

9. 気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の温暖化影響評価

申 龍熙^{1*}・高橋 潔¹・脇岡 靖明¹・花崎 直太²・山本 隆広³・増富 祐司⁴

¹国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

⁴埼玉県環境科学国際センター 温暖化対策研究室 (〒347-0115 埼玉県加須市上種足914)

* E-mail: shin.yonghee@nies.go.jp

複数気候モデルによる気候予測情報を用いて、気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の変化を定量的に評価した。また、トウモロコシ生産性の予測結果に含まれているGCMの選択、排出シナリオの違い、CO₂施肥効果の考慮の有無による不確実性について比較を行った。その結果、世界トウモロコシ生産量上位13カ国平均のトウモロコシ生産性は全排出シナリオで21世紀末に近づくほど大きな減少が予測された。特に気候変化が最も大きい2080年代のA2シナリオではモデル平均の生産性が22%減少すると予測された。ただし、この生産性予測は前提とする気候予測の選択に大きく依存し、10.3%の生産性増 (GISS-ER) ~51.7%の生産性減 (GFDL-CM2.0) と、大きな予測結果の不確実性幅が示された。

Key Words : climate change, uncertainty, maize, GCM, SRES scenario, CO₂ fertilization effect

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書では、人為的な温室効果ガス排出による地球上の平均気温の上昇が世界各地域の作物生産性 (収量) に大きな影響を及ぼすと予測している¹⁾。農作物の生産性は主に気温、降水量、日射量などの農業気候資源と、農薬、肥料使用、品種改良、灌漑水供給のような技術的要因に影響を受け変化する²⁾。人類が農作物を栽培し始めて以来、農作物栽培技術に対する持続的な投資と開発により作物生産性は増加を続けてきた。一方で、今後は気候変動による作物生産性が大きく減少する地域もあると予想されるため、その定量的な評価を通じて気候変動に脆弱な地域を把握することが必要となる。

気候変動による全球規模の作物生産性への影響は、主に気候・土壌条件から作物生産性を推定するDSSAT³⁾、EPIC⁴⁾、GAEZ⁵⁾などの作物生産モデルに、大循環モデル (General Circulation Model: GCM) を用いたシミュレーションから得られる気候予測データを入力する影響予測シミュレーションによって評価されてきた。しかし、世

界の各大学や研究機関で開発されたGCM気候予測データには各モデルに使われた半経験的パラメータ及びプロセス定式化の違いによる気候予測結果の差があるため、影響評価モデルの出力にも不確実性が生ずる。将来の温暖化に対して脆弱な地域を把握し、実効的な温暖化対策を検討するための支援情報として用いるには、気候予測データの違いによる作物生産性推定結果の不確実性を定量的に把握することの重要性は大きい。以上のような背景から、Masutomi et al.⁶⁾はGAEZモデルを独自に改良し、それを用いて複数のGCM気候予測データによる気候変化予測の不確実性を考慮したコメ生産性の定量的評価を、2020年代・2050年代・2080年代の3時点について、SRES-A1B・A2・B1の3種の排出シナリオを前提として、アジアを対象地域として実施した (SRES排出シナリオについては2(3)に後述する)。その結果、大気中のCO₂濃度が最大となる2080年代のA2シナリオで、他のシナリオに比べてコメ生産性が著しく減少することを示した。

一方、世界的な作物生産への影響の把握という観点からは、特にコメを主食とするアジアの外の地域においては、その他の作物生産性についての評価が重要である。

以上の背景に基づき、Masutomi et al.の推計手法を基礎にしつつ、世界3大主要穀物の一つであり飼料作物としても重要なトウモロコシについて、全球を対象地域として、気候変化予測の不確実性を考慮したトウモロコシ生産性変化の定量的評価を行うことを本研究の目的とする。

2. 作物生産性モデルとシミュレーション方法

(1) 潜在作物生産性モデルGAEZ

GAEZモデルは、国際連合食糧農業機関（FAO）と国際応用システム分析研究所（IIASA）により開発された全球規模の潜在作物生産性の推計モデルであり、気候、土壌、入力レベルといった条件に基づき、潜在作物生産性が計算される。GAEZモデルの詳細な計算式に関してはFischer et al.⁷⁾を参照されたい。ここで入力レベルとは、資本、労働力、施肥、機械化等の作物収量に影響を及ぼす要素について置かれた総合的な想定である。気候条件としては、日平均気温 [°C]，日降水量 [mm/day]，日平均放射 [W/m²]，日平均風速 [m/s] が入力情報として用いられる。気候以外の入力情報については、表-1のデータが用いられる。GAEZモデルでは穀物用（13種）と飼料用（6種）トウモロコシについて潜在生産性を推定することができる。穀物用のトウモロコシは栽培地域によって成長期間が異なる品種があり、熱帯低地帯では4つの品種（90, 105, 120, 135日の成長期間），熱帯高地帯では3つの品種（105, 180, 300日の成長期間），亜熱帯・温帯地域では6つの品種（105, 120, 135, 150, 165, 180日の成長期間）を区別して取り扱う。また、飼料用のトウモロコシは成長期間が異なる6つの品種（105, 120, 135, 150, 165, 180日の成長期間）を区別して取り扱う。本研究では、各地点において、基準年の1990s（1991-2000）の品種別の潜在トウモロコシ生産性を計算し、最も生産性が高い品種と植え付け日を判定したうえで、それらの品種・植え付け日を将来予測計算においても用いた。つまり本研究では品種や植え付け日の変更といった適応策は考慮しない。

なお、本研究でGAEZモデルを作物成長モジュール・土壌制約モジュールに採用するにあたり、GAEZモデルの生産性推定精度を確認するため、CRU（Climate Research Unit）による過去30年間（1971-2000）の観測気候値をモデルに入力して求めた世界トウモロコシ生産量上位13カ国（表-2）平均のトウモロコシ生産性と、同13カ国平均のFAOの統計データを比較した（図-1(a)）。本研究では、2008年における世界のトウモロコシ生産量に占める割合が1.0%以上の国（13カ国）を主要トウモロコシ生産国として選択した。また、モデルによる年々変動の再現性を見るために、FAOの統計データについてはその

表-1 GAEZモデルの入力データ

項目	データ名
土壌タイプ	Digital Soil Map of the World ⁹⁾
標高	GTOPO30 ¹⁰⁾
栽培面積率	Major Crop Dataset ¹¹⁾
灌漑面積率	Global Map of Irrigation Areas ¹²⁾
国境界	Gridded Population of the World ¹³⁾
肥料使用量	World Development Indicators ¹⁴⁾

