

超 精 密 加 工

— 加工精度の向上によせて —

大阪大学工学部 津 和 秀 夫

1. はじめに

自然科学の分野では、圧力、速度、温度などの条件を極端に高くあるいは低くすることによって、科学的な新分野が開拓せられ、文化に大きな貢献のなされることが多い。超高压、超高速、超高温、極低温などはこの例である。これらの極限を追求しようという技術——極限技術——は今後の工学が進むべき一つの方向であるには違いない。

加工の持つ大きな目標は、寸法形状的な高精度を得るということである。最近の機械工学の進歩は、常に加工精度の向上によって裏打ちされているといっても過言ではない。mm単位の精度から0.1mmへ、10 μ から1 μ へと精度が向上するたびに、新しい機械文明が発展した歴史は、この間の事情を如実に物語っている。

超精密加工は、加工精度を極度に高めることを目指した技術で、現在到達できた精度の壁を、もう一步高精度の方向に推し進めようとする技術である。加工の分野での極限技術ということができる。

このように超高精度の機械部品を造ろうとすることのねらいは、超高精度部品の要求に応じることはもちろんであるが、極限技術の探求によって、加工法全体の水準を高め、加工精度の向上が期待できる点にある。

本稿においては、超精密加工の意義とその実例を述べ、さらに加工精度を向上させるための方策に言及することとする。

2. 超精密加工の定義

現在行われている加工法を概観するとき、それらを大まかに分けると、鋳鍛造のような変形加工と、刃物による切削加工、および砥粒による加工の3つに大別できる。それらのなかに各種の加工法があるが、それらの加工精度は概念的に図1のようになっている。

そして変形加工では0.1mm(100 μ)、刃物による切削加工では0.01mm(10 μ)、研削などの砥粒加工では0.001mm(1 μ)が、一般的な到達できる精度限界となっている。ここで一般的という意味は、特別に高度な技術的配慮をしなくても到達できるということである。もちろん

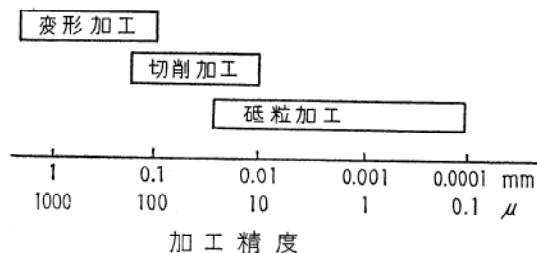


図1 加工法と精度

特別に入念な加工を施せば、加工精度をこれ以上に高めることができる。たとえば、ブロックゲージでは加工精度を0.1 μ にまで高めるように特別なラッピングを行っている。しかしそれ以上の精度を出そうとするときには、多数の製品を測定して、その中から目的の精度を持っているものを選び出すという、原始的な偶然則による以外に途がない。

超精密加工は、この偶然則に頼る部分を合理性に根ざした科学的方法で技術的に解決しようという技術ともいうことができる。米国では、Ultra-precision Machiningと呼んで、millionths of an inch (100万分の1インチ、0.025 μ)単位の加工精度を目標に、超精密加工を実施している。つまり現時点においては、超精密加工は、0.2 μ から0.02 μ あたりの加工精度を目指したものと考えてさしつかえない。しかし、加工技術の進歩によって、この程度の精度が比較的容易に得られるようになったときは、超精密加工はさらに一段と高精度の分野に指向せられる。

要するに、超精密加工には厳密な定義というものはないが、現在の精密加工技術から出発して、その一步高精度の加工を生産的に実現するための技術である。

3. 超精密加工の効果

超精密加工の効果としては、直接的なものと間接的なものとが挙げられる。直接的なものとしては、寸法誤差の極めて小さい、いわば理想に近い機械部品を得るということである。このような部品を機械要素として使用するときには、機械の持っている不確定な運動が除かれて、その性能向上に著るしい成果を挙げることができる。

