

独立行政法人科学技術振興機構

創造科学技術推進事業

第二次追跡調査報告書

青野原子制御表面プロジェクト(1989～1994)

総括責任者 青野正和

青野原子制御表面プロジェクト追跡調査報告書要旨

原子を1個ずつ任意に操作して物質の構造を制御することは、材料科学者や表面科学者の究極の夢であったが、青野原子制御表面プロジェクトでは、試料にSiを使い常温で単一原子の操作を可能にする方法が系統的に研究され、試料表面の任意のSi原子を除去する方法、試料表面にSiあるいは異種の単一原子を付与する方法、表面に付与した原子を移動する方法が開発された。また、原子が除去される物理的機構は電圧パルスによって試料表面に発生する電界による原子のイオン化/蒸発(電界蒸発)であることが明らかにされた。第一原理から試料表面の電子状態を計算し計算結果と実験結果とを相互に検証することによりSTM像の解釈法が理論的に確立され、原子操作により得られる表面の構造が明確になった。また、探針の状態とSTMイメージとの関係、原子の引き抜きのメカニズム、単原子を表面に置いた時の安定性や位置の予測なども理論的に明らかにされた。

上記の単一原子操作法の開発とそのメカニズムの解明に加えて、原子の除去および付与をリアルタイムで検出する方法や表面原子の位置による結合エネルギー差を計測する方法を開発するとともに表面欠陥近傍の歪分布の観察にも成功した。また、単一の液晶分子を電極として用いることにより室温でのクーロンブロックイデ(CB)現象を世界で初めて観察し、この現象を応用した単一電子トランジスタの作製とその動作確認に成功した。

STMによる原子操作はスループットが悪いため、実デバイスを作る方法とするには何らかの大きな改革が必要であることが明らかになったが、STMはナノテクノロジーの極限の手法として新規な人工物質を試作し、その構造・物性を評価する実験装置として不可欠のものとなった。

青野プロジェクトの成果をうけて、単原子操作により意味のある原子サイズの構造を作りその物性を評価するための研究が戦略的創造研究推進事業(CREST)の「人工ナノ構造の機能探索プロジェクト」に引き継がれた(1995~2000年)。この研究においては、ナノレベルの構造の物性評価のため多探針STMが開発され、原子細線の電気伝導性、ナノ分光、ナノ磁性などの研究が行われた。これらの研究成果を参考に、国際共同研究事業(CORP)の「ナノ量子導体アレープロジェクト」が2003年からスタートしている。また、理化学研究所において、原子スケール・サイエンジニアリング研究推進グループが組織され原子スケールの構造制御とそれに関連する様々な事象についての研究が行われている。

STMに加えて少し遅れて登場してきた原子間力顕微鏡(AFM)も原子オーダの分解能を持つ顕微鏡であり、青野プロジェクトで行われたSTM像の理論解析をAFMにも拡張するとともに、その計算速度を大幅に改善する研究に展開されている。

上記の「人工ナノ構造の機能探索プロジェクト」のなかで、Ag原子を使った原子スイッチが発明された(1999年)。その実用デバイスへの応用に関する研究が科学技術振興機構の基礎的研究発展推進事業(SORST)の「新しい量子効果スイッチの機能素子化プロジェクト」へと引き継がれた(2000~2003年)。これに日本電気(株)が興味を持ち、物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所

と共同してプログラマブルIC を目標に開発が行われた。従来のプログラマブルIC の問題であったチップ面積、消費電力がそれぞれ 1/10、1/3 に改善されると期待されている。

原子操作によって得られるナノ構造の物性評価のためには多探針の STM が有効である、というアイデアが青野プロジェクトで生まれた。そして、そのような装置は後続プロジェクトの「人工ナノ構造の機能探索」(CREST)において開発された。その技術を応用して4探針のSTMを、物質・材料研究機構が、京都大学、堀場製作所と共同で開発中である。3年後の実用化を目指しており日本製で世界初のユニークな分析・計測装置として期待されている。

青野プロジェクトの発足15周年を記念する第1回国際シンポジウム1stFON 04 (Functionality of Organized Nanostructures)が2004年11月30日～12月2日まで筑波で開催された。STMの発明者でノーベル賞を受賞しているH. RohrerのKeynote Speech、28件の招待講演、24件のポスタ発表が行われた。国内外の招待講演者からはいずれも青野プロジェクトに学術的な意味で刺激を受けたという主旨の報告が多かった。

青野プロジェクトは個人的に参加した若手の研究者が多かったが、それぞれが各持場で成果を上げ、その後の研究の基盤を築いた人が多い。本プロジェクト実施期間中に3名が学位を取得している。

以上

1. はじめに.....	1
2. プロジェクト研究終了後の科学技術をとらまゝ環境の変化.....	1
3. 研究の継続性とその後の展開	2
3.1. プロジェクト終了時の達成状況	2
3.2. 研究のその後の展開	3
3.3. 科学技術へのインパクト.....	6
4. 研究成果の波及効果及びインパクト.....	7
4.1. 産業的波及効果.....	7
5. 参加研究者の活動状況.....	7
5.1. プロジェクトから育った人材の状況.....	7
5.2. 学位取得	8
6. 創造科学技術推進事業に関する意見	10
6.1. 事業の意義.....	10
6.2. 仕組み運営面に関する提言.....	10
7. アンケート 調査結果.....	11
7.1. 新たな科学、技術分野の開拓.....	11
7.2. 学会、分科会、研究会等の創設.....	12
7.3. 状況変化への寄与	12
7.4. 新たな産業分野の成長.....	13
7.5. 総括責任者に対する評価	13
8. 統計資料.....	14
8.1. 論文被引用件数推移.....	14
8.2. 特許収益の年次推移.....	20
8.3. 招待講演回数の推移.....	20
8.4. 受賞	20

1. はじめに

原子を1個ずつ任意に操作して物質の構造を制御することは、材料科学者や表面科学者の究極の夢である。1982年に金属探針と試料との間のトンネル電流を観測し試料の表面形態を原子レベルで観察する走査トンネル顕微鏡 (STM) が発明された。STM 技術のキーポイントは、試料表面を観察するための探針の製作技術とその探針の位置を原子寸法の何分の一もの精度で駆動する制御技術であるが、このことは STM の探針は試料表面の原子レベルの形態を観察する「目」だけではなく、原子を1個ずつ走査する「手」としても使える可能性を示唆するものであった。

青野原子制御表面プロジェクトは上記背景のもとに、STM の探針による単一原子の操作法を開発すること、単一原子操作の物理的機構を明確にすることを目標に行われた。実験は未踏の分野に踏み込むことになるので、実験結果の解釈や実験の方向づけのために理論解析との密接な協力関係を保ちながら進めるといふ構想のもとに実施された。

