

技術資料



Technical Data

難削材加工における切削シミュレーションを用いた 工具欠損予測

中川純一*¹, 大江章平*²

Development of a Method for Predicting Tool Defects Using a Cutting Simulation for Difficult-to-Machine Materials

Junichi NAKAGAWA and Shouhei OOE

Synopsis

In recent years, difficult-to-machine materials with high strength and high heat resistance have been widely applied to the automobile and energy industries. Milling tools used for these materials easily acquire defects because of the combination of impact force in intermittent machining, high strength at high temperature, low thermal conductivity and so on. However, factory workers usually optimize the machining conditions based on their past knowledge and trial and error, and they spend a lot of time on improvement work. On the other hand, with the progress of numerical analysis, simulations have been applied to the machining process and numerous papers have suggested cutting simulations that utilize finite element methods. Although there are studies on prediction methods of tool defects at the roots of end mills, there are few studies on tool defects like chipping at cutting edges.

So, we have developed a method of predicting tool defects that utilizes cutting simulations in order to quickly to select the optimal tool for the material machining. In this paper, the factors affecting tool defects are identified by a comparison of tool life tests, cutting simulations and micro-observations of cutting edges.

1. 緒言

近年、自動車、エネルギー産業では地球環境への負荷軽減の観点から、エンジンや発電機の燃焼効率向上が強く求められており、より高強度で耐熱性の高い難削材(Ni合金、高強度ステンレス鋼など)が幅広く利用されている。難削材が用いられる部品の例として、産業用インペラーディスクや自動車用のターボチャージャー部品が挙げられる。これらの製品は、工作機械の技術開発に伴い、同時5軸または割出し機能を有したマシニングセン

タでの加工が主流となっており、複雑形状品を高効率かつ高精度で加工できるようになってきた。

一般的に、複雑形状製品の加工においては、フライス工具やエンドミルなどのミリング工具が多数用いられる。しかし、難削材加工時のミリング工具は、断続加工の衝撃力、難削材の特徴である高温強度の高さ、工具との高親和性、加工硬化や低熱伝導率などの要因が複合的に重なるため、工具欠損が発生しやすく、生産性低下の一因となっている。また、この問題に対して、製造現場では、過去の知見やトライアンドエラーに頼った切削条

2020年9月28日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 アメディア(株) (Amedia Co., Ltd.)

件の最適化が行われており、工具形状の選定と切削条件の改善に多くの時間を費やしているのが現状である。

一方、近年の数値解析技術の進歩に伴い切削加工にもシミュレーションが適用されるようになってきた。工業的に用いられる切削シミュレーション手法として、切削工程全体の切削負荷を計算して、NCプログラムを最適化するマクロ視点のシミュレーション¹⁾と、切削工具の応力や温度分布から工具形状の設計や切削条件を最適化するミクロ視点での有限要素シミュレーションがある。特に工具欠損においては後者を活用した切削シミュレーションの事例があり、例えば、断続的な旋削加工における超硬チップの工具欠損予測²⁾から超硬エンドミルの折損予測へ応用した研究がある。しかしながら、この超硬エンドミルの研究では工具の根元からの折損を予測しており、刃先先端のチップングに近い工具欠損の研究はほとんどない。

そこで、難削材加工において迅速かつ最適な工具選定を可能とするため、切削シミュレーションを活用した工具欠損予測手法をこれまで開発してきた^{4), 5)}。本稿では、エンドミル加工の切削シミュレーションから得られた切削抵抗および応力解析結果と実験結果を比較することで、工具欠損因子の同定を試みた。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本実験で用いた SUS630 の化学組成を Table 1 に示す。SUS630 は、時効熱処理を行うことで析出硬化により強度が増す材料であり、切削加工においては難加工材として位置づけられる。主に石油・ガス発掘、石油精製、石油化学、液化天然ガス (LNG)、製鉄、製紙業においてインペラーディスクなどのコンプレッサ用部品に使用されることが多い。素材は、熱間鍛造後、固溶化熱処理をするため、1060℃で3時間均熱保持をした後に水冷した。次に、時効熱処理をするため、620℃で5時間均熱保持した後に空冷し、HRC = 32.2 に調質した。そして熱処理後、素材を縦 68 mm × 横 68 mm × 高さ 100 mm の試験片形状へと加工した。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Material	C	Ni	Cr	Cu	Nb	Fe
SUS630	0.038	4.27	15.69	3.27	0.24	Bal.

