ずしも分かりやすくまとまっているとは言えない。

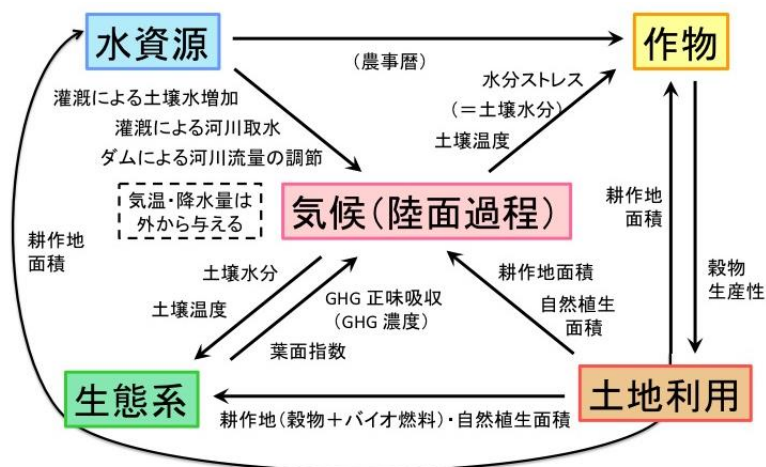
我々は、まず気候変動によって生じる全てのリスクを網羅するために、リスクの分類を行った。社会にある様々な価値観を考慮して、社会が「被害を避けたい」と望む対象ごとに、気候変動影響の整理を行った。気候変動によって起こりえる全ての被害を網羅する形で、リストの作成を行った。これは、S10に参画する幅広い分野の研究者が、IPCC 第5次評価報告書を中心に、文献調査を行うことにより、気候変動によって生じて起こり得るリスクを、リスト化したものである。

これにより、気候変動によって影響を受ける部門と個別の被害に関する全体像を明らかにすることができた。さらに、同様の文献調査によって、気候変動によって生じる様々な現象の間の因果関係のリストを作成した。得られた気候変動リスクの因果関係を、表の形で示すだけでなく、「ネットワーク図」を作成することで、気候変動リスクの連鎖を分かりやすく表現することができた。ネットワーク図は2通りの方法で作図し、デザインの専門家と協力することで、より理解しやすい図の作成を行なった。

#### 4. 結果及び考察

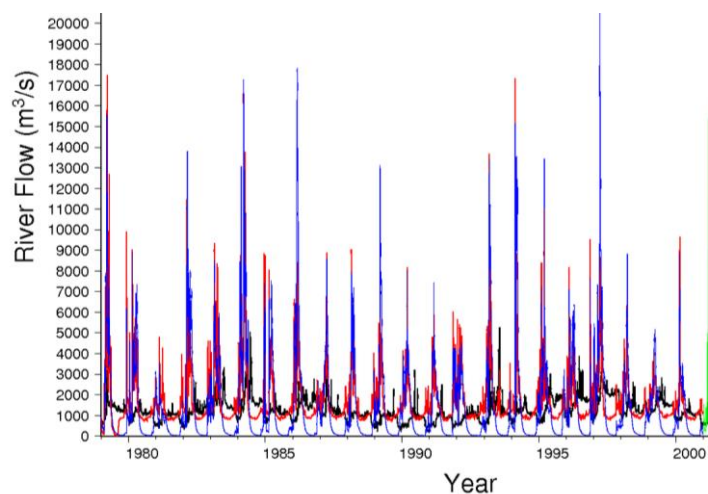
##### a. 陸域統合モデルの開発と気候変動リスク評価

陸域統合モデルの間の変数交換の詳細を、図(1)-1に示す。水資源モデルが計算する人間による水利用が、陸面の土壌水分などを変える。灌漑などによって土壌水分が増加する効果が、作物モデルに反映され、土壌水分の増加によって収量が増加する。作物モデルによって計算された収量の変化が、土地利用モデルに渡され、グリッドの耕作地-自然植生の割合が計算される。土地利用モデルによって計算された土地被覆の情報は、生態系モデルや気候モデルに与えられ、炭素収支の変化や気候の変化が計算される。気候モデルでは大気・陸面・海洋モデルのうち、陸面モデルだけを動作させ、大気モデルによって計算される地表気温・風速・湿度・降水量は、陸面モデルへのインプットとして与える。これにより、気候モデル予測の不確実性を考慮することが可能である。

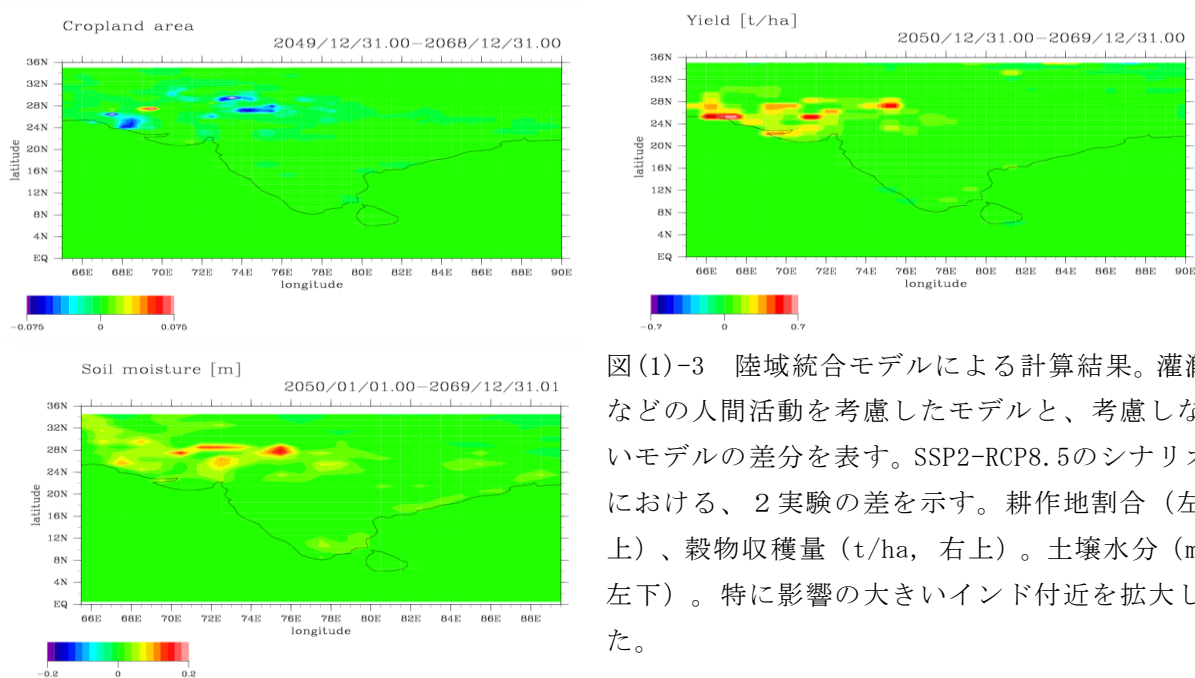


図(1)-1 陸域統合モデルの概念図。ボックスが陸域統合モデルを構成するサブモデル、→が、サブモデルの間で交換する変数。

統合陸域モデルによる計算例として、人間の水利用が河川流量に及ぼす影響を表す結果を図(1)-2に示す。人間活動を記述しない場合(青)は、流量の変動が大きいですが、人間活動によってダムを操作することにより(赤)、流量が安定化される。観測された流量(黒)と比較すると、流量が少ない季節の結果が、人間活動を考慮した場合(赤)の方が、考慮しない場合(青)より整合的である。人間活動を考慮しない場合には、乾期に非常に流量が少なくなってしまうが、人間活動を考慮すると、乾期でも流量が一定に保たれる。観測データでも、同様の傾向が見てとれる。



図(1)-2 河川流量の結果。ダム操作などの人間活動を考慮して計算したモデル（赤）、人間活動を計算しないモデル（青）を、観測された流量データ（黒）と比較。ミズーリ川、西経95度、北緯40度付近の結果。

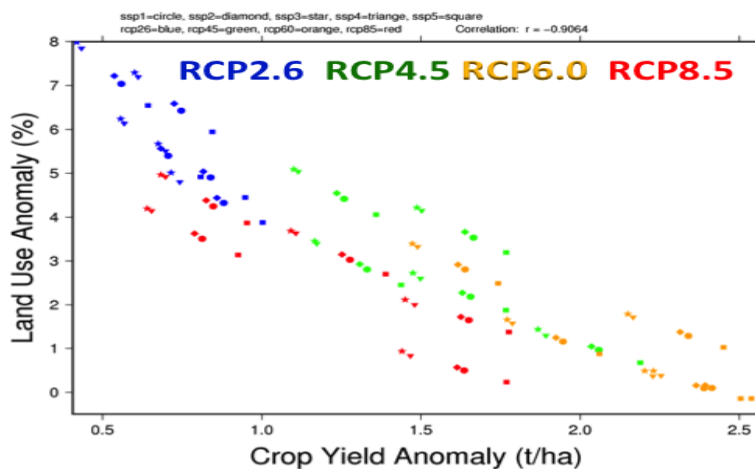


図(1)-3 陸域統合モデルによる計算結果。灌漑などの人間活動を考慮したモデルと、考慮しないモデルの差分を表す。SSP2-RCP8.5のシナリオにおける、2実験の差を示す。耕作地割合（左上）、穀物収穫量（t/ha, 右上）。土壌水分（m, 左下）。特に影響の大きいインド付近を拡大した。

さらに、陸域統合モデルによって、灌漑過程が作物収穫量や土地利用変化に与える影響を調べるための解析を行った。水資源モデルによって計算する灌漑などの人間活動の効果を調べるために、モデルで人間活動を考慮した実験と、人間活動を考慮しない実験の差を比較したのが図(1)-3である。シナリオは、SSP2-RCP8.5 を用いている。特に灌漑のインド付近の結果を示す。図(1)-3

に示すように、灌漑によって、土壌水分の増加が見られる（図(1)-3左下）。特にインドの西部で大きな水分の上昇が見られている。このため、図(1)-3右上に示すように、この地域の穀物収穫量が増加している。穀物収穫量は、各グリッドで大豆、春小麦、冬小麦、とうもろこし、米を計算し、もっとも収量の高い値を示している。人間活動によって穀物収穫量が増加したため、図3左上に示すように、noHIモデルに比べてHIモデルでは、耕作地面積が小さく抑えられている。

次いで、穀物収量と耕作地面積の全体的な関係を調べるため、作物モデルと土地利用モデルを単体で利用し、複数の SSP, RCP, 気候シナリオ (GCM) を用いた実験を行った結果が図(1)-4である。ここでは、土地利用モデルで用いる社会経済シナリオは SSP2 で固定し、作物モデルで穀物収量を計算する際に、5SSP, 4RCP, 5GCM の結果を使っている。穀物収穫量は、施肥効果と技術革新によって、将来増加すると予測されている。施肥効果が最も大きいのが RCP8.5であるが、気候変化の影響のため、穀物収穫量の増加は最小である。このため、穀物収穫量の増加の大小関係は、シナリオによるばらつきがあるが、RCP6.0 > RCP4.5 > RCP8.5 > RCP2.6 となっている。そして、穀物収穫量の大きいシナリオほど、土地利用面積の変化も小さく抑えられることが分かった。つまり、将来の気候変動による穀物収穫量の減少分が大きい場合ほど、食料生産のために、より多くの土地を必要とする。本研究の解析によって、水資源が穀物収穫量を定める上で果たす役割と、穀物収穫量が土地利用変化に及ぼす影響を、異なるモデルの相互作用を考慮した陸域統合モデルによって、定量的に明らかにすることができた。



図(1)-4 RCP2.6 (青)、RCP4.5 (緑)、RCP6.0 (黄)、RCP8.5 (赤) によって得られた、穀物収量変化と土地利用変化の全球平均値の関係。両者の変化量は、2080-2099年と2000-2019年の平均値の差を利用した。PRYSBI2によって計算された穀物収量の結果を、土地利用モデルに与えて計算を行った。1つのドットが1つのモデル実験の結果（2006年から2100年までの積分）を示す。

最後に、陸域統合モデルによる将来予測実験の結果を図5に示す。将来気候シナリオとして、2度安定化を目指すRCP2.6と、成り行きシナリオに近いRCP8.5を与えて実験を行なった。気候シナリオとしてはISIMIPによって提供された4気候モデルの結果を利用している。気候・水資源・陸域生態系・作物・土地利用のすべてのモデルを結合させて走らせた結果である。水資源モデルによって計算した灌漑供給量（図(1)-5a）は、将来増加する傾向にある。灌漑面積は Hanasaki et al.

2013 の SSP2 シナリオにもとづいて増加させている。土壌水分（図(1)-5b）は、気候シナリオを計算する気候モデルの違いによっても結果が異なるが、RCP2.6に比べて、RCP8.5の方が、土壌水分の減少幅が大きい。作物収量の計算では、PRYSBI2 において施肥効果を考慮し、将来の国別GDPの増加に応じて、技術発展による収量増加の効果を計算に含めている（過去の収量増加と国別GDP増加の関係から、将来の技術発展による収量増加を推定）。このため、大豆と春小麦（図(1)-5cとf）では収量が増加する傾向がある。冬小麦とトウモロコシ（図(1)-5dおよびe）に関しては、RCP8.5の気候変化の効果によって、収量が減少する。各グリッドにおける収量の最大値（図(1)-5g）は、RCP2.6では増加傾向にあるが、RCP8.5では、21世紀後半に、気候変化の影響によって収量が低下する。図(1)-4で示すように、将来の土地利用は、収量が多いほど、農地の増加は少なく済む。このため、将来の穀物面積の変化（図(1)-5h）では、RCP2.6にくらべRCP8.5で穀物面積の変化が大きくなる。さらに、生態系正味生産量（Net Primary Production=NPP, 図(1)-5i）は、20世紀後半で、RCP2.6に比べてRCP8.5で少なくなる。気候変化と土地利用変化の影響によって、生態系が正味で吸収する二酸化炭素量は、RCP2.6に比べてRCP8.5でより小さくなり、温暖化を加速する正のフィードバックが働く可能性がある。気候変化が作物生産に影響を与え、より耕作地が広がり、より生態系生産が減少することで、気候変化に影響を与えるという形での相互作用が、RCP2.6に比べてRCP8.5でより大きくなることが示された。土壌水分・作物生産・生態系生産に関しては、気候モデルによる将来予測の不確実性の影響が大きく、RCP2.6に比べてRCP8.5の方が、より将来予測のばらつきが大きくなる。ここでは、社会経済シナリオ（SSP）を固定しているが、特に土地利用モデルの結果は、SSPの違いや、社会経済シナリオを予報する統合評価モデルの結果にも依存する（サブテーマ5）。今後は、ここで示されたようなサブモデル間の相互作用を考慮した上で、気候モデル予測以外の不確実性について考慮することが重要である。

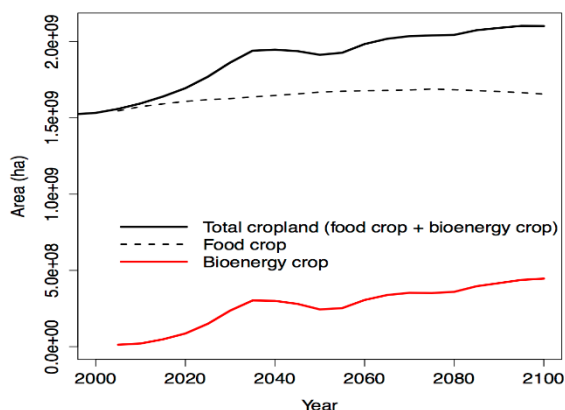


図(1)-5 陸域統合モデルによる将来予測実験の結果。RCP8.5 (赤) およびRCP2.6 (青) シナリオを与え、気候データとして4つの気候モデル (実線=MIROC, 破線=HadGEM, 点線=GFDL, 鎖線=NorESM) の結果を与えた結果を示す。a) 灌漑による水供給量 (kg/sec, 1度グリッドの平均値), b) 150cmの土壌水分 (m), c) 大豆収量 (t/ha), d) 冬小麦収量 (t/ha), e) とうもろこし収量 (t/ha), f) 春小麦収量 (t/ha), g) 5穀物のグリッド最大収量 (t/ha), h) 穀物面積 (グリッドにおける割合)、i) 生態系正味生産量 (Net Primary Production, MgC/ha/mon)。作物収量 (c-g) は、陸面のすべてのグリッドで作物を栽培したと仮定した場合の、全陸面の平均値を表す。

## b. バイオマスエネルギーのポテンシャル評価

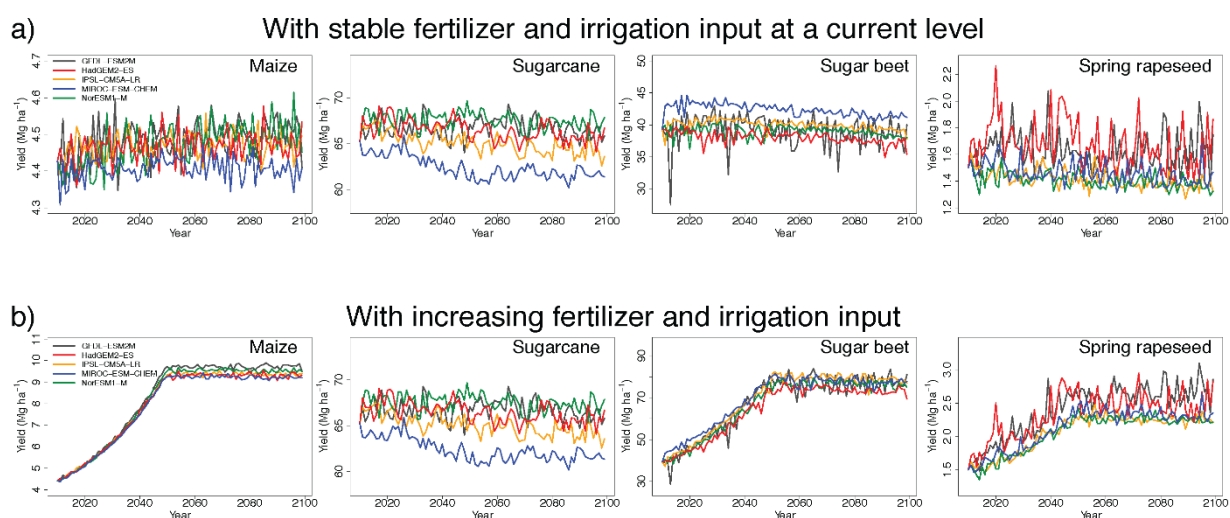
2℃目標達成のためには将来での排出量を負にする技術の利用が必要であることが、統合評価モデルによる研究の多くによって示されている。コスト・技術的観点から、統合評価モデルは、ネガティブ・エミッション技術としてBECCS の利用を多くのシナリオにおいて仮定している。将来の気候変化を2℃以下に抑えることを想定したRCP2.6では、2005年時点の全球の農地面積は約16億haであるが、2100年時点で約21億ヘクタールまで増加し、その増加分の83%がバイオ燃料作物栽培に利用されるシナリオとなっている (図6)。





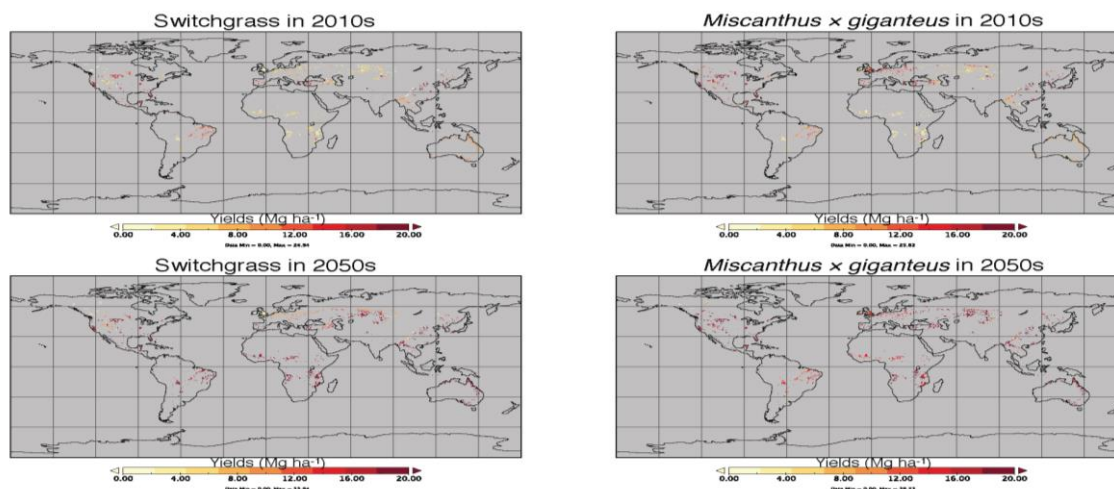
図(1)-6 RCP2.6シナリオにおける農地利用およびバイオ燃料作物利用面積。

本研究では、プロセスベース作物モデルSoil and Water Assessment Tool (SWAT, Neitsch et al., 2005)を改良することにより、第一世代・第二世代バイオ燃料作物の単収量 (t/ha) を、全球的に精度よく推定することが可能となった。第一世代バイオ燃料作物 (トウモロコシ、サトウキビ、サトウダイコン、ナタネ) の単収量の結果を図7に示す。また、第二世代バイオ燃料作物の結果が図8 であり、ミスカンサスは一般的に高緯度地域、特にヨーロッパにおいてスイッチグラスよりも高い単収を示した。スイッチグラスは熱帯、亜熱帯の乾燥地域において肥料投入量が多い場合に高い単収を示した。肥料投入や灌漑利用を考慮し、作物モデルを用いてバイオ燃料作物の終了を計算することにより、第一世代・第二世代バイオ燃料作物を利用した場合のBECCSポテンシャル評価を行なった。具体的には、RCP2.6シナリオにおけるバイオ燃料作物生産のための空間詳細な土地利用シナリオと、シナリオにおけるBECCS利用量 (エネルギー需要を満たすために必要なバイオ燃料作物) を用い、シナリオが想定しているBECCSを達成するために必要なバイオ燃料作物の単収量 (t/ha) と、作物モデルによって計算した単収を比較した。



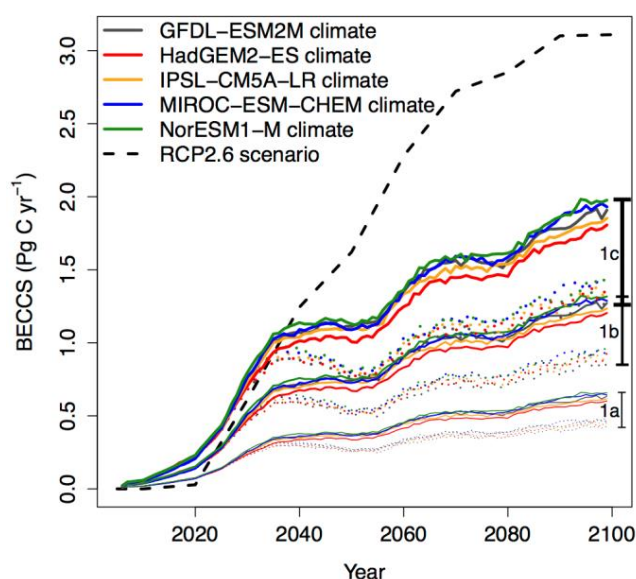
図(1)-7 第一世代バイオ燃料作物の収量予測。a) 現状の肥料投入と灌漑率を2100年まで仮定。b) 2050年に160kgN ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> まで肥料投入量を増加、および、灌漑面積を年0.6%で増加させた場合

の収量予測。



図(1)-8 第二世代バイオ燃料作物の収量空間分布。

作物モデルSWATにおいて肥料投入および灌漑利用を考慮し、現在広く利用されている第一世代バイオ燃料作物(トウモロコシ、サトウキビ、サトウダイコン、ナタネ)の単収量を評価したところ(図(1)-9 実線および点線)、高CCS技術オプション利用した場合でも、RCP2.6シナリオに必要なBECCS(図(1)-9 黒破線)が達成されないことが分かった。RCP2.6シナリオに必要なBECCSの達成のためには、現在の平均収量と比較し、トウモロコシでは約8倍、サトウキビ、サトウダイコンでは約3倍、ナタネでは13倍の収量が必要であることが明らかになった。この一方で、作物モデルによる第一世代バイオ燃料作物の単収は、高肥料・灌漑投入を仮定した場合でも(現在の肥料投入量が $160 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ を下回る地域において2050年までに投入量を年々増加させ、また灌漑面積を年率0.6%で増加させる)において、2055年時点で現在の平均収量の約2倍(トウモロコシ)、約1倍(サトウキビ)、約1.8倍(サトウダイコン)、約1.5倍(ナタネ)までにしかならないことがわかった。肥料投入と灌漑利用を現状のまま維持した場合は、収量増加はみられず、特定の1 GCM気候条件にのみ収量減を示すサトウダイコンを除いて、収量変化は現状の収量の5%の範囲におさまった。これらの結果を総合すると、第一世代バイオ燃料作物を利用すると、BECCS達成可能量は、RCP2.6シナリオにおける必要量には達せず、高CCS技術オプションの利用においても必要量の約50%から65%にしかならないことがわかった(図(1)-9)。これらの結果より、劣化土壌域のバイオ燃料ポテンシャルを考慮しても、RCP2.6シナリオが必要とするBECCSを達成するためには、想定の数倍以上のバイオ燃料作物に利用する土地面積が2050年ごろに必要なことがわかった。生産性の高い土地をバイオ燃料作物利用として転換する場合、土地利用変化による更なる炭素排出によりBECCSにおける吸収量をキャンセルすると考えられ、BECCS利用による炭素バランスを達成するためには、食料作物生産利用による土地利用との競合が起こる可能性が示された。



図(1)-9 第一世代バイオ燃料作物を利用した場合のBECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) 達成量。1a:低CCS効率オプション。1b:中CCS効率オプション。1c:高CCS効率オプション。点線は現状の肥料・灌漑利用シナリオ。実線は高肥料・灌漑利用シナリオ。破線は元の世界経済モデルIMAGEモデルにおいてRCP2.6シナリオで必要なBECCS量。

2年目以降の研究において、第一世代バイオエネルギー作物（サトウキビ、ビート、トウモロコシ、ナタネ）によるバイオエタノールおよびバイオディーゼル利用、将来利用が期待されている第二世代バイオエネルギー作物（Switchgrass, Giant Miscanthus）由来リグノセルロースを利用したガス化におけるBECCSの二種類の実施方法を考慮し、BECCSのポテンシャル評価を行なった。第一世代バイオエネルギー作物を利用した場合でのBECCS 達成可能量は、肥料投入量に依存して不確実性が存在するものの、RCP2.6で必要とされる量の34%-43%と推定され、肥料投入量を150 kgN /ha/yrまで増加させるといった高肥料シナリオにおいても、必要量の半分にも満たないことがわかった。また、第2世代バイオエネルギー作物を栽培し、ガス化によるbioSNG生産の過程でBECCSを行った場合、2100年までに約80Pg C固定できることがわかったが、これも必要量の約半分の吸収量である。これに加え bioSNG 燃焼後の回収技術を仮定したCCSを行う場合では、必要量の95%ほどを満たすことが可能であった。現状の技術において、空気燃焼後のCO<sub>2</sub>回収技術においては排出ガスのCO<sub>2</sub>濃度が低いために、コストとエネルギーが比較的多くかかる点があり、これらの技術革新あるいは、ガス化による水素エネルギーの利用など、CO<sub>2</sub>回収率の高い技術の利用が重要となることがわかった。

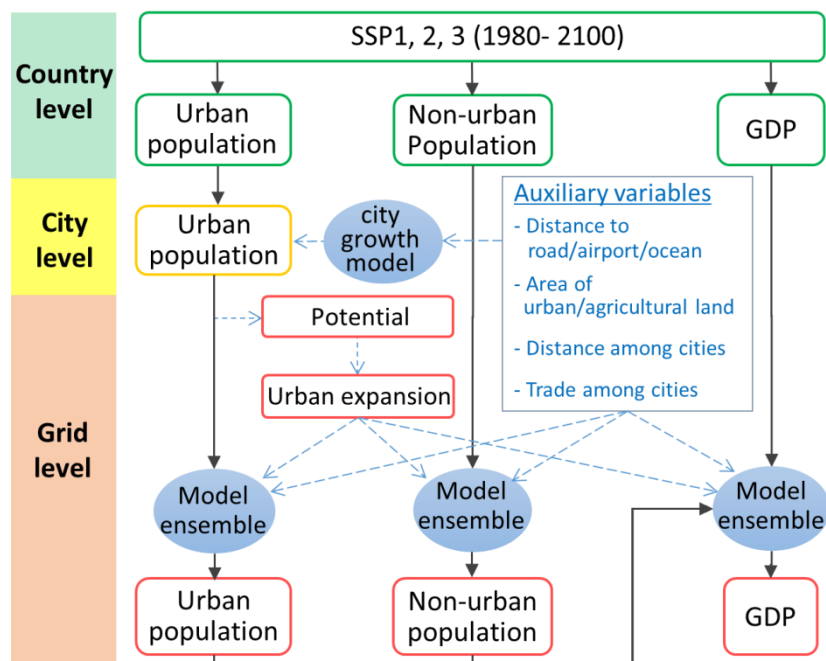
このように、バイオエネルギー利用および回収技術の進歩が進まない場合、つまり第2世代バイオエネルギー作物の広域生産およびコスト的に見合うようなバイオ燃料利用における燃焼後回収技術の高度化が進まない場合には、2℃目標に必要な大規模バイオエネルギー生産による BECCS を達成するためには、さらなるバイオ燃料作物栽培の土地を増やす必要がある。この場合、RCP2.6で仮定されているバイオエネルギー作物生産面積の倍以上を増やす必要があり、食料生産の農地との競合がおこることが考えられる。

さらに、RCP2.6シナリオにおける土地利用変化（森林伐採）による炭素排出を、陸域生態系モデルVISITを用いて計算したところ、2006-2100年の積算で80.7±34.4 Pg Cと推定され、5つのGCMによる気候変動予測データを用いた実験のうち4つの実験において、元の統合評価モデルがRCP2.6において想定している排出量（60.7PgC）より大きい値を示した。統合評価モデルが推定する土地利用変化による二酸化炭素排出と、プロセスベースの陸域生態系モデルが推定する二酸化炭素排出の信頼性評価を行う必要がある。

## c. 人口・GDPのダウンスケールによるグリッドデータの作成

### c-1. 全球を対象としたダウンスケール手法の開発：結果

研究手法で説明したように、(i)統計モデルを活用したModel ensembleに基づき、(ii)補助的データと(iii)空間効果を考慮して、かつ(iv)シナリオの仮定に整合するという条件を満たすようにダウンスケール手法を開発した。結果として開発された手法のイメージを図(1)-3に示す。



図(1)-10：開発したダウンスケール手法のイメージ。緑は国別データ、黄は都市別データ、赤は0.5度グリッド別データを表す。また黒の実線はダウンスケールの手順を、青の点線は補助的データを考慮するための処理を表す。

図(1)-10 に示したように都市人口、非都市人口、GDPの3つを個別にダウンスケールした。都市人口については、まずは都市別に配分することとした。その際、別途開発した都市成長モデルから推定される都市別将来人口を用いて国から各都市への人口配分比を決定した。ここで開発した都市成長モデルは、次の5つを考慮する空間統計モデルである：SSPの仮定；成長メカニズム（標準的なlogistic-growthを仮定）；経済的な結びつきの強い都市からのグローバルな波及効果；近隣都市からのローカルな波及効果；補助変数（道路密度、空港までの距離、海までの距離）からの影響。都市成長モデルの推定にはSEDAC公開の都市別人口データ（1990, 1995, 2000年の世界67,934都市の人口）を用いた。

一方で非都市人口は国からグリッドに直接ダウンスケールした。グリッド別人口（都市+非都市）の推定後は、その結果も考慮しながらGDPをダウンスケールした。

補助変数、具体的には(a)都市面積、(b)農地面積、(c)道路密度、(d)空港までの距離、及び(e)海までの距離の影響、を考慮して人口・GDPをダウンスケールするために、本研究では、各補助変数を考慮してダウンスケールするためのサブモデルを補助変数毎に設定することとした。同サブ

モデルは地理情報科学の関連分野で精度の良さが指摘されてきたdasymmetric mappingモデルをベースに開発した。Yamagata et al. (2015)での手法比較の結果を踏まえ、各サブモデルの統合には、統計理論に基づくModel ensemble手法として知られるGradient boostingを用いることとした。

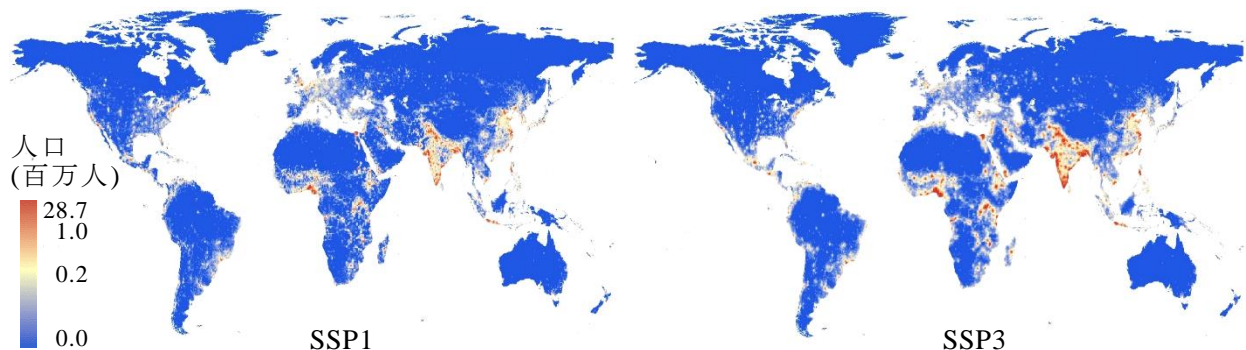
なお、上記補助データのうちの(c)、(d)、(e)については将来も一定と仮定した。一方で、(a)都市面積と(b)農地面積は将来都市人口に応じて拡大／縮小するものとした。そこで、まずはBusiness-as-usualシナリオであるSSP2の下での将来都市面積を、次の手順で推計した：(A-1)上述の都市成長モデルで都市別の将来人口を推計；(A-2)推計された都市別人口を用いて現状～将来の都市化ポテンシャル（近隣都市の人口が大きい＝ポテンシャルが大きい）をグリッド毎に評価；(A-3)都市化ポテンシャルから都市面積を推計するためのモデルを2000年のデータを用いて推定；(A-3) (A-2)で推定したモデルを用いて、将来の都市化ポテンシャル（2100年までの10年おき）から将来の都市面積の拡大／縮小をグリッド毎に推計。また将来の農地面積についても同様に将来推計した。なお都市面積と農地面積の和がグリッドの面積以上となった場合は農地面積を削減した。これにより都市化が進んだグリッドは都市域のみになるが、都市化が不完全な外縁部では都市域と農地が混在するシナリオを組み込んだ。

SSP1については、上記モデルの内部パラメータである都市への集中度を2倍とすることで、SSP3ではどうパラメータを0.5倍とすることで、それぞれシナリオに整合する形で将来都市面積を推計した。

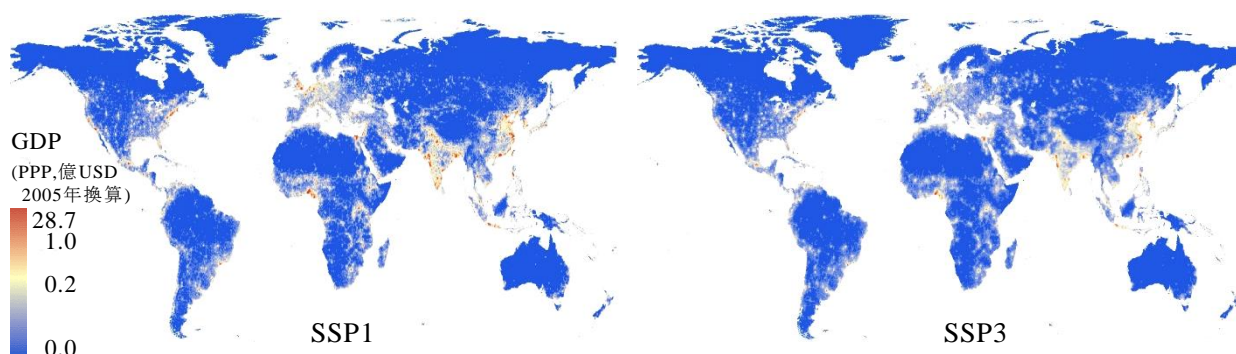
## c-2. 人口・GDPの推計

人口とGDPのダウンスケール結果（SSP1とSSP3）を、図(1)-11 と図(1)-12 にそれぞれプロットした。図(1)-11 より、特にアフリカや西・南アジアなどにおいて、SSP1の人口分布はSSP3に比べて集約的であることが確認できる。図12 からはロンドン、ニューヨーク、上海といった主要都市周辺におけるSSP1での経済成長が、SSP3に比べて顕著に大きくなった。以上の結果は両シナリオの仮定に整合している。

人口とGDPのダウンスケール結果（SSP1とSSP3）を、図(1)-11 と図(1)-12 にそれぞれプロットした。図(1)-11 より、特にアフリカや西・南アジアなどにおいて、SSP1の人口分布はSSP3に比べて集約的であることが確認できる。図(1)-12 からはロンドン、ニューヨーク、上海といった主要都市周辺におけるSSP1での経済成長が、SSP3に比べて顕著に大きくなった。以上の結果は両シナリオの仮定に整合している。



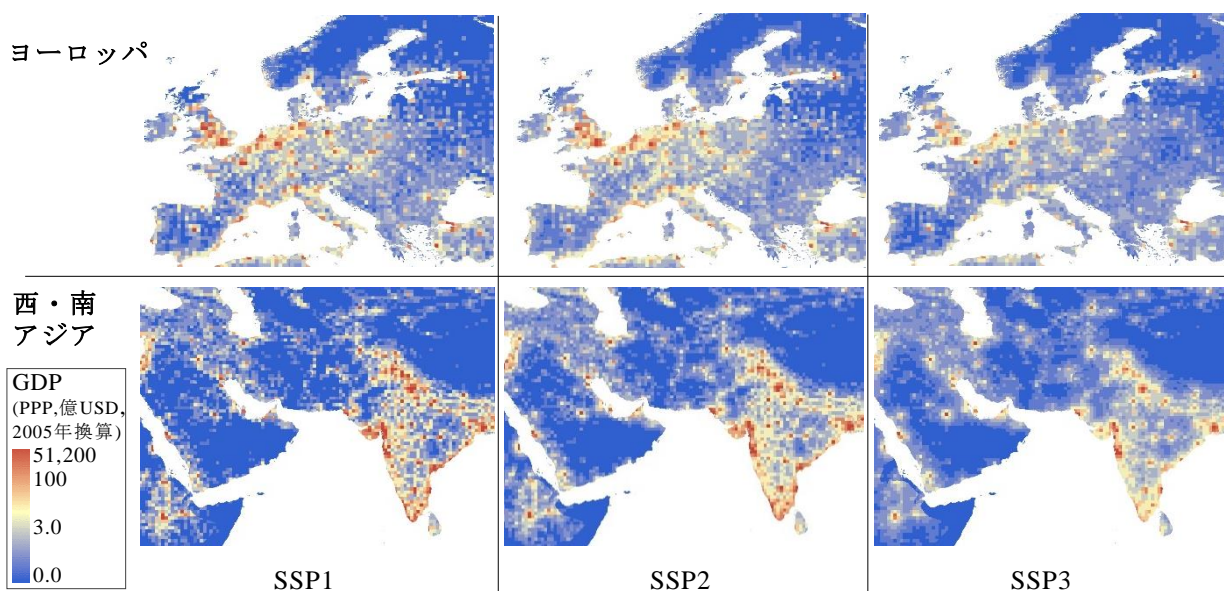
図(1)-11：人口のダウンスケール結果（SSP1とSSP3；2080）



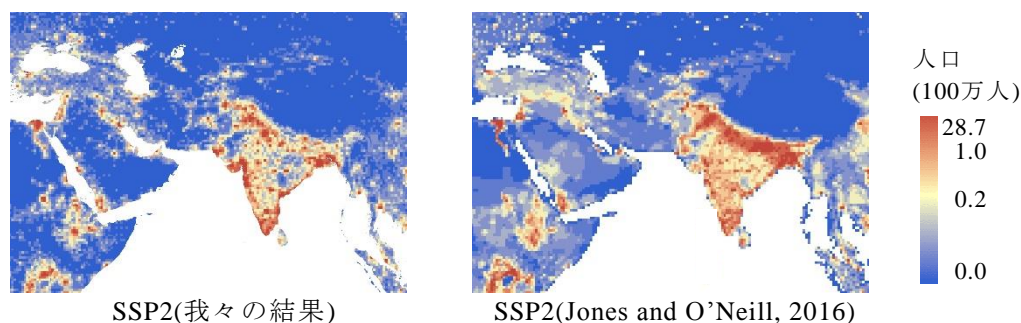
図(1)-12 : GDPのダウンスケール結果 (SSP1とSSP3; 2080)

図(1)-13 はGDPの推計結果をヨーロッパと南・西アジア周辺について拡大したものである。この図より、ヨーロッパにおいては生産活動が営まれる範囲はシナリオ間で類似している一方で、ロンドン、パリ、アムステルダムを含む主要都市域でのSSP3の生産性は、SSP1に比べて著しく小さくなっていることが確認できる。南・西アジアでは、SSP3下での主要都市の成長がSSP1やSSP2に比べて小さい一方で、生産活動自体は広い範囲で拡散的に行われていることがわかる。なお、ヨーロッパとアジアの両方についてSSP2のダウンスケールの結果は中庸的となった。

以上より、人口・GDPの双方について、集約型のSSP1、中庸型のSSP2、拡散型のSSP3という仮定に整合したダウンスケール結果が得られていることを確認した。



図(1)-13 : GDPのダウンスケール結果 (ヨーロッパと西・南アジア; 2080)。



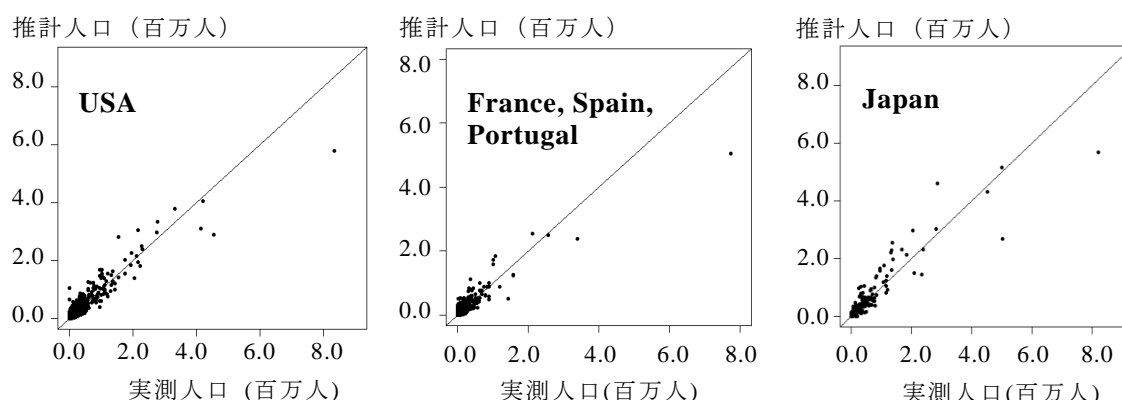
図(1)-14：既存のグリッド別将来人口シナリオの比較（2080）

次に我々の推計結果を、既存グリッド別人口シナリオ（Jones and O'Neill, 2016）と比較する（出典：<https://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/ssp-projections>）。なお、この既存シナリオは気候変動の評価モデルであるIntegrated Assessment Modeling（IAM）を運営するアメリカ大気研究センターが公開するものであり、今後公式データとして幅広く使用される可能性の高いものである。なお、彼らはGDPのダウンスケールは実施していないため、人口のみの比較となる。


図(1)-14に、西・南アジア地域での両シナリオの空間分布を示す。この図よりJones and O'Neill (2016)の推計結果は、非都市部における人口が過度に平滑化されている傾向がみてとれる。例えばサウジアラビアの砂漠地帯にも均一に均衡が分布しているがこれは直観に整合しない。対照的に我々の結果では都市と非都市の差異が明瞭に表れており、より妥当な結果となっている。この際は、Jones and O'Neill (2016)が仮定のみに基づいた（補助データやモデルの精度の良さ等は考慮していない）方法を用いたのに対して、我々は補助データや波及効果などを考慮して統計的にモデルの精度を最大化したためと考えられる。以上より我々のグリッド別推計シナリオの妥当性・有用性を確認した。

次に我々の推計シナリオの精度を、実測値に基づくグリッド別人口データが入手できたアメリカ合衆国、フランス・スペイン・カンボジア、日本を対象に検証した（研究手法参照）。図(1)-15は横軸を実測人口（2000年）、縦軸を推計人口（2000年）とした45度線プロットである。この図より、各国でのプロットが概ね対角線に乗っていること、即ち推計精度が良好であることを確認した。

以上より、我々のグリッド別の人口・GDP推計がSSPの仮定に整合的であること、既存のシナリオよりも直観に整合的であること、及び精度が良好であることを確認した。最後に本業務で得られた推計データ SSP1-3 を新規に作成したウェブページで一般に公開した（<http://www.cger.nies.go.jp/gcp/population-and-gdp.html>；図(1)-16）。



図(1)-15：推計人口と実測人口の比較


Tsukuba International Office

Global dataset of gridded population and GDP scenarios

This dataset summarizes global population and GDP scenarios in  $0.5 \times 0.5$  degree grids by country between 1980 and 2100 by 10 years. The data in 1980–2010 are estimated by downscaling actual populations and GDPs by country, while those in 2020–2100 are estimated by downscaling projected populations and GDPs under three shared socioeconomic pathways (SSP): SSP1; SSP2; and SSP3, by country (source: SSP database version 1: <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>). The spatial coordinates of the grids are given by the World Geodetic System WGS84. For further detail about this dataset, see [Data description](#) (PDF, 71 KB).

If you use this dataset, please cite the following paper:

Murakami, D. and Yamagata, Y. (2016) Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling, *ArXiv*, 1610.09041, URL: <https://arxiv.org/abs/1610.09041>.

