

## 真直度測定法の動向と逐次 2 点法の展開

Recent Straightness Measurement Method and Development of Sequential Two Points Method

佐藤 壽 芳\*

Hisayoshi SATO

真直度は工作機械、特に大型工作機械にとって重要な精度の指標である。レーザーを用いる測定法が実現している時機にあたり、オートコリメータやその他従来の測定法について特徴を明らかにする一方、新たに提案した逐次 2 点測定法の原理とその特徴を測定例を通して解説した。特に逐次 2 点法はくり返し精度がよいこと、標準を必要とせず、工作機械と加工物の真直偏差曲線を分離、測定できること、光学的な測定法に比し安定な測定法であること等を明らかにした。

## 1. ま え が き

機械加工自動化の要望が強まる趨勢のもとで、工作機械の性能として加工精度を適確に把握し、維持管理すること、これとあいまって加工対象に転移される精度の向上をはかることの意義は、高まる一方である。自動化は、精度の管理が熟練した作業者の手をはなれることを意味するから、これに代わる測定法を確立することが要請される。また生産現場で用いられる測定であることを考慮すれば、切削液、切屑等が存在する環境下でも、安定かつ信頼性が高く、使用し易い方法であることが望まれる。このような条件に耐えるにはかなりの困難が伴うが、近年さまざまな方法の開発に努力が払われた結果、実用性に富んだ方法の提案がなされるようになってきている。本稿では工作機械の重要な精度の一つである真直度について測定法の動向と、筆者らの開発した逐次 2 点測定法、ならびにその測定結果について概観する。

真直度の現場的、実用的な測定にはオートコリメータが用いられてきた。レーザーを用いた測定機器は最近ようやく市販されるに至ったが、その普及はこれからというところであろう。筆者らは工作機械の振動特性と表面粗さとの関連について、光切断法を基礎にした測定法を開発し、基本的な特性を明らかにしてきた。<sup>1)2)</sup> この過程では、旋削部材の軸方向表面粗さの測定が狭い視野に限られていたことから、より一般的な性質を知るためにはこれを接続する必要にせまられた。反面もとの視野の狭さから、実用性を考えて精度よく接合をくりかえせる範囲にはどうしても限度があった。<sup>3)</sup> したがって、うねりの成分、これにつながる真直度を測定するには他の方法を開発することが要請された。逐次 2 点真直度測定法は、このような研究の過程から生まれたものである。

オートコリメータやレーザー真直度測定装置等は使い

勝手や測定精度等においてそれぞれに特徴を有するが、調整に時間を要することや、振動、空気の擾乱の影響をうけ易い等の点では改善の余地を残していた。これにたいし、逐次 2 点法は、工作機械の真直偏差曲線のみならず、加工された被削材の真直偏差曲線をも同時に求めうること、平行度、平面度、円筒度等にも容易に適用しうること、切削加工中の測定も可能であること等の特徴を有している。

なお以下では形状を含む精度を真直偏差曲線、円筒偏差曲面等とよび、JIS で定める真直度、円筒度等と区別している。

## 2. 従来の真直度測定法

真直精度の基本的な測定法は旧 JIS に図解されている。<sup>4)</sup> これらのうち代表的なものとして次の例がみられる。図 1 は旋盤刃物台の運動などの水平方向での真直度を求めることを考えた場合で、テストバーをセンタ間にとりつけ、往復台上に位置した測微器をこれにあてて往復台を移動させ、測微器の読みの最大点から真直度を求めるものである。図 2 は長い平面状物体の鉛直面内の真

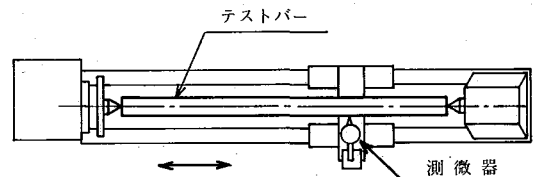


図 1 テストバーを用いた真直度測定法

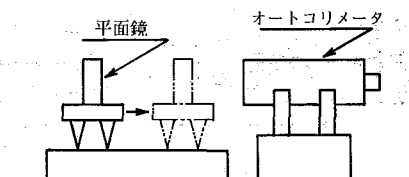


図 2 オートコリメータを用いた真直度測定法

\* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

直度の測定に関するもので、鏡面の傾斜角を測定し、この値から真直度を求めるものである。図1の考え方は、標準真直性にたいし、工具台運動の真直偏差曲線を求めようとするもので、工具台の運動距離が長大となる場合には標準のテストバーがえられなくなること、加工部品の真直度測定には不向きであること等に難点がある。

図2の方法によれば、コリメータレンズの焦点距離  $f$ 、反射鏡の傾き  $\alpha$  にたいして生ずる接眼鏡内の焦点鏡上の目盛の移動量を  $l$  とすると、 $\alpha$  は反射鏡とオートコリメータとの距離には無関係に

$$\alpha = l/2f \quad (1)$$

と求められることから、<sup>5)</sup> 反射鏡のあしの間隔と  $\alpha$  との関係から真直偏差曲線が測定されることになる。図1に示した被削材を対象とするような場合には、やはり測定しにくさが伴うが、工具台の上に反射鏡をおけば、機械の運動精度を求めることも可能であり、現場的には利用し易い方法として用いられてきている。

レーザーは、干渉性がよいことを利用して長さの測定に多く用いられてきたが、光の進行方向と直角方向の運動についての干渉の利用は、比較的最近の動向とみられる。図3は高田らによって提案された真直偏差曲線測定方式である。<sup>6)</sup> 拡大されたレーザービームが工具台にのせられた検出部で交叉しており、その部分の詳細は図4のように示されるから、工具台の運動によってこれと直角方向の動きがなければ相対的な干渉縞の移動はなく、反対にその移動が真直偏差を示すこととなる。

