

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

(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) 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
林 清忠

平成20～22年度累計予算額：28,771千円（うち、平成22年度予算額：10,209千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] バイオ燃料生産に伴う森林から農地への土地利用変化が環境に与える影響を評価するため、土地利用の影響評価手法を検討した。ライフサイクルアセスメント（LCA）の枠組みを活用し、水利用も併せて評価した。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、パームヤシ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（泥炭土シェア）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、ライフサイクルインベントリ（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。

[キーワード] ライフサイクルアセスメント、ライフサイクルインベントリ、土地利用変化、特性化係数、パームオイル

1. はじめに

食料生産やエネルギー生産への世界的な需要の高まりが、熱帯地方での森林破壊の一因になっている。森林破壊の速度は低下しているものの、その率は依然として高いと指摘されている¹⁾。森林破壊は主として熱帯雨林から農地への転換に伴うものであり、関連する環境問題として、気候変動、土壌炭素貯留、生態系サービス、生物多様性等に関わる問題がある。

熱帯地方の森林破壊を減少させることは国際的な課題であり、それは農業生産、バイオ燃料生産と深く関わっている。とりわけインドネシアでのパームヤシ生産、ブラジルでの大豆生産が注目されるところとなっている。本研究では、こうした土地利用変化がもたらす環境影響をどのよ

うに評価するかを検討する。

2. 研究目的

本研究の目的は、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である。熱帯雨林から農地への転換に関して注目されているインドネシアとブラジルの近年の土地利用変化の動向を概観した後で、LCAにおける土地利用の影響評価手法を検討する。以上に基づいて、インドネシアにおけるパームオイル生産を事例とした土地利用の影響評価を行う。

3. 研究方法

本研究は、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する。

第1に、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を解明する。

第2に、「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とヨーロッパのなたね油を仮想的に比較し、土地利用の影響評価に伴う社会的要因を明らかにする。

第3に、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する。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う。

第4に、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、水利用を含め検討する。

4. 結果・考察

（1）LCAにおける「土地利用」の重要性

1) バイオ燃料をめぐる土地利用変化

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は、図1の通りである。両国とも耕地面積は増加傾向にあるのに対して、森林面積は減少している。インドネシアでは地表面積の12%に相当する23 M haが、ブラジルでは同6%に相当する51 M haが1990年から2008年の間に消失している。

これらの傾向は、バイオ燃料生産のために新たに用意できる土地が限られていることを示している。現在バイオ燃料に用いられている土地面積（米国、EU、ブラジル、中国の合計）は、13.8 M haであると推計されており、これは世界の穀物面積（1500 M ha）の1%に相当する²⁾。世界全体でのバイオ燃料の生産目標（2020年）を達成するためには、56～166 M haの土地が必要であると推計されており⁷⁾、これは日本の地表面積の1.5～4.4倍に相当する。

