

微細藻類由来のバイオディーゼルの
経済性・環境効果とその展望

40115079
中村沙代

長崎大学環境科学部 [環境政策コース] 卒業研究

2018 年度

指導教員：松本健一

要旨

我が国の総人口は今後非常に高い確率で長期的に減少すると推計されている。我が国の地方都市は、人口減少に適応したインフラや都市経営の再構築と、地方自治体が主体となって事業を行うことで新たな収入源や雇用を創出することが必要とされている。なかでも、バイオマス事業は、エネルギー利用のみならず食品や熱利用など高い汎用性があるので、世界規模で事業化が拡大している。現在、わが国を含め、世界では第一世代バイオマスと第二世代バイオマスの活用が盛んであるが、これらに次ぐ第三世代バイオマスとして微細藻類バイオマスがある。微細藻類バイオマスは、第一、第二世代バイオマスと比較してバイオマス生産効率が高いことや、付加価値の高い炭化水素を持つといった特徴があり、エネルギーベンチャー企業を中心に技術開発が行われ、活用されている。しかし、微細藻類培養技術や事業の経済性についての研究が盛んな一方、わが国では微細藻類バイオマス事業が事業化された例は少ない。そこで本研究では、研究事例や事業化案の推計からコストや電力消費量に関連するデータを収集し、微細藻類由来のバイオディーゼル 1L (リットル) の生産にかかるコストと製造プロセスにおける二酸化炭素排出量を、石油由来のジェット燃料やその他バイオマスと比較することによって微細藻類バイオマスの経済性と環境効果を明らかにする。分析の結果、現時点では微細藻類バイオディーゼル製造コストはジェット燃料やその他バイオマスより高く、事業としての採算性は見込まれない。しかしバイオディーゼル製造過程の二酸化炭素排出量はジェット燃料の調達・燃焼プロセスでの二酸化炭素排出量と比較して非常に小さいことが明確となった。したがって微細藻類バイオディーゼルは再生可能エネルギーとして環境保全に貢献していると結論づけられた。さらにバイオマス残渣により発電することでさらに二酸化炭素排出量を削減できると考えられる。

分析の結論を踏まえて、今後、微細藻類バイオマスが地域事業として普及していくためには、技術の向上はもちろん地域住民や自治体が積極的に事業へ関与をしていくことが重要である。さらに、政策や法律を整備してバイオマス事業の採算性への懸念を緩和する体制を整えることが、微細藻類の地域再エネ事業拡大に有効であると考えられる。本研究の課題は、データを収集した研究事例数が少なく、ほとんど仮定に基づく分析であったため、微細藻類の持つ地域事業としてのポテンシャルを十分に示すことができなかったことである。

目次

第1章 序論	1
1-1 背景	1
1-1-1 地方創生とエネルギー事業	1
1-1-2 地方自治体の事業としてのバイオマスの適性	2
1-2 目的・意義	4
1-3 論文の構成	5
第2章 微細藻類について	7
2-1 微細藻類バイオマス	7
2-1-1 バイオマス産出効率	7
2-1-2 微細藻類バイオマスの産出物	8
2-1-3 土地活用の可能性	8
2-1-4 微細藻類の培養方法	8
2-1-5 微細藻類の種類	9
2-2 先行研究と近年の状況	10
第3章 分析方法	15
3-1 分析のフレームワーク	15
3-2 研究事例とデータ	15
3-2-1 微細藻類バイオマス生産にかかるコストと二酸化炭素排出量	16
3-2-2 微細藻類バイオディーゼル精製にかかるコストと二酸化炭素排出量	18
3-2-3 ジェット燃料の製造コストと二酸化炭素排出量	20
3-2-4 廃油由来のバイオディーゼル製造コスト	20
3-2-5 微細藻類バイオマス事業の人件費	21
第4章 分析結果と考察	23
4-1 微細藻類バイオディーゼル製造事業の採算性	23
4-2 微細藻類バイオディーゼル製造の二酸化炭素排出量	24
第5章 結論	27
5-1 本論文のまとめ	27
5-2 結論と今後の展望	27

5-3 本研究の課題.....	28
参考文献	31
謝辞	35

図表目次

図 1-1	2018年6月末現在の我が国の固定価格買取制度の認定量.....	2
図 1-2	バイオマス産業都市認定状況.....	3
図 3-1	微細藻類バイオマス生産とバイオディーゼル製造のプロセス.....	15
表 2-1	バイオマス資源ごとの生産効率の比較.....	7
表 2-2	バイオマス生産量 1000t/日のときのフォトバイオリアクターと開放系培養槽の生産性に関する比較.....	9
表 3-1	研究事例のまとめ.....	17
表 3-2	バイオマス生産プロセスの年間電力消費量.....	18
表 3-3	バイオディーゼル精製コスト.....	19
表 3-4	バイオディーゼル精製プロセスの電力消費量.....	20
表 3-5	1haあたりの労働者数と人件費.....	21
表 4-1	微細藻類バイオディーゼル製造コスト.....	23
表 4-2	微細藻類バイオディーゼル製造過程の二酸化炭素排出量.....	25

第1章 序論

1-1 背景

1-1-1 地方創生とエネルギー事業

近年、先進諸国では高齢化と人口減少の同時進行の傾向が確認されている。国立社会保障・人口問題研究所（2017）によると、我が国の総人口は今後非常に高い確率で長期的な減少過程に入ると推計されている。諸富（2018）はこの結果を受けて、とりわけ我が国の地方都市は、人口減少社会に適合したかたちでインフラや制度を再構築する必要があるが、地方に財源が乏しい我が国は、これらの再構築が要因で地方が財政破綻してしまう恐れがあると述べている。そこで、諸富（2018）は、我が国の地方都市経営のために、地方自治体が主体となって事業を行うことによる自立と新しい財源調達方法や費用負担方法の開発の必要性を説いた。さらに、諸富（2013）は地方自治体主体の事業として、ドイツで近年多用されている「エネルギー協同組合」を提案している。これは、地域住民が出資しあって協同組合を創設し、再生可能エネルギー（以下、再エネと略す）による発電事業を立ち上げ、売電収入を配当という形で組合員や地域に還元するものである（諸富, 2013）。ドイツでは、約 900 の自治体が自治体 100% 出資の公社としてエネルギー事業を行っており、これらは「シュタットベルケ（地域公益公社）」と呼ばれる。我が国でも、再エネ事業による地方創生の動きが高まりつつある（諸富, 2013）。例えば、岡山県西粟倉村では 2013 年から「木質バイオマスエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業」に取り組んでおり、未利用間伐材を用いたバイオマス発電によって村内に電力を供給している。また、村と NPO が協働して市民参加型の太陽光発電所を運営し、収益を地域の環境事業や環境教育の資金として還元している（西粟倉村, 2014）。長野県飯田市では、市民と地元の信用金庫が出資して太陽光発電事業を行い、市民へ利子を伴った収益を還元するという「地域内資金循環」の仕組みを作り上げた（諸富, 2013）。

本来、再エネは、地域に分散して存在するエネルギー源を活かして利用し収益を生み出すという地方創生事業と共通する一面を持っている。再エネのみならず、エネルギー事業を地域ごとに分散して行うこと（分散型エネルギーシステム）は、エネルギー資源が乏しく、自然災害の多い我が国のエネルギーセキュリティの強化に不可欠と考

えられる。加えて、化石燃料に依存しないライフスタイルの構築は、持続可能なコミュニティの形成に貢献する（牛山, 2011）。

1-1-2 地方自治体の事業としてのバイオマスの適性

バイオマスは、我が国の再エネ資源の柱といえる存在である（梶山・植田, 2011）。2012年6月に開始した固定価格買取制度（FIT: Feed-in Tariff）のもとでの認定量は2018年6月末時点で8,638MWであり、認定量の約10%を占めている（資源エネルギー庁, 2018）（図1-1）。