**Data**

Grid mesh (ZIP, 26.3 MB [Shapefile])			
Population (CSV):	SSP1 (10.2 MB)	SSP2 (10.0 MB)	SSP3 (10.0 MB)
GDP (CSV):	SSP1 (9.8 MB)	SSP2 (9.8 MB)	SSP3 (9.8 MB)

図(1)-16：グリッド別人口・GDP推計結果（1980～2100年）の公開用ページのイメージ

#### d. 気候変動リスクインベントリの作成とリスク連鎖の可視化

S10プロジェクトに参画する健康・水資源・作物・経済・生態系・気候・地球システムに関する分野の専門家によって、教科書や出版された論文、IPCC第4次・第5次評価報告書をもとに、気候変動リスク項目の抽出を行った（表1）。ここでは、気候変動によって引き起こされる被害や利益についての因果関係を記述するために、気候システムの様々な変化を「climatic driver」というカテゴリにまとめている。すべての項目は、温室効果ガス濃度の増加や気候変動に伴って起こる「現象の変化」を表す形で統一されている。変化の仕方が明らかな場合には、「増加」「減少」「悪化」「向上」などの形で、変化の方向を明示するように記述した。これにより、個別の影響



が被害と利益のどちらになるかを、明確に示すことができる。個別具体的な細かい現象は、できるだけまとめて表現することにより、リスクの項目の数が多くなり過ぎないように注意した。また、各々のリスク項目の間で、内容的な重複がなくなるようにも気をつけた。このような作業は、後述するネットワーク図の作成を行う上でも、非常に重要な作業である。表1のリスク項目データは、数多くの専門家によって作成されたため、初期バージョンでは記述の仕方が統一されておらず、項目間での内容的な重複も多かったが、様々な調整を行い表1の形にまとめた。なお、表1では、将来の気候変動に対して社会が特別な対策を行わず、現在の温室効果ガス排出や社会経済の傾向がこのまま続いた場合のリスクを考えることとした。今後、気候変動リスク管理のためにどのような気候対策をとるかを評価する上で、このような「対策なし」の場合に生じるリスク評価を行うことは非常に重要である。一般に気候変動対策としては、温室効果ガスの排出を削減する「緩和策」と、発生した気候変動の様々な影響に対策を行う「適応策」があり、そのどちらを行う場合にも、何らかのリスクが発生する可能性がある。気候変動対策まで含めたリスク項目の作成は、今後の課題である。

表1：気候変動リスクの網羅的な一覧表（リスクインベントリ）

Sector	No	Risk item	リスク項目
Water 水資源	1	Decrease in river discharge	河川流量の減少
	2	Increase in river discharge	河川流量の増加
	3	Decrease in soil moisture	土壌水分の減少
	4	Increase in soil moisture	土壌水分の増加
	5	Rise in river water temperature	河川水温の上昇
	6	Worsening of river water quality	河川水質の悪化
	7	Salinization of coastal waters	沿岸部の塩水化
	8	Rise in lake water temperature	湖沼水温の上昇
	9	Worsening of lake water quality	湖沼水質の悪化
	10	Worsening of groundwater quality	地下水質の悪化
	11	Decrease in groundwater table	地下水量の減少
	12	Decrease in water resources	水資源の減少
	13	Increase in water resources	水資源の増加
	14	Increase in water demand	水需要の増加
	15	Increase in water treatment costs	水処理費用の増加
	16	Rise in water prices	水価格の上昇
Food 食料	17	Decline in crop production	作物生産量の減少
	18	Increase in crop production	作物生産量の増加
	19	Decrease in pasture production	牧草生産量の減少
	20	Increase in pasture production	牧草生産量の増加
	21	Decrease in livestock production	家畜生産量の減少
	22	Increase in livestock production	家畜生産量の増加
	23	Increase in crop disease damage	病害の増加
	24	Increase in damage to agricultural land	農地被害の増加
	25	Decrease in fisheries catch	漁獲量の減少
	26	Increase in fisheries catch	漁獲量の増加
	27	Change in food distribution	食料流通の変化

	28	Change in food trade	食料貿易の変化
	29	Rise in food prices	食料価格の上昇
	30	Rise in livestock feed prices	飼料価格の上昇
	31	Destabilization of food supply	食料供給の不安定化
Energy エネルギー	32	Decline in hydropower efficiency	水力発電効率の低下
	33	Increase in hydropower efficiency	水力発電効率の向上
	34	Decline in thermal power efficiency	火力発電効率の低下
	35	Decline in nuclear power efficiency	原子力発電効率の低下
	36	Increase in air conditioning demands	冷房需要の増加
	37	Decrease in heating demands	暖房需要の減少
	38	Increase in energy demands	エネルギー需要の増加
	39	Rise in energy prices	エネルギー価格の上昇
	40	Destabilization of energy supply	エネルギー供給の不安定化
Industry & Infrastructure 産業と インフラ	41	Increase in infrastructure damage	インフラ被害の増加
	42	Adverse impacts on tourism	観光産業への悪影響
	43	Decrease in lumber production	木材生産量の減少
	44	Increase in lumber production	木材生産量の増加
	45	Appearance of the Northern Sea Route	北極海航路の出現
Ecosystem 生態系	46	Decrease in ecosystem production	生態系生産量の減少
	47	Increase in ecosystem production	生態系生産量の増加
	48	Increase in soil erosion	土壌流出の増加
	49	Decrease in soil organic matter	土壌有機物の減少
	50	Excessive algal growth	藻類などの繁茂
	51	Increase in wildfires	森林火災の増加
	52	Increase in forest decline	森林の衰退と枯死
	53	Change in vegetation zone	植生帯の変化
	54	Decrease in mangroves and marshlands	マングローブ林や湿原の減少
	55	Increase in insect pests	害虫の増加
	56	Decrease in insect pests	害虫の減少
	57	Loss of biodiversity	生物多様性の低下
	58	Increase in biodiversity	生物多様性の向上
	59	Decrease in marine ecosystem production	海洋生態系生産量の減少
	60	Decrease in ocean nutrients	海洋表層栄養塩の減少
	61	Increase in dissolution of calcium carbonate	海洋炭酸カルシウムの溶解
62	Ocean oxygen depletion	海洋溶存酸素の減少	
63	Change in marine habitats	海洋生物生息域の変化	
64	Loss of ocean biodiversity	海洋生物多様性の低下	
Disasters & Security 災害と 安全保障	65	Worsening of water security	水安全保障の悪化
	66	Worsening of food security	食料安全保障の悪化
	67	Worsening of energy security	エネルギー安全保障の悪化
	68	Adverse impacts on island regions	島嶼地域への悪影響
	69	Damage to cultural heritages	文化遺産の損傷
	70	Change in human migration	居住地の移動
	71	Intensification of conflicts	紛争の激化
	72	Increase in flooding	洪水の増加
	73	Increase in sediment disasters	土砂災害の増加

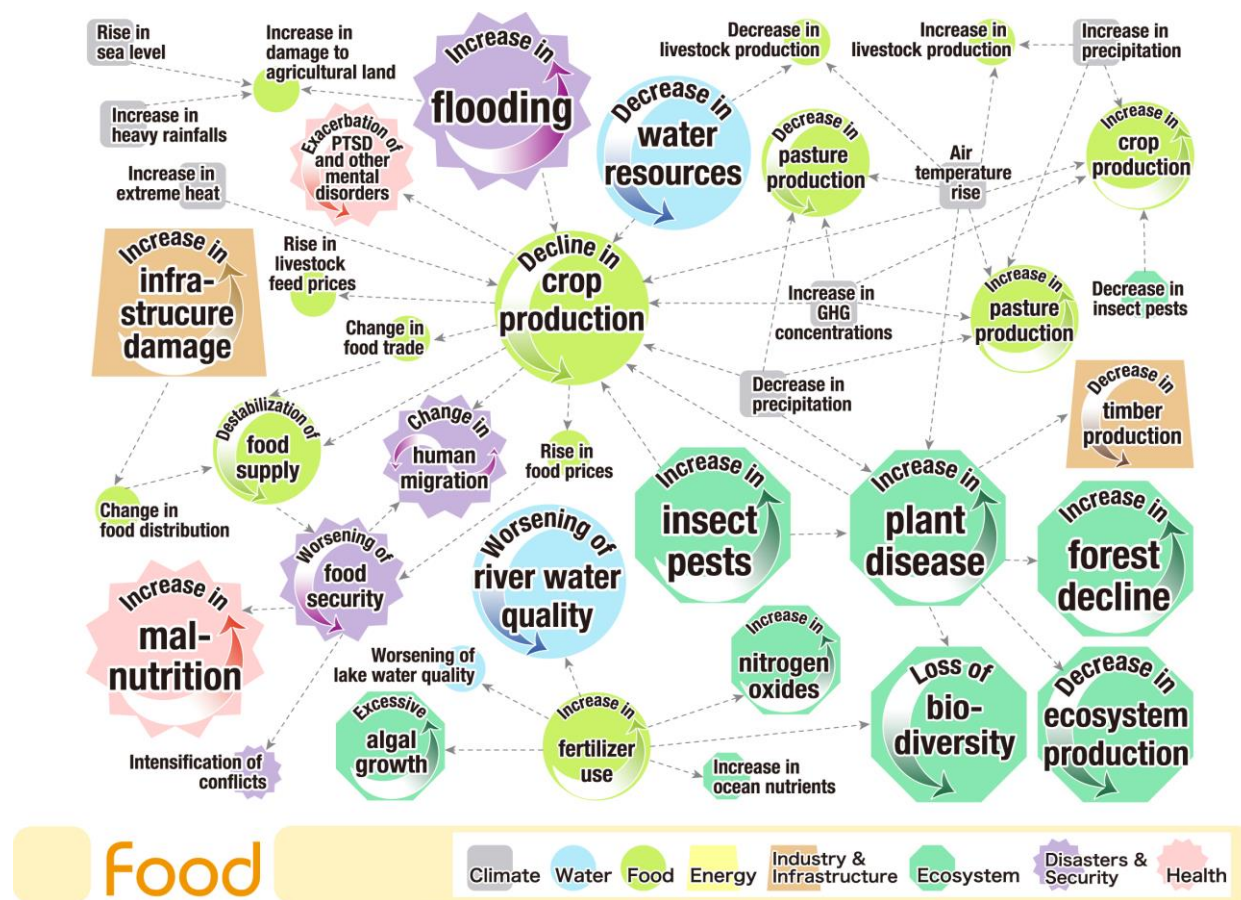
	74	Increase in housing damage	家屋被害の増加
	75	Increase in maritime accidents	海難事故の増加
	76	Increase in drowning accidents	水難事故の増加
Health 健康	77	Increase in mortality due to heatstroke	熱中症や熱関連死亡の増加
	78	Decrease in mortality due to cold	寒冷関連死亡の減少
	79	Increase in diarrhea	下痢の増加
	80	Increase in malnutrition	低栄養の増加
	81	Increase in water-borne infections	水媒介感染症の増加
	82	Increase in food-borne diseases	食料媒介疾患の増加
	83	Increase in animal-borne infections	動物媒介感染症の増加
	84	Decrease in animal-borne infections	動物媒介感染症の減少
	85	Increase in human-to-human infections	人間媒介感染症の増加
	86	Exacerbation of PTSD and other mental disorders	PTSD などの精神疾患の増悪
	87	Increase in respiratory diseases	呼吸器疾患の増加
Climatic Drivers 気候変化 要因	88	Increase in GHG concentrations	温室効果ガス濃度の増加
	89	Decrease in GHG concentrations	温室効果ガス濃度の減少
	90	Air temperature rise	気温の上昇
	91	Increase in extreme heat	猛暑の増加
	92	Decrease in precipitation	降水量の減少
	93	Increase in precipitation	降水量の増加
	94	Stronger tropical cyclones	熱帯低気圧の強化
	95	Increase in heavy rainfalls	豪雨の増加
	96	Increase in storm severity	強風の激化
	97	Stronger high tides	高潮の強化
	98	Increase in snow and ice melting	雪氷の融解
	99	Increase in frozen soil thawing	凍土の融解
	100	Change in seasonal cycles	季節サイクルの変化
	101	Rise in ocean temperature	海水温の上昇
	102	Rise in sea level	海面水位の上昇
	103	Changes in ocean circulation	海洋循環の変化
		104	Ocean acidification

次に、表1の作成手順と同様に、S10研究プロジェクトメンバーによって、既存の文献に基づき、リスク項目の間の因果関係を記述する作業を行った。具体的には、表1で示した気候システムの変化と気候変動によって生じる被害や利益の各項目を、「原因」「結果」のいずれかに配置する。既存の文献に基づき、考えられる全ての因果関係を網羅したデータベースを作成し、現在では全体として300程度の因果関係の記述を行った。ここでも表1のデータの作成と同様に、因果関係の重複がなくなるよう、ある因果関係の内容が別の因果関係の一部に含まれることがないように気をつけた。また、原因と結果の間に別の現象が生じるようなことがないように、「間接的な」因果関係が含まれないように注意してデータの作成を行った。本研究の成果は投稿論文として準備中であり、因果関係のデータベースは、投稿論文に掲載する予定である。

さらに、リスク項目（表1）と、その間の300程度の複雑な因果関係を理解するためには、複雑ネットワークを図化するための手法（Fruchtman & Reingold 力指向アルゴリズム）を利用して、

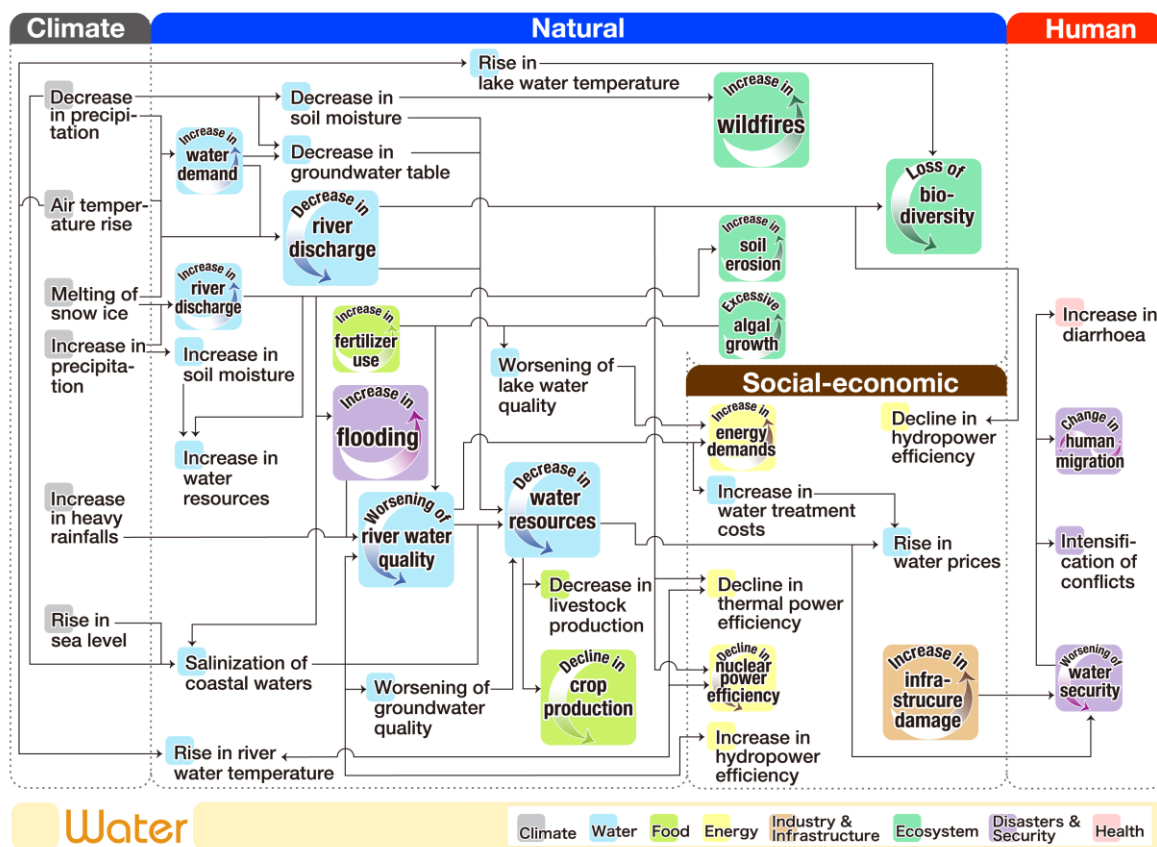
リスク項目の因果関係の視覚化を行った。この手法は、非常に数多くのものごとの間の複雑なつながり、ネットワークを表現するための手法で、様々な分野で利用されている。すべての因果関係を一枚のネットワーク図に表すと、非常に複雑な図になるため、リスク因果関係がある部門に含まれるものだけを抽出して、すべての因果関係を表すネットワーク図を8枚に分割して表現した。

図(1)-17 に、食料部門に関わる気候変動リスクの因果関係のネットワーク図を示す。図(1)-17ではリスク項目の間の因果関係が、矢印でつながれている。気候変動リスクの因果関係リストのうち、原因か結果に食料部門のリスクが含まれる因果関係を図示したものであり、食料に関わるリスクの様々な部門の間の因果関係が示されている。また、図17では、気候リスク項目の部門ごとに、リスク項目（アイコン）の色と形を変えている。また、リスク項目が持つ因果関係の数に、項目の大きさを3通りに表した（大＝因果関係が8以上、中＝4～8、小＝3以下）。気温の上昇や降水量の減少に伴う乾燥化などによって、作物生産量が減少する可能性がある。また熱帯低気圧の強化などによって引き起こされる、強風の激化や豪雨の増加などは、農地に被害を与えることを通して、作物生産量に悪影響を与える。同様の原因は、作物の生産量だけでなく、品質を悪化させることにもつながる。作物生産量の減少は、食料供給の不安定化を通して、食料安全保障の悪化を引き起こす可能性がある。食料安全保障の悪化は、前述のように健康に影響を与え、極端な場合には社会に対しても大きな影響を与える可能性がある。一方で特に寒冷地など、場所によっては気温の上昇・温室効果ガス濃度の増加や降水量の増加によって、作物生産性の増加がみられる可能性もある。



図(1)-17 気候変動リスクの因果関係を表したネットワーク図。食料部門に関わる因果関係を図示。気候変動リスク項目を、部門（気候、水資源、食料、エネルギー、産業、生態系、災害、健康）ごとに、異なる色と形を変えて表現している。

図(1)-17 で示したように、気候変動リスク連鎖の大きな構造として、気候システムの変化をきっかけとして、自然環境システムに変化が生じ、さらに社会システムに変化をもたらし、最終的に人々の生活に影響が及ぶ、という流れがあることが分かった。そこでこの点に着目し、気候変動リスクをフローチャートの形で表現したのが図(1)-18 である。図2は、気候変動リスク項目を自然環境システム、社会システム、人間システムの変化に分けて配置し、リスク連鎖の流れを表現している。



図(1)-18 気候変動リスクの因果関係を表したネットワークフローチャート。水資源部門に関わる因果関係を図示。図(1)-1と同様に、気候変動リスク項目を、部門（気候、水資源、食料、エネルギー、産業、生態系、災害、健康）ごとに、異なる色と形を変えて表現している。気候変化要因を最上流に、自然システム、社会経済システム、人間システムに関わる項目ごとに配置した。

図(1)-18は「水資源」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。降水量が減少する地域では、乾燥化によって河川流量や土壌水分が減少することにより、水資源が減少する。これにより水安全保障の悪化（農業用水・工業用水・家庭用水）が引き起こされる可能性がある。水安全保障の悪化は健康への影響（感染症・低栄養・下痢などの増加）を引き起こす可能性もあり、極端な場合には社会的な影響（居住地の移動や紛争の激化）さえも引き起こすかもしれない。また、河川流量の減少や河川水温の上昇は、発電施設における冷却効率に影響を与えるなどして、火力・水力・原子力発電の効率の低下をもたらす可能性もある。また、肥料の利用などによる河川や湖沼の水質の悪化は、エネルギー需要を増加させるとともに、水処理費用の増加をもたらすことで、水価格に影響を与える可能性がある。この一方で、降水量が増加する地域では、水資源の増加に伴い、作物生産量の増加や水力発電効率の向上などの好影響が生じる可能性もある。

気候変動リスクの網羅的な一覧表（表1）とリスク因果関係の可視化によって、気候変動によって生じる様々なリスクの全体像を、複数の分野にまたがるリスクの連鎖も含めて、明快に示すことができた。我々が作成した一覧表とネットワーク図は、政策決定者や市民が気候変動リスクの全体像を網羅的に把握する際に、有用な情報となるであろう。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

気候・陸域生態系・水資源・作物・土地利用のモデルを結合した「陸域統合モデル」の開発によって、これまで独立にモデル開発され分析されてきたプロセスに関し、様々な相互作用を考慮可能な新たなモデルを完成させることができた。将来予測のシミュレーションを行うことにより、気候・生態系・水資源・作物・土地利用の間に起こりうる相互作用とフィードバックに関して、新たな分析を行うことができた。今後、モデルの不確実性をより体系的に評価することにより、様々な部門の間の相互作用によって生じる新たなプロセスについての評価することが期待できる。

人口・GDPのダウンスケールに関しては、人口・GDPの分布を説明しうる多数の補助的データを活用しながら、空間効果を考慮して、かつ各SSPの仮定にも整合的に人口・GDPを推計する統計的ダウンスケール手法の開発に成功した。また開発した手法を実データに適用することで、既存のグリッド別推計よりも直観に整合的であり、かつ高精度なグリッド別人口・GDPシナリオ（1980～2100年）の推計に成功した。さらに推計データを、ウェブページを通して一般に公開した。空間詳細人口・GDPシナリオは気候変動への適応・緩和を都市・地域のスケールで議論する上で重要なデータであり、今回公開したデータセットは、今後幅広い研究者に利活用されることが期待できる。

### (2) 環境政策への貢献

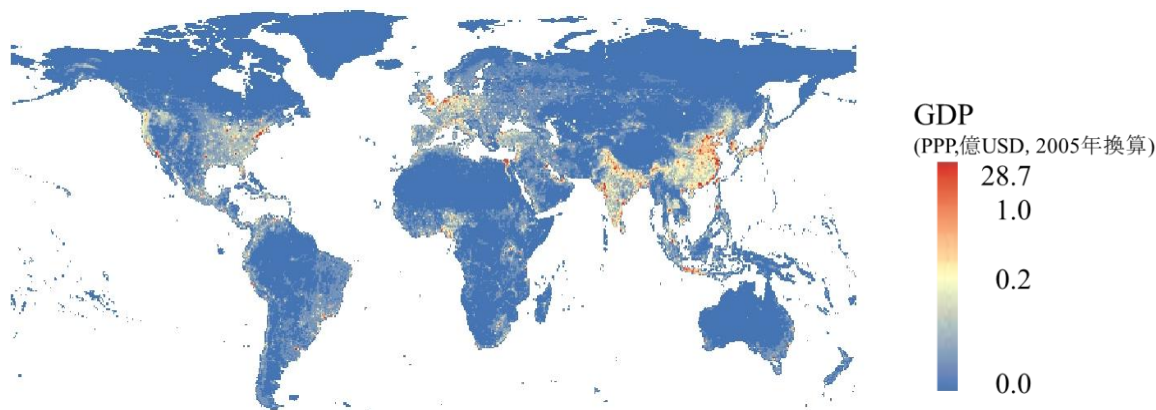
#### <行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)：複数セクター影響モデル相互比較プロジェクトでは、様々なセクターに関わる気候変動影響を評価することが目的であるが、ISI-MIP推進事務局との共同研究を通して、本研究で開発した人口・GDPのダウンスケール手法を活用し、ISIMIPに貢献するための方法を検討している。

本研究で作成した気候変動リスクの包括的な一覧表（気候変動リスクインベントリ）およびリスク連鎖のネットワーク図は、デザインの専門家と協力することで、直感的でわかりやすい図にすることを心がけた。これらの情報を提供することで、多くの人々が気候変動リスクの全体像を把握する上で役立つことが期待できる。



図(1)-19 : PIKとの予備的検討：GDPのダウンスケール結果（SSP2）

## 6. 国際共同研究等の状況

陸域統合モデルの開発では、Yadu Pokhrel 准教授との共同研究を行なっている。気候・水資源モデルの開発に関わった Pokhrel 准教授と議論をすることにより、陸域統合モデルを用いた分析を進めた。

人口・GDPダウンスケーリングの研究では、ポツダム気候変動影響研究所・Tobias（ドイツ）らとの共同研究を実施している。本共同研究の成果の一部として実施した、同氏ら推計の人口データを入力として推計したグリッド別GDPを図(1)-9に示す。今後は1980年以前も含むより長期間のGDP推計を担当することとなっており、その成果をIPCCの公式データとして活用すべく検討を重ねている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) T. Yokohata, J. D. Annan, M. Collins, C. S. Jackson, H. Shiogama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M. Abe, M. J. Webb, and J. C. Hargreaves: *Climate Dynamics* 41,(9) 2745–2763 (2013), “Reliability and importance of structural diversity in climate model ensembles”
- 2) Brovkin, V., Boysen, L., Arora, V. K., Boisier, J.P., Cadule, P., Chini, L., Claussen, M., Friedlingstein, P., Gayler, V., van den Hurk, B.J.J.M., Hurtt, G.C., Jones, C.D., Kato, E., de Noblet-Ducoudré, N., Pacifico, F., Pongratz, J., Weiss, M: *Journal of Climate* (2013) “Effect of anthropogenic land-use and land cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the 21st century”
- 3) C. Le Quéré, R. Andres, T. Boden, T. Conway, R. Houghton, J. House, G. Marland, G. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, R. Andrew, L. Bopp, J. Canadell, P. Ciais, S. Doney, C. Enright, P. Friedlingstein, C. Huntingford, A. Jain, C. Jourdain, E. Kato, R. Keeling, K. Klein Goldewijk, S. Levis, P. Levy, M. Lomas, B. Poulter, M. Raupach, J. Schwinger, S. Sitch, B. Stocker, N. Viovy, S. Zaehle and N. Zeng: *Earth System Science Data*, (2013) “The Global Carbon Budget 1959-2011”



- 4) V. Brovkin, L. Boysen, V.K. Arora, J.P. Boisier, P. Cadule, L. Chini, M. Claussen, P. Friedlingstein, V. Gayler, B.J.J.M. van den Hurk, G.C. Hurtt, C.D. Jones, E. Kato, N. de Noblet-Ducoudré, F. Pacifico, J. Pongratz, M. Weiss: *Journal of Climate* (2013)  
 “Effect of anthropogenic land-use and land cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the twenty-first century”
- 5) C. Le Quéré, G. P. Peters, R. J. Andres, R. M. Andrew, T. Boden, P. Ciais, P. Friedlingstein, R. A. Houghton, G. Marland, R. Moriarty, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, A. Arvanitis, D. C. E. Bakker, L. Bopp, J. G. Canadell, L. P. Chini, S. C. Doney, A. Harper, I. Harris, J. I. House, A. K. Jain, S. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Körtzinger, C. Koven, N. Lefèvre, A. Omar, T. Ono, G.-H. Park, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Schwinger, J. Segschneider, B. D. Stocker, B. Tilbrook, S. van Heuven, N. Viovy, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, S. Zaehle, and C. Yue: *Earth System Science Data*, 6, 235-263 (2014)  
 “Global carbon budget 2013”
- 6) E. Kato and Y. Yamagata: *Earth’s Future*, 2, 421-439 (2014)  
 “BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions”
- 7) Y. Yamagata, D. Murakami, H. Seya (2015) *Applied Energy*, 158: 255–262  
 “A comparison of grid-level residential electricity demand scenarios in Japan for 2050”
- 8) Y. Yamagata, H. Seya *Energy Procedia*, 61: 1446-1450(2015)  
 “Creation of gridded population scenarios of Japan for 2050 using statistical approach”
- 9) D. Murakami, Y. Yamagata, H. Seya (2015) *Energy Procedia* 75: 2751- 2756  
 “Estimation of spatially detailed electricity demands using spatial statistical downscaling techniques”
- 10) H. Bagan, Y. Yamagata (2015) *GIScience & Remote Sensing* 52(6): 765-780  
 “Analysis of urban growth and estimating population density using satellite images of nighttime lights and land-use and population data”
- 11) Y. Yamagata, D. Murakami, H. Seya (2016) *Articulo-Journal of Urban Research*, 14  
 “A spatially-explicit scenario for achieving “Wise Shrink” toward eco-urbanism
- 12) D. Murakami, T. Yoshida, H. Seya, D.A. Griffith, and Y. Yamagata: *Spatial Statistics*, 19, 323-326 (2017)  
 “A Moran coefficient-based mixed effects approach to investigate spatially varying relationships”

<査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) C. Le Quéré, R. Andres, T. Boden, T. Conway, R. Houghton, J. House, G. Marland, G. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, R. Andrew, L. Bopp, J. Canadell, P. Ciais, S. Doney, C. Enright, P. Friedlingstein, C. Huntingford, A. Jain, C. Jourdain, E. Kato, R. Keeling, K. Klein Goldewijk, S. Levis, P. Levy, M. Lomas, B. Poulter, M. Raupach, J. Schwinger, S. Sitch, B. Stocker, N. Viovy, S.

Zaehle and N. Zeng: Earth System Science Data Discussions (2012)

“The Global Carbon Budget 1959-2011”

<http://www.earth-syst-sci-data-discuss.net/5/1107/2012>, doi:10.5194/essdd-5-1107-2012

- 2) C. LeQuéré, G. P. Peters, R. J. Andres, R. M. Andrew, T. Boden, P. Ciais, P. Friedlingstein, R. A. Houghton, G. Marland, R. Moriarty, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, A. Arvanitis, D. C. E. Bakker, L. Bopp, G. Canadell, L. P. Chini, S. Coney, A. Harper, I. Harris, J. I. House, A. K. Jain, S. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Körtzinger, C. Koven, N. Lefèvre, A. Omar, T. Ono, G. -H. Park, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Schwinger, J. Segsneider, B. D. Stocker, B. Tilbrook, S. vanHeuven, N. Viovy, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, S. Zaehle, and C. Yue: The Global Carbon Budget 2013.6, 689-760 (2013)  
“Earth System Science Data Discussions”
- 3) 加藤悦史：地球環境研究センターニュース，24 (3)，9-10 (2013)，  
「Global Carbon Budget 2012 - 広がり続ける 2°C 目標へ向けた排出経路とのギャップ」
- 4) 加藤悦史、山形与志樹：地球環境研究センターニュース，24 (4)，8-10 (2013)  
「Negative Emissions workshop 報告 - 負の二酸化炭素排出の可能性をさぐる」
- 5) 横島徳太、高橋潔、江守正多：Web page 紹介地球環境研究センターニュース，2013 年 8 月号  
「人類は食料危機を乗り越えたのか？ - 専門家によって見解のわかれる問題について理解する - 「食料問題セミナー」 ”
- 6) 加藤悦史：地球環境研究センターニュース，25 (1)，8-9 (2014)  
「地球環境豆知識 (27) ネガティブエミッション技術」
- 7) 山形与志樹・Ayyoob SHARIFI・加藤悦史・横島徳太 (2014)：地球環境研究センターニュース，25 (1)，5-7  
「ネガティブエミッション技術による気候変動リスク管理の課題～GCP国際ワークショップ開催報告」
- 8) 加藤悦史：地球環境研究センターニュース，25 (7)，14-15 (2014)  
「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」
- 9) C. Le Quéré, R. Moriarty, R. M. Andrew, G. P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. D. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, T. A. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. G. Canadell, F. Chevallier, C. E. Cosca, I. Harris, M. Hoppema, R. A. Houghton, J. I. House, A. Jain, T. Johannessen, E. Kato, R. F. Keeling, V. Kitidis, K. Klein Goldewijk, C. Koven, C. S. Landa, P. Landschützer, A. Lenton, I. D. Lima, G. Marland, J. T. Mathis, N. Metz, Y. Nojiri, A. Olsen, T. Ono, W. Peters, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. E. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, J. Segsneider, T. Steinhoff, B. D. Stocker, A. J. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, G. R. van der Werf, N. Viovy, Y.-P. Wang, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, and N. Zeng: Earth System Science Data Discussions, 7, 521-610 (2014)  
“Global carbon budget 2014”
- 10) D. Murakami, Y. Yamagata (2016) ArXiv 1610.09041  
Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) E. Kato and Y. Yamagata: 3rd International Conference on Earth System Modeling (ICESM), Germany, 2012  
“Analysis of trade-offs between bio-energy demand, food production and carbon management in global land-use change scenario”
- 2) E. Kato: Land use change emissions estimates, data and modelling, UK, 2012.  
“Future land-use scenarios: beyond RCPs for the climate risk assessment”
- 3) 横島徳太、J. D. Annan、M. Collins、C. S. Jackson、塩竈秀夫、渡部雅浩、江守正多、吉森正和、阿部学、M. J. Webb、and J. C. Hargreaves : 日本気象学会2012年秋季大会 (2012)  
「気候モデルアンサンブルの自由度と信頼性評価」
- 4) 横島徳太、J. D. Annan、M. Collins、C. S. Jackson、塩竈秀夫、渡部雅浩、江守正多、吉森正和、阿部学、M. J. Webb、and J. C. Hargreaves : 研究集会「週間および1か月予報における顕著現象の予測可能性」(2012)  
「マルチ気候モデルおよび物理パラメータアンサンブルの信頼性評価」
- 5) E. Kato and Y. Yamagata: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, (2012)  
“Evaluating Future Land-use Change Scenarios: Trade-offs between Bio-energy Demand, Food Production, and Carbon Emission”
- 6) T. Yokohata, J. D. Annan, M. Collins, C. S. Jackson, H. Shiogama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M. Abe, M. J. Webb, and J. C. Hargreaves: AGU 2012 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012  
“Structural diversity, degree of freedom, and reliability of climate model ensembles”
- 7) S. Emori, T. Yokohata, A. Itoh, N. Hanasaki, Y. Pokhrel, Y. Sato, K. Yoshimura, T. Oki, E. Kato, K. Takahashi, and Y. Yamagata: AGU 2012 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012  
“Development of a terrestrial integrated model for the sustainable utilization strategy of land-water-ecosystems”
- 8) T. Yokohata, J. D. Annan, M. Collins, C. S. Jackson, H. Shiogama, M. Watanabe, S. Emori, M. Yoshimori, M. Abe, M. J. Webb, and J. C. Hargreaves: Symposium on uncertainty, instability and irreversibility in the earth system, Japan, 2013  
“What can we learn from single and multi-model ensembles?”
- 9) E. Kato : Global Carbon Project (GCP) and International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Workshop on Negative Emissions and the Carbon Cycle, Laxenburg, Austria, (2013)  
“Evaluating future land-use change scenario in the negative fossil fuel carbon emissions”
- 10) 加藤悦史 : 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (幕張) (2013)  
「低炭素シナリオにおける将来土地利用シナリオの評価」
- 11) E. Kato : The 3rd Global Forest Carbon Working Group Meeting “Future of Global Forests”, Laxenburg, Austria, (2013)  
“Assessment of impact of land-use on carbon cycling using VISIT model”
- 12) E. Kato : 6th Annual IAMC Annual Meeting, Tsukuba, Japan, 2013

- “BECCS and sustainable land-use in mitigation pathways”
- 13) 加藤悦史：日本気象学会 2013 年秋季大会(仙台) (2013)  
「全球陸域炭素収支モデリングにおける土地利用変化および木材収穫の影響」
- 14) E.Kato：6th Annual IAMC Annual Meeting, Tsukuba, Japan, 2013  
“BECCS and sustainable land-use in mitigation pathways”
- 15) E. Kato：GCP, IIASA, MCC, NIES joint workshop on Sustainable Negative Emissions: A Climate Risk Management Option?, Tokyo, Japan,2013  
“Ecosystem sustainability of 2°C scenario using BECCS”
- 16) E. Kato and Y. Yamagata：AGU 2013 Fall meeting, San Francisco, U.S.A., 2013  
“BECCS and Sustainable Land-Use in Mitigation Pathways”
- 17) 瀬谷創・山形与志樹 (2013)：土木計画学研究・講演集, 47, CD-ROM
- 18) T.Yokohata,J.D.Annan,M.Collins, C. S. Jackson, H. Shiogama, M.Watanabe, S. Emori, M.Yoshimori, M.Abe, M. J.Webb, and J. C. Hargreaves: International Meeting on Statistical Climatology, Jeju, Korea, 2013  
“Uncertainty in single-model and multi-model ensembles”「広域への適用を念頭に置いたベータ分布アプローチによる小地域将来人口の簡易推計」
- 19) H. Bagan・木下嗣基・山形与志樹 (2014)：日本写真測量学会平成26年度年次学術講演会発表論文集, pp. 18-19, 2014. 5  
「グリッド手法による土地被覆変化の分析」
- 20) Y.Yamagata,H.Seya:The 6th International Conference on Applied Energy -ICAE2014, to appear.(2014)  
“Creation of gridded population scenarios of Japan for 2050 using statistical approach, Energy Procedia”
- 21) 加藤悦史：日本地球惑星科学連合2014年大会、横浜、5月2日 (2014)  
「BECCS利用2°Cシナリオにおける陸域生態系の持続可能性」
- 22) 山形与志樹(2014)：環境研究総合推進費S-10一般公開シンポジウム  
「地球規模の気候リスクにどう対処するか人類の選択肢を考える」  
「大気中CO<sub>2</sub>を減らすことは可能か?～バイオマスCCSとその利用限界」
- 23) H. Bagan, Y. Yamagata (2014) AGU Fall Meeting, San Francisco, USA  
“Spatio-temporal dynamics of urban expansion in Japan using gridded land use data, population census data and DMSP data,”
- 24) 横島徳太、仁科一哉、木口雅司、井芹慶彦、末吉哲雄、吉森正和、山本彬友、本田靖、花崎直太、伊藤昭彦、眞崎良光、重光雅仁、飯泉仁之直、櫻井玄、岩瀬健太、高橋潔、江守正多、沖大幹：日本地球惑星科学連合2014年大会(2014)  
「気候変化によって生じるリスク連鎖の評価」
- 25) T.Yokohata, Development of integrated model for climate change impact and vulnerability assessment, 2014 KEI International Workshop on Climate Chang, Korea, 2014  
“Land, water, ecosystem nexus for climate risk management”
- 26) E.Kato, Y. Yamagata: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA (2014)

“BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions”

- 27) A. B. Harper, P. Friedlingstein, S. Sitch, P. M. Cox, C. Jones, A. Arneth, A. Arvanitis, P. Ciais, C. Frankenberg, A. K. Jain, E. Kato, S. Levis, N. Parazoo, B. Poulter, B. D. Stocker, A. Wiltshire, S. Zaehle: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, (2014)

“The carbon cycle response of the Amazon forest during the 2010 drought in dynamic global vegetation models”

- 28) T. Yokohata, K. Nishina, K. Takahashi, M. Kiguchi, Y. Iseri, T. Sueyoshi, M. Yoshimori, K. Iwase, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, Y. Honda, N. Hanasaki, Y. Masaki, A. Ito, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada, S. Emori, T. Oki, : AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA (2014)

“Visualization of the chains of risks under global climate change”

- 29) T. Yokohata, K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, T. Oki: European Geophysical Union General Assembly 2015, Vienna, Austria, April (2015)

“Mapping of interconnection of climate risks”

- 30) 哈斯巴干・木下嗣基・平春・山形与志樹 (2015): 日本写真測量学会平成27年度秋季学術講演会「土地被覆図を用いたDMSP/OLSから抽出された都市域の解析」

- 31) Y. Yamagata, D. Murakami: Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Chiba, Japan (2015)

“Land use scenarios: An analysis of urban resilience”

- 32) 横島徳太、仁科一哉、高橋潔、江守正多、田中克政、木口雅司、井芹慶彦、本田靖、岡田将司、眞崎良光、山本彬友、重光雅仁、吉森正和、末吉哲雄、岩瀬健太、花崎直太、伊藤昭彦、櫻井玄、飯泉仁之直、西森基貴、沖大幹：日本地球惑星科学連合 2015 年大会「気候変動リスク連鎖の構造と全体像の可視化」

- 33) 横島徳太、仁科一哉、高橋潔、江守正多、田中克政、木口雅司、井芹慶彦、本田靖、岡田将司、眞崎良光、山本彬友、重光雅仁、吉森正和、末吉哲雄、岩瀬健太、花崎直太、伊藤昭彦、櫻井玄、飯泉仁之直、西森基貴、沖大幹：日本気象学会 2015 年度春季大会「気候変動リスク連鎖の全体像の可視化」

- 34) T. Yokohata, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, K. Tanaka, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, I. Toshichika, T. Oki: Our Common Future under Climate Change (CFCC) Conference, Paris, France (2015)

“Mapping of risk interconnection under climate change”

- 35) 村上大輔・山形与志樹：地理情報システム学会第24回研究発表大会「人口・GDPのグローバルダウンスケールと水害リスク推計への応用」(2015)

- 36) Y. Yamagata, D. Murakami, H. Seya: 62nd Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Portland, USA (2015)

“Future land use scenarios for climate change adaptation and mitigation: A case study in Tokyo metropolitan area”.

- 37) D. Murakami, Y. Yamagata: 62nd Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Portland, USA, (2015)

“Spatiotemporal statistical analysis of transportation network and urban growth in Japan in 1980-2010”

- 38) T. Yokohata, K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W. H. Lim, C. Miyazaki, S. Kanae, T. Oki : American Geophysical Union Fall Meeting 2015, San Fransisco, U.S.A. December (2015)  
 “Visualizing interconnections among climate risks”
- 39) 哈斯巴干・L. Zhaoling・木下嗣基・平春・山形与志樹 (2016) 第24回東大生研フォーラム  
 「2000年から2014年までの内モンゴルの土地被覆変化」
- 40) 横島徳太、伊藤昭彦、花崎直太、櫻井玄、木下嗣基、飯泉仁之直、眞崎良光、新田友子、Pokhrel Yadu、江守正多：日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
 “Development of Integrated Terrestrial Model: a biogeophysical land surface model with human components”
- 41) 横島徳太、田中克政、仁科一哉、高橋潔、江守正多、木口雅司、井芹慶彦、本田靖、岡田将誌、眞崎良光、山本彬友、重光雅仁、吉森正和、末吉哲雄、岩瀬健太、花崎直太、伊藤昭彦、飯泉仁之直、櫻井玄、西森基貴、沖大幹：日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
 “気候変動リスクの部門間相互作用の可視化：Visualizing the inter-sectoral connections of climate risks”
- 42) Y. Yamagata, D. Murakami, T. Yoshida (2016) The 12th International Symposium on Urban Planning and Environment Resilient  
 “3D urban design: a “Wise Shrink” approach”
- 43) 村上大輔・山形与志樹 (2016). 地理情報システム学会第25回研究発表大会  
 「建築物ストックデータの整備に向けたリモートセンシングデータと建築物データの関連分析」
- 44) D. Murakami and Y. Yamagata : AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)  
 “Urban CO2 modeling with open geodata toward global carbon mapping”

### (3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) Sustainable Negative Emissions: A Climate Risk Management Option? (2014年12月6日-7日、タイム24ビル、東京)

### (5) マスコミ等への公表・報道等

朝日新聞 (2015年2月23日、朝刊、21頁、東京本社) 「科学の扉」地球をめぐる炭素 山形与志樹主席研究員の記事掲載。

### (6) その他

- 1) 山形与志樹・村上大輔 (2016) Global dataset of gridded population and GDP scenarios (<http://www.cger.nies.go.jp/gcp/population-and-gdp.html>)

## 1. 引用文献

- 1) Jiang, L., and O'Neill, B.C. (2015) Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change* 42: 193-199.
- 2) Jones, B., and O'Neill, B.C. (2016) Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, 11(8), 084003.2.
- 3) O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T. R., et al. (2014) A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Chang* 122 (3): 387-400.
- 3) 日本エネルギー学会 (2008)天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル. 日本工業出版.

## S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

### (2) 陸域生態系の最適利用に向けたモデル開発と分析

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター 物質循環モデリング・解析研究室 伊藤昭彦

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所 仁科一哉・野田響

平成24年～28年度累計予算額：42,213千円（うち平成28年度：8,109千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

陸域生態系は人間社会の持続可能性に必須となる生態系サービスを提供しており、気候変動およびその対策実施に伴う影響を評価することは、陸域の最適利用において極めて重要である。本サブテーマでは、陸域生態系モデル（VISIT）を用いて複数のシナリオに基づいて不確実性を考慮しつつ気候変動の影響評価と対策影響評価を行った。これらの評価における推定精度を向上させるためのモデル高度化およびデータ整備も並行して進めた。気候変動影響評価は、社会経済シナリオ（SSP）、大気中温室効果ガス濃度パス（RCP）、気候モデルの組合せにより不確実性を取り入れつつシミュレーションを行い、生態系の一次生産力、植生バイオマス、土壌炭素、正味CO<sub>2</sub>収支の時間変化とその空間パターンを調べた。リスク要因として土壌流出と野外火災についてもモデルによる推定を行った。さらに国際影響モデル相互比較（ISI-MIP）への参加を通じて生態系モデル間のばらつきも考慮した影響評価を行った。その結果、21世紀前半の生産力推定は濃度シナリオや気候シナリオ間の差違に起因するばらつきが大きいことが示された。北極域とモンsoonアジア地域については、重要性が高い地域として詳細な解析を行った。対策影響として、バイオ燃料増産による自然植生の破壊をもたらす影響や気候工学的対策の実施に伴う影響を評価した。バイオ燃料増産は、森林などの植生減少を引き起こすことで、地域の炭素ストック減少や土壌流出を招く恐れがあり、生態系サービス劣化につながる可能性が示された。本サブテーマで開発された陸域生態系モデルを、サブテーマ1による統合陸域モデルの要素として提供した。これらの研究開発を通じて、気候変動下の陸域最適管理に向けた検討に貢献した。

#### [キーワード]

気候変動、リスク評価、生態系機能・サービス、対策影響、陸域モデリング

#### 1. はじめに

生態系で営まれる諸過程は、生態系自身の発達や維持だけでなく、生態系サービスと呼ばれる様々な産物や調整機能を人間社会にもたらしている。生態系は気候変動に対する耐性や回復力（レジリエンス）を備えていると考えられているが、急速に進む環境変動には適応できる限界がある。その限界近くの生態系は気候変動に敏感に応答する、いわゆる脆弱性を示す。陸域の最適利用を考える上で、生態系への気候変動影響や対策影響を科学的手法で評価する意義は非常に大きい。



都市拡大や耕作地化により、広大な面積の陸域が利用されてきたとはいえ、なお陸地面積の約85%は自然生態系で占められている。Costanzaら（2014）による世界の生態系サービス経済評価によれば、総額は2011年時点で125兆USドルに達しており、生態系サービスの衰退は人間社会活動に深刻な影響をもたらしている。

気候変動が生態系に与える影響に関しては、長期モニタリング、古気候学的分析、野外実験などで実証的証拠が集められてきたが、長期かつ広域の評価には数値モデルを用いたシミュレーションが有効である。特に、近年の温暖化研究では複数の社会経済シナリオ（SSP）、温室効果ガス濃度パス（RCP）、気候モデル予測を用いた多数ケースの評価を行うことが一般的となっており、そのような分析に対応するには数値モデル・シミュレーションが唯一の手法と言っている。しかし、生態系は非常に複雑かつ不均質であり、もたらされる生態系サービスは多岐に及んでいる。多くの要因を適切な手法で取り込み、複雑性や不均質性に対応したモデルを構築使用とすれば、そのモデル自体が極めて複雑化し不確実性も大きなものにならざるを得ない。そこで、実用的なデータ量と計算負荷の上で動作しつつ、必要な種類の推定データを与えるモデルを開発利用することが望ましい。

多くの自然生態系は、都市・住宅地や耕作地の域外に存在するため社会経済的要因との関わりが希薄だと捉えられることが多いが、それは必ずしも事実ではない。人為的な温室効果ガス排出による温暖化によって生態系が影響を受けるだけでなく、様々な経路で人間社会の諸セクターと生態系は相互作用を行っている。例えば、産業活動によって大気に排出された窒素酸化物は地表に沈着して富栄養化や施肥効果をもたらす。また、農耕地の拡大は食糧需要に影響を受けるが、それは森林破壊などの土地利用変化の一因となっている。森林に代表される生態系は、水源涵養機能によって人間社会に利用可能な水資源に影響を与える。このようなセクター間の相互作用と連環はネクサスと呼ばれるが、生態系を含めた分析は新しい研究分野であり、それに応じた研究手法やデータの開発が急務となっている。

## 2. 研究開発目的

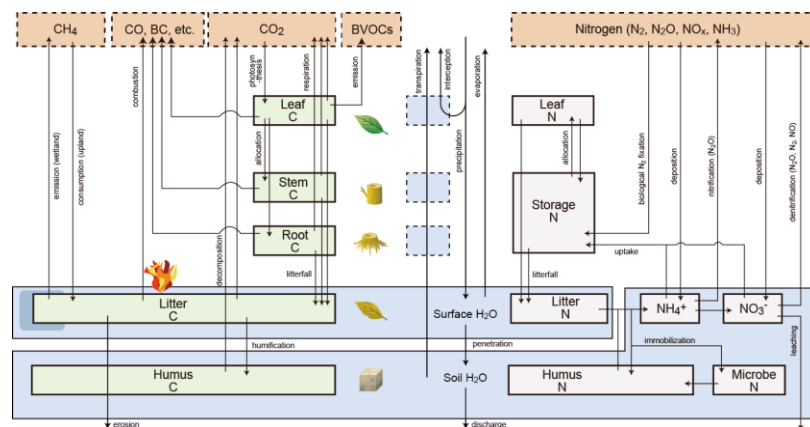
本サブテーマの研究開発目的は、本プロジェクトの基礎となっているリスクトレードオフの枠組みに沿って、気候変動による正負の影響、そして気候変動対策実施に伴う波及影響を評価する生態系モデルを開発し、分析を行うことである。生態系サービスに関与する諸変数を推定可能なモデルを開発し、その信頼性を向上させるための研究を行う。気候変動影響に関しては、近年の温暖化研究で実施されているシナリオベースの評価に対応し、国際的動向を踏まえた研究を行う。対策評価に関しては、プロジェクト実施中にパリ協定が採択されたことを踏まえ、大規模な温度上昇抑制策が講じられることを想定した研究が必要となった。例えば大規模植林やバイオ燃料作物栽培の拡大が、生態系に与える影響を、トレードオフやコベネフィットの観点から整理する。

## 3. 研究開発方法

### （1）生態系モデルの開発

気候変動が陸域生態系に与える影響・リスクや、対策実施に伴う影響を評価する場合、将来の大気中温室効果ガス濃度、土地利用、気候条件に基づいた予測を行うことになる。そのため、過去から現在のデータに基づく経験的モデルを用いると外挿に伴う不確実性が大きくなる危険性が

あり、生態系で行われる素過程をできるだけ科学的ベースのある数式（例えば化学反応論に基づくアレニウス式やミカエリス-メンテン式）で表現したメカニスティックモデル、またはプロセスモデルと呼ばれるモデルを用いることが望ましい。本課題では、陸域生態系で営まれる諸過程のうち、物質循環や生態系サービスに関係するものをできるだけ詳細に扱うモデルの1つであるVISIT（Vegetation Integrative SIMulator for Trace gases：図1）に関する研究開発を行った。VISITは植物群落の光合成生産を推定するモデルから出発しており、基盤的サービスの1つである一次生産を推定することができる。さらに炭素、水、窒素の循環に関する主要プロセスを導入することで、多くの生態系機能をシミュレートしている。一方で、生態系の動態に関する個体ベースの相互作用などは直接扱っておらず、計算を省力化している部分もある。VISITの開発は炭素循環からはじまり、 $\text{CH}_4$ や $\text{N}_2\text{O}$ など主要な温室効果ガスの交換を統合的に扱うことを目標として改良と拡張が加えられてきた。現在でも $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ を統合的な枠組みで扱える数少ないモデルの1つとして様々な基礎研究や応用が行われてきている。



図(2)-1 陸域生態系モデルVISITの構造図。左部分が炭素循環、右側が窒素循環、中央に水収支のスキームが示されている。矢印は物質のフロー、ボックスはストックを表す。

気候変動による影響とリスク評価、生態系サービスに関する分析を行う際には、モデル推定値のうち以下の6指標に注目した。

- ①植生バイオマス：生態系の炭素貯留および産物の供給サービスに関係
- ②土壌有機炭素：生態系の炭素貯留および土壌形成による基盤サービスに関係
- ③純一次生産量：生態系の供給サービスおよび基盤サービスに関係
- ④正味 $\text{CO}_2$ 収支：生態系の気候調節サービスに関係
- ⑤土壌流出：土壌形成による基盤サービスおよび炭素ストック減少リスクに関係
- ⑥火災放出：火災による被災リスクおよび大気への $\text{CO}_2$ 放出に関係

