

超精密加工と高性能加速管への応用(2)

小泉 晋*

Ultra-precision Machining and its Application to Advanced Accelerators (2)

Susumu KOIZUMI*

第2章 超精密加工への道

1. 超精密加工のための主軸

加工に使用される工作機械発展の歴史は、高精度化（精度への挑戦）と高速化（高能率化）との葛藤の歴史であった。そもそも、工作機械による機械加工の目的が、より良い製品を、より早く、より安価に製作する事にあるので、当然の課題だったのである。

一般に、工作機械の加工精度（特に表面粗さ）は何で決まるのかと言えば、それは、主軸の振れで決まると云って良い。と云うのは、加工面とは、工具刃先の軌跡であり、表面粗さは工具刃先が切屑を生成した痕跡であるから、主軸の振れは工具刃先を介して、正確に工作物へ転写されるものと考えられている（これを母性原理と呼んでいる）。それ故、工作機械の精度向上の歴史と云うものは、主軸ベアリング（軸受）精度向上の歴史とも云われているのである。また、高能率化についても、主として主軸の回転数を如何に向上させるかの歴史であるから、同様に、主軸ベアリングの性能向上の歴史と考えても良いのである。

以上の様に考えてくると、前節の鏡面の定義を勘案すれば、鏡面加工が可能な工作機械を手に入れるためには、主軸の振れが $0.08\sim 0.05\ \mu\text{m}$ 以下となる軸受を開発しなければならないと云う絶対条件が出てくるのである。

具体的な例を挙げて考えて見ると、読者の方々が、工場の設備機械で最高の仕上げ面を作り出そうとした場合、まず頭に浮かぶのは、精密な平面研削盤で加工された研削面ではないだろうか。しかしながら、精密に研削された面でも絶対に顔が写る鏡面にはならない。すなわち、研削盤の主軸の振れは、精度の高いも

のでも $3\ \mu\text{m}$ 程度であるから、表面粗さ3(S)程度の面にしか仕上がらないからである。鏡面加工が可能な主軸は、工場の最高精度とされる精密研削盤の主軸の、さらに40倍以上の精度が必要なのである。

工作機械初期段階の主軸用の軸受は、木製などの簡単な機構の滑り軸受^{*1}が常識であった。精度は、明治末期は、ほぼ1 mm、大正に入って0.5 mm程度と1 mmを若干割ったオーダと考えられる。

加工工具がハイス^{*2}になった頃でも、工作機械の主軸用軸受は、やはり、軟金属などを使用して、多少精度を向上させた滑り軸受であり、昭和初期頃に0.1 mm、戦前に0.05 mmと向上した。

回転数が上がってくるに伴い、滑り軸受の問題点であった発熱を回避するために、使用した潤滑油を強制的に排出し、また、大量の油を流すことにより冷却すると云う様な高速化のための工夫も一部で試みられたが、せいぜい1000 rpm (dN 10万)^{*3}だすのがやっと云う状態であったし、精度向上も息切れしてしまっ「谷口のグラフ」の25年に1桁の直線からずれ始めたのである（図6の「滑り軸受」のグラフ）。

*1 本稿で取り扱った種々の軸受については、付録2参照のこと。

*2 高速度工具鋼 (high speed steel) のことである。それまでは焼入れ鋼の工具 (バイト) で加工されていたが、高速切削に適したハイスが開発されてからは、加工能率が格段と向上している。

*3 軸受は、どこまでも早く回転させられるわけではなく、かじりや焼付き等の致命的な事故を起こさず運転出来る許容回転数が決まっている。その限度は、回転軸の直径 (mm) と軸の回転数 (rpm) との積、すなわち、dN値で表される。ころがり軸受の場合には、軸受のピッチ円径 dm (玉軸受の場合は、玉の中心までの径 = mm) を使用した積 dmN値で表される。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
High Energy Accelerator Research Organization

