

氏名	Lenin Chandrakumar KANDASAMY		
学位の種類	博士（農学）		
学位記番号	博甲第10099号		
学位授与年月日	令和3年9月24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	Carbon Dioxide Influenced Cultivation and Siphon-Driven Concentration for Effective Production of Microalgal Polyculture (多種混合培養微細藻類の効率的生産に向けた二酸化炭素濃度制御培養とサイフォン型濃縮)		
主査	筑波大学准教授	博士（農学）	Marcos Antonio das NEVES
副査	筑波大学准教授	博士（農学）	野口 良造
副査	筑波大学教授	博士（工学）	市川 創作
副査	筑波大学特命教授（名誉教授）	工学博士	中嶋 光敏

論文の要旨

人類にとって大きな脅威の一つが気候変動であり、大気中の温室効果ガス（GHG）のレベルの変動によって引き起こされ、生息地の喪失や種の絶滅、人類の政治・社会・経済的活動などに大きな影響を与える。水蒸気、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、オゾンなどのGHGは、自然界と人間の活動によって生成され、現在の大気中の二酸化炭素レベル（約400 ppm）を産業革命以前のレベル（約300 ppm）まで低減しつつ、増大するエネルギー需要に対応することが、最も緊急な課題の一つとなっている。持続可能なエネルギー生産と二酸化炭素隔離のための革新的な学際的ソリューションが今必要とされている。微細藻類は、バイオ燃料や特殊化学品などの付加価値製品の原料として持続的に生産できる可能性を秘めている。藻類の光合成は、全世界における炭素の一次生産量である1,111~1,170億トンの約50%を占めているといわれている。微細藻類からのバイオ燃料生産は1950年代から検討されてきたが、藻類生産システムの設計とその燃料化の経済的実現が課題である。

はじめに著者は、藻類バイオ燃料生産においては、バイオマス生産性と脂質生産性の2つが重要な鍵となると考え、これまで研究が十分に行われていない藻類バイオマスおよび脂質の生産性と二酸化炭素濃度の関係に着目した。まず、エネルギー効率の高いバイオ燃料生産に寄与する微細藻類による二酸化炭素固定化について、淡水域に自生する多種混合培養微細藻類を利用して検討した。多種混合培養における種の多様性は、他の生物による侵略や捕食に対する抵抗力を高め、培養の安定性を向上させ、生産量を向上できると考えたためである。また、微細藻類バイオマスの利活用では、通常数100 mg/L程度と低濃度の藻類培養液の効率的な脱水技術が不可欠である。これまで、実用レベルで、経済性を有する脱水技術はまだみられない。そこで、著者は、遠心分離、濾過、凝集、膜分離などの既存の技術を調査した結果、水頭差圧を駆動力としたサイフォン式の浸漬型膜脱水手法が省エネ性に優れていると考えたが、微細藻類培養液の脱水操作における基礎特性が解明されていないため、本研究を行うに至った。そして、次の3項目を目的として設定した。(1) 微細藻類の成長に影響を与える様々な要因を把握すること、(2) 微細藻類生産性と脂質生産性に対する培地中の二酸化炭素濃度の影響を解明すること、(3) 屋外レースウェイポンドで培養した多種混合培養微細藻類のサイフォン式浸漬型膜脱水の基礎特性を明らかにすること。なお、二酸化炭素は、水中で解離するため、本論文では炭酸水素イオンと炭酸イオンと溶存二酸化炭素を加えた全CO₂として取り扱われている。

