

22. 気候変動による食糧生産への影響 –経済的影響の評価–

Climatic Impacts on food production –an economic assessment–

高橋 潔* 原沢英夫* 松岡 譲**

Kiyoshi Takahashi, Hideo Harasawa, Yuzuru Matsuoka

ABSTRACT; Climate change impact on crops production may be one of the most serious problems in the next century. In order to evaluate this problem quantitatively, we developed a modeling framework to estimate an economic impact caused by climate change. The framework comprises two main models, a GIS-based potential crop productivity model and an 30-regional international trade model. Without considering the direct impact of atmospheric CO₂ concentration increase (CO₂ fertilization), the potential crop productivity of winter wheat will decrease 45% in India and increase 25% in Canada by the end of the next century, while that of rice and maize will not decrease so seriously in any regions. Taking these regional changes of potential productivity as technical changes in production function of the international trade model, the social welfare in India will decrease considerably, 4.89%, while that in Canada and Japan will increase 0.34% and 0.02% respectively. Globally, the social welfare will decrease 0.046%, which is valued at \$9.5 billion loss. With considering the direct impact of CO₂ increase, the potential productivity of rice and maize will increase in most regions of the world. Although the potential productivity of winter wheat will still decrease in some regions, global social welfare will increase 0.41%, \$84.4 billion gain.

KEYWORDS; Global Warming, Climate Impact, Food Production, Applied General Equilibrium Model

1. はじめに

温暖化の原因となる温室効果ガスの排出量削減について、各国における今後の取り組みに関する議論が続けられている。排出削減を実際に行うには多大な努力が必要であり経済に与える影響も大きい。そこで、各国における適切な政策設定のためには、温室効果ガスの排出削減が十分に行われず温暖化が発現した場合に引き起こされる影響について、広い分野にわたり定量的な評価が行われる必要がある。

温暖化の影響は、水資源、健康、海面上昇、生態系などを代表として多岐にわたり、本研究で取り扱う農業への影響も重要なものの一つである。農作物の生産性は、気温、降水量、蒸発散などの気候資源に大きく依存しており、気候変動の影響を直接的に受ける。これまで、気候変動により引き起こされる作物種毎の収量（単位面積当たり生産量）変化について多くの研究が行われてきた。その多くは、気温、降水量、日射量、湿度、風速などの気候データと、傾斜、土壌粒径、pH などの土壌データ、加えて肥料投入量、灌漑などを入力情報として、単位面積当たりの収量を算定するモデルを設定し、将来の気候として GCM（General Circulation Model, 気候予測モデルの一種）の計算結果を利用して、将来の収量を算定するものである。これらの農作物収量変化の推定結果にはばらつきがありいまだ不確実な点は多いものの、今後その評価技術は改善されていくことが見込まれる。

* 国立環境研究所社会環境システム部

** 京都大学大学院工学研究科環境工学専攻

さらに、問題の抑止や適応のための政策提言を目的とした場合、収量変化のような直接的な自然システムへの影響が人類にはたしてどのような影響を及ぼすのかを知ることが重要となる。そのためには、自然システムと人間活動の間に介在する社会・経済システムに関する理解が必要である。本研究では、経済システムを考慮に入れた気候変動影響の評価を行うために、生産性算定モデルと経済モデルを統合したモデルフレームを構築し、将来予測される気候変動が農作物生産を通して社会にどれほどの経済的な影響を与えるかを試算した。次節ではモデルの説明と試算結果を示し、第3節では結果の考察と今後の研究の展開を議論する。

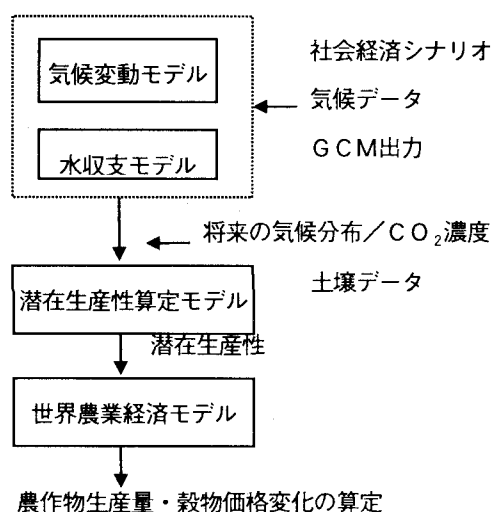


図1 農業影響算定のフロー

2. 農業影響算定モデル

2.1 モデルの概要

図1は本研究で開発した農業影響算定モデルを示している。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、二酸化炭素並びにその他温室効果ガスの排出シナリオを入力として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しうる農作物収穫量（潜在生産性）を求める。世界農業経済

