研削加工のスキルフリー化に向けて*

Toward Skill-Free Grinding

稲崎一郎**

Ichiro INASAKI

Key words grinding, modeling, simulation, monitoring, intelligent data base

1. はじめに

研削加工技術の歴史は古いが、今日でも高硬度難削材料の精密加工技術として極めて重要な位置を占めている。しかしながら、プロセスを成功させるには依然として多くの知識と経験が必要な難しい加工作業である。

研削プロセスの機構を明らかにしようとする研究がこれまで数多く行われ、入力である加工条件と出力である加工結果との因果関係は、少なくとも定性的にはかなりの程度まで明らかにされている。しかし残念ながら、これらの成果が実際の加工現場で有効に利用されているとは言いがたい。1983年のCIRP (International Academy for Production Engineering) 総会においてR.L. Keggは、「研削加工はこれまで多くの研究がなされているが、依然として“black art”である」と苦言を呈した¹⁾。すなわち、要求される加工結果を達成するための加工条件設定は、練技能者のスキルに依存せざるを得ないことを指摘している。特に少ロット生産においては、適切な加工条件を設定するために要する時間が極めて大きな割合を占めていると述べている。

しかし、今日ではセンサと計算機の発達によって研削プロセスの高度な監視も可能となっており、技能者への依存度低減のために利用できる技術環境は当時とはかなり違っている。また、今日の熟練技能者減少という社会環境は、技能の的確な伝承と技能者への依存度を低減することを強く要請している。

2. 研削プロセスのモデル化とシミュレーション

研削加工の遂行にあたって、技能者の知識と経験に大きく依存せざるを得ないのは、

- ・ 要求される加工結果を達成するための加工条件の探索（研削砥石の選定とドレッシング条件の設定を含む）と
- ・ 加工中のトラブル発生に対する適切な対処

である。試し研削を行わずに迅速に条件探索を行うには、プロセスのモデル化とそれを利用したシミュレーションが計算機を使用して可能でなければならない。

研削プロセスのモデル化とシミュレーションに関してはこれまでに多くの研究成果が発表されており、それらは文献2)、3)に総括されている。プロセスのモデル化は、実際のプロセスの入出力関係の特徴抽出と因果関係の構成、モデルの評価と改善によって行われ、次にモデルを利用したシミュレーションによって、目的を達成するために必要な入力の探索、さらには実際のプロセスの最適化に生かされる。入力は研削砥石の作業面性状、研削速度、切込深さなどの加工条件で、知りたい出力は研削抵抗、研削温度などのプロセス情報と加工面粗さ、加工変質層などの加工物品質に関するものである。

プロセスのモデル化手法は大きく次の3つに分類される。すなわち、

- ・ 砥粒による材料除去機構の理論的な解析に立脚
- ・ 幾何学的考察に基づいて構成された回帰多項式の係数と指数の値を実験的に求める
- ・ ニューラルネットワークやファジー理論などのソフトコンピューティング手法の応用⁴⁾

理論的な解析に立脚する方法は、見通しの良いモデルを得ることができてそれを各種の研削プロセスにある程度拡張して適用することを可能とするが、定量的な入出力の因果関係を知ることは困難である。ただ、今日では計算機と数値解析技術の発達によって、有限要素法や分子動力学シミュレーションも利用することができ、定量的な議論も可能になりつつある。

*原稿受付 平成21年4月2日

**正会員 中部大学総合工学研究所（愛知県春日井市松本町1200）

稲崎一郎

1969年慶應義塾大学大学院博士課程修了。工学博士。1984年慶應義塾大学理工学部教授。1998年米国カリフォルニア大学バークレイ校客員教授。1999年ハノーバ大学名誉博士。2004年CIRP会長。2005年SME:F.W. Taylor

Research Medal。2005年学術会議会員。2007年慶應義塾大学名誉教授、中部大学教授、総合工学研究所所長。研究分野は機械加工プロセス、工作機械。

回帰多項式近似によるモデル化は実用的ではある。しかし、実験的に求めた係数や指数の値にかなりのばらつきが避けられず、現場で広く利用する上で障害となっている。回帰式に含まれる定数や指数の値は、使用する砥石、研削液、研削盤の違いによって異なってくる。したがって、それぞれの加工現場で試し研削を行って数値を求めることが必要となり、次章で述べるプロセスの監視技術が重要となってくる。

