

ICORP「バイオリサイクルプロジェクト」追跡評価報告書

1. 総合所見

本プロジェクトの特記すべき事項として、セルロース資源の生物分解にかかわるシロアリ類を対象に、熱帯圏におけるその生態、行動についてのマクロ生物学的調査からシロアリ腸管内微生物群集の分子生物学的解析にいたる、きわめて幅広い視点に立った統合生物学的アプローチが取られたことがあげられる。それによって、多数のシロアリ新種の記録をはじめとして熱帯圏におけるシロアリ類の多様性と生態について多くの基盤的情報が集積される一方、生化学、分子生物学、ゲノム科学等の新しい手法を駆使した解析から、シロアリ類と共生する微生物群集の機能と共生関係について多くの基礎的に重要な知見が得られ、その中から将来の産業利用につながるいくつかの可能性も示唆された。このような多角的取り組みは、生態系における木材資源のリサイクルに巨大な役割を果たしているシロアリの全体像を把握するのに不可欠であり、本プロジェクトは代表研究者のリーダーシップのもとで統合的アプローチを取ることで、それによって成功したと判断される。

本プロジェクトで得られた研究成果の中で最も重要なものは、これまで表面的な観察に止まっていたシロアリ腸管内における複雑な微生物間共生系の物質代謝と微生物学的多様性を分子レベルで精密に解析したことであった。これらの成果と、それを可能にした複合微生物群集の取り扱い技術の蓄積が基盤となって、引き続きプロジェクトにおいて世界に先駆けてシロアリ腸管内の単一難培養細菌の全ゲノム配列を解明するという大きな成功が生まれたといえる。これら一連の成果はシロアリ微生物共生系に対する世界中の研究者の興味と関心を喚起することとなり、これからのリグノセルロース利用に関連する研究戦略にも影響を及ぼしつつある。その他にも、本プロジェクトにおける生態学的調査で用いられたベルトトランセクト法が、シロアリ多様性の標準的評価手法として広く採用されるなど、多方面で基礎的に重要な貢献がなされている。

応用分野における主な研究ターゲットでは、遺伝子組換え技術に基づいたシロアリ腸管内微生物由来セルラーゼのバイオマス産業への応用と、シロアリにおける水素生成系の詳細な理解に基づいた水素・メタンなどバイオガスの生産を視野に入れている。とくにセルラーゼに関しては、シロアリ共生系において強力なセルロース分解能を有するのは原生生物であることを見出すなど、バイオマスの酵素糖化における酵素の低コスト化などの課題解決に将来貢献する新しい可能性を示す成果が得られている。

研究交流では、日本側研究者3名がタイにほぼ常駐して熱帯生態系に造詣の深いタイ側研究者と共同研究を実施した点が重要である。また、タイ側への技術提供は環境分野での国際貢献として評価できる。相手国の政情など悪影響が懸念されたが、プロジェクト後もカセサート大学と理化学研究所との連携大学院など良好な研究交流が維持されており、本プロジェクトの果たした役割は大きい。

今後の展開について提言をするならば、本プロジェクトの課題自体が極めて長期的な取り組

みを必要としており、さらに熱帯圏の生物資源の活用に関して各国が国益保持のため閉鎖的にならぬようにするためにも、研究支援活動も含めた半恒久的かつオープンな共同研究所の設置が望まれる。

2. 研究成果の発展状況や活用状況について

2.1 研究はプロジェクト終了後どのように継続、発展したか

プロジェクト終了後の継続発展状況について、まず要点を述べる。

(1) シロアリと微生物の共生機構の分子レベルでの解析について

理研の大熊盛也氏らにより JST さきがけの「変換と制御」研究領域での「高効率バイオリサイクル共生システムの解析」として発展され、シロアリ腸内の原生生物と共生細菌の機能的関係や遺伝子の解析が進められた。