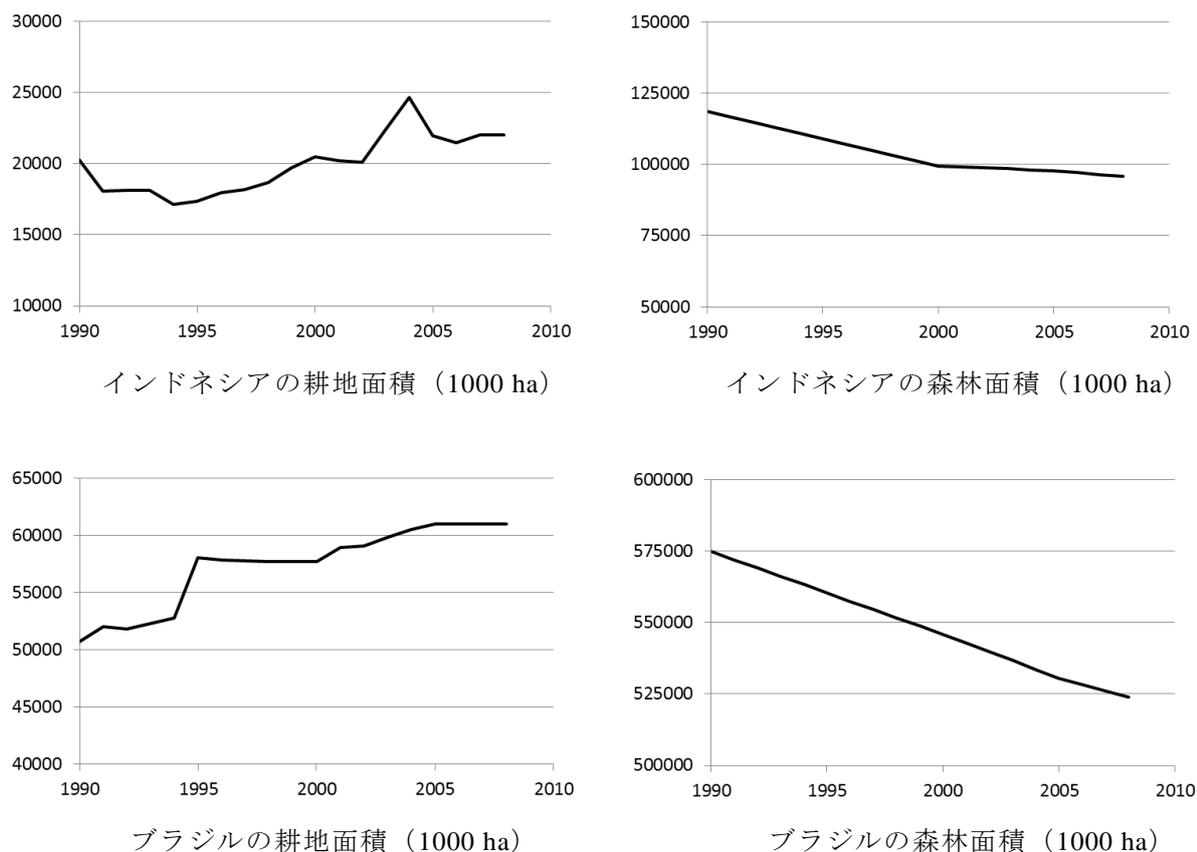


図1. インドネシアとブラジルにおける土地利用変化
資料: FAOSTAT

2) 植物油生産を事例としたLCA

ここでの目的は、製油工場段階での植物油（バイオディーゼルの前段階の物質）の比較LCAを実施し、土地利用の影響評価を実施する意義を確認することである。対象とした植物油は次の通りである。ヒマシ油（インド）、ココナッツ原油（フィリピン）、ジャトロファ油（インド）、オリーブ油（キプロス）、パーム核油（マレーシア）、パームオイル（マレーシア）、パームオイル（森林伐採がない場合、マレーシア）、なたね油（スイス）、なたね油（ヨーロッパ）、有機なたね油（ヨーロッパ）、ダイズ油（ヨーロッパ）、ダイズ油（ブラジル）、ダイズ油（米国）。

システム境界は、製油段階まで（"cradle to gate"）とし、機能単位は製油1 kgとした。分析は通常のLCA（attributinal LCA）によって行った。また、用いたLCIデータベースはecoinvent 2.0⁵⁾を基本とし、ESUサービスが作成したデータ⁴⁾も用いた。評価に用いた影響領域は、GHG排出量（地球温暖化ポテンシャル、GWP）、エネルギー消費（累積エネルギー需要、CED）、土地占有および土地利用転換（エコシステムダメージポテンシャル、EDP）である。計算はSimaPro 7.1によって実施した。地球温暖化ポテンシャルの計算において、生物起源のCO₂排出と固定分は算入しなかった。

