

拡張産業連関表による微細藻類バイオ燃料 生産の経済・環境への波及効果分析

2015年11月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所

科学技術動向研究センター

鷺津 明由 中野 諭 新井 園枝

古川 貴雄 白川 展之 林 和弘

本 DISCUSSION PAPER は、所内での討論に用いるとともに、関係の方々からのご意見をいただくことを目的に作成したものである。

また、本 DISCUSSION PAPER の内容は、執筆者の見解に基づいてまとめられたものであり、機関の公式の見解を示すものではないことに留意されたい。

DISCUSSION PAPER No. 126

Economic and Environmental Impact Analysis of Biofuel Production from Micro Algae
by Extended Input-Output Table

Ayu Washizu, Satoshi NAKANO, Sonoe ARAI,
Takao FURUKAWA, Nobuyuki SHIRAKAWA, Kazuhiro HAYASHI

November 2015

Science and Technology Foresight Center
National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)
Japan

本報告書の引用を行う際には、出典を明記願います。

拡張産業連関表による微細藻類バイオ燃料生産の経済・環境への波及効果分析

文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター

鷲津 明由 中野 諭 新井 園枝 古川 貴雄 白川 展之 林 和弘

要旨

本調査研究では、石油資源の枯渇を背景に、環境負荷やエネルギーセキュリティの面から注目を集める微細藻類バイオ燃料生産を取り上げ、経済・環境への波及効果を定量的に分析した。具体的には、微細藻類バイオ燃料生産方式として、将来の普及が期待される簡易フォトバイオリアクタ方式と大規模開放池を例に、拡張産業連関表を用いた分析により、バイオ燃料施設建設と経常運転における生産誘発額、雇用誘発数、エネルギー消費量、CO₂排出量を推計した。また、産業部門別の誘発効果推計から、2つのバイオ燃料生産方式の特徴と課題を明らかにし、バイオ燃料生産の低コスト化や、CO₂排出量削減に寄与する方法を定量的に比較した。さらに、微細藻類の成長速度と油脂含有率を変数として、バイオ燃料及び残渣から生産される固形燃料、肥料、飼料の年間生産額、CO₂排出削減量について感度分析をした。感度分析の結果、経済効果と環境負荷という2つの観点から、社会的な課題解決に向けた研究開発について、定量的な根拠に基づく議論が可能となった。

Economic and Environmental Impact Analysis of Biofuel Production from Micro Algae by Extended Input-Output Table

Ayu WASHIZU, Satoshi NAKANO, Sonoe ARAI,

Takao FURUKAWA, Nobuyuki SHIRAKAWA Kazuhiro HAYASHI

Science and Technology Foresight Center, National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), MEXT

ABSTRACT

This study quantitatively analyzed the economic and environmental impacts of biofuel production from micro algae that attracts a great deal of attention from the aspects of environmental load and energy security as well as petroleum exhaustion. For simplified photobioreactor (PBR) and large open pond models expected to become widespread, an analysis based on the extended input-output table estimated production inducement, employment inducement, energy consumption and CO₂ emissions in terms of construction and operation of two types of the biofuel production systems. Estimation of the induced effects by industrial sectors revealed the characteristics and problems of the biofuel production systems, and quantitatively showed methods to reduce the cost and CO₂ emissions in the biofuel production. Furthermore, a sensitivity analysis of the annual output and CO₂ emissions by solid fuel, fertilizer and feed produced from residue in addition to biofuel was performed, in which parameters indicating growth rate and oil content of micro algae were used. Consequently, the sensitivity analysis enabled to discuss research and development aiming to solve social problems based on quantitative evidence from the viewpoints of economic impact and environmental load.

目次

概 要.....	i
1. 調査研究の背景と目的	1
1.1 科学技術のもたらす波及効果の定量分析	1
1.1.1 研究開発の経済効果分析	1
1.1.2 産業連関分析の応用	1
1.2 微細藻類によるバイオ燃料生産	2
1.2.1 エネルギー密度からみた液体燃料	2
1.2.2 バイオ燃料とその原料	3
1.2.3 バイオ燃料とエネルギー安全保障・環境規制	4
1.2.4 航空機部門におけるバイオ燃料導入の拡大	4
1.2.5 国内における公的なバイオ燃料研究開発プロジェクト	5
1.3 調査研究の構成	5
2. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産方法	7
2.1 生産工程	7
2.1.1 微細藻類の種類	7
2.1.2 培養	8
2.1.3 収穫	8
2.1.4 脱水・乾燥	8
2.1.5 抽出・分離	8
2.1.6 精製	9
2.1.7 残渣の利用	9
2.2 バイオ燃料生産方式	9
2.2.1 簡易 PBR 方式	9
2.2.2 大規模開放池方式	10
2.2.3 バイオ燃料生産方式の比較	10
3. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産の産業連関分析	12
3.1 生産誘発額の算出	12
3.2 雇用誘発・エネルギー消費誘発・CO ₂ 排出誘発の推計	12
3.3 微細藻類を用いたバイオ燃料生産のアクティビティ	13
4. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産による経済・環境への波及効果推計	16
4.1 生産誘発効果	16
4.1.1 直接効果と間接効果	16
4.1.2 継続性の検討	17
4.1.3 産業部門別分析	18
4.2 雇用誘発効果	22
4.2.1 直接効果と間接効果	22
4.2.2 継続性の検討	23
4.2.3 産業部門別分析	24
4.3 エネルギー消費誘発効果	28

4.3.1	直接効果と間接効果.....	28
4.3.2	継続性の検討.....	29
4.3.3	産業部門別分析.....	30
4.4	CO ₂ 排出誘発効果.....	34
4.4.1	直接効果と間接効果.....	34
4.4.2	継続性の検討.....	35
4.4.3	産業部門別分析.....	35
4.5	誘発効果の比較.....	39
4.5.1	生産誘発効果と雇用誘発効果.....	39
4.5.2	生産誘発効果とエネルギー消費誘発効果.....	40
4.5.3	生産誘発効果と CO ₂ 排出誘発効果.....	41
4.6	経済・環境への波及効果分析から浮かび上がる論点.....	43
5.	残渣利用を含む微細藻類バイオ燃料生産の感度分析.....	45
5.1	バイオ燃料生産における残渣の利用.....	45
5.2	バイオ燃料・残渣生産量.....	45
5.3	バイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料の生産額.....	47
5.4	バイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料の CO ₂ 排出削減量.....	51
5.5	感度分析から浮かび上がる論点.....	55
6.	おわりに.....	57
	謝辞.....	58
	参考文献.....	59
	調査担当者.....	62

概 要

概要

1. 調査研究の目的

石油資源の枯渇を背景に、環境負荷やエネルギーセキュリティの観点から、食糧生産と競合しない微細藻類を原料とする第3世代バイオ燃料の実用化が期待されている。航空機用ジェット燃料の代替には、重量エネルギー密度と体積エネルギー密度が既存ジェット燃料と同等¹で、環境負荷が低く、技術的連続性に優れたバイオ燃料が有力視されている²。本調査研究では、国内外の研究機関のみならず産業界からも注目を集める微細藻類を用いたバイオ燃料生産を取り上げ、産業連関分析と感度分析により、経済と環境への波及効果を定量的に分析する。分析結果から、バイオ燃料生産の特徴と課題を明らかにし、社会実装に向けた今後の研究開発の方向性について検討する。

2. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産方法

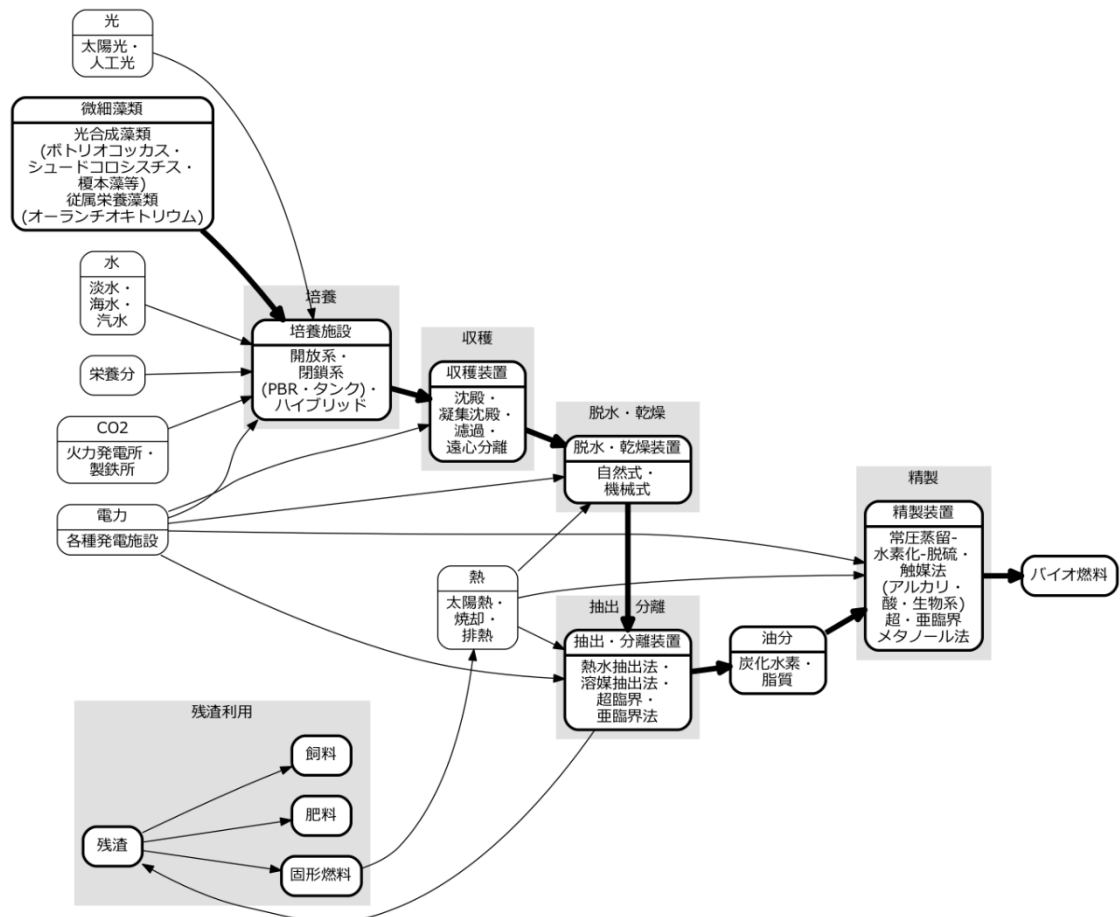
微細藻類を用いたバイオ燃料生産では、原料とする微細藻類の種類だけでなく、培養、収穫、脱水・乾燥、抽出・分離、精製等の工程において、様々な技術的選択肢が存在する(概要図1)。ここでは、詳細な検討が進められている簡易フォトバイオリクタ(Photobioreactor: PBR)方式と大規模開放池方式を例に、既存の産業連関表を拡張し、経済と環境への波及効果を定量的に分析した。簡易PBR方式と大規模開放池方式のバイオ燃料生産施設の面積はそれぞれ、東京ドームのおおよそ4倍と530倍に相当する。簡易PBR方式では、プラスチックパイプの代わりに安価なプラスチックフィルムのチューブを利用する。簡易PBR方式の場合、コンタミネーション等の問題が発生しにくいいため、成長速度が速く、油脂含有率も比較的高い微細藻類が生産できると仮定した(概要表1)。

概要表1 微細藻類バイオ燃料生産施設

	簡易PBR	大規模開放池
成長速度 [g/m ² day]	73.5	31
油脂含有率 [%]	45	40
培養方式	簡易PBR	開放池
収穫方式	凝集沈殿・濾過	凝集沈殿・濾過
抽出・分離	ヘキサン抽出	ヘキサン抽出
稼動日数 [day]	365	330
水路の面積 [ha]	19	2,500
水路の深さ [m]	0.3	0.2
水路の体積 [m ³]	57,000	5,000,000

¹ 水素燃料も検討されているが、体積エネルギー密度が低く、燃料タンクが大型化するため航空機には適さない。

² 微細藻類は成長時に光合成でCO₂を吸収するため、微細藻類を原料とするバイオ燃料生産により大気中のCO₂が微細藻類に固定される。また、バイオ燃料の燃焼時にCO₂が排出されるが、大気中に存在していたCO₂を循環させているに過ぎない。



概要図1 微細藻類を用いたバイオ燃量生産工程

3. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産による経済・環境への波及効果

微細藻類バイオ燃料生産による経済への波及効果を評価するために生産誘発額と雇用誘発数を推計し、環境への波及効果を評価するためにエネルギー消費量とCO₂排出量を推計した³。波及効果に関する産業部門別の分析から、微細藻類バイオ燃料生産における簡易PBR方式と大規模開放池方式の特徴を明らかにする。さらに、波及効果の継続期間に注目し、波及効果をバイオ燃料生産のための施設建設と経常運転に分割して分析する。施設建設による波及効果は建設期間に限定されるが、経常運転による波及効果は継続的に現れるという違いがある。以下に、拡張産業連関表を用いた生産誘発額とCO₂排出量の産業部門別分析の結果を示す。

3.1 拡張産業連関表による生産誘発額の産業部門別分析

(a) 施設建設

簡易PBR方式(概要図 2(a))では、「プラスチック製品」、「化学機械」、「ポンプ及び圧縮機」などの装置

³ バイオ燃料の精製工程にもバイオテクノロジー等の技術革新が期待されるが、産業連関表を拡張するための装置等の情報収集が困難であったため、ここでは既存の石油精製工程を仮定した。ここでは、バイオ燃料生産方式による波及効果を比較するために、バイオ燃料の精製工程の波及効果を除いて分析した。

による生産誘発額が大きく⁴、大規模解放池方式(概要図 2(b))では、「その他の土木建設」による生産誘発額が突出している。簡易PBR方式の場合、プラスチックフィルム等の素材産業や装置産業に波及効果が現れるが、大規模解放池方式の場合、土木工事に波及効果が集中するという相違点が明らかになった。

(b) 経常運転

各種装置の運転に電力を使用するため、簡易PBR方式(概要図 2(c))と大規模解放池方式(概要図 2(d))のいずれも、事業用発電部門⁵における生産誘発額が大きい点は共通している。大規模開放池方式では、大量の水を使用するためを「上水道・簡易水道」部門の生産誘発額が大きいという特徴がある⁶。

3.2 拡張産業連関表による CO₂ 排出量産業部門別分析

(a) 施設建設

簡易 PBR 方式(概要図 3(a))では、「銑鉄」、「事業用火力発電」部門の CO₂ 排出量が多く、大規模開放池方式(概要図 3(b))では、「セメント」、「銑鉄」、「事業用火力発電」部門の CO₂ 排出量が多い。「銑鉄」の CO₂ 排出は間接 4 次以降に現れることから、鉄鋼を用いる様々な産業部門における CO₂ 排出要因となっていることが推測される。大規模開放池方式では、「その他の土木建設」部門において大量のセメントが使用されるため、「セメント」部門における間接 2 次・3 次の CO₂ 排出量が多いという特徴が見られる。

(b) 経常運転

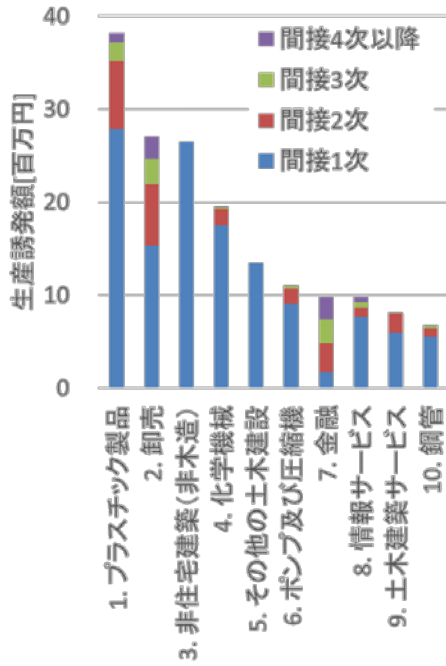
簡易 PBR 方式(概要図 3(c))と大規模開放池方式(概要図 3(d))のいずれも施設設備は電力で運転されるため、「事業用火力発電」部門の CO₂ 排出量が突出している。

施設建設における CO₂ 排出量削減を考えると、鉄鋼に関連する様々な産業からの波及効果が大きい「銑鉄」部門における CO₂ 排出量削減が最優先課題であることがわかる。一方、継続的に発生する経常運転の CO₂ 排出量削減には、事業用火力発電部門における CO₂ 排出量削減の寄与が大きいことがわかる。継続的な CO₂ 排出量削減を重視するのであれば、施設建設費用は増加しても、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギー発電施設を併設する、あるいは、微細藻類から得られる残渣を燃料に用いる熱エネルギーシステムの導入も検討課題と言える。

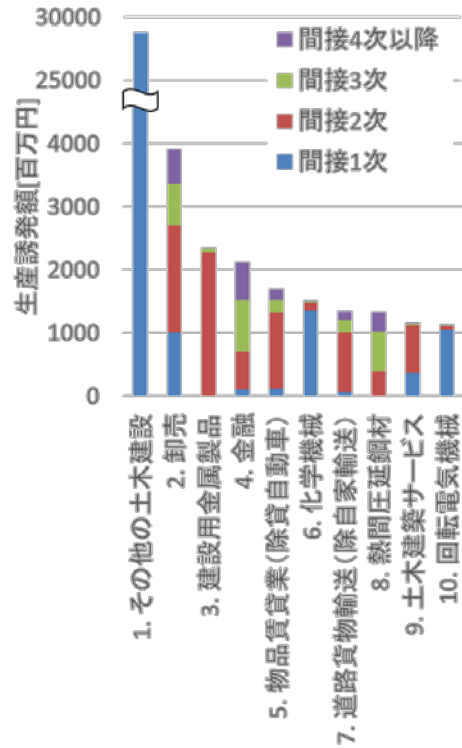
⁴ 施設建設の場合、「卸売」や「非住宅建築(非木造)」等の生産誘発額が一般的に大きい。

⁵ 総務省「平成 17 年産業連関表」調査時点の電源構成が反映されている。

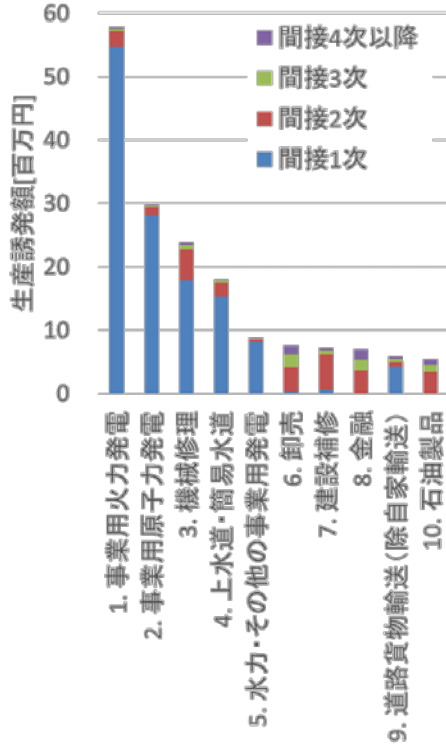
⁶ 工業用水の利用も考えられるが立地条件に依存し、取水設備の費用が必要になることから、この分析では上水道を仮定した。



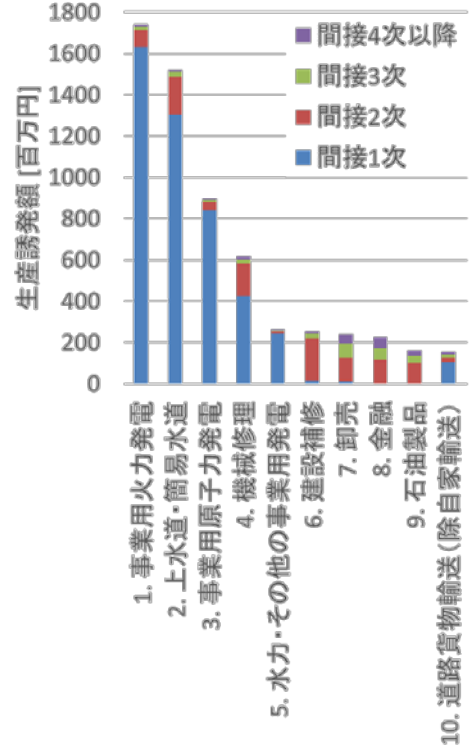
(a) 簡易 PBR 方式 施設建設



(b) 大規模開放池方式 施設建設

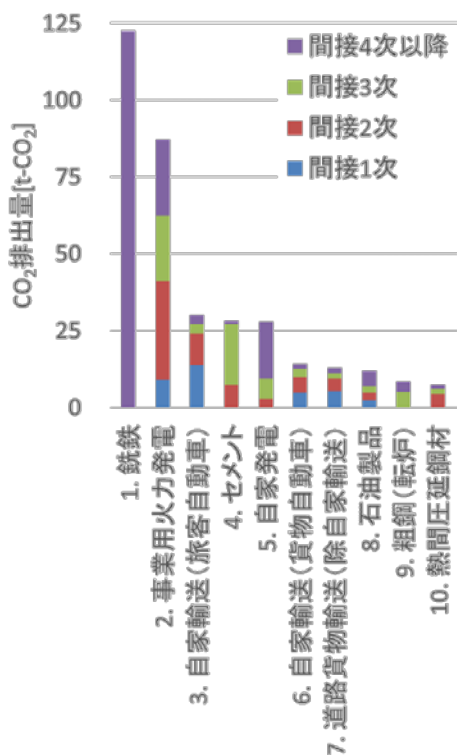


(c) 簡易 PBR 方式 経常運転

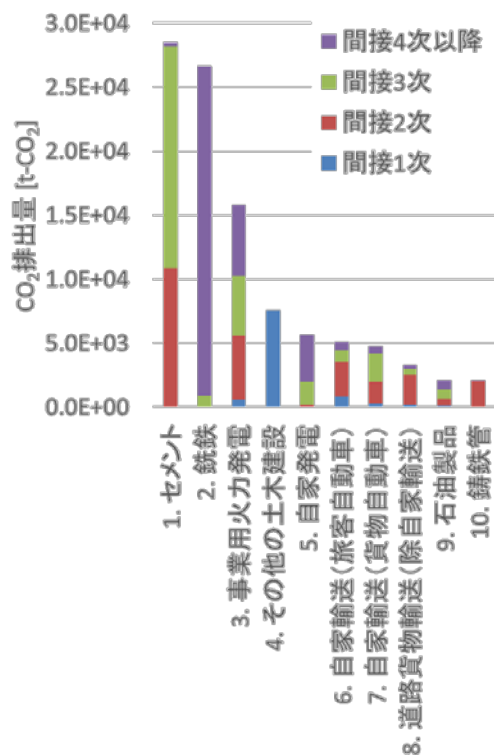


(d) 大規模開放池方式 経常運転

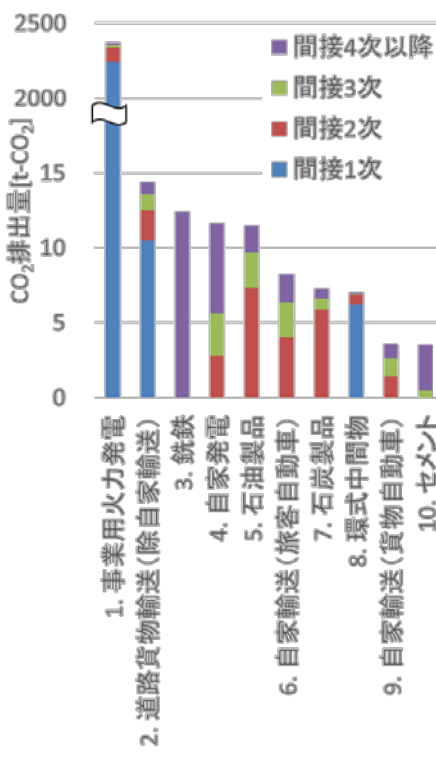
概要図 2 微細藻類バイオ燃料生産による産業部門別生産誘発額
(生産誘発額の間接効果上位 10 部門)



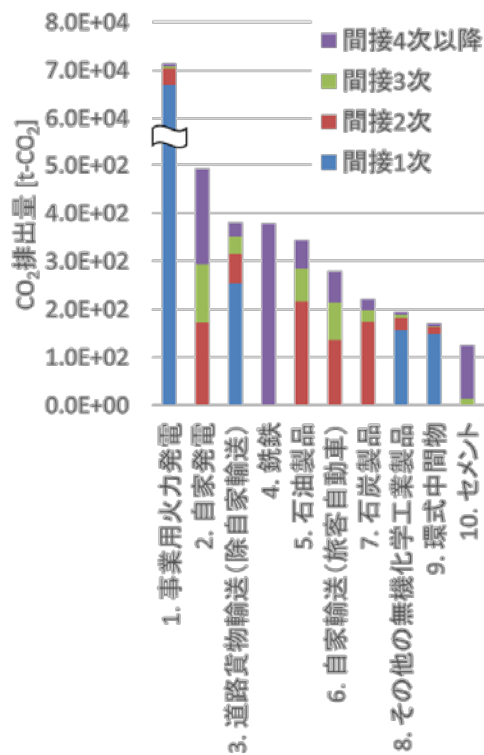
(a) 簡易 PBR 方式 施設建設



(b) 大規模開放池方式 施設建設



(c) 簡易 PBR 方式 経常運転



(d) 大規模開放池方式 経常運転

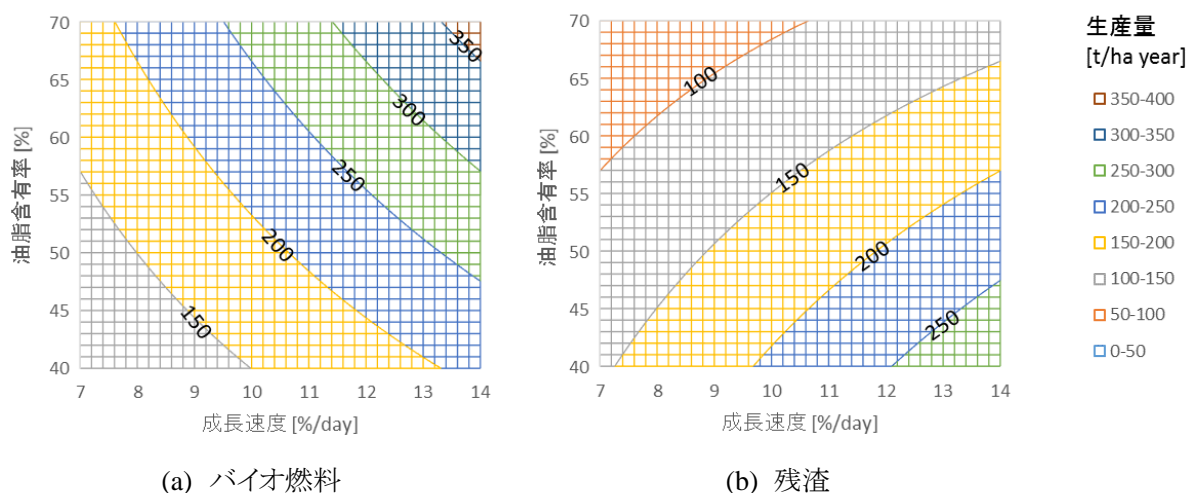
概要図 3 微細藻類バイオ燃料生産施設建設による産業部門別 CO₂ 排出量 (CO₂ 排出量の間接効果上位 10 部門)

4. 残渣利用を含むバイオ燃料生産の感度分析

微細藻類を用いたバイオ燃料生産工程では、油分抽出後に微細藻類の残渣が残り、(1) 固形燃料、(2) 肥料、(3) 飼料等の生産にも残渣が利用される。微細藻類からバイオ燃料及び固形燃料、肥料、飼料を生産した場合の生産額と CO₂ 排出削減量は、微細藻類の成長速度と油脂含有率等を変数とするモデルにより推計ができる。ここでは、成長速度や油脂含有率を変数とする感度分析により、生産額と CO₂ 排出削減量の変化を分析し、今後の微細藻類研究の目指す方向性について検討する。

4.1 バイオ燃料の生産量向上

バイオ燃料の生産量を向上させるには、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類⁷の生産が適している(概要図 4(a))。バイオ燃料生産時に発生する残渣は、微細藻類からバイオ燃料となる油分を除いた成分であるため、油脂含有率が低いほど残渣生産量が増加する (概要図 4(b))。

