

切削工具開発への 切りくず生成シミュレーションの応用

Application of Chip Formation Simulation to Cutting Tool Development

沖田 淳也*
Junya Okida

多山 拓一郎
Takuichiro Tayama

島本 陽介
Yosuke Shimamoto

中田 伸哉
Shinya Nakata

切りくず生成過程のシミュレーションは切削理論構築や切削現象の理解のための一手段として始められたが、他の技術分野と同様に最近では実応用が進展しつつある。一方で切削加工は高温、高圧化で高速に材料が変形する現象であるため、加工シミュレーションの中でも難易度が高く、未だに全ての切削過程を十分な精度で再現できる状況とは言えない。本稿では切削シミュレーション技術の発展経過について述べるとともに、現状についても概説し、当社で実際の工具開発に適用した事例とともに活用する際の留意点について説明する。

The simulation of chip formation processes was started as a method to construct cutting theories or understand cutting phenomena and has recently been used for actual applications. On the other hand, it is still difficult to simulate all cutting processes with sufficient accuracy because cutting processes are conducted under high temperatures and pressures at high deformation speeds. In this paper, we explain the history of the chip formation simulation and its application examples for cutting tool development. We also discuss what to consider when using the simulation.

キーワード：切りくず、シミュレーション、有限要素法

1. 緒 言

切削加工は古くから行われている機械加工法であるが、産業利用が先行する中で理論の構築はこれに遅れて20世紀以降に進展してきた。この中で切りくず生成過程のシミュレーションは切削理論構築や切削現象の理解のための一手段として始められたことから、当初は学術的な活用にとどまっていた。しかし、他の機械加工法と同様に次第に実加工への応用が期待されるようになり、近年現実的、実用的なシミュレーション技術が開発され、切削条件設定や工具開発などへの活用が広がりつつある。当社でも1990年代に検討を開始し、2000年以降、工具開発に切りくず生成シミュレーションを活用してきた。本報告では、このような切りくず生成シミュレーションの発展経過と、当社での取り組み経緯、活用事例について紹介するとともに、今後の展開や課題について言及する。

析手法はこのような非線形現象でも数値解を求めることが可能で、理論構築の上でも有益な手法であることから、1970年頃より切りくず生成過程への適用が始まった。

切りくず生成のシミュレーションはその手法及び発展経過から図1のように大きく、①押し込み解析、②定常解析、③非定常解析、④3次元解析、の4つに分類することができる⁽²⁾。①押し込み解析は、切りくず流出状態を想定した形状に定常状態に達したと考えられる時点まで剛体変位を与えて、塑性域の広がりや工具面上の圧力分布を求める^{(3)、(4)}。本手法は刃先近傍の力学的状態を大まかに説明することは可能であったが、初期モデルに結果が大きく依存するなど精度の面ではまだ不十分なものであった。②の定常解析はいくつかの方法があるが、白樫らにより開発された反復収束法⁽⁵⁾と呼ばれる、弾塑性計算とせん断角などの設定値の修正を繰り返す方法が代表的である。本方法は定常状態の存在する切削過程にしか用いることはできないが、一般に比較的短い計算時間で定常

2. 切りくず生成シミュレーションの発展経過

2-1 シミュレーションモデルの変遷

切削加工における切りくず生成現象の理論化はそのコアとなるせん断角理論⁽¹⁾を中心に発展したものの、切りくず生成は高温、高圧化で高速に材料が変形する現象で、かつ多くの非線形現象が含まれることから、これら解析的な手法で十分な精度の解を得ることは困難であった。これに対し、有限要素法 (Finite Element Method : 以下FEM) *1などの数値解

1970	1980	1990	2000
押し込み解析	定常解析	非定常解析	3次元解析
Zienkiwiz ⁽³⁾ , 垣野 ⁽⁴⁾ 他	白樫 ⁽⁵⁾ 他	Strenkowski ⁽⁶⁾ 他	前川 ⁽⁷⁾ 上田 ⁽⁸⁾ 他

図1 シミュレーション手法の変遷

状態の解を得られるなどの特長があった。

80年代中頃から計算機の進歩に伴い、切削初期状態から定常状態に至るまでの③非定常解析も可能となった。Strenkowskiら⁽⁶⁾は被削材を弾完全塑性体、工具を弾性体とし、初期状態から定常切削になるまでのFEM解析を行い、切りくずカール生成の様子を示した。以降は基本的にこの非定常解析を中心に研究が進展し、より現実的な④3次元解析が行われるようになった⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。そして1990年代後半には切りくず生成シミュレーション専用の商用ソフトウェアも発売され、産業界での活用が徐々に進展した。