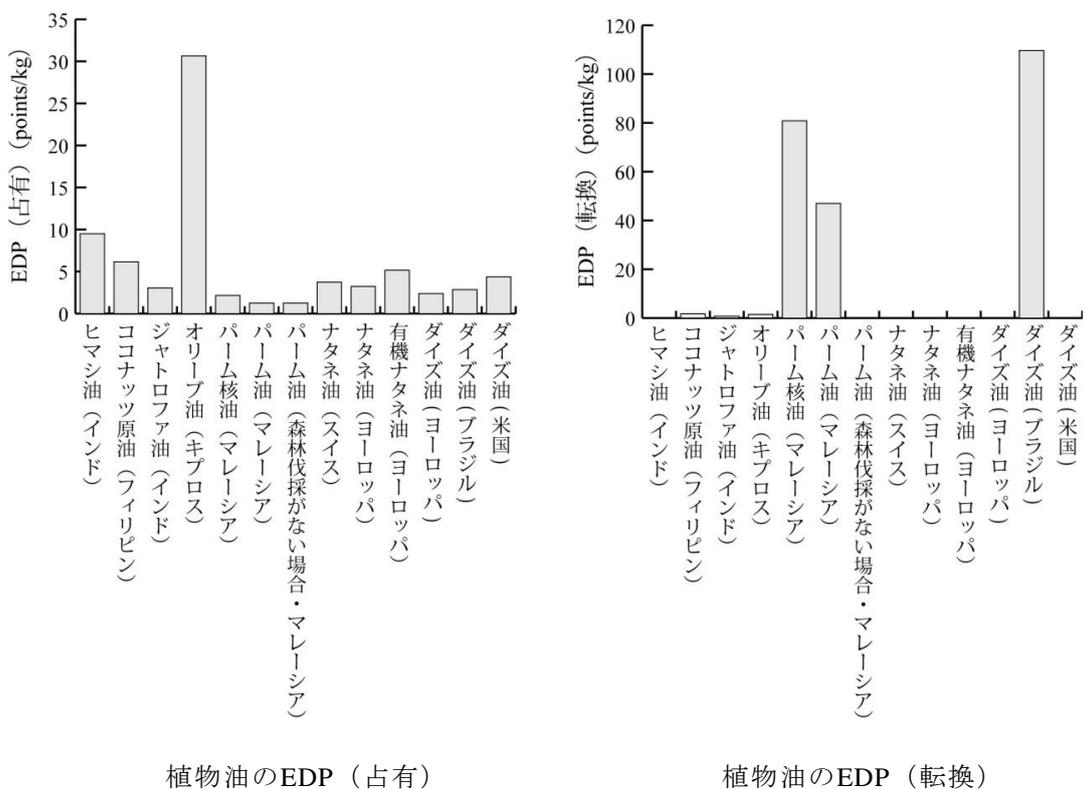
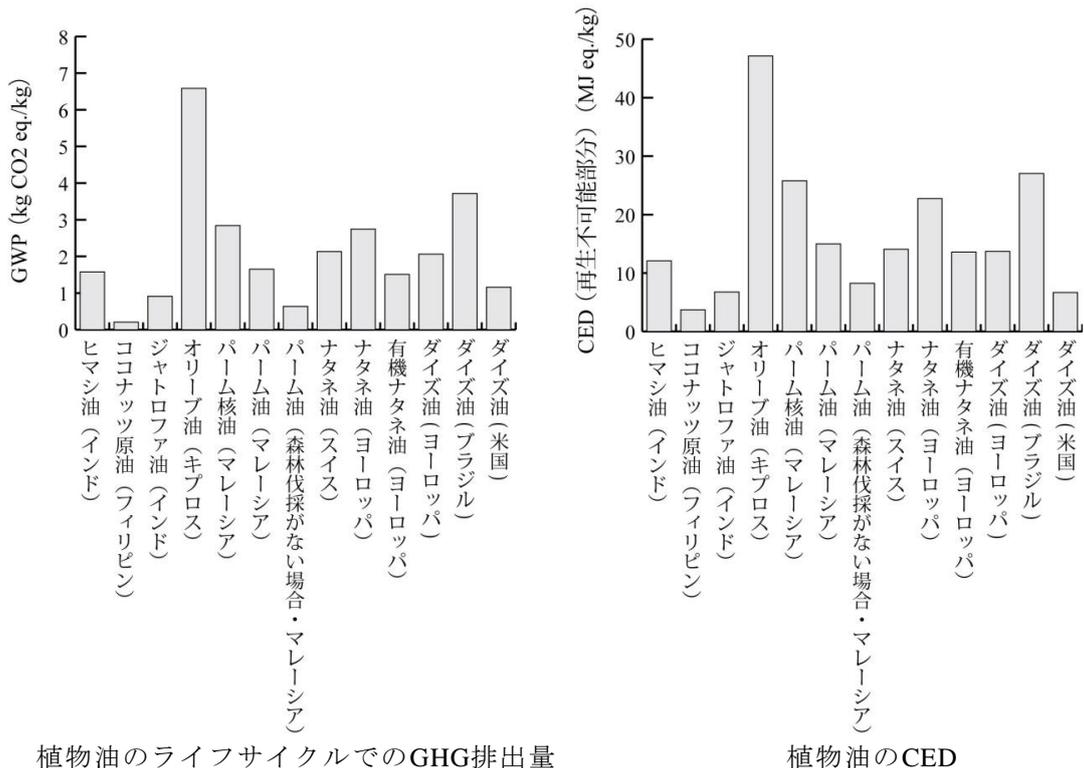


