

**国際共同研究事業（ICORP）における
平成 21 年度追跡評価結果について**

平成 22 年度 9 月 6 日
イノベーション推進本部
基礎研究制度評価タスクフォース

国際共同研究事業（ICORP）における研究プロジェクトの追跡評価を実施したので報告する。なお、この評価は「基礎研究に係る課題評価の方法等に関する達」（平成 21 年 6 月 24 日）に基づき実施したものである。

1. 対象研究プロジェクトおよび評価報告書

平成 15 年度終了（研究期間：平成 10 年 1 月～15 年 3 月）の下記 2 プロジェクト

■バイオリサイクルプロジェクト

共同研究相手国：タイ

共同研究相手機関：カセサート大学

代表研究者：工藤 俊章（理化学研究所 環境分子生物学研究室 主任研究員）
Napavarn Noparatnaraporn（カセサート大学 副学長）

評価報告資料：バイオリサイクルプロジェクト追跡評価報告書

■量子もつれプロジェクト

共同研究相手国：フランス

共同研究相手機関：CNRS／エコール・ノルマル・シュペリオール

代表研究者：山本 喜久（スタンフォード大学 教授／国立情報学研究所 教授）
Serge Haroche（エコール・ノルマル・シュペリオール 教授）

評価報告資料：量子もつれプロジェクト追跡評価報告書

2. 評価委員

「バイオリサイクルプロジェクト」（代表研究者：工藤 俊章）

小林 哲夫 委員 名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授

◎別府 輝彦 委員 東京大学 名誉教授

松本 忠夫 委員 放送大学 教養学部 教授

吉村 剛 委員 京都大学 生存圏研究所 准教授

<◎は主査、以下同じ>

「量子もつれプロジェクト」(代表研究者：山本 嘉久)

上田 正仁 委員 東京大学 大学院理学系研究科 教授

大野 英男 委員 東北大学 電気通信研究所 教授

黒部 篤 委員 東芝 セミコンダクター半導体研究開発センター 副センター長

◎高柳 英明 委員 東京理科大学 理事／総合研究機構 教授

3. 評価の進め方

評価用資料の委員への送付

↓

追跡評価委員会

↓

評価コメントの作成(評価委員)

↓

主査による評価報告書(案)まとめ

↓

評価報告書の確認(評価委員、元代表研究者)

↓

JST 理事会報告

↓

公表

4. 資料

バイオリサイクルプロジェクト

量子もつれプロジェクト

**(独) 科学技術振興機構
国際共同研究事業
追跡評価用資料**

**バイオリサイクルプロジェクト
(1999-2003)**

2009. 9. 15

目次

目次.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
概要.....	2
第1章 プロジェクトの概要.....	5
1.1 プロジェクトの目的及び狙い.....	5
1.2 研究テーマおよび主な研究成果.....	6
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況.....	11
2.1 各研究テーマの現在の状況.....	11
2.2 研究の発展および主な成果（基礎研究の視点から）.....	12
2.2.1 シロアリと微生物の共生機構の分子レベルでの解析.....	12
2.2.2 シロアリ腸内共生細菌の全ゲノム解析.....	14
2.2.3 シロアリ腸内原生生物のゲノム解析.....	15
2.2.4 共生微生物系のメタオミクスによる網羅的解析.....	16
2.3 研究の発展および主な成果（応用研究の視点から）.....	17
2.3.1 シロアリ共生原生生物のセルラーゼ遺伝子群の解析.....	17
2.3.2 シロアリのセルラーゼ群の解明と進化工学的研究.....	18
2.3.3 シロアリ酵素遺伝子の麹菌への導入による発現と量産の研究.....	19
2.3.4 シロアリが発生するバイオガス.....	19
2.4 プロジェクトメンバーの活動状況及び共同研究先との関係.....	19
第3章 プロジェクト成果の波及と展望.....	21
3.1 科学技術への波及と展望.....	21
3.1.1 難培養共生微生物の新たな研究手法.....	21
3.1.2 難培養共生微生物の全ゲノム解析技術.....	21
3.1.3 シロアリ共生系に関する豊富な情報の蓄積.....	22
3.2 社会経済への波及と展望.....	22
3.2.1 バイオマス産業へのシロアリ・セルラーゼ系の応用.....	22
3.2.2 シロアリのバイオガス生産能とその利用.....	24
3.2.3 難分解性物質の分解酵素の探索と応用.....	25
3.2.4 地球環境の保全.....	26
3.2.5 シロアリ害虫防除剤の開発.....	26
3.3 学会関係、研究動向への影響.....	27

概要

地球上に繁茂する植物の中でも森林の比重は高く、大量の木質系バイオマスを創出している。特に、熱帯地域では森林が高密度に発達している。その中で、シロアリは 2600 種類もの種が確認され、バイオマスの物質循環（バイオリサイクル）、ひいては地球規模の炭素の循環に重要な役割を果たしている。土壌動物であるシロアリは体内に微生物との多層な共生系を発達させ、木質バイオマスの効率的な分解と再資源化に成功し、生態系を左右する重要な生物種（キーストーン種）となっている。

本プロジェクトは、シロアリと微生物との共生系について基礎的な解明を行い、その優れた能力を木質系バイオマスの産業利用に活かすことを目的とした。しかしこの共生系の特徴として、多数の原生生物及び細菌が複雑な関係にあり、しかもこれらが難培養微生物であるため解析が極めて困難で、研究手法の開拓も大きな課題であった。

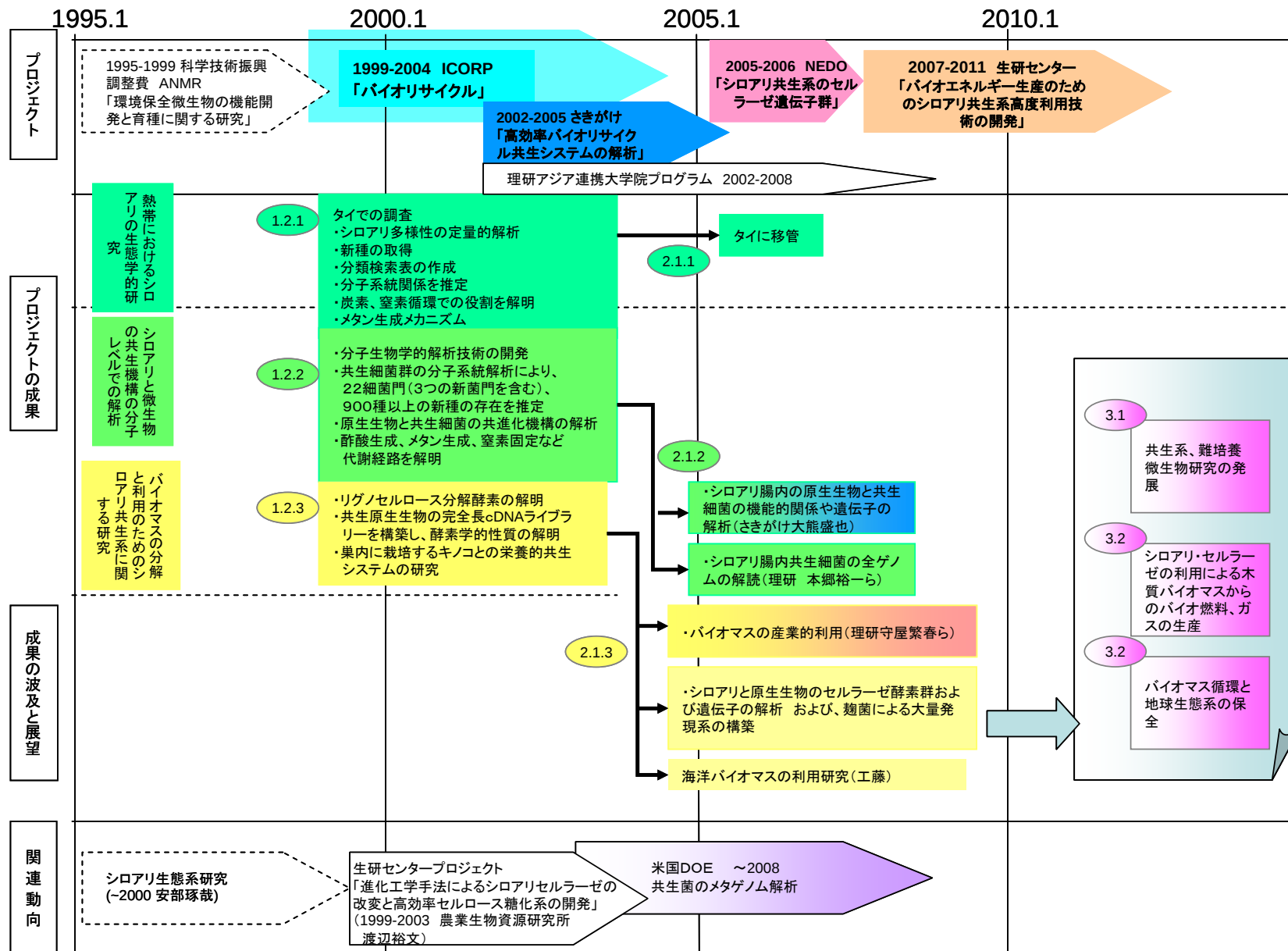
プロジェクトは(独)理化学研究所（理研）とタイとの国際共同研究の形をとり、熱帯地域のシロアリへのアクセスを図るため、現地にラボを設営して理研から研究員を派遣した。5 年間の研究成果として、1) タイ産のシロアリ種を分類して 194 種を識別した。そのうち 103 種は新種と考えられた。2) 高等及び下等シロアリの腸内共生細菌を遺伝子解析により同定し、分子系統を明らかにした。3) リグノセルロース分解能を有する細菌の酵素遺伝子群を解明した。これらの広範な基礎的知見は、その後の幾つかの後継研究或いはプロジェクトに引き継がれ、シロアリの腸内微生物共生系についてさらに解明が行われた。

理研のチームは、ヤマトシロアリの共生菌のゲノム解析に取り組んだ。腸内の原生生物から、1 種類の数百個の細菌を直接取り出し、DNA を抽出して約 1000 万倍に増幅、ゲノム塩基配列の解析を行った。解析の結果、細菌は 1.1 メガ塩基(mb)と比較的小型のゲノムを有し、染色体は 761 個の遺伝子と 121 個もの偽遺伝子から成っていた。これらの遺伝子の機能解析を行い、木質の分解過程や代謝に関与する遺伝子が明らかになった。偽遺伝子は退行進化によるものであった。この成果は 2008 年に報告され、シロアリ共生菌で難培養菌での世界初の全ゲノム解析として注目を集めた。

木質の分解を行うセルラーゼ酵素群の解析も進められ、シロアリが共通に持っている 5 種類の酵素があること、その分解力が糸状菌や細菌類のものより 2-5 倍優れていることが明らかにされた。産業応用を図るため、大腸菌や麹菌への導入発現や、実用酵素との複合体の調製など、酵素の進化工学的研究が行われている。また、シロアリ体内での嫌気性代謝に伴い発生する水素ガスやメタンガスの利用も検討されている。

本プロジェクトを契機として、シロアリと体内微生物との高度な共生機構と優れた木質代謝能の解明が大きく前進した。それらの知見は他の共生系や難培養微生物の研究に応用可能で波及効果が大きく、木質バイオマスの産業利用や、地球生態系の理解に寄与するものである。

バイオリサイクルプロジェクトの展開状況（まとめ）



第1章 プロジェクトの概要

1.1 プロジェクトの目的及び狙い

地球上に繁茂する植物の中でも森林の比重は高く、年間 720 億トンとも推定される大量のバイオマスを生み出している。特に、熱帯地域では森林が高密度に発達して多種多様な生物が生存し、複雑な生態系を形成している。その中で、シロアリは 2600 種類もの種が確認され、バイオマスの物質循環（バイオリサイクル）ひいては地球規模の炭素の循環に重要な役割を果たしている。熱帯林では、落葉供給量の 20-30%がシロアリに食べられているとみられる。土壌動物であるシロアリは体内の多様な微生物と多層な共生関係を結ぶことによって、地球上に最も多く存在する植物資源の効率的な分解と再資源化に成功し、生態系を左右する重要な生物種（キーストーン種）と考えられている。

国際共同研究事業（ICORP）・バイオリサイクルプロジェクト（代表研究者：工藤俊章、以下、本プロジェクト或いは本 ICORP プロジェクトという）は、(独)理化学研究所（以下理研と略す）とタイのカセサート大学との国際共同研究として実施され、熱帯地域に生息するシロアリの生態調査と分子系統解析を行うとともに、シロアリの腸内に共生する原生生物、バクテリアなどの微生物が発現する遺伝子のクローン解析や、セルロースの代謝、窒素固定などについて、分子生物学的な手法を用いて解明を試みた。また、高等シロアリのなかには、大きなアリ塚をつくり、巣内にキノコ（担子菌）を共生させて栽培するキノコシロアリが知られている。高等シロアリが巣内に栽培するキノコとの栄養的共生システムについても研究した。

シロアリ体内共生系の特徴として、多数の原生生物及び細菌が重層した複雑な関係にあり、しかもこれらが難培養微生物であるため菌株を単離して培養することができず、解析が極めて困難であった。それ故、研究手法の考案や開拓も重要な課題となった。

イエシロアリは木造建築物の大害虫であり深刻な被害をもたらす一方、その木材分解能力はバイオマスの資源化、産業の脱石油化の観点から注目されている。シロアリと微生物共生系の極めて効率的な分解・再利用の系を使って、リグノセルロースからのバイオ燃料やバイオガスの生産についても基礎的な検討を行った。

1.2 研究テーマおよび主な研究成果

以下の研究成果に関する 5 年間の発表は、口頭・論文あわせて 281 件、そのうち論文は 37 件であった。5 年間の期間中に未発表であったものでその後に発表されたものも多い。

1.2.1 熱帯におけるシロアリの生態学的研究

① タイ国内の 17 地域において、それぞれ標高、森林タイプの異なる地点でのシロアリ多様性の定量的調査をベルトトランゼクト法によって行い、シロアリの多様性と標高および樹種との関係、種ごとのすみわけ現象を明らかにした。

② タイ産のシロアリ種を分類し、4 科 39 属 194 種に分けられることを明らかにした。うち 103 種は新種と考えられた。これだけ多くの新種を記録したことは、分類学的に大きな成果とみられている。属レベルでの分類検索表を完成させ、簡易な分類・同定が可能となった。

③ 高等シロアリである *Termitidae* 科は極めて多様な種からなり、8 割以上の属が含まれる。シロアリの系統進化については、従来形態学上の特徴から議論されてきたが、統一的な見解は得られていなかった。本プロジェクトでは、シロアリの、ミトコンドリアのチトクローム酸化酵素遺伝子、および 12S rRNA 遺伝子の DNA 配列を決定し、分子系統関係を推定した。どちらの遺伝子の系統解析によっても、*Rhinotermitidae* と *Termitidae* の両科がグループ化され、多系統の *Rhinotermitidae* 科の中から単一系統群の *Termitidae* 科が生じたと推定された。

④ シロアリおよびキノコシロアリの菌園からの呼吸によって無機化される炭素の量を枯死植物に含まれる炭素の量と比較することによって、シロアリの炭素循環における役割を明らかにした。材/リター（植物遺体）食シロアリと地上の微生物によって枯死植物はほぼ完全に無機化される。特に菌園の寄与が大きいことを見いだした。従来、アフリカのサバンナでの同様の評価はあったが、構造の複雑な熱帯林での評価は行われていなかった。

⑤ 枯死植物の分解速度は窒素の含有量によって制限されることがあり、このような分解過程で使われる窒素は主に生物学的窒素固定によって供給されと考えられてきた。アセチレン還元法による窒素固定活性の測定を行い、材/リター食シロアリが窒素循環を通して枯死植物の分解過程に大きく寄与していることを実証した。

1.2.2 シロアリと微生物の共生機構の分子レベルでの解析

① シロアリ腸管内の共生系である、原生生物、細菌などの微生物の多様性と群集構造（図 1 参照）について、培養を介さない分子生物学的手法を用いて解析を行い、シロアリの系統分類、行動様式と共生微生物群集との関係を明らかにした。分子生物学的手法としては、リボソーム遺伝子の PCR 増幅、*in situ hybridization* 法などの技術開発を行い適用した。

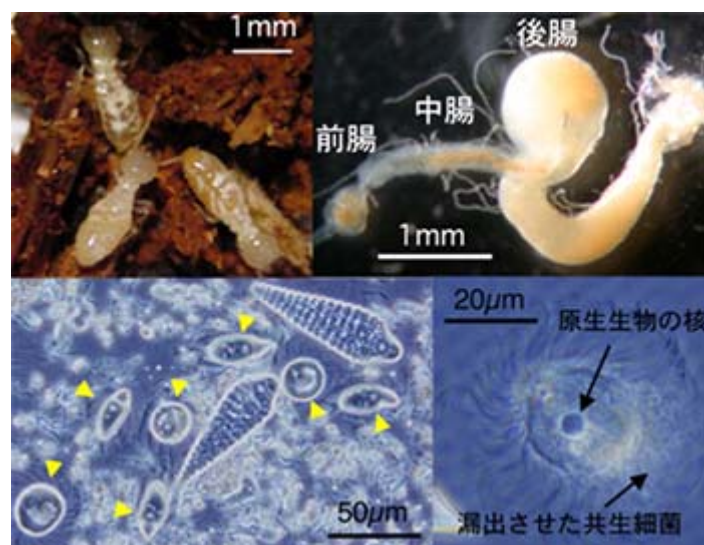


図 1 シロアリの腸内から回収される原生生物および原生生物細胞内共生細菌¹

② 日本およびタイの各地から採取した、下等・高等シロアリから取得した腸内共生細菌を 16S rRNA 遺伝子の塩基配列に基づき分子系統学的解析を行った。その結果、新たにシロアリにのみ特異的な 3 つの新規門候補 (Termite Group1,2,3 ; 略称 TG1,TG2,TG3) を見出すとともに、それらを含めて全体として 22 細菌門に分類されることを明らかにした。また、その中には 97%の相同性で分類して 900 種以上の新種の細菌が含まれることが示唆された。いずれの門においても、各種シロアリ由来の腸内細菌配列は複数の単系統群を形成している。この結果はシロアリ細菌群集が共進化によって生じたシロアリ特異的な系統で構成されていることを示唆するものである。

③ キノコシロアリはシロアリ特異的キノコを培養することで、菌と、菌に分解された植物枯死体を食し、②における食材性シロアリと食性を異にする。またキノコシロアリ

¹ 理研プレスリリース (<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2008/080401/detail.html>) の図から引用

類においても（カーストや齢による）形態型の間で食性に明確な違いがある。これらの食性の異なるシロアリについて腸内細菌叢を比較したところ、腸内細菌群集の細菌種レベルでは異なっても、細菌属・目レベルでの基本構成は良く保存されていることを見いだした。

④ 高等シロアリ種における3つの主要なメタン生成菌属のうち、腸内共生メタン生成古細菌の分子系統樹を明らかにした。その結果、シロアリ系統樹の構成と良く一致し、共種分化すなわち“親から子へ垂直に”受け渡されていることが示唆された。また、従来困難であった高等シロアリにおけるメタン生成古細菌の単離培養に初めて成功した。一方、下等シロアリの腸壁に局在するメタン生成古細菌、真正細菌を遺伝子解析により同定し、優先種について検出するなど、微生物学的に新しい成果を上げた。