(2) シロアリ腸内共生細菌の全ゲノム解析について

理研・中央研の本郷裕一氏と大熊盛也氏らは、ゲノム科学総合研究センターと協力してシロアリ腸内共生細菌のゲノム解析プロジェクトを実施し、2008年に2種類の難培養性共生細菌について全ゲノムの解読を世界に先駆けて行った。

(3) シロアリ共生原生生物セルラーゼ遺伝子群の解析について

理研の工藤俊章氏、東大の北本勝ひこ氏らにより 2005～2006年に NEDO 先導技術研究開発プロジェクトが実施され、GHF7のCBHが大量に発現していることが明らかにされた。これは、効率良いバイオマス利用システムへのヒントとなるものである。

(4) シロアリ・セルラーゼ群の解明と進化工学的研究について

本プロジェクトと並行して、農業生物資源研究所の渡辺裕文氏らのセルラーゼタンパクの進化工学的研究が行われたが、それがさらに、バイオマス変換、バイオエネルギー、パルプの改質、洗剤用途等における高機能の酵素を得るべく発展しつつある。

(5) シロアリ酵素遺伝子の麴菌への導入による発現と量産の研究について

東大の北本勝ひこ氏らはシロアリのセルラーゼ遺伝子を麴菌に導入して発現させることに成功している。将来、木質の高効率糖化法がこれによってさらに発展することが期待される。

(6) シロアリが発生させるバイオガスの研究について

理研の大熊盛也氏や井上潤一氏は、シロアリ腸内で発生する水素に関係する新規な鉄ヒドロゲナーゼの遺伝子を特定した。この酵素遺伝子を大腸菌や酵母に組み換えることができれば、発酵法で水素ガスを得ることができ、発展が期待される。

本プロジェクト終了後の大きな基礎的研究成果のひとつに、難培養共生細菌類のゲノム解析方法の確立が挙げられる。現在、複雑な混合生物系ではメタゲノム解析のような生物種を特定しない解析が主流である。この中で、最先端の技術を駆使して単一の難培養共生細菌類のゲノム解析に成功したことは、単離培養の困難な混合生物系における主要生物種の詳細な遺伝子情

報を得たという点で、共生系の詳細な理解に貢献する特筆すべき成果である。また、世界に先駆けて腸内原生動物のゲノム解析や共生微生物系のメタオミックス解析が精力的に行われており、「基礎的研究の継続・発展」という点で高く評価できる。

さらには、熱帯域におけるシロアリの多様性と生態においても顕著な成果があった。

ただ、終了後、3つのプロジェクトが本プロジェクト参加研究者等によって引き継がれ、応用を目指した取組みが現在も鋭意行われているものの、実用化に向けた研究開発という段階にはまだいたっていないのが現状である。

2.2 プロジェクトにおける相手国チームとの交流は双方にどのような効果をもたらしたか

タイ・カセサート大学における本プロジェクトによる研究室の運営は、理研との間の連携大学院の設置等によって両国の若手研究者の活性化につながったと言える。また、熱帯生態系に造詣の深いタイ側研究者と、分子生物学的解析に長けた日本側研究者が、タイで共同研究を実施したからこそ、分子生態学の面で多大な成果を上げることができたと考えられる。

現地で採取されたシロアリ類および微生物の試料は、生物多様性条約に則ってタイ側に移管され、継続して研究に使用されている。熱帯圏の国々は生物材料の先進国への持ち出しを厳しく規制しているため、それらにアクセスするには、熱帯国において研究を展開する必要がある。したがって、本プロジェクトのような研究には、タイなど熱帯国との密接な交流が今後も必須である。

一方、交流に関連して研究業績を見てみると、タイ側研究者が筆頭著者となっている論文は少なく、2007年以降は皆無の状況である。カセサート大学に設置された研究室が現在も活発に研究拠点として運営されているのかどうか、確認する必要がある。東南アジアを対象にした研究プロジェクトの場合、相手国と機器等のレベルに大きな差があることが多く、往々にして相手国がフィールドや試料提供の場だけに終わってしまうことがある。