干渉縞の検出にはモアレ法が用いられ、モアレ格子の

真直偏差  $a$  と、干渉縞の移動量  $\Delta x$  との間に

$$a = -\{(p/2n)/W\} \Delta x \quad (2)$$

なる関係の成立が示されている。ここで、 $W$  は干渉縞の間隔であり、レーザー光波長を  $\lambda$ 、2つの入射光の  $\pm n$  次の回折角として

$$W = \lambda / (2 \sin \beta) \approx \lambda / 2\beta \quad (3)$$

と与えられる。また  $p$  はモアレ用格子のピッチである。

(2)において  $\Delta x$  の係数の逆数は、干渉縞の移動の真直偏差にたいする拡大率となっており、回折次数や光束直径の設定にもよるが、当該の研究では120と設定されている。

この方法の特徴としては、測定系が小型にまとめられていること、1mの行程にたいし、5 $\mu$ mの精度の測定が可能であること、測定結果を用いて工具運動の真直偏差曲線を所望の範囲内に制御できること等が示されている。反面光路の空気のゆらぎの影響がノイズとなって精度劣下につながり、これを防止するためには光路カバーを設ける必要があること、光路を交叉させるため測定可能な行程が制限されること等使い勝手の上では改善をはかるべき点もあることが指摘されている。

真直度の測定のために光路を交叉させる必要があるのは、これまでのレーザーを用いた装置に共通している。図5は戸沢らによって構成された系であるが、<sup>7)</sup> 光路については同様に交叉している。この場合、 $a$  の変動にともなう干渉縞移動の総数を  $m$  として

$$a = m\lambda/H \sin \alpha \quad (4)$$

なる関係が導かれる。しかし、この場合も、300mmの行

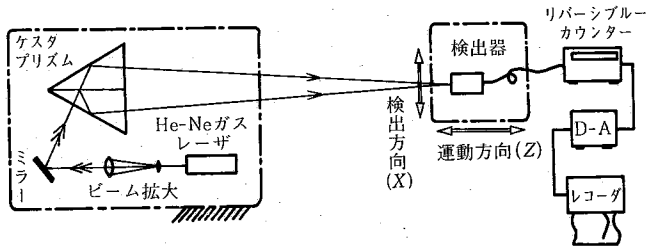


図3 レーザー交叉面干渉による真直度測定方式

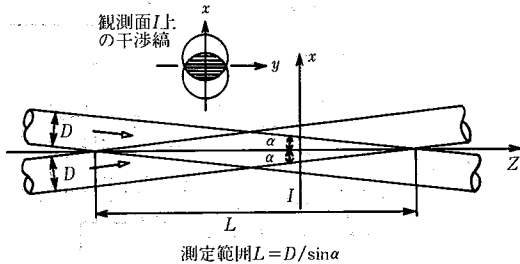


図4 交叉面干渉の説明

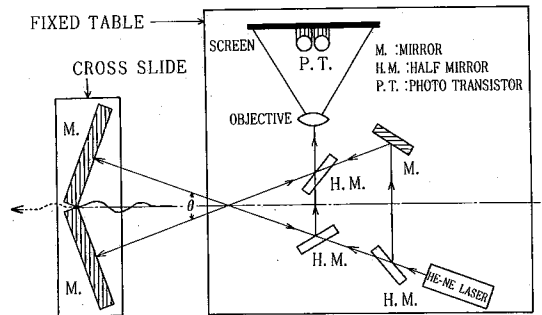


図5 レーザー光路差干渉による真直度測定方式

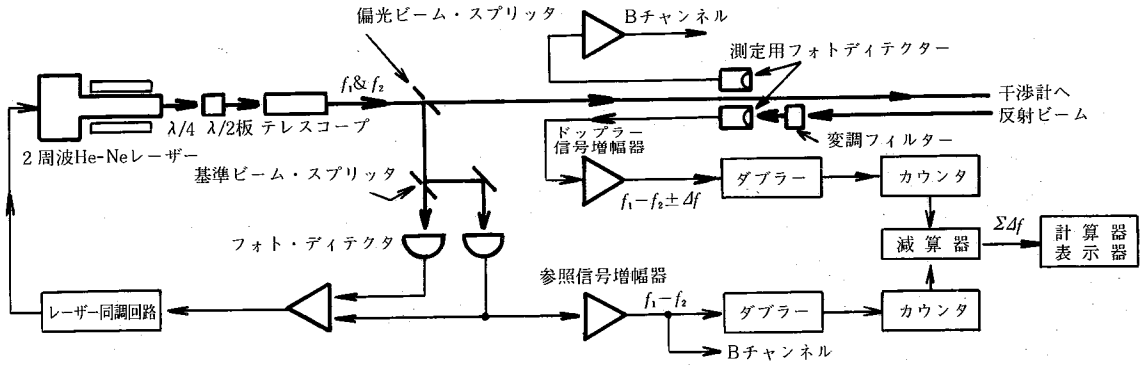


図 6 HP 社レーザー測定装置ブロック線図

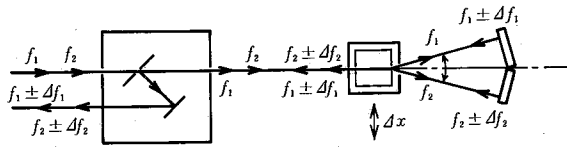


図 7 HP 社干渉計の構成

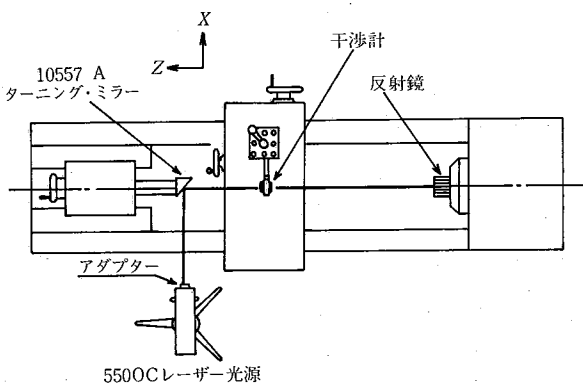


図 8 HP 社装置による真直度測定概念図

程<sup>4)</sup>にたいし  $2 \mu\text{m}$  の真直度測定精度がえられているが、交叉角を開く方が感度が上がる反面、測定可能な行程は短くなること、面精度が高く長い反射鏡を用いることが望ましいが、経費、精度の点からおのずから制約があること、安定な干渉縞をうるためにはレーザー光自身が安定したものであること、系の構成が外部の振動の影響をうけやすいこと等の諸点に問題が残ることが明らかにされている。

