

バイオ燃料導入による諸効果の定量的評価

平成21年9月

農林水産政策研究所

まえがき

農林水産政策研究所では、平成19年度よりプロジェクト研究「新たな農林水産環境政策の社会経済的影響評価に関する研究」（平成19年度～平成21年度）を実施し、農林水産環境政策が与えるさまざまな影響を多角的に分析している。本プロジェクトが開始される頃から世界的にバイオ燃料の導入が急速に進み、我が国においても積極的な導入が進められているところである。バイオ燃料の生産が地域経済や環境にどのような影響を与えるかを分析することは、バイオ燃料の導入や普及促進政策のための重要な基礎データとなる。

このような背景から、本プロジェクトにおいては、初年度よりバイオ燃料の導入による諸効果の定量的評価を継続的に行ってきた。本資料「バイオ燃料導入による諸効果の定量的評価」は、本プロジェクトの研究成果のうちバイオ燃料が地域にもたらす影響や効果の定量的評価に関するものを取りまとめたものである。

第1章ではバイオ燃料を導入することによるさまざまな効果および問題点を列挙し、その評価にはどのような手法が適用可能なのかを検証する。第2章では、北海道十勝地方におけるバイオエタノール生産について、ライフサイクル・アセスメント（LCA）分析を用い、バイオ燃料の導入に伴う地球温暖化防止効果として温室効果ガス（GHG）削減量を定量的に評価する。第3章では、同地方におけるバイオエタノール生産について、既存の産業連関表にバイオ燃料部門を追加した新たな産業連関表を構築し、これをもとにバイオ燃料の需要増に伴う地域経済、雇用への影響のほか、地域内の GHG 排出総量の変化を定量的に計測する。第4章では、バイオ燃料の環境面と経済面の影響の双方を統合するための指標を提示し、これを用いて前章までに評価したバイオ燃料の効果を統合し、環境面と経済面の双方を考慮したバイオ燃料の総合的評価を行う。

バイオ燃料は今後、国際的にも国内的にも生産が拡大すると見込まれる。本資料がバイオ燃料導入に関する基礎的な分析資料として活用されれば幸いである。

平成21年9月
農林水産政策研究所

目 次

まえがき

第1章 バイオ燃料導入の諸効果とその評価手法

林 岳 1

第2章 LCA 分析による温室効果ガス削減効果の計測

林 岳

増田清敬（滋賀県立大学）

山本 充（小樽商科大学） 25

第3章 産業連関分析による地域への影響の評価

林 岳

山本 充（小樽商科大学）

増田清敬（滋賀県立大学） 59

第4章 環境と経済の統合指標による総合評価

林 岳

増田清敬（滋賀県立大学）

山本 充（小樽商科大学）

高橋義文（北星学園大学） 93

第 1 章 バイオ燃料導入の諸効果とその評価手法

林 岳

1. はじめに

地球温暖化対策の一環として、近年バイオ燃料の導入が全世界的に急速に進められている。このようなバイオ燃料の急速な普及の背景には、地球温暖化への対応、原油価格の不安定性など様々な要因があると考えられ、さらには農産物を原料とするバイオ燃料は農業地域の振興手段としての側面もバイオ燃料普及の背景に存在する。このようなことから、バイオ燃料の導入にあたっては地域経済、地球環境などに様々な側面に影響を及ぼすことが予想され、これらの影響を包括的に評価する必要がある。例えば、地球温暖化防止策としての側面ではたしかに燃料の燃焼だけを見るとカーボンニュートラルの性質から、バイオ燃料は化石燃料と異なり温室効果ガス（以下、GHG）を排出しない。しかしながら、バイオ燃料の生産や輸送、原料の生産に際して排出される GHG も考慮した上で地球温暖化の防止効果を考えなければバイオ燃料の導入が地球温暖化防止に与える影響を評価したことにはならない。また、原油価格の高騰に対する対抗策としてバイオ燃料を導入する際も、バイオ燃料生産や原料の生産そのものに化石燃料を多投していれば原油価格の影響を回避する手段とはならないはずである。

このように、バイオ燃料の導入を進める上では、まずどのような効果があるのかを幅広い視野から多角的に検討し、同時にこれらの効果を定量的に評価する必要がある。そこで、本章ではバイオ燃料を導入することによるさまざまな効果および問題点を列挙し、その評価にはどのような手法が適用可能なのかを検証する。

2. バイオ燃料導入の諸効果

（1）バイオ燃料技術革新計画における配慮事項

2007 年 11 月、石油業界や自動車業界と大学等・独立行政法人の研究機関からなる「バイオ燃料技術革新協議会」が設置された。協議会ではバイオ燃料導入の具体的な目標、技術開発、工程表を内容とする「バイオ燃料技術革新計画」の策定作業が進められ、2008 年 3 月に公表された（バイオ燃料技術革新協議会(2008)）。この計画の中では、GHG 排出量の LCA 評価の考え方が示されているほか、バイオ燃料の開発において配慮すべき点が整理されている（第 1 表）。

この中で取り上げられている項目を環境面、経済面、社会面の 3 側面で整理すると、環境面では CO₂ 排出削減効果、エネルギー生産、自然環境との共生の 3 項目が挙げられてい

る。CO₂排出削減効果に関しては、バイオ燃料の生産および利用のライフサイクルで評価したCO₂排出量が、化石燃料のそれを上回ってはいけないことが示されており、またエネルギー生産ではエネルギー収支がプラスであることが条件とされている。さらに、資源の有効利用では、リユース、リサイクルが妨げられないこと、自然環境との共生については自然環境への負荷の未然防止策を講じることなどが挙げられている。次に、経済面に関しては、経済的機能として化石燃料とコスト的に競合しうること、安定価格での安定供給が可能なこと、既存産業との調整、合意を得ることが重要と指摘している。そして、社会的な側面では、食料との競合の回避、地域社会との信頼の構築、文化の尊重が挙げられている。

第1表 「バイオ燃料技術革新計画」で
取り上げられた配慮すべき事項

CO ₂ 排出削減効果
エネルギー生産
経済的機能
安定供給
資源の有効利用
自然環境との共生
食料との競合
既存産業構造との競合
地域社会での受容性
文化の尊重

「バイオ燃料技術革新計画」で取り上げられている項目はあくまで配慮すべき事項であるため、必ずしもバイオ燃料の効果と整理できるものではない。そこで、本節では上記計画を参考にバイオ燃料の効果として想定できるものを再整理し以下にまとめた。

（２）環境負荷削減効果

バイオ燃料を導入する効果のうち最も強く言われているのは、地球温暖化の進行を防止する手段としてのバイオ燃料の役割である。このような GHG 削減効果はバイオ燃料導入の最も大きな根拠となっている。近年、地球温暖化の進行が危惧され、京都議定書のもとに各国においてさまざまな対策が実施されているもののなかなかその効果が表れず、GHG 排出量の増加が進行している。日本においても京都議定書において 1990 年の排出量から 6%の削減が目標とされているが、2007 年における GHG の排出量は 13 億 7,100 万 t-CO₂（速報値）で、基準年である 1990 年の排出量を 8.7%上回っている⁽¹⁾。したがって、京都議定書の目標達成のためには 2007 年の排出量から 14.7%もの大幅な削減が必要となる。このうち、自動車・船舶などの運輸部門からの CO₂ 排出が 2 億 4,900 万 t-CO₂ であり、CO₂ 総排出量の約 18%を占めている。運輸部門からの CO₂ 排出量は京都議定書の基準年である 1990 年から 14.6%も増加しており、運輸部門における CO₂ 排出削減は喫緊の課題となっ

ている。特に、自家用乗用車からの CO₂ 排出量は 1990 年比 41.9%増と、京都議定書の目標達成には自家用乗用車からの CO₂ 排出をいかに抑制するかがポイントとなっており、各自動車メーカーも低燃費車やハイブリッド車などの技術開発により GHG 削減の努力がなされている。

一方で、輸送用燃料にバイオ燃料を導入するという地球温暖化対策も GHG 排出量削減にとって有効な手段とみられている。これは、バイオ燃料がカーボンニュートラルの性質を持ち、燃料の燃焼に伴って発生する GHG がカウントされないことから、化石燃料に比べ GHG 排出量が削減されるためである。仮に運輸部門に使用される燃料すべてを 100% のバイオ燃料で代替した場合、燃料の燃焼に伴う CO₂ 排出量 2 億 4,900 万 t-CO₂、CO₂ 総排出量の 20% 近くがそっくり削減されることになり、バイオ燃料の導入は非常に魅力的な地球温暖化対策と言える。

ところが、上記の計算に際しては重要な視点が欠落している。つまり、燃料の原料の確保や輸送、燃料自体生産や輸送に伴う GHG の排出を考慮していないという点である。バイオ燃料は燃焼時に排出される GHG がカウントされないが、原料や燃料自体の生産に伴う GHG 排出は計算に含まれる。したがって、仮に原料作物の生産やバイオ燃料の生産に化石燃料を多投してしまうと、原料調達から燃料燃焼までのトータルの GHG は逆に増加し地球温暖化をむしろ促進させる結末となるかもしれない。このようなことから、バイオ燃料の導入根拠に地球温暖化対策を掲げる場合には、バイオ燃料の原料作物の調達から燃料燃焼（消費）までのライフサイクルでの GHG 排出量を計算し、本当に GHG が削減されているのかを検証しなければならない⁽²⁾。

このほか、GHG 以外の環境負荷についても十分に検討する必要があるだろう。近年は特に地球温暖化への関心が高まり、GHG 削減が環境問題の最優先課題として取り上げられているが、地球環境に影響を与える環境負荷は GHG に限ったものではない。例えば、排気ガスに含まれる窒素酸化物（NO_x）、二酸化硫黄（SO₂）、一酸化炭素（CO）、粒子状物質（PM）などの環境負荷も人体や地球環境、生態系に大きな影響を与えることが予想され、バイオ燃料の導入によりこれらの環境負荷がどう変化するのかも監視する必要がある。バイオ燃料の導入により GHG が削減されたとしても、別の環境負荷が増加してしまうと GHG の削減対策が別の環境問題を引き起こすいわゆる「環境問題のシフト」が発生してしまい、環境問題の根本的な解決には至らない点に注意が必要である⁽³⁾。

（３）地域経済効果

バイオ燃料の導入は以下の点において地域経済に影響を与える。第 1 に、バイオ燃料は農産物を原料とすることから、農産物の新たな需要を創出する点である。これまで日本においては農業生産額が減少の一途を辿り、国際的な競争の中でいかに国産農産物の市場を確保するかが大きな課題であった。そのような状況の中、バイオ燃料は農産物の新たな需

要先として大きな注目を集めた。詳細はこの後で述べるが、農業の振興を目的としたバイオ燃料の導入は日本のみならず、各国においても同様である。

第2に、バイオ燃料の導入はこれまで結びつきの少なかった農業とエネルギー産業間の新たな取引を発生させ、地域産業構造の変化をもたらす点である。現状では特に農業の盛んな地域においても、石油製品部門と農業の取引関係はほとんどない状態である。しかしながら、バイオ燃料を導入することにより、農業が石油製品部門の原料を供給するという取引関係が発生し地域経済構造の変化をもたらす。このような地域経済構造の変化は、これまで輸入に頼ってきた化石燃料の調達を原材料の生産から燃料の生産まで地域内で行うことを通じ、原油の高騰など国際的な市場動向の影響を受けにくくなる産業構造への変換が可能となる。こうした効果は国内の一地域でバイオ燃料を生産することで達成される効果であるが、海外から輸入した場合も原油市場の直接的な影響は受けにくくなると思われる。

第3に、バイオ燃料がガソリンや軽油などの石油製品を代替することによる地域経済への効果を挙げることができる。特に石油製品については一次原料のほとんどを海外からの輸入に頼っている状態である。また国内の一地域でみた場合も、石油製品の製造は大都市周辺の臨海工業地帯やコンビナート地帯などの特定地域に集中しているのが一般的で、農村地域でその生産が行われることはあまりない。したがって、農村部においてバイオ燃料を生産することは、これまで地域外からの移輸入に頼っていた石油製品の調達を地域内で賄えるようになり、このことから地域内に経済効果がもたらされる。このような効果はこれまで石油製品の生産があまり行われていなかった地域に限定されるものの、バイオ燃料生産は原料となる農産物の調達が容易な農村部で行われる事例が多いことから、バイオ燃料の効果として考慮することには十分妥当性を有すると思われる。

以上、地域経済面への効果を3点掲げたが、これらの効果がすべてのバイオ燃料導入事例について発揮されるかは定かではない。したがって、これらの効果は経営分析や産業連関分析等を用いてその効果を具体的に示す必要があるだろう。

（4）農業の振興効果

現在、米国やドイツなどバイオ燃料の生産拡大を進めている国では、その主な目的は地球温暖化の防止よりもむしろ農業の振興と言っても過言ではない。ドイツでは菜種油を原料としたバイオディーゼル燃料（以下、BDF）が1980年代から生産されており、日本でも耕作放棄地を活用し、原料作物を粗放栽培してバイオ燃料を生産する計画が進められている。このような耕作放棄地の利用はバイオ燃料による環境負荷の削減とともに、農業の振興に有効で、農業農村の活性化にも効果が見込まれる。農業振興の経済的な影響については、地域経済効果の中に含まれるが、経済的側面以外でも農業振興の影響は考えられる。例えばバイオ燃料の原料作物を作付けすることは、農地の維持にも有効で休耕地や耕作放

棄地などこれまで利用されていなかった農地の有効利用に貢献する。このように農地を耕作地として維持することによって、海外からの食料供給が途絶えるといった不測の事態が発生した際も即座に原料作物から食料の生産に切り替え、国内における迅速な食料の供給再開が可能となる。このような農地の維持効果は当然ながらバイオ燃料生産が行われず農地が耕作放棄された場合には発現せず、バイオ燃料の導入による副次的な効果と見ることができるだろう。

沖縄県宮古島市におけるバイオエタノール生産の取組では、宮古島市で栽培されるさとうきびから砂糖を生産し、生産の際に発生する糖蜜をバイオエタノール生産の原料として利用している。これまで糖蜜は廃棄物として処理されていたが、新たにバイオエタノールの原料として利用することにより処理コストの削減およびこれまで廃棄物として取扱われていた糖蜜に原料としての価値をもらたすことが可能となる。さらには地域内で生産されるさとうきびから砂糖、そして糖蜜を介してバイオエタノールという2つの生産物を生産することによって、農業者の所得向上および地域内の農業振興が達成される⁽⁴⁾。

さらに別の例を取り上げると、バイオエタノール生産の副産物である発酵残渣は家畜飼料としての価値が認められている。Searchinger et al.(2008)によると、アメリカでとうもろこしを原料として 5,600 万 KL のバイオエタノールが生産された場合、バイオエタノール生産からの発酵副産物（DDGS）により、およそ 1/3 の家畜飼料の代替が可能と計算している。このように、バイオエタノール生産は新たな家畜飼料の供給源として農業を振興する役割も期待されている。

（５）エネルギーの安全保障・地産地消効果

現在、バイオ燃料の先進国と言われるブラジルがこれほどまでにバイオ燃料の普及に力を注いできたのは、1970 年代の石油危機に直面し、エネルギーを海外からの輸入に頼らず国内で供給できる体制を目指してきたことからである。ブラジルは石油危機の結果、主要農産物であるさとうきびから燃料製造が進められることとなった。その結果、現在ブラジルでは自動車用燃料の約 16% が国内で生産されるバイオエタノールで⁽⁵⁾、バイオ燃料がエネルギー自給（エネルギーの地産地消）に貢献していると言える。エネルギー危機がバイオ燃料への関心を高めた点は、アメリカなどの他国においても同様であり、アメリカでは 1973 年と 1979 年の 2 度の石油危機がエネルギー自給・エネルギー安全保障への関心を高め、さらに 2008 年の原油価格高騰がバイオ燃料普及促進の直接的な引き金となったと言える。

ただし、バイオ燃料がエネルギー安全保障に有効であるかどうかについてはまだ議論の残されている部分がある。例えば、Pimentel and Patzek (2005)では、とうもろこし原料のバイオエタノールではエネルギー収支が負であるという計算結果を導いており、これと同様にバイオ燃料のエネルギー収支が負である計算結果を紹介する論文はほかにもいくつ

が存在する。これら結果をもとに、バイオエタノールの生産に投入されるエネルギーは産出されるエネルギーを上回り、バイオエタノールが石油の輸入を代替しエネルギー安全保障を向上させる手段とはなり得ないことを主張する研究者もいる。

しかしながら、この考え方はエネルギー安全保障をエネルギー収支の観点のみで見ているため、多角的な視点に欠けるものである。別の見方をすると、国家のエネルギー安全保障は、輸入に依存している化石燃料などのエネルギーを国内で調達可能な資源から生産することが重要であり、これはエネルギー収支の問題とは別問題である。すなわち、例えばエネルギー収支が負であったとしても、国内で調達可能な資源を利用してバイオ燃料を生産することができるなら、エネルギー安全保障は確保されることになる。各国の事例を見ると、バイオ燃料の原料は多くの場合自国で生産される農産物が利用されており、原料作物やバイオ燃料自体の製造に必要なエネルギーを自国内で確保することができるのであれば、バイオ燃料の導入はエネルギー安全保障の観点からも有効であると言えよう⁽⁶⁾。

Shapouri et. al (1995)では、米国内におけるバイオエタノールの生産に必要なエネルギーのうち国内で調達可能な石炭、天然ガス・石油ガスとして投入される分は全体のエネルギー量の 85%を占め、海外に依存しなければならない液体燃料はわずか 15%に過ぎないという結果を導出している。このことから、米国におけるバイオエタノール生産は、国内に豊富に賦存する石炭や石油ガスを有効利用して行われるため、燃料の海外依存を低下させることができると結論づけている。

一方、日本においては、現在国内で消費されるエネルギーの 99.7%は海外からの輸入に頼っているため、原油価格の高騰など国際的な原油市場動向に国内経済が大きく影響を受け、国内経済の不安定化要因の 1 つとなっている。日本においても 2030 年頃までに自動車用燃料の約 1 割に相当する 600 万 KL をバイオ燃料に代替することが計画されており、その一部にでも国産のバイオ燃料が利用されることになれば、海外へのエネルギー依存度が低下し、エネルギーの高騰や供給不安からくる経済の不安定要因を緩和することが期待できる。また、地域単位で見ると、バイオガス発電やゴミ発電など地域にあるバイオマスを利活用してエネルギーを供給する動きは各地域で始まっている。これに加え、近年は家庭や食品製造業、外食産業から回収した廃食用油や景観作物として栽培したなたねから BDF を生産する取組も一部地域で見られる。このようにバイオ燃料の導入は都市地域のみならず農村地域においても新たなエネルギー供給源をもたらすことになり、供給されたエネルギーを地域内で消費することによって、地域のエネルギーの地産地消に貢献する。こうしたエネルギーの地産地消効果は地域バイオマス利活用の一環としても重要な位置づけとなり、地域に賦存するさまざまなバイオマスを有効利用する 1 つの手段としてバイオ燃料としての利用方法が挙げられる。

3. バイオ燃料導入の課題

(1) 食用農産物と原料農産物の競合

これまで、バイオ燃料を導入することに対する効果を列挙し検討してきたが、当然ながらバイオ燃料の導入による課題も生じてこよう。これらの問題は急速なバイオ燃料の普及拡大がもたらすものと、バイオ燃料の普及そのものがもたらすものとに分けられる。バイオ燃料の普及が急速であるが故の問題点については、今後普及速度の鈍化に伴い解決してゆくものもあるかもしれないが、バイオ燃料の導入自体がもたらす問題については、導入をやめない限り解決されない問題もあるだろう。いずれにしろ、バイオ燃料の効果だけに着目しては十分とは言えず、バイオ燃料の普及に際しては課題や限界についても十分に検証する必要がある。そこで本節では、バイオ燃料の導入による主な問題点を3点列挙しバイオ燃料導入の限界を把握するとともに、これらの問題点に関する既存研究をいくつか紹介する。

まず、バイオ燃料は原料を農産物に頼るため食料との競合が生じ、農産物価格の上昇など農産物市場への影響が従前より OECD や FAO などの国際機関をはじめ、各国の研究者・専門家により指摘されている。バイオ燃料の導入による農産物価格および生産への影響を分析したものとしては、小泉（2007）、OECD and FAO（2007）、Elobied et al.（2006）などがある。小泉（2007）では、バイオ燃料の普及拡大により世界砂糖生産量（粗糖換算）は 2015 年までに年平均 1.7%増加し、国際粗糖価格は 2003 年の 7.51US セント/pound から 2015 年には 10.0US セント/pound へ上昇すると予測している。また、OECD and FAO（2007）は、2016 年までに各国でバイオ燃料の生産が急増し、その影響で穀物や菜種油、畜産飼料の値上がりが見通しを示している。また、Elobied et al.（2006）では、2015 年には全米の燃料消費の 20%がとうもろこし原料のバイオエタノールで賄われることとなり、その結果とうもろこし価格が上昇し、とうもろこし輸出と畜産生産が減少すると予測している。

農林水産政策研究所においても、バイオ燃料原材料の農産物の需要拡大が農産物の国際価格に与える影響について定量的な分析を行い、①現行の農業・バイオエタノール政策の継続等一定の前提条件に基づいた価格予測（ベースライン予測）と、②2007/08 年度から米国においてバイオエタノールの生産が行われないケースをシナリオ設定して行った価格予測（シナリオ予測）とを比較した。その結果、2007/08 年度におけるとうもろこしの国際価格の上昇のうち、バイオ燃料需要の増大が与えた影響は 22.2%であったことが示された。

バイオ燃料の急速な普及は先進国が中心となって行われ、途上国から安い原料作物を輸入し、それを原料に自国でバイオ燃料を生産している事例も見受けられる⁽⁷⁾。また、穀物価格の上昇は途上国への援助用の食料調達コストの増大を引き起すことが考えられる。こ

のような事例は途上国の食料確保に影響をもたらし、飢餓や農村の貧困を助長するとの見方もある。

一方で、EU は農産物価格の上昇はバイオ燃料が原因ではないという見解を示している（『Agra Europe weekly』2007 年 9 月 28 日号）。この見解は非常に極端なものであるかもしれないが、穀物価格の上昇はインドや中国といった新興国における需要の急速な拡大や投機によるところも大きく、穀物価格上昇の原因のすべてをバイオ燃料とするのは誤った見方かもしれない。しかしながら、少なくともバイオ燃料が穀物価格上昇に何らかの影響を与えていることは十分想定でき、この点を十分に考慮した上でバイオ燃料の生産拡大が行われるべきと考える。

原料作物と食料の競合問題の解決策としては、以下の 2 つが考えられる。1 つは食料と競合しない原料からのバイオ燃料生産である。このような原料としては廃食用油や廃糖蜜などが挙げられる。日本ではこのような食料と競合しない原料からのバイオエタノール生産の取組が積極的に行われている⁽⁸⁾。もう 1 つの解決策は、農産物ではなくセルロース系原料などを使ったバイオ燃料生産である。セルロース系原料からのバイオエタノール生産技術（第 2 世代技術）の確立によって、食料と競合しない木質系原料や食用農産物として利用できない稲わらや麦わらなど農業残渣からバイオ燃料を生産することができ、各国とも第 2 世代技術への期待とともに技術確立を積極的に進めている。現時点ではコストの問題などいくつかの課題が残されているものの、技術開発の進展に伴い第 2 世代技術は今後数年で商業ベースでの実用化が可能との見方もあり、米国では新エネルギー法に基づき 2010 年からセルロース系原料からのバイオエタノール生産を本格的に開始する計画である。

（２）土地利用変化による影響

ブラジルなどでは、バイオエタノール生産に伴う原料作物の増産によりアマゾンの熱帯雨林が破壊され、農地に転換され環境に悪影響を与えていると指摘されている。温室効果ガス削減の目的のもとに森林を切り倒して原料作物を作付けすると、バイオ燃料による GHG 削減効果を上回る炭素吸収源の消失および大気中への GHG 放出がなされ、バイオ燃料の導入が地球温暖化防止に貢献しない結果となることも十分考えられる。したがって、バイオ燃料の生産に伴う土地利用形態の変化の影響を考慮する検討が行われており、これまでに欧米を中心にバイオ燃料生産による土地利用変化を考慮した研究成果が公表されている。

Fehrenbach (2008) は土地利用変化を考慮した場合の GHG 排出量を計算し、南米におけるバイオ燃料生産は土地利用変化を考慮することにより、先進国に比べ GHG 排出量が圧倒的に多くなることを指摘している。また、ドイツにおける土地利用変化を過去 20 年遡及して計測、土地利用変化を含めると GHG 削減目標の 30% 削減にはどのケースも到達し

ない結果となった。Gruson (2008)は、土地利用変化の影響について、輪作による作目の違いによる評価導入の影響は EU 各国においては皆無に近いとの見解を示している。Kadyszewski, et al. (2008)は、インドネシアを事例とした泥炭地をパームオイル栽培用の農地に転換する際に発生する GHG を計測しており、一連の農地転換過程において最も GHG 排出の多いのは泥炭地を切り開き農地化することによるものであり、GHG 排出全体の 80% 近くを占める結果となっている。Hill (2008)は、自然状態からの原料作物作付け、土壌保全プログラムによる保全地を原料作物生産に転換した場合の土地利用変化の影響を評価し、米国での事例よりもインドネシア、マレーシア、ブラジルでの原料作物栽培は炭素放出が大きいとの結果を示している。

これらの研究からも、バイオ燃料生産における土地利用変化は GHG 排出の変化や周辺環境に大きな影響を与えており、特に南米や東南アジアの途上国におけるバイオ燃料生産において影響が大きいことがわかる。ただし、土地利用形態の変化はバイオ燃料生産の有無にかかわらず日常的に発生する事象であり、バイオ燃料による土地利用変化の影響を分析するにはこのうちどのくらいがバイオ燃料生産によって引き起こされたものなのかを明確にし、バイオ燃料による影響を抽出して分析することが必要となる。また、土地利用変化はバイオ燃料の原料作物が直接的に森林などの伐採を引き起こさなくても、これまで食用農産物が作付けされていた農地にバイオ燃料の原料作物が作付けされ、食用農産物は森林を切り開き新たに開発された農地に作付けされるという間接的な影響もあると指摘されており、これは直接的土地利用変化に対して間接的土地利用変化と呼ばれている。国際的な議論の中では、間接的土地利用まで含めてバイオ燃料による土地利用変化を把握すべきとの主張もあるが、現実的にはデータの利用可能性やどこまでがバイオ燃料生産による間接的土地利用変化なのかを示す確固たる根拠を見いだすことが困難であるため、間接的土地利用変化の把握は現時点では困難を伴うことが予想される。

このような中、間接的土地利用変化を考慮した研究として、Searchinger et al. (2008)が挙げられる。この論文では、バイオ燃料生産が GHG を削減できるといったこれまでの研究成果は原料作物の作付けに伴う土地利用変化による GHG 放出を考慮していない一方で原料作物の作付けによる土壌への炭素吸収を考慮しているという点で片手落ちであると批判し、間接的土地利用変化も含めた土地利用変化による GHG 放出を考慮した GHG 排出量を計測している。その結果、土地利用変化による GHG 排出だけでもアメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノール生産は今後 30 年間でガソリンの約 2 倍の GHG を排出し、バイオエタノールの GHG 削減効果を考慮しても GHG が減少するまでには 167 年もの長期を要することを示している。この結果は、間接的土地利用変化まで考慮すると、バイオ燃料による GHG 削減効果は完全に凌駕されてしまうことを示すものである。ただし、Searchinger et al. (2008)の結果はアメリカにおける原料用とうもろこしの作付けの影響が全世界に広がるという設定のもとでの計算であり⁽⁹⁾、結果が過大評価である点も否

定できない。

（３）温室効果ガス以外の環境負荷の変化

バイオ燃料を導入することによる効果はエネルギー投入（エネルギー収支）や地球温暖化防止すなわち GHG の削減効果に注目が集まる傾向があるが、GHG だけでなくそれ以外の環境影響についても幅広く分析を進める必要がある。

GHG 以外の環境負荷を計測した分析としては、これまでもいくつかの研究が行われてきた。Hu et al. (2004)はガソリンよりもバイオエタノール 85%混合ガソリン（E85）のほうが一酸化炭素，炭化水素，粒子状物質がいずれも少なくなるのに対し，NO_xの排出は E85 のほうが多くなるとの結果を導いている。また Reinhardt (2002)は，てんさい原料のバイオエタノールおよびエチルターシャリーブチルエーテル（以下，ETBE）双方に関して，GHG 以外に SO_x，NO_x，塩化水素，アンモニア，一酸化炭素など多数の項目の評価を行っている。このうち大きな環境テーマとしてオゾン層破壊，酸性化，富栄養化，光化学スモッグの 4 項目を評価しており，光化学スモッグを除き残りの 3 項目はいずれもガソリンよりもバイオエタノールもしくは ETBE のほうが環境負荷が増大するとの結果を導いている。一方で，Reinhardt (2002)では，エネルギー投入と GHG 削減に関してはガソリンよりもバイオエタノールもしくは ETBE のほうが環境負荷が小さいという結果を算出しており，バイオエタノールもしくは ETBE かガソリンかを一義的に決めることはできないと主張している。このように，バイオ燃料の導入に際しては GHG の削減に効果があるものの，他の環境負荷は増大するいわゆる「環境問題のシフト」をもたらす可能性も十分に想定される。

上記で紹介した研究以外に，これまでの研究でどのような環境負荷が評価されているかは Von Blottnitz and Curran (2007)にまとめられている（第 2 表）。これを見ると，エネルギー投入と GHG 以外の環境負荷としては酸性化，NO_x，SO_x，富栄養化，一酸化炭素，オゾン層への影響などが評価されているが，いずれの環境負荷項目についても評価対象としている研究事例は少なく，どの研究事例でも全般的に評価対象となる状況には至っていない。さらに，同じ環境負荷項目をとっても，環境負荷が増大する結果，減少する結果の双方が導かれているものもある。

例えば，日本の石油連盟はバイオエタノールを直接混合することにより，ガソリンよりも炭化水素が増加しこれにより光化学スモッグが増加することを指摘し，ETBE 方式の導入を推進している（石油連盟（2005））。これに対し，Hu et al. (2004)はフューエル・フレックス車（FFV）⁽¹⁰⁾で E85 を使用した場合，通常のガソリンに比べ炭化水素が 19%減少するという結果を導き，直接混合方式である E85 でもバイオエタノールの導入によりガソリンに比べて環境負荷削減効果があることを示している。また，Reinhardt (2002)は光化学スモッグへの影響として，ETBE よりもバイオエタノールの方が光化学スモッグへの影

響は少ないという結果を示している。

このように、バイオ燃料の導入により環境負荷排出量がどう変化するかは、研究成果として統一的な結果が出ていないのが現状である。ただし、これらの結果の相違は生産されるバイオ燃料種や原料の違いのほか、前提とする条件や燃料製造技術、評価のシステム境界の違い、さらには結果の導出単位（機能単位）が燃料熱量ベースでの排出量か自動車走行キロあたりなのかなどの違いでも説明される。いずれにしろ、このような事例を見ても GHG 以外の環境負荷項目についてはまだ研究蓄積が十分と言えない状況で、この点については今後の研究の進展に期待したい。

第2表 各既存研究におけるバイオエタノールのLCA評価

文献	Kantschmitt (1997)	Puppan (2001)	Reinhardt (2002)	Hu (2004)	Kadam (2002)	Sheehan (2004)	Tan and Culuba (2002)
	農産物原料				廃棄物原料		
原料	てんさい 小麦 じゃがいも	てんさい 冬小麦 じゃがいも	てんさい 小麦 じゃがいも	キャッサバ	バガス	コーン ストーバー	木質系 廃棄物
生産地	ドイツ	ドイツ	ヨーロッパ	中国	インド	米国	フィリピン
資源減耗	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
地球温暖化	↓	↓	↓	NA	↓	↓	↓
CO ₂	NA	NA	↓	↓	NA	NA	NA
酸性化	—	—	↑	NA	↓	↑	↑
SO _x	↑	NA	↑	NA	NA	NA	NA
NO _x	↓	NA	↑	↑	NA	NA	NA
富栄養化	NA	NA	↑	NA	↓	NA	↑
人的有害物質	NA	—	NA	NA	↓	NA	↑
一酸化炭素	NA	NA	↑	↓	NA	NA	NA
粒子状物質	NA	NA	↑	↓	NA	NA	NA
生態的有害物質	NA	—	NA	NA	NA	NA	NA
光化学スモッグ	NA	NA	↓	NA	NA	↑	↓
炭化水素	NA	NA	↓	↓	NA	NA	NA
固形廃棄物	NA	NA	NA	NA	↓	NA	NA
土地利用	NA	NA	NA	NA	NA	—	NA
水利用	NA	NA	NA	NA	—	NA	NA
オゾン層破壊	↑	↑	NA	NA	NA	↓	NA
臭気	NA	NA	NA	NA	↓	NA	NA

出所: Von Blottnitz and Curran (2007).

