

適応策を考慮した上での温暖化が農作物 潜在生産性に及ぼす影響の評価

村井 啓朗¹・高橋 潔²・増井 利彦³・原沢 英夫⁴・松岡 譲⁵

¹東京工業大学博士前期課程 社会理工学研究科社会工学専攻 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: hmurai@soc.titech.ac.jp

²正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail: ktakaha@nies.go.jp

³正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail: masui@nies.go.jp

⁴正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail: harasawa@nies.go.jp

⁵正会員 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: matsuoka@env.kyoto-u.ac.jp

適応を考慮した上で、地球温暖化がイネ・コムギの潜在生産性に与える影響について、全球レベルでの評価を行った。Takahashi et al.(1997)の既存の農業影響評価モデルと比較して、灌漑の導入と投入労力レベルの変化、作物品種の細分化という改良を加えることで、適応策を勘案した場合の生産性について、より現実的な評価が可能となった。本研究で検討対象とした適応策は、作物品種の変更、栽培期間の変更であり、いずれも農場レベルで行うことができる。評価作業の結果、それぞれの適応作が温暖化の悪影響を緩和する効果を有していることが明らかになった。

Key Words : climate change, global warming, adaptation, crop productivity, agriculture

1. はじめに

(1) 背景と目的

IPCC の第三次評価報告書によれば、『地球の平均表面気温は 2100 年には 1990 年に比べて 1.4℃から 5.8℃上昇する』¹⁾と予測されている。温暖化は地球システムに対して大規模で不可逆的な変化を引き起こす可能性が高く、その対策は非常に重要である。

温暖化の対策としては、温室効果ガスの排出量を削減する緩和策(Mitigation)と気候変化に対して自然生態系や社会・経済システムを順応・適応させることで温暖化の悪影響を軽減する適応策(Adaptation)がある。当初、政策検討・評価研究の注目は緩和策に集まっていたが、緩和策の膨大なコストや最大限の緩和策を実行したとしても依然重大な気候変化は免れ得ないこととか、既に温暖化が進行しているといったことが明らかになるに従い、適応策への注目が高まりつつある。

しかしながら、適応策の効果については定性的な評価

に関する研究は見られるが、定量的な評価に関しては十分行われていない。その原因としては、適応策が多様であり、適応策の代替案を評価する仕組みを包括的に設計することが困難であること、適応策評価の前提となる影響評価の精度が不十分なために、適応策の定量的な評価の障害となっていることなどがあげられる。こうした状況下で本研究は、既存の影響評価手法の改良を通じて適応策の効果について定量的な評価を試みるものである。

農作物の生産性は気温、降水量などの気候因子に強く依存し、気候変動の影響は甚大である。本研究では影響評価の対象としてイネとコムギの主要 2 穀物を取り上げ、適応策としては、(a)作物品種の変更と、(b)栽培時期の変更、2 種類を取り扱う。

(2) 本研究の特徴

Takahashi et al.(1997)は、潜在作物生産性モデルを開発し、イネ、コムギを含む 12 作物の潜在生産性への温暖化影響を、適応を考慮せずに見積もった²⁾。同モデルでは、

気候因子や土壌因子を入力条件とし、作物成長・収穫のシミュレーションを行い、農作物の潜在生産性を算定する。その結果、特に現在においても高温が作物成長の阻害因子となっている低緯度地域において、甚大な悪影響が生ずることを示した。逆に、高緯度地域においては、生産性の向上が予測された。

しかしながら、Takahashi et al.(1997)の研究では、(a)作物に1品種を仮定しており環境変化に応じた品種の変更の可能性を考慮していない、(b)天水農業を前提としており灌漑の効果を考慮していない、(c)技術進歩・投入労力増加による将来の単収向上を考慮していない、などの欠点があった。そこで、本研究では、上記の研究の不足点を補うべく、第2章に記したモデル改良を行うとともに、(a)作物品種の変更と(b)栽培時期の変更を適応策として採用し、より現実的な影響評価を行う。

2. 評価手法

(1) 潜在作物生産性モデルの改良

a) モデルの概要

Takahashi et al.(1997)の潜在作物生産性モデル（以下では、Takahashi モデルと表現する。）は、FAO による農生態地域プロジェクト³⁾において開発された気候資源・土壌資源の農作物栽培適性評価手法を基礎として、地理情報システム（GIS）を利用して開発されたものである。気温、降水量、潜在可能蒸発散、光合成有効放射量、土壌の性質・地勢を入力条件とし、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ことができる。算定可能な作物は、イネ、コムギ（冬播き、春播き）、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。なお、Takahashi モデルにおける潜在作物生産性とは、一定の投入労力を仮定した場合に、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のことをいう。

本研究では、1章にて挙げた Takahashi モデルの不足点を補うべく、以下の改良を施し、その後影響評価に用いた。なお、Takahashi モデルと同様に気候と土壌の情報を入力条件として作物成長をシミュレーションするが、本

