

課題名	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
課題代表者名	武内和彦（東京大学サステナビリティ学連携研究機構、同大学院農学生命科学研究科、国際連合大学）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	169,260千円（うち22年度 60,060千円） 予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) オントロジーを用いた問題の構造化と政策立案支援ツールの開発（大阪大学）
- (2) 持続可能な発展を目指したバイオ燃料利用戦略の策定（東京大学）
- (3) 国際農産物需給を考慮した社会経済分析（東京大学）
- (4) バイオ燃料生産とそれに伴う森林・土地・水利用変化の影響評価（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）
- (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）
- (6) アジア太平洋地域における生態系の財・サービスとバイオ燃料利用（国際連合大学）
- (7) アジア太平洋地域における政策パッケージおよび地域的政策協調の検討（財団法人地球環境戦略研究機関）

研究概要

1. はじめに

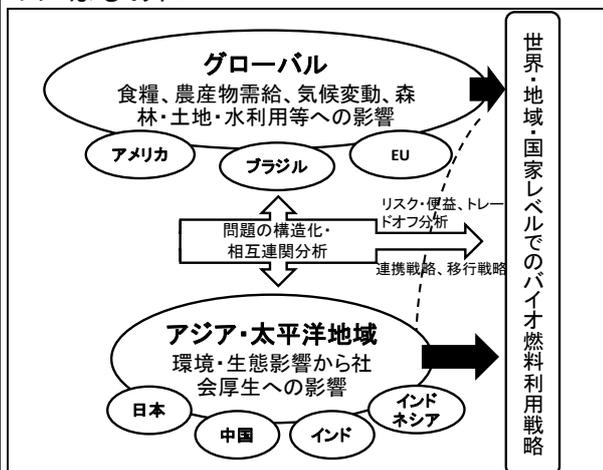


図1 本研究の概念図

バイオ燃料は、化石エネルギーの代替エネルギーの候補の一つであることや、温室効果ガス削減、農業・農村経済活性化、貧困緩和、といった効果が期待される一方で、これらの効果に対する疑問、さらには森林破壊、水質汚染、水資源の枯渇に結びつくといった指摘がなされている。バイオ燃料導入の特徴として、環境・社会・経済への影響の分野や程度などが広範囲に渡り、問題が複層かつ複合化している点が挙げられ、世界、地域、国家、といった各範囲・階層間で導出される分析結果・解を協調させた利用戦略が必要となる。しかしながら既存のバイオ燃料に対するアプローチは、その環境への影響等の技術的影響評価および社会経済的影響評価が、それぞれ自然科学、社会科学別個に行われている。

2. 研究目的

本研究は、学術と問題の構造化に基づく分野横断的総合評価から政策提言へと至ることを可能とするサステナビリティ学アプローチにより、アジア太平洋地域を中心に、バイオ燃料に関する特徴を総合的に分析し、世界、地域、国家レベルでのバイオ燃料利用戦略を策定することを目的とする（図1参照）。すなわち、食料生産との競合、森林破壊および水資源への影響、エネルギー収支に関する問題等の指摘を、複雑多岐な地域・国家、ステークホルダー間の関係を自然科学-社会科学の融合・分野横断により明確に把握・評価し、さらにそれを踏まえた持続可能なバイオ燃料

表1. 各サブテーマの主な研究実施内容

グループ	サブテーマ	主な研究実施内容
(I) 諸要素間・利害関係の構造化	(1)	バイオ燃料利用に関する諸要素・問題間のオントロジー構築と政策支援のためのマップツール作成
	(2)	社会影響評価分析、ステークホルダー分析手法の確立とそれを用いた分析
(II) グローバル影響評価	(3)	国際食料需給シミュレーションモデルの構築とそれを用いた分析
	(4)	バイオ燃料用作物生産の土地利用影響評価
	(5)	LCAによるバイオ燃料生産の環境影響評価
(III) アジア政策評価	(6)	バイオ燃料用作物生産の生態系サービスへの影響評価
	(7)	アジア地域のバイオ燃料利用に関する社会経済分析、および日本のバイオ燃料政策の影響評価モデルの構築と分析

利用戦略・政策提言を導出する。なお、本研究の主な対象は、日本・中国・インド・インドネシア

とバイオ燃料に関する世界のキー・プレイヤーである米国・ブラジル・EUである。

表1は各サブテーマの主な研究実施内容を示したものである。表に示したように本研究は主に3つのグループに分けられる。サブテーマそれぞれの研究実施内容の詳細は後に述べるが、サブテーマ（1）、（2）はそれぞれの研究を実施するとともに、他のサブテーマの結果を受け、最終的に世界・地域・国家レベルでのバイオ燃料利用戦略を検討する。サブテーマ（3）～（5）は米国、ブラジル、EUをそれぞれ主要な対象としてグローバルレベルの、サブテーマ（6）、（7）は、アジア太平洋地域、すなわち中国、インド、インドネシア、日本を対象とし、調査・研究を行った。本研究は、各サブテーマを緊密に連携させ、相補的に進展させることが極めて重要であることから、適宜研究全体のミーティングおよび関連サブグループ間のミーティングを実施し、研究の方向性・分担の確認、カウンターパートに関する情報共有等の相互連携、協力を行った。

