加工プロセスに基づいた研削シミュレーション技術の開発

Development of Grinding Simulation based on Grinding Process

小野﨑　徹　T. ONOZAKI　齋藤　明　A. SAITO

This paper describes grinding simulation technology to establish the generating mechanism of chatter and grinding burn. This technology is consisted of two modules based on grinding process. The chatter prediction module can accurately predict chatter by analyzing the grinding force from the interference area of wheel and workpiece. The grinding burn prediction module can predict burn by calculating the distribution factor of grinding heat in detail. The validity of both modules is verified by comparing the simulated results to the experimental ones.

Key Words: grinding simulation, chatter, grinding burn, grinding force, distribution factor of grinding heat

1．はじめに

自動車部品用研削盤や研削加工をした多くの自動車部品などを製造している当社においては，研削加工におけるびびり（振幅の大小を問わず好ましくない結果をもたらす振動）や研削焼け（研削熱に起因する金属組織変化）に代表される品質異常を未然に防止することが，高品質，短納期，低コストを実現するために重要である．この観点からは，まず品質異常の発生メカニズムを解明する必要があり，加工プロセスに基づいてびびりや研削焼けを予測できる研削シミュレーション技術の開発が重要になる．

びびり予測に関する従来の研究としては，砥粒切込み量に基づいて近似的に研削抵抗を見積もり，びびりを予測したもの[1)～3)]がある．また，研削焼け予測に関する従来の研究としては，工作物に対する研削熱の分配割合に着目し，研削焼けに密接に関係する工作物温度を求めたもの[4)～7)]，クーラントの冷却効果が研削焼けに及ぼす影響を実験的に検討したもの[8)～10)]がある．本研究においては，びびりおよび研削焼けを詳細に検討できるように，従来の研究を参考にしてそれぞれを精度良く求めることを考えた．その特長は，砥石と工作物間の正確

