

# アジアにおける持続可能なバイオ燃料の需給システムに関する考察\*

## Study on the socio-economic aspect of bio-fuel sustainability in Asia \*

紀伊雅敦\*\*・丸山敦史\*\*\*・甲斐聡\*\*\*\*

By Masanobu KII\*\*・Atsushi MARUYAMA \*\*\*・Satoshi KAI\*\*\*\*

### 1. はじめに

地球温暖化対策およびエネルギー安全保障の観点からバイオ燃料導入の取り組みが世界的に進められている。その際、エネルギー作物の生産に比較優位性のある国々にとっては、外貨獲得や農村部における投資機会の創出の場としてのメリットがあるとされており、またエネルギー需要国にとっても供給国の分散によるリスク低減やCO2排出削減に寄与しうるものと考えられている。しかし、生産コストや供給面の不確実性、生産国での環境影響、食料生産との競合等の懸念から、現在、一部の国を除き本格導入には至っていない。

わが国の状況を鑑みると、輸送用燃料としてのエタノール導入の将来目標が掲げられているが、経済的な価格で供給可能な国内生産見通しはごくわずかであり、大半は輸入によらざるを得ないと考えられる。現在、バイオエタノールの輸出余力を有するのはブラジルのみだが、我が国の近隣に位置する東南アジア諸国では気候条件、労働コストの面からバイオ燃料生産に比較優位があると考えられ、我が国からも事業化の可能性について調査が行われている。しかし、我が国がアジア諸国のバイオ燃料生産推進に関与すべきか否かを判断するためには、それがもたらす幅広い影響を考慮する必要がある。

近年、バイオ燃料の持続可能性は環境面や食料需給面から論じられることが多いが、社会的、経済的側面も同様に重要である。現状では石油系燃料と比較してバイオ燃料の製造コストは割高であり、導入を試みている国ではほとんどが免税等の措置を取っている。このため、バイオ燃料導入が経済的に成立しうる原油価格、製造コスト、およびCO2排出削減価値等の条件の検証が必要である。また、社会的には農業振興を通じた社会格差の是正に寄与すると考えられるが、これが単なる所得移転以上の効果を有するかも検証が必要であろう。

\*キーワード：地球環境問題、バイオ燃料

\*\*正員、工博、地球環境産業技術研究機構

(京都府木津川市木津川台、

TEL0774-75-2304, FAX0774-75-2317)

\*\*\*非会員、学博、千葉大学大学院園芸学研究所

\*\*\*\*非会員、学修、株式会社インテージ

本研究では、アジアでの輸送用バイオ燃料の生産、消費を想定し、バイオ燃料の生産国と消費国を含む需給システムモデルに基づき、その持続可能性の社会的、経済的側面についてモデルを用いた検討を行う。これにより、バイオ燃料利用の経済的効率および各主体の便益への影響を理論的に把握するとともに、石油価格等の各種価格がもたらす影響を分析する。

なお、本研究ではバイオ燃料の生産・利用コストを集約的に扱っており、また他の温暖化対策などの代替政策は考慮していない。このため、得られる結果は必ずしも現実を十分反映したものではなく、あくまでもバイオ燃料の需給面にのみ着目し、理論的な考察を行うものであることに留意されたい。

### 2. バイオ燃料需給システムの持続可能性

経済的観点からバイオ燃料の利用が潜在的に持続可能であるためには、利用しない場合と比較して全ての関係主体の便益が非負となる必要があるが、その便益を燃料の生産、消費に絞ってみると、生産者側では製造コスト、消費者側では石油系燃料価格、炭素削減価値、ならびに車両、インフラ等のバイオ燃料への対応コストなどに依存すると考えられる。それら要因の多くは将来見通しを得ることが困難である一方、販売される輸送用燃料に対するバイオ燃料の混合率は通常、燃料品質確保の観点から基準化が必要であり、諸条件の変化に柔軟に対応することが難しい。このためバイオ燃料の導入には、それがもたらす幅広い影響を考慮したロバストな制度設計が求められるが、特にわが国のようにバイオマス資源も海外に依存する場合には生産国における影響までも考慮する必要がある。