3. 研究の方法

（1）オントロジーを用いた問題の構造化と政策立案支援ツールの開発

バイオ燃料利用に関わる問題領域は、エネルギー供給、食糧生産、産業構造、など多岐に渡っており、それぞれの領域におけるステークホルダーも多数存在する。このような複数領域にまたがる多様な問題を適切に構造化することは、バイオ燃料利用戦略に関わる政策立案を行う上でも重要な課題である。そのような背景のもと、本サブテーマでは、バイオ燃料に関わる諸概念を体系化したオントロジーに基づいてバイオ燃料利用に関する問題を構造化し、課題の包括的な洗い出しや重要度・優先順位づけの検討などに役立てるような政策立案支援ツールをサブテーマ（2）と連携しつつ開発することを目的とする。具体的には、以下の方法に沿って研究を実施した。

1) バイオ燃料オントロジーの試作

文献レビューや、専門家との意見交換、研究ワークショップや国際会議への参加を通じたオントロジー構築のための基礎資料の収集・解析し、バイオ燃料オントロジーを試作した。

2) 問題領域の俯瞰

バイオ燃料オントロジーを用いた問題領域俯瞰のために、従来研究で開発した「オントロジー探索ツール」を発展させ、複数分野にまたがる問題領域（ドメイン）を俯瞰し、問題の構造化を実現する手法を検討した。そして、試作したバイオ燃料オントロジーと本ツールを利用して、「バイオ燃料と農業の関連性」と「バイオ燃料生産を中心とした諸問題の俯瞰」などテーマを定めた問題領域の俯瞰を試みた。

3) バイオ燃料オントロジーの拡充

オントロジー探索ツールを用いたバイオ燃料に関わる問題の構造化を行うために、収集した資料からバイオ燃料生産・利用が様々な分野にどのような影響を与えるかの問題構造の事例を整理した29の典型シナリオを元に、バイオ燃料オントロジーを拡充した。

4) バイオ燃料オントロジーに関する機能拡張

オントロジー探索ツールをドメイン俯瞰に利用するために、利用者が試行錯誤しながらオントロジー探索をするための「インタラクティブな探索」機能、詳細な探索条件を設定せずに簡単な操作で探索が行える機能、特定の概念間にどのような関係があるかを調べるための「概念間のパス探索」機能、視点（Aspectのロール概念限定・取り出しクラス限定）の変化に応じて概念マップを切り替える「Change View」機能などの機能拡張を行った。さらに、サブテーマ（2）と連携して本ツールの評価実験を行うと共に、政策立案支援に向けた改良方針を検討した。

5) 合意形成支援

サブテーマ（2）の協力のもと、本ツールを政策立案に必要なステークホルダー間の合意形成支援ツールとして発展させ、被験者がステークホルダーの役割を演じて（ロールプレイ）議論を行う実験を通して、合意形成支援の可能性を示すことができた

（2）持続可能な発展を目指したバイオ燃料利用戦略の策定

1) バイオ燃料関連政策の検討

既存のバイオ燃料利用政策及びエネルギーシナリオの調査とその評価として、米国、EU、インド及び関連主要国の最近のバイオ燃料利用政策について、政府等の発表資料や報告書、報道資料・新聞記事データベース、書籍等をもとに、調査、整理を行った。また、インドネシアについてステークホルダー分析の基礎資料として、パームヤシの栽培についての農薬使用に関する現地調査と将来の栽培面積の拡大に伴うリスクの拡大についての試算を行った。

2) ステークホルダー分析

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の利用戦略を検討するにあたり、その戦略に係るステークホルダーとその利害関心を特定する必要があるため、関連するステークホルダーに関してステークホルダー分析を行った。その際、規模が大きいことから、聞き取り調査に加え、上記の既存政策の整理・分析や、社会影響評価などとも連携して総合的に検討する必要に留意した。本調査では、日本における本格的なバイオ燃料導入において、その調達を主にブラジルからのサトウキビ由来のバイオエタノール輸入、インドネシアからのパームオイル由来のバイオディーゼル輸入に頼るといったシナリオを想定し、ブラジルとインドネシアにおけるバイオ燃料増産のステークホルダー分析をケーススタディとして実施した。

3) 技術の社会影響評価

バイオ燃料の持続可能性に関する基準策定を一種の社会影響評価にとらえ、その動向について調査した。即ち、米国、EU及び日本の状況に加え、国際的動向としてG8の合意に基づきFAO（世界食糧機関）が事務局として活動しているGBEP（Global Bioenergy Partnership）と非政府レベルの自主的取り組みとしてスイス工科大学が主導しているRSB（Roundtable on Sustainable Biofuels）による持続可能性基準や、作物ごとに自主的に検討されている同基準についても、発表資料や報道資料を基に比較、検討した。また、日本国内の技術開発の取り組みに着目し、各技術の社会影響について関連するステークホルダーについて整理した。

(3) 国際農産物需給を考慮した社会経済分析

1) 米国とブラジルのバイオエタノール生産に関する経済的生産性の比較

アイオワ州立大学の研究所CARD（Center for Agricultural and Rural Development）による米国とブラジルのバイオエタノール生産の経済的生産性比較に関する研究を、新たに、米国のトウモロコシからのエタノール製造で使用される化石燃料（石炭、天然ガス）の価格が、原油の高騰と連動して上昇することをコスト計算に組み込むことで拡張し、両国のバイオエタノール生産に関する経済的生産性比較を行った。

2) 国際農産物シミュレーション・モデルの構築とシミュレーション

米国を中心としたトウモロコシ由来のバイオエタノール生産とそれに関連した政策が国際農産物市場に与える影響を分析することを目的に、シミュレーション・モデルの構築とシミュレーションを行った。本モデルの最も特徴的な点は、エタノール価格とガソリン小売価格との関係を明示的に組み込んだ点である。国際農産物市場への影響については、消費者余剰、生産者余剰を合計した社会的総余剰および、CO₂削減量とから評価を行い、米国のバイオエタノールを巡る政策が社会的総余剰の観点から許容される際のCO₂価格についても考察した。