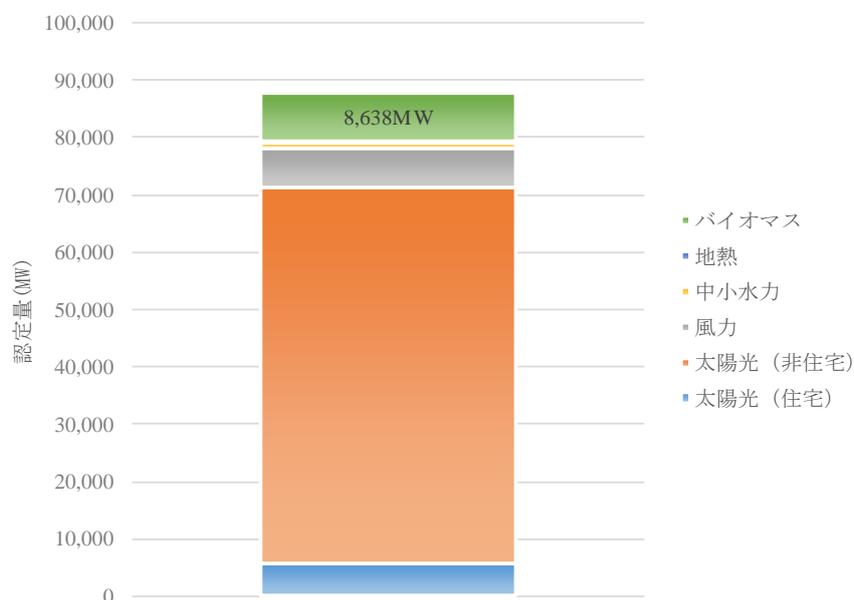


図 1-1 2018年6月末現在の我が国の固定価格買取制度の認定量（MW；資源エネルギー庁（2018）より筆者が作成）

バイオマスは、再エネの中で唯一の炭化水素資源であるため、発電燃料としての利用のみならず、食品や肥料などの用途に汎用性を持つ。また、バイオマス燃焼の際に発生する熱を暖房やハウス農業に利用することもできる。こうした特徴を利用して、エネルギー利用をはじめとする多様な産業を創出し、地域に新たな付加価値と雇用を生み出すべく、我が国では2002年に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され（農林水産省, 2002）、同戦略に基づき、2011年4月までに300を超える市町村でバイオマスタウン構想が策定された。同戦略は、バイオマスタウンの戦略的産業育成や農

村漁村の活性化を目的としている。しかし、経費や原料の確保といった課題により、バイオマスタウンの運営が構想通りに進まない市町村が多数出現した（近藤ら, 2013）。そこで、2013年9月に関係7府省（内閣府、総務省、農林水産省、文部科学省、経済産業省、国土交通省、環境省）と自治体、事業者の連携がより一層強化された「バイオマス事業化戦略」が策定された。同戦略では、原料生産から収集・運搬・製造・利用までの経済性が確保された一貫するシステムを構築し、バイオマス産業を軸とした環境に優しく、災害に強いまちづくり・むらづくりを目指す「バイオマス産業都市構想」の構築が推進されている。バイオマス産業都市構想に認定されることによって、関係7府省より事業化に利用するバイオマス資源の選択や構想に関するアドバイスを得ることができる。バイオマス産業都市構想に認定されている都市は2018年7月時点で84都市あり、年々増加している（図1-2）。

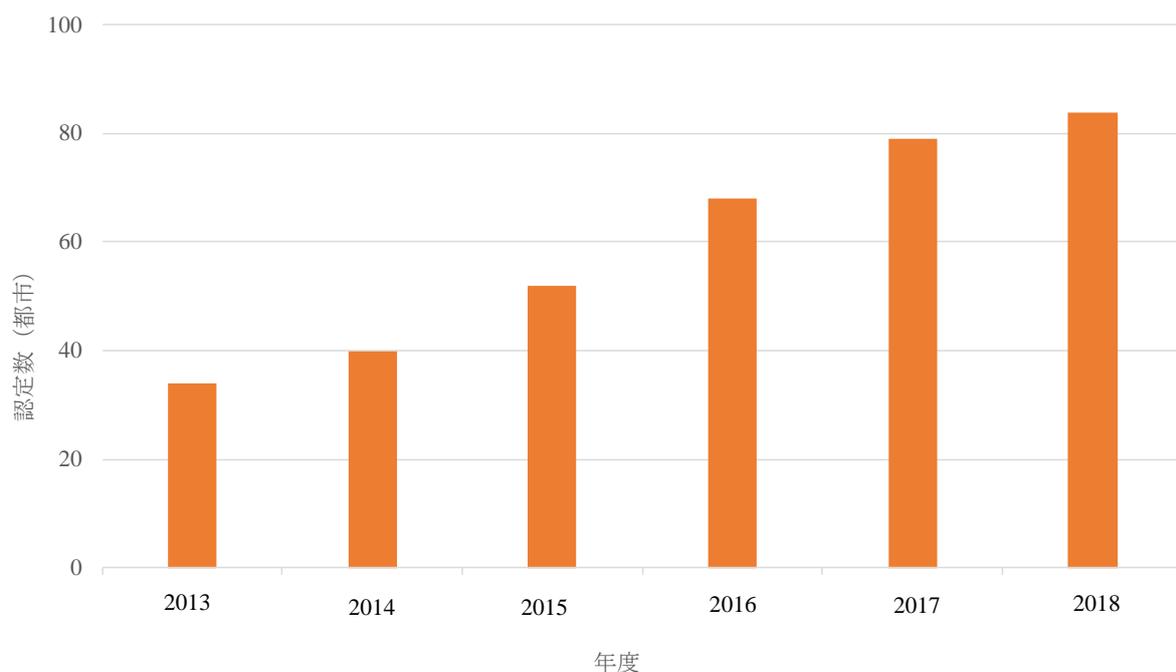


図 1-2 バイオマス産業都市認定状況（農林水産省（2018）より筆者が作成）

バイオマス産業都市の選定都市の事業内容を見ると、トウモロコシやパームといった食物原料のもの（第一世代バイオマス）よりも木材や畜産有機物を利用したもの（第二世代バイオマス）が多い（農林水産省, 2018）。しかし、第二世代バイオマスの中でも現在の技術で原料を効率よく収集し、付加価値の高い製品に変換可能なものはごく一

部であり、大部分は直接燃焼利用にとどまっている（科学技術振興機構研究開発戦略センター, 2006）。我が国で中心となっている木質系バイオマスは、原料の収集にコストと手間がかかるため、高齢化と地方の人口減少が進む社会において地域事業として持続していくのは困難であると考えられる。そこで、食料との競合が少なく、多様な用途と高い付加価値を持つ微細藻類を利用したバイオマスの可能性が注目されている。微細藻類バイオマスは他のバイオマスと比較して、①投入する原材料が比較的容易に手に入る、②穀物より少ない土地で数十倍の速さで生育できる、③原理的には地球上のどの土地でも生産が可能である、④貴重な化学物質を生み出すものがある、⑤水素などを直接生産することも将来可能である、という点で優れている（渡邊, 2012）。微細藻類バイオマスは、効率的な原料調達を実現し、全国各地で実施できる可能性があるという面で、地域再エネ事業として高いポテンシャルがあると考えられる。しかし、微細藻類バイオマスが地域事業化した例は少ない。そこで、本研究では微細藻類バイオマスの研究事例をもとに、微細藻類バイオディーゼルの製造までのプロセスのコストを計算して、微細藻類バイオマス事業の事業性について今後の展望などを考察する。さらに、再エネ事業としてのポテンシャルを計るために、微細藻類由来のバイオディーゼル製造過程の二酸化炭素排出量と、ジェット燃料の調達、燃焼過程の二酸化炭素排出量を比較する。

1-2 目的・意義

本研究の目的は、研究事例から微細藻類培養コストや電力消費量に関連するデータを収集し、微細藻類由来のバイオディーゼル 1L（リットル）の生産にかかるコストと製造プロセスにおける二酸化炭素排出量を、廃油由来のバイオディーゼル製造コストおよび石油由来のジェット燃料の製造コスト、二酸化炭素排出量と比較し、微細藻類バイオマスの経済性と環境効果を明らかにすることである。そして、今後微細藻類バイオマス事業を持続可能な地域再エネ事業の選択肢として考慮するための情報として寄与することが本研究の意義である。

1-3 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景について述べる。第 2 章では、微細藻類について説明し、先行研究のレビューをする。第 3 章では比較に用いたデータや計算方法について説明し、第 4 章で結果と考察を述べる。最後に、第 5 章でまとめと今後の展望について述べる。

第2章 微細藻類について

2-1 微細藻類バイオマス

2-1-1 バイオマス産出効率

微細藻類とは、直径約 1~20 μm 程度の藻類を指す。水中のみならず、家の外壁や街路樹の支柱など至るところに生育しており、極地や高温地帯を好んで生育する種もある。

微細藻類バイオマスは、穀物や果実を利用したバイオマスと比較して、圧倒的に産出効率がよい。表 2-1 から、とうもろこしや大豆といった作物を原料としたバイオマスと比較し、少ない土地で大量のオイル¹を生産できるということがわかる。これは、微細藻類が細胞分裂によって他の植物よりも比較的短期間で増殖できること、および単位重量あたりの脂質含有量が多いことが理由である（渡邊, 2012）。

