

E-0802 アジア太平洋地域を中心とする持続可能な発展のためのバイオ燃料利用戦略に関する研究

(5) LCAによるバイオ燃料利用に関する総合影響評価

東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻

花木啓祐

平成20～22年度累計予算額：14,886千円（うち、平成22年度予算額：5,282千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕化石燃料を代替するバイオ燃料はGHGを始めとした環境負荷を削減する手段として有望と考えられている。しかし、原料作物の栽培、精製、輸送などから構成される生産の過程や自動車の走行による使用の過程において新たな環境負荷が生じる面があり、トレードオフが生じている。それを定量的に把握するためにライフサイクルアセスメント(LCA)による評価を行った。栽培を伴うバイオ燃料の生産は地域性が強いいため、地域特性を組み込んだLCAが必要であり、また生産過程と消費過程を区別した評価を行った上で統合した解析が必要になる。

中国各省のバイオディーゼルの生産ポテンシャルを推定した結果、2020年の需要の6割をまかなえること、副産物のエネルギー利用をすればLCA的にも有利であることが示された。ブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノールについて、将来のシナリオを複数設定してLCAによる比較を行った。生産の過程では、発生副産物であるバガスをエネルギー源として発電することによって、電力代替効果によるGHG削減が達成され、消費過程でのガソリン代替効果を加えることによって大幅なGHG排出削減が可能になる。バイオ燃料あたり、あるいは走行キロあたりのLCAの結果ではバガスの発電利用がもっとも有利になった。しかし、サトウキビ重量あたりでは、バガスからもバイオエタノールを生産した方がGHG削減量が大きいことが分かった。インドのジャトロファ由来のバイオディーゼルについて、将来のシナリオを複数設定してLCAの比較を行った。生産過程と消費過程を統合的に判断すると、GHG排出量削減に貢献できることが示された。しかし、副産物をもバイオディーゼルに変換し収量を上げたプロセスは、製造時のGHG排出が大きくなるため、必ずしも有利とは言えないことが分かった。インドネシアのパームヤシに関しては、環境負荷の原因となっているプランテーションへの土地利用の変化をモデル地区において定量的に把握することができた。

〔キーワード〕 LCA、バイオエタノール、バイオディーゼル、ブラジル、インド

1. はじめに

バイオ燃料は、気候変動の大きな原因となっている化石燃料の消費を削減するため、CO₂の排出量を削減することができる。これは、バイオ燃料がバイオマスから製造されるため、いわゆるカーボンニュートラルであるからである。このことから、バイオ燃料は非常に有効な手段であると、少なくとも表面的には見える。

しかしながら、事態はそう簡単ではない。バイオ燃料の生産過程は、エネルギー作物を栽培し、そこから得られるバイオマスを原料として液体燃料を製造し、それを輸送する部分から構成される。バイオエタノールの場合にはサトウキビ、トウモロコシなどをアルコール発酵させ蒸溜する過程が含まれる。バイオディーゼルの場合には原料となる植物油を原料として化学反応を起こさせる過程が含まれる。これらの過程で当然エネルギーが使われる。

これに加えて、エネルギー作物の栽培過程でもGHGガスが発生することが指摘されている。通常の農業では施用した窒素肥料が原因となって、亜酸化窒素が発生する。エネルギー作物についても、その収量を上げるために施肥を行うと亜酸化窒素が発生する。さらに、森林の土地利用をエネルギー作物のプランテーションに変更した場合には森林のCO₂吸収能力が失われて、また土壌中の有機物が分解してCO₂が発生する。これらのことは、バイオ燃料の製造は多かれ少なかれGHGの排出を伴うことを意味している。すなわち、化石燃料の代わりにバイオ燃料を使用する際に削減されるCO₂と、製造過程で発生するGHGの間にトレードオフの関係がある。

このようなトレードオフがあるから、バイオ燃料を製造するのは意味がない、と判断するのは短絡的であり適切ではない。定量的にこれらのトレードオフを評価することが科学的な判断の前提として必要であり、それを可能にするのがライフサイクルアセスメント(LCA)である。LCAを行うことによって、バイオ燃料の生産過程の一番最初の段階から、最終的な自動車による使用段階までを通じた環境負荷を評価することができる。その中でGHGあるいは他の環境負荷の増加分と減少分を計算すれば、実質的な効果を評価できる。バイオ燃料の元になる植物の栽培から燃料の精製とその輸送の段階までをWell-to-Tank(WTT)段階、バイオ燃料を用いた自動車の走行段階をTank-to-Wheels(TTW)段階と呼ぶ。そしてこれらを通じた全段階はWell-to-Wheels(WTW)と呼ばれる。LCAはこれらの各段階についてなされる。

バイオ燃料に対するLCAのこれまでの研究結果はさまざまである¹⁾⁻³⁾。ある報告ではバイオ燃料は環境面で有効とされ、別の報告では無効あるいは、むしろ有害であるとされる。そのような結果の相違の理由には、どの環境負荷（エネルギー消費か、GHGか）を取り上げるか、どのバイオ燃料を取り上げるかという問題がある。さらにそれに加えて、環境負荷が地域によって異なるという点がある。工業製品のLCAにおいては、地域性を持たせず一般的な解析を行うのが常であるが、バイオ燃料のLCAにおいては、エネルギー作物の栽培、精製時のエネルギー利用、副産物の利用など、生産地域の固有の条件の影響が大きく、それらをLCAに反映していくことが必要である。また、栽培と製造過程で多量に発生する副産物のバイオマスを、エネルギー源として、あるいは新たな技術によるバイオ燃料（第二世代のバイオ燃料と呼ばれる）への原料として用いるか否か、についても環境負荷削減効果を客観的に評価することが求められる。

2. 研究目的

本研究においては、バイオ燃料の生産の適性と環境負荷が世界各地で異なる点に着目し、それぞれの地域の状況を反映したLCAを実施し、バイオ燃料の生産と消費の環境面での有効性を明らかにする。あわせて、生産過程での副産物の利用方法による環境負荷の相違についても検討する。具体的には以下のような目的からなる。

気候の面で多様性に富む中国全土を対象にして、利用可能な土地に対して栽培可能なバイオディーゼル原料の作物を栽培した場合のポテンシャルを求め、その際のGHG排出量をLCAによって

