円筒研削加工中の砥石と工作物の接触による動剛性を考慮した加工シミュレーションに関する研究*

Processing Simulation of Dynamic Stiffness Caused by Contact between Grinding Wheel and Workpiece during Cylindrical Grinding

森　知也　T. MORI　小林久修　H. KOBAYASHI　久原淳司　J. KUHARA

The dynamic stiffness of workpieces during processing is a significant factor in grinding accuracy analysis. In this study, a non-contact measurement system based on electromagnetic excitation was developed to evaluate this dynamic stiffness. A grinding process simulation model incorporating contact dynamics was then constructed to predict grinding results. As a result of identifying the contact dynamics from the measured dynamic stiffness of the workpiece and applying them to the proposed simulation model, the grinding results of workpieces with varying stiffness levels were predicted with high accuracy. This is evidence that consideration of contact dynamics is essential for accurate prediction of grinding surface profiles of workpieces with low stiffness.

Key Words: grinding, dynamic stiffness, contact dynamics, roundness, simulation

1．はじめに

将来の労働力不足や熟練作業者の減少に対応するため，モノづくりのスマート化が求められている．円筒研削加工などの機械加工でスマート化すべき作業の一つとして加工条件の選定がある．現状の生産準備工程では，新規の工作物の加工条件を選定する際，加工精度の要求値を満たすまで加工条件の変更と試し加工を繰返しており，多くの時間と工数を要している．このような試行錯誤をなくし，作業工数を削減する手段として加工シミュレーションの活用がある．

当社は円筒研削加工時の工作物および砥石の動剛性に基づき，任意の加工条件で加工精度を算出するシミュレーション（以下，従来モデル）を過去に開発している[1]．この従来モデルは，剛性が高い工作物の加工精度を高精度に予測できるが，剛性が低くなるにつれて解析誤差が増大する課題があった．機械加工のスマート化を実現するには，工作物の剛性によらず加工精度を高精度に解析できるシミュレーションが必要である．

そこで本研究では，従来モデルで考慮されていなかった「接触動剛性」[2), 3)] に着目し，シミュレーションの高精度化に取り組んだ．なお本報では，互いに押し付けられる二つの物体の間に発生する接触剛性と接触減衰の総称を接触動剛性として定義する．

研削加工中の砥石と工作物の接触剛性に関する研究事例には，加工時の砥石の弾性変形量を推定した研究などがある[4]．しかし，接触減衰を含む砥石と工作物の接触動剛性を定量化した研究事例はほとんどない．さらに，研削加工中の接触動剛性は加工状態で変化すると考えられるため，定量化には加工中の工作物の動剛性の計測が重要である．しかし，円筒研削加工中の動剛性の計測手法に関する研究事例も，これまでほとんど報告されていない．

そこで本研究では，まず円筒研削加工中の工作物の動剛性を計測する手法を確立する．続いて，本手法に基づいて計測システムを構築し，複数の研削能率で動剛性計測試験を行い，それらの結果から接触動剛性を同定する．得られた接触動剛性は従来モデルにくわえ，高精度な研削加工結果予測モデル（以下，開発モデル）を確立する．最後に，剛性の異なる複数の工作物を研削加工し，真円度の実測値と，開発モデルおよび従来モデルの解析値との比較により，開発モデルの妥当性を検証する．

＊　本資料は，2025 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 p. 56 ～ 57，2025 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 p. 194 ～ 195 を基に作成した．

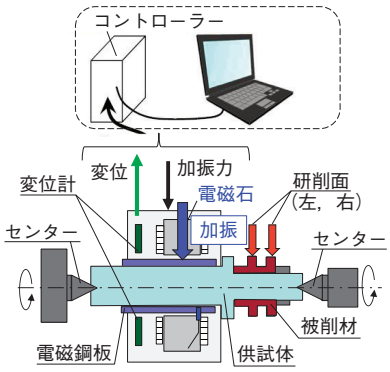
2. 円筒研削加工中の工作物動剛性計測手法の提案

機械構造物の動剛性の一般的な計測手法として，工作物に打撃をくわえ，その応答を測定する「ハンマリング試験」がある．しかし，加工中の工作物の動特性は加工中に工作物をハンマーで叩く必要があるため測定できない．