表 2-1 バイオマス資源ごとの生産効率の比較

作物・藻類	オイル生産量 (L/ha/年)	世界の石油需要を満たす のに必要な面積 (100ha)	地球上の耕作面積に 対する割合 (%)
とうもろこし	172	28343	1430.0
綿実	325	15002	756.9
大豆	446	10932	551.6
菜種	1190	4097	206.7
ヤトロファ	1892	2577	130.0
ココナッツ	2689	1813	91.4
パーム	5950	910	41.3
微細藻類① ^{*1}	136900	36	1.8
微細藻類② ^{*2}	58700	83	4.2

^{*1} バイオマス乾燥重量のオイル含有率 70%の種または培養株、^{*2} バイオマス乾燥重量のオイル含有率 30%の種または培養株

出典：Chisti (2007)に基づき筆者が作成

¹ オイルとは、産出されたバイオマスから抽出される液体を指す。

2-1-2 微細藻類バイオマスの産出物

微細藻類の多くは、付加価値の高い成分（例：スクアレン、アスタキサンチン）を産出するため、バイオマス製品としての汎用性が高い。例えば、タンパク質やビタミン、ミネラル、脂質、食物繊維といった栄養素をバランスよく含む微細藻類は、健康食品や家畜飼料として広く活用されている。なかでも、オーランチオキトリウムという種は、深海ザメの肝油から調整される高付加価値の炭化水素・スクアレンを大量に生産できることが確認されている。深海ザメは個体数減少傾向にあるため、スクアレンの付加価値が高まりつつある。また、微細藻類の中には炭化水素を大量に産出する種もあり、ゴム製品やバイオディーゼル、バイオエタノールに加工して、石油代替製品として利用されることが期待されている（渡邊, 2012）。

2-1-3 土地活用の可能性

微細藻類は、災害や栄養不足等の理由によって、利用用途の制限された土地でも培養できるというメリットを持つ。Demura et al. (2018) は、東日本大震災の原発事故によって農業の立ち行かなくなった、福島県南相馬市の海岸沿いの土地で土着の藻類であるイカダモの培養実験を行い、実用化の目安とされる $20\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ を超え、 $29\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ の生産効率を達成した。この方法では、土着藻類を使って培養を行うため、専門的な技術や知識をほとんど必要としないことがメリットとして挙げられ、新たな農業として微細藻類バイオマス事業の実現可能性を示した。加えて、微細藻類バイオマス事業は日本の農地法で農業として認められているため、休耕田や耕作放棄地の増加が問題視されている地方では微細藻類培養による土地活用も期待される。

2-1-4 微細藻類の培養方法

微細藻類の培養方法は主に 2 種類ある。商業目的としては、多くの企業が開放系培養槽を用いている。開放系培養槽の一種である屋外プール形状の培養槽（Raceway pond）は、現在の微細藻類商業生産の 98% で利用されており、スピルリナやドナリエラ、クロレラといった比較的生存力の強い微細藻類の培養に適している。開放系培養槽は培養環境を調整する必要がほとんどないため、専門家の手を借りずに培養できる場合もある。一方、近年研究が進められているのは、フォトバイオリアクターの培養槽である。開放系培養槽と異なりチューブ型やプレート型のものがあり、培養槽の周囲がガ

ラスで囲まれている。これによって温度や溶存気体、水素イオン濃度、培地成分などを制御しながら培養できる。フォトバイオリアクターは生存力の弱い微細藻類や特定の微細藻類を集中的に培養することに適している一方、コストが高くなる点と、光強度や温度を調節するために大量のエネルギーを必要とするといった点がデメリットとして指摘される（渡邊, 2012）。表 2-2 は、開放系培養槽の一種である Raceway pond とフォトバイオリアクターの生産性を比較したものである。フォトバイオリアクターと開放系培養槽の外観は、付録 A に掲載する。

表 2-2 バイオマス生産量 1000t/日のときのフォトバイオリアクターと開放系培養槽の生産性に関する比較

	フォトバイオリアクター	開放系培養槽 (Raceway pond)
バイオマス生産量 (kg/日)	1000000	1000000
生産量 (kg/m ³ /日)	1.535	0.117
生産性 (kg/m ² /日)	0.048 ^{*1} / 0.072 ^{*2}	0.035 ^{*3}
培養液中のバイオマス集積 (kg/m ³)	4.00	0.14
必要面積 (m ²)	5681	7828
オイル生産量 (m ³ /ha)	136.9 ^{*4} / 58.7 ^{*5}	99.4 ^{*4} / 42.6 ^{*5}

*1 施設内での前培養、*2 フォトバイオリアクターを用いた培養、*3 培養池での培養、*4 バイオマス乾燥重量のオイル含有率 70%の種や培養株、*5 バイオマス乾燥重量のオイル含有率 30%の種や培養株

出典：Chisti (2007)に基づき筆者が作成

2-1-5 微細藻類の種類

微細藻類の系統は、シアノバクテリア、一次植物、および二次植物の 3 つにわけられる。微細藻類は種によって異なる多様な脂質や炭化水素、ビタミンなどを産出し、その成分には、人間に害を及ぼすものもあれば、食料や医薬品成分としての付加価値を持つものもある。例えば、ボトリオコッカスは乾燥重量の 75%が炭化水素であり、燃料利用のポテンシャルに加え、ゴムやバイオポリマーが生産可能であることが確認されている。ドナリエラは好塩性の微細藻類で、塩田での増殖が確認されており、健康食

品としてすでに工業的な大規模培養も実現している。クロレラは、食物繊維やビタミン、リノール酸などの栄養素を含んでおり、健康食品のみならず化粧品や洗剤など幅広く利用されている。さらに、クロレラは生育環境においてストレスが強いほど多くの脂質を蓄積することが明らかになっており、オイル収率を高める試みが広がっている。

微細藻類はほとんどの種が高いオイル産出性を誇っているが、すべての微細藻類がエネルギー燃料に適しているとは限らないため、産出されるオイルの特性を十分に調べる必要がある。例えば、微細藻類バイオディーゼルを利用するためには国や州ごとに設定されたバイオディーゼルに関連する既存の基準（例：ASTM バイオディーゼル基準（アメリカ）、基準 EN14114（ヨーロッパ））と合致する必要がある、EU のバイオディーゼル基準のもとではほとんどの藻類は産出オイルの不飽和度の調整を行わなければならない。また、脂質含有率や含まれる脂肪酸の特徴によっては燃料としての利用より、食料や医薬品としての用途が適すると判断される種も存在する（渡邊, 2012）。

2-2 先行研究と近年の状況

これまでに微細藻類バイオマス生産の技術と事業化を見据えた経済性の研究が行われてきた。Tredici et al. (2016)と Kovacevic and Wesseler (2019)は、実証実験に基づくコスト試算を行った。Jorquera et al. (2010)と Valente et al. (2019) は、ライフサイクルアセスメント（以下、LCA とする）をそれぞれ行った。Sun et al. (2011) は、微細藻類バイオオイル生産コストの研究を 12 個集約し、共通の培養条件で生産を行ったと仮定して推計することでコスト幅を修正した。Takeshita (2011)は、微細藻類由来のバイオディーゼルがエネルギーシステムに与える影響について評価した。

Tredici et al. (2016)は、イタリアで新規のフォトバイオリアクターを用いた微細藻類スエシカの培養を行い、36000kg/年のバイオマス生産量を達成した。さらに、同実験の 100 倍の規模で培養を行ったとき、生産コストが€12.4/kg から€5.1/kg まで削減できると推計した。このスケールのまま微細藻類スエシカに適した気象条件で培養を行った場合、バイオマスの年間生産量は 18000kg/ha/年増加し、€3.2/kg で生産できると推計した。これにより、微細藻類バイオマスは事業規模が大きくなればある程度低いコストで生産できることが示された。

Kovacevic and Wesseler (2019) は、微細藻類バイオマス発電の費用便益分析を行い、化石燃料発電および第一世代バイオマス発電と比較した。分析の結果、社会的費用は微細藻類バイオマス発電が €2.3/GJ となり、化石燃料発電 (€15.8/GJ) と第一世代バイオマス発電 (€36.0/GJ) より高くなった。この結果から Kovacevic and Wesseler (2019)は、微細藻類バイオマス由来の発電燃料が他のものより価格面で優れた燃料になるためには、バイオテクノロジーの進歩と高い原油価格や炭素価格が鍵を握っているとされ、技術進歩への継続的な投資や包括的な環境に関する調査、政策の策定が必要と結論した。

