

13. 途上国におけるバイオエタノール生産プロジェクトの影響評価手法の検討ーパプアニューギニアにおけるケーススタディー

荒巻 俊也^{1*}・齊藤 香菜子²・花木 啓祐³・入江 光輝⁴

¹東洋大学国際地域学部国際地域学科（〒374-0193 群馬県邑楽郡板倉町泉野1-1-1）

²東京大学工学部都市工学科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

³東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

⁴筑波大学北アフリカ研究センター（〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1）

* E-mail: aramaki@toyonet.toyo.ac.jp

途上国において大規模なバイオマス生産とそれを用いたエタノール製造を行うプロジェクトを想定し、プロジェクトが及ぼしうる環境面、社会面での影響を整理した。さらに、パプアニューギニアで検討されているプロジェクトを事例として、雇用の創出と温室効果ガスの削減に関する効果について解析を行った。その結果、大規模な雇用の創出効果が見込まれ、地域経済へ大きな波及効果をもたらすことになるが、一方でその影響があまりに大きいことへの懸念も指摘された。また温室効果ガス削減効果については作物の種類により大きく変わることが指摘され、燃料への転換時の残渣の利用方法や廃液の処理方法によっては通常ガソリン生産より温室効果ガスの発生量が増加してしまう可能性も指摘された。

Key Words : Bio-ethanol, biomass production, developing countries, impact assessment, CO₂ mitigation

1. はじめに

化石資源の節約や温室効果ガス削減のためにバイオマスから生産されるバイオ燃料が注目されており、既にブラジルやアメリカなど大規模な生産が始まっている。多くの途上国においても、雇用の創出や現金収入の確保、また付随して起こるインフラの整備などの経済効果や農業振興に貢献するものとしてバイオ燃料への関心が高まっている。一方で、新たな農地の開拓による森林の伐採やバイオマスの大規模生産による環境負荷、食料との競合、バイオマス生産と燃料転換時のエネルギー消費など多くの問題点も指摘されている。途上国においてバイオ燃料生産を行う際にどのような影響について配慮すべきかを整理して、持続可能な形でバイオ燃料を生産・利用していくことに結びつけていくことが喫緊の課題である。本研究では、パプアニューギニア（以下、PNG）で検討されているバイオエタノール生産プロジェクトの事例を対象として、まずプロジェクトが及ぼしうる環境面、社会面での影響を整理した。さらに、温室効果ガスの削減効果と雇用の創出効果について定量的な解析を行った。温室効果ガスの削減効果については原料の生産から製品の輸送までのライフサイクルにわたる解析を行っている。

2. 途上国におけるバイオマス生産および燃料転換が及ぼす影響

途上国において大規模なバイオマス生産、およびバイオ燃料への転換が行われた場合に起こりうる環境面、社会面での影響を表-1に定性的に整理した。

表-1 途上国におけるバイオ燃料生産が及ぼし得る影響

	良い影響	悪い影響
環境面	化石燃料枯渇の抑制 CO ₂ 排出量の削減	森林などの破壊 CO ₂ 増加の可能性 肥料からのN ₂ O排出 廃水による水質汚染 残渣の処理
社会面	雇用の創出 エネルギー保障 農業振興 周辺地域の経済効果 インフラの整備	食糧との競合 低賃金労働 地域社会の崩壊

バイオ燃料については現在多くの研究^{1)~4)}がなされており、特にエネルギー収支やCO₂削減効果について検討した事例は多い。どのようなバイオマスを原料としたか、

バイオマスを生産し、輸送し、燃料に転換し、輸送し、消費するというライフサイクルの中でどのステップを考慮に入れているか、廃水や廃棄物の処理方法などバイオマス生産や燃料転換をどの程度管理しているかなどの考え方により、結果が大きくばらついている。環境面では、廃水や過剰施肥による水質影響、廃棄物の処理、新たな開墾による森林破壊や既存農地の転換、などさまざまな影響が考えられる。これらの影響についてもバイオマスの生産や燃料転換時にこれらの影響をいかにコントロールするかで実際に影響が出てくるかどうかが決まる。