なおFEMによるシミュレーションとは別に、原子レベルの非常に微小な加工を想定した分子動力学法による解析なども行われている⁽⁹⁾。

2-2 当社の取り組み

当社では1990年代から、特に切りくず処理のためのチップブレーカ開発を念頭に切りくず生成シミュレーションの開発に取り組んだ。そして大学との共同研究⁽¹⁰⁾も活用し、2000年頃に実用的なシミュレーション手法を開発した⁽¹¹⁾。**図2**は旋削加工での切りくず生成シミュレーションの事例である。切りくず形状や切削主成分の精度も良好で、本シミュレーション結果から試作候補形状を絞り込んだ上で金型を製作し、仕上げ用ブレーカであるLU型を開発、製品化した。

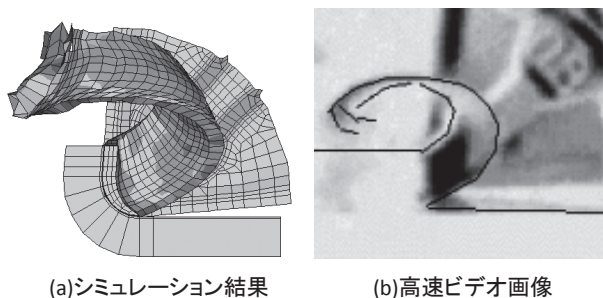


図2 旋削加工での切りくず生成の様子⁽¹¹⁾
(S15C, vc=200m/min, f=0.2mm/rev, ap=1.5mm)

このような当社独自の手法に加え、100種類以上の被削材データベースを備えた上述の切りくず生成シミュレーション専用の商用ソフトウェアであるAdvantEdgeなども導入し、工具形状開発のほか、顧客での工具、加工条件選定といった、当社がツールエンジニアリングサービスと呼ぶ技術サポートにも利用している⁽¹²⁾。これらの具体的な活用事例は4章にて説明する。

3. 切りくず生成シミュレーションの活用方法と留意点

3-1 切りくず生成シミュレーションの効果と活用方法

切りくず生成シミュレーションは被削材、工具の形状や材料特性、切削条件を入力として、FEMなどの数値計算手法を用いて弾塑性変形および熱伝導の解析を行い、切削抵抗や切りくず形状、温度や応力分布を出力として得ることができる。数値計算によるシミュレーション全般に言えることではあるが、切りくず生成シミュレーションにおいても実際の切削に比較して、①切削条件や材料特性などを任意に変更することができる、②実験においては獲得困難な情報を比較的容易に得ることができる、という特長がある。前者は例えば無摩擦状態における切削など、現実には不可能な切削状態も計算機上では可能であることも表している。また後者に関しては、応力やひずみといった実験で測定するのが困難、あるいは非常に手間がかかる情報を比較的容易に得られるということの他、ドリル加工や原子レベルでの加工など、実験では切りくず生成自体が観察できない場合でもそれを可視化できるという利点も含んでいる。これらの特長は学術的にも効果が大いだが、産業利用の観点でも利用価値が大い。

工具開発への活用方法としては、設計した工具の評価手法として利用することが本来の使い方である。一方、学術利用と同様に、各切削現象の基本メカニズムの理解という点でも有益となるケースが多い。例えば工具欠損に関して、加工後の工具の状態を観察しても損傷が激しく、その起点やメカニズムが不明であるケースも多い。そのような場合に同様の加工状態をシミュレーションで再現し、応力の値から機械的な応力で生じた欠損かどうか、また切削過程の過渡状態、定常状態いずれに原因があるかを推定することができる。また熟練者には理解できる現象でも非熟練者にはイメージできないことも多く、このようなシミュレーションによる理論的かつ視覚的な説明によって、現象が理解しやすくなるという教育的効果も有する。

3-2 シミュレーションを活用する上での留意点

このように切りくず生成シミュレーションは有用性がある一方で、活用の上ではいくつかの留意事項がある。ここではそれらの留意点を概説する。

(1) 実験との整合性

シミュレーションを活用する上では常に実験結果との整合性という問題が存在する。このため実験との整合性を確認することが必要となるが、綿密に調査しようとするとその負荷が大きくなり、シミュレーションの価値が薄れてしまう。現実的には、いくつかの条件のみで切りくずや切削抵抗など比較的容易に得られる実験データで検証し、それで整合性があれば他の指標についても整合性が見込めるとして活用することが望ましい。その際、特に以下の2点は注意が必要である。

