

二酸化炭素肥沃化効果を考慮した気候変動による穀物影響評価

Evaluation of climate change impacts on crop production
considering effects of CO₂ fertilization

高橋 潔[†] ・ 松岡 譲[‡] ・ 原沢英夫[†]

Kiyoshi TAKAHASHI, Yuzuru MATSUOKA and Hideo HARASAWA

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate climate change impacts on crop production, which will be the basic information of analyzing world trade of agricultural commodities, and to help decision makings against potential uncertain problems. In this paper, we calculated change in potential productivity of rice, winter wheat and maize (tropical cultivation) between in 1990 and in 2100 based on the 11 GCM outputs combined with several CO₂ emission scenarios and probable range of global temperature increase. Calculation was conducted by using a potential crop productivity model. The results were aggregated into 30 countries / regions. The direct effects of increasing CO₂ concentration (CO₂ fertilization) as well as the impacts due to global warming are considered. The major outcomes of the model calculations are summarized as follows:

- 1) Considering CO₂ fertilization, the potential productivity of rice and maize will increase in 2100 under the changed climate. As for winter wheat, regions at high latitudes gain higher yield and those at low latitudes loses its yield. Especially decrease in the productivity of winter wheat in India region may be serious.
- 2) Comparing results with CO₂ fertilization and those without it, it was found that most part of increases in potential productivity of rice and maize are derived from CO₂ fertilization, not so much from climate change.

KEYWORDS: Global warming, Crop production, CO₂ fertilization, Climate impact

1. はじめに

1. 1. 本研究の全体像

気候変動により引き起こされる影響の一つに農業への影響がある。本研究は、気候変動が農作物生産に及ぼす影響、さらにその影響が連鎖反应的に世界貿易や食料保障に与える影響等を包括的に推定し、将来起こるかもしれない不確実な問題に対する意思決定を支援することを目的としている。

図-1 は本研究で開発中の農業影響算定フレームである。まず気候変動モデル及び水収支モデルにより、農作物生産をとりまく水分、気温、日射量などの条件を算定する。気候変動モデルでは社会経済発展や人口のシナリオと GCM (大循環モデル) による二酸化炭素濃度倍増時の気候分布を入力として、将来の気温分布、降水量分布、大気中二酸

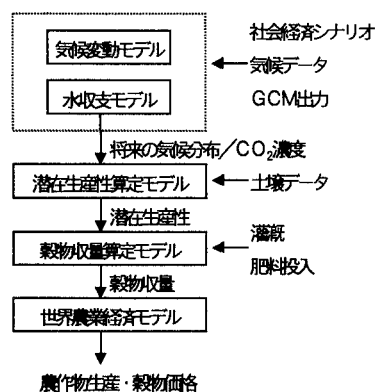


図-1 農業影響算定のフレームワーク

[†] 環境庁国立環境研究所社会環境システム部

[‡] 名古屋大学工学部地圏環境工学教室

化炭素濃度を生成する。続いて水収支モデルでは、積雪、蒸発散、流出などを計算する。それらの気候データ、水資源データ、大気中二酸化炭素濃度及び土壌のデータを入力として、潜在生産性算定モデルでは作物の成長過程をシミュレートすることにより、天水栽培において単位面積当たり達成され得る農作物収穫量(潜在生産性)を求める。さらに穀物収量モデルではその潜在生産性に灌漑、肥料、品種選択などを考慮することにより実際の収量を推定する。世界農業経済モデルでは、穀物収量推定モデルを生産関数として用い、国際・国内市場の需給量や貿易への影響を算定する。

1. 2. これまでの取り組み

現在までに、降水量、潜在可能蒸発散（PET）及び野外容水量（土壌の保水能力）を用いた簡易の水資源モデル(AIM Project Team, 1996)と、農作物潜在生産性算定モデル(Takahashi *et al.*, 1997)を開発し、それらのモデルを用いて将来の気候変動下でのアジア地域の農作物潜在生産性の変化を 5 分メッシュの空間解像度で計算した。さらにその計算結果を国単位で集計し、各国毎に影響の程度を評価した(Matsuoka *et al.*, 1997)。また地理情報システム（GIS）を用いた画像化により潜在生産性の空間的な変化に考察を加えてきた(Harasawa *et al.*, 1996)。これらの研究は図-1 中の潜在生産性算定モデルの開発までに対応している。

1. 3. 本論文で扱う課題とその意義

本論文では既開発の農作物潜在生産性算定モデルを利用し、以下の3点に注目してモデルの改良と将来の農業影響評価を行う。

- (1) 二酸化炭素濃度の農作物への直接影響（二酸化炭素の肥沃化効果）を考慮に入れる。農作物の成長に関して、肥沃化効果による影響は気温上昇による影響と同じ程度重要であり、それらを同時に検討出来る手法の開発が必要とされている。
- (2) 将来の気候分布として表-1 に示す 11 の GCM（大循環モデル）による計算結果を利用して、各々に基づいて農業影響を算定する。GCM の計算結果には大きなばらつきが見られるが、各々に基づく影響算定値（本論文では潜在生産性の変化）の中央値、最大値、及び最小値に関する情報は影響の程度を把握する尺度となろう。また、これにより単一の GCM 出力に基づいて計算した場合に起こりうる偏った推定を避けることが出来る。

