

バイオエタノール生産における 環境負荷削減効果と 地域経済効果の計測⁽¹⁾

食料領域研究員 林 岳

1 はじめに

近年、世界的にバイオ燃料生産が急速に拡大しており、日本においても小麦やさとうきび、食用廃油などを原料とするバイオ燃料の生産が実施、計画されている。バイオ燃料を導入する効果として、化石燃料消費の削減に伴う地球温暖化防止効果、原料作物やバイオ燃料の生産に伴う農業振興および地域経済活性化の効果などが挙げられている。しかしながら、世界的に見てもバイオ燃料の生産を始めるにあたっては経済性のみを重視し、それ以外の効果の定量的・客観的な評価が伴わないまま計画が進められている事例も一部に見受けられる。また、バイオ燃料導入の効果を評価するには、プラント単位のミクロ的な効果の計測だけではなく、地域全体にどのような影響を与えるのかといったマクロ的な視点からの評価も必要と考える。

上述のようなバイオ燃料導入の効果を定量的に評価する手法として、地球温暖化防止効果ではライフサイクル・アセスメント（LCA）分析が、地域経済への効果では産業連関分析などがある。LCA分析を用いたバイオ燃料の評価については、Pimentel and Patzak（2005）やShapouri et al.（2004）、三菱総合研究所（2003）、小野他（2007）など国内外を問わず多数存在する。し

かしながら、いずれもプラント単位のミクロ的視点から生産技術による環境負荷削減効果やエネルギー収支の違いなどを評価するもので、地域全体での温室効果ガス（以下GHG）の削減効果などに言及したマクロ的な視点からの分析ではない。また、産業連関分析を用いたバイオ燃料およびバイオマスの利活用による影響のマクロ的な評価の既存研究では、Urbanchuk（2007）、國光・上田（2006）や保永（2006）などがある。しかしながら、北海道におけるバイオエタノール生産を対象としたマクロ的な分析は筆者の知る限り存在しない。そこで本研究では、北海道十勝地方におけるバイオエタノール生産を対象として、LCA分析と産業連関分析を適用し、地域におけるGHG削減効果および地域経済効果を計測することを目的とする。

