

東京大学生産技術研究所 教授

藤田 博之

「局所高電界場における極限物理現象の可視化観測と制御」

## 1. 研究実施の概要

本研究の目的は、数 nm から数百 nm 級のナノ構造や空間に電圧を加え極めて大きな電界を生じた時に、分子、原子、電子などがどういう振る舞いをするかを、電子顕微鏡による可視化を中心に観測することである。特にマイクロマシンの技術を用いて、ナノ構造の形状を精密に作り、電界を生ずる場を正確に決定する点に特徴がある。また、超高分解能電子顕微鏡の狭い試料室内に収まる数 mm 角のチップ中に、ナノ構造とその動きを nm の精度で自在に制御するアクチュエータ、外部への接続端子などを全て集積化したデバイスを新たに創り出した。さらに第一原理に基づく計算手法を考案し、局所高電界場における新規の現象の予測と、実験結果の正しい解釈を可能にした。このため、

- (1) マイクロマシン技術で作るナノ領域探査ツール、
- (2) 電子波の位相差検出による超高分解能顕微法、
- (3) 第一原理に基づく局所高電界場の理論計算、

の三つの柱で研究を行った。5年間のプロジェクトの前半では、各々の柱について、太さ百 nm 級で先端曲率半径が数 nm の超微細プローブをはじめ、複数のナノ構造を正確に作るマイクロ・ナノ加工法、位相差検出による超高分解能顕微法と透過電子顕微鏡装置、電子や原子の輸送を含む局所高電界場の計算手法などを確立した。これに基づき、局所高電界場に特有の量子現象である電界電子放出現象、真空トンネル現象などを、構造や電界分布の可視化手法および電気計測を用いて観測した。特に電界電子放出現象については、ナノ加工、顕微観測、理論解析の3方向から詳細な研究を行い、多くの新規な知見を得た。また、各々のテーマ内で局所高電界場の解明に資する研究を進めた。さらに、位相検出顕微法の原理を光学顕微鏡に応用して、優れた性能の透過型光干渉顕微鏡を開発し、製品として世に出すことができた。上記の各グループで得られた成果を表1にまとめて示す。

### ナノ冷電子銃の電界電子放出

鋭い針先端に集中する高電界により、電子が真空中に放出される現象が、電界電子放出である。半導体微細加工を利用したマイクロマシン技術により、シリコンチップの上に微細な冷陰極電子銃を作り、電子顕微鏡中で観察しながら電子放出実験を行った。ナノ冷電子銃は、図1に示すような2つの鋭い針(先端曲率5nm程度)が作る百 nm 程度のギャップを隔てて対向した構造である。導電性を高めるため、このような構造に金を薄く付加したデバイスに100Vを印加したところ、6mA という極めて大きな電流を得た。この値は通常の

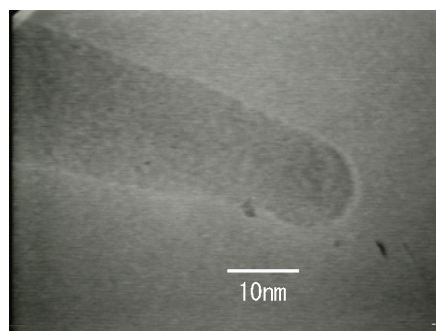
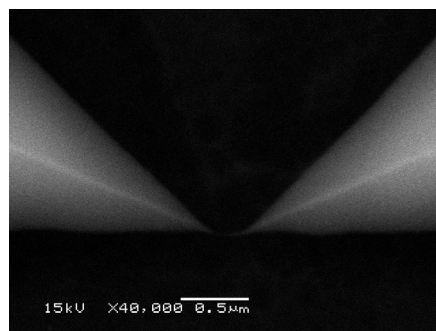
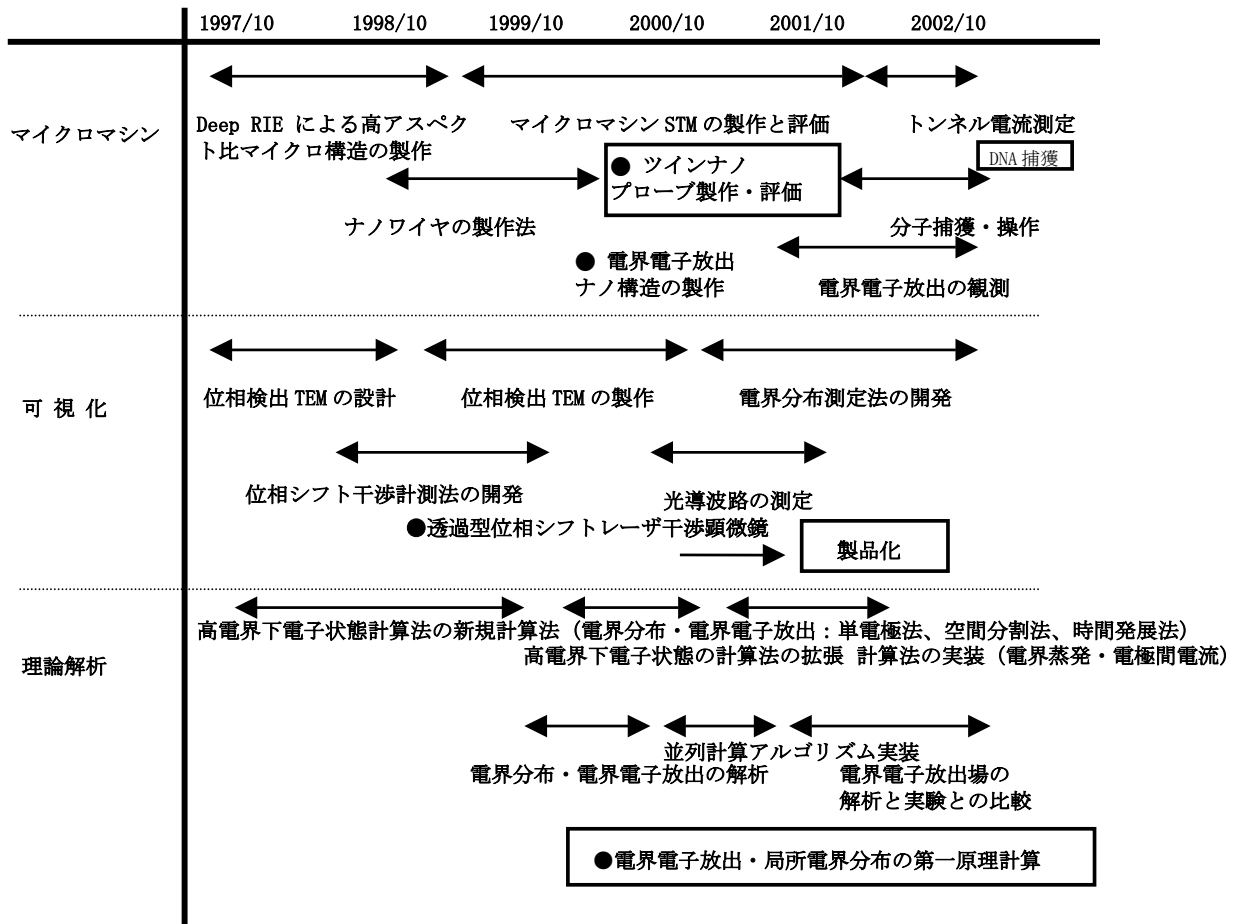


