

高能率円筒研削用アクティブレストの開発

Development of Active Rest Highly Efficient Cylindrical Grinding

杉浦博治 Hiroji Sugiura

●PEセンター 生技開発室

要旨

動力伝達用に使われている軸は、精度を確保するために研削が多く使われている。最近の省エネ、高速化等のニーズに伴い軸径はより細く、また高精度が要求されている。一方、加工する立場からは、剛性は小さくなり精度を維持することが難しくなっている。特に軸径に対する長さの比が大きい軸ほどたわみやすく、加工時間が長くなる傾向にある。たわみを押さえる方法はいくつか存在するが、この課題を解決する適当な方法はない。

このため、研削全域でたわみを防止する装置の開発に取り組んだ。これは、ワークの変位量に比例した力を、研削力と逆向きに作用させてワークを押し戻し、たわみを押さえる装置である。この結果、今まで40分/本かかっていた研削時間が12分/本に改善できた。

長尺軸の外径を研削する場合、砥石を横移動してもワークがたわまない装置が開発できたので、その内容を紹介する。

1 はじめに

機械要素の一部品である軸は、動力伝達用として使われることが多い。最近は地球環境の観点から省エネ・軽量化、さらに機能向上の要求から回転の高速化が行われている。これらを満足させるために、軸径は一層細く、しかも高精度に仕上げる必要がある。軸径を精度よく仕上げる方法としては研削加工が行われる⁽¹⁾。

一方、加工する立場から見ると、ワークがたわむほど要求精度を確保することが困難になる。特に軸径に対する長さの比が大きいほど、たわみやすくこの傾向が強い⁽²⁾。

研削中のたわみを防止する方法は、世の中にいくつかある⁽³⁾。一般的には、ワーク外周に固定の構造物を接触させる。また軸径を3方向からつかむと自動的に軸芯が出る装置もある。しかしながら、いずれの方法もワーク全長に亘ってたわみを防止できない。

そこで研削全域でたわみを防止できる装置を開発したので、その概要を述べる。本装置は既存の研削盤に容易に取り付けられ、長尺軸を精度良く高能率で研削できる。

2 現状の研削技術

対象とする長尺軸は、材質がステンレスで500から1,200mmの長さがある。これらの軸は長さが径の20倍から40倍あり、たわみやすく加工しにくい。工程の中でも研削は要求精度を確保するために、他工程と比較して長い時間を要している。

2.1 研削方法

(1) 軸の製作工程

工場に納入された素材は、最初に両端面を削り、基準となるセンター穴加工を経て、外径を旋削する。次に加工ひずみによって生じた曲がりを修正し、研削工程を経て、次工程に進む(図1)。

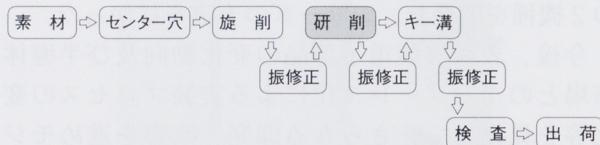


図1 軸の製作工程

(2) 研削工程

研削は次のように行われる。

センター穴を基準とし、片方の外径をチャックで掴み、ワークを回転する。ワーク中央付近に

固定の振止め装置を接触させ、円筒状の砥石を横に移動し（トラバース研削）研削を行う（図2）。

この方法では全長に亘ってたわみを完全に防止できず、送り速度や切込み量を大きくできない。例えば、研削長さ500mm、軸径 ϕ 26mm、取代 ϕ 0.2のワークを、 $13\mu\text{m}$ の公差内に仕上げるために、18回のトラバース研削を要し、約40分かかる。

これは、精度を確保するために、一回当たりの切込み量と送り速度を小さくして、たわみ量を減らしているからである。この加工時間は次に長い工程の3倍かかり、生産工程上の障害となっている。

