気候変化による作物収量変化を通じたマクロ経済への影響

藤森 真一郎¹, 飯泉 仁之直², 長谷川 知子¹, 高倉 潤也¹, 高橋 潔¹, 肱岡 靖明¹,
増井 利彦¹

¹正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター
(〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

²非会員 国立研究開発法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域
(〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3)
E-mail: fujimori.shinichiro@nies.go.jp

将来の気候変化による作物収量の変化は、土地利用、農業部門の生産量や価格、さらにマクロ経済へと影響する。これまで、経済モデルを用いた研究では食料価格や食料安全保障については豊富に研究が存在するが、マクロ経済影響についてはあまり研究が蓄積されていない。そこで本研究では、最も先進的な全球収量モデルのひとつである CYGMA モデルと経済モデルである AIM/ CGE、土地利用分配モデルである AIM/ PLUM を用いて、気候変化による作物収量のマクロ経済への影響を明らかにした。その際、土地利用変化による適応策、社会経済条件、CO₂施肥効果、気候モデルの不確実性などできる限り、マクロ経済に影響を与える因子と不確実性を扱った。その結果、CO₂施肥効果や土地利用適応策は、マクロ経済への影響は必ずしも明瞭な違いを生まず、他の部門（例えば健康影響や洪水被害など）の気候変化の経済影響より小さかった（0.02-0.06%）。しかし、人口増加が大きく低所得といった悲観的な世界のシナリオの基では十分に他部門と比較可能となる大きな影響（0.6%）が出ることが分かった。これは悲観的なシナリオでは農業部門の付加価値の GDP に占める割合が相対的に高く、同じ気候影響下でも被害額が大きくなること主たる原因と考えられた。

Key Words: AIM; integrated assessment model; land use; climate change mitigation, bioenergy

1. はじめに

気候変動による経済的な影響は古くから研究されてきている。IPCC の政府間パネルの第 5 次評価報告書（Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC AR5）の第二作業部会第 10 章¹⁾にそれがまとめられている。しかし、農業部門の経済影響についてはこの第 10 章には記述されておらず、農業の章である第 7 章²⁾は農業に関して包括的にレビューを行っているが、グローバル経済モデルを用いた解析は食料価格、食料安全保障に限られており、マクロ経済ロスがどの程度発生するのかは記述されていない。AR5 には記述されていないものの、農業の経済的な影響に関する研究は実際には行われている。たとえば、Reilly *et al.*³⁾は部分均衡モデルを用いて、作物価格、貿易の変化などを通じた、厚生への影響の解析を行った。そして、作物収量は地域により影響の受け方が異なり貿易を通じて、ど

の地域が経済的な利益者となるのかを明らかにした。近年ではグローバルスケールでは Ren *et al.*⁴⁾が応用一般均衡（Computable General Equilibrium; CGE）モデルを用いて類似の分析を行い、マクロ経済影響は農業価格の変化割合などと比べると小さいという結論を得ている。また、Ciscar *et al.*⁵⁾は欧州に限られた解析ではあるが CGE モデルを用いて、最も温暖化が進行するケースで 0.3% 程度のマクロ経済ロスが発生するという結果を示した。他の部門（例えば健康影響や洪水被害など）も同様であるが、農業影響は労働、資本、中間投入、土地といった要素投入量の変化を通じてマクロ経済に影響を与える。そのような影響の解析には CGE モデルが適しており、既存研究でもそのようなアプローチがとられてきた。

AIM（Asia-Pacific Integrated Model）は CGE モデルにおける土地利用の取り扱いの改良⁶⁾、食料需要に関する解析を通じた詳細化⁷⁾、土地利用分配モデルの開発によるバイオマス供給曲線などを実施してき

図- 1 AIM モデルフレームワーク

た⁸⁾。また、農業モデル比較プロジェクト (Agricultural Model Inter-comparison Project; AgMIP)⁹⁻¹⁰⁾を通じて、農業市場の分析、食料安全保障への影響等の分析なども行ってきた。特に長谷川ら¹¹⁾、Hasegawa et al.¹²⁾は気候変化の収量への影響が飢餓リスク人口へどのような影響を与えるかを用いて明らかにした。

