

知 識 編

1. これからの時代の基盤技術としての超精密加工

日本における主な産業は、図1に示すような変遷を遂げ、先進工業国として世界のトップレベルへと急成長した。日本における工業生産の中核は、自動車を中心とした輸送機械産業から、マイクロエレクトロニクスを中心とした新産業へと確実に移行しつつある。これは通商産業省機械統計年報に発表されている数字からも明らかである。半導体集積回路を中核とするマイクロエレクトロニクスは、機械工業をメカトロニクスに、光学工業をオプトロニクスに、化学工業をケミトロニクスへ……という具合に変化させていく。この傾向は、先進工業国に共通して見られる現象である。日本は、諸外国に比べても、これらの転換が広い分野にわたって大変スムーズに行われたものと思われる。そして現在我々は新産業革命の真っただなかにおり、大きな変革を遂げながら21世紀を迎えようとしている。ということができらるであろう。

これからの時代における各種先端産業に用いられる部品類を製作するに当たって、いろいろな事項が要求される。従来の機械工業部品では、寸法精度だけが要求されることが多かった。しかしマイクロエレクトロニクス産業で用いられる最近の部品類に対しては、寸法精度ばかりではなく、真円度、円筒度、真直度、平面度などの形状精度や、加工面粗さなどに非常に高度の値が要求されることが多い。また電子工業部品に対しては、材料自身の性質と異なった加工変質層が存在することによって、機能に影響することが極めて大きいことが認められている。例えば、半導体素子用シリコンウエファや、磁気ヘッド用フェライトなどにその例を見ることができる。そこで、単なる寸法精度ばかりでなく、形状精度、面粗さ、加工変質層などを考慮に入れて、目標機能を果たす品質のものを、安く、速く、繰り返し生産できる技術を確立しなくてはならない。これを、高精度加工という。

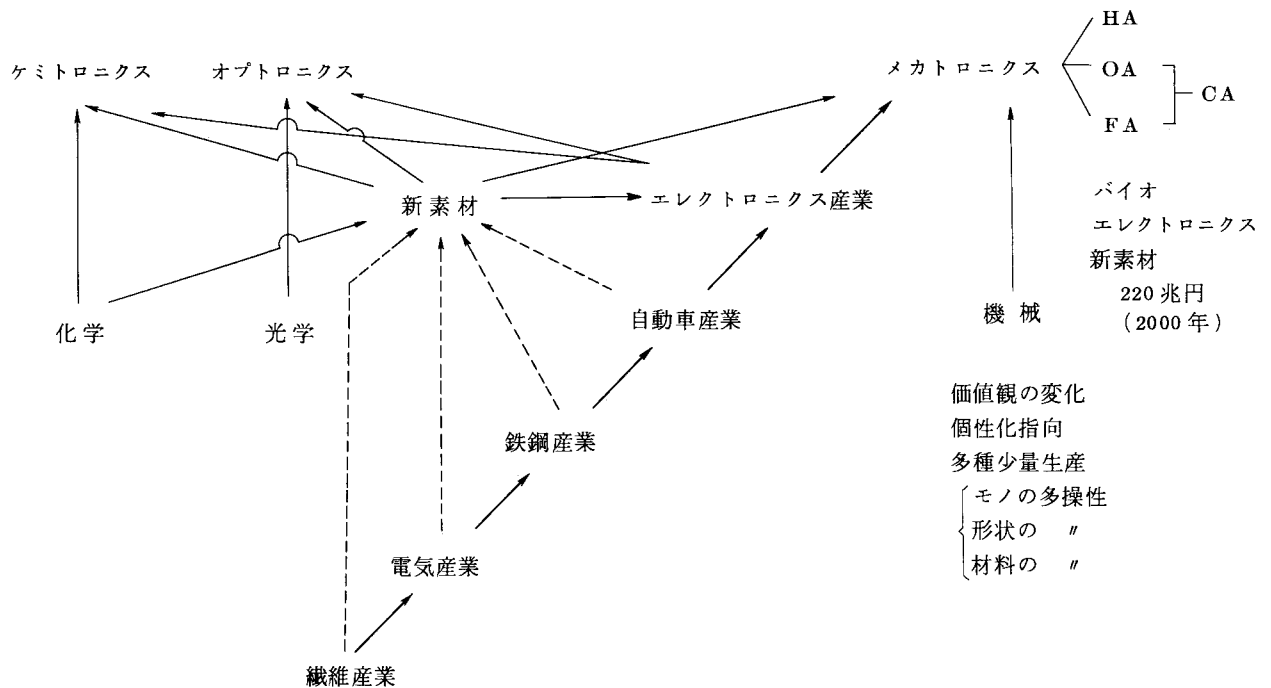


図1 新産業革命の真っただなか

一方、半導体集積回路や光学素子に代表されるような微細寸法加工を達成することも、マイクロエレクトロニクス時代における重要な課題の一つである。

ここに述べた高精度加工技術と、微細寸法作成技術とをあわせて、超精密加工技術と呼ぶことにする。超精密加工技術は、これからの基盤技術として位置付けられるものであり、世界各国で非常な力を入れて活発な研究開発が進められている。アメリカでは、十年ほど前から『これからの製造技術の中心になるものは超精密加工技術である。』という認識が広く浸透している。イギリスでは国家プロジェクトとしてナノテクノロジーというテーマを最近スタートさせた。ヨーロッパ大陸でも、あるいは中国、台湾、韓国あたりでも関心が急速に高まってきた。

超精密加工技術は従来からの精密加工技術とは、本質的に異なる分野に属する技術である。21世紀を目指した職業訓練において、加工技術の中核として重点的に強化していかなくてはならないであろう。

2. これからの時代に必要とされる部品の性能と精度

マイクロエレクトロニクス時代に必要とされる部品の性能は目覚ましいばかりに向上し、それにつれてその機能を果たすための精度は厳しくなる一方である。そのいくつかの例について述べよう。

(1) 機械工業における部品類

イギリスのホイットウォースWhitworthが、三面すり合わせにより、キサゲで正しい平面を作り、正確に平面を測定する技術を確立したのは、1830年頃のことであった。その頃から、工場作業者はすべて手元に必ず三面すり合わせ定盤を置いて作業するようになったといわれている。「ホイットウォースのよく磨いた銅版は互いに密着して、それを削がす力は大気圧より高い」という知見がイギリスのチンダルTyndallによって発表されたのが1875年のことである。これがヒントとなって、若いときから銃機工場で精密加工と測定に携わって来たスウェーデンのヨハンソンJohanssonによって1896年にブロックゲージの概念が発明され特許が出願された。この考え方は、102個組のゲージをできるだけ正確に仕上げ、それらを密着使用(リングング)することによって、1mmから201mmまで0.01mm飛びに20,000種類の正確な測定ができるというものであった。これを実現するために、ヨハンソンは昼間は会社の中で、経年変化の少ない材料とその熱処理法の研究を行い、夜は自宅の小屋の中でミシンを改造したラップ盤と自作した測定機とを使って、端面の高度な仕上げに専念したといわれている。このようにして作り上げたブロックゲージをパリーにある国際度量衡標準局に持ち込み、測定してもらい1 μm /100mm以内の精度に収まっていることが確認され、高い評価が得られた。1908年には特許が確立し、ヨハンソンは会社を辞めて独立し、ブロックゲージの製作に専念するようになった。ちょうどアメリカで自動車の大量生産が軌道に乗り出す時期と一致し、フォードが採用するようになって、近代生産技術の中で精密測定用器具として、従来の線度器に代わる端度器としての地位が確立されるようになった。ヨハンソンはさらにブロックゲージの端面仕上げの向上に力を尽くし、リングングにおける密着力は37気圧にも達したといわれる。このようにして機械部品の最高仕上げはブロックゲージにあるという時代と認識が始まるようになった。ブロックゲージの測定面の面粗さはJISでは、0.06 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ (0級、0級)、または0.08 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ (1級、2級)以下と規定されている。実際に現在各国、各社で製作

されているブロックゲージについて実測したところ、図2のような結果が得られた。一番優れたものの面粗さは $0.02\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 程度まで到達していることが分かった。精密測定機や精密工作機械のすべり面の仕上げには、ブロックゲージの仕上げ面に近いところまで面粗さを向上させ、さらに平面度や真直度などを高精度に仕上げるように努力が払われている。精密測定において、平面度や面粗さの測定に用いられているオプティカルフラットについての測定結果の一例を表1りに示す。溶融石英やガラス製のものの面粗さはnmオーダーとなっている。鋼製の部品よりも非金属硬脆材料を用いた部品の方が一桁高い精度の面粗さが得られることが明らかであり、大変興味深いことである。

精密測定の基準となる金属定盤の精度については、250mm角のものについてJISでは0級として、 $2\mu\text{m}$ (0級)の平面度が規定されている。 $0.1\mu\text{m}$ オーダーの定量化が必要とされている超精密機械部品の測定に対しては、JIS 0級の $1/5 \sim 1/10$ 程度の平面度を持つ定盤が必要とされている。すなわち、250mm角のものについて、 $0.4 \sim 0.2\mu\text{m}$ 程度の平面度が要求されることになる²⁾。

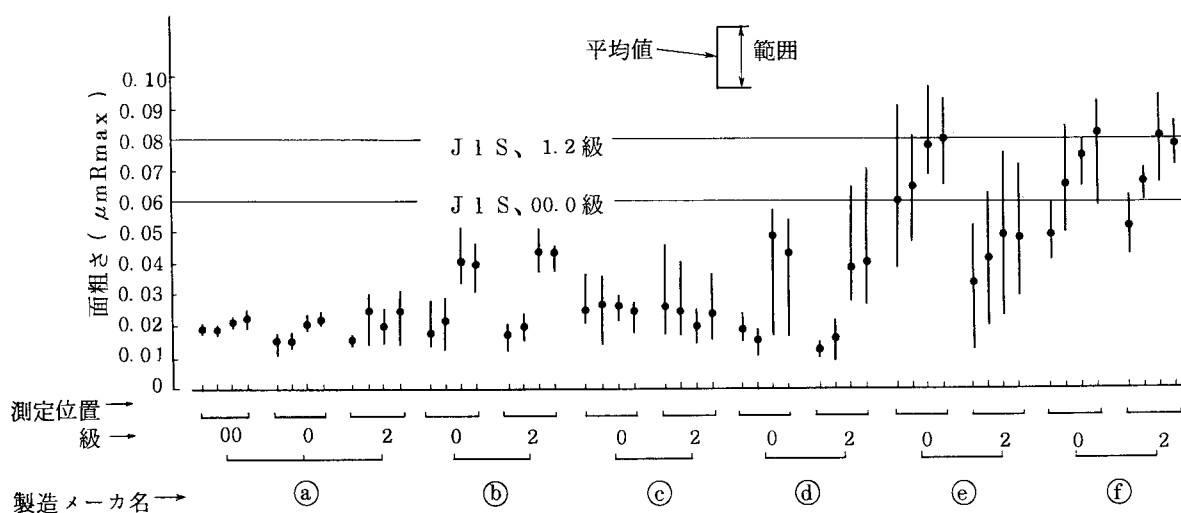


図2 ブロックゲージの面粗さ

ジャイロ스코ープ、磁気ディスク装置、家庭用VTR、レーザー・スキャナ、テープレコーダあるいはレコードプレイヤーなどに使われるメカトロンクス用小型軸受類には従来の軸受とは1~2桁高い回転精度が要求されている。大量に使われているVTR用軸受の精度は海外の軍用ジャイロ스코ープ用軸受よりもはるかに精度の高いことが認められている。

表1 オプティカルフラットの面粗さ

製造メーカ	材 質	寸法 mm	面粗さnmRmax
A	溶融石英 鋼*	55×13.5	4~8
		55×13.5	20~30
B	溶融石英 ガラス	60×15	1~2
		60×15	2~3
C	溶融石英	45×12	2~3
D	溶融石英	51×15	3~4

* ベースプレート

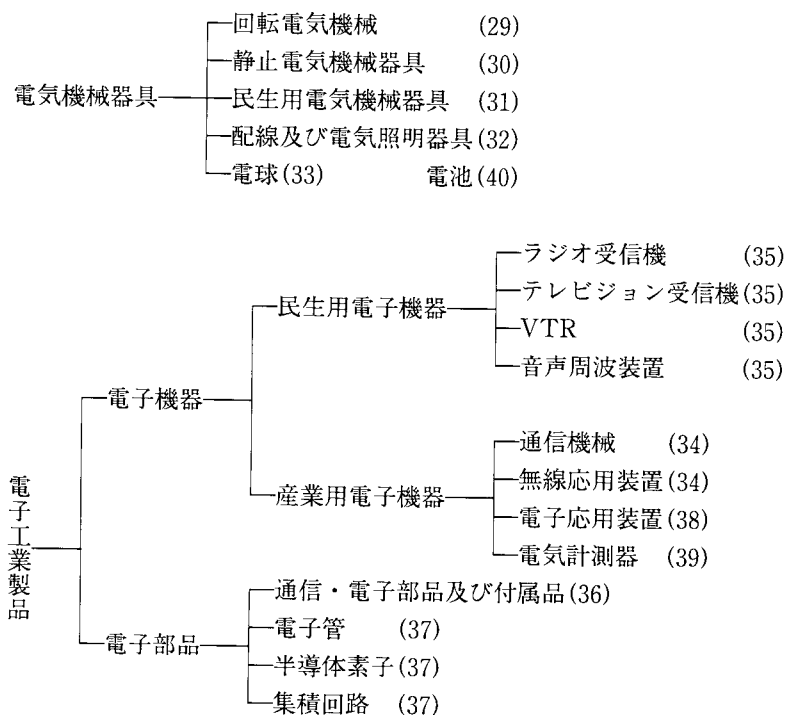
(2) 電気機械工業における部品類

電気機械工業は今後とも日本における製造業の大きな柱であることは間違いない。電気機械工業を従来からの考え方に沿って分類すれば表2のようになる。機械工業統計表にしたがって、電気機械工業品目別に細分化したものについて、生産金額、生産数量を考慮に入れながら、部品製作上の必要精度などを検討してみよう。

たとえば、回転電気機械のうちで、タービン発電機などは大容量化に伴い、部品寸法が大形化し、その加工精度が年々厳しくなっている。あわせて、組立寸法も数十mにわたって0.01mmオーダのアライメントを必要とするようになってきている。いっぽう超小形電動機といわれるマイクロモータにおいては、部品寸法が年々小さくなり、しかも加工精度特に形状精度が厳しくなり、あわせて組立時の正確なダイナミックバランスとりが必要とされる。

表2 電気機械工業の分類

()内の番号は機械統計に用いられている分類番号



電話機および交換機などは、信頼性という面から素材製造から部品加工、組立までをスルーして、非常に高い品質管理が追求されている。

ラジオ・テレビ・VTR・テープレコーダなどは、身のまわりにふつうに使われているものであり、生産金額も大きいし、生産数量も多い。テレビジョン受信機に用いられているブラウン管を構成する電子銃、シャドウマスクなど、高精度部品が要求されている³⁾。

テープレコーダにも高精度部品がかなり多い。特に小型化されたマイクロカセット・テープレコーダはその傾向が著しい。モータとしては、消費電流の少ないこと、回転むらができるだけ小さいこと、電氣的・機械的雑音の少ないこと、などが要求されている⁴⁾。直流小形モータあるいはコアレスモータが使われる。外径1~1.5mmの軸を用いたテープレコーダ用モータでは、外径の寸法差は3μm以下、

真円度 $0.5\mu\text{m}$ 以内、真直度 $1.5\mu\text{m}$ 以内、粗さ $0.3\mu\text{m}$ 以内にする必要がある⁴⁾。ロータ半径 10mm 程度の個所で 2mg 以下になるまでロータのバランス取りをする必要がある。整流子とブラシの回転接触音を小さくするために、ブラシの摺動面をダイヤモンド切削により虹面仕上げすることが望まれている。キャプスタン軸は磁気テープに常に圧着して回転するため、硬質でさびの発生しないこと、帯磁のないことが要求され、軸方向に曲がり生じないこと、そして $0.1\mu\text{m}$ 以内の真円度に仕上げることが望ましいとされている。図3のような構造をしたキャプスタン軸では、フライホイールにキャプスタン軸を圧入して作られる。A面およびB面の回転精度として μm オーダであることが望まれている。軸受内径に加工精度および面粗さも大切な要因である。

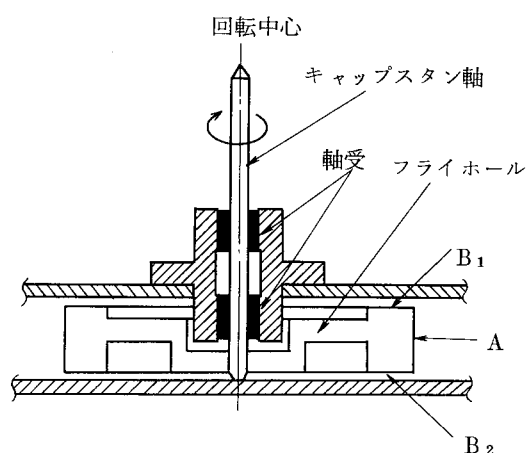


図3 キャプスタン軸の構造例

VTR (ビデオテープレコーダ) の生産額の伸びは誠に目覚ましいものがある。カラーテレビをはるかに抜いており、家電製品の王座を占めている。家庭用VTRはわが国で開発され、製品化がもっとも早く行われた製品であり、小形化、低コスト化、高信頼化、高機能化などの技術開発が進められた。年とともに面記録密度ならびに最短記録波長が小さくなっている⁵⁾。これを達成するために、磁気ヘッド、シリンダ、回転ヘッドアセンブリなどに高精度が要求される⁵⁾⁶⁾。VTRシリンダの一例を図4に示す。高速回転する磁気ヘッドにより磁気テープをヘリカルスキヤニングして記録・再生する方式である。回転シリンダとインロー部を構成する部分の直径公差 $4\mu\text{m}$ 以内、軸部および端面部の面ぶれ $1.5\mu\text{m}$ 以内が要求される²⁾⁶⁾。また磁気テープを斜め方向に精度よく走行させるために、固定シリンダ外周に 0.15mm 程度の段差を持つスパイラル状のリード溝加工が施されるが、このリードの直線性はテープの巻きつく角度範囲 ($170^\circ\sim 180^\circ$) で $3\sim 4\mu\text{m}$ が必要とされている。キャプスタン軸は直径 3.5mm 、長さ 50mm ぐらいのものが用いられるが、直径公差 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 、真円度 $0.3\mu\text{m}$ 、円筒度および真直度 $1.0\mu\text{m}$ が要求されている²⁾。

次に電子部品のうちの水晶振動子と磁気ヘッドについて述べよう。水晶振動子の生産の推移を見ると数量が急増し、単価が低下するというのが、電子部品の大きな特徴である。また小型化の傾向も著しい。水晶振動子は通信機分野や時計分野のほかに、VTR、カラーテレビ、パーソナル無線といった民生用分野から、パソコン、ファクシミリなどにも広く用いられている。現在はほとんど人工水晶を

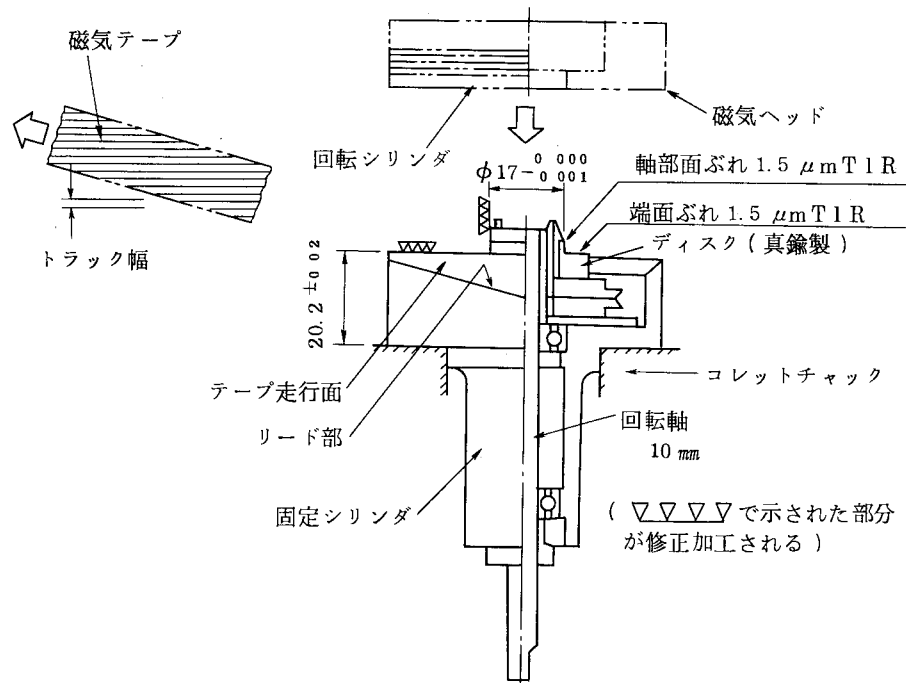


図4 VTRシリンダ

使って製造されており、大多数が周波数温度特性のすぐれたATカットであり、800kHz~150MHzの範囲で使われる²⁾。ふつうは20~40mm角、厚さ0.1mm程度の水晶板を、厚み精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、平面度 $1.5 \mu\text{m}$ 以内、平行度 $2 \mu\text{m}$ 以内に両面同時研磨される⁷⁾。最終的には厚さ $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 程度、平面度 $3 \mu\text{m}$ 以内、平行度 $5''$ 以内におさえる必要があるとされている³⁾。このためには、自動的に周波数を測定しながら、両面ラッピングが行われている。

磁気ヘッドは、音響用、VTR用、電算機用など各方面で使われている²⁾。素材としてはパーマロイ、セダストあるいはフェライトなどの磁性材料が用いられている³⁾。最新のVTR用磁気ヘッドの一例を図5に示す。磁気ギャップを形成するためガラスで融着されている。巻線は $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 径のものが用いられている。公差的にもっとも厳しい部分はトラック幅 T_w とギャップ長 G_L であり、磁気ヘッドの性能を左右する重要な要素である。記録密度の向上とともにこれらの値が年次的にどのように変化してきたかをまとめたのが図6である⁸⁾。1956年4月放送用VTRが最初に実用化されたときは $T_w = 250 \mu\text{m}$ 、 $G_L = 2 \mu\text{m}$ であったものが、次第に微細寸法が要求されるようになってきている。6~8時間の録画可能な家庭用VTRでは、 $T_w = 19 \pm 2 \mu\text{m}$ 、 $G_L = 0.3 \pm 0.02 \mu\text{m}$ が必要とされている⁸⁾。このためにギャップを形成する2面は、平面度・面粗さおよび加工変質層の大きさはいずれも $0.03 \mu\text{m}$ 以内であることが要求されている²⁾。加工変質層並びに面粗さは、理論的ギャップ長さの10%以下であることが必要とされるからである。

このほか表3に示した電子応用装置のなかに、超精密加工の必要とされるものがかなり多く含まれている。情報処理機器類の急速な進展に伴って、これに対応した電子計算機用外部記憶装置の高性能

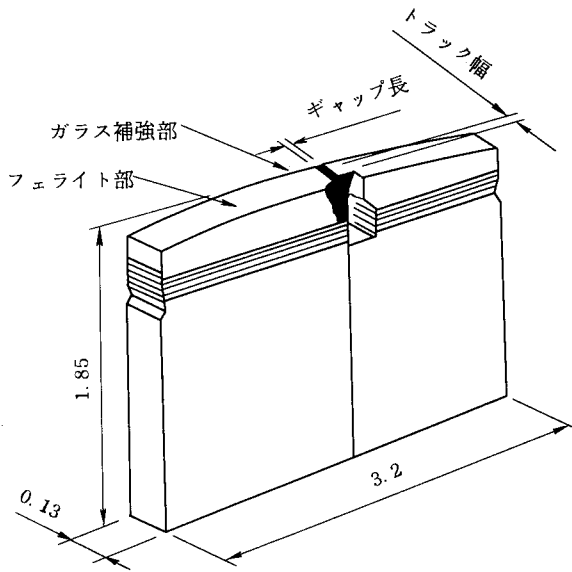


図5 VTR用磁気ヘッドの一例

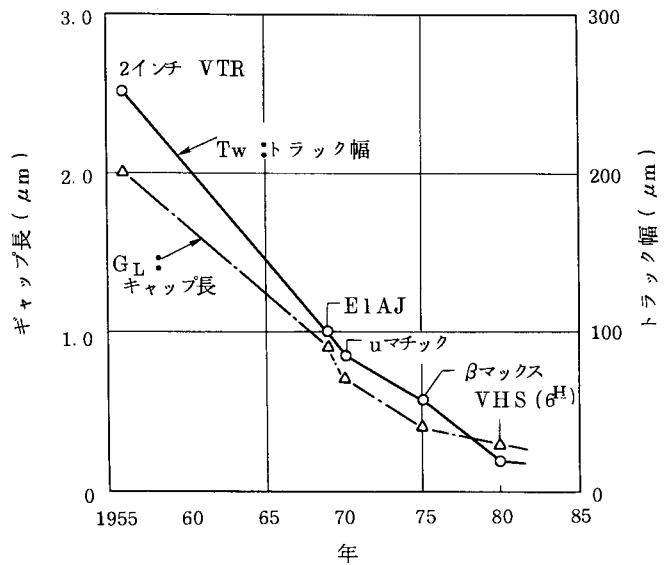
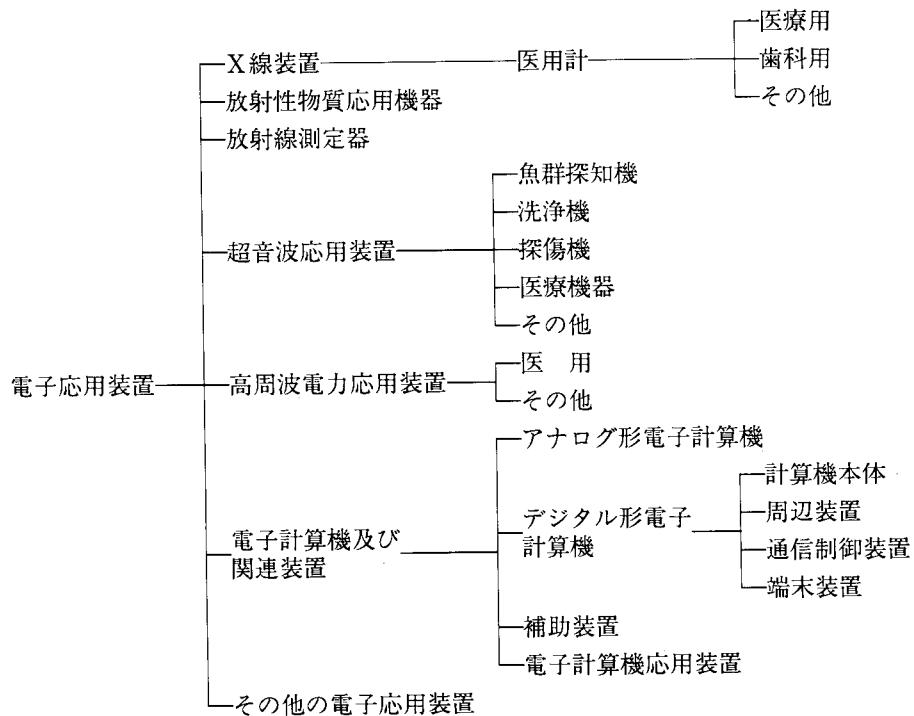


図6 VTR用磁気ヘッドのギャップ長、トラック幅の推移

化、多様化の傾向が益々強い。なかでも磁気ディスク装置は高密度化と高速化が強く要求され、2年で2.5倍の性能向上が図られている。この関係の詳細については、本シリーズ別巻に述べられるので省略する。