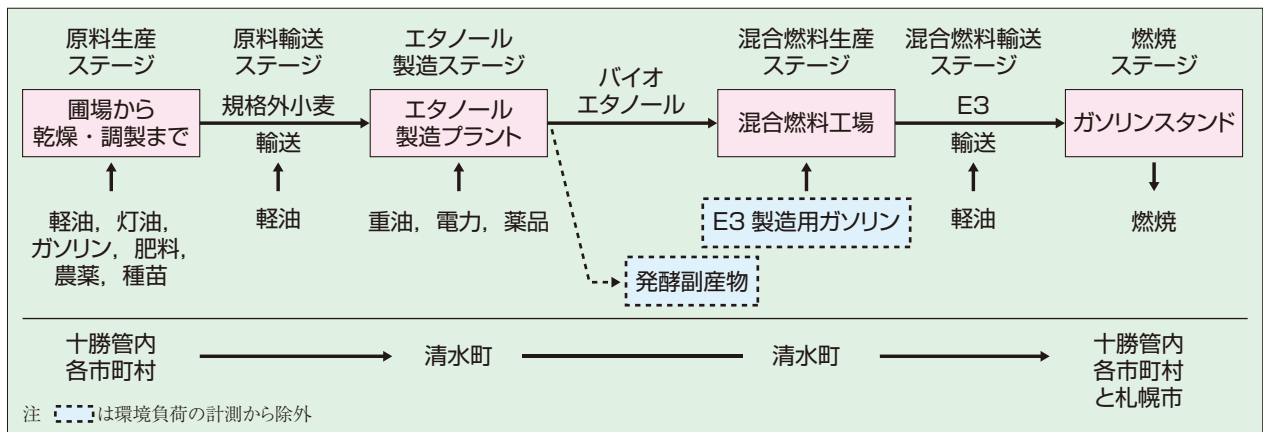
2 分析手法

(1) LCA分析

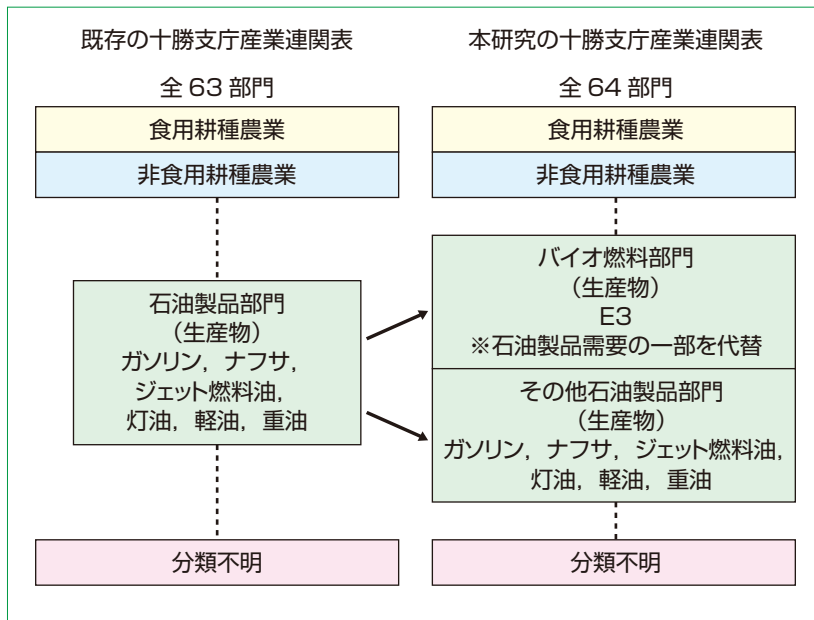
本研究では、十勝地方の小麦栽培の副産物として発生する規格外小麦を原料としたバイオエタノール生産を想定し分析を進める。北海道バイオエタノール株式会社は十勝地方の清水町に規格外小麦を原料としたバイオエタノール製造プラントの建設を進め、平成21年の操業開始を目指しているところであり⁽²⁾、本

研究ではこの計画をベースにLCA分析のシナリオを構築する。規格外小麦とは、食用または食品原料用小麦として生産、収穫された小麦のうち、品質検査において基準を満たさず食用や食品原料用に適さない小麦のことで、通常は飼料用として正規の小麦のおよそ1/10の価格で取引されている。規格外小麦は収集性、運搬性、保存性等に優れ比較的安価に利用できることから、近年はバイオエタノールの原料として有望視されている。

本研究では、LCA分析の評価範囲を原料生産から燃料消費までとし、対象とする環境負荷はGHGのみを対象とする。また、本研究のLCA分析における評価単位はガソリンスタンドに配送される燃料の発熱量1GJ⁽³⁾あたりGHG排出量とする。第1図は原料生産から燃焼までの6つのステージで構成されるバイオエタノールモデルのフローである。本モデルでは、十勝支庁20市町村⁽³⁾における小麦生産で発生する規格外小麦を全て清水町に設置されるバイオエタノール製造プラントに搬送してバイオエタノールを製造し、バイオエタノール製造プラントに隣接された燃料混合プラントでバイオエタノール3%混合ガソリン（E3）に加工され、十勝地方の各市町村に供給し、余剰分は道央地域に輸送して販売するという想定シナリオを構築する。上記モデルにおける各ステー



第1図 バイオエタノールモデルのフロー



第2図 バイオ燃料部門の分割イメージ

ジでのGHG排出量を推計しそれらを集計することで、ガソリンと比較したバイオエタノール生産のGHG削減率を算出するが、データ制約から混合燃料製造ステージにおけるGHG排出量の推計は割愛した⁽⁴⁾。