表-1 計算に用いた 11 の GCM 出力

Climate model	Calculated date	lat. x long.(°)	$\Delta T(^{\circ}C)$	Reference
CCC	Nov-89	3.75x3.75	3.5	Boer et al., 1989
GISS	1982	7.83x10.0	4.2	Hansen et al., 1984
GFDL	1984-85	4.44x7.50	4.0	Wetherald & Manabe, 1986
GFDL R30	May-89	2.22x3.75	4.0	Wetherald & Manabe
GFDL Q-flux	Feb-88	4.44x7.50	4.0	Wetherald & Manabe,1988
OSU	1984-85	4.00x5.00	2.8	Schlesinger & Zhao, 1989
UKmet	Jun-86	5.00x7.50	5.2	Wilson & Mitchell, 1987
UIUC	Sep-96	4.00x5.00	3.4	Schlesinger, 1996
GISS	1995	4.00x5.00	3.6	Miller and Russell, 1995
MRI	1994	4.00x5.00	2.5*	Tokioka et al., 1995
GFDL100	1991	4.50x7.50	3.2*	Manabe et al., 1992

ΔT =平衡計算の地球平均地表温度差（ $2\times CO2-1\times CO2$ ）

ΔT^* =非平衡計算2091～2100年10年間の地球平均地表温度差（年1%増加－現状）

(3) 5 分メッシュで推定された潜在生産性の変化を、空間的、経済的に分類された 30 の地域に集計・平均し評価を行う。30 の地域分類(表-2)とは Purdue 大学において開発されている国際貿易モデル GTAP(Hertel, 1997)で取り扱われている分類であり、本研究にて現在開発中の農業経済モデルの基礎的研究の位置づけを持つ。

大気中二酸化炭素濃度の増加と気候変動が農作物生産に与える物理的な影響の算定についてはこれまでも世界の各地に対して多数行われているが、それらの試みは地域的な適用を目的としたものが主である(松岡ら, 1995)。一方、地球規模的な観点からは、より長期的・広域的な視野に立った将来環境の見通しを得ることが必要である。本研究で使用する潜在生産性算定モデルでは、世界全域について比較的入手が容易な気候・土壌のデータを用いて計算が行われるため、対象地域として全世界、検討時期として来世紀末を取り扱うことが可能である。そのため、他の地域的・短期的な適用を目的とした算定方法に比べ精度に劣る面もあるが、地域的な適用においてもある程度の推定が行えると考えている。

また将来予測に際して、GCM 出力の入手・補間などの困難さのために多くの研究において単一の GCM を用いた推定を行う場合が多いが、本研究ではこれまでに提供を受けた複数の GCM を入力として用いており、従来の研究と比較してより信頼性の高い推定が行われた。

2. モデルの概要

2. 1. 農作物潜在生産性算定モデル

本論文で使用した潜在生産性算定モデルについて簡単に説明する。詳しい説明は Takahashi *et al.*(1997)を参照されたい。本研究で使用した潜在生産性算定モデルは、FAO(国連食糧農業機関)による農生態地域プロジェクト(FAO,1978)にて開発している算定手法にもとづいて作成された。このモデルでは、気温、降水量、潜在可能蒸発散、光合成有効放射量(FAR)、土壌の性質及び地勢を入力とし、穀物の成長を生物学的にモデル化し、潜在生産性を算定する。算定可能な作物は、食糧供給に重要と考えられるイネ、コムギ(冬播、春播)、トウモロコシ(熱帯性、温帯性)、モロコシ(熱帯性、温帯性)、トウジンビエ、キャッサバ、サツマイモ、ジャガイモ、ダイズの 12 作物である。本モデルの計算は高解像度(緯度経度 5 分メッシュ)のグリッド毎に行うために、計算結果を適当な空間レベル(例えば国レベル)で集計して評価を行ったり、画像化された結果を解釈して耕作適地の移動を空間的に調べたりすることが可能である。

本モデルはまず与えられた気候データから、作物の成長に適した期間(成長期間)を算定する。次に、算定された期間中の平均気温、平均昼間気温、平均光合成有効放射量と各作物に準備された成長特性のパラメーターに従って作物の成長をシミュレートし、成長期間内に光合成により生成されるバイオマスの重量を計

表-2 潜在生産性変化の集計に用いられた地域分類

地域名	地域コード
オーストラリア	AUS
ニュージーランド	NZL
日本	JPN
大韓民国	KOR
インドネシア	IDN
マレーシア	MYS
フィリピン	PHL
シンガポール	SGP
タイ	THA
中国	CHN
香港	HKG
台湾	TWN
インド	IDI
残りの南アジア	RAS
カナダ	CAN
アメリカ合衆国	USA
メキシコ	MEX
中央アメリカとカリブ海地域	CAM
アルゼンチン	ARG
ブラジル	BRA
チリ	CHL
残りの南アメリカ	RSM
欧州連合	E_U
オーストラリア、フィンランド、スウェーデン	EU3
欧州自由貿易連合	EFT
中央欧州連合	CEA
旧ソビエト連邦	FSU
中東と北アフリカ	MEA
南アフリカ	SSA
残りの地域	ROW