注 ↑は環境負荷増大, ↓は環境負荷減少, —は環境負荷不変, NAは評価対象外であることを示す。

4. 諸効果の定量的評価手法の検討

(1) 定量的評価の必要性

第2節で触れたバイオ燃料導入の諸効果を評価するには、さまざまな手法が適用できる。しかしながら、バイオ燃料の導入推進や普及の効果を広く訴えるためには、やはり具体的かつ客観的な数値・指標によってその効果を評価することが必要となるだろう。本節では、なぜ定量的評価が必要なのかをその情報量に関して2つ挙げ解説する。

第1に定量的評価は数値として表現されるため、定性的な評価よりも客観性を有している点である。バイオ燃料の導入を推進する際、効果の有無だけでなく具体的な数値でこのくらいの効果があると説明された方がより説得的である。定性的な評価ではバイオ燃料を導入することにより化石燃料消費を置き換えることができ、地球温暖化に大きく貢献すると言われてきた。しかし、実際にはバイオ燃料にも原料作物の生産や燃料の輸送に投入される化石燃料があり、1Lのバイオ燃料が1Lのガソリンを置き換えるものではない。この場合、定性的な評価では「バイオ燃料はガソリンを代替する」ということになるが、「1Lのバイオ燃料は0.1Lのガソリンを代替する」という定量的な評価を加えたほうが情報をより正確に伝えられるだろう。

第2に定量的評価は数値の大小を比較することによって、さまざまな選択肢を比較することに利点がある。先の例をもう一度引き出すと、Aというバイオ燃料1Lは0.5Lのガソリンを、別のバイオ燃料Bは0.8Lのガソリンを代替するとしよう。この場合、AよりもBのバイオ燃料のほうが効果は高いことが示される。定量的評価の場合はこのようなバイオ燃料の選択肢同士の比較はできず、バイオ燃料とガソリンのどちらがよいかを示すのみである。したがって、この場合も定量的評価のほうがより多くの情報を提供できると言えよう。

以上のような理由から、バイオ燃料を導入することにより得られる効果を定量的に評価することは、バイオ燃料政策の推進にも資すると考える。以降ではバイオ燃料導入効果を評価手法のうち特に定量的な評価方法について検討する。

(2) 環境負荷削減効果

1) LCA 分析

環境負荷削減効果の計測にはライフサイクルアセスメント（以下、LCA）分析の適用が有効である。LCA分析とは、ある製品の原料生産段階から製品の消費および廃棄までの一連のプロセスで発生する環境負荷を計測し、製品の「ゆりかごから墓場まで」の環境負荷を計測する手法である。この手法は対象製品の包括的な環境影響を評価できるため、工業製品のみならず最近ではさまざまな分野に適用されている。農業分野にLCAを適用した事例も数多くあり、増田（2007）や林（2000）などは畜産に、工藤（2005）や小野（2005）

などは稲作に LCA を適用した研究事例である。また、ガソリンやバイオ燃料などの輸送用燃料に LCA を適用した事例は、国内外問わず多数公表されており、例えば船崎・種田 (1999)、三菱総合研究所 (2005) や Pimentel and Patzek (2005)、Kim and Dale (2006) などの研究事例が挙げられる。さらに、Kim and Dale (2005) や小野 (2007) のようにバイオ燃料用の原料作物の作付体系に LCA 分析を適用した事例もある。

このように LCA 分析は世界各国で幅広く適用されている環境評価手法であり、その手順などは ISO が規格化して ISO14040 および ISO14044 として公表している。このうち ISO14040 は LCA 分析の原則や枠組みを記述し、ISO14044 では実際の LCA 分析の実施方法を定めるものとなっている。

LCA 分析をさらに発展させたものとして、LCA 分析において計測された環境負荷量をベースにして産出される統合化指標を算出することが行われている。例えば産業技術総合研究所を中心として開発された LIME は環境負荷による影響を被害額として貨幣換算するという方法を用いて、単位や環境テーマの異なる様々な環境負荷を統合する試みを行っている。また、海外においてもエコポイント、エコインディケーター⁹⁵、EPS などといった統合化手法が開発されている。さらには、環境効率やエコファクターなどといった評価指標へ発展させる研究事例もみられる。このように、LCA 分析は単に環境負荷を計測するに留まらず、さらに統合された指標やより高度な評価手法の導出のための環境データを提供する役割も果たすことができるのである。

LCA 分析は原料作物の生産から燃料消費までのバイオエタノールの一連のライフサイクルにおける環境負荷量を計測する有用な手法であるが、一方で限界点も指摘されている。伊坪・稲葉 (2005) では、LCA 分析を行う際に負担となる点として以下の 2 点を指摘している。第 1 に LCA 分析に必要なインベントリデータの収集に手間と時間がかかる点である。現在はいくつかの分野においてインベントリデータの整備が行われ、以前よりも容易に LCA 分析を行うことが可能になったが、バイオ燃料など新たに創設された分野や農業生産など企業などの組織的なデータ整備が期待できない分野においては、まだインベントリデータの収集に苦勞することが多い。第 2 に信頼できる分析手法を見いだすのが容易ではない点である。この点についても、過去に同様の分野で LCA 分析の蓄積があればさほど苦勞することはないかもしれないが、新しく LCA 分析が適用された分野においては、生産境界の設定や主産物と副産物の間の環境負荷配分方法などにルールが確立されていない場合が多い⁽¹¹⁾。このような場合には独自にこれらのルールを設定する必要がある、LCA 分析を実施する上でのネックとなることも想定される。未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会 (1995) においても、LCA 分析の結果がデータの質により大きく左右される点、環境負荷の配分を問題点として指摘しているほか⁽¹²⁾、リサイクル財の投入に関する問題点を指摘している。つまり、リサイクル製品が通常の製品と同様の用途で利用されながらも質の劣化を伴う場合、質の劣化をどう評価するかの問題が発生する。例えば、バージ

ン紙と再生紙は用途としては同じものの、製品の質は再生紙の方が劣る。このような場合、バージン紙と再生紙の質の違いを LCA 分析でどう評価するかといった問題が生じるのである。

以上のような限界点はあるものの、LCA 分析は製品の「ゆりかごから墓場まで」のトータルの環境負荷を計測する有効な評価手法であり、この分析から得られる情報は非常に多くかつ有用である。前述のとおり LCA 分析をバイオ燃料に適用した事例も多数存在する。日本におけるバイオエタノール生産の LCA 分析については、第 2 章で詳細に取り扱う。

2) エコロジカル・フットプリント

エコロジカル・フットプリント（以下、EF）分析は、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学の Wackernagel と Rees によって開発された分析手法で EF という評価手法を用いた分析のことである⁽¹³⁾。Wackernagel らによれば、EF とは「ある特定地域の人間活動、または、そこに住む人々が一定水準の物質消費レベルで持続的に生活を維持するために必要な土地または水域面積、つまり、ある地域で必要とされる資源の要求量を生み出し、排出物質を同化してくれる土地または水域面積」である。つまり、EF は生産、消費、廃棄など人間によるあらゆる活動に伴う環境負荷を特定の計算方法に従い面積に変換してその大きさを表すツールである。EF はあらゆる環境負荷を土地面積に変換することから、「踏み潰された自然生態系面積」、「環境面積要求量」などと和訳される。

EF を具体的に説明すると以下のとおりである。ある地域に住む住民が人間活動を行うためにいくつかの種類の財を必要とする時、住民はそれらを生産するのに必要な資源が持続的に確保できるように土地および水域を確保しなければならない。また、それと同時に財を生産するにあたって発生した廃棄物や環境負荷を吸収・浄化できるような土地および水域も確保しなければ、廃棄物や環境負荷が蓄積され持続的な活動を営むことができないだろう。EF とは特定地域の住民がその活動を持続的に営むために必要な土地・水域面積であり、生産および消費のために使用された土地面積と廃棄物および環境負荷の吸収のために必要となる土地・水域面積の合計値として示され、EF の値が大きいほど環境負荷が大きいことを示す。

EF 分析の特徴は、第 1 に EF を人間の活動による環境負荷総量と捉え、人間活動に利用可能な土地・水域面積と比較することにより、持続可能な状態にあるか否かを判断することができる点である。EF が利用可能な土地・水域面積を下回っていれば、当該人間活動は持続可能であり、逆に EF が利用可能な土地・水域面積を上回っていれば、持続不可能という結論が導かれる。このように、EF を用いることによって人間活動の持続可能性が容易かつ明瞭に評価できる点が EF 分析の特徴である。第 2 に異なる種類・単位の環境負荷を面積という貨幣以外の共通単位に変換することができる点にある。EF は土地・水域面積によって環境負荷を計測する手法であるため、これまで物量評価では比較ができなか

った環境負荷どうしの比較可能性を確保することができるのである。第3に EF 分析は生態学的な側面から持続可能性を評価するものであり、経済的な側面とは一線を画した持続可能性評価となっている点を挙げることができる。

バイオ燃料の効果の評価に EF を導入することによって、バイオ燃料が持続可能性の達成に貢献するか否かが示される。例えば、これまでの化石燃料系の自動車用燃料をバイオ燃料に転換することによって EF が減少することが示されれば、バイオ燃料により持続可能性の達成に資していることが窺える。また、新たなバイオ燃料の生産技術を導入することで、EF がどの程度減少するかを示すことでバイオ燃料生産の新技术の持続可能性への影響を評価することができる。例えば、糖質・デンプン系原料からのバイオ燃料生産からセルロース系原料によるバイオ燃料生産に転換することでどれだけ EF が減少するかを評価すれば、それが持続可能性の到達にどれだけ資するかを示すものと言える。

このように、バイオ燃料の効果 EF によって評価することは持続可能な社会の達成という観点からの評価となり、LCA 分析などによる環境負荷削減効果とは違った側面からの評価が可能となる。

3) 隠れたフロー（エコロジカル・バックパック）

隠れたフローとは、ある製品を生産するのにどのくらい地球上の資源を使用しているかを質量単位で評価する環境負荷計測方法で、エコロジカル・バックパックもしくはエコロジカル・リュックサックとも呼ばれる⁽¹⁴⁾。隠れたフローの概念は具体的な事例を用いたほうが理解しやすいだろう。ここに住宅の柱として使われる 10kg の角材があったとしよう。この角材を作るために 1t の重さがある樹木が切り出されたとしても、その樹木からは 100 本つまり 1t 分の角材を作ることはできない。なぜならば、樹木のうち角材として実際に利用される部分のごく限られており、残りの部分の多くは実際には角材として使われない部分であるからだ。逆に考えると 10kg の角材 1 本を生産するのに、地球上の資源として採取される樹木の量は 10kg をはるかに上回っている。これまでマテリアルフロー分析では、角材にならない部分は計算から除かれてきたが、これをマテリアルフロー分析の中に取り入れようと考えたのが隠れたフローである。したがって、隠れたフローはある製品が生産される際の原材料歩留まりを示すものとも言えよう。

これをバイオ燃料に適用した場合、バイオ燃料の生産に利用される化石燃料の採掘に伴って採取されるガスや土砂、原料作物の生産に伴い発生する籾殻・麦わらなどが隠れたフローに相当し、これらの質量を集計することで計算される。ただし、異なる単位の物質は集計することができないので、総合的指標として隠れたフローを適用することはできない。例えばガスと土砂、籾殻などは 1 つの単位で集計することができず、必ず別個のものとして別の単位で評価されるものである。この数値を見てどのようにバイオ燃料の効果を判断するかは、結果を解釈する者の主観的判断が含まれ、客観的な評価とはなりにくい点が問

題点として指摘できる。

4) ヴァーチャル・ウォーター（仮想水）

ヴァーチャル・ウォーター（以下、VW）とは、ある生産物の生産に伴い消費される水の量を計測する手法で仮想水とも呼ばれる。VW は貿易問題と一緒に論じられることが多く、各国（各地域）において VW を計測することで各国の水効率性の比較ができ、VW の小さい地域から大きい地域へ貿易を行うことによって、水使用の効率性を改善することができる。この意味においては、比較生産費説の生産費を水投入量に置き換えたものが VW といえる。

また、この手法は貿易問題の中でも特に食料貿易に適用される概念で、食料貿易の背景にある水の使用を明示化するために利用されることが多い。すなわち、日本が諸外国から多くの食料を輸入している背景には輸出国で日本向けの輸出食料の生産のために大量の水が投入されており、日本が食料を輸入することは食料輸入国から食料と合わせて水を輸入しているという考え方である。この考え方は先述の隠れたフローの概念とも似ているところがあり、隠れたフローを生産物が「背負う物質（リュックサック）」とするならば、VW は生産物が「背負う水」と言うこともできる。

VW をバイオ燃料に適用する場合には、原料作物の生産や燃料製造に伴う水の投入量を集計することになるが、原料作物生産における水投入が大きな割合を占めることが予想される。バイオ燃料の VW を計測した研究事例としては、Uhlenbrook (2008)がある。Uhlenbrook (2008)は、バイオ燃料の VW を計測してバイオ燃料 1L の生産に 1,000L から 3,500L 以上の水が必要になるとの結果を示し、水投入量は化石燃料よりもバイオ燃料のほうが多いことを示している。

バイオ燃料に限らず VW による評価で議論する際には、必ず水収支との比較が重要となる。例えば A 地域におけるバイオ燃料生産では燃料単位あたり 1KL の水を、B 地域では 0.5KL の水を使用すると計算されたとしよう。この VW の計算結果だけを見ると、B 地域におけるバイオ燃料生産のほうが良いという結論に至る。しかしながら、仮に B 地域では水収支が逼迫しており、一方の A 地域は水収支には十分余裕がある状態であれば、B 地域におけるバイオ燃料生産は水収支をさらに悪化させるという結論が導かれる。このように、VW のみでは評価の範囲が限られており、より広範な分析には VW とともに水収支の分析も必要となってくる。

しかしながら、特にバイオ燃料における VW の推計に際してはまだデータが十分に整備されておらず、多くの仮定条件を設定しなければならない。先に紹介した Uhlenbrook (2008)でも VW の計測結果は大きな幅を持っている。これに加え、バイオ燃料の生産地域水収支の分析も必要となれば、さらにデータ制約は厳しさを増すだろう。また、仮にデータが得られた場合にも地域特性などを排除して一般化することは難しく、特定地域におけ

る評価にすぎない点にも留意する必要がある。

5) プロダクトマイレージ

農産物の地産地消の度合いを測るものにフードマイレージという概念がある。これは、農産物の輸送量と輸送距離を乗じることで計算される値である。フードマイレージは我々が口にする食料がいかに遠くから大量に運ばれてきているかを示すもので、しばしば輸送に伴う環境負荷の大きさと外国からの輸入に頼る日本の食料供給に関して食料安全保障の観点から議論の材料として用いられる⁽¹⁵⁾。

このフードマイレージを農産物・食料以外に適用したものがプロダクトマイレージである。プロダクトマイレージも基本的にはフードマイレージと同じで、製品・貨物の輸送量と輸送距離を乗じることで算出される。フードマイレージも農産物や食料に特化した概念であり、プロダクトマイレージに包含される概念ととらえることができる。プロダクトマイレージはその大きさがトンキロなどの単位で示され概念的にもわかりやすいことから、一般の消費者にも受け入れられやすく最近ではマスコミなどでも取り上げられることが多い。しかしながら、LCA 分析などと比べると、LCA 分析の対象範囲のうち輸送に関する部分のみを評価する指標となるため全体的な環境負荷の一部を評価するに過ぎず、さらに輸送に関する部分についても CO₂ や NO_x などの具体的な環境負荷ではなく距離という間接的指標が用いられ、必ずしも環境負荷の大きさを表すものではないという問題点が存在する。また、理論的な問題点としては、プロダクトマイレージの考え方を厳密に適用し突き詰めていくとすべての財を自給自足で賄うことが最も望ましい結果となり、比較生産費説による貿易を否定し、現実に行われている貿易や流通を説明できない点が挙げられる。このようなことから、農産物や食料に適用したフードマイレージ以外の工業製品にプロダクトマイレージを適用した事例はこれまでにほとんどない。

以上のようなことから、プロダクトマイレージはあくまで環境負荷のごく一部を間接的な指標によってとらえているに過ぎず、評価の際には経済的な側面や輸送以外の環境負荷を取り扱っていない（取り扱えない）ことを認識した上で適用することが必要である。バイオ燃料に関しては、プロダクトマイレージによって輸送部分にかかる輸送トンキロを評価することは環境の側面よりもむしろエネルギー安全保障の指標として利用することのほうが適切かもしれない。

(3) 経済効果

経済効果の計測には大きく分けて2つの方法がある。1つは経営分析を用いバイオ燃料事業者や農家経営体などのミクロ経済的な側面からのアプローチである。これにより、地域経済の構成主体である個別の事業体がどのような影響を受けるのかを把握することができる。特に、経営分析は、事業所の収益にダイレクトに影響する部分の評価であり、バイ

オ燃料の経済性などの名目で各事業主体はこのような経済性分析は必ず行っているはずである。このようなアプローチはミクロ経済学的な位置づけが明確であり、一般の人にも理解しやすいという利点がある。一方で、このアプローチでは地域経済への影響を全体像として把握することはできない点が問題と言えよう。

もう1つの方法は、産業連関分析を用いてマクロ経済的な側面からその効果を計測する方法である。日本ではバイオ燃料生産はここ数年で始まった新たな産業であり、未だ商業用バイオ燃料生産はほとんど行われていないため、これまでに公表された産業連関表ではバイオ燃料事業体の生産額は含まれていない。また、部門としても独立してバイオ燃料が明示されているわけではないため、産業連関表を用いてバイオ燃料の経済効果を計測するためには、バイオ燃料部門を独立させる修正をしなければならない。この修正作業にはバイオ燃料部門の投入構造、産出構造を把握することも必要であり、バイオ燃料部門がどの部門からどれだけの財を投入しているか、さらにはバイオ燃料がどのような部門に需要されているかを把握している必要がある。したがって、これらの情報が十分に得られない場合には産業連関表の修正ができず、経済効果の算出ができない場合も想定される。

（４）エネルギー地産地消効果（エネルギー自給効果）

エネルギーに関する分析ではエネルギー収支分析が最もよく使われる分析手法である。エネルギー収支分析とは、エネルギー生産によって得られるエネルギー量と生産に投入されるエネルギー量からエネルギー生産における投入・産出バランス（エネルギー収支）を計測するもので、エネルギーの生産コストを評価する分析手法でエネルギー収支が1を超えるとエネルギー生産としての役割を果たしていると解釈できる。

エネルギー収支の計算には化石エネルギーや電気エネルギーなどあらゆるタイプのエネルギーが集計される。この集計の際に問題となるのはどのような集計方法を用いるかという点である。これまでに、発熱量換算でそのまま集計する方法、経済的価値をベースにした集計方法などさまざまな集計手法が提案されてきたが、どれも長所短所があり統一的に用いられる手法には至っていない。Cleveland (2005)は、エネルギー収支分析においてはエネルギーの集計方法が結果を大きく左右すると主張している。したがって、この分析を適用する際には、エネルギーの集計方法を十分に検討する必要がある。

ところで、エネルギーの自給効果については単に投入エネルギーと産出エネルギーのエネルギー収支だけで評価することができない。なぜなら、バイオ燃料の生産に投入されるエネルギーのうち大部分が国外で生産されるエネルギーであれば、バイオ燃料自体の生産が不可能となるからだ。したがって、エネルギーの自給自足効果を評価するためには、エネルギー収支のほか投入エネルギーのうちの自国で生産可能なエネルギーの割合や自国で生産不可能な化石燃料などの割合を計測したほうがより正確な評価になる。

Farrell et al.(2008)は、代表的な6つのバイオ燃料のLCA分析についてその分析内容を

詳細に検証し、これらの研究事例の検証からアメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノールはガソリンよりも化石燃料投入が少ないことを主張している。また、Unnasch (2005)は、とうもろこし原料のバイオエタノールはガソリンと比べても化石燃料消費を抑制しさらに木質バイオマスからのエタノール生産ではほとんど化石燃料消費を必要としないという結果を導いている。これらの研究結果からも、バイオ燃料生産が化石燃料消費を抑制しエネルギーの自給に貢献していることが示される。

ただし、エネルギー生産に投入される化石燃料の割合を適用するこれらの研究での議論は、化石燃料が自国内で自給できない状況にあることが前提であり、例えば産油国などは化石燃料消費を抑制することがエネルギーの自給につながらず、このような分析を適用することには意味がない。したがって、エネルギー自給効果の計測には適用する国や地域のエネルギー需給状況を考慮する必要がある。日本の事例に合わせると、化石燃料投入量もさることながら、バイオ燃料生産におけるバイオマスエネルギーの投入量などの指標がエネルギー自給効果の指標となるだろう。

また、エネルギー自給効果のもう1つの評価指標としては、前述のプロダクトマイレージを適用することも考えられる。プロダクトマイレージにより化石燃料が運ばれてくる距離とバイオ燃料が運ばれる距離を計算し比較することで、長距離輸送のリスクを提起し国内のエネルギー自給効果を評価する方法もあるかもしれない。

5. おわりに

本章ではバイオ燃料を導入することによるさまざまな効果および問題点を列挙し、その評価にはどのような手法が可能なのかを検証してきた。バイオ燃料の導入による効果は、環境負荷削減効果、地域経済効果、農業振興効果、エネルギーの地産地消効果などさまざまなものが挙げられる。その一方で、バイオ燃料の導入が原料となる農産物の新たな需要を創出することから、食用農産物との競合が発生したり農産物価格の上昇を引き起こしたりすることが問題点として指摘されている。また、急激なバイオ燃料の拡大は国際的な農産物の急激な生産拡大をもたらし、例えば食料価格の不安定要因になったり森林から農地への土地利用変化が生態系などにさまざまな影響を与えたりする点が指摘されている。さらには、これまで効果があると言われてきた環境負荷削減効果にも、本当にその効果があるのかといった疑問が投げかけられており、そもそも地球温暖化防止のためにはバイオ燃料の導入よりも植林のほうが効果的であるとの指摘もある。これらの問題点に解決策を見いださなければバイオ燃料の導入にも展望が開けない。

そして、これらの疑問点に答えるためには、バイオ燃料の導入に際してどのような効果がどれだけ出現するのかを定量的・明示的に示す必要があり、本章ではその手法を列挙した。このうち、環境負荷削減効果については LCA 分析、地域経済効果の評価には産業連

関分析がよく適用されているが、そのほかにも EF や隠れたフローといったエコロジカル経済学的な手法やプロダクトマイレージや VW といった一般の人々にもわかりやすい評価手法も提唱されている。

次章以降、これらの手法を適用し、バイオ燃料の導入による効果を定量的に計測することを試みる。

〔注〕

- (1) 環境省ホームページ『我が国の温室効果ガス排出量』<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html> 参照。
- (2) これはバイオ燃料に限ったことではなく、一般的に「環境にやさしい」と言われる製品すべてについて当てはまることである。例えば、省エネルギーを通じた環境配慮を目的とした省電力家電製品への買い換えは、古い家電製品の廃棄や新製品の製造にかかる環境負荷も含めると、必ずしも「環境にやさしい」とは言えない場合がある。これを検証するためには LCA 分析が有効である。
- (3) 一般的にガソリンよりも窒素含有量の多いバイオ燃料では燃焼時の NO_x 排出がガソリンより増加する（大聖・三井物産（2004）p.192, U.S. Environmental Protection Agency (2002)pp.36-42）。また、Kim and Dale(2005, 2006)によると、ライフサイクルで考えた場合も、酸性化や富栄養化といった環境負荷は原料作物の栽培時の窒素やリンの投入による影響でバイオエタノールの導入のほうがむしろ増加する。
- (4) これらの情報は 2007 年 8 月に行った宮古島市でバイオエタノールを生産するりゅうせきへのヒアリング調査より得たものである。
- (5) 大聖泰弘，三井物産（2004）p.94 より著者が推計した。
- (6) ブラジルにおけるさとうきび原料のバイオエタノール生産では、バイオエタノール製造に必要なエネルギーをさとうきびのバガス（しぼりかす）を燃料として確保しているため、バイオエタノール生産がブラジルのエネルギー安全保障に貢献していることはほぼ間違いない。
- (7) 例えば、ドイツではアメリカやアルゼンチン、ブラジルから原料の大豆油を輸入し、BDF の生産が行われている。
- (8) 宮古島市ではさとうきびからの砂糖生産で発生する糖蜜を原料としたバイオエタノール生産が行われ、北海道十勝地方では食用・加工用に適さない規格外小麦を原料としたバイオエタノール生産が計画されている。また、廃食用油を回収し BDF を生産する事例は京都市をはじめ全国各地で見られる。
- (9) Searchinger et al.（2008）では、アメリカにおける 5,600 万 KL のバイオエタノール生産に関し、アメリカ国内で 1,280 万 ha の農地が原料用とうもろこし栽培に利用され、全世界で 1,080 万 ha の農地が新たに必要となると計算している。この新たに必要となる農

地の国別内訳はブラジルが 280 万 ha, 中国とインドでそれぞれ 230 万 ha, アメリカ国内が 220 万 ha である。

- (10) フュエル・フレックス車 (FFV) とは, 使用する燃料のエタノール混合率が 0% から 100% までに対応する車両を指す。
- (11) バイオ燃料に関する環境負荷配分方法の概要は第 2 章補論 2 を参照のこと。
- (12) 未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会 (1995) では, 環境負荷の配分のことを振り分け (配賦) と呼んでいる。
- (13) EF についての詳細は Wackernagel and Rees(1996)を参照のこと。
- (14) この概念を最初に提唱したドイツのヴッパータール研究所では当初, エコロジカル・バックパック (もしくはエコロジカル・リュックサック) と呼ばれていたが, 日本の国立環境研究所との共同研究の際に”hidden flow”が採用され, 和訳も「隠れたフロー」が使われるようになった。また, 日本における隠れたフローの詳細については森口 (2003) を参照のこと。
- (15) フードマイレッジの詳細については中田 (2007) を参照のこと。

〔引用文献〕

バイオ燃料技術革新協議会 (2008)『バイオ燃料技術革新計画』。

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80326c05j.pdf>

Cleveland C. J., (2005) “Net energy from the extraction of oil and gas in the United States” *Energy* 30(5), pp.769-782.

Elobeid, A., Tokgoz, S., Hayes, D. J., Badcock, B. A., and Hart, C. E., (2006) “The long-run impact of corn-based ethanol on the grain, oilseed, and livestock sectors: A preliminary assessment” Center for Agricultural and Rural Development (CARD) Briefing Paper 06-BP 49.

Farrell, A. E., Plevin, R. J., Turner, B. T., Jones, A. D., O’Hare, M., and Kammen, D. M., (2008) “Ethanol Can Contribute to Energy Goal and Environmental Goals” *Science* 311 (27 Jan 2008), pp.506-508.

Fehrenbach, H.,(2008) “GHG Accounting Methodology and Default Data According to the Biomass Sustainability Ordinance (BSO)” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

Gruson, J. F., (2008) ”GHG Methodologies for Biofuels :French Developments” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

林孝 (2000) 「肉牛生産の LCA と環境影響評価」(農業環境技術研究所編『農業におけるライフサイクルアセスメント』養賢堂所収), pp.116-125。

- Hill, J.,(2008) “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.
- Hu, Z., Pu G., Famg F. and Wang C., (2004) “Economics, environment, and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China” *Renewable Energy* 29(14), pp.2183-2192.
- 伊坪徳宏，稲葉敦（2005）『ライフサイクル環境影響評価手法－LIME-LCA，環境会計，環境効率のための評価手法・データベース』産業管理協会。
- Kadyszewski, J., Brown, S., Harris, N. and Walker S., (2008) “GHG Emissions GHG Emissions from Converting Forested Peatlands to Palm Oil Plantations” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.
- Kim, S. and Dale, B. E., (2005) “Life cycle assessment of various cropping systems utilized for production biofuels: Bioethanol and biodiesel” *Biomass and bioenergy* 29, pp.426-439.
- Kim, S. and Dale, B. E., (2006) “Ethanol fuels: E10 or E85 – Life cycle perspectives” *International Journal of Life Cycle Assessment* 11(2), pp.117-121.
- 小泉達治（2007）「日本におけるバイオエタノール輸入拡大がブラジルおよび国際砂糖需給に与える影響分析」『2007年度日本農業経済学会論文集』，pp.632-639。
- 工藤卓雄（2005）「水稻直播栽培と局所施肥管理技術の導入における普及及び環境影響に関する可能性評価」北海道大学大学院農学研究科博士号請求論文。
- 増田清敬（2007）「LCA（ライフサイクルアセスメント）を用いた酪農経営の環境影響評価」『北海道大学大学院農学研究院邦文紀要』28(2)，pp.203-297。
- 松村正利，サンケイフェューエルズ(2006)『図解 バイオディーゼル最前線』工業調査会。
- 未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会（1995）『ライフサイクルアセスメント LCA のすべて－環境への負荷を評価する』工業調査会。
- 森口祐一（2003）『マテリアルフローデータブック～日本と取りまく世界の資源のフロー～』地球環境研究センター。
- 中田哲也（2007）『フードマイレージ あなたの食が地球を変える』日本評論社。
- OECD and FAO (2007) “OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016”.
- 大聖泰弘，三井物産(2004)『図解 バイオエタノール最前線』工業調査会。
- 小野洋（2005）「飼料イネ構築連携システムの環境負荷量の計測」『農業経営通信』224, pp.50-53。
- 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。
- Reinhardt, G. A., (2002) “Bioethanol and ETBE Versus Other Biofuels for Transportation in Europe: An Ecological Comparison” 14th International Symposium on Alcohol Fuels

(ISAF), Phuket, Thailand, 12-15 November 2002.

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., and Yu, T., (2008) "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emission from Land-Use Change" *Science* 319 (29 Feb 2008), pp.1238-1240.

石油連盟 (2005) 「バイオエタノールの自動車用燃料としての利用について」, 2005 年 5 月 18 日 石油連盟会長定例記者会見説明資料。

Uhlenbrook, S., (2008) "Biofuel Impacts on Water What do we know, and what do we need to know?" Symposium on Virtual Water Trade: Geopolitical Aspects of Water Trade and Upcoming Biofuels, Delft, the Netherlands, 18 March 2008.

Unnasch, S., (2005) "Alcohol Fuels from Biomass: Well-to-Wheel Energy Balance" Proceedings of the 15th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF), San Diego, California, United States, 26-28 September 2005.

U.S. Environmental Protection Agency (2002) "Draft Technical Report, A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions"

<http://www.epa.gov/region09/waste/biodiesel/resources/analysis-biodiesel-impacts.pdf>

Von Blottnitz, H., and Curran, M. A. (2007): "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* 15(7), pp.607-619.

Wackernagel, M. and Rees, W. E., (1996) "Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth", New Society Publishers, British Columbia.

第 2 章 LCA 分析による温室効果ガス削減効果の計測

林 岳

増田清敬（滋賀県立大学）

山本 充（小樽商科大学）

1. はじめに

第 1 章ではバイオ燃料を導入することによるさまざまな効果と問題点を取り上げ、その評価手法を提示した。農林水産省の国産バイオ燃料生産に関するモデル実証事業にもみられるように⁽¹⁾、バイオ燃料は資源稀少国であるわが国においても生産可能なエネルギーとして注目されている。現在のところ日本国内で販売される E3 もしくは ETBE の原料となるバイオエタノールの供給は必要量の確保やコスト面から海外からの輸入に頼らざるを得ない状況にある⁽²⁾。確かに単純に国際経済学の比較生産費説に基づくと、わが国のバイオ燃料供給は比較優位を持つ諸外国からの輸入に特化することが望ましいという結論に至る。しかしながら、世界的な地球温暖化対策という観点からみれば、それぞれの国・地域ごとに対策が求められており、貿易に伴う環境負荷排出などの問題も考慮すると、国内におけるバイオ燃料供給は輸入だけではなく国内生産による賄うべきとの意見も根強い。このような議論に際しては、バイオ燃料導入の効果を定量的・客観的に評価することが必要であるが、日本国内の事例についてはこのような評価が不足している状況にある。特に、バイオ燃料導入の一番の目的とも言われている地球温暖化防止の効果については、輸入バイオ燃料および国産バイオ燃料にどの程度の GHG 削減効果があるのかを定量的に把握する必要がある。最近ではバイオ燃料の導入が必ずしも地球温暖化防止に貢献しないという見方もあり、OECD においても同様の見解を公式に示している⁽³⁾。このような背景のもと、国産バイオ燃料の導入を推進するためにはまずはバイオ燃料生産に伴う GHG 排出量を定量的に把握し、バイオ燃料の導入によって地球温暖化防止に間違いなく効果があることを明確に示す必要がある。

そこで、本章ではバイオ燃料の導入に伴う地球温暖化防止効果について、LCA 分析を用いて GHG 削減量を定量的に評価することを目的とする。具体的にはまず国内におけるバイオ燃料生産とブラジルや米国といった海外から輸入されるバイオ燃料の GHG 削減効果の比較を行う。次に国内におけるバイオ燃料生産において、さまざまな GHG 削減技術を導入することで、GHG の削減がどの程度まで可能なかを明示する。なお、本分析で取り上げるのはバイオ燃料のうちバイオエタノールの生産であり、BDF の生産は取り上げない。

本節に続き、第 2 節では北海道十勝地方における規格外小麦を原料とするバイオエタノ

ール生産を事例として取り上げガソリンに比べた GHG 削減効果を計測し、第3節では耕作放棄地への作付けや簡易耕起栽培、ふん尿スラリーを投入した原料小麦栽培など、GHG を削減するための各種技術を導入した場合の GHG 削減効果を計測する。さらに第4節では、ふん尿スラリーを利用したバイオガスプラントからバイオエタノール生産へエネルギー供給を行った場合の GHG 削減効果を計測し、最後に第5節でこれら各種 GHG 削減技術のうちどれが有効なのかをまとめ結論を導く。

なお、本章での分析は実在するバイオエタノールプラントからの実証データではなく、既存文献から引用したデータによる事前評価であり、本分析で設定したシナリオは実際の事業で計画される生産・流通方式とも異なることをあらかじめ断っておく。

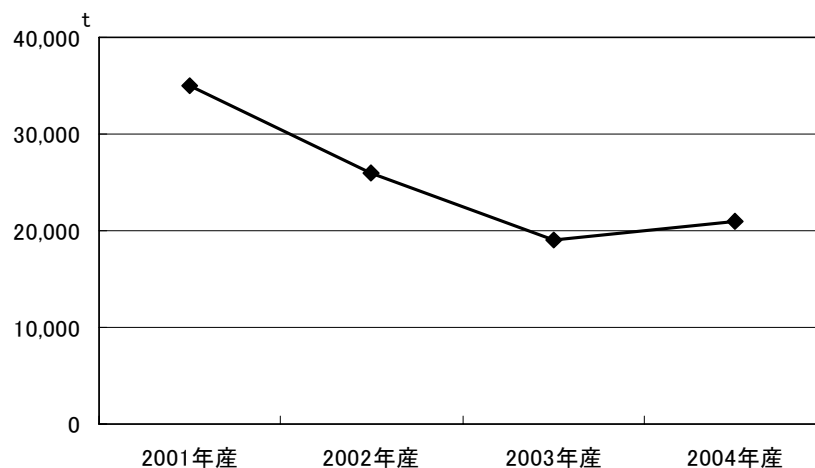
2. 規格外小麦を利用したバイオエタノール生産⁽⁴⁾

(1) 課題

本節の課題は、国内における小麦を原料としたバイオエタノール生産を事例とし、LCA 分析を用いた GHG 削減効果の評価を試みることである⁽⁵⁾。具体的には、わが国最大の小麦産地である北海道十勝地方における小麦生産により副産物として発生する規格外小麦を原料としてエタノール生産を行う想定事例を設定し、LCA 分析によりエタノール原料作物の生産からエタノールの消費までの GHG を計測して、海外からの輸入バイオエタノールとの比較を試みる。

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ある。これら規格外小麦は通常飼料用として利用されており、規格に適合した通常的小麦価格のおよそ 1/10 で取引されている。2001 年産から 2004 年産までの十勝地方における規格外小麦の発生量の推移は第1図に示すとおりとなっている。これを見ると、この期間で最も発生量の多かった 2001 年産と最も少なかった 2003 年産では 2 倍弱の差があり、規格外小麦の発生量は天候などの条件により大きく変動することが窺える。規格外小麦は収集性、運搬性、保存性に優れ、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力視されており、北海道バイオエタノール株式会社は十勝地方清水町に規格外小麦とてんさいを原料としたバイオエタノール製造プラントの建設を計画し、2009 年の操業開始を目指しているところであり⁽⁶⁾、本節の分析においても北海道バイオエタノール株式会社の清水町でのバイオエタノール製造プラント建設計画を基礎に分析モデルを構築する。

ただし、本分析のデータを収集した 2006 年から 2007 年前半の段階では、実際の計画もまだ未確定部分が多かった。そのため、本分析では環境負荷を最小化するためのモデルを構築し、これによる評価を行う。



第 1 図 十勝地方における規格外小麦の発生量

出所：十勝圏振興機構(2005)
注 2004 年産は見込み値である。

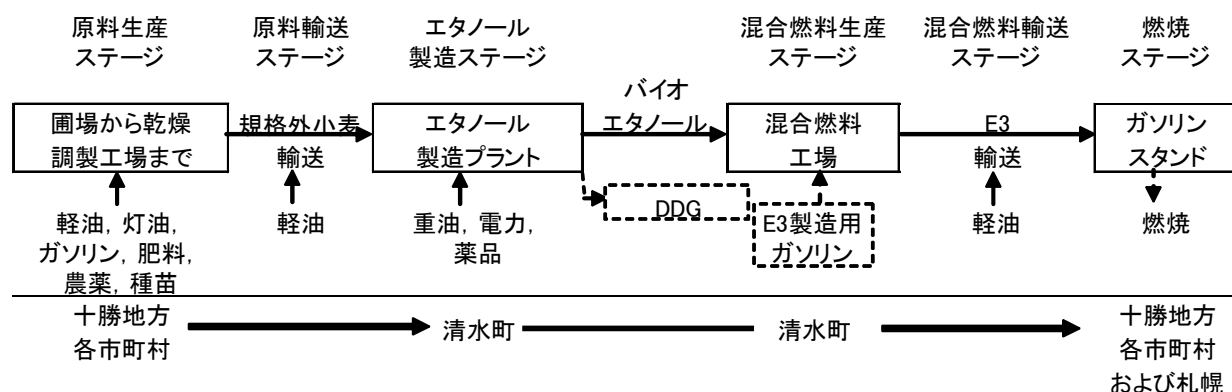
(2) データおよび分析方法

1) 分析モデル

第 2 図は原料生産から燃焼までの 6 ステージで構成される十勝地方でのバイオエタノール生産モデルのフローである⁽⁷⁾。本モデルでは十勝支庁 20 市町村⁽⁸⁾における小麦生産の結果発生した規格外小麦をすべて清水町の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 E3 (バイオエタノール 3% 混合ガソリン) に加工して、十勝支庁 20 市町村に供給し、余剰分は札幌に輸送して販売すると仮定する⁽⁹⁾。なお、本モデルは北海道バイオエタノール株式会社⁽¹⁰⁾の清水プラントにおけるバイオエタノール生産計画を基礎としているものの、実際の生産・販売計画では生産されたバイオエタノールを横浜市の精製プラントまで輸送し ETBE に変換した後、全国で販売されることになっており、E3 を十勝地方や札幌のみに供給することや清水町に燃料混合プラントを併設するといった計画はない。しかしながら、本節ではバイオエタノールの地域内供給を優先させたモデルの構築を目指しており、その場合燃料混合のためだけに十勝地方から苫小牧もしくは釧路へ輸送し E3 を再び十勝地方に輸送することはコスト面からも環境面からも効率的ではなく現実的でない⁽¹¹⁾。このようなことから、燃料の混合も十勝地方で行うことを想定し、清水プラントに燃料混合施設も併設するというシナリオ設定とした。

LCA 分析により上記モデルにおける各ステージでの 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国産バイオエタノール生産の GHG 削減率を算出する。ただし、混合燃料製造ステージにおける GHG 排出量はデータが得られないため割愛した

(12)。



第2図 十勝地方における規格外小麦原料バイオエタノール生産のモデルフロー

注: [] は環境負荷の計測から除外した項目である。

出所: 十勝圏振興機構(2005), 北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査(2006年12月)。

2) 機能単位および環境負荷の配分

本分析における機能単位は自動車で消費される燃料発熱量 1GJ-fuel に設定し、バイオエタノールの発熱量 1GJ-fuel あたりの GHG 排出量を評価する。発熱量は日本化学会(1995)の発熱原単位を用いて推定した。

また、本分析においては、投入財と環境負荷の配分についての検討が必要である。配分とは同一の生産過程から複数の生産物が生産される場合、どの生産物に資源やエネルギー、環境負荷または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))。配分基準には物量基準、経済価値基準などいくつか提唱されているが、これらの詳細は本章補論2で解説する。

第2図に示したモデルの中で配分が生じるステージは3つあり、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。ただし、ここでは適当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⁽¹³⁾。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である Distiller's Dried Grains (以下、DDG) の間の配分である。ここでは各生産物の経済的価値比による配分基準を採用し、十勝圏振興機構(2005)における経済価値額を引用しこのステージにおける GHG 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、このステージにおける GHG 量の 3.0% がバイオエタノールに帰属すると仮定した。

3) インベントリ分析

第2図のモデルに従って、第1表のとおり規格外小麦原料のバイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素を特定してその量もしくは金額を算出し（第1表）、GHG量を計測した。本分析で計測対象としたGHGは、軽油、灯油、ガソリン、重油、電力、肥料、種苗、農薬、薬品の直接・間接投入におけるCO₂排出量と肥料および麦稈（圃場還元分）の窒素投入におけるN₂O排出である。それ以外の種類および発生源のGHG、さらにはNO_xやSO₂など他の環境負荷は計算から除外している。

計測したGHG排出量は地球温暖化係数（GWP）によりCO₂換算し、環境省(2006)に基づきCO₂1に対して、N₂Oは310のCO₂等量換算でGHGを集計した。

第1表 規格外小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ	項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産 軽油	595 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	灯油	544 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	ガソリン	16 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	電力	418,181 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	肥料	365 百万円	北海道農政部(2005)
	種苗	111 百万円	北海道農政部(2005)
	農薬	129 百万円	北海道農政部(2005)
	肥料窒素	436 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送 軽油	53 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造 電力	4,388,973 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
産出	重油	1,901 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	薬品	63 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送 軽油	34 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	原料生産 規格外小麦	24,509 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
	麦稈窒素	103 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造 バイオエタノール	10,490 KL	十勝圏振興機構(2005)
	DDG	7,353 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造 E3	349,668 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