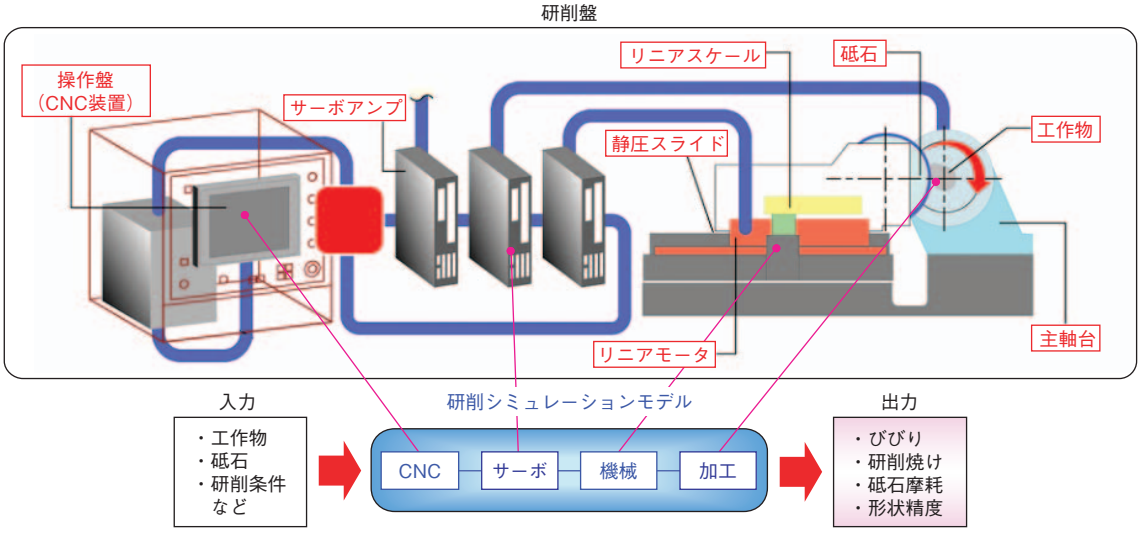

図1　研削盤トータルシミュレータの概要
Schematic view of total simulator for grinding machine

な干渉量から研削抵抗を求め，びびりを精度良く予測すること，クーラントの冷却効果を考慮して研削熱の詳細な分配割合を求め，研削焼けを予測すること，の二点である．

当社は，研削加工品の形状精度を事前予測することを目的に，**図1**に示す研削盤の主要4要素(CNC，サーボ，機械，加工）をモデル化し，さらにそれらを連成した研削盤トータルシミュレータを開発してきた．本報で述べる研削シミュレーション技術は，加工プロセスに基づいて加工モデルを詳細化することで，びびりや研削焼けという重要な加工結果を予測し，その発生メカニズムの解明に役立てるものである．この技術は，びびり予測モジュールと研削焼け予測モジュールの二つで構成され，それぞれ砥石と工作物間の干渉量と研削抵抗の関係，研削熱の詳細な分配割合を考慮して理論を構築している．また，これらの予測モジュールを用いて得た解析結果と実験結果とを比較・検討することで，その妥当性を検証する．

2. 研削における加工プロセス

2.1 加工モデル

研削における加工プロセスを**図2**に示す．加工プロセスを構成する要素は，砥粒の集合としての砥石，工作物，切粉およびクーラントの四つである．

まず，研削を微視的に見ると，砥粒と工作物が干渉することで単粒切削が起こっており，その結果として単粒切削による抵抗と熱が発生していると考えられる．次に，研削を単粒切削の集合と考えて巨視的に見ると，砥石と工作物の干渉の結果として研削抵抗，研削熱が発生し，工作物にびびりや研削焼けが生じると予想される．さらに，砥粒や砥石についても，その状態に変化が起こると考えられる．この加工プロセスを考慮し，びびりおよび研削焼けの観点からまとめた加工モデルを**図3**に示す．次節より，図中のびびり予測モジュールおよび研削焼け予測モジュールの詳細を述べる．

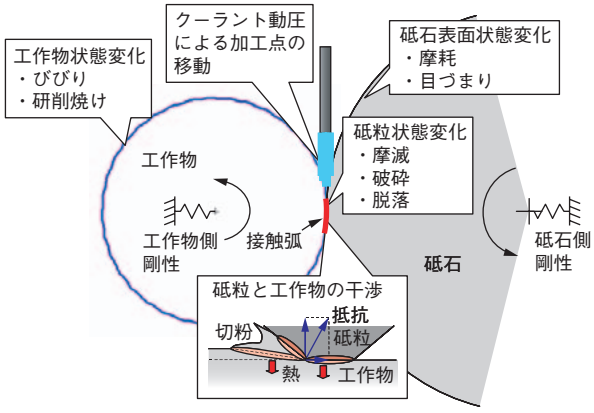

図2 研削における加工プロセス
Machining process of grinding

2.2 びびり予測モジュール

2.2.1 びびりの定義

本報におけるびびりの定義は，“振幅の大小を問わず好ましくない結果をもたらす振動”とする．これに属する振動は，強制振動と自励振動に大別される．強制振動は，主に砥石のアンバランスや偏心，機械の固有振動により生じるもので，自励振動は，系が不安定な状態になった場合に生じるものである．これは，不均一な摩耗や目づまりによる砥石表面のうねり，および砥石と工作物の干渉結果として生じる工作物表面のうねりに起因する研削抵抗の変動が主な要因である．

2.2.2 着眼点

びびりを検討する上で重要なことは，砥石と工作物の干渉量の時間変動に起因する研削抵抗の変動を考慮することである．これにより，研削抵抗の変動と砥石および工作物側の剛性の関係から，機械の固有振動などに起因する強制振動や，系の不安定性に起因する自励振動が検討可能となる．

この点を考慮し，ここでは，砥石と工作物間の干渉量の時間変動に着眼した．なお，干渉量の時間変動は，砥石と工作物の形状を逐次考慮しながら幾何学計算により求める手順を考えた．