社会面では、食糧供給と競合してこれらの価格を上昇させてしまうことへの懸念が多く指摘されている。それ以外に、労働環境や待遇の問題、地域社会に大きな変革をもたらし、それが地域コミュニティに悪い影響を与えてしまう可能性なども考えられる。これらはバイオ燃料転換プロジェクトのみに特有な問題ではなく、さまざまな開発プロジェクトが共通で抱える課題とも言える。

本研究では、これらの影響の中でも、環境面におけるライフサイクルの観点からの CO₂ の削減効果と雇用創出の効果について以降で検討することとする。対象としたプロジェクトは過去に森林が伐採され、現在は利用されていない荒地を利用してキャッサバやサトウキビを栽培し、栽培地の近くに転換工場を設置してバイオエタノールを生産する、というものである。上で指摘された影響のうち、森林破壊については既存の森林域を用いないので該当しない。

情報収集は、対象プロジェクトのホスト企業からのデータ提供、文献値の引用、PNG 関係者へのインタビューにより行った。

3. プロジェクトの概要

(1) パプアニューギニアについて⁷⁾

パプアニューギニア (PNG) はオーストラリアの北 160km、赤道のすぐ南に位置し、大小700を超える島々からなる。国土面積は46km²に対し、人口は約620万人くらいであり、人口密度は13人/km²である。気候はおおむね熱帯雨林気候で年平均降水量は約2000mmである。

PNGの国連人間開発指数は対象173カ国中133位⁸⁾と低位であり、貧困層は人口の37%に及ぶとされている。約85%の国民は自給自足の農業および漁業に依存しているが、都市部の貨幣経済と村落部の自給自足経済が混在する二重構造になっている。また、平均寿命 (57歳) や乳幼児死亡率 (82/1,000人) といった代表的な保健衛生指標に示される通り劣悪な社会状況にあり、保健・衛生、教育等の社会面で多くの課題を抱えている。また、失業率

は地域により4%~80%にもなり、特に都市部での高失業率は社会問題化している。

PNG国内では原油が採掘されるがその多くは輸出され、一次エネルギー供給量の6割以上を占める石油製品は全て輸入製品である。これは原油の精製工場が整っておらず、大量の原油を処理し切れない為であると考えられる。

農林水産業のGDPに占める比率は2割強と高い。農作物は主として焼畑耕作により生産されており、ココナッツ、バナナ、イモ類等の栽培が行われている。しかし、不安定な品質や輸送流通体制の未整備等の為、こうした農業が産業として成立するには至っていない。

(2) 当該プロジェクトについて

当該プロジェクトは前述したように、森林地域ではなくすでに人為的に森林が伐採された土地を利用して行う予定である。現地では大規模な荒地が多く、18 万 ha の土地が利用可能であると仮定し、そのうち 6 万 ha ずつにサトウキビとキャッサバを栽培することとし、残りの 6 万 ha は自生するサゴヤシからデンプン採取してバイオエタノールを生産することを検討した。

バイオエタノールへの転換は農地のすぐ近くに工場を設置して行うこととし、製品の輸送手段 (道路と港) はすでに整備されており、水も十分にあるものと仮定した。生産したバイオエタノールは全て無水化された後ホスト企業がすべて買い取るものと仮定し、道路と港を使って日本に出荷してガソリンと混合されるものとした。

生産プロセスはサトウキビ由来の無水エタノール製造プロセスの例を参考に、以下の図-1 のプロセスを仮定した。キャッサバやサゴヤシも同様に、前処理・液化・糖化・発酵・蒸留・脱水・廃水処理のプロセスを経てエタノール化されるものと考えた。