機械的なものが電氣的なものに対して劣っていること

の一つの大きな理由は、電気の理論的な正確さに比べて機械には不確定な要素が多すぎることである。一見厳密で確実そうな機械も、一步踏み込んで眺めるときには、その不確実なことに驚ろく。直線運動は決して正確な直線運動でなく、軸は決して一点を中心とする円運動を行っていない。

この原因は主として機械部品に与えられている精度が十分でないことによっている。精度さえ十分に与えることができれば、運動と力の伝達をするために、本質的に最も有利な機械が、より一層広い用途を見出すに違いない。

たとえば、最近精密測定分野で世界の話題となっている半径測定式の真円度測定機は、超精密加工の成果を端的に示す適例である。図2にその原理を示す。テーブル上の被測定物に対して、理想的な円運動をする触針を回転させ、被測定物の外周とこの理想円との差異を拡大記録するものである。測定精度は 0.1μ となっている。このためには、理想円運動の精度は 0.01μ の単位でなくてはならない。

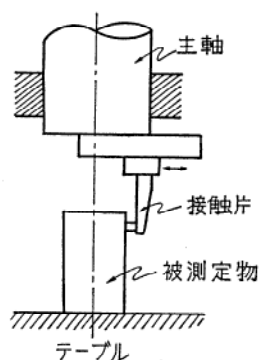


図2 真円度測定機の原理

この種の機械は、恐らく電氣的な自動制御を組み入れることによって可能となるであろう。すなわち、一般の精密軸受を使い、その軸の運動が理想的円運動に対して持つ誤差を計測し、それをフィードバックして、軸に理想運動をさせるか、あるいは測定結果を補正するなどの方法を探ればよい。

しかし、このような電気制御には膨大な装置と莫大な経費を必要とする。一方これを機械的方法で解決するには、 0.01μ 単位の精度を持つ超精密軸受がありさえすれば、あとは極めて簡単な装置でことが足りる。これが超精密加工の直接的効果の一例である。事実、英国のTaylor-Hobson社は精度 0.02μ の軸受の製造に成功し、図2に示した原理の真円度測定機を世に送っている。

このように特殊な精密部品を超精密加工によって製作できるようになれば、その部品はただちに精密測定機、高性能自動制御機器、精密工作機械などに応用して、その機能向上に役立つ。

また他方では、超精密加工の持つ間接的な効果にも注目しなくてはならない。仕上面と寸法精度の向上によって、機械の耐摩性、耐蝕性、疲れ強度が上昇し、負荷能力の増大、効率の向上、振動と騒音の減少と速度の増大とが期待できる。もう一つの間接的な効果としては、超精

密加工のような極限技術を体得することによって、一般の機械加工技術が向上するということである。 0.1μ 前後の精度を出すことのできるものにとっては、 1μ の精度を作り出すことはいとも容易な業である。現状において、 1μ の精度の加工をすることが目標となっていることを憶うとき、その達成には超精密加工を目指した研究をすることが捷徑であることが理解できよう。

さらに一步を進めて、 1μ の精度の加工が、どの工場でも容易にかつ常識的に実現できる時代が来たときには、現用せられている煩雑な限界ゲージ方式は不用となることも予測できる。

4. わが国機械工業の将来と超精密加工

最近10年来、わが国の機械工業が急速な進展を見たことの主要原因は、欧米の発達した技術が無制限に採り入れて、それを上手に自己のものとしたことと、日本の労働賃金が安いことのために製品が外国商品に対して強い競争力を持っていたことによる。

こうして現在わが国機械工業の水準は、世界のトップレベルに接近した。今では欧米から学ぶべき技術は著しい減少を示している。恐らく近い将来には、欧米諸国と対等の立場で技術的な覇を競わねばなるまい。そしてそのときには日本の機械工業は新しい独自の進路を自らの手で開拓する必要が生じる。

