

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

研究課題別終了時評価報告書

1. 研究課題名

インドネシアにおける統合バイオリファイナリーシステムの開発 (2013年4月～2018年4月)

2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：荻野 千秋 (神戸大学 大学院工学研究科 教授)

2. 2. 相手国側研究代表者：Prasetya Bambang

(インドネシア科学院 バイオテクノロジー研究センター 長官)

3. 研究概要

本研究では、インドネシアのバイオマス資源であるパームオイル搾油残渣 (空果房) およびサトウキビ搾汁残渣 (バガス) を原料として、神戸大学が有するバイオリファイナリー技術によって、統合バイオリファイナリー (再生可能資源であるバイオマスを原料にバイオ燃料や合成樹脂などを製造する技術) の確立を目指す。本研究によって、インドネシアでこの技術が確立されれば、現状では廃棄されているバイオマス資源を原料としたバイオ化学産業を興し、ゼロエミッションを通じた石油資源に依存しない社会の実現に貢献することが期待され、社会的・経済的インパクトを生み出す可能性がある。

プロジェクトは下記の5つの研究題目で構成されている。

- (1) 効率的なバイオマス前処理条件の確立
- (2) バイオマス分解に適した酵素の評価
- (3) バイオ燃料 (エタノール) とバイオ化学品 (乳酸) を生産する微生物開発と発酵
- (4) バイオマスからバイオベースポリマーを開発
- (5) フィージビリティスタディと統合バイオリファイナリープロセスの構築

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。)

プロジェクトは5研究題目で構成されており、サトウキビバガスを原料とした場合の放線菌によるセルロースの糖化と酵母によるエタノール発酵または乳酸発酵に係る微生物の遺伝子工学手法による能力の改良や反応条件の最適化等、バイオリファイナリーの中核的技術についての研究は世界最先端と言える成果を挙げた。しかし、インドネシアにおけるバイオリファイナリー資源としての賦存量から最終的にオイルパーム空果房をターゲットとして選んだにもかかわらず、空

果房を供試した実験は行われていない。バイオマスの材料が異なれば微生物の反応条件も異なることが予想され、この点を考慮した研究が欠落していた。また、サトウキビバガスとオイルパーム空果房の前処理、ポリ乳酸の化学合成による製品化は、主にインドネシア側によって研究され、インドネシアで特許申請に至った成果も得られているが、統合バイオリファイナリーとしての一貫したシステム化は成されなかった。このように、個別技術については一定の顕著な成果が得られたものの、オイルパーム空果房を材料とした統合バイオリファイナリー確立に向けた、原料の前処理、微生物発酵および化学合成までの各個別技術を総合的に連結したシステムにするための十分な活動がなされたとは言えず、プロジェクト目標全体の達成には至らなかった。

4-1. 地球規模課題解決への貢献

【課題の重要性とプロジェクトの成果が課題解決に与える科学的・技術的インパクト】

石油、石炭、天然ガスなどの燃焼による温暖化効果ガスに起因する地球温暖化と、それに伴う気候変動はまさに地球規模課題であり、バイオリファイナリーはその解決に貢献できる重要な技術で、green society に向けて、産業化が待たれている。本プロジェクトは、バイオマス生産量の多いインドネシアにおいて、統合バイオリファイナリーシステムの開発を目標として、光合成によって生産されるサトウキビやオイルパームの産業廃棄物からバイオエタノールや乳酸の生産とその商品化までの、一連の技術開発およびその統合化をねらったものである。

このうち、マレイン酸を用いる前処理、セルラーゼ活性を有する放線菌のスクリーニング、エタノール発酵や乳酸発酵活性を有する酵母のスクリーニングと遺伝子工学手法を駆使した活性の高いアーミング酵母（新しい特性を付与した酵母）の開発等、システムの中核的技術においては、サトウキビ産業廃棄物のバガスを供試して、科学的・技術的インパクトの大きい成果を挙げた。しかし、本プロジェクトでは、インドネシアでの賦存量が多いことから、オイルパーム空果房をバイオリファイナリー資源として最終的に選択したにもかかわらず、それを用いた実験を行っておらず、インパクトの評価ができなかった。また、一方で、当初のねらいであった、中核的技術を中心として材料の前処理や微生物による発酵生産物の化学合成までをカバーする統合バイオリファイナリーシステムの開発には至っていない。そのため、プロジェクト全体としての課題解決に与える科学的・技術的インパクトは限定されると言わざるを得ない。