⑤ シロアリ腸管内では、主に共生原生生物がセルロースを分解して酢酸を生成し、生じた酢酸がシロアリの主要なエネルギー源となるとともに、分解過程で生じた水素は還元的酢酸生成能の基になっている。シロアリ腸内の還元的酢酸生成細菌の共生関係を解明するため、還元的酢酸生成酵素の機能遺伝子を取得して分子系統学的に解析した。その結果、還元的酢酸生成細菌の多くは腸内で優先するスピロヘータに由来すること、また原生生物からも上記機能遺伝子を取得したことから、種間水素伝達による共生が成立している可能性が示唆された。（図2）

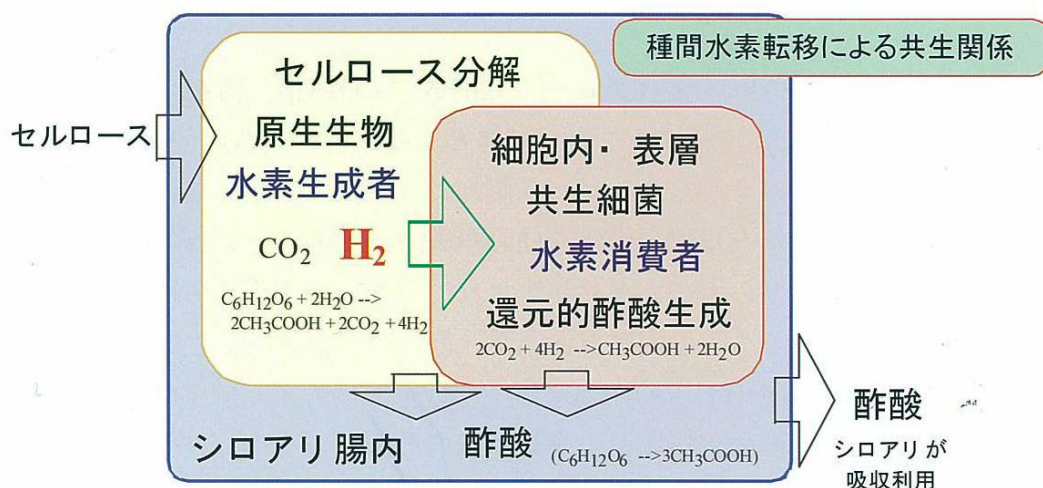


図2 シロアリ腸内における酢酸生成系²

² バイオリサイクル終了報告書(p140)

下等シロアリ腸内のセルロースを分解し水素を生成する原生生物と細胞共生細菌の種間水素転移を介した共生関係（推定）。シロアリ腸内での高い還元的酢酸生成能をよく説明できるばかりでなく、シロアリは生じた酢酸を利用するので、シロアリ・原生生物・細胞共生細菌3者の共生関係が成立する。

⑥ 窒素含有量の少ない植物遺体を餌とする材食性のシロアリは腸内の窒素固定細菌により空中窒素を利用する。下等シロアリから高等シロアリまで、ほとんどのものに高い窒素固定活性が認められるが、従来窒素固定細菌を包括的に理解することは困難であった。下等シロアリの腸内の大型の原生生物を濃縮し、微生物群集を培養を介さずに窒素固定遺伝子 *nifH* を解析した結果、原生生物と細胞共生する細菌が窒素固定能を持つことを明らかにした。

⑦ 下等シロアリ腸内に共生する二つのタイプの原生生物には、それぞれ形態的に異なる多様な種が知られているが、分子生物学的な解析はこれまでほとんど行われなかった。本プロジェクトでは小サブユニットリボソーム RNA (*ssrRNA*) を用いて、多様な種がどのように出現してきたかを、培養を介さない分子進化学的手法で解析した。また、共生原生生物は細胞内外に多くの細菌群を共生させていて、それが腸内の優先する細菌群になっている。そのうちメタン生成古細菌、および真性細菌を 16SrRNA 遺伝子の塩基配列を用いて系統学的に同定した。

1.2.3 バイオマスの分解と利用のためのシロアリ共生系に関する研究

① 木質リグニンの成分である芳香族化合物の分解能を有する細菌や、リグノセルロース分解能を有する細菌を、シロアリ共生系より多数単離し、芳香族分解細菌においてその分解に関与する酵素遺伝子群を解明した。

② 下等シロアリの中には驚異的なセルロース分解能力を持ち、摂食した植物枯死体の 95%以上を利用できるものがある。共生する原生生物がその高い分解能を担っていることが推測されていたが、これらの原生生物の培養が困難であることから分子生物学的な研究がされてこなかった。このような問題の解明と有用な遺伝子資源の網羅的な取得を試みた。共生原生生物の完全長 cDNA ライブラリーを構築し、EST 解析によりセルラーゼ遺伝子を網羅的に採取し、酵素学的に性質を明らかにした。

③ 高等シロアリがつくるアリ塚内の菌園から、共生するキノコ（担子菌）を分離し、シロアリと巣内に栽培するキノコとの栄養的共生システムについても研究した。さらに、担子菌がリグニン分解能を有するラッカーゼを主に発現していることを明らかにした。*Termitomyces* 属の共生担子菌が産生している酵素類の遺伝子解析を、EST 解析の手法を用いて行った。約 1600 の EST について解析した結果、約 60%が既知の酵

素遺伝子との類似性を示した³。

1.2.4 国際共同研究での交流

本プロジェクトは、理研のほかにタイのカセサート大学に研究拠点を設け、日本から研究員 3 名（井上徹志、本郷裕一、城島透）がほぼ全期間出向した。シロアリの分布調査、採集と分類、キノコシロアリの研究などは現地の協力が必須で、タイ国家学術調査委員会（NRCT）王立森林局の支援を受けて国立公園を主体に採集した。日本からの最新の機器類を装置し、測定技術、解析技術などを提供し、タイ側研究者のレベルの向上に寄与した。

³ Yamada A *et.al.*, Ecol Res, 20, 453-460, 2005 （表 1 文献 7）

Taprab Y *et.al.*, Appl Environ Microbiol, 71, 7696-7704, 2005 （表 1 文献 8）

Johjima T, *et.al.*, Appl Microbiol Biotechnol, 73, 195-203, 2006 （表 1 文献 10）

第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

2.1 各研究テーマの現在の状況

2.1.1 熱帯におけるシロアリ生態系の生態学的研究

タイにおける生態学的研究はプロジェクトの終了とともに終わった。現地で採取されたシロアリ及び微生物の試料などは、生物多様性条約(Convention on Biological Diversity; 略称 CBD)に則り、許可されたものを除きタイ側に移管された。

2.1.2 シロアリと微生物の共生機構の分子レベルでの解析

① 国内のシロアリであるヤマトシロアリ、イエシロアリなどを対象に研究が継続された。理研の大熊盛也らにより、2002–2005 年（即ち本 ICORP プロジェクトの後半にこれと並行して）、JST さきがけの「変換と制御」研究領域における課題「高効率バイオリサイクル共生システムの解析」が実施され、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 理研・中央研究所の本郷裕一らと理研ゲノム科学総合研究センター（当時の名称）が協力して、シロアリ腸内共生細菌のゲノム解析プロジェクトが実施され、2 種類の共生細菌について全ゲノムの解読が行われた。その成果が 2008 年に報告され、世界初の成果として注目を集めた。

2.1.3 バイオマスの分解と利用のためのシロアリ共生系に関する研究

① 2005–2006 年、NEDO 先導技術研究開発プロジェクト「シロアリ共生系のセルラーゼ遺伝子群：麹菌による大量発現系の構築とバイオマスの高度利用技術の開発」が、理研の工藤俊章（研究代表者）ら、東大の北本勝ひこらにより実施された。バイオマスの産業的利用を目指した基礎研究である。

② 2007–2011 年、生研センター研究プロジェクト「バイオエネルギー生産のためのシロアリ共生系高度利用技術の開発」が、理研（守屋繁春—研究代表者）、長崎大（工藤俊章）、東大（有岡 学）、(独)農業生物資源研究所（渡辺裕文）、琉球大（徳田 岳）の共同で実施されている。シロアリと原生生物のセルラーゼ群の遺伝子解析、及び麹菌による大量発現系の構築を目指した基礎研究が行なわれている。

2.2 研究の発展および主な成果（基礎研究の視点から）

2.2.1 シロアリと微生物の共生機構の分子レベルでの解析

理研の大熊らは、2002–2005 年上述(2.1(2)①)のさきがけ研究において、シロアリに共生する原生生物と細菌の共生関係およびセルロース分解とエネルギー産生の機構について、分子生物学的な方法で研究を行った。

原生生物に共生する培養不可能な細菌を顕微鏡下で単離し、rRNA 遺伝子等を PCR で増幅してクローン解析をし、分子系統学的に同定した。現在までに報告されたシロアリの 16SrRNA 遺伝子の塩基配列は 22 の細菌門に分類される多様なものである(図 3)。その中には本 ICORP プロジェクトで発見された未培養新規門 TG1、TG2、TG3 が含まれている。

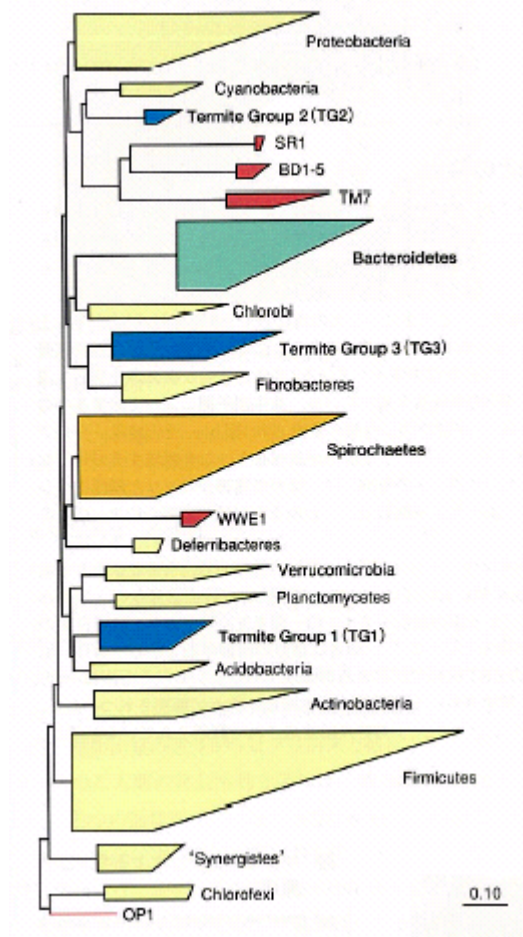


図 3 シロアリの腸内真正細菌の 16SrRNA 遺伝子配列に基づく系統樹⁴

2008 年 4 月までにデータベース上に公開されているシロアリの腸内真性細菌に由来する 16SrRNA 遺伝子配列を、97%の相同性を閾値として分類した。分類された 1650 の系統タイプから各 1 クローンを代表として、最大節約法によって解析した。台形のサイズは、各細菌門に分類されたシロアリの腸内真性細菌由来の配列の多様性を大まかに示す。Spirochaetes 門、Bacteroidetes 門がクローン数、即ち存在量が多い。青色、および赤色の門は培養株が未だ得られていない未培養門である。

⁴ 大熊盛也 他、蛋白質 核酸 酵素, 53,1841-1849, 2008 (表 1 文献 17) の図 2

さらに塩基配列特異的なプローブを作製し、FISH 法により原生生物の細胞表面及び内部での局在状態を明らかにした。その結果スピロヘータ及びバクテロイダレス目の細菌が多く見いだされた。また、原生生物の細胞内共生細菌が、シロアリ腸内の細菌群の大半を占めることと、その役割の重要性を明らかにした⁵。

次に、原生生物の混合細胞から cDNA ライブラリーを構築して、大腸菌の系を用いてセルロース分解活性を検出し、セルラーゼ遺伝子を取得することが出来た。cDNA ライブラリーから 2148 クローンについて遺伝子を網羅的に解析した。その中には、セルロース分解に関連する遺伝子群が 3.4%(73 個)存在していた。これら糖質分解酵素群 (GHF) を分類して、その役割を明らかにした。また、嫌氣的エネルギー産生器官であるヒドロゲノソームによる水素生成酵素遺伝子も取得した⁶。

これらを総合してシロアリ腸内原生生物とその共生細菌の機能的関係を TG1 門細菌を例にとって示すことが出来た (図 4)。原生生物では糖質 1 分子からそれぞれ 2 分子の酢酸と炭酸ガス、4 分子の水素が生成され、2 分子の炭酸ガスと 4 分子の水素は共生細菌により 1 分子の酢酸に還元的に再合成される結果、糖質 1 分子が 3 分子の酢酸に変換されシロアリに利用される、ほぼ 100% のエネルギー効率の共生関係ができている (図 2 も参照)。

大熊はこれらの研究により、2003 年度日本農芸化学会奨励賞を受賞した。

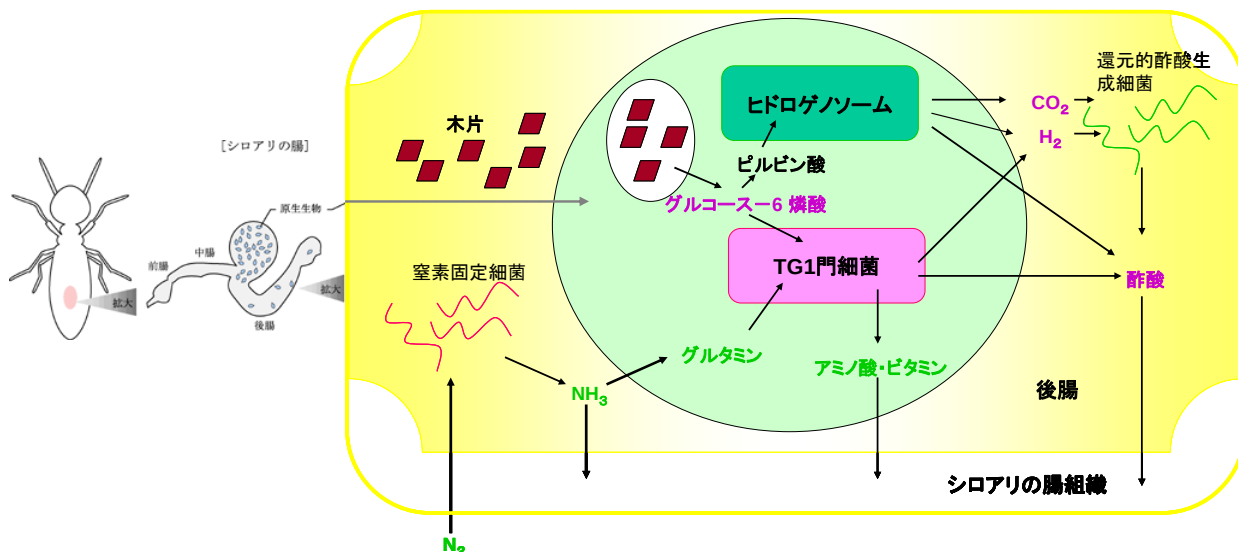


図 4 シロアリ腸内原生生物の細胞内に共生する TG1 門細菌の機能の模式図
(表 1 文献 17 の 1848 頁 図 7 を改編)

⁵ Ohkuma M *et.al.*, Mol Phylogenet Evol, 31, 701-710, 2004 (表 1 文献 6)

Hongoh Y *et.al.*, Appl Environ Microbiol, 71, 6590-6599, 2005 (表 1 文献 9)

⁶ 大熊誠也、日本農芸化学会誌、77、846-851, 2003 (表 1 文献 4)

2.2.2 シロアリ腸内共生細菌の全ゲノム解析

① シロアリ腸内共生微生物の全ゲノム解読に世界で初めて成功

理研の本郷、大熊らは、理研ゲノム科学総合研究センター（当時）と共同で、下等シロアリであるヤマトシロアリの腸内に共生する原生生物 *Trichonympha agilis* の細胞の中だけに生息する細菌 Rs-D17 の全ゲノムの解読に成功し、2008 年 4 月米国科学誌 *PNAS* に発表した⁷。

この細菌はヤマトシロアリの腸内細菌の 10% を占める優先種で、シロアリに特異的な *Termite Group 1* (TG1 門) に属し、培養が出来ない菌である。細菌細胞のゲノム DNA のサイズは 1 pg(10^{-12} g) 程度であるため、いかにしてゲノム解析に必要な 1~10 μ g(10^{-6} g) 量の、コンタミのない DNA サンプルを、培養をしないで取得できるかが課題であった。

そこで、顕微鏡下で原生生物の 1 細胞だけを分離し、その細胞内に局在するコロニーから Rs-D17 の数百個をほぼ純粋な形で得た。そこからゲノム DNA を抽出し、ファージ由来の Phi29DNA 合成酵素を使って“等温全ゲノム増幅”⁸を行い、1000 万倍に増幅したのち塩基配列の解析を行った。その結果、Rs-D17 細菌は、単一の環状ゲノムでサイズは 1.1 メガ塩基(Mb)と、比較的小型のゲノムを有していた。染色体は 761 個のタンパク質遺伝子をコードしており、このほかに 121 個もの偽遺伝子が存在することを発見した (図 5)。

これらの遺伝子の機能解析を行った結果、アミノ酸やビタミン類などの窒素化合物合成遺伝子が豊富に存在する一方、細胞壁合成酵素、DNA 修復・複製系、防御系、調節系や膜輸送系などの遺伝子は偽遺伝子に退化していることが明らかにされた。この事実は、宿主であるシロアリと原生生物及び共生細菌の間で、代謝物の授受を通した多重共生関係を説明する。すなわち、この細菌群は原生生物からセルロース分解産物を提供される見返りに、原生生物やシロアリが合成できないアミノ酸やビタミンなどを供給する。

自然界に存在する各種共生系には培養困難な微生物が多く、今回の成果はそれらのゲノム解析と遺伝子機能の解明に新たな手法を提供したことになり、その研究技術の開発と科学的知見は大きな波及効果をもたらすと思われる。

⁷ Hongoh Y *et.al.*, Proc Nat Acad Sci USA, 105, 5555-5560, 2008 (表 1 文献 15)

理研プレスリリース(2008/04/01

<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2008/080401/detail.html>)

⁸ ファージ（細菌寄生性ウイルス）由来の Phi29 DNA 合成酵素（商品名 Repli-g、キアゲン社）は、DNA2 重鎖をほどこしながら数 10 キロ塩基に渡って DNA を複製することができる。PCR 法を用いるよりも、増幅バイアスや複製エラーが少ない。この酵素を用いて 1Mb 以上のゲノム完全長配列再構築に成功したのは、本研究が初めて。

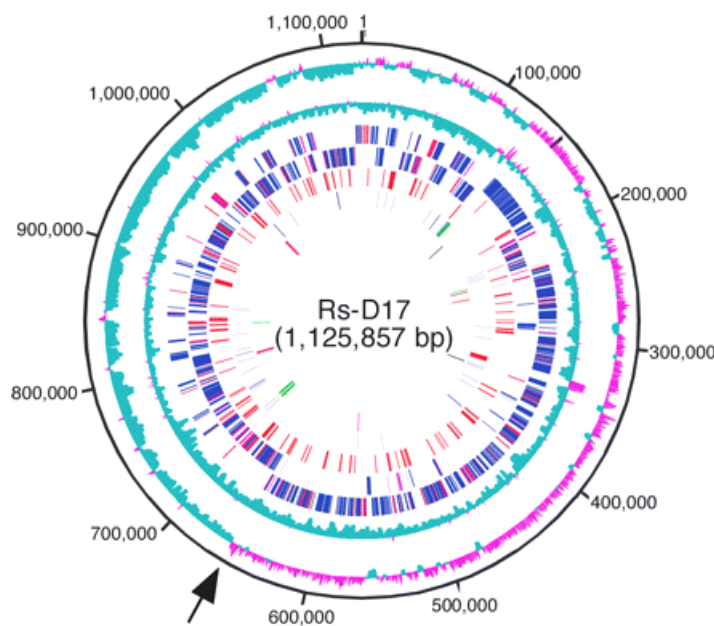


図 5 共生細菌 Rs-D17 の環状染色体の円形表示図⁷

(外囲の数字は塩基配列の番号で、1 は複製開始点、矢印は複製の終止点；内部の同心円表示は外側から、① GC スキュー (G-C)/(G+C)、② GC 含量、③および④ 各種機能遺伝子 (CDS)、⑤ 偽遺伝子、⑥ rRNA 遺伝子 (緑色)、tRNA 遺伝子 (青色) および CRISPR 遺伝子 (赤色)、⑦ 重複領域)

