

独立行政法人**科学技術振興機構**

創造科学技術推進事業

追跡調査報告書

高柳粒子表面プロジェクト(1994～1999)

総括責任者 高柳邦夫

2005 年 3 月報告

高柳粒子表面プロジェクト追跡調査報告書要旨

高柳粒子表面プロジェクトは、物質がナノメートルスケールになるときに、表面効果が支配的になって現れる新現象や新構造を見出すことを目的として開始された。超高真空電子顕微鏡に走査型トンネル顕微鏡を組み込んだ新装置を開発し、その装置を用いて作製した金属ナノワイヤーにおいて、電子伝導が量子化されていることを明らかにした。また、金ナノワイヤーの原子配列の電子顕微鏡観察から、金属ナノワイヤーがカーボンナノチューブと同じように螺旋構造をもつことを発見した。さらに、金原子が一行に並んだ中空に浮かぶ鎖を作って原子一つ一つを目で見せるとともに、第一原理計算で金属でありながら原子鎖では絶縁体となる可能性があることを理論的に示した。シリコンについてもナノ粒子の生成とサイズ選別を行い、量子サイズ効果による発光スペクトルの変化を明らかにし、同時に、粒子構造についても第一原理計算により検討し、原子数が33個以下では非晶質構造となることを示した。

本プロジェクトの成果、特に金ナノワイヤー、およびその究極である金の原子鎖の研究はナノテクを目で見える形で示したことが大きなインパクトを与え、ナノテクの基礎研究の流れを作った先駆的仕事となった。

この成果は国際的にも高く評価され、1998年の英国バーミンガムの国際真空学会で行った最初の発表では、ビデオでナノワイヤーが細くなりそれに伴いコンダクタンスが階段的に変化することを見せたが、何度もアンコールがあり、大きなインパクトを与えた。さらに、プロジェクトがNATUREに発表したナノワイヤーの成果は、米国で2000年からクリントン政権により開始されたナノテクイニシアティブに一つの切り口として使われており、まさに、世界のナノテク拡大の流れの中に位置付けられている。なお、ナノワイヤーの研究およびTEM-STM新装置の開発の功績に対しては、国際真空学会科学賞や日本表面科学会賞などの幾つかの賞が授与されている。

「科学技術の芽」として生まれたナノワイヤーは、研究発表の数が年とともに増加し(2004年は約180件)、本研究領域が拡大・活発化していることを示している。それに伴い、本プロジェクトのNATURE発表論文の引用数も295件と極めて高い。本研究領域については、高柳総括責任者自身も、本プロジェクト終了後、引き続き科学研究補助金特別推進研究「量子コンタクト」および東京工業大学の「21世紀COE」で研究を継続し、ナノワイヤー構造の全体像やコンダクタンス量子化のメカニズムを解明する等の成果を挙げている。

また、超高真空電子顕微鏡(TEM)に走査トンネル顕微鏡(STM)を組み込んだ新装置は、STMのプローブを物質にコンタクトさせて電気特性等の測定や物質の延伸等の加工を行うと同時にTEMにより物質の構造を観察することを目的として開発されたが、本装置を用いたナノワイヤーの研究成果等により、ナノテク研究の有力な道具との認識が広がり活用されるようになった。新装置開発は電子顕微鏡のエンジニアリング基盤技術の向上にも寄与したが、この面に関しても、高柳総括責任者が2004年から開始したCRESTタイプの「0.5 分解能物質解析電子顕微鏡基盤技術の研究」プロジェクト(研究領域は「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」(研究総括 田中通義))に発展した。

本プロジェクトの成果は、上記の様に、ナノテク研究におけるファンダメンタルな成果であり、産業への具体的な波及効果に関して言及するにはまだ時間を要するが、ナノテク研究の重要な一里塚となり、同時にナノテク研究の重要な道具を提供した点が高く評価される

1.はじめに.....	1
2. プロジェクト研究終了後の科学技術を取りまく環境の変化.....	2
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. プロジェクトの成果の意義.....	4
3.3. 研究のその後の展開.....	5
3.4. 科学技術へのインパクト.....	8
4. 研究成果の波及効果及びインパクト.....	10
4.1. 産業的波及効果.....	10
5. 参加研究者の活動状況.....	10
5.1. プロジェクトから育った人材の状況.....	10
5.2. 学位取得.....	11
6. 創造科学技術推進事業に関する意見.....	13
6.1 事業の意義.....	13
6.2 仕組み、運営面に関する提言.....	13
6.3. プロジェクトの成果・展開に関する外部有識者の意見.....	14
7. アンケート調査結果.....	16
7.1. 新たな科学、技術分野の開拓.....	16
7.2. 学会、分科会、研究会等の創設.....	16
7.3. 状況変化への寄与.....	17
7.4. 新たな産業分野の成長.....	17
7.5. 総括責任者に対する評価.....	18
7.6. アンケート集計結果（総合）.....	18
8. 統計資料.....	19
8.1. 論文被引用件数推移.....	19
8.2. 特許収益の年次推移.....	21
8.3. 招待講演回数の推移.....	22
8.4. 受賞.....	22

高柳粒子表面プロジェクト追跡調査報告書

1.はじめに

高柳粒子表面プロジェクトは、物質がナノメートルスケールになるときに、表面効果が支配的になって現れる新現象や新構造を見出すことを目的として1994年に開始された。

上記の目的を達成するため、ナノ粒子表面を特徴づける4つのキーワード「粒子表面構造」「電子状態」「表面魔法数」「次元性」を念頭に置きながら、素性の確かな粒子表面を創成し、表面構造を明らかにし、さらに性質を探索することを研究の基本構想とした。具体的には、下記の5つの研究課題を策定して、ナノ物質の構造を原子レベルで解明する「基礎構造G₁」、第一原理計算による理論構築を行う「量子特性G₂」、粒子の生成と特性解析を行う「設計と生成G₃」の3つの研究グループ体制で研究を推進した。

超高真空電子顕微鏡に走査型トンネル顕微鏡を組み込んだ装置を始めとして、ナノ粒子を個別に研究できる新しい手法の開発をめざす。

非常に良く制御された量子箱における電子状態を明らかにして、量子力学が教える表面状態を捕らえる

実験、理論両面からシリコンナノ粒子の構造を調べ、安定（魔法）構造を探す。安定構造のものについて構造と光学的性質の関係を明らかにする。特に、結晶シリコンが出現する臨界サイズを明らかにする

1次元ナノスケール物質として金属ナノワイヤー、シリコンナノワイヤーの魔法構造を研究する。さらに、その構造とその物性（電気伝導性）との関係を明らかにする

半導体のナノワイヤーやナノ粒子を研究対象とし、粒子サイズに依存した量子効果発光を追求して、青色発光の可能性を探る。サイズの揃ったナノ粒子を大量に生成する方法、特に中性のナノ粒子を分散して作製する方法を探索する

