

加速器関連開発と精密工学 —12 GeV 陽子シンクロトロン建設時からの 技術革新を応用した「もの作り」—

東 保男*

Development of Accelerator Related Precision Engineering Technologies

Yasuo HIGASHI*

Abstract

Since the constructed of 12 GeV proton synchrotron started 35 years ago, technologies have been dramatically developed. Computers, software, hydrostatic bearing and scanning tunneling microscope have given us a big impact on accelerator development. Computer aided numerical control machine can realized any shape with an accuracy of nanometer order. Hydrostatic bearing can be used for ultra high-precision turning and milling, and scanning microscope for the observation of surface roughness with atomic level. In this article, we describe the development of accelerator related precision engineering technologies utilizing these new technologies.

1. はじめに

KEK での 12 GeV 陽子シンクロトロンの建設開始から早 35 年以上の月日が流れて行った。その当時から現在に至るまでに様々な「もの作り」に関する技術革新がなされてきたことは周知の事実である。その技術革新の中で、特に筆者にとって忘れられない技術について考えてみると、まずは、コンピュータ技術及びソフトの驚異的な革新は誰も認めるだろう。次に掲げたい技術として、静圧軸受¹⁾の研究開発と走査トンネル顕微鏡²⁾の開発を挙げたい。「もの作り」屋にとって大事なことは、まず、加工精度であろう。次に、加工方法と思われる。工具の位置決め、自由曲面の加工に飛躍的に貢献したのが NC 工作機械³⁾の発展は言うまでもない。加工寸法計測の究極は金属材料であれば、原子単位と考えられ、走査トンネル顕微鏡はそれを満足する。加工工具が理想的な運動をすれば工具刃先周辺の応力場が安定し、高い再現性が得られる。静圧軸受を用いた工作機械は工具の運動をナノメートルの分解能で制御できるようになった。一方では、コンピュータの発達により加工物理現象のシミュレーションも飛躍的に発達した⁴⁾。12 GeV 陽子シンクロトロンの建設当時よりもっと古くから収差の少ないレンズ磨

きは行われていたが、その加工工程を理論的に説明は出来なかった。ここに「もの作り」の面白さがあると思う。しかし現在では、「第 1 原理分子動力学」理論によりナノメートルの加工がシミュレーションによりかなり再現できるようになった。特に、半導体製造プロセスにおける表面物理現象（拡散、吸着等）は完璧にまでにシミュレート⁵⁾できると考える。このような時代を KEK 内において「もの作り」屋として現在まで過ごした中で、既に述べた技術革新である、NC 加工、ナノメートル計測、ナノメートル加工を実際に応用して加速器関連開発に関わってきた内容について述べてみたいと思う。

2. RFQ Vane の 3 次元 NC 加工⁶⁾

表 1 に示すような RFQ パラメータを持つ Vane を加工して欲しいと加速器の加藤隆夫氏から依頼があったのは 1980 年頃である。入射部から 400 mm 長の Vane を無酸素銅で製作することにした。その当時、KEK にあった NC-FANUC220A (NC 制御器) と加工機 (日立精工製) を用いて 3 次元加工することにした。この加工機は、5 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ の工具位置決め精度であった。3 次元加工用プログラムは当時、KEK・共通研究系データ処理部門にあった大型計算

* 高エネルギー加速器研究機構 共通研究施設 機械工学センター
(E-mail: higashiy@post.kek.jp)

表1 RFQ Parameters

Frequency	201.08	MHz
Input energy	25	keV
Output energy	750	keV
Number of Cells	138	
Length	121	cm
Initial radius	1.5	cm
Minimum radius	0.4	cm
Initial modulation	1.0	
Final modulation	2.0	
Max. surface field	25	MV/m
Final accel. field	1.9	MV/m

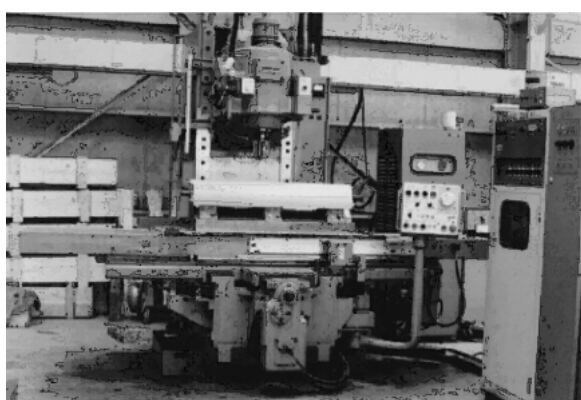


図1 3次元NC加工機
写真の右側にあるのが紙テープリーダー。

機 (HITAC) を利用して製作した。NC プログラムの加工機への読み込み媒体は紙テープであった。400 mm の Vane を加工するのに 9 巻 (1 巻は 256 kbit) 使用した。図 1 に NC 加工に使用した加工機を示す。現在の NC 加工機は 10 nm の位置決め精度を有することを考えると、この 30 年間の NC 技術に関する技術革新があったことを理解して頂けると思う。