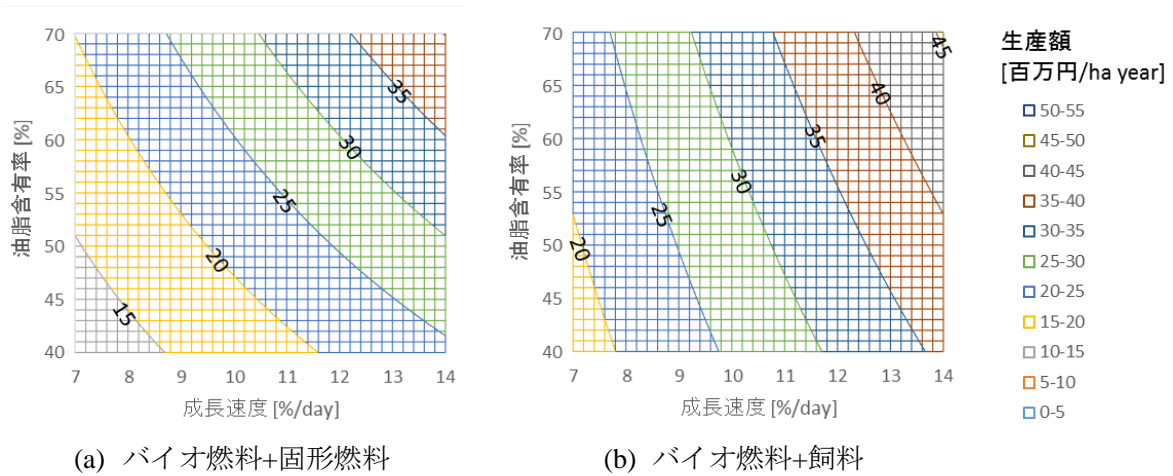


概要図 4 簡易 PBR 方式によるバイオ燃料・残渣の単位面積当たり年間生産量と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係

4.2 残渣利用を含むバイオ燃料生産による生産額の向上

バイオ燃料及び残渣から生産した固形燃料と飼料の生産額を比較すると、同一の成長速度、油脂含有率であれば、バイオ燃料と飼料を合わせた生産額の大きいことがわかる(概要図 5)。微細藻類の成長速度、油脂含有率と生産額の関係から、生産額を向上させるには、油脂含有率が高くなくとも、成長速度の速い微細藻類からバイオ燃料を生産し、残渣から付加価値の高い飼料を生産すればよいことがわかる。結果として、油脂含有率よりも、成長速度の速い微細藻類を用いたバイオ燃料生産により、大きな経済効果が期待されることが示された。

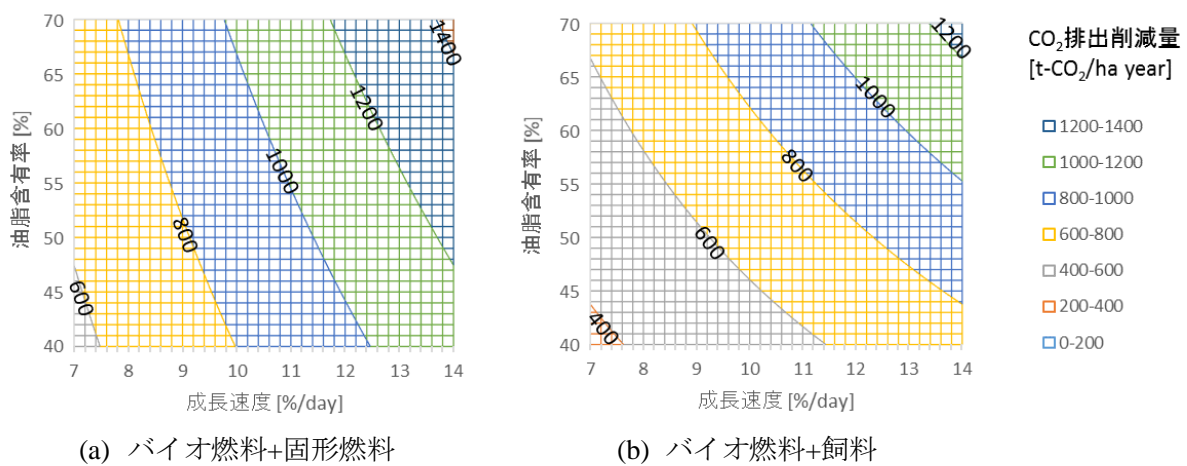
⁷ 成長速度と油脂含有率の下限值はすでに実現されている水準であり、上限値は今後の研究成果により実現が期待される値とした。



概要図 5 簡易 PBR 方式のバイオ燃料・残渣利用による単位面積当たりの年間生産額と微細藻類の成長速度と油脂含有率の関係

4.3 残渣利用を含むバイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量の向上

既存の化石燃料がバイオ燃料に代替されることにより CO₂ 排出量は削減される。バイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量の向上には、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類を生産すればよい。バイオ燃料及び残渣から生産した固形燃料と飼料による CO₂ 排出削減量を比較すると、同一の成長速度、油脂含有率であれば、微細藻類からバイオ燃料と固形燃料を生産した方が CO₂ 排出削減量の大きいことがわかる(概要図 6)。残渣利用を含むバイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量の向上には、油脂含有率が高くなくとも成長速度の速い微細藻類からバイオ燃料と CO₂ 排出削減量の大きい固形燃料を生産すればよい。



概要図 6 簡易 PBR 方式バイオ燃料生産と微細藻類残渣を用いた固形燃料と飼料生産による単位面積当たり年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度と油脂含有率の関係

このような感度分析により、目的に応じて、効果的な微細藻類バイオ燃料生産の残渣利用方法が選択できる。結果として、経済効果と環境負荷という 2 つの観点から、社会実装に向けた研究開発の方向性について、定量的な根拠(エビデンス)に基づく議論が可能となった。

本 編

1. 調査研究の背景と目的

政府研究開発投資については、客観的根拠に基づく合理的プロセスによる意思決定が求められており、科学技術イノベーション政策を推進するために、研究開発投資の社会経済的影響の測定と可視化手法の必要性が指摘されている。これまでに、最新技術による社会的波及効果を定量的に分析する試みとして、拡張産業連関表を用いて再生可能エネルギー発電施設建設による経済・環境への波及効果を、産業部門別の生産誘発額、雇用誘発数、エネルギー消費量、CO₂排出量から多面的に分析した[1]。本調査研究では、将来に我々の生活を大きく変化させることが期待され、国内外の学術機関のみならず産業界からも注目を集めている微細藻類によるバイオ燃料生産を取り上げ、拡張産業連関表を用いて微細藻類培養モデルを比較分析し、経済と環境への波及効果から研究開発の方向性について検討する。

1.1 科学技術のもたらす波及効果の定量分析

1.1.1 研究開発の経済効果分析

科学技術は経済成長の源泉とされ、様々な観点から科学技術のもたらす経済効果が議論されている[2,3]。科学技術の進歩に研究開発が大きく寄与することから、研究開発の成果による生産性向上に注目した研究が行われてきた[4-6]。これらの研究では、研究開発投資によって創出された知識の蓄積や流動を生産関数に導入し、生産性向上を定量的に分析している。このような研究を背景に、技術進歩を内生化した欧州のマクロ経済モデルNEMESIS⁸が開発され[7]、EUの第7次フレームワークプログラム(FP7)の経済効果分析に用いられている[8]。

NEMESISでは産業部門を30に分け、それぞれの技術進歩を個別に記述している。技術進歩は、当該部門及び他部門における研究開発の蓄積や公的な研究開発の蓄積によって生み出される知識の増分として表現され、これが全要素生産性の増分に比例すると仮定している。このように、産業部門別の技術進歩は抽象化された数理モデルに記述される。

1.1.2 産業連関分析の応用

産業連関分析は、産業部門別の生産誘発額や雇用誘発数といった経済効果を分析する手法の一つであり、公的投資による直接・間接効果の測定や産業波及効果の推計に利用されている。また、製品を構成する原材料の需給に注目した産業連関分析は、製造工程におけるエネルギー消費量や環境汚染物質の排出量の推計にも利用されている[8,9]。

産業連関分析は、産業政策やエネルギー・環境政策の波及効果を検討する際に、定量的な根拠(エビデンス)を示すために用いることが多い。例えば、英国におけるエネルギー・環境政策を検討するために、英国の石炭、石油産出・精製、電気、ガス等のエネルギー産業部門を含む10部門の産業連関表を用いて、生産・雇用誘発と大気汚染物質(SO₂, NO_x, CO₂等)排出量の関係が分析された

⁸ NEMESISの詳細については文献[3]を参照されたい。

[11]。また、欧州地域の産業連関分析を用いて雇用誘発効果の観点からバイオ燃料に関する政策を検討した例[12]や、ドイツ国内における雇用誘発の観点から再生可能エネルギーの経済波及効果を分析した例がある[13]。他にも、バイオ燃料も含めたバイオテクノロジー産業によるドイツ国内の生産・雇用誘発を分析した例がある[14]。これらの分析にはシナリオに基づいた将来推計も含まれている[12-14]。日本国内の再生可能エネルギーによる雇用誘発に注目し、住宅用太陽光発電と風力発電[15]、地熱発電[16]について分析した例も報告されている。

既存の産業連関表を、研究開発の成果として生み出される新しい製品・サービスに対応するように拡張すれば、当該技術を導入した場合の経済波及効果や、エネルギー消費や環境汚染物質排出などの環境への負荷を定量的に分析できる。このような分析により、推進すべき技術の候補を多面的、かつ定量的に評価し、公的な研究開発投資の選択と集中を行うためのエビデンスを提示できる可能性がある。さらに、産業連関表では、新素材開発等の技術進歩は、原材料の使用量や構成比の変化として明示的に記述されるという特徴がある。そのため、新技術の波及効果分析から、生産・雇用誘発やエネルギー・環境に支配的影響を与えらると思われる具体的な研究課題の抽出に利用することも期待される。

1.2 微細藻類によるバイオ燃料生産

1.2.1 エネルギー密度からみた液体燃料

液体燃料、水素、蓄電池等をエネルギー貯蔵媒体とみなし、体積エネルギー密度と重量エネルギー密度の関係から比較した結果を図 1.1 に示す。液体燃料の体積エネルギー密度は、Li イオン電池等の蓄電池や圧縮水素、水素吸蔵合金に比べて高いことがわかる。Li イオン電池を用いた電気自動車は一般に普及し、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle: FCV)も今後の普及が期待されている。水素はクリーンなエネルギーとして普及が期待されるが、液体燃料と比べて体積エネルギー密度が低く、高圧低温の貯蔵タンクを使用しても、その容量が大きくなるという問題がある。例えば、FCV 試作車には、70[MPa]の高圧水素貯蔵タンクが使用されているが、ガソリンタンクの3倍程度の容量となっている。水素燃料の航空機[18]も検討されているが、水素は体積エネルギー密度が低いと巨大な貯蔵タンクが必要になるという技術的課題がある。そのため、航空機用ジェット燃料の代替燃料として、体積エネルギー密度と重量エネルギー密度の高いバイオ燃料が利用され、CO₂排出量の削減に寄与することが期待されている。

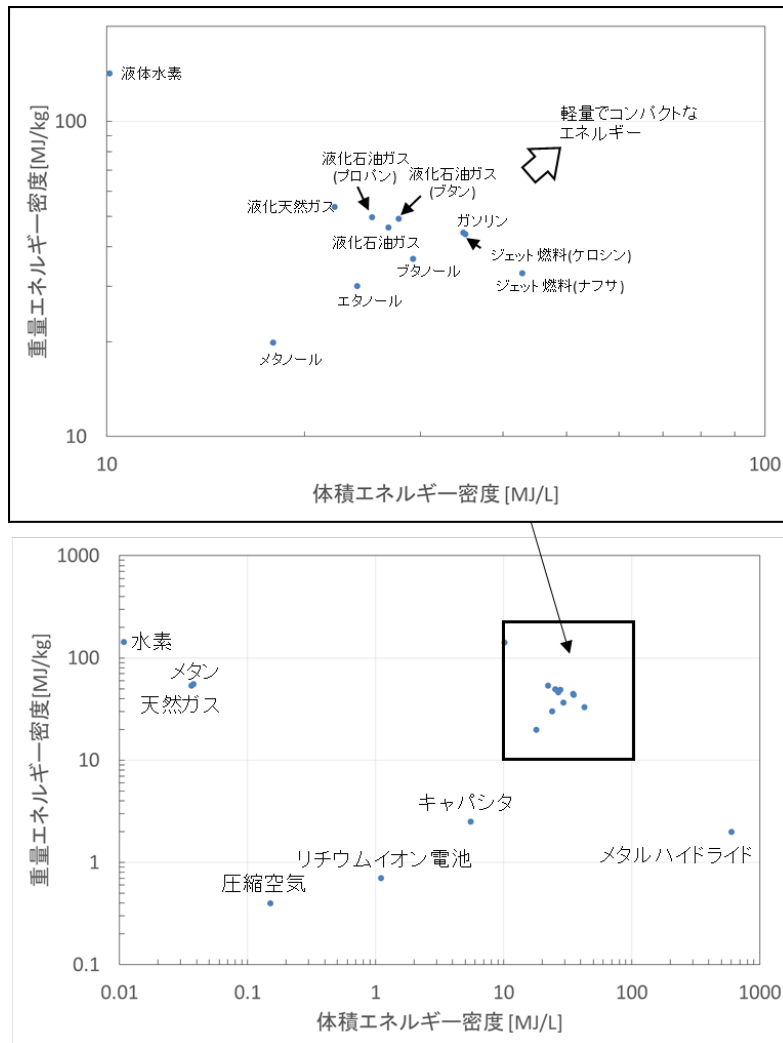


図 1.1 体積エネルギー密度と重量エネルギー密度の関係

文献[17]に基づき科学技術動向研究センターにて作成

1.2.2 バイオ燃料とその原料

バイオ燃料は、トウモロコシ、サトウキビ等の食用作物から製造されるエタノールを第1世代バイオ燃料と呼び、食用作物非可食部やジェトロファなどの非食用作物、草本・木本から製造されるセルロース系エタノールが第2世代バイオ燃料と呼ばれる。食糧生産と競合しない微細藻類 (microalgae) から製造される燃料が第3世代バイオ燃料とされている。

微細藻類は、約30億年前の海洋に現れた最初の生物の1つであり、現在では、海洋のみならず湖沼や川などの淡水系でも繁殖し、その種類は10万種類に及ぶとされている。微細藻類は、食物連鎖の最下層に位置する植物プランクトンとも呼ばれ、多様な生態系を支えている。動物プランクトンの食餌となるだけでなく、クロレラやスピルリナといった微細藻類は健康食品として消費されている。特定の微細藻類の場合、その成長過程において、光合成によって大気中の二酸化炭素を固定して酸素を産出するだけでなく、体内に油脂成分を蓄積する。油脂成分を含む微細藻類の大量の死骸が長期間堆積した地層が、現在の油田となっている[21]。

1.2.3 バイオ燃料とエネルギー安全保障・環境規制

世界的な人口増加に伴う1次エネルギー需要の増加から、エネルギー資源枯渇の問題が指摘されている。採掘技術の向上により商業化が可能となったシェールガス等の非在来型のエネルギー資源も注目を集めているが、採掘、生産コストを考慮すると、在来型エネルギー資源に対して価格競争力が必ずしも優位とは言えず、経済合理性の面で課題が残る。経済活動を支えるエネルギーの安定供給は各国の重要政策課題の1つであり、長期的に安価なエネルギー資源を確保するというエネルギー安全保障の観点から、バイオマスを含む先進的な再生可能エネルギーを普及させる技術に期待が寄せられている。

地球温暖化問題を背景に温室効果ガス排出量の抑制が世界的な課題とされ、温室効果ガス排出量の削減するための環境規制が施行されている。米国の場合、米国環境保護庁(EPA⁹)は、2007年エネルギー自給・安全保障法(EISA¹⁰)に基づき、温室効果ガスの20%削減を目標とした2022年までのバイオ燃料の総量と、食糧生産と競合しない新型バイオ燃料の使用量を再生可能燃料基準(RFS¹¹)として定め、2010年に改訂している(RFS2¹²)。欧州では、2003年にバイオ燃料指令(2003/30/EC¹³)を制定し、輸送燃料に占めるバイオ燃料の割合をEU全体で2005年に2%、2010年までに5.75%とする目標を定めた。さらに、2009年に再生可能エネルギー指令(2009/28/EC¹⁴)を制定し、2020年までに輸送燃料に占めるバイオ燃料の割合を10%にするという目標に加え、持続可能性基準によって環境負荷の考慮し、使用するバイオ燃料の種類を制限している。

1.2.4 航空機部門におけるバイオ燃料導入の拡大

現在、航空機からのCO₂排出量は運輸部門の約20%を占めており、このCO₂排出量を削減するために機体の軽量化技術の導入が進められている。しかし、多様なエネルギーを利用できる自動車等の運輸機器と比べて航空機の場合、抜本的なCO₂排出量削減が困難という問題を抱えている。さらに、格安航空会社の市場参入により旅客数は増え、世界的に航空機需要が拡大する傾向にある。2050年には、航空機部門のCO₂排出量が運輸部門で最大の40%を占めると予測されている[20]。

米国では、国防産業法(the Defense Production Act: DPA)の第3章プログラム¹⁵に基づき、国防総省が先進的なドロップインバイオ燃料生産プロジェクト¹⁶を進めている[21]。ドロップインバイオ燃料とは、既存内燃機関を変更せずに利用可能なバイオ燃料である。このプロジェクトでは、バイオマス原料から軍用輸送機器の燃料として使用可能な経済合理性のあるドロップインバイオ

⁹ Environmental Protection Agency

¹⁰ Energy Independence and Security Act of 2007

¹¹ Renewable Fuel Standard

¹² Changes for the Renewable Fuel Standard

¹³ Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport

¹⁴ Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives

¹⁵ Defence Production Act Title III, <http://www.dpatitle3.com/>

¹⁶ Advanced Drop-In Biofuels Production Project

燃料生産を目的としている。

欧州では、EUがFlightpath 2050 という報告書[22]をまとめ、この報告書の中で、2000年比で2050年には、航空機の1旅客km当たりのCO₂排出量を75%削減し、NO_xを90%削減するという目標を掲げている。また、7th Framework Programme (FP7)では、2008～2012年に約9.7M[Euro]の予算で航空機用バイオ燃料の研究開発プログラムAlfa-Bird(Alternative Fuel and Biofuel for Aircraft Development)¹⁷を実施している。

1.2.5 国内における公的なバイオ燃料研究開発プロジェクト

国内では、(独)科学技術振興機構(JST)が戦略的創造研究推進事業として、「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術」というプログラムを実施している。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業(次世代技術開発)の中で、軽油及びジェット燃料代替バイオ燃料製造技術開発を進めている。また、農林水産省では、農山漁村6次産業化に係る緑と水の環境技術革命プロジェクト事業において、微細藻類によるバイオ燃料生産を取り上げている。

1.3 調査研究の構成

図1.2に本調査研究を構成を示す。第2章では、微細藻類を用いたバイオ燃料生産における生産工程を整理し、将来の普及が期待されている簡易フォトバイオリアクタ(Photobioreactor: PBR)方式と、大規模開放池方式を取り上げる。第3章では、微細藻類バイオ燃料生産を分析するための、産業連関表の拡張方法について述べ、第4章では、拡張産業連関表を用い、バイオ燃料生産による経済と環境への波及効果を推計する。さらに、定量分析から、経済性向上や環境負荷低減に向けた具体的な方策について論じる。第5章では、残渣利用を含むバイオ燃料生産の感度分析により、経済性向上や環境負荷低減に向けた技術選択と研究開発の方向性について論じる。

¹⁷ Alfa-Bird <http://www.alfa-bird.eu-vri.eu/>

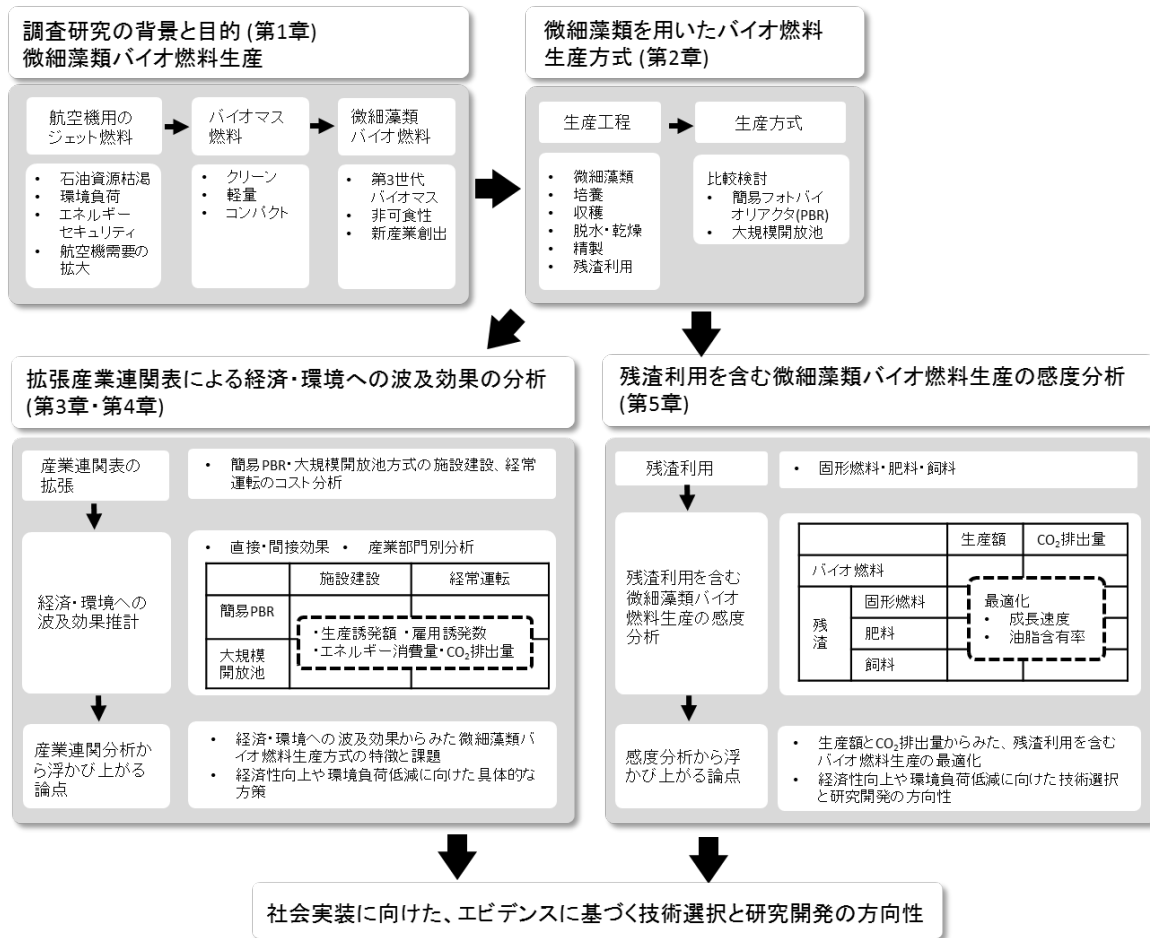


図 1.2 調査研究の構成

2. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産方法

微細藻類は、液体燃料の他にもメタンや水素などのエネルギーキャリアの製造に利用したり、残渣を固形燃料として発電に利用するといったエネルギー用途もある[23, 24]。エネルギーとして利用の他にも、石油代替原料や化粧品原料、健康食品としての利用も注目されている[25]。体積エネルギー密度と重量エネルギー密度が高いことから、航空機用のバイオジェット燃料としての利用法が最も大きな期待を集めている[26]。

食用作物から製造される第1世代バイオ燃料の原料(トウモロコシやサトウキビなど)や食用作物非可食部や非食用作物から製造される第2世代バイオ燃料の原料(ジェットロファ、草本・木本など)と比較して、微細藻類は養分をそれほど必要とせず栽培が簡単で成長が早く、油分含有量が高いという特徴がある[27]。しかし、現状では微細藻類によるバイオ燃料の商業生産法は確立しておらず、図2.1に示す様々な技術的選択肢が検討されている。

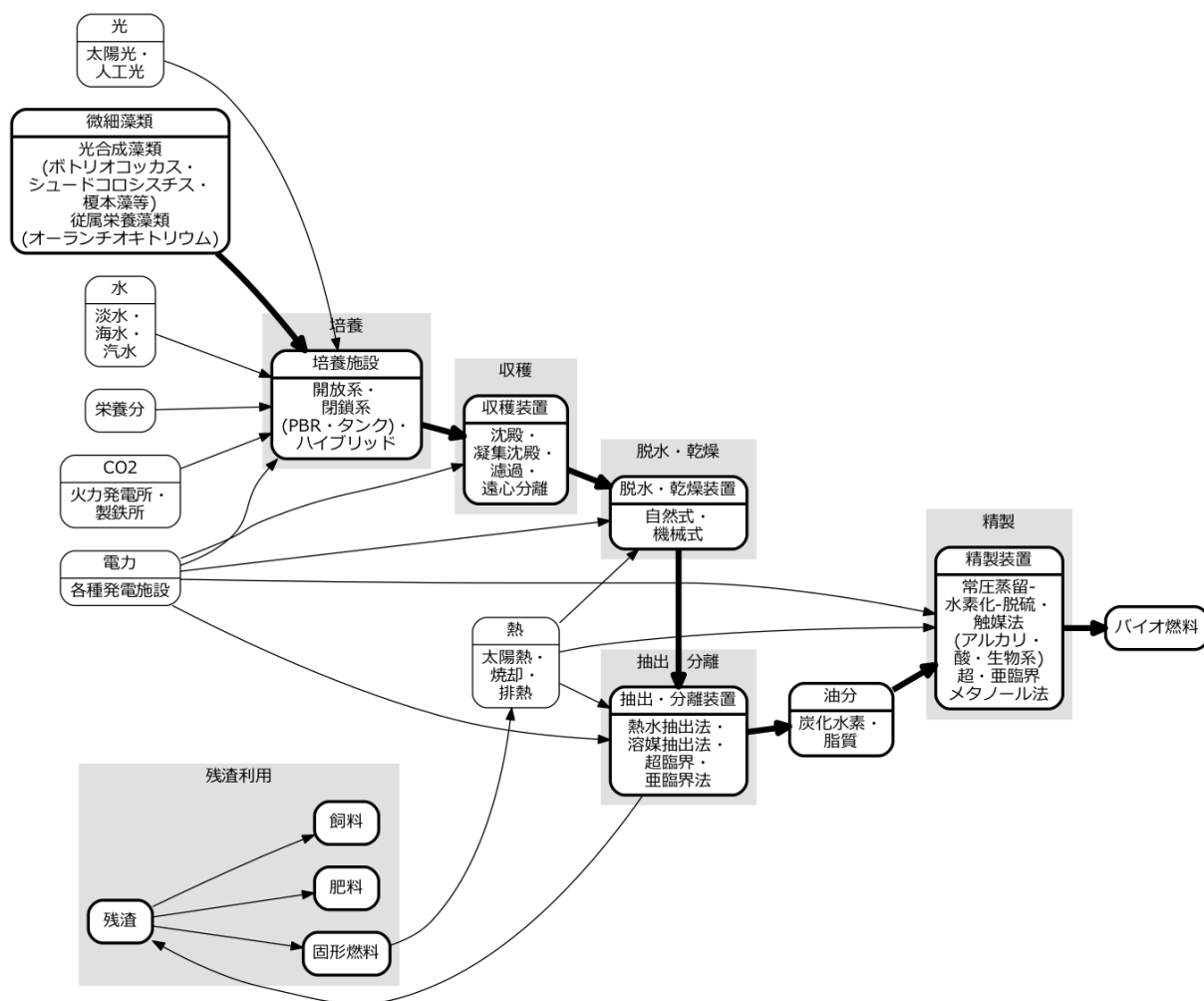


図 2.1 微細藻類を用いたバイオ燃料生産工程

2.1 生産工程

2.1.1 微細藻類の種類

バイオ燃料生産のための微細藻類は、葉緑素を持ち光合成をする種と、葉緑素を持たず周囲の有機物を吸収して成長する種の2種類に大別される。葉緑素を持つ微細藻類としてボトリオコッ

カスが広く知られ、葉緑素を持たない微細藻類にオーランチオキトリウムがある。筑波大学では、生活排水に含まれる有機物でオーランチオキトリウムを培養した上、浄化された水を用いてボトリオコッカスを培養するという実証実験を行っている[28]。現在、各国で、成長速度が速く、油脂含有率が高く、さらに油分の抽出の容易な微細藻類の開発が進められている。国内においても、品種改良により、一般的なボトリオコッカスよりも成長速度の速い微細藻類が開発され、民間企業により 2020 年の実用化を目指した研究開発が行われている[29]。大学・公的研究期間では、遺伝子操作による藻類の開発が精力的に進められているが、生物多様性条約カルタヘナ議定書¹⁸の締約国では、開放系での藻類の培養は制限される。

2.1.2 培養

光合成を行う微細藻類は、屋外に開放された培養池(開放池)、あるいは、フォトバイオリアクタ(Photobioreactor: PBR)で培養される。一般的な開放池はレースウェイといわれる方式で、長円形の浅い池にCO₂を吹き込みながら水車によって水を回流させる施設である。PBRは、ガラスやプラスチックなどの透明な容器を用いて藻類を培養する装置である。閉鎖系のPBRであれば、雑菌などの混入(コンタミネーション)を防ぐことができ、高い収率が期待できるが、装置・施設のコストが高額になることが指摘されている[23]。その他に、開放池とPBRの利点を組み合わせたハイブリッド型の培養池も検討されている[30]。

微細藻類を培養する装置や施設には、地形や気候などに依存して様々な種類がある。例えば、開放池でも、自然の湖の外輪を利用してコンクリート打ちをしないという例[31]もある。また、PBRについても、水平、垂直、傾斜、らせん状などの配置方法がある[18]。光合成を行わない従属栄養性の藻類は、ファーマンターと呼ばれる培養装置で培養される。ファーマンターには1[L]~500[kL]まで様々な規模がある[27]。

