

走査型トンネル顕微鏡の開発

梶村 皓二

電子技術総合研究所

走査型トンネル顕微鏡のもつ高いポテンシャルをナノスケールの科学と技術に活かしたいと考えた電総研の異分野の研究者が 1984 年から STM を開発し、新分野を開いた。企業の協力も得て、21 世紀に入って大きく進展するナノテクノロジーの萌芽期を支えた。

1. はじめに

小さなものを見るための手段は虫眼鏡，光学顕微鏡，電子顕微鏡へと進み，0.1 nm の大きさの原子一つひとつを見て，その原子を動かすこともできる走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope, STM）まで進んだ。STM はトンネル現象を利用して導電性（電気を通しやすい）物質の表面を，鋭くとがった金属の針が触れないようなぞって走査する顕微鏡である。

1970 年代ニューヨークの IBM T.J.ワトソン研究所では極低温で動作する超高速のジョセフソン・コンピュータの開発が進められていた。鉛を主成分とする超伝導トンネル接合素子を使う。蒸着した鉛の粒界と粒界のあいだにヒロック（微小突起）が成長し，数 nm の絶縁酸化膜を貫いてピンホール（微細な穴）を作り，接合がショートする現象に悩まされていたが，膜の背骨に金の薄い層を入れ，インジウムを用いて鉛を合金化することでヒロックの成長を抑え一応解決したという。70 年代半ば筆者が圧電体のフォノンエコーの研究のため同所に 1 年あまり滞在していたころ，オフィスの近い研究員からよく聞いた。

ローラー（H. Rohrer）とビニッヒ（G. Binnig）は 1978 年にスイスの IBM チューリッヒ研究所において，ジョセフソン接合の絶縁酸化膜の形成や構造の解明を目的の一つとして STM の開発を始めた [Binnig and Rohrer (1987)]。しかし STM が完成したころニューヨークでは 10 年以上におよんだプロジェクトを中止していた。動作温度である極低温と室温とを往復するあいだに生じるひずみの応力でヒロックが成長するため，接合がショートする確率が，コンピュータに要請される限界点より下がらなかったからである。ビニッヒたちは STM 完成後，当初想定していた絶縁酸化膜ではなく，シリコン清浄表面に形成される 7×7 超格子構造の空間像を原子スケールで観測するに至った [Binnig *et al.* (1983b)]。

電子技術総合研究所（電総研）では 1984 年から 86 年にかけて STM を自主開発した。STM についての解説や成書は既に数多くある。本稿では電総研において分野の異なる研究者が自発的にチームを結成し原子の並びを日本で初めて観察するに至った経緯と，開発した技術を異なる分野の研究に適用し始めるまでの数年間の活動を記す。メンバーは STM 装置開発そのものを目指したわけではなく，ナノスケールの研究領域を開拓するための手段とし

て手に入れたと思っていたのである。精密工学会長であった谷口が提唱したナノテクノロジーという名前や概念 [Taniguchi (1974)] はまだ一般には流布していなかったが、このプロジェクトはナノテクノロジーの始まりであった。STMは当初から多くの技術分野への展開が予測されたので、電総研内のみならず企業の開発者にも呼びかけ共同で開発した。

STMは科学技術史の研究対象としても取りあげられ、コーネル大のモディの研究 [Mody (2005)] や東京大の山口の研究 [山口(2008)] がある。山口の論文には、欧米における初期のSTM開発史を背景に、電総研におけるSTM装置開発の状況が時系列的に詳述されており、携わったメンバーから直接ヒアリングしたこともあって臨場感にあふれている。

本稿の構成は次のとおりである。2.ではSTMの動作原理、3.ではSTM関連技術の推移を概説する。4.「ロス・アンジェルス」では開発のきっかけ、続く3つの節、5.「STM開発チーム」、6.「電子トンネル顕微鏡コロキウム」、7.「海外事情調査」では調査と検討の経緯、8.では電総研で開発した要素技術を述べる。このチームでは要素技術を系統的に分担して開発したわけではない。異なるメンバーが複数の種類を発案した。技術内容の詳細より開発の流れを知りたい読者はこの節を飛ばして9.に進んでいただきたい。9.では企業の参加、10.では初めて原子像をとらえた前後の経緯を述べる。原子像観察は新しい分野を開いていく出発点になった。11.ではSTMを用いた新分野への展開、12.では産学の研究開発体制への協力について述べる。結言、謝辞、参考文献のあとに資料として出願特許、発表論文、技術指導、共同研究のリストをあげる。

2. トンネル現象とSTMの動作原理

物理学では、粒子が壁の一方から他方へすり抜けることをトンネル現象またはトンネル効果という。金属と金属のあいだに絶縁物があると電気は流れない。しかしその厚さがナノメートルの程度になると事情は変わってくる。量子力学的にみると、電子の存在確率(波

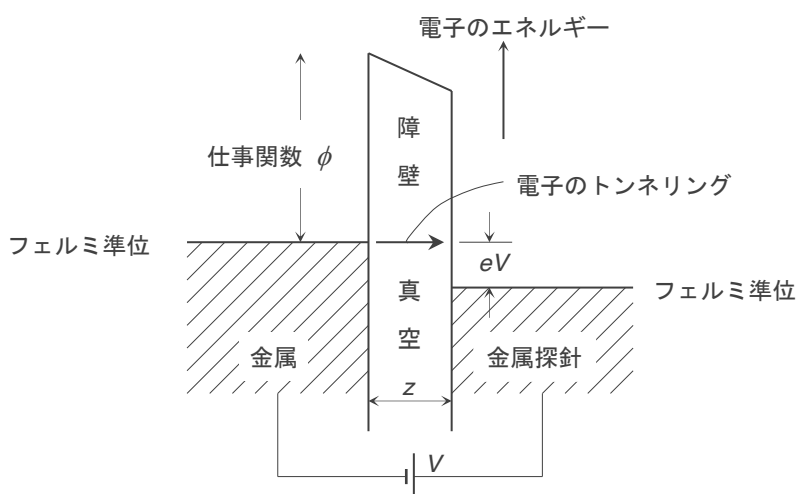


図1 真空を障壁としてトンネルする電子のエネルギー図。

動関数)は金属表面では有限の値をとるが、表面から離れるにつれて指数関数的に急激に減衰する。探針と試料の電子雲(波動関数)が重なりあう 1 nm 程度まで近づけ、電圧を加えると電流が流れる。これがトンネル電流である。電子のエネルギー図(図 1)において、真空を介して距離 z だけ離れた 2 つの金属のあいだに電圧 V を加えると、電圧が仕事関数(電子が外に飛び出すのをさえぎるエネルギー障壁) ϕ より低いとき ($eV < \phi$, e は電子の電荷), 金属の自由電子モデルでは、流れるトンネル電流 J は

$$J = \alpha V \exp[-\beta(\phi)^{1/2} z] \quad (1)$$

で表わされる。ここで $\alpha = e^2(2m)^{1/2}/h^2z$, $\beta = 4\pi(2m)^{1/2}/h$ (m は電子質量, h はプランク定数), α と β は金属材料に依存しない定数である。金属では ϕ は約 5 eV, $\beta = 10.25 \text{ nm}^{-1}(\text{eV})^{-1/2}$ であるので距離 z が 0.1 nm 変化するだけでトンネル電流 J が 1 桁変化する。電圧 V は 1 mV ~ 1 V, 電流 J は 1 ~ 10 nA である。なお $eV > \phi$ の場合もトンネル現象が起きるが電界放射と呼ばれる。

探針を動かすには圧電アクチュエータを使う。圧電アクチュエータは加える電圧の方向によって伸びるか縮む。よく知られた材質に水晶や焼結体の PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)がある。たとえば、マッチの軸のような $1 \text{ mm}^{\square} \times 10 \text{ mm}^{\text{L}}$ の圧電アクチュエータを使うと、1 V の電圧印加で 1 nm 程度変位(伸縮)するので、電圧を制御すれば原子 1 個のサイズ(0.1 ~ 0.3 nm) よりも良い精度で変位距離を制御できる。

次に原子像(原子の並びを示す表面の凹凸像, トポグラフという)を見る方法を述べる。本稿では試料の表面を xy 面, 探針を試料から引き離す方向(探針の軸方向)を z 方向とする(図 2)。トンネル電流を一定に保ちながら、探針を試料表面の x 方向に走査す

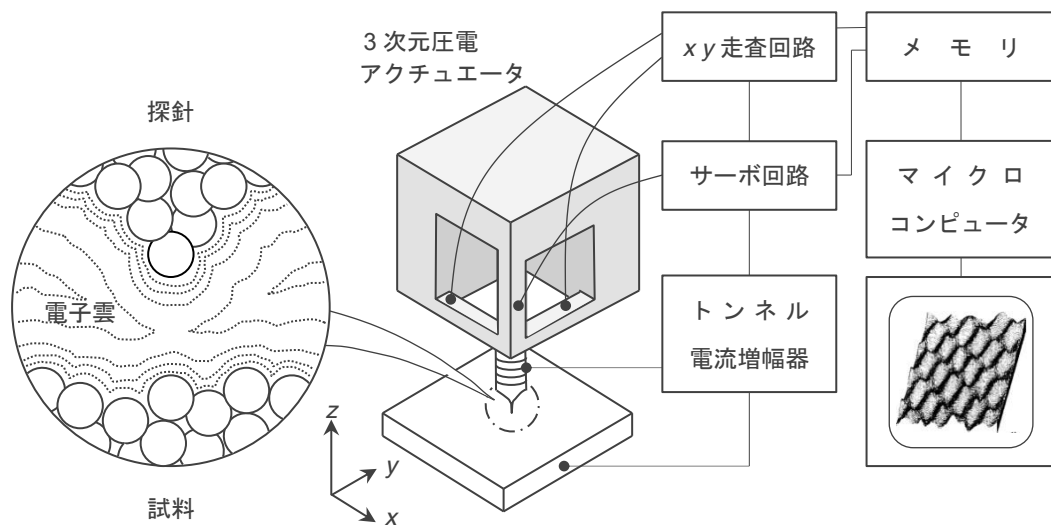


図 2 STM の原理.

る．探針が表面の凸部分に来るとトンネル電流が増えるのもとの電流になるまでアクチュエータを使って探針を遠ざけ，凹部分では近づけるというフィードバック制御をする．この制御系をサーボ回路という．ついで探針を y 方向にわずかにずらして再び x 方向の走査を繰り返す．アクチュエータは，探針を x, y, z 方向に動かすため都合 3 本必要になる．この走査でアクチュエータに加えた 3 方向の電圧変化をメモリに収納しコンピュータで画像化すれば，試料表面の三次元構造を原子スケールで観測できる．レンズはないが拡大して見ることができるので顕微鏡と呼ばれる．

トンネル効果はエサキダイオードや，電圧標準への応用などで知られるジョセフソン効果の中心的物理現象であるが，他方電子のエネルギーに依存する状態密度を極低温で調べる有力な方法としてトンネル分光（スペクトロスコピー）の名が冠せられ，多くの実験が行われてきた．この場合トンネル障壁として絶縁性の極薄膜を試料表面に作らなくてはならないので，自由で清浄な表面の研究には向かない．しかしトンネル障壁として真空を，また対向電極として細い金属探針が利用できれば，表面原子配列の観測やトンネル分光ができ，三次元的に分解能の高い顕微鏡の新しい分野が開ける．物質を原子スケールで操作・加工することもできるようになる．

表 I STM 関連技術発展の推移．

1972	トポグラフィナ発明	NBS, Young <i>et al.</i> ¹⁾
1982	STM 発明	IBM チューリッヒ研, Binnig <i>et al.</i> ²⁾
1983	Si(111)7×7 構造観察	IBM チューリッヒ研, Binnig <i>et al.</i> ³⁾
1984	米欧の研究機関で STM 開発開始	IBM チューリッヒ研の支援
1986	AFM 発明	スタンフォード大, Binnig <i>et al.</i> ⁴⁾
	電総研で日本初の原子像観察	
	STM 第 1 回国際会議	スペイン
	STM ノーベル物理学賞	ビニッヒ，ローラー
1987	各種 SPM の開発始まる	米，欧，日
1988	STM 国産 1 号機（大気用）発表	セイコー電子工業(株)
	超粗さ測定器（大気用 STM）発表	(株)小坂研究所
1989	STM 第 4 回国際会議	茨城県大洗町
1990	AFM 国産 1 号機	セイコー電子工業(株)
	STM による原子操作	IBM アルマデン研, Eigler and Schweizer ⁵⁾
1992	産業技術融合領域研究所発足	工業技術院
	アトムテクノロジープロジェクト開始	～2002 年
2000	米国ナノテクノロジーイニシアティブ	NNI, クリントン米国大統領
2001	第二期科学技術基本計画策定	ナノテク・材料を重点分野に指定

¹⁾ R. Young, J. Ward, and F. Scire, Rev. Sci. Instrum. **43**, 999 (1972).

²⁾ G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).

³⁾ G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **50**, 120 (1983).

⁴⁾ G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. **56**, 930 (1986).

⁵⁾ D.M. Eigler and E.K. Schweizer, Nature **344**, 524 (1990).

3. STM 関連技術発展の推移

STM が開発される 10 年前, 米国立標準局 (National Bureau of Standards, NBS) でトンネル効果に類似の電界放射を原理とする「超マイクロメータ」または「トポグラフィナ」と名づけられた顕微鏡が試作された。しかし分解能も再現性も低かったため研究は 5 年ほどで打ち切られた (表 I)。開発での最大の困難は原子スケールの先端をもつ探針の作製と除振であった。ビニッヒたちは STM 完成まで NBS の研究を知ることはなかったという。

STM は Si(111)7×7 超格子像の発表後, 欧米の研究機関にまたたくまに波及した。STM 開発の共同研究者ゲルバー (Ch. Gerber) は多くの機関に招かれて実機試作の支援を行った。またビニッヒはサバティカルでスタンフォード大 (SU) のクウェート (C.F. Quate) のもとに滞在し, 1986 年には導電性物質のみならず絶縁体にも適用可能な原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM) を開発した [Binnig *et al.* (1986)]。AFM は現在, 汎用的なナノスケール表面計測法として, 研究開発分野での物性評価のみならず, 生産現場における検査機器としても用いられている。

表 II 走査型プローブ顕微鏡 SPM の例.

電氣的局所物性評価	
走査型トンネル顕微鏡 (STM)	電子トンネリング
走査型ケルビンフォース顕微鏡 (KFM)	表面電位
走査型マクスウェル応力顕微鏡 (SMM)	交流電圧印加時の表面電位
静電気力顕微鏡	パルス電圧を印加時の静電気力
弾道電子放出顕微鏡 (BEEM)	弾道電子を測定
走査型圧電応答顕微鏡 (PFM)	圧電特性
走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM)	非線形誘電率
走査型キャパシタンス顕微鏡 (SCaM)	電気容量
走査型イオン伝導顕微鏡 (SICM)	緩衝溶液中のイオン電流, 生体
電気化学トンネル顕微鏡 (EC-STM)	電子トンネリング
力學的局所物性評価	
原子間力顕微鏡 (AFM)	ファン・デア・ワールス力
摩擦力顕微鏡 (FFM)	摩擦力
粘弾性原子間力顕微鏡 (VE-AFM)	粘弾性
磁氣的局所物性評価	
走査型磁気力顕微鏡 (MFM)	磁区構造
走査型 SQUID 顕微鏡 (SSM)	表面磁束
光學的な局所物性評価	
走査型近接場光顕微鏡 (SNOM)	近接場光, 複素透過率
音響的な局所物性評価	
トンネル音響顕微鏡 (TAM)	超音波
熱的な局所物性評価	
走査型熱プロファイラ (SThP)	熱伝導
走査型化学ポテンシャル顕微鏡 (SCPM)	熱起電力

1990 年代 AFM に触発されて、試料表面を走査する様々な走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy, SPM) が開発され、表面物理量のナノスケール計測が行われた。SPM は小型化しやすく、大気、電解溶液、超高真空、極低温、高温、高磁場、応力場などの多様な環境で使える。表 II に代表的な SPM を掲げる。プローブ部分の計測法は異なるが、要素技術には共通点が多い。

1992 年 IBM アルマデン研究所のアイグラー (D.M. Eigler) とシュヴァイツァー (E.K. Schweizer) が、極低温でニッケル板の上にキセノン (Xe) 原子を一つひとつ並べ、ドット文字を描いた。原子操作の最初の報告である。同年設立された産業技術融合領域研究所 (融合研) では産学官共同の原子・分子極限操作技術研究開発 (通称アトムテクノロジープロジェクト) が始まった。2000 年にクリントン米大統領の米国ナノテクノロジーイニシアティブが発表され、2001 年には総合科学技術会議による第二期科学技術基本計画においてナノテクノロジー・材料が重点分野の一つに指定された (表 I)。

4. ロス・アンジェルス

1981 年夏、基礎部低温物理研究室に属していた筆者は、UCLA で開かれた第 16 回低温物理学国際会議に共同研究者とともに出席した。ある朝、遅い朝食でひとけのなくなっていた学生宿舎のカフェテリアでスニーカー姿の研究者に出会った。ポスト・デッドライン論文 (最新データの論文を締め切り後に提出し審査の結果採択された論文) 発表のためスイスから来たという。研究内容を聞くと、圧電アクチュエータを使って真空中で金属の針を別の金属の板に近づけ、特有のエネルギー障壁 [式 (1) の ϕ] をもつ真空トンネル現象を観測したという [Binnig *et al.* (1982a)] (図 21 参照)。

我々は超伝導のトンネル効果の研究をしていたこともあってすぐにその重要性がわかった。表面に垂直に動かせるなら、面内の特定の場所にも移動できるかときくと、彼は一瞬言葉につまったようにみえたが、短く "It's possible." と答えた。筆者はその時面内を走査する STM をイメージしたわけではない。あとで述べるように微細な結晶の特別の面のトンネル分光をしたいと思っていたのである。彼は既に STM の特許を出願し、製作に着手していたことがあとになってわかった [Binnig and Rohrer (1980)]。STM の公表直前であった彼としては詳細を明かせなかったのかもしれない。その研究者は 5 年後 STM の研究でローラーとともにノーベル物理学賞を受賞する 34 歳のビニッヒであった。

次の年 (1982 年)、ビニッヒたちが STM を開発、 CaIrSn_4 と Au の原子スケールの段差を観測し [Binnig *et al.* (1982b)], 続いて Si(111) 表面の 7×7 構造の実空間像を観測した [Binnig *et al.* (1983b)]。装置の詳細は明らかではなかったがその原理は明白であった。超伝導の電子状態をトンネル効果により研究していた筆者にとって魅力的な手段であった。

1980 年代に入って、バブル経済の流れに乗り、国際化と基礎研究に対する日本の応分の負担が必要との施策が実施されるようになっていた。技術の世界では基礎研究の重要性 (基礎シフト) がうたわれた。1981 年、新芽から若葉まで育てるプロジェクトと銘うった、

工業技術院の次世代研究基盤技術開発制度が始まった。そのプロジェクトのひとつである導電性高分子材料の研究開発（1981 年～1990 年）には、有機超伝導体のような基礎的分野の研究も含まれていた。

1983年新しく加わった阪東 寛（基礎部低温物理研究室）とともに、1.4 Kで超伝導に転移する有機超伝導体 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ （tetramethyltetraselenafulvalene perchlorate）のトンネル効果の実験に取りかかった。二人の関心は原子の並びではなく電子状態にあった。有機超伝導体は構造的・電子的に異方性が強く、電子の通り道が一次元的（鎖状）または二次元的（平面）である。いびつな形をした小さな結晶の表面に絶縁物として非晶質シリコン（a-Si）を用い、対向する金属電極として超伝導になる鉛（Pb）の蒸着膜を用いたサンドイッチ接合を作る。試料表面には微妙な段差があり、絶縁薄膜にピンホールができると、漏れ電流が生じてトンネル効果は測れない。さらに面内の分解能は接合面積（1 mm²程度）以下にはならない。サンドイッチ接合作製の再現性が低いなか、いくつかの測定結果を出したが満足のいく明快なものではなかった [Bando *et al.* (1985)]。真空を絶縁物とし、試料の任意の部位を選ぶことができ、分解能の高い STM はますます魅力的な手段に思えてきた。

5. STM開発チーム

1984 年の仕事はじめ 1 月 4 日、大講堂で所長挨拶のあと当時恒例であった新年会が開かれた。紙コップに入った鏡開きの日本酒を片手に、表面科学と真空技術が専門の小野雅敏（極限技術部宇宙環境技術研究室長）と梶村の会話が STM におよんだ。小野は装置開発に強い関心をもっていて、梶村とは独立に STM の論文を読んで大いに興味を引かれていた。しかし超高真空中での試料の 1,000℃の加熱表面処理や極低温の超伝導磁気浮上の除振機構など、極端な条件での動作が必要なことから、かなり扱いにくい器機だと感じていた。会話が進むうちに表面観察のための手段として、製品化されるのを待つのではなく、扱いやすい STM を自主開発しようと意見が一致した。もちろん市販品はなかった。

観察は科学の入口である。新しい手段は発見の始まりとなる。微視的世界への関心が高まっている物理、化学、生物、精密機器、エレクトロニクス、バイオテクノロジーなど広い分野の研究に必要となる手段である。エレクトロニクスの分野では、シリコン電子デバイスの MOSFET のゲート長が微細化してサブミクロン（ナノメートル台）に入る時代であり、集積度と演算速度を上げるため 1 桁以上加工寸法の狭いデバイスがすぐにも必要になると予想されていた。

表 III 電総研の STM 開発チーム（1984 年）。

	所 属	メンバー
基礎部	低温物理研究室	梶村皓二, 徳本洋志, 阪東 寛
電子デバイス部	ビーム応用研究室	岡山重夫
極限技術部	宇宙環境技術研究室	小野雅敏, 清水 肇, 一村信吾, 村上 寛
全部	高エネルギー研究室	岡野 眞, 水谷 亘

STM を使ってナノスケールの未知の世界へいち早く入っていきたいと考えた二人は、所内で必要な知識や技術をもつ研究員や新しい手段を使って新領域を開きたいと考える研究員と連携して開発しようと考えた。集まったメンバーは 10 人になった（表 III）。メンバーの所属研究室名に見られるように、このような多分野融合型のプロジェクトチームは所内ではあまり例をみななかったが、だれにも違和感はなかった。STM 開発は所や上司からの「辞令」で動いたものではない。自発的で自由度の高い構成であった。失敗を危惧して口にする者はいなかった。むしろ新しい領域に立ち向かうことに期待と楽しみを覚えていた。開発時の課題名などの概略年表を表 IV に示す。

表 IV 電総研の STM 開発時の課題年表。

1982. 7	IBM チューリッヒ研 STM を発表	
1984. 4	電総研 STM 開発開始	(所内特別研究：電子トンネル顕微鏡の基礎研究)
7	第 1 回コロキウム	
1985. 4	STM 開発第 2 年	(科学技術振興調整費：電子トンネルスペクトロメータの研究)
5	第 6 回コロキウム	
	STM 設計開始	
1986. 3	要素技術学会発表	
4	STM 開発第 3 年	(経常研究：電子トンネルスペクトロメータの研究)
5	わが国初の原子像観察	
1987. 4	STM 開発第 4 年	(科学技術振興調整費：
5	5 グループの活動開始	① マイクロエレクトロニクスの要素技術に関する研究： 一次元ナノメートル加工技術基礎研究)
		② 極限精密計測技術に関する研究： 電子トンネルスペクトロメータによる新物性開拓の研究)
		(官民連帯共同研究：マイクロエレクトロニクス STM 技術の研究)
		(所内特別研究：有機物の STM 観測に関する研究)
1988. 4	STM 開発第 5 年	(官民連帯共同研究：マイクロエレクトロニクス STM 技術の研究)
		(特別研究：STM 新分野開拓に関する研究)
		(1) 局所電子物性の研究、(2) 微視的表面機能の研究
		(3) アトムマニピュレーション基礎技術の研究

6. 電子トンネル顕微鏡コロキウム

チームメンバー同士、情報を共有するため「電子トンネル顕微鏡コロキウム」というミーティングの場をつくった。小野、梶村、徳本がコーディネータとなって、調査した技術内容の検討を始めた。1984 年 7 月の第 1 回を皮切りに翌年 2 月まで 5 回におよぶコロキウムでは、研究の進め方の共通認識作りと要素技術の検討にほとんどの時間をあて、一部を除き設計に着手するには至らなかった。ただ装置完成後の新しい研究方向や技術目標についてはいつも議論の対象とした。

徳本は極低温における半導体の超音波物性物理を専門としていたため、圧電体の知識を生かしてキューブ型微動・走査素子を考案した（8.2.1 参照）。

岡山は走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）を基礎とする電子ビーム描画や電子光学系の装置開発を専門としており、技術的には STM にいちばん近い研究領

域にいた。STMの装置開発にも関心をもっていてSTMとSEMの技術的類似点を指摘した。STMの圧電アクチュエータによる x, y 走査はSEMの荷電ビームの電磁的 x, y 走査に似ている。また微小なトンネル電流はSEMの2次電子・反射電子による微小電流に相当する。さらにSTMは焦点深度の深いSEMに比べ、 z 方向の感度が格段によいので三次元計測に優れていることを強調した。岡山は電子顕微鏡と粗さ計を用いて徳本が考案したキューブ型微動・走査素子の作動確認試験にいち早く動き始めた(8.2.1 参照参照)。

その他の要素技術開発は2月のコロキウム以降しばらく足踏み状態になった。メンバーはSTM開発以前から抱えていた主たる研究も続けており、STMに100%力を投入できないという事情もあった。しかし士気は高く、次の1985年度は一步進めて、科学技術振興調整費による基礎研究「電子トンネルスペクトロメータの研究」(スペクトロメータはエネルギー分光器の意)として同じメンバーで続けることにした(表IV 参照)。

7. 海外実地調査

発足から1年経った。1985年5月、3ヶ月ぶりに開かれた第6回コロキウム開始直前の空気は重かった。ほとんど議論はつくされていたとはいえ、具体的設計に着手していなかったからである。この雰囲気をはらりと変えたのはその日の主題、小野の米国出張調査報告であった(図3)。

小野はかつて滞在したことのあるNBSをはじめ、カリフォルニア州立大バークレー校(UCB)、スタンフォード大(SU)を訪問しSTMを調査した。3ヶ所に共通した特徴は除振、探針材料(タングステン)、微動・走査機構(トライポッド)であった。除振にはスプリング方式を採用しており、ビニッヒたちが最初に使った複雑な超伝導磁気浮上は使っていなかった。技術力と堪能な英語の対話力で小野は、短時間の訪問にもかかわらず、実機のすべての要素技術情報を的確に把握した。コロキウムは図を活用した視覚的なプレゼンテーションであったため構造やその動作原理が明瞭になり、これまで検討してきた内容をもとに詳細設計に取りかかる強いトリガーになった。

この直後の6月ローラーが電総研に来所し、STMを使って得られた欧米の研究成果を紹介したが、製作技術にはほとんど触れることがなかった。

阪東は1985年8月ベルギーで開かれた低温でのトンネル効果に関する会議に出席したあと、英国ケンブリッジ大、IBMチューリッヒ研、スイスバーゼル大、オランダナイメーヘン大の4つの研究機関を訪問し、関心の深かった計測・制御回路と極低温STMについて議論し多くの着想を得た。IBMチューリッヒ研ではローラーの主導する2つのSTMグループを訪ねた。スプリング式除振構造をもつ極低温から600 Kまで、短時間には1300 Kまで使用できるSTMと金属積層型除振による小型のSTMについてOHPによる口頭説明を受けた。IBMチューリッヒ研から距離的にはさほど遠くないバーゼル大のギュンターロート(H.-J. Güntherodt)のグループでは、意識してIBMチューリッヒ研と独立に開発を

米国における STM の現状

1985.5.21 宇宙環境技術研究室 小野雅敏

米国国立標準局 (NBS), カリフォルニア大学バークレー校 (UCB), スタンフォード大学をそれぞれ5月10, 13, 14日に訪問し, 走査型トンネル顕微鏡 (STM) について見学を行ったので, その概要を紹介する.

