切削加工学の現状・将来・夢*

白樫高洋**

Research Trend on Machining - Present, Future and Far-future- /
Takahiro SHIRAKASHI

Key words: cutting, chip formation, simulation analysis, flow characteristic,
friction characteristic, computational machining

1. はじめに

切削加工学にかぎらず、加工学と言われるものはその大部分が応用の学であり、限られた原理・基礎の上に整然と構築された熱力学、流体力学、弾塑性学、運動・振動学等と異なり、これらを基礎に築き上げられた実用的ではあるが、得体の知れない壮大な建造物のようなものであり、典型的な工学の一つであろう。したがってこの建造物には種々の入口があり、個人の興味・専門分野に応じた挑戦が可能である。

切削加工、特に切削理論はこの20年の間に現象の“解析”から“予測”へと大きな発展をとげつつある。この間の経過と問題点を私見を含めて述べ、本文の責を果たさせていただく。

2. 切削加工学の現状と問題点

2.1 切りくず生成過程

切削加工の特徴は“形状の確定した切れ刃”による加工で“創出可能形状の多様性”と“高エネルギー効率”であるが、一方切れ刃形状の保持という大きな制約を常に受けている。

切削加工の最も基本的な部分は、任意の工具形状、切削

条件で切削するとき、切削力、工具・被削材内の応力・ひずみ分布、同温度分布等を知ることである。この10年間は、この切りくず生成過程の研究は計算機の発展と相まって実験的検討を除けば、計算機によるシミュレーションが大勢を占めた。すなわち本方法は切りくず生成過程を支配する諸方程式、工作物の流動応力式、工具すくい面の摩擦特性式のすべてを連立させ有限要素法を軸として切削過程を数値解析する、いわゆるシミュレーション的手法により、切削状況のすべてを同時に得ようとするものである。この手法は従来の切削理論が説明型のものであったのに対し、原理的には切削実験なしに切削現象のすべてを“予測”し得るものとなった。初期の本手法の適用は2次元流れ型切りくず生成に対するものであった¹⁾が、その後の計算機の発展は切削状況をその開始から定常状態まで追跡計算する、いわゆる忠実に切削過程を計算機上でシミュレートすることを可能²⁾とし、破断条件の導入により、せん断型切りくず、鋸歯状切りくず生成に対しても予測が可能となっている^{3,4)}。さらに傾斜切削、2切れ刃による切削等の3次元切削への適用も試みられつつある⁵⁾。図1にこれらの例を示す。

切削過程のシミュレーションのためにはこれに対応した諸物性値の準備が不可欠である。しかし、新素材はもちろん、現に実用に供されている材料に対しても、切削過程におけるような極限状態での流動応力特性、摩擦特性は、2, 3の材料を除いて測定されていない^{6,7)}。

また非等方性材料、複合材料等の不均一材料の切削過程の解析はその緒についたばかりである^{8,9)}。

シミュレーション的解析のもう一つの発展には超微細切削を想定し、分子動力学の手法を応用し、個々の原子の移動を追跡計算し、切削過程を原子の移動の観点から解析しようとするものがある^{10,11)}。将来、超精密・微細切削の解

* 原稿受付 平成5年9月16日
** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)
1963年東京工業大学大学院修士課程修了、工学博士。切削理論、工具摩耗、工具欠損、切削過程のシミュレーション、熱間塑性変形の材質予測、研削、切削変質の予測、高速塑性変形。著書:加工の力学(共著)、切削関係発表論文約100編

工具：P 20，すくい角：10°，切削速度：75 m/min
(a) 低炭素鋼

切削速度：13 mm/min
(b) 4-6 黄銅³⁾

切削速度：30 m/min
(c) Ti-6Al-4V⁴⁾

切削長：1.39 mm
(d) 3次元切削⁵⁾

図1 切りくず生成過程のシミュレーション

析の有力な手段となる可能性がある。また切削過程のマクロなシミュレーション結果との関連も楽しい分野である。

上述のシミュレーション法による切削過程の解明は将来ドリル，フライス，エンドミル等の総形工具への発展が期待されるが，現状では少し異なった方向からのアプローチが試みられている。すなわち，2次元切削の力学的諸量を基礎データとして3次元切削および総形工具での切りくず生成，切削力などを塑性変形理論を用いて予測しようとするものである¹²⁾。