ところで、第1図に示したモデルの中で、配分問題が生じるステージが3つある⁽⁵⁾。1つは原料生産ステージにおける規格外小麦と畜産農家向け敷料として

系外に持ち出される麦稈間の配分であるが、ここでは適切な配分基準を設定できなかったことから、配分は行わないこととした⁽⁶⁾。2つ目はエタノール製造ステージにおけるバイオエタノールと発酵副産物の配分である。ここでは、十勝圏振興機構(2005)から双方の経済的価値を引用しその比による配分基準を採用して、原料生産からエタノール製造までの各ステージにおけるGHG排出量の

88・9%がバイオエタノールに帰属すると仮定した。3つ目に、混合燃料配送ステージにおけるE3中のバイオエタノールとガソリン間の配分である。ここでは各生産物の容積比による配分基準を採用し、混合燃料配送ステージにおけるGHG排出量の3%がバイオエタノールに帰属すると仮定した。

本研究のLCA分析で計測対象としたGHGは、軽油、灯油、ガソリン、重油、電力の投入による直接CO₂排出、原材料として投入される肥料、種苗、農薬、薬品の生産による間接CO₂排出、さらに肥料および麦稈(圃場還元分)の窒素投入におけるN₂O排出である。計測されたGHG排出量は地球温暖化係数によりCO₂換算し集計した。

(2) 産業連関分析

産業連関分析については、まずバイオ燃料生産部門を追加した産業連関表を用意する必要がある。本研究では、國光・上田(2006)の方法に倣い、第1図のモデルフローから得られる費用構造に基づいて十勝支庁産業連関表にバイオ燃料部門を追加する⁽⁷⁾。まず、バイオ燃料部門の生産物はE3と仮定し、十勝地方においてE3の需要が発生することでガソリン需要を代替すると仮定し、石油製品部門を「バイオ燃料部門」と「その他石油製品部門」に分割する(第2図)⁽⁸⁾。ここではLCA分析の設定条件との

第1表 バイオ燃料部門への投入額の再配分 (百万円)

部門	再配分前	再配分後	変化額
非食用耕種農業	0.00	34.04	34.04
非鉄金属鉱物	-0.15	-0.15	0.00
原油・天然ガス	52.77	0.00	-52.77
その他食料品	0.00	4.77	4.77
基礎化学製品	0.29	0.29	0.00
化学最終製品	0.15	0.15	0.00
その他石油製品	3.68	13.96	10.29
金属製品	0.29	0.29	0.00
建築補修	0.15	0.15	0.00
電力	1.62	5.30	3.68
水道・廃棄物処理	0.15	0.15	0.00
商業	2.06	2.06	0.00
金融・保険	2.21	2.21	0.00
不動産	0.15	0.15	0.00
運輸	4.26	4.26	0.00
通信・放送	0.15	0.15	0.00
教育・研究	0.88	0.88	0.00
対事業所サービス	1.47	1.47	0.00
合計	70.12	70.12	0.00

原油・天然ガス部門の投入額減少分を配分

注(1) 再配分前の金額は石油製品部門の投入額の14.7%で配分した値である。
 (2) ここで取り上げている部門はバイオ燃料部門に投入がある全ての部門である。ここに掲げられていない部門からはバイオ燃料部門への中間投入がない。

整合性を確保するため、バイオエタノール生産の原料は規格外小麦のみとする。十勝圏振興機構(2005)によると、十勝地方におけるガソリン販売量は21万300KLで、本研究のLCA分析により、十勝地方で発生する規格外小麦からは、十勝地方のガソリン販売量を上回る35万KLのE3が生産されることが計算されている。したがって、十勝地方のガソリン販売は全量がE3によって代替されると想定し、余剰となるE3はLCA分析と同様、道央地域へ移出する設定とする。35万KLのE3を産業連関表の作成年次である1998年当時のガソリン価格で金額換算し、E3の生産額を求めると、E3販売額は従来の石油製品部門の生産額の14.7%を占める。そこで、従来の石油製品部門の生産額を14.7:85.3の割合でバイオ燃料部門とその他石油製品部門に分割し、十勝支庁産業連関表にバイオ燃料部門を追加する。