2. 2 実験方法と実験条件

2. 2. 1 切削抵抗の測定方法

Fig. 1 に切削抵抗の測定方法を示す。切削動力計 (Kistler 社製) 上部に設置されたバイスで材料を固定して肩加工にて評価を行った。切削抵抗は X, Y, Z の 3 軸成分を測定した。Table 2 に切削抵抗の測定試験に使用した工具形状と切削条件を示す。切削工具は、直径 12 mm、4 刃の市販のラジラスエンドミルを用いた。工作機械は DMG 森精機 (株) 製の複合 5 軸加工機 NT4200 を使用した。切削条件は、切削速度を 90 m/min、軸切込量を 2.0 mm、径切込量を 4.0 mm で固定し、送り速度を 0.15 ~ 0.25 mm/tooth の範囲で変化させた。

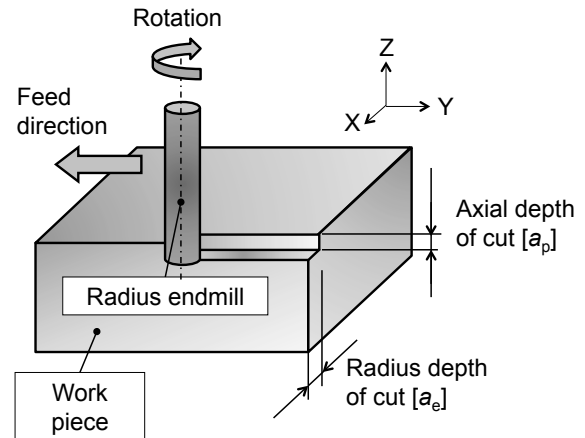


Fig. 1. Method of the tool life test.

Table 2. Cutting tool and cutting conditions.

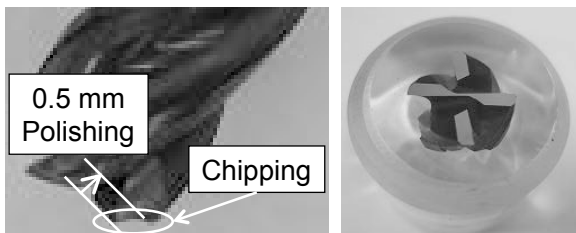
Cutting tool	
Type of tool	Radius endmill
Material	Cemented carbide
Coating	TiAlN
Diameter	12 mm
Corner R	0.75 mm
Rake angle	7°
Helix angle	30°
Number of teeth	4 teeth
Cutting conditions	
Cutting velocity	90 m/min
Cutting feed rate	0.15, 0.20, 0.25 mm/tooth
Axial depth of cut	2.0 mm
Radius depth of cut	4.0 mm

2. 2. 2 工具寿命試験の方法

Table 3 に工具寿命試験で使用した切削工具と切削条件を示す。切削工具は、切削抵抗の測定で用いた、ラジラスエンドミルの刃先のチャンファー（面取り）形状を変更したものを使用した。これは刃先のチャンファー形状を変更することで、刃先近傍にかかる応力状態を変化させる狙いである。切削抵抗の試験と同様に、工作機械は、DMG 森精機(株)製の複合 5 軸加工機 NT4200 を使用し、試験方法は、バイスで材料を固定し、肩加工にて評価を行った。切削条件は、送り速度を 0.15 ~ 0.25 mm/tooth、軸切込量を 2.0 ~ 4.0 mm の範囲で変更することで工具にかかる切削負荷を変化させた。また、工具寿命は工具欠損が生じるまでの加工距離とした。Fig. 2 に工具損傷部の刃面観察のための、工具寿命試験後のエンドミルの樹脂埋め手順を示す。まず、エンドミルを刃底から 10 mm の位置で切断して樹脂に埋め込んだ。このとき、使用済の工具内部の亀裂が進展しないように常温で硬化する樹脂埋め方法を採用した。次に樹脂埋めしたサンプルを刃底端面から 0.5 mm の位置まで研磨を行い、その後、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて刃面を観察した。

Table 3. Cutting tool and cutting conditions.

Cutting tool	
Type of tool	Radius endmill
Material	Cemented carbide
Coating	TiAlN
Diameter	12 mm
Corner R	0.75 mm
Rake angle	7°
Helix angle	30°
Number of teeth	4 teeth
Chamfer	Non chamfer C0.07-0.10, C0.10-0.15
Cutting conditions	
Cutting velocity	90 m/min
Cutting feed rate	0.15, 0.20, 0.25 mm/tooth
Axial depth of cut	2.0, 3.0, 4.0 mm
Radius depth of cut	4.0 mm



(a) Before embedding (b) After embedding
Fig. 2. Procedure of embedding in resin.

