

超精密工業への端緒

日本光学樹脂KK* 谷田部善雄

まえがき

大阪大学の創立の経緯は、故長岡半太郎先生の『随筆』に詳しい。(昭和11年、改造社版)

先生の数少ない珍しい随筆集の中で、先生は大阪大学について、あるいは大阪について、数々の感想を述べていられる。

その中には讚美あり、苦言ありで、まことに興味多く、先生が執着されたポイントを示している。

その頃、たまたま理研に籍があった因縁から、長岡先生のご葬儀につらなる機会を得たが、その際ご身辺にあった品々が展示されていた。

ご書斎机辺での大往生には心うたれ、羨望を感じられた次第であった。長岡先生の重んじられたことの一つは、独創性の発揮である。

キルヒホフ、ファラデー、ニュートン、キュリー等の略伝を十数篇のせていられる。

その要処に強調してあるのはオリジナリティである。

自ら創めよ！これが先生の遺風の一つであると信ずる。

今般、大阪大学に因縁の深い本誌にスペースを与えられたことは、有難くよろこんでその責を果したい。

今20世紀から、来る21世紀にわれわれは何をもちこむべきかということをつねづね考えている。

即ち、現在機械工業全般の大きい傾向の一つは、生產品の一般化に重点がおかれていると思う。

量産性の発揮、自動化、それらによるコストダウン等である。

その限りにおいて、現在の機械工業は、その要求されるところのものを、ほとんど充足していると申せる。

ではこの状態を、このまま、その方向に延長して行ってもよいものかどうか、またどこまでも発展させて行けるものかどうか。

即ち、物資、財産的のものが耐久消費財といわれ、地球の限りある資財がむなしく浪費され、それにつれて、人のエネルギー、時間、等を消耗されているような現状に

は、現実的な批判がはねかえって来そうな気がしてならない。

たとえば電気機器をとって見ても、その木質が進歩しているとは限らない。

テレビジョンにおいて、カナラの走査線の単位当りの本数がおさえられているから、受像機の高性能化は、必ずしも今よりすぐれたテクスチャーの画面をもたらさないのである。

ともあれ、一般化の方法論は一応出つくした感があり、大量需要に限度があり、コストダウンにも限界がある。コストが0にはなり得ない1、0では無限大の量を売っても、経済単位にならぬことになる。

われわれ工業人は、現在の商業主義的工業の単なる走狗であってはなるまい。

量的革命には終局がある、即ち無限の量的需要、無限の量的生産はあり得ない。

どうしても、質的というか、性格的というか、工業の構造的な変化がなくてはならぬ。

その一つとして超精密の機械工業がなり立ち得ると信ぜられ、今世紀の末から21世紀へかけての転換の主体の一つとなると考える。

1. 緒言

現在、金属製の機械部品でその精度公差が、光の波長の分数で定められているものは少い。

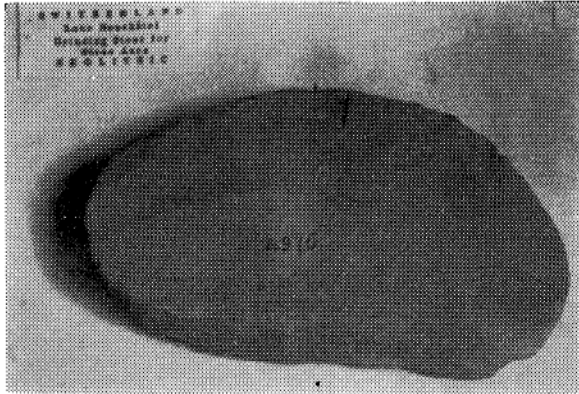
しかしながら、光学レンズ、プリズム、反射鏡のような光学面は余程前から通常の精度として受け入れられ、そのような高い精度の部品が作られて、多量の光学機械として組立てられ流布されている。

また、切瑩、琢磨という文字通り、刃物で切断し、けずり、やすりをかけ、砂石でみがくことは石器時代以来の加工法の常道で、人類が文化をもちはじめたことと平行する歴史のふるい工作法である。(写真1)

