切削シミュレーションの応用と 微細切削への展開*

Application of Cutting Simulation and Micro Cutting Modeling

松村 隆**
Takashi MATSUMURA

Key words cutting, simulation, cutting force, cutting temperature, tool wear, end mill, micro cutting

1. はじめに

切削現象を解析的に予測し制御しようとする研究は、計算機技術の発展とともに、多くの研究者によって進められてきた。切削シミュレーションに関する研究が始められたころは、計算機的能力が十分ではなく、また、簡単な作業にしか適用できないということもあったため、シミュレーションに対する産業界からの期待も少なかった。しかし、近年になり、工具形状の複雑化、生産ライン立上げの短縮化、作業改善に対する要求の厳しさから、シミュレーションに対する関心が高まっている。

切削シミュレーションに対するユーザの利用目的は多岐にわたっており、例えば以下の用途に使われている。

- 最適な切削条件や工具の選定
- びびり振動や工具損傷に対する現象の解明
- 工具開発における設計評価
- 仕上げ面の材料特性に関する解析の評価

これらは開発や改善の用途だけでなく、現行の取り組みに対する理論的な裏づけを確認するためにも利用されている。

ここでは、現在の切削シミュレーションにおける概要を示し、その応用の一つとして工具設計事例を紹介する。また、精密加工とともに最近注目されている微細切削に対する切削シミュレーションの課題について触れる。

2. 切削シミュレーションの概要

これまで報告されている切削シミュレーションの手法は、以下のように大別できる。

(1) 切削係数法

(2) エネルギ解析法

(3) 有限要素法

切削係数法やエネルギ解析法では、切れ刃を有限個の微小切れ刃に分割し、それぞれの微小切れ刃にかかる切削力の総和によって切削力を得るものである。切削係数に基づく切削力モデルは、主に切削厚さの計算が複雑なエンドミル切削の解析に適用されてきた。この方法は切削厚さの幾何学的な解析と比切削抵抗に相当する切削係数によって切削抵抗を計算するため、解析時間がかからず実用性が高い。Martellotti や Koenigsberger らの研究¹⁾²⁾をはじめ、エンドミルの切削シミュレーションに関する研究の多くは、この切削力モデルに基づいたものである^{3)~5)}。また、切削係数の基礎式に対して傾斜切削モデルや二次元切削データに基づいた取り組み⁶⁾もあり、同手法の汎用性が高まっている。さらに最近では、ボールエンドミルのように工具形状の複雑な切削に適用された研究も増えている⁷⁾⁸⁾。この切削力モデルは、切削条件の最適化や、精度評価⁹⁾、びびり振動の解析¹⁰⁾などの実際の切削現象の予測や評価に利用されている。

エネルギ解析法の詳細は次節で述べるが、この切削力モデルは、三次元の切りくず形状を二次元切削の重ねあわせとして考えて切削力を解析する¹¹⁾。このモデルの特徴は、切りくずの流出方向を切削エネルギが最小となるように決定できることである。解析に必要な二次元切削データにおける、切れ刃形状パラメータは、二次元切削のすくい角のみであるため、少ない基礎試験とデータベースで種々の切れ刃形状の切りくず流出方向と切削力が解析できる。そのため、ドライ切削における切りくず制御を考えた切削条件の選定や、工具設計におけるデザインレビューとして利用できる。

有限要素法による解析は、材料の構成方程式をデータベースとし、被削材、切りくず、工具の応力、ひずみ等の物理量を解析する¹²⁾。そのため、前述の2つの手法に比べて、切削過程における現象を詳細に解析できる。近年になって Advantedge¹³⁾などのソフトウェアが市販されるようになり、有限要素法による解析的な研究が飛躍的に進んで

*原稿受付 平成22年5月24日

**正会員 東京電機大学工学部機械工学科（東京都千代田区神田錦町2-2）

松村 隆

1987年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了。1992年博士（工学）東京工業大学。主な研究は切削加工のシミュレーション、硬脆材料の微細加工、機能表面の機械加工。著書は「機械製作法要論」、東京電機大学出版局、1999。