研究における潜在生産性とは、国別の投入労力の差異と灌漑を考慮した上での単位面積当たり達成しうる農作物収穫量と定義する。図-1に、Takahashi モデルのシミュレーションフローと、本研究で加える改良点をまとめる。

b) 作物成長特性の記述に関する改良

表-1に、イネ・コムギの主要な栽培種と、その栽培地域・性質についてまとめる^{4),5)}。コムギの分類としては、さらに播種時期により、秋に播いて冬の低温条件を経過して開花・結実する冬播コムギと、低温を必要としない春播コムギに分けることができる。表-1からわかるように、イネ・コムギには、環境に対する成長特性の異なる多様な種が存在している。しかしながら、Takahashi et al.(1997)の手法ではイネを1種類、コムギを2種類に分類し、モデル中で用いる成長特性のパラメータについては平均的な数値を固定して用いているため、イネ・コムギの多様な種について勘案できていない。そこで、本研究ではより現実的に即した詳細な分類を行った。

イネに関するインディカ、ジャポニカ、ジャヴァニカの分類は、現在では育種技術の進歩により中間的な種も多くなっており、明確な分類は困難である。また、コムギに関する冬播性と春播性の分類は、連続的に変化するものでその境界は明確ではない。このことを勘案して作物品種の分類は、Takahashi et al.(1997)の分類方法ではなく、以下に示す独自の分類方法を用いた。

まず、GeoWeb (GIEWS/FAO, <http://geoweb.fao.org>)、Major Worldcrop and Climatic Profiles⁶⁾、crop calendars⁷⁾より、現状気候下における実際の植付け時期、収穫時期、栽培期間の国平均値情報を収集し、栽培期間中の平均気温と栽培期間（日数）との関係性を調べ、上記のイネ・コムギの栽

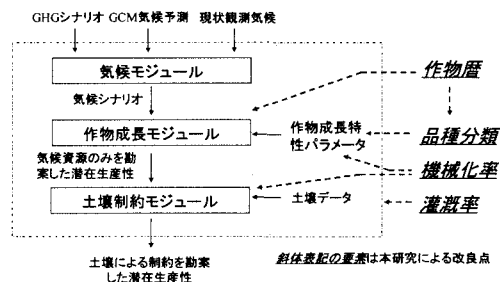


図-1 既存手法の算定手順と本研究の改良点

表-1 イネ・コムギの主要な栽培種とその性質

	栽培種(生態型)	主たる栽培地域	成長等の性質
イネ	アジアイネ(インディカ型)	アジアの熱帯・亜熱帯	草丈が大きく、子実が細長い。
	アジアイネ(ジャポニカ型)	アジアの温帯、豪州、米国	草丈が低く、子実が丸い。低温耐性あり。
	アジアイネ(ジャヴァニカ型)	インドネシア、南米、アフリカ	インディカ型とジャポニカ型の中間的な性質。
コムギ	アフリカイネ	サハラ以南の西アフリカ	乾燥等の不良環境への耐性あり。
	パンコムギ	欧州の平原、中国、インド、米国、南米、豪州	世界の栽培面積の9割以上を占めている。
	デュラムコムギ	地中海沿岸、カナダ、旧ソ連、米国	高温、乾燥への耐性あり。

培種に関する情報を勘案した上で、イネについては4種類、コムギについては5種類に分類した。表-2と表-3に、Takahashi モデルで仮定したイネ、春播コムギ、冬播コムギと、新たな品種分類によるイネ・コムギの、モデル中で用いる成長パラメータを示す。現状気候下のシミュレーションでは、全種について潜在生産性推計を行い、最も潜在生産性が高い作物品種を採用する。将来気候下のシミュレーションでは、現状からの品種変更を行う場合には、現状気候下のシミュレーション同様に全種について推計を行い、最大の潜在生産性を得る品種を採用する。一方、品種変更を行わない場合については、現状気候下での最適品種が、将来も継続的に栽培されると仮定してシミュレーションを行う。

c) 灌漑面積の時間変化の勘案

Takahashi モデルでは、天水農業のみを取り扱い灌漑を考慮していないために生産地域を過小評価する傾向があったため、本研究では灌漑の効果を考慮した。天水農業を仮定した場合の潜在生産性と、土壌水分の不足による制約条件を除外した場合の潜在生産性を灌漑率で重み付けることによって、灌漑を考慮した場合の潜在生産性を計算する。灌漑率とは耕地面積に占める灌漑耕地面積の比率である。シミュレーションで用いた現状ならびに将