(1)-1 切りくず形状

切削加工において切りくず形状は工具によって変形形状が

完全には拘束されず、自由空間中にカールしながら変形するため、切りくず生成のシミュレーションは他の機械加工に比べても形状精度を得ることが難しい。定性的に工具形状や加工条件の影響を確認するのみであれば問題ないが、定量的な整合性を求める場合は切りくずカールに対して影響の大きい切りくず-工具すくい面間の摩擦係数を調整することが多い。

(1) -2 送り分力、背分力

切削抵抗のうち、工具すくい面に垂直にかかる主分力は比較的实验との整合性は良好である。しかしこれに直交する送り分力、背分力は図3に示すように切刃近傍~逃げ面における弾性回復によって工具が押される力の影響が大きい。特に3次元シミュレーションではこの狭い領域の要素分割が不十分になりやすく、実験に比べて値が小さくなりやすい。切削抵抗については主分力のみの評価を行うか、背分力についてはより要素分割を精緻に行える2次元シミュレーションで評価することが必要となる。切削加工の大半は3次元加工であるが、シミュレーションではこのケースのように2次元解析の方が有益なケースも多い。

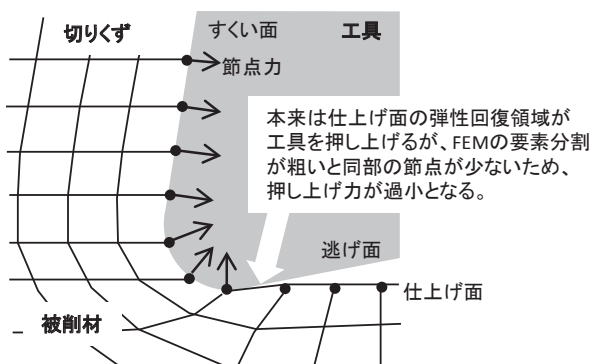


図3 刃先近傍の要素分割と節点力

(2) シミュレーション結果と実際に必要な特性との関係

切りくず生成シミュレーションで得られるデータは、切りくず形状や切削抵抗、温度、応力などであり、実用上求められることが多い切りくずの断断性や工具寿命が直接得られる訳ではない。このため、これらのデータと実際に評価したい特性との関係性を把握することが必要となる。例えば尾崎ら⁽¹³⁾は、シミュレーションと工具摩耗モデルを組み合わせることで、工具寿命を予測するシステムを開発している。

(3) 最適化ツールとの組み合わせ

切りくず生成シミュレーションはあくまで与えられた条件での結果を推定するツールであり、例えば工具設計に使用するのであれば、別に最適化を行うための枠組みが必要となる。そのためには計算時間を勘案して、実験計画法と組み合わせるなど計算数を抑える仕組みも必要である。さらに3次

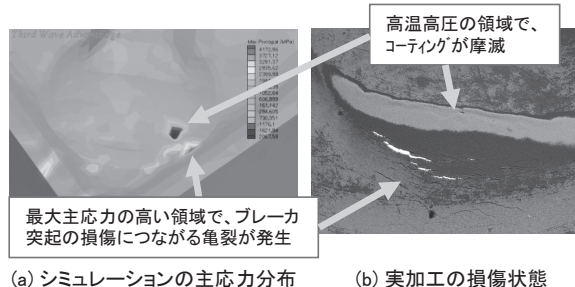
元工具であれば、最適化の対象となるパラメータの抽出が重要であり、その点では従来の工具設計と同じくやはり設計者の知識や“センス”が求められる。

4. シミュレーション活用事例

当社では前述のような考え方にに基づき、その特性を勘案しながら切りくず生成シミュレーションを活用している。ここではその代表例として以下5件を紹介する。

4-1 高送り旋削加工用チップの割損現象

まず旋削加工におけるチップの割損現象に対して、その原因探索調査と開発の方向性確認のためにシミュレーションを使用した事例を示す。図4は汎用タイプのチップブレードにて $f=0.4\text{mm/rev}$ の高送り条件で加工した場合の、第1主応力分布を示す。本条件ではまれにブレード底を起点としてチップが割損する現象が生じていたが、計算結果では同部に引張応力が発生しており、これが原因で割損が生じていると推測される結果となった。そこでブレード底形状を変更して引張応力が発生しない形状を探索し実加工を行ったところ、割損現象は再発せず、この形状をベースに最適化を図ることで当社の高送り用ブレードシリーズ (SE, GE, ME型) の開発につながった。



