



温暖化プロジェクト研究資料 第2号

バイオエネルギーの活用とその評価

平成26年4月

農林水産政策研究所

本刊行物は、農林水産政策研究所における研究成果をまとめたものですが、学術的な審査を経たものではありません。研究内容の今後一層の充実を図るため、読者各位から幅広くコメントをいただくことができれば幸いです。

カバーデザイン 野田詩織

まえがき

農林水産政策研究所では、平成 22 年度よりプロジェクト研究「我が国農業分野における地球温暖化対策の評価手法の開発等に関する研究」（平成 22 年度～平成 24 年度，通称：温暖化プロジェクト）を実施し，農林水産分野における地球温暖化対策が農業や地域に与えるさまざまな影響を多角的に分析してきた。この 3 年間に取り組んできた課題は次頁の図にまとめられている。当初，3 つの課題を設定してスタートした本プロジェクトだったが，初年度がほぼ終わろうとする平成 23 年 3 月 11 日，未曾有の大災害である東日本大震災とそれに伴う福島第 1 原子力発電所の事故が発生した。本プロジェクトも東日本大震災後の社会的な情勢や研究ニーズの変化等を反映させ，平成 23 年度からはバイオエネルギーの研究を新たに加え，それまでの 3 つの課題を（１）農業分野における地球温暖化対策がもたらす影響評価と（２）バイオエネルギーの積極導入に向けた検討及び影響評価という 2 つに再編して研究を遂行することになった。

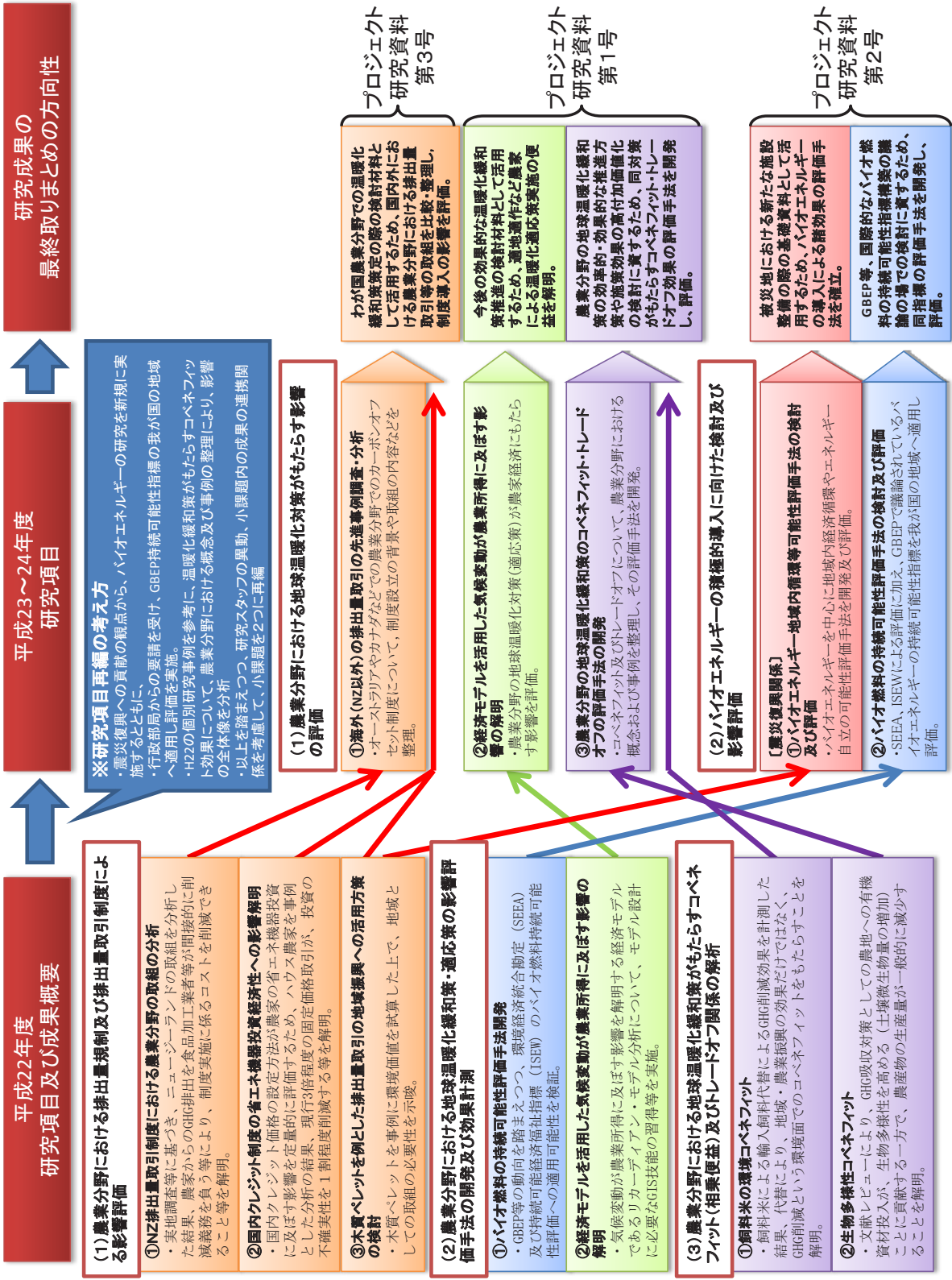
そして，温暖化プロジェクトで得られた研究成果は 3 冊のプロジェクト研究資料に取りまとめられており，本資料はその第 2 号として，バイオエネルギーに関する成果を取りまとめたものである。本資料の執筆にあたっては，温暖化プロジェクトに客員研究員として加わっていただいた九州大学大学院農学研究院矢部光保教授にも一部ご担当いただいた。なお，諸般の事情により刊行が遅れてしまったものの，本資料は本プロジェクト終了直後の平成 25 年 6 月時点の情報をもとに取りまとめたものである。

本資料がバイオエネルギー普及拡大のための基礎資料として幅広い分野で活用されることを願っている。なお，前述のとおり，温暖化プロジェクトでは本資料の他に 2 冊の研究資料を刊行している。温暖化プロジェクト研究資料第 1 号および第 3 号についても，本資料と相互に関連する内容を含んでおり，併せてご覧いただきければ幸いである。

平成 26 年 4 月

農林水産政策研究所

温暖化プロジェクトチーム



要 旨

本資料は2部構成となっており、第Ⅰ部バイオエネルギーの導入効果の総合的評価では、まずバイオエネルギーの定義を明確にした上で（第1章）、バイオエネルギー導入効果をどのような視点から評価すべきかを論じている（第2章）。続いて、第3章では岩手県西和賀町の薪利用を事例に、その導入効果を資源、環境、経済の3側面から多角的に評価している。第Ⅱ部はバイオ燃料の持続可能性評価と国産バイオ燃料として、まず第4章ではバイオ燃料の持続可能性評価の国際的動向を紹介し、さらに国産のバイオ燃料の必要性を論じた。続いて第5章では国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）の持続可能性指標を京都市におけるバイオ燃料生産に適用した結果を紹介し、第6章ではGBEPの持続可能性指標に付加する統合評価手法を提案している。

1. バイオエネルギーの導入効果の総合的評価

まず第1章、第2章では、今後、我が国でバイオエネルギーを導入する場合にどのような効果および課題があるのかを、既存研究における検証結果を踏まえつつ検討し、それぞれの効果をどのような手法で評価すべきなのか、そして評価の際にはどのような点に留意すべきなのかについて検討した。バイオエネルギーの導入による効果としては、化石燃料の代替による地球温暖化の防止が中心に考えられているが、それ以外にも循環型社会の形成や地域経済の活性化、産業の振興にも貢献するなど、さまざまな側面に効果がある。一方で、国内におけるバイオエネルギー製造事業では、製造コストの高さと安定的な原料の確保、温室効果ガス（GHG）以外の環境負荷への影響の評価に課題が残されている点を指摘した。そして、これらの効果の評価の際には、バイオマスの賦存量などを踏まえた長期的な原料の利用可能性も考慮する必要がある点、複数の視点からの評価が必要である点、いかに地域で資金を循環させるかという視点が求められるという点を指摘した。

第3章では、木質バイオマスの利用を経済性の面のみからでなく、環境や地域社会に及ぼす影響などの側面からも評価する手法の開発を試みた。具体的には、岩手県西和賀町の家計における木質バイオマス利用を事例に、①統計情報等に基づいて生産から消費、廃棄までのライフサイクルを通じた各種影響を評価し、②より実践的な評価手法の開発を目指し、地理情報も加味した最適化シミュレーションに基づく各種影響の評価を試みている。

2. バイオ燃料の持続可能性評価と国産バイオ燃料

第Ⅱ部では、バイオエネルギーのうちバイオ燃料に的を絞って分析を行った。まず第4章で、国内外におけるバイオ燃料の持続可能性評価の議論を整理し、日本での持続可能な国産バイオ燃料生産の必要性を論じた。国際バイオエネルギーパートナーシップ（GBEP）では、2011年5月にバイオエネルギーの持続可能性指標24指標を発表した。さらに米国やEUなどの各国においても、独自にバイオ燃料の持続可能性の確保を目指した取組が行われている。このような世界的な潮流や、環境問題への対応、及びエネルギー安全保障の面から、日本においても持続可能なバイオ燃料を生産することが重要であることを指摘した。

第5章では、日本におけるバイオエネルギー生産へのGBEP指標適用の第一歩として、京都市におけるバイオディーゼル燃料（BDF）生産を取り上げ、GBEPの持続可能性指標を用いて持続可能性評価を行うことで、日本の事例にGBEP持続可能性指標を適用する際の課題点を抽出し、GBEP持続可能性指標が有する課題についても言及した。その結果、適用から抽出された課題として、国および地域レベルでの集計の問題とデータ取得の問題を指摘した。また、日本でGBEP持続可能性指標を適用する場合、地域振興にいかに関与しているのかという評価視点を加えること、そしてエネルギーのベストミックスについて何らかの示唆を提供できるようにすべきことを提唱した。さらに、GBEP持続可能性指標の今後の課題として、政策への適用、国・地域の特有の事情の反映の余地、時間軸の問題、データ整理ツールの必要性の4点について指摘した。

最後の第6章では、GBEPの持続可能性指標をより利用価値の高いものにするため、まず概念整理を行った上で、多基準分析（MCA）を適用して指標値を集計する包括的評価手法を開発した。開発した包括的評価手法を用いることで、従来個別の数値として取り扱われていた指標値を集計可能なスコアに変換し、バイオエネルギーの持続可能性について、より利用価値の高い情報を政策担当者に提供することができる。最後に、前章で評価した京都市におけるBDF生産の事例を用いて、開発した包括的評価手法の試行的適用を行い、その有効性を実証した。

目 次

まえがき

要旨

第Ⅰ部 バイオエネルギーの導入効果の総合的評価

第1章 バイオエネルギーの定義および導入の効果と課題

澤内大輔

林 岳 1

第2章 バイオエネルギー導入効果の評価とその視点

林 岳25

第3章 家庭における木質バイオマス利用の影響評価手法の開発—岩手県西和賀町の薪利用を事例とした実証分析—

澤内大輔

國井大輔39

第Ⅱ部 バイオ燃料の持続可能性評価と国産バイオ燃料

第4章 バイオ燃料の持続可能性評価の動向と国産バイオ燃料の必要性

林 岳

矢部光保（九州大学）81

第5章 国内バイオ燃料生産への国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）持続可能性指標の適用可能性の検証

林 岳93

第6章 国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）のバイオエネルギーの持続可能性指標における包括的評価手法の開発

林 岳115

第1章 バイオエネルギーの定義および導入の効果と課題

澤内大輔

林 岳

1. はじめに

地球規模の温暖化や人口増加，途上国を中心とする経済成長に伴い，有限な資源である化石エネルギーの消費を抑制し，再生可能なエネルギーへの転換が進められている。地球の地下資源である化石エネルギーはその生成に非常に長い時間を要し，現状の消費水準では資源が枯渇するという指摘は古くからなされてきた（Jevons(1865)）。このような背景から再生可能エネルギーの利用促進が唱えられ，その1つとしてバイオエネルギーの利用に注目が集まっている。バイオエネルギーはカーボンニュートラルの特性を持つため，温室効果ガス（GHG）の削減に効果があるとされ，地球温暖化対策としてのGHG削減に有効な手段の1つとして考えられている。さらに近年，地域分散型エネルギー供給システムの構築と言った観点等からさらなる注目が集まっている。

バイオエネルギーを導入することによって，様々な影響がもたらされることが予想されるが，バイオエネルギーの導入により，どのような側面にどのような影響がもたらされるのかを明らかにすることは，今後のバイオエネルギー導入を検討する上で非常に重要である。また，これまで日本においては，必ずしもバイオエネルギーが順調に普及してきたとは言えない状況であり，これはバイオエネルギーの導入に際して様々な障壁や課題があることを示している。バイオエネルギーの導入促進に際しては，その効果とともに，導入に際しての課題を明らかにすることも重要であると考えられる。

一方で，化石エネルギーを代替する再生可能エネルギーがどのようなものであるのかは，その言葉を用いる者によって定義が異なる。太陽光や風力，潮力，地熱など枯渇しないエネルギーのみを指す場合，さらにこれらに加え，バイオエネルギーや海洋資源を加える場合もあり，その定義は一定ではなく，あらゆる用語が錯綜して用いられている面がある。

そこで本章では，まずバイオエネルギー，バイオマスエネルギー，再生可能エネルギー，自然エネルギーなどの用語の定義を確認する。次いで，今後我が国でバイオエネルギーを導入する場合にどのような効果および課題があるのかを，既存研究における検証結果を踏

まえつつ検討することを目的とする。

2. 各種エネルギーの呼称に関する定義の整理

(1) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーの定義については、松田・高橋（2008）では、National Renewable Energy Laboratory (online)の定義を引用している。この中では、「再生可能エネルギーは、National Renewable Energy Laboratory (online)の定義によると、風力あるいは太陽エネルギーなどのように、常に補充され、枯渇することのないエネルギーである。」と再生可能エネルギーを定義している（松田・高橋（2008）p.27より引用、一部著者改変）。

また、経済産業省（2010）でも、再生可能エネルギーの解説を行っており、「再生可能エネルギーは国際的にも広く認知されています。例えば、国際エネルギー機関（IEA）によると再生可能エネルギーは『絶えず補給される自然のプロセス由来のエネルギーであり、太陽、風力、バイオマス、地熱、水力、海洋資源から生成されるエネルギー、再生可能起源の水素が含まれる』とされています。また、国際再生可能エネルギー機関（IRENA）憲章によれば、『再生することが可能な資源から持続可能な態様で生産されるあらゆる形態のエネルギーをいい、特にバイオエネルギー、地熱エネルギー、水力電気、海洋エネルギー（特に、潮汐エネルギー、波エネルギー及び海洋温度差エネルギーを含む）、太陽エネルギー、風力エネルギーを含む』とされています」と再生可能エネルギーにはバイオ（バイオマス）、地熱、水力、海洋、太陽、風力などのエネルギーが含まれると述べている。

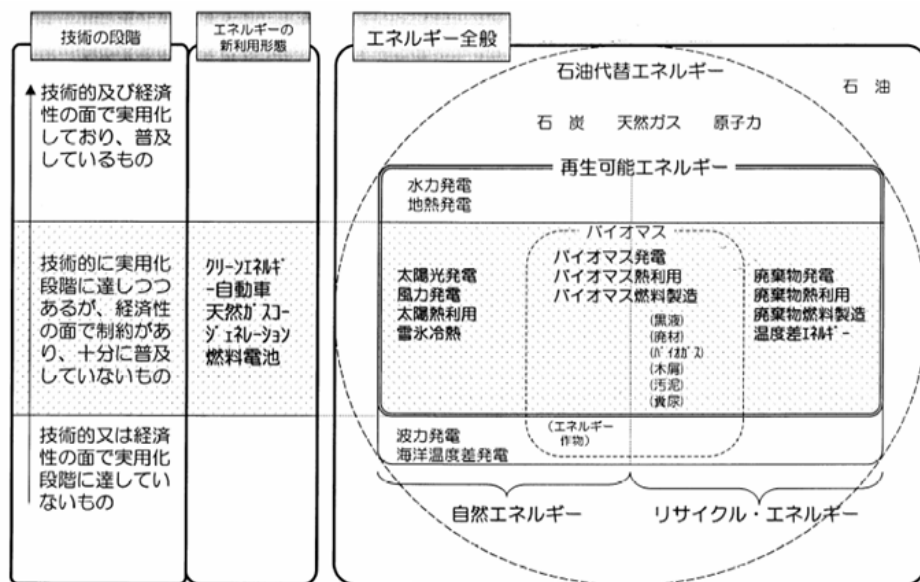
このように、再生可能エネルギーには多様な定義があるが、両者の定義を総合すると、再生可能エネルギーは、「再生することが可能な資源から持続可能な態様で生産されるあらゆる形態のエネルギー」と定義することができよう。

(2) 自然エネルギー

「自然エネルギー」という用語は、古くは農林水産省がグリーンエナジー計画として実施した大規模研究プロジェクトの成果の一環として刊行された『自然エネルギー資源賦存量図』の中で用いられており、この中では、水力、風力、日射の3つが自然エネルギーとして取り上げられている（農林水産省（1986, 1987, 1988））。

一方で、最近の政府資料において自然エネルギーとの表現は各種委員会での資料などで

散見されるが、法律文書などではほとんど用いられていない。「自然エネルギー」との用語が用いられている例は、環境省主催の委員会で外部の委員がこの用語を用いている例などごく一部に限られている（環境省（online a），経済産業省（online a）。このほか，資源エネルギー庁の資料では，自然エネルギーは再生可能エネルギーのうち，リサイクル・エネルギーではないものとして説明される（第1図）⁽¹⁾。このように，最近では自然エネルギーの厳密な定義がなされている文献・資料は見あたらず，その統一的な定義はなくあいまいな表現であると言える。



出所 資源エネルギー庁資料。

第1図 再生可能エネルギーと自然エネルギーの関係

（3）新エネルギー

経済産業省ホームページ（経済産業省（online b））では，新エネルギーについて「『新エネルギー』は，1997年に施行された『新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法』において，『新エネルギー利用等』として規定されており，『技術的に実用化段階に達しつつあるが，経済性の面での制約から普及が十分でないもので，石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの』と定義しています。そのため，実用化段階に達した水力発電や地熱発電，研究開発段階にある波力発電や海洋温度差発電は，自然エネルギーであっ

でも新エネルギーには指定されていません。」と解説している。また、経済産業省（online c）ではさらに「再生可能エネルギーのうち、その普及のために支援を必要とするもの。具体的には、太陽光発電，風力発電，バイオエネルギー利用，雪氷熱等温度差エネルギー利用等」としている。

これらを総合すると、新エネルギーについては、経済産業省で比較的確固たる定義づけがなされており、「再生可能エネルギーのうち、その普及のために支援を必要とするもの」と定義できる。具体的には、太陽光発電，風力発電，バイオエネルギー，雪氷熱等温度差エネルギーなど、技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なものであると定義できる。

（４）バイオエネルギー，バイオマスエネルギー

バイオマスの定義は、『バイオマス・ニッポン総合戦略』に明記されており、「本総合戦略で取り上げるバイオマスとは、生物資源（bio）の量（mass）を表す概念で『再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの』である」と解説している。一方の化石燃料については「私たちのライフサイクルでは再生不可能な資源でありいずれ枯渇が予想される有限の資源である」としている。また、農林漁業バイオ燃料法研究会（2009）によると「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（平成 14 年法律第 62 号）」等においても、動植物由来の有機物でエネルギー源となるもの（原油，天然ガスなどを除く）をバイオマスとして規定している、とされる。

さらに、バイオエネルギーについては、山地他（2000）で「バイオマス（biomass）から化学反応を経て得られるエネルギーをバイオエネルギーと呼ぶ」と定義おり、日本エネルギー学会（2003）では「ある一定量集積した動植物資源とこれを起源とする廃棄物の総称（ただし、化石資源を除く）」と定義されている⁽²⁾。

上記 2 つの定義を踏まえると、バイオマスは「（原油，天然ガスなどを除く）動植物由来の有機物でエネルギー源となるもの」，バイオエネルギーまたはバイオマスエネルギーは、「バイオマスから化学反応を経て得られるエネルギー」と定義づけできる。また、バイオエネルギーもバイオマスエネルギーとほぼ同義で用いられており、本研究でも両者は同義とみなし、バイオエネルギーの表記に統一する。

（５）バイオ燃料，バイオマス燃料

バイオ燃料またはバイオマス燃料については，農林漁業バイオ燃料法研究会（２００９）で解説されているが，農林漁業バイオ燃料法（農林漁業有機物資源のバイオ燃料の原材料としての利用の促進に関する法律）における定義が最も的確であろう。農林漁業バイオ燃料法研究会（２００９）では，「（農林漁業バイオ燃料法において）バイオ燃料とは，農林漁業有機物資源を原材料として製造される燃料（単なる乾燥又は切断その他の主務省令で定める簡易な方法により製造されるものを除く）をいう」としており，「農林漁業有機物資源とは，農林水産物及びその生産又は加工に伴い副次的に得られた物品のうち，動植物に由来する有機物であって，エネルギー源として利用することができるものをいう」と説明がなされている。

バイオ燃料法の対象となるバイオ燃料は，具体的にエタノール，バイオディーゼル燃料，メタン，木質固形燃料が想定され，その原料としては①穀類等，いも類，油糧作物，甘味資源作物，木材，魚類，稲わら等，②家畜排せつ物，使用済み菌床培地等，③加工残渣等がある。なお，①廃ビニールなど動植物に由来しないもの，および②貝殻，骨などバイオ燃料の原材料として利用できない無機物は除外される。

農林漁業バイオ燃料法研究会（２００９）では「バイオ燃料とは，①薪，木炭，木質ペレットなどの固形燃料，②発酵により得られるエタノール，発酵や熱分解により得られるメタノール，植物油等から合成されるバイオディーゼル燃料，熱分解により得られたガス等から合成されるジメチルエーテル・炭化水素油などの液体燃料，③熱分解により得られる水素，発酵により得られるメタン等の気体燃料に分けることができる」と解説している。

ちなみに，政府の公式用語としては，バイオ燃料が用いられ，バイオマス燃料は使わないようで，農林漁業バイオ燃料法研究会（２００９）によると，その理由としては，「既存の政府文書では「バイオ燃料」が用いられている，大手新聞などで「バイオ燃料」が一般的な用語として用いられているなど」であるとのことである。

３．バイオエネルギー導入の諸効果⁽³⁾

（１）「バイオマス活用推進基本計画」におけるバイオマス活用推進の基本的視点

２００２年１２月，我が国におけるバイオマス利活用の具体的取組や行動計画を示した「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され，その後，これまでのバイオマス利活用状

況や 2000 年 2 月の京都議定書の発効など国際的な情勢変化を踏まえ、2006 年 3 月に見直しが行われた。さらに 2010 年にはこの総合戦略を発展的に解消して「バイオマス活用推進基本計画」が制定された（農林水産省（2010））。この中で、バイオマスの活用にあたっての基本的視点として、第 1 表に掲げた 11 項目を挙げている。

しかしながら、ここで取り上げられている項目はあくまでバイオマス活用推進の基本的視点であるため、必ずしもバイオエネルギーの効果に限らず、バイオマスをたい肥や製品原料として利用した場合の効果も含まれる。そこで、本節では上記計画を参考にバイオエネルギー導入の効果として特に重要と思われるものを再整理し以下にまとめた。

第1表 「バイオマス活用推進基本計画」におけるバイオマスの活用の推進に当たっての基本的視点

総合的、一体的かつ効果的な推進

地球温暖化の防止

循環型社会の形成

産業の発展及び国際競争力の強化

農山漁村の活性化等

バイオマスの種類ごとの特性に応じた最大限の利用

エネルギー供給源の多様化

地域の主体的な取組の促進

社会的気運の醸成

食料・木材の安定供給の確保

環境の保全への配慮

出所 農林水産省(2010).

（２）地球温暖化の防止，環境保全への配慮

地球温暖化の防止については、2005 年 2 月に京都議定書が発効し、我が国においては 2008 年から 2012 年の第 1 約束期間の間に 1990 年時点と比べて 6% の温室効果ガス (GHG) を削減することが義務として課されていた。GHG 排出削減に資する対策として、バイオマスタウン構築によるバイオマス利用の推進、バイオエネルギーなどの新エネルギー導入の促進、森林吸収源対策等が進められていた。このように、バイオマス利用が GHG の削減に貢献するという観点からも、バイオマスの積極的な利用が進められている。

近年、化石燃料を用いた火力発電所への依存度が高まっていることに伴い、発電に係る GHG の排出量も増加する中、バイオエネルギーによる化石燃料の代替に伴う GHG 削減効果は大いに注目される⁽⁴⁾。また、これまでもバイオマス・ニッポン総合戦略においては、「バイオマスを燃焼すること等により放出される CO₂ は、生物の成長過程で光合成により大気中から吸収した CO₂ であることから、バイオマスは、私たちのライフサイクルの中で

は大気中の CO₂を増加させないという『カーボンニュートラル』と呼ばれる特性を有している。このため、化石資源由来のエネルギーや製品をバイオマスで代替することにより、地球温暖化を引き起こす温室効果ガスのひとつである CO₂の排出削減に大きく貢献することができる。」としており、その役割の大きさを説いている。

ところが、バイオエネルギーは消費時に排出される GHGこそ算定されないものの、原料やエネルギー自体の生産に伴う GHG 排出は計算に含められる。したがって、仮に原料作物の生産やバイオエネルギーの生産過程で化石燃料を多投してしまうと、バイオエネルギーに代替される化石燃料以上に GHG 排出量を増加させてしまうこともあり得る。このようなことから、バイオエネルギーの導入根拠に地球温暖化対策を掲げる場合には、バイオエネルギー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する必要がある⁽⁵⁾。

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⁽⁶⁾。これについては、第4節（3）で詳しく述べる。

（3）循環型社会の形成

近年、地球規模の人口の爆発的な増加により、各国間の資源獲得競争が続いており、世界的な資源価格の高騰や資源自体の枯渇が懸念されている。このような状況の中、天然資源の多くを海外からの輸入に依存する我が国においては、希少な資源をいかに有効利用するかが重要な課題となる。このようなことから、資源を再利用し新たな採取を極力少なくする循環型社会の構築が求められており、日本ではこれまでも循環型社会の形成に継続的に取り組んできた。日本における物質フローによると、2009年に発生した廃棄物量は5億5,900万トンで、そのうちリサイクルされたのは2億2,900万トンで、廃棄物量に占め

るリサイクル量の割合は 41%となっている（環境省（2012））。日本で循環型社会の構築が特に進められているのは、廃棄物の最終処分施設が不足しているというもう 1 つの理由もある。

バイオエネルギーはバイオマスを原料とすることから短期間での再生が可能な再生可能エネルギーであり、非再生可能エネルギーを代替することで資源消費を削減し、循環型社会の構築に貢献すると考えられている。特に例えば家畜ふん尿からのメタン発酵や廃食用油からのバイオ燃料生産など、廃棄物からエネルギーを得る取組は循環型社会の構築に直接的に貢献する。さらに、バイオマスは生物的な反応によって分解されるため、廃棄物問題を引き起こしにくく、石油などの化石系資源からバイオマスへの転換を行うことで、廃棄物を全く排出しないゼロエミッション社会、すなわち完全な循環型社会を形成することができる。このことから、廃棄物系バイオマスからの廃棄物処理に伴う環境負荷・経済的負担を削減できるというもう 1 つの効果がある。

廃棄物系バイオマスの有効利用に関する研究事例は酒井他（2005）、迫田他（2001）など多数存在する。酒井他（2005）では、GHG の排出削減量を評価対象として、都市部と農村部によるバイオマス賦存量の相違といった地域特性を踏まえ、それぞれに最適なバイオマス利用システムを提案している。また、迫田他（2001）では、ゼロエミッション技術としての各種バイオマスの資源化技術について検討を加え、ゼロエミッションの完全な循環型社会の構築可能性を検証している。迫田他（2001）では、エネルギー収支やコストなどの経済的な課題が残されているものの、検討したバイオマス資源化技術は循環型社会の構築の基盤として可能性を秘めていると結論づけている。このように、バイオマスそしてバイオエネルギーの利用は循環型社会の構築に貢献しているのである。

（４）産業の発展

バイオエネルギーの産業の発展に対する効果としては、主に以下の 3 つの点を挙げることができる。第 1 に、バイオエネルギーは農林水産物を原料とすることから、農林水産物の新たな需要を創出し、農林水産業の発展に貢献する。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、バイオ燃料が農産物の新たな需要先として大きな注目を集めた。また、木質ペレット利用の拡大は、これまでにはなかった新たな林産物の需要先になりうる。さらに、現在、海藻などを原料としたバイオ燃料の開発も進められて

おり、これらについてもこれまで活用されなかった漁業資源の新たな需要となる可能性がある。このような農林漁業，農山漁村の活性化を目的としたバイオエネルギー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，バイオエネルギーの導入はこれまで結び付きの少なかった農林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，新たな産業を創出する。現状では特に農林業の盛んな地域においても，エネルギー供給部門と農林業との取引関係は農林業がエネルギー供給を受けるというだけで，農林業がエネルギー部門へ原材料を供給することはほとんどない状態である。しかしながら，バイオエネルギーを導入することにより，農林業がエネルギー供給の一部を直接的に担うことになるほか，エネルギー供給部門へ原材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。

第 3 に，バイオエネルギーが既存のエネルギー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り，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エネルギーを生産することは，これまで地域外からの移輸入に頼っていたエネルギー供給を地域内で賄えるようになり，このことが地域内に経済効果をもたらす。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，バイオエネルギーは原料となるバイオマスの調達が容易な農山漁村で行われる事例が多いことから，バイオエネルギー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。

岩手県西和賀町では，木質バイオマスの利用促進策の一環として，町内における薪の利用率向上を目標としている。西和賀町では町の面積の約 9 割が森林であり，そこから搬出される間伐材の有効利用が課題になっている。町では現在約 3 割の世帯で薪ストーブが利用されているが，「薪ストーブ利用世界一」を標語として掲げ，町内世帯の 5 割での利用を目標としている。間伐材の有効利用とそれによる間伐の継続的な実施により，健全な森林の維持が可能となるほか，薪の供給による産業振興の効果も期待できる⁽⁷⁾。

また，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たら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。また，宮古島には2008年にE3燃料製造所が設けられ，これまで島内にはなかった新たな産業としてエネルギー製造事業が興された⁽⁸⁾。このように，バイオエネルギーの導入は農山漁村に賦存する資源に新たな価値を付加し，新たな産業の創出に効果があると言える。

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の役割も期待されており，ここでも農業とエネルギー部門の新たな取引関係が発生し，産業の発展に貢献することになる。

（５）農山漁村の活性化，地域の主体的な取組の促進，社会的気運の醸成

前項では，産業の発展という経済的な部分に着目してバイオエネルギーの導入の効果を解説したが，経済および産業活性化以外にもバイオエネルギーの推進は以下の点において農山漁村の活性化につながる。

第1に，農山漁村のコミュニティの維持に貢献する点である。これは農山漁村ではなく都市部における事例となるのだが，京都市における廃食用油を回収してバイオディーゼル燃料（以下，BDF）を製造する取組は，主な目的として循環型社会の形成，地球温暖化の防止などがあるが，京都市ではさらに住民が回収場所に廃食用油を持ち寄ることで，住民同士の交流が促進することも地域コミュニティの活性化としてこの事業の目標の1つとして掲げている。この効果をもたらすため，ペットボトルを公共施設に持参する方式ではなく，自治会単位で回収場所を指定した回収方法を維持している⁽⁹⁾。このような方法を維持することにより，住民参加の取組となり，地域の主体的な取組の促進，社会的気運の醸成といった効果がもたらされるものと思われる。

社会的機運の醸成については，本藤（2011）は，今後の電力システムの改革・構築に於いて，消費者が継続的に関与することが必要であると論じている。本藤はこれまでの電力供給システムが消費者の顔の見えないいわゆる「ブラックボックス」の中で行われており，

消費者の電力供給システムへの不関与を生み出し、結果として、例えば、消費者には電力使用に伴って温室効果ガス排出しているという重要な情報が伝わりにくくなっていると指摘し、「顔の見える」電力システムへの転換を提唱している。

本藤の論理に合わせると、バイオエネルギーはこの顔の見える電力システムへの転換にも資するものと考えられる。その理由は、バイオエネルギーでは発電施設と電力消費者との距離が縮まること、電力源となるバイオマスの収集・運搬に地域住民が参加する機会が多いためである。既存の電力供給システムでは、原子力発電にしろ、火力発電にしろ、海外から輸入された1次エネルギーをもとに発電が行われ、発電所のある地元の原料を用いる事例はまずない。水力発電についても、地域に賦存する水資源を利用しているものの、水資源や収集・運搬の必要がなく、ダムや発電所の管理業務以外に地域住民が直接的に関与する機会はないだろう。このような観点から考えると、バイオマス発電は収集、運搬、加工、発電に至るまで、直接的に地域住民が雇用され、エネルギー生産に関与する機会が他の発電システムに比べて圧倒的に多い。さらに、その雇用された地域住民が電力の消費者となる可能性が高い。このような形で地域住民がエネルギー生産に携わることにより、本藤の指摘する「ブラックボックス化」は改善されることが考えられる。

以上、農林漁業、農山漁村の活性化への効果を2点掲げたが、現在、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1980年代から菜種油を原料としたBDFが生産されている。ただし、これらの効果がすべてのバイオエネルギー導入事例について発揮されるかは定かではなく、効果を適切な評価手法を用いて具体的に示す必要があるだろう。

（6）エネルギー供給源の多様化

東日本大震災以降、それまでのエネルギー政策の見直しや地域完結型のエネルギー供給システムの構築について多くの提言がなされた。例えば、日本経済団体連合会（online）では、原子力発電の重要性を認めつつ今後はエネルギーのベストミックスを検討すべきと示していた。このような状況から、太陽光発電や風力発電、水力発電といった再生可能エネルギーと並び、バイオエネルギーの活用にも注目が集まっている。バイオマスは地域に「広く・薄く」存在するため、分散型のエネルギー供給システムの構築に有効であるとされている。地域に賦存するバイオマスを利用し、小規模なエネルギープラントを地域ごとに設置することにより、万一集中型エネルギー供給システムが停止した際も大規模なエネルギー

一供給停止を避けることができる、との意図である。

バイオ燃料について見ると、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⁽¹⁰⁾。また、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。アメリカは2011年3月に、エネルギー安全保障の観点から今後10年で原油輸入を1/3減らす方針を示しており、この一環としてバイオ燃料の普及を強く進めている⁽¹¹⁾。

一方、日本においては、2010年時点で、我が国のエネルギー自給率は4.4%であり、国内で消費されるエネルギーの95%以上は海外からの輸入に頼っている（経済産業省（2013）、p.104）。このため、原油価格の高騰のように国際市場の動向の影響を大きく受ける。また、東日本大震災以来、集中型のエネルギー供給システムの問題点が指摘されるようになり、分散型のエネルギー供給システムが改めて見直されてきている。