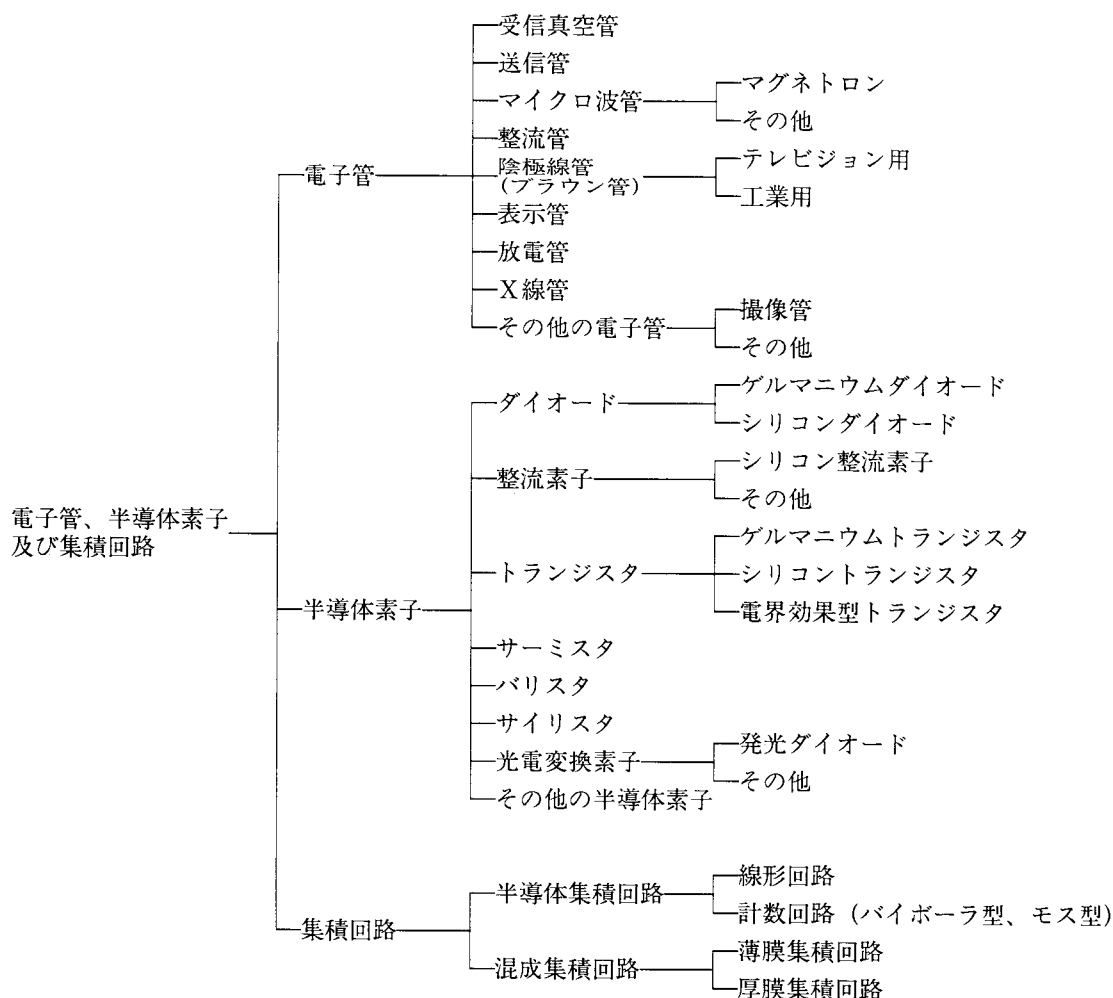
表3 電子応用装置の分類



(3) 半導体集積回路部品

通産省機械工業統計によれば、電子管、半導体素子及び集積回路は表4のように分類されている。

表4 電子管、半導体素子及び集積回路の分類



半導体素子および集積回路の生産額は年々急増しており、それらの生産個数はきわめて大きい。しかも単価の低下は年々きわめて著しい。このような傾向は他種製品には見られない。しかもその高い信頼性が強く要求される。技術集約産業の典型といわれ、研究開発に大きな投資をしながら、比較的短期間に飛躍的進歩をなし遂げたものである。半導体素子および集積回路の生産金額は伸びる一方であって、マイクロエレクトロ時代を支える中心的産業であることは明らかである。生産金額の伸びは今後とも益々増大するものと予想されている。品質のすぐれたものを多量に安く作るという大量生産の必要性は半導体工業ではもっとも強い。高集積化・微細化・高信頼化・多量化を達成するために超精密微細加工の必要性はきわめて高い。1948年にショックレーによりトランジスタが発明され、現在のマイクロエレクトロニクス時代の夜明けとなった。1958年に半導体集積回路（IC）が発明され、小型化、軽量化、省エネルギー化に大きな寄与を果たし、1961年からICの量産が開始された。さらに数mm角のシリコンチップの上に、数万個のトランジスタをのせたLSIが生まれる。これはICの延長線上にあるものであるが、徹底的な微細加工技術が必要とされる。さらに超LSI、超々LSIの時代へと移行

している。

IC→LSI→超LSIの発展において、トランジスタの大きさは $30\mu\text{m}$ → $5\mu\text{m}$ → $3\mu\text{m}$ (64KDRAM)次々と微細化されていった⁹⁾。トランジスタを微細化することによって、電極の静電容量が小さくなり、電極間走行距離が減り、トランジスタの高周波特性が向上することになる。

1948年トランジスタの発明以来、半導体デバイスおよびプロセス技術の主な発展をまとめると表5のようになる⁹⁾。

表5 半導体デバイスおよびプロセス技術の主な発展

年	次	デバイス	プロセス
	1948	トランジスタ発明 (点接触型)	
1950年代 (トランジスタ時代)	1950	接合型トランジスタ	合金接合形成技術
	1952		シリコン精製技術 シリコン単結晶化技術
	1955	シリコンメサ型トランジスタ	選択拡散技術
	1958	ハイブリットIC	
	1959	IC特許	プレーナ技術
1960年代 (IC時代)	1960	接合型FET MOS FET IC (バイポーラ) IC (NOS)	エピタキシャル成長技術
	1962		
	1963		
	1964		リソグラフィ技術の確立
	1968		表面安定化技術(パッシベーション) 薄膜形成技術
1970年代 (LSI時代)	1970	LSI (1K MOSメモリ。電卓用LSI)	シリコンゲート技術 多層電極形成技術
	1974	4K MOSメモリ(ダイナミック) 4ビットマイクロプロセッサ	イオン注入技術
	1976	16K MOSメモリ(ダイナミック) 8ビットマイクロプロセッサ	酸化膜アイソレーション技術
	1978	16ビットマイクロプロセッサ	投影露光技術 電子ビームマスク技術
1980年代 (超LSI時代)	1980	64K MOSメモリ(ダイナミック) 16K MOSメモリ(スタチック)	縮小投影露光技術 ドライプロセス技術
	1981	32ビットマイクロコンピュータ CCDカメラ用素子	ウエハ大口径化技術
	1984	256K MOSメモリ	

(前田和夫：最新LSIプロセス技術より一部改変)

半導体集積回路は、トランジスタからIC、ICからLSIへ、さらに超LSIへと、技術革新がほぼ10年ごとに行われてきている。それを可能にしたのは高集積度の実現であり、図7に示すように機能はほぼ3年ごとに4倍になっている。高集積化を実現するために、最小パターン寸法は非常な勢いで微細化されている。

図8について半導体集積回路の製造工程を簡単に説明する。まずシリコン単結晶を作ることから始まる。現在最大径で8~10インチぐらいのものまでできるようになってきている。無欠陥大口径単結晶製造技術は通産省の大形プロジェクトが一つの大きなきっかけになって、日本の技術は世界の最高

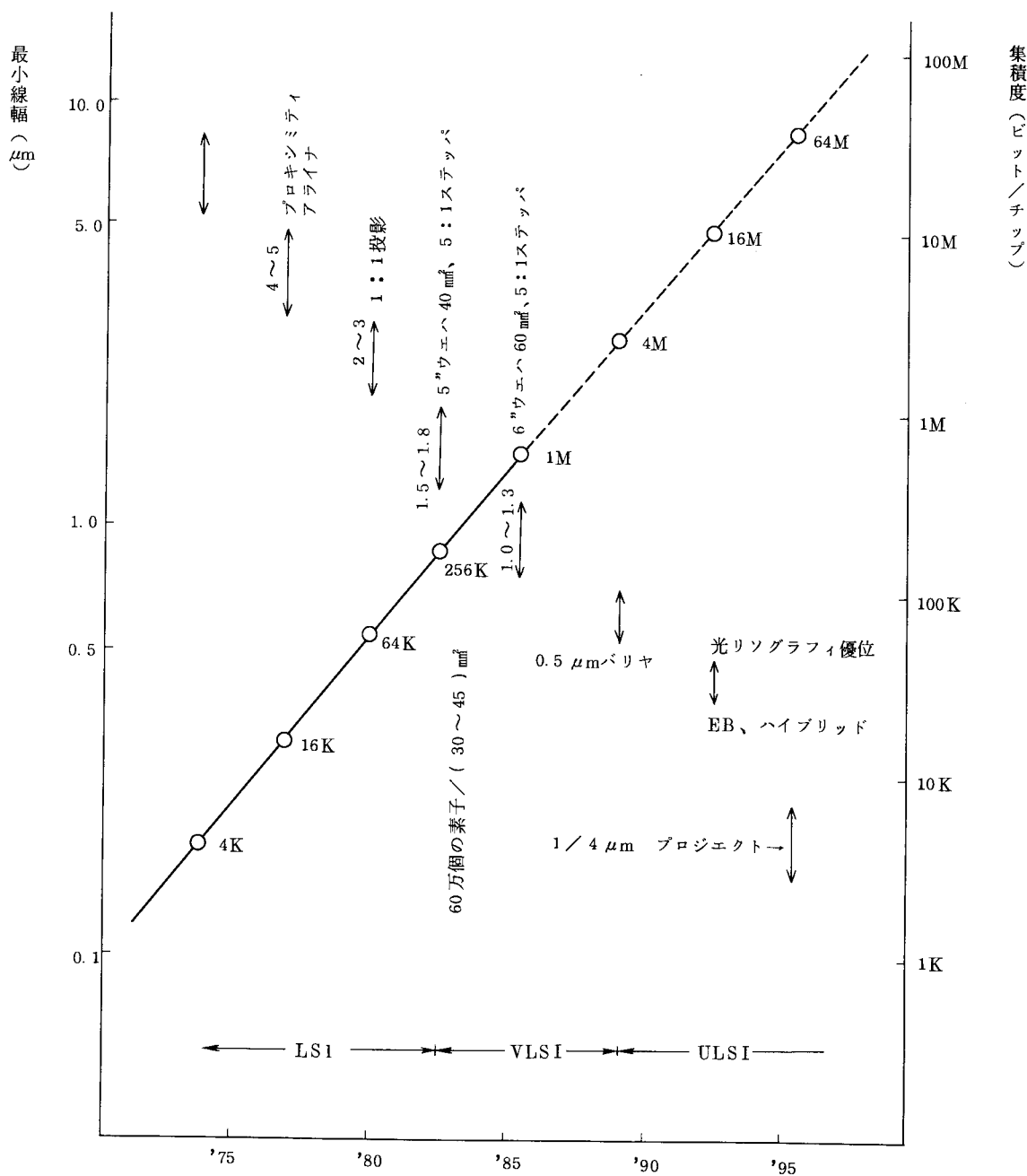


図7 DRAM (Dynamic Random Access Memory)の年代別傾向

レベルを進んでいる。

結晶ができてから、外径研削、結晶方位をきめるためのオリエンテーションフラット研削をした後、これを切断することが次の問題である。ふつうは内周型ダイヤモンド切断砥石が使われている。年々径が大きくなるにつれて、切断のときの反りの問題というような、切断加工上の問題をたくさん含んでいる。次に、ラッピングで平面出しをする。それから、ベベリング、エッチングの工程を経て最終

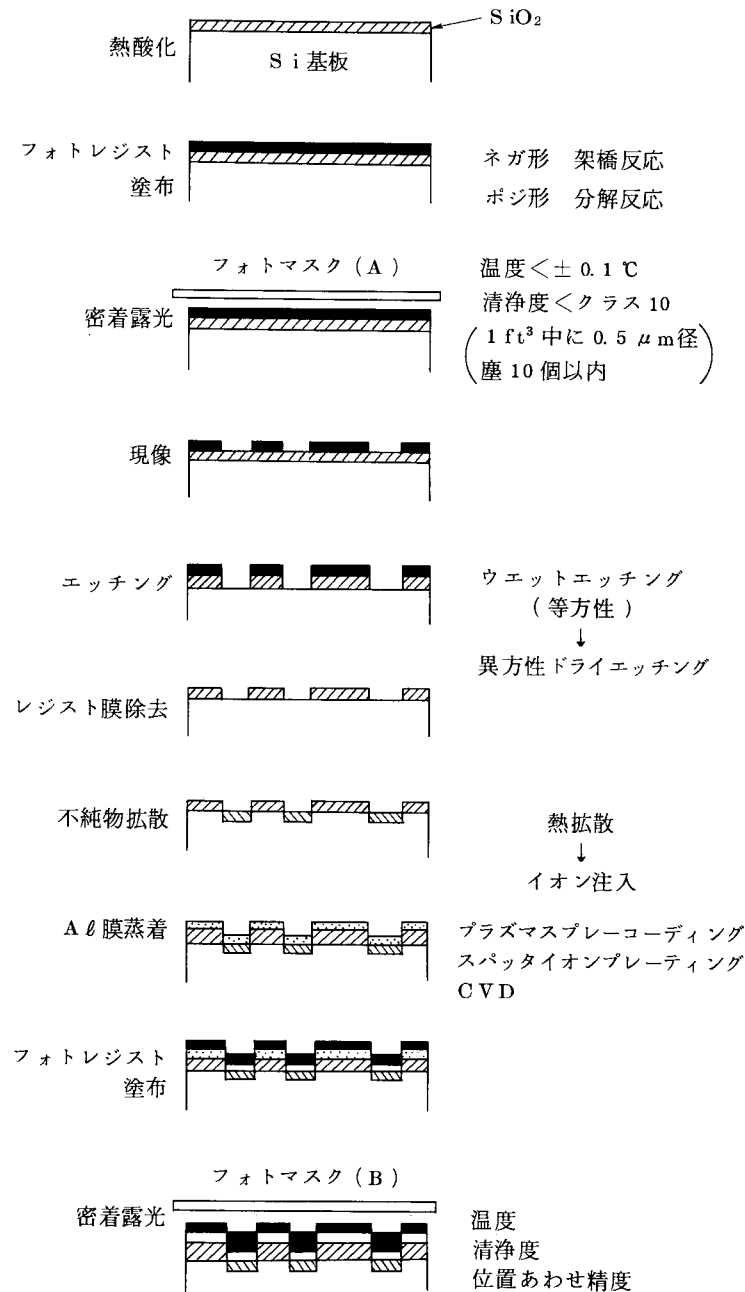


図 8 半導体集積回路の製造工程

表6 半導体ウエハ各工程における加工精度・能率等

ラ ッ ピ ン グ	能率：2 μ m/min 平行度：2～3 μ m 板厚精度： \pm 5 μ m (ロット内)
ベ ベ リ ン グ	外径精度 \pm 50 μ m オリ・フラ真直度 20 μ m
エ ッ チ ン グ	端部ダレ 5～10 μ m 平行度 5～10 μ m
ポ リ シ ン グ	能率：20～50 μ m/h 平面度： \sim 3 μ m/4" 平行度：5～7 μ m 表面粗さ Rmax20 Å

ポリシングで仕上げられる。それぞれの工程で要求される加工精度、能率等は表6に示すとおりである。パターン寸法が小さくなれば小さくなるほど、表7に示すような各種寸法精度を考えていかなければならない。125mm径のSiウエハについて、外径 \pm 1mm、厚さ600～650 μ mがふつうであるが、厚さバラツキ \pm 3 μ m以内、平面度3 μ m以内、そり70 μ m以内、粗さ2nmR_{max}以内、加工欠陥密度100個/cm²以内といわれている。これらの値は高集積化につれて益々厳しいことが要求される。いま普通に流れているもので、面粗さが2nmオーダの面が、量産規模として作られている。ブロックゲージの面粗さよりひと桁高い精度のものが、実際の生産ラインで使われているということである。そのためSi単結晶生成、切断、ラッピング、ポリシングなどについて多くの研究がなされ、それらの進歩発展は目覚ましいものがある。

これだけ手間暇をかけてウエハを作り、次に図9に示す方式によって、半導体集積回路は作られる。最初炉中に入れ表面を酸化し、その上にフォトレジストを塗布する。続いてフォトマスクを密着露光させて露光を行う。このとき微細な塵があるとパターンが正しく作られないので、クラス10以下の清浄度空間が必要とされる。又フォトマスクSiウエハの熱膨張係数が異なるため、 \pm 0.1 $^{\circ}$ C以下の温度制御が必要となる。続いて現像、エッチング、レジマ膜除去、そしてSiウエハ中に不純物拡散を行い、Al膜蒸着をして第一工程が終わる。続いてフォトレジスト塗布して、異なるフォトマスクを使い露光、エッチング、拡散ということが繰り返し行われる。複雑な機能を果たすために異なるマスクを何回も重ね合わせなければならない。そのための位置決め精度として大変厳しいものが要求されている。たとえば線幅2 μ mというようなものを実際の製品で作ろうということになると、位置合わせとしては \pm 0.2 μ mオーダの精度で行わなければならない。それに応じてそれぞれに使う機械自身の精度は、さらにもうひと桁高いものを作らなければならない。ふつう機械工場における精密測定器なみの精度をもった設備が、実際の半導体生産ラインで稼働しているということになる。

半導体素子製造における、エッチング技術や露光技術において、今までには使われなかった新しいエネルギー源が、微細寸法形成に使用されるというのが最近の大きな趨勢である。

図8に示した微細化傾向を達成するために、高解像度の光リソグラフィ技術が確立されている。す

なわちフォトリソ材料として紫外線による架橋反応を行うネガ形、分解反応を行うポジ形などが開発されている。又密着露光の欠点を補う目的でプロキシミティ露光が開発されて4～5 μm パターン幅の作成が可能となった。さらに光の1：1投影露光により2～3 μm パターン幅の作成ができるようになった。又5：1縮小投影露光の開発により、1 μm パターン幅までの実現に大きく寄与した。さらに光組としてG線(436nm)からI線(365nm)へ、又さらに短波長のエキシマレーザの利用により、サブミクロンのパターン幅の作成も可能となってきた。

また、電子ビーム描画によりマスクを製作したり、電子ビームやX線を用いる露光によるパターン作製技術(図9)などの開発が急ピッチで進められている。また従来HF(フッ酸)による湿式エッチ

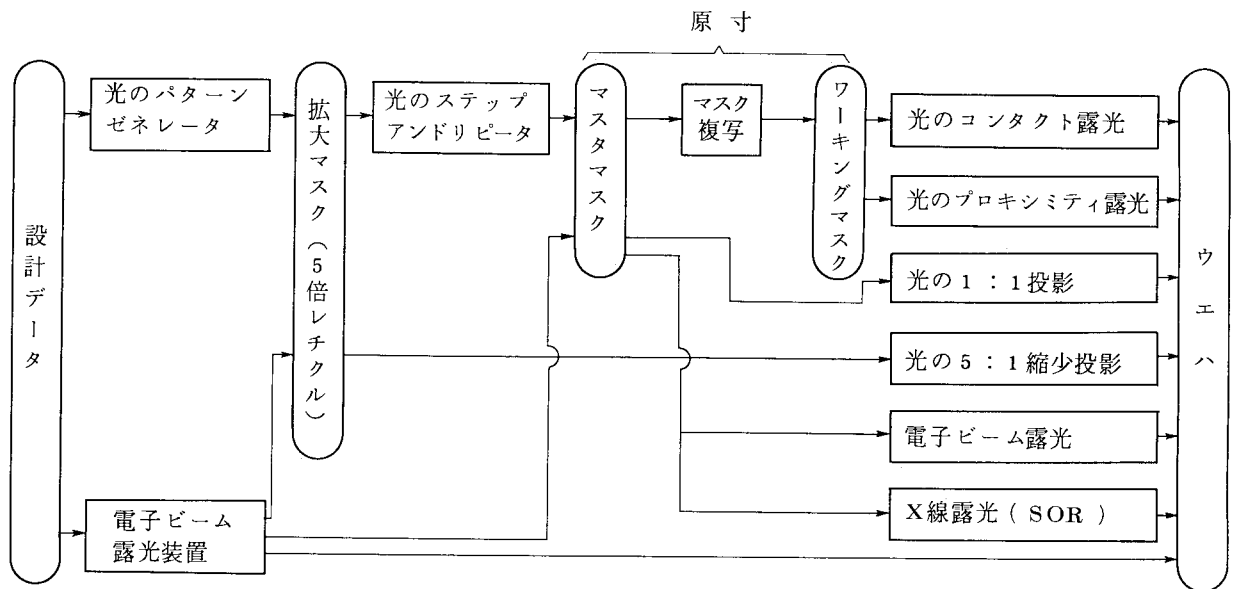


図9 露光方式の変化

光 G線(436nm) → I線(365nm)

エキシマレーザ KrF(248nm)、F₂(158nm) ArF(193nm)

ングでは、サイドエッチングが生じやすく、鋭いパターンが得られにくかった。そこでそれに代わるものとして、プラズマエッチング、反応性イオンエッチング、あるいはレーザエッチングなど新しい異方性エッチング技術としていくつかのドライエッチング技術が実用化に入り、開発も進められ微細化に対応している(図10)。このほか熱拡散に代る方法としてイオン注入技術の開発導入など半導体プロセス技術の進歩は目ざましい。

このような半導体プロセス技術には、従来の機械工業における部品製造には使われなかった新しいエネルギー利用の各種物理・化学加工法(表8)が使われ、0.1 μm オーダのパターン幅の実現はそんなに遠くない時代となってきた。これらの技術は、近い将来における光産業や精密機械部品類の加工

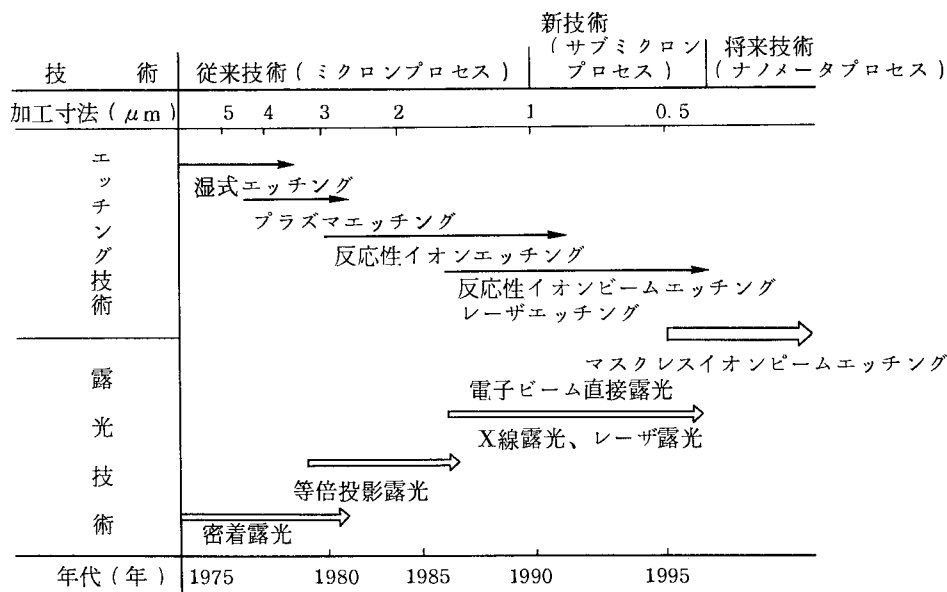


図10 パターン寸法の微細化に対応する新加工技術

に使うことのできる可能性を秘めているので、注意を怠ってはならないであろう。また $0.1\mu\text{m}$ オーダのパターン作成に使われる装置類に対しては、 $0.01\mu\text{m}$ オーダの総合精度が要求されるのは当然である。

LSIが実用化されるにつれて、本節のはじめに述べた電子計算機の機能向上、小形軽量化は誠に画期的なものがある。最初に製作された電子計算機の機能は、現在手の指の上ののるようなワンチップのマイクロプロセッサで十分果たせるようになってきている。日本のあるメーカーで作っている電卓について1964年製と1979年製のものについての比較例¹⁰⁾を示すと、

- 厚 さ 250mm→1.6mm (1/156)
 - 長 さ 440mm→94mm (1/4.7)
 - 体 積 35,600cm³→8.1cm³ (1/4.395)
 - 重 さ 25kg →36g (1/694)
 - 部品点数 トランジスタ15,000個→LSI 3個
 - 消費電力 90W →0.2mW (1/450,000)
- このような例は他の工業では考えられない。

(4) 光学工業における部品類

光産業技術振興協会の報告¹¹⁾によれば、光技術の適用分野と将来的可能性は、図11のようにまとめられている。光産業は、1980年から2000年で、年平均28%の成長を達成するとみられる。

光通信システム、光機器、光部品の構成比をみると、1985年から1990年の間では、そんなに大きな

表8 新エネルギーを用いる加工法

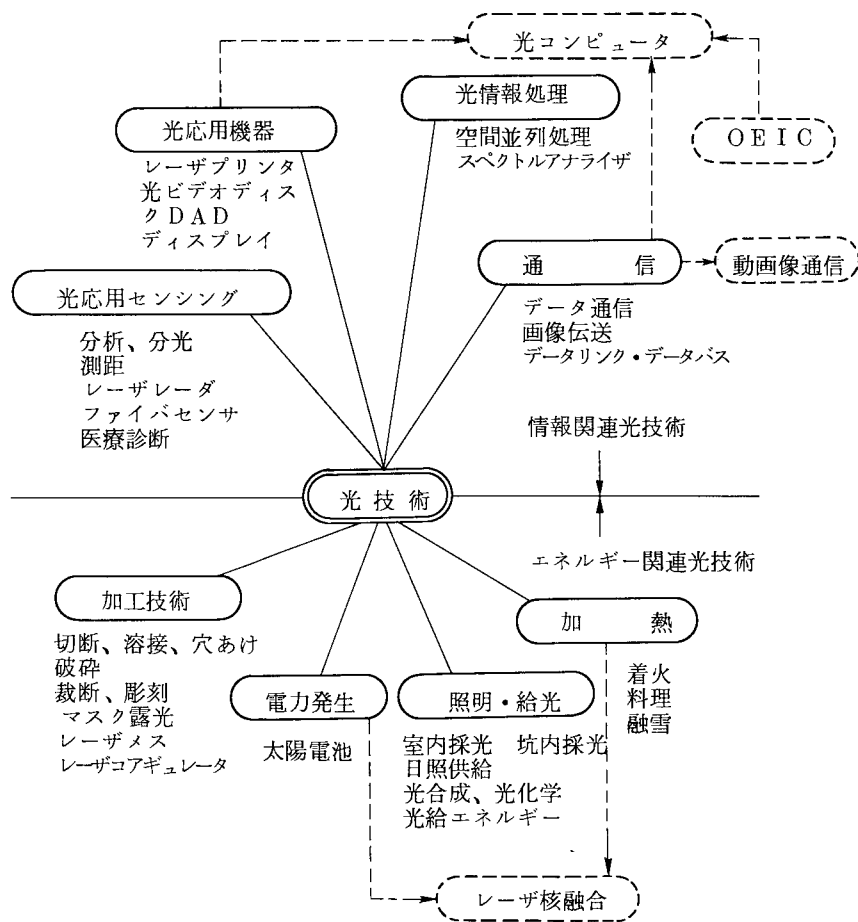
	利用エネルギー	除 去	付 着 ・ 表 面 処 理	接 合	変 形
物理的 加工	放 電	放電加工	アークスプレーコーティング	放電融接	放電成形
		ワイヤ放電加工			放電焼結
	電子ビーム	電子ビーム加工	電子ビーム蒸着	電子ビーム溶接	
			電子ビーム熱処理		
	イ オ ン	イオンビーム加工	イオンプレーティング		
		イオンシャワー加工	スパッタイオンプレーティング		
		イオンエッチング	反応イオンプレーティング		
		反応性スパッタエッチング	イオンクラスタービーム蒸着		
			イオンインプランテーション		
	プラズマ	プラズマジェット加工	プラズマスプレーコーティング	プラズマ溶接	
		プラズマアーク加工	プラズマ溶射		
		プラズマエッチング	窒化・炭化		
	電磁気エネルギー			電磁固相接合	電磁成形
光エネルギー	レーザービーム加工	レーザープレーティング	レーザー溶接		
	レーザーエッチング	レーザー熱処理	光ビーム溶接		
化学的 加工	化学エネルギー	化学研磨	化学メッキ	爆発圧接	爆発成形
		化学研剤	無電解メッキ		
		ケミカルミリング	化学蒸着 (CVD)		
		フォトエッチング	爆発コーティング		
	電気化学エネルギー	電解研磨	電気メッキ		
		電解研剤	電着		
		電解加工	電鋳		
		STEM(*)	陽極酸化		
		ES(**)	不動態化処理		

(*) Shaped-Tube-Electro-Chemical-Machining

(**) Electro-Stream

変化はみられないが、1990年と2000年との間では、光通信システムと光部品の占める割合が増加している。これは、公衆通信システム及び特定ユーザ通信システムでの画像伝達が、1990年以降に本格的な普及期に入るためと考えられる。これに伴って光部品の生産額も増している。

オプトロニクス (エレクトロオプティクス) 分野は表9のように分類されている。レーザー関係として固体レーザーロッド、あるいはキャビティの加工精度はかなり高いものが要求されている。またCO₂レーザーを中心とした高エネルギーレーザーに用いられる非球面金属反射鏡については、直径2m程度のものに対して形状精度0.1μmオーダー、面粗さnmオーダー、反射率98%以上のものが要求され、超精密ダ



罫 (---) で囲まれているのは将来的技術である。

図11 光技術の適用分野と将来的可能性 (光産業技術振興協会)

イヤモンド切削および超精密ポリシングへの期待がきわめて高い。

またOA機器に用いられるレーザー応用機器として重要なレーザープリンタに用いられるポリゴンミラーに対しても高精度が必要とされている。詳細は本シリーズ別冊で述べられるので詳細は省略する。

図12に示すように、今後10年間の先端技術市場をみると、光ファイバ通信、デジタルオーディオディスク、ビデオディスク、レーザープリンタなど、オプトロニクス関連機器の今後の産業市場に占める規模は極めて大きい¹²⁾。

