

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

研究課題別中間評価報告書

1. 研究課題名

微細藻類の大量培養技術の確立による持続可能な熱帯水産資源生産システムの構築

(2016年03月～2021年03月)

2. 研究代表者

2.1 日本側研究代表者：戸田 龍樹（創価大学 理工学部共生創造理工学科 教授）

2.2 相手側研究代表者：Fatimah MD. Yusoff（プトラ大学 バイオサイエンス研究所 教授）

3. 研究概要

微細藻類は、食品、飼料、燃料等の原料の他、医薬品、化粧品、健康食品の原料となる高付加価値物質を含む生物資源として注目されている。一方、実際に有用微細藻類の大量培養に成功している藻類種は数種に留まる上、大量培養に用いるリアクターは欧米で開発されたものが主流であることから、熱帯地域の微細藻類種や高温・高照度の気象条件に適した新規リアクターの開発が望まれている。また、マレーシアをはじめとするアジア諸国で盛んな水産養殖業では、余剰餌料や排泄物等に由来する有機汚泥の蓄積により養殖場及び周辺環境の劣化を引き起こしているが、従来技術による堆肥等への再生では処理費用の回収が難しいのが現状である。本プロジェクトでは、生物多様性に富むマレーシアで高付加価値物質を生産する有用微細藻類及び天然の成長促進物質を探索し、養殖池の水面で有用藻類を大量培養する技術を確立するとともに、養殖池汚泥を藻類培養に再利用する技術を開発することにより、藻類の生産物を利用した様々な産業への展開と環境保全に貢献することを目標とする。

具体的には、下記4つの研究題目に取り組み、(1)マレーシア由来の有用微細藻類の探索・選抜および有用藻類の高付加価値物質生産速度を向上させる環境制御技術の確立、(2)現地の土壌抽出物由来の天然成長促進物質の探索及び特性評価、(3)養殖池の水面に設置できる藻類培養の大型単位ユニット（バグリアクター）並びに(4)それらを連結した屋外大量培養技術の確立とモデル実証、養殖池汚泥からの栄養塩（アンモニア態窒素）回収技術及び汚泥残渣のリサイクル処理技術の確立等を行う。最終的にこれら要素技術を統合化することにより、有用藻類を用いた新産業の創出並びに持続可能な熱帯水産資源生産システムの構築を目指す。

研究題目 1 有用微細藻類の探索

研究題目 2 天然成長促進物質の探索

研究題目 3 新規藻類リアクターの開発

研究題目 4 栄養塩回収・循環システムの構築

4. 評価結果

総合評価：A-

(所期の計画とほぼ同等の取り組みが行われ、一定の成果が期待できる。)

研究題目1では、マレーシアの半島部において合計209株の微細藻類の単離に成功した。さらに高付加価値物質（不飽和脂肪酸を含む脂質や抗酸化物質のカロテノイド）の蓄積量を指標とした一次スクリーニングを実施し、既に9株の有用候補株の絞り込みに至っていることから、当研究題目は順調に進捗していると評価される。研究題目2では、マレー半島で採取した森林土壌から藻類の成長促進物質を抽出する条件検討及び藻類培養への添加試験を進めているが、これまでに実験に供した土壌及び培養の検体数が少なく、標的物質の絞り込みにも至っていないため、研究進捗が遅れが認められる。研究題目3では、開発中の省エネルギー型間欠攪拌式リアクター（CRADLE）において、溶存酸素が過剰となり藻類の増殖を阻害することが判明したので、CRADLEの技術を活かしながら、吸引加圧が可能な攪拌タンクや酸素透過性素材を用いた間欠攪拌式バグリアクターを新たに開発し、モデル藻類を用いた培養実験においてCRADLEと比較して高い生産速度を得ることに成功した。このようにベンチスケールでのリアクターの改良が進められたことは評価されるが、今後、屋外におけるモデル実証に早期に取り組むことが求められる。研究題目4では、小スケール実験により養殖池汚泥の種類や好気発酵の条件検討を進め、アンモニア回収に適した汚泥及び至適発酵温度の特定に至っている。また、ベンチスケール好気発酵装置を開発して現地で試運転を行っているが、今後、実験に供することができる新鮮な有機汚泥を持続的に入手するルートを確保して条件検討を進め、早期にパイロットスケールに進展することが求められる。

