

<博士學位論文要旨>

産業連関表を用いたバイオマス事業の 実用的なライフサイクル評価手法に関 する研究

横浜国立大学大学院 環境情報学府 博士課程後期 (2016年6月修了)

兵法 彩

Study on Practical Life Cycle Assessment Methods of Biomass Projects using Input-Output Tables

Aya HEIHO

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

要旨

近年、低炭素社会の構築や新規産業創出・雇用拡大による地域活性化などの観点から、地域の再生可能資源であるバイオマスを用いた事業（以下、バイオマス事業）が注目されている。効果的なバイオマス事業の導入を進めるためには、導入に伴う影響（温室効果ガス排出量や雇用量など）をライフサイクル思考に基づいて評価することが重要となる。

そこで、本研究はバイオマス事業の事業化プロセスに沿った実用的なライフサイクル評価手法を検討した。バイオマス事業の事業化プロセスは、構想、計画、設計、施工、運用の5段階となった。また、段階に沿って評価に活用できるデータ種は、国内外の先行事例を参考に作成する想定値、プラントエンジニアリングを介して作成される設計値、事業稼働に伴って得られる実績値の3種類となることが分かった。そのため、事業化プロセスの前半（構想・計画段階）では、想定値を用いたライフサイクル評価手法が必要であり、事業化プロセスの後半（設計・施工・運用段階）では、設計値・実績値を用いたライフサイクル評価手法が必要となる。

本研究では、それぞれの段階に合わせ、国や地域の統計データである産業連関表を活用した手法を提案し、バイオガス発電事業のライフサイクル環境・社会経済影響評価に適用した。提案手法を活用することによって、適切なタイミングで事業導入に伴う影響を定量的に理解することができ、地域や社会に適した事業システムの設計・改善が可能となる。

ABSTRACT

There has been a growing interest in biomass projects because they are expected to create a low carbon society and to vitalize regional communities by new business creation and expansion of employment. In order to promote effective implementation of biomass projects, it is important to evaluate their environmental and socio-economic impacts from the life cycle perspective.

The objective of the present study is to discuss practical life cycle assessment methods used in the introduction process of a biomass project. The introduction process is the following five steps: conception, planning, design, construction and operation. The present study suggests that there are three types of data used life cycle assessment in the introduction process, namely, estimated value, design value and actual value. Therefore, it is necessary for a life cycle assessment method using an assumed value for the first half of the introduction process (i.e. conception and planning steps). In addition, in the rest of half of the process (i.e. design, construction and operation steps), it is necessary for a life cycle assessment method using a design value or actual value.

This study proposed practical methods using input-output tables, and applied the methods to environmental and socio-economic impacts assessment of biogas power generation projects using waste biomass. The methods proposed in this study allow for a better understanding of the effects of biomass projects and a successful design and improvement of biomass projects in region and/or national level.

1. はじめに

近年、低炭素社会の構築や新規産業創出・雇用拡大による地域活性化などの観点から、地域の再生可能資源であるバイオマスを用いた事業（以下、バイオマス事業）が注目されている¹⁾。バイオマス事業の計画・実施に際しては、事業導入に伴う温室効果ガス（Greenhouse gas, 以下 GHG）排出量や雇用量などの環境・社会経済影響を適切に把握し、より効果的な事

業構築を図ることが重要となる。しかしながら、これまでに計画・実施されているバイオマス事業の導入効果の把握状況を整理する^{2), 3)}と、GHG 排出量や雇用量の算定に向けて共通の概念・ルールがなく、定量的議論が十分に行われていないことが推察される。

そこで、本研究は GHG 排出量や雇用量などの環境・社会経済影響を定量的に評価する手法として、ライフサイクル思考（Life Cycle Thinking）に基づく評価

(以下、ライフサイクル評価)に着目する。ライフサイクル思考とは、製品・技術の利用(事業実施)に伴う目の前の直接的な影響のみならず、それら製品・技術のライフサイクルに沿って生じる間接的な影響も追跡し、事業システム全体の影響を考慮すること⁴⁾である。バイオマス事業の実施者(以下、事業者)は、ライフサイクル評価を、より効果的な環境負荷低減策や雇用・新規産業創出の検討に活用し、地域や社会に適した事業導入を進めていくことが肝要である。そのためには、限られた時間や費用の中で事業設計・改善に対し有益な情報が得られる実用的な評価方法を検討することが重要となる。