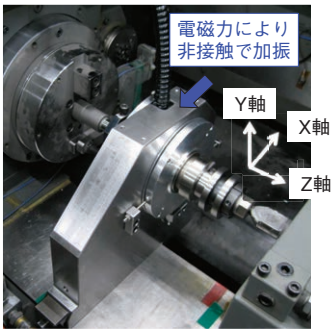
そこで，本研究では加工中の工作物の動剛性を安全かつハンマリング試験と同等の精度で計測するため，非接触での加振と応答性の計測が可能な動剛性計測システムを構築した．

2.1　動剛性計測システムの概要

動剛性計測システムの模式図および外観を**図 1** に示す．本システムは電磁石ユニットと変位計，コントローラー，工作物で構成されている．工作物は，円筒状の供試体に被削材と電磁鋼板を焼きばめで固定した．なお，後述する研削加工実験の効率化を考慮し，研削面は右端面から 33 mm の位置（研削面：右）と 51 mm の位置（研削面：左）の 2 箇所に設けた．これにより，1 回のセッティングで動剛性の異なる 2 箇所の計測が可能である．また，工作物の X 軸と Y 軸方向には非接触式変位計が設置されている．コントローラーからの指令で電磁石による加振力を発生させ，このときの加振力と工作物の変位を同時に計測し，加工中の動剛性を演算する．



（a）動剛性計測システムの模式図



（b）動剛性計測システムの外観

図 1　動剛性計測システムの模式図および外観
Schematic diagram and photograph of dynamic stiffness measurement system

動剛性計測システムの仕様を**表 1** に示す．加振力はハンマリング試験と同等の力を出力可能とした．また，研削加工結果は，特に 100 ～ 200 Hz 程度の砥石の回転周波数成分の振動が影響する．そのため，回転周波数の 5 次成分に相当する 1 kHz までの範囲を評価できるよう 0.64 ms 以下の加振時間でインパルス加振できる電磁石を選定した．変位計の応答周波数は，加振時の工作物の挙動を計測するため，3.5 kHz までの仕様とした．

表 1　動剛性計測システムの仕様
Specifications of dynamic stiffness measurement system

項目	仕様	
加振システム	磁気吸引力（加振力）	63 ～ 417 N
	加振時間	～ 0.64 ms
	動特性計測方法	インパルス加振応答
変位計	測定分解能	0.073 μm
	応答周波数	～ 3.5 kHz
	検出原理	インダクタンス式

2.2　動剛性計測システムの機能評価

構築した動剛性計測システムの妥当性を以下に述べる 2 段階の試験によって検証した．

まず，停止時の工作物の X 方向の動剛性を計測し，ハンマリング試験での計測結果と比較した．ハンマリング試験は，**図 1** に示す電磁力加振位置にて工作物をインパクトハンマーで打撃し，変位計設置位置にて圧電式加速度計で応答を計測した．その結果，**図 2** に示すとおり 450 Hz 付近に 1 次の固有モード（曲げモード）が確認でき，100 Hz から 1 000 Hz の範囲でハンマリング試験とおおむね同等のコンプライアンス（動剛性の逆数）となった．これにより，本計測システムは停止時の工作物の動剛性をハンマリング試験と同等の精度で計測可能であることが確認できた．

つぎに，回転時の測定の妥当性を確認するため，210 min^{-1} で回転中の動剛性を計測し，動剛性計測システムの停止時の計測結果と比較した．その結果，**図 3** に示すとおり 100 Hz から 1 000 Hz の範囲で停止時と

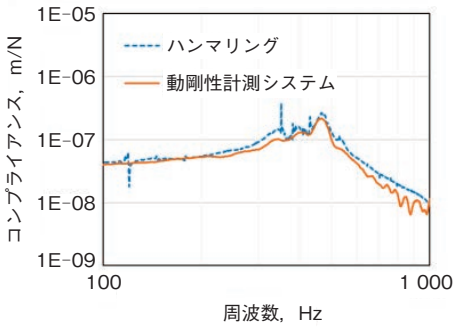


図2　動剛性計測システムとハンマリング試験との比較
Comparison of data between dynamic stiffness measurement system and hammering test

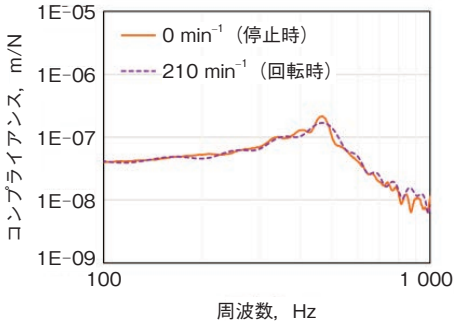


図3　工作物回転時と停止時の動剛性の比較
Comparison of dynamic stiffness between rotating and stationary workpieces