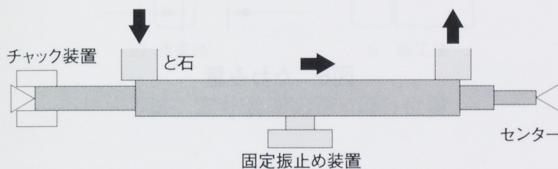


図2 トラバース研削の方法

2.2 研削技術のベンチマーク

開発を始めるにあたり、ワークのたわみ防止に関する技術調査を行った。

前述の固定振止め法は簡単な装置でコストは安いが、固定点以外ではたわみが発生する。また自動調芯式振止め法は3点で軸の中央部を拘束し、研削に伴い軸径が変化しても、自動的に軸芯を保てる利点がある。しかし、ワークを拘束しているため、研削点の移動に伴う装置の横移動が出来ない。このため拘束点以外ではたわみが発生する。

他の方法として、熟練作業者がワークのたわみを竹へらでおさえる研削法がある。この方法は、熟練の程度によっては他の2つの方法より効率的であるが、多台持ち加工ラインを目指す量産工場には不向きである（図3）。

3 新しい研削方法の開発

3.1 ねらい

調査した各種振止め法には一長一短があるため、全長に亘ってたわみを防止する方法を検討した。竹へら法のように研削点に追従しながらたわみを制御し、軸芯の真直性が保たれる装置の開発を目指すことにした⁽³⁾。狙いは、作業者の技能を機械に置き換えることである。作業者はワークの径変化を目で読み取りながら、研削力を指先で感じとり反力を発生させ補正している。

新しい研削法は、次の2項目を目標にした。

- (1) 研削時間が、他の工程と同レベルであること（現状の1/3以下）
- (2) 軸径等の品質が、規格を満足していること

3.2 原理

ワークのたわみを防止する原理は次のようになる。研削力による変位量を検出し、その量に応じた補正力を発生させてワークを押し戻す。この動作を短時間で繰り返し、変位を限りなくゼロに近づける自動制御方式である（図4）。

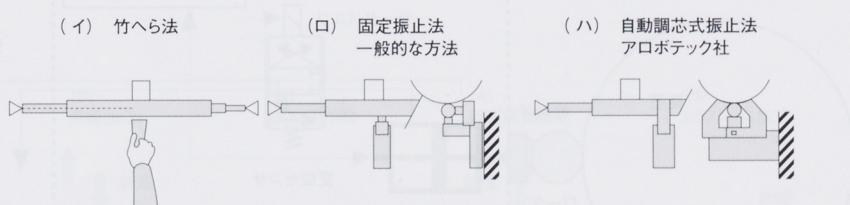


図3 振止め法の種類

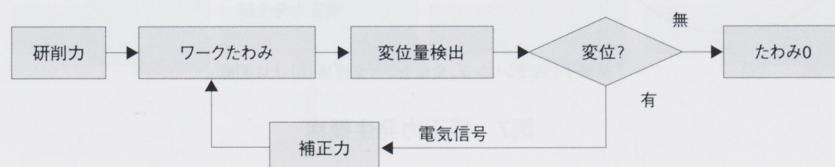


図4 たわみ補正制御

3.3 装置の構成

新装置は、次の3項目を前提として開発した。

- (1) 操作が簡単で、誰でも扱えること
 - (2) 既存の設備に取付けられること
 - (3) 径変更の段取り替えが簡単にできること
- これらを満足した上で、5つの基本要素で構成した。

各要素は力を受けても「ワークを保持し続ける部分」、ワークの「たわみ量を測定する部分」、たわみを抑える「補正力を発生する部分」、目的の寸法に研削できたか「軸径を測定する部分」、ワークを着脱しやすくするため「ワーク保持部を退避する部分」である。次に各機能部の構造を説明する。

(1) ワーク保持部

研削力を受けた時もワークが上下方向に動かず回転でき、さらにワークが軸方向に移動しても安定して保持し続けることが必要である。このため保持部はワークの円筒部を3点で支える構造とし、砥石と対向した位置に配置した(図5)。

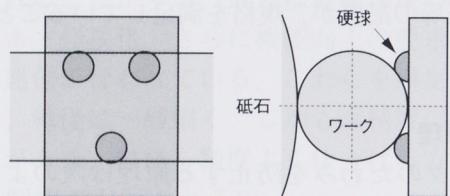


図5 ワーク保持構造

(2) たわみ測定部

マスターワークを両センターで支え、砥石が最初に接触する点(A点)の反対側(保持部側)を原点とした。加工力によって、ワークが原点から移動した変化量をたわみ量として、検出することにした(図6)。