プロジェクトの全貌を掴むため、発足から今日までの経時的発展のまとめを図表1-1に示す。

図表 1-1 高柳粒子表面プロジェクトの経時発展

暦年	研究報告数	学会発表数	特記事項
1994	0	0	プロジェクト発足
1995	0	2	
1996	2	16	
1997	12	58	電子発見 100 年記念シンポジウム (英国)

1998	22	55	「金原子鎖と量子化コンダクタンス」 NATURE に論文掲載 14 th International Vacuum Congress で発表
1999	5	38	プロジェクト終了シンポジウム プロジェクト終了 Surface Structure Prize 韓国真空学会賞
2000	5	—	
2001	3	—	日本表面科学会賞 International Union of Vacuum Society Science Prize
2002	2	—	東レ科学技術賞
2003	1	—	
2004			

2. プロジェクト研究終了後の科学技術をとる環境の変化

(1)2000 年の米国におけるクリントン政権のナノテク・イニシアティブの開始によりナノテクの重要性が社会的に認知され、日本でも大きなインパクトとなり、政財界も動きだし、ナノテクブームが到来した。

(2)本プロジェクトも青野プロジェクトの続きの表面科学(応用物理/薄膜表面)の一分野の仕事と認識されていたのが、ナノテクの先駆的な仕事と評価されるようになっている。

(3)ナノテクの中身も、プロジェクトスター当時は TEM や STM 等マイクロスコプの解析による基礎研究が主流であったが、現在は、エレクトロニクスからバイオ・医学に渡る基礎・応用研究が含まれるようになり、範囲が非常に広がった。

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

(1)ナノサイズの物質から新しい構造・性質を見出す事を目的にしてプロジェクトを開始したが、実際にナノワイヤーから予想もしたような新しい構造・性質を発見することができた。この成果はナノテク研究の拡大に寄与した。特に、金のナノワイヤーを作成し電子伝導が量子化されていることを

明らかにするとともに、カーボンナノチューブと同じように螺旋構造を持つことを発見したこと、さらには、金原子が一列に並んだ中空に浮かぶ鎖を作って原子一つ一つを目で見たことは、プロジェクトにとっても予期した以上の成果であったが、ナノテクを目で見える形で示したことで非常に大きなインパクトを与えた。

(2)ナノ物質を個別に研究できる新しい手法として、TEMにSTMを組み込んだ新装置を開発し、その装置を活用して上記のナノワイヤー等の成果を挙げて初期の目的を達成するとともに、TEMで構造を観察し、同時にSTMで性質・機能を測定するナノテク研究の有力な道具を提供することができた。

(3)シリコンナノ粒子による青色発光を狙ったシリコンナノ粒子の作製・粒径制御・発光スペクトルの研究については、粒子のサイズを小さくして行った時の量子効果発光が途中で破れ青色発光に至らないことが分かったため、その後研究凍結となっている。

本プロジェクトで得られた主要な研究成果を図表 1-2 に示した。

図表 3-1 高柳粒子表面プロジェクト各研究課題毎に得られた新知見、および、開発した実験装置・技術

研究課題	新知見、および、開発した実験装置・技術
1. 原子直視型高分解能リアルタイム超高真空電子顕微鏡の開発	走査トンネル顕微鏡 (STM) を組み込んだ超高真空電子顕微鏡 (HV-TEM) を完成。 ナノ構造をTEM像で解明でき、同時に、STMにより電子物性についても解明できる。
2. 金属ポイントコンタクトに生成するナノワイヤーと量子コンダクタンス	上記装置のTEM内のSTMプローブを用いて、金属接点を引き延ばした時に生成されるナノワイヤーの構造を解析すると同時に、量子化された電気伝導を観測した。 金ナノワイヤーは細くなるに伴い、コンダクタンスが $2e^2/h$ を単位として階段状に減少した。従来推定の域を出なかった金属ポイントコンタクトの量子物理現象を目に見える形で明らかにした。 金ナノワイヤーでは、多層シェル構造からなり、魔法数が支配する。また、各層はカーボンナノチューブにも見られるカイラル構造をもつことを明らかにした。
3. 中空にスパンした金原子の鎖と金属―絶縁体相転移	ナノワイヤーの究極である金原子の鎖をつくり、原子一つ一つをTEMで観察した。原子鎖を形成する原子が異常に長い距離 (4 Å) 隔たった状態でも安定であることを見出した。 第一原理計算による検討で、ダイマー構造ができるまで伸びると原子鎖の電気伝導はドラスティックに変化し、絶縁体となることが

	示された。
4.シリコン表面の量子箱	シリコン(001)表面上に Al ダイマー鎖を配列して量子箱を形成し、箱に閉じこめられる電子状態を低温 STM 法により直接観測した。 量子箱には離散的なエネルギー状態が生じ、電子を注入する STM の探針の電位を変化させることにより、各エネルギー状態に順次電子を注入できることを示した。
5.シリコンクラスターの構造	シリコン粒子の量子発光の問題と関連して、結晶粒子が形成される最小の魔法数を第一原理計算に基づいて調べた。 原子数が 33 個以下では、非晶質構造をとる傾向があり、結晶にはならないという結果が得られた。
6.シリコンのナノ粒子のサイズ選別	中性粒子のまま粒子選別する方法として、粒子生成にはガス中レーザーアブレーション法を、サイズ選別にはフランクアタック法を適用する独自の方法を試みた。 粒子選別能は平均サイズの 20% 以内であり、従来のイオン化粒子のサイズ選別能に匹敵するものであり、フランクアタック法は今後の工業的応用の期待もできる。
7.シリコン粒子の発光	シリコン超微粒子は発光素子材料としての期待が寄せられていたが、発光機構に関して理解が得られていない。 粒子サイズ選別法を用いて検討し、3nm より大きい粒子について量子サイズ効果による発光スペクトルの変化を観測できた。しかし、青色発光には至らなかった。3nm より小さい所で、量子効果発光が破れる理由は結晶シリコンが出来ていないためではないかと推測した。

3.2. プロジェクトの成果の意義

(1)ナノワイヤーの成果は、その特異な構造と特性を目に見える形で実証した点で大きなインパクトを与えた。ナノワイヤー研究の火付け役となり、周辺分野に広がりを生み出し、新しい領域を広げた。

(2)TEM-STM技術の高さを世の中に知らしめると同時に、ナノテク研究の有力な道具を提供したことはプロジェクトの意義の一つとして挙げられる。TEMにSTMを組み込む狙いは、TEMで物質の構造を観察すると同時にSTMのプロブを物質にコンタクトさせて電気特性等の測定や延伸等の加工を行うことにあったが、本プロジェクトの上記の成果によりナノテク研究の有力な道具であ

るとの認識が広がり STM だけでなく原子間力顕微鏡 (AFM) などを含めた走査プローブ顕微鏡 (SPM) を組み込み、TEM を目として SPM を手とする研究の活発化に寄与した。

(3) 米国で 2000 年から開始されたナノテク・イニシャティブによって、本プロジェクトが NATURE に発表した金原子鎖についての成果 (原子を直接観察しながら量子化コンダクタンスを同時測定した) が、ナノテクにおいては原子を 1 個 1 個直視しながら測定を行うことが重要であるとの切り口として使われており、世界のナノテク研究の流れの中で極めて重要な成果として位置付けられていると言える。

