

中国におけるバイオエネルギーの利用が 環境・経済に与える影響に関する研究

兎森 崇志¹・奥岡 桂次郎²・白川博章³・東修⁴・井村秀文⁵

¹非会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: kabutomori.takashi@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

²非会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

³正会員 博士 (学術) 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 博士 (工学) 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

⁵正会員 工学博士 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

中国におけるバイオエネルギー産業が拡大していくなかで、将来の環境・経済に与える影響は無視することはできない。特に、食料との競合や耕地不足の問題が懸念されている。既存の研究では、将来のエネルギー重要な増大を考慮していない。そのため、本研究ではバイオ資源の賦存量を推計するとともに、バイオ資源に対する需要を推計し、経済成長にともない、バイオ資源の需給バランスがどのように変化するかを検討した。その結果、理想的な経済発展シナリオでいけば、2050年まで、需要を満たすだけのバイオ燃料作物を食料と競合せずに作付けすることはできると推計された。また、可能耕地面積の限界は超えないことが推計された。ただし、実際の耕地ではそれほどの単収が見込まれないとすると、食料と競合してしまう可能性もあるとわかった。

Key Words : *bio ethanole, food demand, food supply, food problem, shortage of farmland*

1. はじめに

現在、環境問題の影響が懸念されるなか、各国において様々な取り組みがなされている。中国でも、省エネルギー対策や再生可能エネルギー利活用促進に向けた様々な取り組みが行われている。中国におけるバイオエネルギーの利用は、薪炭材の利用に加え、一部地域では家畜の糞尿を利用したバイオガスが利用されてきた。こうした取り組みに加え、2000年代に入ると、ガソリンや軽油をバイオエネルギーで代替する、いわゆるバイオ燃料の開発・製造も行われるようになり、大きな注目を集めている。

中国政府は、エタノール燃料やバイオディーゼルなどのグリーンエネルギーの開発を国家5カ年経済計画の重要優先課題に掲げ、2020年までにグリーンエネルギーが交通燃料全体の15%を占めるようにしたいと考えている。

バイオ燃料は、石油に代わる環境に優しいエネルギーだと考えられている。しかし、バイオエネルギーの利用拡大の期待と同等か、それ以上に、環境や経済に与える影響が懸念されている。その原料が食料と競合する場合、

食糧不足を引き起こし、食料価格が高騰する可能性が考えられるからである。

中国でも余剰トウモロコシ利用やエネルギー安全保障などの観点からエタノール増産が続いていたが、原料となるトウモロコシが値上がりし、豚肉価格にも影響し始めたため、中国政府は食糧を原料とするエタノール生産工場の認可を停止した。しかし、将来エネルギー重要が増大し、バイオ燃料が普及していく上で、トウモロコシなどの穀物からバイオエネルギーを生み出すほうが効率が良いとされている。

中国の食料需要については、これまで様々な研究が行われてきた。その代表的なものとして、Brown (1995)¹⁾は中国では、工業化による耕地減少と水不足で食料の自給が困難になる可能性があるとして指摘した。この指摘は、大きな反響を呼び様々な議論が行われた。例えば、IIASA(1999)²⁾は、農作物の可能耕地面積を推計し、Brownは耕地面積を過小評価していることを指摘した。ただし、IIASAは、バイオ燃料需要は検討していない。また、既存の研究では、将来のエネルギー重要な増大を考慮していない。

そこで本研究では、中国を対象に、将来のエネルギー

重要な増大を考慮して、バイオエネルギーに対する需要を明らかにするとともに、その供給可能性を穀物の需給バランスに着目し、自給を前提として、検討する。そして、これによって、中国における穀物からのバイオエネルギーのポテンシャルがどの程度あるのかを調べることが目的とする。その際、ガソリンの代替となるバイオエタノールを中心に、また、バイオエネルギーの原料は穀物の中でも米、小麦、トウモロコシの三品目だけとして、検討することとする。