図2. 植物油の比較LCA

分析結果は以下の通りである (図2)。植物油のライフサイクルGHG排出量を比較することによ

り、パームオイル、とりわけ森林伐採がない場合のパームオイルの排出量が小さいことがわかった。CED（再生不可能部分）の比較からも同様の傾向が指摘できた。生産効率が高いパームオイルは、EDP（占有）の値も小さいこと、つまり占有に伴う生態系への影響が相対的に小さいことが示された。しかしながら、土地利用の転換については、異なった結果が得られた。EDPの値が最も大きいのは、ブラジルのダイズ油である。マレーシアのパームオイルについては、森林伐採がある場合とない場合とで大きな相違のあることが示された。

（２）LCAにおける土地利用の影響評価

上の比較LCAにおいて注目すべき結果は、「パームオイル（マレーシア）」と「パームオイル（森林伐採がない場合・マレーシア）」の違いであり、土地利用の影響評価がLCAにおいて重要であることを示している。実際、土地利用の影響評価はLCAにおいて、とりわけ農産物のように生産段階で土地への依存度が大きい製品のLCAにおいて重要なテーマとなっている。

1) フレームワーク

LCAにおける土地利用の影響評価のフレームワークは図3の通りである。その特徴は、以下のよう要約される。①占有と転換が明示的に区別されている。②土地利用の変化に伴う土地の質（ q^* , q_0 , q_1 , q_2 ）が定義されている。③影響の程度は参照点となる状態（ q^* ）との関係で決定される。④占有期間等の時間の定義（ t_0 から t_1 または t_2 ）が評価上重要である。