この独自の進路とは、日本の体質に最も適し、しかも日本の将来にとって大きな利益をもたらせるものでなくてはならない。つまり、新しい技術であって、かつ日本人の特質を最大限に生かすことができ、その技術によって生まれた製品は高価で輸出商品として最高の魅力を持つものを志さす必要がある。

こう考えてみると、超精密加工が日本機械工業の将来にとってどれほど必要なものであるかは自ら理解できよう。日本人の頭脳の明敏さ、感応性の鋭さ、勤勉さに加えて伝統的に持っている技能的に卓越した能力は、超精密加工こそ日本人に最適の技術であることを理解させるのに十分である。とくに、超精密加工は極限技術を目指すものであるため、多量生産が不可能なことで、凡ゆる方面への細心の配慮と、卓抜の技能とを要求することが、日本人の特質に最もよく適合したものといえることができる。

しかも、超精密加工によって造られた製品は、驚ろくほど高価に売ることができるので、輸出産業の花形となることもできよう。スイスが精密計測機や工作機械などで世界に冠絶する地歩を築き、国家の繁栄を招いていることを憶えば、わが国が超精密加工の普及発展によってそれ以上の隆盛に至ることは困難であるまい。

とにかく、今後のわが国機械工業は、新しいものや性能の極めて高いものに、その生きる道を見出さねばならない。生活水準の高度化による労働コストの高騰と、アジア諸地域における機械工業のぼっ興とは、わが国の機械工業にとって、好むと好まないとにかかわらず、上のような進路をとらなくてはならないようにしている。

5. 超精密加工の数例

超精密加工が、現状よりも一歩先じた高精度部品をつくるための技術であるために、その内容が極秘技術となることがほとんどで、公表せられているものは極めて少ない。

米国では1950年代から弾道兵器の制御装置に超精密部品を必要としたため、その加工のために莫大な経費をかけて超精密加工法が研究せられ、専用の工作機械も製作せられた。これが Ultra-precision Machining (超精密加工) の起りである。そのうちの一、二について簡単な解説を加える。

弾道兵器を正確な軌道に乗せるための姿勢制御装置には、精密なジャイロ스코プを必要とする。図3はこのジャイロを支えるピボット軸端である。図の右側にある直径約0.3mmという細い部分を公差100万分の25インチ、すなわち約 0.6μ の公差内で仕上げるとともに、先端と

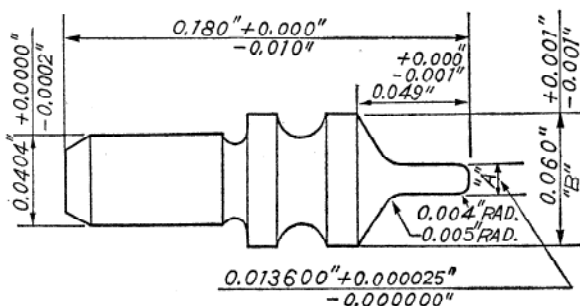


図3 ジャイロのピボット軸

根本とは規定の丸味を付けなくてはならない。材料は2%Vを含むCr-Mo-W鋼の熱処理材で硬さは Rc 64 という、最も高硬度の部類に入るものである。

この加工には特殊のセラミック製と超硬製のローラでローラ仕上をしている。細目は不明であるが、このために特別設計せられたローラ仕上機と、この目的のために材料と形状および仕上程度を特別に考案したローラを使って加工している。図4は工作物を取り付けた部分である。手前の溝付超硬円盤は工作物の送り込みと、加工中の受けの作用をするものである。ローラは図の上方から降下してきて加工をする。

