

IPCC排出シナリオ（SRES）にもとづいた世界の農地必要量 の変動要因分析

誌名	環境科学会誌 = Environmental science
ISSN	09150048
著者名	棟居, 洋介 増井, 利彦
発行元	環境科学会
巻/号	22巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 73-90
発行年月	2009年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



一般論文

IPCC 排出シナリオ (SRES) にもとづいた
世界の農地必要量の変動要因分析

棟居 洋介*・増井 利彦**

摘 要

筆者らは先行研究において、IPCCの「排出シナリオに関する特別報告書 (SRES)」の4つの社会・経済シナリオにもとづいて、世界184カ国を対象に国内の栄養不足人口を2.5%以下にするために必要な一次生産レベルの食料(96品目)を2100年までの長期にわたって推計した(棟居・増井, 2008)。本研究では、その中から農作物54品目の推計値を用いて、2000年から2100年における世界全体の食料用の農地必要量を計算し、1) 長期的な食料必要量の変動要因と世界全体の農地必要量の関係を明らかにすること、および2) 将来の農作物の単収の持続的な増加の見通しについて、農業生態学的な根拠にもとづいた複数のケースを想定し、世界全体の農地必要量の減少の可能性の範囲を定量的に示すことを目的として分析を行った。分析にあたっては、現在の気候条件のもとで、各国の農作物生産量の世界シェアが2000年レベルで維持されることを仮定した。また、将来の農作物の単収の持続的な増加の見通しについては、単収の年増加量の最大値を20世紀後半の実績値とし、単収の上限值については、国際応用システム分析研究所 (IIASA) の世界農業生態地帯 (GAEZ) 分析で推計された国・農業技術レベル別単収の値を用いて、これらの組み合わせにより4つのケースを想定した。これに、単収が2000年レベルから増加しないケースをあわせて5ケースについて推計を行った。

分析の結果、SRESシナリオで想定されている将来の社会・経済条件のもとでは、以下のことが予測された。

- ・今世紀末までの世界全体の農地必要量の変化の主因は、世界人口の増減である。
- ・農作物の単収が2000年レベルから増加しない場合、世界全体の農地必要量は2100年までに、世界人口120億人のレベルにおいて、最大26億6,900万ヘクタールに達する可能性がある。
- ・農作物の生産に適した土地面積は、世界全体として農地の最大必要量を十分に上回るだけ存在する。しかしながら、森林の保全、他の土地利用との競合により農地の大幅な拡大は制約を受けると考えられる。
- ・農作物の単収は、超多収品種の導入によって、技術的には既存の品種の1.5倍程度まで高められる可能性がある。これによって、世界全体の農地必要量を大幅に減少させることができるが、経済的な要因や、気候変動、淡水資源の制約などの栽培環境の変化により、20世紀後半に達成したような単収の大幅な増加は今世紀においては難しくなることが見込まれる。
- ・2000年の農地面積(15億3,300万ヘクタール)において扶養できる世界人口は、単収が1961年から2004年の年増加量の半分のペースに減少した場合には80億人、また単収が2000年レベルから増加しない最も厳しいケースでは70億人が限度である。

2008年8月26日受付, 2009年1月28日受理

* 東京工業大学大学院社会理工学研究科, 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 W9-100

** 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

これらのことから、農地拡大による森林破壊を引き起こすことなしに飢餓問題を解決していくためには、食料の供給サイドにおいては、農作物の単収を増加させるための技術開発への投資を促進し、食料生産のための土地利用を優先させる対策をとるとともに、食料需要サイドにおいては、開発途上国における国内の食料配分の不平等を改善し、世界人口を早期に安定化させるための政策を促進する必要があることが推察された。

キーワード：温室効果ガス排出シナリオ、IPCC SRES、食料必要量、農地必要量、土地利用

1. はじめに

増加し続ける世界人口を養うためにはどれだけの土地が必要になるのか、またその余地はあるのかという問題は、社会の持続可能性を考えるうえでしばしば取り上げられる。本研究では、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の「排出シナリオに関する特別報告書（SRES）」¹⁾の4つの社会・経済シナリオにもとづいて、先行研究（棟居・増井、2008）^{2,3)}で推計した一次生産レベルの世界の食料必要量を用いて、国内の栄養不足人口を2.5%以下にするために必要な世界全体の農地面積（収獲面積）を試算し、その変動要因の分析を試みた。

世界の土地利用の長期的な見通しに関する研究は多いが、栄養不足人口を生じさせないために必要な世界全体の農地面積について推計した例は極めて少ない。例えば、Smil (2001)⁴⁾は人口一人当たりが必要とされる耕作地面積は、菜食主義的な食事で集約的な栽培が行われる場合には700 m²から800 m²であり、動物性たんぱく質が食事の30%を占め、かつ牛肉への依存が高まったとしても3,000 m²にとどまると推計されることから、100億の人口の扶養に必要な土地面積は8億ヘクタールから30億ヘクタールの間にあり、最も妥当な幅は11億ヘクタールから15億ヘクタールであるとしている。したがって、現在の世界の耕作地以上の面積は必要ないとしている。また、Wolfら (2003)⁵⁾は、もし生産性の高い農業システムが導入されるならば、世界の食料生産に必要な農地は2050年には現在の農地面積の55%程度になると推計し、残りの45%をエネルギー作物の生産にまわすことができるとしている。

将来の農地必要量は、食料必要量と単位面積当たりの作物の収量(yield)（以下、「単収」と略称）によって決まる。食料必要量は、人口や一人当たり所得の増加にともなって変化する一人当たりの食事エネルギー必要量、食料消費パターン、家畜生産システムにおける飼料穀物の集約化などの影響によって

変化する。また、農作物の単収は品種改良や新しい栽培管理技術の導入などによって増加するが、一方で、気候条件や、水資源、土壌資源などの栽培環境によって制約を受ける。

既存研究では、これらの食料必要量や農作物の単収を変化させる要因について包括的に扱われることが少なく、また、将来の社会情勢などについて単一の想定にもとづく一時点での分析にとどまっている。

そこで本研究では、これらの要因を包括的に扱い、先行研究の農作物54品目の推計値を用いて世界全体の農地必要量を計算し、1) 長期的な食料必要量の変動要因と世界全体の農地必要量の関係を明らかにすること、および2) 単収の持続的な増加の見通しについて農業生態学的な根拠にもとづいた複数のケースを想定し、世界全体の農地必要量の減少の可能性の範囲を定量的に示すことを目的として分析を行った。

なお、本研究では気候条件をはじめとする農作物の栽培環境の長期的な変化については考慮せず、現在の環境が維持されることを仮定して分析を行った。栽培環境の変化の影響を考慮した分析については今後の課題とした。

2. 分析の枠組み

図1に分析の手順を示す。はじめに、先行研究で推計した世界184カ国、54品目の農作物の必要量のデータを用いて、1) 農作物の単収が2000年レベル(1998年から2002年の5年平均値)で変わらないと仮定して2100年までの農地必要量を推計し、人口、一人当たり食事エネルギー必要量、食料消費パターン、家畜生産システムなどの食料必要量の変動要因と農地必要量との関係を分析した。次に、2) 国際応用システム分析研究所（IIASA）の世界農業生態地帯（GAEZ）分析⁶⁾で実施された世界各国の農業技術レベル別単収の推計値と、国際連合食糧農業機関（FAO）の農業生産統計（FAOSTAT）⁷⁾における1961年から2004年の農作物の単収の年平均

増加量, および超多収品種の開発の見通しから, 4つの単収の持続的な増加ケースを想定し, これに単収が2000年レベルで一定のケースを合わせて5つのケースを設定した。そして, 最後に3) 将来の単収の持続的な増加の可能性を考慮に入れて世界の農地必要量を推計し, 世界全体の農地必要量の減少の可能性について分析を行った。

なお, 本研究の分析における主要な仮定は以下の通りである。

- ・現在の気候条件(1961年から1990年の30年平均)のもとで分析を行う。将来の気候変動による影響は考えない(GAEZ分析の条件)。
- ・灌漑水は予測期間を通して十分に供給されるものとする(GAEZ分析の条件)。
- ・農作物の生産量の各国の世界シェアは, 予測期間を通して2000年のシェアで不変とする。

3. 食料必要量の変動要因と農地必要量の関係

3.1 農地必要量の定義

はじめに, 本研究の「農地必要量」の定義について述べる。本研究で推計した「農地必要量」は, 表1に示す農作物54品目の収穫面積(Area Harvested)の合計である。農作物54品目は, FAOの食料需給表96品目(棟居・増井, 2008)³⁾のうち, 農作物51品目をもとに, 豆類のひよこ豆とカウピー, 油料作物の菜種とからし種子を分けて54品目とした。したがって, 牛や羊などの反芻動物の飼育のための採草・放牧地や, たばこや繊維などの非食用用途の作物栽培のための土地は「農地必要量」に含まれていない。

収穫面積の推計法は, 国際連合食糧農業機関(FAO)の農業生産統計(FAOSTAT)⁷⁾における収穫面積の定義にしたがった。すなわち, 式(1)に示すように, i 国における t 年の農作物 j の収穫面積(Area Harvested)は, 農作物の年生産量(Production)と単位面積当たり収量(Yield)から算定した。

$$\text{Area Harvested}_{i,j}(t) = \text{Production}_{i,j}(t) / \text{Yield}_{i,j}(t) \quad (1)$$