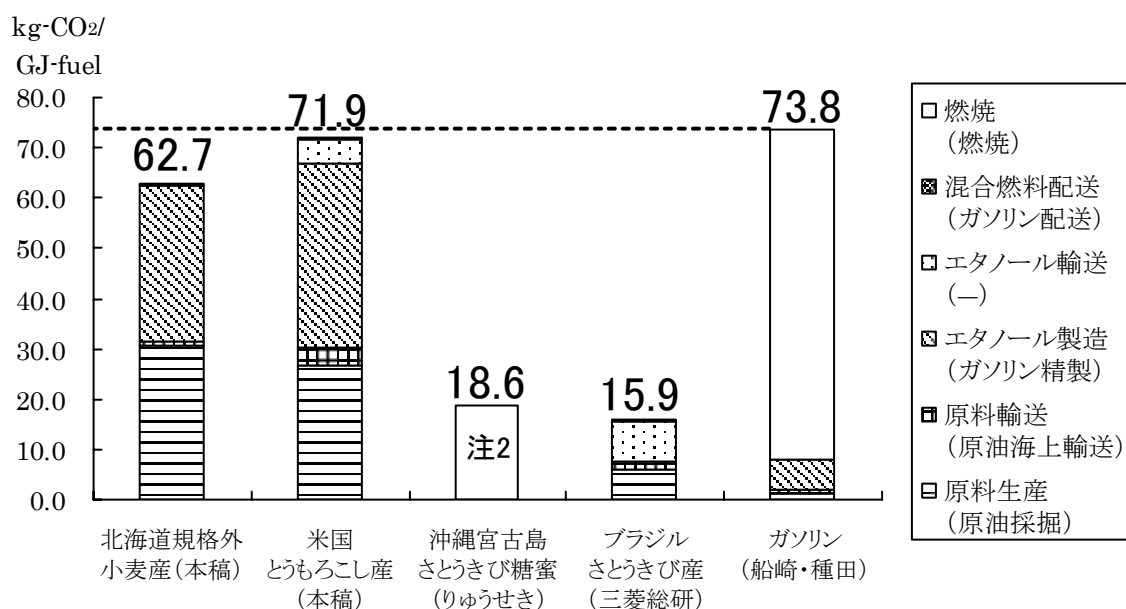
注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である。

(3) 分析結果及び考察

本節で評価した十勝地方産規格外小麦原料バイオエタノールのGHG削減効果について、ブラジル産さとうきび原料バイオエタノール、アメリカ産とうもろこし原料バイオエタノールを日本に輸入した場合と国内におけるガソリン生産との比較評価を試みる。ブラジル産バイオエタノールは三菱総合研究所（2003）が同様のLCA分析を行っており、これをそのまま引用して比較対象とした。また、アメリカからの輸入については、Pimentel and Patzek(2005)、ガソリンは船崎・種田（1999）の計測結果を引用した。このうち、Pimentel and Patzek(2005)については、アメリカ国内におけるとうもろこしの生産とそれを原料にしたバイオエタノールのLCA分析であり日本への輸出を考慮した分析ではない。したがって、ここではPimentel and Patzek(2005)の結果を引用し、日本までのバイオエタノー

ル輸送を考慮して LCA 分析の結果を修正した。分析結果の修正方法の詳細は本章末尾の補論 1 に示す。

第 3 図および第 2 表に十勝地方産バイオエタノールの LCA 計測結果を示した。これを見ると、十勝地方産バイオエタノールの GHG 排出量は $62.7\text{kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ となっている。また、投入されたエネルギーと産出されたエネルギーでみたエネルギー収支は 1.21 となり、産出されるエネルギーが投入されるエネルギーよりも多く、エネルギー生産としての役割を果たしていることが示された。この結果をガソリンと比較すると、船崎・種田(1999)の結果よりガソリンの GHG 排出量は、 $73.8\text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ 、エネルギー収支は 7.09 となっており、ガソリンに対する十勝地方産バイオエタノールの GHG 削減効果は 14.8%で、エネルギー収支についてはガソリンを大幅に下回る結果となった。



第 3 図 規格外小麦原料バイオエタノール生産の GHG 排出量の計測結果

注 1 沖縄宮古島の事例はりゅうせき内部資料、ブラジルの事例は三菱総合研究所(2003)、ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した。

2 沖縄宮古島の事例については、GHG 排出の内訳は不明である。

第2表 ステージ別GHG排出量とエネルギー収支

産地および原料	(kg-CO ₂ /GJ-fuel)							ガソリンからの削減率	エネルギー収支
	原料生産 (原油採掘)	原料輸送 (原油輸送)	燃料製造 (精製)	燃料輸送 (—)	燃料配送	燃焼 (燃焼)	合計		
十勝規格外小麦原料	30.8	0.6	30.9	—	0.5	0.0	62.9	14.8%	1.21
米国とうもろこし原料	26.8	3.4	36.6	4.8	0.3	0.0	71.9	2.5%	1.04
ブラジルさとうきび原料	5.9	1.3	0.3	8.0	0.3	0.0	15.9	78.4%	5.30
ガソリン	1.3	0.8	5.8	—	0.2	65.6	73.8	—	7.09

注1 ステージ項目の()内はガソリンのステージを表し、(—)はガソリンにはないステージである。

2 —は計算されない項目である。

3 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は、カーボンニュートラルによりゼロとカウントされる。

次に、海外で生産されたバイオエタノールを輸入した場合の GHG 排出量およびエネルギー収支をみると、まずアメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノールを日本に輸入した場合には、GHG 排出量が $71.9 \text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ 、エネルギー収支が 1.04 となり、GHG 排出量はガソリンの $73.8 \text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ とあまり変わらず、国内においてアメリカからとうもろこし原料のバイオエタノールを輸入した場合には地球温暖化防止の効果がほとんどないことが示された。また、エネルギー収支を見てもかろうじて 1 を上回る状況であることから、エネルギー生産としての機能もごくわずかであることが明らかとなった。したがって、日本においてバイオエタノールの導入により地球温暖化の防止を目指すのであれば、アメリカからの輸入バイオエタノールを使うことでは目的が達成されず、バイオエタノールの調達には国内生産もしくは実質的な GHG 削減効果のある他国もしくは他の原料のバイオエタノールの輸入が必要であることが示された。

一方、ブラジルにおけるさとうきび原料のバイオエタノールを輸入した場合をしてみる。三菱総合研究所(2003)によると、ブラジル産さとうきび原料のバイオエタノールは、GHG 排出量が $15.9 \text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ 、エネルギー収支で 5.30 と、どちらも十勝地方で規格外小麦を原料として生産するバイオエタノールよりも良い結果となっている。ガソリンと比較した GHG 削減効果は 78.4%と、十勝地方の小麦原料の場合の 14.8%を大幅に上回っている。このように、ブラジル産バイオエタノールが十勝地方産バイオエタノールに対して地球温暖化防止面で大きな優位性を持つのは、ブラジルにおけるさとうきび原料のバイオエタノール生産では原料生産ステージおよびエタノール製造ステージにおける GHG 排出が少なかったためである。第 2 表からこれらの 2 ステージにおける GHG 排出量の合計をみると、十勝地方産バイオエタノールの $61.8 \text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ に対し、ブラジル産バイオエタノールはわずか $6.2 \text{ kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ に過ぎず十勝の小麦原料の場合のおよそ 1/10 となっている。

このように両者の間で GHG 排出量に大きな差が出た要因としては、以下の 2 点が考えられる。第 1 に原料生産ステージにおいて十勝地方産バイオエタノールの原料である規格外小麦は、ブラジル産バイオエタノールの原料であるさとうきびよりもエネルギー集約的な生産が行われている点である。日本国内における規格外小麦は本来的に主産物である高品質の小麦を生産することを目的とした結果として副産物として生産されるものであるため、規格外小麦の生産にも高品質小麦と同程度に化学肥料や農薬、農業機械が投入されている。そのため、規格外小麦生産においても通常の高品質小麦と同程度の GHG が排出されることとなる。このようなことから、規格外小麦の原料利用は資源の有効活用として注目されているものの、LCA 分析においては環境負荷すなわち GHG の排出量を削減するには不利な条件となってしまうのである。

第 2 にブラジルにおけるバイオエタノール生産ではエタノール製造ステージにおいてさとうきびバガス（搾りかす）によるカーボンニュートラルなバイオマスエネルギーが利用

可能であるのに対し、十勝地方におけるバイオエタノール生産では製造時におけるすべての投入エネルギーを電力・重油などの外部からのエネルギー供給に依存せざるを得ない点である。この点については原料作物の性質によって製造時の投入エネルギーが大きく変わるという問題に起因しており、十勝地方におけるバイオエタノール生産が小麦を原料とする限り GHG 排出量の比較においてさとうきびを原料とするバイオエタノールにかなわないのはやむを得ないことである。この点に関しては、仮に原料がてんさいやとうもろこしの場合でも同様の問題が発生し、バイオエタノールの生産の地球温暖化防止効果ではさとうきび原料が圧倒的な比較優位を持つと言えよう。

しかしながら、以上の分析結果をもってわが国が消費されるバイオエタノールはすべてさとうきびを原料としたブラジルからの輸入で賄われるべきと結論づけるものではない。なぜならば、バイオ燃料の導入には GHG 削減効果のほかにも国内生産によって地域経済の活性化などの点において輸入バイオエタノールに比べて優位な点が存在するからである。また、国内生産においても GHG の削減が達成可能であるにもかかわらず、輸入に依存するのであれば、輸出国にバイオエタノール生産にかかる GHG 排出を負担させることになり、地球温暖化対策が世界的に取り組まれるべき重要課題という点からも望ましくないからである⁽¹⁴⁾。また、エネルギー自給の観点からはバイオ燃料を輸入に頼るのであれば、化石燃料からバイオ燃料に変換したところでエネルギー自給の確保には何ら効果はない⁽¹⁵⁾。このように、バイオ燃料の導入に関してはこれらの効果を総合的に踏まえた上で輸入か国産かの議論をする必要がある。

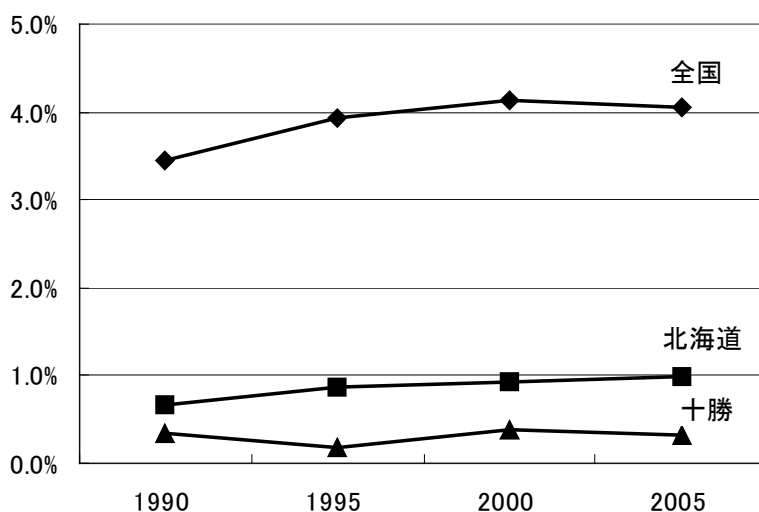
一方で、今後日本において国産バイオエタノールの導入を推進していくならば、将来的に輸入バイオエタノールに対する GHG 削減効果を向上させてゆく必要がある。本分析の結果から、十勝地方産規格外小麦原料のバイオエタノール生産では、原料生産ステージとエタノール製造ステージにおける GHG 排出量の削減が強く求められることが示唆された。原料生産ステージにおいては、有機農業など肥料や農薬投入量の削減に資する栽培技術や簡易耕起栽培または不耕起栽培のような農業機械投入の削減に資する栽培技術、そして農業機械への BDF の投入といった取組が GHG 排出量削減に有効と推察される。一方、エタノール製造ステージにおいては、地球温暖化対策面で効果のある家畜ふん尿を利用したバイオガスプラントをエタノール製造プラントに併設するといった手段が考えられ、併設されたバイオガスプラントから電力や熱エネルギーの供給を受けることでエタノール製造プラントの外部エネルギーへの依存を軽減することができると推察される⁽¹⁶⁾。次節以降、これら GHG 排出量を削減するのに有効と思われるいくつかの手法を用いた場合に、どのくらい GHG 排出量が削減できるかを検証する。

3. 原料作物生産段階における温室効果ガス削減手法の検討

(1) 耕作放棄地への原料小麦作付け

本節の課題は、国内の耕作放棄地に栽培した小麦を原料としたバイオエタノール生産を取り上げ、LCA 分析により GHG 削減効果の評価を試みることである。ここでも、前節の規格外小麦の事例と同様に北海道十勝地方を対象地域に取り上げ、耕作放棄地において生産される小麦を原料として、エタノール生産を行う想定事例を設定し LCA 分析を行う。

十勝地方は広大な平地を有することから、日本随一の穀倉地帯となっており、畑作を中心とした大陸的な大規模農業が行われている。このため、大規模農業の恩恵を十分に受け、衰退が危惧される日本農業の中でも、農業が大きな競争力を有する国内では数少ない地域と言える。このようなことから、十勝地方では耕作放棄される農地が他地域と比べても非常に少なく、十勝地方における耕作放棄地率は全国平均から比べてもきわめて低くなっている（第4図）。その意味においてはバイオエタノール原料用小麦の栽培には適していないとも言えよう。北海道バイオエタノール株式会社の計画においても、現在のところ耕作放棄地への原料小麦の作付けは検討されていない。



第4図 各地域における耕作放棄地の割合

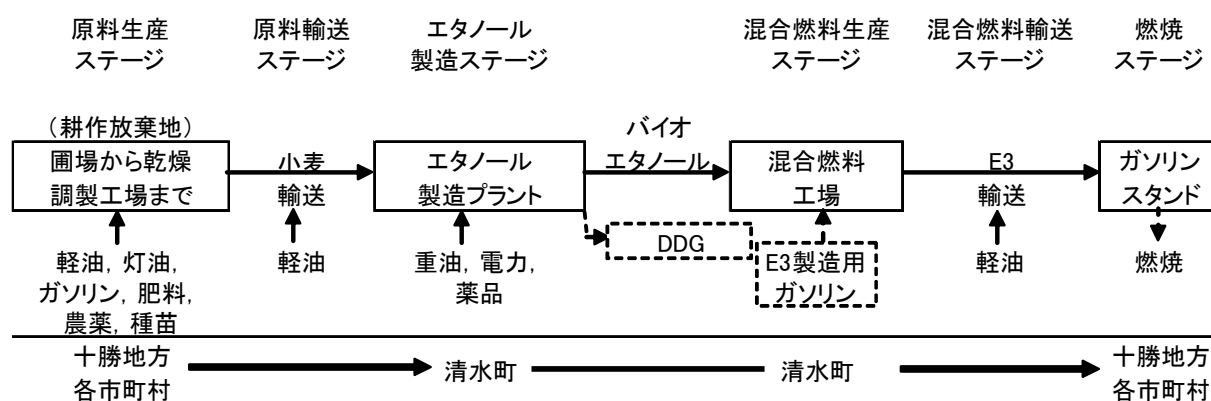
出所：『世界農林業センサス』各年版。

注 割合は総農家における経営総面積に占める耕作放棄地面積の割合である。

当然ながらバイオエタノール原料用小麦の価格は食用小麦や他の農産物よりも低く抑えられることが予想されるため、農業者は現在農産物の作付けを行っている農地をあえて原料用小麦栽培に転換するインセンティブを持つことは想定しにくい⁽¹⁷⁾。また、環境面から考えても規格外小麦のような副産物を原料として利用するのではなく、はじめから栽培

した作物を原料とする場合には、LCA で見たバイオエタノール生産にかかる環境負荷も大きくなる。

それでもなお、なぜ本分析で耕作放棄地への原料作物作付けに着目しているのかというと、十勝地方でバイオエタノールを年間 1.5 万 KL 生産するには、規格外小麦だけでは不十分であるためである。前述のとおり、北海道バイオエタノール株式会社の事業計画では規格外小麦のほかにてんさいもバイオエタノールの原料として検討している。しかしながら、複数の原料に依存することは生産工程の複雑化、設備投資の増大、品質の確保など様々な問題が生じるため⁽¹⁸⁾、原料は 1 種類にすることが効率的と言える。そのためには、規格外小麦以外にいかに原料小麦を確保するかを検討しなければならない。その 1 つの方策として、耕作放棄地への小麦栽培が考えられるのである⁽¹⁹⁾。



第5図 十勝耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産のモデルフロー

出所：十勝圏振興機構(2005)、北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査(2006年12月)。

注：[] は環境負荷の計測から除外した項目である。

(2) 分析モデル

耕作放棄地作付けモデルのフローは第5図に示されるが、このモデルフローは基本的に第2図と同様で、十勝支庁 20 市町村の耕作放棄地で栽培した小麦をすべて清水町のバイオエタノールプラントに搬送してバイオエタノールを製造し、E3 に加工して十勝地方 20 市町村において販売するものである。前節の規格外小麦のモデルフロートの違いは、小麦の作付けが耕作放棄地で行われる点と販売地が十勝地方のみに限定され、札幌への販売がない点のみである。札幌における販売を導入しない理由は、耕作放棄地への作付けで収穫される小麦の量が規格外小麦の発生量よりも少なく、そこから生産される E3 の量は十勝地方ですべて消費することができる量であるためである。すなわち、本モデルでは十勝地方で原料生産から消費までのすべてが行われるいわゆるバイオエタノールの「地産地消モデル」となっている。

ところで、前節の規格外小麦モデルではバイオエタノールの生産量が多いため、ガソリ

ンとの混合施設を清水町のバイオエタノールプラントに併設するというシナリオ設定としていた。耕作放棄地モデルでも、規格外小麦モデルとの比較可能性を確保すること、本分析ではバイオエタノールを地域内で自給自足させたモデルの構築を目指していることの2つの理由から、前節と同じく清水町内に燃料混合プラントを建設するというシナリオを採用した。

もう1つ、前節の規格外小麦モデルとの違いは、耕作放棄地における慣行栽培のほか、耕作放棄地で簡易耕起栽培を行った場合と、ふん尿スラリーを投入し化学肥料を削減した場合の2つのケースについても GHG 削減効果を計測する点にある。原料小麦の作付けには極力資材・労働力投入を削減し、コストと環境負荷を抑制することが求められる。また、十勝地方は畑作地帯であるとともに酪農経営も盛んで、小麦の栽培が行われる地域周辺でのふん尿スラリーの確保は比較的容易である。このようなことから、簡易耕起栽培による農業機械使用の削減および化学肥料の削減を目的としたふん尿スラリーの投入はそれほど非現実的なシナリオではない。よって、本分析では耕作放棄地での原料小麦作付けをベースとして、慣行栽培ケースと簡易耕起栽培のケース、ふん尿スラリー投入ケースの3つのシナリオを設定し GHG 削減効果を計測する。これら3つのシナリオに従って、第3表、第4表および第5表のとおり耕作放棄地栽培小麦原料のバイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素を特定してその量もしくは金額を算出し GHG 量を計測した。なお、機能単位およびエネルギー、環境負荷の配分方法、計測対象の GHG などは、規格外小麦モデルと同様の取扱いとする。

第3表 耕作放棄地栽培(慣行栽培)小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ	項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産 軽油	152 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	肥料	93 百万円	北海道農政部(2005)
	種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
	農薬	33 百万円	北海道農政部(2005)
	肥料窒素	111 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送 軽油	18 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造 電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
産出	重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送 軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	原料生産 小麦	6,140 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
	麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造 バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
	DDGS	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造 E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である。

まず、第3表の慣行栽培シナリオについて前提条件を整理すると、耕作放棄地への作付

けで生産される小麦の量は 6,140t にとどまり、規格外小麦の場合のおよそ 1/4 に留まる。これは、前述のとおり十勝地方では耕作放棄地の面積が少なく、小麦の作付面積が確保できないためである。耕作放棄地への作付けした小麦から生産されるバイオエタノールの量は 2,628KL にとどまり、E3 量にすると 87,601KL となる。

次に、簡易耕起栽培シナリオの前提条件であるが（第 4 表）、以下の 3 点について慣行栽培との違いを検討した。第 1 に播種前のプラウによる耕起を省略し、碎土整地作業をロータリーハローでの 1 回に削減し、さらに麦桿のすき込みもプラウからチゼルプラウに変更するという前提とした。これにより、原料生産段階における軽油消費量を慣行栽培に比べて 18%削減できる。第 2 に簡易耕起栽培では慣行栽培時よりも雑草管理が重要であり、継続的な簡易耕起栽培のためには収穫後の除草剤散布が不可欠となる。そのため、簡易耕起栽培シナリオでは収穫後非選択性除草剤の散布を追加的に 1 回行うこととした。この結果、簡易耕起栽培では慣行栽培に比べ農薬使用費が 37.5%増加した。第 3 に収量の変化である。小川他（1998）や古賀（2004）では簡易耕起栽培を行った場合の収量は慣行栽培に比べても変わらないとの結果を導いており、本分析でも簡易耕起栽培時の収量は慣行栽培と変わらないとして分析を行った。

第4表 耕作放棄地栽培(簡易耕起)小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ	項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産 軽油	124 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	肥料	93 百万円	北海道農政部(2005)
	種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
	農薬	45 百万円	北海道農政部(2005)
	肥料窒素	111 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送 軽油	18 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造 電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
産出	重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送 軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	原料生産 規格外小麦	6,140 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
	麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造 バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
	DDG	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造 E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である。

一方、ふん尿スラリー投入シナリオの前提条件については、以下の 3 点で慣行栽培シナリオとの相違点を検討した（第 5 表）。第 1 にふん尿スラリー投入に伴う燃料消費の増加である。これは、ふん尿スラリーを散布する追加的作業による機械運転に伴い軽油の消費量が増大するためである⁽²⁰⁾。既存のデータから推計した結果、慣行栽培に比した軽油消費量の増加率は 6.8%となった。第 2 にふん尿スラリーの投入に伴う化学肥料の削減である。こ

ここでは化学窒素肥料を代替する形でふん尿スラリーが投入されたため、耕作放棄地に投入される窒素量の合計は慣行栽培シナリオと変わらない。また、カリウム肥料についてもふん尿スラリーの成分に含まれるカリウムが化学肥料の一部を代替すると仮定しているが、リン肥料については、ふん尿スラリー成分にリンが含まれていないため、化学肥料を慣行栽培と同じ量投入すると仮定する。計算ではふん尿スラリー投入により窒素肥料の投入が窒素換算で23%削減される結果となった。第3に、ふん尿スラリー投入による小麦単収の増加についてである。北海道立十勝農業試験場（1999）における圃場実験により、小麦栽培にふん尿スラリーを投入することで単収は平均8.3%増加することが示されている。しかしながら、ふん尿スラリー投入と単収の関係は統計的に有意ではないため、本分析においては収獲不変と仮定して計算する。

第5表 耕作放棄地栽培(スラリー投入)小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ	項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産 軽油	162 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
	肥料	56 百万円	北海道農政部(2005)
	種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
	農薬	33 百万円	北海道農政部(2005)
	肥料窒素	123 tN	北海道農政部(2004)
	うち化学肥料	97 tN	北海道農政部(2004), 北海道立十勝農業試験場(1999)
	うちスラリー	26 tN	北海道立農業畜産試験場(2004)
	スラリー炭素	1,193 tC	農林水産省北海道統計・情報事務所(2007)
	原料輸送 軽油	19 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
産出	BE製造 電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送 軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	原料生産 規格外小麦	6,647 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
	麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造 バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
	DDG	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造 E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である。

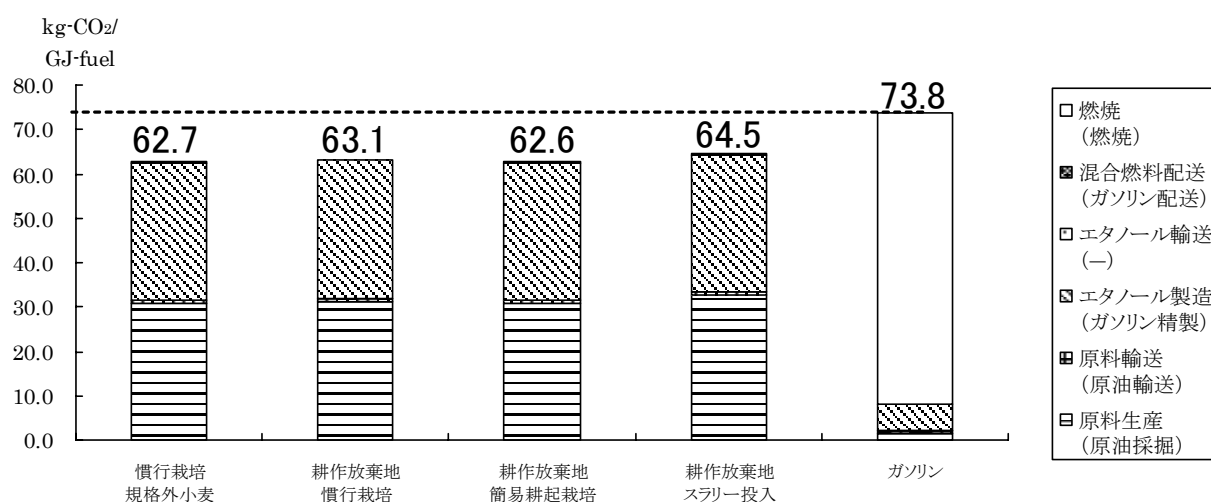
(3) 分析結果及び考察

計測結果については第6図および第6表に掲げた。耕作放棄地で慣行栽培された小麦を原料とするバイオエタノールの生産に伴うGHG排出量は、63.1kg-CO₂/GJ-fuelとなり、規格外小麦の場合から若干増加する結果となった。また、エネルギー収支は1.21と規格外小麦の場合と同じで、エネルギー生産としての役割を果たしていることが示された。この結果からは、耕作放棄地における栽培においても規格外小麦とほぼ同等のGHG削減効果が得られることが示された。

この要因としては耕作放棄地における原料小麦生産において慣行栽培を想定しているた

め、投入されるエネルギー量，投入資材量が通常の農地に作付けする場合と同じと仮定しているためである。また，GHG 排出量が規格外小麦の場合よりも増加している要因は，耕作放棄地は単収の低い地域で多く，単収の高い地域で少ないため，必然的に投入資材あたりの収穫量は規格外小麦の場合よりも少なくなってしまうためである。

次に耕作放棄地における原料小麦栽培に簡易耕起を導入した場合の結果を見る（第 6 図，第 6 表）。これを見ると，簡易耕起栽培の場合の GHG 排出量は $62.6\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{-eq} / \text{GJ}\cdot\text{fuel}$ で，慣行栽培の場合から若干低下するものの大きな GHG 削減となっておらず，規格外小麦の場合とほぼ同じ水準になることがわかる。GHG 削減量が耕作放棄地への慣行栽培から大きく低下していないのは，簡易耕起の際に必要な追加的除草剤散布に伴う GHG 排出増加が影響し，簡易耕起栽培による燃料消費量削減による GHG 排出削減を相殺しているためと考えられる。このようなことから，簡易耕起栽培による農業機械使用に由来する GHG の削減と追加的散布による有効な GHG 削減手段とはなりにくいことが示された。



第 6 図 耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産の GHG 排出量の計測結果

注 ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した。

第6表 耕作放棄地栽培小麦のステージ別GHG排出量とエネルギー収支

産地および原料	(kg-CO ₂ /GJ-fuel)						ガソリンからの削減率	エネルギー収支
	原料生産 (原油採掘)	原料輸送 (原油輸送)	燃料製造 (精製)	混合燃料配送 (ガソリン配送)	燃焼 (燃焼)	合計		
規格外小麦	30.8	0.6	30.9	0.4	0.0	62.7	15.0%	1.21
耕作放棄地慣行栽培	31.3	0.8	30.9	0.1	0.0	63.1	14.4%	1.21
耕作放棄地簡易耕起栽培	30.8	0.8	30.9	0.1	0.0	62.6	15.2%	1.22
耕作放棄地スラリー投入	32.7	0.7	30.9	0.1	0.0	64.5	12.5%	1.27
ガソリン	1.3	0.8	5.8	0.2	65.6	73.8	-	7.09

注1 ステージ項目の()内はガソリンのステージを表す。

2 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は，カーボンニュートラルによりゼロとカウントしている。

ただし、上記の結果は高品質小麦を生産することを目的とした小麦栽培に簡易耕起栽培を導入した既存捕縄実験データを基礎データとして使用しており、高品質よりもむしろ高バイオマス量が求められるバイオエタノールの原料用小麦に適用することが妥当かどうかの議論が残されている。バイオエタノールの原料小麦生産は高品質の小麦の生産を目的とするものではないため粗放的な栽培が求められる。しかしながら、本分析ではそのような粗放的な栽培を意図したシナリオにはしていないため、通常の農地における栽培と同程度の GHG が発生するという結果となったと思われる。したがって、これら結果は耕作放棄地での原料小麦生産におけるかなり過大評価としていえると考えられる。耕作放棄地における原料小麦栽培においては今後どのように投入エネルギーおよび投入資材を削減してゆくかがさらなる GHG 削減効果の向上の鍵となる。この点についてはこの後第 5 節で議論する。

一方、耕作放棄地における小麦栽培にふん尿スラリーを投入した場合の GHG 削減効果を見ると、GHG 排出量は $64.5\text{kg-CO}_2\text{-eq/GJ-fuel}$ となり、GHG 削減率もガソリンの場合と比べて 12.5%にとどまることが示された。この結果は規格外小麦のケースから比べても GHG 排出量が逆に 2.2%増加し、ふん尿スラリーを投入することでは GHG 削減効果を向上できないことを示すものである。一方、エネルギー収支については 1.27 に達し、規格外小麦のケースからも向上する結果となった。以上の結果から、耕作放棄地における原料小麦は、エネルギー収支の向上には貢献するものの、ふん尿スラリーを直接農地に投入して栽培することでは GHG 削減効果を得ることができず、むしろ GHG 削減効果を減退させてしまうことが明らかとなった。

このような結果がもたらされた背景には、ふん尿スラリーに含まれる窒素成分のうち、化学肥料の代替要素として有効に利用されるものは一部にとどまり、残りの窒素成分は土壌中の窒素分を増加させ、結果として原料小麦生産における N_2O 排出量が増加したことがある。また、エネルギー収支が向上したのは、ふん尿スラリーの投入によって投入される化学肥料も減少し、化学肥料の製造に伴うエネルギー投入が削減されたためと考えられる。ふん尿スラリーは酪農経営の副産物として発生するものであるため、その適正な利用は酪農経営にとってもメリットがある。特に十勝地方のような畑酪混合農業地帯では農地へのふん尿スラリー還元がもっとも効率的な資源循環方法の 1 つと考えられる。しかしながら、今回の分析結果からは農地にふん尿スラリーを直接的に投入すれば、GHG 削減効果はむしろ減退してしまうことが示された。このことは、GHG 削減効果を目指してスラリーを利用する場合には、農地への投入以外の適切な方法を検討する必要があることを示唆するものである。

4. 燃料製造段階における温室効果ガス削減手法の検討

(1) 分析の目的

前節において、バイオエタノール生産に際し原料小麦の栽培にふん尿スラリーを直接投入することでは GHG 削減効果が得られないことを明らかにした。しかしながら、前述のとおり畑酪混合農業地帯である十勝地方において家畜ふん尿はもっとも有効なバイオマス資源であり、これを有効に活用することが地域内の資源循環を促進する鍵になると言っても過言ではない。

そこで本節では、ふん尿スラリーを農地投入以外にどのように利用すれば、GHG 削減効果を向上させることができるかを検討する。具体的には、バイオガスプラント（以下、BGP）にふん尿スラリーを投入し電力と熱を発生させ、これらをバイオ燃料製造に投入することで GHG 削減効果がどのくらい向上するかを分析する。

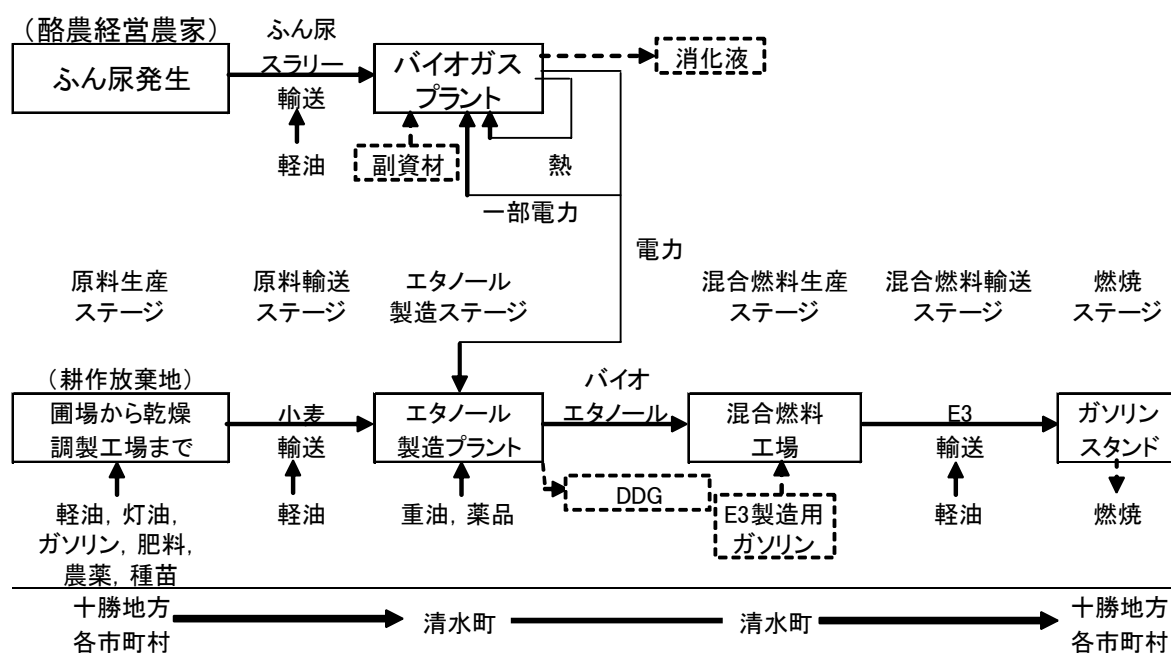
(2) 分析シナリオ

まず、分析シナリオについては、前節と同様、耕作放棄地においてバイオエタノール原料用の小麦を慣行栽培し、バイオエタノール製造段階において、バイオエタノールプラントに併設された BGP に周辺酪農経営農家で発生するふん尿スラリーを搬入して電力を発生させ、これをバイオエタノールプラントに供給するという設定とする。LCA 分析のシステム境界は、第 7 図のように設定される。酪農経営農家については、ふん尿発生をシステム境界とし、家畜飼養に関わる環境負荷は除外している。また、BGP でエネルギー発生後に生じる消化液は BGP へふん尿スラリーを供給している農家の圃場に還元し、小麦を作付けする耕作放棄地には還元しないこととする。その理由として、BGP から十勝地方に分散する耕作放棄地への輸送では消化液の輸送距離が長くなり現実的ではないこと、ふん尿スラリー供給農家は BGP 事業者にふん尿スラリーを提供する代わりに消化液を引き取るので、BGP 事業者は消化液を販売している訳ではないという 2 点からである。最後に、北海道土木開発研究所（2005）によると、BGP にはふん尿スラリーのほか、副資材として有機質資源を投入することで発電・発熱効率が向上する。そのため、本分析においても副資材を投入することを前提とした。ただし、副資材はあくまで BGP 事業者が処理代金を得て処理するものであるため、副資材の輸送・搬入にかかる環境負荷は計算から除外する。

次に細かな設定について解説する。BGP の主要諸元については、北海道土木開発研究所（2005）における設定を参考に、乳牛および肉牛 1000 頭規模⁽²¹⁾、ふん尿の受け入れ形状はスラリー 10 割、バイオガス発生量をふん尿 1m³あたり 30m³とした。副資材としては、廃用牛乳、廃脱脂粉乳、廃用バターなどである。十勝地方には乳製品メーカーの工場も点在しており、これらはいずれも十勝地方でも一定量発生する有機性廃棄物と考えられる。このようなふん尿および副資材の投入によって、BGP からバイオエタノールプラントへ供

給される電力量は年間 63 万 2,851kWh で、BGP からの電力供給により、耕作放棄地に作付けした小麦を原料とするバイオエタノール生産に必要な電力量の約 51%を賄うことができる。一方、発生した熱については全て BGP での発酵槽保温などに用いられ、バイオエタノールプラントへの供給はないものとする。

BGP 導入による新たな化石燃料消費項目としては、酪農経営農家から BGP までのふん尿の輸送にかかる軽油消費および BGP 内での搬入機械稼働で必要となる軽油消費があり、BGP 導入による追加的軽油消費量は年間 17.7KL と算出された。第 7 図に示したシステム境界設定ではこの軽油消費量の増加分以外に追加的なエネルギー及び資材の投入はないこととなる。



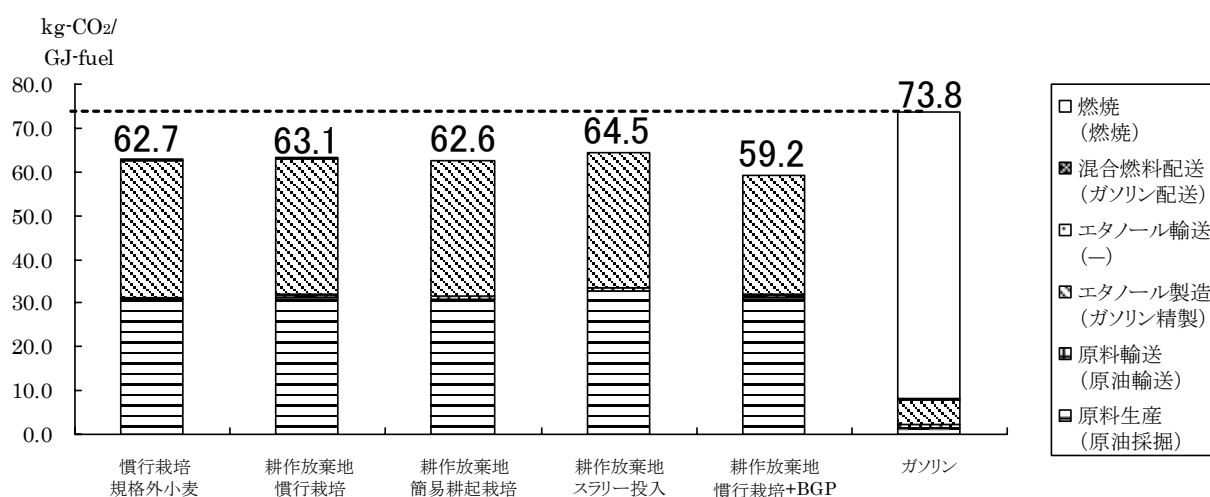
第7図 BGPエネルギー供給バイオエタノール生産のモデルフロー

出所：十勝圏振興機構(2005)、北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査(2006年12月)、北海道土木開発研究所(2005)。

注：[] は環境負荷の計測から除外した項目である。

(3) 分析結果

分析結果は第 8 図および第 7 表に示した。これを見ると、耕作放棄地で生産される小麦を原料とし、さらに BGP からバイオエタノールプラントへ電力供給を行うことで、GHG 排出量は $59.2\text{kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ となり、電力供給がない場合に比べ GHG 削減率が 5.4 ポイント向上した。エネルギー収支についても 1.27 に向上している。このようなことから、ふん尿スラリーを利用した BGP からの電力供給はバイオエタノール生産における GHG 削減効果の向上に貢献することが示された。