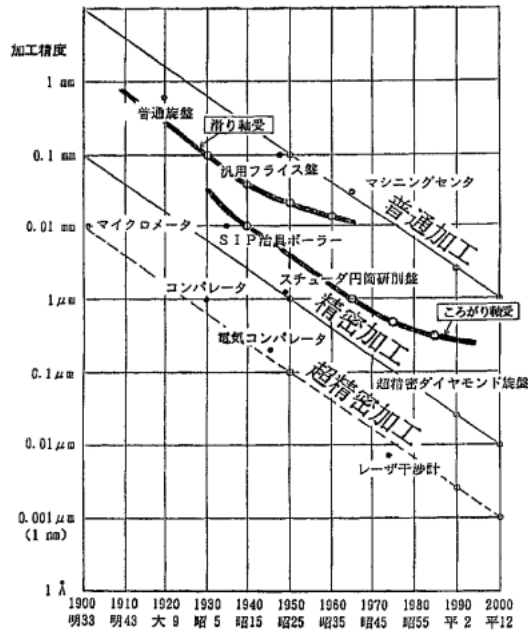


図6 滑り軸受ところがり軸受精度の推移

そう言うこともあって、しだいに、規格化されて安価に提供されて手に入りやすくなったころがり軸受の方へと主役の座は移行していくのである。

ころがり軸受は、世界中何処へ行っても規格化されており、精度や用途に応じて沢山の種類の中から容易にしかも安価に選択出来る上、加工もベアリングの入る穴だけを明けさえすれば、回転精度、剛性、発熱の問題などで満足し得る優れた性能の軸受を得ることが出来るので、ほとんどの軸受がころがり軸受を使用するようになったのである。戦後から現在までは、このころがり軸受の苦しい葛藤の歴史で築かれたと云って良い。

昭和40年(1965)から昭和50年(1975)ごろまでは、円錐コロ軸受が全盛で、主軸回転数も1000 rpmか2000 rpm, dmN 40万以下であり、潤滑はオイルポンプによる滴下給油^{*4}で十分であった。

ところがNC・MC時代を迎えると、工具は、ハイスから超硬・サーメット・セラミック^{*5}時代へと本格

的に突入し、主軸は、急速に高速化が要求されて、ベアリングの形式は円錐コロ軸受からアンギュラ玉軸受へと変わって、昭和53年(1978)には3000 rpm (dmN 50万), 昭和57年(1982)には4000 rpm (dmN 60万)を越えた。潤滑法も、要求に合わせてグリース潤滑法やミスト潤滑法が開発された。

さらに、高度情報化時代を迎えると、主軸はさらなる高速化が要求されて、dmN 80万越えるようになってきた。こうなると、問題となるのは発熱である。その発熱対策としては、ベアリング本体の検討や潤滑油・潤滑方式の検討などのいろいろな技術革新が必要となった。ベアリング本体の開発には、玉径と材質の変更、接触角の変更、形式の変更などがあり、冷却方法の開発には、オイルジャケット法、冷凍器による冷却法、電子冷却法などがあり、潤滑油の供給方法の開発には、アンダーレース法、オイルエア潤滑法、ジェット潤滑法などがなされ、種々の技術革新を行いながら必死で頑張った。

一方、精度の方も、戦前には10 μm程度であったものが、昭和40年(1965)に1 μm, 昭和50年(1975)には0.5 μm, 昭和60年(1985)には0.3 μmと頑張ってきた(図6)。

しかしながら、これらの努力を、25年に1桁の「谷口のグラフ」に正確にプロットしてみると、ベアリングの精度および高速化は、昭和40年(1965)過ぎから息切れして、25年に1桁の線に追いつかずに次第に離れていく傾向にある事が分かる。

すなわち、精度は0.2 μm, 高速化ではdmN値で200万(20,000 rpm)でグラフがサチュレイトするものと推定されるので、すなわち、ころがり軸受(玉軸受)の限界であると推定されるので、このあたりが戦後から現在まで必死に頑張ってきたころがり軸受と決別する潮時ではないかと判断されるのである。

もはや、ころがり軸受に頼れなくなったとすれば、早急に、次世代の主軸ベアリングの方式を生み出さねばならない時期となった。

そこで、現在の技術として次期の軸受方式の候補として考えられたのは、現在開発途上にある磁気軸受と、昭和40年(1965)頃からようやく実用化へのメドがたった静圧軸受との2つである。

MCに装着された磁気軸受は、1万rpm以上の高速回転でアルミニウムを切削して観客の度肝を抜くと云うデモンストレーションで、昭和59年(1984)の第12回日本国際工作機械見本市に華々しく登場した。