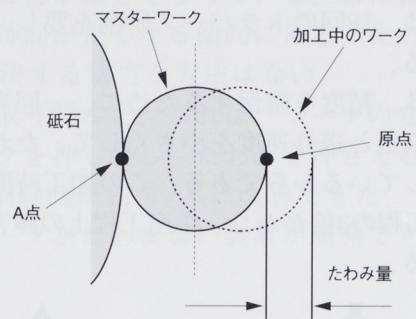
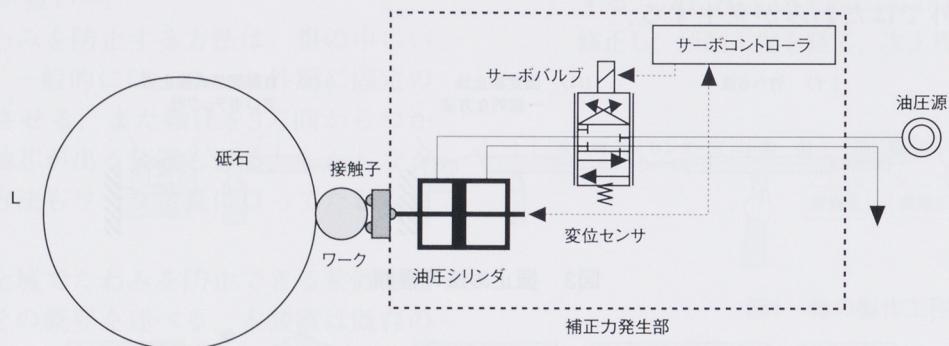


図6 たわみ量

応答性と高い検出精度を得るため、最小 $0.1 \mu\text{m}$ の読み取りが可能な電気マイクロメータを採用した⁽⁴⁾。また、「アッベの原理」に従い、たわみ量の検出方向と検出用の変位センサは、測定点を通る一直線上に配置した(図7)⁽⁵⁾。

(3) 補正力発生部

補正力を発生する部分は補正命令に高速で追従し、正確な位置制御ができる油圧・サーボ機構を採用することにした(図7)⁽⁶⁾。



接触子、油圧シリンダ、変位センサを直線(L)上に配置

図7 補正力発生機構

高能率円筒研削用アクティブレストの開発

(4) 軸径測定部

一般に狙いの寸法に仕上げるため、砥石正面に定寸装置を設置する。今回は正面にワーク保持部を設けるため、定寸装置を横に移動した。ワークとの接点を砥石幅内にするため、測定子に角度を付けて対応した(図8)。

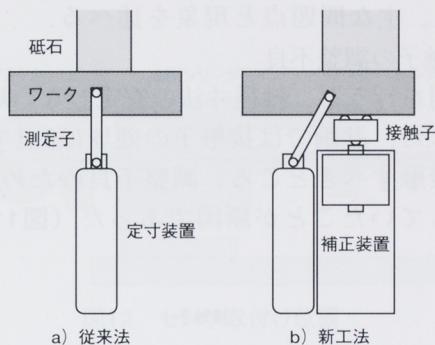


図8 定寸装置の取り付け位置

(5) ワーク保持部の退避機構

ワークが容易に着脱できるように、保持部を50mm後退可能な構造にした。また、段取りに伴う前進端位置の変更は、精度を確保でき交換が容易なストップ方式とした。以上の機能をもつ装置を製作し、既存の設備に取付けた(図9)。

この装置により98N(10kgf)までの力に対し、ワークを予め設定した位置に、ワークを保持し続けることが可能となった。また、熟練を必要とすることなく誰でも使える装置にすることができた。