求めると共にコストの概略を推定する。

ブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノール生産に対して、生産過程で発生するバイオマス副産物の利用方法に着目し、第二世代エタノール生産も含めて将来のシナリオを想定してGHGの削減効果および大気汚染物質などの発生を評価する。さらに、生産されたバイオエタノールを日本またはブラジルにおいて自動車用に用いた際の環境負荷変化を推定し、統合的な評価を行う。

また、インドにおけるジャトロファ栽培によるバイオディーゼル生産についても解析を行い、栽培と製造過程でのGHG排出量を推定すると共にインドにおいて自動車燃料として用いられた際の環境負荷についても解析を行う。この研究においても副産物の利用に関してシナリオを設定して解析を行う。

さらに、パームヤシのプランテーション栽培への土地の改変に伴って環境問題を引き起こすと指摘されながらも把握の困難な土地利用の変化の定量的な評価を、インドネシアにおいて行う。

これらの研究においては、地域性に着目し、それぞれの地域の現地調査に基づく地域固有のデータに基づいたLCAを実施すると共に、それぞれの地域におけるバイオ燃料導入に関する将来計画を踏まえたシナリオに基づく解析を行う。また、バイオマス副産物の利用方法についても第二世代のバイオ燃料化を含め複数の代替案を想定して解析を行う。

これらの研究を通じてそれぞれの地域においてLCA的に見て有効なバイオ燃料活用法を明らかにする。

3. 研究方法

(1) 中国におけるバイオディーゼル生産

中国の場合には気象条件、森林に関する状況が国内で多様であるので、省、または省の中の地域の単位で森林に関する統計、気象統計を基にしてエネルギー植物の生育ポテンシャルを推定し、次いでその植物からバイオディーゼルの生産し輸送した際のGHGの生成のLCAを行い、また概略のライフサイクルコスト分析を行った。目標年次は2020年とした。

まず、バイオディーゼルの生産が可能な種子植物を選択し、生育条件、種子の生産量、油の生産量を評価した。その生育条件と各地域の気象条件を比較し、また森林統計から植物の栽培可能な面積を省の単位で求め、この利用可能な面積にすべて植物を栽培することと仮定した。

想定した枠組みでは、1つの省の中の中国の都市を3つのレベルに分けた。すなわち、省都レベル、都市レベル、地方レベルである。種子の収集地域は地方レベルであり、これを各都市に1つ設置すると想定するバイオディーゼル工場に運び、生産されたバイオディーゼルの省都にある配送センターに運ぶ。省内で消費することを優先とするが、余剰が出る場合は近隣の別の省に輸送する。輸送はこれらの4つの段階（輸送1～4）に分けて評価した。

(2) ブラジルにおけるサトウキビからのバイオエタノール生産の評価

1) 生産段階の解析

栽培と精製、輸送からなる生産段階（WTT段階）についてまず解析を行った。現地調査で得たさまざまな情報と将来計画に基づいて、2030年までの期間を対象にしたシナリオを設定した。その際、現在は利用されていない難生物分解性部分を転換する第二世代のバイオエタノールも想定した。サトウキビの収率向上、バイオエタノール生産過程での収率向上も想定した。また、副生

産物であるサトウキビわら、絞るかすであるバガス(bagasse)、蒸留廃液であるビナス(vinasse)の活用方法についても複数の場合を想定した。

LCAの実施に当たっては、インパクトカテゴリーとして、GHG、非再生可能エネルギー消費量、呼吸器疾患物質、酸性化物質を対象とした。可能な限り当該地域のデータを得るようにしたが、バックグラウンドデータはLCAソフトウェアSimaPro7.2.4のものを用いた。電力の代替効果の算出に当たってはブラジルの発電の技術と電源構成の現状と将来予測に基づいた。

2) 自動車による利用段階を含む統合評価

自動車による利用段階(TTW段階)については、ブラジルで生産されたバイオエタノールが日本で用いられる場合とブラジルで用いられる場合の両者について検討した。これら両国ではバイオ燃料の混合率、それに対応する自動車、燃費、大気汚染に関する政策が異なっているため、環境負荷にも相違が生じると想定される。これらの状況を組み込んだシナリオを作成した。

これらの燃費の効果も含めた環境負荷を表現するため、LCAにおける環境負荷は走行距離(VKT, Vehicle Kilometers Traveled)あたりで表現した。なお、日本に輸入する場合、国際輸送分はWTT段階に含めて評価した。WTTおよびTTW段階を通じた評価であるWTW評価を最終的に行った。

(3) インドにおけるジャトロファからのバイオディーゼル生産の評価

2003年以来インド政府は20%のディーゼル油をバイオディーゼルに置き換えるというプランを推進してきており、その中でジャトロファの種は重要な作物となっている。しかし、その目標は過大であり、順調には進んでいない。ジャトロファは2012年までに11.2-13.4百万ha作付ける計画だが、2009年には0.5百万haにとどまっている。現地調査を行い、ローカルな情報を得ると共に、制約因子について情報を収集した。

WTT解析とTTW解析の両者を行った。前者においては技術の動向と可能性を含むシナリオを、副産物の利用、第二世代バイオディーゼルを含めて複数設定した。TTW解析においては、インドにおける使用を想定し、バイオディーゼルの混入率に応じて、B3, B5, B10およびB100の場合に対して解析を行った。

(4) インドネシアにおけるパームヤシ栽培のもたらす効果

もっぱらバイオディーゼルに供するジャトロファと異なり、パームはさまざまな用途に用いられ、バイオディーゼル用途はわずかな比率である。一方で、パームヤシは大規模なプランテーションとして行われることが多く、そのことが土地利用の変化を通じて環境へ複雑な影響を与えている。そこで、バイオディーゼル用途に限定せずパームヤシのプランテーションへの土地利用の変更がもたらす環境面の影響を評価することをインドネシアを対象に行った。

土地利用変化についての信頼できる情報が従来得られていない。同国の各部署に対する調査を重ねることにより、詳細に検討を行う地域を特定した。次いで、その地区における土地利用の変化に関して統計データとGISデータを入手し、その両者をつきあわせることによって把握した。