加工条件は、送り速度 300 mm/min, ポールエンドミルの半径 5 mm, 軸方向の送りピッチ 0.5 mm とした。加工時の問題が幾つかあった。一番困ったのは、紙テープリーダーの読み間違いである。これはどうしようもないのでただ祈るだけだった。次に問題は紙テープの交換である。テープのセットミスを知らずに加工を始めた瞬間、アラームランプが点滅してストップしてしまう。一応機械原点は持っていたがあまり当てにならず、これには閉口した。加工時間は粗加工を含めて数ヶ月を費やしたと思う。図 2 に製作した 4 本の Vane を示す。多分日本で最初に加工した Vane

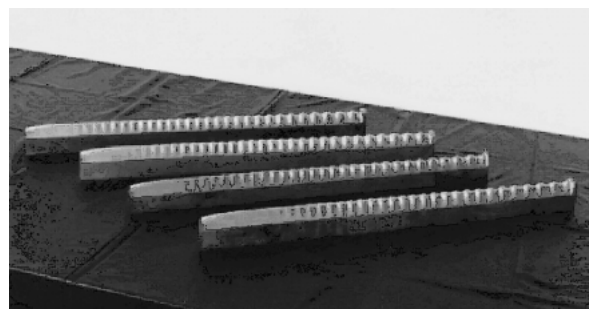


図2 製作した RFQ Vane (長さ 400 mm)

だと思われる。現在、J-PARC のリニアックで RFQ が使用されていると聞いて Vane を見学したが、感慨深いものだった。

3. 静圧空気軸受の開発

流体 (液体, 気体) を介して直進運動や回転運動をさせると案内面の歪みの影響が軽減されるという基本的な理論を誰が最初に発見したか不明であるが、軸受理論を最初に見たのが 1970 年代後半の精密機械学会誌であった。著者は京都大学の教授でした。先生は、流体回転軸受は、ナビエ Stokes の方程式を解いて直接答えを出せないが、ある境界条件を導入することによりラプラスの方程式を解けばよいことに着目され、解析的に解く方法を発表された。

すぐに、その論文の空気軸受のパラメータ導出方程式を用いて設計製作した。軸径、軸長や流体を閉じ込める隙間と空気導入径を大型計算機で計算した。特に軸受の性能を左右するのは剛性である点に注意を払い、軸と軸受の隙間を 10 μm にした。図 3 は円筒研削盤により加工した回転軸を示す。

軸形状は外径 50 mm 長さ 300 mm である。加工した軸の表面粗さは P-V 値で 0.2 μm で真円度が 1 μm であった。真円度測定は東工大・精密工学研究所で測定して頂いた。静圧軸受の特徴は、回転軸の真円度の 1/4~1/10 の回転精度が得られることである。したがって、本軸受の回転精度は 0.1 μm 前後が期待できた。当時としてはまあまあの加工精度だと思う。図 4 に完成した空気軸受の回転精度を測定しているときのスナップ写真を示す。20 数年前のことである。

4. 走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM) の開発

この新しい表面観察装置は、G. Binnig と Rohrer によって発表され (1982 年ノーベル賞受賞)、垂直分解能が 0.1 nm, 横分解能が 1 nm が得られる極限的な

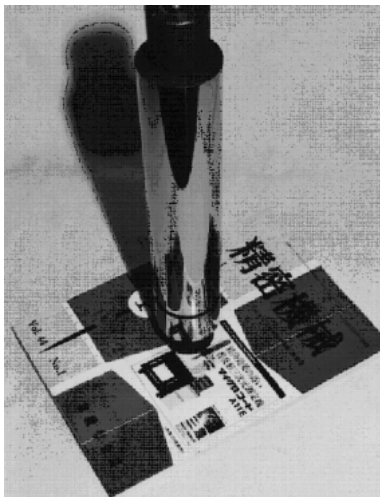


図3 加工した空気軸受用軸

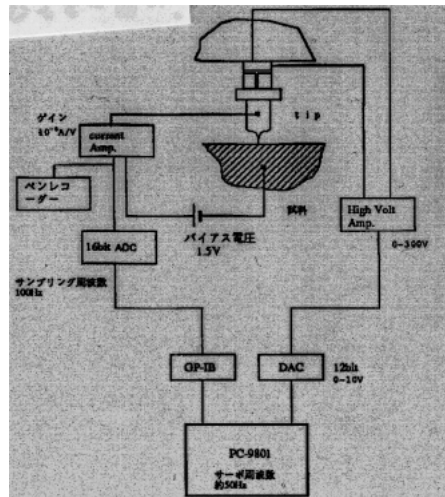


図5 製作したSTM装置のブロックダイアグラム



図4 設計製作した空気軸受の性能試験風景
右から3番目が筆者.