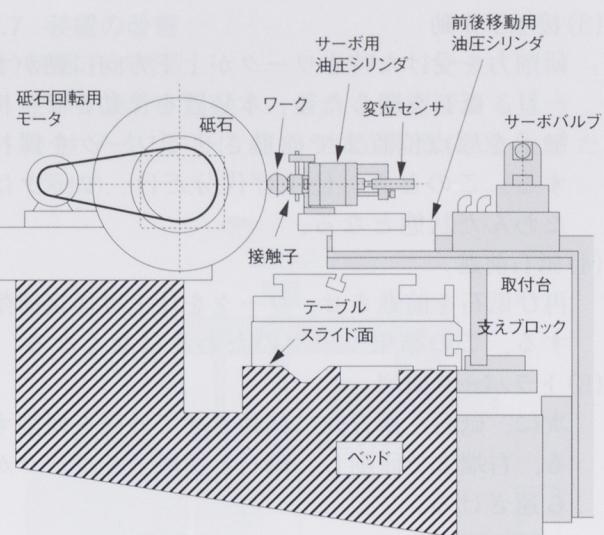


図9 装置の概観

3.4 研削手順

本装置を効果的に使うには研削手順にも工夫が必要であり、次にその手順を説明する(図10)。

(1) 段取り

マスターワークを使用し、外径に接触子を当て、たわみ量の測定基準となる原点を決める。

(2) 準備加工

素材の研削代が大きいので、本装置をこの状態で作動するとワークを無理に曲げ、ワーク・センター等に悪影響が生じる。

このため、最初は本装置を作動させないで仕上げ代を残して左端を研削する。後の手順で本装置を作動させた状態で、砥石前進位置を正確に決めるための取代である。

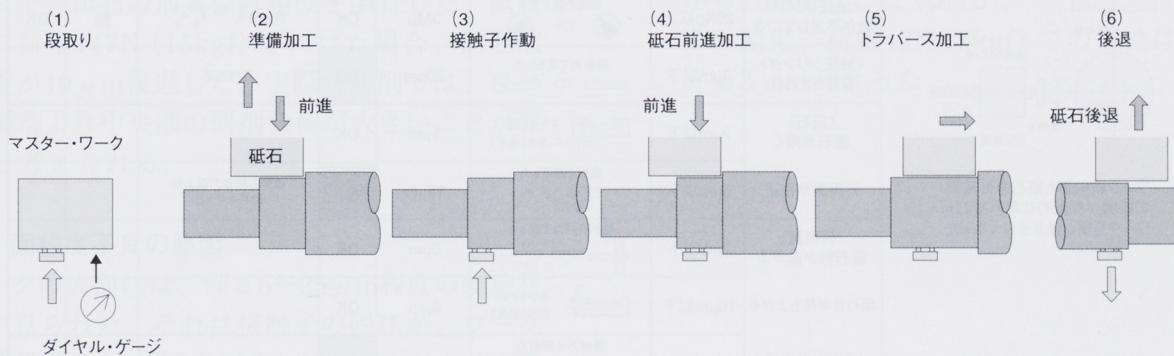


図10 研削手順

高能率円筒研削用アクティブプレストの開発

(3) 接触子作動

研削力を受けた時もワークが上下方向に動かず、一旦、砥石を戻した後、本装置を作動させ、接触子を原点位置まで前進させてワークを保持する。このとき、仕上げ代分だけ、ワークはたわんだ状態となる。

(4) 砥石前進

再び砥石を前進させ、ワークを仕上げ径迄研削する。この結果ワークのたわみはなくなる。

(5) トロバース研削

次に、砥石を横方向に移動させて外径を研削する。右端まで研削し、砥石と接触子をワークから遠ざける。

以上の手順で $\phi 26\text{ mm}$ 、長さ 700 mm 、取代 $\phi 0.2\text{ mm}$ のワークを 1 パスで研削した。

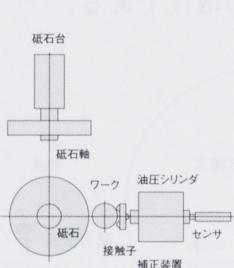
3.5 発生した問題点

その結果、次の 2 つの問題が発生した。

- (1) 両端以外で、軸径が $30\text{ }\mu\text{m}$ 程大きくなる。
- (2) 螺旋状の圧痕がつき、面粗度が最大 $Rz25$ で規格から外れる。

