| | |
|---|---|
| 氏名 | NUGROHO ADI SASONGKO |
| 学位の種類 | 博　士（　生物資源工学　） |
| 学位記番号 | 博　甲　第　8370　号 |
| 学位授与年月日 | 平成　29年　9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 | Industrial Microalgae Production System Using Process Engineering Approach -Potential of Wastewater to Bioenergy and Coproducts-<br>(プロセス工学アプローチを用いた工業的微細藻類生産　- 廃水利用による エネルギー・副産物生産ポテンシャル - ) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 主査 | 筑波大学准教授 | 博士（農学） | 野口 良造 |
| 副査 | 筑波大学教授 | 農学博士 | 瀧川 具弘 |
| 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 | 工学博士 | 中嶋 光敏 |
| 副査 | 筑波大学教授 | 博士（農学） | 北村　豊 |

# 論　文　の　要　旨


バイオ燃料の産業化を目指した工業的微細藻類オイル生産では、生産上流工程における藻類の培養において大量の水と肥料が消費されるとともに、生産下流工程での藻類の収穫、濃縮、オイル抽出において大量のエネルギーが消費される。一方で、パーム油搾油工場排水（POME: Palm Oil Mill Effluent）、公共下水道排水、畜舎排水は、藻類の培養において無償かつ豊かな栄養資源の有力な候補である。そこで、これらの排水を用いた工業的微細藻類オイル生産における藻類への肥料使用量削減や、それにともなうエネルギー消費量削減の可能性が議論されている。本論文は、工業的微細藻類オイル生産において、適切な排水利用を導入した藻類の培養システム、生産下流工程で生じる副産物の利用、水熱液化（HTL: Hydrothermal Liquefaction）によるオイル抽出を含むエネルギー集積型プラントの提案、分析、評価を目的としたものである。なお、提案された工業的微細藻類オイル生産の分析や評価は、プロセス設計シミュレーションソフトウェア Superpro Designer 9.0、ライフサイクルアセスメント（LCA: Life Cycle Assessment）ソフトウェア Simapro 8.1 の援用によるプロセス工学アプローチによって行われた。

著者は、第一章において以上の研究背景と研究目的の詳細を述べ、つづく第二章、第三章において、インドネシア Riau 州におけるパーム椰子果実（FFB：Fresh Fruit Bunch）の処理量 60 t/h を有する平均的なパーム搾油工場を対象として、混合微細藻類培養を組み入れたパーム油生産プラントを提案し、そのプラントによるパーム油生産とバイオエネルギー生産の持続可能性と環境影響評価を行った。特に、藻類の培養、収穫、濃縮、オイル抽出で使用される水、原料、エネルギーや、排出される温室効果ガスについて、包括的な環境影響評価を実施した。つづいて、POME の利用によるバイオガス発電の実施、飼料化と堆肥化によって、プラント内部でのエネルギー自給、藻類の培養での家畜飼料、有機肥料の生産を目指した。その結果、10 ha の藻類培養槽から 223 t/年のバイオディーゼル、520 t/年の家畜飼料を生産できることを明らかにした。

著者は第四章において、福島県相馬市の藻類オイル生産拠点を対象に、地域の排水処理場からの排水と、火力発電所から排出される $CO_2$ の利用による微細藻類培養手法を提案し、エネルギー消費量を削減できる効率的な工業的微細藻類オイル生産のプラントを設計した。その結果、土着の微細藻類種の複合生態系を利用した潜在的バイオマス生産量は最大 107 t/ha･年となり、培養において最大 140.58 t/ha･年の $CO_2$ を吸収できる可

能性を明らかにした。

著者は第五章において、西オーストラリアのパースにおける嫌気性消化養豚場排水（ADPE: Anaerobic Digestion Piggery Effluent）を用いた藻類の培養システムを提案した。また、培養システムを含む全体のプラントを、*Chlorella* と *Scenedesmus* の藻類による排水浄化を用いて設計した。また、ADPE は、大規模養豚場に相当する 2000 頭で 355 $m^3$ /日となり、C:N:P 比は、41.00：7.20：1.00 となった。シミュレーション結果から、藻類培養による飼料生産量は 199.90 t/年、$CO_2$ 削減量は 2014.89 t/年であることが示された。さらに、得られた藻類を飼料として養豚に用いた場合の標準温屠体枝肉（HSCW: Hot Standard Carcass Weight）は、1.86 kg-$CO_2$eq/kg となることが LCA によって示された。加えて、*Botryococcus braunii* 培養による工業的微細藻類オイル生産プラントの技術的経済性が、シミュレーションを通じて明らかとなった。

著者は第六章において、藻類の培養における水消費の削減と、収穫や濃縮プロセスに関わるエネルギー消費量の削減のために、藻類芝型培養システム（ATS：Algal Turf System）を用いた生産シミュレーションを行った。シミュレーションでは、*Botryococcus braunii* の培養のための ATS とオープンレースウェイ（ORP: Open Raceway Pond）の設計を通じて、それぞれの技術的経済性を明らかにした。その結果、藻類収穫のための水理学的滞留時間（HRT: Hydraulic Retention Time）を 10 日とした場合、バイオフィルムを用いた ATS の生産性は、最大で 38 g/$m^2$･日を示し、ORP の生産性 7.5 g/m･日の 5 倍以上を示した。さらに、ATS と ORP それぞれで培養された *Botryococcus braunii* の平均脂質含有量は 14.21 % dw 以上となり、189,384 USD/ha の利益潜在力を示した。加えて、ATS は ORP に比べて 1/6 の水消費量、乾燥重量比 43%の藻類バイオマスを収穫できることから、水使用量や収穫関連のコスト削減が可能となった。

以上を総括すると、様々な排水利用による工業的微細藻類オイル生産において、プロセス工学アプローチを用いた総合的なエネルギー生産と利用、副産物生産のポテンシャルの有利性が示されるとともに、本論文で提案されたプロセス設計を踏まえた一連の評価手法の有効性と汎用性が示された。

## 審　査　の　要　旨

本論文は、適切な排水利用を導入した工業的微細藻類オイル生産において、藻類の培養システム、副産物の総合的利用、水熱液化処理によるオイル抽出プロセスを含むエネルギー集積型プラントの提案、分析、評価を、プロセス工学にもとづくプラント設計と LCA を用いた環境影響評価を通じて、システム解析の観点から行ったものである。さらに、排水、廃熱、燃焼ガスなどの利用をともなう工業的微細藻類オイル生産プラントは、エネルギー削減を可能とするとともに、副産物の利用による便益から、本プラントの経済性が大幅に向上することを明らかにした。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。

平成 29 年 7 月 14 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（生物資源工学）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。