磁気軸受は、回転軸の6つの自由度のうち、回転を除く5つの自由度の全てを磁気力で制御する技術

*4 本稿で取り扱った種々の給油方法については、付録3参照のこと。

*5 超鋼、サーメット、セラミックは、高速切削用工具(バイト)として開発された非常に硬い焼結体である。超鋼はタングステンカーバイト(WC)が主成分でコバルトなどと焼結した合金であり、サーメットは炭化チタン(TiC)が主成分でこれを鉄系金属(Ni, Mo)で焼結した合金であり、セラミックはアルミナ(Al₂O₃)を主体とした焼結体である。

が開発されてようやく実用化に漕ぎつけたのだが、その制御装置が複雑なためにコストが嵩み、販売価格も現在でも数千万円と云う高価なものとなって、おいそれと簡単に使用するわけにはいかないのである。それにまた、回転精度も当時はまだ $2\mu\text{m}$ 程度で超精密機械に使用できる段階にはなかった。

しかしながら、磁気軸受は非接触軸受であり、摩擦損失が限りなく0に近いので、発熱が無く、回転数を限りなく上げられるし、摩耗もない。また、無潤滑であり、真空、超高压、極低温の様な特殊環境で使用出来るなどの玉軸受などに無い優れた特長を持っているので、将来には必ずやかけがいのない軸受となることには間違いがない。次世代の軸受として将来が楽しみな軸受である。

次に、静圧軸受であるが、空気または油の流体膜を軸と軸受との間に入れて非接触とした静圧軸受の理屈については古くから知られていたが、実用になり始めたのは極く最近のことである。

当初、オモチャと云われていた静圧軸受も、その振れが、昭和35年(1960)頃には $0.5\mu\text{m}$ 程度のものが製作されるようになり、昭和45年(1970)頃には $0.1\mu\text{m}$ 程度にまで精度が向上してきたので、精度的にも、ころがり軸受に、正に、取って代わることが出来るのではないかと注目されていたのである。

さて、我が国で、公表された形での超精密加工用工作機械と云う話を初めてされたのは、前述したように、昭和45年(1970)頃ローレンス・リバモア研究所を見てきた東大の佐田登志夫である。

佐田登志夫によると、「ダイヤモンドで切削した面が、見事な鏡面に仕上がっていた」と表現されたことも前述した通りである。ローレンス・リバモア研究所は、昭和37年(1962)頃からダイヤモンドバイトによる超精密加工に注目して、昭和42年(1967)に鏡面加工に成功していた。この時の加工機械の主軸には、その振れが $0.08\mu\text{m}$ から $0.05\mu\text{m}$ 以下の空気静圧軸受が使用されていたのである。

その点に注目し、静圧軸受を使用し、日本で一番早く超精密加工に着手したのは、メーカーでは豊田工機である。豊田工機は、京都大学の指導を受けて静圧軸受の将来性に着目して次世代軸受として研究を開始していたのである。

豊田工機は、フランスのジャンドロン社から技術導入した流体軸受を使用している円筒研削盤から、昭和35年(1960)頃すでに独自に油静圧軸受の開発に成功していた。この主軸の回転精度は、当時としては驚異的とも云える $0.5\mu\text{m}$ 以下であったと云う。その後、

さらに改良されて昭和45年(1970)頃には、 $0.1\mu\text{m}$ の軸受が製作できるようになっていたのである。すなわち、もう豊田工機は、超精密加工用の軸受を射程範囲に確保出来ていたのである。

昭和45年(1970)、佐田登志夫の提案を受けて、豊田工機は、早速、この油静圧軸受を使用した超精密加工用工作機械の製作に取り掛かった。そして、ついに鏡面加工に成功したのである。

翌、昭和46年(1971)日立製作所小田原工場から、当時、ボーレ社(西ドイツ)やシモンズ社(米国)などの超精密旋盤で加工していたコンピュータ用磁気ドラムを加工する超精密旋盤を受注して、昭和47年(1972)に納入している。これが、我が国に於ける超精密加工機の1号機である。なお、超精密旋盤の2号機は、東芝機械相模工場に納入され、印刷機の版胴の仕上げ加工に活躍している。