【国際社会における認知、活用の見通し】

サトウキビバガスを粉砕し、主要構成成分であるリグノセルロースを、マレイン酸を用いて糖化する前処理技術は、処理後の中和処理を必要とせず、これまでの希硫酸処理を超える前処理技術と言える。また、インドネシア由来の放線菌から選抜された高いセルラーゼ活性を示す菌株の特定、前処理液に含有されるリグニン・ヘミセルロース・セルロース等を効率良く分解することが可能な酵素カクテルの新発見、放線菌による大量生産やエタノール発酵活性を基準としてインドネシア由来酵母から選抜され遺伝子工学手法で高活性化が図られたアーミング酵母などの研究成果は、今後論文化を急ぎ、国際会議等での発表や広報活動などにより、国際社会における認知

を得て活用されることが期待される。

【他国、他地域への波及】

セルロースの糖化やグルコース等の単糖類からバイオエタノールと乳酸の生産に係る研究成果は、マレーシアなど条件に近い近隣の地域や国への波及が十分期待される。一方、産業廃棄物であるオイルパーム空果房から、前処理、糖化、アルコール発酵または乳酸発酵さらにはポリ乳酸からバイオプラスチック製品等の商品化を図るまでの統合バイオリファイナリーシステムは、本プロジェクトでは未完成であるため、一貫システムとしての波及に対する予測はできない。しかし、完成すれば、オイルパームやキャッサバなどを生産しているアジアとアフリカの国々から高い関心呼び、波及が見込まれる。

【国内外の類似研究と比較したレベルや重要度】

本研究分野は多くの研究グループが競争している重要な分野であり、特に、マレイン酸前処理技術は新しい有用な技術となりうる。また、インドネシア科学院生物学研究センター（LIPI-RC Biology）の微生物センター（InaCC）が収集・保存している菌株を巧みに利用した、前処理したバイオマスの糖化に係る放線菌とその作用機序の解明、エタノール発酵活性を高めた酵母の作出は、他に類を見ない研究レベルであり、重要度は高い。一方、それらを活用した実用技術の開発はこれからである。

4-2. 相手国ニーズの充足

【課題の重要性とプロジェクトの成果が相手国ニーズの充足に与えるインパクト】

インドネシアに豊富に存在する非食用資源であり、現状では廃棄されているオイルパーム空果房からバイオエタノールや乳酸を発酵生産する一連の統合技術の開発は、当該国にとって極めて高いニーズであるものの、プロジェクトの成果はその充足には十分応えていない。しかし、今後技術の統合化の過程において必要となる前処理と微生物発酵の基本技術は、サトウキビバガスで開発されたので、これをオイルパーム空果房に適用することが可能であれば、相手国ニーズの充足に対して一定程度の進展をもたらしたとすることができる。

【課題解決、社会実装の見通し】

プロジェクト期間を通じて、インドネシアのサトウキビ製糖企業やオイルパーム企業と日本の関連企業との交流や情報交換を仲介・継続し、プロジェクト終了時には日本企業とインドネシアのプランテーション企業各1社、インドネシア2研究機関と神戸大学間の5者で統合バイオリファイナリー技術の開発と実施に関する協力協定を結んだことから、社会実装に向けた協力体制ができたことは特記に値する。一方、個別技術をつないで組み立てる統合バイオリファイナリー技術のモデル実証には至っておらず、しかもプロジェクトのターゲットバイオマス資源として最終的に選定したオイルパーム空果房を使った基礎的研究がなされていないので、未利用バイオマス

が廃棄される現状に対する課題解決や社会実装の見通しがたつたとは言えない。

【継続的発展の見通し（人材育成、組織、機材の整備等）】

プロジェクト期間中3名のインドネシア人若手研究者が神戸大学で博士学位を取得し、3名とも帰国して研究に従事している。終了時評価の時点で、博士課程後期課程7名、前期課程2名、合計9名が在学中である。さらに2019年4月には各1名の学生が修士課程と博士課程に入学予定となっている。また、日本で博士学位を取得したインドネシア人の若手研究者が神戸大学に雇用され、本プロジェクトで5年間日本とインドネシア間の技術移転や共同研究において中核的役割を果たした。ただし、若手日本人研究者の養成では物足りなかった。研究機材はプロジェクトを通じてよく整備され、インドネシアでも神戸大学と同等の研究ができるまでになった。LIPIには研究成果の実用化を図るイノベーションセンターが設置されており、継続的発展の見通しは高いと言える。

