

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改変に関する研究

吉本 皓亮¹・吉川 直樹²・天野 耕二³・島田 幸司⁴

¹京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 Cクラスター)
E-mail: kohsuke.yoshimoto@kx8.ecs.kyoto-u.ac.jp

²修(工) 立命館大学大学院 理工学研究科

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部

⁴正会員 博(工) 立命館大学教授 経済学部

近年、気候変動緩和策やエネルギー自給率向上策として食料資源由来のバイオエタノール利用が進められているが、途上国における食料需要の増加と相まって、食料とバイオ燃料の競合問題が顕在化しつつある。本研究では、社会経済発展やバイオエタノール需要増等の影響を考慮した上で、将来の地球規模の食料需給構造および作物増産に必要な土地利用改変に関する分析を行った。その結果、将来の作物需給が逼迫する要因として、食用および飼料用需要の方がバイオエタノール用需要よりもその影響が大きいことが示された。また、2015～2020年頃まで現状の可耕地（休耕地含む）で供給可能だが、それ以後は耕地が不足し、2050年には2005年の耕地面積から約11～15%の耕地拡大が必要になると予測された。

Key Words: food demand, food supply, land use, bio-ethanol

1. はじめに

近年、気候変動緩和策やエネルギー自給率向上策として食料資源由来のバイオエタノールが利用され始めている¹⁾。しかし、開発途上国における人口増加や経済成長に伴う食料需要の増加と相まって、食料とバイオ燃料の競合問題が顕在化しつつあり、食料資源由来バイオエタノールの生産に関して食料需給への悪影響を懸念する声が高まっている²⁾³⁾。食料資源を燃料として利用するという新たな付加価値の創造や食料資源と競合しないセルロース系バイオエタノールの普及動向等を考慮すると、今後も食料資源由来バイオエタノールの利用が拡大する可能性は高く、世界の食料需給に与える影響が懸念される。また、開発途上国の経済成長に伴う食料選好の変化が世界の食料需給に与える影響も少なくなく、将来の世界的な食料需給に対する不安が募っている。そのため、食料資源由来バイオエタノール需要の増加や社会経済発展を考慮した上で、将来における地球規模の食料需給構造やその土地利用への影響について把握することが必要である。

これまでにバイオエタノール需要を考慮した将来の食料需給予測に関する研究がいくつか報告されている。小泉(2007)⁴⁾は、トウモロコシ、粗糖、ガソリン、バイ

オエタノールの国際市場価格変化を考慮したトウモロコシおよび砂糖に関する世界需給予測モデルを構築し、今後のバイオエタノール需要増が2015年までの国際食料需給に与える影響を分析した。その結果、世界最大のトウモロコシ生産・輸出国である米国でのバイオエタノールの利用拡大により、トウモロコシの国際市場価格が上昇することで輸入国の食料事情に大きな影響があると報告している。

足立ら(2007)⁵⁾は、食料需給の逼迫化に伴う食料価格の変化等を考慮した上で、バイオエタノール需要の増大が2040年までの世界各地の食料需給に与える影響を分析した。その結果、アジアでは主食であるコメと主要な飼料用作物であるトウモロコシをバイオエタノールに転換することによって食料事情が悪化し、現在のアフリカと同程度の食料消費水準となることが示された。

他方、川島ら(2007)⁶⁾は、物質収支概念に基づき、東南アジアにおけるエネルギー作物の潜在的生産可能性を検討した。その結果、2050年の東南アジアにおける余剰農地は15.6 (Mha) に及ぶと予測され、そこから1,180 (Mt) のサトウキビ生産が可能であると報告している。さらに、システム・ダイナミクス手法⁷⁾を用いた食料需給モデルや土地利用モデルの構築に関する研究が報告されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

このように、バイオエタノール需要増を考慮した食料需給予測や土地利用変化に関する研究事例は存在するものの、自動車用燃料需要の予測手法やバイオエタノール用作物需要の予測手法等に検討の余地がある。また、バイオエタノール需要の増加を考慮した上で、将来の食料不足を補うために必要な土地利用改変に関する検討を行っている既存研究はほとんどない。そこで、本研究では、社会経済発展やバイオエタノール需要増を考慮した将来の地球規模の食料需給構造およびその土地利用への影響についての分析を試みる。

2. 作物需給の将来推計

(1) 研究対象

本研究では、分析基準年を2005年、分析目標年を2050年とし、5年毎に分析を行うこととする。また、対象地域は世界114カ国を16地域に分類している(表-1)。なお、推計結果について考察する際は、各地域の結果を積み上げて世界全体として捉える。

表-1 対象地域 (世界16地域)

地域コード	地域分類	地域コード	地域分類
USA	アメリカ合衆国	CHN	中国 (香港・マカオ・台湾含む)
CAN	カナダ	BRA	ブラジル
JPN	日本	IND	インド
AUS	オーストラリア	MES	中東(北アフリカ諸国含む) (13カ国)
NZL	ニュージーランド	EAS	その他東・東南アジア (7カ国)
WEP	西欧 (19カ国)	LAM	その他中南米 (20カ国)
EEP	東欧 (10カ国)	SAS	その他南アジア (4カ国)
FSU	旧ソ連 (13カ国)	AFR	その他アフリカ (20カ国)

