

食料・バイオ燃料に関わる 将来の土地需要とその抑制策

田村 賢人¹・吉川 直樹²・天野 耕二³・橋本 征二⁴

¹学生会員 立命館大学大学院修士課程学生 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:rv0013ir@ed.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学特任助教 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³正会員 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

⁴正会員 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

近年、食料の需要が増加する一方、農作物を原料とするバイオ燃料の導入が進められ、食料とバイオ燃料の競合が問題となっている。本研究では、IPCCの新しいシナリオ(SSP)に基づき、2010年を基準に2100年までの長期にわたって、食料・バイオ燃料の需要を推計し、その生産に必要な農地面積を推計した。また、これを現在の収穫面積と比較し、農地面積拡大の可能性について考察するとともに、食生活の変化などにより抑制できる農地面積を検討した。その結果、発展途上国の人口増加と経済成長に伴い、2100年までに農地需要量は最大で現在の約1.3倍になると推計され、バイオ燃料用作物に関わる農地需要量は最大で全体の30%を占める結果となった。また、肉の消費量を半減させることで、最大で全体の約15%の農地需要を削減できる結果となった。

Key Words : biomass, food demand, biofuel, land use, SSP

1. はじめに

近年、エネルギー問題、環境問題、地域開発などの観点から、農作物を原料とするバイオ燃料の導入が進められ、需要が増加している。一方、開発途上国における人口増加や経済成長に伴い食料需要も増加しており、バイオ燃料と食料の競合が問題となっている。このようなバイオマス資源の利用の増加は、土地利用の変化、生物多様性の減少、窒素・リンの流出、水利用の増加、気候変動等、様々な環境問題と関連している。土地利用に関しては、現在、世界の62カ国で食料用の農地が土地利用の限界を超えているとされている¹⁾。また、食料に関する世界の農地必要量は、2100年までに最大26億6,900万ヘクタールに達するとも推計されている²⁾。したがって、食料・バイオ燃料の双方を考慮した将来の土地制約について検討しておくことが重要と考えられる。しかしながら、既存の研究¹⁾²⁾³⁾ではバイオ燃料に関して考慮しているものが少なく、バイオ燃料について考慮しているものは、食料の対象品目が少ない等の課題がある。将来の農地の需要量や農地に関わる土地制約を検討するためには、より詳細な推計が必要である。

このようなことから、本研究では、食料とバイオ燃料の両方の需要に関わる世界の農地必要量を推計し、農地面積拡大の可能性について考察するとともに、食生活の変化などにより抑制できる農地面積について検討した。このため、今後の詳細な食料需要を考慮した食料用作物需要量の推計と、今後のバイオ燃料政策を考慮したバイオ燃料用作物需要量の推計を行った。

2. 方法

(1) 推計の枠組み

本研究では、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の人口とGDPに関する新しいシナリオ(Shared Socioeconomic Pathways: SSP)に基づいて2010年から2100年まで5年毎に推計を行った。このシナリオのデータベース⁴⁾では、2010年から2100年までの各国の人口とGDPのシナリオを得ることができる。

ここで、SSPにおける5つのシナリオについて簡単に説明する⁵⁾。新シナリオにおいては、緩和策に対する困難度と適応策に対する困難度の組み合わせで5つのシナ

リオ (SSP1~SSP5) が設定され, SSP1: Sustainability (持続可能), SSP2: Continuation (過去の延長), SSP3: Fragmentation (分断), SSP4: Inequality (格差), SSP5: Conventional Development (在来型発展) の各シナリオが定義されている。SSP1では, 緩和・適応ともに困難性が小さく, 緩和策・適応策の導入が容易な世界である。途上国の教育水準の向上により, 人口増加がとまり, 経済発展も進み, 貧困の解消が進む。それに対して, SSP3は, 緩和策・適応策ともに導入には大きな困難が伴う社会である。教育水準の向上は低く, 途上国では人口増加が止まらず, 所得は増加しない。SSP2は, 過去の延長上にあるシナリオであり, 多くの世界では発展が進むが, 一部の国は例外となる。人口増加, 所得の増加は中庸的な世界であり, SSP1とSSP3の中間的な要素を持つ。SSP4は, 緩和策の困難度が小さく, 適応策の困難度が大きい世界である。先進国ではますます富を得るが, 途上国では経済発展が進まない。また, SSP5は, 緩和策の困難度が大きく, 適応策の困難度が小さい世界で, 先進国, 途上国ともに経済発展は進む。