まず、予備的なスクリーニングと応答表面法を用いた最適化により、光合成光量子束密度 (PPFD) $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{h})$ 、培養温度 28°C 、光周期 $24:0$ (明時間:暗時間) がバイオマス蓄積に最も適していることを著者は明らかにした。これらの最適条件の下、様々な全 CO_2 レベル ($200\sim 2,500 \text{ mg/L}$) でのバイオマス蓄積率は、 $1,000 \text{ mg/L}$ 以上の全 CO_2 レベルが微細藻類の多種混合培養に有害であることを明らかにした。次に、 2 L の光バイオリアクターを用いて、バイオマスの蓄積と生化学的組成に及ぼす全 CO_2 の影響を回分培養により調べた。その結果、最大の CO_2 生物固定化率は、全 CO_2 400 mg/L であること、 CO_2 濃度が成長と生化学組成に有意な影響を与えること、 400 mg/L の全 CO_2 では、最大バイオマス生産性は $22.1\pm 0.7 \text{ mg}/(\text{L day})$ 、 CO_2 固定化速度は $28.9\pm 3.0 \text{ mg}/(\text{L day})$ であることを見出した。藻類のタンパク質含有率は全 CO_2 400 mg/L で最大 30% となり、脂質含有率は全 CO_2 が $600\sim 800 \text{ mg/L}$ において 50% 程度と最大となった。この高い脂質含有率はこれまで窒素制限下で実現されていたが、新たに、著者が初めて全 CO_2 濃度の制御で実現できることを示したものである。以上、著者は (i) 微細藻類の多種混合培養では、 $1,000 \text{ mg/L}$ までの全 CO_2 濃度に耐性があること、(ii) 全 CO_2 濃度を上げていくと 400 mg/L 以上では、生産性は減少したが、全 CO_2 $600\sim 800 \text{ mg/L}$ において脂質が顕著に蓄積されることを実験的に明らかにした。本論文の結果から、多種混合培養微細藻類は、比較的高濃度の全 CO_2 条件下で、安定した生育が可能であり、 CO_2 固定化に関わる大規模な藻類培養に応用できる可能性を有していることを示した。

サイフォン式浸漬型膜脱水システムにおける予備濃縮実験において著者は、浸漬型フラットパネル膜を用い、低濃度の多種混合培養微細藻類に対して、ベンチ規模での実現性を検討した。吸引を駆動する圧力は、水頭の差によって供給される。微細藻類プロセスの脱水を細孔径約 $1 \mu\text{m}$ のナイロン製精密ろ過膜を培養液中に浸漬して、サイフォン式で透過液を回収するという方式を採用した。検討の結果から、この方法は、従来の遠心分離や大容量ポンプを必要とする膜分離法と比べて、格段に省エネルギーを実現できることを示した。ろ過処理の時間経過に伴い膜透過流束は低下したが、 30 分ごとにヘッド差での水による逆圧洗浄を行うことで、 5 サイクルにわたって連続反復濃縮処理が可能であった。さらに透過流束が低下した場合も、膜面のシャワー洗浄により容易に透過流束を回復でき、平均で $100\sim 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$ の膜透過流束の維持が可能であり、藻類細胞へのダメージを最小限に抑え、微細藻類の濃度を最大で 10 倍にまで高めることができた。本手法のみでは、まだ高濃度濃縮は実現できないが、著者は、微細藻類の収穫・脱水プロセスにおけるはじめの一次濃縮システムとしてサイフォン式浸漬型膜システムがきわめて有望であることを明らかにした。

以上、著者は、微細藻類の多種混合培養における温度、光周期、光合成光量子束密度、全 CO_2 濃度の影響について実験的検討を行い、その特性を明らかにした。また、藻類成分の分析を行うことで、全 CO_2 濃度の制御により、藻類生産性の増大、また藻類の脂質含有率を 50% 程度と高くすることが可能であることを明らかにした。さらに、収穫・脱水プロセスの一次濃縮技術としてのサイフォン式浸漬型膜システムの基礎特性を解析し、その応用の可能性を見出した。

審 査 の 要 旨

本論文では、自然界に存在する多種混合培養系の微細藻類を用いて、藻類生産性や組成への全 CO_2 濃度の影響が系統的に検討され、微細藻類が $1,000 \text{ mg/L}$ までの全 CO_2 濃度に耐性があること、全 CO_2 濃度 400 mg/L が藻類バイオマスの最大生産性を与えること、また、全 CO_2 濃度 $600\sim 800 \text{ mg/L}$ で藻類の脂質含量が 50% 程度と高い条件を見出した。これらは従来報告されていないオリジナルな成果と判定された。また、藻類培養液が低濃度であることから、効率的な濃縮脱水手法として、ナイロン製精密ろ過膜を用いて、省エネルギーに優れたサイフォン式浸漬型膜脱水システムを提案し、膜透過流束が $100\sim 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$ であり、従来の膜法に比べて高い膜透過流束が実現できたこと、また 5 サイクルの連続実験における藻類バイオマスの高い回収率、ろ過時間や逆洗時間などの適切な運転条件などの基礎特性についてマスバランスを示しつつ明らかにした。藻類培養液の一次濃縮手法としての高い応用性を示したことは、本研究分野において高い工学的価値がある判断される。

令和3年7月27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。