図-1に、研究方法をフローチャートとして示す。

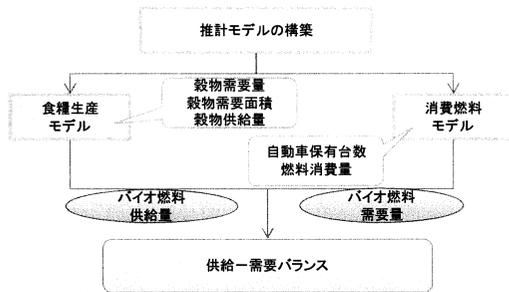


図-1 本研究の分析チャート

2. バイオ燃料供給モデル

(1) 穀物需要量の推計

まず、穀物消費の空間分布について把握する。本研究では、総消費量として、FAOSTAT⁹⁾の記載値を用い、省の食料消費傾向および人口に基づいて、2000年の空間分布を推計した。ここでの推計の方法については、園田(2006)⁴⁾を参考とした。

推計は、都市部と農村部の消費傾向の違いを考慮して行い、統計書のデータより、全土に対する省の割合をそれぞれ求め、FAOSTATの全土消費量を割り振る方法を用いた。農村部の一人当たりの米と小麦、トウモロコシの消費量のデータはあるが、都市部のデータはない。そこで、CIESEN⁹⁾より、都市部の1人当たり穀物消費量は農村部の消費量の0.84倍であるということを用い、農村統計年鑑⁹⁾の農村部省別一人当たりの消費量からの各省の米、小麦の消費割合から、都市部のものを求めた。ただし、都市への人口流動は同じ省内の農村からのものであり、穀物の消費傾向も維持されると仮定し、都市部の消費割合が全土平均の農村部の一人当たり消費割合を下回ることはないものとした。そして、その推計結果を中国統計年鑑⁷⁾の都市部全土一人当たり穀物消費量に合うように換算した。さらに、中国食物供求与予測⁸⁾を用い

て、省別、都市と農村別、穀物の種類別に基づいた1人当たり穀物消費量 U_{ijk} を求めた。 i は省、 j は都市また農村の区分(都市 u 、農村 r)、 k は穀物の種類を示す。この U_{ijk} および各省の都市人口および農村人口を P_{iu} 、 P_{ir} として、FAOの全土の品目 k の総消費量に対する、省 i 、都市または農村区分 j に属する消費量の割合 S_{ijk} を、式(1)によって求めた。

$$S_{ijk} = U_{i,j,k} P_{i,j} / \sum_i \sum_j U_{i,j,k} P_{i,j} \quad (1)$$

S_{ijk} をFAOの総消費量 $Q_{FAO,k}$ に乘じ、都市および農村の消費量を式(2)のように合計することにより、省 i の該当の消費量 $Q_{i,k}$ を求めた。

$$Q_{i,k} = Q_{FAO,k} (S_{i,u,k} + S_{i,r,k}) \quad (2)$$

2000年のFAOフードバランスにおいて、家畜飼料のうち、米、小麦、とうもろこしが占める割合は94%であり、この主要3品目の内訳では、トウモロコシの割合が大きく、家畜飼料全体に対して90%を占める。米、小麦の飼料向けの消費量は、人が消費する量の2%とともに小さいため、本研究では考慮しない。一方、トウモロコシについては、人の消費量に対して飼料としての消費が3.7倍に及んでいる。このような家畜飼料の消費状況を踏まえ、家畜飼料はすべてトウモロコシであると仮定し、トウモロコシの消費量の推計を行った。推計では、まず肉類の生産量を求め、次にこの生産に必要となる飼料量を計算した。肉類の生産量については、FAOSTATに記載されている品目 k の総生産量 $Y_{FAO,k}$ を、統計年鑑記載の省単位の生産量 $Y_{i,k}$ を用い、式(3)のように分配した。 $Y_{i,k}$ は推計された生産量である。

$$Y_{i,k} = Y_{FAO,k} Y^s_{i,k} / \sum_i Y^s_{i,k} \quad (3)$$

次に、推計された肉類の生産量に家畜の生育に必要な食肉と飼料の換算係数を乗じることで、飼料として消費されたトウモロコシ消費量を計算した。飼料換算係数については、表-1に示される黒井(1995)⁹⁾が紹介している中国科学院の係数を用いた。