Jorquera et al. (2010) は開放系培養槽と、チューブタイプとプレートタイプのフォトバイオリアクターを用いた微細藻類バイオマス生産過程のエネルギー消費量とバイオマス生産コストに対する LCA を行い、Brenann and Owende (2010) や Zittelli et al. (2006) の分析をもとにそれぞれの培養槽の Net energy ratio を求め、事業としての経済的な実行可能性を評価した。分析の結果、チューブタイプのフォトバイオリアクターは他の 2 つと比較してポンプの費用が高いため、経済性がマイナスになることが明らかとなった。さらに、プレートタイプのフォトバイオリアクターと開放系培養槽は、微細藻類バイオ燃料の大規模製造事業を行うことを仮定すると経済性が高くなることが示された。

Valente et al. (2019) は、条件の異なる 31 個の微細藻類由来のバイオディーゼル生産に関する LCA の研究を集約し、システム境界や CO₂ 排出量のバランスなどを調整して再度 LCA を行った。複数の LCA の条件を調整して行うことには、技術のポテンシャルに関する誤解を低減する重要な役割がある。この研究によって、LCA の質が高まり、集約した研究のうち約 60% が GHG 排出量をさらに削減できることがわかった。

Sun et al. (2011) は、12 個の微細藻類バイオオイル生産コストの研究事例を比較し、バイオオイル生産コストは、最大値から最小値の間で US\$41.68/gallon の差があることを明らかにした。このコストの幅を調整するために、この研究では研究事例のコスト推計を学術研究機関や調査団体と協働でやり直し、共通の条件でコスト推計を行った。これによって、バイオマスオイル生産コストの幅は US\$12.45/gallon に縮まった。

Takeshita (2011)は、Global energy system model を用いて微細藻類バイオマス由来のバイオディーゼルが、21 世紀のエネルギーシステムに与える影響として具体的に、①微細藻類バイオディーゼルの競争力は CO₂ 安定化レベルが厳しくなることによって失われていくこと、②微細藻類バイオディーゼルの競争力は微細藻類生産コストや脂質生

産量に大きく影響されること、③微細藻類バイオディーゼルは輸送部門において、石油製品の代替として需要を賄うポテンシャルがあること、④微細藻類バイオディーゼルの市場への参入は、エネルギー市場や世界のエネルギー供給構造に大きな影響を与えることを示した。

Benemann and Oswald (1996)は、排気ガスと純二酸化炭素を供給して藻類培養を行った場合のコストを試算し、最も低い推計でも US\$39/barrel になることを示した。当時の原油価格が US\$12.7~23.35/barrel であったことを考慮すると、実用化のために一層のコスト低減が必要とされる。

佐藤 (2006) は、実験室スケールのフォトバイオリアクターを用いて微細藻類を培養し、実験結果をもとに微細藻類培養コストと CO₂ 削減コストを試算した。この研究では CO₂ 削減コストを微細藻類由来のバイオディーゼル燃料発電と太陽光発電で比較し、微細藻類由来のバイオマス発電が 1300 円/t 上回る結果となった。

中野・鷺津 (2015) は、産業連関分析を用いて微細藻類バイオマス燃料油生産システムの建設時と運転時における経済および環境面への波及効果を計算した。そして、微細藻類バイオマス事業の採算性は、脂質産出性の改善と残渣の肥料や飼料への高付加価値化によって改善が見込まれるとした。しかし、残渣の高付加価値化は付加価値の低い固形燃料として利用する場合に比べて、CO₂ 誘発が大きくなった。

伏見・柿村 (2014) は、藻類からの大規模バイオディーゼル生産プラントの実現性を示す要素として、オイル回収プロセスにおいて水熱液化 (hydrothermal liquefaction) と従来のヘキサン抽出法、バイオディーゼル合成に超臨界メタノール法と従来のアルカリ触媒法それぞれ組み合わせてどの組み合わせが最も経済性があるか検討した。そして、水熱液化と超臨界メタノール法を組み合わせたものが最も経済性があることが明らかになった。

これらの先行研究より、微細藻類バイオマス事業は現時点では事業性や CO₂ 削減効果において第一世代バイオマスや他の再生可能エネルギーに劣ることがわかった。しかし、これらの研究のみでは微細藻類バイオマスが地域再エネ事業としての可能性がないとは判断できない。以下、近年の微細藻類バイオマス事業について述べる。

近年、微細藻類バイオマス事業への関心は高まってきている。これは、国家的プロジェクトというよりも、多くの新興ベンチャービジネスが主体となって行われている傾向にある。微細藻類は土地の状態にかかわらず培養できるため、微細藻類バイオマス

事業を行う自治体やベンチャーが年々増加している。佐賀県佐賀市では、2015～2016年に行われた「下水道革新的技術実証事業 B-DASH プロジェクト」（国土総合研究所, 2017）においてユーグレナ、東芝、日本下水道事業団などと協働して下水処理場のバイオガス中の二酸化炭素分離・回収と微細藻類培養技術への利用技術の実証事業を行った。この事業では分離・回収された二酸化炭素が、光合成の栄養源として微細藻類の培養槽に供給された（佐賀市, 2018）。事業終了後は、「バイオマス産業都市さが」の一環としてユーグレナと協働で微細藻類を培養し、収穫したバイオマス成分を化粧品などに商品化して販売している。

微細藻類バイオディーゼルは、ディーゼル車の燃料やジェット燃料として利用することができる。これを事業化するためには、微細藻類の大量培養技術や培養効率の向上といった技術革新が求められており、世界各地で実証事業や研究が行われている。アメリカではシェブロンが National Renewable Energy Laboratory（アメリカ国立再生可能エネルギー研究所）と共同で、2006年から藻類を原料とするジェット燃料の開発とバイオ燃料の改質研究を行っている。日本では、2009年1月に日本航空が微細藻類由来のバイオ燃料を混合したボーイング機のテスト飛行に成功し（日本航空, 2009）、ユーグレナは2020年までに、微細藻類由来のバイオマス燃料を100%使用した飛行機でのフライト成功を目標に掲げた（ユーグレナ, 2017a）。2015年には筑波大学を拠点に藻類バイオマス・エネルギーシステム研究開発センターが設立され、微細藻類バイオマスエネルギーの大量生産と実用化に向けた研究が進められている（藻類バイオマス・エネルギーシステム研究開発センター, 2015）。以上のように、微細藻類由来のバイオディーゼルの大量生産と実用化に向けた動きは、世界のエネルギー業界に拡大しつつある。

これまで第1章を含めてバイオマス事業と微細藻類バイオマスに関する先行研究について述べてきたが、微細藻類バイオマスを含む第三世代バイオマスは地域バイオマス事業として事業化されているものが少ない。理由としてコスト競争力の低さや世界的に新しいバイオマスとして実証例が少ないことが挙げられる。特に我が国では、2000年以降の微細藻類バイオマス研究が下火の傾向にあることも理由のひとつである。きっかけは、1990～1999年にわたって行われた「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術開発」において、当初経済性や現実性の分析について酷評されたことである（渡邊, 2012）。

そこで、本研究の分析では先行研究中の国内外を含めたいくつかの研究事例からデータを収集し、日本での地域事業化を想定して、微細藻類バイオマス生産からバイオディーゼル精製までのプロセスにおけるコストをジェット燃料および廃油由来のバイオディーゼルと比較して経済性評価する。さらに、同プロセスにおける二酸化炭素排出量を算出し、ジェット燃料調達と燃焼プロセスでの二酸化炭素排出量と比較して、地域事業規模の微細藻類バイオディーゼル生産がどの程度二酸化炭素を削減するか評価する。

第3章 分析方法

3-1 分析のフレームワーク

本研究では、まず微細藻類由来のバイオディーゼル 1L の製造にかかるコストを算出し、石油由来のジェット燃料と廃油由来のバイオディーゼル 1L の製造コストと比較する。次に、微細藻類由来バイオディーゼルの製造・燃焼過程で排出される二酸化炭素量とジェット燃料の製造・燃焼過程で排出する二酸化炭素量を比較する。ジェット燃料と比較する理由は、微細藻類バイオディーゼルとジェット燃料は共通した特徴を持っているからである。微細藻類バイオディーゼルの製造プロセスは図 3-1 のとおりである。本研究におけるバイオディーゼル生産コストの分析範囲は、図 3-1 の赤枠の部分である。一方、二酸化炭素の分析範囲は、図 3-1 の点線枠の部分とする。