図1 三次元の切りくず生成過程

α_b : 平行上すくい角, α_s : 垂直横すくい角, α_e : 有効すくい角, η_c : 切りくず流出方向, f : 送り, d : 切込み

いる。この手法では材料内部の応力やひずみを解析できるため、特に仕上げ面の加工変質などを評価するのに便利である¹⁴⁾。しかしながら、大規模なマトリックス計算を実行するために解析時間がかかるため、例えば多くの事例を解析して切削条件や工具の最適化を図るような場合には、解析時間の短縮化が望まれている。有限要素法の解析におけるもう一つの問題点は、構成方程式のデータベースの管理において追加、修正が困難なことである。通常、構成方程式を作成するためには、ホプキンソン棒による衝撃試験を実施しなければならないが、試験機が特殊であり、衝撃試験に要する労力と時間がかかる。現在、材料特性については、ソフトウェアメーカーよりデータベースが提供されている場合が多いが、ユーザが所有している材料に対するものではないため、十分な解析精度が得られない場合もある。

3. エネルギー解析法による切削加工のシミュレーション

エネルギー解析法は、二次元切削の実験式のみで、三次元の切削過程における切削力と切りくず流出方向を解析できる。この切削力モデルは、まず、旋削過程を対象として適用され¹¹⁾、その後、平フライス切削¹⁵⁾、ドリル切削¹⁶⁾、ボールエンドミル切削^{17)~19)}に適用され、種々の切削様式に対して解析手法の妥当性が報告されている。

この解析では、図1のような旋削における三次元の切りくず生成過程を、切削方向と切りくず流出方向を含む面内の二次元切削の重ねあわせとして考えている。解析に必要な基礎データは、二次元切削におけるせん断角、せん断せん断応力、摩擦角に関する実験式であり、これらが切りくずモデルにおける二次元切削の物理的な諸量を与える。この方法では、切りくず流出方向を仮定すると、切削速度と切りくず流出速度を含む面内の二次元切削におけるすくい角が幾何学的に計算され、二次元切削モデルとこの面内で消費するエネルギーが得られる。これを切削領域で積分して、切削エネルギーが計算される。シミュレーションでは、この切削エネルギーが最小となる方向を切りくず流出方向とし、これに基づいて切削三分力が計算される。

この手法は、切削力を予測する過程で、せん断面でのせ

図2 切削温度分布の解析例

図3 逃げ面摩耗のシミュレーション

切削条件: 被削材, インコネル X750; 工具, 超硬 P20 (0, 5, 11, 6, 15, 15, 0.8); 切込み, 1.0 mm; 乾式

ん断仕事や工具面での摩擦仕事を計算できるため、これに相当する発熱を考えれば、切削温度分布が解析できる。図2は有限体積法による切削温度分布の解析例である。有限体積法は、有限要素法に比べて解析時間が短く、同図の温度分布は通常のノートパソコンでも数十秒で計算できる。さらに、このような温度分布と応力分布が得られれば、次式の摩耗特性式に基づいて、すくい面摩耗や逃げ面摩耗の解析が可能である。

$$\frac{dW}{\sigma dL} = C \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta}\right) \quad (1)$$

ただし dW/dL は単位面積単位時間当たりの摩耗体積、 σ と θ は工具面の応力、 C と λ は工具摩耗特性定数である。図3はインコネル X750 の切削における逃げ面摩耗の予測シミュレーションと実測値を比較した例であるが、ある程度の精度で予測可能なことがわかる。

4. 切削シミュレーションの応用

冒頭に述べたように切削シミュレーションの応用は、シミュレーションのモデルや解析手法によって異なる。シミ

図4 ラフニングエンドミル

図5 ラフニングエンドミルの切りくず生成モデル

シミュレーションを利用するユーザは、切削シミュレーションで何をしたいのかを明確にすべきである。例えば、最適化のように多くの事例を解析して、その中で目的に最も適した切削条件や工具を検討する場合には、解析時間のかかるシミュレーションは不向きである。一方、切削現象を詳細に解析し、特に仕上げ面の表層部における残留応力状態やその傾向を明らかにする場合は、有限要素法による解析が不可欠となる。前述のエネルギー解析法の特徴は、二次元切削データによって種々の切れ刃形状における切削力が解析できるため、工具設計の評価に利用できる。本節では、エネルギー解析法に基づくシミュレーションの応用として、工具設計事例を紹介する。