このように、各研究題目において研究は概ね順調に進捗していると言えるが、今後はプロジェクト目標の達成に向けてより戦略的な要素技術の確立と統合化が求められる。

4-1. 国際共同研究の進捗状況について

研究題目1では、日本側研究機関（東京大学）はマレーシア半島部の養殖池、農業用水路、船着場など人為的影響の大きい地点（16カ所）から、マレーシア側（マレーシア・トレンガヌ大学、UMT）はマレー半島の沿岸部、マングローブ林、サンゴ礁、河川、湖沼など人為的影響の少ない地点（10カ所）から微細藻類を採集し、一次スクリーニングにおいて合計209株の単離株から9株の有用候補株の絞り込みに成功した。さらに、研究題目3で作成したバブルカラムリアクターを用いた二次スクリーニングにも着手していることから、熱帯地域の微細藻類に係る貴重な基礎データの一蓄積とともに、今後熱帯地域固有の有用株が同定されることが大いに期待される。

研究題目2では、国立公園や森林保護区など人為的影響が少ない地点（8カ所）とエビ養殖池（1カ所）の合計9地点から土壌を採取し、成長促進物質を含む画分の抽出法の検討を進めている

が、先述の通り進捗の遅れが認められる。一方、日本側研究機関（国立環境研究所）は土壌抽出液の全自動分画装置を開発し、セラシエール大学（UNISEL）に導入して実際に使用しており、分析作業の加速化が図られている。よって、今後、藻類成長を促進する土壌抽出画分を絞り込み、天然成長促進物質の分子構造の解明に至れば、新規性の高い科学的知見の獲得につながる事が期待される。

研究題目3では、既存のチューブ型リアクター、フラットプレートリアクター、垂直型バッグリアクター、カラムリアクター、回転流動式リアクター等と比較して、より省エネルギー性及び光利用効率に優れ、かつ連続培養を可能とする高機能型リアクターの開発を目指している。当初は熱帯の強光・高温の環境条件に耐えるバッグリアクターを養殖池の全面に浮かべてリアクター内培養液の単純な上下運動による攪拌により有用微細藻類を大量増殖する計画であったが、CRADLEを用いた室内実験の過程で二酸化炭素と酸素のガス交換効率、特にリアクター内の残留酸素による藻類の成長阻害が大きな問題であることが分かった。その解決のため、リアクターの両端に吸引・加圧できるタンクを接続し、バッグリアクター内の培養液を定期的に左右交互に移動させることによりガス交換の促進を図る機構を取り入れるなど、装置の大幅な改良を行なった。現在、モデル藻類を用いた培養実験においてCRADLEと比較して溶存酸素量の低減及び生産速度の向上に成功したことは評価される。今後、屋外での実規模レベルでのデータ取得、実証試験への進展を期待する。

研究題目4では、日本で実施した小規模実験により養殖池汚泥及び発酵温度等の至適条件を見出したが、現地で入手した有機汚泥の品質の低さから、ベンチスケール好気発酵装置を用いた条件検討が停滞した。現在、新たに複数のエビ養殖業者から新鮮な有機汚泥を入手するための協力関係を構築したことから、今後、ベンチスケールリアクターを用いた実証試験の進捗に期待したい。

このように、一部の研究題目において遅延が見られるものの、技術上の課題を克服するための新たな展開が図られており、今後研究が一定程度加速化されることが期待される。熱帯地域の微細藻類及び高温・強光環境条件下に適した微細藻類の大量培養系を確立した先行例はないことから、本プロジェクトが創出する成果の科学的・技術的インパクトは高いと考えられる。