図1 ナノ冷電子銃チップと針先拡大写真

表 1 研究成果のまとめ



冷陰極で得られる値の数十倍である。電圧印加を継続したところ、シリコンの針の上に薄く成膜した金の原子層がナノ粒子となって針上を移動する現象が見られた後、強い電界と電子衝突による温度上昇のためと思われるが、針先が突然破壊した。これに伴い、電流値が 6mA から 1mA に急減した。エレクトロマイグレーションによる電子銃針端の破壊現象が、リアルタイムで観測されたのはこれが初めてである。

さらに、シリコン針からの電子放出について実験を行い、電流対電圧特性の時間変化と針先形状の変化を同時に観測した。電子放出を 1 時間程度継続すると初期に比べ電流値が増加するが、秒単位の電流の増減が見られた。このような時間的不安定性は、電子銃先端の原子レベルでの形状変化が関与していると考えられる。しかし、現在得られている顕微鏡像ではそのような形状変化まで捕らえられていないが、さらに分解能を向上することで可視化観測結果との対応を取っていきたい。

理論班も、電界電子放出現象の理論解析と取り組んだ。電極内部一表面間の電子移動を考慮しながら、定常電流下での電子状態を自己無撞着に計算できる、半無限電極密度汎関数法を新たに構築した。これを用いて、原子レベルの微小な突起からの電界放出電流に対し、突起サイズが顕著に影響することを明らかにした。また、ナノチューブを展開したグラフィイトシート端からの電界電子放出への水素吸着の影響、ダイヤモンド表面の電界放

出電流について従来理論の誤差の評価などを行った。さらに、実験との対応を取るため、電界計算と電子放出理論を組み合わせ、放出された電子の空間電荷による電界の変化を自己整合的に取り入れた解析法を考案し、針先だけでなくギャップ全体に対して電界電子放出場の解析を行った。この結果、針先の曲率半径が数 nm 以下の領域で、大きな電界放出が起きること、その針先の電界は放出電子の空間電荷による緩和効果が大きく影響することなどが明らかになった。このように、実験で得られた放出電流の時間変化と原子レベルでの針先形状変化の関連が、理論面からも示唆された。

### <マイクロマシニンググループ>

本研究では、マイクロマシニングの技術を用いて、ナノ構造の形状を精密に作り、局所的な高電界を生ずる場を正確に決定する点に特徴がある。特に、超高分解能電子顕微鏡の狭い試料室内に収まる数 mm 角のチップ中に、ナノ構造とその動きを nm の精度で自在に制御するアクチュエータ、外部への接続端子などを全て集積化したデバイスを新たに創り出す必要があった。このため、シリコンチップの微細加工技術を拡張して、太さ百 nm 級で先端曲率半径が数 nm の超微細プローブをはじめ、複数のナノ構造を正確に作るマイクロ・ナノ加工法を確立した。従来のリソグラフィーに基づくエッチングでは、このような極微細かつ立体的な加工を再現性良く行うことは難しいため、単結晶シリコンの結晶異方性エッチングと局部酸化法（LOCOS 法）を組み合わせた新しいナノマシニング技術を開発した。さらにこのナノ構造を精密に動かすマイクロアクチュエータを、モノリシックに集積化し、真空トンネル電流を制御するチップ、太さわずか 50~100nm で先端曲率が 5~10nm 程度の 2 本のプローブをハシのように開閉できるチップ、電界放出観測用のナノ電子銃などを作った。

真空トンネル現象観測用のマイクロ STM デバイスについては、まず針先の先鋭化とアクチュエータ構造のバネ剛性の最適化を行った。針先については先端曲率が 5~10nm 程度を実現し、市販のプラチナ製の針に比べてより鮮明なグラファイト原子像を得られることを示した。また、バネ剛性を数百 N/m と強化することで、試料表面との間に働く原子間力に打ち勝って安定な動作を確保し、トンネル電流を制御できることを明らかにした。本デバイスは電子顕微鏡での観測を目的とするため、二つの先鋭な針が対抗する構造となっているが、シリコン薄膜中のわずかな残留応力等のため針先の位置が必ずしも一直線上に並ばないという、困難な問題が生じた。これを解決するために、針の高さを上下して軸合わせを行う垂直駆動方のマイクロアクチュエータを新たに開発し、デバイスに組み込んだ。現在 2 方向駆動のデバイスの試験中である。

マイクロマシニング技術の利点を最大限に発揮できるのは、複数のプローブを百 nm 以下の近傍に集め、同時に複数点で測定を可能にするマルチナノプローブである。おのおのプローブは、マイクロアクチュエータで独立に動かすことができるようになっている。二本のプローブが直角に向き合い、その間隔を nm 単位で制御できるデバイスを作り、電

子顕微鏡中で動作を確認した。またお互いに向かい合ったナノ探針も製作し、そのギャップ間にナノ物体を捕獲して操作したり、評価するデバイスを製作した。他の CREST プロジェクト（徳島大馬場プロジェクト）と共同で、水中に溶けた DNA 分子をナノ探針に加えた交流電界で捕獲する実験を企画し、分子の束を捕獲することに成功した。また、針先からカーボンナノチューブを成長させ、それを評価することを試みている。

### <可視化グループ>

電子干渉計測法は、通常の電子顕微鏡とは異なり、試料を透過した電子の位相を計測することによって、試料の電気的、磁氣的性質を同時に可視化することができ、物体の原子・分子的な組織・構造と電磁氣的な性質とを同時に観察・計測できる極限的な計測の可能性を有している。この方法が高度化されれば、固体電子論、表面物理、触媒化学など材料の基礎物性に関する幅広い分野に極めて有望な計測・評価法となり、固体電子論、表面物理、触媒化学など材料の基礎物性に関する幅広い分野に大きなインパクトを与えうる。一方、マイクロマシン法は近い将来の有望な技術として各研究機関で積極的に取り組みが始まっているが、いずれも製作に主眼が置かれ、計測まで含めた研究はほとんど例がない。そこで、マイクロマシン法によりマイクロアクチュエータやマイクロプローブを作成し、原子・分子の振る舞い・構造、電気的・磁氣的な性質を電子干渉計測により原子直視レベルの分解能で観察・計測するという構想でスタートした。

可視化グループでは、まずこの計測法のための基本的な装置の開発と、レーザ干渉計を用いた原理実験、解析・制御ソフトウェアの開発に着手した。最も重要な装置は、位相解析が可能な高干渉電子顕微鏡で、試料の原子的な構造の観察が可能なように試料環境を超高真空とした。写真は、本研究で開発した超高真空高分解能位相解析型電子顕微鏡で、得られる分解能は通常の高分解能電子顕微鏡と同等である。また、マイクロマシン試料の構造・動作を観察するために、試料に電圧を与え、あるいは電流を読み出すことが必要で、9接点を有する特殊な試料ホルダを開発した。2接点程度の試料ホルダはこれまでもあったが、9点もの接点を有する試料ホルダは、世界レベルで見ても過去に例がない。また、通常の電子干渉法よりも飛躍的に計測精度の向上が見込まれる位相シフト干渉法を可能にするために、電子線軸周りに回転可能でかつ電子線軸に直交する方向に0.1ミクロンオーダーの微動が可能な電子線干渉計を開発した。この位相シフト方式と装置も、当グループのオリジナルなアイデアである。これらの装置は、マイクロマシンの構造・動作の観測や電界放出現象の観察・計測に供され一定の成果を得るに至ったが、電子干渉計測については現在も進行中である。