一方、作物の収量の情報を CGE で扱うときにはさまざまなことを検討する必要がある。たとえば、作物モデルは一般に地理分解能が高く 0.5 度グリッドなどの情報を持つが、CGE では世界を 10-20 地域程度に分割して解析を行うためなんらかの集約が必要となる。この集約を現状の土地利用をベースとするのか将来も変化していくものかで決定するのか、別の言葉で言うと土地利用を変化させるという適応策を想定するかどうかで解析結果は変わってくる。気候モデルの不確実性、CO₂施肥効果の有無、社会経済シナリオの想定といった事項も将来の収量変化、気候変化に対するマクロ経済の影響を左右する要因と考えられる。しかし、これらを包括的に取り扱い、その影響の大きさを明らかにした研究は存在しない。

以上のような背景のもと、本研究は、気候変化による農業部門の収量への影響がマクロ経済へ及ぼす影響を土地利用の適応可能性、GCM の不確実性、CO₂施肥効果の有無、社会経済シナリオの想定という 4 つの観点から解析し、将来の農業経済影響とそれを決定づける重要な要素を同定する。

本論文は、以下のように構成される。第二章では、

全体的方法論、モデル、シナリオフレームワークを示し、第三章で結果の分析を示す。第四章ではシナリオ分析結果の解釈について考察し、第五章で結論を述べる。

2. 手法

図- 1 に AIM のモデルフレームワークの全体像を示す。今回のシミュレーションで用いるのは世界応用一般均衡モデル AIM/CGE (Computable General Equilibrium) モデル^{7,12-15)}、作物モデル CYGMA (Crop Yield Growth Model with Assumptions on climate and socioeconomy)¹⁶⁾、土地利用分配モデル AIM/PLUM⁸⁾である。AIM/CGE が最初にシミュレーションを行う (Reference ケース)。次に、その土地利用情報をグリッド別に扱う AIM/PLUM を用いて農地、牧草地などのアロケーションを行うとともに、バイオマス作物の供給曲線 (土地面積と土地生産性の関係) を地域別で計算する。そこで得られたバイオマス供給曲線を再び AIM/CGE に入力する。一方、収穫地面積を CYGMA の収量ポテンシャルマップと重ねることで土地利用変化に由来する適応策を考慮した場合の 17 地域の平均収量を計算する。本研究では AIM/PLUM の土地利用情報を介さずに現状の土地利用情報を用いて CYGMA のグリッド別の収量を直接集約して用いる場合についても検討するため、CYGMA から AIM/CGE へ入力するパターンも存在する。従って、CYGMA から直接

表-1 世界地域区分

コード	地域名	コード	地域名
JPN	日本	TUR	トルコ
CHN	中国	CAN	カナダ
IND	インド	USA	アメリカ
XSE	その他東南アジア	BRA	ブラジル
XSA	その他アジア	XLM	その他南米
XOC	オセアニア	XME	中東
EU25	EU25	XNF	北アフリカ
XER	その他欧州	XAF	その他アフリカ
CIS	旧ソ連		

表-2 シナリオ一覧

Dimension	options	Description
Socioeconomic condition	SSP1	Sustainability
	SSP2	Middle of the road
	SSP3	Regional rivalry
CO2 fertilization	on	Considering CO2 fertilization
	off	Not considering CO2 fertilization
Aggregate method	Harv	Harvest area in base year
	PLUM	Land use change based on AIM/PLUM
気候条件・GCM	NoCG	気候現状に固定
	RCP8.5 ge2m	RCP8.5下でのGFDL-ESM2M
	RCP8.5 hg2e	RCP8.5下でのHadGEM2-ES
	RCP8.5 ipsl	RCP8.5下でのIPSL-CM5A-LR
	RCP8.5 mes	RCP8.5下でのMIROC-ESM
	RCP8.5 ne1m	RCP8.5下でのNorESM1-M