以上の人口とGDPのシナリオをもとに, 食料用作物需要量に関しては, 棟居ら⁹⁾を参考に, 世界の187の国・地域を対象として, 世界食糧農業機関 (FAO) の食料需給表⁷⁾に記載されている96品目に関連する作物需要量を推計した。また, バイオ燃料に関しては, 吉本ら⁸⁾を参考に, 自動車燃料として使用されるバイオエタノールを対象として推計した。本研究の推計フローを図-1に示す。

(2) 食料用作物需要量の推計

a) 食料消費パターンの推計

はじめに, 世界各国の食料消費パターンについて, 各国の1人あたり購買力平価GDP⁹⁾に基づき推計した。各国の各対象品目の1人1日あたり摂取量が経済の成長とともに下記の式(1)にしたがって現在の先進国の平均 (これを基準国の食料消費パターンとする) に漸近するモデルを仮定した。イスラム教国は, 豚肉やアルコールの摂取量などで食生活の違いがあることから, 別に所得の高い国の平均を基準国の食料消費パターンとして推計した。

$$CAL_{k,i}(t+1) = CAL_{k,i}(t) + \alpha_{cal,i} \frac{GDP_{PC,k}(t+1) - GDP_{PC,k}(t)}{GDP_{PC,k}(t)} \quad (1)$$

ここで, $CAL_{k,i}(t)$ は k 国の t 期における食料品目 i の1人1日あたりエネルギー摂取量 (kcal/人/日), $GDP_{PC,k}(t)$ は k 国の t 期における購買力平価1人あたりGDP (2005年国際ドル) を表す。(1)式において, 各食料品目 i の1人1日あたりエネルギー摂取量が基準国のレベルに達した場合には, その期以降において各品目の1人1日あたりエネルギー摂取量は固定した。また, 基準年において各食料品目の1人1日あたりエネルギー摂取が, 既に基準国の値を超えている場合は, 基準年の値で固定した。係数

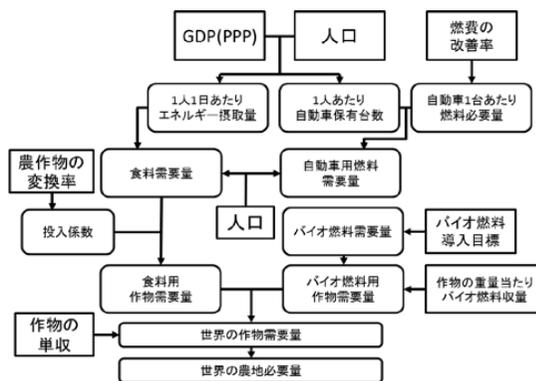


図-1 本研究の推計フロー

$\alpha_{CAL,i}$ については, 多くの食品において1人1日あたりエネルギー摂取量は購買力平価1人あたりGDPが低いレベルにおいて大きく変化し, 購買力平価1人あたりGDPの増加にともない平坦化する傾向が見られるため購買力平価1人あたりGDPと各食料品目の1人1日あたり摂取量との間に対数関数を仮定し, 回帰分析を行った結果を用いた。

次に, 推計した各食料品目の1人1日あたりエネルギー摂取量から, k 国の t 期における各食料品目 i のシェア $S_{k,i}(t)$ を次式より導出した。

$$S_{k,i}(t) = \frac{CAL_{k,i}(t)}{\sum_j CAL_{k,j}(t)} \quad (2)$$

b) 食料用作物需要量の推計

続いて, 各国各期における最終消費レベルの食料需要量を求めた。最終消費レベルの食料需要量とは, 食事において直接摂取する食料の需要量である。 k 国の期における最終消費レベルの1人1日あたりエネルギー消費量の合計 $CAL_{k,total}(t)$ を食品別の1人1日あたり需要量と同様に下記の式で求めた。

$$CAL_{k,total}(t) = \alpha_1 \ln GDP_{PC,k}(t) + \beta_1 \quad (3)$$

ここで, α_1, β_1 はパラメータを表す。なお, 上記による基準年の推計値が基準国の1人1日あたりエネルギー消費量を下回る場合には基準年の値とし, 基準年において既に基準国の値を超えている場合には基準年で固定した。品目別のエネルギー必要量の推計と同様にイスラム教国は別に回帰分析を行った。