第8図 耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産のGHG排出量の計測結果

注 ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した。

第7表 バイオガスパラント導入時のGHG排出量とエネルギー収支

産地および原料	(kg-CO ₂ /GJ-fuel)						ガソリンからの削減率	エネルギー収支
	原料生産 (原油採掘)	原料輸送 (原油輸送)	燃料製造 (精製)	E3配送 (ガソリン配送)	燃焼 (燃焼)	合計		
耕作放棄地慣行栽培	31.3	0.8	30.9	0.1	0.0	63.1	14.4%	1.21
耕作放棄地慣行栽培+BGP	31.3	0.8	27.0	0.1	0.0	59.2	19.8%	1.27
ガソリン	1.3	0.8	5.8	0.2	65.6	73.8	-	7.09

注1 ステージ項目の()内はガソリンのステージを表す。

2 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は、カーボンニュートラルによりゼロとカウントしている。

このような結果は、これまで廃棄物として処理されていたふん尿スラリーが GHG 削減のための有効な資源であることを示すものである。特に分析対象の十勝地方では畑酪混合農業が営まれ、ふん尿スラリーが十分確保できるという特性を持ち、さらには大規模な酪農経営が行われているため、家畜ふん尿による周辺環境汚染の問題も過去に生じたことがある。GHG 削減とふん尿による環境汚染問題を同時に解決する方法としても、BGP へのふん尿スラリー投入は有効な手段と言える。さらに、BGP から副産物として発生する消化液は、農地に還元することで作物の収量を増加させることができ、農家にとっても魅力的な有機肥料である⁽²²⁾。このように、BGP によるエネルギー供給は廃棄物としての家畜ふん尿処理、クリーンエネルギーの供給による地球温暖化防止、副産物投入による作物単収増加という「一石三鳥」の効果が得られるのである。

さらに、前節までの分析結果を踏まえると、ふん尿スラリーは農地へ直接投入するよりも BGP へ投入し、BGP で発生した消化液を農地へ投入するという資源循環システムを構築

することで、環境負荷の削減と農産物収量の増加を両立させることができることが示された。また、このような資源循環システムの中にバイオエタノール生産を組み込むことで、バイオエタノールの生産・消費を含めた高度な資源循環システムと地球温暖化防止策を構築することができる。

5. 分析の限界と課題

(1) シナリオ設定の限界

以上、本章ではバイオエタノールを対象として、GHG 削減効果を LCA 分析により評価してきた。しかしながら、先に紹介した LCA 分析結果にも限界と課題が残されている。LCA 分析の手法としての限界についてはすでに第 1 章で論じているので、本節では本章のバイオエタノール生産における LCA 分析の限界と課題について主に本分析に特有の限界および課題を整理する。

まず、本分析で採用したシナリオ設定は、十勝地方において最も GHG 排出量を少なくするシステムを想定して分析を行い、GHG 削減効果の最大値を計測することを分析の目的としたものである。したがって、今後展開される十勝地方におけるバイオエタノール生産とは異なる点がある。これまでに明らかになった実際の計画との相違点としては、現実の計画では十勝地方で生産されたエタノールは横浜市へ海上輸送し、そこで ETBE へ転換された後に全国各地で販売される点になっている点を挙げることができる。本分析では、E3 として販売される点や十勝地方や北海道内のみに販売地域が限定されるという点で実際の動きと異なる。このような相違は、本分析では十勝地方においてバイオエタノールを生産する場合に GHG 削減効果を最大限に高めるような生産・流通・販売方式を採用した場合にはどれだけの GHG 削減効果になるかを把握することを目的としており、実際の計画をフォローした分析を想定していないことが大きい。また、分析に関するデータを収集した 2006 年末から 2007 年前半の時点では、まだ十勝地方におけるバイオエタノール生産の計画の全容が明らかにされておらず、想定や仮定を置いたもとで分析を進めざるを得なかったことももう 1 つの要因として挙げることができる。

ただし、このような現実との乖離は決して本分析の結果を否定するものではない。前述のとおり、本分析は十勝地方でバイオエタノール生産を行い、GHG 排出量を最小化した場合にはどのようなシステムが考えられるのか、またその際の GHG 排出量はガソリンと比べどの程度削減されるのかを計測するものである。当然ながら、実際のバイオエタノールの生産には GHG 排出量の最小化だけではなく、経済性など諸々の要因を考慮した上で生産計画・販売計画が策定される。このようなことから、GHG 排出量の最小化のみを考慮した本分析のシナリオと実際の計画が異なることは半ば当然とも言える。

以上のように、本章における LCA 分析は十勝地方でバイオエタノール生産が行われた

場合の GHG 削減効果の仮想的な最大値を示すものであり、実際に十勝地方でバイオエタノール生産が行われた場合の GHG 排出量を計測するものではないことに留意されたい。

（２）施設建設等に関わる環境負荷量

本章の分析ではバイオエタノール製造プラントやバイオガスプラントなど施設の建設に伴う環境負荷は計測していない。また、耕作放棄地において原料小麦の栽培を行う際も耕作放棄地を農地として再生するために必要な農業機械稼働などから発生する環境負荷は考慮していない。分析はあくまで「フロー部分」の環境負荷を捉えるもので、施設や農地といった「ストック部分」からの環境負荷は計測の対象とはしていない点に限界がある。もちろん、これらの環境負荷も計測に取り入れることは可能だが、本章の分析の目的はバイオエタノールを生産する工程から発生する GHG を計測することであるため、ストック部分にかかる環境負荷は計測対象から除外している。もちろん、比較対象となるブラジルやアメリカ、ガソリンなど本分析と比較した事例においてもストック部分にかかる GHG は除かれている。

（３）原料作物栽培技術

原料作物のバイオマス量が多ければ多いほどバイオ燃料の収量も多くなることから、バイオ燃料の大量生産にはより多くの原料の供給が必要となるが、これに加え、原料作物は低コストで供給する必要がある。このことは、これまで日本においては主に「高品質、高付加価値」を目指して農業生産が行われてきたことと正反対の動きで、原料作物の生産には日本の農業の前提を根本から覆すような大きな転換が求められる。このように、バイオ燃料の原料作物生産はこれまで農業者が取り組んでこなかった「手間と費用をかけず、低品質でも高バイオマス」な農産物生産を新たに行うことにもなる。

このことは、本章で紹介したバイオエタノールの LCA 分析とも深く関連する。すなわち、LCA 分析に用いた基礎データは「手間と費用をかけず、低品質でも高バイオマス」といったことを目的とした農業生産方式から得られたものではなく、「高品質、高付加価値」を目指した農業生産方式のデータである。両者の目的が大きく異なることから、用いたデータが果たしてバイオエタノールの原料生産に本当に妥当なデータなのかは現段階では明らかではない。

具体的に例を挙げると、本章の分析では例えば耕作放棄地において原料小麦を栽培するシナリオの分析においても「高品質、高付加価値」を目指した通常的小麦栽培のデータを適用して計算している。バイオエタノールの原料作物としての小麦には、高品質な小麦より高バイオマス量の小麦が求められる上、究極の粗放栽培でコストを抑制することが求められる。結果として、本章における分析で得られた GHG 排出量の計測結果は過大評価になっているかもしれない。しかしながら、本分析を行った段階では日本におけるバイオエ

タノール生産がまだ本格的に始まっていない段階であり、バイオエタノール用の原料作物栽培によって排出される GHG 量もこれまでの既存研究のデータを用いざるを得ない状況である。本章における分析結果を解釈する際には、この点も限界点として踏まえる必要がある。

6. おわりに

本章では北海道十勝地方の規格外小麦を原料とするバイオエタノール生産を事例に、バイオエタノール生産に伴う GHG 削減効果を、LCA 分析を用いて定量的に評価することを目的としてきた。十勝地方における規格外小麦を原料とするバイオエタノール生産では、ガソリンに比べ GHG を削減できることが示された。一方で、一連のバイオエタノール生産のライフサイクルにおいて発生する GHG は、原料作物生産段階と燃料製造段階でほとんどを占めることも明らかになり、今後わが国において国産バイオエタノール導入を推進していくならば、原料作物生産時およびバイオエタノール製造時における GHG 排出抑制が GHG 削減効果の向上に大きな影響をもたらすことが明らかとなった。

このような結果から、耕作放棄地への作付けをベースとして、各種環境負荷削減技術を導入した場合、十勝地方におけるバイオエタノール生産システムでどれだけ GHG が削減できるかを検証した。その結果、耕作放棄地に簡易耕起栽培をした場合には規格外小麦と同様の水準の GHG 排出量となり、ふん尿スラリーを投入した栽培では GHG 排出量は規格外小麦の場合よりも増加してしまうことが明らかとなった。一方で、バイオエタノールプラントに BGP を併設し、ふん尿スラリーを投入したエネルギー供給を行った場合、GHG 削減効果の向上に貢献することが示された。この結果はふん尿を資源として有効利用した資源循環システムを構築する際にも、ふん尿の活用方法を誤ると GHG 削減効果が得られない可能性を示唆するものである。したがって、ふん尿の有効利用と地球温暖化防止を両立するようなシステム構築が求められ、その一例としてふん尿スラリーを農地へ直接投入せず BGP へ投入し、BGP で発生した消化液を農地へ投入するという資源循環システムを構築することが示された。

ただし、本章における分析は費用や採算性といったバイオエタノール生産の経営的側面や地域に与える経済効果などの経済的側面を考慮したものではなく、あくまで GHG 排出を最小化する生産システムを見いだすことを主眼に置いたものである。また、GHG 以外の各種環境負荷についても本章の分析では取り上げていない。これらの点は本分析の限界点として挙げられるが、次章ではバイオエタノール生産が地域経済に与える影響を分析し、本章で取り扱わなかった部分のうち地域経済効果の定量化を試みる。

補論 1 アメリカとうもろこし原料バイオエタノール LCA 結果の修正

(1) はじめに

ここでは、国内小麦原料バイオエタノールとアメリカとうもろこし原料バイオエタノールの輸入におけるエネルギー収支および GHG 排出量の比較を行うため、アメリカとうもろこし原料のバイオエタノールの LCA 分析を行った Pimentel and Patzek(2005)の分析結果の修正方法を解説する。

Pimentel and Patzek(2005)では、アメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノール生産について、原料作物（とうもろこし）生産およびそれを原料とするバイオエタノール生産の LCA 分析が行われている。この論文では原料となるとうもろこしの生産およびバイオエタノールの生産にかかるエネルギー投入量からバイオ燃料生産のエネルギー収支が計算されており、その結果バイオエタノールの生産に投入されるエネルギーは産出エネルギーより 29%も多く、エネルギー収支はマイナスであるとの結論を導いている。とうもろこし原料のほか、スイッチグラス、木質を原料とするバイオエタノール、大豆とひまわりを原料とする BDF についてもエネルギー収支が計算されており、いずれもエネルギー収支がマイナスという結果となっている。

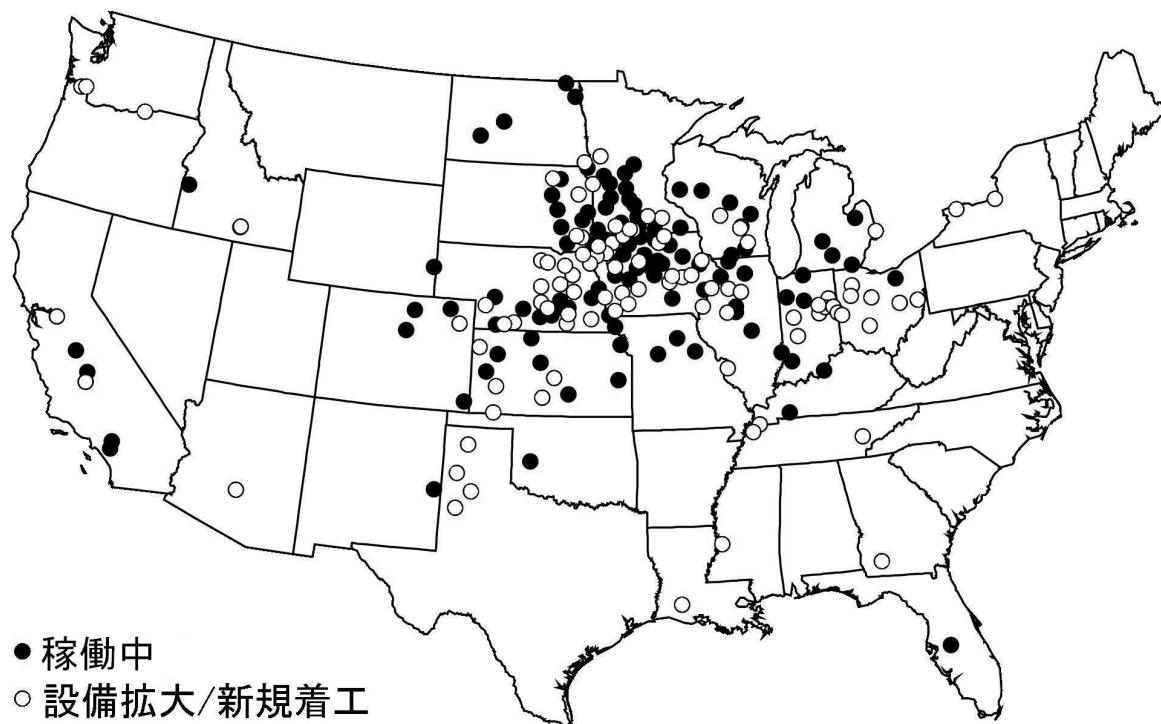
本章の分析結果と Pimentel and Patzek(2005)の分析結果では前提とする条件が異なるため、単純に両者を比較することはできない。そこで、Pimentel and Patzek(2005)における生産条件によりアメリカでとうもろこしを原料に生産されたバイオ燃料 1000KL を日本へ輸入する場合のエネルギー収支およびバイオ燃料熱量単位あたり GHG 排出量を計算し、本章の分析結果と比較することとする。

具体的には、Pimentel and Patzek(2005)の結果を本章での分析結果と比較できるよう、大きく以下の 3 点の修正を行った。第 1 に Pimentel and Patzek(2005)では日本までの輸送にかかるエネルギーが考慮されていないためこれを計算に含めること、第 2 にエネルギー収支だけでなく GHG 排出量を計算すること、第 3 に Pimentel and Patzek(2005)のシステム境界を本稿の分析に合わせ Pimentel and Patzek(2005)に含まれるいくつかの項目を分析から除くことである。

(2) 日本までの輸送の考慮

Pimentel and Patzek(2005)では特に米国内のどの地域でバイオ燃料の生産が行われるかは特定されていないが、第 9 図に示すとおり、バイオエタノールの生産プラントは原料となるとうもろこしの生産が盛んなアメリカ中西部コーンベルト地帯に集中しており、本分析においてもアメリカ中部のコーンベルト地帯で生産が行われると仮定するのが妥当と判断される。アメリカ中部から日本までの輸送については、まずは内陸部から西海岸まで鉄道で輸送し⁽²³⁾、そこから船舶で日本まで輸送すると想定する。具体的には、アメリカ中

部から西海岸のサンフランシスコまで鉄道輸送とし，さらにサンフランシスコから京浜港（横浜市）まで海上輸送すると仮定した。アメリカ中部からサンフランシスコまでの鉄道距離を 3000km とし，サンフランシスコから横浜までの距離は海上保安庁（2003）より野島埼沖経由で 4536 海里すなわち 8401km と設定した。



第 9 図 米国におけるバイオエタノールプラント

出所：RFA 作成資料。

アメリカ国内の鉄道輸送に関しては，国土交通省（2007）の鉄道輸送エネルギー原単位を用いてエネルギー投入量を求めた。国土交通省（2007）の鉄道輸送エネルギー原単位は日本国内のデータであり，日本より鉄道電化率の低いアメリカに適用するとエネルギー投入量の過小評価になる可能性がある。しかし，アメリカにおける鉄道輸送のエネルギー原単位の適当なデータが見つからなかったためやむを得ずこの数値を適用した。また，海上輸送に関しては，同じく本章での分析結果の比較対象としたブラジルさとうきび原料のバイオエタノールの LCA 分析を行った三菱総合研究所（2003）と同じ原単位を用いた。さらに，海上輸送後の国内でのバイオエタノール配送についても，三菱総合研究所（2003）と同一の設定すなわち日本国内におけるバイオエタノール輸送を内航およびタンクローリーとし，輸送距離を 209km としてエネルギー投入量を計算した。

（３）システム境界の変更

Pimentel and Patzek(2005)では、バイオ燃料生産に伴うエネルギー投入に施設建設や輸送機械の調達に伴うエネルギー投入もカウントしている。本章における分析では、これら施設建設や輸送機械の調達に伴うエネルギー投入はシステム境界外となっており、Pimentel and Patzek(2005)におけるこれらのエネルギー投入は除外した上で本章の分析と比較することが必要である。

そこで、Pimentel and Patzek(2005)においてエネルギー投入として計算されている項目のうち、原料生産ステージにおける労働力、農業機械、灌漑設備については比較対象から除外した。また、バイオエタノール生産ステージにおいても、水、ステンレス、鉄鋼、セメントが投入材として挙げられているが、これらについても評価の対象から除外した。

（４）GHG 排出量の算出

Pimentel and Patzek(2005)では、エネルギー収支を計算しており GHG 排出量は計算されていない。しかしながら、本章の分析の中心は GHG 削減効果の計測であり、比較対象となるアメリカのバイオ燃料生産の事例においても、GHG 排出量を算出して比較可能とすることが求められる。そこで、Pimentel and Patzek(2005)のエネルギー投入量から GHG 排出量を算出した。

まず、原料生産ステージにおける GHG 排出量の推計について、Pimentel and Patzek(2005)には投入財および投入エネルギーの項目ととうもろこし作付面積 1ha あたりの投入量が物量単位で示されている。また、アメリカにおける 1000KL のバイオエタノールの生産には、310ha のとうもろこし作付けが必要と計算される。そこで、肥料などの投入財については、ha あたり投入量に必要作付面積を乗じて物量単位の投入量を算出した。

$$(\text{ha あたり投入物量}) \times (\text{とうもろこし作付面積}) = (\text{投入財物量単位投入量})$$

一方、軽油、重油、ガソリンといった化石燃料については、1ha あたりの投入量が物量単位と熱量単位の双方で記載されている。しかしながら、物量単位と熱量単位では投入量の計算が一致しないことが判明した。例えば軽油について見ると、1ha に投入されるエネルギー量（熱量単位）は 100 万 3,000kcal とある。軽油は 1L あたり 9,146kcal の発熱量を持つので、物量単位に換算すると、1ha あたり 109L となる。一方、Pimentel and Patzek(2005)には、とうもろこし作付面積 1ha あたりの軽油投入量は 88L とあるので、20%以上もの誤差が生じるのである。Pimentel and Patzek(2005)では、どのような投入エネルギーの算出方法が採用されているかが確認できないため、誤差の原因をフォローすることができない。そこでここでは化石燃料の発熱量が各国共通であることを鑑み、発熱量から化石燃料の物量投入量を計算することとした。

$$(\text{ha あたり投入エネルギー量}) \times (\text{とうもろこし作付面積}) = (\text{全投入エネルギー量})$$

$$(\text{全投入エネルギー量}) \div (\text{化石燃料発熱量原単位}) = (\text{化石燃料物量単位投入量})$$

このほか、バイオエタノール生産ステージについて、Pimentel and Patzek(2005)では蒸気と電力が投入エネルギーとして計上されている。このうち蒸気については、重油ボイラーを用いて発生させるものと仮定し、エネルギー量を重油換算で計上した。電力については、

$$(\text{ha あたり電力・重油エネルギー量}) \times (\text{とうもろこし作付面積}) = (\text{全電力・重油投入エネルギー量})$$

$$(\text{全電力・重油投入エネルギー量}) \div (\text{電力・重油熱量原単位}) = (\text{電力・重油物量単位投入量})$$

という計算方法を用いて物量単位の投入量を求めた。

(5) 副産物との環境負荷の配分

とうもろこしを原料としてバイオエタノールを生産する場合、生産方式はドライミル方式とウェットミル方式の2通りがあり、それぞれの場合に副産物が発生する。ドライミル方式の場合は副産物として DDGS (Distiller's Dried Grains with Solubles) が、ウェットミル方式の場合は、コーンスターチ、コーンシロップという食品にも利用できる副産物のほか、コーン・グルテンフィード、コーン・グルテンミールといった副産物が発生する。DDGS およびコーン・グルテンフィード、コーン・グルテンミールは栄養価が高く家畜飼料に適しており、バイオエタノール生産が盛んな米国中部コーンベルト地帯の周辺の畜産農家では家畜飼料としてこれら副産物を使用している。アメリカにおけるバイオエタノール生産の急速な拡大は、DDGS の供給も急速に拡大させる一方で、原料となるととうもろこしの需要を逼迫させることから、DDGS の飼料需要は今後も拡大すると考えられる。

Pimentel and Patzek(2005)では、バイオエタノール製造にはドライミル方式を前提として計算がなされており、DDGS が副産物として発生することになる。LCA 分析のルールでは、ある生産物の製造過程で有価の副産物が発生する場合、環境負荷は副産物にも配分される。したがって、DDGS が副産物としての経済的な価値を有するのであれば、環境負荷の配分が必要になる⁽²⁴⁾。環境負荷の配分の基準には、物量重量、経済価値、含有エネルギー量、投入エネルギー量などいくつかあり、そのうちのどれを採用するかによって LCA 分析の結果も大きく異なってくる(補論2参照)。

Pimentel and Patzek(2005)では、DDGS の供給は今後急速に拡大し供給過剰状態に陥ること、大量に発生した DDGS はコーンベルト地帯だけでは需要が足りず、長距離の輸送が必要となり、コスト的に採算が取れなくなることなどから、DDGS を廃棄物とみなし環

環境負荷の配分を行っていない。しかしながら、現時点では現実として DDGS がコーンベルト周辺の畜産農家に有償で引き取られているのも事実であり、このことから DDGS が無価値の廃棄物であるとは言い難い。そこで、ここでは DDGS を有価の副産物とみなして環境負荷の配分を行うことにした。配分基準には経済価値基準を採用し、バイオエタノールと DDGS の比率を 87 : 13 に設定した⁽²⁵⁾。経済価値基準を採用した理由は、エネルギー含有量などの基準はデータの取得に難があり、また、物量基準では副産物に主産物よりも多くの環境負荷が配分される可能性があり、このような場合にはバイオエタノールの適切な評価と言えないと考えたためである。

以上の前提条件に基づきアメリカとうもろこし原料のバイオエタノールを輸入した場合の GHG 排出量を計測した。計測結果は第 2 節で示したとおりである。

補論 2 エネルギーおよび環境負荷の配分方法

(1) はじめに

これまで、LCA 分析においてバイオエタノールの GHG 削減効果を定量的に評価してきたが、副産物とバイオエタノールとのエネルギーおよび環境負荷の配分方法にはいくつかの方法があり、これまでに(1)物量基準、(2)含有エネルギー基準、(3)投入エネルギー基準、(4)経済価値基準、(5)置き換え法などの各種配分方法が提示されている。これらの配分方法のうちどれを採用するかによって、LCA 分析の結果は大きく左右される。これを具体的に示す事例として Shapouri et al. (1995)の研究成果を紹介しよう。Shapouri et al. (1995)では、各種配分方法の適用によって、どのくらい配分割合およびエネルギー収支が異なるかを計測している(第 8 表)。これによると、エタノールへの配分割合が最も高いのが置き換え法でその割合はバイオエタノール : 副産物 = 81:19 で、逆に最もエタノールへの配分割合が低いのは物量基準の 48:52 となっている。また、Gruson (2008)は、バイオ燃料と副産物の間の GHG 配分について、いくつかの方法を用いてその結果の違いを分析しており、採用する配分方法いかんでバイオ燃料の GHG 排出量(燃料熱量単位あたり : t-CO₂/GJ-fuel)に 2 倍以上の開きがあることを指摘している。これらのことから、どのような配分方法を適用するかによって、LCA 分析の結果が大きく異なってくることが示唆される。また、Kim and Dale(2002)では、配分基準が他のどの要因よりも最も大きく結果に影響すると主張している。このように配分方法の決定は、LCA 分析の過程においても重要な部分であることがわかる。

ここでは LCA 分析におけるエネルギーおよび環境負荷の配分方法について簡単に解説する。

（２）物量基準による配分

物量基準による配分とは単に生産物の質量によって環境負荷を配分する方法であり，配分基準としては最も単純で明示的な方法と言える。しかしながら，生産物に含まれる水分量によって，質量そのものが変化する場合もあり，また，単に質量の比較であれば主産物と副産物の関係とは無関係であるため，仮に主産物よりも副産物のほうが大きな質量であれば環境負荷は副産物に多く配分されてしまうという欠点が生じる。

第8表 配分基準による配分割合とエネルギー収支の違い

		エネルギー配分割合		エネルギー収支
		バイオエタノール	副産物	
エネルギー含有量基準	ウェットミル	57%	43%	1.68
	ドライミル	61%	39%	1.71
	加重平均	58%	42%	1.69
市場価値基準	ウェットミル	70%	30%	1.38
	ドライミル	76%	27%	1.39
	加重平均	72%	28%	1.38
置き換え法	ウェットミル	81%	19%	1.21
	ドライミル	82%	18%	1.30
	加重平均	81%	19%	1.24
生産物物量基準	ウェットミル	48%	52%	1.96
	ドライミル	49%	51%	2.09
	加重平均	48%	52%	2.02

出所：Shapouri et al.(1995)。

注1 値はバイオエタノール1ガロンあたりで計算されたものである。

2 とうもろこし原料のバイオエタノール生産にはドライミル方式とウェットミル方式の2つの製造方法があり，それぞれの製造方法で発生する副産物も異なる。

（３）経済価値基準による配分

経済価値基準による配分とは，生産物の市場価値（価格）を基準に環境負荷を配分する方法である。物量基準とともに明示的な方法であるとともに，通常は主産物のほうが価格が高くなることから，主産物と副産物の位置づけが環境負荷の配分に反映されるという利点がある。しかしながら，経済価値については生産物そのものの影響のみならず，市場における需要・供給の状況，競合生産物との関係など，目的の生産物とは直接的に関係のない要因によって大きく影響を受けること，本章の事例における麦稈のように市場が確立していない生産物の場合にはこの配分基準が適用できないこと，さらに市場価格は常に変動することから，配分基準が不安定になるという欠点がある。このうち，3つ目の欠点については，問題の解決のために長期間にわたる平均市場価格を配分基準に採用することも一部の研究事例において行われている。

（４）含有エネルギー量による配分

生産された生産物に含まれるエネルギー量を比較し，それに応じてエネルギーおよび環

環境負荷を配分する方法である。この方法はそれぞれの生産物が持つエネルギー量で明確に配分基準が決定されるため、恣意性の少ない配分方法である。しかしながら、エネルギー量は食物の栄養価を評価するための指標であることから、この配分方法は食料や飼料など人間や動物が食する生産物に適用することが望ましく、燃料やその他の生産物に対して適用するのはふさわしくないという指摘がある（Shapouri et al.(1995) p.11）。

（５）投入エネルギー量による配分

生産された生産物に投入されたエネルギー量を基準として環境負荷を配分する方法である。この基準による配分は投入されたエネルギー量を複数の生産物の間で明確に区分できる場合にのみ適用できる。したがって、両者のエネルギー量が明確に区分できない場合には配分基準として適用することができないという問題点が存在する。

（６）置き換え法

置き換え法とは生産物の片方を代替する財の環境負荷によって計算する方法である。例えば、ある生産過程から生産物 A と生産物 B の 2 つが生産されるとし、全環境負荷は生産物 A の生産による環境負荷と生産物 B の生産による環境負荷に分割可能と仮定する。すなわち、

$$E = E_a + E_b$$

（ E ：全環境負荷， E_a ：生産物 A の生産に伴う環境負荷， E_b ：生産物 B の生産に伴う環境負荷）

となる。ここでは E_a 、 E_b も個別に計測することはできないものの、全環境負荷 E はすでに計測されているとする。その際、生産物 B については、その代替物として生産物 C が存在し、その生産に伴う環境負荷 E_c は個別に計測可能とする。このとき、 E_b は代替物の環境負荷 E_c から産出できるとみなすのが置き換え法である。すなわち、 $E_b = f(E_c)$ から $E = E_a + f(E_c)$ と計算されて、 $E_a = E - f(E_c)$ から E_a および $E_b (= f(E_c))$ の環境負荷量を計測するのである。

この方法は、厳密な意味では環境負荷を配分する方法ではなく、環境負荷の恣意的な配分を回避する方法として提案されたもので、生産システムを拡張することからシステム拡張法とも呼ばれる。LCA 分析の規格を定めた ISO14040 番台においても、置き換え法によって配分をなるべく回避するようにすべきことが明記されている。

このような置き換え法は前述のとおり、恣意的基準による配分を回避できるという利点があるものの、置き換え法の実施にはこれまでより多くの生産システムにおいて環境負荷を計測する必要がある点が欠点である。上記の例では、生産物 A と生産物 B が生産され

るシステムにおける環境負荷を計測するために、全く別の生産物 C の生産システムにおける環境負荷を計測しなければならない。また、 E_c が個別に計測可能であればよいが、仮に生産物 C が生産物 D と結合生産物であるとした場合には、さらに生産物 C を代替する生産物の環境負荷計測が必要となってくる。このように、配分を回避することが目的でもそのシステムは非常に複雑になるという点が問題点として挙げられる。また、この手法はバイオエタノールとガソリンなど他の燃料との環境負荷を比較するには適用可能だが、バイオエタノール生産における導入技術の違いによる環境負荷発生量の差を評価するためには、適用することはできないという問題点も生じる。

このような置き換え法をバイオ燃料の LCA に適用した事例は, Shapouri et al. (1995), Wang (2000), Kim and Dale(2002)がある。Kim and Dale(2002)では、米国産とうもろこし原料バイオエタノールの LCA 分析に置き換え法を適用し、環境負荷を規定する要因のうちどの配分基準を採用するかが他のどの要因よりも最も大きく結果に影響することを明らかにしている。一方で、Kim and Dale(2002)では他の基準による配分を完全に回避するための置き換え法適用のために、バイオエタノール自体を含め 5 つもの生産システムを導入して計算しており、やはり生産システムの複雑さ、計算の煩雑さは免れない。

〔注〕

- (1) 農林水産省（2007）によると、2011 年までに 5 万 KL の国産バイオ燃料の生産を目指している。さらには、2030 年までに国内におけるバイオ燃料の生産量を 600 万 KL まで拡大する目標を掲げている。
- (2) 農林水産省（2007）によると、ブラジルのさとうきび原料バイオエタノールを輸入した場合の国内価格は関税を含め 146 円/L、日本のさとうきび糖蜜原料バイオエタノールは 144 円/L、規格外小麦原料バイオエタノールは 152 円/L である。これらの価格には関税（ブラジル産の場合のみ）、ガソリン税が含まれているが、小売マージンおよび流通経費は含まれておらず小売段階での価格はさらに高くなる。また、小泉（2007）によると、2003 年におけるブラジルのバイオエタノール輸出量は 76.7 万 KL で、バイオエタノールの世界最大の輸出国となっている。

なお、農林水産省の 2009 年の推計では、ブラジルのさとうきび原料バイオエタノールを輸入した場合の国内価格は関税込み、小売マージン抜きで 122 円/L と試算されている。

- (3) バイオ燃料の効果に疑問を投げかける論文は Peters(2007)のほか、Lieberman(2002), Giampietro et al(1997)など多数見られる。また、2007 年 6 月 19 日に開催された当所セミナー「OECD 将来を見通すための OECD における政策分析－農業見通しとバイオ燃料への適用－」において、講師のルーク・ブーネカンブ OECD 貿易・農業局農業・食料貿易・市場課長は、OECD の公式見解として、バイオ燃料の環境への効果は疑問であると発言し、その後発表された OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016 (OECD, FAO(2007)) に

においても、バイオ燃料需要の高まりが農産物市場に抜本的な変化をもたらし、多くの農産物の価格が世界的に上昇する可能性があることを警告している。さらには、政府のバイオマス・ニッポン総合戦略推進会議においても、「バイオ燃料の生産過程において、必要となる化石燃料や排出する CO₂ 量は極力少なくすることが重要である」との見解が示されている（バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007））。

- (4) 本節の一部は、増田清敬「国産バイオエタノールのライフサイクル評価—北海道産規格外小麦を事例として—」（平成 19 年度日本農業経営学会研究大会報告論文）を、著者の承諾を得たうえで林が分析シナリオを一部修正し、本文を加筆・修正したものである。本稿における誤りはすべて林の責任である。
- (5) LCA は、製品のライフサイクルを通じた環境影響を評価する手法であり（石谷・赤井（1999））、本章の課題を解明するにあたり、最も適した手法と考えられる。近年、例えば、Pimentel and Patzek(2005)、Shapouri et al. (2002)、Kim and Dale(2006)など、バイオ燃料について LCA 分析による評価を行った研究が数多く発表されているが、十勝地方産規格外小麦原料のバイオエタノールを対象に LCA 分析を用いて評価した研究は、筆者らが行った Masuda（2008）や Masuda et al.（2008）がある以外、筆者の知る限り存在しない。
- (6) ホクレンの計画では、清水町におけるエタノール生産には規格外小麦のほか、てんさいも使われる予定である。
- (7) 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。
- (8) 現在は忠類村が幕別町に編入合併され 19 市町村となっているが、分析は合併前の 20 市町村分のデータを用いて行っている。
- (9) 本稿の基礎とした増田（2007）では、清水町のプラントで製造したバイオエタノールを苫小牧および釧路に輸送して E3 を製造するシナリオとしており、E3 の製造場所が本分析とは異なる。
- (10) 北海道バイオエタノール株式会社は、北海道農業協同組合中央会が中心となり 2007 年 6 月に設立された会社である。
- (11) りゅうせきへのヒアリング調査によると、宮古島におけるバイオエタノール生産では、E3 生産の際、ガソリンとバイオエタノールのタンクから混合比を調節するバルブを介してブレンダーへ送油しドラム缶へ充填する方式で行われており、特に大規模な施設は設置されていない。
- (12) 比較対象となるブラジルさとうきび産のバイオエタノール生産事例（三菱総合研究所（2003））においても燃料混合ステージの GHG 発生は計算されていない。
- (13) 仮に重量比による配分基準を採用した場合、規格外小麦生産量よりも麦稈生産量の方が

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。また、十勝地方においては、麦稈は厩肥と交換される等、経済的取引が行われないことも多いという実態を鑑みると、経済的価値比による配分基準も適当ではないと考えられる。

- (14) このような土地利用形態の変化による GHG 排出量の増大は、発展途上国におけるバイオ燃料生産の場合特に大きな問題となる。この点を指摘する研究には、Fehrenbach (2008) や Hill (2008) などがあり、これら研究についての詳細は第 1 章第 3 節を参照されたい。
- (15) 中東に大きく依存するエネルギー供給を分散させるという意味では、ブラジルからのバイオエタノールの輸入にも意義があるが、これはエネルギー自給の問題ではなく、エネルギー保障の問題である。
- (16) 増田他 (2006) は家畜ふん尿を利用するバイオガスプラント導入がエネルギー消費量の削減、地球温暖化の防止に貢献することを明らかにしている。また、規格外小麦に関連するバイオマスエネルギーとしては、麦稈や発酵副産物の利用も考えられる。しかし、麦稈は GHG 削減には有効であるがバイオエタノール生産費が高くなることが指摘されており (LowCVP(2004))、発酵副産物は通常飼料用として販売されることでバイオエタノール生産費の低減に寄与している (十勝圏振興機構 (2005))。それゆえ、これらをバイオマスエネルギーとして利用するためには克服すべき課題がまだいくつか残されている。
- (17) このことを逆に捉えると、食料との競合を起ささないとも言える。
- (18) 筆者が 2006 年 12 月に行った北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査によると、小麦とてんさいの双方を原料にすることによるデメリットとして、原料の切り替えの際に原料タンクの洗浄が必要とのことである。
- (19) 耕作放棄地への作付けに関しては、採算性、労働力の確保などの問題も存在するが、ここではあくまで環境面に限定した分析を行い、採算性、労働力問題などの検討は行わない。
- (20) ここでは、化学肥料投入量が削減されることによる機械の燃料消費量削減は生じないものと仮定している。これは、化学肥料とふん尿スラリーの散布時期にずれがあり、化学肥料が削減されても化学肥料散布のための農業機械の稼働回数は削減できないことと、農地面積が変わらなければ化学肥料の散布量が削減されても機械を稼働させる時間や走行距離も変わらないためである。
- (21) 2005 年の農林業センサスによると、清水町の乳牛・肉牛飼養頭数は 30,548 頭である。スラリー 10 割でふん尿を処理している酪農家の割合を考慮しても、1,000 頭規模のバイオガスプラントにふん尿スラリーを搬入する場合、清水町内のみで十分調達することができると考えられる。
- (22) 筆者が 2007 年 8 月に行った北海道別海町のバイオガスプラントでのヒアリング調査によると、発生した消化液はふん尿を搬入した酪農家へ還元しているが、牧草の収量増加効果が認められ、ふん尿を搬入していない農家からも消化液提供の要望が多いとのことである。ただし、消化液の発生量が限られていることから、別海町のバイオガスプラントでは

ふん尿搬入農家以外への消化液提供は行っていない。

- (23) USDA(2002)によると、アメリカ国内では燃料用エタノールの 48%が鉄道輸送、38%がトラック（ローリー）輸送、14%がバージ輸送である。
- (24) ただし LCA 分析では無価値の副産物は廃棄物とみなされ、環境負荷の配分は行わないこととなっている。
- (25) 経済価値は『AMS レポート』に掲載された 2007 年 7 月の DDGS 価格をバイオエタノール 1 ガロンの値に換算した。

〔引用文献〕

バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007）『国産バイオ燃料の大幅な生産拡大』。

Fehrenbach, H.,(2008) “GHG Accounting Methodology and Default Data According to the Biomass Sustainability Ordinance (BSO)” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

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。

Giampietro M., Ulgiati S., and Pimentel D. (1997): “Feasibility of large-scale biofuel production” *Bio Science* 47(9), pp587-600.