(a) シミュレーションの主応力分布 (b) 実加工の損傷状態

図4 高送り条件でのチップ応力と損傷状態 (SCM435, $vc=200\text{m/min}$, $f=0.4\text{mm/rev}$, $ap=3\text{mm}$)

4-2 正面フライス加工におけるバリ抑制

次に正面フライス加工におけるバリ生成に関連して、切刃形状の影響をバリ生成メカニズムに関連付けて解析した事例を紹介する。図5は当社DGC型カッタ⁽¹⁴⁾のチップコーナ部形状である。汎用タイプのG型チップはコーナ部をR形状、バリ抑制用のFG型はチャンファー形状としている。図6はそれらの工具でバリ発生時の変形状態を解析した結果である。バリは切りくずが切刃の軌跡通りにワークから分離せず、引き伸ばされた一部がワーク側に残存することにより発生する。FG型はG型と比較して、この引き伸ばされた部位のうちよりワークに近い位置でひずみが高くなっている。

すなわちよりワークに近い位置で引き伸ばされた部位が分断されることになり、その結果残存するバリが小さくなるということが理解できる。

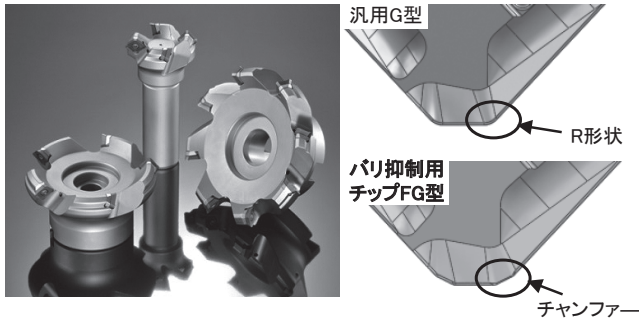


図5 正面フライスカッターSEC-Dual Mill™ DGC型

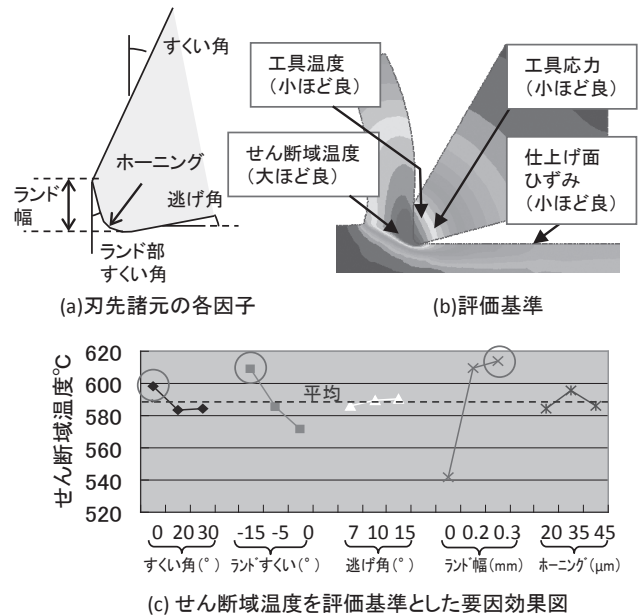


図7 実験計画法を活用した刃先諸元の最適化

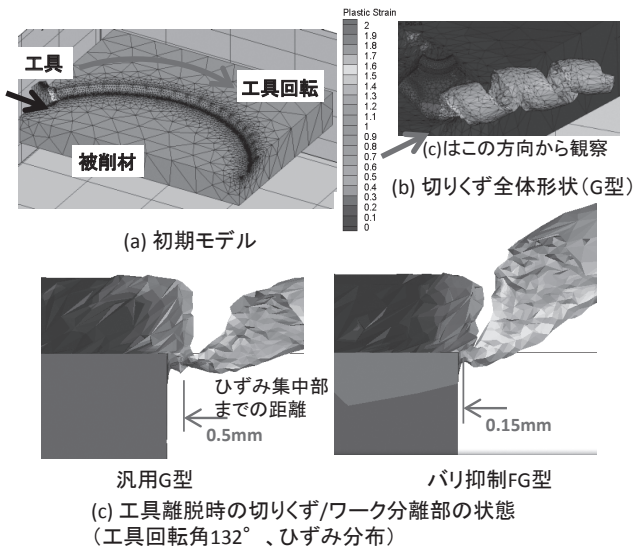


図6 正面フライス加工での工具離脱時のワーク変形 (φ100カッタ, SCM435, vc=200m/min, fz=0.25mm/t, ap=2.5mm)