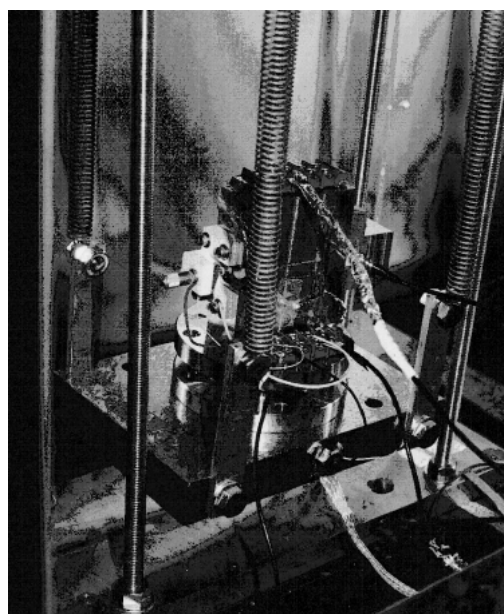


図6 製作したSTM装置

ものである。原理的には金属、半導体（絶縁体には、同じ分解能をもつ原子間力顕微鏡が使用される）の試料表面に対して、タングステン材等の先を鋭く尖らせたチップを1 nm程度の微小間隔に保ち、試料とチップ間に印加する数Vの電圧によって試料とチップ間の絶縁層を通して流れるトンネル電流を検出することが基本原理である。このトンネル電流を一定に保つようにチップを試料表面に沿って走査することにより、原子オーダーの分解能で加工表面の凸凹を計測することが可能となる。この理論の詳細は文献⁸⁾を参考にして頂くこととして、試作したSTMのブロックダイアグラムを図5に、試作したSTM装置を図6に示す。チップはタングステンを使用し、KOH溶液中で電解研磨により製作した（図7）。試料はAuを使用した。印加電圧源として乾電池を使用し、試料へのチップのアプローチにはマイクロメータを使用した。光学顕微鏡でチップ位置を観察しながら5 μm まで試料表面に

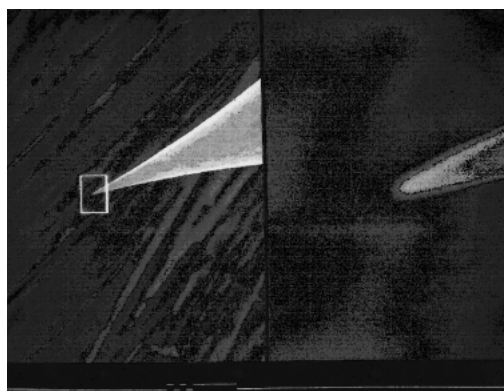


図7 タングステンチップの先端
電解研磨によりチップ半径10 nm達成.

近づけ、その後はトンネル電流を計測しながらピエゾアクチュエータにより恐る恐る近づけていく。装置全体はバネで吊るし、外部からの振動伝達を防止し、真空装置にセットした。たった数10秒間のみトンネル電流をコントロールするに留まった。したがって、3D計測は失敗に終わった。約20年前のことである。現在は、お金を投資すれば $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の凸凹を原子オーダーで測定できる時代である。

5. 放射光用集光ミラーの開発

本研究の目的は、XFEL (X-ray Free Electron Laser) や EUVL (Extremely Ultra Violet Lithography) から要請される次世代高精度ミラー、すなわち最大サイズ $500\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (EUVLの場合 $\phi 300\text{ mm}$)、非球面量 $15\mu\text{m}$ 以上に対して、形状誤差を 0.08 nm-RMS の精度で大型自由曲面の形状計測可能なシステムを構築することである。以下に、提案した新しい形状計測法の原理を図8に示す⁷⁾。本計測方法は、レーザーの直進性を用いてミラーの任意測定点(座標)の法線ベクトルを測定し、補間、積分することから形状を求める。この測定法は、日本語で「傾斜角積分型形状計測法」、また英語で「Surface Gradient Integrated Profiler」と学会等で発表している。これまで広く用いられている干渉法と異なり、基準面を必要としない点が大きな特徴である。このように、直進運動より精度の高い回転運動を用いることで、広範囲に亘って超精密な形状を計測する方法である。

図9に設計製作した実験装置の写真を示す。装置は、光学系と試料系及び法線ベクトル計測用レーザー光学系で構成されている。法線ベクトルの計測法は、入反射光路が一致したかどうかを4分割フォト検出器で計測している。法線ベクトルの測定分解能は $0.05\mu\text{rad}$ である。

この装置の性能を確かめるために、SPring8の1kmビームラインの集光光学系として、大阪大学で製作した硬X線集光ミラーを計測した。このミラーは、集光径 $36\text{ nm} \times 48\text{ nm}$ の世界最小記録を達成しており、世界最高の 0.2 nm-RMS の形状精度であることを明らかにしたものである⁸⁾。図10にミラーの写真を示す。

図11に本装置で、ミラーの中心ラインを写真で左右に計測した結果を示す(2次元計測)。赤線は形状を、緑線は理想曲面からの偏差を表す。測定時のミラーの固定方法等まだ問題はあがるが、nmオーダーの測定精度があることを証明した実験である。図中の赤丸

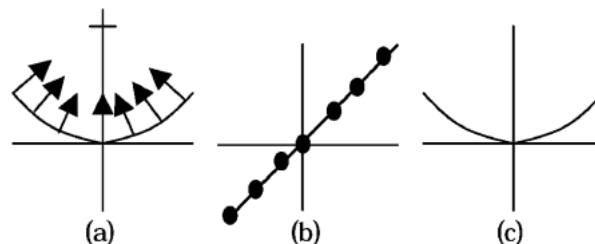


図8 自由曲面形状の法線ベクトル測定原理図
(a) ミラー面の法線ベクトルを計測する。
(b) 側定点をスロープに変換し、補間する。
(c) 積分し、形状にする。