Gruson, J. F., (2008) ”GHG methodologies for biofuels :French developments” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

Hill, J.,(2008) “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

北海道電力（2006）『ほくでんサステナビリティレポート 2006』。

北海道開発土木研究所（2005）『積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書』。

北海道農政部（2004）『北海道農業入門 新規就農者向けテキスト〔畑作編〕』。

北海道農政部（2005）『北海道農業生産技術体系（第 3 版）』。

北海道立農業畜産試験場（2004）『家畜ふん尿処理・利用の手引き』。

北海道立十勝農業試験場（1999）「畑作物に対する牛糞尿スラリーの施用効果と利用法」『平成 10 年度北海道農業試験会議成績会議』。

石谷久・赤井誠監修（1999）『ISO 14040/JIS Q 14040 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。

環境省（2002）『平成 14 年度温室効果ガス排出量算定方法検討会農業分科会報告書』。

環境省（2006）『日本国温室効果ガスインベントリ報告書』。

唐澤哲也・郷達也「米国における家畜飼料の利用状況とエタノール副産物の活用について」『月

- 報 畜産の情報（海外編）』213（2007年7月号），pp.52-65。
- Kim S., and Dale B. E., (2002) "Allocation Procedure in Ethanol Production System from Corn Grain" *International Journal of Life Cycle Assessment* 7(4), pp.237-243.
- Kim S., and Dale B. E., (2006) "Ethanol Fuels: E10 or E85 –Life Cycle Perspectives" *International Journal of Life Cycle Assessment* 11(2), pp.117-212.
- 小泉達治（2007）『バイオエタノールと世界の食料需給』筑波書房。
- 古賀伸久（2004）「十勝地方の大規模畑作に対する LCA の適用」『北農』71（1），pp.8-16。
- 国土交通省（2007）『交通関係エネルギー要覧』平成19年度版。
- Lieberman B. (2002) "The ethanol mistake: one bad mandate replaced by another"
<http://www.nationalreview.com/comment/comment-lieberman031202.shtml>
- LowCVP (2004) "Well-to-wheel evaluation for production of ethanol from wheat" The LowCVP Fuels Working Group.
- 増田清敬（2007）「国産バイオエタノールのライフサイクル評価—北海道産規格外小麦を事例として—」，平成19年度日本農業経営学会研究大会報告論文。
- Masuda, K. (2008) "Does bio-fuel production in Japan have environmental advantages?: evaluating bio-ethanol production from substandard wheat in Hokkaido" 『農業経営研究』46(1), pp.138-143.
- Masuda, K., Hayashi, T., and Yamamoto, M., (2008) "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Newly Introduced Processes in a Wheat-based Bio-ethanol Production System," 『2008年度日本農業経済学会論文集』，pp.300-306。
- 増田清敬，和田臨，山本康貴，出村克彦（2006）「LCAを用いた地域資源循環システムの環境影響評価」『2005年度日本農業経済学会論文集』，pp.397-404。
- 松本成夫，三輪睿太郎，袴田共之（1990）「農村地域における有機物フローシステムの現存量とフロー量の推定法」『システム農学』，6（2），pp.11-23。
- 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』。
- ナビタイムジャパン（online）「NAVITIME」，<http://www.navitime.co.jp/>
- 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して—』。
- 日本化学会（1995）『化学便覧応用化学編第5版』。
- 農林水産技術情報協会（1996）『平成7年度新経営体育成エネルギー利用体系化調査：主要作目の作業体系におけるエネルギー消費原単位』。
- 農林水産技術情報協会（1997）『平成8年度新経営体育成エネルギー利用体系化調査：主要作目の作業体系におけるエネルギー消費原単位』。
- 農林水産省（2007）「国産バイオ燃料の大幅生産拡大」ホームページ，

http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_energy/kokusanbio.html

農林水産省（2007）『食料・農業・農村政策審議会企画部会地球環境小委員会第一回会合資料』。

農林水産省北海道統計・情報事務所（2006）『北海道農林水産統計年報（農業統計市町村別編）平成16～17年』。

農林水産省北海道統計・情報事務所（2007）『北海道農林水産統計年報（農業統計市町村別編）平成17～18年』。

OECD, FAO(2007) "OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016"

小川 和夫, 竹内 豊, 片山 雅弘 (1998)「湿性火山性土における簡易耕の導入が土壌の諸性質と作物の生育に及ぼす影響」『北海道農業試験場研究報告』150, pp.57-90。

尾和尚人 (1996)「わが国の農作物の養分収支」『環境保全型農業研究連絡会ニュース』, 33, pp.428-445。

Peters, G (2007) "Promoting Biofuels: Implications for Developing Countries" Presentation for 7th International Conference of the European Society for Ecological Economics in Leipzig, Germany on 5-8 June 2007.

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 Graboski, M. S., (1995) "Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol" *USDA Office of Energy Agricultural Economic Report No.721*.

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』。

U.S. Department of Agriculture (2002) "USDA's 1998 ethanol cost-of-production survey", *Agricultural Economic Report, 808*.

Von Blottnitz, H., and Curran, M. A. (2007) "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* 15(7), pp.607-619.

Wang, M. (2000) "GREET1.5 -Transportation Fuel-Cycle Model", *Argonne National Laboratory Technical Report*,

<http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html>

第3章 産業連関分析による地域への影響の評価

林 岳

山本 充（小樽商科大学）

増田清敬（滋賀県立大学）

1. はじめに

前章では LCA 分析を用いて十勝地方におけるバイオエタノール生産を事例に GHG 削減効果を計測し、原料生産および燃料製造段階においてどのようなシステムを導入することで GHG 排出量を抑制できるかを検証してきた。

第1章で解説したとおり、バイオ燃料の導入の効果は GHG といった環境負荷の削減のみならず地域経済への影響、農業振興などの側面も有し、バイオ燃料の導入には環境負荷の削減と地域経済への影響の両方についてともに高い効果を発揮することが望まれる。そのため、バイオ燃料の評価では環境負荷削減効果だけではなく地域経済への影響も定量的に把握する必要がある。また、地域経済への影響がもたらされた場合、一部の部門で生産活動が活発化するため生産活動に伴う GHG 排出量も増加することが予想される。このことから、バイオ燃料部門における生産量の増加は経済波及効果を通じた各部門の生産量増加に伴う GHG 排出増加を通じて、地域全体の GHG 排出量を増大させる結果をもたらすことも考えられる。よってバイオ燃料の導入を図る上では地域全体の GHG 排出量がどう変化するかも定量的に把握する必要がある。

そこで本章では、十勝地方におけるバイオエタノール生産を事例として、既存の産業連関表にバイオ燃料部門を追加した新たな産業連関表を構築し、これをもとにバイオ燃料の需要増に伴う地域経済、雇用への影響のほか、地域内の GHG 排出総量の変化を定量的に計測することを目的とする。まず十勝地方を対象範囲として、既存の産業連関表にバイオ燃料部門を追加する修正方法を解説する。ついでバイオエタノール需要の増加が地域経済、雇用、地域内 GHG 排出量に与える影響を定量的に計測し、ガソリン需要増が与える影響と比較分析した結果を解説する。そして、対象範囲を十勝地方から北海道へと拡張し同様の分析を行う。

2. 既存研究の整理

産業連関分析を用いたバイオマス利活用による影響評価の既存研究では、國光・上田（2006）や保永（2006）などがある。國光・上田（2006）では、タイにおける籾殻発電を事例として籾殻発電により既存の電力供給の一部が置き換えられることで地域経済にど

のような変化が現れるかを産業連関分析により明らかにしている。また、保永（2006）では、産業連関分析の手法を用いて北海道において農業有機質資源の循環利用が行われることによる効果を定量的に明らかにしている。このように、産業連関分析を適用してバイオマスの利活用の効果を定量的に把握する研究はこれまでも多数行われている。さらに、バイオ燃料生産の導入による経済効果を計測する研究はアメリカなどを中心に数多く行われてきた。アメリカにおけるバイオエタノール生産の経済効果および雇用効果を計測した論文は、RFA から多数のレポートが公表されている。このうち Evans(1997)のレポートでは、バイオエタノール産業は農業所得 45 億ドル、雇用を 19 万 2,000 人、税収入を 4 億 5,000 万ドル増加させ、連邦政府予算の支出を 35 億ドル削減し、貿易収支を 20 億ドル改善させると評価している。また、Urbanchuk(2007)がアメリカにおけるバイオエタノール生産は農業を中心として大きな経済効果や雇用効果をもたらすことを産業連関分析によって示している。Urbanchuk(2007)では、2006 年のアメリカにおけるバイオエタノール生産により 325 億ドルの経済効果がもたらされ、11 万人分の雇用を増加させたとしている。これに加え、2006 年に行われた新たなバイオエタノールプラントの建設により 93 億ドル、5 万 5,000 人の雇用がもたらされたことを明らかにしている。

3. 十勝地方におけるバイオエタノール生産の経済波及効果と CO₂ 波及効果

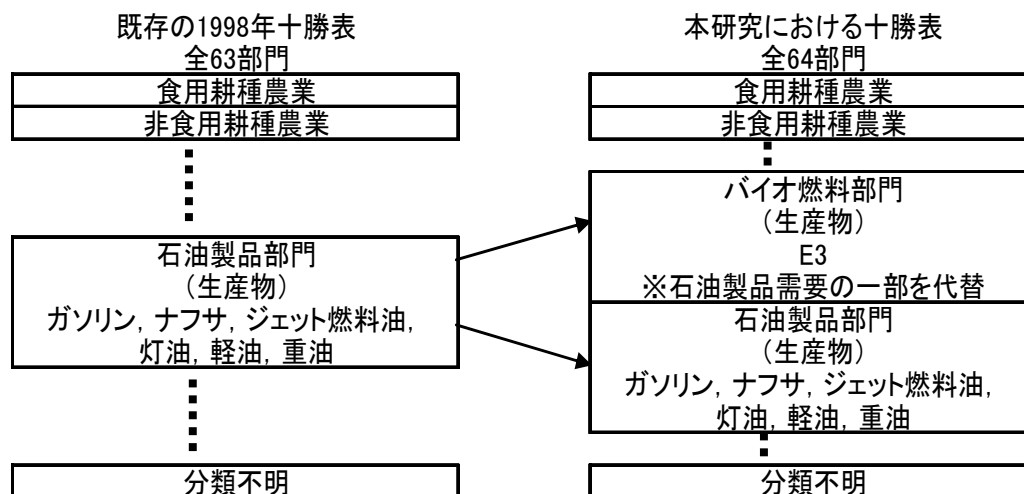
（1）産業連関表の修正

1）基本構造の修正

産業連関分析による地域経済効果の算出に際しては産業連関表が不可欠であるため、本分析では現時点で最新版である 1998 年十勝産業連関表 63 部門表（以下、十勝表）を使用して分析を進める。しかし、1998 年当時はバイオ燃料の製造は行われていなかったため、十勝表にもバイオ燃料部門は独立した部門として設定されていない。したがって、バイオ燃料部門を独立して取り扱った産業連関分析を進めるためには十勝表を修正しバイオ燃料部門を追加する必要がある。そこで、國光・上田（2006）における産業連関表の修正方法を参考にし、十勝表にバイオ燃料部門を追加する修正作業を行った。本節ではその修正方法および手順を解説する。

まず、バイオ燃料部門で生産される生産物としては、具体的にはバイオエタノールや BDF などがあるが、十勝地方で生産が行われるのはこのうちのバイオエタノールであり、これから作られる E3（バイオエタノール 3%混合ガソリン）は石油製品部門の生産物であるガソリンを代替することとなる。したがって、ここではバイオ燃料部門の生産物を E3 のみとし、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する。前述のとおり、十勝表で基準とする 1998 年の時点ではバイオ燃料の生産は行われておらず、既存の十勝表では 63 部門の中にバイオ燃料の生産額は含まれていない。した

がって、バイオ燃料が石油製品部門の一部に置き換わることを想定し、既存の十勝表にバイオ燃料部門を追加する修正を加えることとする（第1図）。



第1図 バイオ燃料部門の分割イメージ

十勝表にバイオ燃料部門を追加するためには、まずバイオ燃料部門の生産規模を明確にする必要がある。現在、十勝地方で計画されているのは規格外小麦やてんさいを用いたバイオエタノールの生産であるが、ここでは前章の LCA 分析との設定条件の整合性を確保するため、規格外小麦のみを原料としてバイオエタノールを生産した場合を想定する。前章の LCA 分析から十勝地方で発生する規格外小麦は年間およそ 2 万 4,000t で、これから生産されるバイオエタノールは 1 万 490L、E3 に換算すると 34 万 9,668KL となり、これがガソリンを代替することになる（第1表）。

第1表 エタノールとE3の生産量と販売量・移出量

	数量(KL)	データ出所
エタノール生産量	10,490	本稿第2章
E3生産量	349,668	エタノール生産量より計算
十勝地方ガソリン販売量	210,300	大深他(2006)
十勝地方E3販売量	212,331	ガソリン販売量より計算
道央地域への移出量	137,336	エタノール生産量とE3販売量より計算

E3 の需要先も LCA 分析と同様に十勝地方で販売し、十勝地方で販売しきれない分を道央地区へ移出する設定にする。大深他（2007）によると十勝地方におけるガソリン消費量は 21 万 300KL であり、この量を熱量等価で換算すると 21 万 2,331KL の E3 に相当する。したがって、規格外小麦原料からバイオエタノールを生産した場合、十勝地方におけるガソリン需要をすべて代替したとしてもまだ余ることになる。このため、十勝地方で消費しきれない分については十勝地方の域外へ移出するとの設定が妥当である。本分析では E3

により十勝地方のガソリン消費をすべて置き換えると仮定し、十勝地方における E3 販売量を 21 万 2,331KL とする。また、生産量 34 万 9,668KL から十勝地方での販売分 21 万 2,331KL を差し引いた 13 万 7,336KL を道央地域へ移出すると仮定する。この場合の域内消費と移出の割合は 60.7 : 39.3 となる。

この生産量からバイオ燃料部門の生産額を推計しよう。そのためには生産物である E3 の価格が必要となるが、これについては現段階ではバイオエタノール生産が実証実験段階であり E3 がまだ一般消費者に広く市販されておらず、E3 市場が確立して安定的な価格形成がなされている状況にはない。しかしながら、E3 についてはその 97%がガソリンであり、またガソリンを代替する燃料であることなどを考えると、E3 価格はガソリン価格で代替することが妥当と思われる。したがって、本分析では E3 の課税前価格をガソリンの課税価格と同じと仮定し、需要増加額を算出することにする。

石油情報センター (online) によると、1998 年当時のレギュラーガソリンの平均小売価格 (1998 年 1 月～12 月) は、91.7 円/L で、この価格にはガソリン税 53.8 円/L が含まれており、ガソリン本体の価格は 37.9 円/L となる。ただし、2009 年 2 月から E3 はエタノール分の 3%が非課税になっており、E3 のガソリン税は E3 容積の 97%に相当するガソリン分のみ課税対象となる。したがって E3 の税額は $53.8 \times 0.97 = 52.186$ 円/L と計算され、E3 の小売価格は E3 とガソリンの課税前価格が同じ 37.9 円/L としても、ガソリン税額の違いから $37.9 + 52.186 = 90.1$ 円/L と計算でき、本分析ではこの値を E3 ガソリン税込価格と設定する。バイオ燃料部門の生産額はこの E3 価格に生産量を乗じて求められ、その額は 315 億円と計算される。この生産額を先に求めた域内消費と移出の割合を用いて按分し域内需要額と移出額を求めると、域内需要額が 191 億 2,800 万円、移出額が 123 億 7,200 万円となった (第 2 表)。なお、現段階では十勝地方の域外からのバイオ燃料の移輸入も考えられないことから、移輸入についてはゼロとした。

第2表 バイオ燃料部門の生産額, 域内需要額, 移出額の推計

	単位	数量・金額	割合
E3単価	円/L	90.1	—
E3生産量	KL	349,668	—
バイオ燃料部門生産額	百万円	31,500	100.0%
うち域内需要	百万円	19,128	60.7%
うち移出	百万円	12,372	39.3%

注 E3単価は石油情報センター(online)から1998年のレギュラーガソリン平均価格をもとに、エタノール分のガソリン税を無税として計算した。

2) 需要構造の設定

当然ながら、バイオ燃料部門と石油製品部門ではその需要先が異なる。これは石油部門の製品には航空燃料やナフサなども含まれているため、他部門での中間需要が多いのに対

し、バイオ燃料部門の生産物である E3 はガソリンスタンドでの小売が中心となることが想定されるためである。したがって、需要先についてはもとの石油製品部門からの按分計算は現実を反映しているとは言えず、新たに需要部門の数値を設定し直す必要があるのだが、十勝地方におけるバイオエタノール生産もまだ開始されておらず、E3 の販売が実際にどのように行われるかは想像の域を脱しない⁽¹⁾。E3 需要先の特定に必要なデータも入手困難であるため、本分析では石油製品部門の需要構造をベースに以下のとおりバイオ燃料部門の需要構造を構築した。

まず、域内需要の内訳であるが、これは大きく域内中間需要と域内最終消費に分けられる。ここでは十勝地方における全ガソリン消費が E3 に置き換えられると仮定しているため、E3 は中間需要と最終需要の双方あることになる。したがって、本分析ではバイオ燃料部門の中間需要と最終需要は石油製品部門の中間需要と最終需要の比率を用いて各需要部門へ按分した。すなわち、 X_{ip} を i 部門における石油製品の中間需要、 F_{jp} を j 部門における石油製品の最終需要、 X_e をバイオ燃料部門の生産額とすると、 i 部門における E3 の中間需要 X_{ie} および j 部門における E3 の最終需要 F_{je} は以下の式で表される。

$$X_{ie} = \frac{X_{ip}}{\sum_i X_{ip} + \sum_j F_{jp}} X_e, \quad F_{je} = \frac{F_{jp}}{\sum_i X_{ip} + \sum_j F_{jp}} X_e \quad (1)$$

以上の式に基づき、各部門の中間需要額を算出した。

3) 投入構造の設定

バイオエタノールは農産物を原料に生産されることから、バイオ燃料部門の投入構造は石油製品部門と大きく異なる。例えば十勝表を見ると、石油製品部門では原油・天然ガス部門からの投入額が大きい、バイオ燃料の生産には原油・天然ガスの投入はないと考えられる。このようにバイオ燃料部門の投入構造を考える上では、実際の製造に投入される中間投入財を整理する必要がある。第3表には第2章の LCA 分析のインベントリから得られたバイオエタノール生産における中間投入財とその金額を示している。前章の LCA 分析においては、バイオエタノールの生産には規格外小麦、電力、重油、薬品、ガソリンの5項目のみ投入されているという仮定の下で分析を行った。

しかしながら、現実にはこれ以外にも様々な財・サービスが投入されており、それら全てを細かく取り上げることは困難である。そこで、ここでは第3表に掲げたバイオエタノール生産費目と石油製品部門の中間投入構造をもとに、以下のようにバイオ燃料部門の投入構造を構築した。第1に、第3表に掲げた5費目について十勝表の部門に対応させ⁽²⁾、費用額をそのまま当該部門の中間投入財投入額とした。第2に、5費目以外の投入財については、石油製品部門の投入構造をそのまま適用し、投入係数によって生産額からの按分を行った。すなわち、 a_{ip} を石油製品部門における i 部門の投入係数、 X_e をバイオ燃料部

門の生産額とすると、バイオ燃料部門における i 部門の投入額 X_{ie} は以下の式で表される。

$$X_{ie} = a_{ip} \cdot X_e \quad (2)$$

第3に、バイオ燃料部門と石油製品部門の投入構造の大きな違いである原油・天然ガス部門からの投入について、バイオ燃料部門では投入額をゼロとした。また、石油製品部門では非金属鉱物部門へ副産物の販売があり、負値の投入額が計上されている。しかし、これについても、バイオ燃料部門から非金属鉱物部門への副産物投入は想定されないことから値をゼロとした。

次に、付加価値部門の構造であるが、これについても基本的には(2)式に基づいて石油製品部門の投入構造から計上値を推計したが、以下の2点の修正を加えた。1つは間接税部門で、第3表のとおりバイオ燃料部門の間接税額はE3用のガソリンに課税される分の188億4,780万円となるので、この値をバイオ燃料部門の間接税額として計上した。2つ目には、バイオ燃料部門から発生する副産物であるDDGについては家畜飼料としての利用価値が認められており、(2)式に基づき石油製品部門からの比率計算で求めた営業余剰の値はDDGの販売収入1億5,000万円を加えた点である。副産物収入のこのような措置は、産業連関表における副産物の取り扱い方法のうち一括方式をベースとしたものである⁽³⁾。一括方式は副産物がこれと競合する財の量に対してわずかな場合に適用される方法であるが、DDGと競合関係にある財を生産する飼料・有機質肥料部門の生産額が213億円であるのに対し、副産物収入は1億5,000万円とごくわずかであり、その発生量から見ても家畜飼料の生産に何ら影響を与えないという仮定も合理的と考えられることから、一括方式を採用した。

第3表 規格外小麦原料E3生産費

費目	十勝表部門対応	金額 (百万円)	割合	単価	データ出所
小麦購入費	食用耕種農業	507.7	5.1%	20716円/t	十勝圏振興機構(2005)
BE生産電力費	電力	54.9	0.6%	11.12円/kwh	北海道電力(online)
BE生産重油費	石油製品	40.2	0.4%	19円/L	日本関税協会(1999)
BE生産薬品費	その他食料品	71.1	0.7%		本稿第2章分析結果
E3用ガソリン購入費	石油製品	9,211.5	93.2%	27.2円/L	石油情報センター(online)
内生部門計		9,885.5	100.0%		
E3用ガソリン税	間接税	18,247.8	—	53.8円/L	
DDG販売額	営業余剰	-150.0	—	20400円/t	十勝圏振興機構(2005)
合計		27,983.2	—		

注 ガソリン単価は、北海道局1998年レギュラーガソリン小売平均価格81.0円/Lからガソリン税53.8円/Lを控除した値である。

以上のような修正により、バイオ燃料部門をはじめ各部門において行和・列和で求められる地域内生産額が一致しなくなるため、産業連関表の全体的な調整作業が必要となる。まず、バイオ燃料部門への投入がゼロとなる原油・天然ガス部門では、バイオ燃料への中間投入分の生産額が減少することになる。この生産額の減少は輸入の減少に反映させた。逆にバイオ燃料部門への中間投入が増加する非食用農業部門、その他食品部門、その他石油製品部門、電力部門については、地域内での生産が増加すると仮定し、それぞれの中間投入額を増加させた。

4) 最終需要部門と付加価値部門の調整

このような需要と供給の修正を行った結果、付加価値部門および最終需要部門の間、すなわち産業連関表のタテ計の域内生産額（中間投入＋付加価値）とヨコ計の域内生産額（域内中間需要＋域内最終需要＋移輸出－移輸入）で数値の不一致が発生する。これは十勝表においてこれまでになかったバイオ燃料部門が新たに追加され、さらにバイオ燃料部門に中間投入財を供給する部門でも生産額が増加するため、経済規模は拡大し域内生産額が増加するため供給側と需要側の修正が整合的に行われないことが要因にある。産業連関表は供給側と需要側での域内生産額の完全一致が必要なため、付加価値部門と最終需要部門の間において数値の調整を行う必要がある。

ここではタテ計とヨコ計の差を付加価値部門で調整した。すなわち、 ΔX_i を i 部門におけるタテ計とヨコ計の差、 V_{ij} を i 部門の付加価値項目 j の金額、 V_i を i 部門の粗付加価値計とすると、 i 部門の付加価値項目 j の調整額 ΔX_{ij} は以下の式で表される。

$$\Delta X_{ij} = \Delta X_i \cdot \frac{V_{ij}}{V_i} \quad (3)$$

以上のような作業を行い、十勝表にバイオ燃料部門を追加した。修正した十勝表は 18 部門に統合したものを本章末尾の付表 1 に掲げた。

(2) 雇用効果の計測

雇用への影響については、産業連関分析からバイオ燃料部門の導入に伴い域内で新たに発生する雇用数を定量化することができる。産業連関分析における雇用分析は、産業連関表の付表である雇用表を用いて行うことが一般的であり、そのためにはまず従業者係数を算出することが必要である。従業者係数とは域内生産額に占める従業者数の割合として表され、 l_i を i 部門の従業者係数、 L_i を i 部門の従業者数、 X_i を i 部門の域内生産額とすると、従業者係数は以下の式で定義される。

$$l_i = L_i / X_i \quad (4)$$

この従業者係数を E3 需要増加による域内生産増加額に乘じることによって E3 による雇用効果が算出される。 i 部門の域内生産増加額を ΔX_i とすると、従業者増加数 ΔL_i は

$$\Delta L_i = l_i \cdot \Delta X_i \quad (5)$$

で表され、地域全体の雇用効果は以下の式で表される。

$$\Delta L = \sum_{i=1} \Delta L_i \quad (6)$$

産業連関表の雇用表とは、各部門における従業者数をまとめた表であり L_i を算出するために用いられる。しかしながら、本分析で用いた十勝表では雇用表が公表されていないため、ここでは 1995 年版全国産業連関表の雇用表を利用して分析を進めることとする。はじめに全国の産業連関表において従業者数と国内生産額から産業中分類 101 部門各部門の従業者係数を算出する。これを十勝表によって算出したバイオ燃料の経済波及効果すなわち域内生産増加額に乘じることによって、新たに増加する従業者数が算出できる。なお、産業連関表による雇用分析では、従業者のうちの雇用者のみに対象を絞り雇用者係数から雇用増加数を算出する分析も可能である。しかしながら、バイオ燃料部門の創設による影響が大きい農業部門においては家族経営が主体であり、雇用労働者の割合が他部門に比べて低いという特徴がある。このようなことから、雇用者に限定して分析を行うと農業部門への影響を過小評価することになるため、本分析では従業者を分析対象とする。

さて、本分析で用いる産業連関表は新たにバイオ燃料部門を追加したものである。当然ながら、全国の産業連関表にもバイオ燃料部門の従業者数は掲載されておらず、独自に従業者係数の値を設定する必要がある。本分析では十勝圏振興機構（2005）を参考として第 4 表のと通りの人員体制を想定し、年間 300 日の 24 時間稼働のプラントを 1 チーム 9 名、3 交代制により 3 チームと非番 1 チームの合計 4 チーム、36 人で操業すると仮定する。このプラントによるバイオエタノール生産額は 315 億円であることから、生産額あたりの従業者数である従業者係数は 0.0011 人/百万円となった。分析では十勝地方におけるバイオエタノールプラントはこの 1 社のみと仮定しているため、このプラントにおける従業者係数がバイオ燃料部門の従業者係数となる。0.0011 人/百万円という従業者係数は石油製品部門のそれが 0.0017 人/百万円であることから見てもおおむね妥当と考えている。

なお、全国の産業連関表と十勝表では一部部門分類が異なっているところがある。具体

的には農業部門などは十勝表においてより細かく分類され、製造業では全国表よりも統合されている部分がある。これらの部門についても部門統合を行い、該当する部門の従業者係数を適用した。

第4表 本分析におけるバイオエタノール製造プラントの人員配置

	作業員 (人)	監視員 (人)	職長 (人)	合計 (人)	チーム数 (組)	従業員合計 (人)
前処理過程	2	1	1	9	4	36
液化過程	3					
糖化過程						
増殖過程						
発酵過程						
混合過程	2					

出所:十勝圏振興機構(2005)を参考に著者が作成した。

(3) CO₂波及効果の計測

1) 分析の背景と目的

さて、本節では産業連関分析によりバイオ燃料生産が地域経済にもたらす経済波及効果を算出するが、経済波及効果がもたらされる部門においては財の生産量が増加するため、生産活動に伴う GHG 排出量も増加する。このことから、バイオ燃料部門における生産量の増加は経済波及効果を通じた各部門への生産量増加に伴う GHG 排出増加を通じて、地域全体の GHG 排出量を増大させる結果をもたらすことが予想される。バイオ燃料は地球温暖化防止の手段としてその役割が期待されているため、バイオ燃料部門の創設による地域への GHG 排出増加は最小限にとどめるべきであろう。また、前章での LCA 分析ではバイオ燃料生産に伴うミクロ的な GHG 削減効果を分析したが、これとともに地域全体のマクロ的な GHG 排出量がどう変化するかも分析する必要がある。以上の2つの理由から、バイオ燃料部門が地域全体の GHG 排出量をどう変化させるかを把握することが重要となる。本節ではバイオ燃料生産が地域全体へもたらす GHG 排出量変化を産業連関分析により計測することを目的とする。

なお、本節ではデータ取得の関係から分析対象を GHG のうち CO₂ のみに限定し、経済波及効果によってもたらされる地域内の CO₂ 排出量変化を CO₂ 波及効果と呼ぶ。

2) CO₂ 排出原単位

南齋他(2002)では、産業連関表の各部門が生産額あたりどのくらいの CO₂ を排出するかのデータが示されている。これは CO₂ 排出原単位といい、生産額百万円あたりの CO₂ 排出量(単位:百万円/t-CO₂)で定義されている。本分析ではこのデータを用いて分析を行う。南齋他(2002)によると、CO₂ 排出原単位ベクトル e は、直接 CO₂ 排出量ベクトル d 、投入係数行列 A 、輸入対角行列 M により以下の式で定義される。

$$e = d\{I - (I - M)A\}^{-1} \quad (7)$$

しかし当然ながら，南齋他（2002）ではバイオ燃料部門，すなわち E3 生産に伴う CO₂ 排出原単位は掲載されておらず，バイオ燃料導入による CO₂ 波及効果を求めるためには独自にバイオ燃料部門の CO₂ 排出原単位を推計する必要がある。そこで本分析では前章のバイオ燃料生産の LCA 分析結果をもとに，独自にバイオ燃料部門の CO₂ 排出原単位を推計した。

第 5 表には規格外小麦原料のバイオエタノール生産の LCA 分析から得られた CO₂ 排出量が示されている。前述のとおり，南齋他（2002）の CO₂ 排出原単位は各部門の生産活動により直接的に排出される CO₂ のほか，当該部門の生産活動に投入される原材料生産に伴う CO₂ が計上されている。したがって，この定義に合わせるため，第 5 表の CO₂ 排出量のうち原料生産からバイオエタノール製造までの CO₂ 排出量を計算に導入した。さらに，本分析ではバイオ燃料部門の生産物を E3 と仮定しているため，E3 に含まれるガソリンも投入物となり，この製造にかかる CO₂ 排出量もバイオ燃料部門の CO₂ 排出量として考えなければならない。ガソリンの生産に伴う CO₂ 排出量は，南齋他（2002）の石油製品部門の CO₂ 排出原単位を引用し，ガソリン価格に CO₂ 排出原単位を乗じて E3 用のガソリン生産に伴う CO₂ 排出量を推計する。推計の結果，バイオ燃料部門の CO₂ 排出原単位は 1.904t・CO₂/百万円となった。

第5表 バイオエタノール生産に伴うCO₂排出量

		(t-CO ₂ eq/GJ-fuel)
原料生産	軽油	6.4
	灯油	5.5
	ガソリン	0.2
	電力	0.9
	肥料	7.8
	種苗	0.7
	農薬	1.6
原料輸送	軽油	0.6
BE製造	電力	9.1
	重油	21.3
	薬品	0.6
BE輸送	軽油	0.0
E3輸送	軽油	0.4
合計		54.9

出所:本稿第2章.

注 上記はCO₂のみでCO₂以外のGHGは除いている.

(4) 分析シナリオ

ここでは構築した産業連関表を用いて経済波及効果、雇用効果、CO₂波及効果を求めるための分析シナリオについて解説する。分析シナリオとしては十勝地方において E3 1 万 KL の追加的需要が発生した場合を想定し、これによる経済波及効果、具体的には GDP 増加額を計測することとする。また、ガソリンとの比較を行うため、ガソリンを販売した場合の GDP 増加額も同時に計測する。ただし、ガソリンと E3 では発熱量が異なるため、1 万 KL の E3 と 1 万 KL のガソリンは等しく扱うことができない。そこで、1 万 KL の E3 を発熱量で換算しこれと等価のガソリン量を求め、ガソリンについては E3 1 万 KL と発熱量等価の量を販売した際の GDP 増加額を算出する。

第6表 E3とガソリンの発熱量・金額

	単位あたり 発熱量 (GJ/KL)	数量 (KL)	総発熱量 (GJ)	燃料単価 (円/L)	金額 (百万円)
E3	34.3	10,000	342,704	90.1	901
ガソリン	34.6	9,904	342,704	91.7	908

出所: 日本化学会(1995), 本稿第2章.

第6表に示すとおり、E3 1 万 KL と発熱量等価のガソリンは 9,904KL となり、E3 量よりもおよそ 100KL 少ない量になる。これは E3 に含まれるエタノールの発熱量がガソリンよりも低いためである。しかしながら、両者を金額換算すると、E3 には税控除があるため 700 万円ほど低くなる。本分析では E3 で 9 億 100 万円分の最終需要が増加したと考え、経済波及効果を分析し、ガソリンについては 9 億 800 万円分の最終需要増加を想定して分析を進める。

ただし、これらの最終需要が増加した際もガソリンの場合は最終需要増加分を賄うのは大半が移輸入で、域内の生産増加に結びつくのは最終需要増加のうちの一部である。本分析ではこの点を考慮した上で経済波及効果を算出する。具体的には産業連関表から石油製品部門の域内自給率を算出し、これを最終需要増加額に乗じることによって域内の石油製品部門にもたらされる生産増加額を算出し、この生産増加額から経済波及効果を求める。十勝表から石油製品部門の域内自給率を計算すると 1.5%となる。すなわち、域内でガソリンに 9 億 800 万円の最終需要増加があったとしても、域内の石油製品部門の生産増加に結びつくのはその 1.5%の 1,350 万円にしかならないということである。したがって、ガソリンの地域経済効果は域内生産増加額を 1,350 万円として分析を行った。一方、E3 については需要増加分をすべて十勝地方のバイオエタノールプラントからの供給で賄うとし、E3 の域内自給率は 100%として計算した。まとめると、十勝地方で 1 万 KL の燃料需要が追加的に発生した場合、E3 ではこの 1 万 KL 分、金額にして 9 億 100 万円分が十勝地方の生産増加

に結びつく一方、ガソリンでは大半が移輸入で賄われるため域内の生産増加は 1,350 万円となる。これらの域内生産増加額をもとに E3 とガソリンの地域経済効果の比較を行う。その上で雇用効果と CO₂ 波及効果も同時に算出し、バイオエタノール生産の導入が雇用や地域環境へ与える影響もガソリンと比較する。

なお、E3、ガソリンともに経済波及効果および CO₂ 波及効果は 2 次波及効果まで算出する。

（５）分析結果

１）経済波及効果

分析の結果は第 7 表に示すとおりである。ここでは 64 部門の一部を統合し 35 部門として数値を計上している。まず、E3 の経済波及効果すなわち誘発 GDP 額を見ると、十勝地方では 9 億 100 万円の E3 需要増加から合計 6 億 400 万円の GDP 増加がもたらされ、一方でガソリンの場合を見ると、同じ熱量の燃料需要の増加であっても域内自給率の関係で域内での生産増加に結びつかず、誘発 GDP 額は 820 万円にとどまっている。このことから、E3 はガソリンよりもはるかに大きな経済効果をもたらすことが示された。次に生産誘発係数を見ると E3 の場合は 1.09、一方のガソリンも 1.07 となり、E3、ガソリンとも生産誘発係数はあまり高くないものの、E3 のほうがガソリンに比べわずかに高くなっている。

第7表 経済波及効果の計測結果(十勝地方)

	(百万円)	
	E3	ガソリン
耕種農業	6.5	0.0
畜産	0.5	0.0
林業	0.0	0.0
漁業	0.0	0.0
鉱業	0.0	0.0
と畜・肉・酪農品	0.0	0.0
水産食料品	0.0	0.0
その他の食料品	0.4	0.0
繊維	0.0	0.0
製材・家具	0.0	0.0
パルプ・紙	0.0	0.0
出版・印刷	0.1	0.0
化学製品	0.3	0.0
バイオ燃料	558.5	0.1
石油・石炭製品	2.2	7.6
石炭製品	0.0	0.0
皮革・ゴム	0.0	0.0
窯業・土石製品	0.0	0.0
鉄鋼製品	0.0	0.0
非鉄金属一次製品	0.0	0.0
金属製品	0.2	0.0
機械	0.0	0.0
その他の製造品	0.0	0.0
建築	0.0	0.0
建設補修	0.5	0.0
土木	0.0	0.0
電力・ガス・水道	1.3	0.0
商業	7.6	0.1
金融・保険・不動産	6.4	0.1
運輸・通信・放送	7.0	0.1
公務	0.0	0.0
公共サービス	4.8	0.1
サービス業	6.6	0.1
事務用品	0.0	0.0
分類不明	0.4	0.0
内生部門計	603.6	8.2
生産誘発係数	1.09	1.07

注 生産誘発係数は粗生産額ベース(誘発粗生産額に占める直接生産増加額割合)である。

また、部門別の経済波及効果を見ると、E3 の経済波及効果では直接生産額増加がもたら

されるバイオ燃料部門に次いで商業の GDP 増加額が 760 万円と大きくなっている。これは E3 が地域内のガソリンスタンドで販売され、そこからもたらされる経済効果が大きいことを示していると推察される。また、バイオ燃料部門へ原材料となる規格外小麦を供給する耕種農業部門においても 650 万円の GDP 増加がもたらされ、十勝地方の基幹産業である農業へも一定の経済効果がもたらされることが窺える。また、それ以外の部門では、運輸・放送・通信部門の 700 万円、サービス業の 660 万円、金融・保険・不動産部門の 640 万円、公共サービス部門の 480 万円など、十勝地方には第三次産業を中心として一定の経済効果がもたらされている。このように、E3 による経済波及効果では十勝地方において原料を供給する耕種農業部門のみならず、商業やサービス業など第 3 次産業においても生産誘発が波及し、十勝地方の経済に幅広く経済波及効果がもたらされることが示された。一方で、ガソリンの経済波及効果では、石油部門以外にはバイオ燃料部門や運輸・放送・通信部門で生産誘発がわずかに見られるだけで、それ以外の部門での生産誘発はほとんどないと言ってよい。したがって、十勝地方においてガソリン需要が増加したとしても十勝地方での経済波及効果はほとんどないと言える。これは前述のとおり石油製品部門はそのほとんどを移輸入に依存していることによる。