4. 結果・考察

(1) 中国におけるバイオディーゼル生産

1) エネルギー植物の選択、栽培面積推定、燃料需給の推定

候補とした植物の収量、種中の含油率から、ジャトロファ、Xanthoceras、Pistacia、Swidaの順に優先順位をつけ、これらの植物の気候適性を中国各地の気象データと照合し、栽培植物を決定した。また、各省のディーゼル油消費量と中国全体の増加分を元に2020年の燃料消費量を推定し、バイオディーゼルの混入度を20%としたときのバイオディーゼル需要を予測して比較した。表1に結果の一部を示す。たとえば表中の河北省の場合、余剰地は合計23,800 km²であり、気候条件からXanthoceras（表中でXと表示）が生育可能と判断され、その種子の生産可能量が6,080 kt、理論的なバイオディーゼル生産可能量が2,432 ktとなる。一方需要は3,923 ktなので不足分が出る。

表1. 栽培植物種の当てはめとバイオディーゼル需給の試算の例

省	原料植物	利用可能土地面積(千km ²)	年間種子生産量(千t)	年間バイオ燃料生産ポテンシャル(千t)	2020年の年間バイオ燃料需要(千t)	年間バイオ燃料収支(千t)	地域のバランス(千t)
北京	X	3.5	885	354	1,260	-906	北部
天津	X	0.3	78	31	2,174	-2,143	-5,074
河北	X	23.8	6,080	2,432	3,923	-1,491	
山西	X	37.8	9,628	3,851	2,204	1,647	
内モンゴ	X	21.9	5,588	1,216	3,398	-2,182	
内モンゴ2				1,019	0	1,019	Northeast



図1. 2020年の中国各省のバイオディーゼルの需給予測

図1に各省の需給バランスを示す。経済活動が高く、需要の大きい沿岸部では不足するが、雲南省など、西南部はバイオディーゼルの他省に供給する余力があることが分かる。中国全体では、2020年のバイオディーゼル需要95.5百万tに対して57.6百万tの供給(すなわち60%)が可能である。

2) 栽培・精製・輸送(WTT段階)の各段階のGHG排出とコスト

栽培段階では、肥料由来の亜酸化窒素排出と肥料製造時のCO₂排出を計算した。

精製段階の抽出段階は中国の状況に合わせて燃料源を想定した。CO₂排出量 (g CO₂ eq/MJバイ

オディーゼル) は総量で7.76、内訳は電力：2.56、蒸気：4.93、n-ヘキサン：0.27であった。

トランスエステル化段階では副産物として生成するグリセリンの工業製品代替効果も考慮した。

輸送段階については、4つの輸送段階のそれぞれに対して、車種と積載量を想定し、道路情報システムから輸送距離を得て、CO₂排出量を算出した。

いくつかの省について、LCCO₂の結果を図2に示す。肥料由来のGHGが45%程度、精製が40%程度、輸送が15%程度であるが、長距離輸送を行う地域では輸送は3割近くに達することなどがわかる。

バイオディーゼルの総コストは2170 Yuan/ton-biodieselであり、熱量あたりに換算すると通常のディーゼル油の価格（2009年9月現在）の6割程度で、設備投資費やマージンなどが推定コストに含まれていないものの、競争可能と推定される。

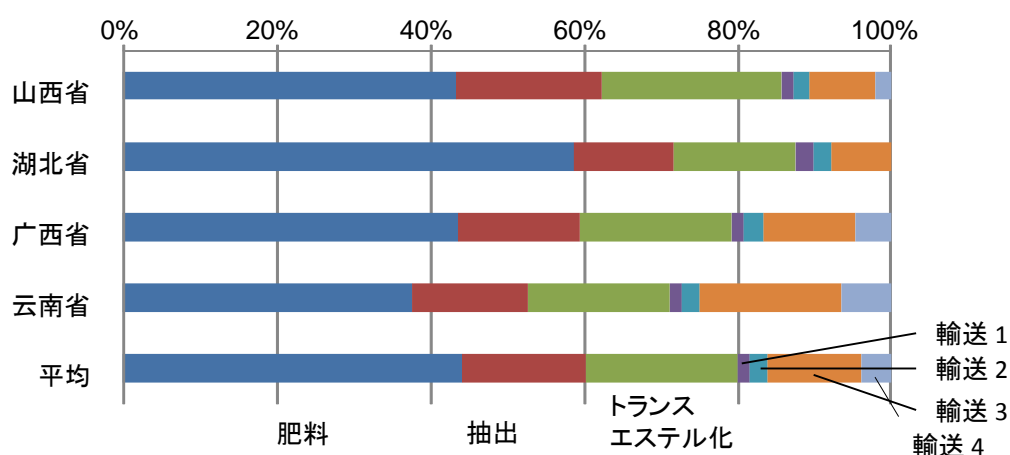


図2. いくつかの省における栽培・製造過程のLCCO₂の内訳

3) 統合評価と剰余バイオマスの利用

自動車の走行段階（TTW段階）ではバイオディーゼルの利用によって化石燃料のディーゼル油の使用を回避することができる。この段階の効果を含めてWTWを通じた統合評価が可能である。

図2の解析では種子の搾りかす等、製造過程で生じる副産物である剰余バイオマスの利用は想定していない。剰余バイオマス利用の有無の両ケースについて統合的にLCCO₂を整理すると表2のようになる。剰余バイオマスを活用しない場合、TTW段階で2.08t-CO₂削減しても製造段階で1.31 t-CO₂の排出が生じるので実質GHG削減効果は0.77 t-CO₂にまで低下してしまう。これに対して、剰余バイオマスを活用することによってこの削減効果を1.13 t-CO₂に高めることが可能になる。

表2. 剰余バイオマスの利用の有無によるLCCO₂の相違(t CO₂ eq/ton fuel)

条件	バイオディーゼルからの GHG 排出(WTT 段階)				化石ディーゼルの消費回避量 (TTW 段階)	WTW を通じた実質削減量
	肥料	精製段階	輸送段階	全排出量 (Mt/Year)		
剰余バイオマスの活用なし	0.58	0.47	0.26	1.31	2.08	0.77
剰余バイオマスの活用あり	0.58	0.11	0.26	0.95	2.08	1.13