ここで, 収穫面積(Area Harvested)はFAOSTATの用語解説^{注1)}にあるように, 一年間に同種の作物が2回以上収穫された場合には1回のみの面積が計上されている。したがって, 単位面積当たり収量(Yield)は, 1回の単位面積当たり収穫量に年間の収穫回数を表す作付集約度(Cropping Intensity)を乗じた値となっている。

式(1)から将来の農地必要量を計算するためには, 生産量と単収の見通しが必要になる。生産量については, 先行研究で推計した農作物54品目の世界全体の必要量(Food)を用いて, 各国の生産量の世界シェア(Share)が予測期間を通して2000年のシェアで変わらないと仮定して, 式(2)により計算した。

$$\text{Production}_{i,j}(t) = \text{Food}_j(t) \cdot \text{Share}_{i,j}(2000) \quad (2)$$

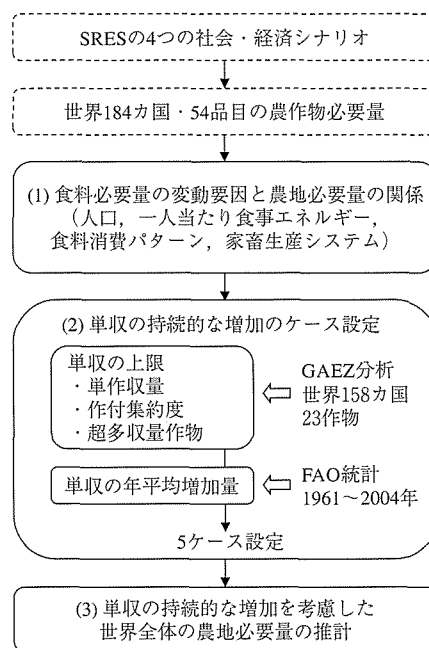


図1 分析の枠組み

1 FAOSTATにおける収穫面積(Area harvested)⁸⁾の定義は以下のとおりである。

「収穫面積は, 農作物が収穫される面積。したがって播種や植え付けされても, 被害や不出来により収穫がない面積は除かれる。通常は単年性作物については純量を, 永年作物については総量を示すことがある。総面積は未耕作地域, 小道, 水路, 枕地, 路肩, 畑と土壤保全のための防風林などを含む場合には, 純面積と異なる。当該の農作物が連続した作付けにより年に2回以上収穫される場合(すなわち, 同じ農作物が一年間に同じ土地に2回以上播種または植え付けられる場合)には, その面積は収穫された回数と同じだけ数えられる。これに反して収穫面積は, 同じ農作物が一年間に連続して収穫された場合には一回だけ計上される。混作に関しては, 各作物に関連した播種面積は区別して報告される。混作が特定の作物に言及している場合は, 一般的には穀物であるが, 混作を単一の作物のように扱うことが推奨される。そのため, 播種面積は報告された作物のみが計上される。」

表 1 農地必要量推計の対象農作物 54 品目

No.	品目	GAEZ 分析	No.	品目	GAEZ 分析	No.	品目	GAEZ 分析
1	小麦	*	19	ひよこ豆	*	37	オレンジ・マンダリン	
2	大麦	*	20	カウピー	*	38	レモン・ライム	
3	とうもろこし	*	21	その他豆類		39	グレープフルーツ	
4	ライ麦	*	22	木の実		40	その他柑橘類	
5	えん麦		23	大豆	*	41	バナナ	*
6	ミレット	*	24	落花生（から付き）	*	42	プランターン	*
7	ソルガム	*	25	ひまわり種子	*	43	りんご	
8	その他穀物		26	菜種	*	44	パイナップル	
9	米（もみ）	*	27	からし種子		45	ナツメヤシの実	
10	ばれいしょ	*	28	綿実	*	46	ぶどう	
11	キャッサバ	*	29	ココナッツ		47	その他果物	
12	かんしょ	*	30	ごま		48	コーヒー	
13	その他のいも類		31	パーム核	*	49	カカオ豆	
14	ヤム		32	オリーブ	*	50	茶	
15	砂糖キビ	*	33	その他油料作物		51	コショウ	
16	甜菜	*	34	トマト		52	スパニッシュ・ペパー	
17	豆		35	たまねぎ		53	クローブ	
18	えんどう豆		36	その他野菜		54	その他香辛料	

補注）*印は GAEZ 分析対象 23 品目

また、単収については 2000 年（1998 年から 2002 年の 5 年平均値）の単収を基準として、後で述べるように国・作物別に将来の増加ケースを想定した。

一方で、FAOSTAT には作物の収穫面積とは別に農地に関する統計がある。土地利用（Land Use）に関する項目がそれである。表 1 の 54 品目は、その土地利用区分のうち耕作地²または永年作物地³で栽培される作物である。図 2 に示すように、2000 年における世界の耕作地と永年作物地の合計は 15 億 3,300 万ヘクタールであった。これに対して、農作物 54 品目の 2000 年の収穫面積の合計は 11 億 6900 万ヘクタールで、耕作地と永年作物地の合計の 76% に相当した。このような耕作地と永年作物地の合計と収穫面積の差に関して FAOSTAT に詳細な説明はないが、その多くは休耕地であると考え

られる。休閒は輪作体系の中では地力維持のために必要であるが、本研究で推計した「農地必要量」は、このための休耕地についても除いた最低面積となっている。

3.2 世界全体の農地必要量の変動要因分析

次に、食料必要量の変動要因と世界全体の農地必要量の関係について述べる。

式（1）で定義したように、農地必要量（収穫面積）は食料必要量と農作物の単収によって決まる。ここでは、食料必要量の変動要因と農地必要量の関係を見るため、農作物の単収については予測期間を通して 2000 年のレベルで一定であると仮定して農地面積の推計を行った。

推計手順としては、まず、先行研究で推計した 2000 年から 2100 年の農作物 54 品目の世界全体の

2 FAOSTAT における耕作地（Arable land）の定義⁹⁾は以下のとおりである。

「耕作地とは、単年性作物作付地（二毛作地は 1 回として計算）、採草または放牧用の単年牧草地、市場用菜園および家庭菜園の用地、並びに一次的（5 年以下）休閒地をいう。焼畑農業あとの放棄された土地は、この定義には含まれない。耕作地のデータは、潜在的な耕作可能地の面積を示すものではない。」

3 FAOSTAT における永年作物地（Permanent crops）の定義⁹⁾は以下のとおりである。

「永年作物地とは、ココア、コーヒーおよびゴムなどのように長期間土地を使用し、毎収穫後に再種付を必要としない作物を耕作する土地をいう。永年作物地には、花灌木地、果樹地、堅果樹地、蔓樹地などが含まれるが、木材・製材用の樹木地は含まれない。」

必要量, 2000 年の単収, および式 (1), 式 (2) から国・作物別の農地必要量を推計した。次に, 式 (3) のように世界 184 カ国, 54 作物の農地必要量を合計して, 世界全体の農地必要量 (*Global Cropland*) とした。SRES の 4 つの社会・経済シナリオについての推計結果を図 3 (a) に示す (図 3 (b) については後で説明する)。

$$Global\ Cropland(t) = \sum_{i=1}^{184} \sum_{j=1}^{54} Area\ Harvested_{i,j}(t) \quad (3)$$

(1) 世界人口と農地必要量の関係

ここで, 図 3 (a) の世界全体の農地必要量の推移と, 図 4 に示す SRES シナリオの世界人口の想定を

比較すると, 世界全体の農地必要量は世界人口とほぼ同じ増減の経路をたどることがわかる。一方で, 図 3 (a) と図 4 のデータから, 図 5 に示すように一人当たり農地必要量の世界平均値の推移を計算すると, 予測期間を通して変化が少なくほぼ平坦に推移することが示された。つまり, 世界全体の農地必要量の変化の主因は世界人口の変化にあると考えられる。

このことは, 世界全体の農地必要量の年変化率 ($\Delta Global\ Cropland$) を, 式 (4) に示すように世界人口の年変化率 ($\Delta World\ Population$) と一人当たり農地必要量の年変化率 ($\Delta Cropland\ per\ capita$) の和に分解して示すとさらにはっきりする。^{注4}

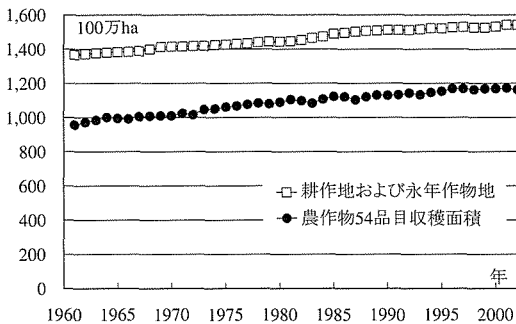


図 2 世界全体の耕作地および永年作物地と農作物 54 品目の収穫面積の経年変化 (出典: FAOSTAT)