レーザーを用いた装置としては、長さを始めとして、平面度、真直度、ピッチ、ヨー等の精度を測定するシステムがすでにヒューレット・パカード (HP) 社によって市販されている。<sup>8)</sup> 図 6 はレーザー発振器と各精度の演算表示をする部分のブロック図であり、図 7 は、真直度測定用の干渉計の構成である。He-Ne レーザ光にわずかに異なる周波数  $f_1, f_2$  から成るものを用い、干渉計ではビームを  $f_1$  と  $f_2$  に分離して光軸に直交する方向

の運動によって光路差を生じ、これによってそれぞれの周波数にシフトが生じるようになっている。この反射光をうけた本体では、シフトされた振動数の分が縞数計数によって蓄積され、精度偏差分が求められることになる。

図 8 はこのシステムを旋盤に用いて工具台の真直性を求めるための概念図であるが、レーザー光源を機械本体の外側においているにもかかわらず、上記のような巧妙な系の構成によって図 3、図 5 等でみたレーザー光使用にともなう困難を巧みに解決し、安定な測定を可能としている。しかし、光学系構成の調整は特に行程が長くなった場合に時間を要すること、加工物の真直性の測定は必ずしも容易でないこと、真直偏差曲線の測定には、数回の行程測定の平均化が必要なこと等の諸点には使い勝手の上で注意しておくべきであろう。

### 3. 逐次 2 点法の原理

戸沢らは、レーザーによる真直度測定を試みる中で、逐次 2 点法とよぶ新たな測定法の提案をおこない、その可能性を旋盤のみならず真直度測定の必要性の高い大型工作機械について検討している。<sup>7)</sup>

図 9 はこの方法の原理を示すものである。すなわち、工具台に A, B 2 つの相対変位計 (以下変位計と略称する) をとりつけ、適当な測定対象との間の相対変位の測定を A, B の間隔  $L$  で工具台を送りつくりかえし、えられたデータ列を演算処理して、工具台の真直偏差曲線のみならず、測定対象の真直偏差曲線も求めるものである。この間の関係は、工具台の  $K$  位置における工具台、測定対象の真直偏差を  $X_k, Y_k$ 、同位置の A, B による相対変位を  $D_{K,A}, D_{K,B}$  として、

$$X_K = X_{K-1} + D_{K-1,B} - D_{K,A} \quad (5)$$

$$Y_K = X_K + D_{K,A} - D_{0,A} \quad (6)$$

とあらわされる。すなわち、2 点で測られた相対変位のデータ列をもとに、簡単なアルゴリズムによって、工具台、測定対象の真直偏差曲線が分離されて、同時に求められることになる。

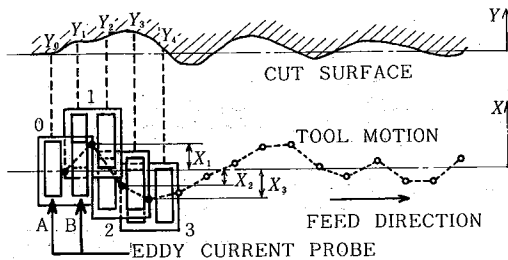


図9 逐次2点真直度測定法の原理図

測定対象には特に標準のものを必要とせず、仕上げ切削された後の部材であってもよいことは、測定法に関わる負担を著しく軽減するであろう。従来では、機械の運動の真直性か、加工された部材の真直性のどちらかを測定するものであり、両者を測定して相互の関係を知ることは、2度測定すれば可能とほいうものの、実際にはほとんどなされていなかったといえる。測定にあたって必要となる変位計の間隔で送りをかける操作は、NC機械にとっては難しいことではない。またアルゴリズムは簡単なものであり、初期の検討では、電卓による計算もおこなわれている。したがって、現場向にはマイクロコンピュータの利用が適しており、実用性が確かめられれば、CNC装置に組みこむことも可能であろう。

変位計としては渦電流型、容量型等があるが、分解能が高いこと、切削溶剤等にたいして安定に作動すること等の点で渦電流型は使い易いが、工作機械の構造材である鋳鉄、鋼にたいし、磁性上の性質からと思われるが、安定に動作しないことが実用上大きな障害である。容量型は分解能の点でやや劣ること、対象面上の水、油等の影響をうけ易いこと等の点で現場利用の信頼感に欠けるきらいがある。このほか、接触式の電気マイクロメータも考えられるが、移動のくり返しときは接触子を持ちあげ、停止時に接触させるような機構が必要となること、接触子は点接触となるため、一つの測定位置で2つの変位計による測定が完全に同じ位置となることは期待できず、表面粗さの影響もうけ易いこと等から、面積部分にたいする平均的な変位を求める渦電流型や、容量型の方が秀れていると思われる。

この測定法には各種の誤差の混入が考えられるが、その主なものの性質について考察しておく。変位計が平行を保つこと、その間隔と送りの間隔を一致させることはこの方法の原理に関わるものであるが、装置の配置が十分精度よくこれらの条件を満たすように注意を払っておけば、測定結果に大きな影響を与えずにすむとみられる。

実際問題として除去することが難しく、測定結果にきいてくるのは図10に示す変位計先端の不揃い $\Delta$ である。測定される真直偏差曲線が、図9に示すように送り方向の軸周辺にえられることは少なく、傾斜直線に重畳してえられるのが一般的である。いま $\Delta$ 分を含んだまま