このような分散型のエネルギー供給については、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活用してエネルギーを供給する動きが各地で始まっている。バイオエネルギーの導入は都市地域、農村地域にかかわらず、その地域に賦存するバイオマスを利用することで新たなエネルギー供給源を作り出すことができる。このことは地域のエネルギーの自給率向上に貢献する上、地元企業はその地域で生産されたエネルギーの供給を受けることにより、原油の高騰など国際的なエネルギー市場動向や広域的なエネルギー供給網の断絶による影響を受けにくいビジネスモデルへの変換が可能となる。このように、バイオエネルギーは、エネルギー供給源の多様化に貢献するだけでなく、エネルギーを生産する場所と消費する場所を近づけ、分散型エネルギー供給システムの構築にも資するものである。

ただし、エネルギー生産拠点が分散的であったとしても、域外や海外からバイオエネルギーの原料を調達した場合には、分散型エネルギー供給システムという効果は薄れてしまう。すなわち、化石燃料と同様に、バイオマス原料の国際市場での価格・需給動向に影響を受けるようになり、必ずしも分散型エネルギー供給システムとして機能しないという問題を抱えることになる。同様に、バイオエネルギーの生産に際して、従来どおり電力を既存の供給システムによって賄っている場合にも、万一電力の供給が停止した場合にはバイ

オエネルギーの生産もできなくなり、この場合も分散型エネルギー供給システムとして役割が十分機能しないという問題を残すことになる。したがって、分散型エネルギー供給システムのメリットを最大限に発揮するためには、国内の一地域で原料調達からバイオエネルギー生産さらに消費までを一貫して行うことが必要となる。

（７）食料等の安定供給の確保

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も貢献しうる。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にも比較的迅速に国内での農産物増産が可能となりうるであろう。このような農地を耕作地として維持することのメリット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。

４．バイオエネルギー導入の課題

これまで、バイオエネルギーを導入することに対する効果を列挙し検討してきたが、当然ながらバイオエネルギーの導入に向けた課題も存在する。これらの課題はバイオエネルギーの普及拡大に際しての課題と、バイオエネルギーの普及そのものがもたらす問題とに分けられる。さらに、原料に国産バイオマスを用いた場合に生じる問題点もある。いずれにしろ、バイオエネルギーの効果だけに着目しては十分とは言えず、バイオエネルギーの普及に際しては、まずその普及拡大に際しての課題や導入後の課題についても十分に検証する必要がある。そこで本節では、まずはバイオマスの導入拡大に際しての課題および導入後に生じる課題を列挙するとともに、これらの問題点に関する既存研究をいくつか紹介する。

（１）コストの問題

バイオエネルギーを導入することによる最大の課題は既存のエネルギーよりもコストが高くなりうることである。このことは、本稿で指摘するまでもなく、これまで数多くの論文、書籍、報告書などで指摘されてきた。バイオマスに関わるコストの問題は、バイオマスが広く薄く存在することにより、その収集に多額のコストがかかることが主たる問題で

ある。特に日本の場合、エネルギーの原料作物を農地に作付けして利用する場合でも、間伐材など木質バイオマスを山林から搬出して利用する場合でもどちらも既存のエネルギーにはない栽培または伐採・搬出コストが上乗せされ、これがコストアップの大きな要因になっている。大木(online)では間伐材の伐採費用が 12,000 円/m³ に対し、販売金額が 9,000 円/m³ という完全な逆ざやが生じている事例を紹介している⁽¹²⁾。また井内(2005)は、全国 86 のバイオマスプロジェクトの事例を調査し、バイオマスの収集・運搬には、(1)バイオマスの発生量が様々な状況に応じて大きく変化すること、(2)既存の廃棄物輸送ルートを活用できないこと、(3)輸送用車両がバイオマスの種類・形状に応じて異なる上、中間処理がなされていないことが問題点として挙げられ、これらの点を検討することが収集・運搬のコスト削減につながると指摘している。

このような高コストを指摘する研究がある一方で、既存エネルギーよりも低いコストでバイオエネルギーを供給できるという研究成果もいくつか見られる。佐々木他(2006)では、移動式チップパーを用いたチップ供給の採算性を検証し、チップ生産システムの相違を踏まえてもいずれも重油換算コストを下回るという結果を得ている。同様に、森口他(2004)でも、林地残材をチップ化してエネルギー利用した場合のチップ化、運搬コストを算出しており、残材量が 20m³ 以上であれば重油に匹敵する経済性があると結論づけている。このように、日本においても様々な方法を検討することで、低コスト化さらに既存エネルギーに匹敵するコストでバイオエネルギーの供給が可能であると言える。

それでは、日本以外の諸外国の事例を見た場合、コストの問題をどのように克服しているのだろうか。江藤・佐々木(2010)は、ドイツ、オーストリア、スウェーデン、イタリアの欧州 4 か国の再生可能エネルギー政策を分析している。その結果、上記 4 か国ではいずれも電力市場の全面自由化、再生可能エネルギーによる電力の優遇固定価格買取制度、税制優遇措置が導入されており、これにより木質バイオマスの利用が増加していると指摘している。欧州 4 か国におけるこれらの制度はいずれもバイオマス利用によるコストの増加を埋め合わせる経済的インセンティブを与えるものと位置づけられる。

また、加賀爪(1998)はデンマークにおける家畜ふん尿を原料としたバイオガス発電を事例として、環境経済的な評価を行っている。この中でデンマークでは再生可能エネルギー利用促進のため、枯渇性エネルギーに課せられる消費税が免除され、この結果バイオガス 1m³ あたり 1.6~1.7 クローネの価格補填効果が生じていると指摘している。さらに加賀爪はデンマークでバイオガス工場の設置が進んだ要因として、エネルギー価格、金融・

投資面で他国以上に優遇されていたことを挙げている。このような政策的な支援とともに、デンマークの事例では、コジェネにより電力と熱の双方を供給することにより、事業者は高付加価値化を行っている指摘している。

（２）原料確保の問題

バイオマスを利用する上での最大の課題は、原料となるバイオマスをいかに確保するかという問題である。これまでバイオエネルギーを国内で製造する取組においては原料の確保に苦労している事例が散見される。そのため、事業の設計段階で原料の確保についてはより厳しく見積もる必要があるだろう。

バイオマスは広く薄く存在する特徴を持つため、それを原料として大量に収集することには多くの費用がかかる。特に木質バイオマスの場合は、間伐材など国内随所に多くの資源が賦存するが、その多くは収集コストがかかり採算が取れないことから、間伐自体が行われなかったり、行われたとしても森林の中に切り捨てられたまま放置されたりしている。さらに、バイオエタノールの場合も、国内で行われている実証事業では、多収穫米やミニマムアクセス米を原料にしたバイオエタノール製造を行っているが、生産費用と販売費用とが逆ザヤ状態になっており、何らかの方法での補填が必要となっている。

原料確保の問題は、先に見たコストの問題と密接に関連し、その課題としては原料をいかに安価で安定的に確保するかということになる。このような観点から、これまでにバイオマスの賦存量推計に関する研究はあらゆる種類のバイオマスで多数行われており、その多くは地理情報システム（GIS）を用いた研究である（分山・江原（2009）、上村他（2009）、山口他（2010）、吉岡・小林（2006））。一方で、単に賦存するバイオマス量や利用可能なバイオマス量を推計するだけではまだ不十分で、原料供給コストといった経済的な観点からの検証も必要となる。山口他（2010）、吉岡・小林（2006）では、このようなコスト計算も含めた利用可能なバイオマス量の推計が行われている。

以上で見たとおり、バイオエネルギーの原料となるバイオマスの安定的な確保には、特にコストの問題と密接に関連する課題がまだ多く残されていると言える。

（３）温室効果ガス以外の環境負荷の変化

バイオエネルギー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。バイオ燃料については、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。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) ⁽¹³⁾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。

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)
原料	農産物原料			キャッサバ	廃棄物原料		
	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		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。

このように、バイオ燃料の導入により環境負荷排出量はどう変化するかは、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⁽¹³⁾。

一方、バイオ燃料以外のバイオエネルギーについても、GHG 以外の環境負荷の計測は必要である。国際バイオエネルギーパートナーシップ（GBEP）でもバイオエネルギーの持続可能性指標として「大気有害物質を含む非温室効果ガスの排出量」や「屋内煤煙による死亡・疾病の変化」が指標として取り上げられている。この背景には、特に途上国における薪や炭などの伝統的バイオエネルギーが GHG 以外の環境負荷の発生をもたらし、これが住民や周辺環境へ悪影響を与えているという問題意識がある。このようなことから、GBEP では伝統的バイオエネルギーからバイオ燃料などの近代的バイオエネルギーへの転換が必要と説明している。最近では、中国からの越境大気汚染により、西日本などで PM2.5 などの値が環境基準値を上回ることがあり、マスコミなどでもその影響を頻繁に指摘している。しかし、大気汚染の影響は中国からの越境問題のみならず、国内における化石燃料消費でも発生しており、国内における十分な対策も求められている。

バイオエネルギーの利用に関しては、森のエネルギー研究所（2012）によると、「木質バイオマスの排ガスには、一酸化炭素（CO）、揮発性有機化合物（VOC）、多環芳香族炭化水素（PAH）、粒子状物質（PM）等の有害な成分が含まれるほか、不適切な燃料を使用した場合には、窒素酸化物（NO_x）や硫黄酸化物（SO_x）、ダイオキシン等が発生し、健康への影響が発生する場合がある。さらに今後、木質バイオマスストーブが普及すれば、人口密集地においては面的な大気汚染源になることも考えられる。」と警鐘を鳴らし、これらは適正な機器設計・施行、燃料選択などで大幅に抑制することが可能としている（森のエネルギー研究所（2012）、p11）。諸外国でも大気汚染防止の観点から、特に人口密集地や盆地での薪ストーブの利用が規制・禁止されている地域もあり、バイオエネルギーの利用の際にはやはり GHG だけでその効果を検証するだけでなく、それ以外の環境負荷の発生状況も検証する必要があるだろう。

5. おわりに

本章では、バイオエネルギー、再生可能エネルギーなどの用語の定義を確認した上で、今後、我が国でバイオエネルギーを導入する場合にどのような効果および課題があるのかを、既存研究における検証結果を踏まえつつ検討してきた。

バイオエネルギーの導入による効果としては、化石燃料の代替による地球温暖化の防止が中心に考えられているが、それ以外にも循環型社会の形成や地域経済の活性化、産業の

振興にも貢献するなど、さまざまな側面に効果がある。一方で、国内におけるバイオエネルギー生産事業では、生産コストの高さと安定的な原料の確保、GHG 以外の環境負荷への影響の評価に課題が残されている点を指摘した。

こういった背景の下、2012 年 9 月のバイオマス活用推進会議において『バイオマス事業化戦略』が公表された。これは、バイオマス利用におけるコスト削減、安定供給、持続可能なバイオマス利用といった社会的ニーズを踏まえ、地域におけるバイオマス産業創出と自立分散型エネルギー供給体制の強化を実現するための指針である。今後のバイオエネルギーの普及・拡大には、『バイオマス事業化戦略』を念頭におきつつ、本章で示した課題に対応することが不可欠と言えよう。

〔付記〕

本稿は、2012 年 9 月時点までの情報をもとに作成した原稿を、プロジェクト研究資料に掲載するに当たり、若干の加筆・修正を行ったものである。このため、必ずしも最新の情報が反映されているわけではない点に注意が必要である。特に 2012 年 9 月以降の直近の政策動向については各省庁のホームページなどの原典に当たられ確認されたい。

〔注〕

- (1) 第 1 図のもともとの出典は不明である。
- (2) なお、松田・高橋（2008）では、バイオエネルギーとの用語について、厳密な定義は存在しないとしている。
- (3) 本節の一部は、2009 年 9 月刊行の農林水産政策研究所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』の第 1 章「バイオ燃料導入の諸効果とその評価方法」を加筆・修正したものである。
- (4) 2011 年 3 月の福島原子力発電所の事故以降、原子力発電所の稼働率が大幅に低下しており、化石燃料を用いた火力発電所への依存度が高まっている。電力中央研究所（2010）によると、原子力発電の CO₂ 排出原単位は 20g-CO₂/kwh であるのに対し、火力発電は 474 g-CO₂/kwh（LNG 複合火力）から 943 g-CO₂/kwh（石炭火力）となっており、原子力発電から火力発電へのシフトは CO₂ 排出の大幅な増加をもたらす。
- (5) これはバイオエネルギー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ライフサイクルアセスメント（LCA）が有効である。

なお、地球温暖化緩和策の定義と GHG 削減の関係については、農林水産政策研究所温暖化プロジェクト第 1 号研究資料『地球温暖化緩和策がもたらすコベネフィットの解明とその評価』第 3 章を参照されたい。

- (6) 環境問題ではないものの、バイオ燃料生産の負の副次的効果として、食料との競合について注目されることが多い。例えば遠藤（2008）などはバイオ燃料の大幅な増産が 2006 年 1 月から 2008 年夏にかけての食料価格高騰の原因のひとつとされている旨を記している。
- (7) 西和賀町における薪利用の評価については、本資料第 3 章を参照されたい。
- (8) 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が、宮古島のバイオエタノールに関連する実証事業は 2011 年度で終了し、2013 年 2 月現在バイオエタノール製造施設は稼働を停止している。
- (9) 2011 年 7 月に実施した京都市へのヒアリング調査によると、ペットボトルに入れた廃食用油を公共施設に設けた回収ポイントに持ち込む方式だと現行の自治会単位の回収方法よりも低コストではあるが、コミュニティ活性化の機能を重視して自治会単位の回収を敢えて継続しているとのことである。
- (10) 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）を燃料としたエネルギーによっ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と言える。
- (11) 2011 年 8 月 17 日の日本経済新聞記事によると、アメリカではバイオ燃料普及促進のため、今後 3 年間で 5 億ドル以上の投資を行う方針とのことである。
- (12) 大木（online）によると、この事例では、補助金（4,000～5,000 円/m³）による赤字補填でようやく経済的に成立しているとのことである。
- (13) フューエル・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。

〔引用文献〕

- 電力中央研究所（2010）「電源別ライフサイクル CO₂ 排出量を評価－技術の進展と情勢評価を考慮して再評価－」『電中研ニュース 2010 年 8 月号』468。
- 江藤寛子・佐々木ノビア（2010）「欧州と日本における木質バイオマス利用促進政策の比較」『日本森林学会誌』92(2), pp88-92。
- 遠藤真弘（2008）「食料と競合しないバイオ燃料」『調査と情報』第 627 号。
- 本藤佑樹「論壇：東日本大震災 エネルギー変革に求められる視点－消費者側の継続的な関与－」『日本エネルギー学会誌』90(7), pp.670-672。
- 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.
- 井内正直（2005）『バイオマス資源の収集・運搬及び利用の現状と課題』, 中央電力研究所報告, 調査報告 Y04016。
- Jevons, W. S., (1865) “The Coal Question” Macmillan & Co. London.
- 加賀爪優（1998）「デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察：中央集中管理型バイオガス工場を事例として」『京都大学生物資源経済研究』4, pp.21-42。
- 上村佳奈・久保山裕史・山本幸一（2009）「北東北三県における木質バイオマス供給可能量の空間的推計」『日本エネルギー学会誌』88, pp.877-883。
- 環境省（2012）『環境白書 循環型社会白書／生物多様性白書 震災復興と安全安心で持続可能な社会の実現に向けて』。
- 環境省（online a）「自然エネルギーを中心とする今後のエネルギー対策について」『中央環境審議会 地球環境部会（第 84 回）』配付資料,
<http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-84.html>（2013 年 2 月 19 日アクセス）
- 環境省（online b）『日本の温室効果ガス排出量の算定結果』
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>（2013 年 2 月 19 日アクセス）
- 経済産業省（2010）『エネルギー白書 2010』。
- 経済産業省（2013）『エネルギー白書 2013』。
- 経済産業省（online a）「ファンド型・市民参加による自然エネルギー普及地域自然エネルギー政策」『総合資源エネルギー調査会第 16 回新エネルギー部会（2006 年 4 月 24 日）資

料』

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60519b02j.pdf> (2013 年 2 月 19 日アクセス)

経済産業省 (online b) 「新エネルギーを巡る動向」

<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/newenergy/newene01.htm> (2013 年 2 月 20 日アクセス)

経済産業省 (online c) 「総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会新エネルギー部会 (第 15 回) 配付資料」 www.meti.go.jp/committee/materials/g60414kj.html (2013 年 2 月 20 日アクセス)

松田浩敬・高橋大輔 (2008) 「国際食料需給の現状と環境問題：バイオ燃料生産と水問題を中心に」『農業経済研究』80(1), pp.23-35。

森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・山口達也・白石祐治・小原忠 (2004) 「林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト」『日本森林学会誌』86(2), pp.121-128。

森のエネルギー研究所 (2012) 『平成 23 年度 地球温暖化対策と大気汚染防止に資するコベネフィット技術等の評価検討業務報告書』。

National Renewable Energy Laboratory (online) “National Renewable Energy laboratory Home Page” <http://www.nrel.gov/>, (2011 年 6 月 6 日アクセス)。

日本経済団体連合会 (online) 『エネルギー政策に関する第 1 次提言』

<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2011/078/index.html> (2011 年 9 月 1 日アクセス)

農林漁業バイオ燃料法研究会 (2009) 『逐条解説 農林漁業バイオ燃料法』大成出版。

農林水産省 (1986) 「自然エネルギー資源賦存量図(風力) (グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系(エネルギーの分布と利用) No.4)」

農林水産省 (1987) 「自然エネルギー資源賦存量図(水力) (グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系(エネルギーの分布と利用) No.6)」

農林水産省 (1988) 「自然エネルギー資源賦存量図(日射) (グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系(エネルギーの分布と利用) No.7)」

農林水産省 (2010) 『バイオマス活用推進基本計画』。

大木祐一 (online) 「木質バイオマス発電導入のための課題調査 (1)」日本エネルギー経済研

究所, <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/719.pdf> (2011 年 8 月 18 日アクセス)。

Reinhardt, G. A., (2002) "Bioethanol and ETBE Versus Other Biofuels for Transportation in Europe: An Ecological Comparison" 14th International Symposium on Alcohol Fuels 23 (ISAF), Phuket, Thailand, 12-15 November 2002.

酒井伸一・平井安宏・吉川克彦・出口晋吾 (2005) 「バイオ資源・廃棄物の賦存量分布と温室効果ガスの視点から見た厨芥利用システムの解析」『廃棄物学会論文誌』16(2), pp173-187。

迫田章義・望月和博・安部郁夫・片山葉子・川井秀一・沢田達郎・棚田成紀・中崎清彦・中村嘉利・藤田晋輔・船岡正光・三浦正勝・吉田 孝 (2001) 「ゼロエミッションのための未利用植物バイオマスの資源化」『環境科学会誌』14(4), pp.383-390。

佐々木誠一・多田野修・東野正・深澤光・小笠原啓次郎 (2006) 「燃料用チップ供給コストの試算」『岩手林業技術センター研究報告』14, pp.9-15。

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., and Yu, T. (2008) "Use of Crop lands 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。

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.

分山達也・江原幸雄 (2008) 「GIS を用いた再生可能エネルギー評価ー長崎県雲仙市の例ー」『日本エネルギー学会誌』88, pp. 58-69。

山口鈴子・有賀一広・村上文美・斎藤仁志・伊藤要 (2010) 「栃木県佐野市における用材と林地残材収穫の経済性を考慮した林地残材収穫量と収穫費用算定モデルの構築」『日本エネルギー学会誌』89, pp. 982-995。

山地憲治・山本博己・藤野順一 (2000) 『バイオエネルギー』ミオシン出版。

吉岡拓如・小林洋司 (2006) 「中山間地域におけるエネルギー利用可能な森林バイオマス資源量と収穫・輸送コスト」『日本森林学会関東支部大会発表論文集』57, pp.335-338。

第 2 章 バイオエネルギー導入効果の評価とその視点

林 岳

1. はじめに

前章では、バイオエネルギーの定義及び導入による効果と課題について整理した。今後バイオエネルギーの導入を検討する際には、導入による効果を適切な手法を用いて評価すべきである。しかしながら、バイオエネルギーを導入する際の評価に適用される手法は、それぞれどのような視点から何をどのように評価するのかによって大きく異なってくる。このような評価手法を適切に適用しなければ、目的とした評価が正しく行えず、事業の効果に対して誤った情報を提供し、ひいてはそれが、事業が計画通りに進まない原因にもなりうる。そのため、それぞれの効果にどのような手法をどのような視点から適用すべきかについて整理しておく必要がある。

そこで、本章ではまず評価結果を数値で表す定量的評価の必要性を説明した上で、それぞれの効果をどのような手法で評価すべきなのか、そして評価の際にはどのような点に留意すべきなのかについて、既存研究の事例を踏まえつつ検討する。

2. 諸効果の定量的評価の既存研究と手法の検討⁽¹⁾

(1) 定量的評価の必要性

前章で触れたバイオエネルギー導入の諸効果进行评估するには、さまざまな手法が適用できる。しかしながら、バイオエネルギー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。

定量的評価が必要とされる第 1 の理由は、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具体性、客観性を有している点である。バイオエネルギー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エネルギー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、実際にはバイオエネルギー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る。例えば、1Lのバイオ燃料の生産にはいくらかの化石燃料が投入されており、必ずしも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のバイオ燃料は〇L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の理由として、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でき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。定性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、バイオエネルギー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、多くの有益な情報を提供することになり、バイオエネルギー導入促進に資すると考える。以降ではバイオエネルギー導入効果を評価する定量的な評価方法について、環境への影響、経済への影響の2つの評価手法を列挙し、最後に複数の視点から影響評価を行った研究事例を紹介する。

（2）環境への影響の評価

バイオエネルギー導入による環境への影響を評価するには、環境負荷発生量がどのくらい削減されるのかを計測することが求められる。このような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）の適用が最も有効である。LCA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を適用している。また、ガソリンやバイオ燃料などのバイオエネルギーにLCAを適用した事例は、国内外問わず多数公表されており、例えばバイオガスプラントでは、増田他（2006）、中村他（2008）、

バイオ燃料では船崎・種田(1999), 三菱総合研究所(2003)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)や小野他(2007)のようにバイオエネルギー用の原料作物の作付体系に LCA を適用した事例もある。

このように LCA 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 の原則や枠組みを記述し, ISO14044 では実際の LCA の実施方法を定めるものとなっている。

LCA をさらに発展させたものとして, LCA において計測された環境負荷量をベースにして算出される統合化指標を評価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 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 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 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 に必要となる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 を行うことが可能になったが, バイオエネルギーなど新たに創設された分野や農業生産といった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労することが多い。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 の蓄積があればさほど苦労することはないかもしれないが, 新しく LCA 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⁽²⁾。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 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⁽³⁾、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。

(3) 経済への影響の評価

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エネルギー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、バイオエネルギー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。ミクロ的評価の研究事例としては、八木・中田(2007)、任他(2009)などを挙げることができる。八木・中田(2007)は、森林バイオマスを原料とする発電プラントについて、最適なプラント規模、立地地点、プラント数、および最小発電コストを解析した上で、直接燃焼発電と小規模ガス化発電の経済性を比較している。その結果、直接燃焼発電では発生した熱量が多すぎるため有効活用できず、小規模ガス化発電のほうが発生した熱を効率よく利用できるため、小規模ガス化発電のほうが経済的に有利であるという結果を導いている。間伐材については、木材としての利用可能性もある材を、コストを費やして集材しエネルギー利用することは、経済的な観点からも不利であると結論づけている。また、任他(2009)は、北九州学術研究都市の住宅地区を事例に、バイオマス複合エネルギーシステムの経済性を評価し、バイオガス価格の変動と炭素税の導入が与える影響を解析している。その結果、バイオマス複合エネルギーシステムは現状ではバイオマスを導入する経済的なメリットは少なく、何らかの

導入支援策が必要であり、バイオガス価格の低下は経済性を発揮するのに効果がある一方、炭素税の導入はその影響が限定的であると結論づけている。

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。日本ではバイオエネルギー生産は新たな産業であり、未だ商業用バイオエネルギー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エネルギー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エネルギー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エネルギーの経済効果を計測するためには、バイオエネルギー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エネルギー部門の投入構造、産出構造を把握することも必要であり、バイオエネルギー部門がどの部門からどれだけの財を投入しているか、さらにはバイオエネルギー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。

マクロ経済的視点からの影響評価については、これまで多数の研究が行われてきた。林他（2009）が産業連関分析を用いて北海道十勝地方におけるバイオエタノール生産の導入による地域経済への影響を評価している。また、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。Evans(online)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(online)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、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。

（４）複数の側面からの評価

バイオマスエネルギー導入事例を複数の視点から評価した研究事例についても国内外を問わず多数存在する。日本の研究事例で見ると、沖縄県宮古島のバイオマス利活用の評価（東理・凌（2006））、福島県飯舘村、栃木県佐野市、岩手県遠野市の木質バイオマスの導入事例（浦上・糸長（2007）、山口他（2010）、久保山他（2004））、千葉県香取市におけ

るバイオガスプラントの評価事例（中村他（2008a））など、個別の事例にそれぞれ独自の評価視点および評価手法を適用して評価を行った研究事例が多い。浦上・糸長（2007）は、飯館村を事例にした木質バイオマス導入の GHG 削減量の推計と村内に滞留する経済効果の計測という 2 つの側面からの評価を行っており、久保山他（2004）は岩手県遠野市を事例として木質バイオマスの実際の発生量を推計し、単位重量あたりの熱量と単位重量あたり収集コストの 2 要素を考慮した評価を行っている。また、東理・凌（2006）は宮古島を事例にバイオマス利用による(1)農家レベルでの原料生産段階と(2)原料収集・輸送に伴う大気環境・地球温暖化への影響、(3)地下水水質への影響の 3 側面について評価し、さらにそれらの統合手法について論じている。さらに山口他（2010）は栃木県佐野市を事例に林地残材の収穫ポテンシャル、収穫費用をモデル化し、収支面からの林地残材の収穫可能量と収穫費用を評価している。

一方、森本他（2009）は個別事例の評価ではなく、より総合的な評価を行っている事例である。森本他（2009）では、「バイオマス利活用総合評価モデル」を開発し、バイオマスタウン構想を公表している 38 市町村でこのモデルを用いた評価を行っている。モデルでは、経済収益、化石エネルギー消費量、炭素利用率、CO₂ 排出削減量の 4 項目を総合的に評価している。評価の結果、バイオマス利用率を 100%に近づけることだけを目標とすると、利用率以外の評価項目が悪化するケースもでてくると結論づけている。

また、海外における評価事例に関しては、日本と同様個別のバイオマスエネルギー導入事例の評価も見られるが、中にはこれら個別の評価を整理し、どのような視点が重視されているかを分析した研究も行われている（Wang et al. (2009)）。Wang et al.(2009)では、評価側面を技術的側面、経済的側面、環境的側面、社会的側面の 4 つに分類し、それぞれの側面に属する評価項目の中でどれがもっとも適用されているかをまとめている。この中で、経済的側面でもっとも適用されている評価項目は投資コストであり、環境的側面では CO₂ 排出量、社会的側面では雇用創出、技術的側面では効率性となっている。さらに、Silva and Nakata (2009)は、コロンビアの非交流地域（Non-Interconnected Zone）を対象に、今後電力供給システムを導入する場合に、軽油を燃料とする発電機の導入と再生可能エネルギー技術（木炭混焼、廃棄物混焼、バイオガス混焼、太陽光発電、小水力発電）の導入において、社会側面、環境側面のいくつかの効果の違いを多目的意思決定法（Multi-Objective Decision-Making Method）によりシミュレーション分析している。この分析からは、エネルギーアクセスの向上による貧困の低減を目的とした再生可能エネル

ギーによる発電用軽油代替は発電費用に制約を受け、軽油の場合を上回るパフォーマンスを示すには燃料の代替率が大規模コミュニティで 90%、小コミュニティで 80%となるとしている。一方で、新たな電力により電力消費が拡大すると、家計の電気代が従来の 2 倍から 5 倍に跳ね上がるものの、クリーン開発メカニズム（CDM）などの制度を利用し CO₂ 削減分を金銭化することで相殺可能であるとしている。Silva and Nakata (2009)は再生可能エネルギー導入の事前評価を行っている点で注目すべき研究成果である。

3. 今後のバイオエネルギー導入に求められる視点

さて、これまで既存研究からバイオエネルギーの導入事例について、どのような視点からの評価がなされているのかを見てきたが、これらの既存研究から、今後バイオエネルギーの導入効果を評価する際に求められる視点を整理する。

第 1 に、個別事業を対象とした評価と地域全体を対象とした評価の双方に着目すべきという点である。市町村や都道府県など地域全体を対象とした影響評価と個別の事業に限った影響の評価では、根本的に異なるものを評価しており、地域への影響を最大化することと個別の事業者の便益（利益）を最大化することは必ずしも整合的ではない。地域へのバイオエネルギー導入の（個別の）事業評価は、一般に事業の経済性が判断基準となり、事業の経済性が良ければ事業を実施するということになる。一方で、地域にバイオエネルギーが導入されれば、エネルギー安全保障や、CO₂ 削減、農業・農村の発展などの（正の）外部効果がもたらされる。通常の事業評価では、これらの（正の）外部効果が適正に評価されていないため、多くのバイオマス導入事業の経済性はその分だけ低く見積もられることになる。結果として市場の失敗が発生し事業が継続されなければ、事業主体だけでなく地域全体に損失をもたらすこととなる。このギャップを埋めるのが政府の役割で、具体的には、外部効果を適正に評価し、何らかの形で外部効果に対する支払いがされるようにする仕組みを作ることが必要となる。

第 2 に、マクロ経済学視点からは、バイオエネルギーの導入により、資金が動くこと（マネーフローの発生）、そしてそれがどこに流れるのか、さらにはそれがどのくらいの期間継続するかということが重要であるという点である。この点を踏まえると、地域経済への貢献という視点も再生可能エネルギー導入の効果として評価すべき重要な視点と考える。バイオマスの生産には毎年継続的に労働と投資が必要であることが特徴である。換言すると、

原料の生産のため、毎年継続的に雇用が生み出され資材が投入され、それが地域のマネーフローを起こす源になっているのである。この点は例えば他の再生可能エネルギーには見られないバイオマスの大きな特徴である。太陽光発電や風力発電は施設の整備に伴って一定のマネーフローをもたらすが、一旦設備が完成した後は施設の維持管理以外に必要な労働および資本投入はなく、マネーフローが継続することは想定しにくい。

特にバイオマスは地域に「広く薄く」存在する資源であるため、地域分散型のエネルギー供給システムの構築には都合がよい。バイオエネルギーの原料となるバイオマスは農林水産業従事者が多くの労働と資本を投入して生産されており、農林業の生産活動がなければバイオエネルギー生産設備を維持することはできない。つまり、バイオエネルギーではその原料の供給のため、農林業を源とする継続的なマネーフローが発生することを意味する。この意味で、バイオエネルギーは地域に資金が流れやすく、地域経済に貢献することが想定される。松田・高橋（2008）によると、バイオ燃料の特徴として(1)カーボンニュートラルであること、(2)再生可能であること、(3)化石燃料と比べ大気汚染防止効果があること、(4)エネルギー安全保障に貢献すること、(5)農業振興に貢献することの 5 つを挙げている。バイオエネルギーに当てはめて考えてみると、特に(5)の農業振興への貢献が他の再生可能エネルギーと比べたバイオエネルギーの特徴といえる。このような継続的な地域への経済効果を考慮すると、単に建設コストや事業レベルでの収支計算のみを考慮するだけでは不十分で、投入された資金が地域にどの程度貢献するのかについても十分に検証する必要がある。

第 3 に、長期的視点での評価が必要であるという点を指摘しておく。バイオマスはその生産に長い年月がかかる場合がある。特に木質バイオマスの場合は、原料生産に数十年かかることが十分に想定され、このような長期に渡る影響を考慮した上でその効果を評価する必要がある。例えば、原料の確保が将来にわたり持続的に可能なのか、環境負荷の削減効果が短期に限定されるものではないかなどは、直近の影響のみならず将来にわたる経年的な影響を評価する必要がある。

第 4 に、1 つの側面のみならず、複数の視点からの多角的・総合的な評価が必要である点である。先に見た既存研究でも複数の要素を考慮した評価を行った事例は多数存在する。単一の側面からの評価では他の側面に深刻な悪影響を及ぼすおそれもあり、可能な限り多角的な視点からの評価が望ましい。このような観点からの評価はバイオマスの導入によるコベネフィットまたはトレードオフを明らかにするもので、より効果の高いバイオマス導

入を図るために必要な情報となると思われる。

4. おわりに

本章ではまず評価結果を数値で表す定量的評価の必要性を説明した上で、それぞれの効果をどのような手法で評価すべきなのか、そして評価の際にはどのような点に留意すべきなのかについて、既存研究の事例を踏まえつつ検討してきた。

検証の結果は以下の3点にまとめられる。第1に、特に木質バイオマスのように原料の生成までに長期間を要するバイオマスについては、バイオマスの成長量などを踏まえた長期的な原料の利用可能性も考慮する必要があることである。このような観点からは単年度の効果だけでなく、5年後、10年後といった将来的な影響まで評価する必要があるだろう。第2に、複数の視点からの評価が必要であるという点である。より効果的なバイオエネルギーの導入のためには、導入による影響をより幅広く捉えようとする必要がある。既存研究を見ても、1つの側面を評価するのみならず、複数の側面への影響を多角的に評価するものが見られる。そして第3に、いかに地域で資金を循環させるかという視点が求められるという点である。バイオエネルギーを利用した地域振興のためには、域外から流入する資金を地域になるべく滞留させておくことが求められる。そのためには、上記のような地域資金循環についても評価に加えるべきと考える。

このような長期的な評価や多角的な評価、地域資金循環の評価は、バイオエネルギー導入によるコベネフィットまたはトレードオフを明らかにし、事業の実施に際する影響を幅広く捉えることができ、事業実施主体に有益な情報を提供することができる。次章ではこれらの点に留意しながら、実際の木質バイオマスの利用事例を対象に評価を行う。

注

- (1) 本節の一部は、2009年9月刊行の農林水産政策研究所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』の第1章「バイオ燃料導入の諸効果とその評価方法」を加筆・修正したものである。
- (2) バイオ燃料に関する環境負荷配分方法の概要は、農林水産政策研究所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』の第2章「LCA分析による温室効果ガス削減効果の計測」補論2を参照のこと。

- (3) 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。

〔引用文献〕

地域環境資源センター（online）「バイオマス利活用技術情報データベース」

<http://www2.jarus.or.jp/biomassdb/>（2013年2月26日アクセス）

遠藤真弘（2006）「木質バイオマスのエネルギー利用—その動向と課題—」『国立国会図書館 調査と情報-Issue Brief-』No.510。

Evans, M., (1997) “The Impact of the demand for ethanol” RFA Reports and Studies.

