

氏名	SUPRIYANTO		
学位の種類	博 士 (生物資源工学)		
学位記番号	博 甲 第 9 2 8 0 号		
学位授与年月日	令和元年 9 月 2 5 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	Data Analytical Simulation System of Polyculture Microalgae for Biofuel Production Using Machine Learning Approach (機械学習アプローチによるバイオ燃料生産に向けた多種混合培養微細藻類のデータ解析シミュレーションシステム)		
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 (農学)	北村 豊
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

微細藻類は、陸生植物と比較して高い光合成効率を有することから、エネルギー資源としての利用が期待されている。微細藻類を用いたバイオ燃料生産では、生産プラントの用地の選定や施設の建設に向けて、微細藻類種の選択とともに、微細藻類の培養、収穫、脱水、バイオ燃料の抽出の各工程を最適化する必要がある。微細藻類の大規模培養を行うための開放型培養槽（以下「ORP」）は、他の培養方法に比べてエネルギー消費量が少ないため、最も一般的な培養技術として位置づけられている。しかしながら、ORP は開放系の培養技術となるため、環境の影響を受けやすく、微細藻類生産に望ましくない生物種からの生物汚染（以下「コンタミネーション」）を防ぐことが容易ではないという欠点を有する。一方で、地域固有の藻類である土着微細藻類群による多種混合培養微細藻類は、コンタミネーションに強く生産性が高い。よって、多種混合培養微細藻類の導入は、ORP の欠点を克服して大規模培養へ貢献するとともに、微細藻類によるバイオ燃料生産の実現化に大きく寄与する。本論文は、将来の大規模な微細藻類によるバイオ燃料生産のために、ORP での多種混合培養微細藻類（以下「微細藻類」）に着目し、機械学習アプローチを用いたデータ解析を行い、微細藻類の培養条件や環境条件にもとづく成長予測を中心としたシミュレーションモデルの構築を目的としたものである。

著者は、第一章と第二章において、本論文の研究背景と研究目的の詳細を述べ、つづく第三章では、微細藻類の栽培、収穫、およびバイオ燃料抽出からなる微細藻類バイオ燃料生産におけるデータベース管理システムを提案し、MySQL を使用したデータベースの設計および実装を行った。また、Web アプリケーションによる表やグラフの管理ためのユーザーインターフェイスの開発を行った。

著者は第四章において、微細藻類とバクテリアの一般的な組成を考慮し、ORP における微細藻類の成長モデリングを行った。8つの入力パラメータ、1つの中間層、1つの出力層から構成され、誤差逆伝播法を用いた人工ニューラルネットワーク（以下「ANN」）を用いて、ORP での半連続培養における微細藻類の成長予測を行った。初期微細藻類濃度、収穫期間、水理学的滞留時間（以下「HRT」）、酢酸ナトリウムの添加の有無、日射量、水温、pH、および硝酸イオン濃度を入力変数とし、培養期間中に観察された培養液中の微細藻類乾燥重量比を出力変数とした。その結果、設計された3層 ANN が、すべての入力の組み合わせに対して高い予測

精度 ($R^2=0.93$) を達成し、水温と日射量が微細藻類の生産性を予測するための有効なパラメータであることが明らかとなった。また、ORP での微細藻類生産において、水温と日射量のパラメータは制御が困難な環境条件であるのに対して、HRT、pH、硝酸イオン濃度などのパラメータは、微細藻類生産の制御を可能とする変数として位置づけられることを確認した。

著者は第五章において、第四章の結論である微細藻類の生産性を予測するための有効なパラメータが日射量と水温であることから、直接 ORP から測定しなければならない水温を気象データである気温で代替し、日射量と気温による簡易的な微細藻類の成長予測を機械学習によって行った。使用した機械学習アルゴリズムは、サポートベクターマシン (以下「SVM」)、重回帰分析 (以下「MLR」)、および ANN を用いた。機械学習法のためのモデルは、Statistical and Machine Learning Toolbox、MATLAB 2019a を使用して開発した。その結果、ANN の 4 つの中間層 (2-2-2-2-1)、3 つの中間層 (2-2-2-1)、および 2 つの中間層 (2-2-1) のモデルを用いた微細藻類の生産性予測の R^2 は、それぞれ 0.92、0.92、0.91 となった。SVM-gaussian、MLR、SVM-polynomial、SVM-Linear の R^2 は、0.90、0.81、0.78、0.77 となり、気象データから間接的に ORP での微細藻類の生産性を予測できる可能性を示した。

著者は第六章において、ビジネス化を目指した微細藻類の培養、収穫、脱水、およびバイオ燃料の抽出とその後の燃料精製のプロセスに対して、信頼性の高い分析を可能とする意思決定支援システムの開発を行った。微細藻類によるバイオ燃料生産の統合プロセスモデルシミュレータを提案するとともに、意思決定をサポートするためのツールとフレームワークの提供を行った。

以上を総括すると、本論文を通じて、データベース管理システムを用いたバイオ燃料生産のための微細藻類のデータ解析シミュレーションシステムの構築と検証を行うとともに、微細藻類の生産性予測のために機械学習法のアプローチを行い、微細藻類の収穫以降の下流プロセスを含む統合化された微細藻類によるバイオ燃料生産のプロセスモデルの利用可能性が示された。

審 査 の 要 旨

本論文は、単一培養微細藻類と比較して安定した生態系と高い生産性を有する多種混合培養微細藻類を対象として、バイオ燃料生産のための多種混合培養微細藻類の生産性の予測のために、機械学習アプローチを用いて予測精度を向上させるとともに、システム化されたデータ管理、データ分析、およびバイオ燃料生産プロセスのシミュレーションシステムへの統合を行ったものである。さらに、機械学習アプローチとして用いられた SVM、MLR、ANN は、多種混合培養微細藻類の成長予測モデルの精度向上に寄与し、機械学習の応用のための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。

令和元年 7 月 16 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。