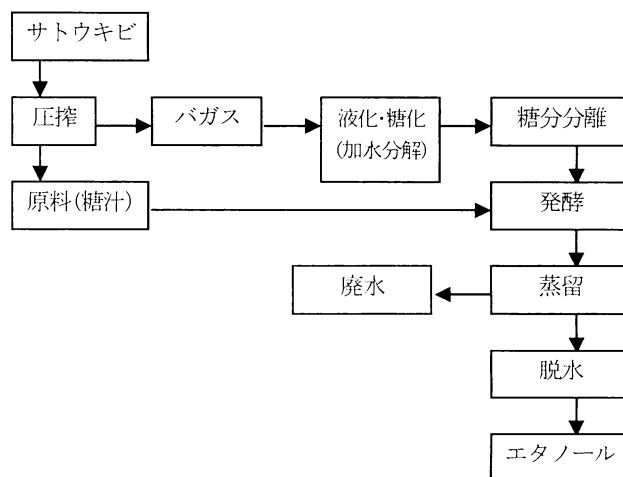


図-1 エタノール製造プロセス ⁸⁾を参考に作成

4. プロジェクトによる社会面での影響評価

(1) 雇用の創出

ブラジル全体のサトウキビ生産の 60%を占めるサンパウロ州では、サトウキビ 100 万 ton/yr 当たりの直接労働力は 2,200 人（農業 1,600、工場 600 人）であり、このうち農業管理者・工場技術者は 30%、中間技術者（運転手等）は 10%、非技術者は 60%を占め、さらに 660 人の間接労働力を創出する⁹⁾。また、ブラジル北東部は生産効率、機械化の遅れ、労働力資質が低いこと等から単位生産量当たりの労働力は3倍にもなる。

サンパウロ州における単位生産量当たりの労働力が本プロジェクトにも適用出来るとし、またエタノール生産量当たりに換算した値をキャッサバやサゴヤシにも適用した場合、本プロジェクトにより創出される労働力は表-2 の結果となる。合計で約 3 万人の雇用創出となるが、これは PNG 全体の人口の 0.5%にもおよぶ。なお、バイオマス生産の数値は 5. (1)の表-3 で算出している値のうち、悪条件のもの (min) を用いている。

この結果から、本プロジェクトは栽培地周辺に住む数千人の住民のみではなく、都市部の失業者を雇用するポテンシャルも持つことが分かる。一方で、雇用の規模が非常に大きいため、就業者の住環境などの整備も併せて検討をする必要があろう。

(2) その他の社会的効果

本プロジェクトは利用されていない放置された土地を使用する為、本来食糧に使われるはずの作物を使うわけではない。本プロジェクトにより農業基盤の整備が進み、定着型農業が普及して安定的な作物の生産が行われれば、将来的に食糧需給が逼迫した場合には食物としての供給も可能になる。このように、定着型農業を普及させ、バイオエタノールのみでなく持続可能な食糧の確保も出来るような農業振興も本プロジェクトの目的の一つである。

また大規模自営の農場での雇用だけでなく、地元農家からの作物の買い取りも検討しており、マーケットアクセスを提供することで地方活性化を目指すと共に、都市部の治安改善にも貢献しうる。またプロジェクトの実行に際し、周辺人口も増加し、道路や電気等の基礎的なインフラのみでなく、学校・病院やマーケット等の商業施設の建設などの波及効果をもたらすことも期待される。さらに現在は植林を伴わない持続不可能な形での林業により生計を立てている地域住民も存在し、貴重な熱帯林の破壊に繋がっているが、彼らに雇用の機会を提供することで森林破壊の防止にも効果があるとも考えられる。

このように本プロジェクトではさまざまな波及的な効果が見込まれる。その一方で、4. (1)で述べたように最

終的なプロジェクト規模が現地経済に対して大きいため、地域経済の活性化による新たな環境への圧力に注意が必要である。

5. CO₂排出削減効果

(1) 評価の前提条件

本プロジェクトにより製造される無水エタノールはすべてガソリン代替として消費されることになる為、代替されたガソリン消費量に対応する CO₂ 排出量（以下、ベースライン排出量）からプロジェクトに係る全てのエネルギー消費に対応する CO₂ 排出量（以下、プロジェクト排出量）を差し引いた値が、プロジェクトによる CO₂ 排出削減量に相当する。なお、バイオエタノール燃料に伴い発生する CO₂ はバイオマス由来であるため、算出の対象としない。