原子スケールの構造を制御した電子デバイスなどの実用的な応用については、本プロジェクトの成果の応用が大いに期待できるところであるが、実用的な応用は、原子操作に関する基礎的な知見が得られた次のステップの課題と位置づけられ研究が推進された。

2. プロジェクト研究終了後の科学技術をとりにく環境の変化

青野原子制御表面プロジェクトのねらいであり、またその英語名でもある「アトムクラフト」は究極のナノテクノロジーといえる。本プロジェクト発足前からナノテクノロジーなる用語ならびにこの分野における研究の萌芽が見られていたものの、本プロジェクトの活動中および本プロジェクト終了後現在まで、ナノテクノロジーの社会的認知度ならびにナノテクノロジーに対する期待は高まる一方である。21世紀の前半に突入するとされる原子・分子の科学と技術の時代」をにらんで、日本だけでなく欧米も含めてこの分野でイニシアチブを握るため、各国はナノテクノロジーを最も重要な基盤技術と位置付け、集中的・重点的に国家予算を投入するなど戦略的な政策運営が行われるようになった。

ナノテクノロジーにおける微細加工の2つの流れである「ボトムアップ」と「トップダウン」に関して、半導体の微細加工技術に代表される「トップダウン」技術は経験の世界であり、あまり学問的ではないが巨大な電子産業が技術開発を牽引するためその進歩はめざましく、15年前にいわれていた「トップダウン」の限界はどんどん克服されてきている。一方「アトムクラフト」は究極の「ボトムアップ」技術であるが、実用的にはまだまだ未成熟である。

科学技術をとりにく環境については、グローバルな国際競争がますます激しくなっていることや基礎研究にたいする重要性の認識の高まりが国の政策や企業の研究活動にも影響を与えるようになってきている。また、複数の専門分野にまたがる研究がますます重要になりつつあり、インター

ディシプリナな研究プロジェクトの企画および推進リーダーが強く求められている

3. 研究の継続性とその後の展開

3.1. プロジェクト終了時の達成状況

青野原子制御表面プロジェクトがねらった STM の探針による単一原子の操作技術を開発すること、単一原子操作の物理的機構を明確にすること、実験結果の解釈や実験の方向づけのために理論解析との密接な協力関係を保ちながら進めること、についてはほぼ目標どおりの成果が得られた。また、これらの研究の過程で、表面原子の結晶学的位置による結合エネルギー差の検出や表面欠陥周辺の歪分布の観察が可能であることが明かにされた。さらに、室温で動作する単電子トランジスタの原理となる室温でのクーロンブロック現象の観察に成功した。

3.1.1. STM による単一原子操作技術の開発及び機構の解明

試料に Si を使い、常温で単一原子の操作を可能にするため STM 探針の調製方法 (材質、電界研磨条件など)、探針と試料との間にかける電圧パルスの極性・大きさ・継続時間、探針と試料との間の距離などを系統的に研究し、試料表面の任意の Si 原子を除去する方法、試料表面に Si あるいは異種の単一原子を付与する方法、表面に付与した単一原子を移動する方法を開発した。また、原子の除去について、その物理的機構は電圧パルスによって試料表面に発生する大きな電界 (数千万 V/cm) による原子のイオン化 / 蒸発 (電界蒸発) であることを明らかにした。

上記の単一原子操作法の開発とそのメカニズムの解明に加えて、探針と試料との距離を高精度 (0.01 ナノメートルの精度) でモニタすることにより、原子の除去および付与をリアルタイムで検出することができることを明らかにした。また、単原子操作法を応用し、原子を除去する難易度から、表面原子の位置による結合エネルギー差を計測する方法を見出した。さらに、表面欠陥近傍の歪分布の観察にも成功した。

青野プロジェクトがスタートしてから IBM の Eigler ら (Ni 表面の Xe, 1990)、日立の細木ら (MoS₂, 1992) による STM をつかった原子操作の報告が相次いだ。青野プロジェクトでは半導体の基礎材料である Si について常温での系統的な実験を一貫して行い単原子操作技術を開発するとともに、そのメカニズムを明確にした。

青野プロジェクトにおいて、単一原子操作が STM を使えば可能であることが実証されたことは、ナノテクノロジーにおけるボトムアップ技術の原点が明確になるとともに、トップダウン技術から見ればその極限が見届けられたということで意義は大きい。STM による原子操作は、スレーブが悪いため実デバイスを作る方法としては適さないことが本プロジェクトにおいて明らかにされたが、STM

はナノテクノロジーの極限の手法として新規な人工物質を試作しその構造、物性を評価する実験装置として不可欠のものとなった。

3.1.2. STM 像の理論計算法の確立

STM 像は探針と試料との間に流れるトンネル電流の分布を見ていることになるが、トンネル電流は電子状態の影響を敏感に与える。STM 像を解釈するためには試料表面の電子状態を予測する必要があり、第一原理から理論的に試料表面の電子状態を計算し、計算結果と実験結果とを相互に検証した。その結果 STM 像の解釈法が理論的に確立され原子操作により得られる表面の構造が明確になった。また、探針の状態とSTM イメージとの関係、原子の引き抜きのメカニズム、単原子を表面に置いた時の安定性や位置の予測なども理論的に明かにした。