ラフニングエンドミルは、図4に示すように周期的な凹凸を有する工具である。その周期的な凹凸はニックと呼ばれ、それぞれのニック上で独立して切りくずが生成される。図5は、ニックにおける切りくず生成モデルであり、この三次元的な切りくずを二次元切削の重ね合わせとして考える¹⁸⁾。各ニックの切りくず流出方向は、切れ刃の回転角によって異なるため、ラフニングエンドミルの解析では、ニックごとに切りくず流出方向を決定し、切削力を計算する。そして、全ニックの切削力から工具にかかる切削三分力を得る。図6にラフニングエンドミルの切削力の例を示す。X成分は工具にかかる送り方向の分力、Y成分は送り方向に向かって左手側にかかる分力、Z成分

図6 ラフニングエンドミルの切削力解析
切削条件：被削材、黄銅；工具、超硬合金、直径 20 mm、ねじれ角 30°；ニックの大きさ 0.4 mm、ピッチ 2.5 mm；切削速度、100 m/min；送り、637 mm/min；切込み、5 mm；乾式

図7 ニックの大きさに対する送り方向の切削分力と変動量

は工具軸に対して上方にかかる分力である。ラフニングエンドミルの切削において、工具の送り方向にかかる反力は、工具のたわみや折損を引き起こすため、負のX成分が小さい方が望ましい。また、各切れ刃のニックの高さが異なるために切削力が変動するが、これをできるだけ抑えることが望ましい。図7はニックのピッチを2.5 mmとし、ニックの大きさに対して、X成分の平均値とその変動を解析したものである。同図よりニックの大きさが0.4 mmの形状が、負のX成分の平均値と変動が最も小さく、最適値であることがわかる。この応用例のように、シミュレーションによる工具形状設計の評価ができれば、試作および切削試験にかかる費用とコストが削減され、工具開発に対する柔軟性が向上する。

5. 微細切削のシミュレーションに対する課題

最近では、エンドミルやドリルの小径化とともに、微細切削に対する試みが増えている。そのため、切削シミュレーションに対しても、微細切削への対応が求められている。切削厚さが小さくなると、比切削抵抗が大きくなることは、中山らの研究²⁰⁾などで示されている。この傾向は、材料の寸法効果や、押込み力（圧壊力）による成分がせん断変形に關与する成分に比べて相対的に大きくなり無視でき

なくなること、切削厚さに対して切れ刃丸みが無視できず微視的に見た場合に実質のすくい角が下がることなどがあり、これらの影響を考慮できる切削モデルも提案されている²¹⁾²²⁾。2章で述べた切削係数に基づく切削力モデルでは、せん断変形による力成分と Ploughing による力成分を分けて切削係数に反映させた研究も進められている²³⁾。

また、仕上げ面生成の観点から、微細切削過程をシミュレーションすることも重要である。切れ刃の軌跡から除去できる形状を解析する研究は、マイクロ・ナノオーダの表面粗さを制御するために不可欠である。金属材料の場合、除去領域がマイクロ1桁のオーダになると、切削厚さに対して材料の弾性域が相対的に大きくなるため、材料の弾性回復による形状変化も考慮しなければならない。この場合、材料の特性を考慮した有限要素法によるシミュレーションが効果的であろう。

材料特性の観点では、微細切削における切削厚さに対して材料の結晶粒の影響が無視できなくなる。比較的切削厚さの大きい切削シミュレーションでは、材料が均一な特性であることが仮定されている。一方、微細切削では、切削厚さに対して材料の結晶粒が相対的に大きくなるため、不均一な材料を切削することになる。現在、材料メーカでは微細粒子鋼などの研究が進みつつあり、材料開発の面から擬似的に均一材料の切削としてシミュレーションができることも期待できるが、シミュレーションの研究としては、不均一な材料特性をどのようにモデル化するかが課題となる。

6. お わ り に

切削シミュレーションのこれまでの動向について述べてきたが、計算の高速化に伴い、シミュレーション技術はさらに多くの製造現場で有効に活用されるであろう。切削シミュレーションの仕様としては、(1)汎用性(シミュレーションが対応できる作業と解析できる物理量)、(2)解析時間、(3)解析精度、(4)データベース管理の容易さがあり、シミュレーションの導入において、ユーザはその目的を明確にし、シミュレーションソフトを選択すべきである。また、シミュレーションの精度は、解析に必要なデータベースの質に依存するため、データベースの管理に対してサポートがなされているソフトを導入すべきである。一方、微細切削におけるシミュレーションについては、材料の特性や刃先丸みの問題など、モデル化に対する課題も多い。微細切削に対する需要は今後とも増えてくるため、実用的なシミュレーションの研究やソフトウェアの開発が期待される。