また Dupont 社は、同じように弾道兵器部品の超精密加工のために特別の超精密位置決め形削盤 (Ultra-

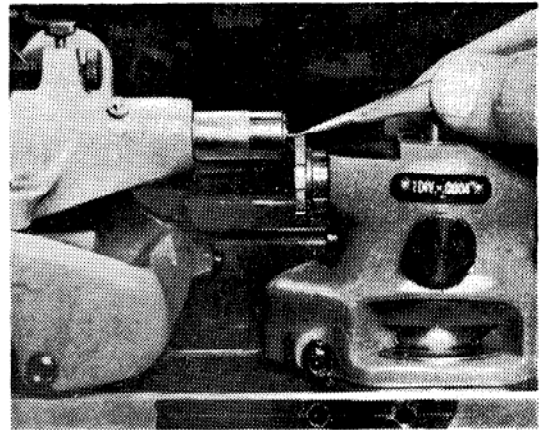


図4 ピボット軸加工機

precision Positioner and Shaper, 略して UPPS) をつくって、これで超精密なダイヤモンドバイト切削を行っている。その機械の主要部断面を図5に示す。中央の

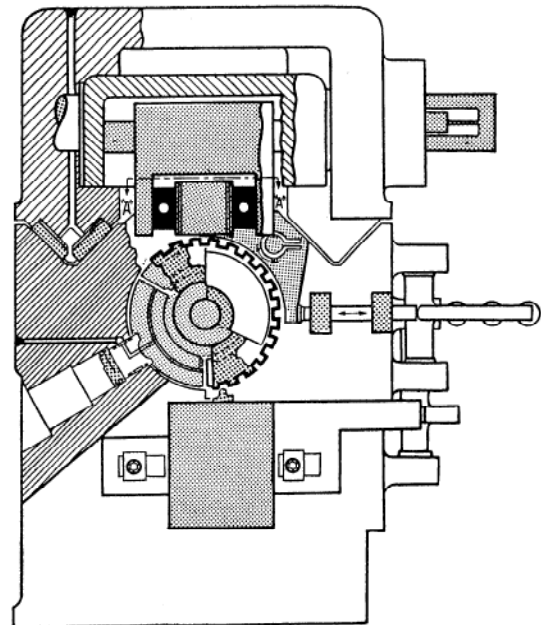


図5 UPPS 機の構造

主軸に工作物に取り付けられるが、主軸は3分割せられたグラファイト粉末焼結体による空気軸受で支えられている。この主軸の真円度は特殊ラッピングによって、 0.025μ の精度となっている。これが超高精度で主軸中心線のまわりに割り出しせられ、機械上部のラムに取り付けられたダイヤモンドバイトによって切削せられる。ラムの直線運動も重要で、これも軸受と同じようにグラファイト焼結体を使って空気軸受としている。主軸の割り出しには鏡とオートコリメータを使った新しい測定装置を用い、 $\pm 1\text{sec}$ の超高精度を保たせている。

つぎに重要なものは、工具の微小切込装置であるが、図6のような、特殊設計のくさびとバネ関節を応用した

ものを用いている。グラファイトの2枚のくさびを同一

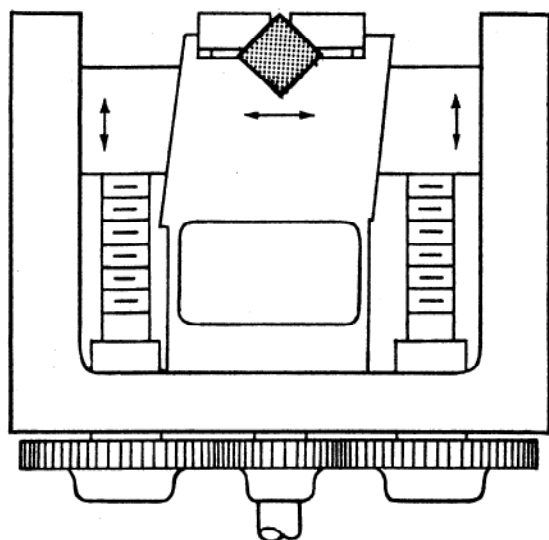


図6 工具位置決め装置

ピッチのネジと歯車によって、同時に上下させて中央の工具ホルダを左右に超微量移動させる。運動のガタを除くために、工具ホルダは2枚のバネ関節で支えられている。くさびのテーパは1/1000としている。このほか、切削抵抗を一定に保つために、切削抵抗測定機を内蔵したり、機械と駆動装置を分離して熱と振動の影響を避けるなど、各部にわたって細心の注意が払われている。