図9 設計製作した傾斜角積分型形状計測装置
光学系：直交する2軸の回転テーブルとXYXテーブルで構成。回転テーブルの直交点からレーザー光を射出し、反射光が直交点を通るよう試料系の回転テーブルと合わせて調整する。
試料系：直交する2軸の回転テーブルとXYXテーブルで構成され、ミラー取り付け治具を含む。

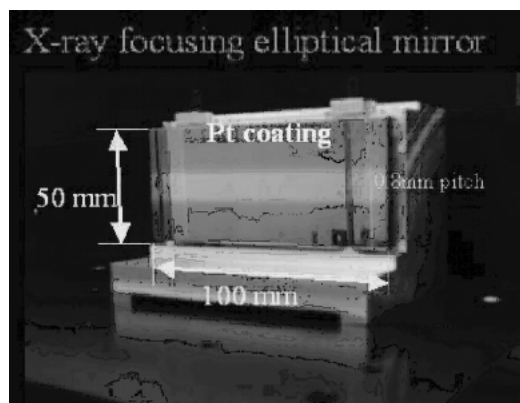


図10 集光径 $36\text{ nm} \times 48\text{ nm}$ を達成した楕円形状ミラー

は大阪大学で開発された干渉計とステッチング法を取り入れて測定した値、青四角は本測定結果である。現

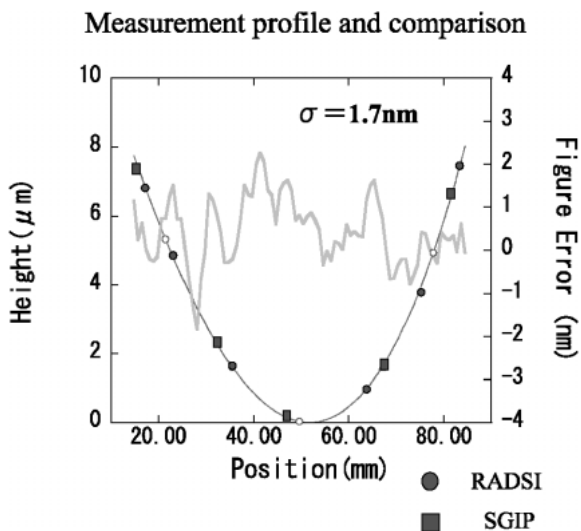


図11 集光径 36 nm×48 nm を達成した楕円形状ミラー計測結果

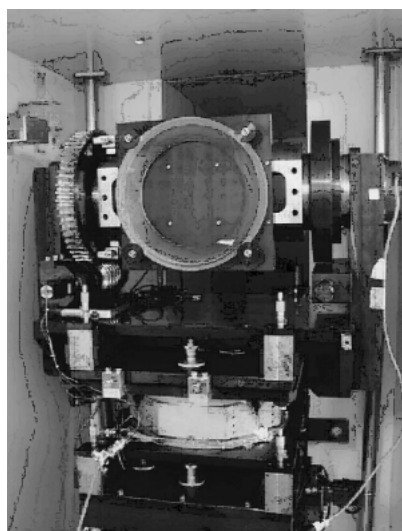


図12 軸外し放物面ミラー形状計測テスト装置の試料系に取り付けたミラーを示す

在は、レーザコンプトン実験用ファブリペロー型光共振器用放物面ミラーの形状計測に挑戦している所である。図12は $f=150\text{ mm}$ のミラーの形状計測テストをおこなっている写真を示す⁹⁾。

6. Laser wire BPM 用ファブリペロー型光共振器の開発

KEK・ATF と京都大学のグループではこれまでファブリペロー型共振器に CW レーザーを蓄積することによりレーザーのワイヤーを作成し、これを KEK-ATF のダンピンリング内に設置することによりビー

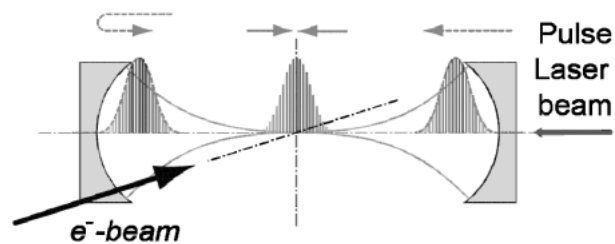


図13 ファブリペロー型共振器

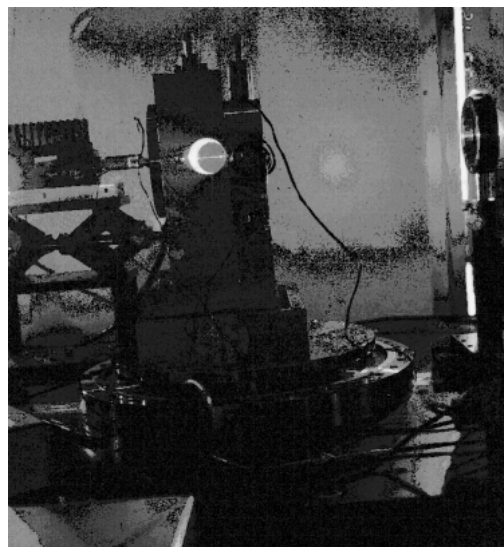


図14 初めてファブリペロー光共振器内で光増幅を達成した時の写真

ムサイズモニターとして開発してきた。図13に開発したファブリペロー型光共振器の光学系と共振器内部の光の定在波を示す。

筆者は、ファブリペロー型共振器の設計製作を担当した。要求される項目は、使用するレーザ波長の少なくとも 10^{-3} 程度（共振器の Q 値による）に対向するミラー間を制御可能な構造にする必要がある。4章でのべた STM 試作には失敗しているのでは何とか実現したかった。