本研究の対象品目を表-2に示す。品目種とは、主食であるデンプン料作物、嗜好品である糖料作物、主要なタンパク源である畜産物を指し示し、品目は各品目種に属する個別の食料のことを意味する。また、作物とはデンプン料作物や糖料作物に属する各作物のことを意味する。本研究では、FAOSTAT¹²⁾の作物用途分類に基づき、作物需要を食用、飼料用、バイオエタノール用の3つに分類し、工業用等のその他の需要については対象外とする。また、飼料用作物は主に配合飼料として利用されるもののみを考慮し、青刈り用作物は対象としない。

表-2 対象とする品目

品目種	品目
デンプン料作物	イネ、コムギ、トウモロコシ、オオムギ、ソルガム ジャガイモ、サツマイモ、キャッサバ
糖料作物	サトウキビ、テンサイ
畜産物	牛肉、豚肉、羊肉、鶏肉、鶏卵、牛乳・乳製品

注)イネ:籾ベース、肉類:枝肉ベース、牛乳・乳製品:生乳ベース。

各作物の需要及び供給の推計フローを図-1に示す。GDP(PPP)及び人口の変化から将来の作物需要を推計し、供給ポテンシャルについては作物の単収の経年変化を用いて推計する。本研究において、GDP(PPP)とは2000年時点の各国通貨の対米ドルの購買力平価を用いて算出したGDP(国内総生産)である。

本研究では、将来の人口およびGDP(PPP)を外生的に与え、過去のデータを用いて現在のダイナミクスを導出し、将来予測を行う手法を採用している。本手法は、現在のダイナミクスが将来にも適用可能であることを前提条件とするものであり、これまでに多くの先行研究で行われてきた⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。ただし、本手法に対する批判も存在するため¹⁶⁾、将来の予測結果についての解釈には注意を要する。

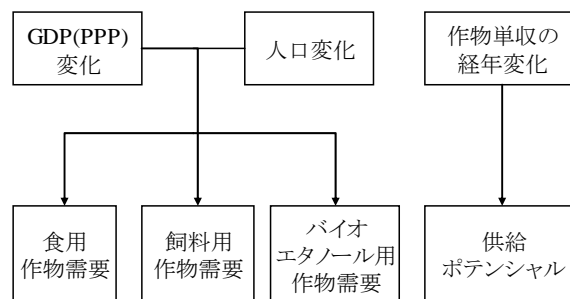


図-1 推計フロー

本研究で用いたデータを次頁の表-3に示す。ここで、耕地は短年性作物の収穫が行われている土地を意味し、二毛作の土地は重複計算をしないものとする。したがって、二毛作を行っている地域では、作物の単収が高く見積もられる。また、将来推計に用いる各地域の人口および1人あたりGDP(PPP)を次頁の表-4に示す。なお、本研究における将来推計は、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)」¹⁷⁾の地域共存型社会シナリオ(B2)に基づき、Gaffin *et al.* (2004)¹⁸⁾によるダウンスケーリングデータを用いた。

表-3 本研究で用いたデータ

データ	対象年	引用元
人口	1991-2050	UN(2007) ¹⁹⁾
GDP(PPP)	1991-2005	WB(2007) ²⁰⁾
GDP予測値	2000-2050	IPCC(2000) ¹⁷⁾
1人1日あたり食料摂取カロリー	1991-2005	FAOSTAT ¹²⁾
食料消費量	1991-2005	FAOSTAT ¹²⁾
飼料消費量	1991-2005	FAOSTAT ¹²⁾
自動車用燃料消費量	1996-2005	IEA ²¹⁾²²⁾
自動車用ガソリン消費量	1996-2005	IEA ²¹⁾²²⁾
自動車保有台数	1996-2005	日本自動車工業会 ²³⁾²⁴⁾²⁵⁾
作物生産量	1961-2005	FAOSTAT ¹²⁾
作付面積	1961-2005	FAOSTAT ¹²⁾
耕地面積	1961-2005	FAOSTAT ¹²⁾

表-4 人口¹⁹⁾および1人あたりGDP(PPP)¹⁷⁾¹⁹⁾²⁰⁾

地域 コード	人口 (百万人)			1人あたりGDP(PPP) (2000年国際ドル)		
	2005	2030	2050	2005	2030	2050
USA	300	366	402	36,840	44,439	50,215
CAN	32	39	43	29,714	36,123	41,028
JPN	128	118	103	27,318	37,576	46,504
AUS	20	25	28	30,270	30,920	29,915
NZL	4	5	5	22,880	24,355	24,553
WEP	472	509	511	24,254	31,182	34,217
EEP	105	96	84	12,083	32,293	79,600
FSU	274	255	231	7,518	21,427	57,206
CHN	1,321	1,467	1,418	6,116	27,567	52,902
BRA	187	236	254	7,622	16,562	34,115
IND	1,134	1,506	1,658	2,964	9,656	28,064
MES	335	484	569	5,759	9,787	22,275
EAS	546	686	732	5,653	16,323	25,980
LAM	352	458	498	7,621	16,155	32,883
SAS	358	520	617	1,979	5,884	15,880
AFR	556	1,185	1,596	1,886	3,601	10,037
World	6,125	7,957	8,749	8,704	17,222	30,767

(2) 食用・飼料用作物需要の将来推計

まず、1人あたりGDP(PPP)を説明変数、各品目種の1人1日あたり摂取カロリーを被説明変数として、1991年から2005年までのデータを用いて単回帰分析を行い、式(1)のような地域・品目種別の需要関数を導出し、それに将来のGDP(PPP)を適用することで、将来の1人1日あたり食料摂取カロリーを求める。