3.3. 研究のその後の展開

(1) ナノ粒子を個別に研究できる新しい手法の開発

TEM・STM の組み合わせにより TEM で構造を観察し、同時に、プローブを使って性質・機能を調べる手法が開発され、その応用展開が始まった。また、新装置の開発は電子顕微鏡のエンジニアリング基盤技術の向上にも寄与したが、この面に関しても、高柳総括責任者が 2004 年から開始した電子顕微鏡の分解能向上プロジェクトに発展した。

A. STM プローブがルーチ的に TEM に組み込まれ始め、次のフェースとして使われ始める。最初考えられた TEM が目で、プローブが手のイメージ通りに進んでいる。STM をマルチプローブにする方向に発展しており、たとえば SEM に STM の手を 3～4 本入れることが行われ始め、市販レベルに近づいている。

B. TEM に原子間力顕微鏡 (AFM) を組み込み、力が発生するメカニズムの解明や、従来マクロスコピックな手法でしか検討されていなかった摩擦・潤滑などを原子レベルから検討する研究が開始されている。AFM がバネを使っており振動に非常に敏感であるためエンジニアリング的な難しさがあり、まだ完全には成功していないが、今後の発展が期待される。

C. 本プロジェクトの成果が、欧米における電子顕微鏡の高性能化を目標とする国家プロジェクトの発足を触発する一因となった。2002 年から米国の TEAM プロジェクトが開始されたが、プロジェクトの必要性の理由の一つに高柳粒子表面プロジェクトの金原子鎖に関する成果が引用されている。該プロジェクトは、米国の 5 国立研究所がチームを組み、20 億円を掛けて、TEM の分解能・真空度向上を図るものである。TEM は日本が進んでいるとの認識があったが、英国においても 1997 年から分解能向上を目的とする Super-STEM プロジェクトが開始されるなど、収差改善による分解能向上に関して、米・欧を中心に検討が行われ特許取得が進められており、厳しい状況となっている。これに対応して、日本でも 2004 年 10 月から、JST の CREST プロジェクトで高柳総括責

任者がリーダーとなって「0.5 分解能物質解析電子顕微鏡基盤技術の研究」(研究領域は「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」(研究総括:田中通義))が開始された。

(2)金ナノワイヤーの構造解明とその量子的な電気伝導度の変化の測定

本プロジェクトに引き続き、高柳総括責任者自身が平成 12 年度—15 年度科学技術補助金特別推進研究「量子コンタクト」で研究を継続発展し、下記の成果が得られている。

A. 金ナノワイヤーには、単一の原子鎖と原子鎖チューブ多層シェル構造 (7-1、11-4、13-6、14-7-1 など、シェルを構成する原子鎖の数の魔法数 7 を持つ) ナノワイヤーだけでなく 5-0 チューブと 6-0 チューブなどヘリカル単層構造が存在することが解明された。このようなヘリカル単層構造は白金でも見つかっている。この結果、ナノワイヤーが十分長くなるときに自然が取る形状にはある種の普遍性があり、カーボンナノチューブと全く同様に考えられることが判明した。今後、他の元素についても期待できて大きな材料分野に広がることが期待される。

B. 金属ナノワイヤーではエネルギー損失のない量子化伝導が期待されるので、十分な長さを持つワイヤーを作製し検証することが重要である。そして実際に金ヘリカルナノワイヤーが完全導体(電気抵抗がゼロ)であることが見いだされた。この成果は将来のボトムアップ素子の材料としての期待につながるものである。

C. 金属コンタクトが示す非線形な電流—電圧機構が明らかにされた。同時に、Pb は非対象性を示すという予想外の結果が発見され、整流効果が期待され金属ダイオードとしてオンオフスイッチへの適用について特許出願が行われた。

(3)液体ヘリウム温度での STM 操作によるシリコン表面上の量子箱の作製

A. 低温での STM の測定が困難で、当時低温 STM で成果を出している所は少なかった。量子箱での電子の波動性については、IBM グループが金属表面で観測していたが、半導体表面では本プロジェクトが初めてであり反響があった。金属では 2 次元に電子が広がったイメージであるのに対して、1 次元(細線の長さを制限すると量子ドットに近いとも言える)での電子の波動性を観察したと言える。測定が難しく(低温 STM、および、電子の微妙な変化の測定のテクニックが難しい)、また、研究の性質が検証に近いので、その後の発展は少ない。

B. 基板の上に回路を形成する研究は発展している。日立基礎研では、Si 表面の全面に水素原子を結合し、部分的に水素をはぎ取りラングリングボンドの回路を作ることが検討された。分子ワイヤーを基板の上に貼って回路を作る検討もされていて、現在ではこちらが主流になっている。横山研究員自身が、プロジェクト終了後、金属材料研究所 / 横浜市立大学において、基板上

へ有機分子のワイヤーを貼り付ける研究を行っており、概念的には研究が継続していると言えるし、プロジェクトで開発した装置 (低温 STM)、経験、知識が役立っている。

(a)金属材料研究所では、有機分子の合成グループと組んで、反応の場をフラスコの中から基板 (金属表面) 上にシフトした。DNA が部品分子 (4 つの塩基) のつながりで機能が出ている様に、基板上で部品分子を組み合わせて機能をださせることが狙いであった。基板としては、反応性がなく分子を動かし易い金を選択し、有機分子としては、ヘモグロビンのベースであるポリフィリンを選択した。基板に密着すると機能が発現し難いと考えて、ブチルフェニル基を付加して浮かせる様にした。そのままでは、最密充填で並ぶのだが、結合の手として分極し易いシアノベンゼンを付けた。結合手が 180° 方向に二本付けると分子がワイヤー状の構造に組み上がることが分かった。本成果は、NATURE のハイライト論文 (Nature, Vol.413, No.6856, pp.619-621, 11 October 2001) に掲載され、また新聞でも報道された (01 年 10 月 11 日付け毎日新聞、日本工業新聞、日刊工業)。

(b)横浜市立大学では、半導体表面に構成した分子ワイヤーの機能を探る研究を開始した。置換基の種類を変えて、あるいは、複数の種類の分子でできる構造 (分子の P - N 接合など) を解明し、電気伝導度の測定を行った。また、分子ワイヤーの最大の特長は、光との相互作用があり、光エネルギーで生じる他の機能やエネルギー変換が期待できるので、P 型、N 型など分子でも発光するものを狙っている。装置的にも STM のプローブとして、光ファイバーの針に透明電極をコーティングしたものを使い、電流も流れ、光の出し入れも可能な様にして、試料の光機能を確認できるように工夫した。電流を局所的 (原子レベル) に流して発光する EL 素子としての検討も開始した。