近世で見ても、英国のニュートンは天文学上の観測、光学の実験をするために自ら光学研磨法を工夫して光学機械器具を作っている。

彼がこれらの機器を使って幾多の発見をしたことは申すまでもない。

* 東京都北区十条仲原1の1



写1 新石器時代の砥石（ハーバード大学博物館所蔵）

彼はその研磨法と、研磨作用に関する見方を彼の著書「オプティクス」の一巻一部にのべている。

この著書は1675年にROYAL SOCIETYに送られているから、彼の研磨実験は300年以前のものである。

現在の光学工業の主要技術はこのニュートンの方法を用いている。

また昨年初夏英国のロンドン大学のトランスキー教授に伺ったところでは、ダイヤモンドの研磨加工法が、少なくとも400年以上古いベリベリオールドファッションの方法であるとのことであった。

このように研磨加工法というのは古い来歴の方法で、今更大きい改良がありそうには思われない。

しかしながら幾分でも進歩させるのが後進のつくすべき道であると考えるので、本誌にスペースを与えられたのを機会にここ数年の実験の結果をのべさせて頂くこととする。

2. 超精密の便宜的定義

超精密という意味を正しく定義づけようとするの大変にむづかしいことになって果しが無いと思われるので、ここでは光の波長——と云っても可視域で、肉眼の最高感度波長が基準になると思うが——の2分の1とか、精度について考えることにする。

a. 超精密寸法形状精度

ここでは近似的に 0.6μ を基準としての2分の1で 0.3μ 、20分の1で 0.03μ あたりが対象になる。

このような精度になると加工法ももとよりであるが、測定が容易でないことは申すまでもない。

b. 超精密表面あらさ

寸法、形状の精度が上記の如くであると表面のなめらかさがまた問題であって、寸法形状の精度より疎では無意味である。

これはどうしても更に高い精度が要求されねばならな

い。

とはいっても無限になめらかなものは現在の物質観からは出ていない筈である。

物質の最小単位としての単分子の大きさを超越することは考えられない。

そこで取りあえず、前記の寸法、形状の精度より一桁高い精度で考えれば大過ないと考える。

表面のなめらかさは、これを逆に表面あらさで定義するのが機械工業の常法であるから、それに従うともっとも高い表面あらさ——このように高精度になるとこの逆さまの表示はいささか不適當である——は 0.003μ になる。

これは偶然の一致であるが光学レンズ面の表面のあらさがほぼこの程度になる（写真2）

以上甚だ勝手な定義であるが、話を進める上からこのようにさせて頂くことにする。

現行の超精密部品

一がいに断定する訳には行かないが、現在のところ上記のような超精密な加工法が実現されているものは、光学ガラスからなる光学レンズ等の光学部品、金属ではゲージブロックがよく知られている。

この内前者はガラス材料に特に適した加工法であってレンズ研磨法はただちに金属材料一般の加工に適していない。

また後者は、現在のところ10年以上もの経験をもつ特殊技能者によってのみ加工し得る方法で一般的であると云い難い。

超精密の一般化への疑問

以上のような現状であるから超精密の機械というものの具体性について疑問をもつ人が大部分である。つまり、超精密機械というのはなにか特殊の別世界のものと考えられている。

このような固定観念が広く行きわたっているのは、必ずしもそのように考える側のせいばかりではあるまいと思われる。

そう思いこまれている原因の一つは、超精密加工ということがまだ特殊のもので、一般性をもっていないということ、即ち現実性具体性が少ないことと考えられているせいであろう。