2.2 切削工具とその評価

切削工具の安定性，信頼性向上が要請され，種々の工具材の改良と開発が続いている。

超硬工具に関しては耐摩耗性向上のため，TiC，TiN，Al₂O₃，ダイヤモンド等の単層または多相コーテッド工具が開発され，またコーティング過程により生ずる残留応力の低減による耐欠損性向上が実現している。

高速度鋼系工具では粉末焼結法，コーティング，さらにイオン注入等の品質改良が精力的に研究され，いずれも実用化域に達している。

新素材としては，セラミックス系の開発，CBN，ダイヤモンド焼結工具の実用化が進み，それぞれの短所の除去が検討されている。

工具形状の設計に対しては，切りくず処理の点から種々のチップブレイカが試行錯誤により提案されている。総形工具に対しても切りくず生成機構の解析を通してより有効な切りくず生成を有する工具形状へのアプローチが試みられつつある¹²⁾。

工具摩耗は切れ刃に働く応力，温度と被削材・工具材の特性値によって支配される。したがって摩耗速度を表現する何らかの摩耗特性式が求められれば，刃先の温度，応力と対比し，図2のように摩耗の進行が予測可能となる¹³⁾。

切れ刃欠損が生ずるのは，切れ刃内の応力状態が切れ刃の破壊強度を越えるためである。また欠損が切削の継続に従って多発するようになるのは，摩耗等による工具面応力の変化および切れ刃の破壊強度が何らかの原因で低下するためである。したがって欠損発生を予測するためには切れ刃に働く応力（熱応力，衝撃応力も含めて）分布とその変化を求めること，ついで工具材の破壊強度（予想される温度，負荷速度のもとでの）とその推移を知る必要がある。前者は切削理論から求まるとしても後者の工具材の情報に関しては線形破壊力学¹⁴⁾を基礎とするもの，また巨視的破壊条件を基礎¹⁵⁾とするもの等が提案されている。

切削加工の経済性・安定性のためには工具損傷が最も大きな障害となり，予測理論の完成が待ちきれず早急にこれに対する対策を講ずるため，新素材，新工具の開発に対応

(a) 鋼と P20 の摩耗特性 (dry)¹³⁾

工件物: S45C,
 工具: P20 (0, 0.6, 6, 15, 15, 0.5),
 切削速度: 300 m/min, dry
 (b) クレータ摩耗の予測

図2 工具の摩耗特性とクレータ摩耗

して、多数の実験的検討がなされている。新素材、新工具の被削性、切削性評価等の大部分は、現状では切削理論を介して得られた結果を定性的に採用するにしても工具損傷状況の実験的検討によりなされている。

総形工具であるフライス、ミリング、エンドミル、ドリル等に関しては、工具損傷を予測する手法の確立にはほど遠い状況にある。特にドリル加工のように切りくずとの干渉が不可避の場合には予測の困難さが倍加される。

2.3 切削加工技術

たとえ切削理論、工具損傷の予測理論が確立しても、被削材、工具材のばらつき、運転中の不慮のトラブルが避けられず、切削加工の無人化のためには、何らかの加工状態

の監視が必要となる。監視技術として、特に重視されているのは加工中の工具摩耗・欠損の予知・検出であり、多くの努力が払われつつある。すなわち、摩耗、欠損に伴う切削力変動、振動スペクトル変化、AE、切削温度などを何らかの方法で監視し、ニューラルネット等を併用して処理することにより工具損傷を検出することが試みられている¹⁶⁾。しかし現状では工具形状、切削条件の大幅な変化に対しての汎用性が不足しており、十分な監視技術とはなっていない。