6 加工精度向上の方策

超精密加工を実施するときには、加工の誤差として起り得るあらゆる問題を細かく分析して、それを除去するための対策を考えねばならない。この誤差の要因は、在来からの精密加工技術から比較的容易に推論することができる。ただ、在来の加工技術のときには問題とならなかったような微細なことまでも採り上げねばならないことである。この意味において、超精密加工実施のための前提としての加工精度向上の方策を述べたい。

(1)弾性変形 完全な剛体があり得ない現実において、材料の弾性変形による変位は、加工精度にとって常に大きな障害となる。弾性変形の原因となるものは、材料の自重と加工抵抗である。

まず、自重による弾性変形を考えると、図7の例では

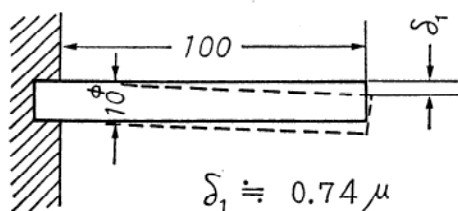


図7 自重による工作物のたわみ

0.7μm 余りとなり超精密加工では大いに問題としなくてはならない。それに反して立形に材料を保持する図8の

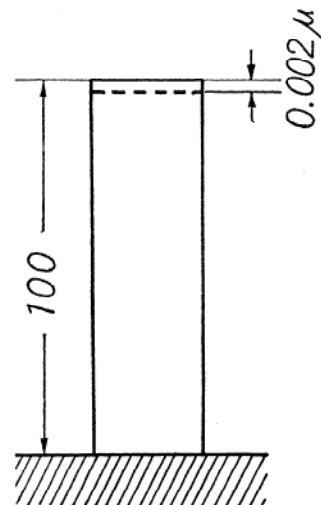
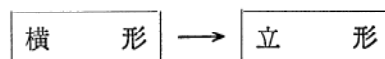


図8 工作物の自重による縮み

場合は、0.002μm であるため現段階では問題にするに足らない。このことから工作機械の方式としては



でなくてはならない。

切削抵抗による弾性変形は、自重によるものよりも一段と大きくなる。図9の場合には1Kgの加工抵抗に対して2μmの誤差を発生する。このことから加工抵抗の加

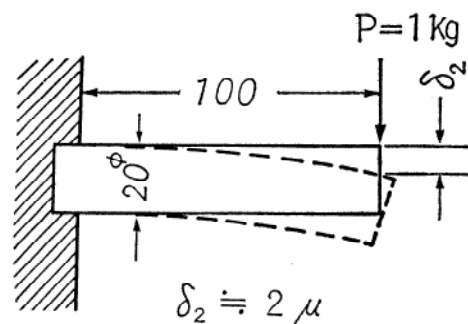


図9 切削抵抗による工作物のたわみ

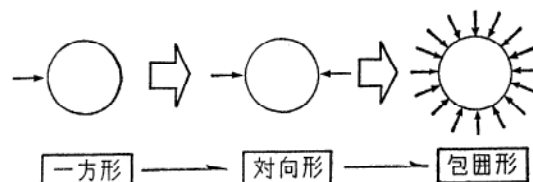


図10 加工圧の加え方

え方としては、図10のように対向形から包囲形へと持つて行く必要がある。

(2)熱膨張 熱膨張から来る誤差は超精密加工にとって最も大きな障害となる。長さ100mmの鋼材料は1℃の

温度上昇によって 1μ の延びを示す。工作機械、工具、工作物を含めて常に一定温度下で加工することに心掛けねばならない。それには厳密な恒温室中で断熱を考えるなどの配慮をするだけでなく、加工による熱の発生を極度に押えることと、熱放散を十分に行なうことに留意しなくてはならない。現在の常識的な加工法から外れて