② 全ゲノム解析第 2 弾及び腸内共生機構の解明

前記の理研チームは前項同様の方法で、本邦のイエシロアリの腸内原生生物の細胞内に局在する共生細菌のゲノム配列の完全解読を行い、サイエンス誌に発表した⁹。この細菌種は、バクテロイデス門に属する CfPt1-2 で、原生生物 *Pseudotrichonympha grasilii* の細胞内にのみ生息している。イエシロアリ腸内の総細菌数の約 7 割を占める優先種で、宿主のシロアリ、原生生物と共進化をしてきたことがわかっているが、その機能はほとんど未知であった。

ゲノムの塩基配列解析の結果、ゲノムサイズは 1.1mb で、その染色体は 758 個のタンパク質遺伝子をコードしていた。この結果は上記ヤマトシロアリの共生菌 Rs-D17 の数値とほとんど同じで、これらの細菌はほぼ同様な進化過程を経てきたものと考えられる。新たに発見された機能として、CfPt1-2 は空気中の窒素を固定して、アンモニアを合成する能力をもっていること。さらに、アンモニアからグルタミン酸を経て各種アミノ酸、あるいはビタミンをつくり、木質中に不足している窒素源の供給において重要な役割を果たしていることが解った。このようにイエシロアリに多数の原生生物と細菌が共生して、互いに機能を補完しながら、優れた多重共生系を築いていることが今回のゲノム解析から裏付けられた。

2.2.3 シロアリ腸内原生生物のゲノム解析

⁹ Hongoh Y *et.al.*, Science, 322, 1108-1109, 2008 (表 1 文献 16)

(理化学研究所プレスリリース 2008/11/14

<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2008/081114/index.html>)

前項で述べたシロアリ腸内共生細菌の全ゲノム解読に続いて、理研の守屋・本郷らは、その細菌の宿主であるシロアリ腸内に生息する原生生物を対象にしたシングルセル・ゲノミクスによるゲノム解析に取り組んでいる。原生生物の1個を慎重に、純粋に分離してそのDNAを抽出し、増幅して解析するが、先述の共生細菌のゲノムサイズが1.1Mbであったのと比較するとはるかに大型で、100Mb ぐらいある。これを一挙に解析することは難しいので、塩基配列特異的な酵素で切って得られる各 DNA フラグメントについて等温ゲノム増幅をかけ、高速シーケンサーで読んでいる。既に延べ 1000Mb 分ぐらいの部分断片配列の解析はできているが、細菌に比べるとはるかに膨大で複雑な作業であり、スーパーコンピューターを動員して遺伝子の特定と全ゲノムへの構成作業を進める予定である。

2.2.4 共生微生物系のメタオミクスによる網羅的解析

1 匹のシロアリの腸内には、10–12 種類、数千個の原生生物と、約 700 種類、1 億個もの細菌が生息している。この共生集団をそのまま網羅的に解析する手法としてメタオミックス解析が試みられている。

① メタ・トランスクリプトーム

理研の守屋らは、1 匹のシロアリから得られる原生生物混在物のメタ・トランスクリプトーム・ライブラリーを作成し、既知のライブラリーとのホモロジー分析により発現タンパクを推定した。この方法で4種類の代表的シロアリが発現しているセルラーゼ遺伝子の比較研究を行い、糖質加水分解酵素 GHF5（エンドグルカナーゼ）、GHF7（セロビオヒドロラーゼ）、GHF10（ヘミセルラーゼ）、GHF11(キシラナーゼ)、GHF45（セロビオヒドロラーゼ）の5種類のセルラーゼ酵素がシロアリに共通の基本的なセルラーゼであることを確認すると共に、それらの発現量を比較している¹⁰。

② メタ・メタボローム

理研の守屋・菊池淳らは、1 匹のシロアリを丸ごとで NMR にかけて代謝物を網羅的に解析するメタ・メタボローム解析を試みている。シロアリの餌として、ある成分のバイオマスを与えた場合に出現する代謝物を、代謝物ライブラリーのパネルから検知し、どの代謝系が活発に作動しているかを推定する。餌の成分や種類により、動員される酵素が異なり代謝物となって示される。

これにより新たな代謝物、新たな酵素などが発見できる場合もあり、菊池らはこの方法の応用について特許出願している¹¹。

¹⁰ Todaka et al., FEMS Microbiol Ecol, 59, 592-599, 2007（表 1 文献 13）

¹¹ 特開 2009-63487 菊池淳 他 “タンパク質の探索方法”

③ メタゲノム

米国ではエネルギー省(DOE)が主体となって、高等シロアリであるテングシロアリの腸内共生細菌を対象にメタゲノム解析を行い、71Mbの配列情報を得て解析した。優先菌である *Treponema* 属と *Fibrobacteres* 属細菌の遺伝子や、セルラーゼ、キシラナーゼなど多くの酵素遺伝子を確認できた。但し、ゲノムの構成などは解明出来なかった¹²。

2.3 研究の発展および主な成果（応用研究の視点から）

2.3.1 シロアリ共生原生生物のセルラーゼ遺伝子群の解析

工藤らは、ヤマトシロアリの腸内に共生する原生生物群を対象に全長 cDNA ライブラリーを構築し、それを用いたトランスクリプトーム解析を行うことによって、遺伝子群の網羅的解析を進めた。発現遺伝子のパターンを調べたところ、取得クローンの10%近くが糖質加水分解酵素群（GHFs）に属する遺伝子であり、そのタイプは80以上知られるGHFのうちわずかな数種類に限られていた（図6、2.2.4-①も参照）。

この解析をほぼ全ての下等シロアリの科について行った結果、ヤマトシロアリとほぼ共通のGHFsが、選択的にすべてのシロアリの共生原生生物群で保持されていることが明らかになった。また同時に、シロアリと祖先を共通にするキゴキブリについても同様の解析を行ったところ、同じGHFsがその腸内原生生物群から見いだされた。このことは、シロアリ共生系の進化のごく初期で、これらの遺伝子が高効率セルロース糖化系のコンポーネントとして固定されたことを示しており、共生システムの成り立ちを考えるうえでも、効率の良いバイオマス利用システムへの応用を考えるうえでも重要な事実と考えられる^{13,14}。

¹² Warnecke F, et al Nature, 450, 560-565, 2007

¹³ 工藤俊章、化学と生物 46, 41-45, 2008 （表1文献18）

¹⁴ 理化学研究所 守屋バイオスフェア科学創成研究ユニット HP
(<http://www.riken.jp/bob/termite2/termite2.html>)

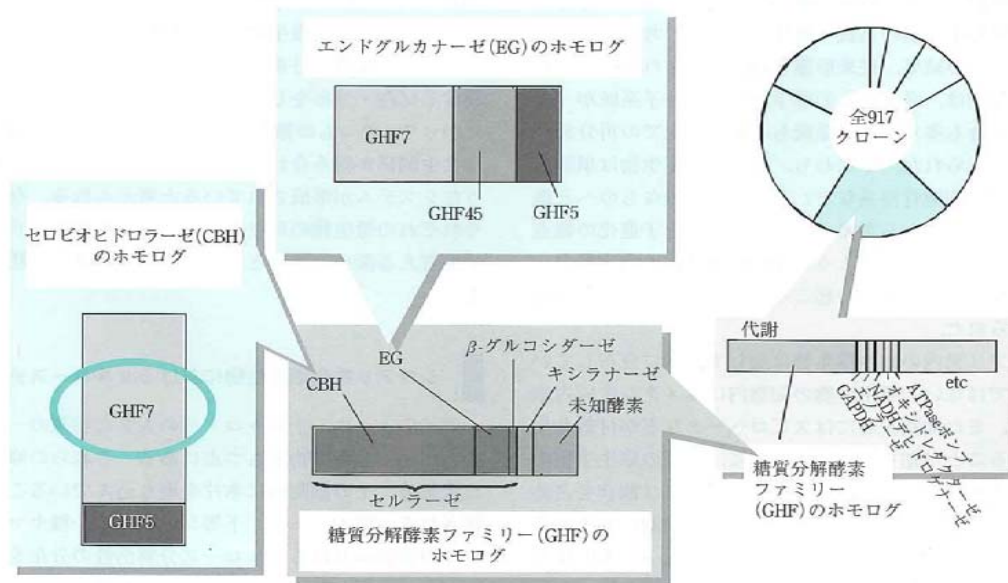


図 6 共生原生生物の遺伝子発現解析¹³
GHF7 の CBH が大量に発現していた（濃コバルト色丸印）。

2.3.2 シロアリのセルラーゼ群の解明と進化工学的研究

農業生物資源研究所の渡辺らは、本 ICORP プロジェクトと同時期の 1999–2003 年、生研センタープロジェクト「進化工学手法によるシロアリセルラーゼの改変と高効率セルロース糖化系の開発」を実施した。各種のシロアリから約 30 種類の新規セルラーゼ遺伝子をクローニングし、さらにセルラーゼ遺伝子を酵母及び大腸菌に組換えて、増殖と発現させる系を作製した。2007 年より、2.1.3 ②に記載の生研センター研究プロジェクト「バイオエネルギー生産のためのシロアリ共生系高度利用技術の開発」プロジェクトに参加して、セルラーゼ蛋白の進化工学的な研究を行っている。シロアリと原生生物のセルラーゼ遺伝子を大腸菌に導入した組換え体を作成した。

なお、培養と発現はジャパンエナジーに依頼している。遺伝子的人為的な組換えによる酵素タンパクの改変によって、アルカリや熱耐性など産業的に有用な性質を付与した酵素を作出し、バイオマス変換、バイオエネルギー、パルプの改質、洗剤などの用途への応用を目指している。

また、上記プロジェクトとは別に、2008 年から参加した NEDO の「バイオエネルギープロジェクト」では、長岡技術科学大（森川康）、明治製菓、天野エンザイムと協力して、トリコデルマのセルラーゼとの組換えによる高機能の酵素の作製を目指している。

2.3.3 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

東大の北本らは、将来の産業的リアクターを想定して、シロアリ特異的な 5 種類のセルラーゼ遺伝子を麴菌の系に導入し発現させる研究を行い、そのうち 4 種類では成功している¹⁵。ただ、結晶セルロースを分解する *exo* 型の GHF7 では、タンパク構造が複雑でまだ成功していない。麴菌を宿主としてシロアリや昆虫酵素の発現ができれば大量培養が可能となり、木質の高効率糖化法の有力な道が開けてくる。

2.3.4 シロアリが発生するバイオガス

シロアリ腸内の強い還元力に起因して、原生生物が生産する水素が大量に発生する。自然界の生物による水素の発生としては最大の量であろう。理研の井上徹志らは、タカサゴシロアリの原生生物から、培養を経ないで、メタ EST (Expressed sequence tag) 解析によりこの酵素遺伝子を確認した。2 種類の新規な鉄ヒドロゲナーゼ (*iron-hydrogenase*) 遺伝子が検出され、腸内の水素分圧が高くても水素を生産する。井上らのこの報告は、“クリーンエネルギー生産の可能性”というタイトルで、米国微生物学会からトピック記事としてとりあげられ、*Nature* アジア版にも掲載された。これに関与する酵素遺伝子は大腸菌や酵母などに組替え、発酵法で水素を作るなどのアイデアがある¹⁶。

2.4 プロジェクトメンバーの活動状況及び共同研究先との関係

(1) 日本側メンバー

代表研究者の工藤俊章は、2007 年 9 月より長崎大学水産学部の教授として、世界 6 位の経済水域の利用を目指して海洋バイオマスの利用研究を始めている。工藤は 2008 年、日本農学会から「シロアリー微生物共生系とその効率的分解機構に関する先駆的研究」で日本農学賞を受賞、併せて読売農学賞も受賞した。

大熊盛也と本郷裕一は理研でシロアリ共生系微生物に関する活発な研究を続け、共生細菌の全ゲノム解析の報告で注目を集めている。大熊は副主任研究員に昇格した。また、2003 年度の日本農芸化学会奨励賞を受賞した。2009 年 4 月より理研 JCM 微生物材料開発室長を務めている。

一方、本郷は、2009 年に農芸化学会奨励賞、日本ゲノム微生物学会第 2 回研究奨励賞を受賞し、同年 5 月より、東京工業大学生命理工学研究科 准教授に就任した。

守屋繁春専任研究員は、理研基幹研究所の守屋バイオスフェア科学創成研究ユニット

¹⁵ Todaka N et al., Appl Biochem Biotechnol, DOI 10.1007/s12010-009-8626-8, 2009 (表 1 文献 19)

¹⁶ Inoue et al, Eukaryot Cell, 6, 1925-1932, 2007 (表 1 文献 14)

の ユニットリーダー、及び横浜市立大学大学院 環境分子生物学研究室客員研究員である。現在、生研プロジェクト (2.1.3 ②) の代表研究者を務めている。

井上徹志は香川学園宇部環境技術センター課長として移籍した。

竹松葉子は山口大学の昆虫学の准教授でシロアリの分類学的研究を継続している。

城島透は (財) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) へ移籍し主任研究員として、ソフトバイオマスからのバイオ燃料製造法の研究を行っている。

古園さおり専任研究員は理研で研究を続け、2006 年極限環境微生物学会の奨励賞を受賞した。

野田悟子は、2009 年 4 月、山梨大学 准教授に就任した。

(2) タイ側メンバー

代表研究者の Dr. Napavaran は大学を離れ、Agricultural Research Development Agency (ARDA) という農業全般に関する研究開発のファンディングを管轄する公的機関の理事長のポジションについている。カセサート大学では、Dr. Savitr の Assistant Professor への就任など 3 名の昇格者がある。プロジェクト終了後も数名の研究者が研究を継続している。

(3) 両者の協力関係の継続

カセサート大学と理研との間で連携大学院が設けられ、工藤客員教授、大熊客員助教授、古園客員助教授が就任して指導を行っている。Yaovapa Taprab、Deevong Pin の両氏は、講師を務める。その間、タイから 3 名が来日して理研で研究を行い、いずれも博士号を得た。これらの人達を含めプロジェクト関係者の間で関係は維持され、新たな共同研究や産業化のベースになると思われる。

しかし、国際共同研究が目指す対等の理念のうえでは、やや一方通行の感があるのは否めない。先方からは生物資源へのアクセスの協力を得たが、研究、技術の力量で差がありすぎ、ほとんどの研究は日本側により実施され、成果も一方的であった。今後、アクセスのための良好な関係を維持し、両者の協力による熱帯生態系の維持とバイオマス・エネルギー産業化を展開できるよう努める必要がある。

第3章 プロジェクト成果の波及と展望

3.1 科学技術への波及と展望

3.1.1 難培養共生微生物の新たな研究手法

自然界の微生物の99%は培養できない微生物といわれる。これらの微生物は培養によるサンプル量の確保ができないため、既存の各種微生物研究法で取り扱えない。特に腸内微生物など、難培養共生集団の解析が課題となっている。本 ICORP プロジェクト及び後継の研究などから難培養微生物に関する多くの成果が得られた¹⁷。

難培養共生微生物の研究手法として本郷らが新たに試みたのが、直接の純粋分離であった⁷ (2.2.2 ①参照)。シロアリ後腸内に生息する原生生物中の共生細菌が、比較的純粋なコロニーを形成していることに着目し、顕微鏡下で慎重に採取し、厳密に選別して百個ほどの均質な細胞を得た。これを用いて全ゲノム解析にかけることが出来た。高度の手技を必要とするとはいえ、条件が整えば培養出来ない共生微生物や複合生物系に適用できることを示している。他の昆虫や、動物や魚の腸内は嫌気環境であり、同様の手法がとれる可能性がある。

3.1.2 難培養共生微生物の全ゲノム解析技術

前項で述べた百個ほどの均質細胞サンプルから DNA を抽出し、難培養共生細菌の全ゲノム解析に世界で初めて成功した⁷。しかも優先種での遺伝子解明だけにその影響は大きい。全ゲノムの塩基配列の解析にはマイクログラム量の DNA サンプルが必要であり、1 個の細菌にはピコグラムしかないため 100 万倍以上の増幅をしなければならない。通常の PCR 法では、多サイクルでの増幅中に部位による転写の偏り（バイアス）が生じる可能性がある。そこで 40kb 程度と長い断片が連続で増幅できるファージ由来の Phi29DNA 合成酵素を使って等温ゲノム増幅を行い、1000 万倍の均質な増幅を達成した。等温ゲノム増幅法は、ヒト赤血球など真核生物のゲノム解析に使用されているが、それを原核細胞でも適用できることを示した。

将来シーケンサーの能力が高まって、DNA サンプルの必要量が減少すれば、数十個、更には数個の細菌細胞から全ゲノムの解析が可能となり、難培養や共生系を対象とする解析が飛躍的に進むことが予想され、今回の成果は大きな波及効果があると言えよう。

¹⁷ 監修：工藤俊章、大熊盛也、“難培養微生物研究の最新技術－未利用微生物資源へのアプローチ”
シーエムシー出版、2004 年

3.1.3 シロアリ共生系に関する豊富な情報の蓄積

シロアリの共生系に関する研究が従来の生態学的研究から分子生物学的手法を用いる研究（系統解析や共生細菌の機能解析など）へと進化することについて、本 ICORP プロジェクトは大いに貢献したと言える。研究が進むに従い、その高度で効率的な共生の仕組みが益々明らかになっている。シロアリ、原生生物、細菌の垂直型のシステムを使い、餌の中のセルロース類をほぼ 100%の効率で利用している。一方、細菌は餌のバイオマス中に不足する窒素の固定化をしてアミノ酸などを宿主に還元している。ゲノム解析の結果、共生細菌の遺伝子の約 20%は偽遺伝子と化し、宿主に依存できる機能は退化させていることが示された。このように、ゲノム情報、遺伝子の発現情報、代謝系の情報など蓄積された豊富な知識は、今後の研究を促進するものと思われる。

シロアリ共生系を詳細に研究することは新規な機能細菌の資源を探索することである。各種のシロアリをあわせると、4000 種類もの細菌種がいるとみられ、大分類の門でいえば、自然界で細菌の門の総数である 25 門のうち 22–24 門が見いだされている。いわば、地球上の細菌の世界が小さなシロアリの中に再現されているといえるほどである。シロアリと共生微生物の間での共進化(Co-evolution)により、環境と餌の変化に応じて必要な菌種と酵素系を発動させ、柔軟に代謝経路を変えることを可能にしている。このことから、腸内に生息している潜在的な微生物を探索し、新たな機能を有する稀少種を発見するスクリーニング系にすることができる¹⁸。この手法は 3.2 に述べるように効率の良いバイオマス産業への応用、難分解性化合物の分解法への応用などに繋がる可能性がある。