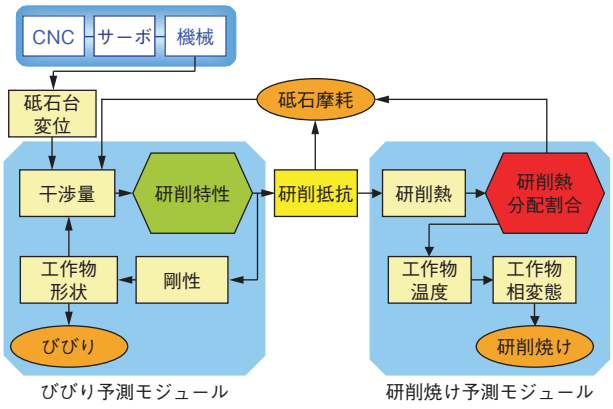

図3 加工モデル
Machining model of grinding

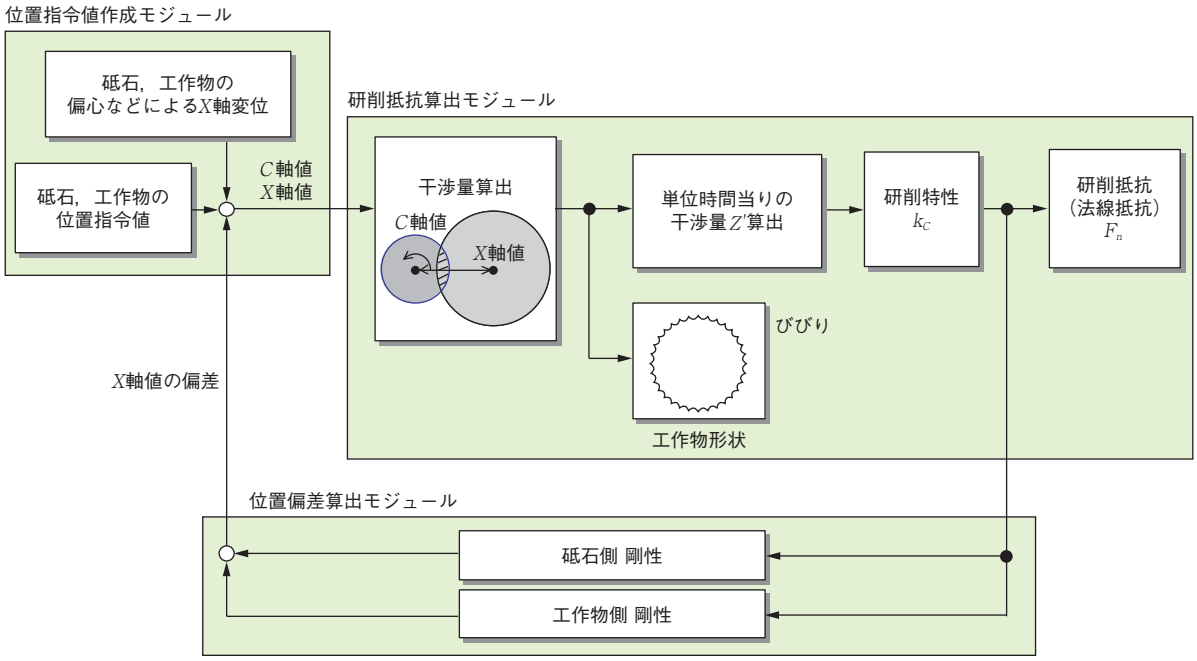

図4　びびりの予測手順
Predicting procedure of chatter

2.2.3　びびりの予測手順

前項の考えをもとに構築したびびりの予測手順を**図4**に示す．ここでは，各手順を機能毎に分類して三つのモジュールにまとめた．以下，各モジュールの機能について説明し，びびり予測の具体的な計算手法を述べる．なお，本予測手順はいかなる研削方式にも対応するものではあるが，ここでは最も基本的な円筒プランジ研削を対象とする．

①位置指令値作成モジュール

砥石および工作物の位置指令値より，時刻 t における工作物の回転角度（以下，C 軸値とする），砥石と工作物の心間距離（以下，X 軸値とする）を計算する．X 軸値が，砥石あるいは工作物の偏心などにより周期的に振動することを考慮すると，C 軸値と X 軸値は次式で表される．

$$\begin{cases} C = \omega t \\ X = X_0 - \dfrac{v_X t}{2} + \sum_{i=1}^{N} A_i \sin(2\pi f_i t) \end{cases} \quad (1)$$

ω：工作物の角速度，X_0：加工開始位置における X 軸値，v_X：砥石送り速度，A_i：偏心などに起因する振動片振幅，N：考慮する最大次数，f_i：振動周波数

②研削抵抗算出モジュール

①で算出した C 軸値，X 軸値の場合において，砥石と工作物の一般的な位置関係を**図5**に示す．図中，砥石と工作物が重なる箇所が干渉部分である．この面積を幾何学的に計算した後，単位時間当たりの干渉量 Z'（以下，研削能率という）を求める．算出した研削能率と研削特性の関係から，研削抵抗は次式で表される．