(2) ブラジルにおけるサトウキビからのバイオエタノール生産の評価

1) 生産段階の解析

表3に設定した合計6つのシナリオを示す。シナリオAは基本的に現状の方式を踏襲するシナリオである。バガスは燃焼され従来型のコジェネレーションシステムで燃料利用されるが、サトウキビわらは農地で燃やされる。シナリオBとCでは40%のサトウキビわらは集められて焼却されエネルギー利用する。シナリオBは、酸による加水分解を経てバガスから第二世代のエタノール生産を行うシナリオである。シナリオCはエネルギー回収を高めるシナリオで、バガスとサトウキビわらに対して、バイオマス・ガス化複合発電(BIG-CC)によって高効率の発電を行う。

これらの3つのシナリオのそれぞれに対して、ビナスの利用方法によって2つのサブシナリオを想定した。現状のようにビナスをそのまま肥料として施用する場合と、メタン発酵によってエネルギーを回収して発電した後、肥料として施用する場合である。

表中に示されたエタノール生産量、発電量は技術の改良も考慮した2030年の予測値である。Bはエタノール生産を優先するシナリオであり、Cは発電を優先するシナリオであり、エタノール生産量、発電量が大きく異なる。

図3にシナリオA系列のGHG排出量の経年的な変化を示す。このシナリオでは2010年と2020年の間にサトウキビわらの野焼きの中止が組み込まれているほか、サトウキビの生産収率の向上、サトウキビからエタノールを生産するプロセスの効率の向上を見込んでいる。しかし、大きく差が出るのは電力の代替効果である。この代替効果を評価した場合(図中で[D]と表記されている)、バイオエタノールの生産過程でのGHG排出は負になる。すなわち、バイオエタノールの生産過程において、発電を行うことによって系統発電部門のGHG削減効果があり、ガソリンの代替によるCO2排出削減効果がTTW段階ではこれに加わり、全体としては大きなメリットが生じる。これはバガ

表3 ブラジルのサトウキビ由来バイオエタノールに関し想定した2030年の6つのシナリオ

システムの内容	サトウキビあたり生産量		
	エタノール (L.t ⁻¹)	発電量 (kWh.t ⁻¹)	
		バガスとサトウキビわら	ビナスから
A	現状の方式を踏襲し将来を予測		
A1	94.7	135.0	-
A2	94.7	135.0	24.5
B	第2世代のエタノール生産		
B1	133.6	45.0	-
B2	133.6	45.0	24.5
C	バガスをガス化し、再生可能エネルギーを生産		
C1	94.7	190.0	-
C2	94.7	190.9	24.5

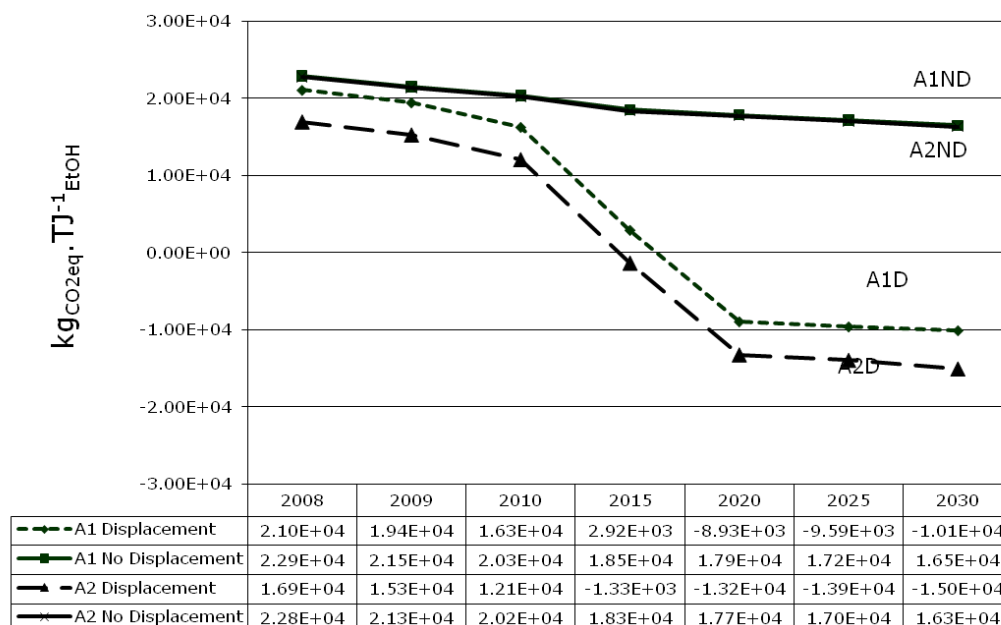


図3. シナリオAにおけるGHG排出量(D:電力代替効果考慮、ND:同非考慮)

スによる発電に負うところが大きい。サトウキビからエタノールを生産する場合、バガスを有効活用することによって、プロセス自体がGHG削減効果を持ち非常に有効であることが分かる。メタン発酵によってビナスからエネルギー回収を行った場合(A2D)は更にGHGの収支が改善するが、ビナスによる貢献はさほど大きくない。以下の解析ではすべてこの電力の代替効果を評価した。

表4に、このようにして求めた2030年時点でのGHG排出量を全シナリオについて比較する。現状踏襲のAシナリオでも、効率の向上により2030年にはGHG収支は改善し、電力代替効果を考慮するとバイオエタノールの生産によってGHGの削減を達成することができることがわかる。

バガスから第二世代の技術を使ってバイオエタノールを作るBシナリオは、エタノールの生産量は表1に示すように40%も増加するものの、バガスを燃料目的では使えなくなるため、エネルギー収支の面では必ずしも得策でなく、電力代替効果を含めてもGHGはほぼ正負均衡状態となる。これに対して転換効率の高い技術で発電を行うCシナリオは電力代替効果を評価するとともにGHG収支が有利になる。従って、バイオ燃料あたりのGHG削減効果を高めるためには、バガスを第二世代エタノールに転換するよりは、エネルギー利用の方が得策である。サトウキビからのエタノールの生産と発電源としての効率的なバガス利用技術を組み合わせることがGHG削減の観点からは有効である。また、ビジネスについては、栄養源として農地に戻す前にエネルギーを回収することが有効であることも示された。