毎週のミーティングを繰り返しながら1号機が完成したのが1年後であった。ミラー間の制御システムは、KEK 素核研の谷口敬氏が担当した。しかし望んだ結果は得られなかった。また、STM の二の舞を踏むのかと思い、奮起して2号機を製作したのは半年後であった。前者との違いは共振器全体の剛性を上げるために一体構造にした。図14が最初に光共振に成功した時の写真である。レーザ波長は 532 nm で Q 値は数 1000 であったことからミラー間の距離の制御がサブ nm である。長期間安定性を確認した後、

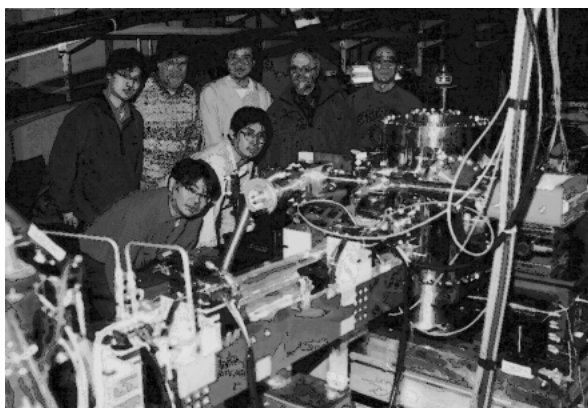


図15 ファブリペロー光共振器をATFに組込んだ直後。(筆者が一番右)

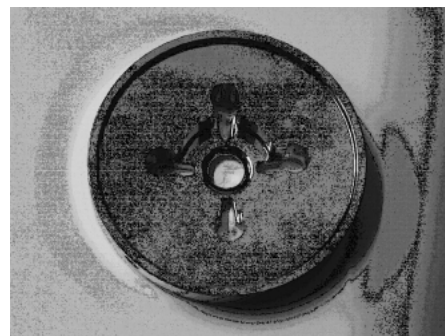


図16 レギュラーディスクの写真(外径60mm)

ATFに組込んだ。

図15は、本来の目的であるLaser Wire BPMとしての実験に使用するため、ATFに組込んだ時の写真を示す¹⁰⁾。この技術をパルスレーザーに用いることにより、ピークパワーの高いレーザー光を共振器内に蓄積し、電子ビームと衝突させることによりレーザーコンプトン散乱によって高品質なX線を生成することが計画されている。

7. X-バンド加速管の開発^{11,12)}

私のKEKにおける仕事の中で、この加速管開発は避けて通れません。約20年弱従事したからです。既に小泉晋先生、人見宣輝先生が本学会誌で詳細を報告されていますので、現場の「もの作り」屋の観点から印象に残った事項について述べてみたいと思います。

7.1 空洞内径20mmをサブミクロンで絶対測定できる方法があるか？

図16がレギュラーディスクの形状である。トラベリングウェーブタイプなのでカップ部の寸法がすべて異なる。空洞内径(2b)が $1\mu\text{m}$ 変化すると0.6MHz変わる。0.1MHzの誤差以内に抑えようとするとはほぼ2bを $0.1\mu\text{m}$ の精度で加工しなければならない。そこで、フィールドエミッションマイクロメータを開発し、測定分解能を $0.01\mu\text{m}$ で測定できる装置を開発した。

この原形は、IBMの研究者がSTMの基礎となる論文の中で、球状のアノードをカソード面に接近させるとギャップ距離の指数関数的にエミッション量が変化することを利用して製作した内径計測装置である。図17に装置の写真と実験結果を示す¹³⁾。どうしても

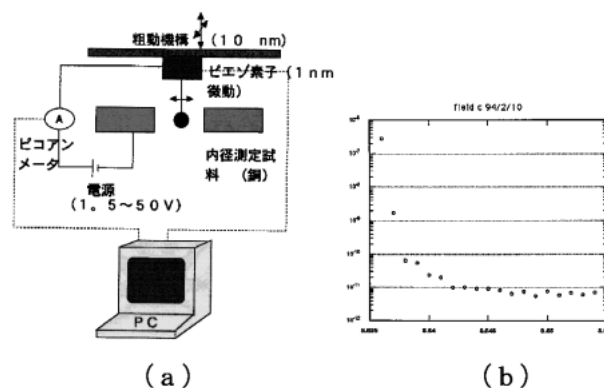


図17 開発したフィールドエミッション内径測定器
(a) 装置の概念図。使用したボールプローブの絶対精度不明。
(b) プローブを空洞内壁に右から近づけ時のフィールドエミッション電流の変化。