2. 3 シミュレーションによる解析方法

切削シミュレーションは、市販の有限要素法解析ソフト DEFORM™ -3D（SFTC 社製）を使用した。Fig. 3 に切削シミュレーションによる工具の応力解析方法を示す。エンドミルは剛体モデル、被削材を剛塑性体モデルとして切削負荷解析を行い、これを弾塑性体のエンドミルに転写することで応力解析を行った。切削負荷の計算で用いた SUS630 の材料データベース（応力 - ひずみ線図）は、2次元の旋削加工試験で測定した切削抵抗と一致するように切削シミュレーションで逆解析することで同定した⁶⁾。

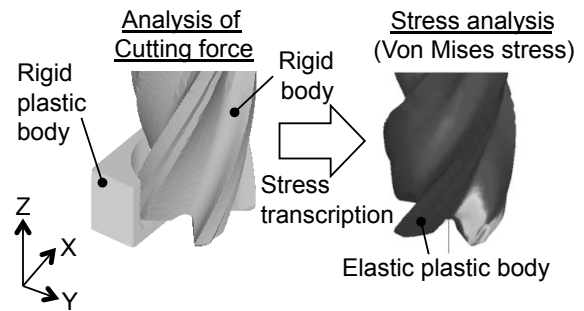


Fig. 3. Method of analyzing the stress of a cutting tool.

3. 結果および考察

3. 1 切削抵抗の比較結果

Fig. 4 に送り速度と切削抵抗の関係を、実験と切削シミュレーションで比較した結果を示す。切削抵抗は 1/4 回転加工したときの最大切削力をプロットし、X、Y、Z の各軸方向で比較した。結果、各軸、各送り速度において実験と解析結果の誤差がほぼ 10% 以内であり、切削シミュレーションの予測精度が十分であることを確認した。

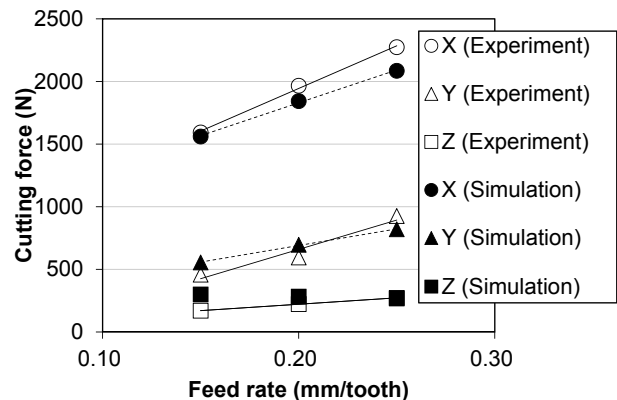


Fig. 4. Relationship between cutting force and feed rate in experiment and simulation.

3. 2 工具寿命試験の結果

Fig. 5 に送り速度 0.15 mm/tooth で固定し、刃先チャンファ形状と軸切込量を変化させたときの工具寿命の結果を示す。軸切込量が 3 mm, 4 mm のとき、チャンファの幅が大きいほど工具寿命が低下し、軸切込量が 2 mm のときチャンファの幅があるほど工具寿命が向上した。これはチャンファの付与により工具欠損防止に効果がある一方で、軸切込量が増加すると工具にかかる全体の切削負荷と振動が増加するため、工具寿命が悪化したと考えられる。

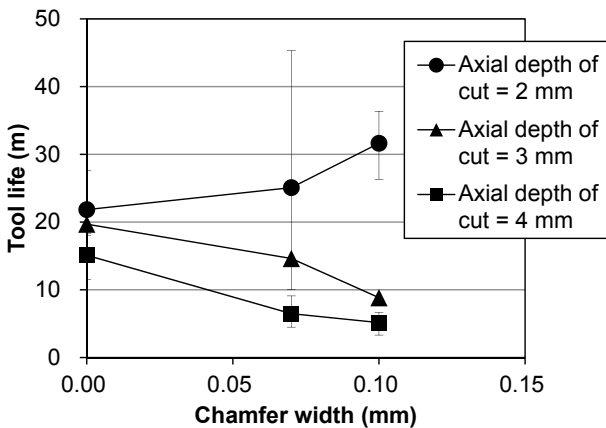
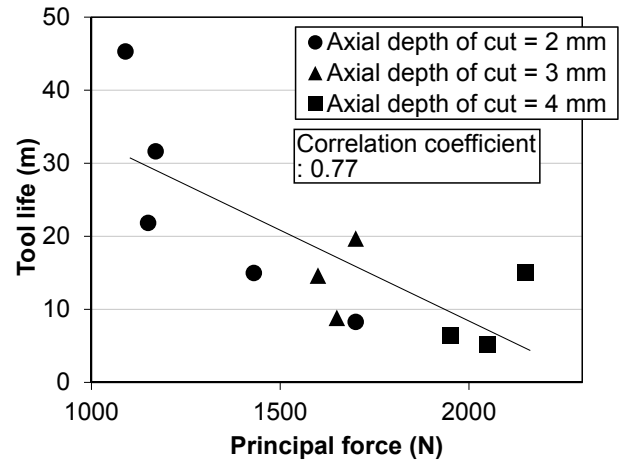


