

バイオ燃料の生産拡大が 食料需給に及ぼす影響分析

足立信太郎¹・白川博章²・井村秀文³

¹非会員 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博士(学術) 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

バイオ燃料は現在、気候変動の緩和策の一つとして注目されている。一方で、食用作物から燃料用作物への農地転換を促し、食料需給を逼迫させることが懸念されている。本研究では、バイオ燃料が食料需給に及ぼす影響を分析するため、エタノール用作物需要、食用作物需要、作物供給、の3つの部門からなる部分均衡モデルを構築した。トウモロコシやサトウキビなどの燃料用作物のみならず、非燃料用作物の価格や作付面積についても内性変数として取り扱い、農地転換を表現できるモデルとした。分析した結果、燃料用作物の価格上昇が、競合作物の作付面積を縮小させる結果となった。また、将来の気候変動に伴う気温上昇と降水量減少は、収量の減少を招くことがわかった。

Key Words : bio ethanole, food demand, food supply, farmland conversion, climate change

1. はじめに

ガソリンの代替燃料として注目されているバイオエタノールの生産量は、アメリカ、ブラジルを中心に拡大している。植物由来のバイオエタノールは燃焼しても二酸化炭素総量が増えない「カーボンニュートラル」の性質を有するため、温室効果ガス削減に対して一定の効果があると期待されている。

一方で、バイオ燃料は食料需要との競合が課題となっている。アメリカでは、食用とうもろこし、大豆や小麦から燃料用トウモロコシ畑への農地転換が進行している。燃料価格高騰によって生産者がエタノール生産に注力したためである。このような食料から燃料への生産シフトによって、図-1に示すように、食料価格は2000年より上昇し続けている。

このように、世界規模で食料需給が逼迫するなか、2008年6月、ローマで行われた食料サミットでは、バイオ燃料について、「気候変動の抑制」と「地球規模の食料安全保障」の両立が求められた。食料が主原料であるバイオ燃料の利用に際しては、これらのことを踏まえ、普及に向けて取り組んでいかななくてはならないだろう。

世界食料需給を予測した研究は数多くあるが、バイオ燃料との関係を考慮したものには小泉(2007)³がある。この需給予測モデルでは、大豆、小麦、米などの非燃料

用作物の価格と耕地面積の予測値を外性的に与え、各方程式のパラメータをOLSで推計し、バイオ燃料の需給予測を行っている。モデルによると、アメリカのとうもろこしの輸出量が減少し、国際とうもろこし価格が10%程

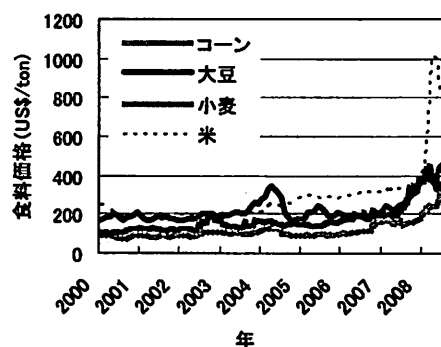


図-1 食料価格の推移²⁾

度上昇することが示された。また、価格上昇によって、南米諸国のとうもろこし生産が増大し、輸出シェアが拡大すると予測された。しかし、バイオ燃料の需要増大に伴う、非燃料用作物の耕地面積や供給量への影響については考慮されていない。例えば、農地転換の結果、小麦の面積が減少し、とうもろこしの面積が増大することが考えられる。また、このモデルは2015年までという比較

的短期のシミュレーションであるため、気候変動の影響を加味していない。気温、降水量が変化する将来においては、それらが農業生産に及ぼす影響を考慮してシミュレーションを行う必要がある。

そこで本研究では、バイオ燃料生産の影響分析として、農地転換、気候変動による生産量の変化を定量的に推計することを目的とする。

2. 食料需給の推計方法

本研究では食料需給モデルを構築することによって、以下3点を明らかにする。

- ・バイオ燃料の生産拡大に伴い食料価格がどのように推移するかを明らかにする。
 - ・燃料用作物への農地転換による影響を定量的に求める。
 - ・気候変動による生産量がどの程度変化するかを求める。
- 推計の全体フローを図-2に示す。また全体フローにおけるエタノール用作物の需要量、食料供給量、食料需要量の推計フローを図-3から図-5に示す。