2) 雇用効果

次に雇用への影響についてまとめたのが第 8 表である。この表を見てわかるとおり、E3 を 1 万 KL 販売することによる従業者の増加は、地域全体でわずか 11 人に留まる。これは 1 万 KL という限られた燃料の追加的需要を想定しているために値が小さくなっていると考えられる。また、従業者数の影響を部門別で見ると、バイオ燃料部門へ原料を供給する耕種農業で 6 人と、地域全体の従業者増加のうちほぼ半数は耕種農業にもたらされることが示されている。これは、雇用面においてバイオ燃料部門による影響のおよそ半分が農業に及んでいることを示している。

一方、ガソリンについては、第 8 表のとおり十勝地方の雇用への影響は全くないと言ってよい。これはガソリンの域内自給率が E3 よりも低いことから、域内の燃料の追加的需要が地域内での生産増加に結びつかず、結果として雇用面への影響をもたらないことが原因と考えられる。

以上の結果から、雇用面への影響を E3 とガソリンで比較すると、E3 のほうが雇用への影響が大きいことが示された。特に E3 では原料の供給を農業部門に頼ることから、農業部門への影響が大きく、バイオ燃料生産が十勝地方の基幹産業である農業部門の雇用確保に貢献していることが示された。ただし本分析では 1 万 KL というごく限られた燃料需要増加を想定した際の効果を評価したものであり、本分析の結果をもってバイオ燃料の雇用効果の絶対的な大きさを評価することができない点に留意する必要がある。

第8表 雇用への影響の計測結果(十勝地方)

	(人)			(人)	
	E3	ガソリン		E3	ガソリン
耕種農業	6	0	鉄鋼製品	0	0
畜産	0	0	非鉄金属一次製品	0	0
林業	0	0	金属製品	0	0
漁業	0	0	機械	0	0
鉱業	0	0	その他の製造品	0	0
と畜・肉・酪農品	0	0	建築	0	0
水産食料品	0	0	建設補修	0	0
その他の食料品	0	0	土木	0	0
繊維	0	0	電力・ガス・水道	0	0
製材・家具	0	0	商業	1	0
パルプ・紙	0	0	金融・保険・不動産	1	0
出版・印刷	0	0	運輸・通信・放送	1	0
化学製品	0	0	公務	0	0
バイオ燃料	1	0	公共サービス	0	0
石油・石炭製品	0	0	サービス業	1	0
石炭製品	0	0	事務用品	0	0
皮革・ゴム	0	0	分類不明	0	0
窯業・土石製品	0	0	内生部門計	11	0

3) CO₂波及効果

最後に、CO₂波及効果の計測結果についてまとめる。第9表にはE3とガソリンのCO₂波及効果の計測結果が示されている。まず地域全体のCO₂排出量変化をみると、E3の場合は1,760tのCO₂排出増加が生じている一方で、ガソリンの場合は地域内でのCO₂増加が49tに留まることが示されている。次に部門別のCO₂波及効果をみると、E3の場合バイオ燃料部門自身を除くと燃料の輸送を行う運輸・通信・放送部門およびバイオ燃料部門にエネルギー投入する電力・ガス・水道部門でのCO₂排出量が増加していることがわかる。これらの部門は全産業の中でもCO₂の排出係数が高い部門であるため、影響が大きく出ていると思われる。また、農業分野については0.6tのCO₂排出増加に留まっている。

このようにCO₂波及効果の計測では、E3よりもガソリンの方が影響が少ないことが示された。これは域内における燃料需要増加に対してガソリンはその追加的需要のほとんどを域外からの移入に依存しているため、域内生産への波及が小さく生産増加に伴うCO₂波及効果も必然的に小さくなっていることが要因と考えられる。この数値だけをみるとガソリンのほうがE3よりも地域におけるCO₂排出増加を抑制していると言える。しかしながら、E3については域内自給率100%を仮定しているため、第9表で掲げたCO₂排出増加量以外の域外におけるCO₂排出量増加は基本的に発生しないが⁽⁴⁾、ガソリンについては域外において燃料需要増加に対応するための生産増加が行われるため、CO₂排出増加が引き起こされる点に注意が必要である。

第9表 CO₂波及効果の計測結果(十勝地方)

	(t-CO ₂)			(t-CO ₂)	
	E3	ガソリン		E3	ガソリン
耕種農業	0.6	0.0	鉄鋼製品	0.0	0.0
畜産	0.7	0.0	非鉄金属一次製品	0.0	0.0
林業	0.0	0.0	金属製品	0.2	0.0
漁業	0.0	0.0	機械	0.0	0.0
鉱業	0.0	0.0	その他の製造品	0.0	0.0
と畜・肉・酪農品	0.0	0.0	建築	0.0	0.0
水産食料品	0.0	0.0	建設補修	0.2	0.0
その他の食料品	0.2	0.0	土木	0.0	0.0
繊維	0.0	0.0	電力・ガス・水道	2.6	0.1
製材・家具	0.0	0.0	商業	1.9	0.0
パルプ・紙	0.0	0.0	金融・保険・不動産	0.6	0.0
出版・印刷	0.1	0.0	運輸・通信・放送	6.0	0.1
化学製品	0.4	0.0	公務	0.0	0.0
バイオ燃料	1,744.4	0.0	公共サービス	0.9	0.0
石油・石炭製品	0.3	49.0	サービス業	2.1	0.0
石炭製品	0.0	0.0	事務用品	0.1	0.0
皮革・ゴム	0.0	0.0	分類不明	0.1	0.0
窯業・土石製品	0.1	0.0	内生部門計	1,761.6	49.2

(6) まとめ

これまでの分析で十勝地方を対象にバイオエタノール生産による経済波及効果、雇用効果および CO₂ 波及効果を計測し、バイオエタノール生産が地域経済および地域における CO₂ 排出量に与える影響を分析してきた。

まず、分析結果から経済波及効果および雇用への影響、CO₂ 波及効果の計測結果をまとめると以下の5点が示唆される。第1に十勝地方における E3 需要増加による経済効果は域内自給率を考慮するとガソリン需要増加よりもはるかに大きな経済効果をもたらすことである。十勝地方で生産される E3 とそのほとんどを移輸入に頼るガソリンとの違いが大きく出た結果といえよう。第2に生産誘発係数で見た場合にも E3 はガソリンに比べ生産誘発係数が高くなっていることである。生産誘発係数から見ても E3 はガソリンに比べ地域経済により大きな影響を与えることが示唆された。第3に部門別の経済波及効果を見ると、十勝地方におけるバイオエタノール生産はバイオエタノール生産に原材料を供給する耕種農業部門のみならず第三次産業などにも経済波及効果をもたらし、十勝地方の経済を活性化させる効果がある点である。この点もガソリンの場合には得られない効果であり、バイオ燃料生産が十勝地方で行われ、それが十勝地方で消費されることによる効果と言える。第4に雇用に与える影響についてガソリンよりも E3 のほうが影響が大きく、特に農業部門の雇用確保に貢献していることが示された。第5に、CO₂ 波及効果を見ると、地域内 CO₂ 排出増加がより少ないのはガソリンであることが示された。これは域内自給率の関係から、完全自給を仮定している E3 については燃料需要の追加分すべてを域内生産の増加で賄うのに対して、ガソリンの場合は追加的燃料需要の約 2/3 を域外からの移輸入に依存しているため、域内における CO₂ 排出増加を低く抑えることができることが要因である。

ただし結果の解釈に際しては、ガソリンの場合域内における CO₂ 排出増加が小さくても域外において CO₂ 排出増加が生じる点も留意しなければならない。

経済波及効果の大きさを生産誘発係数で見た場合、E3 はガソリンよりも地域経済に大きな影響を与えるという結果となったが、生産誘発係数で見た E3 のガソリンに対する優位性は誘発 GDP 額でみた優位性よりも小さくなっている。この理由としては、第 1 に E3 の原材料はその容積の 97% を占めるガソリンのシェアが大きく、前述のとおりガソリンの生産はそのほとんどを域外からの移輸入に依存している点が挙げられる。すなわち、バイオエタノールを 3% しか含まない E3 であれば、その効果はガソリンとそれほど大きく変わらないという点が示唆される。第 2 の理由として、バイオ燃料部門の影響力が小さいこと、さらにバイオ燃料部門の経済効果が波及する農業などの部門の影響力も小さいことが挙げられる。要するに、E3 では原材料である規格外小麦の購入を通じて農業部門へ一定の経済効果がもたらされるが、投入される財の種類が少ないため域内の他分野への波及効果は限定されてしまう。他部門への影響力は製造業など多数の部門から中間投入財を購入している部門で大きくなる。バイオ燃料部門の場合は農業部門からの原料作物の投入のほか、発酵菌などの投入、電力などのエネルギー投入程度しかなく、いわゆる「裾野の狭い」産業であると言え、これがバイオ燃料部門の影響力が小さい要因であることが窺える。したがって、地域経済にいかに大きな経済効果をもたらすかを考えた際のバイオ燃料部門の今後の課題としては、域内で生産される原材料をいかに多く中間投入し域外から移輸入される中間投入財を削減するか、さらにはバイオ燃料部門自体の影響力を大きくするかという点が重要になろう。

ただし、バイオ燃料部門は上記のような課題を抱えているものの、E3 がガソリンよりもはるかに大きな経済効果をもたらすこと、農業部門にも一定の経済効果がもたらされるという本章での分析結果は、バイオ燃料生産が地域経済・農業の振興にも有効に機能していることを示すものである。

以上の結果から、十勝地方におけるバイオエタノール生産はガソリンと比べ地域経済や雇用に大きな影響を与える一方で、地域全体での CO₂ 排出量の増加はガソリンのほうが E3 に比べて小さいことが示された。ここで残された課題は 2 点ある。第 1 に十勝地方というごく狭い範囲を対象とした分析であり、今回の分析で評価した地域経済効果は限定的なものとも言える。すなわち、バイオエタノール生産に由来する経済的な影響は十勝地方という狭い地域にとどまるものではなく、広く北海道内また日本全国に波及する効果もあるはずで、今後より広い範囲を対象とした分析を行うべきであろう。この点については次節以降、十勝地方から北海道へと分析対象範囲を拡張する。第 2 に E3 とガソリンの優位性を判断する場合には、環境への影響と経済への影響の相対的な関係を考慮すべきという点である。ガソリンの場合は CO₂ 波及効果とともに地域にもたらされる経済波及効果が非常に小さく、一方の E3 は経済波及効果、CO₂ 波及効果ともに大きい。両者の相対的な関係

を把握しなければ E3 とガソリンのどちらがより優位なのかを判断することができないと考える。この点については、第 4 章において効率性指標などを用いて経済波及効果と CO₂ 波及効果の相対的な関係を把握する。

4. 北海道を対象とした分析への拡張

(1) はじめに

前節では十勝地方におけるバイオエタノール生産の経済波及効果および CO₂ 波及効果を計測した。この分析では十勝地方から北海道内の他地域へ E3 が移出されるというシナリオを設定したため、十勝地方での分析では経済への影響の一部を捉えるに過ぎず測られる効果が限定されるという点が残された課題の 1 つとして挙げられた。

そこで本節では、効果の計測範囲を拡大し十勝地方におけるバイオエタノール生産による経済波及効果および CO₂ 波及効果を北海道全体で計測することとする。分析にはバイオ燃料部門を追加する修正を行った上で 2003 年北海道産業連関表延長表 104 部門表(以下、北海道表)を用いる。

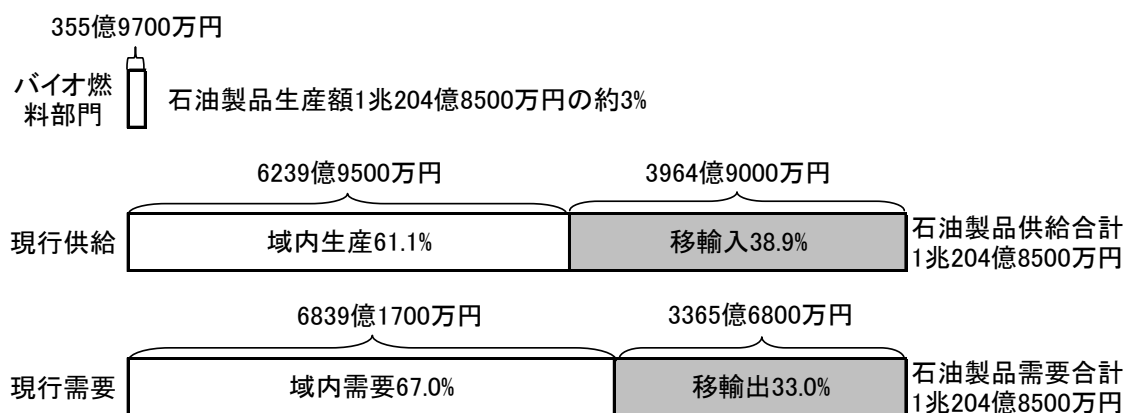
(2) 北海道産業連関表の修正

1) バイオ燃料部門の位置づけ

先の第 1 表において示したように、十勝地方でバイオエタノールの生産が行われた場合のバイオエタノール生産量は 1 万 490KL で、このバイオエタノール量から生産可能な E3 量は 34 万 9,668 KL となる。この量は産業連関表の年次である 2003 年の北海道におけるガソリン販売量 245 万 8,134 KL の約 14%を占め、2003 年当時のガソリン価格をもとに金額換算すると 355 億 9,700 万円となる⁽⁵⁾。この金額はバイオ燃料部門の域内生産額としてみることができるが、北海道内のガソリン販売額のどのくらいを占めるのであろうか。本分析で使用する北海道表は 2003 年延長表でガソリン部門を明示した産業基本分類表(515 部門)は公表されていないため、産業基本分類表が利用可能な 2000 年の北海道表で見ると、ガソリン部門の域内生産額は 2,630 億 9,300 万円であり、バイオ燃料部門の域内生産額はこの約 14%となる。2000 年から 2003 年の間のガソリン価格上昇を考慮しても、バイオ燃料部門の域内生産額はガソリン部門の域内生産額のおよそ 10%強となろう。また、2003 年北海道表では北海道内の石油製品供給額は 1 兆 204 億 85 万円で、バイオ燃料部門域内生産額はこのおよそ 3%となっている(第 2 図)。北海道内の石油製品供給の内訳としては域内生産が 61.1%、移輸入が 38.9%となっている。当然ながら、石油製品の域内需要は供給額と同じ 1 兆 204 億 8,500 万円であるが、そのうち域内需要が 67.0%、移輸出が 33.0%となっている。

2) バイオ燃料部門の投入構造

LCA 分析から得られるバイオ燃料部門への投入原材料およびエネルギーは第 10 表のとおりである。十勝地方における分析に用いた第 3 表との違いはガソリンおよび重油の投入額が 2003 年の価格を用いて計算されている点のみで、それ以外の投入財およびエネルギーの価格は十勝地方での分析と変わらない。十勝地方における分析の際にも触れたが、これら LCA 分析から得られる費目以外にどのような項目があるのかは産業連関表に則して考える必要があるものの、産業連関表ではバイオ燃料部門は明示されないため、投入構造が似ている部門の投入構造を導入するほかない。本分析ではバイオ燃料部門の投入構造が石油製品部門のそれと近似していると仮定してバイオ燃料部門の投入構造を構築する。



第2図 バイオ燃料部門、石油製品の需要と供給

出所: 2003年北海道産業連関表延長表, 本稿第2章.

第10表 規格外小麦産バイオエタノール生産費(北海道)

費目	北海道表部門対応	金額 (百万円)	割合	単価	データ出所
小麦購入費	食用耕種農業	507.7	3.9%	20716円/t	十勝圏振興機構(2005)
BE生産電力費	電力	54.9	0.4%	11.12円/kwh	北海道電力(online)
BE生産重油費	石油製品	63.5	0.5%	29.7円/L	日本関税協会(2004)
BE生産薬品費	その他食料品	71.1	0.5%		本稿第2章分析結果
E3用ガソリン購入費	石油製品	12,406.0	94.7%	36.6円/L	石油情報センター(online)
内生部門計		13,103.3	100.0%		
E3用ガソリン税	間接税	18,247.8		53.8円/L	
DDG販売額	営業余剰	-150.0		20400円/t	十勝圏振興機構(2005)
合計		31,201.0			

注 ガソリン単価は、北海道局2003年レギュラーガソリン卸平均価格90.4円/Lからガソリン税53.8円/Lを控除した値。

第 11 表には石油製品部門とバイオ燃料部門の投入構造が示されている。第 10 表から得

られる数値は産業連関表の該当部門へ計上し、それ以外の投入項目は石油製品部門から比率計算した。具体的には石油製品部門において域内生産額に占める各投入額の比率を求め、この比率をバイオ燃料部門の生産額に乘じることで LCA 分析からの数値が計上されない各部門に投入額を計上した。

第11表 石油製品部門とバイオ燃料部門の投入構造(北海道)

				(百万円)			
部門	投入額	投入係数	バイオ燃料部門 注2)	部門	投入額	投入係数	バイオ燃料部門 注2)
耕種農業	0	0.0000	508	鉄鋼一次製品	0	0.0000	0
畜産	0	0.0000	0	非鉄金属一次製品	8	0.0000	
漁業	0	0.0000	0	金属製品	964	0.0025	
林業	0	0.0000	0	機械	6	0.0000	
非金属鉱物	-882	-0.0023	0	その他の製造品	1,374	0.0036	
石炭	30	0.0001		建築・土木	718	0.0019	
原油・天然ガス	317,140	0.8285	0	電力	6,136	0.0160	55
その他の鉱業	0	0.0000	0	ガス・水道	392	0.0010	
と畜・肉・酪農品	0	0.0000	0	商業	4,991	0.0130	
水産食料品	0	0.0000	0	金融・保険・不動産	9,312	0.0243	
その他の食料品	0	0.0000	71	運輸・通信・放送	13,630	0.0356	
繊維	13	0.0000		公共サービス	4,181	0.0109	
製材・家具	12	0.0000		サービス業	3,898	0.0102	
パルプ・紙	0	0.0000	0	事務用品	16	0.0000	
出版・印刷	143	0.0004		分類不明	224	0.0006	
化学製品	1,454	0.0038		内生部門計	382,806	1.0000	注4)
バイオ燃料	0	0.0000		営業余剰	6,121		注5)
石油製品	19,010	0.0497	12,469	間接税	204,584		18,248
石炭製品	0	0.0000	0	補助金	-1,073		注6)
皮革・ゴム	1	0.0000		その他の付加価値	31,557		
窯業・土石製品	35	0.0001		付加価値合計	241,189		注4)
銑鉄・粗鋼	0	0.0000	0	域内生産額	623,995		35,597

出所: 2003年北海道表, 本稿第2章.

注1 105部門表における石油製品への投入額を33部門表をベースに統合した.

2 バイオ燃料部門に計上されている値はLCA分析から得た数値である.

3 ■ は石油製品部門から比率計算する.

4 この欄には合計値が計上される.

5 営業余剰は比率計算後に副産物収入150を加える.

6 補助金は域内生産額と域内生産額－(内生部門計＋補助金を除く付加価値合計)で計算する.

また、十勝地方での分析と同様、バイオ燃料部門において比率計算で投入額を算出しなかった部門は LCA 分析の結果から値を計上した部門以外に2つある。1つは原油・天然ガス部門、もう1つは非金属鉱物部門である。前者について、石油製品部門は原油・天然ガス部門からの投入が非常に多いが、バイオ燃料部門は原油などの鉱物資源を原料として投入しないため当該部門からの投入額はゼロとした。後者については、石油製品部門からは副産物として非金属鉱物部門の生産物が発生するものの、バイオ燃料部門ではこのよう

な副産物が発生しないためこの部門からバイオ燃料部門への投入額もゼロ計上とした。また、DDGを販売することによる収入は営業余剰に加算し、バイオ燃料部門の営業余剰は石油製品部門から比率計算された額にDDGの販売額を足し合わせた額とする点も十勝地方における分析と同様である。

3) 2つのモデル

さて、域内で生産されるバイオ燃料がどのようにガソリンを代替するかについては、(1)域内におけるバイオ燃料生産がガソリンの移輸入を代替するケース、(2)域内におけるバイオ燃料生産がガソリンの域内生産を代替するケースの2通りが考えられる。先に説明した産業構造においてバイオ燃料がどのようにガソリンを代替するかは分析結果を左右すると考えられる。それぞれのケースの詳細は以下のとおりである。

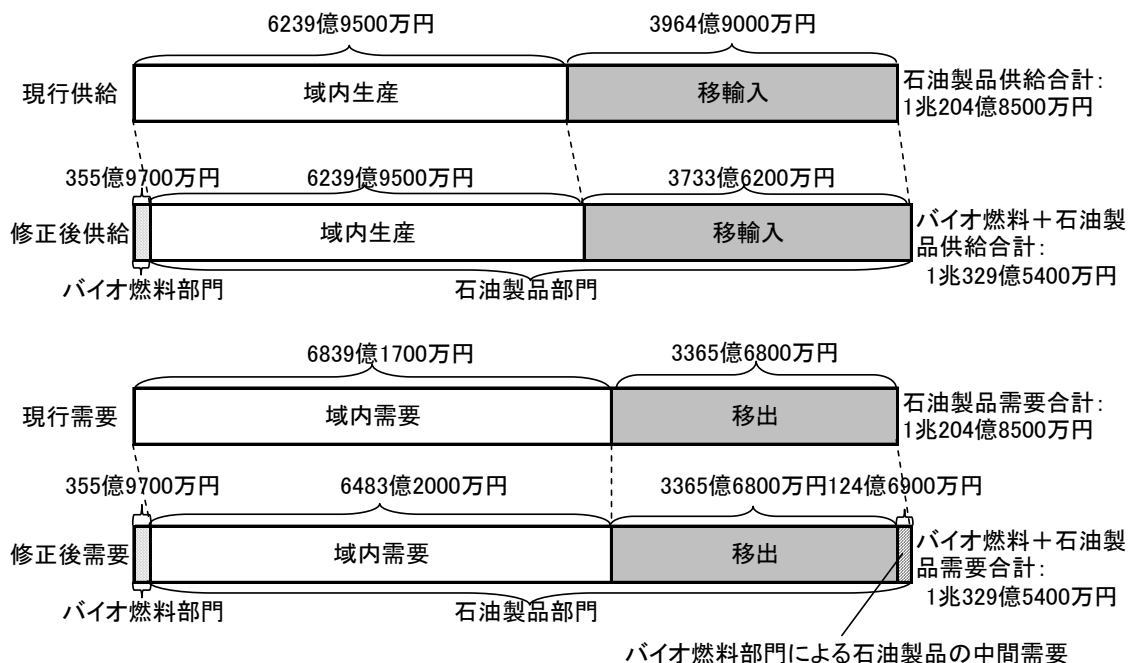
Case1：移輸入代替ケース

バイオ燃料部門の生産額分だけ石油製品部門の移輸入が減少するケースである(第3図)。このケースではバイオ燃料部門の生産額が増加しても域内の石油製品部門の生産額は変化せず、バイオ燃料に代替されるガソリンの減少は移輸入の減少で相殺されると仮定する。これは域内で供給能力がある石油製品部門を縮小させることなく、地域外に供給を依存していた部分を縮小するという想定からである。そのため、北海道全体としての域内生産額はバイオ燃料部門の生産額分だけ増加することになり、いわゆるエネルギーの域内自給率が向上するケースととらえられる。ところで北海道を対象範囲とした場合、北海道内へ移輸入されるガソリンが生産される際に北海道外で発生する環境負荷は北海道内の環境負荷としてカウントされていない。したがって、バイオ燃料の生産は従来域外に依存していた燃料供給を域内自給に移行することになり、これによって域内で発生する環境負荷は増加することになる。そのため、このケースではバイオ燃料の生産が域内における環境負荷の増大をもたらす結果となることが予想される。

Case2：域内生産代替ケース

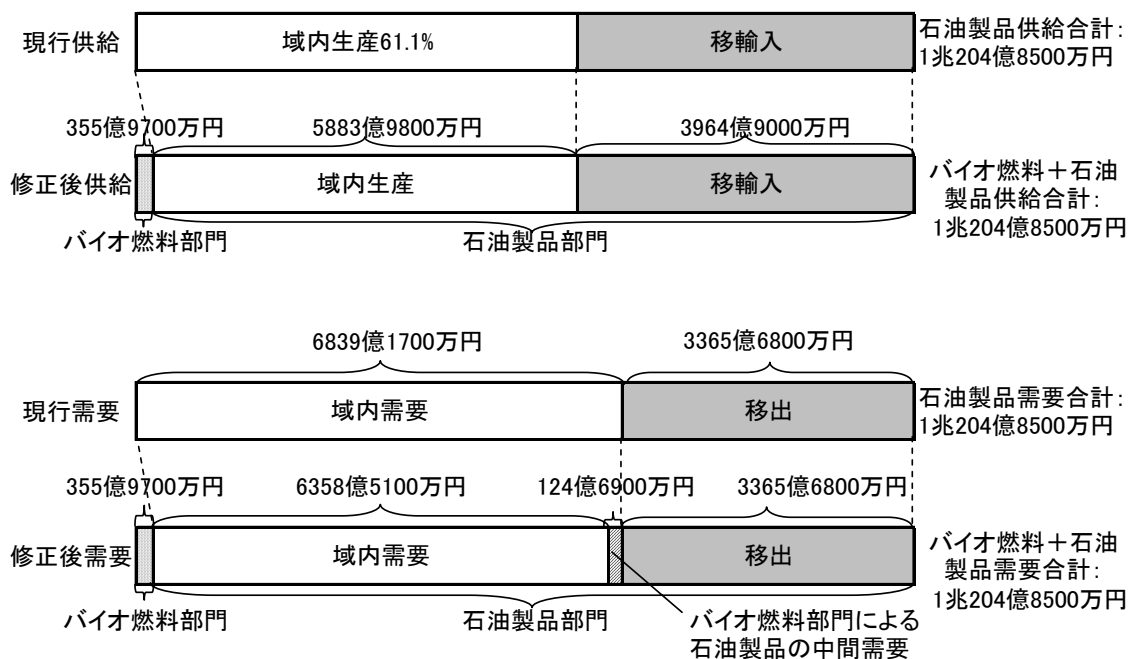
これはバイオ燃料部門の生産額分だけ域内の石油製品部門の生産額が減少するケースで、バイオ燃料は域内において石油製品部門と競合し、域内のガソリン生産を減少させるという想定である(第4図)。この想定のもとではバイオ燃料部門の生産額分だけ石油製品部門の生産額が減少することとなり、北海道全体の域内生産額は変わらない。なぜこのようなケースを想定するかというと、バイオ燃料による環境負荷削減効果はガソリン生産がバイオ燃料生産で置き換えられた際の効果を評価しなければならないと考えるからである。すなわち域内においてガソリン生産がバイオ燃料生産に置き換わる本ケースによって、バイオ燃料によるガソリンの代替がもたらす環境負荷削減効果を評価するのである。ただし、

供給能力のある域内石油製品部門が縮小する一方で移輸入は変わらないという設定は現実の変化を反映しているかといった議論の余地が残されている。



第3図 移輸入代替モデルにおけるバイオ燃料および石油製品部門の需要と供給

出所: 2003年北海道表.



第4図 域内生産代替モデルにおけるバイオ燃料および石油製品部門の需要と供給

出所: 2003年北海道表.

現実的には期間の取り方によって移輸入代替ケース，域内生産減少ケースのどちらも想定されるが⁽⁶⁾，国レベルに拡張した場合にはバイオ燃料の生産がガソリンの移輸入を減少させ，国内におけるガソリン生産が現状のまま維持されるとは想定しにくい。すなわち，移輸入代替ケースは分析が十勝地方や北海道など国よりも小さい対象範囲に限定されかつガソリンの移輸入が行われている場合に適用できるもので，それ以外の場合には域内生産代替モデルを適用することが妥当となる。さらに，一時的に移輸入が減少したとしても，長期的に見ればガソリンの域内生産の減少に帰着することも考えられることから，本分析では域内生産代替モデルを採用して北海道表の修正を行うこととした。

4) 域内生産代替ケースにおける産業連関表の修正

a. バイオ燃料部門の需要構造の設定

北海道内におけるバイオ燃料の需要構造であるが，十勝表における仮定とは異なり E3 はすべて域内で最終需要として消費され域内における中間需要や域外への移輸出はないものとする。北海道内のガソリン消費量と E3 の生産量から見ると，E3 販売量はガソリン販売量の 14%を占めるにとどまることから，域外への移輸出の余地はないものと推察され，移輸出が行われないという仮定は妥当と思われる。一方で，北海道内において E3 の中間需要が一切ないというのはいささか強い仮定かもしれない。しかしながら，現実のバイオエタノール生産・販売計画を見ても E3 は事業者向けの販売よりもむしろガソリンスタンドにおける一般消費者向けの販売が計画されていることに鑑み，中間需要分に関してはこれまでどおりガソリンが需要され E3 は最終需要のみとした。家計外消費支出，民間消費支出など最終需要内各項目への配分は石油製品部門における最終需要合計に占める各項目の比率から按分した。

b. バイオ燃料部門の投入構造の設定

第 12 表は，第 11 表の網掛け部分等にも数値を計上したバイオ燃料部門の投入構造である。第一段階としてこの投入構造をベースに北海道表の修正を行う。バイオ燃料部門に投入のあるこれらの部門ではバイオ燃料部門への投入増による域内生産が増加するため，当該部門への投入も増加する。各部門においてバイオ燃料部門への投入額に相当する域内生産の増加が生じるとして，それぞれの部門での投入額を推計した。例えば，バイオ燃料部門への投入によって耕種農業部門では 5 億 800 万円の域内生産増加がもたらされる。このため，耕種農業部門に中間投入財を供給する部門での域内生産が増加する。これが波及効果となって繰り返されるのである。

域内生産代替モデルではバイオ燃料部門の生産額分だけ石油製品部門の域内生産額が減少する。したがって，バイオ燃料部門と石油製品部門の域内生産額の合計はバイオ燃料部門がない従来の北海道表における石油製品部門の域内生産額と一致する。しかしながら，

投入構造はバイオ燃料部門と石油製品部門では異なるため、両部門へ中間投入を行う部門にも変化が生じる。そのため、以下の手順で投入構造を修正した。まず、当初の石油製品部門の域内生産額 6,239 億 9,500 万円からバイオ燃料部門の域内生産額 35 億 9,700 万円を差し引いた 5,883 億 9,800 万円を修正後の石油製品部門の域内生産額とする。次に、石油製品部門の生産額が減少した分だけ各部門からの中間投入額および付加価値額を減少させた。つまり、バイオ燃料部門の創設により石油製品部門では中間投入額が 5.7%減少したことになる。よって修正後の各部門から石油製品部門への投入額、付加価値額は当初の石油製品部門への投入額に 94.3%を乗じた値とした。前述のとおり、第 13 表に示される当初の石油製品部門の域内生産額と修正後のバイオ燃料部門、石油製品部門の域内生産額の合計はいずれも 6,239 億 9,500 万円で一致している。

第12表 域内生産代替モデルにおけるバイオ燃料部門の投入構造

		(百万円)	
部門	投入額	部門	投入額
耕種農業	508	機械	0
畜産	0	その他の製造品	78
林業	0	建築・土木	41
漁業	0	電力・ガス・水道	77
石炭	2	商業	285
その他の鉱業	0	金融・保険・不動産	531
と畜・肉・酪農品	0	運輸・通信・放送	778
水産食料品	0	公務	0
その他の食料品	71	公共サービス	239
繊維	1	サービス業	222
製材・家具	1	事務用品	1
パルプ・紙	0	分類不明	13
出版・印刷	8	内生部門計	15,465
化学製品	83	家計外消費支出	97
バイオ燃料	0	雇用者所得	591
石油・石炭製品	12,469	営業余剰	499
皮革・ゴム	0	資本減耗引当	1,112
窯業・土石製品	2	資本減耗引当	0
銑鉄・粗鋼	0	間接税(除関税)	18,248
鉄鋼一次製品	0	(控除)経常補助金	-415
非鉄金属一次製品	0	粗付加価値部門計	20,132
金属製品	55	域内生産額	35,597

出所:2003年北海道表.

注 産業連関表の修正は、104部門統合表にバイオ燃料部門を追加し
105部門で行っているが、本表では部門を統合している。

次に、バイオ燃料部門の発現によりバイオ燃料部門に中間投入を行う部門の生産額が変化してくる。このため、当該部門の生産額をバイオ燃料部門への中間投入額分だけ増加させ、それぞれの部門の中間投入額および付加価値額の増加へと按分した。このような波及効果に対してさらに中間投入額分の生産量増加が各部門に生じる。波及効果は際限なく続くため、以降は域内生産額に占める各項目の比率に応じてバイオ燃料部門へ中間投入を行う部門における域内生産額の増加分を配分する調整を、波及効果による域内生産額増加が

第13表 域内生産減少モデルにおけるバイオ燃料部門および石油製品部門の投入構造

(百万円)				
	修正前	修正後		
	石油製品	バイオ燃料	その他石油製品	合計
01 耕種農業	0	508	0	508
02 畜産	0	0	0	0
03 林業	0	0	0	0
04 漁業	0	0	0	0
05 石炭	30	2	28	30
06 原油・天然ガス	317,140	0	299,180	299,180
07 その他の鉱業	-882	0	-832	-832
08 と畜・肉・酪農品	0	0	0	0
09 水産食料品	0	0	0	0
10 その他の食料品	0	71	0	71
11 繊維	13	1	12	13
12 製材・家具	12	1	11	12
13 パルプ・紙	0	0	0	0
14 出版・印刷	143	8	135	143
15 化学製品	1,454	83	1,372	1,455
16 バイオ燃料		0	0	0
17 石油製品	19,010	12,469	17,674	30,143
18 石炭製品	0	0	0	0
19 皮革・ゴム	1	0	1	1
20 窯業・土石製品	35	2	33	35
21 鉄鉄・粗鋼	0	0	0	0
22 鉄鋼一次製品	0	0	0	0
23 非鉄金属一次製品	8	0	8	8
24 金属製品	964	55	909	964
25 機械	6	0	6	6
26 その他の製造品	1,374	78	1,296	1,375
27 建築・土木	718	41	677	718
28 電力・ガス・水道	6,528	77	6,159	6,236
29 商業	4,991	285	4,708	4,993
30 金融・保険・不動産	9,312	531	8,785	9,316
31 運輸・通信・放送	13,630	778	12,858	13,636
32 公務	0	0	0	0
33 公共サービス	4,181	239	3,944	4,183
34 サービス業	3,898	222	3,677	3,900
35 事務用品	16	1	15	16
36 分類不明	224	13	211	224
37 内生部門計	382,806	15,465	360,868	376,333
38 家計外消費支出	1,699	97	1,603	1,700
39 雇用者所得	10,364	591	9,777	10,368
40 営業余剰	6,121	349	5,774	6,124
41 資本減耗引当	19,494	1,112	18,390	19,502
42 資本減耗引当	0	0	0	0
43 間接税(除関税)	204,584	18,248	192,998	211,246
44 (控除)経常補助金	-1,073	-265	-1,012	-1,277
45 粗付加価値部門計	241,189	20,132	227,530	247,662
46 域内生産額	623,995	35,597	588,398	623,995

出所:2003年北海道表.

第14表 分析シナリオの設定値

需要増加燃料種	E3	ガソリン
E3販売量(KL)	10,000	0
発熱量換算値(GJ)	342,704	0
販売額(百万円)	1,018	0
ガソリン販売量(KL)	0	9,904
発熱量換算値(GJ)	0	342,704
販売額(百万円)	0	1,024

出所:本稿第2章.