## (2) 気候変動リスクに関するモデル分析

気候変動がもたらすリスク分析のためにVISITモデルを用いた一連の分析を行った。ここでは5種類のSSP (1-5) に基づく土地利用変化データ、4種類のRCP (2.6、4.5、6.0、8.5)、そして各RCPに対応した5種類の気候モデル (GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL、MIROC-ESM-CHEM、NorESM) に基づくシミュレーションを行い、その出力結果を解析した。全球シミュレーションの空間分解

能は0.5度（約55kmメッシュ）であり、自然植生の分布はOlsonおよびRamankutty & Foleyのデータに基づいて与えた。気象データは（3）で説明されるISI-MIP仕様のものであり、過去については観測データによりバイアス補正が行われている。1951年から2099年までの計算を行ったが、それに先だって最初の30年分の気象データを繰り返し100回使用して3000年間のスピニアップ計算を行っている。土地利用変化のデータは、各メッシュ内の耕作地割合の変化として与えられた。

### （3）気候変動影響に関する不確実性解析

将来の気候変動に伴う影響・リスクを評価することは、適切な対策を講じる上で重要であるが、複数の大きな不確実性要因が残されている。これまでも将来の気候予測シナリオを用いて陸域生態系における影響評価が行われてきたが、いずれも少数のモデルやシナリオを用いたものであり、不確実性の全体像を系統的に解析した例はほとんどなかった。ドイツ・ポツダム気候変動影響研究所（PIK）の主導により、2012年からInter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project（ISI-MIP）が実施され、複数モデル×複数シナリオによる不確実性を考慮した影響評価プロジェクトが進められている。本課題は、ISI-MIPへの参加を通じて陸域生態系への気候変動影響を進めた。これは国際標準のプロトコルに沿ったシミュレーション解析を行うことができ、当研究グループの国際的プレゼンスを高める上で有効であった。ISI-MIPは複数のセクターにおける影響評価モデルで構成されるが、ここでは生態系を扱うBiomeセクターに参加した（表(2)-1）。

表(2)-1 ISI-MIP の biome セクターに参加した生態系モデルの一覧

モデル名	実行した実験	開発機関など	文献
Hybrid	RCP(2) x ESM(5)	Dynamic vegetation model developed in Cambridge University, UK	Friend and White (2000)
JeDi	RCP(2) x ESM(5)	Jena Diversity model developed in Max-Planck Institute, Germany.	Pavlick et al. (2012)
JULES	RCP(2) x ESM(5)	Joint UK Land Ecosystem Scheme developed in Centre for Ecology and Hydrology, Met Office Hadley Centre, and University of Exeter	Clark et al. (2011)
LPJmL	RCP(2) x ESM(5)	Lund-Potsdam-Jena model with managed Land developed in Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany	Sitch et al. (2003)
ORCHIDEE	RCP(2) x ESM(1)	Organized Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems model developed in Institut Pierre Simon Laplace, France	Krinner et al. (2005)
SDGVM	RCP(2) x ESM(5)	Sheffield Dynamic Global Vegetation Model developed in University of Sheffield, UK	Woodward and Lomas (2004)
VISIT	RCP(2) x ESM(5)	Vegetation Integrative Simulator for Trace gases model developed in National Institute for Environmental Studies, Japan	Ito and Inatomi (2012)

ISI-MIPの第1フェーズでは、気候変動に関するハイエンドとローエンドに焦点を当て、RCP2.6とRCP8.5における評価を行った。それぞれについて変動パターンが異なる5種類の気候モデル（GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL、MIROC-ESM-CHEM、NorESM）による予測データが提供され、シミュレーションの入力データとして使用した。生態系モデルによる計算出力は、変数別・所定の期間毎にファイルが分割され、NetCDF形式でPIKに提出された。一次的な解析の後、それらのデータは所定の手続きを経て一般ユーザへの公開が行われた。

2015年度よりISI-MIPは第2フェーズに入り、より踏み込んだ解析や実験が進められている。前半部（2a）では、各モデルの精度検証に立ち返り、過去（1951～2010年）の計算結果について観測データとの比較によるベンチマーキングが行われた。続く後半部（2b）では、パリ協定の採択を受けて、2℃または1.5℃目標に向けた影響評価のためのモデル解析が進行中である。

#### （4）地域スケールのリスク分析

過去の研究より、将来の気候変動は全球一様に進行するわけではなく地域偏差があり、さらに各種の影響も空間的に不均質に生じることが示唆されている。そのため、全球の解析に加えて、重要な地域に焦点を当てて詳細な解析を行う必要がある。陸域では、高緯度域や高標高域は積雪の減退によるフィードバックが作用して、平均よりも速い速度で温度上昇が進行することが指摘されている。そして、21世紀末までの温度上昇による影響も他地域と比べてより顕著であることが示唆されているため、ここではISI-MIP第1フェーズの出力データから緯度60度以北の高緯度域を対象に詳細な解析を行った。また、モンスーンアジアは日本が含まれることはもちろん、温暖化の進行に伴うモンスーン循環の変調が注目される地域であり、同様に地域解析の対象とした。北極域は凍土融解や亜寒帯林の消失について、またモンスーンアジアはモンスーン循環の変調について、ティッピングエレメント（地球物理学的臨界現象）の点でも注視すべき地域であり、それぞれ生態系機能や炭素ストックについて詳細な解析を行った。

#### （5）気候変動への対策実施に係る影響分析

既往研究により、化石燃料消費に伴う排出を削減するだけでは温暖化を抑制する上で検討が不十分であり、低炭素社会に向けたより包括的な検討が必要とされている。特にパリ協定で採択されたような1.5℃または2℃目標を達成するには、大気中の温室効果ガス濃度を大幅に低下させるための方策が必要であることが示唆されている（Fuss et al., 2014）。バイオ燃料の大幅な増産による化石燃料への代替、さらには地中埋設による隔離（BECCS）の実効性が要検討課題として浮上しており、それに伴う各種影響評価も本テーマで取り上げられた。そこでは、耕作地の転用などの食料・水資源とのトレードオフに注目したシナリオに加え、森林のバイオ燃料栽培地化シナリオも検討した。全世界の森林のうち約1割に相当する5億ヘクタールを21世紀末までに伐採し、バイオ燃料栽培地とするシナリオである。その面積はインドの国土面積にも匹敵し、現実にもそのような大規模な森林の転用が進むことは想像しがたいが、ある程度極端なシナリオを用いることで影響を端的に示すことができる。転用される森林の分布は、サブテーマ5の土地利用モデルを用いて推定が行われた。

別の温暖化対策として、破滅的な影響を回避するための緊急措置として気候工学（ジオエンジニアリング）に関する検討が行われている。気候工学の手法として、主に成層圏へのエアロゾル

注入などの日射量調節 (solar radiation management) と、空気中の二酸化炭素の人為的な固定除去 (carbon dioxide removal) が提案されている。二酸化炭素除去には植林によるものも含まれ、一部は上記のBECCSと共通する部分がある。一方、日射量調節はコスト的には比較的安上がりだが、不確実性が大きい手法とも考えられている。ここでは、気候工学実施に対する気候システムの応答を見るためのモデル相互比較プロジェクトであるGeoMIP (Kravitz et al., 2013) の出力を用いてシミュレーションに基づく影響評価を行った。気候工学的な対策を行わない場合 (RCP4.5相当)、温室効果ガスによる放射強制力を相殺するシナリオ (G3)、毎年一定量の硫酸エアロゾルを成層圏に注入するシナリオ (G4) について検討した。G3とG4シナリオでは、2020年から2069年まで気候工学的対策が行われた後、2070年以降は対策を中止することになっており、対策終了 (termination) に伴う影響にも注目した。エアロゾル注入による日射の直達成分と散乱成分は経験式を用いて分離し、それぞれについて植生キャノピーでは異なる吸光係数を割り当てることで日射の量的な減衰だけでなく散乱効果についても考慮した。

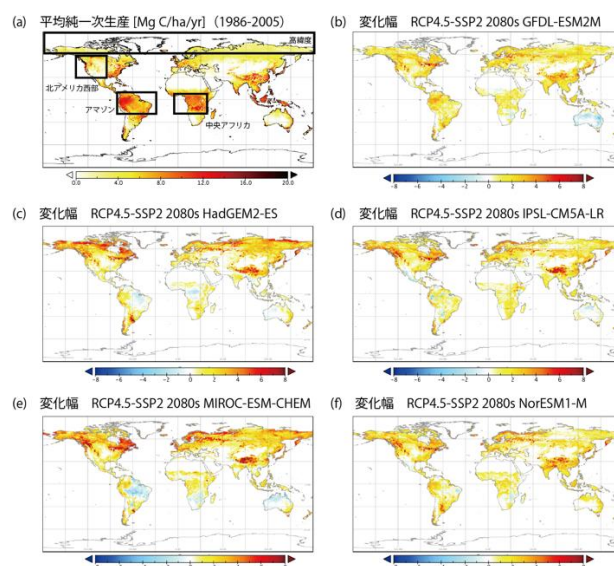
#### (6) 窒素ネクサス分析に関する研究

農地を含む陸域生態系と外部との窒素の出入りは、食料や水質、さらには健康にも影響を及ぼすため、統合陸域モデルを用いた最適利用検討の対象として重要なものに挙げられる。窒素は環境中で、工業的窒素固定により化学肥料として農地に投入されたものが、河川への溶脱やアンモニアでの揮散などにより流出する。また一部は $N_2O$ として大気に放出され、温暖化や成層圏オゾン破壊の一因となっている。このような窒素循環の視点から自然と人間社会の各セクターの連環 (ネクサス) を解析し、最適な窒素利用を提言する意義は大きいと考えられる。実際に、プラネタリー・バウンダリーの中で窒素をはじめとする栄養塩循環は最も切迫度が高い項目にあげられており、2016年からは国際窒素管理システムの準備作業が開始されている。ここでは、窒素ネクサス分析でモデル入力として必要となる、農耕地への窒素肥料投入に関するグローバルデータの開発を行った。国連食糧農業機関 (FAO) が提供している農業関係統計データセット (FAOSTAT) による国別の窒素肥料消費量を使用した。しかし、この統計データは欠損値を多く含み、肥料の種類 (アンモニア肥料、硝酸肥料) の情報も含んでいない。そこで、統計的な欠損値補間アルゴリズムを用いて連続的な時系列データを作成した。また、国別の情報を緯度経度0.5度メッシュにダウンスケーリングするにあたり、耕作地の分布だけでなく、作物種類や二期作の分布も考慮した。

## 4. 結果及び考察

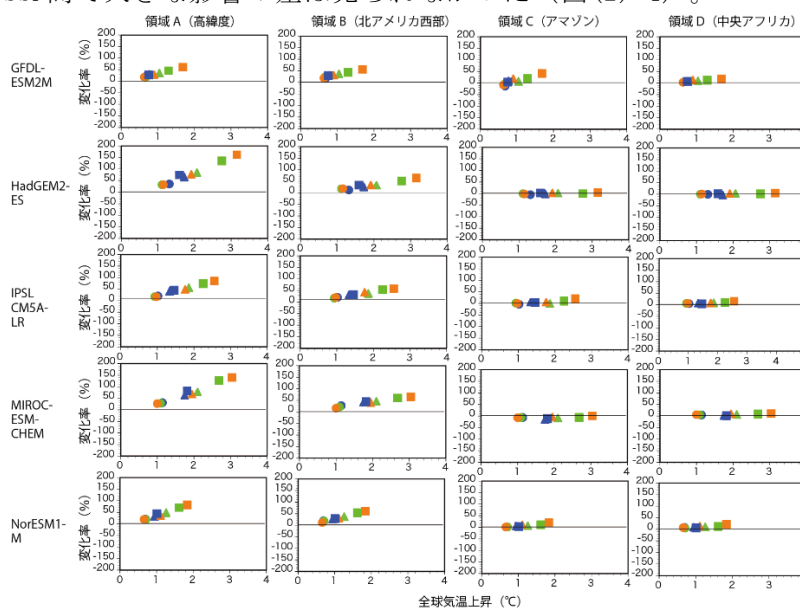
### (1) 気候変動リスクに関するモデル分析

複数シナリオを用いたシミュレーションに基づき、生態系に生じうる影響・リスクが評価された。

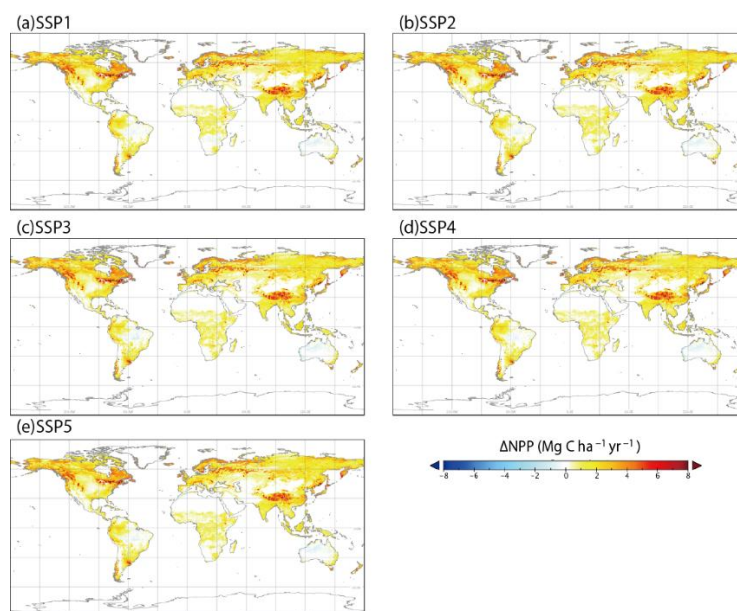


図(2)-2 陸域生態系モデルVISITで推定された純一次生産(NPP)に関するリスク評価結果の一例。(a)現在の気候条件下における平均的NPP、(b-f)気候モデルによる予測シナリオを用いた2080年代までの変化分布。(b)GFDL-ESM2M、(c)HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、(d)MIROC-ESM-CHEM、(e)NorESM1-M。(a)の矩形領域は図(2)-3の解析領域を示す。いずれも土地利用はSSP2シナリオに基づく。

植物の純一次生産(NPP)は、いずれのシナリオでも概ね増加していた(図(2)-2)。その原因は、大気CO<sub>2</sub>濃度上昇による施肥効果が大いと考えられる。次いで、温度上昇による主に中高緯度の植生における成長期間の延長効果があげられる。大気CO<sub>2</sub>濃度と温度上昇の間には厳密には線形では無いが比例関係が認められるため、概要として温度上昇幅とNPPの増加幅には関係性が認められた(図(2)-3)。SSP間で大きな影響の差は見られなかった(図(2)-4)。

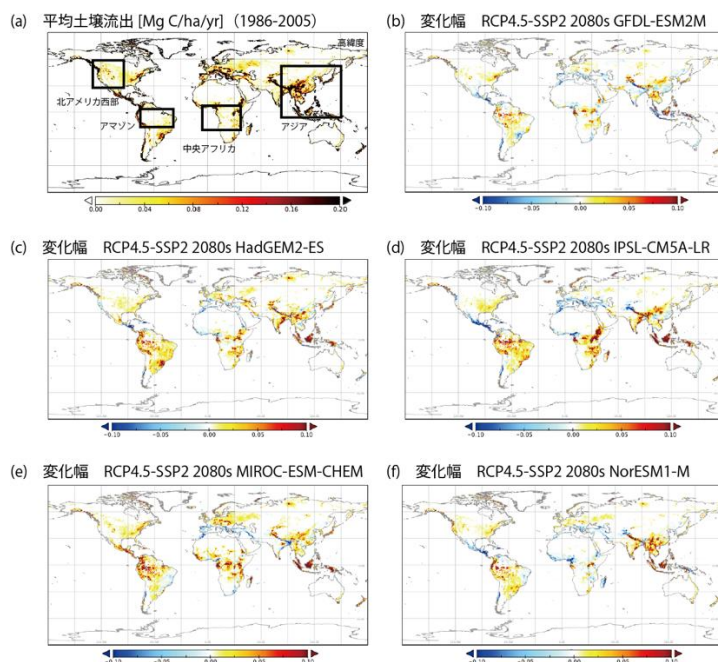


図(2)-3 代表的地域における全球温度上昇幅と純一次生産の変化幅の関係。上段から下段は異なる気候シナリオの結果を示し、色がRCPシナリオ(青 = RCP2.6、緑 = RCP4.5、橙 = RCP6.0)、記号が年代に対応する(● = 2020年代、▲ = 2050年代、■ = 2080年代)。

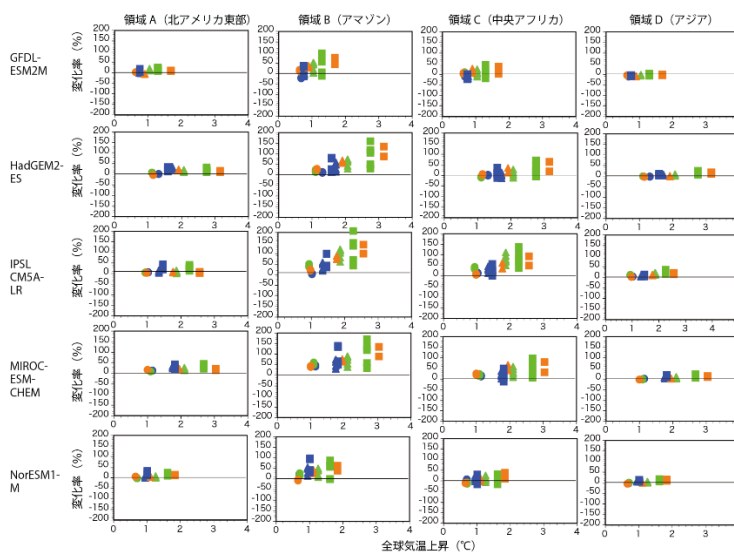


図(2)-4 SSP別の現在（1986～2005年）と2080年代（2070～2099年）の間の純一次生産変化（ $\Delta$ NPP）の分布。RCP4.5における5GCM予測を用いた推定結果の平均。

土壌流出量は、それ自体は大気CO<sub>2</sub>濃度や温度への感度は無いが、降水量の変化、植生からの有機物供給の変化、そして土地利用変化により影響を受ける。土壌流出の増加は、地力の低下を招き農地を含む生態系の生産力を低下させ、ひいては生物多様性の維持など様々な生態系サービスの劣化につながる。ここで行われた影響評価では、主に熱帯域やモンスーンアジアで降水量の増加に伴う土壌流出の増加が見られ、逆に地中海沿岸のように降水量が減少する可能性が高いとされる地域では土壌流出の減少傾向が見られた（図(2)-5）。土壌流出と全球温度変化の関係は、NPPほどきれいな線形関係ではなく、応答感度の地域差も見られた（図(2)-6）。

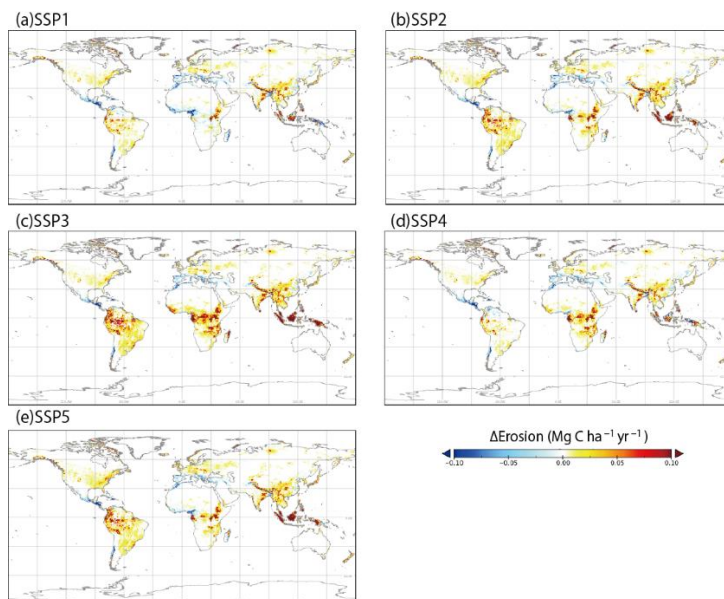


図(2)-5 陸域生態系モデルVISITで推定された土壌流出に関するリスク評価結果の一例。(a)現在の気候条件下における平均的土壌流出速度、(b-f)気候モデルによる予測シナリオを用いた2080年代までの変化分布。その他は図(2)-2参照。



図(2)-6 代表的地域における全球温度上昇幅と土壌流出の変化幅の関係。記号や色の違いに関する説明は図(2)-3参照。

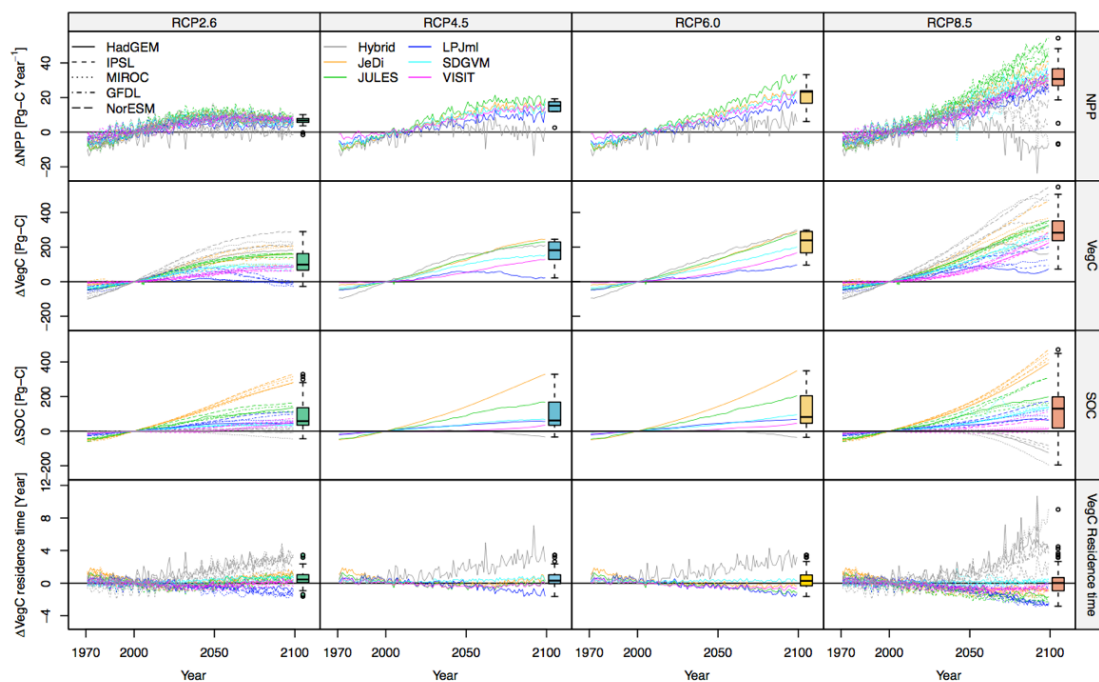




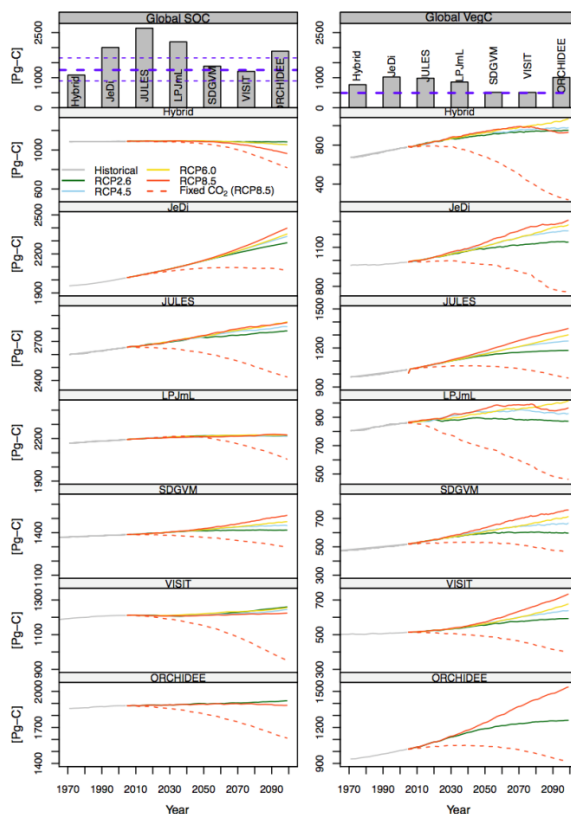
図(2)-7 SSP別の現在（1986～2005年）と2080年代（2070～2099年）の間の土壌流出量変化（ $\Delta$ Erosion）の分布。RCP4.5における5GCM予測を用いた推定結果の平均。

## (2) 気候変動影響に関する不確実性解析

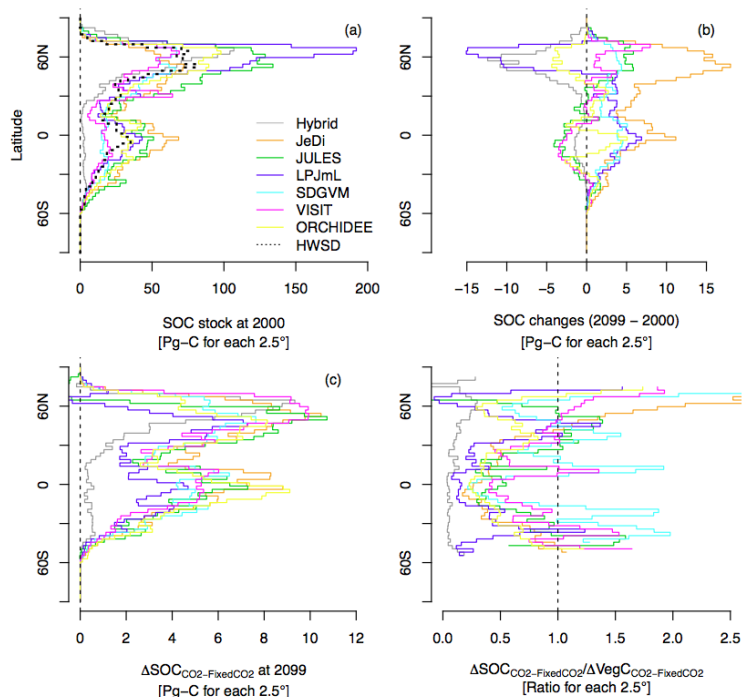
複数のモデルとシナリオに基づくシミュレーション結果（図(2)-8）の解析により、不確実性を考慮した気候変動影響・リスク評価を行った。



図(2)-8 異なるRCP（2.6-8.5）、気候モデル（線種の違い）、生態系モデル（色の違い）で推定された陸域生態系の主要変量の時間変化。上段から純一次生産（NPP）、植生バイオマス（VegC）、土壌有機炭素（SOC）、植生の平均滞留時間。



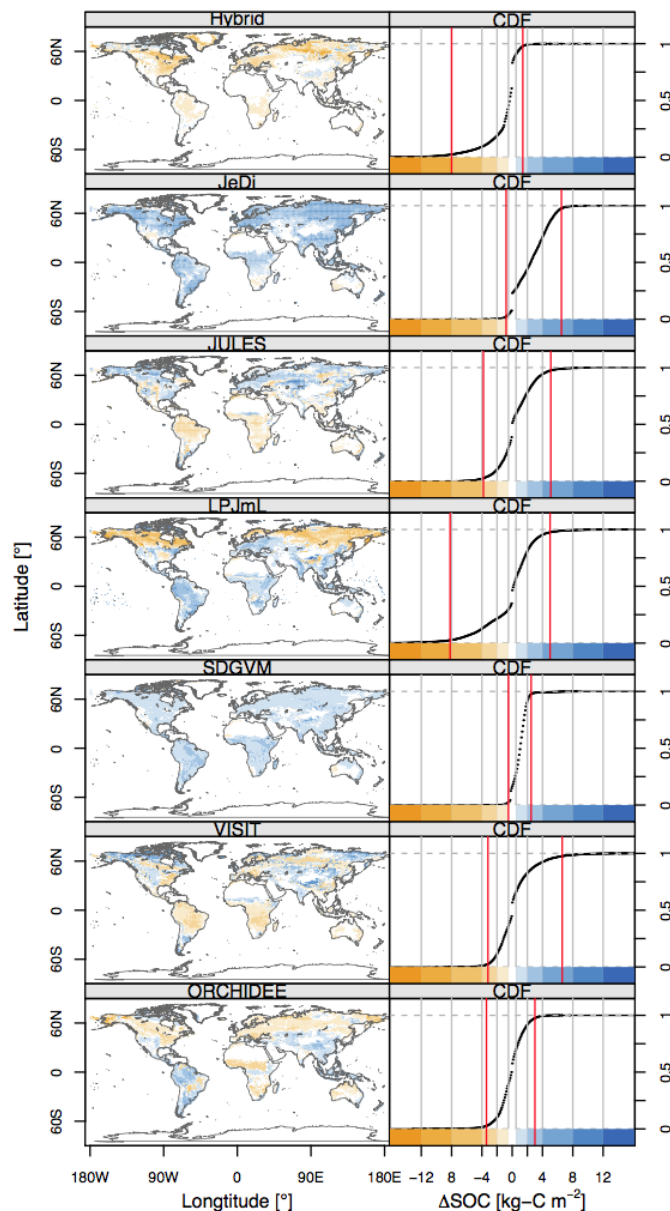
図(2)-9 陸域生態系モデル7種類により推定された将来の全球の土壌有機炭素 (SOC) および植生バイオマス炭素ストック (VegC)。最上段は観測ベースの現在値に関する比較。色はRCPの違いを示し、破線は大気CO<sub>2</sub>濃度を固定した実験の結果 (Nishina et al., 2014)。



図(2)-10 陸域生態系モデルで推定された(a)現在 (2000年) の土壌有機炭素ストック、(b)21世

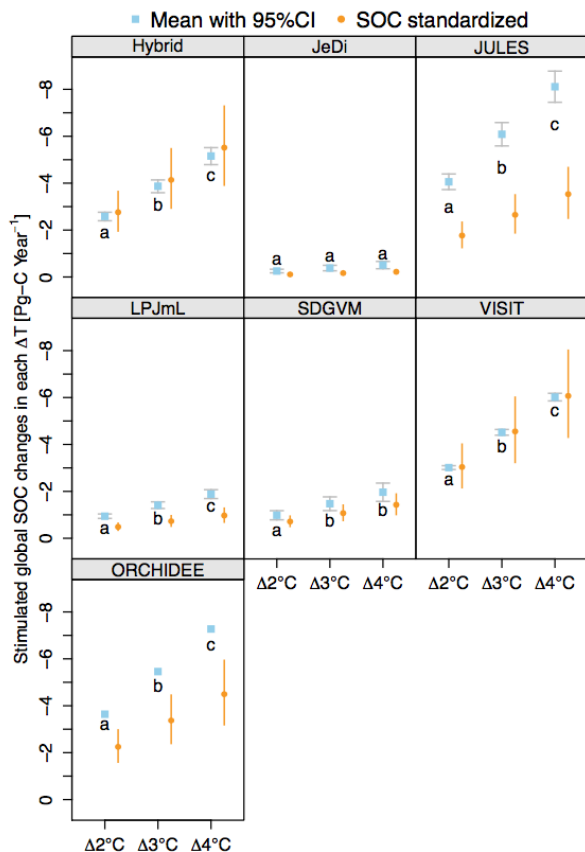
紀末までの変化量の分布、(c)大気CO<sub>2</sub>濃度固定実験での変化量、(d)大気CO<sub>2</sub>濃度固定実験での植生応答と土壤炭素応答の比率 (Nishina et al., 2014)。

陸域生態系における土壤と植生バイオマスの炭素ストックは、異なるシナリオと生態系モデルを通じて概ね増加する傾向が見られたが、その量的な応答感度には大きな差が見られた(図(2)-8)。変化の空間パターンにもモデル間の差は顕著に表れており、高緯度域で土壤有機炭素ストックが減少するモデル(例えばHybrid、LPJmL、VISIT、ORCHIDEE)と増加するモデル(JeDi、SDGVM)に分かれた(図(2)-11)。



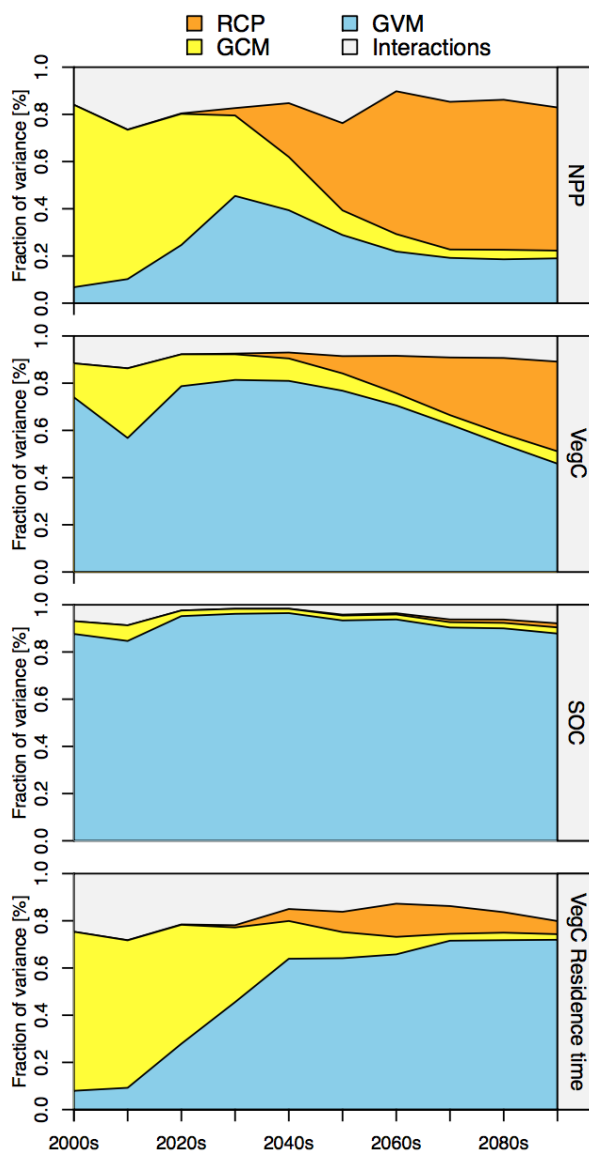
図(2)-11 陸域生態系モデル (ISI-MIPのbiomeセクターに参加した7種) で推定された21世紀末までの土壤有機炭素ストックの変化分布。右はグリッドベースの累積確率頻度分布を示す (Nishina et al., 2014)。

複数のシナリオを通じて温度分布と土壤有機炭素ストックの関係を見ることで、モデル間の差違を明確にした(図(2)-12)。全球の気温変化に対し大きく土壤炭素を減らすモデル(例えばHybridやVISIT)と感度が低いモデル(例えばJeDi、LPJmL、SDGVM)があり、それは一部は植生からの炭素供給にも原因があるが、微生物による分解速度の温度依存性の設定の差などに起因すると考えられる。



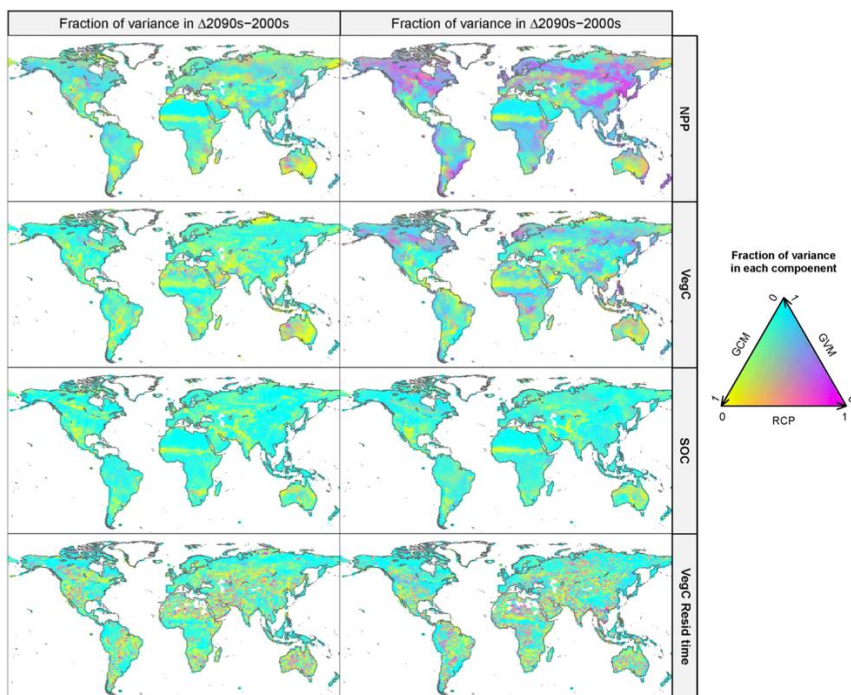
図(2)-12 異なるモデルによる将来の気温変化(Δ=2~4°C)と土壤有機炭素ストックの変化速度の関係(Nishina et al., 2014)。

RCP、気候モデル、生態系モデルの組合せにより異なる推定結果が得られることが分かったので(図(2)-8)、それぞれの寄与率を分散分析の手法により分離した(図(2)-13)。植生の純一次生産に関しては、21世紀前半は気候モデルによる予測シナリオ間の差違が最も強く影響しており、一時的に生態系モデル間の差の影響が強くなるが、後半にかけてRCPの影響が優勢となる。これはRCP間の大気CO<sub>2</sub>濃度上昇による施肥効果の差が現れていると考えられる。植生バイオマスへの応答は、純一次生産の傾向をなぞる部分もあるが、生態系モデル間差の影響が強く表れていた。これは植生内の同化産物分配、枯死率、呼吸消費など光合成生産以外のプロセスにおけるモデル間差が大きいことを示唆している。土壤有機炭素(SOC)の差違においてその傾向はさらに強まり、ばらつきのおよそ大半は生態系モデル間の差違に起因するとする結果が得られた。

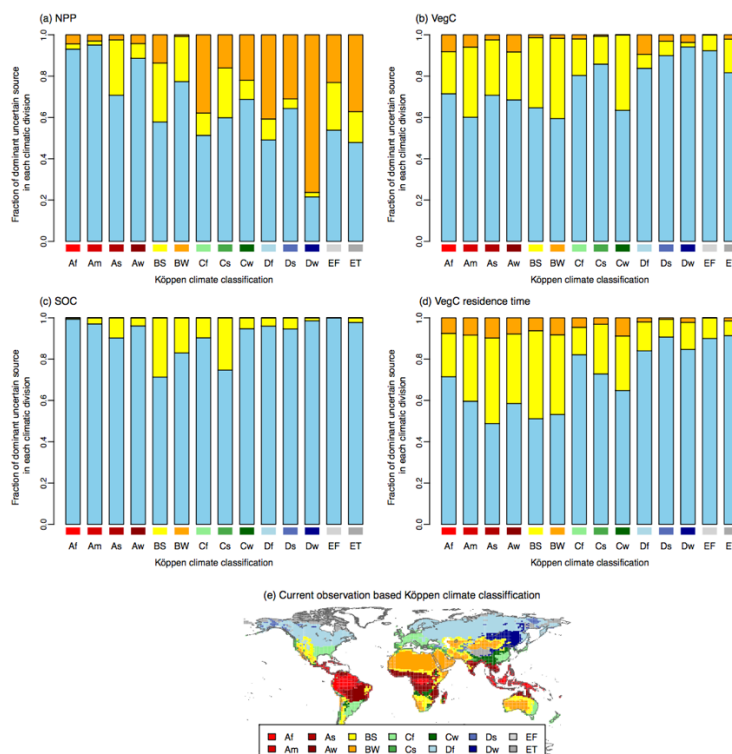


図(2)-13 複数シナリオ・モデルによる将来影響評価の結果（全球合計）に関する不確実性の寄与度。オレンジはRCP、黄色は気候モデル（GCM）、青は生態系モデル（GVM）、灰色はそれらの相互作用の寄与を示す（Nishina et al., 2015）。

同様な不確実性分離評価を格子点ベース（図(2)-14）および植生タイプ別（図(2)-15）に実施した。植生による純一次生産については、全球合計でRCPの影響が見られていたが、それは特に温帯や亜寒帯の森林で顕著であり、逆に熱帯林では生態系モデルの影響が強かったことが分かった。土壌炭素については一様に生態系モデル間の差が大きく、草原など降水量変動の影響が強い一部地域では気候モデル間の差が影響を決定付けていた。植生タイプ別に見ると、冬季の降水量が少ない亜寒帯林で特に純一次生産に対するRCPの影響が強い、熱帯とツンドラでは土壌炭素の違いはほぼ全て生態系モデル間の差に起因するなどの特徴が明らかとなった。土壌有機炭素の推定のばらつきに対してRCPの違いはほとんど影響していなかった。



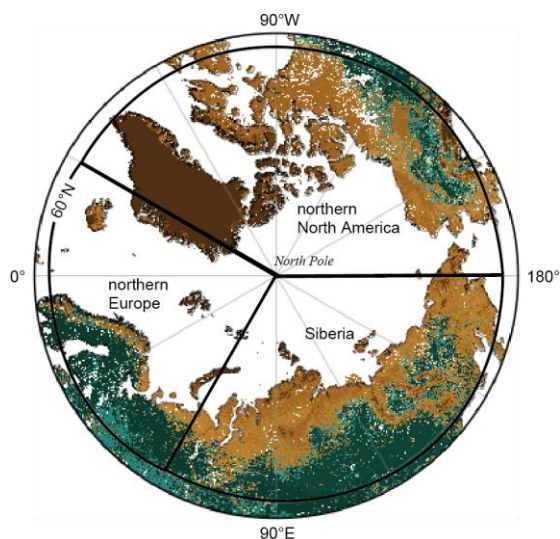
図(2)-14 各格子点における推定のばらつきに対するRCP、気候モデル、生態系モデルの寄与。左が2050年代まで、右が2090年代までの差違に対する結果 (Nishina et al., 2015)。



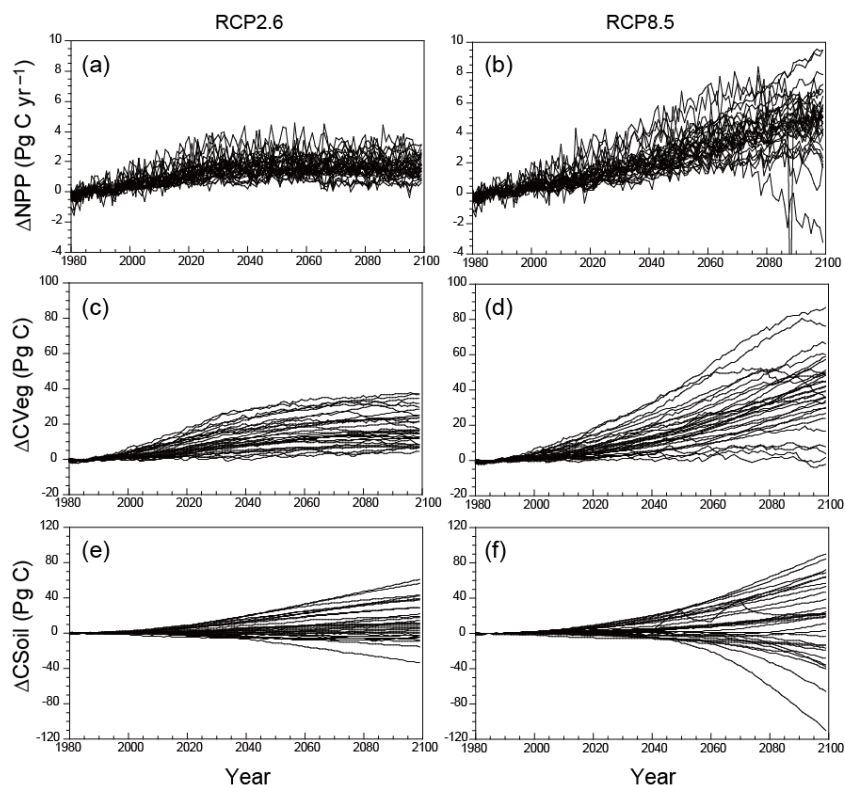
図(2)-15 植生タイプ(ケッペンの気候帯に基づく区分:下図)毎の推定のばらつきに対するRCP、気候モデル、生態系モデルの寄与 (Nishina et al., 2015)。

### (3) 地域スケールの生態系リスク分析

前項までに行われた全球シミュレーションに基づく解析の中で、特に注目される高緯度域(図(2)-16)とモンスーンアジアについて詳細な解析を行った。

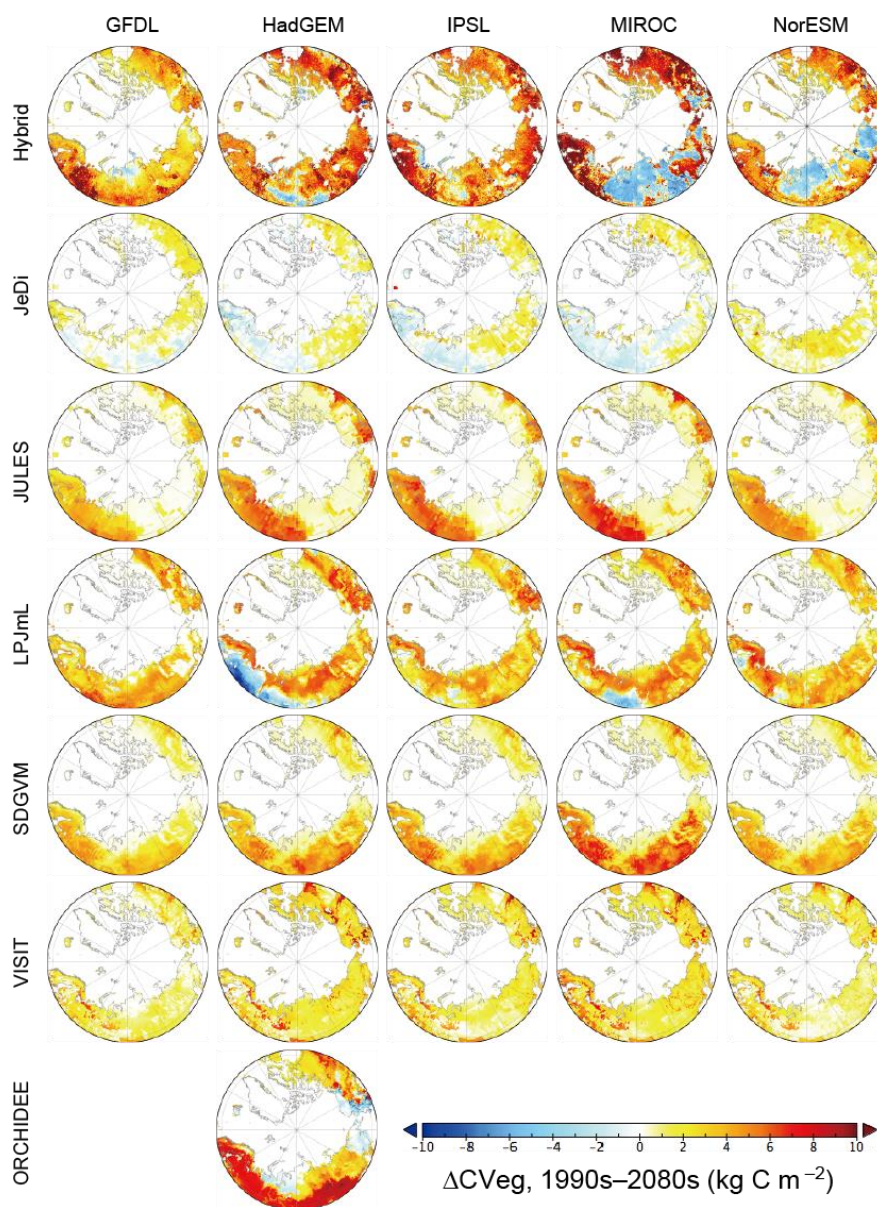


図(2)-16 解析対象とした高緯度域における植生分布。緑が森林、茶色はそれ以外のツンドラ、極沙漠、雪氷域を示す。



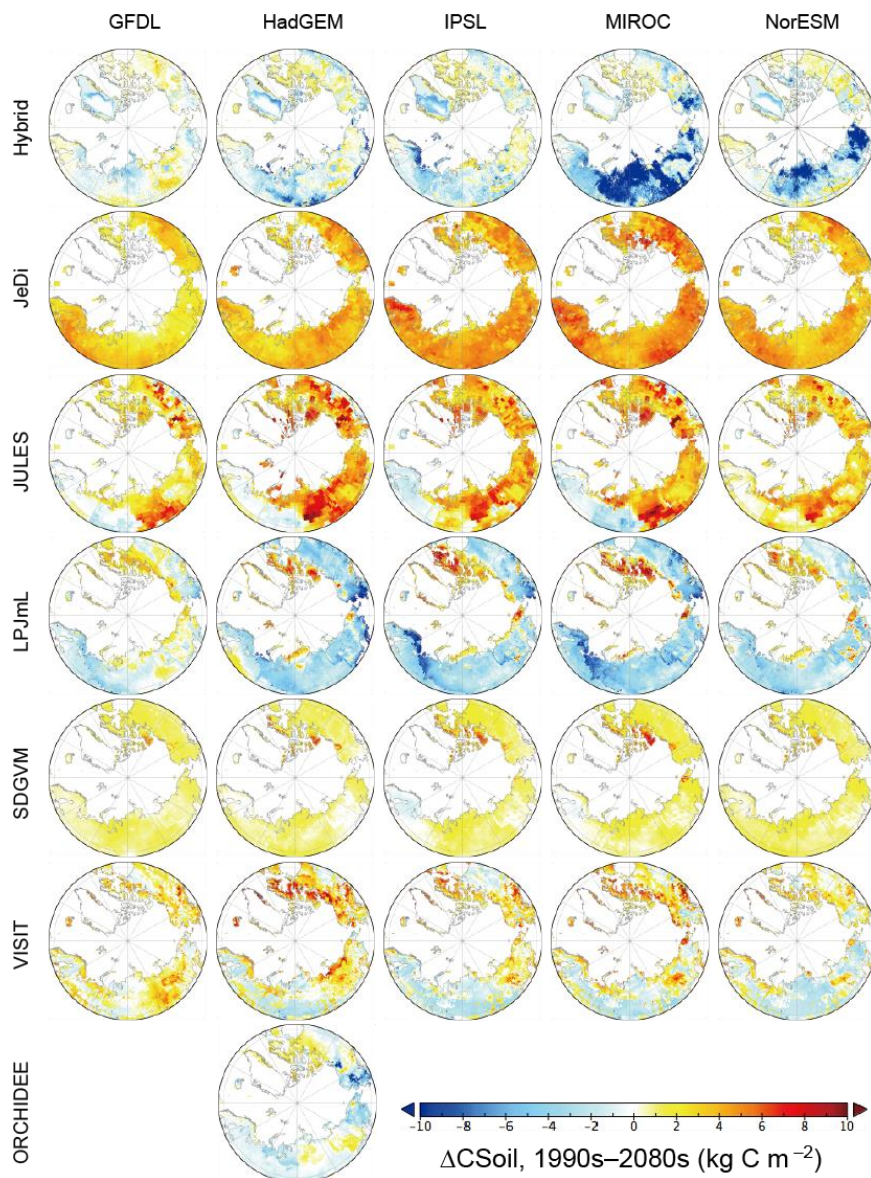
図(2)-17 高緯度域(図(2)-13)における複数シナリオ・モデルで推定された純一次生産(NPP)、植生バイオマス(CVeg)、土壌有機炭素(CSoil)の1990年からの変化の時系列。左がRCP2.6、右がRCP8.5の結果。