種々の動物が腸を発達させて共生微生物を持っているのは、物質利用の効率、進化の点で理由があるはずで、大きな研究課題を提供している。

3.2 社会経済への波及と展望

3.2.1 バイオマス産業へのシロアリ・セルラーゼ系の応用

(1) シロアリによる木材破碎と利用

シロアリは大顎と磨砕器でもって木材を物理的に粉碎し、原生生物が取り込める 10–20 ミクロンの微細サイズにしている。工学的な粉碎では 100 ミクロン程度が限界であり他の前処理法と組み合わせなければならず、エネルギーの負荷がかかる。

一般に、リグニンマトリックスからのセルロースの取り出しはきわめて難しく、セル

¹⁸ Hayashi A. *et al.*, Appl Microbiol Biotechnol, 75, 1437-1446, 2007

ロースの酵素的分解も反応が遅い。シロアリはリグニンの堅い組織を避け、唾液腺から分泌するエンドグルカナーゼ(GHF9)を使って結晶セルロースを切断して取り出し、原生生物に渡して消化していると考えられる。一方、殆んどのリグニンは分解せずそのまま排出されて、ヒューマスとして土壌の表層にリサイクルしていると思われる。

現在、バイオマスの工業的利用研究の標的は、樹木や草木などの非可食バイオマスであり、最大の問題となっているのはリグノセルロースの前処理技術である。生物的なマイルドな処理によるシロアリの合理的なプロセスから得られる効率、速度、エネルギーなどの情報は、産業化を目指す研究に多くの示唆を与えている。また、高等シロアリにおいては、シロアリが裁断した木質片を基質として担子菌(キノコ)が栽培されている。この担子菌がラッカーゼを産生し、リグニンの骨格を分解していることが本 ICORP プロジェクトにより見いだされており(1.2.3③参照)、シロアリとキノコの協力によるバイオ的処理方法も、今後の技術開発における研究テーマになると思われる。

(2) セルラーゼ酵素類の産業応用

先述した(2.2.4-①)守屋らの研究では、シロアリの原生生物から、セルラーゼ系酵素遺伝子の5種 GHF5, 7, 10, 11, 45 が糖質加水分解酵素複合体としてセットで働いていることを明らかにした。中でもセロビオヒドロラーゼ、キシラナーゼなどが主体である。シロアリの酵素蛋白は一般の菌類の菌体外酵素に比べてコンパクトであり、セルロース結合モチーフがないにも拘らず、反応速度は2~5倍速い極めて性能の優れた酵素である。しかし、シロアリの酵素はシロアリの体内において最適な機能を発揮するものであり、シロアリの系外でその性能を示すか否かが課題である。

産業応用の見地からは、i) シロアリの系外で酵素を発現させ、リアクターで反応させる、ii) トリコデルマなどの実用セルラーゼ酵素の分子的改良に応用する、iii) 大腸菌や麹菌に導入して大量生産する、などが必要で、将来の研究目標になると思われる。

リグノセルロースを主体とする未利用バイオマスの資源化と効率的利用の研究が世界的に展開されているが、自然界において最も効率的な利用を実現しているのがシロアリおよび関連する微生物系であり、そのシステムの解明と技術的応用が産業利用につながると期待される。

そのほか、セルロースの分解による生産物として、シロアリは体内で酢酸を生産している。工業的にはバイオエタノールの他にバイオポリマー用の乳酸も注目されている。

バイオエタノールの生産に関しては、サトウキビやトウモロコシから得られる澱粉や糖などの食糧を原料として用いることに疑問の声が上がっている。今後、食糧にはならない木屑などの木質バイオマスの活用が重要になると考えられる。シロアリ共生系の効率的な分解機構の解明とその模倣、利用を通じて、他の動物がほとんど利用できない木質バイオマスから効率的にバイオエタノールを生産することも、やがて実用化段階に入るであろう(図7)。

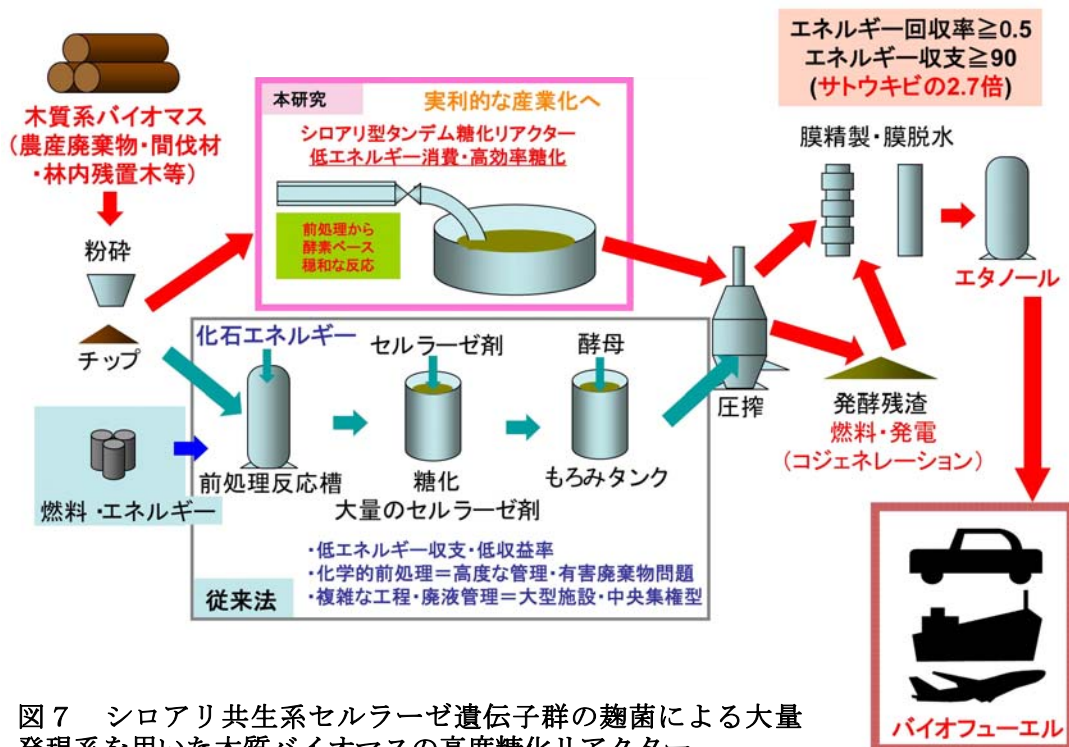


図7 シロアリ共生系セルラーゼ遺伝子群の麹菌による大量発現系を用いた木質バイオマスの高度糖化リアクター

(3) 窒素固定

食料性昆虫の多くは、餌となる樹木を食い散らし、セルロース部分や窒素が豊富な部分のみを摂取している。一方、窒素分に乏しい枯死植物体に依存するシロアリでは、その共生細菌が窒素固定をして宿主に供給する役割を務めており、その機構が明らかにされた¹⁹。しかし、シロアリ共生菌の窒素固定能の産業利用についてはまだ未検討の段階である。

3.2.2 シロアリのバイオガス生産能とその利用

先述(2.3.4)したように、シロアリの嫌氣的代謝に伴って水素ガスが発生する。その多くは酢酸生成に利用され自己消費されるが、ある部分は体外に排出される。また、水素の一部はメタン菌によりメタンガスに変換される。その結果、シロアリは自然界では最大の水素ガスとメタンガスの発生源となっている。

井上らの報告が、“クリーンエネルギーの生産の可能性”として、米国で注目を浴びたことは2.3.4で述べた。

京大生存圏研究所の吉村剛によると、1つの巣に約100万匹のシロアリがおり、その

¹⁹ Noda S *et.al.*, Appl Environ Microbiol, 65. 4935-4942, 1999 (表1文献1)

体重は 3 kg 程度である。そこから最大 1 日 10 リットルの水素が発生する。実験では、抗生物質でメタン菌を抑制すると水素のみが得られる。逆に、メタン菌の強い種ではメタンの発生が多くなる。ただ、この程度の水素発生では、それを集めて燃料電池などへの用途にはとても無理である。むしろ熱帯のあり塚などのある現地で小規模な採取装置を作り、水素ガスやメタンガスを燃料とするほうが現実的かもしれない。

また、シロアリの系外に嫌氣的解糖系を組み、鉄ヒドロゲナーゼを固定化して工業的に水素ガス発生をさせる方法が考えられる。2004－2007 年、吉村が研究代表者になって、京大と筑波大で科研費の基盤研究 A「木材劣化生物を用いた保存処理廃材のバイオプロセッシングと新規エネルギーの創成」を実施した²⁰。この中で筑波大青柳秀記らは、バイオガスを効率的に発生させる混合培養系を検討している。人工餌の炭素源を変えてイエシロアリの馴化生育させ、これをホモジナイズして得た腸内微生物の混合液を、Jar レベルで培養する。炭素源としてキシランを原料として培養したとき、シロアリ飼育時と比較して 100 倍の速度で水素ガスを発生させることが出来た。キシラン含有量が多いイネの籾殻を用いてもガスの効率的な発生が見られ、籾殻を原料としてシロアリの飼育し、バイオガス生産をする「餌－シロアリ－腸内微生物叢モデル」として産業化を提案している。さらに実用化へ向けた研究が期待される。

3.2.3 難分解性物質の分解酵素の探索と応用

シロアリと共生微生物の間の共進化(Co-evolution)によって、環境と餌の変化に応じて必要な菌種と酵素系を発動させ、柔軟に代謝経路を変えることを可能にしている。これを応用して、人工餌に難分解性リグニンの成分である各種フェノール化合物を添加してシロアリの培養することにより、それらの強力な分解菌、更には分解酵素を効率的に取得できた。この手法は、環境ホルモンのダイオキシンなど難分解化合物の分解菌の探索にも応用できる²¹。

また、細菌によるステロイド分解は、1960 年代に医薬品原料の合成を目的に研究が行われたが、2000 年代に入り堀之内正枝らは、*Comamonas testosteroni* の主だったステロイド分解遺伝子を初めて明らかにした²²。こうした分解菌を用いて、化学合成では合成が煩雑な有用な代謝中間化合物を効率的に蓄積させることが可能であり、ステロイド医薬製造への応用が期待される。

²⁰ 科研費基盤研究 A2006 年報告書： <http://kaken.nii.ac.jp/ja/p/16208017/2006/3/ja>

²¹ 特開 2007-215404 飯田敏也 他、“ダイオキシン類の分解能を有する新規微生物”

²² Horinouchi M et al., “Testosterone Research Trends” pp255-276, 2007 (表 1 文献 12)

3.2.4 地球環境の保全

地球環境への危機的影響として言われているのが、大気中の炭酸ガスの増加による地球の温暖化である。石油、石炭、天然ガスは、本来バイオマスであった炭素が何億年もかけて固定されたものである。温暖化はこれを一挙に燃焼して炭酸ガスにすることに起因している。森林中に保有されている炭素の総量は、大気中の炭素の3倍量とも推定されているので、森林を主体とする自然の循環が営まれていれば炭素循環の恒常性は保てるはずである。

シロアリはその生物的な循環（バイオリサイクル）と自然生態系の維持に重要な役割を果たしてきた。シロアリは木材を壊し原生生物と細菌で消化することにより、その循環を速めている。地球上の樹種の多さに対応するように、シロアリの種類も2600種類に及んでいる。東南アジアにはケナフ、パーム、ゴム、イネワラ、アカシア、ユーカリなどのバイオマス資源が豊富にある。そこで、シロアリ技術を現地の地域や村に提供し、小規模な形でシロアリが飼える昆虫工場でもって利用する形態が考えられる。水素、メタンやバイオエタノールなどの生産と利用が可能であろう。

最近では各国で植林による人工林が多くなっている。特に商業用の人工林はシロアリに弱い。10年ほど育ってくると食材される。そこで、人工林には抵抗性のある樹種を選び、育てることが課題になっている。

3.2.5 シロアリ害虫防除剤の開発

熱帯、亜熱帯地域でのシロアリの活動は、日本では想像できないほど凄いものであるが、生の木は忌避物質を出して防衛している。忌避物質を自然界から分離してシロアリ防除に利用するアイデアもあるが成功していない。

ところで、シロアリが腸内に固有の原生生物とさらに共生細菌を有し、それらの間の関係は厳密で、シロアリは共生菌に依存して生存している。この関係を利用し、共生菌に対して特異的な薬物あるいは抗体、RNAiなどを使って攻撃すれば、シロアリは弱体化する可能性がある。上述のRs-D17およびCfPt1-2共生細菌の全ゲノムが解析され、その情報が応用できることになったことから、特異的な知見がもたらされる。理研のプレスリリース⁷に、新たな害虫防除剤あるいは防除法の開発の可能性が指摘されている。シロアリは日本で年間数100億円、米国でも年間数1000億円の損害を与えており、実用化できればその経済効果は大きい。このような厳密な共生関係は多くの昆虫において見出されており、昆虫の害虫に対して応用の範囲は広いと考えられる。

3.3 学会関係、研究動向への影響

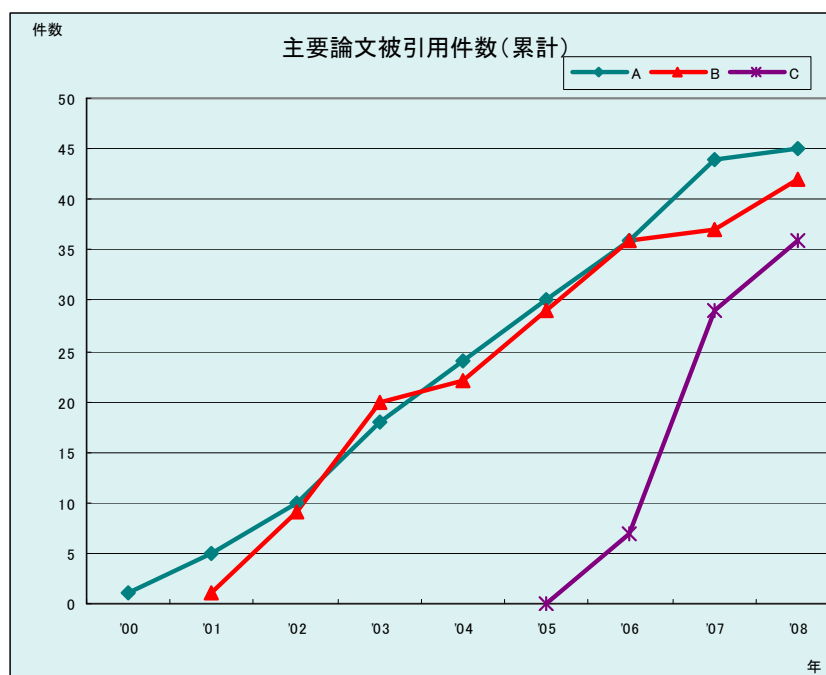
(1) 国内、海外の動向

本 ICORP プロジェクトは、木質のバイオリサイクルを支えるシロアリ-微生物共生系について、生態学、微生物学、生化学、分子生物学などの幅広い手法を利用して研究を行い、その後の研究においても、さらに分子遺伝学、ゲノム科学などの領域で先端的な成果をあげている。直接に関係する学会としては、日本および国際微生物生態学会など生態関係の学会、極限環境微生物学会(工藤副会長)、環境テクノロジー学会、農芸化学会、生物工学会、日本ゲノム微生物学会などである。シロアリは最もよく研究されている共生系のモデルとなっている。

海外でシロアリを対象に活発な研究をおこなっているところとしては、米国のミシガン州立大学、ドイツのマックスプランク研究所がシロアリの共生関係を主体に研究し、フランスのパスツール研究所は原生生物に強く、最近は米国のエネルギー省 (DOE) がメタゲノム解析をすすめている。米国は 2006 年の大統領令でもってバイオエネルギー、環境問題重視の政策を打ち出しており、今後シロアリ研究は活発化するであろう。ケニアのナイロビにある昆虫生理生態学センター (ICIPE) には、シロアリ研究チームの支所があって世界のシロアリの研究をリードしていたが、現在は被害が顕在化しているバッタやツェツェバエの研究にシフトしている。

(2) 論文引用件数、キーワード検索による動向推定

本 ICORP プロジェクトの研究代表者により選定された主要文献の中で、被引用件数の上位 3 件についての被引用件数の推移 (累計) 検索結果を図 8 に示した。シロアリの共生系に関する研究が限られた機関でおこなわれ、研究者も限定的であることを反映して、被引用件数としては多くはないが、着実な増加を示している。ただ、2008 年に発表された全ゲノム解析に関する論文^{7,9}は著明な国際誌であり、今後の被引用件数の伸びが予想される。



A : 表 1 文献 2
B : 表 1 文献 3
C : 表 1 文献 9

図 8 主要論文の被引用件数の年次推移 (累積グラフ)
(Web of Science 検索日 : 2009/1/16)

表 1 プロジェクト関連の文献

No	書 誌
1	Noda S, Ohkuma M, Usami R, Horikoshi K, Kudo T “Culture-independent characterization of a gene responsible for nitrogen fixation in the symbiotic microbial community in the gut of the termite <i>Neotermes kosshunensis</i> ” <i>Appl Environ Microbiol</i> , 65, 4935-4942, 1999
2	Ohkuma M, Ohtoko K, Iida T, Tokura M, Moriya S, Usami R, Horikoshi K, Kudo T “Phylogenetic identification of <i>Hypermastigotes</i> , <i>Pseudotrichonympha</i> , <i>Spirotrichonympha</i> , <i>Holomastigotoides</i> and <i>Parabasalian Symbionts</i> in the hindgut of termites” <i>J Eukaryot Microbiol</i> , 47, 249-259, 2000
3	Dacks JB, Silberman JD, Simpson AGB, Moriya S, Kudo T, Ohkuma M, Redfield RJ “Oxymonads are closely related to the excavate taxon <i>Trimastix</i> ” <i>Mol Biol Evol</i> , 18, 1034-1044, 2001
4	大熊誠也 “シロアリ微生物共生系の分子生態学的研究” 日本農芸化学会誌, 77, 846-851, 2003
5	監修 : 工藤俊章、大熊盛也 バイオテクノロジーシリーズ、“難培養微生物研究の最新技術 –未利用微生物資源へのアプローチ–” シーエムシー出版、2004年7月30日 第1刷
6	Ohkuma M, Yuzawa H, Amornsak W, Sornnuwat Y, Takematsu Y, Yamada A, Vongkaluang C, Sarnthoy O, Kirtibutr N, Noparatnaraporn N, Kudo T, Inoue T “Molecular phylogeny of Asian termites (Isoptera) of the families Termitidae and Rhinotermitidae based on mitochondrial COII sequences” <i>Mol Phylogenet Evol</i> , 31, 701-710, 2004