1 億円未満になるまで繰り返した。ただし、石炭部門および原油天然ガス部門については、域内生産ではなく移輸入が増加すると仮定して調整を行った。これは域内におけるエネルギー調達には限界があり、バイオ燃料部門による当該部門の需要増加分は地域外に依存せざるを得ないと考える。

一方、このような波及効果の調整は内生部門と付加価値部門における調整であるため、最終需要部門は一切修正されておらず、最終需要部門と付加価値部門の間の整合性も取れなくなる。そこで、最終需要部門と付加価値部門の差を調整し、両者を一致させて投入側の域内生産額と需要側の域内生産額を一致させる調整を行った。調整過程では最終需要部門が付加価値部門よりも大きかったため、その差分を最終需要部門に割り振って加算し、最終的に縦横の域内生産額を完全に一致させた。

以上のような修正の結果、修正後の域内生産額は 33 兆 4,979 億円と修正前の域内生産額 33 兆 4,975 億円より 4 億円ほど増加している。これはバイオ燃料部門の発現に伴う投入・算出構造変化の結果、これまで移輸入に頼っていた部分が域内生産へシフトした結果である。なお、修正後の北海道表は 14 部門に統合の上、本章末尾に付表 2 として掲げた。

（３）シナリオ設定

産業連関分析のシナリオ設定については、上記で解説した域内生産代替モデルに対して、1 万 KL の E3 需要が域内で新たに発生した場合を設定し、経済波及効果、雇用効果および CO₂ 波及効果を算出する。さらに比較分析のために 1 万 KL の E3 と発熱量等価のガソリンを販売した場合を想定したシナリオも設定する。細かな設定条件は第 14 表のとおりで、十勝地方における分析シナリオとは販売額のみが異なり他の設定値は同じである。

（４）経済波及効果の計測結果

分析結果は第 15 表に示した。これから経済波及効果の大きさすなわち誘発 GDP 額を見ると、E3 を 1 万 KL 生産した場合の誘発 GDP 額は 7 億 1,900 万円となる一方、発熱量等価のガソリンを生産した場合の誘発 GDP 額は 1 億 6,300 万円に留まり、その差は 5 億 5,000 万円以上に達する。また、生産誘発係数で考えると、E3 は 1.29、ガソリンは 1.16 で E3 のほうが高い値となっている。このことから、北海道を対象とした分析においても地域内にもたらされる経済波及効果に関しては、ガソリンよりも E3 の方が大きいといえる。

次に、部門別の経済波及効果の大きさを見る。E3 の場合、バイオ燃料部門を除き経済波及効果が最も大きいのは石油製品部門の 5,600 万円である。これは E3 製造に投入されるガソリンの生産誘発によりもたらされる効果と考えられる。それ以外の部門では金融・保険・不動産の 2,100 万円、運輸・通信・放送の 1,900 万円、サービス業の 1,100 万円など第三次産業を中心に経済波及効果が大きくなっている。また、第一次産業では耕種農業に 500 万円の経済波及効果がもたらされ、これは原料作物である規格外小麦の投入から得ら

れる効果であると考えられる。一方のガソリンの場合は、自部門の石油・石炭製品部門の1億3,400万円以外に大きな経済波及効果をもたらされる部門はなく、金融・保険・不動産の700万円、運輸・通信・放送の600万円程度であり、第一次産業にもたらされる経済波及効果も皆無である。このようにガソリンの生産からは北海道内にはあまり大きな経済波及効果をもたらされないことがわかる。

以上の結果から、北海道を対象とした経済波及効果の計測では以下の2点を指摘することができる。第1にE3はガソリンに比べ北海道内に大きな経済波及効果をもたらす点である。つまり、北海道内で発生した自動車用燃料の需要を満たす場合、それをE3によって賄うほうがガソリンで賄うよりも北海道経済に与える影響が大きいということである。これは、E3の域内自給率が100%なのに対しガソリンは33%となっており、両者の差が大きく影響していると思われる。したがってE3の導入は北海道における地域内エネルギーの域内自給率向上にも貢献すると言える。

第2に、E3が規格外小麦という第一次産業生産物を原料にしていることから農業への経済波及効果が発生している点である。特に北海道は農業の盛んな地域であり、地域の基幹産業となっている。このような産業に経済波及効果をもたらすことは地域経済の活性化に貢献する可能性を持っていると言える。しかし一方で、十勝での分析と同様E3の経済波及効果もそのほとんどがバイオ燃料部門自らと石油製品部門への経済波及効果であり、地域産業全般に広く効果が波及するには至っていない。これはバイオ燃料産業の裾野がそれほど広くないことを意味しており、このようなバイオ燃料部門の産業構造も念頭に置く必要があるだろう。

第15表 経済波及効果の計測結果(北海道)

			(百万円)		
	E3	ガソリン	E3	ガソリン	
耕種農業	5.4	0.0	鉄鋼製品	0.1	0.0
畜産	0.8	0.0	非鉄金属一次製品	0.0	0.0
林業	0.0	0.0	金属製品	0.4	0.2
漁業	0.0	0.0	機械	0.2	0.1
鉱業	1.6	3.8	その他の製造品	0.6	0.2
と畜・肉・酪農品	0.0	0.0	建築	0.0	0.0
水産食料品	0.0	0.0	建設補修	1.1	0.4
その他の食料品	0.5	0.0	土木	0.0	0.0
繊維	0.0	0.0	電力・ガス・水道	3.9	2.8
製材・家具	0.1	0.0	商業	7.6	2.2
パルプ・紙	0.2	0.1	金融・保険・不動産	21.1	6.9
出版・印刷	0.7	0.2	運輸・通信・放送	18.8	5.8
化学製品	0.2	0.0	公務	0.1	0.1
バイオ燃料	582.9	0.0	公共サービス	5.8	2.0
石油・石炭製品	55.6	134.3	サービス業	11.4	4.0
石炭製品	0.0	0.0	事務用品	0.0	0.0
皮革・ゴム	0.0	0.0	分類不明	0.4	0.2
窯業・土石製品	0.1	0.0	内生部門計	719.7	163.3
			生産誘発係数	1.29	1.16

注 生産誘発係数は粗生産額ベース(誘発粗生産額に占める直接生産増加額割合)である。

(5) 雇用効果の算出

雇用への影響については 2000 年版全国産業連関表の雇用表を利用して従業者への影響の分析を進める。はじめに、全国の産業連関表と北海道産業連関表の部門分類の相違を調整し、従業者数と国内生産額から産業中分類 101 部門各部門の従業者係数を算出した。これを本分析で算出した域内生産増加額に乗じて新たに発生する従業者数を算出する。また、バイオ燃料部門の従業者係数については十勝地方における分析と同様に第 4 表の設定をもとに算出し、バイオ燃料部門の従業者係数は 0.0010 人/百万円とする⁽⁷⁾。

計測の結果は第 16 表に掲げた。この表を見ると、従業者の増加数は E3 で合計 15 人、ガソリンの場合は 3 人となっている。雇用効果の絶対数が小さいのは、1 万 KL の燃料需要増加を想定したシナリオであるためである。北海道内の年間ガソリン消費量は 243 万 KL で 1 万 KL の燃料需要はそのわずか 0.4% に過ぎず、インパクトとしては過小であるかもしれないが、結果の考察の際の煩雑さを避けるため経済波及効果や CO₂ 波及効果と同じシナリオ設定とした。雇用効果の把握はその絶対的な大きさよりもどのような部門において雇用効果が生じているか、また E3 とガソリンとの雇用効果の相違などを分析することが重要であると考え。上記の結果から示唆されることは、バイオ燃料を創設することにより石油製品部門よりも大きな雇用効果が発生するという点である。特に農業部門において就業者増加の効果が大きく、バイオ燃料が農業部門の雇用確保に貢献していることが示された。このことから、雇用効果に関してもガソリンよりも E3 のほうが地域に与える影響は大きいことが明らかになった。

第16表 雇用への影響の計測結果(北海道)

				(人)	
	E3	ガソリン		E3	ガソリン
耕種農業	5	0	鉄鋼製品	0	0
畜産	0	0	非鉄金属一次製品	0	0
林業	0	0	金属製品	0	0
漁業	0	0	機械	0	0
鉱業	0	0	その他の製造品	0	0
と畜・肉・酪農品	0	0	建築	0	0
水産食料品	0	0	建設補修	0	0
その他の食料品	0	0	土木	0	0
繊維	0	0	電力・ガス・水道	0	0
製材・家具	0	0	商業	2	0
パルプ・紙	0	0	金融・保険・不動産	2	0
出版・印刷	0	0	運輸・通信・放送	2	1
化学製品	0	0	公務	0	0
バイオ燃料	1	0	公共サービス	1	0
石油・石炭製品	0	1	サービス業	2	1
石炭製品	0	0	事務用品	0	0
皮革・ゴム	0	0	分類不明	0	0
窯業・土石製品	0	0	内生部門計	15	3

(6) CO₂波及効果の計測結果

最後に、CO₂波及効果により地域内のCO₂排出量への影響を見る。第17表に掲げたCO₂波及効果の計測結果を見ると、E3の場合には合計で2,296tのCO₂排出の増加が北海道内にもたらされることがわかる。一方で、ガソリンの場合は1,254tとなっておりE3の半分程度に留まっている。この結果はE3よりもガソリンの方が地域内にもたらずCO₂波及効果、すなわち生産活動の誘発によるCO₂排出増加はガソリンの方が小さくなることを示しており、域内自給率の関係から域内で発生する生産増加額がE3とガソリンで異なることに起因する。すなわち、北海道における石油製品の域内自給率は33%であり、域内の追加的需要の2/3は北海道外で生産されたガソリンが移輸入されることで賄われることを意味する。したがって、域内での生産増加が少ない分だけ必然的に各部門で増加するCO₂排出量も少なくなるのは十勝地方を対象とした分析と同様である。

第17表 CO₂波及効果の計測結果(北海道)

			(t-CO ₂)		
	E3	ガソリン	E3	ガソリン	
耕種農業	0.4	0.0	鉄鋼製品	0.7	0.2
畜産	1.0	0.0	非鉄金属一次製品	0.0	0.0
林業	0.0	0.0	金属製品	0.4	0.1
漁業	0.0	0.0	機械	0.3	0.1
鉱業	0.1	-0.2	その他の製造品	0.5	0.2
と畜・肉・酪農品	0.0	0.0	建築	0.0	0.0
水産食料品	0.0	0.0	建設補修	0.6	0.2
その他の食料品	0.3	0.0	土木	0.0	0.0
繊維	0.0	0.0	電力・ガス・水道	20.8	12.0
製材・家具	0.1	0.0	商業	2.4	0.7
パルプ・紙	0.8	0.2	金融・保険・不動産	4.1	1.3
出版・印刷	0.7	0.2	運輸・通信・放送	35.3	10.4
化学製品	0.5	0.1	公務	0.0	0.0
バイオ燃料	2,210.5	0.0	公共サービス	0.8	0.3
石油・石炭製品	9.4	1,226.1	サービス業	4.8	1.6
石炭製品	0.2	0.1	事務用品	0.2	0.1
皮革・ゴム	0.0	0.0	分類不明	0.3	0.1
窯業・土石製品	0.9	0.4	内生部門計	2,296.4	1,254.3

次に、部門別のCO₂波及効果を見ると、E3の場合はバイオ燃料部門自身での2,211tのCO₂排出増加以外には運輸・通信・放送部門で35t、電力・ガス・水道部門で21tのCO₂排出増加が見られる程度である。また、農業部門におけるCO₂排出増加はほとんどない。一方、ガソリンについても同様に石油製品部門自身における1,226tのCO₂排出増以外には、電力・ガス・水道部門で12t、運輸・通信・放送部門で10tのCO₂排出増加が見られ、排出増加が大きい部門はE3、ガソリンともほぼ同じである。

ガソリンの方がE3よりもCO₂波及効果が小さいという結果は2つの点を示唆する。第1に、十勝地方での分析と同様、ガソリンの場合には北海道外においてCO₂排出増加がもたらされるという点である。本分析は北海道を対象とした分析であるため、北海道内に限

定した影響を把握するのみで、北海道内における需要を賄うために北海道外においてもたらされる CO₂ 排出増加は考慮されない。これは十勝地方での分析でも指摘した点であるが、北海道に対象範囲を拡張した分析でも同様の限界が指摘でき、この点を踏まえて結果を解釈する必要がある⁽⁸⁾。第2に、経済波及効果と CO₂ 波及効果の大きさの比較が必要となる点である。経済に与える影響が大きくても必ずしも CO₂ 波及効果も大きくなるとは言えない。バイオ燃料の導入に求められるのはより大きな経済効果をもたらしながら CO₂ 排出増加をできるだけ抑制できることであり、このような産業にバイオ燃料部門が該当するのかについては、これまでの分析では明らかにすることができない。この点については章を改め効率性分析により明らかにしたい。

(7) 十勝地方と北海道でのシナリオ設定・結果の違い

これまで十勝地方を対象にした産業連関分析から北海道へと対象範囲を拡張して分析を進めてきた。ここでは十勝地方と北海道における分析の相違点を明確にし、結果の違いを考察する。

まず、十勝地方での分析と北海道での分析ではシナリオ設定が一部異なるところがあり、これが産業連関表の修正過程において影響している（第18表）。大きな違いは適用した産業連関表の年次で、十勝表は1998年、北海道表は2003年延長表を適用した点である。1998年から2003年の間の5年間にガソリン価格が上昇しており、これに伴い E3 価格も両年次間で約12円上昇する結果となった。このことから、E3 の販売額すなわちバイオ燃料部門の生産額が十勝地方の分析では315億円、北海道の分析では356億円となっている。

第18表 十勝地方と北海道の分析におけるシナリオ設定の相違

	十勝地方	北海道
対象年次	1998年	2003年
E3価格(円/L)	90.1	101.8
E3の販売先	最終消費と中間消費	最終消費のみ

もう1つの相違点として、十勝地方と北海道では分析シナリオの E3 販売用途が異なっている。十勝地方の分析では十勝地方におけるガソリン消費すべてを E3 で代替したとしても余剰分が発生するため、最終消費、中間消費の双方を含むすべての十勝地方のガソリン消費が E3 に置き換えられるというシナリオ設定にした。これに対し、北海道の場合は、E3 の生産量が道内ガソリンの最終消費分の一部を置き換える程度に留まるため、E3 はすべて最終消費向けのみ販売されるという設定とした。

このように、十勝地方における分析と北海道における分析ではいくつかのシナリオ設定の違いがあり、これらの違いが十勝地方と北海道での結果の相違をもたらした部分もある。以下、結果の相違の解釈についてはこれらの点を念頭に置いていただきたい。

第 19 表に十勝地方と北海道の結果をまとめた。E3 について見ると、まず経済波及効果、生産誘発係数、雇用効果、CO₂ 波及効果とも対象範囲を拡張した北海道の方が値が大きくなっていることがわかる。これはより広い範囲を分析対象とすることで、経済波及効果が大きくなっていることを示す。この理由としては、十勝地方での分析では移輸入・移輸出に依存する部分が多くなり、域内の経済に波及する効果が限定的になっていることが考えられる。域内自給率の違いがより明確に表れるのはガソリンの方である。十勝地方ではガソリンのほとんどを移輸入に依存しており、域内自給率はわずか 1.5% である。一方、北海道では域内自給率が 33% となっており、これが十勝地方と北海道での分析結果の違いに大きく影響したと考えられる。ただし第 18 表で見たとおり、十勝地方よりも北海道での分析の方が設定した E3 およびガソリンの単価が高くなっており、北海道における経済波及効果の高さは一部これを反映していると考えられることにも注意が必要である。

第19表 十勝地方と北海道の分析結果の違い

	E3		ガソリン	
	十勝	北海道	十勝	北海道
経済波及効果(百万円)	603.6	719.7	8.2	163.3
生産誘発係数	1.09	1.29	1.07	1.16
雇用効果(人)	11.2	14.6	0.1	3.3
CO ₂ 波及効果(t-CO ₂)	1,761.6	2,296.4	49.2	1,254.3
域内自給率(参考)	100%	100%	1.5%	33.3%

注 ガソリンの域内自給率は産業連関表から算出した値である。

経済波及効果に比例する形で CO₂ 波及効果も分析対象を十勝地方から北海道へ拡張することで大きく値が増加している。これは十勝地方での分析では域外とされていた北海道内地域での CO₂ 波及を考慮に入れた結果、値が増加したと考えられる。特にガソリンの場合は十勝地方から北海道へ拡張することで CO₂ 波及効果が E3 よりも大きく増加している。このことは特にガソリンのような域内自給率が低い製品について、当該地域で CO₂ 波及効果を計測することが経済波及効果による CO₂ 排出量増加を過小評価する可能性があることを示唆している。特に地球温暖化に影響がある GHG については限られた狭い範囲で議論すべき問題ではなく、より広範に影響を評価する必要がある。この観点からも CO₂ 波及効果を計測する際には当該製品の域内自給率を考慮し、適切な分析対象範囲を設定すべきであると考えられる。

5. おわりに

本章では、北海道十勝地方におけるバイオエタノール生産を事例として、既存の産業連

関表にバイオ燃料部門を追加した新たな産業連関表を構築し、これをもとにバイオ燃料の需要増に伴う地域経済、雇用への影響のほか、地域内の GHG 排出総量の変化を定量的に計測することを目的として分析を行った。

十勝地方を対象とした分析では、十勝地方における E3 需要増加による経済効果および雇用効果は域内自給率を考慮するとガソリン需要増加よりもはるかに大きな経済効果をもたらし、十勝地方の基幹産業である農業部門にも一定の経済波及効果がもたらされることが示された。一方、CO₂波及効果を見ると、域内自給率の関係から地域内 CO₂ 排出増加がより少ないのはガソリンであることが示されたが、ガソリンの場合域内における CO₂ 排出増加が小さくても域外において CO₂ 排出増加が生じる点を留意しなければならないことが示唆された。

そして、十勝地方を対象とした分析ではその効果の評価部分が限定されることから、十勝地方のみを対象とした分析から北海道を対象とした分析へと拡張を行った。北海道における分析でも経済波及効果と雇用効果については、E3 のほうがガソリンよりもはるかに高いという十勝地方での分析と同様の結果が導かれた。また CO₂ 波及効果でも北海道内にもたらす CO₂ 波及効果、すなわち生産活動の誘発による CO₂ 排出増加は E3 よりもガソリンの方が小さくなるという十勝地方と同様の結果が導かれたが、E3 とガソリンの差は十勝地方よりも縮小する結果となった。十勝地方での分析と北海道での分析ではシナリオ設定や対象年次が異なるため単純に比較することはできないが、両者でほぼ同様の結果が得られたことから、E3 とガソリンの比較における E3 の優位性として経済および雇用への影響を挙げることができるだろう。

本章の分析で残された課題は経済波及効果と CO₂ 波及効果の大きさの比較を行うことであり、より大きな経済効果をもたらしながら CO₂ 排出増加をできるだけ抑制できるかどうかを把握することである。この点については次章で効率性分析により明らかにする。

〔注〕

- (1) 現在のところ、実際の事業計画では十勝地方において生産されるバイオエタノールは一旦神奈川県へ輸送し、そこで ETBE へ加工された後、全国のガソリンスタンドで販売されることが計画されている。
- (2) その他食料品部門からバイオエタノール生産へ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はその他食料品部門に計上されている。
- (3) 産業連関表における副産物の取り扱い方法には本分析で採用した一括方式のほか、分離方式、トランスファー方式、マイナス方式（ストーン方式）、分離方式、表章方式などがある。これらの方法の詳細については、総務省（2004）を参照のこと。
- (4) E3 の域内自給率が 100%であっても、その生産に移輸入財が投入される場合には域外で

の CO₂ 排出増加も生じるが、ここではそれは考慮していない。

- (5) 十勝地方での分析と同様、ガソリン 1L の価格からエタノール分のガソリン税 (53.8 円/L × 3% = 1.614 円/L) を控除した金額を E3 の価格として生産額を算出した。
- (6) 例えば、バイオエタノール導入直後はガソリンの移輸入を代替し、その後最終的にはガソリンの域内生産を代替するということも考えられる。
- (7) バイオ燃料部門の従業者係数は十勝地方と同様に第 4 表から従業員 36 人として計算しているが、十勝地方の分析と北海道の分析ではバイオ燃料部門の域内生産額が異なるため、従業者係数も異なっている。
- (8) この問題を解決するには移輸入財の生産による環境負荷を計算に入れる方法が考えられる。エコロジカル・フットプリントは環境負荷排出の起因となる主体に帰属させる方法が採用されている。これらの手法の導入した分析の拡張については今後の課題としたい。エコロジカル・フットプリントの詳細は Wackernagel and Rees(1996)を参照のこと。

〔引用文献〕

- Evans, M., (1997) “The Impact of the demand for ethanol” *RFA Reports and Studies*
<http://www.ethanolrfa.org/resource/reports/>
- 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。
- 北海道電力 (online) 『北海道電力ホームページ』 <http://www.hepco.co.jp/>
- 北海道経済産業局 (online) 『北海道経済産業局 資源・エネルギーホームページ』
http://www.hkd.meti.go.jp/information/sigen_energy/index.htm
- 国土交通省 (online) <http://toukei.mlit.go.jp/jidousya/jidousya.html>
- 國光洋二, 上田達己 (2006) 「穀物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。
- 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して—』, 国立環境研究所地球環境研究センター。
- 日本関税協会 (1999) 『日本貿易月報'98.12』。
- 日本関税協会 (2004) 『日本貿易月報'03.12』。
- 大深正徳, 中村和正, 樺澤雅之 (2007) 「資源作物によるエタノール原料供給モデルの事例検討」, 第 50 回 (平成 18 年度) 北海道開発局技術研究発表会報告資料。
- 石油情報センター (online) 『石油情報センターホームページ』 <http://oil-info.ieej.or.jp/>
- 総務省 (2004) 『平成 12 年 (2000 年) 産業連関表—総合解説編—』。
- 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。
- Urbanchuk, 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/>
Wackernagel, M. and Rees, W., (1996) “Our Ecological Footprint – Reducing Human Impact on the Earth–” New Society Publishers (和田喜彦監訳・解題, 池田真理訳『エコロジカル・フットプリントー地球環境持続のための実践プランニング・ツールー』合同出版)。
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ー北海道地域を対象とした連関効果の推計ー」『地域学研究』36(3), pp.611-620。

付表1 バイオ燃料部門追加十勝支庁産業連関表(1998年)

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	内生部門 計	域 最終需要計	域 内 輸移入計	(控 除) 輸移入計	域 生 産 額
耕種農業	7,729	26,449	6	0	0	508	0	43,258	1,044	0	36	0	12	14	408	1,388	0	0	80,852	9,446	98,983	-30,672	158,609
01 畜産	9,731	16,123	53	0	0	0	0	52,143	0	0	0	0	0	1	1	81	334	0	78,467	12,815	72,179	-15,697	147,764
02 林業	18	0	4,596	0	0	0	0	7,138	61	0	0	0	0	0	7	147	0	0	11,968	7,739	7,729	-1,978	25,458
03 漁業	0	0	0	206	0	0	0	3,470	0	0	0	0	1	4	179	798	0	0	4,658	1,966	2,197	-1,660	7,161
04 鉱業	0	0	0	0	12	0	358	2,550	7,123	649	0	0	0	5	7	2	2	2	10,708	-56	4,802	-1,536	13,918
05 バイオ燃料	629	355	402	263	436	0	13	1,252	1,883	483	1,063	102	2,699	747	548	664	0	54	11,593	7,535	12,372	-25,784	31,500
06 その他石油製品	559	315	355	232	386	9,252	12	1,101	1,664	429	940	91	2,387	661	484	586	0	47	15,501	6,667	695	-459,043	437,675
07 その他製造品	20,490	24,611	1,033	907	574	216	5	106,699	89,387	1,309	9,738	1,726	3,109	18,741	34,561	39,663	3,735	805	357,309	254,022	285,387	-459,043	437,675
08 その他製造品	20,490	24,611	1,033	907	574	216	5	106,699	89,387	1,309	9,738	1,726	3,109	18,741	34,561	39,663	3,735	805	357,309	254,022	285,387	-459,043	437,675
09 建設業	318	343	140	4	95	29	1	1,659	1,186	1,742	3,352	559	1,913	4,433	5,776	7,049	0	186	40,115	370,592	227	-23,375	387,218
10 電力・ガス・水道	172	1,219	107	23	338	84	12	8,577	2,515	3,800	3,352	559	1,913	4,433	5,776	7,049	0	186	40,115	370,592	227	-23,375	387,218
11 商業	8,801	4,108	937	516	558	409	14	34,538	27,990	611	4,246	545	3,102	4,109	12,199	16,067	1,036	245	194,288	77,005	-118,750	-118,750	272,594
12 金融・保険・不動産	2,390	6,247	767	173	1,050	467	16	6,349	17,381	880	19,691	9,690	4,786	830	4,427	12,469	0	2,567	81,540	129,069	2,262	-85,999	156,872
13 運輸・通信・放送	3,960	6,459	2,641	191	695	876	30	16,954	19,865	924	11,775	1,652	11,597	6,508	5,279	9,234	263	170	97,273	69,424	72,812	-90,743	148,766
14 公務	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,777	158,919	3,176	-2,918	161,696	
15 公共サービス	19	331	37	18	16	175	6	6,839	1,770	730	812	199	1,494	135	3,746	1,397	0	136	17,860	250,332	3,176	-2,918	161,696
16 サービス業	3,166	2,387	946	134	1,960	292	10	16,415	44,875	4,185	17,979	5,655	13,456	14,241	13,684	21,851	0	560	161,796	150,173	70,507	-98,707	283,769
17 事務用品	2	51	34	25	26	0	0	564	330	77	1,346	173	343	545	779	736	0	4	5,035	779	0	-88,707	5,035
18 分類不明	1,356	1,975	343	48	207	0	0	2,252	986	240	2,405	1,035	861	2,759	1,922	1,226	1	0	17,616	73	871	-2,906	15,654
域内生産額	59,130	90,973	12,167	2,740	6,353	12,308	477	311,758	208,060	16,059	74,901	25,894	46,670	55,206	85,680	114,781	5,035	7,553	1,135,745	1,648,598	711,204	-929,768	2,565,780
域外消費支出	0	0	0	0	0	0	0	-19	-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-36	0	0	0	0
雇用者所得	3	239	304	242	478	88	3	6,979	6,218	792	6,384	1,334	2,683	2,678	3,348	7,424	0	71	39,278	0	0	0	0
営業余剰	3,515	11,978	11,888	1,521	3,812	730	25	70,556	132,349	10,250	128,482	20,078	68,142	97,193	152,079	98,458	0	499	811,555	0	0	0	0
資本減耗引当	75,113	28,566	1,565	1,445	1,587	851	24	23,532	17,379	5,104	33,421	62,901	9,050	6,114	11,452	27,410	0	6,431	305,831	0	0	0	0
間接税(除開税)	20,433	15,432	737	947	1,067	1,808	55	19,099	14,145	8,991	17,905	33,228	16,975	6,114	18,907	23,466	0	966	205,056	0	0	0	0
(控除)補助金	9,950	4,671	607	274	653	18,248	496	12,070	10,720	1,944	12,463	8,654	5,849	505	2,514	12,760	0	141	101,665	0	0	0	0
域付加価値部門計	99,479	56,791	13,291	4,421	7,565	19,193	602	125,936	179,175	26,503	197,693	130,978	102,096	106,490	182,770	168,988	0	8,101	1,430,072	0	0	0	0
域内生産額	158,609	147,764	25,458	7,161	13,918	31,500	1,079	437,675	387,218	42,582	272,594	156,672	148,766	161,696	268,450	283,769	5,035	15,654	2,565,780	0	0	0	0

付表2 バイオ燃料部門追加北海道産業連関表延長表(2003年)

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	内生部門 計	道 最終需要計	内 輸移出計	(使 入) 輸移入計	道 内 生産額
01 耕種農業	23,005	90,722	43	0	0	508	0	277,342	9,650	0	687	2	365	190	7,540	21,876	0	0	431,929	142,586	343,058	-241,071	676,502
02 畜産	63,655	87,297	31	0	0	0	0	244,612	439	0	0	0	42	8	1,374	4,642	0	0	401,661	106,422	220,162	-21,006	707,239
03 林業	140	0	8,979	50	102	0	0	42,212	0	0	0	0	0	18	123	1,929	0	0	53,992	9,806	1,450	-21,264	43,984
04 漁業	0	0	0	4,239	0	0	0	216,211	0	0	0	0	48	38	2,794	10,705	0	0	234,035	14,549	69,143	-46,755	270,972
05 鉱業	0	0	3	0	69	2	298,369	45,210	57,086	17,201	0	0	0	2	66	43	-9	28	418,070	-264	21,147	-323,062	115,891
06 バイオ燃料	8,692	4,890	1,477	21,802	8,588	12,469	17,674	54,856	51,424	58,525	53,308	8,928	107,566	31,940	25,423	30,958	0	0	501,061	147,245	336,568	-396,476	35,597
07 石油製品	77,436	134,217	2,916	36,298	6,669	300	3,783	1,487,691	780,905	29,982	128,966	51,075	65,632	233,063	504,223	604,007	41,791	11,617	4,200,551	3,456,072	2,679,666	-5,099,462	5,236,827
08 その他製造品	1,632	3,754	179	77	637	41	677	17,506	9,824	38,291	24,404	109,659	24,818	16,984	30,352	20,582	0	6	299,403	3,124,409	0	-2,347	3,423,812
09 建設業	2,201	9,446	378	306	3,923	77	6,158	124,862	21,771	58,747	58,464	21,800	46,450	52,147	104,938	118,592	0	2,504	632,853	378,073	764	-3,247	1,009,348
10 電力・ガス・水道	31,341	32,621	1,494	17,955	4,090	285	4,708	373,055	230,945	17,190	77,923	14,926	42,256	44,243	182,082	246,286	15,911	1,911	1,339,201	2,875,212	895,449	-1,320,514	3,789,348
11 商業	17,330	25,659	1,081	4,325	7,987	531	8,784	69,737	63,562	56,363	259,885	258,892	139,454	8,966	64,711	201,850	0	42,985	1,232,142	2,489,408	36,831	-54,447	2,713,934
12 金融・保険・不動産	8,105	18,715	2,118	4,920	4,204	778	12,858	157,860	160,673	21,488	168,003	64,915	303,793	95,448	82,373	182,756	2,799	8,051	1,299,857	1,109,103	557,720	-346,570	2,619,110
13 運輸・通信・放送	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,603	2,571,745	0	0	2,595,348	
14 公務	103	731	154	798	790	239	3,944	135,298	17,707	31,832	15,016	6,917	23,750	898	53,484	30,860	0	4,266	326,786	3,550,416	21,297	-23,603	3,874,896
15 公共サービス	13,756	12,644	1,329	4,389	16,532	222	3,677	162,814	326,438	67,992	299,746	236,184	276,075	179,940	226,956	380,747	0	11,718	2,241,158	2,243,794	651,099	-559,495	4,576,556
16 サービス業	7	242	27	442	141	1	15	4,521	1,365	1,078	14,664	5,596	4,858	5,408	10,570	11,456	0	122	60,513	0	0	0	60,513
17 事務用品	3,545	5,180	51	1,097	2,615	13	211	26,632	21,470	9,480	34,310	14,656	15,240	1,143	7,482	14,940	12	0	158,078	3,149	3,678	-5,251	159,654
18 分類不明	250,947	426,118	20,260	96,698	56,337	15,465	360,859	3,440,417	1,753,257	428,151	1,135,376	793,640	1,050,349	670,500	1,304,466	1,882,157	60,513	109,382	13,854,893	22,266,322	5,838,032	-8,461,323	33,497,925
道外消費支出	181	1,395	383	10,327	5,819	97	1,603	79,373	48,576	19,377	82,651	50,567	104,955	48,145	52,662	107,915	0	4,396	618,721	0	0	0	0
雇用者所得	25,978	67,154	11,793	61,234	23,637	591	9,777	839,309	1,262,253	217,612	1,722,026	539,901	937,592	1,202,415	2,261,017	1,489,217	0	8,814	10,680,319	0	0	0	0
営業余剰	289,548	121,869	8,855	58,032	14,601	499	5,775	414,495	70,562	131,320	403,771	1,307,322	153,577	0	158,930	473,693	0	16,140	3,628,839	0	0	0	0
資本減耗引当	87,353	79,447	3,232	29,548	10,964	1,112	18,391	244,328	180,229	152,035	208,177	917,775	272,549	0	86,660	436,122	0	17,890	2,745,751	0	0	0	0
資本減耗引当 (社会資本等減耗分)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,505	0	0	0	667,306	40,947	0	0	719,251	0	0	0	0
間接税(除開税)	46,380	33,604	2,286	16,393	6,872	18,248	193,006	260,618	156,528	58,875	252,407	181,207	108,954	6,982	43,183	192,269	0	3,143	1,580,954	0	0	0	0
(控除)経常補助金	-23,885	-22,348	-2,824	-1,260	-3,332	-415	-1,012	-41,785	-47,583	-8,532	-15,001	-16,477	-9,286	0	-73,269	-4,817	0	-111	130,904	0	0	0	0
組付加価額	476,502	707,239	43,984	270,972	115,891	35,597	588,398	5,236,827	2,423,812	1,009,343	3,789,348	3,713,934	2,619,110	2,595,348	3,874,896	3,547,925	0	60,513	33,497,925	0	0	0	0
道内生産額	676,502	707,239	43,984	270,972	115,891	35,597	588,398	5,236,827	2,423,812	1,009,343	3,789,348	3,713,934	2,619,110	2,595,348	3,874,896	3,547,925	0	60,513	33,497,925	0	0	0	0

第4章 環境と経済の統合指標による総合評価

林 岳

増田清敬（滋賀県立大学）

山本 充（小樽商科大学）

高橋義文（北星学園大学）

1. はじめに

第2章では LCA 分析を用いてバイオ燃料の GHG 削減効果を計測し、第3章では産業連関分析を用いてバイオ燃料の経済波及効果、雇用への影響および CO₂ 波及効果を定量的に評価した。これをもって環境面への影響と経済面への影響を評価したことになるが、これらの影響の大きさを直接比較することはできない。特に第3章の分析で得られた経済波及効果と CO₂ 波及効果の2つの効果は、バイオ燃料の効果の中でも地域経済と地域環境への影響を計測したマクロ的な視点からの評価と言える。バイオ燃料の普及導入にはより高い環境負荷削減効果とより高い地域経済効果の双方を達成することが求められるが、これらの効果が別個の手法により評価すると両者の関係を総合的に判断することができない。したがって、バイオ燃料の総合的な評価を行うためには環境面と経済面の総合的指標を構築し評価することが必要である。

そこで、本章ではバイオ燃料の環境面と経済面の影響の双方を統合するための指標を提示し、これを用いて前章までに評価したバイオ燃料の効果を統合し、環境面と経済面の双方を考慮したバイオ燃料の総合的評価を行う。

環境面と経済面を統合した総合的指標にはさまざまなものが提案されている。例えばエコロジカル・フットプリントやグリーン GDP、エネルギー効率、環境効率指標などが挙げられる。このうち環境効率指標とは環境負荷1単位あたりの生産額、付加価値額などを計測する指標で、これを計測することで一定量の環境負荷排出によりどのくらいの生産額や付加価値、利益を得ることができるかを見ることができる。本章ではこれらの総合的指標のうち、環境効率指標を適用し、本稿のこれまでの分析で得られた結果を利用できるように改良し、環境面と経済面の双方を考慮したバイオ燃料生産の総合的評価を行う。以降、第2節において既存研究を整理した後、第3節でバイオ燃料生産の環境指標として第2章で得られた結果を用いて GHG 効率を計測する。続いて第4節では第3章の分析で得られた結果をもとに地域全体での環境効率を計測することを試みる。そして、第5節では環境勘定体系を用いたバイオ燃料に関する指標の体系的な整理手法を提示する。

2. バイオ燃料の総合的指標の既存研究

バイオ燃料の諸効果を 1 つの総合的指標によって評価した先行研究としては Hu et al. (2004)が挙げられる。Hu et al. (2004)はバイオ燃料の LCA 分析をベースに経済面，環境面，エネルギー面の 3 側面を総合的に評価する指標を提示している。この研究では中国広西県において通常のガソリンを使用した車両とキャッサバ原料の E85 を使用した車両を 20 万 km 走行させた場合を想定し，LCA 分析によって得られたエネルギー消費および環境負荷排出量に原料生産から車両の廃棄までにかかる総費用を組み込んだ新たな指標（EEE 指標）を構築している。EEE 指標は以下の式で表される。

$$EEE = \begin{bmatrix} C \\ Env \\ En \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_C & \alpha_{Env} & \alpha_{En} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで， C はライフサイクルコスト（総費用）， Env は環境負荷排出量， En はエネルギー消費量で， Env と En については LCA 分析によって計測された各種環境負荷およびエネルギーをウェイト付けして集計したものである。 α_C ， α_{Env} ， α_{En} はそれぞれ総費用，環境負荷排出量，エネルギー消費量のウェイトである。したがって，EEE は総費用，環境負荷排出量，エネルギー消費量のウェイト付けした集計値となり，この指標が小さければ小さいほどバイオ燃料の総合的パフォーマンスが高いことを表す。Hu et al. (2004)ではガソリン使用車に比べ，E85 使用車の EEE 指標が 29%低くなるという結果を導き，ここから費用面，環境面，エネルギー消費面の 3 側面を総合的に考慮した場合，バイオ燃料の導入は中国において持続可能な輸送用燃料の発展に貢献するとの結論を導いている。

Hu et al. (2004)はバイオ燃料の個別の指標を統合した新たな総合的指標を提示した点で先駆的な研究といえよう。しかしながら，この研究では以下の 2 つの点が問題点として挙げられる。第 1 に α_C ， α_{Env} ， α_{En} の設定が恣意的である点である。Hu et al. (2004)では α_C を 1.0， α_{Env} を 0.6， α_{En} を 0.8 と設定しており，この数値設定の理由として広西県は開発途上地域であり経済性をもっとも重視され，環境側面はそれほど重要ではないことを挙げている。しかしながら，なぜ環境面が費用面の 3/5 のウェイトになるのかといった明確な説明はなされていない点に問題がある。第 2 の問題点として，費用面がミクロ的な費用として取り扱われマクロ的な費用を考慮していない点である。すなわち費用面が 1km あたりの金額で算出され，そこに考慮されている費用項目が広西県全体としてどのくらいの費用負担になるのかといったマクロ的な考察がなされていない点である。

3. GHG 効率の計測によるバイオ燃料の評価

(1) GHG 効率の定義

本節では Hu et al. (2004)の問題点を解決するため指標に以下の2点の改良を加えた。第1に費用、環境負荷排出量、エネルギー消費量の3項目だった評価視点を経済面と環境面の2つに絞った点である。第2章で紹介した LCA 分析では、エネルギー消費として重油、軽油、ガソリンといった化石燃料のほか、電力エネルギーや一部バイオマスエネルギーの投入を考慮しているが、バイオマスエネルギーを除いたいずれの燃料もエネルギー消費量に環境負荷排出原単位を乗じて環境負荷排出量を計算している。したがって、エネルギー消費量と環境負荷排出量の間には相関関係が存在する。このことから、本節ではエネルギー消費量と環境負荷排出量を1つの指標としてまとめることとした。第2にウェイト付けの恣意性の問題を解決するため、経済指標と環境指標の比を取った効率指標を新たな統合指標とした。ここでは一般的な環境効率の定義に従い、E3 製造のみを対象としたときに発生する環境負荷とその生産額から環境効率を求める。 i 財の一般的な環境効率 E_i の定義は、 E_i を i 財生産に伴う環境負荷量、 V_i を i 財の付加価値額として以下の式で表される(1)。

$$EE_i = V_i / E_i \quad (2)$$

環境効率では E_i の計測についても、ライフサイクルではなくプラント内における環境負荷のみを計測対象とすることが一般的である。しかしながら、本分析では LCA 分析を既に行っていること、環境負荷の計測はプラント内に限定すべきものではなくライフサイクルで適切であると考えられることから、ここで適用する環境負荷には第2章で計測した LCA 分析による GHG 排出量を取り上げる。一方、経済指標は E3 の付加価値額を採用する。本節での GHG 効率は $GHGE_{E3}$ を E3 製造に伴う GHG 排出量 (LCA ベース)、 V_{E3} を E3 の付加価値額として以下の式で定義される。

$$GHGE_{E3} = V_{E3} / GHG_{E3} \quad (3)$$

同様の定義で、ガソリンについても GHG 排出量を分母に、付加価値額を分子に取った GHG 効率を定義し、E3 とガソリンの GHG 効率性の比較を行う。

この定義に従った環境指標に類似する指標として、第3章での分析の際に用いたバイオ燃料部門の CO₂ 排出原単位が挙げられる。CO₂ 排出原単位はバイオ燃料の生産額百万円あ

たりの CO₂ 排出量で定義されるが、本節で定義する GHG 効率とは以下の点が異なる。最も重要な相違点は計測対象となる GHG の範囲の違いである。CO₂ 排出原単位はバイオ燃料の原料生産からバイオ燃料自体の製造までの CO₂ を計測対象としているのに対し、GHG 効率は LCA 分析を基礎としているため、生産された燃料の輸送や消費に伴う GHG 排出も計測対象としている。また、CO₂ 排出原単位は産業連関表を基礎としているため、国内における CO₂ 排出のみを対象としており、域外における原材料生産に伴う GHG 排出、すなわち原材料の移輸入に伴う環境負荷は考慮されていない。GHG 効率は原材料の生産地域がどこであるかに関わらず、生産から消費まで一貫して計測対象としていることから、CO₂ 排出原単位は GHG 効率よりも対象とする範囲が狭いと言える。第 1 表には CO₂ 排出原単位と GHG 効率の計測対象範囲の違いがまとめられている。このことはバイオエタノールのように原材料を域内で調達する場合にはそれほど大きな問題とはならないが、例えばガソリンの場合は海外の油田での原油採掘時における CO₂ 排出や燃焼時に大半の CO₂ 排出が含まれないため、CO₂ 排出原単位は過小評価になることを意味する⁽²⁾。このほか CO₂ 排出原単位は GHG のうち CO₂ だけを対象としているが、本分析での GHG 効率は CO₂ のほか、N₂O も計測対象としている。

第1表 CO₂排出原単位とGHG効率の計測対象

	原料生産 (域外)	原料生産 (域内)	製品製造	消費	計測対象GHG
CO ₂ 排出原単位		○	○		CO ₂ のみ
GHG効率	○	○	○	○	CO ₂ , N ₂ O

注 ○印は計測対象であることを示す。

次に、生産額と付加価値額の違いと指標の分母・分子が入れ替わっている点が相違点として挙げられる。CO₂ 排出原単位は産業連関表から求められる粗生産額を基準としているが GHG 効率は付加価値額を経済指標に採用している。さらに、CO₂ 排出原単位は生産額百万円あたりの CO₂ 排出量であり分母に経済指標、分子に環境指標がくるのに対し、一般的な環境効率は環境負荷単位あたりの環境負荷量で定義され分母が環境指標、分子が経済指標と、CO₂ 排出原単位とは指標の分母と分子が逆となる。

このように、本分析で定義する GHG 効率は CO₂ 排出原単位とはいくつかの点で異なる指標である。以下の計測結果は上記の相違点を踏まえて解釈願いたい。

(2) GHG 効率の計測

前述のとおり、本分析で定義する GHG 効率には指標の分母となる環境指標として第 2 章の LCA 分析から得られた GHG 排出量を採用する。第 2 章で示したとおり LCA 分析の

結果、十勝地方のバイオエタノール生産により発生する GHG は $62.7\text{kg-CO}_2/\text{GJ-fuel}$ となっており、この値は原料生産から燃料消費までの各段階における GHG 排出量の合計である。しかしながら、本分析で対象とするのは E3 の GHG 効率であり、バイオエタノールのほか、混合されるガソリンの GHG 排出量（ライフサイクルベース）が必要となる。そこで、第2章で比較対象とした船崎・種田（1999）からガソリンのライフサイクルベースの GHG 排出量を引用し、第2章の分析結果と合わせて E3 の GHG 排出量を算出する（第2表）。

第2表 E3のライフサイクルGHG排出量の推計

	バイオ エタノール	E3用 ガソリン	E3 (合計)
数量(KL)	10,490	339,178	349,668
熱量(GJ)	247,221	11,736,052	11,983,272
熱量単位あたりGHG排出量($\text{t-CO}_2/\text{GJ-fuel}$)	0.0627	0.0738	—
ライフサイクルGHG排出量(t-CO_2)	15,505	865,814	881,318

出所: 船崎・種田(1999), 本稿第2章.