今は、どうしてもこの既成観念をすてて、超精密機械工業なる新しい工業を発達させねばならぬと信じている。

超精密機械の利点

このように申しても、機械を超精密化した場合のメリ

ットというものは、事績に乏しく、ほとんど推測の域を出ないのが現状である。

従って精度が過度に高いものが超精密という受け取られ方があつたのも事実である。

この点は勇気をもって、またリスクを払って実績によって世にとう外はないことである。

現在のところ、推測を出ないにしろ、皮算用なりとして見るのも一興であろう。

示唆的な実験

少しデータがふるいのであるが、1957年にロンドンで行われた潤滑と摩耗 (LUBRICATION & WEAR) の国際会議が行われている。

その講演の中に表面あらさと摩耗の関係についての実験がある。実験内容は概略次のようである。

摩擦条件は境界潤滑状態

資料：4"×1"の鋼材を用いトロリーの上のせて水平に動かす。

資料表面：表面あらさ疎から密まで5種

潤滑油：流動パラフィンとオレイン酸

資料の上に直径0.25"の半球状の銅の同位元素を用いて条痕をつけるやり方で、ラディオアクティブな銅が資料の方に転移する量を測っている。

その結果を見ると、硬度の高い材質、即ちこの場合資料表面の幾何学的形状、つまり表面あらさの大いさと形状の影響が著しい。

表面あらさが24マイクロイン (C.L.A.) と1マイクロインの比較において金属の転移は最大 $34,000 \times 10^{-10} \text{g cu/mm}$ 最小で $3 \times 10^{-10} \text{g cu/mm}$ で10,000倍もの比が見られる。

この比が小さい場合でも約50倍ある。この両者の表面あらさの比は24倍となっている。もとよりこれは実験一例にすぎないが、それでも表面あらさの影響を示唆して興味深い。

この実験の示唆する処が妥当であれば、仕上げ精度の向上による摩耗の軽減は驚くべきものになる。

ガラスと金属との間のオプティカルコンタクト

従来、光学工業において、OPTICAL CONTACT ということがある。

これは、二枚の光学ガラスの面を正しい光学平面に仕上げ、この仕上げられた二面を全く清潔に拭き、密着させるとその中間に何等接着剤を用いず接着出来ること、精密なガラス部品の組立てに利用されている。

このような方法はガラス同志については、以前から行われているが、ガラスと金属の間では行われたことが

ない。

その原因の一つは金属面がガラス面のように高度に仕上げられぬからである。

金属面でも精度よく仕上げればオプティカルコンタクトを行わせることが出来、すでに一年以上をへてもその密着は尖われないのである。

これらは特殊な例であるが、特に精密に仕上げられた元素、基礎的合金等の物理的性質、機械的性質についてのデータを出すことは重要なことである。

3. 従来の人工砥石

砥石が天然の砂岩、粘板岩等の模造であることは周知のことで、改めて述べるのも如何と考えるが、一応要約しておく。

即ち、工具としての研磨、研削作用を行う砥粒と、この微粒状でそれ自体では一定の巨視的形狀を保ち得ぬ砥粒を工作に都合のよい相互関係の位置に保ち、砥粒の集約状態を都合のより強度で保持するためのボンド、結着剤と、砥粒、結着剤の間に結果的に生ずる空隙、ボイドとからなっている。

砥石の性能はこれら三つの要素のコントロールによって、各種の作業条件に応じたものが得られる。

とは申しても、直接コントロールし得るのは砥粒の選択とその分量、或は単位容積中の密度、工作作用的には作用面の単位面積当りの効果的砥粒密度というもの、それら砥粒の間をつなぎ保持するボンドの種類分量等であるボイドは多分に結果的に生ずるもので、このコントロールはさほど容易でない。

従来の砥石の改良の方向は、大体この三要素の性質の変化、向上にあることは明らかである。

硬度の高い金属の酸化物、炭化物、ダイヤモンド粉の豊富な使用、すすんでダイヤモンドの人造というように砥材の新種の導入、人造と、砥材の改良がなされ、更に現在の発達した人造合成樹脂の結着剤の使用、人工的にボイドのコントロールを行うための発泡剤の使用等ほとんど、三要素の改良、調節についての工夫がこらされている。

使用方法においては、砥材の硬度の高いものの採用とともに単位時間当りの研削量の増大、切入、送りの量の増大等、研削能率の増進に役立っている。

また、研削機械においては研削速度を増大させ、かつ主軸、工具（この場合砥石）軸の振動を減じて製品の精度向上を企図して、軸、軸受けに各種の工夫がこらされている。

また砥粒の切刃面を微妙にドレスして切刃先をそろえ、

高度の仕上げ面が得られている。

4. 超精密砥石の発想

再三で、冗漫にわたるが、従来の砥石は天然砥石の模倣として出発したもので、砥粒を長石粉末を主とした陶土を結着剤として、練和して焼結して、陶材の成分中に砥粒を密度高く分布せしめたビトリファイド砥石