4-3 実験計画法との組み合わせによる刃先諸元の最適化

ここまでは切削現象の理解を狙いとした活用であったが、次に、より直接的に工具設計に活用した事例を示す。まず2次元シミュレーションと実験計画法を組み合わせた事例を紹介する。本件は耐熱合金加工用の刃先諸元設計に活用したもので、まず刃先諸元パラメータを抽出し、これを実験計画法の因子として、L18直交実験^{※2}により最適化することを試みた(図7)。その際評価関数が必要となるが、シミュレーションでは前述の通り直接工具寿命は得られないため、工具寿命に影響する因子として切削温度など数種を設定し、それぞれを評価関数として最適化した数パターンの工具形状を導き出

した。その上で実際にそれらを試作して切削評価を行うことで、最小限の工具試作、実切削評価により工具形状を最適化した。

4-4 溝入れ工具のブレイカ設計

次に溝入れ工具設計への活用事例を示す。溝入れ工具も近年は切りくず処理性向上のためブレイカ形状は3次元的なものが一般的となっている。このため設計にも3次元シミュレーションを活用している。図8は当社溝入れ工具GND

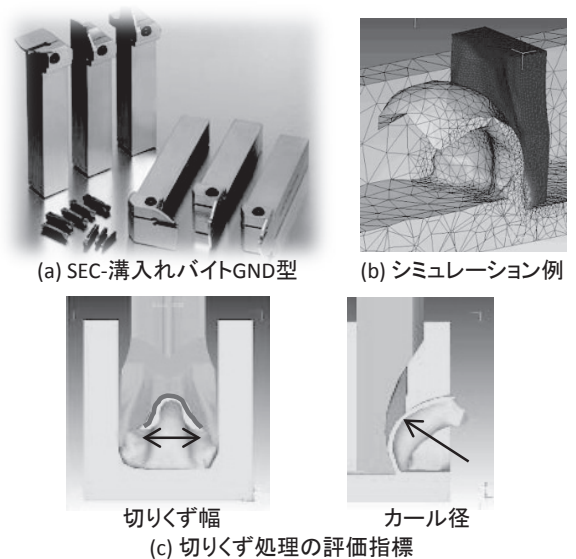


図8 溝入れ工具での解析事例 (S13C, vc=150m/min, f=0.1mm/rev, 刃幅3mm)

型⁽¹⁵⁾での解析例である。本工具では特に切りくず処理性向上を狙いとしているが、前述の通り切りくず断断性をシミュレーションで直接評価することは困難である。そのため①切りくずカール径、②切りくず幅、を指標とした評価を実施した。3次元ブレードは通常、金型によるプレス加工により成形するが、金型の製作コストやリードタイム削減の上で、シミュレーション技術は非常に有効な手段となっている。

4-5 ステンレス穴あけでの切りくず形状評価

最後にドリル加工の解析事例を紹介する。3次元シミュレーションの中でもドリル加工は非常に計算負荷が大きい解析となる。しかしながら計算機能力の向上とソフトウェアの改善により、ようやく現実的なシミュレーションが可能となりつつある。図9はステンレス材への穴あけにおいて切刃形状が切りくず形状に与える影響を評価したものである。ドリル加工ではこのような刃先近傍での切りくず生成状態を実切削で可視化することが困難であり、シミュレーションは非常に有効である。現状ではまだシミュレーションの改良が必要ではあるが、期待も大きい分野と言える。