一方、当初電子干渉の原理実験として始めたレーザ干渉実験では、干渉光学系がレーザ光学分野で新規であること、2光束干渉法にもかかわらず拡大光学系が1系統でよく、機械的な振動にも極めて強いという特徴がある。さらに、サブミクロン領域の微小な屈折率分布を詳細かつ高精度に可視化定量計測できるという、従来の顕微鏡にない新しい機能が

実現され、光デバイス内部の屈折率計測に応用して論文化した。この装置は、科学技術振興事業団の独創的研究成果共同育成事業に採択され、平成14年8月製品化された。

### <理論解析グループ>

局所高電界場中の物理現象を理論解析する上でまず留意すべき点は、この場の中で起こる現象の多くは非平衡量子現象であるため、バンド計算に代表される通常の手法の適用が難しい、という点である。そこで理論グループでは、まず新しい方法論や計算プログラムの開発から取り組んだ。その結果、ミクロなレベルでの原子・電子の振舞いを信頼性高く予測できる「密度汎関数法」という方法論の枠組みの中で、(1)電極内部-表面間の電子移動を考慮しながら定常電流下での電子の状態を自己無撞着に計算する「半無限電極法」、および(2)複数個の物体からなり、物体間の電流が無視できる系の電子状態を計算する「空間分割法」という、2つの新しい方法論の開発に成功した。さらに、電子状態や電流の過渡的な時間変化を追跡する「時間依存法」についても、既に提案されていた方法論に独自のアルゴリズムを織り込んだ計算プログラムを開発した。

これらの方法論・計算プログラムを用いた物理現象の理論解析においては、マイクロマシングループ及び可視化グループとの連携を念頭に、電界電子放出現象を中心に研究を進めた。その結果、(1)先端が単原子で終端されている鋭い突起を持つアルミニウム表面からの電界放出電子のエネルギー分布において、突起サイズが大きい場合には2つのピークが現れるのに対し、小さい場合にはピークが一つしか現れないという、顕著な突起サイズ効果を見出した、(2)グラファイトシート(グラフェン)端からの電界電子放出では、グラフェン端への水素吸着によって仕事関数が減少するにもかかわらず放出電流も大きく減少することを見出した、(3)ダイヤモンド表面からの電界電子放出の解析では、弱電場に対して有効と思われていた従来理論がむしろ弱電界ほど計算結果からはずれることがわかった、等の従来の常識を覆す知見を得た。

さらに、電界電子放出以外にも、電界蒸発現象、電極間原子鎖の電流-電圧特性、ミクロなスケールでの静電容量、走査トンネル顕微鏡による局所トンネル障壁高さ測定などの現象について解析を行い、多くの興味深い知見を得ることができた。

## 2. 研究構想

本研究の目的は、原子レベルで先鋭化されている一対の針状電極系に電圧を加え、針先に発生する局所的な高電界(1~10V/nm)の下で、分子、原子、電子などがどういう振る舞いをするか(局所高電界場での極限物理現象)を解明することである。このため、マイクロマシンの技術を用いて、数nmから100nm級のナノ構造を正確に作り、ここに電圧を加え極めて大きな電界を発生させることとした。またその現象は、電子波位相差検出型電子顕微鏡による可視化を中心に観測することとした。このため超高分解能電子顕微鏡の狭い試料室内に収まる数mm角のチップ中に、ナノ構造とその動きをnmの精度で自在に制

御するアクチュエータ、外部への接続端子などを全て集積化したデバイスを新たに創り出す必要があった。さらに第一原理に基づく計算手法を開発し、局所高電界場における新規の現象の予測と、実験結果の正しい解釈を可能にすることとした。当初は、局所高電界場として走査トンネル顕微鏡（STM）の真空トンネルギャップを対象に研究を進め、さらにこのトンネルギャップ中に、原子鎖で構成された量子細線、電子機能をもつ分子などを捕獲して、可視化と同時に導電特性などを測定する予定であった。

このため、(1) マイクロマシン技術で作るナノ領域探査ツール、(2) 電子波の位相差検出による超高分解能顕微法、(3) 第一原理に基づく理論計算、の三つの柱で研究を進めた。5年間のプロジェクトの前半では、各々について基礎技術を確立することに専念し、半導体微細加工を援用したマイクロ・ナノ加工法、位相差検出による超高分解能顕微法と透過電子顕微鏡装置、電子や原子の輸送を含む局所高電界場の計算手法などを研究した。この間に、ERATO 高柳プロジェクトにおいてトンネルギャップ中の金原子からなる量子細線の可視化と導電特性計測などの成果が発表されたため、さらにマイクロ・ナノ加工技術を生かした、高度なデバイスを用いた実験を行うことを余儀なくされた。マイクロマシン応用STMの研究では、形状を正確に定めた針先をシリコン単結晶から作り、それを対向させてトンネル現象を観測することとした。また、現在の走査プローブ顕微鏡では複数のプローブ先端同士を百 nm 以内に接近させることは極めて困難であるので、これを可能とするマルチナノプローブの研究を行うこととした。

さらに、真空トンネル現象以外の局所高電界場に特有の量子現象として知られる電界電子放出現象に着目し、マイクロ・ナノ加工によるナノ冷電子銃の製作、電子顕微鏡中での可視化観測および電気計測、電界電子放出場の理論解析を組み合わせた研究を行うこととした。通常はあまり密接な関係のない実験関係の研究者と理論計算の研究者が、同一の対象について議論を戦わす機会が多数回あり、きわめて刺激的な研究体験であった。また、各々のテーマ内で局所高電界場の解明に資する研究およ

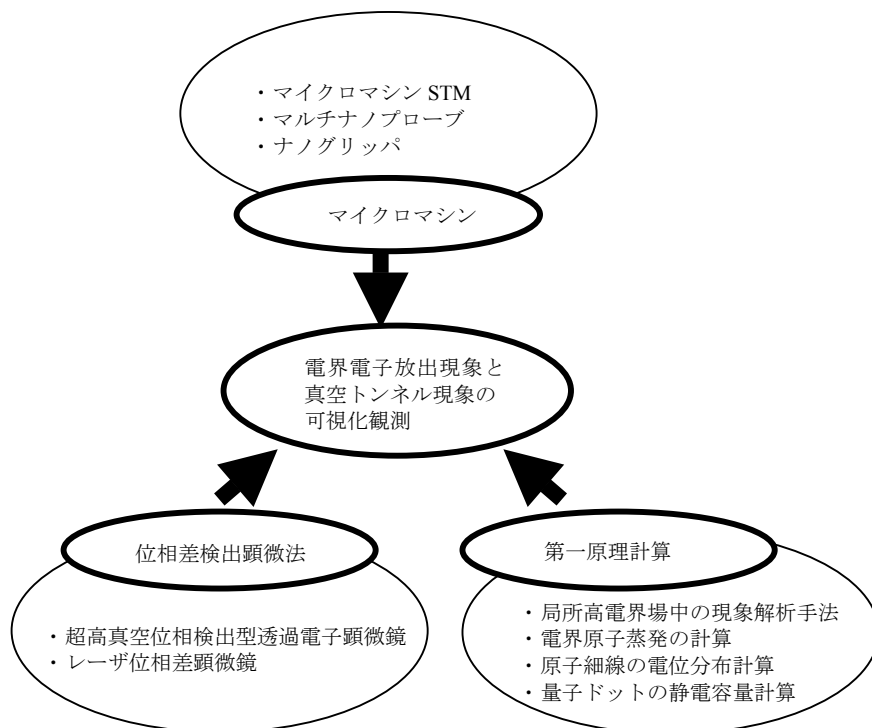


図1 研究の構成と成果概要

び、本研究の成果の実用化を進めた。研究の構成と得られた成果を図1にまとめて示す。

### <マイクロマシングループ>

まず本グループでは、シリコンチップの微細加工技術を拡張して、太さ百 nm 級で先端曲率半径が数 nm の超微細プローブをはじめ、複数のナノ構造を正確に作るマイクロ・ナノ加工法を確立した。従来のリソグラフィーに基づくエッチングでは、このような極微細かつ立体的な加工を再現性良く行うことは難しいため、新しいナノマシーニング技術を開発することとした。さらにこのナノ構造とそれを精密に動かすマイクロアクチュエータを、モノリシックに集積化するマイクロマシーニング技術を開発することとした。