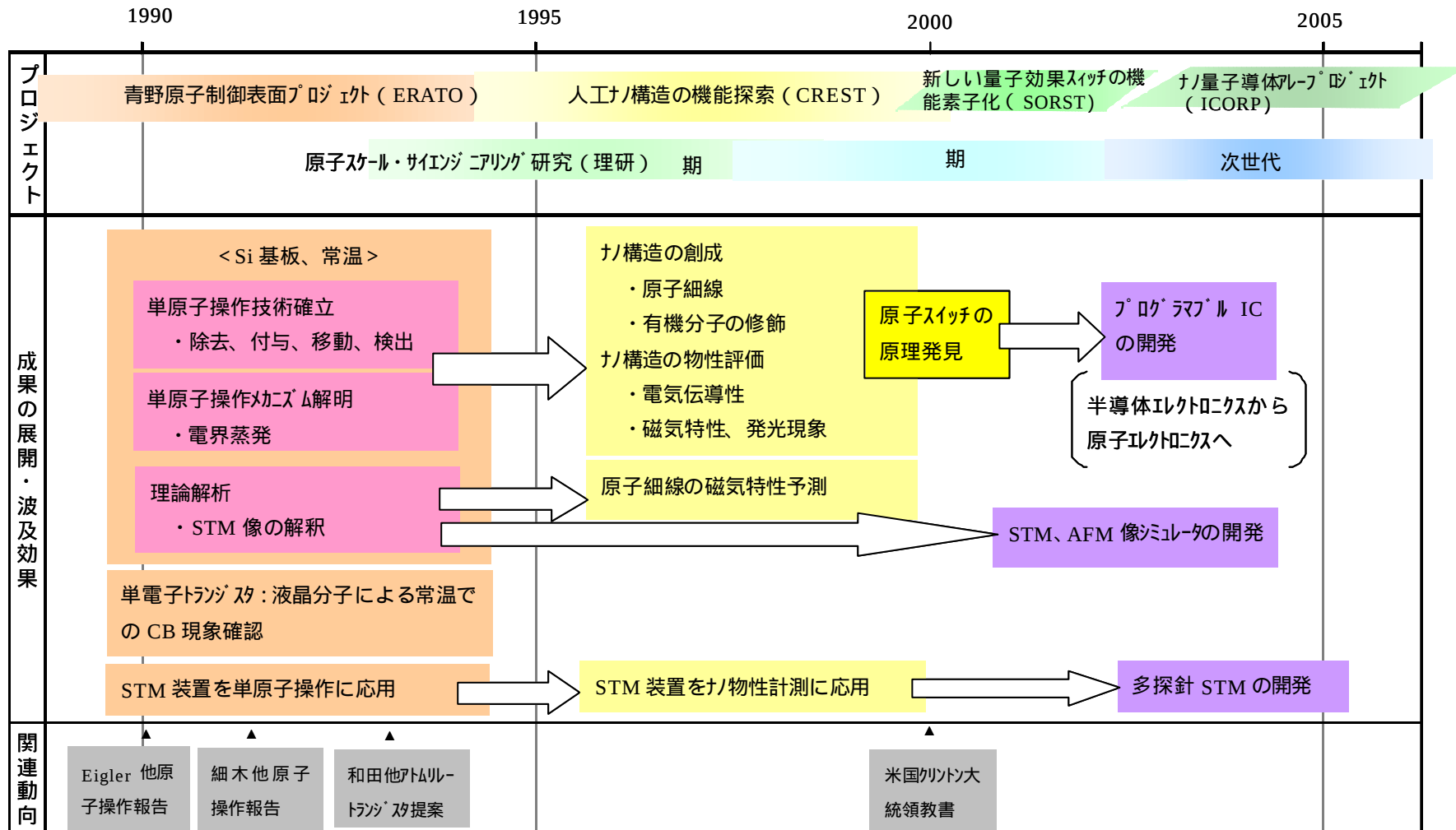
STM による原子操作は全くの未踏の分野であったため、実験結果の解釈や実験の方向づけのために理論の重要性を最初から認識し、理論解析のグループを含めてプロジェクト体制を組むという構想で研究が進められ、ねらいどおりの成果をあげた。

3.1.3. シングル・エレクトロンデバイスのコンセプト確認

単一の液晶分子を電極として用いることにより室温でのクーロンブロッケイド(CB)現象を観察することに成功した。電極を小さくすれば室温でも CB 現象が見られるはずという理論的予測を実証できたことを意味する。この現象を応用し単一電子トランジスタのモデルを作製しその動作確認に成功した。最近分子エレクトロニクスの発展は著しいが、青野プロジェクトにおけるこの成果は、分子エレクトロニクスの研究の巾を広げるのに寄与している。

3.2. 研究のその後の展開

青野原子制御表面プロジェクトの展開状況



3.2.1. ナノ構造の創製とその物性評価

青野プロジェクトによりSTM による単原子操作とそのメカニズムが明確にされたが、次のステップとして単原子操作により意味のある原子サイズの構造を作ること、その構造に発現する物性を評価することが課題となった。これらの課題に取り組むため、戦略的創造研究推進事業 (CREST) の「量子効果等の物理現象」の領域において「人工ナノ構造の機能探索」という研究に引き継がれた (1995 ~ 2000 年)。この研究においてはナノレベルの構造の物性評価のため多探針 STM が開発され、原子細線の電気伝導特性、ナノ分光、ナノ磁性などの研究が行われた。これらの研究を参考にして、ナノ構造の製造方法は青野プロジェクトとは全く異なるが、配列させたナノワイヤーの量子効果を応用した実用デバイスの基礎研究が JST の国際共同研究事業 (CORP) ナノ量子導体アレープロジェクトとして 2003.3 からスタートしている。

また、理化学研究所において、「原子スケール・サイエンシエンジニアリング研究推進グループ」が組織され、第 1 期 (1993 ~ 1998 年)、第 2 期 (1998 ~ 2002 年)、次世代 (2002 年 ~) と研究が継続されている。「原子スケール・サイエンシエンジニアリング研究推進グループ」の目的は、原子スケールの極微構造における量子現象や原子・分子の運動素過程をより深く理解し、制御し、利用しようとするもので、関連する物理・化学・工学の専門家が一体となり原子スケールの構造制御とそれに関連する様々な事象についての研究が行われている。

3.2.2. SPM イメージのシミュレーション、ナノ構造の物性予測

STM に加えて少し遅れて登場してきた原子間力顕微鏡 (AFM) も原子オーダーの分解能を持つ顕微鏡であるが、STM と AFM とを合わせて走査型プローブ顕微鏡 (SPM) と呼ばれている。青野プロジェクトで行われた STM 像の理論解析を AFM にも拡張するとともに、その計算速度を大幅に改善する研究が JST の先端計測分析技術・機器開発事業 (要素技術開発プロジェクト) 「汎用走査プローブ顕微鏡シミュレータ」(チームリーダー 塚田 捷) 本プロジェクト研究推進委員 >) に採択された。

単原子操作により作製したナノ構造物に発現する物性の予測に関し、特定の原子を並べた原子細線において、元の原子は磁性を示さないのに原子細線にすることにより磁性が発現することが理論的に予測された。

3.2.3. 原子エレクトロニクスへの展開

上記の CREST の「人工ナノ構造の機能探索」という研究のなかで、STM 探針から各種の原子を注入するため様々な材質の探針を探索し、いわゆるトンネル化合物とよばれる Ag_2S 等が適していることが見出されたが、その研究の過程で Ag 原子を使った原子スイッチが発明された (1999 年)。

トンネル化合物を使って原子を局所に供給するというアイデアは ERATO 青野 プロジェクトで生まれたものだが、その詳細な検証研究は後続の CREST のプロジェクトにおいて進められた。そして、その研究の過程で原子スイッチが発明され、その実用デバイスへの応用に関する研究が科学技術振興機構の基礎的研究発展推進事業 (SORST) の新しい量子効果スイッチの機能素子化プロジェクトへと引き継がれた (2000~2003 年)。これに日本電気 (株) が興味を持ち、物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所と共同で、同プロジェクトにおいてプログラマブル IC を目標に開発が行われた。従来のプログラマブル IC の問題であったチップ面積、消費電力がそれぞれ 1/10、1/3 に改善されると期待されている。原子エレクトロニクス技術は従来の半導体エレクトロニクスに代る基幹技術として、エレクトロニクス分野のパラダイムを変えてしまう可能性があるといわれている。