2.1.3 収穫

微細藻類は開放池やPBRなどの水中で培養されるため、水中から微細藻類を取り出す収穫の工程が必要である。微細藻類の収穫工程では、凝集沈殿、濾過、遠心分離など方法が検討されている。

2.1.4 脱水・乾燥

収穫された藻類は水分を多く含むため、脱水が必要である。脱水方法として、下水処理場の汚泥処理に用いられているドラムフィルタを使用する方法が検討されている[30, 31]。乾燥工程は、加熱乾燥と日光による自然乾燥がある。

2.1.5 抽出・分離

脱水された微細藻類から油分を抽出する方法として、実用段階にあるのはヘキサンによる溶媒抽出法

¹⁸ 生物の多様性に関する条約のバイオセーフティに関するカルタヘナ議定書

である。他にも水熱液化という方法があり、バイオ燃料の収量が3倍になるという効果が指摘されている。しかし、この方法では300[°C]、10[MPa]の抽出条件を必要とするため、その条件を効率的につくり出せるようなプラントシステムの開発が必要とされている[32]。

2.1.6 精製

抽出・分離された油分は、ジェットバイオ燃料等に精製されて商品となるが、この精製工程は既存の研究でも議論がなされていない。ある民間企業では、抽出・分離された油分は粗油として石油精製部門に産出し、精製は既存の石油精製工程で行うことを想定している。また、既存の石油精製工程よりも、超臨界メタノール法がエネルギー収支の点から優位であることも指摘されている[32]。さらに、特定の燃料成分を生産する微細藻類であれば、不純物も少ないため原油と同等の精製工程は必要とされないという考え方もある。

2.1.7 残渣の利用

最終的に生産された微細藻類は、抽出された油分と、絞るかすの残渣に分離される。油分は、ジェット燃料油として使用されることが最も期待されている。一方、残渣については、固形燃料、肥料、飼料を生産するという事業が提案されている。費用回収の観点からは残渣の付加価値を上げる工夫が必要とである。

2.2 バイオ燃料生産方式

前節で示したように、微細藻類に由来するバイオ燃料の生産工程にはいくつかの技術的選択肢が存在する。現在、実証研究レベルにあるバイオ燃料生産システムを、大量生産可能な商業レベルに発展させるには、様々な技術的選択肢の中から最適な組み合わせを選定する必要がある。バイオ燃料生産方式に関する先行研究では、簡易 PBR(Photobioreactor)を用いた手法と、大規模開放池を用いた手法が、近い将来に実現可能なバイオ燃料生産方式として詳細に検討されている[30,33]。

2.2.1 簡易 PBR 方式

図 2.2 に示す簡易 PBR 方式として検討されているのは、国内の休耕田を利用してボトリオコッカス種の微細藻類から粗油を産出するというモデルである[30]。休耕田は、ある程度の面積が確保できる勾配のない平らな土地であり、灌漑設備もあるので、培養池用地として魅力がある。また、国土の狭い日本では農地と発電所などの工場用地が隣接している場合が多く、微細藻類の培養に有用な CO₂ の供給も可能である。そのような 19[ha]の休耕田にビニールシートを敷設し、ビニールチューブ製の簡易 PBR を用いた準開放系培養池を設置する。付設施設で、ドラムフィルタによる収穫、ヘキサンによる溶媒抽出までを行い、石油精製施設に粗油を産出する。バイオ燃料生産によって発生する残渣の利用方法として飼料、肥料、固形燃料を検討する。

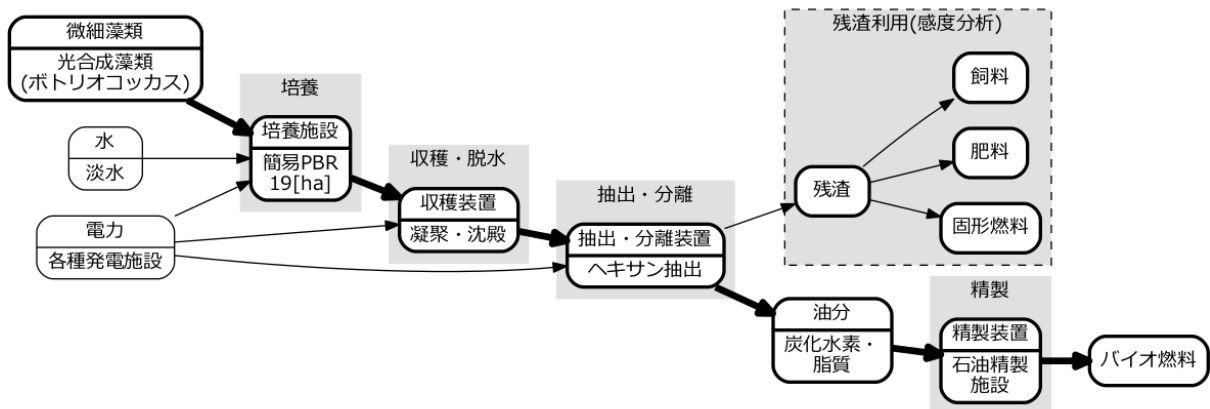


図 2.2 簡易 PBR 方式のバイオ燃量生産工程

2.2.2 大規模開放池方式

図 2.3 に示す大規模開放池方式では、温暖な地域に 2,500[ha]の大型の開放池を設置し、ポトリオコッカス種の微細藻類を培養する[33]。付設施設で凝集沈殿・濾過による収穫、ヘキササンによる溶媒抽出までを行い、石油精製施設に粗油を産出する。簡易 PBR 方式と同様に、バイオ燃料生産によって発生する残渣の利用方法として飼料、肥料、固形燃料を検討する。

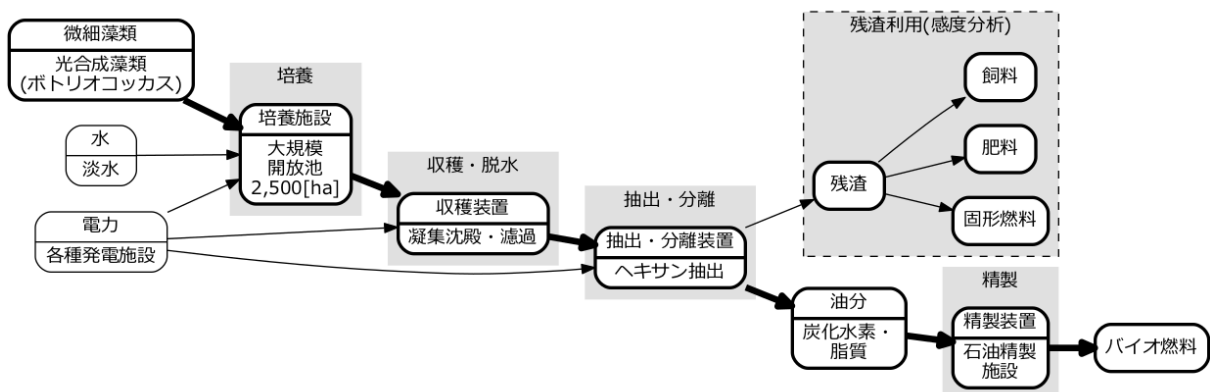


図 2.3 大規模開放池方式のバイオ燃量生産工程

2.2.3 バイオ燃料生産方式の比較

簡易 PBR 方式と大規模開放池方式について、バイオ燃料生産方式の条件を比較した結果を表 1 に示す。準開放系の簡易 PBR 方式の場合、大規模開放池よりもコンタミネーション等の問題が発生しにくい。そのため、簡易 PBR 方式の場合、微細藻類の成長速度は大規模開放池方式の約 2.4 倍に設定され、油脂含有率も 5% 高く設定されている[30,33]。その他、施設の規模が異なり、簡易 PBR 方式は水路の面積が 19[ha]であるが、大規模開放池方式は 132 倍の 2,500[ha]である。大規模開放池方式のバイオ燃料の収量は、簡易 PBR 方式の 54 倍となる。

ここでは、拡張産業連関表を用いた分析により図 2.2、図 2.3 のバイオ燃料生産の経済・環境への波及効果を分析し、残渣利用の工程については感度分析を行い、研究開発の方向性について検討する。ただし、産業連関分析では、簡易 PBR 方式と大規模開放池方式で石油精製工程が共通するため、石油精製工程を除いて波及効果の比較を行った。

表1 バイオ燃量生産方式とその条件

	簡易PBR	大規模開放池
成長速度 [g/m ² day]	73.5	31
油脂含有率 [%]	45	40
培養方式	簡易PBR	開放池
収穫方式	凝集沈殿・濾過	凝集沈殿・濾過
抽出・分離	ヘキサン抽出	ヘキサン抽出
稼動日数 [day]	365	330
水路の面積 [ha]	19	2,500
水路の深さ [m]	0.3	0.2
水路の体積 [m ³]	57,000	5,000,000

3. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産の産業連関分析

2つの微細藻類を用いたバイオ燃料生産モデルについて、その施設建設時と経常運転時に必要とされる資材から誘発される、生産額、雇用、エネルギー消費、CO₂排出量を、産業連関分析のオープンモデルを用いて計算する。

3.1 生産誘発額の算出

微細藻類バイオ燃料生産の施設建設、及び、経常運転アクティビティの静学的波及効果を推計するために、産業連関分析の静学オープンモデルを使用する。つまり、微細藻類バイオ燃料生産施設建設費、または、バイオ燃料生産額を最終需要ベクトル \mathbf{f} として与え、レオンティエフ逆行列を乗じることで、生産誘発額ベクトル \mathbf{x} が算出される。

$$\mathbf{x} = \left\{ \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A} \right\}^{-1} \mathbf{f} \quad (3.1)$$

ただし、 \mathbf{x} ：生産誘発額ベクトル、 \mathbf{I} ：単位行列、 \mathbf{A} ：投入係数行列、 $\hat{\mathbf{M}}$ ：輸入係数行列、 \mathbf{f} ：最終需要ベクトルである。生産誘発額を算出するために必要な投入係数及び輸入係数は、本研究で作成したアクティビティを除いて、総務省「平成17年産業連関表」のデータを使用する¹⁹。なお、バイオ燃料は内生部門（中間需要）には産出されず、すべて最終需要に産出されると想定している。

3.2 雇用誘発・エネルギー消費誘発・CO₂排出誘発の推計

産業連関分析の静学オープンモデルによって算出される生産誘発額に、生産額単位当たりの労働投入量、エネルギー消費量及びCO₂排出量（それぞれ、労働係数、エネルギー消費原単位及びCO₂排出原単位）を乗じれば、各電力施設建設に伴う労働力誘発、エネルギー消費誘発及びCO₂排出誘発の直接・間接波及効果を計測することができる。

$$\mathbf{l} = \hat{\mathbf{U}}^L \left\{ \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A} \right\}^{-1} \mathbf{f} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{e} = \hat{\mathbf{U}}^E \left\{ \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A} \right\}^{-1} \mathbf{f} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{c} = \hat{\mathbf{U}}^C \left\{ \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A} \right\}^{-1} \mathbf{f} \quad (3.4)$$

ただし、 \mathbf{l} ：労働力誘発ベクトル(従業者ベース)、 $\hat{\mathbf{U}}^L$ ：労働係数行列(従業者ベース)、 \mathbf{e} ：エネ

¹⁹ 本研究で作成したアクティビティの場合、投資財は国内生産を仮定し、投資財を生産する際の原材料は産業連関表の平均的な輸入係数で評価した。

ルギー消費誘発ベクトル、 \hat{U}^E : エネルギー消費原単位行列、 c : CO₂排出誘発ベクトル、 \hat{U}^c : CO₂排出原単位行列である。労働係数は、総務省「平成17年産業連関表」「雇用表」の部門別従業者数を使用し、対応する部門別国内生産額で除して求めている。エネルギー消費原単位及びCO₂排出原単位は、国立環境研究所「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）2005年版」[35]の部門別直接エネルギー消費量及びCO₂排出量を使用し、対応する部門別国内生産額で除して求めている。

3.3 微細藻類を用いたバイオ燃料生産のアクティビティ

各施設の建設と経常運転に必要な資材の費用と対応する産業連関表の部門名を表3.1～表3.4に示す。簡易PBRの施設に必要な資材の情報は文献[30]を参考にした。産業連関表の部門への格付けにあたり、当該論文の研究者から詳細な説明を受けた。大規模開放池の施設については、文献[33]に建設、及び、経常運転に関する資材情報も示されていない。現状では、2,500[ha]もの大規模開放池で微細藻類培養を行っている施設の実績はない。そこで施設建設用資材については、400[ha]の開放池の施設の情報[34]をもとに、汚水処理場施設の維持管理費用関数に基づく規模効果(0.8102乗)を仮定して、表3.3のように必要量を設定した。一方、施設経常運転資材については、施設の規模によって資材の種類が変わることはなく、それらの必要量は収穫量に応じて変化すると仮定し、簡易PBR施設の資材情報を拡張する形で表3.4のように必要量を設定した。

なお、各施設から産出されるバイオ燃料は、107[円/L]で金額換算した。107[円/L]は簡易PBRモデルで、利潤を除いた損益分岐点の採算価格とされている値である[30]。

表3.1 簡易PBRの施設建設費用推計

施設建設費用	IOコード	IO部門	金額[百万円]
土地改良	4132099	その他の土木	9.00
土木工事	4132099	その他の土木	4.50
プール施工			58.50
ビニールシート	2211011	プラスチックフィルムシート	40.95
ポリエチレンチューブ	2211016	プラスチック製容器	17.55
吸気ポンプ	3019011	ポンプおよび圧縮機	18.00
ポンプ	3019011	ポンプおよび圧縮機	4.50
油分抽出装置	3022011	化学機械	13.50
濾過装置	3022011	化学機械	13.50
水質浄化装置	3022011	化学機械	6.80
タンク	2899021	金属製容器および製缶板金製品	4.50
計量分流通装置	3719021	分析器・試験機・計量器・測定器	9.00
攪拌機	3022011	化学機械	6.80
制御システム			8.60
コンピュータ	3331011	パーソナルコンピュータ	0.50
ソフトウェア	7331011	ソフトウェア業	8.10
準備棟			31.50
アクリルチェンバー	2211016	プラスチック製容器	5.00
建屋	4112021	非住宅建築(非木造)	26.50
変換器	2622012	特殊鋼鋼管	2.30
配管	2622011	普通鋼鋼管	9.00
		合計	200.00

表3.2 簡易PBRの経常運転費用推計

運転費用	IOコード	IO部門	金額[百万円]
混合・攪拌用電力	5111001	事業用電力	38.50
培地・培養液			15.50
	2029099	その他の向き化学工業製品	0.60
	2021019	その他のソーダ工業製品	0.20
	521101	上水道・簡易水道	14.70
曝気用電力	5111001	事業用電力	25.30
濾過用電力	5111001	事業用電力	3.30
油分抽出	5111001	事業用電力	10.60
室内制御	5111001	事業用電力	2.30
土地賃貸費用		IO部門の対象外*	14.50
保守			22.00
機械補修費	8515101	機械修理	16.50
溶媒等の補充費	2032029	ヘキサン	5.50
一般管理費		内水面養殖業の当社関連資材で分割	20.50
雇用賃金		付加価値	47.50
		合計	200.00

*土地費用および、土地賃貸費用は、定義により産業連関表の経済活動として捉えられていないため波及効果の分析には含めない。

表3.3 大規模開放池の施設建設費用推計

施設建設費用	IOコード	IO部門名	金額[百万円]
土地造成	4132099	その他の土木	477
開放池の造成	4132099	その他の土木	21,816
水掻車	3011031	原動機	752
散布装置	3019011	ポンプおよび圧縮機	1,908
沈殿槽	4132099	その他の土木	1,336
凝集・遠心分離・油分抽出装置	3022011	化学機械	2,767
水・栄養素	2622011	普通鋼鋼管	233
	2622012	特殊鋼鋼管	59
	2899021	金属製容器および製缶板金製品	116
	3022011	化学機械	351
	3719021	分析器・試験機・計量器・測定器	233
水処理		建設IOの下水道で分割	191
建物・道路・排水路	4112021	非住宅建築(非木造)	382
電力インフラ	4132021	電力施設建設	382
予備発電機	3211011	発電機器	2,708
機械・器具	3919021	機械工具	95
土地		IO部門の対象外*	301
土木工事予備費	4132099	その他の土木	5,116
		合計	39,223

*土地費用および、土地賃貸費用は、定義により産業連関表の経済活動として捉えられていないため波及効果の分析には含めない。

表3.4 大規模開放池の経常運転費用推計

運転費用	IOコード	IO部門	金額[百万円]
混合・攪拌用電力	5111001	事業用電力	1027.90
培地・培養液			1359.70
	2029099	その他の無機化学工業製品	56.20
	2021019	その他のソーダ工業製品	14.50
	521101	上水道・簡易水道	1289.00
曝気用電力	5111001	事業用電力	675.50
濾過用電力	5111001	事業用電力	165.60
油分抽出	5111001	事業用電力	531.80
室内制御	5111001	事業用電力	54.90
土地賃貸費用		IO部門の対象外*	487.40
保守			524.90
機械補修費	8515101	機械修理	393.70
溶媒等の補充費	2032029	ヘキサソ	131.20
一般管理費		内水面養殖業の本社関連資材で分割	489.20
雇用賃金		負荷価値	1133.50
		合計	6450.40

*土地費用および、土地賃貸費用は、定義により産業連関表の経済活動として捉えられていないため波及効果の分析には含めない。

4. 微細藻類を用いたバイオ燃料生産による経済・環境への波及効果推計

微細藻類によるバイオ燃料生産モデルとして、簡易PBR方式と大規模開放池方式を取り上げ、施設建設時と経常運転時に誘発される生産、雇用、エネルギー消費量、CO2排出量を産業連関分析により推計する。

4.1 生産誘発効果

4.1.1 直接効果と間接効果

産業連関分析により、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転による生産誘発額を推計した結果を表4.1と図4.1に示す。表4.1には、直接効果²⁰、間接効果²¹、直接・間接効果に分けた生産誘発額、単位面積当たりの生産誘発額と、直接効果に対する直接・間接効果の大きさを表す乗数を示す。

表4.1 バイオ燃料生産施設建設と経常運転による生産誘発の直接・間接効果

	直接効果		間接効果		直接・間接効果		乗数
	[百万円]	[百万円/ha]	[百万円]	[百万円/ha]	[百万円]	[百万円/ha]	
簡易PBR 施設建設	200.0	10.5	304.9	16.0	504.9	26.6	2.525
19[ha] 経常運転	254.4	13.4	233.8	12.3	488.2	25.7	1.919
大規模開放池 施設建設	38921.4	15.6	71332.7	28.5	110254.0	44.1	2.833
2,500[ha] 経常運転	11522.2	4.6	8106.9	3.2	19629.1	7.9	1.704

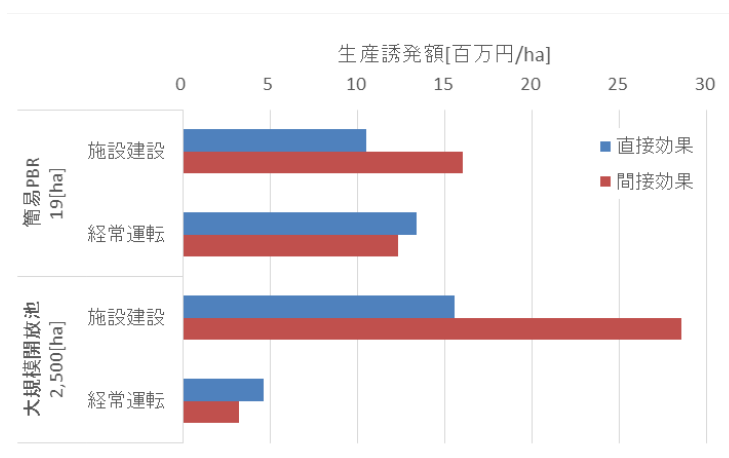


図 4.1 バイオ燃料生産施設建設と経常運転による生産誘発の直接・間接効果

簡易PBR方式の直接効果は、生産施設の建設費 200[百万円]と1年間の経常的なバイオ燃料の生産額 254.4[百万円]に一致する。間接効果は施設建設から304.9[百万円]、経常運転から233.8[百万円]と

²⁰ 施設建設の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産施設の建設費を指し、経常運転の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産額を指す。

²¹ 施設建設の間接効果とは微細藻類バイオ燃料生産施設建設のための資材生産から誘発されるすべての生産活動のことであり、経常運転の間接効果とは、施設運転に必要な投入資材で誘発されるすべての生産活動のことである。

なり、結果として直接・間接効果を合わせて施設建設から504.9[百万円]、経常運転から488.2[百万円]の生産誘発額が推計された。簡易PBRを用いたバイオ燃料生産における施設建設と経常運転の乗数はそれぞれ2.525と1.919であり、経常運転よりも施設建設による波及効果が大きいことがわかる。

大規模開放池方式の直接効果は、生産施設の建設費 38,321 [百万円]、1年あたりの経常的なバイオ燃料生産額 11,522 [百万円]に一致する。間接効果は施設建設から713,323 [百万円]、経常運転から8,107 [百万円]となり、結果として直接・間接効果を合わせて施設建設から110,254 [百万円]、経常運転から19,629 [百万円]の生産誘発額が推計された。大規模開放池を用いたバイオ燃料生産における施設建設と経常運転の乗数はそれぞれ2.833と1.704であり、経常運転よりも施設建設による波及効果の大きい点は簡易PBR方式の結果と共通する。

施設建設による単位面積当たりの生産誘発額の直接効果を比較すると、簡易PBR方式の10.5[百万円/ha]に対して、大規模開放池方式の15.6[百万円/ha]と大きい。このような差が生じる要因として、簡易PBR方式の場合、休耕田を利用するため、土地造成等の費用が抑制されることが考えられる。経常運転の単位面積当たりの直接効果を比較すると、簡易PBR方式の13.4[百万円/ha]に対して大規模開放池では4.6[百万円/ha]と小さい。簡易PBR方式の微細藻類の生産効率は大規模開放池方式よりも高いため、バイオ燃料の生産効率も高くなる。そのため、簡易PBR方式の経常運転による単位面積当たりの生産誘発額は大規模開放池方式よりも大きいという結果になった。

施設建設による単位面積当たりの生産誘発額の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の16.0 [百万円/ha]に対して大規模開放池方式は28.5 [百万円/ha]と大きい。一方、経常運転による単位面積当たりの生産誘発額の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の12.3 [百万円/ha]に対して大規模開放池方式は3.2 [百万円/ha]と極めて小さい。間接効果の差異については、4.1.3の産業部門別分析で検討する。

4.1.2 継続性の検討

施設建設の場合、建設時に工事費用等の直接・間接の生産誘発が発生するが、施設完成後には施設建設の生産誘発効果がなくなる。ここでは、バイオ燃料生産施設の減価償却期間、及び、耐用年数を考慮し、建設費をこれらの期間に分散することにより年間の生産誘発効果を推計し、生産誘発効果の継続性について検討する。

図4.2にバイオ燃料施設建設と経常運転による年間生産誘発の変化を示す。年間生産誘発を求めるために、施設建設による直接・間接効果を減価償却期間、または、耐用年数で除した値を用いた。結果として、バイオ燃料施設建設による直接・間接効果は、減価償却期間・耐用年数が長くなると0に近づくため、バイオ燃料施設建設と経常運転による直接・間接の経済波及効果は、最終的に経常運転による経済波及に収束する。経常運転による単位面積当たりの直接・間接効果は、大規模開放池方式よりも簡易PBR方式が大きいことから、バイオ燃料の生産効率の高い簡易PBR方式の方が、より大きな経済波及効果を継続的にもたらすことが期待される。

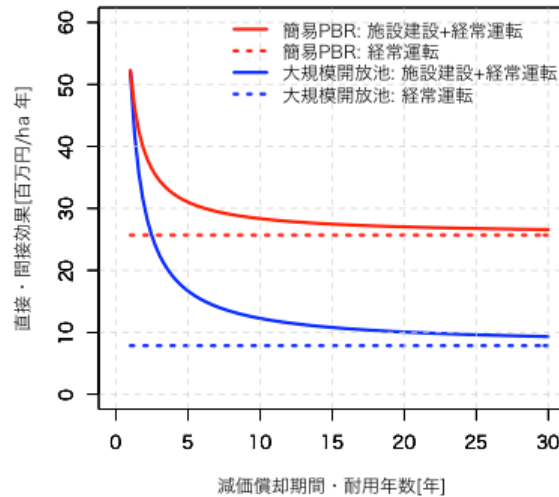


図4.2 バイオ燃料施設建設と経常運転による年間生産誘発

4.1.3 産業部門別分析

微細藻類バイオ燃料生産施設の建設、及び、経常運転による産業部門別の生産誘発額を図 4.3 と図 4.4 に示す。図 4.3 と図 4.4 の上段に簡易 PBT 方式の生産誘発額、下段に大規模開放池方式の生産誘発額をまとめ、産業部門別の間接効果は、間接1～3次と間接4次以降に分けて図示した。

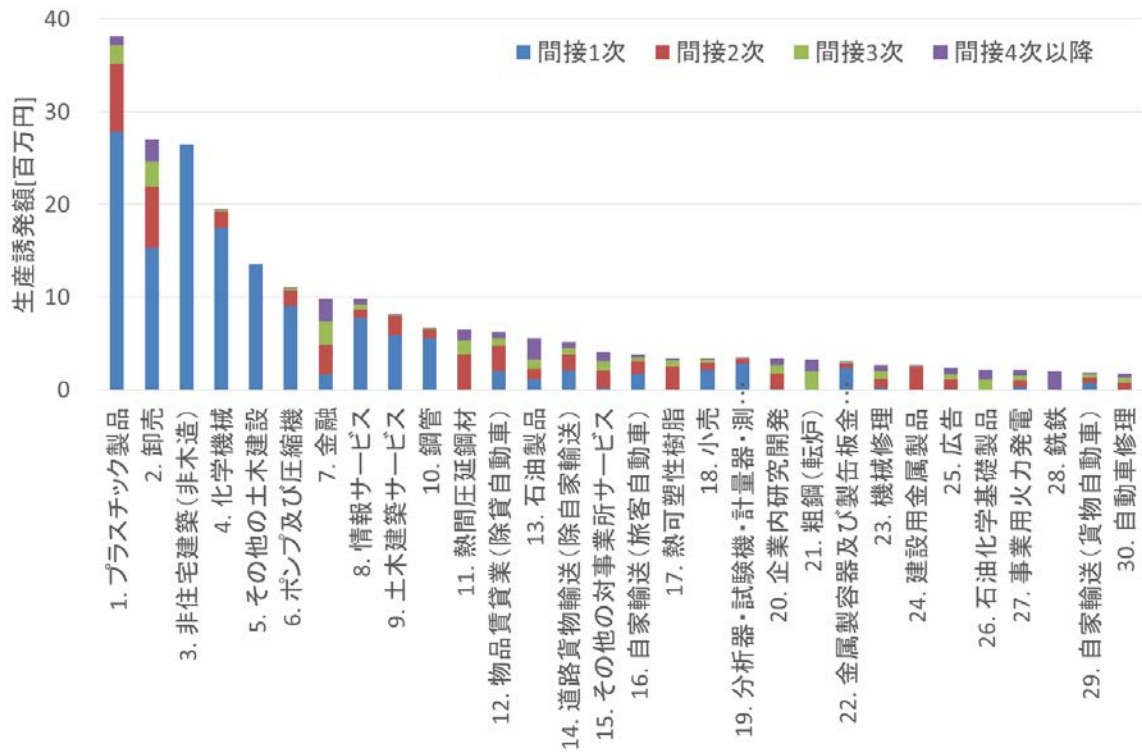
簡易 PBR 方式の施設建設による産業部門別生産誘発額 (図 4.3(a))を見ると、1. プラスチック製品、2. 卸売、3. 非住宅建築(非木造)、4. 化学機械、5. その他の土木建設などの部門で生産誘発額が大きい。生産誘発額の大きな部門は、建設資材となる 1. プラスチック製品、4. 化学機械、6. ポンプ及び圧縮機などの部門と、建設作業に対応する 3. 非住宅建築(非木造)、5. その他の土木建設などの部門に大別され、これらの部門では間接1次効果の占める比率が高い傾向がある。簡易 PBR のビニールチューブ、予備培養を行うアクリル・チェンバー容器、培養池のビニールシートなどの誘発により、1. プラスチック製品部門の生産誘発額が最大となっている。2. 卸売部門には、すべての財の取引により生産誘発額が集約される特徴がある。さらに、今回は、マージンも含めた購入者価格を用いた分析としたため、2. 卸売部門の生産誘発額が大きく評価されたと考えられる。