算する。生成されたバイオマスのうち食用に資する部分の割合（収穫係数）をかけて、これを土壌制約を考慮しない場合の潜在生産性とする。作物ごとの成長特性パラメータを調整することによって、品種による成長特性の違いをモデルに反映させることが出来る。さらに土壌パラメータとしては FAO/UNESCO 世界土壌図第2版（FAO/UNESCO,1994）に対応する土壌単位（106 種）、フェイズ（12 種）、傾斜（3 段階）、土性（3 段階）の4種類を用いて、作物種及び投入労力に応じた収量割引値を準備した。

2. 2. 二酸化炭素肥沃化効果について

二酸化炭素の肥沃化効果は、大気中の二酸化炭素濃度の増加にしたがって引き起こされる二つのプロセスの複合作用と考えられている。一つは光呼吸作用の低下による光合成効率の上昇、もう一つは気孔の収縮による蒸発散量の減少に伴う水利用効率の上昇である(Fischer *et al.*, 1996)。

光呼吸は光が照射された場合に光合成によって固定された炭水化物の一部が再び大気中に放出される植物反応であり、その結果、純炭素固定量が減少する。二酸化炭素濃度の上昇に伴い光呼吸が抑制され、純炭素固定量が増加することが分かっている。イネ、コムギなどのC3植物では二酸化炭素濃度の増加に対して光呼吸の抑制が顕著に現れるが、トウモロコシなどのC4植物ではC3植物に比べると現れにくい。これはC4植物が、二酸化炭素をいちど葉の内部に蓄え、その後光合成反応を行う細胞中で濃縮を行うという光合成プロセスを持つためである。このようなC4植物の光合成プロセスは、現在の大気中二酸化炭素濃度ではC3植物のプロセスに比べて光合成の効率が良いが、二酸化炭素肥沃化の効果を受けにくい。

また、気孔は葉表面の小さな穴であり、ここを通して二酸化炭素が吸収され水蒸気が放出される。二酸化炭素濃度の増加により気孔開度が小さくなることが分かっており、それにより水分の蒸発散量が減少し、水利用効率（単位蒸散量あたりのバイオマス生成量）が上昇する。降水量が少ないなど水資源に恵まれない地域においては、これにより生産性が上昇する可能性がある。

本論文では、気孔の収縮による水利用効率の変化は直接的には取り扱わない。Cure *et al.* (1986)は二酸化炭素濃度が340ppm から680ppm に変化した時の単位面積収量の変化率(%)について作物毎にサーベイを行った。我々の研究では、Cure *et al.*により報告された変化率の平均値を、二酸化炭素の肥沃化効果による潜在生産性の変化率として用いて、潜在生産性算定モデルの計算結果を補正する。表-3 は本研究で取り扱う3つの穀物について肥沃化効果による収量の変化率を同サーベイより抜粋したものである。トウモロコシについては、イネ、コムギに比べて収集された研究の結果が少なかったため、誤差が大きい。本論文で取り扱う二酸化炭素濃度は最大709ppm (IS92a, 2100 年)であり、同サーベイで取り扱われる680ppm から大きくはかけ離れていないので、二酸化炭素濃度340ppm-680ppm 付近では肥沃化効果が二酸化炭素濃度に対して一次関数的に変化すると仮定し、二酸化炭素肥沃化効果を考慮に入れた推定年*t*での潜在生産性*y_t* (kg/ha)を以下の式(1)を用いて計算する。

$$y_t(x, Y_t) = Y_t \times \left\{ 1 + \frac{f_{680}}{100} \left(\frac{x}{340} - 1 \right) \right\} \tag{1}$$

表-3

二酸化炭素倍増時（340ppm から680ppm に変化）

の作物収量変化（Cure *et al.*, 1986）

ただし、*x* (ppm)は推定年*t*の大気中二酸化炭素濃度、*Y_t* (kg/ha)は推定年*t*の気候条件に基づいて計算された肥沃化効果を考慮しない場合の潜在生産性（2.1.で説明されたモデルにて算定）、*f₆₈₀* (%)は表-3 に示された二酸化炭素肥沃化効果による潜在生産性の変化率である。

	イネ	コムギ	トウモロコシ
収量変化(%)	+15±3	+35±14	+29±64

(±は95%信頼限界)

-124-

3. 計算

3. 1. 計算の対象

計算の対象地域として世界全域、対象作物としてイネ、コムギ（冬播）、トウモロコシ（熱帯性）を取り扱い、評価の対象年は2100年とする。それぞれの潜在生産性を、5分メッシュの解像度（気候データは0.5度メッシュ、土壌データは5分メッシュを用いる）で現在及び将来の気候・二酸化炭素濃度の条件下で算定し、それらを表-2に示す30の地域分類で集計（平均）し、各地域について現在から将来への変化率を計算する。

3. 2. 将来の気候データの準備について

以下の4つの条件を設定することにより、潜在生産性算定モデルで必要とされる将来気候及び将来大気中二酸化炭素濃度を決定し、潜在生産性の計算が可能となる。

- ・現在の気候データ（月平均気温・月降水量）
- ・GCMによる二酸化炭素濃度2倍時と1倍時の気温差および降水量変化率の予測結果
- ・二酸化炭素排出シナリオ
- ・気候感度