オプトロニクスは情報処理技術分野で、質的にはマイクロエレクトロニクス産業と比肩できるキーテクノロジーに成長し、将来の情報化社会を実現する先端技術として期待が高まっている。直径0.2mmの光ファイバで、毎秒1億ビットの情報を伝送する光通信システムの開発が完成し、この関連技術は工場の自動化に伴う制御システムをも含めて広く産業界で活用され始めている。これらの機器開発は機能的に大きなインパクトを業界に与えるばかりでなく、産業における製品の一つの大きな柱としての期待が寄せられている。光応用製品としては、加工精度、組立精度ともに、光の波長より厳しい精度が要求されることは当然である。従って μm 以下nmに至る厳しい精度を実現させる超精密加工技術が

表9 オプトロニクスの構成要素

光 部 品	光 機 器	光 応 用 シ ス テ ム
<u>発光素子</u> 半導体レーザー 長波長 (1.3~1.5 μ m) 短波長 (0.8 μ m帯) 可視域 (0.78 μ m) 気体レーザー ヘリウムネオンレーザー アルゴンレーザー 炭酸ガスレーザー 固体レーザー ルビーレーザー ガラスレーザー YAGレーザー 液体レーザー LED 通信用 その他用 <u>受光素子</u> Pin PD APD その他のホットダイオード ホトトランジスタ <u>太陽電池</u> 電力用 民生用 宇宙用 <u>光ファイバ</u> 石英系ファイバ ステップインデックスファイバ グレーデッドインデックスファイバ シングルモードファイバ 偏波面保存ファイバ イメージファイバ ガラスファイバ プラスチックファイバ エネルギー伝送用ファイバ <u>その他の光部品</u> 光分岐結合器 光合波分波器 光減衰器 光アイソレータ 微小光学部品 光変調器 光偏向器 光スイッチ素子 コネクタ プラグ その他の部品 <u>未来素子</u> OEIC 双安定素子 その他	<u>光伝送機器</u> デジタルリンク アナログリンク 光中継器及び装置 光モデム 光マルチプレクサ 空間伝搬用通信機器 <u>光測定器</u> 伝送損失測定器 硫断場所検出器 その他の計測器 パワーメータ <u>敷設用機器</u> ファイバ融着器 ファイバ利用センサ <u>電流・磁界センサ</u> <u>電圧・電界センサ</u> <u>温度センサ</u> <u>流速・角速度センサ</u> <u>振動・圧力・音響センサ</u> <u>放射線センサ</u> <u>イメージセンサ</u> <u>レーザー利用センサ</u> レーザレーダ 位置センサ 長さセンサ 厚さセンサ <u>光学式ビデオディスク</u> 民生用 産業用 <u>光学式デジタルオーディオディ</u> <u>スクプリンタ</u> 半導体レーザープリンタ 気体レーザープリンタ LEDプリンタ <u>レーザスキャナ</u> 半導体レーザー 気体レーザー <u>レーザメス</u> <u>レーザ加工機</u> 穴あけ加工 切断加工 表面処理 アニールンク 溶接 半導体加工用加工機 <u>未来機器</u> 光コンピュータ 光交換機	<u>光通信システム</u> 公衆通信システム 長・中距離通信システム 加入者系通信システム 海底通信システム 画像通信システム 特定ユーザ通信システム 電力企業関連通信システム 鉄鋼関連通信システム 化学関連通信システム その他製造業関連通信システム 鉄道関連通信システム 道路関連通信システム 大学・研究所関連通信システム 医療関連通信システム OA及びビル管理システム 放送及び地域共聴システム 政府及び地方公共団体関連システム 移動体用先システム 自動車 船舶 航空機 <u>光エネルギー利用システム</u> 電力企業関連エネルギー利用システム 鉄鋼企業関連エネルギー利用システム 化学企業関連エネルギー利用システム その他製造業関連エネルギー利用システム 大学・研究所関連エネルギー利用システム 医療関連エネルギー利用システム 政府・地方自治体関連エネルギー利用システム <u>太陽電池発電システム</u> 電力企業関連太陽電池発電システム 大学・研究所関連発電システム 農業用太陽電池発電システム 住宅用太陽電池発電システム 工業用太陽電池発電システム <u>その他のシステム</u> 海洋牧場用先システム レーザ核融合発電システム

要求される。これらのうちのいくつかについて述べる。

光コネクタは、ファイバとファイバあるいは光部品とファイバの光接続に用いるもので、着脱可能

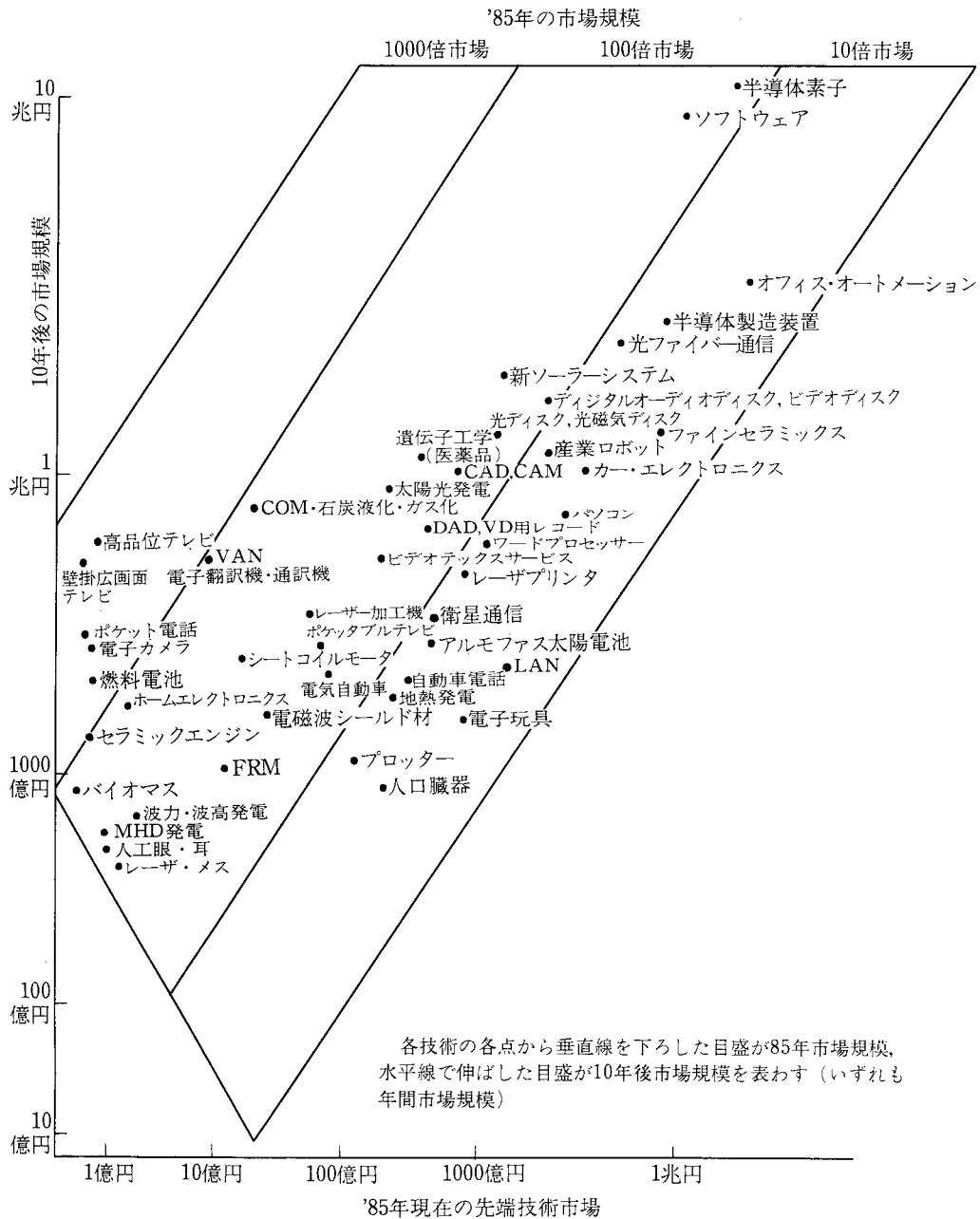


図12 先端産業の展望（渡辺）

であることを基本としている。光接続は光学的な結合が必要であるため、機械寸法的には極めて高精度である。

光ファイバ内の伝送路の損失に比べ、接続点での損失が大きいため、伝送の品質やコストに占めるウエイトが高く、これまでは光通信システム実用化の大きなポイントであった。

光コネクタの接続損失はファイバの光学的な結合の良否によって決まる。ファイバ内の光の伝送路はコア部であり、この突き合せ精度、すなわち軸ずれ量や角度折れ量などが必要である。現在、全接

続損失は1.0dB以下を目標としている。

図13に示すFC形光コネクタはコア径50 μ mの多モードファイバと10 μ mの単一モードファイバ用に

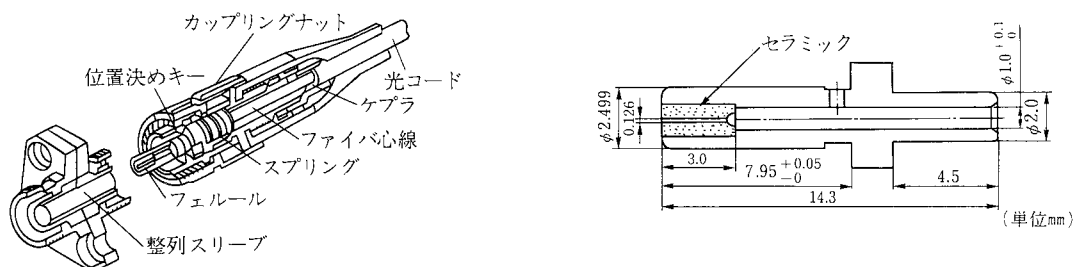


図13 FC形コネクタの構造とフェルールの形状寸法

開発された高性能な光コネクタで、ファイバ外径は125 μ mを標準としている。フェルールではファイバ外径をガイドするが、光の伝送路はコア部であり、コア径が細径でありまた外径部に対するコア部の偏心もあるため低損失な接続を実現するにはフェルールなどの主要部品には表10に示すような厳しい精度が要求されている¹²⁾。

表10 フェルールの精度 (単位: μ m)

種別 項目	単一モード用	多モード用
外径精度	± 0.5	± 1
穴偏心	0.7以下	2以下
穴径精度	+1 -0	+1 -0
真円度	0.5以下	0.8以下
円筒度	0.5以下	1以下

光学式ディスクメモリは、半導体レーザーの導入によるコンパクト化、オーディオビデオのコンパクト機器の発売、ビデオディスク (VD) 用ソフトのタイトル増などにより家庭への導入が目ざましく、需要が大幅に拡大した。また、電子ファイルシステムの中核として大容量の文書用ファイルも着実に伸びている。300mm径の光ディスクにA4版文書6万枚も収納可能であるようになった。

1982年秋に全世界規格統一されて発売開始された光学式デジタルオーディオディスク (DAD) は、低価格機種の登場、ソフトのタイトル増で需要が本格化してきており、車載用の製品の発売でさらに用途が広がってきている。光ディスクの成長率は、ビデオが164%、オーディオが183%と非常に大きい。光ディスクについての報文が加工上参考となる所が大きい^{13)~16)}。120~300mm外径、15~35mm内径、1.2mm厚のディスクについて、面粗さ10nm以下、うねり0.1mm以下、溝幅0.8 μ m、トラックピッチ

チ $1.6\sim 2.0\mu\text{m}$ が要求されている¹⁷⁾。

光ディスクファイルの基本構成の一例を図14に示す¹²⁾。光ヘッドはリニアアクチュエータで駆動され、目標とする情報トラックにランダムアクセスする。ディスクは直径 300mm で2枚のディスクを積層したサンドイッチ構造とし、情報記録面を内側に封じ込めることで塵埃の影響を防いでいる。

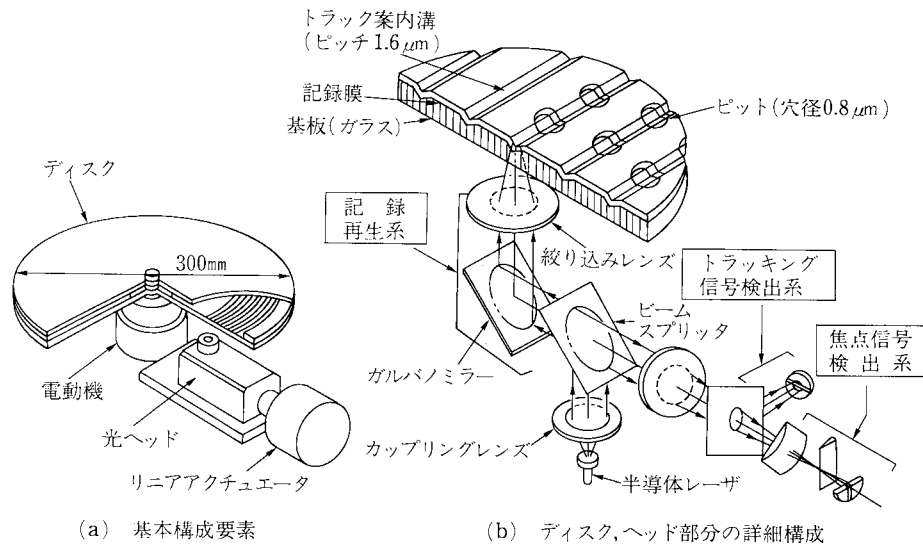


図14 光ディスクファイルの基本構成（渡辺）

光ヘッドは記録再生系、焦点信号検出系、トラッキング信号検出系で構成される。記録再生は、1個の半導体レーザで行い、記録時にはパルス発振出力 20mW で、記録面に直径 $0.8\mu\text{m}$ のピットをあける。再生時には 4mW 連続発振させ、ピットの有無を検出する。

光ビデオディスクは直径 300mm で、片面に静止画で $54,000$ コマ、動面で 30min という映像情報と音声情報2チャンネルが記録されている。プレーヤは、希望のコマを瞬時に選び出す高速アクセス機能のほか、静止画、早送り、スローなど特殊再生が可能である。再生原理は上述の光ディスクファイルと全く同じであり、図15に示すように高速回転 $1,800\text{rpm}$ する透明ディスクの下側から対物レンズで絞られたレーザ光を照射し、信号ピットの有無によって生ずる反射光の強弱を検出し、電気信号に変換して映像と音声を再生する。

直径 300mm のディスクの情報面には幅 $0.4\mu\text{m}$ 、長さ $0.55\sim 1.8\mu\text{m}$ の微細なピットが約 10^{10} 個形成されており、欠陥があると再生時の画面上にドロップアウトとして現われるので、欠陥管理は全プロセスを通じて重要である。特に、ガラス原盤の製造プロセスは最先端の半導体製造プロセスに匹敵するものであり、原盤はクラス100のクリーンルーム内で、専用に開発された装置と作業によって作製している。

光ビデオディスク用の半導体レーザピックアップ光学系の構成を図16に示す。

ディスクは再生状態で、面振れ、偏心などによって生じる変動がある。照射光スポットが、情報トラックを正しく追跡するために

- ① ディスク信号記録面上に光スポットを絞るフォーカス制御

② 信号トラックの半径方向の動きに追従する
トラッキング制御

③ 信号トラックの周速度変動を補償するジッタ補正制御

が必要である。これらの高機能で、しかも高精度な機構および動作を保証するためには、ピックアップ本体の精密量産加工技術の開発と、凹、凸レンズおよびビームスプリッタなどの光学系小形部品の生産方法の確立が重要な問題である。

光ピックアップ自体の機能の向上と、装置の小型軽量化と相まって、光学部品に対する要求精度はますます厳しくなりつつある。しかし、現在、光学部品の専門メーカーによってこの分野の技術は積極的に開発され、コンパクトディスク・ピックアップ用非球面レンズ（径5mm）のガラス素材プレス成形加工されたものの仕上り面精度は 0.03λ にまで達しているものもあるという¹²⁾。

高エネルギーレーザに用いられる特殊形状光学部品の一例を図17に示す。Axiconは点光源をその回路軸に投影したときその軸方向に焦点を結ぶ性質を持った鏡であって、基本的には図(a)、(b)に示す2形式がある。この両者の複合されたものにWaxiconと呼ばれるものがあり、図(c)に示すとおり断面がW状をしており、平面リングミラーと一緒に用いられる。さらに直線形状の代わりに曲面形状を加えると図(d)のような放物面状Axicon、図(e)のようなGauss曲線面をもったWaxiconもある。Toricは円のある直線のまわりに回転させることによって得られるもので、図(f)および(g)に示す2種類のものがある。このほか図(h)に示すような多面体鏡もある。

いずれも300~400mm径に対し、 $1\mu\text{m}$ 以下の形状精度、nmオーダの面粗さが要求されている。

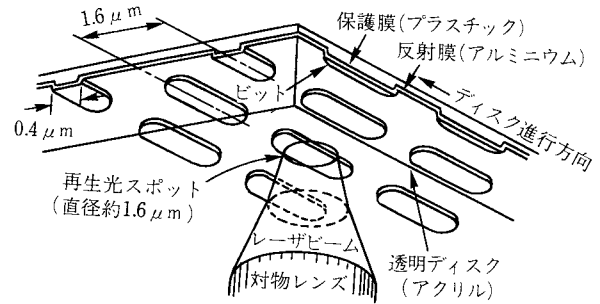


図15 光ビデオディスクの再生原理（渡辺）

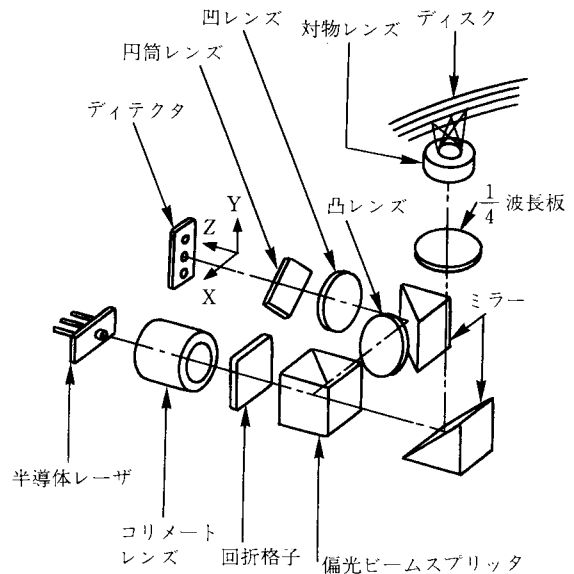


図16 光ビデオディスク用半導体レーザピックアップ光学系の構成（渡辺）

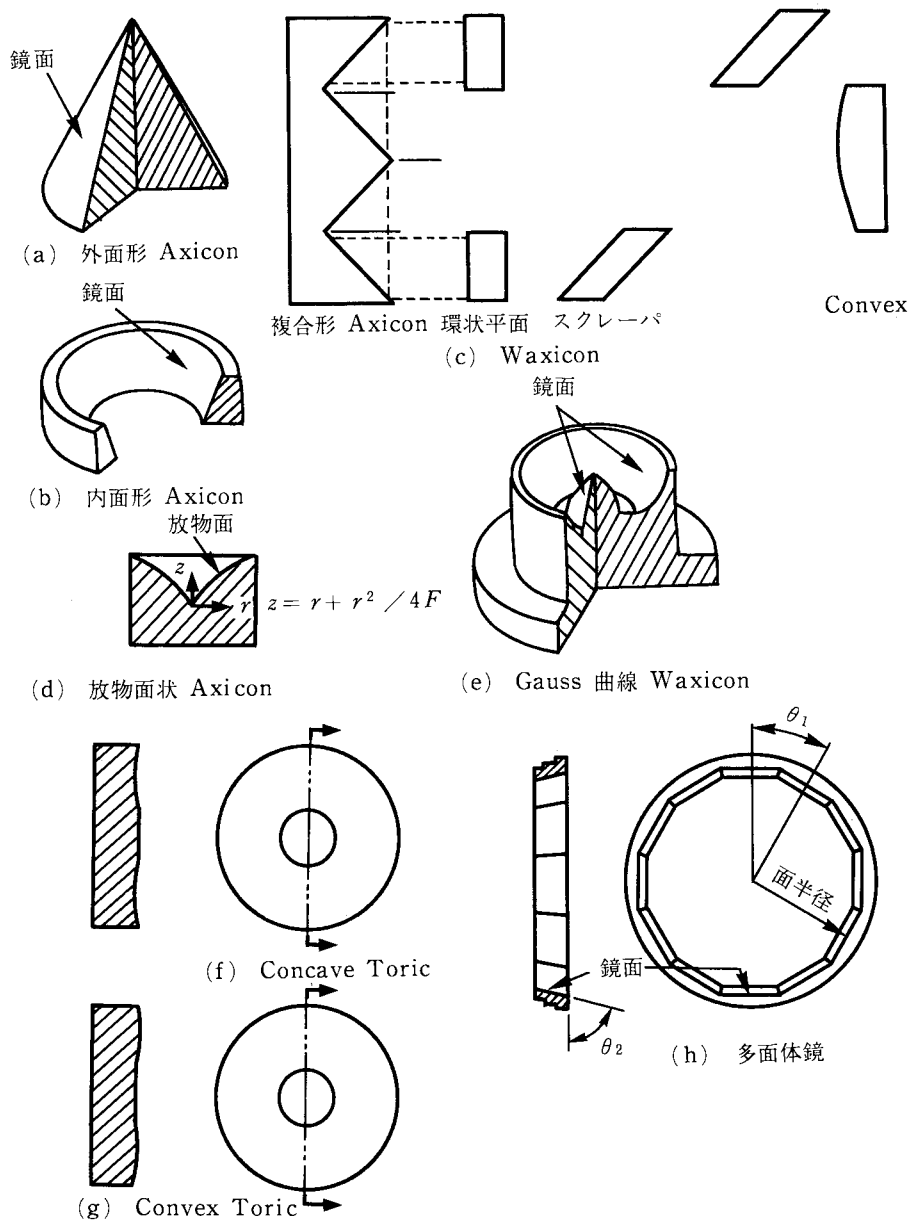


図17 特殊形状光学部品

(5) X線光学分野における部品類

X線光学の全容についてはFranksの展望¹⁸⁾がもっともまとまったものと思われる。この記事のなかで、X線の基礎、表面仕上の影響、X線結像系、X線回折格子、ゾーンプレートなどの原理を詳述した後いくつかの応用例について述べている。すなわち、薄膜の厚さ測定、表面構造の研究、分光化学分析、微小角散乱カメラ、X線顕微鏡、X線天文学、X線分光学などの応用例が説明されている。そしてX線分野の今後として、X線源、望遠鏡、顕微鏡などの重要性が提起されている。そして精機学会50周年記念国際会議に来日したFranksは、特別講演会で現状における問題点と将来への展開について詳しく述べた¹⁹⁾。これらをまとめて見ると、今後におけるX線光学の応用分野として次のようになろう。

- ・ X線リソグラフィ……マイクロエレクトロニクス
- ・ X線顕微鏡……バイオテクノロジーなど
- ・ X線望遠鏡……天文学
- ・ X線分光・回折……新素材開発
- ・ プラズマX線診断……核融合

これらを具体化するためには、小型、高効率、高出力のX線源の開発が必要であり、又超精密X線光学素子の開発および測定技術を確立しなくてはならない。

X線の波長としては、0.13~230 Åの範囲が対象となるが、反射系光学素子としては0.1~5 nmの範囲がもっとも大事な領域となる。X線反射鏡として、図18に示す基本的形式のものがある。

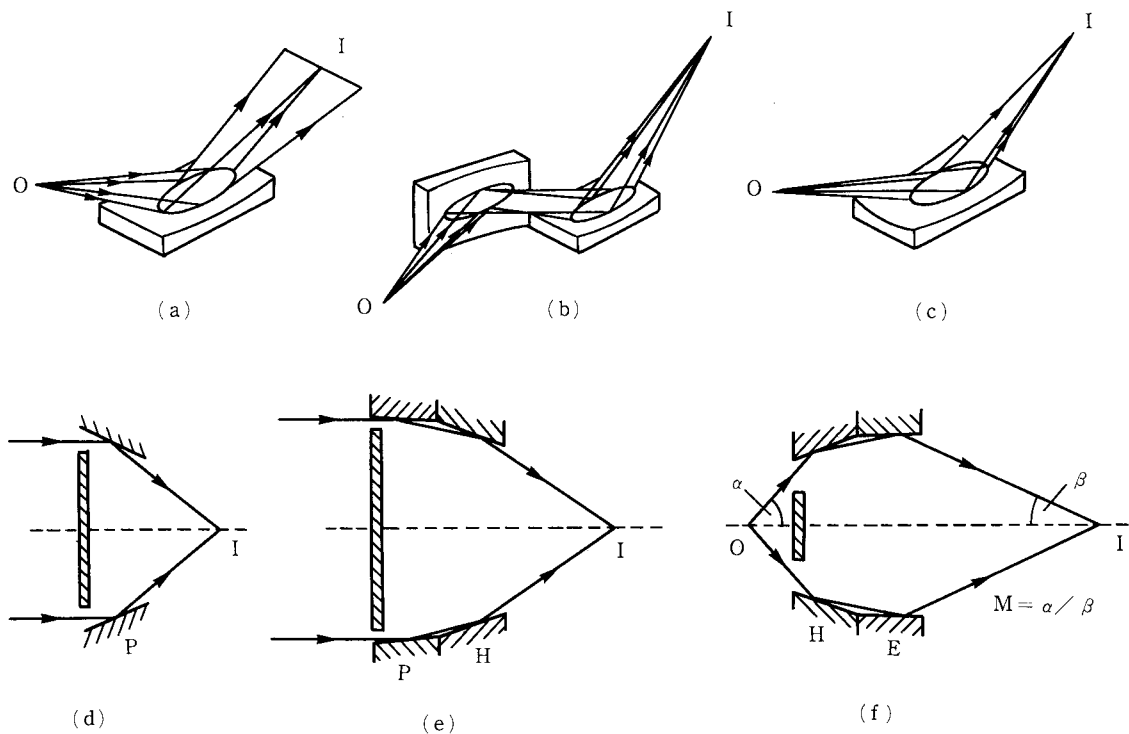


図18 X線光学部品の各種 (Franks)

図(a)はもっとも簡単なもので、平面鏡を弾性変形させた円柱状鏡であって、O点から発散したX線はI点で線状に収束する。この鏡を2枚組み合わせた(b)ではI点に収束する。図(c)の鏡は1枚で点に収束する性質をもつもので、toroidalかconicoidalな形状の反射鏡である。これらを軸対象にしたものが図(d)、(e)、(f)の鏡である。(d)はparaboloid (回転放物面)であって、軸に平行なX線をIに焦点を結ばせる。軸はずしなX線に対しては、図(e)のX線望遠鏡のように回転放物面とhyperboloid(双曲面)との組み合わせか、図(f)のX線顕微鏡(倍率 α/β)のように双曲面とellipsoid(楕円体)との組み合わせが必要となる。望遠鏡の場合径と長さとはほぼ1 mのオーダーであり、顕微鏡の場合径8 mmぐらいで長さ30~40 mmぐらいとなる。たとえばX線天体望遠鏡AXAFに用いられる0.84 m長さの反射鏡の軸

方向勾配公差は 0.05arc sec あるいは $0.25\mu\text{rad}$ 以内でなければならない。振幅公差は 500mm 長さに対し $0.12\mu\text{m}$ 、 100mm に対し 25nm 、 10mm 長さに対しては 2.5nm ということになる。面粗さは \AA rms オーダーでなくてはならない。

したがってX線顕微鏡部品に対しては nm オーダーの形状精度と \AA オーダーの面粗さが、 1 m 近い大きさのX線望遠鏡部品に対しては数 μm オーダーの形状精度が必要とされることになる。このような高精度が要求されるX線光学素子に対し、最終的にはX線に対する挙動として評価されるが、部品の寸法・形状測定の開発も大きな課題である。

3. これからの時代に必要とされる材料の種類と特徴

(1) これからの時代の機械工業における材料

高硬度・高抗張力耐熱合金が広く使われるようになってくる。また無機-有機、無機-金属など各種の複合材料の用途も拡大してくる。プラスチックを中心とした有機高分子材料、あるいは、セラミックスを中心とした無機硬脆材料が多方面で使われるようになる。現在ニューセラミックスあるいはファインセラミックスといわれるものには多種類のものがあり、たとえば表11に示すように分類することができる。ファインセラミックスについては職業訓練研究センター発行のシリーズに詳しいので、これ以上はここではふれない。

表11 セラミックスの化学組成による分類

酸 化 物 系	一成分系	Al_2O_3 、 BeO 、 CeO_2 、 Cr_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 La_2O_3 、 MgO 、 Mn_3O_4 、 SiO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2
	二成分系	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ 、 $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ 、 $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO} \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$
	三成分系	$3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ 、 $3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
非物 酸 化系	炭化物	B_4C 、 SiC 、 TaC 、 TiC 、 WC 、 ZrC
	窒化物	AlN 、 BN 、 Si_3N_4 、 TiN 、 ZrN

(2) これからの電気機械工業における材料

ブラウン管に用いられるガラスの種類と成形方法が大切である。

プリント回路基板として用いられる紙基材フェノール樹脂やエポキシ樹脂、ガラス布基材エポキシ樹脂などの高分子系複合材料のほかにセラミックスやガラスなどの新基板もかなり多くなっている。その模様は表12に示すとおりである。これら材料の今後の予測は図19に示すようになるであろうといわれている²⁰⁾。