このような背景を受け、本研究はバイオマス事業者にとって実用的なライフサイクル評価手法を提案することによって、効果的なバイオマス事業の導入促進に資することを目的とする。博士論文は全6章で構成されており、第1章は社会的背景をまとめた序論、第2章はバイオマス事業の実用的なライフサイクル評価に向けた論点整理、第3章は簡易な事業評価に向けたバイオガス発電事業部門拡張産業連関表の構築、第4章は事業導入効果が生じる地域に着目した実用的なライフサイクル評価手法、第5章はバイオマスプラント建設のGHG排出量推計を対象とした推計手法に関する基礎的分析、第6章は総括及び今後の展開をまとめた結論となっている。なお、手法検討における主な対象事例は、国内のエネルギー政策における重要技術のひとつとして事業導入が始まっている⁵⁾廃棄物系バイオマスを用いたメタン発酵ガス化発電事業(以下、バイオガス発電事業)とする。

2. バイオマス事業の実用的なライフサイクル評価に向けた論点整理

本研究において、実用的なライフサイクル評価手法とは、適切なタイミングで効果的な事業設計や事業システムに改善に役立つ有益な情報が得られる手法であり、さらに可能な範囲で作業に係る負担(以下、作業負荷量)が過度に大きくない簡易な手法であることが望ましいと考えている。そこで、まずライフサイクル評価のなかで各種影響の定量化を行う段階であり、作業負荷量が大きいインベントリ分析に着目し、その分類を先行研究⁶⁾⁻⁸⁾に従って整理した。次に、バイオマス事業の事業化プロセスで求められるライフサイクル評価手法およびそのタイミングを明らかにするために、実

際の事業者を対象とした実態調査を行った。調査の結果、バイオマス事業の事業化プロセスは、構想、計画、設計、施工、運用の5段階となった。また、段階に沿って評価に活用できるデータ種は、国内外の先行事例を参考に作成する想定値、プラントエンジニアリングを介して作成される設計値、事業稼働に伴って得られる実績値の3種類となることが分かった。

これらの結果を受け、プラントの設計段階を境に、事業化プロセスの前半(構想・計画段階)では、想定値を活用した評価手法が必要であり、事業化プロセスの後半(設計・施工・運用段階)では、設計値・実績値を活用した評価手法が必要であることがわかる。このようなバイオマス事業の事業化プロセスにおける状況を踏まえ、以下の3つの論点を設定した。設定した論点は、①想定値を活用した簡易なライフサイクル評価手法、②設計値・実績値を活用した有益な情報作成手法、③作業負荷量と推計結果のバランスに着目したインベントリ分析手法の実用性に関する検討であり、それぞれ第3章から第5章に展開した。

3. 簡易な事業評価に向けたバイオガス発電事業部門拡張産業連関表の構築

第3章では、想定値を活用した簡易なライフサイクル評価手法として、国の産業連関表を活用した評価ツールの構築に取り組んだ。近年、再生可能エネルギー技術のライフサイクル環境・社会経済影響評価に広く用いられている、拡張産業連関表⁹⁾⁻¹⁴⁾に着目し、本研究ではバイオガス発電事業部門拡張産業連関表(以下、拡張表)の作成を行った。拡張表は、対象となる事業の国内実績を踏まえて設定したモデルプラントの詳細な建設費・運用費を作成し、その情報を既存の国が公表している産業連関表に組み込むことで作成する。また、GHG排出量および雇用量の推計を行うために、対象事業の直接GHG排出係数および直接雇用係数を作成する。対象とした事業は、家畜排せつ物を用いたバイオガス発電事業(以下、家畜バイオ)と厨芥類を用いたバイオガス発電事業(以下、厨芥バイオ)の2種類である。

作成した拡張表に評価対象となるプラントの建設費・運用費を与えることにより、ライフサイクル環境・社会経済影響評価が可能となる。本研究では、運用期間を20年とし、モデルプラントと同等の規模の事業導入に伴うライフサイクルGHG排出量および雇用量を推