上の条件から将来の気候を設定する手順を示す。まず、二酸化炭素排出シナリオ及び気候感度から簡易の世界平均気温上昇算定モデルを用いて対象年までの気温上昇（ ΔT_{world} ）を算定する。各GCM出力はそれぞれ独自の気候感度を持つから、それらを合わせて使用して影響研究を行うには調整が必要である。月平均気温及び月降水量について以下の式(2)、(3)にしたがってこの調整を行う。この時、GCMの出力データは表-1にあるように高解像なものでも緯度2.22度×経度3.75度と影響計算を行うには非常に粗いので、緯度0.5度×経度0.5度に補間を行う。気温変化についてはスプライン補間法、降水量変化率については $1/r^2$ 重み付け補間を用いる。

$$\text{気温: } T(t) = T(\text{present}) + (T(\text{perturbed}) - T(\text{base})) \times \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \quad (2)$$

$$\text{降水量: } P(t) = P(\text{present}) + P(\text{present}) \times \left\{ \frac{P(\text{perturbed})}{P(1 \times \text{CO}_2)} - 1 \right\} \times \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \quad (3)$$

ここで $T(t)$ [°C]、 $P(t)$ [mm/month]はそれぞれ t 年における気温と降水量、 $T(\text{perturbed}) - T(\text{base})$ [°C]、 $P(\text{perturbed}) / P(\text{base})$ [-]はそれぞれGCM計算によって得られた各グリッドの大気中二酸化炭素濃度一倍時（base）と二倍時（perturbed）の間の気温差、降水量変化率である。 ΔT [°C]はGCM計算による世界平均気温の変化である。 $T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})$ [°C]は基準年と評価対象年 t 年の間の世界平均気温変化である（以降 ΔT_{world} と表記）。

3. 3. 計算に用いたデータ

現在の気候分布は、気温、降水量とも Legates *et al.* (1990a, 1990b) による平年値を用いる。光合成有効放射量を算定するために必要な雲量データは Leemans *et al.* (1992) を用いた。将来の気候条件下でも雲量是不変と仮定して、同データを用いた。

GCMの予測結果については、表-1に示した11種類のGCM出力それぞれを用いて計算を行い、その計算結果を起こりうる影響の幅と見る。また、その中央値を代表値と考える。その他の条件については以下のように設定して、潜在生産性の変化を算定、比較した。

(a) 社会経済シナリオに IPCC の IS92a シナリオ（中程度の経済発展、人口増加）を仮定した場合。

IPCC(1996)での予測によると、評価対象年（2100年）の大気中の二酸化炭素濃度は708ppm。対象年

の気温上昇は気候感度の仮定に依存する。本実験では、気候感度を設定するかわりに、対象年までの世界平均気温上昇 (ΔT_{world}) が 0.5°C 刻みで $0.5^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ という条件でそれぞれ計算を行い、影響を比較する (ケース A-05~A-40)。

- (b) 気候感度を 2.5°C として、いくつかの二酸化炭素排出シナリオを仮定した場合。排出シナリオとして、
 (i)IS92a に基づくもの (ケース IS92a)、(ii)S450 (ケース S450、2100 年以降 450ppm 安定化)、(iii)S650 (ケース S650、2200 年以降 650ppm で安定化、2100 年では 564ppm) を仮定し、それぞれについて計算する。対象年における二酸化炭素濃度、気温上昇は表-4 のとおりである。

4. 算定結果

4. 1. ケース A-05~A-40

図-2 及び図-3 はそれぞれ、イネ、コムギ (冬播) の主要生産国におけるケース A-05~ケース A-40 の 8 ケースでの潜在生産性の変化を示している。鉛直線の両端は 11 種の GCM を用いた結果の最大値・最小値を示しており、その幅は起こりうる影響の範囲と考えることが出来る。

世界平均気温上昇に従うイネの潜在生産性の変化は、大きく 3 つの傾向にグループ分けすることが出来る。まず第一にカナダ (CAN)、旧ソ連 (FSU)、オーストリア・フィンランド・スウェーデン (EU3) では、 $0^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{world}} \leq 4^{\circ}\text{C}$ の範囲では ΔT_{world} の上昇に従って潜在生産性は上昇し続ける。ただし、 ΔT_{world} に対する伸び率は $\Delta T_{\text{world}} = 2.5^{\circ}\text{C}$ くらいから緩やかになる。次のグループは、二酸化炭素肥沃化効果のため ΔT_{world} が低い時には 20% 弱の潜在生産性増加が見られるが、 ΔT_{world} 上昇に従って緩やかに潜在生産性の増加率が低くなっていく地域である。しかしながら排出が IS92a に従った場合の 2100 年二酸化炭素濃度は 708ppm とかなり高いため二酸化炭素肥沃化効果が期待出来ること、イネの成長は高温によっては阻害されにくいことから、このグループでは $\Delta T_{\text{world}} = 4^{\circ}\text{C}$ でも潜在生産性は現在よりも高い。図-2 中では、インドネシア (IDN) やタイ (THA) などがこれに相当する。第三はインド (IDI) である。インドでは