次に, 式(3)で推計した値に, 式(2)で求めた各食料品目のシェアを乗じることにより, k 国の期における食料品目 i の1人1日あたりエネルギー消費量 $rCAL_{k,i}(t)$ を算出した。

$$rCAL_{k,i}(t) = S_{k,i}(t) \cdot CAL_{k,total}(t) \quad (4)$$

1人1日あたりのエネルギー摂取量が異なれば, 食料消費

パターンも変化すると考えられるが、ここではa)で求めた食料消費パターンをそのまま適用した。

さらに、食料品目ごとに係数を乗じ、カロリーから重量単位へ変換した。

最後に、最終消費レベルの食料需要量から、間接的な作物の消費を含めた一次生産レベルの作物需要量、すなわち、食料用作物需要量を求めた。畜産物、食料加工品へ投入された作物については、国際貿易分析プロジェクトのデータベース（GTAP）¹⁰⁾における産業部門間の取引額とFAOの「農作物の技術変換率」報告書¹¹⁾より投入係数を求め、最終消費レベルでの食料需要量から一次生産レベルでの食料需要量を推計した。

(3) バイオ燃料用作物需要量

a) 自動車用燃料需要量の推計

k国^kのt期における1人あたり自動車保有台数 $MV_k(t)$ (台/人) を、購買力平価1人あたりGDPを説明変数として、次式の線形単回帰モデルで推計した。

$$MV_k(t) = \alpha_2 \cdot \ln GDP_{PC,k}(t) + \beta_2 \quad (5)$$

ここで、 α_2 、 β_2 はパラメータを表す。ただし、推計期間において1人あたり自動車保有台数が基準年の値を下回る場合は、基準年の値を用いた。また、推計期間を通じて、アメリカ合衆国の値を最大とした。自動車保有台数については、1996年から2005年の各国のデータ¹²⁾⁻¹⁶⁾を用いたが、十分なデータがない国に関しては、データの揃っている国の世界平均による回帰分析の結果を用いた。

次に、1年ごとの燃費改善率が一定であると仮定して、自動車1台あたり燃料消費量を、次式に示す指数関数型の単回帰モデルで推計し、燃費の改善率を設定した。

$$DFV_{World}(t) = \alpha_3 \cdot \exp(\beta_3 \cdot t) \quad (6)$$

ここで、 $DFV_{World}(t)$ はt年の世界全体における自動車1台あたり燃料消費量 (GJ/台)、 α_3 、 β_3 はパラメータを表している。回帰分析には、1996年から2005年までの10年間の世界全体における燃料消費量のデータ^{17,18)}を用いた。

さらに、将来の1人あたり自動車保有台数、自動車1台あたり燃料需要量、自動車の燃費改善率、人口を用いて、下記の式のように将来の自動車用燃料需要量を算出した。

$$QDFV_k(t) = MV_k(t) \cdot \exp(-\beta_3) \cdot DFV_k(t-1) \cdot P_k(t) \quad (7)$$

ここで、 $QDFV_k(t)$ はk国におけるt年の自動車用燃料需要量 (GJ)、 $DFV_k(t-1)$ はk国における(t-1)年の自動車1台あたりの燃料需要量 (GJ/台)、 $P_k(t)$ はk国におけるt年の人口の推計値を表す。基準年における自動車1台あたり燃料消費量は地域ごとに設定をした。

b) バイオ燃料需要量の推計

前項a)にて求めた自動車用燃料需要量に各国のバイオ

表-1 各地域におけるバイオエタノール原料作物²⁰⁾

地域	原料作物	地域	原料作物
オセアニア	さとうきび	北米	とうもろこし
中国	とうもろこし、キャッサバ、ばいしよ、かんしよ、さとうきび	西ヨーロッパ	小麦、大麦、甜菜
		東ヨーロッパ	小麦、ばいしよ
日本	米、さとうきび	旧ソビエト連邦	小麦、大麦
その他東・東南アジア	キャッサバ、さとうきび	その他ヨーロッパ	小麦、大麦、甜菜、ばいしよ
南アジア	さとうきび	中東	とうもろこし
中南米	さとうきび	アフリカ	とうもろこし