大規模開放池方式の施設建設による産業部門別生産誘発額 (図 4.3(b))を見ると、1. その他の土木建設部門が突出して大きく、2. 卸売、3. 建設用金属製品、4. 金融、5. 物品賃貸業(除自家輸送)などの部門がこれに続く。表 3.3 の大規模開放池の施設建設費用推計によれば、施設建設にかかる直接費用の約 73%が土木建設の費用であるため、土木工事に関係する生産誘発が大半を占めることになる。1. その他の土木建設と、建設資材の 6. 化学機械、10. 回転電気機器、11. ポンプ及び圧縮機は間接1次効果が大きく、資材からの波及した 3. 建設用金属製品、土木建設から波及した 9. 土木建築サービスは間接2次効果が大きい。また、様々な財・サービスの取引によって生じる 2. 卸売、4. 金融、5. 物品賃貸業(除貸自動車)、7. 道路貨物輸送(除自家輸送)では、間接2次以降の波及が大きいことがわかる。大規模開放池方式の場合、簡易 PBR 方式と比較して 15. プラスチック製品の生産波及額が小さく、土木建設による 13. セメント製品の生産誘発額が大きくなる。

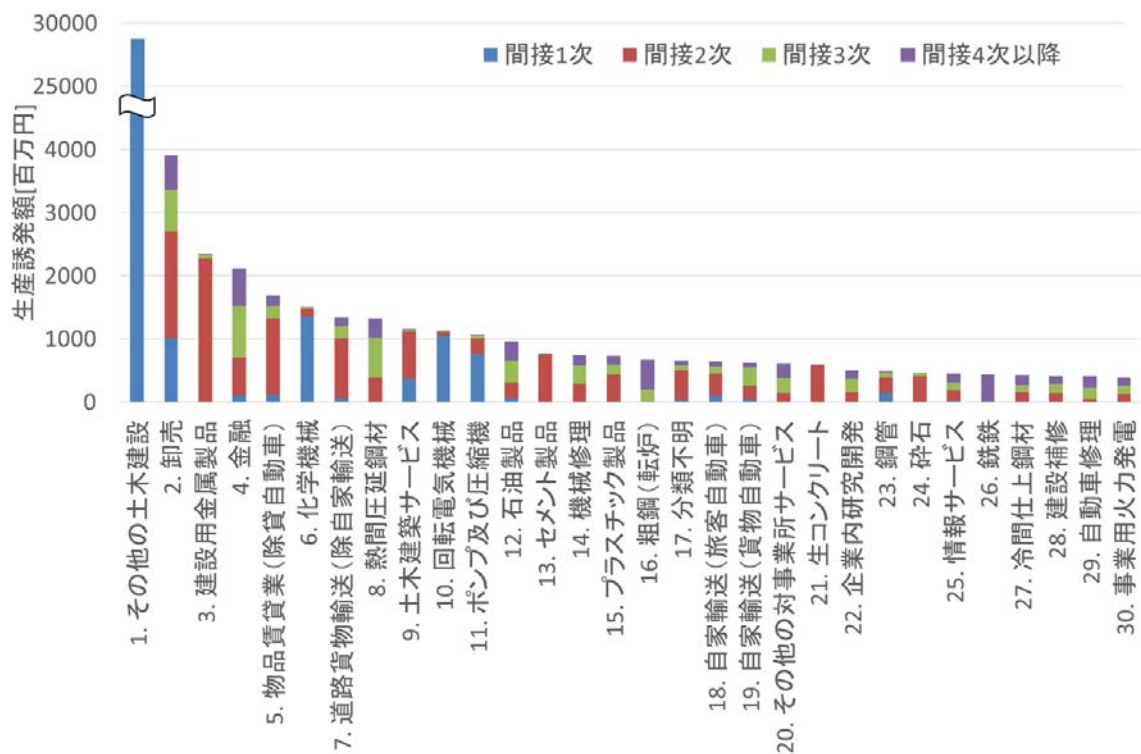
簡易 PBR 方式の経常運転による産業部門別生産誘発額 (図 4.4 (a))を見ると、発電部門の 1. 事業用火力発電、2. 事業用原子力発電が大きく、3. 機械修理、4. 上水道・簡易水道、5. 水力・そ

の他の事業用発電がこれに続く。産業連関分析に「平成 17 年産業連関表」を用いたため、結果は当時の電源構成を反映している。そのため、再生可能エネルギー発電の増加が見込まれる将来の電源構成によっては、1. 事業用火力発電、2. 事業用原子力発電、5. 水力・その他の事業用発電などの部門間の比率が変化する。簡易 PBR 方式の経常運転の場合、6. 卸売、8. 金融のように間接 2 次以降の間接効果が大半を占める部門も含まれるが、全体としては、間接 1 次効果の比率が高く、施設建設のように生産誘発が波及しないことがわかる。

大規模開放池方式の経常運転による産業部門別生産誘発額 (図 4.4 (b))を見ても、発電部門の 1. 事業用火力発電、3. 事業用原子力発電、5. 水力・その他の事業用発電部門の生産誘発額が大きい。微細藻類の培養に大量の水道水を使用するモデルによる分析のため、2. 上水道・簡易水道部門の生産誘発額が 2 番目に大きくなっている。微細藻類の用途には、バイオ燃料に加えて、医薬品や健康食品、飼料なども想定されているため、微細藻類の培養に水道水を用いると仮定した。しかし、浄水装置を用いて河川や湖沼の水を利用することも考えられるため、浄水装置を含めた大規模開放池方式の微細藻類バイオ燃料生産についても、今後は検討の必要があろう。

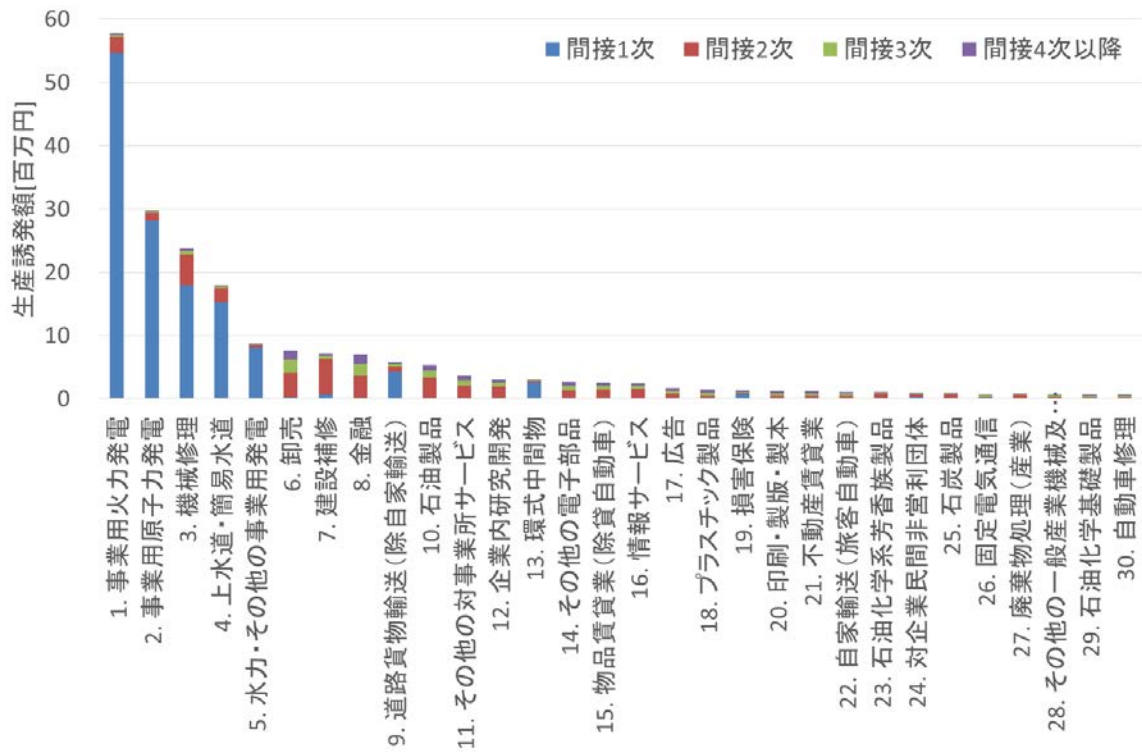


(a) 簡易 PBR 方式

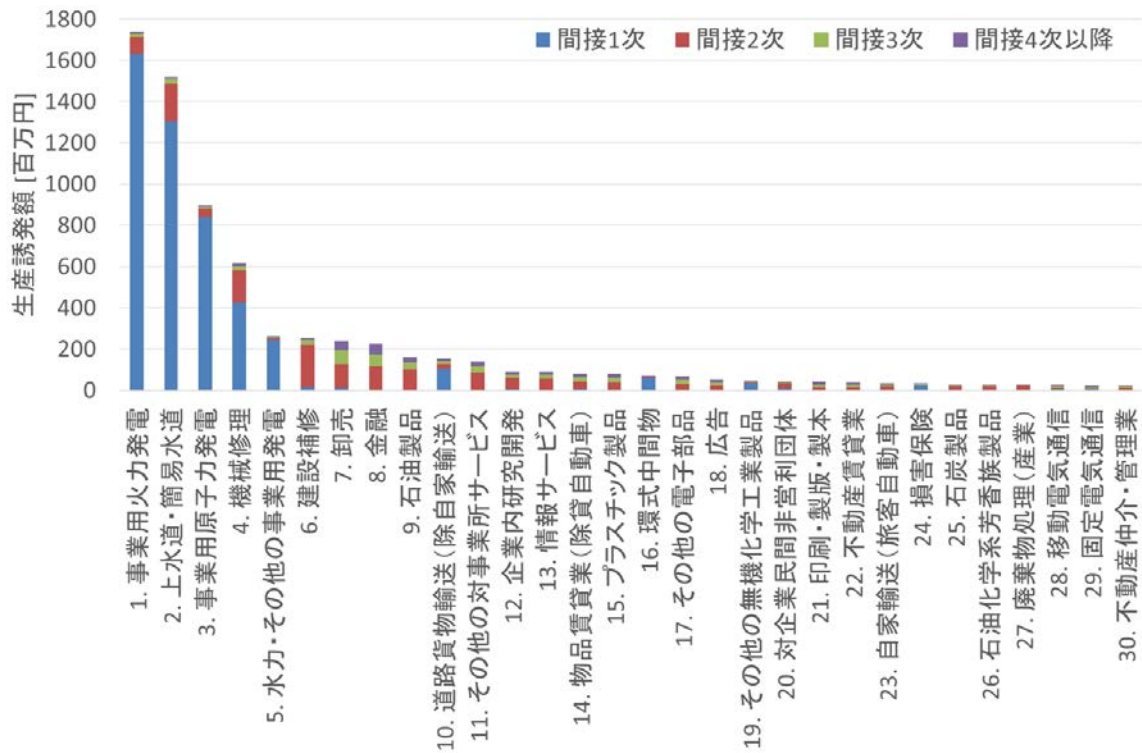


(b) 大規模開放池方式

図 4.3 微細藻類バイオ燃料生産施設の建設による産業部門別生産誘発額
(生産誘発額の間接効果上位 30 部門)



(a) 簡易 PBR 方式



(b) 大規模開放池方式

図 4.4 微細藻類バイオ燃料生産施設の経常運転による産業部門別生産誘発額
(生産誘発額の間接効果上位 30 部門)

4.2 雇用誘発効果

4.2.1 直接効果と間接効果

産業連関分析により、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転による雇用誘発数を推計した結果を表4.2と図4.5に示す。表4.2には、直接効果²²、間接効果²³、直接・間接効果に分けた雇用誘発数、単位面積当たりの雇用誘発数と、直接効果に対する直接・間接効果の大きさを表す乗数を示す。

表4.2 施設建設と経常運転による雇用誘発

	直接効果		間接効果		直接・間接効果		乗数
	[人]	[人/ha]	[人]	[人/ha]	[人]	[人/ha]	
簡易PBR 施設建設	7.4	0.389	16.7	0.879	24.1	1.268	3.257
19[ha] 経常運転	10.0	0.526	7.5	0.395	17.5	0.921	1.750
大規模開放池 施設建設	464.4	0.186	4,816.7	1.927	5,281.1	2.112	11.372
2,500[ha] 経常運転	137.8	0.055	252.8	0.101	390.6	0.156	2.834

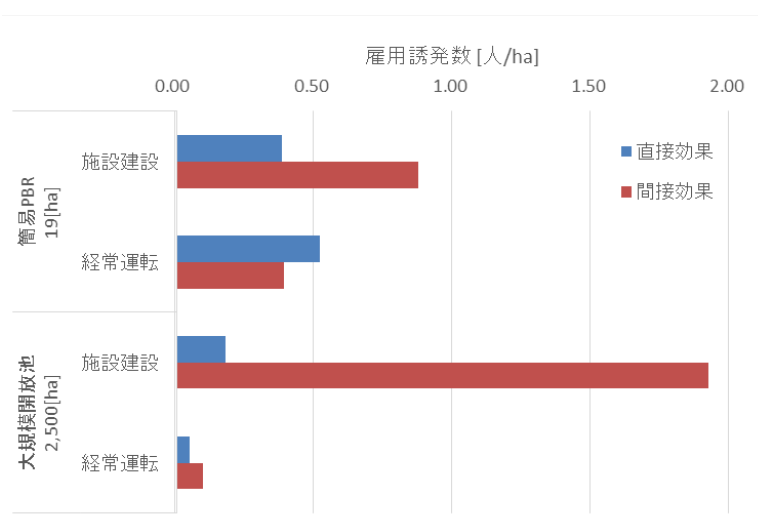


図 4.5 バイオ燃料生産施設建設と経常運転による雇用誘発の直接・間接効果

簡易PBR方式の直接効果として、施設建設から7.4[人]、経常運転から10.0 [人]の雇用誘発数が推計された。産業連関分析を適用した結果、簡易PBR方式の間接効果として、施設建設から16.7[人]、経常運転から7.5[人]の雇用誘発数が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から24.1[人]、経常運転から17.5[人]の雇用誘発数が見込まれる。直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は、施設建設で3.257、経常運転で1.750となった。乗数の比較から、簡易PBR方式の施設建設において、経常運

²² 施設建設の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産施設の建設費を指し、経常運転の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産額を指す。

²³ 施設建設の間接効果とは微細藻類バイオ燃料生産施設建設のための資材生産から誘発されるすべての生産活動のことであり、経常運転の間接効果とは、施設運転に必要な投入資材で誘発されるすべての生産活動のことである。

転よりも大きな雇用誘発効果をもたらすことがわかる。

大規模開放池方式の直接効果として、施設建設から464.0[人]、経常運転から137.8[人]の雇用誘発数が推計された。産業連関分析を適用した結果、大規模開放池方式の間接効果として、施設建設から4,816.0[人]、経常運転から252.8[人]に雇用誘発数が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から5,281.1[人]、経常運転から390.6[人]の雇用誘発数が見込まれる。直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は、施設建設で11.372、経常運転で2.834となった。乗数の比較から、大規模開放池方式の施設建設において、経常運転よりも大きな雇用誘発効果をもたらすことがわかる。

施設建設による単位面積当たり雇用誘発数の直接効果を比較すると、簡易PBR方式の0.389[人/ha]に対して大規模開放池方式は0.186 [人/ha]と小さい。このような差の生じる要因として、簡易PBR方式では大規模開放池の場合よりも複雑な施設となるため、より多くの施設建設の作業人員とされることが考えられる。さらに、大規模開放池の場合、規模を拡大することにより単位面積当たりの建設作業効率が改善されことも要因として考えられる。経常運転による単位面積当たりの雇用誘発数の直接効果を比較すると、簡易PBR方式の0.526 [人/ha]に対して大規模開放池方式では0.055 [人/ha]と小さい。経常運転についても、大規模化による効率化で雇用誘発効果が抑制されたと考えられる。

施設建設による単位面積当たりの雇用誘発数の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の0.879 [人/ha]に対して大規模開放池方式は1.927 [人/ha]と大きい。一方、経常運転による単位面積当たりの生産誘発額の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の0.395 [人/ha]に対して大規模開放池方式は0.101 [人/ha]と極めて小さい。このような間接効果の差異については、4.2.3の産業部門別分析で検討する。

4.2.2 継続性の検討

施設建設の場合、建設時に直接・間接の雇用創出効果が発生するが、この雇用は施設完成後になくなる。ここでは、バイオ燃料生産施設の減価償却期間、及び、耐用年数を考慮し、雇用誘発効果をこれらの期間に分散することにより年間の雇用誘発効果を推計し、雇用誘発効果の継続性について検討する。

図4.6にバイオ燃料施設建設と経常運転による年間雇用誘発数の変化を示す。年間雇用誘発数を求めるために、施設建設による直接・間接効果を減価償却期間、または、耐用年数で除した値を用いた。バイオ燃料施設建設と経常運転の雇用誘発効果は、最終的に経常運転による雇用誘発効果に収束する。経常運転による単位面積当たりの直接・間接効果は、大規模開放池よりも簡易PBRが大きいことから、バイオ燃料の生産効率の高い簡易PBR方式の方が、より大きな雇用誘発効果の継続的にもたらすことが期待される。

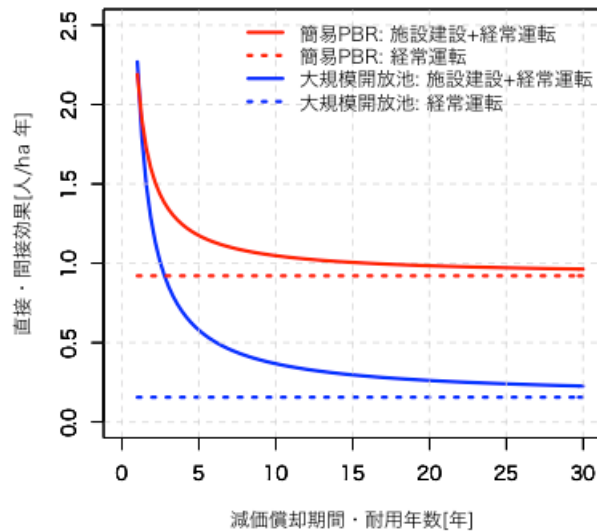


図4.6バイオ燃料施設建設と経常運転による年間雇用誘発

4.2.3 産業部門別分析

微細藻類バイオ燃料生産施設の建設、及び、経常運転による産業部門別の雇用誘発数を図 4.7 と図 4.8 に示す。図 4.7 と図 4.8 の上段に簡易 PBT 方式の雇用誘発数、下段に大規模開放池方式の雇用誘発数をまとめ、産業部門別の間接効果は、間接 1~3 次と間接 4 次以降に分けて図示した。

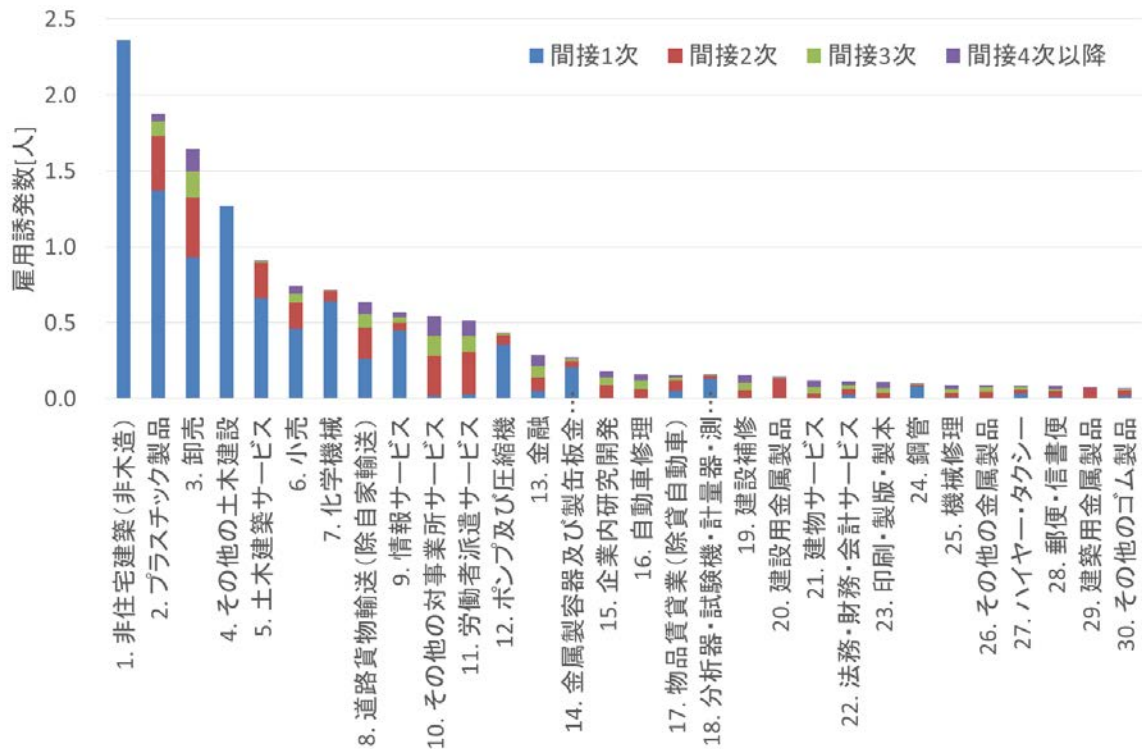
簡易 PBR 方式の施設建設による産業部門別雇用誘発数(図 4.7 (a))を見ると、1. 非住宅建築(非木造)、2. プラスチック製品、3. その他の土木建設、5. 土木建築サービスなどの部門で雇用誘発数の大きいことがわかる。雇用誘発数の大きな部門は、建設作業に対応する 1. 非住宅建築(非木造)、4. その他の土木建設、5. 土木建設サービスと、簡易 PBR、及び、予備培養装置を構成する 3. プラスチック製品、7. 化学機械などに大別される。1. 非住宅建築(非木造)と 4. その他の土木建築は、ほぼ間接 1 次効果のみであり、2. プラスチック製品では、間接 2 次以降の雇用誘発効果もみられる。2. 卸売部門には、すべての財の取引により雇用誘発数が集約される特徴がある。さらに、今回は、マージンも含めた購入者価格を用いた分析であるため、2. 卸売部門の雇用誘発数が大きく評価されたと考えられる。

大規模開放池方式の施設建設による産業部門別雇用誘発数(図 4.7(b))を見ると、1. その他の土木建設部門が突出して大きく、2. 卸売、3. 道路貨物輸送(除自家輸送)、4. 土木建築サービス、5. 建設用金属製品などの部門がこれに続く。1. その他の土木建設、10. 化学機械、11. 回転電気機械、18. 非住宅建設(非木造)、19. 電力施設建設は間接 1 次効果が大半を占め、5. 建設用金属製品、12. セメント製品、22. 生コンクリートは間接 2 次効果が大半を占める。

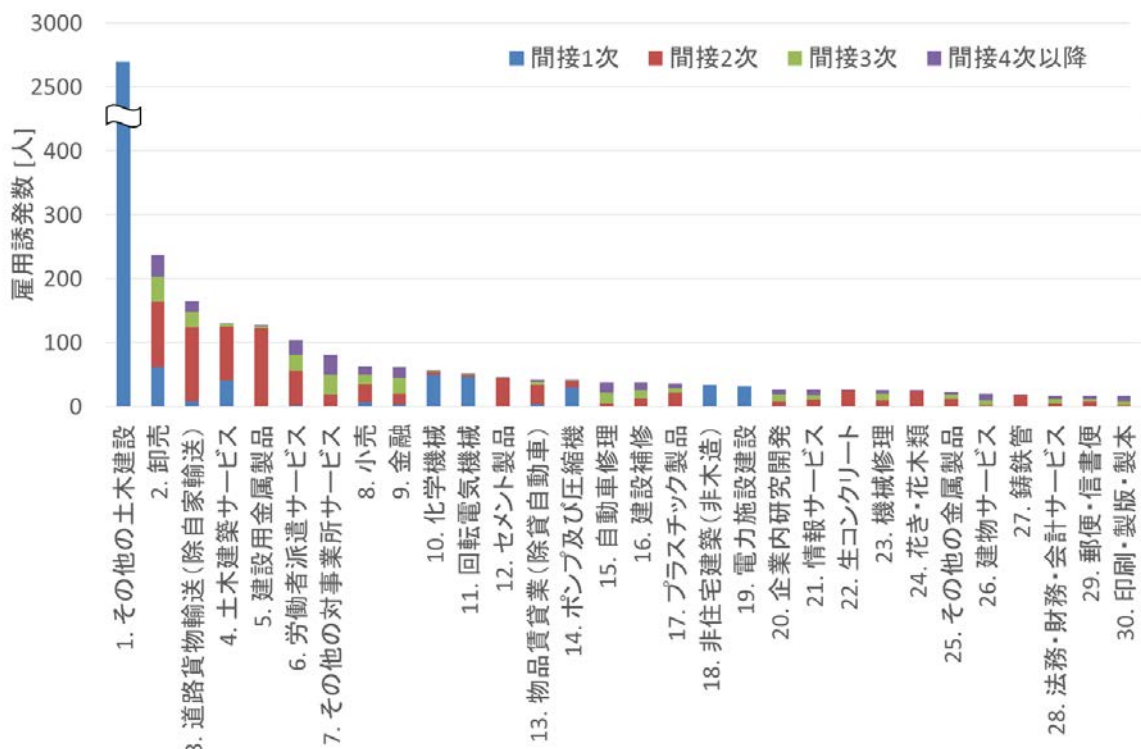
簡易 PBR 方式の経常運転による産業部門別雇用誘発数(図 4.8 (a))を見ると、1. 機械修理、2. 道路貨物輸送(除自家輸送)、3. 建設補修、4. 事業用火力発電、5. その他の他意事業所サービス、6. 卸売といった部門が大きい。発電部門の 4. 事業用火力発電、8. 事業用原子力発電、14. 水力・その他の事業用発電は間接 1 次効果が大半を占めている。また、3. 建設補修は間接 2 次効果の比率が高いという特徴がある。

大規模開放池方式の経常運転による産業部門別雇用誘発数(図 4.8 (b))をみると、1. 上水道・簡易水道、2. 建設補修、3. 機械修理、4. 道路貨物輸送(除自家輸送)、その他の対事業所サービスな

どの部門で大きい。微細藻類の培養に大量の水道水を使用するモデルによる分析のため、2. 上水道・簡易水道部門の雇用誘発数が最も大きい。微細藻類の用途には、バイオ燃料に加えて、医薬品や健康食品、飼料なども想定されているため、微細藻類の培養に水道水を用いると仮定した。しかし、浄水装置を用いて河川や湖沼の水を利用することも考えられるため、浄水設備を含めた大規模開放池方式の微細藻類バイオ燃料生産であれば、1. 上水道・簡易水道部門における雇用誘発は抑制される。