続いて、完全球の作製の研究をしていた東芝は、昭和45年(1970)、アルキメデスの原理による水の比重測定用に使用される直径 85mm の溶融石英標準球を、真球度 $0.03\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.01\mu\text{m} R_{\text{max}}$ で完成させて、水の比重を 0.999972g/cm^3 と有効数字6桁での測定に成功していた。

東芝は、この球体の製作技術を生かして昭和51年(1976)に、予想以上の性能を示す球面空気軸受を完成させた(図7)¹⁾。

その試作したスピンドルの振れは、鏡面加工可能な $0.05\mu\text{m}$ 以内であったと報告されている。ここにおいて東芝は、このスピンドルさえ搭載すれば鏡面加工可能な加工機を作り出すことが出来ると云う切り札を手に入れたことになったのである。事実、東芝は、すぐさまこのスピンドルを使用した鏡面加工機を昭和53年(1978)に試作して、無酸素銅やアルミニウムをダイヤモンドバイトで切削し、表面粗さ $0.013\mu\text{m} R_{\text{max}}$ と云う驚異的な鏡面を作り上げることに成功したのである。その結果は、CIRP^{*6}に発表され、全世界に大きな反響を呼んだ。

以上に述べた超精密加工に成功したところのローレンス・リバモア、豊田工機そして東芝の各社に共通して言える成功の秘訣とは、各社とも主軸など精度を必要とする部分に、玉軸受を用いる事なく、技術革新の進んだ空気または油の流体膜を軸と軸受の間にいれて

^{*6} CIRPは、生産技術発展のために世界の研究者に情報交換の場を提供する目的で設立された機構。International Institution for Production Engineering Research = 国際生産工学研究者会議で、生産工学分野においては世界的権威のある機構である。

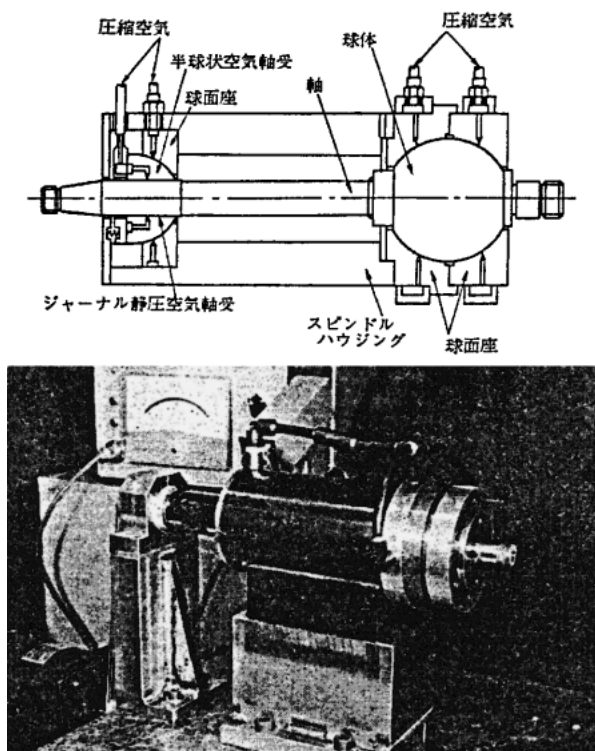


図7 東芝が開発した球面空気軸受¹⁾

非接触とした流体（静圧）軸受を採用したことにある。

超精密加工が可能な精度の主軸には、ころがり玉軸受の様に、ころがる玉の精度（誤差）が1:1の比で直接現れる形式の軸受を使用したのでは、現在の加工精度から考えて、絶対に無理なのである。

前述した様に、空気または油の流体膜を軸と軸受の間に入れて非接触とすれば、軸受誤差が平均化されて、精度が高くなるのではないかとする流体（静圧）軸受の理屈については、かなり古くから知られていたのであるが、なかなか実用可能な精度の軸受とはならなかったため、実用化されていなかったのである。

流体軸受が高い精度を出せる理由は、丁度川面に浮かべた舟が、水が川底の凹凸の影響を吸収して、凹凸の影響を受けないようになるのと同様のスムージング効果と云う理屈で、流体膜が軸受の形状誤差を1/10から1/20に減少させてしまうと言う効果があるからである。すなわち言い換えれば、流体膜を利用することによって、現在の加工精度を10倍から20倍も向上させることが可能となるのである。