3番目の方法はプロセスの大きな非線形性なども考慮に入れることができて実用性は高いと考えられるが、プロセスをブラックボックス化することになる。

いずれの方法においても研削液の種類や供給量の影響を考慮することができない場合がほとんどであり、また研削時間の経過によるプロセス挙動の変化を広く模擬することも現状では困難である。

3. 研削プロセスの監視技術

3.1 監視対象と監視項目

熟練作業者は自分の視覚、聴覚、触覚、嗅覚などの感覚器官と、これまでに学習した経験を駆使してトラブルの検出と回避、そして研削プロセスの条件設定を行っている。研削加工のスキルフリー化を進めるには、これら器官に代わるセンサと人間の脳に代わる計算機を組み合わせた監視システムを開発することが必要となる。研削プロセスの監視技術に関しては、文献5)、6)に幅広い展望がなされている。

研削における監視システムの役割は次のように要約され

る(図1)。

- ・ 研削中に発生する異常状態(主としてびびり振動、研削焼け等の砥石寿命)の検出
- ・ 研削条件を最適化するためのプロセス情報獲得
- ・ 加工条件設定に必要なデータベースを作成するための情報獲得

研削プロセスを成功させるには、事前に行われるツルーニングやドレッシングプロセスの監視も必須である。これら作業の監視項目は図2のようにまとめられる。砥粒砥石のドレッシングに関しては、砥石に損傷を与えないための接触検知と、高価な砥粒の消費を最少に抑えるためのドレッシング終了判定を行うことが重要である。研削プロセスへの影響を推定するために、ドレッシング後の砥石作業面の形状や切刃分布分をポストプロセスで計測する技術に関しても多く方法が提案されている⁶⁾。

研削プロセスの監視では、びびり振動と研削焼けのトラブル検出が重要で、砥石寿命の判定基準ともなる。これらはインプロセスで検知されることが必要である。上記トラブルの検出に役立つ実用的な監視項目は研削動力、研削抵抗、研削温度、アコースティックエミッション(AE)などである。加工出力としての加工物の品質は、ポストプロセスで計測されているのが大部分である。データバンク作成のためであればポストプロセス計測で十分である。研削サイクル時間の短縮などを目的としたプロセス最適化のための加工条件の修正は、各加工物の加工終了時ごとに行えば良い。

3.2 センサーフュージョン

研削プロセスの監視に使用されるセンサは、加工環境に対してロバストで、信頼性が高く、加えて小型で安価であることが必要である。今日では種々のセンサが開発されており、研削機構の解明研究に有効に使用しうるものは多い。しかし、費用と作業の邪魔にならないという観点から、実作業に適用可能と考えられるものは限られている。例えば、動力センサ、研削抵抗センサ、AEセンサなどが実用的である。動力センサと研削抵抗センサは、これらの物理量が材料除去プロセスに密接に関連しているのでその同定には最適であり、AEセンサは接触検知に有効である。これらセンサの取り付け位置に関しては、材料除去プロセスに最も近接しているという点で、砥石内にセンサを組み込むことが提案されている⁷⁾。このようなセンサの内蔵は、超砥粒砥石のようにそのコア部分が金属や複合材料等で製造されている場合に可能である。

プロセスの同定と異常検知を信頼性高く行うには単一のセンサでは困難な場合もあり、複数のセンサを同時に使用する戦略(センサーフュージョン)も有効である。実際、熟練技能者は、複数の感覚器官を使用して状況判断をしていると考えられる。このような複数センサの統合は、監視システムの信頼性と適応性を向上する上で有効であると考えられるが、いたずらに複雑にならない範囲内で行われるべきである。センサーフュージョンによって監視システム

図1 研削加工用監視システムの役割

図2 ドレッシングと研削プロセスの監視項目

の異常監視に対する信頼度は向上するが、逆にプロセスが正常であっても異常と誤認してしまう確率は上昇してしまう場合があることに注意が必要である。またセンサの複合化は、監視システムの導入費用を上昇させる。したがって、異常を検知できなかった場合の損失とのトレードオフである。監視システムの信頼度と適応性の向上が現場からの最も強い要望である。