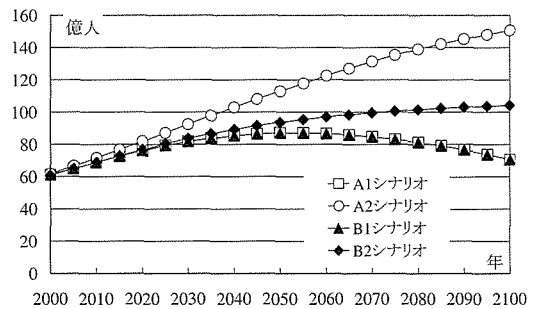


図 4 SRES シナリオにおける世界人口の想定

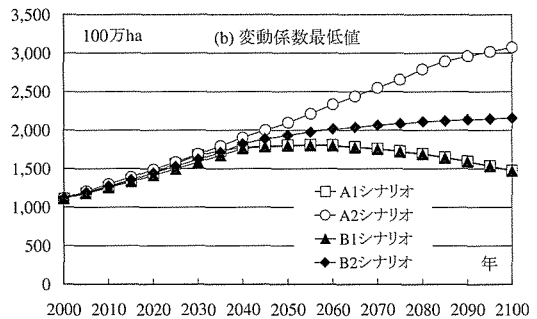
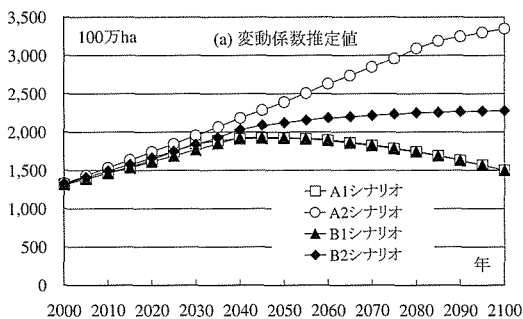


図 3 SRES シナリオにおける世界全体の農地必要量の推移 (単収は 2000 年レベルで一定)

- 4 例えば, 世界全体の農地必要量を A , 世界人口を P , 一人当たり農地必要量 L とすると,

$$A = P \cdot L$$

の関係がある。このとき, それぞれの微小変化分を dA , dP , dL とすると, 全微分の関係から以下の式が成り立つ。

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{P} + \frac{dL}{L}$$

したがって, ここで変化の期間を 1 年とすると, 世界全体の農地必要量の年変化率 (dA/A) は, 世界人口の年変化率 (dP/P) と一人当たり農地必要量の年変化率 (dL/L) の和に等しくなる。

$$\Delta \text{Global Cropland } (t) = \Delta \text{World Population } (t) + \Delta \text{Cropland per capita } (t) \quad (4)$$

図6は、B2シナリオを例として、世界全体の農地必要量、世界人口、および一人当たり農地必要量の年変化率の経年変化を示したものである。図6からわかるように、一人当たり農地必要量の年変化率は2030年頃まで増加するが、その後は減少してほぼ0%の近傍を推移する。一方で、世界全体の農地必要量の年変化率は、2020年から2040年の期間を除いてほぼ世界人口の年変化率と同様の挙動を示している。A1、A2、B1の3シナリオについても同様の結果となった。したがって、これらの結果からも、食料必要量の変化と農地必要量の関係を長期的に見た場合、世界人口の増減が世界全体の農地必要量の変化の主因であることが明らかとなった。

(2) 一人当たり農地必要量の変動要因

図5に示されているように、SRESシナリオでは今世紀末までに一人当たり所得の大幅な増加が想定されているにもかかわらず、一人当たり農地必要量の増加がほとんど見られないことは、意外に思われるかもしれない。先進国の経験によれば、一人当たり所得の増加は畜産物や加工食品の消費を増加させ、一人当たりの農地面積を増加させることが知られている。例えば、Gerbens-Leenesら(2002a, 2002b, 2005)^{10~12)}によると、1950年から1990年の間にオランダでは、チーズ、飲料、フルーツ、肉などの消費の増加が一人当たりの農地面積を40%増加させた。また、1995年の欧州14カ国を対象にした分析では、各国の食料消費パターンの違いが農地面積に大きな差を生じさせたことが報告されている。

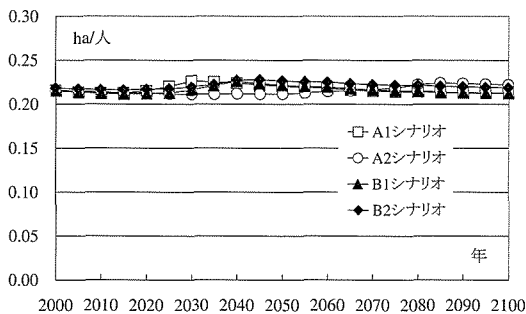


図5 SRESシナリオにおける一人当たり農地必要量の世界平均値の推移

ところが本研究のように、主に食料価格と所得レベルによって決定される食料需要(消費)量ではなくて、栄養不足人口を生じさせないように決定される食料必要量にもとづいて一人当たり農地面積を推計すると、一人当たり所得の増加にともなう食料消費パターンや家畜生産システムの変化は、長期的な農地面積の主要な増加要因とはなっていない。

この理由については以下のように考えられる。図7は、B2シナリオについて、食料必要量に大きく影響を及ぼす人口以外の3つの要因(国内における一人当たり食事エネルギー摂取の不平等度を示す変動係数^{注5)}、食料消費パターン、家畜生産システムにおける飼料投入係数)を、最小値もしくは2000年の値で固定して、図5の一人当たり農地必要量の推計値(図7では基準ケースとして表記)と比較したものである。

図7において、食料消費パターンまたは家畜生産システムにおける飼料投入係数を2000年レベルで固定したケースと基準ケースの推計値を比較する

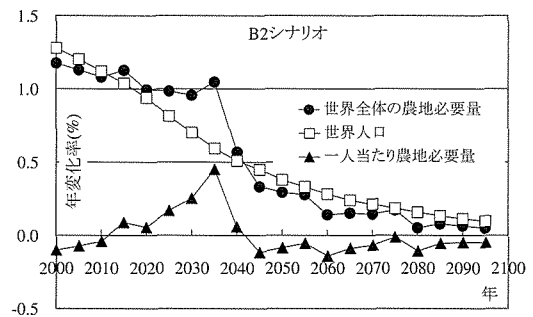


図6 世界全体の農地必要量の変動要因の年変化率の推移(B2シナリオの例)

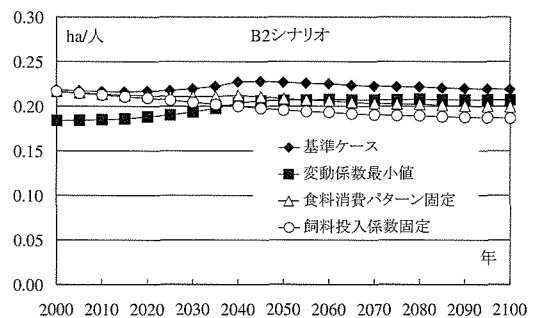


図7 食料必要量の変動要因と一人当たり農地必要量の関係(B2シナリオの例)

5 変動係数の定義と導出方法の詳細については、先行研究(棟居・増井, 2006)²⁾に記載されている。

と、食料消費パターンと家畜生産システムの変化が一人当たり農地必要量を増加させていることがわかる。一方で、変動係数最小値のケースは、国内における一人当たり食事エネルギー摂取の不平等度を示す変動係数が予測期間を通して最低値 (0.2) にあると仮定して一人当たり農地必要量を推計したものである。基準ケースでは変動係数 (経験的に 0.2 から 0.36 の間にあることが知られている) は 0.2 よりも大きく、一人当たり所得の増加にともない 0.2 に漸近するため、国内における食事エネルギー摂取の不平等度の改善が一人当たり農地必要量を減少させる方向に働くことがわかる。したがって、食料消費パターンと家畜生産システムという増加要因と変動係数の低下という減少要因が相殺しあって、結果的に一人当たり農地必要量の変化が少なくなっていると考えられる。

(3) 食料必要量の推計における不確実性

図 3 (a) の農地必要量は、先行研究 (棟居・増井, 2008) ³⁾ で推計した食料必要量を用いて算定したが、この食料必要量の値は、変動係数が上限値 (0.36) に近く、食料不安の大きい国においてはかなり高めに見積もられている。先行研究 (棟居・増井, 2006) ²⁾ で述べているように、開発途上国の国内の栄養不足人口の割合を 2.5% 以下にするためには、一人当たり食事エネルギーの平均摂取レベルを相当高いレベルまで増加させる必要がある。具体的な対策としては、農作物の増産や食糧援助などにより国内の食料供給を増加させることになるだろう。これにより国内の食事エネルギー配分の不平等が改善し、変動係数も低下すると考えられるが、図 3 (a) の推計においてはこの変動係数の低下は考慮されていない。

変動係数がどの程度低下するかを予測することは困難であるため、ここでは、図 3 (b) のように、変動係数が予測期間を通して最低値 (0.2) をとる場合の世界全体の農地必要量を示した。この場合の世界全体の農地必要量は、図 3 (a) の変動係数が一人当たり所得の増加にともない減少していく場

合の農地必要量に比べて、SRES の 4 つの社会・経済シナリオで、2000 年に 16%、2050 年に 6% から 12%、2100 年には 1% から 8% 減少する。

一方で、FAO の「世界の食料不安の現状 2006」¹³⁾ で報告されているように、開発途上国では貧困者のおよそ 70% が農村地域に居住し、栄養不足人口の削減には農業の成長が決定的に需要であるとされている。農業の成長にはインフラ、農業研究、教育のための公共投資が不可欠であるため、変動係数が最小値に近いレベルまで低下するには時間を要するだろう。また、緊急時の食糧援助は一時的に国内の食事エネルギー配分の不平等を改善する効果があると考えられる。したがって、世界全体の農地必要量は図 3 (a) と図 3 (b) の 2 つの値を最大値と最小値とする範囲内にあると推察される。