3.3. 科学技術へのインパクト

青野 プロジェクトは STM による原子操作や原子オーダの計測が可能であることを実証し、STM が単なる原子レベルの構造観察装置ではなく、原子のマニピュレータとして使えることや、トンネル電流による原子の仕事関数や電子の局所状態の測定などの新しい計測装置として使えることを明らかにした。これらのことから、STM はナノテクノロジーの分野で必須の装置になった。

原子操作によって得られるナノ構造の物性評価のためには多探針の STM が有効である、というアイデアが青野 プロジェクトで生まれた。そして、そのような装置は後続プロジェクトの「人工ナノ構造の機能探索」(CREST)において開発された。その技術を応用して4探針のSTMを、物材機構が、京都大学、堀場製作所と共同で開発中である。3年後の実用化を目指しており、日本発のユニークな分析・計測装置として期待されている。

一方、青野 プロジェクトでの研究により、STM による原子操作は原子を1個ずつ操作するのには向いているが、実用的なデバイスに必要なナノ構造を大量に効率よく製造するためには、何らかの大きな改革が必要であることが明らかになった。STM による原子操作の限界が明確にされることにより、量産については STM とは別の方法 (例えば連鎖反応で配線を作る、DNA のような自己複製機能を持つ分子を活用するなど) を考えるべきであるとの方向が明確になった。

青野 プロジェクトの発足 15 周年を記念する第 1 回国際シンポジウム 1st FON '04 (Functionality of Organized Nanostructures) が 2004 年 11 月 30 日 ~ 12 月 2 日まで筑波で開催された。STM の発明者でノーベル賞を受賞している H. Rohrer の Keynote Speech、28 件の招待講演、24 件のポスター発表が行われた。参加予定者は当初 100 名程度を見込んでいたが実際には 198 名の参加があり盛況であった。国内外の招待講演者からはいずれも青野 プロジェクトに学術的な意味で刺激を受けたという主旨の報告が多かった。今後予算の目途がつけば毎年開催される予定である。

4. 研究成果の波及効果及びインパクト

4.1. 産業的波及効果

青野プロジェクトの研究成果が直接製品化に結びついた例はまだない。比較的近い将来に、原子スイッチを使った電子デバイスの実用化が期待されている。

青野プロジェクトの研究においては STM 装置が使われたが、実験を担当した研究者がそのときに習得した STM 装置の操作技術を参考にして、大学などでの教育用を主なターゲットに簡易型 STM 装置を開発した。株式会社アルファプロジェクトから今後販売される予定である。

5. 参加研究者の活動状況

5.1. プロジェクトから育った人材の状況

青野プロジェクトは個人的に参加した若手の研究者が多かったが、それぞれが各持場で成果を上げ、その後の研究の基盤を築いた人が多い。本プロジェクトの分野あるいはそれに極めて近い分野で現在活躍中の人達は次のとおりである。

渡邉 聡 個人参加→日立基礎研究所→東京大学教授

中村正人 個人参加→日本大学助教授

根城 均 個人参加→独 物材機構 主席研究員

中山知信 個人参加→独 物材機構 アンシエイトディレクタ 筑波大学助教授

本プロジェクトで取り扱った研究装置の分野で活躍中の人達は次のとおりである。

・西原隆治 島津製作所→同社。同軸型直衝突イオン散乱分光装置 (CAICISS) の開発に従事。

・倉持宏実 個人参加→セイコーインスツルメント。SPM 応用研究に従事。

その他本プロジェクトの分野とは関係はないがそれぞれの分野で活躍中の人達は次のとおりである。

・内田裕久 個人参加→豊橋技術科学大学助教授

・小林 中 個人参加→大阪市立大学助教授

・澤村 誠 個人参加→北海道大学 創成科学研究機構 戦略重点プロジェクト部門
研究員

・F. Grey デンマーク国立研究所→CERN (スイス)

- ・黄 徳勲 個人参加→山本量子ゆらぎプロジェクト

5.2.学位取得

本プロジェクト実施期間中に学位を取得した人達は次のとおりである。

- ・根城 均 東京大学
- ・内田裕久 豊橋技術科学大学
- ・小林 中 東京大学

図表 5.1 プロジェクト参加者リスト

グループ	プロジェクト内での役職	氏名	現在の所属	現在所属での役職	参加時の所属	参加時所属での役職	参加期間開始	参加期間終了
	統括責任者	青野 正和	物質材料研究機構 ナノマテリアル研究所	所長	理化学研究所 表面界面工学研究室	主任研究員		
	技術参事	河野 功					1992/5	1995/3
	技術参事	野村 英一	大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻 森田研究室内 大阪大学大学院工学研究科 フロンティア研究機構				1989/10	1994/9
基礎解析グループ	研究員	野村 英一	大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻 森田研究室内 大阪大学大学院工学研究科 フロンティア研究機構	主任研究員			1989/10	1994/9
	研究員	澤村 誠	北海道大学 創成科学研究機構 戦略重点プロジェクト部門	研究員			1991/4	1994/9
	研究員	中村 正人	日本大学 理工学部	助教授			1990/3	1993/3
	研究員	渡邊 聡	東京大学 大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻	教授			1989/12	1994/9
構造制御グループ	グループリーダー	根城 聡	文部科学省 金属材料技術研究所 極高真空場ステーション	主席研究員			1990/7	1994/9
	研究員	内田 裕久	豊田技術科学大学	助教授			1990/4	1994/9
	研究員	中山 知信	物質材料研究機構 ナノマテリアル研究所 ナノ電気計測グループ	アソシエイトディレクタ			1989/10	1991/8
	研究員	西原 隆治	株式会社 表面半導体機器事業部応用技術課	主任	株式会社 中央研究所	研究員	1990/2	1994/9
	研究員	黄 徳歆 (Huang De-Huan)	Stanford University Edward L. Ginzton Laboratory	Researcher			1990/10	1994/9
表面計測グループ	グループリーダー	根城 均	物質材料研究機構 ナノマテリアル研究所 ナノデバイスグループ	主席研究員			1990/7	1994/9
	研究員	榎村 昭雄	日本板硝子テクノロジー株式会社	調査グループマネージャ	日本板硝子株式会社 筑波研究所	主任技師	1993/4	1994/9
	研究員	倉持 宏美	セイコーインスツルメン株式会社				1992/4	1994/9
	研究員	小林 中	大阪市立大学大学院工学研究科 電子情報系専攻	助教授			1990/4	1994/9
	研究員	Grey Francois	CERN Opealab, IT Division(スイス)		RISØ 国立研究所(デンマーク)	研究員	1991/5	1994/7
	研究員	Snyder Eric J.					1992/4	1994/6
	研究員	Yuun, Hwe-Shik					1990/11	1991/6