次に、バイオ燃料部門への原材料投入額を設定する。バイオ燃料部門への投入の種類はLCA分析によって取り上げられた規格外小麦、電力、重油、薬品、ガソリンの5項目とし、それ以外の投入財については、その他石油製品部門と同じとした。ただし、その他石油製品部門と異なり、バイオ燃料部門は原油を原材料として投入しないため、原油・天然ガス部門からの投入はゼロとし、原油・

天然ガス部門からの投入額を上記5項目の投入財に対応する部門である非食用耕種農業、電力、石油製品、その他食料品⁽⁹⁾の各部門へ配分する(第1表)⁽¹⁰⁾。

次に、バイオ燃料部門の需要について、LCA分析では生産されたE3は十勝地方または道央地域のガソリンスタンドで販売されるというシナリオが設定されている。本研究ではガソリン需要の大半が自動車燃料用であること、ガソリンは軽油と異なり主に自家用車に利用されていることを鑑み、バイオ燃料部門で生産されたE3は他産業の中間財としての投入は無く、全て最終需要として需要されると想定する。前述のとおり、十勝地方で生産されるE3は35万KLで、このうち60.7%が域内のガソリンスタンドで販売され、残りの39.3%は道央地域へ移出されることになる。これをもとに、バイオ燃料部門で生産されるE3の需要は、域内の民間最終消費支出が60.7%⁽¹¹⁾、道央地域への移出が39.3%とし、域内の中間需要はゼロとした。

このような投入・需要の修正を行った結果、内生部門、付加価値部門および最終需要部門の間で数値の調整が必要となる。そこで、各部門において内生部門、付加価値部門、最終需要部門にそれぞれ誤差を按分することで、行項目と列項目の地域内生産額を完全に一致させ、バイオ燃料部門を追加した十勝支

庁産業連関表を構築した。

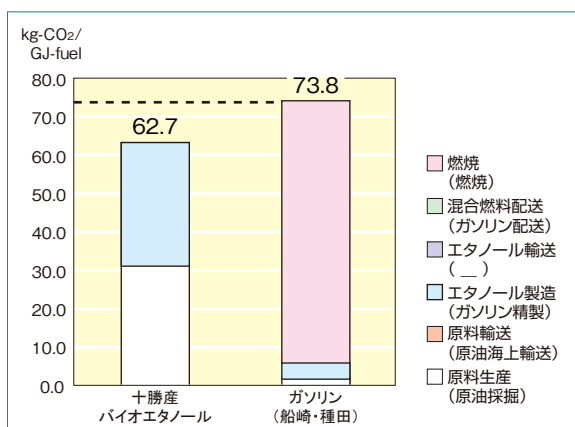
(3) 分析シナリオ

LCA分析および産業連関分析では、以下の2つのケースを想定して十勝地方におけるGHG削減効果および経済波及効果を算出する。

- (ケース1) 1万KLのE3が販売されるケース
- (ケース0) 1万KLのE3と発熱量等価のガソリンが販売されるケース

第2表 分析シナリオの設定値

	ケース0	ケース1
E3 販売量 (KL)	0	10,000
発熱量換算値 (GJ)	0	342,704
販売額 (百万円)	0	917
ガソリン販売量 (KL)	9,904	0
発熱量換算値 (GJ)	342,704	0
販売額 (百万円)	908	0



第3図 バイオエタノールとガソリンのGHG排出量

第3表 E3導入によるGHG増加抑制量

ガソリン 9904KL の生産・消費に伴う GHG 排出量 (ケース0)	25,283 t-CO ₂
E3 1万 KL の生産・消費に伴う GHG 排出量 (ケース1)	25,169 t-CO ₂
E3 導入による GHG 増加抑制量 (抑制率)	114 t-CO ₂ 0.4 %