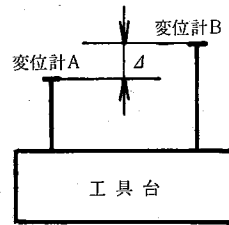


図10 変位計先端の不揃い

でえられる真直偏差を $X_k^*$ 、 $\Delta$ 分を除去した真直偏差を $X_k^{\bar{}}$ とすると、

$$X_k^{\bar{}} = X_k^* - K \cdot \Delta \quad K=0,1,\dots,N \quad (7)$$

であることが示されている。<sup>9)</sup>また、傾斜分を除く手段として、 $K=0, K=N$ を結んで真直とすることが一つの方法と考えられるが、このとき

$$X_N^{\bar{}} = 0 \quad (8)$$

とできるから、

$$\Delta = X_N^* / N \quad (9)$$

なる関係のあることが知られる。

逐次2点法は、工具台の運動に伴うヨーイング、あるいは紙面内での変位計保持部の傾きはないものとしているが、相対変位のデータ列から真直偏差曲線が求められることは、3点で逐次相対変位を測定したデータ列が求められれば、工具台の傾きの変化も求めることを示唆している。原理的にこれが可能なことも示されているが、<sup>9)</sup>2点の場合より誤差に影響を与える因子が多くなり、これらの調整は容易でないこと、比較すべき他の方法による測定結果もないこと等から傾きの測定についてはこのような方法に限らず今後の課題であろう。

上記の研究<sup>9)</sup>では、HP社のレーザー測定装置を用い、普通旋盤の工具台を対象に測定が試みられ、200 mmの区間にたいし $2 \times 10^{-5}$  rad程度であることが求められている。逐次3点として20 mmの間隔でこれを測定しうするためには、変位計の測定を $0.04 \mu\text{m}$ をもって測定することが要請され、現在の測定器では追いつかず、この点ではレーザー測定装置の方が汎用性があるといえる。

#### 4. 逐次2点法の大型工作機への適用

##### 4.1 装置の概要と基本的測定結果

この方法の実用性を検討するために、東芝機械製大型横中ぐりフライス盤BSF-160が対象として用いられた。<sup>10)</sup>図11は機械の全景と、変位計がとりつけられているラム的位置、測定対象として設置された同様大型機のベッド、比較のために同時測定をすすめたレーザー測定装置の配置を示している。図12は平面図と側面図をもって示した主要寸法である。

測定は機械のfront側にあたるX軸原点から2,400 mmの位置を始点とし、5,000 mmの区間にわたつ

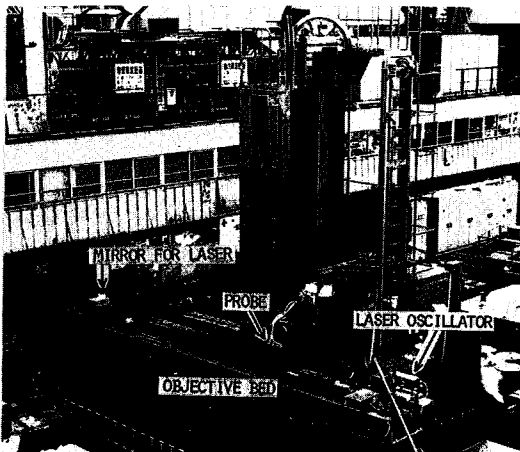


図11 大型横中ぐりフライス盤全景

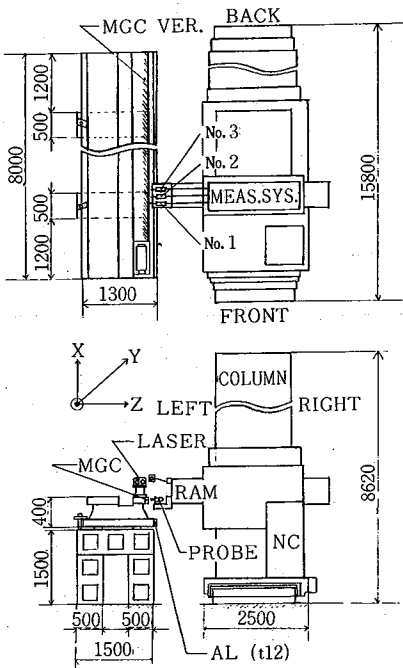


図12 大型横中ぐりフライス盤の主要寸法

ておこなっている。始点の位置は対象ベッド上では一端から約 1,600 mm となっている。変位計は 100 mm 間隔で 3 本をとりつけ、同じ区間で、3 組の組合せで測定することにより、測定法としての信頼性を検討できるようにしている。図 12 のプローブの先端に対して測定対象のベッド面は上側の側面であり、他の機械によって仕上切削されている。またベッドの材料である鋳鉄 (MGC) がそのまま対象面となっている。

ラムの位置をさげて下側の側面でもできるがこの面には 12 mm t の Al 板が接着ねじ止めされており、BSF-160 によってフライス削りした後測定をおこなうよう

にしている。また、第一段階の測定結果にもとづいて真直偏差曲線を補正改善した機械の動きで切削し、新しい対象面とすることも可能である。渦電流型の変位計は、対象面によって磁性体用、非磁性体用のプローブを区別して用いるようになってきているが、Al 板をはった対象面によって、より安定な測定が可能である非磁性体の面をつくりだし、測定法の検討が多様におこなえることも意図している。

プローブの出力は NEC 製 TK-80 をもとに構成したマイクロコンピュータシステムにとりこんで、演算処理をおこなっている。図 13 は測定手順の流れ図である。これをおとしてみると、まず、プローブを変位計にとりつけてあるマイクロメータヘッドで調整し対象面におしつけた後、0.6 mm 引きさげて変位計の先端が揃うようにしている。すなわち、図 10 に示した  $\Delta$  が零となることを期している。その後、これを原点とし、変位計と対象面の間隔が 0.3~0.9 mm の間で 0.1 mm ごとに機械の NC 操作によってラムを動かしてデータを取りこみ、この間で変位計とその出力の関係を較正している。その後再び 0.6 mm の位置にもどし、その状態でコラムを移動させて測定に入るようにしている。