表4. 各シナリオにおける2030年時点のGHG排出量予測(t-CO₂eq/TJ)

		電力代替考慮	電力代替非考慮
A1	バガスを燃焼利用	-10.1	16.5
A2	上記+ビナスをメタン発酵利用	-15.0	16.3
B1	バガスから第二世代のエタノール生産	5.05	13.9
B2	上記+ビナスをメタン発酵利用	-0.07	13.7
C1	バガスとサトウキビわらのバイオマス・ガス化複合発電	-20.9	16.5
C2	上記+ビナスをメタン発酵利用	-25.9	16.3

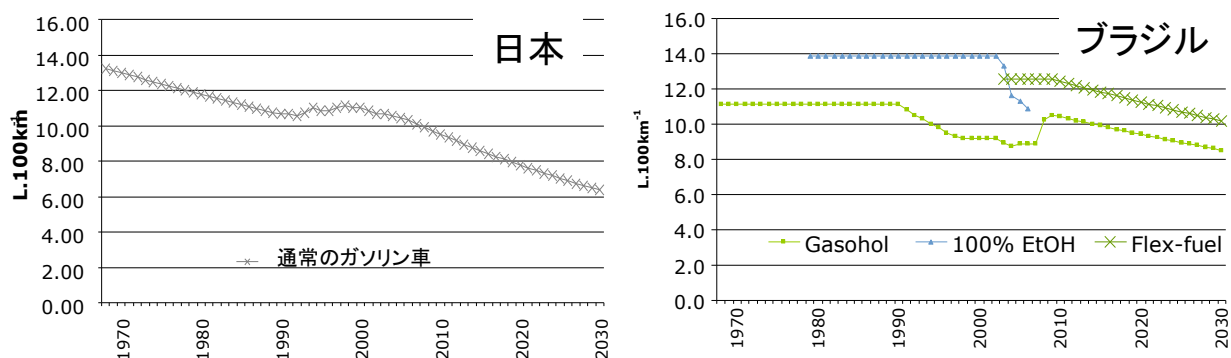


図4. 日本とブラジルにおける燃費の過去の実績と将来予測

2) 自動車による利用段階を含む統合評価

日本とブラジルにおけるバイオエタノール利用のシナリオを作成した。ガソリンに混入する場合、25%までのエタノールは従来のオートサイクルのエンジンで大きな変更なしで利用可能である。これに加えてブラジルでは、代替燃料車（FFV, Flex Fuel Vehicle）が用いられ、ガソリンとエタノールの任意の混合割合に適応できる。

2030年までの小型自動車数、車歴と燃費の変化を組み込んでシナリオを作成した。ブラジルでは新車の保有台数が年率2.3%の伸びを示しており、2030年には2008年比3.1倍になると予測した。一方、日本では2030年には6%減になる。この差は、年間走行キロ、環境負荷に影響を与える。

自動車の燃費（図4）については、日本の燃費は現状でも優れているが、今後も毎年2%向上すると想定した。ブラジルでは、環境規制によって年率1%の向上を見込んでいる。

日本の場合にはエタノール混入率を3%から最大100%まで想定し、E3, E10, E20, E100, FFV-10%, FFV-30%の場合に対して計算を行った。一方ブラジルに対しては、エタノール自動車とFFVの2つの場合に対して計算を行った。

図5に日本とブラジルのそれぞれにおいて各エタノール混合割合の自動車で行ったときのライフサイクル的GHG排出量をガソリン車と比較した数値として示す。図中ではバイオ燃料製造段階であるWTTと使用段階のTTWに分けて示している。TTWの大きな負の値はバイオ燃料である