3) 国際植物油市場のパームヤシ生産農家に与える影響

バイオディーゼルの原料となるパームオイルについて国際植物油市場がパームヤシ生産農家に与える影響を把握することを目的に、パームオイルの世界1位の生産国であるインドネシアを事例に分析を行った。より具体的には農家・中間集荷業者・搾油企業からなるインドネシアのパームオイル生産に関する産業構造に関して、国際植物油市場価格の変動へのそれぞれの主体の反応を非対称価格伝達のフレームワークを用いて分析した。

(4) バイオ燃料生産とそれに伴う森林・土地・水利用変化の影響評価

ライフサイクルアセスメント（LCA）の枠組みを用いて土地利用の影響評価を行う方法を検討し、実際に農地への転換に伴う土地利用変化の影響評価を行うことを目的に、以下のように、グローバルな問題からローカルな問題へと順を追って分析を実施した

1) インドネシア、ブラジルにおける農地森林の動向調査および植物油に関するLCA

LCAにおいて土地利用を評価対象とすることが重要であることを示すため、インドネシアとブラジルにおける農地と森林の近年の動向を検討するとともに、植物油のLCAを実施し、パームオイルの位置づけについて分析を行った。

2) パーム油生産に関するインドネシアとヨーロッパの比較

「後発者の不利益」ともいえる状況を示すため、インドネシアのパームオイル生産とヨーロッパのナタネ油を仮想的に比較し、土地利用に伴う社会的要因について明かにした。

3) インドネシアにおける土地利用影響評価

土地利用の影響評価の結果は土地条件によって大きく異なることが予想されるため、インドネシアの州レベルでの土地利用の影響評価を実施した。影響評価の地域化は、パームヤシの生産性、パームヤシ生産地における泥炭土地帯のシェアに基づいて行った。

4) パームヤシ生産のライフサイクルインベントリ（LCI）分析

パームヤシ生産のライフサイクルインベントリ（LCI）分析の展望を示すため、実際のプランテーションにおけるデータ収集の結果を、水利用を含め検討した。

(5) LCAによるバイオ燃料利用に関する総合影響評価

1) 中国におけるバイオディーゼル生産

中国各省の気候条件と土地利用の統計情報から生産可能なバイオディーゼル量を推定した。2020年のディーゼル油需要を省別に推計した。次いで植物からバイオディーゼルの生産し輸送した際のGHG（温室効果ガス）の生成のLCAを行い、またライフサイクルコスト分析を行った。

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

生産段階（WTT段階）について2030年までの期間を対象に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、絞りかすであるバガス(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。この条件下で地域固有の条件に配慮してLCAを実施した。

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。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るので、これを組み込んだシナリオを作成した。この段階のLCAとWTT段階のLCAを統合的に解析した。

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

WTT解析とTTW解析の両者を行った。前者で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解析では、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, 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

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の環境面への影響を評価することをインドネシアを対象に行った。同国の対象地域を特定しその地区における土地利用の変化に関する統計データと地理情報システム(GIS)データを入手し、その両者をつきあわせ、把握した。

(6) アジア太平洋地域における生態系の財・サービスとバイオ燃料利用

本サブテーマは、バイオ燃料の持続的な生産と利用を行う上で必要な生態系サービスに関する知見を得、政策提言の土台を構築することを目的とした。しかしながら、バイオ燃料や生態系サービス研究そのものの歴史は浅く、未だ確立した方法論があるわけではない。また、そもそも、生態系サービスには、人間活動が与える様々な要素が関係しており、バイオ燃料生産等の影響を客観的に評価することは非常に困難である。そこで、本サブテーマは、以下の二段階の分析を行った。

1) バイオ燃料に関する需要拡大とパームオイル生産及び収穫エリア拡大の関連に関するモデル分析

バイオ燃料と生態系サービスの相関についてのケーススタディとして、バイオ燃料に関する需要拡大が、インドネシアにおけるパームオイル生産及びパーム収穫エリア拡大にどのように関連しているかについて、1997年から2007年までの土地利用変化を基に分析を行った。

2) バイオ燃料とパームオイルに関するステークホルダー意識分析

バイオ燃料の原料となるパームオイルに関する国際的な産業連盟であるRSPO (Roundtable for Sustainable Palm Oil) の参加者をステークホルダーと捉え、パームオイル生産拡大に伴う生物多様性、生態系サービスや人間の生活の向上といった広範な項目に関して彼らの認識を検証した。

(7) アジア太平洋地域における政策パッケージおよび地域的政策協調の検討

1) 対象国におけるケーススタディ

中国：バイオ燃料生産に関わる問題の同定および今後のバイオ燃料利用に関する条件（生産方法、バイオ燃料市場、土地利用など）についてデータを収集して市場構造や政策ギャップなどについて検討・分析を行った。

インド：バイオ燃料計画に関する全般的条件と実現を可能にする環境について、およびバイオエタノール生産に関する水資源制約について分析を行った。

インドネシア：3か所のエネルギー自給村(ESSV)における農民に対して家計調査等を行い、バイオ燃料の小規模生産のための条件の同定および必要な政策の検討・分析を行った。

日本：日本においては、バイオ燃料は、温室効果ガス(GHG)削減、エネルギー安全保障、地域振興、循環型社会形成等の分野において国レベルの戦略・計画に盛り込まれている。これらをレビューし、目標達成においてバイオ燃料が果たしうる役割について検討・分析を行った。