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。

林岳・増田清敬・山本充（2009）「産業連関分析による地域への影響評価」農林水産政策研究所『環境プロジェクト研究資料第1号』所収，pp.59-91。

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。

東理裕・凌祥之（2006）「宮古島におけるバイオマス利活用に関する評価手法の検討」『農村工学研究所技報』204，pp.211-219。

Kim S., and Dale, B. E., (2005) “Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel” Biomass and Bioenergy 29(6), 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.117-212.

久保山裕史・西園朋広・家原敏郎・奥田裕規（2004）「林業・林産バイオマスのエネルギー利用の可能性について：岩手県遠野市を事例として」『日本林学会誌』86(2)，pp. 112-120。

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。

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。

- 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。
- 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。
- 松田浩敬・高橋大輔（2008）「国際食料需給の現状と環境問題：バイオ燃料生産と水問題を中心に」『農業経済研究』80(1), pp.23-35。
- 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 のすべてー 環境への負荷を評価する』工業調査会。
- 三菱総合研究所（2003）『輸送用バイオマス燃料の導入可能性に関する研究調査』。
- 森本英嗣・土井和之・星野敏・柚山義人・九鬼康彰（2009）「バイオマス利活用総合評価モデルの開発とその適用」『農村計画学会誌』27, pp.317-322。
- 中村真人・柚山義人・山岡賢・藤川智紀・清水夏樹（2008a）「消化液を液肥利用するメタン発酵システムによる温室効果ガス削減効果」『農業農村工学会誌』76(11), pp.13-16。
- 中村良平・柴田浩喜・渡里 司（2008b）「資源循環型社会における地域経済活性化効果 岡山県真庭市におけるバイオマス事業」2008年環境経済・政策学会大会報告論文, 2008年9月27-28日, 大阪大学。
- 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。
- 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.
- 任洪波・高偉俊・渡辺俊行（2009）「バイオマスを原料とした住宅地区の複合エネルギーシステムの導入効果及び経済性の要因解析」『日本建築学会環境系論文集』74（637）, pp.331-337。
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（2010）『バイオマスエネルギー導入ガイドブック第3版』。
- 大木祐一（online）「木質バイオマス発電導入のための課題調査」日本エネルギー経済研究所, <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/404.pdf>（2013年4月2日アクセス）。
- Silva, D., and Nakata, T., (2009) "Multi-objective assessment of rural electrification in

remote areas with poverty considerations” Energy Policy 37(8), pp.3096-3108.

Urbanchuk, J. M., (2009) “Contribution of the ethanol industry to the economy of the United States” RFA Reports and Studies.

浦上健司・糸長浩司（2007）「木質バイオマスエネルギーの地産地消を通じた持続可能な農村地域づくりの展望：飯館村の地産地消計画を事例として」『農村計画学会誌』26(3), pp. 153-158。

山口鈴子・有賀一広・村上文美・斎藤仁志・伊藤要（2010）「栃木県佐野市における用材と林地残材収穫の経済性を考慮した林地残材収穫量と収穫費用算定モデルの構築」『日本エネルギー学会誌』89, pp. 982-995。

Wang, J., Jing, Y., Zhang, F., and Zhao, J., (2009) “Review on Multi-criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-making” Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (9), pp.2263-2278.

八木賢治郎・中田俊彦（2006）「資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス小規模ガス化システムの経済評価」『日本エネルギー学会誌』86, pp.109-118。

第3章 家庭における木質バイオマス利用の影響評価手法の開発 —岩手県西和賀町の薪利用を事例とした実証分析—

澤内大輔
國井大輔

1. はじめに

我が国では、これまでバイオマスニッポン総合戦略やバイオマス活用推進基本法などを通じて、市町村などによるバイオマス利用の促進が図られてきた。これらの取り組みを通じて、バイオマス利用のノウハウや効果に関する知見もかなり蓄積されてきている。たとえば、エネルギー学会（2003）などでは、バイオマスの種類ごとにエネルギー変換の方法やその特徴といった供給側からの基礎的知見の整理、および最適な取組の規模といった需要側からの基礎的知見の整理などが行われている。またその効果についても、経済的な評価をはじめ、温室効果ガス（GHG）削減の効果、化石燃料節減効果といった諸側面からの評価研究が蓄積されつつある。これらを統合しバイオマスの生産から消費・廃棄までのライフサイクルを通じて、諸側面から評価を行う必要性は柚山ら（2006）等により指摘されている。

本研究の目的は、バイオマスの利用を経済性の面のみからでなく、環境や地域社会に及ぼす影響などの側面からも評価する手法を開発することである。具体的には、岩手県西和賀町の家庭における木質バイオマス利用を事例に、①統計情報等に基づいて生産から消費、廃棄までのライフサイクルを通じた各種影響を評価するとともに、②より実践的な評価手法の開発を目指し、地理情報も加味した最適化シミュレーションに基づく各種影響の評価を試みる。

本稿の構成は以下のとおりである。第2節では西和賀町での薪利用の取り組みについて、既存文献やヒアリングをもとに整理した。第3節では、西和賀町での薪フローを明らかにした上で、既存の統計情報をもとに各種影響を推計する。具体的には薪利用に関わるライフサイクルでのGHG削減量、化石燃料の削減量、雇用発生量を推計するほか、マクロ的な視点から薪利用によるエネルギー自給率への寄与も推計する。第4節では、より実践的な木質バイオマス利用の影響評価手法の開発を目指し、地理的な情報も加味した薪利用の費用最小化シミュレーションを実施し、その結果に基づいて資源の持続可能性、環境への影響、経済への影響という各

方面からの評価を試みた。第 5 節は、まとめである。

2. 西和賀町における薪利用の取組

1) 西和賀町における薪利用の取組経緯

西和賀町は岩手県の南西部に位置しており、平成 17 年 11 月に旧沢内村と旧湯田町とが合併して誕生した町である。平成 21 年時点での世帯数は 2,493 世帯、人口は 7,093 人となっている（西和賀町（2010））。町の主な産業は農業と温泉を生かした観光業であり、農業では米のほか、酪農、花（主にリンドウ）の生産額が大きい。町の総面積は 590.8km²であるが、そのうち 87%が森林である。森林のうち約 3/4 が国有林となっており、私有林は約 23%、残りが町有林である。平成 12 年時点で 1ha 以上の山林を有する林家数は 812 戸であり、その中でも所有林地面積が 3ha 未満の小規模林家の層が最も多くなっている。

西和賀町では平成 17 年 11 月の合併以前より、豊富な森林資源を生かした木質バイオマス利用の取組が進められてきた（表 1）。平成 12 年度に旧沢内村で策定された「地域新エネルギービジョン」の中で、薪利用の促進が初めて町の施策に位置づけられた。その後も、平成 15 年の「森林バイオマス利用促進行動計画」では家庭での薪ストーブ導入が基本方針として定められ、同時に住民の薪利用に関するアンケート調査が実施された（沢内村（2004））。アンケートでは、薪ストーブの利用状況、利用している薪ストーブの種類や購入額、薪の入手方法、年間の薪利用量などについての設問が設けられている。アンケート結果の概要から、平成 15 年における旧沢内村での住民による薪利用の実態は以下のようにまとめられる。

表 1 西和賀町における木質バイオマス利用促進の取組経緯

年度	摘要（国や県の主要な政策も含む）
平成 11 年度	湯田町で「地域新エネルギービジョン」を策定
平成 12 年度	沢内村で「地域新エネルギービジョン」を策定
平成 13 年度	岩手県が「木質バイオマス資源活用計画」を策定
平成 14 年度	「バイオマスニッポン総合戦略」が公表される
平成 15 年度	沢内村が「森林バイオマス利用促進行動計画」を策定 沢内村にて「薪利用に関するアンケート調査」を実施
平成 16 年度	岩手県が「いわて木質バイオマスエネルギー利用拡大プラン（第 1 ステージ）」を策定 沢内村にて「岩手県循環型システム実証事業」を実施
平成 17 年度	旧沢内村と旧湯田町が合併し西和賀町となる
平成 19 年度	岩手県が「いわて木質バイオマスエネルギー利用拡大プラン（第 2 ステージ）」を策定 西和賀町が「総合開発計画」を策定
平成 21 年度	「バイオマス活用推進基本法」が策定 西和賀町にて「薪ストーブに関するアンケート調査」を実施
平成 22 年度	西和賀町が「「薪」利用最適化システム構築計画書」を策定

出所：西和賀町（2011）。

まず、アンケートの有効回答のうち 33%が薪ストーブを利用していることが明らかになった。このことより、沢内村（2004）では、旧沢内村の薪ストーブ利用世帯数を全 1,161 世帯（平成 15 年度の値）の 33%に当たる 383 世帯と推計している。住民が利用している薪ストーブは鉄製のものが最も多く（有効回答数の 36.8%）、価格は 1 万円以内のものが最も多かった（同 38.9%）。1 年間に使用する薪の量は平均 4.1 間（実材積約 4.1m³に相当）となっている⁽¹⁾。薪の入手元としては薪炭共有林からの調達が多く（同 29.7%）、次いで自分の山からの調達（同 26.3%）、業者からの購入（同 19.0%）の順に多かった。

平成 17 年の旧湯田町と旧沢内村の合併後も、木質バイオマスエネルギーの利用は継続的に町の重要な施策の一つとして位置づけられている。平成 19 年の「西和賀町総合開発計画」で

は、エネルギー自立や森林整備促進などの側面から、木質バイオマスエネルギーの導入促進が施策として盛り込まれた。平成 21 年には合併後の町内住民を対象としたアンケートが実施されている。その概要は以下の通りにまとめられる。

表 2 西和賀町の薪ストーブ利用世帯数の推計値（平成 21 年度）

地区名	世帯数 (世帯)	薪ストーブ利用率 (%)	薪ストーブ利用世帯数 推計値 (世帯)
西和賀町合計	2,493	24.8	617
旧沢内村合計	1,140	39.4	449
貝沢区	85	56.0	48
若畑区	72	54.5	39
川舟区	165	40.3	67
長瀬野区	80	66.0	53
泉沢区	77	34.5	27
弁天区	32	60.0	19
猿橋区	88	20.0	18
太田区	165	20.0	33
鍵飯区	35	41.7	15
前郷区	99	48.9	48
新町区	144	38.0	55
大野区	52	16.1	8
東大野区	46	44.0	20
旧湯田町地区合計	1,353	12.4	168
左草区	46	59.4	27
下前区	37	32.0	12
湯田区	199	13.6	27
湯本区	233	8.1	19
槻沢区	44	11.1	5
白木野区+湯之沢区	105	12.5	13

川尻 1 区	110	5.1	6
川尻 2 区	166	6.1	10
上野々区	144	8.5	12
耳取区	56	13.2	7
鷲之巢区+草井沢区	22	17.6	4
湯川区	47	0.0	0
小繁沢区	45	10.0	5
越中畑区	41	15.4	6
野々宿区	34	20.8	7
柳沢区	24	33.3	8

出所) 世帯数は『西和賀町の統計』、薪ストーブ利用率は西和賀町 (2011)。

注) 居住地区名が不明の回答は集計から除外した。四捨五入のため細目の合計と各地区の合計値とが一致しない場合がある。

まず、地区別の内訳をみると、最も高い地区で 66.0%、最も低い地区でゼロなど地区により差が見られた (表 2)。各地区の世帯数と各地区の薪ストーブ利用割合とを掛け合わせて算出した西和賀町の薪ストーブ利用世帯数は、全世帯数の 24.8%に相当する 617 世帯と推計される。旧沢内村の地区において薪ストーブの利用率が比較的高い傾向が見られ、その割合は 41.5%であり平成 15 年の調査時の 33%よりも増加している。直近 (平成 21 年) の方が、薪ストーブ利用率が高い理由として、灯油等の価格が大幅に上昇したこと等が推察される。

薪の入手方法は「自分の山から採取している」が最も多く 52.0%、次いで「購入する」が 38.9%であり、購入先としては森林組合が最も多かった。また薪炭共用林⁽²⁾などから薪を入手するとの回答も 21.1%であった。

一世帯当たりの年間薪使用量は 3.5m³であった。この値は平成 15 年度調査の 4.1m³や長野県における調査での 9.0m³ (平成 23 年) と比べると小さな値となっている⁽³⁾。このうち、薪を購入している世帯の一世帯当たりの年間薪購入量の平均は 3.3m³であり、年間の薪購入額は 1 世帯当たり平均 56,800 円であった。

2)「薪利用最適化計画」による木質バイオマス利用促進の取組内容

西和賀町では平成 23 年 3 月に『「薪」利用最適化システム構築計画書』(以下、計画書とする)を策定した。計画書は平成 22 年度の過疎地域等自立活性化推進交付金事業(総務省)による「森林エネルギー利用で切り開く西和賀町の未来推進事業」の成果である。計画書の作成にあたって研究者、森林管理署、町役場、町民有志からなる「計画書策定委員会」が編成され、平成 22 年 4 月から 3 回の会合を経て計画書が策定された。計画書の概要は以下の通りである。

計画書では「薪ストーブ利用世界一」を目標としており、数値目標として平成 29 年までに「薪利用世帯割合 50%、1,100 世帯以上」を掲げている⁽⁴⁾。計画書を踏まえた町の具体的な事業として、町立病院周辺での地域暖房導入等が計画されており最大で 1 年あたり 5,400 万円(平成 24 年度)の予算で、平成 26 年度までに合計で 8,489 万円の予算が付けられている。

また計画書には、西和賀町の森林資源は町民が持続可能な薪利用をするのに十分な量が確保されている点も示されている。これは、西和賀町の森林の年間成長量が、西和賀町全世帯が薪利用した場合に必要な薪の量を大幅に上回っている状況にあることに依拠している。具体的には、西和賀町内の広葉樹の年間成長量は $27,545\text{m}^3$ と推計されており、すべて薪ストーブ燃料に換算すると約 7,900 世帯分(= $27,545\text{m}^3 / 3.5\text{m}^3 / \text{世帯} \cdot \text{年}$)になる。一方、西和賀町の総世帯数は約 2,200 世帯であることから、仮に西和賀町内の全世帯が薪ストーブを利用したとしても、そのすべてを町内の広葉樹林の年間成長量で十分に賄えると推察される。

西和賀町がこの「薪」利用最適化システム計画を立てた背景として、衰退傾向にある町内の林業活性化があげられる。西和賀町の面積の 9 割は森林であり、かつて林業は町の主要産業の一つであったものの、近年では安価な外国産材の輸入などにより町内の林業は停滞している。

「薪」利用最適化システムとは「森林から木を切りだし、燃料として効率的、合理的に利用することで地域に活力をもたらし仕組み」および「薪の供給・流通から利用までを合理化することで町民などに安価なエネルギー源を供給するとともに、地域を活性化させる仕組み」と定義されており、林業活性化を通じた地域経済活性化が期待されている。さらに木質バイオマスの中でも薪に注目した理由は「薪は町民にとって昔から身近であり、雇用の拡大に貢献できることなどが期待されるため」とされている。

西和賀町では計画書の作成にあたって、薪供給システムの実証試験、薪ボイラーの実証試験、国内外への先進地視察などを実施している。薪供給システムの実証試験では、森林組合の協力のもと、高性能林業機械などを導入することで間伐材を利用した薪供給の経済性が検証された。

具体的には、従来にはない新たな薪供給システムとして、①立木（広葉樹）を伐採し薪とする方法、および②スギの間伐材を収集し薪とする方法、について作業時間や投下エネルギー等を調査している。これらのデータは、後段の分析において大いに利用できると思われる。

このほか、薪ボイラー実証試験では、事業所やハウス栽培農家が薪を利用した暖房機を利用した場合の性能調査が実施されており、実証データが利用可能となっている。また平成 23 年 7 月には「西和賀町森林エネルギー利用促進協議会」が発足し、町民を対象とした森林資源活用に関する勉強会開催、薪ストーブの展示・販売会開催、オーストリアからの木質バイオマス熱供給事業アドバイザーの招聘などを実施した。

3) 西和賀町の薪利用に関するヒアリング調査

(1) 西和賀町農林課へのヒアリング調査

西和賀町農林課では、主に町内における薪利用の実態についてヒアリングした。その概要は以下のとおりである。

西和賀町の民家で利用される薪ストーブは、ホームセンターで 3,000～4,000 円/台程度で販売されている「時計型ストーブ」と呼ばれる、2 次燃焼装置などはない簡易なものが主流となっている。煙突もホームセンターにて数千円程度で調達されることが多く、ストーブ本体と合わせて安価なため、数年おきに買い替える家庭も見られるとのことである。

西和賀町内でも他地域と同様に、昭和 30 年代のエネルギー革命以降、住宅改善事業により立て替えられた家では囲炉裏が撤去される等の傾向が見られたものの、3 割程度の家では現在でも薪ストーブを利用している。これは、住民が自分の山を所有していたり、薪炭共有林が利用しやすい状況にある等、薪の入手が比較的容易であったためと考えられる。薪炭共有林は各地区（農林業センサスの集落にほぼ該当）に 17 カ所 1,067ha（平成 21 年時点）配置されており、町内の 699 戸が利用している。特に旧沢内村での薪炭共有林の利用が活発であり 699 戸中、約 8 割に当たる 564 戸が旧沢内村地区の利用者となっている。

しかしながら、現在、実際に薪炭共有林を利用して薪の収集をしているのは上記の 699 戸のうち 1/6 程度と推計されている。これは、薪炭共有林の原則として、自分で伐採などの作業をしなければならず、高齢者などには負担が大きいためと推察される。

平成 23 年 3 月の東日本大震災時には、西和賀町内でも 2 日間電力供給が停止した。その際、

電気を使わなくても利用できる薪ストーブは単に居室暖房の熱供給源としてだけではなく、光源にもなり、また、煮炊きもできるなど便利であったとの住民の話がある。このほか西和賀町住民を対象にしたアンケート調査では、通常時の薪ストーブのメリットとして、他の暖房より暖かい、薪（燃料）が身近にある、他の燃料に比べて経済的である、などの回答が挙げられている。逆にデメリットとしては、煙突掃除が大変である点、薪割りが重労働である点が指摘されている⁽⁵⁾。

（２）森林組合へのヒアリング調査

西和賀町森林組合では、主に森林組合による薪生産・販売事業についてヒアリングした。その概要は以下の通りである。

西和賀町森林組合は、旧湯田町森林組合と旧沢内村森林組合が平成 19 年に合併して設立された。平成 21 年末の組合員数は 971 人（うち正組合員数は 928 人）、一般職員数 5 人となっている。現在の森林組合の主な事業は国有林を中心とした森林整備（除伐・間伐）事業であり、その他に規模は小さいものの薪・オガ粉の加工事業、チェーンソーなどの購買事業、丸太の販売事業（販売先は合板会社）等を実施している。

表 3 西和賀町森林組合の加工部門販売実績（平成 21 年）

	オガコ	チップ	加工薪	その他	合計
数量(m ³)	10,003	701	103	33	10,840
金額(万円)	6,002	394	244	63	6,703
単価(円/m ³)	6,000	5,623	23,689	19,030	6,183

出所：西和賀町森林組合へのヒアリング（2011 年 11 月）。

森林組合では、薪の生産および町内外向け販売を行っている。販売価格は、1m³あたり 18,500 円（丸太の状態）から 23,000 円（割薪の状態）の範囲であり、別途、配送料が 1m³あたり 1,000 円かかる。平成 21 年の販売実績は、割薪（加工薪）が 103m³（平成 20 年の 80m³ から増加）、丸太が 135m³（平成 20 年の 133m³ とほぼ同等）となっている。割薪の購入者は高齢者が多い傾向にある。なお、加工薪販売額（平成 21 年に 244 万円）は、加工部門の販売額（同 6,703 万円）の 4%程度に過ぎないが、販売単価（同 2 万 3,689 円/m³）で見るとオガコ（同 6,000

円/m³) やチップ (同 5,623 円/m³) などに比べ割高になっている。

森林組合では春先に薪の生産および配達をし、各家庭においては森林組合から購入した薪を、必要があれば薪割りした上で軒先などに保管し、乾燥させている。森林組合はフィンランド製の自動玉切り・薪割り機を所有しており、薪用の原木を機械に投入すると 30cm～40cm の長さの薪が自動的に生産される。このようにして生産された薪は、そのままトラックに積み込まれ、各家庭の庭先などまで配達される。

以上、森林組合は薪の供給という面から、町の薪利用促進策を支える役割を担っていると考えられる。労力不足などのため自力での薪の入手が困難と考えられる高齢者等にとって、薪販売事業は高齢化の進む西和賀町において広く住民の薪利用を促進させる上で重要な取組を担っているものと推察される。

4) 小括

以上で見た通り、西和賀町においては町や森林組合が主体となって継続的に家庭や事業所における木質バイオマス（薪）の利用促進が図られてきた。具体的には、町は実証試験を通じた基礎データの収集、公共施設への木質バイオマスボイラー導入等のハード事業、講習会や薪ストーブ展示会を通じた住民の理解醸成等を実施し、森林組合は住民への薪供給や実証事業への協力等を担当している。家庭においても、所有する山林や薪炭共用林等から容易に薪を調達できる住民を中心に、薪が灯油などの化石燃料よりも安価なエネルギー源として位置付けられているものと推察される。

こういった西和賀町における薪利用の促進は、地域の活性化、地域におけるエネルギー自給、地球温暖化防止への貢献、といった様々な効果を見込んで進められているものであり、事業単体での経済性以外の側面からも評価されるべきと考える。これらを背景に、本稿ではバイオマスの利用を経済性のみでなく、GHG 排出量などを指標とした環境への影響、資源の持続的利用可能性、雇用創出やエネルギー自給など地域社会への影響といった様々な側面から評価する手法の開発を試みることにする。

3. 西和賀町における薪利用実態の評価

1) 本節の目的と既存研究の整理

本小節ではバイオマスのエネルギー利用の評価手法及び評価指標についての既存研究を整理する。バイオマスのエネルギー利用評価に関する研究は国内外を問わず蓄積されつつある状況にある。以下では、わが国のバイオマスの利用実態に即した研究であり、かつバイオマスエネルギーの生産から消費に至るまでのライフサイクルでの評価を試みた既存研究として農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006)、柚山ら(2010)、Wang et al (2009)を概説する。

農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006)は、農林水産技術会議が平成15年度から17年度にかけて実施したプロジェクト研究「農林水産バイオリサイクル」のシステム化サブチームによる「バイオマスの地域循環利用システム化技術の開発」に関する研究成果を取りまとめたものである。この研究では、地域レベルでの適切なバイオマス利用システム構築に向けて、社会的な合意形成を支援するツールを開発することを研究目的としている。より具体的には、①バイオマス利用の物質フローを把握する「バイオマス資源循環利用診断モデル」の開発、②経済性、環境影響、安全性等の面からバイオマス利用を評価する手法の開発、③国レベルでのバイオマス資源の循環実態を把握するモデルの作成、を研究開発課題として掲げている。

このうち①バイオマス循環利用診断モデルの開発では、市町村のバイオマスフローを明らかにできるツールを開発している。ここでのバイオマスフローとは、バイオマスの発生、収集、加工、利用、廃棄等の各段階の投入・産出状況を示したものである。利用診断モデルは、バイオマスの利用に対する評価を目的としたモデルではないものの、市町村でのバイオマス利用方針の策定する段階での検討材料としての活用が期待される。

第Ⅱ部の「バイオマス変換施設のコスト評価」では、牛糞及び食品廃棄物を対象にバイオマスの変換技術ごとに、施設建設費、維持管理費、及び収入を試算している。そのデータの多くを柚山ら(2006)に依拠しているものの、乳牛の糞尿と食品廃棄物の処理を事例とし、堆肥化、飼料化等のマテリアル利用だけでなく、エネルギー利用についても経済面からの評価を実施している。具体的には、各技術を事業化した際の施設建設費、資材費や人件費などの運営費、事業収入等を試算している。その上で総括として、バイオマスの利用計画は着実な需要のある物

質・エネルギーを生成していくことが重要である点、及びバイオマス利用は採算性だけでなく外部不経済の解消効果や地域の社会・経済へのプラスの波及効果も勘案すべきである点を述べている。

第Ⅲ部の「バイオマス利活用システムの評価視点」では、バイオマス利用評価の考え方を示し、安全性や環境への影響評価例を提示している。バイオマス利用の評価の必要性については、公的資金を利用してバイオマス利用を進める際には、社会的な合意を得るために助成を受けた個別事業の達成度を定量的に評価することが求められる、としている。具体的には、物質収支、エネルギー収支、環境への影響、安全性、経済性、運営組織からみた妥当性、地域の社会・経済への波及効果等を総合的に評価することが必要とされている。また、評価手法に際しては、評価目的、評価対象、及び評価手順を明確にする必要があることも示している。

さらに評価に用いられる指標群について、次の条件が含まれていることが望ましいとしている。第 1 に、評価目的に適合しており、かつ分かりやすいことである。第 2 に、時間的または空間的な持続性が検討できることである。第 3 に、ライフサイクルコストが比較できることである。ライフサイクルコストとは、建設費、減価償却費、維持管理費の全てを含む費用である。さらに近年では、排出される環境負荷回収コストをも含んだフルコストでの評価も注目されている。第 4 に、常識的な信頼度を持つデータが入手できることである。第 5 に、外部経済促進や外部不経済解消への貢献（環境改善や健康予防など）が評価できることである。ただし、バイオマス利用には正確な計測が困難な多様な価値も生み出していることや、開発中の技術が用いられていることもあることから、バイオマス利用の環境効率の計測は不確実性を伴っている点に留意が必要としている。

第Ⅳ部の「バイオマス利活用の評価手法」では、バイオマス再生資源の需要量予測手法、バイオマス利用への LCA（ライフサイクルアセスメント）手法等が紹介されている。需要量予測の手法としては、従来は線形計画法や CVM 等が用いられてきた点、及び新たな手法として選択実験を取り上げその利点および今後の課題を提示している。LCA の適用については、時間的・空間的なシステムの全体像が把握できる等、環境改善の意思決定ツールである点をメリットとして挙げている。一方で、LCA により試算される環境影響項目間の統合方法やデータの精度に起因する不確実性への対応方法等が今後の課題として挙げられている。

柚山ら（2010）ではバイオマス利用を、ライフサイクルでのコスト（LCC ; Life Cycle Cost）及び化石エネルギー消費量（LCFEC ; Life Cycle Fuel Energy Consumption）の削減量について評価する手法の論点整理を行っている。LCC 及び LCFEC の試算の目的はコスト形成やエ

エネルギー生産・消費の構造を明らかにすることであり、数多くあるバイオマス利用の評価視点の中でも、LCC や LCFEC は持続性を担保してリスクの少ない判断のために必要な評価手法として位置付けている。

Wang *et al.* (2009)では、持続可能エネルギー供給システムにおいてどのような評価指標が用いられているのかを文献サーベイによって明らかにしている。これによると、持続可能なエネルギー供給を評価する上では、単一の評価指標ではなく複数の評価指標を考慮することが重要である点を指摘している。既存研究サーベイの結果、技術面の評価指標としてはエネルギー効率、経済面の評価指標としては投資費用、環境面の評価指標としては CO₂ 排出（削減）量、社会面の評価指標としては雇用創出が最も多く利用されていることを示している。

以上より、バイオマスのエネルギー利用事業をライフサイクルで評価することは、その事業を時間的、空間的な観点から理解し、評価することを可能にできるメリットが考えられる。本稿において事例とする西和賀町の薪利用の取組は、生産から消費、廃棄までのライフサイクルのほとんどが町内で完結しており、諸効果の発現も町内が中心になると考えられ、柚山ら（2010）をもとにして評価を進めることが適していると考えられる。また、評価指標については Wang *et al.* (2009)を参考に、エネルギー自給率、CO₂ 排出（削減）量、雇用創出量を用いることとする。本稿の分析手順については次小節において説明する。

2）分析手法とデータ

以下では、本稿における木質バイオマスのエネルギー利用の評価手法を概説し、西和賀町の取組を事例にその適用の手順を説明する。全体の方針として、評価の手順は柚山ら（2010）が示した LCC および LCFEC の適用手順を参考とし、評価指標の設定については Wang *et al.* (2009)を参考とした。

柚山ら（2010）では、LCC および LCFEC の試算の具体的な作業手順を以下のように示している^⑥。第 1 に、収集するデータの整理である。第 2 に、バイオマス利活用診断ツール等を用いたモノのフローの把握である。第 3 に、モノのフローをバイオマスの生産（発生）から利用、廃棄までの各段階に振り分けることである。第 4 に、それぞれの段階で生じるコスト及びエネルギーをリストアップすることである。第 5 に、バイオマス利用施設等の総合耐用年数やバイオマスの運搬手段等のパラメータを設定する。第 6 に、試算結果の比較から望ましいバイオマス利用計画案を抽出することである。また、利用計画の評価手法に際しては、評価目的、

評価対象、及び評価手順を明確にする必要があることも示している。

評価にあたっては、薪の生産から利用、廃棄までのライフサイクルの各段階における経済活動を明らかにすることが必要になる。そこで、柚山ら（2010）による LCC および LC FEC の試算方法を参考に、本稿における作業手順を以下のように設定した。

第 1 に、ヒアリングや各種統計資料の整理から、西和賀町での薪の生産から消費、廃棄までのフローを明らかにすることである。本稿では、データの制約などから薪のフローを限定した上で分析を進めた。詳細なフローについては次節で述べる。

第 2 に、想定したフローの各段階におけるエネルギー消費量や、労働時間等のパラメータを明らかにする。データとしては、西和賀町における実証試験結果やヒアリング結果等を利用した。

第 3 に、CO₂ 排出削減量、雇用創出量、町内におけるエネルギー自給率といった評価指標を算出する。CO₂ 排出削減量は、家庭の暖房が全て灯油で賄われていた場合の CO₂ 排出量をベースラインとし、薪利用により削減された CO₂ 排出量として算出した。雇用創出量は、現在の薪利用および西和賀町が掲げる町内 50%の世帯での薪利用が実現した際に増加する雇用者数として算出した。町内におけるエネルギー自給率は、町内の家庭で消費されるエネルギー量のうち薪から供給されているエネルギー量の割合として算出した。

3) 西和賀町における薪フロー量の推定

西和賀町における薪のフローを、ヒアリング調査および西和賀町のアンケート調査（西和賀町（2011））などをもとに明らかにした（図 1）。

西和賀町における薪の供給源は、①西和賀町内の森林、②ダムの湖面から除去された流木⁷⁾、③森林組合が考えられる。①町内の森林とは、個人の山林（民有林）や薪炭共有林（国有林）のことであり、主として薪を利用する個人が利用している。②ダムの流木については、町内の湯田ダムにおいて無償で提供されているが、具体的にどれほどの流木が町内で暖房の燃料として利用されているのかは把握できていない。③森林組合が販売する薪または薪用の原木は、加工品（シイタケ栽培に利用するホダ木など）生産のために町外から調達した広葉樹の端材を原料としていることがヒアリングにより明らかになっている。

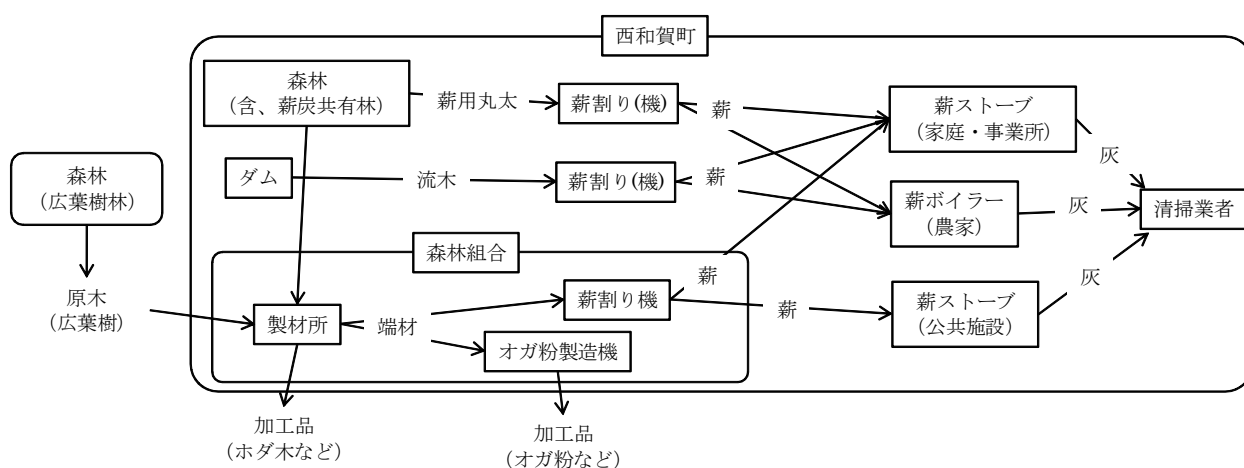


図 1 西和賀町における薪のフロー図

西和賀町における薪の利用者は、①家庭や事業所、②農家、③公共施設などである。①家庭や事業所においては、居室の暖房用に薪が利用される。この場合、エネルギー源である薪は灯油を代替するものと考えられる。薪の入手先としては町内の山林、ダムの流木、森林組合からの購入のいずれも考えられる。②農家においては、花きやシイタケなどのハウス内の暖房に利用される。この場合、薪は主として重油を代替するものと考えられる。ヒアリングから農家による薪の利用量は、家庭や事業所の薪利用量に比べかなり大きいものと推察される⁽⁸⁾。また、ヒアリングから農家の薪の調達先は町内の山林やダムの流木であると考えられる。③公共施設とは、チップボイラーを導入している町内の雪国文化研究所や新たに建設が予定されている町立病院である。いずれも主として森林組合からの薪（チップ）調達と考えられる。代替するエネルギー源は、研究所であれば居室内暖房用であるので灯油、病院であればボイラー用であるので重油と推察される。西和賀町においては、薪を燃焼させて発生した灰は家庭の場合は燃えないゴミとして処理できる。

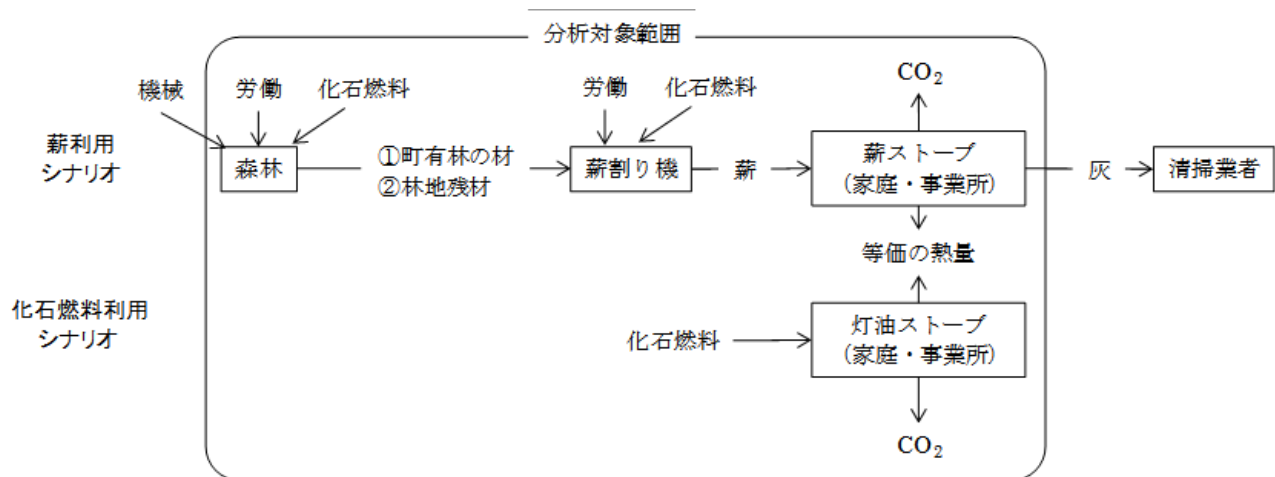


図 2 本稿の分析における薪のフロー図

以上が、西和賀町における薪のフローの概観であるが、薪利用を評価するためには、資材、労働、エネルギー等についての数値データが必要となる。現在のところ、図 1 のフローのうち入手できるデータは限られている。具体的には、農家の薪調達先および正確な薪利用量、建設予定の病院等による薪利用量などのデータは入手できない。