製作するデバイスは、当初の目的であるマイクロマシニング用走査トンネル顕微鏡の設計と試作を第一に行った。実験の結果、駆動用の静電マイクロアクチュエータの剛性が低く、原子間力に左右されて動作が不安定になる、鋭い先端同士的位置を正確に合わせ、トンネル状態を作り出すことが困難、などの問題を発見し、それを改善するための新しいデバイス設計と試作を繰り返した。

マイクロ・ナノ加工で様々な複雑なナノ構造を作れる利点と、プローブとアクチュエータの一体化による駆動の自由度を最大限に生かすため、複数のプローブ先端を接近させて同時他点測定を可能にするデバイスを考案し、それも研究対象に含めることとした。マルチプローブデバイスの例として、太さわずか 50~100nm で先端曲率が 10nm 程度の 2 本のプローブをハシのように開閉できるチップなどを作った。このデバイスの有用性を示すため、液中の DNA 分子を対になったプローブ間に捕獲する実験を行った。

研究体制では、当初は東大生産技術研究所に所属していた橋口博士が、香川大学助教授として採用されたため、香川大学においてもマイクロ・ナノ加工が可能な設備を準備し、デバイス製作に共同で取り組んだ。また、2001年3月に東大生産技術研究所が、六本木から駒場リサーチキャンパスに移転したため、すべてのプロセス設備を閉鎖し再度立ち上げる必要が生じ、その間およそ7ヶ月にわたってデバイスの製作が中断した。

### <可視化グループ>

可視化グループでは、電子干渉計測法のための超高真空高分解能位相解析型電子顕微鏡の開発、マイクロマシニング試料用に、多接点を有する特殊な試料ホルダの開発、電子線軸周りに回転かつ電子線軸直交方向に微動可能な位相シフト電子線干渉計の開発および解析・制御ソフトウェアの開発を3年半程度で行い、その後の1年半でマイクロアクチュエータやマイクロプローブなどのマイクロマシニング試料を計測を行う当初目標で研究を推進した。電子干渉計測の精度はそれまで 1/30 波長程度であったが、原子1個による位相変化は数 10 分の 1 波長程度であるので、本研究には計測精度の大幅な向上が不可欠であった。このため、電子干渉計測に先立って、レーザ干渉計を用いて原理実験を行い、TV 信号ノイズや干渉計の微動精度、干渉計から発生する回折波の精度に及ぼす影響、TV 画像の取り込



みと処理方法、誤差の補正方法などを明らかにし、解析・制御アルゴリズムを開発することとした。電子干渉系の装置の開発、解析制御アルゴリズムの開発は(株)日立製作所基礎研究所、レーザ干渉実験は東京工芸大学が主として担当する計画であった。

この原理実験の過程で、当該レーザ干渉計がレーザ光学分野で新規であり、拡大光学系の簡略化、対振動性の大幅な向上、顕微鏡形式の干渉計に対する適応性の高さなどのメリットが明らかになった。さらにサブミクロン領域の微小な屈折率分布を詳細かつ高精度に可視化定量計測できるという、従来の顕微鏡にない新しい機能が実現され、光デバイス内部の屈折率計測や、生体試料の精密計測に極めて大きな可能性を有することを見いだした。このため、研究代表者の了解の元、この研究も主要研究テーマの1つに加え、2年目、3年目にかなりの労力を新しい形式のレーザ干渉顕微鏡に注いだ。この結果、世界で初めて、光導波路内部の屈折率をサブミクロンの分解能で可視化し定量化することに成功した。この結果は、光デバイス研究者に評価され、製品化の要望も出された。これを受けて、科学技術振興事業団の平成13年度独創的研究成果共同育成事業に応募して採択され、平成13年8月から可視化グループの指導の元(株)エフケー光学研究所において実用化研究が進められ、平成14年3月プロトタイプ完成、同年8月に製品化された。

一方、位相解析型超高真空高分解能電子顕微鏡は平成11年2月に納入され、問題なく目標分解能も達成できたが、多接点試料ホルダ、回転微動型電子線干渉計は、当初仕様はとりあえずクリアしていたがまだ十分なレベルになく、その後数回の改良を重ねることとなった。いずれの装置も、世界レベルで見ても過去に例がないもので、設計仕様を実現するには特殊な製法や技術が必要で、電子干渉計測の実験は大幅に遅れることとなった。試料ホルダ、干渉計いずれもようやく一定のレベルに達し、電子顕微鏡法によるマイクロマシン試料の観察では、STMの構造・動作の計測、細線の構造観察、対向針間の電界放出現象の観測など一定のレベルの結果が得られているが、種々の悪条件もあって電子干渉計測実験は本校執筆時点ではまだ当初目標を完全にクリアするには至っていない。

### <理論解析グループ>

理論グループは、(1)局所高電界場中の物理現象を理論解析するための数値計算手法を開発すること、および(2)電極間に架橋した原子鎖や分子の電気特性、電極表面での原子や電子の移動などの様々な局所高電界場中物理現象の理論解析を行い、局所高電界場中の極限物理現象の原子レベルで解明すること、の2点を当初からの目標としてきた。研究期間の前半では主にプログラム開発を行いつつ既存の方法論である程度解析できる弱電界場及びゼロ電界場での振舞いを検討し、後半では開発したプログラムの改良(高速化、効率化を含む)を進めつつ強電界場中の種々の物理現象について解析していく研究計画を立てた。

本研究開始後にチーム内の議論や新発見の結果生じた軌道修正点は下記の通りである。まず、数値計算手法の開発については、当初は他グループが既に開発済みの第一原理リカ

ージョン伝達行列法を基本とした計算プログラム開発を想定していたのに対し、既に述べた「半無限電極法」および「空間分割法」のアイデアが本グループ内で生まれたため、これらの方法論に基づいた計算プログラム開発を行うことに方針転換した。また、当初は開発目標に含まなかった「時間依存法」の重要性に研究過程で気づいたため、この方法も開発目標に含めることにした。