AIM/CGEへ入力する矢印が図中に示されている。シミュレーションは2005年から2100年までの全世界を対象とした。

(1) AIM/CGE モデル

本研究で用いるCGEモデルは生産、消費、投資、貿易活動が各種生産要素、財等の価格を所与とした関数を用いて記述されている。生産活動は利潤最大化を前提としており、中間財、生産要素を投入する。生産活動により発生する所得（雇用者報酬、営業余剰、生産にかかる税）は代表的家計が受け取る。家計は所得の一部を貯蓄に回し、所得から貯蓄を引いた可処分所得を所与として消費を行う。消費財の支出割合は効用最大化のもと決定される。次に最終消費は家計消費、資本形成で構成される。ここでは家計消費と政府消費を集約して代表的家計消費として表している。資本形成は固定係数の消費とし、財間の消費割合は変化しないとした。貯蓄と投資がバランスするため貯蓄性向は資本形成に応じて内生的に決定するとした。ここで、新たに蓄積される資本は次の年の新規資本として稼働し、生産要素の一つとなる。本モデルは1年単位の逐次型動学モデルである。旧資本と新規資本が区別されており、資本の情報が次年へ更新される。一般に統合評価モデルには逐次動学型と動学最適型モデルの二つのタイプが存在するが、本モデルは逐次動学型モデルである。詳細な式体系については、Fujimori, *et al.*¹⁷⁾に記述されているのでそちらを参照されたい。地域区分は17

地域であり表-1に示すとおりである。

(2) CYGMA モデル

CYGMAは将来の社会経済状況の変化を明示的に扱う作物生産性モデルである。地域解像度は全球を $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ で扱っている。日別の物理環境条件に基づいて生育シミュレーションを行い、生育期間の変動が決定される。生育期間における窒素不足、高温、低温、乾燥、過湿が葉面積指数などの作物の生長量と収量形成における主要なストレスとして考慮されている。これらのうち、窒素投入量は一人当たりGDPおよび一人当たり農耕地面積を説明変数とした関数を国別に作成して適用している。また、すべてのストレスは農業技術と気候条件の関数となっており、経済成長に応じて改良品種とそれに適した栽培管理が普及し、ストレスに対する収量の脆弱性が低下する。播種日と品種特性（播種から登熟までに必要な温度要求量）は過去10年間のモデル内の温度・湿度条件により毎年、決定される。モデルの過去の検証、将来への適用はIizumi *et al.*¹⁶⁾に詳細が記述されている。

(3) AIM/PLUM モデル

AIM/PLUMはAIM/CGEで計算される地域レベル（17地域）の集約された土地面積を入力し、その土地をその地域内のグリッドに分配する。地理情報は $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ のグリッドである。人間の生産活動すなわち農林産物の生産に要する土地の面積を外生的に与え、その面積を満たすよう土地利用の分布を探索する。農地の分配は、土地所有者が土地生産性に基づき生産により最大の収益を得られるグリッドを選択するよう、最適化（収益最大化）により決定する。AIM/CGEモデルと整合的な地域区分をとり、単一の国・地域ごとに最適化問題を解く。地域を越えた配分は考えない。毎年逐次的に計算され、毎期の土地利用分布の結果は翌期に渡される。各グリッドでの潜在的生産性（単位面積当たりの潜在的生産量）は、生物物理的条件を考慮して算定される。作物の潜在的生産性はCYGMAを用いる。ただし、CYGMAは現在4作物（米、小麦、トウモロコシ、大豆）のみを対象としているため（植物由来カロリーベースで56%を占める）、それ以外の作物はThe Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)¹⁸⁾のLund-Potsdam-Jena managed Land Dynamic Global Vegetation and Water Balance Model (LPJmL)¹⁹⁾の情報を用いた。バイオ作物の生産性及び森林の炭素吸収量についてはVISIT (the Vegetation Integrative Simulator for Trace gases)²⁰⁾を用

図-2 2100年における世界全体のGDP損失率（気候変化なしと比べて）。a)は土地利用変化をグリッドレベルで考慮するかどうか（harvは現状固定, plumは将来変化）、b)はCO₂施肥効果を考慮するかどうか（off, onはそれぞれ施肥効果なしとあり）、c)は社会経済条件SSP1, 2, 3の違いを表している。また不確実性幅はそれぞれGCMの幅を表している。

図-3 GDP損失の時系列（%）。CO₂施肥効果なし、SSP2下でグリッド別の土地利用変化を考慮するかしないかを比較。Harvは土地利用を現状固定、plumは将来変化する。地域はAsia:アジア、OECD90:OECD、REF:旧共産圏、MAF:アフリカ・中東、LAM:中南米