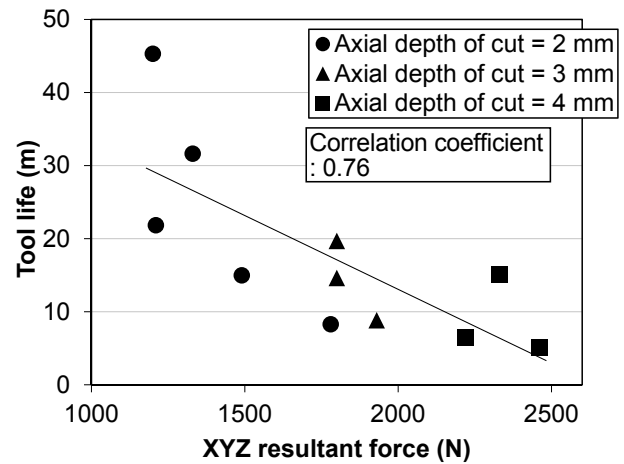
Fig. 5. Effects of chamfer width and cutting condition on tool life test.

3. 3 工具寿命の支配因子の同定

Fig. 6 に切削シミュレーションで得られた切削抵抗と工具欠損までの工具寿命の相関性を調査した結果を示す。また、ここで計算した相関係数は直線近似から求めた。これは、酒井らの報告⁷⁾において、エンドミル加工では、切削抵抗と加工距離の関係が直線近似となることから採用した。その結果、主分力と工具寿命の相関係数は 0.77 と最も高く (Fig. 6(a)), 次いで XYZ 合力との相関係数が 0.76 と高いこと (Fig. 6(b)) がわかった。また、最大切削負荷の合力と工具欠損寿命の相関性については上田らの報告⁸⁾があり、今回と同様な結果が得られている。このため、今回のメカニズムにおいても、切削負荷によって微小な切欠きが発生した後、切削負荷の繰り返し変動に伴って疲労亀裂が進展することで欠損に至ったと推測される。



(a) Relationship between principal force and tool life

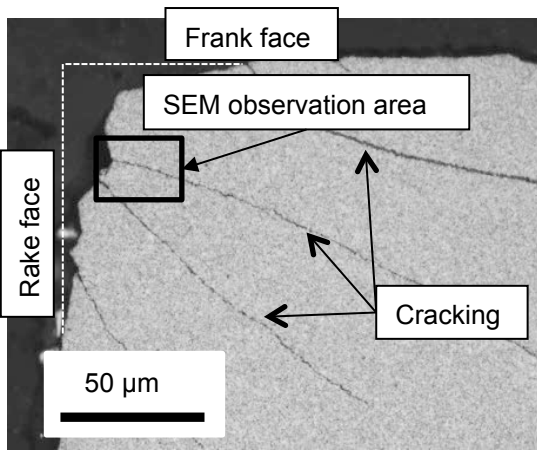


(b) Relationship between XYZ resultant force and tool life

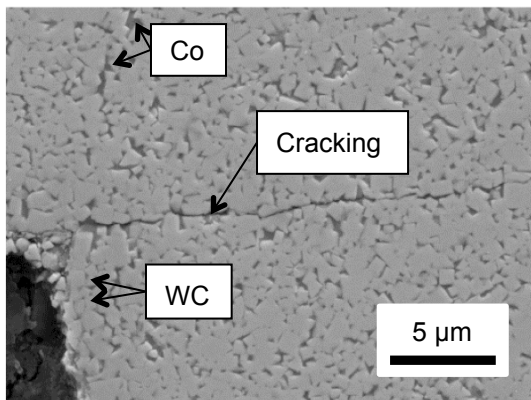
Fig. 6. Relationship between simulation and tool life test.