6. 創造科学技術推進事業に関する意見(※)

6.1. 事業の意義

ERATO は比較的大型の予算を投入し未踏の基礎研究の分野で総括責任者を厳選した上でプロジェクトの運営を任せるといのが本来の姿であろう。ただ、ERATO がスタートしたころは基礎研究に関する研究環境が粗末であったが今は違うので昔と同じ考え方で運営するのは意味がない。ERATO の仕組みの中で実施するか否かは別にして、国家の政策とリンクした戦略的な研究開発、インタディシプリナリな研究開発をもっと積極的に進めるべきである(外部有識者の意見。以下外部意見と記す)。

6.2. 仕組み運営面に関する提言

総括責任者(テーマ)については、何故選ばれたのか全く理解できない人(テーマ)もないわけではないが、全体を通して見れば適任者が選ばれている(外部意見)。テーマについては、思いきった挑戦的なテーマに絞るか、広範囲の専門分野にまたがる横断的なテーマがふさわしいであろう(プロジェクト関係者、外部有識者共通の意見。以下共通意見と記す)。選出方法については現行のままで良い。あまり知られていないものの中にすごく良いテーマがあり得るので、公募制にすることによりこれらのテーマが掘り起こせるのであれば公募制を検討すべきである(共通意見)。

研究期間が5年間ということについては、まとまった研究を行うのに適当である。研究者も腰を落着けて研究が出来る等の点で概ね妥当である。全く未踏の基礎研究の場合には5年では短い。その場合でも5年目に何らかの中間評価ポイントを設けるべきである。研究予算(15~20億円)は妥当である(共通意見)。

研究提案を行う場合、提案書に記載した内容の守秘を明確にすべきである。守秘の点で不安があったため、研究プロセスについてのアイデアを全部は書かなかったところ、研究プロセスがよくわからないという理由で却下された例がある(外部意見)。

プロジェクト成果の報告会は定期的に行われているが、他のプロジェクトの研究者と研究の状況などについて意見交換する場がない。研究者間の情報交換会のような仕組みがあれば良い(プロジェクト関係者の意見)。

ERATO に限らないが、テクニシャン的なサポートが弱いという問題がある。IT 関連(プログラム、システムエンジニアなど)のみ技官を採用できるが、その他の分野は出来ない(外部意見)。

評価については、論文(件数、掲載雑誌のレベル)、受賞(究極はノーベル賞)などで判断するしかない(共通意見)。産業分野への実用的な応用については、青野プロジェクトについていえば、研究企画の段階では研究構想に入れていなかったはずで、その点を今ごろ評価項目に入れるの

※この章は創造科学技術推進事業(ERATO)に限らず、ERATOを含む日本の研究支援制度全般に対する広い意見も掲載されています。

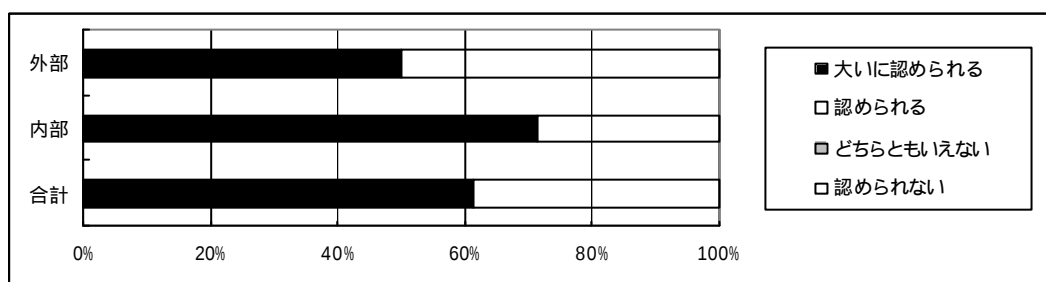
はおかしい。産業分野への実用的な応用のきざしがあれば付記する程度にすべきである（外部意見）。

7. アンケート調査結果

アンケート調査は総括責任者を除きプロジェクト関係者7名、外部有識者6名、計13名を対象に実施した。アンケート調査結果を以下に記す。

7.1. 新たな科学、技術分野の開拓

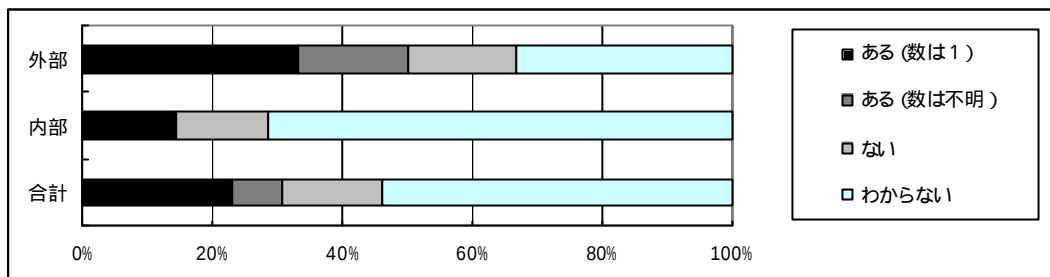
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1 大いに認められる	5	3	8
2 認められる	2	3	5
3 どちらともいえない	0	0	0
4 認められない	0	0	0



プロジェクト関係者、外部有識者いずれも「大いに認められる」ないしは「認められる」との回答であり、新たな科学、技術分野の開拓については、全員が肯定的な意見であった。ただ、「大いに認められる」とい回答と「認められる」とい回答の比率は、プロジェクト関係者では5/2であるのに対して外部有識者では3/3となっており、外部有識者のほうがやや厳しい評価になっている。

7.2.学会、分科会、研究会等の創設

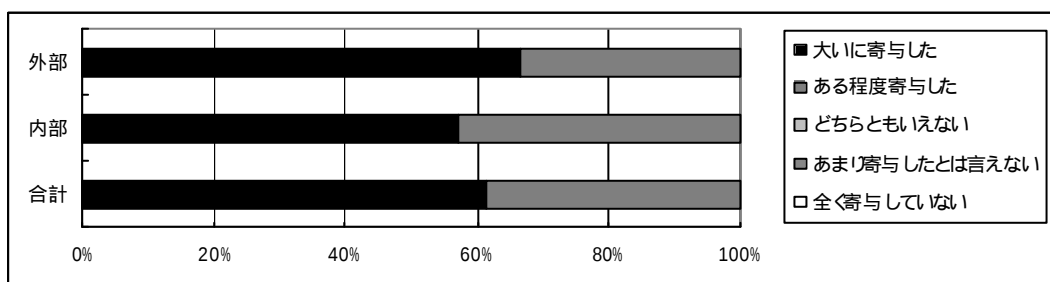
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. ある(数は1)	1	2	3
2. ある(数は不明)	0	1	1
3. ない	1	1	2
4. わからない	5	2	7



