

円筒研削における工作物たわみ補償に関する研究*¹

Feed Control Based on the Prediction of Workpiece Deflection in Grinding

頼経昌史 M. YORITSUNE 田野 誠 M. TANO
酒井隼樹 T. SAKAI 村上慎二 S. MURAKAMI

Grinding is used as a finishing process for the manufacture of engine parts. Actual depth of cut in grinding is lower than the command value due to workpiece deflection. Therefore, the grinding process has a long finishing time for the demanded machining accuracy. In this research, we propose feed control logic (based on the prediction of workpiece deflection in grinding) to achieve both machining time and machining accuracy. This report describes the development of a grinding system composed of a standard cylindrical grinder and the proposed feed control logic. A grinding experiment is also carried out for evaluation of the proposed grinding system.

Key Words: grinding cycle, grinding force, workpiece deflection, feed control

1. はじめに

研削加工は高硬度の微細砥粒を用いた除去加工であり、焼入れ鋼や超硬などの難削材を高品位かつ高精度に加工することができる。その特長から、エンジン部品など大量生産品の機械加工で最終工程となる場合が多く、近年では高生産性も要求されている。

一方、シャフトなどの円筒工作物を高能率で加工する場合、加工中に発生する研削力によって工作物がたわむことにより、実切込み量が指令切込み量に対して遅れて変化する¹⁾。そのため、要求される形状精度を達成するには、仕上げ工程の取りしろを大きくする必要があり、加工時間が長くなる。

本研究では、円筒研削における加工時間の短縮と形状精度の安定を両立させることを目的とした、加工システムの開発に取り組んだ。加工中の工作物たわみ量を推定して送り速度を制御することによって、実切込み量を短時間で安定させる制御ロジックを構築した。また、本制御ロジックを既存の円筒研削盤に搭載した円筒研削加工システムを開発し、その有効性を加工実験で検証した。本報では、加工システムの概要と加工実験結果について述べる。

2. 研削加工の概要

2.1 円筒研削サイクル

図1に一般的に使用される円筒研削サイクルを示す。粗研から精研、微研へと段階的に切込み速度を下げ、最後は切込みを一定時間停止するスパークアウト工程を経て、形状精度を達成する。この切込み位置の時間変化を研削サイクルと呼んでいる。被加工部の工作物径をインプロセスで測定する自動定寸装置を用いて、あらかじめ設定した工作物径に達した時点（定寸信号点）で工程の切替えを行う。

表1に各工程の役割を示す²⁾。粗研は加工時間を短くするために大きな取りしろを速く加工することが求められる。仕上げ工程である精研・微研・スパークアウトは形状精度や表面粗さなどの品質を確保することが求められる。加工時間を短縮するには、粗研の切込み速度を高くすることが考えられるが、研削能率の増大により研削焼けを引き起こしてしまう。また、切込み量の増加により、仕上げ工程で除去すべき切込みによる段差が大きくなるため、要求される形状精度を達成できないことが懸念される。以上の理由から、容易に加工時間を短くすることはできない。また、形状誤差は加工中のたわみ量で変化する。同じ研削力であれば工作物剛性が低いほど形状誤差も大きくなる。すなわち、工作物剛性が低いほど加工時間が長くなる。

* 1 本資料は、2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (p.531 - 532) を基に作成した。

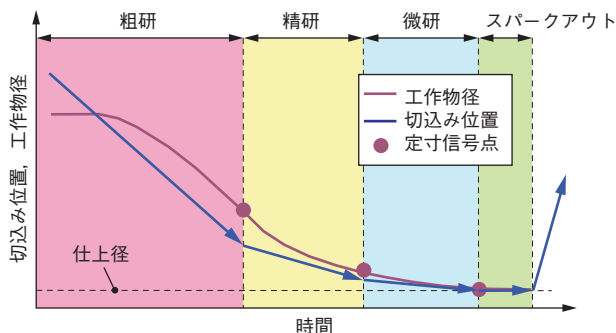


図1 一般的な研削サイクル
Conventional cylindrical grinding cycle

表1 各工程の役割
Functions of grinding processes

	役割
粗研	・前加工の振れを除去する ・可能な限り速く加工する (速度重視)
精研	・粗研時の形状誤差を除去する ・微研取りしろを確保する (精度重視)
微研	・外径寸法のばらつきを抑える ・表面粗さを確保する (精度重視)
スパークアウト	・微研削時の削り残しを除去する ・表面粗さを向上させ安定させる (精度重視)