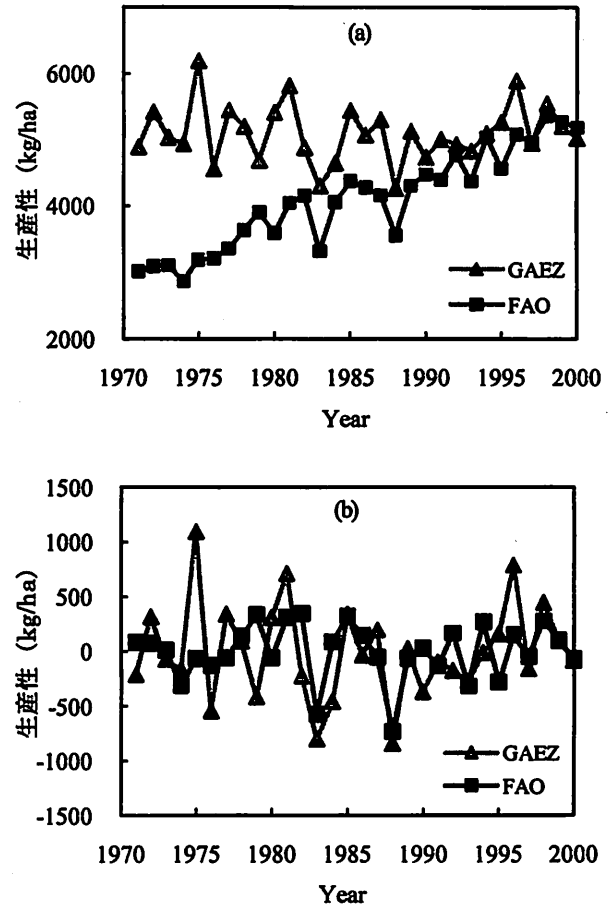


図-1 過去のGAEZモデル結果とFAOデータの比較
(生産性比較(a), トレンド除去の生産性比較(b))

線形回帰式で計算されるトウモロコシ生産性の推定値を差し引くことで年々のトウモロコシ生産性増減を取り出し、一方 GAEZモデルの結果についてはモデル結果の30年平均値を差し引くことで年々のトウモロコシ生産性増減を取り出し、両者を比較した（図-1(b)）。FAOの統計データによると、トウモロコシ生産性は気象災害による被害が大きかった1983年・1988年（ともに米国での干ばつ）や1993年（米国の洪水氾濫）などを除くと30年間にわたり技術的な発展によって徐々に増加してきた。一方で、モデルの方では技術的な発展による作物生産性の変化がないと仮定されているため、作物生産性に時間的な

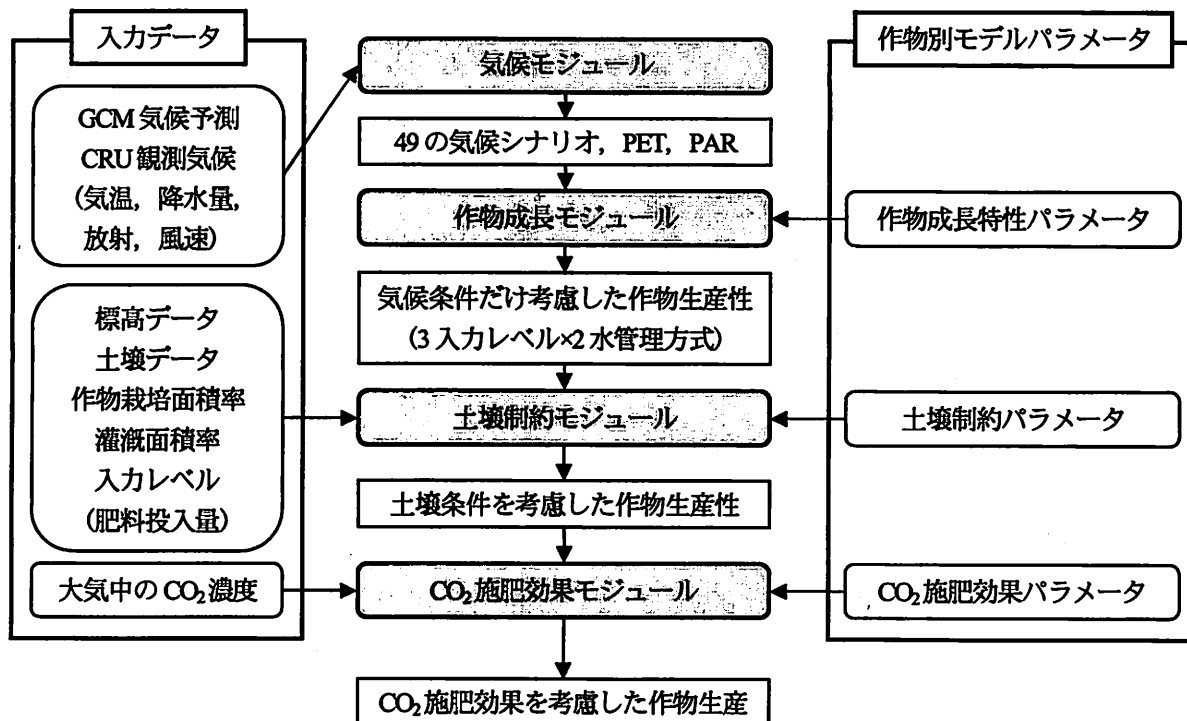


図2 潜在作物生産性の推計の流れ

変化傾向は現れない。GAEZモデルを用いて過去30年間の世界トウモロコシ生産量上位13カ国の平均トウモロコシ生産性をシミュレーションした結果、1970年代はモデルに考慮された技術水準と実際の技術水準の差によりトウモロコシ生産性に大きな差が生じたと考えられる。1980年代から1990年代についてみると、1980年代については依然としてトウモロコシ生産性の絶対量についてモデル推計値と統計値の間に乖離が見られるが、年々変動については米国での干ばつによるトウモロコシ生産性減少年などを再現していることが見て取れる。