図 14 は Al 面を対象に 200 mm の送り間隔で測定された結果と、オートコリメーター、レーザー測定装置によって測定された結果を比較したものである。まず Tool Motion としてえられている工作機械の真直偏差曲線は中央部が高く、-Z 方向に凸で加工物にくいこむような運動であることが計測されている。両端で零とすることは、(7)にもとづいている。コラムの往復にたいして真直偏差曲線にはほとんど差がなく測定されている。

一方ベッド側 Al 被削面の真直偏差曲線は両端近傍で機械のそれに一致しているが、中央付近では機械の偏差曲線を上まわる形で示されている。フライスの半径が 200 mm であり、これによって被削面の真直偏差曲線が機械のそれよりも平滑化されることを考慮すれば、機械の偏差曲線を上まわる形になることも理解される。両者の間には中央部で 18  $\mu$ m の相異があるが、これが上記の考え方で定量的に説明されるかどうかは、二つの偏差曲線相互の関連の一般的な性質を含め、今後の課題である。機械の真直偏差曲線を測定区間両端で零とした結果、研削面の曲線の両端も零となっており、逐次のくり返しにたいして十分な精度で測定できているとみてよいと思われる。

レーザー測定装置による機械の真直偏差曲線は逐次 2 点法の結果よりも最大で約 18  $\mu$ m 小さくなっているが、傾向としては中央部でいったんおちこむ同じ特性が示されている。逐次 2 点法との差が何によるか現在のところ明らかではないが、干渉計の位置が逐次 2 点が対象としたベッド面とは異なっていること、レーザー装置によつ

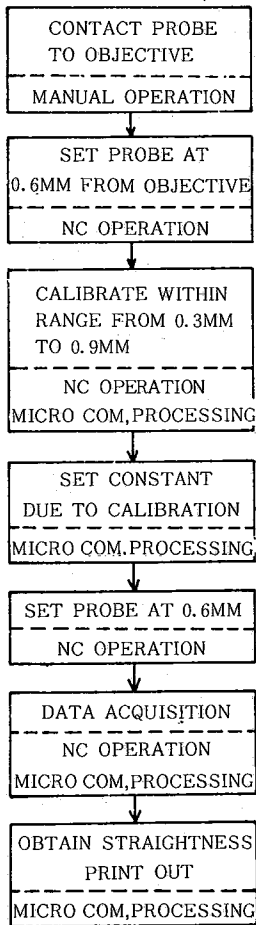


図13 測定手順の流れ

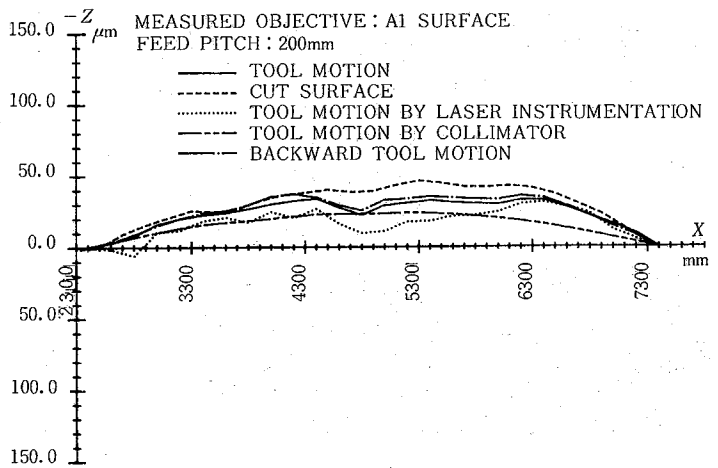


図14 AI面の測定結果

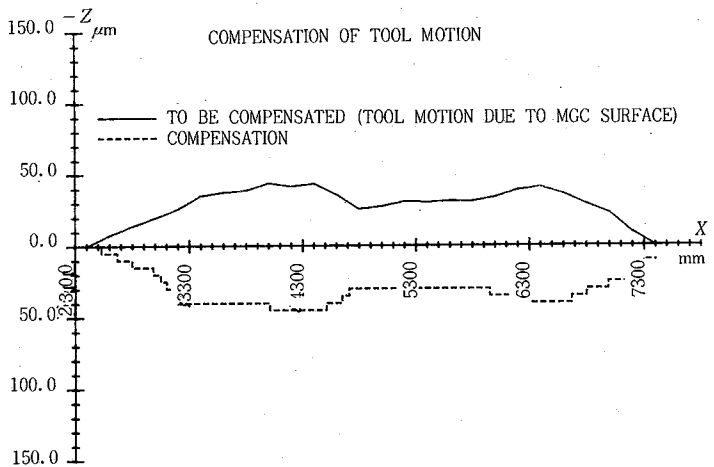


図15 真直偏差曲線の補正

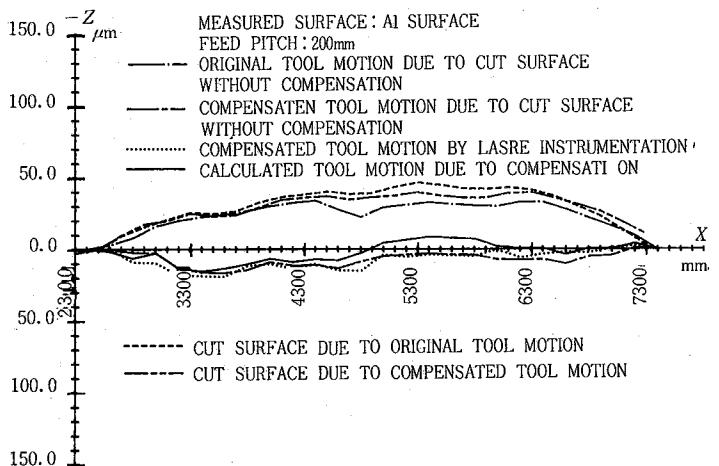


図16 補正された機械による測定法の検討

て偏差曲線を求めるには、数回の測定による平均化が要請されているのに対し、図示の曲線は一標本であること、レーザー装置の測定配置から、干渉計の位置がやむをえず現場環境下での振動をうけ易い状況になっていること等が原因としてあげられる。オートコリメータの測定結果も -Z 方向に凸である傾向は同様であるが、測定法の性質から平滑化された曲線で示され、細部の形状を見るには満足な方法ではないことがわかる。