4. 単収の持続的な増加のケース設定

4.1 単収の変化の要因と将来のケース設定

続いて、本研究で設定した農作物の単収の持続的な増加のケースについて述べる。SRES 報告書 (IPCC, 2000) ¹⁾ では、6 つのモデリングチームにより 4 つの社会・経済シナリオのストーリーラインの定量化が行われたが、農作物の単収の将来の変化については記述があるのは、AIM モデルの農作物の生産性の年平均変化率 (年率 1% から 2%) だけであり、他のモデルについては明示されていない。加えて、図 8 に示すように SRES シナリオにおける食料と農業に関する記述は極めて少ない。

ただし、IMAGE モデルについては、後になって EU15 カ国とノルウェー、スイスの計 17 カ国を対象とした小麦の単収の増加シナリオが報告されている (Ewert, 2005) ¹⁴⁾。このシナリオでは、小麦の単収の変化を、技術開発による増加、二酸化炭素の

表 2 IMAGE モデルにおける EU17 カ国の小麦の平均単収の技術開発による増加シナリオ (2000 年の単収を 1 としたときの相対値)

年	A1	A2	B1	B2
2020	1.37	1.37	1.30	1.20
2050	1.87	1.81	1.63	1.28
2080	2.34	2.17	1.87	1.28

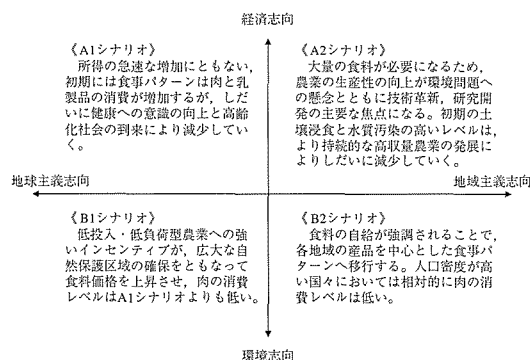


図 8 SRES シナリオの食料・農業に関連するストーリーライン

増加による施肥効果による増加、気候変化による変化の3つの要因に分けて、それぞれのシナリオを作成している。そして、技術開発による増加については、経済志向のA1、A2シナリオでは、遺伝子組換え作物（GM作物）などのバイオテクノロジーによる単収の増加が想定される一方で、環境志向のB1、B2シナリオでは、GM作物の普及が少なく、化学肥料の消費も押さえられるため単収の増加は少なくなっている。また、地球主義志向のシナリオのほうが、地域主義志向のシナリオに比べて国際的な技術移転が促進されるため単収の増加が大きい（表2）。

一般に農作物の単収は、図9に示すように品種改良や、播種時期、輪作などの栽培技術の向上、機械、化学肥料、農薬などの農業資材の投入など人為的な貢献によって増加する。これらは、食料価格や食料需要などの社会経済状況によって影響を受ける。

一方で、農作物の単収は、大気中の二酸化炭素濃度の増加、気候の変化、水資源の不足、塩類集積など、作物の栽培環境の変化によっても多大な影響を

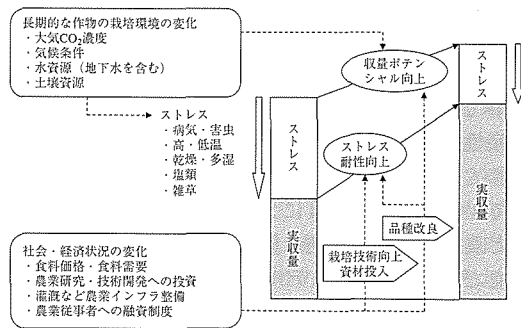


図9 作物の収量ポテンシャルと実収量の関係(大杉, 2006を改変)¹⁵⁾

受ける。十分に好適な気候条件、水資源、土壌資源が与えられた場合の収量として示される作物の遺伝的ポテンシャルは、作物の収量ポテンシャルと呼ばれるが、栽培環境におけるストレスによって実収量は収量ポテンシャルを下回ることになる。

このように農作物の将来の単収は、社会経済的な要因と作物の栽培環境によって決まり、その関係は複雑で、すべての変化要因を考慮して長期的に農作物の単収の見通しを立てることはきわめて困難である。

そこで、本研究では、現在の栽培環境が維持されることを仮定して、社会・経済状況の変化による技術的な単収の増加の可能性に焦点を当てて単収の増加ケースを想定することとした。具体的には、国、作物ごとに農業生態学的な単収の上限値を求め、これと単収の年増加量を組み合わせることにより、表3に示すように超多収、高位、中位、低位の4つのケースを想定し、単収が2000年レベルから増加しないケースと合わせて5つのケースを想定した。これにより、単収の持続的な増加レベルと農地必要量との関係を感度分析により明らかにすることを試みた。

なお、単収の上限値と年増加量の組み合わせとして、例えば農業技術レベルが中投入であるにもかかわらず、20世紀後半のような高い単収の増加のトレンドを維持するような矛盾する組み合わせのケースについては除外した。

以下では、表3の各項目について順に説明を行う。

4.2 単収の上限値

各国の作物別単収の上限値 (Yield Ceiling) は、式(5)に示すように農作物の単作収量 (Single Cropping) の値に、作付集約度係数 (Cropping Intensity) と遺伝子組換え作物係数 (GM Crop) を

表3 単収の持続的な増加のケース設定

単収ケース	単収の上限値 (トン/ha)			単収の年増加量 ^{d)} (トン/ha/年)
	単作収量 ^{a)}	作付集約度係数 ^{b)}	GM作物係数 ^{c)}	
1 超多収量	高投入	高投入	適用	1961-2004年の平均
2 高位	高投入	高投入	—	1961-2004年の平均
3 中位	高投入	高投入	—	1961-2004年の平均の1/2
4 低位	中投入	—	—	1961-2004年の平均の1/2
5 2000年レベル	—	—	—	—

補注)

a) 単作収量はGAEZ分析の158カ国・23作物についての農業技術レベルが高投入または中投入の推計値。

b) 作付集約度係数はGAEZ分析の穀物についての農業技術レベル高投入の推計値。

c) GM作物係数は文献値から設定。

d) FAOSTATの作物別単収から、先進工業国、市場経済移行国、開発途上国の平均値を推計。

乗じた値とした。

$Yield\ Ceiling =$

$Single\ Cropping \times Cropping\ Intensity \times GM\ Crop$ (5)

単作収量と作付集約度係数については、GAEZ 分析の国・作物別の推計値を用いた。また GM（遺伝子組換え）作物係数については文献のレビューにより設定した。

(1) 単作収量

GAEZ 分析の単作収量（*Single Cropping*）は、1961 年から 1990 年の 30 年平均の気候条件を前提として、23 作物（表 1 参照）を対象に、経緯度 5 分角（赤道 9.3km × 9.3km）に分割されたグリッドについて評価され、世界 158 カ国の国別平均値が計算されている。単作収量は表 4 に示す 3 つの農業技術レベルにおいて推計されている（Fischer ら、2006）¹⁶⁾。

また、作物の栽培における水分条件に関しては、天水のみを利用した場合（降雨依存型）と天水と灌漑水を組み合わせた場合の 2 つのケースの単作収量が推計されている。本研究では後者の天水と灌漑水の両方を利用した場合の推計値を用いた。また、GAEZ 分析では灌漑水は作物の成長の制約にならないように十分に供給されることが仮定されており、流域内における水資源の利用の制約については考

慮されていない。

さらに、各グリッドにおける作物の栽培適正に関しては、表 5 に示すように作物の単作収量を、同じ気候条件、農業技術レベルで土壌と地形の制約がない場合の単作収量（最大無制約単収）と比較することにより、5 段階の適正分類で評価されている。本研究では VS から MS までの上位 3 クラスに分類されるグリッドの単収の国別平均値を用いた。

加えて、GAEZ 分析の推計値は作物の乾物収量（dry matter weight）であるのに対して、FAOSTAT の単収（Yield）は、農場レベルで報告された水分を含んだ値であるため直接比較することができない。本研究では、作物の含水率を考慮した変換係数を乗じることにより GAEZ 分析の推計値を生体重に変換して用いた（FAO, 1993¹⁷⁾ および Thompson ら、2005¹⁸⁾）。

GAEZ 分析における単作収量の推計例として、図 10 に 2000 年における小麦の生産量の上位 20 カ国について、FAOSTAT の単収の実績値と比較した結果を示す。Duwayri ら（1999）¹⁹⁾によると、同じ作物の農地による単収の格差の要因は、気候条件のように格差を狭められない要因と、投入財や栽培技術などの農業技術レベルに関する要因の 2 つに分けて考えることができる。後者については、経済的な条件が整えば狭めることができる格差であり「開発できる単収格差」と称されている。GAEZ 分析で評

表 4 GAEZ 分析の農業技術レベル

集約化レベル	特徴
高投入／高度の管理	・改良多収量品種を生産。 ・機械化、低い労働集約性。 ・肥料の適切な利用、農薬による病気・雑草の管理。 ・完全な保全対策。 ・農業システムは市場志向。
中投入／改善された管理	・改良品種を生産。 ・動力は人力、家畜および多少の機械。 ・多少の肥料、化学農薬を使い、病気と雑草をコントロール。 ・適切な休閑期間と多少の保全対策。 ・農業システムは部分的に市場志向。
低投入／伝統的な管理	・伝統的な栽培品種を生産。 ・労働集約的。 ・肥料、病気と雑草管理に農薬を使用しない。 ・適切な休閑期間と最小の保全対策。 ・農業システムは自給農業に等しい最低限のシステム。