表-4 計算に用いた二酸化炭素濃度・気温上昇シナリオ

シナリオ名	排出パス	二酸化炭素濃度 (2100年, ppm)	世界平均気温上昇 (2100年, $^{\circ}\text{C}$)
A-05	IS92a	708	0.50
A-10	IS92a	708	1.00
A-15	IS92a	708	1.50
A-20	IS92a	708	2.00
A-25	IS92a	708	2.50
A-30	IS92a	708	3.00
A-35	IS92a	708	3.50
A-40	IS92a	708	4.00
S450	S450	450	0.79
S650	S650	564	1.34
IS92a	IS92a	708	2.03

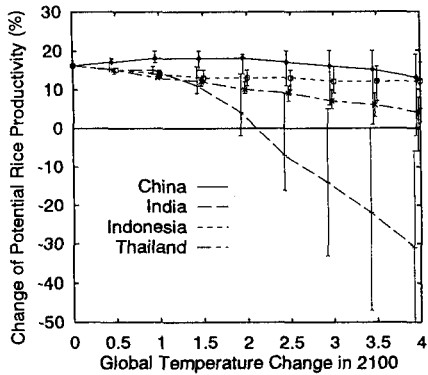


図-2 主要生産国におけるイネの潜在生産性の変化 (%), ケース A-05~A-40

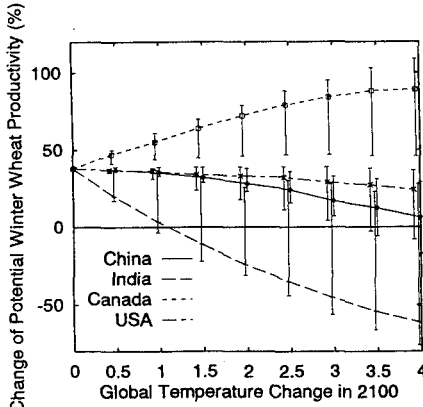


図-3 主要生産国におけるコムギ (冬播) の潜在生産性の変化 (%), ケース A-05~A-40

ΔT_{world} の上昇に従い、比較的急激に潜在生産性が減少する。高い二酸化炭素肥沃化効果の影響を受けるにもかかわらず、 ΔT_{world} が 2°C 近辺で現在の潜在生産性を下回り、その後も減少する。イネについてはインドのみがこのような傾向を示した。

コムギについては、大きく 3 つのグループに分けることが出来る。一つ目は、カナダ、旧ソ連、北欧(EU3, EFTA)であり、 ΔT_{world} の上昇に従い潜在生産性が次第に増加し、 $\Delta T_{\text{world}}=2.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ で安定する。最も潜在生産性が増加するのがカナダであり、図-3 示したような増加を行う。次は、二酸化炭素肥沃化効果のために今回取り扱った ΔT_{world} の範囲では現在より高い潜在生産性が推定されるものの、 ΔT_{world} の増加に従い潜在生産性は単調に減少するグループである。オーストラリア(AUS)、日本(JPN)、中国(CHN)、アルゼンチン(ARG)、米国(USA)、欧州連合(E_U)などがこのグループに属する。第 3 のグループは $\Delta T_{\text{world}}=1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ で現在の潜在生産性を下回り、 ΔT_{world} の増加に従って潜在生産性が単調に減少していく。ブラジル(BRA)、その他南アメリカ(RSM)、中央アメリカ(MEX, CAM)、その他南アジア(RAS)、インドなどがこれに該当する。IPCC の中位予測が大体 $\Delta T_{\text{world}}=2^{\circ}\text{C}$ 近辺であるから、これらの地域では深刻なコムギの減産が起こりうる。また、東南アジアの国で $\Delta T_{\text{world}}=0.5^{\circ}\text{C}$ からかなりの潜在生産性の減少を示す国がいくつかあったが、これは現在潜在生産性を持つと算定される低温の高地が気温の上昇により耕作に不適になる場合で、実際にはコムギ作は行われておらず重要ではない。

トウモロコシ(熱帯性)は、どの地域においてもイネとほぼ同じ傾向を示す。ただし、 ΔT_{world} の増加に伴う潜在生産性の減少はイネよりもやや緩やかである。また、インドにおいても潜在生産性は現在より低くならない。よってトウモロコシ(熱帯性)は、気候変動に対して有利な作物であるということが出来る。

表-5 各地域のイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の変化と現在の各地域生産量で重み付けした世界全域への影響(%)，ケース S450, S650, IS92a, IS92a-, IS92a+, IS92a*