なお、過去の食料摂取カロリーデータは、地域毎に所属各国の値を積み上げて地域データに加工している。ただし、基準年における各品目種の摂取カロリーの最大値

を将来における上限値として設定する。また、デンプン料作物需要の推計値については、畜産物需要との合計値の推計値から畜産物需要の推計値を差し引いたものとする。また、食用・飼料用需要の将来推計において、当該品目種内の各品目の消費量の割合は基準年の値で一定とする。

$$D_{i,j,t} = a_{i,j} \cdot \ln GDP_{i,t} + b_{i,j} \quad (1)$$

ここで、 i は地域、 j は品目種、 t は年、 $D_{i,j,t}$ は年・地域・品目種 j の1人1日あたり摂取カロリー (kcal/人/日)、 $GDP_{i,t}$ は年・地域 i における1人あたりGDP(PPP) (2000年国際ドル)、 $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ はパラメータを表す。

上記手法に基づいて導出した、品目種別1人あたり食料摂取カロリーの推計結果を表-5に示す。表-5を見ると、将来の日本や中国における1人あたりデンプン料作物需要が減少し、中国やブラジルにおける畜産物需要が大幅に増加するという推計結果となった。また、糖料作物は緩やかな需要変化が起ると予測された。

表-5 品目種別1人あたり食料摂取カロリー

地域 コード	1人あたり食料摂取カロリー (kcal/人/日)								
	デンプン料作物			畜産物			糖料作物		
	2005	2030	2050	2005	2030	2050	2005	2030	2050
USA	1,652	1,737	1,752	959	1,008	1,039	290	316	316
CAN	1,510	1,727	1,845	860	919	959	369	380	380
JPN	1,367	1,108	950	409	432	453	213	219	219
AUS	925	1,024	1,041	892	874	883	411	437	437
NZL	1,187	1,237	1,243	943	882	880	532	567	569
WEP	1,316	1,402	1,426	866	883	892	380	368	368
EEP	1,535	1,750	1,951	764	809	858	383	341	341
FSU	1,627	1,949	2,287	568	601	632	365	342	342
CHN	1,590	1,115	892	537	893	1,045	119	92	92
BRA	1,282	1,392	1,573	615	1,239	1,500	572	600	600
IND	1,459	1,524	1,595	174	251	315	308	331	331
MES	1,901	1,879	1,894	298	384	519	301	424	600
EAS	1,840	2,055	2,162	201	335	396	228	394	462
LAM	1,321	1,835	2,015	471	738	980	427	424	424
SAS	1,559	1,825	2,051	223	414	584	190	192	192
AFR	1,372	1,766	2,431	99	150	220	126	114	114
World	1,534	1,597	1,767	419	539	615	259	271	286

出典：FAOSTAT等¹²⁾を基に作成

次に、式(2)のように基準年における地域・品目種別の食料消費量に人口変化率、1人1日あたり食料摂取カロリー変化率、基準年における1人1日あたりデンプン料作物または糖料作物の摂取カロリーに占める各作物の割合を乗じることで将来の作物別食用需要量を推計する。

$$QF_{i,k,t} = QF_{i,j,2005} \cdot \frac{P_{i,t}}{P_{i,2005}} \cdot \frac{D_{i,j,t}}{D_{i,j,2005}} \cdot RFO_{i,k,2005} \quad (2)$$

ここで、 $QF_{i,k,t}$ は t 年・地域 i ・作物 k の食用需要量 (t) , $QF_{i,j,2005}$ は2005年・地域 i ・品目種 j の食用需要量 (t) , $P_{i,t}$ は t 年・地域 i における人口 (人) , $RFO_{i,k,2005}$ は2005年・地域 i ・作物 k の1人1日あたりデンプン料作物または糖料作物の摂取カロリーに占める割合を表す。

また、式(3)のように基準年の飼料消費量に人口変化率、畜産物の1人1日あたり摂取カロリー変化率、基準年におけるデンプン料作物または糖料作物の飼料用消費量に占める各作物の割合を乗じることで飼料用需要量を推計する。

$$QL_{i,k,t} = QL_{i,j,2005} \cdot \frac{P_{i,t}}{P_{i,2005}} \cdot \frac{D_{i,animal,t}}{D_{i,animal,2005}} \cdot RFe_{i,k,2005} \quad (3)$$

ここで、 $QL_{i,k,t}$ は t 年・地域 i ・作物 k の飼料用需要量 (t) , $QL_{i,j,2005}$ は2005年・地域 i ・品目種 j の飼料用需要量 (t) , $D_{i,animal,t}$ は t 年・地域 i における畜産物の1人1日あたり摂取カロリー (kcal/人/日) , $RFe_{i,k,2005}$ は2005年・地域 i ・作物 k のデンプン料作物または糖料作物の飼料用消費量に占める割合を表す。

(3) バイオエタノール用作物需要の将来推計

a) 自動車用ガソリン需要量の推計

Wang *et al.* (2006)²⁶⁾によると、一般に1人あたり所得が増加すると、1人あたり自動車保有台数は増加するが、実際は地域毎に自動車保有に関する傾向が異なる。また、将来の自動車保有台数の推計手法として、所得と自動車保有台数の相関関係から将来の自動車保有台数を推計する方法や自動車の新車販売台数と自動車ストックの残存率を考慮する方法等がある²⁷⁾²⁸⁾。本研究では、複雑なモデル体系を避け、先行文献の分析手法を参考にしつつ、より簡略化した予測手法を用いる。