7種類の生態系モデルによる、純一次生産力、植生バイオマス、土壌有機炭素の変化を調べた（図(2)-17、(2)-18、(2)-19）。ISI-MIPでは複数の気候シナリオを用いた評価が行われたが、温室効果ガス排出が少ないシナリオ（RCP2.6）でも、植生には30%以上のバイオマス変化など大きな影響が引き起こされる可能性が高いことが示唆された。土壌炭素は比較的長い時間スケールを持ち、現在の生態系モデルでの予測には不確実性が大きいが、温室効果ガス排出が多いシナリオ（RCP8.5）では北米の北極沿岸（図上部のカナダ・ハドソン湾からアラスカにかけて）などで植生バイオマスの50%以上の増加といった大きな変化が生じる可能性が高いことが示された（図(2)-20）。このような研究結果は、将来の気候変動予測の高精度化を促し、高緯度域の生態系における適応を検討する際にも有用と考えられる。



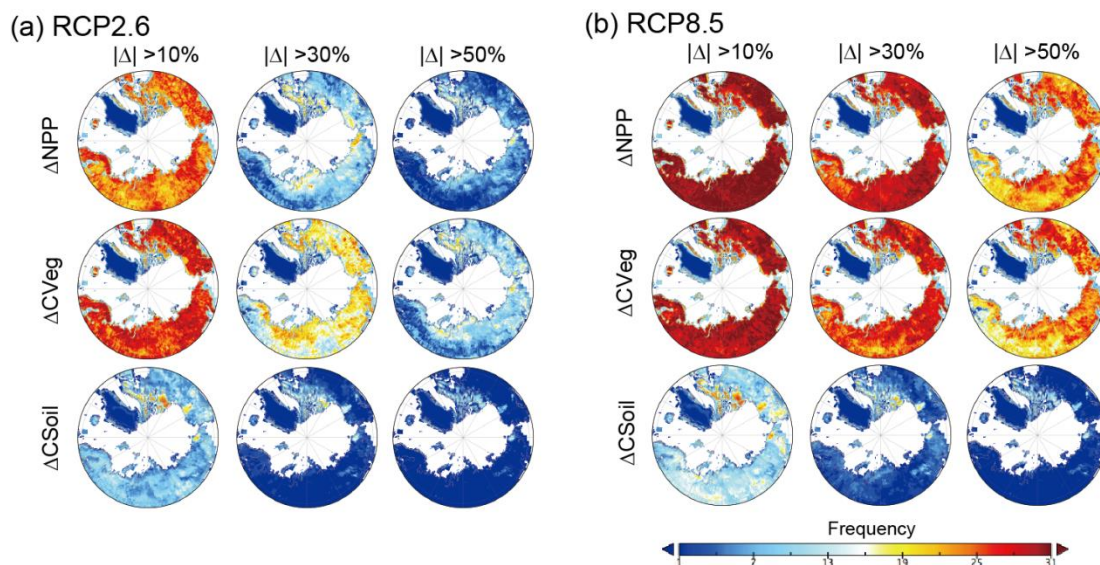
図(2)-18 7種類の生態系モデルによる1990年代から2080年代までの植生バイオマスの変化分布。列の違いは使用した気候モデルによる予測シナリオの違い。RCP8.5における結果。



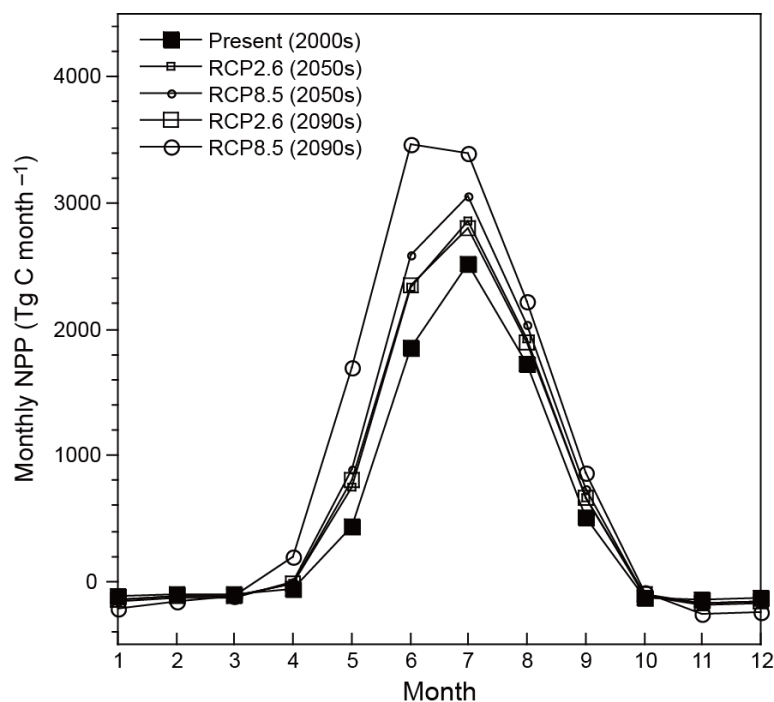


図(2)-19 7種類の生態系モデルによる1990年代から2080年代までの土壌有機炭素の変化分布。列の違いは使用した気候モデルによる予測シナリオの違い。RCP8.5における結果。

複数のモデルとシナリオに基づいた評価を行うことにより、影響が発生しやすい場所や時期を示すことが出来た。観測による影響検出に更なる示唆を与えることを目的に、影響が発生しやすい季節に関する検討も行った。純一次生産の季節変化は、衛星観測による植生指数の変化や現地観測によるフラックスと対応させやすいため、影響検出に有用な生態系機能指標である。図(2)-21に示されたように、1年の間では成育期間の初期にあたる5、6月に特に将来的な増加が顕著に生じることが示された（逆に成育期間終盤の秋季における生産量の差は大きくない）。これは生物季節的な応答も寄与していると考えられる。従って、この成育期間の初期に観測を重点化し、データを詳細に分析することで気候変動の影響を早期かつ高い確度で検出できる可能性が高まると考えられる。



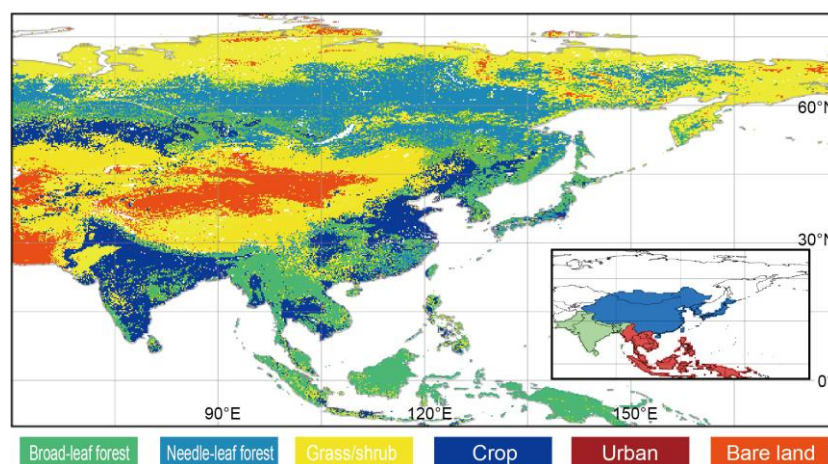
図(2)-20 複数のシミュレーション結果に基づくリスク評価例。一定規模（±10～50%）の変化を推定したシミュレーションの一致数からリスクの高さを求めた。(a)RCP2.6、(b)RCP8.5の結果。



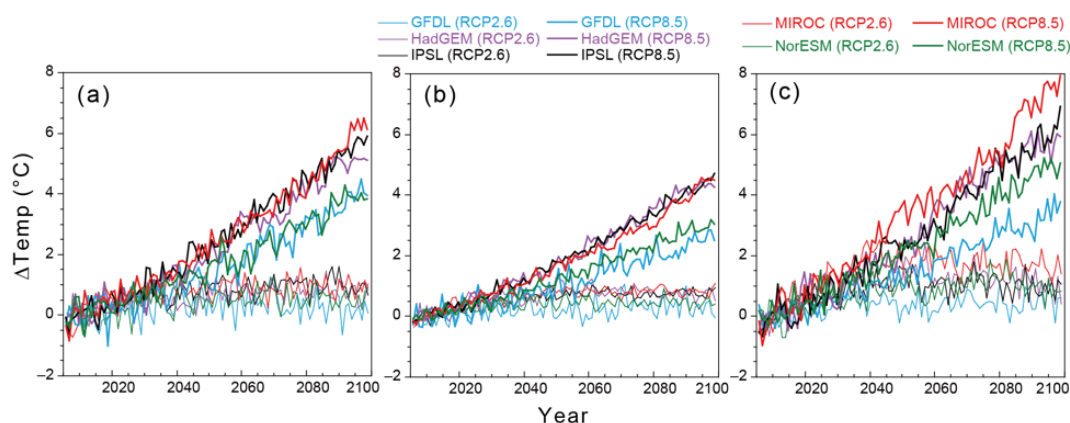
図(2)-21 高緯度域における月別純一次生産（NPP）現在から将来までの変化。複数モデルによる予測結果の平均を示す。

モンスーンアジア地域（図(2)-22）は、東南アジアの熱帯多雨林からシベリアの亜寒帯林にまたがる特徴的な生態系から構成されており、産物供給や気候調節など様々な生態系サービスをもたらすことでこの地域に暮らす数十億人の生活を支えている。将来の気候変動（図(2)-23、図(2)-24）に伴って、この地域の陸域生態系にどのような変化が生じるかは、温暖化への緩和策や

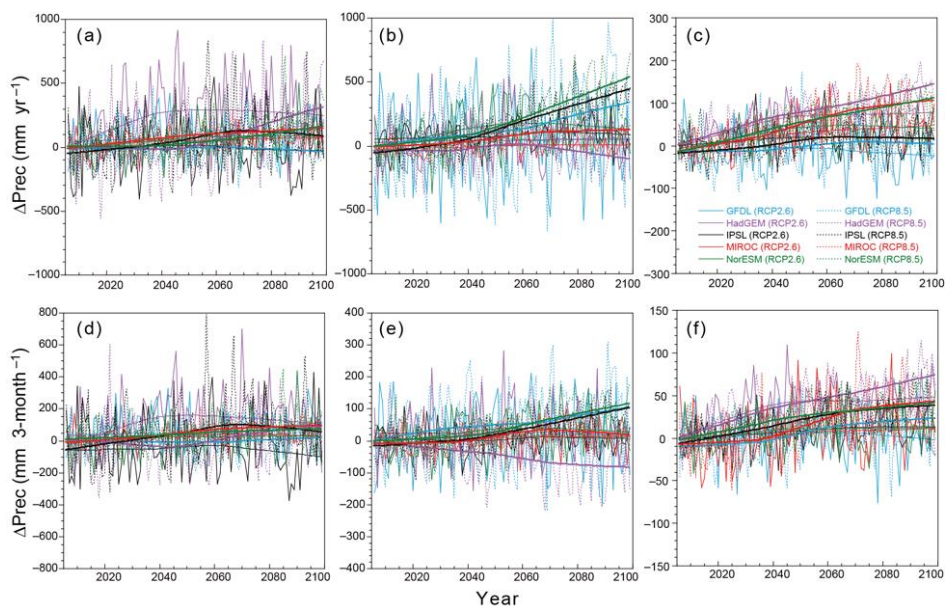
適応策を考える上で極めて重要な問題である。ここでの解析では、CO<sub>2</sub>濃度上昇による施肥効果等により植生の生産力は現在と比較して9~45%増加し、それに伴うバイオマスの増加が生じる可能性が示された（図(2)-25、図(2)-26）。土壌炭素も少数の結果では減少が見られたが多くは増加しており（図(2)-27）、シミュレーション間のばらつきはなお大きいものの、生態系全体として正味の炭素吸収が生じていた。多数の結果を横断的に解析し、全体を通して共通性の高いパターンを抽出したところ（図(2)-29）、チベット高原や南アジアの一部には温度上昇幅を小さく抑える低位のシナリオであるRCP2.6条件下でも生産力や土壌炭素量に相当の影響が生じる可能性が高い地域が見られた。一方、温暖化がより進行するRCP8.5の場合では、東アジアや南アジアの多くの地域で強い影響が見られる可能性が高いことが分かった。また、本論文では気候変動による生産力や炭素ストックの極端な増加・減少が出現する頻度や、観測からの影響検知への示唆に関する議論も行った。これらの結果は、気候とその影響の予測、対策立案に有用な示唆をもたらすと期待される。



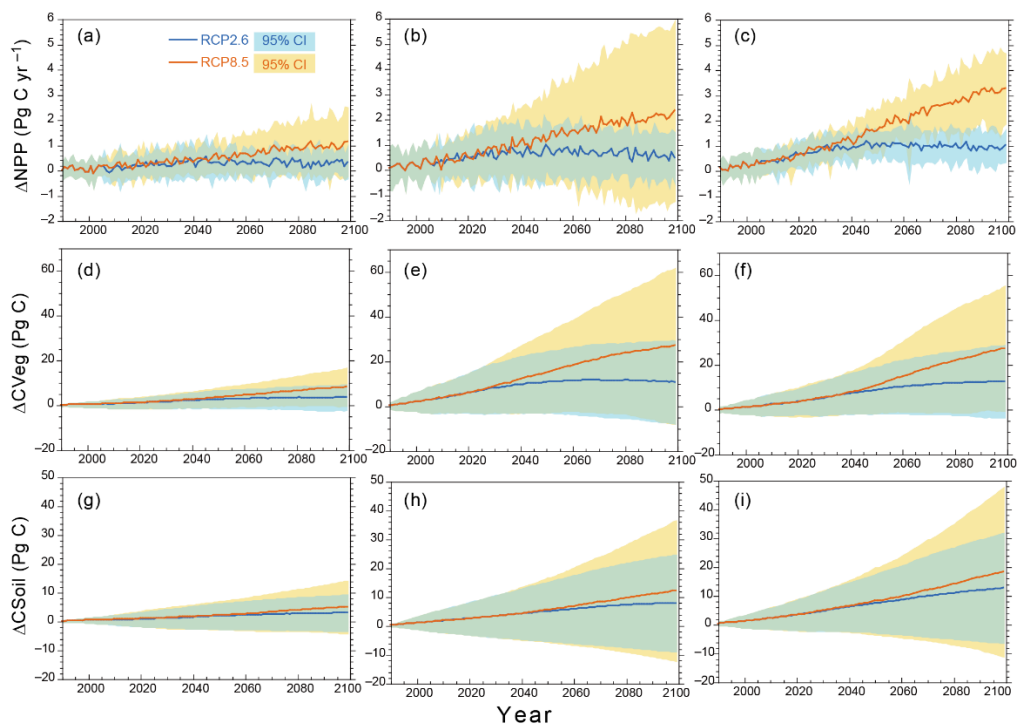
図(2)-22 モンスーンアジア地域の植生分布。右下の挿入図は南アジア、東南アジア、東アジアの領域を示す。（Ito et al., 2016）



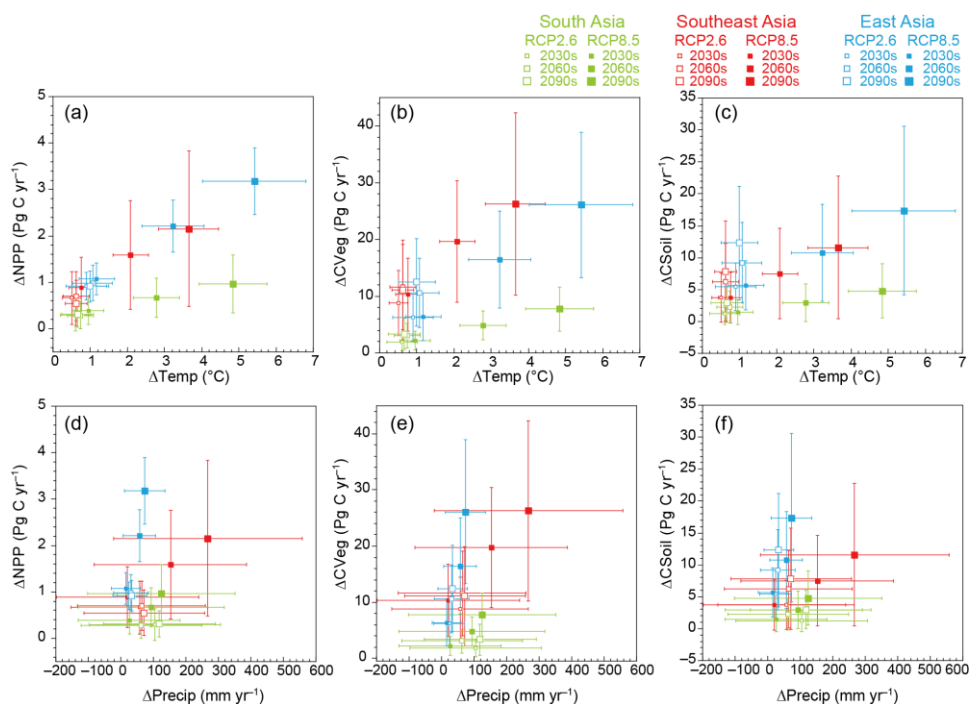
図(2)-23 モンスーンアジア地域における将来の温度上昇パターン。(a)南アジア、(b)東南アジア、(c)東アジア。（Ito et al., 2016）



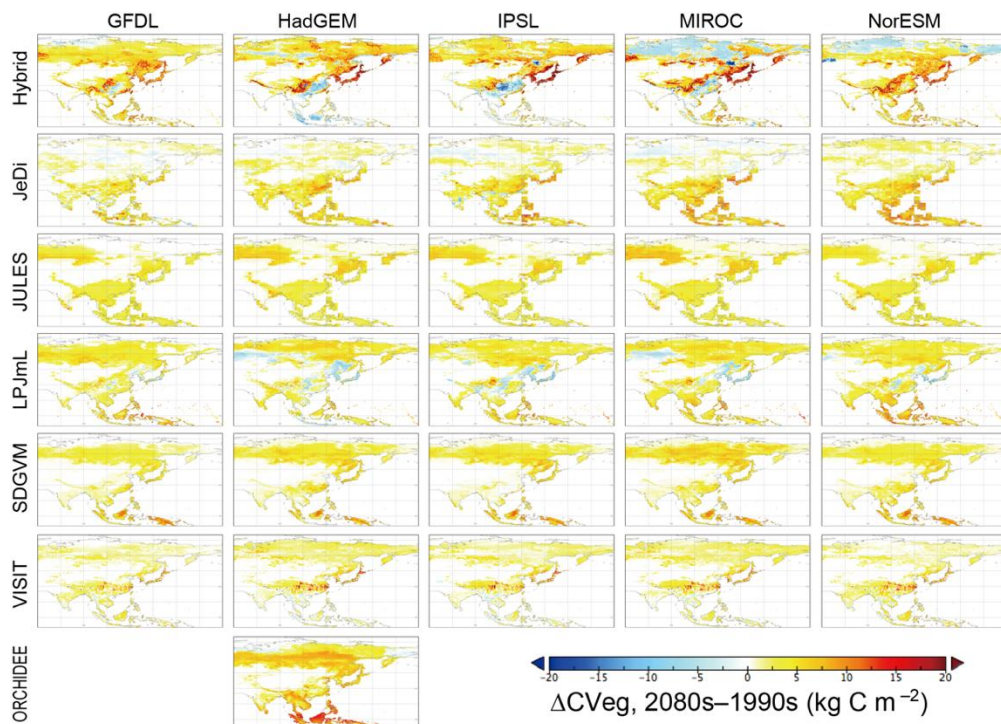
図(2)-24 モンスーンアジア地域における将来の降水量変化パターン。(a, d)南アジア、(b, e) 東南アジア、(c, f)東アジア。(a, b, c)年間、(d, e, f)雨季の降水量。(Ito et al., 2016)



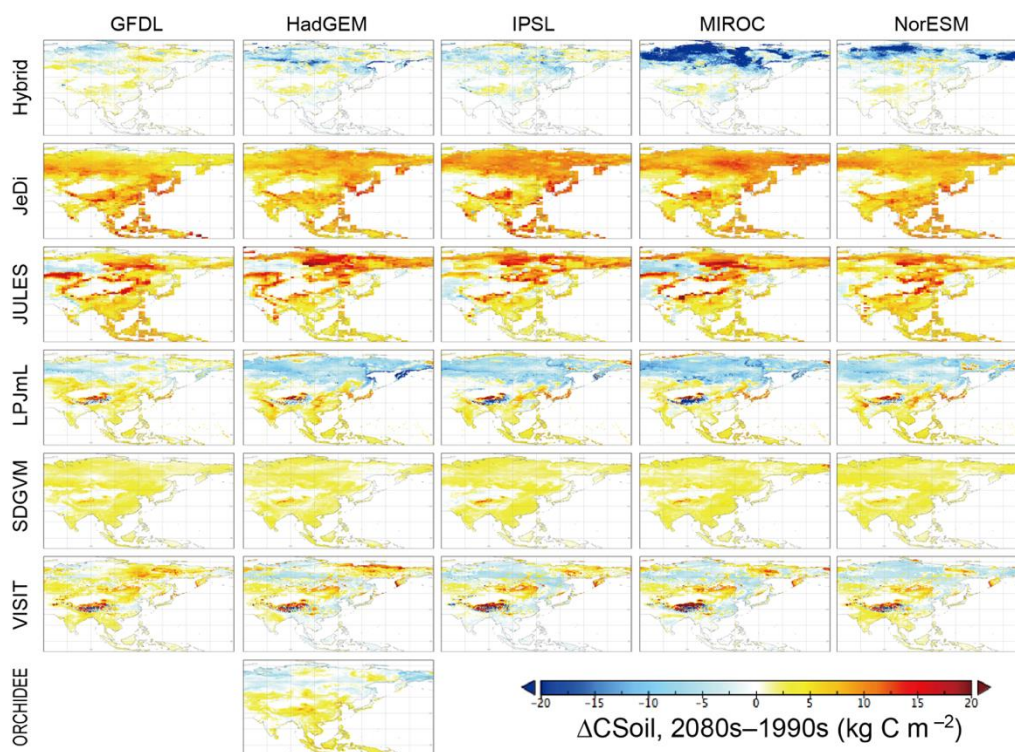
図(2)-25 陸域生態系モデル(7種類)によって推定されたモンスーンアジア地域における生態系機能量の将来変化。上段:純一次生産(NPP)、中段:植生バイオマス(CVeg)、下段:土壌有機炭素(CSoil)。(a, d, g)南アジア、(b, e, h)東南アジア、(c, f, i)東アジア。(Ito et al., 2016)



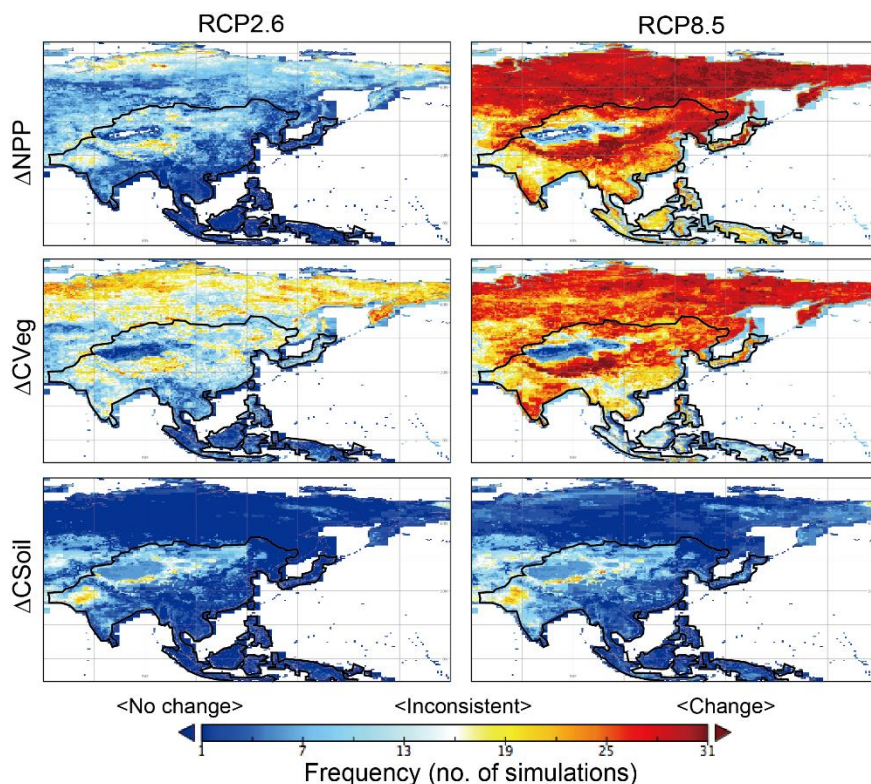
図(2)-26 モンスーンアジアにおける気候変化と生態系機能変化の関係。(a, d)南アジア、(b, e)東南アジア、(c, f)東アジア。(a, d)純一次生産(NPP)、(b, e)植生バイオマス(CVeg)、(c, f)土壌有機炭素(CSoil)。(Ito et al., 2016)



図(2)-27 7種類の生態系モデルによる1990年代から2080年代までの植生バイオマスの変化分布。列の違いは使用した気候モデルによる予測シナリオの違い。RCP8.5における結果。(Ito et al., 2016)

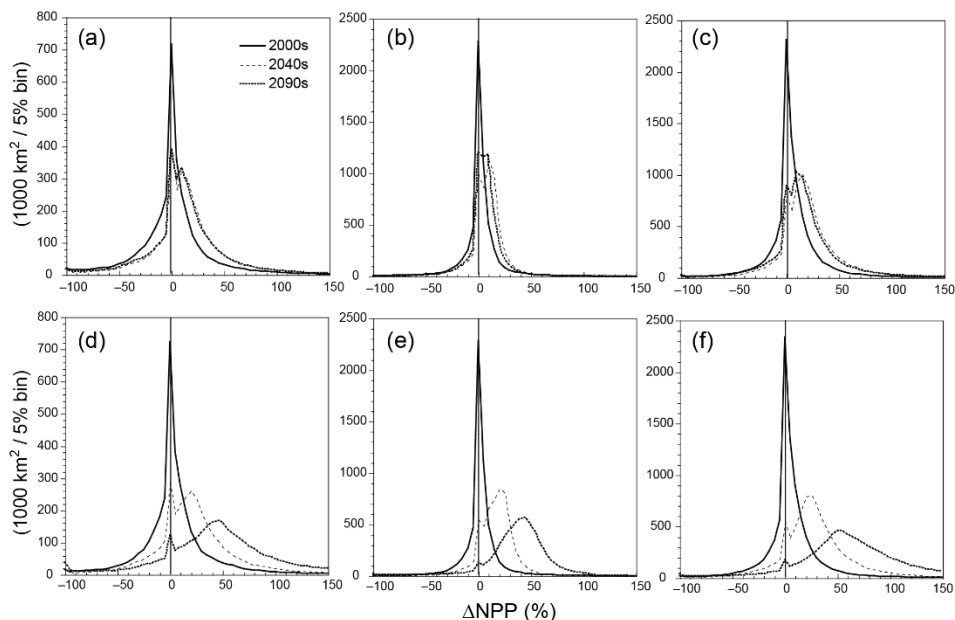


図(2)-28 7種類の生態系モデルによる1990年代から2080年代までの土壌有機炭素の変化分布。列の違いは使用した気候モデルによる予測シナリオの違い。RCP8.5における結果。(Ito et al., 2016)

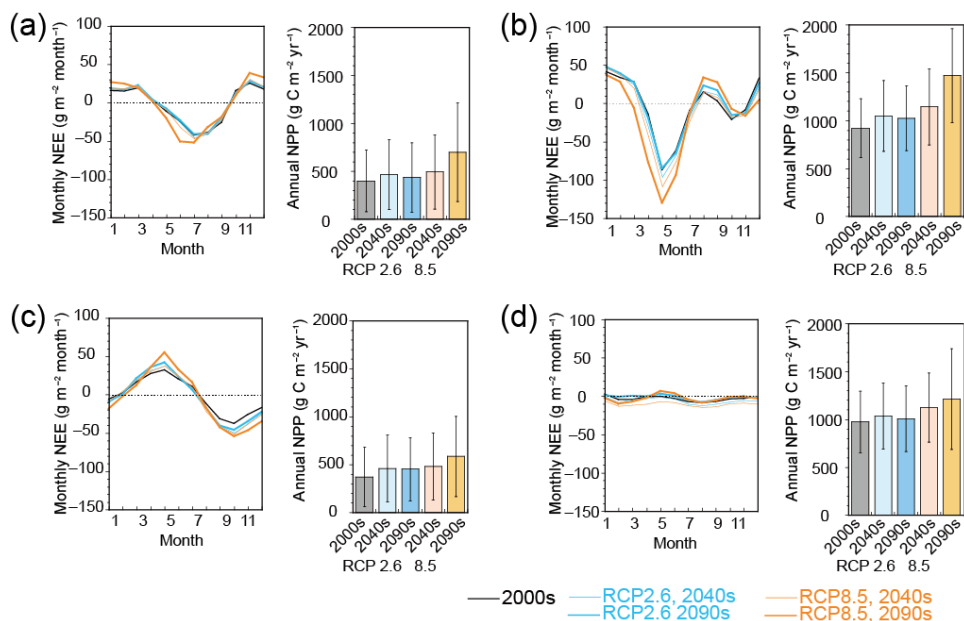


図(2)-29 複数のシミュレーション結果に基づくリスク評価例。一定規模(±30%)の変化を推定したシミュレーションの一致数からリスクの高さを求めた。左: RCP2.6、右: RCP8.5の結果。

リスクおよび観測の観点から更に詳細な解析を行った。推定された将来影響から極端な増減の発生頻度を調べたところ、RCP8.5では21世紀末までに100%を超える変化の頻度が大幅に増えるが、RCP2.6では現在と大差ない水準まで抑え込めることが分かった（図(2)-30）。また、アジア地域の代表的な観測サイトにおけるデータを抽出し、そこで将来的にどのような変化が観測されるかを示した（図(2)-31）。このような情報は、生態系の観測や適応の検討に有用と考えられる。



図(2)-30 モンスーンアジア地域における純一次生産（NPP）変化の頻度分布。(a, b, c)RCP2.6、(d, e, f)RCP8.5。(a, d)南アジア、(b, e)東南アジア、(c, f)東アジア。（Ito et al., 2016）

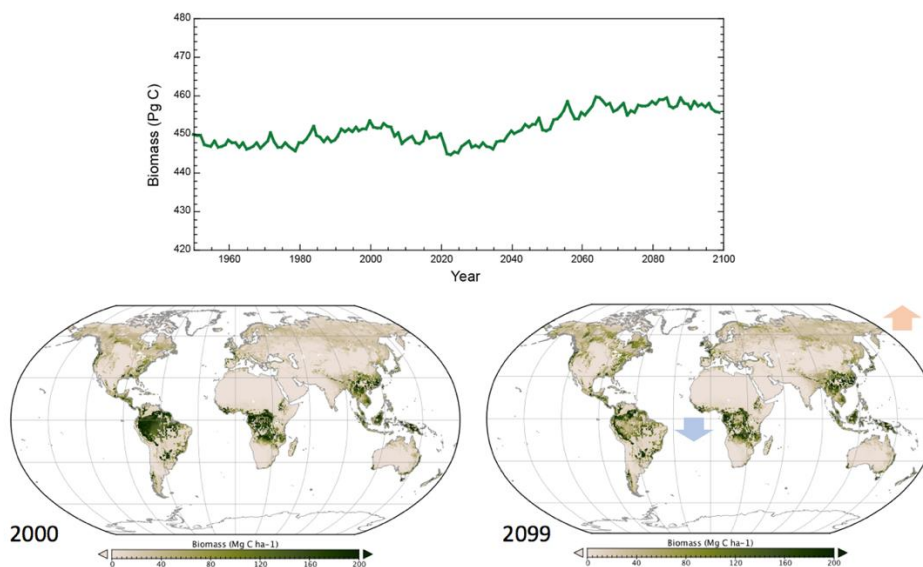


図(2)-31 アジア地域の代表的サイトにおける月別正味CO<sub>2</sub>交換（NEE）と年間純一次生産（NPP）の予測結果。(a)中国・海北、(b)日本・岐阜高山、(c)インド・ベツル、(d)マレーシア・パソ。（Ito et al., 2016）

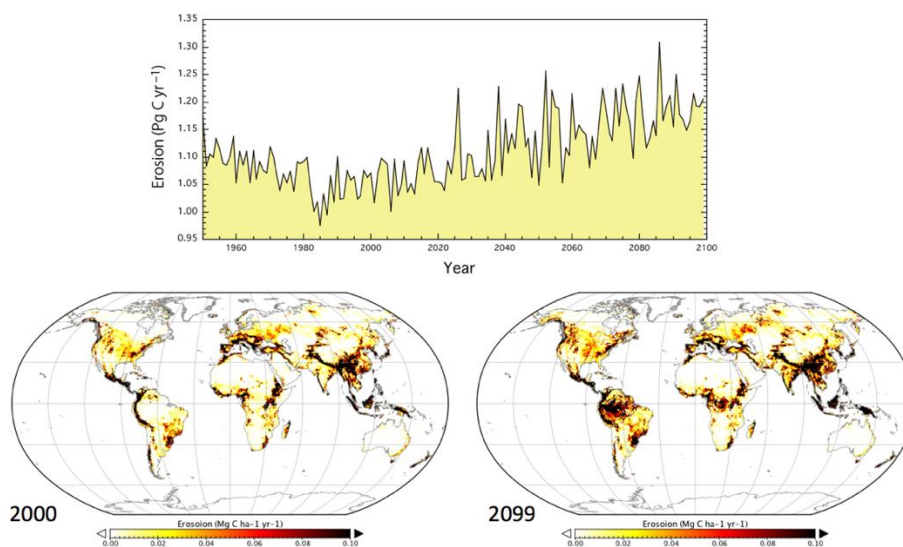
#### (4) 気候変動への対策実施に係る影響分析

##### ① バイオ燃料増産による影響

シナリオで設定された5億ヘクタールの土地利用は、主に熱帯・亜熱帯の自然植生をバイオマス燃料栽培に転換することで行われた。そのため、それらの地域では本来の植生バイオマスが大幅に失われ、それは中高緯度の植生成長促進による増加分を大幅に打ち消す規模であった（図(2)-32）。その結果、植被による保護が失われ、アマゾン河流域やコンゴ盆地など熱帯での土壌流出が大幅に増加することが予想された（図(2)-33）。



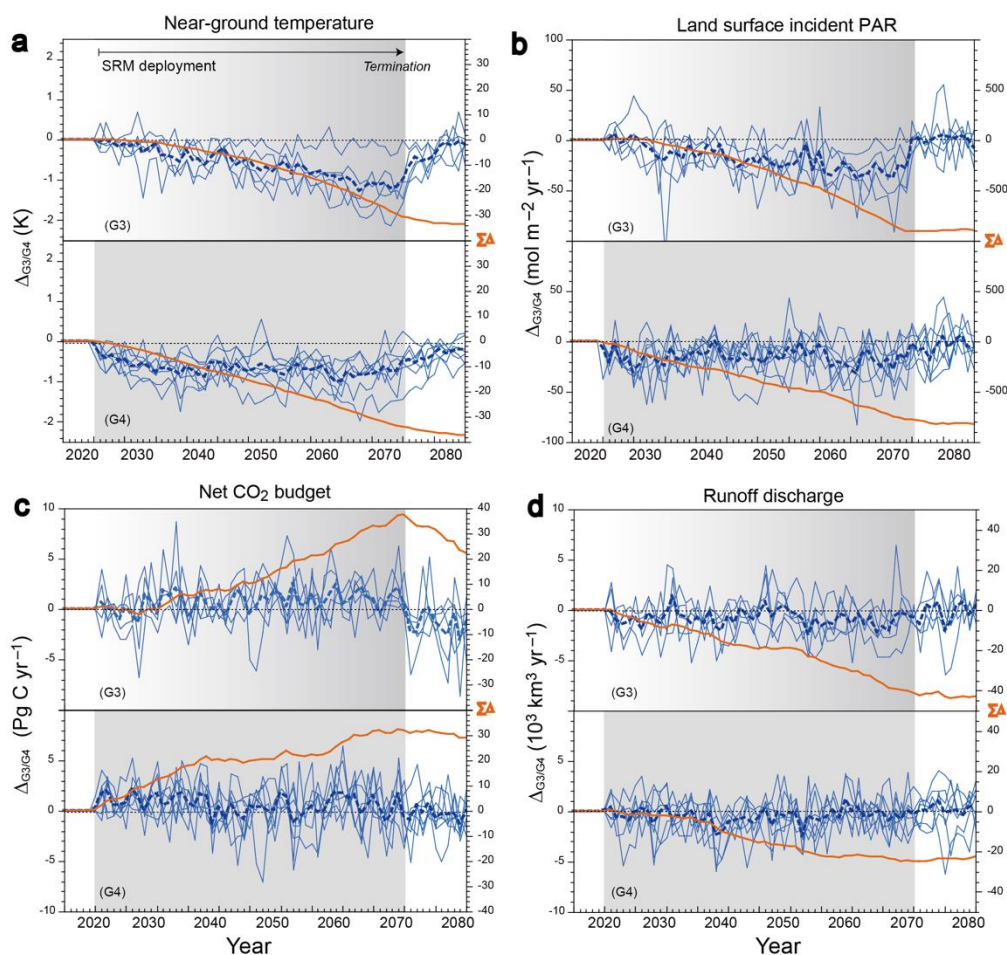
図(2)-32 バイオ燃料栽培のための自然植生転換シナリオを用いて計算された植生バイオマス変化。上：植生バイオマス合計値の変化、左：2000年の分布、右：2099年の分布。RCP2.6を設定。



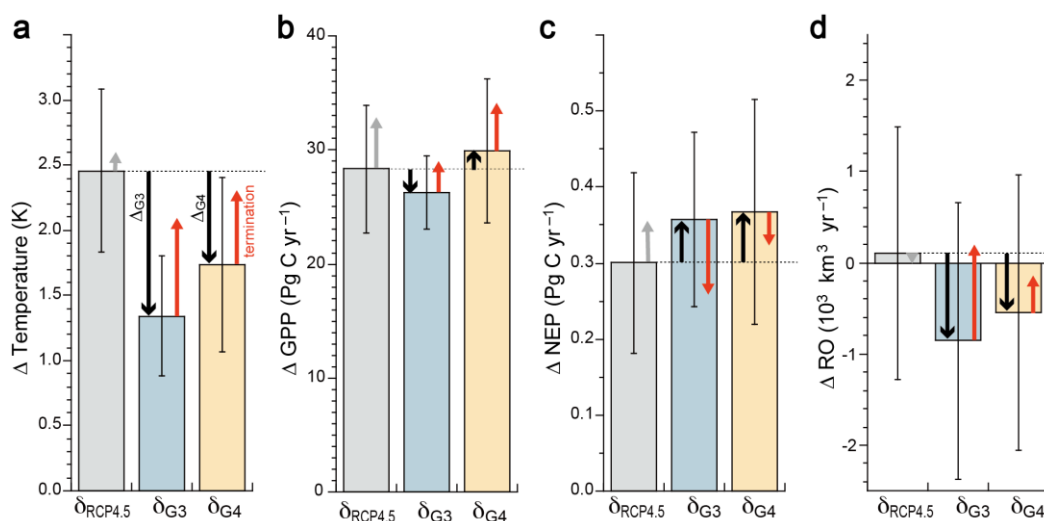
図(2)-33 バイオ燃料栽培のための自然植生転換シナリオを用いて計算された土壌流出変化。上：植生バイオマス合計値の変化、左：2000年の分布、右：2099年の分布。RCP2.6を設定。



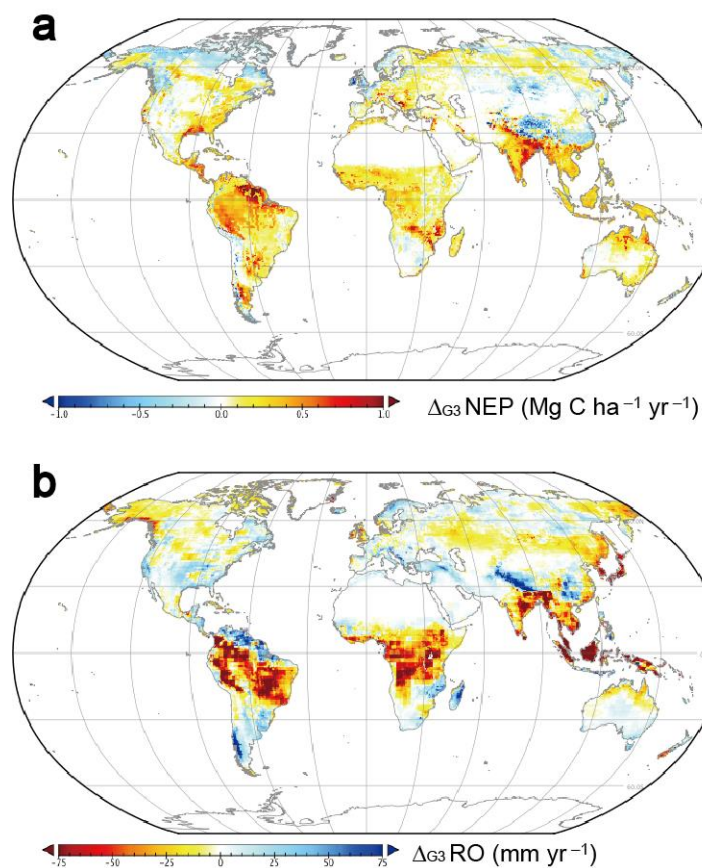
気候工学（特に日射量調節）による対策実施の影響は、これまで体系的な評価が行われてこなかった。ここで使用した日射量調節シナリオ（GeoMIPのG3とG4）では、温室効果ガスによる放射強制力の相殺や年間一定量を想定して成層圏への硫酸エアロゾル注入が行われている。温度上昇を完全に抑制するには至らなかったが、1°C程度の緩和効果が生じており、それに伴う生態系影響の軽減もある程度まで見られた（図(2)-34）。温度上昇の抑制により、生態系からの呼吸放出は、対策なしの場合に比べると抑制され、結果的に生態系への正味炭素吸収が増加する結果となっていた。しかし注目すべきことに、硫酸エアロゾル注入を停止すると速やかに温度が対策なしのレベルにまで上昇し（温室効果ガス濃度は同じシナリオを設定）、それに伴い生態系から炭素が失われていくことが分かった。日射量調節の実施中は、エアロゾルによる日射の散乱により、植生の生産力にはある程度の促進効果があることも分かった。また、温度上昇の抑制に伴い、水循環の活発化が比較的抑制されるため、対策なしと比較すると河川流出量が抑制されることも示された（図(2)-34d、図(2)-35d、図(2)-36b）。



図(2)-34 日射量調節による生態系機能への影響評価結果。(a)地表気温、(b)入射する光合成有効放射、(c)正味CO<sub>2</sub>収支、(d)河川流出。上段がG3、下段がG4の結果。細線が個々の気候シナリオに対する結果、太い破線が平均、オレンジ色の線が平均値の累積を示す。



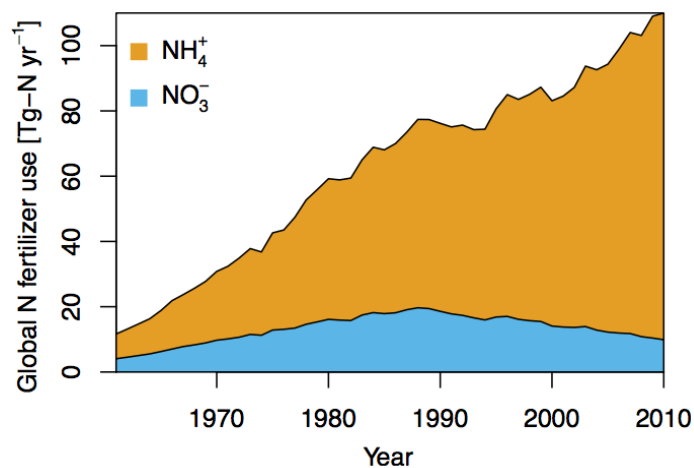
図(2)-35 日射量調節の実施による生態系影響。対策無し (RCP4.5)、放射強制力の相殺 (G3)、一定量注入 (G4) の結果。(a)温度、(b)総一次生産 (GPP)、(c)純生態系生産 (NEP)、(d)河川流出 (RO)。黒矢印は気候工学的対策の効果、赤矢印は対策終了による回復効果を示す。



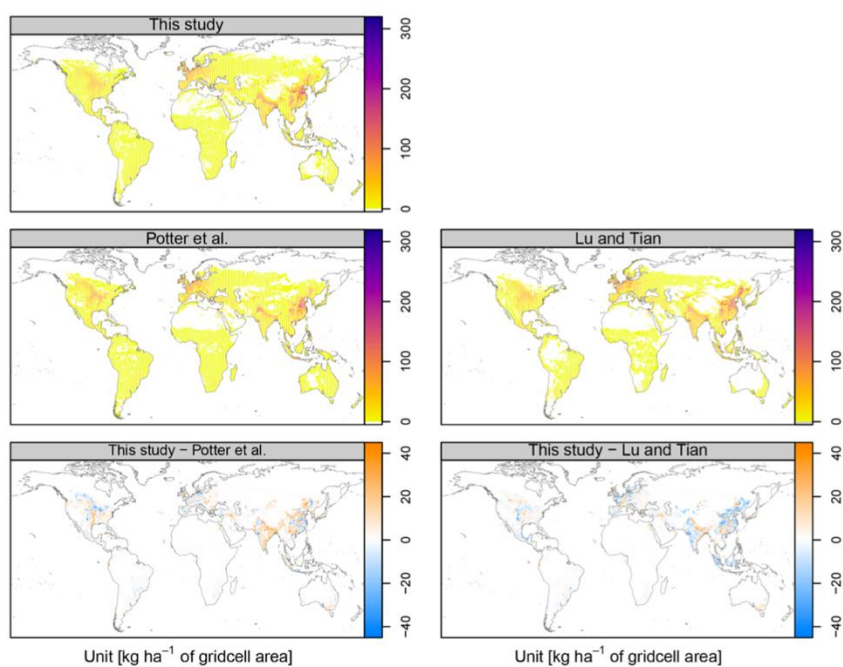
図(2)-36 日射量調節 (温室効果ガスの放射強制力を相殺するG3ケース) における、(a) 純生態系生産 (正味CO<sub>2</sub>収支)、(b) 河川流出量の変化。

### (5) 窒素ネクサス分析に関する研究

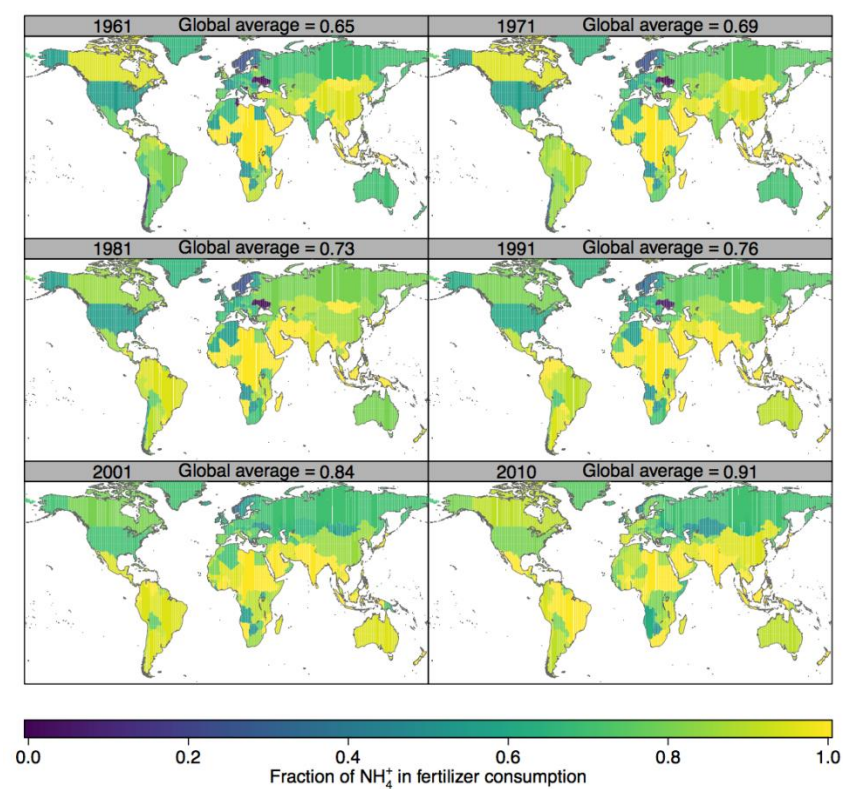
生態系と人間社会セクターの相互作用を解析し、気候変動条件下での最適管理を検討するため、窒素ネクサスに注目してその解析のためのデータ開発を行った。ここではFAOSTATを基礎データとし、統計学的な内挿手法とダウンスケーリングを行うことで、欠落値を補完した全球マップデータを作成した。ここでは人口、GDP、耕作地データを変数に用いた統計モデルを作成し、時系列データの補完を行った。また肥料に含まれる窒素の種類によって土壤中での動態や植物による利用可能性が異なるため、アンモニア態と硝酸態の分離も行った（図(2)-37, 38, 39, 40）。