いた。作物収量の気候影響は、各作物モデル内で気温や降水量、CO₂濃度に対する変化として表現され（例；灌漑なし作物は水ストレスがかかった場合はその分成長速度が阻害される）、その収量の地理的情報がここでは使用される。分配の手順は3ステップに分けられる。第一に、農地、定住地、ツンドラ・水面、その他の分配を決定する。第二に、その他のうち、牧草地を決定する。最後に、その他の土地から牧草地を除いた残りを森林と草地に分配する。詳細はHasegawa *et al.*⁸⁾を参照されたい。

(4) シナリオ

本研究では4つの要素を考慮してシナリオを構成する（表-2）。第一は社会経済シナリオで、Shared Socioeconomic Pathways (SSP)のSSP1, 2, 3を用いた。GDP、人口、食料選好などの社会経済条件もSSPに

従う²¹⁻²²⁾。第二はCO₂施肥効果の有無である。第三は作物モデルCYGMAをAIM/CGEの集約地域へ集約するときの方法で2種類存在する。一つは土地利用または収穫地を現状に固定して17地域の平均収量を計算する方法でこれは土地利用変化に起因する適応策がないケース（Harv）を想定している。もう一つはAIM/PLUMを用いて収量に応じて耕作地を変化させていくという適応策があるケース（Plum）である。それぞれ、Harv、Plumケースと呼ぶ。第四は複数気候モデル（GCM）を扱うもので、ISIMIPで用いられた5つのGCMを用いる。これらの要素の違いを気候条件が変化するRCP8.5（Representative Concentration Pathways）と気候を現状でとどめた（NoCC）、2種類のケースを考慮する（他のRCPの使用も可能ではあるが、今回は最も極端なケースで感度を見る）。これらの4次元の組み合わせを総当たりでシナリオを想定した。ただし、気候を現状に固定するケースは、CO₂施肥効果はなし、土地集約は現状のマップにとどめたもののみを対象とした。

3. 結果

(1) 経済影響

気候変化がないSSP2-NoCCと比べたときの気候変化があるケース（RCP8.5）について手法別、CO₂施肥効果有り無し別、SSP別でGDPロスの影響を見る。図-2には2100年、世界全体におけるSSP別、CO₂施肥についてはHarv手法（現状の収穫地マップを用いる）を示す。ここでHarvを用いたのは結果的にそれほどこの手法の違いが大きくなかったため、より比較を容易にするためである。まず手法別のa)についてみるとAIM/PLUMを用いた土地利用変化を考慮しない場合は0.04%であったが土地利用変化を考慮すると約半分となり0.02%であった。ただし、GCMの不確実性を考慮するとこの差は明瞭でなくなる。次にCO₂施肥効果の有無に着目するとb)施肥効果がないと仮定した時と比べて施肥効果がある場合、中位値はa)と同様に約半分の0.02%となった。一方c)の社会経済条件による違いはSSPで顕著であり、桁が一桁異なる。SSP3では0.57%となった。それに対してSSP1はほとんど影響がなかった。SSP3でこれほど違いが出たのは、農業部門の付加価値がGDPに占める割合が高いことによると考えられる。2100年における農業部門の付加価値のGDPに占める割合がSSP1, SSP2でそれぞれ1.0%, 1.3%であるのに対してSSP3では3.7%であった。農産物価格の気候変化に対する応答はSSP間では明瞭に

図-4 5部門の作物（米，小麦，その他穀類，油糧作物，砂糖作物）の平均収量（単位はt/年）。Harvは土地利用を現状固定，plumは土地利用が変化するケースである。地域コードは表-1を参照されたい。点線は気候変化がないケース，で実線は気候変化がある場合の5GCMの中位値。幅はGCMの最大と最小幅を表す。

差がなかった。

次に時系列の情報を手法別について見る（図-3）。世界全体でみると2070年以降急激にGDP損失率が高くなっており、気候変動の影響が急激に出てくる。ただし、一概にすべての地域でそのような傾向を示しているわけではなく、OECDやアジアでは全体としては期間後半になるにつれて、不確実性幅が高くなり、正負ともにあり得るが、中位値としてはほぼ影響がないといった結果であった。アフリカ、南米などは低緯度帯が多く比較的温暖化の影響を強く受けやすい。