まず、将来のガソリン需要量を推計し、エタノールの導入量を決定する。次いで、将来における食料供給量、食料需要量を推計する。食料価格は需給ギャップを調整するように変化させる。

食料需給を推計するにあたり、設定した前提条件は以下の通りである。

- ・食料価格は国際価格として、各地域共通の価格とする。政策、補助金、輸入関税等による食料価格の変動は考慮しない。
- ・食料価格、原油価格によらず、バイオエタノールは毎年、ガソリン需要量に応じて一定量が製造される。
- ・気候変動による栽培地域の移動は考えない。

なお、対象とする食料と地域を次のように設定する。食料は主要なカロリー源であるとうもろこし、米、サトウキビ、大豆、小麦、肉類を対象とする。地域はアメリカ合衆国、中国、インド、ブラジルといった農業主要国のほか、アフリカ、その他アジア、ヨーロッパ、その他北アメリカ、オセアニア、その他南アメリカの6地域に分類して分析を行う。

(1) エタノール用作物の需要量の推計方法

経済成長に伴い自動車製造技術が進歩し燃費の向上が予測される。地域 j 、 t 年における一人当たり GDP を $GDP_{j,t}$ 、乗用車一台あたりの年間ガソリン使用量を f_g とすると、 f_g は次式で表すことができる。 (a_1 、 b_1 はパラメータ)

$$f_{j,t} = a_1 (GDP_{j,t})^{b_1} \quad (1)$$

また、生活水準の向上に伴い、乗用車保有率の上昇が予想される。式と同様に、地域 j 、 t 年における一人あたり乗用車保有台数を c_g は次式で表すことができる。 (a_2 、 b_2 はパラメータ)