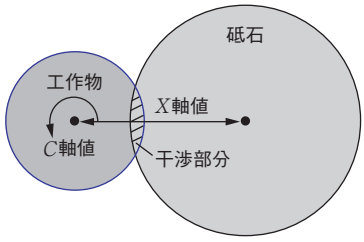

図5　砥石と工作物の位置関係
Geometrical relationship between wheel and workpiece

$$F_n = k_C Z' \quad (2)$$

F_n：法線抵抗，k_C：研削能率に対する法線抵抗の傾き

なお，k_C は研削特性を意味する．

③位置偏差算出モジュール

②で算出した法線抵抗と，砥石側および工作物側の剛性を考慮し，X 軸値の偏差（位置指令値と実位置との差）を求める．次に，X 軸値の偏差を，時刻 $t + \Delta t$ における X 軸値に加算し，研削抵抗算出モジュールに引き渡す．ここで，Δt は計算周期を表す．

①～③のモジュールを研削工程終了まで繰り返すことで，びびりなどの特徴的な工作物形状の予測を可能とする．

2.3　研削焼け予測モジュール

2.3.1　研削焼けの定義

本報における研削焼けの定義は，“研削熱に起因する金属組織変化”とする．この例としては，焼入れ鋼を研削した際，研削熱により高温になった工作物表面近傍に，再焼入れ層や焼戻し層が生じることが挙げられる．また，生材を研削した際，焼入れ層が生じることも研削焼けの一つである．

2.3.2　着眼点

研削焼けの発生に関しては，工作物温度が主な要因と考えられるため，これを予測することが重要である．また，工作物温度の理論設定のためには，まず研削熱の分配割合を決定する必要がある．これらの観点から，ここでは，研削熱の分配割合に着眼した．

2.3.3　工作物温度の予測理論

まず，研削熱の分配割合を検討するため，研削熱の授受を**図6**のようにモデル化した．砥石と工作物の干渉により生じた研削熱は，接触弧内において，砥石･工作物･切粉・クーラントに分配される．工作物に分配された研削熱が工作物内部に熱伝導することで，工作物温度は上昇する．なお，クーラントの冷却効果により，工作物表面からは熱が奪われることを考慮しなければならない．

①研削熱の分配割合

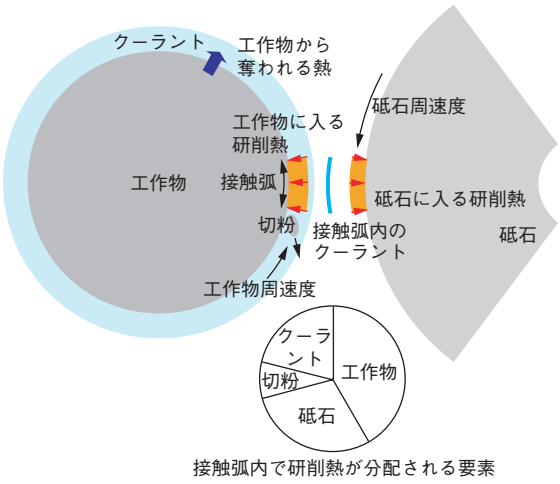

図6　研削熱の授受モデル
Transfer model of grinding heat

図7に示すように研削を微視的に見ると（砥粒研削点という），研削熱は，せん断面における塑性変形，すくい面における砥粒と切粉間の摩擦，さらに逃げ面における砥粒と工作物間の摩擦により生じると考えられる．特に，工作物への研削熱の分配割合は，せん断面および逃げ面における熱の授受を検討することで決定できる．Jaeger の移動熱源の理論[11] を用いると，せん断面における工作物への熱の分配割合 R_{w1} は次式で表される．

$$R_{w1}=\frac{1}{1+0.752\sqrt{\dfrac{g_m(V+v)f_1(\alpha,\phi)}{K_w}}} \tag{3}$$

K_w：工作物の温度伝達率，$f_1(\alpha, \phi)$：α，ϕ で定義される関数

また，逃げ面における工作物への熱の分配割合 R_{w2} は次式[4] で表される．

$$R_{w2}=\frac{1}{1+1.590\dfrac{k_g}{k_w\sqrt{\dfrac{(V+v)l_g}{K_w}}}} \tag{4}$$

k_w：工作物の熱伝導率，k_g：砥粒の熱伝導率

②工作物温度

工作物温度の理論設定として，高温・微小である砥粒研削点の温度が瞬時に周囲に伝導されて巨視的温度分布を形成すると考え，工作物温度を接触弧近傍の温度分布として検討する．先に示した工作物への研削熱の分配割合を考慮し，さらに，クーラントによる冷却を考慮した移動熱源の理論を用いると，位置（X，Z）における工作物の温度 θ_w（X，Z）は次式[12] で表される．