バイオエタノールの生産量について、生産収率および原料原単位は文献値を用い、収率について好条件・悪条件の下で生産量を推定すると表-3のような結果となる。

(2) ベースライン排出量

エタノール年間生産量とエタノールの発熱量 (=0.0212(TJ/ton)¹³⁾)から代替されるガソリンの発熱量を計算し、これガソリンの CO₂ 排出係数 (=69.3 (ton/TJ)¹⁴⁾) を掛けて算出される。その結果を表-4に示す。

表-2 雇用の創出(人)

サトウキビ	キャッサバ	サゴヤシ
8,800	8,300	13,100

表-3 バイオエタノール生産量の算出

	サトウキビ		キャッサバ		サゴヤシ
	min	max	min	max	
栽培地面積 (ha)	60,000		60,000		60,000
生産収率 (ton/ha/yr)	51.2 ¹⁰⁾	69 ¹¹⁾	15.63	31.25	40 ¹²⁾
原料原単位 (ton/kl)	12.7 ⁹⁾		4.46		6.67 ¹³⁾
エタノール生産量 (10 ³ kl/yr)	242	326	210	420	360

表-4 ベースライン CO₂ 排出量の算出 (ton-CO₂/yr)

サトウキビ		キャッサバ		サゴヤシ
min	max	min	max	
277,000	374,000	241,000	482,000	412,000

(3) プロジェクト排出量

原料の生産から製品の輸送までの各工程において、表-5 に示す 5 つの項目に由来する CO₂ 排出量 (ton-CO₂/yr) を評価し、これを足しあわせてプロジェクト排出量とした。各項目について、算出方法を以下に述べる。

a) 原料の栽培時に使用する化石燃料

サトウキビおよびキャッサバ原料の栽培時に使用するエネルギー消費由来の CO₂ 排出量の算出にあたっては、農林水産省の小麦栽培収穫時の機械使用による燃料消費量¹³⁾ (L/ha/yr) に、燃料種ごとの発熱量原単位および CO₂ 排出量原単位^{10,14)} を乗じて 1ha 当たりの CO₂ 年間排出量を算出した。なお、サトウキビおよびキャッサバ特有の栽培時燃料費が得られなかった為、小麦のデータで代用することとした。

サゴヤシに関して、分蘖により自然に新しい樹木が育つので植付けは必要なく、収穫は人力で行うと考えられ、その際に排出される CO₂ は無視出来るほど小さい為、栽培収穫時のエネルギー消費由来 CO₂ 排出量はないものとした。

b) 農業機械や肥料の製品生産時のエネルギー消費

PNG における農業関連データおよび製品製造時エネルギー消費量原単位の入手が困難である為、日本の農林水産省の「さとうきび」および「かんしょ」（キャッサバ・サゴヤシに適用）に関する統計資料の農業機械の購入・原価償却費、種苗費、肥料費、農薬費 (円/ha/yr) のデータ¹⁵⁾ を用いた。これら各々の製品に該当する産業連関表 (I-A) -1 型 CO₂ 排出量原単位¹⁶⁾ (t-CO₂/円) を乗じることでにより各種製品生産時のエネルギー消費に伴う CO₂ 排出量を算出した。

サゴヤシについては人力での収穫や分蘖により植付けが不要であることから農業機械や種苗の製造時 CO₂ 排出量は無視出来るとした。

c) 栽培地から工場までのトラック輸送に伴う燃料消費

原料の栽培面積あたりの収穫量に栽培地面積の 6 万 ha を乗じて得た収穫量を用い、使用するディーゼルトラックは 12 トン車、平均積載率 75%として¹⁷⁾、トラックの延べ台数を計算した。また、栽培地から工場までの平均走行距離は 3 原料とも約 25 (km/台) とし、トラックの燃費 3km/L¹⁷⁾、ディーゼル油の発熱量 38.4 (MJ/L)¹⁸⁾、CO₂ 排出係数 74.1 (ton/TJ)¹⁹⁾ を用いて算出した。

d) エタノール製造工場内で使用するエネルギー

表-6 によりエタノール生産量あたりの使用エネルギーを推定した。電力については重油による自家発電で賄われると仮定した。ここでサトウキビは残渣であるバガスを燃料としてプロセスで使用する為、追加的なエネルギーが殆ど不要⁹⁾ であることが知られているの