学会の創設については、「あり」との回答は3件(プロジェクト関係者1件、外部有識者2件)あったが、全て2004年11月30日～12月2日に筑波で開催された第1回国際シンポジウム1stFON 04 (Functionality of Organized Nanostructures)を学会と認識したものであった。その他は「わからない」とい回答が最も多かった。

7.3.状況変化への寄与

	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 大いに寄与した	4	4	8
2. ある程度寄与した	4	2	5
3. どちらともいえない	3	0	0
4. あまり寄与したとは言えない	0	0	0
5. 全く寄与していない	0	0	0

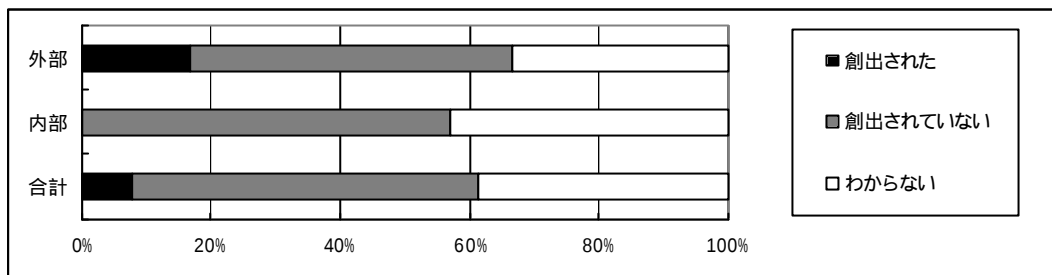


プロジェクト関係者、外部有識者いずれも「大いに寄与」ないしは「ある程度寄与」との回答であり、この分野の状況変化への寄与については、全員が肯定的な意見であった。「大いに寄与」という回

答と「ある程度寄与」とい回答の比率は、プロジェクト関係者では4/3であるのに対して外部有識者では4/2となっており、わずかではあるが、外部有識者のほうがやや高い評価になっている。

7.4.新たな産業分野の成長

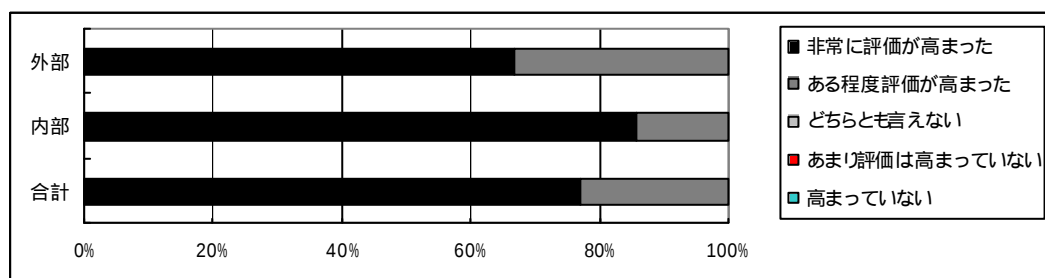
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 創出された	0	1	1
2. 創出されていない	4	3	7
3. わからない	3	2	5



新たな産業分野は「創出されていない」とい回答がプロジェクト関係者、外部有識者いずれも最も多く、次いで「わからない」とい回答であった。「創出された」とする回答が1件だけあったが、プロジェクトでの研究を通じてSTM装置が改良され販売されていることを想定した回答である。

7.5.総括責任者に対する評価

	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 非常に評価が高まった	6	4	10
2. ある程度評価は高まった	1	2	3
3. どちらとも言えない	0	0	0
4. あまり評価は高まっていない	0	0	0
5. 高まっていない	0	0	0



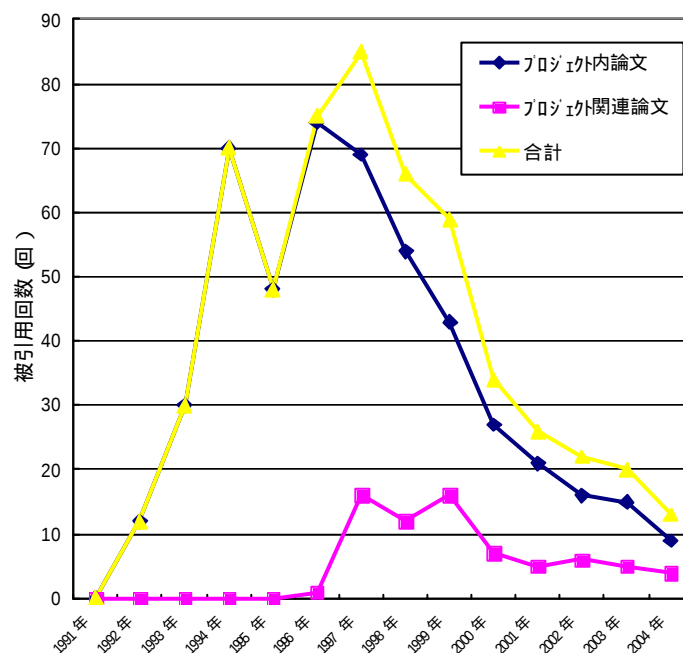
8. 統計資料

8.1.論文被引用件数推移

青野原子制御表面プロジェクトの中での研究成果に関する論文リスト(計 31 報)および個別被引用件数を図表 8-2 に示す。また後続のプロジェクトなど本プロジェクトが終了後の関連する研究における論文のリスト(計 9 報)および個別被引用件数を図表 8-3 に示す。

本プロジェクトの中での研究に関する報告 8 報と後続のプロジェクトなど本プロジェクトと関連する研究に関するもの 4 報を選び、その被引用回数の年次推移を調べた結果を図表 8-1 に示す。なお被引用回数の年次推移を調べる対象とした論文は、図表 8-2,3 のリストで下線を引いたものである。この結果、合計の被引用回数は、プロジェクトが終了した 1994 年にピークをむかえた後、プロジェクト終了後 3 年目に最高値を示している。

図表 8-1 青野プロジェクト主要論文被引用回数推移



図表 8-2 青野原子制御表面プロジェクト論文リストおよび個別被引用件数 (1)

(アンダラインは被引用件数の推移を調べた論文を示す)