(5) その他

シリコンナノワイヤーについて、検討を続けている電子関係の研究者もいるが、現在はシリコン基板を使ってトップダウン的に加工する方向に進んでいる。

3.3.3. 研究の移動進展状況 (継続・継承) のフロー図

図表 3-2 「高柳粒子表面プロジェクト」の研究の移動進展状況

研究成果	1999 年	2004 年
原子直視型高分解能 リアルタイム超高真空 電子顕微鏡の開発	2000～2003 年 科学研究費補助金 特別推進研究	2004～2008 年 CREST プロジェクト 「0.5 分解能物質解析電子 顕微鏡基盤技術の研究」
金属ポイントコンタクト に生成するナノワイヤー と量子コンダクタンス	「量子コンタクト」	2003～2007 年 東工大「21 世紀 COE プログラム」
中空にスパンした原子の 鎖と金属—絶縁体相転移		
シリコン表面の量子箱	1999～2003 年 金属材料研究所	2003 年～ 横浜市立大学
シリコンクラスターの構造 シリコンナノ粒子の 生成とサイズ選別	研究凍結	
シリコンナノ粒子の発光		

3.4. 科学技術へのインパクト

3.4.1. プロジェクトが切っ掛けとなり 新たな分野が開拓された例

ナノワイヤーの領域。ナノワイヤーの研究報告数が、高柳粒子表面プロジェクトが開始した 1994 年にはゼロだったものが、1999 年に約 10 件、プロジェクト終了後の 2000 年に約 30 件と急増し、2004 年には約 180 件まで増大している (ISI Web of Science により調査)。金から金属 (磁性金属他)、酸化物 (MgO、SiO₂ 他)、半金属 (Bi 他) 等のナノワイヤーの研究が行われ、今後、半導体デバイス等、どの様に企業化につながるか関心がもたれる。

なお、さきがけ研究「状態と変革」研究領域の第 2 期研究 (1998～2001 年) において、木塚徳志氏が TEM に STM や AFM の機能を組み込んだ装置の開発を行い、ナノ物質の構造、力学、電

気伝導特性をその場計測する研究に活用している。

3.4.2. 新たに創設された学会（分科会）研究会の例

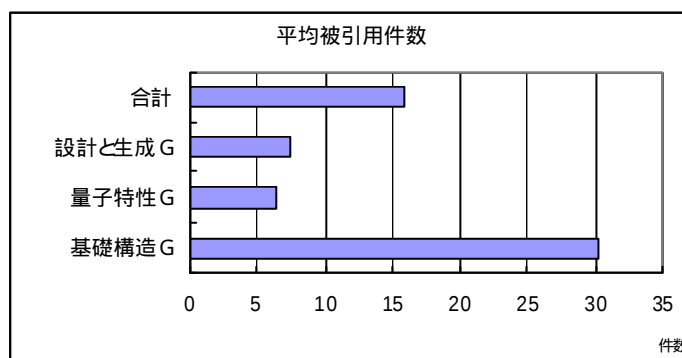
日本物理学会にナノワイヤーのセッションがプロジェクト終了後発足した。東大、京大、阪大、物質材料研がグループを持っている。2002 年春の物理学会でのナノワイヤーの分科会（3 月 27 日）の参加者は、50 人程度であった。

3.4.3. 論文被引用数から見た影響度

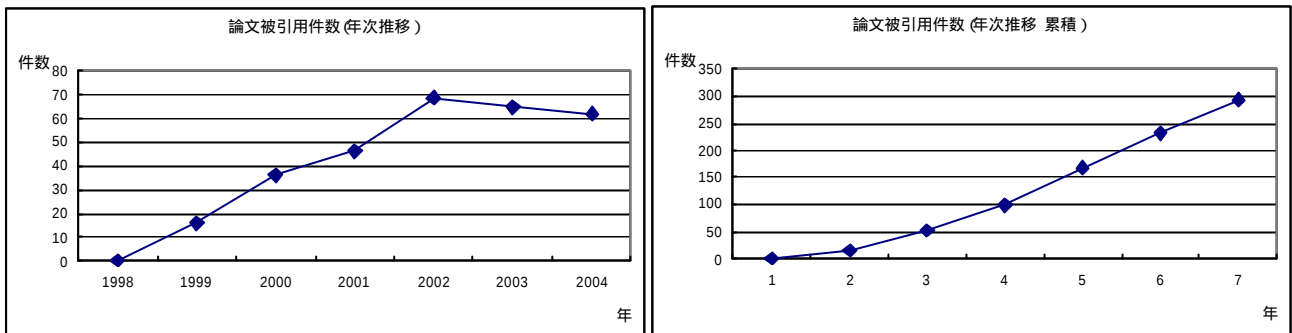
本プロジェクトから発表された論文（邦文は除く）54 件の 2004 年末までの被引用数を図表 3-2 に示した（データベース SciSearch により調査 2004 年 12 月検索）。平均被引用数は約 16 件である。特筆すべきことは、金ナノワイヤー、およびその究極である金の原子鎖の Nature 発表論文の被引用数が 295 件と非常に高いことである。その影響もあって、グループ別平均被引用数は、基礎構造 G が約 30 件と多い。

図表 3-3 「高柳粒子表面プロジェクト」の論文の報告数と被引用数

グループ名	報告数	被引用数	平均被引用数	備考
基礎構造 G	21	633	30.1	Nature 発表論文は 295 件
量子特性 G	22	142	6.5	
設計と生成 G	11	81	7.4	
合計	54	856	15.9	



図表 3-4 「Nature」発表論文 被引用件数推移



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

4.1.1. 研究成果が直接実用化、製品化、あるいは企業化に結びついた、若しくは結びつつある例

ファンダメンタルな成果なので産業界への直接的な波及効果に言及するのは難しいが、超高真空電子顕微鏡 (HV-TEM) の引き合いが増加した (台湾、シンガポール、ブラジル等)。それ以上に、TEM のエンジニアリング基盤技術のレベルアップに繋がった (TEM-STM 組み合わせ、ピエゾ素子利用など) 点大きい。ナノスケールで、構造と特性を同時に測定する基盤技術の重要性の認識が深まった。TEM-STM 組み合わせ装置に関して、超高真空 TEM-STM 組み合わせ装置は 3~4 億円と高価であるが、世界で 10 数台に増加し、台湾 2 台、シンガポール 1 台とアジアでもナノテクに力を入れている国に入っている。TEM の構造も、試料周辺に STM 等を組み込むスペースがあるものに変更された。

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

5.1.1. プロジェクト参加研究者のプロジェクト終了後の活動状況

(1) 全体的な動き

参加研究者の構成は、東京工業大学大学院教授と兼務であった高柳総括責任者以外は、民

間企業からの出向 6名、個人参加 5名、外国人 4名であった。プロジェクト終了後、民間企業からの出向者は、大学で職を得た人が 1名で、後の 5名は復職して主として研究部門で活躍している。個人参加者は、大学で職を得た人が 2名、企業に就職した人が 2名、専業主婦が 1名である。外国人は、母国の大学に職を得た人が 1名、母国の企業に就職した人が 1名、ベンチャー企業を興した人が 1名、専業主婦が 1名である。

