

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。

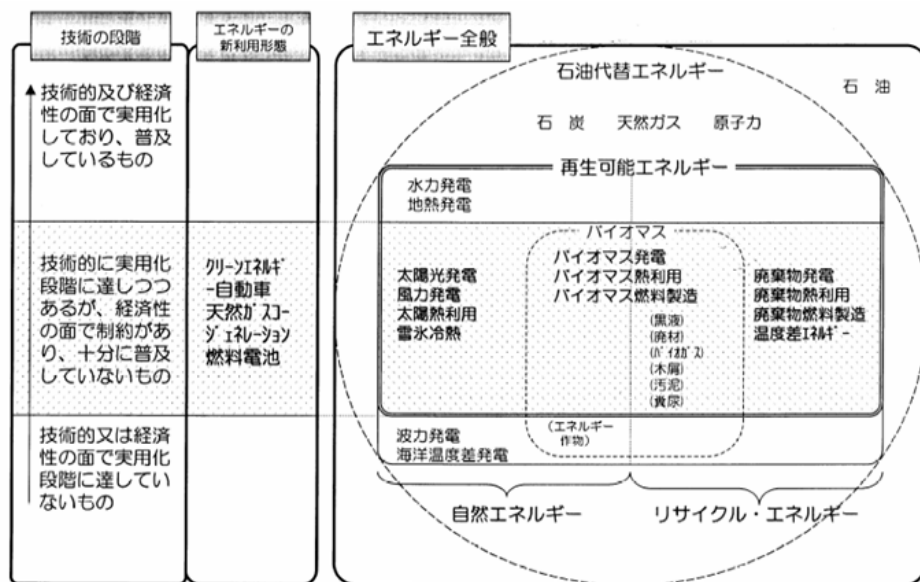
このように、再生可能エネルギーには多様な定義があるが、両者の定義を総合すると、再生可能エネルギーは、「再生することが可能な資源から持続可能な態様で生産されるあらゆる形態のエネルギー」と定義することができよう。

(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可能性がある。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。