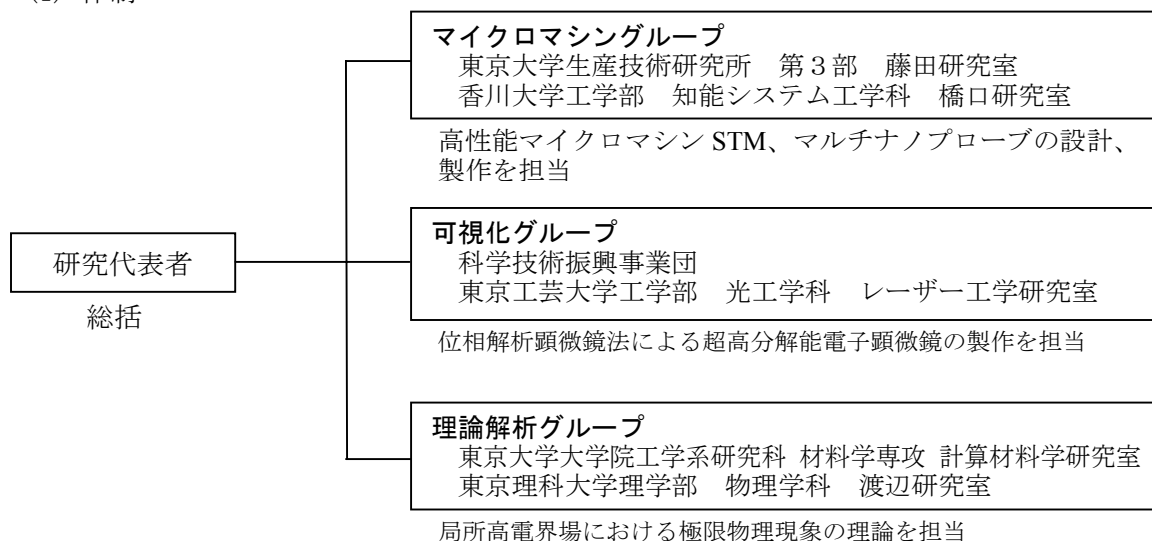
次に研究対象の面では、当初あまり重要視していなかった電界電子放出現象がマイクロマシニンググループ及び可視化グループとの共同研究のターゲットとして好適であることがチーム内の議論で明らかとなり、理論研究面でも手がける価値が高くかつ世界に先駆けた重要な結果を本グループが出しうるようになったため、この現象の原子レベルからの理論的解明を研究期間後半の大きな柱にすることとした。その他の局所高電界場中物理現象については、当初から目標に掲げていた電極間原子鎖の電気特性や電界蒸発現象の解明を予定通り行うと共に、理論解析が未開拓な領域により積極的に切り込むべく、ミクロな構造物のキャパシタンスや走査プローブ顕微鏡による局所トンネル障壁計測などにも理論解析の対象を広げることとした。

最後に、ゼロ電場での表面原子・電子の振舞いの解析は当初予備検討としてのみ行う予定であったが、銀を吸着したシリコン表面が興味深い揺らぎ構造を持つ可能性が研究開始後に示唆され、この系の研究からナノスケール計測および物性制御に役立つ興味深い知見が次々と本グループで見出されたため、予備検討の域を越えた労力を注いで研究期間後期まで継続して理論解析を行うこととした。

研究の分担は、渡邊聡（東大工）グループが主に原子・分子架橋の電気特性を中心とする電子の振舞い、渡辺一之（東理大理）グループが電界蒸発を中心とする原子の振舞いとそれぞれに必要な方法論開発を行う、というのが当初の予定であったが、研究開始後の上記の新展開をうけ、渡邊聡グループは半無限電極法の開発とこれを応用した理論解析、およびゼロ電場での銀吸着シリコン表面の解析を行い、渡辺一之グループは空間分割法および時間依存法の開発とこれらを応用した理論解析を分担することとした。なお、当初から両グループ間で緊密に情報交換・議論しながら研究を進めていく計画であったが、この点は予想以上にうまくいき、上記の新展開の多くをもたらす契機となった。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 体制



### 4. 研究期間中の主な活動

#### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 11 年 11 月 25 日- 27 日	第 3 回 N2M99 日仏ワークショップ	京都リサーチパーク	80 名	日仏に於けるバイオ・電子デバイス・走査プローブ顕微鏡等のナノテクノロジーの進展と、そこへのマイクロマシンツールの適用を討議する会議。
平成 12 年 11 月 1 日	S.W. Han 氏セミナー及びディスカッション	東京理科大学	13 名	カーボンナノチューブからの電界電子放出の時間依存密度汎関数法による解析という、本理論グループの研究テーマと密接に関連した研究を行っている S.W. Han 氏 (ソウル国立大) が来日した機会をとらえ、同氏を招いて講演頂くとともに、同氏の研究及び本理論グループの研究について活発に議論した。
平成 13 年 3 月 19 日	H12 年度成果報告会	東京大学 生産技術研究所	20 名	研究の現状報告
平成 13 年 12 月 18 日	藤田チーム全体会合	東京大学 生産技術研究所	20 名	研究参加者全員による研究報告、打合わせ
平成 14 年 8 月 28 日	藤田チーム全体会合	東京大学 生産技術研究所	20 名	研究参加者全員による研究報告、打合わせ
平成 15 年 1 月 24 日 * 予定	マイクロマシンツールによる局所高電界場観察ワークショップ	東京大学 生産技術研究所	50-70 名	本プロジェクトの成果を広く発表する。同時期に京都で開催される IEEE MEMS 2003 国際会議に参加する海外の研究者も含め、討議と情報交換を行う。

## 5. 主な研究成果

### (1) 論文発表

#### 平成9年度

1. T. Kawai, K. Watanabe, "Vibration and diffusion of surface atoms in strong electric fields", Surf. Sci. 382, 320 (1997).
2. H. Kuramochi, H. Uchida, Y. Kuwahara, K. Watanabe, M. Aono, "Site-independent adsorption of hydrogen atoms deposited from scanning tunneling microscope tip onto the Si(111)-7x7 surface", Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 36, L1343 (1997).
3. S. Watanabe, M. Ichimura, T. Onogi, Y.A. Ono, T. Hashizume and Y. Wada, "Theoretical study of Ga adsorbates around dangling-bond wires on an H-terminated Si surface: Possibility of atomic-scale ferromagnets", Jpn. J. Appl. Phys., 36, L929-932 (1997).
4. S. Watanabe, Y.A. Ono, T. Hashizume and Y. Wada, "First-principles study of atomic wires on a H-terminated Si(100)-(2x1) surface", Surface Science, 386, 340-342 (1997).
5. R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki, A. Yajima, M. Tsukada, S. Watanabe, M. Ichimura, T. Onogi and T. Hashizume, "Ferromagnetism in a Hubbard model for an atomic quantum wire: A realization of flat-band magnetism from even-membered rings", Phys. Rev. B 57, R6854-R6857 (1998).
6. 和田恭雄、「原子細線を自由にパターンニング」、化学と工業 50 (10), 1519 (1997).
7. Y. Wada, "Atom Electronics: A Proposal of Atom/Molecule Switching Devices", Annals of New York Academy of Science, vol 852, A. Aviram and M. Ratner (Eds.)