来の灌漑率データについては、次節にて説明する。

灌漑を考慮した潜在生産性＝灌漑率×天水農業時の潜在生産性

+ (1－灌漑率)×水分制約除外時の潜在生産性

d) 投入労力の時間変化の勘案

Takahashi モデルでは、肥料使用量・機械化等の投入労力について、高投入力と低投入力の2段階に区分し生産性推計を行っている。本研究では、機械化率を投入労力の代理変数とし、機械化率は単位耕地面積あたりトラクター台数を仮定する。これによって、国ごとの投入労力の差異を考慮可能となった。現状の先進国における単位耕地面積あたりトラクター台数データ⁸⁾をもとに、単位耕地面積あたりトラクター台数(台/ha)が0.01台以上の場合には高投入力(投入レベル100)とし、逆に途上国のデータをもとに0.00001台以下の場合を低投入力(投入レベル0)とし、レベル0から100の間については単位耕地面積あたりトラクター台数の一次関数と仮定し投入レベルを定義した。投入レベルを考慮し、以下のように潜在生産性を推計した。

投入レベルを考慮した潜在生産性＝

耕地面積あたりトラクター台数×レベル100時の潜在生産性
+ (1－耕地面積あたりトラクター台数)×レベル0時の潜在生産性

表-2 既存モデルにおける成長特性パラメータ

作物種	イネ	コムギ(冬播)	コムギ(春播)
作物グループ	II	I	I
光合成経路	C3	C3	C3
標準成長期間(NGP)[日]	130	150	100
最低成長期間(GP _{min})[日]	100	120	100
収量形成期間(YP)[日]	30	30	-
最大葉面積指数(LAI _{max})[-]	5	5	5
標準収穫指数(NHI)[-]	0.3	0.4	0.4
成長許容最低気温(T _{min})[℃]	13	5	5
成長許容最高気温(T _{max})[℃]	36	25	25

表-3 本研究における成長特性パラメータ

作物種	イネ			
	①	②	③	④
作物グループ	II	II	II	II
光合成経路	C3	C3	C3	C3
標準成長期間(NGP)[日]	*1	*2	*2	*3
時最低成長期間(GP _{min})[日]	105	148	90	128
収量形成期間(YP)[日]	NGP/3	NGP/3	NGP/3	NGP/3
高入力時最大葉面積指数(LAI _{max})[-]	6	6.25	6.5	5.75
低入力時最大葉面積指数(LAI _{min})[-]	3	3	3	2.75
高入力時標準収穫指数(NHI)[-]	0.4	0.43	0.45	0.4
低入力時標準収穫指数(NHI)[-]	0.3	0.3	0.3	0.275
成長許容最低気温(T _{min})[℃]	7	7	10	16
成長許容最高気温(T _{max})[℃]	24	24	32	32

作物種	コムギ				
	①	②	③	④	⑤
作物グループ	I	I	I	I	I
光合成経路	C3	C3	C3	C3	C3
標準成長期間(NGP)[日]	*4	*5	*5	107	118
最低成長期間(GP _{min})[日]	153	260	135	97	108
収量形成期間(YP)[日]	NGP/3	NGP/3	NGP/3	NGP/3	NGP/3
高入力時最大葉面積指数(LAI _{max})[-]	5.5	5	5	4.75	4.75
低入力時最大葉面積指数(LAI _{min})[-]	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3
高入力時標準収穫指数(NHI)[-]	0.5	0.45	0.4	0.4	0.4
低入力時標準収穫指数(NHI)[-]	0.3	0.25	0.2	0.2	0.2
成長許容最低気温(T _{min})[℃]	-14	-5	8	4	4
成長許容最高気温(T _{max})[℃]	26	30	32	26	26

*1 NGP = 189.365 - 3.16839 × 栽培期間中の平均気温

*2 NGP = 307.8623 - 7.50024 × 栽培期間中の平均気温

*3 NGP = 348.4071 - 7.51379 × 栽培期間中の平均気温

*4 NGP = 286.0801 - 6.81135 × 栽培期間中の平均気温

*5 NGP = 378.2582 - 9.93582 × 栽培期間中の平均気温

(2) 入力シナリオ

本研究では、現状(平年の状況(1961年～1990年))と2050年(2036年～2065年の平均)についてそれぞれ穀物潜在生産性を推計し、温暖化影響を評価した。以下に、現状及び2050年の推計に用いた入力シナリオについて整理する。

a) 気候シナリオ

ベースライン(現在)の気候としては、LINKの0.5°×0.5°月別気候値⁹⁾の1961年～1990年の30年平年値を使用した。将来の気候シナリオは、同ベースライン気候値に、CCSR/NIESモデルによるIPCC-SRES-A1B排出シナリオシミュレーション¹⁰⁾の出力結果による気候変化(ベースライン期間から2036年～2065年の平均)を足し合わせて作成した。将来気候シナリオの作成手法については、Takahashi et al.(1997)に従った。

b) 灌漑・社会経済シナリオ

現在の灌漑率の空間分布情報としては、0.5°×0.5°の空間解像度の灌漑率ラスタデータ¹¹⁾を用いた。将来については、農地面積・灌漑農地面積の国別統計値⁸⁾に基づいて計算した1990年代の変化トレンドの外挿により国別灌漑面積率変化シナリオを作成し、その変化率を現状空間分布に掛け合わせることで将来灌漑率ラスタ