繰り返しになるが、本プロジェクトの応用面での展開を図るには、リグノセルロース系パイオマスの集積地である熱帯地域との共同研究が有用であり、そのためには研究拠点の再構築も不可欠になる。

3. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的および経済的な効果・効用および波及効果について

3.1 研究成果は科学技術の進歩にどのように貢献しているか

本プロジェクトの意義は、生態学的研究が中心であったシロアリの共生系に対して、分子生物学的観点からメスを入れたことにある。共生系における物質代謝について、セルラーゼ遺伝子、還元的酢酸生成酵素遺伝子、窒素固定遺伝子などの解析により、シロアリ-原生動物-微生物間での低分子の受け渡しによる炭素、窒素の共生的代謝系の提唱に至っている。本研究の特筆すべき点は複雑な混合生物系に関しての取扱い技術の蓄積である。

これが、単一難培養微生物や原生動物のゲノム解明という世界トップレベルの成果の礎とな

ったと考えられる。また、バイオリサイクルという観点では、シロアリ共生系において強力なセルロース分解能を有するのは原生生物であることを示し、原生生物セルラーゼの利用という新たな分野を生み出している。

科学技術の進歩への貢献としては具体的には、以下の5点に要約できよう。

(1) 難培養共生微生物の新たな研究手法の確立

顕微鏡下で微生物である原生生物を直接的に純粋分離する手法は、条件を整えば培養できない共生微生物や複合生物系に適用できることを示したものである。

(2) 難培養共生微生物の全ゲノム解析の技術

原生生物の100個ほどの細胞サンプルからDNAを抽出して、難培養共生微生物の全ゲノム解析を世界に先駆けて成功したが、これは大きな波及効果があろう。

(3) シロアリ共生系に関する情報の蓄積

シロアリ共生系について統合生物学的にマクロからミクロまでの情報を集積した。消化器官としての腸を発達させている動物全般（家畜として重要な反芻動物など）が共生微生物を持っているので、この情報蓄積はたいへん応用科学的にも有用である。たとえば、摂食物質の利用効率の上昇、地球温暖化ガスの排出問題、水素やメタン等の燃料ガス生産などの課題である。

(4) シロアリ・セルラーゼ系の応用

現在、廃材や農業廃棄物に含まれるセルロースを燃焼せずにいかに有効利用するかが大きな課題となっているが、本研究成果は、それらの研究に大きなヒントを与える。

(5) 生物多様性の正確な評価方法の確立

タイの生態学的調査で用いられた評価手法（ベルトランセクト法）は、シロアリ多様性の標準的評価手法として現在広く採用され、エコシステムの定量的評価につながる重要な貢献をなした。

3.2 研究成果はどのような形で応用に向けて発展しているか

応用分野における主な研究ターゲットは、シロアリ・セルラーゼ系のバイオマス産業への応用と水素・メタンなどバイオガスの生産についてであり、社会的・経済的に適切な設定であると考えられる。

本プロジェクト終了後に行われた技術の実証や応用に向けての技術開発の取組みに関しては、以下の点で期待がもてる。

(1) シロアリのセルラーゼ遺伝子を麹菌に導入して発現に成功しているので、それをさらに発展させ、廃棄木材、稲わらなどのバイオマス資源に含まれる木質の高効率糖化法の工業化に成功することが期待される。それには、木質材料の前処理技術の向上が必要である。

(2) シロアリ類のエタノールやバイオガス生産能力につながる基礎研究を、産業技術開発に結びつけ、大工業化するのにはまだ多くのハードルがあるが、熱帯圏の国で役立つような小規模な工業化を達成するのに、現地との協力体制があればあまり時間はかからない。