(2) 気候シナリオ作成方法

GAEZモデルでは、影響評価を行うために入力データとして気温、降水量、放射、風速に対する緯度経度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の日別気候シナリオが必要である。以下の式(1a)・(1b)により、PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) 気候モデルデータベースに収録された19のGCMによる気候予測情報とCRUによる観測気候値の空間データを用いてメッシュ毎に月別気候シナリオを作成した。なお、日別気候シナリオは月別気候シナリオを線形補間して作成した。

$$T'_{y,m} = (T_{y,m} - T_{61,90,m}) + CRU_T_{61,90,m} \quad (1a)$$

$$V'_{y,m} = \begin{cases} (V_{y,m} - V_{61,90,m}) + CRU_V_{61,90,m} & \text{for } V_{y,m} \geq V_{61,90,m} \\ (V_{y,m}/V_{61,90,m}) \times CRU_V_{61,90,m} & \text{for } V_{y,m} < V_{61,90,m} \end{cases} \quad (1b)$$

表2 本研究で行った実験の設定

項目	設定内容
対象期間	1990s (1991-2000), 2020s (2021-2030), 2050s (2051-2060), 2080s (2081-2090)
GCM	19のGCM (CMIP3 ¹⁵⁾)
排出シナリオ	A1B, A2, B1 (SRES ¹⁶⁾)
気候予測	A1Bシナリオ: 18個, A2シナリオ: 14個, B1シナリオ: 17個 (総49の気候予測)
現状気候	CRUCL1.0 ¹⁷⁾ , CRUTS2.1 ¹⁸⁾
モデル	GAEZモデル ^{7,19)}
対象地域	全球
対象作物	トウモロコシ (穀物用: 13種, 飼料用: 6種)
気候条件	日平均気温[°C], 日平均降水量[mm/day], 日平均放射[W/m ²], 日平均風速[m/s]
主要生産国 (13カ国)	米国, 中国, ブラジル, メキシコ, アルゼンティン, インド, インドネシア, フランス, 南アフリカ, ウクライナ, カナダ, イタリア, ハンガリー

ここで、 T と V は気候モデルによる気候予測情報であり、 T は月平均気温 [°C] を、 V はその他の気候変数である月降水量 [mm/month]、月平均放射 [W/m²]、月平均風速 [m/s] のいずれかを表す。「 $'$ 」はそれぞれの気候

変数に関する気候シナリオであることを表す。添え字yとmはシミュレーション期間での年と月を表し、61_90は1961年から1990年までのm月の平年値を表す。CRU_T_{61_90,m}とCRU_V_{61_90,m}は観測気候値であり、1961年から1990年までの月平均気温とその他の気候変数に対する平年値を表す。観測気候値のうち気温、降水量、放射、気温日較差に関してはCRU TS 2.1データを用い、風速に関してはCRU CL 1.0データを用いた。

(3) 計算・解析の手順

図-2は本研究における作物生産性の推計の流れ（入力データ・モジュール・計算フロー）を示している。推計の流れは、気候モジュール、作物成長モジュール、土壌制約モジュール、二酸化炭素（CO₂）施肥効果モジュールの4つのモジュールからなる。うち、作物成長モジュール・土壌制約モジュールは、既存の作物生産性モデル（GAEZモデル）の定式化並びに作物成長特性パラメータに依拠している。

気候モジュールでは、GCM気候予測データとCRU現状観測気候値から、作物成長モジュール・土壌制約モジュールの入力データとなる気候シナリオが作成される。同時に、作物成長モジュールの入力データとなる潜在可能蒸発散量（PET）および光合成有効放射量（PAR）も計算される。

次に、作物成長モジュールでは、気候モジュールで作られた気候予測データ等に基づき、気温条件適性（必要積算気温、高温と低温の制限）の判定、成長期間の算定、土壌条件を考慮しない潜在作物生産性の計算が行われる。なお、ここでは、3つの入力レベル（High, Intermediate, Low）と天水農地と灌漑農地（土壌水分の不足による制約が無いと仮定）の2ケースについて計算が行われる。

土壌制約モジュールでは、土壌条件（土壌の化学的・物理的性質や傾斜）による制約を考慮した潜在作物生産性の計算が行われる。また、灌漑面積率に応じて、天水農地と灌漑農地の2ケースでの作物生産性推計の重みづけ平均を計算する。

最後に、CO₂施肥効果モジュールでは、大気中のCO₂濃度に応じた施肥効果についての計算が行われる。CO₂施肥効果とは大気中のCO₂濃度の増加が作物の光合成に有利に作用し肥料のように作物の生育や収穫量を増大させる効果である。施肥効果の考慮には、植物タイプ別CO₂施肥効果乗数²⁰を用いた。より詳しいモデル計算の手順に関してはMasutomi et al.⁹を参照されたい。

本研究では以上の推計の流れを用いて、表-2に示す実験設定でのシミュレーションを実施した。モデルのシミュレーション期間は1990s（1991-2000）、2020s（2021-2030）、2050s（2051-2060）、2080s（2081-2090）であり、気候予測の数は表-3に示すSRES排出シナリオのA1Bシナ

表-3 各SRES排出シナリオの特徴

項目	A1B	A2	B1
人口増加	低	高	低
経済成長	非常に高	中	高
技術変化速度	早い	遅い	中間
CO ₂ 排出量	高	非常に高	低

リオが18個、A2シナリオが14個、B1シナリオが17個で合計49個である。

まず、各大陸を代表するトウモロコシ生産国のシナリオ別のトウモロコシ生産性変化の傾向をつかむために、シナリオごとにGCMを平均し、国別将来トウモロコシ生産性の変化を示した（3.1節）。ここで、トウモロコシ生産性変化率は1990sの平均トウモロコシ生産性を基準にした各シミュレーション期間（2020s, 2050s, 2080s）に対する平均トウモロコシ生産性の変化で計算される。

次に、複数GCMによる気候予測データの不確実性に起因するトウモロコシ生産性変化予測の幅を把握するために、世界トウモロコシ生産量の約84.7%（2008年）を占める上位13カ国全体へのトウモロコシ生産性変化率を各GCM別に平均し、GCMの選択によるシミュレーション期間別トウモロコシ生産性変化率の違いとその幅を示した（3.2節）。

また、排出シナリオの違いによる世界全体でのトウモロコシ生産性変化の予測幅を把握するために、上記の各GCM別に平均した主要生産国に対するトウモロコシ生産性変化率をさらに排出シナリオ別に平均し、シミュレーション期間別にトウモロコシ生産性変化率を示した（3.3節）。

同様に、CO₂施肥効果の不確実性によるトウモロコシ生産性変化の予測幅を把握するために、CO₂施肥効果を不確実性幅のうちの大き目に考慮した場合と考慮しなかった場合のトウモロコシ生産性を計算し、上記のように排出シナリオ別に平均してCO₂施肥効果の考慮の有無によるトウモロコシ生産性変化率の違いを示した（3.4節）。なお、CO₂施肥効果の考慮の有無が作物生産性に及ぼす影響の評価は、Tubiello et al.²⁰の実験を参考にして実施した。