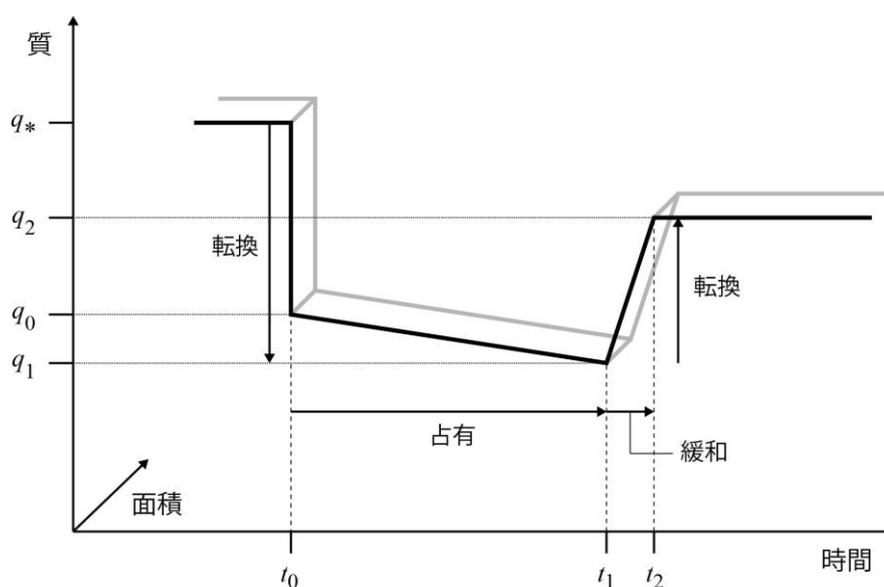


図3. LCAにおける土地利用の影響評価のフレームワーク

2) パームオイル生産の事例

a 地域間の比較

この節では、東南アジアとヨーロッパでの植物油生産を比較することにより、環境影響評価の背後にある社会的側面を明らかにする。マレーシアでのパームヤシ生産とドイツでのナタネ生産を比較するが、その際に仮想的な土地利用シナリオの違いが種多様性（species richness）に与える影響を検討することにより、発展段階の違いに起因するある種の不平等性に焦点を当てる。イン

ベントリデータはecoinvent 2.2をベースとし、Schmidt⁵⁾によって開発された特性化係数によって、表1のシナリオを検討した。その特性化係数は、デンマーク用とマレーシア・インドネシア用が求められているが、検討したドイツの事例に対してはデンマーク用の係数を代用した。

ナタネを集約的草地から集約的単年性穀物栽培への転換により栽培した場合とパームヤシを集約的ゴム農園からアグロフォレストリーへの転換により栽培した場合を比較すると、後者の方が多様性への影響が小さいことが示された。特に注目されたのは、ナタネを原生林から集約的単年性穀物栽培への転換により栽培した場合の影響の大きさである。

この結果は、東南アジアとヨーロッパの間に異時点間での不平等性（「後発者の不利益」）が存在することを示している。言い換えれば、ヨーロッパにおける過去の土地利用転換の環境負荷の方が、現在の東南アジアにおける転換の負荷よりも大きくなり得ること、したがって、東南アジアにおける現在の土地利用転換に伴う負荷のみに注目することには、ある種の不平等性が伴い得ることを示している。

表1. 土地利用変化の種多様性への影響 (wS₁₀₀/kg)

製品	シナリオ	占有	転換
ナタネ油	原料生産：ドイツ（ザクセン＝アンハルト州）でのナタネ生産。集約的草地から集約的単年性穀物栽培への転換。 製油：EUでの平均的プラント。	0.0191	0.0398
ナタネ油	原料生産：ドイツ（ザクセン＝アンハルト州）でのナタネ生産。原生林から集約的単年性穀物栽培への転換。 製油：EUでの平均的プラント。	0.0191	6.01
パームオイル	原料生産：マレーシアでのパームオイル生産。集約的ゴム農園からアグロフォレストリーへの転換。 製油：マレーシアでの平均的プラント。	0.00473	0.000851
パームオイル	原料生産：マレーシアでのパームオイル生産。原生林からアグロフォレストリーへの転換。 製油：マレーシアでの平均的プラント。	0.00473	0.0421

注：wS₁₀₀とは、100 m²の標準地域において、生態系の脆弱性に関するファクターで重み付けをした種多様性である。

b 生産性に基づいた地域化

以上の分析は、土地利用変化のシナリオの設定が影響評価を実施する上で重要であることを示唆している。土地利用変化の影響評価においては、それに加え、地域性を考慮することが重要な意味を持つ。そこで以下では、地域差を反映した土地利用の影響評価を、つまり土地利用の影響評価の地域化を検討する。

まずは、インドネシアのボルネオ島とスマトラ島の12州（図4）のそれぞれについて、パームヤシの生産性の違いを反映させた評価を行う。具体的には、インベントリデータ（ecoinvent 2.2）における収量に各州の値を用いた³⁾。ただし、その値がパーム原油（Crude Palm Oil, CPO）であったためパーム果房（Fresh Fruits Bunch, FFB）に換算した¹⁾。特性化係数は暫定的にEDPを用いた。