データを作成した。将来の国別灌漑面積率については、現状と比較して減少する国は 26 カ国、増加する国は 140 カ国である。アメリカ大陸やアジアでは、ほぼ全ての国で増加する。

投入労力の代理変数である単位耕地面積あたりトラクター数については、まず過去の国別時系列統計値から 1961 年～1990 年までの 30 年間平均を作成し、一人当たり GDP との回帰式を作成した。サンプル数 136、自由度修正済み決定係数は 0.61 である。なお係数の下の () 内の値は t 値である。この関係式を用いて、IPCC-SRES-A1B シナリオで前提としている一人当たり GDP から将来値を作成した。イスラエルやトルコなど 13 カ国のみに現状と比較して将来値が減少するが、その他多くの国においては増加する。特にアフリカや熱帯アジアではその増加率が大きい。

$$\log(\text{耕地面積あたりトラクター台数}) = -0.0408152 + 1.315684 \times \log(\text{一人当たり GDP}) \\ (-13.9913) \quad (14.5568)$$

3. 結果と考察

(1) 想定した適応策ケース

適応の効果を評価するために、以下の 4 つのケースについて現状（1961 年～1990 年）と 2050 年（2036 年～2065 年）の穀物潜在生産性を推計した。

- ケース CNTN：将来の気候条件下においても、現在栽培されている作物品種を継続的に栽培し(CN)、かつ植付けを現状観測されている植付け時期に行う(TN)ケース
- ケース CNTY：現在の作物品種を継続的に栽培する(CN)が、植付け時期を気候変化に対応して適宜調整する(TY)ケース
- ケース CYTN：気候条件に応じて適宜作物品種を変更する(CY)が、植付けは現状観測されている時期に行う(TN)ケース
- ケース CYTY：気候条件に応じて適宜作物品種・植付け時期の変更を行うケース

(2) イネの潜在生産性変化

図2～図4 は、現状と将来ケースにおけるイネの潜在生産性を示しており、図-5 は、上記各将来ケースにおける現状からの潜在生産性変化を地域別に集計した結果である。CNTN と現状を比較すると、米国などにおいては生産可能と評価された面積が減少している。生産性

が減少している地域がある一方で、インド北部などのように生産性が増加に転じる地域もある。これは、気候変化に応じた品種変更や植付け日移動が行われなくても、気温上昇が作物生産に好影響を与え、灌漑率と投入労力の増加によるプラスの影響が出ているためである。CYTY では、適応により気候変化を有効に利用できるため、多くの地域において生産性向上が見られる。ロシアにおいては現状で栽培不可能な地域においても、生産可能となっている。米国や中東では、CYTY で仮定する最大限の適応を行ってもなお生産性減少が見込まれる。この原因のひとつとして、灌漑率や投入労力の増加が小さいため、気候変動による悪影響を緩和することができないことが挙げられる。

(3) コムギの潜在生産性変化

図6～図10 は現状ならびに将来ケースにおける、コムギの潜在生産性の推計結果を示したものである。図-11 は、将来ケースにおける現状からの潜在生産性変化を地域別に平均化したものである。CNTN では、気候変化に応じた品種変更や植付け日移動が行われないため、多くの地域において生産可能地域と生産性の減少が見込まれる。特に米国や南米では生産可能地域が大幅に減少