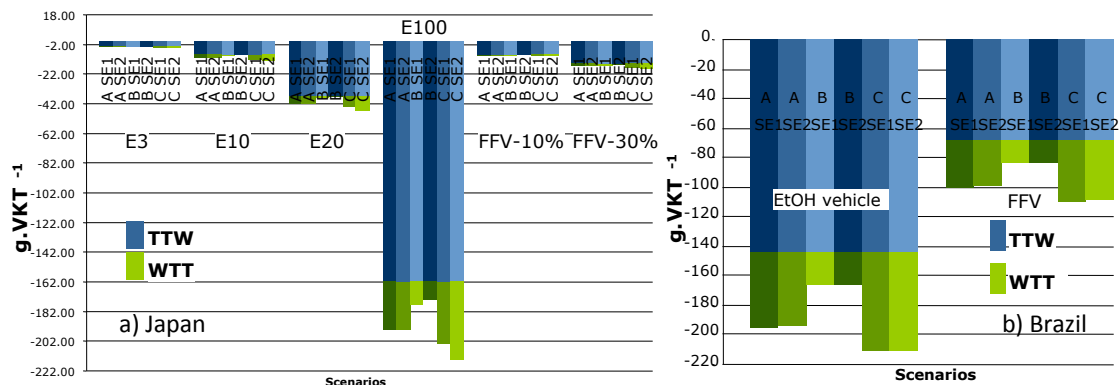


図5. ブラジル産のサトウキビ由来のバイオエタノールを用いて自動車が行く場合のライフサイクルGHG排出量。a)は日本、b)はブラジルが走行地。

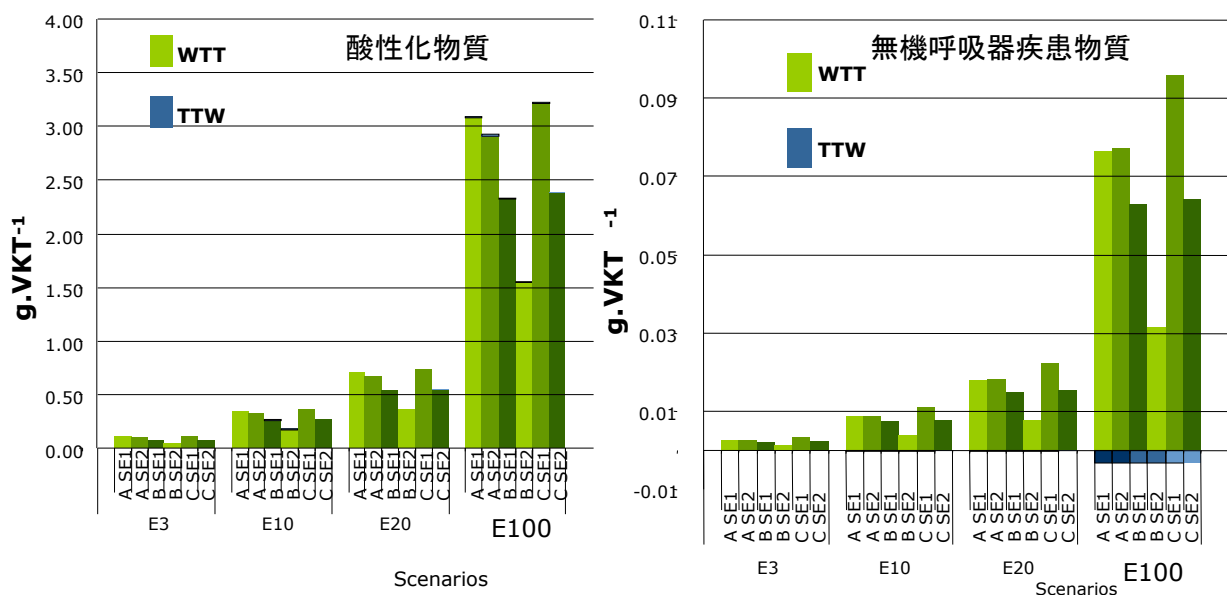


図6. ブラジル産のサトウキビ由来のバイオエタノールを用いて自動車が行く場合の酸性化物質と呼吸器系汚染物質のライフサイクル排出量

エタノールが化石燃料であるガソリンを代替した効果を現すものである。WTTについても前項で見たようにバガスのエネルギー源としての利用を最大化したCのシナリオ（図中ではE100（日本の場合）やEtOH vehicle（ブラジルの場合））の中のC-SE2と表記した棒のWTT分）を始めとして負の値になっている。日本への輸送に伴うCO₂排出はこれらの収支に大きな影響を与えるものではなく、GHGの観点からはバイオエタノールの混入比率を高めると大きな効果が期待できることがわかる。ブラジル産のサトウキビ由来のバイオエタノールはGHG削減の観点からは大きな効果を持つことが分かる。

以上のように走行距離あたりのGHG排出削減量で見ると、シナリオC-2がもっとも有利である。すなわち、バガスもビナスもエネルギー源として用いる方法が有利と言うことである。生産されるバイオ燃料の量、あるいは熱量あたりで比較しても同様にC-2がもっとも有利である。

しかしながら、限られた土地面積で栽培されるサトウキビ原料をもとにして最大限のGHG削減を得ようとする場合には、原料のサトウキビ重量あたりで効果を表現することも考えられる。その場合にはバイオエタノールの生産量が大きいシナリオBが有利になる。すなわち、表3に示されるように、シナリオBのエタノール生産量はAに比べ1.4倍と大きいため、代替するガソリンの量がやはり1.4倍多くなる。従って図5に示されるようにGHG削減の主な部分を占めるTTWの部分が比例して1.4倍に増加するためである。

このようにGHG削減効果に関してLCAの結果を解釈する際には注意が必要である。すなわち、得られるバイオエタノールあたり、もしくは走行距離を機能単位とすればバガスをエネルギー源として用いるシナリオC群が有利になるが、原料側であるサトウキビ、さらには土地面積を機能単位とすれば、バイオエタノールへの転換を最大化したシナリオB群がはるかに有利になる。

ところで、大気汚染物質の排出量を見ると、必ずしもバイオエタノールが有利と言うことではない。日本で走行する場合に対して、酸性化物質（窒素酸化物、イオウ酸化物）、無機呼吸器疾

患物質（PMなど）の指標を示したのが図6である。バイオエタノールの生産過程での排出が通常の場合よりも大きい。これらの物質は走行場所（すなわちTTW）で排出されるのではなく、生産工程、すなわちブラジルにおいてWTT過程で排出されるものである点、またこれらの物質は総量と言うよりは濃度が問題になる点には注意が必要である。剰余バイオマスを用いたとしても、製造過程で燃焼とエネルギー利用が必要になることにより大気汚染物質が発生するためである。

（3）インドにおけるジャトロファからのバイオディーゼル生産の評価

表5に示すようなシナリオを設定した。シナリオA群は基本的に従来の方法のトランスエステル化によるバイオディーゼル生産である。シナリオB群は水素処理植物油（HVO）を製造するプロセスである。このプロセスの方が転換率が高い。これらAおよびBのシナリオでは、収穫した種子を長距離輸送し、集約的な生産を行う場合を想定しており、副産物のエネルギー利用を行わない。

これに対してシナリオC群とD群は分散型の生産を行うものであり、栽培地に近い場所でバイオディーゼルの生産する。シナリオC群では、バイオマス・ガス化複合発電を行うもので、幹、殻などをガス化してエネルギーを回収する。シナリオD群は第二世代のバイオディーゼルとしてフィッシャー・トロプシュ（FT）プロセスでディーゼルの生産量を向上させる場合を想定する。

これらのそれぞれのシナリオ群に対して、ジャトロファの種子を圧搾して油を得たときに副産物となるシードケーキを肥料として用いる従来の方法とこれをメタン発酵してエネルギーを得る方法をシナリオとして含める。

表5. インドのジャトロファ由来バイオディーゼルに関し想定した2030年の8つのシナリオ

システムの内容	ジャトロファあたり生産量		
	バイオディーゼル (L/t)	発電量 (GJ/t)	
		幹、殻から	シードケーキから
A 現状の方式を踏襲し将来を予測			
A1 トランスエステル化でバイオディーゼル生産。幹、殻などは利用せず。シードケーキは肥料化	336	2.65	
A2 上記において、シードケーキはメタン発酵で発電する	336	2.65	1.46
B 水素化して植物油生産(HVO)			
B1 水素化して植物油生産。幹、殻などは利用せず。シードケーキは肥料化	362	2.65	
B2 上記において、シードケーキはメタン発酵で発電する	362	2.65	1.46
C 幹、殻などはガス化する			
C1 トランスエステル化でバイオディーゼル生産。幹、殻などはガス化して発電。シードケーキは肥料化	336	3.67	
C2 上記において、シードケーキはメタン発酵で発電する	336	3.67	1.46
D FT(フィッシャー・トロプシュ)法によるバイオディーゼル生産			
D1 トランスエステル化と FT 法で生産。シードケーキは肥料化	336+111	0.31	
D2 上記において、シードケーキはメタン発酵で発電する	336+111	0.31	1.46