この値を他部門（健康、洪水など）の気候影響の経済分析と比べるとかなり小さいといえる¹⁾。この理由にはいくつか考えられる。第一に農業部門の付加価値が経済全体のGDPに対して小さいことである。現状の値は3.7%であり、社会経済シナリオの想定に従って2100年のGDPは約7倍となるが、その成長の大部分は第二次産業、第三次産業から生じるため、2100年における農業部門の付加価値のGDPに占める割合は1.0%となる。第二に地域によってはマクロ経済への影響がプラスに出る地域もあり（図中ではマイナス）、世界全体で相殺される。

（2）収量

5作物の平均収量を図-4に示す。収量はまず大きく気候変化を考慮した場合とそうでない場合で異なる。世界全体でみると、現在の3t/haである。GDP/capの伸びに従い技術進歩があるため、気候状態を現状にとどめたシナリオでは、収量が伸び、約5t/haとなった。これは3つの収量の集約方法に大きくは依存しなかった。ただし、2050年付近では3手法間での乖離が相対的にやや大きい。多くの地域で同様の傾向をみることができる。一方、気候変化のあるシナリオについて見るとその収量は大きく減少する。世界全体では、気候変化の影響が顕著になる前の21世紀前半はNoCCと大きな差は見られないが、年が後になるにつれて、乖離が大きくなる。2100年では2005年とほぼ同様の3t/ha付近となる。ただし、気候変化がある場合は、GCM間での不確実性があり、相応の幅が生じていることには注意が必要である。上記のようなNoCCとのかい離が大きい傾向が特に顕著なのはインド（IND）、その他アジア（XSA）、その他アフリカ（XAF）などの途上国である。

図-5 5部門の作物（米，小麦，その他穀類，油糧作物，砂糖作物）の生産量（Mt/年）。Harvは土地利用を現状固定，plumは土地利用が変化するケースである。地域コードは表-1を参照されたい。点線は気候変化がないケース，で実線は気候変化がある場合の5GCMの中位値。幅はGCMの最大と最小幅を表す。

(3) 食料生産

図-5に食料生産量（米，小麦，その他穀類，砂糖作物，油糧作物）を地域別に示す。世界全体では，人口増加と所得増加を背景に食料生産が堅調に伸びる。気候変化がない場合は2100年において約47億トンとなる。それに対して気候変化がある場合は若干生産量が落ち44億トンとなる。収量の落ち方は約50%であったことから収穫地面積は倍近く上がっている。

地域別でみるとその挙動は大きく異なる。まず気候変化がない場合でも増加する地域と減少する地域がある。今回特に現状の貿易政策等を明示的に入れなかったため，日本は人口減少と，高い食料価格のために食料をほぼ輸入する形となっている。それ以外にもEU（XE25）や中国は減少し，ともに2100年では2005年の約半分となっている。アメリカ（USA），オセアニア（XOC）などは増加する。気候変化に対する応答は必ずしも収量の変化と対応しているわけではない。例えばEU（XE25）は気候変化により収量は下がっているが生産量は増加している。これは生産量が貿易を通じて決まるため，地域間の相対的な気候影響の発現が影響しているものと考えられる。

地域別でみるとその挙動は大きく異なる。まず気候変化がない場合でも増加する地域と減少する地域がある。今回特に現状の貿易政策等を明示的に入れなかったため，日本は人口減少と，高い国内食料価格のために食料をほぼ輸入する形となっている。それ以外にもEU（XE25）や中国は減少し，ともに2100年では2005年の約半分となっている。アメリカ（USA），オセアニア（XOC）などは増加する。気候変化に対する応答必ずしも収量の変化と対応しているわけではない。例えばEU（XE25）は気候変化により収量は下がっているが生産量は増加している。これは生産量が貿易を通じて決まるため，地域間の相対的な気候影響の発現が影響しているものと考えられる。

4. 考察

まず，農業部門の気候変化によるマクロ経済影響は概して，小さいと結論付けてよいであろう。これは収量の集約方法，GCMの違いなど現状で考慮できる範囲で行った結果である。既存文献¹⁾で見られる他部門の経済損失や経済全体の損失等と比較しても

