

氏名（本籍）	石崎 理有		
学位の種類	博 士（ 農学 ）		
学位記番号	博 甲 第	9848	号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	オキシデーションディッチ法による廃水処理を導入した 微細藻類燃料生産プロセスの環境影響評価		
主査	筑波大学准教授	博士（農学）	野口 良造
副査	筑波大学准教授	博士（農学）	トファエル アハメド
副査	筑波大学教授	博士（工学）	市川 創作
副査	筑波大学教授（連携大学院）	博士（農学）	元林 浩太

論 文 の 要 旨

微細藻類による燃料生産は、培養工程で微細藻類が CO₂ を固定化するため、温室効果ガス（GHG）の排出量を削減できるとともに、食料生産と競合しない廃水を栄養塩として利用できる特徴を持つ。一方、日本における微細藻類の培養条件は、赤道付近と比べると日射量が少なく、冬場の水温が低いなどの不利な面がある。しかし、微細藻類の培養工程において、環境負荷の低い廃水処理技術への応用を考慮すると、未利用資源の有効活用が期待される。本論文では、微細藻類の培養を廃水処理と組合せたシステムの定量的評価を目的としている。そこで、福島県南相馬市の実証実験での成果をもとに、微細藻類の培養からバイオクルード生産までを含めたシステムモデルを構築した。また、構築したシステムモデルをベースにシミュレーションを実施し、エネルギー収支比（EPR）、環境影響評価（LCA）、経済性について、微細藻類燃料生産と廃水施設の組合せの実現可能性を検証した。

著者は第一章で、南相馬市で行われた多種混合培養微細藻類による燃料生産プロジェクトにおける大規模実証実験のデータと、EPR、LCA にもとづいた、詳細かつ全体を網羅する微細藻類燃料生産シナリオを構築した。シナリオでは、培養槽における廃水の利用率及び微細藻類生産効率、各工程における藻類懸濁液から燃料に至るまでの質量バランス、電力使用量、薬剤使用量などのパラメータを独立変数と従属変数に区分し、それぞれのパラメータの関係性を明確化した。その結果、オキシデーションディッチ法（OD 法）の排水処理場と微細藻類燃料生産について、施設容量、培養環境に関する蓋の有無や気温等の条件、水質浄化基準の検討を行い、微細藻類による廃水処理導入に支障がないことを確認した。また、廃水処理において現在導入が進められているメタン発酵技術は、複数の標準活性汚泥法施設の集約や生ごみの追加投入等による大規模処理に有効であるのに対し、微細藻類燃料生産では比較的小規模（1,000～6,000 m³/日）の処理場に適合することを明らかにした。

著者は第二章において、第一章で構築したシナリオと関数を用い、微細藻類燃料生産における各プロセスの稼働における環境負荷、ならびにエネルギー使用状況を明らかにした。運転時における CO₂ 換算総 GHG 排出量が、既存シナリオでは廃水 1 m³ を処理した際に 2.76 kg-CO₂ eq/m³-w.w. 排出され、藻類シナリオでは 1.59 kg-CO₂ eq/m³-w.w. 排出されることが示された。また、既存の排水処理場に藻類シナリオを導入すると、環境負荷が 60%程度にまで減少した。一方で、廃水処理における藻類シナリオの EPR は 0.41 であり、既存シナリオの

0.21 と比べて約 2 倍となることが明らかとなった。さらに、懸濁液からの変換質量を理論値並みに改善し、深培養により培養水深を 0.2 m から 0.8 m へスケールアップを図れば、EPR が 1 を超える可能性があることが示された。加えて、HTL に必要な熱（施設間距離 400 m 以内で 700°C 以上 : HTL 工程使用時に 350°C 以上）や、排ガス（0.64 kg CO₂ eq/m³-w.w.）を獲得する重要性について言及した。

著者は第三章において、第一章で設定した条件に加え、具体的かつ詳細な排水処理場へ導入する微細藻類燃料生産システムを構築し、経済面からの解析を進めた。その結果、運転時における廃水処理費用として既存システムは 1.34 \$/m³-w.w.、藻類シナリオ A（排ガスと排熱利用）は 1.29 \$/m³-w.w.、藻類シナリオ B（排ガスのみ利用）は 1.36 \$/m³-w.w. であり、ほぼ同等の経済性であることが示された。

以上を総括すると、本論文では、実験室規模の主要な実験データ抽出から、環境、エネルギーおよび経済の観点からの実現可能性までの包括的な研究が実施された。また、LCA を用いた環境影響評価の結果から、微細藻類燃料生産を OD 法の廃水処理施設と組み合わせることにより、同程度の運転コストで GHG 排出量を 60% まで低減可能であることが示された。さらに、廃熱と CO₂ を無償かつ環境負荷なしでの獲得方法の検討、HTL 工程の変換効率が実験値では理論値の 50% 程度となるなどの課題を指摘し、既存廃水処理施設に藻類システムを組込む際の使用面積に制限があることを明らかにした。

審 査 の 要 旨

本論文は、福島県南相馬市における実証実験施設での多種混合培養微細藻類を対象として、培養からバイオ燃料生産までの各工程を、生物生産システム工学の観点から、エネルギー、物質、廃棄物の入出力、ならびにコストを一連のフローとして数値化した。また、数値化したデータを基に微細藻類燃料生産シナリオを構築し、最適な排水処理場との組合せによる技術移転の可能性を考察した。さらに、廃水処理プロセスにおける既存システムと微細藻類燃料生産システムを比較し、環境影響評価や経済性評価を含む技術移転の可能性について論じた。これらの成果は、農学分野における学術的価値に大きく貢献した。以上から、本論文は、高い学術的価値を有し、博士論文としてふさわしい内容であると判断される。

令和 3 年 1 月 25 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。