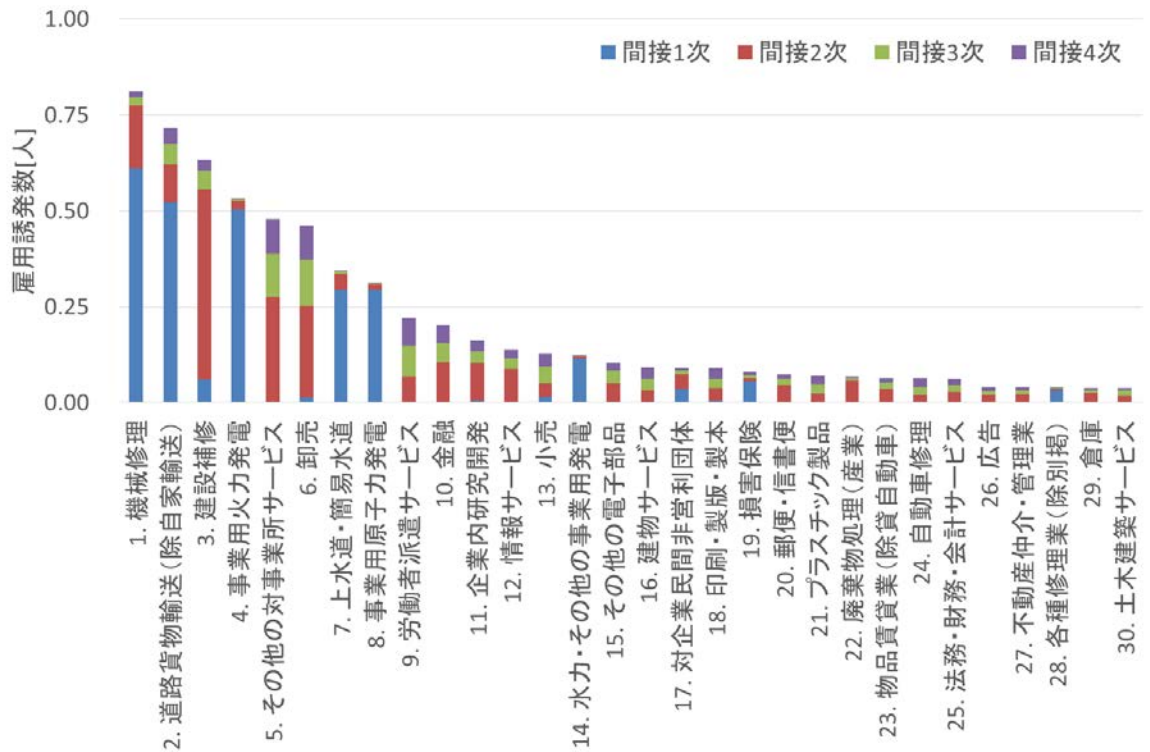


(a) 簡易 PBR 方式

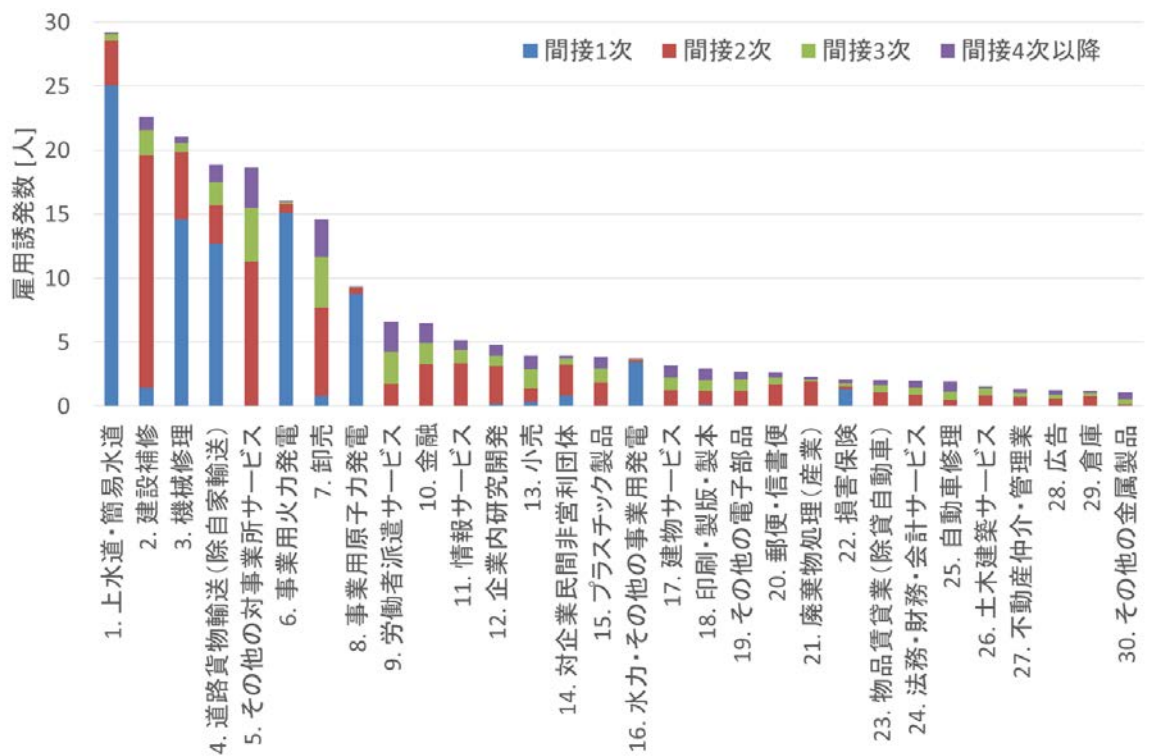


(b) 大規模開放池方式

図 4.7 微細藻類バイオ燃料生産施設建設による産業部門別雇用誘発数
(雇用誘発数の間接効果上位 30 部門)



(a) 簡易 PBR 方式



(b) 大規模開放池方式

図 4.8 微細藻類バイオ燃料生産施設の経常運転による産業部門別雇用誘発数
(雇用誘発数の間接効果上位 30 部門)

4.3 エネルギー消費誘発効果

4.3.1 直接効果と間接効果

産業連関分析により、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転によるエネルギー消費誘発量を推計した結果を表4.3と図4.9に示す。表4.3には、直接効果²⁴、間接効果²⁵、直接・間接効果に分けたエネルギー消費量、単位面積当たりのエネルギー消費量と、直接効果に対する直接・間接効果の大きさを表す乗数を示す。

簡易PBR方式の直接効果として、施設建設から5.7 [GJ]のエネルギー消費量が推計された。分析に用いる産業連関表[35]の構造上、経常運転によるエネルギー消費量は、使用されるエネルギーを製造する時点のエネルギー消費量として評価されるため、直接効果としてのエネルギー消費量は0[GJ]とする。産業連関分析を適用した結果、簡易PBR方式の間接効果として、施設建設から 6.01×10^3 [GJ]、経常運転から 4.38×10^3 [GJ]のエネルギー消費量が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から6.02 [GJ]、経常運転から4.38 [GJ]のエネルギー消費量が見込まれる。施設建設の場合、直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は1,056であり、間接部門がエネルギー消費量の大半を占めることがわかる。

大規模開放池方式の直接効果として、施設建設から 3.55×10^2 [GJ]のエネルギー消費量が推計された。産業連関分析を適用した結果、大規模開放池方式の間接効果として、施設建設から 1.37×10^6 [GJ]、経常運転からも 1.32×10^6 [GJ]のエネルギー消費量が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から 1.37×10^6 [GJ]、経常運転から 1.32×10^6 [GJ]のエネルギー消費量が見込まれる。大規模開放池方式の施設建設の場合、直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は3,866であり、簡易PBR方式に比べて、間接部門の占めるエネルギー消費量の比率が高いことがわかる。

施設建設による単位面積当たりのエネルギー消費量の直接効果を比較すると、簡易PBR方式の 3.0×10^{-1} [GJ/ha]に対して大規模開放池方式は 1.29×10^{-1} [GJ]と小さい。施設建設による単位面積当たりのエネルギー消費量の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の 3.16×10^2 [GJ/ha]に対して大規模開放池方式は 5.49×10^2 [GJ/ha]と大きい。一方、経常運転による単位面積当たりのエネルギー消費量の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の 2.30×10^3 [人/ha]に対して大規模開放池方式は 5.29×10^6 [GJ/ha]と小さい。このような間接効果の差異については、4.3.3の産業部門別分析で述べる。

²⁴ 施設建設の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産施設建設時のエネルギー消費量のことである。なお、施設経常運転時の直接エネルギー投入は電力であるが、3EIDでは消費エネルギー量を1次エネルギーの消費量でカウントしており、2次エネルギーとしての電力は消費量としてカウントしない。よって、表4.3の経常運転時の直接効果は0である。

²⁵ 施設建設の間接効果とは微細藻類バイオ燃料生産施設建設のための資材生産によって誘発されるエネルギー消費量のことであり、経常運転の間接効果とは、施設運転に必要な投入資材の生産によって誘発されるエネルギー消費量のことである。

表4.3 バイオ燃料生産施設建設と経常運転によるエネルギー消費誘発の直接・間接効果

	直接効果		間接効果		直接・間接効果		乗数
	[GJ]	[GJ/ha]	[GJ]	[GJ/ha]	[GJ]	[GJ/ha]	
簡易PBR 施設建設	5.70E+00	3.00E-01	6.01E+03	3.16E+02	6.02E+03	3.17E+02	1,056
19[ha] 経常運転	0.00E+00	0.00E+00	4.38E+04	2.30E+03	4.38E+04	2.30E+03	
大規模開放池 施設建設	3.55E+02	1.42E-01	1.37E+06	5.49E+02	1.37E+06	5.49E+02	3,866
2,500[ha] 経常運転	0.00E+00	0.00E+00	1.32E+06	5.29E+02	1.32E+06	5.29E+02	

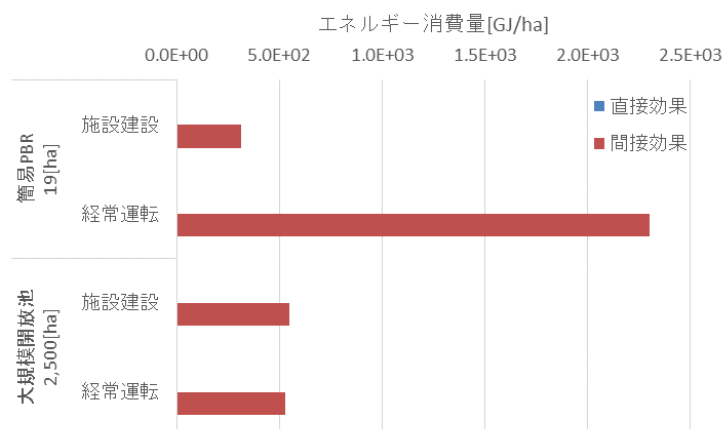


図4.9 バイオ燃料生産施設建設と経常運転によるエネルギー消費誘発の直接・間接効果

4.3.2 継続性の検討

施設建設の場合、建設時に直接・間接のエネルギーが消費されるが、このエネルギー消費は施設完成後にはなくなる。ここでは、バイオ燃料生産施設の減価償却期間、及び、耐用年数を考慮し、エネルギー消費量をこれらの期間に分散することにより年間のエネルギー消費量を推計し、エネルギー消費量の継続性について検討する。

図4.10にバイオ燃料施設建設と経常運転による年間エネルギー消費量の変化を示す。年間エネルギー消費量を求めるために、施設建設による直接・間接効果を減価償却期間、または、耐用年数で除した値を用いた。バイオ燃料施設建設と経常運転のエネルギー消費量は、最終的に経常運転によるエネルギー消費量に収束する。経常運転による単位面積当たりのエネルギー消費の直接・間接効果は、簡易PBR方式よりも大規模開放池が小さいことから、エネルギー消費の面からは大規模開放池方式が有利と考えられる。

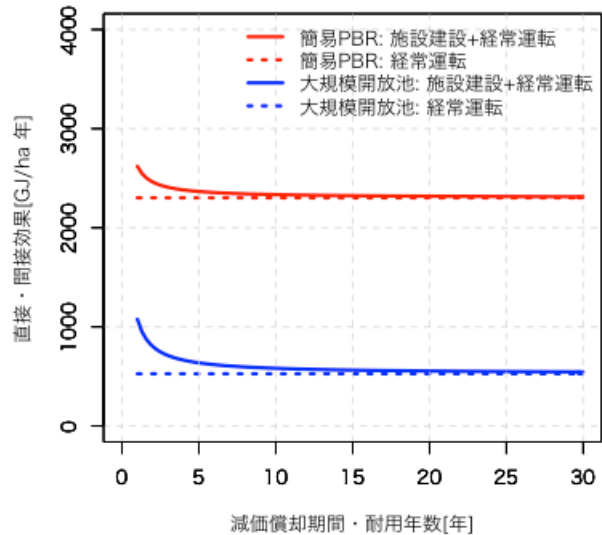


図4.10 バイオ燃料施設建設と経常運転による年間エネルギー消費誘発

4.3.3 産業部門別分析

微細藻類バイオ燃料生産施設の建設、及び、経常運転による産業部門別のエネルギー消費量を図 4.11 と図 4.12 に示す。図 4.11 と図 4.12 の上段に簡易 PBT 方式のエネルギー消費量、下段に大規模開放池方式のエネルギー消費量をまとめ、産業部門別の間接効果は、間接 1～3 次と間接 4 次以降に分けて図示した。

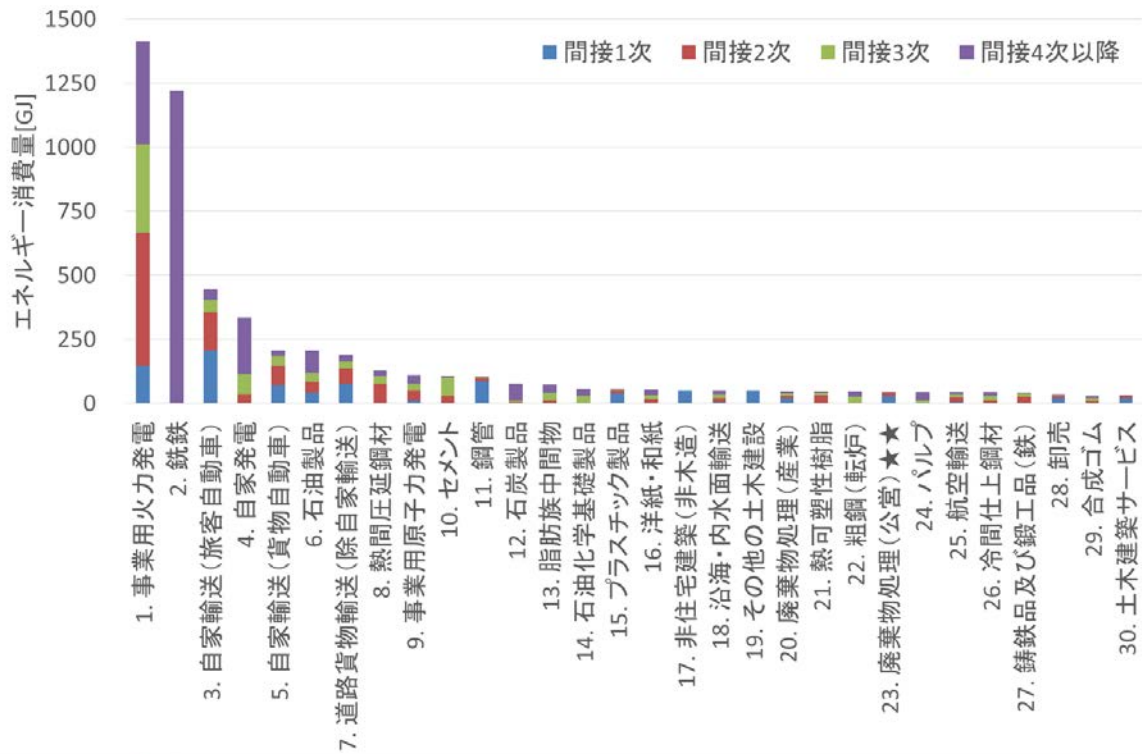
簡易 PBR 方式の施設建設による産業部門別エネルギー消費量(図 4.11 (a))を見ると、1. 事業用火力発電、2. 銑鉄、3. 自家輸送(旅客自動車)、4. 自家発電などの部門でエネルギー消費量が大きい。簡易 PBR 方式の施設建設によるエネルギー消費量は、発電、輸送、製鉄等の産業部門で大きいことがわかる。分析に使用した 2005 年産業連関表における電源構成を反映した結果であるため、発電部門では 1. 事業用火力発電のエネルギー消費量が最も大きい、将来には再生可能エネルギー発電の増大により発電部門間の比率が変化する可能性が高い。輸送部門については、輸送を必要とする各種産業部門のエネルギー消費量が集積されるため、輸送部門のエネルギー消費量が大きく評価されたと考えられる。また、11. 交換、17. 非住宅建築(非木造)、19. その他の土木建設を除くと、全体に間接 1 次効果の占める比率が低いことから、全体としては、2. 銑鉄や 6. 石油製品に代表される素材や原料に関する部門のエネルギー消費量が多い傾向が見られる。

大規模開放池方式の施設建設による産業部門別エネルギー消費量(図 4.11 (b))を見ると、1. 銑鉄、2. 事業用火力発電、3. セメント、4. その他の土木建設などの部門が大きい。大規模開放池方式の施設建設の場合、簡易 PBR 方式と同様に製鉄、発電、輸送部門のエネルギー消費量が多いが、3. セメント、4. その他の土木建設のエネルギー消費量が多いという点で異なる。大規模開放池方式の場合、微細藻類を培養する開放池の土木工事で多くのエネルギーが消費されることがわかる。

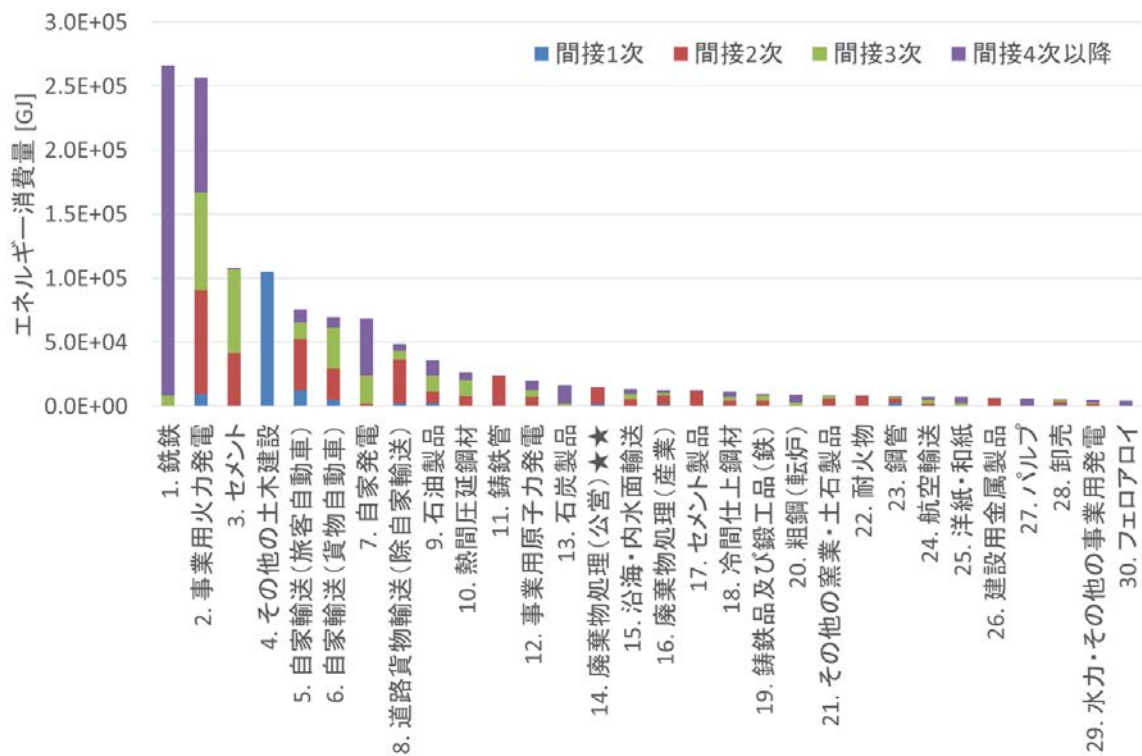
簡易 PBR 方式の経常運転による産業部門別エネルギー消費量(図 4.12 (a))を見ると、1. 事業用火力発電、2. 事業用原子力発電、3. 水力・その他の事業用発電の発電部門が突出して大きい。電源構成については、前述したように将来は火力、原子力、水力、その他の事業用発電の比率が変化する可能性が高い。これらの発電部門では、間接 1 次効果が大半を占めることから、簡易 PBR

方式のバイオ燃料生産施設の経常運転に必要な電力によって多くのエネルギーが消費されていることがわかる。

大規模開放池方式の経常運転による産業部門別エネルギー消費量(図 4.12 (b))をみると、1. 事業用火力発電、2. 事業用原子力発電、3. 水力・その他の事業用発電の発電部門が大半を占める点は、簡易 PBR 方式と共通している。これらの結果から、バイオ燃料生産施設の経常運転におけるエネルギー消費量を削減するには、発電部門における省エネルギー技術が重要であることが示唆された。

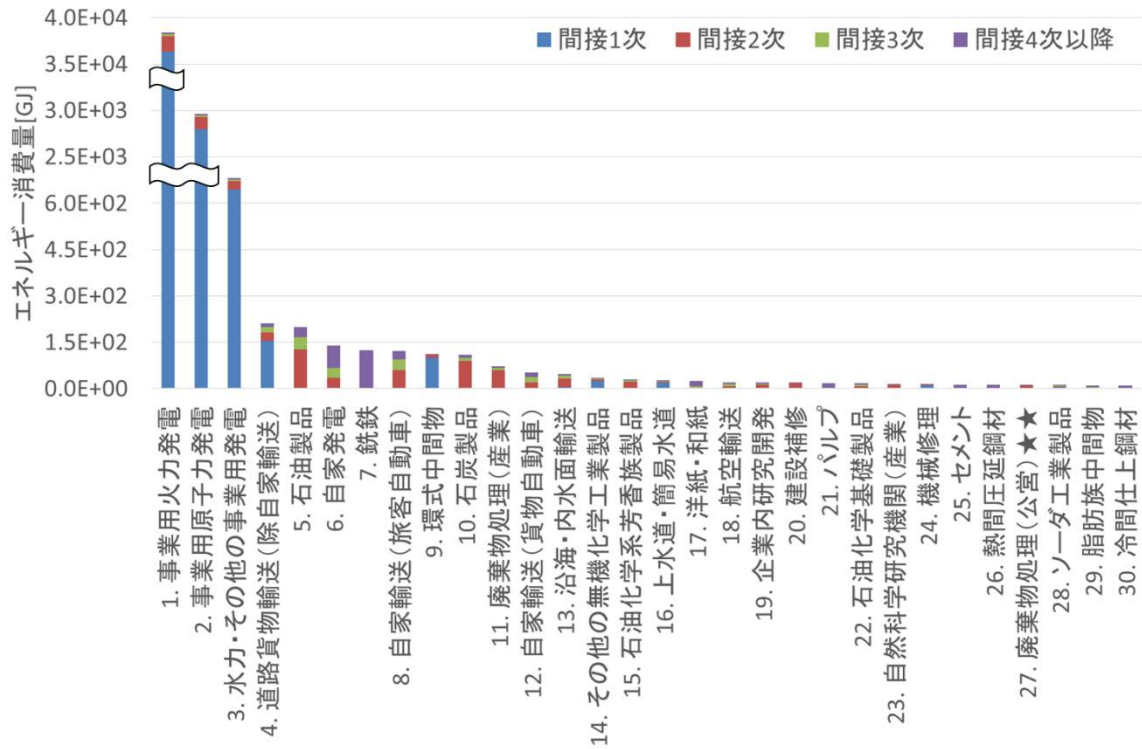


(a) 簡易 PBR 方式

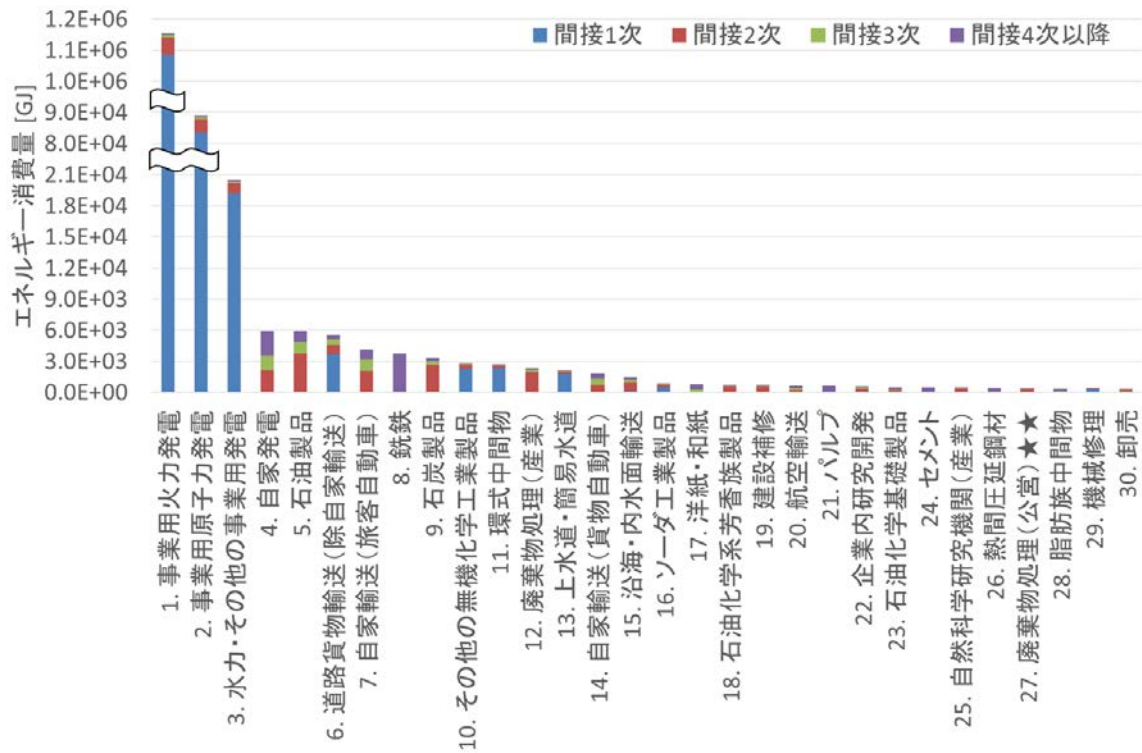


(b) 大規模開放池方式

図 4.11 微細藻類バイオ燃料生産施設建設による産業部門別エネルギー消費量
(エネルギー消費量の間接効果上位 30 部門)



(a) 簡易 PBR 方式



(b) 大規模開放池方式

図 4.12 微細藻類バイオ燃料生産施設の経常運転による産業部門別エネルギー消費量 (エネルギー消費量の間接効果上位 30 部門)

4.4 CO₂ 排出誘発効果

4.4.1 直接効果と間接効果

産業連関分析により、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転によるCO₂排出量を推計した結果を表4.4と図4.13に示す。表4.4には、直接効果²⁶、間接効果、直接・間接効果に分けたCO₂排出量、単位面積当たりのCO₂排出量と、直接効果に対する直接・間接効果の大きさを表す乗数を示す。

簡易PBR方式の直接効果として、施設建設から、 4.00×10^{-1} [t-CO₂]のCO₂排出量が推計された。分析に用いる産業連関表[35]の構造上、経常運転によるCO₂排出量は、使用されるエネルギーを製造する時点のCO₂排出量として評価されるため、直接効果としてのCO₂排出量は0[t-CO₂]とする。産業連関分析を適用した結果、簡易PBR方式の間接効果として、施設建設から 4.59×10^2 [t-CO₂]、経常運転から 2.49×10^3 [t-CO₂]のCO₂排出量が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から 4.59×10^2 [t-CO₂]、経常運転から 2.49×10^3 [t-CO₂]のCO₂排出量が見込まれる。施設建設の場合、直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は1,186であり、間接部門がCO₂排出量の大半を占めることがわかる。

大規模開放池方式の直接効果として、施設建設から24.0[t-CO₂]のCO₂排出量が推計された。産業連関分析を適用した結果、大規模開放池方式の間接効果として、施設建設から 1.22×10^5 [t-CO₂]、経常運転からも 7.53×10^4 [t-CO₂]のCO₂排出量が推計された。直接・間接効果を合わせると、施設建設から 1.22×10^5 [t-CO₂]、経常運転から 7.53×10^4 [t-CO₂]のCO₂排出量が見込まれる。大規模開放池方式の施設建設の場合、直接効果に対する直接・間接効果の比を示す乗数は5,084であり、簡易PBR方式に比べて、間接部門の占めるエネルギー消費量の比率が高いことがわかる。

施設建設による単位面積当たりエネルギー消費量の直接効果を比較すると、簡易PBR方式の 2.11×10^{-2} [t-CO₂]に対して大規模開放池方式は 9.59×10^{-3} [t-CO₂]と小さい。施設建設による単位面積当たりのCO₂排出量の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の24.1[t-CO₂]に対して大規模開放池方式は48.7 [t-CO₂]と大きい。一方、経常運転による単位面積当たりのCO₂排出量の間接効果を比較すると、簡易PBR方式の131 [t-CO₂]に対して大規模開放池方式は30.1 [t-CO₂]と小さい。直接・間接効果を合わせた単位面積当たりのCO₂排出量を比較すると、施設建設では簡易PBR方式が少なく、経常運転では大規模開放池方式が少なくなっている。

表4.4 バイオ燃料生産施設建設と経常運転によるCO₂排出誘発の直接・間接効果

	直接効果		間接効果		直接・間接効果		乗数
	[t-CO ₂]	[t-CO ₂ /ha]	[t-CO ₂]	[t-CO ₂ /ha]	[t-CO ₂]	[t-CO ₂ /ha]	
簡易PBR 施設建設	4.00E-01	2.11E-02	4.59E+02	2.41E+01	4.59E+02	2.42E+01	1186
19[ha] 経常運転	0.00E+00	0.00E+00	2.49E+03	1.31E+02	2.49E+03	1.31E+02	
大規模開放池 施設建設	2.40E+01	9.59E-03	1.22E+05	4.87E+01	1.22E+05	4.87E+01	5084
2,500[ha] 経常運転	0.00E+00	0.00E+00	7.53E+04	3.01E+01	7.53E+04	3.01E+01	

²⁶ 施設建設の直接効果とは、微細藻類バイオ燃料生産施設建設時に発生するCO₂排出量のことである。なお、施設経常運転時の直接エネルギー投入は電力のみであるので、CO₂の排出はない。よって、表4.4の経常運転時の直接効果は0である。

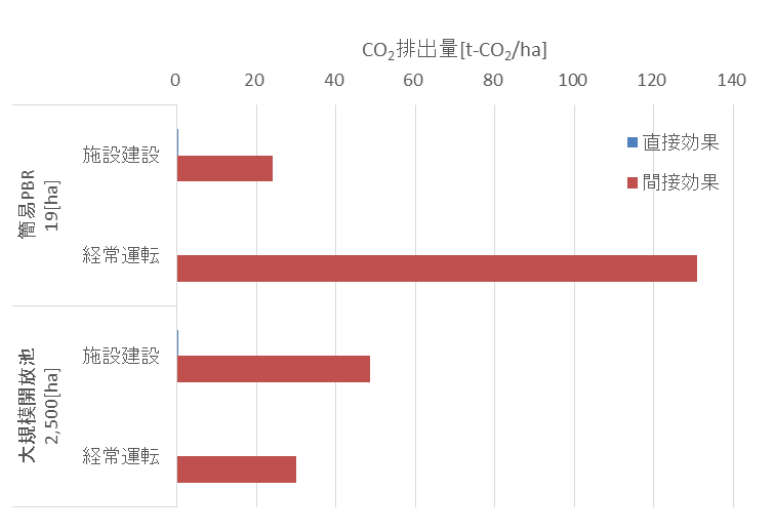


図4.13 バイオ燃料生産施設建設と経常運転によるCO₂排出誘発の直接・間接効果

4.4.2 継続性の検討

施設建設の場合、建設時に直接・間接のCO₂が排出されるが、このCO₂排出は施設完成後にはなくなる。ここでは、バイオ燃料生産施設の減価償却期間、及び、耐用年数を考慮し、CO₂排出量をこれらの期間に分散することにより年間のCO₂排出量を推計し、CO₂排出量の継続性について検討する。