比較測定になり絶対値がわかったサンプルが必要になった。そこで、知り合いの計量研究所(現在の産総研)に電話してみた。答えは「測定原器や計測法は研究していない。ただ、企業からの要請が有るから、技術検討会を組織しようと思っている。関連会社を紹介するから聞いてみてほしい。」であった。その後、計量研からその関連会社に移られた沢辺先生に電話した(昔から少し懇意にして頂いた)。結果は、「計測関連会社で相談に乗ってくれる所を紹介しましょう。」であった。また、その関連会社に相談した結果、「ツアイスのCMM(3次元測定機)で測定します。」だった。その測定機は既に、KEK内に存在していた。結論は、日本国内で、直径20mmの内径を0.1ミクロンの絶対精度で測定できる装置はないのではないかと考えた(論文もかなり検索したが)。結局、ディスク加工時に外形寸法を基準とし、基準ディスクを基にして $0.75\mu\text{m}$ 以上の誤差が生じたならば次の加工にフィードバックすることで対処した。未だに外形、空洞内径

寸法の絶対値は不明である。

7.2 ディスク同士の接合時に歪を最小限にするための接合法

加速ディスクの加工精度をほぼ達成した時点で、さてどうしてディスク同士を接合しようかと考え抜いた結果、銅同士の拡散接合しかないと思った。SLACが採用しているロー付け技術を我々が使用すると、どうしてもSLACとの技術評価がなされるのは自明であった。以前に、歪の少ない接合としてEBW、レーザ溶接、TIG溶接を検討したが、詳細な検討のための時間がなかった。ちょうどその頃、低温工学センターの学生だった古河電工㈱所属の木村昭夫氏が博士論文テーマとして超伝導線材（ラザフォードケーブル）のACロスに関する研究を始めたころと重なった。この超伝導線材は、無酸素銅で被服されているが使用することにより線材同士間に電流が流れることによりACロスが発生すると考えられていた。その原因として、キュアリング条件を230℃10分で線材間の拡散が起こっていることを写真で示した¹⁴⁾。図18が彼が観察した写真である。私も国内外から拡散現象や金属拡散に関する論文の厚さが10cmになるくらい集め、読み漁った。その中で、当時、科技庁の金属材料研究所の大橋先生が銅同士の具体的な接合実験結果を執筆した論文が非常に役にたった。

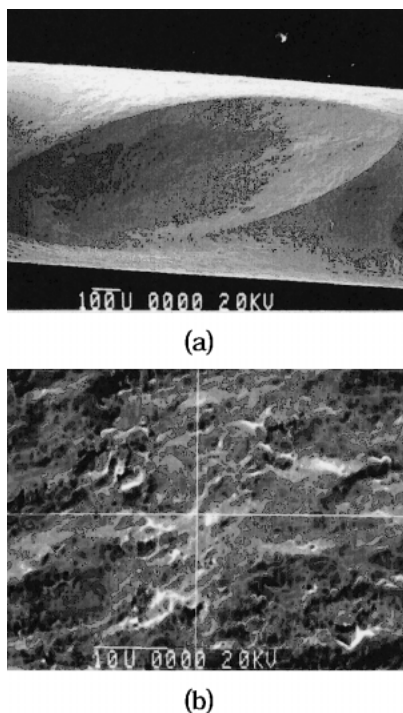


図18 ケーブル同士の密着痕(a)と銅同士の拡散が起こった痕跡(b)

彼の論文趣旨は、銅表面を加工し、エメリー紙で研磨し、アルコール洗浄後真空中で800℃1時間加熱することにより拡散が達成できるという。また、三菱重工㈱広島研究所の深谷氏は表面酸化膜(CuO₂)の解離をギブスの自由エネルギーの計算を用いて850℃加熱(真空度10⁻⁶Pa)で、達成できるとした¹⁵⁾。ディスクの接合面は直接真空環境にさらされないため実際のところはよくわからないが、実験結果から、銅原子の拡散現象が起こっているのは明らかであった。そこで、酸化膜の酸素が銅原子中に拡散するかどうか計算した結果、850℃1時間で十分酸素が銅原子内に拡散されることが計算と実験で確かめられた。この結果は、先の木村氏の写真を定性的に説明できる結果であった。これらの結果を基にして、接合実験を繰り返して、加速管の性能を満足するパラメータ(表面洗浄法、拡散温度、時間、加圧量)を決定した。

7.3 高電界における放電の問題

以上述べた技術とロー付け技術により1.3m加速管(M2と呼んだ)を製作したのが1993年であった。この加速管はPEP2を使ってロングレンジウエークフィールドの測定を行いほぼ理論どおりの結果を得ている。ここまでは非常に順調に開発が進んだと思う。次はいよいよ高電界の耐久試験である。65MV/mの仕様を満足するかである。M2の試験結果は、800時間の運転で位相が30°変わったことがわかった。図19にアイリス部がブレイクダウンによりダメージを受けた写真を示す¹⁶⁾。

高電界によるダメージが明らかになった後、表面処理、材料選定、形状変更等を改良し、80%程度、仕様をクリアしたところでILC(International Linear Collider)では超伝導加速空洞使用に変更になった。