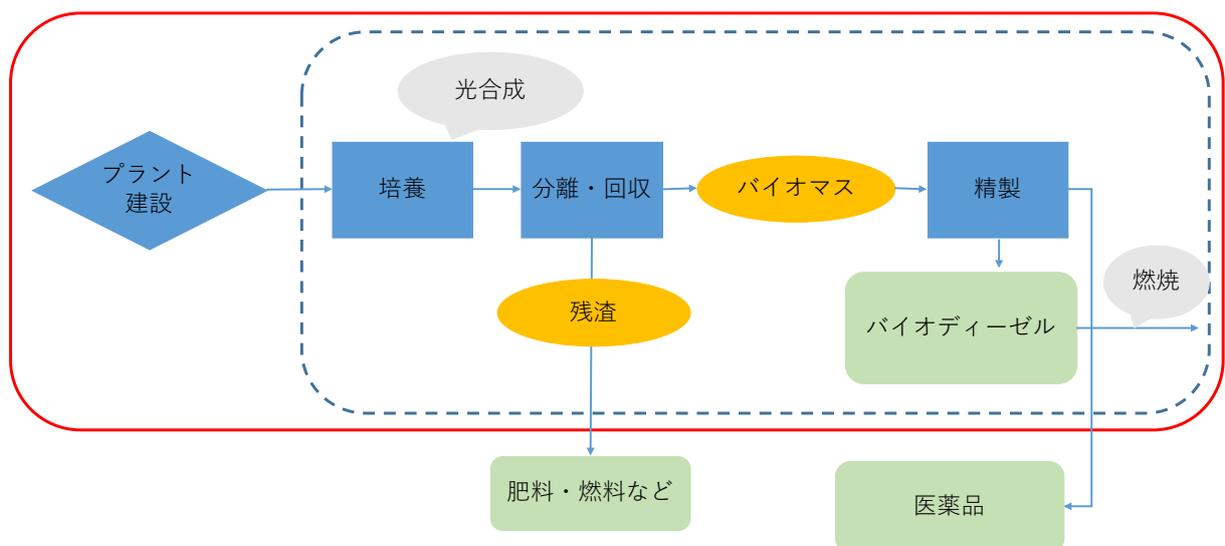


図 3-1 微細藻類バイオマス生産とバイオディーゼル製造のプロセス（渡邊（2012）より筆者が作成）

3-2 研究事例とデータ

本研究では、研究事例にもとづいて微細藻類バイオマス生産コストとバイオディーゼル製造コストをそれぞれ収集した。さらに、日本で地域事業として展開することを

想定して、人件費を調整及び追加した。バイオマス生産コストについては複数の文献値を参考にし、バイオディーゼル製造コストは統一して同じものを用いた。プロセスを2つに分けた理由は、微細藻類バイオマスの生産プロセスにおいて、どのような種類の微細藻類を用いるか、またどの種類の培養槽を用いるかといった選択は、事業性の改善や特定の製品の生産といった目的によって最適な組み合わせが異なるからである。バイオディーゼル精製プロセスについては、伏見・柿村（2014）の値を用いて、このデータをすべての事例のバイオマス生産コストとそれぞれ足し合わせて、トータルの微細藻類バイオディーゼル生産コストとする。

3-2-1 微細藻類バイオマス生産にかかるコストと二酸化炭素排出量

本研究では、微細藻類バイオマスの生産コストについて、開放系培養槽を用いた Benemann and Oswald (1996) から、フォトバイオリクターを用いた Tredici et al. (2016) と佐藤（2006）からデータを収集した。Benemann and Oswald (1996) は、屋外で開放系培養槽を用いた培養を行った。この実験のデータについては、1982年時の実験に基づくデータと、それを基に1987年にバイオマス生産量を2倍と仮定して推計したデータの2種類を収集できたため、表3-1中で Benemann and Oswald (1996)_1 と Benemann and Oswald (1996)_2 としてそれぞれ示している。Tredici et al. (2016) と佐藤（2006）はフォトバイオリクターを用いた培養を行ったが、佐藤（2006）は実験室スケールの培養で得られた結果をもとに推計されたコストのデータのみ得られたので、これを使用している。研究事例における培養槽やバイオマスの種類などについて表3-1に示した。微細藻類は種類によって培養速度や脂質含有量が異なるが、本研究で用いた研究事例では微細藻類の種類はバイオマスの生産量に影響しないものとする。さらに微細藻類は基本的にどのような土地でも培養可能であるが、気候の違いによってバイオマス生産効率に差が生まれることがある。現実には、培養地の環境の違いが微細藻類バイオマスの生産効率に影響を及ぼしている可能性があるが、本研究ではその点は考慮していない。

表 3-1 研究事例のまとめ

	Benemann and Oswald (1996)_1 ^{*1}	Benemann and Oswald (1996)_2 ^{*1}	Tredici et al. (2016)	佐藤 (2006)
培養槽	開放系培養槽	開放系培養槽	フォトバイオ リアクター	フォトバイオ リアクター
藻類の種類	ドナリエラ、ス ピルリナ	ドナリエラ、スピ リナ	スエシカ	クロロコッカ ムリトアレイ
事業地	EU	EU	イタリア	東京
バイオマス生 産量 (kg/年)	109000	219000	36000	257800

^{*1}Benemann and Oswald (1996)_2 は Benemann and Oswald (1996)_1 の 2 倍のバイオマス生産量であると仮定して推計した予測値であり、微細藻類の培養速度はそれぞれ 30g/日と、60g/日である。

微細藻類バイオマスの生産過程の二酸化炭素排出量は、各プロセスにおける電力消費量²を合計して、環境省・経済産業省 (2018) の電気事業者別排出係数 (代表値: 0.512kg-CO₂/kWh) をかけて算出する (熱エネルギー消費については本研究で考慮していない)。しかし、表 3-1 で電力消費量についての詳細なデータが得れたのは Tredici et al. (2016)のみであった。ここで培養槽の種類の違いがコストにもたらす影響を比較するために、開放系培養槽を用いた Collet et al. (2011)のデータを用いて³、Tredici et al. (2016)のデータと 2 つの事例の生産プロセスにおける電力消費量を算出した (表 3-2)。

² 本研究ではバイオマス生産過程においてデータの得られた電力消費量に焦点を当てて収集した。

³ Collet et al. (2011)にはコストについてのデータがなかったため、コスト計算は行っていない。

表 3-2 バイオマス生産プロセスの年間電力消費量

項目	Tredici et al. (2016)	Collet et al. (2011)
ポンプ (kWh/年)	92256.0	-
送風機 (kWh/年)	112560.0	-
コンプレッサー (kWh/年)	22800.0	-
培養 (kWh/年)	-	412.0
収集 (kWh/年)	-	275.4
遠心分離 (kWh/年)	-	75.6
嫌気性消化 (kWh/年)	-	1463.8
合計	222816.0	2226.8
バイオディーゼル製造量 (L/年)	13846.0	2307.0
バイオマス生産にかかる消費電力量 (kWh/L)	16.1	0.965227568

出典：Collet et al.(2011)、Tredici et al. (2016)より筆者が作成

3-2-2 微細藻類バイオディーゼル精製にかかるコストと二酸化炭素排出量

微細藻類バイオディーゼルの精製過程におけるコストは伏見・柿村 (2014) から収集した。第 2 章でも示したが、伏見・柿村 (2014) は、微細藻類バイオマスからバイオディーゼルの精製する際の炭化水素抽出方法とバイオディーゼルへの転換方法をそれぞれ組み合わせて精製コストを算出・比較した。炭化水素抽出方法については、藻類からオイルを抽出する過程で高温押圧処理をする水熱液化とヘキサンを溶媒に用いた方法のいずれかを、バイオディーゼル変換方法については、オイルとメタノールを高温高圧下で反応させる超臨界メタノール法 (梅田・伏見, 2016) とアルカリを触媒に用いた方法のいずれかを組み合わせ、バイオディーゼル 1L の精製にかかるコストを算出している (表 3-3)。本分析では、これら 4 つのケースのうち、最大値であるヘキサン抽出法と超臨界メタノール法の組み合わせと、最小値である水熱液化と超臨界メタノール法の組み合わせを用いた。

表 3-3 バイオディーゼル精製コスト

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
抽出	水熱液化	水熱液化	ヘキサン抽出 法	ヘキサン抽出 法
変換	超臨界メタノ ール法	アルカリ抽出 法	超臨界メタノ ール法	アルカリ抽出 法
抽出コスト（百万円/年）	67	90	77	69
変換コスト（百万円/年）	223	250	200	188
バイオディーゼル年間生産量 （ML/年）	18	18	5.7	5.7
バイオディーゼル精製コスト （円/L）	79.4 ^{*1}	103.9	112.1 ^{*1}	102.0