2) バイオ燃料政策の経済的・環境的影響評価

インド、中国、インドネシアがバイオ燃料生産を大幅に増加させた場合の政策含意を得る目的で、2001年を基準年とするGTAP(Global Trade Analysis Project) version 6データベースにトウモロコシ由来のエタノール、サトウキビ由来のエタノール、およびバイオディーゼルの3セクターを追加したGTAP-BIOデータセットを本調査用に改良したデータセットを用いて、一般均衡モデルによる定量的影響評価を実施した。

3) バイオ燃料の持続的利用に関する基準についての検討

バイオ燃料の国際的基準が、よりローカルなレベルに及ぼす影響の分析を行うため、RSBなどバイオ燃料の国際的原則・基準作成を試みるイニシアチブの基準作成過程の検討・分析を行った。また今後、現実的に主流化することが予測されるバイオ燃料生産・流通の基準についての求められる条件や内容について考察した。さらに、将来的にアジア地域においてバイオ燃料の原料が多様化していくことを踏まえながら、基準・原則が同地域における持続的利用に関する政策協調に及ぼす影響について検討・分析を行った。

4. 結果及び考察

(1) オントロジーを用いた問題の構造化と政策立案支援ツールの開発

本研究で収集した国内外のバイオ燃料の生産と利用に関する情報をもとに、バイオ燃料オントロジーを試作し、オントロジー探索ツールを利用した問題領域の俯瞰を試みた結果、本ツールを用いて生成される構造化された知識（概念マップ）をコンテキストに応じて収束させることで、政策立案支援に必要な知識を利用者が発見することに貢献すると考えられた。

本ツールで用いるバイオ燃料オントロジーは、収集した問題構造の事例を整理した29の典型シナリオを元とした拡充の結果、概念数が649から1892、スロット数が1075から2119となった。また、拡充したバイオ燃料オントロジーが問題構造を適切に表せていることは、元にした29のシナリオのうち27（93%）がオントロジー探索ツールを用いて生成した概念マップとして再現できることを通して確認した。さらに、サブテーマ（2）と連携して行った本ツールの評価実験の結果、生成したマップから専門家が興味を持ったものを選択した概念連鎖（パス）のうち約85%が4段階の主観評価で上位2段階という高い評価を得たことから、十分に意味があるマップやパスが生成できることが確認できたと言える。また、それらの選択されたパスを元のシナリオと比較したところ、約75%のパスがシナリオを再現したマップに含まれない想定外のパスであったことから、本ツールが思いがけない内容を提示し利用者の発想を刺激する可能性を持つことが示唆された。

続いて、サブテーマ（2）の協力のもと、本ツールを政策立案に必要なステークホルダー間の合意形成支援ツールとして発展させ、被験者がステークホルダーの役割を演じて（ロールプレイ）議論を行う実験を通して、合意形成支援の可能性を示すことができた。以上より、オントロジーを用いたバイオ燃料利用に関する問題の構造化と政策立案支援ツールの開発を達成できた。

(2) 持続可能な発展を目指したバイオ燃料利用戦略の策定

バイオ燃料関連政策については、米国、EU、インド、インドネシアについて調査を行った。米国では、第二世代バイオエタノールの開発普及を図るとともに、2005年のエネルギー政策法、2007年のエネルギー自給・安全保障法に基づき、再生可能燃料基準では、2020年のバイオ燃料の自動車燃料への使用目標を360億ガロンとしている。

EUでは再生可能エネルギー指令により、輸送部門における各国のエネルギー使用量に関して2020年に10%の目標を設定する、この際、化石燃料に比較してライフサイクルで見た温室効果ガスの排出削減量を裁定35%とすること、生物多様性の高い地域からのバイオ燃料原料を使用したものはバイオ燃料として認めない等の環境影響等を考慮したバイオ燃料の利用拡大が図られている。

インドでは、2003年に国家バイオディーゼル目標が提案され、また、2017年までにバイオ燃料の混入目標を20%に定めたが、多くの課題が残されている。

インドネシアのパームヤシ栽培については、中小農民とプランテーションによる栽培方法が大きく異なっており、農薬の施用について環境影響の面での懸念が把握された。

ステークホルダー分析は、その方法論を検討した後、多様なステークホルダーについて、ブラジルとインドネシアをケーススタディとして現地調査、ヒアリングを実施した。両国のケーススタディに共通して、しばしば強調される土地利用の変化とそれに伴う環境影響以外にも、国内の雇用問題、地域間の所得格差、輸出先のバイオ燃料政策等について導入における重要課題として検討する必要性が明らかになった。同様に、生産農家や環境団体のほかにも、プラントメーカー、労働者団体、商社など多様な国内外のステークホルダー群を捕捉した。

バイオ燃料利用に関する社会影響評価については、バイオ燃料の環境的及び社会・経済的観点からの持続可能性基準策定動向を題材として調査を行ったほか、国内のバイオ燃料導入事例を横断的

に整理し、技術導入における課題を抽出した。前者については、現在のところ、国際的に統一的な持続性基準は策定されていないが、基準を構成する要素としては、環境（GHGの排出抑制、炭素貯留の確保等）、経済、社会（食料安全保障を脅かさない、人権、土地権利等）、エネルギー安全保障、良い統治等が持続可能性の基準の項目としてあげられており、これらを考慮してバイオ燃料の持続可能な利用戦略を検討する必要があることが明らかとなった。パームヤシ、大豆、サトウキビ等の作物の持続可能性基準が自主的に策定され、一部で実際に認証システムも開始されている。