3.5節では、3.1節～3.4節の結果をもとに、トウモロコシ生産性推計に関わる各要素（気候モデル・排出シナリオ・CO₂施肥効果）に由来する不確実性の大きさについての比較を行った。

3.6節では、Masutomi et al.のアジア地域を対象とした将来のコメ生産性変化特性と本研究の全球を対象とした将来のトウモロコシ生産性変化特性について比較を行った。

3. 結果及び考察

(1) 各国別のトウモロコシ生産性の変化

図-3は各大陸を代表する主要トウモロコシ生産国における生産性変化率を排出シナリオ別に気候モデル平均して表したグラフである。複数の気候予測情報からメッシュ毎のトウモロコシ生産性をシミュレーション期間別に計算した後、トウモロコシ栽培面積率データと国境データを用いて生産性の国別平均を計算し、国別生産性変化率を求めた。比較的高緯度地域に位置しているカナダでは、将来、気温上昇の影響で現状のトウモロコシ栽培地域で全排出シナリオで1990sに比べて生産性が増加すると予測されている。しかし、カナダ以外の国ではシミュレーション期間において生産性が減少すると予測されており、特にインドと南アフリカでは排出シナリオによっては2080sに50%以上の減少が予測されている。2020sを見ると、どの国についても、排出シナリオ間の差異は明確ではない。一方、温暖化の進行が進む2080sを見ると、排出シナリオの中で温室効果ガス排出が最大となるA2シナリオにおいて、ほとんどの国で最大の生産性減少が予測されるが、これは主として気温上昇によるものと考えられる。また、カナダ、インド、南アフリカでは他地域に比べて排出シナリオによるトウモロコシ生産性変化の違いが大きく表れている。

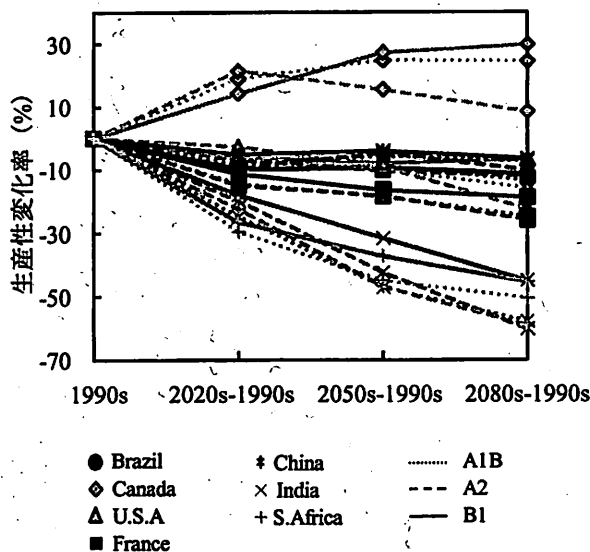


図-3 各大陸を代表する国のトウモロコシ生産性変化

(2) GCM 気候予測データの違いによる不確実性

各 GCM 気候予測データによる世界トウモロコシ生産量上位 13 カ国平均のトウモロコシ生産性変化率を図-4のように排出シナリオ別に分けて示し、各シミュレーション期間においてどの程度の不確実性幅があるかを検討し、その結果を表-4にまとめた。

表-4 シナリオ別生産性変化率の平均と不確実性幅 単位:%

シナリオ	2020s		2050s		2080s	
	平均	幅	平均	幅	平均	幅
A1B	-8.5	-24~8	-11.7	40~12	-16.3	40~11
A2	-6.5	-26~12	-11.8	-33~15	-21.7	-52~10
B1	-7.3	-23~4	-8.9	-28~9	-10.1	-26~9

図-4の A)は A1B シナリオで 18 個の GCM 気候予測データに対するトウモロコシ生産性変化率とその不確実性幅を、B)は A2 シナリオで 14 個の GCM 気候予測データに対するトウモロコシ生産性変化率とその不確実性幅を、C)は B1 シナリオで 17 個の GCM 気候予測データに対するトウモロコシ生産性変化率とその不確実性幅を表したグラフである。気候変化量がまだ小さい 2020s では、気候変化が進行する 2050s・2080s と比べ、どの排出シナリオでも不確実性幅が相対的に小さかった。一方、2080s について見ると、不確実性幅は、排出量が最大の A2 シナリオで各 GCM 気候予測の大きなバラつきを反映して最大となり (モデル平均: -21.7% [Max: +10%, Min: -52%])、排出量が最小の B1 シナリオで最小となった (モデル平均: -10.1% [Max: +9%, Min: -26%])。

図-5 は A1B シナリオに対して世界トウモロコシ生産量上位 13 カ国平均のトウモロコシ生産性変化が最大、最小となる GCM 気候予測データでのトウモロコシ生産性変化率の地理的分布である。A2 シナリオと B1 シナリオについては図を省略した。トウモロコシ生産性変化が最大の GCM 気候予測データを用いて作成した a) CGCM3.1(T63), b) GISS-AOM, c) CGCM3.1(T47)でのトウモロコシ生産性変化率分布と生産性変化が最小の GCM 気候予測データを用いて作成した d) GFDL-CM2.1, e) GFDL-CM2.0, f) MIROC3.2 (medres)でのトウモロコシ生産性変化率分布を比較してみると、2020s の北アメリカ地域では、a)で生産性増加が、d)で生産性減少が予測されている。2080s の北アメリカ地域は、2020s と比較すると、c)でさらに大きな生産性増加が、f)でさらに大きな生産性減少が予測されている。一方、東北ヨーロッパ地域では、2020s には a)で生産性増加が、d)で生産性減少が予測されているが、2080s には、c)でも f)でも生産性増加が予測されている。つまり、21 世紀末については、東北ヨーロッパ地域ではトウモロコシ生産性が増加する可能性が高いことが示された。

図-6 は世界のトウモロコシ生産量の約 40%を占める米国と 0.8%を占めるロシアについて、A1B シナリオでの 18 個の GCM 気候予測データから予測されたメッシュ毎の生産性変化率を国平均して示したグラフである。2020s の米国とロシアの平均トウモロコシ生産性変化率はそれぞれ-6.3%と 8%であり、18 個の GCM 気候予測データのうち米国では 12 個で、ロシアでは 6 個で、生産