	Rice						Winter Wheat						Maize TRC			
	S450	S650	IS92a	IS92a-	IS92a+	IS92a*	S450	S650	IS92a	IS92a-	IS92a+	IS92a*	S450	S650	IS92a	IS92a*
AUS	9	17	27	23	30	9	5	11	18	5	31	-15	13	26	42	8
NZL	4	8	14	11	17	-2	10	22	36	21	51	-1	14	27	40	7
JPN	5	10	17	13	20	0	10	20	31	16	45	-5	8	16	26	-4
KOR	4	8	13	10	16	-2	8	17	29	15	43	-7	7	16	26	-4
IDN	3	7	13	10	16	-2	-13	-13	-22	-31	-14	-44	8	18	30	-1
MYS	3	6	11	8	14	-4	-39	-89	-100	-100	-100	-100	8	17	28	-3
PHL	3	7	12	8	15	-4	-71	-87	-100	-100	-100	-100	8	17	29	-2
SGP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
THA	3	6	10	7	13	-5	-	-	-	-	-	-	12	24	37	4
CHN	6	12	18	14	21	1	10	19	28	14	42	-7	9	19	30	-1
HKG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TWN	4	20	26	23	30	9	7	16	24	10	38	-10	8	17	28	-2
IDI	4	7	4	1	6	-11	-13	-17	-24	-32	-15	-45	9	19	31	0
RAS	5	9	14	10	17	-2	-6	-7	-12	-22	-3	-36	15	29	51	15
CAN	37	65	105	99	110	76	22	44	72	53	91	25	45	85	140	83
USA	5	10	17	13	20	0	10	20	33	18	48	-4	10	20	33	1
MEX	3	7	11	8	14	-4	-5	-7	-19	-28	-10	-41	7	15	24	-5
CAM	4	9	14	11	17	-2	-15	-27	-42	-49	-36	-58	8	17	29	-2
ARG	3	6	12	9	16	-3	8	17	27	13	41	-8	8	18	30	-1
BRA	4	8	13	10	16	-3	-12	-16	-21	-30	-12	-43	8	17	29	-2
CHL	28	39	50	46	54	29	10	22	37	22	52	-1	30	49	72	31
RSM	4	8	14	11	17	-2	-3	-1	0	-11	11	-27	9	19	31	0
E_U	9	16	22	18	25	5	7	16	27	13	41	-8	12	22	35	3
EU3	40	71	109	104	115	80	23	46	74	55	93	26	56	106	166	102
EFTA	28	39	55	50	57	34	22	41	66	48	85	21	32	50	84	41
CEA	7	13	20	16	23	3	9	19	29	15	44	-6	9	18	29	-2
FSU	31	55	85	80	90	59	22	42	66	48	84	20	28	51	74	33
MEA	9	18	25	22	29	9	7	15	24	10	37	-10	15	29	43	9
SSA	4	7	12	9	15	-3	-10	-15	-19	-28	-10	-41	8	17	28	-3
ROW	5	10	17	14	20	1	7	15	26	12	40	-9	14	28	44	10
WLD	4.95	9.69	13.84	10.34	16.65	-2.23	8.57	18.26	29.35	15.13	43.63	-6.30	10.39	20.92	33.95	1.89

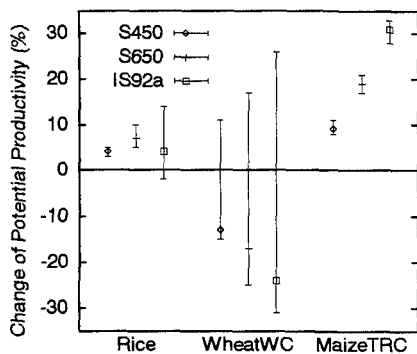


図-4 インド(IDI)におけるイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の変化(%), ケース A-05~A-40

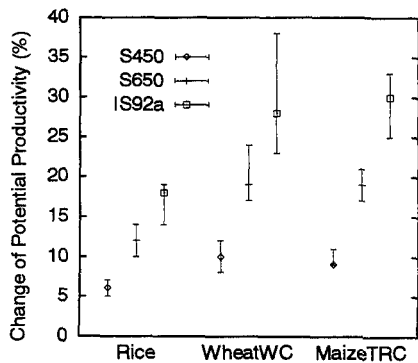


図-5 中国(CHN)におけるイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の変化(%), ケース A-05~A-40

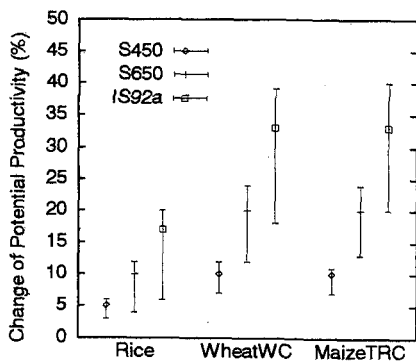


図-6 合衆国(USA)におけるイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の変化(%), ケース A-05~A-40

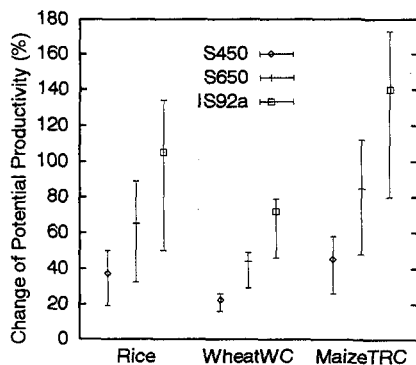


図-7 カナダ(CAN)におけるイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の変化(%), ケース A-05~A-40

4. 2. ケース S450、S650、IS92a

表-5 はケース S450、ケース S650、ケース IS92a でのイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性変化の中央値を地域ごとに示している。また表-5 の最下段では、表-6 に示した 1992 年における各作物の生産量の統計データ(FAO, 1994)により重み付けした世界全体での生産性変化の影響を示した。IS92a に基づいた気候変動下で、二酸化炭素肥沃化効果を表-3 に示した誤差の範囲で最大に見込んだ場合(IS92a+), 最低に見込んだ場合(IS92a-), 二酸化炭素肥沃化効果がないとした場合(IS92a*)の変化も加えている。トウモロコシについてはデータ不足により誤差が大きいため肥沃化効果の誤差については計算を行わなかった。また、図-4~7 はそれぞれインド、中国、米国、カナダにおけるケース S450、ケース S650、ケース IS92a でのイネ、コムギ、トウ