#### 平成10年度

8. 藤田博之、「新しいマイクロアクチュエータ」、電気学会誌、Vol.118, pp.364-365、電気学会、1998.6
9. H. Fujita, "Microactuators and Micromachines," PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol.86, No.8, pp.1721-1732, IEEE, 1998.8
10. 藤田博之、「ナノの世界を開くマイクロマシン」、学術月報、Vol.51, No.7, pp.704(42)-709(47)、日本学術振興会、1998.7
11. H. Fujita, H. Toshiyoshi, "Micro actuators and their applications," Microelectronics Journal, Vol.29, No.9, pp.637-640, Elsevier Science Ltd, 1998.8
12. H. Fujita, "Micromachines," INDUSTRIAL ELECTRONICS HAND BOOK, Chapter115 pp.1472~), CRC PRESS (Editor J. DAVID IRWIN), 1998.4
13. Y. Wada, "Possible Application of Micromachine Technology to Nanometer Lithography (invited)", Microelectronics J., 29, 601 (1998).
14. Nakajima, T. Kawai, K. Watanabe, "First-principles determination of potential barriers for field emissions from atomic-scale structures," Surf. Sci. in press.
15. K. Watanabe, M. Shindo, K. Tada, K. Kobayashi, "Structures and electronic properties of SinC5-n clusters in electric fields," Jpn. Appl. Phys., in press.
16. S. Heike, S. Watanabe, Y. Wada, T. Hashizume, "Electron Conduction through Surface States of the Si (111) 7x7 Surface," Phys. Rev. Lett., 81, 890-893 (1998)
17. M. Ichimura, K. Kusakabe, S. Watanabe, T. Onogi, "Flat-band Ferromagnetism in Extended Delta-chain Hubbard Models," Phys. Rev. B, 58, 9595-9598 (1998)
18. M. Ichimura, K. Kusakabe, S. Watanabe, T. Onogi, "Ferromagnetism in Hubbard Models for

Quantum Atomic Wires,” J. Magnetism Soc. Jpn., 23, 676-678 (1999)

19. 渡邊 聡、「半導体表面上の原子サイズ細線」、日本物理学会誌、53, 421-429 (1998)
20. 市村雅彦、小野木敏之、橋詰富博、渡邊 聡、「原子を並べて磁石を創る- 平坦バンド強磁性の実現の可能性-」、固体物理、33, 685-691 (1998)
21. 市村雅彦、小野木敏之、橋詰富博、草部浩一、渡邊 聡、「半導体表面上の原子サイズ細線における強磁性の可能性」、日本応用磁気学会誌、23, 770-775 (1998)

#### 平成 11 年度

22. H. Kawakatsu, H. Toshiyoshi, D. Saya, H. Fujita, “A Silicon based nanometric oscillator for scanning force microscopy operating in the 100 MHz range,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 38(1999), Part 1, No.6B, pp.3962-3965
23. H. Toshiyoshi, D. Kobayashi, M. Mita, G. Hashiguchi, H. Fujita, J. Endo, Y. Wada, “Microelectromechanical Digital-to-Analog Converter of Displacement for Step Motion Actuators,” IEEE/ASME J. Microelectromech. Sys. vol.9, June 2000 (in press)
24. H. Toshiyoshi, D. Kobayashi, M. Mita, G. Hashiguchi, H. Fujita, J. Endo, Y. Wada, “A Digital-to-Analog Converter of Displacement by Integrated Micromechanism,” Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38 (1999) Part 1, No.6B, 30 June 1999, p.3962.
25. H. Toshiyoshi, M. Goto, M. Mita, H. Fujita, D. Kobayashi, G. Hashiguchi, J. Endo, Y. Wada, “Fabrication of Micromechanical Tunneling Probes and Actuators on a Silicon Chip,” Japanese J. Appl. Phys. vol.38, Part 1, No.12B (Special Issue on Microprocesses & Nanotechnology), Dec.1999, p.7185-7189.
26. 年吉 洋、小林 大、三田 信、橋口 原、藤田博之、遠藤潤二、和田恭雄、「シリコンマイクロマシニングによるステップアクチュエータ」、生産研究（東京大学生産技術研究所発行）、第 51 巻 8 号、平成 11 年 8 月、647
27. S. Heike, T. Hashizume, Y. Wada, “Correlation between tip-apex shape and surface modification by scanning tunneling microscopy,” Journal of Applied Physics, Vol.86, No.8, pp.4220-4224, October 15, 1999.
28. Y. Wada, “Proposal of atom/molecule switching devices,” J. Vac. Sci. Technol., A17(4), pp.1399-1405, Jul/Aug, 1999.
29. Y. Wada, D. Kobayashi, H. Fujita, “Micromachine Scanning Tunneling Microscope Research in Japan,” Sensor Update, Vol.6, Part 1, pp.41-58, 1999.
30. 三田 信、三田吉郎、年吉 洋、藤田博之、「遅延マスク法によるシリコンの 3 次元バルクマイクロ構造」、電気学会 E 部門誌、5 月号、pp.310
31. M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, T. Oba, H. Fujita, “Multi-height HARMS by planer photolithography on initial surface,” Microsystem Technologies, 1999.
32. Y. Gohda, Y. Nakamura, K. Watanabe and S. Watanabe, “Self-Consistent Density Functional Calculation of Field Emission Current from Metals,” Phys. Rev. Lett., submitted.
33. K. Watanabe, M. Shindo, K. Tada, K. Kobayashi, “Structures and electronic properties of Si<sub>n</sub>C<sub>{5-n}</sub> clusters in electric fields,” Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 5270.
34. K. Tada, K. Watanabe, “Ab initio study of carbon nanotubes in electric fields,” Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 268.
35. Nakajima, T. Kawai, K. Watanabe, “First-principles determination of potential barriers for field emissions from atomic-scale structures,” Surf. Sci. 433-435 (1999) 868.

36. 遠藤潤二、和田恭雄、藤田博之、陳 軍、「電子干渉計測によるナノ構造と電界分布の可視化の試み」、電気学会論文誌 (E) 平成 12 年 6 月号掲載決定、(平成 11 年 12 月 7 日受理、平成 12 年 2 月 4 日再受理)

#### 平成 12 年度

37. H. Toshiyoshi, D. Kobayashi, M. Mita, G. Hashiguchi, H. Fujita, J. Endo, Y. Wada, "Microelectromechanical Digital-to-Analog Converter of Displacement for Step Motion Actuators," IEEE/ASME J. Microelectromech. Sys. vol.9, June 2000, p.218-225.
38. 和田恭雄、「原子分子操作による新規素子の創製(招待論文)」高分子 49(7), 435 (2000).
39. Y. Wada, M. Tsukada, K. Matsushige, M. Fujihira, T. Ogawa, M. Haga and S. Tanaka , "Prospects and Problems of Single Molecule Information Devices (invited)," Jpn. J. Appl. Phys., 39(7), 3835 (2000).
40. 和田恭雄、「未来を担う分子エレクトロニクス (招待論文)」化学 55(8), 26 (2000).
41. 三田 信、三田吉郎、年吉 洋、藤田博之、「遅延マスク法によるシリコンの 3 次元バルクマイクロ構造」電気学会 E 部門誌、5 月号、p.310
42. M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, T. Oba, H. Fujita, "Multi-height HARMS by planer photolithography on initial surface," Microsystem Technologies.
43. M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, H. Fujita, "Multiple-height Microstructures Fabricated by ICP-RIE and Embedded Masking Layers," 電気学会 E 部門誌, 2000 Vol.120-E, pp.493-497
44. 遠藤潤二、和田恭雄、藤田博之、陳 軍、「電子干渉計測によるナノ構造と電界分布の可視化の試み」電気学会論文誌 E、120 巻 6 号 285-291, 2000
45. Y. Gohda, Y. Nakamura, K. Watanabe and S. Watanabe, "Self-consistent density functional calculation of field emission currents from metals," Physical Review letters, 85 (2000) pp.1750-1753.
46. S. Watanabe, Y. Kondo, Y. Nakamura and J. Nakamura, "Atomic and electronic structure of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface reexamined using first-principles calculations," Science and Technology of Advanced Materials, 1 (2000) pp.167-172.
47. K. Tada, K. Watanabe and C. Ishii, "Ab Initio Study of Clusters and Nanotubes in Electric Fields," Few-Body Systems Supplement 12 (2000) pp.60-65.
48. N. Nakaoka, T. Tada, S. Watanabe, H. Fujita and K. Watanabe, "Partitioned Real-Space Density Functional Calculations of Bielectrode Systems under Bias Voltage and Electric Field," Physical Review Letters 86 (2001) pp.540-543.