で重油消費はないものとした。なお、自家発電の効率を 30%、重油からの蒸気エネルギー転換効率を 90%¹⁹⁾ とする。尚、この原単位はキャッサバ由来バイオエタノール製造工場に基づいたデータであるが、サゴヤシを原料とした場合もキャッサバと同様にデンプン質であることから大きな違いは無いとし、同じ値を使用した。この値と重油の CO₂ 排出係数 73.3 (ton-CO₂/TJ)¹⁴⁾、重油の発熱量 42.0 (MJ/L) を用いて CO₂ 排出量を計算した。

e) 港から日本までのタンカー輸送に伴う燃料消費

PNG から日本までの距離約 5,000km およびタンカー輸送で消費するエネルギーの原単位を 0.068 (MJ/km・ton-ethanol)¹⁷⁾、タンカーの燃料として使用される C 重油の CO₂ 排出係数を 73.3 (ton-CO₂/TJ)¹⁴⁾ として計算した。

(4) 考察

プロジェクト排出量をベースライン排出量と比較した結果を図-2 に表す。キャッサバやサゴヤシの結果ではエタノール製造過程の燃料消費による CO₂ 排出量が大きな部分を占めており、ベースライン排出量よりプロジェクト排出量が大きくなっている。つまり、これらの作物では CO₂ の削減効果は見込まれないことになる。その一方でサトウキビはバガスをエネルギー源として用いるため大幅な CO₂ 排出削減が期待出来る。

ここで、キャッサバの廃液からメタン発酵により得られるバイオガスのエネルギー回収可能量は、文献によると 3.45 (MJ/L-ethanol)²⁰⁾ である。この値を重油の CO₂ 排出係数およびエタノールの発熱量・比重を用いて変換し、前述の解析結果をエネルギー生産量当たりの CO₂ 排出量に変換したデータと合わせたグラフを図-3 に表す。

表-5 各工程における評価項目

工程	評価項目
原料の生産	・原料の栽培時に使用するエネルギー消費 ・農業機械や肥料の製品生産時のエネルギー消費
原料の輸送	・栽培地から工場までのトラック輸送に伴う燃料消費
エタノールの製造	・エタノール製造工場内で使用するエネルギー消費
エタノールの輸送	・港から日本までのタンカー輸送に伴う燃料消費