図4.14にバイオ燃料施設建設と経常運転による年間CO₂排出量の変化を示す。年間CO₂排出量を求めるために、施設建設による直接・間接効果を減価償却期間、または、耐用年数で除した値を用いた。バイオ燃料施設建設と経常運転のCO₂排出量は、最終的に経常運転によるCO₂排出量に収束する。経常運転による単位面積当たりのCO₂排出の直接・間接効果は、簡易PBR方式よりも大規模開放池が小さいことから、CO₂排出の面からは大規模開放池方式が有利と考えられる。

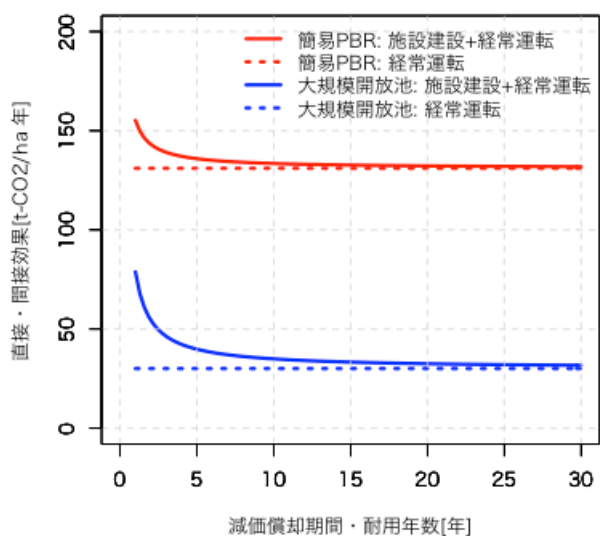


図4.14 バイオ燃料施設建設と経常運転による年間CO₂排出誘発

4.4.3 産業部門別分析

微細藻類バイオ燃料生産施設の建設、及び、経常運転による産業部門別のCO₂排出量を図4.15と図4.16に示す。図4.15と図4.16の上段に簡易PBR方式のCO₂排出量、下段に大規模開放池方式

式の CO₂ 排出量をまとめ、産業部門別の間接効果は、間接 1～3 次と間接 4 次以降に分けて図示した。

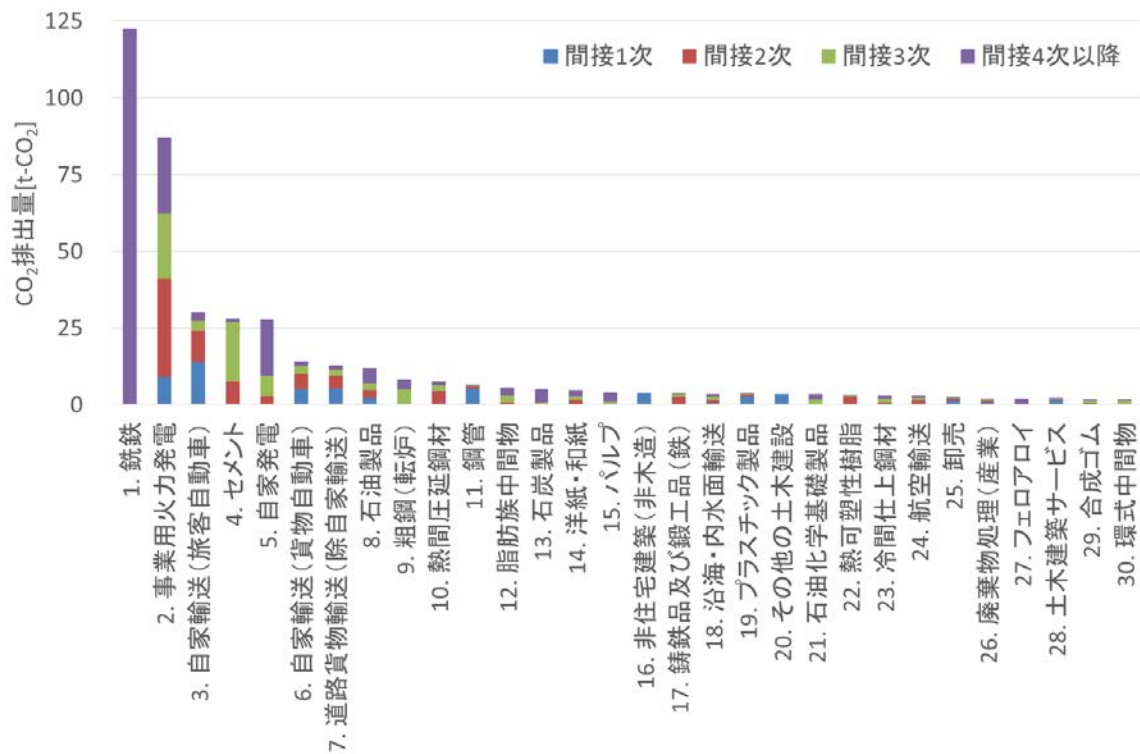
簡易 PBR 方式の施設建設による産業部門別エネルギー消費量(図 4.15 (a))を見ると、1. 銑鉄、2. 事業用火力発電、3. 自家輸送(旅客自動車)、4. セメント、5. 自家発電などの部門で CO₂ 排出量が多い。簡易 PBR 方式の施設建設による CO₂ 排出量は、製鉄、発電、輸送、セメント等の産業部門で大きい。ただし、輸送部門の場合、輸送を必要とする各種産業部門の CO₂ 排出量が集積されるため、輸送部門の CO₂ 排出量が大きく評価される傾向がある。1. 銑鉄は間接 4 次以降の CO₂ 排出量が大半を占めている。CO₂ 排出量の間接 1 次効果が大きい部門は、3. 自家輸送(旅客自動車)、2. 事業用火力発電、6. 自家輸送(貨物自動車)、7. 道路貨物輸送(除自家輸送)、11. 鋼管などであるが、全体としては間接 2 次以降の CO₂ 排出量比率が高い。

大規模開放池方式の施設建設による産業部門別エネルギー消費量(図 4.15 (b))を見ると、1. セメント、2. 銑鉄、3. 事業用火力発電、4. その他の土木建設などの部門が大きい。大規模開放池方式の施設建設の場合、簡易 PBR 方式と同様に製鉄、発電、輸送、セメント等の部門の CO₂ 排出量が多いが、1. セメントの CO₂ 排出量が最も大きいという点で異なる。大規模開放池方式の場合、微細藻類を培養する開放池の土木工事から波及した部門で多くの CO₂ が排出されることがわかる。

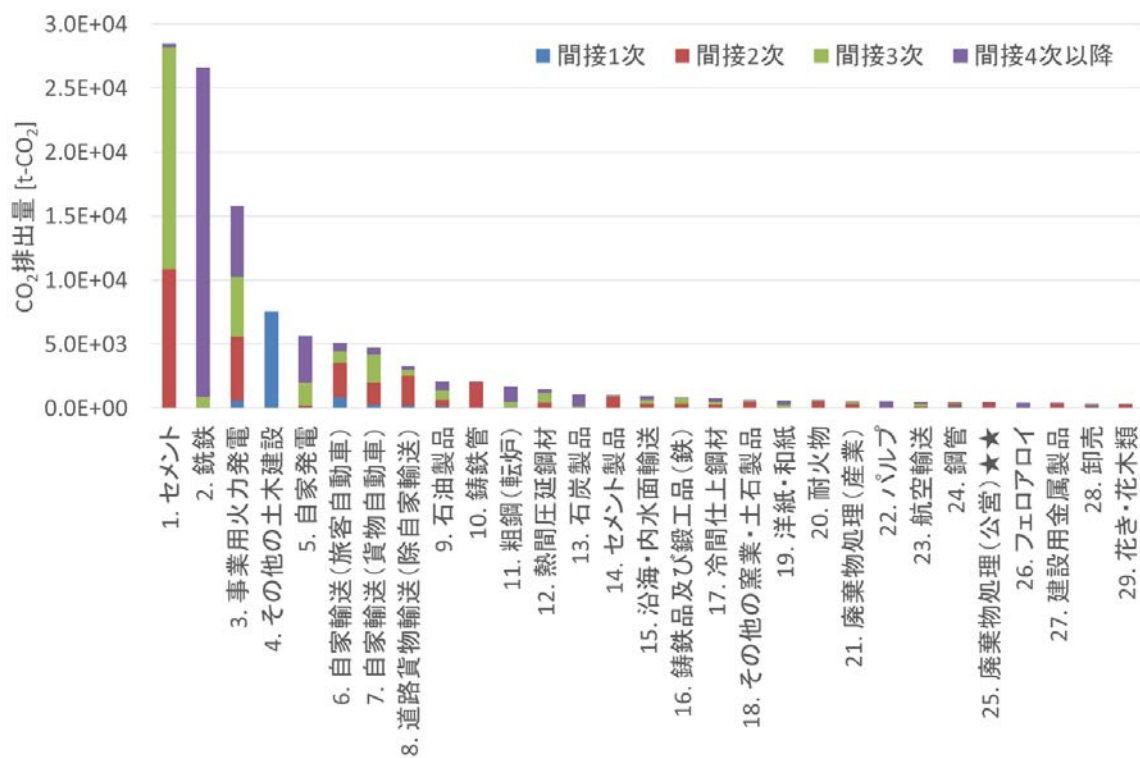
簡易 PBR 方式の経常運転による産業部門別 CO₂ 排出量(図 4.16 (a))を見ると、1. 事業用火力発電が突出して大きく、2. 道路貨物輸送(除自家輸送)、3. 銑鉄がこれに続く。1. 事業用火力発電の間接 1 次の CO₂ 排出量が大半を占めることから、CO₂ 排出量を削減するには、再生可能エネルギー発電の比率を増やすなどの対策が必要と考えられる。

大規模開放池方式の経常運転による産業部門別エネルギー消費量(図 4.16 (b))をみると、1. 事業用火力発電が突出して大きく、2. 自家発電、3. 石油製品、4. 銑鉄がこれに続く。発電部門が大半を占める点は、簡易 PBR 方式と共通している。これらの結果から、バイオ燃料生産施設の経常運転における CO₂ 排出量を削減するには、CO₂ 排出を削減するクリーンな発電技術が重要であることが示唆された。

他のバイオ燃料生産モデルを用いた場合、経常運転による CO₂ 排出量は、培養液に必要な肥料生産からの誘発と、収穫されたバイオ燃料の精製に必要なエネルギーからの誘発が大きいことが指摘されている[36]。それに対し、この分析では、培地・培養液生産から誘発される CO₂ 排出量は 1% 程度に過ぎないが、本研究で仮定した程度の培地・培養液で十分な微細藻類の収量が確保できることを専門家に確認している。また、生産されたバイオ燃料を粗油として産出するモデルであるため、精製工程は計算に含めていない。しかし、精製工程を一般的な石油化学工業の精製部門で行うというモデルは、規模効果も期待でき、合理性があると考えられる。

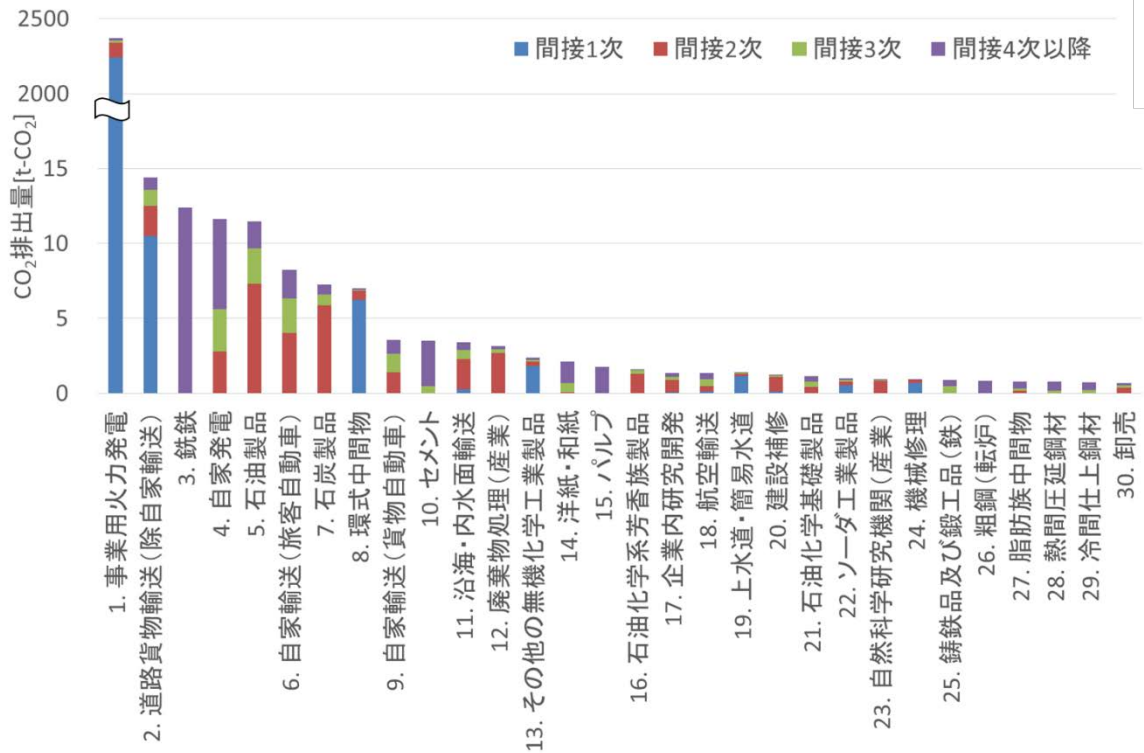


(a) 簡易 PBR 方式

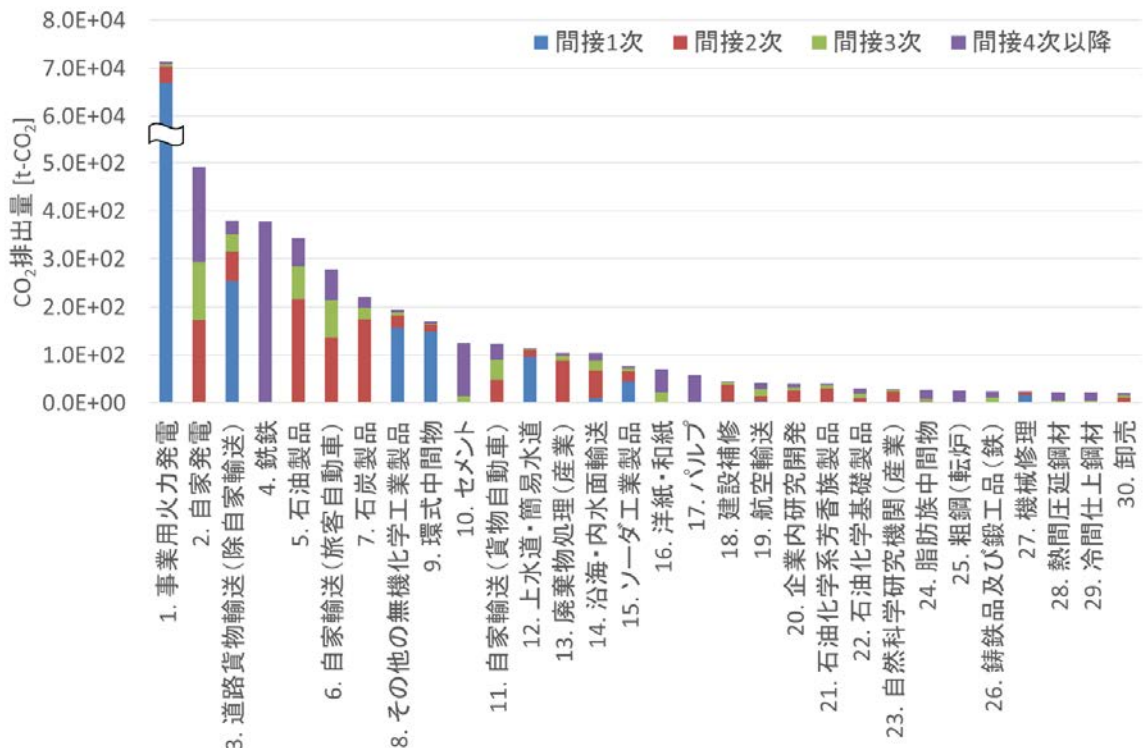


(b) 大規模開放池方式

図 4.15 微細藻類バイオ燃料生産施設建設による産業部門別 CO₂ 排出量 (CO₂ 排出量の間接効果上位 30 部門)



(a) 簡易 PBR 方式



(b) 大規模開放池方式

図 4.16 微細藻類バイオ燃料生産施設の経常運転による産業部門別 CO₂ 排出量 (CO₂ 排出量の間接効果上位 30 部門)

4.5 誘発効果の比較

4.5.1 生産誘発効果と雇用誘発効果

図 4.17 に、2 つのバイオ燃料生産方式の施設建設と経常運転による単位面積当たりの生産誘発額と雇用誘発数の直接効果と直接・間接効果の合計を示す。図 4.17 の■は直接効果を示し、□は直接・間接効果の合計を示す。線分の長さ(■-□)が間接効果を表し、間接効果の大きさから波及効果の大きさがわかる。

(a) 施設建設

間接効果(■-□, ■-□)は、生産誘発額[百万円/ha]と雇用誘発数[人/ha]のいずれも、大規模開放池方式(■-□)が簡易 PBR 方式(■-□)よりも大きく、単位面積で比較しても大規模開放池方式の波及効果の大きい結果となった。大規模開放池方式では、雇用誘発の直接効果(■)が小さいため、雇用誘発効果が大きい。なお、大規模開放池方式の生産・雇用誘発は土木工事に集中するが、簡易 PBR 方式の生産誘発は様々な産業部門に分散する(図 4.3 参照)。

(b) 経常運転

間接効果(■-□, ■-□)は、生産誘発額[百万円/ha]も雇用誘発数[人/ha]のいずれも、簡易 PBR 方式(■-□)が大規模開放池方式(■-□)よりも大きく、施設建設の結果とは逆になっている。大規模開放池方式の波及効果は小さく、直接・間接効果(□)を合わせも、簡易 PBR 方式の直接効果(■)に満たない。

微細藻類バイオ燃料生産施設建設による単位面積の生産・雇用への波及効果(直接・間接効果の合計)は簡易 PBR 方式(□)よりも大規模開放池方式(□)が大きいが、波及効果は建設期間に限定される。一方、継続的に発生する経常運転による単位面積の生産・雇用への波及効果(直接・間接効果の合計)は、反対に、大規模開放池方式(□)よりも簡易 PBR 方式(□)が大きく、長期的な経済効果の観点からは簡易 PBR 方式が優れていると言えよう。簡易 PBR 方式は、施設の面積が比較的小さいため立地条件の制約を受けにくいという特徴がある。さらに、休耕田を利用した簡易 PBR 方式による微細藻類バイオ燃料生産も想定されており、地域における継続的な雇用創出効果も期待される。

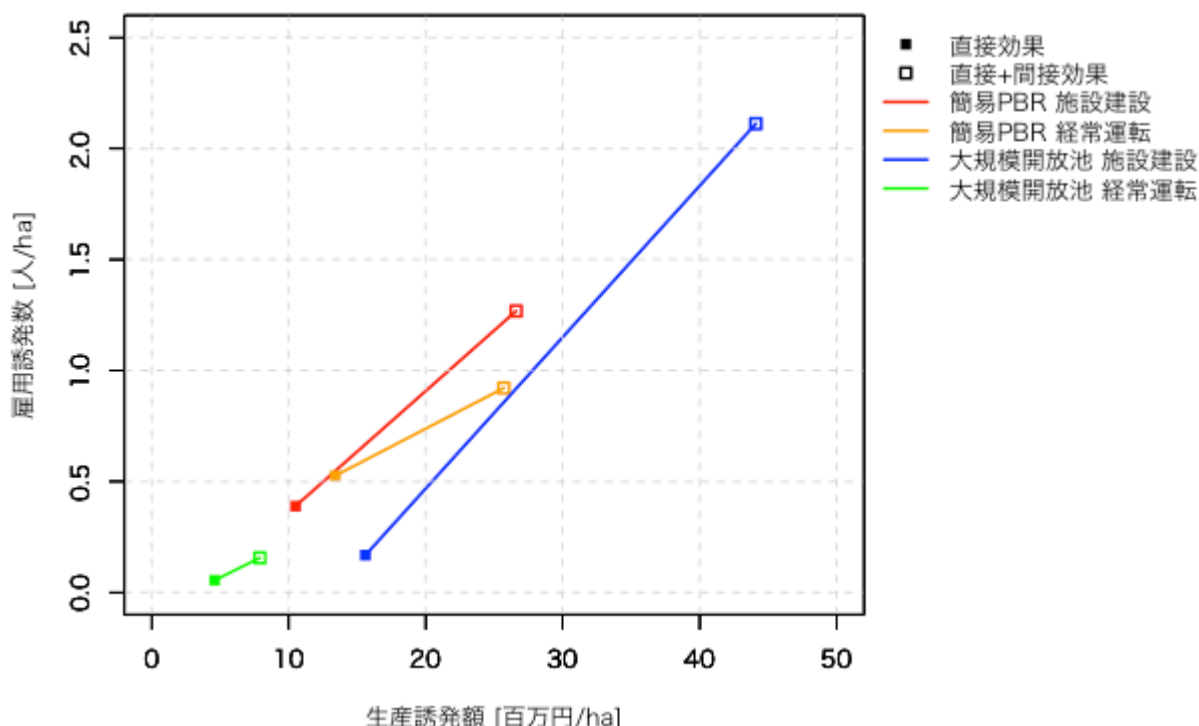


図 4.17 生産誘発額と雇用誘発数から見る微細藻類バイオ燃料生産施設建設と経常運転の直接・間接効果

4.5.2 生産誘発効果とエネルギー消費誘発効果

図 4.18 に、2 つのバイオ燃料生産方式の施設建設と経常運転による単位面積当たりの生産誘発額とエネルギー消費量の直接効果と直接・間接効果の合計を示す。

(a) 施設建設

エネルギー消費量[TJ/ha]は間接効果(■-□, ■-□)が大半を占め、直接効果(■, ■)の影響は少ない。直接・間接効果を合わせたエネルギー消費量は、大規模開放池方式(□)が簡易 PBR 方式(□)の 1.72 倍と推計された。

(b) 経常運転

エネルギー消費量[TJ/ha]は間接効果(■-□, ■-□)が大半を占める。直接・間接効果を合わせたエネルギー消費量は、簡易 PBR 方式(□)が大規模開放池方式(□)の 4.35 倍と推計された。簡易 PBR 方式におけるエネルギー消費は、電力 (事業用火力と事業用原子力)部門がその大半を占めている。

生産誘発額とエネルギー消費量について、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転を比較すると、経常運転(□, □)は生産誘発額に対してエネルギー消費量が大きく、施設建設(□, □)はエネルギー消費量に対して生産誘発額が大きいことがわかる。2 つのバイオ燃料生産方式を比較すると、大規模開放池方式は、施設建設による短期的な経済効果が大きく、かつ、継続的なエネルギー消費量が少ないという点で簡易 PBR 方式よりも優れている。ただし、大規模開放池方式は立地条件の制約があるため、我が国においてバイオ燃料生産を考慮すると、簡易 PBR 方式の経常運転におけるエネルギー消費の削減が技術課題の一つと言える。そのため、微細藻類バイオ燃料生産におけるエネルギー消費量を

削減するには、これらの事業用発電部門における発電効率向上させる省エネルギー技術や、発電時のエネルギー消費量の少ない再生可能エネルギー発電が重要な役割を果たす。

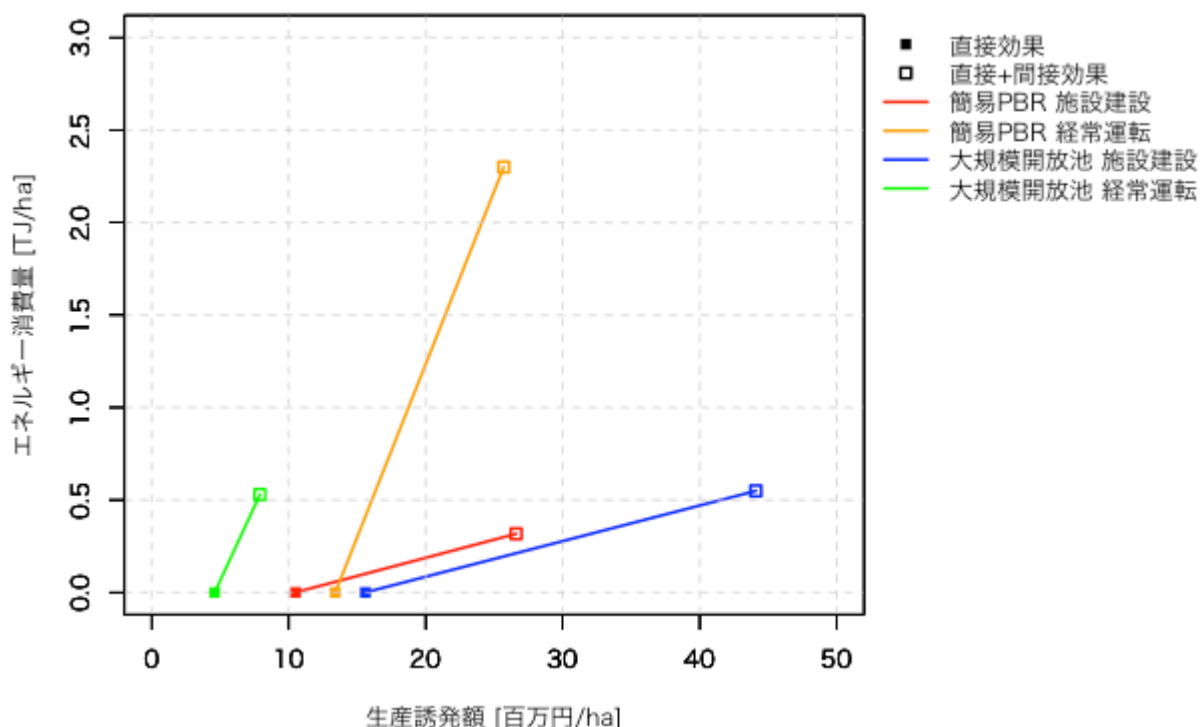


図 4.18 生産誘発額とエネルギー消費量から見る微細藻類バイオ燃料生産施設建設と経常運転の直接・間接効果

4.5.3 生産誘発効果と CO₂ 排出誘発効果

図 4.19 に、2 つのバイオ燃料生産の施設建設と経常運転による単位面積当たりの生産誘発額と CO₂ 排出量の直接効果と直接・間接効果の合計を示す。

(a) 施設建設

CO₂ 排出量[t-CO₂/ha]は間接効果(■-□, ■-□)が大半を占め、直接効果(■, ■)の影響は少ない。直接・間接効果を合わせた CO₂ 排出量は、大規模開放池方式(□)が簡易 PBR 方式(□)の 2.01 倍と推計された。

(b) 経常運転

CO₂ 排出量[t-CO₂/ha]は間接効果(■-□, ■-□)が大半を占める。直接・間接効果を合わせた CO₂ 排出量は、簡易 PBR 方式(□)が大規模開放池方式(□)の 4.35 倍と推計された。

生産誘発額と CO₂ 排出量について、微細藻類バイオ燃料生産における施設建設と経常運転を比較すると、経常運転(□, □)は生産誘発額に対して CO₂ 排出量が大きく、施設建設(□, □)は CO₂ 排出量に対して生産誘発額が大きいことがわかる。2 つのバイオ燃料生産方式を比較すると、大規模開放池方式は、施設建設による短期的な経済効果が大きく、かつ、継続的な CO₂ 排出量が少ないという点で簡易 PBR 方式よりも優れている。ただし、大規模開放池方式は立地条件の制約があるため、我が国においてバイオ燃料生産を考慮すると、簡易 PBR 方式の経常運転により排出される CO₂ の削減が技術課題の一つと言える。