表12 回路基板用材料の種類

有機プラスチック系	紙フェノール、紙エポキシ、ケブラーエポキシ、ポリイミド、テフロン、ポリエステル、ポリサルフォナイド、ポリエーテルサルフォナイド
無機セラミック系	アルミナ、炭化珪素、ボロンナイトライド、窒化珪素、結晶化ガラス、雲母、ベリリヤ
無機・有機複合系	ガラス-エポキシ、石英-ポリイミド、ガラス-ポリイミド、石英-エポキシ
金属・有機複合系	鉄心エポキシ、アルミ心エポキシ
金属・無機複合系	アルマイト基板 ($\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$)、ホウロウ基板 ($\text{Fe}-\text{ガラス}$)

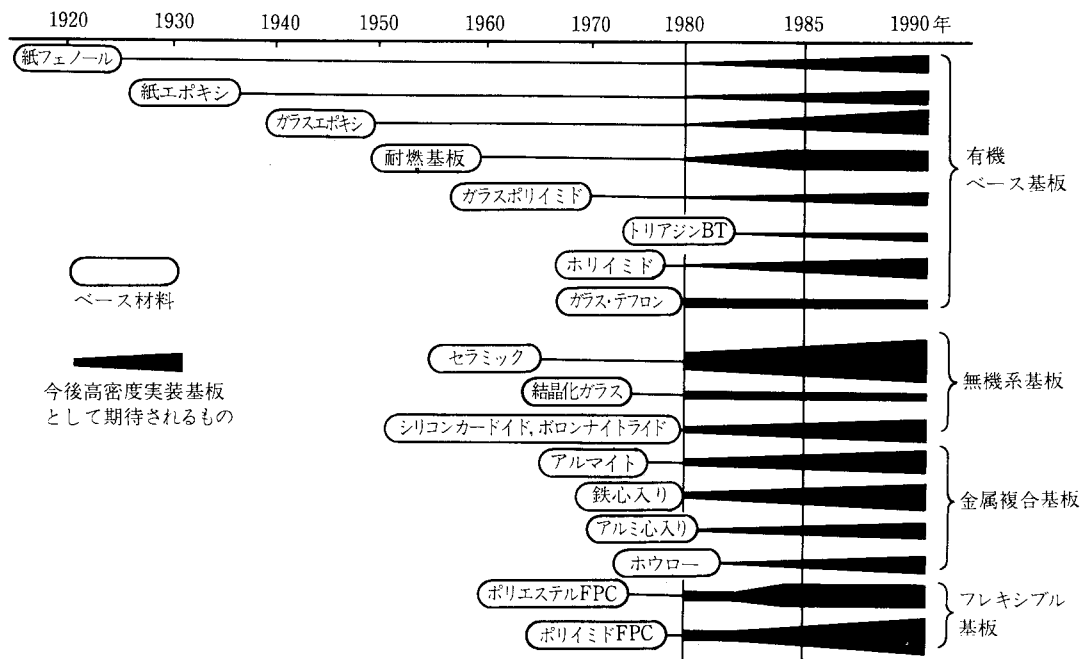


図19 回路基板の種類と予測 (二瓶)

水晶の圧電性を利用した水晶振動子は古くから通信機器に使われてきたが、最近マイクロプロセッサ用クロック発振源としての用途が非常に多くの分野で拡がりつつある。ほとんど人工水晶が用いられるが、代表的なY棒人工水晶とZ板人工水晶とを図20に示す。これらを用いて、カットする方位と外形で振動姿態、特性が異なる。縦型振動子、厚み振動子、厚みすべり振動子、輪郭振動子、屈曲振動子などの種類があり、その模様は表13に示すとおりである²⁰⁾。

感熱紙に画素のモザイクにより絵や文字などを印字するのに用いられるサーマルヘッドには、発熱体としてTa-N、Cr-Si-O、Ta-Si-Oなどが使われ、Si半導体集積回路の微細パターン作成技術が基本となっている。表14に示す各種液晶パネル²⁰⁾の需要は拡がる一方であるが、ソーダガラス系ガラスを用いた高精度加工と電極パターン

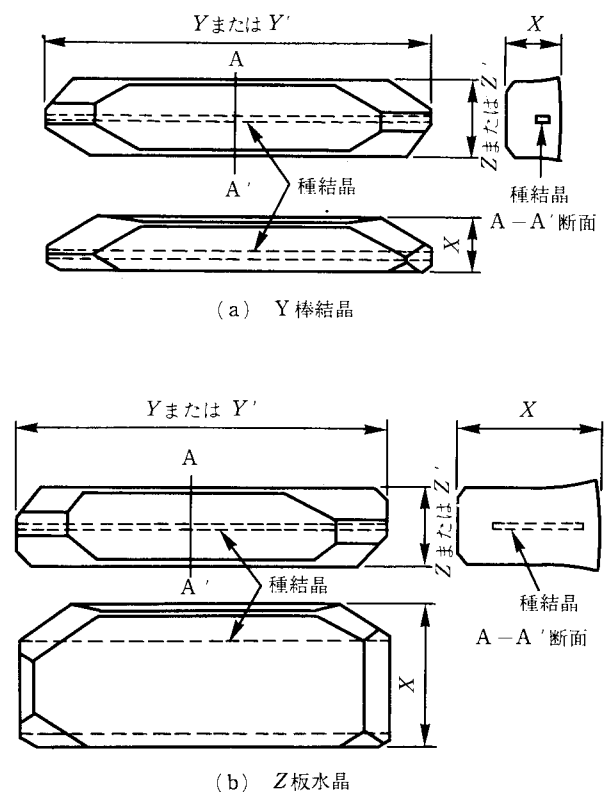


図20 Y棒人工水晶とZ板人工水晶 (JIS C 6704-1981)

表13 水晶板の振動姿態

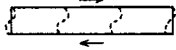


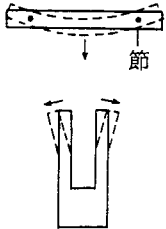
振 動 姿 態	水 晶 板 名	主 要 用 途
 厚みすべり振動 (thickness shear)	Y AT AC BT BC	中波、短波通信用
 輪郭すべり振動 (face shear)	CT DT ET FT	中波、長波通信用、 標準および濾波用
 縦 振 動 (extensional or longitudinal)	X (厚み) ÷ 5° X (長辺) -18.5° X (長辺) MT (長辺) GT (短辺)	超音波 搬送濾波用 周波数標準用
 屈 曲 振 動 (flexural)	NT ÷ 5° X (貼り合せ) 音叉	可聴周波 長波通信用 ウォッチ、クロック

表14 液晶パネルの推移

	ウォッチ (3・1/2桁)	電卓パネル (8桁)	液晶プリンタ	ポケット テレビ	コンピュータ (ニートップ)
素 子 数	23~26	64~70	2000~3000	21000~53000	120000~164000
パターン分解能 (μm)	120	150	20	10	30
パネル面積 (cm ²)	0.8~0.2	6.3~18	20~30	9~25	250~400

の微細寸法加工が必要とされている。

磁気ディスクや感光ドラムなどにはAl合金が主として用いられている。磁気ヘッドには表15に示すような各種フェライトが用いられる。

(3) これからの時代の半導体工業における材料

現在全世界でわずか3,000t程度のSi単結晶が生産され使用されているだけで、マイクロエレクトロニクス時代として人類の生活まで一変させようとしている。超高集積化に対応し、無欠陥大口径均一化された高純度単結晶の生成が基本となる。50mm径からスタートしたものが5年ごとに75mm、100mm、125mm、150mmへと大口径化され、200mm径あるいは250mm径の実用化もそう遠くないとされている。

最近では表16に示す各種単結晶材料のうちIII-V族に属する各種化合物半導体や二成分系酸化物のものなども用いられるようになってきている。

表15 磁気ヘッド用フェライト材料の磁氣的・物理的性質

	単結晶 フェライト	高密度 フェライト	ホットプレス フェライト A	ホットプレス フェライト B	ホットプレス フェライト C	焼結 フェライト
組成 (wt%)	MnO 19	NiO 11	MnO 14	MnO 15	NiO 18.9	MnO 21
	ZnO 11	ZnO 22	ZnO 16	ZnO 15	ZnO 13.6	ZnO 10
	Fe ₂ O ₃ 70	Fe ₂ O ₃ 67	Fe ₂ O ₃ 70	Fe ₂ O ₃ 70	Fe ₂ O ₃ 67.5	Fe ₂ O ₃ 60
透磁率 Mg, DC	4,000	850	10,000	3,000	250	3,000
Mg, 4MHz	600	550	800	800	250	500
飽和磁束密度 Bs(G)	3,800	3,900	3,800	4,000	3,500	3,200
抗磁力 Hc(øe)	0.05	0.4	0.03	0.1	0.5	0.1
電気比抵抗ρ (Ω-cm)	> 1	>10 ⁴	>10	>10 ²	>10 ⁴	>10 ³
キュリー温度 Tc(°C)	180	125	110	150	350	150
ビッカース硬さ Hv(kg/mm)	650	600	600	650	750	600
密度 (g/cm ³)	5.1	5.3	5.1	5.1	5.3	4.9
空孔率 (%)	0	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1	< 5

i) プレスによる成形加工後、焼結されたもの。(焼結フェライト)

焼結のため、気孔欠陥が多く、一般的には消去ヘッドに使用されている。

ii) 高温・高圧下で焼結されたもの。(高密度フェライト、HPP®、HIP法)

この方法ではフェライト材料の気孔欠陥が少なく、(気孔率0.5%以下) アナログ用・デジタル用をとわず広く使用されている。

iii) 単結晶化されたもの。(単結晶フェライト)

一般的にはVTR用映像ヘッドに使用されるが、その他では一部デュプリケーティング用磁気ヘッドに採用されている。

(4) これからの光学工業における材料

光通信分野で用いられる光ファイバには石英ガラスを主体とした低損失のものが必要とされる。

光導波路材料としては、GaAs系・InP系の化合物半導体、LiNbO₃系電気光学結晶、各種ガラスあるいはプラスチックが用いられる。

固体レーザーロッドとしてはルビー、YAGなどの単結晶あるいはガラスなどが用いられる。気体レーザーの光学系として主として銅又は銅合金を鏡面加工したものが反射系として用いられている。赤外域光学系のレンズや窓に用いられる光学透過材料としては図21に示すものが多く用いられている²¹⁾。

可視領域の材料の多くが、SiO₂を主成分とし、Ba、K、Pbなどの成分を混合することによって任意の曲折率と分散とを得ることができるので、非常に多くのガラス材料が開発使用されている。これに比べて赤外線透過材料の特性をまとめたものが表17である²¹⁾。赤外域で用いられる透過材料は屈折率の高いものが多いため、研磨面での表面反射が大きく、反射防止膜は不可欠となる。反射防止処理後の透過率は、MIL-F-48616で定められた値、すなわち10μm帯については7.5~11.5μmにおいて98% (両面コート時)を必要とする。また、反射防止膜の機械的強度については、MIL-C-48497Cに細かく

表16 単結晶材料の分類

IV 族	C、Si、Ge	
I — VII族	LiF、NaF、NaCl、KCl、KBr、KI、CeBr、Cel	
II — VI族	BeS、BeSe、BeTe、MgTe、ZnS、ZnSe、ZnTe、CdS、CdSe、CdTe、HgSe、HgTe、HgCdTe	
II — VII族	CaF ₂	
III — III族	LaB ₆	
III — V族	GaN、GaP、GaAs、InP、InAs、InSb、GaAlP、GaAlAs、GalnP、GaAsP、GalnAs、GaInSb、InAsP、GaAlAsP、GaAlAsSb、GaInAsP	
IV — IV族	SiC	
IV — VI族	SnSe、PbTe、SnPbTe	
V — VI族	Bi ₂ Te ₃	
酸化物	一成分系	Al ₂ O ₃ (サファイヤ)、SiO ₂ (水晶)、TiO ₂
	二成分系	Al ₂ O ₃ ·MgO (スピネル)、LiNbO ₃ 、LiTaO ₃ 、Bi ₁₂ SiO ₂ 、SrTiO ₂ 、Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ (GGG)、Y ₃ Al ₅ O ₁₂ (YAG)、BaTiO ₃ 、KNbO ₃
	多成分系	Zn _{1-x} Mn _x Fe ₂ O ₃ (フェライト)

表17 主な赤外線透過材料

光学材料名 (科学組成)	屈折率 $\lambda = 4 \mu\text{m}$	光透過範囲 (μm)	溶解度(H ₂ O) (g/100g)
NaCl	1.52	0.21~26	35.7 (0°C)
KCl	1.47	0.21~30	34.7 (20°C)
KBr	1.54	0.23~40	53.5 (0°C)
SiO ₂ (結晶)	1.47	0.15~4.5	不溶
SiO ₂ (溶融)	1.40	0.16~4.5	不溶
Al ₂ O ₃	1.68	0.17~6.5	不溶
MgO	1.67	0.25~8.5	不溶
MgF ₂	1.35	0.11~7.5	0.008 (18°C)
LiF	1.35	0.11~9	0.27 (18°C)
CaF ₂	1.41	0.13~12	0.002 (26°C)
CaF ₂	1.46	0.15~15	0.17 (10°C)
Si	3.43	1.2~15	不溶
Ge	4.03	1.8~23	不溶
ZnSe	2.45	0.48~21.8	不溶
ZnS	2.25	0.4~14.7	不溶

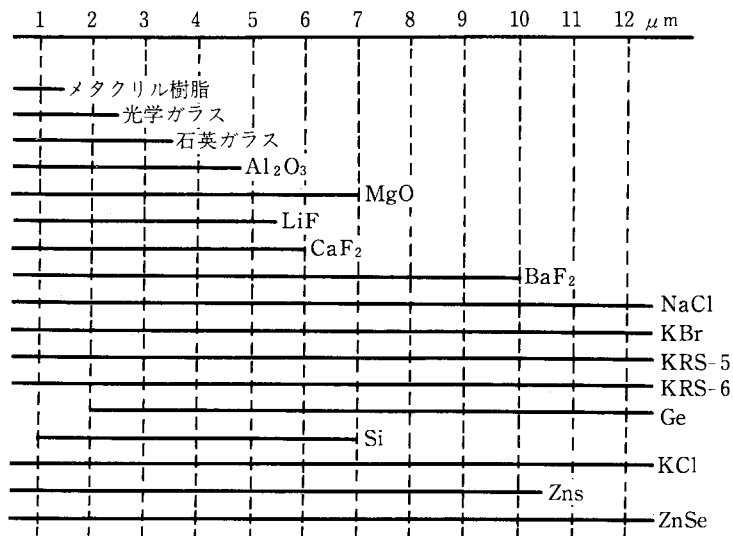


図21 赤外領域透過材料 (内部吸収20%/2mm以下)
(阿竹、阿形)

表18 主な赤外線薄膜材料

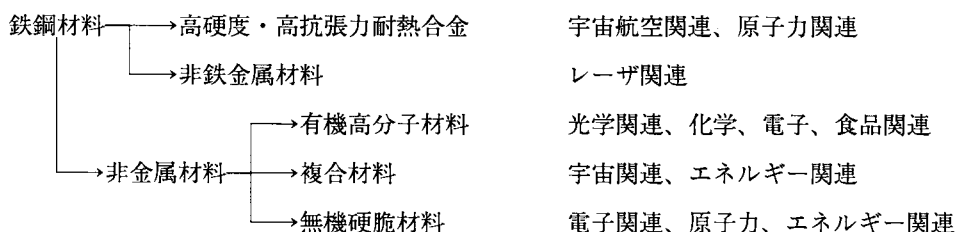
薄膜材料名	屈折率	光透過範囲 (μm)	膜硬度	膜応力
NaF	1.3 (0.55 μm)	0.2 ~	軟 水溶	
LiF	1.3 (0.55 μm)	0.11 ~ 7	軟 吸湿性あり	
MgF ₂	1.35 (0.55 μm)	0.11 ~ 9	硬	高伸張応力
CaF ₂	1.23 (0.55 μm)	0.11 ~ 12	やや硬	低伸張応力
BaF ₂	1.46 (0.55 μm)	0.15 ~ 15	軟 吸湿性あり	
Na ₂ AlF ₆	1.32 (0.55 μm)	0.2 ~ 14	軟	低伸張応力
ThF ₄	1.5 (0.55 μm)	0.2 ~ 15	軟 放射性物質	伸張応力
PbF ₂	1.98 (0.55 μm)	0.25 ~ 17	軟	
SiO ₂	1.45 (0.55 μm)	0.2 ~ 9	硬	圧縮応力
SiO	1.55 (0.55 μm)	0.4 ~ 9	硬	
Si ₂ O ₃	1.54 (0.55 μm)	0.2 ~ 7	硬	
Si	3.4 (3.0 μm)	1 ~ 9	硬	
Ge	4.4 (2.0 μm)	2 ~ 23	やや硬	
ZnSe	2.57 (0.6 μm)	0.55 ~ 15	軟	
ZnS	2.25 (0.6 μm)	0.4 ~ 14	軟	圧縮応力

指示されている。これらの条件を満たす反射防止膜は、基本的に2層又は3層の基本設計を等価膜に置き換えて7～8層にしているものが多い(表18)。等価膜は膜厚の増加によるクラックの発生等を防止する効果もあり膜を構成する物質は、通常3～4種類の物質が用いられる。等価膜の特性によりそれぞれの膜の屈折率はある程度自由に設定できるが、各膜の厚さのバランスを考慮して、高屈折率のもの ($n=4$) と低屈折率のもの ($n=1.4\sim 1.5$) とその中間のものが選ばれている。赤外域の反射防止膜の問題点は、透過特性と屈折率と膜強度とを両立する適当な蒸着物質が、ごく限られている事である。

(5) これからのX線光学分野における材料

これからのX線光学素子に要求される形状精度および面粗さに到達できる材料として、微結晶構造をもった材料か非晶質材料が望ましいとされている。経年変化を考えると残留応力も大きな問題である。このほか機械的性質、化学的安定性などについても検討する必要がある。合成ガラス状シリカ(例 Spectrosil)、熔融石英(例 Homosil)、低熱膨張係数ガラス(例 Zerodur)、高強度セラミック(例 SiC)、およびHIP BeもしくはAl合金上に無電解Niメッキしたものがもっとも好結果を与えるものであることが見いだされている。以上述べたことから、これからのマイクロエレクトロニクス時代において必要とされる材料は表19のようにまとめることができる。

表19 これから必要とされる材料



4. 超精密加工の定義と分類

「超精密加工」とは、その時代時代におけるふつうの技術をもってしては容易に到達できない精密さ・微細寸法の限界を破ろうとする加工技術である。部品機能に対する要求が高度になるにつれて、精度や微細寸法に対する要求は、年とともに厳しくなる一方である。これを達成するのに、いくら時間や金・人をかけても、あるいはまたチャンピオン・データだけで限界の壁を破ったとしても無意味である。超精密加工技術は、21世紀へ向かってこれからの時代の生産加工の基盤技術である。したがって、加工コスト・加工時間を考慮に入れ、再現性のある技術でなければならない。

表20 幾何偏差の定義
Definition of Geometrical Deviations

種 類	
形状偏差	真直度：直線形体の幾何学的に正しい直線からの狂いの大きさ 平面度：平面形体の幾何学的に正しい平面からの狂いの大きさ 真円度：円形体の幾何学的に正しい円からの狂いの大きさ 円筒度：円筒形体の幾何学的に正しい円筒からの狂いの大きさ 線の輪郭度：理論的に正確な寸法によって定められた幾何学的に正しい輪郭からの線の輪郭の狂いの大きさ 面の輪郭度： 同様
姿勢偏差	平行度：データム直線又はデータム平面に対して平行な幾何学的直線又は幾何学的平面からの平行であるべき直線形体又は平面形体の狂いの大きさ 直角度：データム直線又はデータム平面に対して直角な幾何学的直線又は幾何学的平面からの直角であるべき直線形体又は平面形体の狂いの大きさ 傾斜度：データム直線又はデータム平面に対して理論的に正確な角度を持つ幾何学的直線又は幾何学的平面からの理論的に正確な角度を持つべき直線形体又は平面形体の狂いの大きさ
位置偏差	位置度：データム又は他の形体に関連して定められ理論的に正確な位置からの点、直線形体又は平面形体の狂いの大きさ 同軸度及び同心度：データム軸直線と同一直線上にあるべき軸線のデータム軸直線からの狂いの大きさ 対称度：データム軸直線又はデータム中心平面に関して互いに対称であるべき形体の対称位置からの狂いの大きさ
振れ	円周振れ：データム軸直線を軸とする回転面をもつべき対象物又はデータム軸直線に対して垂直な円形平面であるべき対象物をデータム軸直線の周りに回転したとき、その表面が指定した位置又は任意の位置で指定した方向に変位する大きさ 全振れ：データム軸直線を軸とする円筒面をもつべき対象物又はデータム軸直線に対して垂直な円形平面であるべき対象物をデータム軸直線の周りに回転したとき、その表面が指定した方向に変位する大きさ

データム：形状の姿勢偏差、位置偏差、振れなどを決めるために設定した理論的に正確な幾何学的基準、例えば、幾何学的基準が点、直線、軸直線、平面及び中心平面の場合には、それぞれデータム点、データム直線、データム軸直線、データム平面及びデータム中心平面という。

(JIS B0022)

精密さということは従来の機械工業では寸法精度だけを論ずればよかった。しかしこれからの部品では、すでに述べたように、各種形状精度、加工面粗さ、加工変質層などを考慮に入れて作製しないと、所要機能は達成できない。

このように考えてくると、超精密加工にはふたつの分野が考えられる。

そのひとつは高精度加工の分野である。JISには表20に示すように、真直度、平面度、真円度、円筒度、線・面の輪郭度などの形状偏差；平行度、直角度、傾斜度の姿勢偏差；位置度、円軸度及び同心度、対称度の位置偏差；円周振れおよび全振れの振れなどに関する幾何偏差が定義されている。精度の概念および加工誤差について十分考慮する必要がある。この分野では表21に示す力学的エネルギーを用いる

表21 力学的エネルギーを用いる除去加工法

切削加工	{	<p>単一刃工具による加工：旋削、中ぐり、形削り、立て削り、平削り、等</p> <p>複数刃工具による加工：ドリル加工、リーマ加工、フライス削り、歯切り、ブローチ加工、ねじ切り（タップ、ダイス）、鋸きり、</p>
砥粒加工	{	<p>固定砥粒による加工：研削、ホーニング、超仕上、研磨布紙加工、</p> <p>遊離砥粒による加工：ラッピング、ポリッシング、バフ加工、バレル加工、噴射加工（乾式ブラスト、湿式ブラスト）、液体ジェット加工、超音波加工、</p>

除去加工法が用いられ、そのなかでも超精密ダイヤモンド切削・超精密ラッピング・ポリッシングおよび超精密ダイヤモンド研削が今後の主流になるであろう。超精密加工が必要とされる部品（第2章）ごとに適用加工法をまとめると表22のようになる。

また第3章で述べた材料を対象として分類すると表23のようになる。いずれも目標機能を果たす品質のものを、安く、速く、繰り返し生産できる技術でなくてはならない。

表22 超精密加工が必要とされる部品

超精密ラッピング・ポリシング		超精密ダイヤモンド切削		超精密研削
非金属材料	金属材料	非金属材料	金属材料	
宝 石 ダイヤモンド レンズ、プリズム オプティカルフラット 水晶振動子 マイクローム 磁気ヘッド Si ウ エ ハ サファイヤ基板 ダイヤモンド工具 セラミック定盤	ブロックゲージ 金属定盤 ストレートエッジ 工作機械スライド面 精密ステージ 鋼 球 ね じ 歯 車 インジェクションノズル サーボバルブ 金 型	赤外線用部品 Infrared Imaging System Forward Looking Infra Red (FLIR) プラスチック部品	レーザー用反射鏡 Laser Fusion 感光ドラム VTR シリンダ 磁気ディスク X線光学部品 光ディスク	転がり軸受 圧延ロール ロータリコンプレッサ キャブスタン軸 X線光学部品

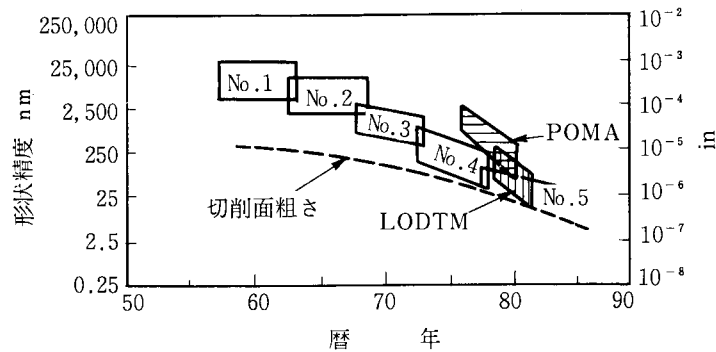
表23 マイクロエレクトロニクス時代の超精密加工の方法

材 料	超精密加工方法		
半導体材料	無機硬脆材料		
セラミックス		超精密研削	
ガラス		超精密ラッピング	
フェライト		超精密ポリシング	
水晶		(複合)	
サファイヤ ダイヤモンド	}	超精密ダイヤモンド切削	
軟質金属		}	超精密研削
プラスチック	}		超精密ラッピング・ポリシング
耐熱合金			
複合材料			

(1) 超精密ダイヤモンド切削

アメリカにおけるレーザー核融合の研究開発がきっかけとなり、多量の高精度軟質金属製非球面反射鏡が必要とされるようになった。軟質金属の形状精度を高めながら面粗さを向上させるのに、従来のラッピング・ポリシングによったのでは、時間がかかり、コストも高つく。これに代わる方法として、高精度・高剛性の切削加工機械を開発し、構成刃先の生じにくい鋭利なダイヤモンド工具を用いて、振動・塵埃・温度などの影響ができるだけ少ない環境条件で、切削加工によって高精度非球面反射鏡を得ようとする方法が、最近飛躍的に進展してきた。これを超精密ダイヤモンド切削加工法と呼ぶ。

そこで超精密ダイヤモンド切削では、工作機械の運動精度を正しく加工物に転写しようとするものである。したがって、運動精度を保証する工作機械でなくてはならない。1960年頃からアメリカで、あるいはヨーロッパであいついでいくつかの工作機械が開発された。1980年前後から中国や日本でも、



- No. 1 : ならい旋盤
- No. 2 : 第 1 号機 (オイルシャワー方式)
- No. 3 : Ex-Cell-O製 POMA : Union Carbide社
- No. 4 : 第 2 号機
- No. 5 : 第 3 号機

図22 Lawrence Livermore国立研究所における超精密ダイヤモンド切削加工機械の精度向上の様相
Dr. McClureから受領し発表許可を得たものを少し手直ししてある。

幾種類かの機械が商品化された。これらの様相は表24に示すとおりである。この間におけるアメリカLawrence Livermore国立研究所での工作機械到達精度向上のあとを、図22に見ることができる。20年近い年月の後に $1\mu\text{in}$ (25nm) の壁をクリアしたことがよくわかる。

超精密ダイヤモンド切削は数多くの利点をもっている。すなわち、

① 加工面粗さがすぐれている

スピンドル回転精度のすぐれたものと、鋭い刃先のダイヤモンド工具を用いれば、比較的容易に $0.01\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 程度の面粗さが得られる。アメリカ海軍兵器センターの報告によれば、径150mm以下の平面鏡に対して4nm、rmsの値を得ている。曲面鏡では5~10nm、rms、150mm以上2,000mm径の反射鏡については18nm、rmsという値が発表されている。

② 加工精度がすぐれている

加工面粗さはともかく、大径寸法の非球面反射鏡を高精度で加工するのはかなり難しい。Moore Special Tool社製ダイヤモンド旋盤を用いて切削した場合、直径640mmまでの平面鏡に対して2nm/mm、曲面鏡に対して3nm/mmという形状精度の値が得られている。軟質金属反射鏡の製作にあたって、ポリッシングによったのでは面粗さと形状精度を同時に高めるのは難しく、高精度・高剛性機械を用いたダイヤモンド切削の優位性が認められる。

③ 加工コストが安い

Honeywell社はアメリカ空軍材料研究所との契約に基づいて種々検討を行ない、赤外領域における観察系に用いられる反射および屈折光学部品の加工に、ダイヤモンド切削を適用することによって、加工費低減に役立つことが大きいことを明らかにした。また100mm径放物面鏡について、形状精度 $3\mu\text{m}$ のものを作るのに従来方法では12箇月、50,000ドルかかっていたものを、ダイヤモンド切削

表24 各国で開発された超精密ダイヤモンド切削加工機械

			1960	1965	1970	1975	1980			
ア メ リ カ	研 究 機 関	D O E 関 連	Union Carbide, Y-12	● du Point No. 1	○ du Point No. 2	○ Moore No. 3	○ Multi- faceted (R-θ Lathe) Mirror	○ Ex-Cell-O	○ POMA	
			Lawrence Livermore (National) Laboratory			○ Moore No. 1	○ Moore No. 2	○ Moore No. 3	○ PERL	● LODTM
			Battelle Pacific Northwest Laboratory					○ Omega-X Nanometer		
							○			
							● α-θ Machine			
					△	△	△	△	○	△
							○	○	○	
							△	△	△	
							△	△	△	
									●	
ヨ ー ロ ッ パ	研 究 機 関	Culham Laboratory				●				
		Cranfield Unit for Precision Engineering					●			
		Rank Taylor Hobson			●					
		Philips Research Laboratory		○				○ COLATH		
日 本	機 械 メ ー カ	豊田工機				○				
		日立精工					○			
		不二越					○			
		東芝機械					○			
部 品 加 工 業 者	シャープ						○			
	キャノン						○			
	コパル電子						○			
中 国	機 械 メ ー カ	沈陽第一工作機械工場					○S1-222 ○235 ○246 ○254			
		上海工作機械工場					○ST199 ○186			