おおむね同等のコンプライアンスとなった．すなわち，本システムは回転中の工作物の動剛性も停止時と同等の精度で計測可能であることが示された．

以上より，本計測システムは，センター支持される工作物の円筒研削加工中の動剛性計測手法として妥当と考えられる．

3. 円筒研削加工中の工作物動剛性の計測実験および接触動剛性の同定

3.1　実験の方法と条件

研削加工中の工作物の動剛性は動剛性計測システムで計測した．主な実験条件を**表2**に示す．接触動剛性は加工状態で変化すると考えられるため，当社が鉄系材料のシャフトを研削する際，標準としている研削能率を参考に7水準を設定した．

動剛性は以下の手順で計測した．まず，切込み量 ϕ0.15 mm のプランジ研削中である工作物に 300 N でインパルス加振を行い，その応答を計測して動剛性を求める．これを10回繰返した平均値を1回の動剛性計測結果として3回計測した．

表2　実験条件
Experimental conditions

項目	条件
砥石	ビトリファイドボンド CBN ホイール ϕ120 × 25.5 mm #120 集中度 150
砥石周速度	80 m/s
被削材	ϕ60 × 8 mm，SUJ2 浸炭焼入れ材
主軸回転速度	120 min^{-1}
研削能率	0.1, 0.5, 0.9, 2.5, 4.0, 6.0, 9.0 mm^3/(mm·s)
研削方式	円筒プランジ研削方式
加振力	300 N

なお，計測前はツルーイングと予備加工によって研削抵抗の変動を± 3% 以内に安定させた．また，効率よくデータを取得するため，前述のとおり1回のセッティングで**図1**中の「研削面：左」および「研削面：右」の2箇所を加工した．

3.2　加工中の工作物動剛性測定の結果

円筒研削加工中に計測した工作物動剛性の例として，研削能率 4，0.9，0.1 mm^3/（mm·s）での結果を**図4**に示す．なお，比較のため非加工時の計測結果も示す．7条件の研削能率での計測から，1次の曲げモードの固有振動数とコンプライアンスを求めた結果を**図5**(a)，**図5**(b) に示す．

測定したコンプライアンスには，工作物系の動剛性に接触動剛性の影響が加わっており，研削能率が高いほど1次ピークの周波数は高く，コンプライアンスが向上する結果となった．これは，研削能率を高くすると砥石と工作物の接触面積が増えることに起因し，接触動剛性が

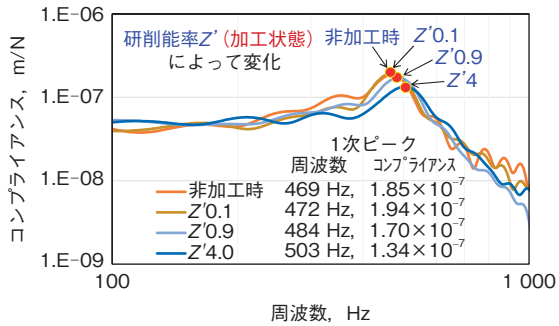
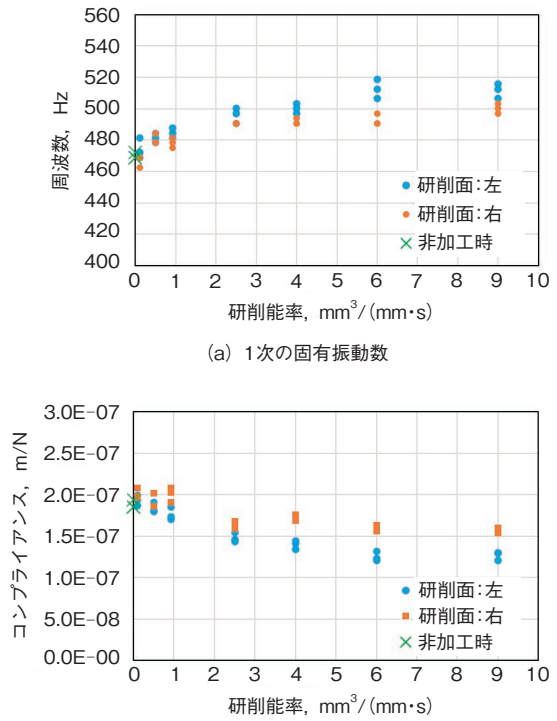