α：砥粒すくい角，ϕ：せん断角，g_m：最大砥粒切込み深さ，
l_g：逃げ面の長さ，V：砥石周速度，v：工作物周速度

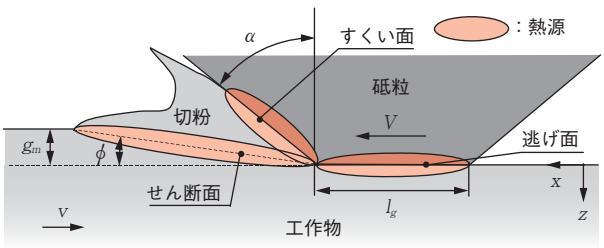

図7　砥粒研削点における単粒切削モデル
Machining model with single grain at grinding point

$$\theta_w(X,\ Z)=\frac{2q_wK_w}{\pi k_w v}\left\{\int_{X-L}^{X+L}e^{-u}\mathrm{K}_0\left[\sqrt{Z^2+u^2}\right]du\right.$$
$$-\pi He^{HZ}\int_0^{\infty}\tau e^{H^2\tau^2}\mathrm{erfc}\left[\frac{Z}{2\tau}+H\tau\right]\left[\mathrm{erf}\left[\frac{X+L}{2\tau}+\tau\right]\right.$$
$$\left.\left.-\mathrm{erf}\left[\frac{X-L}{2\tau}+\tau\right]\right]d\tau\right\}+\theta_{w0}(X,\ Z) \quad (5)$$

$$q_w=\frac{R_wF_t(V+v)}{l_cb} \quad (6)$$

K_0：第 2 種 0 次の修正ベッセル関数，erf：誤差関数，erfc：補誤差関数，$\theta_{w0}(X,\ Z)$：工作物の初期温度，q_w：工作物に対する熱流束，F_t：接線抵抗，l_c：接触弧長，b：工作物の幅

また，X，Z，L，H は次式で表される無次元量である．

$$X=\frac{vx}{2K_w},\ Z=\frac{vz}{2K_w},\ L=\frac{vl_c}{4K_w},\ H=\frac{2K_wh}{k_wv} \quad (7)$$

h：クーラントの対流熱伝達係数

なお，工作物への研削熱の分配割合 R_w は次式で表される．

$$R_w=\frac{R_{w1}f_2(F_{t,c},\ F_{n,c},\ \alpha,\ \phi)+R_{w2}F_{t,sl}}{F_t} \quad (8)$$

$F_{n,\ c}$，$F_{t,\ c}$：切粉部における法線抵抗および接線抵抗

$f_2(F_{t,\ c},\ F_{n,\ c},\ \alpha,\ \phi)$：$F_{t,\ c}$，$F_{n,\ c}$，$\alpha$，$\phi$ で定義される関数，$F_{t,\ sl}$：逃げ面における接線抵抗

2.3.4　研削焼けの予測手順

図6に示した工作物の状態と，工作物温度の予測理論を考慮した研削焼けの予測手順を**図8**に示す．ここでは，手順を機能毎に分類し，図中に示す二つのモジュールにまとめた．以下，各モジュールの機能について説明し，研削焼け予測の具体的な計算手法を述べる．

①温度予測モジュール

まず，F_t と（$V+v$）を乗算して研削熱を計算する．次に，式(8)を用いて工作物への研削熱の分配割合 R_w を計算する．さらに伝熱解析として，式(5)を用いて工作物の温度分布 $\theta_w(X,\ Z)$ を求める．その結果を用いて，工作物表面からの深さ Z における最高温度 $\theta_{w,\max}(Z)$ を求める．