具体例で示せば、現在の最高精度0.5 μmに加工された軸受本体を使用しても、主軸の振れ0.05 μm以下（鏡面加工用）の主軸を作ることが出来るのである。すなわち、精密工作機械の代表であるマシニングセン

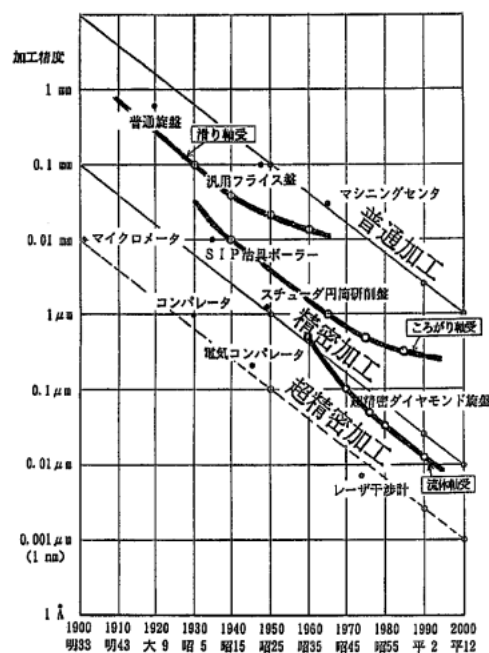


図8 流体軸受精度の推移

タの主軸の振れがやっと1 μmの時代に、なんとその1/20の精度の鏡面加工用スピンドルが製作可能となるのである。

以上で述べてきた様に、流体軸受である静圧軸受は、その振れが、昭和35年(1960)頃には0.5 μm程度であったものが、昭和45年(1970)頃には0.1 μm程度、昭和50年(1975)頃には0.05 μm程度、昭和55年(1980)頃には、0.03 μm、また、平成4年(1992)の超精密加工機の主軸に使用されている流体軸受の振れ精度は、0.01 μm以下と、年々精度が急速に向上している。

これらを、25年で1桁の対数グラフの上ののせてみると、図8に示す様に、25年で1桁の直線に平行線的に精度が向上している様子が良く分かる。しかもまだサチュレイトする気配がない。

したがって、これからしばらくの間の主軸の形式は、この流体軸受で進むのではないかと推察されている。

2. 超精密加工のための工具（バイト）

超精密加工可能な主軸の方式は決まった。ここで、バイトと呼ばれている加工用工具の話をちょっとしておきたい。

例えば「旋盤で厚さ1 μmの切屑が出せますか」と呼び掛けた時に、手を挙げる人は皆無の筈である。実は、厚さ1 μmの切屑を出せる名工は、全国で2、3

人しかいないからである。通常、旋盤で出せる切屑の最小厚さはたかだか 0.02 mm ($20\text{ }\mu\text{m}$) 程度であり、 $1\text{ }\mu\text{m}$ には遠く及ばないのである。その理由は、旋盤の加工プロセスにある。

旋盤の加工プロセス²⁾は、簡単に云うと、クサビを打ち込んで、割りながら引き裂いていくと云う方法の繰り返しである。もう少し専門的に云うと、**図9**に示す様に、切削の進行につれて、材料の持つ欠陥、すなわち、転位欠陥（結晶内部の線状の欠陥）、マイクロクラック、結晶粒界、析出物、空洞（孔）などに応力が集中し、材料の塑性滑り限界応力値や脆性破壊限界応力値に達すると、局所的な変形や破壊で欠陥を拡大し、ついには大きな破壊や分割に至ると云う過程をたどっていくと考えるのが一般的である。

その様に考えてくると、この**図9**から明らかな様に、切屑の厚さには、バイトの刃先半径 R が大いに関係していることが分かってくる。すると、通常の工場で使用されている超合金や高速度鋼（ハイス）のバイトの R は、いくら慎重に砥いても $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下にはなかなかならないので、普通の旋盤では、 $1\text{ }\mu\text{m}$ の切屑など出せるはずがないのである。