宮古島バイオエタノールプロジェクト、大阪府E3実証事業、農業協同組合(JA)新潟イネ原料バイオエタノール生産、北海道十勝地区におけるバイオエタノール生産、京都市バイオディーゼル燃料化事業、大木町バイオタウン構想、南阿蘇村バイオマスタウン構想を対象として、それぞれのステークホルダーと技術的な課題について横断的に整理することで、日本におけるバイオ燃料技術の導入に関する社会的影響を探索した。政府レベルでは、環境省、経済産業省、農林水産省、文部科学省がそれぞれの利害関心に基つき異なるプロジェクトに関与しているが、各実証プロジェクトから得られた知見を総合し、技術政策をとりまとめる機関の不在が問題だと考えられる。農林業の立場から見れば追加需要につながる点で魅力的だが、フィードストックの収集に伴う追加コストを回収できるかどうか協力のカギとなる。新潟や北海道の事例では、JAが主体であり、生産から流通まで関連組織が一貫して担うことで、技術導入の調整コスト削減の可能性を示唆している。

（3）国際農産物需給を考慮した社会経済分析

米国とブラジルのバイオエタノール生産に関する経済的生産性の比較に関しては、ブラジルのサトウキビについては、各年いずれも、サトウキビからのエタノールがガソリンよりも割安で、採算がとれる一方で、米国のトウモロコシについては、補助金がなければ、ほぼすべての年で採算割れになり、エタノール1ガロン当たり51セントの税控除を前提とすることで、2005、2006年は採算がとれ、2007、2008年はほぼブレイクイブという状態になっており、政府からの補助の効果が発揮されていることが明らかとなった。

国際農産物シミュレーション・モデルの構築とそれを用いたシミュレーション分析の結果から、米国のバイオエタノール導入促進政策が国際トウモロコシ市場に対して、価格の上昇を通じ大きな影響を有することが本研究のシミュレーション結果から明らかとなった。その評価については、国際社会全体としての社会厚生、あるいは、温室効果ガス削減効果等を総合して判断する必要がある。国際トウモロコシ価格が上昇するものの、消費者余剰の減少以上に生産者余剰が増大する、あるいは温室効果ガス削減効果が見込めるのであれば、米国のバイオ燃料導入促進政策は肯定される。本分析の結果から米国が全体としてエタノール生産を増加させる政策をとるにつれ社会的余剰は減少する傾向にあることが明らかとなった。また米国にとっての社会的余剰の最大化とグローバルレベルでの社会的余剰の最大化をもたらす米国のバイオエタノール政策が異なることも明らかとなった。世界全体の社会的総余剰の最大をもたらす米国のバイオエタノール政策は、税控除なしでエタノール生産を行う場合である。

国際植物油市場のパームヤシ生産農家に与える影響に関しては、パームオイルの世界1位の生産国であるインドネシアのパームオイル生産の産業構造を非対称価格伝達のフレームワークを用いて分析した。2000年7月頃までは正の非対称価格伝達となっていたが、2000年8月頃から負の非対称価格伝達に向けて変化し、2002年4月頃から2007年4月頃までは完全な負の非対称価格伝達となり、それ以降は対称的な価格伝達が行われていることが確認できる。1999年1月から2000年7月頃までの下方硬直的な非対称価格伝達は、相対的に搾油工場がFFB購入価格の決定力を持っていることと合致する。しかし、パームオイルの国際価格の上昇とそれにとまなうパームオイル需要の増大により、パームヤシ作付地域が拡大するとともに搾油工場が増加し、搾油能力も上昇したため、搾油産業が厳しい競争に晒されるようになり、FFBの売り手（農家）に価格決定権が移行したといえる。これは2000年8月頃から2007年4月頃までの上方硬直的な非対称価格伝達に示されている。

（4）バイオ燃料生産とそれに伴う森林・土地・水利用変化の影響評価

第1に、インドネシアとブラジルにおける農地と森林の近年の動向を明らかにするとともに、植物油のLCAを通してパームオイルの位置づけを解明した。以上により、LCAにおいて土地利用を評価対象とすることが重要であることを示した。第2に、東南アジア（マレーシア/インドネシア）のパームオイル生産とヨーロッパのナタネ油生産を比較し、「後発者の不利益」ともいえる状況があることを明らかにした。第3に、事例としてインドネシアを取り上げ、地域（州）レベルでの土地利用の影響評価を実施し、土地利用の影響評価の結果は土地条件によって大きく異なることを示した。まず、パームオイルの生産性に基づく地域（州）ごとの影響評価を実施し、土地利用転換に伴う環境影響には州ごとに大きな格差が生じ得ることを示した。次いで、州別に土地条件（泥炭土シエラ）を考慮した影響評価を実施し、土地利用転換に伴う州別のCO₂排出量は、化石燃料由来のCO₂

排出量より一般に多く、土地条件（泥炭土シェア）を考慮するとさらに増加することを解明した。第4に、LCIデータを構築する中で、商用のパームヤシプランテーションにおける肥料・農薬等の資材や用水の利用実態を明らかにした。また、土地利用の影響評価の一環として、エネルギー作物生産の水必要量を推計した。