価されている農業技術は、すでに普及期にある確立された技術であるため、図 10 の小麦の単収実績と GAEZ 分析の単作収量の推計値との差は、この「開発できる単収格差」に相当すると考えられる。このことは、本研究において GAEZ 分析の推計値を単収の上限値の設定に用いた根拠となっている。

しかしながら、将来の食料、農業を取り巻く経済状況が単収の格差を狭めるための障害になる可能性が考えられる。例えば、図 10 において 2000 年の米国の小麦の単収は 2.7 トン/ha で、技術水準が高投入の場合の単収 7.3 トン/ha、さらには中投入の場合の単収 5.0 トン/ha をも大きく下回っているが、これは現在の小麦の価格においては、中投入以下のレベルで生産をすることが経済的に効率的であるということであり、将来小麦の価格が上昇しないかぎり、より高い農業技術の投入による単収の増加は困難であることを示している。その一方で、穀物価格の上昇は近年見られるように貧困層の人々の栄養不足問題を深刻化させ、政治的にも不安定化の要因になるため受け入れがたいであろうと考えられる。

(2) 作付集約度係数

GAEZ 分析では、穀物の多毛作の可能性について分析が行われており、天水と灌漑水の両方が利用可能な条件下で、農業技術レベルが高投入における穀物の単作収量と多毛作収量がグリッドごとに評価されている。各グリッドの単作収量については、最

大の収量を示す穀物の値が入力されており、多毛作収量については穀物の複数の組み合わせのうち、最大の収量を示す穀物の組み合わせの値が入力されている。そこで、単作収量と多毛作収量について国ごとに平均値を求めて、単作収量の平均値に対する多毛作収量の平均値の比を作付集約度係数 (*Cropping Intensity*) とした (表 6)。作付集約度係数は、主として気候条件の制約により低緯度の熱帯に属する国において高く、高緯度地域の国ほど低くなる傾向がある。

(3) GM 作物係数

いわゆる「緑の革命」に代表されるように、米、小麦、とうもろこしの単収の世界平均は、1960 年代以降 2 倍近くの伸びを示した。米と小麦に関しては、化学肥料への反応性の高い矮性品種の普及と灌漑施設の整備、多毛作が単収の伸びに大きく貢献した。また、とうもろこしについては密植への耐性のあるハイブリッド品種の普及と化学肥料の使用量の増加が貢献したことが知られている。

GAEZ 分析では農業技術が高投入レベルにおいて改良多収量品種の単収が評価されているが、これには GM (遺伝子組換え) 作物は含まれていない。GM 作物の開発を含むバイオテクノロジーの進歩によって、今世紀においても緑の革命に匹敵するような大幅な単収の増加が可能かどうかについては、作物研究者の間でも意見が分かれている。

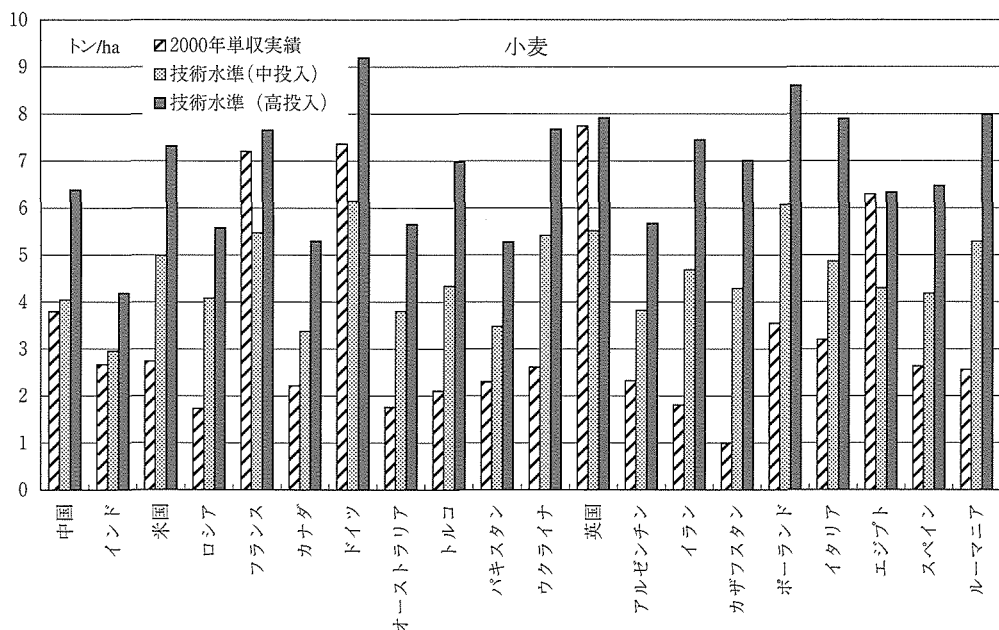


図 10 小麦の単収の 2000 年実績値と GAEZ 分析の単作収量との比較 (小麦の生産量上位 20 カ国)

作物の収量 Y は、収穫指数 HI 、日射量 I 、作物の受光割合 f 、光エネルギーの物質への転換効率 RUE によって規定される (国分, 2007)²⁰⁾。

$$Y = HI \cdot \sum (I \cdot f \cdot RUE) \quad (6)$$

現在、穀物の単収が上限に近づきつつあるといわれる理由として、米と小麦に関しては、既存の多収品種の収穫指数 HI が経験的な上限である 0.6 に近いこと (白岩, 2008)²¹⁾、光エネルギーの物質への転換効率 RUE を向上させるため技術的な目途が立っていないこと、窒素吸収能が限界に近づいていること、また、世界の主要な穀倉地帯において地下水の枯渇などの栽培環境の制約が厳しくなっていることなどがあげられる (Brown, 2004)²²⁾。加えて、Cassman (1999)²³⁾ は穀物の収量が遺伝的な収量ポテンシャルの 70% から 80% に達するとそれ以上の増産は期待できないことに加えて、これまでの遺伝子操作による品種改良では、単収の増加よりも作物のストレス耐性を伸ばすほうに注力されてきたことも理由としている。

ところが、最近になってこのような穀物の収量ポテンシャルの限界を技術的に克服できる可能性があることを示す成果があらわれてきた。例えば、米に関しては 2004 年にイネの全ゲノムの完全解読が終了し、耐病性、多収性、耐冷性などの量的形質に関わる QTL 遺伝子の解析と単離が可能となったことから、収量が約 30% 増加し草丈が 80% に減少したコシヒカリ品種が作られた。さらなる収量の増加も理論的には可能であり、他のイネ科作物への応用も期待されている (松岡, 2008)²⁴⁾。また、上記の米や小麦の矮

性育種の限界を見据えて、中国の瀋陽農業大学では新しい草型をもつ超多収イネ (ジャポニカ) の開発に成功した。食味を保ちながら玄米収量は日本のイネ品種の約 1.8 倍もある (谷坂, 2008)²⁵⁾。さらに、農業・食品産業技術総合研究機構 (2008)²⁶⁾ は、一時期わが国の作付面積で首位の品種であった「日本晴」よりも粗玄米重で 35 ~ 40% 多収の飼料米の開発に成功している。

このような状況から、米に関しては長期的には既存の多収品種の単収の 1.5 倍程度の増加は実現できる可能性が高いと考えられる。また、イネ科の作物については米の品種改良の知見が応用できることから、本研究では単収の上限値の計算において、穀物に関しては超多収ケースで既存の多収品種の単作収量に係数 1.5 (これを GM 作物係数 (*GM Crop*) と表記) を乗じることとした。また、大豆についても穀物に比べて受光態勢の改良が不十分であり、品種改良による収量ポテンシャル向上の余地が大きいと考えられているため²⁰⁾、同様に超多収ケースで係数 1.5 を乗じることとした。バイオテクノロジーの応用は穀物以外の農作物についても可能であるが、特に研究開発投資が促進されると思われる穀物と大豆にのみを対象とした。その他の作物の GM 作物係数は 1.0 とした。

4.3 単収の年増加量

以上のように、単収の上限値は栽培環境や農業技術レベルによって決まり、その根拠を明示して設定できた。これに対して、単収の年増加量は、基本的には農業技術の開発状況と普及に要する時間によって決まるが、それらは将来の社会・経済状況や農業政策に大きく依存するため、その見通しを明確に説明することは難しい。そこで、本研究では 20

表 6 穀物生産量上位 20 カ国 (2000 年) の作付集約度係数

No.	国名	作付集約度係数	No.	国名	作付集約度係数
1	中国	1.22	11	アルゼンチン	1.27
2	米国	1.16	12	ベトナム	1.69
3	インド	1.28	13	オーストラリア	1.27
4	フランス	1.01	14	トルコ	1.07
5	ロシア	1.01	15	タイ	1.65
6	インドネシア	1.76	16	パキスタン	1.28
7	カナダ	1.01	17	メキシコ	1.51
8	ブラジル	1.54	18	スペイン	1.05
9	ドイツ	1.00	19	英国	1.01
10	バングラデシュ	1.56	20	ウクライナ	1.01

世紀後半において実現された大幅な作物の単収の年あたりの増加のトレンドが、今世紀においても維持されるケースを上限として設定し、それに増加のペースが半減するケースを加えて2ケースを設定した。具体的な計算方法については、FAOSTATの地域分類にしたがって、世界を先進工業国、市場経済移行国、開発途上国に分類し、それぞれの地域の単収の1961年から1965年の5年平均値と2000年から2004年の5年平均値から、作物・地域別にこの期間の年増加量（トン/ha/年）の平均値を計算した（表7）。