表-2 原料作物別重量あたりバイオエタノール収量²⁰⁾

原料作物	収量(kL/t)	原料作物	収量(kL/t)
米	0.303	ばいしよ	0.087
小麦	0.303	さつまいも	0.129
とうもろこし	0.370	キャッサバ	0.180
大麦	0.333	さとうきび	0.070
ソルガム	0.326	甜菜	0.083

燃料導入目標を乗ずることにより、バイオ燃料需要量を算出した。

当然のことながら、2100年までの各国の詳細なバイオ燃料の導入目標は存在しないため、本研究では、多くの国が2030年までに掲げると考えられる導入目標として、仮に20%^{18,19)}を世界一律に設定した。この設定については、今後いくつかのシナリオ分析を行っていく必要がある。

c) バイオ燃料用作物需要量の推計

地域における現状のバイオエタノール用作物の利用状況を考慮して、各地域におけるバイオ燃料原料作物を表-1のように設定する²⁰⁾。なお、複数の原料作物を設定した地域では、バイオ燃料導入量を均等に配分し、原料作物の推計を行った。次に、各地域におけるバイオ燃料（バイオエタノール）導入量を、表-2に示す各原料作物の重量当たりのバイオエタノール収量²⁰⁾で除すことで、バイオエタノール用作物需要量を算出した。

(4) 農地需要量の推計

前節(2)、(3)で求めた作物需要量を各作物の単位面積あたりの収穫量 (単収) で除すことにより、各国の農地需要量を算出した。各作物の単収に関しては、FAOにおける2009年から2011年までの各年の単収の世界平均を用いた²⁾。将来の単収に関しては、単収の増加を考慮するため、直線型の時系列単回帰分析を行い設定した。ただし、回帰モデルの決定係数の値が0.7以上の回帰式を

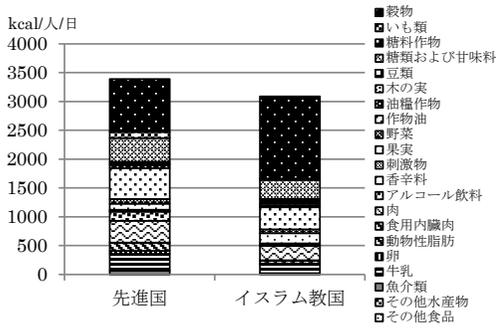


図2 基準国における食料消費パターン

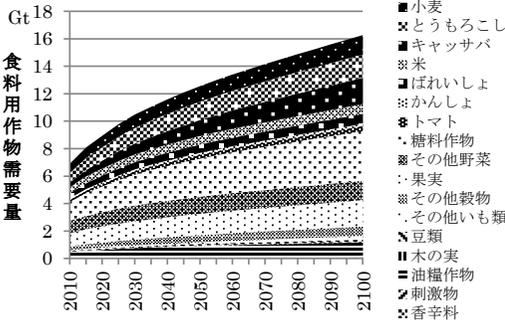


図3 食料作物需要量

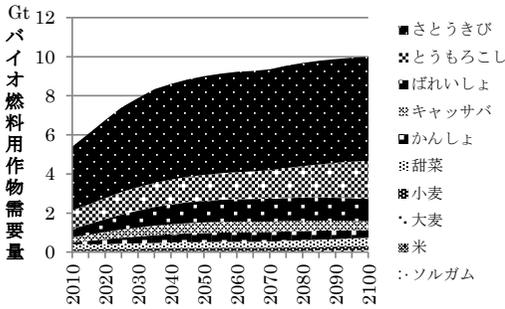


図4 バイオ燃料作物需要量

単収の増加量の決定に用い、決定係数の値が0.7未満の作物については単収の増加はしないものとした。

3. 結果と考察

(1) 食料作物需要量

a) 食料消費パターン

図-2に基準国における食料消費パターンを示す。イスラム教国に比べて先進国の方が、最終消費レベルのエネルギー消費量の総量が多いことがわかる。食品分類別にみると、イスラム教国は穀物の摂取エネルギーが大きく、いも類やアルコール飲料の摂取エネルギーが小さかった。