	米	小麦	トウモロコシ
	4.3	3.6	2.7

これらより、2000年の穀物消費の空間分布は把握できるが、将来の穀物需要量の空間分布を推計するために、省別の一人当たり穀物消費量や飼料消費量を予測するのは難しい。そこで、本研究では、近年の一人当たり穀物消費量は安定しているとみられるので、2000年の省別の値をそのまま用いることにする。また、GDPと一人当たりの肉類消費量の相関関係より求めた近似式より将来の飼料用穀物消費量を求め、以下の式を使って、2005年から2050年までの飼料用穀物需要量を推計した。ここで、 t は年とする。

$$D_{i,k,t} = U_{i,k,2000} P_{i,t} + T_{i,k,t} \quad (4)$$

- D_{ik} : 穀物消費総需要量
 $U_{ik,2000}$: 2000年の一人当たり穀物消費量
 P_{it} : 人口
 T_{ikt} : 飼料用穀物需要量

2010年、2030年、2050年の推計結果を図-2に示す。

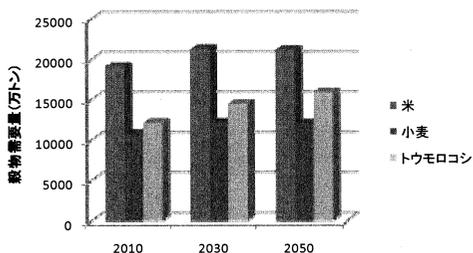


図-2 穀物需要量の推計結果

(2) 耕作需要面積の推計

2000年から2050年までの穀物消費需要量を推計した結果を面積に変換する。経済力の高い社会は機械・化学肥料・灌漑設備等の農業技術より、高い単収値を達成できるものと考えられる。このことからGDPと単収値の間にはある程度の相関関係が認められると予想される。1985年から2006年までのGDPと単収値の関係を米、小麦、トウモロコシそれぞれについて近似式で表し、2005年から2050年までの中国における品目別の単収値を推計し、耕作需要面積を求めた。

(3) 穀物からの燃料供給量の推計

ここでは、IIASAによる中国の可能耕地面積の推計結果データを用いて、どれだけ未利用耕地があるかを推計し、その耕地からのバイオ燃料供給量を推計した。ここでは、2010、2030、2050年を対象とする。

以下の表-2に品目別のバイオ燃料換算係数¹⁰⁾を示したが、本研究では、トウモロコシの一番換算係数が大きいため、未利用面積をすべてトウモロコシ耕地とするとときのバイオ燃料量を推計した。ただし、IIASAの土地利用の定義の中には、「最適地」「適地」「可」「限界地」「不適地」があるが、「最適地」「適地」「可」「限界地」を合わせたものを可能耕地とする。

以上より、可能耕地面積より推計した未利用耕地の面積を表-3に示す。

表-2 バイオ燃料換算係数 (L/t)

米	小麦	トウモロコシ
303	303	337

表-3 未利用耕作面積の比較 (万ha)

	耕地面積	未利用可能耕地
2010	13,955	4,116
2030	14,715	3,355
2050	14,461	3,609

3. バイオ燃料需要モデル

バイオ燃料はガソリンに混入させて用いるのが一般的であるので、市場においての取引が最も活発的に行われている運輸部門における燃料について扱うものとする。さらに、運輸部門のうちでも、道路における交通について本節では対象とする。また、燃料と自動車のサイズを考慮して、乗用車、二輪車、バス・トラックの三種類に分類し、バス・トラックについては、燃料がディーゼルのものとガソリンのものがあることを考慮する。

(1) 自動車保有率の推計

世界の主要国の人口、GDP、自動車保有台数から、一人当たりの自動車保有台数を推計した。世界の主要国は「世界国勢図会」¹¹⁾のデータから、1970年から2000年にわたって人口、GDP、自動車保有台数がそろっている国を参考に、以下の10ヶ国をピックアップする。それは、日本、中国、韓国、インド、イギリス、フランス、アメリカ合衆国、カナダ、ブラジル、オーストラリアである。東アジア諸国に加えて、OECD諸国をいくつかあげたのは、現在の中国のGDPだけでは将来予測について不確実性が残るために、いくつかのOECD諸国を参考に、自動車保有率の限界値を探るためである。