4. ドレッシング/研削プロセス監視の例

実加工への応用可能性が高いと考えられる AE センサと砥石軸消費動力センサを利用して、以下のようなドレッシングと研削プロセスの監視が可能となる。

4.1 ドレッシングプロセスの監視

超砥粒砥石の使用に際しては、ドレッシングプロセスの監視が極めて重要である。監視すべき項目は、ドレッサーと砥石の接触検知、砥石形状の確認と、加えて可能であれば砥石作業面の切刃分布分状態である。これらの監視を行うには、高速応答性の点から AE センサが最も適していると考えられる。ドレッシングプロセスの監視と研削プロセスの監視に併用できるという理由で、砥石内に AE センサを内蔵させることができれば好都合である。ただし、回転軸から信号を取り出すため、スリッピングの使用や無線での送信や流体を媒体とした送信手段が必要となる。

4.2 びびり振動の検知

びびり振動の検知は、安定な加工条件を探索するためと砥石の寿命判定のために必要である。AE 生信号を包絡線検波した波形を利用して振動の検出が可能である⁷⁾。発生するびびりの振動数は、機械系の振動特性によって異なり事前には不明なので、正常時と振動発生時のパワースペクトラムの違いを判定するためのパターン認識アルゴリズムが必要である。

4.3 研削焼けの検知

研削焼けの検知は、研削動力の監視によって可能なはずである。研削温度が上昇すると加工物の局所的な膨張によって切込深さが増大して研削動力が急上昇する⁸⁾。円筒研削のように使用する砥石直径が大きい場合は、砥石駆動に消費される動力が大きいので、焼けの発生による動力上昇が小さい場合はその検知が困難な場合があると考えられる。一方、内面研削のように砥石が小径の場合は検知の信頼性は高いと考えられる。

4.4 砥石切れ味の監視

砥粒切刃の目潰れ現象によって砥石の切れ味は次第に劣化し、切り残し量の増大とやがては研削焼けが発生して砥石は寿命に達する。切り残し量の増加は加工物寸法誤差を増大させる。円筒プランジ研削を例にとると、砥石切り込みに対する実際の加工物半径減少量は 1 次遅れ系で近似されることが理論的に証明され、その時定数 T は

$$T = \frac{\kappa B \pi D_w}{k_m V_g} \quad (1)$$

で与えられる。ここで κ は比例定数、 B は研削幅、 D_w は加

図3 研削サイクル時間の短縮

工物直径、 k_m は機械系の静剛性、 V_g は研削速度である。研削時定数は砥石の切れ味を表す指標で、これが大きいと切り残し量も増大するので高い加工精度を達成するには時定数は小さくなくてはならない。研削時間の経過に伴って砥石切れ味が劣化すると時定数は増大する。研削時定数は、加工物と砥石の接触開始時の過度状態における研削動力パターンから求めることができ、機械系の特性をも考慮して砥石の切れ味を評価するパラメータとして有用である⁸⁾。

4.5 研削サイクルの最適化

粗研削と精研削で構成される円筒プランジ研削に対して、研削サイクル時間の短縮を目的とする加工条件の自動探索アルゴリズムを構築した例を以下に紹介する⁹⁾。監視システムは、cBN 砥石に内蔵された AE 信号と砥石駆動モータから検出される消費動力信号を利用し、AE 信号はスリッピングを使用して伝送された。

研削動力、研削時定数、AE 信号の計測値を利用し、びびり振動と研削焼けを発生しない範囲内で砥石切り込み速度を最大化してサイクル時間を短縮する戦略である。研削中の AE 信号と加工面粗さの相関をニューラルネットワークによってあらかじめ学習しておくことにより、ある程度の加工面粗さの推定も可能としている。加工条件の修正は、構成されたファジールールによって加工物の交換ごとに行われる。図3に見られるように、数回の加工物研削後に顕著な時間短縮が達成されている。

5. 研削データベースの自動作成

研削加工の現場で最も必要とされているのは、要求された加工結果を達成する加工条件を迅速に提示してくれるデータベースである。信頼できるデータベースによって段取り時間が著しく短縮される。このような目的をもって円筒プランジ研削用に提案された知的データベースの構成が図4である¹⁰⁾。ファジー推論と遺伝アルゴリズムを応用して、学習モジュールと推論モジュールとから構成されている。ドレッシングプロセスと研削プロセスの両条件を探索