7	Yamada A, Inoue T, Wiwatwitaya D, Ohkuma M, Kudo T, Abe T, Sugimoto A “Carbon mineralization by termites in tropical forests, with emphasis on fungus combs” Ecol Res, 20, 453-460, 2005
8	Taprab Y, Johjima T, Maeda Y, Moriya S, Trakulnaleamsai S, Noparatnaraporn N., Ohkuma M, Kudo T “Symbiotic fungi produce laccases potentially involved in phenol degradation in fungus combs of fungus-growing termites in Thailand” Appl Environ Microbiol, 71, 7696-7704, 2005
9	Hongoh Y, Deevong P, Inoue T, Moriya S, Trakulnaleamsai S, Ohkuma M, Vongkaluang C, Noparatnaraporn N, Kudo T “Intra- and interspecific comparisons of bacterial diversity and community structure support coevolution of gut microbiota and termite host” Appl Environ Microbiol, 71, 6590-6599, 2005
10	Johjima T, Taprab Y, Noparatnaraporn N, Kudo T, Ohkuma M “Large-scale identification of transcripts expressed in a symbiotic fungus (Termitomyces) during plant biomass degradation” Appl Microbiol Biotechnol, 73, 195-203, 2006
11	工藤俊章 “シロアリ共生系の生態的機能と難培養微生物” 極限環境微生物学会誌、第5巻 1-11, 2006
12	Horinouchi M, Hayashi T, Kudo T “Testosterone degradation by bacteria” Chap13 of "Testosterone Research Trends" edited by Ardis LI , Nova Science Publishers Inc. pp 255-276, 2007
13	Todaka N, Moriya S, Saita K, Hondo T, Kiuchi I, Takasu H, Ohkuma M, Piero C, Hayashizaki Y, Kudo T “Environmental cDNA analysis of the genes involved in lignocellulose digestion in the symbiotic protist community of Reticulitermes speratus” FEMS Microbiol Ecol, 59, 592-599, 2007
14	Inoue J-I, Saita K, Kudo T, Ui S, Ohkuma M “Hydrogen production by termite gut protists: Characterization of iron hydrogenases of parabasalians symbionts of the termite Coptotermes formosanus” Eukaryot Cell, 6, 1925-1932, 2007
15	Hongoh Y, Sharma VK, Prakash T, Noda S, Taylor TD, Kudo T, Sakaki Y, Toyoda A, Hattori M, Ohkuma M “Complete genome of the uncultured Termite Group 1 bacteria in a single host protist cell” Proc Nat Acad Sci USA, 105, 5555-5560, 2008
16	Hongoh Y, Sharma VK, Prakash T, Noda S, Toh H, Taylor TD, Kudo T, Sakaki Y, Toyoda A, Hattori M, Ohkuma M “Genome of an endosymbiont coupling N2 fixation to cellulolysis within protist cells in termite gut” Science, 322, 1108-1109, 2008
17	大熊誠也、本郷裕一、野田悟子 “シロアリの腸内微生物 バイオマス資源を高効率に利用する多重共生” 蛋白質 核酸 酵素、53, 1841-1849, 2008
18	工藤俊章 シロアリ－微生物共生系とその効率的分解機構 化学と生物、46 41-45, 2008
19	Todaka N, LopezCM, Inoue T, Saita K, Maruyama J, Arioka M, Kitamoto K, Kudo T, Moriya S “Heterologous expression and characterization of an endoglucanase from a symbiotic protist of the lower termite, Reticulitermes speratus” Appl Biochem Biotechnol, DOI 10.1007/s12010-009-8626-8, 2009

次に、キーワードを設定して検索を試みた。“シロアリ”に関するヒット数は、昆虫学、動物学、生態学などにおいて圧倒的に多く数千件に達した（表 2）。しかし、シロアリと本 ICORP プロジェクトの主題である“共生”微生物“を連関させるとその数は大幅に減少し、100 件台となった（表 3）。しかも、論文の多くは理研、京大など日本の研究機関からのものであった。このことは、この共生機構をテーマとする研究が主として我が国が世界をリードする形で行われていることを示している（表 4）。なお、キーワードヒットの件数は着実に増加しており、今後も共生機構の解明、バイオマスの利用などへの関心が高まるに伴い、さらに研究が活発化することが予想される（図 9）。

表 2 キーワードをシロアリ（TS=termite(s)）で検索した論文(5,675 件)の分野分類

(検索日 2009/3/10)

順位	分野	論文数
1	昆虫学 (Entomology)	1,775
2	生態学 (Ecology)	544
3	動物学 (Zoology)	492
4	生化学・分子生物学 (Biochemistry & Molecular Biology)	342
5	総合的科学 (Multidisciplinary Science)	294
6	微生物学 (Microbiology)	260
7	材料科学 (紙・木) Materials Science, Paper&Wood	255
8	生物工学および応用微生物学 (Biotechnology & Applied Microbiology)	192
9	生物学 (Biology)	179
10	土壌学 (Soil Science)	172

表 3 キーワード検索 (シロアリ and (共生 or 微生物))

① TS=Termite or Termites、② TS=symbiosis、③ TS=symbiotic、④ TS=symbiot or symbiots
 ⑤ TS=ectosymbiont or ectosymbionts、⑥ TS=endosymbiont or endosymbionts
 ⑦ TS=(microbe or microbes)、⑧ TS=(microorganism or microorganisms)、⑨ TS=microbiology
 式① and ((② or ③ or ④ or ⑤ or ⑥) or (⑦ or ⑧ or ⑨)) による 論文数

年	総論文数	工藤論文	その他の論文
'90	5		5
'91	19		19
'92	14		14
'93	11		11
'94	17	1	16

' 95	18	1	17
' 96	19	2	17
' 97	20	0	20
' 98	31	6	25
' 99	26	4	22
' 00	24	4	20
' 01	21	1	20
' 02	23	3	20
' 03	31	5	26
' 04	23	2	21
' 05	38	5	33
' 06	42	5	37
' 07	58	8	50
' 08	34	4	30

表 4 機関別発表論文数 (キーワード検索 (シロアリ and (共生 or 微生物)))

所属	論文数
Riken	48
Kyoto Univ	34
Yokohama City Univ	21
Michigan State Univ	20
Univ Massachusetts	20
Univ Paris 12	16
Univ Ryukyus	16
Univ Sydney	15
Natl Inst Agrobiol Sci	14
Univ Konstanz	14

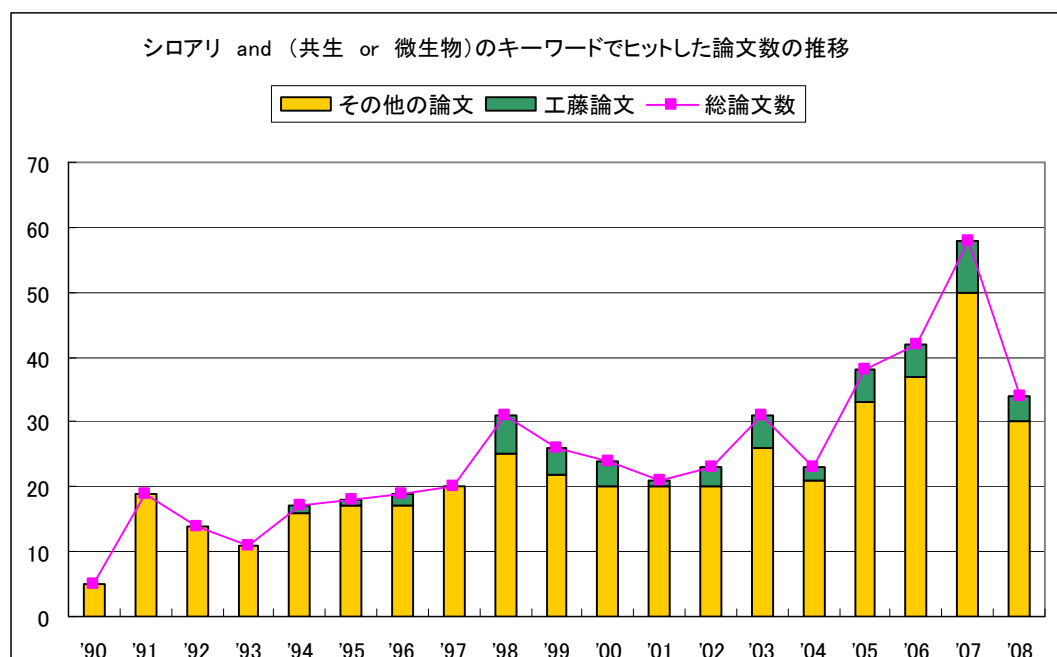


図 9 論文の発表数の年次推移
(キーワード検索 (シロアリ and (共生 or 微生物)))

**(独) 科学技術振興機構
国際共同研究事業
追跡評価用資料**

**量子もつれプロジェクト
(1999-2003)**

2009. 7. 28

目 次

目 次	0
概 要	2
第 1 章 プロジェクトの概要	4
1.1 プロジェクトの目的及び狙い	4
1.2 研究テーマおよび主な研究成果	5
1.2.1 量子情報通信の基礎技術	5
1.2.2 量子ドットにおけるポラリトンの物理	8
1.2.3 シリコン単結晶の量子コンピュータ	9
1.3 国際共同研究の意義と成果	10
第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況	11
2.1 各研究テーマの現在の状況	11
2.1.1 量子情報通信の基礎技術	11
2.1.2 励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮	15
2.1.3 シリコン単結晶の量子コンピュータ	16
2.2 プロジェクトメンバーの活動状況	17
第 3 章 プロジェクト成果波及と展望	18
3.1 科学技術への波及	18
3.1.1 量子暗号通信	18
3.1.2 励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮 (BEC)	19
3.1.3 量子ドットからの「単一光子」発生論文によるインパクト	21
3.2 社会経済への波及	23
3.2.1 量子鍵暗号通信の実施（現在から近未来（数年後））	24
3.2.2 通信の安全が保証された大規模通信社会（近未来から未来（十数年後））	25
3.2.3 量子シミュレータ・量子コンピュータ（遠い未来（数十年後））	26

概 要

本プロジェクト（ICORP：「量子もつれ」（1999 年－2003 年））は「量子もつれ」の概念をキーワードに量子情報処理・通信技術構築のための基礎概念を創出することを目的に実施された。その結果、①ポスト形の微小共振器構造を持った半導体量子ドットにより、世界で初めて「識別できない単一光子」を発生させた。②従来のプロトコルより鍵生成効率の高い量子暗号鍵配布の新規プロトコルとして差動位相シフト方式を提案し、原理実験で有効性を確認した。③上記のポスト形の微小共振器構造の半導体量子ドットでボーズアインシュタイン凝縮に繋がる励起子ポラリトンの凝縮を確認した。特に「識別できない単一光子」の発生に関する論文は 2 報で累計 800 件を越えて引用され、研究者が多いとは言えないこの分野で、多大な影響を与えたことを示している。

これらの成果をもとに、SORST「光を用いた量子情報システムの研究」（2004/1～2008/12）に進展し以下に示す大きな成果を得た。①「識別できない単一光子」から光子対が生成できることを示し、その光子対の量子もつれ状態を確認した。②ポスト形の微小共振器構造から、ドナー不純物を含んだフォトリック半導体結晶による共振構造を開発し、単一光子の発生を確認した。この素子は多数の量子ドットから「識別できない単一光子」を同時に、多数発生させることを狙っただけでなく、量子中継のための素子への展開を図ったものである。この素子のドナー不純物の電子スピンを光で高速に制御する技術を開発し、その素子を使った新しい量子中継の方式を提案し、1000km の量子鍵配送が可能であることを示した。③微小共振器構造を持った半導体量子ドットにより、ボーズアインシュタイン凝縮を世界で初めて確認した。この凝縮体の超流動状態も観測した。基底状態へ凝縮する性質を使った新しい概念の量子コンピュータの概念を提案した。

これらの成果はこの分野における最先端の成果であり、代表研究者は世界をリードする研究者と目されている。これらの成果により紫綬褒章をはじめ米国物理学会フェロー等の数々の栄誉を受けている。また、国立情報学研究所の教授を兼ねていることや NTT 研究所との共同研究を通じて、日本の研究者への指導にも尽力している。スタンフォード大学の教授として世界の研究者と活発な交流を行っているばかりでなく、日本の研究や研究者を世界に紹介し、研究を世界的な視点で推進するための良きチャネルとなっている。

以上

プロジェクトの展開状況（まとめ）

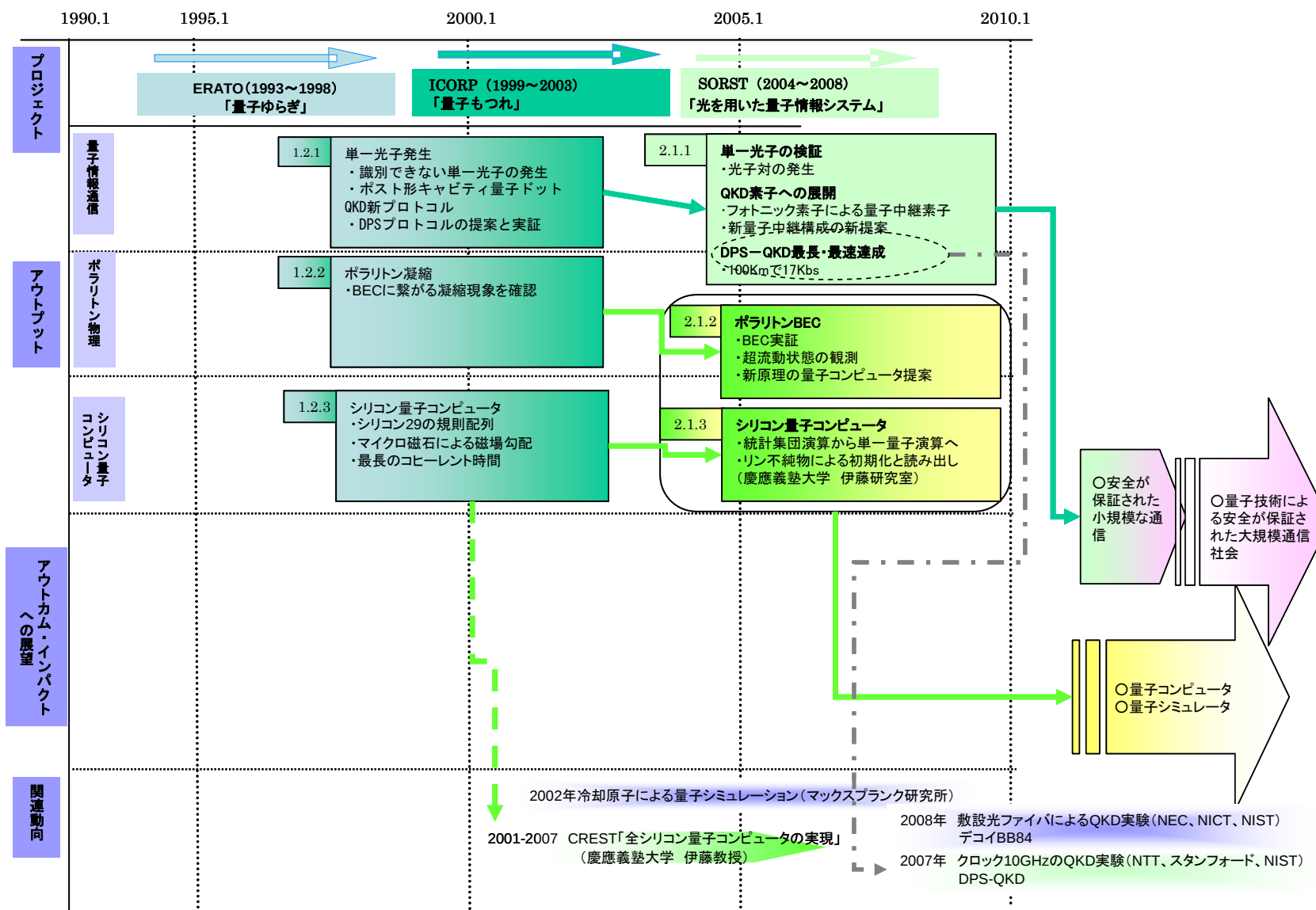


図1 プロジェクトの展開状況

第1章 プロジェクトの概要

1.1 プロジェクトの目的及び狙い

量子情報処理・通信技術は量子力学の技術によって、従来の通信や情報処理の壁を越えた、大量・高速の情報処理や通信を実現する技術である。この技術は従来の古典的な情報処理・通信技術では不可能な機能、例えば、絶対に解読不可能な暗号通信（量子暗号）、シャノンの定理¹の限界を打破する超高速通信（量子通信）、現在のスーパーコンピュータの能力を凌駕する超並列・高速情報処理（量子コンピュータ）などが実現する可能性があることが理論的に証明されている。このような量子情報処理・通信技術は量子力学における「量子重ね合わせ」「観測による射影」「量子もつれ」という三つの基本的な性質により実現される。量子情報処理・通信技術の実現のためにはこのような量子的な性質を自由に創成・制御することが必要である。

本プロジェクトの開始時には、量子情報処理の実現の可能性が理論的に証明され、量子情報処理・通信技術の実現のための課題、すなわち、どの量子を使うべきか、その量子の発生と制御を実現するには等々、数々の難問への挑戦が始まっていた。本プロジェクトの代表研究者はこのプロジェクトの前に「量子ゆらぎ」をテーマとしたERATOプロジェクト（1993～1998年）を行った。このプロジェクトでは、量子光学、メゾスコピック物理、操作マイクロコピーの実験技術を発展させることで、光子・電子・原子の波動関数を量子レベルで制御する新概念の創出と実験による実証を目指した。その結果以下のような量子レベルでの光子、電子、原子を制御する多様な成果を得た²。

(1) 量子測定限界の解明

単一の調和振動子を用いて外力を測定する場合、普遍的な量子限界が存在することを明らかにし、重力波検出等で量子限界を越えるために提案された様々な測定法を否定した。

(2) メゾスコピック電子衝突における量子干渉

フェルミ縮退した2次元電子ガスを用いて2電子の衝突を実現し、衝突による出力電流雑音の抑圧を観測した。電子の量子干渉効果を始めて実験により実証できた

(3) スクィーズド光発生用半導体レーザの開発とその応用

振幅ゆらぎをショット雑音以下へ抑圧したスクィーズド光を安定に発生するTJS (Transverse Junction Stripe) 形半導体レーザの開発に成功した。

(4) 単一光子の発生と検出

¹ 通信チャネルが持つ信号／雑音比と周波数帯域幅によって決まる、これ以上どうやってもデータ伝送速度を上げられない伝送容量の限界を与えた定理のこと。

² (独) 科学技術振興機構の創造科学技術推進事業（当時）（ERATO）「山本量子ゆらぎプロジェクト」終了報告書

決められた時刻に光子を1つずつ発生する単一光子ターンスタイル素子と単一光子を90%以上の高い量子効率で検出できる固体ホトマル素子の開発に成功した。この研究を発展させ、本ICORPプロジェクトでは極低温（～50mK）が不要で、高速繰り返し動作可能で、外部光学系への結合効率が高い半導体微小ドットからの単一光子発生を研究した。

(5) 励起子ポラリトンの誘導放出現象の実証

量子井戸と微小共振器へ閉じ込められた励起子と光子が強結合して作る励起子ポラリトンの誘導放出現象を実証した。本研究はICORPプロジェクトへ引き継がれ、励起子ポラリトンによる凝縮、特にボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）の実現に向けた研究へと発展した。

(6) 単一原子結合におけるクーロンブロケード振動の観測

単一原子で終端されたSTM探針と金属基板の間を流れるトンネル電流にクーロンブロケード振動が現れることを発見した。

上記 ERATO プロジェクトの成果を引き継ぎ、量子的な性質を自由に創成・制御することを大きな目的としながら、具体的には、半導体ナノ構造の物性を中心に固体中の量子もつれ物質系を探索し、それを用いた量子情報・通信技術構築のための基礎概念を構築することを目的として本プロジェクトを実施した。また、固体中の量子の物理現象を追求し、原子系で確認されてきた固体の多体现象、特に凝縮現象を、微小共振器を備えた半導体量子ドットでの励起子ポラリトンを対象に追求した。これらの研究は発展研究（SORST）の課題「光を用いた量子情報システムの研究」において 2003～2008 年に渡ってさらに実施された。

研究の流れの概要を前ページ図 1 に示す。

1.2 研究テーマおよび主な研究成果

1.2.1 量子情報通信の基礎技術

(1) ポスト形マイクロキャビティ量子ドットからの単一光子の発生

今後ますます発展すると考えられている情報通信技術の安全性は暗号技術によって守られている。しかし、量子コンピュータ技術が実現すると、現在の暗号技術は解読され、秘匿性が保たれないことが明らかになってきた。このため暗号解読の鍵を安全に通信する技術が量子暗号鍵配布（Quantum Key Distribution: 以後 QKD 略称する）技術である。