$$c_{j,t} = a_2 (GDP_{j,t})^{b_2} \quad (2)$$

以上より地域 j 、 t 年における人口を $N_{j,t}$ とすると、ガソリン消費量 $F_{j,t,gas}$ は式(3)のようになる。

$$F_{j,t,gas} = f_{j,t} \cdot c_{j,t} \cdot N_{j,t} \quad (3)$$

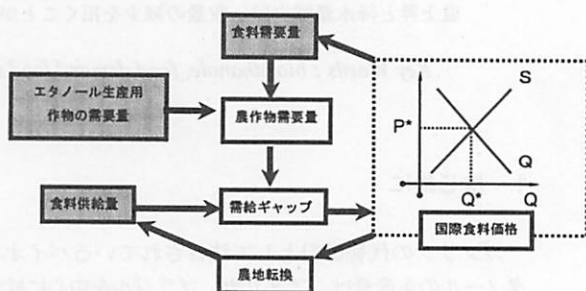


図2 食料需給推計の全体フロー

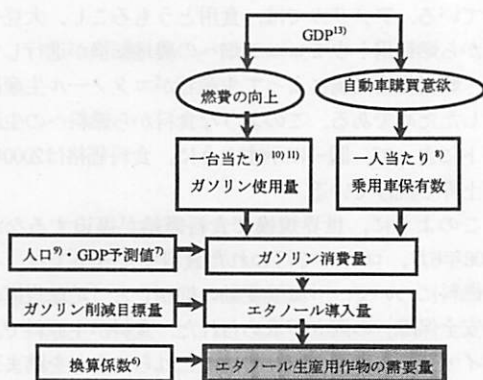


図3 エタノール用作物の需要量の推計フロー

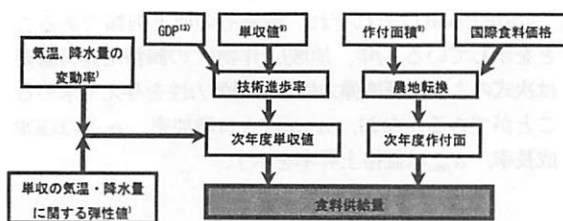


図4 食料供給量の推計フロー

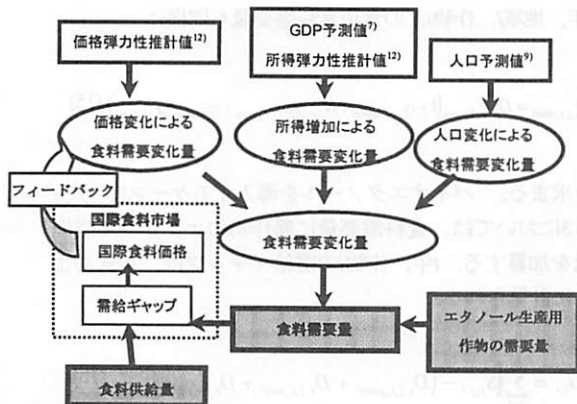


図5 食料需要量、価格の推計フロー

なお、 $N_{j,t}$ は地域 j , t 年における人口を示す。

バイオエタノールの導入量を決定する際、ガソリン消費量の $n\%$ を削減量として設定し、必要となるバイオエタノール量 $F_{j,t,eth}$ を次式にて求める。なお、バイオエタノールとガソリンとは単位体積当たりの発熱量が異なるので、その点を考慮する。(ガソリン: 34.6 エタノール: 21.2 [MJ/L])

$$F_{j,t,eth} = \frac{34.6}{21.2} (F_{j,t,gas}) \frac{n}{100} \quad (4)$$

本モデルではケース毎にバイオエタノールの導入率が異なる。バイオ燃料を導入しないケース 1、北アメリカ、南アメリカのみバイオ燃料を導入するケース 2、さらにケース 2 に加えヨーロッパ、アジアについてもバイオ燃料を導入するケース 3 の合計 3 ケースを想定する。(表-1 を参照)

単位重量あたりの農作物から製造できるエタノール容量を α_i (L/t) としたとき、地域 j , t 年に使用されるエタノール

ール生産用作物 i の需要量 $D_{i,j,t,eth}$ は次式にて表される。

$$D_{i,j,t,eth} = \frac{F_{j,t,eth}}{\alpha_i} \quad (5)$$

(5) 式は食用食料需要量に加算され、全体の需要量として算出される。

表-1 エタノール導入率

国(エタノール原料作物)	ケース1	ケース2	ケース3
アジア(砂糖きび)	0%	0%	5%
アジア(米)	0%	0%	5%
ヨーロッパ(小麦)	0%	0%	10%
北アメリカ(とうもろこし)	0%	10%	10%
南アメリカ(サトウキビ)	0%	10%	10%

(2) 食料供給量の推計方法

技術の発展に伴い農業機械・化学肥料・灌漑設備等の投入要素が充実し、高い単収値(t/ha)を達成できるものと考えられる。このことから地域 j , 年 t における作物 i の単収値を $h_{i,j,t}$ とすると、次式で表すことができる。(a_3 , b_3 はパラメータ)

$$h_{i,j,t} = a_3 (GDP_{j,t})^{b_3} \quad (6)$$

また、気候変動による影響を考慮するケースにおいては、古屋ら³⁾の気温と降水量に関する収量パラメータの値を用いる。将来の気候変動による気温、降水量の変動率は IPCC の A1B シナリオの値⁴⁾を用いる。その際、気温変動率を α_{temp} 、降水量変化率 α_{prec} 、地域 j , 作物 i に関するそれぞれの弾性値を $\varepsilon_{temp,i,j}$ 、 $\varepsilon_{prec,i,j}$ としたとき単収は

$$h_{i,j,t} (1 + \alpha_{temp} \varepsilon_{temp,i,j} + \alpha_{prec} \varepsilon_{prec,i,j}) \quad (7)$$

と表すことができる。ただし、現在の単収値の最大値を、将来におけるその作物の生産性向上の上限とする。例えば、とうもろこしの場合、2000 年のヨーロッパにおいては、ベルギーの 11.1(t/ha) が地域内で最大の単収値を示す。将来のヨーロッパ全体の単収値は、この 11.1(t/ha) を超えないと仮定する。

次に作付面積の推計方法について説明する。FAO の作付面積の年次データと IMF の作物価格の推移データ²⁾

とを回帰分析によって精査し、変数間の関係をパラメータによって表すこととした。国*j*、年*t*における作物*i*の作付面積 $A_{i,j,t}$ は次式のようなラグ付きの方程式で表すことができる。 (a_i , b_i , b_n はパラメータ)

$$\frac{A_{i,j,t}}{A_{i,j,t-1}} = \frac{a_i}{A_{i,j,t-1}} + \left(\frac{P_{i,t-1}}{P_{i,t-2}} \right)^{b_i} \left(\frac{P_{n,t-1}}{P_{n,t-2}} \right)^{b_n} \quad (8)$$