図4 研削用知的データベースの構造

表1 データの構造

要素	次元	単位	ファジーセットとメンバーシップ関数				
			VS	S	M	L	VL
加工物直径	d_w	mm	10.0	47.5	85.0	122.5	160.0
加工面粗さ	R_z	μm	0.8	1.4	2.0	2.6	3.2
比研削エネルギー	E_c	J/mm^3	40	60	80	100	120
ドレッシング送り	f_d	mm/rev	0.03	0.10	0.17	0.23	0.30
ドレッシング切込み深さ	a_d	μm	2.0	6.5	11.0	15.5	20.0
砥石切込み	a_w	$\mu\text{m}/\text{rev}$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
加工物回転数	n_w	min^{-1}	50	100	150	200	250

することができるのが特徴である。

加工物直径、ドレッシング切込み深さ、ドレッシング送り、研削切込み深さ、加工物回転数などがデータベースへの入力加工条件で、仕上げ面粗さと比研削エネルギーをプロセスからの出力としている。比研削エネルギーは、研削焼けを避けるための拘束条件として考慮したものである。表1に示したように、これらパラメータは5個のメンバーシップ関数で表示され、研削プロセスの入出力関係は例えば以下のようにIF-THEN形式で記述される。

IF f_d is very small and a_d is medium THEN R_z is small ;
表示された入出力パラメータの組み合わせは、0と1で構成される遺伝子の形で表示される。これは、遺伝アルゴリズムを応用して実加工データとの適合性評価を行ってよりよく適合するように進化させるためである。実加工で得られた入出力関係は、図4のデータベースに“first in first out”のルールで蓄積される。

図5は提案されたアルゴリズムの有効性を実研削で検証した結果である。白丸印は学習のために行われた実研削の出力データで、この場合10組の入出力データが利用された。黒丸印は要求出力である。要求出力をデータベースに入力すると、これらの出力を達成するドレッシングと研削条件が提示される。提示された条件でドレッシングと研削を実行して得られた加工面粗さと比研削エネルギーの値が三角印である。黒丸印と三角印は接近しており、提案アルゴリズムが機能していることがわかる。

図5 知的データベースの機能検証

6. あとがき

研削機構をモデル化するための研究はこれまでに多数行われている。また、シミュレータに関してもそのソフトウェアが商品化されている例もある。しかしこれらが加工現場で有効に利用されているかという点が残念ながら否である。せっかくの成果を有効に利用するために、研究者側にはその成果をもっと利用しやすい形に構成することが、利用者側には積極的に利用する姿勢と工夫が必要であると考えられる。

加工中のトラブル検知に関しては、トラブルが起きて生ずる損害を最小限に抑えるために、プロセスの劣化過程を監視できるより高度な監視システムの開発が期待される。センサ技術の発達と計算処理の高速化は、プロセスの監視システムを高性能化する環境を提供している。実用化を目指した研究開発の一層の展開が期待される。

参考文献

- 1) R.L. Kegg: Industrial Problems I Grinding, Annals of the CIRP, **32**, 2 (1983) 559.
- 2) H.K. Toenshoff, J. Peters, I. Inasaki and T. Paul: Modeling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, **41**, 2 (1992) 677.
- 3) E. Brinksmeier, J.C. Aurich, et al.: Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, **55**, 2 (2006) 667.
- 4) W.B. Rowe, L.Y. Yan, I. Inasaki and S. Malkin: Application of Artificial Intelligence in Grinding, Annals of the CIRP, **43**, 2 (1994) 521.
- 5) H.K. Toenshoff, T. Friemuth and J.C. Becker: Process Monitoring in Grinding, Annals of the CIRP, **51**, 2 (2002) 551.
- 6) H.K. Toenshoff and I. Inasaki: Sensors in Manufacturing, Wiley-VCH, (2001) 236.
- 7) B. Karpuschewski, M. Wehmeier and I. Inasaki: Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors, Annals of the CIRP, **49**, 1 (2000) 235.
- 8) I. Inasaki: Intelligent Monitoring System and Supervision in Grinding, Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing, (1995) 257.
- 9) 志田淳, 稲崎一郎: センサーフュージョンを適用した研削加工知的監視システムの開発, 日本機械学会論文集 (C編), **65**, 629 (1999) 173.
- 10) M. Sakakura and I. Inasaki: Intelligent Data Base for Grinding Operations, Annals of the CIRP, **42**, 1 (1993) 379.