これらの問題を解決するため、たわみ防止メカニズムの原点に戻って調査を行った。

表1 PM分析表 長尺軸の高能率研削

現象	補正装置を使った長尺軸の研削において両端以外の軸径が大きくなる							
物理的解析	成立する条件		設備・治工具・材料・方法との関連(1次)			設備・治工具・材料・方法との関連(2次)		
	項目	許容値	項目	測定値	判定	項目	測定値	判定
 <p>ワーク研削部と砥石の外周面の距離が相対的に離れ砥石がワークを削る量が少なくなった</p>	〈ワーク〉上下に動く	10 μm 以下	接触子が上下に動いた	30 μm	NG	調整部の隙間	1.5mm	NG
	接触子側に動く	2 μm 以下	隙間が出来た	12 μm	NG	調整不良	測定不可	NG
	〈センサ〉測定基準が動く	1 μm 以下	固定位置がたわむ	25 μm	NG			
	〈油圧ポンプ〉力が不足している	20Kg以上	油圧が低下する	3Mp	OK	気泡混入	無	OK
	〈油圧シリンダ〉装置がたわむ	4 μm 以下	研削力で変形した	20 μm	NG	剛性不足		
<p>砥石台が持ち上がる</p> <p>砥石台が後退</p>	〈砥石〉砥石が傾く	2 μm 以下	砥石部にガタ(水平)	1 μm	OK			
	外周面が後退	5 μm 以下	砥石が脱落した	15 μm	NG	砥粒の結合力以上の力がかかるた		
	〈研削盤〉砥石軸が曲がる	2 μm 以下	軸が研削力で曲がる	0 μm	OK			
	砥石台が持ち上がる	10 μm 以下	砥石軸のカタ(垂直)	5 μm	OK			
	砥石台が後退	2 μm 以下	保持力<研削力	10 μm	NG			

■ 本文に説明を加えた項目

3.6 原因の追求

3.6.1 軸径不良の原因

軸径が安定しない原因の究明には PM 分析手法を使った^⑦。その結果、本装置の剛性やたわみ測定用のセンサ取付け位置、ワークの保持方法、また砥石や研削盤にも問題があることが解った(表1)。

以下に、主な問題点と現象を述べる。

(1) 接触子の調整不良

研削を行うと、軸径寸法の安定しない場合が発生した。計画では接触子の硬球は 3 点でワークに接触すべきところ、調整不良のため 2 点で接触していたことが原因であった(図11)。

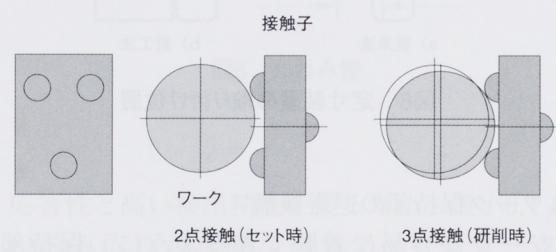


図11 接触子とワークの状態

(2) センサの取付け位置

軸径寸法が安定しない理由には、別の原因も存在していた。ワークのたわみを測定するセンサは、補正力を発生させる油圧シリンダの端面に取付けていた。この場所は補正反力により変位し、たわみを正確に測定できていなかったためと思われる(図12)。

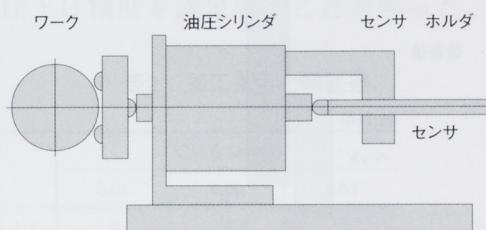


図12 センサ取付け位置

(3) 装置の剛性

両端以外で軸径が大きくなる原因には、装置の剛性も影響していた。補正力を加えると、その反力により装置全体が変形した。研削力に相当する49N(5kgf)の荷重を保持部にかけた場合、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 変位することが解った。

(4) 砥石の摩耗

円筒形状の砥石で研削したところ、加工が進むにつれ振動が発生し始めた。これは切込み量が大きく、研削負荷が高いため、砥石に異常摩耗が発生したことが原因と考えられる。

(5) 砥石台の位置精度

当初は1パス加工を目指して研削を行った。研削代が小さい場合は精度良く研削できたが、取代を増していくと、中央部で径が $20\text{ }\mu\text{m}$ 程大きくなる現象が発生した。

そこで、砥石の前進位置精度を調査した。砥石台に荷重147N(15kgf)をかけた場合、前進端位置が $10\text{ }\mu\text{m}$ 後退した。実際の研削では、ワーク両端より中央部の研削負荷が大きいことが原因と考えられる。