以上のデータ入手可能性の制約および町有林や間伐材の有効活用との観点から、本稿で分析対象とする薪のフローを図 2 の薪利用シナリオの通りに設定した。具体的には薪は、①町有林の広葉樹を伐採して薪を生産する方法、および②林地残材となっている間伐材を収集し薪を生産する方法の 2 通りにより、割薪の形で家庭に供給されるものとする。各家庭では、灯油を利用する暖房機に替えて、薪ストーブを利用するものと仮定した。

また、ベースラインとなるシナリオとして家庭で化石燃料を利用するシナリオを想定した（図 2 の化石燃料利用シナリオ）。このシナリオでは、薪ストーブと同等の熱量を得るために必要なエネルギーを全て化石燃料（灯油）で賄った状況を想定している。両シナリオの比較から、薪利用による化石燃料使用量の削減効果や温室効果ガスの削減効果等が明らかにできる。

4) ライフサイクルにおける諸効果の測定

(1) 西和賀町の薪のフローにおけるパラメータの特定

本小節では図 2 の各フローの具体的な数値を、西和賀町（2011）の実証試験結果等をもとに

明らかにする。森林から薪用の原木を調達し、薪割り機により割薪の状態にするまでには表 4 に示した作業工程が必要である。具体的には、間伐材から割薪を生産するまでには①現地確認から⑫薪割りまでの全 12 の作業工程が必要となる。一方、林地残材を収集し薪を生産する際には①現地確認、②作業道確保、④伐木、⑤枝払い、⑦集積、⑨雑木除去の作業は不要になる。これらの作業は、間伐をした際にすでに実施済みであるためである。

表4 作業工程別軽油消費量の比較(薪1m³あたり)

作業工程	間伐材利用		林地残材利用		備考
	軽油使用量 (L/m ³)	割合 (%)	軽油使用量 (L/m ³)	割合 (%)	
<u>①現地確認</u>	0.0	0%	-	0%	
<u>②作業道確保</u>	0.3	4%	-	0%	
③機材搬入	0.4	5%	1.1	12%	
<u>④伐木</u>	0.0	0%	-	0%	
<u>⑤枝払い</u>	0.0	0%	-	0%	
⑥玉切り	0.0	0%	0.0	0%	
<u>⑦集積</u>	1.4	16%	-	0%	
⑧積み込み	1.8	20%	0.0	0%	フロー2では人力で積み込み
<u>⑨雑木除去</u>	0.1	1%	-	0%	
⑩搬出	0.7	8%	4.0	47%	
⑪積み下ろし	0.5	6%	0.0	0%	フロー2では人力で積み下ろし
⑫薪割り	3.5	40%	3.5	41%	
合計	8.6	100%	8.5	100%	

出所: 西和賀町(2011)を著者が再集計。

注: 下線で強調している作業工程は、フロー1のみで実施される作業行程。

西和賀町(2011)を再集計した作業工程別の軽油消費量を表 4 に示した。町有林を利用した場合には、1m³の薪を生産するために 8.6L の軽油が必要であることが明らかになった。作業工程別にみると薪割りにおいて最も多くの軽油を消費しており、軽油消費量合計の 40%にあたる 3.5L がこの作業工程で消費されていた。一方、林地残材を利用した場合には、1m³の薪を生産するために 8.6L の軽油が必要であることが明らかになった。林地残材を利用した薪生産の方が、作業行程が少ないため薪 1m³を生産する際の軽油消費量が少ないと予想されたが、実証試験結果では町有林利用が 8.6L/m³であるのに対し林地残材利用が 8.5L/m³と両者間に大きな差は認められなかった。西和賀町(2011)によると、これは林地残材を利用した薪生産の試験時に、あらかじめ目標とする薪生産量がごく少量(2m³)に設定されていたため、一部の工程で機材等の投入量が過剰となる非効率が発生していたためとされている。表 4 をみると③機材搬入や⑩搬出の工程において、林地残材利用シナリオの軽油消費量がかなり大きくなっていることが分かり、これらの工程で非効率が発生していたものと推察される。

(2) 薪利用による GHG 削減量の推計

表5 薪生産実証実験結果のまとめ

比較項目	町有林利用	林地残材利用	備考
薪の生産方法	立木から	林地残材（間伐材）から	
樹種	広葉樹（ナラ、ブナなど）	スギ	
薪1m ³ あたり			
作業量（人・時間）	4.2	3.8	事務作業は除く。
軽油消費量（L）	8.6	8.5	主にトラック、重機の燃料に使用。
ガソリン消費量（L）	0.9	0.6	主にチェーンソーの燃料に利用。
生産費（円）	12,206	10,750	直接経費のみを計上。
CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)	24.7	23.8	軽油およびガソリン消費量から推計。

出所：西和賀町（2011）より著者が再集計。

表5に、薪の生産に係る作業量、軽油およびガソリン消費量、生産費、CO₂排出量をまとめた。薪1m³を生産する際に利用される化石燃料利用により排出されるCO₂排出量は、町有林利用の場合で24.7kg-CO₂、林地残材利用の場合で23.8 kg-CO₂と推計された。薪はバイオマスであり、薪の燃焼の際に排出されるCO₂はゼロとしてカウントされるので、上記の値を薪を1m³利用した際のCO₂排出量として採用した⁽⁹⁾。

続いて、化石燃料利用シナリオのフローを推定する。薪1m³を燃焼させたときの発熱量は10,048MJとなり、この発熱量は灯油232L分に相当する⁽¹⁰⁾。環境省（2005）より、灯油を1L燃焼させると発生するCO₂は2.49kg-CO₂/Lであるので、灯油232Lの燃焼によるCO₂排出量は577kg-CO₂と推計される。同様に環境省（2005）より、灯油1Lを製造する際に発生するCO₂は155.8g-CO₂/Lであり、灯油232Lの製造によるCO₂排出量は36kg-CO₂と推計される。以上をまとめると、薪1m³と同等の発熱量を灯油で得るためには232Lの灯油が必要であり、この燃焼によりCO₂が613kg-CO₂発生すると推計される。

表6 西和賀町の薪と灯油のCO₂排出量の比較

項目	薪 1m ³	灯油 232L
発熱量（MJ）	10,048	
CO ₂ 排出量合計（kg-CO ₂ ）	24.7	613
うち燃焼時（kg-CO ₂ ）	0	577
製造時（kg-CO ₂ ）	24.7	36

注）薪のCO₂排出量は、町有林の立木から薪を製造した時の値。薪の燃焼時に発生するCO₂は、カーボンニュートラルの性質を考慮しゼロを計上した。

以上の薪と灯油の比較を表 6 にまとめた。西和賀町の家庭において薪 1m³ を利用することで、灯油 232L の削減および CO₂ 排出量 588kg-CO₂ (=613-24.7) の削減といった効果が期待される。CO₂ 排出量の削減効果は 96% (=588/613) となる。

西和賀町の薪利用世帯における年間薪使用量の平均が 3.5m³ であることから、灯油ストーブに変えて薪ストーブを利用することで、1 世帯当たり 1 年間で 811L の灯油使用量削減および 2,060kg-CO₂ の CO₂ 排出量削減の効果が期待できる⁽¹¹⁾。さらに平成 21 (2009) 年時点での西和賀町における薪ストーブ利用世帯数は 617 戸の薪利用の効果は、500KL の灯油使用量削減、1,271t-CO₂ の CO₂ 排出量削減と推計される。

(3) 雇用創出効果の推計

続いて、薪を利用することによる雇用創出の効果を評価する⁽¹²⁾。表 5 より町有林を利用して薪 1m³を生産するためには、4.2 人・時間の雇用量が必要であった。仮に現在、町内で利用されている薪がすべて、この方法で賄われていたとするとその労働量は 9,070 人・時間となりこれは、4.7 人分の年間労働時間に相当する⁽¹³⁾。また、西和賀町の目標が達成され町内世帯の半数で薪ストーブが利用されたとすると、9.4 人分の雇用が発生すると考えられる。

以上より、西和賀町の家庭における薪利用の取り組みは、薪の製造段階で利用される化石燃料を考慮しても、灯油使用量や CO₂ 排出量を大幅に削減する効果が見込まれることが明らかになった。また、利用される薪生産にかかわる雇用の量は現状で 4.7 人分、計画の達成時には 9.4 人分となりうることも明らかになった。次小節では、西和賀町のエネルギー利用量全体から見て薪利用によるエネルギー量がどの程度のウェイトであるのかを明らかにしたい。

5) 薪利用促進のエネルギー自給率への寄与

本小節では、西和賀町のエネルギー消費量を明らかにし、薪利用の促進が西和賀町のエネルギー自給率に及ぼす影響を解明する。具体的な手順は以下のとおりである。まず、資源エネルギー庁 (2006)『市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン』(以下、「ガイドライン」とする)の方法により、2009 年時点における西和賀町におけるエネルギー消費量を明らかにする。続いて、平成 21 年の推計値である町内の 24.8%の世帯が薪を利用した場合(表 2 より)と、「薪利用計画」の目標である町内の 50%の世帯が薪ストーブを利用した場合とに

ついて、町内のエネルギー消費量のうちどの程度が薪によって賄われているのか、を明らかにする。

利用するデータは、西和賀町による調査の年次に合わせ、可能な限り 2009 年のデータとし、2009 年のデータが入手・利用できない場合には 2009 年に最も近い年次のデータを利用することとした。この方針の下、統計等のデータの年次は次の通りとなった。「都道府県別エネルギー消費統計」「工業統計」「経済センサス」「家計調査年報」「ガス事業年報」「住民基本台帳人口移動報告」「熱供給事業便覧」「固定資産の価格等の概況調書」については 2009 年のデータを利用した。なお、「都道府県別エネルギー消費統計」の 2009 年度の値は速報値となっている。農林業センサスについては 2010 年のデータを、漁業センサスは 2008 年のデータをそれぞれ利用した。

ガイドラインにおける方法は、「都道府県別エネルギー消費データ」や「家計調査」などの都道府県別に公表されているエネルギー消費データを、生産額や生産要素投入量などの活動指標を用いて按分し、市町村別のエネルギー消費量を推定する方法である。按分のもととなる岩手県の 2009 年におけるエネルギー消費量を表 7 に示した。

表 7 岩手県のエネルギー消費量（2009 年）

	エネルギー源					
	石炭	石炭製品	石油製品	都市ガス	電力	熱
表示単位	000t (輸入一般 炭換算)	000t (輸入一般 炭換算)	000kl (精製用原 油換算)	Mm ³ (一般ガス換 算)	GWh	TJ
製造業	169.6	0.1	129.9	8.8	4,603.5	2,491.8
非製造業合計	0.0	0.1	205.0	7.8	363.3	0.0
農林水産業	0.0	0.0	162.9	0.3	246.1	0.0
建設業・鉱業	0.0	0.1	42.1	7.5	117.1	0.0
民生部門合計	0.0	0.0	587.2	139.1	5,472.6	44.6
家庭	0.0	0.0	384.1	15.3	2,887.6	0.0
業務	0.0	0.5	203.1	123.8	2,585.0	44.6
運輸部門	0.0	0.0	421.0	0.0	0.0	0.0

出所：「都道府県別エネルギー消費統計」（平成 21 年）、「家計調査年報」（平成 21 年）。

注：家庭による石油製品利用については「家計調査年報」の灯油及びプロパンガスの購入額の合計により推計した。それ以外の値は「都道府県別エネルギー消費統計」による。

エネルギー源としては、石炭、石炭製品、石油製品、都市ガス、電力、熱の 6 種類を計上する⁽¹⁴⁾。エネルギーを消費する部門は、製造業部門、非製造業（農林水産業と建設業・鉱業の 2 部門）部門、民生部門（家庭と業務の 2 部門）、運輸部門を推計対象とした。なお、「熱供給事業便覧」および「ガス事業年報」によれば、西和賀町内では都市ガス供給事業および熱供給事業が存在していないため、西和賀町における「都市ガス」および「熱」のエネルギー消費量は 0 とした。西和賀町におけるその他のエネルギー消費量推計方法は表 8 にまとめた。

表 8 推計方法のまとめ

エネルギー利用部門	エネルギー源					
	石炭	石炭製品	石油製品	都市ガス	電力	熱
製造業	①	①	①	—	①	—
非製造業						
農林水産業	②	②	②	—	②	—
建設業・鉱業	—	③	③	—	③	—
民生部門						
家庭	—	—	④	—	⑤	—
業務	—	—	⑥	—	⑥	—
運輸部門						
旅客用乗用車	—	—	⑦	—	—	—

注)表中の記号の説明は以下の通り。

—:推計対象外。

①:「都道府県別エネルギー消費統計」を「工業統計」の出荷額をウェイトに按分。

②:「都道府県別エネルギー消費統計」を「農業センサス」「林業センサス」「漁業センサス」の就業者数をウェイトに按分。

③:「都道府県別エネルギー消費統計」を「事業所・企業統計」の就業者数をウェイトに按分。

④:「家計調査」の世帯あたり年間購入量の補正值(世帯人員補正係数を利用)に世帯数を乗じる。

⑤:「都道府県別エネルギー消費統計」を「住民基本台帳」の世帯数をウェイトに按分。

⑥:「都道府県別エネルギー消費統計」を「固定資産の価格等の概要調書」から算出した業務系建物床面積をウェイトに按分。

⑦:「家計調査」の世帯あたり年間ガソリン購入量の補正值(世帯人員補正係数及び保有台数補正係数を利用)に世帯数を乗じる。

製造業で消費されるエネルギーは、石炭、石炭製品、石油製品、電力とした。「都道府県別エネルギー消費統計」に掲載されている岩手県の製造業部門のエネルギー消費量の値を、「工業統計」（2009 年）の岩手県の製造業出荷額に占める西和賀町のシェアをウェイトとして按分した。具体的には、岩手県の製造業出荷額が約 2.0 兆円であるのに対し、西和賀町の製造業出荷額は約 36.1 億円であることから、按分係数は 0.002 となった。

非製造業のうち農林水産業部門で消費されるエネルギーは、石炭、石炭製品、石油製品、電力とした。「都道府県別エネルギー消費統計」に掲載されている岩手県の農林水産業部門のエネルギー消費量の値を、岩手県における「2010 年農林業センサス」の農林業経営体数と「2008 年漁業センサス」の漁業経営体数との合計に占める西和賀町のシェアをウェイトとして按分した。具体的には、岩手県の農林業経営体数と漁業経営体数の合計は 64,614 経営体であるのに対し、西和賀町の農林業経営体数と漁業経営体数の合計は 827 経営体であることから、按分係数は 0.013 となった。

非製造業のうち建設業・鉱業部門で消費されるエネルギーは、石炭、石炭製品、石油製品、電力とした。推計の際には「都道府県別エネルギー消費統計」に掲載されている岩手県の建設業・鉱業部門のエネルギー消費量の値を、岩手県の建設業・鉱業従事者数に占める西和賀町のシェアをウェイトとして按分した。「平成 21 年経済センサス」による岩手県の建設業・鉱業従事者数は 52,348 人であるのに対し、「西和賀町の統計」（原資料は「平成 18 年事業所・企業統計調査報告」）による西和賀町の建設業・鉱業従事者数は 373 名であることから按分係数は 0.007 となった⁽¹⁵⁾。

民生部門のうち家庭部門で消費されるエネルギーは、石油製品（灯油、プロパンガス）および電力とした。石油製品の消費量は、「家計調査年報」の盛岡市における 1 世帯当たりプロパンガス購入量および灯油購入量（それぞれ 2 人以上世帯と単身世帯のデータがある）と西和賀町における 2 人以上世帯数と単身世帯数とを掛け合わせて推計した。電力の消費量は、岩手県の電力販売量を世帯数をウェイトとして按分し推計した。

民生部門のうち業務部門で消費されるエネルギーは、石油製品（灯油、重油、プロパンガス）および電力とした。それぞれ「都道府県別エネルギー消費統計」に掲載されている岩手県の値を、「固定資産の価格等の概要調書」による事業所（ホテル・宿泊施設、病院事務所、劇場など）の床面積をウェイトに按分し推計した。

最後に運輸部門で消費されるエネルギーは石油製品（ガソリン）とし、家計調査に掲載されている値を世帯当たりの自動車保有台数を調整したうえで、世帯数をウェイトとして按分し、

推計した。

以上のようにして推計した西和賀町の部門別エネルギー利用量は表 9 のとおりとなった⁽¹⁶⁾。西和賀町で 1 年間に利用されるエネルギーは石油製品由来のものが 270TJ, 電力由来のものが 160TJ であり, 合計 430TJ である。推計した部門別にみると民生部門の中の家庭部門のエネルギー消費量が最も多く, 124TJ であった。

表 9 西和賀町の部門別エネルギー利用量 (2009 年)

単位 : TJ

エネルギー利用部門	エネルギー源						合計
	石炭	石炭製品	石油製品	都市ガス	電力	熱	
製造業	0	0	9	0	30	0	39
非製造業合計	0	0	91	0	14	0	105
農林水産業	0	0	80	0	11	0	91
建設業・鉱業	0	0	11	0	3	0	14
民生部門合計	0	0	120	0	116	0	236
家庭	0	0	75	0	49	0	124
業務	0	0	45	0	68	0	113
運輸部門 (旅客用乗用車)	0	0	50	0	0	0	50
合計	0	0	270	0	160	0	430

出所 : 著者推計。

平成 21 年における西和賀町内の家庭での薪利用では, 約 21TJ のエネルギーが利用されていると推計される⁽¹⁷⁾。これは町内の家庭によるエネルギー利用量の 23%に相当する量である。また, 町内のエネルギー利用量合計と比べても 5%に相当する値である。薪利用の促進は, 町内でのエネルギー自給率を高めることにつながり, 震災などに対する地域のレジリエンスを高めるといふ点からも注目される。

6) 小括

本節では岩手県西和賀町の家庭における薪利用促進を事例に、生産から消費、廃棄までに至るライフサイクルでのバイオマスの循環を明らかにした上で、温室効果ガス排出量の削減量などを指標に試験的な評価を実施した。

分析の結果、平成 21 (2009) 年時点での西和賀町の家庭による薪利用の効果は、500KL の灯油使用量削減、1,271t-CO₂ の CO₂ 排出量削減と推計された。このとき、町内の家庭でのエネルギー消費量の 23%が薪によるものとなっていた。

以上の結果から次の点が示唆される。家庭における木質バイオマスの利用が促進されると、相当量の化石燃料削減や CO₂ 排出量削減といった効果が期待されることである。また、家庭による木質バイオマスエネルギー利用促進が、町内のエネルギー自給率（全エネルギー消費量に占める薪によるエネルギー供給量の割合）を向上させる効果も確認でき、エネルギー安全保障の面からも評価しうる点が示唆されたと考える。

4. 最適な薪利用シミュレーションに基づく諸効果の測定

1) 本節の目的と既存研究の整理

前節では、西和賀町における生産から消費、廃棄に至るまでの薪のライフサイクル全体を対象に、既存の手法に準じ西和賀町の家庭における薪利用の評価を試みた。分析の結果、薪利用の促進により経済面、環境面で好ましい効果が見込まれる点が定量的に明らかにされた。しかしながら、こういった効果の方向や程度は木質バイオマスの賦存状況や収集・運搬方法などの条件に左右されると考えられる。したがって、より実践的な影響評価のためには、資源の賦存量や輸送費といった利用の制約となる側面も明示的に考慮した分析が重要となる。また、薪利用促進は代替する化石燃料の使用量削減と表裏をなしており、市町村全体での経済面の効果を評価するにあたっては、この代替効果によるマイナス面を考慮することも必要であろう。

まとめると、本節では①資源の賦存量も考慮したより実態に即した評価、②木質バイオマスによる化石燃料の代替を明示的に考慮した経済的影響の評価、を念頭により実践的な評価手法の開発及び開発した手法を用いた実証を行いたい。そこでまずは、関連する研究をレビューし、研究課題を絞り込む。

薪に限らずチップやペレットも含めた木質バイオマスの供給量または供給コストに関する既存研究としては、佐無田ら（2011）、寺田ら（2010）、山口ら（2010）、Kinoshita et al.（2009）、上村ら（2009）、畑中（2008）、佐々木ら（2006a,b）、吉岡・小林（2006）、井内（2004）、前野ら（2002,2003）などがあげられる。これらの研究の多くに共通しているのは、地理情報システム（Geographic Information Systems; GIS）を用いて分析している点である。これは、薄く広く分布する特徴を有する木質バイオマスにおいては生産地と消費地との輸送距離などの地理的要因を明示的に考慮する必要があるためと考えられる。また、分析対象としてはチップやペレットが多く、より小規模分散型の利用が特徴といえる家庭における薪利用を対象とした研究は見られない。

続いて、木質バイオマスの生産から消費、廃棄までのシステムを何らかの指標を用いて評価した研究としては、吉原・土屋（2011）、永野ら（2011）、森本ら（2010）、井内（2006）、八木・中田（2006）などがあげられる。これらの研究では、事業の経済性や GHG 排出削減量を指標とした評価が多く、資源の賦存量や持続的利用の観点からの評価までを含んだ研究は見られない。

また、農山村での薪ストーブ利用に焦点を当てた研究としては、畑中ら（2012）および安村（2011）がある。畑中ら（2012）は薪ストーブの利用実態の解明と石油ストーブと比較した GHG 排出削減量を指標とした評価を実施している。安村（2011）も、重点的な実地調査をもとに、薪ストーブ利用実態の解明を試みている。

このように関連の既存研究は多く存在するものの、家庭での薪ストーブ利用という小規模分散型の木質バイオマス利用に焦点を当て、資源、環境、経済といった複数の側面から定量的な評価を行った研究は見られない。そこで、本研究の新規性の確認の意味も含め、改めて本節の課題を述べると、家庭における小規模分散型の木質バイオマス利用を資源利用、環境影響、町内経済への影響という点から定量的に評価する手法を開発し、岩手県西和賀町の薪ストーブ利用を事例にその手法を用いた実証を試みることとなる。

本節の構成は以下の通りである。第 2 小節では、分析方法とデータについて述べる。分析方法については、GIS を用いた処理や線形計画法を利用した薪需給のマッチング等について説明する。データについては、森林に関する情報が記載された森林簿、分析に利用した各種のパラメータ、本研究における家庭の取り扱い等について説明する。第 3 小節では分析結果として、①持続的な資源利用の面からの評価結果、②GHG 削減量を指標とした環境面からの評価結果、③町内資源有効活用による町民所得増加額を指標とした経済面からの評価結果、を提示する。

第4小節では、本節のまとめとして本評価手法の他事例への適用可能性などについて述べる。

2) 分析手法とデータ

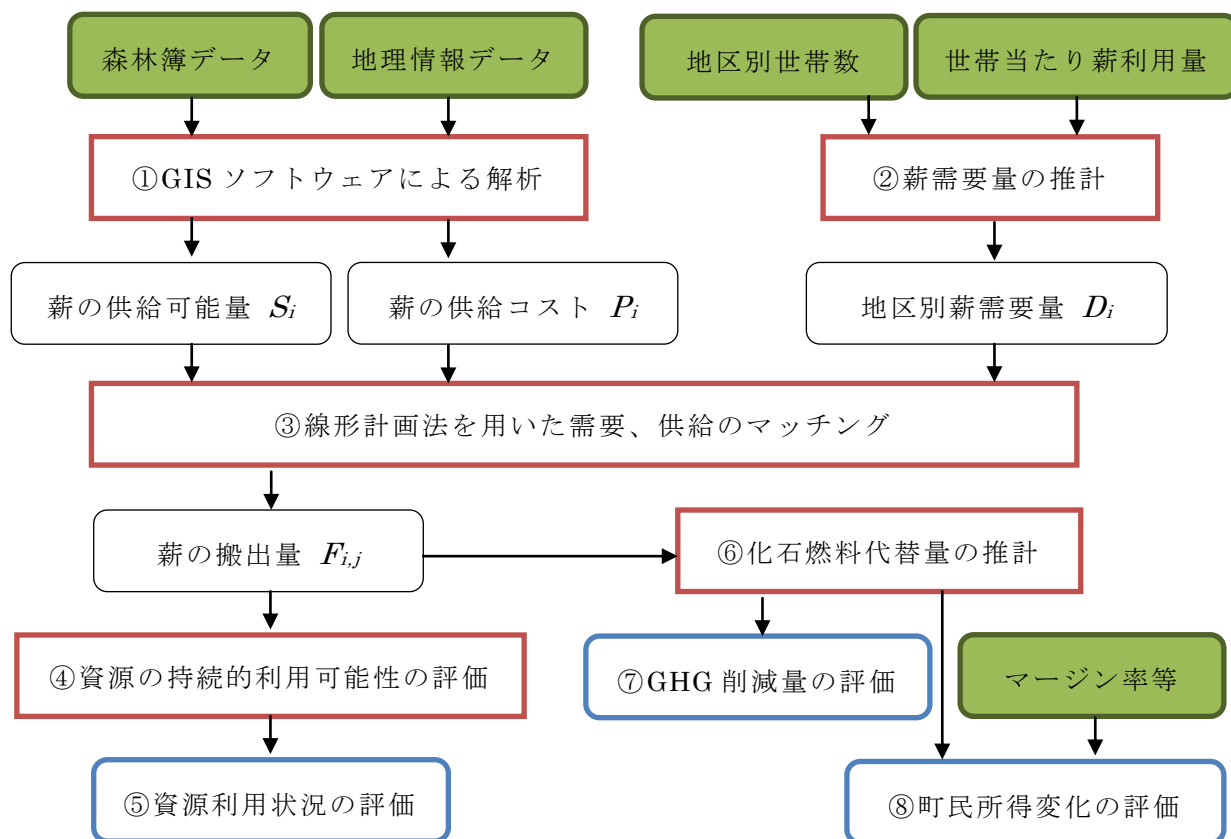


図3 分析枠組み

本小節の分析枠組みは図3の①～⑧の通りである。以下ではそれぞれの手順に沿って、推計方法及び利用したデータについて説明する。

第1に、森林簿データ及びその他の地理情報データをもとに、GISソフトウェアを用いて薪の供給可能量 (S_i) 及び薪の供給コスト (P_i) を林小班ごとに推計する (図3の①)。本小節では、町内のスギ間伐材の未利用分を薪として利用することを仮定して推計した。林小班ごとの薪供給可能量は(1)式により求めた。

$$S_i = Zaiseki_i \times Kanbatu \times Miriyoun \quad (1)$$

ここで $Zaiseki_i$ は林小班 i におけるスギの材積、 $Kanbatsu$ はスギ林の間伐率、 $Miriyou$ は間伐されたスギの未利用率である。 $Zaiseki_i$ の値は、西和賀町の森林簿より入手した。

西和賀町の森林簿には、町内民有林の林班、林小班ごとに位置、樹種、材積などのデータがまとめられている。町内の林小班のうち、スギのみからなる林小班、かつ車両での搬出を想定し平均傾斜角度が 35 度未満である林小班を分析対象とした。 $Kanbatsu$ の値は、西和賀町において県の事業を利用する際の間伐率である 50% を採用した⁽¹⁸⁾。 $Miriyou$ の値は、沢内村(2004)に記載されている 73% を採用した。

林小班ごとの薪供給コストは、吉岡・小林(2006)の推計方法を採用した。具体的には、まず林小班ごとにスギの重量当たりの供給コスト (PDM_i) を(2)式により推計した。

$$PDM_{i,j} = 2.11 LSY_i + 0.068 LT_{i,j} + 229 e^{0.117 d_i} + 11408 \quad (2)$$

ここで LSY_i は林内の輸送距離、 $LT_{i,j}$ は道路上の輸送距離、 e は自然対数の底、 d_i は林小班の平均傾斜角度である。林内輸送距離 LSY_i は、林小班 i の重心から最短距離にある道路までの直線距離に、杉原・岩川(1960)による林内輸送の迂回率 0.53 を加味して推計した。道路輸送距離 $LT_{i,j}$ は、林小班 i の重心から最短距離にある道路上の点を起点とし、町内の各行政区 j の建物の重心までの直線距離に、杉原・岩川(1960)による道路輸送の迂回率 0.50 を加味して推計した。林小班の平均傾斜角度 d_i は、国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービスの「基盤地図情報(数値標高モデル)」のデータをもとに ArcGIS により町内全域の傾斜角度を求め、求められた傾斜角度のメッシュと林班のポリゴンとから林小班ポリゴンごとの平均傾斜角度を推計した。

以上により求められた $PDM_{i,j}$ は、重量当たりのコストとなっているので、スギの含水率と容積率を考慮した補正係数を用いて材積あたりのコストに変換した。具体的には(3)式による。

$$P_{i,j} = PDM_{i,j} \times 0.31221 \quad (3)$$

第 2 に、行政区別の 1 年あたり薪需要量 (D_j) を推計する(図 3 の②)。本小節の分析では、個別の住宅ではなく、町内の行政区の住宅(建物)の重心において薪が利用されることを仮定した。これは、西和賀町の統計により行政区別の薪ストーブ利用世帯数は明らかになっているものの、薪を利用している住宅の位置情報までは入手できなかったためである。具体的には(4)

式により求めた。

$$D_j = Makisetai_j \times Riyouyou \times Hosei \quad (4)$$

ここで、 $Makisetai_j$ は行政区 j における薪ストーブ利用世帯数、 $Riyouyou$ は 1 世帯当たりの薪(スギ)利用量で $4.37\text{m}^3/\text{年}$ 、 $Hosei$ は広葉樹の発熱量をスギの発熱量に換算する係数(1.2488)である。薪ストーブ利用世帯数について本稿では、『計画書』が目標とする町内の半数の世帯で薪ストーブが利用される状況を仮定した。具体的には、現在の薪ストーブ世帯推計値の 617 世帯ではなく、町内の半数にあたる 1,247 世帯で薪ストーブが利用される状況を想定した。現状(617 世帯)と目標値(1,247 世帯)との差である 630 世帯は、各行政区の世帯数に応じて(5)式の通り按分した。

$$Makisetai_j = Genjo_j + 630 \times Setaisu_j / \sum_j Setaisu_j \quad (5)$$

$Genjo_j$ は各行政区の薪利用世帯数であり表 2 の推計値を利用した。 $Setaisu_j$ は各行政区の世帯数であり、西和賀町(2010)の値を利用した。

第 3 に、線形計画法を用いて、薪の供給可能量、供給コスト、需要量をもとに町内の薪搬出費用合計($Cost$)が最小となる薪の搬出量($Hanshutsu_{i,j}$)を決定する(図 3 の③)。具体的には、費用最小化問題として(6)式～(9)式のように定式化した。

$$\text{Min} \quad Cost = \sum_i \sum_j P_{i,j} \times Hanshutsu_{i,j} \quad (6)$$

$$s. t. \quad \sum_j Hanshutsu_{i,j} \leq S_i \quad (7)$$

$$\sum_i Hanshutsu_{i,j} \geq D_j \quad (8)$$

$$Hanshutsu_{i,j} \geq 0 \quad (9)$$

$Hanshutsu_{i,j}$ は林小班 i から行政区 j へのスギ間伐材の搬出量である。(6)式は目的式であり、町内の薪搬出費用合計を、林小班ごとの薪の搬出費用と搬出量とを掛け合わせた値の合計として定義している。(7)式は、各林小班 i の搬出量の合計が搬出可能量を超えないという制約である。(8)式は、行政区 j への搬出量の合計はその行政区の薪需要量と同等か上回るという制約である。(9)式は、林小班 i から行政区 j への搬出量が負の値をとることはないという制約である。

以上の費用最小化問題を数値計算ソフト GAMS23.9 の BDMLP ソルバーにより解いた。

第 4 に、資源の持続的利用可能性の評価を実施した（図 3 の④及び⑤）。具体的には、薪の供給可能量と需要量について、町内全体及び各行政区でのバランスを比較した。

第 5 に、薪の搬出量から化石燃料の代替量及び薪の搬出にかかわる GHG 排出量を推計し、薪利用による GHG 排出削減量を推計した（図 3 の⑥及び⑦）。薪を利用することにより化石燃料が減少すると考えられる一方、薪の搬出により排出される GHG 排出量を推計し、両者の差を薪利用による GHG 排出削減量として推計した。

第 6 に、薪利用による町民所得の変化額を推計した。薪は町内で生産、流通、消費されるため薪利用の促進は町民所得を増加させる効果が見込まれる。一方で、薪利用により化石燃料の使用量が減少し、灯油販売による町民所得は減少すると考えられる。本小節では、上記の 2 つの効果を「平成 17 年産業連関表」及び「平成 17 年岩手県広域振興圏別産業連関表」をもとに明らかにし、町民所得への効果を推計する。

本分析では多くの仮定を置いているが、主たる仮定は以下の通りである。第 1 に、町内のスギ間伐材の未利用分を薪として利用すると仮定した。前節で触れたが、町内では主に広葉樹が薪として使われており、現状ではスギが薪として利用される機会は限られているとのことである。しかし同時に西和賀町が作成した計画書では、将来的には町内に豊富に存在するスギも薪として利用することを想定しており、本小節でもその想定を採用した分析を実施した。

第 2 に、家計で消費される薪は、各行政区の建物の重心において消費されるものと仮定した。これは、薪を利用している家庭の位置情報までは入手できなかったためである。行政区別の薪ストーブ利用世帯数は西和賀町の統計から推測できる。

第 3 に、本稿でのシミュレーションでは、西和賀町が目標に掲げる町内世帯の半数での薪ストーブ利用がなされている状況を想定している。これは、現状に比べ倍近くの新が必要となる目標達成時においても、持続可能な薪利用を続けることができるのかどうかという点を明らかにするためである。

3) シミュレーション結果と考察

(1) 資源面での評価結果と考察

西和賀町の行政区におけるスギの林小班の賦存状況を表 10 に示した。町内には、樹種がスギで平均傾斜角度が 35 度未満の林小班（以下、スギ林小班とする）は 9,866 箇所存在している。スギ林小班に賦存するスギの材積は、町内合計で 1,696 千 m^3 であるが、行政区別にみる

と 2 千 m^3 ～111 千 m^3 と賦存状況は行政区によってかなり異なることがわかる。なお、このスギ林小班ごとの材積に間伐率と未利用率を乗じた値が、その林小班の薪供給可能量 (S_i) となり、町内全体では 619 千 m^3 の薪が供給可能と推計された。