（5）LCAによるバイオ燃料利用に関する総合影響評価

中国におけるバイオディーゼル生産については、ジャトロファ、Xanthoceras、Pistacia、Swidaのいずれか適した植物を未利用地に栽培し、バイオディーゼルの混入度を20%としたときの中国全体の2020年のバイオディーゼル需要の60%が供給できることが推定された。それぞれの省の生産能力と需要により、不足する省と他省へ供給することが可能な省があることが推定された。各省における製造過程でのライフサイクルGHG排出の比率を見ると、肥料由来のGHGが45%程度、精製が40%程度、輸送が15%程度で、省により異なる。走行段階も含めてバイオディーゼル1tあたりのGHG排出削減を評価すると、剰余バイオマスをエネルギー源として用いない場合、化石ディーゼルの回避で2.08tのCO₂を削減できるものの、燃料生産に伴い1.31tのCO₂排出が生じる。剰余バイオマスをエネルギー源とすると、燃料生産に伴うCO₂排出を0.95tに抑えることができ、GHG削減効果が大きくなる。

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に関しては、製造過程について、①現状の方式を踏襲し、バガスを燃料とするコジェネレーションボイラーを用いて蒸気を製造し発電するシナリオ、②通常バイオエタノールに加え、バガスから第二世代のエタノールを生産し、サトウキビわらとリグニン焼却し蒸気と電力のエネルギー源にするシナリオ、③通常バイオエタノールに加え、バガスとサトウキビわらに対しバイオマス・ガス化複合発電するシナリオ、の3群を想定してLCAを行った。その結果、バイオマス・ガス化複合発電により副産物からのエネルギー回収を高めるシナリオがGHGの面で最も有利であることが明らかになった。このバイオエタノールを日本とブラジルで消費する場合についてそのTTW段階のLCAを行い、総合的な評価を行った。いずれのシナリオの場合も大きくGHGを削減することができた。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③のバイオマス・ガス化複合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、あるいは農地面積あたりでは、②の第二世代バイオエタノールを導入して生産量を1.4倍にする方がGHG削減量の面ではるかに有利になることが分かった。また、バイオエタノールは従来のガソリンより環境負荷が大きい、それは製造過程で生じることが分かった。

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に関しては、製造方法について、①従来の方式に従い、トランスエステル化でバイオディーゼルを生産し、幹、殻などは利用しないシナリオ、②水素化して植物油を生産し、幹、殻などは利用しないシナリオ、③トランスエステル化でバイオディーゼルを生産し、幹、殻などはガス化して発電するシナリオ、④トランスエステル化とフィッシャー・トロプシュ法によりバイオディーゼルを生産するシナリオ、の4シナリオ群に対して解析を行った。インドの場合は代替する電力が石炭火力であり、発電効果が大きく、③の発電シナリオが最もGHG削減が大きくなった。原料となるジャトロファを機能単位として考えた場合、収量を上げた④では、製造時のGHG排出が大きくなり、必ずしも有利とは言えない。

インドネシアにおけるパームヤシ栽培について、環境負荷の原因となっているパームヤシプランテーションへの土地利用の変化を、スマトラ島のRiau県のPelalawan地区を選定し解析した。リモートセンシングに基づくGISと統計データの両者から、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パームヤシに変更されたことが推定された。

（6）アジア太平洋地域における生態系の財・サービスとバイオ燃料利用

バイオ燃料に関する需要拡大とパームオイル生産及び収穫エリア拡大の関連に関するモデル分析により、バイオ燃料に関する需要拡大が、インドネシアにおけるパームオイル生産及び収穫エリア拡大にどのように関連しているかについて、1997年から2007年までの土地利用変化を基にモデル分析を行い、国際的需要拡大と、インドネシアにおける森林減少及びパームヤシ作付面積拡大との間に正の相関が見られることが明らかになった。

また、バイオ燃料とパームオイルに関するステークホルダー意識分析により、バイオ燃料の原料となるパームオイル生産拠点のひとつであるインドネシア・マレーシアにおいて、現地企業・需要家・NGOらに対する詳細な質問表調査を行い、RSPOというひとつの現実のステージを通じ、バイオ燃料の原材料となるパームオイル生産から消費に至る一連のサイクルの最前線に深く関与しながらも、立場の異なる人々の価値観や優先事項を明らかにした。

(7) アジア太平洋地域における政策パッケージおよび地域的政策協調の検討

現在行われている規模のバイオ燃料政策は妥当なものであり、今後、市場が引き続き発展することが予想される。一方、大規模なバイオ燃料生産の導入をもたらす高い目標のバイオ燃料混合比率や補助金、価格操作による産業活性化のための政策は、森林破壊などを誘発する持続可能ではない生産方法であるから促進されるべきものではない。一方、先端的なバイオ燃料生産についての科学的・技術的調査は引き続き行うべきである。

持続可能なバイオ燃料の基準は、持続可能な生産方法を確実に使用することを担保しなくてはならない。 RSBの基準は政府に採用されることを推奨されている。RSB基準は、他のイニシアチブのものより厳しいものであるがパイロット実験の結果では実行可能であった。また、バイオ燃料は廃棄物利用に貢献することが指摘された。しかしながら、他の廃棄物リサイクリング方法との調整をする政策が必要だということも明らかになった。同時に、農業廃棄物が生態系の保存に有効であるため、バイオ燃料のための農業廃棄物の利用促進政策が生態系の維持への障害とならないようにすべきことも分かった。また、ケーススタディから、それぞれの国特有の政策が必要であることが明らかになった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