3. 4 工具観察による工具欠損の原因調査

Fig. 7 に工具欠損後のエンドミル刃先断面 (軸切込量 2.0 mm, 1 刃送り 0.15 mm/刃, チャンファなし) を光学顕微鏡と SEM で観察した結果を示す。光学顕微鏡像から、すくい面、逃げ面に微小なチッピングが存在し、そこから亀裂が伝播した様子がわかる。亀裂部分を測定した SEM 像において、四角形状部がタングステンカーバイト (WC) であり、それらの隙間を埋めている部分がコバルト (Co) であるが、WC を避けるように Co 内に亀裂が入り、伝播していることがわかる。



(a) Optical microscope image



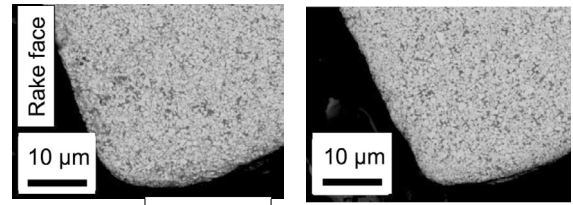
(b) SEM image

Fig. 7. Optical microscope image and SEM image near the cutting edge.

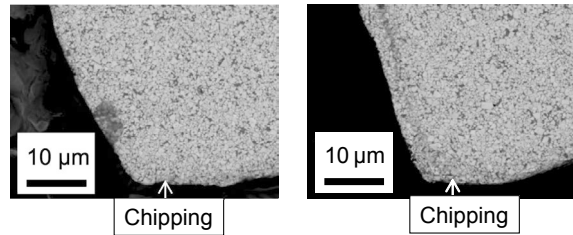
次に、エンドミルの工具刃先に微小チップングが生じるまでの過程を調査するため、所定の加工距離、6.9 m、13.9 m、20.8 m（加工条件：軸切込量 2.0 mm、1 刃送り 0.15 mm/刃、チャンファなし）を加工した後の工具刃先近傍を観察した。Fig. 8 に SEM 像を示す。観察部位は 4 刃中、2 刃を選定し、底刃から 0.5 mm 位置の断面を観察した。加工距離が 6.9 m では、刃先に変化は見られなかったが、加工距離が 13.9 m になると、すくい面、逃げ面ともに刃先近傍に凹凸が見られるようになった。さらに、加工距離が 20.8 m になると、すくい面と逃げ面に複数の微小なチップングが確認された。

3. 5 微小チップング発生因子の考察

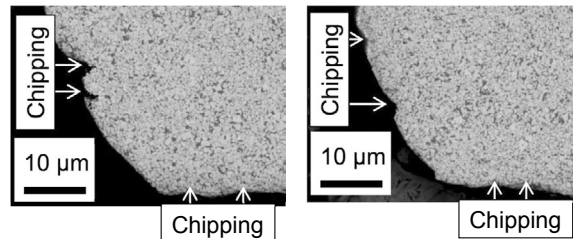
ここでは微小チップング発生因子を考察するため、工具刃先近傍に発生した微小チップングの発生部位とシミュレーション結果を比較した。Fig. 9 に軸切込を 2 mm、1 刃送りを 0.15 mm/刃とした切削条件におけるシミュレーション結果を示す。一般的に超硬合金の引張強



(a) Cutting distance: 6.9 m



(b) Cutting distance: 13.9 m



(c) Cutting distance: 20.8 m

Fig. 8. SEM images near the cutting edge for each machining distance.

度は圧縮対比で 1/3 の強度しかなく、脆性破壊が引張応力場で発生しやすいことから、応力の最大値である最大主応力を、さらに、先に挙げた臼井ら²⁾の提案する引張の主ひずみを合算した引張主ひずみ和を、切削シミュレーションの数値として用いた。その結果、最大主応力 (Fig. 9(a)) がすくい面に応力が集中しているのに対して、引張主ひずみ和 (Fig. 9(b)) は、工具刃先近傍のすくい面と逃げ面の双方の数値が高いことがわかり、Fig. 8(c) のマイクロ観察が示す微小チップング位置と臼井らの提案する引張主ひずみ和の最大位置がほぼ一致することがわかった。