まず、1人あたりGDP(PPP)を説明変数、1人あたり自動車保有台数を被説明変数として、1996年から2005年までのデータを用いて単回帰分析を行い、式(4)に示す線形単回帰モデルを導出する。そして、地域別の回帰モデルにGDP(PPP)の予測値を代入し、将来の1人あたり自動車保有台数を求める。ただし、各年度において米国の値を上限值とする。

$$MV_{i,t} = a2_i \cdot GDP_{i,t} + b2_i \quad (4)$$

ここで、 $MV_{i,t}$ は t 年・地域 i における1人あたり自動車保有台数 (台/人) , $a2_i$, $b2_i$ はパラメータを表す。

次に、自動車1台あたり燃料消費量について、1996年から2005年までの10年間の世界全体におけるデータを用いて時系列回帰分析を行い、式(5)に示す指数関数型の

単回帰モデルを導出する。ここでは、1年毎の自動車の燃費改善率が一定であるとして、指数関数型回帰モデルを採用した。

$$DFV_{world,t} = a3 \cdot \exp(b3 \cdot t) \quad (5)$$

ここで、 $DFV_{world,t}$ は t 年・世界全体における自動車1台あたり燃料消費量 (GJ/台) , $a3$, $b3$ はパラメータを表す。

その結果、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%ずつ減少する傾向であることが明らかになった。そこで、燃費改善率0.65%を「BaUシナリオ」とし、自動車燃費水準に関して世界のトップランナーである日本の過去10年間の平均燃費改善率が約2.00%であることから、燃費改善率2.00%を「燃費対策シナリオ」(図表中では燃対と表示)として設定した。

上記手法に基づく1人あたり自動車保有台数および自動車1台あたり燃料需要量の推計結果を表-6に示す。表-6を見ると、東欧や旧ソ連、ブラジルなどで自動車普及が急速に進むという推計結果となった。また、自動車1台あたり燃料需要量はシナリオ毎に異なり、2050年における燃費対策シナリオの推計値は、BaUシナリオの推計値のおよそ2分の1となると予測された。

表-6 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

地域 コード	1人あたり 自動車保有台数 (台/人)			自動車1台あたり燃料需要量 (GJ/台)				
	2005	2030	2050	BaU		燃対		2050
				2005	2030	2005	2030	
USA	0.80	0.86	0.91	96	82	71	56	36
CAN	0.59	0.60	0.61	97	82	72	56	36
JPN	0.59	0.74	0.87	43	37	32	25	16
AUS	0.66	0.68	0.67	74	62	55	43	27
NZL	0.78	0.86	0.91	58	49	43	34	22
WEP	0.51	0.66	0.73	52	44	38	30	19
EEP	0.32	0.86	0.91	41	35	30	24	15
FSU	0.17	0.56	0.91	51	43	37	29	19
CHN	0.03	0.14	0.27	91	77	67	53	34
BRA	0.12	0.56	0.91	90	76	66	52	33
IND	0.01	0.07	0.21	77	66	57	45	29
MES	0.07	0.19	0.55	188	159	139	108	70
EAS	0.09	0.29	0.49	81	68	60	47	30
LAM	0.13	0.37	0.84	93	79	69	54	35
SAS	0.01	0.03	0.08	172	146	128	100	64
AFR	0.02	0.03	0.05	137	116	101	79	51
World	0.14	0.25	0.38	76	70	67	47	34

出典：IEA²¹⁾²²⁾、日本自動車工業会²³⁾²⁴⁾²⁵⁾等を基に作成

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、式(6)のように将来の自動車用燃料需要量を算出し、基準年における各地域での自動車用燃料消費量に占めるガソリン消費量の割合を乗じて、将来の自動車用ガソリン需要量を算出する。

$$QDFV_{i,t} = MV_{i,t} \cdot (1 - RDFV) \cdot DFV_{i,t-1} \cdot P_{i,t} \quad (6)$$

ここで、 $QDFV_{i,t}$ はt年・地域iにおける自動車用燃料需要量(GJ)、 $RDFV$ は世界全体における自動車の燃費改善率(BaU: 0.65×10^2 , 燃費対策: 2.00×10^2)、 $DFV_{i,t-1}$ は(t-1)年・地域iにおける自動車1台あたり燃料需要量(GJ/台)を表す。

b) バイオエタノール導入量の算定

まず、自動車用ガソリン需要量のn(%)をバイオエタノールで代替するとして、地域別のバイオエタノール導入目標 n_i を設定し、バイオエタノール導入量を算定した(表-7)。導入目標は各地域における現在のバイオエタノール導入状況、バイオエタノール政策動向、社会・経済状況、自動車用ガソリン需要量の推計結果等を勘案して設定した。本研究では、非食料資源由来のバイオエタノール生産技術開発および本格的導入に向けての十分な情報が得られていないため、現時点において世界各地で普及している食料資源由来のバイオエタノールのみを考慮する。

表-7 バイオエタノール導入目標・導入量

2050 地域 コード	導入 目標 n_i (%)	バイオエタノール導入量 (万kL)	
		BaU	燃対
USA	5	4,711	2,368
CAN	3	202	101
JPN	3	256	129
AUS	3	100	50
NZL	3	17	9
WEP	3	789	397
EEP	3	132	66
FSU	1	318	160
CHN	3	2,244	1,128
BRA	15	5,251	2,640
IND	3	883	444
MES	0	0	0
EAS	1	464	233
LAM	1	841	423
SAS	1	60	30
AFR	1	228	115
World	-	16,495	8,293