以上のデータから、一人当たりのGDPを横軸に自動車保有率を縦軸としてグラフ作成し、図-3に示す。ただしここで、一人当たりGDPは自然対数をとる。

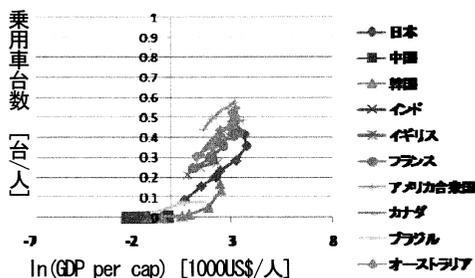


図-3 GDP と自動車保有率の関係

図-3 を見ると GDP の増加に対して乗用車保有率が増加しているのはほぼ明らかであり、理論傾向線分析の中ではロジスティック曲線に当てはまる成長モデルであると考えられる。よって、ここでは自動車保有率について1.0を成長上限としてロジットモデルに当てはまると仮定した。同様に、二輪車、バス・トラックについても上限値を0.3、0.6として、ロジットモデルに当てはまるとして仮定した。なお、上限値の設定については今回の考察では、OECD 諸国の現在地がロジットの中央水準をやや超えた程度にあると仮定して設定した。

推計は回帰分析を用いて行った。被説明変数を自動車保有率として、説明変数に一人当たり GDP を用いた。自動車保有率に関しては、乗用車、二輪車、バス・トラックの三種類において、ロジットモデルを当てはめた。また、一人当たり GDP ただ一つを説明変数としたのは、自動車保有が経済成長とともに行われ、所得が上昇することでその配分を得るとの仮定による。

式は以下のとおりである。

$$Y_i = \frac{e^{\alpha_i + \beta_i \ln x}}{1 + e^{\alpha_i + \beta_i \ln x}} \quad (5)$$

- Y : 自動車保有率[台/人]
 x : 一人当たり GDP[1000US\$/人]
 i = {1,2,3}: {乗用車, 二輪車, バス・トラック}
 α, β : 回帰係数

推計結果を表-4に示す。

ただし、二輪車に関しては、データが少なく各国の地域的要因が大きいいため、全体ではなく日本と中国の二カ国においてのみ推計したのでサンプル数が小さい。

表-4 自動車保有率推計結果

	乗用車	二輪車	バス・トラック
GDP	1.47 ***	1.01 ***	0.98 ***
切片	-4.35 ***	-4.32 ***	-4.86 ***
サンプル数	70	9	70
補正重決定係数	0.87	0.72	0.86

(2) 一台当たりの燃料消費量の推計

中国の GDP、自動車保有台数、燃料消費量から、一台当たりの燃料消費量を推計した。自動車の種類は乗用車、二輪車、バス・トラックである。燃料消費量は自動車の種類別に Kebin He(2005)²⁾を参考に、乗用車、二輪車はガソリン消費量を、バス・トラックはディーゼル消費量とガソリン消費量を用いて、自動車保有台数で除すことで一台当たりの燃料消費量を求めた。乗用車、二輪車の一台当たりの燃料消費量は、GDP の変化に対してあまり変化が見られなかったためデータを平均して一定とした。バス・トラックについては GDP を説明変数として指数関数モデルで推計した。

(3) 自動車による燃料消費量の推計

中国全体の燃料消費量を推計するのに、省ごとの値を積み上げて推計した。各省において、将来にわたって推計した自動車保有台数と1台あたりの燃料使用量を乗じることによって、将来の燃料使用量を乗用車、二輪車、バス・トラック（ディーゼルとガソリン別）に推計した。