切削工具損傷を理論的、また実験式的に予測するにしても、そのため必要となる物性値、基礎資料の準備は充分でなく、特に近年のように新素材、新工具材の開発が相つづ場合には、これら基礎データの実測・収集は容易ではない。切削中の工具損傷の計測により、上述の基礎データを逆に切削中に収集することが可能となり、この結果と損傷予測法を用いて工具寿命を予測し、切削条件の最適化を行う方法も提案されている¹⁷⁾。

加工技術は極限化へと発展しており、そのうちの1つは超精密切削加工である。このための加工機、工具材・形状、切削方法が切削理論も併用して検討されつつある。最後に切削現象のシミュレーション解析に関する成書として文献18)を挙げておく。

3. 切削加工学の将来と夢の実現のために

切削理論の研究者の長年の夢は削らずに被削材特性、工具特性、加工条件のみから切削現象のすべてを予測し得る理論または手法の確立である。計算機の発展は、この夢を部分的ながら現実のものとしつつある。しかし、実際の切削現象を正しく予測するためには、被削材、工具材の物性値が不可欠であり、これらのデータがないかぎり、シミュレートした現象の正確さはもちろん、用いた理論の正確さの検証・保証が不可能である。

いったんシミュレーション法の正当性が保証されれば、逆に任意の物性値を用いた仮想(計算)切削加工(virtual machining, computational machining)が可能となり、提示された素材に対する最適工具材・形状、切削条件、さらに工具材開発、材料学的見地の素材の被削性改善等の指針が提示されよう。いわば仮想機械加工工場(virtual machine shop)の創設である。この工場では作業者は任意の加工条件のもとでの切削加工を高価な新素材・工具を消費することなく、手も汚さずに計算機上で体得し、パソコンゲーム感覚で各人の経験を高めることが可能となるであろう。

さて現実には切りくず生成のみに限定しても、シミュレーションが可能なのは等方性、連続体が想定可能な被削材に対し、旋削工具のような単一工具についてやっと3次元的

取扱いが緒についたばかりであり、早急にドリル、エンドミルのような総形工具への展開が望まれる。しかし、これらの予測はすべてを2次元切削で行われているように計算機を主体としてシミュレートする方法のみではなく、現在もいくつかの試みもある、2次元切削との結合といういわば“ハイブリッド型シミュレーション法”も考えられる手段の一つであろう。

被削材が強い異方性を有する場合、また変形中（せん断域中）で新たな異方性が生ずる場合等については完全な意味でのシミュレーションの理論は確立していない。

工具摩耗予測に関しては、汎用性のある摩耗理論の確立、工具材・被削材との組合せにより決定する物性値の獲得法の確立が当面の問題であろう。また工具欠損に関しては、任意環境下での工具材の破壊特性が未知なことなどの課題が残されている。

加工は素材を製品化することであり、加工された製品の品質を予測することも重要である。従来この品質として寸法精度、表面粗さが対象となっていた。このうち前者は工作機械の運動精度と工具摩耗量の補償で保証してきた。しかし、表面粗さに関しては試行錯誤的に種々の手段を講じてきたにすぎない。さらに製品が高精度化すると残留応力による加工後の変形、製品寿命も重要な評価基準となる。このような切削加工と製品の品質の関連についての研究は実験的なものしかなく、汎用性がなく、理論的な予測法が切望される。

以上、主として定常または静的な切削状況についてのみ述べたが、動的、すなわちびり振動を伴うような場合についても全く同一の展開、議論が期待されるが、切削現象と振動との関係は研究の緒についたばかりというのが現状である。また、切削加工学が将来にわたっても理論のみで完成することは考えられず、多くの know-how が要求され、エキスパートシステム、人工知能などの利用手法も欠かせないであろう。