参 考 文 献

- 1) M.E. Martellotti: An Analysis of the Milling Process, Transactions of the ASME, **63** (1941) 677.
- 2) F. Koenigsberger and A.J.P. Sabberwal: An Investigation into the Cutting Force Pulsations during Milling Operations, International Journal of Machined Tool and Design Research, **1** (1961) 15.
- 3) S. Smith and J. Tlustý: An Overview of Modeling and Simulation

- of the Milling Process, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry, **113** (1991) 169.
- 4) K.F. Ehmann, S.G. Kapoor, R.E. DeVor and I. Lazoglu: Machining Process Modeling: A Review, Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **119** (1997) 655.
- 5) 森脇俊道, 社本英二, 高大力, 杉原和郎: 切削力モデルに基づくエンドミル加工状態の知的認識(データベースを必要としない手法の開発), 日本機械学会論文集(C編), **69**, 683 (2003) 1927.
- 6) E. Budak, Y. Altintas and E.J.A. Armarego: Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **118** (1996) 216.
- 7) M.Y. Yang and H.D. Park: The Prediction of Cutting Force in Ball End Milling, International Journal of Machine Tool Design and Research, **31**, 1 (1991) 45.
- 8) G. Yucesan and Y. Altintas: Prediction of Ball End Milling Force, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry, **118** (1996) 95.
- 9) 白瀬敬一, 稲村豊四郎, 安井武司: エンドミル加工における加工誤差の推定と要因分析, 精密工学会誌, **53**, 9 (1987) 1433.
- 10) 白瀬敬一, 佐野雅基, 平尾政利, 安井武司: エンドミル加工におけるびり振動の解析と抑制(第1報)—時間領域シミュレーションによる不等ピッチエンドミルのびり振動解析—, 精密工学会誌, **64**, 3 (1998) 465.
- 11) E. Usui, A. Hirota and M. Masuko: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process—Part I Basic Cutting Model and Energy Approach, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry, **100** (1978) 222.
- 12) J. Mackerle: Finite Element Analysis and Simulation of Machining: An Addendum a Bibliography (1996-2002), International Journal of Machine Tools and Manufacture, **43** (2003) 103.
- 13) http://www.thirdwavesys.com/products/advantedge_fem.htm
- 14) H. Sasahara, T. Obikawa and T. Shirakashi: Prediction Model of Surface Residual Stress within a Machined Surface by Combining Two Orthogonal Plane Models, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **44** (2004) 815.
- 15) 広田明彦, 臼井英治: 平フライス切削における切削抵抗の解析的予測, 精密機械, **44**, 4 (1978) 508.
- 16) 広田明彦, 笠原和夫: ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測(第1報): 切削模型とエネルギー解法および二, 三の予備結果, 精密機械, **47**, 8 (1981) 987.
- 17) 笠原和夫, 広田明彦, 笹井洋介: ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第1報): 球体部の切れ刃形状と切削模型, 精密工学会誌, **69**, 3 (2003) 396.
- 18) T. Matsumura and E. Usui: Predictive Cutting Force Model in Complex-shaped End Milling Based on Minimum Cutting Energy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **50**, 5 (2010) 458.
- 19) T. Matsumura, and E. Usui: Simulation of Cutting Process in Peripheral Milling by Predictive Cutting Force Model Based on Minimum Cutting Energy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **50**, 5 (2010) 467.
- 20) 中山一雄, 田村清: 切削抵抗の寸法効果, 精密機械, **31**, 3 (1965) 240.
- 21) X. Lai, H. Li, C. Li, Z. Lin and J. Ni: Modelling and Analysis of Micro Scale Milling Considering Size Effect, Micro Cutter Edge Radius and Minimum Chip Thickness, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **48**, 1 (2008) 1.
- 22) G. Bissacco, H.N. Hansen and J. Slunsky: Modelling the Cutting Edge Radius Size Effect for Force Prediction in Micro Milling, Annals of CIRP, **57**, 1 (2008) 113.
- 23) P. Lee and Y. Altintas: Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data, International Journal of Machine Tool Design and Research, **36**, 9 (1996) 1059.