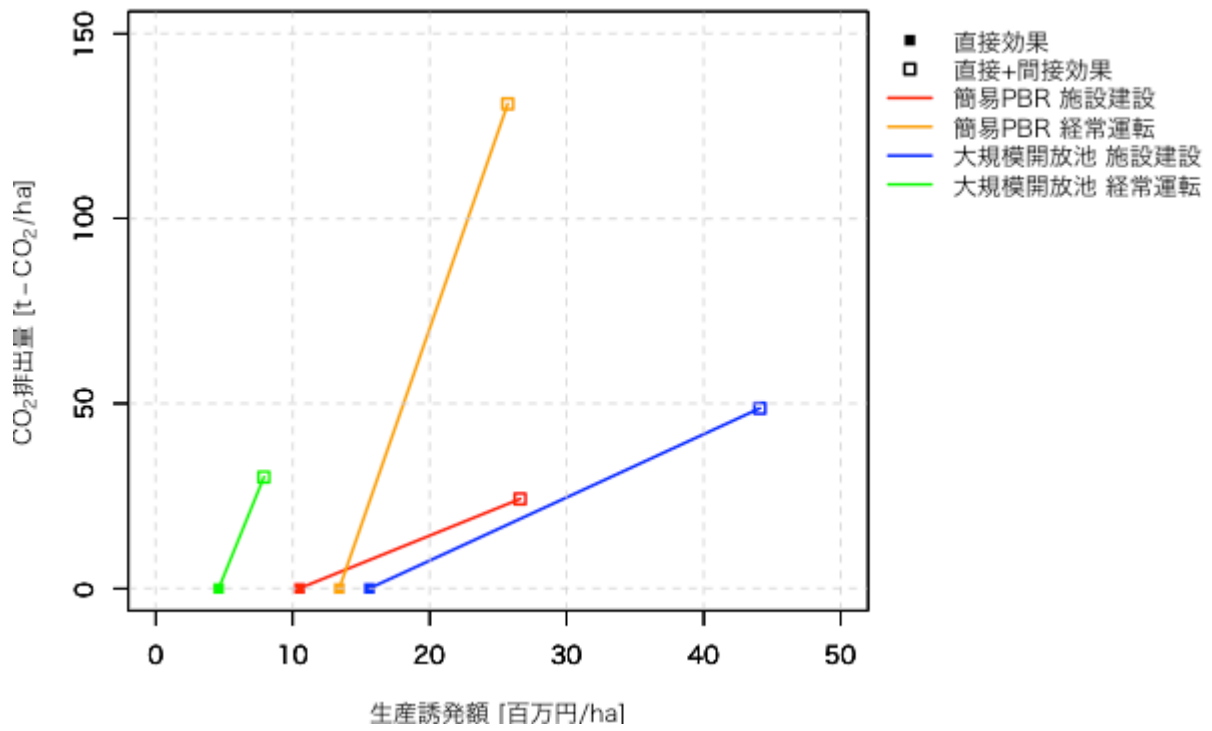


図 4.19 生産誘発額と CO₂ 排出量から見る微細藻類バイオ燃料生産施設建設と経常運転の直接・間接効果

4.6 経済・環境への波及効果分析から浮かび上がる論点

微細藻類によるバイオ燃料生産施設として、簡易 PBR 方式と大規模開放池方式を取り上げ、拡張産業連関表を用いて生産誘発額、雇用誘発数、エネルギー消費量、CO₂ 排出量の産業連関分析を行った。分析結果から、微細藻類バイオ燃料生産の課題を明らかにし、今後の研究開発の方向性について検討した。

(1) 生産誘発額

バイオ燃料施設建設による単位面積当たりの生産誘発額は、簡易 PBR 方式よりも大規模開放池方式が大きい。大規模開放池方式では、土木工事による生産誘発額が極めて大きく、簡易 PBR 方式では、プラスチック製品や装置による生産誘発額が相対的に大きい。簡易 PBR 方式の生産コスト低減には、プラスチック製品や装置の低価格化に寄与する研究開発が重要と考えられる。

遺伝子操作された微細藻類の場合、生物多様性条約カルタヘナ議定書の締約国では、開放系での培養は制限されたため、高コストな閉鎖系 PBR によるバイオ燃料生産を想定しなければならない。したがって、遺伝子操作された微細藻類によるバイオ燃料生産の経済性を向上させるには、閉鎖系の培養施設建設コストを低減する必要がある。簡易 PBR 方式や大規模開放池方式でも利用可能な微細藻類を考えると、従来から行われている育種・品種改良に目を向ける必要がある。また、遺伝子操作ではなく、重イオンビームを照射して生産性の高い微細藻類を選抜育種する研究も進められており、今後の研究成果が期待される。

バイオ燃料施設建設による生産誘発は、建設期間内に限定されるが、経常運転の生産誘発効果は施設完成後も継続する。バイオ燃料生産方式によらず、経常運転における生産誘発額の大きな部門は事業用発電であるため、発電コストを低減する技術導入は、バイオ燃料生産コストの低減に寄与する。また、大規模開放池方式の経常運転では、上水道・簡易水道部門の生産誘発額が大きいため、河川等の水を利用するための安価な水供給施設が、バイオ燃料生産コストの低減に寄与することが期待される²⁷。

(2) 雇用誘発数

施設建設による雇用誘発数の直接効果を単位面積当たりで比較すると、大規模開放池方式よりも簡易 PBR 方式が大きい。しかし、間接効果を見ると、大規模開放池方式の雇用誘発数が簡易 PBR 方式よりも大きい。継続的に発生する経常運転による雇用誘発数の直接効果を単位面積当たりで比較すると、大規模開放池方式よりも簡易 PBR 方式が大きく、間接効果も簡易 PBR 方式が大きい。単位面積当たりの比較になるが、雇用創出効果の観点からは、一時的に発生する施設建設の雇用誘発よりも、継続的な経常運転による雇用誘発の大きい簡易 PBR 方式が土地利用の制約の多い国内では適していると考えられる。

²⁷ 工業用水の利用も考えられるが立地条件に依存すること、取水設備の費用が必要になることから、この分析では上水道を仮定した。

(3) エネルギー消費量

エネルギー消費量については、施設建設と経常運転のいずれも間接効果が大半を占め、施設建設の場合、事業用発電、銑鉄、セメント等の部門におけるエネルギー消費量が大きく、経常運転の場合、事業用発電部門のエネルギー消費量が突出している。バイオ燃料生産の施設建設、経常運転によるエネルギー消費量を削減するには、これらの間接部門における省エネ技術の導入が不可欠である。

(4) CO₂ 排出量

CO₂ 排出量についても、施設建設と経常運転のいずれも間接効果が大半を占め、施設建設の場合、銑鉄、セメント、事業用火力発電等の部門における CO₂ 排出量が多い。したがって、施設建設による CO₂ 排出量を削減するには、これらの部門における CO₂ 排出量を削減する技術の導入が重要な課題と言える。一方、経常運転の場合、事業用火力発電部門の CO₂ 排出量が突出している。銑鉄の CO₂ 排出は間接 4 次以降に現れることから、微細バイオ燃料生産以外の施設建設でも CO₂ 排出に大きな影響を与えていることがわかる。したがって、施設建設における CO₂ 排出量削減には、銑鉄における CO₂ 排出量削減が最優先課題となる。経常運転による CO₂ 排出は、施設建設のように建設期間に限定されず継続的に発生するため、継続的な CO₂ 排出量を削減するには、事業用火力発電部門における CO₂ 排出量削減が不可欠である。例えば、CO₂ 排出の少ない再生可能エネルギー発電の導入拡大や、CO₂ 排出量の大きな事業用火力発電の比率を下げるといった電源構成の変更が有効と考えられる。

5. 残渣利用を含む微細藻類バイオ燃料生産の感度分析

5.1 バイオ燃料生産における残渣の利用

微細藻類を用いたバイオ燃料生産工程では、微細藻類から油分抽出後に残渣が発生する。残渣については、以下の利用方法が想定されている。

- (1) 固形燃料
- (2) 肥料
- (3) 飼料

ここでは、バイオ燃料生産だけでなく、残渣の利用方法を含めたエネルギー生産・利用の観点から微細藻類研究の方向性を検討する。具体的には、微細藻類の成長速度と油脂含有率に注目し、バイオ燃料と残渣から固形燃料、肥料、飼料を生産した場合の生産額とCO₂排出削減量について感度分析を行い、経済と環境への影響から今後の微細藻類研究の方向性について検討する。

5.2 バイオ燃料・残渣生産量

微細藻類の年間生産量 P_{algae} [kg/year]は次式で与えられる。

$$P_{algae} = AdpvT \quad (5.1)$$

ここで、 A [m²]: 水路の面積、 d [m]: 水路の深さ、 ρ [kg/m³]: 微細の藻類の密度、 v [%/day]: 微細藻類の成長速度、 T [day]: 培養施設の年間稼動日数である。バイオ燃料の年間生産量は P_{oil} [kg/year]は、微細藻類の年間生産量 P_{algae} [kg/year]、有機物含有率 C_{org} [%]、油脂含有率 C_{oil} [%]の積で与えられる[30]。

$$P_{oil} = P_{algae}C_{org}C_{oil} = AdpvTC_{org}C_{oil} \quad (5.2)$$

バイオ燃料生産により発生する残渣の年間生産量 P_{solid} [kg/year]は、微細藻類の年間生産量 P_{algae} [kg/year]、有機物含有率 C_{org} [%]、油脂含有率 C_{oil} [%]、損失 L [%]により

$$P_{solid} = P_{algae}C_{org}(1 - C_{oil} - L) = AdpvTC_{org}(1 - C_{oil} - L) \quad (5.3)$$

とする。ここでは、バイオ燃料の年間生産量は P_{oil} [kg/year]と、残渣の年間生産量 P_{solid} [kg/year]を、微細藻類の成長速度 v [%/day]と油脂含有率 C_{org} [%]の関数 $P_{oil}(v, C_{org})$ 、 $P_{solid}(v, C_{org})$ とみなし、感度分析を行う。

表 5.1 に示す数値を用いて計算したバイオ燃料及び残渣の単位面積当たり年間生産量と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を図 5.1 に示す。成長速度の下限は、現在の微細藻類研究で実現されている値とし、上限は研究の進展による実現が期待される値とした[30]。油脂含有率についても、下限を現在の水準に設定し、上限は研究の進展により実現が期待される値とした。バイオ燃料生産施設は簡易 PBR 方式と大規模開放池方式に分けて計算した。

図 5.1(a)、(b)に示すバイオ燃料の単位面積当たり年間生産量を見ると、微細藻類の成長速度と油脂含有率の数値が大きいと、バイオ燃料の生産量が向上することがわかる。簡易 PBR 方式は効率的な空間利用できるため、水路の深さが大規模開放池方式よりも深く設定でき、さらに、施設が比較的小規模であることから年間稼動日数を高く設定できる。そのため、大規模開放池方式よりも簡易 PBR 方式によるバイオ燃料生産量の多い結果となっている。

図 5.1(c)、(d)に示す残渣の単位面積当たり年間生産量を見ると、微細藻類の成長速度の増加の伴い残渣生産量は増加するが、バイオ燃料とは反対に油脂含有率は低いほど残渣生産量が多いこ

とがわかる。微細藻類のバイオ燃料に利用されない成分が残渣となるため、成長速度が速く、油脂含有率が低い場合に残渣生産量が多くなるためである。

表 5.1 微細藻類・バイオ燃料・残渣の年間生産量推計の条件

		簡易 PBR 方式	大規模開放池方式
水路の面積	$A[m^2]$	1.9×10^5	2.5×10^7
水路の深さ	$d[m]$	0.3	0.2
施設の年間稼働日数	$T[day]$	365	330
微細藻類の密度	$\rho[kg/m^3]$	3.5	3.5
有機物含有率	$C_{org}[\%]$	98	98
損失	$L[\%]$	5	5

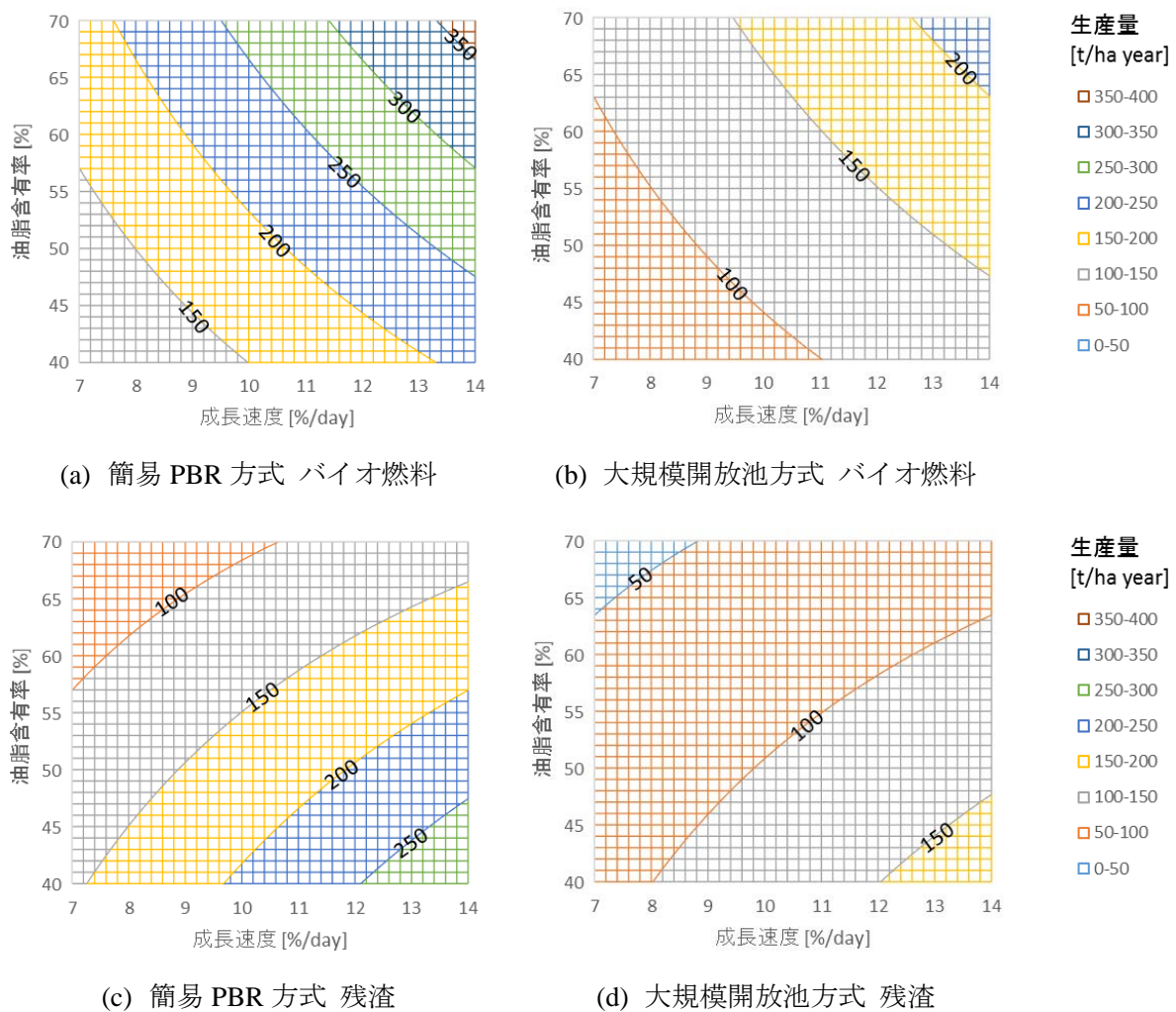


図 5.1 バイオ燃料・残渣の単位面積当たり年間生産量と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係

5.3 バイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料の生産額

表 5.2 に示す価格を用いてバイオ燃料の単位面積当たり年間生産額と残渣から得られる固形燃料、肥料、飼料の単位面積当たり年間生産額を推計する。文献[30]で想定されているバイオ燃料の生産者価格 107[円/L]を用い、バイオ燃料の比重を 1 として単位重量バイオ燃料生産者価格を 107[円/kg]とした。残渣を成形した固形燃料は、おが屑を成形したオガライトと同等の発熱量があると仮定した。オガライトの発熱量が石炭の約 60%であることから、固形燃料の価格は石炭の生産者価格 9.50[円/kg]の 60%である 5.70[円/kg]と仮定した。肥料の生産者価格は、有機質肥料(除別掲)の国内生産額(206,711[百万円])と国内生産量(7,434,378[t])の比から 27.80[円/kg]とした。飼料の価格も同様に、国内生産額(1,186,017[百万円])と国内生産量(25,644,694[t])の比から 46.25 [円/kg]とした。これらの価格とバイオ燃料の年間生産量 P_{oil} [kg/year]と残渣の年間生産量 P_{solid} [kg/year]の積を求めることにより、バイオ燃料及び残渣を原料とする固形燃料、肥料、飼料の年間生産額が求まる。

図 5.2 に、バイオ燃料の単位面積当たり年間生産額と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を示す。微細藻類の成長速度と油脂含有率の増加に従い、バイオ燃料の生産量が増加するため生産額も増加する。簡易 PBR 方式のバイオ燃料生産量は大規模開放池方式よりも大きいため、生産額も簡易 PBR 方式が高くなっている。

図 5.3 に、残渣から得られる固形燃料、肥料、飼料の単位面積当たり年間生産額と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を示す。残渣の生産量に比例して、固形燃料、肥料、飼料の生産額も増えるため、微細藻類の成長速度が大きく、油脂含有率が低いほど生産額も大きい。また、固形燃料、肥料、飼料の付加価値の違いから生じる価格差により、生産額は飼料、肥料、固形燃料の順に大きい。微細藻類の生産効率は簡易 PBR 方式が高いため、生産額も大規模開放池方式よりも簡易 PBR 方式が高い結果となっている。

図 5.3 に、バイオ燃料と残渣利用による単位面積当たり年間生産額と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を示す。残渣利用は、(1) 固形燃料、(2) 肥料、(3) 飼料の 3 種類があるため、図 5.3 には、バイオ燃料+固形燃料、バイオ燃料+肥料、バイオ燃料+飼料の生産額を示した。飼料、肥料、固形燃料の順に単位面積当たり年間生産額が大きくなるため、バイオ燃料と残渣利用を合わせた単位面積当たり年間生産額もバイオ燃料+飼料、バイオ燃料+肥料、バイオ燃料+固形燃料の順に大きい。ただし、残渣利用による生産額が大きくなるのは、微細藻類の成長速度が大きく、油脂含有率が低い場合であり、残渣の利用方法によって生産額の等高線形状が変化していることがわかる。これらの結果から、残渣利用を含めたバイオ燃料生産による生産額を向上させるには、油脂含有率は低くても、成長速度の速い微細藻類を培養することが有効であることが示唆された。

表 5.2 バイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料の生産額推計に用いた価格

	価格
バイオ燃料	107.00[円/kg]
固形燃料	5.70[円/kg]
肥料	27.80[円/kg]
飼料	46.25[円/kg]

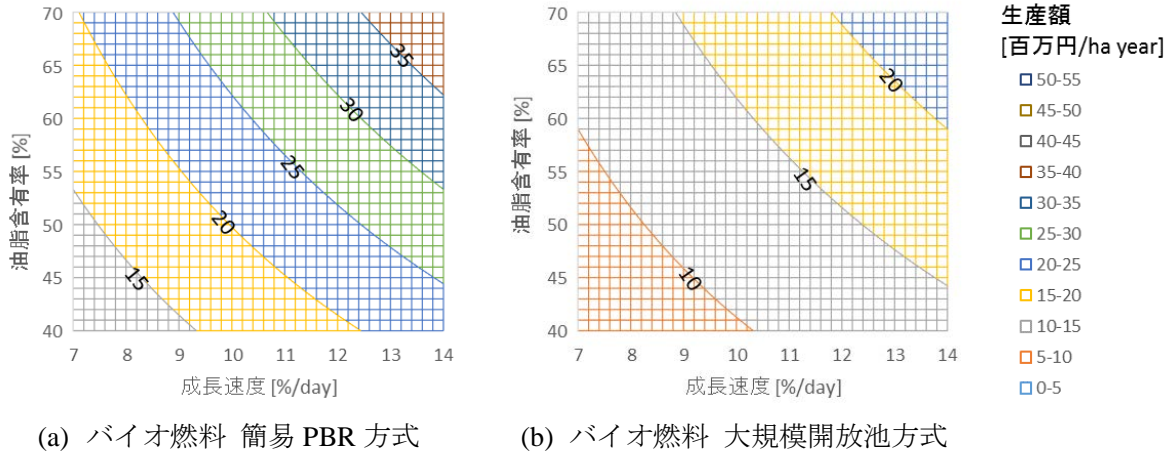
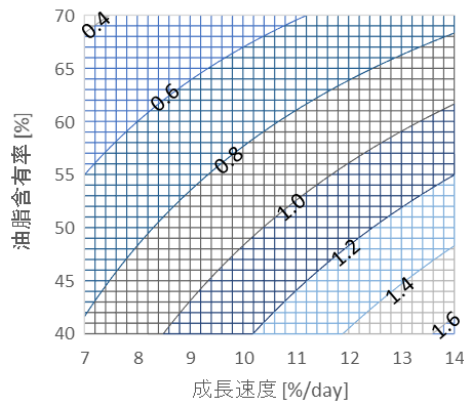
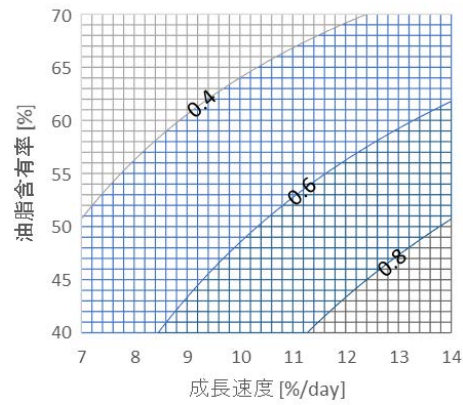


図 5.2 バイオ燃料の単位面積当たり年間生産額と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係



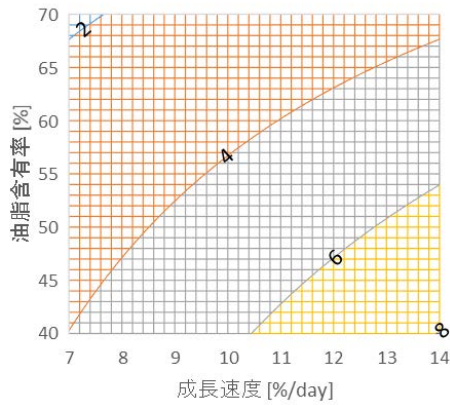
(a) 固形燃料 簡易 PBR 方式



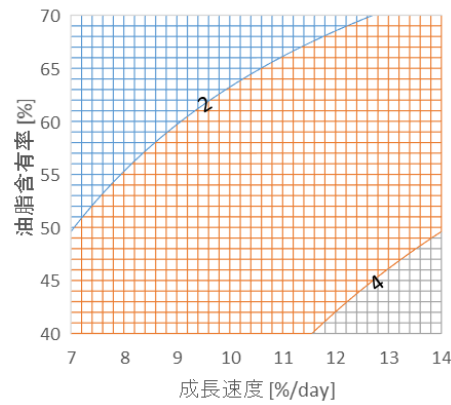
(b) 固形燃料 大規模開放池方式

生産額
[百万円/ha year]

- 1.8-2
- 1.6-1.8
- 1.4-1.6
- 1.2-1.4
- 1-1.2
- 0.8-1
- 0.6-0.8
- 0.4-0.6
- 0.2-0.4
- 0-0.2



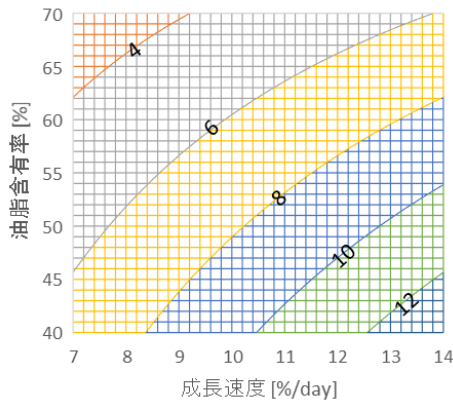
(c) 肥料 簡易 PBR 方式



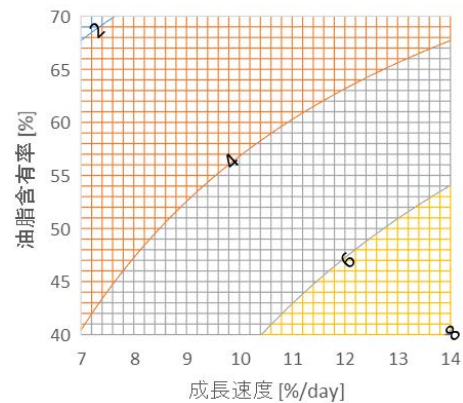
(d) 肥料 簡易 PBR 方式

生産額
[百万円/ha year]

- 12-14
- 10-12
- 8-10
- 6-8
- 4-6
- 2-4
- 0-2



(e) 飼料 簡易 PBR 方式

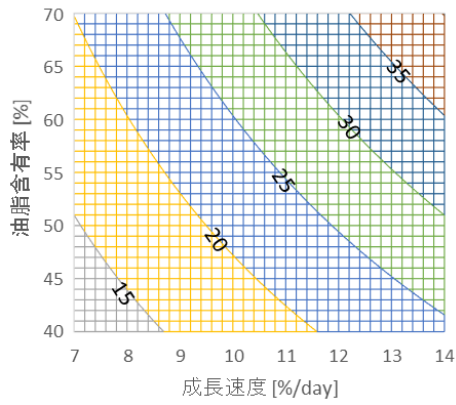


(f) 飼料 大規模開放池方式

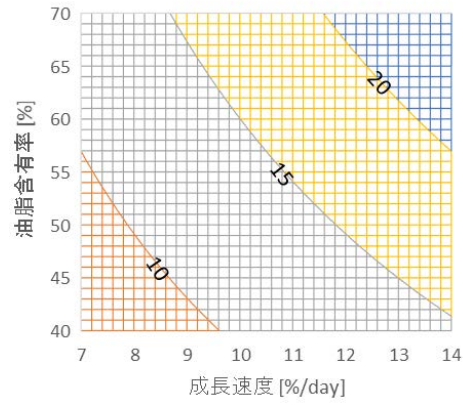
生産額
[百万円/ha year]

- 12-14
- 10-12
- 8-10
- 6-8
- 4-6
- 2-4
- 0-2

図 5.3 固形燃料・肥料・飼料単位面積当たり年間生産額と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係



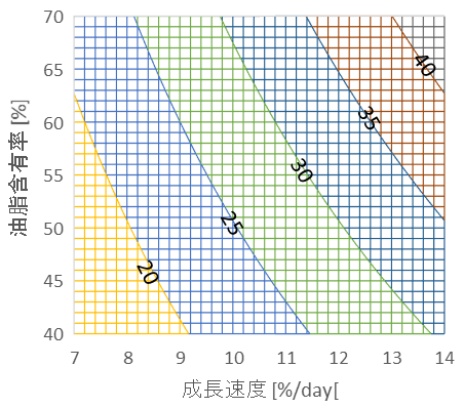
(a) バイオ燃料+固形燃料
簡易 PBR 方式



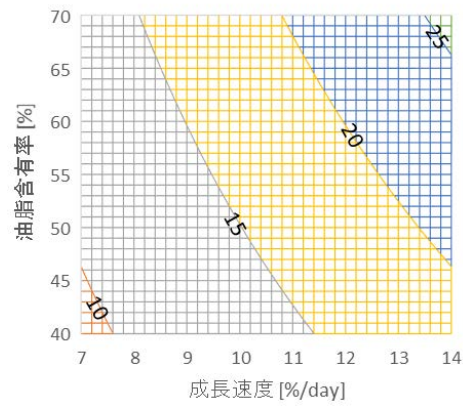
(b) バイオ燃料+固形燃料
大規模開放池方式

生産額
[百万円/ha year]

- 50-55
- 45-50
- 40-45
- 35-40
- 30-35
- 25-30
- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10
- 0-5



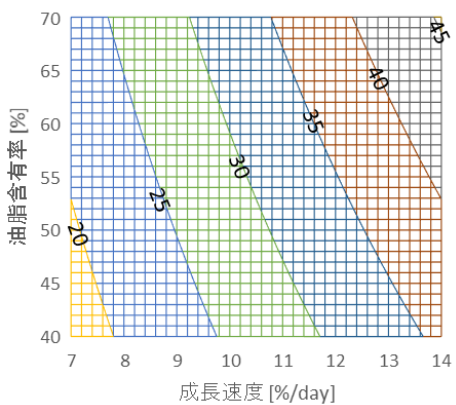
(c) バイオ燃料+肥料
簡易 PBR 方式



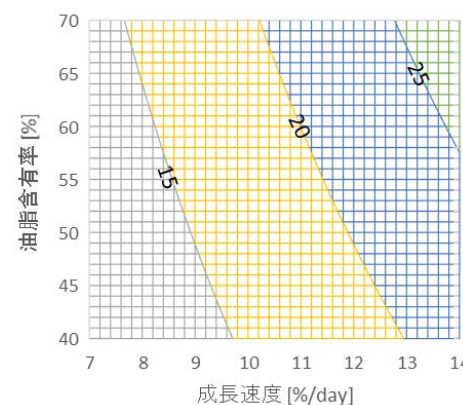
(d) バイオ燃料+肥料
大規模開放池方式

生産額
[百万円/ha year]

- 50-55
- 45-50
- 40-45
- 35-40
- 30-35
- 25-30
- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10
- 0-5



(e) バイオ燃料+飼料
簡易 PBR 方式



(f) バイオ燃料+飼料
大規模開放池方式

生産額
[百万円/ha year]