表-6 1992 年の各地域生産量統計 (FAO, 1994)

(1000tons)								
	Rice	Wheat	Maize		Rice	Wheat	Maize	
AUS	957	14739	269	USA	8149	66923	240844	
NZL	0	191	164	MEX	361	3626	17003	
JPN	13216	759	1	CAM	1683	21	3349	
KOR	7303	1	92	ARG	592	9813	10699	
IDN	48240	0	7996	BRA	10006	2796	30506	
MYS	2070	0	36	CHL	134	1557	911	
PHL	9129	0	4559	RSM	5580	898	3913	
SGP	0	0	0	E.U.	2214	84825	29983	
THA	20180	1	3672	EU3	0	2943	1118	
CHN	188255	101591	95722	EFT	0	739	193	
HKG	0	0	0	CEA	65	22758	14280	
TWN	0	0	0	FSU	1941	89830	7075	
IDI	108845	55690	10147	MEA	6554	28522	6106	
RAS	37152	17533	2536	SSA	10274	3539	19012	
CAN	0	29871	4883	ROW	44991	25478	12666	
Total					527891	564644	527735	

モロコシの潜在生産性の変化である。

表-5 からわかるようにどの排出シナリオにおいても、気候変動により潜在生産性が減少する地域が存在するのはコムギ（冬播）であり、特に低緯度の地域において減少が見られる。また、コムギについて潜在生産性が低くなる地域では、二酸化炭素排出量が多い（IS92a）場合の方が、二酸化炭素排出量が少ない（S450）場合よりも潜在生産性の減少が激しい。逆に潜在生産性が増加する地域では、IS92a の方が潜在生産性の増加が大きい。これは、地域平均の潜在生産性の低下が、水分の不足などによる地域内の耕作可能地が耕作不適地となったことを反映したものであり、二酸化炭素濃度の増加による収量増加では補償できないからである。図-4 のインドのコムギはその一例である。

表-5 の最下段から現在の生産量で重み付けした世界全体での潜在生産性の変化の影響をみると、どの作物においても二酸化炭素肥沃化効果を考慮した場合には正の影響が算定された。しかし、今後食糧需要が増大していくと考えられる途上国地域では、イネ・トウモロコシの潜在生産性の増加は小さく、コムギについては減少するところが多い。

図-5～7 では、気候変動が農作物に与える正の影響が見られる。しかしながら、その正の影響の多くは二酸化炭素肥沃化効果によるものであることが、表-5 の IS92a*（二酸化炭素肥沃化を考慮しないもの）との比較により分かる。二酸化炭素肥沃化はいまだ多く議論がかわされている研究分野であり、実際の農地では本研究で仮定したほどの効果を実際には示さないかもしれない。その場合イネやトウモロコシについても、潜在生産性が低下する地域は多く存在すると考えられる。

5. おわりに

本研究によって以下のことが分かった。

- ・二酸化炭素肥沃化効果を考慮に入れた場合、温室効果はイネ及びトウモロコシの潜在生産性を増加させ、コムギについては高緯度において正の影響、低緯度では負の影響を与える。
- ・ただしこの楽観的な推定は主として二酸化炭素の増加による肥沃化に起因するものであり、肥沃化が起きないとした場合、イネ及びトウモロコシの潜在生産性は増加する地域と減少する地域が共に存在し、コムギについては全世界的に負の影響が出る。

本論文での計算では、二酸化炭素肥沃化効果を単純に大気中二酸化炭素濃度の関数として加えた。しかしながら、肥沃化効果は二酸化炭素濃度以外の条件にも依存することが知られている。肥沃化が起きないとした場合の算定結果がかなり深刻なものであることから、本研究で仮定した程二酸化炭素肥沃化が十分に起らない耕作条件についても考慮することが今後必要である。以下に実際の農地において肥沃化効果の反応を阻害する原因となりうるものをあげてみる。

- ・土中水分の不足もしくは過剰な土中水分
- ・雑草との競合（農作物よりも肥沃化の効果が大きい雑草が存在する場合）
- ・土中栄養分（K、P、N）の不足

これら阻害因子の影響については現在も実際の農地に似た環境の圃場を設定するなどして、多くの研究が行われている。今後も更新されていく知見を取り入れることにより、更に適切な肥沃化効果の検討を続けて行う必要があるだろう。

本研究では将来気候下での各地点の農作物潜在生産性の算定により、気候変動が農業生産に与える影響を概観的に知ることが出来た。しかしながら本研究では、何らかの対応策をとることにより負の影響が緩和される可能性については検討が加えられていない。例えば将来、降水量の減少や PET の増加などの理由によ

り潜在生産性が低下する地域においては、灌漑を行うことにより収量の低下を防げるかもしれない。気候分布が変化する将来にわたって灌漑の可能性を検討するためには、詳細な水資源・水需要に関する知見が必要となる。筆者らは気候変動の影響研究の一環として、雨水の流出・流下過程、及び世界各地域での水需要量などをシミュレートする詳細な水資源モデルの開発にとりくんでいる。将来的には開発中の水資源モデルを農業影響研究とリンクさせ、灌漑の可能性について明示的に取り扱えるようにしていきたい。