式は以下のとおりである。

$$FC = \sum_i \sum_j FC_{ij} \quad (6)$$

$$FC_{ij} = Cpv_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

$$P_{ij} = Y_{ij} x_{ij} \quad (8)$$

- FC : 燃料消費量(Fuel Consumption) [Mt]
 Cpv : 一台当たり燃料消費量(Consumption per vehicle) [Mt/台]
 P : 自動車保有台数(Possession) [台]
 Y : 自動車保有率[台/人]
 x : 人口[人]
 i = {1,2,3}: {乗用車, 二輪車, バス・トラック}
 j = {1,2,...,31}: {省}

4. 将来予測シミュレーション

(1) シナリオの設定

中国のバイオエネルギー利用に関する将来予測をするためには、将来の経済成長を省別に把握する必要がある。

まず、中国工程院の『中国持続発展水資源戦略研究報告集第4巻』で示されている全国及び省別の人口シナリオ（高成長ケースと低成長ケース）の2010～2030年の人口成長率より、2050年の仮の省別人口（A）を求めた。これは、2030～2050年の期間については省別に設定されたシナリオが存在しないためであるが、2030～2050年の実際の人口成長率は2010～2030年の人口成長率より低下することが予想されるので、次式によって下方修正を行った。

$$P_{i,2050} = A \times \frac{B}{\sum A} \quad (9)$$

$P_{i,t}$: 省*i*における*t*年の人口

ここで、*B*は『中国人口情報研究中心』の全国人口増加率の値（-0.01%）を使用して得られる2050年の全国人口である。

また、社会経済のシナリオ分析を行うにあたり、各種GDP成長シナリオを設定する必要がある。トレンドシナリオ、均等成長シナリオ、沿岸部発展シナリオ、内陸部発展シナリオの四種類のシナリオを設定した。ただし、シナリオごとに人口には変化をつけず、全国のGDPがシナリオごとにおおよそ一致するようにした。

(2) バイオエネルギーの供給量

推計された未利用耕作面積の値から、余剰トウモロコシ生産量を求め、バイオ燃料換算係数よりバイオ燃料供給量を推計した。ただし、近年における各省別のGDPと単収値の相関関係がとれなかったため、供給量については、中国全体のトレンドによる推計単収値を用いたものだけである。

表-5に推計結果を示す。

表-5 余剰トウモロコシ生産量とバイオ燃料供給可能量 (Mt)

	トウモロコシ生産量	バイオ燃料供給量
2010	221.1	58.9
2030	196.2	52.2
2050	221.0	58.8

(3) バイオエネルギーの需要量

燃料消費量を推計するモデルから、バイオエネルギー

の需要を推計した。省別にそれぞれ推計を行い、積み上げることで中国全体の燃料消費量とした。

シナリオ別の結果は以下のとおりである。

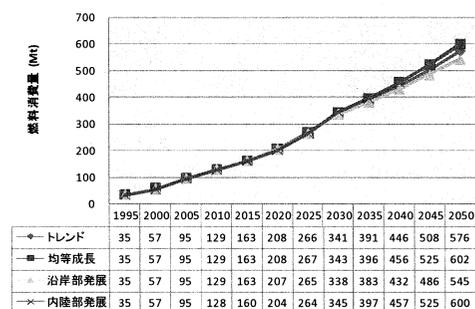


図-4 シナリオ別の推計燃料消費量

2025年まではシナリオによってほとんど変化が見うけられない。その後、シナリオごとに違いが出てくる。消費量が最も小さくなるのは沿岸部発展型のシナリオで、最大となる均等成長型シナリオと比較すると50Mt程度違いが出る。

(4) バイオ燃料供給量と需要量の比較

中国では、現在、9つの省でE10が導入されている。そこで、バイオ燃料需要をガソリン需要の10%とし、供給量と比較した。

表-6 バイオ燃料の供給量と需要量の比較 (Mt)

	2010	2030	2050
	供給量		
	58.86	52.24	58.85
	需要量		
トレンド	12.87	34.12	57.56
均等成長	12.87	34.28	60.17
沿岸部発展	12.88	33.78	54.46
内陸部発展	12.84	34.52	60.01