表-6 エタノール生産あたりの用役原単位²⁰⁾

	原単位 (/kL)
電気	300 (kWh)
重油	230 (L)
用水	14m ³

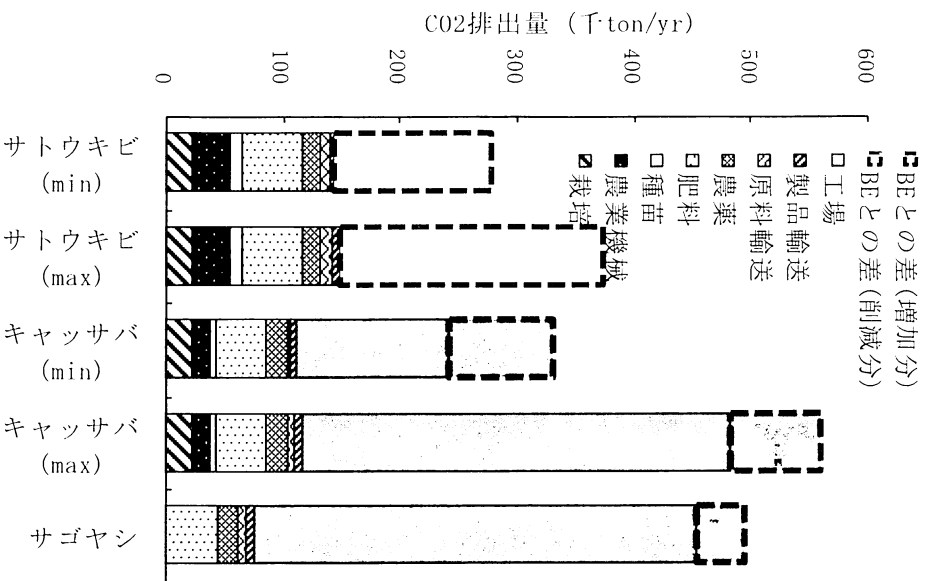


図2 作物種ごとのプロジェクト CO₂排出量とベースライン (BE) CO₂排出量との比較

バイオガスのエネルギー回収により削減出来る CO₂ 排出量は、工場の CO₂ 全排出量の 31.7% という結果を得た。これは、バイオガスによりエタノール変換過程の消費エネルギーのほぼ全量を賄うサトウキビと比較すると小さい割合である。しかしこの図より、好条件下での栽培が可能で原料の収率が良い場合であれば、バイオガスによる CO₂ 排出量削減分を考慮するとキヤッサバでもベースライン排出量を下回ることが出来ることが分かる。

さらに、本プロジェクトにおいては同じ地域でサトウキビとキヤッサバを栽培する為、サトウキビのバイオガスをキヤッサバ由来エタノール製造のエネルギーとして利用することも可能である。これにより、サトウキビからのエタノール生産量は減少するものの、プロジェクト全体として考えると CO₂ 排出量を削減することが可能になるものと考えられる。

6. まとめ

PNG におけるバイオマス生産とバイオエタノール製造プロジェクトについて、雇用の創出については大きな効

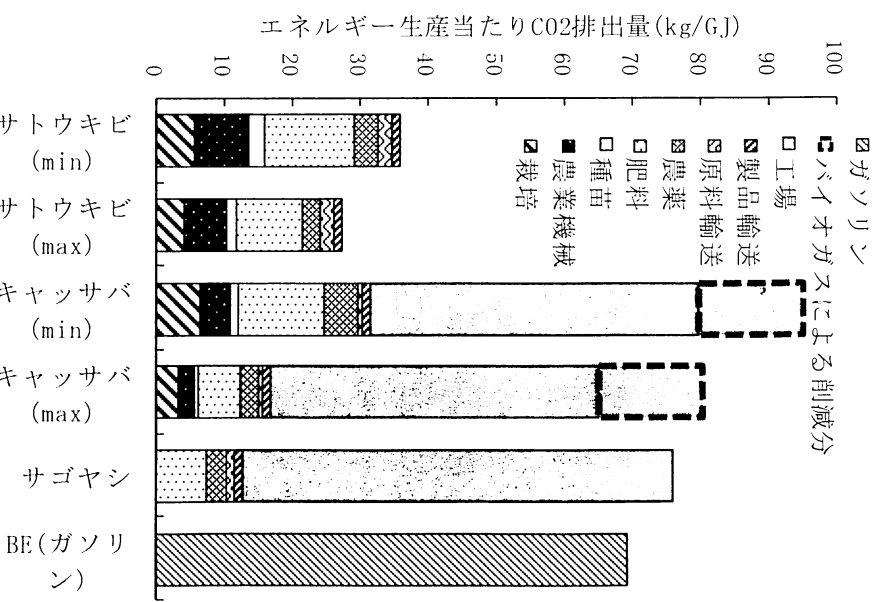


図3 作物種ごとのエネルギー生産量当たりプロジェクト CO₂ 排出量とベースライン (BE) CO₂ 排出量

果が得られることがわかった。これは失業者がもたらす都市部の治安悪化の改善に貢献するものと考えられるが、与える効果が大きい故に環境面で負の側面が出てくる可能性もあることに注意が必要であろう。また、原料作物の種類や収率、工場におけるエネルギー供給方法等により、CO₂ の削減効果が得られない場合があることも分かった。プロジェクトの計画時にどのようにプロジェクトをデザインするかで、その効果が大きく変わることが示された。