4-2. 国際共同研究の実施体制について

日本側、マレーシア側ともにそれぞれの研究題目における実施体制は十分に構築されており、両国研究者の密な連携及び協働作業により研究が推進されている。特にマレーシア・プトラ大学（UPM）、UNISELにそれぞれ1名ずつ日本人研究者が教員として所属してプロジェクトに参加し、精力的に研究を実施するとともに、両国研究者の連携強化に貢献している点は評価される。一方、前述の通り、研究題目1では研究計画に準じた進捗が見られるが、他の研究題目は計画からやや遅れているのが実情である。これは、プロジェクト全体としての目標の位置付け、及びその目標

達成に向けた各研究題目の研究方針、並びに、各研究・技術要素の確立における責任の所在が不明確であり、プロジェクト全体の統括が曖昧になっていることに起因するものと推察される。一方、今回の中間評価では、この点を関係者全員で議論して共通認識を醸成する場を設けることができ、また、2019年度上半期に研究代表者がマレーシアに半年ほど滞在して陣頭指揮を執る計画も示された。よって、プロジェクト後半では、研究代表者の強力なリーダーシップの下、各研究題目がその知見及び技術要素の重要性に準じて効率的に推進され、各成果が有機的に統合されることによりプロジェクト目標が達成されることを期待する。

マレーシア側に供与された研究機材に関しては、日本側研究者による講習会や研修を通して極めて有効に使用されていることに加え、マニュアルや管理表を作成、運用して適切に維持管理されている。特に UMT では大学院生の研究活動に積極的に活用されている点は評価される。一方、UNISEL では使用頻度がやや低いと思われる機材が認められたことから、今後のさらなる活用を期待する。

4-3. 科学技術の発展と今後の研究について

各研究題目の成果統合化に向けた研究開発の加速化が必要であるが、研究代表者のリーダーシップの下、今後の進め方を明確化することが最も重要であると考えられる。今後求められる大きな方向性として、UPM 構内に設置予定のエビ養殖施設を模倣したプールでモデル実証を行い、養殖業者を対象としたデモンストレーション及び技術普及に向けた研修等を実施することが求められる。一方、実証モデルのイメージを明確にし、プロジェクトに参画するすべての関係者で共通認識を図った上で実証試験を進めなければ、その達成は困難であると思われる。また、実証モデルの設計と建設にあたっては、養殖業者の意見を徴し、より実用化に近い構成にすることが必要である。これまで研究開発に取り組んできたすべての要素技術を網羅的に総合化できれば最良であるが、プロジェクト後半では、プロジェクト目標の達成に必須な研究開発要素を見極め、必要な人員及び研究資金の選択と集中を行なうことが重要であると考えられる。

本プロジェクトでは、養殖場で従来の水産資源に加えて微細藻類による高付加価値物質の生産を目指している。さらに、養殖池汚泥から回収したアンモニア態窒素等の栄養塩類を藻類培養に有効利用し、抽出残渣はリサイクル処理により農業資材等に利用することを想定している。よって、熱帯地域に適した微細藻類大量培養系及び持続可能な水産資源生産システムのモデル実証ができれば、熱帯地域の水産養殖業に与える技術上および環境保全上のインパクトは大きいと考えられる。さらに、EPA (Eicosapentaenoic acid) や DHA (Docosahexaenoic acid) 等の長鎖不飽和脂肪酸、アスタキサンチンやカロテノイド等の抗酸化物質をはじめとする高付加価値物質の生産性に優れた熱帯産微細藻類の新株を同定し、培養方法の確立に至れば、上記のモデル実証と合わせて、関連産業に与えるインパクトは極めて高いと期待される。

また、本プロジェクトでは、前述の通り 2 名の日本人の若手研究者がそれぞれ UPM 及び UNISEL で大学教員として教育活動及び研究に従事し、さらには、日本側で参画している博士大学院生や

若手研究者の3名がプロジェクト期間中に大学等で助教の職務に就き、引き続きプロジェクトの研究活動に従事している。よって、海外で活躍しうる日本人の若手研究人材の育成は順調に進捗していると評価される。