②研削焼け予測モジュール

①で求めた工作物の深さと最高温度の関係から，以下の条件を満足する Z を求め，研削焼けの深さを計算する．

焼入れ，再焼入れの深さ：Z_1

Z_1：$\theta_{w,\ \max}(Z)>\theta_1$ を満足する最大の Z

焼戻しの深さ：Z_2

Z_2：$\theta_{w,\ \max}(Z)>\theta_2$ を満足する最大の Z

θ_1，θ_2：工作物の金属組織特性から決まる温度

さらに，深さに対する各相組織の体積比率などを求めたい場合には，詳細な相変態解析が必要になる．

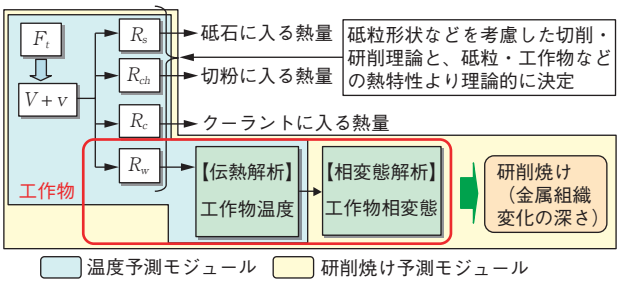

図8　研削焼けの予測手順
Predicting procedure of grinding burn

3. 結果および考察

本章においては，びびり予測モジュールと研削焼け予測モジュールについて，その妥当性を個別に検討した結果を述べる．

3.1　びびり予測結果

びびり予測モジュールの検証を目的として，びびりに関する解析結果と実験結果を比較する．検証のための研削条件を**表1**に示す．

まず，研削中における切込み残り量（工作物径と目標工作物径の差）の変化を**図9**に示す．解析値と実験値

表1　びびり予測における研削条件
Grinding conditions in predicting chatter

研削方式	1 速円筒プランジ研削	
研削能率，$mm^3/(mm\cdot s)$	1	
砥石	仕様	CBN 砥石 #120 集中度 200
	径，mm	160
	周速度，m/s	119
工作物	種類	SCr420 浸炭焼入れ鋼 HRC64
	径，mm	32
	周速度，m/s	0.50
	切込み量，mm	ϕ0.3
クーラント	仕様	エマルションタイプ 水溶性クーラント
	流量，L/min	30

はよく一致しており，工作物形状の履歴を高精度に予測できたことが分かる．次に，研削後の工作物形状の周波数分析結果を**図10**に示す．工作物に生じたびびりの傾向は解析値と実験値でほぼ一致していることが確認できる．なお，このときの工作物真円度は，解析値：0.40μm，実験値：0.54μm であり，真円度も比較的精度良く予測できたことが分かる．以上の結果より，びびり予測モジュールの妥当性を検証できた．

3.2　研削焼け予測結果

研削焼け予測モジュールの検証を目的として，研削焼けに関する解析結果と実験結果を比較する．検証のための研削条件を**表2**に示す．解析に必要な砥粒すくい角や逃げ面の長さ，せん断角などについては，砥石表面の観察結果などをもとに工夫して見積もった．

まず，再焼入れ発生の有無に関する比較結果を**表3**に示す．解析結果と実験結果が定性的によく一致することが分かる．次に，工作物表面からの深さに対する最高温度の予測結果を**図11**に示す．工作物周速度が速いと，深さに対する最高温度を抑制でき，研削焼けを起きにくくできると予想される．これは，研削の一般的な知見として，“同体積を同時間で研削する場合は，速く薄く研削すると焼けにくい”，という経験則と定性的に一致する．以上の結果より，研削焼け予測モジュールの定性的な妥当性を検証できた．今後は定量評価も実施予定である．

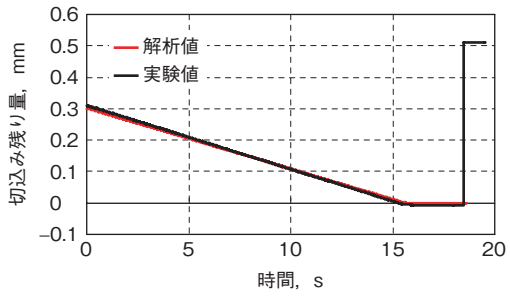

図9　切込み残り量の解析値と実験値の比較結果
Comparison results between predicted and experimental value of residual cutting depth