【成果を基とした研究・利用活動が持続的に発展していく見込み（政策等への反映、成果物の利用など）】

本課題はLIPIはじめインドネシアの中核機関と密接に連携して進められており、プロジェクトの研究成果が今後の研究に活用されていくことは間違いない。また、インドネシアは地球温暖化対策として低炭素社会の実現を目指した政策をとっている。統合バイオリファイナリー技術は、その政策の実現に向けて貢献できるポテンシャルは大きいですが、企業レベルでは経営上の採算が課題であり、現状では難しい状況である。一方、それは石油製品の価格政策等にも依拠するので、今後の推移を見守る必要があるが、技術面において現時点で実行可能なことは個別技術を統合した統合バイオリファイナリー技術のモデル実証である。それによって、今後の研究・利用活動が発展していく見込みが出てくると思われる。

4-3. 付随的成果

【日本政府、社会、産業への貢献】

バイオリファイナリーの中核的技術としての微生物の開発および開発された微生物工学技術は、今後の日本の社会や産業の発展に貢献するポテンシャルを秘めている。また、バイオマスの高度利用によってCO₂排出削減も可能となるが、これは日本政府主導による2国間取り引きにも利用できる。さらに、研究題目5の社会実装に向けた取り組みには、日本の民間企業も参画し、貴重な経験を得ている。このような活動を行ってきているものの、現段階での日本政府、社会、産業への直接的貢献はまだ潜在的である。

【科学技術の発展】

本プロジェクトでは、日本の製品技術評価基盤機構の微生物ジーンバンク（NBRC）の酵母を反応阻害物（酢酸、ギ酸、レブリン酸、フルフラール、バニリン等）耐性やグルコースおよびキシ

ロース資化性能に基づいてスクリーニングし、エタノール生産用宿主株として1菌株、乳酸生産用として2菌株を特定し、また、インドネシアの微生物センター（InaCC）からそれぞれ各1菌株を特定した。これらをもとに遺伝子工学手法を駆使して活性の高いアーミング酵母を開発しており、今後バイオリファイナリーシステムの重要な中核的技術として発展することが期待される。

【世界で活躍できる日本人人材の育成（若手、グローバル化対応）】

課題を通して、若い研究代表者の実力はアップし、今後の国際的活躍が期待される。一方、神戸大学の実験室でインドネシアやガーナからの留学生と日本人学生や大学院生がともに実験や研究を行ったが、インドネシアに渡航して研究した日本人若手研究者は少なく、世界で活躍できる日本人人材の育成は十分であったとは言えない。

【知財の獲得や、国際標準化への取り組み、生物資源へのアクセスや、データ入手手法】

本プロジェクトでスクリーニングに用いた放線菌と酵母は、日本の NBRC またはインドネシアの InaCC から正規に分譲を受けた菌株であり、ジーンバンク保存菌株から今後の研究によってさらに優れた菌株を発見できる可能性は高いと言える。特に、InaCC は先行 SATREPS による技術支援を契機として、インドネシア政府主導で設立されたジーンバンクで、その保存菌株を有効活用したことは特筆される。一方、インドネシアで3件の特許申請がなされたが、いずれの特許も日本では申請されておらず、また、特許出願に際してインドネシアの研究者から研究代表者に相談がなく、両国研究機関間の調整がなかったのは、プロジェクト内の意思疎通や情報交換がうまく図られていなかったことに加えて、研究代表者の指導不足があったのではないかと推察される。

【その他の具体的成果物（提言書、論文、プログラム、試作品、マニュアル、データなど）】

新たな知見は、評価の高い学術誌にも論文として発表されており、学会発表も多く、研究活動としては成果があった。一方、研究成果の広報は十分になされたとは言えない。

【技術および人的ネットワークの構築（相手国を含む）】

カウンターパート研究機関の研究者、育成した若手研究者や第3国からの学生を含む留学生および日本人研究者、並びに民間や第3国の人材を含めた人的ネットワークが構築されており、引き続き共同研究等を通じてその機能が継続されることが期待される。