計した。その結果、家畜バイオの GHG 排出要因はメタン発酵後の副産物である消化液貯留に伴う CH₄ と N₂O であったのに対し、厨芥バイオはメタン発酵時の電力消費が誘発する GHG 排出量となっていた。一方、雇用量はどちらの事業においても、施設の運用や原料収集などに伴う直接的な雇用創出量が大きく、次いでサービス業など波及的に生じる雇用量が大きい結果となった。このように拡張表は、建設費・運用費を用いることで簡易に対象事業の GHG 排出量と雇用量の特性を評価することが可能となっている。そのため、事業者は拡張表の活用によって、事業化プロセスの早い段階で定量的情報に基づく議論および効果的な事業設計への展開が可能となる。

4. 事業導入効果が生じる地域に着目した 実用的なライフサイクル評価手法

第 4 章では、設計値・実績値を活用した有益な情報作成手法として、バイオガス発電事業の導入に伴う影響が生じる場所に着目した実用的なライフサイクル評価手法の開発に取り組んだ。先行研究では、導入地域に生じる影響のみに着目した分析¹⁵⁾や、導入地域とその近隣地域の影響を分析するために地域の産業連関表を用いた分析^{16) -19)}が行われている。しかしながら、実際には事業導入に伴う影響は導入地域や近隣地域にあたる自治体レベルに留まるものではなく、国内のその他の地域や海外にも生じるため、それらの影響も網羅して評価することが重要となる。

そこで本研究では、バイオマス事業実施前後の 2 つのシステムを設定し、両者の差分として得られる便益を、比較的詳細な分析が可能な積み上げ法と国と地域の統計データである産業連関表を用いた産業連関法を組み合わせるにより、波及的に生じる影響も網羅して地域別の評価が可能手法を提案する。提案手法を北海道鹿追町のバイオガス発電事業²⁰⁾のライフサイクル社会経済影響評価に適用し、事業導入に伴う地域別の雇用変化を明らかにした。このとき影響が生じる範囲を①事業が実際に行われる場所(以下、事業スポット)、②近隣地域(北海道)、③近隣地域を除く国内(46 都府県)、④海外の 4 つに区分した。

その結果、バイオガス発電事業の導入はいずれの地域においても雇用量の増加に寄与しており、その内訳でみると事業スポット内の直接的な増加量よりも、事業スポット以外で生じる間接的な増加量の合計の方が

大きいことが分かった。そのため、特定地域に生じる直接的な雇用だけでなく、波及的にその他の地域に生じる変化も考慮することが重要となる。また、得られた結果に基づき、北海道外における設備のメンテナンス・修繕や燃料製造に伴う雇用量の増加分を、近隣地域の企業や既に取り組みが始まっている広域連携事業(十勝バイオマス産業都市構想²¹⁾)の活用によって、事業スポットにより近い地域(北海道内)で雇用を生み出せる可能性について議論した。このように提案手法を用いることで、バイオマス事業の導入効果をよりの確に明らかにすることが可能となる。また、得られた結果を活用することによって、より地域や社会に適した事業システムの設計・改善が進むことが期待される。

5. バイオマスプラント建設の GHG 排出量推計 を対象とした推計手法に関する基礎的分析

第 5 章では、インベントリ分析の作業負荷量と推計結果のバランスに着目して、推計手法の実用性に関する分析を行った。バイオマス事業のように多くのプロセスから成るシステムを対象とした評価実施においては、積み上げ法で精緻な分析を行うプロセスと、産業連関法で統計値を用いた平均的な分析を行うプロセスを合理的に選別し、作業負荷量を過度に大きくしない工夫をすることが実用的である。一般的な建物や設備機器のライフサイクル評価^{22) -26)}においても、評価対象に関する全てのデータ収集は困難であるとされ、結果に影響を及ぼすプロセスは積み上げ法で推計し、その他のプロセスは産業連関法で補完する分析手法の提案²⁵⁾等が行われている。しかしながら、いずれの先行研究においても、産業連関法で得られる結果の妥当性については言及されているが、積み上げ法と比べて産業連関法がどの程度実用的なのか、すなわち作業負荷量がどの程度異なるかについての定量的な議論は十分に行われていない。