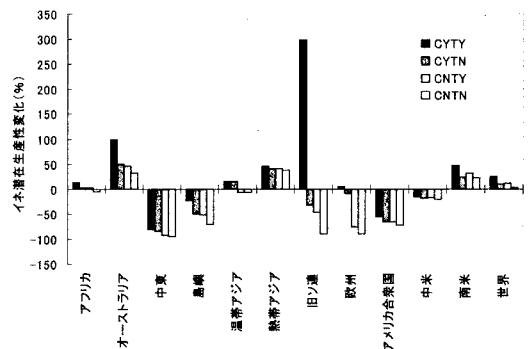


図-5 イネの潜在生産性の変化（地域平均）

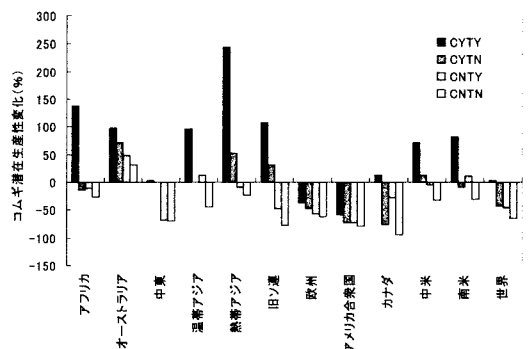


図-11 コムギの潜在生産性の変化（地域平均）

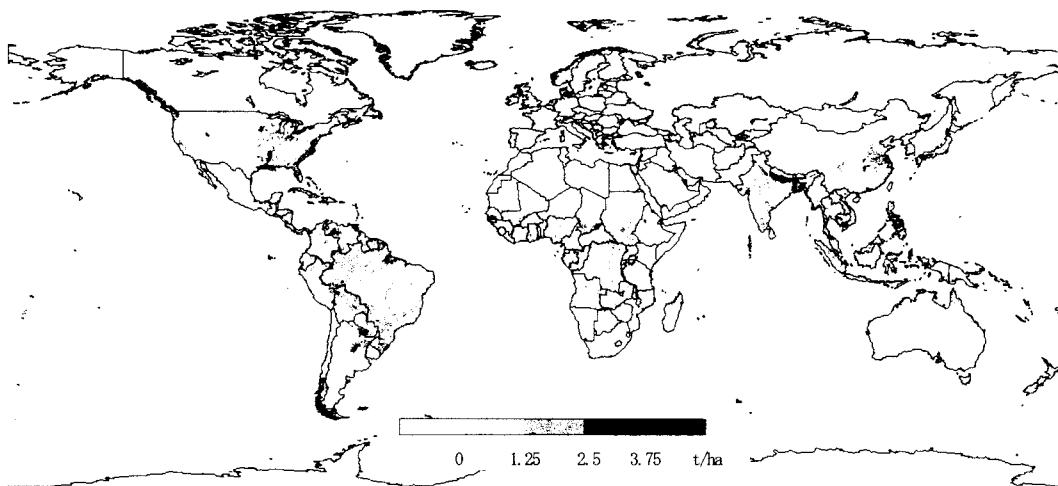


図-2 稲の現状の潜在生産性

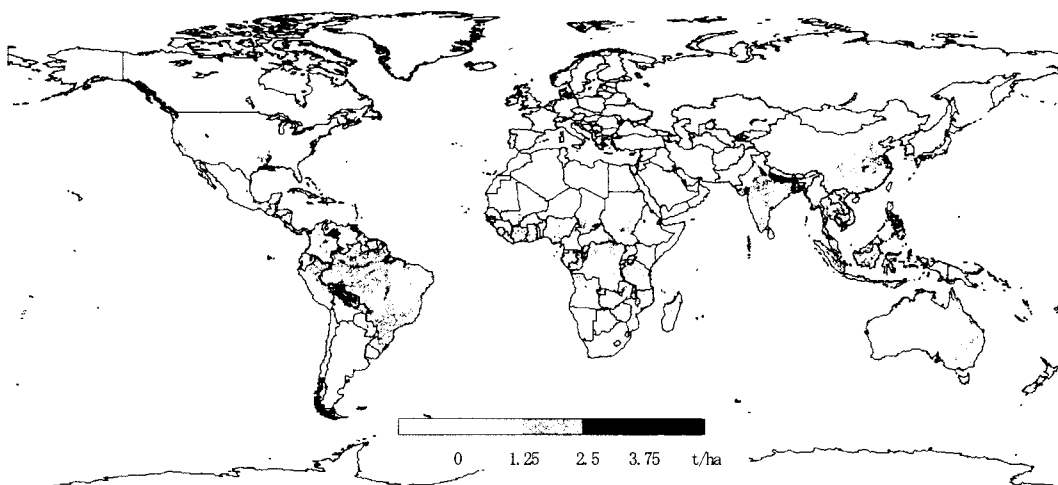


図-3 稲のCNINケースの潜在生産性

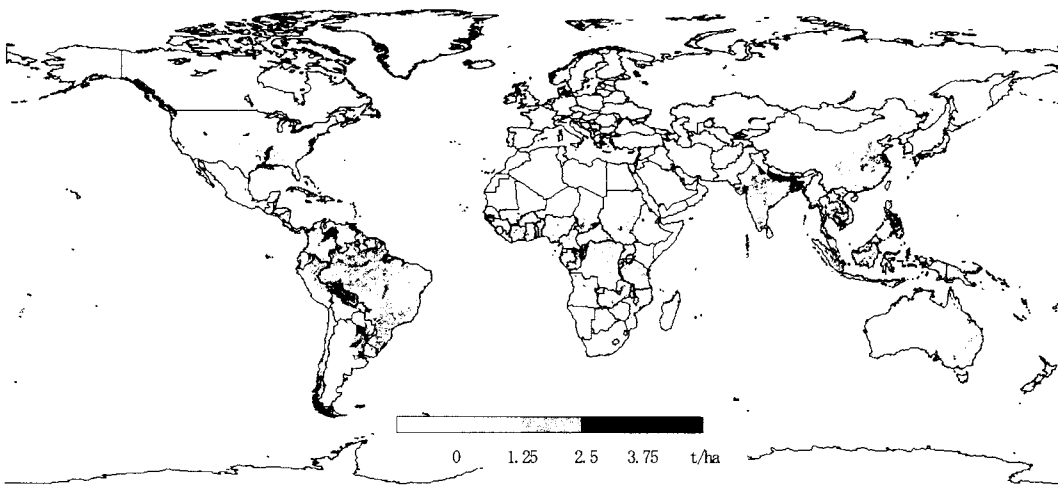


図-4 稲のCYTYケースの潜在生産性

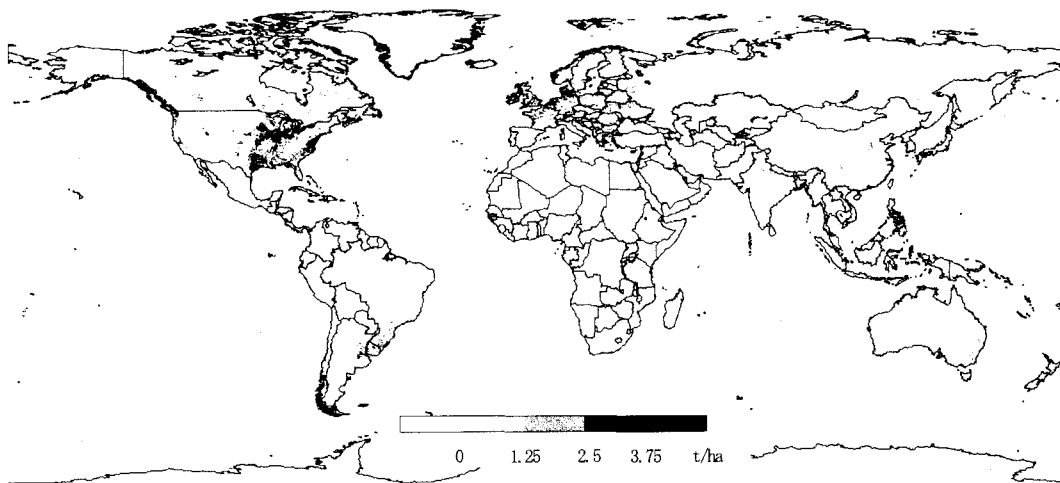