(2)研究継続

A. 近藤行人氏 (日本電子 (株) から参加、基礎構造グループで、超高真空 TEM による金ナノワイヤーの研究) :日本電子 (株) に戻っているが、2004 年度開始の戦略的創造推進事業 CREST タイプ研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」(研究総括 :田中通義) の採択分 高柳邦夫「0.5 分解能物質解析電子顕微鏡基盤技術の研究」の共同研究者として、TEM 高分解能化の研究に参加する。

B. 横山崇氏 (松下技研 (株) から参加、シリコン表面上の量子箱作製) :金属材料技術研究所を経由して横浜市立大学の助教授として、極低温の清浄なシリコン表面に有機分子を付着させてモレキュラーワイヤー (ソフトマテリアルワイヤー) を作製する研究を進めており Nature に発表した。物理学会で招待講演をしたりして活躍中である。

C. 大西秀朗氏 (理研から阪大超高压電子顕微鏡 G を経て個人参加、基礎構造 G で TEM-STM の開発、金ナノワイヤーの量子化コンダクタンスの研究) :電子工学科出身で、プロジェクトでは図面作製・回路設計も自分で行って、一年間は装置開発に専念した。プロジェクト終了後、大阪大学超高压電顕センターの助手に就任した。

D. Nouari Kebaili 氏 (仏科学技術センターから個人参加、シリコンナノワイヤーの作製) :パリ大学助教授として、金属のクラスターの研究を行っている。

5.2.学位取得

5.2.1. プロジェクトの成果を含む業績での学位取得

岡本、横山の 2 氏が、本プロジェクトの仕事で学位を取得した。

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	高柳 邦夫	東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻	教授	東京工業大学大学院総合理工学研究所	教授	1994/10	
	技術参事	小島 建治	日本電子(株)経営戦略室	副理事	日本電子(株)		1994/10	2000/3
基礎構造G	ゲル-ブリーダ	近藤 行人	日本電子(株)電子光学機器技術本部	副主幹研究員	日本電子(株)		1994/12	1994/9
	研究員	太田 慶新 (旧姓・茹)	(株)マイクロフェーズ	代表者			1994/10	1997/6
	研究員	大西 秀朗	大阪大学超高压電顕センター	助手			1995/4	1999/9
	研究員	木全 英樹	(株)エスジー技術部				1995/8	1999/9
量子特性G	ゲル-ブリーダ	岡本 政邦	アトムテクノロジー研究体(JRCAT) オンゲストロームテクノロジー研究機構(ATP) 理論研究グループ		(株)日立製作所		1995/3	1999/9
	研究員	鈴木 晃子 (旧姓・岡野)	日本航空電子工業(株)中央研究所	主任研究員			1995/4	1999/9
	研究員	橋本 和信	バイオニア(株)総合研究所デバイス研究部 第一研究室 研究開発本部総合研究所研究統括部システムズ研究グループ		バイオニア(株)		1995/5	1999/3
	研究員	横山 崇	横浜市立大学大学院総合理工学研究科/理学部環境学科 表面・ナノ構造物性研究室	助教授	松下技研(株)		1995/4	1999/7
設計と生成 G	ゲル-ブリーダ	西村 公宏	川崎製鉄(株)技術研究所厚板・条鋼研究部門 JFEスチール(株)	主任研究員	川崎製鉄(株)		1995/5	1997/10
	研究員	濱田 悦男	日本鋼管(株)基盤技術研究所物性解析研究部	主任研究員	NKK		1995/4	1997/9
	研究員	南 伸昌	宇都宮大学教育学部化学教室	助手			1995/4	1997/3
	研究員	趙 祐?	Georgia Institute of Technology School of Materials Science and Engineering				1995/4 1998/9	1997/9 1999/9
	研究員	? 海萍					1995/4	1999/9
	STA Fellow	Nouari Kebaili	パリ大学				1998/2	1999/9

6. 創造科学技術推進事業に関する意見

6.1 事業の意義

- 新しい分野の開拓を目指す方針は、非常によい。(内部)
- 統括責任者の自由度が大きく 資金が潤沢であるため、自由に研究ができる。(内部)
- 基本的によりよいシステムであるが、プロジェクト終了後の実用化も大切である。(外部)
- 課題を選定するときに基礎研究と応用研究をつなぐ様な全体的な戦略が必要である。(外部)

6.2 仕組み、運営面に関する提言

- 基礎シーズを応用に使うアイデアを出す場合、基礎と応用の両方が分かっている人材が必要である。日本の研究者はその様なタイプが少なく、また、その様な教育を受けていない。米国では、基礎研究からの企業化(ベンチャー)が多い。現状では効率が悪いし、国の発展が遅れる。(外部)
- ERATO の成果の生かし方として、その後、他の省庁への道筋があると良い。基礎研究だから行政サイドからつなげるのが必要である。(内部)
- ERATO は統括責任者の自由度が大きい。国主導ではなく 自由な発想で将来に対して種をまく必要がある。人選が重要で、すべては人選にかかっている。(内部)
- 公募制ではない人選が JST の独自性がでてよいと思う。(内部)
- どのようなシステムで選任するのか、オープンにしたほうがよい。例えば、科学研究費は選択のシステムが明確である。(外部)
- 成果の評価も公表していることは周知されているが、一度採択されてしまうと、後の評価については日本は甘い部分がある。中間評価などをして途中で評価することも大事と考える。ただ、評価の基準方法は難しい。(外部)
- ERATO の仕組みは他の仕組みに比べて運営の自由度が大きいところがよい。5 年間の間にテーマの変更があってもいちいち届けなくてもよい。その自由度によって 大きい成果が出ているプロジェクトも多く ERATO の果たした力は大きい。(外部・内部)
- 研究期間に関しては採択がプロジェクト開始のほぼ 1 年前に決まり 実質 6 年に相当する。装置などを準備する場合、その期間も取られる。たとえば、本プロジェクトでは装置の設計から完成までに 3 年あまりかかった。ただ準備期間が 1 年あるため、3 年は研究とまとめをすることができて、他の仕組みより 余裕がある。(内部)
- 期間 5 年は、人事面からは短いと思う。プロジェクト終了後の行き先の検討は 1 年前に開始する必要があり、そのためにはその時点でなんらかの結果を出していなければならず、時間が短い。(外部・内部)

- 予算は潤沢である。ERATO は新しい分野を作るとい目的もあり 装置開発などに費用がかかるため、経費が潤沢に使えるのはよい。プロジェクトの統括責任者の多くはリーダーとして成長している (外部)
- 人材育成に関してはERATOは成功していると思うが、プロジェクト終了時が結構大変である。例えば、日本も米国のようにポストドク 2 年でパーマネントの職につけるなどのシステムがあると落ち着いて仕事ができる。(外部)
- 研究者の採用に関して、任期制の人材マーケットがないため、日本人はパーマネントの職を求める。順調な人は特にそうであるため、なかなか採用が難しい。また、日本のドクター、マスターは教育のスタンダードができていないため個人差が大きく、すぐ戦力にならない場合もあり、採用に苦労する部分もある。(内部)
- 新しい施設を使うことが予算化されている点がすばらしい。新しい装置を開発して、設置できる場所を確保できるなど、インフラの整備ができる。(内部)
- ERATO は費用と日程の管理を担当する事務局があり、研究に専念できるのがよい。(内部)