1. NBS : Metrology : Group leader; Bob Celotta, Post-doc; Bob Dragoset

STM本体 : 構造材料 : 石英ガラス

Tip : W, Ptlr, 電解研磨

Tip 走査 : P Z T (5A)三脚走査 (～700 V), 0.1～1nA, 5～100mV

Walker : Y字型P Z T, 底部 : 金属/Kapton 1 mil 3mmφ

除振装置 : IBM Zurich Mark 3 方式, 躯体 : 石英ガラス

二段スプリング懸架, Spring material: Elgiloy; Elgin Co. Indiana

渦電流ダンピング : (SmCo)磁石/Cu

計算機 : HP ; 制御 (所内製回路), 画像処理

設置場所 : 2 F / B 1 ～ 3 F

運転状況 : 大気中観察で Au(5 mil)の単原子ステップの確認? ～数百 nm

2. UCB : Department of Physics, Professor John Clarke, PD David Abraham

STM本体 : 構造材料 : マコール, Al

Tip : W, 機械研磨

Tip 走査 : P Z T (5A)三脚走査 (～700 V), ～1nA, 5～100mV

Walker : Y字型P Z T

試料交換機構+エアロック

除振装置 : IBM Zurich Mark 3 方式, 躯体 : Al

二段スプリング懸架

渦電流ダンピング : (SmCo)磁石/Cu

計算機 : LSI 11 /hard disk; 制御および画像処理:画像専用機あり

多重ラインスキャン, 等高線表示 (線,濃度,色) 立体陰影図

設置場所 : BF / B 2 ～ 7 F

運転状況 : 大気中観察で Au(5 mil)の単原子ステップの確認～数百 nm

3. Stanford Univ. : Professor C.F. Quate

STM本体 : 構造材料 : マコール, Al

Tip : W, 機械研磨

Tip 走査 : P Z T (5A)三脚走査 (～700 V), ～1nA, 5～100mV

Walker : 磁気駆動方式

試料交換機構+エアロック

除振装置 : IBM Zurich Mark 3 方式, 躯体 : Al, ステンレス

二段スプリング懸架

渦電流ダンピング : (SmCo)磁石/Cu, 低温部 Al

計算機 : LSI 11 /hard disk; 制御および画像処理:画像専用機あり

多重ラインスキャン, 等高線表示 (線,濃度,色) 立体陰影図

設置場所 : 1 F / 1 F ～ 7 F

運転状況 : 常温UHV中でPt単原子像観察

図3 米国出張報告資料 (小野 1985 年).

進めていた(後には多くの共同研究を行った). 一種の電磁キッカーであるマゴット(maggot, うじ虫)と呼ぶ独自の粗動を使っていた. まだ原子像は得られていなかった.

小野は同年 11 月に米国真空学会に参加したあと 2 度目の実地調査を行った. IBM ワトソン研のフィンストラ(R.M. Feenstra) とデムース(J.E. Demuth) 並びに NBS を訪ねた. デムースからは, 剛性の高い梃子型粗動機構の論文発表前の情報 [Demuth *et al.* (1986)] を得た. 尺取虫型あるいはラウス型の粗動に見いだしていた問題点 (8.1.2 参照) を払拭するものであった.

海外実地調査で得られた情報は, 既にコロキウムで何種類もの要素技術を検討してきたメンバーに, STM 装置の全体像と新たな前進の意欲を与えた. 具体的設計値などは海外機関に頼ることはせず, 要素技術の動作原理に基づいて解析し設計した. メンバーの専門領域に対応して, 室温大気中, 液体中, 超高真空中, 極低温などの各種の異なる環境でできるように構造や性能などに注意を払いながら要素技術を複数開発した.

8. 要素技術開発

STM を構成する要素は(1) 粗動, (2) 微動・走査, (3) 除振, (4) 探針, (5) 測定環境, (6) 計測・制御, (7) 画像処理, (8) 試料の 8 つにブレイクダウンできるが, 相互の関連性は強く, 特にトンネルユニット (粗動, 固定台, 微動・走査, 探針, 試料からなる) は, 機械的ループとして常にセットで考えなくてはならない (図 4). ここで粗動とは, 試料を目視によってセットしたあと, 探針と試料をトンネル現象が起こる間隔まで z 方向に近づけることであり, 微動・走査とは, 探針を三次元的に移動すること (面内走査, 原子スケールの凹凸への追従) である. 公表された論文には設計・製作の情報は少なかったが, いずれも SEM や他の科学機器に用いられる技術から類推できるものであった. 表 V に要素技術の課題をまとめ, 以下の小項目で補足する.

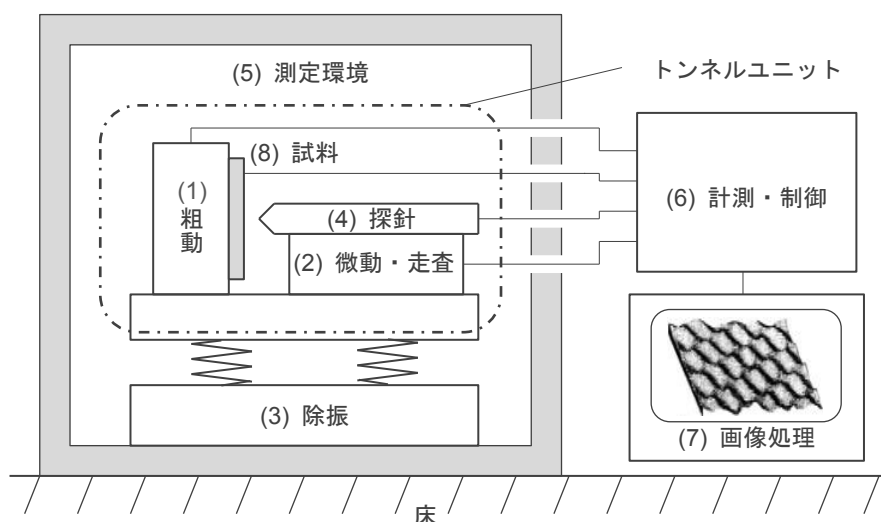


図 4 STM の 8 つの要素技術.

表 V 要素技術と課題 (1985 年～87 年).

項 目	要 素 技 術	課 題
粗 動	差動マイクロメータ型 パルスモータによる直接駆動 圧電積層型(単一素子の積層, 一次元伸縮) 尺取虫型(静電吸着と圧電素子の伸縮) ラウス型(静電吸着と圧電素子の伸縮) 磁気駆動型(ローレンツ力による移動) 梃子型(移動縮小梃子と移動台の組み合わせ)	剛性の向上と固定時の安定化, ドリフト低減, 摩擦低減, マイクロメータのバックラッシュ, パルスモータの機械的振動, 熱ドリフト低減, 尺取虫型とラウス型の鳩首振り様運動, 可動距離の拡大.
微動・走査	キューブ型(一体構造) トライポッド型(単一素子の組み合わせ) 五脚型(十字型 XY 駆動+Z 駆動) 二連 S 字型(一体構造) 円筒型(一体構造, 対称性, 小型) 圧電屈曲型 (バイモルフ) 静電反発型	剛性向上 (高い共振周波数), XY 走査時の相互干渉低減, 変位量拡大によるヒステリシス, 電圧-変位関係の非直線性, 対策: 電荷制御(電流制御)による直線性 向上, 変位特性に基づくソフトによる 補正.
除 振	超伝導磁気浮上型 二段スプリング型 (懸架型のバネと渦電流ダンピング) 金属積層型 (層間にゴムやバネを挿入) 常伝導磁気浮上型	測定環境とトンネルユニットの剛性に 依存, 外部振動振幅を 2 桁以上低減する必要, 装置全体は空気除振台上に設置.
探 針	原子レベルで先端のとがった製作技術 探針材料: TaC, W, Pt, PtIr, Au, 金属膜を蒸着した破碎ガラス 作製方法: 機械研磨, 電解研磨	先端形状の制御・把握が困難, FIM, TEM による観察必要, 清浄化: 電界蒸発, イオンエッチング, 電子線加熱, ミニスポットウェルディング.
測定環境	大気中: 安定表面, 表面粗さ 液体中: 有機物質, 表面科学反応 超高真空: 清浄表面, 界面 極低温: 超伝導, 原子・分子吸着	大気中では測定雰囲気恒温化と振動遮断 のため被い, 超高真空系では試料処理機構, 試料・探針 交換機構が必要. 極低温では狭い空間, PZT 圧電定数低下.
計測・制御	Z サーボ回路の高速化と雑音の低減, 電流/電圧変換器と対数増幅器の高速化, 低雑音化 圧電素子駆動増幅器の高速化, 安定化	超伝導, 金属, 有機物などの測定では <10 pA のトンネル電流計測技術が必要, 走査型トンネル分光 STS ではサーボ回路を 固定, バイアス電圧掃引時のトンネル電流, データ蓄積, 画像表示が必要.
画像処理	線画, 濃淡, 等高線, 三次元表示 トポグラフ: トンネル電流一定時の凹凸像 電流像: Z 軸距離一定時のトンネル電流像 STS 像: バイアス電圧に依存するトンネル 電流の電圧微分 (状態密度計測)	周期的凹凸, 局所的凹凸, 原子間力, 電子状 態, 表面吸着などにより原子像(トンネル電 流)は変化を受けるため, 得られた像解釈に 注意が必要, STS 像の解析では取り込みデータ 2 桁以上 増大, 処理能力の高い CPU, メモリ必要.
試 料	MoS ₂ , NbSe ₂ , 黒鉛, Al ハードディスク, マイクロデバイス, LB 膜, 液晶, 超伝導体	技術分野により多様な試料が今後観察され ようになる.

表 VI 初期に開発した要素技術（1985 年～87 年）.

項 目	要 素 技 術	設 計・作 動 試 験	備 考
粗 動	差動マイクロメータ型	徳本, 阪東, 水谷	
	パルスモータによる直接駆動	水谷	
	圧電積層型	阪東	試作せず
	尺取虫型	徳本, 小野, 阪東	
	ラウス型	小野	
	磁気駆動型	徳本	
	梃子型	小野, 村上	特許・日, 米
微動・走査	キューブ型	徳本, 岡山	特許出願
	トライポッド型	小野, 脇山*	
	五脚型(十字型 XY 走査+Z 駆動)	水谷, 松本 [†] , 小林 [†] , 渡辺 [†]	特許出願
	二連 S 字型	岡野	特許出願
	円筒型	脇山*, 阪東, 水谷	
	圧電屈曲型	小野	試作せず
	静電反発型	岡野	試作せず
除 振	超電導磁気浮上型	徳本	試作せず
	二段スプリング型	梶村, 岡野, 水谷	
	常伝導磁気浮上型	水谷	試作せず
	金属積層型	小野, 村上, 岡野	
探 針	炭化タンタル	小野	試作せず
	タングステン	村上, 小野	
	白金	村上, 小野	
	破碎ガラス（金属膜を蒸着）	岡野	試作せず
測定環境	大気中：安定表面, 表面粗さ	岡山, 阪東, 水谷, 岡野	
	液体中：有機物質	水谷, 繁野*	
	超高真空：清浄表面, 界面	小野, 徳本, 岡山	
	極低温：超伝導	阪東, 梶村	
計測・制御	圧電アクチュエータ駆動	岡山, 阪東, 水谷	
	制御系	岡山, 渡辺*, 阪東, 水谷	
画像処理	線画表示	水谷	
	濃淡表示	水谷	
	等高線表示（彩色）	水谷	
試 料	二硫化モリブデン	小野	
	二セレン化ニオブ	遠藤	
	グラファイト	水谷, 阪東	
	Al ハードディスク	徳本	
	Si	徳本	
	マイクロデバイス	岡山	
	LB 膜, 液晶	水谷, 繁野*	
	有機超伝導体, 高温超伝導体	阪東	

*セイコー電子工業(株), [†](株)小坂研究所

これらの要素技術開発は個々のメンバーに割り振りをして行われたわけではない。どの要素技術に対しても、異なるメンバーが異なる種類のを自主的に提案し、STM 装置全体との関連をコロキウム議論に付した。結果としてどの技術内容も全員が共有することになった。表 VI に提案・設計・作動試験を直接的に行ったメンバーを示す。

8.1 粗動機構

圧電アクチュエータによる移動範囲はせいぜい $10\ \mu\text{m}$ であり、肉眼での位置合わせ精度は $1\ \text{mm}$ 前後である。 $1\ \text{mm}$ からトンネル効果の起こる nm スケールへの橋渡しと試料の視野選択が粗動である。しかし粗動は微動・走査と独立ではない。たとえば粗動後の位置決め固定に際しては、微動の精度での安定性が要請される。この要請の障害になるものに摩擦、機械的バックラッシュ、マイクロダスト、熱膨張などがある。特に熱膨張についてはその係数の小さい材質でも $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度 ($1\ \text{cm}$ 長さの部材は $1\ ^{\circ}\text{C}$ の温度変化で $10\ \text{nm}$ 伸縮する) であり、部材の組合せと温度制御に注意が必要である。またトンネルユニットのうち特に粗動と固定は、除振と制御回路の応答の観点から剛性を高めなければならない。

8.1.1 差動マイクロメータ型粗動機構

コロキウムの始まった初期に、徳本は室温で真空トンネル効果を確認するため、粗動に差動マイクロメータ、微動に一次元的 (z 方向) に伸縮する圧電アクチュエータを使う構造を提案した (図 5)。

阪東はこれを具体化した。室温大気中と真空中でのトンネル効果の確認のための z 方向粗動に、差動マイクロメータとその先端につけた積層 PZT アクチュエータを用いたトンネルユニットを設計・試作した (図 20 参照)。積層アクチュエータは圧電セラミクス PZT を何枚も重ねて伸縮量をふやすものである。

(株)小坂研究所 (小坂研) の小林好行らは水谷の依頼を受けて室温大気中仕様の差動マイクロメータ型粗動と五脚型微動・走査を用いた直結型トンネルユニットを設計・試作した (図 22 参照)。

また水谷はパルスモータによるマイクロメータの直接駆動を提案した。

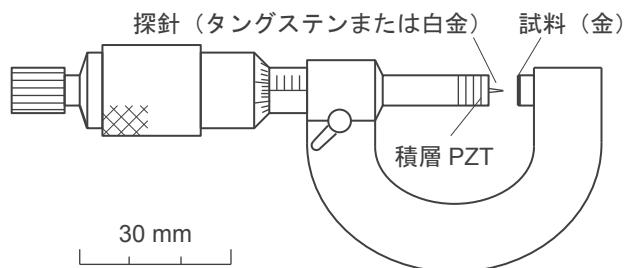


図 5 真空トンネル効果を確認するための差動マイクロメータ型粗動と圧電アクチュエータを組み合わせた移動機構 (徳本 1984 年)。

8.1.2 尺取虫型粗動機構

ベニツヒたちがラウス (louse, しらみ) と呼んだ粗動 [Binnig and Rohrer (1983a)] は静電吸着部と圧電伸縮部からなる (次項 8.1.3 参照) が, 3 つの問題点が懸念された. (1) 基板と足部が面接触であるため, マイクロダストなどで移動が妨げられる, (2) 静電吸着部に強い吸着力を持たせるために強誘電体をはさむが, 一度電圧を加えたあとゼロに戻しても強誘電体への電荷蓄積のため吸着が解除されない, (3) 圧電素子の伸縮量が小さいと上の 2 点のため全く移動しない.

このような問題を避けるため徳本と小野は圧電素子 2 個 (1 枚の圧電体板の 2 ヶ所を使う) と静電吸着 3 個を用いた尺取虫型粗動の改良を試みた (図 6). 1 mm ϕ のルビービーズを金属の足に埋め込み, 間隔約 15 μm の空気間隙を作った. 3 本の脚には, 位置決め固定後の熱ドリフトを抑えるため熱膨張係数の小さい 14 mm ϕ のインバー合金を使い, 基台としてクロム (Cr) をスパッタ蒸着した光学的に平坦な石英ガラスを用いた.

作動試験のため, 徳本は予備的にファブリペロー型光干渉システムを構成した (図 7).

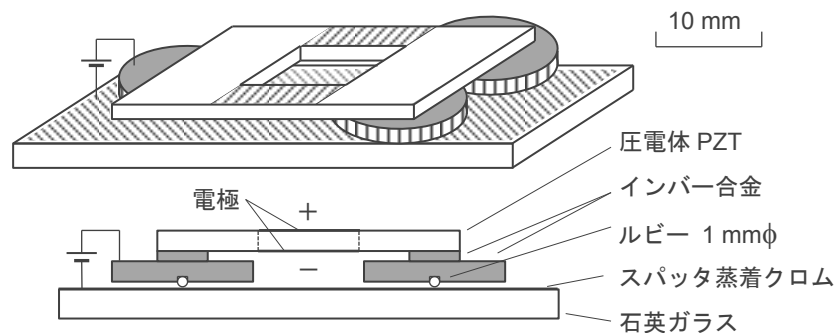


図 6 尺取虫型粗動機構. (徳本, 小野 1984 年).

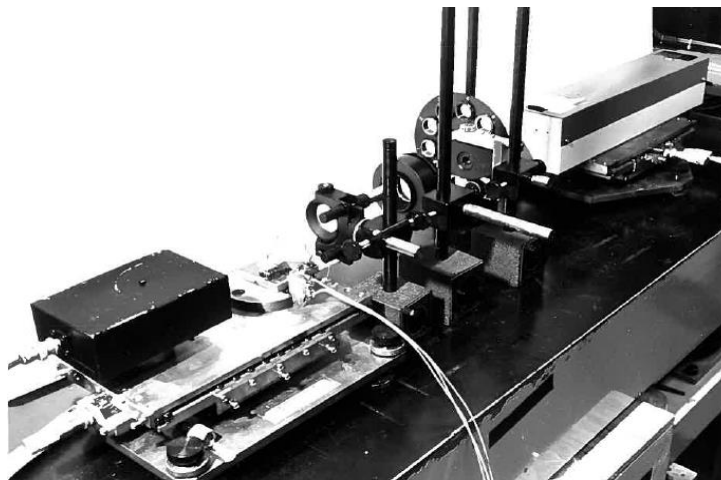


図 7 粗動機構作動試験用のファブリペロー型レーザ干渉システム (徳本 1984 年).

150 nm 以下の移動測定を念頭に置き、反射率 50 % のミラー 2 つを基台上と粗動機構上に固定し、移動に伴って変化する He-Ne レーザ光（波長 632.8 nm）の透過強度をフォトダイオードで受光する。作動試験の回路系とプログラミングは岡山と阪東が担当した。静電吸着部に電氣的絶縁破壊以下の 300 V、圧電伸縮部に 200 V 以上のパルス電圧を連続して印加することにより 100 nm 以上の移動を確認し、上記 3 つの問題点はクリアした。可動範囲は広いが、探針または試料を取りつける先端部が、鳩が歩くときの首振りのような動きであったため以後使用しなかった。

8.1.3 ラウス型粗動機構

小野は海外実地調査で見た STM の実機を参考に、ビニッヒたちが最初に試作したラウス型に類似の粗動機構を設計した（図 8）。基台は石英ガラスである。前出 8.1.2 の尺取虫型とともにセイコー電子工業(株)（セイコー電子）が試作した。

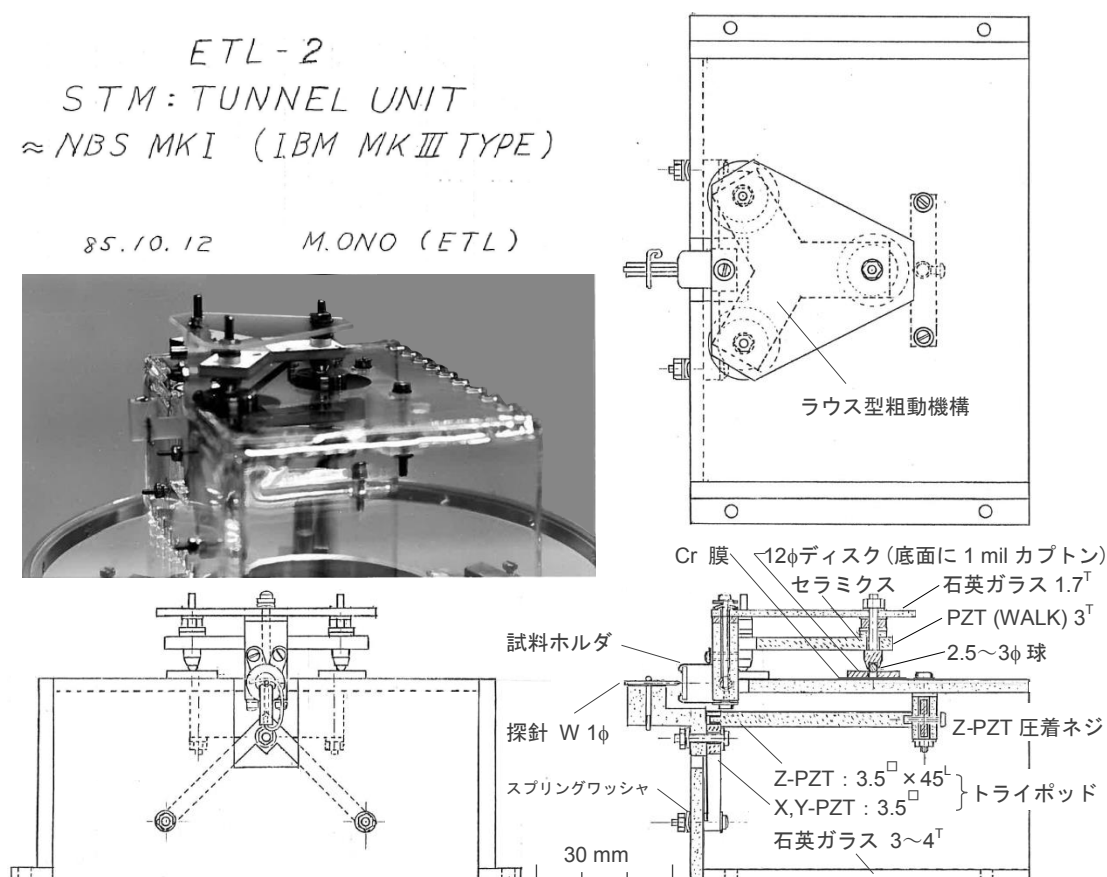


図 8 ラウス型粗動とトライポッド型微動・走査を搭載したトンネルユニット（小野 1985 年）。トライポッドについては 8.2.2 を参照。

8.1.4 磁気駆動型粗動機構

この機構は永久磁石の上に置いたコイルにパルス電流を印加してローレンツ力によって移動させるもので、電磁キッカーとも呼ばれる。8.1.2の圧電性と静電吸着を利用する尺取虫型粗動の、鳩の首振りのような動きの問題がない。