図-6 コムギの現状の潜在生産性

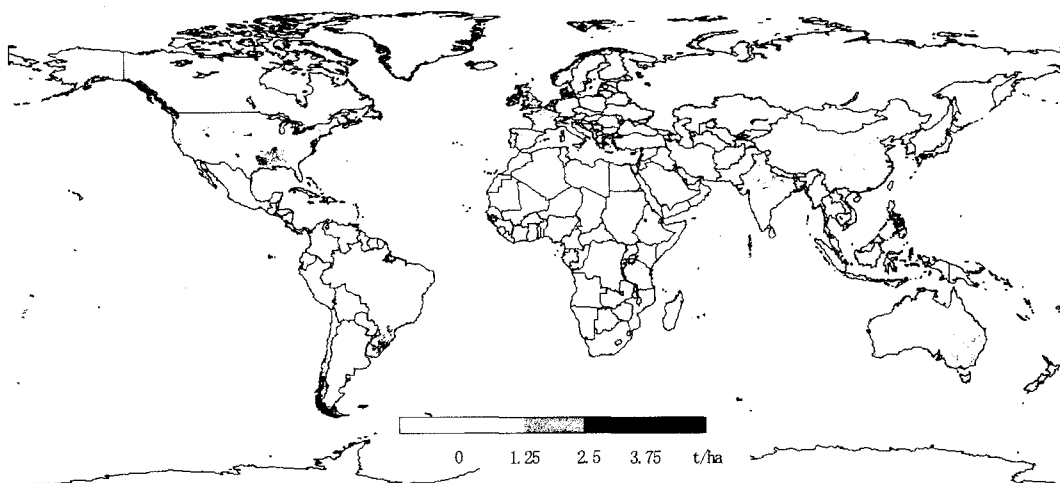


図-7 コムギのQNTN ケースの潜在生産性

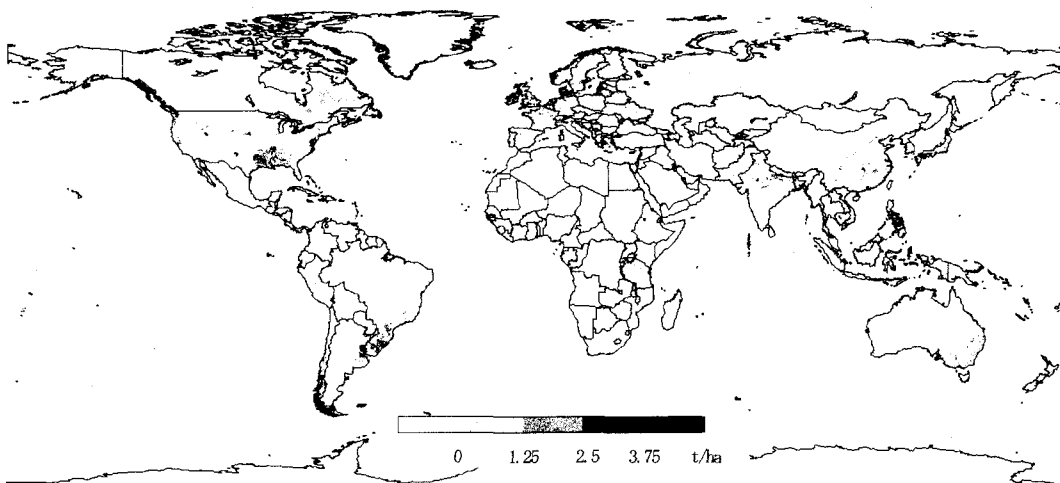


図-8 コムギのQNTY ケースの潜在生産性

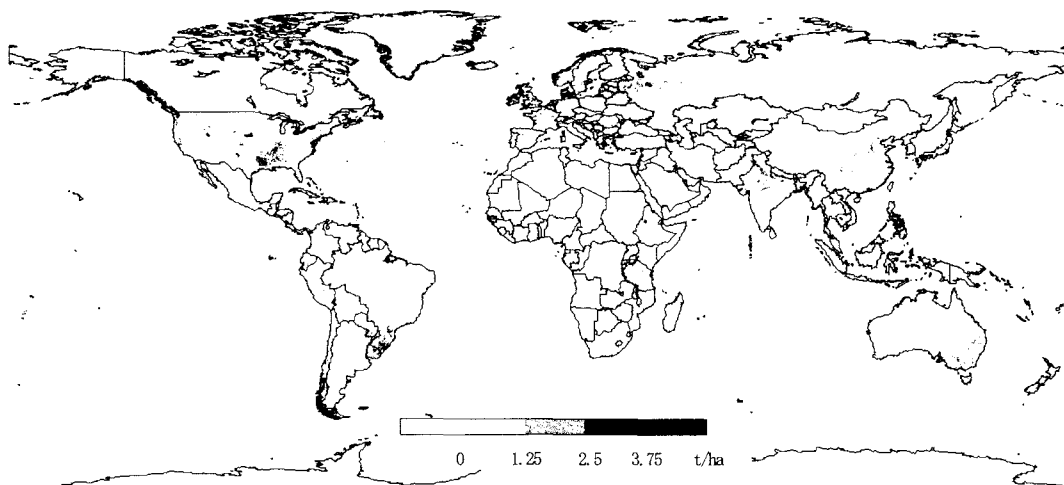


図-9 コムギのCYTN ケースの潜在生産性

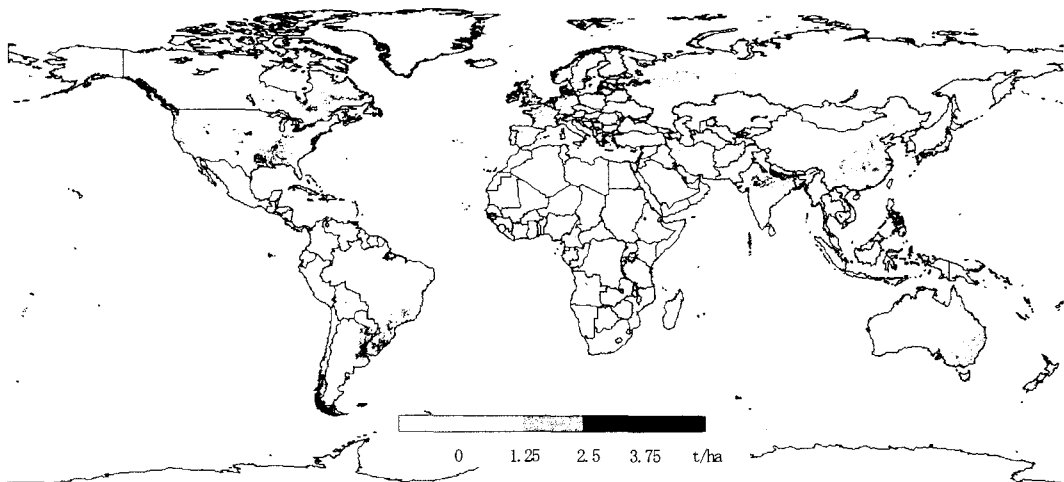


図-10 コムギのCYTY ケースの潜在生産性

している。生産性に関しては、アフリカや南米などにおいて灌漑率と投入労力の増加が見込まれるため、先進国に比して減少の度合いが小さい。CNTY では、植付け日移動により CNTN に比べ若干の影響緩和が見られるが、多くの地域において適宜品種変更を行える CYTN の方がより影響が緩和される。CNTY ではカナダ、CYTN ではロシアに新たな栽培可能地域の出現も見られるようになる。CYTY では、流動的な適応により気候変化を有効に利用できるため、多くの地域において生産性向上が見込まれる。低温が阻害因子となり現状で生産不適なカナダ、欧州、ロシアの一部地域においても、新たに栽培可能な地域が出現する。この新たな栽培可能地域出現による生産性向上は、適切な作物種・植付け日選択を仮定した CYTY で顕著である。ただし、現状において栽培に良好な条件を備えた米国中部・東部などでは、CYTY で仮定する適応を行ってもなお生産性減少が見込まれる。