4-4. プロジェクトの運営

【プロジェクト推進体制の構築（他のプロジェクト、機関などとの連携も含む）】

プロジェクト当初より、InaCC の微生物ジーンバンクとの連携が図られて正規手続きによる菌株的分譲を受け、また、日本とインドネシアのバイオリファイナリーやバイオマス関連企業との交流や相互の訪問調査を毎年実施することにより、日本側と相手側の人的結びつきが強化され、ネットワーク作りに成功している。さらに、神戸大学の他のプロジェクトとも連携しており、プ

プロジェクト推進体制の構築は優れている。

【プロジェクト管理および状況変化への対処（研究チームの体制・遂行状況や研究代表者のリーダーシップ）】

研究代表者がプロジェクトの実施に熱意を持って取り組んだことは評価できる。しかし、中間評価における「オイルパーム残渣に絞って研究することが望ましい」とした助言に対して、一貫してサトウキビバガスでの実験を継続し、オイルパーム空果房についての実験は行っていない。また、「プロジェクトの達成目標の明確化」と「全プロジェクトメンバーの共通理解の醸成」に係る提言に対しては、日本とインドネシアの民間企業を取り込んで統合バイオリファイナリーの社会実装に向けた協定を結ぶなどの努力は認められるものの、前処理、微生物による発酵、バイオ化合物の生産に係るそれぞれの個別技術を統合するための一貫した技術上の検証は十分になされていない。加えて、プロジェクト成果の報告や説明はプロジェクト全体を十分に把握していたとは思われない内容であった。以上のことから、研究代表者はプロジェクト目標を明確にし、その達成に向けてメンバーを指導・リードすべき重要な役割を果たすべきところ、その姿勢に不十分さが感じられ、ややリーダーシップに欠けていたのではないかと思われる。

【成果の活用に向けた活動】

研究成果の学会発表や論文による公表、成果発信のシンポジウム開催に加え、社会実装を見据えて民間企業の取り込みに努力し、最終的に日本とインドネシアの民間企業、インドネシアの研究機関と神戸大学の5者間で合意書を締結したことから、成果の活用に向けた活動は充実していたと言える。ただし、インドネシアにおけるバイオリファイナリー概念を広く社会に伝える活動は十分とは言えず、今後の取り組みの強化に期待したい。

【情報発信（論文、講演、シンポジウム、セミナー、マスメディアなど）】

毎年シンポジウムを開催するなど、インドネシアと日本において複数の機会で開催し、成果発信に努めたことは評価されるが、マスメディアによる情報発信は十分とは言えない。

5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

- (1) 民間企業を含む5者間の合意書に基づいて、統合バイオリファイナリーの実現に向けた共同研究を継続し、パームオイル加工工場にラボを設置して、統合バイオリファイナリーの実証事例を作っていただきたい。
- (2) バイオベースポリマーの研究成果を実用化へと繋げる取り組みに注力していただきたい。
- (3) 社会実装を実現するためには、石油資源とのコスト比較が求められるので、オイルパーム空果房を用いた統合バイオリファイナリーのシステムとしてのコストを含めた評価を行なう必要がある。

- (4) インドネシア政府の低炭素社会の実現という政策に対して貢献できることを表明し、関係省庁や研究機関の理解を深めることが重要であるので、その活動にも注力してもらいたい。また、バイオリファイナリー概念が広く社会に伝わることも重要であるので、マスメディア等を利用した情報発信に努めてもらいたい。
- (5) プロジェクトで構築した研究機関・研究者間ネットワークを通じた活動を続け、さらにマレーシア等同様の課題を抱える周辺諸国へも裨益できるような活動にも期待したい。

以上

研究課題名	インドネシアにおける統合バイオリアファイナリーシステムの開発
研究代表者名 (所属機関)	荻野千秋(国立大学法人神戸大学大学院工学研究科)
研究期間	H24採択 平成25年11月から平成30年11月(5年間)
相手国/主要研究機関	インドネシア共和国/インドネシア科学院(LIPI)