表 10 西和賀町のスギ林小班の賦存状況（行政区別）

項目	単位	合計	1 行政区あたり		
			最小値	平均値	最大値
スギ林班数	箇所	9,866	19	318	945
スギ林面積	ha	5,295	7	171	404
スギ材積	千 m^3	1,696	2	56	111

出所：西和賀町の森林簿をもとに、条件に合う林小班を抽出し集計。

続いてスギ林小班の状況を表 11 に示した。スギ林小班 1 箇所あたりの面積は平均で $5,367\text{m}^2$ であり、材積は平均で 172m^3 であった。スギ林小班から道路までの林内輸送距離 (LSY_i) は平均で 128m であったが、0m～855m と林小班によって差がみられた。最近接の行政区の中心地までの道路輸送距離 ($LT_{i, \text{最近接}}$) は平均で 1,273m であった。最近接行政区向けの薪（原木） 1m^3 当たりの供給コスト ($P_{i, \text{最近接}}$) は平均で 4,410 円/ m^3 であり、最小で 3,649 円/ m^3 最高で 8,490 円/ m^3 であった⁽¹⁹⁾。この薪の供給コストの差は、主として林小班の位置や斜度などの立地条件によるものである。木質バイオマスのエネルギー利用の計画を立案する際には、バイオマスの賦存量だけでなく立地条件も考慮すべき点が示唆されたものと考えられる。

表 11 スギ林小班の状況

項目	単位	1 林班あたり		
		最小値	平均値	最大値
スギ林小班の面積	m ²	15	5,367	167,131
スギ材積	m ³	0	172	6,794
林内輸送距離 (LSY_i)	m	0	128	855
最近接行政区までの道路輸送距離 ($LT_{i,最近接}$)	m	15	1,273	4,370
最近接行政区向けの供給コスト ($P_{i,最近接}$)	円/m ³	3,649	4,410	8,490

出所：西和賀町の森林簿をもとに、条件に合う林小班を抽出し集計

続いて、(4)式に基づき行政区別の薪需要量を推計したところ、町内合計で 1 年あたり 5,407m³ となった。1 行政区あたり平均で 174m³/年、最小で 224m³/年、最大で 4,674m³/年であった。これらの値は上で推計した町全体の薪供給可能量（619 千 m³）に比べ 100 分の 1 未満の小さな値であり、スギの成長を考慮すれば、町内の半数世帯による薪ストーブ利用は持続可能な取り組みと考えられる。

図 4 に、行政区ごとの薪の需要量及び供給可能量をプロットした。1 年あたりの需要量を供給可能量で割った値は、3.8～1,313（年）となった。薪として利用可能な資源が十分に存在する西和賀町であっても、薪の需給状況は地区によって大きく異なることがわかる。このことから、町全体での薪利用を振興する際には町内の各地区間での協力も大きな課題となることが示唆される。

以上をまとめると、西和賀町では町全体でみると半数の世帯が薪ストーブを利用したとしても十分な森林資源が賦存しており、薪ストーブ利用の促進は資源の面から持続可能な取り組みであるといえよう。一方で、地区によっては将来的に薪が不足することも見込まれるため、町全体で薪利用を振興する際には、そういった地域に薪を供給する町内全体での仕組みづくりが必要である点も示唆された。

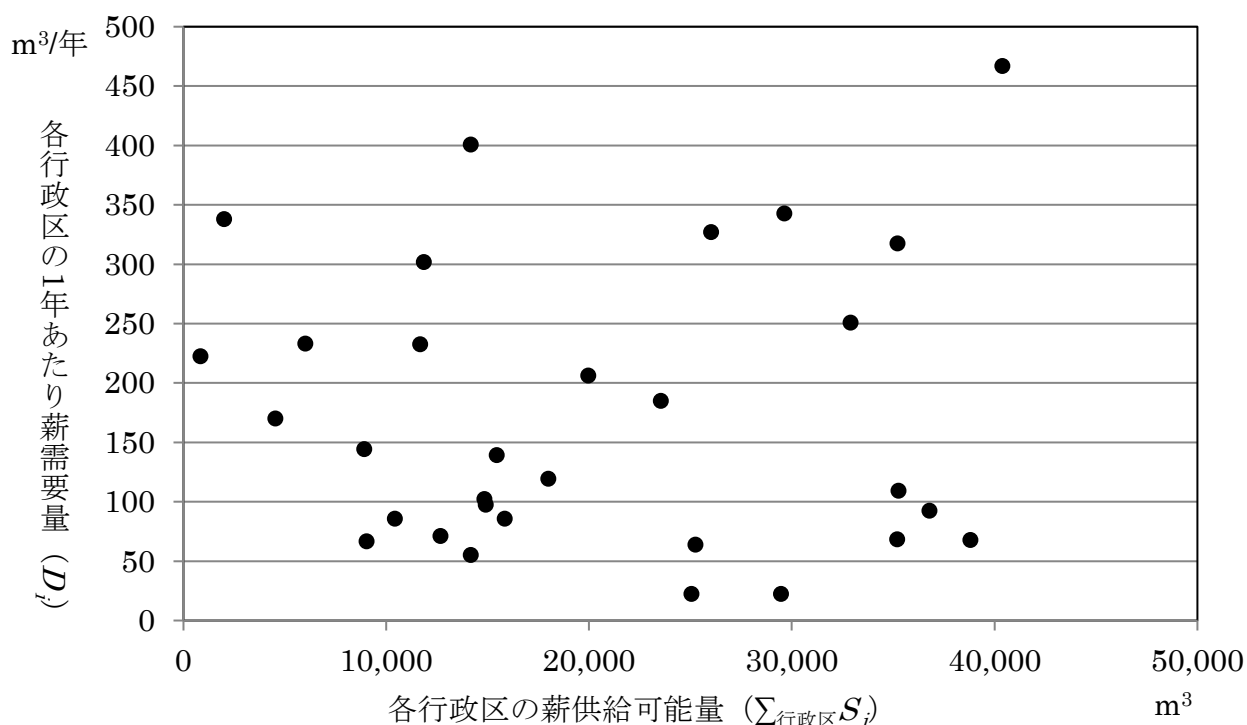


図4 各行政区の薪需要量と供給可能量の比較

これらの推計データをもとに、(6)式から(9)式によって定式化される費用最小化問題を解き、各林小班から各行政区への薪の搬出量を推計した。この搬出量をもとに以下で、環境面への影響評価及び、経済面への影響評価を実施する。

(2) 環境面での影響評価結果

次に環境面への影響として、家庭において薪が灯油を代替することによる GHG の削減量を計測した。薪への代替による灯油の削減量は、薪ストーブ利用世帯 1 世帯あたり年間 942KL であった。これを GHG 排出量に換算すると、1 世帯あたり 1.9tCO₂/年の削減となる。また、さらに町内全体で合計すると 2,346tCO₂/年の削減が見込まれることが明らかになった。一方で、町内の薪輸送にかかる GHG 排出量は 0.6tCO₂ であり、これを差し引いた町内全体での GHG 削減量は 2,345tCO₂/年と推計される。

(3) 経済面での評価結果

西和賀町内の半数の世帯が薪ストーブを利用する際には、全世帯が灯油ストーブを利用する場合と比べ町内合計で 942KL の灯油が削減可能であった。この灯油削減量を貨幣換算すると、

7,913 万円（灯油価格が 84 円/L の場合）から 1 億 268 万円（同 109 円/L の場合）に相当する。一方で、暖房用燃料として新たに薪を購入する場合には費用が発生する。現在の森林組合が販売している薪単価をもとに薪の購入費を推計すると、1 世帯あたり 6.3 万円/年、町内全体で 7,793 万円となる⁽²⁰⁾。

家計の立場から見ると、灯油価格が 84 円/L の時には薪を利用することで年間数百円程度の暖房費削減、同じく 109 円/L の時には年間約 2 万円の暖房費削減が見込まれる⁽²¹⁾。これを町全体で合計すると 120 万円（灯油価格が 84 円/L）から 2,475 万円（同 109 円/L）の暖房費削減が見込まれる。灯油価格が上昇すればするほど、暖房費の削減額は大きくなるが、灯油価格が大幅に下がったときには、薪を使うことでむしろ暖房費が増加することもありうる。

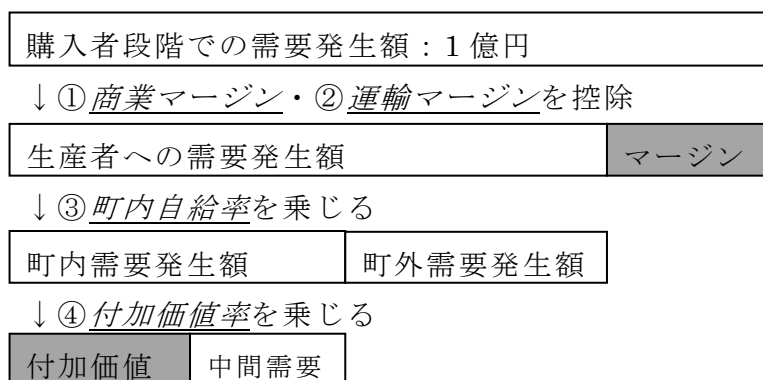


図 5 町内で生み出される価値の推計

次に、町内経済全体への影響という観点からの推計を試みたい。単純化のため、薪 1 億円の暖房費と灯油 1 億円の暖房費がもたらす経済効果を比較する。その手順を図 5 に示した。まず、町内で暖房費として 1 億円の需要があるものと仮定し、それを以下のように分解する。そのうち、小売店や運送業者の取り分である商業マージン及び運輸マージンを控除し、灯油や薪の生産者に対する需要の発生額を推計する。この値に、灯油や薪がどれだけ町内で生産されるかを示す町内自給率を乗じ、町内での灯油や薪の需要発生額を推計する。さらに、町内需要発生額のうち、中間投入分を控除するために、付加価値率を乗じ灯油や薪生産に係る町内での付加価値の発生額を推計する。

表 12 分析に利用したパラメータ

項 目	灯油の場合	薪の場合
①商業マージン率	0.3378	0.3697
(小売マージン率)	(0.1651)	(0.1658)
②運輸マージン率	0.0147	0.0233
③町内自給率	0	0.7037
④付加価値率	0.2874	0.7309

出所：著者推計。推計方法については本文を参照。

表 13 マージン率の推計根拠（単位：100 万円，％）

項目	特用林産物（0213）	石油製品（2111）
最終需要計（①）	277,762	10,116,756
商業マージン合計（②）	102,678	3,417,554
卸売	56,619	1,747,764
小売（③）	46,059	1,669,790
国内貨物運賃合計（④）	6,463	148,857
商業マージン率（②/①）	0.3697	0.3378
小売マージン率（③/①）	0.1658	0.1651
運送マージン率（④/①）	0.0233	0.0147

出所：総務省『平成 17 年（2005 年）産業連関表：計数編（2）』の産出表。

推計に用いたパラメータは表 12 に示したとおりである。具体的には、商業マージン率及び運輸マージン率は、平成 17 年西和賀町または岩手県の値が入手できないため、『平成 17 年（2005 年）産業連関表』の算出表からそれぞれのマージン率を推計した。推計に用いたデータは表 13 に示した。灯油の町内自給率については、西和賀町内に灯油の精製等を行っている事業所はないと考えられるため 0 とした。薪の町内自給率については、西和賀町提供の資料より、アンケートでの薪購入者のうち森林組合から購入すると回答した割合である 0.7037 とした。付加価値率に関して、西和賀町が含まれる岩手県県南地域の産業連関表（『平成 17 年 岩手県広域振興圏別産業連関表（県南広域振興圏 35 部門表）』）の値を利用した。灯油について

は「石油・石炭製品」部門の粗付加価値部門計を域内生産額で割り返した値を、薪については「林業」部門の粗付加価値部門計を域内生産額で割り返した値を利用した⁽²²⁾。

このような手順で、灯油や薪の需要発生額 1 億円を分解し、町内に留まる資金を推計した。灯油の場合、1 億円の需要に対し町内に留まる資金は、小売マージン分である 1,651 万円分であると考えられる。これは、灯油の卸売は町外で行われていると考えられ、灯油の輸送も町外の業者が実施していると考えられるためである。また、町内の自給率は 0 となっているので、灯油生産に係る付加価値も 0 と考えられる。

一方、薪の場合、1 億円の需要に対し町内で生み出されると考えられる価値は、商業マージン（3,697 万円）と運輸マージン の合計（233 万円）である 3,930 万円に、町内での付加価値である 3,122 万円（ $=1 \text{ 億円} \times (1 - 0.3697 - 0.0233) \times 0.7037 \times 0.7309$ ）を加えた 7,052 万円と考えられる。これは、薪の原料となる木材の生産、薪への加工、薪の輸送など薪生産に係る工程行程の多くが町内で完結することによる。

両者の比較から、灯油を利用するよりも薪を利用する方が地域に留まる資金は多くなり、地域の所得増に大きく貢献することが分かる。例えば、同じ 1 億円を支払ったとしても、灯油に支出する場合に比べ薪に支出する方が地域に留まる資金は 4 倍以上も大きくなると言える。

続いて、これらの結果とシミュレーション結果とを合わせて考慮する。シミュレーションの結果では、薪利用により削減される灯油を金銭評価すると 7,913 万円から 1 億 268 万円であり、その時に町内に留まる資金は 16.5%にあたる 1,306 万円から 1,694 万円と見積もられる。これに対し薪の購入費用は町内全体で 7,793 万円と見積もられていたが、その時に町内に留まる資金は 5,494 万円となる。

以上をもとに町内に留まる資金を比較すると、灯油の利用量が減少することで町内に留まる資金は 1,306 万円から 1,694 万円程度減少すると見込まれる一方で、薪の新規需要により 5,494 万円の資金が町内に留まるようになる。差し引きすると、町内半数世帯の薪利用により 3,800 万円から 4,188 万円も多くの資金が町内に留まるようになる。薪利用の促進が地域経済にとって、町内資金循環の増加というプラスの影響をもたらし得る点が示唆されたものと考えられる。

4) 小括

本節では①資源の賦存量も考慮したより実態に即した評価、②木質バイオマスによる化石燃料の代替を明示的に考慮した経済的影響の評価、を念頭により実践的な評価手法の開発及び開発した手法を用いた実証を試みた。具体的には、森林簿情報と町内の薪利用データをもとに

GIS と線形計画法を利用し、最適な薪利用についてシミュレーションし、マクロ経済的な影響も含め、資源面、環境面への影響評価を実施した。

本稿で用いた評価手法の要点は、①森林簿と地図情報とをもとに木質バイオマスの地理的分布を明示的に考慮した点、②西和賀町による薪利用実態調査をもとにした木質バイオマス需要の地理的分布を明示的に考慮した点、及び③線形計画法を用いて、費用が最小となる木質バイオマス利用のシミュレーションを実施し各種の影響を評価した点、といえる。前節で実施した統計情報のみを用いた影響評価と比べ、地理情報も考慮した評価を行うことで、町内の薪の需給には濃淡がある点などを新たに析出することができたと考える。

一方で、本評価手法を他地域に適用するとの観点から、木質バイオマス需要に関する地理的分布や量的な情報は、比較的入手しにくい情報となっている点に注意が必要である。西和賀町は、薪の利用実態について町内の地区別の需要量データを公表しており、本稿でもそのデータを利用することで、評価を実施することができた。他地域においてより実態に即した評価を実施するためには、詳細な需要データの整備が望まれる。

5. おわりに

本研究の目的は、バイオマスの利用を経済性の面のみからでなく、環境や地域社会に及ぼす影響などの側面からも評価する手法を開発することであった。具体的には、岩手県西和賀町の家庭における木質バイオマス利用を事例に、①統計情報等に基づいて生産から消費、廃棄までのライフサイクルを通じた各種影響を評価し、②より実践的な評価手法の開発を目指し、地理情報も加味した最適化シミュレーションに基づく各種影響の評価を試みた。

第3節では、既存の統計資料を用い、西和賀町における薪利用のライフサイクル全体について、GHG削減量、雇用創出量、エネルギー自給率といった面から評価した。第4節では、地理的情報も加味した影響評価手法の開発及び適用を試み、町内での木質バイオマスの需給に濃淡がある点など統計情報のみを用いた評価では不明であった点も析出できた。

本稿で示した評価手法は、いまだ改良の余地を有しており、また体系だったものとはなっていないものの、少しでもバイオマス利用を通じた地域活性化につながるのであれば幸いである。

注

- (1) 西和賀町における薪の 1 間とは、 $0.3\text{m} \times 1.25\text{m} \times 5.3\text{m}$ であり層積（薪を積み上げた時の容積）で 1.988m^3 、実材積で 1.004m^3 となっている（西和賀町（2011））。
- (2) 薪炭共有林とは、地域住民と国が契約を結ぶことで、自宅用の薪炭材を採取できる国有林のことである。
- (3) このように地域によって薪使用量が大きく異なる理由として、気温や暖房機器の性能などの要因以外に、計測単位の相違が考えられる。沢内村および西和賀町の調査における薪使用量は、実際に燃焼される木材の容積である材積ベースで計測されている。一方、長野県の調査結果は西和賀町の調査結果の 2 倍以上の値となっており、表示単位が間隙も含む薪棚の容積である層積ベースであるとも考えられる。この場合、薪棚の間隙率を 50% として計算すると長野県の調査結果は材積ベースで 4.5 m^3 と推計される。
- (4) 計画書における薪の定義は「従来の薪に加え、一次加工（破砕）を加えたチップ」となっており、圧着などの二次加工が必要となるペレットは本計画の「薪」の範囲外となっている。
- (5) 薪ストーブの利用者である住民にとっての、薪ストーブ利用のメリット、デメリットについては西和賀町（2011）などにまとめられている。
- (6) 柚山ら（2010）の最終的な目的はバイオマス利用計画の立案であるが、本稿ではすでに立案されたバイオマスの利用の評価を目的としているなど、両研究の研究目的には相違があることを反映し、分析手順を改良している。
- (7) 湯田ダムでは平成 22 年度に 55 トンの流木が薪用として近隣の住民に提供されている（2011 年 5 月 26 日付け岩手日日新聞記事）。この流木のどの程度が、町内の家庭で暖房用の燃料として利用されているのかは不明である。
- (8) ハウスでのシイタケ栽培農家へのヒアリングでは、毎年 20m^3 から 30m^3 程度の薪を調達しているものの、春先には全て使いきってしまうことが明らかになっている。ハウスの規模にもよるものの、西和賀町の家庭における標準的な薪使用量が 3.5m^3 であることから考えると、10 倍程度の薪が消費されていると推察される。
- (9) より正確には薪を生産した場所から消費する場所までの、薪の運搬分の化石燃料消費量も算定に入れるべきではあるが、データの入手可能性から本研究では分析対象としていない。
- (10) 薪 1m^3 あたりの発熱量は、薪の種類をナラとし、薪の含水率を 20%dry として次式の通り算出した。

$$(\text{薪 } 1\text{m}^3 \text{ あたり発熱量}) = (\text{薪 } 1\text{m}^3 \text{ あたり重量(かさ密度)}) \times (\text{薪 } 1\text{kg} \text{ あたり発熱量})$$

$$=680\text{kg/m}^3 \times 3,530\text{kcal/kg}=10,048\text{MJ}$$

- (11) 本稿での試算には多くの仮定が置かれていることに注意が必要である。具体的には、薪生産の各段階で使用される機械などの生産にかかわる CO₂ 排出量は考慮されておらず、薪ストーブや灯油ストーブの熱効率も考慮していない。これらの点の改良は今後の研究に期待したい。
- (12) 本稿での雇用創出効果は薪の生産にかかる雇用の量として算出した。薪利用に代替される灯油使用量の削減に伴う雇用量の減少については、考慮していない。この点の改善は今後の課題としたい。
- (13) 一人当たりの年間労働時間は、8 時間/日 × 243 日 = 1,944 時間と仮定した。
- (14) 熱とは熱供給事業者による蒸気や水などによる熱の供給を示す。
- (15) 経済センサスにおける西和賀町の建設業・鉱業部門の就業者数は 0 となっており、実態を正確に反映したものとは考えられないため、「西和賀町の統計」の値を利用した。
- (16) 推計方法からも明らかとなっており、ガイドラインの方法ではバイオマスによるエネルギー供給は考慮されていない。
- (17) 町内の薪利用量 (2,160m³) にかさ密度 (ナラの場合 680kg/m³) および重量当たり発熱量 (14.8MJ/kg) を乗じて推計した。
- (18) ここでの県の事業とは、いわて森林づくり県民税を原資とした、いわて環境の森整備事業である。
- (19) この供給コストには原木を薪にするための薪割りに掛かる費用は含まれていない。
- (20) 森林組合が販売している薪は広葉樹であるが本稿では杉を巻きにするとの仮定をおいている。両者は容積あたりの熱量が異なるが、薪の購入費の推計の際にはこの容積あたりの熱量の差も考慮し、熱量あたりの単価が等しくなるように推計した。
- (21) 暖房費の削減額には、暖房機器の減価償却費用は含まれてない。
- (22) 岩手県県南の産業連関表において薪を含む産業部門は、「パルプ・紙・木製品」部門であるが、①この部門の係数は北上市に存在する製紙会社の投入・産出状況の影響が大きく、薪の投入・産出状況の影響が薄れてしまっていると考えられる点、②薪は素材からの加工度が低く「林業」部門の投入・産出状況に近いと考えられる点から、本研究では薪に関するパラメータを「林業」部門の値により算出した。

引用文献

- [1] 環境省（2005）「事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン」,
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/index.html>。
- [2] 長野県環境保全研究所（2011）『薪ストーブ利用実態調査結果』
http://www.pref.nagano.lg.jp/xseikan/khozen/sizen/junkan_research/stove/maki_summary.pdf。
- [3] 日本エネルギー学会編（2003）『バイオマスハンドブック』日本エネルギー学会。
- [4] 西和賀町（2010）『西和賀町の統計』。
- [5] 西和賀町（2011）『「薪」利用最適化システム構築計画書：森林エネルギー利用で切り開く西和賀町の未来推進事業』。
- [6] 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」編著（2006）『バイオマス利活用システムの設計と評価』農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」。
- [7] 沢内村（2004）『沢内村森林バイオマス利用促進行動計画：煙突の見える村あったか沢内』。
- [8] 資源エネルギー庁（2006）『市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン』。
- [9] 柚山義人・生村隆司・小原章彦・小林久・中村真人（2006）「バイオマス再資源化技術の性能・コスト評価」『農工研技報』204, pp.61-103。
- [10] 柚山義人・山岡賢・中村真人・清水夏樹（2010）「ライフサイクル的にみたバイオマス利活用評価の論点」『農業・農村工学会論文集』第78巻第2号, pp.71-76。
- [11] Wang, J., Jing, Y., Zhang, F., and Zhao, J., (2009) “Review on Multi-criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-making” Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (9), pp.2263-2278.
- [12] 畑中健一郎（2008）「長野県内におけるバイオマスエネルギー量の地域別推計」『長野県環境保全研究所研究報告』4号, pp. 39-44.
- [13] 畑中健一郎・陸斉・井出政次（2012）「長野県における薪ストーブの利用実態とCO2排出量の推計」『長野県環境保全研究所研究報告』8号, pp. 25-30.
- [14] 井内正直（2006）「林地残材を用いたバイオマスエネルギー事業の成立性評価」『電力中央研究所報告』電力中央研究所。
- [15] Kinoshita, T., K. Inoue, K. Iwao, H. Kagemoto, and Y. Yamagata (2009) “A Spatial Evaluation of Forest Biomass Usage using GIS,” Applied Energy 85, pp.1-8.

- [16] 前野真吾・糸永浩司・藤沢直樹 (2002) 「GIS による里山のバイオマスに関する研究 : 長野県飯田市を事例地として」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp.567-568.
- [17] 前野真吾・糸永浩司・藤沢直樹 (2003) 「長野県飯田市千代地区での GIS による里山領域の把握と木質バイオマス潜在量の算定 : 里山の木質バイオマス活用に関する研究 その 2」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp. 559-560.
- [18] 森本英嗣・橋本禪・星野敏・九鬼康彰 (2010) 「バイオマスタウンを軸とした木質バイオマスの広域利用に関する評価」『農村計画学会誌』第 29 巻, pp.191-196.
- [19] 永野正展・松村勝喜・高見志津 (2011) 「木質エネルギーの地産地消による新たな地域産業モデルの構築」『高知工科大学紀要』第 8 巻 1 号, pp.187-194.
- [20] 西和賀町 (2011) 『「薪」利用最適化システム構築計画書』
(<http://www.town.nishiwaga.lg.jp/index.cfm/8,10397,c,html/10397/20110426-181119.pdf>) [参照年月日 : 2012 年 8 月 16 日].
- [21] 佐無田啓・内山洋司・岡島敬一 (2011) 「茨城県におけるバイオエネルギー生産と輸送の最適化分析」『エネルギー・資源』32 巻 2 号, pp. 16-23.
- [22] 佐々木誠一・多田野修・神道徹平・立川史郎 (2006a) 「製紙用チップ工場で生産した土場残材チップの供給コスト試算」『岩手県林業技術センター研究報告』No.14, pp.3-8.
- [23] 佐々木誠一・多田野修・東野正・深澤光・小笠原啓次郎 (2006b) 「燃料用チップ供給コストの試算」『岩手県林業技術センター研究報告』No.14, pp.9-15.
- [24] 沢内村 (2004) 『沢内村森林バイオマス利用促進行動計画』.
- [25] 杉原彦一・岩川治 (1960) 「陸上路線の迂回率について」『日本林学会誌』第 42 巻 7 号, pp.269-275.
- [26] 寺田徹・横張真・田中伸彦 (2010) 「収穫・輸送コストから見た都市近郊部へ一輪の木質バイオマス利用の可能性」『ランドスケープ研究』73 巻 5 号, pp. 663-666.
- [27] 上村佳奈・久保山裕史・山本幸一 (2009) 「北東北三県における木質バイオマス供給可能量の空間的推定」『日本エネルギー学会誌』88 巻, pp. 877-883.
- [28] 八木賢治郎・中田俊彦 (2007) 「資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス小規模ガス化システムの経済評価」『日本エネルギー学会誌』86 巻, pp.109-118.
- [29] 分山達也・江原幸雄 (2009) 「GIS を用いた再生可能エネルギー評価 : 長崎県雲仙市の例」『日本エネルギー学会誌』88 巻, pp. 58-69.
- [30] 山口鈴子・有賀一広・村上文美・斎藤仁志・伊藤要 (2010) 「栃木県佐野市における

用材と林地残材収穫の経済性を考慮した林地残材収穫量と収穫費用算定モデルの構築」

『日本エネルギー学会誌』86巻, pp. 982-995.

- [31] 安村直樹 (2011)「農山村における薪ストーブ利用と普及」『山林』2011年8月号, pp.11-20.
- [32] 吉原利一・土屋陽子 (2011)「木質バイオマスのエネルギー利用における貯蔵・輸送行程での温室効果ガス排出量の再評価」『電力中央研究所報告』電力中央研究所.
- [33] 吉岡拓如・小林洋司 (2006)「中山間地域におけるエネルギー利用が可能な森林バイオマス資源量と収穫・輸送コスト」『第57回日本森林学会関東支部大会発表論文集』, pp.335-338.
- [34] 浦上健司・糸長浩司 (2007)「木質バイオマスエネルギーの地産地消を通じた持続可能な農村地域づくりの展望:飯館村の地産地消計画を事例として」『農村計画学会誌』26(3), pp. 153-158。

第4章 バイオ燃料の持続可能性評価の動向と国産バイオ燃料の必要性⁽¹⁾

林 岳

矢部光保（九州大学）

1. はじめに

第1章で論じたとおり、バイオ燃料は地球温暖化防止への対策としてその効果が期待されているものの、一方で原料作物の作付けの拡大による森林の伐採など環境への悪影響をもたらし、いわゆる環境問題のシフトが発生することも懸念されている。また、途上国ではバイオ燃料の原料作物の作付けにより住民の生活に必要な森林が破壊されるなど様々な側面に影響を与えることが指摘されている。一方でバイオ燃料の導入が農村部に新たな収入源をもたらすとも言われており、バイオ燃料の導入・普及が国民の生活にどのような影響を与え、それが持続可能性にどのように関係するのかといった議論が盛んに行われている。具体例でいうと、例えば国内では2008年に「バイオ燃料持続可能性基準検討会」が開催され、また、国際的には持続可能な「バイオ燃料円卓会議（RSF）」や「国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）」などにおいて、バイオ燃料の持続可能性の議論が行われていた、もしくは現在も行われている。

一方、国内に目を向けると、国内で流通するバイオ燃料のほとんどは海外からの輸入に依存している状況である。輸入に際しては、輸入元での生産段階における持続可能性の確保にも気を配らなければならない。また、チップやパームなどのバイオ燃料の原料の確保に際しても、同様の配慮が必要になろう。このように、日本においては輸入元におけるバイオ燃料さらにはその原料生産が持続可能なものとなるような配慮や支援が求められる。しかし最終的には、自国内でのバイオ燃料生産が可能にもかかわらず、安易に海外に依存すること自体が持続可能なバイオエネルギーに反するものであるともなりかねず、日本においても国内でのバイオ燃料生産にも目を向ける必要があるだろう。

本章では、まず国内外におけるバイオ燃料の持続可能性評価の議論を整理し、日本での持続可能な国産バイオ燃料生産の必要性を論じる。

2. バイオ燃料の持続可能性評価に関する国際的動向

(1) 国際バイオエネルギー・パートナーシップ (GBEP)

1) GBEP の概要

バイオ燃料の持続可能性評価に関する国際的な動きとしては、国際バイオエネルギー・パートナーシップ (GBEP) におけるバイオ燃料の持続可能性基準・指標の検討作業が挙げられる。GBEP とは、2005 年のグレンイーグルスサミットにおいて、G8+5 各国（ブラジル、中国、インド、メキシコ、南アフリカ）首脳がバイオエネルギーの持続的発展を図ることを目的とした組織を設立することに合意したことを受け、2006 年 5 月に設立された国際的組織である。

GBEP では、現在その活動の一部として、2008 年からバイオエネルギーの持続可能性に貢献するため科学的な基準・指標の作成作業が行われている。これは GBEP 内ではタスクフォースとして位置づけられ、2008 年の 6 月にイギリスの主導のもとで発足し、現在はスウェーデンの主導で活動が行われている。この持続可能性タスクフォースでは、(1)バイオ燃料との関連性がある、(2)実用的である、(3)科学的根拠に基づく、(4)義務的なものとはならない、などの原則に基づいてバイオ燃料の基準と指標を策定する作業を行っており、策定された基準・指標は国家レベルでの意思決定や持続可能なバイオ燃料の普及などの目的のために利用されることが想定されている。GBEP では、ほぼ 4 年間の議論を経て、2011 年 5 月にバイオエネルギーの持続可能性指標を発表した (GBEP (online))。

2) GBEP のバイオエネルギー持続可能性指標

GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標は、政府レベルで合意した初のバイオエネルギーの持続可能性指標であり、(1)各国に利用の義務を負わせるものではなく各国が自発的に利用することを意図していること、(2)科学的根拠に基づいていることの 2 点が特徴である。第 1 表に 24 の GBEP の持続可能性指標をまとめている。指標は大きく環境、社会、経済およびエネルギー安全保障の三つの分野に分かれ、各分野にはそれぞれ 8 つの指標が含まれる。これらの指標はメンバーおよびオブザーバー各国・機関から提案のあった指標をもとに、(1)バイオエネルギーの持続可能性との関連性、(2)科学的根拠の有無、(3)実用性などの観点から多くの議論が行われた末に、類似・関連指標の統合や実用性の低い指標や持続可能性との関連が薄い指標の削除がなされて取りまとめられたものである。

GBEP の持続可能性指標は、事業者が個別の経営状況やプラントの稼働状況を判断するために用いるというよりは、政府や自治体といった公的機関が国または地域全体での評価を行い、持続可能なバイオエネルギー供給・利用を促進することを想定して策定されている。そのため、いずれの指標も定量的評価を基本としているが、指標間のウェイトは置かず、最終的に統合化された総合指標での結果表示や国・地域ごとの結果の比較は目的としていない。

GBEP では各指標の細かな定義や評価方法を記述したレポートを作成し、2011 年 12 月に公表した（GBEP（2011））。この指標のユーザーはこのレポートに沿って指標の推計・評価を行うことになるが、指標の選択や実際の利用方法は各国の判断に任されており、これら 24 の指標から各国の生産事例の実情に合った指標を選択し評価することになる。

第1表 GBEPのバイオエネルギー持続可能性指標

分野	指標
環境	1 ライフサイクル温室効果ガス排出量
	2 土壌質
	3 木質資源の採取水準
	4 大気有害物質を含む温室効果ガスの排出量
	5 水利用と効率性
	6 水質
	7 生物多様性
	8 バイオ燃料の原料生産にともなう土地利用と土地利用変化
社会	9 新たなバイオエネルギー生産のための土地分配と土地所有権
	10 国内の食料価格と食料供給
	11 所得の変化
	12 バイオエネルギー部門の雇用
	13 バイオマス収集のための女性・児童の不払い労働時間
	14 近代的エネルギーサービスへのアクセス拡大のためのバイオエネルギー
	15 屋内煤煙による死亡・疾病の変化
	16 労働災害、死傷事故件数
経済および エネルギー安 全保障	17 生産性
	18 純エネルギー収支
	19 粗付加価値
	20 化石燃料消費および伝統的バイオマス利用の変化
	21 職業訓練および再資格取得
	22 エネルギー多様性
	23 バイオエネルギー供給のための社会資本および物流
	24 バイオエネルギー利用の容量と自由度

出所：GBEP(2011)を著者が和訳。

3) GBEP 持続可能性指標の意義

GBEP の持続可能性指標の意義としては、バイオエネルギーの生産・利用に関する持続可能性を評価する世界共通のツールを提供することで、各国のバイオエネルギー政策を支援することが挙げられる。冒頭で掲げたバイオエネルギーの問題について言えば、GBEP の持続可能性指標では、原住民の生活の場の喪失の問題については「新たなバイオエネ

ギー生産のための土地分配と土地所有権」(指標 9) で評価されるし、熱帯雨林の伐採については「バイオ燃料の原料生産にともなう土地利用と土地利用変化」(指標 8), 食料との競合問題については「国内の食料価格と食料供給」(指標 10) でそれぞれチェックされることになる。したがって、このような問題点が指摘されているバイオエネルギーの生産国では、自国のバイオエネルギーが持続可能なものであることを GBEP の持続可能性指標を用いて示すことが必要となり、問題解決のために何らかの対策を講じるが必要になってくるだろう。

ただし、GBEP の持続可能性指標は、あくまで各国が自発的に利用することを求めている、これを用いた評価を義務化しているわけではない。そのため、短期的にはバイオエネルギー供給やバイオエネルギーが引き起こす諸問題への影響は大きくないと考えられる。しかしながら、「自発的な利用」の意味を逆に捉えると、バイオエネルギーを需要する各国が持続可能なバイオエネルギー流通促進のため、独自の判断で GBEP 指標を用いて持続可能性を評価した原料作物やバイオエネルギーを輸出国に要望することも可能であるということである。その場合、需要国にバイオエネルギーを輸出する国では、自国のバイオエネルギーの販売促進のために GBEP 持続可能性指標を用いた評価を行うことで、必然的に持続可能なバイオエネルギーの利用促進が図られることになる。