砥粒を未硫化の生ゴムを結着剤として練和した後、硫化、固化せしめたラバー砥石、

砥粒とフェノールフォルムアルデヒド低縮合体を結着剤として練和した後、更に縮合反応（広義の重合反応）を行わしめて固化せしめたレジノイド砥石が主なものである。

これらがいずれも加工能率、大量生産を主目的として重研削を、即ち単位時間当りの研削量の大なることを企図していることは明らかである。

従って重研削によって発生する大なる熱量と、それによる被削材と砥石双方表面の高温状態、（被削金属からは金属固有の火花が出る）に耐えるよう配慮されている。

即ち高温においても結着力をうしなわぬよう陶土、硫化ゴム、フェノールフォルムアルデヒド樹脂（熱硬化性）等を用いている。

重研削を行うのには、切込み（砥石面が被削材に切込む深さ）、送り（砥石を加工方向に単位時間に移動させる量、または速度で表す）を大ならしめる。

しかしながら、砥石は静止しては加工が行われないので、予め砥石は車輪状に作られ、軸を中心に回転させられる。

この回転によって有効な研削作用が営まれ、同時に多数の砥粒は交替して被削材を削り、逐次研削作業を分担する。

先にのべた切込みと送りとの内で、送りは回転速度（砥石表面の周速度）と大きい関係があり、周速度が大なる

程送りを大きく出来ることは自明のことである。

このように、現行の研削加工は砥石車の高速回転によって加工能率を向上せしめることに主眼がある。

著者の砥石の発想はこれと異った考え方による。

即ち、研削量を大にすることは、加工能率の向上には至極有効である。

しかし必ずしも精度の向上には効果的でない。

むしろ副作用のために精度の向上がさまたげられることもある。

高速回転の場合、研削盤機体、主軸、砥石軸、動力伝導機構、原動機等は皆振動の発生源となる。

これらは高速回転により各部品個々の、あるいは組立てられた一体のものとして振動し、振動の周期が、それら部品の固有振動の周期と一致すると甚しい共鳴振動を起すこともある。

振動しつつある研削盤（一般に工作機械も）で加工を行うときに、被削材の加工面と砥粒切刃先の先端との間の距離の変移によって鋸歯状の加工面になり仕上げ面が悪化する。

これを防ぎ、軽減するのに通常、原動機と工作機体の間を軟結合にするとか本体から切離しておくとか、

あるいは歯車による変速、動力の伝達をさけてつぎめなしのベルトにおきかえるとか、更に主軸、砥石軸の軸及軸受の精度の向上によって改善を行っている。

著者は、これらの改善はもちろん有効であるが、精度向上の前提であって、効果が間接的であると考えている。

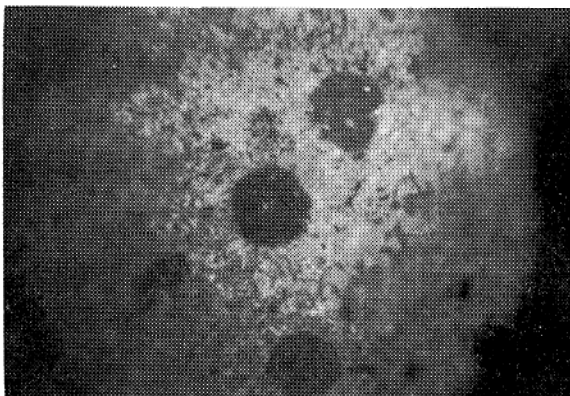
要するに原動機、伝導機構、主軸、砥石軸等の振動は軽減することは可能であるが、絶対的には防ぎ得ない。