注) ○横軸 ●立軸 △納入

によってわずか3週間、4,000ドルになり、しかも形状精度0.6μmのものが得られている。

④ その他

同一材料について、ポリシ面、スパッタ面、蒸着面、ダイヤモンド切削面を作って、各種波長における反射率を比較したところ、ダイヤモンド切削面がもっとも反射率が高く、材料固有の値に近いことが見いだされた。

ダイヤモンド切削された面は、被覆したり、面を保護しなくても、安定していて長いこと変わることがない。

金属反射鏡にレーザ照射することにより、表面損傷をうけるが、ポリシ面に比べてダイヤモンド切削面のほうがレーザ損傷をうけるしきい値が高い。

このように数多くの利点があるので、ダイヤモンド切削加工法は、レーザ核融合装置の反射鏡を製作する手段として使われるようになった。このほか、赤外領域における各種計測システム、極端紫外部やX線領域における天体望遠鏡などに用いられる光学部品の製造に適用されだしている。さらにレーザスキャナ、レーザプリンタなど、レーザ応用情報処理関係で多く用いられる多面体鏡を、ダイヤモンド切削によって従来方法に比べて、安く早くできることが見いだされ、多くのところで用いられるようになった。また専用加工機も数多く作られるようになった。

ダイヤモンド切削加工はすぐれた超精密加工技術の一つであって、その適用範囲は拡大するいっぽうである。

レーザ核融合に関連して政府資金、あるいは軍の援助の下に進歩したアメリカとは異なり、日本では民需を目指し工作機械メーカーの努力によって、最近急激な立ち上がりを見せている。油静圧あるいは空気回転軸受または直線運動機構の開発がはかられ、各種の高精度工作機械が1980年代になって製造されるようになった。電算機用メモリディスク、複写機用ドラム、事務機用多面体鏡などの切削加工分野におけるレベルはかなり高い。アメリカのように直径2mに達するような非球面金属反射鏡を

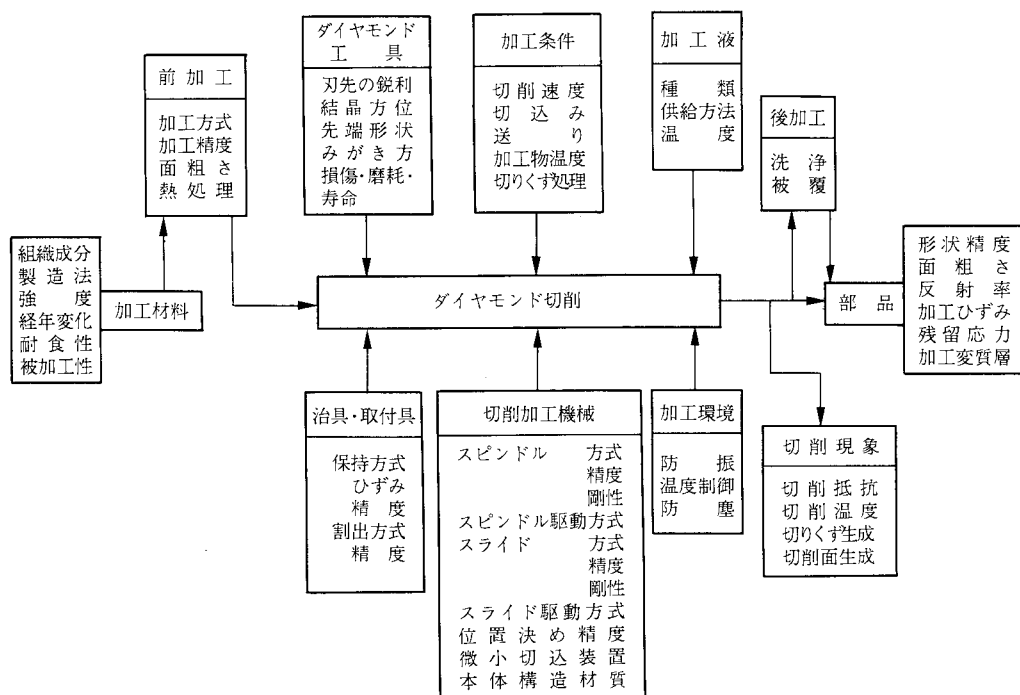


図23 超精密ダイヤモンド切削の諸要因

製作する技術や機械は現れていない。直径300mm、平面度 $2\mu\text{m}$ 、面粗さ $0.02\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の無酸素銅平面鏡、あるいは直径300mm、面粗さ $0.03\mu\text{mRz}$ の無酸素銅放物面鏡などが現在日本において加工できる大口径鏡といえよう。

このようにすぐれた特徴を持つ超精密ダイヤモンド切削に関与する要因は図23に示すとおりきわめて多い。主なものについて概説しよう。

i ダイヤモンド工具の加工法および刃先評価法の確立

超精密ダイヤモンド切削加工法を遂行する上において、ダイヤモンド工具の良否は極めて重要な地位を占めている。結晶品質の選択、結晶方位の選定、刃先の磨き方などによって、切削性能が左右されるが、それらの関係はまだほとんど明らかにされていない。特にダイヤモンド刃先稜丸みの測定は甚だ難しいものとされている。刃先稜丸みの測定値と、ダイヤモンド工具の切削性能との関連、あるいは切削法による刃先稜丸みの変化との関係も明らかにする必要があるだろう。1986年2月からスタートした精密工学会産学協同プロジェクト「超精密ダイヤモンド切削加工用工具刃先の評価に関する研究」に寄せられる期待は誠に大きい。この種の研究は諸外国でまだほとんどなされていないからである。このグループ研究では、2つのデテクタを持った改良型SEMにより、10nmオーダの刃先稜丸みの値を確定できるようになっている。

ii 加工材料

微小切込みにおける材料の加工機構、材料特性がダイヤモンド工具刃先に及ぼす影響などの解明が望まれている。ダイヤモンド切削が実用されている材料について、材料組織の均一性、加工前後あるいは加工中の熱処理、加工後の清浄または被覆などに関するデータの蓄積が必要である。従来は銅および銅合金、アルミニウムおよびアルミニウム合金が主としてダイヤモンド切削されてきた。鋼、プラスチック、ガラス、結晶材料などが対象となるならば、ダイヤモンド切削の範囲はますます拡大するので、これら材料の微小切削の可能性の追求も大切である。最近これら材料のダイヤモンド切削に関する研究が盛んになってきた²²⁾。

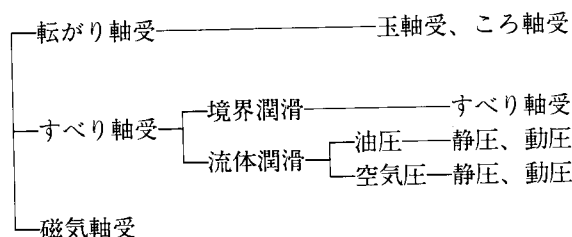
iii 加工機械

工作機械の運動精度を正しく加工物に転写して、高い形状精度、すぐれた面粗さを得ようというのが超精密ダイヤモンド切削加工法の基本的考え方である。

そこで形状精度を保証する高精度・高剛性加工機械の開発が必要である。現在までに開発されたダイヤモンド切削加工機械をまとめて表24に示した。各国でいろいろな形式のものが作られている。

スピンドルは大部分横軸のものであるが、表24中に●印で示したいくつかのものは立軸である。加工物径が大きく重くなった場合、取付けはずみも含めて立軸のメリットは考えられる。精度保証

表25 加工機械用スピンドルの種類



すべき加工機械として立軸・横軸の利害損失を十分検討する必要がある。高精度加工機械とするために、超精密運動機構の解明が大切である。

加工機械用スピンドルの種類として、表25のように分類することができる。スピンドルの機能としては、工具あるいは加工物を保持し、これらに正しい回転切削運動を行なわせることと、力や熱などの外乱による変形を極力小さく抑えることが必要である。その特性や製作・使用上の考慮に対して定量評価できる比較データを積み重ねることが必要であろう。

スピンドルの駆動方法によって回転精度が大きく影響を受けるので、その選択は大事である。空気タービンによる駆動、ベルトを介したモータ駆動、カップリングを介したモータ駆動、ベルトイン形式のモータ駆動などの方法がそれぞれの機械で使われている。駆動側のもつ振動が伝達されないように、そして駆動側と被駆動側とのミスアライメントによる擾乱が伝わらないように留意する必要がある。スピンドルの種類、使用区分などに応じて、それぞれ駆動方法を使い分けることが大切であろう。

スピンドルの回転精度として、軸心の振れ、軸方向の軸の振動、回転むらなどについて考えなければならない。これらが生じる種々の原因に対して適切な対策を施すことが必要である。とくに高精度スピンドルに対しては、その正確な回転精度の測定法もきわめて大事な問題である。

回転運動とともに重要なのは、正しい直線運動である。直線運動を与えるものがスライド機構である。その案内面として、V—平、中央V形、ダブルV形あるいはくさびを用いた案内面などがある。超精密直進運動を与える方式の設計、製作が現在の緊急な課題である。流体潤滑直進運動軸受として、重量バランス形、平面拘束形、あるいは円筒拘束形などのものが実用化されている。

この場合平均化効果によって、部品加工精度よりも運動精度が一段とよくなるからという理由で、部品加工は極限まで追究しなくてもよい、という考え方が一部にある。しかし超精密ダイヤモンド切削加工機械では、部品加工精度の徹底追究ということが、基本的に大切なことであると考えられる。この場合に高度の熟練に裏付けられた技能の果たす役割をかみしめる必要がある。

スライド送り機構として、台形ねじ、ボールねじ、静圧ねじ、空気ねじ、静圧シリンダ、リニアモータなどによる送り、あるいはワイヤロープや摩擦車を利用した駆動など、工作機械製造各社によっていろいろの方法が採用されている。

スライド機構に使われる案内面の真直度、あるいは、スライド機構としての直進運動の正しい測定法は、高精度化された場合にとくに問題となることである

このほか、位置決め精度、微小切込装置、加工物保持方式、本体構造や材質など超精密加工機械として重要な点が多い。これら超精密運動機構については、精密測定機、光学機器あるいは半導体製造装置などから学ぶこともきわめて大事なことと考えられる。超精密制御技術、高性能センサ、フィードバックシステムにおける高速電算機の開発なども非球面加工に必要な問題となる。日本工業技術振興協会超精密部会のなかに、この問題に関する研究プロジェクトがスタートしている。

iv 加工条件

加工材料の特性に応じて、微小切込みにおける切削機構を考慮に入れた切削条件の選定が大切である。加工液の種類・供給方法・温度、切りくず処理などにも解決しなければならない点が多い。そのためには、切削中の切りくず生成の模様をよく観察し、切削抵抗あるいは切削温度などの測定

をし、生成された切削面について十分な観察をすることが必要であろう。同一条件で加工しても、材料の種類によって生成される切りくずや切削面の模様が異なることが知られているので、この追究も今後に残された課題であろう。

v 加工環境に対する配慮

高精度・高剛性の加工機械を用いた超精密ダイヤモンド切削加工において、建家構造を含めて防振、温度制御、防塵に対する厳しい管理が必要である。1985年11月アメリカのLawrence Livermore 国立研究所を訪問したとき、LODTM(直径1.6m、厚さ0.5mの加工物が加工できる立軸超精密ダイヤモンド旋盤)について徹底的な加工環境整備が行なわれたのを見学し、トータルシステムとしてのアプローチに大きな差があることを痛感した(超精密技術に関する米国調査団報告書、1986年1月20日)。これらの問題については半導体集積回路製造やルーリングエンジン製作における諸問題での蓄積から学ぶことが多いであろう。

vi 超精密測定の開発

海外では2m径の非球面金属反射鏡を、形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 、面粗さ数nmに加工しようとする挑戦が進められている。X線光学部品に対してÅオーダの面粗さの測定の必要性もそんなに遠くない時代となろうとしている。これら加工物の非接触超精密測定技術の早急な開発が望まれている。超精密加工の分野では、とくに超精密測定が車の両輪以上の重要な位置づけにある。そのためには超精密加工された面について、加工面とは?面粗さとは?真直度とは?というような面の本質について、加工ひずみ・残留応力・加工変質層などとともに考えていかなければならない。今までとは違う観点に立った超精密測定に対する期待はすこぶる高いものがある。これについては本シリーズ第6号に詳述される。

(2) 超精密ラッピング・ポリシング

ラッピング・ポリシング技術は人類の歴史とともに、最も古くから発達したもののひとつである。近年、精密測定用部品ばかりでなく表22に示したとおり精密機器部品、光学部品、電子部品、半導体基板など、高機能が要求されるにつれて、超精密ラッピング・ポリシングの必要とされる割合が増してきた。

電子工業・半導体工業が日本で隆盛をきわめているのを反映して、それらに用いられる非金属硬脆材料のラッピング・ポリシングに関する論文が圧倒的に多い。1977年5月に発表された極微量弾性破壊(EEM)、1978年3月に発表されたメカノケミカルポリシング、あるいは1984年3月に発表されたP-MACポリシングなど、非接触研磨技術に見るべきものが多く、日本のレベルはたいへん高いといえよう。光学素子についての詳細が本シリーズ第5号に詳述される。

(3) 超精密ダイヤモンド研削

工作機械の高精度化・高剛性化に伴い、超精密研削加工への期待もすこぶる大きい。研削加工は研削砥石を用いて機械精度を加工物に転写することによって高精度部品を得ようとする方法である。超精密切削のとき工具の製作に問題点があるのと同じように、超精密研削の場合には研削砥石の開発ならびにドレッシング法に残された問題点が多い。最近、半導体ウェハ、水晶板、あるいはファインセ

ラミックスなどを対象として、超精密研削が一部実用化に入ったと言える。電子部品を対象として本シリーズ第4号に詳述される。非金属硬脆材料の高精度複雑形状部品を得ようとしたとき、超精密研削の進展が強く希まれている。耐熱合金や複合材料などの難削材料に対しても、超精密研削加工の役割はますます増大する一方である。硬脆材料の超精密研削には、ダイヤモンド砥石が最近多く用いられる。ダイヤモンド砥石は Al_2O_3 系やSiC系砥石に比べて、砥粒硬度ははるかに高いが、砥粒率(砥石中に含まれる砥粒の割合)が少ないために砥粒間隔が大きく、しかも切りくずの逃げの作用を受持つ気孔が少ないという特徴をよく考える必要がある。

硬脆材料のダイヤモンド研削においては特に次のことが強く望まれている。1) 単位時間当たり研削量の大きいこと、2) 研削所要動力の小さいこと、3) 研削比(研削量と砥石減耗量との比)の大きいこと、4) 製品の寸法・形状精度が高く、粗さが小さく、表面損傷の少ないこと。

これらを達成するためには、金属材料とは異なる硬脆材料の諸特性を基本として、研削盤の形式、加工物支持方法、研削系の剛性(静・動および熱剛性)などに至るまで、十分に考慮しなければならない。いずれにしても、図24に示すように、加工物・砥石・研削液・研削盤を含めて一つのシステムとして考えていく必要がある。砥粒切込み深さの大小が研削条件を選ぶときの目安として大事なことである。切込み深さの大きい所では脆性破壊する材料であっても、微小切込み深さになると塑性流動による切りくず生成が行われ、脆性を示さなくなる。そこでそのような微小切込みを与えられる研削盤の開発が特に重要となる。そして、硬脆材料用に適したダイヤモンド砥石と、それを使うためのドレッシング法の開発も焦眉の急の問題である。

最近セラミックス研削用として新しいタイプのダイヤモンド砥石がいくつも開発され、実用化されている。これについては、別シリーズ「ファインセラミックス」に詳しい。0.1 μ m単位の微小切込み

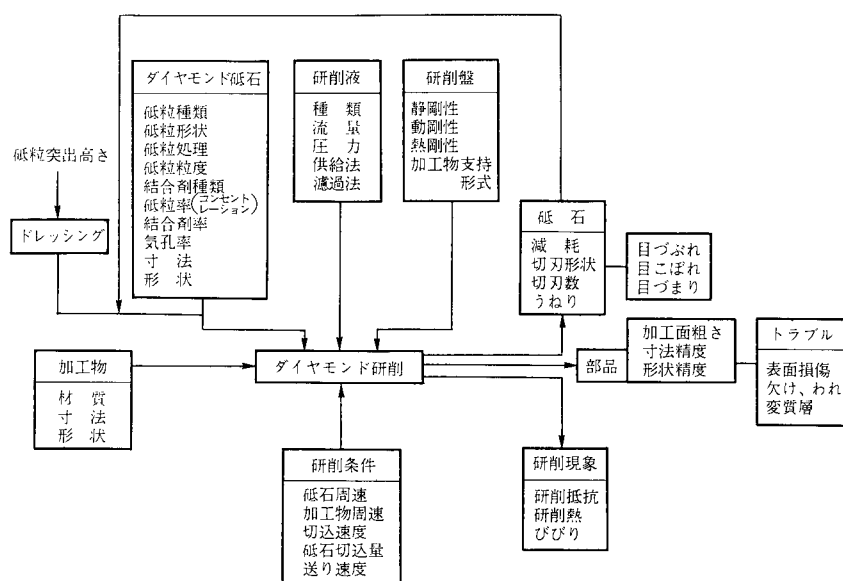


図24 ダイヤモンド研削加工システム

を与えることによって、硬脆材料の研削加工において微細破壊の集合ではなくて、塑性流動による加工によって、透明な面粗さのすぐれた研削加工面が得られることが判明し、硬脆材料の研削加工の今

後に大きな期待を寄せるものである。したがって、硬脆材料のダイヤモンド研削に適した高精度、高剛性の研削盤の開発に力をそそがなくてはならない。そのためには加工物主軸、砥石軸、加工物支持系、砥石支持系、案内面、切込み系あるいはツルーイング装置系にも、金属材料加工用とは違った観点からの構造を考える必要のあることが提案されている。

(4) これからの課題

工業技術院傘下の試験研究所で今後実施すべき重要研究課題の検討を行うため、昭和58年度から設置された三次元ナノメータ技術調査委員会（委員長、計量研究所 森村部長）では昭和60年7月に報告書をまとめ発表した。そこで取り上げられた今後の応用分野としては、

- ・ 半導体・光デバイス開発・製造
- ・ 超精密機器開発・製造
- ・ 新素材開発・製造
- ・ 分子エレクトロニクス
- ・ バイオテクノロジー・ライフサイエンス基礎技術

が挙げられている。

研究分野としては、

- ・ 計測技術……幾何学量計測、微小領域計測と分析、赤外・可視・紫外光源、X線源、電子線源、粒子線源
- ・ 操作技術……位置ぎめ、駆動と固定、マニピュレータ
- ・ 環境制御……防振・防音、温度・湿度、清浄、超高真空
- ・ システム化技術……設計、製造・加工

などが挙げられている。

委員会審議を通じて論議された今後の研究課題を、表26に示す。

表26 超精密技術に関する今後の研究課題

A) 計測に関する課題

- a) 超精密計測 (10nm—0.1nmの分解能)
- b) 超精密インプロセス計測
- c) 超精密平面計測 (nmオーダー、非接触高速測定)
- d) 超精密光学回折格子およびホログラム原器の開発
- e) nm計測光ファイバ干渉計システム
- f) 非接触超精密三次元形状測定器 (超高精度非球面測定器)
- g) X線干渉技術 (X線ホログラフイおよびX線光学素子製造システムなど)
- h) X線反射鏡 (反射型X線光学技術) およびX線顕微鏡
- i) 高分解能超音波顕微鏡

B) 駆動に関する課題

- a) 超精密位置決め (サーボ) 技術 (10nm—0.1nmの分解能)
- b) 超精密アクチュエータ (同上用)
- c) 超精密直線および円弧運動基準の開発
- d) バイオリジカル・アクチュエータ

C) 加工に関する課題

- a) 超精密非球面加工システム (大型金属反射鏡用など)
- b) 超鋭利切削工具の開発
- c) 超精密複合材料加工技術
- d) 超精密平面研磨機
- c) 三次元微細加工技術

D) 電子技術関連課題

- a) 微細加工システム
 - X線露光、超小型SOR
 - Deep UV (エキシマレーザ) 縮少投影
 - 超高速イオンビーム縮少投影
- b) 測定検査システム
 - VLSI形状・寸法測定
 - VLSI非破壊検査

E) 生物・医療工学関連課題

- a) 超マイクロ・マニピュレータシステム
- b) 細胞挙動観測システム
- c) マイクロ・サージェリ・システム
- d) 遺伝子自動操作システム
- e) nmロボットの開発
- f) 生体内反応観測システム

F) その他

- a) 超薄膜・超細線量産システム
- b) 超微粒子製造システムおよび測定技術
- c) 超高清浄環境制御システム
- d) 超精密温度制御システム
- e) 超安定防振台の開発
- f) 超純水の実現および計測
- g) 超高真空の実現および計測
- h) バイオ・センサおよびバイオ・エレクトロニクス

5. 超精密加工における人間の感性の果たす役割

ここでは超精密加工に関連する人間の感性の問題について考えてみたい。

超精密加工を行う工作機械については、その回転運動を与えるスピンドル、直進運動を与えるスライド機構について、形式の選定、部品加工精度と運動精度、剛性、それらの測定方法、駆動方式など検討しなければならない問題は極めて多い。現在空気または油静圧が多く用いられているが、平均化効果によって部品加工精度よりも運動精度が向上するという理由で、部品加工精度を極限までは追及しなくても良いという考え方が一部にある。しかしより高精度の加工機械を製作するためには、部品加工精度を徹底的に追及することが大切なことと考える。この場合高度の熟練に裏づけられた人間の感性の果たす役割をかみしめる必要があるだろう。真の意味での“nm”の分かる人を育てなければならない。

電気試験所時代に標準インダクタの制作に挑戦した。直径300mm、長さ350mmのパイレックスガラス製ボビンにピッチ1mmのねじを作り、それに直径0.7mmの無酸素銅線を300ターン巻き付けたものである。1 μ m精度のねじを製作するのがまず第一歩であった。大形ねじ研削盤を入手した上、徹底的に精度向上を図り、ねじ研削によって目標精度の達成を目指したが、どうしても旨く行かなかった。そこで、研削後のねじを測定し、ラッピングで修正をするようにした。ねじの測定・ラッピングの繰り返しによって長い年月を掛けて目標精度を達成した。ラッピングにあたったのは、旋盤にかけては名人クラスの人であった。他の人が使えば0.01mmの精度を出すのがやっとの機械であったが、彼が扱うと優に1 μ m台の精度を出すことができた。彼はこよなく機械を愛し、暇さえあれば機械を手入れしていた。「彼は機械と話し合っているのだろう」などと我々は見ている。彼は、ねじのラッピングについてはまったくの素人であった。朝早くから夜遅くまでねじ研削盤に取り付いていた。機械からの呼び掛けに応えて、いろいろな工夫を凝らしていった。全身全霊を打ち込んで、当時の最高精度を達成したのだった。

同じ電気試験所時代に微小容量標準器の製作に携わった。そのとき、ブロックゲージの生産現場で実習させて頂いたことがある。そこには、測定の名人がおられた。光波干渉計を使って目盛りに表示されない数値を読み取り、ハンドラップでブロックゲージの最終仕上げをするのを感嘆の目で見ていることを思い出す。またこの方から、ブロックゲージのリンキングの後で必ずかえり取りする事を教わった。これには、三面すり合わせしたアルカンサス砥石を使うのである。ただしこの砥石は、絶対に貸しては貰えなかった。この砥石でゲージ面を軽くこすると、極く僅かではあるがシャリッという音がするのである。精密測定機のステージにも同じ現象がみられた。

同じような例は、東芝精密加工研究センターで球面空気軸受の開発のときにもいえる。ラッピングに携わったのは、フライスの名人であった。ラッピングについては全くの素人であったが、フライス加工で長年培った経験をもとに日常の現象をよく観察していた。軟質金属のラッピングに当たって、表面の傷にホコリが関与することが判ってきた。彼はそれ以来夏でも通勤時に手袋をはめて爪に入るゴミを防ぐという心構えで臨んでいた。そのような細かい気配りをもとにして、半径60mmの過半球体と球面座とを真球度0.2 μ mに仕上げるのに成功した。ラッピングについては素人のフライス工であったが、ひとつことに打ち込んできた人には、文章で書き表せないなものがあるようである。

精度限界の壁を破る為には、原因を追及し、対策を工学的につめていく技術以外に、人間のもつ感性すべてを投入する必要があるように思われる。技術プラスアルファの人間の“なにか”を加味して最高

水準のものに挑戦しなくてはならない。

最近アメリカに行って回析格子を製作している現場を見る機会があった。これを作るのには、ルーリングエンジンを使う。この機械を取り扱う人の採用試験の話聞いた。試験をする人は機械のこちら側にいる。試験を受けようとする人を機械の向こう側に立たせ、ハンマーを手渡させる。機械の上から渡そうとする人は、無条件に不合格という。もし間違っ、ハンマーが落ちたとすると、機械の精度を回復するのに半年も1年も掛かるからだという。超精密工作機械を扱うのには、この位の心構えが必要なのである。

以前から、スイスやドイツでは、技能者を非常に大事にしてきた。マイスター制度にもよく判ることである。最近アメリカでも、特に超精密技術関係で技能者を大事にしだした。日本では、技能の技術化という方向で議論されることが多い。ともすれば技能不在でも処理できるという思想が強い。

超精密機器の製作に当たっては、部品加工精度を徹底的に高め、それらを使って組み上げていく、というのが根本理念である。限界まで部品加工精度を高めるためには、人間の備えているすべてをフルに活用していくことが、欠かせないことであると考え。心を中心に据えて、人間の感性の果たす役割を解明する必要がある。

6. 超精密加工をマスターするための教育訓練のあり方

機械、電気、電子、光学工業において必要とされる材料とそれらを使った部品類の精度は、サブミクロンオーダさらにナノメータオーダやオングストロームオーダの表面粗さ、形状精度が要求されている。これらの精度を出すためには、超精密加工技術が必要とされる。代表的な超精密加工の対象機器としては、レーザ発振器の反射鏡やレーザプリンターのポリゴンミラー、感光ドラム、VTRシリンダー、光コネクタ、各種光学レンズ類、半導体集積回路などがある。

現在の教育訓練機関での技術の蓄積は、マイクロメータオーダまでであろう。サブミクロンオーダ以上の高精度になると、機械の精度、制御系、熱、振動等の影響を十分考慮しなくてはならないので、従来からの方法で精度を出すことは不可能である。

図25に超精密加工をするために考えなければならない諸要因をまとめた。これらの諸要因の誤差を最小限にいくとめる必要がある。

教育訓練のカリキュラムに超精密加工を導入するためには、ここに示した超精密加工の諸要因を十分考慮した内容でなければならない。これらのことを考えたときに、いままでの機械加工技術とは異なる超精密加工法について検討しなければいけない。その基礎となるものが、従来からの工作機械の設計思想を根本的に考え直し、いわゆる精密測定機の設計思想に取り入れられている運動学的設計の導入を図るべきである。さらに各種材料の特性は勿論、超精密加工技術、超精密測定技術、超精密環境技術、微細寸法作成技術に関する学科や実験をはじめ、より高度な制御技術および超精密仕上の知識と実験・実習が必要である。また、実験・実習のための設備や機器等については、超精密機械加工用の機械をはじめ各種測定器、制御装置および超仕上用の機工具類が必要になる。特に測定器は $0.01\mu\text{m}$ オーダ以上の測定が可能でなければならない。

加工精度を高めるためには、加工された精度が定量化でき、加工の母体となる機械の要素の運動精度の定量化、さらに部品精度を正確に把握し、これらの間のつながりを見つけ出すことである。例えば、超精密スピンドルの場合、スピンドルの運動精度は加工物の面粗さ、形状精度を左右する。超精密加工された光学的鏡面の面粗さ、形状精度についてはナノメータオーダの精度が必要になる。これらの部品の形状精度を保証するための環境としては、温度・湿度、振動、塵埃等の精密な管理が可能なクリーンルームが必要になる。さらに、一般の精密加工は技能に依存するところは少ないが、超精密加工においては、超精密工作機械あるいは機械要素の製作に関し、技能に依存することによって品質、コスト、生産性のすべてについて優れた製品を作り出すことができる。また、技能に依存して部品精度を十分に満足する精度に作られた、超精密部品を用いて製作された超精密工作機械の母性原則に従って高精度部品が大量生産されるようになる。このように技能の役割は大きく技能の必要性を認識しなければならない。