出典：F.O.Licht (2007)¹⁾、大聖ら (2004)²⁹⁾を基に作成

c) バイオエタノール用作物需要量の推計

まず、F.O.Licht (2007)¹⁾や大聖ら (2004)²⁹⁾等による、各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エタノール原料作物を表-8に示すように設定する。なお、複数の原料作物を設定した地域では、バイオエタノール導入量を均等に配分し、原料作物需要量の推計を行う。

表-8 各地域におけるバイオエタノール原料作物¹⁾²⁹⁾

地域 コード	原料作物	地域 コード	原料作物
USA	トウモロコシ	CHN	トウモロコシ, キャッサバ, ジャガイモ, サツマイモ, サトウキビ
CAN	トウモロコシ	BRA	サトウキビ
JPN	イネ, サトウキビ	IND	サトウキビ
AUS	サトウキビ	MES	—
NZL	サトウキビ	EAS	キャッサバ, サトウキビ
WEP	コムギ, オオムギ, テンサイ	LAM	サトウキビ
EEP	コムギ, ジャガイモ	SAS	サトウキビ
FSU	コムギ, オオムギ	AFR	トウモロコシ

次に、各地域におけるバイオエタノール導入量を、表-9に示す各原料作物の重量あたりのバイオエタノール収量で除することで、バイオエタノール用作物需要量を算出する。

表-9 原料別重量あたりのバイオエタノール収量^{29),30)}

原料作物	収量 (kL/t)	原料作物	収量 (kL/t)
イネ	0.303	ジャガイモ	0.087
コムギ	0.303	サツマイモ	0.129
トウモロコシ	0.370	キャッサバ	0.180
オオムギ	0.333	サトウキビ	0.070
ソルガム	0.326	テンサイ	0.083

(4) 食料供給ポテンシャルの将来推計

まず、対象16地域における1961年から2005年までの作物の単収データを用いて作物別に時系列単回帰分析を行い、式(7)に示す線形単回帰モデルを導出する。そして、地域・作物別の回帰モデルに将来年を代入することにより将来の単収を求める。

ただし、回帰モデルの決定係数の値が 0.7 以上で正の相関を示す回帰式を単収予測に用いることとし、それ以外のものは過去 10 年間の平均単収を将来における単収とする。また、将来の単収の上限値は基準年の単収の最大値とする。

$$YH_{i,k,t} = a4_{i,k} \cdot t + b4_{i,k} \quad (7)$$

ここで、 $YH_{i,k,t}$ は t 年・地域 i ・作物 k の単収 (tha) , $a4_{i,k}$ 、 $b4_{i,k}$ はパラメータを表す。

さらに、将来の作物の単収に基準年の作付面積を乗じて、将来の各作物の供給ポテンシャルを算出する。なお、基準年の休閑地 (表-10) を作付面積に加算した。本研究では、休閑地は 5 年未満の一時的な休閑を行っている耕地を意味し、5 年以上の休閑を行っている土地については考慮していない。

表-10 基準年における休閑地面積¹²⁾

地域コード	休閑地面積 (Mha)	地域コード	休閑地面積 (Mha)
USA	0.0	CHN	0.0
CAN	4.1	BRA	0.0
JPN	0.0	IND	0.0
AUS	0.0	MES	9.5
NZL	0.0	EAS	0.0
WEP	8.7	LAM	0.3
EEP	2.0	SAS	6.4
FSU	0.3	AFR	1.4

※Mha=10⁶ha

3. 作物需給分析

(1) 将来の作物需給

2050年の世界全体における作物需給についての推計結果を表-11に示す。供給不足量が負の値を示す作物は供給余剰となることを表す。2050年の世界全体における作物総需要は、BaUシナリオで7,863 (Mt) , 燃費対策シナリオで7,125 (Mt) となった。また、供給ポテンシャルについては5,607 (Mt) となった。

ここで、供給不足量を熱量に換算すると、BaUシナリオで1,917 (Pcal) , 燃費対策シナリオで1,328 (Pcal) となった。以上より、自動車の燃費改善率の違いによって生じる将来の作物供給不足量の差は少なくないということが明らかになった。

表-11 2050年の世界全体における作物需給

作物需給	需要			供給	供給不足量				
	2005	2050 BaU	2050 燃対	2050	2050 BaU		2050 燃対		
分類	作物	Mt	Mt	Mt	Mt	Pcal	Mt	Pcal	
デンプン料	イネ	598	869	867	958	-89	-210	-91	-215
	コムギ	603	806	798	885	-80	-225	-88	-248
	トウモロコシ	730	1,507	1,432	1,095	413	1,240	337	1,015
	オオムギ	135	202	196	184	19	48	12	32
	ソルガム	53	129	129	64	66	201	66	201
	ジャガイモ	309	438	409	366	72	70	43	42
	サツマイモ	118	230	212	184	46	31	28	19
	キャッサバ	170	432	414	259	173	170	154	152
糖料	サトウキビ	1,265	2,951	2,386	1,613	1,339	596	773	344
	テンサイ	264	298	282	308	-10	-5	-26	-14
デンプン料作物		2,716	4,614	4,457	3,994	620	1,326	463	998
糖料作物		1,528	3,249	2,668	1,613	1,637	591	1,055	330
作物全体		4,244	7,863	7,125	5,607	2,257	1,917	1,518	1,328