ただし P_n は作物 *i* に対する競合作物 *n* の、年 *t* における価格を表している。例えば、とうもろこしの場合、競合作物は、小麦、大豆、米となる。パラメータについては、有意水準 10%以上の値を用い、それ以外は 0 とした。詳細を表2に示す。

以上より、地域 *j*、年 *t* における作物 *i* の供給量 $S_{i,j,t}$ は次式のように定義できる。

$$S_{i,j,t} = \sum_{j=1}^6 (h_{i,j,t} A_{i,j,t}) \quad (9)$$

(3) 食料需要量の推計方法

需要量を求めるための重要な変数として価格弾力性と所得弾力性が挙げられる。生活水準が高く暮らしが豊かであるほど、価格、所得変化に対する需要量の変化は小さいと予測できる。1人あたりGDPとUSDAの公開している弾性値¹⁰⁾との関係を回帰分析を行った、そして価格弾力性 ϵ 、所得弾力性 η との関係について次式のように明らかにした。

$$\epsilon_{j,t,grain} = 0.0717 \ln(GDP_{j,t}) - 0.872 \quad (10)$$

$$\epsilon_{j,t,meat} = 0.0843 \ln(GDP_{j,t}) - 1.17 \quad (11)$$

$$\eta_{j,t,grain} = -0.0887 \ln(GDP_{j,t}) + 1.08 \quad (12)$$

$$\eta_{j,t,meat} = -0.104 \ln(GDP_{j,t}) + 1.44 \quad (13)$$

grainとmeatはそれぞれ、穀物その他と肉類であることを示している。*t*年、地域*j*、作物*i*の飼料用食料需要は次式のように価格弾力性と所得弾力性を与えて求めることができる。なお、 α_{pop} は人口増加率、 α_{GDP} はGDP成長率、 α_{price} は価格上昇率を示す。

$$D_{i,j,t,feed} = D_{i,j,t-1,feed} (1 + \alpha_{j,t,Capital} + \alpha_{j,t,GDP} \eta_{j,t,meat} + \alpha_{i,j,t,price} \epsilon_{j,t,meat}) \quad (14)$$

*t*年、地域*j*、作物*i*の食用食料需要量も同様に

$$D_{i,j,t,plant} = D_{i,j,t-1,plant} (1 + \alpha_{j,t,Capital} + \alpha_{j,t,GDP} \eta_{j,t,grain} + \alpha_{i,j,t,price} \epsilon_{j,t,grain}) \quad (15)$$

と求まる。バイオエタノールを導入するケース2、ケース3においては、食料需要量に農作物のエタノール志向量を加算する。*t*年、作物*i*の需給ギャップは、次式のように計算される。

$$G_{i,t} = \sum_{j=1}^6 [S_{i,j,t} - (D_{i,j,t,plant} + D_{i,j,t,feed} + D_{i,j,t,eth})] \quad (16)$$

次に、食料価格の推計方法を説明する。価格が α_{price} だけ変化したときを考える。その際の需要の変化量は価格弾力性 ϵ を用いて、式(17)のように表すことができる。

$$(D_t - D_{t-1}) = D_{t-1} \alpha_{price} \epsilon \quad (17)$$

式(16)に示す需給ギャップが式(17)に示す需要の変化量と等しくなるように、価格上昇率 α_{price} を設定する。次年度の食料価格は、前年度の食料価格に先述の価格上昇率 α_{price} を乗じた値となる。

なお、あらかじめ入力値として、2000年度の食料需要量を与える。

表2 作付面積に関する価格弾性値

対象国	対象作物	トウモロコシ価格	小麦価格	大豆価格	米価格
アメリカ	とうもろこし作付面積	0.758	-0.564		
アメリカ	大豆作付面積	0.226	-0.226		
アメリカ	小麦作付面積		0.428		
中国	とうもろこし作付面積				0.140
中国	大豆作付面積	-0.279		0.210	-0.265
インド	大豆作付面積	0.106	0.469		
ブラジル	とうもろこし作付面積	0.483	-0.613		
ブラジル	大豆作付面積			0.319	