図4 事例としたインドネシア12州の位置

分析結果は表2の通りである。第1に、転換の方が占有に比べて大きく、前者は後者のおよそ38倍であった。第2に、インドネシアにおける主要なパームヤシ生産地帯である北スマトラとリアウにおける値が相対的に小さいことが示された。

表2. パームヤシ生産の地域別EDP (EDP/kg FFB)

地域 (州)	占有	転換
ボルネオ島		
西カリマンタン	0.533	20.1
中央カリマンタン	0.518	19.6
南カリマンタン	0.486	18.3
東カリマンタン	0.598	22.6
スマトラ島		
アチェ	0.541	20.4
北スマトラ	0.390	14.7
リアウ	0.432	16.3
西スマトラ	0.529	20.0
ジャンビ	0.509	19.2
ブンクル	0.533	20.1
南スマトラ	0.515	19.4
ランブン	0.551	20.8

c 泥炭土のシェアに基づいた地域化

上記結果は州ごとの環境負荷の違いを検討する上では有用であるが、近年問題となっている泥炭地帯における土地利用転換を対象とした評価ではない。したがって、次に、各州における泥炭土のシェアを考慮した評価を行う。ここでは、土地利用転換に伴うCO₂排出量に注目する。

排出量の計算において転換を2つの部分に区分した。第1は、開拓地の供給プロセスであり、熱

帯雨林の伐採による集約的森林への転換である。第2は、他方はプランテーションレベルでのFFBの生産プロセスであり、集約的森林から集約的短伐期林への転換を意味する。伐採時には20%のバイオマスを燃焼すると想定した。各州のパームヤシプランテーションにおける泥炭土のシェアはKohらの成果によった⁶⁾。パームヤシプランテーションでの泥炭の分解によるCO₂排出量は、Uryuらの報告書に基づいている⁹⁾。

分析結果は以下の通りである(表3)。第1に、泥炭土の存在を無視した場合(ケース2)でさえ、化石燃料由来のCO₂排出量よりも土地利用転換に伴うCO₂排出量の方が多いたことが示された。第2に、泥炭土のシェアを考慮すると、CO₂排出量の値が著しく増加することが明らかとなった。西スマトラとリアウでは4倍以上、ブンクル、北スマトラ、ジャンビ、西カリマンタンでは3倍以上の増加となった。また、泥炭土を考慮した場合の土地利用転換に伴うCO₂排出量は、化石燃料由来のCO₂排出量の8倍以上であった。以上のことは、土地利用の影響評価において、地域の土地条件を考慮することが重要であることを示している。

表3. パームヤシ生産への土地利用転換に伴う地域別CO₂排出量 (kg CO₂ / kg FFB)

地域 (州)	土地利用転換に伴うCO ₂ 排出量			化石燃料由来のCO ₂ 排出量
	ケース1	ケース2	ケース1/ケース2	
ボルネオ島				
西カリマンタン	0.861	0.289	3.0	0.165
中央カリマンタン	0.491	0.281	1.8	0.164
南カリマンタン	0.263	0.263	1.0	0.162
東カリマンタン	0.326	0.324	1.0	0.170
スマトラ島				
アチェ	0.705	0.293	2.4	0.166
北スマトラ	0.656	0.211	3.1	0.156
リアウ	1.038	0.234	4.4	0.159
西スマトラ	1.417	0.287	4.9	0.165
ジャンビ	0.824	0.276	3.0	0.164
ブンクル	1.061	0.289	3.7	0.165
南スマトラ	0.560	0.279	2.0	0.164
ランブン	0.712	0.298	2.4	0.167