4.4 主要な農作物の単収の世界平均値のケース設定

世界三大穀物の小麦、とうもろこし、米と大豆の単収の持続的な増加ケース設定について以下に示す。本研究では、式（2）で説明したように、農地必要量の計算において、各国の生産量の世界シェアは予測期間を通して2000年のシェアで固定されることを仮定している。このため、農作物 j の単収（Yield）の世界平均値は、以下の式（7）により算出される。

$$Yield_{World,j}(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{184} \frac{Share_{i,j}(2000)}{Yield_{i,j}(t)}} \quad (7)$$

式（7）から小麦、とうもろこし、米、大豆について単収の世界平均値を計算すると、各作物の単収増加のケースは図11のような推移を示した。例えば、超多収ケースの2050年の平均単収は、2000年の平均単収と比べて、4つの作物でそれぞれ、1.8倍、1.8倍、1.7倍、1.6倍、ま

表7 主要作物の単収の1961年から2004年の年平均増加量（トン/ha/年）

作物	地域	年増加量
小麦	先進工業国	0.041
	市場経済移行国	0.029
	開発途上国	0.046
とうもろこし	先進工業国	0.120
	市場経済移行国	0.038
	開発途上国	0.047
米	先進工業国	0.051
	市場経済移行国	0.017
	開発途上国	0.050
大豆	先進工業国	0.024
	市場経済移行国	0.022
	開発途上国	0.035

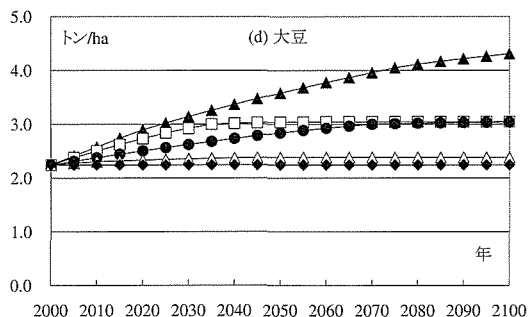
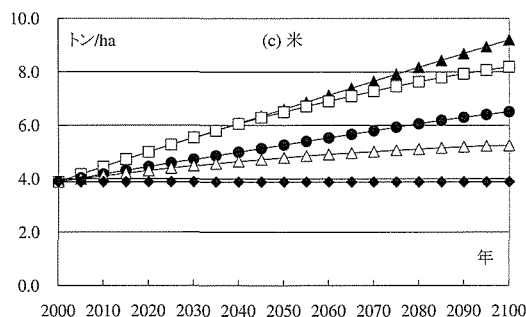
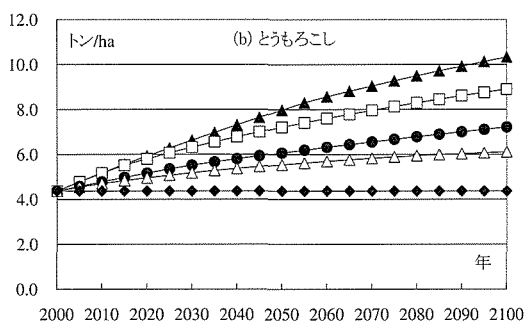
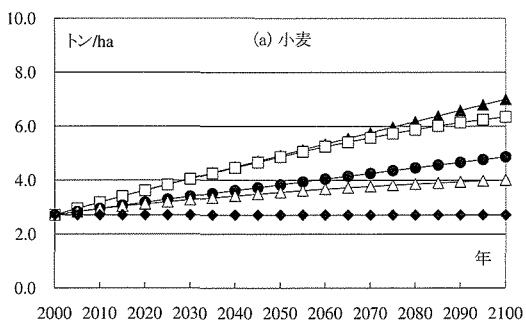


図11 主要作物の単収の世界平均値の推移
（▲単収_超多収，□単収_高位，●単収_中位，△単収_低位，◆単収_2000年レベル）

た、2100年の平均単収は、それぞれ、2.6倍、2.4倍、2.4倍、1.9倍となっている。なお、FAOでは開発途上国における穀物の単収は、2050年には現在の2.7t/haから3.8t/ha(1.4倍)に増加すると予測しており(IPCC 2007²⁷⁾、FAO 2005²⁸⁾)、この値は、本研究のケース設定のほぼ中位ケースの単収の伸びに相当する。

5. 世界全体の農地必要量の推計

5.1 SRES シナリオにおける世界全体の農地必要量の推移

次に、世界全体の農地必要量の推計結果について述べる。

前掲の式(1)から式(3)を用いて、GAEZ分析の対象158カ国、23作物については、表3の5つのケースにしたがって単収が増加し、その他の国、作物については予測期間を通して2000年の単収が維持されると仮定して、2100年までの世界全体の農地必要量を計算した。また、2000年の単収がすでに各ケースの単収の上限値を超えている場合には、予測期間を通して2000年の単収が維持されると仮定した。なお、GAEZ分析の対象23作物の収穫面積が本研究の対象作物54品目の収穫面積に占める割合は、FAOSTATのデータによると2000年

には81%であった。

世界全体の農地必要量の推計結果を図12に示す。ここでは、図3(a)に示した変動係数が推計値の場合の農地必要量の推計結果について述べるが、図3(b)に示したように、変動係数の低下により図12の推計結果は減少する可能性がある。

図12をみると、単収が2000年レベルから増加しないケースの農地必要量が最も大きく、超多収品種が普及するケースの農地必要量が最も少ない結果となっている。もし本研究で想定したように、長期的にみて農作物の単収が2000年のレベルを下回ることがなく、また年増加量が過去のトレンドより大きくなることはないと考えることが妥当ならば、世界全体の農地必要量はこの2つのケースの推計結果の範囲内を推移するだろう。

これらの単収の増加が最大と最少の2つのケースについて、世界全体の農地必要量の2100年までの最大値とその時期についてみると、A1シナリオではそれぞれ19億2,000万ヘクタール(2050年)、14億4,600万ヘクタール(2030年)、A2シナリオでは33億4,800万ヘクタール(2100年)、19億9,900万ヘクタール(2100年)、B1シナリオでは19億3,200万ヘクタール(2045年)、14億2,300万ヘクタール(2040年)、B2シナリオでは22億7,900万ヘクタール

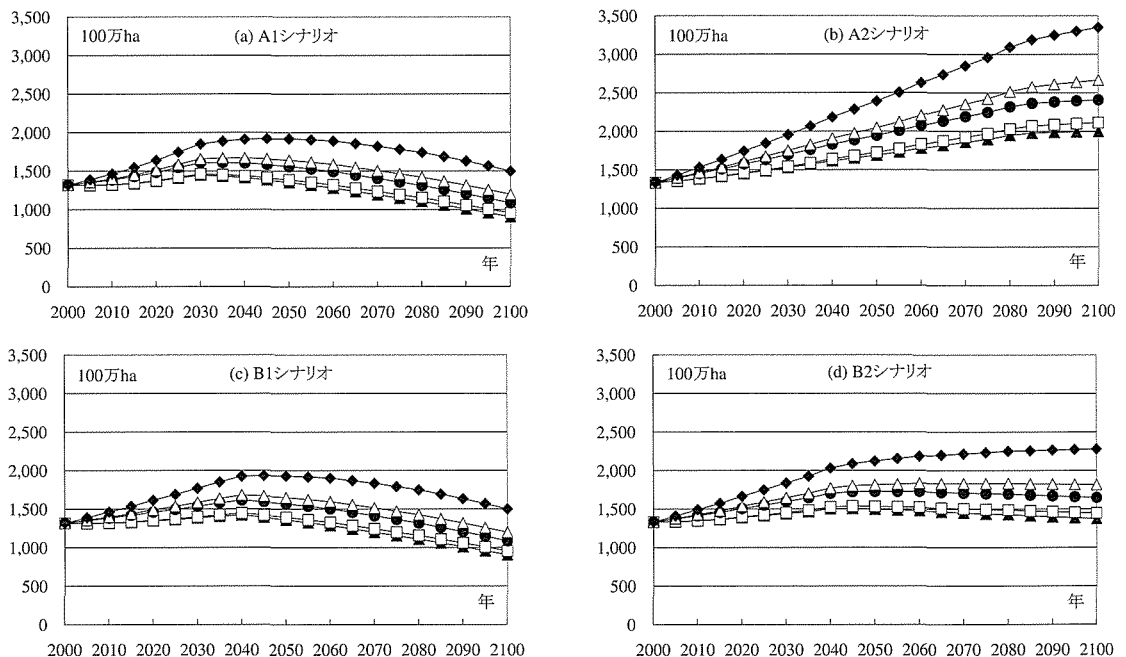


図12 SRES シナリオにおける世界全体の農地必要量の推移
(▲単収_超多収, □単収_高位, ●単収_中位, △単収_低位, ◆単収_2000年レベル)

ル(2100年), 15億600万ヘクタール(2045年)となった。このように, どのような単収の持続的な増加が実現するかによって, 農地必要量のピークとその時期が大きく異なってくることがわかった。

それでは, SRESの4つの社会・経済シナリオにおいて, どのような単収の増加ケースが実現する可能性が高いかについて考えると, 第4.1節で述べたように経済志向のA1, A2シナリオでは, 遺伝子組換え作物の積極的な導入により単収の増加が想定されるが, 環境志向のB1, B2シナリオでは, 遺伝子組換え作物の受け入れに対する社会の抵抗が大きく, また環境汚染の懸念から化学肥料の消費も押さえられるため超多収や高位ケースが実現する可能性は低いと考えられる。また, 地球主義志向のシナリオ(1)のほうが, 地域主義志向のシナリオ(2)に比べて国際的な技術移転が促進されるため, 単収の年増加量が大きくなるケースが実現する可能性が高いといえるだろう。