b) 食料作物需要量

図-3に世界全体の食料作物需要量を示す。食料作物

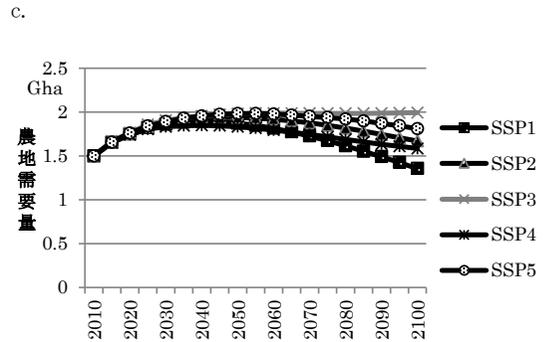
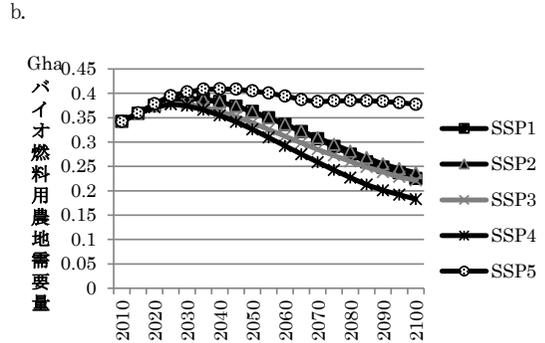
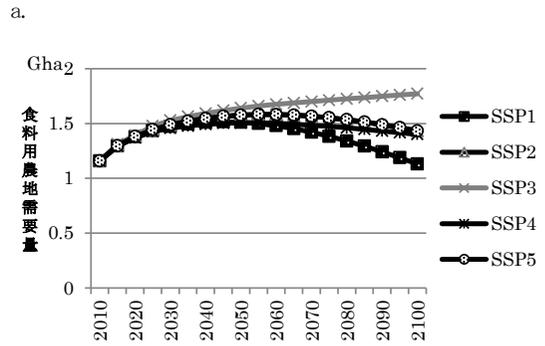


図5 農地需要量 (a.食料用, b.バイオ燃料用, c.合計)

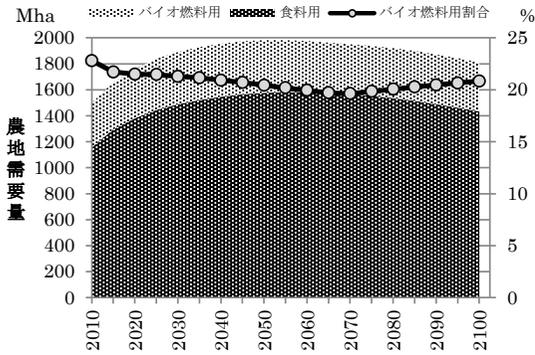
物は人口と購買力平価1人あたりGDPの増加と共に増加し、最大で163億t (SSP3, 2100年) 必要となり、2010年と比べると、2.4倍となる。品目別にみると、小麦やとうもろこしなどの穀物、キャッサバ等のいも類、さとうきび、甜菜を示す糖料作物の需要が大きい。

(2) バイオ燃料作物需要量

回帰分析の結果、世界全体における自動車1台あたり燃料需要量は年率約0.65%ずつ減少する傾向にあることが明らかになった。そこで本研究では、燃費改善率を0.65%に設定した。

次に、図-4に原料作物別のバイオ燃料作物需要量を示す。バイオ燃料作物需要量は最大で、100億t (SSP5,

a.



b.