以下、本研究により得られた成果の科学的意義をサブテーマ別に整理する。

サブテーマ(1)：本研究は、オントロジー工学技術をバイオ燃料問題に適用した世界初の試みであり、視点を適切に扱うことで、同じオントロジーを様々な視点から俯瞰できるという本ツールの特徴は、世界的にみても類似ツールはなく、学術的に独創性が高い。また、バイオ燃料のような複数領域の専門家や、様々なステークホルダーが関係する問題領域において、問題を多様な視点から構造化できる本ツールの有効性を、その当事者となる専門家が実際にツールを使用することを通して確認し、単なる机上ではなく実用上の有用性を示すことができたという点で意義深い。

サブテーマ(2)：持続可能な発展のためのバイオ燃料利用戦略を検討するために必要な社会科学的知見を得るため、政策分析、ステークホルダー分析、社会影響評価について、その方法論を検討し、ケーススタディを通じ、バイオ燃料利用戦略の検討に向けたこれら社会科学的知見の方法論の適用性を確認することができた。

サブテーマ(3)：バイオ燃料利用に関する数量的な把握は、世界でも研究途上にあり、本サブテーマの構築したシミュレーション・モデルは、シナリオも含め更なる発展を図るものであるが、バイオ燃料生産の影響を総合的かつ客観的に分析する有効な手法である。また、国際農産物市場を通じたバイオ燃料生産による農産物価格の上昇が与える途上国農民への影響について非対称価格伝達のフレームワークを適用して明かにした研究は世界でも例をみず、非常に意義深い。

サブテーマ(4)：近年、たとえば、ある国がバイオ燃料を新たに輸入した場合に、輸出国において食料作物生産からバイオ燃料作物生産への農地利用のシフトが生じることで、結果的に新たな食料生産分の農地が必要となり、他の土地（森林等）がそれに転換される間接的土地利用の問題が盛んに議論されている。本サブテーマは暫定的ながらこれを数量的に明らかにすることに成功しており、科学的意義は非常に大きい。

サブテーマ(5)：バイオ燃料生産・利用の環境への効果を把握するにはLCAが有効であり、そのLCAの評価に際しては製造段階と使用段階の両者を把握すること、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であり、本研究はこれに成功している。またブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノールの場合、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であること、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削減量が大きいことを明かにした。これはバイオ燃料へのLCAの応用の際に注意すべき点であり、本研究の科学的意義は非常に大きい。

サブテーマ(6)：生態系サービスに関する研究者および日本（および国際社会において）の政策立案者にとって、直接的な関連性をもつ形で成果を提供するという点において、生態系サービスの分析を柔軟なアプローチで行う本サブテーマの貢献と意義は極めて大きい。

サブテーマ(7)：ケーススタディ国におけるフィールドワークを主とする資料収集や政策課題の同定、バイオ燃料政策の経済的・環境的影響評価モデルの構築により、バイオ燃料の大規模輸入国となる可能性がある日本とその輸出地域との関係を分析するフレームワークを構築した。これによりバイオ燃料輸入国の動向が自国内のみならず開発途上国を中心とするバイオ燃料輸出国へ潜在

的に与える影響を分析することが可能となった。また実際に暫定的な分析を行いその有用性が明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

本研究では、オントロジーや各シミュレーション・モデル、LCA等に代表される研究方法・フレームワークを用い、サステナビリティ学アプローチに基づき詳細かつ総合的に分析し、バイオ燃料を巡る現況を科学的証左に基づき客観的に明らかにした。食糧需給の逼迫、森林・水資源への負の影響、それらに起因する開発途上国における貧困層への悪影響等が現行の第一世代バイオ燃料から引き起こされることが本研究から指摘できる。また、一国・地域のバイオ燃料利用戦略がグローバルレベルの社会的余剰の最大化に一致しない場合があることが明らかになった。以上は現在国際的に進展しているバイオ燃料に関する議論に大きく貢献することは明らかである。また、現状への対応策として剰余バイオマスや副産物の利用、他のセクターとの連携、あるいは第二世代バイオ燃料が有望であることも明らかとなった。

科学的な観点からバイオ燃料の持続可能性の基準や指標について様々な角度から検討し、GBEPをはじめとする国際的な場に示すことを目的とした、農林水産省による「国際バイオ燃料基準会議」に、研究参画者の鈴木宣弘教授が、同会議座長として以上の分析結果に基づく知見を提示した。

「BforSDプロジェクト最終国際Work Shop – バイオ燃料の持続可能性に関するシンポジウム：政策担当者とステークホルダーの対話」を開催し、世界のバイオ燃料政策を牽引するFAO、GBEP、RSP0、インドネシア政府、ブラジル政府、環境省等の各ステークホルダーへ本研究成果を提示した。

6. 研究者略歴

課題代表者：武内和彦

1951年生まれ、東京大学理学部卒業、農学博士、現在、東京大学サステナビリティ学連携研究機構(IR3S)副機構長/国際連合大学副学長/東京大学大学院農学生命科学研究科教授

主要参画研究者

(1)：溝口理一郎

1948生まれ、大阪大学基礎工学部卒業、工学博士、現在、大阪大学産業科学研究所教授

(2)：武内和彦(同上)

：城山英明、1965生まれ、東京大学法学部卒業、現在、東京大学大学院法学政治学研究科教授

(3)：鈴木宣弘

1958年生まれ、東京大学農学部卒業、農学博士、現在、東京大学大学院農学生命科学研究科教授

(4)：林清忠

1962生まれ、岐阜大学大学院農学研究科修了、現在農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター環境影響評価研究チーム長

(5)：花木啓祐

1952年生まれ、東京大学工学部都市工学科卒業、工学博士、現在、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授