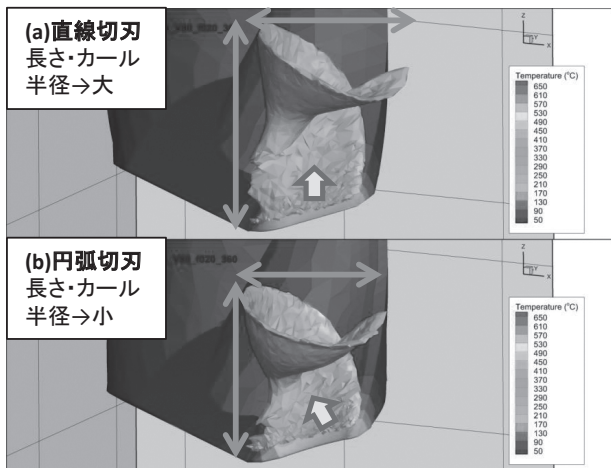


図9 ステンレス穴あけでの切りくず形状
($\phi 8$ ドリル, SUS304, $vc=80\text{m/min}$, $f=0.2\text{mm/rev}$)

5. 結 言

本報告では切りくず生成シミュレーションの発展経過について概説するとともに、当社での工具開発への適用事例、またシミュレーション活用における留意点を説明した。切りくず生成シミュレーション技術はようやく実用が始まった段階であり、まだ十分に現象再現ができないケースも多く、その特性を十分に理解した上で活用する必要がある。一方で、大きなポテンシャルを持つ技術でもあり、今後もより有効な活用を進めていく。

用語集

※1 FEM

Finite Element Method：有限要素法。数値解析手法の1つで、解析対象を微小な要素に分割し、各要素での計算結果を足し合わせることで、全体の挙動の近似解を求める。

※2 L18直交実験

実験計画法において因子の組み合わせを決定する直交表として、3水準の7因子と2水準の1因子からなる18通りを含むもの(L18直交表)を使用して実験を行うこと。因子間の相互作用を受けにくいなどの特徴がある。

参 考 文 献

- (1) M. E. Merchant, Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting, J. Applied Physics, 16, pp.318-324 (1945)
- (2) Kanji Ueda, Keiji Manabe, and Junya Okida, A Survey and Recent Investigations on Computational Mechanics in Cutting, 2nd CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, pp.39-55, Nantes, France (1999)
- (3) O.C. Zienkiwicz, The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill Publishing Company Limited (1971)
- (4) 垣野義昭, 「有限要素法による二次元切削機構の解析」、精密機械、37、7、pp.503-508 (1971)
- (5) 例えば 白樫高洋、白井英治, 「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、pp.340-345 (1976)
- (6) J. S. STRENKOWSKI, et al., A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 107, pp.349 (1985)
- (7) 前川克廣、前田正史、北川武揚, 「三次元連続型切りくず生成過程のシミュレーション解析(第2報) - 工具コーナ半径が高マンガン鋼の切削機構に及ぼす影響 -」、精密工学会誌、60、2、pp.240-244 (1994)
- (8) 上田完次、真鍋圭司、野崎省二, 「三次元切削機構の剛塑性有限要素法による解析(第2報) - 平フライス切削過程のシミュレーション -」、精密工学会誌、62、4、pp.526-530 (1996)
- (9) N. IKAWA, et al., Ultrprecision Metal Cutting -The Past, the Present and Future, Annals of the CIRP, 40, 2, pp.587-594 (1991)
- (10) 沖田淳也、真鍋圭司、上田完次, 「溝型チップブレード工具による切削過程の三次元有限要素法解析」、精密工学会誌、66、9、pp.1451-1455 (2000)
- (11) 島田 ら, 「3次元切削シミュレーション技術の開発」、SEIテクニカルレビュー第160号、pp.52-56 (2002)
- (12) 沖田 ら, 「切削環境評価技術とその応用」、SEIテクニカルレビュー第173号、pp.48-52 (2007)
- (13) 尾崎 ら, 「切削シミュレーション技術」、KOBEL STEEL ENGINEERING REPORTS、61、1、pp.84-88 (2011)
- (14) 松田 ら, 「汎用正面フライスカット[SEC-Dual Mill DGC型]の開発」、SEIテクニカルレビュー第181号、pp.19-22 (2012)
- (15) 島本 ら, 「溝入れ加工用工具[SEC-GND型]の開発」、SEIテクニカルレビュー第181号、pp.23-27 (2012)

執 筆 者

沖田 淳也* : 住友電工ハードメタル㈱
デザイン開発部 グループ長
博士(工学)



多山 拓一郎 : 住友電工ハードメタル㈱
アプリケーション開発部



島本 陽介 : 住友電工ハードメタル㈱
デザイン開発部



中田 伸哉 : 住友電工ハードメタル㈱
デザイン開発部



*主執筆者