4.2 真直偏差の補正と測定法の諸特性

図 14 のように真直偏差曲線が求められたとき、これを改善するには NC 工作機械の機能との結合による真直偏差曲線補正の方法があげられる。図 15 は MGC 面を対象に求められた機械の真直偏差曲線をもとにして、これを相殺するように NC 記憶装置に設定した偏差特性を点線で示している。これらの両特性を加算しても完全な真直とはなっておらず、なお僅かの偏差が残ること、この補正にもとづいて実際に切削をおこなうのが A1 面であるのに、MGC 面の位置における真直偏差曲線を用いていること等問題が残る点もあるが、測定法自体に必ずしも見通しがあったといえない実験遂行時点の判断としては、やむをえないものであった。

この補正をした機械の動きで A1 面を削るとすれば、真直偏差曲線の測定は、機械と被削面のそれぞれに補正を入れた場合と入れない場合の 4 通りの測定が可能になる。図 16 はその一半を示したもので、A1 被削面は補正を入れない場合の機械の特性で削られた面を用い、機械の運動としては、図 14 に示した補正を入れない場合のものに加えて、補正を入れた動きで測定を試み、相互の比較を試みている。

長い点の点線は機械の動きに補正を入れて測定した被削面の真直偏差曲線であるが、機械の動きが変わっているにもかかわらず、すでに図 14 でえた 2 点鎖線の被削面の真直偏差曲線と同じにえられているとみてよい。右端では零レベルにもどらず偏差分が生じているが、これは図 15 の右端に残された偏差分に対応している。逐次 2 点の測定がくりかえされる中でも、この分が誤差に埋もれることなく対応を見出していることになり、測定の精度に一つの保証を与えているとしてよいであろう。

図中実線は図 15 の両曲線の和を求めたもので、いわば理論上の真直偏差曲線である。これにたいし、微細点線は補正された機械の運動をレーザー測定装置によって測定した結果、これに重なる一点鎖線は、補正していない機械で切削された面を対象に補正した機械の運動を測定した結果である。理論上の曲線が中央でややはなれているが、測定値は互いによく一致している。またここでは示していないが、残る組合せによって求められる補正された機械の真直偏差曲線もこれらによく一致している。以上の結果は対象面と機械の動きが異なった組合

表1 3本の変位計による Δ の検討

Case	I	II
$\Delta_1$	2.57	-0.44
$\Delta_2$	1.04	-0.48
$\Delta$	3.81	-0.94
$\Delta_1 + \Delta_2$	3.61	-0.92

UNIT:  $\mu\text{m}$

I: 補正なしの工具運動による被削面を対象

II: 補正した工具運動による被削面を対象

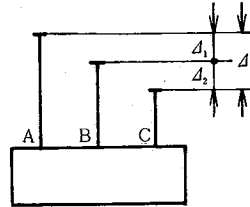


図17 3本の変位計にたいする Δ の関係

せについても同様の真直偏差曲線がえられることを意味し、逐次 2 点測定法が精度のよい測り方であることを示している。

この測定法では変位計の先端を完全に揃えることが難しく、測定結果は一般に傾斜に重畳してえられ、この間の関係として(7),(8),(9)が与えられることをのべたが、3本の変位計を用いて測定していることを利用して、この特性を検討した結果についてのべる。3本の変位計の先端の不揃い相互の関係を図 17 のようにすると、5,000 mm の測定区間にたいし、100 mm, 200 mm 間隔の逐次 2 点測定の結果で、表 1 の結果がえられている。いずれも A1 面を対象とし、I は通常の機械の動きによる切削面を対象に、II は補正した機械の動きによる切削面を対象に測定されたものである。

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \tag{10}$$

が成り立つが、表中に示されたこの間の相異は僅かであり、(7)あるいは(9)とすることの妥当なことが示されている。

図 18 は MGC 面を対象とした測定結果である。機械の運動の真直偏差曲線はすでにのべてきた特性と基本的に変わらないが、MGC 面の性質に大きな特徴がある。すなわち、機械の真直偏差曲線の両端を零とする時、MGC 対象面の偏差曲線右端で約 150  $\mu\text{m}$  のオフセットを生じていることである。MGC 面が他の機械によって仕上切削され、対象面として当該機械と平行となるよう調整配置されていることを考慮すると、このオフセットは配置時の誤差と理解されるものである。この結果は、逐次 2 点法によって機械の運動と対象面の平行度も求められることを意味している。なお、オートコリメータの測定結果の傾きは、逐次 2 点法の結果にあわせているものである。

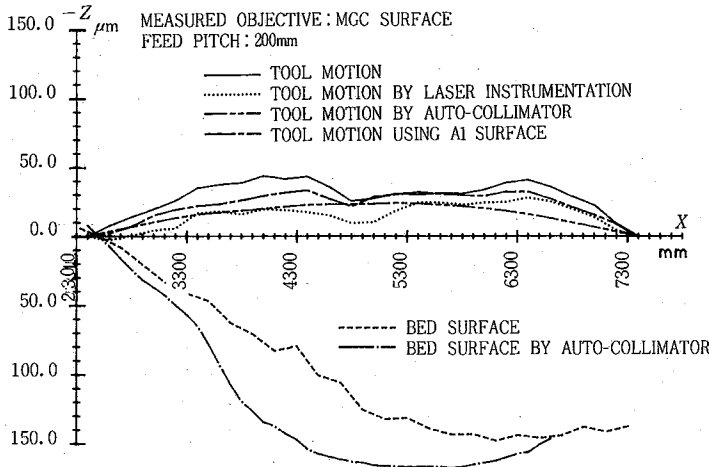


図18 MGC 面の測定結果

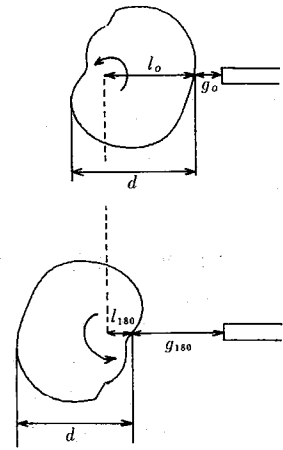


図19 軸心を基準にした座標変換の説明

逐次 2 点法は真直度のみならず、平行度の測定にも効果的な方法であることが示されたが、測定方向を上下にとることによって、平面度の測定にも適用できることはいうまでもない。