大気中加工 → 液中加工

高速加工 → 低速加工

を考えることも必要である。

(3)振動 工作機械、工具、工作物の振動は駆動装置と加工抵抗とによって誘起せられるものと、外部から基礎を伝わって来るものとがある。外部からのものは基礎を外部から遮断するため、吸振材を使うとか溝を設けたり、空気バネなどで浮かせるなどの方法がある。しかし工作機械系内部で起るものに対しては、抜本的で有効な防止法はない。結局は工作機械の動剛性を高めるとともに、

高速加工 → 低速加工

として振動原因を消滅させる以外に方策がない。

(4)微小加工 加工精度と最終の加工量とは比例的関係をもつものである。 0.1μ の精度を出すためには、最終の加工量は 0.01μ 単位でなくてはならない。すなわち超精密加工をするためには、超微小な加工が可能でなくてはならない。 0.1μ 以下の量を削り取ることは、工作物材料の剥離、溶着、工具切刃の鋭さ、摩耗、切り込み装置を含む加工系全体の弾性などの要因のために、ほとんど不可能である。そこで、切くずを出す加工法だけに頼って超精密加工を実施することは不可能である。摩擦によって鏡面をつくり出すときには、微小な塑性変形があづかって力があるので、このような作用を応用することが重要である。すなわち、つぎようになる。

切くずを出す加工 → 微小塑性加工

(5)工作機械 工作機械はいわゆる工作機械的設計として大きな荷重に堪えるように設計されているが、軸受とすべり面が面接触によって構成せられているため精度が不十分である。幾何学的設計として点接触によるものにする必要がある。図11は幾何学的スライドの一例である。これは大きな荷重には堪え得ないが、運動としては理想に近い正確さを持っている。超精密加工のような軽荷重低速の場合には、この種のスライドや軸受が適当している。

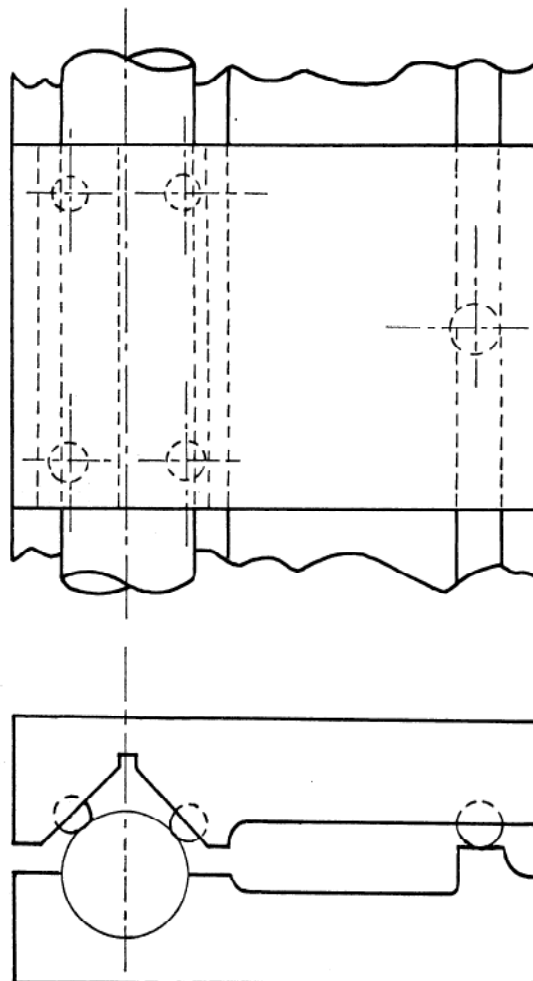


図11 幾何学的スライドの例

また工作機械の各部をつないでいる締め付けねじは、荷重がかかれば微小ではあっても必ずゆるみを生じ、超精密加工の障害となるので、締め付けねじを極力なくするのがよい。さらに一步を進めるならば、部品を少なくし単純な機構にすることが超精密加工には必要である。結局つぎようになる。