本稿では運輸部門のバイオ燃料を対象に、政策の影響を受ける主体として生産国の生産者と消費者、消費国の消費者を想定し、生産コストや石油価格等の各種条件下での燃料政策の効率と持続可能性を検討する。その際、両者を以下のように定義する。

① 燃料政策が効率的であるとは、政策変数に関し社会的余剰が最大化されている。

② 政策が持続可能であるとは、それが効率的であり、

なおかつ、いずれの主体の便益も政策により減少しない。

ここで社会的余剰は生産者、消費者の生産額、費用から構成され、各国政府は社会的余剰を最大化するよう国内のバイオ燃料混合率を決定すると想定する。このとき政策によりすべての主体の便益が正になることは必ずしも保証されない。例えば、バイオ燃料の製造コストが石油価格と比較して高い時に使用を義務付ける政策は、生産者には便益をもたらすが消費者には費用をもたらす。このため、持続可能性の評価には主体ごとに便益、費用の帰着量を計測することが必要である。

以下では、それを具体化するために各主体の行動および政策をモデル化し、バイオ燃料需給システムを部分均衡モデルとして定式化する。

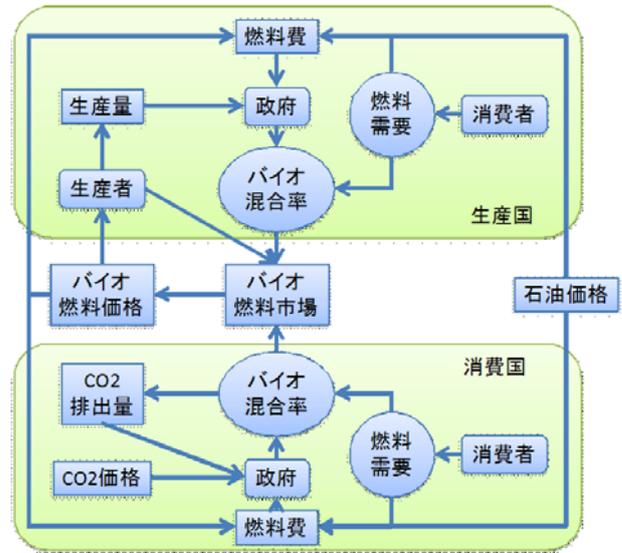


図1 バイオ燃料需給システム

### 3. バイオ燃料需給システムのモデル化

本稿では、輸送用バイオ燃料について生産国と消費国の二カ国を想定し、生産国ではバイオ燃料の生産と消費を行い、消費国ではバイオ燃料の消費のみ行うと仮定する。両国とも燃料需要は価格に関し非弾力的と仮定し、生産国ではバイオ燃料の生産額と燃料コストの差を最大化するよう混合率を設定し、消費国ではCO2排出制約のもとでその削減費用と燃料費の合計を最小化するよう混合率を決定すると仮定する。この両国の需給が一致するようバイオ燃料価格は決定される。これら活動の相互連関を図1に示す。

以下、生産者、消費国政府、生産国政府の行動を定式化し、バイオ燃料の均衡価格を導く。

#### (1) バイオ燃料生産者

バイオ燃料生産者は所与の価格  $p_b$ 、コスト  $c_b$  の下で利潤  $\Pi$  を最大化するよう生産量を決定する。

$$\Pi = p_b \cdot q_b - c_b \quad (1)$$

バイオ燃料の限界生産費用は土地制約に起因して逡増すると想定し、費用関数を以下のような2次式で定義する。

$$c_b = c_v(q_b) + c_0 = \alpha_1 \cdot q_b^2 + c_0 \quad (2)$$

生産者の利潤最大化の条件より

$$q_b = \frac{p_b}{2\alpha_1} \quad (3)$$

ここで、供給条件は  $\Pi \geq 0$  であることから

$$p_b \geq 2\sqrt{\alpha_1 \cdot c_0} \quad (4)$$

#### (2) 消費国政府

消費国  $d$  は以下の燃料コストと CO2 削減費用の総和  $TC_d$  を最小化するようバイオ燃料混合率を定める。

$$TC_d = \{p_{bd} \cdot s_d + p_f \cdot (1 - s_d) + \beta_{0d} \cdot s_d^2\} \cdot L_d \cdot \varepsilon_d + p_c \cdot (D - s_d \cdot \delta \cdot L_d \cdot \varepsilon_d) \quad (5)$$