以上のことを考えて超精密加工を教育訓練に取り入れる必要がある。表27に超精密加工に必要な教育訓練の内容を提案する。

表27 超精密加工の教育訓練内容

講 義	実 験・実 習
<p>1. 超精密加工の概論</p> <p>(1) 超精密加工の歴史</p> <p>(2) 産業界における超精密加工</p> <p>(3) 超精密加工と材料</p> <p>(4) 超精密加工と工具</p> <p>2. 材料工学</p> <p>(1) 各種材料の特性</p> <p>(2) 新素材の特性</p> <p>(3) 材料の評価法</p> <p>3. 材料加工技術</p> <p>(1) 高精度加工</p> <p>① ダイヤモンド工具による切削加工</p> <p>② ダイヤモンド工具による研削加工</p> <p>③ ラッピング、ポリッシング加工</p> <p>(2) 微細加工</p> <p>① 光リソグラフィ ② エッチング</p> <p>③ イオンビーム加工</p> <p>④ 電子ビーム加工</p> <p>⑤ レーザ加工</p> <p>4. 計測工学</p> <p>(1) 加工誤差理論の基礎</p> <p>(2) 加工面測定 (3) 形状精度測定</p> <p>(4) 運動精度測定</p> <p>① 回転精度 ② 直進精度</p> <p>5. 超精密加工機的设计概論</p> <p>(1) 運動力学的な設計理論</p> <p>(2) 精度の設計</p> <p>(3) 設計方法に関する問題</p> <p>① 超精密加工システムの開発および設計</p> <p>② 環境技術 (温湿度制御、防振、防塵)</p> <p>6. 感性工学</p>	<p>1. 加工技術</p> <p>(1) ラッピングによる平面のつくり方</p> <p>① 金属、非金属材料</p> <p>(2) ポリッシングによる鏡面加工</p> <p>① Siウエファ、光学系レンズ</p> <p>(3) 超精密ダイヤモンド切削</p> <p>① 金属、非金属材料</p> <p>2. 測定技術</p> <p>(1) 加工面粗さの測定</p> <p>① 光学的な非接触測定</p> <p>② 触針式測定</p> <p>(2) 形状精度測定</p> <p>① 真円度 ② 円筒度</p> <p>③ 真直度 ④ 平面度</p> <p>(3) チャッキングによる加工物の変形量の測定</p> <p>(4) 運動精度の測定</p> <p>① スピンドルの回転精度</p> <p>② スライドの直線精度</p> <p>3. 超精密加工機要素の設計・製作</p> <p>(1) 静圧空気軸受</p> <p>① スピンドル ② スライド</p> <p>(2) 静圧油圧軸受</p> <p>① スピンドル ② スライド</p>

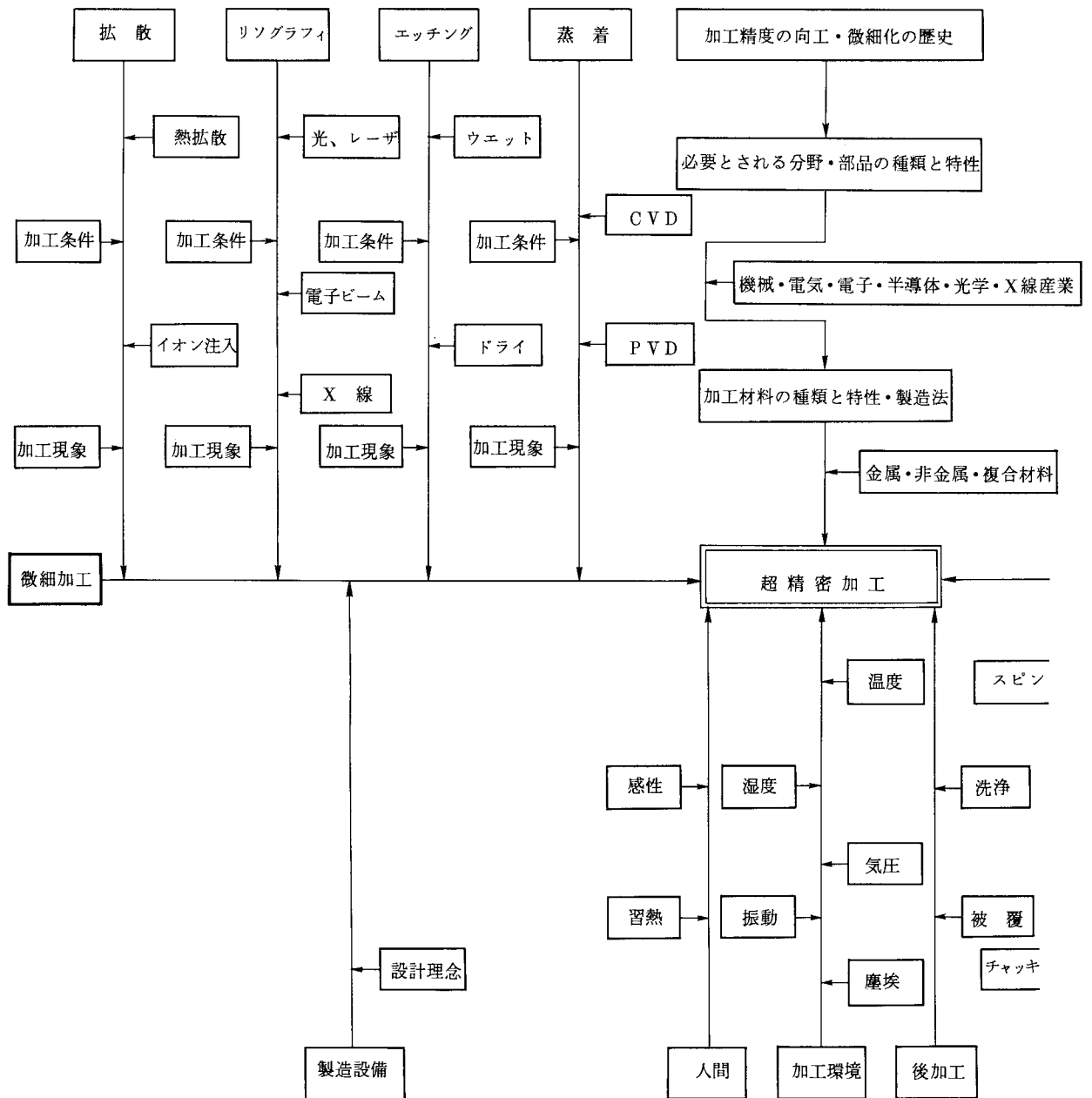
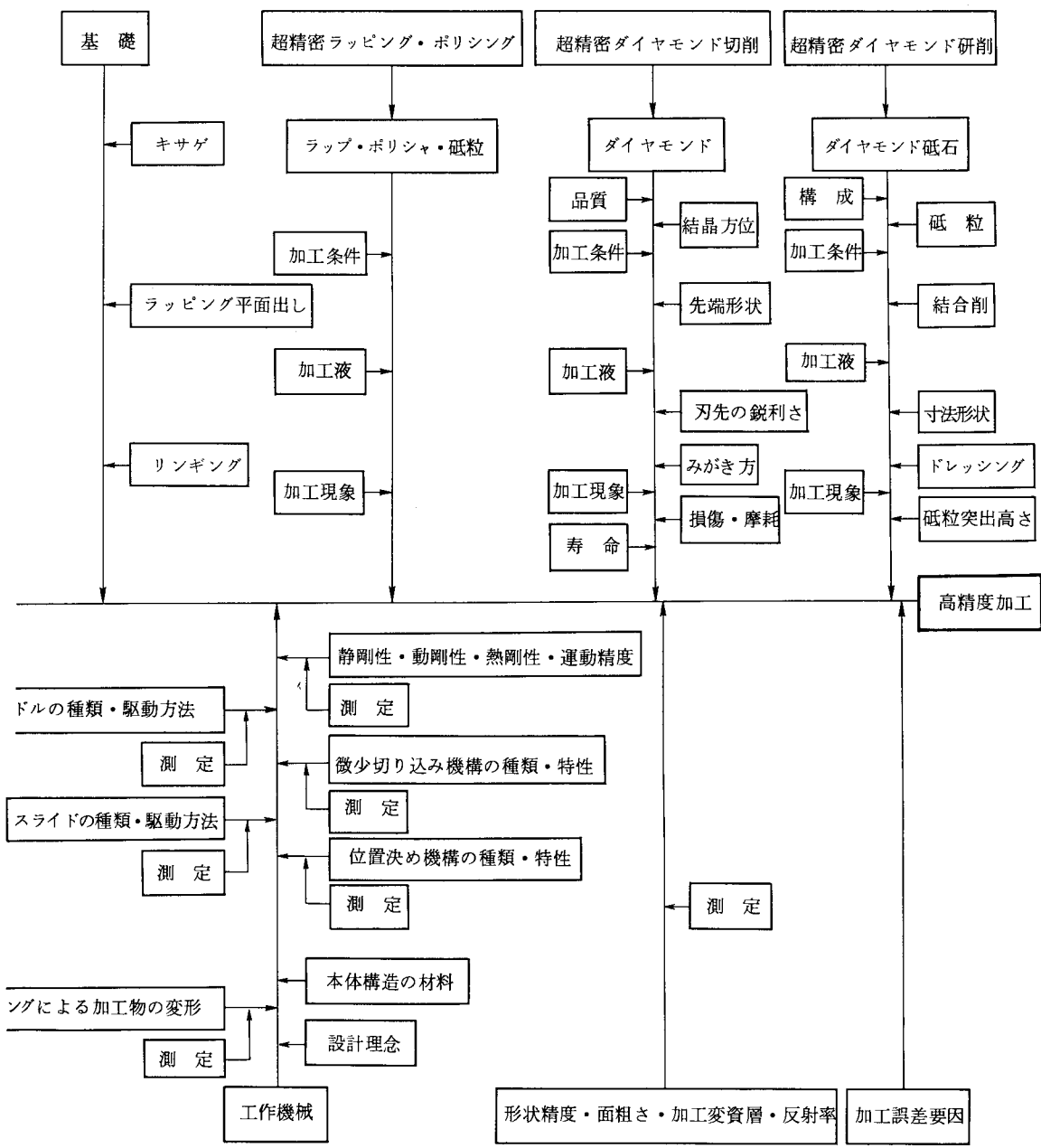


図25 超精密加工の諸要因



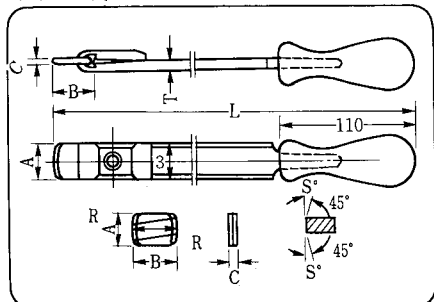
〈参考文献〉

- 1) Kobayashi A., Hoshina N. and Mori Y.: Annals of the CIRP, 22, 1 (1973)
- 2) 小林昭編：超精密加工技術実用マニュアル、新技術開発センター (1985)
- 3) マイクロ加工技術編集委員会編：マイクロ加工技術、日刊工業新聞社 (1977)
- 4) 砥粒加工研究会熊谷記念会：超精密加工技術、工業調査会 (1984)
- 5) 山内信也、森田稔：日本機械学会誌、84、755 (1981)
- 6) 榊田正美：機械の研究、35、1 (1983)
- 7) 井田一郎ほか：精密機械、25、8 (1959)
- 8) 小林昭監修：超精密加工技術、日本工業技術センター (1984)
- 9) 前田和夫：「最新LSIプロセス技術」工業調査会 (1983)
- 10) 日経ビジネス：時代は「軽・簿・短・小」日本経済新聞社 (1982)
- 11) 光産業技術振興協会：光産業の将来ビジョンII (1982)
- 12) 渡辺真：加工技術データファイル第10巻機械振興協会技術研究所 (1986)
- 13) 神尾健三：日本機械学会誌、84、755 (1981)
- 14) 甲斐正勝：日本工業技術振興協会超精密部会、1983.11.26
- 15) 前田武志ほか：工業材料、32、8 (1984)
- 16) 吉田富夫：日本会学機械関西支部第132回講習会、1985.6.6
- 17) 日経産業新聞、1985.10.14
- 18) Franks A. : Sci. Prog. Oxf. (1977)
- 19) Franks A. : 日本工業技術振興協会超精密技術部会、1984.7.11
- 20) マイクロ加工技術編集委員会編：マイクロ加工技術第2版日刊工業新聞社 (1988)
- 21) 阿竹宏ほか：光技術コンタクト、26、10 (1988)
- 22) 精密工学会シンポジウム1987.5.8
- 23) 石風武人、田島琢二：日本機械学会誌、89、814 (1986)

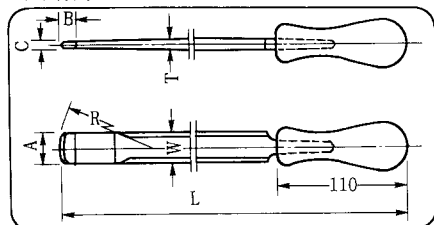
資料 1

1. スクレーパ

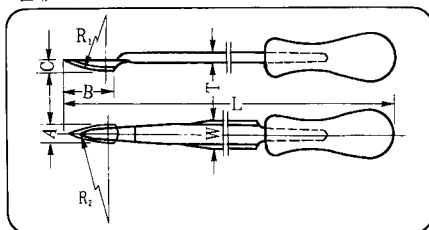
クランプ式スクレーパ



ろう付式スクレーパ



錐形スクレーパ



ホルダ形番	寸法(mm)			使用チップ	在庫
	W	T	L		
HCS-15	15	5	400	CST-15	●
HCS-20	20	5	400	CST-20	●
HCS-25	25	5	400	CST-25	●
HCS-30	30	5	400	CST-30	●

チップ形番	寸法(mm)				在庫
	A	B	C	R	
CST-15	15	25	2.3	250	●
CST-20	20	25	2.3	250	●
CST-25	25	25	2.3	250	●
CST-30	30	25	2.3	250	●

形番	寸法(mm)							在庫
	W	T	L	A	B	C	R	
HBS-15	15	5	320	15	13	2.5	200	●
HBS-20	20	5	370	20	13	2.5	200	●
HBS-25	25	5	390	25	15	2.5	200	
HBS-10	10	5	320	10	10	2	200	

材種THI

形番	寸法(mm)								在庫
	W	T	L	A	B	C	R ₁	R ₂	
HLS-10	15	5	290	10	35	7	70	90	●
HLS-15	15	5	310	15	55	9	155	170	●

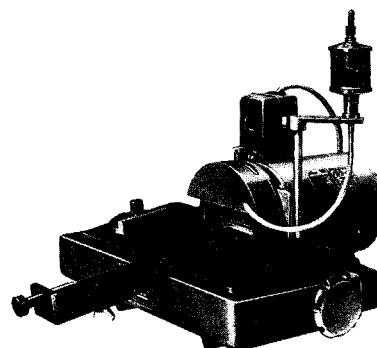
材種THI

2. 小形超硬研削盤

小形超硬研削盤はコンパクトに設計された湿式タイプの研削盤で、スクレーパや、ろう付バイトの研削が高精度にしかも手軽にできる。

スクレーパ研削用とバイト研削用の2機種あるが、アタッチメントと砥石をつけかえれば両方の研削が可能。

仕様



用 途	バイト研削用	スクレーバ研削用
形 番	TFG300-B	TFG300-S
付属アタッチメント形番	TFA-4	TFA-3
付属砥石	形 番	D220-25
	外径、粒度	φ125、D#220
芯 高	125mm	
油 皿 面 積	380mm×200mm	
所 要 床 面 積、重 量	380mm×410mm、26kg	
スピンドル回転数	50Hz/60Hz、2850r.p.m/3450r.p.m	
電 動 機	0.15kW、単相100V	

資料 2 . ブロックゲージ (Gauge Blocks) B7506-1978

1 . 適用範囲

この規格は、呼び寸法が0.5mm以上1000mm以下の長方形断面をもつブロックゲージ⁽¹⁾について規定する。

また、ブロックゲージの附属品については、附属書で規定する。

注(1) ブロックゲージの保護のために、その両端に密着して使用する保護ブロックゲージを含む。

2 . 用語の意味

この規格で用いる主な用語の意味は、次による。

(1) ブロックゲージ

耐久性のある材料で作られ、長方形断面で平行な測定面をもつ端度器であり、その測定面は他のブロックゲージと良く密着する性質をもっているもの。

(2) ブロックゲージの寸法

ブロックゲージの測定面上の点から他の測定面に密着させた同一材質、同一表面状態の基準平面までの距離 (L) ⁽²⁾ (図 1 参照)。

注(2) ブロックゲージの寸法には、密着のときに生じる中間層の厚さを含む。

(3) ブロックゲージの中央寸法

ブロックゲージの測定面の中心における寸法 (L_c) ⁽³⁾ (図 2 参照)

注(3) ブロックゲージの中央寸法は、その測定面が平行でないときは、二つの測定面に対応して L_c と L_{c1} とがある。この規格で規定された精度の範囲では、 L_c と L_{c1} との差は実際上問題にならない。

(4) ブロックゲージの平行度

ブロックゲージの寸法のうち最大の寸法 (L_1) と最小の寸法 (L_2) との差 (P) (図 3 参照)。

(5) 密着 (リングング)

ブロックゲージの測定面が他のブロックゲージの測定面又はそれと同等な面と分子力などによって結合すること。

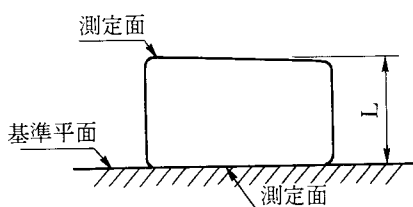


図 1

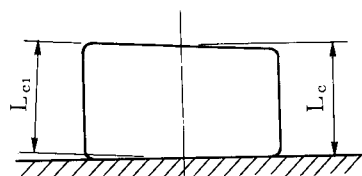


図 2

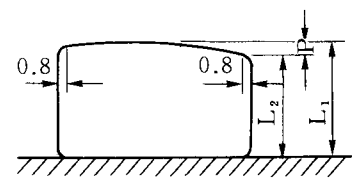


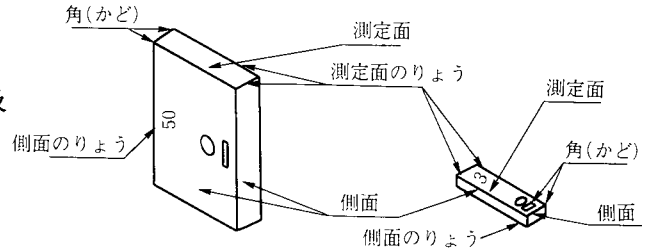
図 3

3. 名 称

ブロックゲージの各部の名称は、図4による。

4. 等 級

ブロックゲージは、精度によって00、0、1及び2級の4等級とする。



5. 精 度⁽⁴⁾

注(4) 精度は、測定面の側面から0.8mmの範囲には適用しない。

呼び寸法が5.5mmを超えるもの

呼び寸法が5.5mm以下のもの

図4

5.1 寸 法

ブロックゲージの寸法の許容差（実寸法から呼び寸法を差し引いた値の許容値）は、表1による。

5.2 平 行 度

ブロックゲージの平行度の許容値は、表1による。

5.3 測定面の平面度

ブロックゲージの測定面の平面度の許容値は、表2による。

表1 寸法の許容差及び平行度の許容値

単位 μm

呼び寸法 (mm)		00 級		0 級		1 級		2 級	
を超え	以 下	寸法の許容差(±)	平行度の許容値	寸法の許容差(±)	平行度の許容値	寸法の許容差(±)	平行度の許容値	寸法の許容差(±)	平行度の許容値
0.5 ⁽⁵⁾	10	0.06	0.05	0.12	0.10	0.20	0.16	0.45	0.30
10	25	0.07	0.05	0.14	0.10	0.30	0.16	0.60	0.30
25	50	0.10	0.06	0.20	0.10	0.40	0.18	0.80	0.30
50	75	0.12	0.06	0.25	0.12	0.50	0.18	1.00	0.35
75	100	0.14	0.07	0.30	0.12	0.60	0.20	1.20	0.35
100	150	0.20	0.08	0.40	0.14	0.80	0.20	1.60	0.40
150	200	0.25	0.09	0.50	0.16	1.00	0.25	2.00	0.40
200	250	0.30	0.10	0.60	0.16	1.20	0.25	2.40	0.45
250	300	0.35	0.10	0.70	0.18	1.40	0.25	2.80	0.50
300	400	0.45	0.12	0.90	0.20	1.80	0.30	3.60	0.50
400	500	0.50	0.14	1.10	0.25	2.20	0.35	4.40	0.60
500	600	0.60	0.16	1.30	0.25	2.60	0.40	5.00	0.70
600	700	0.70	0.18	1.50	0.30	3.00	0.45	6.00	0.70
700	800	0.80	0.20	1.70	0.30	3.40	0.50	6.50	0.80
800	900	0.90	0.20	1.90	0.35	3.80	0.50	7.50	0.90
900	1000	1.00	0.25	2.00	0.40	4.20	0.60	8.00	1.00

注⁽⁵⁾ 呼び寸法の0.5mmは、この寸法区分に含まれる。

表2 測定面の平面度の許容値

単位 μm

呼び寸法 (mm)		00 級	0 級	1 級	2 級
を超え	以下				
—	150	0.05	0.10	0.15	0.25
150	500	0.10	0.15	0.18	0.25
500	1000	0.15	0.18	0.20	0.25

なお、呼び寸法2.5mm以下のブロックゲージは、十分な剛性と良い平面度をもつ補助体に密着した状態で測定するものとし、密着しないときの測定面の平面度は、 $4\mu\text{m}$ を超えてはならない。

5.4 測定面の表面粗さ

ブロックゲージの測定面の表面粗さは、00級及び0級では $0.06\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 、1級及び2級では $0.08\mu\text{mR}_{\text{max}}$ を超えてはならない。

6. 形状・寸法

6.1 呼び寸法

ブロックゲージの呼び寸法は、原則として表3による。

6.2 断面寸法

ブロックゲージの測定面に平行な断面寸法は、表4による。

6.3 りょう及び角(かど)

ブロックゲージのすべてのりょうと角(かど)は、 0.3mm を超えない大きさの面取り又は丸みづけをしなければならない。

また、測定面のりょうと角(かど)は、密着に影響を与えたり、相手の測定面に傷をつけたりしないような状態でなければならない。

6.4 側面の平面度

ブロックゲージの側面の平面度は、呼び寸法が 100mm 以下のブロックゲージでは $80\mu\text{m}$ 、 100mm を超えるブロックゲージでは $(80+0.08L_0)\mu\text{m}$ を超えてはならない。ただし L_0 は、 mm で表した呼び寸法とする。

6.5 側面の幅の不ぞろい

ブロックゲージの両端において求めた各々の側面間の距離の差は、呼び寸法 100mm 以下のブロックゲージでは $40\mu\text{m}$ 、 100mm を超えるブロックゲージでは $(40+0.04L_0)\mu\text{m}$ を超えてはならない。ただし L_0 は、 mm で表した呼び寸法とする。

6.6 側面の倒れ

ブロックゲージの測定面に対する側面の倒れ(図5参照)の許容値は、表5による。

また、幅 9mm の側面に対する他の側面の倒れは、 $90\mu\text{m}$ を超えてはならない。

6.7 継ぎ足し用の穴

ブロックゲージを継ぎ足したり、密着したものを保持するための穴をブロックゲージに設けるときの

表3 呼び寸法の種類

単位mm

呼 び 寸 法									寸法の段階
1.0005									—
1.001	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	0.001
0.991	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996	0.997	0.998	0.999	0.001
1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	0.01
1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	
1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	
1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	
1.37	1.38	1.39	1.40	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	
1.46	1.47	1.48	1.49						
1.6	1.7	1.8	1.9						
0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	0.5
5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	
9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	
14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	
18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	
23.0	23.5	24.0	24.5	25.0					
30	40	50	60	70	80	90			
75	100	125	150	175	200				25
250									—
300	400	500	600	700	800	900	1000		100
750									—

備考 保護ブロックゲージの呼び寸法は、1 mm及び2 mmとする。

表4 断面寸法

単位mm

呼び寸法	断面寸法
10.1以下	$30_{-0.3}^0 \times 9_{-0.2}^{-0.05}$
10.1を超えるもの	$35_{-0.3}^0 \times 9_{-0.2}^{-0.05}$

表5 側面の倒れ

単位μm

呼び寸法 (mm)		倒れの許容値
を超え	以下	
10.1	25	50
25	60	70
60	150	100
150	400	140
400	1000	180

は、図6による。

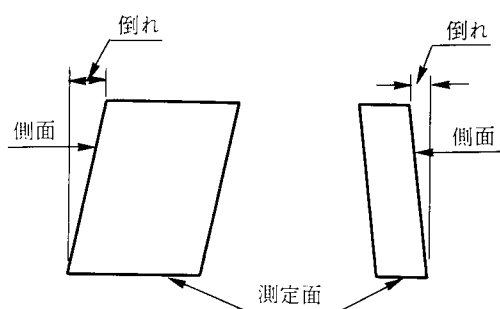


図5

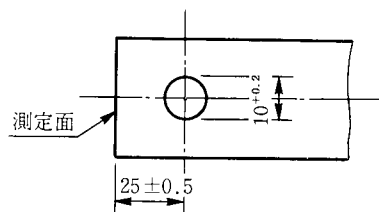


図6 単位mm

7. 測定面

ブロックゲージの測定面は、互いに密着しなければならない。

また、測定面には、ブロックゲージの使用上有害な欠陥があつてはならない。ただし、かえりのない細かいラッピング傷のように、密着や精度に影響を与えないものは、あつても差し支えない。

8. 材料

8.1 材料の種類

ブロックゲージの材料は、高品位かつ均質のものとし、その主な材料及び記号は、次による。

材 料	記 号
高炭素高クロム鋼	(無記号)
クロムカーバイド	CC
タングステンカーバイド	TC

8.2 硬 さ

ブロックゲージの測定面の硬さは、Hv800以上とする。

8.3 熱膨張係数

ブロックゲージ材料の10～30℃における熱膨張係数は、原則として $(11.5 \pm 1.0) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とする。この範囲内でない材料を用いるときは、熱膨張係数の値を寸法検査表、等級検査表又は格納箱に明示しなければならない。

8.4 寸法の安定度

ブロックゲージの寸法の安定度は、経年による寸法の変化が表6の許容値を超えてはならない。寸法の安定度は、試料による試験で確認し、その期間中、試料を寸法の安定度に特別の影響を及ぼさない環境に保管しなければならない。試験期間は、寸法測定の精度を考慮して、寸法の変化を識別するのに十分な長い期間でなければならない。

表6 寸法の安定度

等級	変化量の許容値 ($\mu\text{m}/\text{年}$)
00、0	$0.02+0.0005L_0$
1、2	$0.05+0.001L_0$

備考 L_0 は、mmで表した呼び寸法とする。

9. 標準

9.1 寸法の標準

ブロックゲージの寸法の標準は、クリプトン86原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ との間の遷移に対応する光波の真空中での波長 (λ) とし、次の値をもつものとする。

$$\lambda = \frac{1}{1650763.73} \text{m}$$

9.2 標準状態

ブロックゲージの寸法は、温度20°C、気圧1013.25mbarにおけるものとする。

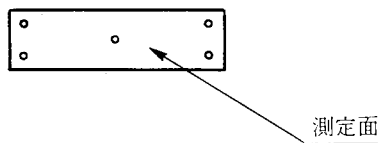
9.3 姿勢の標準

ブロックゲージの寸法は、呼び寸法100mm以下は、測定面を上下にした鉛直の姿勢におけるものとする。呼び寸法100mmを超えるときは、有害な内力を生じないように適当な2個の支持体で、端面から呼び寸法 $\times 0.211$ の位置で、小さい幅の側面を保持した水平姿勢におけるものとする。

10. 寸法の測定

00級のブロックゲージを測定するとき、及び0級のブロックゲージの比較測定に使用する標準のブロックゲージを測定するとき、そのほか特に必要と認めたときは、2.(2)及び9.に基づき、原則として光波干渉測定方法によって測定する。0級、1級及び2級は、原則として標準のブロックゲージとの比較測定方法によって測定する。

参考 ブロックゲージの寸法の測定は、原則として参考図に示す5箇所で行うものとする。



参考図

・印は測定箇所を示す。

11. 検査

ブロックゲージの検査は、精度、形状・寸法、測定面及び材料について行い、5.、6.、7.及び8.の規定を満足しなければならない。

参考表 主なセット（組合せ）の種類

寸法段階 (mm)	0.001	0.01	0.1	0.5	1	—	—										25	—	100	総 個 数
寸法範囲 (mm)	0.991~0.999 1.001~1.009	1.01~1.09 1.01~1.49	1.1~1.9	0.5~9.5 0.5~24.5	1~9 1~24	1.0005 1.005	10	20	25	30	40	50	60	75	100	125~200	250	300~500		
セット記号	個 数																			
S 112 ⁽⁶⁾	9	49		49		1			1			1		1	1				112	
S 103		49		49		1		1				1		1	1				103	
S 76		49		19		1	1	1		1	1	1		1	1				76	
S 47		9		9		24		1		1				1	1				47	
S 32		9		9		9		1	1	1		1		1 ⁽⁷⁾					32	
S 18	9	9																	18	
S 9(+)		9																	9	
S 9(-)	9																		9	
S 8																4	1	3	8	