5.2 世界人口と農地必要量の関係

第3節において, 世界全体の農地必要量の主要な変動要因が世界人口の変化であることが示された。そこで, 世界全体の農地必要量を世界人口との関係で整理すると図13(a)のようになった。図13(a)は図12のデータを用いて, 世界人口60億人から150億人までの世界全体の農地必要量を5億人ごとに内挿により求めて, その範囲とケースの中央値を示したものである。ただし, SRESの4つの社会・経済シナリオにおいて世界人口のピークが異なるため, 世界人口が60億人から85億人の範囲については, A1からB2までの4シナリオに単収増加5ケースを乗じた20ケース, 90億人から100億人の範囲については, A2, B2の2シナリオに単収増加5ケースを乗じた10ケース, 105億人から150億人の範囲については, A2シナリオのみの5ケースのデータを用いて, 各世界人口レベルにおける世界全体の

農地必要量の最大値と最小値およびケースの中央値を示している。また, A1, B1シナリオについては, 21世紀後半の人口減少局面におけるデータは除いている。

図13(a)からわかるように, 世界人口のレベルが同じであっても社会・経済シナリオと単収レベルの想定が異なるため, 世界全体の農地必要量はある幅を持って示されている。

図13(a)から, 例えば, 世界人口70億人を養うために必要な世界全体の農地面積は, 15億1,500万ヘクタールから13億2,100万ヘクタールの範囲にあり, 90億人では20億4,800万ヘクタールから15億300万ヘクタール, 110億人では23億2,800万ヘクタールから16億6,600万ヘクタールの範囲にあることがわかる。

また, 本研究で想定したシナリオと単収のケース設定の範囲において, 最大どれだけの農地が必要になるかについてみると, A2シナリオの2100年における33億4,800万ヘクタールになる。しかしながら, SRESシナリオで想定されている世界人口の増加については, Fischerら(2005)²⁹⁾は, A2シナリオの人口増加率は高すぎるため, 最悪のシナリオとして農業への影響を見るべきだとしている。また, Grublerら(2007)³⁰⁾は, 同じ理由からA2シナリオの2100年の世界人口が150億人から120億人になるように増加率を下方修正して, 地域, 国ごとのダウンスケーリングシナリオ(A2r)を作成している。したがって, SRESシナリオで想定されている世界人口を最大120億人として補正すると, 最大の農地必要量は26億6,900万ヘクタールになる。

一方で, 図13(b)に示すように, 変動係数が最低値(0.2)の場合について同様の分析を行ったところ, 世界全体の農地必要量は図13(a)に比べて減少し, 世界人口70億人では12億9,700万ヘクタールから11億3,700万ヘクタール, 90億人では

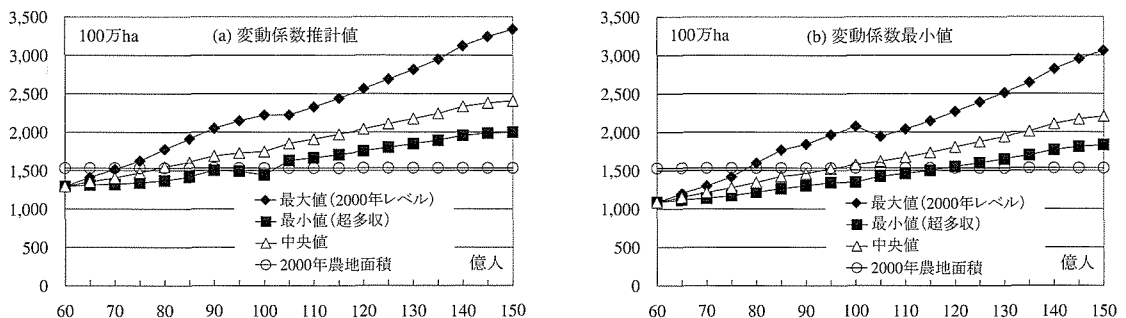


図13 世界人口と農地必要量の関係 (A1, B1シナリオの2050年以降の人口減少期間を除く)

18 億 4,200 万ヘクタールから 13 億 100 万ヘクタール、110 億人では 20 億 3,800 万ヘクタールから 14 億 5,900 万ヘクタールの範囲にあることがわかった。したがって、変動係数に関する不確実性を考慮すると、世界全体の農地必要量は最大で図 13 (b) の範囲まで減少する可能性があることが推察された。

5.3 地球規模での農地拡大の可能性

最後に、既存研究から世界全体の農地の拡大余地について参照し、本研究で推計した世界全体の農地必要量との関係を考える。

表 8 に示すように、2000 年の世界全体の土地利用についてみると、耕作地および永年作物地が 15 億 3,300 万ヘクタール、永年採草・放牧地が 34 億 4,200 万ヘクタール、森林が 54 億 3,700 万ヘクタールであった。したがって、世界人口を最大 120 億人として下方補正した場合でも、農地必要量は最大 26 億 6,900 万ヘクタール必要になる考えられるため、2000 年の農地面積から最大 11 億 3600 万ヘクタールの追加の農地が必要になる。

一方で、世界全体の農地の拡大の可能性についてみると、GAEZ 分析によれば、表 8 に示すように世界全体の降雨依存型作物の生産適地は適正分類が上位 3 分類 (VS から MS) の場合で 36 億 5,100 万ヘクタールあるとされている (FAO, 2003)³²⁾。さらに、上位 4 分類 (VS から mS) では 41 億 8,800 万ヘクタールまで拡大する。また、川島 (2008)³³⁾ によると、森林を破壊することにつながるが、南米とサハラ以南アフリカを中心に 11 億ヘクタールほどの農地の造成が可能であるとされる。

このように農地の拡張の余地は、世界全体の農地

必要量の推計結果と比較しても十分にあると考えられる。しかしながら、森林伐採による農地の拡大は生物多様性を消失させ、同時に蓄積されていた炭素を放出して大気中の二酸化炭素濃度を上昇させる原因となる。また、アマゾンの熱帯雨林を大規模に伐採した場合、地域の気候が大きく変化してブラジル中央の農業地帯を潤す水循環システムを衰退させてしまう可能性が報告されているため、農業自体の長期的な持続可能性についても疑問が残る³⁴⁾。

加えて、食料生産のための農地は長期的に他の土地利用との競合にさらされる。例えば SRES のマーカーシナリオでは、エネルギーバイオマスの生産のための土地が、今世紀後半に最大 2 億 9,400 万ヘクタール (B1 シナリオ) から 5 億 8,000 万ヘクタール (A1 シナリオ) に拡大すると想定されている¹⁾。また、開発途上国においては、経済発展により住宅や工場、商業施設、自動車の普及による道路や駐車場の拡大などにより、既存の農地がこれらの用途に転用されることは日本をはじめ先進国の経験から明らかである。

したがって、このような余剰地がすべて食料生産のために利用できることはないだろう。Young (1999)³⁵⁾ によれば、農地以外の土地利用を含めて考えた場合、既存研究における途上国の耕作可能地の推計は過大評価であるとし、土地残余 50% を持つ地域では実際の耕作可能な面積は 3% から 25% が妥当であるとしている。

5.4 長期的な栽培環境の変化による農作物の単収への影響

本研究では農作物の栽培環境の長期的な変化に

表 8 2000 年の土地利用および降雨依存型作物の生産適地面積

100 万 ha	土地面積 ^{a)}	耕作地および 永年作物地 ^{a)}	永年採草・ 放牧地 ^{a)}	森林 ^{b)}	その他 ^{c)}	適地 VS ～ mS ^{d)}	適地 VS ～ MS ^{d)}
開発途上国	7,525	888	2,244	2,950	1,443	2,782	2,510
東アジアおよび東南アジア	1,547	249	547	539	212	366	318
南アジア	478	213	49	89	127	220	210
オセアニア	54	1	1	41	11	-	-
ラテンアメリカ・カリブ海	2,008	162	560	1,104	182	1,066	985
近東・北アフリカ	1,198	89	328	92	689	99	67
サハラ以南アフリカ	2,241	173	760	1,085	223	1,031	929
先進工業国	2,262	254	379	977	651	874	700
市場経済移行国	3,135	391	811	1,510	423	497	408
世界	13,004	1,533	3,442	5,437	2,591	4,188	3,651

補注)

a) 土地面積、耕作地および永年作物地、永年採草・放牧地については、FAOSTAT の Web サイトより 2008 年 8 月に入手した。

b) 森林については、FRA2005³¹⁾ より 2000 年の森林および林木地の面積を集計した。

c) その他は、土地面積から a)、b) の面積を除いて求めた。

d) 降雨依存型の作物生産の適地は FAO (2003)³²⁾ の表 4.6 から引用した。

については扱わなかったが、IPCCの第4次報告書の第2作業部会報告書に、気候変動による食料への影響がまとめられている (IPCC, 2007)²⁷⁾。それによると、中緯度及び高緯度地域では、地域平均気温が1℃から3℃の範囲内で上昇すれば大気二酸化炭素濃度の増加と降雨の変化によって作物の収量に若干のプラスの影響があるとされている。また、低緯度地域では、地域平均気温が1℃から2℃の上昇でも主要な穀物の収量にマイナスの影響を及ぼす可能性が高いとされている。全体としては、地域平均気温が1℃から3℃の幅で上昇すると世界の食料生産能力が増加するが、この幅を超えれば減少すると予測された。さらに、これらの平均的な気候の変化による影響とは別に、異常気象の頻度が増加することによって、熱ストレス、干ばつ、洪水などが発生し、食料生産に重大なマイナスの影響をもたらす可能性が高くなることが報告されている。