注(1) E3のGHG排出量は本研究の分析結果より、ガソリンのGHG排出量は船崎・種田(1999)のLCA分析結果より推計した。

1万KLのE3は十勝地方の年間ガソリン消費量のおよそ5%を占め、作成した産業連関表の年次である1998年当時のレギュラーガソリン平均価格91.7円/Lで換算すると9億1700万円に相当する(第2表)。また、1万KLのE3と発熱量で等価となるガソリン量は9904KLとなり、金額では9億800万円となる。したがってケース1では、E3 1万KLによる十勝地方全体でのGHG削減効果をLCA分析より算出し、さらにバイオ燃料部門の最終需要9億1700万円による十勝地方

における経済波及効果を産業連関分析より算出する。一方、ケース0では、従来どおりガソリン9904KL(9億800万円分)の販売による経済波及効果を算出しケース1と比較する。また、経済波及効果による各部門における経済活動量の変化に伴い、地域内のCO₂排出量も変化するはずである。そこで本研究では、両ケースにおいて経済波及効果に伴う各部門のCO₂排出量(CO₂波及効果)も計測する⁽¹²⁾。CO₂波及効果は、経済波及効果額すなわち地域内生産変化額に各部門の生産

額あたりCO₂排出量(CO₂排出原単位)を乗じることで算出する。CO₂排出原単位は南齋他(2002)から引用し、これにデータのないバイオ燃料部門のCO₂排出原単位は本研究におけるLCA分析の結果より推計して適用する⁽¹³⁾。なお、ここでの分析は、E3によるガソリン代替による経済波及効果を計測するものではなく、「仮に十勝地方にバイオ燃料部門とその他石油製品部門の両方が存在する場合、E3とガソリンにおける経済波及効果およびCO₂波及効果にどのような違いがあるか」を分析するものである点に留意されたい。

3 分析結果と考察

まず、LCA分析については、船崎・種田(1999)にあるガソリンのLCA分析結果と比較し、バイオエタノールのGHG削減効果を計測した。その結果、バイオエタノールのGHG排出量は62.7kg-CO₂/GJ-fuelであり、燃料発熱量あたりで考えたとガソリンよりも15.0%削減されることが示された(第3図)。この結果から1万KLのE3による地域全体でのGHG削減効果を算出すると、ケース0では2万5283t-CO₂、ケース1では2万5169t-CO₂となり、ケース1における削減率は0.4%となった(第3表)。

また、経済波及効果およびCO₂波及

効果の計測結果については第4表にまとめた。これを見ると、ケース1ではバイオ燃料部門の最終需要9億1700万円から、十勝地方全体で11億6200万円の域内生産額の増加がもたらされ、生産誘発係数は1.27となることが示された。部門別に見ると、耕種農業部門

で1億4200万円の生産額増加がもたらされる。これはバイオエタノールの生産が増加することでその原料供給部門である耕種農業部門へ影響が及んだためと考えられる。一方で、ガソリンの場合の経済波及効果を算出すると、その他石油製品部門の最終需要9億800万円からもたらされる域内生産額の増加は9億5400万円となり、生産誘発係数は1.05に留まることが明らかとなった。また、ガソリンの場合は耕種農業部門など地域農業への影響はほとんどなく、域内への経済波及効果が小さいことが示された。

これに加え、CO₂波及効果を見ると、ケース1においてはCO₂排出増加量が2490t-CO₂となる一方、ケース0では3455t-CO₂となる。CO₂排出量の増加はE3よりもガソリンのほうが大きく、ガソリン生産・販売するよりもE3を生産・販売した方がCO₂排出量の増加を地域全体で28%抑制できることが明らかとなった。これは、バイオ燃料部門によるE3販売ではCO₂排出強度の高い部門への影響が抑制され、比較的

CO₂排出強度の低い耕種農業部門などへ大きな影響がもたらされたため、地域全体としてはCO₂排出量が抑えられたためと考えられる。

4 おわりに

本研究では、北海道十勝地方におけるバイオエタノール生産を対象として、LCA分析と産業連関分析を適用し、地域全体でのGHG削減効果および地域経済効果を計測することを目的とってきた。