微量の振動は必ず残留する。

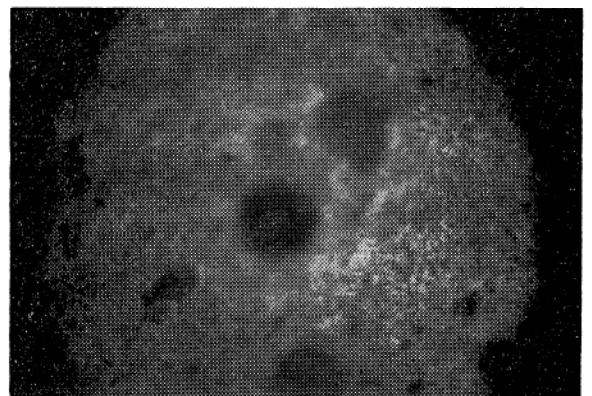
加工精度が向上する程、微量の振動もその影響を無視し得なくなる。

この振動の影響は結局には刃先（砥粒の尖端）と被削材の加工部位に表れるものが直接的である。

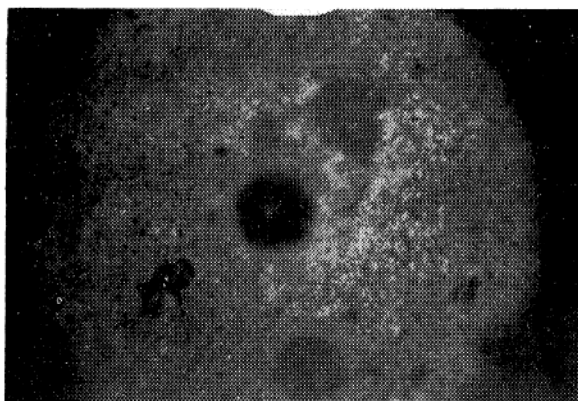
この影響を最小ならしめることが高精度加工のポイント



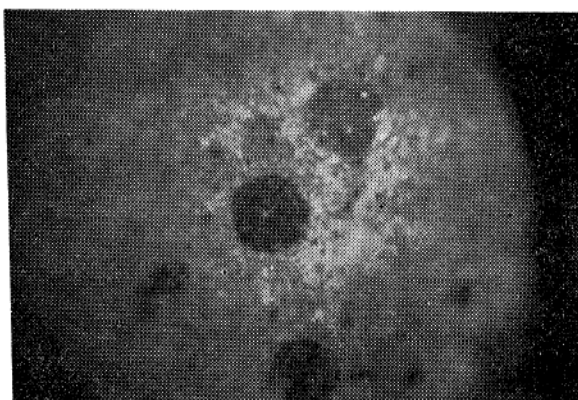
写 2



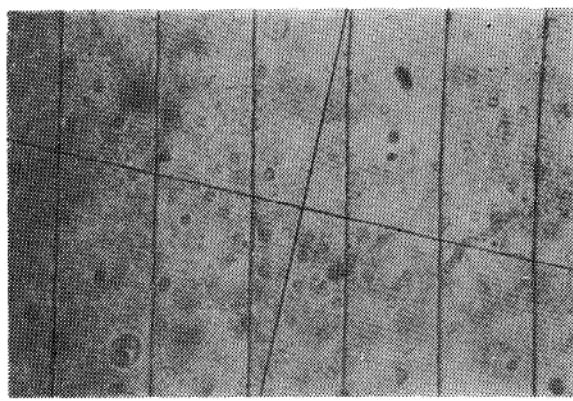
写 3



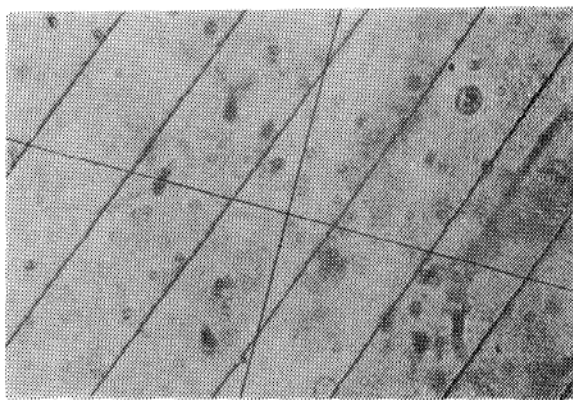
写4



写5



写6 くりかえし反射干渉顕微鏡写真



写7 くりかえし反射干渉顕微鏡写真

トである。

結果的にこの悪影響を防ぐことが出来れば高い加工精度が得られる。

著者の砥石とその使用はこの考えにもとづく。

即ち砥粒切刃に直ちに隣接して振動を吸収緩和するための緩衝物質である。

これは内部摩擦の大きい有機粘弾性体が適当である。

この砥石の表面を偏光顕微鏡によって見た（ニコルクロス位置）ものが写真2, 3, 4, 及5である。

写真の視野中、黒、あるいは黒灰色に見えるのが合成樹脂粒である。偏光撮影で表面反射を除いてある。樹脂粒は透明であるが光学的には空洞として作用するので樹脂粒の深さが、粒の直径の半分以上であると黒く見え、それよりも浅いと外光を一部反射して灰色に見える。