(6)：Claudia ten Have

1974生まれ、国際基督教大学卒業、行政学博士、現在、国際連合大学高等研究所マネージング・リサーチフェロー、持続可能な開発のガバナンスプログラムのコーディネーター

(7)：鈴木 胖

1934年生まれ、大阪大学工学部卒業、工学博士、現在、財団法人地球環境戦略研究機関関西研究センター所長および兵庫県立大学副学長

：Mark Elder

1966年生まれ、イリノイ州立大学アーバナ・シャンペーン校政治学部および経済学部卒業、政治学博士、現在、財団法人地球環境戦略研究機関上席研究員ガバナンスと能力グループディレクター

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

(主要なもののみ)

- 1) 鈴木宣弘：農業経済研究，第81巻2号，2009，食料をめぐる国際情勢と日本農業・農政の展開方向
- 2) N. Matsumoto, D. Sano, and M. Elder： The Journal of Applied Energy, 86, (2009), “Biofuel initiatives in Japan: Strategies, policies, and future potential”
- 3) Prabhakar, SVRK, and M. Elder： The Journal of Applied Energy, 86, (2009) "Biofuels and resource use efficiency in developing Asia: Back to basics"
- 4) T. Kumazawa, O. Saito, K. Kozaki, T. Matsui and R. Mizoguchi： Sustainability Science, Vol.4, No.1, 2009, DOI:10.1007/s11625-008-0063-z, “Toward knowledge structuring of sustainability science based on ontology engineering”
- 5) N. Kuga, N. Suzuki, and H.M. Kaiser: Agribusiness: An International Journal, 26(1), 64-82, 2010, “Trade implications of price discrimination in a domestic market”
- 6) T. Nakajima, A. Ruffin, and H. Matsuda: International oil palm conference proceedings 2010, “The structural change in supply-chain of Indonesia’s palm oil industry between farmers and companies”
- 7) Rui Guo and Keisuke Hanaki: Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2, 033107, 1-15, 2010, “Potential and life cycle assessment of biodiesel production in China”
- 8) T. Dang, O. Saito, Y. Yamamoto and A. Tokai： Journal of Sustainable Energy and Environment, 1, 137-148, 2010, “Scenarios for sustainable biomass use in the Mekong Delta, Vietnam”
- 9) K. Kozaki, T. Hirota and R. Mizoguchi： ESWC 2011, Part I, LNCS 6643, 305-320, 2011(in Press), “Understanding an ontology through divergent exploration”
- 10) X. Li, T. Takahashi b, N. Suzuki and H. M. Kaiser： Agricultural Systems, 104, 348-353, 2011, “The impact of climate change on maize yields in the United States and China”

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可）

(主要なもののみ)

- 1) K. Hayashi and H. Kato： Proceedings of the 8th European IFSA Symposium, 667-674 (2008), “Ecological-economic assessment of farms using multi-input multi-output models: Life cycle assessment and extensions”
- 2) M. Elder, P. SVRK, J. Romero, and N. Matsumoto. 2008. Prospects and Challenges of Biofuels in Asia: Policy Implications. In *Climate Change Policies in the Asia-Pacific: Re-uniting Climate Change and Sustainable Development*, edited by H. Hamanaka, A. Morishima, H. Mori and P. King. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- 3) R. Mizoguchi, K. Kozaki, O. Saito, T. Kumazawa and T. Matsui: IR3S Series Vol.1, Sustainability Science I, United Nations University Press, 2010, Section 2-3: “Structuring of knowledge based on ontology engineering”
- 4) O. Saito, K. Kozaki, T. Hirota, R. Mizoguchi: IR3S Series Vol.1, Sustainability Science I, United Nations University Press, 2010, Section 2-4: “Application of ontology engineering to biofuel problems”,
- 5) K. Hayashi, S. Uchida, S. Hokazono and M. Sato： LCA Food 2010: VII International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, Vol. 1, 455-460 (2010), “Modeling life cycle inventories for crop production in Japan: development of the NARO LCI database”
- 6) P. Stromberg, A. Gasparatos, J.S.H. Lee, J. Garcia-Ulloa, L.P. Koh and K. Takeuchi： UNU-IAS Report, 2010, “Impact of biofuels on ecosystem services and biodiversity (Available at www.ias.unu.edu/publications)”
- 7) R. Moreno-Penaranda, A. Gasparatos, J. Puppim de Oliveira, A. Suwa and P. Stromberg： K. Takeuchi, H. Shiroyama, M. Matsuura and O. Saitoh (Eds.), Biofuels and Sustainability, United Nations University Press, Tokyo, 2011(forthcoming), “Local impacts of biofuels: Assessing the socio-ecological sustainability of palm oil in Indonesia”
- 8) M. Elder, P. SVRK, J. Romero, and N. Matsumoto. 2008. Prospects and Challenges of Biofuels in Asia: Policy Implications. In *Climate Change Policies in the Asia-Pacific: Re-uniting Climate Change and Sustainable Development*, edited by H. Hamanaka, A. Morishima, H. Mori and P. King. Hayama,

Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

- 9) N. Matsumoto and D. Sano : IGES Report, Forthcoming, 2011, “Waste-based ethanol production and a sound material-cycle society:Case studies on construction and food wastes in Japan”
- 10) D. Sano, J. Romero and M. Elder : Socioeconomic and Environmental Impacts of Biofuels: Evidence from Developing Nations. Alexandros Gasparatos and Per Stromberg (eds). New York: Cambridge University Press. Forthcoming, 2011, “Jatropha production for biodiesel in Yunnan, China: Implications for sustainability at the village level”