4. まとめにかえて

二十数年前、“切削の7不思議というのがあって…”という指導教授の呪文に魅せられて(?)、それならば、とりついたのが運のつき。さしあたって切削現象の観察と“7不思議”を切削とは独立した試験により確認することとし、被削材の流動応力および摩擦特性式の検討を行った。このころ、“マトリクス法による構造力学の解法”“マトリクス有限要素法”に接し、変形問題の汎用性のある数値解析法を知り、これを切削の解析に利用した。ところが、当時の計算機能力は低く、これを有効に利用するた

め、切削現象の観察を通して、これに対応した種々の工夫を強いられた。この結果、現象の予測への道がひらかれ、以後工具摩耗・欠損の予測へと発展した。しかしいずれの場合も解析手法も重要であるが、明確な目的意識と現象を注意深く観察し、疑問と好奇心を持ち理論的に積み上げることがより重要であることを知らされた。

最近の相次ぐ新素材・新工具材の開発、それらの切削技術にしても、さしあたり必要な被削性・切削性試験を行うことは仕方がないにしても、先入観にとらわれることなく、常に疑問と好奇心を持って現象を注視する必要がある。

文 献

- 1) 白樫高洋, 臼井英治: 二次元流れ型切削のシミュレーション解析, 精密機械, 42, 5 (1976) 340.
- 2) J. S. Stevenkowski and J. T. Carroll III: A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 107, Nov. (1985) 349.
- 3) 帯川利之, 田口克行, 笹原弘之, 白樫高洋, 臼井英治: せん断形切りくず生成の有限要素法シミュレーション, 精密工学会誌, 59, 5 (1993) 821.
- 4) 帯川利之, 臼井英治: チタン合金 (Ti-6Al-4V) の鋸歯状切りくず生成の FEM シミュレーション (第2報), 精密工学会誌, 59, 6 (1992) 933.
- 5) 笹原弘之, 帯川利之, 白樫高洋: 三次元切削の有限要素法シミュレーション, 精密工学会誌, 59, 8 (1993) 1275.
- 6) 例えば, 前川克廣, 白樫高洋, 臼井英治: 高温・高変形における低炭素鋼の流動応力特性, 精密機械, 44, 12 (1978) 1495.
- 7) 白樫高洋, 臼井英治: 工具すくい面の摩擦特性, 精密機械, 39, 9 (1973) 966.
- 8) 白樫高洋, 吉野雅彦, 倉島宏実: 超精密切削過程のシミュレーション解析, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 893.
- 9) 帯川利之, 白樫高洋, 臼井英治: FRP 切削の有限要素シミュレーション, 精密工学会誌, 57, 6 (1991) 1029.
- 10) 稲村豊四郎, 鈴木裕幸, 武沢伸浩: 銅とダイヤモンドの原子配列モデルによる計算機内での切削実験, 精密工学会誌, 56, 8 (1990) 1480.
- 11) S. Shimada, N. Ikawa, H. Tanaka, G. Ohmori and J. Uchikoshi: Molecular Dynamic Analysis as Compared with Experimental Results of Micromachining, Ann. CIRP, 41, 1, (1992) 117.
- 12) 笠原和夫, 広田明彦: すくい面が平面からなるドリルの切削と長ピッチ形切りくず生成機構の解析, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1075.
- 13) 北川武揚, 前川克廣, 白樫高洋, 臼井英治: 逃げ面摩擦特性の検討, 精密工学会誌, 53, 9 (1987) 1414.
- 14) 柴坂敏郎, 橋本英文, 上田完次, 岩田一明: 切削工具のぜい性損傷に関する破壊力学的研究, 精密機械, 49, 10 (1983) 1435.
- 15) 臼井英治, 井原 透, 白樫高洋, 金沢憲一: 断続切削における切刃欠損の解析的予測に関する研究 (第7報), 精密機械, 50, 5 (1984) 866.
- 16) 例えば, M. S. Lau and D. A. Dornfeld: Inprocess Tool Fracture Detection, Trans. ASME, J. Eng. & Mat. Tech., 106, April (1984) 1111.
- 17) 松村 隆, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井英治: 切削加工の適応予測, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2044.
- 18) 臼井英治: 現代切削理論, 共立出版, (1990. 5).