3. 推計結果

(1) バイオ燃料生産拡大による影響分析

推計結果を以下のケースに分けて、表示する。

- ・ケース1：バイオエタノールを製造しないケース
- ・ケース2：バイオエタノールを製造するケース
(北アメリカ、南アメリカのみ導入)
- ・ケース3：バイオエタノールを製造するケース
(北アメリカ、南アメリカ、アジア、ヨーロッパで導入)

図-6にとうもろこし、大豆、米、サトウキビ、小麦の国際価格の推移を示す。各作物の価格は1999年の価格を1として、相対価格で表している。次いで、図-7に品目別作付面積を示した。ただし、ケース毎の差異が顕著であった、とうもろこし、小麦、大豆のみを対象品目とする。また分析を容易にするため、生産主要国のみの作付面積をグラフ化した。

ケース1においては米、小麦が緩やかに価格が上昇する。アジア、アフリカを中心に人口が増大し、米と小麦の消費量は増えるものの、面積、単収が大きく伸び生産が需要に追いつくため、価格の上昇幅は比較的小さくなる。サトウキビ、大豆については価格が降下し続けている。特にサトウキビ価格の下落が著しい。現在、南アメリカを中心に導入されているサトウキビ由来のエタノールも全て食用にまわされるケース1では、供給過多となり価格が下落する。

サトウキビととうもろこし由来のバイオエタノールを導入するケース2においては、両者ともケース1と比べ価格が2倍程度上昇している。特に、とうもろこしは短期間に価格が急騰している。しかし、作付面積の方も価格に比例して拡大しているため、2010年以降は比較的安定して価格が推移している。

ケース3においては大豆以外の作物は全て、短期間に急騰している。今後アジアは中国、インドを中心に自動車の普及が拡大する。それに伴いガソリン消費量は飛躍的に増大するため、アジアの米とサトウキビが大量にエタノールへと変換されることになる。したがって、米とサトウキビの価格は大幅に増大する。

次にとうもろこしの価格に着目すると、エタノールに変換されとうもろこしの量は不変であるにも関わらず、ケース2より高い値で推移している。これは競合作物である小麦の価格が急上昇したためである。表-2のアメリカ、ブラジルのとうもろこし面積に対する小麦価格の弾性値は負の値を示している。したがって、図-8からも明らかとなおり、とうもろこしの作付面積が小麦価格の上昇に伴って縮小したためである。その分、小麦の作付面積はケース2よりも拡大している。