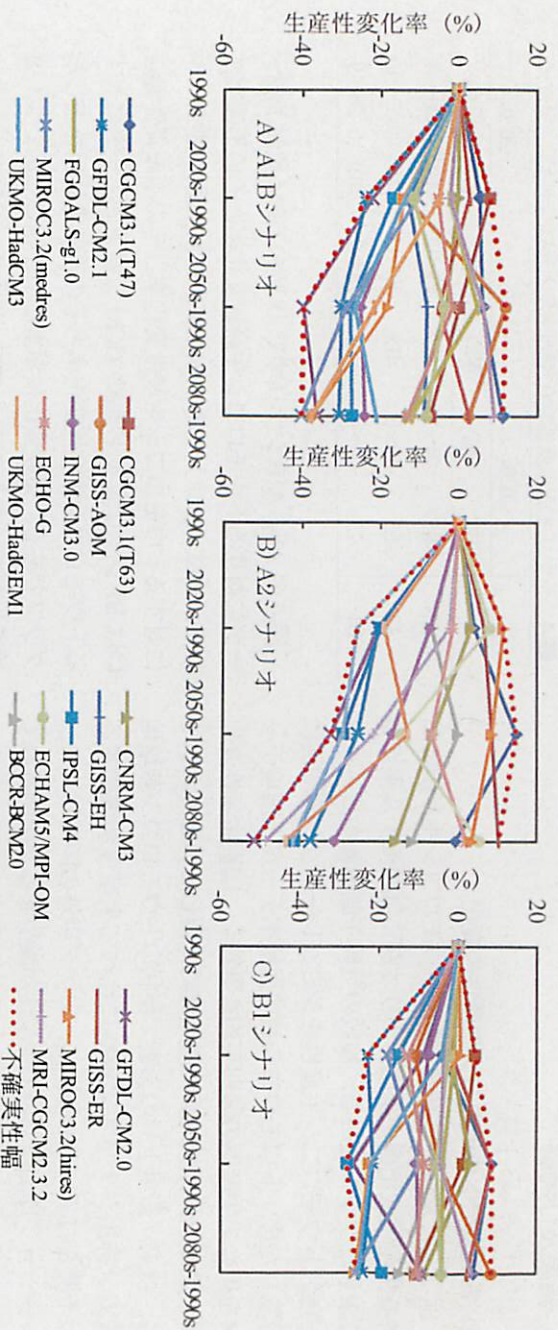


図-4 各GCMによるSRES排出シナリオ別トウモロコシ生産性変化率と不確実性

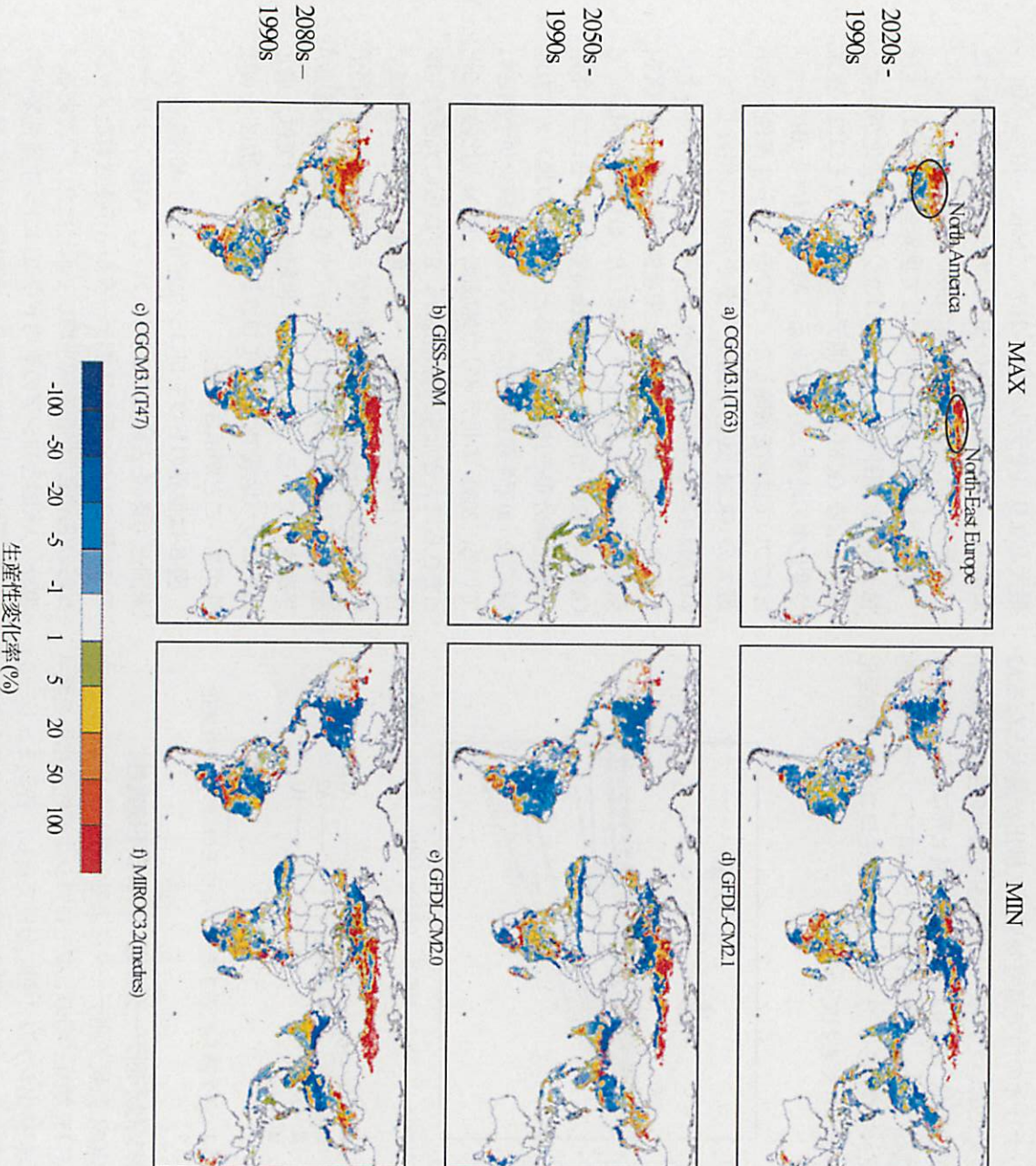


図-5 主要13カ国平均生産性変化が最大、最小の値を表すGCMによるトウモロコシ生産性変化率分布 (A1Bシナリオ)