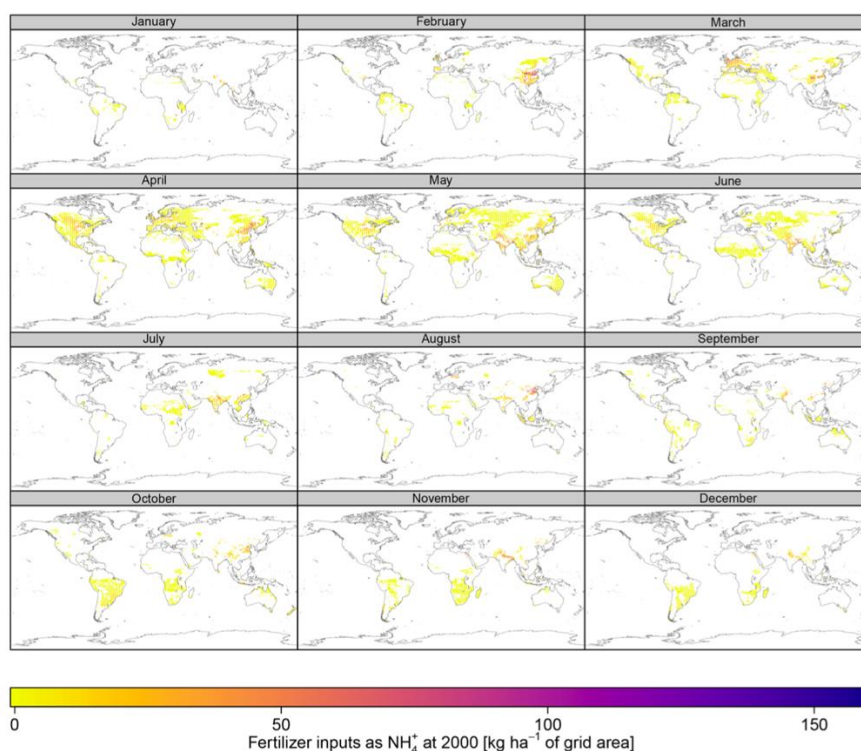
図(2)-37 全世界の窒素肥料消費量の変化と、そのアンモニア態 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) と硝酸態 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) の内訳 (Nishina et al., 2017)。



図(2)-38 推定された窒素肥料消費の分布と、他研究 (Lu and Tian, 2016) との比較。(Nishina et al., 2017)



図(2)-39 肥料消費のうちのアンモニア態窒素の割合の変化。(Nishina et al., 2017)



図(2)-40 アンモニア態窒素肥料投入量の季節変化。2000年における結果を月別に示した。  
(Nishina et al., 2017)

窒素肥料投入量に関するデータは、窒素ネクサスを現実的に解析する上で基本的に重要なだけでなく、食料生産量の推定・予測など幅広い応用が考えられる。ここでは独自の成果として、アンモニア態と硝酸態の区別や、作物別の栽培歴を考慮した季節変化のある肥料使用データを開発した。今後これらのデータに基づいた一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) 放出量や系外への溶脱量など環境負荷に関する解析、さらには前項のバイオ燃料栽培地拡大シナリオと組み合わせた総合的な解析を進めていく計画である。

#### (6) 成果のまとめ

陸域生態系モデルを用いた気候変動影響・リスク評価を行った結果、植生の生産力やバイオマスはいずれのシナリオでも増加することが示された。これは生態系活動の促進や産物供給などの生態系サービスの増加を示すことから好影響の例と捉えることも可能であろう。しかし、生産力やバイオマスの増加は必ずしも生産系の健全さや生態系サービス全般の向上に直結するとは限らないことには留意する必要がある。例えば、早成樹種の植林地は生産力が高くバイオマスへの炭素ストックも大きいですが、生物多様性は低く土壌は劣化しがちで、健全性が高い生態系とは言い難い。気候変動による影響に関しても、急激な生産力の変化は生態系のバランスを崩す可能性が無いとは言えない。また別の面として、今回の解析の多くはグローバルから地域スケールの変化に着目したが、よりローカルには生産力低下やバイオマス減少が生じる場合もある点には注意が必要である。特に気候変動に関する世論や国際交渉においては、少数の負影響が大きくクローズアップされる場合がある。土壌炭素ストックの応答は、分析した整体系関係指標のうちでも不確実性が

大きい点に特長が見られた。それは応答幅の量的な不確実性だけでなく、増加か減少かの定性的な不確実性も残されていることが示された。このような土壌応答の不確実性は、既往のモデル相互比較研究でも指摘されていたが、本課題で国際モデル相互比較プロジェクトの出力を解析した結果は生態系モデル間の差違が大きな原因となっていることを示していた。従って、土壌応答の改良が生態系モデルの信頼性向上のターゲットの1つとなりうるが、実際には非常に困難な課題と考えられている。その原因は、土壌中の生物地球化学的循環は非常に複雑であること、特に微生物分解の温度・水分依存性は観測データが断片的かつ理解が不十分であり、全球モデルの自由度を拘束するには不十分であることが指摘されている。表土流亡（エロージョン）は分解とは別のプロセスであり、植被の変化に大きく左右されるため、SSP間の土地利用の差が明らかに見られた。表土流亡は降水パターンにも影響を受けるため、長期的に降水減少が予想される地域では土壌流出量の減少が推定される地域（地中海沿岸地域など）も見られた。しかし、降水減少は干ばつや農作物への悪影響を伴いがちであり、土壌流出の減少を以て好影響と判断することはできない。一方、表土流亡の増加は有機物や栄養塩の保持量減少につながるということが明らかであり、負影響と判断できる。特にバイオ燃料栽培面積の増加を想定したシナリオに基づく分析では、食料生産との競合を避けるために既存の耕地面積を保全する仮定の下では、広大な面積の森林がバイオ燃料栽培地に転換されるため土壌流出が顕著に増加する結果となっていた。ここで使用されたモデルでは、土壌劣化による生態系影響が十分現実的に扱われているかの検証が不十分であり、今後は各地での土壌学的・農学的研究成果を取り入れた推定法の改良が課題である。もう1つのリスク要因として野外火災を取り上げたが、可燃物の増加や乾燥化に伴って被災面積とバイオマス燃焼が増加する傾向が見られた。これは、陸域生態系からのCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>放出の増加だけでなく、ブラックカーボンなど短寿命の微量物質放出を増加させる可能性がある。また、火災の大幅な増加は植生の更新と回復のサイクルを乱し、植生の劣化や生物多様性の低下を招く恐れがある。また、人家近くで発生する火災の激化は、人家などの財産だけでなく人命にも関わるリスクを高める可能性がある。ただし、本課題で用いられた火災スキームは半経験的なものであり、将来の気候変動条件下で信頼できる推定結果を与えるかは十分慎重に議論すべきである。少なくとも、人為的な失火・延焼防止・防火・消火の影響を取り入れられるようモデル改良を図る必要がある。気候工学（日射量調節）やバイオ燃料栽培拡大シナリオに基づく分析結果から明らかにされたように、気候変動への対策実施により別の生態系影響が生じる場合がある点は非常に重要であり、今後の陸域最適利用の検討に寄与する有用な成果が得られた。

## 5. 本研究により得られた成果

### （1）科学的意義

陸域生態系モデルを用いた分析により、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇、気候変動、土地利用変化の複合的な影響に関する系統的な解析を行うことに成功した。気候変動の正負の影響に加えて、対策実施に伴う影響を評価することで陸域最適利用の検討に有用な成果をもたらした。推定不確実性に関する詳細な解析を行うことで、排出と気候のシナリオ、生態系モデルによる寄与を分離し、今後の推定精度向上に資する重要な示唆をもたらした。複数の生態系指標について影響を比較検討することで、注目する要素や視点によって気候変動影響の評価結果が変わりうることを示した。影響評価モデルに関する国際相互比較プロジェクトに参加し、計算結果を提出しただけでなく、主

著論文を執筆することで解析を主導し独自の貢献を果たした。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

### <行政が活用することが見込まれる成果>

サブテーマ2で開発された陸域生態系モデルを用いて、全球およびアジア地域の炭素収支に関する広域評価が行われ、それはグローバル炭素プロジェクト（GCP）への貢献を通じて、IPCC第5次評価報告書に引用される成果をもたらした。また、気候変動影響評価モデルの相互比較プロジェクトへの参加を通じて、複数モデルによる推定不確実性を考慮した影響評価に貢献し、同じくIPCC第5次評価報告書に引用される成果となった。

## 6. 国際共同研究等の状況

Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)複数セクター影響モデル相互比較プロジェクト：ポツダム気候変動影響研究所・Lila Warszawski、Christopher Reyer（ドイツ）ら、気候変動影響評価モデルのうち生態系（biome）セクターに参加し、将来予測シナリオを用いたシミュレーション結果を提出し、影響・リスク評価に関する共同研究を実施した。その第1フェーズの成果論文はIPCC第5次報告書に引用された。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) AD.Friend, W.Lucht,TT. Rademacher, RM.Keribin,R. Betts,P. Cadule, P.Ciais,DB. Clark,R. Dankers, P.Falloon,A. ItoR. Kahana,A. Kleidon,MR. LomasR,K. Nishina,S. Ostberg,R. Pavlick, P.Peylin, S.Schaphoff, N.Vuichard, L.Warszowski,A. Wiltshire:Woodward FI.: Proceedings of the National Academy of Science USA.111(9),3280-3285(2013)  
“Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub>.”
- 2) L.Warszowski, Ad.Friend, S.Ostberg, K.Frieler, W.Lucht, S.Schaphoff, D.Beerling, P.Cadule, P.Ciais, DB .Clark, R.Kahana, A.Ito, R.Keribin, A.Kleidon, M.Lomas, K.Nishina, R.Pavlick, T.T. Rademacher, M. Buechner, F.Piotek, J.Schewe, O.Serdeczny and H.J.Schellnhuber : Environmental Research Letters, 8, 044018 (2013)  
“A multi-model analysis of risk of ecosystem shifts under climate change. Environmental Research Letters”
- 3) J. C. S. Davie, P. D. Falloon, R.Kahana, R.Dankers, R. Betts, F.T.Portmann, D.Wisser, D. B.Clark, A. Ito, Y.Masaki, K.Nishina, B.Fekete, Z.Tessler, Y.Wada, X.Liu,Q.Tang,S.Hagemann,T.Stacke,R. Pavlick,S.Schaphoff,S.N.Gosling,W.Franssen,and N. Arnell: EarthSyst. Dynam., 4(2), 359-374 (2013)

“Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP”

- 4) K.Nishina,A. Ito, DJ .Beerling,P. Cadule, P.Ciais, DB.Clark, P.Falloon, AD.Friend, R.Kahana,E. Kato, R.Keribin,W. Lucht, R.Pavlick,TT. Rademacher,S. Schaphoff, N.Vuichard,L. Warszwaski,T. Yokohata: Earth System Dynamics(2014) Earth System Dynamics 5:197–209.

“Quantifying uncertainties in soil carbon responses to changes in global mean temperature and precipitation.”

- 5) F.Piontek,C.Müller,T.A.M.Pugh,D.B.Clark,D.Deryng,J.Elliott,F.d.J.ColónGonzález,M.Flörke,C. Folberth,W.Franssen,K.Frieler,A.D.Friend,S.N.Gosling,D.Hemming,N.Khabarov,H.Kim,M.R.Lomas, Y.Masaki,M.Mengel,A.Morse,K.Neumann,K.Nishina,S.Ostberg,R.Pavlick, A.C.Ruane,J.Schewe,E. Schmid,T.Stacke,Q.Tang,Z.D.Tessler,A.M.Tompkins,L.Warszawski,D.Wisser,andH.J.Schellnhuber: P. Natl. Acad. Sci. USA, 111(9), 3233-3238 (2014)

“Multisectoral climate impact hotspots in a warming world”

- 6) K. Nishina, A. Ito, P. Falloon, A.D. Friend, D.J. Beerling, P. Ciais, Clark D.B., R. Kahana, E. Kato, W. Lucht, M. Lomas, R. Pavlick, S. Schaphoff, L. Warszawski, and T. Yokohata: Earth System Dynamics, 6, 435-445 (2015)

“Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result.”

- 7) A Ito, K Nishina and H M Noda (2016) Polar Science, 10, 346–355, doi:10.1016/j.polar.2015.11.002.  
Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data

- 8) A Ito, K Nishina and H M Noda (2016) Ecological Research, 31, 459–474,  
doi:10.1007/s11284-016-1354-y.

“Evaluation of global warming impacts on the carbon budget of terrestrial ecosystems in monsoon Asia: a multi-model analysis”

- 9) K Nishina, A Ito, N Hanasaki and S Hayashi (2017) Earth System Science Data, 9, 149–162,  
doi:10.5194/essd-9-149-2017.

“Reconstruction of spatially detailed global map of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  application in synthetic nitrogen fertilizer”

- 10) A Ito (in press) Climatic Change

“Solar radiation management and ecosystem functional responses”

### <その他誌上発表（査読なし）>

「特に記載すべき事項はない。」

### （２）口頭発表（学会等）

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめること。発表年順（古→新）に並べること。

- 1) K. Nishina, A. Ito, ISI-MIP Workshop, Reading, UK, 2012

“Evaluation of the uncertainties in future projection of soil C dynamics and GHG exchange relevant



- to the interactive effect of soil temperature and moisture conditions”
- 2) K. Nishina, C. Takenaka, S. Ishizuka, S. Hashimoto, Y. Yagai: AGU 2012 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012  
“Tree manipulation experiment”
  - 3) A. Ito: International Symposium on Soil Carbon Modeling, Tsukuba, Japan, 2013  
“Process-based modeling of SOC dynamics at global scale”
  - 4) K. Nishina, A. Ito, E. Kato, T. Yokohata: ISI-MIP Biome team: Impact World 2013, Germany, 2013  
“Statistical evaluation of uncertainties in future projection of global soil C dynamics relevant to sensitivities of global temperature and precipitation changes”
  - 5) 仁科一哉, 伊藤昭彦, 加藤悦史, 横畠徳太, ISI-MIP team: 日本惑星連合大会A-CG37-07, 千葉, 2013  
「モデル相互比較による全球土壌炭素予測における気候変動影響評価」
  - 6) 仁科一哉, 伊藤昭彦, 加藤悦史, 横畠徳太: 日本地球惑星科学連合2014年大会 (2014)  
「ISI-MIPにおける複数RCP, GCM, 生態系モデルによる陸域生態系炭素収支の将来予測不確実性評価」
  - 7) 仁科一哉, 伊藤昭彦, 花崎直太, 眞崎良光: 日本地球惑星科学連合2014年大会 (2014)  
「窒素肥料および窒素降下物による全球陸域窒素循環の改変」
  - 8) H.M. Noda and H. Muraoka: Symposium of Botanical Society of Japan, Responses of the photosynthetic systems to spatio-temporal variations in light environments: scaling and eco-devo approaches, Kawasaki, 2014  
“Spatial and temporal scaling of forest canopy photosynthesis by ecophysiological remote sensing”
  - 9) A. Ito: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, 2014  
“Optimizing parameters of process-based model with Particle Filter”
  - 10) K. Nishina, A. Ito, E. Kato, T. Yokohata, ISI-MIP team: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, 2014  
“Relative Uncertainties in Global SOC Projections in Multiple GCM and RCP”
  - 11) H. Muraoka, H.M. Noda, T. Saitoh and S. Nagai: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, 2014  
“Multidisciplinary research on canopy photosynthetic productivity in a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Japan”
  - 12) H. M. Noda and H. Muraoka: AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, 2014  
“Ecophysiological remote sensing of leaf-canopy photosynthetic characteristics in a cool-temperate deciduous forest in Japan”
  - 13) 伊藤昭彦, 野田響, 仁科一哉: 第62回日本生態学会 (2015)  
「気候変動により顕著な炭素収支変化が生じる陸域生態系の特定: 国際モデル相互比較ISI-MIPに基づく解析」
  - 14) 仁科一哉, 伊藤昭彦, 野田響: 第62回日本生態学会 (2015)  
「ISI-MIP における生態系影響予測のこれまでの成果」
  - 15) H. M. Noda, K. Nishina, A. Ito: European Geophysical Union General Assembly 2015, Vienna, Austria, April, 2015

“Assessment of regional-scale primary production in terrestrial ecosystems to estimate the possible influence of future climate change on biodiversity”

16) H. M. Noda, K. Nishina, A. Ito: AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA, 2015

“Estimation of the possible influence of future climate changes on biodiversity in terrestrial ecosystem”

17) K. Nishina, A. Ito: AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA, 2015

“Development of new historical global Nitrogen fertilizer map and the evaluation of their impacts on terrestrial N cycling and the evaluation of their impacts on terrestrial N cycling”

18) 仁科一哉、伊藤昭彦：日本生態学会第63回大会（2016）

「広域生態系モデルを用いた影響評価」

“Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data”

19) A. Ito: iLAMB 2016 Workshop, Washington DC, USA, 2016

“2016 Workshop, Washington DC, USA, 2016 carbon budget of northern  $N_2$  exchange resulting from the ensemble of terrestrial biosphere models”

20) Y. Nakagawa, M. Yokozawa, T. Hara: International Symposium on Ecological Modeling, Baltimore, USA, 2016

“USA, 2016 USA, 2016 ium on Ecological Modeling, Baltimore, USA, 2016 sh-latiplant population”

21) 伊藤昭彦：日本地球惑星連合2016年合同大会（2016）

「陸域生態系の温室効果ガス収支に関する統合評価モデル」

22) A. Ito and K. Nishina: ISI-MIP Workshop, Potsdam, Germany, 2016

“ISI-MIP Workshop, Potsdam, Germany, 2016y, 2016ny, 2016

23) 伊藤昭彦、仁科一哉、野田響：日本気象学会2016年秋季大会（2016）

「モンスーンアジアにおける陸域生態系への気候変動影響：複数モデルを用いた解析」

24) A. Ito, T. Kinoshita, N. Hanasaki, Y. Yamagata and E. Kato: GCP-MaGNET pre-conference, Laxenburg, Austria, 2017

“Impacts of deforestation for bio-fuel production on ecosystem services”

### （3）知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

### （5）マスコミ等への公表・報道等

「特に記載すべき事項はない。」

### （6）その他

「特に記載すべき事項はない。」

## 8. 引用文献

- 1) Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson SJ, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK (2014) Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26:152–158.
- 2) Fuss S, Canadell JG, Peters GP, Tavoni M, Andrew RM, Ciais P, Jackson RB, Jones CD, Kraxner F, Nakicenovic N, Le Quéré C, Raupach MR, Sharifi A, Smith P, Yamagata Y (2014) Betting on negative emission. *Nature Climate Change* 4:850–853.
- 3) Kravitz B, Caldeira K, Boucher O, Robock A, Rasch PJ, Alterskjær K, Irvine PJ, Ji D, Jones A, Kristjánsson JE, Lunt DJ, Moore JC, Niemeier U, Schmidt H, Schulz M, Singh B, Tilmes S, Watanabe S, Yang S, Yoon J-H (2013) Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research* 118:8320–8332.

## S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

### (3) 水資源の最適利用に向けたモデル開発と分析

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室

花崎直太

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所 眞崎良光（平成24年4月～平成28年6月）

平成24年～28年度累計予算額：41,659千円（うち平成28年度：7,680千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

全球水資源モデルH08を利用して気候変動が水資源に及ぼす世界的な影響を評価した。様々な社会経済シナリオおよび気候シナリオの下で、21世紀中の水の利用可能性に対する気候変動の影響を詳細かつ包括的に評価した。また、貯水池の貯水容量の増強、灌漑の水利用効率改善などの選択肢を含む、適応策の潜在的効果を検討した。また、国際モデル相互比較プロジェクト（Inter Sectoral Impact Model Intercomparison Project; ISIMIP）に参加し、影響力のある多くの海外の研究機関とともに淡水資源に関する最も信頼性の高い地球規模の温暖化影響評価を実施し、一連の論文として出版することに貢献した。なお、ISIMIPでは、世界的な水文モデルに搭載されている貯水池操作モデルに関する性能評価を担当し、それぞれのモデルの特徴と課題を抽出することに成功した。さらに、2度目標を達成するための重要な技術と考えられる二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産に関する包括的な評価をテーマ2の参画者と共同で実施し、特に、食料生産や生態系保全と潜在的に競合するバイオ燃料作物生産のための灌漑の影響に関する調査を主導した。IPCC第5次評価報告書からは、参画者または研究協力者が筆頭著者または共同執筆者になった8編の論文が引用された。

#### [キーワード]

水循環・水需要・適応策・包蔵水力・バイオ燃料への灌漑

#### 1. はじめに

水は人間の生存と社会の活動に不可欠な資源である。しかし、温暖化の進行に加え、途上国を中心とした人口の増加や経済の発展によって、世界各地で持続的な水利用が脅かされている。また、重要な緩和策である水力発電の利用促進やバイオ燃料の生産向上においても、水資源の制約は考慮しなければならない要素である。よって、地球規模で水資源の最適利用戦略を立てていく必要があるが、自然の水循環と人間の水利用の間の複雑な相互作用や強い地域性、将来想定における不確実性により実施が阻まれている。こうした問題を解決し、水資源の将来をグローバルに見通すためには、自然水循環と人間水利用を統合的に扱うモデルと、気候のみならず社会経済の変化も考慮した包括的な世界シナリオが必要である。本研究は全球水資源モデルH08を拡張するとともに、国内外の研究者が開発する最新の世界シナリオを高度に組み合わせることにより、世界

で最も詳細で包括的な水資源評価を実施し、IPCC報告書への貢献などを通じて温暖化抑制の政策に資する情報を提供することを目的とした。

## 2. 研究開発目的

本研究では4つの目標を達成することを目指した。一つ目は、温暖化と社会変化の影響を考慮した21世紀中の全球水循環・水利用の見通しを得ることである。全球水資源モデルH08を利用し、21世紀中の陸域水循環と水利用を全球0.5度解像度、日単位でシミュレートする。複数の気候シナリオ、社会経済シナリオを利用することにより、さまざまな想定における水循環と水利用のシミュレーション結果（水資源シナリオ）を得る。二つ目は、国際研究プロジェクトInter Sectoral Model Intercomparison Project (ISIMIP)に参加・貢献することである。かねてより、一つの影響モデルを利用した温暖化影響だけでは、影響モデル自身の持つ不確実性の評価ができないという問題が指摘されてきた。そこで、ISIMIPの策定した共通のシミュレーション仕様に沿ってH08を運用し、結果を共有することにより、モデル不確実性を定量化・低減する国際的な活動に貢献する。三つめは貯水池・節水技術に着目した適応策の検討である。貯水池の新規建設や、農業用水における節水技術の導入といった政策オプションによる、水需給逼迫・治水面など主に適応に関する効果を定量的に評価する。加えて緩和策とも密接な関係のある水力発電への温暖化影響についても検討を行う。また、水力発電によるエネルギー供給の観点からの評価も行う。四つ目は、水資源・土地利用・生態系・食料生産の観点を含めた包括的なバイオマス燃料生産に関する分析である。サブテーマ(2)(4)(5)で実施される陸域生態系モデル、土地利用モデル、作物成長モデルの研究と連携することで、2℃目標達成に必要とされる大量のバイオ燃料生産の実現可能性について検討する。他にサブテーマ(1)で行われる統合陸域モデル研究に貢献する。

## 3. 研究開発方法

期間中実施した研究は5つに大別される。すなわち、最新の気候・社会経済シナリオを利用した地球規模水資源への温暖化影響評価（以下温暖化影響評価）、貯水容量の増強に着目した適応策の効果の検討（以下適応策検討）、地球規模の包蔵水力への温暖化影響評価（以下包蔵水力検討）、テーマ2内のモデル統合運用に関する作業としてのBio-Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS)導入に関する包括的検討のうち、水資源に関する影響評価（以下BECCS検討）、そして、国際プロジェクトInter Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)への参加と貢献である（以下ISIMIP参加）。

温暖化影響評価は次の方法で行った。まず、最新の気候変動シナリオと社会経済シナリオを入手した。気候変動シナリオは気候モデル相互比較プロジェクトCMIP5に提出された3つの気候モデルが4つの(RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)の温室効果ガス排出シナリオに沿って実施した将来予測結果を用意した。次に、社会経済シナリオはShared Socio-economic Pathways (SSP)と呼ばれるもので、国立環境研究所の統合評価モデルAsia Pacific Integrated Model (AIM)が計算したSSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5の5つを用意した。続いて、SSPの叙事的・定量的シナリオを利用して水利用シナリオをSSPごと・国ごとに作成した。気候変動シナリオと水利用シナリオを利用して、21世紀中の水循環のシミュレーションを行った。本研究で利用したのは全球水資源モデルH08である。このモデルに気候シナリオと水利用シナリオを入力すると、取水や貯水池操作といった主要な人

間活動を含めて、世界の水循環の計算を実施することができる。それぞれのシナリオを詳細に分析し、21世紀中の水逼迫の評価を行った。

適応策検討は次の方法で行った。H08モデルには世界の主要な河川に建設された総貯水容量10億 $m^3$ 以上のダムが含まれている。これを便宜上、既存ダムと呼ぶ。今回は任意の場所に任意の大きさのダムが建設できるという仮定を置いた。これら为新設ダムと呼ぶ。新設ダムの集水域で発生した流出は新設ダムに流れ込み、貯水量がその容量を上回るとあふれて川に流れこむものとした。水利用量が河川流量を上回る場合、この新設ダムから水を利用できるとし、水充足指標が現在期間と近くなる貯水容量を求め、適応に必要な新設ダムの貯水容量とした。

包蔵水力検討は次の方法で行った。まず、流出量の位置エネルギーに基づいて理論的に変換可能な電力量のポテンシャル（理論包蔵水力）を現在気候と将来気候について全球規模に計算した。つぎに流況や発電機の性能など水文・技術的な要素も加味して求めた電力量のポテンシャル（技術包蔵水力）を計算する手法を開発し、やはり現在気候と将来気候について全球規模に計算した。この手法とは具体的には次のようなものである。河川には河川維持流量( $Q_{env}$ )が設定されている。また、発電機（水車）の効率は水車種類にも依存するが、一般に計画最大流量( $Q_{max}$ )の10～30%で0となる。そこで、発電可能な最小河川流量( $Q_{th}$ )を以下のように定義した。

$$Q_{th} = \varepsilon(Q_{max} - Q_{env}) + Q_{env}$$

ここで、 $\varepsilon = 0.1$ と設定した。これを上回る流量分( $Q_{eff}$ )が発電に利用されるものとした。

$$Q_{eff} = \begin{cases} Q_{max} - Q_{th} & Q_{max} \leq Q \\ Q - Q_{th} & Q_{th} \leq Q_{max} \\ 0 & Q < Q_{th} \end{cases}$$

この条件下で、年間に発電に使われた総流量 $Q_{effsum} = \sum Q_{eff}$ を求めた。年間の総流量 $Q_{tot}$  および発電所の能力を最大限に活用したときの理想流量 $Q_{full} = (Q_{max} - Q_{th}) \times 365$ に対して、

- ・ 河水利用率  $\xi_1 = Q_{effsum} / Q_{tot}$
- ・ 流量設備利用率  $\xi_2 = Q_{effsum} / Q_{full}$

を定義した。

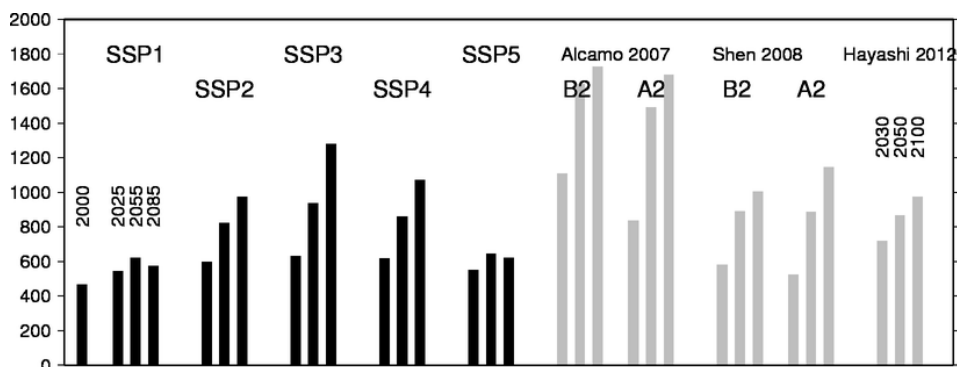
ISIMIP参加については、プロジェクトの進展に合わせ、3つのフェーズに参加した。ISIMIPとは複数の影響評価モデルを利用してモデル間の不確実性を考慮しつつ定量的な全球温暖化影響評価をすることを目的として、2012年より開始された国際モデル相互比較プロジェクトである。2012-2013に実施されたのはIPCC第5次評価報告書への貢献を目指したFast Trackと呼ばれるフェーズである。その後2014-2015にはPhase 2.1aと呼ばれる過去のモデル検証へ、2016以降はPhase 2.1bと呼ばれるIPCCの1.5℃特別報告書への貢献を目指したテーマへと移行している。いずれについても、プロジェクトの要請する計算手順に従って全球水資源モデルH08を利用して大規模な水循環・水資源シミュレーションを実施した。Fast Trackフェーズでは河川流量や灌漑必要水量などの将来推計を5つの全球気候モデル、4つの気候シナリオについて1960年から2100年までの期間について実施した。ISIMIP2.1aフェーズでは20世紀全体について、人間活動が皆無だった場合、2000年頃の土地利用・水利用で固定した場合、20世紀中の土地利用と水利用の時間的変化を組み込んだ場合、の3つの条件で実験を実施した。過去の気象データはISIMIP事務局と協力機関が整備したGSWP3, Princeton, WATCH, WFDEIの4種類である。計算実施期間は1901年から2012年であ

る。ISI-MIP2.1A実験からは20世紀中の水循環・水利用に関する膨大なシミュレーション結果が得られたが、適応策とも密接に関わることから、特にダムの効果に着目して検討を行った。解析対象としたのは1971-2000年で、観測データが充実していることから、特にMissouri川およびColorado川に着目した。ISIMIP参加モデルには、貯水池を表現するアルゴリズムが導入されているものもあるが、アルゴリズムの違いによる貯水池の効果やその下流域への影響についてモデルの相互比較が実施されたことはなかった。そこで、貯水池操作モデルを含む5つの参加モデルの出力を利用し、特にアメリカのMissouri川とColorado川に着目し、モデル間の相互比較を実施した。

BECCS検討については、まず、全球水資源モデルH08を拡張し、第2世代バイオ燃料と呼ばれるミスカンサスとスイッチグラスを明示的に扱えるようにした。この新モデルを利用し、基準実験と2つのシナリオ実験を再実施した。基準実験はバイオ燃料作物の栽培をゼロとし、現在の食料用の灌漑・天水農地の分布情報を利用してH08の計算を実施するものである。シナリオ1は現在の天水農地の1/5をバイオ燃料作物生産用の灌漑農地に転用するものである。バイオ燃料の灌漑は、作物に水ストレスがかからないよう、栽培期間を通して土壌水分量を一定量に保つことで表現した。このときの水源は近接の河川水としたが、河川水が不足する場合、地下水や遠隔地からの導水などにより実施したとみなし、必要な量が常に得られると仮定した。シナリオ2は現在の天水農地の2/5をバイオ燃料作物生産用の天水農地に転用するものである。3つのシミュレーションを通じ、水利用・食糧生産・バイオ燃料生産の関係を明らかにしようとした。

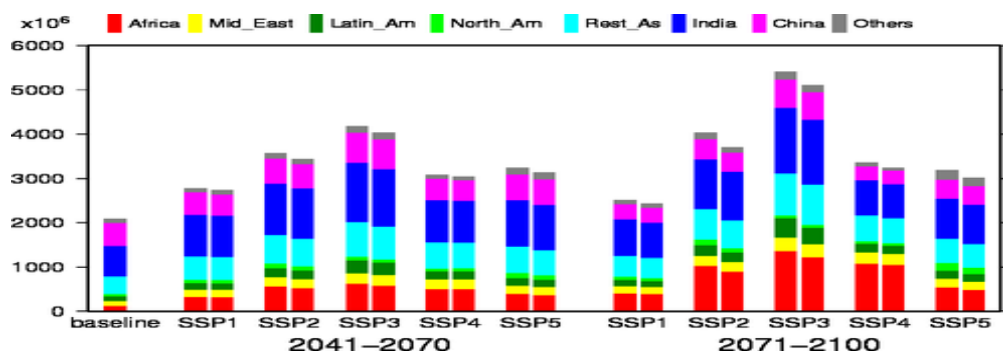
#### 4. 結果及び考察

水資源の地球規模の温暖化影響評価はHanasaki et al. (2013a, b)にまとめられた。以下ではその概要を示す。まず、21世紀中の水利用の推定結果を示す。SSPには21世紀中の世界12地域の社会・経済像が定量的・定性的に示されているが、水利用に関する情報がなかったため、整合的なものを開発した。本研究は水利用を農業・工業・都市の3つのセクターに分類し、過去の水利用量変化の統計を利用し、それぞれ将来推計モデルを開発した。将来推計モデルで用いるパラメータに関しては、それらがSSPの定性的なシナリオと整合的になるように設定を行った。最後にこのモデルの説明変数である人口やGDPとして、SSPの定量的なシナリオを与えることで、将来の水利用量をSSPの5つのシナリオについて推計した。農業・工業・都市の各セクターについて水利用を推定したが、例として都市用水の結果を図(3)-1に示す。一番左に示しているのが2000年付近の取水量であり、世界全体で400km<sup>3</sup>/yr強である。その右に3本ずつあるのが、SSP1、SSP2、SSP3、SSP4、SSP5の各シナリオにおける取水量であり、それぞれ、2025年、2055年、2085年の推計値を示している。SSP1は持続可能な社会が描かれている。人口成長が低いことに加え、節水技術が普及すると想定したため、21世紀中は600km<sup>3</sup>/yr弱で推移する結果となっている。これに対し、SSP3は分断された社会が描かれる。人口成長が高いことに加え、節水技術が普及せず、取水量が大幅に増加していき、21世紀後半には1200km<sup>3</sup>/yrを超える結果になっている。このように、SSPのそれぞれの世界観を反映した推計結果が得られた。



図(3)-1 21世紀中の都市用水の変化

次に、21世紀中の水逼迫の推定結果を示す。H08によるモデルシミュレーションで得られた日単位・グリッド単位(約50km四方)の河川流量と水利用量を利用し、Cumulative Abstraction to Demand Ratio (CAD)という水充足指標を計算した。これは、取りたいときに取りたい量の水が得られやすいかを示すものである。CADを含むさまざまな指標と観点から水逼迫の解析を行ったが、例として水ストレス人口を図(3)-2に示す。水ストレス人口とは水充足指標CADが閾値(0.5)を下回るグリッドに住む人口、つまり、取りたいときに取りたい量の水を得にくい地域に住む人口である。本研究において、CADはすべてのシナリオの組み合わせについて、グリッド(約50km四方)単位で計算を実施したが、図は大陸別の積み上げとして示している。一番左のバーは現在のもので、水ストレス人口は約20億人である。その右には2041-2070年の結果を示している。5つのSSPシナリオに対してバーは2本ずつある。左は気候政策がなく、温暖化が進行する場合、右は気候政策があり、温暖化の進行が抑制される場合を示している。5つのシナリオのうち、持続可能な社会を描いたSSP1がもっとも水ストレス人口が小さく、分断された社会を描いたSSP3がもっとも大きくなった。水ストレス人口が大きく伸びるのはアフリカである。なお2041-2070年においては気候政策の有無による違いは比較的小さい。その右に示したのは2071-2100の結果である。SSP間の違いはさらに大きくなり、気候政策の有無の違いも顕著になる。つまり、気候政策を導入して温暖化の程度を小さくすると水ストレス人口は小さくなる。いずれのシナリオにおいても、アフリカの水ストレス人口が伸びる結果が得られた。



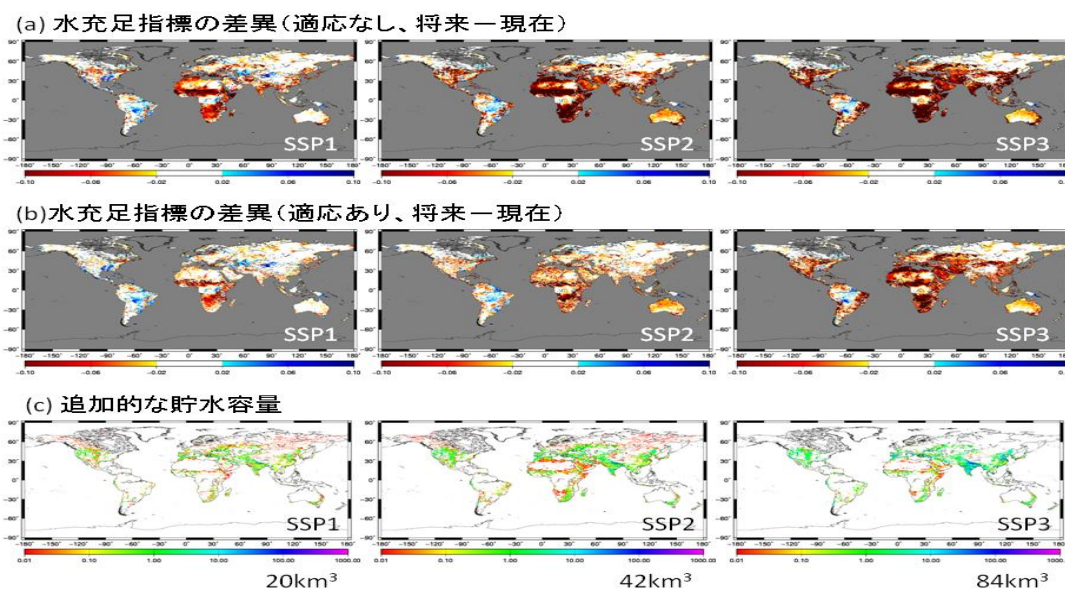
図(3)-2 21世紀中の水ストレス人口の変化

平成24年度に実施した温暖化影響分野の国際モデル相互比較プロジェクトISI-MIPのFastTrackフェーズによる温暖化影響評価に関してはH08を含む12の水循環モデルの出力結果を利用し、洪水、渇水、農業水利用など多くの温暖化影響評価が実施された。結果はDavie et al. (2013)、Wada



et al. (2013)、Dankers et al. (2014)、Elliot et al. (2014)、Haddeland et al. (2014)、Prudhomme et al. (2014)、Piontek et al. (2014)、Schewe et al. (2014)に詳述され、花崎ら (2013, 2014) に概要が簡潔にまとめられている。また、H08モデルの結果の特徴については眞崎ら (2013, 2014) に示された。結果の一例を示すと、将来の世界の灌漑用水はどのモデルも増加の傾向を示したが、河川からの取水については取水可能量が伸び悩み、水逼迫が悪化していくことが示唆された (Haddeland et al., 2014)。

適応策検討はHanasaki et al. (2013c)およびMasaki et al. (2013)にまとめられた。主な結果を図(3)-3に示す。シミュレーションはまず、年流量の0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 5%, 10%に相当する貯水容量を持つ新設ダムを世界中すべてのグリッドに配置した。この8通りについて、1年目と同じ条件でH08のシミュレーションを行った。この結果、一般に貯水容量が増すほど、水充足指標は大きくなる。ここで、8通りの中から、水充足指標が現在期間と近くなる貯水容量を求め、適応に必要な新設ダムの貯水容量とした。図(3)-3(a)は新設ダムがない計算で、将来期間(2071-2100)と現在期間(1971-2000)の水充足指標の差を示している。SSP1は水需要の増加が小さく、温暖化が進まない「持続可能社会シナリオ」、SSP3は逆の傾向を示す「分断シナリオ」、SSP2はそれらの間の「中庸シナリオ」である。特にSSP3は現在期間より大幅に水充足指標が下がることが示された。図(3)-3(b)は新設ダムがある計算である。水充足指標が上昇し、現在期間との差異が小さくなっていることが分かる。図(3)-3(c)は新設ダムの貯水容量とその分布である。今回の試算では追加的に必要な貯水容量はSSP1, SSP2, SSP3でそれぞれ20, 42, 84km<sup>3</sup>と推計された。なお、現時点ではいくつかの大きな仮定のもとにモデルを構築し、計算を行っている(例えば新設ダムからは蒸発等のロスが起こらない)。仮定を現実的なものに近づけるべくモデルの改良を今後も継続していくことが必要である。



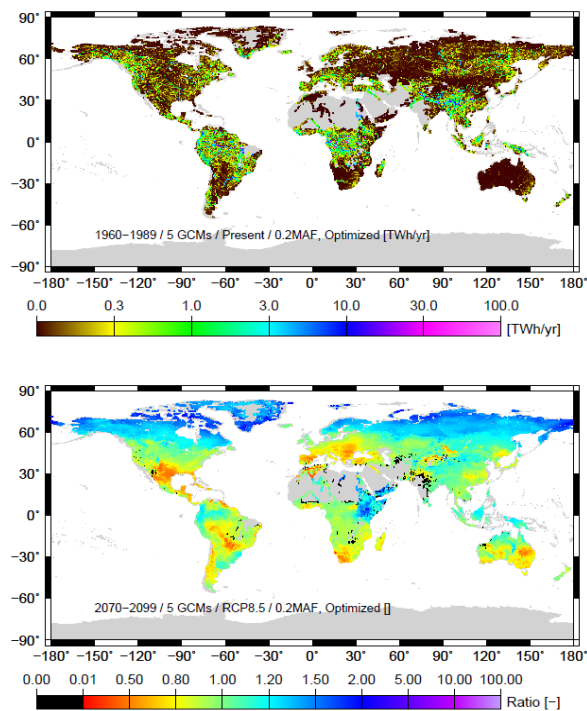
図(3)-3 (a)水充足指標の差異(適応なし、昨年度の結果と同じ)。赤は指標が低下し、水充足が減るところ。青はその逆で、白は変化が小さいところ。(b)水充足指標の差異(適応あり、今年度の結果)。(c)追加的に必要な貯水容量。

包蔵水力検討は眞崎ら（2014）にまとめられた。まず、理論包蔵水力については既往研究に従い、 $(\text{包蔵水力}) = (\text{河川流量}) \times (\text{隣接セルとの標高差})$ を全球0.5度で計算した。まず、現在期間（1960-1989年）の世界の包蔵水力は43,890TWhと推定された。これは先行研究と比較しても、妥当な値であった。次に、将来期間（2070-2099）についてはRCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5でそれぞれ、44,360, 45,400, 45,870, 45,770TWhと推定された。これは現在よりも1.1%, 3.4%, 4.5%, 4.3%の増加であった。包蔵水力の総和が増加するのは、世界全体では流出量が増加するためである。ただし、流出量の増減には大きな地域差があり、ヨーロッパやアフリカ南部では大幅な減少が示唆された。

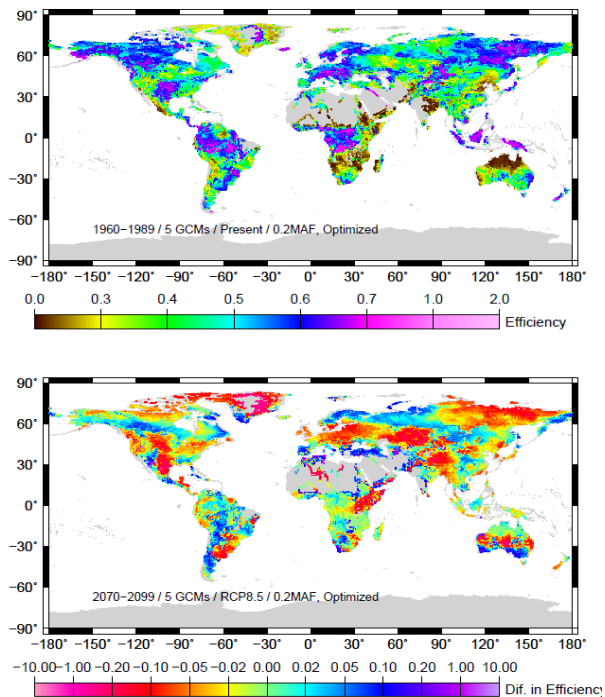
続いて全球での流況に基づく発電量を推定した。年間の流況に基づく発電量は、1960～1989年で年間15,348TWh（ $Q_{env}=0.2MAF$  のとき、MAFは年間平均流量）で理論包蔵水力（流況を考慮せず、理論的に導かれる発電量）の35.0%にあたる。地理的分布（図(3)-4(a)）は、山岳地域や北半球高緯度では理論包蔵水力に比べてかなり小さな値を示した。現在の水力発電設計仕様が維持された場合、将来の全球での流況に基づく発電量は、温暖化が進行するほど大きく増加する。ただし、理論包蔵水力の結果と比べると、一般にその今世紀末での増加率が小さく抑えられている。流況に基づく発電量変化の地理的分布（図(3)-4(b)）は、北半球高緯度やヒマラヤ、エチオピア高原ではその増加率が小さく抑えられている。

1960～1989年の河水利用率（図(3)-5(a)）は、北アメリカ（内陸部を除く）、アマゾン周辺、アフリカ赤道地域、ヨーロッパ、ロシア極東などで高い値を示している。将来変化の地理的分布（図(3)-5(b)）は、理論包蔵水力の将来変化とはまったく異なる地理的分布を示し、カナダ高緯度、米国内陸部、ウルグアイ周辺、ヨーロッパ中央部～中央アジア、エチオピア高原、ヒマラヤ、ロシア極東などで減少傾向を示す。一方、ロシア西部～北欧、南アメリカ内陸部、地中海沿岸、カリフォルニアなどでは増加傾向にある。

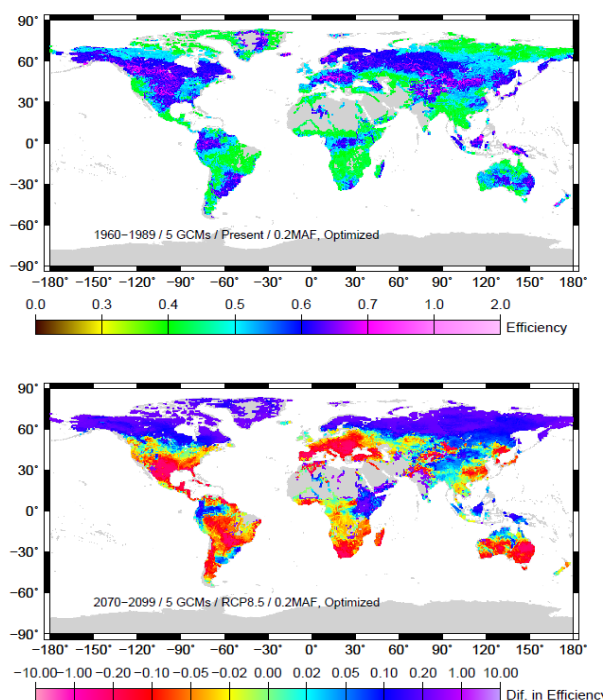
発電設計仕様に基づいて、1960～1989年の流量設備利用率とその将来変化を図(3)-6に示す。60%を超える流量設備利用率が、北アメリカ、ヨーロッパ～ロシア西部にかけて広く分布していることが分かる。将来変化量は、北半球高緯度、ヒマラヤおよびその下流域、エチオピア高原周辺などで増加、米国、南アメリカ内陸部、地中海沿岸、東アジアの一部などで減少傾向を示す。増減の地理的分布は、理論包蔵水力の将来変化と似た分布を示した。



図(3)-4 流況に基づく発電量の地域分布。(a)1960-1989年 および(b)2070-2099年のRCP8.5における変化率。Qenv=0.2MAFの事例を示す。



図(3)-5 河水利用率の地域分布。(a) 1960-1989年 および (b) 2070-2099年のRCP8.5における変化Qenv=0.2MAFの事例を示す。