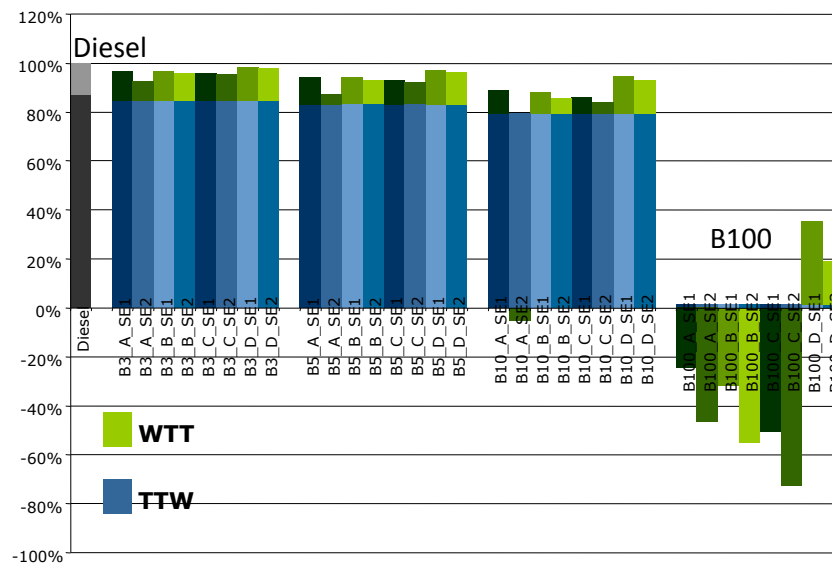


図7.インド産のジャトロファ由来のバイオディーゼルを用いて自動車が行く場合のライフサイクルGHG排出量

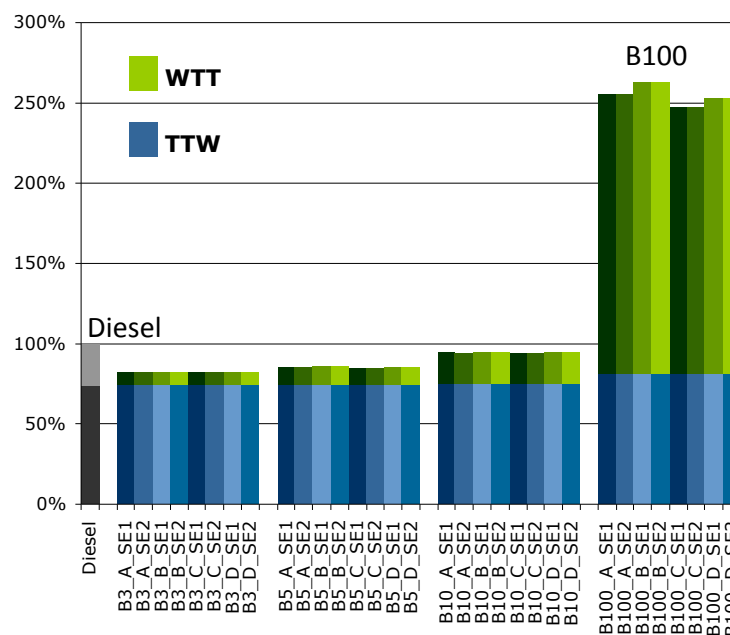


図8. インド産のジャトロファ由来のバイオディーゼルを用いて自動車が行く場合のライフサイクル酸性物質排出量

2030年におけるGHG排出に関するWTTとTTWの結果をまとめて図7に示す。ここでは通常のディーゼル（図中の一番左の棒）と排出量を比較して図示している。混入率が低い場合には効果が低いが、混入率を高めるとGHG削減効果は大きい。8つのシナリオの中ではCがもっともよい。Cにおいては電力を代替するが、インドの場合グリッドの電力は石炭火力であるので、それを置換することによるGHG削減効果が大きい。シナリオDの場合には精製過程(WTT)でのGHG排出量が比

較的大きく、このことがGHG排出量削減効果を殺いでいる。

ブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノールの場合には、単位サトウキビ、あるいは土地面積あたりのGHG削減効果は第2世代のバイオエタノールをも導入したシナリオの場合が最も大き