注⁽⁶⁾ S 112の1.0005を除いてS 111 (111個組)としてもよい。

⁽⁷⁾ 60mmの代わりに50mmにしてもよい。

備考 上記のセット（組合せ）に保護ブロックゲージ（2個）を加えたものの記号は、そのセット（組合せ）記号の末尾にPを付ける。

12. セット（組合せ）

12.1 セット（組合せ）

ブロックゲージのセット（組合せ）は、一つの格納箱に納められ、そのブロックゲージは、すべて同一等級のものでなければならない。

12.2 格納箱

セット（組合せ）の格納箱は、ブロックゲージを個別に確実に収納し、その出し入れが容易で、防じん（塵）・防せい（錆）に効果のある十分強固な構造であること。

参考 セット（組合せ）の種類は、その使用目的により種々のものがあるが、代表的な種類を参考表に示す。

13. 製品の呼び方

ブロックゲージの呼び方は、規格番号又は規格名称、呼び寸法及び等級による。

例：JIS B 7506 100mm 0級

参考 参考セット（組合せ）の呼び方は、規格番号又は規格名称、セット（組合せ）記号及び等級による。

例：JIS B 7506 S103 1級

JIS B 7506 S76P 2級

14. 表 示

14.1 刻 印

ブロックゲージには、次の事項を表示する。

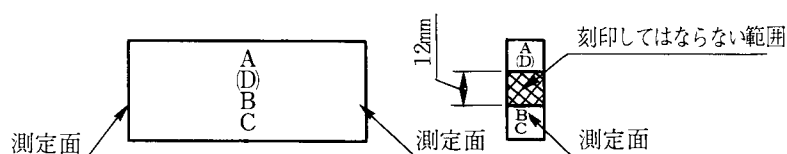
なお、すべての刻印は鮮明であり、製造業者の略号と呼び寸法の文字の大きさは、1.5mm以上でなければならない。

- (1) 製造業者の略号
- (2) 呼び寸法
- (3) 製造番号⁽⁵⁾
- (4) 材料記号（材料記号のあるものに限る）

注(5) 製造番号の最初の2けた（桁）は、製造時の西暦年号の10位と1位の数を表す。ただし、年号とそれ以外の数字を切り離して刻印してもよい。

刻印を施す面は、呼び寸法5.5mmを超えるものでは側面とし、5.5mm以下では測定面とするが、測定面の中央9mm×12mmの範囲内には刻印してはならない（図7参照）。

備 考 刻印の位置は、図7によることが望ましい。



- A：呼び寸法（mmは省略してよい）
- B：製造業者の略号
- C：製造番号（D：材料記号）

呼び寸法が5.5mmを超えるもの 呼び寸法が5.5mm以下のもの

図7

14.2 支持位置の表示

呼び寸法100mmを超えるブロックゲージには、支持位置を示すためのマークを測定面から呼び寸法×0.211の所に表示することが望ましい。

14.3 セット（組合せ）の表示

ブロックゲージのセット（組合せ）の格納箱には、次の事項を表示する。

- (1) 製造業者の略号
- (2) 製造番号
- (3) 等級

参 考 セット（組合せ）記号のあるものは、これを記入する。

14.4 寸法及び等級検査表

00級及び0級のブロックゲージには寸法検査を、1級及び2級のブロックゲージにはその等級を保証する等級検査表を添えるものとする。

寸法検査表に表示する値は、中央寸法誤差の測定値とし、等級検査表には等級のみを表示する。

附属書 ブロックゲージの附属品

1. 適用範囲

この附属書は、ブロックゲージの附属品（以下、附属品という。）について規定する。

2. 種類

附属品の種類は、次のとおりとする。

- | | |
|-----------------------------------|-------------|
| (1) 丸形ジョウ（内・外側 測定用） | (4) センタポイント |
| (2) 平形ジョウ A形（内・外側 測定用）、B形（外側 測定用） | (5) ホルダ |
| (3) スクライバポイント | (6) ベースブロック |

3. 密着面

附属品の密着面は、表面粗さ $0.08\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 以下とし、ブロックゲージと密着しなければならない。

4. 材料

附属品の材料は、高品位かつ均質で、この附属書に定められた諸性質を満足し、その測定面⁽¹⁾及び密着面の硬さはHv800以上でなければならない。

注(1) スクライバポイント及びセンタポイントの先端を含む。

5. 丸形ジョウ

丸形ジョウの寸法及び精度は、附属書表1及び次による。

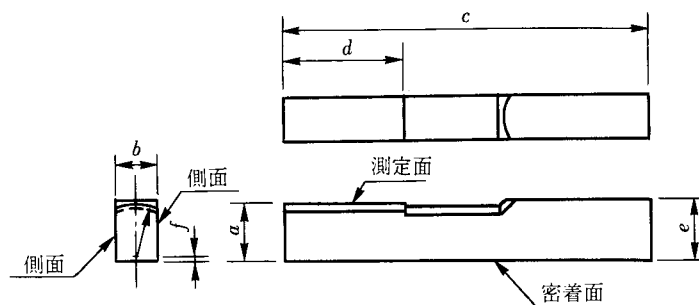
- (1) 密着面に対する円筒状測定面の母線の平行度の許容値は、 $0.5\mu\text{m}$ とする。
- (2) 側面と密着面との直角度の許容値は、 $50\mu\text{m}$ とする。
- (3) 密着面の平面度の許容値は、 $0.5\mu\text{m}$ とする。

6. 平形ジョウ

平形ジョウは、A形、B形の2種類とし、寸法及び精度は、附属書表2及び次による。

- (1) A形の密着面の平行度の許容差は、 $1\mu\text{m}$ とする。
- (2) 側面と密着面との直角度の許容値は、 $50\mu\text{m}$ とする。
- (3) 密着面の平面度の許容値は、 $1\mu\text{m}$ とする。

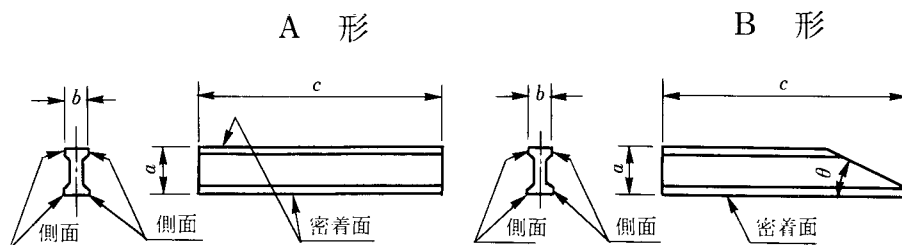
附属書表1



単位mm

呼び寸法	a		b	c	d	e	f
	基準寸法	許容差(μm)					
2	2	±0.5	9 ^{-0.05} _{-0.2}	約40	約5.5	約7.5	約0.05
5	5			約45	約14		
8	8			約50	約18.5	約8.5	
12.5	12.5			約75	約25	約13	

附属書表 2



単位mm

呼び寸法	a			b	c	θ
	A 形		B 形			
	基準寸法	許容差(μm)				
100	20	±1	約20	9 ^{-0.05} _{-0.2}	約100	約20°
150					約150	

7. スクライバポイント

スクライバポイントの寸法及び精度は、附属書図1及び次による。

- (1) 側面と密着面との直角度の許容値は、50μmとする。
- (2) 密着面の平面度の許容値は、0.5μmとする。

8. センタポイント

センタポイントの寸法及び精度は、附属書図2及び次による。

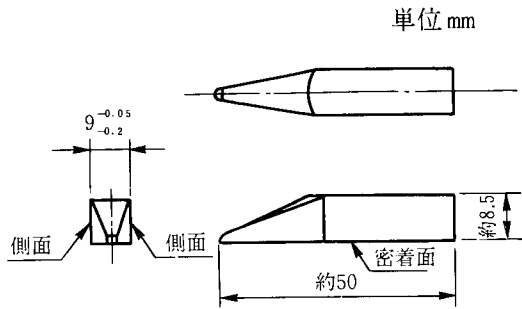
- (1) ポイントの中心と密着面との食い違いは、10μm以下とする。
- (2) 側面と密着面との直角度の許容値は、50μmとする。
- (3) 密着面の平面度の許容値は、0.5μmとする。

9. ホ ル ダ

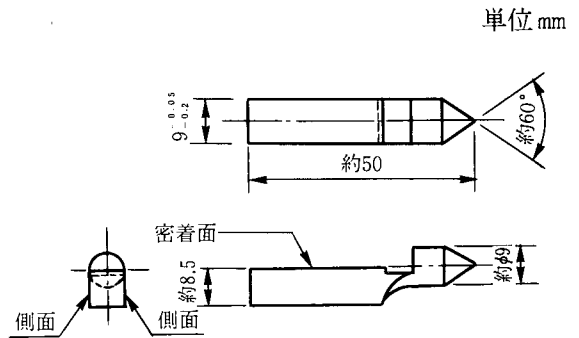
ホルダの寸法及び精度は、附属書図3及び次による。

- (1) ホルダの呼び寸法は、固定ブロックと移動ブロックとの最大間隔による。

附属書図 1



附属書図 2



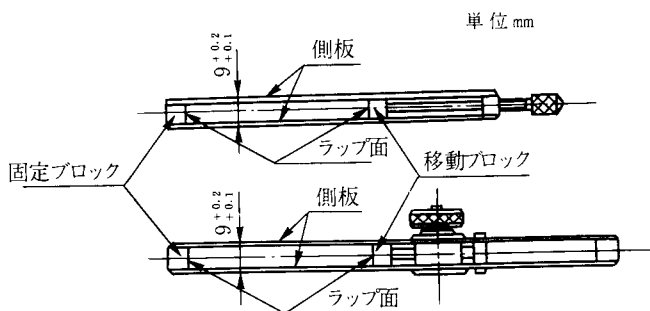
- (2) 固定ブロックのラップ面に対する側板の倒れの許容値は、最大間隔300mm以下において0.1mmとする。
- (3) 附属書図 3 に示すホルダの側板の距離は、最大間隔300mm以下のものについて適用する。

10. ベースブロック

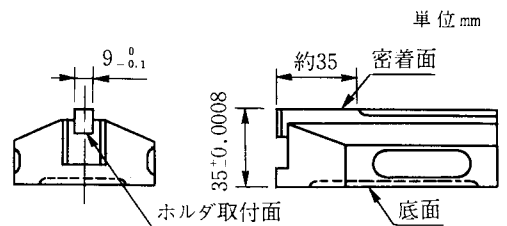
ベースブロックの寸法及び精度は、附属書図 4 及び次による。

- (1) ホルダ取付部の側面と密着面との直角度の許容値は、 $50\mu\text{m}$ とする。
- (2) ホルダ取付面と密着面との平行度の許容値は、 $2\mu\text{m}$ とする。
- (3) 密着面の平面度の許容値は、 $0.5\mu\text{m}$ とする。
- (4) 底面の平面度の許容値は、 $1\mu\text{m}$ とする。
- (5) 密着面と底面との平行度の許容値は、 $0.8\mu\text{m}$ とする。

附属書図 3



附属書図 4



11. 製品の呼び方

附属品の呼び方は、規格番号、種類及び呼び寸法による。

例：JIS B 7506平形ジョウ A形150mm

12. 表 示

附属品には、次の事項を表示する。

- (1) 製造業者の略号
- (2) 呼び寸法（呼び寸法のあるものに限る。）

資料3. 施設の環境

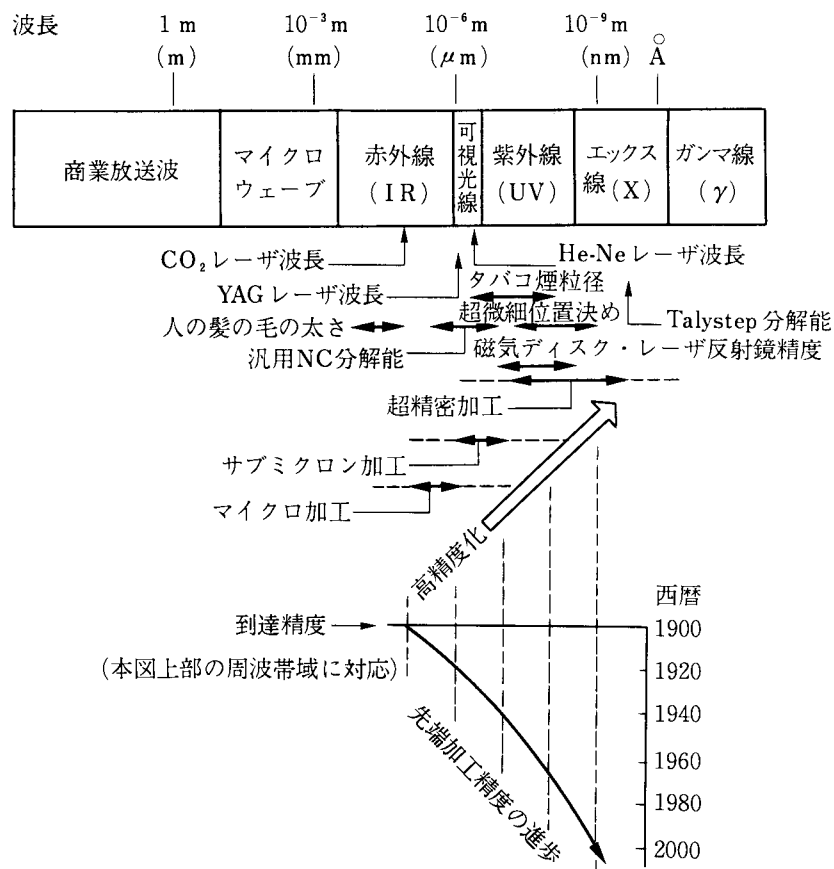
出典：(株)日本オプトメカトロニクス協会発行
「光技術コンタクト」VOL. 26 No. 12

1. はじめに

重厚長大から軽薄短小へと言われて久しい。社会のニーズが急速に変化し、製品のより高性能、高信頼性のあるものが求められてきている。また製品の小型化、エレクトロニクス化が加速度的に進み、ここ数年の進歩は驚くべきものがある。それらのニーズに対応して、製品を加工する施設、研究施設—超精密加工をおこなう施設—も年々増えている。超精密加工を行なう作業環境は一部には十分に配慮された環境となっている施設もあるが、まだ十分な環境になっていないと思われる。

サブミクロンからナノメートルへ進みつつある加工にふさわしい作業環境とは、空気清浄化技術のみではなく、微振動、温・湿度コントロール、電磁波、静電気等の対策が必要に応じてなされている環境をいう。日進月歩で加工装置の性能、加工精度の計測装置が向上しているが、新しい装置や機器を既存の施設内あるいは改造を行ない設置している場合が多く、そのため装置や機器の仕様・性能を十分事前に予測して、それらの環境条件を整えておかないと後で苦勞することが多い。

超精密加工環境を計画する場合には、装置・機器の要求するスペックに対応することはもちろんだが、装置・機器を含めた加工空間全体をバランスよく機能を十分に発揮できる環境づくりを目指さなければならない。



(先端加工技術研究会編「超生産加工技術への挑戦」より)

図1 各種波長からみた加工精度とその進歩

2. 超精密加工をおこなう環境

精密加工環境は、空気環境、温・湿度環境、振動環境等で構築されており、それらの環境の維持についても忘れてはならない。(図4)

建設業で対象としている精密環境の分野は、土木、建築のみではなく地下空間、海洋さらに宇宙空間へと広がっているが、それぞれの用途の必要とする精度、制御すべき環境条件が異なっており、ある施設を実現する場合は上記の種々の環境の技術の組み合わせにて対応することになる。(図3)

超精密加工は 10^{-6}m (μm) $\sim 10^{-9}\text{m}$ (nm) のオーダーの精度の加工を行なうレベルであり、建築で通常おこなっているレベルからすれば数段厳しい環境が求められている。加工精度は産業革命以来200年の間に $1/1,000 \sim 1/10,000$ 、計測精度は $1/1,000,000$ になっている。今後ますます加工精度、計測精度は厳しくなるであろう。

3. 超精密加工環境を構築する環境について

1) 空気環境

われわれの生活している空間、大気中、部屋の中にはいろいろなゴミや微粒子が存在している。これらの空間中に存在するこれらのゴミが超精密加工では、加工面に付着し、汚染や損傷の原因になり、

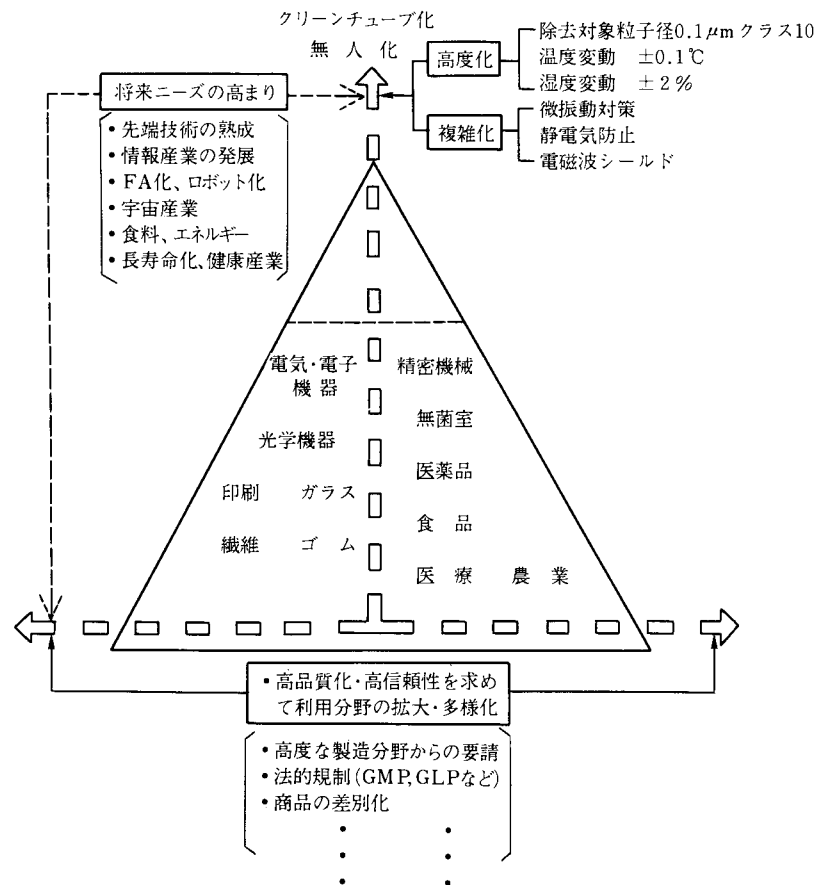


図2 クリーンルームの分野の広がりや高度化

品質管理上大きな問題となってくる。半導体製造の面からいうと、1M（メガ）のチップを生産するには線幅は1.0～1.8 μm になる。この場合1/10のゴミがウェーハに付着すると製品の性能が出ない不良品になってしまうため、0.1～0.3 μm のゴミの制御が必要となる。

これらの清浄度を表わす尺度を「クリーン度」という。これは米国連邦規格（表1）によっており、日本には公的な基準はない。最近では技術的進歩により従来の基準を改訂する提案がされている。また対象となる粒子径が0.5 μm から0.3 μm さらに0.1 μm となりつつある。

クリーン化技術は超高性能フィルターの出現により可能となった。これはHEPA (High Efficiency Particulate Air) と呼ばれるフィルターと、それよりも高性能な、ULPA (Ultra Low Penetration Air) と呼ばれるフィルターである。HEPAは0.3 μm の粒子を99.97%以上捕集する能力があり、一般のクリーンルームに使用される。これに比較してULPAは0.1 μm の粒子を99.999%以上捕集する能力があり、クラス10以上のスーパークリーンルームと呼んでいる高精度の環境で使用される。また0.05 μm の粒子に対して99.99999%以上捕集する能力のあるフィルターの開発も進んでいる。

クリーン度のみでなく、気流についても、光計測、半導体レーザー製造施設などにおいては重要になる。いわゆる“ゆらぎ”が問題となる。風速をおとし、均質な気流を得るために、天井を全面有孔天井にした環境もある。

ゴミは其中でゆく作業者、生産機器だけではなく思いもかけないところから発生しており、クリーンルーム、スーパークリーンルームの計画に当っては後で述べるが、施設の配置計画を含め、仕上、メンテまでを十分に検討した上で進めていく必要がある。

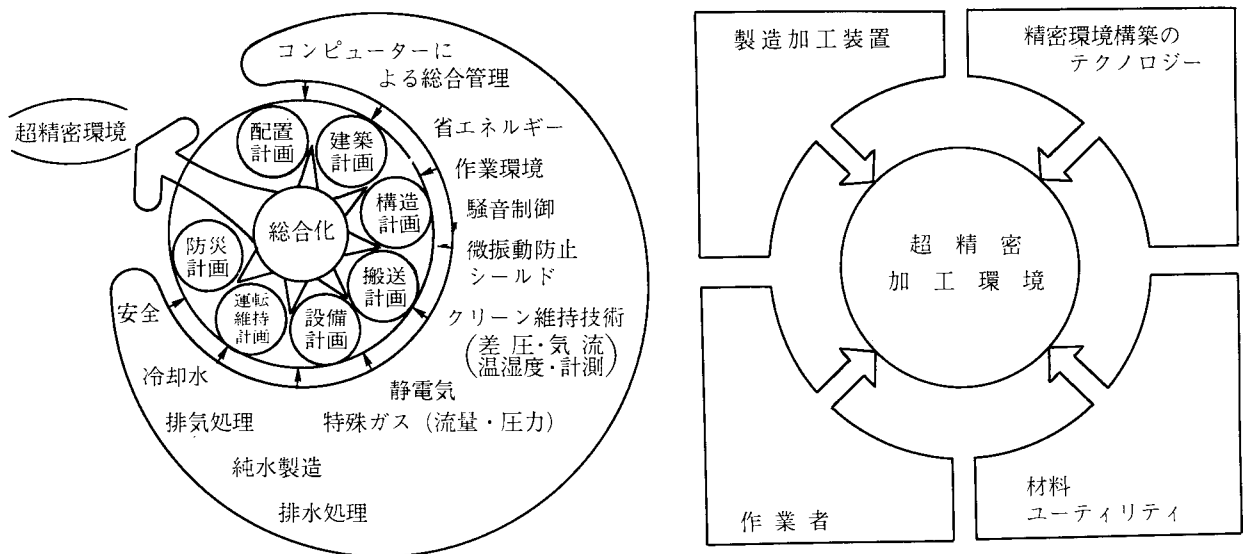


図3 超精密環境への実現

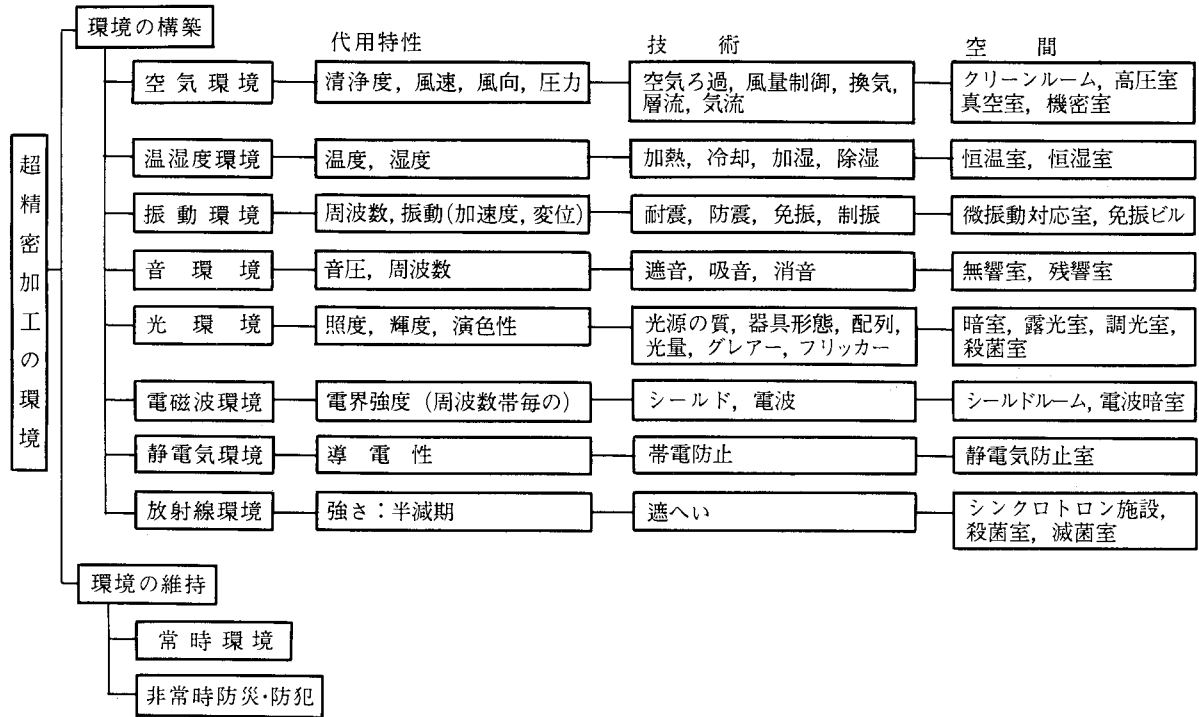


図4 超精密加工環境を構築する技術

表1 米国連邦規格209B要旨

クリーンルームクラス		100	1,000	10,000	100,000
微粒子	粒径0.5μm以上 (個/ft ³)	100	1,000	10,000	100,000
	最大数 (個/l)	3.5	35	350	3,500
	粒径0.5μm以上 (個/ft ³)	—	10	65	700
	最大数 (個/l)	—	0.35	2.3	25
圧力 (mmAq)		1.3以上			
温度	範囲 (°C)	19.4~25			
	推奨値 (°C)	22.2			
	誤差 (°C)	±2.3 (特別に必要とする場合には ±5)			
湿度	最高 (%)	45			
	最低 (%)	30			
	誤差 (°C)	±10 (特別に必要とする場合には ±5)			
気流換気回数		層流方式0.45m/s±0.1m/s 乱流方式20回/h以上			
照度 (Ix)		1.080~1.620			

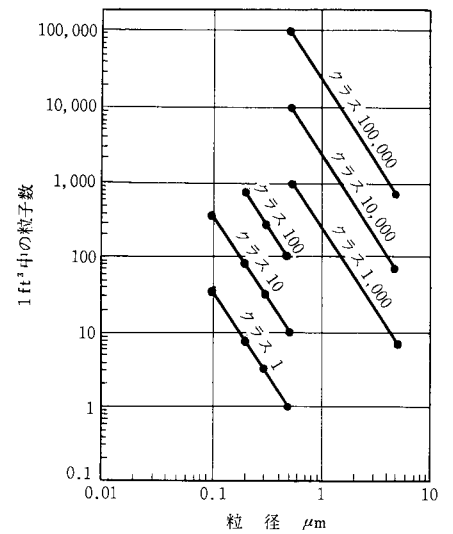


図5 清浄度クラス条件の改訂案

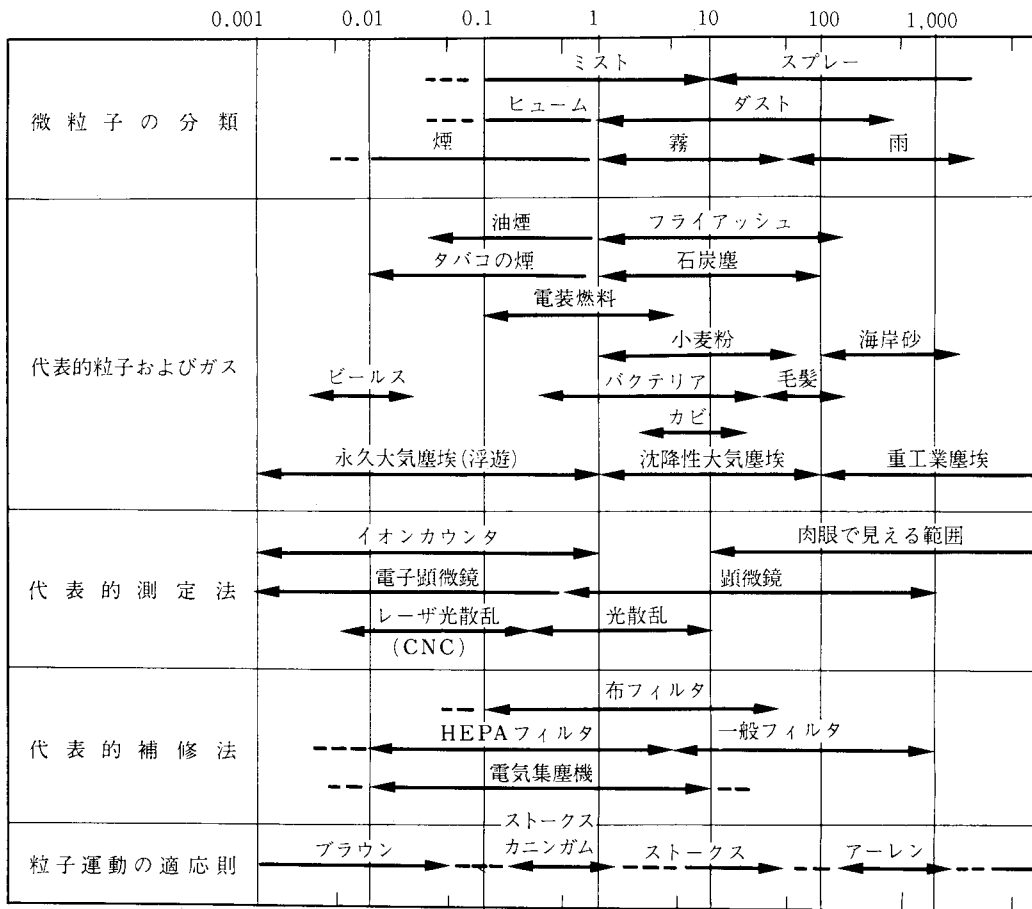


図6 代表的粒子の粒度分布 (ASHRAE: Hand Book of Fundamentals)