4-4. 持続的研究活動等への貢献の見込み

日本側研究者が主体となり、マレーシアの大学に導入した研究機材の技術研修を開催するとともに、マレーシア側研究者を日本に招聘して短期研修、機器・分析講習会を行うなど、積極的に技術移転を実施している。また、大学の奨学生制度や文部科学省の国費外国人留学生制度(SATREPS 枠)を利用してマレーシアから博士課程学生2名を受け入れ、教育指導及び協働作業を行っている。2018年8月には、UMTで開催された国際会議(International Postgraduate Conference on Biotechnology (IPCB) 2018)の中で、SATREPSの両国研究者が協力してSATREPSシンポジウムを企画・開催し、本プロジェクトの研究開発及び人材育成等に係る取組についてマレーシア国内外の研究者や学生等に広く紹介した。さらに、日本の企業と連携した二国間での学術交流、研究手法の研修、企業における高付加価値物質の商品化プロセスの見学等を開催し、研究組織の垣根を超えた幅広い人的交流を実施している。このような実績から、マレーシア側研究者の自立や自主性の確立を促しつつ二国間での人的交流の構築が十分に図られている。

また、マレーシア側は本プロジェクトのSATREPS予算額の3分の1に相当するマッチングファンドをプロジェクト当初より5年間獲得しており、プロジェクト活動を補完する形で幅広く主体的に研究を遂行している。さらに、マレーシア側の若手研究者が積極的に論文執筆に取り組み気運も醸成されつつあり、持続的に発展する基盤は構築されつつある。

特に、東南アジアでは水産養殖業による環境負荷は大きな課題であるとともに、熱帯産微細藻類の大量生産・利用の経験がないことから、本プロジェクトが目指す課題解決と付加価値追加を伴うバリューチェーンの創出は同地域において価値の高いテーマである。よって、本プロジェクトの成果を基とした研究・利用活動の持続的発展の見込みは高いと考えられる。

4-5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

1. 本プロジェクトは学際的な研究開発に取り組んでいる点で優れている反面、プロジェクト前半では、専門性の異なる多数の研究者がそれぞれの専門分野で研究題目を追求している印象を強く受ける。よって、プロジェクト後半では、終了時における社会実装または社会実装に直結する成果目標をプロジェクト内で明確化し、4つの研究題目の統合化に向けて真剣に取り組んでいただきたい。
2. 微細藻類の屋外大量培養技術の確立とモデル実証に関して以下のことを要望する。また、その実施においてはプロジェクト内で共通認識を十分に図っていただきたい。

- 2.1 本プロジェクトの根幹となる要素技術は、有用微細藻類の選抜、養殖池に浮遊させたバグリアクターによる大量培養、養殖池汚泥からの栄養塩類の回収及びその抽出残渣のリサイクル処理である。よって、プロジェクト期間内にこれら要素技術を統合化したモデル実証を実施すること。
 - 2.2 実験室や学内といった閉鎖系での議論に留まらず、マレーシアの養殖漁業における技術水準、経営体系等の現状を調査するとともに、養殖業者の意見を徴して彼らのニーズを把握した上で、例えばコストパフォーマンスの点などにおいて業者が受容及び普及しやすい技術構成とすること。
 - 2.3 要素技術の確立にあたっては、有用微細藻類の同定と高付加価値物質、特に不飽和脂肪酸及び抗酸化物質の特定、及び最適生産条件の解明、実際の養殖条件下における実用レベルでの大型単位ユニット（バグリアクター）培養システムの強光・高温への耐性の実証、養殖池汚泥の品質と回収される栄養塩類の定量・相関解析、汚泥抽出残渣のリサイクル処理技術等、個々の技術開発に注力すること。
 - 2.4 天然成長促進物質の探索も重要な課題であるので、標的物質を早期に絞り込むなどして、上記のモデル実証に組み込むことが可能となる成果が得られることを期待する。今後、一定の成果が得られる目途が立たない場合は、適切な時期を見計らい当該項目の中止または縮小を検討すること。
3. プロジェクト全般において知的財産権の帰属、取扱いに十分に留意して研究開発を進め、特に商品化に際しては、両国研究機関及び研究者が十分に協議の上、合意を得て慎重に実施していただきたい。
 4. マレー半島から単離された熱帯産の微細藻類 209 株は科学的及び産業的に貴重な資源であるため、今後、大切に継代培養等で保管するとともに、両国の遺伝資源の取扱いに係る法規制を遵守した上で、両国で利活用していただきたい。