No.	Author	TITLE	被引用件数
1	H.Nejoh	Visible mechanism of liquid crystals on graphite under scanning tunneling microscopy. Appl. Phys. Lett., Vol.57, No.27, p.2907-2909 (1990.12.31)	26
2	<u>H.Nejoh</u>	Incremental charging of a molecule at room temperature using the scanning tunneling microscope. Nature (Lond.) ,Vol.353, No.6345, p.640-642 (1991.10.17)	35
3	<u>S. Watanabe, M. Aono and M. Tsukada</u>	Theoretical calculations of the scanning-tunneling-microscopy images of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface. Phys. Rev. B, Vol.44, No.15, p.8330-8333 (1991.10.15)	85
4	H.Nejoh	Liquid crystal molecule orientation on a polyimide surface. Surf. Sci., Vol.256, No.1/2, p.94-101 (1991.10)	15
5	H.Nejoh and M. Aono	Incremental Charging of a Molecule at Room Temperature: Disturbance of Molecular Electronic States Due to the Tunneling Event.Mod. Phys. Lett., Vol. B6, No. 4, p.187-195(1992)	3
6	<u>S.Watanabe, M.Aono and M. Tsukada</u>	Theoretical calculations of the scanning tunneling microscopy images of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface: effects of the tip shape App.Surf.Sci., Vol.60/ 61,p.437-442(1992)	14
7	<u>S. Watanabe, M. Aono, and M. Tsukada</u>	First-principles calculation of STM images of the Si(111)-Ag surface Applied Surface Science, Volumes 60-61 , p.437-442, 1992.	9
8	<u>H .Nejoh, D.P. E. Smith and M. Aono</u>	Cyanobiphenyl-group alignment observed by a scanning tunneling microscope.Nanotechnology, Vol.2, p.214-220(October 1991)	

図表 8-2 青野原子制御表面プロジェクト論文リストおよび個別被引用件数 (2)

(アンダラインは被引用件数の推移を調べた論文を示す)

No.	Author	TITLE	被引用件数
9	D. H. Huang, H.Uchia and M. Aono	Fabrication of Atomic -scale Structures on Si (111)-7 × 7 Using a Scanning Tunneling Microscope(STM).Jpn. J. Appl. Phys., Vol 31, Part 1, No.12B,July p.4501-4503 (1992)	24
10	M.Nakamura, M. Aono and M. Tsukada	Interaction of low-velocity rare-gas ions with a solid surface. Surf. Sci. JST, Vol.283, No.1/3, p.46-51 (1993.03.01)	2
11	M.Tsukada and M. Sawamura	Theory of desorption from a negatively biased surface Surface Science Vol 283, Issues 1-3 , p.182-188(1 March 1993)	3
12	<u>H. Uchida, D. H. Huang, J. Yoshinobu and M. Aono,</u>	Single-atom manipulation on the Si(111)7 × 7 surface by the scanning tunneling microscope (STM) Surface Science, Volumes 287-288, Part 2 ,p.1056-1061(10 May 1993)	26
13	Satoshi Watanabe, Masakazu Aono, and Masaru Tsukada	Theoretical calculations of STM images of the Si(111)- -Ag and -Sb surfaces. Surface Science, Volumes 287-288, Part 2 , p.1036-1040(10 May 1993)	17
14	M. Nakamura, M. Tsukada and M. Aono	A computer simulation study on hyperthermal energy rare gas ion scattering from solid surfaces Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms,vol.78, Issues 1-4 , Pages 81-85(3 May 1993)	2
15	<u>A. Kobayashi, F. Grey, R. S. Williams and M. Aono</u>	Formation of Nanometer -Scale Grooves in Silicon with a Scanning Tunneling Microscope.Science, Vol. 259, p.1724-1726(1993)	131
16	<u>H. Uchida, D. H. Huang, F. Grey and M. Aono</u>	Site-Specific Measurement of Adatom Binding Energy Differences by Atom Extraction with the STM. Phys. Rev. Lett., Vol.70, No.13, Page2040-2043 (1993.03.29)	101

図表 8-2 青野原子制御表面プロジェクト論文リストおよび個別被引用件数 (3)

(アンダラインは被引用件数の推移を調べた論文を示す)

No.	Author	TITLE	被引用件数
17	H. Nejoh and M. Aono	Single Electron Tunneling Observed in a 2D Tunnel Junction Array at Room Temperature. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol.32, No.1B, p.532-535 (1993.01)	4
18	<u>M. Aono, A. Kobayashi, F. Grey, H. Uchida, D. H. Huang</u>	Tip-Sample Interactions in the Scanning Tunneling Microscope for Atomic-Scale Structure Fabrication. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol.32, No.3B, p.1470-1477 (1993.03)	48
19	H. Nejoh and M. Aono	Single-Electron-Charging Effect Controlled by the Distance between a Substrate and a Liquid-Crystal Molecule. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol.32, No.3B, p.1480-1483 (1993.03)	2
20	S. Watanabe, M. Aono and M. Tsukada	First Principles Study of the Effect of Tip Shape on Scanning Tunneling Microscopy Images. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol.32, No.6B, p.2911-2913 (1993.06)	10
21	M. Sawamura, M. Tsukada and M. Aono	Molecular Orbital Theory of Field Evaporation. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, Vol.32, No.7, p.3257-3260 (1993.07)	10
22	A. Kobayashi, F. Grey, E. Snyder, M. Aono	Probing local binding energy differences on the Si(001)2×1 surface by field-induced atom extraction with the STM. Surf. Sci., Vol.291, No.1/2, p.L739-L744 (1993.07.01)	14
23	F. Grey, D. H. Huang, A. Kobayashi, E. J. Snyder, H. Uchida and M. Aono	Detection of Single Atom Extraction and Deposition Events during Nanolithographic Processing of Silicon with a Scanning Tunneling Microscope. Proc. Jpn. Acad. Ser. B, Vol.69, No.5, p.101-106 (1993.05)	2
24	D. H. Huang, H. Uchida and M. Aono	Scanning Tunneling Microscope Fabrication of Atomic-Scale Memory on a Silicon Surface. Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.33, No.2A, p.L190-L193 (1994.02.01)	0

図表 8-2 青野原子制御表面プロジェクト論文リストおよび個別被引用件数 (4)

(アンダラインは被引用件数の推移を調べた論文を示す)