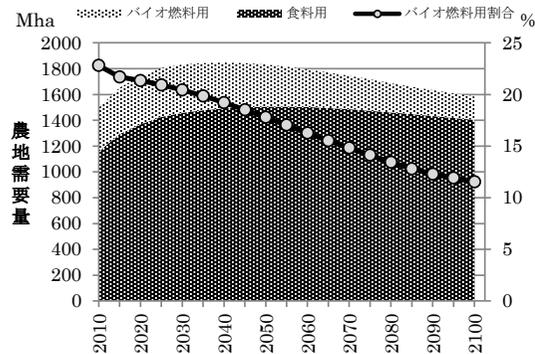


図-6 用途別農地需要量 (a.SSP5, b.SSP4)

2100年)となり、2010年の推計値から比べると、およそ1.9倍の作物が必要となり、その半分以上をさとうきびが占めた。

(3) 農地需要量

a) 農地需要量

図-5に推計された農地需要量を示す。農地需要量は最大で20億haと推計され、2010年の実際の収穫面積である15億8000万haと比べるとおよそ1.3倍となった。作物需要と比べ、農地需要は人口の増加と経済成長による影響が少なかった。これは作物の単収の増加による効果であり、単収増加のシナリオの設定により、農地需要量は変化し得る可能性がある。今回のシナリオでは、どの人口・経済シナリオにおいても2040年までに農地需要量はほぼ最大に達し、その後横ばい、または減少する結果となった。

b) 用途別農地需要量

次に食料用、バイオ燃料用の用途別の農地需要量について考察する。バイオ燃料用の農地需要量は最大で21%程度、最小で11%程度となった。図-6にバイオ燃料用の農地が最大を示したSSP5 (a) と、最少を示したSSP4 (b) における、用途別の農地需要量を示した。バイオ燃料用作物が占める割合が大きく異なる理由として、購買力平

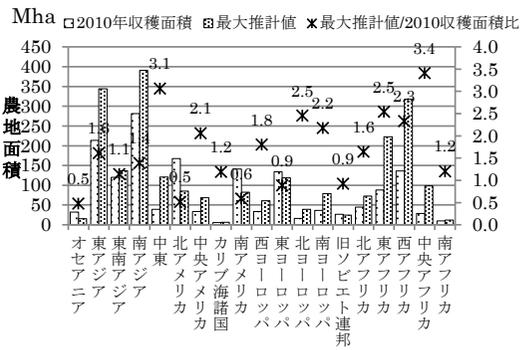


図-7 各地域の推計値と現在の収穫面積の比較

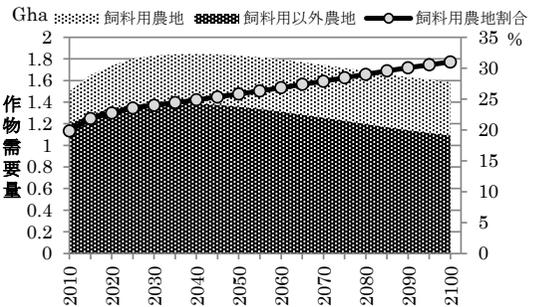


図-8 飼料用作物に関わる農地

価1人あたりGDPの増加による影響が大きいこと考えられる。そのため、経済成長が大きいシナリオではバイオ燃料用作物用の農地需要量が大きくなった。

c) 各地域における要農地拡大面積

図-7に各地域の農地需要量の最大値と2010年における実際の収穫面積を比較した結果を示す。要拡大面積に着目すると、東アジア、南アジア、東アフリカ、西アフリカで多くの土地が必要となる。増加率でみると、中東、中央アフリカで現在の収穫面積の3倍以上の農地が必要であると推計された。一方、オセアニア、北アメリカ、南アメリカでは予測期間を通して農地の拡大の必要はなく、他の地域に輸出等をする余裕があると考えられる。これらは現状でも食料を輸出している地域である。全体として、人口の増加が大きい地域で農地の需要が高まること示唆された。

d) 農地需要量の抑制に関する考察

図-8に飼料に関わる農地需要量に関して分析を行った結果を示す。飼料に関わる農地は、最大で31%程度 (SSP4, 2100年) になると推計された。したがって、仮に、肉食を現在の先進国の半分の水準にした場合、農地需要量は最大で0.6Gha (15%)程度削減されると考えられる。

4. おわりに

本研究では、食料とバイオ燃料に関わる今後の農地需要について、IPCCが作成したSSPにおける5つのシナリオに基づき、2100年までの長期にわたる推計を行った。その結果、農地需要量は最大で現在の約1.3倍まで増加し、そのうちバイオ燃料用の農地は約20%を占めると推計された。地域別にみると、東・南アジアや東・西アフリカで多くの農地が必要になると推計された。飼料用農地は最大で約30%を占め、肉食を半分にするだけで、全体に対して約15%の農地を削減できることが示唆された。