2.2 研削加工現象

円筒研削加工状態のモデルを図2に示す。位置指令から与えられる指令切込み量 Δ_{com} により、砥石と工作物が干渉して、その領域を除去加工する。このとき、切込み量に相応した負荷が発生する。この負荷を研削力と呼び、この研削力を工作物剛性 K で除した量であるたわみ量 ϵ だけ、工作物はたわむ。その結果、実切込み量 Δ_{actual} は Δ_{com} に対して小さくなる。この現象は式(1)のように表され、時定数 τ は式(2)で表される。

$$\Delta_{actual} = \Delta_{com} - \Delta_{com} \cdot e^{-t/\tau} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot b \cdot \pi \cdot D}{K \cdot V} \tag{2}$$

ここで、 α は砥石切れ味、 b は加工幅、 D は工作物径、 K は工作物剛性、 V は砥石周速度である。

このように Δ_{actual} は Δ_{com} の一次遅れ系で表される。砥石切れ味が低下することによって α は大きくなる。式(2)より砥石切れ味が大きいのか、または工作物剛性が低いほど、時定数が大きくなる。

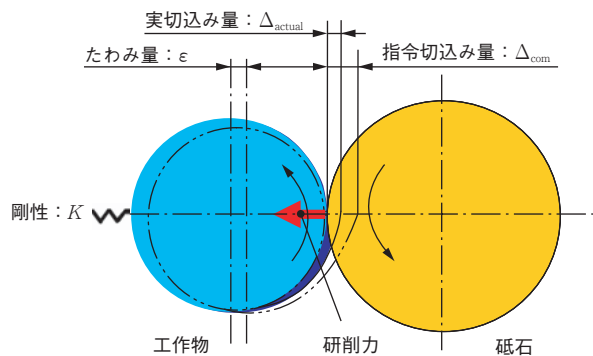


図2 研削加工状態モデル
Cylindrical grinding model

2.3 たわみによる遅れの影響

たわみによる遅れに対する砥石切れ味 α および工作物剛性 K の影響を調査するため、図3に示す工作物の剛性が異なる部位を、表2に示す条件で加工実験を行った。

図4に実切込み量と加工時間の関係を示す。図4(a)に示すように、同一加工条件において工作物剛性 K が低い場合は粗研時のたわみ量が大きくなる。そのため、形状精度を確保するには精研時間を長くしてたわみを整定させる必要がある。また、図4(b)に示すように砥石切れ味 α が大きい場合は研削力が大きくなり、既定時間のスパークアウト終了時にたわみ量が整定しないことを実証した。このとき、形状測定結果から切込みによる段差が残ることを確認した。

以上の結果から、研削力に起因するたわみの影響で形状精度が低下し、それを防止するためには仕上げ取りしを大きくする必要があることが分かった。

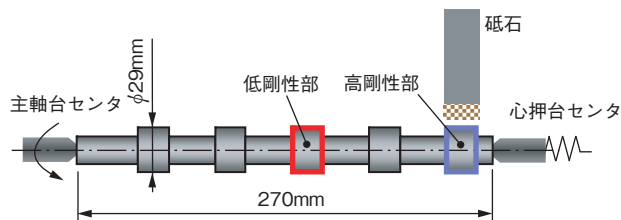
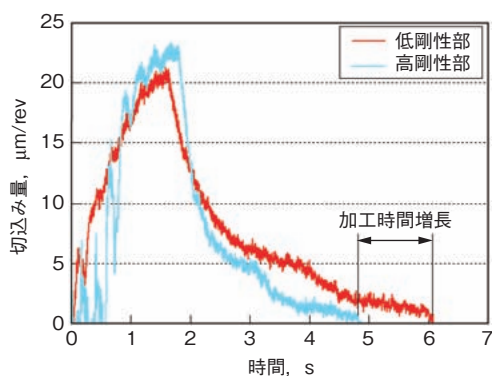