図4　工作物動剛性の計測結果の例
Examples of measurement results of workpiece dynamic stiffness



(a) 1次の固有振動数

(b) コンプライアンス

図5　研削能率に対する動特性
Dynamic characteristics related to grinding efficiency

増加したことを示唆している．

また，「研削面：左」は「研削面：右」よりも上記の傾向が大きい．これは，動剛性の計測位置に近い「研削面：左」の加工のほうが，接触動剛性の影響が大きいことを示唆している．

3.3　接触動剛性の同定

接触動剛性は以下の方法で同定した．まず，コンプライアンスは**図6**に示す工作物支持系モデルの2次元有限要素法で算出する．このとき，モデルの加工位置に接触剛性 K_{con} と接触減衰 C_{con} の値をくわえることで接触動剛性の影響を考慮した工作物のコンプライアンスが計算できる．

つぎに，加工中の工作物動剛性を各研削能率で計測する．本報では**3.2節**の計測結果を用いた．

最後に，工作物支持系モデルの加工位置にくわえる K_{con} と C_{con} の値を変化させ，工作物動剛性の解析値と実測値の差が小さくなるよう，各研削能率での K_{con} と C_{con} の値を同定する．

本手法で求めた接触剛性と接触減衰の数値を**表3**に示す．

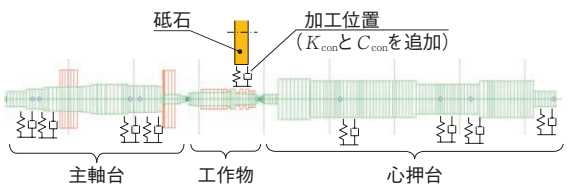


図6　工作物支持系モデル
Workpiece support system model

表3　接触動剛性の計算結果
Calculation results of contact dynamics

項目	研削能率 Z', mm³/(mm･s)						
	0.10	0.50	0.90	2.5	4.0	6.0	9.0
接触剛性 K_{con}, N/μm	7.0	9.0	10	12	14	16	18
接触減衰 C_{con}, Ns/m	100	100	250	1 000	1 500	1 800	1 900

さらに，次章で記述する工作物形状の算出に使用するため，**表3**の接触動剛性の値から各研削能率 Z' での接触動剛性の実験式を作成した．

4. 研削加工結果予測モデルの構築

4.1　研削加工結果予測モデルの計算手順

構築した研削加工結果予測モデルは，**図7**に示すとおり三つの計算モジュールで構成される．このうち，「位置偏差算出モジュール」に青枠で示す接触動剛性の要素を新たに追加した．

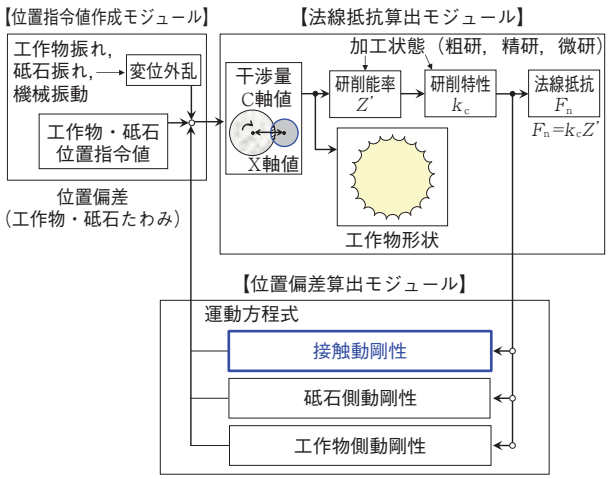


図7　研削加工結果予測モデルの計算手順
Calculation procedure of grinding process result prediction model

各モジュールにおける計算の詳細を説明する．まず，「位置指令値作成モジュール」では，工作物と砥石の位置の指令値に工作物・砥石振れなどの変位外乱および工作物・砥石たわみの位置偏差をくわえ，砥石と工作物の相対位置を計算する．つぎに，「法線抵抗算出モジュール」では工作物と砥石が干渉する部分の体積（以下，除去体積）を算出するとともに工作物の干渉する部分を除去し，工作物の形状を更新する．また，除去体積から研削能率 Z' を計算し，研削能率と法線抵抗 F_n の関係を示す研削特性によって法線抵抗を算出する．

最後に，「位置偏差算出モジュール」において法線抵抗の値を運動方程式に代入して得られた工作物と砥石のたわみから位置偏差を求め，「位置指令値作成モジュール」へフィードバックする．これらの一連の演算を研削工程終了まで計算周期 Δt で繰返し，最終的な工作物形状を求める．