そこで、本研究ではバイオマス事業のライフサイクル評価の中でも、多種多様な財・サービスが投入されるバイオマスプラント建設の GHG 排出量の推計を対象とした基礎的分析において、物量データに基づく積み上げ法と金額データの粗さが異なる 2 種類の産業連関法(以下、詳細 IO 法、簡略 IO 法)を①推計結果、②推計に要する作業負荷量、③プラント建設の GHG 排出量の推計結果がライフサイクル評価に与える影響の 3 つの観点から比較した。

その結果、積み上げ法は物量データの入手・作成に多くの時間が必要であり、かつ現実的に得られるデータ範囲が限定的となるため、産業連関法に比べ過小な推計値となった。詳細 IO 法は、網羅的な推計が可能な手法であるが、プラント建設は多種多様な財・サービスで構成されているため、費用項目が 1,000 以上となり GHG 排出量の推計に時間を要する。簡略 IO 法は、平均化された推計値をなることから、詳細 IO 法に比べ 20% 程度小さい値となったが、簡略 IO 法の作業負荷量は詳細 IO 法の作業負荷量の 2% 程度と極めて小さい。また、詳細 IO 法と簡略 IO 法の推計差は、ライフサイクル評価における他の不確実性（例えば、電力排出係数の変動など）と同程度であることから、簡略 IO 法の結果は一定の妥当性を持つことが明らかとなった。そのため、推計における実用性を重視する場合には、簡略 IO 法が有用な手段のひとつであると結論づけた。

6. おわりに

本研究では、バイオマス事業の事業化プロセスに沿った実用的なライフサイクル評価手法の検討を行い、事業化プロセスの前半に対しては簡易評価ツールの構築、事業化プロセスの後半に対しては、設計値・実績値の活用を前提として、事業導入効果が生じる地域に着目した実用的なライフサイクル評価手法の開発および、作業負荷量と推計結果のバランスに着目した推計手法の実用性に関する分析を行った。本研究の提案手法を活用することによって、適切なタイミングで事業導入に伴う影響を定量的に理解することができ、地域や社会に適した事業システムの設計・改善が可能となる。

なお、本研究では事業者が有している情報（想定値、設計値、実績値）の活用を前提として、実用的なライフサイクル評価手法の検討を行ったが、実際の事業化プロセスにおいては、想定値のような導入検討事業に関する情報を早い段階で作成すること自体が難しい場合もあり得る。そのため、今後の展開としては、ライフサイクル評価の実施に向けた国内先行事例の統計情報の整備や、想定値の算定を支援するツール開発を進めていくことも重要となる。

参考文献

- 1) 農林水産省, バイオマス事業化戦略～技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進～, 農林水産省ホームページ, http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/senryaku.pdf, (参照日 2016.1.14)
- 2) 朝野賢司 (2009) 「バイオマスタウン構想の実施過程の分析」『電力中央研究所研究報告書』, Y08033, 28p.
- 3) 総務省, バイオマスの利活用に関する政策評価, 総務省ホームページ, http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/39714.html, (参照日 2016.1.14)
- 4) 日本太陽エネルギー学会編集委員会 (2008) 『持続可能エネルギー講座 第 2 巻 持続可能エネルギーと LCA』日本太陽エネルギー学会 . p.1-25, 51-88.
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁, なっとく! 再生可能エネルギー 固定価格買取制度, 資源エネルギー庁ホームページ, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/, (参照日 2016.1.14)
- 6) Suh, S. and Huppes, G. (2005) “Methods for Life Cycle Inventory of a product”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, No. 7, pp.687-697.
- 7) Crawford, H. R. (2008) “Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method”, *Journal of Environmental Management*, Vol.88, No.3, pp.469-506.
- 8) Islam, S., Ponnambalam, G. S. and Lam, L. H. (2016) “Review on life cycle inventory: methods, example and applications”, *Journal of Cleaner Production*, IN PRESS.
- 9) 松本直也・本藤祐樹 (2011) 「拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析」『日本エネルギー学会誌』第 90 巻 第 3 号, pp.258-267.
- 10) 稗貫峻一・本藤祐樹 (2013) 「拡張産業連関モデルを用いた地熱発電のライフサイクル雇用分析」『日本エネルギー学会誌』第 92 巻 第 1 号, pp.164-173.
- 11) 水本佑樹・内山洋司・岡島敬一 (2013) 「ハイブリッド産業連関法を用いた太陽光発電システム導入の経済・環境分析」『エネルギー・資源学会誌』第 34 巻 第 5 号, pp.296.
- 12) 氏川恵次 (2014) 「拡張産業連関表による再生可能エネルギー導入の波及効果—デンマークにおける風力発電の事例—」『横浜国際社会科学研究所』