通信の完全な安全性を実現する条件は、鍵を盗み読む傍受者（通常 Eve と呼ぶ）がいかなる量子的な手段を使っても破られないことであり、これを保証するために通常、①誰かが通信の途中で情報を読み取れば、それを検知できること、②偽の情報を送ってきたことが分かること、等が要求される。これらの要求を満たすには、①情報を 1 光子で送ること。そうすれば 1 光子の欠落は情報が傍受されたことがわかる。②送られてきた 1 光子を 1 ビットの情報に変換したり、傍受されたことを検知する手順を備えること、が必要である。

光子発生光源として微弱なレーザー光、単一光子、光子対の 3 つの光源が考えられている。微弱なレーザー光は現在の技術でも可能であるが、2 光子以上の発生が多く効率良い通信が難しい。光子対は光非線形効果を利用したパラメトリックダウンコンバージョンという技術で作られることが多いが、光子対の発生確率が低く、通信効率の点では微弱レーザー光と同じ問題がある。このプロジェクトでは、これらの問題を避けて単一光子の発生を効率よく行える素子を目的に研究を行った。

従来の研究では、量子ドットを光励起して得られる単一光子は発生した光子が基板に吸収されるため発生効率が低かった。さらに、発光の寿命が 1 ナノ秒程度と長いこと位相の乱れが起きやすく、「識別できない単一光子³」とは言えない欠点があった。

本プロジェクトでは光共振器構造の InAs 単一量子ドットを含むポスト形のマイクロキャビティ（以下、QED と略称する）（図 2）から識別できない同一量子粒子としての単一光子を発生させることに世界で初めて成功した⁴。この研究ではインジウム砒素（InAs）の基板にガリウム砒素（GaAs）とアルミ砒素（AlAs）スペーサーからなる DBR 反射層（Distributed Bragg Reflector）を持った光共振器構造のナノサイズ量子ドット素子を用いた。この素子では発光の寿命が 0.2 ナノ秒に減り、その結果、素子をパルス光で励起すると、発生した光子はその周波数も位相も一定の識別できない単一光子であることを示した。この実験と同時に半導体量子ドットから 40%という

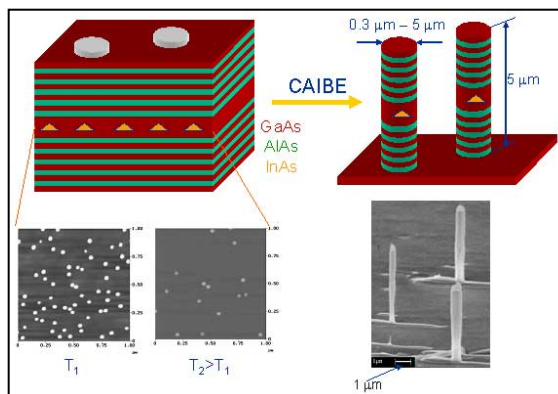


図 2 単一量子ドットを含むポスト形マイクロキャビティ

³ 周波数が同じで、かつ位相の乱れが全くない光電界振動の単一光子。不確定性原理からパルス幅とスペクトル幅の積（時間帯域幅積と呼ばれる）は一定値以上の値をとる。その最小値はパルス幅とパルスの形状によって決まる。最小の時間帯域幅積、つまり最も短いパルスであるフーリエ限界の光子パルスが「識別できない単一光子」である。

⁴ Santori, C., et al, "Indistinguishable Photons from a Single-Photon Device", Nature 419, 594-597 (October 2002)

高い効率で単一光子を取りだせること、パルスに光子が2個以上存在する確率が1%以下となっていることも確認した。このように優れた単一光子源の実現は本手法の世界的潮流形成に貢献した。

(2) 量子暗号鍵の配布プロトコル研究

量子暗号鍵の配布 (QKD) は光子発生源と検出器というハードウェアと同時にそのプロトコルが非常に重要である。従来 QKD には BB84 と呼ばれる基本的なプロトコルが提案されていた。このプロジェクトで BB84 より鍵発生効率の良いプロトコルとして差動位相シフト方式

(Differential Phase Shift : 以後 DPS と略す) を提案した⁵。DPS プロトコルの原理を図3に示した。

送信側 (通常 Alice と呼ぶ) は単一光子源からの光子をそれぞれ T 秒だけ隔たった3個の光子 a、b、c に分ける。各パルスはそれぞれの位相が 0 あるいは π とし、どちらに

なるかはランダムに選ばれる。受信側 (通常 Bob と呼ぶ) は入射してくる光子を二つに分け、T 秒だけ遅れた a、b、c を作製し、元の光子と干渉させる。干渉の結果は二つの検知器 DET1 と DET2 によって光子の有無を検知する。Bob は4回の光子検知結果 (i) ~ (iv) を得る。その中で (ii) と (iii) は干渉の結果 DET1 あるいは DET2 のどちらかがカウントする。この結果を Alice へと返すと Alice は位相の選択に対応して Bob のどちらの DET が検知したかを知ることができる。Alice と Bob は DET1 がカウントしたとき"0"、DET2 がカウントしたとき"1"と決めれば、データを送付できる。本プロジェクトでは基本システム実験によって有望性を確認した。

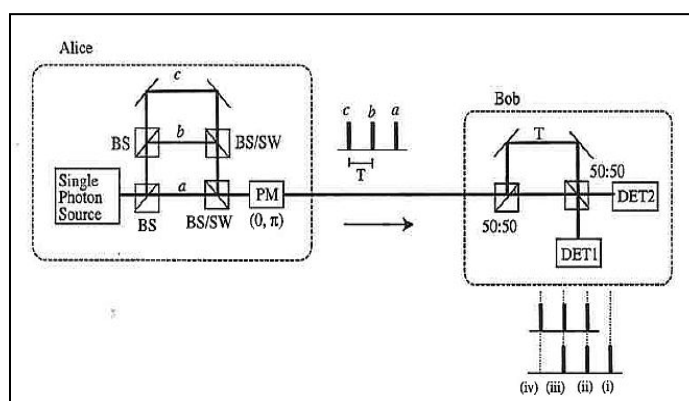


図3 DPS プロトコルによる暗号鍵の配布原理

⁵ Inoue, K., et al, "Differential Phase Shift Quantum Key Distribution", Phys. Rev. Lett. 89. 037902 (July 2002)

1.2.2 量子ドットにおけるポラリトンの物理

微小光共振器に閉じ込められた量子閉じ込め状態の電子系を光励起すると高密度のポラリトンの集合が形成される。このような高密度のポラリトンではボーズアインシュタイン凝縮（以後、BEC と略す）が期待できる。本プロジェクトにおいて、微小光共振器を強く光励起した時、光励起の閾値を越えると 2 次のコヒーレンス関数⁶の平均値の減少が見られることから（図 4）、ポラリトンが量子力学的にさまざまな状態が混在しない純

粋な状態になることを示した⁷。ポラリトンの凝縮が起こっていることが裏付けられた。しかし、このポラリトンの寿命は熱平衡に達する時間より十分長いとは言い難く、熱平衡状態の物理現象である BEC が起こっていると確実に言えなかった。

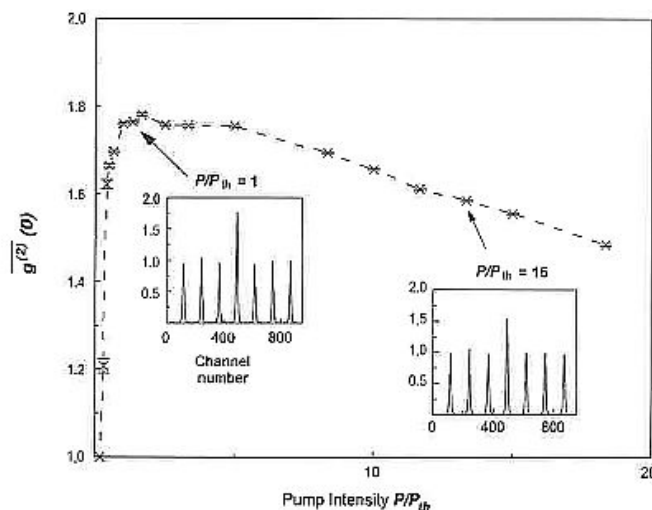


図 4 2 次のコヒーレンス関数の減少と光励起の強度の関係

⁶ 光子流に対する 2 次の強度相関関数で単一光子源としての性能を評価する因子。通常 $g^{(2)}(\tau)$ で表され、ある時刻に光子が検出されてから、次の光子が検出されるまでの時間差 τ の関数として表される。 $\tau=0$ において、完全な単一光子源ならば $g^{(2)}(\tau)=0$ 、コヒーレント状態ならば $g^{(2)}(\tau)=1$ をとる。

⁷ Deng, G., et al, "Condensation of Semi-conductor Microcavity Exciton Polaritons", Science 298, 199-202 (October 2002)

1.2.3 シリコン単結晶の量子コンピュータ

これまで、少数の量子ビットの量子相関を用いた量子演算の実証実験は有機分子を含む液体の NMR によるもののみであったが、より発展性が期待される固体の核スピンを用いる新しい演算方式を提案し、実験によってその基礎固めを行った。核スピンのないシリコン 28 (^{28}Si) 中に分子線エピタキシーによってスピン 1/2 のシリコン 29 (^{29}Si) を規則的に配列させた構造を作成した。それぞれの核スピン量子ビットを区別するためにマイクロ磁石による磁場勾配を作った。その核スピン量子ビットの集団のパルス磁場を制御してスピンを整列させ、大きな磁気共鳴信号を得る方法を考案し、基礎実験によって有効性を確認した。さらにこのシリコン構造の核スピンの保持時間が 25 秒に達することが分かった⁸。

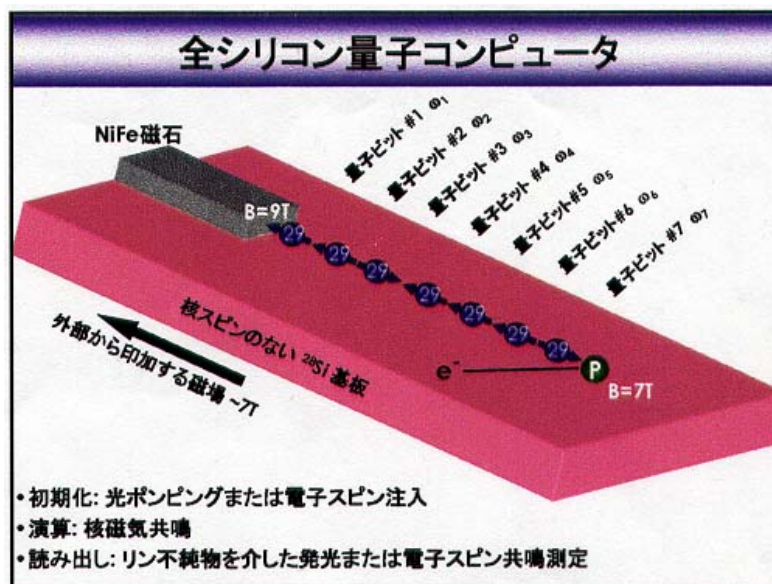


図 5 NMR によるシリコンコンピュータ概念図

マイクロ永久磁石により、量子ビット列を構成している ^{29}Si に異なる磁場を与え、異なる周波数の高周波電磁波で各原子の核スピンを制御する。

⁸ Ladd T D., et al, "All-Silicon Quantum Computer", Phys. Rev. Lett., 89, 017901, (July 2002)

1.3 国際共同研究の意義と成果

本 ICORP プロジェクトではフランスの高等師範学校（Ecole Normale Supérieure(ENS)）の Serge Haroche 教授と共同研究を行った。代表研究者が固体中の電子、励起子等の量子もつれや共鳴電磁波との相互作用（QED）が研究対象であるのに対して、Haroche 教授は、原子の「量子もつれ」や共鳴電磁波との相互作用が研究対象であった。すなわち、研究対象は異なっても、「量子もつれ」や QED 物理の深い理解が共通の研究課題であった。本プロジェクトにおいて、Haroche 教授はリドベリ状態の原子 1 個のもつれ状態と 1 個の光子（Q 値⁹の高い共振器中の）との相互作用を基本として、個々の原子の状態を制御しながら 3 個の原子の量子もつれ状態を観測する技術を開発した¹⁰。また、同様の手法を使って、共振器中の 1 光子の生成と消滅を、リドベリ原子をプローブとして非破壊で観測する¹¹などの成果を得た。

二つの研究グループはスタンフォード大学で 2 回／年、フランスで 1 回／年程度集まって研究交流会を行った。実験手法は全く異なっているが、根本原理である「量子もつれ」や QED は共通の探求課題であり、それらの議論は互いに良き刺激となった。

⁹ Q 値とは共振波形のピーク振幅／ピーク幅で表される値で、共振器の損失の逆数を表す。

¹⁰ Rauschenbeutel A., et al., “Step-by-step engineered multiparticle entanglement”, Science 288, 2024-2028 (June 2000)

¹¹ Nogues, G., et al., “Seeing a single photon without destroying it”, Nature 400, 239-242 (July 1999)

第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

本プロジェクト終了後、代表研究者は JST の戦略的創造研究推進事業 発展研究 (SORST)「光を用いた量子情報システムの研究」(2004/1～2008/12) で研究を継続した。

2.1 各研究テーマの現在の状況

本プロジェクト後、そのまま技術を深化させたテーマと研究の方向を大きく転換したテーマがある。研究の方向を大きく変更したテーマは以下のとおりである。

全シリコンコンピュータの研究は当時の共同研究者伊藤公平（現慶応大学教授）が引き続き研究を継続した¹²。代表研究者としてはテーマの方向を高周波電磁波による方法から、光によるスピン制御の研究へと変更した。これは光によるスピン制御の時間がピコ秒と高周波電磁場と比べて桁違いに早いことによる。

2.1.1 量子情報通信の基礎技術

(1) 発生単一光子の検証

ポスト形の半導体量子ドットにより「識別できない単一光子」の発生に成功した後、この素子を用いて、2 つの「識別できない単一光子」を発生し、一方の偏波を 90° 回転させた後、2 つの単一光子を 50%－50% ビームスプリッターで衝突させた。この時、ビームスプリッターの出力は、50%の成功確率でベル状態(エンタングル光子対状態)となっていることが理論的に予測される。

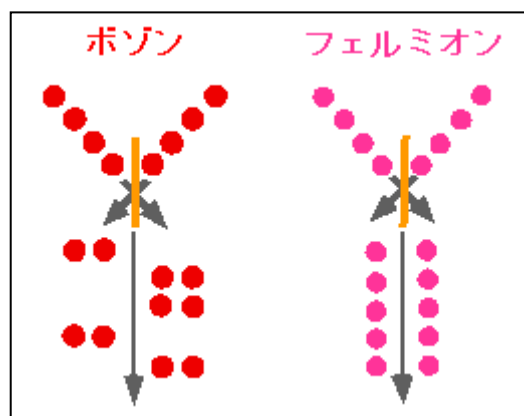


図 6 干渉計におけるボゾン量子とフェルミオン量子の散乱

¹² 共同研究者であった伊藤公平（現慶応大学）教授が、戦略的創造研究推進事業 CREST（研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」研究課題「全シリコン量子コンピュータの実現」（2001 年・2007 年））にて研究を行った。

この原理を実験により確認した¹³。すなわち、「識別できない単一光子」は連続する二つの光子が干渉し、その結果連続した2つの単一光子を50%–50%のビームスプリッター上でちょうど重なるようにして衝突させると、出力が(1, 1)というパターンになる割合が抑圧され、図6に示したボゾン型量子散乱、すなわち、(0, 2)か(2, 0)のどちらかの出力パターンしか起こらない事が確認された。

このようにポスト形の半導体量子ドットからの単一光子の発生は大きな成果を挙げたが、さらなる性能の向上を目指すためには以下の三つの欠点があった。

A. 量子ドットの発光波長には大きな不均一拡がりがあるため、共振器波長との共鳴をとるのが難しく、また多数の素子を同一波長で並列的に動作させるのが極めて困難である。

B. ポスト型共振器はその形状の不完全さのために、共振のQ値を上げるのが難しい。

C. さらに、量子ドットは通常結晶基底状態にあり、磁場をかけても基底状態が分裂せず、3準位原子系に固有なラマン散乱を起すことができない。

これらの欠点のため、量子ドットエキシトンと共振器フォトンの結合はいわゆる弱結合状態にあり、様々な高度な機能を持たせることができなかった。

これらの欠点を解決する素子として、不均一拡がりの狭いドナー不純物にトラップされたエキシトンを発光源とする単一光子光源として、フッ素19 (¹⁹F) 原子1個をセレン化亜鉛 (ZnSe) 半導体中のドナー不純物として閉じ込めたフォトニック結晶マイクロキャビティを開発した (図7)。

この新しい素子の開発に ZnSe 結晶成長、ド

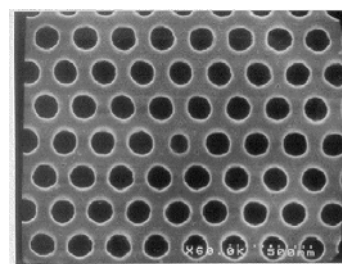


図7 GaAs に形成されたフォトニック結晶

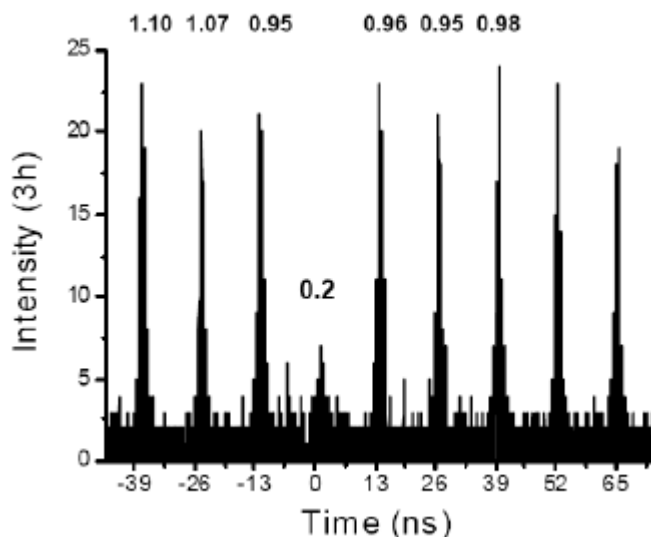


図8 ¹⁹F:ZnSe 単一ドナー不純物からの単一光子実験

¹³ Fattal D., et al., Phys. Rev. Lett. 92, 037903 (2004)

ナー不純物原子(^{19}F)を1個だけ含む結晶部分を分離する微細加工法(メサエッチ法)、分光実験技術を立ち上げた。その結果、 $g(2)(0)=0.2$ という光子アンチバンチング特性を観測して、その単一光子発生を証明した¹⁴(図8)。

さらにこの素子では同時にドナー不純物にトラップされた電子はゼーマン分裂を起して最低のエキシトン準位と共に3準位系を構成する¹⁵。すなわち、ドナー不純物の核スピンのゼーマン分裂を起した2準位を量子メモリーの量子ビットとし、これにハイパーファイン相互作用で結合している束縛電子スピンのゼーマン分裂した2準位を量子制御ビットとし、これと束縛電子の間でラムダ型の3準位を形成する。この系を1ピコ秒以下の光パルスで励起し、電子スピンのコヒーレントな回転操作、すなわち量子ビット制御を実現した¹⁶(図9)。