6.3. プロジェクトの成果・展開に関する外部有識者の意見

(1)プロジェクト目標の達成状況

A. ナノワイヤーの分野は、本プロジェクトの成果に立脚してできたと言える。ヨーロッパでも STM を使った研究が行われていたが、インパクトが全然違った。TEM を使って目で見られる様にしたことが大きい。これが切っ掛けとなって多くの人が研究に参加し、ナノワイヤーの研究が広がった。量子コンタクトの分野の第一人者の V. Rultenbeek 氏が、ナノワイヤーのレビューを書いているが、引用論文数が、高柳プロジェクト以降の論文が中心で、500 報ある。

B. 金属をナノワイヤーにする技術の影響も大きい。ランドマン氏が 1992 年の Nature に予測を出していたが、ナノワイヤーを作るのが難しかった。TEM で見ながら伸ばして行って、実像を見、同時に、コンダクタンスが量子化されていることを測定した。STM の発明者の H. Rohrer 氏 (スイス、1986 年にノーベル物理学賞受賞) もナノワイヤーが簡単には出来るとは思っていなかったと高く評価していた。

C. 学会へのインパクトは大きかった。英国のバーミンガムで 1998 年に開催された International Vacuum Congress で行った金ナノワイヤーに関する最初の発表で、ビデオでナノワイヤーが次第に細くなり、それに従ってコンダクタンスが変化するのを見せたが、大きな反響があり、何遍もアンコールがあった。アトランタで 2000 年に開催された ISSPIC (クラスター国際会議) での金ナノワイヤーの発表でも大きなインパクトを与えた。

¹ Physics Report 377(2003)81-279 “Quantum Properties of Atomic-sized Conductors”

D. 単結晶がどこで切断するかは重要なテーマだが、切断する時の張力、何故切断するか等の力学的特性に関する解析が欲しかった。温度・張力に耐える材料をどう作るかは実用的には重要であり、それに役立つ知見が望まれる。

(2) プロジェクトの研究成果の今日的意味

A. 日本が先行したナノテクのファンダメンタルな成果の一つである。一次元ナノワイヤーは、ナノテクの基本的な課題の一つであるが、TEMの中でナノワイヤーを作り、螺旋構造であることを実験的に解明し、同時にコンダクタンスの測定で量子効果を明らかにした。金の原子鎖(究極のナノワイヤー)で新しい構造を始めて見つけて研究者にインパクトを与えた。原子間距離が0.4nmとの結果は、結合距離は変わらないものと考えていた者にとってはショッキングで、研究者を刺激し問題提起となった。現時点でも、軽原子が間に入っているのか、特徴ある構造なのか結論はついていない。

B. 手法としてもTEMとSTMを組み合わせたのは、新しいと言える。ナノテクに対するTEMの重要性を明らかにしたことの影響は大きい。ナノの世界は見ること自体が大変である。STMは、大変な技術ではあるが、実像を見ているかどうかの判断が難しい。その点、TEMは直接見られる点が良い。

C. このプロジェクトは無機物質(特に貴金属)に限った研究であったが、この研究は有機物および有機物/無機物複合材料、さらに生命科学の問題にも敷衍出来る可能性を含んでいる。今日、医学・生命科学・遺伝子工学の分野でもこのような研究手段を利用する課題が生まれても不思議はない。

(3) 研究成果の産業的波及効果

A. 基本的にはアカデミックなプロジェクトであり、本プロジェクトはそれで良いと思う。各プロジェクトによって、基礎的なものと応用的なものがあり、全体として橋渡しが出来ていれば良いと考える。高柳プロジェクト個別の話ではないが、国として、ベーシックなプロジェクトをどう産業へ結びつけるか、別のところで考えるべきである。

B. まだプロジェクトが終了して4~5年であり、急にはないが、デバイスの微細加工の一つとして、半導体の上にナノワイヤーを作り、電流を流すことが進むことが期待される。シリコンにドーピングする従来のやり方では、原子スケールでの制御が不可能であり、限界がある。この一個一個の原子でナノワイヤーを作るボトムアップ手法は、設計できる点が強みである。この流れは、高柳プロジ

エクトの実験から始まって (あるいは、流れを刺激して) 先頭を走っていると言える。

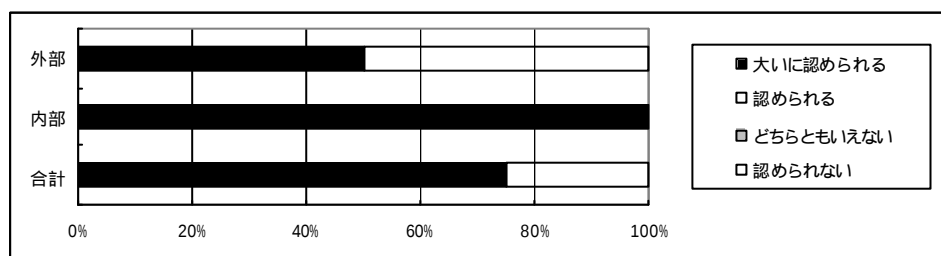
C. インstrumentationを通じての波及効果がある。TEM等の使い方について、研究者にインパクトを与えた。例えば、触媒の研究でも、金属の表面に付いている元素をTEMで検出手法の開発に影響したと考えられる。間接的だが、材料開発の手段として波及効果があったと考える。Instrumentationは地道だが、みんなが使う大事な分野である。

D. 固定概念に執着せず、もう少し広くやると良い。ケミカル、バイオに広げると未開の分野が開ける。バイオが一番難しいかも知れない。実用素子を作れるまでは、相当な努力が必要とは思うが、実用と言う観点をも少し入れる方が良い。

7. アンケート調査結果

7.1. 新たな科学、技術分野の開拓

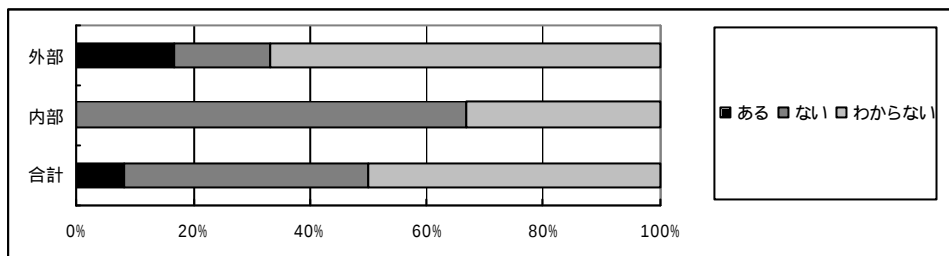
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1 大いに認められる	6	3	9
2 認められる	0	3	3
3 どちらともいえない	0	0	0
4 認められない	0	0	0