- 50-55
- 45-50
- 40-45
- 35-40
- 30-35
- 25-30
- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10
- 0-5

図 5.4 バイオ燃料・残渣利用による単位面積当たりの年間生産額と微細藻類の成長速度と油脂含有率の関係

5.4 バイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料の CO₂ 排出削減量

微細藻類は成長する過程で大気中の CO₂ が固定するため、微細藻類生産により CO₂ 削減効果が得られる。表 5.3 に示す CO₂ 排出削減量を用いて、バイオ燃料による単位面積当たりの年間 CO₂ 排出削減量と残渣から得られる固形燃料、肥料、飼料による単位面積当たりの年間 CO₂ 排出削減量を推計する。表 5.3 の CO₂ 排出削減量は、国立環境研究所「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) 2005 年版」[35]に示されている LC-CO₂ 原単位から求めた。

表 5.3 に単位重量のバイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料による CO₂ 排出削減量を示す。ここでは、精製され純度の高いジェットバイオ燃料ではなく、精製前のバイオ燃料を分析している。バイオ燃料の CO₂ 排出削減量は、バイオ燃料に含まれるケロシン、軽油、B・C 重油、ナフサ等の比率と、それぞれの CO₂ 排出量を掛け合せて 3.386[kg-CO₂/kg]とした。固形燃料の CO₂ 排出削減量は、石炭の CO₂ 排出削減量 2.368 [kg-CO₂/kg]の 60%である 1.427[kg-CO₂/kg]と仮定した。肥料の CO₂ 排出削減量は、有機質肥料(除別掲)の CO₂ 排出削減量である 0.05688[kg-CO₂/kg])とし、飼料の CO₂ 排出削減量は 0.07723 [kg-CO₂/kg]した。

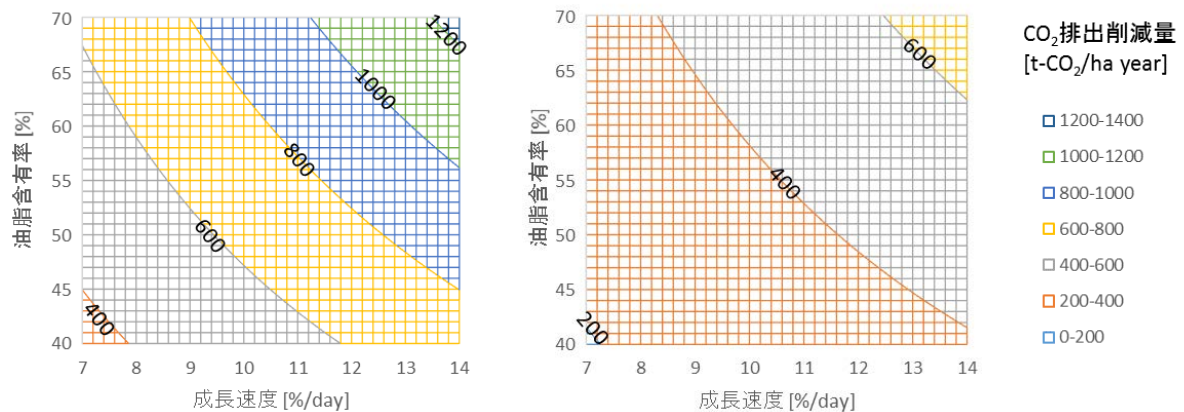
図 5.5 に単位重量のバイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料による CO₂ 排出削減量、バイオ燃料生産による単位面積当たり年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度・油脂含有率の関係を示す。微細藻類の成長速度と油脂含有率の増加に従い、バイオ燃料の生産量が増加するため CO₂ 排出削減量も増加する。簡易 PBR 方式のバイオ燃料生産量は大規模開放池方式よりも大きいため、CO₂ 排出削減量も簡易 PBR 方式が高くなっている。

図 5.6 に、単位面積当たりで産出された残渣から固形燃料、肥料、飼料を生産した場合の年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を示す。微細藻類の成長速度が大きく、油脂含有率が低いほど残渣の生産量も大きいため、CO₂ 排出削減量も大きくなっている。また、固形燃料、肥料、飼料の生産による CO₂ 排出量は異なり、CO₂ 排出削減量は固形燃料、肥料、飼料の順に大きい。微細藻類の生産効率は、簡易 PBR 方式が高いため、生産額も大規模開放池方式よりも簡易 PBR 方式が高くなっている。

図 5.7 に、単位面積当たりのバイオ燃料と残渣利用による年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度、油脂含有率との関係を示す。図 5.7 には、バイオ燃料+固形燃料、バイオ燃料+肥料、バイオ燃料+飼料の CO₂ 排出削減量を示した。固形燃料、肥料、飼料の順に CO₂ 排出削減量が大きくなるため、バイオ燃料と残渣利用を合わせた CO₂ 排出削減量もバイオ燃料+固形燃料、バイオ燃料+肥料、バイオ燃料+飼料の順に大きい。ただし、残渣利用による CO₂ 排出削減量が大きくなるのは、微細藻類の成長速度が大きく、油脂含有率が低い場合であり、残渣の利用方法によって CO₂ 排出削減量の等高線形状が変化していることがわかる。これらの結果から、残渣利用を含めたバイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量を向上させるには、油脂含有率は低くても、成長速度の速い微細藻類を培養することが有効であることが示唆された。

表 5.3 単位重量のバイオ燃料・固形燃料・肥料・飼料による CO₂ 排出削減量

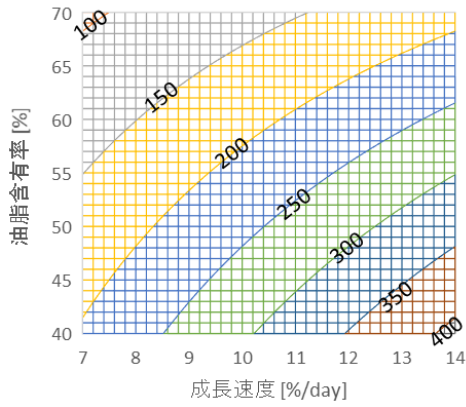
	CO ₂ 排出削減量
バイオ燃料	3.386[kg-CO ₂ /kg]
固形燃料	1.421[kg-CO ₂ /kg]
肥料	0.057[kg-CO ₂ /kg]
飼料	0.077[kg-CO ₂ /kg]



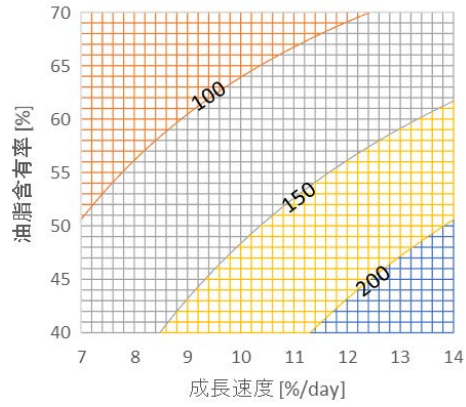
(a) 簡易 PBR 方式 バイオ燃料

(b) 大規模開放池方式 バイオ燃料

図 5.5 バイオ燃料生産による単位面積当たり年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係



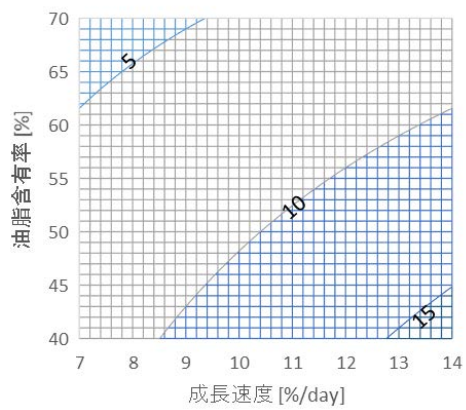
(a) 簡易 PBR 方式 固形燃料



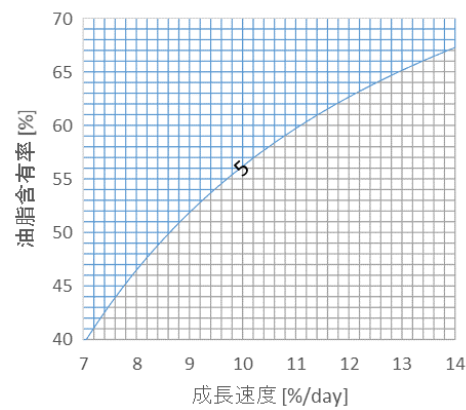
(b) 大規模開放池方式 固形燃料

CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 450-500
- 400-450
- 350-400
- 300-350
- 250-300
- 200-250
- 150-200
- 100-150
- 50-100
- 0-50



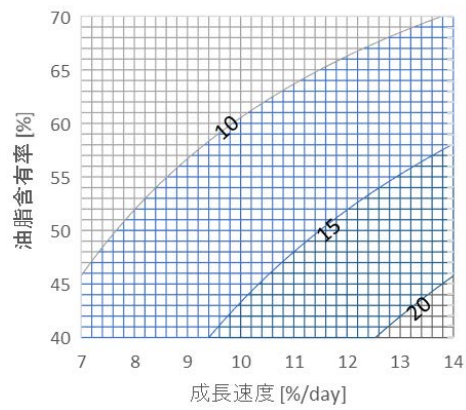
(c) 簡易 PBR 方式 肥料



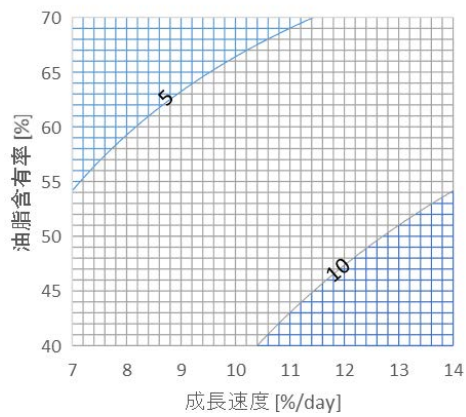
(d) 簡易 PBR 方式 肥料

CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10
- 0-5



(e) 簡易 PBR 方式 飼料

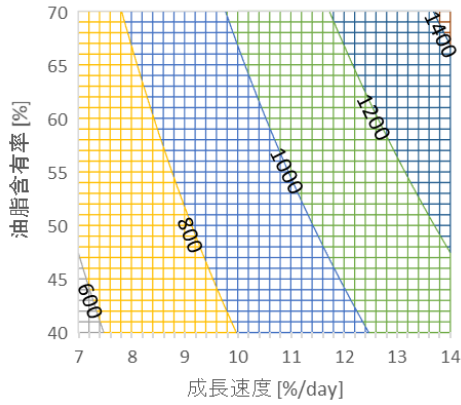


(f) 大規模開放池方式 飼料

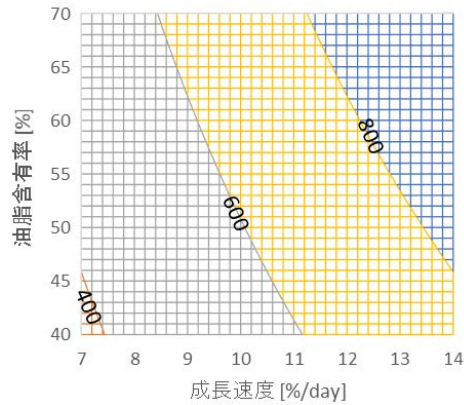
CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 20-25
- 15-20
- 10-15
- 5-10
- 0-5

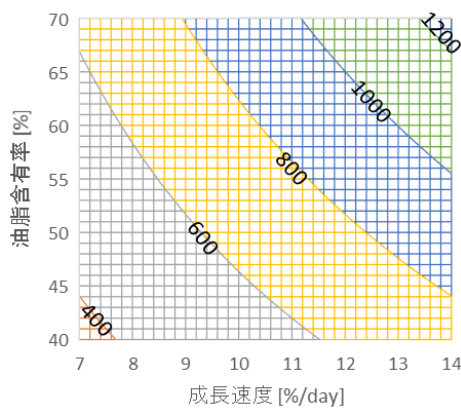
図 5.6 微細藻類残渣を用いた固形燃料・肥料・飼料生産による単位面積当たり年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係



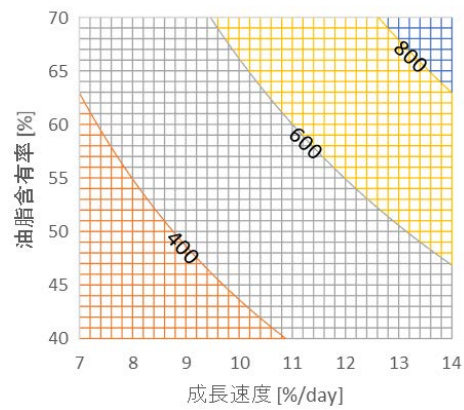
(a) 簡易 PBR 方式
バイオ燃料+固形燃料



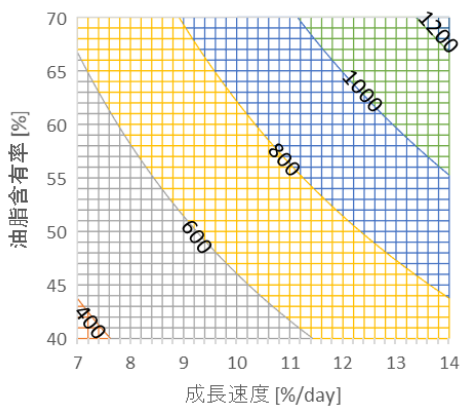
(b) 大規模開放池方式
バイオ燃料+固形燃料



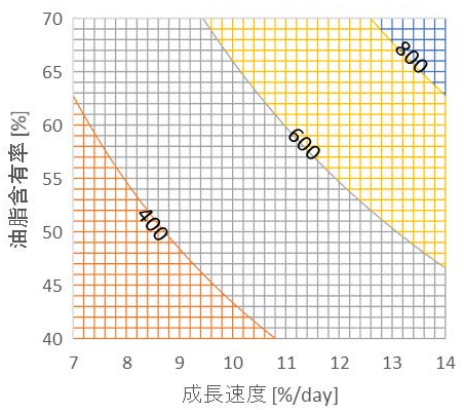
(c) 簡易 PBR 方式
バイオ燃料+肥料



(d) 大規模開放池方式
バイオ燃料+肥料



(e) 簡易 PBR 方式
バイオ燃料+飼料



(f) 大規模開放池方式
バイオ燃料+飼料

CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 1200-1400
- 1000-1200
- 800-1000
- 600-800
- 400-600
- 200-400
- 0-200

CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 1200-1400
- 1000-1200
- 800-1000
- 600-800
- 400-600
- 200-400
- 0-200

CO₂排出削減量
[t-CO₂/ha year]

- 1200-1400
- 1000-1200
- 800-1000
- 600-800
- 400-600
- 200-400
- 0-200

図 5.7 バイオ燃料生産と微細藻類残渣を用いた固形燃料・肥料・飼料生産による単位面積当たり年間 CO₂ 排出削減量と微細藻類の成長速度・油脂含有率との関係

5.5 感度分析から浮かび上がる論点

微細藻類の成長速度と油脂含有率を変数として、バイオ燃料の単位面積当たり年間の生産量、生産額、CO₂ 排出削減量と、残渣から生産される固形燃料、肥料、飼料の単位面積当たり年間生産量、生産額、CO₂ 排出削減量について感度分析をした結果から、今後の研究開発の方向性が示唆された。

(1) バイオ燃料の生産量向上

成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類を用いたバイオ燃料生産が効果的である。品種改良や遺伝子操作により、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類を開発することで、バイオ燃料の生産量向上が期待される。しかし、遺伝子操作により得られた微細藻類の場合、生物多様性条約カルタヘナ議定書の締約国では、開放系での培養は制限されるため、高コストな閉鎖系 PBR によるバイオ燃料生産を想定する必要がある。商業的なバイオ燃料生産の採算性を考慮すると、閉鎖系施設で培養しなければならない遺伝子操作微細藻類の成長速度、油脂含有率は、開放系施設で培養可能な品種改良された微細藻類よりも十分に高い必要がある。

(2) 残渣利用を含むバイオ燃料生産による生産額の向上

バイオ燃料の生産額を向上させるには、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類を用いて効率的にバイオ燃料を生産すればよい。残渣を利用した固形燃料、肥料、飼料の生産額の比較から、残渣による生産額を向上させるには付加価値の最も高い飼料の生産量を増加させることが有効であることが示された。残渣は微細藻類からバイオ燃料を除いた成分であるため、油脂含有率が低いほど、残渣の生産量は多くなる。そのため、残渣利用を含めたバイオ燃料生産の生産額向上には、油脂含有率が高くはなくとも、成長速度の速い微細藻類を用いてバイオ燃料を生産し、残渣から付加価値の高い飼料を生産することが効果的である。

(3) 残渣利用を含むバイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量の向上

微細藻類は大気中の CO₂ を固定するため、化石燃料をバイオ燃料に置換することで CO₂ 排出の削減効果が得られる。バイオ燃料による CO₂ 排出削減量を向上させるには、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類を効率的に生産すればよい。残渣からされる固形燃料、肥料、飼料の CO₂ 排出削減量を比較すると、固形燃料による CO₂ 排出削減量が最も多い。したがって、CO₂ 排出削減量を向上させるには、バイオ燃料生産に加えて、CO₂ 排出削減効果の大きい固形燃料を大量に生産すればよい。結果として、残渣利用を含むバイオ燃料生産による CO₂ 排出削減量の向上には、油脂含有率が高くなくとも成長速度の速い微細藻類を培養してバイオ燃料を生産し、残渣から CO₂ 排出削減量の多い固形燃料を生産することが効果的である。

(4) 社会実装を意識した研究開発

バイオ燃料の生産効率を向上させるのであれば、成長速度が速く、油脂含有率の高い微細藻類に関する研究開発を推進すればよい。微細藻類培養の制約を示す生物多様性条約カルタヘナ議定書を考慮すると、遺伝子操作に関する研究だけでなく、既存、あるいは重イオンビームのような新たな育種・品種改良に目を向ける必要がある。また、実験室の環境で、微細藻類の成長速度

が速く、油脂含有率が高くとも、生産設備で同等の性能が得られるとは限らない。そのため、品種改良や遺伝子操作などの微細藻類そのもの研究のみならず、エネルギー効率の高い培養システムやバイオ燃料抽出などの研究開発にも注視する必要があるだろう。

微細藻類の残渣利用を含めたバイオ燃料生産の場合、油脂含有率の高さよりも成長速度の速い微細藻類を用いることにより、生産額、あるいは、CO₂ 排出削減量が向上することが定量的に示された。残渣による生産額向上には、付加価値が高い飼料生産が効果的である。しかし、CO₂ 排出削減量の向上には、CO₂ 排出削減量の大きい固形燃料のが効果的である。本稿で述べた感度分析により、微細藻類バイオ燃料生産における効果的な残渣利用を選択手法を示した。結果として、経済効果と環境負荷という2つの観点から、社会実装に向けた、定量的な根拠(エビデンス)に基づく技術選択と研究開発の方向性に関する議論が可能となった。

6. おわりに

本調査研究では、石油資源の枯渇を背景に、環境負荷だけでなくエネルギーセキュリティの面でも注目を集める微細藻類バイオ燃料生産を取り上げ、経済・環境への波及効果を定量的に分析し、今後の研究開発に関する方向性について検討した。バイオ燃料生産方式として、将来の普及が期待される、簡易 PBR 方式と大規模開放池を例に、拡張産業連関表を用いた分析により、バイオ燃料施設建設と経常運転における生産誘発額、雇用誘発数、エネルギー消費量、CO₂ 排出量を推計した。産業部門別の誘発効果推計により、2 つのバイオ燃料生産方式を特徴と課題を明らかにすることで、社会実装に向けた今後の研究開発の方向性について検討した。

拡張産業連関表を用いた分析により、簡易 PBR 方式の場合、プラスチックフィルムなどの素材産業や装置産業等の産業部門に波及効果が現れるが、大規模開放池方式の場合、土木工事に波及効果が集中するという相違点が明らかになった。また、継続的な CO₂ 排出量削減を重視するのであれば、施設建設費用は増加しても、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギー発電施設を併設する、あるいは、微細藻類から得られる残渣を燃料に用いる熱エネルギーシステムの導入を検討すべきであろう。

微細藻類の成長速度と油脂含有率を変数として、バイオ燃料及び残渣から生産される固形燃料、肥料、飼料の単位面積の生産額とCO₂排出削減量について感度分析をしたことにより、今後の微細藻類研究の目指す方向性が示唆された。微細藻類の残渣利用を含めたバイオ燃料生産の場合、油脂含有率の高さよりも成長速度の速い微細藻類が、生産額、あるいは、CO₂ 排出削減量の向上に寄与することが定量的に示された。残渣による生産額向上には、付加価値が高い飼料の生産が適するが、CO₂ 排出削減には、CO₂ 排出量削減効果の大きい固形燃料の生産が適切であることが示された。本稿で述べた感度分析により、効果的な微細藻類バイオ燃料生産における残渣利用を選択することで、経済効果と環境負荷という2つの観点から、社会実装に向けた研究開発の方向性について、定量的な根拠に基づく議論が可能となった。

謝辞

本調査研究のうち産業連関表の作表に関わる部分は、平成 23～26 年度科学研究費補助金（基盤研究（B））研究課題名「消費の多様性が環境負荷にもたらす影響と持続可能なライフスタイルに関する考察」（課題番号 23310033 研究代表：鷺津明由）の助成の下で行った。

調査にあたり以下の方々にご協力いただいたことを、ここに深謝する。

志甫 諒	(財)応用光学研究所 主任研究員・研究統括
渡邊 信	筑波大学 生命環境系 教授
水野谷 剛	筑波大学 生命環境系 准教授
Helmut Yabar	筑波大学 生命環境系 准教授
王 敦彦	京都大学経済研究所附属先端政策分析センター 研究員
伏見 千尋	東京農工大学 大学院 工学研究院 准教授
松澤 克明	(株) IHI 技術開発本部 総合開発センター 課長
石井 浩介	(株) IHI 技術開発本部 総合開発センター 主任研究員
岩田 修	(株)ユーグレナ 研究開発部 主任研究員

参考文献

- [1] 鷺津 明由, 中野 諭, 朝倉 啓一郎, 高瀬 浩二, 古川 貴雄, 新井 園枝, 林 和弘, 奥和田 久美 (2013): 拡張産業連関表による再生可能エネルギー発電施設建設の経済・環境への波及効果分析, NISTEP DISCUSSION PAPER, No. 96, 科学技術・学術政策研究所.
- [2] Stephan, P. E. (1996): The economics of science. *Journal of Economic literature*, 34(3), 1199-1235.
- [3] 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 SciSIP 室 (2013), 研究開発投資の経済的・社会的波及効果の測定についての海外動向に関する調査, 調査資料 No.219, 科学技術・学術政策研究所.
- [4] Griliches, Z. (1998): Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth. In *R&D and Productivity: The Econometric Evidence* (pp. 17-45). University of Chicago Press.
- [5] Audretsch, D. B., Bozeman, B., Combs, K. L., Feldman, M., Link, A. N., Siegel, D. S., Stephan, P. E., Tassay, C., Wessner, C. (2002): The economics of science and technology. *The Journal of Technology Transfer*, 27(2), 155-203.
- [6] Jaffe, A. B. (2008): The “Science of Science Policy”: reflections on the important questions and the challenges they present. *The Journal of Technology Transfer*, 33(2), 131-139.
- [7] Brécard, D., Fougeyrollas, A., Le Mouël, P., Lemiale, L., Zagamé, P. (2006): Macro-economic consequences of European research policy: Prospects of the Nemesis model in the year 2030. *Research Policy*, 35(7), 910-924.
- [8] Fougeyrollas, A., Le Mouël, P., Zagamé, P. (2010): Consequences of the 2010 FP7 Budget on European Economy and Employment, DEMETER Report.
- [9] Leontief, W. (1986): *Input output economics. Second edition*. Oxford University Press.
- [10] Miller, R. E., Blair, P. D. (2009): *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge University Press.
- [11] Hawdon, D., Pearson, P. (1995): Input-output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK. *Energy economics*, 17(1), 73-86.
- [12] Neuwahl, F., Löschel, A., Mongelli, I., Delgado, L. (2008): Employment impacts of EU biofuels policy: Combining bottom-up technology information and sectoral market simulations in an input-output framework. *Ecological Economics*, 68(1), 447-460.
- [13] Lehr, U., Nitsch, J., Kratzat, M., Lutz, C., Edler, D. (2008): Renewable energy and employment in Germany. *Energy Policy*, 36(1), 108-117.
- [14] Wydra, S. (2011): Production and Employment Impacts of Biotechnology—Input–output Analysis for Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(7), 1200-1209.
- [15] 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, 90 (3), 258-267.
- [16] 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 92 (1), 164-173.
- [17] Sherif, S. A., Goswami, D. Y., Stefanakos, E. L., & Steinfeld, A. (Eds.). (2014). *Handbook of Hy-*

drogen Energy. CRC Press.

- [18] 水素燃料航空機検討調査会 (2008), 水素燃料航空機の国内外検討調査, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 宇宙航空研究開発機構.
- [19] 鷺見 芳彦 (2009): 微細藻類 (マイクロアルジェ) が開く未来 —有用性とその利用—, 科学技術動向, No. 102, 11-22.
- [20] International Energy Agency (2010): *Energy Technology Perspectives 2010*, IEA Publications.
- [21] 石油エネルギー技術センター(2013), 米国航空部門でのバイオ燃料導入に関する最新動向, ~バイオジェット燃料関連動向とその他バイオ燃料政策動向~, JPEC レポート(2013 年度第 10 回).
- [22] European Union (2011): *Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation*, European Union.
- [23] Brennan, L., Owende P.(2010): Biofuels from microalgae: A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,14 (2), 557-577.
- [24] Amin, S.(2009): Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae, *Energy Conversion and Management*, 50 (7), 1834-1840.
- [25] Mata, T. M., Martins, A. A., Caetano, N. S.(2010): Microalgae for biodiesel production and other applications: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,14 (1),217-232.
- [26] Ribeiro, L. A., Pereira da Silva, P. (2013): Surveying techno-economic indicators of microalgae biofuel technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,25,89-96.
- [27] 藻類産業創成コンソーシアム(2012): 平成 23 年度農山漁村 6 次産業化対策事業に係る緑と水の環境技術革命プロジェクト事業, 農山漁村における藻類バイオマスファーム事業化可能性調査報告書, 1-116.
- [28] 渡邊 信・彼谷 邦光研究室 (2012), 藻類バイオマスエネルギーシステム開発実験・実証設備, 筑波大学藻類・エネルギーシステム研究拠点.
- [29] IHI 新事業推進部(2012): 最先端のバイオ技術で日本が産油国になる, *IHI 技法*, 52 (1), 32-33.
- [30] Shiho, M., Kawachi M., Horioka K., Nishita Y., Ohashi K., Kaya K., Watanabe M. (2012): *Procedia Environmental Sciences*, 15, 90-109.
- [31] Benemann, J. R., Van Olst, J. C., Massingill, M. J., Weissman, J. C., & Brune, D. E. (2003): The controlled eutrophication process: using microalgae for CO₂ utilization and agricultural fertilizer recycling. In *Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Technologies*, Kyoto, Japan.
- [32] 伏見千尋, 柿村麻依 (2014) : 水熱液化と超臨界メタノール法による微細藻類バイオディーゼル大規模生産システム, 第 23 回日本エネルギー学会大会講演要旨集.
- [33] 産業競争力懇談会(COCN)(2012):産業競争力懇談会 2011 年度プロジェクト最終報告, 微細藻類を利用した燃料の開発, 1-24.
- [34] Alabi, A.O., Tampier, M., Bibeau, E.(2009): *Microalgae Technologies & Processes for Biofuels / Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation*, Final Report, British Columbia Innovation Council, 1-74.

- [35] 国立環境研究所(2005): 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) 2005年版.
- [36] Frank, E.D., Han, J., Palau-Rivera, I., Elgowainy, A., Wang, M.Q. (2011), Life-Cycle Analysis of Algal Lipid Fuels with GREET Model, Energy System Division Argonne National Laboratory

調査担当者

調査設計・実施・分析・取りまとめ

- 鷺津 明由 早稲田大学 社会科学総合学術院 教授
文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 客員研究官
- 中野 諭 (独)労働政策研究・研修機構 労働政策研究所 研究員
文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 客員研究官
- 新井 園枝 (独)経済産業研究所 計量分析・データ専門職
文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 客員研究官
- 古川 貴雄 共立女子大学 家政学部 教授
文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 客員研究官

調査設計・取りまとめ

- 白川 展之 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 研究員
文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 客員研究官
慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科 特任講師
(公財)未来工学研究所 連携研究員
- 林 和弘 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 上席研究官

DISCUSSION PAPER No. 126

拡張産業連関表による微細藻類バイオ燃料生産の
経済・環境への波及効果分析

2015年11月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所
科学技術動向研究センター

鷲津 明由 中野 諭 新井 園枝
古川 貴雄 白川 展之 林 和弘

〒100-0013

東京都千代田区霞が関3-2-2 中央合同庁舎第7号館 東館16階

TEL:03-3581-0605 FAX:03-3503-3996

本報告書は2015年5月末に作成、11月に公表されました。