#### 平成 13 年度

49. 藤田博之、「第 2 部-16 ナノ電気機械システム」、ナノテクノロジー最前線、p177-194, (株)東京教育情報センター、2002.3
50. 藤田博之、橋口 原、「ナノ加工のためのエッチング技術」、図解ナノテクノロジーのすべて第 3 章ナノテクノロジーのための加工・計測、p74-77、工業調査会、2001.11
51. H. Fujita, H. Toshiyoshi, G. Hashiguchi, Y. Wada, "Micromachined tools for nano technology," Riken Review No.36, Focused on Science and Technology in Micro/Nano Scale, pp.12-15 The Institute of Physical and Chemical Research, 2001.6
52. Y. Wada, "Prospects for Single Molecule Information Processing Devices," Proc. IEEE, 89(8),

- 1147 (2001).
53. Y. Wada , “Prospects for Molecular Electronic Devices (invited),” *Current Applied Physics*, 1, 28 (2001).
  54. 和田恭雄、山田、松重、「分子ナノエレクトロニクスの展望 (招待論文)」、*応用物理* 70(12)、1395 (2001).
  55. J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada and H. Fujita, “Transmission laser microscope using the phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguides,” *Applied Optics OT Vol.41* (2002) 1308-1314
  56. J. Chen, J. Endo, Y. Niino, H. Fujita, “Phase shifting interference microscopy using a Fresnel’s biprism,” *Proc. of SPIE*, Vol.4116, pp.158-161 (2001).
  57. S. Itoh, T. Yamazaki, K. Katoh, and J. Chen, “High Precision Testing Method for Fabry-Perot Etalon”, *Optical Review Vol.8*, No.3, pp.179-183 (2001)
  58. Y. Gohda and S. Watanabe, “Total energy distribution of field-emitted electrons from Al(100) surface with single-atom terminated protrusion,” *Physical Review Letters*, 87 (2001) pp.177601-1-177601-4.
  59. Y. Gohda, Y. Nakamura, K. Watanabe and S. Watanabe, “Density functional analysis of field emission from metals,” *Materials Science and Engineering A*, 327 (2002) pp.1-6.
  60. Y. Nakamura, Y. Kondo, J. Nakamura, and S. Watanabe, “Theoretical study on the structural phase transition of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface,” *Surface Science*, 493 (2001) pp.206-213.
  61. Y. Nakamura, Y. Kondo, J. Nakamura, and S. Watanabe, “STM images apparently corresponding to a stable structure: Considerable fluctuation of a phase boundary of the Si(111)-( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )-Ag surface,” *Physical Review Letters*, 87 (2001) pp.156102-1-156102-4.
  62. N. Sasaki, S. Watanabe, H. Aizawa, and M. Tsukada, “Simulation of interaction force between Si tip and Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface of IET structure in noncontact AFM,” *Surface Science*, 493 (2001) pp.188-193.
  63. N. Sasaki, S. Watanabe, H. Aizawa, and M. Tsukada, “Visualization of thermally fluctuating surface structure in noncontact atomic-force microscopy and tip effects on fluctuation: Theoretical study of the Si(111)-( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )-Ag surface,” *Physical Review Letters*, 88 (2002) pp.046106-1-046106-4.
  64. K. Tada, S. Furuya and K. Watanabe, “Ab Initio Study of Hydrogen Adsorption to Single-Walled Carbon Nanotubes,” *Physical Review B*, 63 (2001) pp.155405-1-155405-4.
  65. K. Tada and K. Watanabe, “Ab Initio Study of Field Emission from Graphitic Ribbons,” *Physical Review Letters*, 88 (2002) pp.127601-1-127601-4.

#### 平成 14 年度

66. H. Kawakatsu, S. Kawai, D. Saya, M. Nagashio, D. Kobayashi, H. Toshiyoshi, and H. Fujita, “Towards Atomic Force Microscopy up to 100MHz,” *Review of Scientific Instruments*, Vol.73, No.6, June 2002, pp2317-2320, 2002.6
67. 安井 学、平林康男、藤田博之、角嶋邦之、三田 信、「Si 鋳型を用いた微細穴の試作」、*電気学会論文誌 E*, Vol.122-E, No.8, pp415-416、社団法人電気学会、2002.8
68. Kobayashi, M. Nakajima, K. Chun, Y. Kikuchi, H. Fujita, “Silicon Array of Elongated Through-Holes for Monodisperse Emulsion Droplets,” *AIChE Journal*, Vol.48, No.8, pp1639-1644, the American Institute of Chemical Engineerings, 2002.8

69. E. Lebrasseur, J.B. Pourciel, T. Bourouina, T. Masuzawa and H. Fujita, "A new characterization tool for vertical profile measurement of high-aspect-ratio microstructures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12 (2002), p280-285, Institute of Physics Publishing, 2002.
70. Y. Wada, "Prospects for Single Molecule Information Devices for the Next," *Paradigm* (invited), *Annals of New York Academy of Science*, Vol.960, 39 (2002).
71. 和田恭雄、「電子・光材料におけるグリーンケミストリー (招待論文)」*現代化学* No.372, 55 (2002).
72. J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada and H. Fujita, "Transmission laser microscope using the phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguides," *Applied Optics* OT Vol.41 (2002) 1308-1314.
73. S. Furuya, Y. Gohda, N. Sasaki and S. Watanabe, "Ab initio Calculation of the Electric Properties of Al Atomic Chains under Finite Bias Voltages", *Japanese Journal of Applied Physics*, 41, pp.L989-L991, (2002).
74. Y. Gohda and S. Watanabe, "Theoretical Analysis of Field Emission from Atomically Sharp Aluminum Tips", *Surface Science*, 516, pp.265-271, (2002).
75. N. Nakaoka and K. Watanabe, "Ab Initio Study of Field Evaporation from Single-Walled Carbon Nanotubes", *Physical Review B*65, pp.155424-1~155424-5, (2002).
76. H. Totsuka, Y. Gohda, S. Furuya and S. Watanabe, "First-Principles Study of Apparent Barrier Height", *Japanese Journal of Applied Physics*, in press.
77. N. Nakaoka, K. Tada and K. Watanabe, "Theory of Field Evaporation and Field Emission from Carbon Nanotubes", *Physica B*, in press.
78. N. Nakaoka and K. Watanabe, "Quantum Capacitances of Molecules, Fullerenes and Carbon Nanotubes by the Partitioned Real-Space Density Functional Method", submitted to *European Physical Journal D*.
79. Y. Nakamura, H. Koga and S. Watanabe, "Multistage Order-Disorder Surface Transition of Si (111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface with Defects", submitted to *Physical Review Letters*.
80. Y. Gohda and S. Watanabe, "Theoretical Analysis of Field Emission from Metallic Nanostructures on Si (100) Surfaces", submitted to *Physical Review B*.
81. Y. Gohda and S. Watanabe, "Theoretical Calculations of Field Emission from Si (100) Surfaces", submitted to *Journal of Vacuum Science and Technology B*.
82. C. Hu, Y. Gohda, S. Furuya, and S. Watanabe, "First-Principles Calculation of Vibrational Properties of a Nanostructure in Electric Fields", submitted to *Japanese Journal of Applied Physics*.
83. K. Ando, N. Bray-Ali, Y. Gohda, and S. Watanabe, "Theoretical Analysis of Electron Standing Waves and Electric Field Strength in a Vacuum Gap of STM", submitted to *Japanese Journal of Applied Physics*.
84. S. Watanabe, "Theoretical Calculations of Electrical Properties of Nano-Scale Systems Under Electric Fields and Currents", in *Chemistry of Nano-Molecular Systems-Toward the Realization of Molecular Devices* (T. Nakamura, T. Matsumoto, H. Tada and K. Sugiura, eds., Springer Verlag), in press.