2) 温・湿度環境

温・湿度は空気環境の空気清浄度（クリーン度）よりも超精密加工環境では基本的に要求される要素である。わずかな温度の変化が加工精度に大きな影響を及ぼすからである。温度変動、あるいは局部的な不安定温度が発生すると熱変形による加工誤差が発生する。例えば温度1℃の変化で1μm/10cmの変形が生じるため0.1μmの精密度が要求される超精密加工では0.1℃以下の温度・湿度制御が必要となる。また空調のみではなく切削油剤の供給位置と液温、加工機温度、切削温度などの外乱が加工精度に及ぼす影響を十分に検討する必要もある。

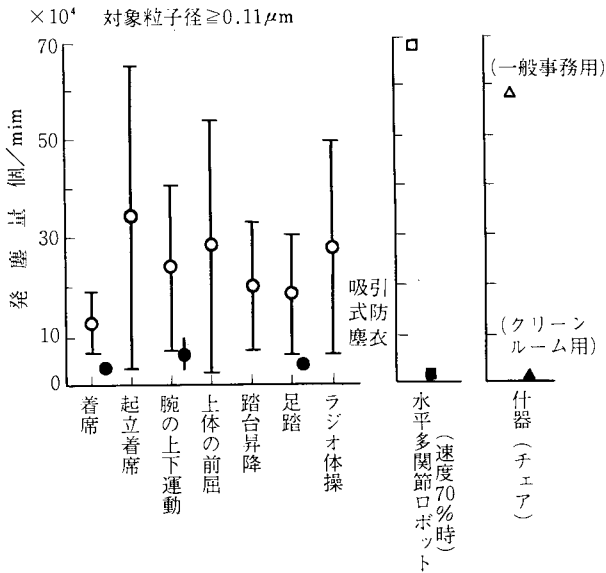
3) 振動環境

振動といっても種々の種類があるが、ここでは微振動による環境について述べることにする。

超精密加工環境においては、サブミクロンからナノメートル加工が現実となってきており、建築の振動による加工への影響、あるいは精度の高い機器による測定への影響が無視できなくなっている。その振動源は外部振動、建物内部振動、自然外力振動と多岐にわたる。これらが地盤、基礎から柱・ハリを通して床に伝わり加工装置に伝播することになる。振動は振動数 (Hz)、振幅 (μm)、加速度 (gal)、で表わされる。それらの許要限界は振動数によって異なる。建築構造の固有振動数等から考えると考慮しなければならない振動数は0.5Hz~70Hz前後の範囲である。一般に低振動数帯では振幅、

高振動数帯では加速度でその限界がきまることが多い。

地面は振動しており、波の波動による振動、鉄道等交通による振動など思いもかけぬ振動をしていることがある。これら暗振動についても調査し十分に把握した上で計画していくことが必要である。



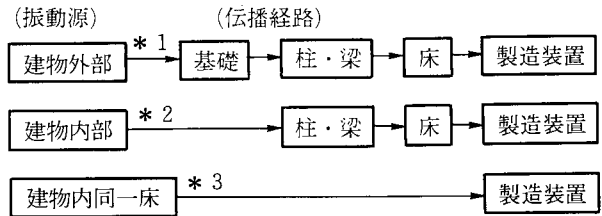
作業者発塵

白：一般品または対策なし

黒：対策後

* 50kgの重りを6回/min座部に衝撃を加えた時の発塵量

図7 種々の発塵源からの発塵量



- * 1 常時微動，自然外力，交通，建設，同一敷地内の他棟からの振動
- * 2 建築設備，作業時などの振動
- * 3 歩行振動

図8 振動源と伝播経路

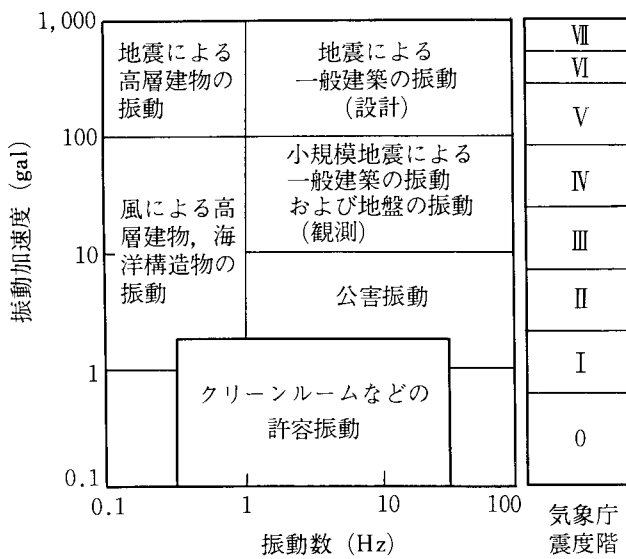


図9 地震、公害振動とクリーンルームなどの許容振動比較

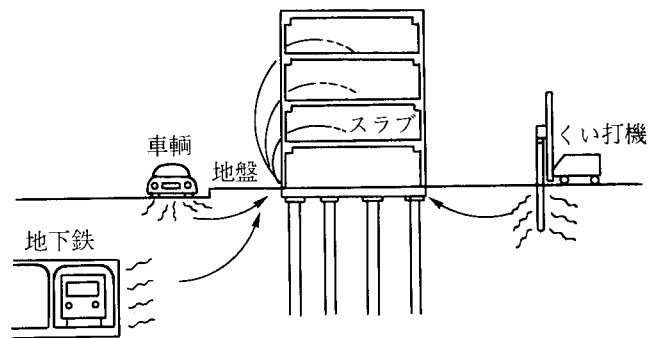


図10 振動の発生と伝播

4) その他の環境

電磁波環境：測定機・加工機などは電波ノイズに対して極めて弱い性質をもっているものであり、誤動作、破損が問題になってきている。電波ノイズは外部からだけでなく、内部の配線、モーター等からも発生しており、これらを遮断するためにシールドルームが要求されたり、部分的にシールドすることが必要となる。

静電気環境：床・壁・天井あるいは装置に静電気が発生すると静電気をもったもの間に放電現象がおこる。この放電によって製品への損傷、フィルムへの感光、ピンホール、またゴミの付着など生産障害を生じる要因になる。物体の帯電を防止するための対策が必要となる。

その他「光環境」「放射線環境」等構築する環境についても考慮しておくことが必要になる。

以上主な環境について述べたが（表2）に実証実験に基づき推定した達成可能なレベルを示す。又厳しい環境が要求される場合は、建物全体、空間全体でなく、その必要な部分のみ限定しユニット化あるいは局所化をすることも考える必要になる。（表3）

表2 数年後に達成可能となる要素技術レベル

項 目	数年後に達成可能となるレベル
1. 微細加工技術への対応	
① 微 振 動 防 止	加速度で規制 0.02gal以下 (1/3オクターブバンド) 変位で規制 0.12 μ m (O-P) 以下 (1/3オクターブバンド)
② 温湿度コントロール	温 度 22 $^{\circ}$ C \pm 0.15 $^{\circ}$ C (HEPA 下面分布) 湿 度 40% \pm 2 % 温湿度制御方法 40% \pm 2 % 電気ヒータ、サイリスタ制御 (全面層流) 冷却コイル付クリーンユニット } (トンネルファ 冷水：定温流量制御 } ン組み込みユ 外気取入空気：定温定流量制御 } ニットタイプ)
2. 空気清浄技術	
① 清 浄 度 ・ 粒 径	クラス0.5 (個/ft ³) \geq 0.03 μ m
② 換 気 回 数	600回/h
③ フィルタ面速度	0.45m/s
④ フ ィ ル タ	Super ULPA \geq 0.02 μ m 99.99999%
⑤ 室 圧 制 御	差圧センサによる外気量コントロール
⑥ 検収方法および計測技術	確度 \pm 0.05 $^{\circ}$ C、再現性 \pm 0.01 $^{\circ}$ Cの精密温度計による測定

表3 各ユニット、局所化の例

	精 密 環 境	超 精 密 環 境
温度制御	\pm 1.0 $^{\circ}$ C	\pm 0.05 $^{\circ}$ C (超恒温ユニット)
微振動制御 (水平方向)	0.144gal (コンクリート基礎上) (外乱は0.365gal)	0.034gal (除 振 台 上 部) (空 気 ば ね)

4. 超精密加工環境の計画

これまでは超精密加工環境を構築する環境について説明してきた。ここではそれらの環境の計画方法について述べる。

最適な超精密環境をいかにして実現させるか、スペック及び製造ライン等を十分理解して進めるのは当然であるが、建築・空調設備・電気設備、ユーティリティ設備、製造装置、メンテナンス方法から人の管理にいたるまで相互の関連部分を十分に把握して計画を進めていかなければならない。以下に計画のねらいと考えられる項目をあげる。

① 高性能な製造空間の実現

半導体の製造に見られるようにプロセスがますます精密化・集積化されていくために、プロセスの要求する厳しい空間条件や施設の性能条件を満たす必要がある。

② 経済性の追求

クリーンルームをはじめとする超精密加工施設では多量の電気や水、種々なユーティリティ・薬品が使用されるため、耐用年数を十分考慮しイニシャルコスト、ランニングコスト共に経済的な施設となるように計画する。

③ 信頼性の確保

安定して高性能な生産ができるために、施設が安定して稼働されるように考慮する必要がある。

④ 安全で無公害

表4 クリーンルーム計画の基本フロー

基本項目	検 射 対 象 内 容
(1) 与 握	規模、用途、目的、資金、生産プロセス、工期、年次計画、清浄度(状態の確認)、内部装置(発熱量、発塵量、負荷率、配置、ユーティリティなど)、周辺環境、運転管理(運転時間、清掃、保守員など)、作業者、熱源、エネルギー源の供給状況、消毒、そのほか特記事項および要求される機能(温度など)
(2) 設計条件の設定	立地条件——室内環境および機能の条件 社会条件(周囲環境) 資金条件(グレード) 法規制 将来計画
(3) システム設計	ゾーニング計画——プロセスレイアウト、人の動線、材料の動線、将来計画など 動線計画—— 構造計画——荷重、防振計画、架構法、構法など 環境計画——設備システムなど 省エネ計画——耐用年数 イニシャルコスト・ランニングコスト 防災安全計画——防災(防火・防爆・避難シミュレーション) エルゴノミックス ユーティリティ計画——電力、特殊ガス、純水、圧縮空気、排水、排気など 搬送計画——FA化、無人化、搬送手段など
(4) 評 価	

表5 室別条件表

(室別)

室名	名・数	床面積	天井	室内環境	振動	温度	湿度	クリーン度	度	作業時間	作業人員	作業内容
			(F寸法)	(特に注意を要すること)							男: 女:	

(機械リスト)

設備名 No.	発熱量 kcal/日	台数	大きさ W×D×H	重量 t	電気(使用)			給水(使用)			圧室 kg/cm ² 分	真空 mmgg	ガス配管 ガス種別・圧力	バックアップ他
					E	KVA	アース	給水l/分	冷却水l/分	排水l/分				
									入 出	℃ ℃				

超精密加工施設は閉鎖空間であることが多く更に内部で特殊ガスや薬品類が使用されるので作業員に対する安全性の配慮が必要である。又外部に対しても騒音、振動、排水、排気の面で公害を及ぼさない配慮が必要である。

⑤ 将来に対するフレキシビリティ

技術革新の早いテンポに対応して製造装置は常に新しいものになっていくために、生産施設もその変化に耐えられるようなフレキシビリティのあるものとしなければならない。

⑥ 働きやすさ

精密作業をおこなう場合、孤独な作業になることが多く、温・湿度も生産機器に合わせたコントロールをしているために人間的なものではなくなりがちである。このためお互いに存在を確認しあえる窓の設置、密閉空間から解放された時に外部の緑が十分に飛び込んでくるゆったりとした休憩スペースの確保などエルゴノミックスを考慮した計画も必要となる。

5. 計画の進め方

計画にあたっては、まずニーズをできるだけ正確に把握することが重要である。

- ① 超精密加工施設についてどのような考え方をしているのか。
- ② 何が一番重点をおいているのか。なぜクリーンルームが必要なのかなど目的・目標をはっきりさせる。
- ③ 竣工時のクリーン度、微振動等の検収条件をはっきりさせる。

以上計画を始める前に綿密に検討しておくことが必要となる。次に具体的な仕様の確認に入るが、室ごと、機器ごとのスペックを具体的な数字として決定することが重要であり、室別条件表(表5)として一覧表にまとめ確認していく。

5.1 敷地の選定

超精密加工施設の場合の立地条件、特に半導体工場の場合は、①候補地の地質、②気象条件、③周辺の開発状況、④各ユーティリティについての供給ルート・供給量・質、⑤法的規制及び自治体との折衝、⑥その他の特殊な条件として、労働環境・交通状況・情報環境等であるが、特に地質については軟弱な地盤の場合には杭などの基礎工事にコストがかかりすぎると同時に、微振動対策上も極めて不利になることがある。

ニーズの多様化に対応した計画とするためには

- ① 製造装置の増設や高品質な機器への入れ換え
- ② 製造プロセス変更への対応
- ③ 将来製造スペースになりうるような配慮、などの点について、十分に検討していくとともにクリーンシステム、ユーティリティ供給システム、メンテナンス方法、積載荷重、建築及び設備の工法など総合的に計画をしていく。

超精密加工施設においては複雑な装置を多く必要とするため、生産機器・設備の更新にフレキシブルに対応できる計画にするためには、どの程度の自由度を当初の計画に持たせておくかは重要な決断事項となる。又エネルギーの余裕率やバックアップ体制についても同様である。自由度が増えるとイニシャルコストが上昇していくのが一般的であり、研究施設の場合は量産工場に比較してよりフレキシブルな計画をする必要がある。

基本的な条件が明確になると、より具体的な計画に入る。施設全体の配置、建物の平面、断面、立面等の計画はもちろん、ゾーニング計画、動線計画、構造計画、設備計画、ユーティリティ計画その他の計画をそれぞれの関連性を考慮し総合的にまとめることが必要である。

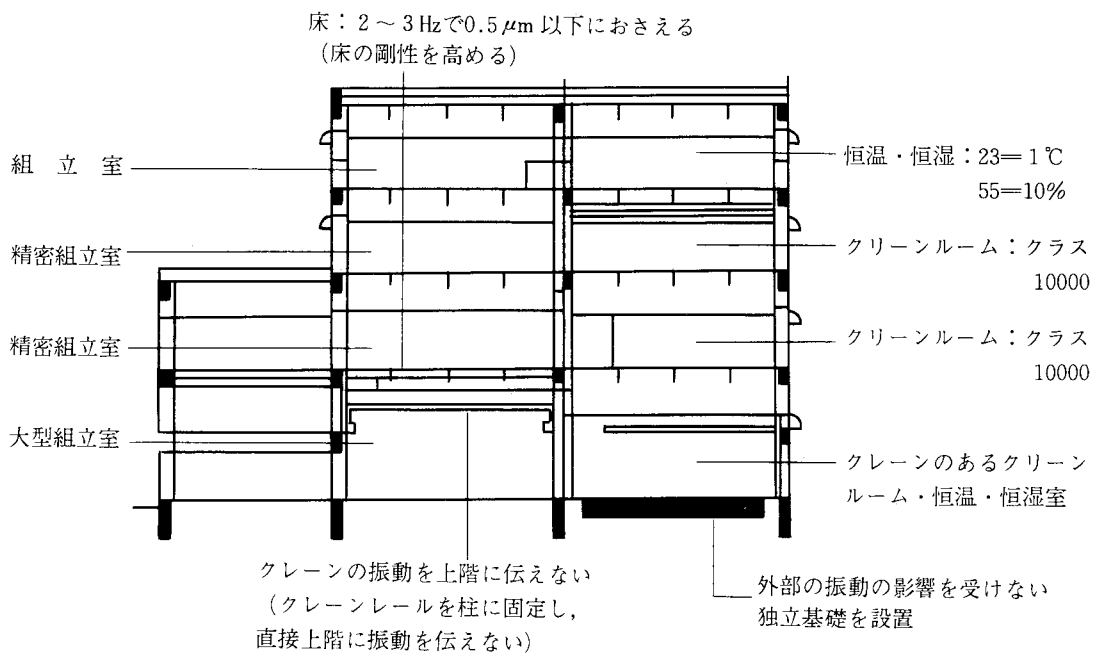


図11 多層階の精密環境施設例

5.2 構造計画

最近の超精密加工環境の特徴としては独立した建物ではなく、大きな建物の一部にその性能をつくり込むケースが増えてきている。又最近の傾向としては、①敷地の有効利用、作業動線の短縮化、建物の省エネルギー化の点から多層階の要求が増えている。②将来の変更に対するフレキシビリティ、機器の大型化への対応からスパン(柱間)、階高が大きくなっている。③迅速な対応とするため工期の短縮、等が求められている。

一方性能要求も厳しくなり、特に微振動対策については上記の傾向の中で対応する必要があり、建物全体の剛性をあげることを考えながら平面、断面、設備計画と関連づけ、さらに経済性を重視して

適正解を出さなければならない。

1) 構造種別の検討

構造体の種類は大きく分けて以下の3種類が一般に使われる。

- ① 鉄筋コンクリート造
- ② 鉄骨鉄筋コンクリート
- ③ 鉄骨造

構造計画で重要な微振動対策上有利な構造は鉄筋コンクリート造である。鉄骨造より剛性が高く変形量が少ない建物となり振動に対して有利になる。しかし最近では常に生産ラインの組み換えに対応しやすい空間、柱の本数が少なく、スパン（柱間）を限度まで大きくする傾向が強いために、PS構法（プレストレストコンクリート構法）などの特殊な構法を選択する場合も出てくるし、場合によっては鉄骨造として剛性に対する配慮をする場合もある。スパンの他にも、短工期で建物を完成させなければならないことが多くある。例えば鉄筋コンクリート造は鉄骨造よりは工期の点で不利になる。又生産施設の場合は生産機器との関連からスパンが決まってくる場合が多く、大スパンを鉄骨造で設計し、微振動対策も行なうことも当然生じてくるが、この場合は1階の剛性の大きな部分に厳しい条件のものを設置し上階に許容値の大きいものを配置するように計画するような配慮も必要である。架構方式をどうするかは将来計画にも影響してくるため十分に検討した上で進めないで過剰品質になったり、将来使えないものになってしまうことがある。現状の生産機器、将来の計画、微振動対策の面、又経済性の面からも総合的に判断してバランスのよい架構方式を決定していく必要がある。

2) 微振動対策

地質調査を行ない地盤の良い部分に配置することが重要になる。一般的に微振動対策が要求されるクリーンルーム等の施設は一般の建物の計画とは違って基本計画の段階から配慮していく必要がある。微振動対策については、

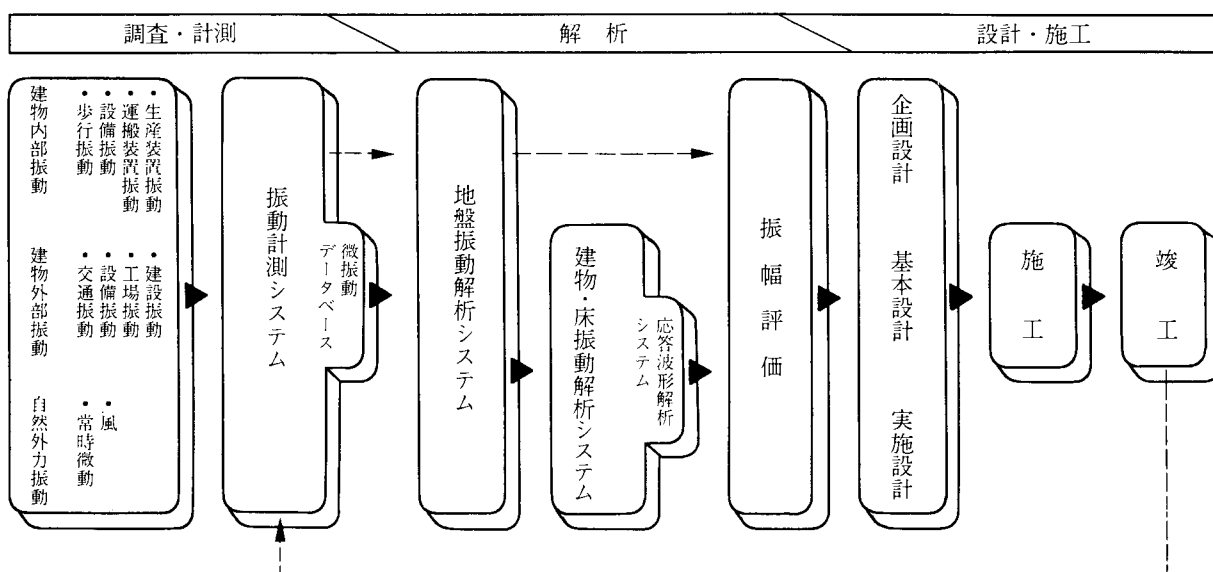


図12 シミズ微振動総合設計システム

- ① 距離減衰の活用をはかる
- ② 建築構造上別建物として分離、部分的に剛性を高める構造計画を行なう
- ③ フレキシブル接手や防振材により遮断する
- ④ 除振装置をとりつける

等を考慮する。

具体的には振動条件は床上でたとえば振幅（O-P） $3\mu\text{m}$ （5 Hz）以下、加速度 2 gal以下（70 Hz）などで与えられるが、地盤のもつ振動特性の測定、建物の持つ特性（剛性）、振動源となる設備機器等が稼動したときの振動予測、人の歩行による振動予測をコンピューターを用いて解析する、あるいは必要に応じて実物大モデルによる実験により確認をしていくこともある。

5.3 環境計画

1) 空気清浄化技術

クリーンルームを維持するためには、4つの原則が一般的にいられている。

- ① 微粒子を入れない：クリーンルームにはじん埃を持ち込まない
- ② 微粒子を極力排除する：どうしても入ってきてしまうじん埃はかならず集めて室外にする。
- ③ 微粒子の発生を防ぐ：室内で人が働くと、どうしてもじん埃が発生するがこれを最小限にする。
- ④ 微粒子の堆積を防ぐ：どうしても残ってしまうじん埃を堆積させない。

これら四つの原則を完全に実施するために、クリーンルームの方式の選択、クリーンルームのレイアウト、仕上材料の選択、などその要求されるクリーン度によってそれらを十分に検討していく必要がある。さらに実際の作業員及び生産機器の影響により気流の流れが変化するため、気流のコンピューターによるシミュレーションや、可視化実験を通して乱流や偏流の発生を事前に検討することができる（図13）。また加工中に発生するミスト、粒子や熱の処理などは加工機械の形状や性能と関係づけて施設環境を考える必要がある。

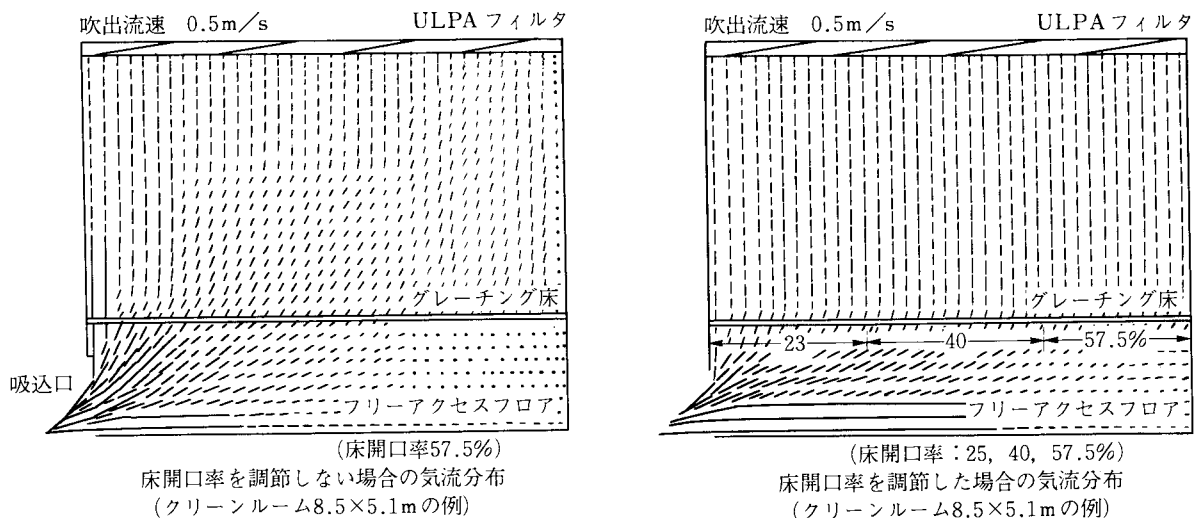
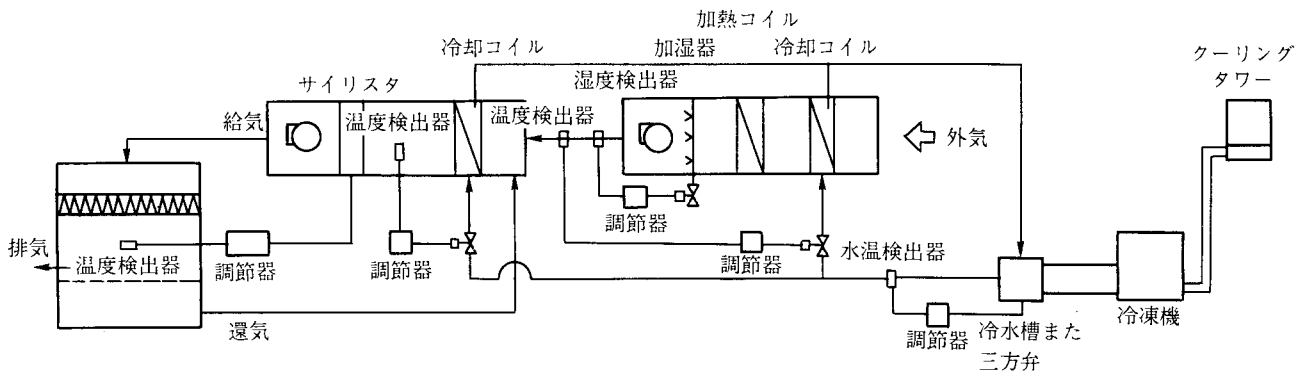


図13 気流分布のシミュレーション

2) 温湿度制御計画

超精密加工環境ではクリーン度よりも温度・湿度制御のほうが重要になるし、今後ますます厳しい条件になると思われる。室全体を厳しい条件のまま維持するのではなく、室全体はある程度幅をもたせ、もっとも厳しい条件が必要な空間を限定しサーマルチャンバーなど空調装置を設ける方法が省エネルギー上有利である。図14に温・湿度制御システムを示す。又温度変動幅 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内という厳しい環境で空間を制御する場合は、温度センサーの取り付け位置に注意しないと、フィルター面と支持枠、壁面では空気の流れが異なってくることもある。また、低コスト化のためサイリスタ制御を止めることが考えられる。この場合、冷却コイルへ供給される水温の温度制御幅が問題となる。実際の負荷変動や省エネルギーの観点から風量のインバータ制御を含めて、温湿度制御システムは決定される。

又、超精密加工施設は、エネルギーを多量に消費する施設であり、ランニングコストをいかに低く押えるかが環境計画の重要なポイントのひとつである。



制御幅	室内検出器	制御機器	空調機制御	外調機制御	熱源制御
$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2\%$	電子式温度検出器	電子式調節器	冷水コイルの出口温度一定 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) 電気ヒータ再熱制御 (サイリスタ) 吹出温度差 1°C 以内	ファン出口空気温度一定 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) 冷水、温水コイル制御 出口露点検出器により加湿器を制御加湿器 (ドライスチーム、赤外線加湿)	送水温度一定 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)
$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 5\%$	同上	同上	冷水コイルの出口温度一定 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) 温水コイル再熱制御 吹出温度差 5°C 以内	同上	同上
$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ $\pm 10\%$	同上	同上	同上 吹出温度差 10°C 以内	同上	送水温度一定 ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)
$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ $\pm 15\%$	電気式サーモスタット	不要	冷水コイルを室内サーモにより制御	塵埃のためには外調器があった方が良 いが温湿度制御の面からは不要	同上

図14 温度・湿度制御システム一例

5.4 防災安全面からの配慮

精密環境施設は外界とは遮断された密閉空間であり、大型化、自動化などによりシステム化された機器や有害で危険性の高いガス、薬品が使用されることが多い。万一災害が発生した場合には空気の拡散速度も速く、災害規模も拡大しやすい。また復旧にかかるコストも高く企業イメージの低下につながることになる。それゆえに防災計画や作業環境の向上につとめる必要がある。

法令に基づく防災計画は最小の基準であり、作業者の心理面を考慮した計画が必要となる。2方向避難が確実に確保できる計画、色彩計画などによる方向性が確認できること、緊急対策時の設備やセンサーの設置、避難シミュレーションにより事前に把握する方法も実用化されている。

又、「労働環境計画」としても騒音対策・照度の確保はいうまでもなく、作業者がリフレッシュできるスペース作りも、ゾーニング計画・動線計画を考える際に十分に検討しておくことが必要である。

以上、計画を進める上で重要なポイントとなる「構造計画」「空気清浄化計画」「温・湿度制御計画」「防災安全計画」についての概略を述べたが、これらが単独で計画されるのではなく、お互いに関連して計画されることが必要となる。

〈参考文献〉

- 1) 金田、安永、和田：超精密作業環境の計画 機械と工具、工業調査会 1988年5、6、7月号
- 2) 清水建設、微振動マニュアル
- 3) 超生産加工技術への挑戦 先端加工技術研究会