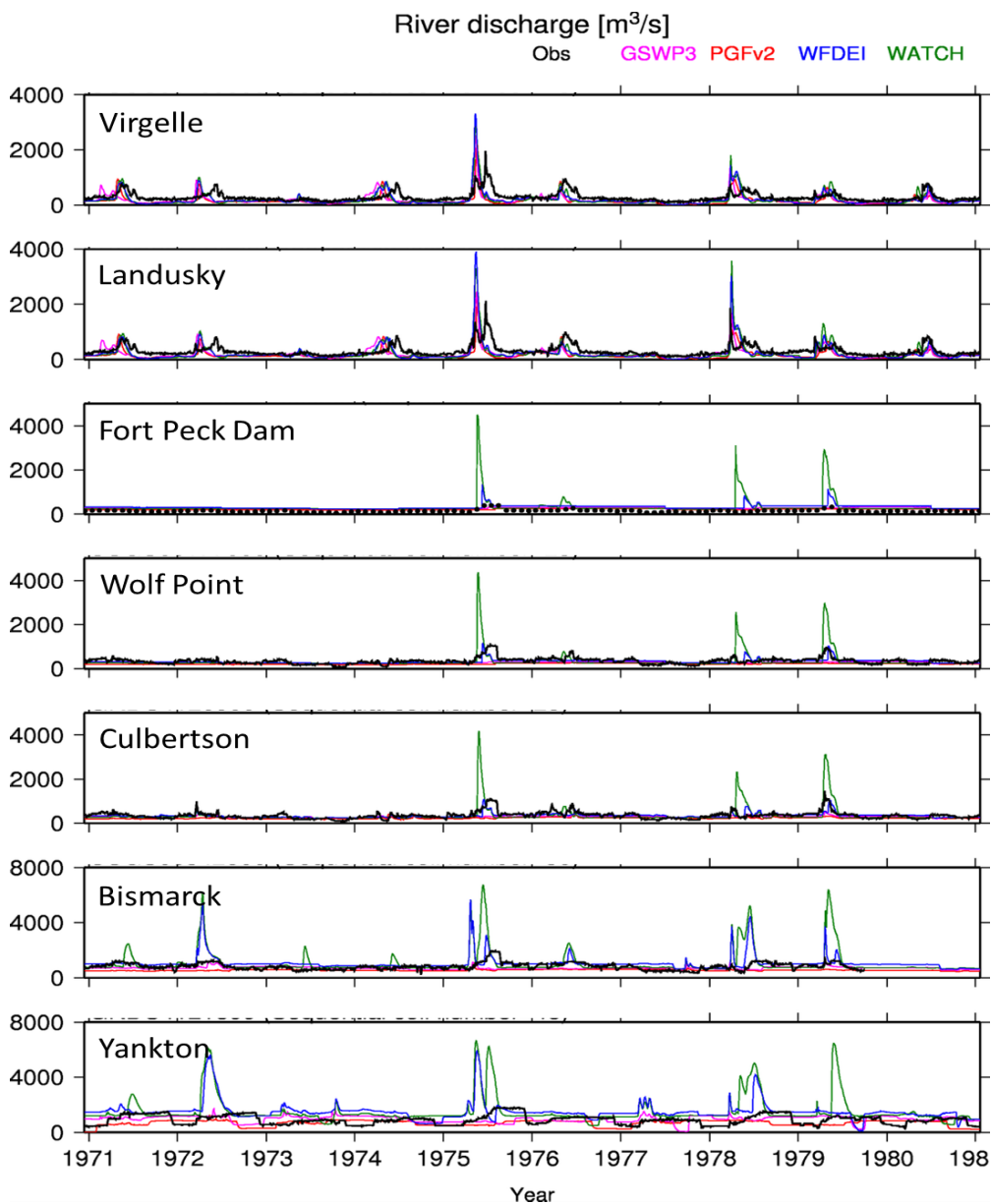
図(3)-6 流量設備利用率の地域分布。(a) 1960-1989年 および (b) 2070-2099年のRCP8.5における変化

$Q_{env}=0.2MAF$ の事例を示す。

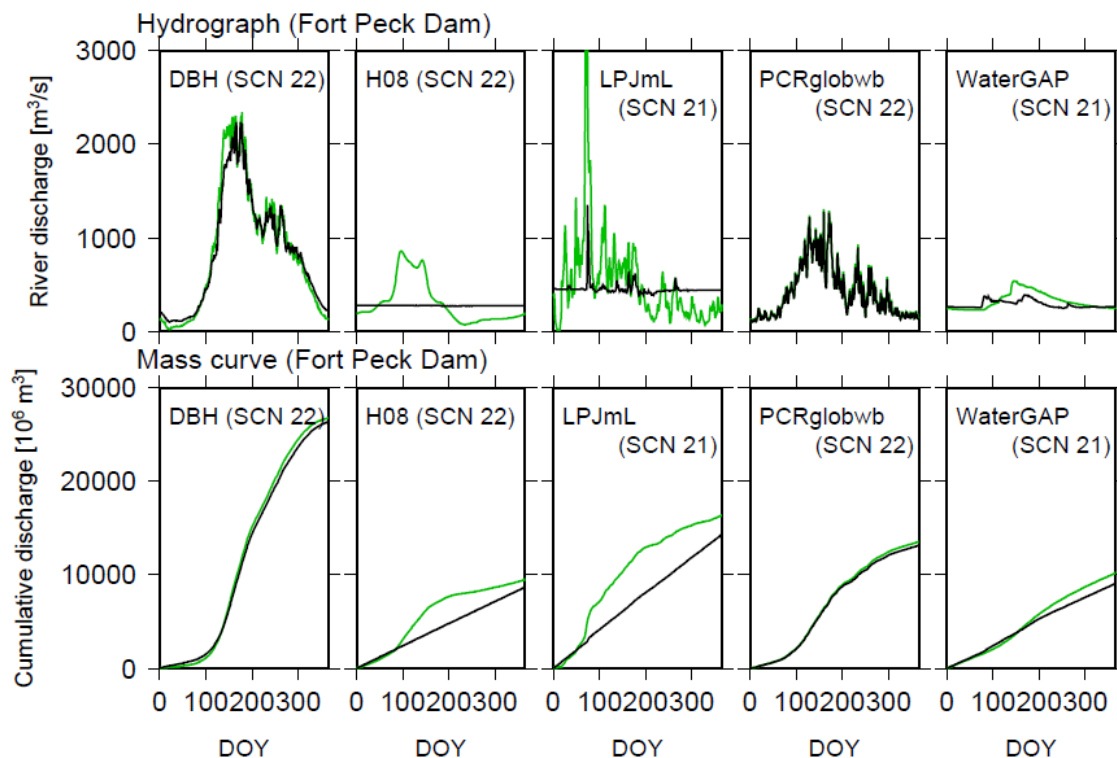
平成27年度に実施したISI-MIP検討はMasaki et al. (submitted)にまとめられている。また報告の便宜上、平成28年度に実施した検討Masaki et al. (2017)も併せてここに記す。H08を利用したMissouri川の河川流量シミュレーションにおける貯水池操作の検討結果を図に示す。図(3)-7に示しているのはMissouri川の上流から順に(1) Virgelle、(2) Landusky、(3) Fort Peck Dam、(4) Wolf Point、(5) Culbertson、(6) Bismarck、(7) Yanktonの7地点での河川流量であり、GSWP3 (紫)、Princeton (赤)、WATCH (緑)、WFDEI (青)の4つの気象データを利用した際の1971年から1980年までの計算結果である。最上流の2地点については、上流に大きなダムがないため、流量に変動が見られた。これに対し、(3)はMissouri川の主要ダムの一つであるFort Peck Damの直下にあたり、流量変動が押さえられているのが分かる。これは観測結果(黒線)ともよく一致する。ただし、WATCH、WFDEIを利用したシミュレーションでは1975年夏の出水が大きく、ダムが洪水流を制御しきれなかったため、ピークが発生している(これは観測事実とは反する)。このピークは特にWATCHにおいて極めて大きく、下流のYankton地点まで到達した。他の気象データを利用した場合は下流になるに従い、支川の合流により徐々に変動が発生していくのが分かる。ここから得られた知見は主に2点である。まず、貯水池を含む河川流量シミュレーションの解析において、洪水発生時(貯水池が満杯になる事象)のシミュレーションの挙動に着目することが重要だと示唆された。貯水池が満杯になると、下流に越流量のスパイクが伝播していくことになる。次に、利用する全球気象データによって洪水発生が大きく異なるということである。全球気象データによって降水量パターンは大きく異なり、貯水池を満杯にするような洪水流の有無の違いを生じさせることもある。

また ISIMIP に参加した DBH, H08, LPJmL, PCR-GLOBWB, WaterGAP という 5 つの国際的に定評のある全球水文モデルの貯水池操作の特徴を比較した。図(3)-8に示すのは米国の Missouri 川にある Fort Peck ダムの操作のシミュレーション結果である。H08, LPJmL, WaterGAP の 3 つのモデルは貯水池操作の効果が大きく、流入量の季節変動はダムによってほぼ吸収され、放流量は年間を通じて一定になっていることが分かる。これに対し、DBH と PCR-GLOBWB は流入量と放流量の違いが少なく、貯留・放流の効果が小さいことが分かる。このような貯水池操作のアルゴリズムの差は下流の流量にまで影響する。

最新鋭の全球水資源モデルにはいずれも貯水池操作アルゴリズムが含まれているが、同一条件で結果の相互比較が行われたのは本研究が初めてである。水資源分野の温暖化影響の予測において、モデルシミュレーションによるシナリオ分析は有力な方法となっており、こうした水資源影響に直接影響を及ぼすモデル要素についての詳細な相互比較は今後ますます重要になるものと考えられる。



図(3)-7 貯水池操作を考慮したMissouri川の長期シミュレーション。GSWP3(紫), Princeton(赤), WATCH(青), WFDEI(緑)の4つの気象データを利用した計算結果。



図(3)-8 Fort Peckダム地点における5つのモデルのシミュレーション結果。左からDBH, H08, LPJmL, PCR-GLOBWB, WaterGAPモデル。上図は日放流量(黒)と日流入量(緑)。下図は放流量と流入量の年間累積値である。

BECCS検討の結果を表(3)-1と表(3)-2に示す。実験設定により、食料用の灌漑農地はいずれのシミュレーションでも変わらないが、天水農地の1/5をバイオ燃料用の灌漑農地に転換するシナリオ1において、バイオマス燃料の灌漑に必要な追加的な水量は消費ベースで1780km<sup>3</sup>/yrと推定された。この水量は現在の食料用の灌漑水量1590km<sup>3</sup>/yrとほぼ同量である。全体のうち、約1520km<sup>3</sup>/yrは近接河川からの取水が可能だが、残りの1850km<sup>3</sup>/yrは河川以外からの取水が必要と推定された。また、H08の一部である作物収量モデルにより、食料用作物とバイオ燃料用作物の生産量と単収を推計した(表(3)-2)。天水農地での食料用作物の生産量は面積に応じて変化している。バイオ燃料生産は天水農地の1/5を灌漑農地に転換するシナリオ1では7360Mt、2/5を天水農地に転換するシナリオ2では9430Mtと示された。単収は、それぞれ31.0t/ha、21.2t/haとなり、灌漑することにより単収は約50%増加する(同じ量のバイオ燃料生産を行うための土地は2/3で済む)ことが示唆された。

現実的には食料用の農地のうちバイオ燃料に転換される割合は限定されると考えられるが、今回の設定のように、現在の農地をバイオ燃料生産に転換したとした場合、シナリオ1の場合は食料生産を14%失い、水消費量を112%増やすことと引き換えに、7360Mtのバイオ燃料を得ることに、

シナリオ2の場合、水消費量は変わらないものの、食料生産を28%失うことと引き換えに9430Mtのバイオ燃料を得ることになる。森林等の農地以外の土地をバイオ燃料用に転換した場合の検討はサブテーマ2が実施したが、同様のトレードオフが発生していたものと考えられる。このように、大量のバイオ燃料生産を行う際には、土地、水、食料、生態系の間でトレードオフが発生するが、今年度の検討により水に関する検討を大きく推し進めることができた。

表(3)-1 バイオ燃料生産に必要な土地と水資源

			基準	シナリオ1	シナリオ2
土地 [M ha]	食料用	灌漑	270	270	270
		天水	1240	1000	790
	バイオ燃料用	灌漑	0	240	0
		天水	0	0	460
灌漑 [km <sup>3</sup> /yr]	食料用		1590	1590	1590
	バイオ燃料用		0	1780	0
	合計		1590	3370	1590
	河川からの取水		790	1520	790
	その他からの取水		800	1850	800

表(3)-2 バイオ燃料生産と食料用作物生産の関係

			基準	シナリオ1	シナリオ2
生産 [M t]	食料用	灌漑	1630	1630	1630
		天水	5570	4550	3590
	バイオ燃料用	灌漑	0	7360	0
		天水	0	0	9430
収量 [t/ha]	食料用	灌漑	6.0	6.0	6.0
		天水	4.5	4.5	4.5
	バイオ燃料用	灌漑	0	31.0	0
		天水	0	0	21.2

## 5. 本研究により得られた成果

### 1) 科学的意義

自然水循環と人間水利用を統合的に計算することのできる全球水資源モデルに、あらたに工業用水、生活用水、包蔵水力、バイオ燃料作物の灌漑需要を計算する機能が加わり、より総合的に地球水循環のシミュレーションをすることができるようになった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究が直接貢献した9編の論文がIPCC第5次評価報告書から引用された。

## 6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：土木学会論文集B1(水工学)，69，I\_1813-I\_1818 (2013)「全球気候モデル出力のバイアス補正手法の違いによる水文解析への影響」
- 2) C.Jemma, P.D. Falloon, R.Kahana, R.Dankers, R.Betts, F.T.Portmann, D.B.Clark, A.Itoh, Y.Masaki, K. Nishina, B.Fekete, Z.Tessler, X.Liu, Q.Tang, S.Hagemann, T.Stacke, R.Pavlick, S.Schaphoff, S.N.Gosling, W. Franssen, N.Arnell: Earth System Dynamics.4, 359-374 (2013)  
“Comparing projections of future changes in runoff and water resources from hydrological and ecosystem models in ISI-MIP”
- 3) N.Hanasaki, S.Fujimori, T.Yamamoto, S.Yoshikawa, Y. Masaki, Y. Hijioka, M. Kainuma, Y. Kanamori, T. Masui, K. Takahashi, and S. Kanae: Hydrol.Earth Syst. Sci., 17(7), 2375-2391 (2013)  
“A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways – Part 1: Water use”
- 4) N.Hanasaki, S.Fujimori, T.Yamamoto, S.Yoshikawa, Y.Masaki, Y. Hijioka, M. Kainuma, Y. Kanamori, T. Masui, K. Takahashi, and S. Kanae: Hydrol. Earth Syst. Sci., 17(7), 2393-2413 (2013)  
“A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways–Part2:Water availability and scarcity”
- 5) J. C. S. Davie, P. D. Falloon, R.Kahana, R.Dankers, R. Betts, F.T.Portmann, D.Wisser, D. B.Clark, A. Ito, Y.Masaki, K.Nishina, B.Fekete, Z.Tessler, Y.Wada, X.Liu, Q.Tang, S.Hagemann, T.Stacke, R. Pavlick, S.Schaphoff, S.N.Gosling, W.Franssen, and N. Arnell: EarthSyst. Dynam., 4(2), 359-374 (2013)  
“Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP”



- 6) Wada, D., Wisser, S., Eisner, M., Flörke, D., Gerten, I., Haddeland, N., Hanasaki, Y., Masaki, F. T., Portmann, T., Stacke, Z., Tessler, and J. Schewe: *Geophys. Res. Lett.*, 40(17), 4626-4632 (2013)  
“Multi-model projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change”
- 7) R. Dankers, N. W. Arnell, D. B. Clark, P. D. Falloon, B. M. Fekete, S. N. Gosling, J. Heinke, H. Kim, Y. Masaki, Y. Satoh, T. Stacke, Y. Wada, and D. Wisser: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3257-3261 (2014)  
“First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble”
- 8) J. Elliott, D. Deryng, C. Müller, K. Frieler, M. Konzmann, D. Gerten, M. Glotter, M. Flörke, Y. Wada, N. Best, S. Eisner, B. M. Fekete, C. Folberth, I. Foster, S. N. Gosling, I. Haddeland, N. Khabarov, F. Ludwig, Y. Masaki, S. Olin, C. Rosenzweig, A. C. Ruane, Y. Satoh, E. Schmid, T. Stacke, Q. Tang, and D. Wisser: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3239-3244 (2014)  
“Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change”
- 9) I. Haddeland, J. Heinke, H. Biemans, S. Eisner, M. Flörke, N. Hanasaki, M. Konzmann, F. Ludwig, Y. Masaki, J. Schewe, T. Stacke, Z. D. Tessler, Y. Wada, and D. Wisser: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3251-3256 (2014)  
“Global water resources affected by human interventions and climate change”
- 10) F. Piontek, C. Müller, T. A. M. Pugh, D. B. Clark, D. Deryng, J. Elliott, F. d. J. Colón González, M. Flörke, C. Folberth, W. Franssen, K. Frieler, A. D. Friend, S. N. Gosling, D. Hemming, N. Khabarov, H. Kim, M. R. Lomas, Y. Masaki, M. Mengel, A. Morse, K. Neumann, K. Nishina, S. Ostberg, R. Pavlick, A. C. Ruane, J. Schewe, E. Schmid, T. Stacke, Q. Tang, Z. D. Tessler, A. M. Tompkins, L. Warszawski, D. Wisser, and H. J. Schellnhuber: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3233-3238 (2014)  
“Multisectoral climate impact hotspots in a warming world”
- 11) C. Prudhomme, I. Giuntoli, E. L. Robinson, D. B. Clark, N. W. Arnell, R. Dankers, B. M. Fekete, W. Franssen, D. Gerten, S. N. Gosling, S. Hagemann, D. M. Hannah, H. Kim, Y. Masaki, Y. Satoh, T. Stacke, Y. Wada, and D. Wisser: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3262-3267 (2014)  
“Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment”
- 12) J. Schewe, J. Heinke, D. Gerten, I. Haddeland, N. W. Arnell, D. B. Clark, R. Dankers, S. Eisner, B. M. Fekete, F. J. Colón-González, S. N. Gosling, H. Kim, X. Liu, Y. Masaki, F. T. Portmann, Y. Satoh, T. Stacke, Q. Tang, Y. Wada, D. Wisser, T. Albrecht, K. Frieler, F. Piontek, L. Warszawski, and P. Kabat: *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 245-3250 (2014)  
“Multimodel assessment of water scarcity under climate change”
- 13) 眞崎良光・花崎直太・高橋潔・肱岡靖明：土木学会論文集 B1(水工学), 70, 4, I\_289-I\_294 (2014)  
「地球規模の灌漑用水要求量とその水源に対する気候変化の影響」
- 14) 眞崎良光, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明：(2014) 土木学会論文集 G (環境), 70 (5), I\_111-I\_120  
「気候変動にともなう理論包蔵水力と流況に基づく水力発電量の将来変化」.
- 15) Y. Masaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Hijioaka, (2014) *Water Resources Research*, 50 (5),

4054-4078

"Global-scale analysis on future changes in flow regimes using Gini and Lorenz asymmetry coefficients"

- 16) K. Frieler, A. Levermann, J. Elliott, J. Heinke, A. Arneth, M.F.P. Bierkens, P. Ciais, D.B. Clark, D. Deryng, P. Doll, P. Falloon, B. Fekete, C. Folberth, A.D. Friend, D.C. Gellhorn, S.N. Gosling, I. Haddeland, N. Khabaroy, M. Lomas, Y. Masaki, K. Nishina, K. Neumann, T. Oki, R. Pavlick, A. C. Ruane, E. Schmid, C. Schmitz, T. Stacke, E. Stehfest, Q. Tang, D. Wisser, V. Huber, F. Piontek, L. Warszawski, J. Schewe, H. Lotze-Campen, and H.J. Schellnhuber: *Earth System Dynamics*, 6, 447-460 (2015)
- “A framework for the cross-sectoral integration of multi-model impact projections: Land use decisions under climate impacts uncertainties”
- 17) Y. Masaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Hijioaka: *Earth System Dynamics*, 6:461-484, 2015
- “Propagation of biases in humidity in the estimation of global irrigation water”
- 18) F.F. Hattermann, V. Krysanova, S.N. Gosling, R. Dankers, P. Daggupati, C. Donnelly, M. Flörke, S. Huang, Y. Motovilov, S. Buda, T. Yang, C. Müller, G. Leng, Q. Tang, F.T. Portmann, S. Hagemann, D. Gerten, Y. Wada, Y. Masaki, T. Alemayehu, Y. Satoh, and L. Samaniego.: *Climatic Change*, 141, 561-576, 10.1007/s10584-016-1829-4 (2017)
- “Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins”
- 19) X. Liu, Q. Tang, H. Cui, M. Mu, D. Gerten, S.N. Gosling, Y. Masaki, Y. Satoh, and Y. Wada: *Environmental Research Letters*, 12, 025009 (2017)
- “Multimodel uncertainty changes in simulated river flows induced by human impact parameterizations”
- 20) Y. Masaki, N. Hanasaki, H. Biemans, S. Hannes Müller, T. Qiuhong, W. Yoshihide, G. Simon, K. Takahashi, and Y. Hijioaka : *Environmental. Research. Letters.* ( in press)
- “Intercomparison of global river discharge simulations focusing on dam operation --- Part II: Multiple models analysis in two case-study river basins, Missouri-Mississippi and Green-Colorado”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない。」

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 花崎直太、眞崎良光、仁科一哉：地球環境研究センターニュース，23（8），2-3（2013）  
「ISI-MIP Results Workshop参加報告」
- 2) 花崎直太・伊藤昭彦・金炯俊・佐藤雄亮・仁科一哉・長谷川知子・藤森真一郎・眞崎良光：地球環境研究センターニュース，24，11，7-13（2014）  
「温暖化影響の全体像に迫る：米国科学アカデミー紀要に特集されたISI-MIPの紹介」
- 3) 花崎直太・中山忠暢・眞崎良光：地球環境研究センターニュース，24，5，9-10（2013）  
「人間活動と水環境問題の新時代に向けて ～「人新世の水」会議参加報告～」
- 4) K. Frieler, A. Levermann, J. Elliott, J. Heinke, A. Arneth, M.F.P. Bierkens, P. Ciais, D.B. Clark, D.

Derying, P. Doll, P. Falloon, B. Fekete, C. Folberth, A.D. Friend, C. Gellhorn, S.N. Gosling, I. Haddeland, N. Khabaroy, M. Lomas, Y. Masaki, K. Nishina, K. Neumann, T. Oki, R. Pavlick, A.C. Ruane, E. Schmid, C. Schmitz, T. Stacke, E. Stehfest, Q. Tang, D. Wisser, V. Huber, F. Piontek, L. Warszawski, J. Schewe, H. Lotze-Campen, and H.J. Schellnhuber: Earth System Dynamics Discussions, 5, 1075-1099 (2014)

“The relevance of uncertainty in future crop production for mitigation strategy planning”

## (2) 口頭発表 (学会等)

1) Y. Masaki and N. Hanasaki: AGU 2012 Fall Meeting, San Francisco, USA, (2012)

“How sensitive are hydrological simulations to the selection of bias correction methods?”

2) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：第57回水工学講演会 (2013)

「全球気候モデル出力のバイアス補正手法の違いによる水文解析への影響」

3) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：日本気象学会 2013 年度秋季大会 (2013)

「流況の指標化による全球主要河川の気候変動影響評価」

4) Y.Masaki,Hanasaki.N: Impacts World 2013 International Conference on Climate Change Effects (2013)

“Adaptation measures for the impact of climate change on global water resources— Option 1: Reducing water use”

5) Y.Masaki,Hanasaki.N : GWSP (Global Water System Project) international conference:Water in the Anthropocene -Challenges for Science and Governance. Indicators, Thresholds and Uncertainties of the Global Water System- (2013)

“Projection of future irrigation water requirement under different global warming rates”

6) 眞崎良光：第3回シナリオイニシアティブ会議 (2013)

「Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)における影響評価研

7) 眞崎良光：統合的陸域圏研究連絡会 (日本気象学会の研究連絡会) (2013)

8) Y.Masaki, N.Hanasaki,K.Takahashi,Y.Hijioka: AGU2013 Fall meeting, San Francisco, U.S.A.,(2013)

“Global-scale analysis on future changes in flow regimes using Gini and Lorenz asymmetry coefficients”

9) Y.Masaki ,N.Hanasaki, K.Takahashi, Y.Hijioka: 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle (GEWEX), The Hague, The Netherlands (2014)

“Global-scale analysis on future changes in flow regimes using Gini and Lorenz asymmetry coefficients”

10) Y.Masaki ,N.Hanasaki, K.Takahashi, Y.Hijioka : AOGS11th Annual Meeting, Singapore, (2014)

“Impacts of climate change on global irrigation water requirement and its sources”

11) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：土木学会第22回地球環境シンポジウム,東京(2014)

「気候変動にともなう理論包蔵水力と流況に基づく水力発電量の将来変化」

12) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：日本気象学会2014年度秋季大会 (福岡) (2014)

「GCMの湿度バイアスが蒸発散量の推定に与える影響の定量的評価」

- 13) 眞崎良光、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：第 58 回水工学講演会（2014）  
「地球規模の灌漑用水要求量とその水源に対する気候変化の影響」
- 14) Y.Masaki, N.Hanasaki, K.Takahashi, Y.Hijioka,: AGU Fall meeting 2014, San Francisco, USA  
(2014)  
“Quantitative analysis of differences in the humidity among GCMs and propagation of uncertainty into  
irrigational water withdrawal”
- 15) Y. Masaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Hijioka: 26th International Union of Geodesy and  
Geophysics General Assembly 2015, Prague, Czech (2015)  
“Propagation of biases in humidity in the estimation of global irrigational water”
- 15) Y. Masaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Hijioka: 12th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences  
Society together with 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW)  
Conference, Singapore (2015)  
“Future Changes in Theoretical Hydropower Potential and Hydropower Generation Based on River Flow  
under Climate Change”
- 16) Y. Masaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Hijioka: American Geophysical Union Fall Meeting 2015, San  
Francisco, U.S.A. December (2015)  
“Evaluation of global hydrological model considering reservoir operation”

### (3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

### (5) マスコミ等への公表・報道等

「特に記載すべき事項はない。」

### (6) その他

眞崎良光特別研究員が「気候変動にともなう理論包蔵水力と流況に基づく水力発電量の将来変化」  
で土木学会の平成 27 年度地球環境論文賞を受賞した。

## 8. 引用文献

「特に記載すべき事項はない。」

## S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

### (4) 土地利用モデルの開発と水資源・生態系との相互作用の分析

茨城大学農学部

木下 嗣基・ハスバガン・稲富素子

平成24～28年度累計予算額：61,690千円（うち平成28年度：13,078千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

気候変動による影響は様々な方面に現れてくる。その影響を低減するための方策は数多くあるが、ベストの答えはない。ある方策を講じるとマイナスの側面も出てくることが予想される。本テーマでは、陸域の最適戦略を検討ため、土地利用と水資源や生態系との相互作用の分析を行う。そのために、土地利用モデルの開発を行うとともに、陸域生態系モデルや水資源モデル、作物モデルとの統合モデルの構築を行った。開発された土地利用モデルにより、様々な条件での土地利用予測を行いとともに、シナリオの作成を行った。その中で、土地利用の不確実性は、気候の不確実性、気候モデルの不確実性、社会経済の不確実性、食料需要の不確実性がともに同レベルであることが示されるとともに、アフリカなどの発展途上国の不確実性が非常に大きいことが示された。また、気候変動対策として期待されている第二世代バイオ燃料作物の生産であるが、第二世代といえども、適切な制限を設けないと熱帯雨林の現象に繋がることを示された。

#### [キーワード]

土地利用、森林減少、バイオ燃料作物農耕地、空間詳細シナリオ、モデル統合

#### 1. はじめに

気候変動における土地利用に関する研究は、土地利用が気候に与える影響と、気候が土地利用に与える影響がある。前者は、土地被覆の状態によって地表面のアルベドが変化による熱収支が変化し、地表面の蒸発散によって熱収支、水循環が変化し気候に影響を与える。これらは全球スケールでは大きな影響を与えないが、地域スケールでは気候に影響を与えることが指摘されている。これは、将来の社会への気候変動影響や適応策を検討するにあたり、地域スケールやそれ以下のスケールの土地利用変化が必要であり、気候モデルを含む地球システムモデルでは土地利用変化がシナリオとして必要とされている。これに対し、RCP (Representative Concentration Pathways : 代表的濃度経路) が提供されている。これは、空間詳細な土地利用変化のシナリオが気候モデルなどに提供されている。このように、将来の土地利用変化については、気候予想などから、シナリオとしての必要性が求められている。後者の、気候が土地利用に与える影響も無視できない。気候変動が人間社会に与える影響にはたくさんの要素がある。その中には、高温が人の体に与える影響である健康リスクや、洪水などの災害リスクの変化が重要とされている。それらと同レベルの重要性で扱われる問題に食料供給のリスクがある。この食料の供給の問題は、土地から得られるエコシステムサービスの変化リスクとも言える。そのように考えとともに、土地の面積は有限であることを考慮すると、食料問題は食料のみで完結する問題ではな

く、木材などの供給やバイオ燃料作物の供給も同時に考えなければならない。それだけでなく、様々な生態系によって享受されるサービスも考える必要がある。

これは、食料生産を増大させることで得られるサービスを検討するだけでなく、それによって失われるサービスも考えなければ、人間社会にとって損失が大きくなるということである。例えば、増大する人口による食料需要の増大に対し、無秩序に農耕地を拡大すると生物多様性などの機能の喪失を引き起こしたり、地下に貯蔵されている有機物の分解を促進することで温室効果ガスの排出を促し、気候変動を加速することもあり得る。しかし、そのような悪影響が低い地域が事前にわかっているならば、食料生産に多少の非効率が生じたとしても、人間社会全体が享受する利益が大きくなるのが可能である。そのような検討が必要であるが、土地利用は其中で重要な要素と言える。人間の活動と、自然を結びつける要素が「土地利用」なのである。気候変動を伴う生態系への影響を考慮するには、生態系モデルを利用することが有効であるが、その際に土地利用の変化シナリオが重要な入力データとなる。また、気候変動下における水資源変化の影響を考慮するにもモデルが重要な役割を果たすが、そこでも土地利用変化シナリオは重要な入力データとなる。このように、土地利用変化シナリオの重要性は高いものである。

しかし、土地利用変化は気候変動の影響を受けることも重要な要素である。気候の変化により作物の収量が変わると土地利用は変化する。作物だけでなく、水資源が減少すると灌漑水が不足するために作物の収量が変わり、土地利用も変化する。食料だけでなく、木材の生産についても、その収量が変わると毎年の伐採面積や伐期が変わる。この伐採面積の変化と伐期の変化は、土地の利用の方法が変わることを意味するので、広い意味での「土地利用変化」ともいえる。つまり、土地利用の最適戦略を検討するにあたり、気候変動影響は重要であることを意味している。

このような背景のもとで、水資源や生態系との相互作用について検討を行う。そのために、土地利用モデルの開発をおこない、土地利用変化シナリオを提供するだけでなく、生態系の影響を考慮可能な統合モデルを構築し、最適な土地利用戦略への検討を行う。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、気候変動下における水資源、生態系との相互作用を含んだ土地利用に関する最適戦略の検討を行う。そのために、土地利用に関するシナリオの作成を行い、他のモデルによって最適な戦略の検討を行えるようにする。これは、土地利用自体が人間社会に影響を直接与えることはなく、生態系サービスを通して影響を与えるためである。

この検討を行うにあたり、水資源の検討を行うモデル(H08)、陸域生態系の検討を行うモデル(VISIT)、作物収量の予測を行うモデル(PRYSBI2)、人口・GDPダウンスケールモデルとの連携を行うことが可能で、なおかつハードリンクにより統合されたモデルの構築に寄与する土地利用モデルの構築を行うものである。この際、他のモデルとの連携から、土地利用シナリオは緯度経度0.5度メッシュの空間詳細シナリオとする。この土地利用モデルでは、次のような要素を検討できるものの開発をおこなった。

- 農耕地の分布
- バイオ燃料作物の分布
- 牧草地の分布

- 森林の分布
- 管理森林の分布
- 伐採量の分布
- 土地利用変化（トランジションマトリックス）の推計

モデルの予想期間は2010年から2100年までである。このモデルは、統合評価モデルによる社会経済シナリオおよびそのダウンスケールシナリオ（人口・GDP）を入力データとするが、生態系モデルや作物収量モデルについても入力データとするモデルと、これら連動するモデルの開発を同時に行う。

このモデルの構築により、今後の土地利用がどのように変化していくのかを推計するとともに、様々な不確実性が土地利用の不確実性にどのように作用するのかを検討することで、土地利用の最適戦略の検討に寄与することが可能である。

### 3. 研究開発方法

土地利用戦略の検討と、土地利用モデルの開発について次のような段階に分けて研究を進める。

- ① 農耕地土地利用モデルの開発
- ② バイオ燃料作物土地利用モデルの開発
- ③ その他の土地利用モデルの開発
- ④ 土地利用遷移モデル
- ⑤ 土地利用戦略の検討

まず、①農耕地土地利用モデルの開発について示す。土地利用において最も重要な形態は農耕地である。これは、人間社会に必要な食料供給に直接的な影響を与えることだけでなく、人が直接的に利用する土地利用の面積として、最も大きいものが農耕地のためである。そのため、農耕地のモデルについての開発を重点的に行った。農耕地以外のモデルについては、地域レベル（全世界を17地域に分割したもの）の土地利用については、S-10プロジェクトのテーマ4に参画している社会経済モデルAIMの結果を利用しているが、農耕地に関しては独自の推計を行う。これは、農耕地の分布をダウンスケールする方法では、矛盾が生じるためである。なぜならば、農耕地のダウンスケールは、農耕地としての適地に対し優先的に割り振りを行う方法が一般的である。これは従来の研究で行われてきた方法であり、決定的な問題点の指摘は行われていない。特に今回の対象となる解像度（緯度経度0.5度）では、問題点は見当たらない。この割り振りであるが、土地の供給関数とも密接に関連している。農耕地が多く割り振られる地域は、農耕地へ土地が多く供給されていることと同義である。つまり、ダウンスケールの方法と、土地の供給関数は同一であることが望ましい。これが同一でない場合矛盾が発生する。この矛盾は、極端なケースを検討する場合に大きくなり、長期の予測では様々な困難が発生する。そのため、農耕地の土地利用モデルでは、地域別の土地利用予測モデルを内包するモデルの開発を行った。

農耕地モデルは、サブモデルとして(a)農産物国際交易サブモデル、(b)農耕地分配（ダウンスケールリング）サブモデルからなる。(a)の農産物国際交易サブモデルは、収穫逓減型リカードモデルを基礎とした国際交易モデルにより国別の農業生産量、農産物価格および農耕地面積の推定を行うモデルである。(b)の農耕地配分サブモデルは、国別に推定された農耕地面積を、各国の人口や地理条件に応じて配分するモデルである。このモデルでは、(a)の農産物国際交易モデルに対し

て、土地供給関数のパラメータを与える役割も果たす。

農産物国際交易サブモデルは、人口とGDPの推移から、採算がとれる農耕地の面積の推定を行う。農耕地は、単位面積あたりの収量と穀物価格により売上げが決まり、コストは肥料投入量と機械化度によって決定されると仮定する。機械化度は傾斜によって異なるため、傾斜や賃金が高いほど生産コストは高いとした。これにより、各国の採算可能な面積が決定される。この採算可能な面積と穀物価格により、農業人口および農業生産額が決まる。国内総生産額は外生変数として与えられているので、非農業部門の生産額が求められる。また、国の間では貿易がなされるが、リカードモデル的な比較優位に基づく貿易が行われる。この際に本モデルでは、収量低減の仮定を課している。これは、各国において農耕地面積の拡大を行うと、農業に適した土地は既に農耕地になるか、より生産性の高い都市として利用されているので生産効率が低い土地が農耕地に転換されることになる。つまり、工業製品の生産効率が向上する一方で、農耕地における単位面積あたりの収量が増加せず、穀物価格も上昇しない場合、農業が比較劣位となり輸入量が増加する。しかし、収量低減の仮定を貸しているため、農耕地面積が減少するほどに競争力の高い農耕地が生き残り、工業国が完全に工業生産に特化し、農業を放棄することはない。また、収量低減の仮定を課したうえで、貿易収支は長期的には0となる仮定、全世界の生産量は消費量と一致する仮定を課すことにより、為替レートが内生変数として必要となる。つまり、一人当たりのGDPが大きく向上する一方で、農業生産性が向上しない国では、為替レートが工業製品の生産性向上に引きずられる形で上昇する一方で、農産物は上昇した為替レートにともなって競争力を失う形となる。そのような国内では、競争力を確保できる地域で農業が営まれるだけでなく、上昇する賃金および低下する穀物価格に対応するように生産規模を拡大することとなる。このモデルの特徴はシンプルであるが決定的な問題点がないとされるリカードモデルを基礎としており、ロバストなものである。このロバストネスは他のモデルとの連携では非常に重要なものである。

農耕地ダウンスケールサブモデルでは、農産物国際交易サブモデルで得られた、世界17地域別の農作物生産量、農作物価格などの情報を用いて緯度経度0.5度メッシュにダウンスケールする。ダウンスケールを行う際には、農産物国際交易サブモデルでも用いた土地の供給関数のパラメータ作成に用いたデータにより農業適正度の指数を用いる。このデータは、作物モデルPRYSBI2によって推定された農作物収量と、傾斜のメッシュデータと、地域別GDP、人口のデータを用いて作成する。これによって、メッシュごとの農業適正度の指数を求める。このとき、農業適正度の空間解像度は緯度経度30秒として推計を行った。緯度経度30秒単位で農業適正度が高い土地から農耕地に割り当てを行う。ただし、2010年の時点で都市となっている地域には農耕地の割り当てを行わない。このダウンスケールや土地の供給関数の作成には精度の高い土地被覆図が必要となるが、今回のプロジェクトではこの作成も同時に行った。

また、農耕地のマネージメントモデルの開発も同時に行った。世界の農業では、地域により収量は大きくことなる。この違いは気候の影響以外にも、施肥や灌水といったマネージメントの影響も無視できない。例えば、アフリカの穀物類の平均収量は1ヘクタール当たり2トンに満たないが、気候等から予測される潜在収量はその数倍あるとされている。この違いは長期的な予測を行う際には無視しえないものである。そこで、簡易作物モデルと社会経済データ、および統合評価モデルでの農産物価格を用いて、経済的に合理的なマネージメント（特に施肥）の推定を行うことで、反収の将来推計を行うモデルを開発した。これにより、全世界の各地点（グリッドセル）



において、穀物売上高と肥料投入費用が最大となる肥料投入量を求めた。

次に、バイオ燃料用作物の農耕地土地利用モデルの構築をおこない、シナリオの作成を行った。本モデルは、食用・飼料用作物の収量分布としてはサブテーマ5にて作成された収量マップを使用した。つまり、気候変動が発生しないと仮定した上でも収量分布は変化（上昇）する収量シナリオである。この収量シナリオと、国別の人口・GDPシナリオ、サブテーマ1にて作成されたバイオ燃料用作物（MiscanthusおよびSwitchgrass）の収量マップ、地理情報を入力データとし、本サブテーマにて開発された土地利用モデルおよびダウンスケールモデルの利用を行った。本シナリオ作成では、食糧の供給は、バイオ燃料の供給に優先して行われることを仮定し、全世界の食料需要と価格から穀物生産量および分布を求める。その結果を利用し、バイオ燃料の分布を求めた。

その他の土地利用モデルとそれを用いたシナリオであるが、これらは主に森林の伐採による損失を考慮するために作成したものである。農耕地の土地利用は他の土地利用と比べて優先的に決定される。これは、農業に適した土地での収益は、林業の収益よりも大きいためである。同様に、牧草地での収益は、多くの場合林業の収益を上回る。これは、熱帯雨林の伐採の原因ともいわれている。この傾向は長期的に維持されると仮定し、農耕地、牧草地は、林業的な土地利用よりも優先的に行われるとした。この過程に基づき、まず牧草地の土地利用を決定する。方法は、統合評価モデルによる予測値をもとに、ダウンスケールするものである。ダウンスケールの際には陸域生態系モデルのVISITによるC3、C4植物のNPPを用いた。また、傾斜角が20度以上の土地では、動物が植物を食べることはまれであることから、傾斜度は20度以下とした。この条件に基づき、牧草地の空間詳細シナリオの作成を行った。これら、農耕地、牧草地のシナリオと、2010年の土地被覆図を基に、森林の分布の推移を求めた。この際には、現在の砂漠や雪氷地の土地被覆は変化しないと仮定した。また、本研究では都市域も変化しないと仮定した。これらの仮定から、全世界で、農耕地、牧草地、砂漠、雪氷地、水域、都市を除いた土地が、森林か草原となる。これから、2010年の分布をもとに、森林と草原のシナリオを決定する。このように森林を求めたのち、人間が経済活動として利用する森林のシナリオと、伐採量のシナリオの作成を行った。人間が利用する管理森林の割合は、ある閾値までは人口密度に比例するとした。この管理森林の面積は、統合評価モデルによる木材生産量から逆推定を行った。陸域生態系モデルによるNPPとバイオマスの時間推移から、伐採期間（伐期）と単位面積当たりの伐採量を推定し、木材生産量から求められる伐採面積を推定し、伐期とともに管理森林の面積を決める方法とした。この方法により伐採に関する空間詳細シナリオの作成も行った。

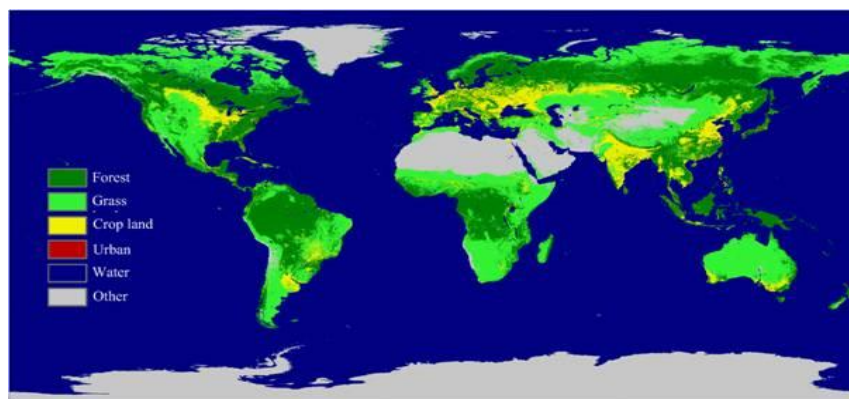
モデル構築と併せて、他の陸域モデル（陸域生態系モデル、水資源モデル、作物モデル）との統合を行うために土地利用遷移モデル（トランジションマトリックスモデル）の構築を行った。これは、土地利用の変化が何から何に対して行ったかを推計するモデルである。例えば、1つのメッシュ（緯度経度0.5度）において、農耕地の面積と森林の面積が不変であったとしても、移動耕作などが行われている地域では、森林伐採と二次植生への遷移が行われている。また、経済発展をしている地域では、急傾斜の土地では農地の放棄が進む一方で、農業適地での農耕地面積は増加する。このようなことを考慮するモデルの構築を試みた。このモデルは、本サブテーマで開発されたすべての土地利用モデルが、内部的に緯度経度30秒の解像度を有しており、その中では単一の土地利用として推計を行っていることを利用して構築した。このトランジションマトリックスモデルは、農耕地土地利用モデル、バイオ燃料作物土地利用モデル、その他のモデルと併せて、

他の陸域モデルとの統合に提供された。

以上のように、開発された土地利用モデルにより、作物モデルの結果をソフトリングで利用し、土地利用の不確実性解析を行った。土地利用に与える影響は、放射強制力の不確実性、気候モデルの不確実性、社会経済（人口・GDP）の不確実性、食料需要予測モデルの不確実性といったさまざまな要因がある。リスク戦略を検討するうえで、どの不確実性が大きな影響を与えているのかを把握する必要がある。そこで、放射強制力を4種類（RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5）と、気候モデルを5種類（HadGEM, GFDL, IPSL, MIROC, NorESM）、社会経済シナリオを3種類（SSP1, SSP2, SSP3）、食料需要のモデルを3種類（AIM, GRAPE, MARIA）用いた。このすべての組み合わせの計算を行い、どの要素が土地利用に影響を与えるのか検討を行った。また、バイオ燃料作物の影響に関して考察を行うために、その生産がどのような地域で行われているのか検討と考察を行った。

#### 4. 結果及び考察

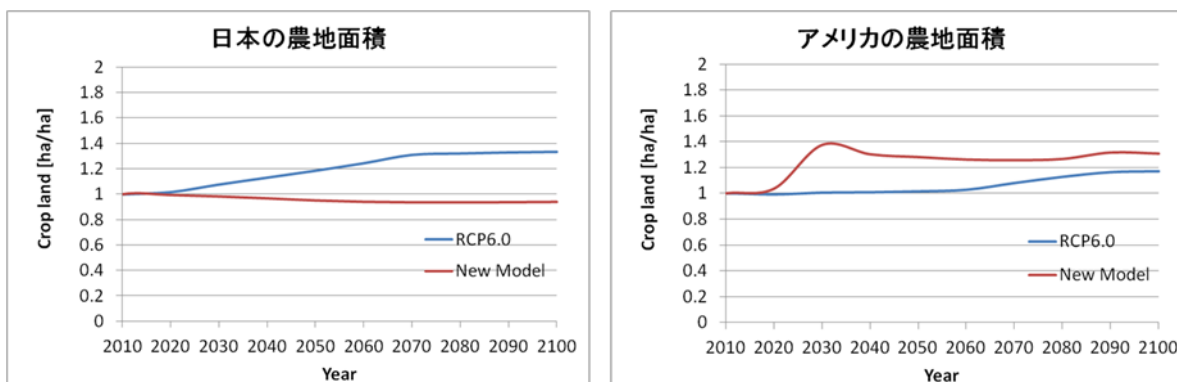
まず、農耕地土地利用モデルの結果について述べる。農耕地土地利用モデルでは、土地の供給関数のパラメータやダウンスケール指標である農業適正度指数を算出するために、精度の高い土地被覆図が必要となるため、その作成を行った。その結果を図(4)-1に示す。



図(4)-1 作成された土地被覆図

この土地被覆図では、既存の6枚のマップと4000点以上の地上検証データを用いて作成したものである。その精度は既存のマップでもっとも精度が高いもの（約70%）よりも5%程度の精度上昇が見られた。

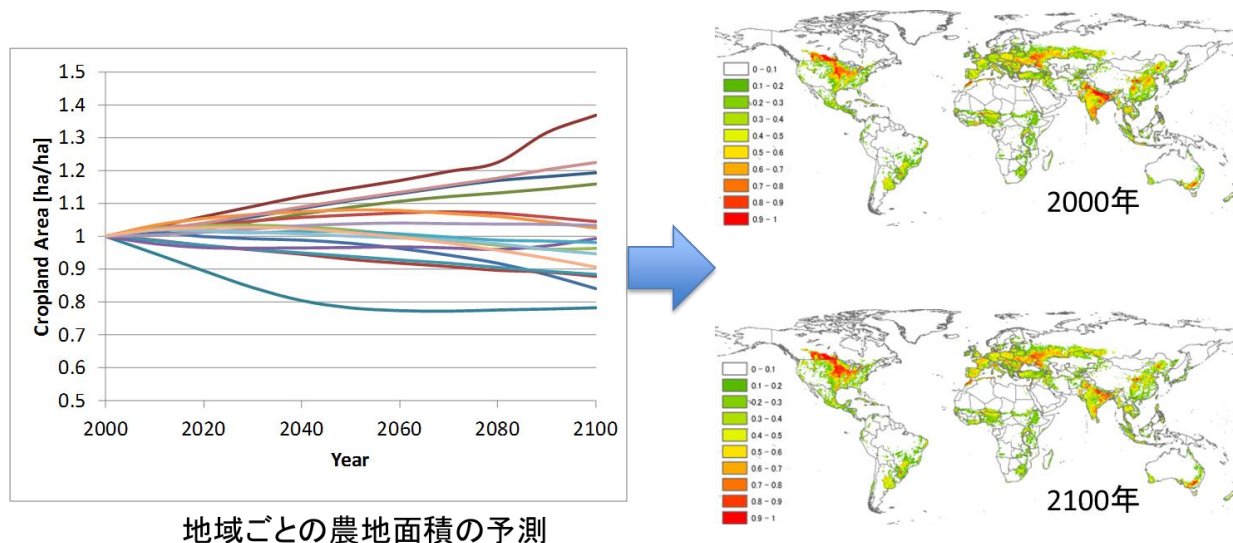
農耕地土地利用モデルでは、農産物国際交易サブモデルと農耕地ダウンスケールモデルがあるが、図(4)-2に、地域別の農耕地の推移を示す。



図(4)-2 日本とアメリカにおける農耕地の推移の予測

この推計は、AIM (Asia Integrated Model) のRCP6.0に準じて行った。RCP6.0では、日本の一人当たりGDPは減少する傾向がある。一方アメリカではGDPは少々する傾向がある。日本では減少する一人当たりGDP、大きく減少する人口に対応するように農地面積は減少する。食糧消費量については、農地面積よりも大きく減少するが、一人当たりのGDPが低下することにより、農業として採算が取れる面積が増加するため、農地面積の減少に歯止めがかかる。また、一人当たりGDPが減少することにより為替レートが低下するため、農業の国際競争力の増加（日本国内における穀物価格の上昇）が起こるため、これも農地面積の減少に歯止めをかけている。