2本のSmCo系の永久磁石（ $26\text{ mm}^{\text{W}} \times 20\text{ mm}^{\text{T}} \times 50\text{ mm}^{\text{L}}$, 0.3 T）の上に光学的に平坦な石英ガラスの基台を固定する。4 mmφの石英球3個をもつ台座にコイルボビン（ $9\text{ mm}^{\text{W}} \times 13\text{ mm}^{\text{T}} \times 15\text{ mm}^{\text{L}}$, 0.3 mmφ 銅線 200 ターン）2個を固定する。この台座が石英ガラスの基台上を二次元的に移動する（図9）。小野がスタンフォード大で得た情報 [Smith and Elrod

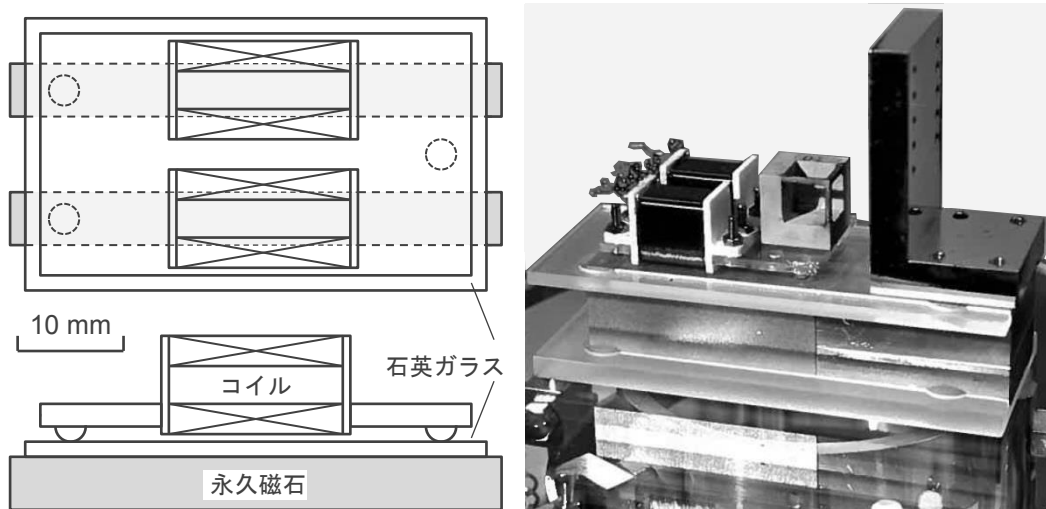


図9 磁気駆動型粗動機構（徳本 1985 年）。写真にはキューブ型微動・走査機構（8.2.1 参照）を搭載。

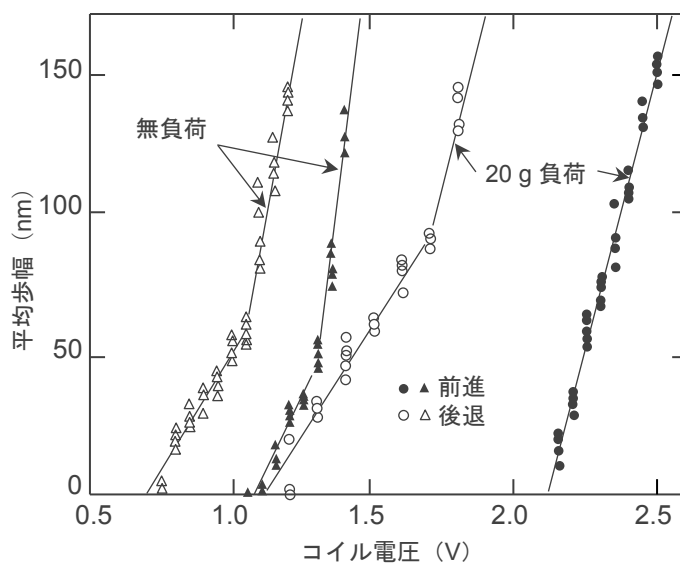


図10 磁気駆動型粗動機構の移動特性 [Tokumoto *et al.* (1987)] .

(1985)] をもとに、徳本とセイコー電子が設計、試作した。

作動試験には図 7 のファブリペロー型光干渉システムを用いた。コイルに電圧 0.7 V, 幅 1 ms 以上のパルス電圧を印加することにより, 数 nm 以上のステップで滑らかに移動した (図 10)。尺取虫型に比べ制御は容易である。粗動後の位置決め固定機構がないためトンネルユニットとしての剛性が低いという難点があったが, この機構を最初の原子像観察に際し試料粗動として用いた。

8.1.5 ^{てこ} 梃子型粗動機構

梃子型粗動は梃子を用いて差動マイクロメータの動きを縮小する。IBM ワトソン研のデムースらが考案したもので, 尺取虫型粗動や磁気駆動型粗動のように基台の上を滑る機構に比べ, 試料台をスキッド (ストッパー) で抑える剛性の高いものである [Demuth *et al.* (1986)]。

小野と村上は可動アームを回転軸機構と板バネを用いた二段構成に改良した。可動アームを長くすることなく探針・試料間移動距離をマイクロメータの移動距離の 1/30 程度 (最小 1/300 まで) にすることができる (図 11)。可動アームの初期状態 [図 18(a) の点線の位置] で試料を装着する。マイクロメータを回転し可動アームを F 点で押し上げる。試料台の先端がスキッドに接触するまでは, 板バネで連結された可動アーム全体が支柱にある支点 P_1 の周りに回転する。試料台がスキッドに接触したあとは, P_2 を支点とする梃子として動き, 板バネが反り, 2 つの可動アームが F の動きを縮小する。この機構は剛性が高く, 試料の装着が比較的簡便である。日米特許を取得し現在も SPM 装置に広く使われている。

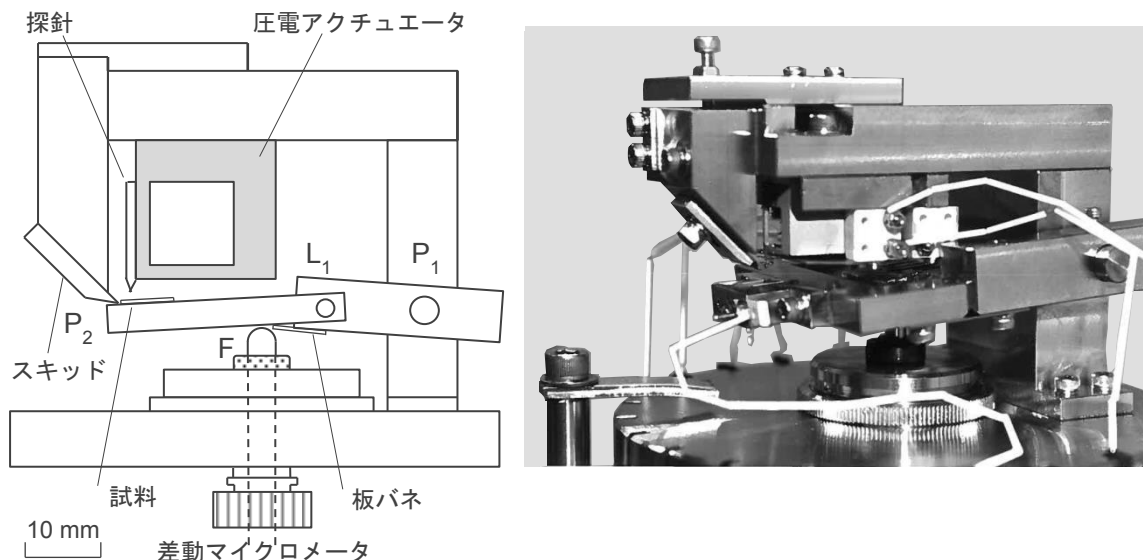


図 11 梃子型粗動機構 (小野, 村上 1986 年)。写真は金属積層型除振機構 (8.3.4 参照) 上に搭載。

8.2 微動・走査機構

微動・走査は探針を原子のスケールの精度で三次元的に動かす技術である，すなわちサーボ回路によって z 方向の試料の凹凸をなぞりながら試料表面（ xy 面）を走査する．この機構には探針，試料のどちらを装着してもよいが，通常細くて軽い探針を固定する．隣接する探針と試料に流れる微弱なトンネル電流への影響を抑えるため，微動・走査機構に加わる高電圧配線をシールドすることはノイズ低減に有効である．

以下メンバーの考案した7種類の微動・走査機構をあげる．

8.2.1 キューブ型微動・走査機構

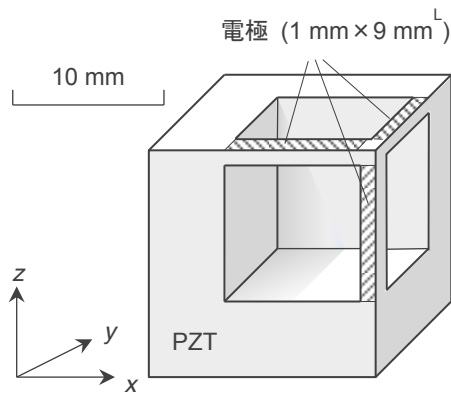


図 12 キューブ型微動・走査機構（徳本 1984 年）．

三次元的な微動・走査のためには単一圧電アクチュエータを貼り合わせる方法が考えられるが，接着面の不安定性，接着部の弾性応答の差異による直線性からのずれなどが予想される．徳本は全ての構造を固く小さくという原則に基づいて，一体構造のキューブ型微動・走査機構を考案した（図 12，図 9 に写真）．ハッチ部分と対向面に電極がある．厚い部分は伸縮しない壁として剛体の役割を果たす．分解能 10 pm， z 方向伸縮スパン 10 nm， xy 面内伸縮スパン 100 nm として設計した．単体の固有（共振）周波数は 25 kHz であった．

岡山は x, y 走査について SEM との類似性の観点から，当時は注目されていなかった圧電アクチュエータに関心をもった．触針式粗さ計（タリスステップ）を用い，電圧を掃引印加してアクチュエータの変位を測定した．ヒステリシスはあるものの，電圧感度は 1.6 nm/V でナノメートルスケールの変位制御に使用可能であると結論した．また x 変位の 10 % 以下程度が y または z 方向の変位へ干渉となって現われたが，干渉を受けた分の電圧値を y または z 方向にフィードバックすることにより 1% 以下まで補正することができた．後に岡山は電荷制御によりアクチュエータのヒステリシスを抑える方法を考案した[11.3 の(2)参照]．

岡山はさらに x, y の二次元走査を定量的に調べるため，この圧電アクチュエータを SEM に装着し，SEM の電子線を偏向コイルで走査する代わりに（電子線を走査せずに），光軸上にロックしたまま，この素子に貼りつけた金属試料表面の約 $2 \mu\text{m}^2$ をアクチュエータで走査した．得られた試料の像は，SEM 像と変わらないものであった．これを試料走査型電子顕微鏡法（Sample Scanning Electron Microscopy, SSEM）と名づけた[Okayama et al. (1985)]．圧電アクチュエータが微少移動に使えるとの認識がなかった当時，これらの実験結果は，PZT のような多結晶焼結体でも，0.1 nm の精度で再現性よく機能することを実証した点で，

関係者の認識を変えるものであった。

セイコー電子の脇山 茂が徳本と小坂研の協力を得て、このアクチュエータも含め以下に述べるすべての微動・走査機構の特性を系統的に評価した。評価には小坂研の光触針式粗さ計やミツトヨの電気マイクロメータを用い、特に x, y, z の干渉と最大印加電圧によって異なるヒステリシスループに注目してデータを蓄積した。

8.2.2 トライポッド型微動・走査機構

IBM チューリッヒグループが最初に発表した微動・走査機構はトライポッド（三脚）であった [Binnig *et al.* (1982b)]。L 字構造の圧電アクチュエータの交叉部に I 字型（単一）アクチュエータを垂直に挿入したものである。

小野は NBS のセロッタ (R.J. Celotta) グループを訪れた際に実機を見て得た情報をもとにトライポッドを改良設計し、セイコー電子が試作した (図 8)。各脚は $3.5 \text{ mm}^{\square} \times 45 \text{ mm}^{\text{L}}$ の PZT、基台は石英ガラスで、この機構の固有周波数は 1 kHz であった。

トライポッドの作動確認と特性評価では、 $\pm 800 \text{ V}$ までの印加電圧では電圧感度 3.4 nm/V で、 $2 \mu\text{m}$ までの伸縮の場合は最大 25 % のヒステリシスが観測された。Z-PZT を X, Y-PZT の交叉部にネジによって押し付ける圧力が弱いとき非線形性が現われた。さらにトンネルユニット評価の一部としてトンネル電流 J の z 依存性を真空中で測り、3 桁にわたる指数関数的変化 (図 21 参照) を確認した。この機構は初めての原子像観察に用いた。

8.2.3 五脚型微動・走査機構

水谷は STM を室温大気中で使用するため、幾何学的対称性が高く、 x, y 面内の温度ドリフトを自動補償できるように、五脚型の機構を小坂研の松本文雄、小林好行、渡辺眞二とともに考案した [水谷他(1987)]。 x, y 走査用の十字構造を一体で成形し Z-PZT を挿入するプッシュプル型である (図 13)。各脚は $2 \text{ mm}^{\square} \times 15 \text{ mm}^{\text{L}}$ で、この機構単体の固有周波数は 10 kHz であった。

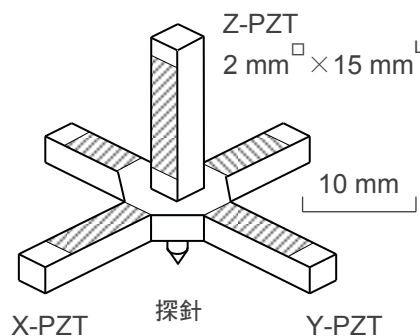


図 13 五脚型微動・走査機構 (水谷, 松本, 小林, 渡辺 1986 年)。

8.2.4 二連 S 字型微動・走査機構

キューブ型 (図 12) は接着部分を含まない一体構造である点で剛性は高いが加工整形が難しい。岡野は加工を簡易化するため S 字型微動・走査機構を考案した。図 14 は 2 個の S 字構造を 90 度ずらして合体した特徴的な二連構造になっており、一体として加工することを念頭においている。しかし次項 8.2.5 の円筒型の採用で、これは試作しなかった。

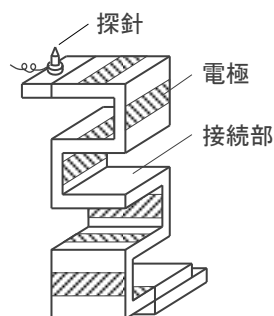


図 14 二連 S 字型微動・走査機構
(岡野 1986 年).

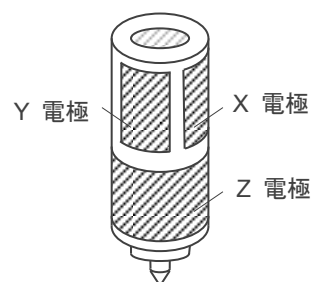


図 15 円筒型微動・走査機構
[Smith and Binnig (1986)] .

8.2.5 円筒型微動・走査機構

円筒型はスタンフォード大のスミスとビニッヒが小型の STM 試作に採用したもの [Smith and Binnig (1986)] (図 15) である. 内径 3 mm ϕ , 外径 5 mm ϕ , 長さ 10 mm の中空円筒形セラミクス圧電体の周囲を 4 分割して x, y 電極とし, 長さ方向に場所を変えて周囲を z 電極としたもので対称性が高い. x, y, z とも対向電極は内面にある. 単体の曲げ振動モードの固有周波数は 8 kHz, 伸縮は 30 kHz であった. 肉厚が薄いため高電界が得られる. さらに円筒形であるため肉厚が薄くても同じ断面積の矩形材質に対して, 構造強度を表す断面 2 次モーメント, バネ定数がともに 2 倍になり剛性が高くなる. 小型で幾何学的対称性に優れ加工も比較的容易である. 後のトンネルユニットの多くにはこれを採用した (図 23 参照). 最もよく使われる微動・走査機構である.

微動・走査機構については, 以上 5 件の他, 圧電屈曲を用いた全水晶型 (小野 1985 年), 静電反発型 (岡野 1986 年) などオリジナルな案も議論されたが試作には至らなかった.

8.3 除振機構

建物の床は人や車の動き, 空調設備など機械類のため常に振動している. 岡野と水谷が異なる棟や階の実験室の床や廊下の機械的振動を加速度センサで測定したところ, 周波数 5~200 Hz, 最大振幅 10 μm 程度であった. 外部振動を避けるには, トンネルユニットの固有周波数を基台の振動周波数に比べ数桁高くする方法を採りさらにダンピングを付加する. 市販のエアダンパ付光学ベンチの上では建物の床を伝わってくる数 10 Hz 以下の振動振幅は 1 μm 程度になる. 光学ベンチ上に設置した真空チェンバーまたは被い箱内に, 下に述べる除振機構を置きその上にトンネルユニットを固定する.

8.3.1 超伝導磁気浮上型除振機構

IBM チューリッヒ研で最初に導入した除振は超伝導磁気浮上であった. 永久磁石を貼りつけたお椀型の台を, 超伝導状態の鉛のマイスナー効果を利用して浮かせるもので, IBM

第1世代と呼んでいる。この機構は室温にあるトンネルユニットが極低温に近接していて、液体ヘリウムの消費量が大きく、さらに生じた熱歪みが長時間にわたって緩和するため、熱的にドリフトする問題点がある。

岡山はプロジェクト開始早々これがあまりにも複雑すぎることを、高分解能の透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope, TEM）ではスプリングや積層ゴム板によって高周波の機械的振動を遮断する方法が主流で、原子レベルの TEM 像観察ができていると指摘し、この機構は採用しなかった。

8.3.2 二段スプリング型除振機構

小野が訪問した米3機関のどこでもスプリング方式の除振を用いていた。スプリングが長ければ長いほど固有振動の周波数は低くなるが、装置をコンパクトにし真空チェンバーの中に収めるため、**図 16(a)**に示すように入れ子になった二段スプリング方式が考案された。

梶村は 8.3.4 に述べる金属積層型も考慮して、多段のスプリングをもつ除振の一般式を導いたうえで詳細設計を行った（1985 年）。枠組みには SUS304 を、スプリング材には時計用高弾性合金スプロンをを用いた。必要なバネ定数や無負荷長とともに、渦電流ダンピングをもたらす永久磁石（SmCo）の強さも設計した。セイコー電子が試作した [**図 16(b)**]。

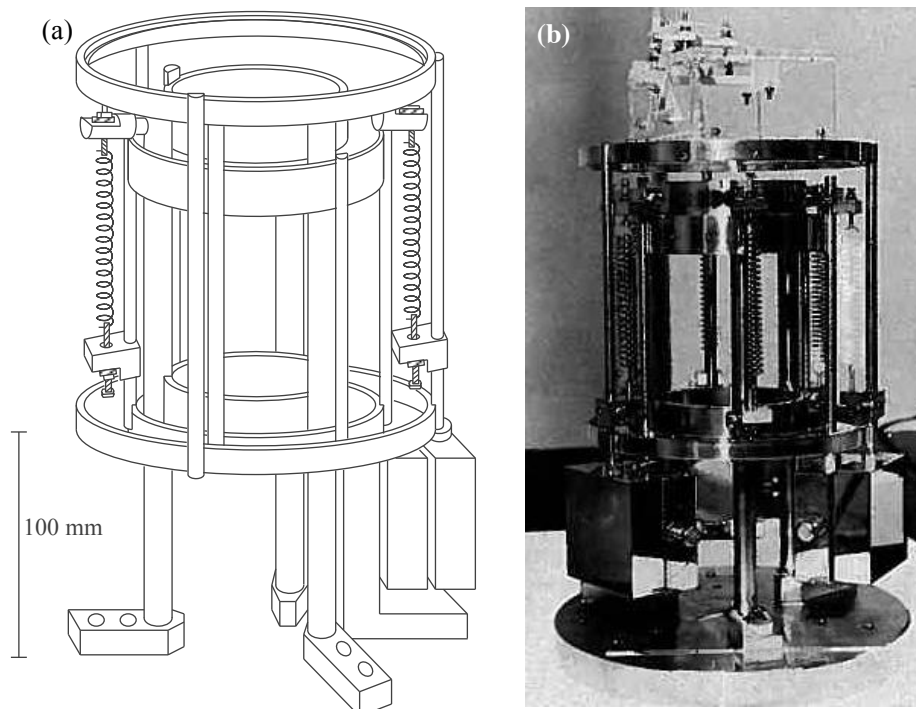


図 16 (a) 渦電流ダンパをもつ二段スプリング型除振機構（梶村 1985 年）。
(b) 試作したラウス型粗動機構とトライポッド型微動・走査機構からなるトンネルユニットを搭載した二段スプリング型除振機構。

超伝導磁気軸受けの研究開発をしてきた岡野は加速度センサを用いて伝達関数（外部励振振幅に対するトンネルユニットを置く位置での振動振幅）を測定した（図 17）[Okano *et al.* (1987)]．共振周波数は 4 Hz であった．

二段スプリング型除振は、尺取虫型、ラウス型、磁気駆動型などの粗動を用いた、機械的振動の固有周波数が低いトンネルユニットの場合に有効であり最初の原子像観察に用いた．

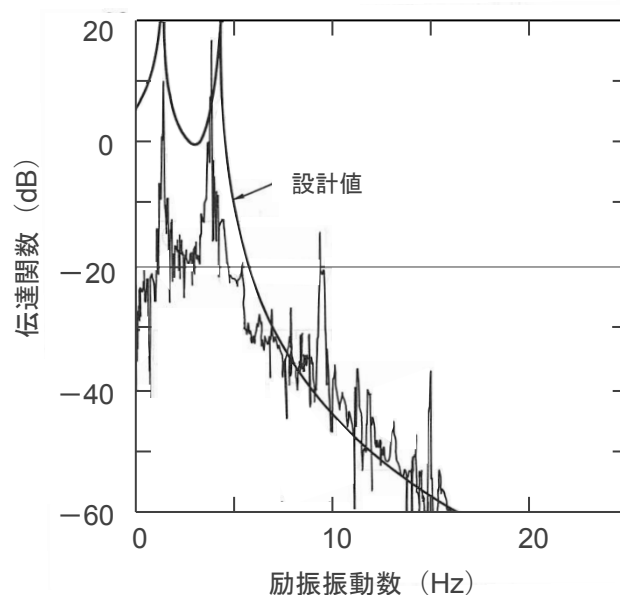


図 17 二段スプリング型除振機構の性能試験（岡野 1986 年）．渦電流ダンパを取去って計測．

8.3.3 常伝導磁気浮上型除振機構

水谷は常伝導磁気浮上を用いた能動型の除振を提案した（1985 年）．スプリングを用いたものに比べ、(1) 縦方向の寸法を小さくできる、(2) 位置、剛性、負荷能力を能動制御できる、(3) センサとコイルのリード線が必要で約 1 W の消費電力となる．しかし次項 8.3.4 で述べる、より簡便な金属積層型除振の情報がもたらされ、試作には至らなかった．

8.3.4 金属積層型除振機構

IBM 第 4 世代と呼ばれる金属積層型除振は、複数の金属板のあいだにバイトンゴムをはさむかまたは円錐スプリングも合わせてはさんだシンプルで扱いやすいものである．[図 18(a)]．小野と村上が梃子型粗動機構と同時に設計し、セイコー電子が試作した[図 18(b)]．中央部は差動マイクロメータの軸が通る穴になっている．除振をさらに強化するするにはこの金属積層機構全体をスプリングで懸架する [図 32(b)参照]．

岡野と脇山が加速度センサを使って性能試験を行った [Okano *et al.* (1987)]．バイトンゴムの圧縮弾性と粘性ダンピングを用いるので比較的固い．つまりバネ定数がコイルスプリングに比べて大きく、60dB までの伝達関数の減衰の周波数は二段スプリング型除振の場合より 1 桁以上高くなる．除振機構の固有周波数が高くなるのは好ましい方向ではないが、剛性の高い梃子型粗動や五脚型微動・走査機構を搭載したトンネルユニット（図 22 参照）では金属積層型除振は簡便で有効に作動する．

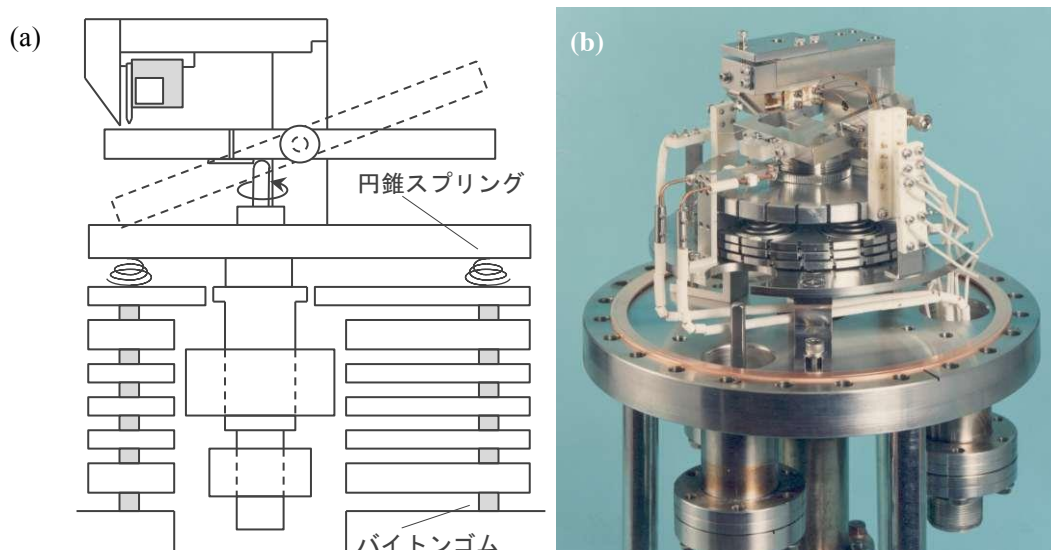


図 18 金属積層型除振機構 (小野, 村上 1986 年).
写真は梃子型粗動とキューブ型微動を搭載.