東芝機械に、かって、定年を9年間も延長された名旋盤工がいた。彼は $1\text{ }\mu\text{m}$ の切屑を出せる数少ない旋盤工の一人であった。彼は、真綿にくるんで大切に保管しているカミソリよりも鋭い刃を持ったバイトで、 $1\text{ }\mu\text{m}$ の切屑を出した。彼はこのバイトの砥ぎ上げに全てを賭け心血を注いでいたと云う。しかし、これは、あくまでも彼の卓越した特技であり、すぐに他人に真似の出来ることではない。

図9に示した加工プロセスにおいて、通常の加工している領域、すなわち、切り込み深さ $10\text{ }\mu\text{m}$ 位までは材料欠陥のうち大きなクラックや結晶粒界などからの大きな破壊であるが、もっと微小寸法や超精密加工の行われる領域になると、破壊の挙動は大きく異なっ



図9 加工プロセスの概念図

てきて、析出物、結晶体の線状の格子欠陥である転位欠陥や点欠陥とされる格子欠陥、結晶格子の空洞(孔)などの原因で発生する変形や破壊となってくる。

この様な場合でも、図からも明らかな様にバイトの刃先半径 R は重要であり、超精密加工 ($0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の領域) が行われる領域では、刃先の R は少なくとも $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ($=100\text{ nm}$) 以下のバイトを使用しなければならないことになる。

前述したローレンス・リバモア、豊田工機そして東芝の各社は共に、ダイヤモンドバイト使用して鏡面加工に成功している。では、ダイヤモンドバイト以外では、鏡面加工可能な鋭い刃先 R を得ることは不可能なのであろうか。

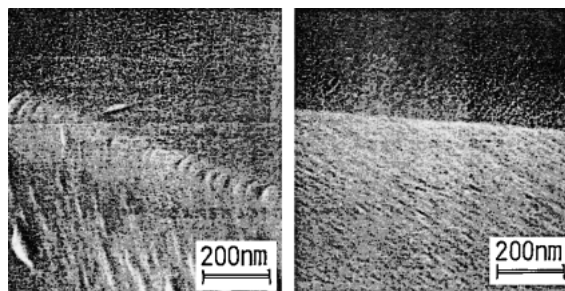
この様に、丸み半径が重要なことは分かっているが、その当時の学会に於いてさえ刃先 R の測定法すら掴めていない状態であったため、昭和61年(1986)、精密工学会に産学協同の分科会「超精密ダイヤモンド切削工具刃先の評価に関する研究協力分科会」を発足させて、本格的なバイトの研究を開始した。

その研究の結果、丸み半径をナノオーダー以下にすることの出来る工具は、単結晶ダイヤモンド以外には見あたらないことを明らかにした。また、刃先 R の値の数値化することに成功すると共に、 20 nm 以下と云う鋭利な工具を作り出し得るためのノウハウを確保出来たのである。

そう云うことで、現在、超精密加工用のバイトは、すべてダイヤモンドバイトであり、刃先半径 R は数 10 nm 以下の鋭いものであると報告³⁾されている。

図10は、従来のバイトと現在使用されている超精密加工用ダイヤモンドバイトの刃先の写真⁴⁾である。明らかに格段の進歩があったことが見て取れる。

ひとつの物理的限界として、刃先の収縮による結晶表面エネルギーと弾性歪みエネルギーの平衡条件から



(a)従来のバイト

(b)最近のバイト

図10 バイトの刃先の顕微鏡写真⁴⁾

近似的に理論限界丸み半径を求めると、2 nm 程度になし得る可能性があるとも報告⁵⁾されている。2 nm とは、炭素原子が 10 数個並んでいるだけの究極の寸法であり、もし、バイトをこれだけの刃先 R に仕上げることが出来れば、ナノレベルの仕上げ面の可能性も出てくるが、しばらくは、まず不可能と考えて良い。

3. 超精密加工のための被削材

以上述べてきた様に、超精密加工用の主軸と刃物（ダイヤモンドバイト）の開発に成功し、各社競って鏡面加工を開始したのであるが、どうしても当初は、加工面が理論通りの精度に仕上がらず、きれいな鏡面とはならなかったのである。

バイトの刃先の軌跡が、被削物の表面に転写されて表面粗さを決めていることを再三にわたり述べてきた。しからば、主軸の精度に相当する表面粗さが得られなかったとすれば、バイトの刃先と被削材表面との接触する界面において、何らかの相互作用が働いて、転写性が乱されると云う擾乱現象が起きているものと推定せざるを得ない。