No.	Author	TITLE	被引用件数
25	<u>H. Kuramochi, H. Uchida and M. Aono</u>	Local Hydride Formation of the Si(111)-(7 × 7) Surface by Hydrogen Atoms Deposited from a Scanning Tunneling Microscope Tip. Phys. Rev. Lett., Vol.72, No.6, p.932-935 (1994.02.07)	34
26	A. Kobayashi, F. Grey, E. J. Snyder and M. Aono	Spatially anisotropic atom extraction around defects on Si(001) using a STM. Phys. Rev. B, Vol.49, No.12, p.8067-8070 (1994.03.15)	16
27	F. Grey, D. H. Huang, A. Kobayashi, E. J. Snyder, H. Uchida and M. Aono	Time-resolved atomic-scale modification of silicon with a scanning tunneling microscope. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, Volume 12, Issue 3, p.1901-1905 (May 1994)	8
28	F. Grey, D. H. Huang and M. Aono	The sound of one atom hopping: atomic manipulation on silicon surfaces by STM. Philos. Mag. B, Vol.70, No.3, p.711-720 (1994.09)	8
29	<u>D. H. Huang, H. Uchida and M. Aono</u>	Deposition and subsequent removal of single Si atoms on the Si(111)-7 × 7 surface by a scanning tunneling microscope. J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.12, No.4, p.2429-2433 (1994.07)	29
30	H. Nejoh and M. Aono	Voltage oscillations in an array of tunnel junctions controlled by a scanning tunneling microscope gate at room temperature. Appl. Phys. Lett., Vol.64, No.21, p.2803-2805 (1994.05.23)	2
31	S. Watanabe and M. Aono	Effects of the tip shape on scanning tunneling microscope images: First-principles calculations. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, Vol.12, Issue 3, p. 2167-2170 (May 1994)	5
総 計			102
平均値			3.29

図表 8-3 プロジェクト終了後の関連論文リストおよび個別被引用件数
(アンダラインは被引用件数の推移を調べた論文を示す)

No.	Author	TITLE	被引用件数
11.	<u>T. Nakayama, S. Watanabe and M. Aono</u>	Structure and stability of the out of phase boundary in a surface superlattice Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30-Ag. Surface Science, 344, 143-148(1995)	13
22.	<u>S. Watanabe, Y. A. Ono, T. Hashizume, Y. Wada, J. Yamauchi and M. Tsukada</u>	Electronic structure of an atomic wire on a hydrogen-terminated Si(111) surface: First-principles study, Physical Review B, 52, 10768-10771(1995)	21
33.	H. Nejo, and M. Aono	Single-electron tunneling with liquid-crystal molecule. Optoelectron.-Devices Technol., 10, 221(1995)	0
44.	<u>S. Watanabe, Y. A. Ono, T. Hashizume and Y. Wada</u>	Theoretical Study of Atomic and Electronic Structures of Atomic Wires on an H-Terminated Si(100)2x1 Surface. Physical Review B54, R17308-R17311(1996)	29
55.	<u>T. Nakayama, D. H. Huang and M. Aono</u>	Extraction, Deposition, and Displacement of Atoms by STM Microelectronic Eng., 32, 191(1996)	8
66.	H. Nejoh, M. Aono, D. G. Baksheyev and V. A. Tkachenko	Single-electron charging of a molecule observed in scanning tunneling scattering experiments. Journal of Vacuum Science and Technology, B14(4), 2399(1996)	0
77.	H. Kuramochi, H. Uchida, Y. Kuwahara, K. Watanabe and M. Aono	Site-Independent Adsorption of Hydrogen Atoms Deposited from a Scanning Tunneling Microscope Tip. Jpn. J. Appl. Phys., 36, L1343-L1346 (1997)	2
88.	G. Treboux, T. Nakayama, H. Uchida and M. Aono	Analysis of STM Images after Extractions from The Si(111) 7×7 Unit Cell Through Tunneling Microscope Tip. Jpn. J. Appl. Phys., 36, L1343-L1346(1997)	1
99.	T. Miyamae, H. Uchida, I. H. Munro and T. Urisu	Synchrotron-Radiation Stimulated Desorption of SiO ₂ Thin Films on Si(111) Surface Observed by Scanning Tunneling Microscopy. J. Vac. Sci. Technol., A17, No.4 1733-1736(1999)	2
総計			76
平均値			8.44

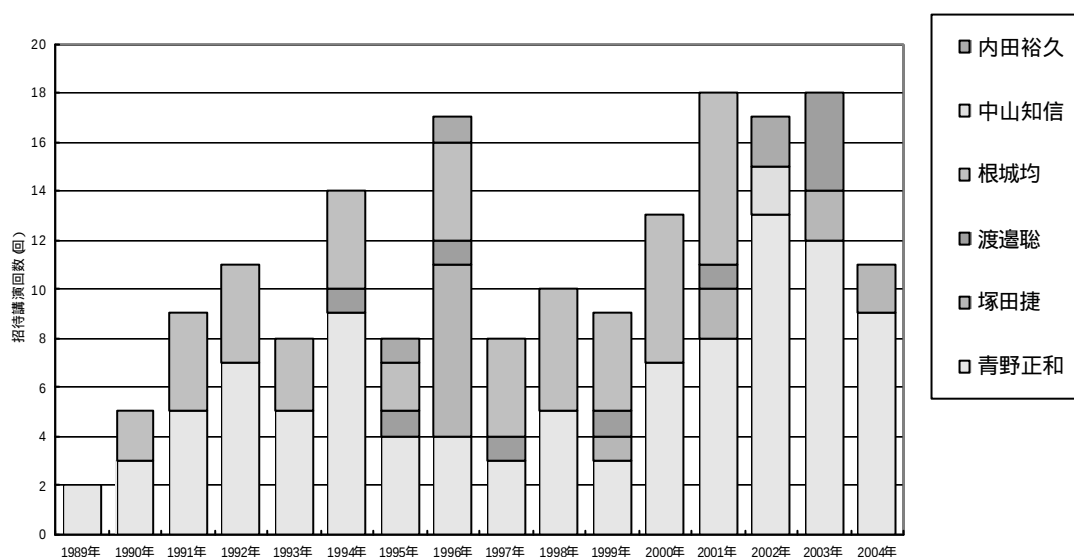
8.2.特許収益の年次推移

本プロジェクトの成果に係る特許収益は現時点ではない。

8.3.招待講演回数の推移

本プロジェクト関係者について、各人の業績リストを入手した場合にはそのリストに記載されている招待講演を年次毎に数えた。業績リストを入手していない場合には、インターネット検索により調べた回数を用いた。招待講演回数の年次推移を図表 8-4 に示す。全体の傾向として、プロジェクト開始後徐々に増えた後、終了後3年目にはやや減少するが、その後徐々に回復し2001、2003年に最高となっている。

図表 8-4 青野プロジェクト招待講演回数推移



8.4.受賞

本プロジェクトおよびその後の関連する研究成果に対する主な受賞は次のとおりである。

- ・ 青野正和 1992年日経BP技術賞
- 2003年 米国真空学会 (American Vacuum Society: AVS)フェロー
- 2003年 日本表面科学会 学会賞

2004 年 英国物理学会 (Institute of Physics: IOP)フェロー

- ・塚田 捷 1999 年 ナノプローブテクノロジー賞
- ・内田裕久 2004 年 船井情報科学振興賞
- ・根城 聡 1997 年 Who 's Who
- ・中山知信 2000 年 日本 MRS 研究奨励論文賞
2001 年 第3回花王研究奨励賞 表面の科学」部門

以上