※Mt=10⁶t, Pcal=10¹⁵cal

注1) 粗食料として熱量換算を行ったため、歩留まりは考慮していない。

注2) 糖料作物については、粗糖換算した後に熱量換算を行った。

出典：FAOSTAT等¹²⁾を基に作成

(2) 作物需要の内訳

2050年におけるBaUシナリオの作物別需要内訳を図-2に示す。トウモロコシ、オオムギ、サツマイモは飼料用需要の割合が最も大きく、その他の作物は食用需要の割合が最も大きい。ただし、サトウキビについては、バイオエタノール用需要の割合がBaUシナリオで約40%に及び、バイオエタノール需要の増大によってサトウキビの大幅な増産が必要になることが示された。また、作物全体として見ると、将来の作物需給が逼迫する要因として、食用・飼料用需要による影響の方がバイオエタノール用需要による影響よりも大きいことが示された。

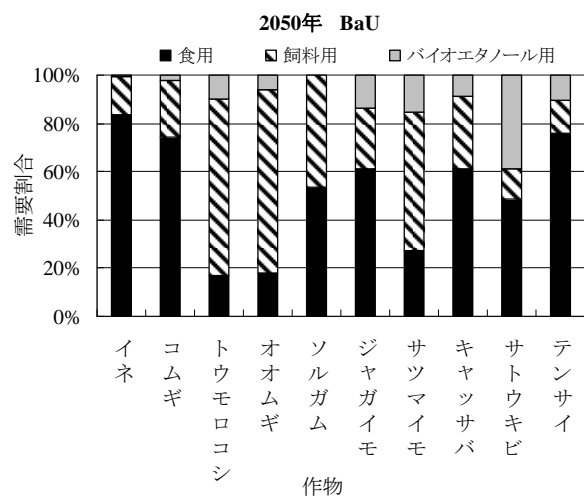


図-2 作物別需要内訳

4. 土地利用改変に関する分析

(1) 分析方法

まず、将来の世界全体における各作物の供給不足量（表-11）を作物別の世界平均単収（表-12）で除することで、各作物の需要を全て満たすために拡大することが必要な耕地面積（以下、要拡大耕地面積）を算出する。次に、将来の要拡大耕地面積の全てにおいて作付けを行うものとして、その耕地面積を2005年の世界全体における作物別作付面積に追加した場合の作付面積増加率を算出する。

また、バイオエタノール1kLあたりの原料作物生産に要する耕地面積を式(8)により算出する。

$$AEE_{world,k,t} = (\beta_k \cdot YH_{world,k,t})^{-1} \quad (8)$$

ここで、 $AEE_{world,k,t}$ はt年・世界全体・作物k由来のバイオエタノール1kLあたりの原料作物生産に要する耕地面積(ha/kL)、 β_k は作物kのバイオエタノール収量(kL/t)、 $YH_{world,k,t}$ はt年・世界全体・作物kの単収(t/ha)を表す。

表-12 将来の世界平均単収 (単位: t/ha)

分類	作物	2005	2030	2050
デンプン料	イネ	4.2	5.8	6.9
	コムギ	2.9	3.7	4.4
	トウモロコシ	5.0	6.5	7.8
	オオムギ	2.6	2.9	3.2
	ソルガム	1.5	1.6	1.7
	ジャガイモ	17.2	18.8	19.7
	サツマイモ	15.4	20.7	24.5
糖料	サトウキビ	69.6	80.3	88.9
	テンサイ	46.6	48.6	54.5
	キャッサバ	11.9	13.9	15.7

出典: FAOSTAT¹²⁾を基に作成

(2) 結果

2050年の世界全体における要拡大耕地面積および作付面積増加率の推計結果を表-13に示す。要拡大耕地面積が負の値を示す作物は余剰耕地が生じることを表す。要拡大耕地面積が最も大きくなるトウモロコシでは、2050年で43.1~52.6(Mha)の耕地面積の拡大が必要となる。一方、イネ、コムギ、テンサイでは余剰耕地が生じ、2050年での3作物の余剰耕地を合計すると、31.1~33.5(Mha)となる。これは、イネ、コムギ、テンサイの需要の増加よりも単収増加による供給ポテンシャルの増加が大きいと予測されたためである。

しかし、作物分類別に集計すると、2050年にはデンプン料作物で65.7~82.7(Mha)、糖料作物で8.2~14.9

(Mha)の耕地拡大が必要となるという結果を得た。作物全体としては、2050年で2005年の耕地面積から11.3~14.9%の耕地拡大が必要となることが明らかになった。

また、要拡大耕地面積の推移(図-3)を見ると、本研究における諸条件において、BaUシナリオでは2015年頃まで余剰耕地が生じ、燃費対策シナリオでは2020年頃まで耕地余剰となる。つまり、耕地面積という指標を基準として考えると、2015~2020年頃までは、2005年時点の可耕地(休閑地含む)で、本研究において設定したバイオエタノール導入目標(表-7)を達成可能であることが示唆された。しかし、それ以後は大幅な耕地拡大が必要とするため、食料資源由来バイオエタノールの利用拡大の潜在性は限定的なものであるといえる。