付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	日本のバイオマス関連化学企業とインドネシアの企業の情報交換を通じた、ジョイントベンチャー(JV)の可能性を模索
科学技術の発展	機能未知のインドネシアの生物資源の産業界への還元
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	特許出願【予定】 名古屋議定書に従ったインドネシア微生物資源の工業利用計画の確立
世界で活躍できる日本人人材の育成	インドネシア大学と神戸大学の国際単位互換システムの創設【予定】
技術及び人的ネットワークの構築	国費留学生として複数名を受け入れ、本分野のインドネシアでの学問領域の普及を図る
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"> ・査読付論文掲載 ・バイオマス白書の作成 ・国際会議 ・招待講演 ・新聞

上位目標

化石資源と競合しない非可食性バイオマス資源を用いたバイオ燃料・バイオ化学品生産に関わる基盤技術(バイオリアファイナリー)の成果がインドネシアをはじめとするバイオマスを豊富に生産する東南アジアの国々に広く還元される。

バイオリアファイナリー技術体系が政府機関、民間企業などに認められ、低炭素社会の構築に向けて、化学企業などに於いて社会実装に向けた取り組みが着手される。

プロジェクト目標

バイオリアファイナリー技術の体系化に必要なバイオマス前処理、バイオマス分解酵素開発、微生物宿主の分子育種(代謝工学、及び細胞表層工学)、及び膜分離技術を用いた発酵試験液濃縮技術を確立し、バイオマス利活用対策及び科学技術水準の向上につながる新たな知見を集積する。

- ①バイオマスからの低コストなバイオ燃料及びバイオ化学品の製造技術が構築され、これらの社会実装が行われる
- ②バイオ膜分離およびバイオプロセスの一貫化によるバイオ燃料及びバイオ化学品の環境適応型生産技術が構築され、社会実装に向けた基盤構築を行う

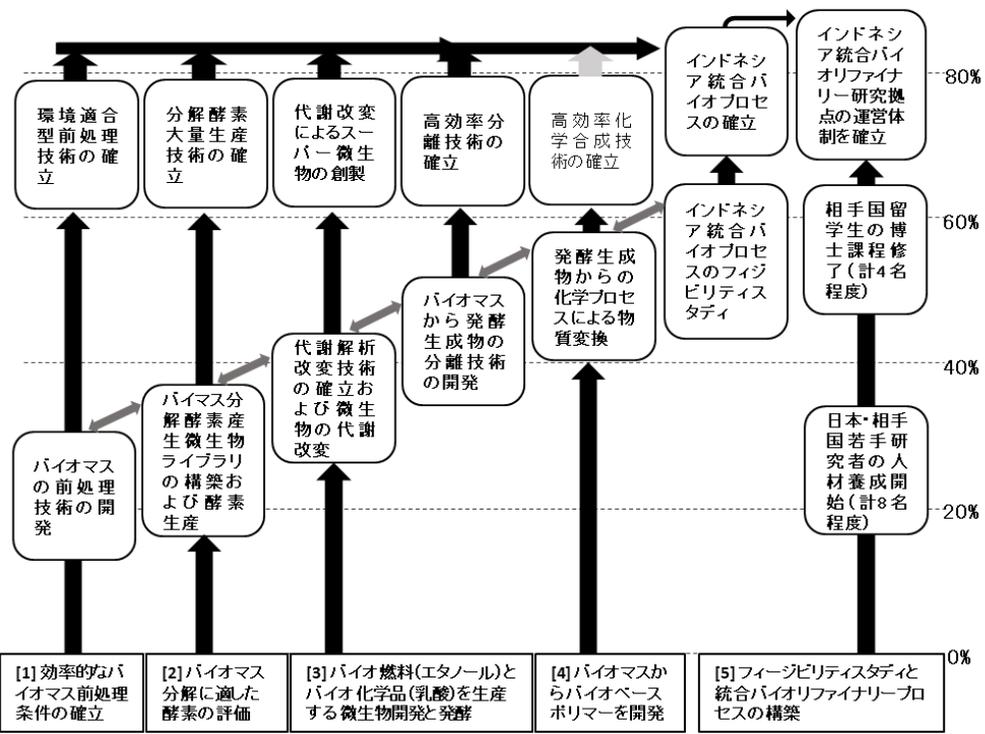


図1 成果目標シートと達成状況 (2018年12月時点)