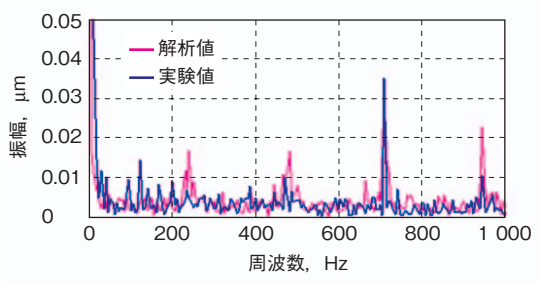

図10　工作物形状の周波数分析における解析値と実験値の比較結果
Comparison results between predicted and experimental value of frequency analysis of workpiece shape

4．おわりに

加工プロセスに基づいた研削シミュレーション技術の開発を狙いとして，びびり予測モジュールおよび研削焼け予測モジュールを構築した．また，それぞれの予測モジュールについて，解析値と実験値を比較・検討するこ

表2　研削焼け予測における研削条件
Grinding conditions in predicting grinding burn

研削方式	1 速円筒プランジ研削	
研削能率，$mm^3/(mm \cdot s)$	5，12，20	
砥石	仕様	CBN 砥石 #120 集中度 200
	径，mm	400
	周速度，m/s	120
工作物	種類	SCM415H 浸炭焼入れ鋼 HRC60
	径，mm	68
	周速度，m/s	0.53，1.77
クーラント	仕様	エマルションタイプ 水溶性クーラント
	流量，L/min	30

表3　再焼入れにおける解析と実験の比較結果
Comparison results between prediction and experiment in re-quenching

工作物周速度，m/s	0.53			1.77		
研削能率，$mm^3/(mm \cdot s)$	5	12	20	5	12	20
解析	無	無	有	無	無	有（微小）
実験	無	無	有	無	無	無

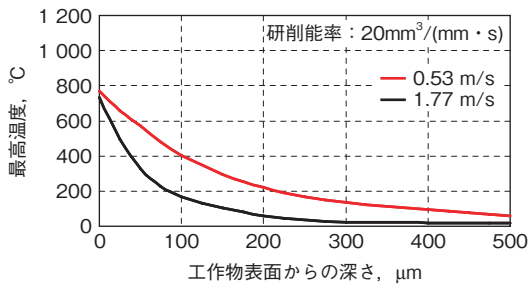

図11　工作物における最高温度の予測結果
Prediction results of maximum temperature of workpiece

とで，その妥当性を検証した．その結果，二つの予測モジュールは，びびりおよび研削焼けに関して定性的な傾向の把握が可能であることを確認した．このことから，本技術は，びびりおよび研削焼けの発生メカニズムの解明に有効であることが分かった．

今後は，びびりおよび研削焼けの定量予測を目指し，モジュールの解析精度向上に取り組む．また，開発した研削シミュレーション技術を用いて，社内設備における研削条件の最適化，研削条件選定の効率化，研削盤開発の効率化に取り組む予定である．

参考文献

1）星鐵太郎：精密機械，vol. 49，no. 12(1983)1680.
2）宮下政和：加工技術データファイル，vol. 5，no. 7.
3）I. Inasaki: Annals of the CIRP, vol. 50, no. 2(2001) 515.
4）高沢孝哉：精密機械，vol. 30，no. 12(1964)914.
5）S. Malkin: ASME J. Engineering for Industry, vol. 96, no. 4(1974)1177.
6）S. Malkin: ASME J. Engineering for Industry, vol. 96, no. 4(1974)1184.
7）S. Malkin: Annals of the CIRP, vol. 27, no. 1(1978) 233.
8）安井平司：精密機械，vol. 48，no. 5(1982)609.
9）安井平司：精密工学会誌，vol. 56，no. 3(1990)521.
10）安井平司：精密工学会誌，vol. 56，no. 11(1990) 2087.
11）J. C. Jaeger: Proceedings of Royal Society of New South Wales, vol. 76(1942)203.
12）N. R. DesRuisseaux, R. D. Zerkle: ASME J. Heat Transfer, vol. 92, no. 3(1970)456.

筆　者


小野﨑徹*　T. ONOZAKI
齋藤　明**　A. SAITO

*　研究開発センター　機械システム研究部
　　工学博士
**　研究開発センター　機械システム研究部