表-13 2050年における要拡大耕地面積・作付面積増加率

2050		要拡大耕地面積		作付面積	作付面積増加率	
		BaU	燃対	2005	BaU	燃対
分類	作物	Mha	Mha	Mha	%	%
デンプン料	イネ	-13	-13	147	-8.7	-8.9
	コムギ	-18	-20	214	-8.5	-9.3
	トウモロコシ	53	43	138	38.1	31.2
	オオムギ	6	4	54	10.6	7.0
	ソルガム	39	39	37	103.2	103.2
	ジャガイモ	4	2	18	20.4	12.1
	サツマイモ	2	1	8	24.7	15.3
糖料	サトウキビ	15	9	18	85.0	49.1
	テンサイ	0	0	5	-3.4	-8.8
デンプン料作物		83	66	633	13.1	10.4
糖料作物		15	8	23	64.5	35.7
作物全体		98	74	656	14.9	11.3

出典: FAOSTAT¹²⁾を基に作成

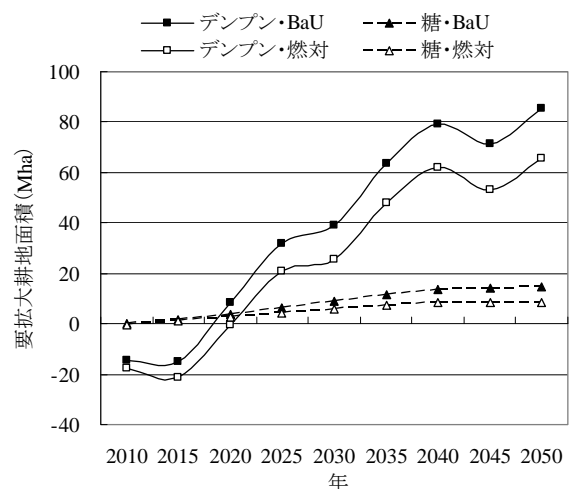


図-3 要拡大耕地面積の推移

また、2050年の世界全体におけるバイオエタノール1kLあたりの原料作物生産に要する耕地面積を図-4に示す。各作物の値を比較すると、サトウキビが最も小さく、次いでテンサイ、サツマイモ、トウモロコシの順となる。バイオエタノール用需要量は、サトウキビで1,137 (Mt)、トウモロコシで151 (Mt)となるが、その生産に必要な耕地面積はサトウキビで13 (Mha)、それに対してトウモロコシでは19 (Mha)となり、バイオエタノール用トウモロコシの需要増による土地利用改変への影響は、バイオエタノール用サトウキビ需要増によるものよりも大きくなる。

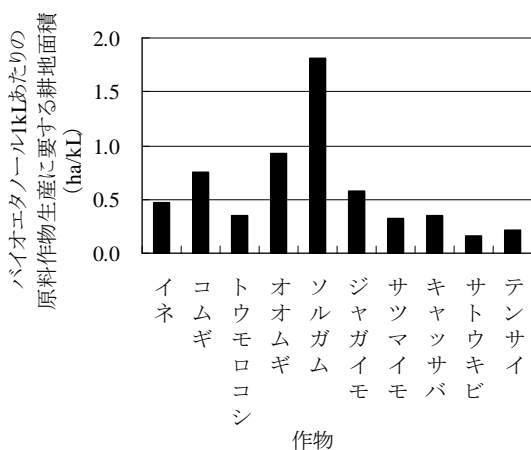


図-4 バイオエタノール1kLあたりの原料作物生産に要する耕地面積

5. まとめ

本研究では、社会経済発展、バイオエタノール需要増の影響を考慮した上で、将来の地球規模の食料需給構造を分析した。また、食料需給分析の結果を受けて、将来予想される食料供給ポテンシャル不足を補うために必要な耕地面積を推計し、バイオエタノール需要の増大が将来の土地利用改変に与える影響を評価した。

その結果、2050年における世界全体の作物総需要は、BaUシナリオで7,863 (Mt)、燃費対策シナリオで7,125 (Mt)となり、供給ポテンシャルは5,607 (Mt)となった。作物別で見ると、2050年でサトウキビの総需要に占めるバイオエタノール用需要の割合がBaUシナリオで約40%に及び、バイオエタノール需要増によりサトウキビの大幅な増産が必要になることが示された。作物全体として見ると、将来の作物需給が逼迫する要因として、食用・飼料用需要による影響の方がバイオエタノール用需要による影響よりも大きいことが示された。一方、2050年にはデンプン料作物で65.7~82.7 (Mha)、糖料作物で8.2~14.9 (Mha)の耕地拡大が必要となるという

結果を得た。さらに、時系列で作物全体として見ると、2015~2020年頃まで現状の可耕地(休耕地含む)で供給可能だが、それ以後は耕地が不足し、2050年で2005年の耕地面積から約11~15%の耕地拡大が必要となると予測された。

今後の検討課題としては、食料やエネルギー需要に対する価格弾力性、さらには食料品目間の代替性等を計算過程に組み込んだ分析手法を構築することが挙げられる。また、都市の人口構成や経済発展段階、地理特性などの影響を考慮した自動車保有台数の将来推計手法の改善が挙げられる。さらに、バイオエタノール用非食料資源の生産に伴う土地利用変化についての検証が今後必要である。一方、先行研究では南米やアフリカの草原や牧草地において耕地転用が進むと報告している³⁾。そこで、土壌や気候などの作物栽培に係わる影響因子を考慮したGISベースの土地利用変化モデルを構築し、本研究によって得られた結果を適用することによって、将来の土地利用改変が起こり得る地域を具体的に導出することが必要である。