擾乱現象は、理論解析するには不明な点が多すぎるので、現在では、丹念な実験によって確かめるほか方法がないとされている。

昭和 35 年(1960)代からアメリカでは、国家的プロジェクトとして、各種材料についての適性を徹底的に調査して、数多くの貴重なデータを発表した。

このようなデータを基に、良好な鏡面が得られる鏡面加工用に適している材料としては、銅（純銅、無酸素銅）、銅合金（青銅、黄銅、ベリリウム銅）、アルミニウム合金（含アルミニウム）、銀、無電解ニッケルなどが一般的に使用されるようになった。

しかしながら、初期の段階には、このような鏡面用材料を使用していながら、どうして良好な鏡面が得られなかったのだろうか。

図11⁶⁾は、市販の JIS 規格のアルミニウム合金を鏡面加工した時の表面の顕微鏡写真である。

ここで白く見える部分を通る様に、粗さ試験機の測定子をスキャンさせてみると、下側に示した粗さ曲線のグラフの様に、白く見える部分は、削れないで残っている何か硬いものが析出している様にみえる。

そこで、この析出物が何か分析調査してみた結果、これはアルミニウム合金に極く僅かに含まれている鉄分であることが判明した。鉄はダイヤモンドとの親和性が強く、これが切れ刃に付着して切削を阻害していたのである。

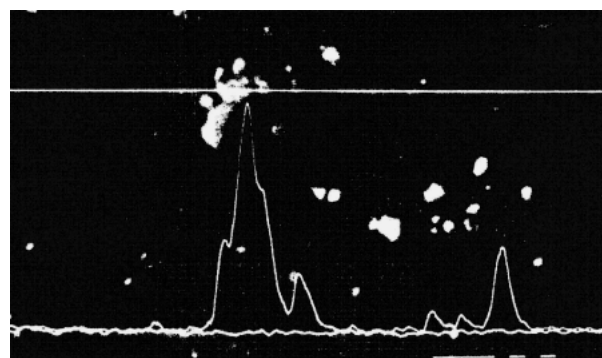


図11 アルミニウム加工表面の顕微鏡写真⁶⁾

鉄分が、きれいな鏡面に仕上げられなかった最大の原因であることを発見して、早速、鉄分などの不純物のない鏡面加工用高純度のアルミ合金の開発をアルミ業界に要求した。

日本においては、昭和 59 年(1984)初頭より、全アルミ業界が一斉に、高純度アルミ合金の開発に着手していただけることとなり、金属間化合物金属、非金属介在物、不純物などの析出を極力抑える研究努力をした結果、99.99% の高純度化することに成功し、ほぼ表面欠陥ゼロの目標をクリアしたアルミ素材を完成させてしまった。

その結果、かつては、米国の Alcoa 社が一手に供給していたアルミ市場であったが、神戸製鋼、日本軽金属、住友軽金属、古河アルミニウム、それに、スカイアルミニウムの 6 社によって、世界の 75% を独占するに至っているのである。

参考文献

- 1) 小林 昭：最近の超精密切削技術(7)，機械の研究，33 [昭 56(1981)]7, 97.
- 2) 江田 弘：超精密工作機械の製作，平 5(1993)，工業調査会，5.
- 3) 浅井昭一：単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削に関する研究，東京工業大学博士論文，平 3(1991).
- 4) 西村一仁：精密切削用ダイヤモンドバイトの開発，機械の研究，40[昭 63(1988)]10, 43.
- 5) 井川直哉，島田尚一：超精密切削加工用ダイヤモンド工具，機論集 (C 編)，50[昭 59(1984)]456, 1325.
- 6) 和田龍児：バイトの形状と材料の問題，工作機械 '84 超精密加工 [昭 59(1984)]，大河出版，12.