除振技術に関しては岡山が開発初期に指摘したように (8.3.1 参照), 原子レベルの TEM 像観察に採用されているようなスプリングかゴム板に結局落ち着いたことになる.

8.4 探針

まず先端の形状について述べる. STM の面内分解能は先端が鋭いほど高くなると考えられる. ビニッヒは分解能の試算を 1979 年 1 月 5 日付の研究ノートに記録している [Quate (1986) に ビニッヒの研究ノートのコピーが転載されている]. 探針の先端が曲率半径 100 nm のスムーズな半球であると仮定すると分解能は 4.5 nm になる. 当初この程度の分解能を予想していたことになる. しかし実際には, 実験途中で何度も表面に衝突した可能性のある探針で, 予測に反して, 原子 1 個を識別できる 0.1 nm 以下の面内分解能を得た [Binnig *et al.* (1982b); (1983)]. 彼らはしばらくその理由に悩んだ末, 探針の先端付近に 0.1 nm (原子 1/3 個程度) でも飛び出した部分があれば, トンネル電流のほとんどがそこを流れることに思い至ったという [ローラー私信(1986 年), 図 2 の探針・試料拡大図参照]. これが STM で原子スケールの分解能が得られる重要なポイントである.

STM 探針とほとんど同じ形状をもつ電界放射エミッター作製に豊富な経験を持っていた村上と小野は 1~2 mmφ のタングステン (W), 白金 (Pt), 白金イリジウム (PtIr) 線の先端を機械研磨や電解研磨により曲率半径 10 nm 程度に仕上げ, SEM と TEM で確認した (図 19). 最初に原子像を得たのは電解研磨によって得たタングステンであった.

一方, 岡野はガラスや水晶などの単結晶の破断面先端が原子スケールになる (金属では展延性のため室温破断は困難) ことに注目し, 先端に導電性金属を蒸着する方法を提案し, グラファイト (HOPG) の表面原子像を観測した.

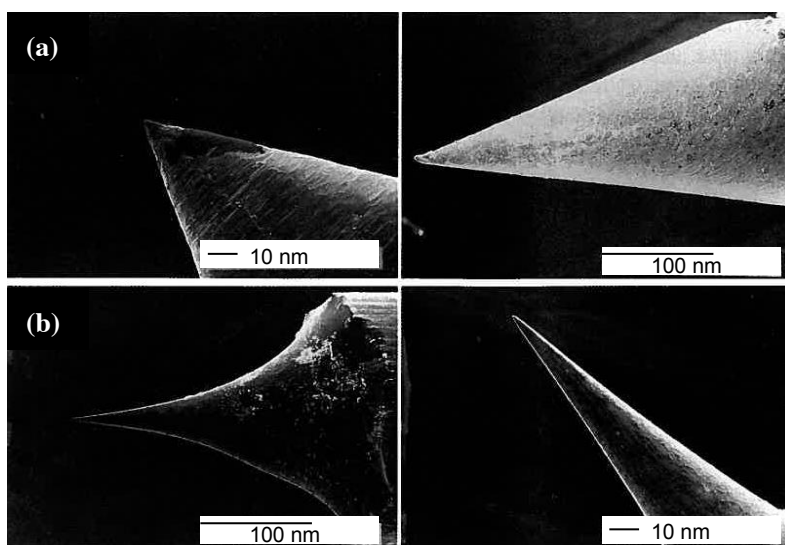


図 19 探針先端部の SEM 像. (a) 機械研磨した白金, (b) 電解研磨したタングステン (村上 1986 年).

タングステンや白金の探針を用いて測定を始める前に、低い電圧で比較的大きな電流が短時間流れるように探針を試料に軽く触れると、安定した像が得られやすいことが経験的にわかった。ビニッヒたちはこれをミニスポットウェルディングと呼んでいる。

実験を始めて、不安定ながらトンネル電流が流れ、距離を一定に保つサーボ回路も作動しているにもかかわらず原子像がなかなか得られないことがある。しかし面内走査を繰り返すうちに突如として安定した原子像が現われてくる、また逆に原子像観察時に突発的に分解能が低下するということがしばしば起こった。結合が不安定な探針先端の原子や原子クラスタが剥がれ落ちるか、試料の側から探針先端に原子かクラスタが付着して、そのうちの 1 個の原子がトンネル電流に寄与すると考えられた。ミニスポットウェルディングでも似た現象が起こっていると考えられる。また同じ原子像が複数重なった画像が得られることがまれにあり、これは探針先端でたまたま同等に頭を並べた原子が複数あれば、それぞれが原子像を与えるためであると解釈された。

探針先端の原子スケールの構造や電子状態の把握は、原子像の解釈や原子・分子を精密に操作して超微細構造を作るためには避けて通れない。村上とセイコー電子の繁野雅次らは SEM, TEM のほかに電界イオン顕微鏡 (Field Ion Microscope, FIM) を製作し先端形状評価を行うとともに、探針加工整形後の清浄化法として電子衝撃法、イオン衝撃法、電界放出法などを適用した。また z 方向に深い段差や溝形状をもつ試料の測定には探針の側面形状が影響を及ぼすなど、探針形状は重要研究課題として検討し、素材によって異なる電解研磨自動化の条件や機械研磨の精度など実験的にも工夫を続けた。

8.5 測定環境

室温大気中の計測以外に、半導体や金属の真正表面あるいは極低温での超伝導の研究のため、開発当初から測定環境と STM の組み合わせの議論をしばしば行った。様々な測定環境に適合したトンネルユニットは最初の原子像観察後の重要課題になった。

8.5.1 室温大気中

阪東は室温大気中でのトンネル電流検出と真空トンネル現象の検証のため、一次元的 (z 方向だけ) に移動するトンネルユニットと測定・制御回路を設計し、セイコー電子が試作した (図 20) . なおトンネル電子にとっては、大気は真空と同等とみなせる.

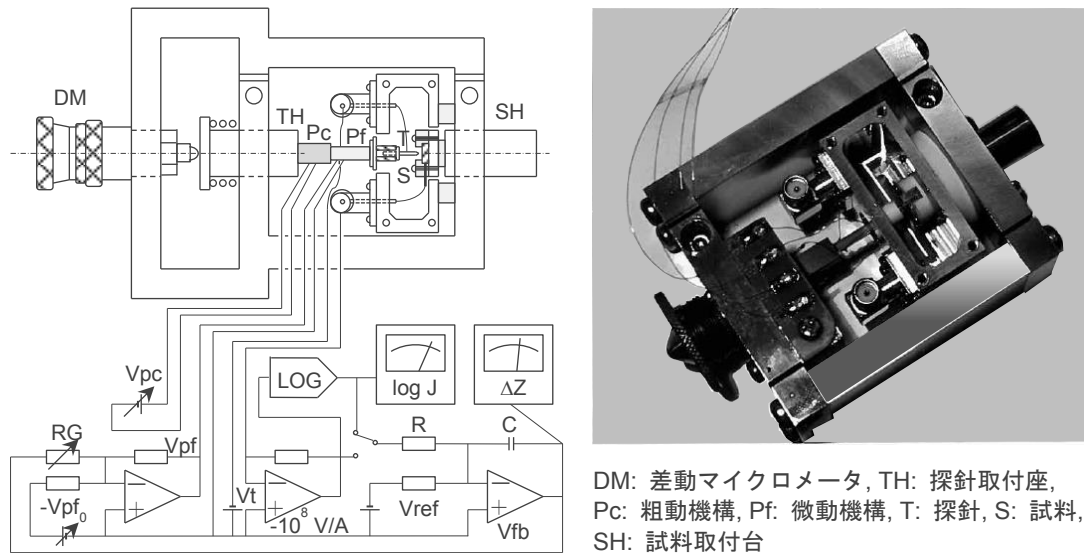


図 20 トンネル電流検出用一次元 (z 方向移動) ユニットと測定回路 (阪東 1985 年) .

p. 3 の式 (1) に示されるように、探針・試料間の距離 z はトンネル電流 J の対数 ($\log J$) に比例し、その係数から仕事関数 ϕ が得られる. 阪東は白金/金に対し式 (1) の関係を確認し、 ϕ が既知であればアクチュエータの校正に使えることを示した (図 21) .

水谷は室温大気中で使用するため、五脚型 (8.2.3 参照) を用いたトンネルユニットの試作を小坂研に依頼した (図 22). 白金またはタングステンの探針を雄ネジに固定し、五脚型微動・走査機構の中央にネジ止めする. この微動・走査機構を、セラミックスを介して差動マイクロメータヘッドに連結し金属の円筒基体内をスライドさせる. 試料を取りつけた直径 50 mm の金属ふたを基体にはめあわせる.

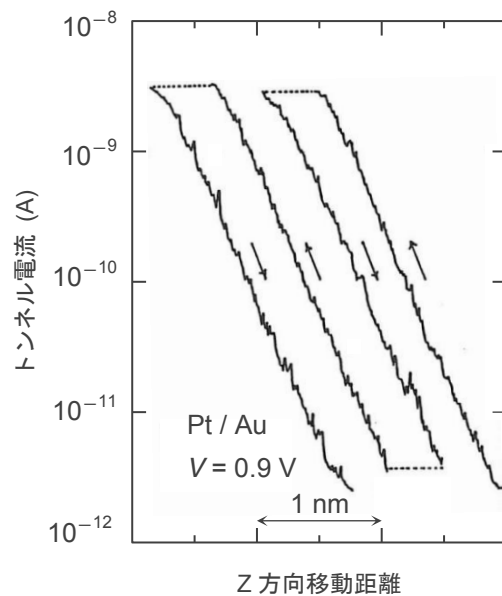


図 21 室温大気中で電圧 $V=0.9$ V 一定の下で白金 (Pt) 探針を金 (Au) 板のある z 方向に移動したときのトンネル電流の変化 [Bando *et al.* (1987)] .

基体に設けた観察穴を通して、光学顕微鏡で確認しながら、探針・試料間距離をマイクロメータで $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度まで近づける。そこで z 軸制御回路を作動させ、トンネル電流が検出できる距離までさらに近づける。自動接近系は後になって製作した(8.6.1 および 11.2 参照)。

測定は空気バネ除振台に載せた金属積層型除振機構の上で行った。このユニットの振動特性を小坂研製の非接触微細形状測定器 HIPOSS、周波数掃印器、スペクトルアナライザを用いて測定すると、共振周波数は 11 kHz で金属積層型除振機構の 20 Hz に比べ 3 桁近く高かった。剛性が高く幾何学的に対称で、電磁的雑音も受けにくくなっている。防音と恒温のため装置全体の被いは効果的である。

セイコー電子の宮田千加良、脇山、繁野は、阪東の要請を受け、室温 STM/STS 測定用に剛性が高く、温度ドリフトの小さいトンネルユニットを試作した(図 23)。熱容量を増やし熱伝導の径方向均一性を確保するため肉厚で円筒構造をしたトンネルユニットを採用し、円筒型微動・走査機構を用いて剛性を高めた。室温の STS 測定に有効に働いた。

ここで類似形状の室温トンネルユニットの移り変わりを振り返ってまとめる(図 24)。

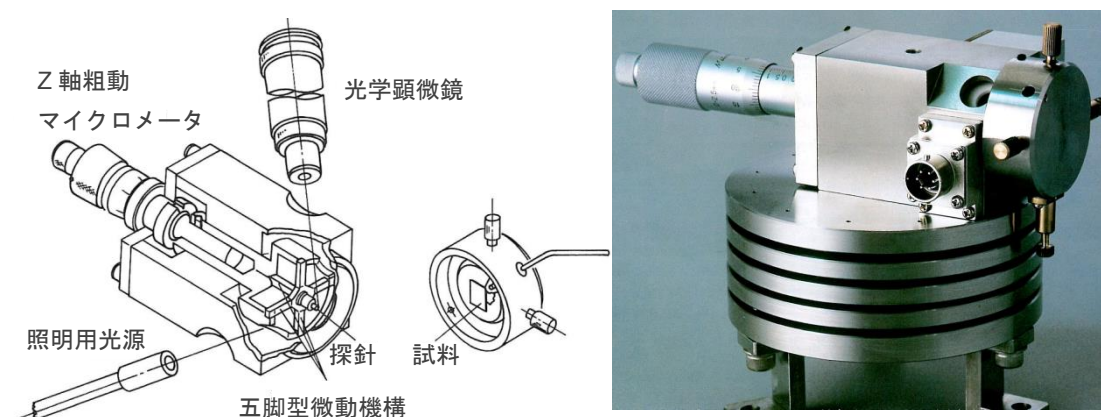


図 22 差動マイクロメータの粗動および五脚型微動・走査機構(図 13 参照)を搭載した室温大気用直結型トンネルユニット(水谷, 小坂研 1986 年). 写真では金属積層型除振機構に搭載。

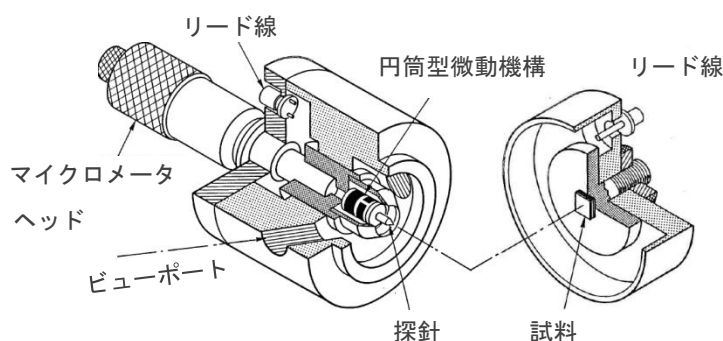


図 23 STM/STS 計測用トンネルユニット(セイコー電子宮田, 脇山, 繁野 1987 年)。

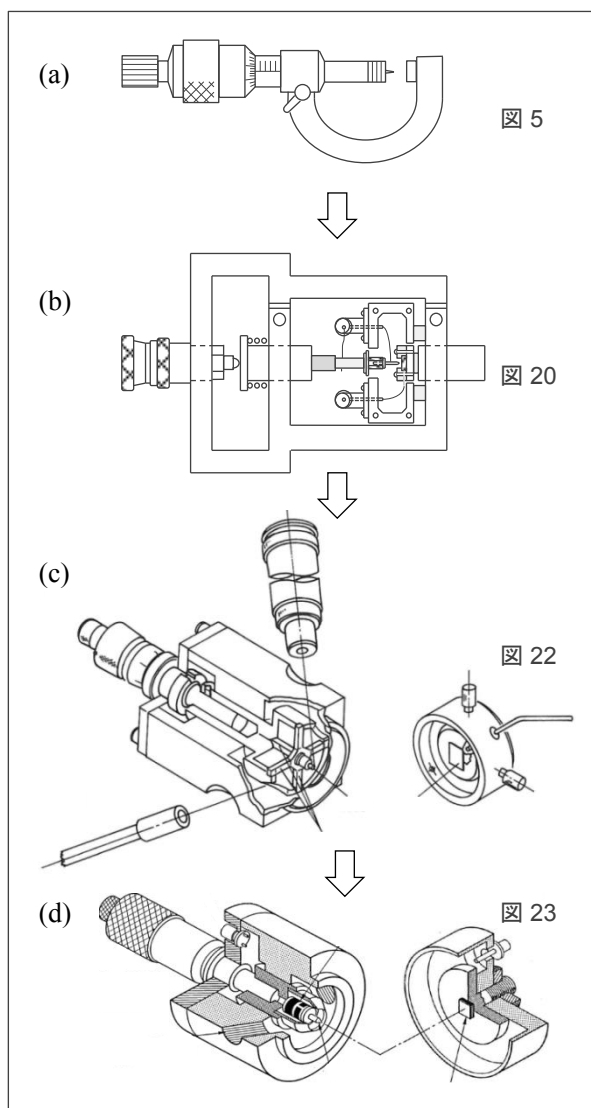


図 24 トンネルユニットの変遷.

- (a) 徳本は室温で真空トンネル効果を確認するため, 粗動には差動マイクロメータを用い, 微動には z 方向に伸縮する圧電アクチュエータを使うユニットを提案した (図 5).
- (b) 阪東は徳本の提案を具現化した. 室温大気中でのトンネル電流検出のため, 一次元的ユニットを試作し (図 20), 探針・試料間の距離がトンネル電流の対数に比例することを確認めた (図 21).
- (c) 小坂研は水谷の要請により差動マイクロメータと五脚型微動・走査機構を用いた三次元計測用の剛性の高い直結型ユニットを試作した (図 22).
- (d) セイコー電子は阪東の要請により STM/STS 測定のためのコンパクトな円筒型微動・走査機構と円筒形の厚肉のユニットを試作した (図 23). 剛性が高く温度ドリフトの少ないユニットに進化した.

8.5.2 超高真空

真空環境は(1) 空気を介した音響振動伝達防止 ; P (真空の圧力) $\leq 10^{-2}$ Pa , (2) 理想的なトンネル障壁 ; $P \leq 10^{-4}$ Pa, (3) 試料の清浄表面維持 (吸着・反応防止) ; $P \leq 10^{-6}$ Pa のため不可欠である. 真空用のトンネルユニットでは機械的操作や光学的観察は制約を受ける. また超高真空 ($P \leq 10^{-6}$ Pa) を得るためには通常 $150 \sim 200$ °C加熱の脱ガスが必要であるが, アクチュエータが 150 °C以上では圧電性を失うので部分的な熱絶縁かエアロックの対処が必要である. さらに排気系 (分子ポンプなどの回転機器) の振動伝達を避けるため, 真空チェンバーは光学ベンチなどの簡易防振台上に設置, 分子ポンプで 10^{-5} Pa に排気後, 分子ポンプを機械的に切り離してイオンポンプだけに切り換える必要がある.

小野は真空チェンバーと排気系を設計した (図 25). (a)は最初の設計であるが, 製作時

間と費用節約のため(b)のような窓のない形に簡素化した。 10^{-7} Pa に達するこの装置を最初の原子像を得るために使用した。 活性の高い半導体表面を観察するためには、トンネルユニットから離れた位置で試料表面を加熱処理あるいは劈開したあと、試料を移動する必要がある。 そのような装置は原子像観察後の新たなプロジェクトで試作した (11.2 参照)。

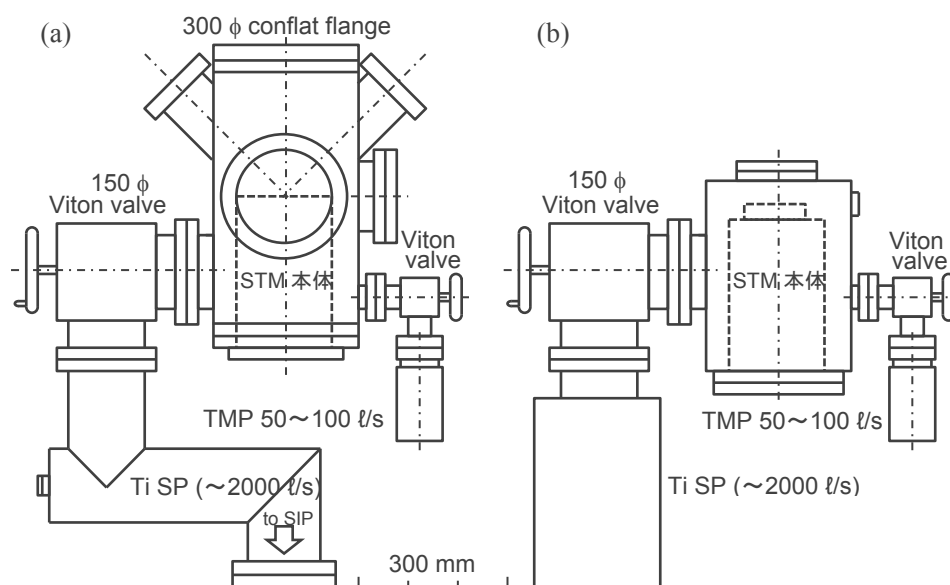


図 25 真空チェンバーと排気系 (小野 1985 年), (a) 窓のある構造と (b) 簡素化構造.