写真2は樹脂粒の表面に顕微鏡の焦点面を合せてある。3, 4, 5, と順に顕微鏡を下げて焦点面を下げてとったものである。

焦点の合ったかしょと、合わぬ部分との境界が一種のコンターラインを作っていることが判る。

これから図1の如き砥石面を構成していると見てよろしかろう。

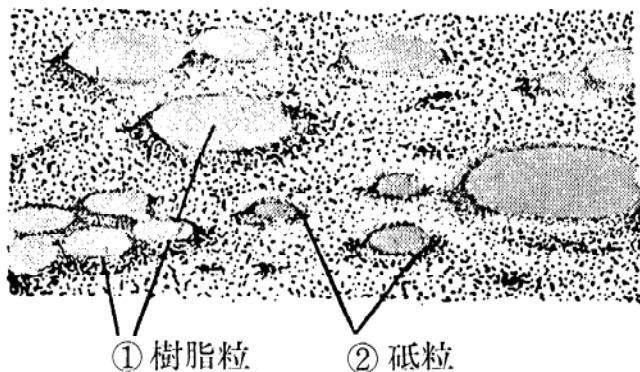
従前の砥石は三要素からなっているが、著者の考えた

ものはこの外に振動吸収のための樹脂の面を三要素の外に介在させている。

このような砥石による研磨は、表面あらさの向上が著しい。（写真6, 7）

ガラスの研磨にピッチ製のラップが用いられてよい仕上げ面が得られる。この物は研磨の最終工程であるつや出しに使用されるもので、レンズの形状精度はそれ以前のいわゆる砂かけ（鋳鉄のラップとガラス素材の間に研磨砂を介在させるラップ法）で得られるものである。

ピッチは温度が高くなると流動し変形するので、形状を正しく保つことが困難で熟練を要する。

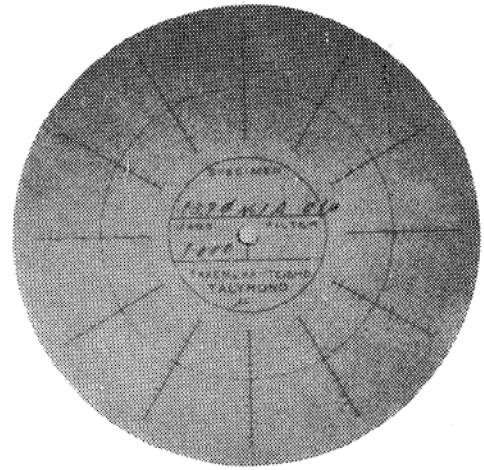


① 樹脂粒 ② 砥粒

図1



加工前



加工後

写8 形状精度の向上(円筒度) 53・9φ No1A

著者の考えたものは合成樹脂材料の選択範囲が広いので、形状の精度が重要である場合は剛性の高い材料を利用することが出来る。

現在砥石自体が開発の途中であって充分にきわめつく

したと申し難い。

写真8以下に若干の成果を供覧する。

著者の独断を叱正あるよう願って擱筆する。