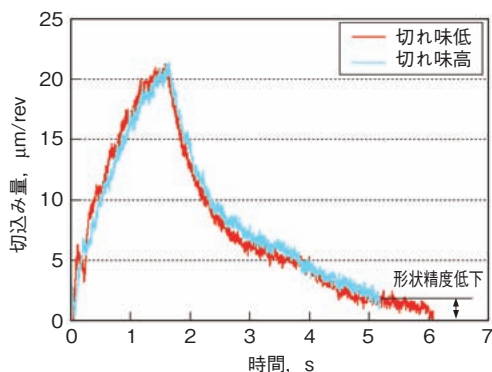
図3 工作物形状
Workpiece dimensions

表2 加工条件
Grinding test conditions

研削盤	円筒研削盤 (当社製)
砥石	ビトリファイド CBN ホイール (#120, 集中度 150) φ120mm
工作物	クロム鋼 (浸炭焼入れ) φ29mm 幅 20mm 4.4N/μm (低剛性部), 13.8N/μm (高剛性部)
砥石周速度 V	80m/s
工作物周速度 v	0.4m/s
研削能率 Z	8.4mm ³ /(mm·s) (粗研)
クーラント	エマルジョンタイプ (20倍希釈)



(a) 工作物剛性の違い
(a) Difference in workpiece stiffness



(b) 砥石切れ味の違い
(b) Difference in wheel performance

図4 切込み量と加工時間の関係

Relationship between cutting depth and machining time

3. たわみ補償研削制御システム

3.1 概要

式(1)で表されるたわみ量の変化に伴い、指令切込みに対して実切込みが遅れることを加工実験で確認した。従来の研削サイクルにおいて、加工中のたわみ量に起因する実切込み量の一次遅れによって加工時間が長くなることに着目して、加工時間の短縮を実現することができる研削サイクルを開発した。図5の開発研削サイクルの概

略図において、図中①の粗研設定切込み到達までの領域と②の粗研から微研へのつなぎである精研でたわみ量が過渡的に変化する領域において、それぞれたわみ量を短時間で整定させて加工時間を短縮する。

たわみ量の整定時間は時定数 τ に依存するので、工作物剛性 K と砥石切れ味 α の影響を受けるが、たわみ量を短時間で整定させる送り制御によって工作物剛性に依存せず、ほぼ同じ時間で加工できる。また、砥石切れ味の変化に対しても微研時のたわみ量に整定させることで、切込み量が安定するため、形状精度の安定性が向上する。

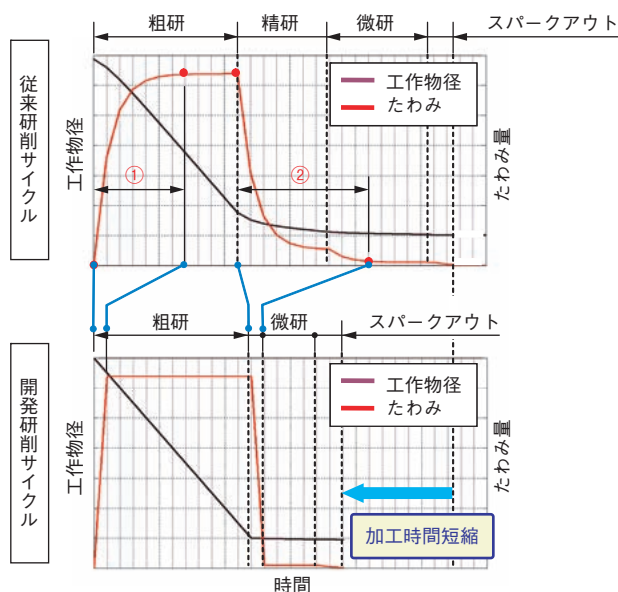


図5 開発研削サイクルの概略図
Schematic of developed grinding cycle

3.2 制御ロジック

たわみ補償研削制御ロジックを図6に示す。本制御ロジックではたわみを補償して粗研および微研のたわみ量に工作物1回転の時間で整定させる。そのためには研削加工中のたわみ量が必要になるが、切りくずやクーラントなどの環境下で被加工部のたわみ量を直接測定することは困難である。そこで、加工中の法線方向研削力 F_n と実切込み量 Δ_{actual} の関係からたわみ量を推定する制御ロジックを構築した。実切込み量と研削力は比例関係⁽³⁾にあるため、砥石切れ味 α を比例定数とすれば法線方向研削力は式(3)のように表される。

$$F_n = \alpha \cdot \Delta_{actual} + \beta \tag{3}$$

ここで、 β はクーラント動圧による力と定義する。式(3)