桁がひとつ小さいレベルである。これは、そもそも農業部門の付加価値が小さいことにも由来すると考えられる。2005 年の農業部門の付加価値が GDP に占める割合は世界全体で 3.7% であることを考えると、1% 以下の影響であることは十分にあり得る。ただし、社会経済の違いはマクロ経済に対して相対的に大きな影響を与える。ここからは二つのインプリケーションが得られる。第一に気候緩和が失敗した時のことを考えるならば、気候影響を最小限にとどめられるように、人口増加を抑制し、特に途上国での所得増加が起こるような社会を目指すべきである（SSP の文脈で言えば、適応策への挑戦が小さな世界）。第二に社会経済条件が大きな要素であるということは、よりその点について詳細な研究を進める必要があるということを意味する。一点作物モデルの不確実性は今回扱えなかったが、既存研究でこれまで見られてきたものを考慮すると、作物モデルの不確実性によって一段とその幅が広がるが結論が変わるということはあまり予想しにくい。

土地利用を変化させることによって影響が変わるかどうかは適応策がどの程度の効果を持っているのかという問いに対するひとつの答えになる。これまで CGE を用いた研究でこの影響に立ち入って検討した研究は存在しなかった。本研究の結果からは世界全体といったマクロな単位で見た場合はそれほど大きな影響を及ぼさないことがわかり、既存のアプローチでも代替可能であることが分かった。ただし、詳細な地域についての解析が必要な場合はその限りではないであろう。

ただし、今回の地域別の情報からは一定の傾向は見出せず、どの地域にとって気候変動が負の影響をもたらすのかは明瞭にはわからなかった。ただし、GDP に対する農業付加価値が高いほど気候変化に対して経済の影響が高いと思われるので、途上国のほうが GDP に対する比で見た場合は大きい傾向にある。

5. 結論

本研究は AIM モデルを用いて農業部門における気候変化によるマクロ経済影響を明らかにした。その際社会経済条件、土地利用変化による適応策など様々な事象を考慮した結果、マクロ経済影響は気候影響全体、他の部門と比較すると小さく 0.02-6% というオーダーであった。ただし、社会経済条件を SSP3 にした場合はその規模が一桁増加し、十分に他の部門と比較可能なレベルになることがわかった。

これは悲観的なシナリオでは農業部門の付加価値の GDP に占める割合が相対的に高く、同じ気候影響下でも被害額が大きくなることが主たる原因と考えられた。最後に本研究の限界点について述べる。第一に作物モデル、経済モデルを今回は一つしか用いなかったが、これらを複数用いることで結果は変わるかもしれない。この点についてはモデル比較等で追試が必要であると考える。第二に CYGMA の小麦は現在春小麦しか扱っていないため、小麦部門の収量にはバイアスがかかっている。これは今後の改善点としたい。

謝辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S14-5, 2-1702)により実施された。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Arent, D., Tol, R., Faust, E., Hella, J., Kumar, S., Strzepek, K. M., Key economic sectors and services. In *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Field, C. B. ; Barros, V. R. ; Dokken, D. J. ; Mach, K. J. ; Mastrandrea, M. D. ; Bilir, T. E. ; Chatterjee, M. ; Ebi, K. L. ; Estrada, Y. O. ; Genova, R. C. ; Girma, B. ; Kissel, E. S. ; Levy, A. N. ; MacCracken, S. ; Mastrandrea, P. R. ; White, L. L., Eds. Cambridge University Press: Cambridge, 2014.
- 2) Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B., Travasso, M. I., *Chapter 7: Food security and food production systems*, Cambridge University Press: 2014.
- 3) Reilly, J., Hohmann, N., Kane, S., Climate change and agricultural trade, *Global Environmental Change*, Vol. 4, No. 1, pp. 24-36, 1994.
- 4) Ren, X., Weitzel, M., O' Neill, B. C., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., Balistreri, E. J., Dalton, M., Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS), *Climatic Change*, 10. 1007/s10584-016-1791-1pp. 1-15, 2016.
- 5) Ciscar, J. C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabo, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O. B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C. M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., Physical and economic consequences of climate change in Europe, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the*