この素子を用いれば、コヒーレント・ラマン散乱過程を用いて、より高い効率、高速で単一光子を発生できるばかりでなく、単一光子パルスを、逆過程を用いてトラップすることができる。量子中継の素子としての利用を提案した。

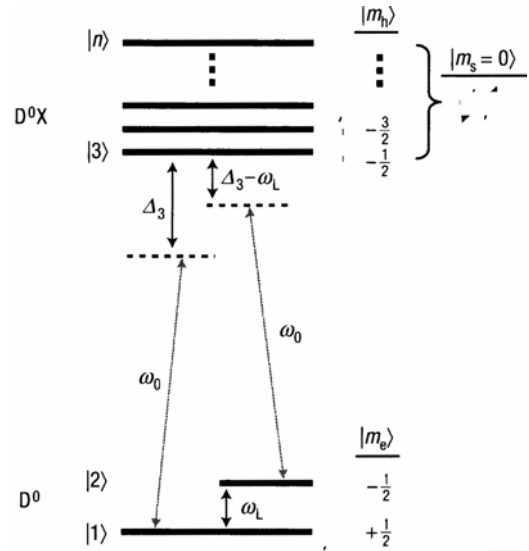


図9 3準位ラムダ型遷移による半導体電子スピン1ビット制御の原理図

|1>と|2>がゼーマン分裂した束縛電子の2状態。束縛励起子の最低準位との間でラムダ型3準位を構成する。この系のラマン散乱過程により電子スピンの回転操作を実現した。

(2) 量子中継技術への展開

QKDの通信距離は現在精々200Kmであり、実用的には100km以内と言われている。量子暗号システムを300km以上の長距離システムとするためには、いわゆる量子中継という技術を用いなければならない。そのためには、数十km離れた2点間に量子エンタングル状態を配信し、その後純粋化、スワッピングというステップ(nested purification protocol)を各中継点で実装しなければならない。

¹⁴ Englund D., et al, "Generation and transfer of single photons on a photonic crystal chip", Optics Express, 15, 5550, (April, 2007)

¹⁵ Ladd T.D., et al., "Hybrid Quantum Repeater Based on Dispersive CQED Interactions between Matter Qubits and Bright Coherent Light," New Journal of Physics 8, 184 (September 2006)

¹⁶ Clark S.M., et al., "Quantum Computers Based on Electron Spins Controlled by Ultrafast Off-Resonant Single Optical Pulses", Phys. Rev. Lett. 99, 040501 (July, 2007)

この3つの量子操作を可能とする中継器として、前述の3準位ドナー原子1個を閉じ込めた共振構造の量子（cavity QED）システムをノード¹⁷とし、これらのノードをコヒーレント状態にある光パルスでつなぐ、量子テレポーテーションのプロトコルを提案した¹⁸。図10はその構成を示している。この構成の特徴は、プロ

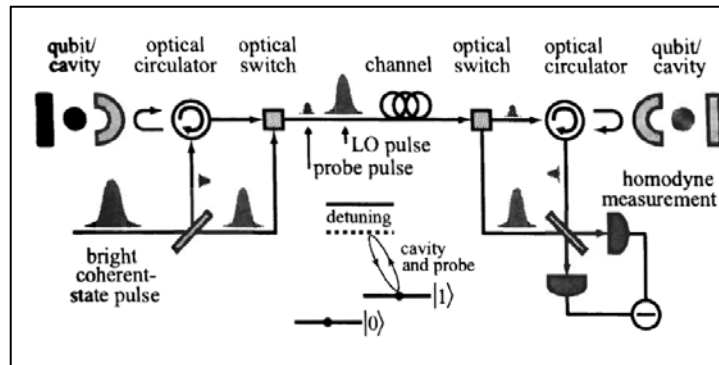


図10 量子テレポーテーションの構成。LO 光パルスとプローブ光パルスを送り、LO パルスを使って検出側の共振器に記憶させると同時にプローブ光パルスを測定する。

ーブ光パルスと LO 光パルスがほぼ同じような時刻に光ファイバ上を伝わるため、光ファイバの位相遅延の影響がほぼ解決できることである。この構成による見積もりでは、99%の忠実度で 1280Km の距離を通信レート 100Hz で通信できる。

これら2つの成果により、エンタングルメントを用いた量子暗号通信（BBM92、Ekert91 プロトコル）や線形光学量子コンピュータ（KLM プロトコル）などを、この単一光子光源を用いて実現できることを原理的に証明することができた。すなわち、「識別できない単一光子」は光子対と同等に使うことを示した。

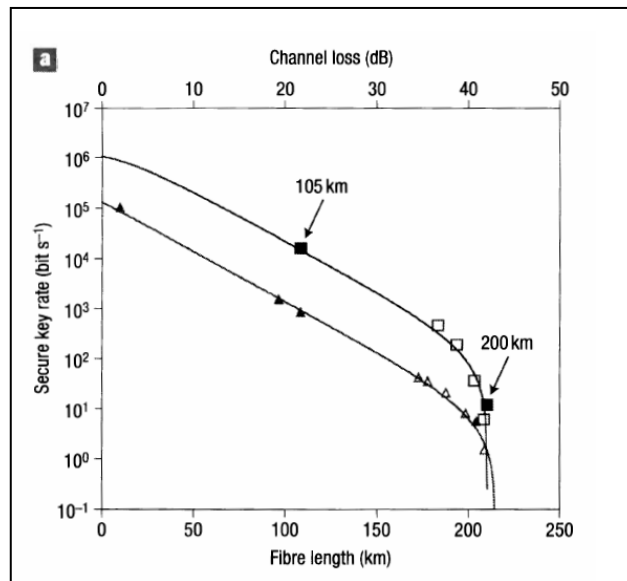


図11 DPSによるQKD 実証実験

¹⁷ ネットワークを構成する一つ一つの要素のこと。通信ネットワークではコンピュータやハブ、ルータなど一台一台の通信機器がノードを構成する。ノードとノードを結ぶ線をリンクという。

¹⁸ Loock P., et al., “Hybrid Quantum Repeater Using Bright Coherent Light”, Phys. Rev. Lett. 96, 240501 (June 2006)

(3) 量子暗号鍵の配布プロトコルの実証実験

本プロジェクトで提案した差動位相シフト（DPS）プロトコルは、その後の安全性の数学的な証明研究等を経て、実証研究の段階へと進んだ。総務省が 2006 年から 5 ヶ年計画で進める量子暗号方式実用化において、(独)情報通信機構（NICT）を通じて NTT 物性科学基礎研究所（以下 NTT 研究所と略す）が「量子暗号の実用化のための研究開発」テーマでの研究委託を受けて、DPS 方式による QKD 実用化の開発と実験を代表研究者と共同で行った。その結果、鍵生成レート 12bps（bps はビット／秒）（距離 200Km）及び 17Kbps（距離 100Km）と世界最高の性能を達成した¹⁹（図 11）。

2.1.2 励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮

本プロジェクトにおいて励起子ポラリトンの過渡的な量子縮退現象の観測に成功していたことは前節に述べたとおりである。この過渡的な現象を熱平衡ボーズ凝縮現象とするために、エキシトンの共鳴エネルギーに比べ、マイクロキャビティの共鳴エネルギーを高エネルギー側へシフトさ

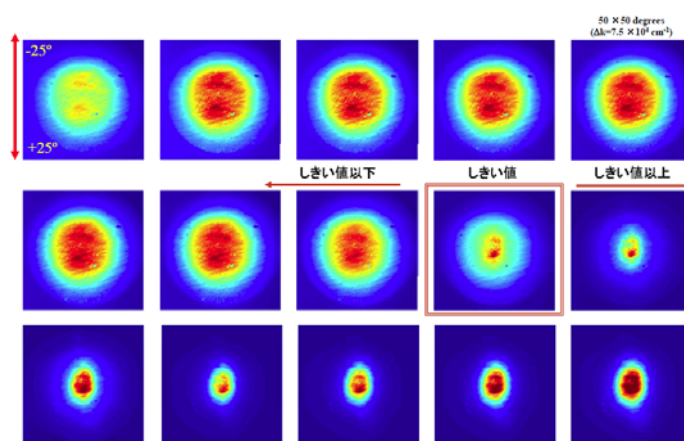


図 12 励起子ポラリトンのボーズ凝縮に伴う運動量の劇的な変化

せ(blue detuning)、これにより、ポラリトンのエキシトン成分を大きくし、冷却効率を上げることができた。その結果、ポラリトンの冷却時間をポラリトンの寿命よりも短くすることに成功した。こうして、熱平衡状態のポラリトンのボーズ凝縮の観測に初めて成功した。例えば、ボーズ凝縮の特性の 1 つである、熱平衡条件下での量子縮退の観測²⁰、ボーズ凝縮に伴う巨大な空間コヒーレンスの形成の観測²¹、1 次元格子中での $\mathbf{p}$ 軌道励起状態でのボーズアインシュタイン凝縮の観測²²、励起子ポラリトンについて励起スペクトルのエネルギー対運動量の分散関係を精密に観測し、ヘリウム 4 液

¹⁹ Takesue H., et al., "Quantum key distribution over 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors," *Nature Photonics* vol. 1, 343 (2007)

²⁰ Deng H., et al., “Quantum Degenerate Exciton-Polaritons in Thermal Equilibrium” *Phys. Rev. Lett.* **97**, 146402 (October 2006)

²¹ Deng H., et al., "Spatial Coherence of a Polariton Condensate," Phys. Rev. Lett. 99, 126403 (September 2007)

²² Lai C., et al., "Coherent zero-state and $\frac{1}{4}$ -state in an exciton-polariton condensate array," Nature 450, 529 (November 2007)

体やアルカリ原子気体のボーズ凝縮体と同じ線形な分散関係を観測した²³ (図 12、

図 13)。図 12 は量子ドット共振器を光パルスで励起したときに素子から発生する光のエネルギーと運動量を分光学的に同時に測定する手法によって測定したものである。発生する光の縦軸がエネルギーを示し、横軸が運動量を示している。この図からボーズ凝縮のしきい値以下のポラリトン密度では、励起子ポラリトンの分散関係は通常の放物型になっており、粒子のエネルギー分布は熱的に大きく広がっている。しかし、励起子ポラリトンの数がボーズアインシュタイン凝縮のしきい値に達すると、急激に運動量分布が狭くなり、運動量ゼロの状態でボーズ凝縮が起こったことが確認された。

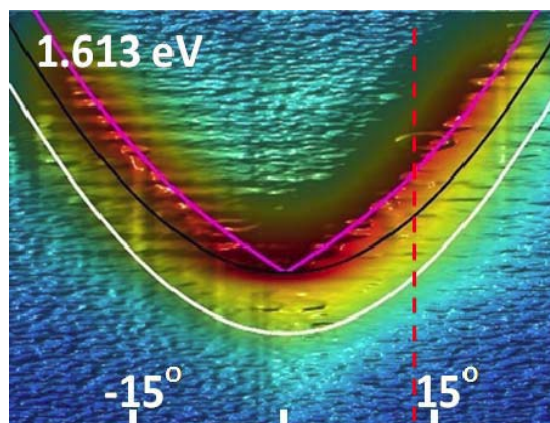


図 13 励起子ポラリトンの励起スペクトル。ボーズ凝縮状態特有の直線関係(桃色の線)が得られた。

ボーズ凝縮体には、より高いエネルギーを持った励起スペクトルがわずかながら常に存在した。その分散関係を測定した結果を図 13 に示す。運動量の小さな領域では放物型ではなく線形な分散関係が観測され、超流動状態となっていることを示している。その線形なエネルギー対運動量の分散の傾きから超流動現象が起こる臨界速度が 10^8 cm/秒であることが結論された。この臨界速度は、アルカリ原子気体の臨界速度よりも 8 桁速く、またヘリウム 4 液体の臨界速度よりも 4 桁も速いものである。固体中の励起子（電子-正孔対）も超流動状態になりうることを、およびその臨界速度が極めて速く光速のわずか 100 分の 1 であることが、今回の実験で初めて明らかにされた。

その提案（1965 Keldysh）から 40 年経って、励起子の BEC にこれら一連の成果がひとつの区切りをつけたと言える。

2.1.3 シリコン単結晶の量子コンピュータ

本プロジェクトのシリコン量子コンピュータの共同研究者伊藤公平教授（現慶応大学教授）が引き続き JST の戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」研究課題「全シリコン量子コンピュータの実現」（2001 年～2007 年）において、研究を継続した。その結果、本プロジェクト中に行われた提案（2002 年）と比較して、アンサンブル（統計的集団）演算を理想的な単一

²³ Utsunomiya D, et al, “Observation of Bogoliubov excitations in exciton-polariton condensates”, Nature Physics, Published online: (August 2008) doi: 10.1038/nphys1034 (August 2008)

量子演算に発展させたことと、その場合に困難とされる初期化と読み出しを、リン不純物を用いて実現するアイデアを具体化したことがその後の成果である²⁴。この研究の中で核スピンの相互作用が弱い故にコヒーレンス時間が長い、しかしそれ故に外部からの効率的な制御が難しい課題も明らかになった。全シリコン量子コンピュータはコヒーレンス時間が長いことから量子メモリーとして適しているとの提案がされている。

シリコンコンピュータで使われた量子の核スピンはデコヒーレンスの時間が長い特徴があるが、一方、スピンを揃える初期化や各量子の制御に高周波の電磁パルス（以後 RF パルスと略記する）を使うため、処理スピードが遅い欠点がある。そのため、代表研究者は、電子スピンを光で制御する方式へと研究の方向を変えた。それは RF パルスで制御する方式では各量子へのアクセスが本質的に難しいことと核スピンの制御に短くてナノ秒の時間が掛かるのに対して、光による制御では量子へのアクセスが容易になるだけでなく桁違いに速い制御時間が得られるからである。そのため代表研究者は量子としての電子スピンを制御する方法として、従来のラマン散乱を使う方法とは異なる方法を研究した。その結果不純物量子ドットで中のラムダ型の 3 準位系を使い、光学遷移の共振から外れた波長の光でドナーに束縛された電子を励起する新しい誘導ラマン散乱の方法で、1 パルスで $\pi/4$ 、2 パルスで $\pi/2$ を越える回転を得た²⁵。光による固体中の電子スピンをピコ秒で制御できれば、光の量子情報を高速で不純物量子ドットの量子情報へとコピーでき、コヒーレンス時間が短い固体の量子系での量子制御に有力な技術となる。

2.2 プロジェクトメンバーの活動状況

本プロジェクトは主にスタンフォード大学で行われたため、研究者の多くは外国人である。学生を含めた 9 人の研究者の中 3 人がプロジェクト終了後様々な大学の Assistant Professor になっている（詳細は別添資料 D を参照）。その後の SORST プロジェクトでは殆どのメンバーが入れ替わっており、その中で上述の成果を挙げることができたのは驚異的である。日本人の研究者も企業から 2 名（キヤノン（株）、パナソニック（旧松下電器産業（株））、国立情報学研究所（NII）から 2 名が参加している。

²⁴ JST 戦略的創造研究推進事業 CREST（研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」）研究課題「全シリコン量子コンピュータの実現」（平成 13 年～平成 19 年）研究終了報告書

²⁵ Fu K.C., et al., “Ultrafast control of donor-bound electron spins with single detuned optical pulses”, Nature Physics, Published online: doi:10.1038/nphys 1052 (August 2008)

第3章 プロジェクト成果波及と展望

3.1 科学技術への波及

3.1.1 量子暗号通信

本プロジェクトで研究開発された成果の一つは、「識別できない単一光子」発生技術とそれを実現する固体デバイス、量子暗号鍵配付 (QKD) のプロトコルであった。「識別できない単一光子」発生技術や差動位相シフト方式 (DPS) プロトコルの実現は量子通信に必要な要素技術である光源の問題やプロトコルの課題を確実に克服してきた。特に、固体中の量子ドットという、現在の技術によって作製可能で、しかも高速の光子発生が期待できる実用的と思われる系で実現してきたことは、原理実証というよりは、実用基礎技術と言えるもので、QKD 技術のみならず、量子通信を技術的に大きく前進させるものである。その結果、「識別できない単一光子」発生技術を使つての高性能な QKD 通信の実証実験が行われた。この分野では QKD の実現に向けて多くの研究が行われてきており関心が高い。このプロジェクトで行ってきた成果の影響は引用数に示されており、単一光子発生のもっとも重要な論文²⁶では 300 回以上引用されている。研究者が多いと言えないこの分野で驚異的な引用数である。特に、量子ドットの単一光子発生研究が世界的に立ち上がった 2001 年から 2004 年においては、3.1.3 項で後述するように、多くの論文で引用された。

近距離の QKD はすでに実用の段階に入ったと言われる。しかし、候補となる技術がいくつか挙げられているものの、まだ確かなことが言える段階ではない。QKD プロトコルについては、一番古い BB84 とその改良版であるデコイ BB84 が有力といわれているが、DPS 方式も候補として残っており、DPS が使われる可能性は十分ある。単一光子源も弱いレーザー光源が現在は有力といわれているが究極の技術とは思えない。本プロジェクトが研究してきたキャビティ量子ドット (Cavity QED) のような本質的に優れた光源に変わってゆくと思われる。

現在量子暗号通信の大きな課題は量子中継技術である。この技術は小規模の量子コンピュータと言われており、数十量子ビット以下の量子情報処理、すなわち、量子ゲート、量子メモリー機能を備え、入出力として光通信機能が必要である。前述のように本プロジェクトは、単一光子発生技術を実現したデバイスを使って、長距離の量子

²⁶ Santori C et.al., Phys Rev Lett, 86, 1502-1505, 2001
Santori C et.al., Nature, 419, 594-597, 2002

鍵配信に必要な量子中継技術を実現する素子の提案と実証にも展開し注目される大きな成果を挙げており、この分野をリードしている。

代表研究者は、予想される次の課題にいち早く取り組み、新しい提案を行い、優れた成果を挙げてきた。その実績からこの分野の世界の研究を牽引する研究者の一人と目される存在といえる。また、NTT の研究所や国立情報学研究所（以後 NII）との共同研究を通じて日本と世界をつなぐ役割においても多大なよき影響を与えている。

3.1.2 励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮（BEC）

代表研究者は量子暗号通信というような具体的な応用イメージがある研究とともに、光との共振状態にある半導体量子ドットの励起子、励起子ポラリトンの物理現象を長年追いかけてきた。本プロジェクトで過渡状態ではあるが凝縮を観察し、その後さまざまな技術を開発して、ついに固体中の励起子（ポラリトンという形態ではあるが）の BEC を実証した。さらにその中で、BEC 状態での位相反転や量子渦等の物理的に面白い現象を見出してきた。さらに、超流動と見られる現象を見出し、超流動の臨界速度が桁違いに高速であることも見出した。

光と結びついた励起子ポラリトンの量子情報が光により比較的容易に外部から観察できること、励起子の有効質量が光と結びつくことにより桁違いに軽くなること、BEC 状態への臨界温度が高温でも実現できたりすること等からこのような成果が実現した。これらの性質を使った量子シミュレータ、特に数値計算でも解けないハバードモデル²⁷（超伝導や強磁性等の強く相関する量子のモデル）のシミュレーションへの応用が提案されている²⁸。一般に量子シミュレータと言うと量子状態をコンピュータシミュレーションで解くと

いうイメージが強いが、2002 年のマックスプランク研究所の極低温原子のアレイを使って、多体の量子状態をこの原子アレイの上に実現する量子シミュレーションが発表され注目された。本プロジェクトが開発した手法は、固体中で励起子ポラリトンのアレイを作り、励起子ポラリトンの凝