8.5.3 極低温

極低温で作動する STM は超伝導や低温での電子状態の測定, 原子・分子の吸着などの基礎研究にとって重要である。 極低温トンネルユニット設計上の問題点は, (1) クライオスタットのサイズの制限から室温での STM に比べて狭い空間 (典型的には $25\text{ mm}\phi \times 150$

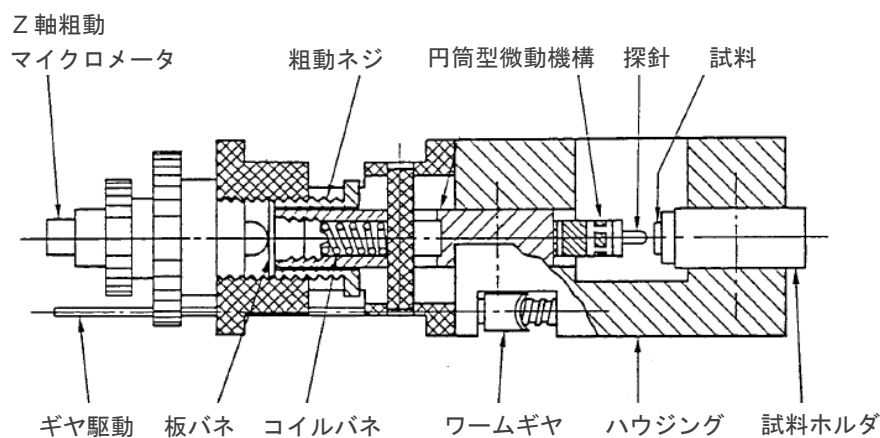


図 26 極低温 STM のトンネルユニット (阪東 1986 年).

mm^L 程度) に収める必要がある, (2) 液体窒素や液体ヘリウムの発泡による振動がある, (3) PZT の圧電定数が室温の約 1/10 になる, (4) ダンピング用のゴムや潤滑剤を使うと凍りついて機能しなくなる, (5) 試料表面へのガス吸着を少なくするため超高真空が必要になる, (6) 室温につながるパイプやリード線を経由する熱流入によってトンネルユニットが熱歪みを起こし長時間緩和に伴うドリフトが起こり得ることなどである。

阪東と梶村は 0.5 K まで使用可能な極低温ユニットを考案し, セイコー電子が試作した (図 26). 有機超伝導, 高温酸化物超伝導の STM/STS に用いた. 後に梶子型粗動をもつトンネルユニットや, 室温大気中で変性した試料表面を低温で劈開できる極低温ユニット (図 27) も設計した。

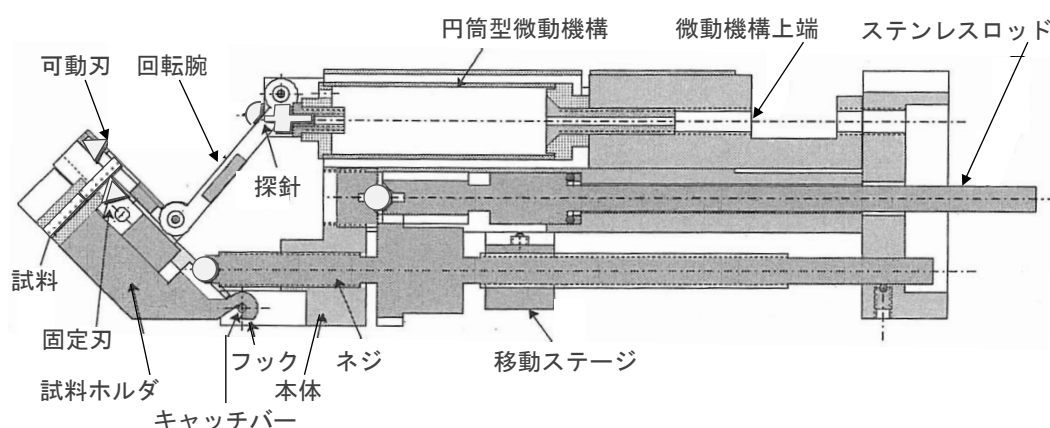


図 27 試料をその場劈開できる極低温トンネルユニット (阪東 1990 年)。

8.6 計測・制御

STM 像を得る計測方法には(1) 探針・試料間距離 z を一定に保って走査する定電流モード, (2) 原子の凹凸程度に平坦な面を距離 z 一定で走査する可変電流モード, (3) 電流距離微分 $[d(\log J)/dz]$ モード, 障壁高さモードまたは ϕ マップとも呼ばれ, 仕事関数 ϕ の面内分布を測定する [式(1), 図 21 参照], (4) 微分コンダクタンスモード $[dJ/dV]$, 走査型トンネル分光(Scanning Tunneling Spectroscopy, STS) の 4 つがある. (1) の定電流モードと (4) の STS モードについて記す。

8.6.1 定電流モード

STM の定電流モードは探針・試料間距離 z を一定に保って面内を走査する作動である. 岡山は STM の微小電流測定は SEM の 2 次電子・反射電子による微小電流測定に似ているという観点から, 電流・電圧変換器 (最小 10 pA を増幅する電流増幅器, I/V AMP) を主体とする z 軸制御のサーボ回路を重視し, 阪東, セイコー電子の渡辺和俊とともに計測・制御回路設計に取り組んだ (図 28)。

心臓部であるサーボ回路系は電流・電圧変換器, 対数変換器, 差動増幅系 (比較器, 積

分器，加算器，精密電源)， z 軸駆動の増幅器， z 軸圧電アクチュエータからなる．微小なトンネル電流を扱うため，アクチュエータ駆動の高電圧回路系の干渉や外部雑音を減らし，10 pm の z 軸制御と速い周波数応答を目指して，集積回路や部品を選びながらサーボ回路系を設計し，(株)エヌエフ回路設計ブロックに外注した (1985 年)．

比例・積分型のサーボ回路（フィードバック回路）の安定作動のためには，制御系のループゲインが 0 dB になる周波数を，除振機構の共振周波数とトンネルユニットの共振周波数のあいだになるように積分要素の時定数を設定する．速い応答速度の制御系を得るには，トンネルユニットの共振周波数を可能な限り高くしなければならない．さらに圧電アクチュエータは容量性負荷であり，回路の発振防止のためサーボ回路を構成する z 軸駆動の増幅器内部で容量分をキャンセルする位相補償を行う．自動機械の設計に経験の深い渡辺は納入された計測・制御器のサーボ回路に改良を施しさらなる安定化を図った．また後に (1987 年) セイコー電子の本間昭彦はボード線図に基づき，別途計測したトンネルユニット，除振機構，各種増幅器の伝達関数を考慮した最適パラメータの決定方法を解析した．

データ処理には当時主流であった 16 ビットのマイクロプロセッサを用いた． z 軸アクチュエータの電圧を 12 ビットの A/D 変換器で読み取り， x, y 方向の圧電アクチュエータへの印加電圧に対応する番地に収納し，外部メモリに出力してから，制御用とは別のコンピュータで画像処理を行った．

開発の 3 年目以降，研究領域に応じた複数の STM 装置を試作したが，それぞれに適合するよう計測・制御系も改良した．粗動機構の動作からトンネル現象が起きる微動・走査機構の動作に自動的に移行する自動接近設定回路系 (小林 1987 年) をはじめ，面内走査のスピードや分解能向上のため z 軸制御のサーボ回路の周波数帯域を広げるなど，回路系とその構成部品，超高真空チェンバーや極低温内部への電流増幅器の実装などについて定量的見直しを行い，新機能も付加した (11.2 参照)．

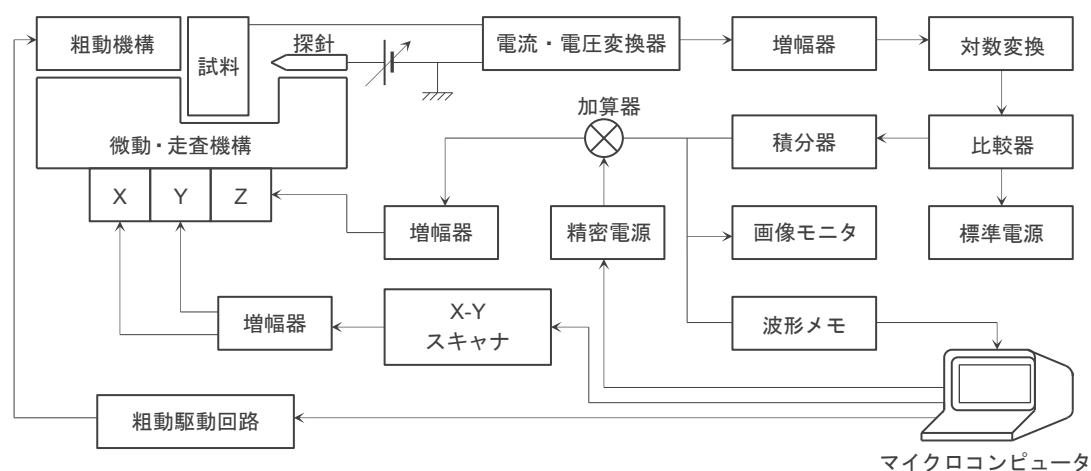


図 28 定電流モード計測・制御回路 (岡山，阪東，渡辺 1985 年)．

8.6.2 STS モード

STM 画像上の任意の点でサーボ回路のフィードバック動作を間隙的に止め、探針・試料間距離 z を保持した状態でトンネル電流・電圧特性を測定して微分コンダクタンス dI/dV を得るのが STS で、電子やフォノン状態密度の面内分布を測定するモードである。(1) 式の自由電子モデルでは dI/dV は電圧 V に対して一定であるが、複雑な電子構造をもつ物質や超伝導状態では顕著な電圧依存性、すなわち電子エネルギー依存性がある。微分コンダクタンスは数値微分によって得る。STS では STM に比べてデータ量が 2 桁以上多くなる。

阪東は渡辺、水谷とともに STM/STS の計測・制御回路を設計し (図 29, 粗動駆動回路は省いてある)、セイコー電子が試作した。室温と極低温における NbSe₂, グラファイト, 有機超伝導体, 酸化物高温超伝導体の STM/STS を測定した (1987 年)。

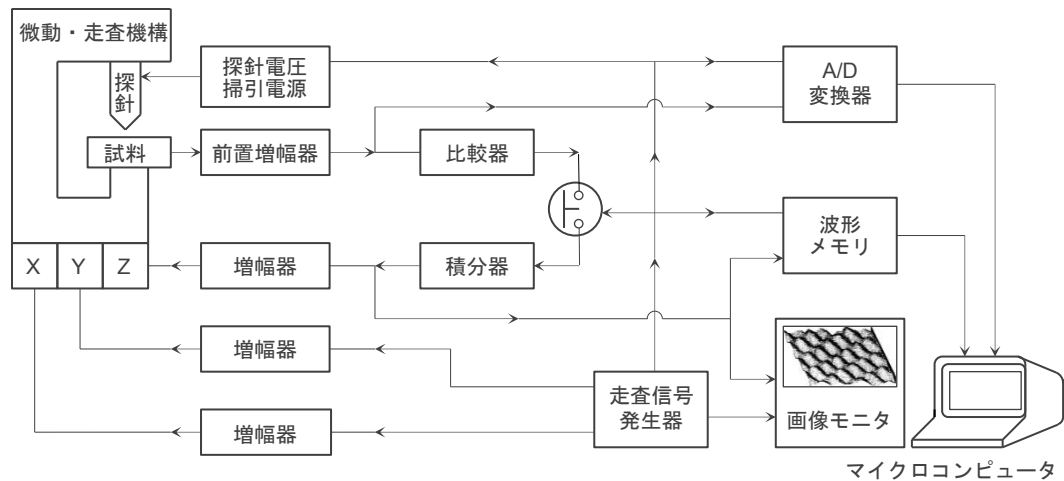


図 29 STM/STS 計測・制御回路 (阪東, 渡辺, 水谷 1987 年)。

8.7 画像処理

画像の表示方法には(1) 線画表示, (2) 濃淡表示, (3) 等高線表示, (4) 三次元表示などがある。線画表示では y 座標を段階的に動かして、段ごとに z 座標値 (探針高さ) の x 方向依存性を表す波型曲線を表示する。ストレージコップでアナログ表示できるが、他方外部メモリに取り込み、制御用とは別のコンピュータによって傾斜補正、デジタルフィルタによる雑音低減、アクチュエータの非線形性などによって生じた画像ひずみ補正を行う。

計測・制御と画像処理用のソフトは、1985 年からチームに加わり、CAD による最適信号検出や制御回路、さらにデータ収集法などの検討を担当した電子計算機部アナログ情報研究室の小野祐一の検討も踏まえ、水谷が中心になって仕様を決め、BASIC 言語でだれでも自由に改変できるソフトを(株)タートル工業に外注した (1986 年 3 月)。最初の原子像を得たあとにスピードアップのための C 言語への書換えやバージョンアップをソフトプライムの中島 寛に依頼した。

8.8 試料

原子像を得る前に凹凸や溝幅が 2 桁以上大きいアルミニウムのハードディスクも対象にしたが、目標が原子像を得ることにあったので、 MoS_2 、グラファイトなどの不活性な表面をもつ層状物質に着目した。材料部高温電子材料研究室の遠藤和弘は蒸気輸送法を用いて高純度で結晶性の良い遷移金属ダイカルコゲナイドの単結晶を育成していた。そのうちのひとつで育成したばかりの NbSe_2 結晶の提供を受け、メンディングテープで表面を剥がす（劈開の一種と考えてよい）ことで清浄面を得た。これを最初の原子像観察に用いた。

清浄・平坦表面を得るには物質により異なった手法がある。(1) エッチング（化学的、電解法、酸化溶融法）、(2) 超高真空中高温フラッシュ（W, Mo, Re, Ta, Si, Ge）、(3) イオン衝撃・アニール法（合金以外の金属イオンスパッター）、(4) 酸化・還元法（高温・ガス雰囲気中：W, Mo, Fe, Ni）、(5) 劈開法（Si, Ge, GaAs, GaP, 他の半導体、冷却した金属）、(6) 真空蒸着法（多チェンバー方式：MBE 半導体、Fe, Ni, Cu, Ag, Au）。表面・界面には魔物が棲んでいると言われるほど表面処理技術は奥が深く、表面科学の重要課題でもある。これらの処理方法に応じた真空チェンバーやトンネルユニットの設計が必要である。

徳本を中心とするグループでは、超高真空中のシリコンの観察にあたって、まず大気中で表面を水素で終端する化学的前処理を行って活性の少ない表面を準備したあと、超高真空中で通電加熱処理などにより所用の清浄表面を得た。阪東は有機超伝導体や酸化物超伝導体の極低温での劈開によって清浄面を得た。

9. 企業との共同開発

前節では試作した一連の要素技術を述べたが、時間を試作前の時点にもどそう。

1985 年 5 月小野の海外出張報告でトリガーがかかって以降具体設計を進めたが(7.参照)、精密な機械加工や計測・制御機器の試作を所内で行うのは困難であった。いくつかの要素技術を除き、外注するための仕様を書くには不確定要素が多い。たとえ要素技術の相互関係を考慮に入れて仕様を書き下したとしても、複雑すぎてどこにも受注してもらえない。精密機械加工や計測・制御回路製作技術とともに経常研究（毎年定率的に配分される人当研究費で運用する研究）ベースの開発予算の補完などいささか虫のいい期待もしながら、伝手を頼って各方面の企業を訪ね共同開発をもちかけた。

賛同してくれたのはセイコー電子*常務の内山哲夫であった。セイコー電子ではクォーツ時計の技術が完成に近く、科学機器への事業拡大を模索している時期であった。内山は、ビニッヒらの論文の発表直後、社内研究開発部門に検討を指示したが、着手には時期尚早との判断であったという。しかし 1985 年初め電総研の呼びかけに応じた内山の判断によって協力することになり、坂井文樹（生産技術開発部）、脇山 茂（同）、渡辺和俊（電子技

*セイコー電子の STM を開発した事業部門は現在(株)日立ハイテクサイエンスに変わっている

術課)が1985年10月からチームに加わった。彼らには畑違いの仕事が突然降ってわいた心境だったようだ。その半年前、責任者の坂井は電総研での最初の打合せ後自社に戻って同僚たちに話したところ、原子を見る顕微鏡製作なんて正気の沙汰ではないと言われたという。この時期、先進科学機器メーカーではSTMが研究開発に「使える」道具になるとは考えていなかったし、そもそも原子像を見ることにはほとんど関心がなかった。

半年にわたって設計してきた多種類の部品の機械加工を、STMに馴染むための手はじめとしてセイコー電子が引き受けてくれた。また水谷は別途、五脚型微動・走査機構を備えた室温大気用の直結型トンネルユニット(図22)の試作を小坂研に依頼した。両社ともSTMの技術内容を電総研メンバーと共有するまで半年近くを要したが、どの技術要素も既存技術からかけ離れたものではなく、むしろ標準的な精密技術の組み合わせであることがわかってからは、設計技術、製造技術に長けた社内の他の技術スタッフも加わり、積極的なアドバイスや新しいアイデアを提供した。共同開発は軌道に乗った。このときも電子トンネル顕微鏡コロキウムが役割を果たした。1990年までに50回を越えた。

10. 原子像をとらえる

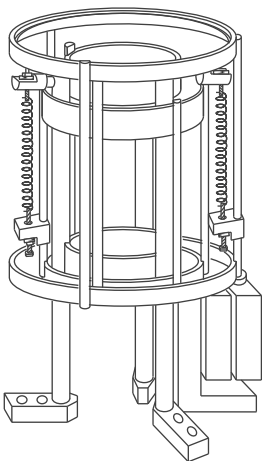
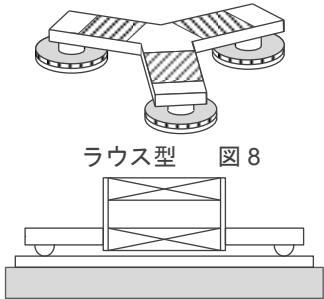
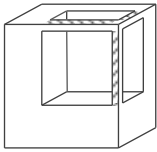
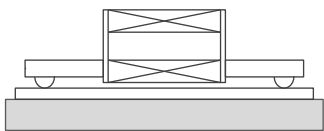
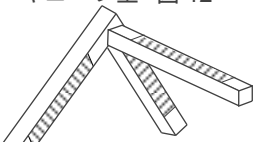
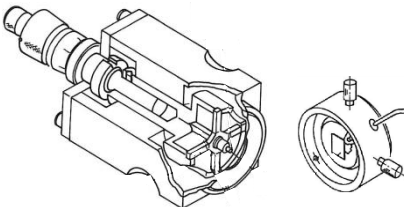
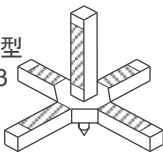
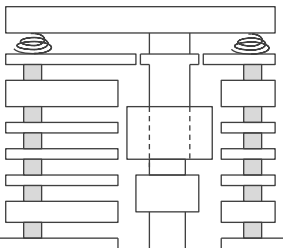
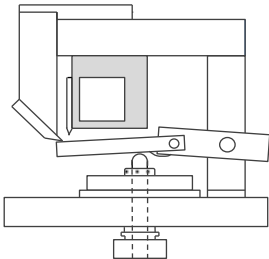
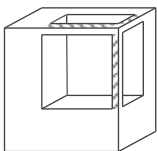
1985年の冬、部品類が納入され、組み立てられ、作動試験に入った。極低温トンネルユニットを別にすれば、除振、粗動、微動・走査の組み合わせにより9種類のSTM装置ができていた(表VII)。個々の試作部品はほぼ設計どおりの性能を示した。1986年4月、除振、磁気駆動型粗動とキューブ型微動・走査、トンネル電流検出、梃子型ユニット、STM装置の6件を応用物理学会でまとめて報告した。国内初のSTM開発の発表で、会場いっぱい聴衆がつめかけた。原子像の発表を期待する向きもあったが像はまだ見えていなかった。

この学会の発表準備をしていたころAFMの発表があった[Binnig *et al.* (1986)] (3. 参照)。導電性材料を対象とするSTMと違って、固体の絶縁物をはじめ広範な材料に適用できる。有用な材料の大半は絶縁物である。急速に進展しつつある分子生物学の現象解明やバイオテクノロジーの開発にもSTM以上に必要な手段になるであろう。すぐにも着手したかったが、STMの原子像をまだとらえていない。留保せざるをえなかった。

話をもとに戻そう。装置はできたが、原子像はすぐには姿を現わさなかった。ノイズに埋もれていると判断した阪東、水谷、徳本は組み上ったSTM本体、周辺測定機器、接地、既存標準電源類、計測・制御回路内の各種増幅器によるノイズ源をくまなく調べていった。トンネルユニットへの配線の不具合、ユニットの固定不良、デジタル計器や無停電電源からのノイズなども見付き、一つひとつ障害を取り除いた。原子より2桁以上大きな形状をもつ、ダイヤモンドバイトで精密切削したアルミニウムのハードディスクの溝が見えるようになった。ノイズ源の特定と改善に2ヶ月を要した。準備は整いつつあった。

1986年5月末の深夜、二段スプリング型除振、磁気駆動型粗動(試料を駆動)、トライポッド型微動・走査(タングステン探針を駆動)の組み合わせで、振動を避け、コソとの音もたてないように息を殺してブラウン管を見つめる中、それが姿を現した。徳本はわが国で

表 VII 開発した除振，粗動，微動・走査の組み合わせ．

除 振	粗 動	微動・走査
 二段スプリング型 図 16	 ラウス型 図 8	 キューブ型 図 12
	 磁気駆動型 図 9	 トライポッド型 図 8
	 差動マイクロメータ型 図 22	 五脚型 図 13
		 円筒型 図 15
 金属積層型 図 18	 挺子型 図 11	 キューブ型 図 12

初めて原子を見た男になった．試料は遠藤が提供した NbSe_2 であった．徳本はその時，プレゼンテーションや解析のための記録システムを準備していなかった．阪東と水谷が徳本の目の奥に焼きついた原子像をストレージスクープの画面からポラロイドフィルムに記録し，解析の結果， $2H\text{-NbSe}_2$ の既知の格子定数と一致した（図30）．こうして科学実験における再現性確認の重要なプロセスもクリアした．想像力，思考，信念，それに仲間とのコミュニケーションがSTM画像に結実した．

応用物理学会の欧文誌速報 [Tokumoto *et al.* (1986)]，プレスリリース，スペインでの第1回 STM 国際会議 STM'86，第6回国際固体素子・材料コンファレンスに発表した．調査と検討に1年，設計に半年，試作と原子像観察に半年，計2年であった（表 VIII）．

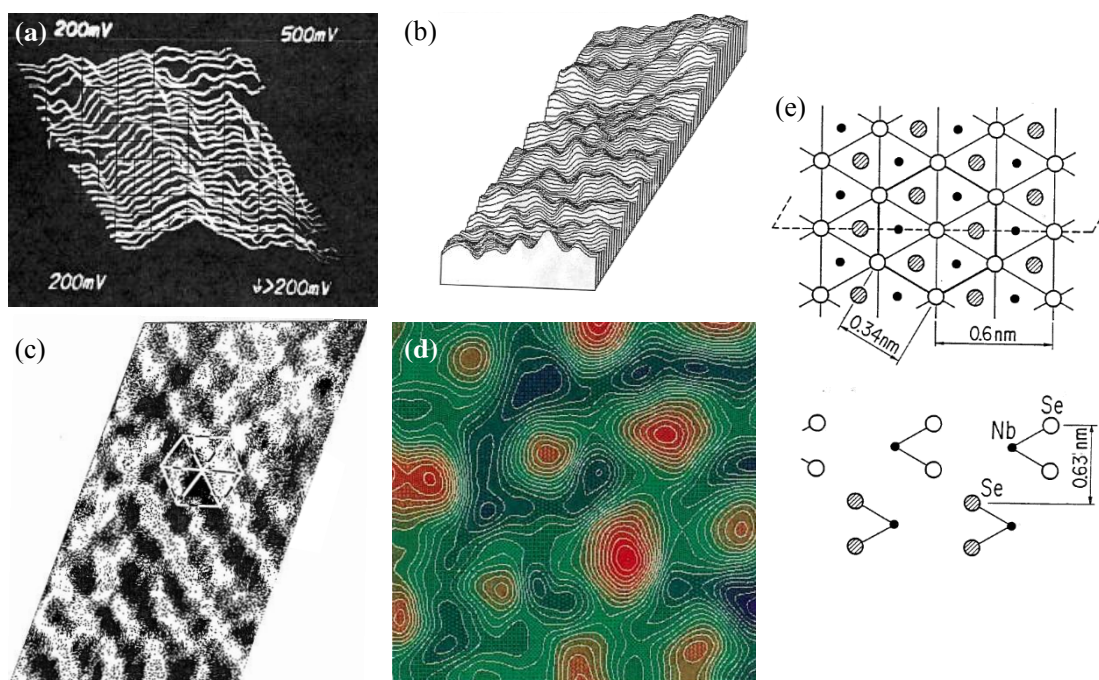


図 30 $2H\text{-NbSe}_2$ の STM 像. (a) ストレージスコープの写真記録, (b) 線画表示 $1.8\text{ nm} \times 3.2\text{ nm}$, (c) 濃淡表示 $1.8\text{ nm} \times 3.2\text{ nm}$, (d) 等高線表示 $1\text{ nm} \times 1\text{ nm}$, (e) 上面と断面の原子配置.

この年の 12 月, ビニッヒとローラーは, 電子顕微鏡開発のルスカ (E.Ruska) とともに 1986 年のノーベル物理学賞を受賞した. 1987 年 6 月電総研を再び訪れたローラーは, IBM チューリッヒグループの支援なしに原子像観察の成果を出した初めてのグループだと述べ, STM 画像のハードコピーに, "My compliments to this extraordinary STM effort, Heini Rohrer 1/6/87" とサインし祝意を示した.



第 1 回 STM 国際会議 STM'86

表 VIII 電総研 STM 開発の経緯.

1984.	4	開発開始
1984.	7	第 1 回電子トンネル顕微鏡コロキウム
1985.	5	第 6 回コロキウム, 設計開始
1985.	10	セイコー電子と共同開発開始, 試作開始
1985.	12	作動試験開始
1986.	4	要素技術学会発表
1986.	5	原子像観察
1986.	9	企業技術指導開始 (7 社参加)
1987.	4	新分野開拓開始
		官民連帯共同研究開始 (セイコー電子, 小坂研) ~1989.3

11. 新分野開拓

11.1 測定のコウハウと装置の最適化

達成感に浸っている時間は短かった。NbSe₂の原子像は得られたが、欧米のグループがSTM観測の標準物質としているグラファイトの像はすぐには得られなかった。格子定数0.34 nmの2H-NbSe₂に対しグラファイトは1/3の0.14 nmしかなかったため、NbSe₂観測と同じシステムでは信号・雑音比が不足していたのである。しかし一度ならず原子像をとらえたあとだけに困難な道ではなく、金属積層除振、梃子型粗動、キューブ型微動・走査、白金探針の剛性の高いトンネルユニットで、まもなくグラファイトの原子像も得られた(図31)。複数の要素技術を開発してきたことが功を奏した。当然ながら、バイアス電圧、トンネル電流、走査速度、サーボ回路の設定定数などの測定条件は異なった。

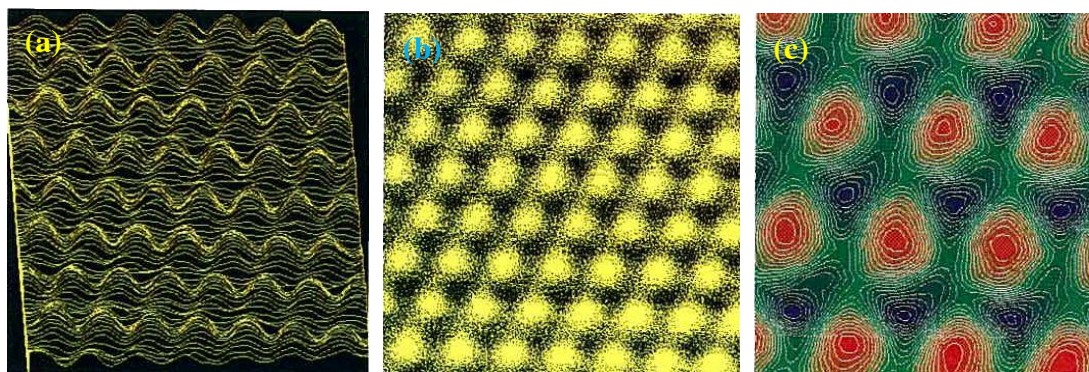


図31 グラファイト STM 像の表示. (a) 線画表示 (1.76 nm²), (b) 濃淡表示 (1.76 nm²), (c) 等高線表示 (0.72 nm×0.8 nm).