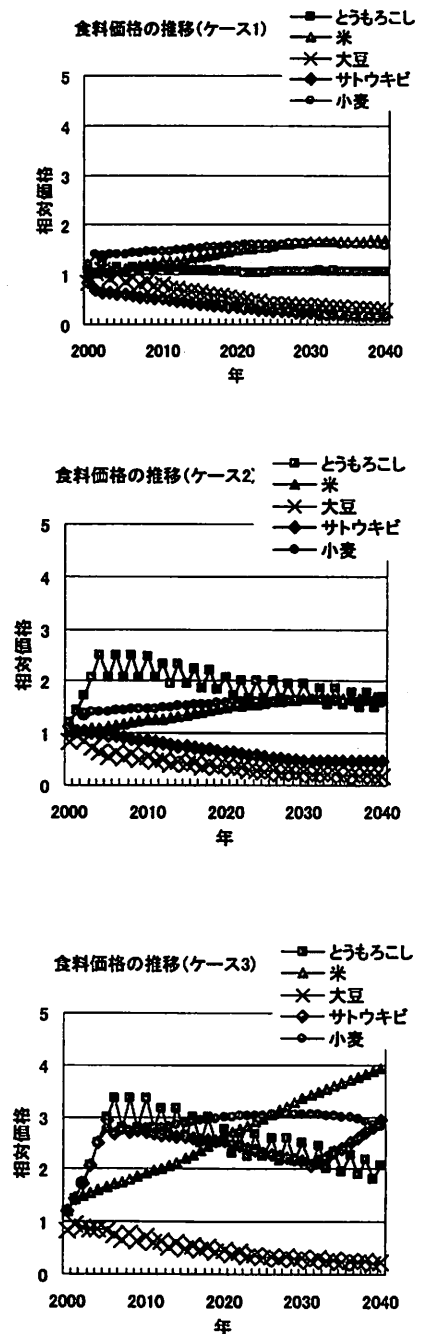


図-7 ケース毎の作物価格の推移

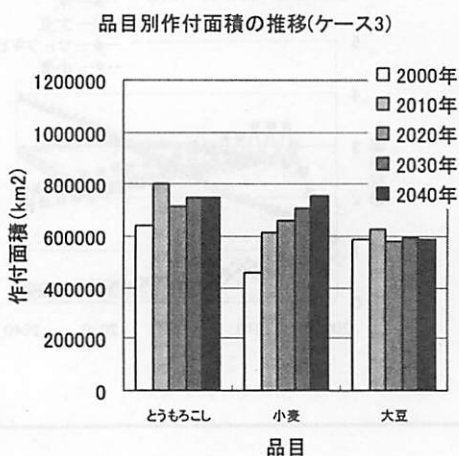
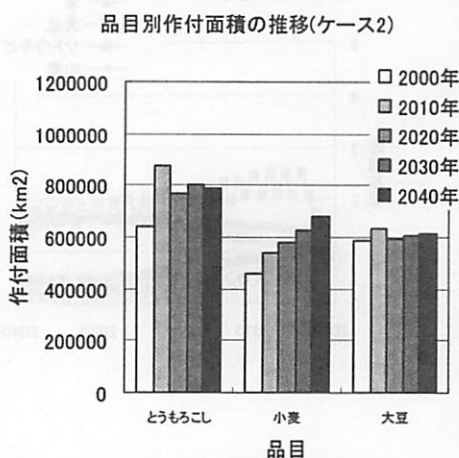
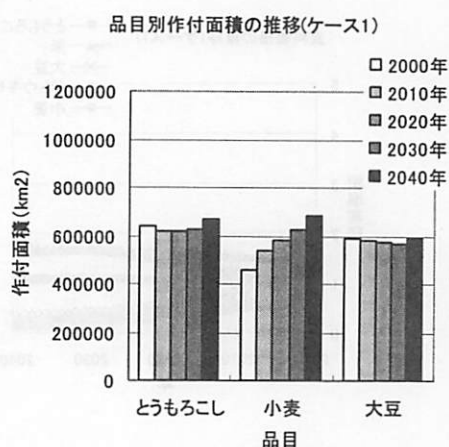


図8 品目別作付面積の推移

(2) 気候変動による影響分析

A1Bシナリオの気温変化率と降水量増加率を用いるにあたって、標準、少雨、高温、高温少雨の4ケースを想定した。気候変動の予測のばらつきに伴う影響の変化を考慮に入れるためである。

・標準：気温変化率と降水量増加率において、50%値を用いた。

・少雨：気温変化率については50%値、降水量増加率においては25%値を用いた。

・高温：気温変化率については75%値、降水量増加率においては50%値を用いた。

・高温少雨：気温変化率については75%値、降水量増加率においては25%値を用いた。

各地域、作物毎の気候変動に伴う収量の変動率を図9に示す。EUで栽培される米、小麦以外については、気候変動に対して収量が減少する結果を示している。中でも、「高温少雨」のケースが最も収量が減少することがわかった。作物によって200万tから1000万tのばらつきがあるものの、生産量に占める変化量の割合は2%未満に留まった。

ただ、分母を生産量から貿易輸出総量（2000年）に直すと、米、小麦、とうもろこし、大豆の変動量の占める割合はそれぞれ、-350%、-1.7%、-10%、-7.5%となり、安易に看過できる数値でないことがわかる。