3.6.2 面粗度不良の原因

ワークの表面には、深さ $6\sim25\text{ }\mu\text{m}$ 程度の螺旋状の傷が見られた。それは接触子の硬球が、ワークを強く押すための圧痕であった。

以上の問題点を次のように解決した。

3.7 装置の改善

(1) 接触子の構造

硬球が3点で当っているかを確認できるよう、接触子を上下に動かせる構造に改良した(図13)。

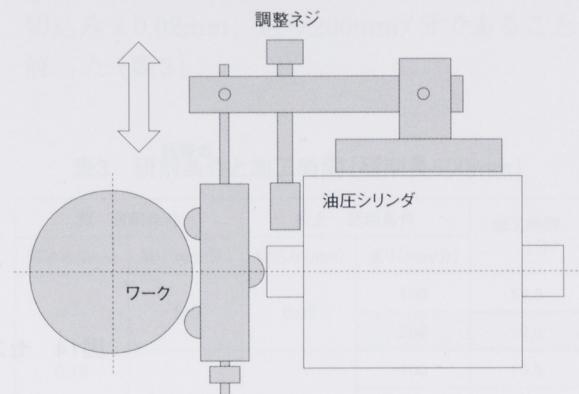


図13 接触子の調整構造

その確認方法を以下に示す。

ワークにダイヤルゲージを当てたまま、接触子を前進させ、ワークをたわませる。この状態で接触子を上下方向に動かし、たわみ量が最小になる位置をダイヤルゲージで読み取る。この方法で、ミクロンレベルの調整が容易に確認できるようになった。

(2) センサの取付け位置

センサは補正力の影響を受けない位置を変更した(図14)。

(3) 装置の剛性

本装置は「片持ち」構造が避けられないため、ベースの剛性を向上した。PM分析より断面係数を5倍に上げる必要から、ベース板厚を9mmから16mmにした(図15)。

この結果、荷重49N(5kgf)での変位は許容できる $3\text{ }\mu\text{m}$ となった。

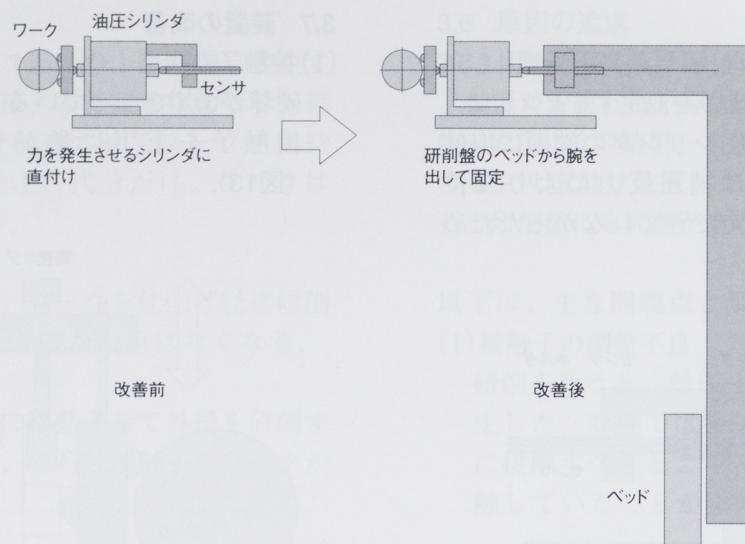


図14 センサ取付け位置の変更

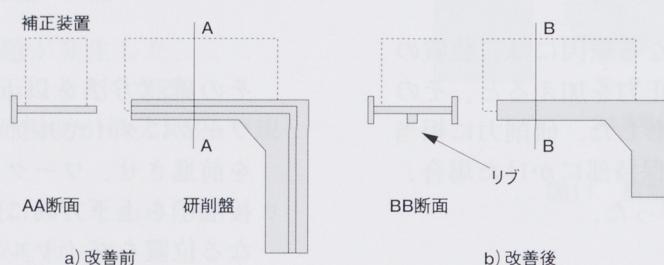


図15 ベースの構造

(4) 砥石の摩耗

円筒形状の砥石でトラバース研削した場合は、進行方向の角部に負担がかかり、異常摩耗する。そこで角部をテーパーにすることで、研削する砥石の面積を増やした。この結果、砥粒1個当たりの荷重は1/200になり、支障なく研削できるようになった（図16）⁽⁸⁾。