5. 円筒度測定への応用

逐次 2 点法は、大型工作機械に適用するに先立ち、旋盤を対象に開発され、基本的な特性が検討されている。<sup>7)</sup> この場合、相対変位計の間隔は 10~20 mm と短く、工具台の移動にたいする真直偏差曲線もすでに示した大型機械よりは小さく、たかだか 10 μm 以内であるが、加工物対象面が変わっても機械の真直偏差曲線は同じに求められること、機械と加工物の真直偏差曲線相互の関連が求められること等すでにみた逐次 2 点法の特徴を明らかにしていた。

加工物の真直偏差曲線が容易に求められることから、旋削の場合は、被削材を停止した状態での測定を周方向にくりかえせば、円筒度の測定につなげられる。円筒形状の測定、解析についてはこれまでも提案があるが、<sup>11)~14)</sup> 本方法は真直度をもとにすすめる点で、これまでの方法とは異なっている。図 19 はこれを説明するものである。すなわち、被削材両端で円の外径を測定し、軸心は基準で不動なものとして、求められた真直偏差曲線から円筒偏差曲面が次の過程で求められる。

図では被削材が回転中心のまわりに 180° 回転した時の関係を示している。ここで、 $d$  : マイクロメータで測定される直径、 $g$  : 変位計で測られる相対変位、 $s$  : 被削材軸心と変位計間の距離、 $l$  : 中心から真直度測定側の半径、suffix : 回転角、等とすれば、 $\theta$  位置における半径  $l_\theta$  は、

$$l_\theta = \{d + (g_{180} + g_0 + 2g_\theta)\} / 2 \quad (11)$$

なる関係から求められる。図 20 は細長い被削材を切削す

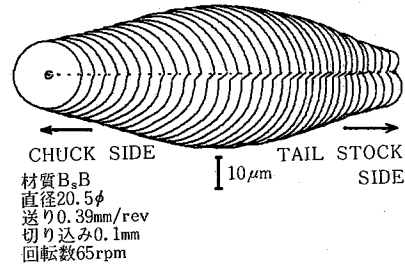


図20 被削材円筒形状の表示

るときに被削材に生じ易い逃げによる円筒度の劣化を、上記の関係を考慮して求め図示した例である。1 回転させたときの測定値を平均化していないことによるつなぎの乱れは除外して考えるとして、中太になる結果がよく測定されている。

すでにのべてきた測定の範囲で、逐次 2 点法はレーザーを用いた測定に比較して安定な測定法である。この性質を利用して、回転状態の被削材を対象に円筒度測定の可能性が検討されている。この際、レーザー測定装置による測定との比較も併せて試みられている。図 21 はこの測定系の概念図である。対象加工物は直径約 20 mm、長さ 400 mm のものを使用し、ロータリーエンコーダで円周方向を分割、工具台は直流サーボモータで送り、送り方向に 14 点の測定をおこなうようにしている。

図 22 は加工物を回転している状態で測定した工具台の真直偏差曲線である。逐次 2 点法によって求められた結果が機械静止時の結果と比較できる値と特性であり、使用している旋盤の精度もよく表していると思われるのにたいし、レーザー装置による偏差曲線は、静止時のものでも逐次 2 点法の結果より大きなばらつきを示しているものが、運転状態ではさらに大きな変動を示し、かつ一貫性のある傾向も示さず、測定値としては無意味とい



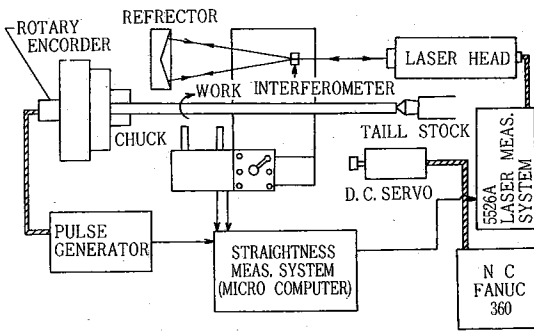
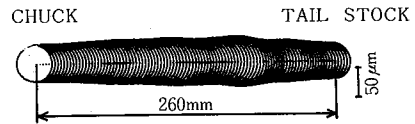
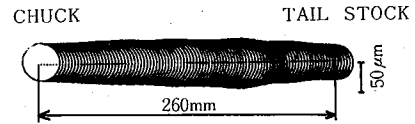