本研究における分析の結果、以下の3点が明らかになった。第一に、ライフサイクルで見たバイオエタノールのGHG排出量はガソリンに比べ15.0%削減でき、E3とガソリンのGHG排出量を比較すると、E3によるGHG削減効果は0.4%になることである。第二に、十勝地方におけるE3の生産・販売により、経済波及効果が耕種農業を中心として地域内にもたらされるようになる一方、ガソリンの販売では地域経済への経済波及効果がほとんどないことである。第三に、E3の販売はCO₂排出の多い部門から少ない部門へ生産のシフトが発生することで、ガソリン生産・販売の場合に比べ地域内のCO₂排出量増加が28%抑制されることである。

このようなことから、本研究の結論は以下の2点にまとめられる。第一に、バイ

オエタノールの生産はライフサイクルの視点から一定のGHG削減効果があり、E3においてもマクロ的な視点から見るとGHG排出抑制に大きく貢献している点である。これはE3の生産・販売がGHG排出の少ない部門に対して大きな影響を与えることで地域全体のGHG排出抑制に貢献していることを示している。したがって、今後のバイオエタノール

生産の環境負荷削減効果の計測にあたっては、ライフサイクルからの観点のみならずマクロ的視点からの評価も考慮する必要がある。第二に、E3の生産・販売はガソリンに比べ地域内へ大きな経済効果をもたらすし、特に耕種農業への影響が大きい点である。したがって、E3の生産・販売は地球温暖化防止および地域経済活性化の双方に影響を与えることが示さ

第4表 経済波及効果とCO₂波及効果の計測結果

	ケース0		ケース1	
	経済波及効果 (百万円)	CO ₂ 波及効果 (t-CO ₂)	経済波及効果 (百万円)	CO ₂ 波及効果 (t-CO ₂)
耕種農業	0	0	142	253
畜産	0	0	3	5
林業	0	0	0	0
漁業	0	0	0	0
鉱業	-1	-4	-6	-24
バイオ燃料	0	0	931	1,787
その他石油製品	909	3,288	1	3
その他製造品	1	6	17	55
建設業	0	1	1	3
電力・ガス・水道	4	89	13	307
商業	10	9	22	20
金融・保険・不動産	7	3	10	4
運輸・通信・放送	9	47	11	56
公務	0	0	0	1
公共サービス	6	7	1	1
サービス業	10	9	13	12
事務用品	0	0	0	1
分類不明	0	0	3	4
合計	954	3,455	1,162	2,490
生産誘発係数	1.05		1.27	

れた。また、バイオ燃料は石油製品部門に比べ地域内のCO₂排出増加を抑制しつつも地域内により大きな経済波及効果をもたらすという、いわゆる「デカップリング」の実現に資することも注目すべき点である。

- 注(1)本稿は、筆者と小樽商科大学山本充教授、日本学術振興会特別研究員(小樽商科大学)増田清敏氏との共同研究の成果の一部である。
- (2)北海道バイオエタノール株式会社計画では、清水町におけるエタノール生産には規格外小麦の他、てんさいや米なども利用される予定である。
- (3)2006年の市町村合併により現在十勝支庁は19市町村となっているが、本分析は20市町村のときのデータを用いて行っている。
- (4)本モデルでは、あくまで想定事例をベースとしており実証データの蓄積がないことから、新エネルギー・産業総合開発機構(2003)によるバガス・タピオカ利用のエタノール製造プラントデータを援用した。
- (5)配分問題とは、どの生産物に資源やエネルギーまたは環境負荷や廃棄物のフローをどれだけ帰属させるかというものである(石谷・赤井(1999))。
- (6)配分基準には重量比や経済価値比等が用いられているが、仮にバイオエタノールと麦稈と間の環境負荷の配分基準に重量比を採用した場合、規格外小麦発生量よりも麦稈発生量の方が多いため、本来副産物である麦稈に環境負荷が多く配分されてしまうという問題点がある。

一方、経済価値比を採用する場合にも、十勝地方においては、麦稈は既肥と物々交換されることが多く、市場が形成されないことから経済的価値の設定が困難であるという問題点が残る。