工作機械的設計 → 幾何学的設計

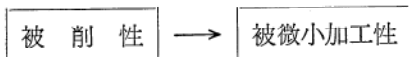
複雑機械 → 単純機械

(6)工具 単一工具による切削では切刃稜が超微小切削に堪えぬため不十分である。研削砥石は個々の切刃が十分の切れ味がなくても、総合的に仕上量を出せばよいので、精密加工に適している。さらに切刃数の多いラッピングは一層超精密加工に適している。

切削工具 → 研削砥石 → ラップ

(7)工作物 微小加工に対する適性のあるものが超精密

加工に適しているが、その適性についてはまだ研究がなされていない。



(8)母性原則 切込を与えて強制切削をする加工法はほとんど母性原則によって加工精度を出している。例えば旋盤では図12のように主軸軸受とすべり面が母となり、工作物である子を製造する。そのため子は母の精度よりよくなることはあり得ない。これに比べてラッピングのような加圧加工法は図13のように接触部分だけを選択的

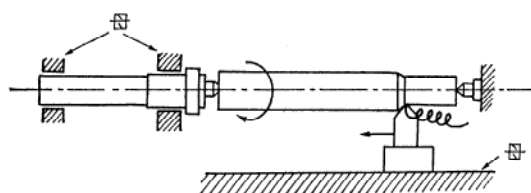


図12 母性原則による加工

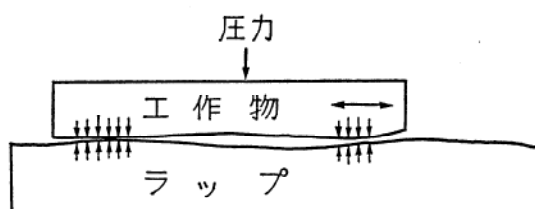
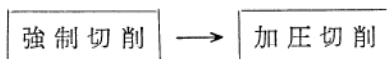


図13 加圧加工法

に加工するので超精密加工に適している。



7. 著者の超精密加工機

著者は上に述べた方策に従って図14のような超精密円筒ラッピング機

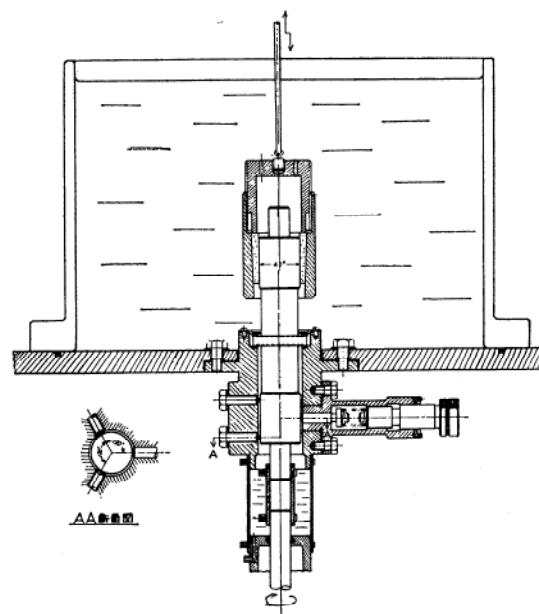


図14 超精密円筒ラッピング機

筒ラッピング機を製作中である。これは中央の軸が上下対称になっていて、上部は工作物としてラッピングされ、下部はそれを回転させるための軸となる。上下とも研削後ラッピングせられ、あらさは 0.1μ 、真円度は 0.2μ である。上部をラッピングして、その真円度が向上すれば、上下を逆にして軸となっていた部分をラッピングする。すなわち軸部よりも工作物の精度が上がれば、つぎにはこれを軸として工作物部をより一層高精度にする。このような作業をくり返すと窮極においては理論的に精度0の超精密加工ができるはずである。

機械各部は防振、断熱、幾何学的設計、低速、低圧加工、など超精密加工に最も適しているように設計してある。目下組み立て中であるので、来春には予備的な加工実験を開始できる予定である。