(2) 各国における動き

1) 米国

米国は主にとうもろこしを原料とするバイオエタノール生産を行っており、その生産量は 2009 年におよそ 4,200 万 KL と世界第 1 位である。米国では再生可能エネルギー指令が施行され、再生可能エネルギーの利用が義務化されており、さらにとうもろこしなど、いわゆる第 1 世代の再生可能エネルギーの利用にもキャップが設けられている (Balian (2011))。

米国は自国でのバイオエネルギー生産の持続可能性を確保する取組だけでなく、途上国における持続可能なバイオエネルギー普及促進にも取り組んでいる。Balian (2011) によると、米国は、GBEP での活動として、西アフリカ諸国経済共同体再生可能エネルギー・エネルギー効率性地域センター (ECOWAS/ECREEE) と共同で西アフリカにおける持続可能なバイオエネルギー普及支援として、持続可能な森林管理の技術的支援と近代的バイオエネルギー普及促進、さらに GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標を用い、西ア

フリカ各国がエネルギー安全保障と食料の安定供給の双方を達成できるよう支援することの3つに着手することを明らかにしている。

このように、米国は国内のみならず海外、特に途上国における持続可能なバイオエネルギー推進に取り組んでおり、国内外で持続可能なバイオエネルギーの生産・消費に貢献している。しかしながら一方で、米国のこのような途上国への支援は、米国国内における持続可能なバイオエネルギーへの関心をそらす意図もあるのではないかと疑念を抱く見方もある。

2) ブラジル

ブラジルでは、バイオエタノールの原料となるさとうきびについて、持続可能な生産を確保するため、さとうきびの農業生態学的ゾーニング制度を導入している。さとうきびの農業生態学的ゾーニング制度は、ブラジルが持続可能なさとうきび生産を誘導するために2009年に制定した制度である。ブラジルの製糖業、エタノール製造業の持続可能な拡大を支援する技術的制度である。ブラジルのさとうきび農業生態学的ゾーニング制度については、小泉（2011）に詳しい。小泉（2011）によると、この制度により、ブラジルでは環境と調和したさとうきび生産を実現し、温室効果ガスの削減、炭素クレジットの活用促進、土壌浸食の低減による土壌保全の効果が期待されているという。

具体的には、さとうきび栽培に適した土地の選別のため、気候適正評価と土壌適正評価を行い、また生態系および生物多様性と調和したさとうきび生産の実施のためのデータベースを構築する（小泉，2011）。自然保全地域など、すでに保護地域に指定されている地域は評価から除外されている。適正評価の結果、ブラジルでさとうきび生産に適した土地は6,300万haを超え、現行のさとうきび栽培面積を大きく上回っている。また、Rebua（2011）によると、測量した面積の12%以上がさとうきび栽培が制限された土地となっているとのことである。

一方で、ゾーニング制度の課題として、小泉（2011）はさとうきび栽培に適した土地があまりにも広大で、生産抑制の歯止めにならないこと、適地以外への栽培にも罰則規定がないことなどを問題点として挙げている。このことから、さとうきびの農業生態学的ゾーニング制度が持続可能ではないさとうきび栽培を抑制できるかは疑問が残る部分もある。

3) EU

EUでは、2009年に採択された再生可能エネルギー利用促進指令（RED）のもと、バイオ燃料の利用促進に取り組んでいる。REDの中では、2020年までに輸送用燃料の10%をバイオ燃料とする目標を打ち出している。この目標にカウントされるには、REDの中で定められる持続可能性基準を満たさなければならない。この持続可能性基準は、温室効果ガスの削減率が化石燃料と比べて35%以上であることのほか、原生林や熱帯雨林など、生物多様性や土壌炭素貯留に大きな影響を与える土地で生産された原料を用いていないことなどである。REDで認められるバイオ燃料には域内原料を用いて域内で生産されたバイオ燃料のほか、域外から輸入されたバイオ燃料および域外から輸入された原料を用いて域内で生産されたものも対象となる。なお、温室効果ガスの削減率については、2017年以降は50%に引き上げられる予定である。

第2表 EUで承認された7つのバイオ燃料持続可能性指標

ISCC
(International Sustainability and Carbon Certification)

Bonsucro EU

RTRS
(Roundtable for Responsible Soy)

RSB
(Roundtable on Sustainable Biofuel)

2BSvs
(Biomass Biofuel Sustainable voluntary scheme)

RBSA
(Abengoa RED Bioenergy Sustainable Assurance)

Greenergy

REDの持続可能性基準に対応して、燃料製造事業者や輸入者が自発的に自らのバイオエネルギーの持続可能性評価に適用するための具体的指標として、既存の7つ持続可能性指標を指定している（第2表）。これらは環境NGOなど異なる7つの組織・団体が独自に公表しているものであり、これをEUがREDの具体的な持続可能性基準の判定基準として認めたものである。したがって、これら七つの指標のいずれかを用いて評価を行わなければ、REDが認めるバイオ燃料と見なされないことになり、再生可能エネルギー導入目標に

カウントや政府支援の対象とはならない。なお、上記七つの指標は 2011 年 7 月時点で公表されたものであり、これ以外に 18 の指標がさらに承認の査定が行われているところである（European Commission（2011））。

3. 日本におけるバイオ燃料の持続可能性評価と国産バイオ燃料の課題

（1）日本国内における持続可能性評価の動向

日本におけるバイオ燃料持続可能性評価の動きは、世界的に食料価格が高騰した 2008 年頃より盛んに進められるようになった。まず、2008 年 9 月より「国際バイオ燃料基準検討会議」が立ち上げられ、バイオ燃料の持続可能性に関する基準および指標の検討が行われた。この会議の目的は 2 つ挙げられる。1 つは、当時急激なバイオ燃料の生産拡大が食料価格の高騰や森林破壊の要因の 1 つとなっているとの批判が生じてきたことに対する対応である。もう 1 つは、後述する世界バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）などの国際的な議論において、日本がどのような立場を取るかを明確化することである。そのため、「国際バイオ燃料基準検討会議」では、当時喫緊の課題であった食料、農業とバイオ燃料生産の関係を中心にバイオ燃料の持続可能性の議論が行われた。

また同時期、「バイオ燃料持続可能性研究会」も開催され、食料、農業との関係のみならずバイオ燃料生産によるあらゆる影響について検討が行われ、バイオ燃料の持続可能性について幅広い視点から議論が行われた。その検討結果は 2009 年 4 月に報告書にまとめられている（バイオ燃料持続可能性研究会（2009））。この「バイオ燃料持続可能性研究会」は 2009 年 7 月に「バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会」へと発展し解消された。これは、「エネルギー供給構造高度化法」に基づいて事業者バイオ燃料導入の誘導的規制を課すことが決められたことから、一定の「持続可能性基準」を満たすバイオ燃料に導入対象を限定するための持続可能性基準を検討することが主な目的である。この検討会の結果も 2010 年 3 月に中間とりまとめが公表されている（バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会（2010））。

（2）日本の役割と国産バイオ燃料の必要性

今までバイオマスエネルギーは生産量を拡大させる「量の拡大」が政策目的の中心だったが、今後は世界的にバイオエネルギーの持続可能性を向上させることが求められること

になり、GBEP の持続可能性指標は、持続可能なバイオエネルギーの促進という「質の向上」への転換の第 1 歩といえる。今後、GBEP はこの持続可能性指標を通じて持続可能なバイオエネルギーの生産・利用を途上国に普及させるべく、途上国における能力開発に取り組む方針を示している。

GBEP の持続可能性指標はバイオエネルギー全般に適用されるものなので、例えばエネルギー利用のための木材チップやペレットの輸入に際しても、GBEP 指標を適用した評価を通じた持続可能性の向上が期待される。特に日本は木材チップやペレットの多くを途上国などからの輸入に頼っているので、原料作物やバイオエネルギーの輸入国における GBEP 指標を用いた持続可能性評価の動向を注意深く見守る必要があるだろう。さらに、現在、日本では東日本大震災からの復興のため、被災地を中心に再生可能エネルギーを導入しようという動きがある。バイオエネルギーの導入については、やはり GBEP の持続可能性指標を意識した取組が求められると思われる。

日本は自国で生産されるバイオエネルギーのみならず、自国が輸入するバイオエネルギーについて、「質の向上」に努めなければならない。さらには、GBEP における能力開発を通じて途上国におけるバイオエネルギーの「質の向上」への貢献も求められるだろう。日本はバイオエネルギーの製造技術での優位性を活かして途上国の効率的なバイオエネルギー生産を支援し、世界で生産されるバイオエネルギー全体の「質の向上」に貢献することが必要と思われる。

現在日本は国内で流通するバイオ燃料の多くを輸入に頼っている。しかしながら、以下の 2 点の理由から、バイオ燃料を国内で生産することが必要であると考えられる。第 1 に、環境問題への影響である。これまで日本は国内での地球温暖化防止の取組とともに温室効果ガスの排出量削減の努力を続けてきた。その一方で、国内における削減の限界を克服するため、クリーン開発メカニズム (CDM) などを用いて海外で排出削減を行ってきた。また、バイオ燃料の生産を海外に依存する現在のやり方が海外の生産国、特に途上国において一部環境問題を引き起こしていることは先に触れた。例えば、インドネシアの熱帯雨林におけるプランテーション栽培が生物多様性に影響を与えているとの報告もあり、日本国内で生産を行えばさほど問題とならないことであっても、海外で生産を行うことで表面化する環境問題は枚挙にいとまがない。したがって、バイオ燃料自体もしくは原料作物の生産を安易に海外に生産を依存することが必ずしも最適な選択肢とは言えないと考えている。

第 2 に、エネルギー安全保障の問題である。我が国は 1 次エネルギーの 98% を海外から

の供給に依存しており、エネルギー安全保障上に大きな問題があるということは長年指摘されてきた。さらに、近年は国際的なエネルギー価格の高騰もしくは大きな変動により、国内経済活動に大きな影響を与えてことも事実である。さらに、東日本大震災の際には、一時的に輸送用燃料の流通が停滞し、経済活動や日常生活、さらには震災被災地における救援活動に大きな支障を来した。その際、BDFを自前で生産していた地域では、BDFにより車両を動かし、救援物資を輸送したという話も聞く。このように、エネルギー安全保障の観点からも国内においてバイオ燃料を生産することが必要であり、さらに東日本大震災での経験を考慮すると、分散的な燃料供給システムが望ましいと考える。

なお、バイオ燃料流通に関する制度については、各種指摘がなされているところであり、国産バイオ燃料の生産・流通・消費の拡大に向け、諸課題への対応を図っていく必要がある⁽²⁾。

4. おわりに

本章では、まず国内外におけるバイオ燃料の持続可能性評価の議論を整理し、日本での持続可能な国産バイオ燃料生産の必要性を論じた。バイオ燃料の持続可能性については、国際バイオエネルギーパートナーシップ（GBEP）をはじめ、さまざまな団体・組織によって国際的な議論が行われている。GBEPでは、ほぼ4年間の議論を経て、2011年5月にバイオエネルギーの持続可能性指標24指標を発表した。これは政府レベルで合意した初のバイオエネルギーの持続可能性指標であり、①各国に利用の義務を負わせるものではなく各国が自発的に利用することを意図していること、②科学的根拠に基づいていることの2点が特徴である。さらに米国やEUなどの各国においても、独自にバイオ燃料の持続可能性の確保を目指した取組が行われている。このような世界的な潮流や、環境問題への対応、及びエネルギー安全保障の面からも日本においても持続可能なバイオ燃料を国内で生産することが重要である。

一方で、BDFなど一部のバイオ燃料に関しては、自治体が独自にプラントを建設して取り組んでいるところもあり、小規模分散型の供給システムが確立しているところがある。当然ながら、これらの取組についても持続可能性の評価が求められてくる。それでは、このような事例においてGBEPの持続可能性指標で評価した場合、指標の適用にどのような課題があるのかを検証する必要がある。次章では、国内の取組におけるGBEP指標の適用

可能性を，具体的事例を取り上げて検証する。

注

- (1) 本章は，築上町（2012）の一部を，築上町の下承を得た上で加筆修正したものである。
ただし，本文中における誤りは全て著者らが責を負うものである。なお，本章の執筆にあたっては，JA 全農にご指導・ご協力いただいた。記して感謝の意を表する。
- (2) 築上町（2012）では，バイオ燃料に関する国内の法律の整理から，国産バイオエタノールの流通販売に関する課題を指摘している。

〔引用文献〕

バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会（2010）『バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会 中間取りまとめ』。

バイオ燃料持続可能性研究会（2009）『日本版バイオ燃料持続可能性基準の策定に向けて』。

European Commission (2011) “Sustainability schemes for biofuels”

http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/sustainability_schemes_en.htm（2011年12月14日アクセス）。

GBEP (online) “The Global Bioenergy Partnership agrees on a set of sustainability indicators for bioenergy” GBEP press release,

http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/pdf_folder/pressreview_11/GBEP_press_release_sustainability_indicators.pdf(2013年4月2日アクセス)

GBEP (2011) “The Global Bioenergy Partnership sustainability indicators for bioenergy First edition”

小泉達治（2012）「ブラジルにおけるサトウキビ農業生態学的ゾーニング制度：背景，内容，評価」，『農林水産政策研究』19。

Rebua, M., (2011) “Bioenergy and world challenges” Proceedings of International Symposium “The State and Future of Bioenergy” at Tokyo International Forum on 2011.11.17。

Balian, R., (2011) “Bioenergy and the United States Policies, Status, Future Trends” Proceedings of International Symposium “The State and Future of Bioenergy” at

Tokyo International Forum on 2011.11.17。

築上町（2012）『バイオ燃料（米エタノール化）による過疎地域活性化に関する提案書』。

第5章 国内バイオ燃料生産への国際バイオエネルギー・パートナーシップ (GBEP) 持続可能性指標の適用可能性の検証⁽¹⁾

林 岳

1. はじめに

第4章で解説したとおり、近年国内外でバイオ燃料の持続可能性を求める動きが進んでいる。日本国内で生産されるバイオ燃料についても当然ながら持続可能性指標に照らして持続可能性が担保されているかを確認する必要がある。特に、GBEPのバイオエネルギーの持続可能性指標は、日本も参加して取り決めた持続可能性指標であり、国際的にも我が国のバイオエネルギーへの適用が求められることが予想される。

しかしながら、GBEPの持続可能性指標は世界各国のあらゆるバイオエネルギー生産に適用することを意図して構築されており、必ずしも日本のバイオエネルギー生産に適したものとはなっていない。室内煤煙による疾病を意図した指標は我が国のバイオエネルギー利用の実態に当てはめるとほとんどの事例において適用する必要があると思われる。また、GBEPの持続可能性指標を適用するには、多くの統計データを収集することが必要であり、我が国の統計データの利用可能性と照らし合わせ、どのようなデータが取得可能なのかを明らかにすることが必要である。このように、GBEPの持続可能性指標を日本のバイオエネルギー生産に適用する場合、データの有無と制約要因、評価の際にどのような点に留意する必要があるのかを明らかにすることは、今後の日本の国産バイオ燃料生産における持続可能性評価に大きな示唆を与えると考える。

そこで本章では、日本におけるバイオエネルギー生産へのGBEP指標適用の第一歩として、京都市におけるBDF生産を取り上げ、GBEP指標を用いて持続可能性評価を行うことで、日本の事例にGBEP持続可能性指標を適用する際の課題点を抽出し、GBEP持続可能性指標が有する課題についても言及することを目的とする。

なお、第4章で解説したとおり、GBEPの持続可能性指標は国レベルもしくは地域レベルといったマクロ的な適用が目的とされており、今回取り上げるような京都市の一事例を対象とした評価には向いていない。しかしながら、現状では日本においてはバイオマス関連の統計データがほとんど整備されておらず、マクロ的な評価も個別事例の積み重ねでの

評価とならざるを得ない状況を踏まえ、京都市を一地域として捉え、バイオ燃料生産に GBEP 持続可能性指標を適用する。

2. 適用事例の紹介と事例選定の理由

(1) 京都市における BDF 生産の紹介⁽²⁾

本章では、評価の対象となるバイオエネルギーとして京都市における BDF 生産を取り上げる。まず、京都市における BDF 生産の取組を概説する。京都市では 1997 年から廃食用油を原料とした BDF 生産を開始している。原料となる廃食用油は一般家庭から発生するものを収集している。家庭から発生する廃食用油については、市内各所に回収地点を設け、ここに住民が廃食用油を持ち込み、月 1 回程度これを収集している。回収地点は 1997 年に 13 か所のみだったが、2010 年には 1,352 か所に増加している。これに伴い廃食用油の回収量も増加し、1997 年には 4.2KL だった家庭からの廃食用油の回収量は、2010 年には 207KL に達している。しかしながら、年間 200KL 程度の供給では原料量としては十分ではなく、京都市では市内の飲食店や食品製造業者、ホテルなどから発生する事業系廃食用油を業者から 45 円/L で購入している⁽³⁾。こちらについては、2010 年に 1,279KL の廃食用油を回収しており、一般家庭からの分を合わせて 1,487KL が BDF 生産の原料として使われている。

BDF の製造は京都市南部に位置する南部クリーンセンター内に設置された BDF 製造プラントで行われ、2009 年は 1,650KL、2010 年には 1,405KL の BDF を生産している。製造能力は年間 1,500KL であり、設備の稼働率としては 100% 近い状況である。プラントの総工事費は 7 億 5,000 万円で、そのうち環境省の助成が 2 億 7,000 円である。内訳は、プラントの建設費用が 4 億 4,000 万円。残りは管理棟の建設費用、土地取得費用などである。製造コストについては、単純に事業額（減価償却費除く）を BDF 生産量で割り返すと 138 円/L となるが、市役所の本局勤務者の人件費を除けば 110 円/L 程度となる。なお、BDF 製造の際に生じるグリセリンは助燃剤としてクリーンセンターのゴミ焼却炉で混焼させている。また、精製の際に発生する廃液については、清掃工場内で焼却の温度調節用に利用しており、外部の業者に処理を委託する廃棄物はない。

生産された BDF は京都市が所有する清掃車に B100（100%BDF）として、また市バスの一部にも B20（BDF20%混合軽油）として利用されている。清掃車については各清掃工

場に給油施設を設け、ごみの搬入の際に給油する仕組みにしている。市では当初、清掃車を 220 台保有していたが、収集ルート効率化と 1 台あたりの走行距離増により、現在は 150 台まで減らしている。また、市バスについては、燃料製造プラントから最も近い横大路営業所の所属の車両全 95 台に給油している。京都市の市バス在籍車両数はおよそ 773 台で、そのうち圧縮天然ガス（CNG）車が 41 台あるので、残りの 732 台のうち 95 台に BDF を利用することになる（第 1 表）。B100 を利用する清掃車については、燃料ホースなどに腐食防止の措置をしているが、B20 を使っている市バス車両については特段措置を施していない。

第1表 燃料種ごとの車両台数

	B100	B20	軽油	CNG	合計
清掃車	147	0	0	0	147
市バス	0	95	637	41	773

注 数値は2011年9月現在のものである。

BDF 製造部門と同じ環境局の管轄である清掃車に対しては、BDF に関する金銭的取引は行っていないが、交通局の管轄である市バス事業に対しては、85 円/L⁽⁴⁾で提供している。市中の軽油価格と比べるとかなり安い価格ではあるが、交通局では軽油を大量に使用するため、入札で安く買っているため、あまり高い価格だとバイオディーゼル燃料が利用されないことや市バスの経営への影響もあり、低めの価格に設定している。

（２）BDF 生産から得られる効果

京都市では、BDF 生産の取組から得られる効果として、食用廃油のリサイクル、温室効果ガス排出抑制、排気ガスのクリーン化、生きた環境教育効果、地域コミュニティの活性化、河川汚濁防止、食料との競合の回避の 7 つを挙げている。京都市ではこのうち特に地域コミュニティの活性化の効果を重視している。地域コミュニティの活性化とは、廃食用油を回収地点に持ち寄ることで、井戸端会議のような会話が発生し、住民の交流が深まるといった効果である。家庭由来の廃食用油は、回収だけでもかなり高コストとなっているが、仮に回収が行われなかった場合は、固めたり吸わせたりした廃食用油をごみとして処理することとなり、その際には 50 円/L 程度の費用がかかる。コストダウンのためには家庭からの廃食用油もペットボトルで回収すると費用は安くなるが、京都市は

この回収方式ではコミュニティを活性化させる取組にはならないと考えており，現行方式を継続している⁽⁵⁾。

これら 7 つの効果を分類すると，温室効果ガス排出抑制，排気ガスのクリーン化は BDF 生産により化石燃料の代替によることの効果，食用廃油のリサイクル，地域コミュニティの活性化，河川汚濁防止，食料との競合の回避については，廃食用油を回収することによる効果，生きた環境教育効果はこれら双方にまたがる効果と言えるだろう。

（３）京都における取組を取り上げる理由

本章で京都市の BDF 生産事例を取り上げた理由は，第 1 に事業の開始が 1997 年と国内の同様の取組の中では，比較的長期間の操業実績があることから，生産が安定的に行われていること，データの蓄積がなされていることである。第 2 に京都市は単なる地球温暖化対策としてこの事業を行っているのみならず，前述のような様々な効果に期待しており，持続可能性評価としては，地域コミュニティの活性化といった社会的な側面の効果も評価できると考えたためである。

3. 評価方法

（１）計測した指標

本研究では，第 4 章で紹介した GBEP の 24 の持続可能性指標のうち，京都市の事例に適合すると思われる 14 指標を取り上げ，具体的な評価を行った。

環境分野については，ライフサイクル温室効果ガス排出量（指標 1），大気有害物質を含む非温室効果ガス排出量（指標 4），水利用と効率性（指標 5）の 3 つを取り上げた。京都市の取組は原料を廃食用油としているので，原料作物の生産に関係する土壌質（指標 2）や木質資源の採取水準（指標 3），バイオ燃料の原料生産に伴う土地利用と土地利用変化（指標 8）は京都での取組の評価に適合しないものとして除外した。また，水質（指標 6）は精製の際に発生する廃液については，清掃工場内で焼却の温度調節用に利用しており，外部環境の水質を汚濁する原因にはなり得ないことから，除外した。さらに，景観と生物多様性（指標 7）の指標については，与える影響が無視できるほど小さいと考え，これも除外した。

第2表 評価に適用した指標一覧

環境	1	ライフサイクル温室効果ガス排出量	○ *
	2	土壌質	N/A
	3	木質資源の採取水準	N/A
	4	大気有害物質を含む温室効果ガスの排出量	○ *
	5	水利用と効率性	○
	6	水質	N/A
	7	景観と生物多様性	N/A
	8	バイオ燃料の原料生産に伴う土地利用と土地利用変化	N/A
社会	9	新たなバイオエネルギー生産のための土地分配と土地所有権	N/A
	10	国内の食料価格と食料供給	N/A
	11	所得の変化	△
	12	バイオエネルギー部門の雇用	○
	13	バイオマス収集のための女性・児童の不払い労働時間	N/A
	14	近代的エネルギーサービスへのアクセス拡大のためのバイオエネルギー	N/A
	15	屋内煤煙による死亡・疾病の変化	N/A
	16	労働災害、死傷事故件数	○
経済・エネルギー安全保障	17	生産性	△
	18	純エネルギー収支	△ *
	19	粗付加価値	○
	20	化石燃料消費および伝統的バイオマス利用の変化	△
	21	職業訓練および再資格取得	△
	22	エネルギー多様性	○
	23	バイオエネルギー供給のための社会資本および物流	○
	24	バイオエネルギー利用の容量と自由度	○

○: 計測したもの。

△: 一部計測したもの。

N/A: 京都市の事例には適合しないと思われるもの。

*: 寺川・東野(2008)および寺川(2009)に基づき計測したもの。

社会分野の指標については、所得の変化（指標 11）、バイオエネルギー部門の雇用（指標 12）、労働災害、死傷事故件数（指標 16）の 3 つを取り上げた。新たなバイオエネルギー生産のための土地分配と土地所有権（指標 9）と国内の食料価格と食料供給（指標 10）は原料作物の生産を想定したものであり、京都市の事例とは無関係と判断し除外した。また、バイオマス収集のための女性・児童の不払い労働時間（指標 13）、近代的エネルギーサービスへのアクセス拡大のためのバイオエネルギー（指標 14）、屋内煤煙による死亡・疾病の変化（指標 15）については、途上国におけるバイオエネルギーおよび原料作物生産を意図した指標であるため、これも除外した。

最後に、経済・エネルギー安全保障分野の指標については、8 つ全ての指標が京都市の取組の評価に適用すべきと判断し、全て評価対象として取り上げた。

なお、評価の際に参照した細かな方法論については、2011 年 5 月に開催された GBEP ワシントン会合で議論された非公開版を用いており、2011 年 12 月に公開された最終版（GBEP（2011））とは若干異なる部分がある点、留意いただきたい。

（２）収集データ

上記で取り上げた 14 の指標の評価に用いた統計データは京都市から提供されたもののほか、ライフサイクルアセスメント（LCA）をベースとした指標である指標 1，指標 4，指標 18 については，既存研究の寺川・東野（2008）および寺川（2009）を参考にして指標の評価を行った。寺川・東野（2008）および寺川（2009）では，一部実際に京都市で行われている BDF の生産・供給システムとは異なる設定のもとで分析を行っており，これらの相違をあらかじめ念頭に置く必要がある。具体的には，BDF の利用先は市バスのみで清掃車は想定していないこと，B20 を BDF 製造プラントから市バス営業所まで輸送する際の環境負荷は考慮していないこと，さらに，分析結果が廃食用油の回収率 10%から 100%までの 10 段階で表示し，回収率の変化により環境負荷発生量の違いを把握できるようにしている点である。3 点目については，著者が独自に計算した結果では，実際の取組における回収率は家庭からの廃食用油で 10.5%，事業系廃食用油では 6.6%と推計された。したがって，本研究では寺川（2009）における回収率 10%が最も現実に近いと考え，この数値を採用して評価を行った。

4. 計測結果

（１）環境分野

環境分野の 8 つの指標の評価結果については，第 3 表に示した。このうち，指標 4 と指標 5 については，各指標に評価すべき数値が複数あり，それぞれ 4.1 から 4.5 および 5.1a，5.1b，5.2 に細分されている。ここでは，このうち指標 1 と指標 5 について，数値の推計方法を簡単に解説する。

指標 1 のライフサイクル温室効果ガス排出量の推計に用いたのは，寺川・東野（2008），寺川（2009）による評価結果が中心である。寺川（2009）より，廃食用油回収率 10%時の温室効果ガス年間排出量を引用した。この数値は廃食用油回収（回収用トラックの走行）段階，廃油回収用トラックの製造段階，BDF プラントの建設段階・BDF 製造設備生産段階，BDF 製造段階，BDF 消費段階の 6 つのステージに分けられ，さらに家庭からの回収分と事業所からの回収分に分類されて推計されている。本研究では，これらの数値を引用し発熱量あたりの値に変換して集計して算出された値を，ライフサイクル温室効果ガス排

出量として計上した（第4表）。このとき、カーボンニュートラルを考慮し、BDF消費段階における温室効果ガス排出量は加えていないが、全ての段階の排出量を合計したカーボンニュートラルを考慮しなかった場合の数値を参考値として掲げた⁽⁶⁾。

第3表 計測結果(環境分野)

指標	単位	数値
1. ライフサイクル温室効果ガス排出量	kg/GJ	11.7 (1)
4.1 廃油回収時のNO _x 排出量	kg/GJ	1.5
廃油回収時のSO ₂ 排出量	kg/GJ	0.4
4.2 燃料製造時のNO _x 排出量	kg/GJ	14.2
燃料製造時のSO ₂ 排出量	kg/GJ	14.5
4.3 燃料輸送時のNO _x 排出量	kg/GJ	N/E
燃料輸送時のSO ₂ 排出量	kg/GJ	N/E
4.4 燃料使用時のNO _x 排出量	kg/GJ	547.7
燃料使用時のSO ₂ 排出量	kg/GJ	0.1
4.5 ライフサイクルで見たNO _x 排出量	kg/GJ	563.3
ライフサイクルで見たSO ₂ 排出量	kg/GJ	15.0
5.1a 再生可能水総量に対する割合	--	0.0010%
5.1b 総取水量に対する割合	--	0.0010%
5.2 発熱量あたりの水利用量	m ³ /MJ	0.0000438 (2)

寺川(2009)に基づき計測したもの。

注1 カーボンニュートラルを考慮しなければ80.8。

第4表 指標1 ライフサイクル温室効果ガス排出量の推計

	単位	数値
廃油回収トラックの走行	kg/GJ = g/MJ	0.3
廃油回収トラックの製造	kg/GJ	0.3
BDFプラントの建設	kg/GJ	0.8
BDF製造設備の生産	kg/GJ	1.4
BDF製造	kg/GJ	8.9
BDF消費	kg/GJ	69.1
1 総排出量	kg/GJ	11.7
総排出量(カーボンニュートラル不考慮)	kg/GJ	80.8
軽油からの温室効果ガス総排出量	kg/GJ	92.2
温室効果ガス排出削減率		87.3%
(カーボンニュートラル不考慮)		12.3%

さらに、指標1では化石燃料からの温室効果ガス排出削減率を計上することを求めている。軽油からの温室効果ガス排出量についても寺川（2009）の分析結果に基づき、推計を行った。その際、寺川（2009）では、廃食用油を下水処理場で処理した場合の温室効果ガス排出量を化石燃料との比較で考慮している。これは、廃食用油からBDF生産が行われなかった場合、化石燃料（軽油）が消費されるとともに、下水処理場で廃食用油の処理が行われ、追加的な温室効果ガスの排出をもたらすという考えに基づく。本研究でも寺川

(2009)に基づき、同様の考え方を採用し、下水処理場での廃食用油処理に係る温室効果ガス排出量についても計算に加えた。なお、温室効果ガス排出削減率についても、カーボンニュートラルを考慮しなかった場合の値を参考値として掲載した。

続いて、指標 5 水利用の推計について解説する。指標 5 の推計の前に、GBEP の持続可能性指標のレポートでは、バイオ燃料の製造に使用する用水の水源を特定することを求めている。京都市の事例の場合、京都市の上水道は琵琶湖を水源としていることから、これを明記した（第 5 表）。次に、琵琶湖からの総取水量（Total annual water withdrawal : TAWW）であるが、京都市水道局（online）によると、2006 年現在の水供給量は 2 億 1,345 万 m³ となっており、これを総取水量として引用した⁽⁷⁾。このうち再生可能な水量（Total actual renewable water resources : TARWR）については、京都市および琵琶湖周辺地域では十分な降水量があり、水資源の枯渇問題が発生していないことを鑑み、総取水量の全てが再生可能と判断し、総取水量と同じ値を計上した⁽⁸⁾。BDF 製造に利用される水の総量については、京都市（2011）から水道使用量を引用して計上し、全量が再生可能水と定義した。

第5表 指標5 水利用の推計

	単位	数値
国家的に定められた水源	—	琵琶湖 (1)
総取水量	m ³	213,445,000 (2)
再生可能水の総量	m ³	213,445,000 (3)
原料生産に利用される再生可能水の水量	m ³	0
原料生産に利用される非再生可能水の水量	m ³	0
燃料製造に利用される再生可能水の水量	m ³	2206.4 (4)
燃料製造に利用される非再生可能水の水量	m ³	0
燃料製造に利用される水の総量	m ³	2,206.4
燃料製造量(発熱量換算)	MJ	50,348,736
5.1a 再生可能水総量に対する割合	%	0.0010%
5.1b 総取水量に対する割合	%	0.0010%
5.2 発熱量あたりの水利用量	m ³ /MJ	0.0000438
5.2 発熱量あたりの水利用量	cm ³ /MJ	43.8

注1 京都市に供給される上水は全て琵琶湖から取水している。

2 2006年の上水取水量である。

3 京都市に供給される全ての水は再生可能と考えられる。

4 管理部門での使用を含む。

これらの数値をもとに指標 5.1a, 5.1b, 5.2 を推計したが、琵琶湖からの総取水量に対する割合は非常に小さく、大きな影響はないと判断された。これは、GBEP の持続可能性指標が国レベルでの適用を念頭に置いているため、本研究のような個別事例（マイクロレベル）での評価との齟齬が発生していることも 1 つの要因と考えられるので、その点留意いただきたい。しかし、それでもなお GBEP レポートで指定された MJ あたりの水量という

のは数値が小さくなりすぎ、少なくとも TJ あたりとすべきと考えている。

(2) 社会分野

社会分野の指標の計測結果は第6表に掲げてある。指標 11 の所得の変化については、バイオエネルギー部門で支払われた賃金 (11.1) とバイオエネルギー生産物の取引、物々交換、自家消費による純収入 (11.2) の2つの指標に分けられる。このうち、指標 11.1 については、京都市 (online) から使用済てんぷら油回収事業の人件費を計上した⁽⁹⁾。指標 11.2 については、本研究で対象とする京都市の事例には適合しない指標であるため、推計を行わなかった。指標 12 のバイオエネルギー部門の雇用も、GJ あたり総雇用発生数 (12.1)、GJ あたり技能職従業員数 (12.2)、GJ あたり一時雇用労働者数 (12.3) の3つの指標に分けられる。京都市の BDF 事業に携わる職員数は合計 6 名、うち本庁所属で他業務と兼務する職員が 2 名、専属スタッフが 4 名で、全員が常時雇用となっている⁽¹⁰⁾。指標 16 の労働災害、疾病、死亡件数については、京都市がプラントの操業を開始して以来、大きな労働災害等は発生していないため、ゼロとした。

第6表 計測結果(社会分野)

指標	単位	数値
11.1 バイオエネルギー部門で支払われた賃金	1000円	9,338.7 (1)
11.2 バイオエネルギー生産物の取引、物々交換、自家消費による純収入	—	N/E
12.1 GJあたり総雇用発生数	人/TJ	0.00012 (2)
12.2 GJあたり技能職従業員数	人/TJ	0.00008 (3)
12.3 GJあたり一時雇用労働者数	人/TJ	0.00000 (4)
16. 労働災害、疾病、死亡件数	件	0 (5)

注1 2010年値、職員6人(うち専属スタッフ4名)である。

2 職員合計6名である。

3 職員4名である。

4 全員常時雇用である。

5 これまで重大事故はない。

(3) 経済分野

経済分野の指標に関しては、指標 17 から指標 24 までの全ての指標の評価を行った (第7表)。これらの指標も細分化されており、合計 19 のサブ指標が存在する。本研究では、このうち京都市の事例には適さないサブ指標を除き、合計 12 の指標の計測を行った。ここでは環境分野の指標同様、推計した指標のうち一部のみを解説する。

第7表 計測結果(経済分野)

指標	単位	数値
17.1 原料種・農家ごとのバイオエネルギーの原料生産性	トン/ha	N/E
17.2 原料種・技術ごとのバイオエネルギー製造生産性	MJ/L-廃油	33.9
17.3 面積あたり、年あたりのバイオエネルギー最終生産物の量、発熱量	トン/ha	N/E
17.4 バイオエネルギー単位あたりの生産コスト	円/L-BDF	133.5
18.1 原料生産に関する純エネルギー収支	---	N/E
18.2 燃料製造に関する純エネルギー収支	---	4.2
18.3 バイオエネルギーの使用に関する純エネルギー収支	---	N/E
18.4 ライフサイクルにおける純エネルギー収支	---	N/E
19 バイオエネルギー生産物の取引、物々交換、自家消費による粗付加価値	円/L-BDF	4.4 (1)
20.1 化石燃料の代替	GJ/年	38,343.2
20.2 伝統的バイオマス利用の近代的エネルギーへの転換	---	N/A
21.1 バイオエネルギーに関する従業員のうち訓練済み従業員数	---	0.67 (2)
21.2 バイオエネルギー部門で失業した総数のうち、再就職者の割合	---	N/A
22. エネルギー多様性(ハーフィンダール指標)	---	0.73
22. エネルギー多様性(バイオエネルギーがない場合のハーフィンダール指標)	---	0.86
23.1 流通ルートの数	本	2
23.2 流通ルートの容量	MJ/年	0
23.3 それぞれに関するバイオエネルギーの割合	---	100%
24.1 バイオエネルギー使用拡大の余地に関する容量割合	---	11.1
24.2 バイオエネルギーと代替燃料の転換に関する柔軟性割合	---	9.4%

注1 便益には清掃工場における廃油処理コスト削減分(50円/廃油L)を含む。

2 訓練された職員4名をもとに算出した。

第8表 指標18 純エネルギー収支の推計

	単位	数値
廃油回収時のエネルギー投入	GJ/年	627.1
廃油回収時のエネルギー産出	GJ/年	N/E
18.1 原料生産時の純エネルギー収支	----	N/E
製造プラントの建設・設備製造のエネルギー投入	GJ/年	1,171
製造時のエネルギー投入(廃油単位あたり)	GJ/t-廃油	9
廃油投入量	t/年	1,905
製造によるエネルギー生産	GJ	17,602
製造過程における総エネルギー投入	GJ/年	18,773
製造過程における総エネルギー産出	GJ/年	78,730
18.2 製造過程における純エネルギー収支	----	4.2
18.3 使用時における純エネルギー収支	----	N/E
18.4 ライフサイクルにおける純エネルギー収支	----	N/E

寺川(2009)および寺川・東野(2008)から一部データを引用したもの。

第8表は指標18 純エネルギー収支の推計値を示したものである。このうち網掛けをした数値については、寺川(2009)および寺川・東野(2008)から引用した数値である。18.1 原料生産時の純エネルギー収支については、廃油回収時のエネルギー投入と産出の比で示される指標であるが、京都市の事例の場合、廃油回収時のエネルギー産出というのは概念的に想定しにくいので、このサブ指標については計測をしなかった。また、18.3 使用時における純エネルギー収支については、寺川(2009)において、BDFプラントから市バス営業所への輸送にかかるエネルギー投入量を計算していないため、本研究においても計測しなかった。その結果、実際に推計したのは指標18.2の製造過程における純エネルギー収支のみとなり、指標18.4 ライフサイクルにおける純エネルギー収支も計測しなかった。

第9表 指標19 粗付加価値の推計

	単位	数値
BDF生産量	L-BDF	1,405,761
交通局へのB20販売価格	yen/L-B20	85 (1)
中間投入額総額	1000円	187,685 (2)
BDF単位あたり中間投入額	円/L-BDF	134 (3)
清掃工場における廃油処理コスト削減(廃油単位あたり)	円/L-廃油	50 (4)
廃油回収量	L-廃油	1,486,723
BDF生産による廃油処理コスト削減(総額)	1000円	74,336
清掃工場における廃油処理コスト削減(BDF単位あたり)	円/L-BDF	53
19 粗付加価値	円/L-BDF	4.4 (5)

注1 2010年の値.