こうした実験をとおして測定のコウハウを蓄積し、さらにノイズを減らすため、各種組み合わせのトンネルユニットの伝達関数と固有周波数の確認など STM 装置そのものの機械的・電氣的性能をはじめ、データ収集方法や画像処理ソフトなどの過不足分も明確になり、その後の改良、修正などの方針がはっきりした。

また阪東と水谷が NbSe₂ とグラファイトを使って、室温と低温の試料表面のいろいろな原子位置で電子のエネルギー状態を調べる STM/STS を完成させたことで、原子スケール分解能をもつトンネル分光の準備は整った。

原子像を得るためのポイントは、(1)トンネルユニットである「機械系のループ」を小さく固くして剛性を上げる(共振周波数を高くすること)、(2)z軸制御のサーボ回路である「電気系のループ」の雑音を減らし応答周波数を高めることの2点に集約される。

11.2 研究協力

原子像観察を公表するや多くの見学者が訪れた。この研究分野を多くの人と共有すべきであるという考えから、実機のみならずこの時点で得ていた設計や測定のコウハウの詳細も可能な限り開示した。さらに7つの企業からあいついで研究協力の要請があった。制

度上「技術指導」という形式をとり、次項 11.3 に述べる専門分野の展開の中で受け入れた（資料 C 参照）。

企業との共同実績と STM の重要性が認められ、1987 年から 2 年間、工業技術院の官民連帯共同研究制度の第 1 号となった「マイクロエレクトロニクス STM 技術に関する研究」を実施した。徳本と岡山が主に担当して、セイコー電子と小坂研の二社とともに 2 種類の STM 装置を開発した。これまでに開発してきた STM 装置のいわば集大成である。

セイコー電子は半導体表面の原子レベル評価用超高真空 STM (UHV-STM) と計測制御系の新規設計を担当した。UHV-STM は坂井文樹が責任者になり大村研二、脇山 茂らが中心になって開発した（図 32）。試料・探針の搬送と交換用、STM ユニット用、試料処理用（試料劈開、MBE、クリーニング、その場評価を含む）の 3 つのチェンバーからなる STM 装置である。粗動にはステップモータで駆動する差動マイクロメータ（1 ステップ当り 65 nm）を用い、トンネル電流を検出すると自動停止する。また粗動位置決め後、外部の機械的振動が駆動系をとおしてトンネルユニット伝わらないよう両者の連結にはクラッチ機能を施した。微動・走査には高分解能化のため 2 つの z 電極をもつ新規の円筒型 PZT を開発した。除振は 4 本の懸架スプリング（バネ定数 140 kg/m）で保持した金属板の上に 3 本の円錐スプリング（バネ定数 85 kg/m）を介して基台になる金属板を浮かせる方式を採り、超高真空チェンバー全体はエアークラッチ除振台の上に設置した。

計測・制御系は、井上 明を責任者として本間昭彦、渡辺和俊、石原健一郎が担当し、当時は一般的ではなかった 32bit CPU を使って高分解能化、高速化を図った（図 33）。さらに STM/STS 同時測定もできるようにした。新規の機能として、試料面上充分離れた位置から短針を振り下ろす動作を面内等間隔に行い、像情報を得るサンプリング方式を導入した。これは後にバックステップモードと呼ばれる測定法で、起伏の激しい試料に対して探針が試料と衝突することなく走査できる。またこれにより走査範囲の大小にかかわらず一定時間で走査することもできる。 z 軸制御の周波数帯域を広げ高速走査をできるようにした。これは数 μm^2 以上の大領域走査用としても有効な機能である。さらに入力ケーブルの浮遊容量によるノイズレベル低減のためトンネルユニットに近接して設置できる超高真空対応のハーメチックシールに内蔵した電流・電圧変換器（I/V AMP）を開発した。

セイコー電子は時計製造を主な事業としていたが、事業多角化の一つとして科学機器事業を進めていた。すでに軌道に乗っていた蛍光 X 線分析、熱分析、分光分析のほかに顕微鏡分野の事業を模索していた時期に、新たな技術取得を目指して UHV-STM の共同開発に参画した。

小坂研は松本文雄、小林好行、渡辺眞二、中川春樹、志村昌行、宮本紘三が半導体プロセス評価に必要な超微細加工測定用三次元計測 STM の開発を担当した（図 34）。装置の設計思想は次のとおりである。簡易的に用いられる表面形状の測定法（光学顕微鏡や表面粗さ測定器）から連続性をもってズームアップすることを考慮して走査範囲を 10 μm^2 とした。従来の測定では、対象になる形状は数 μm からサブ μm であり、そのときの観察領域は数百

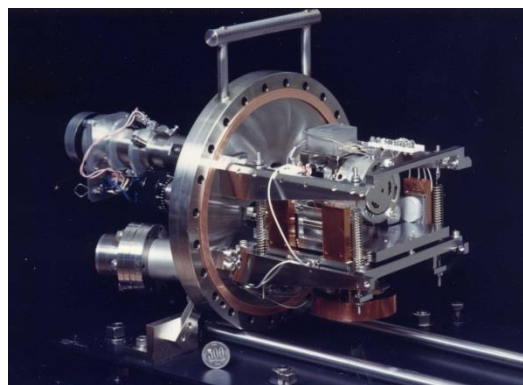
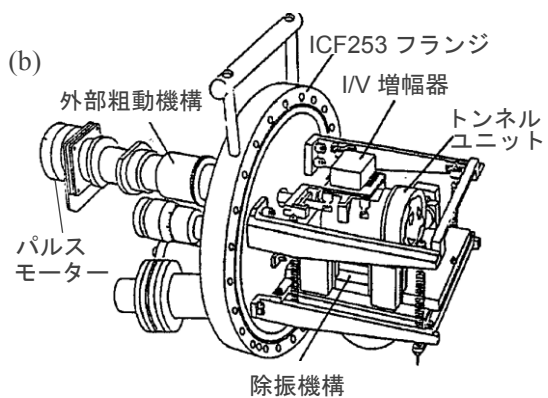
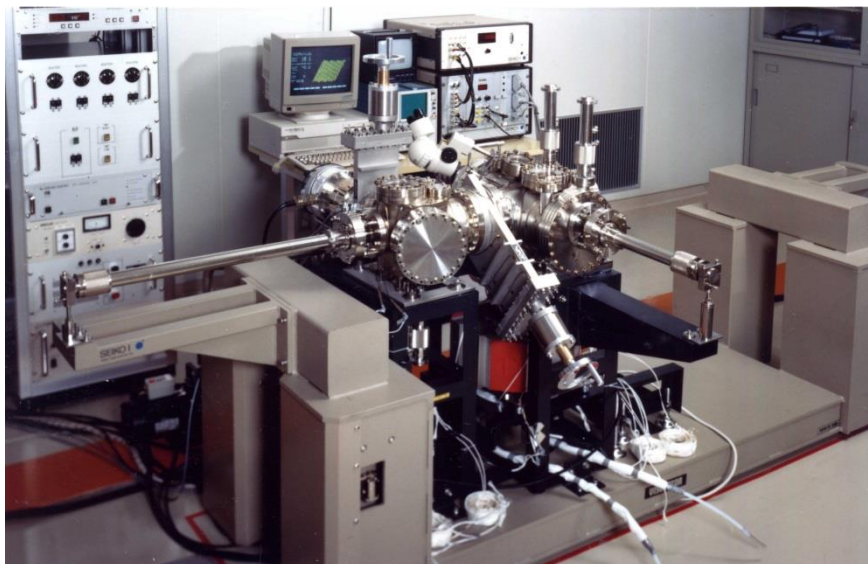
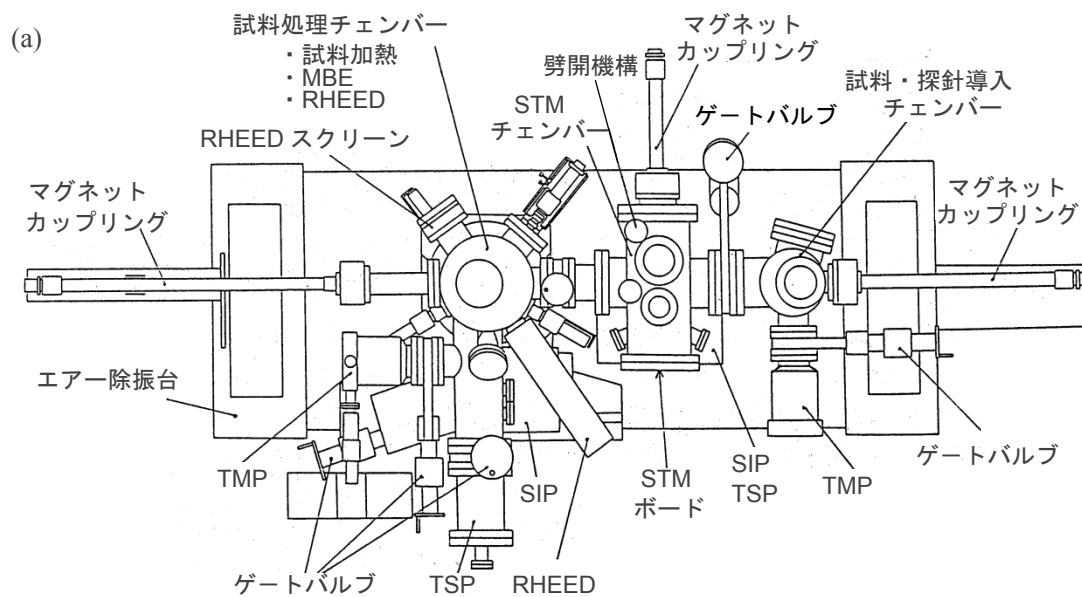


図 32 (a)半導体原子像観察用 UHV-STM, (b) STM チェンバー内部 (1988 年).

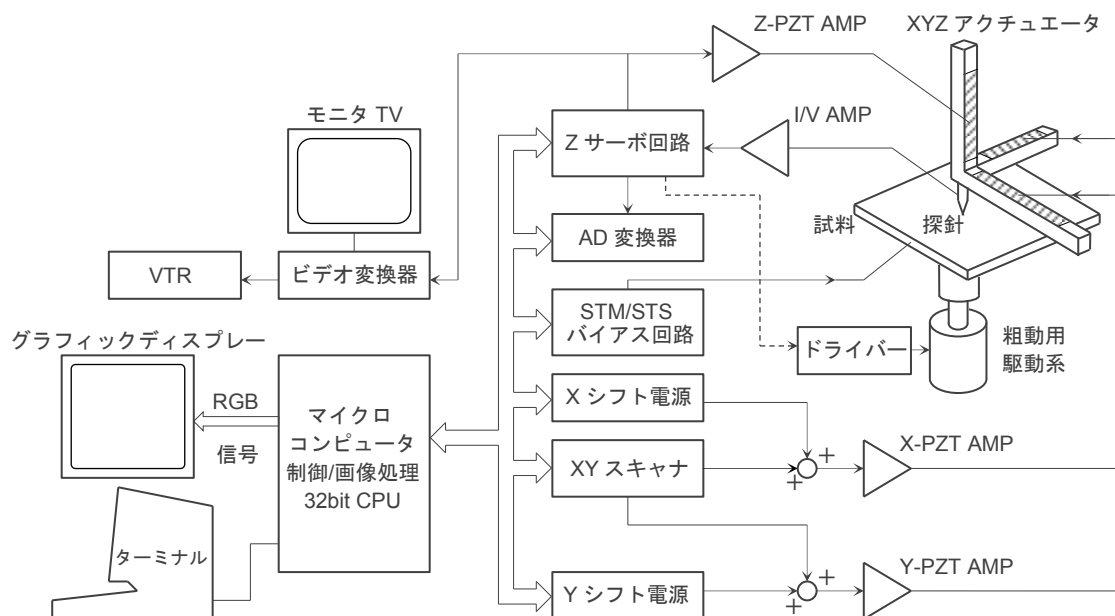


図 33 32bit-CPU を用いた計測・制御回路，太い矢印はローカルバス（1988 年）.

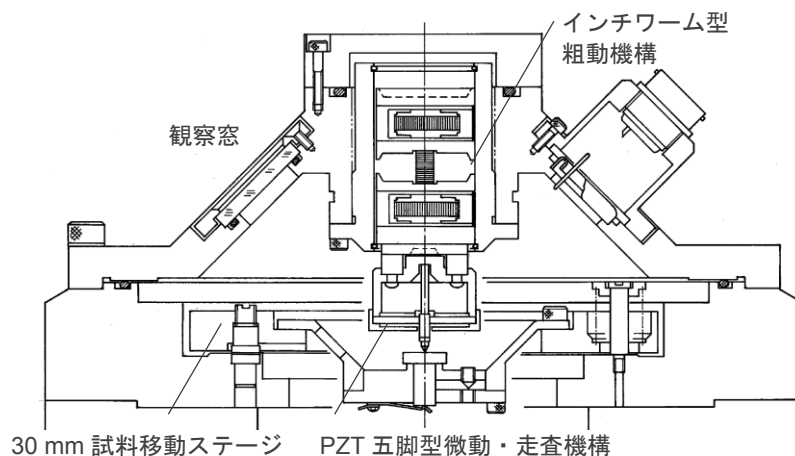


図 34 真空対応の超微細加工測定用三次元計測 STM. (1988 年).

μm^2 である．対象になる数 μm 形状のパターンの全体像のみならず，少なくとも同一パターンを複数個観察できるように，走査領域を $10\mu\text{m}^2$ まで拡大した．小坂研は，視点をマイクロメートルからナノメートルスケールへと移しつつあったユーザーの要請を先取りするものに着目していたのである．

装置は垂直方向に移動する枠固定式のインチワーム型粗動，PZT 五脚型微動・走査機構，30 mm 試料移動可能で移動精度 $0.1\mu\text{m}$ の大面積 XY ステージを備えている．五脚型微動・走査機構には大面積をカバーできる積層型の圧電アクチュエータを使った．縦型構造にし

て液体中での試料処理や測定ができ、気密構造にして気体の封入もできるようにした。除振にはゴムダンパーをもつ金属積層型を用いた。

小坂研は表面粗さ測定器、三次元の輪郭形状測定器、真円度測定機などの専門メーカーである。これらの測定では、探針を使って微小変位をムービング・コイルによる変位センサで電気信号として高感度、高分解能で検出するものである。その測定技術は STM との共通点が多い。ナノメートルレベルの測定器メーカーとして SPM の利用技術、応用分野に高い関心を持ってこのプロジェクトに参画した。

この共同研究は官民連帯という制度名の理念のとおり企業とのイコールパートナーシップを掲げて運営したため、参画メンバーのあいだの関係がスムーズに回転した。官尊民卑の風潮があったこの時代ではあまり例をみないことであった。企業の立場からみた産学官の共同研究について、セイコー電子の坂井は数年後に STM 開発を振り返って、精密工学会誌に次のように書いている。「産学（官）協同の成功のポイントは、…（中略）…キブ・アンド・テイクがうまく行われること、言い換えれば共有できる目標があることと、それを達成するための資源の相互補完がうまく行われることであると思う。当社においても開発当初から今日に至るまで様々な形での学（官）との交流を行ってきた。幸い、協同していただいた方々は明確な目標とバイタリティを持った研究者であったため、有形、無形の成果を得ることができた。こうした成果が製品開発の大きな原動力になったと思う」[坂井(1995)]。

イコールパートナーシップの考え方は融合研での産学官連携アトムテクノロジープロジェクトの運営体制にも引き継がれたと聞く。また工業技術院が官民連帯共同研究という新制度を設けたことが、他省庁での同様の制度導入への刺激になり、我が国の産学官の広範な技術協力に弾みをつけたとされる。

11.3 専門分野への展開

1987 年から電総研内の新たなメンバー、さらに企業メンバーも加わって、5 つの分野に研究を展開した（資料 C, D, 表 IV 参照）。研究は多くの科学技術分野と融合しながら進んだが、ここでは原子像観察以降、目標にしていた専門分野の初期の展開と成果を挙げる（資料 A, B 参照）。

(1) Si, 化合物半導体表面研究

徳本を中心とするグループは、セイコー電子とともに 10^{-8} Pa 台で探針交換、試料交換、劈開可能な UHV-STM ならびに化合物半導体成膜用試料処理チェンバーを試作し（図 32 参照）、半導体の活性化表面・界面解明の研究を開始した。試料表面の清浄化処理技術を確立し、Si(111)7×7, Si(001)2×1 表面において異方的な原子ステップを発見した。微傾斜 Si(111)表面では試料加熱の直流電流によって原子ステップが電流方向に対して可逆的に動くことを見いだした。化合物半導体では GaAs/AlAs 超格子系の界面の急峻性を観察し、(110)表面の劈開後に起こる界面反応に伴って曲線的な界面構造ができることをとらえた。

(2) マイクロファブリケーション・パターンの三次元計測と加工実験

岡山らは計測・制御回路系のブラッシュアップとともに、デバイスの局所評価技術、微細化する半導体製造プロセスに直接かかわる技術として STM のもつポテンシャルを生かして電子ビームやイオンビームと対応させながら研究を進めた。まず圧電アクチュエータの改良により、 $5\text{ }\mu\text{m}^2$ 次いで $10\text{ }\mu\text{m}^2$ におよぶ広い走査範囲をもつ STM ユニットと 30 mm の試料移動可能な三次元測定用 STM ユニートを小坂研とともに試作した (図 34 参照)。このように大きな変位のアクチュエータはヒステリシスに伴う非直線性を生ずるので、アクチュエータに流入する電流量を完全積分し、変位量に見合った電流量を制御 (電荷制御) することによりヒステリシスを 0.1% 程度まで低減した。次に新たに試作した 32bit CPU によるデータ解析装置を駆使して、SEM では不可能であったマイクロファブリケーション・パターンの高分解能の三次元計測を行った (図 35)。

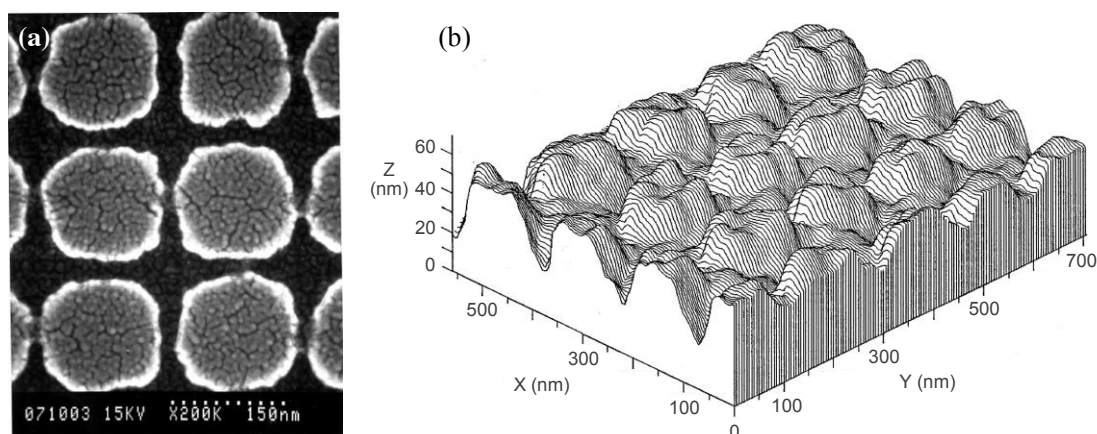


図 35 収束 Ga イオンビームと増速化学エッチングにより、 160 nm ピッチ格子、 $20\sim 30\text{ nm}$ 溝幅、 $40\sim 50\text{ nm}$ 深さに加工した Si の (a) SEM 像と (b) STM 像。細かい粒は導電性をもたせるためコーティングした金の粒子 (岡山 1987)。

同グループの古室昌徳 (電子デバイス部ビーム応用研究室) は STM 構成のイオンビーム加工実験装置でコンピュータ制御したステージ駆動システムと、液体金属の濡れと先端への円滑な供給のため表面処理法を改善したイオン源を用いて、探針・試料間距離 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ において $1\text{ }\mu\text{m}$ 幅のパターンを安定に形成した。

(3) 有機物質研究

水谷とセイコー電子の繁野らはラングミア・プロジェクト膜や繁野の開発研究の対象でもあった液晶などの有機物質の自己組織化膜で、分子スケールの構造と電子状態の研究に取り組んだ。これらの有機物質は絶縁体であるが、グラファイトなどの導電性基板の上で単分子あるいは数分子の膜にすることにより観察した。共鳴トンネル効果を考慮したモデルで説明できることを示し、STM による自己組織化膜研究の道を開いた。またグラファイト STM 画像上でマウスにより指定した領域の探針による通電加工も試みた。水谷は 1991 年から 1 年半 IBM チューリッヒ研に博士研究員として招かれ研究を進めた。

(4) 超伝導研究

阪東と梶村が 1983 年に行った有機超伝導体のサンドイッチ接合によるトンネル効果の実験では明快な結果が出なかった(4.参照). 阪東らは有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$ の単結晶について念願の STM/STS 測定により, 超伝導エネルギーギャップと準粒子状態密度関数を測定し, 超伝導の BCS 理論で説明できることを示した.

標準計測部量子計測研究室の柏谷 聡らは高温超伝導体 YBa $_2$ Cu $_3$ O $_{7.8}$ (YBCO) の STM/STS において, 結晶方位に依存してトンネル伝導度 (dJ/dV) がゼロバイアス ($V=0$) で極大をもつ現象を発見した. 従来の BCS 型超伝導体ではゼロバイアスで dJ/dV は極小になる. この研究は以後長年にわたって実験的にも理論的にも詳細に追究された. 従来超伝導の s 波対称性と異なる銅酸化物高温超伝導体に特有の異方的な d 波対称性の超伝導の問題として注目を浴び, 世界中の多くの高温超伝導研究者が参入する分野の始まりになった.

新日本製鉄(株)第一技研の田中将元らは Bi $_2$ Sr $_2$ CaCu $_2$ O $_8$ において BiO 面が非金属的性質をもち CuO $_2$ 面の O $2p$ 軌道がフェルミ液体状態を作ることを STS, 光電子分光法, 逆光電子分光法により示し, 他の銅酸化物超伝導体にも敷衍できることを実験的に解明した.

(5) 金属表面研究

表面科学が専門の清水, 一村, 村上らのグループは金属表面・界面の研究を目的とした装置を試作し, 金属表面に吸着している分子の実時間観察や微視的な表面制御によって分子スケールの素子の作製と評価を目指した.

これらの 5 つのチームは分かれて別々に活動したわけではない. メンバーは 50 人以上に増えたが依然として定期的な電子トンネル顕微鏡コロキウムに集まって検討を続けた(表 IX). 異分野でしかも文化の違う研究者, 技術者が集まり, 複数の要素技術と広い応用分野をもつ STM さらに SPM 装置開発に向けて一心に議論したことは, メンバー全員にとって貴重な経験になった. 1987 年以降新たに加わった所内と企業のメンバーの創意工夫が加わり, 製作技術とノウハウが蓄積されていった.

セイコー電子が 1988 年国産初の STM 商品機(図 36)を, 1990 年には AFM を, 小坂研は 1988 年に STM 方式の超粗さ測定器(図 37)を市場に出した. (株)東芝総合研究所超 LSI 研究所, (株)神戸製鋼所電子技術センター, 新日本製鉄(株)第一技研は自社の研究開発に資する特有の STM を試作した. 共同研究は多くの特許と研究成果を生んだ(資料 A, B 参照).

チームの活動と日本の学界の研究水準が国際的にも認められるように

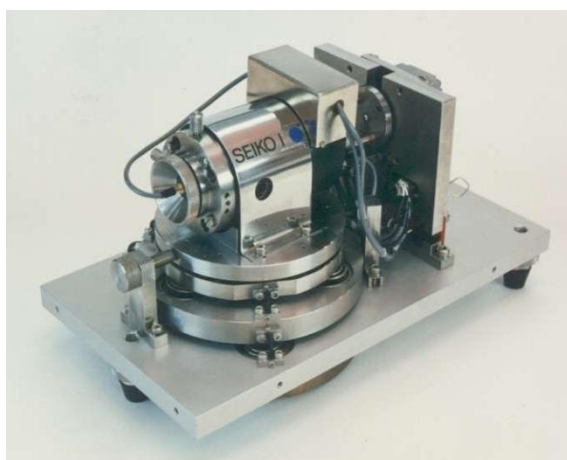


図 36 国産初の STM 商品
(セイコー電子 1988 年) .

表 IX 第 28 回電子トンネル顕微鏡コロキウム (研究討論会).