なお、本研究では、食料品やバイオ燃料の輸出入を考慮できておらず、自国で消費される食料、バイオ燃料用作物はすべて国内で生産されることを仮定している。実際には、各地域で消費される食料、バイオ燃料には国外で生産されたものも含まれるため、貿易の考慮が必要である。また、廃棄物発生率や単収の変化率、自動車保有台数、燃費改善率、バイオ燃料導入目標などについての国別の詳細な分析（シナリオ分析を含む）が必要である。さらに、たばこなどの食料・バイオ燃料用以外の作物に関する需要の考慮に入れた分析も今後の課題である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（S-11-2）による成果である。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) M Fader et al.: Spatial decoupling of agricultural production and consumption: qualifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints, *Environmental Research Letters*, 8, 2013.
- 2) 棟居洋介, 増井利彦：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, *環境科学会誌*, 22(2), 73-90, 2009
- 3) 吉本皓亮ら：バイオエタノール需要増を考慮した地球規模の食料需給構造と土地利用変化に関する研究, *環境システム研究論文集*, 36, 255-263, 2008.
- 4) IISAS: SSP Database, <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>, accessed in Jul 2014.
- 5) 藤森真一郎, 増井利彦：将来の気候変化を評価するための温室効果ガス排出経路と社会経済シナリオ, *日本エネルギー学会誌*, 92, 196-203, 2013.
- 6) 棟居洋介, 増井利彦：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, 2008.
- 7) FAO : FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/>, accessed in Jul 2014.
- 8) World Bank : <http://data.worldbank.org/>, accessed in Jun 2014.
- 9) Narayanan, B. et al.: *Global trade, assistance, and production: The GTAP 8 Data Base*, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2012.
- 10) FAO: *Technical conversion factors for agricultural commodities*, 2000.
- 11) U.S. Census Bureau: *Vehicle Inventory and Use Survey*. U.S. Census Bureau, Washington DC.2002.
- 12) United Nations Statistics Division(UNSD); *Statistical Yearbook*. United Nations, New York.2007.
- 13) Directorate-General of Budget, Accounting and Statistics(DGBAS): *Executive Yuan*, Republic of China, 2008.
- 14) Japan Statistics Bureau. *Historical Statistics of Japan*. <http://www.stat.go.jp/english/data/chouki/index.htm>, accessed in Dec 2009.
- 15) Japan Statistics Bureau. *Japan Statistics Yearbook 2010*. <http://www.stat.go.jp/english/data/nenkan/index.htm>, accessed in Dec 2009.
- 16) International Energy Agency(IEA): *Energy Statistics of OECD Countries 1996-2005*, OECD, 1999-2007.
- 17) International Energy Agency(IEA): *Energy Statistics of non-OECD Countries 1996-2005*, OECD, 1999-2007.
- 18) Housed Energy Network(HEDON), *Bioethanol as a major source of energy*, 2009
- 19) United Nations Environmental Programme(UNEP): *Assessing Biofuels*, 33-38, 2009
- 20) 大聖泰弘, 三井物産(株)：*図解バイオエタノール最前線*, 工業調査会, 2004

(2014. 7. 11 受付)

FUTURE DEMAND FOR AGRICULTURAL LAND ASSOCIATED WITH FOOD AND BIOENERGY AND ITS RESTRAINT MEASURES

Kento TAMURA, Naoki YOSHIKAWA, Koji AMANO and Seiji HASHIMOTO

Demand for food has been increasing while biofuel has attracted attentions as carbon neutral energy. Increased demands for these agricultural products will affect on changes in global land use. In this study, we estimated: (1) demand for crops for food and biofuel under new IPCC scenarios (SSP) from 2010 through 2100 and (2) required agricultural land. We then discussed potential expansion of agricultural land and potential reduction of land requirement through change in diet. The results showed that land requirements could reach 1.3 times larger than the present at most through 2100 because of expected increases in per-capita GDP and population in developing countries. Land demand for biofuel was expected to be 30% of the total at most. Halving meat consumption could reduce about 15% of total land requirement at most.