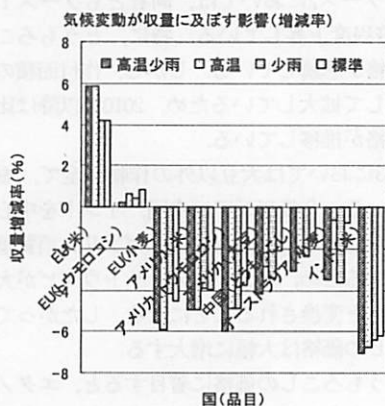


図9 気候変動が収量に及ぼす影響

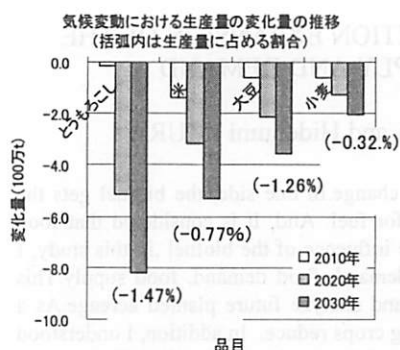


図-10 気候変動による生産量の変化量

4. 結論と今後の課題

(1) 結論

本研究では価格を変化させることで需給ギャップを調整するモデルを組み、将来の食料需要量、食料価格を推計した。シミュレーションを行った結果、以下のことが分かった。

- ・ケース2のようにある一定の種類、量までのエタノール生産量であれば、短期的には価格が急騰しても、生産量の増大により、中長期的に価格は安定する。
- ・ケース3のように燃料用作物の種類を増やすと、一方の作物の価格上昇が、競合作物の作付面積の縮小を招く。その結果、燃料用作物のみならず、他の競合作物の価格上昇が波及する。
- ・気候変動の影響は「高温少雨」が最も、収量減少の影響が大きい。その影響の度合いは、生産量と比べると軽微であるが、輸出入貿易市場に与える影響は小さくないといえる。

今後の課題

本研究の価格モデルは以下の点について不十分である。モデルの精度を上げるために今後の課題としたい。

- ・バイオエタノールの製造量が食料価格や原油価格と無関係である。
- ・政策や補助金、輸入関税、輸出コストといった地域の特性を考慮していない。
- ・作付面積の価格弾性値を求めるに当たって、対象とした国がごく一部の生産主要国のみであった。対象地域をさらに細分化したい。
- ・気候変動が収量に与える影響は、気温、降水量に限ったことではない。二酸化炭素増大に伴う施肥効果など、その他要因を考慮していきたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり多くの人からご協力をいただきました。特に、井村秀文教授には研究全体についての貴重な情報を提供してくださいました。白川博章准教授からは具体的な研究の方法について多くのご助言をいただきました。皆様に感謝申し上げます。

なお、本研究は平成20年度地球環境研究総合推進費（課題番号：Hc-086）、「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」（代表：井村秀文）によるものである。

参考文献

- 1) 小泉達治：バイオエタノールと世界の食料需給，筑波書房，pp141-176, 2007
- 2) IMF: IMF Primary Commodity Prices, 2008
(<http://www.imf.org/external/np/res/commmod/index.asp>)
- 3) 古屋淳：地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響の計量モデル分析, 2005.
(http://www.jircas.affrc.go.jp/kankoubutsu/research/seika2005/pdf/2005_01.pdf)
- 4) IPCC: Regional Climate Projections, 2007
(<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter11.pdf>)
- 5) 大谷洋・高橋潔：将来の発展シナリオを考慮した地球温暖化による農業影響のシミュレーション分析, 13(4), pp.529-538, 2000.
- 6) 大聖泰弘：バイオエタノール最前線，工業調査会, 17p, 2004.
- 7) 地球環境研究センター：IPCC Scenario Database
(<http://www.cger.nies.go.jp/scenario/>)
- 8) 矢野恒太郎記念：世界国勢図絵, CD-ROM, 2005.
- 9) FAO: FAOSTAT 2005, CD-ROM, 2005.
(<http://www.fao.org/docrep/009/a0750e/a0750e00.htm>)
- 10) IEA: Energy Statistics of OECD Countries 2006, CD-ROM, 2006.
- 11) IEA: Energy Statistics of Non-OECD Countries 2006, CD-ROM, 2006.
- 12) USDA: International Food Consumption Patterns, 2006.
(<http://www.ers.usda.gov/data/InternationalFoodDemand/>)
- 13) World Bank: World development Indicators, CD-ROM, 2006.

THE INFLUENCE ANALYSIS THAT PRODUCTION EXPANSION OF THE BIOFUEL GIVES TO THE FOOD SUPPLY AND DEMAND

Shintaro ADACHI, Hiroaki SHIRAKAWA and Hidehumi IMURA

Now, The biofuel is in the spotlight as a solution of climate change. In one side, the biofuel gets the farmers to convert farmland from the crops for food to crops for fuel. And, It is considered that food demand compete with demand of Biofuel Crops. To analyze the influence of the biofuel, in this study, I constructed the models composed of three section, ethanol demand, food demand, food supply. This model is able to treat price for non-biofuel crop as variables, and analyze future planted acreage. As a result of estimate, price hike let the planted area of the competing crops reduce. In addition, I understood that a temperature rise with the future climate change and the precipitation decrease caused the decrease of the yield.