2/4

走査型トンネル顕微鏡
第 4 回 研究 討 論 会 案 内

日 時 昭和 62 年 10 月 14 日 (水) 9:30-17:30

場 所 C-713 中会議室 1/4

発表題目 1	STM 用探針技術の研究	9:30-10:00
発表者	村上 寛, ^H 小野雅敏, ^G 岡野 真, ^I 梶村皓二, ^A 紫野雅次, ^K 小川健一, ^K 小林好行, ^L 山崎修一, ^O 植森龍治, ^O 酒井 明	
概要	現在STM に用いる探針は主にPtやW を電解研磨, 機械研磨により製作している。探針の良否はグラファイトの原子像観察, SEM 等による表面状態, 先端形状の観察から行い, 探針の汚れ, 形状が重要な要素を持つことが明らかになった。ここでは探針製作技術の現状と問題点および今後の方針について述べる。	
発表題目 2	ガラスプローブによる表面原子像の観察	10:00-10:30
発表者	岡野 真, ^I 村上 寛, ^H 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	ガラスを破断して得られる尖鋭な先端を利用したガラスプローブを考案し, STM 用のプローブとして用いる可能性を検討している。本報告では, このプローブを用いてグラファイト(HOPG)の表面原子像を観測した結果について述べる。	

- A 基礎部低温物理研究室
B 基礎部部品基礎研究室
C 材料部高温電子材料研究室
D 電子デバイス部長
E 電子デバイス部固体デバイス研究室
F 電子デバイス部ビーム応用研究室
G 極限技術部長
H 極限技術部宇宙環境技術研究室
I 極限技術部高エネルギー研究室
J 極限技術部超微細プロセス技術研究室
K セイコー電子工業

- L 小坂研究所
M 東芝総研
N 神戸製鋼所
O 新日鐵第一技研
P トーレリサーチセンター

企画室長	研究部長	主 宰
		

(本件問合せ先: 岡山重夫 ☎5103)

3/4

発表題目 6	グラッシーカーボンの STM 観察	13:30-14:00
発表者	鈴木紀生, ^N 水口 修, ^N 河島貞夫, ^N 紫野雅次, ^K 徳本洋志, ^A 阪東 寛, ^A 岡野 真, ^I 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	フロン樹脂から作成したグラッシーカーボン表面の STM 観察を行なった。トンネルバイアス電圧による変化, 熱処理温度の違いによる粒子径の差を示す像等が得られているので, これらの結果を総合的な観点から報告する。	
発表題目 7	STM による有機物質測定 (1)	14:00-14:30
発表者	紫野雅次, ^K 水谷 亘, ^J 斎藤和裕, ^B 池上敦一, ^B 坂井文樹, ^K 杉 道夫, ^B 梶村皓二, ^A 小野雅敏 ^G	
概要	高次に配向した単分子膜の集合体である LB 膜は, 有機物質測定の基礎データを示してくれる重要なサンプルである。我々はアラキン酸カドミウム LB 膜の STM 電流イメージ像の測定に成功したので報告する。	
発表題目 8	UHV-STM による Si 劈開面の観察	14:30-15:00
発表者	杉原和佳, ^H 酒井 明, ^H 赤間善昭, ^H 堀池清浩, ^H 徳本洋志, ^A 阪東 寛, ^A 脇山 茂, ^K 岡野 真, ^I 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	Si 清浄表面の原子構造を観測するための試料劈開型 UHV-STM 装置を開発している。今回は特にユニットの振動特性を重視したもので, グラファイトでは良好な原子像を得ている。現在 Si(111) 面の観察を行なっているので併せて報告する。	
発表題目 9	UHV-STM による Si の電子衝撃加熱面の観測	15:00-15:30
発表者	徳本洋志, ^A 酒井 明, ^H 村上 寛, ^H 赤間善昭, ^H 三木一司, ^E 坂本邦博, ^E 阪東 寛, ^A 脇山 茂, ^K 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	Si(111) 清浄表面を加熱 (サーマルフラッシング) したとき 7×7 構造が現れることは良く知られている。今回は UHV-STM 装置に電子衝撃系を付加し, STM 観測を行ったので報告する。また直接通電による清浄表面の観測も行なっているの併せて報告する。	

発表題目 3	グラファイト STM 像の微細歪みの検討	10:30-11:00
発表者	水谷 亘, ^J 阪東 寛, ^A 徳本洋志, ^A 紫野雅次, ^K 田中裕元, ^O 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	グラファイトの STM 像を等高線表示すると, 原子の形状に対応する同心円だけでなく, 非対称同心円など異常な歪みが現われることがある。Batra ら ¹⁾ の解析に見られるように, グラファイトの相間のズレに起因する偏平円化の他に探針先端形状 (ダブルティップ, トリアルティップなど) の影響があることを実験的に確認した。1) I. P. Batra <i>et al.</i> , Proc. STN'86, 126 (1986)。	
発表題目 4	STM 探針のトンネル領域への自動設定	11:00-11:30
発表者	小林好行, ^L 志村昌行, ^L 中川春樹, ^L 渡辺眞二, ^L 宮本結三, ^L 松本文雄, ^L 渡辺和俊, ^K 水谷 亘, ^J 岡野 真, ^I 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	STM では探針を試料に衝突せずに約 1 nm のトンネル領域に自動設定することが不可欠である。我々のユニットの探針の近接機構は, 積層型圧電素子と移動とクランプに用いる方法で, ステップ移動量は可変機構にした。連続移動で自動停止したときのオーバーランは微動アクチュエータの 2 軸で吸収でき, 探針の自動設定が可能になった。	
発表題目 5	大面積・三次元測定 STM 技術	11:30-12:00
発表者	岡山重夫, ^F 古室昌徳, ^F 清水啓三, ^E 阿刀田伸史, ^F 廣島 洋, ^F 徳本洋志, ^A 岡野 真, ^I 鷗島裕夫, ^D 松本文雄, ^L 宮本結三, ^L 渡辺眞二, ^L 小林好行, ^L 中川春樹, ^L 志村昌行, ^L 坂井文樹, ^K 渡辺和俊, ^K 宮田千加良, ^K 本間昭彦, ^K 脇山 茂, ^K 紫野雅次, ^K 石原健一郎 ^K	
概要	マイクロエレクトロニクス分野における微細形状の三次元計測の特徴は高分解能トポグラフを非破壊で計測することにある。これを目的として開発を進めている試料移動範囲 4 mm を有する高精度試料移動機構と, 印加電圧 74 V に対し 10 μm □ の走査フィールドを有する XYZ の積層 PZT アクチュエータを組み合わせた大面積・三次元測定 STM の試作について報告し, 表面の凹凸が小さく走査範囲の小さい原子像観察用 STM にない大面積測定 STM の要素技術について明らかにする。	

4/4

発表題目10	STM による 4Hb-Ta ₂ の電荷密度波の観察	16:00-16:30
発表者	田中裕元, ^O 水谷 亘, ^J 中野恒夫, ^O 清水 肇, ^J 小野雅敏, ^G 梶村皓二 ^A	
概要	STM の物性研究への応用として, 原子間距離の数倍の長周期構造を有する電荷密度波 (CDW) の観察を行った。測定に用いた試料は 4Hb-Ta ₂ である。4Hb-Ta ₂ は 315 K (T _c) で incommensurate-commensurate 相転移を起こす。実験は 300 K および 325 K で行った。300 K において $\lambda_{CDW} = \sqrt{13}a$ と非常に良い一致を示す CDW 像が観察でき, ① S 原子, ② S 原子 + CDW's, ③ CDW's の三種の像が得られることが明らかになった。T _c 以上ではゆらぎが大きいため, 原子像は観測されるが, CDW 像は観測されなかった。	
発表題目11	STS の計測とデータ処理	16:30-17:00
発表者	森田直成, ^P 阪東 寛, ^A 徳本洋志, ^A 水谷 亘, ^J 渡辺和俊, ^K 本間昭彦, ^K 石原健一郎, ^K 梶村皓二 ^A	
概要	STM を用いれば, 分子, 原子クラスター等などの微視的構成単位中のトンネルスペクトルを測定すること (STS) が可能であり, 強力な表面分析の手段となり得る。そこで STS/STM 同時測定系の現行例と得られる情報等について報告する。主な内容は①データ取り込みのタイミングとデータの流れ, ②データの補正, 統計処理, 及び表示, ③測定系の安定性, 限界などの問題点と今後の課題である。	
発表題目12	STS/STM による層状物質の表面電子状態の測定	17:00-17:30
発表者	阪東 寛, ^A 森田直成, ^P 徳本洋志, ^A 水谷 亘, ^J 紫野雅次, ^K 渡辺和俊, ^K 脇山 茂, ^K 宮田千加良, ^K 坂井文樹, ^K 遠藤和弘, ^C 梶村皓二 ^A	
概要	グラファイト及び NbSe ₂ の STS/STM 同時測定を大気中で行った。STS ではバイアス電圧を掃引する範囲内での試料表面の各微分伝導度像が特定のエネルギーをもつ電子の空間的分布 (局所状態密度関数) を表す。STM との同時測定によりこの局所状態密度関数と STM に現れる原子サイトとの相関関係が分かる。実験の結果グラファイトの β サイトの局在性及び NbSe ₂ 表面の荷電分布を見出した。	

以上 1987 年秋第 48 回応用物理学会発表予定

なった。1989 年，スペイン，米国，英国につぐ第4回目の STM 国際会議のつくば近辺開催の要請があり，施設などの点で可能だった茨城県大洗町で開催した（表 I 参照）。

1992 年には融合研が設立され，以後 10 年にわたる産学官連携のアトムテクノロジープロジェクトが発足した。新素材，化学，エレクトロニクス，バイオテクノロジーなどの分野の共通基盤技術として原子を一つひとつ精密に観察し，操作し，超微細構造を作る技術を開発することを目指した。STM で培ってきた研究開発の内容や体制が国家プロジェクトにつながった。徳本のグループと水谷はアトムテクノロジープロジェクトを担うため電総研から融合研に移籍した。



図 37 STM 方式による超粗さ測定器（小坂研 1988 年）。

12. 産学の研究開発体制への協力

1986 年社団法人新機能素子研究開発協会に，徳本を主査とする「分析評価委員会 STM 分科会」が設けられた。産業界の技術開発責任者 20 名からなる委員会において，ナノテクノロジー研究の展望ならびに産業界からの要望を含めた開発体制について，小野も協力して検討を重ね，詳細な報告書をまとめた[昭和 61 年度分析評価技術委員会報告書(1987)]。この活動は融合研でのアトムテクノロジープロジェクト発足の下地になったと考えられる。

原子像観察直後の 1986 年 9 月，国内の STM 関連研究者の有機的連携を目指した情報交換と検討の場として，財団法人新世代研究所〔向坊 隆理事長（第 21 代東大総長），御茶ノ水〕に小野を委員長とする「走査型トンネル顕微鏡研究委員会」が設けられた。学界をリードする大学，国研の STM 関連研究者の大半が参加して数年にわたって討論を重ねた。わが国の STM 関連研究の総合的推進，ナノサイエンス・ナノテクノロジーの研究開発を牽引した。新世代研究所では世代を刷新しながら今日もなお時代に沿ったナノサイエンス研究会活動を続けている。

13. おわりに

基礎研究シフトが奨励された時代，また電子デバイスの MOSFET のゲート長がサブミクロンに入る時代に，ナノスケールの科学技術の基礎になる領域を開こうとする電総研の異分野の研究者たちが自主的にチームを作り，いくつもの技術要素を試作しながら，企業メンバーと協力して STM 装置を作り上げるまでの活動を記した。STM 装置やその要素技術は自主開発ではあったが，オリジナリティを追究するものではなかった。むしろ異なる分野の個々の研究に適した装置を作り，それを手段として新たな研究領域を開いていくこ

とを目指した。実際、本稿に記した時期のあとも各分野で世界をリードする研究成果がいくつも出た。

このプロジェクトでは、経験の差はあったが、だれもがオピニオンリーダーであった。各人独自の提案をする一方、他のメンバーの意見に耳を傾け、討論し、互いの協力を惜しまなかった。原子を見る手段を早く手にしなければ、その先にある目標に到達できないという切迫感があったからである。やがてナノテクノロジーの大きな波が起こると予想する者はいなかったが、世界の科学技術の流れは敏感に感じていた。

本稿では、日米欧の STM 開発についてほとんど触れなかった。欧米では IBM チューリッヒ研の直接的支援を受けたいくつもの研究機関が 1985 年ころから STM を立ち上げ始めた。またそういった研究機関で研究に従事したポストドク達が他の研究機関に移って STM 研究拠点を広げていった。日本には当時このような柔軟で流動性のある制度も習慣もなく、技術の波及は相対的に遅かったが、産業界の研究開発投資意欲は高く、12. に述べた活動などとあいまって、1986 年ころからは大学の表面科学系、企業の中央研究所、顕微鏡メーカー、真空機器メーカーなどが開発を始めた。1990 年代に入って研究開発および産業の AFM の需要とともに海外製品も含め各種の製品が市場に出た。バブル終焉後も新しい技術の開発は続けられ、21 世紀のナノテクノロジーの展開につながった。

随所に触れてはきたが、このプロジェクトの社会的な影響についてまとめると、(1) 研究分野の潮流になりつつあった微視的構造観察に新たな手段を提示した、(2) SEM に比べ表面の高さ方向の高倍率観察ができるため三次元的形状情報を得たのみならず物性情報も得た、(3) 産業分野、特に半導体や情報記録媒体では、最小加工寸法がミクロンからサブミクロン（ナノメートル台）へと移りつつあり、そのために求められるナノメートルの管理対象寸法に対応できた、(4) 結果的に産業界における品質管理など広範な分野への利用が急拡大し、あとに続くナノテクノロジーの萌芽期を支えた。

STM を含む SPM の展開は、先にも触れたが、本稿で記した時期のあとにやってくる。C₆₀ フラーレン（1985 年）、カーボンナノチューブ（1991 年）、グラフェン（2004 年）の素材の発見によって加速されたナノテクノロジーは、STM 発明後 30 年にわたってあらゆる科学技術領域と産業分野に浸透し続けている。進化し続けるナノテクノロジーの道をたどり分析し位置づけるために、科学技術史研究者の力をお借りしたいと願うものである。

謝辞

闊達で緊張感のあるグループで互いの信頼のもとに STM の研究開発をともに進めることのできたチームのメンバー各位に感謝する。30 年前の研究開発のひとつまを書き記すにあたって、小野雅敏氏、徳本洋志氏、岡山重夫氏、岡野 眞氏、水谷 亘氏、坂井文樹氏、井上 明氏、渡辺和俊氏、脇山 茂氏、繁野雅次氏、宮本紘三氏、小林好行氏の支援を得た。チームで活躍した阪東 寛氏は 2013 年に他界した。氏が丹念に整理し遺した開発当時の資料は家族によって保管されており、本稿の力強いよりどころになった。

参考文献

- 坂井文樹 (1995) 精密工学会誌 **61**, 53.
- 昭和 61 年度分析評価技術委員会報告書(1987), 社団法人新機能素子研究開発協会, FED-54, pp. 127~205.
- 水谷 亘, 阪東 寛, 徳本洋志, 岡野 眞, 岡山重夫, 梶村皓二, 小野雅敏, 脇山 茂, 坂井文樹(1987), 精密工学会誌 **53**, 695.
- 山口まり(2008), 東京大学広域科学専攻・相関基礎科学系修士学位論文(2008).
- Bando, H., Kajimura, K., Anzai, H., Ishiguro, T., and Saito, G. (1985) Mol. Cryst. Liq. Cryst. **119**, 41.
- Binnig, G. and Rohrer, H. (1980), U.S. Patent 4343993, Aug. 10, 1982 (Filed: Sep. 12, 1980).
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel E. (1982a), Physica **109 & 110B**, 2075.
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel E. (1982b), Phys. Rev. Lett. **49**, 57.
- Binnig, G. and Rohrer, H. (1983a) Surface Sci. **126**, 236.
- Binnig, G., H. Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel E. (1983b) Phys. Rev. Lett. **50**, 120.
- Binnig, G., Quate, C.F., and Gerber, Ch. (1986) Phys. Rev. Lett. **56**, 930.
- Binnig, G. and Rohrer, H. (1987) Rev. Mod. Phys. **59**, 615.
- Demuth, J.E., Hamers, R.J., Tromp, R.M., and Welland M.E. (1986) J. Vac. Sci. Technol. A **4**, 1320.
- Mody, C.C.M (2005) in book of Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspectives, ed. by D. Kaiser, p, 185, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Okano M., Kajimura K., Wakiyama S., Sakai F., Mizutani W., and Ono M. (1987), J. Vac. Sci. Technol. A **5**, 3313.
- Okayama, S., Bando, H., Tokumoto, H., and Kajimura, K. (1985) Jpn. J. Appl. Phys. **24**, Suppl. **24-3**, 152.
- Quate, C. F. (1986), Physics Today, **39**, 26.
- Smith D.P.E. and Elrod, S.A. (1985) Rev. Sci. Instrum. **56**, 1970.
- Smith, D.P.E. and Binnig, G. (1986) Rev. Sci. Instrum. **57**, 2630.
- Taniguchi, N. (1974), Proc. Intl. Conf. Prod. London, Part II British Society of Precision Engineering.
- Tokumoto, H., Bando, H., Mizutani, W., Okano, M., Ono, M., Murakami, H., Okayama, S., Ono, Y., Watanabe, K., Wakiyama, S., Sakai, F., Endo, K., and Kajimura, K. (1986) Jpn. J. Appl. Phys. **25-2**, L621.
- Tokumoto, H., Okayama, S., Bando, H., Murakami, H., Sakai, F., Wakiyama, S., Ono, M., and Kajimura, K. (1986) Proc. of the 6th Sensor Symposium, p.147.
- Yamaguchi, M. (2008), 27th Symposium of the Scientific Instrument Commission of the International Union for the History and Philosophy of Science, Lisbon, Portugal, 16-21 Sep. 2008.

資料（特許，論文，協力企業，共同研究）

本稿は研究成果の詳細を記すことは目的ではないが，プロジェクト開始から数年の成果を追跡できるように，A. 特許出願関連，B. 原著論文，C. 開発に協力した企業，D. 共同研究をあげる．B.の原著論文については(1) 要素技術，(2) 層状物質，(3) 半導体表面，(4) マイクロデバイス評価・加工，(5) 有機薄膜，(6) 極低温 STM/STS に分けて出版順にあげた．この資料リストの研究開発に関与したメンバーの当時の所属を表 X に掲げる．

STM 開発途上で得た重要な技術的ノウハウや，論文には至らなかったさまざまな挑戦については成果とともに各種学会の学術講演会（口頭発表），電子技術総合研究所彙報，電総研ニュースなどで広く開示した．詳しいリストは 2001 年まで毎年発行された「電子技術総合研究所年報」に記載されており，産総研図書館に保管されている．

表 X 資料中の研究開発者所属一覧(1985 年～1990 年).

あ	赤間善昭	(株)東芝総合研究所	す	杉野谷 充	セイコー電子工業(株)
	安西弘行	電総研材料部		杉原和佳	(株)東芝総合研究所
	安藤和徳	セイコー電子工業(株)		鈴木紀佳	(株)神戸製鋼所技術開発本部 電子技術センター
い	石原健一郎	セイコー電子工業(株)	た	高橋 隆	東北大学物理
	犬飼潤治	東京大学理学部		田中将元	新日本製鉄(株)第一技研
	井上 明	セイコー電子工業(株)		谷島 聡	東京大学工業化学
え	遠藤和弘	電総研材料部	と	徳本洋志	電総研基礎部
お	大野公輔	東京大学工業化学		戸嶋直樹	東京大学工業化学
	大海 学	セイコー電子工業(株)	な	中川春樹	(株)小坂研究所
	大村研二	セイコー電子工業(株)		中静恒夫	新日本製鉄(株)第一技研
	岡山重夫	電総研電子デバイス部	は	阪東 寛	電総研基礎部
	岡野 眞	電総研極限技術部		本間昭彦	セイコー電子工業(株)
	小野雅敏	電総研極限技術部	ふ	藤浪真紀	新日本製鉄(株)第一技研
	小野祐一	電総研電子計算機部	ま	松本文雄	(株)小坂研究所
か	柏谷 聡	電総研標準計測部	み	三木一司	電総研電子デバイス部
	梶村皓二	電総研基礎部		水口 修	(株)神戸製鋼所技術開発本部 電子技術センター
	河島貞夫	(株)神戸製鋼所技術開発本部 電子技術センター		水谷 亘	電総研極限技術部
き	岸 次男	(株)東芝総合研究所		宮田千加良	セイコー電子工業(株)
	木下信盛	電総研基礎部		宮本紘三	(株)小坂研究所
こ	小林好行	(株)小坂研究所	む	村上 寛	電総研極限技術部
	古室昌徳	電総研電子デバイス部	や	山崎修一	新日本製鉄(株)第一技研
	小柳正男	電総研基礎計測部	も	森田直威	(株)東レリサーチセンター
さ	斉藤和裕	電総研基礎部		森田行則	電総研電子基礎部
	酒井 明	(株)東芝総合研究所	わ	若月 隆	セイコー電子工業(株)
	坂井文樹	セイコー電子工業(株)		脇山 茂	セイコー電子工業(株)
	榊原陽一	電総研材料部		渡辺和俊	セイコー電子工業(株)
し	繁野雅次	セイコー電子工業(株)		渡辺眞二	(株)小坂研究所
	志村昌行	(株)小坂研究所			

複数回引用する場合を記し，単数回の場合は文中に示す．

A. 特許・実用新案（1985 年～1991 年）

A.1 国内出願

1985 年

60-60451「微動装置」徳本洋志, 阪東 寛, 岡山重夫, 梶村皓二 (1985.3.25). 登録番号 1620572

60-226372「微動装置」徳本洋志, 阪東 寛, 岡山重夫, 梶村皓二 (1985.10.11). 登録番号
1567405

1986 年

61-164145「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 阪東寛, 脇山 茂, 坂井文
樹(1986.7.11). 登録番号 1888447

61-164146「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 阪東 寛, 坂井文樹, 脇山
茂(1986.7.11). 登録番号 1888448

61-200824「微動装置」岡野眞, 水谷 亘, 梶村皓二, 小野雅敏(1986.8.27). 登録番号 1725172

61-200825「プローブ」岡野眞, 水谷 亘 (1986.8.27).

61-289154「微小位置決め装置」小野雅敏, 村上 寛, 坂井文樹, 脇山 茂(1986.12.4).

61-289155「微小位置決め装置」小野雅敏, 村上 寛, 坂井文樹, 脇山 茂(1986.12.4).

61-289156「圧電素子体微動機構」徳本洋志, 阪東 寛, 坂井文樹, 脇山 茂(1986.12.4). 登
録番号 1658349

61-289157「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 阪東 寛, 坂井文樹, 若月 隆
(1986.12.4). 登録番号 1959241

61-303446「磁気浮上装置」水谷 亘(1986.12.19). 登録番号 2021938

1987 年

62-017561「振動緩衝装置」岡野 眞, 村上 寛, 坂井文樹, 脇山 茂, 宮田千加良(1987.1.28).
登録番号 1945615

62-027820「微小位置決め機構」徳本洋志, 阪東 寛, 坂井文樹, 宮田千加良, 脇山 茂(1987.2.9).

62-071013「圧電素子電荷制御方式駆動回路」水谷 亘, 本間昭彦, 渡辺和俊(1987.3.25).

62-071014「圧電素子微動機構」徳本洋志, 阪東 寛, 梶村皓二, 坂井文樹, 宮田千加良,
脇山 茂(1987.3.25). 登録番号 2134830

62-071015「走査領域移動装置」水谷 亘, 本間昭彦, 渡辺和俊(1987.3.25). 登録番号 1751960

62-071016「微小位置決め機構」阪東 寛, 徳本洋志, 坂井文樹, 宮田千加良, 脇山 茂(1987.3.25).
登録番号 1903618

62-071086「走査型トンネル顕微鏡」小野雅敏, 杉原和佳, 赤間善昭(1987.3.25).

62-071087「走査型トンネル顕微鏡」小野雅敏, 杉原和佳 (1987.3.25). 登録番号 1916557

62-071088「走査型トンネル顕微鏡」小野雅敏, 杉原和佳, 赤間義昭, 岸 次男(1987.3.25). 登
録番号 1891063

62-071089「走査型トンネル顕微鏡」小野雅敏, 杉原和佳, 赤間義昭, 岸 次男(1987.3.25). 登
録番号 1918041

62-071090「走査型トンネル顕微鏡」小野雅敏, 杉原和佳 (1987.3.25). 登録番号 1914624

62-072376「回転可能な試料台」水谷 亘, 小野雅敏, 梶村皓二, 宮田千加良, 坂井文樹, 脇山 茂(1987.3.26). 登録番号 1721087

62-071387「X-Y-Z 移動機構」徳本洋志, 阪東 寛, 鈴木紀佳, 河島貞夫, 水口 修(1987.3.27). 登録番号 1720313

62-071388「2 次元インチワームとその原点位置合わせ装置」徳本洋志, 阪東 寛, 鈴木紀佳, 河島貞夫, 水口 修(1987.3.27). 登録番号 1787033

62-071389「移動機構」徳本洋志, 阪東 寛, 鈴木紀佳, 河島貞夫, 水口修(1987.3.27). 登録番号 1748209

62-071390「1 次元移動機構」徳本洋志, 阪東 寛, 鈴木紀佳, 河島貞夫, 水口 修(1987.3.27). 登録番号 1714344

62-071391「走査型トンネル顕微鏡の積層除振装置」岡野 眞, 鈴木紀佳, 河島貞夫, 水口 修 (1987.3.27).