一方経済指標について、一般的な環境効率では付加価値額のほか生産量や生産額を経済指標として分子に取ることがあるが、本節では産業連関表から算出される付加価値額を経済指標として採用する。付加価値額を採用する理由は、付加価値額が GDP といったマクロ経済指標に関連しており、この後の第4節の分析にも関連するためである。まず、バイオ燃料部門すなわち E3 の域内生産額は第3章第4節における分析から 356 億円と推計されており⁽³⁾、この金額をベースに付加価値額を推計する。第3章第4節で用いた北海道表からバイオ燃料部門の付加価値率を適用し、E3 の域内生産額に付加価値率を乗じることで E3 の付加価値額を算出する（第3表）。

以上、E3 の GHG 排出量と付加価値額の算出方法を解説したが、これと同様の方法により、ガソリンの GHG 排出量と付加価値額も算出し、E3 との比較を行う。

第3表 E3の付加価値額の推計

E3の生産額(百万円)	35,597
バイオ燃料部門の付加価値率	0.566
E3の付加価値額(百万円)	20,132

出所: 本稿第3章.

注 数値はE3 34万9,668KLあたり.

(3) 計測結果

第4表には E3 とガソリンの生産に伴う GHG 効率の計測結果が示されている。これを見ると、E3 の GHG 効率は 22,843 円/t-CO₂、一方でガソリンのそれは 15,667 円/t-CO₂ となっており、E3 のほうがガソリンを上回る結果となった。これは E3 のほうがガソリンよりもより少ない GHG 排出でより多くの付加価値をもたらすことを意味し、経済面と環境面の双方を考慮した総合的指標では、E3 のほうがガソリンよりも優位であることを示すものである。

第4表 GHG効率の計測結果

	E3	ガソリン
GHG排出量(t-CO ₂ /1万KL)	25,204	25,527
付加価値額(百万円/1万KL)	576	400
GHG効率(円/t-CO ₂)	22,843	15,667

出所:本稿第2章, 第3章.

注 ガソリンはE3 1万KLと発熱量等価である9904KLあたりの数値.

上記の結果は十勝地方におけるバイオエタノール生産を一般的な環境効率の定義に従って計測したものであり、一事業主体のプラントを中心としたいわばプラントレベルのミクロ的な効率性評価の結果と言える⁽⁴⁾。しかしながら、第3章で計測した経済波及効果の結果からも示されるとおり、バイオエタノール生産を開始することによる影響は個々の事業所レベルには留まらず地域経済に様々な影響をもたらす。したがって、環境効率の評価についてもプラントレベルから地域レベルへと拡張した概念により行うことが重要と考える。次節では環境効率の概念を拡張し地域レベルにおけるバイオエタノール生産の環境効率性評価を試みる。

4. 地域レベルの環境効率による評価

(1) 背景と環境効率指標の提示

本節では北海道を対象として十勝地方におけるバイオエタノール生産による環境効率を地域単位で評価する。先の既存研究で紹介した Hu et al. (2004)は、LCA 分析から得られたデータを基礎として用いていることから、本稿前節と同様、プラントレベルをベースとした環境効率を計測していると言える。そこで、本節では地域環境・地域経済への影響を評価できるように前節で行った2点の改良に加え、さらに経済面の指標をライフサイクルコストではなく産業連関分析から導かれる誘発 GDP 額とする改良を行った。これによりプラントレベルでの効果分析ではなくマクロ的な視点からの経済効果の評価が可能となる。

以上のような改良を加えた総合指標として CO₂ 効率を定義し分析に用いる⁽⁵⁾。具体的に

は、本分析における CO₂ 効率は CO₂ 増加量あたりの域内誘発 GDP 額と定義する。すなわち、CO₂ 効率は 1 t の CO₂ 排出増加によりどのくらいの経済波及効果がもたらされるかを示す値である。

(2) 分析シナリオと計測結果

第3章での産業連関分析のシナリオ設定と分析により求められた経済波及効果と CO₂ 波及効果の計測結果はそれぞれ第5表、第6表にまとめられている。また、経済波及効果と CO₂ 波及効果から求められる CO₂ 効率は第6表に示されている。これを見ると、E3 の CO₂ 効率は E3 で 31 万 3,400 円/t-CO₂、ガソリンの場合で 13 万 2,000 円/t-CO₂ であり、E3 のほうがガソリンよりも CO₂ 効率が 2 倍以上高いことが示された。

第5表 分析シナリオの設定値

	E3	ガソリン
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6表 経済波及効果とCO₂波及効果およびCO₂効率の計測結果

	E3	ガソリン
CO ₂ 波及効果(t-CO ₂)	2,296	1,254
誘発GDP額(百万円)	720	163
CO ₂ 効率(円/t-CO ₂)	313,393	130,196

前節における GHG 効率と比較すると、マクロ的な視点から環境効率を計測した結果 E3 のガソリンに対する優位性はより高まっていることがわかる。この点をより深く考察するために GHG 効率と CO₂ 効率の相違点を整理しよう(第7表)。まず対象となる GHG の範囲が異なり、CO₂ 効率は CO₂ のみを計測対象とし GHG 効率は CO₂ のほか N₂O も計測対象としている。第2に GHG 効率が第2章での LCA 分析の結果を基礎としているのに対し CO₂ 効率は第3章の産業連関分析で得られた CO₂ 波及効果を基礎データとして使用している。これは GHG 効率がプラントレベルをベースとして、バイオエタノールの原料生産から燃料消費までに GHG を対象としている一方で、CO₂ 効率は原材料生産からバイオエタノール生産までを対象としている。これを見ると、CO₂ 効率のほうが GHG 効率よりも対象とする範囲が狭く思われるかもしれないが、CO₂ 効率は産業連関分析を適用していることから GHG 効率に比べ原材料生産による影響をより広範に捉えることができるのである。第3に経済指標について GHG 効率は付加価値額、CO₂ 効率は誘発 GDP 額を適用している。国民経済計算の定義としては GDP も付加価値額であることから本質的に両者は変わらないが、CO₂ 効率の方が地域経済への影響をより広範に網羅している点異なる。このように GHG 効率と CO₂ 効率を比較すると、CO₂ 効率の方がより広範な影響を捉えることができ、このことから CO₂ 効率は環境面と経済面を考慮した統合指標であるとともに地域への包括的な影響を捉える指標と言える。

第7表 GHG効率とCO₂効率の相違点

	GHG効率	CO ₂ 効率
対象GHG	CO ₂ , N ₂ O	CO ₂ のみ
環境負荷の対象範囲	原料生産から燃料消費まで	原料生産からバイオエタノール生産まで
原材料生産の後方連関効果	含まない	含む
経済指標	付加価値額	誘発GDP額

第8表には GHG 効率と CO₂ 効率の計測結果が掲げられている。これを見ながら両者の比較と結果の違いの要因を考察する。まず効率指標の数値で見ると、GHG 効率よりも CO₂ 効率のほうがはるかに大きな値となっている。これは前述のとおり CO₂ 効率の方が GHG 効率よりも経済指標の計測対象範囲が広いことが影響していると考えられる。E3 とガソリンの GHG 効率または CO₂ 効率の比を見ると、GHG 効率よりも CO₂ 効率のほうが値が大きく GHG 効率よりも CO₂ 効率のほうが E3 の優位性が高まっていることがわかる。これはマクロ的な評価を行うことによってプラントレベルでの評価に比べ E3 の優位性が高まることを示している。このような結果がもたらされる CO₂ 効率の推計に用いた経済波及効果の大きさの違いによるものと推察され、E3 が地域経済に与える影響が大きいと考えられる。このようなことから本分析における CO₂ 効率は単純にプラントレベルの環境効率では把握できない地域への影響を考慮しており、それにより環境効率の評価が大きく変わることが明らかとなった。

第8表 GHG効率とCO₂効率
(円/t-CO₂)

	E3	ガソリン	E3/ガソリン
GHG効率	22,843	15,667	1.46
CO ₂ 効率	313,393	130,196	2.41

以上、本分析での結果をまとめると、環境面と経済面の双方を考慮する指標を適用して評価した結果、プラントレベルの GHG 効率、地域レベルの CO₂ 効率ともに E3 のほうがガソリンに比べ優位な状況にあることが示された。E3 の環境効率が高いことは E3 がガソリンに比べ環境負荷の発生を抑制しながらより高い経済的影響をもたらすことを示すものである。しかしながら、本分析での環境効率では GHG のみを取り上げて計測しているため、他の環境負荷の動向は把握できない。したがって、同様の効率指標の計測を他の環境負荷についても行うことが望ましい。また、環境面と経済面の総合的指標は環境効率指標に限られるものではなく、ほかにも多くの指標が提唱されている。次章では環境指標以外の総合的影響評価手法について解説する。

5. バイオ燃料評価のためのハイブリッド型環境勘定の構築

（１）はじめに

前節までの分析では産業連関分析の結果から環境効率を推計し、バイオエタノール生産の環境面・経済面への影響を総合的に評価してきたが、環境指標の算定の基礎となる環境面の影響を捉える手法には LCA 分析や産業連関分析による CO₂ 波及効果以外にもいくつかの手法が考えられる。その 1 つの手法としてマテリアルフロー分析が挙げられ、これは経済活動および人間活動によって地球上の物質がどのように動いているのかを把握する分析手法である。これをバイオエタノール生産に適用することでバイオエタノール生産の導入により発生する環境負荷物質を含めたあらゆる物質の動きの変化を把握することができ、環境への複合的な影響を評価することができる。さらに、これを経済活動とリンクさせることにより複合的環境影響のほか経済指標との関連も分析でき、環境経済指標による総合的な評価も可能となる。そして、このようなマテリアルフローと経済指標を統合するためにはその情報基盤として環境勘定を作成することが有効であり⁽⁶⁾、上記の目的を達成する環境勘定の構築には既存のハイブリッド型環境勘定を援用することができる。

そこで、本節ではバイオ燃料による複合的な環境影響を評価することを念頭に置き、ハイブリッド型環境勘定を援用して環境経済指標による総合的指標の構築を目指して経済システムへの物質の投入産出をマテリアルフロー勘定として明示する環境勘定フレームワークを検討することを目的とする。このような環境勘定の構築により、経済システム内で流動する物質の量や再生・中間処理による廃棄物の減量化の状況など経済システムの物質使用量の実態が明確化するため、資源生産性や環境効率性などの環境経済指標も導出でき物理的次元での持続可能性をより適切なかたちで評価できるものと考えられる。さらには物理的次元の情報に基づいた環境政策の立案に貢献できると考えられる。

（２）ハイブリッド型環境勘定とマテリアルフロー

地球の環境中において物質は様々な形態で存在し常にその賦存形態は変化している。ただし、物質は全体として増加も減少もしない。これは地球が宇宙に対して物質的に閉じたシステムであるからである⁽⁷⁾。ゆえに地球上の環境中に賦存する物質の量は常に一定であり、例えば人工資本の蓄積は一方で自然資本の減耗（＝量的減少）となる。

しかしながら、人工資本の維持には一定の自然資本の投入が不可欠なため、経済システムを恒常的に維持するためには環境との間で資源・エネルギーの交換が必要である。したがって、これに必要な資源・エネルギー量は経済システムの総自然資本投入量を規定すると言える。このことから考えると、この総自然資本投入量が環境の自然資本再生力の範囲内に収まっていることが環境を持続可能な水準に維持するために必要な条件となる。それゆえ、経済システムの持続可能性を評価するためには自然資本投入量、人工資本量などの物量情報すなわちマテリアルフローを把握することが必要で、その前段階として環境との

間でやりとりされる資源・エネルギー量を計測することが重要となる。

このような物量情報を把握するための手法の開発研究はこれまでも多数行われてきた。日本での研究としては、例えば森口・橋本（2006）は日本を中心とした世界のマテリアルフローを推計しており、これをもとに環境省では日本のマテリアルフローを毎年公表している（環境省総合環境政策局（2008））。また、マテリアルフロー分析の適用事例として天野他（2001）はマテリアルフロー分析から全国都道府県ごとの総合的地域循環指標を推計している。一方、マテリアルフロー情報を提供するツールとしては日本総合研究所（2004）が環境勘定という形で日本国内のマテリアルフローを把握するための情報提供ツールを開発している。日本総合研究所（2004）で開発された環境勘定はハイブリッド型環境勘定と呼ばれ⁽⁸⁾、経済活動とマテリアルフローの双方を1つのフレームワーク上で把握することができる有用なツールとなっている。

しかしながら、このハイブリッド型環境勘定では環境勘定（EA）部分で記載されている物量情報は経済システムから環境へ排出される汚染物質と環境から経済システムへ取り込まれる資源・エネルギーに関するものである。すなわち、環境と経済システムの間で交換される資源・エネルギーについては明示的に取り扱われている一方で、財の生産量や消費量といった経済システム内部で流動する物質や固定資本形成や在庫増加といった経済システム内部で蓄積された物質質量については明示的に取り扱われていない。前述のとおり経済システムで持続的に財を生み出し経済システムを維持するためには環境からの資源・エネルギーの投入が必要である。したがって、経済システムが持続可能な水準に維持されているか否かを判断するためにはハイブリッド型環境勘定において経済システム内部で流動する物質質量と環境から取り入れる物質質量の関係を分析し、経済システムの維持に必要な資源・エネルギー投入量を適切に把握することが必要である。そして、このような経済システム内部の物質情報の提供をできる環境勘定フレームワークを構築することは経済システムの物質的制約を明示する意味においても意義あるものと考えられる。また、経済システム内部に流動する物質質量と環境から取り入れる物質質量を記載した環境勘定システムでは、マテリアルフローと環境負荷の関係についても明示することが可能となるので物質消費を抑制する情報提供も可能となると考えられる。

（３）ハイブリッド型環境勘定の修正

それでは経済システム内部に流動する物質質量を捉えられるような環境勘定システムをどのように構築すべきだろうか。環境省総合環境政策局（2008）のマテリアルフローを見るとこの中での評価項目は第9表のとおりである。このうちハイブリッド型環境勘定での評価項目に計上されていないのは製品、輸出量、中間処理による減量などの8項目で、これらの項目のマテリアルフローは自然還元を除いて経済システム内部における物質流動と考えることができる。この経済システム内部における物質流動は経済システム内部における

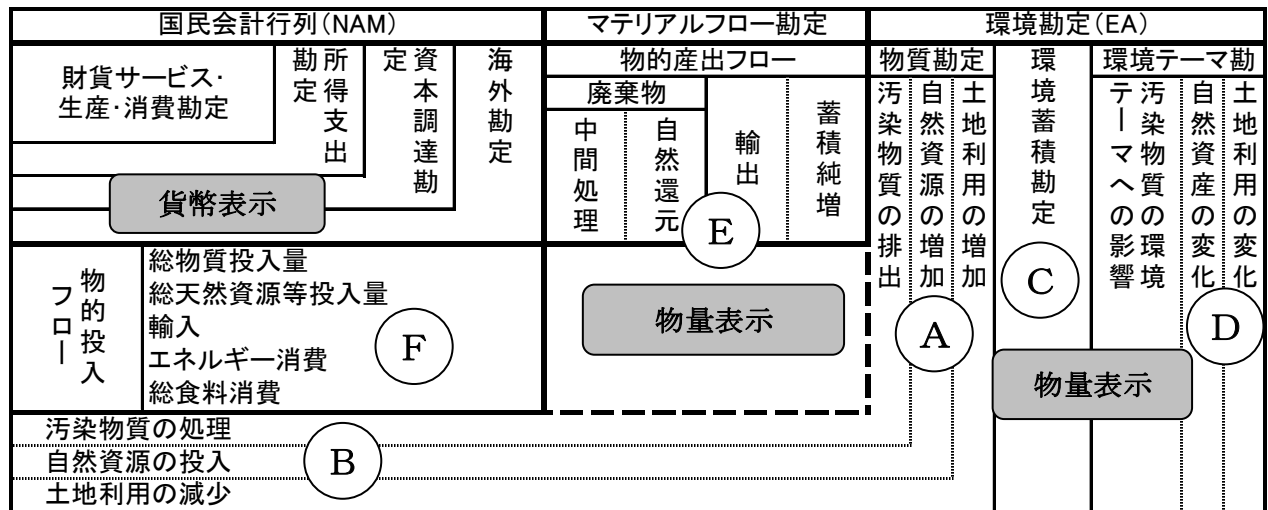
物質消費と関連しており，環境勘定を含む国民会計行列（NAMEA）における国民会計行列（NAM）との関連が強いため，ハイブリッド型環境勘定においては NAM との関連性を明確に表示する必要がある。そこで，本分析では新たに NAM の縁辺部に環境勘定（EA）との間にこれらのマテリアルフロー情報を計上する勘定であるマテリアルフロー勘定を挿入して新たなフレームワークを構築する。第 1 図にはその大まかなフレームワークが示されている。この図の中で新たに追加された部分はアルファベットの E と F の部分である。E の部分には経済活動の結果生み出される製品，輸移出財，廃棄物などが計上され，F の部分には経済活動のために投入される原材料物質，エネルギーおよび天然資源，輸移入財などが計上される。

第9表 マテリアルフロー分析の評価項目

投入	海外資源(輸入)
	天然資源
	製品※
	国内資源
	天然資源
	再生資源
産出	輸出※
	廃棄物
	中間処理による減量※
	最終処分
	自然還元※
	再生利用
	エネルギー消費
	総エネルギー消費量※
	エネルギー消費に伴う環境負荷
	食料消費
	総食料消費量※
	食料消費に伴う廃棄物
	経済内への蓄積
	耐久消費財※
	固定資本形成※

出所: 環境省(2008).

注 ※はハイブリッド型環境勘定で評価されない項目である。



A: 国内および海外部門による国内環境への負荷と、国内部門による海外自然資源の復元

B: 国内環境から国内および海外部門へのフローと、輸入による海外自然資源の減少

C: 国内環境への蓄積と海外自然資源の変化 D: 環境問題別の影響度

E: 経済活動による物的産出フロー F: 経済活動による物的投入フロー

第1図 マテリアルフロー勘定を導入したハイブリッド型環境勘定フレームワーク

第1図をもとに、より詳細な勘定体系としたものが第2図である。これを用いて本研究で提唱するフレームワークの特徴を解説する。まず、NAMの構造は既存のハイブリッド型環境勘定と同様でありこの中で経済活動に関する指標を貨幣評価で表示する。NAMの周辺には経済活動の結果生じるマテリアルフローを記述するマテリアルフロー勘定が配置され、経済から環境へ移行される物質のほか経済活動内部で流動する物質も記述される。NAMの左側には物的産出フローが配置され、経済活動によって生み出される物質を記述する。具体的には経済内部に流動する物質を廃物と財に分け、さらに廃物は廃棄物と環境負荷物質、財は域内取引と域外取引に分けている。一方の表側項目は物的投入フローで、経済活動に投入される物質を記述する部分である。こちらは廃棄物と財に分けられ財は域内取引と域外取引に二分される。例えば生産や消費といった経済活動によって生み出される財はAの部分に記述され、このうち輸移出として域外に流出する分についてはBに記載される。そして、域内にとどまる財は過去からの蓄積である期首ストックC、在庫ストック増減Dと合わせてその一部が経済活動に投入されることになり、NAM下部の物的投入フローのEへと移項し、残りは期末ストックFへ計上される。さらに、経済活動に投入される物質Eは域外から輸移入される物質Gと合わせ、経済活動に投入される財の総量が計算される仕組みである。

一方、経済活動に伴い排出される廃棄物については物的産出フロー部分の a と b の部分に計上される。次に、発生した廃棄物は廃棄物処理業に投入物として投入され処理されるので物的投入フロー部分の c の部分に記述される。そして、廃棄物処理の結果減量化された量は d の部分へ計上し、最終的に環境中へ蓄積される廃棄物量として発生量から減量化量を控除した値が EA へと移項し計上される。経済活動に伴う環境負荷物質も同様に発生量が a' に計上されるが、廃棄物と異なり環境負荷物質が廃棄物処理業の投入物として扱われるものではなく発生と同時に除去まで行われると仮定し、環境負荷物質を物的投入フローに計上することは行わない。そのため、経済活動における発生量からそのまま除去量 d' を控除した値が環境中への蓄積として EA に移項して計上される。

このようなマテリアルフローの取扱いは有吉（2008）によって地域版ハイブリッド環境勘定として提唱されているものとほぼ同一のフレームワークとなっているが、有吉のフレームワークは廃棄物のフローを記述する目的で構築されているのに対し、本節で提唱するフレームワークは経済システム内に流動する物質全般を捉えることを目的としている点に相違がある。なお、第2図は NAM とマテリアルフロー勘定のみ示されているが、マテリアルフロー勘定の右側および下側に通常ハイブリッド型環境勘定と同様の EA が配置され、EA の部分で経済活動から環境中へ蓄積される物質が集計される。

（４）ハイブリッド型環境勘定から得られる指標

一般に、環境勘定は経済活動や環境、マテリアルフローに関連した各種統計値を体系的に整理するためのツールであるため、ハイブリッド型環境勘定を用いて環境分析を行うためには勘定内で整理された情報を用いて、何らかの指標を作成することが必要となる。例えば日本総合研究所（2004）では、環境経済統合勘定（SEEA）から温室効果、酸性化など5つの環境テーマについてデカップリング指標を算出し、経済成長と環境負荷の増大が切り離されているか（デカップリングが実現しているか）を判断している。また、山本他（2008）では地域農林業に NAMEA を適用し、エコロジカル・フットプリント（EF）を算出して地域における農林業の持続可能性を評価している。このように環境勘定を構築することだけでなく環境勘定からどのような指標を推計するかも分析上重要な点であり、これは利用する数値や分析の目的によっても変わってくる。本節におけるハイブリッド型環境勘定ではマテリアルフローを取り入れたことに特徴があることから、これに関連した指標を推計することで本分析の環境勘定の特徴をさらに強調することができる。

マテリアルフローに関連した指標としては、資源生産性や環境効率指標、デカップリング指標などが考えられる。次節ではバイオ燃料を取り上げ、バイオ燃料の資源生産性・環境効率性を分析することを想定しハイブリッド環境勘定からバイオ燃料の資源生産性もしくは環境効率指標を算出するためのフレームワークの改良点について論じる。

（５）バイオエタノール生産導入効果評価のための改良

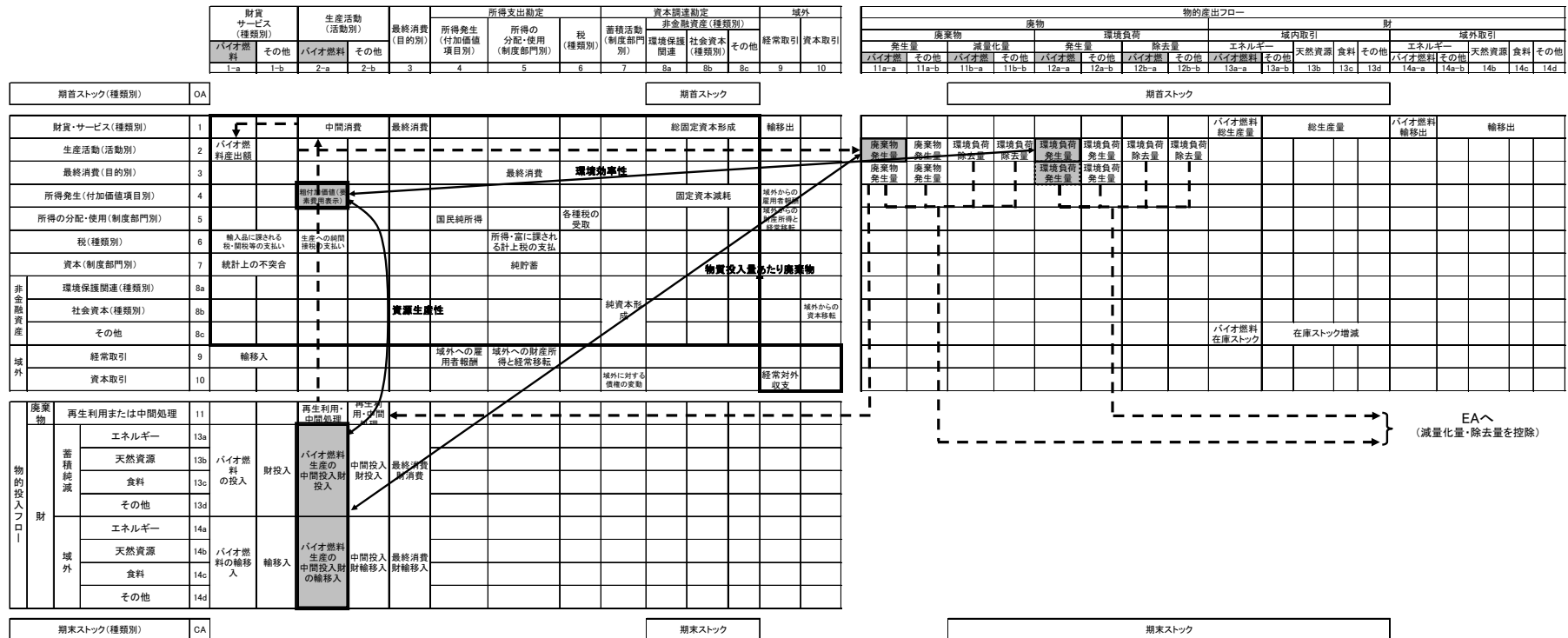
第２章では LCA 分析により北海道十勝地方で規格外小麦を原料とするバイオエタノール生産において、ガソリンに比べた GHG 削減率が約 15%になるという結果を導出した。この分析からは、バイオ燃料の GHG 削減効果を向上させるには燃料製造段階のみならず原料生産段階における GHG 削減も必要であることも示されている⁽⁹⁾。これはバイオ燃料のサプライチェーンにおける環境負荷削減がバイオ燃料の環境負荷削減に影響することを意味する。つまり、バイオ燃料の環境負荷削減のためにはバイオ燃料部門だけを見るのでは不十分で、サプライチェーンでの環境負荷削減も包括的に評価する必要があることを示すものである。このように考えるとバイオ燃料の原料生産から消費に至るマテリアルフローの各段階においてどの程度の資源生産性・環境効率性が実現されているかという情報を引き出す環境勘定フレームワークを構築することが有用である。

ここに着目点を絞るとバイオ燃料のマテリアルフローとそれに関係する経済フローだけを示す勘定を構築することになり、この場合はバイオ燃料勘定といったものになる。しかし、現状ではバイオ燃料勘定を構築することはデータの利用可能性などから現実的ではないため、当面の対応としてはバイオ燃料部門をその他の部門と区別して分割表示しバイオ燃料部門の資源生産性・環境効率性を求めることにしたい。

以上のような背景をもとに改良された勘定フレームワークが第３図である。第３図においては、バイオ燃料部門を独立させバイオ燃料生産に関わる数値を明示できるように改良されている。このフレームワークをもとに資源生産性を算出するためには NAM 中の粗付加価値と NAM 下部分のマテリアルフロー勘定にあるバイオ燃料生産への中間投入財量（第３図中のグレーの数値）を使用する。また、環境効率性を求めるためには NAM 中の粗付加価値と NAM 右側のマテリアルフロー勘定の生産活動に伴う環境負荷発生量を用いればよい。そして、もし仮に財の消費まで含めた環境効率性を算出したければ生産活動に伴う環境負荷発生量も含めて計算すればよい。さらに、NAM の経済指標を介さずとも、物質投入量と廃棄物発生量からは物質投入あたりの廃棄物量などが計測され、投入された物質がいかに効率的に財へと変換されているかが計測できる。

（６）まとめ

本節ではバイオ燃料による複合的な環境影響を評価することを念頭に置き、ハイブリッド型環境勘定を援用して環境経済指標による総合的指標の構築を目指して経済システムへの物質の投入産出をマテリアルフロー勘定として明示する環境勘定フレームワークを検討することを目的としてきた。本節で提示した新たな環境勘定フレームワークは経済システム内で流動する物質質量など経済システムの物質の動きを明確にできるため、資源生産性などの環境指標も導出でき物理的次元での持続可能性をより適切に評価できるものと考えられ、こうした物理的次元の情報に基づいた環境政策の立案に貢献できると考えられる。そ



第3図 バイオ燃料導入効果の分析のためのハイブリッド型環境勘定

注 マテリアルフロー勘定の右および下には環境勘定（EA）が付くが，図中ではスペースの都合上，EA部分が割愛されている。

してこの環境勘定フレームワークをバイオ燃料の評価に適用することによってバイオ燃料自体の資源生産性や環境効率性の評価ができ、さらにフレームワークを拡張することでバイオ燃料のサプライチェーンの各段階における資源生産性や環境効率性も評価することができる。

しかしながら、本節ではフレームワークの概念を解説するに留まっており、これを実際に推計するためには細かな部門設定やデータ制約への対処などまだ多くの改良の余地が残されている。これらは残された課題とし、今後実際の推計作業およびフレームワークの拡張作業を進めながら随時改良していきたい。

6. おわりに

本章ではバイオ燃料の環境負荷削減効果と経済波及効果の双方を統合するための指標を提示し、これを用いて前章までに評価したバイオ燃料の効果を統合することを目的としてきた。その結果、プラントレベルの GHG 効率、地域レベルの CO₂ 効率ともに E3 のほうがガソリンに比べ優位な状況にあることが示され、E3 がガソリンに比べ環境負荷の発生を抑制しながらより高い経済的影響をもたらすことが示された。さらにマテリアルフロー分析によりバイオ燃料による複合的な環境影響を評価することを念頭に置き、ハイブリッド型環境勘定を援用した環境勘定フレームワークを提示した。

バイオ燃料の総合的な評価の方法は決して 1 つに限られるものではなく、これまでも様々な手法が提示されている。本章で取り扱ったのはそのうちのごく一部であり本章で導かれた結果は必ずしも絶対的なものではないが、環境効率において E3 がガソリンよりも優位であるとの結果はバイオ燃料導入に一定の示唆をもたらすと考える。今後、ここでは手法を提示するに留まったマテリアルフロー分析による評価やその他の手法を用いて再度バイオ燃料の評価を行うことでその評価がより確固たるものとなるだろう。これらの事項は本稿における分析での残された課題となる。

〔注〕

- (1) 環境効率の分母には付加価値額のほか、生産量や生産額、利益などが用いられることがある。
- (2) 船崎・種田（1999）によると、ガソリンの燃焼時に発生する GHG はライフサイクル全体の GHG 発生量のうち 89%を占める。
- (3) 十勝地方を対象とした分析と北海道を対象とした分析では使用した産業連関表が異なるため、各部門の付加価値率も異なる。本節の分析では、十勝表が北海道表をベースに推計されており、より広い範囲である北海道表の数値を適用するほうがデータの信頼性が高いと判断し、北海道表の付加価値率を適用して分析を進める。したがって、バイオ燃料部門などの域内生産額も北海道表に適用した 2003 年の数値を採用する。

- (4) ここでの「プラントレベル」とは、一事業主体のバイオエタノールプラントを中心としたライフサイクルを捉えているということを指し、プラントからの環境負荷のみを対象としているという意味ではない。
- (5) 第3節では「GHG 効率」を評価したが、本節では計測対象となる GHG を CO₂に限定していることから「CO₂ 効率」と呼ぶこととする。
- (6) 環境問題のシフトの発生を環境勘定により明らかにした研究事例として林・山本（2008）がある。林・山本（2008）では農業廃棄物勘定を構築・推計し、家畜ふん尿の処理により水の環境負荷が削減される一方で大気環境負荷は増大していることを示し、環境問題のシフトが発生していることを明らかにしている。
- (7) 地球と宇宙との間の物質のやりとりを取って挙げるならば、宇宙ロケットや人工衛星の打ち上げやそれに伴う不要物の宇宙への投棄、月面からの物質の採取などがある。しかしながら、これらに物質量は地球の物質量から比べると十分無視できるものであると考える。
- (8) 内閣府などは正式には「ハイブリッド型統合勘定」と称しているが、本稿では環境勘定であることを強調するため、「ハイブリッド型環境勘定」と呼ぶ。
- (9) 第2章では、規格外小麦を原料として十勝地方で製造されたバイオエタノールを E3 として北海道内で使用した場合、燃料のライフサイクルで発生する GHG の 98%が原料生産段階と燃料製造段階で発生するという結果が導かれている。

〔引用文献〕

天野耕二，戸辺勝俊，長谷川聖洋（2001）「日本全国の都道府県における物質循環評価手法に関する研究」、『環境システム研究論文集』29，pp.215-223。

有吉範敏（2008）「わが国における環境経済統合勘定の展開」、『環境共生』15，pp.55-65。

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。

林岳，山本充（2008）「マクロ環境会計による農林業の環境評価」，出村克彦・山本康貴・吉田謙太郎編著『農業環境の経済評価－多面的機能・環境勘定・エコロジー－』北海道大学出版会，pp.270-293。

北海道電力（online）<http://www.hepco.co.jp/index.html>

Hu, Z., Pu G., Fang F. and Wang C., (2004) “Economics, environment, and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China” *Renewable Energy* 29(14), pp.2183-2192.

石谷久，赤井誠監修（1999）『ISO 14040/JIS Q 14040 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。

環境省（2006）『日本国温室効果ガスインベントリ報告書』。

環境省総合環境政策局（2008）『平成 20 年版環境統計集』。

- 國光洋二，上田達己（2006）「籾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。
- Masuda, K. (2008) “Does bio-fuel production in Japan have environmental advantages?: evaluating bio-ethanol production from substandard wheat in Hokkaido” 『農業経営研究』46(1)，pp.138-143。
- Masuda, K., Hayashi, T. and Yamamoto, M. (2008) “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Introducing New Processes into a Wheat-Based Bio-Ethanol Production System”，『2008年度日本農業経済学会論文集』pp.300-306。
- 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』。
- 森口祐一，橋本征二（2006）『マテリアルフローデータブック－日本を取りまく世界の資源のフロー－第3版』，地球環境研究センター。
- 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して－』。
- 日本化学会（1995）『化学便覧応用化学編第5版』，丸善株式会社。
- 日本総合研究所（2004）『平成15年内閣府委託調査 SEEAの改訂等にもなう環境経済勘定の再構築に関する研究報告書』。
- 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。
- 石油情報センター（online）<http://oil-info.ieej.or.jp/>
- 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。
- Von Blottnitz, H., and Curran, M. A. (2007): “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* 15(7), pp.607-619.
- 山本充，高橋義文，林岳（2008）「ハイブリッド型環境勘定とエコロジカル・フットプリントによる北海道の持続可能性評価」『商学討究』58(4)，pp.65-80。

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関連効果の推計－」『地域学研究』36(3), pp.611-620。

平成21年 9 月 30 日

印刷・発行

環境プロジェクト研究資料 第 1 号

バイオ燃料導入による諸効果の定量的評価

編集発行 農林水産省農林水産政策研究所

〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-1-1

電 話 東京 (03) 6737-9000

FAX 東京 (03) 6737-9600

印刷・製本 (株)アライ印刷