図16 砥石形状

(5) 砥石台の位置精度

研削負荷変動による砥石前進位置のバラツキを、研削盤の改善によって解決することは困難なた

め、研削負荷の変動幅を軽減することで改善した⁽⁸⁾。すなわち、仕上げ研削を追加し2パス加工することにした。これにより仕上げ研削時の面圧が減少し、面粗度不良の原因である圧痕の問題も解決した。

以上の改善を折り込み、研削条件を設定した。

4 良品条件の設定

一般的に送り速度は遅く、切込み量は少ない方が良い精度が得られる。そこで精度を満足した上で、加工時間が最小となる条件を選定することにした。最初に、完成精度（目標径公差 $6 \mu\text{m}$ ）を確保できる仕上げ条件を決め、次に荒加工条件を決めることにした。

高能率円筒研削用アクティブレストの開発

(1)仕上げ条件の調査

仕上げ加工の送りは100mm/分ごとに最大400mm/分までの条件とし、切込みは10 μm ごとに最大30 μm まで変化させて精度評価を円筒度(外径の最大値と最小値の差)で表わした(表2)。

その結果、切込み $\phi 0.01\text{mm}$ では送り300mm/分まで、切込み $\phi 0.02\text{mm}$ では送り200mm/分までが仕上げ精度を満足することが解った。

表2 加工条件と軸径差

		切込み(Φmm)			単位 μm	
		0.01	0.02	0.03		
送り(mm/分)	100	3	4	7	100	14.5
	200	4	4	10		
	300	5	7	12		
	400	8	11	15		

■ 良品範囲
■ 不良品範囲

(2)荒加工条件の調査

以上より仕上げ切込みは $\phi 0.01\text{mm}$ と $\phi 0.02\text{mm}$ が考えられる。全取代が $\phi 0.2\text{mm}$ あるので、荒加工における $\phi 0.01\text{mm}$ の差は精度への影響が少ないと考え、荒加工の切込み量を $\phi 0.18\text{mm}$ に設定した。送り速度を50mm/分ごとに最大150mm/分まで変化させ、テストした(図17)。

その結果、150mm/分では円筒度が20 μm を越え、仕上げ精度に影響することが解った。また、送りが100mm/分では円筒度が14 μm となり、仕上げの取代が $\phi 0.02\text{mm}$ 必要となる。送りが50mm/分では円筒度が8 μm となり、仕上げの取代は $\phi 0.01\text{mm}$ で良いことが解った。

(3)最適加工条件の選定

以上より円筒度が確保でき、加工時間が最も短くなる荒加工と仕上げ加工条件の組合せを選定した。

この結果、最適条件は荒加工を切込み量 $\phi 0.18\text{mm}$ 、送り速度100mm/分、仕上げ加工を切込み $\phi 0.02\text{mm}$ 、送り200mm/分であることが解った(表3)。

表3 研削条件と加工時間(研削長500mm)

荒 研削条件		仕上 研削条件		加工時間 (分)
切込み(mm)	送り(mm/分)	切込み(mm)	送り(mm/分)	
0.18	100	0.02	100	14.5
			200	12.0
	50	0.01	100	19.5
			200	17.0
			300	16.2

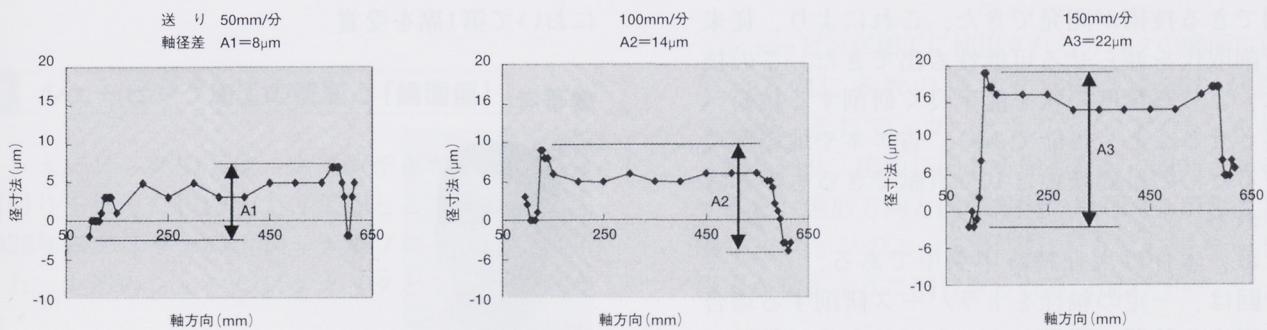
この条件で数回のテストを繰り返し、仕上げ加工後の径寸法が安定していることを確認した(図18)。