モデルでは、潜在生産性の変化を生産技術変数の変化として用いて、国際・国内市場の需給量や貿易への影響を算定し、更に厚生分析を行う。

同様のアプローチを用いて、気候変動の経済影響の評価を試みた例としては、Fischer *et al.*(1994)、Kane *et al.*(1992)、Darwin *et al.*(1995)の研究が知られている。これらの研究はともに、気候・土壌条件から農作物生産性を算定するモデルと国際貿易を取り扱う経済モデルを組み合わせて、気候変動下での食糧需給量を世界規模で算定するという点で手法的に一致している。Fischer らは、USIAD により開発された IBSNAT 穀物モデル (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, 1989) と IIASA/FAP によって開発された一般均衡モデル BLS (Fischer *et al.*, 1988) をリンクさせ、貿易による適応を考慮に入れて気候変動の食糧供給への影響を評価した。Fischer らの報告によると、2060 年時点の世界穀物生産量は、適応・対策を行わない場合、温暖化により 1~8%減少し、穀物価格は 24~145%上昇する。作付け時期の変更など農場レベルの適応を行えば、生産量変化は-2.5~+1%、価格変化は-5~35%まで抑制することが出来るとの結果を得ている。Kane らの研究では、世界 13 地域、20 産物に関する部分均衡モデル SWOPSIM(Sullivan *et al.*, 1992) を経済モデルとして使用した。その結果、気候変動により大きな生産量減少を被る地域はあるものの、その総体的影響は貿易によりかなり緩和され、世界 GDP の変化は-0.17~0.09%程度となっている。Darwin らは、独自に開発した土地生産性評価方法と Hertel らによって開発された一般均衡モデル GTAP (Hertel *et al.*, 1997) に基づいて世界 8 地域、13 産物に関する一般均衡モデル FARM を開発し、-0.1~0.1%の世界 GDP 変化と算定した。

本研究では、AEZ プロジェクト (FAO, 1978-1981) により報告された作物成長に関するパラメータを利用して独自に作物潜在生産性算定モデルを開発し、その計算結果を世界農業経済モデルにて取り扱われる世界 30 地

表1 本研究の地域区分

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
オーストリア	
フィンランド	EU3
スウェーデン	
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

表2 本研究で取り扱う生産セクタ

生産セクタ	含まれる業種	詳細
1. 米		米
2. 小麦		小麦
3. その他穀物		大麦・トウモロコシなど
4. 非穀物農作物		果物・香辛料など
5. 畜産物	羊毛 その他畜産	羊毛 家畜・ペットなど
6. 加工農産物	漁業 加工米 肉製品 乳製品 その他食製品 飲料・タバコ 繊維物 皮革製品	魚介類 精製米 牛肉・豚肉など 牛乳・バターなど 小麦粉・食用油など 酒類・タバコなど 毛糸・絹糸など 皮革・毛皮製品など
7. 鉱業・製造業	林業 石炭 石油 ガス その他鉱物 衣類 木材・木製品 パルプ・紙 石炭・石油製品 化学製品 非金属製品 鉄鋼 非鉄金属 金属製品 輸送機械 一般機械 その他製品	原木・木炭など 石炭・コークスなど 原油など 天然ガス・生成ガス 鉄鉱石・銅鉱石など 衣類 加工木材・合板など 紙・パルプ製品など ガソリン・潤滑油など ゴム・プラスチックなど セメント・ガラスなど 各種鉄鋼製品 銅合金・鉛合金など 金属製品・ワイヤーなど 飛行機・乗用車など エンジン・各種機械など 音響・楽器・玩具など
8. サービス	電力・ガス・水道供給 建設 運輸サービス 民間サービス 政府サービス 不動産	

域（表1）8産物（表2）で集計して、世界農業経済モデルへの入力とした。潜在生産性モデルに地理情報システムを用いることで空間的に細密な分解能での生産性の算定を可能にしており、経済モデルで取り扱う地域への集計を容易に行うことが可能である。