以上

成果目標シート

研究課題名	微細藻類の大量培養技術の確立による持続可能な熱帯水産資源生産システムの構築
研究代表者名 (所属機関)	戸田龍樹(創価大学理工学部)
研究期間	平成27年6月～平成33年3月
相手国名／主要相手国研究機関	マレーシア/プトラ大学(UPM)、トレンガヌ大学(UMT)、セランゴール大学(UNISEL)

付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 藻類生産に関わる新産業創出 CDM事業への展開 熱帯養殖産業におけるデフォルト技術の確立
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> 革新的藻類生産技術 成長促進物質による培養困難有用種の培養技術 生物多様性の保全 持続可能な水産技術
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	<ul style="list-style-type: none"> 熱帯の多様な有用藻類の単離と生産技術 藻類生産技術 藻類生産のための廃棄物からの栄養塩回収技術
世界で活躍できる日本人人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> 国際的に活躍可能な日本若手研究者の育成、若手研究者の国際ネットワークの構築
技術及び人的ネットワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> アフリカ諸国、インドネシアの既存ネットワークを利用した、他の熱帯諸国との新たなネットワークの構築
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	<ul style="list-style-type: none"> 査読論文多数、啓蒙書発刊 熱帯種の培養液作成方法 熱帯藻類生産マニュアル 有用藻類の単離・スクリーニングマニュアル「Protocol for Microalgae Isolation and Screening」 栄養塩自動分析マニュアル「Methods for Auto Analyzer of Macro Nutrients」

上位目標

多様な有用藻類の生産技術が確立され、世界の熱帯途上国の養殖産業において活用・持続可能な生産を可能にする

- 藻類生産技術のマレーシア国内での社会実装、コストダウン、他の熱帯途上国への普及
- 熱帯養殖産業へのデフォルト技術としての組み込み、技術の熟成
- 多様な藻類バイオマスの機能解明、生産技術の確立、市場の拡大

プロジェクト目標

熱帯の多様な有用藻類を探索し、バイオマス収率が現状の10倍(1トン/GJ)となる革新的な藻類大量培養技術を確立する。

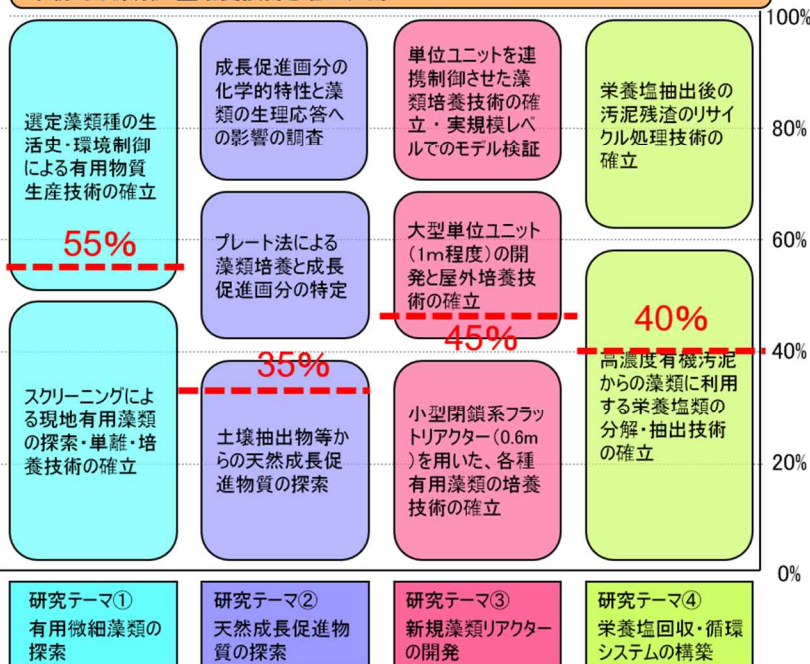


図1 成果目標シートと達成状況(2018年12月時点)