- (7)使用した十勝支庁産業連関表は現時点で最新版の1998年表である。
- (8)ここでは、分割前の「石油製品部門」からバイオ燃料部門を除いた分割後の部門を「その他石油製品部門」と呼ぶこととする。
- (9)規格外小麦を原料としたバイオエタノール生産へのその他食料品の投入とは具体的には薬品を指す。バイオエタノール生産に使われる薬品の多くは発酵に用いられる酵母菌などであり、これらの製品の生産額は産業連関表においてその他食料品部門に計上されている。
- (10)本来であれば、E3生産のための全ての投入物を網羅した上でその費用を推計し、そこから産業連関表の投入構造を構築する必要があるが、十勝地方におけるバイオエタノール商用生産は現時点では行われておらず投入物や費用の詳細なデータは得られない。そのため、ここでは原油・天然ガス部門からの投入のみをゼロとし、商業や運輸など原油・天然ガス部門以外からの投入は従来の石油製品部門と変わらないと仮定して、バイオ燃料部門の投入構造を構築した。
- (11)十勝地方のガソリン販売量21万300KLと発電熱量等価換算のE3量を基準に計算している。
- (12)本研究におけるLCA分析ではCO₂の他NO_xの排出も一部計測対象としているが、経済波及効果に伴うGHG排出量の変化は

CO₂のみを計測対象とする。

- (13)本研究では、バイオ燃料部門の生産物はE3としており、CO₂排出原単位もE3製造に伴うCO₂排出量を推計している。E3の97%を占めるガソリンのCO₂排出量は、ガソリン仕入れ価格とその他石油製品部門のCO₂排出原単位をもとに推計した。これに3%分のバイオエタノール製造に伴うCO₂排出量を合計してバイオエタノール販売額で除すことで、バイオ燃料部門のCO₂排出原単位を推計した。

【引用文献】

- 船崎敦・種田克典(1999)「自動車LCAのためのインベントリ作成の考え方(1)―石油系燃料モデルと燃料油製造インベントリ―」『自動車研究』21(12)、pp.716-723。
- 石谷久・赤井誠監修(1999)『ISO14040 /ISO14040 ライフサイクルアセスメント―原則及び枠組み―』、産業環境管理協会。
- 國光洋二・上田達己(2006)「初殻発電導入の経済的効果に関する分析―タイを対象とした産業連関分析の適用―」『地域学研究』36(3)、pp.561-573。
- 三菱総合研究所(2003)『平成15年度新エネルギー等導入促進基礎調査―輸送用バイオマス燃料の導入可能性に関する調査研究報告書』。
- 南齋規介・森口祐一・東野達(2002)『産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)―LCAのインベントリデータと』。
- 小野洋・平野信之・上田達己・天野哲郎(2007)「ナタネを軸とした資源循環システムの環境影響評価」『農業経営研究』45(1)、pp.122-125。
- Pimentel, D. and Patzek, T. W. (2005) 'Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood: Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower' Natural Resources Research 14(1), pp.65-75.
- Shapouri, H., Duffield, J. A., and Wang, M. (2002) "The energy balance of corn ethanol: an update" USDA Office of Energy Policy and New Uses, Agricultural Report No.813.
- 新エネルギー・産業総合開発機構(2003)『バガス・タピオカ利用エタノール製造モデル事業実施可能性調査』。
- 十勝圏振興機構(2005)『北海道十勝地域の規格外農産物及び農産加工残渣物利用におけるバイオエタノール変換システムに関する事業化可能性調査報告書』、十勝圏振興機構。
- Urbanuk, J. M. (2007) "Contribution of the ethanol industry to the economy of the United States" RFA Reports and Studies <http://www.ethanolrfa.org/resource/reports/>
- 保永展利(2006)「地域経済における農業有機質資源の循環利用評価―北海道地域を対象とした連関効果の推計―」『地域学研究』36(3)、pp.611-620。