- 1) 農林水産省, バイオマス事業化戦略～技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進～, 農

- 第 19 巻第 1・2 号, pp.1-13.
- 13) Nakano, S., Murano, A. and Washizu, A. (2015) “Economic and Environmental Effects of Utilizing Unused Woody Biomass”, 日本エネルギー学会誌, Vol. 94, No. 6, pp. 522-531.
 - 14) 森泉由恵・本藤祐樹・中野諭 (2015) 「再生可能エネルギー部門拡張産業連関表の開発と応用」『日本エネルギー学会誌』第 94 巻 第 12 号, pp.1397-1413.
 - 15) 池上真紀・新妻弘明 (2008) 「福島県天栄村湯本地区における持続可能な木質バイオマス利用と雇用の創出」『エネルギー・資源学会誌』第 29 巻 第 5 号, pp.22-28.
 - 16) 中村良平・中澤純治・松本明 (2012) 「木質バイオマスを活用した CO2 削減と地域経済効果—地域産業連関モデルの構築と新たな適用—」『地域学研究』第 42 巻 第 4 号, pp.799-817.
 - 17) Madlener, R. (2007) “Economic and CO2 mitigation impacts of promoting biomass heating systems: An input-output study for Vorarlberg, Austria”, *Energy Policy*, Vol.35, No.12, pp.6021-6035.
 - 18) Martínez, H. S., Eijck, J. Cunha, P. M. Guilhoto, J.M. J., Walter, A. and Faaij, A. (2013) “Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane-ethanol production by means of inter-regional Input-Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 290-316.
 - 19) Silalertruksa, T., Gheewala, H. S., Hünecke, K. and Fritschec R. U. (2012) “Biofuels and employment effects: Implications for socio-economic development in Thailand”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 46, pp. 409-418.
 - 20) 北海道鹿追町, 鹿追町環境保全センター, 北海道鹿追町ホームページ, <http://www.town.shikaol.g.jp/machizukuri/seisaku-keikaku/kakusyu-sengen/kankyoubikasengen/kankyouhozecenter/biogasplant>, (参照日 2016.4.26)
 - 21) 北海道帯広市 (十勝 19 市町村), 十勝バイオマス産業都市構想, 農林水産省ホームページ, http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/pdf/01_tokati.pdf, (参照日 2016.4.25)
 - 22) 酒井寛二・漆崎昇・下山真人・相賀洋 (1996) 「建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究」『日本建築学会計画系論文』第 484 巻, pp. 105-112.
 - 23) 伊藤武美・花木啓祐・本多博 (1996) 「公園建設にともなう二酸化炭素排出量に関する研究」『土木学会第 4 回地球環境シンポジウム講演集』第 4 巻, pp.63-68.
 - 24) 中嶋芳紀・河野幸次・松本亨・井村秀文 (1997) 「港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究: 福岡市アイランドシティのケーススタディ」『土木学会論文集』第 566 巻, pp.35-47.
 - 25) 本藤祐樹・内山洋司 (1999) 「産業連関表を用いた実用的なインベントリー分析手法の確立—財多価による配分問題および積み上げ法との融合方法」『日本エネルギー学会誌』第 78 巻 第 10 号, pp.861-868.
 - 26) 石川明・加藤丈佳・鈴置保雄 (2008) 「産業連関表を用いた機械装置重量と CO2 排出量の関係の検討: CO2 排出量の簡易推計のために」『日本 LCA 学会誌』第 4 巻 第 4 号, pp.349-358.