付録 2 軸受とは

第 2 章の主旨は、軸受が如何に重要であるかと云うことなので、ここで軸受についての簡単な解説をしておきたい。(ただし、ここで述べる軸受とは、回転運動をしている軸の荷重を支えながら摩擦を少なくし

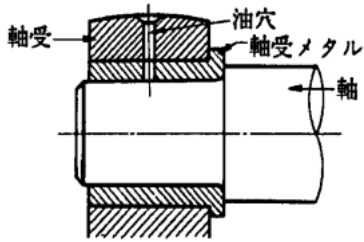


図12 滑り軸受

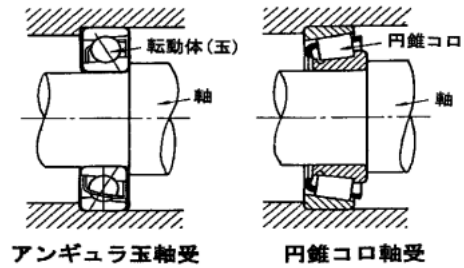


図14 アンギュラ玉軸受と円錐コロ軸受

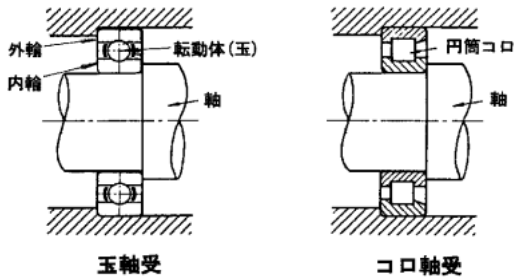


図13 ころがり軸受

角度が付くとコロは円錐コロが使用される) の場合には円錐コロ軸受 (tapered roller bearing) と呼ぶ。

付録3 ころがり軸受の給油方法

軸の回転数が低い場合には、油ポンプから軸受の側まで給油配管を行い、転動体に潤滑油が流れ込む様にした給油方法を滴下給油と云う。配管が出来ない所などには、グリースの様な高粘度の油をはじめから転動体付近に練り込んでおくグリース給油法がとられ、軸の回転が高速になると、油が回転に伴う風圧ではじき飛ばされてしまうので、圧縮空気と共に霧状にした潤滑油を吹き付けると云うミスト潤滑法が開発された。

さらに軸が高速になると、発生する熱を抑える方法として、軸受の周りに冷却された油を循環させる熱交換用オイルジャケットを設けたオイルジャケット法、油の代わりに冷凍器の冷媒を流す冷凍器による冷却法等の強制的に発生した熱を取り去る強制冷却の工夫もなされた。また、異種金属の接点を軸受付近に埋め込んでペルチェ効果を利用して冷却する電子冷却法も試みられた。さらに、ものすごく大量の低粘度の油をかけて熱を奪い去るオイルジェット潤滑法もとられた。

同時に、高速軸受専用の潤滑油供給方法も開発された。転動体にうまく給油するために、軸受内輪の転動面付近の給油口を設けて大量の給油を可能にしたアンダーレース法、また、極微量な供給量の領域に発熱を低く抑えられる位置があることを発見し、計測された微量な油を空気に混ぜて間欠噴霧給油を行うオイルエア法も開発された。

この様な必死の努力による開発によって、ころがり軸受の飛躍的な高速化が実現出来たのである。

て滑らかに回転させるための機械要素を指す。また、静圧軸受と磁気軸受は、本文で述べたので省略する)

一般に軸受は、滑り軸受 (sliding bearing) ところがり軸受 (rolling bearing) との2種類に分類される。

滑り軸受は、図12に示す様に、回転軸を軸受メタルで支える簡単な構造をしており、摩擦も大きく、高速回転には適さず、現在は、ほとんど見かけなくなった。

ころがり軸受とは、図13に示す様に、摩擦の大きい滑り軸受の欠点を補うため、外輪と内輪を設け、その間に玉やコロの転動体を挿入して摩擦を軽減した軸受で、転動体に玉を使用した玉軸受 (ball bearing) とコロを使用したコロ軸受 (roller bearing) とに分類されている。(現在、回転軸に使用されている軸受は、ほとんどがころがり軸受であり、単にベアリングと称した場合には、このころがり軸受を指す。)

ころがり軸受で、半径方向の荷重と軸方向の推力との双方を同時に受けたい場合には、図14に示す様に、内輪と外輪に角度を付ける方法がとられる。この場合、転動体が玉の場合はアンギュラ玉軸受 (angular ball bearing) と云い、転動体がコロ (内輪、外輪に