(3) 本プロジェクトでは副次的におかれていたが、キノコシロアリ類が栽培する担子菌類に関する応用研究も、食料生産とのからみで期待できる。

ところで、上記(1)項で触れたように、植物性バイオマスの有効利用にはリグノセルロースの糖化が必要であるが、環境負荷の少ない酵素糖化は必ずしも成功しているとは言えない。これは、酵素生産にコストがかかりすぎるためである。シロアリ共生系の強力なセルラーゼを素材として、実用化に必要な機能改良を施せば、リグノセルロースの有効利用に新たな道が開かれると考えられる。

また、将来の展開を考えたときに、発展状況の中に課題も見えてくる。すなわち、本プロジェクトとその後の3プロジェクトがあまりにも密接に関連しすぎていたことを、ここでは問題点として指摘しておきたい。主な参加研究者がそのままスライドした結果、基礎的な研究成果は引き続き大いに挙がっているが、実用化に向けた研究開発には、広範囲な分野の研究者の柔軟な発想と共同作業が不可欠である。一例を挙げれば、木質系バイオマスの利用については、木質科学の専門家がより積極的に参加すべきであろう。

3.3 参加研究者はどのような形で活躍しているか

日本側参加研究者のキャリアアップについては、生態学の研究者と微生物工学の研究者で大きな差が生まれているようである。評価用資料によれば、生態系研究グループでは、本プロジェクトによってキャリアアップを達成した若手研究者はいないようである。一方、共生微生物及び代謝機能研究グループでは多くの参加研究者がキャリアアップを果たしている。これは、生態系に関する研究が別プロジェクトに引き継がれることがなかったことがその原因のひとつとして挙げられる。

なお、本プロジェクトおよびその後の3プロジェクト参加者で、参加時点で常勤職を有していた若手研究者については、その後も世界的に誇るべき日本のシロアリ研究の最先端を走り続けている。一例を挙げれば、守屋繁春氏は理研中央研究所のユニットリーダーに就き、現在、本プロジェクトの応用的展開と言えるシロアリ共生系の利用に関する生研センターのプロジェクトを率いている。

また、大熊盛也氏は、現在、理化学研究所バイオリソースセンター (RIKEN BRC) 微生物材料開発室長として、理研の微生物保存事業の充実を図る目的で、難培養微生物を取り扱う技術の開発、複雑な微生物群集の多様性解析技術の開発などにも取り組んでいる。

4. その他

ICORP 研究制度の意義は、開発途上国と先進国との間で研究基盤、研究人員に大きな差がある現状においては非常に大きい。特に、熱帯圏においては未利用の生物資源が多くあり、それらにアクセスするには共同研究体制の構築が必須である。今後も、各国が国益保持のために閉鎖的にならぬよう、開発途上国と先進国間のトップレベルでの理解・交流を通じて、多いに開発途上国を援助すべきである。長期間の共同研究体制、できれば半恒久的な研究所の構築を

考えるべきであろう。

一方、日本側と相手国側の意識および研究レベルの差が最終的に埋まらなかった場合、研究成果は一方的となり、また、プロジェクト終了後の研究施設の維持・管理もおろそかになることが想定される。立派な機械や装置が日本の援助で導入されたものの、シートをかぶって放置されている光景は、東南アジア諸国の研究機関で一般的なものである。

各国の実状と研究者レベルでの要望をよく調査したうえで、柔軟な形でこれからの国際共同研究助成を考えるべきであろう。

ところで、現在、国際共同研究の助成に関して、相手側のマッチングファンドを求める場合が殆どであると思われる。理念として考えればこれは正当なものである。しかしながら、研究の現場では、一部の突出した分野—例えばインドにおける IT 分野など—を除き、先進国と発展途上国間の格差は、装置の高額化や先鋭化に伴い科学技術分野においてむしろ拡大しているように見える。資金提供のあり方にもよりいっそうの工夫と改善が求められる。また、現在の環境問題は地球規模であるため、その解決には世界各国、特に発展途上国における問題の理解と対策が必須である。こうした共同研究を通じ、我が国の研究者が現地の状況を理解しながら技術提供を行うことは、相手国での研究推進のために極めて有意義であることをあらためて強調しておきたい。