^{*1} 本分析のバイオディーゼル精製コストとして用いた値

出典：伏見・柿村（2014）より筆者が作成

バイオディーゼル精製過程の二酸化炭素排出量は、柿村・伏見（2013）を参考にした。柿村・伏見（2013）は、伏見・柿村（2014）と同様の組み合わせで、4つのケースの電力消費量を比較した（表 3-4）。本分析では、4つのケースのうち伏見・柿村（2014）と同じ組み合わせを用いた。なお、微細藻類バイオディーゼルが燃焼したときの二酸化炭素排出量は、微細藻類が光合成によって吸着することで相殺されるため（カーボンニュートラル）、微細藻類バイオディーゼルの二酸化炭素排出量は、実質的にバイオディーゼル製造過程において排出される二酸化炭素量のことを指す。

表 3-4 バイオディーゼル精製プロセスの電力消費量

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
抽出	水熱液化	水熱液化	ヘキサン抽出 法	ヘキサン抽 出法
転化	超臨界メタノ ール法	アルカリ抽 出法	超臨界メタノ ール法	アルカリ抽 出法
エネルギー年間消費量 (MJ/MJ-BDF)	0.26	0.30	0.27	0.31
エネルギー消費量 (MJ/L)	12.38	14.29	12.86	14.76
エネルギー消費量 (kWh/L)	3.44	3.97	3.57	4.10
二酸化炭素排出量 (tCO ₂ /kWh)	1.76 ^{*1}	2.03	1.83 ^{*1}	2.09

*1 本分析のバイオディーゼル精製過程の消費電力量として用いた値

出典：柿村・伏見（2013）より、筆者が作成

3-2-3 ジェット燃料の製造コストと二酸化炭素排出量

ジェット燃料の価格は、2019年1月14日現在のジェット燃料の価格 50～60 円/L（国際航空運送協会，2019）の中央値である 55 円/L を用いた。

ジェット燃料の二酸化炭素排出量は、燃料調達から燃焼まで一貫して計算したデータを得られなかった。そこで燃料調達プロセス（採掘、国際輸送、精製、および国内輸送）と燃焼プロセスで分けて二酸化炭素排出量のデータを収集した。燃料調達に伴い排出される二酸化炭素量（7.88g-CO₂/MJ）は経済産業省（2007）に、石油連盟（2015）の換算係数（36.3MJ/L）を用いて 0.0286kg-CO₂/L に換算した。ジェット燃料燃焼時に排出される二酸化炭素は環境省（2018）の燃料の使用に関する排出係数（ジェット燃料）より、2.463kg-CO₂/L を用いた。最後に 2 つの値を合計して、ジェット燃料の二酸化炭素排出量は 2.492kg-CO₂/L とした。

3-2-4 廃油由来のバイオディーゼル製造コスト

廃油由来のバイオディーゼル製造コストは、岡田（2012）が見積もった 111.9 円/L を用いる。内訳は、原料費と設備費、人件費の合計であり、それぞれ 64.1 円/L、28 円/L、

20 円/L となっている。

3-2-5 微細藻類バイオマス事業の人件費

本研究では地域事業としてバイオディーゼル生産を行うことを想定しているので、人件費については TKC グループ（2018）の BAST⁴を参考に、人件費の平均値(4668 千円/人)を用いた。さらに、Tredeci et al. (2016)より事業における労働者 6 人/ha と仮定し、論文中の比に合わせて人件費を設定した。

表 3-5 1ha あたりの労働者数と人件費

職種	労働者数（人）	人件費（円/年）
現場監督	1	10503000
科学者	1	7095360
その他労働者	4	4668000
計	6	36270360

⁴ BAST とは、企業の経営成績と財政状態を分析したもので、中分類 86 種および細分類 498 業種について経営分析項目 14 項目を軸に収録している。本研究で参考にしたのは、他に分類されないその他の製造業の平均人件費である。

第4章 分析結果と考察

本研究では、微細藻類バイオマス生産と微細藻類バイオディーゼル精製過程のコストおよび二酸化炭素排出量に関連するデータについて研究事例を参考に算出し、ジェット燃料の販売単価および製造過程における二酸化炭素排出量と比較した。

4-1 微細藻類バイオディーゼル製造事業の採算性

まず、微細藻類バイオディーゼル製造コストのデータを収集した結果を表 4-1 に示す。表 4-1 より、最も低コストの事例は、Benemann and Oswald (1996)_2 であった。

表 4-1 微細藻類バイオディーゼル製造コスト

	開放系培養槽		フォトバイオリアクター	
	Benemann and Oswald (1996)_1	Benemann and Oswald (1996)_2	Tredici et al. (2016)	佐藤 (2006)
バイオマス生産量 (kg/y)	109000	219000	36000	257800
バイオマス生産コスト (円/年)	39142592	40284700	70472271	59479855
バイオディーゼル生産量 (L/年)	41923.08	84230.77	13846.15	99153.85
バイオディーゼル生産コスト (円/年)	933.68	478.27	5089.66	599.87
バイオディーゼル精製コスト (円/年)	79.4 ^{*1}	79.4 ^{*1}	79.4 ^{*1}	79.4 ^{*1}
	/112.1 ^{*2}	/112.1 ^{*2}	/112.1 ^{*2}	/112.1 ^{*2}
バイオディーゼル製造コスト (円/年)	1013.08	557.67	5169.06	679.27
	/1045.78	/590.37	/5201.76	/711.97

^{*1}表 3-3 より、水熱液化と超臨界メタノール法を組み合わせたコスト、^{*2}表 3-3 より、ヘキサン抽出法と超臨界メタノール法を組み合わせたコスト

微細藻類バイオディーゼルのジェット燃料の販売価格 55 円/L と比較する。最も低コストである Benemann and Oswald₂ (1996)の製造コスト 557.67 円/L でもジェット燃料の販売価格の約 10 倍のコストになっており、その他比較に用いたいずれの事例もジェット燃料に価格競争力で劣ることが明らかになった。コストが高くなった理由としては、微細藻類バイオマス生産過程におけるコストの高さが考えられる (付録 B 参照)。コスト削減方法については、第 2 章で述べた通り微細藻類バイオマスが基本的にどのような土地でも生産が可能であるという特徴から、土地購入費用を耕作放棄地や地価の低い土地など活用して削減することができると考えられる。また、Demura et al. (2018)の研究事例と同様に地域の気候に適した土着藻類の培養は、温度や光強度管理がより容易になるため、管理運営費用の削減に貢献すると考えられる。

また、Benemann & Oswald (1996)₂ のコストは廃棄物由来のバイオディーゼル製造コスト (111.9 円/L) と比較しても約 4 倍高くなった。ここから、微細藻類由来のバイオディーゼルは第 2 世代バイオマスと比較しても価格競争力で劣ることが明らかになった。しかし第 1 章で述べた通り、今後人口減少によって地方地域の人口が減少すれば、バイオマス原料の調達コストや人件費はさらに高くなると考えられる。微細藻類は原料が比較的簡単に手に入るというメリットがあるので、この点がコスト競争において今後鍵になると考えられる。

4-2 微細藻類バイオディーゼル製造の二酸化炭素排出量

微細藻類バイオディーゼル製造過程の二酸化炭素排出量を表 4-2 に示す。二酸化炭素排出量が最も少なかったのは、Collet et al. (2011)₁であった。フォトバイオリアクターの代表例として Tredici et al. (2016)のデータと、開放系培養槽の代表例として Collet et al. (2011) のデータを用いて比較し、バイオマス生産過程の電力消費量は Tredici et al. (2016) のほうが約 5 倍多いという結果であった。先述のように、フォトバイオリアクターは開放系培養槽に比べて純度の高い微細藻類を産出できる一方、温度や光強度の調節といった設備が必要であるため、電力消費量が増加する。これらの設備に必要な電力は、Demura et al. (2018)の研究事例のように土着藻類を用いて温度や光強度の調節を簡易なものにすることで削減できると考えられる。バイオディーゼル精製過程における抽出・転化手法はできるだけ消費電力の少ない組み合わせを選ぶことが理想的

である。表 3-3・3-4 より最もコストが低く、かつ消費電力量の少ない組み合わせは、水熱液化と超臨界メタノール法の組み合わせである。したがってこの方法が今後抽出・転化手法として事業者に積極的に採用されていくと考えられる。

表 4-2 微細藻類バイオディーゼル製造過程の二酸化炭素排出量

	Tredici et al. (2016)_1 ^{*1}	Tredici et al. (2016)_2 ^{*2}	Collet et al. (2011)_1 ^{*1}	Collet et al. (2011)_2 ^{*2}
バイオマス生産過程の消費電力量 (kWh/L)	16.10	16.10	0.97	0.97
バイオディーゼル精製過程の消費 電力量 (kWh/L)	3.44	3.57	3.44	3.57
バイオディーゼル生産過程の消費 電力量 (kWh/L)	19.54	19.67	4.41	4.54
二酸化炭素排出量 (kg-CO ₂ /L)	10.00	10.07	2.26	2.32