(2) 特許出願（国内 12 件、海外 2 件）

①国内

1. 和田恭雄、「分子単電子トランジスタ」特願平 10-66499、平成 9 年
2. 和田恭雄、「分子発光デバイス」特願平 10-66500、平成 9 年
3. 和田恭雄、「集積回路」特願平 11-83359、平成 11 年 3 月 26 日
4. 年吉 洋、小林 大、「梯子型サスペンション機構を用いたマイクロストリップアクチュエータ」特願平 11-321993、平成 11 年 11 月 12 日
5. 年吉 洋・小林 大、「機械的デジタルアナログ変換装置」、平成 11 年 11 月 14 日
6. 藤田博之・橋口 原・和田恭雄・遠藤潤二、「電子プローブの構造とその製造方法」、平成 12 年 3 月
7. 藤田博之・三田 信、「光軸セルフ・アライメント構造を有する機械式光スイッチ」、平成 12 年 1 月 20 日
8. 藤田博之、小林 大、三田 信、天坂祥一、「マイクロアクチュエータ及びその製造方法」特願 2000-077105、平成 12 年 3 月 17 日
9. 藤田博之、橋口 原、和田恭雄、遠藤潤二、角嶋邦之、三田 信、「ナノプローブ装置及びその製造方法」特願 2000-199175、平成 12 年
10. 遠藤潤二、陳 軍、「干渉計測装置」特願 2000-97877、平成 12 年 3 月 30 日
11. 遠藤潤二、陳 軍、「干渉計測装置および干渉計測方法」特願 2000-244031、平成 12 年 8 月 9 日
12. 遠藤潤二、陳 軍、「試料観察計測用可干渉ビーム装置」特願 2001-234878、平成 13 年 8 月 2 日

②海外

1. 藤田博之、小林 大、三田 信、天坂祥一、「マイクロアクチュエータ及びその製造方法」特願 2000-077105、平成 12 年 3 月 17 日
2. 遠藤潤二、陳 軍、「干渉計測装置」PCT/JP01/02534、平成 13 年 3 月 28 日、波面分割干渉素子の波面分割境界から発生するフレネル回折波を、ハードウェアまたはソフトウェアまたはその両方で除去する干渉計測装置

(3) 新聞報道等

①新聞報道

新聞名	タイトル	掲載日
秋田さきがけ新聞	米粒以下の鏡で光通信交換機	H9. 4. 2
神奈川新聞	同内容記事	H9. 4. 7
沖縄タイムズ(夕刊)	同内容記事	H9. 4. 1
中国新聞	同内容記事	H9. 4. 5
京都新聞 (夕刊)	同内容記事	H9. 4. 11
岩手日報	同内容記事	H9. 4. 5
南日本新聞	同内容記事	H9. 4. 10
高知新聞	同内容記事	H9. 3. 31
信濃毎日新聞	同内容記事	H9. 3. 31
日経産業新聞	50 倍強い駆動機構	H9. 4. 17
日本工業新聞	「ナノ振動子」作製、実用性を確認	H11. 8. 4
科学新聞	ナノサイエンス・テクノロジー研究 3/ナノ世界を開くマイクロマシン	H12. 9. 1
日本経済新聞	フォトクリック/小さな巧み 8 一万分の一ミリの箸 DNA 分子つかめ	H12. 11. 5
日経産業新聞	箸の太さ 100 ナノメートル実現	H12. 11. 8
朝日新聞 (朝刊)	超小型、でも多用途期待	H13. 2. 1
サンデー毎日	「東大研究・ユニーク研究室」	H13. 4. 1 号
読売新聞 (夕刊)	ナノ革命・DNA 素子も開発中	H13. 5. 9
日経産業新聞	大日本印刷、東大、線幅 0.8 マイクロを印刷、半導体回路製造に応用	H13. 8. 9
日本工業新聞	DNA を 1 本つまめるピンセット	H14. 3. 8
日本工業新聞	鋳型で微細穴の金属膜を量産化	H14. 4. 10
日本工業新聞	直径 100~200 マイクロメートルの細孔・内面の凹凸を高精度に測定	H14. 6. 19

②受賞

1. 市村学術賞功績賞 (平成 9 年): 藤田博之
2. 服部報公賞 (平成 12 年): 藤田博之
3. Chevalier de l'Ordre des Palmes Academiques-フランス共和国政府教育・学術功労勲章シユバリエ受賞- (平成 13 年): 藤田博之

(4) その他特記事項

電子干渉計測法はまだ発展途上の技術である。このため、電子干渉における精度、画像処理法などを原理的に検討することを目的として、レーザ干渉系で電子干渉の光学系とほぼ等価な干渉系を構成して研究を進めたところ、その光学系がレーザ光学分野で新規であり、かつ機器構成がシンプルで対振動性の極めて高いことが解った。さらに、サブマイクロン領域の微小な屈折率分布を極めて明瞭に可視化し、定量計測ができるという、これまで

にない新しい機能の顕微鏡が実現できることを示すことができ、光ファイバーや光導波路など光デバイス分野、生体物質計測分野の研究者から注目されている。

この新しい形式の顕微鏡の可能性を具体化すれば、今後大きな発展が見込まれる上記光デバイス分野、生体物質計測分野において、国際競争力の高い技術、製品の開発に貢献できるものと思われる。そこで、当該干渉系の製品化を検討し、光学関連の中小メーカ3社を選んで製品化の意向を打診したところ、3社とも是非担当したい旨回答が得られ、干渉計の開発経験を基準として1社を選定した。基本的な3件の特許は、いずれも可視化グループの考案になるもので、持分は科学技術振興事業団70%、筆頭発明者の所属元である(株)日立製作所30%である。こうした公的研究による発明を具体化する制度はいくつかあるが、そのうち科学技術振興事業団の平成13年度「独創的研究成果共同育成事業」および「委託開発事業」に応募したところ、委託開発事業に於いては10数倍の競争を経て最終選考に残り、独創的研究成果共同育成事業でも採択された。開発規模や製品化後の製品市場等を勘案して委託開発事業を辞退し、独創的研究成果共同育成事業により、平成13年夏から、可視化グループが装置構成、解析・制御プログラム等全般にわたって指導しながら製品化を進めた。

この結果、平成14年3月にプロトタイプが完成し、1/140波長を越える計測制度を達成した。この後、ソフトウェアや細部のブラッシュアップを行い、工業所有権、特許使用許諾関係の整備を進め、8月に製品を発売するに至った。この間にも、生体物質を研究している某国立大学の先生から計測の可能性の打診を受け、テストサンプルで計測した結果、これまでにない情報が得られているとの評価を頂いている。現在、技術、装置の有用性が認知されつつある段階である。