ただし、 $p_{bd}$  は消費国でのバイオ燃料価格、 $s_d$  はバイオ燃料混合率、 $p_f$  は石油燃料価格、 $L_d$  は年間走行距離、 $\varepsilon_d$  は燃費、 $p_c$  は炭素価格または他の手段による CO2 削減費用、 $D$  は CO2 削減目標、 $\delta$  は石油燃料の CO2 排出原単位を表す。なお、右辺第1項のカッコ内の  $\beta_{0d} s_d^2$  はバイオ燃料導入に伴う車両、インフラ等の年間費用を表し、導入量に応じてより高度なガソリン基材調整や輸送、貯蔵設備、および車両側の対応が必要になると想定し費用が逡増すると仮定する。また、第2項はバイオ燃料のみで排出制約を満たせない場合には一定の価格で排出権を購入するか他の削減策を行うことを想定している。この最小化問題より次式が得られる。

$$s_d = \frac{p_f + p_c \cdot \delta - p_{bd}}{2\beta_{0d}} \quad (6)$$

ただし、 $p_f + p_c \cdot \delta < p_{bd}$  の場合は  $s_d = 0$  であり、この場合バイオ燃料の輸入は行わず他の手段で削減目標を達成する。すなわち、石油燃料価格に炭素価格または削減費用を加えたものよりもバイオ燃料の消費地価格が安ければ、その差額に応じて混合率が設定されるが、バイオ燃料の方が高ければ使用しないことが効率的となる。

#### (3) 生産国政府

生産国  $g$  はバイオ燃料生産額と燃料コストの差を最大化するようバイオ燃料混合率を定める。

$$TB_g = W_b \cdot p_b \cdot \{s_g \cdot L_g \cdot \varepsilon_g + q_d\} - L_g \cdot \varepsilon_g (s_g \cdot p_b + (1-s_g)p_f + \beta_{0g} \cdot s_g^2) \quad (7)$$

ただし、 $W_b$  はバイオ燃料生産に対する政策的重要度、 $p_b$  はバイオ燃料の生産国内価格、 $q_d$  は消費国需要量である。また、消費国と同様にバイオ燃料消費に応じてコストが増加することを仮定している。この最大化問題を解くことで生産国のバイオ燃料混合率は次式で与えられる。

$$s_g = \frac{p_b(W_b - 1) + p_f}{2\beta_{0g}} \quad (8)$$

なお、バイオ燃料の生産地は通常農村部であり、消費地は都市部である。都市部と農村部の所得格差や経済機会格差が問題となる場合、政策的に  $W_b$  は 1 より大きい値が設定される。また、 $W_b=1$  の場合、式(7)において国内向け生産額は国内消費額とキャンセルされ、混合率はバイオ燃料価格によらず、石油価格のみで決定される。一方、 $W_b>1$  の場合にはバイオ燃料価格が高いほど混合率を高くすることで生産額を増加させることになるが、これは反射的に消費者のコストとなる。

#### (4) バイオ燃料需給均衡

式(3), (6), (8)より、バイオ燃料の需給均衡条件は次式となる。

$$q_b = \frac{p_b}{2\alpha_1} = \frac{p_f + p_c \cdot \delta - p_{bd}}{2\beta_{0d}} \cdot L_d \cdot \varepsilon_d + \frac{p_b(W_b - 1) + p_f}{2\beta_{0g}} \cdot L_g \cdot \varepsilon_g \quad (9)$$

ここで、バイオ燃料の消費地価格  $p_{bd}$  は生産地価格  $p_b$  と輸送費  $c_t$  の和と仮定すると、均衡価格は次式となる。

$$p_b^* = \frac{\left( \frac{p_f + p_c \cdot \delta - c_t}{2\beta_{0d}} \cdot L_d \cdot \varepsilon_d + \frac{p_f \cdot L_g \cdot \varepsilon_g}{2\beta_{0g}} \right)}{\left( \frac{1}{2\alpha_1} + \frac{L_d \cdot \varepsilon_d}{2\beta_{0d}} + \frac{W_b - 1}{2\beta_{0g}} \cdot L_g \cdot \varepsilon_g \right)} \quad (10)$$