新たな分野の開拓については、全体に評価高いが、特にプロジェクト参加者は、全員が大いに認められるとの評価であった。分野としては、ナノワイヤー。

7.2. 学会、分科会、研究会等の創設

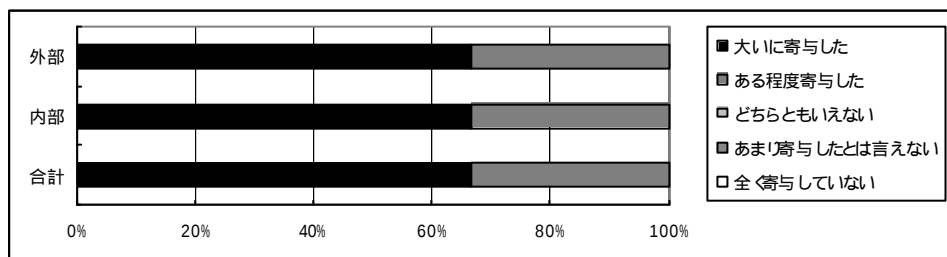
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. ある	0	1	1
2. ない	4	1	5
3. わからない	2	4	6



学会等の創設については、ほとんどが、ないか分からないとの評価であった。

7.3.状況変化への寄与

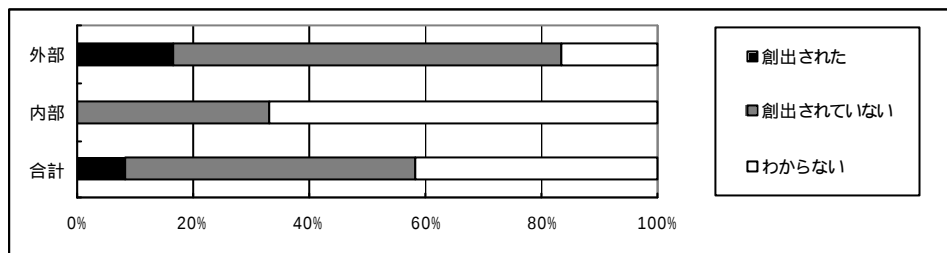
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 大いに寄与した	4	4	8
2. ある程度寄与した	2	2	4
3. どちらともいえない	0	0	0
4. あまり寄与したとは言えない	0	0	0
5. 全く寄与していない	0	0	0



インパクトおよび波及効果については、全体に高い評価であった。

7.4.新たな産業分野の成長

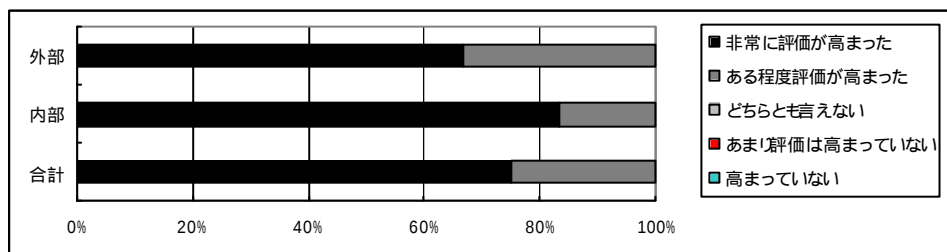
	プロジェクト関係者	外部有識者	計
1. 創出された	1	0	1
2. 創出されていない	6	2	4
3. わからない	5	4	1



新たな産業分野の成長については、ほとんどが、創出されていないか分からないの評価であった。

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	5	4	9
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



総括責任者に対する評価については、全体に高い評価であった。

7.6.アンケート集計結果（総合）

プロジェクト参加者6人、外部有識者6人の計12人のアンケート結果を図表7-1に示した。

試みに、評価結果が(1)のものを1点、(5)のものを5点として、点数評価をしてみた。

従って、点数が低い方が評価が高いと見なされることになる。

その結果、各項目ともプロジェクト参加者と外部有識者の評価点数は、ほぼ一致しており、合計評価点は全く同一点となった。

図表 7-1 全体に対する評価

項 目	プロジェクト参加者	外部有識者	合 計
1.新たな分野の開拓	1.0	1.5	1.3
2.学会等の創設	2.3	2.5	2.4
3.状況変化への寄与	1.3	1.3	1.3
4.新たな産業・分野の成長	2.7	2.0	2.3
5.総括責任者に対する評価	1.2	1.3	1.3
合計 (平均)	1.7	1.7	1.7

点数評価は、(1)を1点、(4)を4点として計算した。従って、点数が低い方が評価が高い。

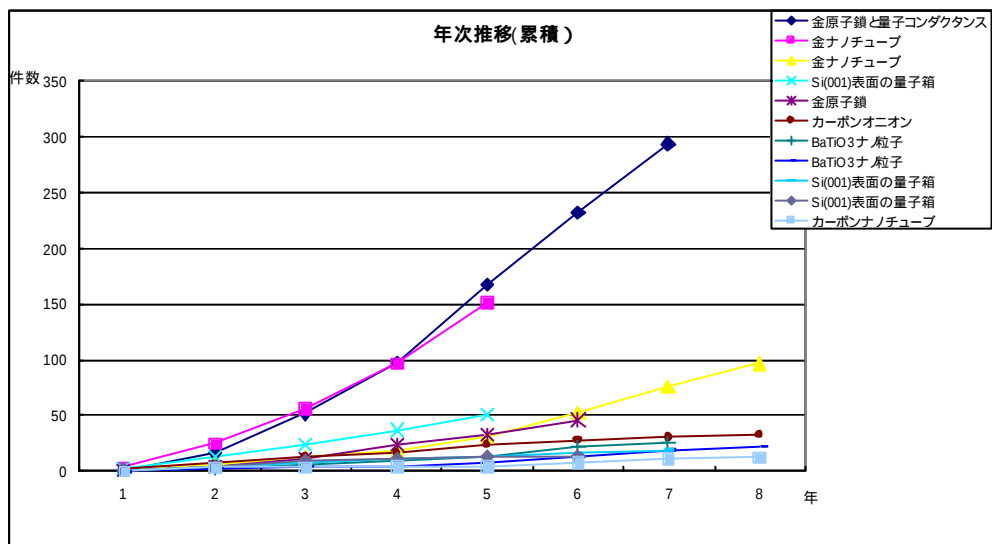
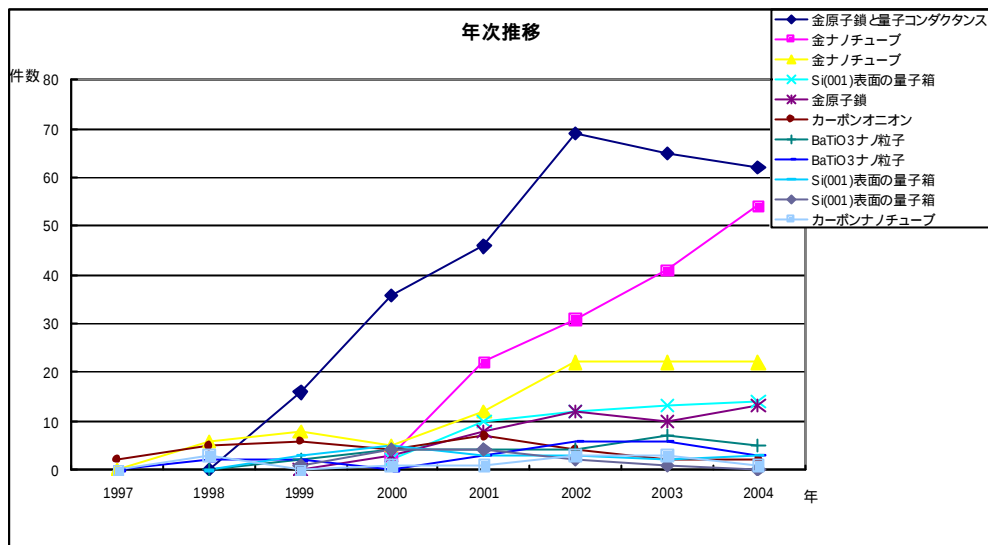
8. 統計資料