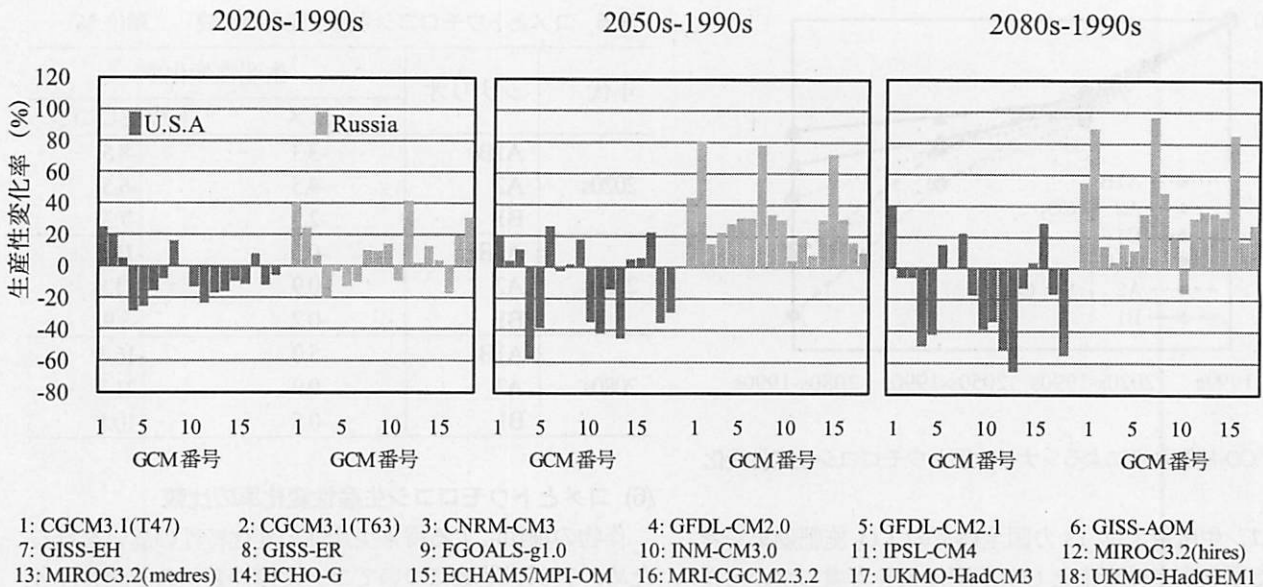


図-6 各GCMによる米国とロシアの平均トウモロコシ生産性変化率不確実性 (A1Bシナリオ)

性の減少が予測された。2050sには米国の平均トウモロコシ生産性が10.1%減少すると予測されたが、ロシアではおよそ33%増加すると予測された。さらにトウモロコシ生産性が減少するGCM気候予測データの割合も、米国では9個で減少が予測されたが、ロシアでは全てのGCM気候予測データでトウモロコシ生産性増加が予測された。2080sには米国で-15.9%ともっと大きな生産性減少が予測されたが、ロシアでは36%の生産性増加が予測された。両国におけるトウモロコシ生産性の変化は時間経過とともに米国では次第に減少すると、ロシアでは逆に次第に増加すると予測された。

この結果から、米国では気候変動とともにトウモロコシ生産性が次第に減少することを考慮して、新たな気候での栽培に適した新品種の開発や、新たな気候で栽培に向けた他作物への変更などの適応策を検討すべきことがわかる。

(3) 排出シナリオの違いによる不確実性

排出シナリオの違いによるトウモロコシ生産性の不確実性を明らかにするため世界トウモロコシ生産量上位13カ国について49個の気候予測データから推定されたトウモロコシ生産性を排出シナリオ別に平均した。図-7は排出シナリオ別トウモロコシ生産性変化率を時系列で表したグラフであり時間の経過とともに全シナリオでトウモロコシ生産性が減少することが予測された。A2シナリオの生産性低下は2020sに他のシナリオより小さいが、2050s、2080sに行くほど他のシナリオより大きく減少すると予測された。一方、B1シナリオの生産性低下は2020sにA2シナリオより大きいが2080sには他のシナリオに比べ小さい。シナリオによるトウモロコシ生産性

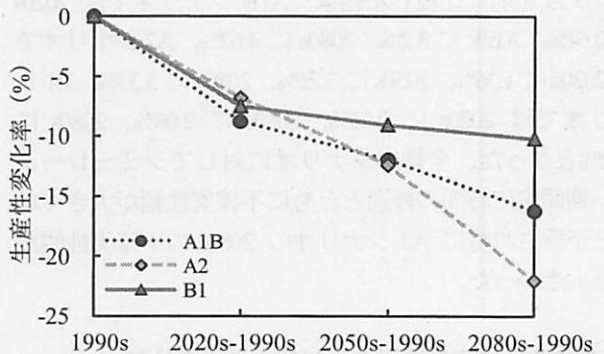


図-7 シナリオ別平均トウモロコシ生産性変化率

変化の幅は時間の経過とともに大きくなり、2080sにはA2シナリオの生産性低下がB1シナリオの2倍以上になると予測された。2080sでみると、B1シナリオとA2シナリオの間での生産性変化率の違いは11.6%である。

人口増や動物性たんぱく質消費増に伴う穀物需要の増加やバイオマス燃料との農地の競合といった食料需給の悪化の趨勢を考慮した場合、気候変化に伴う作物収量減はその趨勢をさらに助長する深刻な問題である。将来の排出量水準に応じて生産性減少の大きさに差が出ることは、低炭素社会の必要性を示唆するものである。

(4) CO₂施肥効果の有無による不確実性

CO₂施肥効果が作物生産性に及ぼす影響については、実験室レベルでの評価結果と圃場実験での評価結果に違いがあることを含めてまだ科学的な結論が出ておらず、その不確実性も小さくはない。排出シナリオによる大気中のCO₂濃度の違いがCO₂施肥効果を通じてトウモロコシ生産性変化に及ぼす影響を評価するために、世界トウ