2. 2 潜在生産性算定モデル

本研究で開発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) 並びに高橋ら (1997) を参照されたい。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 (PAR)、土壌の性質及び地勢、大気中二酸化炭素濃度を入力とし、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米、小麦（冬播、春播）、トウモロコシ（熱帯性、温帯性）など 12 作物である。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（本研究では 30 地域）で集計したり、画像化された結果により耕作適地の移動を空間的に把握したりすることが可能である。

社会経済シナリオに IS92a シナリオ（中程度の経済発展・人口増加）を仮定した場合の、来世紀末における米、冬小麦、熱帯性トウモロコシの潜在生産性変化の推定値を表3に示した。IPCC(1996)によると、気候感度を 2.5℃とした場合、IS92a シナリオでの来世紀末の大気中二酸化炭素濃度は約 710ppm、平均気温上昇は 2.0℃と推定されている。気温変化と降水量の空間・季節分布を得るために、平均気温上昇と GCM 計算結果を組み合わせた。

GCM 計算結果間にはおおきなばらつきが存在するために、複数（11 種）の GCM 計算結果を用いてそれぞれについて潜在生産性の変化を計算した後に地域集計し、その中央値を代表値として用いた。また Is92a*は二酸化炭素施肥効果が無いとした場合である。実験室での研究結果から、植物は大気中二酸化炭素濃度増加により施肥効果を受け、生産性が上昇する（米、小麦などの C3 植物で 15～30%）と考えられているが、実際の農地では、同じく施肥効果を受ける雑草との競合など様々な理由により、施肥効果はあまりあらわれないという議論も存在する。本報告では、Cure *et al.* (1986)によりサーベイされた二酸化炭素施肥効果を考慮した場合(Is92a)としない場合(Is92a*)について検討することにした。

表3 潜在生産性変化の推定 (%)

	米		冬小麦		トウモロコシ	
	IS92a	IS92a*	IS92a	IS92a*	IS92a	IS92a*
AUS	27	9	18	-15	42	8
NZL	14	-2	36	-1	40	7
JPN	17	0	31	-5	26	-4
KOR	13	-2	29	-7	26	-4
IDN	13	-2	-22	-44	30	-1
MYS	11	-4	-	-	28	-3
PHL	12	-4	-	-	29	-2
SGP	-	-	-	-	-	-
THA	10	-5	-	-	37	4
CHN	18	1	28	-7	30	-1
HKG	-	-	-	-	-	-
TWN	26	9	24	-10	28	-2
IDI	4	-11	-24	-45	31	0
RAS	14	-2	-12	-36	51	15
CAN	105	76	72	25	140	83
USA	17	0	33	-4	33	1
MEX	11	-4	-19	-41	24	-5
CAM	14	-2	-42	-58	29	-2
ARG	12	-3	27	-8	30	-1
BRA	13	-3	-21	-43	29	-2
CHL	50	29	37	-1	72	31
RSM	14	-2	0	-27	31	0
E_U	22	5	27	-8	35	3
EU3	109	80	74	26	166	102
EUF	55	34	66	21	84	41
CEA	20	3	29	-6	29	-2
FSU	85	59	66	20	74	33
MEA	25	9	24	-10	43	9
SSA	12	-3	-19	-41	28	-3
ROW	17	1	26	-9	44	10

(IS92a*は二酸化炭素施肥効果を考慮しない)

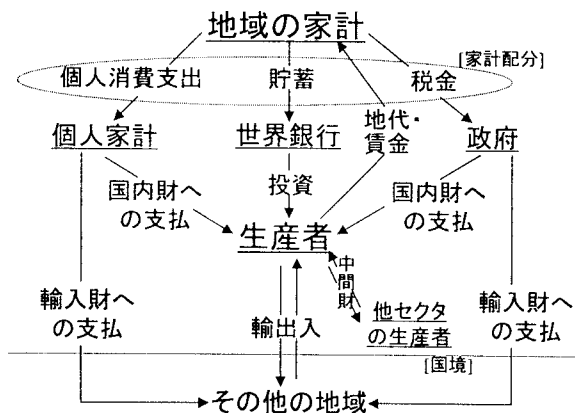


図2 世界農業経済モデルのフロー

2. 3 世界農業経済モデル

農作物生産性の変化が各地域の経済に与える影響を定量的に評価するために本研究で用いた世界農業経済モデルは、米国 Purdue 大学において開発された GTAP モデルを基に、30 地域 8 産物（表 1、2）を取り扱うように農作物を中心に集計した一般均衡モデルである。