以上より、工具欠損の起点は微小なチップング（切欠き）であり、この切欠きが発生した後、切削負荷の繰り返し変動によって亀裂が進展して欠損に至ると考えられる。さらに、微小なチップングと引張主ひずみ和の位置が一致したことから、引張主ひずみ和の数値が小さくなるよう工具の刃先形状や切削条件を決定することで微小チップングが抑制されて、工具欠損が発生しにくくなると考えられる。

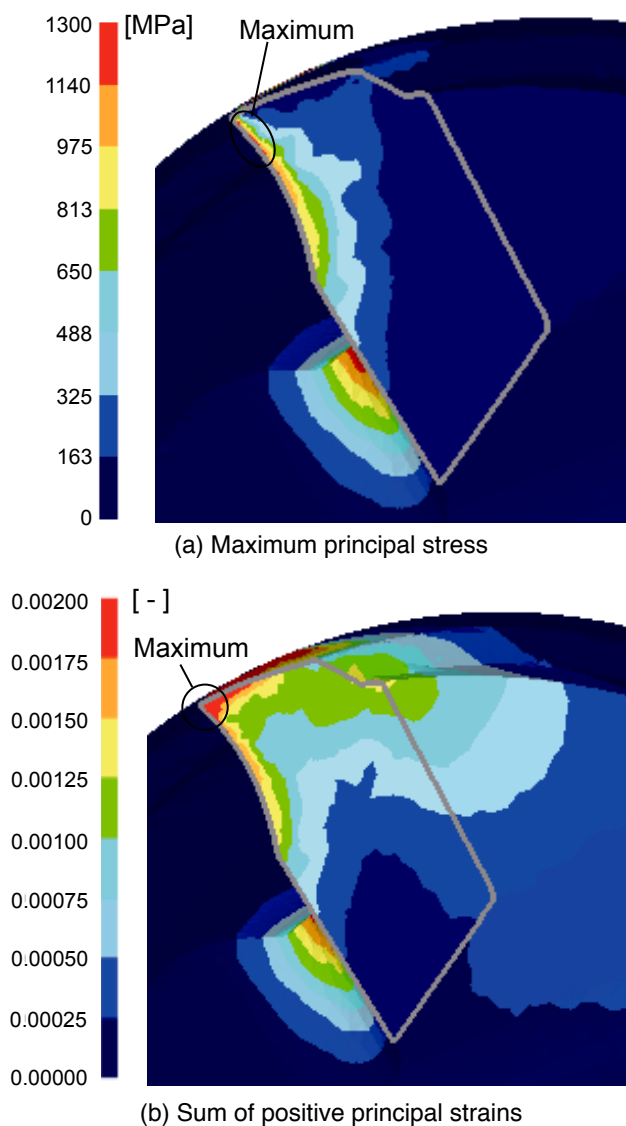


Fig. 9. Simulations of cutting edge.

4. 結 言

エンドミル加工の切削シミュレーション結果と実験結果を比較することで工具欠損因子の同定を試み、以下の結果を得た。

- 1) シミュレーションから得られた切削負荷の主分力と工具寿命の相関係数が 0.77 と最も高い数値を示した。このことから切削抵抗を抑制することで工具欠損までの工具寿命が向上すると考えられる。
- 2) 工具欠損後の刃先の光学顕微鏡観察により、すくい面、逃げ面に微小チップングが存在し、それらを起点として亀裂が伝播することがわかった。
- 3) 工具刃先近傍の微小なチップング位置と引張主ひずみ最大の位置が一致することから、引張主ひずみ最大の数値が小さくなるように工具形状や切削条件を決定することで、微小チップングが抑制され、工具欠損が発生しにくくなると考えられる。

(文 献)

- 1) 八田武士, 中川純一: 電気製鋼, **87**(2016), 1, 45.
- 2) 臼井英治, 井原透, 白樫高洋, 金沢憲一: 精密機械, **50**(1984), 5, 866.
- 3) 金沢憲一, 奈良岡暁: 精密工学会誌, **64**(1998), 1, 131.
- 4) 中川純一, 杉野敦, 八田武士, 大江章平: 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015), 153.
- 5) 中川純一, 杉野敦, 八田武士, 藤原正尚, 大江章平: 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016), 601.
- 6) 株ヤマナカゴーキン: 素形材, **52**(2011), 1, 48.
- 7) 是永宗祐, 大澤洋文, 植松俊明, 伊藤芳典, 静弘生, 酒井克彦: 2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2015), 1023.
- 8) 上田完次, 岩田一明, 柴坂敏郎, ジョーン・パーシー: 精密機械, **48**(1982), 10, 1311.



中川純一



大江章平