現在は、ILCプロジェクトに参加しながら常伝導加

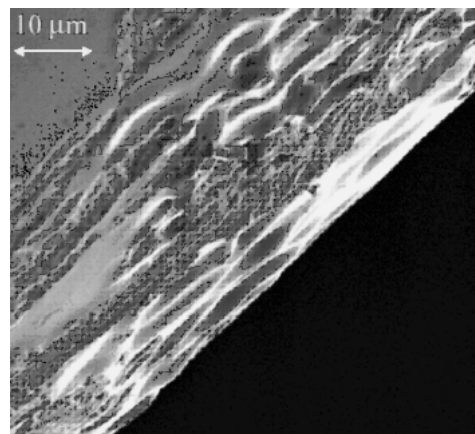


図19 ディスクアイリス部のダメージ

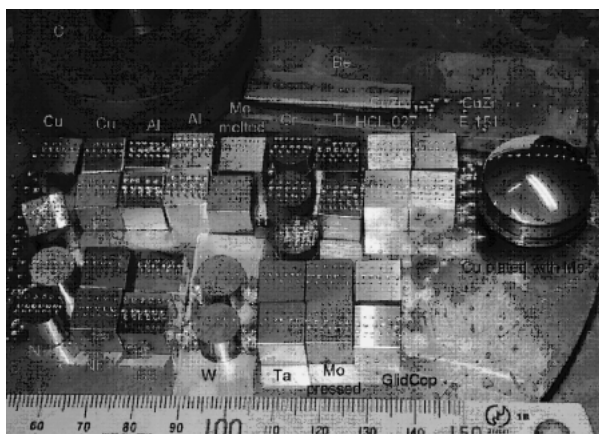


図20 電子ビーム溶接機を利用した照射実験
照射条件 (120 KV, 30 mA, 75 μ S, 1パルス照射), 材料 (SS, Mo, Cu, Ta, Nb, Mn, Cr, W, Al, Ti, Be)

速管で高電界に耐えうる材料をサーチしているところである。図20は、パルス電子ビームを各材料に照射し、ダメージの状態を検討しているところである。いつか高電界のXバンド、30 GHz、Wバンド加速管を製作できる日が来るよう研究を続けたいと思っている。

7.4 SLAC との付き合い

私が頻りにSLACを訪問するようになったのは1993年ころだったと思う。頻繁さは、多い時に年5回で各1-2週間であった。R. Ruth氏の肝いりでA/M BuildingやKlystron Lab.には自由に訪れることができた。実際に議論の相手は、加速管設計をやっていたJ. Wong氏、R. Miller氏、RF計算をしていたZ. Li氏、メカニカル設計をしていたG. Bowden氏、また、Klystron Lab.の現場責任者である、C. Peason氏であった。R. Ruth氏、R. Miller氏が我々の加速管製作法をサポートしてくれたお陰で、スムーズにKEK/SLAC加速管製作の共同研究が進んだと私は思っている。具体的な仕事のやり取りは、J. Wong氏と肥後氏であった。彼は、中国人で日本人的な仕事の進め方を良く理解してくれたと思う。彼が日米間の重要な役目を果たしたと思っている。最初のころは、Klystron Lab.に行く時は、C. Peason氏に了解を得て入室しなければならなかったが、仕事をしている連中は明らかに我々を避けていることが分かった。多分、技術を盗みに来たと思ったような気がしての事だろうと思った。我々はロー付け技術に関してはまったくの素人で、彼らは30年前にその技術を使って2 mile Acceleratorを建設している。現場での仕事の流れは、部品加工、メカニカルQC、表面処理、ロー付

けと流れて行くが、特に、QCに関しては、大企業顔負けのシステムで、全ての部品に管理番号が振ってあった。表面処理は別の建て屋にあり、ここもQCは完璧に近いと思った。彼らと付き合っていく中で、一番の問題は言葉である。つまり英語である、英語が話せないから、データを持って行く訳だがそのデータの説明も本当に彼らは理解してくれただろうか未だ不明である。逆に彼らから積極的に我々にデータを提示してくれたことは長い付き合いの中で一度も無かった様と思う。

8. ILCを目指している45 MV/m超伝導空洞用チューナー (Lorenz Force Detuning) の開発

ILCプロジェクトが発足するや否や加速器研究施設の齊藤健治氏から9連空洞のチューナー開発を依頼された。45 MV/mの加速勾配のときのDetuning量は4.9 KHzで空洞長さを7.8 μ m伸ばさなければならぬ。しかも1 msの立ち上がりで5 Hz運転。空洞の機械的特性として、軸方向の剛性328 kg/mm、固有振動数124, 253, 390, 529, 665, 791 Hzであることが解析でわかっている。

この空洞は定在波を利用するので、既に述べたファブリペロー光共振器と原理は同じである。光共振器の場合、Q値はミラーの反射率で、加速空洞の場合は表面抵抗で決まる違いはある。以前に光共振器で成功した実績があるので簡単だと思ったが、実際は大間違いであった。加速空洞の場合の駆動する質量が二桁大きいところに難しさがある。フィードバックのスピード、位置決め制度は光共振器の方が一桁上回る。つまり、加速空洞の場合、大きな力積が必要である。そこで、空洞を变形させるのに、山に登るとき直登するのではなく、ジグザグに登る方法を採用した。この方法だと力はあまり要らないが、スピードが要求される。この考えを実現させるために、直径250 mmのボールネジ(1回転で40 mm軸方向に伸びる)を採用した。また、初期条件として空洞を約1 mm程度引っ張った状態で加速周波数1.3 GHzになるようにし、いつもネジに300 kgfの引っ張り荷重が印加されている所で、チューニングをおこなう。すると駆動力はほぼ1/20になり、回転は周方向に約160 μ m動かせばよい。低温における長ストロークのピエゾ素子は高価であるので、「てこ」を利用してピエゾのストロークを3倍にしている。図21にフル装備の45 MV/mを目指す空洞の写真を示す。現在、77 Kでの性能チェックをおこなっているところである。