8.1.論文被引用件数推移

被引用数上位の個別報文について、発表後の年次推移を表5に示した。やはり金原子鎖、金ナノチューブ、およびそれらの量子コンダクタンスに関する論文が長期に渡り引用され、しかもプロジェクト終了後5年経過した現在も被引用数が減少せずコンスタントに引用されていることが注目に値し、その技術的価値が現在に至るまで維持されていることを示している。

図表 8-1 高柳粒子表面プロジェクトの個別報文被引用数の年次推移 (上位 11 報について)

報文テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	合計
金原子鎖と量子コンダクタンス		0	16	36	46	69	65	62	294
金ナノチューブ				3	22	31	41	54	151
金ナノチューブ	0	6	8	5	12	22	22	22	97
Si(001)表面の量子箱				2	10	12	13	14	51
金原子鎖			0	3	8	12	10	13	46
カーボンオニオン	2	5	6	4	7	4	2	2	32
BaTiO ₃ ナノ粒子		0	2	4	4	4	7	5	26
BaTiO ₃ ナノ粒子	0	2	2	0	3	6	6	3	22
Si(001)表面の量子箱		0	3	5	3	3	2	3	19
Si(001)表面の量子箱			1	4	4	2	1	0	12
カーボンナノチューブ	0	3	0	1	1	3	3	1	12



高柳粒子表面プロジェクト関連報文リスト(代表的なもの)

No.	論文
1	Cho,W. ;Hamada,E.;Kondo,Y.;Takayanagi,K. Synthesis of carbon nanotubes from bulk polymer, Appl. Phys. Lett.,69, 1996, 278-279
2	Ru,Q.;Okamoto,M.;Kondo,Y.,Takayanagi,K. Attraction and orientation phenomena of bulky anions formed in a transmission electron microscope, Chem.. Phys. Lett.,259, 1996, 425-431
3	Cho,W.;Hamada,Takayanagi,k. Stacking faults in BaTiO ₃ particles synthesized from organic precursor, J. Appl.phys. ,81, 1997, 3000-3002
4	Kondo,T.;takayanagi,K. Gold nanobridge stabilized by surface structure, Phys. Rev. Lett., 79, 1997, 3455-3458
5	Cho,W. Structural evolution and characterization of BaTiO ₃ nanoparticles synthesized from polymeric precursor, J.Phys. Cem.Solid, 59, 1998, 659-666
6	Ohnishi,H.;Kondo,K.;takayanagi,K. UHV electron microscope and simultaneous STM observation of gold stepped surface, Sur. Sci. Lett., 415, 1998, L1061-L1064
7	Yokoyama,T.;Okamoto,M.;Takayanagi,K. Electron wave in the π^* surface band of the Si(001) surface, Phys. Rev. Lett. 81, 1998, 3423-3426
8	Ohnishi,H.;Kondo,Y.;Takayanagi,K. Quantized conductance through individual rows of suspended gold atoms, Nature, 395, 6704, 1998, 780-783
9	Kondo,Y.;Ru,Q.;Takayanagi,K.. Thickness induced structural phase transition of gold nanofilm, Phys. Rev. Lett., 82, 1999, 484-490
10	Yokoyama,T.;Takayanagi,K. Sized quantization of surface-state electron on the Si(001) surface, Phys. Rev. B, 59, 1999, 12232-12235
11	Okamoto,M.;Takayanagi,K. Structure and conductance of gold atomic chain, Phys. Rev. B, 60, 1999, 7808-7811
12	Yokoyama,T.;Takayanagi,K. Anomalous flipping motions buckled dimers on the Si(001) surface at 5K, phys. Rev. B, 61,2000, R5078-5081
13	Kondo,Y.;Takayanagi,K. Synthesis and characterization of helical gold nanowire, Science, 289, 2000, 606-608
14	Ohsima,Y.;Koizumi,H.;Kondo,Y.;Mouri,H.;Hirayama,H.;Takayanagi,K. Phys. Rev. B, 65, 2002, 401

8.2.出願特許

下記の2件の特許出願が行われたが、現時点での実施の実績はない。

- ・発明の名称：「バイブリズムシフトによる電子線干渉計測システム」

発明者：大田慶新、近藤行人、高柳邦夫

公開番号：特開平 11-15359

- ・ 発明の名称：「超高真空状態で電子顕微鏡と走査トンネル顕微鏡とで同時に観察できる顕微鏡」

発明者：大西秀朗、近藤行人、高柳邦夫

公開番号：特開平 11-67141

8.3.招待講演回数の推移

プロジェクト期間(1994～1999年)中の招待講演回数を表6に示した。

図表 8-2 高柳粒子表面プロジェクトの招待講演回数の推移

暦年	招待講演回数	備考
1997	7	電子発見 100 年記念シンポジウム(英国)他
1998	9	14 th International Congress of Electron Microscopy 他
1999	18	Physical Society of the Netherland 基調講演他

ナノテクノロジー関係の学会は国際的に沢山できていて、招待講演等依頼多い。

欧州(独、伊等)では、ナノテクノロジー関係の講義を毎年定期的に1週間程度集中的に行うスクールがあり、NATURE 等に論文を出している第一線の研究者やトピック的な仕事をした人が講師に呼ばれている。毎年講義をしており聴講者は大学院の学生 100 人程度であるが、活気があり良いシステムと考えられる。

8.4.受賞

高柳邦夫

- ・ 1999 年 Surface Structure Prize (International Surface Structure Society)
- ・ 1999 年 韓国真空学会 学会賞
- ・ 2001 年 IUUSTA Science Prize (International Union of Vacuum Society)
- ・ 2002 年 東レ科学技術賞

近藤行人

- ・ 1997 年 Poster Prize out of 110 Displays at the EMAG '97 Conference

大西秀朗

- ・ 1998 年 応用物理学会講演奨励賞

- ・ 1999 年 ナノプロ-ブテクノロジー奨励賞
横山 崇
- ・ 1997 年 応用物理学会賞

以上