2 2010年, B20用の軽油購入費用含む.

3 軽油の購入費用含む.

4 京都市調べ.

5 清掃工場での処理費削減分を含む.

第9表は、指標19 粗付加価値の推計手順を示している。京都市環境局が交通局へのB20の売り渡し価格は2010年時点で85円/Lであり、一方、BDFの生産費用は人件費およびB20に混合する軽油の購入費用も含めて134円/Lとなっている。また、京都市の担当者によると、清掃工場に廃油が持ち込まれると、この処理に1Lあたり50円ほどの処理費用がかかっており、これがBDF製造のために回収されることによってこの処理費用が軽減されるということである。したがって、本研究では廃油1Lあたり50円をBDF1Lあたりに換算した53円をBDFの生産費用から差し引いて計算した。

5. 適用の課題

前節では、京都市のBDF生産事例におけるGBEPのバイオエネルギー持続可能性指標の試行的適用について解説した。ここでの適用の目的は京都市のBDFを評価することではなく、試行的な適用からGBEP持続可能性指標の課題点や日本のバイオエネルギー生産事例への適用の際に考慮しなければならない点を明らかにすることである。本節以降では、これらの点に関して検証していく。

まず、京都市のBDF生産への試行的適用から抽出された課題について2点指摘する。第1は、国および地域レベルでの集計の問題である。今回のケースは京都市によるBDF生産事業という単一事例での評価に対してGBEP持続可能性指標の適用を行った。これは、京都市を対象とした地域の中では、バイオ燃料を生産する事業者が京都市とレボインターナショナル社という民間企業の2つしかなかった。そのうち自治体で行っている事例のほ

うが、予算額などのデータ取得が容易であると考え、京都市を評価対象とした次第である。したがって、評価対象はあくまで1プラントであり、その意味からはミクロ的な事例への適用ということになる。本来、GBEP 持続可能性指標は国や地域といったマクロ的な対象範囲を念頭に置いているため、指標の適用には国もしくは地域レベルでの統計データが必要であり、これには個別事例から取得したミクロ統計の積み上げが必要になる。しかしながら、個別事例のミクロ統計をどのようにマクロ統計に加工していくのかについては、集計方法や対象範囲、どこまで細かなミクロデータから積み上げを行うのかなど、多くの課題が残されている。

第2に、データ収集の問題がある。今回のケースは京都市からデータを提供してもらった。京都市を事例に選択した理由は、前述のとおり、データ取得の容易性が大きい。特に民間企業の場合は売り上げやコストなどのデータの提供に消極的な場合もある。例えば、指標1 ライフサイクル温室効果ガス排出量の評価には、LCA による分析結果が不可欠である。本研究における試行的事例の場合は幸い既存研究からデータを入手することができたが、それができない場合には自らが LCA を実施する必要がある。しかしながら、GBEP の持続可能性指標のユーザーは主に政策立案者や行政官を想定しており、必ずしも LCA に精通した者をターゲットにしているわけではない。現在は LCA についても簡単に分析できるソフトも開発されているが、事例ごとに配分方法や生産境界の設定を行わなければならない、これらに専門的知識が必要となり、誰でも評価できるというわけにはいかない。また、LCA を行うにあたって、そのバックデータとして多くの統計情報や生産プラントや原料生産の実測データが必要となり、これらの蓄積がない場合には評価が難しくなる。

このように、評価に必要なデータが得られないと、GBEP の持続可能性指標を適用できないことも想定される。したがって、バイオマスやバイオエネルギーの統計データを整備する必要がある、特に温室効果ガスやその他汚染物質の LCA や土壌関連データといった自然科学系のデータ蓄積は、専門家の知識や技術が必要であるため、十分な準備が必要と思われる。

6. 日本で適用する場合に考慮すべき点

(1) 日本で導入すべき評価項目

次に、GBEP 持続可能性指標を日本の事例に適用する場合に考慮すべき点について、バ

バイオ燃料だけでなくバイオエネルギー全体を踏まえ検討する。これについては、日本特有の考慮すべき事項と日本特有の課題の 2 つに分けて考える。

日本が GBEP の持続可能性指標を用いてバイオエネルギーの持続可能性を評価する際、独自に考慮すべき点は 3 点ある。廃棄物からのバイオエネルギー生産である。日本におけるバイオエネルギー生産の大きな特徴として、廃棄物や副産物を原料にしたバイオエネルギー生産事例が多いという点を挙げることができる。本章での試行的適用の対象にした京都市の BDF 生産事例においても、廃食用油を原料としていることから、例えば指標 2 土壌質や指標 8 バイオ燃料の原料生産に伴う土地利用と土地利用変化など、一部の指標は評価の対象から外された。廃棄物を原料とする場合には、廃棄物の定義、原料収集方法やバイオエネルギー原料として利用しない場合の利用または処理方法など新たな評価項目を加える必要があるだろう⁽¹¹⁾。

2 点目として、地域振興・林業振興との関係を挙げることができる。日本において各地でバイオエネルギーの取組を行っている背景には、林業の衰退、過疎や限界集落への歯止めといった、林業振興、地域振興を背景として実施されている場合が多い。特に日本は国土の 70% が森林で覆われ、木質バイオマスについては豊富に賦存する。かつては林業で素材生産が盛んに行われていた地域においても、現在は価格の安い輸入材に押され多くの地域で素材生産は減少している。結果として、山林が適切な管理がなされないまま放置され、鳥獣害や台風などの自然災害の発生原因にもなっている。このような状況の中、バイオエネルギーへの利用を行うことで林業を再構築し、さらには山林を適切な管理へつなげようという意図は、多くの取組で共通するところである。したがって、日本では地域振興や林業振興にどのように結びつくかという点もバイオエネルギーの持続可能性評価で非常に重要な評価視点と言える。これらの指標は社会分野の指標として新たに加えるべきである。

最後 3 点目に、エネルギー安全保障、エネルギー源の多様性の重要性を指摘できる。2011 年 3 月の東日本大震災を契機としたエネルギー供給の停滞や福島第 1 原子力発電所での事故を契機に、原子力発電からの脱却やエネルギー供給を一極集中型から分散型への転換、再生可能エネルギーへ転換という主張が目につくようになってきた。その際、原子力に代わるエネルギー源として、太陽光や風力といった再生可能エネルギーとともにバイオエネルギーも取り上げられている。太陽光発電や風力発電は、天候や風向きに大きく影響される変動型の再生可能エネルギーであるのに対し、木質をはじめとするバイオエネルギーは安定的に供給が可能な非変動型再生可能エネルギーである。これらエネルギー源の特性を

考慮し、最適なエネルギーミックスを達成することが現在の日本には求められている。このうち、既存の GBEP 持続可能性指標で考慮されているエネルギー安全保障関連の指標は、指標 22 エネルギー多様性、指標 23 バイオエネルギー供給のための社会資本および物流と、指標 24 バイオエネルギー利用の容量と自由度の 3 つの指標である。これら 3 つの指標はどれも日本のバイオエネルギー供給の持続可能性評価にも重要であり、不可欠な指標と考えられる。日本では、これらの指標をより深く掘り下げて持続可能性の評価を行うことが求められる。特に指標 19 のエネルギー多様性では、国全体のエネルギー供給に占める割合を指標化しているが、この他大規模なエネルギー供給施設から小規模な施設までの規模の多様性、バイオエネルギーの中でも木質バイオマスから家畜ふん尿の利用までの原料の多様性、薪やチップといった直接燃焼からバイオマス発電までの利用形態の多様性など、さらに深く踏み込んだ持続可能性評価も重要と考えられ、日本においてバイオエネルギーの持続可能性を考慮する際には、これらの点にも十分配慮する必要があると考える。

（２）日本特有の課題

バイオエネルギーの持続可能性評価を行う上で、検討しなければならない日本特有の問題としては、2 点挙げられる。1 つにバイオエネルギーの取組の多様性を挙げることができる。先に多様性の評価が重要である点を指摘したが、日本のバイオエネルギーの利用は、薪や木炭など古くから行われている熱利用から始まり、林地残材や建築廃材のチップ燃料化、家畜ふん尿からのメタンガスなど、非常に多岐に渡る。さらに、規模の面からも、多くが非常に小規模な施設でエネルギー供給範囲も農家 1 戸のみといった自己完結型の非常に小規模なものから、地域全体に熱供給を行う大規模なものまで非常に多様性がある。前述のとおり、GBEP の持続可能性指標は国または地域を対象とした評価を想定しているため、これらの多様性の高い取組をいかに集計し、マクロ指標にするのかという点は、日本の場合他国よりも重要な課題と言える。

2 点目に、輸入されるバイオマスまたはバイオエネルギーに関して、注視すべきという点である。日本ではエネルギーの大部分を輸入に依存しており、バイオエネルギーに関しても、原料または現物の状態で輸入されることが多くなっている。2010 年度の目標として、輸送用燃料に 200 万 KL（原油換算 50 万 KL）のバイオ燃料を導入することが掲げられており、このうち 84 万 KL（原油換算 21 万 KL）を石油業界が供給することとなっていた。石油業界では、北海道の 2 か所のバイオエタノール製造事業所からの供給分 3 万 KL（原

油換算 7500KL)を除き、残りは全てブラジルなどから輸入されたバイオエタノールを加工の上、国内で流通させている。GBEPの持続可能性指標においても、当該国が輸入するバイオエネルギーについては、原産国での影響も評価できるよう工夫がなされている。特にエネルギーの輸入割合が高い日本では、輸入する原産国での原料作物またはエネルギー自体の生産について、持続可能性を確保するように配慮することが求められるだろう。

7. GBEP 持続可能性指標の今後の課題

次に、GBEPの持続可能性指標自体が有する課題について言及する。これについては、一部GBEP内での持続可能性指標策定段階でも議論されているものを含むが、今後検討すべき課題は大きく4つ挙げることができる。まず、この指標をどのように政策に活用すべきかという点である。GBEPの持続可能性指標は、今後の方向性や限界点を示すものでも基準や法的義務を負わせるものでもなく、あくまで自発的な利用を意図している(GBEP(2011), p.11)。GBEPでは持続可能性指標の主な利用者層を政策立案者とその他利害関係者(policy-makers and other stakeholders)としており、それぞれのバイオエネルギー部門が持続可能な発展の国家目標を達成するための一助となることを意図して持続可能性指標を策定しているのである(GBEP(2011), Acknowledgements)。このことから、GBEP自らが持続可能性指標を用いて何らかの国際的な枠組みを提供したり基準を作ったりすることではなく、各国の政策担当者がこの指標を政策に何らかの形で活用することを期待していると言える。したがって、持続可能性指標を用いてどのように政策に活かすかは、それぞれの国または地域の政策担当者にゆだねられているのである。しかし、各国で独自にバイオエネルギーの持続可能性を追求するだけなら国際的合意を経たGBEP持続可能性指標の存在意義は大きいとは言えない。このため、各国でこの指標をいかに政策に活用するか、そして、GBEP自身が各国に対して持続可能性指標の活用を促進していくかが今後の課題として挙げられる。

第2の課題として、国・地域による特有の事情をいかに反映させるかという点である。日本のバイオエネルギーを取り巻く事情を考慮して検討した結果は前節で説明したが、これと同様の検討は利用する各国で独自に行われるべきことである。GBEPの持続可能性指標はこれを用いて各国のバイオエネルギーを比較することは目的としていないことから、国または地域の事情を反映させ、それぞれの政策担当者が利用しやすいように改変する自

在性を有すると言える。また、例えば、一国で生産されるバイオエネルギーAとBのうち、Aは非常に持続可能性に配慮した生産方法を採用しているが、一方のBは持続可能性の低い生産方法が採られているとしよう。このような場合、国全体としては評価が平均化され、評価の善し悪しが上手く表れないという問題がある。これは国や地域を対象としたマクロ的な評価の際に生じる特有の課題であり、その解決方法としては、それぞれのエネルギー種ごとに評価を行ったり、地域を細分化した評価を行ったりする必要がある。しかしながら、その一方で、あまりに地域特有の事情を反映させると、国際的な合意を得たGBEPの持続可能性指標自体の意義が失われ、その国・地域だけにしか適用できない独自の持続可能性指標と化してしまう。このことから、国または地域特有の事情をGBEPの持続可能性指標にどの程度反映させるべきなのか、またどの程度反映させられるのかという点についても検討が必要と思われる。

第3に、時間軸の問題である。バイオエネルギーの生産技術は日々進歩し、一時点での持続可能性評価がその後長期に渡って同じ評価であることは少ない。したがって、GBEPの持続可能性指標によるバイオエネルギーの持続可能性評価も一時点で行うだけでなく、定期的・継続的な再評価が求められる。この再評価をどのような期間で行うべきなのかについては、GBEPのレポートでも触れられていない。著者としては、すくなくとも数年おきに持続可能性評価を再度行うことが望ましいと考えている。一方で、持続可能性は長期的な視点に立った評価が求められることが多く、あまりに短期的な評価を繰り返すことが本当の意味での持続可能なバイオエネルギーの生産に結びつくのかといった疑問も残る。この問題については、今後実際にGBEPの持続可能性指標が各国において適用され、データの取得やバイオエネルギー生産の状況変化の経過などを総合的に判断して検討すべき課題である。

第4に、GBEP持続可能性指標の評価に必要な膨大なデータをどのように体系的に整理すべきかという点である。GBEPの持続可能性指標の評価に必要なデータは多岐にわたる。例えば、指標1 ライフサイクル温室効果ガス排出量の指標推計のためには、第10表に掲げたデータを入手または算出することが必要となる。1つの指標推計するためにこれだけのデータが必要となるため、24指標全ての評価を行うためには、さらに膨大なデータが必要となる。このような状況に対し、日本の場合、バイオエネルギーに関する国や地方の統計データは非常に限られている。既存の国家統計の中でバイオエネルギーを明示的に取り扱っているものは皆無に等しい。したがって、現時点では日本において体系的に整備され

第10表 指標1 ライフサイクル温室効果ガス排出量の推計のために必要なデータ
指標項目 単位

廃油回収にかかるデータ	
廃食用油回収量(実測値)	t
廃食用油回収量(寺川(2009)での設定値)	t
食用油消費量(寺川(2009)での推計値)	t
廃食用油回収率(実測値からの推計)	%
廃食用油回収率(寺川(2009)の推計値からの推計)	%
BDF製造量	
実測値, 容量表示	KL/年
実測値, 熱量表示	GJ/年
寺川(2009)での設定値, 容量表示	KL/年
寺川(2009)での設定値, 熱量表示	GJ/年
BDF製造にかかる温室効果ガス排出量(排出総量)	
廃食用油回収用トラックの走行	t/年
トラックの製造	t/年
BDF製造施設の建設	t/年
BDF製造設備の製造	t/年
BDF製造工程	t/年
BDF消費	t/年
BDF製造にかかる温室効果ガス排出量(BDF熱量あたり)	
廃食用油回収用トラックの走行	kg/GJ = g/MJ
トラックの製造	kg/GJ
BDF製造施設の建設	kg/GJ
BDF製造設備の製造	kg/GJ
BDF製造工程	kg/GJ
BDF消費	kg/GJ
軽油製造にかかる温室効果ガス排出量(排出総量)	
軽油のライフサイクルGHG排出量(well-to-tank)	t-CO ₂ /KL
BDFに代替される軽油量(容量表示)	KL/年
BDFに代替される軽油量(熱量表示)	GJ/年
軽油製造にかかる温室効果ガス排出量(軽油熱量あたり)	
ゴミ処理上における廃食用油処理	t-CO ₂ /年
軽油のライフサイクルGHG排出量(well-to-tank)	t-CO ₂ /年
軽油消費	t-CO ₂ /年

たバイオマスまたはバイオエネルギー関連統計データが存在しないことから、あらゆるデータを独自に収集する必要がある。バイオエネルギーに関するデータ収集は、GBEPでも持続可能性評価における重要な課題と認識されており、持続可能性指標のレポートでは、各指標の解説の中に「評価の実現性 (Practicality)」という項目を設け、必要となるデータとその入手方法について助言を行っている (GBEP(online1),)。その一方で、例えば指標1 ライフサイクル温室効果ガス排出量と指標4 大気有害物質を含む非温室効果ガスの排出量のように、指標同士で使うデータが同じ場合もある。このような場合に同じデータを流用できるよう、整理しておくことが求められ、そのためにはそれぞれの指標に必要なデー

タを体系的に整理するツールを用意する必要もあるだろう。これについては、具体的には例えば国連で開発された環境会計ツールである環境経済統合勘定（System of Economic and Environmental Accounting: SEEA）を適用することが考えられる。

8. おわりに

本章では、日本におけるバイオエネルギー生産への GBEP 指標適用の第一歩として、京都市における BDF 生産を取り上げ、GBEP の持続可能性指標を用いて持続可能性評価を行うことで、日本の事例に GBEP 持続可能性指標を適用する際の課題点を抽出し、GBEP 持続可能性指標が有する課題についても言及した。

京都市の BDF 生産事例への適用から、国および地域レベルでの集計の問題とデータ取得の問題を指摘した。また、日本で GBEP 持続可能性指標を適用する場合、地域振興にいかに関与しているのかという評価視点を加えること、そしてエネルギーのベストミックスについて何らかの示唆を提供できるようにすべきことを提唱した。これらの点に加え、規模やバイオエネルギーの種類に多様性の高さ、輸入されるエネルギーの評価という日本特有の事情を反映することで、日本におけるバイオエネルギーの事情を考慮したより適用可能性の高い指標となりうるだろう。

最後に、GBEP 持続可能性指標の今後の課題として、政策への適用、国・地域の特有の事情の反映の余地、時間軸の問題、データ整理ツールの必要性の4点について指摘した。これらの点については、今後実際に GBEP の持続可能性指標が各国において適用され、データの取得やバイオエネルギー生産の状況変化の経過などを総合的に判断して検討すべき課題である。また、4点目の統計データを体系的に整理できるツールについては、具体的に SEEA の適用が想定されることを指摘した。

注

- (1) 本章は、著者が第1回 GBEP 能力開発に関するワーキンググループ会合（2011年11月16日、於：東京）において報告した内容に基づいて執筆したものである。GBEP 会合での著者のプレゼンテーションファイルは GBEP のウェブサイト（<http://www.globalbioenergy.org/events1/gbep-events-2011/working-group-on-capacity-building/en/>）を参照のこと。

- (2) 京都市 BDF 生産の取組の概要については、著者が 2011 年 7 月に行った現地調査とその後の補足調査による情報をもとにしている。
- (3) これは運搬料込みの価格である。
- (4) 年度ごとに価格交渉しているが、これまで大きな変動はない。
- (5) 家庭用廃食用油の回収は、住民がペットボトルなどで持参した廃食用油を回収用ポリタンクへ移して行われる。この方式のほうが単にペットボトルを置いていくよりも会話の機会が増えると思われる。
- (6) 寺川（2009）においてもカーボンニュートラルを考慮した値と考慮しない値を算出しているが、ここでは BDF 消費段階の温室効果ガス排出量のうち廃食用油由来の炭素のみを除外している。本研究では、寺川（2009）における廃食用油由来の炭素の算出法が把握できなかったため、BDF 消費段階全ての温室効果ガス排出量を除外した。
- (7) 正確には取水量と供給量は異なるが、データ制約の関係から、ここでは便宜的に給水量を取水量とした。
- (8) GBEP の持続可能性指標において、TARWR を求める背景として、降水量が極端に少ない中で地下水に依存した原料作物の生産を行うことは、持続可能なバイオ燃料生産とは言えないと想定していることがあり、十分な降雨があり、地下水が潤沢に涵養される状況下においては、推計にあまり大きな意味はない指標と言える。
- (9) 京都市（online）に計上されている人件費は本庁勤務の管理職分も含まれているが、他業務と兼務するこれらのスタッフの人件費については、エフォート率で配分しているとのことである。
- (10) これら職員は 1 名を除いて嘱託職員という身分であるが、一時的、流動的な雇用形態ではなく長期にわたって安定的に雇用されている状況に鑑み、常時雇用として扱った。
- (11) 指標 1 の評価のための基礎情報を提供する「GBEP バイオエネルギーの GHG ライフサイクル分析共通方法論フレームワーク」（GBEP（2009））では、廃棄物をどのように定義したのかについても確認する項目がある。

〔引用文献〕

GBEP (2011) “The Global Bioenergy Partnership Sustainability indicators for bioenergy First Edition”.

GBEP (2009) “Common Methodological Framework for GHG Lifecycle Analysis of

Bioenergy Version 1”.

京都市水道局（online）『京都市水道局ホームページ 京都市水道施設の現状』

<http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000008776.html>（2012 年 1 月 6 日アクセス）

京都市（2011）『平成 22 年度 廃食用油燃料化施設稼働状況（年報）報告』。

京都市（online）『京都市事務事業評価ホームページ 平成 23 年度評価結果 使用済てんぷら油回収事業』

<http://www.city.kyoto.jp/somu/gyokaku/hyouka/siryo/h23/link09/1002011.pdf>（2012 年 1 月 6 日アクセス）。

寺川卓志・東野達（2008）「京都市における廃食用油の BDF 利用システムのライフサイクル評価」『エネルギー・資源学会論文誌』29(6), pp.1-7。

寺川卓志（2009）「京都市における廃食用油リサイクルシステムのライフサイクル評価」『京都大学修士論文』。

第6章 国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）のバイオエネルギーの持続可能性指標における包括的評価手法の開発⁽¹⁾

林 岳

1. はじめに

近年、社会経済や環境への負の影響を軽減するためのバイオエネルギーの持続可能性への関心が高まっており、EUにおける再生可能エネルギー指令（RED）、英国の再生可能輸送燃料義務（RFTO）、オランダの持続可能なバイオマス生産（PSB）、ドイツにおける炭素認証に関する国際機関（ISCC）など、いくつかの国では自国で生産・消費されるバイオマスの認証制度を導入している。持続可能なバイオ燃料円卓会議（RSB）や責任ある大豆生産円卓会議（RTRS）、よりよいさとうきびイニシアティブ（BSI）、そしてスウェーデンのエネルギー会社が進めるSEKABやノルウェーのエコラベルであるThe SWANなど、いくつかの民間主体が自発的に持続可能性認証制度を自身のバイオエネルギー製品に導入している（van Dam(2008), Scarlat and Dallemand(2011)）。

国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）もまた、2011年にバイオエネルギーの持続可能性指標を公表した。これは、バイオエネルギーの持続可能な生産と利用を評価する指標として、世界各国の政府レベルで合意された初めての指標である（GBEP(2011), p.11）。現在、GBEPでは指標の開発段階から普及段階へと移行し、指標を用いた評価の実施により得られるデータと経験を共有しようとしている。しかしながら、開発段階におけるいくつかの重要な課題が未だ議論されずに残されている。その1つは「持続可能性」の定義である。GBEPは科学的根拠、実用性、持続可能性との関連性の3点に基づいて指標を選択してきた。それでもなお、指標の中での持続可能なバイオエネルギーがどのようなものかは明確ではない。Mendoza and Prabhu (2003)は、あらゆる場面で通用する持続可能性概念を構築することは困難であると主張している。特に、GBEP指標は、国家・地域レベルで適用される点、持続可能性の3つの柱である環境、経済、社会を考慮しつつバイオエネルギーの全ライフサイクルを網羅している点、といった他の指標にはない特徴を有するため、独自の持続可能性評価の枠組みを構築する必要性が強く求められる。そして、もう一つの未解決の課題は、それぞれの指標を集計することができず、指標群は包括的評価手法とならないため、指標からは直接的にバイオエネルギーが持続可能なのか否かを直

接的に判断することができないという点である。したがって、指標を用いて持続可能性を判断するためには包括的評価手法を開発する必要がある。このような手法は政策担当者に有用な情報を提供し、バイオエネルギーの持続可能性を判断するのに有効な手法となる。

本研究の課題はバイオエネルギーの持続可能性を評価する GBEP の指標の包括的評価手法を開発することである。特に GBEP 指標をより利用しやすいものとするため、以下の 2 つの課題に取り組む。

- ・バイオエネルギーの持続可能性評価のための GBEP 指標を有効活用するためにどのような概念フレームワークが必要か。
- ・持続可能性を判断するためにどのように GBEP 指標を集計できるか。

持続可能性指標の理論的な背景は Martinet (2011)などで既に議論されているため、本研究の学術的な貢献は概念フレームワークを構築し、指標を数量化可能なスコアに集計することである。指標の集計には多基準分析 (MCA) を適用する。本稿の構成は以下のとおりである。第 2 節では持続可能性評価の概念的フレームワークについて解説する。第 3 節では指標の集計のための MCA について触れ、第 4 節では京都市におけるバイオディーゼル燃料 (BDF) 製造事業への GBEP 指標の適用事例に、開発された手法を試行的に適用した結果について解説し、第 5 節で結論をまとめる。

2. 概念的フレームワーク

(1) GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標

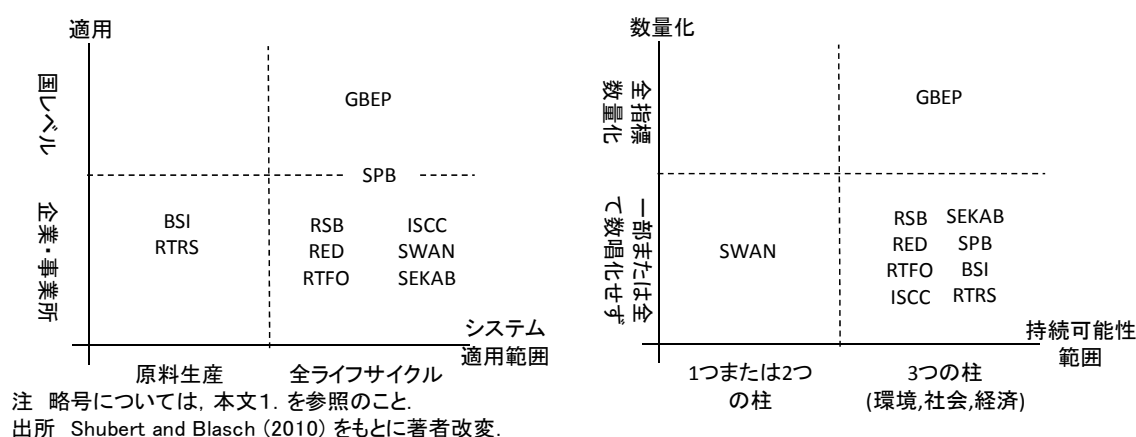
バイオエネルギーは地球温暖化防止の一手段と期待され、主に先進国を中心にここ 10 年ほどで生産が大きく拡大されてきた。しかしながら、2008 年に食料価格が高騰した際、バイオ燃料はその原因として非難された。さらに、バイオエネルギーの原料生産は環境や地球上の資源賦存に負の影響を与えている (Hein and Leemans(2012))。原料生産に伴う土地利用変化により、バイオ燃料は地球温暖化の軽減に貢献しないもしくは超長期の”償還期間”を伴ってのみ貢献する (Serchinger et al.(2008), Holtsmark(2010))。

これらの批判を受けて、GBEP は 2008 年より各国が持続可能なバイオエネルギーの生産・利用を評価、支援するためバイオエネルギーの持続可能性指標の開発に取り組み、2011 年に公表された。GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標の詳細については、第 4 章でも解説したが、その指標は 3 つの柱、環境、社会、経済に分類された 24 の指標か

ら構成されている。第1表には24の指標が掲げられている。GBEPの持続可能性指標は他の持続可能性指標と比べ独自の特徴を有する（第1図）。第1に、他の指標フレームワークに導入されている指標は大部分が記述的なもののなのに対し、GBEP指標は全ての指標が数量化される点である。第2に、他の指標フレームワークは企業・事業所レベルでの適用を想定しているのに対し、GBEP指標は国または地域レベルで適用することを意図している点である。第3に、GBEP指標は主に政策担当者による政策利用を意図して設計されている点である。

第1表 GBEP持続可能性指標一覧と比較対象

No.	指標名	単位	比較対象
1	ライフサイクル 温室効果ガス排出量	kg/GJ	化石燃料及び他のエネルギー
2	土壌質	パーセンテージ	他の農業生産活動
3	木質資源の採取水準	m3/ha/年, トン/ha/年	化石燃料及び他のエネルギー
環境 4	大気有害物質を含む非温室効果ガスの排出量	mg/ha, mg/MJ, パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
5	水利用と効率性	パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
6	水質	kg-N/ha/年, kg-P/ha/年	他の農業生産及び/または農用地の地域平均
7	生物多様性	km2, パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
8	バイオ燃料の原料生産に伴う 土地利用と土地利用変化	ha, パーセンテージ	石炭, 石油, ガス, ウランなどの化石燃料及び 伝統的バイオマス利用
9	新たなバイオエネルギー生産のための土 地分配と土地所有権	パーセンテージ	土地を必要とする他のエネルギー
10	国内の食料価格と食料供給	トン, 通貨単位, パー センテージ	土地の競合が生じるエネルギーまたは食料生 産に利用される他の投入物
11	所得の変化	通貨単位/家計/年, パー セント変化	他の農業部門, 化石燃料部門, 他のエネ ルギー部門
社会 12	バイオエネルギー部門の雇用	人, 人/MJ	化石燃料部門及び再生可能エネルギー部門
13	バイオマス収集のための女性・児童の不 払い労働時間	時間/週/家計, パー センテージ	伝統的バイオマス利用
14	近代的エネルギーサービスへのアクセス 拡大のためのバイオエネルギー	L/年, MJ/年, パーセ ンテージ	近代的エネルギー供給部門
15	屋内煤煙による死亡・疾病の変化	パーセンテージ	近代的エネルギー供給部門
16	労働災害, 死傷事故件数	件/ha, 件/MJ	化石燃料及び他のエネルギー
17	生産性	トン/ha, MJ/トン, トン /ha/年, USD/トン/MJ	化石燃料及び他の農業生産
18	純エネルギー収支	比率	化石燃料及び他のエネルギー, 下流での利用
19	粗付加価値	USD/年, パーセン テージ	全産業及びエネルギー
経済 20	化石燃料消費および伝統的バイオマス利 用の変化	MJ/年, USD/年	化石燃料及び他の再生可能エネルギー
21	職業訓練および再資格取得	%/年	化石燃料部門及び再生可能エネルギー部門
22	エネルギー多様性	指数(範囲: 0-1)	他のエネルギー
23	バイオエネルギー供給のための社会資本 および物流	数, MJ/年	化石燃料及び他の再生可能エネルギー
24	バイオエネルギー利用の容量と自由度	指数	化石燃料及び他のエネルギー



第 1 図 持続可能性評価手法の分類

(2) 本研究への GBEP 指標の適用

Barrera-Roldan and Saldivar-Valdes (2002)は指標を適用して持続可能な発展を評価する際の 3 つの問いを以下の 3 つ挙げている。(1)何を数量化しているのか、(2)持続可能な発展を把握するために指標を用いることにどのような意義があるのか、(3)強い持続可能性と弱い持続可能性のどちらの持続可能性を想定しているのか。これらの問いを GBEP 指標に関連づけると、(2)の質問については、GBEP が既に「指標はより効率的なエネルギーの利用と再生可能エネルギーのより広い利用を通じて経済成長を遂げるという国家目標を達成することの一助となる」と回答していることから (GBEP(2011), p13), 本研究では残りの持続可能性の定義と指標での数量化対象に関する 2 つの問いについて検討する。