本研究は、温暖化及び二酸化炭素濃度の増加が農作物に与える直接影響のみを取り扱ったが、実際に我々の生活に及ぼされる影響を評価する場合には、経済的な側面からの影響評価が必要である。本論文で取り扱ったような直接影響と経済的な間接影響との関係を調べるために、国際貿易を取り扱う農業経済モデルの利用を試みている。その利用により、例えば本研究で明らかになったインドにおける深刻な農業影響が、その他の地域の農業影響や、人口の増加による需要の増加などと絡みあって、インド国内またその他の地域の経済や暮らしぶりにどのような効果を引き起こすのかを検討することが可能になる。本研究の結果として得られた 30 地域での潜在生産性の変化は現在開発中の農業経済モデルの地域分けに対応しており、今後経済影響の視点から研究を発展させていくうえで有用な情報となると考えている。

謝辞

本研究は、著者らと国立環境研究所地球環境研究グループ森田恒幸総合研究官による共同研究である。また、その遂行にあたっては、環境庁地球環境研究総合推進費の援助を受けた。これらを記して感謝の意を表す。

引用文献

- AIM Project Team (1996): Technical structure of AIM/Impact model, AIM Interim Paper, IP-95-06, Tsukuba, Japan.
- Boer, G.J., N. McFarlane and M. Lazane (1989): Equilibrium response studies with the CCC climate model, Pers. Com.
- Cure, J.D. and B. Acock (1986): Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey, *Agricultural and Forest Meteorology*, 38, pp.127-145.
- FAO (1978): *Report on the Agro-Ecological Zones project, Vol.1*, World Soil Resource Report 48, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (1994): *AGROSTAT-PC Production*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO/UNESCO (1994): *Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fischer, G. and C. Rosenzweig (1996): The impacts of climate change, CO₂, and SO₂ on agricultural supply and trade, Working Paper, WP96-05, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Gehlhar, M., D. Gray, T.W. Hertel, K.M. Huff, E. Ianchovichina, B.J. McDonald, R. McDougall, M.E. Tsigas and R. Wigle (1997): Overview of the GTAP data base, In: *Global Trade Analysis* (ed.T.W. Hertel), Cambridge University Press, 1997
- Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, L. Russel, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy and J. Lerner (1984): Climate sensitivity analysis of feedback mechanisms, In: *Climate processes and climate sensitivity* (ed. J. Hansen and T. Takahashi), *Geophys. Monogr.*, Ser.29, pp.130-63.
- Harasawa, H., K. Takahashi, Y. Matsuoka and T. Morita (1996): Preliminary analysis of global warming

- impacts in China using the AIM/Impact Model with EMF-14 climate scenarios, Proceedings of Workshop Climate Change Impacts and Integrated Assessment.
- IPCC (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Leemans, R. and W. Cramer (1992): The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, Research Report, RR-91-18, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott (1990a): Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature, *Theor. Appl. Climatol.*, 41, pp.11-21.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott (1990b): Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected, global precipitation, *Int. J. Climatol.*, 10, pp.111-127.
- Manabe, S., M.J. Spelman and R.J. Stouffer (1992): Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part II: Seasonal response, *J. Climate*, 5, pp.105-126.
- Matsuoka, Y., K. Takahashi, H. Harasawa and T. Morita (1997): Climatic impacts on the Asia and Pacific regions, Proceedings of IPCC Workshop on Integrated Assessment Models, UNU, Tokyo, Japan.
- Miller, J.R. and G.L. Russell (1995): Climate change and the Arctic hydrologic cycle as calculated by a global coupled atmosphere-ocean model, *Ann. Glac.*, 21, pp.91-95.
- Schlesinger, M.E. and Z.C. Zhao (1989): Seasonal climatic change introduced by doubled CO₂ as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model, *J. Climate*, 2, pp.429-495.
- Schlesinger, M.E. (1996): Development of the geographical climate scenarios for the impact analyses of Energy Modeling Forum 14 -Integrated assessment of climate change-, Proceedings for Energy Modeling Forum 14 workshop, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Takahashi, K., H. Harasawa and Y. Matsuoka (1997): Climate change impact on global crop production, *J. of Global Environment Engineering*, 3, pp.145-161.
- Tokioka, T., A. Noda, A. Kitoh, Y. Nikaidou, S. Nakagawa, T. Motoi, S. Yukimoto and K. Takata (1995): A transient CO₂ experiment with the MRI CGCM -Quick Report-, *J. Met. Soc. Japan*, 74(4), pp.817-826.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe (1986): An investigation of cloud cover change in response to thermal forcing, *Climatic Change*, 8, pp.5-23.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe (1988): Cloud feedback processes in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 45, pp.1397-1415.
- Wilson, C.A. and J.F.B. Mitchell (1987): Simulated climate and CO₂ induced climate change over western Europe, *Climatic Change*, 10, pp.11-42.
- 松岡 讀・高橋 潔 (1995): 地球温暖化が穀物生産能に及ぼす影響について, 環境システム研究, 23, pp.255-260.