5 効果

本研削法により次のような効果を得た。

(1)研削時間

研削パス数が従来18回あったものが、2回となり、研削長500mmの場合、研削時間は40分/本が12分/本に短縮された。これにより当初の目標である研削時間1/3が達成できた。

図17 送り速度の影響(切込み $\phi 0.18\text{mm}$)

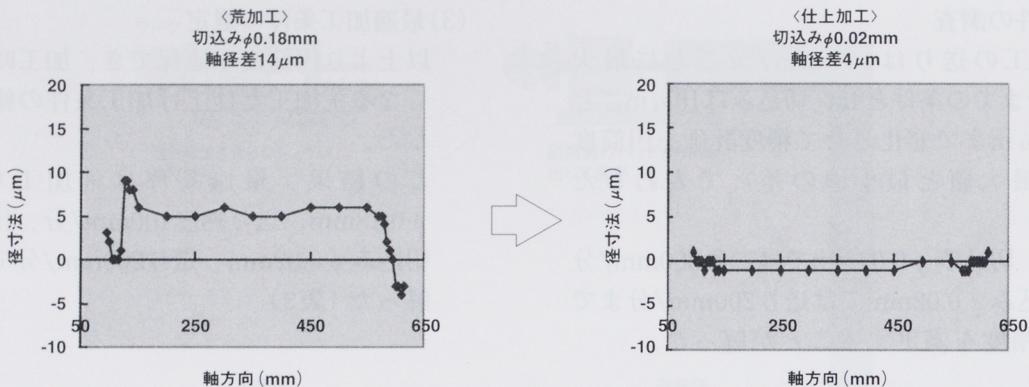


図18 外形精度の向上過程

(2) 精度

精度は全て規格を満足できた（表4）。

表4 精度比較

	規格	従来法	新研削法
軸径差(μm)	φ13	φ5	φ5
面粗度(Rz)	6.3	2.4	3.7
真円度(μm)	—	2	2
振れ(μm)	30	30	30

装置の開発にも取組んでいきたい。

最後になりましたが、本装置開発のきっかけと、ご指導およびご助言をいただいた社内外の関係各位に紙面をもってお礼申し上げます。

■参考文献

- 田中ほか：精密工作法（上），共立出版（1993）
 - 井の上ほか：高能率研削1,2 大河出版（1974）
 - 堀内ほか：力補償型空圧ベローズ式アクティブレーストによる精密円筒研削, JSPE-54-07 (1988)
 - 谷口紀男：ナノテクノロジの基礎と応用，工業調査会（1988）
 - 中沢 弘：やさしい精密工学, 工業調査会（1991）
 - 大滝ほか：特集「はじめてのサーボ機構設計」，機械設計第37巻第8号
 - 中嶋ほか：生産革新のためのTPM展開プログラム加工・組立編, 日本プラントメンテナンス協会編（1992）
 - 工作機械の最先端技術, 日本機械学会編, 工業調査会（1989）
- PM優秀論文賞（主催：日本プラントメンテナンス協会）において第1席を受賞

●著者



杉浦博治

6 おわりに

本装置は工作機メーカーと共同で開発を進め、実用化にこぎつけた。これにより研削時間が短縮され、工程の平準化が可能になった。

竹へら法に見られる熟練作業者の技を機械に置換えることで、ワーク軸心の真直性を保ちながら、研削できる技術が開発できた。これにより、従来の研削取代を減らせる可能性も出てきた。この技術は、より高精度の軸を能率良く研削する技術へ発展させることも可能であり、省エネや地球環境を守るために基礎技術として貢献できるものと考えられる。

なお、本件は現在特許申請中である。

今回は、一定の軸径をトラバース研削する場合に適用する装置の開発であったが、今後は段差のある軸や、クランク軸・カム軸等の研削に使える