より加工中のたわみ量 ϵ は砥石切れ味 α と工作物剛性 K を用いて式(4)で表される。

$$\epsilon = (\alpha \cdot \Delta_{\text{actual}} + \beta) / K \quad (4)$$

クーラント動圧による力 β は、切込み量によらず一定であると仮定する。砥石と工作物が接触する粗研開始時のたわみ量を基準として、粗研および微研での指令切込み量をそれぞれ Δ_r 、 Δ_f とすると、そのときのたわみ量 ϵ_r 、 ϵ_f はそれぞれ式(5)、式(6)で表される。

$$\epsilon_r = \alpha \cdot \Delta_r / K \quad (5)$$

$$\epsilon_f = \alpha \cdot \Delta_f / K \quad (6)$$

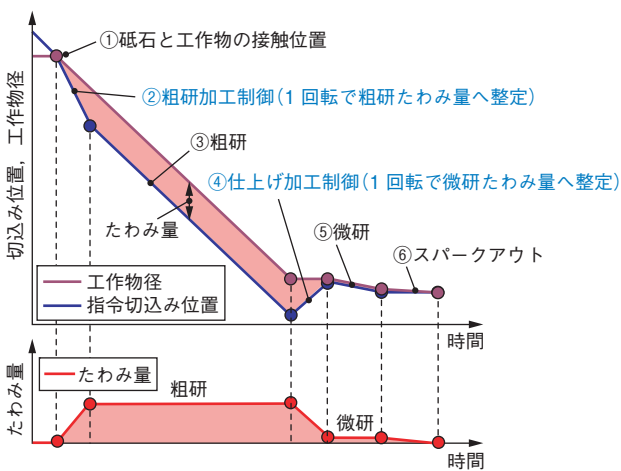


図6 たわみ補償研削制御ロジック

Feed control logic based on compensation of workpiece deflection

図中②の粗研加工制御では粗研の切込み量に切込み増加量分として、粗研たわみ量 ϵ_r を加えて、切込み増加時間は工作物1回転の時間で行う。また、図中④の仕上げ加工制御では ϵ_r と ϵ_f の差から微研指令切込み量を除いた量を切込み減少量として、切込み減少時間は工作物1回転の時間で行う。

3.3 開発システム

図7にたわみ補償研削制御システムの概要を示す。砥石台切込み駆動装置であるリニアモータの電流値を推力に換算して法線方向研削力 F_n を導出する。実切込み量 Δ_{actual} は、自動定寸装置からの出力を演算して導出する。研削力 F_n と実切込み量 Δ_{actual} の関係から、砥石切れ味 α とクーラント動圧による力 β を推定する。

運用上、1本目は従来研削サイクルで加工して研削力と実切込み量を演算し、砥石切れ味 α とクーラント動圧による力 β を推定する。2本目以降は開発研削サイクルで加工する。加工ごとに砥石切れ味 α を更新して次の加工へフィードバックすることにより、砥石切れ味の経時変化に対応している。