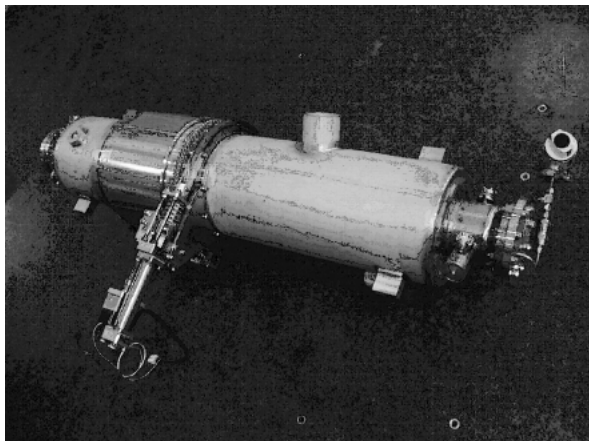


図21 45 MV/mの加速勾配を目指す超伝導9セル加速空洞

9. おわりに

「もの作り」屋として、多くのプロジェクトに参加できたことに感謝します。まもなく団塊の世代がリタイアしていく時期が来る。いろんな所で、技術の伝承をどうしようかと言う議論が起こっている。プロジェクトの巨大化、細分化が進む中、我々世代はこの事について考える必要があると思う。

謝辞

超精密工学について長年に渡りご指導下さいました大阪大学名誉教授 森勇蔵先生に感謝の意を表します。放射光集光用ミラー形状計測装置開発では、大阪大学大学院工学研究科の先生方および学生に謝意を表します。KEK 共通基盤研究施設機械工学センターの皆様へ感謝します。X-バンド加速管開発では特に、KEK 加速器研究施設の肥後寿泰氏、高田耕治先生および KEK 開発グループの方々、三菱重工(株)三原製作所および広島研究所、石川島播磨重工(株)の方々に感謝します。レーザーワイヤー用オプチカルキャビティ開発では、京都大学 笹尾登先生、当時学生だった阪井浩氏、本田洋介氏および KEK ATF スタッフに感謝します。高電界超伝導キャビティ用チューナ開発では、齊藤健治氏を含む KEK 開発グループに感謝します。また、R&Dのために総合的にご支援を頂いた KEK に感謝します。

参考文献

- 1) See for example, J. B. SHUKLA, et al. “Externally Pressurised Optimum Bearing with Micropolar Fluid as Lubricant”, J.J.A.P, vol. 14, No. 2, FEBRUARY, 1975.
- 2) G. Binning, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 57.
- 3) 中川一雄, “セラミックスエアースライドを用いたリニアーマータ駆動超精密加工機”, 精密工学会誌 vol. 72, No. 4, 2006.
- 4) See for example, K. Arima, et al.: “Atomic Images of H-Terminated Si(110)-(1×1) Surfaces by Wet Cleaning”, Abstracts of 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques, pp. 360-360 (2005)
- 5) See for example, Katsuyoshi Endo, Tomoya Ono, Kenta Arima, Yuji Uesugi, Kikuji Hirose and Yuzo Mori: Atomic Structure of Si(001)-c(4×4) Formed by Heating Processes after Wet Cleaning and its First-Principles Study, Japanese Journal of Applied Physics, 42, part 1, 7B, 4646-4649 (2003).
- 6) Takao Kato, et al. “DEVELOPMENT OF AN RFQ MODEL CAVITY IN KEK”, Proc. 4th SYMPOSIUM ON ACCELERATOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, Nov 24-28, RIKEN JAPAN, 1982, pp261-262.
- 7) Y. Higashi, et al.: Proc. 8th Int. Conf. X-ray Microscopy IPAP Conf. Series 7 pp. 192-194.
- 8) K. Yamauchi, K. Endo, et al.: JJAP. **44**. 18. 539-5, 42 (2005).
- 9) J. Urakawa, et al.: Nucl. Instr. and Meth. A, **532** (2005) 388.
- 10) Y. Honda et al.: Nucl. Instr. and Meth. A, **538** (2005) 100.
- 11) Y. Higashi, et al.: Study on High-precision Diffusion Bonding for X-band Accelerator Structure (in Japanese), KEK Report 2000-2, April 2000, A/H.
- 12) Y. Higashi, et al.: Study on High-precision Machining for X-band Accelerator Structure, KEK Report 2000-1, April 2000, A/H.
- 13) 東 保男, 他: フィールド エミッションによる内径測定, 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, **A68**.
- 14) 木村昭夫: 超伝導成形擦線の電磁特性 (学位論文), 総合研究大学院大学 数物科学研究科 加速器科学専攻, (1994).
- 15) 深谷保弘, 他: 溶接学会論文集 第15巻 第3号, (1996), pp. 467-475.
- 16) P. Wilson: “GRADIENT LIMITATION IN ACCELERATOR STRUCTURES IMPOSED BY SURFACE MELTING, Proc. of Workshop on High Gradient RF, ANL, October 7-9, 2003.