参考文献

- 1) F.O. Licht : *F.O. Licht's World Ethanol & Biofuels Report*, Agra Informa, 2007.
- 2) OECD/FAO : *OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016*, OECD Publications, 2007.
- 3) OECD/FAO : *OECD-FAO Agricultural Outlook 2008-2017*, OECD Publications, 2008.
- 4) 小泉達治 : *バイオエタノールと世界の食料需給*, 筑波書房, 2007.
- 5) 足立信太郎, 白川博章, 井村秀文 : *バイオ燃料の利用拡大が環境・経済に及ぼす影響に関する研究*, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.35, pp.33-40, 2007.
- 6) 川島博之, 新藤純子, 堀雅文 : *東南アジアにおける余剰水田を利用したエネルギー作物生産*, 環境科学会誌, Vol. 20, No. 4 pp. 279-289, 2007.
- 7) 宮川公男, 小林秀徳 : *システムダイナミクス - 経営・経済系の動学分析*, 白桃書房, p.211, 1988.
- 8) 松村寛一郎, 中村泰人 : *日本食料需要モデルの構築*, 環境科学会誌, Vol.10, No.1, pp.21-28, 1997.
- 9) 松村寛一郎, 中村泰人 : *アジア各国食料需要モデルの構築*, 環境科学会誌, Vol.11, No.1, pp.49-63, 1998.
- 10) 松村寛一郎, 中村泰人 : *アジア各国土地利用モデルの構築*, 環境科学会誌, Vol.12, No.1, pp.27-36, 1999.
- 11) 松村寛一郎, 中村泰人 : *アジア各国食料需給モデルの構築*, 環境科学会誌, Vol.13, No.3, pp.339-349, 2000.
- 12) FAO : *FAOSTAT*, FAO, <http://faostat.fao.org/default.aspx/>, 2007.
- 13) 星野敏 : *土地利用変化の要因に関する統計的分析*, 環境システム研究, Vol.25, pp.277-286, 1997.

- 14) 一ノ瀬俊明, 大坪国順 : アジア地域における土地利用変化の時空間構造, 環境科学会誌, Vol.13, No.2, pp.217-222, 2000.
- 15) Ichinose, T. and K. Otsubo : Temporal Structure of Land Use Change in Asia, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.9, pp.41-51, 2003.
- 16) 一ノ瀬俊明 : 土地利用・被覆変化のモデリング, 環境科学会誌, Vol.18, No.4, pp.403-410, 2005.
- 17) IPCC : Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, 2000.
- 18) Gaffin, S.R., C. Rosenzweig, X. Xing, and G. Yetman : Downscaling and Geo-spatial Gridding of Socio-economic Projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES), *Global Environmental Change Part A*, Vol.14, No.2, pp.101-193, 2004.
- 19) United Nations (UN) : World Population Prospects: The 2006 Revision Population Database, UN, <http://esa.un.org/unpp/>, 2007.
- 20) World Bank (WB) : World Development Indicators 2007, CD-ROM, WB, 2007.
- 21) International Energy Agency (IEA) : Energy Statistics of OECD Countries 1996-2005, OECD, 1999-2007.
- 22) International Energy Agency (IEA) : Energy Statistics of non-OECD Countries 1996-2005, OECD, 1999-2007.
- 23) 日本自動車工業会 : 世界自動車統計年報, Vol.1-6, 日本自動車工業会, 2002-2007.
- 24) 日本自動車工業会 : 主要国自動車統計, Vol.28-29, 日本自動車工業会, 1999-2000.
- 25) 日本自動車工業会 : 自動車統計年報, Vol.27-28, 日本自動車工業会, 1999-2000.
- 26) Wang, M., H. Huo, and L. Johnson : Projection of Chinese Motor Vehicle Growth, Oil Demand, and CO₂ Emissions through 2050, Argonne National Laboratory, 2006.
- 27) 田崎良三 : 自動車交通とエネルギー - 自家用乗用車の燃料需要の将来予測 -, 高速道路と自動車, Vol.24, No.9, 1981.
- 28) 鶴崎敬大, 茅陽一 : 選好変化による自家用乗用車の省エネルギーポテンシャルの推定, エネルギー・システム・経済コンファレンス講演論文集, Vol.13, pp.341-346, 1997.
- 29) 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.
- 30) U.S. Department of Agriculture (USDA) : *GAIN Report*, No.RP7029, USDA, 2007.
- 31) 加藤正弘, 森俊介 : GISによる食糧供給評価と需給均衡モデルの構築, エネルギー・システム・経済コンファレンス講演論文集, Vol.23, pp.167-170, 2007.

?

A STUDY ON FOOD SUPPLY-DEMAND STRUCTURE AND CHANGE OF LAND USE IN THE WORLD CONSIDERING INCREASE OF THE DEMAND FOR BIO-ETHANOL

Kohsuke YOSHIMOTO, Naoki YOSHIKAWA, Koji AMANO and Koji SHIMADA

In recent years, bio-ethanol derived from edible crops has been proceeding as alternative fuel for motor vehicles to mitigate climate change and improve self sufficiency ratio for energy. On the other hand, food demand in developing countries has been increasing because of population explosion, and a conflict between food and bio-fuel production becomes manifest. In this study, the global food supply-demand structure and change of land use to increase food production were analyzed considering economic growth, population growth, and increase of the demand for bio-ethanol. Our analysis indicated that the edible crop demand for food and feed would have the bigger impact on food affordability than that for bio-ethanol in the future. Furthermore, it was estimated that approximately 11-15% expansion in arable land between 2005 and 2050 should be necessary to meet the future demand for edible crops although the current arable land should be able to provide required edible crops until around 2015-2020.