この農産物国際交易サブモデルの結果を用いたダウンスケールを行った結果を図(4)-3に示す。

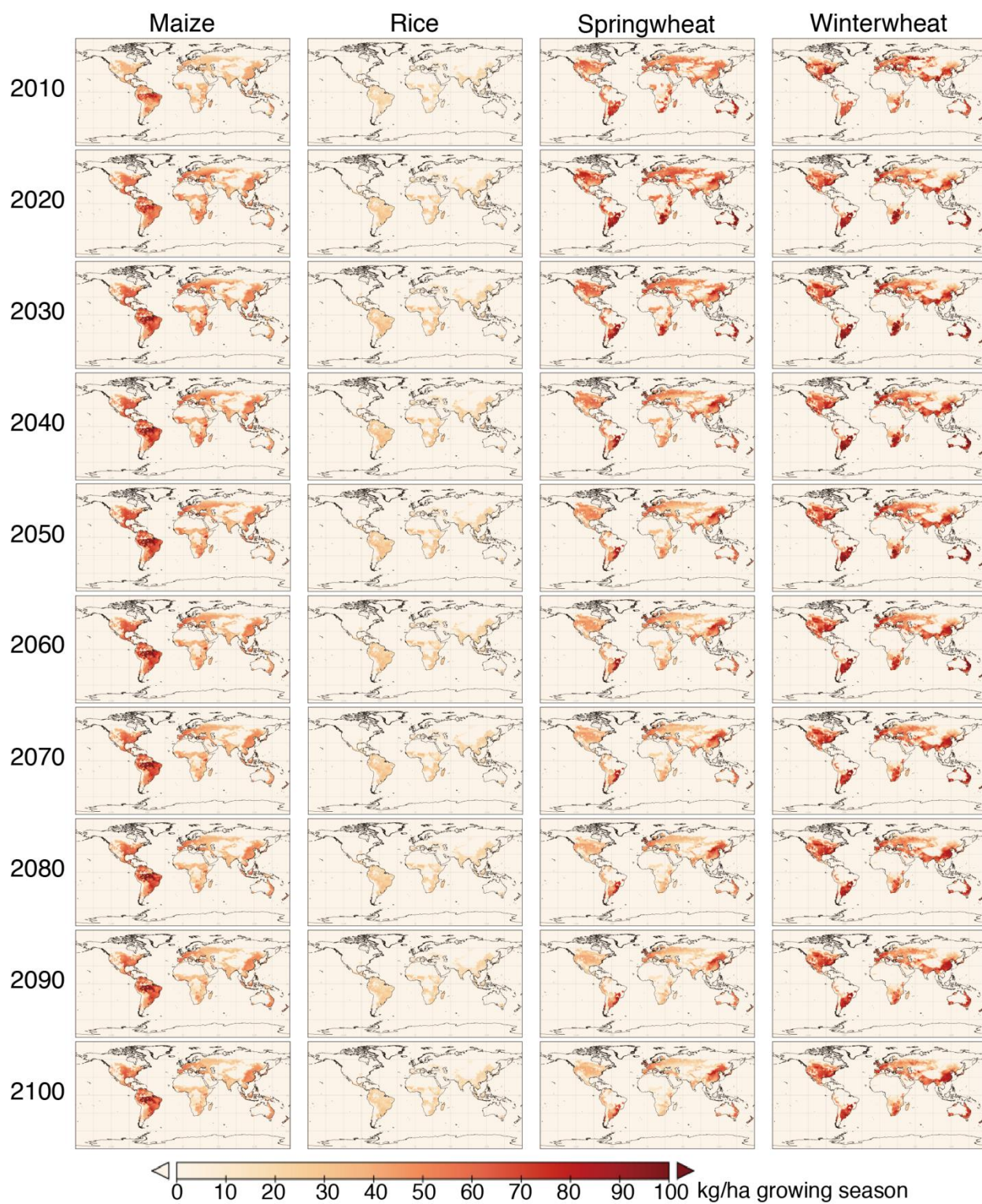


図(4)-3 土地利用モデルによる空間詳細シナリオの作成結果

農耕地面積は経済の発展（賃金の上昇）に伴って減少する傾向がある。一方で穀物価格の上昇は農耕地面積の増加を促す。経済の発展に伴って傾斜地の農耕地が優先的に放棄され、穀物価格の上昇によっては、平たん地での農耕地利用率が上昇する傾向がある。その結果、先進国では全世界の中で相対的に経済成長が低いため、農業が盛んになる傾向が見られる。一方、インドや中国など、経済が発展し穀物換算の食料需要の増加が見込まれる地域では、農耕地の面積はむしろ減少する方向になることがわかった。また、一つの地域の中においても、農耕地面積が2000年の時点で大きい地域では農地面積が増加する、または農地面積の減少が小さいが、農耕地面積が少ない地域では、農地面積の増加が少ない、または農地面積の減少が大きく、現在以上に差が大きくなることが示された。これは、農村部の収入格差が大きくなることを示しているため、重要な知見である。

次に、農業マネジメントに関する結果を示す。従来の土地利用シナリオでは、土地の利用方法についてのシナリオのみであったが、施肥の量を提供する本シナリオの新たな試みである。肥料投入量は作物生産量の決定要素の一つであり、食料需給と人類が存続するために重要である。一方、化学肥料の過度の使用により環境汚染と多くの温室効果ガス排出を引き起こす結果となった。将来の食料生産、土地利用形態とその管理、気候変化を考慮した肥料投入の適切なシナリオが必要とされている。緯度経度0.5度の解像度の全球作物モデルSWATを使用し、ISI-MIPプロコト

ルによる4つの大気温室効果ガス濃度シナリオ（RCPs）と5つの気候モデルシナリオを組み合わせ、2099年までの窒素施肥シナリオを作成した。シナリオを作成した作物は4種類（トウモロコシ、コメ、春コムギ、冬コムギ）であり、それぞれの作物の窒素施肥量と収穫量をモデルから算出し、生産関数を求め、これを元に将来の窒素施肥計算を行った。全球におけるトウモロコシ、コメ、春コムギ、冬コムギへの窒素肥料投入量について、生産関数を用いて推定を行った。結果の一部を図1に示した。図1は、オフラインのHadGEM2-ES気候モデルシナリオとRCP6.0シナリオを用いて2010年から2100年まで、灌漑をしない条件で10年ごとの各作物への一期作の窒素肥料投入量である。

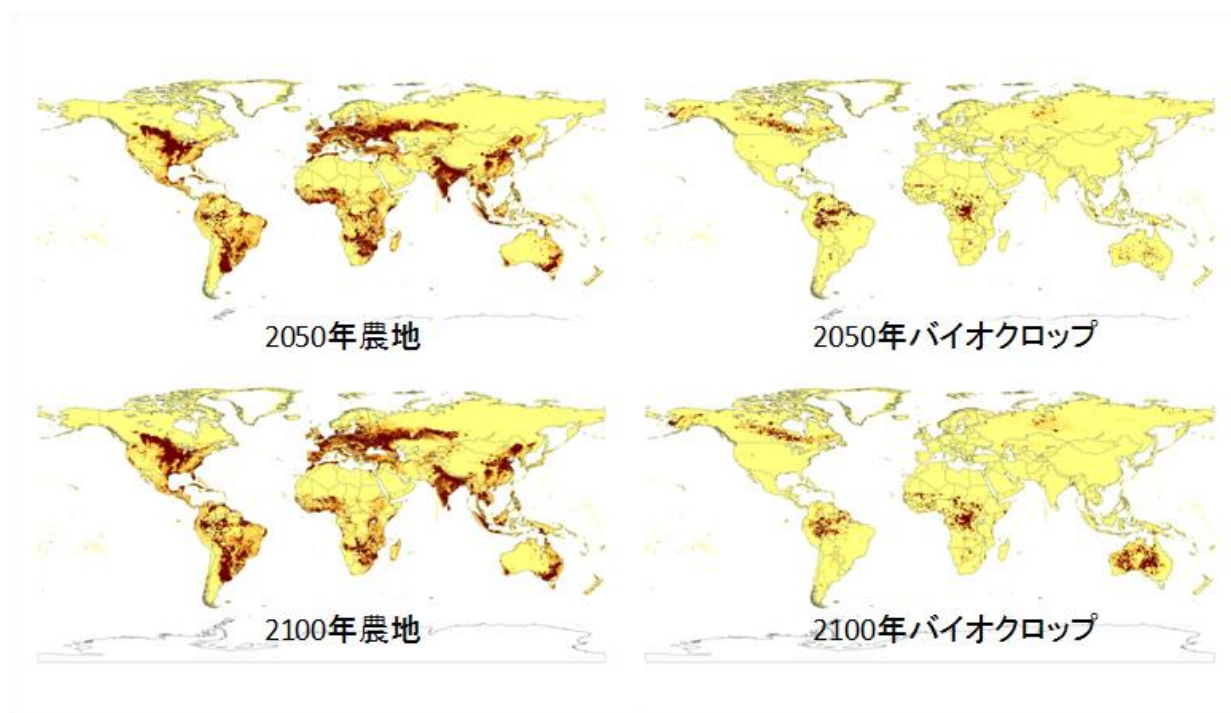


図(4)-4 球におけるトウモロコシ、コメ、春コムギ、冬コムギへの窒素肥料投入量

南アフリカの中央では、トウモロコシの耕作地への肥料投入量は最も高く100kg/haと推定された。イネの水田への肥料投入量は、他の作物と比較して、少なかった（約30kg/ha）。春コムギへの肥料投入量は南アメリカの南部、アフリカの西部、オーストラリアにおいて高く、冬コムギへ

の肥料投入量は北アメリカとヨーロッパにおいて高かった。HadGEM2-ES気候モデルシナリオとRCP6.0シナリオをもとに予測した窒素肥料投入量は、作物収量や作物価格、肥料価格により異なることがわかった。北アメリカの東部におけるトウモロコシの耕作地への肥料投入量の経時変化は増加すると予測された。水田への肥料投入量は明確な経時変化は推定できなかった。春コムギの耕作地への肥料投入量の経時変化は南アメリカ、アフリカ、オーストラリアを含む多くの地域でわずかに減少し、冬コムギでは、アジアの中央の一部では減少、一方東アジアでは増加すると予測された。

次に、農耕地土地利用モデルの拡張として開発したバイオ燃料作物土地利用モデルの結果と考察を示す。図(4)-5はSSP1シナリオにおけるバイオ燃料作物の空間詳細シナリオである。

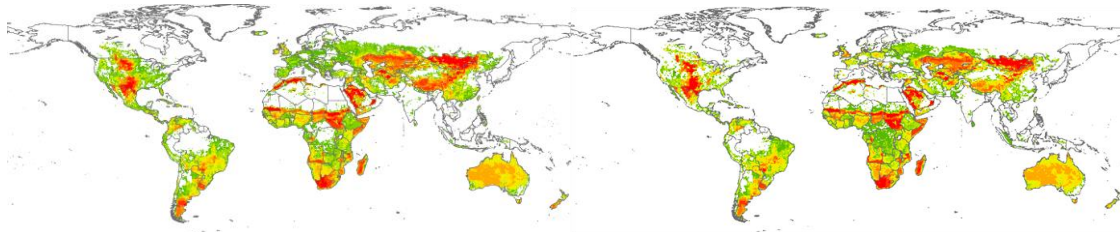


図(4)-5 SSP1シナリオにおけるバイオクロップ向け農耕地分布

SSP1シナリオにおけるバイオクロップの空間詳細シナリオの作成を行った。作成されたシナリオでは、既存の食用穀物の空間分布とは異なる結果となった。また、大きな特徴としては世界の広くに生産域が分布している。食用穀物の分布が南北の中緯度帯に集中していることとは対照的に、カナダ北部の寒冷な土地や、オーストラリアの半乾燥地帯、アフリカのザイール河流域、南米のアマゾンなどの熱帯雨林の地域での生産が顕著に行われている。一方、経済発展が著しい中国やインドなどでは生産があまり行われない結果となった。これらの結果は、経済的な要因のみを検討した結果であり、寒冷な土地の開発による、土壌中炭素の大气中への放出や、熱帯雨林の伐採による生態系への影響、炭素の放出などは含まれていない。今後は、統合モデルと連携を行って、環境影響の評価も行い、その場合のバイオマスエネルギー生産の可能性や問題点の検討が重要になると考えられる。

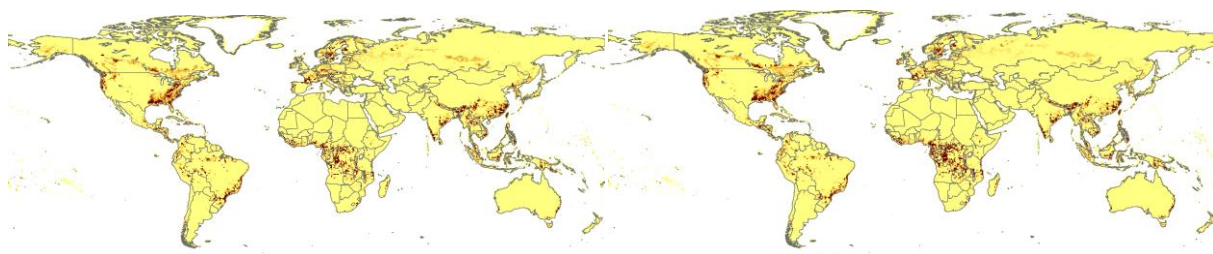
ここからは、その他の土地利用のモデルの結果と考察について述べる。その他の土地利用の中で、人間社会に最も重要な要素は牧草地と森林である。牧草地は家畜の飼育に重要であり、人間の食料を支える大きな要素であるが、多すぎる家畜の飼育は環境に大きな負荷を与えることが指

摘されている。一方、森林であるが、現在は農業を行っていない土地の中で、農業の適地である土地は森林であることが多い。そのため、農地拡大の多くは森林伐採によって起こってきた。この森林の減少は生物多様性や、二酸化炭素の吸収などに負の影響を及ぼす。これもまた、最適戦略の検討には重要な要素である。まず、牧草地の結果を図(4)-6に示す。



図(4)-6 牧草地土地利用モデルによる2010年(左)と2060年(右)の牧草地分布(SSP2 RCP2.6) この結果は食用・飼料用農耕地の分布の計算を行った後に、牧草地分布の計算を行ったものである。ここではS-10プロジェクトのテーマ2において重点的に分析をおこなったSSP2 RCP2.6について示す。図(4)-6には、PRYSBI2による作物収量モデルによって農耕地面積を求めたのち、VISITによる草原の生産性をもとにし、AIMによる牧草地面積の出力を用いた。中国では牧草地面積は増加すると予想されているが、沿岸部では牧草地面積は減少する一方、内陸部では牧草地面積が増加する結果となった。これは食用・飼料用作物の農耕地が沿岸部付近で増加することが原因である。そのため、内陸部において牧草地が広く使われるようになる。また特徴的な結果として、アフリカの牧草地面積の増加が挙げられる。アフリカでは、牧草地面積が増加する予測となっているが、その増加エリアは熱帯雨林の地域であり、それ以外の地域では牧草地は増加しない。この空間詳細シナリオでは、REDDなどの森林保護の効果は考慮していない。そのため、熱帯雨林での牧草地生産が上昇し、森林減少を引き起こしている。これは、無秩序な開発を引き起こす可能性を示唆している。

その他の土地利用として、重要な森林のシナリオを示すとともに、空間詳細伐採量のシナリオも併せて開発した。この森林土地利用モデルでは、人が利用しない土地の推計を行うモデルにより、森林および天然草原の範囲の推計を行った後、木材伐採量の空間詳細シナリオを作成するモデルからなる。このモデルでは、伐採量は陸域生態系モデル(VISIT)による、純一次生産とバイオマスといった、森林の生産性のほかに、人口密度が入っている。この結果を図(4)-7に示す。

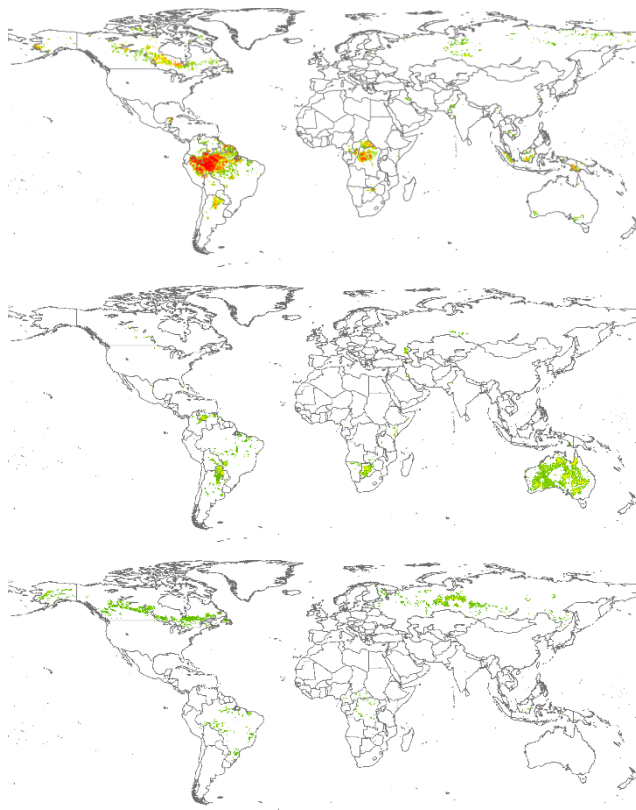


図(4)-7 森林土地利用モデルによる2010年(左)と2060年(右)の伐採量分布(SSP2 RCP2.6)

分布について大きな変化はない。これは、収量の変化が、肥料投入量などの社会経済変化の影響を含む穀物などことなり、木材は気候の変化のみに依存しているためである。また、人口分布については、サブテーマ(1)で開発された人口分布シナリオを用いているが、全世界的に都市

化が進行するなかで、農村部の総体人口分布は変化が大きくないことが理由と考えられる。森林伐採については、むしろバイオ燃料作物を含む農耕地面積の増加による、森林経営地域の変化の方が大きいシナリオがある。以上からも、バイオ燃料作物を含む農耕地土地利用モデルの影響が大きいことが確認された。この方法の問題点は、人口密度のみの関数となっていることである。実際には、海上輸送費は陸上輸送費に比較して非常に安価である。そのため、人口密度が低くとも、海岸に近い地域で木材伐採が盛んにおこなわれる。今回の方法では、丸太の生産は統合評価モデルの値を利用したため、地域内での生産のみを考えたが、今後はメッシュ単位での輸送を考慮した空間詳細伐採モデルが必要となるであろう。

以上で、本プロジェクトで開発した各種の土地利用モデルの結果と考察を示した。これらのモデルをベースとして改良を行ったうえで、サブテーマ（１）と協力のもと、陸域統合モデルの構築を行った。この際に必要となるものが土地利用遷移情報である。サブテーマ（２）の陸域生態系モデルではこの情報をもとに、土地利用が生態系に与える影響の推計を行っている。そのため、陸域統合モデルの開発には必要不可欠なモデルである。ここでは土地利用遷移モデルの結果のみをしめし、陸域統合モデルの結果および考察はサブテーマ（１）に譲る。図(4)-8には土地利用遷移の情報の一つ、1次植生から農地への転換の結果を示す。



図(4)-8 1次植生からの遷移。全世界で5億haの農耕地増加を仮定。

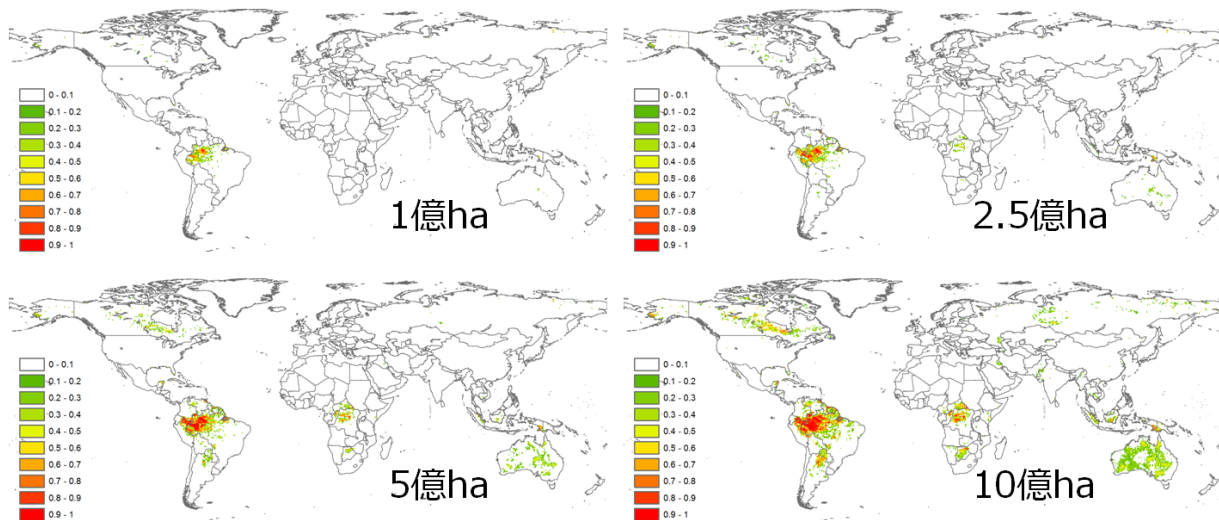
(上段：一次植生から農地、中段：一次植生から牧草地、下段：一次植生から二次植生)

この結果は全世界で5億haの農耕地が増加した場合を仮定している。5億haの増加は食用・飼料用としては大きすぎる仮定と言えるが、バイオ燃料作物用農地を含めた場合は必ずしも大きいとは言えないものである。一次植生の減少は多くの地域で発生することがうかがえる。特に、南米やアフリカの熱帯雨林では農地への転換が大きく、オーストラリア、南米の一部では牧草地への転



換が大きくなっている。また北米、ロシアでは原生林が、木材需要増加の為に伐採されていることがわかる。このような結果は陸域生態系モデルで分析に用いられた。

最後に、土地利用戦略への検討の結果と考察を示す。まず気候変動の対策として期待されているバイオ燃料作物の影響を検討する。シナリオ分析単純化の為に、バイオ燃料用作物農耕地の面積を1億ha、2.5億ha、5億ha、10億haとした。5億haのバイオ燃料用作物農耕地は、1.5度目標を達成する際に必要となる面積と考えられている。それよりも少ない場合や多い場合と比較して、バイオ燃料用作物農耕地の影響の検討を行った。その結果を図(4)-9に示す。



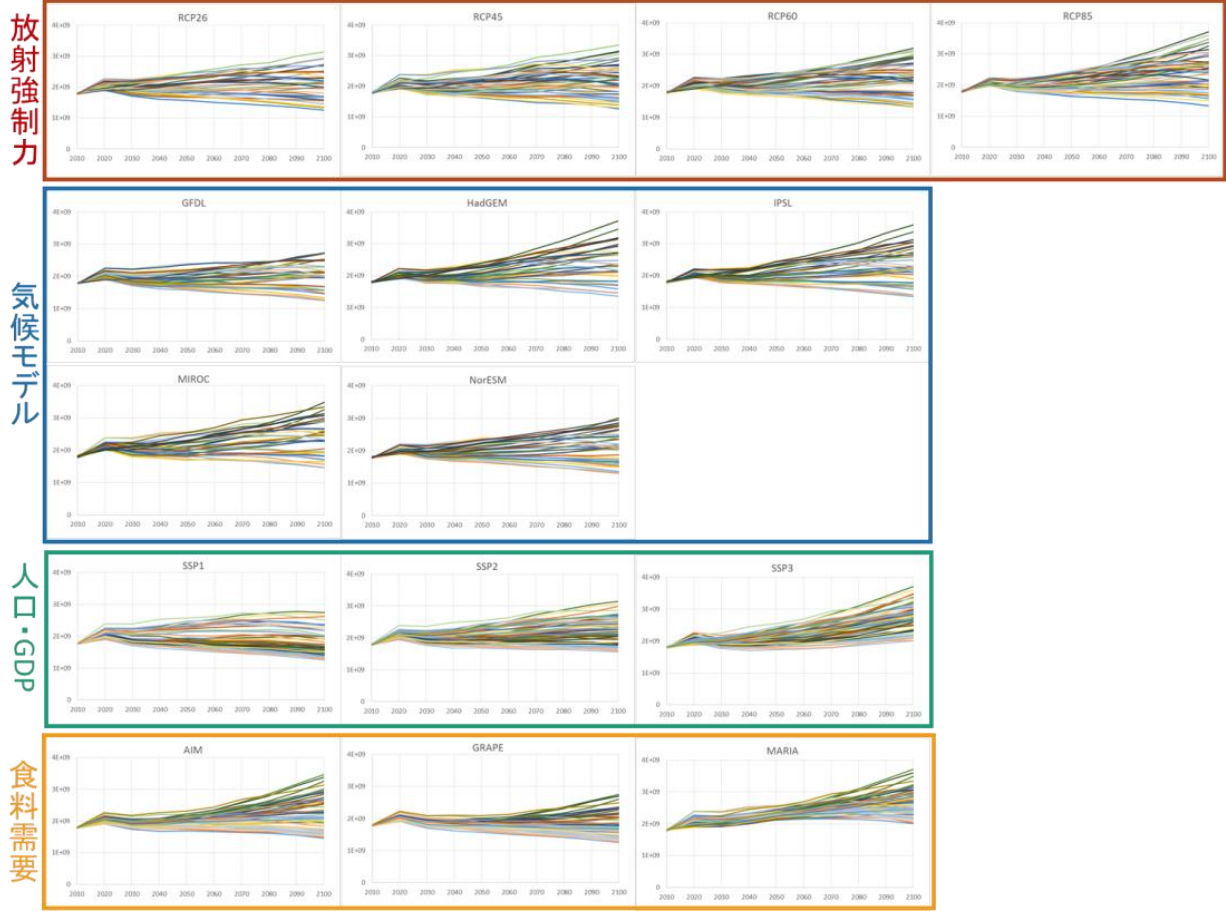
図(4)-9 バイオ燃料作物用農耕地の面積を変化させたときのバイオ燃料作物農耕地分布  
(左上：1億ha、右上2.5億ha、左下5億ha、右下10億ha)

いずれの計算でも、REDDなどの熱帯雨林の保護政策は導入していない。このような仮定の下では、南米やアフリカの熱帯雨林がバイオ燃料作物農耕地に転換されてしまう。今回のバイオ燃料はSwitchgrassとMiscanthusであり、これらは農耕地としては不的な地域でも生産が可能とされている。しかし、単収から見ると、熱帯地方の収量が高いため、森林がバイオ燃料農耕地へ転換されてしまう。2.5億haのシナリオではその多くが熱帯雨林であり、5億haシナリオにおいてもその多くが熱低雨林である。10億haまで増加すると、北米の北方林やオーストラリアの草原が対象地域になる。つまり、10億haと5億haの差が、熱帯雨林を保護した場合のバイオ燃料農耕地の適地になる。面積的には熱帯雨林を保護した場合も、十分に農耕地を確保できるが、その5億haでの生産量と比較して、5億haから10億haに増加させたときの生産量増加は20%以上となっている。より精緻な検討が必要であることが確認された。この検討は、陸域統合モデルによって可能となるため、今後の発展が期待される。

また、最適戦略を検討するために、全世界の土地利用の不確実性の検討を行った。特に、農耕地に関して分析を行った。開発された土地利用モデルにより、作物モデルの結果をソフトリングで利用し、土地利用の不確実性解析を行った。土地利用に与える影響は、放射強制力の不確実性、気候モデルの不確実性、社会経済（人口・GDP）の不確実性、食料需要予測モデルの不確実性といったさまざまな要因がある。リスク戦略を検討するうえで、どの不確実性が大きな影響を与えているのかを把握する必要がある。そこで、放射強制力を4種類（RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5）と、気

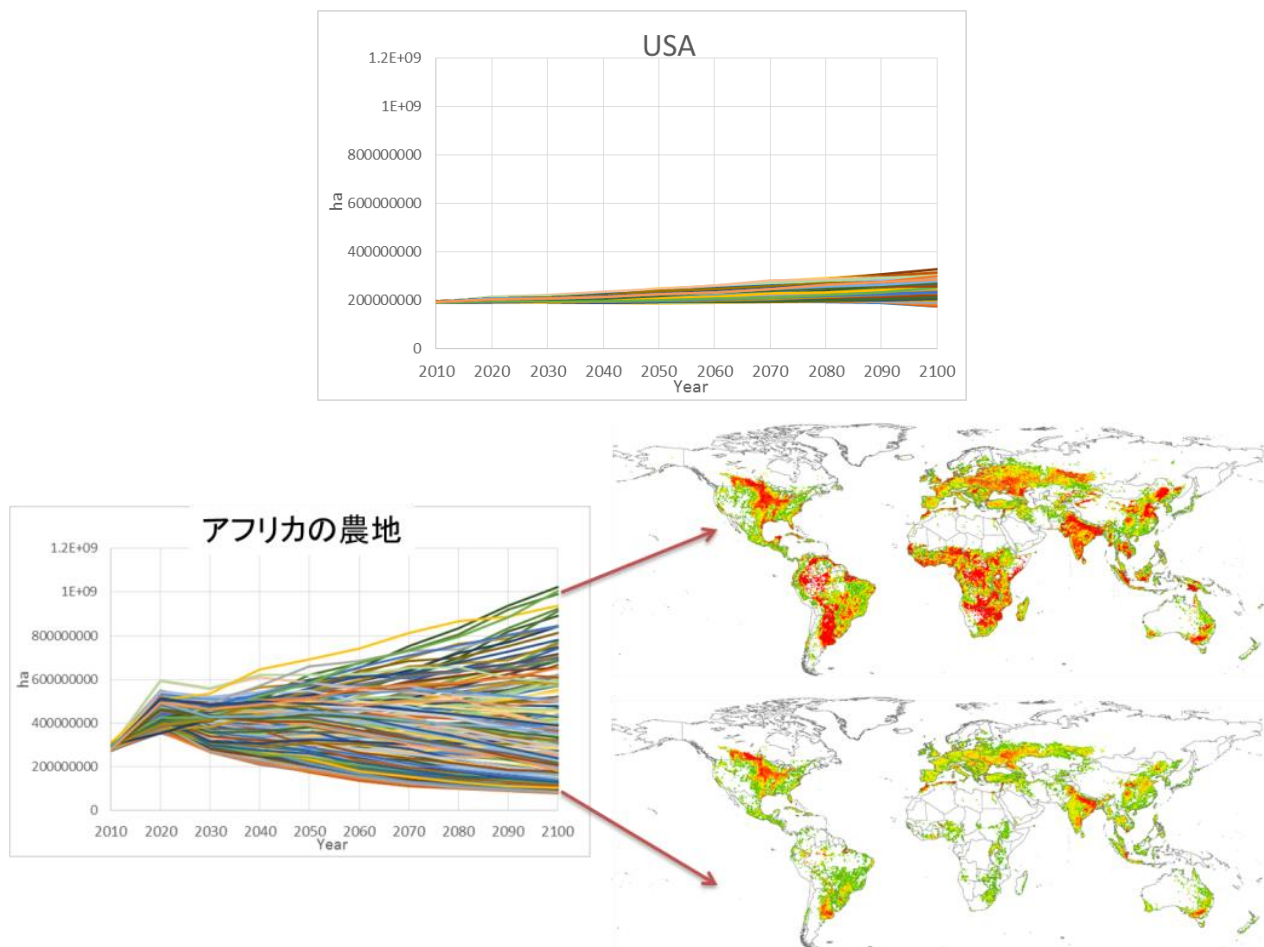
候モデルを5種類(HadGEM、GFDL、IPSL、MIROC、NorESM)、社会経済シナリオを3種類(SSP1、SSP2、SSP3)、食料需要のモデルを3種類(AIM、GRAPE、MARIA)を用いた。このすべての組み合わせの計算を行い、どの要素が土地利用に影響を与えるのか検討を行った。

不確実性分析の結果を図(4)-10に示す。これは2010年から2100年の全世界の農耕地面積の推移を要素ごとに比較したものである。赤い枠で囲まれた放射強制力4つのグラフは放射強制力ごとの全世界の農耕地面積の推移を表しており、蒼い線で囲まれたグラフは気候モデルごとの全世界の農耕地面積の推移、緑の枠で囲まれたグラフは社会経済シナリオ(SSP)ごとの全世界の農耕地面積の推移を表している。



図(4)-10 全世界の農耕地面積の不確実性

この結果からわかるように、社会経済(人口・GDP)と食料需要のモデルが不確実性に与える影響が大きいことがわかるが、その他の要因も同等のレベルで不確実性を有することが示されている。これは、土地利用シナリオの不確実性は、放射強制力、気候モデル、社会経済シナリオ、食料需要予測の組み合わせにより、様々に変化しうることになる。これは、統合モデルの必要性を示唆しているとも言える。一方、この不確実性はどの地域が最も大きいのか分析を行ったところ、アメリカなどの先進国の不確実性は小さく、アフリカなどの発展途上国の不確実性が非常に大きいことが判明した。その結果を図(4)-11に示す。



図(4)-11 アメリカとアフリカの農耕地面積の不確実性

これは、経済の発展の不確実性がアフリカで非常に大きいことが要因である。アフリカの所得の増大と、農業収益の増加、海外からの購買力の増加のバランスにより大きな不確実性が生じることが判明した。この結果も、ハードリングによる最適な土地利用戦略の意義があることを示唆している。また、先進国の不確実性は気候モデルや放射強制力の不確実性が大きく影響している。食糧生産の多くは先進国で行っていることから、社会経済のシナリオ以外のしなりの不確実性縮小も食料問題においては重要であることが分かった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究で得られた科学的な意義であるが、土地利用に関するシナリオの提供を他の研究者に行い、その利用により気候変動の影響を考慮した研究の発展に寄与したことである。また、土地利用モデルの不確実性分析により、どのような地域で不確実性が大きいかわ示されたため、研究を重点的に行う地域への指摘を行うことができた。

### (2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

土地利用のシナリオは、気候変動のリスク管理、例えば気候変動対策の優先順位を立案する上で有用である。開発された陸域統合モデルの今後の展開によりIPCCの報告書に採用されうる知見の発見が見込まれる

#### 6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

#### 7. 研究成果の発表状況

##### (1) 誌上発表

##### <論文（査読あり）>

- 1) T.Qian, H.Bagan, T.Kinoshita, Y.Yamagata: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 99, (2014) DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2301152, “Spatial-temporal analyses of surface coal mining dominated land degradation in Hologol, Inner Mongolia,”
- 2) T. Kinoshita, K. Iwao, Y.Yamagata: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28, 70-77(2014) “Creation of a Global Land Cover and a Probability Map through a New Map Integration Method”
- 3) H. Bagan, Y. Yamagata : GIScience & Remote Sensing 52(6): 765-780(2015) “Analysis of urban growth and estimating population density using satellite images of nighttime lights and land-use and population data”

##### <査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない。」

##### <その他誌上発表（査読なし）>

「特に記載すべき事項はない。」

##### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) M.Inatomi, T.Kinoshita: Global Land Project Open Science Meeting, Humboldt University, Berlin 19th - 21st March (2014) “Global estimation of fertilizer use in croplands in the 20th and 21st centuries”
- 2) 稲富素子, 木下嗣基: 237回日本作物学会講演会, 千葉大学西千葉キャンパス (2014) “全球スケールにおける作物生産予測のための窒素施肥シナリオ作成”
- 3) H.Bagan, Y.Yamagata, AGU Fall Meeting2014, San Francisco, USA (2014) “Spatio-temporal dynamics of urban expansion in Japan using gridded land use data, population census data and DMSP data,”

- 4) H. Bagan, 木下嗣基, 山形与志樹: 日本写真測量学会平成26年度年次学術講演会「グリッド手法による土地被覆変化の分析」日本写真測量学会平成26年度年次学術講演会発表論文集, pp. 18-19 (2014)
- 5) M. Inatomi and T. Kinoshita: International Symposium on Agriculture Meteorology, Tsukuba, Japan (2015)  
“Global estimation of Fertilizer use in croplands in the 21st century using a production function analysis”
- 6) Hasi Bagan, 木下嗣基, 山形与志樹: 第23回生研フォーラム: 第23回生研フォーラム論文集, pp. 99-100 (2015)  
「統計手法による土地被覆の時・空間変動の分析」
- 7) 哈斯巴干, 木下嗣基, 平春, 山形与志樹: 日本写真測量学会平成27年度秋季学術講演会 (2015)  
「土地被覆図を用いたDMSP/OLSから抽出された都市域の解析」
- 8) 哈斯巴干 (Hasi Bagan), Zhaoling Li, 木下嗣基, 平春, 山形与志樹: 第24回東大生研フォーラム (2016)  
「2000年から2014年までの内モンゴルの土地被覆変化」

### (3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

### (5) マスコミ等への公表・報道等

「特に記載すべき事項はない。」

### (6) その他

「特に記載すべき事項はない。」

## 8. 引用文献

「特に記載すべき事項はない。」

## S-10-2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略

### (5) 作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター

気候変動対応研究領域

西森基貴

長谷川利拓（平成24年4月～平成28年8月）

石郷岡康史・飯泉仁之直

環境情報基盤研究領域

櫻井玄（平成25年10月～）

独立行政法人農業環境技術研究所

大気環境研究領域

横沢正幸（平成24年4月～平成25年9月）

<研究協力者>

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター

岡田将誌・櫻井玄（～平成25年9月）・酒井徹（平成26年1月～平成27年12月）

静岡大学工学部・横沢正幸（平成25年10月～）

平成24～28年度累計予算額：54,298千円（うち平成28年度：10,536千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

世界の作物生産性、水資源、土地利用との動的相互作用の解明ならびに将来の環境変動に対する応答分析を行うために、主要作物を対象とした広域作物モデルを構築するとともに、他のサブテーマで開発される水資源モデル等と結合させた。広域作物モデルを用いた将来予測の結果、収量増加の要因として大気中の温室効果ガス濃度の上昇による光合成効率の上昇（施肥効果）が挙げられ、その効果は特にダイズで大きかった。加えて増収要因には、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の下での技術発展により緩和される効果もある。一方、作物生産性の低下要因として気温上昇による生育期間の短縮、高温による光合成効率の低下、蒸発散量の増加による土壌水分量の低下などが挙げられるが、適応策を行うことにより改善する場合もあることを、今回初めて示すことが出来た。特に、生産性の低下要因としての気温上昇による生育期間短縮が起こらないような品種の導入により、ムギ類やトウモロコシにおける将来の減収をある程度カバーできることが示された。さらに、作物－水資源の結合モデルを用いた、複数の予測される気候・土地利用変化の条件下での、世界の主要作物への影響と灌漑面積拡大による影響適応効果の将来の見通しを示した。その結果、灌漑適応策は、流域の気候・土地利用変化やそれに付随する水資源環境の変化に依存する灌漑設備の新規導入は食料生産の気候変化リスクに対する適応策として常に有効的とはいえないことがわかった。

#### [キーワード]

作物収量、作物モデル、農業水資源、適応策、農業技術進展

## 1. はじめに

将来の気候変動は、人間社会と生態系に大きな影響を与える。気候変動に対する適応策・緩和策を立案するためには、我々が土地・水資源・生態系をいかに効果的に利用するかということが非常に重要な課題であるが、地球環境システムにおいて土地・水資源・生態系が果たす役割、それぞれの間の相互作用までを考慮した研究は、十分に行われていない。特に、効果的な気候変動適応策の検討に必要となる土地利用への影響の評価、土地・水資源・生態系の環境制約を考慮した土地利用シナリオの構築など、グローバルレベルでの陸域モデリング研究には、まだ多くの課題が残されている。農業分野においては従来、天水から灌漑への切り替えは有効な適応策と考えられてきたが、気候変化による水資源量の変動を実際に解析したうえでの結論ではない。

## 2. 研究開発目的

まず、気候変動影響下における作物成長を評価できるモデルとして、圃場スケール作物モデルの不確実性評価とアップスケール手法を開発し、主要4作物（コメ、トウモロコシ、ダイズ、コムギ）を対象とした、広域スケールの生産性環境応答を予測するモデル（広域作物モデル）を構築する。さらに、これを他のサブテーマで開発される水資源モデル等と結合させることで、気候変動影響下における世界の作物生産性、水資源、土地利用との動的相互作用の解明ならびに将来の環境変動に対する応答分析を行い、その不確実性を含めて定量的に評価する。

## 3. 研究開発方法

### （1）世界作物収量データベースの作成および解析・広域作物モデル用気象フォーシングの作成

国連農業食料機関（FAO）の国別統計収量データおよび衛星データ（NOAA/AVHRR）由来の純一次生産量を元に、世界作物収量データベースを開発し、また別途収集した25か国の郡別ないしは州別の統計収量と比較・検証した。さらに、気象再解析値をイーストアングリア大学気候研究ユニット（CRU）の月別観測値で補正した広域作物モデル用日別気象フォーシング（GRASP Forcing Data）を開発し、既存の陸面過程モデル用フォーシングと相互比較を行った。

### （2）広域作物モデルの開発

まず作物成長モデル Soil and Water Assessment Tool (SWAT, Neitsch et al., 2005<sup>1)</sup>)に、葉群の階層構造等、圃場スケールモデルの改良を行い、ダイズを対象とした広域作物モデルのプロトタイプを作成した。次に、乾燥・低窒素・その他の技術要因を単一かつ時間変化するストレスパラメータとして扱うことが可能な、トウモロコシ・コメ・コムギを対象とする広域作物モデルを開発し、（1）の世界作物収量データベースと気象フォーシングを用いてグリッドセル別に全球でキャリブレーションを行った。キャリブレーションにはベイズ推定を用い、パラメータ値の不確実性を確率分布として推定することにより、入手可能なデータのもとでの作物モデルの経験的なパラメータ値の不確実性を陽に考慮した作物生育シミュレーションが可能となった。こうして、気候モデルのグリッドスケール（約100km格子間隔）における空間平均的な作物生産性の環境応答を予測するモデル（広域作物モデル、Process-based Regional crop Yield Simulator with Bayesian Inference version 2、PRYSBI2）を作成した。

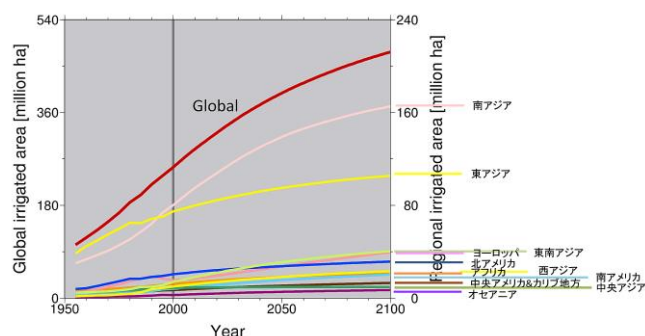
そしてこの PRYSBI2 に、5つの全球気候モデル GCM（GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M）、4つの温室効果ガス排出シナリオ RCP（2.6、

4.5、6.0 および 8.5) ならびに SSP1~3 の社会経済シナリオを与えた計算を 1980-2098 年の約 100 年について行った (Normal)。次に適応策として、上記各ケースについて、温室効果ガス濃度を 2000 年値に固定した場合 (CO<sub>2</sub> Constant) および GDP を 2000 年の値に固定した場合 (GDP Constant) のほか適応策として、栽培期間を気候変化に合わせて変更できる品種を選択・変更した場合 (Adapt)、前後 1 ヶ月の間で、最適な播種日を選んだ場合 (Change Planting Day)、必要な灌漑を常時行った場合 (Maximum Irrigation) の予測を行った。なお土地利用変化は、全ての計算において 2000 年に固定している。

### (3) 水資源と作物生産性の流域規模での相互作用を取り扱うことのできる結合モデル

まず中国東北部を対象に、水資源と作物生産性の流域規模での相互作用を取り扱うことのできる結合モデルの開発・検証を行った。具体的には、対象地域の 1.125 度格子各グリッドを 11 のサブグリッド (トウモロコシ・コメ・ダイズ・春コムギ・冬コムギの 5 種類の農地でそれぞれ灌漑と天水の計 10 およびこれに草地を加える) に分割し、気候・地形・地理的位置などの要因で動的に変化する水資源量に応じて灌漑を実施するという仮定に基づく、アジア域を含む全球でシミュレーション可能なモデルである。このモデルは、作物生育・収量形成、陸面過程、河川流下、ダム操作、農業・工業・家庭用水取水サブモデルから構成されており、日単位で気象、土壌、土地利用、作物栽培管理、水利用、ダム管理に対応した流域の水循環及び作物生育・収量形成のシミュレートが可能である。

次にこのモデルを、全球の流域スケールで水資源-作物生産性間の相互作用を取り扱うことのできる結合モデル (CROVER) に拡張し、(2) で用いたものと同じ 5 つの GCM による気候変化シナリオに加え、灌漑面積率シナリオを導入し、天水農地を灌漑農地にするなどの土地利用 (農耕地分布) の変化が食料生産に与える影響を、トウモロコシを例に評価した。灌漑面積率シナリオは、過去については Siebert らの HID プロダクトを使用し、(灌漑+天水) の面積はあくまで Portmann らによる現行収穫面積 (MIRCA2000) を越えない、という制約条件のもとに、2100 年までの将来期間のシナリオを、直近 20 年 (1980~2000 年) の回帰直線による外挿で作成した (図(5)-1)。また窒素投入量が食料生産に与える影響を評価するために、Monfreda らによる統計収量に対し、人口一人あたり GDP、窒素投入量および灌漑面積を説明変数とする重回帰式を、主要 4 作物についてそれぞれ作成し、その有意性を検定するとともに、過去の平均収量に対する窒素投入量の影響を評価した。さらに、将来予測において用いる窒素投入量 (施肥シナリオ) を作成するために、過去の一人あたり GDP と窒素投入量および作物モデル中の技術係数との関係を、コムギを冬コムギと春コムギに分けた 5 作物について、回帰的手法で解析した。



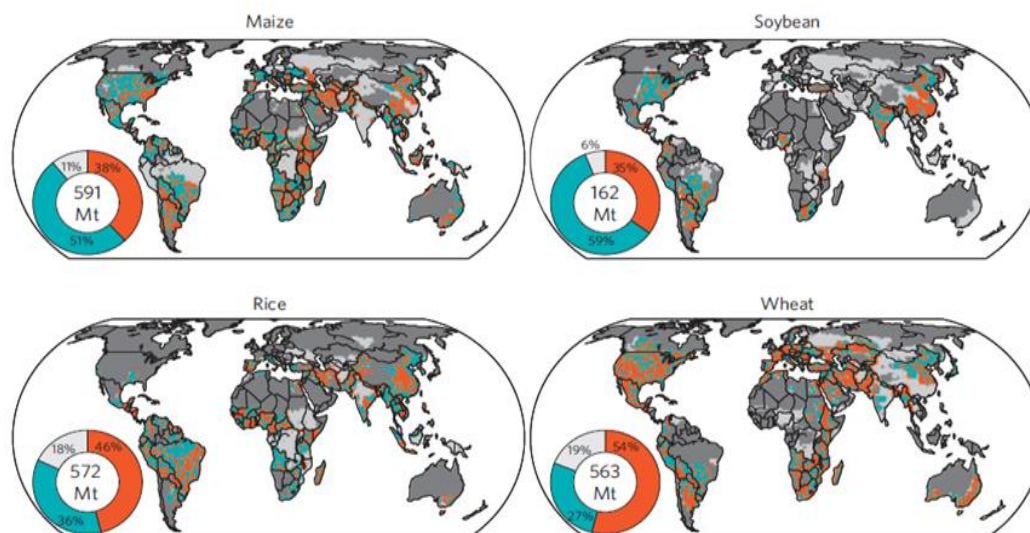
図(5)-1 本研究で用いた灌漑による農業土地利用変化シナリオ。

## 4. 結果及び考察

### (1) 世界作物収量データベースの作成および解析・広域作物モデル用気象フォーシングの作成



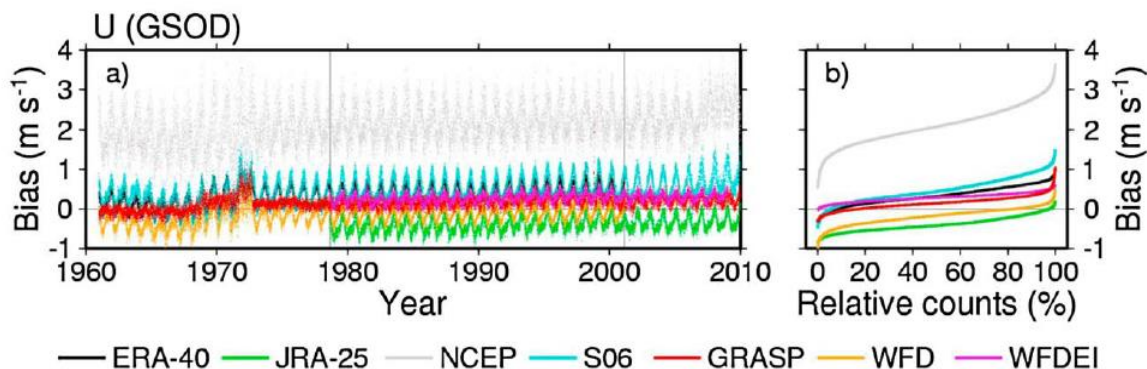
トウモロコシとダイズについては世界生産量の70%超、コメとコムギについては50%超を算出する地域の統計収量データを収集し、1.125°（約120km）のグリッドに割り付けた。統計収量が入手できなかったグリッドでは次の方法で収量を推定した。まず対象作物の栽培グリッドで播種日から収穫日までの衛星データ由来の純一次生産量（NPP）を積算した。作物別の栽培暦はSacks et al. (2010)<sup>2)</sup>を用いた。次いで、国の対象作物栽培グリッドの平均積算NPPを計算し、各栽培グリッドの積算NPPと国平均NPPとの比率を算出し、この比率をFAOの国別統計収量に乗じて国内の収量の空間分布を推定した。なお、収量推定に際してはトウモロコシとコメについては一・二期作、コムギについては春・冬作の生産量割合を考慮した。先に収集した統計収量を用いて、収量の推定精度を評価したところ、グリッド内の収穫面積が大きいほど推定収量と統計収量が良く一致した。この推定収量の年変動成分を被説明変数、生育期間平均の気温と土壌水分量のそれぞれの偏差を説明変数として重回帰分析を行った結果、**図(5)-2**に示すように、全球では、トウモロコシとダイズの収量の年々変動は土壌水分量で良く説明される地域が多く、コメとコムギの収量の年々変動は気温で良く説明される地域が多いことが明らかになった。これは全球を対象とするグリッド別の収量と気候条件の解析としては世界初であり、広域作物モデルのシミュレーションを全球で検証するうえでも有用である。