これより、バイオ燃料価格は石油価格、炭素価格、および両国の燃料需要量の関数となる。ただし、 $p_f + p_c \cdot \delta < p_{bd}$  の場合は  $s_d=0$  であり、貿易は行われず均衡価格は次式となる。

$$p_b^* = \left( \frac{p_f \cdot L_g \cdot \varepsilon_g}{2\beta_{0g}} \right) / \left( \frac{1}{2\alpha_1} + \frac{W_b - 1}{2\beta_{0g}} \cdot L_g \cdot \varepsilon_g \right) \quad (11)$$

## 4. 各主体への影響と持続可能性

以上の定式化において、生産額と費用の差を便益と定義すると、各国のバイオ燃料混合率は便益を最大化するものとなっている。この下で、バイオ燃料需給システムが本稿の定義において持続可能であるためには、各主体にもたらされる便益が正であることが必要である。また、それがCO2削減に寄与することも重要な条件と考えられる。

ここではバイオ燃料生産がおこなわれない場合を基準として、それに対しバイオ燃料の導入政策が各主体にもたらす便益とCO2削減量を定式化する。

#### (1) バイオ燃料生産者

式(1)-(3)と均衡価格より生産者の利潤は次式となる。

$$\Pi = \frac{p_b^{*2}}{4\alpha_1} - c_0 \quad (12)$$

ここでバイオ燃料生産を行わない場合は利潤はゼロであることから、生産者の便益は式(12)の利潤で表される。ただし、均衡価格が式(4)の条件を満たさない場合には、価格が平均費用を下回るためバイオ燃料は生産されない。

#### (2) 生産国消費者

生産国における燃料消費コストはすべて消費者が負担するとして、費用を次式で定義する。

$$TC_g = L_g \cdot \varepsilon_g (s_g \cdot p_b^* + (1-s_g)p_f + \beta_{0g} \cdot s_g^2) \quad (13)$$

ここで、バイオ燃料が生産されない場合は  $s_g=0$  であり、費用の差を便益と定義すると次式で与えられる。

$$B_g = L_g \cdot \varepsilon_g (s_g \cdot p_f - s_g \cdot p_b^* - \beta_{0g} \cdot s_g^2) \quad (14)$$

式(8)を代入すると

$$\frac{B_g}{L_g \cdot \varepsilon_g} = -\frac{p_f^2}{4\beta_{0g}} + \left( \frac{p_b^*}{2\beta_{0g}} + 1 \right) p_f + \frac{p_b^{*2}(W_b^2 - 1)}{4\beta_{0g}} \quad (15)$$

また、式(10)より  $p_b^*$  は  $p_f$  の一次式であるから結局  $B_g$  は  $p_f$  に関し二次式となる。ただし、 $p_f$  に関する  $B_g$  の挙動は各種係数の値により異なり、最大値をとる場合も最小値をとる場合も存在しうる。

#### (3) 消費国消費者

排出権取得や他の CO2 削減策の費用は結局消費者が支払うと考え、式(5)より消費者の費用は次式となる。

$$TC_d = \left\{ (p_b^* + c_t) \cdot s_d + p_f \cdot (1 - s_d) + \beta_{0d} \cdot s_d^2 \right\} \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \\ + p_c \cdot (D - s_d \cdot \delta \cdot L_d \cdot \varepsilon_d) \quad (16)$$

バイオ燃料が生産されないときは $s_d=0$ であり、その時とのコスト差を便益と定義すると次式で与えられる。

$$B_d = \left\{ p_f \cdot s_d - (p_b^* + c_t) \cdot s_d - \beta_{0d} \cdot s_d^2 \right\} \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \\ + p_c \cdot s_d \cdot \delta \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \quad (17)$$

式(6)を代入すると、

$$\frac{B_d}{L_d \cdot \varepsilon_d} = \frac{(p_f + p_c \cdot \delta - p_b^* - c_t)^2}{4\beta_{0d}} \quad (18)$$