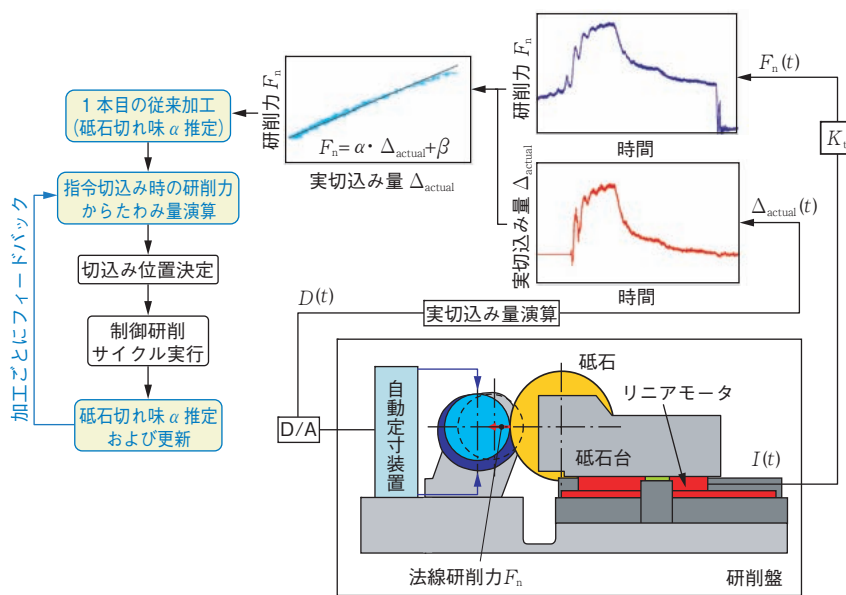


図7 たわみ補償研削制御システム

Grinding system based on compensation of workpiece deflection

4. 実験結果

本システムの基本性能を評価するため、既存の円筒研削盤に制御ロジックを搭載して、表2に示す加工条件で加工実験を行った。従来研削サイクルと開発研削サイクルで加工した時の実切込み量と加工時間の関係を、それぞれ図8と図9に示す。従来研削サイクルでは工作物剛性が低い場合、加工中のたわみ量が大きくなるため、精研時間を長くして微研切込み量に整定させることで、形状精度を達成している。一方、開発研削サイクルではたわみ補償制御により工作物1回転の時間で設定切込み量に整定している。また、加工時間が工作物剛性に依存せず、同程度の時間で加工可能なことが確認できた。今回評価した加工条件では従来研削サイクルと比べて加工時間を20%以上短縮できた。

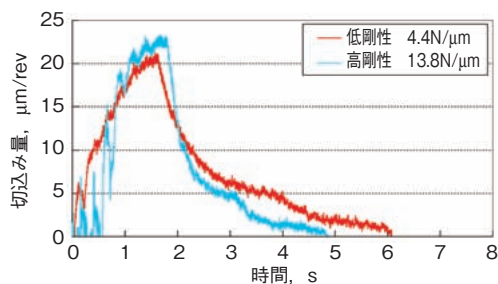


図8 切込み量の時間変化（従来研削サイクル）

Grinding experiment results (conventional grinding cycle)

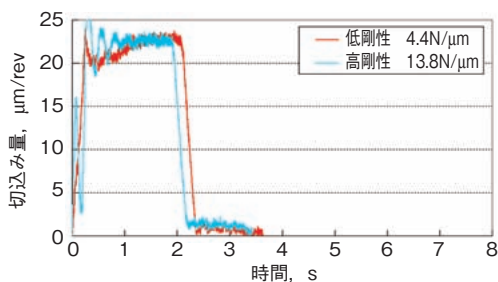


図9 切込み量の時間変化（開発研削サイクル）

Grinding experiment results (developed grinding cycle)

5. おわりに

加工中の工作物たわみ量を推定する制御ロジックを構築して切込み量を短時間で整定させることにより、加工時間の短縮と形状精度の安定性が両立可能な研削加工システムを開発した。加工実験によって、加工時間を従来に比べて20%以上短縮できることを示し、剛性の異なる工作物においても加工時間、形状精度が安定していることを確認した。

研削力による工作物たわみが加工時間および形状精度に与える影響を原理原則に基づいて考えることで、加工時間を大幅に短縮できる研削サイクルを実現した。今後も、商品競争力を向上させる研削加工技術を開発していきたい。

参考文献

- 1) 稲崎一郎：JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1004(2007)3.
- 2) 豊田工機研削盤グループ：知りたい外径研削作業，ジャパンマシニスト社，(1982)153.
- 3) 庄司克雄：研削加工学，養賢堂，(2004)88.

筆者



頼経昌史*

M. YORITSUNE



田野 誠**

M. TANO



酒井隼樹*

T. SAKAI



村上慎二*

S. MURAKAMI

* 研究開発本部 先端プロセス研究部

** 研究開発本部 先端プロセス研究部 博士（工学）