62-099115「キュービック状微小位置決め機構」徳本洋志, 阪東 寛, 脇山 茂, 坂井文樹, 宮田千加良(1987.4.22). 登録番号 1817627

62-109981「ダイヤモンド探針」岡野 眞, 坂井文樹, 脇山 茂, 船本宏幸*, 伊藤浩信*(1987.5.6). *セイコー電子, 登録番号 2565336

62-127414「微小位置決め機構」阪東 寛, 徳本洋志, 水谷 亘, 脇山 茂, 坂井文樹, 繁野雅次(1987.5.25). 登録番号 1736900

62-133884「STM 用微動素子着脱機構」梶村皓二, 坂井文樹, 宮田千加良, 脇山 茂(1987.5.25).

62-234040「トンネル電流検出光音響分光装置」徳本洋志, 阪東 寛, 坂井文樹, 宮田千加良, 脇山 茂(1987.9.18). 登録番号 1805720

62-255006「走査型トンネル顕微鏡」徳本洋志, 岡野 眞, 杉原和佳, 赤間善昭(1987.10.9). 登録番号 1940573

62-260612「走査型トンネル顕微鏡の測定方法」岡山重夫, 徳本洋志, 阪東 寛, 水谷亘, 志村昌行, 中川春樹, 繁野雅次, 渡辺和俊(1987.10.15). 登録番号 2566794

1988 年

63-007970「微小位置決め方法」阪東 寛, 徳本洋志, 脇山 茂, 宮田千加良, 坂井文樹(1988.1.18). 登録番号 2008935

63-061282「探針位置制御方法」阪東 寛, 岡山重夫, 梶村皓二, 渡辺和俊(1988.3.15). 登録番号 1915328

63-061283「面内走査範囲移動方法」阪東 寛, 水谷 亘, 岡山重夫, 石原健一郎(1988.3.15).

63-153485「走査型トンネル顕微鏡」徳本洋志, 杉原和佳, 赤間義昭, 酒井 明(1988.6.23). 登録番号 2595313

63-153486「金属材料の付着装置」徳本洋志, 岡山重夫, 古室昌徳* (1988.6.23). *電総研電子デバイス部, 登録番号 2645085

63-153487「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛, 酒井 明(1988.6.23). 登録番号 2760508
 63-153488「走査型トンネル顕微鏡用探針及びその製造方法」村上 寛, 酒井 明(1988.6.23).
 登録番号 2558814
 63-195811「圧電素子微小位置決め機構」阪東 寛, 徳本洋志, 脇山 茂, 大村研二(1988.8.5).
 登録番号 2057022
 63-232930「微動機構」岡山重夫, 徳本洋志, 中川春樹, 大村研二, 脇山 茂, 渡辺和俊(1988.9.16).
 登録番号 2043251
 63-241891「真空用潤滑膜」徳本洋志, 脇山 茂, 大村研二, 安藤和徳(1988.9.27). 登録番号
 1658353
 63-241892「白金探針の加工方法」村上 寛, 鈴木輝夫*, 小川健一* (1988.9.27). *セイコー
 電子, 登録番号 1858966
 63-323636「圧電素子を用いた微動装置の駆動方法」岡山重夫, 本間昭彦, 石原健一郎, 中
 川春樹, 志村昌行 (1988.12.23).

1990 年

02-119270「振動緩衝装置」岡野 眞, 坂井文樹(1990.5.8).
 02-146959「電流電圧変換回路」水谷亘, 渡辺和俊(1990.6.5).

1991 年

03-168849「微小変位検出器」三木一司, 徳本洋志(1991.6.13). 登録番号 2500331

A.2 外国出願

1987 年

EPC 英 87306090.9「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 脇山 茂, 坂井文
 樹, 若月 隆(1987.7.9).
 EPC 西独 87306090.9「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 脇山 茂, 坂井
 文樹, 若月 隆(1987.7.9).
 EPC 仏 87306090.9「微小位置決め装置」小野雅敏, 水谷 亘, 村上 寛, 脇山 茂, 坂井文
 樹, 若月 隆(1987.7.9).
 米 071994「微小位置決め装置, Relative Displacement Control Apparatus」小野雅敏, 水谷 亘,
 村上 寛, 脇山 茂, 坂井文樹, 若月 隆(1987.7.9).特許番号 4,866,271 (1989.9.12)

1988 年

米 257468「走査型トンネル顕微鏡の測定方法」岡山重夫, 徳本洋志, 阪東 寛, 水谷 亘,
 志村昌行, 中川春樹, 繁野雅次, 渡辺和俊(1988.10.3). 特許番号 4,902,892 (1990.2.20).
 米 246359「トンネル電流検出光音響分光装置」徳本洋志, 阪東 寛, 坂井文樹, 宮田千加
 良, 脇山 茂(1988.9.18). 特許番号 4,921,436 (1990.5.1).

1989 年

米 370819「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛, 酒井 明(1989.6.23).特許番号 4939363(1990.7.3).

米 370819「走査型トンネル顕微鏡」阪東寛，酒井 明(1989.6.23).
蘭 89306423.8「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛，酒井 明(1989.6.23).
英 89306423.8「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛，酒井 明(1989.6.23).
独 89306423.8「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛，酒井 明(1989.6.23).
仏 89306423.8「走査型トンネル顕微鏡」阪東 寛，酒井 明(1989.6.23).

A.3 実用新案出願

1987 年

62-009885「探針の三次元駆動装置」水谷 亘，松本文雄，小林好行，渡辺眞二(1987.1.28).
実登 2031318
62-082780「精密位置決め機構」梶村皓二，小野雅敏，宮田千加良，坂井文樹，脇山 茂
(1987.5.29). 実登 2110988
62-142959「走査型トンネル顕微鏡用探針の微動装置」水谷 亘，岡野 眞，梶村皓二，小林
好行，志村昌行，中川春樹，渡辺眞二，宮本紘三，松本文雄(1987.9.21).
62-142960「走査型トンネル顕微鏡に於ける探針の三次元駆動装置」水谷亘，小林好行，中
川春樹(1987.9.21).
62-142961「光学式顕微鏡付走査型トンネル顕微鏡」水谷 亘，岡野 眞，梶村皓二，小野雅
敏，小林好行，志村昌行，中川春樹，渡辺眞二，宮本紘三，松本文雄，渡辺和俊，坂井
文樹(1987.9.21).
62-152538「圧電素子微小位置決め機構」阪東寛，徳本洋志，坂井文樹，宮田千加良，脇山
茂(1987.10.5). 実登 2129303
62-152539「圧電素子微小位置決め機構」阪東 寛，徳本洋志，坂井文樹，宮田千加良，脇
山 茂(1987.10.5). 実登 2145848
62-152540「圧電素子微小位置決め機構」阪東 寛，徳本洋志，坂井文樹，宮田千加良，脇
山 茂(1987.10.5). 実登 2139283

1988 年

63-004475「精密位置決め機構」阪東 寛，水谷 亘，宮田千加良，脇山 茂，坂井文樹(1988.1.18).
実登 2064116
63-012441「微動機構」岡山重夫，阪東 寛，梶村皓二，宮田千加良，脇山 茂，坂井文樹
(1988.2.1).
63-034292「除振装置」岡野 眞，渡辺眞二，宮田千加良，脇山 茂 (1988.3.15).
63-055859「微動装置」岡山重夫，徳本洋志，井上 明，小林好行，渡辺眞二，松本文雄
(1988.4.27).
63-103702「微小位置決め機構」徳本洋志，脇山 茂，宮田千加良(1988.8.5).
63-129764「真空内搬送機構」坂本統徳，川浪仁志，志村昌行，安藤和徳，大村研二，脇山
茂(1988.10.3). 実登 2102175

63-129765「微小位置決め機構」岡山重夫, 徳本洋志, 小林好行, 脇山 茂, 大村研二, 安藤和徳(1988.10.3). 実登 2066913

63-166222「微動機構」阪東 寛, 徳本洋志, 鹿倉良晃,* 脇山 茂(1988.12.22). *セイコー電子

63-170944「精密位置決め台」岡山重夫, 徳本洋志, 岡野 眞, 大村研二, 井上 明, 渡辺眞二, 志村昌行, 中川春樹, 小林好行, 宮本紘三, 松本文雄(1988.12.29).

1989 年

平 1-11797「走査型トンネル顕微鏡」岡山重夫, 徳本洋志, 中川春樹, 石原健一郎(1989.2.3). 実登 2087846

1-21002「シールド付微動機構」阪東寛, 水谷亘, 岡山重夫, 渡辺眞二, 脇山 茂, 宮田千加良(1989.2.23). 実登 2058218

1-34991「走査型トンネルスペクトロスコープ装置」岡山重夫, 徳本洋志, 中川春樹, 本間昭彦(1889.3.28).

1-111778「試料加工機構」徳本洋志, 岡山重夫, 三木一司, 小林好行, 脇山 茂(1989.9.25).

1-111779「試料加工機構」徳本洋志, 岡山重夫, 三木一司, 小林好行, 脇山 茂(1989.9.25).

1-111780「試料ホルダ」徳本洋志, 岡山重夫, 三木一司, 小林好行, 脇山 茂(1989.9.25).

B. 原著論文 (1987 年～1991 年)

B.1 要素技術

S. Okayama, H. Bando, H. Tokumoto, and K. Kajimura, *Piezoelectric actuator for scanning tunneling microscopy*, Jpn. J. Appl. Phys. **24**, Suppl. 24-3, 152 (1985).

K. Kajimura, H. Bando, K. Endo, W. Mizutani, H. Murakami, M. Okano, S. Okayama, M. Ono, Y. Ono, H. Tokumoto, F. Sakai, K. Watanabe, and S. Wakiyama, *Construction of an STM and observation of 2H-NbSe₂ atomic images*, Surface Sci.**181**, 165 (1987.1).

H. Bando, W. Mizutani, K. Watanabe, S. Okayama, M. Okano, H. Tokumoto, and K. Kajimura, *Detection and control of nanometer displacement with the tunneling current*, Proc. of the 6th Sensor Symposium p.143 (1987.2)

H. Tokumoto, S. Okayama, H. Bando, H. Murakami, F. Sakai, S. Wakiyama, M. Ono, and K. Kajimura, *Micropositioners for scanning tunneling microscope*, Proc. of the 6th Sensor Symposium p.147 (1987.2).

水谷 亘, 阪東 寛, 徳本洋志, 岡野 眞, 岡山重夫, 梶村皓二, 小野雅敏「走査型トンネル顕微鏡の探針微動機構」精密工学会誌 **53**, 695 (1987.5).

水谷 亘, 阪東 寛, 小野祐一, 岡山重夫, 徳本洋志, 村上 寛, 岡野 眞, 遠藤和弘, 小野雅敏, 梶村皓二「STM による精密三次元表面計測」電気学会論文誌 C 107-7 (1987.7).

M. Okano, K. Kajimura, F. Sakai, S. Wakiyama, W. Mizutani, and M. Ono, *Vibration isolation for scanning tunneling microscopy*, J. Vac. Sci. & Technol. **A5**, 3313 (1987.12)

- 岡山重夫, 梶村皓二, 渡辺眞二, 本間昭彦「高分解能微動アクチュエータと制御—STMにおけるピエゾアクチュエーター—」精密工学会誌 **54**, 817 (1988.5).
- A. Inoue, F. Sakai, K. Watanabe, S. Wakiyama, K. Ishihara, A. Homma, C. Miyata, W. Mizutani, H. Murakami, H. Bando, H. Tokumoto, S. Okayama, and K. Kajimura, *Development of a scanning tunneling microscope for operation in air*, Proc. of Conf. on Precision Electromagnetic Measurements, 1988 (CPEM 88), 327 (1988.6).
- K. Sugihara, A. Sakai, Y. Akama, N. Shoda,* Y. Kato,* H. Tokumoto, and H. Murakami, *An ultrahigh vacuum tip transfer system for the scanning tunneling microscopy/field ion microscopy*, Rev. Sci. Instrum. **61**, 81 (1990.1). *榊東芝総合研究所
- Y. Akama, E. Nishimura,* A. Sakai, and H. Murakami, *New scanning tunneling microscopy tip for measuring surface topography*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 429 (1990.2). *榊東芝総合研究所

B.2 層状物質

- H. Tokumoto, H. Bando, W. Mizutani, M. Okano, M. Ono, H. Murakami, S. Okayama, Y. Ono, K. Watanabe, S. Wakiyama, F. Sakai, K. Endo, and K. Kajimura, *Observation of atomic image of 2H-NbSe₂ surface by scanning tunneling microscope*, Jpn. J. Appl. Phys. **25**, L621(1986.8).
- H. Bando, H. Tokumoto, W. Mizutani, K. Watanabe, M. Okano, M. Ono, H. Murakami, S. Okayama, Y. Ono, S. Wakiyama, F. Sakai, and K. Endo, *Effect of atomic force on the surface corrugation of 2H-NbSe₂ observed by scanning tunneling microscope*, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L41 (1987.2).
- W. Mizutani, H. Tokumoto, H. Bando, M. Shigeno, M. Tanaka, M. Ono, and K. Kajimura, *Asymmetric atomic images of STM resulting from probing tips*, Proc. 34th Intl. Field Emission Symp., J. Phys. (Paris) p.C6-73 (1987.11).
- H. Bando, N. Morita, H. Tokumoto, W. Mizutani, K. Watanabe, A. Honma, S. Wakiyama, M. Shigeno, K. Endo, and K. Kajimura, *Scanning tunneling spectroscopy study on graphite and 2H-NbSe₂*, J. Vac. Sci. & Technol. **A6-2**, 344 (1988.4).
- M. Tanaka, W. Mizutani, T. Nakashizu, N. Morita, S. Yamazaki, H. Bando, M. Ono, and K. Kajimura, *Study of 4Hb-TaS₂ and graphite intercalation compound by STM/STS*, J. Microscopy **152**, 183 (1988.10).
- M. Tanaka, W. Mizutani, T. Nakashizu, S. Yamazaki, H. Tokumoto, H. Bando, M. Ono and K. Kajimura, *Study of charge density waves in 4Hb-TaS₂ by STM/STS*, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, 473 (1989.3).

B.3 半導体表面

- H. Tokumoto, K. Miki, H. Murakami, N. Morita, H. Bando, A. Sakai, M. Ono, and K. Kajimura, *Imaging of Hydrogen-Induced Si(111)-Surface with the Scanning Tunneling Microscope*, J.

- Microscopy **152**, 743 (1988.12).
- K. Miki, H. Tokumoto, T. Sakamoto,* and K. Kajimura, *Scanning tunneling microscopy of anisotropic monatomic steps on a vicinal Si(001)-2×1 surface*, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1483 (1989.9); Errata, L2108 (1989.11). *電総研電子デバイス部
- H. Tokumoto, K. Miki, and K. Kajimura, *STM images of anisotropic atomic steps on a Si (111) 7×7 surface*, J. Cryst. Growth **99**, 1329 (1990.1).
- H. Tokumoto, K. Miki, H. Murakami, H. Bando, M. Ono, and K. Kajimura, *Real-time observation of oxygen and hydrogen adsorption on silicon surfaces by scanning tunneling microscopy*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 255 (1990.1).
- Y. Nakagawa,* A. Ishitani,* T. Takahagi,* H. Kuroda,** H. Tokumoto, M. Ono, K. Kajimura, *Scanning tunneling microscopy of silicon surfaces in air: observation of atomic images*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 262 (1990.1). *東レリサーチセンター, **新技術開発事業団
- H. Tokumoto, S. Wakiyama, K. Miki, and S. Okayama, *Scanning tunneling microscopy of [112^{bar}] oriented steps on a cleaved Si (111) surface*, Appl. Phys. Lett. **56**, 743 (1990.2).
- S. Clarke,* M.R. Welby,* D.D. Vvedensky,* T. Kawamura,** K. Miki, and H. Tokumoto, *Step stability, domain coverage, and nonequilibrium kinetics in Si(001) molecular beam epitaxy*, Phys. Rev. **B41**, 10198 (1990.5). *Imperial College London, **山梨大
- H. Tokumoto and K. Miki, *Microscopic analyses of semiconductor surfaces by STM*, Defect Control in Semiconductors II (Proceedings of the International Conference on the Science and Technology of Defect Control in Semiconductors, The Yokohama 21st Century Forum, Yokohama, Japan, September 17–22, 1989), ed. by K. Sumino (Elsevier Sci. Pub.) p.1491 (1990.10).
- H. Tokumoto, S. Wakiyama, K. Miki, H. Murakami, S. Okayama, and K. Kajimura, *Scanning tunneling microscopy of microstructures on cleaved Si (111) surfaces*, J. Vac. Sci. & Technol.**B9**, 695 (1991.3).
- H. Tokumoto, K. Miki, H. Murakami, and K. Kajimura, *Heating-current-induced step motion on Si (111) surface by scanning tunneling microscopy*, J. Vac. Sci. & Technol.**B9**, 699 (1991.3).
- Y. Morita, K. Miki and H. Tokumoto, *Direct observation of SiH₃ on a 1%-HF-treated Si(111) surface by scanning tunneling microscopy*, Appl. Phys. Lett. **59**, 1347 (1991.9).
- Y. Morita, K. Miki and H. Tokumoto, *Atomic structures of hydrogen-terminated Si(111) surfaces by hydrofluoric acid treatments*, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, Pt 1, 3570 (1991.12).

B.4 マイクロデバイス評価・加工

- M. Komuro, S. Okayama, O. Kitamura, W. Mizutani, H. Tokumoto, and K. Kajimura, *Nanometer structure fabricated by FIB and its observation by STM*, Microelectronic Eng. **6** (1987.12).
- S. Okayama, M. Komuro, W. Mizutani, H. Tokumoto, M. Okano, K. Shimizu, Y. Kobayashi, F.

Matsumoto, S. Wakiyama, M. Shigeno, F. Sakai, S. Fujiwara, O. Kitamura, M. Ono, and K. Kajimura, *Observation of microfabricated patterns by scanning tunneling microscopy*, J. Vac. Sci. Technol. **A6**, 440 (1988.4).

B.5 有機薄膜

- W. Mizutani, M. Shigeno, K. Saito, K. Watanabe, M. Sugi,* M. Ono, and K. Kajimura, *Observation of Langmuir-Blodgett films by scanning tunneling microscopy*, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1803 (1988.10). *電総研電子基礎部
- W. Mizutani, M. Shigeno, K. Saito, N. Morita, T. Yoshioka,* M. Ono, K. Kajimura, *Measurements of polyphosphoric acid on HOPG*, J. Microscopy, **152-2**, 547 (1988.11). *早稲田大
- W. Mizutani, Y. Sakakibara, M. Ono, S. Tanishima, K. Ohno, and N. Toshima, *Measurements of copper phthalocyanine ultrathin films by scanning tunneling microscopy and spectroscopy*, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1460 (1989.8).
- M. Shigeno, W. Mizutani, M. Sugino, M. Ohmi, K. Kajimura, and M. Ono, *Observation of liquid crystals on graphite by scanning tunneling microscopy*, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L119 (1990.1).
- W. Mizutani, M. Shigeno, Y. Sakakibara, K. Kajimura, M. Ono, S. Tanishima, K. Ohno and N. Toshima, *Scanning tunneling spectroscopy study of adsorbed molecules*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 675 (1990.1).
- W. Mizutani, M. Shigeno, M. Ono, and K. Kajimura, *Voltage-dependent scanning tunneling microscopy images of liquid crystals on graphite*, Appl. Phys. Lett. **56**, 1974 (1990.5).
- W. Mizutani, M. Inukai, and M. Ono, *Making a monolayer hole in a graphite surface by means of a scanning tunneling microscope*, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L815 (1990.5).
- M. Shigeno, M. Ono, M. Sugino, and W. Mizutani, *Observation of liquid crystal molecule on graphite by scanning tunneling microscopy*, Mol. Crystal Liq. Crystal **199**, 141 (1991.1).
- W. Mizutani, M. Shigeno, M. Ohmi, M. Sugino, K. Kajimura, and M. Ono, *Observation and control of adsorbed molecules*, J. Vac. Sci. Technol. **B9**, 1102 (1991.3).
- J. Inukai, W. Mizutani, K. Saito, H. Shimizu and Y. Iwasawa,* *Gold substrates for scanning tunneling microscopy of adsorbed species*, Jpn. J. Appl. Phys. Pt 1, **30**, 3496 (1991.12). *東大理
- W. Mizutani, M. Shigeno, K. Kajimura, and M. Ono, *Tunneling through a deformed potential*, Ultramicroscopy, **42-44**, 236 (1992.7).

B.6 極低温 STM/STS

- H. Bando, H. Tokumoto, W. Mizutani, K. Endo, S. Wakiyama, K. Watanabe and Koji Kajimura, *Measurement of local density of states by scanning tunneling spectroscopy at low temperature*, Proc. 18th Intern Conf. on Low-Temp. Phys, Jpn. J. Appl. Phys. **26-3**, 627 (1987.8).
- H. Bando, N. Morita, H. Tokumoto, W. Mizutani, K. Endo, S. Wakiyama, K. Watanabe, K.

- Kajimura, and M. Ono, *Scanning tunneling spectroscopy on superconducting Y-Ba-Cu-O system*, J. Electron Microsc. (Microscopy) **36**, 270 (1987.8).
- M. Tanaka, T. Takahashi,* H. Katayama-Yoshida,* S. Yamazaki, M. Fujinami, Y. Okabe,* W. Mizutani, M. Ono, and K. Kajimura, *Evidence for non-metallic nature of BiO plane in Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ by scanning tunneling microscopy*, Nature **339**, 691 (1989.6). *東北大理
- M. Tanaka, S. Yamazaki, M. Fujinami, T. Takahashi, K. Kajimura, and M. Ono, *Surface electronic properties on BiO plane of Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ single crystal measured by scanning tunneling microscopy*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 475 (1990.1).
- H. Bando, S. Kashiwaya, H. Tokumoto, H. Anzai, N. Kinoshita, and K. Kajimura, *Tunneling spectroscopy on an organic superconductor (BEDT - TTF)₂Cu(NCS)₂*, J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 479 (1990.1).
- H. Bando, S. Kashiwaya, H. Tokumoto, H. Anzai, N. Kinoshita, M. Tokumoto,* K. Murata,* and K. Kajimura, *STM measurement of superconducting properties in κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂*, The Physics and Chemistry of Organic Superconductors (Proc. of the ISSP Intern. Sympo, Tokyo, Japan, Aug. 28–30, 1989), ed. G. Saito and S. Kagoshima, p.167 (1990.6). *電総研電子基礎部
- S. Kashiwaya, M. Koyanagi, S. Shoji,* M. Matsuda,** and H. Shibata,*** *Scanning tunneling spectroscopic studies of superconducting NbN single crystal thin films at 4.2 K*, IEEE Trans. Magn. **27**, 837 (1991.3). *電総研電子デバイス部, **基礎計測部, ***光技術部

C. 技術指導 (1985 年～1991 年)

- セイコー電子工業(株)「走査型トンネル顕微鏡の実用化技術」 (1985.11.20～1987.3.31).
- (株)小坂研究所「走査型トンネル顕微鏡の実用化技術」 (1986.8.1～1988.3.31).
- (株)東芝総合研究所「走査型トンネル顕微鏡の設計技術及び利用技術」 (1986.9.16～1987.3.31).
- (株)神戸製鋼所「走査型トンネル顕微鏡装置の設計, 製作, および操作技術」 (1986.10.7～1987.9.30),
- (株)東レリサーチセンター「STM による高分子観察に関する技術指導」 (1987.4.8～1989.3.31).
- 新日本製鉄(株)「STM の製作技術・利用技術の習得」 (1987.4.8～1988.3.31).
- セイコー電子工業(株)「走査型トンネル顕微鏡の実用化技術」 (1987.5.28～1987.9.30).
- (株)東芝総合研究所「走査型トンネル顕微鏡を用いた固体表面の評価技術」 (1987.9.5～1990.3.31).
- 日本真空技術(株)「STM 関連基礎技術」 (1989.9.1～1990.9.30).
- (株)東芝総合研究所「走査型プローブ顕微鏡を用いた半導体表面の評価」 (1991.2.1～1991.3.31).

D. 共同研究

D.1 官民連帯共同研究

「マイクロエレクトロニクス STM 技術に関する研究」セイコー電子工業(株), (株)小坂研究所 (1987.12.17～1989.3.31).

D.2 共同研究

「走査型トンネル顕微鏡による材料解析技術に関する研究」新日本製鉄(株) (1989.6.26～1990.3.31).

2016.3 記

梶村皓二 (Kajimura Koji)

1968 工技院電気試験所入所, 1983 電総研基礎部低温物理研究室長, 1988 企画室長, 1988 電子基礎部長, 1995 次長, 1998 所長, 1999 工技院長, 2001 (財)機械振興協会副会長・技術研究所長, 2012 同協会退任, 2012 産総研電子光技術研究部門研究顧問, 理博.

受理日 : 2016年4月1日