これより便益は $s_d=0$ のとき最小値となり、 $p_f + p_c \cdot \delta - p_b^*$ に対して、二次のオーダーで便益が増加する。

#### (4) CO2排出量

バイオ燃料はカーボンニュートラルであり使用時のCO2排出量はゼロと想定し、また生産時にもCO2は排出されないと仮定すると、生産国のCO2排出量は次式で与えられる。

$$CO2_g = \delta \cdot (1 - s_g) \cdot L_g \cdot \varepsilon_g \quad (19)$$

また、消費国の排出量はクレジット購入分を差し引くことで次式で与えられる。

$$CO2_d = \delta \cdot (1 - s_d) \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \\ - (D - s_d \cdot \delta \cdot L_d \cdot \varepsilon_d) \quad (20) \\ = \delta \cdot L_d \cdot \varepsilon_d - D$$

最後に、バイオ燃料貿易に伴うCO2排出量を次式で定義する。

$$CO2_t = s_d \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \cdot \tau \quad (21)$$

ここで、 $\tau$ は燃料の単位輸送量当たりのCO2排出量である。

以上より、バイオ燃料生産を行わない場合と比較すると、CO2削減量は次式で与えられる。

$$\Delta CO2 = \delta \cdot s_g \cdot L_g \cdot \varepsilon_g - s_d \cdot L_d \cdot \varepsilon_d \cdot \tau \quad (22)$$

なお、式(19)より消費国ではバイオ燃料混合率によらずとも結局他の方法により目標値まで排出削減を行うため、バイオ燃料導入による正味の国内削減量はゼロであり、一方でバイオ燃料輸送に伴うCO2が発生することから、混合率を増やすことでその分だけCO2は増加することとなる。

## 5. 考察

以上の定式化により、効率的なバイオ燃料混合率とその時の便益の帰着額、並びにCO2排出変化量の推計が可能となった。ただし、この便益はバイオ燃料導入によるCO2削減費用の節約額とともに石油消費節約に伴う産油国への所得移転の抑制効果より構成される。効率性基準の下でバイオ燃料が導入されるか否か、またそれが各主体の便益を向上し、かつCO2削減に寄与するものか否かは、バイオ燃料の生産費用構造、消費に伴う追加費用とともに、燃料価格、炭素価格等の外部条件にも依存する。それら条件の把握には実証研究が必要だが、本モデルではそれらを想定できた場合のバイオ燃料政策の持続可能性の評価を行いうるものとなっている。

本稿で示した解析結果のみでは、生産国消費者の便益の符号が確定せず、またCO2排出量も輸送条件で削減されるか否かは明確ではない。加えて式(4)で表される供給条件を満たすための均衡価格は式(10)で示すように外部条件に大きく依存する。事実、フィリピンでは、バイオ燃料法によりエタノール導入が義務付けられているが、価格情報が与えられておらず国内での生産投資は行われていない。これは、ブラジル等海外と比較したコスト競争力の低さを反映しているともいえるが、現時点の価格が供給条件を満たしていない可能性も考えられる。

また、式(5)、(7)のバイオ燃料混合率に対し消費者側の費用が逡増するとの仮定はアドホックではあるが、我が国の調査ではエタノール直接混合を行う場合には濃度が高くなるに従い燃料混合時と保管時の水分管理等が重要になるとともに、蒸気圧等の燃料品質を確保するためガソリン基材側の調整も必要となる。また車両側も耐食性のある部材への置き換えや空燃比変化に対するフィードバック制御等の対応が必要となる。このため、現時点では混合率の上限が3%までと品確法で定められている。以上より低濃度の混合では消費者の費用はそれほど大きくないと考えられるが、濃度が高くなるに従い各種対応コストが生じるものと考えられる。

今後、数値例を用いたシミュレーションにより、バイオ燃料の供給条件を満たす石油価格等の外部条件を把握するとともに、その持続可能性についても評価を行う予定である。また、石油価格変動や収穫変動に伴うコストについても評価が重要である。加えて、各種コストパラメータについても感度分析が必要である。これらは発表時に報告する予定である。

## 謝辞

本研究は環境省「地球環境研究総合推進費（RF-078）」の支援により実施されたものである。ここに記して謝意を表する。