^{*1}表 3-3 より、水熱液化と超臨界メタノール法を組み合わせた消費電力量、^{*2}表 3-3 より、ヘキサソ抽出法と超臨界メタノール法を組み合わせた消費電力量

次に、カーボンニュートラルによって、バイオディーゼルの燃焼で発生する二酸化炭素量はゼロになると仮定し、ジェット燃料の調達と燃焼過程での二酸化炭素排出量と比較した。ジェット燃料の二酸化炭素排出量が 2.492kg-CO₂/L であるため、開放系培養槽を用いたバイオディーゼル製造はジェット燃料より二酸化炭素排出量が 0.232kg-CO₂/L 少ないという結果になった。しかし、フォトバイオリアクターを用いた製造は、約 7.5kg-CO₂/L 二酸化炭素排出量が多くなった。これらより、微細藻類由来のバイオディーゼルはジェット燃料の二酸化炭素排出量と比較して環境保全効果はそれほど得られないということが分かった。先の考察でも述べた通り、フォトバイオリアクターはバイオマス生産過程でかなりの電力を消費するので、培養方法を工夫して電力消費量を削減することが重要である。さらにバイオディーゼル生産過程で発生する残渣を燃料にして発電を行うことで、さらに二酸化炭素排出量を削減できることが期待される。

第5章 結論

5-1 本論文のまとめ

我が国の地方都市は少子高齢化と人口減少によって、今後、都市経営が困難になることが予測される。持続可能な都市経営のために、地方自治体の自立と新しい財源確保のための事業を運営する必要がある。そこで、地域主体のバイオマス事業の推進が都市経営の継続・安定化のために重要であると考えられる。中でも、微細藻類バイオマスは高いバイオマス産出効率と付加価値を持っている。しかし、微細藻類バイオマスについて産出物の利用に関する研究や大規模培養を想定した培養効率向上と事業性についての研究が盛んな一方、日本国内で実際に地域事業として微細藻類バイオマス培養を行っている地域は少ない。地方自治体が主体のバイオマス事業に微細藻類が選択肢として考慮されるようになるためにも、これらの事業の経済性評価が重要である。

本研究では、微細藻類バイオマス由来のバイオディーゼルの経済性と、環境への効果についてジェット燃料とその他バイオマスと比較した。具体的には、研究事例から微細藻類バイオディーゼル製造過程にかかるコストのデータを収集し、ジェット燃料価格と廃油由来のバイオディーゼルの製造コストとの比較を行った。環境効果については、同過程に加えジェット燃料の燃焼で排出した二酸化炭素量のデータをもとに計算し、比較した。

分析の結果、微細藻類バイオディーゼル製造過程でかかるコストはジェット燃料と比較して最も小さいものでも約8倍以上となることが明らかとなった。廃油由来のバイオディーゼルと比較した結果も、最低でも約4倍以上コストが高くなった。一方、二酸化炭素排出量については、バイオディーゼルのカーボンニュートラルを考慮してジェット燃料より $0.232\text{kg-CO}_2/\text{L}$ 少ないことがわかった。

5-2 結論と今後の展望

本研究から、微細藻類バイオマス事業は地域再エネ事業として運営するためにさらにコストを低減することが求められるといえる。二酸化炭素排出量については、ジェット燃料として代替することで非常に大きな二酸化炭素削減効果が得られる。加え

て、中野・鷺津（2015）が指摘するように微細藻類バイオマスの残渣を発電燃料として有効活用することで、さらに二酸化炭素排出量の削減が見込める。

コスト低減に関しては、宮下ら（2017）や中野・鷺津（2015）など技術面の向上を論じたものが多いが、本研究では政策や自治体の協力体制面での提案を述べる。

微細藻類バイオマス生産が事業として成立するためには次のようなアプローチができると考えられる。まず、微細藻類事業に自治体が関与することである。第1章を中心に述べてきた地域再エネ事業の特性として、自治体の積極的なアプローチが挙げられる。岡山県真庭市は、民間企業主導の人材育成や取り組みが貢献して地域エネルギー事業を軌道に乗せることができた。長野県飯田市は、住民が運転費の一部を出資するかたちで太陽光発電事業がスタートし、収益を地域内で循環するシステムが完成している。加えて、北海道下川町は自治体が直営でバイオマスボイラーの運転を行っている（諸富, 2013）。佐賀市のバイオマス産業都市構想では、地域と民間企業が協働して微細藻類バイオマス事業に取り組み、化粧品を生産で事業化を図った。これらの例のように、自治体の積極的なアプローチが、地域再エネ事業やバイオマス事業の運営面に貢献することが期待される。また、微細藻類培養に関する正式な政策を整えることも重要である。米国では農業法に「藻類」を正式に加えることが2018年末に決定し、これによって生産者は作物保険や農業化による税制面での優遇、補助金を享受できるようになった（中原, 2018）。もともと日本では農地法で微細藻類培養も農業として認められていたが、正式に微細藻類の政策や法律が整えられることによって採算性への懸念が緩和され、地域事業として採用する地域が増加すると考えられる。

5-3 本研究の課題

本研究では参考事例数が少ないため、結果について十分な信頼性を得られなかったことが課題として挙げられる。また、ほとんどのデータが仮定に基づくもの、または海外の事例であったため、微細藻類が日本の地域事業としてのどの程度ポテンシャルを持つのか、十分に明らかにすることができなかった。本研究の意義は、日本の地域再エネ事業に微細藻類バイオマスを選択肢として考慮してもらえるように情報提供することであった。よって今後は、日本での微細藻類バイオマス事業のデータに基づき、地域にもたらす影響を定量的に明らかにすることによって、情報源としてさらに貢献できる

と考えられる。さらに今回はバイオディーゼルを微細藻類バイオマスの産出物として分析に用いたが、健康食品や医薬品といったその他の産出物についての分析も加えることで、地域事業としてのポテンシャルをさらに補強できると想定される。

参考文献

- 1) 牛山泉 (2011) とことん考える新エネルギー②風力発電の世界の成長率 30%経済効果は自動車産業並み. エコノミスト, 89(37), pp.86-88.
- 2) 梅田章仁・伏見千尋 (2016) 超臨界メタノール法による微細藻類オイルからのバイオディーゼルの転換. 第 11 回バイオマス科学会, pp.141-142.
- 3) 岡田正史 (2012) バイオディーゼル燃料の製造方法と利用の現状. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 47(1), pp.45-50.
- 4) 科学技術振興機構研究開発戦略センター (2006) 第三世代バイオマス技術の日米欧研究開発比較 〈<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2006/GR/CRDS-FY2006-GR-01.pdf>〉, 2019.1.28.
- 5) 柿村麻衣・伏見千尋 (2013) 微細藻類バイオディーゼル大規模生産におけるシステム検討. 第 22 回日本エネルギー学会大会, pp.88-89.
- 6) 梶山恵司・植田和弘 (2011) 国民のためのエネルギー原論. 日本経済新聞出版, pp.127-134.
- 7) 環境省 (2018) 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 〈<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran2015.pdf>〉, 2019.2.15.
- 8) 環境省・経済産業省 (2018) 電気事業者別排出係数-平成 29 年度実績 - 〈<http://www.env.go.jp/press/files/jp/110465.pdf>〉, 2019.2.15.
- 9) 経済産業省 (2007) 「次世代自動車・燃料イニシアティブ」について 〈<http://www.opda.or.jp/library/links/jisedaijidousya.pdf>〉, 2019.2.15.
- 10) 近藤加代子・大隈修・美濃輪智朗・堀史郎編 (2013) 地域力で活かすバイオマス. 海鳥社, pp.7-10.
- 11) 国土総合研究所 (2017) B-DASH プロジェクト No.18 : バイオガス中の CO₂ 分離・回収と微細藻類培養への利用技術導入ガイドライン (案) 〈<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn1003.htm>〉, 2019.1.28.
- 12) 国立社会保障・人口問題研究所 (2017) 日本の将来推計人口 : 平成 29 年推計の解説および条件付き推計 〈http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp29suppl_report2.pdf〉, 2019.2.1.
- 13) 佐賀市 (2018) 株式会社ユーグレナとの微細藻類に関する共同研究契約 〈<https://www.city.saga.lg.jp/main/2984.html>〉, 2019.1.28.