縮状態を使うアイディアである。このアイディアでは固体を使うため、大掛かりな設備が不要で、光を使つての内部観測が可能であることが大きな特徴である。この量子シミュレータにより、固体中の電子等についての量子状態理解が進み、高温超伝導、超流動等を初めとする量子力学での理解が不十分な問題の理解が進み、応用へとつながることが期待される。

最近、多数の粒子が BEC という基底状態へ落ち込む現象を、いわゆる NP 問題²⁹の最適問題（巡回セールスマン問題が有名）を解く量子コンピュータの提案が代表研究者からなされた（図 14）³⁰。最適問題は今までの量子コンピュータのアルゴリズムでは解けないことがわかっており、新しいタイプの量子コンピュータとして注目される。今後の進展が期待される。

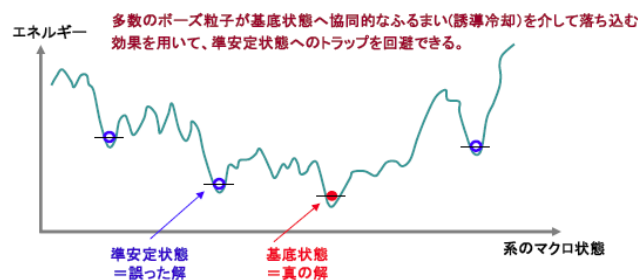


図 14 基底状態へ落ち込む量子による最適問題への量子計算の概念

²⁷ ハバードモデルとは周期ポテンシャル中を相互作用しながらトンネル効果により移動する多数の粒子を扱う固体物理の基本的なモデル。超伝導等の問題への理論モデル。解析手法でも、数値手法でも解けない難問

²⁸ Lai, C.W., et al., “Coherent zero-state and π -state in an exciton-polariton condensate array”, Nature, 450, 529-532, (November 2007)

²⁹ NP 問題とは計算回数が多項式ではなく、指数関数的に増大するタイプの問題をいう。

³⁰ JST、NII の共同新聞発表（2007-11-22）から。以下のホームページによる。

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20071122/index.html>

および、Byrnes, T., et al. “Quantum computation using bosonic final state stimulation and indistinguishability”, Proceedings of 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Poster session

3.1.3 量子ドットからの「単一光子」発生の論文によるインパクト

量子暗号通信の光源として 2 光子以上の発生確率が小さい条件で半導体レーザーを使う方法が本プロジェクトの開始時期に知られていた。しかし、2 光子の発生確率を小さくすると、光量が低くなり、通信速度が上がらないという欠点があった。そのため高い確率で単一光子が発生する光源が求められた。この課題に取り組み、世界をリードして大きなインパクトを与えたのが次の二つの論文である。これら論文の及ぼしたインパクトをキーワード検索を用いて調べた。

- (1) Santori C, Pelton M, Solomon GS, Dale Y, Yamamoto Y Triggered single photons from a quantum dot Phys Rev Lett, 86, 1502-1505, 2001 (被引用数 424 件)
- (2) Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon GS, Yamamoto Y Indistinguishable photons from a single-photon device Nature, 419, 594-597, 2002 (被引用数 377 件)

キーワードとして「単一光子」(Single Photon を含む) および「量子ドット」(Quantum Dot) の両方を含む論文件数を検索した。その結果を図 15 に示す。図には全論文数と被引用論文件数の両方を示した。

このグラフから全体の論文数が 2001 年頃から急速に立ち上がっていることが分かる。上記 2 件の論文が発表されたのは 2001 年、2002 年であり、世界の研究の立ち上がりの初期に発表されたことが分かる。その後、この 2 件の論文は 2004 年頃までは全論文の 2/3 で引用されていた。その後、全論文数が増えるにつれて、割合としては低くなっているが、毎年 30~40 件程度の引用が現在に至るまで続いていることが分かる。

これらのことから、本プロジェクトの研究成果が量子ドットを使った単一光子発生の研究に大きな影響を与えたことが分かる。特に、世界の研究が立ち上がる時にその研究をリードした研究であったことを裏付けるものである。

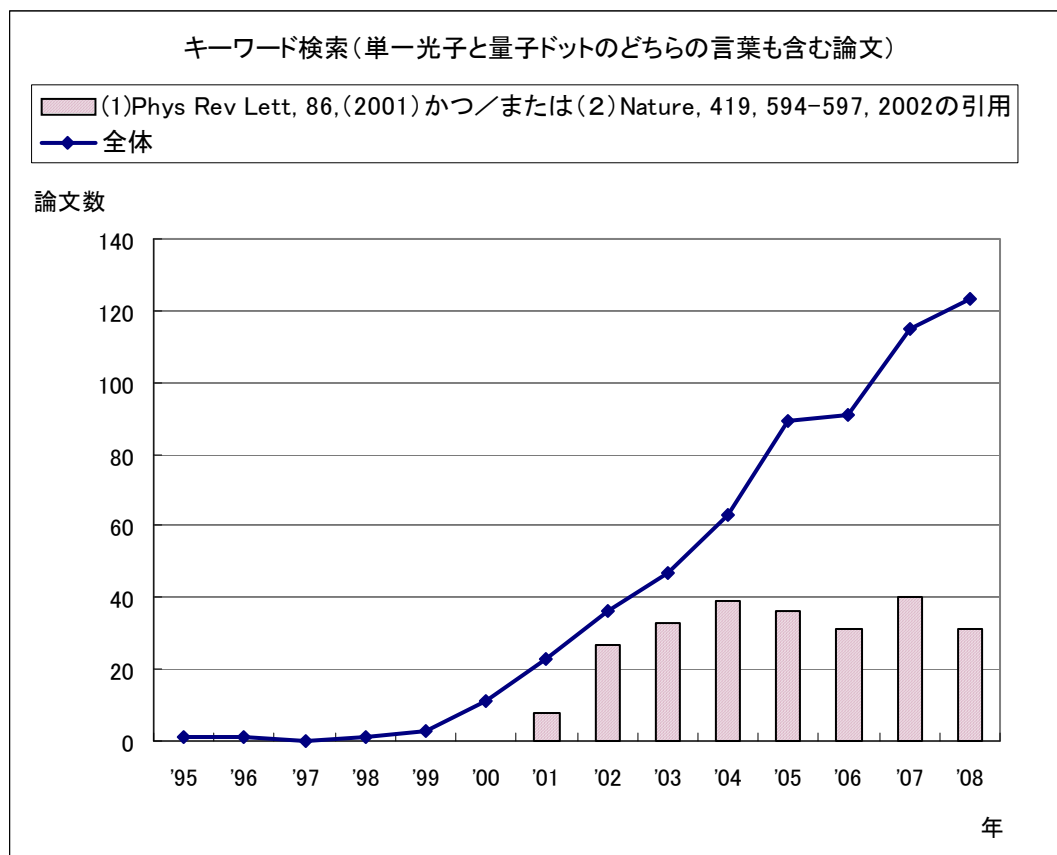


図 15 キーワード検索(「単一光子発生かつ量子ドット」)結果
 全論文数と本文中 2 件の論文に対する被引用件数の比較
 (Web of Science 検索日 2009/3/17)

3.2 社会経済への波及

本プロジェクトが展開する分野には、実現の予想される時期が近未来から、遙か遠い未来、そしてどんな応用が出てくるか分からないものまで様々なフェーズの内容が含まれている（図 16）。量子のもつれの数が多くなるに連れて困難度は増し実現の時期は遅くなる。現在、QKD については既に実用化が可能だと言われている。一般的な高度な量子計算を行う量子コンピュータの実現は遠い未来と考えられているが、その途中に様々な応用を考えることができる。

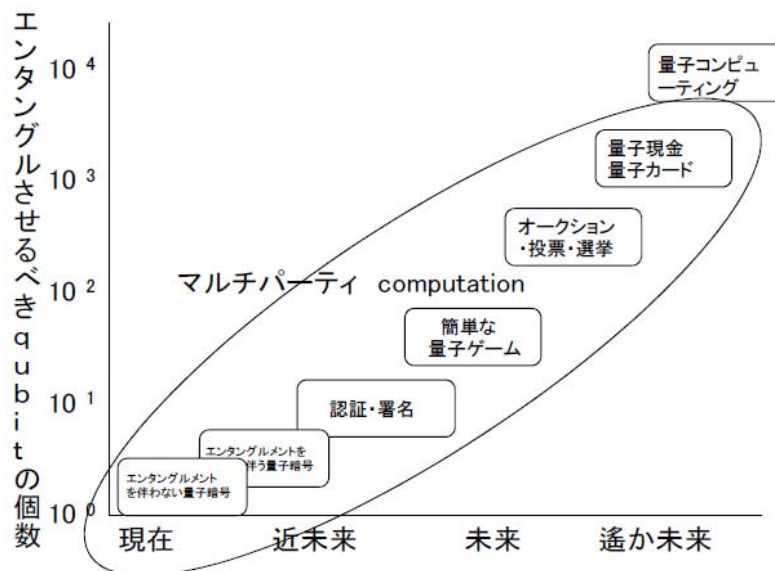


図 16 情報として扱う量子の数と実現する時期

図 17 は実現が期待される様々な量子情報システムを、扱う量子ビットの数とシステムの複雑さの軸で表したものである。扱う量子ビットの数とシステムの複雑さによって、その実現の時間軸が遅くなるという明確な整理ができることから、以下では本プロジェクトに関連する技術について、社会経済への波及効果を時間軸で記述した。

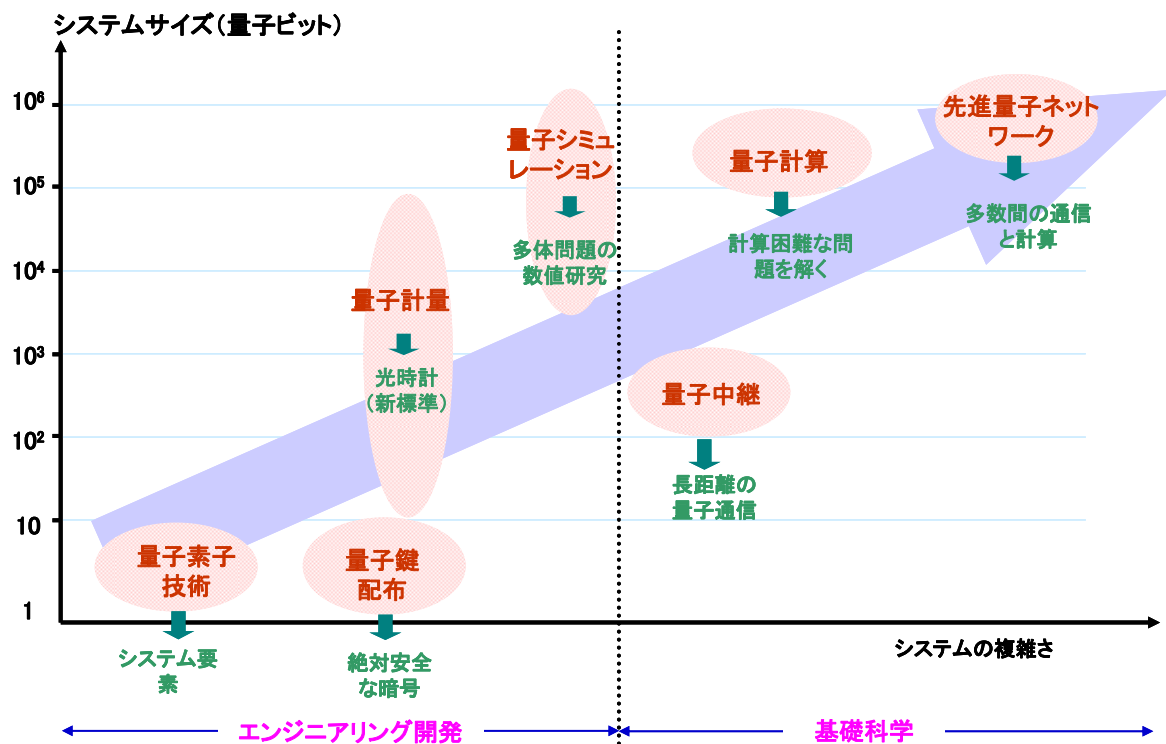


図 17 情報として扱う量子数と技術フェーズ

3.2.1 量子鍵暗号通信の実施（現在から近未来（数年後））

量子情報処理の分野で最も早く実用化されると言われているのが量子暗号鍵配付（QKD）である。既に短距離（100Km 程度）の QKD は要素技術が実用化されている。例えば、2002 年にはスイスの企業 id Quantique が QKD のシステムを商品化した。また、米国の MagiQ Technologies 社も同様のシステムを販売している。日本では、三菱電機、NEC、東芝、日立製作所等のメーカーが QKD を含む量子通信の研究を進めており、大学や国の研究所等と共同でフィールド実験を行っており、成功裏に実証実験が行われている³¹。その結果として、今すぐでも実際に実用可能と言われている。市場規模は前述の MagiQ Technologies 社の予測によると、2015 年、悲観的な場合で 3 億ドル（約 300 億円）、楽観的な場合で 300 億ドル（約 3 兆円）であった³²。ま

³¹ Tanaka A., et al., "Ultra fast quantum key distribution over a 97-km installed telecom fiber with wavelength division multiplexing clock synchronization" The Optical Fiber Communication Conference and Exposition(OFC) San Diego, California, USA, 2008 年 2 月 24-28 日 OWJ - QKD and 100 Gbps Pres., no. OWJ2

³² 「量子暗号通信システムに関する世界的な動向調査報告書」（2007 年 4 月）（独）情報処理推進機構

た、実用のフェーズとして、

フェーズ 1： 政府，軍事関係，研究機関向け

フェーズ 2： 巨大金融機関及び外交関係

フェーズ 3： 中規模金融機関，航空管制，警察，賭博場

フェーズ 4： 公共利用及び地方議会，州政府

フェーズ 5： データ保管庫のような詳細なデータベースを利用する巨大な組織，秘密の顧客情報を守る必要のある会社，たとえば大きな会計事務所や法律事務所

を目標とする順としている。秘匿性が強く要求される順になっている。

現在この技術において、単一光量子の発生として弱いレーザー光が最も実用に近いと考えられているが、このプロジェクトで開発したような、優れた単一光子源であれば安全性が高まり、かつ通信距離が伸びる等のメリットがあることから置き換わってゆくと思われる。

3.2.2 通信の安全が保証された大規模通信社会（近未来から未来（十数年後））

この時間範囲に入ってくるのが遠距離の QKD である。遠距離の QKD には量子状態を中継する中継技術が不可欠である。この技術は規模の小さな量子コンピュータであり、量子コンピュータの要素（量子メモリー、量子ゲート、量子入出力等）をすべて備え、量子ビット数が少ないだけである。量子中継技術のポイントは上記の三つの要素を実現する手段である。本プロジェクトおよびその展開で開発されたドナー不純物にトラップされた励起子は中継の量子ビットとして有力な素子であり、その素子を使った量子中継の構成も本プロジェクトの展開の中で提案されている。本プロジェクトで研究された核スピンは量子メモリーとしての利用が有望視されている。このように本プロジェクトの成果は量子中継技術にも大きく影響を与えている。

量子中継技術が実現すれば、安全性の保証された情報通信が世界中で行える社会が実現する。このことによってインターネットを通じた信頼できる認証、情報の安全が保証された商取引等が行われ、一般社会に大きな影響を与えるものである。2005 年の総務省による 21 世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議報告書によると、図 18 のような QKD を含む安全性の高い都市内ネットワークが構想されている。

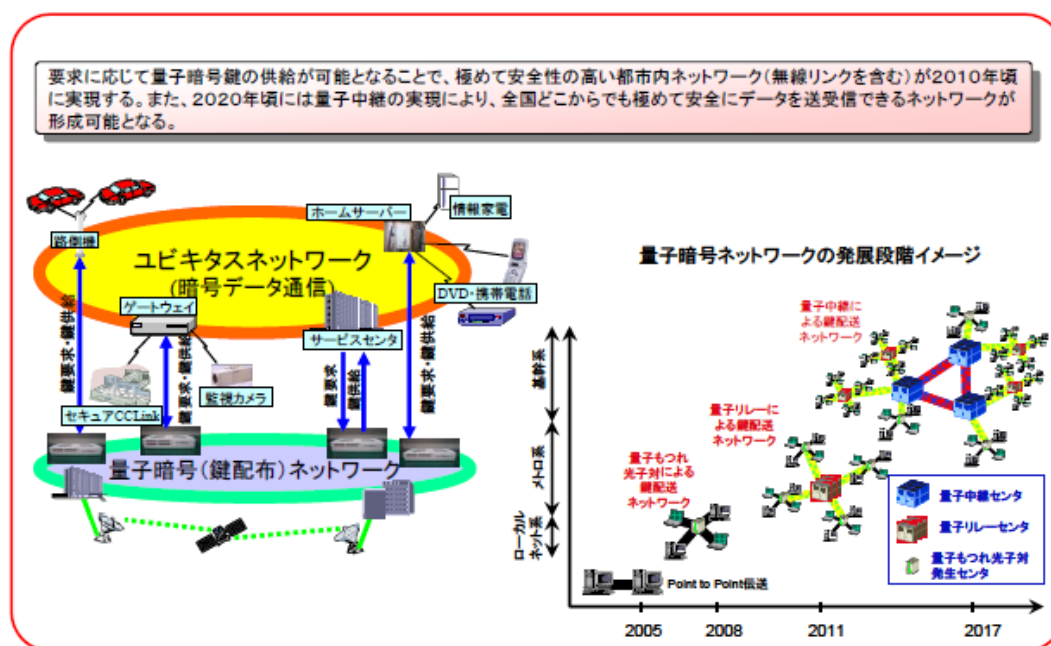


図 18 量子情報通信の実現像

3.2.3 量子シミュレータ・量子コンピュータ（遠い未来（数十年後））

量子コンピュータをはじめとする量子制御技術は理論家が先導してきた。特に、量子コンピュータの概念の発表により、これが実現されれば現在の情報のセキュリティが一挙に崩壊することが明らかになったが、実現性が疑問視されていた。それが具体的な因数分解のアルゴリズムが提案された結果、一挙に研究に火がついたものである。

このプロジェクトの発展から全く発想の異なる量子コンピュータのアイディアが提出された。純物理的な BEC という現象と最適化問題というコンピュータ計算の問題を結びつけ、BEC が基底状態へ量子が落ち込むことを利用して最適化問題の計算ができるかもしれないというユニークな発想である。実際の計算がどのように行われるか等の課題は山積しているが、いわゆる NP 問題がこの手法で、短時間で解ければ画期的である。最適化問題はあらゆる分野の計算で解きたい対象になっており、経済学から生物学等、物理学とはあまり縁のない領域への応用が可能である。しかし、このテーマは遠い未来と考えられており、波及効果を具体的に見積もることは難しい。

量子コンピュータの理論面では、前述の因数分解やデータベース検索等、いくつかのアルゴリズムが提案されているが、まだまだ様々な有用なアルゴリズムを研究して行く必要がある。もっと課題が多いのが量子コンピュータを実現するための物理的な

素子とシステムの研究である。現在、各国で様々なアイディアで研究が行われているがその実現の見通しは得られていない。

本プロジェクトからの社会貢献や経済貢献への成果が現実の物になるのは短期的なものは数年以内（QKD 等）、長期的なものは数十年掛かるかもしれない。しかし、この研究が代表研究者の所属するスタンフォード大学と日本の NTT や NII との共同研究として行われたことは有形無形の刺激を若手研究者に与えていると思われる。この研究を通じての科学技術への貢献とともに、若手研究者の育成に大きなインパクトを持つことになると思われる。

以上