4.2　研削加工結果予測モデルの運動方程式

本節では本モデルの位置偏差算出モジュールに追加した接触動剛性の要素について説明する．本モデルの運動方程式の模式図を**図8**に示す．

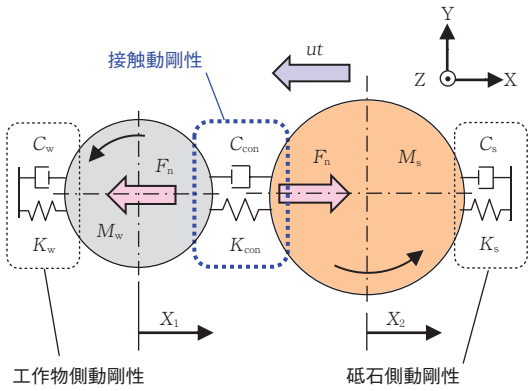


図8　運動方程式の模式図
Schematic diagram of equation of motion

従来モデルで工作物のたわみ X_1 と砥石のたわみ X_2 は，工作物側の等価質量 M_w，等価減衰 C_w，等価剛性 K_w，砥石側の等価質量 M_s，等価減衰 C_s，等価剛性 K_s で表される1自由度系の運動方程式によって算出している．これに対し，本研究では接触剛性 K_{con} と接触減衰 C_{con} によって発生する力も運動方程式へ追加した．接触剛性による力は接触剛性のたわみ X_{con} に比例し，法線抵抗の反力として作用すると考えると本モデルの運動方程式は式(1)で表される．

$$\begin{cases} M_w\ddot{X}_1+C_w\dot{X}_1+K_wX_1=-F_n+C_{con}\dot{X}_{con}+K_{con}X_{con} \\ M_s\ddot{X}_2+C_s\dot{X}_2+K_sX_2=F_n-C_{con}\dot{X}_{con}-K_{con}X_{con} \end{cases} \quad (1)$$

ここで，砥石の摩耗量を無視すると**図9**に示すとおり砥石の総送り量 ut は，工作物のたわみ X_1，砥石のたわみ X_2，工作物の半径の除去量 Δr，X_{con} の総和と定義できる．

したがって，X_{con} は**図8**に示すモデルの座標系のX方向の正の向きに留意して式(2)で表される．式(2)を式(1)に代入し，求める運動方程式は式(3)となる．

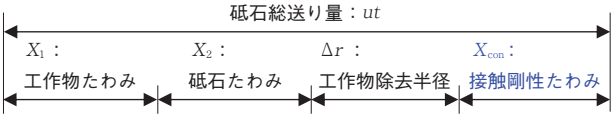


図9　砥石総送り量の分配
Distribution of total grinding wheel feed

$$X_{con}=-X_1+X_2-ut+\Delta r(t) \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_w\ddot{X}_1+C_w\dot{X}_1+K_wX_1=-F_n+C_{con}(-\dot{X}_1+\dot{X}_2-u+\Delta\dot{r}(t)) \\ \qquad\qquad +K_{con}(-X_1+X_2-ut+\Delta r(t)) \\ M_s\ddot{X}_2+C_s\dot{X}_2+K_sX_2=F_n-C_{con}(-\dot{X}_1+\dot{X}_2-u+\Delta\dot{r}(t)) \\ \qquad\qquad -K_{con}(-X_1+X_2-ut+\Delta r(t)) \end{cases} \quad (3)$$

5．研削加工結果予測モデルの検証

5.1　研削加工結果予測モデルの評価の方法と条件

開発モデルの妥当性を検証するため，研削加工実験を行い，研削後の工作物形状と真円度の実測値を開発モデルおよび従来モデルによる解析結果と比較した．

研削加工実験の実験条件を**表4**に示す．工作物は剛性の異なる3種類（以下，高剛性工作物，中剛性工作物，低剛性工作物）とし，研削条件は自動車用のシャフト系部品の標準的な研削条件とした．

表4　研削加工条件
Grinding process conditions

項目	条件
砥石	ビトリファイドボンドCBNホイール ϕ120 × 25.5 mm #120 集中度150
工作物材質	SUJ2 浸炭焼入れ材
工作物剛性	高剛性：28.9，中剛性：3.7，低剛性：1.0 N/μm
研削能率	粗研：9.0，精研：0.92，微研：0.1 mm^3/（mm・s）
砥石周速度	80 m/s（回転速度：12 687 min^{-1}）
主軸回転速度	120 min^{-1}
スパークアウト	2 s