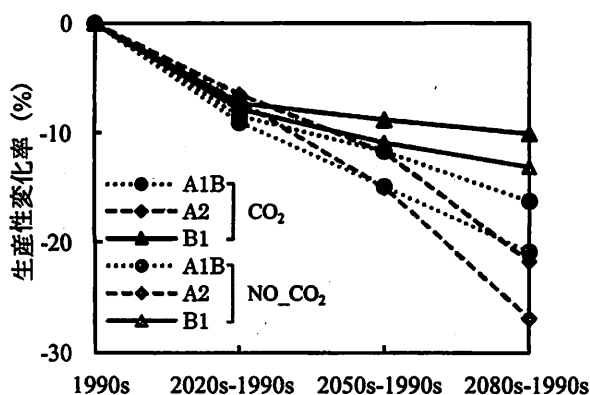


図-8 CO₂施肥効果によるシナリオ別トウモロコシ生産性変化

モロコシ生産量上位 13 カ国全体での CO₂ 施肥効果を考慮した平均生産性変化と CO₂ 施肥効果を考慮しなかった平均生産性変化を比較した (図-8)。

施肥効果の有無によるトウモロコシ生産性変化の差異をシナリオ別に比較した結果、A1B シナリオでは 2020s に 0.64%、2050s に 3.2%、2080s に 4.62%、A2 シナリオでは 2020s に 1.36%、2050s に 3.25%、2080s に 5.37%、B1 シナリオでは 2020s に 0.53%、2050s に 2.06%、2080s に 3.02% となった。全排出シナリオに対してシミュレーション期間中に時間の経過とともに不確実性幅が大きくなると予測され特に A2 シナリオの 2080s の不確実性幅が最も大きかった。

(5) 各種の不確実性要因の相対的大きさの比較

本章の(2)~(4)では、入力データに含まれる不確実性のうち、GCM 気候予測データの違い、SRES 排出シナリオの違い、CO₂ 施肥効果の有無のそれぞれから生じる不確実性幅を見た (表-4、図-7、図-8)。まず、世界トウモロコシ生産量上位 13 カ国の平均トウモロコシ生産性変化率については、GCM 気候予測データの選択によってトウモロコシ生産性変化率に最大 62%の幅が生じた (表-4 の A2 シナリオ)。さらに、生産性変化率を国又は地域別にみると、米国では 2080s の A1B シナリオで 105% (CGCM3.1-T47 : 40%増加, MIROC3.2-medres : 65%減少) のさらに大きい不確実性幅が予測された (図-6)。一方、各 GCM 気候予測データでのトウモロコシ生産性変化率を排出シナリオ別に平均した結果、シナリオの違いによって不確実性幅が最大 11.6%となった (図-7)。また、CO₂ 施肥効果の考慮の有無によるトウモロコシ生産性変化率の不確実性幅は、CO₂ 濃度が最大となる 2080s の A2 シナリオで最大 537%となった (図-8)。2080s について上記 3 要因による不確実性幅を比較した結果、GCM 気候予測データに由来する不確実性幅が最大となり、CO₂ 施肥効果による不確実性幅が他に不確実性要因に比べると相対的に小さいことが分かった。

表-5 コメとトウモロコシ生産性変化の比較 単位:%

年代	シナリオ	生産性変化率	
		コメ	トウモロコシ
2020s	A1B	-3.3	-8.5
	A2	-4.5	-6.5
	B1	-2.5	-7.3
2050s	A1B	-0.3	-11.7
	A2	-0.9	-11.8
	B1	-0.2	-8.9
2080s	A1B	-5.0	-16.3
	A2	-9.9	-21.7
	B1	-0.5	-10.1

(6) コメとトウモロコシ生産性変化率の比較

作物の種類による将来生産性の変化特性の違いを見るため、アジア地域についてコメ生産性変化の予測を行った Masutomi et al.⁸⁾の研究結果と世界のトウモロコシ生産性変化の予測を行った本研究の結果を比較した (表-5)。なお、比較した両研究で対象地域が異なることには注意が必要である。

両作物の将来生産性変化率を比較した結果、全シミュレーション期間でトウモロコシ生産性がコメ生産性より大きく減少すると予測された。トウモロコシの場合は全ての SRES 排出シナリオで 2050s の生産性が 2020s より減少するが、コメは全ての SRES 排出シナリオで 2050s の生産性が 2020s より増加すると予測された。2050s のコメ生産性変化率減少が他のシミュレーション期間より小さく予測されたことについては、気候変化の負の影響と CO₂ 施肥効果の正の影響が同程度と見積もられ打ち消しあったためであると報告されている⁹⁾。一方、本研究での 2050s のトウモロコシ生産性変化率に関しては、光合成経路の違いにより C3 植物のコメよりも C4 植物のトウモロコシでは小さな CO₂ 施肥効果しか期待出来ないことから、気候変化の負の影響が卓越し、より大きな生産性変化率の減少が見積もられた。

4. まとめ

本研究では全球潜在作物生産モデル (GAEZ) に 19 種の GCM 気候予測データ及び 3 個の SRES 排出シナリオから作成された 49 個の将来気候予測データを入力し、気候変動が全世界トウモロコシ生産性の変化に及ぼす影響を気候予測の不確実性を考慮しつつ定量的に評価した。また、生産性の予測結果に含まれている GCM の選択、排出シナリオの違い、CO₂ 施肥効果の考慮の有無による不確実性について比較を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

世界トウモロコシ生産量上位 13 カ国平均の生産性は

各シミュレーション期間（2020s, 2050s, 2080s）において時間の経過とともに全排出シナリオ（A1B, A2, B1）で次第に減少すると予測された。気候変化量がまだ小さい2020sでは、気候変化が進行する2050s・2080sと比べ排出シナリオ別生産性減少の差が相対的に小さかった。一方、2080sでは、排出量が最大のA2シナリオで21.7%の生産性減少が、排出量が最小のB1シナリオで10.1%の生産性減少が予測され、排出シナリオ別生産性減少の差が最大となった。排出量の水準に応じて生産性減少の大きさに差が出ることは、低炭素社会の必要性を示唆するものである。ただし、この生産性予測は前提とする気候予測の選択に大きく依存し、例えばA2シナリオ・2080sの場合で、10.3%の生産性増（GISS-ER）～51.7%の生産性減（GFDL-CM2.0）と、大きな予測結果の不確実性幅があることには注意が必要である。

入力データに含まれる不確実性のうち、GCM気候予測データの違い、SRES排出シナリオの違い、CO₂施肥効果の有無による不確実性幅はどれも2080sに最大となった。2080sについて、それら3種の因子に由来する生産性予測結果の不確実性幅を比較したところ、GCM気候予測データの選択による不確実性幅が最も大きく、次に排出シナリオの違いが続き、CO₂施肥効果の考慮の有無による不確実性幅は他因子に比べると相対的に小さかった。