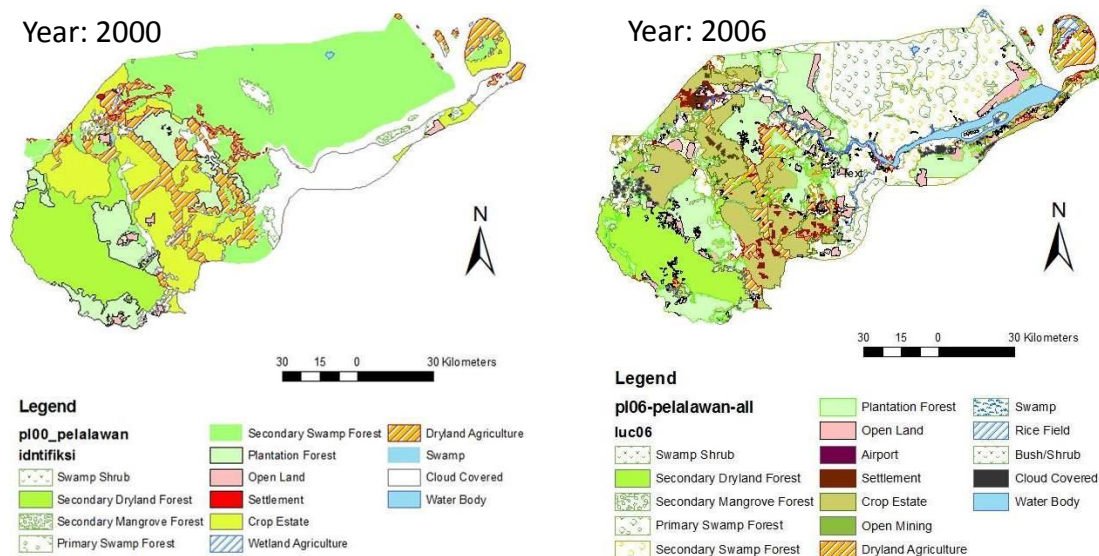


図9. Pelalawan 地区の土地利用変化（東半分の大幅な変化は誤認識と判断される）

くなくなった。このインドのジャトロファの場合、シナリオDは他のシナリオに比較してバイオディーゼルの生産量が表5に示すように33%大きくなる。しかし、図7を見るとWTT過程ではシナリオDは他のシナリオに比較してかなり不利であるので、結果としてバイオディーゼルの収量を高めるシナリオDは必ずしも有利とは判断できない。

酸性化物質の排出について見ると、図8のようになり、生産時の増加が著しく、全体としては通常のディーゼルよりも大きい排出となる。これは製造時に燃料を用いるためである。

（4）インドネシアにおけるパームヤシ栽培のもたらす効果

インドネシアにおいては、工業製品原料、食用としてパームヤシの大規模プランテーションが行われている。1989年から2007年の間に同国のパームヤシ栽培面積は21倍になり、4600千haに達している。このようなプランテーションの拡大が生じている典型的な地域として、スマトラ島のRiau県（9460千ha）のPelalawan 地区（1330千ha）を選定した。この地区の土壌はピートで、近年ピートからのCO₂の排出が国際的に議論になっている。森林局から図9のように2000年と2006年の土地利用のGISデータを得た。

リモートセンシングに基づく本情報だけでは信頼が乏しいため、これとは別の地上の調査に基づく土地利用変化の情報を組み合わせることによって土地利用の変化を推定した。

その結果、パーム・プランテーションについては、129千haは2000年以前に、44.7千haは2000年から2006年の間に、それぞれ他の土地利用から変更されたと推定された。

これらの土地利用変化に伴うGHGの排出については、土壌、地中バイオマス、地上バイオマスに分け、転換に伴う収支と、パーム・プランテーション占有時の経常的な収支を比較して評価することが必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、バイオ燃料がもたらす環境への効果を把握するためにはLCAが有効であること、しかしそのLCAの評価に当たっては製造段階と使用段階の両者を把握することが必要であり、またそれぞれの地域固有の条件を含めて評価することが必要であることが明らかになった。また、バイオ燃料に対するLCAの評価の活用については、いくつかの留意点も明らかになった。

ブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノールについてはGHG排出削減への寄与が大きいことが分かった。製品であるバイオエタノールあるいは供用時の走行距離を機能単位としてLCAを評価すると、副産物であるバガスエネルギー源として用いた方が有利との結論になる。一方、原料またはそれを生み出す土地を機能単位としてLCAを評価すると、第二世代のバイオエタノールなどの手法で生産量を拡大する方がGHG削減量が大きいとの結論になる。この点はバイオ燃料へのLCAの応用の際に注意すべき点であり、また誤解の原因にもなり得る点である。

ジャトロファ由来のインドのバイオディーゼルは、GHG削減効果は有効であるものの、第二世代の生産に拡大することが必ずしも総合的にGHG削減の観点から有利ではない、との結論になった。

これらの結果はLCAのバイオ燃料生産の評価への応用に関する新たな知見である。

(2) 環境政策への貢献

今回得られた成果は国際的にバイオ燃料政策にとっても有意義なだけでなく、輸入の可能性があるわが国の政策にとっても重要である。とりわけ、わが国におけるバイオ燃料の消費が輸入先国における環境負荷の新たな発生をもたらすことを明らかにし、今回のLCAでその定量的な評価が可能になったことは応用の範囲が広い。学会などを通じて成果を還元していきたい。

6. 引用文献

- 1) Fargione, J., Hill, J., Tilman, D. Polasky, S., Hawthorne, P. (2008), "Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt," Science, 319, pp. 1235-1238.
- 2) Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S. and Tiffany, D. (2006), "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels." Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 103 (30), pp. 11206-11210.
- 3) Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, and T.-H. Yu. (2008), "Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gasses through emissions from land use change," Science, 319, pp. 1238-1240.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) G. Rui and K. Hanaki: Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2, 033107, 1-15, 2010, “Potential and life cycle assessment of biodiesel production in China”

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) J. Portugal, K. Kurisu, J. Nakatani and K. Hanaki : Proc. 18th European Biomass Conference and Exhibition -From Research to Industry and Markets, France, 2010, “A life cycle assessment of diversified bioenergy technology systems of ethanol production in Brazil: a forecast for 2030”
- 2) J. Portugal, K. Kurisu, J. Nakatani and K. Hanaki : Renewable Energy 2010, Yokohama, 2010, “Environmental potential benefits of sugar cane bioenergy systems: a life cycle perspective”
- 3) K. Hanaki and J. Portugal : Expert Workshop “Evaluation of the sustainability of biofuels from multiple perspectives, Yokohama, 2010, “Evaluation of Sugar Cane Bioenergy Systems: A Life Cycle Perspective”
- 4) J. Portugal, K. Kurisu, J. Nakatani and K. Hanaki : Proceedings of ISIE Asia-Pacific Meeting & ISIE MFA-ConAccount Meeting, Tokyo, 2010, “Jatropha-based biodiesel: a sustainable and feasible option to the future?”
- 5) J. Portugal, K. Kurisu, J. Nakatani and K. Hanaki : EcoBalance 2010, Tokyo, 2010, “Integrated life cycle assessment of second generation bioenergy systems: an Indian case study”
- 6) J. Portugal, K. Kurisu, J. Nakatani and K. Hanaki: Industrial Ecology Conference 2011 (発表決定済), USA, 2011, “Life cycle analysis of Brazilian sugar cane and cellulosic ethanol production and its use in passenger light vehicle fleets in Brazil and Japan”

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。