ただし、実際は食料としての穀物は「最適地」「適地」の順に良い土地で作られると考えられ、燃料用の穀物が作られる土地の単収はそれに比べ、低くなると想定される。そこで、IIASAによる「最適地」「適地」「可」「限界地」の単収値の違いを考慮して、供給量を概算した。ここで、未利用耕作面積をトウモロコシだけではなく、各年における米、小麦、トウモロコシのそれぞれの需要面積の割合に配分して推計した。その結果、2010年において31.3Mt、2030年において27.6Mt、2050年において31.2Mtとなった。

5. まとめ

本研究では、将来の経済成長を考慮して、中国における食料需給に対する影響、土地利用に対する影響や自動車燃料に対する影響を推計した。

人口増大による耕地面積の不足が懸念されたが、可能耕地面積を超えることはないという結果となった。また、自動車数の増大によるバイオ燃料需要が起こることが想定されるが、トレンドシナリオ、沿岸部発展シナリオにおいては、その需要を満たすだけのバイオ燃料作物を食糧と競合せずに作付けできると推計された。これは、沿岸部発展の方が他のシナリオに比べて貧富の差が大きくなり、自動車保有率がそこまで増大しないことによるものであると考えられる。

ただし、今回の分析では、農地が宅地や工業用地に転用されることを考慮していない。加えて、可能耕地面積の中でも、単収の大きい「最適地」が耕地以外に転用されると、供給量に与える影響は大きいと考えられる。したがって、穀物を原料としたバイオ燃料の需要拡大は、食料需要を逼迫する可能性があると思われる。

今後は、上記の土地利用転換の問題を考慮することに加え、穀物由来以外のバイオ燃料の供給ポテンシャルの推計、バイオ原料の輸入等を検討することが課題である。また、単収などシナリオの前提となる値の精度を高めることも課題である。

参考文献

- 1) L. R. Brown : だれが中国を養うのか? 迫りくる食糧危機の時代,ダイヤモンド社, 1995
- 2) IIASA: IIASA Laxenburg, Austria, <http://www.iiasa.ac.at/>
- 3) FAO: FAOSTAT, <http://apps.fao.org/default.html>
- 4) 園田益史・大西暁生・白川博章・井村秀文: 食料需要モデルを利用した黄河流域の農業用水消費に関する研究, 環境システム研究vol.34, pp.525-535, 2006
- 5) CIESIN: Columbia University, Center for International Earth Science Information Network, <http://www.ciesin.org/data.html>
- 6) 中華人民共和国国家統計局: 中国農村統計年鑑, 中国統計出版社, 2000-2005
- 7) 中華人民共和国国家統計局: 中国統計年鑑, 中国統計出版社, 1990-2006
- 9) 黒井尚志: 中国が2600億の卵を食べる日, 家の光協会, pp.88, 1995
- 8) 陳永福: 中国食物供求与予測, 中国農業出版社, 2004
- 10) 大聖泰弘: バイオエタノール最前線, 工業調査会, 2004
- 11) (株) 富士通ラーニングメディア: 世界国勢図会CD-ROM2005/2006, (財) 矢野恒太記念会, 2005
- 12) Kebin He, Hong Huo, Qiang Zhang, Dongquan He, Feng An, Michael Wang, Michael P. Walsh : "Oil consumption and CO₂ emissions in China's road transport : current status, future trends, and policy implications", Energy Policy 33, pp1499-1507, 2005

STUDY ON INFLUENCE OF BIOFUEL USE ON ENVIRONMENT AND ECONOMY IN CHINA

Takashi KABUTOMORI, Kejiro OKUOKA, Hiroaki SHIRAKAWA,
Osamu HIGASHI, and Hidehumi IMURA

As bio-energy is replaced to, the impact to environment and economy can't be ignored in the future, in particular being anxious about competing with food. Then, the study estimates stock-potential and the demand of bio-fuel. In addition, it is examined what change can have mattered in demand-supply balance of bio-fuel with four scenario of economy development. As the result, in case of ideal scenario for economic growth, it is possible that grain for bio-fuel enough to satisfy the demand is produced without competing food and that an area of cultivated land is available in 2050. But actually it seems to be not high yield, and there is a possibility of competing food