この結果は今回のケーススタディに特有なものではなく、途上国におけるバイオ燃料プロジェクト全般に通ずるものである。途上国側では経済発展の一つのオプションとしてバイオ燃料への期待は大きいですが、各プロジェクトにおいて複数の代替案を検討しながらバイオ燃料が与える効果や影響について十分な検討をしていく必要がある。今回のケーススタディではバイオ燃料生産が与える影響のうち限られた項目のみを評価したが、他の項目についても可能な限り定量的に評価していく必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたって、現地情報の収集などコスモ石油（株）海外事業部の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Martin C. Heller et al.: Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system, *Biomass and Bioenergy*, Vol.25, pp. 147-165, 2003.
- 2) David Pimentel and Tad W. Patzek: Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, *Natural Resources Research*, Vol.14, No. 1, 2005.
- 3) Alexander E. Farrell et al.: Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals, *Science*, Vol. 311, pp. 506-508, 2006.
- 4) Harro von Blottnitz et al.: A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 607-619, 2007.
- 5) Richard Doornbosch and Ronald Steenblik: Biofuels: Is the cure worse than the disease?, OECD, 2007.
- 6) 加用千裕, 園田隼也, 荒巻俊也, 石井暁, 花木啓祐: 栽培系バイオマス由来のバイオエタノール活用による二酸化炭素排出削減ポテンシャルの推計, 第35回環境システム研究論文発表会, pp.19-26, 2007.
- 7) 在日パプアニューギニア大使館 HP, <http://www.png.or.jp/general%20information.htm>, 閲覧日 2008/02/12.
- 8) 外務省: 政府開発援助 (ODA) 国別データブック 2006, http://www.mofa.go.jp/mofai/gaiko/oda/shiryo/kuni/06_databook/pdfs/07-10.pdf, 閲覧日 2008/02/12.
- 9) 株式会社ジャパンエナジー・リサーチ・センター, CDM 事業調査「ベトナムにおけるサトウキビからエタノール含有ガソリンの製造に関する調査報告書」, 2001.
- 10) International Fertilizer Industry Association, Fertilizer use by crop in Ghana, <http://www.fao.org/docrep/008/a0013e/a0013e00.htm#Contents>, 閲覧日 2008/02/12.
- 11) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール醗酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発, 平成 15 年度成果報告書, 2004.
- 12) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): アジア諸国における未利用バイオマスからの燃料エタノール生産に関わる調査, 平成 18 年度調査報告書, 2007.
- 13) 農林水産省統計部: 農業経営統計調査平成 18 年産小麦生産費, 2006.
- 14) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6a.htm>, 最終閲覧日 2008/02/12.
- 15) 農林水産省統計部: 平成 18 年度 工芸農作物等の生産費, 2006.
- 16) 南齋規介, 森口祐一: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), (独) 国立環境研究所, 京都大学大学院エネルギー科学研究科, 2002.
- 17) 株式会社 三菱総合研究所: バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究, 平成 14 年度経済産業省委託調査新エネルギー等導入促進基礎調査, 2002.
- 18) Tetsuya Suzuki: Effects on Reduction of Environmental Loads from Transport Sector by Low-Environmental-Loads Commuter Buses, 2004.
- 19) 戒能一成: 「補論 2: 産業部門内部での自家発電・産業用蒸気のエネルギー転換について」, 経済産業研究所 HP, <http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2004EBXRCAN0200.pdf>, 閲覧日 2008/02/12.
- 20) 財団法人 バイオインダストリー協会: タピオカ利用燃料用エタノール製造システムの開発に関する調査報告書, 平成 5 年度 NEDO 委託調査, 1994.
- 21) Thu Lan Thi Nguyen, Shabbir H. Gheewala, Savitri Garivait: Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand, *Energy Policy*, 2007.