また、気候変動による淡水資源への影響に関しては、氷河・積雪による水貯留量が減少して河川の流量が低下すること、海面上昇により沿岸地域での淡水量が減少すること、降水強度と降水量変動の増加により多くの地域で洪水および渇水の危険性が増加することが高い確率で予測された。その一方で、世界全体として人口増加と富裕層の増加のために、今後数十年にわたって水需要が増加する可能性が高く、地域的には、気候変動に起因する灌漑水需要の大幅な増加が予測されている (IPCC, 2007)²⁷⁾。これらのことから、農作物の単収を持続的に増加させていくためには、灌漑水の効率的な利用により淡水資源の制約を緩和させる対策が必要不可欠になると考えられる。

6. 結 論

以上のように、気候変動により長期的に作物の栽培環境がより厳しくなると考えた場合には、20世紀後半に達成した大幅な単収の増加を期待することはできないかもしれない。本研究の結果から、現在の農地面積において扶養できる世界人口は、単収が1961年から2004年の年増加量の半分のペースに減少した場合には80億人、また単収が2000年レベルから増加しない最も厳しいケースでは70億人が限度である。

したがって、農地拡大による森林破壊を引き起こすことなしに飢餓問題を解決していくためには、食料の供給サイドにおいては、農作物の単収を増加させるための技術開発への投資を促進し、食料生産のための土地利用を優先させる対策をとるとともに、食料需要サイドにおいては、開発途上国における国

内の食料配分の不平等を改善し、世界人口を早期に安定化させるための政策を促進する必要があるといえる。

なお、本研究では、気候変動影響や水資源の制約など、農作物の栽培環境の長期的な変化を考慮した分析は行わなかった。また、農作物の生産に関するグローバルな地理的分布の変化の見通しについても十分な解析を行っていない。これらの分析については今後の検討課題としたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、独立行政法人国立環境研究所温暖化リスク評価研究室の高橋潔主任研究員、および増富祐司 NIES ポスドクフェローから大変有益なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000) Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, London.
- 2) 棟居洋介・増井利彦 (2006) IPCC 排出シナリオ (SRES) にもとづいた世界の食事エネルギー必要量の長期推計. 環境科学会誌, 19 (6), 477-493.
- 3) 棟居洋介・増井利彦 (2008) IPCC 排出シナリオ (SRES) にもとづいた世界の食料必要量の長期推計. 環境科学会誌, 21 (1), 63-88.
- 4) Smil, V. (2001) Feeding the world. The MIT Press, Cambridge, 23-64.
- 5) J. Wolf, P.S. Bindraban, J.C. Luijten, L.M. Vleeshouwers. (2003) Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. Agricultural Systems 76, 841-861.
- 6) Fischer, G., et al. (2002) Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results. IIASA RR-02-02, Laxenburg, Austria.
- 7) FAO (2008) FAOSTAT. FAO, Rome. URL: <http://faostat.fao.org/>.
- 8) FAO (2008) FAOSTAT. Glossary (List). FAO, Rome. URL: <http://faostat.fao.org/site/375/default.aspx>.
- 9) 国際食糧農業協会 (2003) 「2002年版 FAO 農業生産年報 1998-2000」農山漁村文化協会.
- 10) P.W. Gerbens-Leenes, S. Nonhebel, W.P.M.F. Ivens. (2002a) A method to determine land requirements relating to food consumption patterns. Agriculture, Ecosystems and Environment 90, 47-58.
- 11) P.W. Gerbens-Leenes, S. Nonhebel. (2002b) Consumption patterns and their effects on land

- required for food. *Ecological Economics* 42, 185-199.
- 12) P.W. Gerbens-Leenes, S. Nonhebel. (2005) Food and land use. The influence of consumption patterns on the use of agricultural resources. *Appetite* 45, 24-31.
 - 13) FAO (2006) The state of food insecurity in the world 2006. FAO, Rome.
 - 14) Ewert, F, et al. (2005) Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107, 101-116.
 - 15) 大杉 立 (2006) 「第 3 章 作物の生産性研究と遺伝子組換え作物の圃場試験」日本農学会編『遺伝子組換え作物の研究』養賢堂.
 - 16) Fischer, G., et al. (2006) Agro-ecological zones assessments. IIASA RP-06-03, Laxenburg, Austria.
 - 17) FAO (1993) Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning, a case study of Kenya, resources database and land productivity, technical annex 4, crop productivity. FAO, Rome.
 - 18) R. Thompson, S. Campbell (2005) Preliminary feasibility of ethanol production from sugar beet in NE Tasmania. RIRDC Publication No 05/012, Kingston, Australia.
 - 19) Duwayri, M., Tran, D. & Nguyen, V. 1999. Reflections on yield gaps in rice production. *International Rice Commission Newsletter*, 48: 13-26. Rome, FAO.
 - 20) 国分牧衛 (2007) 「第 3 章 作物の収量ポテンシャル」巽二郎編著『地球環境と作物』博友社.
 - 21) 白岩立彦 (2008) 「第 3 章 作物収量の過去・現在・未来」山末祐二編『作物生産の未来を拓く』京都大学学術出版会.
 - 22) Brown, L.R. (2004) *Outgrowing the Earth: The Food Security Challenge in an Age of Falling Water Tables and Rising Temperatures*. W.W. Norton & Company, Inc., New York, U.S.A.
 - 23) Cassman, K.G. (1999) Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *PNAS* 96, 5952-5959.
 - 24) 松岡 信 (2008) 「食料問題の解決に向けたゲノム育種の可能性 農業形質を制御する QTL 遺伝子をどのように単離し利用するのか」食料・生物生産研究連携群シンポジウム資料, 科学技術振興機構.
 - 25) 谷坂隆俊 (2008) 「第 4 章 人類の生存基盤を支える品種改良」山末祐二編『作物生産の未来を拓く』京都大学学術出版会.
 - 26) 農業・食品産業技術総合研究機構 (2008) 「飼料米・稲発酵粗飼料向け水稻新品種モミロマンを育成～玄米収量 800kg/10a を実現～」独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構プレスリリース.
 - 27) IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press, London.
 - 28) FAO (2005) *World agriculture: towards 2030/2050. Interim report*, Global Perspective Studies Unit, FAO, Rome.
 - 29) Fischer, G., M. Shah, F.N. Tubiello, and H. van Velhuizen (2005) Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Phil. Trans. Royal. Soc. B*, 360, 2067-2073, doi: 10. 1098/rstb. 2005. 1744.
 - 30) Grubler, A, et al. (2007) Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. *Technological Forecasting & Social Change*. 74, 980-1029.
 - 31) FAO (2008) *Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO, Rome.
 - 32) FAO (2003) *World agriculture: towards 2015/2030, An FAO perspective*. p129, FAO, Rome.
 - 33) 川島博之 (2008) 「世界の食料生産とバイオマスエネルギー 2050 年の展望」東京大学出版会.
 - 34) Laurance, W.F. et al. (2004) Deforestation in Amazonia. *Science* 304: 1109.
 - 35) Young, A. (1999) Is there really spare land? A critique of estimates of available cultivable land in developing countries. *Environment, Development and Sustainability*, 1: 3-18.

Variation Factors of Global Cropland Requirements from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES)

Yosuke MUNESUE * and Toshihiko MASUI **

(* Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology,
W9-100, 2-12-1 Ohkayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

** National Institute for Environmental Studies, Social &
Environmental Systems Division, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506 Japan)

Abstract

Global cropland requirements have been projected from 2000 to 2100 based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emissions Scenarios (SRES). The future of global cropland requirements will depend on both global food requirements and the productivity of crops. Global food requirements are estimated so that the proportion of undernourished in total population may be below 2.5 % throughout the projection period for each of 184 countries. With regard to the productivity of crops, several scenarios of future technological changes are modeled to narrow the gap between actual yield and land potential evaluated in the global agro-ecological zones (GAEZ) study.

The following results have been shown from these analyses. 1) The primary factor of variation in future global cropland requirements will be the change of world population. 2) Global cropland requirements will amount to a maximum of 2,669 million ha by 2100 at the level of 12 billion world population. 3) There exists sufficient suitable land for agricultural production in the world, which is much larger than the maximum requirements of cropland. However, it is thought that the large expansion of cropland will be subject to restraints by the preservation of forest land and competition with other land uses. 4) Crop yields can be technologically increased to about 1.5 times as much as those of existing high yield varieties by the introduction of super-high yielding crops. Consequently, global cropland requirements may be sharply decreased. However, it is expected that steep increase in crop yields, which have been attained in the second half of the 20th century, will not be realized in this century due to economical restrictions, climate change, and the finite nature of fresh water resources. 5) The number of world population which can be fed within the cropland area in 2000 (1,533 million ha) is approximately 8 billion assuming that future average annual increases in crop productivity equal to the half of those attained between 1961 and 2004. Moreover, in the severest case that crop yields do not increase from 2000 levels, only 7 billion people can be supported.

Key Words: emissions scenarios; IPCC SRES; food requirement; cropland requirement; land use.