図 2 に本モデルの価値・財のフローを示す。各地域での収入は家計に付与され、それは個人消費、政府消費、貯蓄に使われる。均衡条件下では、各地域の貯蓄の総和が投資の総和に等しくなる。生産活動に用いられる本源要素として土地、労働力、資本の 3 つを取り扱う。家計は土地・労働力を所有し、地域内の生産者に提供し地代として地代・賃金を受け取るが、地域をまたいだ取引は考慮しない。

生産者並びに消費者の行動をそれぞれ説明する。モデル中、各々の生産者は競争市場の仮定の下で自己の利潤最大化を目的とした生産活動を行う。またすべての生産セクタでは規模に関して収穫不変が仮定されている。各生産セクタでの代替構造は図 3 に示すようにモデル化される。企業は合成本源要素と合成中間財を固定比率で合成 (Leontief 型技術) することにより財を生産する。合成本源要素、合成輸入中間財、合成中間財の形成は、CES(Constant Elasticity of Substitution) 生産関数で行う。

家計は効用最大化を目的として消費活動を行う。個人消費、政府消費、貯蓄への割り振りは Cobb-Douglas 効用関数に基づき決定される。つまり、それぞれ支出の収入に占める割合は、収入の大小に関わらず一定である。個人消費は CDE (Constant Difference of Elasticities) 効用関数によりモデル化

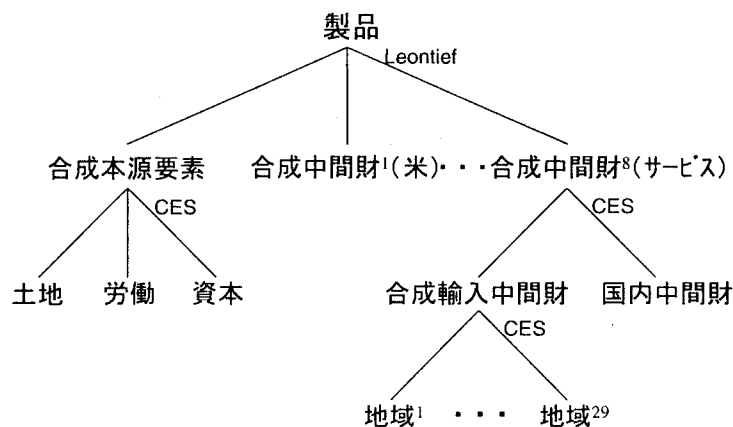


図3 生産の代替構造

し、政府消費は Cobb-Douglas 効用関数でモデル化する。

世界農業経済モデル中では、気候変動による米、冬小麦、熱帯トウモロコシの潜在生産性の変化を、それぞれ「米」、「小麦」、「その他穀物」の生産セクタにおける Hicks 中立的技術変化として取り扱う。例えば、生産量 Q が 2 変数 X_1 、 X_2 の関数であるとする、外生的に与えられる技術変化は生産関数中で技術変化を表すパラメータ A_0 、 A_1 、 A_2 を用いて

$$Q = A_0 \times f(X_1 \times A_1, X_2 \times A_2)$$

とあらわされるが、Hicks 中立的技術変化は式中のパラメータ A_0 の変化で表現される。気候変動により各地域で表 2 のように潜在生産性が変化した場合

の各産物の生産者価格、生産量、消費者物価指数、収入、1 人あたり厚生、のそれぞれの変化を世界農業経済モデルを用いて算定し、いくつかの地域に注目して表 4 にまとめた。