- 14) 佐藤徹 (2006) フォトバイオリアクターの開発プロセス効率化と性能予測法. 藻類の大量培養に向けたフォトバイオリアクターの高効率化 〈<http://lemons.k.u-tokyo.ac.jp/SATO/lecture/Special/microalgae.pdf>〉, 2018.2.14.
- 15) 資源エネルギー庁 (2018) 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト 〈<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>〉, 2019.1.30.
- 16) 石油連盟 (2015) 換算係数一覧 〈<http://www.paj.gr.jp/statis/kansan/>〉, 2019.2.15.
- 17) 藻類バイオマス・エネルギーシステム研究開発センター (2015) 概要 〈<http://www.abes.tsukuba.ac.jp/aboutus>〉, 2019.1.30.
- 18) 中野諭・鷺津明由 (2015) 微細藻類バイオマス燃料油利用の産業連関的評価：2つの事業モデルを中心に. 日本エネルギー学会誌, 95, pp.123-138.
- 19) 中原剣 (2018) 2018年農業法に藻類が追加 (米国) 〈<https://modia.chitose-bio.com/articles/76/>〉, 2019.2.5.
- 20) 西栗倉村 (2014) 西栗倉村バイオマス産業都市構想 〈http://www.jora.jp/tiikibiomassangyokasien/pdf/08_nishi_awakura.pdf〉, 2019.1.28.
- 21) 日本航空 (2009) 世界初! 「カメリナ」を主原料とするジェット燃料で「JAL バイオ・フライト」成功! 〈<http://press.jal.co.jp/ja/release/200901/000729.html>〉, 2019.1.28.
- 22) 農林水産省 (2002) バイオマス・ニッポン総合戦略 〈http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_gaiyou.pdf〉, 2019.1.28.
- 23) 農林水産省 (2018) バイオマス産業都市について 〈http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_sangyo_toshi/attach/pdf/H30_sangyo_toshi_1.pdf〉, 2019.1.28.
- 24) 伏見千尋・柿村麻衣 (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, pp.86-87.
- 25) 星野孝仁 (2017) フォトバイオリアクターを用いた微細藻類バイオマスの生産コスト 〈<https://modia.chitose-bio.com/articles/18/>〉, 2019.2.1.
- 26) 宮下英明, 荒谷彰吾, 井村綾子, 沈元, 石井健一郎, 神川龍馬 (2017) 次世代微細藻類バイオマス生産法とそれに適した微細藻類の収集・選抜. えねるみくす, 96, pp.40-49.
- 27) 諸富徹 (2013) 「エネルギー自治」による地方自治の涵養: 長野県飯田市の事例を踏まえて. 地方自治, 786, pp.2-29.
- 28) 諸富徹 (2018) 人口減少時代の社会. 中央公論新社, pp.6-20.

- 29) ユーグレナ (2017a) エネルギー・環境事業 国産バイオ燃料計画 〈<https://www.euglena.jp/business/fuel/>〉 , 2019.1.28.
- 30) ユーグレナ (2017b) ユーグレナのニュース 〈<https://www.euglena.jp/news/20170731-2/>〉 2019.2.1
- 31) 渡邊信 (2012) 新しいエネルギー藻類バイオマス. みみずく社, p.266.
- 32) TKC グループ (2018) TKC 経営指標 (BAST) 要約版・速報版 〈<https://www.tkc.jp/tkcnf/bast/sample/>〉 , 2019.2.14.
- 33) Benemann, R.J., and Oswald, J.W. (1996) Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass. Final Report to the Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center, Grant No. DE-FG22-93PC93204.
- 34) Brenann, 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), pp.557-577.
- 35) Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances 25, pp.294-306.
- 36) Collet, P., Helias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, A.R., Steyer, P.J. (2011) Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. Bioresource Technology 102, pp.207-214.
- 37) Demura, M., Yoshida, M., Yokoyama, A., Junko, I., Kobayashi, H., Kayano, S., Tamagawa, Y., Masayuki, W., Teruo, W., Inoue, I., Osaka, M., kawarada, M., Date, N., Makoto, M.M. (2018) Biomass productivity of native algal communities in Minamisoma city, Fukushima Prefecture Japan. Algal Research 29, pp.22-35.
- 38) Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, A.E., Embirucu, M.,Ghirardi, L.M. (2010) Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors, Bioresource Technology 101, pp.1406-1413.
- 39) Kovacevic, V., Wesseler, J. (2019) Cost-effectiveness analysis of algae energy production in the EU. Energy Policy 38, pp.5749-5757.
- 40) Sun, A., Davis, R., Starbuck, M., Amotz, B.A., Pate, R., Pienkos, T. P. (2011) Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. Energy 36, pp.5169-5179.
- 41) Takeshita, T. (2011) Competitiveness, role, and impact of microalgal biodiesel in the global energy future. Applied Energy 88, pp.3481-3491.

- 42) Tredici, R.M, Rodolfi, L., Biondi, N., Sampietro, G. (2016) Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel(GWP®) plant. *Algal Research* 19, pp.253-263.
- 43) Valente, A., Iribarren, D., Dufour, J. (2019) How do methodological choices affect the carbon footprint of microalgal biodiesel? A harmonized life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 207, pp.560-568.
- 44) Zittelli, C.G., Rodolfi, L., Biondi, N., Tredici, M.R. (2006) Productivity and photosynthetic efficiency of outdoor cultures of *Tetraselmis suecica* in annular columns. *Aquaculture* 261, pp.932-943.

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、1年間指導教員として親身にご指導指摘くださいました松本健一先生には心からの感謝を申し上げます。先生は当初怖い人だというイメージを持っていたので、10月くらいまで話すのもめっちゃめっちゃ緊張していたのですが、話してみるとギャップの塊でとても驚きました。私は言われたことをすぐに忘れるし、Wordもまともに使えず、かなり手のかかる生徒だったと思いますが、面倒を見てくださって本当にありがとうございました。

そして、同じゼミ生である鬼木香美さん、中峯結衣さん、吉田武寛さんにはいつも親切にしてくださいました。同期がいなくて寂しかったので、皆さんがかまってくれてとても（いや、めっちゃ）嬉しかったです。皆さんの来年度卒論作成において、良い反面教師になれたと自負しているので、就活も、卒論も、学生生活も充実したものにしてもらいたいと思います。

本研究を進めるにあたり、お忙しい中、微細藻類の知識をご提供くださったブランマンこと竹下先生、佐賀大学・出村先生、事業視察させていただきつつ佐賀市バイオマス産業都市推進課の皆様、研究に関してアドバイスをくださったり、お会いするたびに温かいお言葉をかけてくださった経済三銃士・山本先生、重富先生、お菓子の濱崎先生にも心より感謝申し上げます。

最後に、これまで私を育て、大学にも通わせてくれた両親、4年間苦楽を共にした友人にも感謝の意を表したいと思います。皆様の温かい応援により、大変充実した大学生活を送ることができました。大学生活楽しすぎて、これを書いている途中でも涙が出そうなくらい寂しいです。皆さんと過ごした日々の思い出を糧にこれからも頑張るつもりですが、やっぱり寂しいのでちょくちょく帰ってくるかもしれないです。皆さんも、関西に来るときはぜひお会いしたいので、連絡待っています！これからの人生楽しいことばかりではないかもしれませんが、大変な時こそ自分も周りも **HAPPY** にできるような人間を目指して今後も精進したいと思います。

皆様、本当にありがとうございました。

中村沙代

付 録

付録目次

付録 A 微細藻類培養槽.....	1
図 A-1 開放系培養槽.....	1
図 A-2 フォトバイオリアクター.....	2
付録 B 微細藻類バイオマス生産の研究事例の詳細.....	3

付録A 微細藻類培養槽



図 A-1 開放系培養槽の外観（出典：ユーグレナ（2017b））



図 A-2 フォトバイオリアクターの外観（出典：星野（2017））

付録B 微細藻類バイオマス生産の研究事例の詳細

表 B-1 微細藻類バイオマス生産の研究事例

研究事例	種類	培養方法	バイオマス生産量 (kg/年)	バイオディーゼル生産量 (g/年)	バイオディーゼル生産 (L/年)	資本費用 (円/年)	運転費用 (円/年)	バイオマス生産コスト (円/年)	バイオマス生産コスト (円/L)
Benemann and Oswald (1996)_1	スピルリナ	開放系 培養槽	109000	32700	41923.07692	2035440	37107152	39142592	933.6765064
Benemann and Oswald (1996)_2	ドナリエラ	開放系 培養槽	219000	65700	84230.76923	2657380	37627320	40284700	478.2658447
Tredecì et al. (2016)	スエシカ	PBR ^{*1}	36000	10800	13846.15385	12972419	57499852	70472271	5089.664017
佐藤 (2006)	クロロコッカム リトアレイ	PBR ^{*1}	257800	77340	99153.84615	12256972	47222883	59479855	599.8744104

*1 PBR は、フォトバイオリクターのことである。