ケース1：泥炭土のシェアを考慮した場合。

ケース2：泥炭土のシェアを考慮しない場合。

(3) プランテーションレベルでの検討

より詳細な分析の可能性を検討し、今後の展望を示すため、プランテーションレベルでのLCIデータの収集を行った。対象は、北スマトラ州の2つの商用プランテーションである。収集したデータは、FFB生産、CPO生産、バイオディーゼル生産に関するフォアグラウンドプロセス(前景となる評価対象自体)のデータである。パームヤシプランテーションでのFFB生産についてみると、最も多用されている肥料が尿素であること、成分量で最も多用されている農薬が除草剤のパラコートジクロライドであること等が示された。これらの資材利用については、FFB生産においてはBMP (Best Management Practices) が、CPO生産においてはGMP (Good Management Practices) が実践されていることに留意する必要がある。

水利用については、上のインベントリデータにおいては、種苗生産段階で多く利用されていることが示された。影響評価手法としては、ウォーターフットプリントの可能性を検討した。とりわけ、土地利用変化の影響評価の一環としての分析を意識しつつ、エネルギー作物生産の水必要量の計算方法に検討を加え、モデルを用いる方法の妥当性を検討した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究の主要成果は以下の通りである。①LCAの枠組みを利用した土地利用の影響評価手法は、仮想的なシナリオに基づく異時点間の比較に適用することができる。この方法によりある種の不平等性（「後発者の不利益」）の存在が指摘できた。②土地利用の影響評価手法は地域化することができる。これによりインドネシアでのパームヤシ生産を事例に、生産性格差を考慮した評価を行い、土地利用転換に伴う環境影響の結果には地域（州）ごとに大きな格差が生じ得ることが示された。③インドネシアでのパームヤシ生産について、州別に土地条件（泥炭土シェア）を考慮する方法を示した。この方法の適用結果は、土地利用転換に伴う州別CO₂排出量は、化石燃料由来の州別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が示された。これらは、土地利用変化に関するこれまでの議論に新たな次元を付加するものであり、土地利用の影響として、GHG排出量に加え、生物多様性や生態系サービスまでを対象にしていることの科学的意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

本研究成果は、バイオ燃料の環境影響を評価する際に、土地利用変化、とりわけ森林から農地への転換を評価対象にすることが重要であることを示している。このことは、環境政策に対して以下のような意味を持っている。まず、地球温暖化防止に関する政策に関しては、GHG排出量を計算する際に、それが化石燃料の使用に由来するものか、土地利用変化に由来するものかを区別することが重要であることである。また、生物多様性に関する政策に関しても、種多様性の評価に留まってはいるが、それを定量的に評価するLCAの手法は貢献するところが大きい。総じて、環境と調和したバイオ燃料生産・利用システムを構築する上での指針を示す際に活用することができる。以上に加え、インドネシアを事例とした分析は、森林を新たに農地として利用することに伴うグローバルな観点からの問題点を示しており、土地利用に制限を設けること等の論拠となり得る。今後、成果の広報・普及に努めたい。

6. 引用文献

- 1) FAO (2010), *Global forest resources assessment 2010: Main report*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 2) Renewable-Fuels-Agency (2008), *The Gallagher review of the indirect effects of biofuels production*. St Leonardo-on-Sea, East Sussex, UK: Renewable Fuels Agency.
- 3) Jungbluth, N., M. Chudacoff, A. Dauriat, F. Dinkel, G. Doka, M. Faist Emmenegger, E. Gnansounou, N. Kljun, K. Schleiss, M. Spielmann, C. Stettler, and J. Sutter (2007), "Life cycle inventories of bioenergy: ecoinvent report No. 17," *ecoinvent report*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life

Cycle Inventories.

- 4) Jungbluth, N., S. Büsser, M. Stucki, and M. Leuenberger (2009), *Life cycle inventories of food consumption: EcoSpold LCI database of ESU-services*. ESU-services Ltd., Available from <http://www.esu-services.ch/inventories.htm>.
- 5) Schmidt, J. H. (2010), "Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil." *International Journal of Life Cycle Assessment*, no. 15 (2), pp. 183-197.
- 6) JIRCAS and MURCI (2006), *Final report for study of biomass production and flow in Indonesia (Phase II)*. Japan International Research Center for Agricultural Science and MU Research and Consulting Indonesia.
- 7) Corley, R.H.V., and P.B. Tinker (2003), *The oil palm*. 4th ed., Wiley-Blackwell.
- 8) Koh, L.P., J. Miettinen, S.C. Liew, and J. Ghazoul (2011), "Remotely sensed evidence of tropical peatland conversion to oil palm." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. 108 (12), pp. 5127-5132.
- 9) Uryu, Y. et al. (2008), "Deforestation, forest degradation, biodiversity loss and CO₂ emissions in Riau, Sumatra, Indonesia," *WWF Indonesia Technical Report*. Jakarta, Indonesia.