本研究では、作物生産モデルへの入力データのうち、主要温室効果ガスである大気中のCO₂濃度及び気温、降水量、放射、風速などの気候因子について将来変化を考慮し、世界のトウモロコシ生産性変化とその不確実性幅について定量的評価を行った。

今後の課題の一つとして、生産性変化に及ぼす各気候因子の寄与度の把握が挙げられる。モデル式の構造を考慮した定性的検討に加え、各地点の観測気候データ・気候予測データの精査を含む定量的検討を通じて、生産性変化予測の結果の理解を深める必要がある。

また、CO₂濃度や気候因子の他に作物生産性へ直接的に影響を及ぼす因子としては土地利用（栽培面積率、灌漑面積率）、技術進歩（品種改良）、肥料及び農薬の投入量などが、間接的影響因子としてはモデルの入力レベルに関わる社会・経済状況などがあり、実際にはこれらの因子についても将来変化が見込まれる。より現実的な評価を行うためには、これらの因子についても将来変化を想定して作物生産性を推計することが望ましい。例えば、肥料消費量の変化については、過去の統計データから経済指標（一人当たりGDP）と肥料消費量の相関を見出し、GDPの将来想定に対応した肥料消費量を推計して作物生産性評価で用いた研究事例¹⁹等もあり、その種の手法の応用を今後検討しうる。また、品種改良についても、長期的見通しは極めて大きな不確実性を伴うが、

その不確実性を明示的に扱いながら生産性推計に反映していくことが必要であろう。これらの改良に関しては、2014年公表予定のIPCC第5次評価報告書に向け、社会経済・排出シナリオ（土地利用や技術進歩なども含まれる）と気候シナリオの整合的開発について国際的な研究調整が行われており²⁰、今後示される同研究調整の成果を適時に応用することで、より現実的な評価に向けた研究手法の改善に取り組む余地がある。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（S-5ならびにS-8）の支援により実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Easterling W.E., Aggarwal P.K., Batima P., Brander K.M., Erda L., Howden S.M., Kirilenko A., Morton J., Soussana J., Schmidhuber J. and Tubiello F.N.: Food, fibre and forest products, In: Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., Vander Linden P.J., Hanson C.E.(Eds.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2007.
- 2) 高橋 潔：温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策，地球環境，Vol. 11, pp. 111-119, 2006.
- 3) Tsuji G.Y., Uehara G. and Balas S.: Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3., University of Hawaii Press, Honolulu, Hawaii, 1994.
- 4) Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijssman A.J. and Ritchie J.T.: The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy*, Vol. 18, pp.235-265, 2003.
- 5) Willams J.R., Jones C.A. and Dyke P.T.: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* Vol.27, pp.129-144, 1984.
- 6) Guoxin T. and Shibasaki R.: Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration, *Ecological Modelling*, Vol. 168, pp.357-370, 2003.
- 7) Fischer G., van Veldhuizen H., Shah M. and Nachtergaele F.O.: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*, IIASARR-02-02, IIASA, Laxenburg, Austria, 2002.
- 8) Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H. and Matsuoka Y.: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation mod-

- els, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol.131, pp.281-291, 2009.
- 9) FAO: *Digital Soil Map of the World (Version 3.5)*, Food and Agriculture Organization Press, Rome, Italy, 1995.
 - 10) USGS: *GTOPO30*, United States Geological Survey; <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>
 - 11) Leff B., Ramankutty N. and Foley J.A.: Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 18, GB1009, doi:10.1029/2003GB002108, 2004.
 - 12) Siebert S., Döll P., Hoogeveen J., Faures J.M., Frenken K. and Feick S.: Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol.9, pp.535-547, 2005.
 - 13) CIESIN: *Gridded Population of the World (Version 3)*; Center for International Earth Science Information Network, Palisades, <http://sedac.ciesin.org/gpw/lecz.jsp>
 - 14) World Bank: *World Development Indicators 2006*, World Bank, Washington, CD-ROM, 2006.
 - 15) Meehl G.A., Cover C., Delworth T., Latif M., McZvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J. and Taylor K.E.: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A new era in climate change, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 88, pp. 1383-1394, 2007.
 - 16) Nakicenovic, N. and Swart, R.: *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2000.
 - 17) New M., Hulme M. and Jones P.D.: Representing twentieth century space-time climate variability. Part1: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology, *J. Clim.*, Vol. 12, pp.829-856, 1999.
 - 18) Mitchell T.D. and Jones P.D.: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, Vol. 25, pp.693-712, 2005.
 - 19) 増富祐司, 高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲: 気候予測の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稻生産量に及ぼす影響及びその適用策の評価, *地球環境*, Vol. 16, pp. 121-129, 2008.
 - 20) Tubiello F.N., Amthor J.S., Boote K.J., Donatelli M., Easterling W., Fischer G., Gifford R.M., Howden M., Reilly J. and Rosenzweig C.: Crop response to elevated CO2 and world food supply, *European Journal of Agronomy*, Vol.26, pp.215-223, 2007.
 - 21) Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K., Manning M., Rose S.K., Van D., Carter T., Emori S., Kainuma M., Meehl G., Mitchell J., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Kram T., Thomson A.M., Weyant J. and Wilbanks T.: The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment, *Nature*, Vol.463(7282), pp.747-756, 2010.

(2011.4.11 受付)

(2011.7.3 受理)

Assessment of Climate Change Impact on Maize Productivity that Considered the Uncertainty of the Climate Projections

Yonghee SHIN¹, Kiyoshi TAKAHASHI¹, Yasuaki HIJIOKA¹, Naota HANASAKI², Takahiro YAMAMOTO³ and Yuji MASUTOMI⁴

¹Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

³Department of Civil Engineering, Nagaoka National College of Technology

⁴Global Warming Research Lab., Center for Environmental Science in Saitama

We assessed climate change impact on maize productivity at global scale with considering uncertainty of future climate change using multiple GCM climate projections. In addition, uncertainties of future productivity due to the choice of GCM projection, the difference of emission scenarios, and the assumed degree of CO2 fertilization effect were estimated and compared with each other. As a result, maize productivity in the present global top 13 production countries was projected to decrease progressively under any emission scenarios towards the end of the 21st century. With the A2 scenario, which consequently conduces to the largest climate change among the emission scenarios examined in this study, maize productivity (mean of productivities calculated for each climate projection) was estimated to decrease by 22% in 2080s. It needs to be mentioned that projected productivity strongly depended on the choice of climate projection and there was a large uncertainty range in the projected productivities (Min: -51.7% (GFDL-CM2.0); Max: +10.3%(GISS-ER)).