初めに持続可能性の定義に関する問いについて、GBEP(2011)では、持続可能な発展について、「環境と開発に関する世界委員会」(通称：ブルントラント委員会)、アジェンダ 21、リオ宣言、ヨハネスブルグ実行計画、持続可能な発展委員会 (CSD) を参照しており、「持続可能な発展とは、現世代だけでなく将来世代のニーズも満たすためにもたらされる変化」と定義している (GBEP(2011), p12)。さらに、GBEP(2011)では、指標は「方向性や閾値、限界を示すものではない」と明言している。このことから考えると、GBEP 指標は現在の状況からの変化に着目することでバイオエネルギーの持続可能性を評価するもので、これが(1)の問いに対する回答となる。さらに問い(2)に関しては、閾値を持たない持続可能性の定義は明らかに弱い持続可能性に基づく評価と言える。

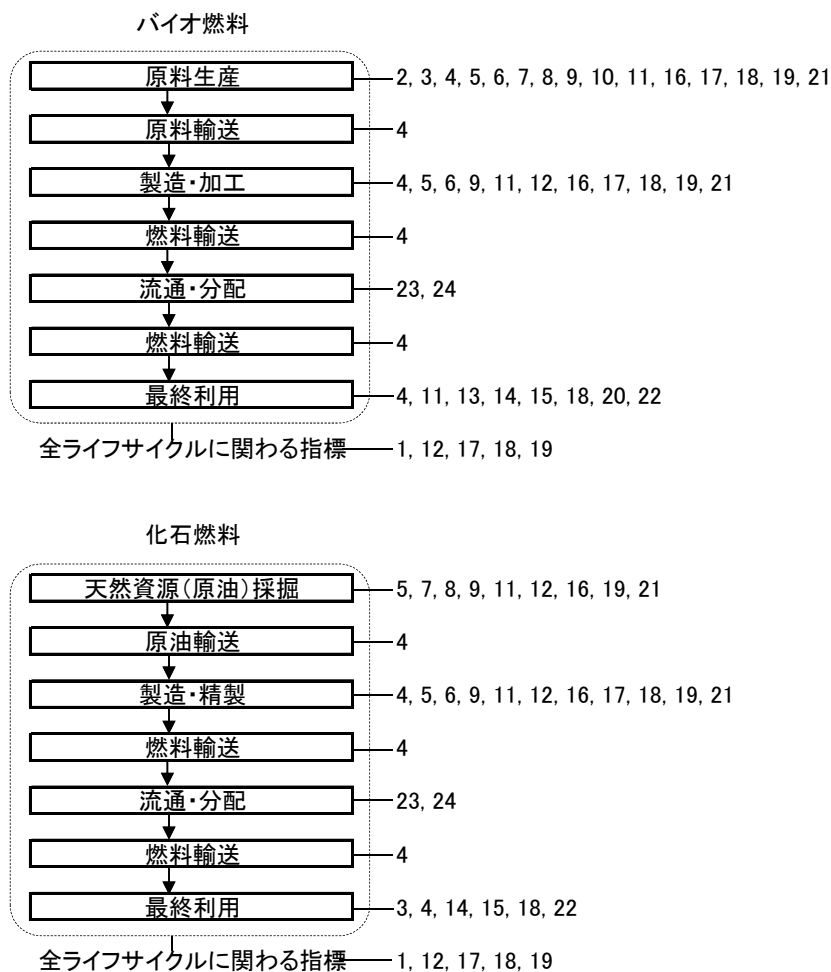
ただし、上記の定義からは指標は「変化前後」を比較して評価すべきだが、必ずしも変化前後の比較を意図して設計されていない。第 1 表に示されたとおり、各指標は比較対象

を有しており、この比較対象は大きく化石燃料との比較、他のエネルギーとの比較、伝統的バイオマスとの比較、他の農業生産との比較の4つに分けられる。したがって、GBEP指標は特に上記の4つの項目との比較において、バイオエネルギーの導入が国または地域の持続可能な発展に貢献する何らかの変化をもたらすか否かを評価している。変化を基準に持続可能性を評価することは、比較点から持続可能な発展に向かっているのかもしくは持続可能な発展とは逆方向に向かっているのかを把握するのみで、持続可能性の絶対水準は考慮されない。これがGBEP指標の持続可能な発展の数量化に関しての1つの問題点と言える。

次に、上記比較対象の4つの項目の中で、バイオエネルギーは化石燃料の代替エネルギーとして考えられており、特に化石燃料との比較が重視される。バイオエネルギーと化石燃料との持続可能性の比較のためには、そのライフサイクルを把握することが有効である。第2図はバイオエネルギー（バイオ燃料）と化石燃料のライフサイクルを示したもので、さらにGBEP指標がそれぞれのライフサイクルのどの段階に適用されるのかも示されている。前述のとおり、GBEP指標はその全てが化石燃料と比較を想定しているわけではない。例えば、バイオ燃料と化石燃料とのライフサイクルの大きな違いは原料生産と資源採掘の段階である。この2つの異なる段階の比較は容易ではなく、GBEP指標でも原料生産段階は化石燃料との比較ではなく、他の農業生産との比較を意図している。このように、GBEP指標は全体としては化石燃料との比較を想定しながらも、個別の段階ではそれ以外のものとの比較もなされており、GBEP指標が何に対しての持続可能性を評価しているのかが不明確となっている。このことは利用者が評価結果を理解する上での妨げになると思われる。これがもう1つの問題点である。

指標に基づく評価を扱いやすくするため、本研究では何を数量化するのか、何と比較するのかという2つの視点により、GBEP指標を5つのグループに分類した（第2表）。第1のグループ（グループA）は、絶対値を数量化する指標である。ライフサイクル温室効果ガス発生量（指標1）、死傷事故・労災件数（指標16）などがこのグループに含まれる。第2のグループ（グループB）は全バイオエネルギー中、土壌質の維持（指標2）、ILO原則（指標12）など特定の持続可能性条件を満たすものの絶対数または割合を測る指標グループである。第3のグループCは、特定の効果の貢献度を測る指標群で、例えば原料生産への単収増加、廃棄物利用、劣化した土地の活用がどの程度原料生産に貢献しているかを示すもの（指標8）などがある。そして、第4グループ（Dグループ）は、何らかの全体

数に占めるバイオエネルギーの割合を測るもので、例えば全投入量に占めるバイオエネルギーの割合（指標 3）、全汚染物質排出量に占めるバイオエネルギー由来の割合（指標 6）、国の GDP に占める（指標 19）。最後の第 5 グループ（グループ E）はバイオエネルギー生産によってもたらされた変化を計測する指標グループで、例えば所得の増加（指標 11）、近代的バイオエネルギーへのアクセスの増加（指標 14）、化石燃料の代替（指標 20）などがある。



注 表中の番号はGBEP指標の番号を表す。第1表を参照のこと。
 化石燃料のシステム境界はGnansounou et al (2009)による。
 出所 著者作成。

第2図 バイオ燃料と化石燃料のライフサイクル及び関連GBEP指標

第 2 表が示すとおり、何を数量化するのか、何と比較するのかという両視点による指標は広く多様である。このことから、持続可能性の意味するところは各指標の定義に依存し、GBEP 指標の不整合性の原因となっている。

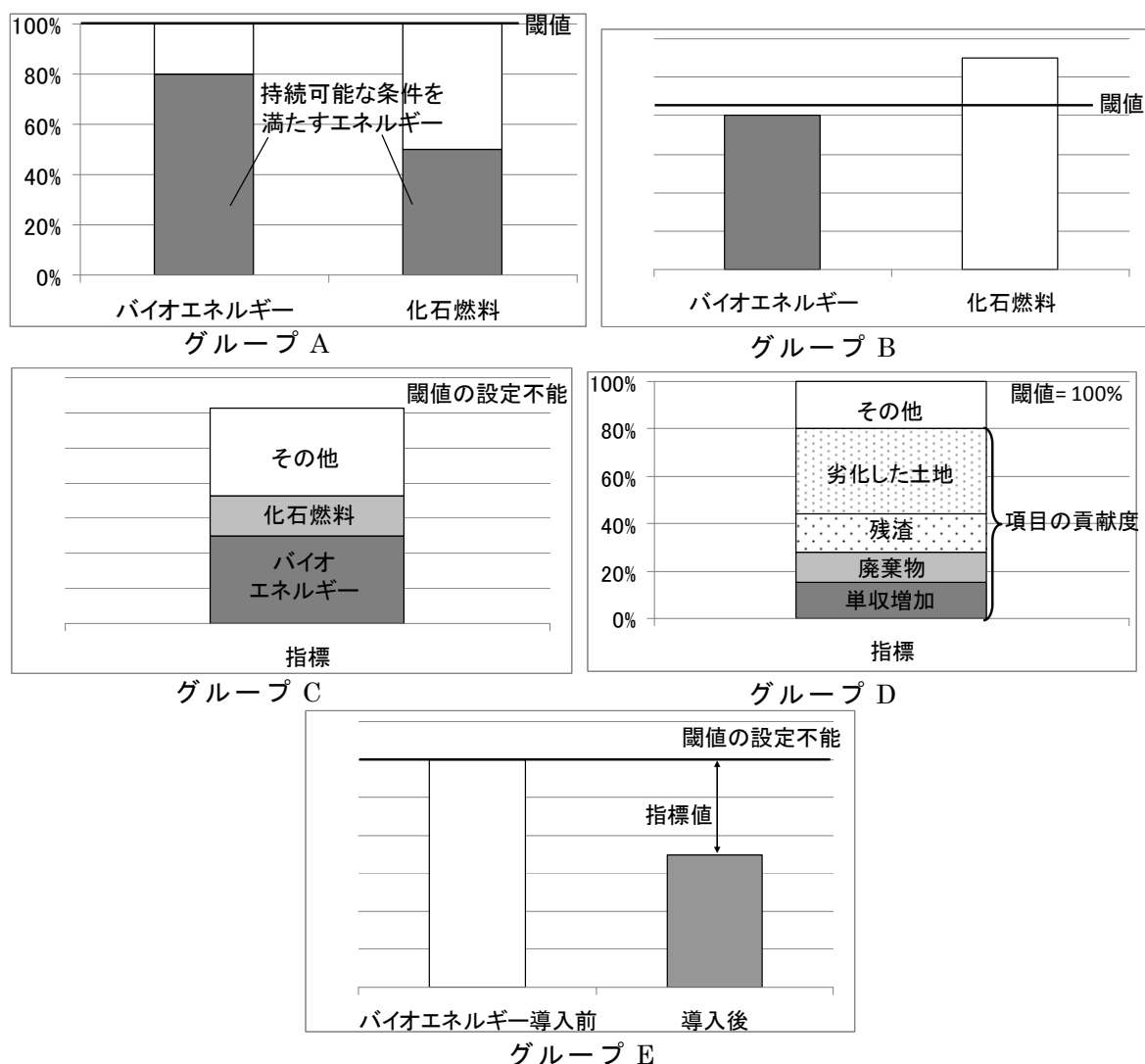
第2表 計測対象と比較対象によるGBEP指標の分類

グループ	定義	化石燃料との比較	他のエネルギーとの比較	他の農業生産との比較	伝統的バイオマス利用との比較
A	絶対値を計測する指標	1, 3, 4, 7, 14, 15, 16, 18, 19, 22, 23	1, 3, 4, 7, 14, 15, 16, 18, 19, 22, 23	17	8
B	全バイオエネルギー中、特定の持続可能性条件を満たすものの絶対数または割合を測る指標	9, 12, 21, 24	9, 12, 21, 24	2	
C	特定の効果の貢献度を測る指標				8
D	何らかの全体数に占めるバイオエネルギーの割合を測る指標	3, 5, 7, 9, 19, 23	3, 5, 7, 9, 19, 23	6	
E	バイオエネルギー生産によってもたらされた変化を計測する指標	10, 12, 14, 15, 20	10, 12, 14, 15, 20	11	13

注: 表中の番号はGBEP指標の番号を示す。第1表を参照のこと。

さらに、持続可能性を測ろうとする指標はその指標の閾値との比較で結果を表す必要があるが (Liverman et al.(1988), Martinet(2011)), 一部指標は閾値を定義できず、実際に GBEP も GBEP 指標が方向性や閾値, 限界を示すものではないと認めている (GBEP(2011), p11)。第3図は指標と閾値がどのように数量化されるかを第2表の5グループごとに示している。グループ A~C については、閾値を設定するのは比較的容易だが、グループ D, E については指標が直接的に持続可能性と関連しないため閾値の設定は不可能である。例えば、グループ D の指標は、例えば年間総採水量に占めるバイオエネルギー生産での水使用量割合 (指標 5) ある側面について全体数に占めるバイオエネルギー由来の割合を計算しているが、より高いもしくはより低い数値となったところで、「持続可能」と「持続不可能」の間の線引きをすることはできないのである。

このことは、たとえ利用者が GBEP 指標を自身のバイオエネルギー計画に適用したとしても、それが持続可能なのかどうかを判断できないことを示す。GBEP 指標は時間的にある特定のバイオエネルギー計画を評価し、それがより持続可能な方向に向かっているかどうかを示すにすぎないのである。その上、GBEP 指標は持続可能性を最終判断する包括的評価手法を有しない。このようなことから、第3節ではより包括的持続可能性を判断できる評価手法を開発する。



第3図 指標の各グループの計測方法及び閾値定義方法（つづき）

3. GBEP 指標に基づく持続可能性評価のための多基準分析

多基準分析（MCA）は GBEP 指標に基づく評価に最も適切かつ有効な手法の 1 つである。MCA は多様な代替的行動を評価する手法で、多角的な評価視点を有し幅広い利害関係者を考慮することができるのが特徴である。この手法は、(1)定量データ、定性データ双方を含む多様なデータセットを取り扱うことができること、(2)共同的計画や意思決定環境の構築に利用しやすいこと、(3)理論的技術的に強固な背景を持ちつつもその仕組みは簡素で直感的であることなどから、基準や指標を構築するのにふさわしい手法と認められている（Mendoza and Prabhu(2003)）。さらには、バイオエネルギー供給システムは、原料や製造技術の選択、流通手段、エネルギー種など多くの複雑性と利害関係者を有することか

ら、MCA はバイオエネルギーに関する意思決定のための重要な要素を分析するのに最も適した手法である (Buchholz et al.(2009a))。

MCA を持続可能性に適用した研究事例は数多く存在する。一部は複数の利害関係者の関与を取り扱ったり (Buchholz et al.(2009a), Elghali et al.(2007), Turksim et al.(2011)), 一部は最も持続可能で最適なバイオエネルギーの選択肢, もしくは少なくとも最悪の選択肢を抽出するために適用したり (Turksim, et al.(2011), Sultana and Kumar(2012)), 一部は指標間の相互関係を解明するために MCA を適用している (Mendoza and Prabhu(2003))。Scott et al.(2012)と Huang et al.(2011)はバイオエネルギー及び再生可能エネルギーへの MCA 適用研究事例をレビューしている。しかしながら, MCA を GBEP 指標に適用した研究事例はこれまで存在しない。したがって, 本研究では GBEP 指標に基づく持続可能性評価手法の開発に MCA を適用する。

このためには, まず指標間の相対的ウェイトを構築しなければならない。Mendoza and Prabhu (2003)の方法に基づき, 本研究では各指標間のウェイトの設定に加重加算方式 (WSM) を適用する。この方法は最も簡単な方法であるが, データ制約・欠落で階層分析法 (AHP) などより複雑な手法を適用することができない場合に有効な手法である。Mendoza and Prabhu (2003)に基づき, 相対的ウェイトは以下の式で表される。

$$w_i = a_i / \sum a_i, \quad (1)$$

ここで, w_i と a_i はそれぞれ指標 i の相対的ウェイトと平均ウェイトを表す。

次に, 指標の集計を行う必要がある。ここでの問題は各指標が異なる単位で数量化されている点であり, 集計のためには標準化が必要となる (Krajnc and Glavic(2005))。本研究では, 標準化を2つの段階を経て行った。第1段階は, 指標をポジティブ指標とネガティブ指標に分類する。ポジティブ指標とは「多ければ多いほど望ましい」性質を持つ指標で, ネガティブ指標は「少なければ少ないほど望ましい」性質の指標である。そして, 本研究では以下の式を用いて標準化を行った。

ポジティブ指標については,

$$I_i^+ = (I_{Ai}^+ - T_i) / (I_{\max i}^+ - T_i) \text{ if } I_{Ai}^+ > T_i, \quad (2)$$

$$I_i^+ = (I_{Ai}^+ - T_i) / T_i \quad \text{if } I_{Ai}^+ \leq T_i, \quad (3)$$

ネガティブ指標については,

$$I_j^- = -(I_{Aj}^- - T_j) / (I_{\max j}^- - T_j) \quad \text{if } I_{Aj}^- > T_j \quad (4)$$

$$I_j^+ = -(I_{Aj}^- - T_j) / T_j \quad \text{if } I_{Aj}^- \leq T_j, \quad (5)$$

である。ここで、 I_i^+ と I_j^- はそれぞれポジティブ指標 i , ネガティブ指標 j の標準化指標である。 T は閾値, 添え字の A は当初の指標値を表す。 $I_{\max i}^+$ と $I_{\max j}^-$ はそれぞれ I_i^+ と I_j^- で理論的に考えられる最大値を表し, 過去のデータ, 法的規制などから設定される。例えば, 環境負荷発生量限度が法律または基準値などで設定されている場合はそれが理論的最大値となる。

この標準化法では, 最も持続可能な結果と最も持続不可能な結果がそれぞれ 1 と -1 で表され, 結果が閾値と一致する場合は 0 となる。

最後に, バイオエネルギーの持続可能性の集計スコア S を計算するのには以下の式を用いる。

$$S = \sum I_i w_i, \quad (6)$$

このスコアをあらゆるバイオエネルギー政策で計算して他の代替政策と比較することにより, 利用者はバイオエネルギー政策が持続可能性を向上させるかもしくはどの政策が最も持続可能なのかを判断することができる。

4. 実際の評価事例への例示的適用

(1) データ

前節で示した手法は単なる理論的な提案でしかないため, ここでは京都市の BDF 製造事業での GBEP 評価事例を用いて実施に開発した手法の適用を行い, 化石燃料との結果の比較を行う。林は京都の BDF 製造事業に対して GBEP 指標の適用結果を公表した (Hayashi(2011))。林の研究では, 24 指標のうち 14 指標を計測しているが, 一部の指標は異なる環境負荷や単位で複数計測されているので, 計測された指標の総数は 40 となっ

ている。本研究では、(1)閾値と理論的最大値が設定できるか、(2)化石燃料（軽油）の結果が計測できるかという2つの基準に基づき、Hayashi (2011)の結果の一部を抽出して利用することとする。その結果、14指標のうち8指標（ポジティブ指標2、ネガティブ指標6）を採用した（第3表）。標準化の際には、原稿もしくは過去の法規制・基準値、既存研究の結果に基づき、閾値と理論的最大値を設定した。

第3表 選択した指標と標準化の結果

No	指標	正負 (1)	単位	閾値	最大値	最小値	結果数値
環境 BDP 社会 経済	1 MJあたり温室効果ガス排出量	負	g CO ₂ eq/MJ	46.1	0	92.2	11.7
	4NO _x NO _x 排出量	負	g/GJ	1,075	0	1,639	548
	4SO _x SO _x 排出量	負	g/GJ	0.47	0	94	0.09
	11 雇用者への賃金	正	1000 yen/person	4,593	0	41,798	1,556.5
	16 死傷・労災件数	負	Number	0.01	0	0.06	0
	17 製造コスト	負	yen/L-fuel	97.10	0	168.90	134
	19 粗付加価値	正	yen/L-fuel	41.2	0	137.9	4.4
	22 エネルギー多様性（ハーフィンダール指数）	負	-	0.83	0	1	0.73
	1 MJあたり温室効果ガス排出量	負	g CO ₂ eq/MJ	68.6	0	92.2	92.2
	4NO _x NO _x 排出量	負	g/GJ	1,075	0	1,639	323
軽油 社会 経済	4SO _x SO _x 排出量	負	g/GJ	2	0	86	23
	11 雇用者への賃金	正	1000 yen/person	4,593	0	41,798	6,570
	16 死傷・労災件数	負	Number	2.29	0	11.1	0
	17 製造コスト	負	yen/L-fuel	97.10	0	168.90	64
	19 粗付加価値	正	yen/L-fuel	41.2	0	135.2	85
	22 エネルギー多様性（ハーフィンダール指数）	負	-	0.83	0	1	0.86

注(1) 正:ポジティブ指標, 負:ネガティブ指標

第4表 利害関係者のウェイト付け結果

指標	環境			社会		経済			合計
	1	4NO _x	4SO _x	11	16	17	19	22	
バイオエネルギー専門家	8	7	7	9	8	5	5	9	
バイオエネルギー専門家	9	3	3	9	5	6	9	8	
バイオエネルギー専門家	8	7	7	8	7	8	8	8	
GBEPメンバー	8	6	6	4	3	8	5	3	
GBEPメンバー	9	8	8	4	4	8	8	8	
GBEPメンバー	8	8	8	5	5	7	7	8	
経済学者	8	8	8	8	6	9	8	9	
経済学者	9	8	8	5	8	5	6	8	
政策担当者	9	8	8	5	5	5	8	8	
政策担当者	9	8	8	9	9	9	7	7	
平均	8.6	7.7	7.7	5.7	5.7	7.3	7.0	7.3	
標準偏差	0.53	0.76	0.76	1.98	2.14	1.70	1.15	1.98	
相対的ウェイト	0.15	0.14	0.14	0.10	0.10	0.13	0.12	0.13	1.00

注 評価スコア 1:ほとんど重要ではない, 2:あまり重要ではない, 3:それほど重要, ではない, 5:普通, 7:少し重要, 8:とても重要, 9:きわめて重要. この他, 4:それほど重要ではないと6:ほんの少し重要も設定した。

相対的ウェイトを計算する際には、GBEP 指標に詳しいバイオエネルギー専門家 3 名、GBEP メンバー3 名、経済学者 2 名、政策担当者 2 名の合計 10 名にそれぞれが考える各指標の重要度をランク付けするよう依頼し、回答してもらった。ランク付けの回答は第 4

表に示した。

(2) 結果

分析の結果は第5表に掲げた。各指標の最終スコアが0よりも大きい場合には、その項目が閾値との比較で持続可能であることを示す。同様に、各ピラー（環境、社会、経済）の平均最終スコアは各ピラーが持続可能か否かを示し、最終総スコアは評価された BDF が全体として持続可能かどうかを示す。ただし、本研究ではウェイトを設定する際にランキング法を採用しているため、スコアの絶対値は意味を持たず、計算されたスコアは全て序数的なものであることに留意いただきたい。つまり、2 というスコアは 1 というスコアよりも2倍持続可能ということにはならないのである。

第5表 評価結果

No	持続可能性 (1)	標準化スコア	相対的 ウェイト	最終スコア	平均スコア
BDF 環境 社会 経済	1 温室効果ガス量	持続可能	0.75	14.75	11.01
	4NOx NOx排出量	持続可能	0.49	13.25	6.50
	4SOx SOx排出量	持続可能	0.80	13.25	10.63
	11 賃金	持続不可能	-0.08	11.00	-0.90
	16 死傷・労災件数	持続可能	1.00	10.00	10.00
	17 製造コスト	持続不可能	-0.51	12.75	-6.47
	19 粗付加価値	持続不可能	-0.38	12.00	-4.57
	22 エネルギー多様性	持続可能	0.12	13.00	1.57
合計		最終総スコア		27.78	
軽油 環境 社会 経済	1 温室効果ガス量	持続不可能	-1.00	14.75	-14.73
	4NOx NOx排出量	持続可能	0.70	13.25	9.28
	4SOx SOx排出量	持続不可能	-0.24	13.25	-3.22
	11 賃金	持続可能	0.05	11.00	0.58
	16 死傷・労災件数	持続可能	1.00	10.00	10.00
	17 製造コスト	持続可能	0.34	12.75	4.29
	19 粗付加価値	持続可能	0.47	12.00	5.61
	22 エネルギー多様性	持続不可能	-0.18	13.00	-2.30
合計		最終総スコア		9.51	

注 (1) 標準化スコアが0以上で持続可能, 0未満で持続不可能.

本節の目的は京都事例の持続可能性を分析することではなく、提案した手法の実演を行うことなので、ここでは結果について簡単に触れる程度にとどめておく。京都の BDF 事例については、環境ピラーの全ての指標が持続可能となっているが、軽油については3つの指標のうち2指標（指標1：ライフサイクル温室効果ガス排出量、指標4：SOx 排出量）について持続可能ではないという結果になっている。環境ピラーの平均スコアはそれぞれ 9.38 と -2.89 となっている。特に温室効果ガス排出については軽油の結果が非常に悪くな

っている。一方、社会ピラーについてはそれぞれ 4.55 と 5.29 と、BDF も軽油も良好な結果となっている。経済ピラーに関しては、BDF は製造コスト（指標 17）でスコアが負と良くない結果が出ており、これは BDF の高い製造コストを反映した結果となっている。BDF の経済ピラーの平均スコアは -3.15 と経済的に持続不可能な結果となっている。最後に、BDF の最終総スコアは 27.78 で、軽油は 9.51 となっており、この結果は京都の BDF は全体として軽油よりも持続可能であることを示している。京都での BDF 製造事業は環境ピラー、で持続可能性を達成しているものの、経済ピラーではまだ達成されていないことがわかる。このことから、京都の場合、政策担当者は BDF の持続可能性向上のため、製造コストの低減など経済性をより高めることが求められていると結論づけることができる。

（３）限界

本研究で提案した手法は政策担当者がバイオエネルギーの持続可能性を向上させるために非常に有用なツールであるが、いくつかの限界も残されている。ここではその限界について言及する。第 1 に、いくつかの指標について閾値と理論的最大値が設定できないという問題である。本研究で適用した標準化手法は各指標で閾値と予想される最大値を設定することが求められる。しかしながら、第 2 表のグループ D、E の指標では閾値を設定することができず、これらの指標の評価結果は本研究で開発した包括的評価手法に反映させることができないのである。これらの指標を考慮するためには、新たな標準化手法を検討しなければならない。第 2 の限界は、閾値と理論的最大値の設定に追加的な統計・情報が必要ということである。現在のところ、バイオマスやバイオエネルギーに関して体系的に整備された統計を有する国は少なく、多くの国では農業や石油産業などに比べると、限られた統計・情報しか有していない。それ故、本研究でもさまざまなデータ源から必要な統計・情報を引用しなければならず、多くの労力と時間を費やした。この問題は本研究に限らず、バイオマスやバイオエネルギーに関する全ての分析に当てはまることである。この問題の解決には、あらゆる目的に簡便に統計・情報が利用できるようなバイオマス統計を整備することが必要であろう。第 3 の課題は、MCA の適用に関してである。Buchholz et al (2009a) は、異なる 4 つの MCA 手法を適用し、結果の大きな差異が生じたと結論づけている。また、本研究で適用した手法は最も簡便な方法の 1 つであり、評価手法から提供される情報も限られる。AHP などより複雑な手法は一対比較の一貫性やある指標が他よりどのくらい

重要かなど、より多くの情報を提供することができる。この問題は必要となるデータと手法から提供される情報のトレードオフの問題とも見なされるが、より複雑な手法を適用すると、政策担当者が利用しにくくなるという問題も生じるだろう。

5. 考察と結論

GBEP 指標の公表までに 3 年以上の年月が費やされた。GBEP の指標開発タスクフォースのメンバーは国の政策担当者や国際機関担当者のみならず、バイオエネルギーの専門家、経済学者、物理学者などで構成され、利害関係者の幅広い意見が反映された。それ故、GBEP 指標は Buchholz et al (2009b)で提案された指標と多くの類似性を有し、このことは GBEP 指標が利害関係者の意見を反映するという意味でよく議論された指標であることを示している。

第 2 節で示したとおり、GBEP 指標は弱い持続可能性を評価するものである。しかしながら、GBEP 指標そのものでは、現行のバイオエネルギーが持続可能なのはどうかについて結論を得ることができないことも示した。その理由の 1 つが GBEP 指標は「何を数量化するか」について一貫していないことである。本研究では第 2 表で指標を 5 つのグループに分け一部の指標が閾値の設定ができないことを示した。指標から明確に持続可能性を判断できるよう、例えば指標 5 の年間総採水量に占めるバイオエネルギー生産での水使用量割合など、いくつかの指標は改訂して一貫性のなさをなくすべきと考える。第 2 の理由は GBEP 指標が各指標の結果を集計できる包括的評価手法を持たないことである。GBEP 指標が持続可能性を最終判断できないという点は政策担当者の指標の利用を妨げることにもなりかねない。GBEP の指標のさらなる有効活用のため、政策担当者が持続可能性の最終判断ができるよう包括的評価手法を導入することが必要である。

GBEP 指標の京都事例の適用結果を利用し、本研究では開発した手法の適用を実演した。この指標を用いることで、京都の BDF が環境ピラーで良好な結果だったものの、経済ピラーであまり良くない結果となったことを示した。このような情報は政策担当者がバイオエネルギー政策を実行する際に有用である。

本研究での手法に基づき、利用者はバイオエネルギーの持続可能性を包括的に評価することができる。利用者がすべきことは、(1)指標の選択、(2)閾値と理論的最大値の設定、(3)各指標のウェイトの設定の 3 つである。一部の GBEP 指標は直接的に持続可能性と関連し

ないため、全ての指標を評価に利用する必要はない。指標の選択は第2表のグループA～Cに限るだけでなく、閾値と理論的最大値の設定が可能かどうかでも判断する必要がある。閾値と理論的最大値の設定は複雑な場合もあるが、現行または過去の規制値や既存研究などもとに設定すべきである。本研究の標準化とウェイトの設定方法は非常にシンプルなので、手法に精通していない利用者でも分析を行うことができる。

しかしながら、バイオエネルギーと化石燃料の各スコアはどちらも同じ範囲で評価されるが（最終総スコアの場合は-100から100まで）、各指標の閾値、理論的最大値などの中身は異なる。そのため、本研究の手法は国家間での比較を行うよりもむしろ一国でのバイオエネルギー政策オプションの検討に利用することが望ましい。この特徴は「指標はより効率的なエネルギーの利用と再生可能エネルギーのより広い利用を通じて経済成長を遂げるという国家目標を達成することの一助となる」というGBEP指標の原則にも整合的である。

謝辞

著者は、2012年OECD共同研究プログラム「持続可能な農業システムのための生物資源管理」の受給者であり、このプログラムによりオランダ・ワーヘニンゲン大学へ赴任し、本研究を遂行した。本プログラムで渡航・研究資金を提供してくださったOECD並びに著者を客員研究員として受け入れてくださったワーヘニンゲン大学に記して感謝の意を表する。

注

(1)本章は、2012年OECD共同研究プログラム「持続可能な農業システムのための生物資源管理」により、著者がオランダ・ワーヘニンゲン大学Ekko C. van Ierland教授及びXueqin Zhu准教授と共同で行った研究成果を和訳の上取りまとめたものである。本稿の分析の詳細はHayashi et al. (2014)を参照のこと。

〔引用文献〕

Barrera-Roldan, A., Saldivar-Valdes, A., (2002) “Proposal and application of a Sustainable Development Index” *Ecological Indicators* 2(3), pp.251-256.

- Buchholz, T., Volk, T.A., Luzadis, V.A. (2009a) "Multi Criteria Analysis for Bioenergy Systems Assessments" *Energy Policy* 37(2), pp.484-495.
- Buchholz, T., Luzadis, V.A., Volk, T.A. (2009b) "Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey" *Journal of Cleaner Production* 17, pp.S86-S96.
- Daly, H. E., Cobb, J. B. Jr. (1990) *For the Common Good Undated and Expanded*, Beacon Press.
- van Dam, J., Junginger, M., Faaji, A., and Fritsche, U. (2008) "Overview of recent developments in sustainable biomass certification" *Biomass and Bioenergy* 32(8), pp749-780.
- Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C., Bauen, A. (2007) "Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems" *Energy Policy* 35(12), pp.6075-6083.
- GBEP (2011) "The Global Bioenergy Partnership sustainability indicators for bioenergy", available at http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/Indicators/The_GBEP_Sustainability_Indicators_for_Bioenergy_FINAL.pdf
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Panichelli, L. (2009) "Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances" *Bioresource Technology* 100(21), pp.4919-4930
- Hayashi, T., (2011) "Piloting study of GBEP indicators in Kyoto, Japan" Presentation of GBEP 1st Working Group on Capacity Building hold at Tokyo in 16 November 2011, available at http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2011_events/1st_WGCB_Tokyo_16_November_2011/12._Hayashi.pdf
- Hayashi, T., van Ierland, E. C., Zhu, X., (2014) "A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators" *Biomass and Bioenergy* 66, pp.70-80.
- Hein L., Leemans, R. (2012) "The Impact of first-generation biofuels on the depletion of the global phosphorus reserve" *AMBIO* 41, pp.341-349.
- Holtmark, B. (2010) "Use of wood fuels from boreal forests will create a biofuel carbon debt with a long payback time" *Discussion Papers* 637, Statistics Norway, Research

Department.

- Huang, I. B., Jeffrey Keisler, J., Linkov, I., (2011) "Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends" *Science of the Total Environment*, 409 (19), pp.3578-3594.
- Krajnc, D., Glavic, P., "How to compare companies on relevant dimensions of sustainability" *Ecological Economics* 55 (4), pp.551-563.
- Liverman, D. M., Hanson, M. E., Brown, B. E., Merideth Jr., R. W., (1988) "Forum Global Sustainability: Toward Measurement" *Environment* 12(2), pp.133-143.
- Malovics, G., Csigen, N. N., Kraus, S., (2005) "The role of corporate social responsibility in strong sustainability" *The Journal of Socio-Economics* 37 (3), pp.907-918.
- Martinet, V., (2011) "A characterization of sustainability with indicators" *Journal of Environmental Economics and Management* 61(2), pp.183-197.
- Mendoza, G. A., Prabhu, R. (2003) "Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management" *Forest Ecology and management* 174(1-3), pp.329-343.
- Scarlet, N., Dallemand, J. (2011) "Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview" *Energy Policy* 39 (3), pp.1630-1646.
- Schubert, R., Blasch, J., "Sustainability standards for bioenergy-A means to reduce climate change risks?" *Energy Policy* 38(6), pp.2797-2805.
- Scott, J. A., Ho, W., Dey, P. K. (2012) "A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy system" *Energy* 42(1), pp.146-156.
- 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.
- Sultana, A., Kumar, A. (2012) "Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors" *Biomass and Bioenergy* 39, pp.344-355.
- Turcksin, L., Macharis, C., Lebeau, K., Boureima, F., Mierlo, J. V., Bram, S., Ruyck, J. D., Mertens, L., Jossart, J. M., LeenGorissen, L., Pelkmans, L. (2011) "A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel

options: The case of Belgium” Energy Policy 39(1), pp.200-214.

2014（平成 26）年 4 月 30 日 印刷・発行

温暖化プロジェクト研究資料 第 2 号

バイオエネルギーの活用とその評価

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



リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。