- United States of America*, Vol. 108, No. 7, pp. 2678–83, 2011.
- 6) Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions, *Food Sec.*, Vol. 6, No. 5, pp. 685–699, 2014.
 - 7) Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Masui, T., Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways, *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 1, pp. 014010, 2015.
 - 8) Hasegawa, T., Fujimori, S., Ito, A., Takahashi, K., Masui, T., Global land-use allocation model linked to an integrated assessment model, *Science of The Total Environment*, Vol. 580, pp. 787–796, 2017.
 - 9) Nelson, G. C., van der Mensbrugghe, D., Ahammad, H., Blanc, E., Calvin, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Heyhoe, E., Kyle, P., Lotze-Campen, H., von Lampe, M., Mason d'Croz, D., van Meijl, H., Müller, C., Reilly, J., Robertson, R., Sands, R. D., Schmitz, C., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Willenbockel, D., Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree, *Agricultural Economics*, Vol. 45, No. 1, pp. 85–101, 2014.
 - 10) Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlik, P., Ahammad, H., Deryng, D., Elliott, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Heyhoe, E., Kyle, P., Von Lampe, M., Lotze-Campen, H., Mason d'Croz, D., van Meijl, H., van der Mensbrugghe, D., Müller, C., Popp, A., Robertson, R., Robinson, S., Schmid, E., Schmitz, C., Tabeau, A., Willenbockel, D., Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 9, pp. 3274–3279, 2014.
 - 11) 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 潔, 高., 増井利彦, 気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)*, Vol. 68, No. 5, pp. I_227–I_236, 2012.
 - 12) Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y., Takahashi, K., Masui, T., Tanaka, A., Climate Change Impact and Adaptation Assessment on Food Consumption Utilizing a New Scenario Framework, *Environmental science & technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 438–445, 2014.
 - 13) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints, *Energy Economics*, Vol. 48, pp. 306–315, 2015.
 - 14) Fujimori, S., Kainuma, M., Masui, T., Hasegawa, T., Dai, H., The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation, *Energy Policy*, Vol. 75, No. 0, pp. 379–391, 2014.
 - 15) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology, *Applied Energy*, Vol. 128, No. 0, pp. 296–306, 2014.
 - 16) Iizumi, T., Furuya, J., Shen, Z., Kim, W., Okada, M., Fujimori, S., Hasegawa, T., Nishimori, M., Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes, *Scientific Reports*, Submitted.
 - 17) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y., *AIM/CGE [basic] manual*, Discussion paper series, 2012–01, Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute Environmental Studies: pp 1–87, 2012, <http://www.nies.go.jp/social/dp/pdf/2012-01.pdf>.
 - 18) Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J. W., Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 9, pp. 3268–3273, 2014.
 - 19) Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biology*, Vol. 13, No. 3, pp. 679–706, 2007.
 - 20) Ito, A., Inatomi, M., Water-Use Efficiency of the Terrestrial Biosphere: A Model Analysis Focusing on Interactions between the Global Carbon and Water Cycles, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 13, No. 2, pp. 681–694, 2012.
 - 21) Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M., SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways, *Global Environmental Change*, Vol. 42, pp. 268–283, 2017.
 - 22) Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaserna, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, Vol. 42, pp.

MACROECONOMIC IMPACT INDUCED BY CROP YIELD CHANGE ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE

Shinichiro FUJIMORI, Toshichika Iizumi, Tomoko HASEGAWA, Junya TAKAKURA,
Kiyoshi TAKAHASHI, Yasuaki HIJIOKA, Toshihiko MASUI

Changes in crop yield due to future climate change will affect land use, agricultural production volume, and prices in the agriculture sector, as well as macroeconomics. While there has been much research into food prices and food security using economic models, there is little research on macroeconomic effects. Therefore, this study clarifies the macroeconomic impacts of crop yield changes using the CYGMA model, which is one of the most advanced global yield models, the AIM / CGE economic model, and the AIM / PLUM land use distribution model. In doing so, we dealt with factors and uncertainty that affect macroeconomics as much as possible, such as adaptation measures due to land use change, socioeconomic conditions, CO₂ fertilization effects, and the uncertainty of climate models. This showed that the CO₂ fertilization effect and the land use adaptation measures did not necessarily produce distinct differences in macroeconomic effects, and were smaller (0.02–0.06%) than the economic impacts of climate change in other commonly known sectors. However, socioeconomic conditions changed their values greatly and there was a large influence (0.6%) that can be compared with other sectors based on a pessimistic world scenario, such as a large population increase and low incomes.