表 4 気候変動による 6 地域の経済的影響

	IS92a(二酸化炭素施肥効果あり)						IS92a*(二酸化炭素施肥効果なし)					
	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E_U	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E_U
生産者価格変化(%)												
米	-18.24	-19.71	-6.64	-51.76	-17.07	-19.16	-0.01	-1.58	17.96	-40.16	-0.06	-4.93
小麦	-28.61	-27.47	38.64	-41.18	-28.27	-22.82	4.91	8.47	125.11	-13.10	4.76	8.92
その他穀物	-26.26	-29.14	-29.80	-59.35	-27.83	-27.51	1.81	0.79	1.80	-43.59	-1.46	-3.36
非穀物農産物	-1.68	-1.43	-1.75	-0.35	-1.57	-0.62	-0.01	-0.28	1.90	2.76	-0.10	-0.05
畜産物	-3.16	-5.81	-2.49	-6.21	-8.80	-1.48	-0.19	-0.09	2.84	-1.22	-0.59	-0.04
加工農産物	-3.30	-5.21	-1.22	-2.24	-2.16	-1.14	-0.15	-0.01	0.30	-0.35	-0.07	0.04
鉱業・製造業	0.10	0.12	-0.92	0.14	-0.11	-0.17	0.03	-0.12	-1.10	0.61	0.03	-0.02
サービス	0.14	0.38	-1.09	0.17	-0.10	-0.17	0.03	-0.16	-0.93	0.69	0.02	-0.02
生産量変化(%)												
米	1.88	2.48	-0.26	113.40	-0.51	0.82	0.11	-0.25	-1.76	105.99	0.23	2.03
小麦	-0.53	0.53	-6.22	105.10	-0.64	-7.20	-6.60	-3.97	-7.64	115.07	2.87	-3.64
その他穀物	-8.30	-0.09	-1.73	82.94	-3.69	-8.03	-15.56	-1.39	-1.33	89.41	-4.04	-6.50
非穀物農産物	1.39	4.47	-0.02	-0.81	0.56	-0.57	0.11	-0.07	-4.25	-2.26	0.25	-0.03
畜産物	1.31	6.88	-0.49	0.16	0.90	-0.60	0.09	-0.24	-2.27	0.94	0.03	-0.22
加工農産物	1.94	7.79	-0.63	0.53	0.38	-0.46	0.11	-0.27	-4.73	0.69	0.04	-0.22
鉱業・製造業	-0.03	1.08	1.63	-0.46	0.19	0.26	-0.01	0.31	-0.37	-1.62	0.03	0.05
サービス	0.08	1.65	0.37	0.10	0.09	0.15	0.00	0.00	-2.62	-0.02	0.01	0.01
消費者物価指数(%)	-0.439	-5.131	-1.698	-0.156	-0.286	-0.393	0.001	0.001	6.047	0.513	0.017	-0.010
一人当たり収入変化(%)	0.054	0.296	-1.474	0.259	-0.013	-0.086	0.026	-0.236	-0.617	0.833	0.026	-0.009
社会的厚生変化(%)	0.333	3.685	-0.077	0.334	0.232	0.224	0.022	-0.219	-4.892	0.343	0.009	0.003

3. 考察

二酸化炭素施肥効果が起こらないとした場合の計算結果から見てみる。カナダで大きな生産性の増加が見られ、その結果生産者価格は大幅に低下する。農産物生産は増加するが、一方製造業やサービス業などでは生産量が減少する。消費者物価指数はそれら非農業生産での価格上昇を反映して上昇するが、生産者余剰の増加が消費者余剰の減少を上回るため、社会的厚生は 0.3% の増加である。表 4 に示した地域の中では気候変動により最もよい

表5 個人支出に占める各産物の割合 (%)

	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E U
米	0.001	5.026	8.481	0.001	0.001	0.004
小麦	0.001	2.131	3.842	0.001	0.001	0.107
その他穀物	0.002	5.511	4.446	0.002	0.006	0.079
非穀物農作物	1.002	11.195	8.223	1.027	0.597	0.700
畜産物	0.178	10.636	9.212	0.233	0.097	0.804
加工農産物	16.090	27.074	21.394	11.345	8.289	15.566
鉱業・製造業	12.068	17.752	11.596	16.985	15.377	18.265
サービス	70.658	20.675	32.806	70.406	75.632	64.474
計	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

影響を受ける地域であるといえる。インドでは小麦の生産者価格が2倍以上に上昇し、あらゆる業種で生産量が減少する。個人支出に占める農産物及び加工農産物消費の比率が高いこともあり(表5)、社会的厚生は4.8%減少と推定される。現状で多くの貧栄養層を抱えるインドでは、農産物消費の減少は深刻な飢餓問題を引き起こすと考えられる。日本では、生産性の低下により小麦とその他穀物の生産者価格上昇、国内生産量減少が見られるがその影響は小さく、総体的には社会的厚生は0.02%上昇する。米国においても日本と同傾向の変化が見られる。世界全体で見た場合に、社会的厚生は0.046%、95億米ドルの減少となる。