(4) 計算結果のまとめ

Takahashi et al.(1997)の潜在作物生産性モデルでは、全体的傾向として、高緯度地域において生産性が向上し、低緯度地域においては専ら生産性が減少すると見積もっている。しかしながら本研究のように、途上国における将来の灌漑率の増加・投入労力の増加（気候変化以外の将来変化因子）が生産性に及ぼす効果を考慮した場合、低緯度途上国の生産性は現状に比べ必ずしも減少せず、地域によっては上昇することが示された。ただし、気候変化状況に応じた適切な作物種・植付け日選択が行われない場合には、気候変化以外の将来変化因子による生産性向上は気候変化による生産性減少に打ち消されるため、適応実施が必要であることがわかる。また、高緯度地域における生産性向上は、適切な作物種・植付け日選択が行われることが前提となることが明示的に示された。

4. 結論と今後の課題

本研究では、Takahashi et al. (1997)の農業影響評価モデルに改良を加え、より現実的な評価ができ、かつ適応策を定量的に評価できるモデルとした。このモデルを用いてイネとコムギの将来の生産性について計算した結果、以下のことが明らかとなった。

- 栽培作物品種の変更と栽培期間の変更という、農場レベルで比較的容易に行える適応策を施すことにより、温暖化による生産性減少の度合いを低下させることができる。現状より生産性を向上できる地域がある一方で、生産性の減少を避けられない地域も存在しており、地域間で差異が見られる。
- Takahashi et al. (1997)では、温暖化の影響は低緯度地域において生産性減少の被害が大きいと評価されていた。しかしながら本研究では、低緯度地域においても適応策を行うことで被害を緩和し、生産性が現状より向上する地域も存在する。
- 途上国においては、将来の灌漑率や投入労力の増加によって、生産性を向上させる効果が大きく、温暖化による生産性減少を緩和することができる。一方、先進国においては、既に灌漑率や投入労力が高いために、生産性を向上させる効果は小さい。

今後の課題としては、より現実的な評価を行うためのモデルの更なる改良と、本研究では取り扱うことができなかった適応策の検討が挙げられる。モデル改良面では、連作や灌漑による土壌の劣化による生産性の減少効果、二酸化炭素施肥効果、肥料投入による生産性の増加などを勘案していく必要がある。また今後の研究で取り扱うべき適応策としては、品種の変更だけでなく、イネから

コムギへというような作物種の変更や、より効率の高い灌漑システムの利用、耐寒・耐熱性の高い作物の品種改良の効果といった農場レベルでの適応策が挙げられる。さらには、本研究のモデルを経済モデルと組み合わせることで統合評価モデルへと拡張し、国際貿易による各国間の調整といった適応策も検討していくべきだろう。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC 地球温暖化第三次レポート-気候変化 2001-, 中央法規出版, 2002.
- 2) Takahashi, K., Harasawa, H., and Matsuoka, Y. : Climate change impact on global crop production, *Journal of Global Environmental Engineering*, 3, pp.145-161, 1997.
- 3) FAO : Report on the Agro-Ecological Zones Project, Vol.1, pp.15-17, 1978
- 4) 石井龍一, 中世古公男, 高崎康夫 : 作物学各論, pp.4-31, 朝倉書店, 1999.
- 5) 日本作物学会 : 作物学事典, pp.5-31, 朝倉書店, 2002.
- 6) USDA : Major World Crop and Climatic Profiles, USDA, 1994.
- 7) FAO : crop calendars, pp.56-67, FAO, 1978.
- 8) FAO : FAOSTAT, FAO, 2004.
- 9) New, M., Lister, D., Hulme, M. and Makin, I. : A high-resolution data set of surface climate over global land areas, *CLIMATE RESEARCH*, vol.21, pp.1-25, 2002.
- 10) Nozawa, T., Emori, S., Numaguti, A., Tsushima, Y., Takemura, T., Nakajima, T., Abe-Ouchi, A., and Kimoto, M. : Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES scenarios, In *Present and Future of Modeling Global Environmental Change* (Eds. Matsuno, T. and Kida, H.), Terrapub, Tokyo, 2001.
- 11) AQUASTAT : Global Map of Irrigated Areas, Version 2.1, FAO, 2002

RESEARCH ON ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON GRAIN PRODUCTION TAKING ACCOUNT OF ADAPTATION

Hiroaki MURAI, Kiyoshi TAKAHASHI, Toshihiko MASUI, Hideo HARASAWA and Yuzuru MATSUOKA

With considering effects of adaptation measures, climate change impact on potential productivity of rice and wheat were estimated at global scale. Through the revision of an existing agricultural impact assessment model for elaborating effect of irrigation, level of input and crop varieties, more realistic assessment were enabled. Adaptation measures taken into account in the assessment were modifications of crop variety and cultivation period. Both measures can be implemented at individual farmer scale. The result of the assessment made it clear that both adaptation measures had a possibility to mitigate negative impact of climate change on crop potential productivity.