7. 国際共同研究等の状況

バイオディーゼルを含むパーム油産業に関するライフサイクルインベントリデータベースを構築するため、インドネシアオイルパーム研究所（カウンターパート：Dr. Erwinsyah）と共同の取り組みを実施し、北スマトラ州における2社のプランテーションに関するデータを収集した。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 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) 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"

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) K. Hayashi : Proceedings of the 8th International Conference on EcoBalance, 85-86(2008), "Transition to sustainable agriculture and transdisciplinarity in the life cycle approach"
- 2) 林 清忠 : 水環境学会誌, 32(2), 2-6(2009), 「バイオ燃料生産と資源循環利用の影響評価－環境と調和した農村活性化のために－」
- 3) 林 清忠 : 土・水研究会資料, 27, 44-50(2010), 「農業生産システムにおけるトレードオフ－方法論をめぐる横断的展望－」

- 4) K. Hayashi : Proceedings of the International Oil Palm Conference 2010, CD-ROM(2010), “Life cycle assessment of palm oil: current issues and future perspectives”
- 5) K. Hayashi, S. Uchida, S. Hokazono, M. Sato, Y. Furushima, T. Otani and K. Hada : Proceedings of the 9th International Conference on EcoBalance, 404-407(2010), “Modeling life cycle inventories for agricultural production and biomass utilization: development of the NARO LCI database”
- 6) 林 清忠 : 日本LCA学会誌, 7(1), 23-29(2011), 「農業のLCIデータベースをめぐる世界動向と農研機構の取り組み」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) K. Hayashi, M. Sato, and S. Hokazono : 6th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, Book of Abstracts, 53(2008), “How to reconcile agronomic and economic perspectives in LCA for agriculture”
- 2) K. Hayashi and S. Uchida : Farming Systems Design Symposium, Monterey, CA, USA, 2009, “Sustainable design of farming systems using the life cycle approach: the case of agricultural biomass production”
- 3) K. Hayashi : Agadir International Conference, The Integration of Sustainable Agriculture, Rural Development, and Ecosystems in the Context of Climate Change, the Energy Crisis and Food Insecurity, Agadir, Morocco, 2009, “A new conceptual framework for assessing rural development performance: sustainability of scale, scope, and integration”
- 4) 林清忠、内田晋、外園信吾、佐藤正衛 : 第5回日本LCA学会研究発表会(2010), 「農業生産システムのライフサイクルインベントリ－農研機構LCIデータベースの構築－」
- 5) K. Hayashi : International Forum for Sustainable Asia and the Pacific (ISAP 2010), Yokohama, 2010, “Environmental impacts of land use change caused by biofuel production: recent issues in life cycle assessment”
- 6) K. Hayashi : Workshop on Land Use in Life Cycle Assessment, Sustainability 2.0, Stuttgart, Germany, 2010, “Why we need land use impact assessment: LCA of agricultural production and biomass utilization in national agricultural research”

(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)

- 1) Sustainable Transition of Agriculture: Linking the Life Cycle Approach and System Innovation (2008年12月11～12日、東京ビックサイト会議棟および東京ベイ有明ワシントンホテル、1セッション当たり平均参加者数60名、OECD Co-operative Research Programme on Biological Resource Management for Sustainable Agricultural Systemsに基づくワークショップを第8回エコバランス国際会議の特別セッションとして開催)
- 2) International Workshop on Life Cycle Assessment of Biomass Utilization for Sustainability Transition (2010年11月9日、プラザ平成、参加者数60名)

(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。