図21 旋盤駆動状態における測定系の構成

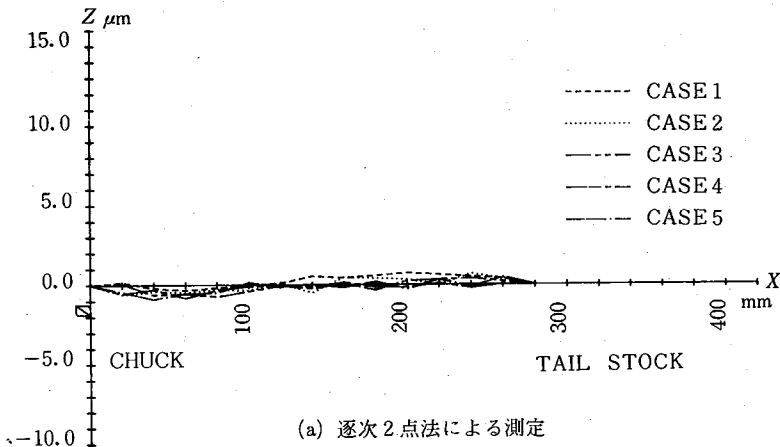


(b) 主軸静止状態での測定

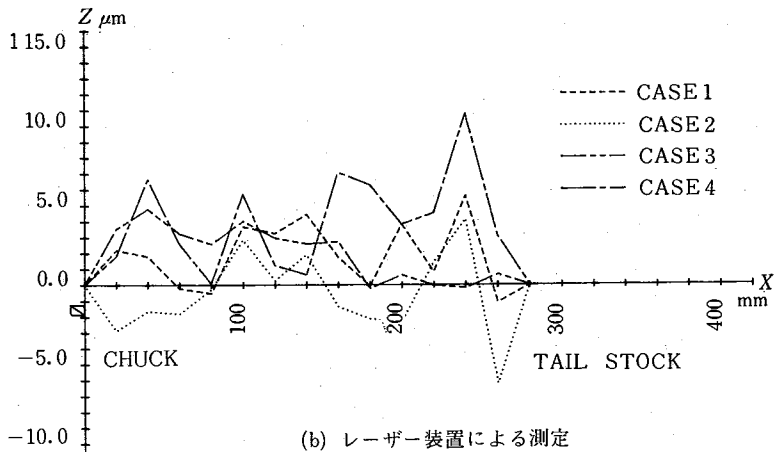


(a) 主軸回転状態での測定

図23 旋盤駆動状態と静止状態の円筒形状表示の比較



(a) 逐次2点法による測定



(b) レーザー装置による測定

図22 旋盤駆動状態で測定された工具台の真直偏差曲線

ってよい結果となっている。

図23は加工物の測定結果を円筒形状表示したものであり、回転状態での測定結果を静止時のものと比較している。中央部で最も太くなり、その両側で増減をくり返すように見える傾向が互によく一致している。加工物を回転している状態で機械には微小であっても振動が生

じ、工具台と被加工物の間にも主軸回転精度、加工物自体の固有振動数等による相対変位が励起されるが、図23の表示をする場合加工物を基準とする測定によってこれらは工具台側に集約されることとなる。このように逐次2点法によれば機械の駆動状態でも安定な測定が可能であることは、他の測定法にはない大きな特徴である。

## 6. お わ り に

真直度測定法についてレーザー測定装置やオートコリメータ等の光学的方法の考え方について概観する一方、逐次2点法とよぶ全く新しい測定法の提案と、これを大型工作機械や普通旋盤に適用し、実用を目的として基礎的な研究をすすめた経過についてとりまとめた。この結果、逐次2点法が、

- 1) 光学的な方法にくらべて、簡便に、安定でくり返し精度のよい測定ができること。
- 2) 工作機械と加工物の真直偏差曲線を1回の測定から同時に求めることができ、したがって、相互の関係を明らかにできること。
- 3) 測定結果にもとづき、NC機能を利用し工作機械の真直性を簡単に補正できること。
- 4) 真直度のみならず、平面度、平行度、円筒度の測定にも展開できること。
- 5) 加工物が回転していたり、機械が運転している状態でも測定が可能なこと。

等の点で秀れた特徴を有し、工作機械、中でも大型工作機械の精度向上と精度維持に貢献する可能性が少なくないことを明らかにした。

反面この測定法は使用する相対変位計の性能に左右され、この方法が工作機械を対象として実用的に信頼をうるには、性能のよい変位計をうるものが早急の課題であることも明らかにした。

逐次2点法に関する研究の推進は戸沢幸一、田中宏明両元大学院生に負うところが大きい。また、東芝機械(株)沢田潔技師長、関口久夫専任次長からは実験遂行に絶大なご支援を頂いた。変位計の使用には機械技術研究所、

吉田嘉太郎課長の御援助を頂いた。精度と偏差曲線の関連については、計量研究所、沢辺雅二課長(現(株)三豊製作所)から貴重な御示唆を頂いた。大堀真敬助手には日頃の助力をえた。記して深甚の謝意を表する。

(1982年3月17日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 三井, 佐藤: 表面あらさの実時間測定に関する研究, 機論, 44-377, 昭53-1, 321-331
- 2) 三井, 佐藤: 工作機械構造の振動特性と周方向表面粗さの関連性, 機論の研究, 33-11, 昭56-11, 1267-1273
- 3) 内田, 佐藤, 大堀: 光切断法による2次元表面粗さ計測に関する研究, 機論, 46-407, 昭55-7, 771-780
- 4) JIS 真直度, B 0603-1964
- 5) 和田: 精密測定演習, 産業図書, 昭44, 97
- 6) 高田, 竹山: 独立光学座標系による工作機械の運動精度向上に関する研究 精密機械 45-5, 昭54-5, 36-42
- 7) 戸沢, 佐藤, 大堀, 駒崎: 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 機論C, 47-419, 昭56-7, 909-917
- 8) レーザー精密測定システム, 5526 A, 横河ヒューレットパッカード(株)
- 9) 田中, 佐藤: 逐次2点真直度測定法の基本的な特性に関する研究, 機構論, 820-6, 昭57-3, 13-19
- 10) 田中, 佐藤, 関口, 大堀: 逐次2点真直度測定法の実用化に関する基礎研究, 機論C, 47-423, 昭56-11, 1484-1492
- 11) 沢辺, 古江: 円筒度の測定法の検討, 精密機械, 44-6, 昭53-6, 737, 739
- 12) 垣野, 北沢: 工作機械上での3点法円筒度測定に関する研究, 精密機械, 44-11, 昭53-11, 1386-1392
- 13) 塚田, 笹島, 阿武, 梅村: 表面おうとつの3次元評価のための一測定法, 精密機械, 46-2, 昭55-2, 230-235
- 14) 後藤, 飯塚: 円筒形状誤差の一解析法, 精密機械, 41-5, 昭50-5, 477-482