また，本モデルの解析条件のうち，研削特性は**3.1節**で計測した実測値を使用した．すなわち，**図7**の変位外乱には工作物の振れ，砥石の振れ，機械振動をすべて考慮した．なお，工作物の振れ量はセンターで押される圧力で生じる工作物のたわみ量とし，工作物支持系モデルで算出した．工作物の振れ量の計算結果を**表5**に示す．

表5　工作物振れ量の計算結果
Calculation results of workpiece runout

パラメーター	工作物種類		
	高剛性工作物	中剛性工作物	低剛性工作物
工作物振れ量，μm	0.00	0.02	0.18

砥石の振れ量は別途実施した予備実験（砥石と工作物の回転速度比が整数倍の加工条件で高剛性工作物を研削）の結果より，0.4 μm と設定した．機械振動には非加工時の砥石軸振動の実測値を与えた．

5.2　研削加工結果予測モデルの評価の結果と考察

研削後の工作物形状および真円度の実測値と各解析モデルによる解析結果を**図10**に示す．

本モデルによる解析では，実測で観察される中剛性工作物と低剛性工作物の高周波成分に対応する凹凸状の形状を表現できている．これらの形状は接触動剛性をくわえない従来モデルによる解析では表れなかった．この結果，剛性の低い工作物の加工では，接触動剛性が加工形状の形成に影響することを示している．これにより，開発モデルは工作物剛性によらず，研削加工結果を高精度に解析できることを確認できた．

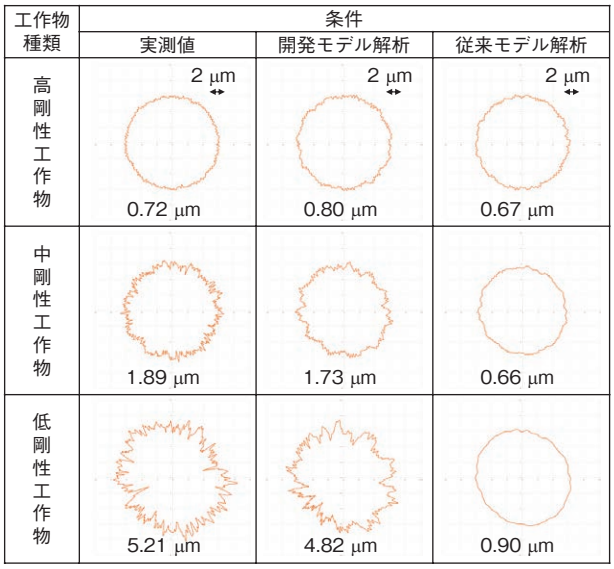


図10　工作物真円度・形状の比較
Comparison of workpiece roundness and profile

6. おわりに

本報では，砥石と工作物の接触動剛性の影響を含んだ円筒研削加工中の工作物の動剛性の計測システムを構築し，ハンマリング試験と同等の測定結果が得られることを示した．また，接触動剛性を考慮した研削加工結果予測モデルを構築し，複数の剛性の工作物について研削加工結果を高精度に解析できることを確認した．

本研究の内容が製造現場の生産性向上を実現することを期待する．また，今後は本研究の内容を発展させ，次世代のスマート化技術の創出へ取り組んでいく．

参考文献

1）T. ONOZAKI, A. SAITO, M. YORITSUNE：Simulation of Cylindrical Plunge Grinding Processes Considered Successive Change of Workpiece Shape, International Journal of Automation Technology, Vol. 5, No. 3 (2011) 433-438.

2）太田和秀，香川洸二，江藤俊夫，西川　進：ディスクブレーキ鳴きに関する研究（モード修正法によるシミュレーション計算および実験），日本機械学会論文集 C 編，50 巻，457 号 (1984) 1585-1593.

3）X. SHI, A. A. POLYCARPOU：Measurement and Modeling of Normal Contact Stiffness and Contact Damping at the Meso Scale, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 127, Issue1 (2005) 52-60.

4）竹澤佳介，山田高三，李　和樹，三浦浩一：研削加工中における砥石の接触剛性に関する一考察，2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2011) 525-526.

筆　者

森　知也*　T. MORI
小林久修*　H. KOBAYASHI
久原淳司*　J. KUHARA

*　イノベーション本部　成形プロセス研究部