二酸化炭素施肥効果を考慮に入れた場合、米・トウモロコシの生産性は全地域で向上し、冬小麦については地域により変化する。世界全体で見た社会的厚生の上昇が期待されるが、その値は0.41%、844億米ドルである。地域別に見ると、中国と南アジアでの社会的厚生が増加が大きい。これらの地域では消費者物価指数が大きく減少している。表5からわかるように、これは価格が下がる米及びその他穀物の個人支出に占める比率が他の地域と比べて大きいためである。インドにおいても米・その他穀物の価格低下による正の効果は存在するが、小麦の価格上昇がそれを打ち消している。先進国においては、穀物の価格低下に加えてそれに起因する畜産物や加工農産物の価格低下があるにもかかわらず、個人支出の大半が製造業・サービス業による産物に用いられるので、社会的厚生は大きく向上しない。

二酸化炭素施肥効果を考慮した場合としない場合との比較から、温暖化の農業影響は施肥効果の程度に大きく依存することがわかる。しかしながらその効果については大きな不確実さが存在しており、今後も不確実さを取り込んだ影響評価を行っていく必要がある。

農作物の生産性は、気候変動により低緯度地域において減少し高緯度地域で増加する傾向がある。さらに低緯度地域には、個人支出に占める農作物の比率が高い途上国が多く位置しており、これらの国々は生産性低下による価格上昇のあおりを受けやすい。気候変動による農業影響は、これまで多くの温室効果ガスを排出してきた先進国ではなく途上国において深刻な影響を及ぼす可能性が高いといえる。特に施肥効果を考慮した場合世界全体の厚生は増加するものの、その地域的分布は不均一であり、途上国では負の影響を持つ国が存在することに注意する必要がある。温室効果ガス削減の議論において、まず先進国が早急な対策を講じることが重要であるが、途上国も自国への影響が大きいことを認識し可能な限り早い時期に削減努力を始める必要がある。

本研究の分析では、気候変動により農作物の土地生産性に変化が起きた場合に、その他の条件は変化しないとしてどれほどの経済的な影響が引き起こされるかを算定した。本研究の結果は、地域により異なる土地生産性の変化が各地域の経済に引き起こす挙動を考察するための基礎的な情報として有用である。しかしながらモデルによる評価が政策決定の根拠として実際に用いられるためには、将来の影響をより現実的に推定することが必要であり、農作物の土地生産性の変化だけではなくそれを取り巻く様々な因子の将来変化についても取り扱われねばならない。取り扱うべき因子としては、気候変動による生産技術変化以外の生産技術進歩、人口の変化、関税率などの各地域での政策変化、各地域消費者の嗜好の変化などが挙げられる。

謝辞

本研究の遂行にあたって、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の協力を得た。ここに記して感謝の意をあらわす。なお、本論文で報告された研究は、環境庁地球環境研究総合推進費による「アジア地域における人間活動による広域環境変化と経済発展の相互影響に関する研究」の一環として行われたものである。

引用文献

- Cure, J.D. and B. Acock (1986): Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey, *Agricultural and Forest Meteorology*, 38, pp.127-145.
- Darwin, R., M. Tsigas, J. Lewandrowski and A. Raneses (1995): *World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptations*, Agricultural Economic Report 703, USDA/ERS.
- FAO (1978-1981): Report on the Agro-Ecological Zones project, Vol.1-4, *World Soil Resource Report 48*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Fischer, G., K. Frohberg, M.A. Keyzer and K.S. Parikh (1988): *Linked National Models: A Tool for International Policy Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Fischer, G., K. Frohberg, M.L. Parry and C. Rosenzweig (1994): Climate change and world food supply, demand and trade, *Global Environmental Change*, Vol.4(1), pp.7-23.
- Hertel, T.W. (1997): *Global Trade Analysis*, Cambridge University Press, New York.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer Project (1989): *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 2.1*, Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, H.I.
- IPCC (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kane, S., J. Reilly and J. Tobey (1992): *Climate Change: Economic Implications for World Agriculture*, Agricultural Economic Report 647, USDA/ERS.
- Sullivan, J., V. Roningen, S. Leetmaa and D. Gray (1992): *A 1989 Global Database for the Static World Policy Simulation (SWOPSIM) Modeling Framework*, Staff Report AGES9215, USDA/ERS.
- Takahashi, K., H. Harasawa and Y. Matsuoka (1997): Climate change impact on global crop production, *J. of Global Environment Engineering*, 3, pp.145-161.
- 高橋 潔・松岡 譲・原沢英夫 (1997): 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, *環境システム研究*, 25, pp.121-131.