**図(5)-2** 世界作物収量データベースとJRA-25再解析値を用いた作物収量の変動の主要な気候要因。赤は気温、水色は土壌水分量が収量変動と主に関係していることを示す。濃い灰色は非生産地域。円グラフは各区分の地域の生産量が2000年の世界総生産量に占める割合を示す。

広域作物モデルの入力値として用いた再解析値は一般に、観測気象値に比べれば系統的な誤差（バイアス）があり、広域作物モデルのシミュレーションにおいて大きな誤差要因になりうる。そこで、広域作物モデル用の日別気象フォーシングデータを開発した。**図(5)-3**は、日平均風速データが利用可能な世界の観測点（2085地点）において、本研究で開発したフォーシング（GRASP）と再解析値、既存のフォーシングとを地上10m風速について比較した結果である。いずれのフォーシングも再解析値よりバイアスが小さいが、GRASPフォーシングのバイアスは既存のフォーシングよりもさらに小さく、より信頼性が高い。地上風速は作物の蒸発散を推定するうえで重要な気象要素の一つであり、GRASPフォーシングを広域作物モデルに適用することで、より信頼性の

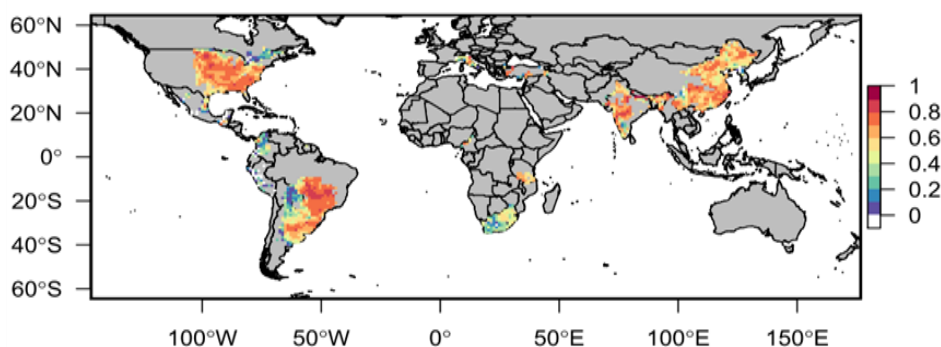
高い蒸発散量と土壌水分量の推定が可能と期待される。解析の結果、日最低気温と気温日較差、日射量、水蒸気圧、風速についてはGRASPフォーシングが再解析値および既存のフォーシングの中で最もバイアスが小さく、日最高・平均気温と降水量、降水日数、相対湿度についてはGRASPフォーシングのバイアスは再解析値よりも小さく、既存のフォーシングと同程度であった。



図(5)-3 本研究で開発した広域作物モデル用気象フォーシング (GRASP) と再解析値 (ERA-40、JRA-25、NCEP)、既存の気象フォーシング (S06、WFD、WFDEI) の地上10m風速の地点観測値に対する、(a) 日々の空間平均バイアスの時系列および(b) その経験的な累積分布関数を、それぞれ示す。

## (2) 広域作物モデルの開発

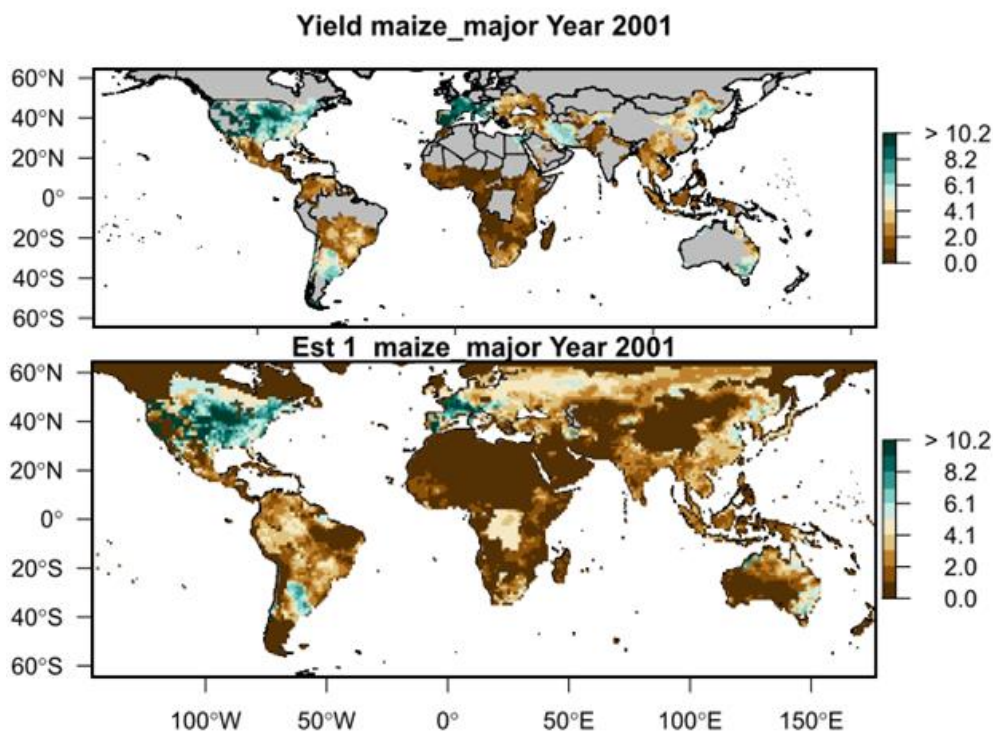
まず、上記3.により構築したプロトタイプの広域作物モデルを、(1)の世界作物収量データベース、客観解析気象データ (JRA-25) および水や肥料などの栽培管理の情報を加味しながら、ベイズ推定によりモデルのキャリブレーションを行った。これにより作物モデルのパラメータ値を各地域の品種や栽培管理特性を反映した値に近づけるとともに、利用可能なデータの下でのパラメータ値の不確実性を評価することが可能となった。図(5)-4はダイズについて、各グリッドにおける過去25年間の広域作物モデルによる推定収量と世界作物収量データベースの値との相関係数を示す。統計収量の信頼性に乏しい南米の一部地域やアフリカを除き、ほとんどの地域で0.6以上の相関係数が得られた。



図(5)-4 ダイズの広域作物モデルのキャリブレーション結果。過去25年間における世界作物収量データベースとモデル推定収量との相関係数でモデルの性能を表している。

次に、時間詳細な入力値がグリッドごとに得られない窒素・灌漑投入量が影響する生育過程を

パラメタリゼーションによって簡易化するために、乾燥と低窒素、その他の技術要因による生育ストレスを単一のストレスパラメータとし、複雑な広域作物モデルを最適化しつつ、パラメータ値の不確実性を陽に表現可能なベイズ推定を用いたキャリブレーションを再度行った。土地利用モデルとの結合を考慮し、全陸域でのシミュレーションを可能とするために、収量データがあるグリッドで推定されたパラメータ値と緯度や経度、標高、GDPなどとの経験的な関係（重回帰式）を利用してパラメータ値を収量データがないグリッドに空間内挿した。図(5)-5は、2001年のトウモロコシ収量について、各グリッドにおける広域作物モデルによる推定値と世界作物収量データベースの値とを比較を示す。収量の地理分布を概ね再現できているが、中央アフリカなどの一部地域で収量の過大評価が見られ、重回帰式によるパラメータ値の空間内挿に起因する問題と考えられる。このほか、コムギとコメについても広域作物モデルのキャリブレーションを行い、主要4作物を対象とする広域作物モデルの構築が完了した。

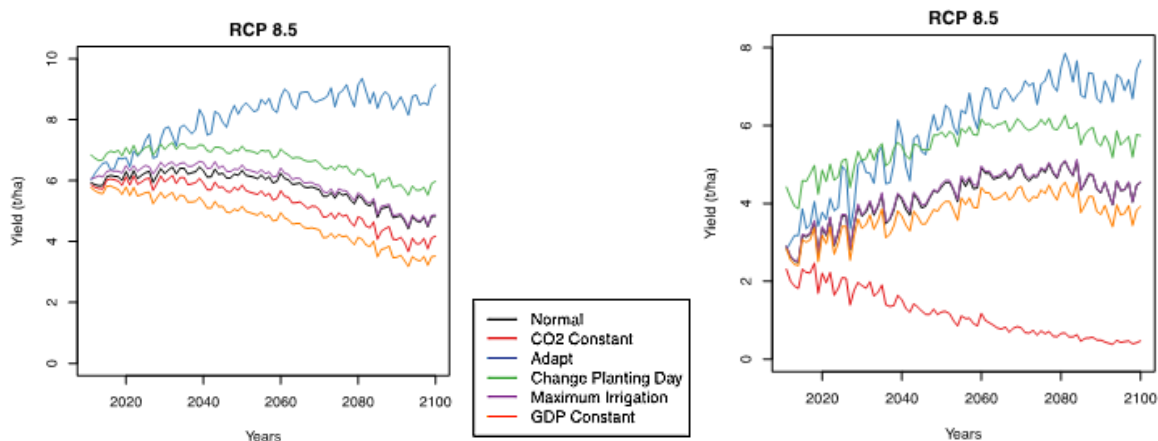


図(5)-5 本研究で構築した世界収量データベースにおける2001年の（上）トウモロコシ収量、および（下）広域作物モデルによる推定収量。推定は過去25年間（1982-2006）の遇数年の収量データのみで広域作物モデルのキャリブレーションを行い、2001年の収量をシミュレートした。

さらにこのPRYSBI2を用いた、さまざまな適応策による将来の食料生産（作物収量）の見通しを示した。その結果、いずれの作物においても、ほとんどのケースでの最も効果的な適応策として、温度上昇による生育期間の短縮による吸収日射量の減少を排除する、つまり高温による生育期間の短縮がない品種への変更（Adapt）が有効であることがわかった。この品種適応により増収量が大きくなるか、または減収量が小さくなり、この傾向はトウモロコシ（図(5)-6左）のほか、特に冬コムギで顕著であった。その次には、シミュレーション上で最適な播種日を選択する（Change Planting Day）ことが有効で、その適応効果は気温上昇度が小さい近未来年代で大きい。作

物別では、コメで最も有効で、その次にダイズ（図(5)-6右）、春コムギとなる。

まとめると、作物間で程度の差はあるが、収量への影響はいずれの作物でも、正と負の両方の影響が反映された結果となる。収量の増加要因には、まず、大気中の温室効果ガス濃度の上昇による光合成効率の上昇（施肥効果）が挙げられ、その効果は特にダイズで大きい（図(5)-6右）。加えて、高温や低温、乾燥、栄養欠乏、病虫害による生育ストレスが、想定される経済発展（SSP）の下での技術発展により緩和される効果が挙げられる。経済発展による生産性増加はアフリカ等、現在の開発途上国で大きく、特にトウモロコシでは顕著である（図(5)-6左）。一方、作物生産性の低下要因として気温上昇による生育期間の短縮、高温による光合成効率の低下、蒸発散量の増加による土壌水分量の低下などが挙げられるが、適応策を行うことにより改善する場合もあることを、今回初めて示すことが出来た。特に、生産性の低下要因としての気温上昇による生育期間短縮が起こらないような品種の導入により、ムギ類やトウモロコシにおける将来の減収、特に冬コムギにおけるRCP8.5で想定される大幅な生産性低下をある程度カバーできることが示された。



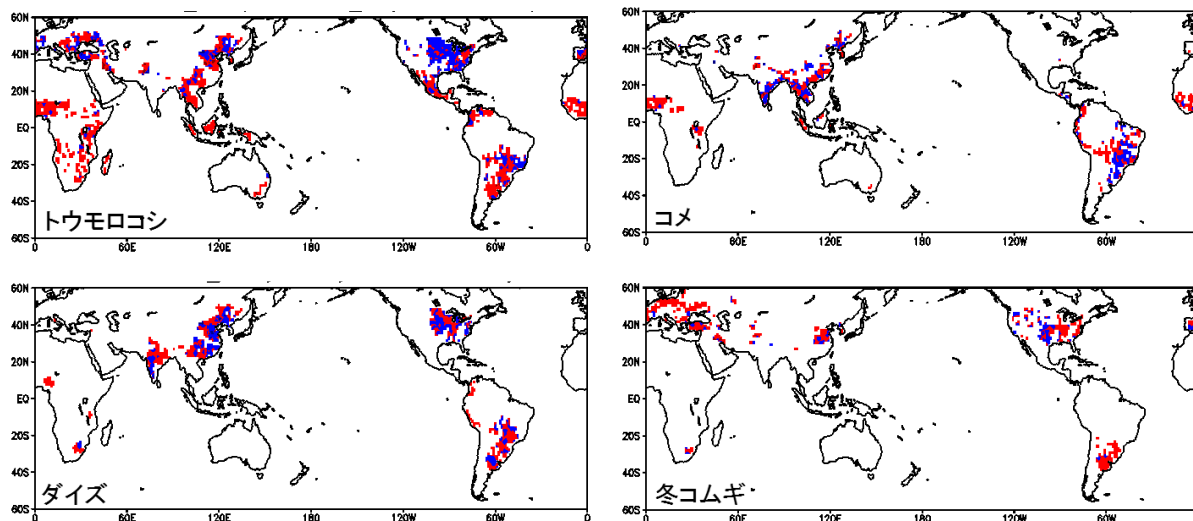
図(5)-6 (左) トウモロコシおよび (右) ダイズについて、現在の作物面積で重み付けした全球平均収量の経年変動で、複数の適応策等を用いて各GCMのRCP8.5気候シナリオ予測を平均したもの。適応策を行わない場合 (Normal)のほか、3(5)に示した、温室効果ガス濃度2000年固定場合 (CO<sub>2</sub> Constant) およびGDP2000年固定 (GDP Constant)、さらに適応策として、品種変更 (Adapt)、最適播種日 (Change Planting Day)、常時灌漑 (Maximum Irrigation) の予測を、それぞれ併せて表示した。

### (3) 水資源と作物生産性の流域規模での相互作用を取り扱うことのできる結合モデル

まず、全球スケールで結合モデルと非結合モデルを比較し、結合による作物収量の再現性の向上を評価した。その結果、主要生産地域である米国や中国東北部、ブラジル南部などでは結合による収量再現性の向上が認められたが、アフリカなどの非主要生産地域では必ずしも再現精度の向上は見られなかった（図(5)-7）。これは、結合モデルにおいて自然植生を考慮していないため、非主要生産地域では自然植生が流量に与える影響が相対的に大きく、農耕地の水収支や灌漑可能水量、ひいては収量のシミュレーション精度が結合により必ずしも改善しないためと考えられる。

次に、アムール川流域のダイズを例に、RCP2.6/MIROC5気候変化シナリオの下で、さまざまな割合の灌漑農地拡大シナリオを設定し、将来の灌漑水需給と作物生産量についての段階的な灌漑面積拡大による応答分析を行った。この解析から、天水農地に灌漑を導入することの気候変動適

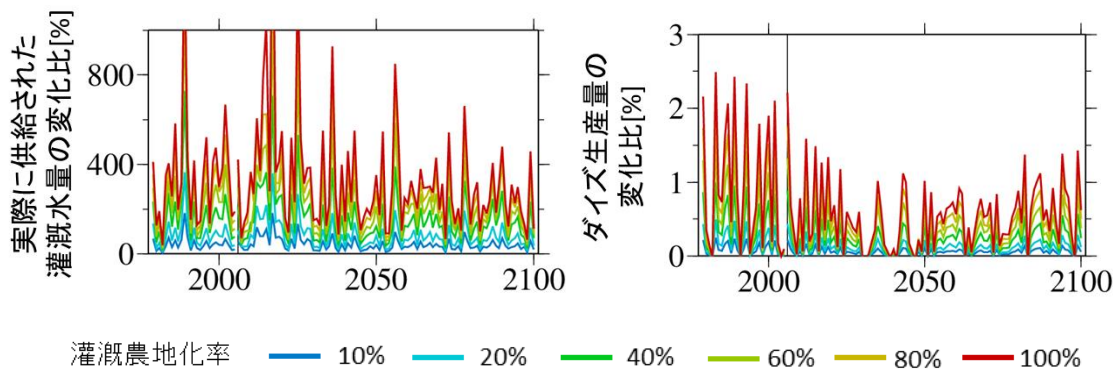
応策として有効性と限界を示すことが可能である。シナリオ解析の結果、灌漑農地に置き換えられる天水農地の割合が大きいほど流域のダイズ総生産量は増加するが、今世紀末に向かうにしたがって、生育期間積算の供給灌漑水量は減少し、それに伴い、灌漑農地の拡大による生産量の増



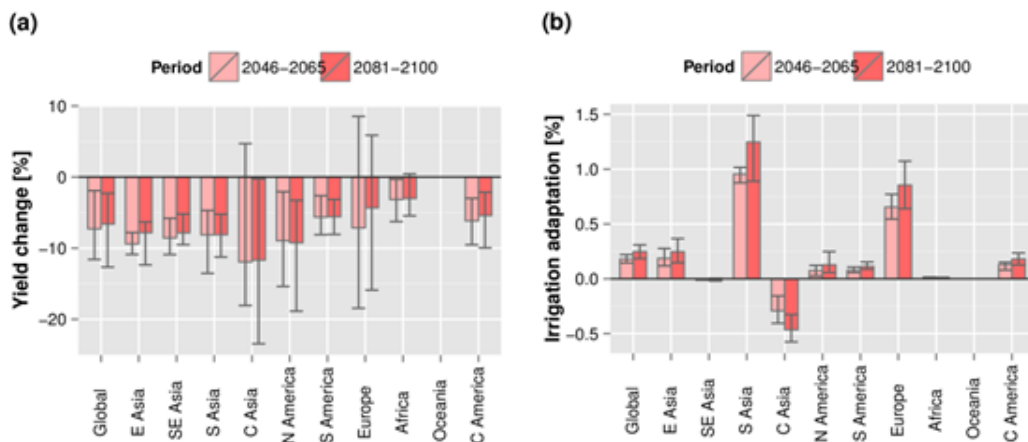
図(5)-7 作物収量の再現精度についての結合モデルと非結合モデルの比較。1982-2006年におけるモデル推定収量と収量統計値との間の相関係数を、結合モデルと非結合モデルのそれぞれについて算出し、その相関係数の差を示した。またトレンドを除去するため、3年移動平均に対する各年の収量偏差割合を使用した。青（赤）色は、結合モデルの相関係数値が非結合モデルのそれより高（低）く、結合による収量再現精度の向上が見られた（見られなかった）地域。

加は漸減していくことが示された（図(5)-8）。使用した気候変化シナリオでは対象流域の降水量の変化は明確でないが、気温上昇に伴い、蒸発散量が増加する一方、作物の水需要も増加した。このため、100%など極端な灌漑農地化シナリオでは、流域の全灌漑農地に十分な水を供給できない年が次第に増加した。

そして、全球を対象とし、3. で開発した灌漑面積率シナリオを導入し、RCP2.6シナリオを用いた食料生産に与える影響の例を示す。まず図(5)-9aに示すように現行の灌漑農地分布における将来のトウモロコシ収量は、多くの地域で減収した。その減収割合は中央アジアで最も大きく、次いで北アメリカや東アジアで大きい。次に、現行の土地利用、および灌漑農地の拡大シナリオにおける結果を比較した場合、南アジアやヨーロッパでは、灌漑面積拡大による灌漑適応策により減収量は低減される。しかしながら中央アジアでは灌漑農地の拡大により、逆に減収率が大きくなる結果となった（図(5)-9b）。これは地域内で水資源利用の競合が発生したためであり、灌漑による適応策の有効性は、流域の気候・土地利用変化やそれに付随する水資源環境の変化に依存する。従って、灌漑設備の新規導入は食料生産の気候変化リスクに対する適応策としては有効であるものの、水資源量や作物の栽培体系によっては有効でない場合もあることがわかった。



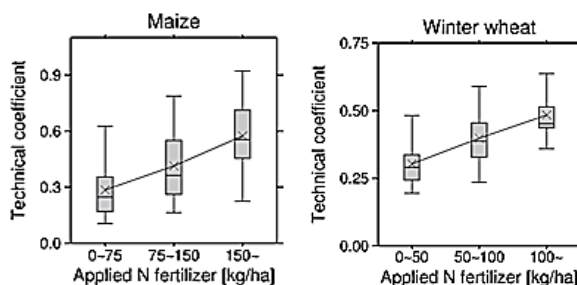
図(5-8) 様々な割合の天水農地を灌漑農地に置き換えた場合のRCP2.6/MIROC5気候変化シナリオに基づくアムール川流域の(左)生育期間積算の供給灌漑水量と(右)ダイズの流域総生産量の変化比の時系列。供給灌漑水量は、利用可能な水資源量としての河川流量と作物の水需要量とを考慮し、灌漑に使用された水量を示す。判例に示した灌漑農地化率の割合は、現在の天水農地面積の何パーセントが灌漑農地に置き換えられたかを示し、100%の場合には現在の天水農地は全て灌漑農地に置き換えられる。比を算出する際のベースラインは、MIRCA2000データから得られた現在の天水・灌漑面積を仮定したシミュレーション値で、この値は年々変動する。全ての灌漑農地化シナリオで共通の気候変化シナリオを使用しているため、示した比は灌漑農地化シナリオの差を表す。



図(5-9) 作物生産性-水資源結合 (CROVER) モデルにより計算されたRCP2.6シナリオ条件でのトウモロコシ収量について世界大陸別に集計した(a)収量の変化比および(b)灌漑適応策を考慮した場合の効果。それぞれ今世紀半ば (2046-65) および今世紀末 (2081-2100) について、5つの気候モデルの各20年間中での不確実性を誤差棒で示す。

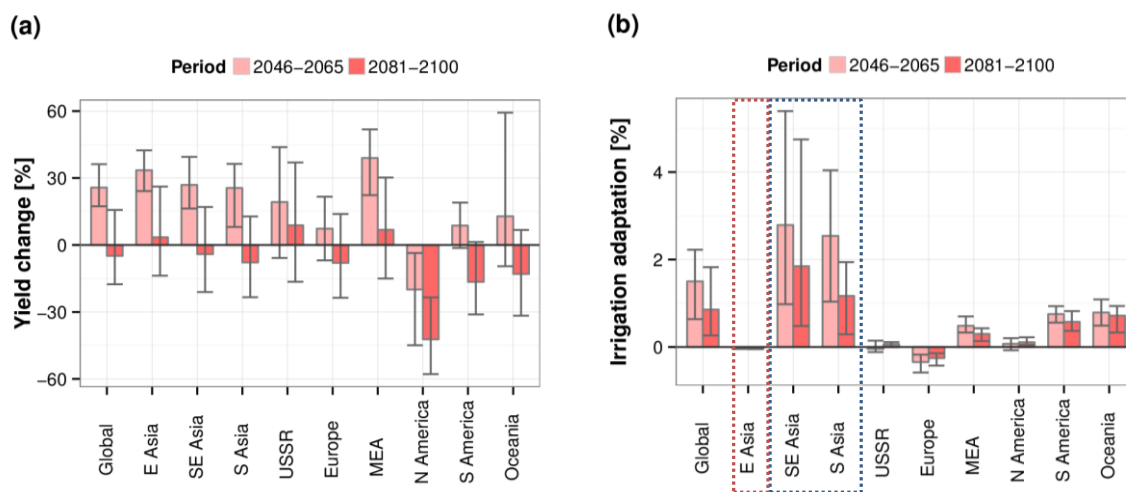
ここで、収量変動に関係する要因解明のための重回帰式において、窒素投入量に着目した結果、4作物のうち、ダイズを除く3作物において、統計的には有意な関係が得られた。ダイズは根粒菌により窒素固定を行うため全体として施肥量が少ないことから、統計的な関係は抽出されなかった。ここで統計収量と窒素投入量に有意な関係が見られたことから、将来施肥シナリオを利用するために、作物モデル内の技術係数が窒素投入量に応じて変化するように、CROVERモデルの

さらなる改良を行った。図(5)-10にはトウモロコシと冬コムギについての施肥量と技術係数の関係を示すが、コメを加えた3作物については、窒素投入量の増加に伴い、技術係数が大きくなる、すなわち作物の収量が増加する方向に働くことが言える結果となった。なお、この傾向はダイズでは見られなかった。これにより、平成28年度に行う食料生産の将来見通しにおいて、SSPシナリオ等から推定される窒素投入量を導入することにより、窒素投入量が将来の食料生産変動に与える影響についても評価可能とした。



図(5)-10 (左) トウモロコシおよび(右) 冬コムギにおける、それぞれ作物モデル中の技術係数と窒素投入量との関係を推定したもの。

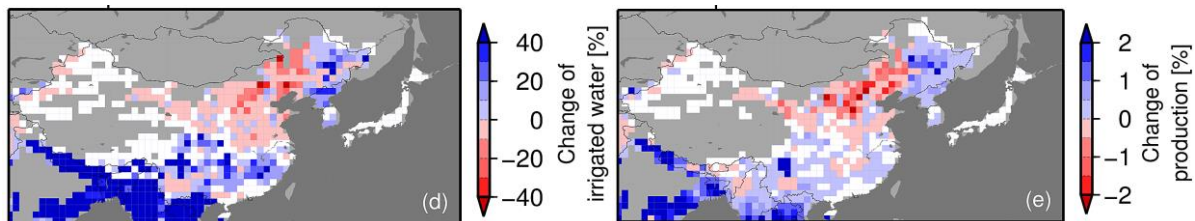
これを踏まえ、CROVERモデルを用いた、動的な水資源量変動および灌漑による土地利用変化を考慮した作物収量予測の結果を、灌漑の効果が最も大きいと予想されるコメについて示す。まず灌漑面積を現時点に固定し、RCP8.5に基づく気候シナリオを入力した結果、コメ収量は多くの地域で今世紀末にかけて減収することが予測された(図(5)-11a)。次に、3. で示した灌漑面積率シナリオを導入した結果、コメを主食としているアジア地域に置ける特徴的な将来変化が示された。すなわち東南・南アジアにおいては、灌漑面積拡大により増収する効果が見込まれる。しかしながら、東アジアでは灌漑面積の拡大が減収に働くことが予測された(図(5)-11b)。



図(5)-11 RCP8.5に基づく気候シナリオを入力した、全球および地域ごとの将来における(a)コメ収量の変化比と(b)灌漑面積拡大によるコメ収量の適応策効果。それぞれ、1981~2000年に対する変化量を比で示す。

これは、東アジアのコメ主要産地である中国において、灌漑面積拡大に伴い、トウモロコシ農地における灌漑取水量が増加し、その結果、コメ生産に利用可能な水資源量が減少したこと(図(5)-12左)が、当該地域における減収(図(5)-12右)の要因であると考えられる。従って、本研究により、灌漑適応策の有効性は流域の気候・土地利用変化やそれに付随する水資源環境の変化に依存することがわかった。

このように本研究では、複数の予測される気候・土地利用変化の条件下での、世界の主要作物への影響と灌漑面積拡大による影響適応効果の将来の見通しを示した。その結果、灌漑適応策は、流域の気候・土地利用変化やそれに付随する水資源環境の変化に依存する灌漑設備の新規導入は食料生産の気候変化リスクに対する適応策として常に有効的とはいえないことがわかった。



図(5)-12 今世紀末の2081～2100年における、(左) コメについての灌漑取水量、および、(右) 灌漑水田と天水田を併せたコメ収量の、それぞれ灌漑水田を、シナリオにより変化させた場合と2000年時点に固定した場合との差を示す。5つのGCMによるRCP8.5に基づく気候シナリオを入力した場合の平均値の、2000年時点に対する変化比で表す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

気候変動が作物生産に与える影響について、さまざまな適応策を用いた場合の将来変化を示した。特に品種改良による増収可能性や、一般に増収効果があるとされた灌漑適応におけるその限界を示したことに本研究の特徴がある。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究により開発、運用された全球作物モデルおよび作物－水資源結合モデルにより、食料生産分野における適応策の有効性と限界を定量的に評価できるようになり、食糧増産が急務となる発展途上国などに対する適応策立案の支援に資することが可能となった。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) Agricultural Model Intercomparison and Improvement (AgMIP)プロジェクト

協力案件名：コメモデルの相互比較・改良、全球作物モデルの相互比較、全球作物・気象データベースの共有

カウンターパート：Joshua Elliot (シカゴ大学・米国)

参加・連携状況：AgMIP は世界 58 機関の作物モデルおよび農業経済モデルの研究者が参画する国際共同研究である。本テーマのメンバーのうち、長谷川は AgMIP におけるコメモデルの相互比較・改良チームの共同議長として貢献し、飯泉は本テーマで開発した全球作物・気象データを AgMIP の全球チーム AgGRID (共同議長：Joshua Elliott (シカゴ大学・米国) および Christoph Müller (ポツダム研究所・ドイツ)) の共通基盤データとして提出した。また、櫻井は全球作物生産性モデル PRYSBI2 を、AgGRID の後継である全球グリッド作物モデル比較 (GGCMI) プロジェクトに登録し、収量絶対値の再現性で、他のモデルに比べて良好な結果を得た (Muller et al.,



2016<sup>3)</sup> 結果、このモデルで現在収量を高精度で再現出来ることが明らかとなり、将来気候下での適応策を含む高度化された影響評価が可能となった。さらに西森と石郷岡は、AgMIP の東アジアチームにおける、気候シナリオ、作物モデルおよび社会経済モデルを統合した評価の枠組みに参画した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文 (査読あり) >

- 1) T. Iizumi, H. Sakuma, M. Yokozawa, J.-J. Luo, A. J. Challinor, M. E. Brown, G. Sakurai and T. Yamagata: *Nature Clim. Change*, 3, 904–908 (2013)  
“Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production”
- 2) T. Iizumi, G. Sakurai and M. Yokozawa: *J. Agric. Meteorol.*, 69, 4, 243-254 (2013)  
“An ensemble approach to the representation of subgrid-scale heterogeneity of crop phenology and yield in coarse-resolution large-area crop models”
- 3) T. Iizumi, M. Yokozawa, G. Sakurai, M. I. Travasso, V. Romanenkov, P. Oettli, T. Newby, Y. Ishigooka and J. Furuya: *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 23, 3, 346–357 (2014)  
“Historical changes in global yields: Major cereal and legume crops from 1982 to 2006”
- 4) T. Iizumi, M. Okada and M. Yokozawa: *J. Geophys. Res.*, 2013JD020130 (2014)  
“A meteorological forcing data set for global crop modeling: Development, evaluation, and intercomparison”
- 5) M. Okada, T. Iizumi and M. Yokozawa: *J. Agric. Meteorol.*, 70, 1, 13-23 (2014)  
“Applicability of empirical solar radiation models to altered climate”
- 6) T. Iizumi, J.-J. Luo, A. J. Challinor, G. Sakurai, M. Yokozawa, H. Sakuma, M. E. Brown, and T. Yamagata: *Nature Communications*, 5, 3712, doi:10.1038/ncomms4712 (2014)  
“Impacts of El Nino Southern Oscillation on the global yields of major crops”
- 7) T. Iizumi, Y. Tanaka, G. Sakurai, Y. Ishigooka, and M. Yokozawa: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 6, 527-540 (2014)  
“Dependency of parameter values of a crop model on the spatial scale of simulation”
- 8) G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori and M. Yokozawa: *Scientific Reports*, 4(4978), 1-5 (2014)  
“How much has the increase in atmospheric CO2 directly affected past soybean production?”
- 9) J. Elliott, C. Muller, D. Deryng, J. Chryssanthacopoulos, K. J. Boote, M. Buchner, I. Foster, M. Glotter, J. Heinke, T. Iizumi, R. C. Izaurralde, N. D. Mueller, D. K. Ray, C. Rosenzweig, A. C. Ruane, and J. Sheffield *Geoscientific Model Development Discussion*, 7, 4383-4427 (2014)  
“The Global Gridded Crop Model intercomparison: data and modeling protocols for Phase 1 (v1.0)”
- 10) T. Iizumi, and N. Ramankutty: *Global Food Security*, doi:10.1016/j.gfs.2014.11.003 (2014)  
“How do weather and climate influence cropping area and intensity?”
- 11) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai, N. Hanasaki, T. Sakai, K. Okamoto and M. Yokozawa: *J. Adv. Model. Earth System.* 7, 1409-1424 (2015)  
“Modeling irrigation-based climate change adaptation in agriculture: Model development and

evaluation in Northeast China”

- 12) T. Sakai, T. Iizumi, M. Okada, M. Nishimori, T. GRÜNWALDB, J. PRUEGERC, A. CESCATTID, W. KORRESE, M. SCHMIDTF, A. CARRARAG, B. LOUBETH, E. CESCHIAI: *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf*, doi:10.1016/j.jag.2015.09.011 (2015)  
“Varying applicability of four different satellite-derived soil moisture products to global gridded crop model evaluation”
- 13) T. Hasegawa, H. Sakai, T. Tokida, Y. Usui, M. Yoshimoto, M. Fukuoka, H. Nakamura, H. Shimono and M. Okada: In: Jerry L. Hatfield and David Fleisher, eds. *Improving modeling tools to assess climate change effects on crop response*. doi:10.2134/advagricsystmodel7.2014.0015, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA (2016)  
“Rice free-air carbon dioxide enrichment studies to improve assessment of climate change effects on rice agriculture”
- 14) T. Iizumi and N. Ramankutty: *Environ. Res. Lett.*, 11, 034003 (2016).  
“Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change”
- 15) R. Confalonieri, S. Bregaglio, M. Adam, F. Ruget, T. Li, T. Hasegawa, X. Yin, Y. Zhu, K. Boote, S. Buis, T. Fumoto, D. Gaydon, T. Lafarge, M. Marcaida, H. Nakagawa, A.C. Ruane, B. Singh, U. Singh, L. Tang, F. Tao, J. Fugice, H. Yoshida, Z. Zhang, L.T. Wilson, J. Baker, Y. Yang, Y. Masutomi, D. Wallach, M. Acutis, and B. Bouman: *Environ. Model. Softw.*, 85, 332-341, (2016)  
“A taxonomy-based approach to shed light on the babel of mathematical models for rice simulation”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない」

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 飯泉仁之直、農林水産省海外食料需給レポート（平成26年7月31日）、2p (2014)  
「2014年のエルニーニョ発生による世界の穀物収量への影響の見通し」
- 2) 櫻井玄、横沢正幸、飯泉仁之直：統計数理研究所共同研究レポート、343, 39-49. (2015)  
「環境変動が全休の同時不作確率に及ぼす影響のコピュラを用いた解析」
- 3) 西森基貴、JATAFFジャーナル、4, 5, 68 (2016)  
「気候変動による食料生産変動の影響予測に向けて」

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 飯泉仁之直：日本気象学会2012年秋季大会（2012）  
「限られた年数の気候変化予測から確率情報を生成するためのウェザージェネレータを用いたブートストラップ法」
- 2) 飯泉仁之直、横沢正幸、櫻井玄：農業環境工学関連学会2012年合同大会（2012）  
「主要4作物を対象とする全球収量時系列データセットの開発」
- 3) 岡田将誌、飯泉仁之直、横沢正幸：日本気象学会2012年秋季大会（2012）  
「地表面日射量を推定する統計モデルの将来気候条件における適用可能性」

- 4) 岡田将誌、櫻井玄、飯泉仁之直、横沢正幸：農業環境工学関連学会2012年合同大会（2012）  
「動的水資源制約を考慮した広域作物生産性予測モデル」
- 5) 櫻井 玄：日本生態学会関東地区会シンポジウム(2012) Hierarchical modeling for the environmental sciences  
“Application of Bayesian method to the estimation of the past effect of the increase of atmospheric CO2 concentration on crop production”
- 6) T. Iizumi: 2nd CCARA (Climate Change Adaptation in Rainfed Rice Area) Annual Review and Planning Meeting, Vientiane, Laos, 2012  
“Forecasting global crop failure to prepare climate-induced food insecurity”
- 7) T. Iizumi, J.-J. Luo, G. Sakurai, H. Sakuma, and M. Yokozawa: NCCARF Climate Adaptation in Action 2012, Melbourne, Australia, 2012  
“Predictability of global crop yield variations using seasonal climate forecasts”
- 8) T. Iizumi, H. Sakuma, M. Yokozawa, J.-J. Luo, A. J. Challinor, and T. Yamagata: APEC Climate Symposium 2012: Harnessing and Using Climate Information for Decision Making-An In-Depth Look at the Agricultural Sector, St. Petersburg, Russia, 2012  
“Forecasting global crop failures to prepare climate-induced food insecurity”
- 9) T. Iizumi, M. Yokozawa, G. Sakurai, M. I. Travasso, V. Romanernkov, P. Oettli, T. Newby, Y. Ishigooka, and J. Furuya: AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) 3rd Global Workshop, Rome, Italy, 2012  
“Historical changes in global yields from 1982 to 2006: A global yield dataset”
- 10) T. Iizumi, M. Yokozawa, and G. Sakurai: AGU Fall Meeting 2012, San Francisco, USA  
“Development of a global, gridded, and time-series crop yield dataset for four major cereal and legume crops”
- 11) M. Okada, G. Sakurai, T. Iizumi, and M. Yokozawa: AGU Fall Meeting 2012, San Francisco, USA  
“An integrated model for assessing both crop productivity and agricultural water resources at a large scale”
- 12) G. Sakurai, T. Iizumi, and M. Yokozawa: ISBA 2012 Conference, Kyoto, Japan, 2012  
“Application of Bayesian method for estimating past effect of climate change on crop production”
- 13) G. Sakurai, T. Iizumi, and M. Yokozawa: World Crop FACE Workshop 2012, Tsukuba, Japan, 2012  
“Actual benefit from elevated [CO2] during the past few decades to soybean production: an estimation based on a semi-process based crop model with FACE data”
- 14) G. Sakurai, T. Iizumi, and M. Yokozawa: International Biometric Conference, Kobe, Japan, 2012  
“Correcting CO2 fertilization effect on crop growth using field observation data by Bayesian method”
- 15) G. Sakurai, T. Iizumi, and M. Yokozawa: RCN FORECAST Conference 2012, Woods hole, USA, 2012  
“A quantitative estimation of the benefit of atmospheric carbon dioxide elevation during the past few decades to the past crop yield”
- 16) M. Yokozawa, G. Sakurai, and T. Iizumi: AGU Fall Meeting 2012, San Francisco, USA

- “Projecting climate change impacts on the stability of productivities of maize and soybean in terms of probability of concurrent failure”
- 17) 岡田将誌、飯泉仁之直、櫻井玄、横沢正幸：日本気象学会2013年度秋季大会（2013）  
「作物生産性－水資源統合予測モデルを用いた穀物主要生産地域における流域水収支の再現性」
- 18) 櫻井玄、飯泉仁之直、横沢正幸：平成25年度統計数理研究所共同研究集会「環境・生態データと統計解析」（2013）  
「全球作物収量統計データを用いた過去の気候変動の影響評価」
- 19) 櫻井玄、飯泉仁之直、横沢正幸：日本地球惑星科学連合2013年大会（2013）  
「作物収量統計データを利用した作物成長モデルのMCMCによる全球キャリブレーション」
- 20) G. Sakurai, T. Iizumi and M. Yokozawa: American Geophysical Union Fall Meeting 2013, San Francisco, USA (2013)  
“A data-oriented semi-process model for evaluating the yields of major crops at global scale (PRYSBI-2)”
- 21) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai and M. Yokozawa: American Geophysical Union Fall Meeting 2013, San Francisco, USA (2013)  
“A crop-water model for simulating both of regional crop yields and water balance simultaneously: An application to Songhua river watershed, Northeast China”
- 22) 櫻井玄、飯泉仁之直、西森基貴、横沢正幸：平成25年度文部科学省数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究 ワークショップ『気候モデルの農業への応用2』（2014）  
「スモールスケールのモデルをラージスケールに展開するにはどうしたらいいか？－作物モデルを用いた全球の作物収量シミュレーションの試み－」
- 23) M. Nishimori: 5th Session of the AMIS Global Food Market Information Group, Mexico City (2014)  
“Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production”
- 24) 岡田将誌・飯泉仁之直・櫻井玄・酒井徹・横沢正幸：水文・水資源学会2014年研究発表会  
“中国東北部における作物生産量の気候変化影響と灌漑による適応策の評価”
- 25) T. Sakai, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada and M. Nishimori: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014)  
“Global patterns of the trends in satellite-derived crop yield proxy, temperature and soil moisture”
- 26) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai, T. Sakai and M. Yokozawa: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014)  
“Modeling the climate change adaptation of crop production using Irrigation over water-limited Region”
- 27) G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, M. Okada and M. Yokozawa: AGU Fall Meeting 2014 (Invited), San Francisco, USA (2014)  
“The past impact of climate change on the yield of major crops”
- 28) G. Sakurai, M. Nishimori, T. Iizumi, M. Okada and M. Yokozawa: The 6th ASIAHORCs Joint Symposium, Bangkok, Thailand, (2014)  
“The past impact of climate change on the global yield of major crops”

- 29) T. Li, T. Hasegawa, X. Yin et al.: AgMIP Global Meeting, Gainesville, Florida. USA. (2015).  
“The evaluation of multiple rice model responses to elevated CO<sub>2</sub>. “
- 30) G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, M. Okada and M. Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meteorology, Tsukuba, Japan (2015)  
“How much has the past climate change affected the past yields of the major crops all over the world?”
- 31) T. Sakai, T. Iizumi, G. Sakurai, M. Okada and M. Nishimori: International Symposium on Agricultural Meteorology, Tsukuba, Japan (2015)  
“The relationship among temperature, precipitation and topographic complexity on crop yield proxy”
- 32) T. Iizumi: MARCO Symposium 2015 “Next Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia” (2015)  
“Global risk assessment of climate-induced food production shocks: from Seasonal scale to the end of this century”
- 33) T. Hasegawa: MARCO Symposium 2015 “Next Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia” (2015)  
“Rice Model Inter-comparison Activities in Asia”
- 34) 岡田将誌、飯泉仁之直、櫻井玄、酒井徹、西森基貴：農業環境工学関連5学会2015年合同大会 (2015)  
「食料生産の気候変化リスクに対する灌漑適応策の有効性評価」
- 35) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai, T. Sakai and M. Nishimori: Second International Conference on Global Food Security (2015)  
“Regionally varying potential of irrigation for adaptation of crop production systems to climate change”
- 36) T. Hasegawa: AgMIP Rice Team Workshop (2015)  
“The assessment and improvement of rice models responding to CO<sub>2</sub> Elevation”
- 37) T. Hasegawa: AgMIP Rice Team Workshop (2015)  
“Sources of uncertainties in rice yield predictions with multi-model ensembles”
- 38) G. Sakurai, M. Nishimori, M. Okada, T. Iizumi and M Yokozawa : Adaptation Futures 2016, Rotterdam, The Netherlands (2016)  
“Future possible crop yield scenarios under multiple SSP and RCP scenarios”
- 39) 岡田将誌・飯泉仁之直・櫻井玄・西森基貴：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)  
「気候・水資源制約下での農業適応策としての灌漑面積拡大の有効性」
- 40) G. Sakurai, M. Nishimori, M. Okada and M Yokozawa : AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)  
“Future Potential productivity: an analysis of global crop yield using process based model”
- 41) M. Okada, T. Iizumi, G. Sakurai and M. Nishimori : AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)  
“Effectiveness of irrigation adaption depending on change in available water resources under changing climate and landuse”

- 42) 櫻井玄・西森基貴・岡田将誌・横沢正幸：日本農業気象学会 2017 年全国大会 (2017)  
「作物モデルを用いた各国の作物生産性ポテンシャルの逆推定」
- 43) 飯泉仁之直：日本農業気象学会 2017 年全国大会 (2017)  
「主要穀物の栽培暦についてのグローバルデータセットの開発」

### (3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない」

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない」

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 「世界のコムギとコメの不作を収穫 3 か月前に予測する手法の開発—季節予測による穀物の世界的豊凶予測—」を、(独) 海洋研究開発機構と共同でプレス発表した(2013年7月19日)
- 2) 「エルニーニョ/ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関係性を解明」を(独) 海洋研究開発機構と共同でプレス発表した (2014年5月15日)
- 3) 日経BPコンサルティング社の取材を基にした記事「生産地の移動や品種改良「適応」で生き残る農業」が『ナショナルジオグラフィック日本版』2015年1月号特別編集版「気候変動の今」の一部として掲載された (2014年12月30日)
- 4) 「過去30年間に穀物収量が不安定化した地域と気候要因の寄与を明らかに」をプレス発表した。(2016年3月28日)

### (6) その他

- 1) 飯泉任期付き研究員が、「コメ・コムギ 3ヶ月前に豊凶予測 —世界の2割の栽培面積で—」により、「2013年農林水産研究成果10大トピックス」(農林水産省農林水産技術会議事務局、2013年12月16日) に選定された。
- 2) 飯泉任期付き研究員が、「穀物のグローバルな豊凶予測を収穫 3 か月前に行う手法の開発」により、ナイスステップな研究者2013 (文部科学省科学技術・学術政策研究所、2013年12月20日) に選定された。
- 3) 飯泉任期付き研究員が、「作物収量に対する気候変動の影響の広域予測に関する研究」により日本農業気象学会学術賞 (平成27年3月) を受賞した。
- 4) 飯泉任期付き研究員、櫻井任期付き研究員ら (Iizumi, T., G. Sakurai and M. Yokozawa) が「An ensemble approach to the representation of subgrid-scale heterogeneity of crop phenology and yield in coarse-resolution large-area crop models」により日本農業気象学会論文賞 (平成27年3月) を受賞した。
- 5) 飯泉任期付き研究員が、「グローバルな食糧生産変動の予測に関する研究」により科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞 (平成27年4月) を受賞した。
- 6) 櫻井任期付き研究員が、「農業生態系のモデル化と数理統計手法を用いた農業環境応答機構の解明」により農環研若手研究者奨励賞 (平成28年1月) を受賞した。

- 7) 岡田農環研特別研究員が、「気候および水資源の変動が食糧生産に及ぼす影響の広域モデリングに関する研究」により農環研若手研究者奨励賞（平成28年1月）を受賞した。

## 8. 引用文献

- 1) Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service 808 East Blackland Road; Temple, Texas 76502; Blackland Research Research Center; Texas Agricultural Experiment Station 720 East Blackland Road; Temple, Texas 76502, USA
- 2) Sacks, W. J., D. Deryng, J. A. Foley, and N. Ramankutty (2010), Crop planting dates: An analysis of global patterns, *Global Ecol. Biogeogr.*, 19(5), 607–620.
- 3) Muller, C., J. Elliott, J. Chryssanthacopoulos, A. Arneth, J. Balkovic, P. Ciais, D. Deryng, C. Folberth, M. Glotter, S. Hoek, T. Iizumi, R. C. Izaurralde, C. Jones, N. Khabarov, P. Lawrence, W. Liu, S. Olin, T. A. M. Pugh, D. Ray, A. Reddy, C. Rosenzweig, A. C. Ruane, G. Sakurai, E. Schmid, R. Skalsky, C. X. Song, X. Wang, A. de Wit, H. Yang, 2016: Global Gridded Crop Model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geoscientific Model Development Discussions*, doi:10.5194/gmd-2016-207.

## **Adaptive Land-water-ecosystems Use Strategy for the Climate Risk Management**

Principal Investigator: Yoshiki YAMAGATA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2545 / Fax: +81-29-850-2960  
E-mail: mailaddress@nies.go.jp

Cooperated by: Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO (NIAES), Ibaraki  
University

[Abstract]

Key Words: Integrated Terrestrial Modeling, Ecosystem Service, Water resource,  
Land use, Crop productivity

In order to assess the sustainabilities of difference land use scenarios that correspond to IPCC scenarios (SSPs and RCPs), we have developed a new Integrated Terrestrial Model (ITM) that combines terrestrial ecosystem (VISIT), hydrological model (H08) and crop model (PRYSBI2) and land use change model (TeLUMO). Complicated interactions between land-water-ecosystem were investigated using the models.

Firstly, to create spatially explicit scenarios as input into models, Population and GDP scenarios given under Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) were downscaled into 0.5-degree grids based on a model ensemble approach considering spatial and economic interactions among cities.

Impacts of climate change and deployment of counter measures were investigated using a process-based terrestrial ecosystem model (VISIT). It was shown that global warming under RCP8.5 scenario affect terrestrial productivity and carbon stock significantly, and that under RCP2.6 also exert influences in several vulnerable ecosystems such as those in the Arctic.

Global impacts of climate change on water resources have been investigated using a global hydrological model (H08). It includes a comprehensive global assessment for the impacts of climate change on availability of water throughout the 21st century under various socio-economic and climatic conditions (Hanasaki et al., 2013a,b), contributions to the Inter Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP; Schewe et al. 2014; Masaki et al., 2017)

Global land-use scenarios consistent with the yield of crop model (PRYSBI2) were generated by a land-use model (TeLUMO). The land-use scenarios were used in



ecosystem model and water resource model and their results were used for the information of the land-use strategies. By land-use scenario, uncertainty were discussed and it was indicated that uncertainty of developing countries were very large.

A global gridded crop model (PRYSBI2) was developed and combined the hydrological model (H08). Major crop yields increase due to rising the photosynthetic efficiency based on increased greenhouse gas concentrations and the technological development under the economic growth in future. The decreasing trend of the productivity was also seen, suggested by extreme high temperature and longer dry spells.

Using these models, we have investigated various important implications for planning optimal management of land systems. Especially, the projected impacts to ecosystem services for massive bioenergy production to achieve the two-degree target have shown possible global and local tradeoffs between climate change mitigation and food security, water resources etc.