研究論文

インコネル 718 に対するボールエンドミル加工の切削シミュレーション（第２報）

須貝　裕之*

CAE Analysis about Cutting of Inconel718 by Ball-nosed endmill (2nd report)

SUGAI Hiroyuki*

抄　　録

市販の切削シミュレーションソフトウエアを用いて，ボールエンドミルによる Ni 基超耐熱合金インコネル 718 の高速切削加工を解析した。既報 [1)]ではソフトウエアの標準条件で解析を行い，切削シミュレーションの基本的な解析特性について検証した。本報では，実際に切削実験を行っている市販ボールエンドミル工具を対象として切削シミュレーションを行い，その結果について検討した。併せて，実験において切削速度の増加に対して切削抵抗が低下する切削条件を解析し，実験と同じ現象が発現するか検証した。それぞれの検討結果をまとめると，ボールエンドミル工具によるインコネル 718 の切削については，切削速度の増加に伴って工具刃先の温度分布が高温になるとともに，熱の拡散時間が短くなるため高温領域が狭まってゆくことを確認した。また，切削速度の増加に対する切削抵抗減少については，わずかな切削抵抗減少は認められたものの，実験と同じ現象を完全に再現するまでには至らなかった。

1.　緒　　言

従来，切削条件や工具形状を検討するため，切削中の工具などが受ける応力や温度を測定する方法が数多く試みられてきた。しかし，切削現象は工具刃先の微細領域において温度やひずみが極めて短時間で急激に変化する現象であり，これを詳細に測定することは現時点においても容易ではない。一方，現実の物理現象をコンピュータにより計算する CAE（Computer Aided Engineering）は，1950 年頃の航空機設計のための構造解析を出発点として，その後のコンピュータのめざましい計算能力向上とともに，その解析領域を広げてきた。近年では，切削のような極めて非線形性が強い現象に対しても解析が可能な動的陽解法による CAE ソフトウエアが登場している。

既報 [1)]ではソフトウエアの基本的な解析特性の検証と従来の実験結果に対する解析結果の比較，ボールエンドミルとスクエアエンドミルの切削特性の違いについて調べた。本報では，実際の切削に近い条件におけるボールエンドミルによるインコネル 718 の高速切削を解析し，切削現象の分析や最適加工条件等の導出に利用可能かを検証する。

2.　解析ソフトウエア

解析にはアメリカ THIRD WAVE SYSTEMS 社が開発した金属切削用有限要素法プログラム AdvantEdge を使用した。AdvantEdge は切削シミュレーション専用のソフトウエアであり，様々な切削現象を計算できる。図 1 にソフトウエアの画面を示す。このソフトウエアは，汎用の CAE ソフトウエアと異なり，解析者が解析モデルの要素分割や境界条件の設定を意識することなく計算ができるよう配慮されている。

＊ 研究開発センター

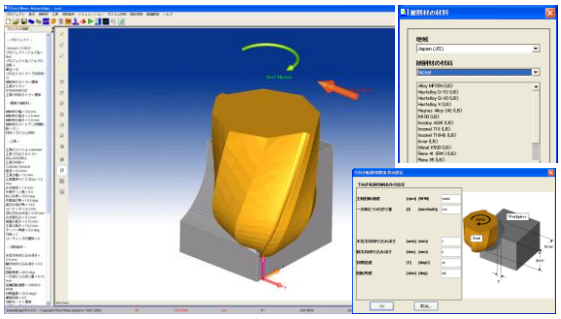


図 1　ソフトウエアのメイン画面

その一方，材料特性に関しては，具体的にどのような値が定義されているかは非公開であり，使用者が直接確認することはできない仕様となっている。

3.　解析結果

3.1　市販ボールエンドミル工具によるインコネル 718 の切削

ここでは，本研究の切削実験で使用している市販のボールエンドミル工具によるインコネル 718 の切削シミュレーションを行った。図 2 に解析における工具の形状を示す。工具の仕様と切削条件を表 1，表 2 にそれぞれ示す。既報 [1] で行った標準条件工具による切削と比較をするため，主軸回転速度を同じにしてシミュレーションを行った。この条件では，切り込みと工具の直径，刃数が異なる以外は，ほぼ同じ切削条件となっている。

図 3 に主軸回転速度 20000min^{-1} の場合の計算結果を示す。工具の回転に伴い切りくずが飛散する様子が再現されている。図 4 に切削時の最高温度と切削抵抗の時間変化の計算結果を主軸回転速度毎に示す。切削中の最高温度は一刃毎の切削に伴って上下する。最高温度は主軸回転速度の増加に伴って 5000min^{-1} の 1000℃から増加して行くが，20000min^{-1} で 1200℃に達した後は，主軸回転速度が増加してもほとんど上昇

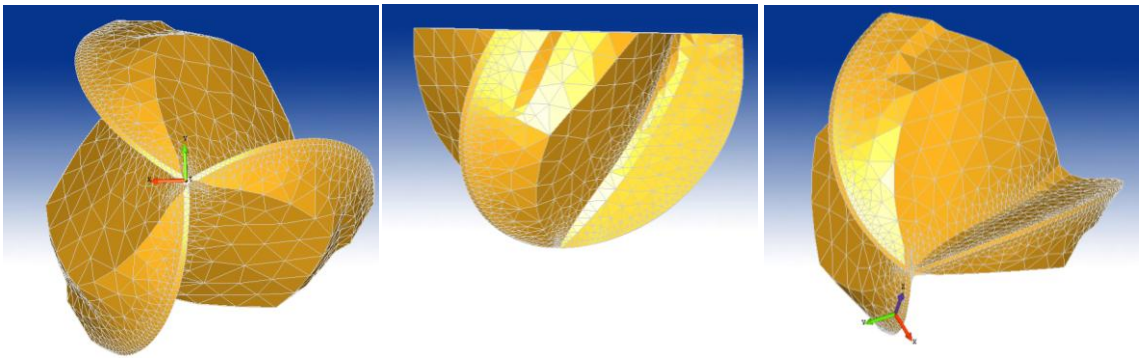


図 2　市販ボールエンドミルの解析モデル形状

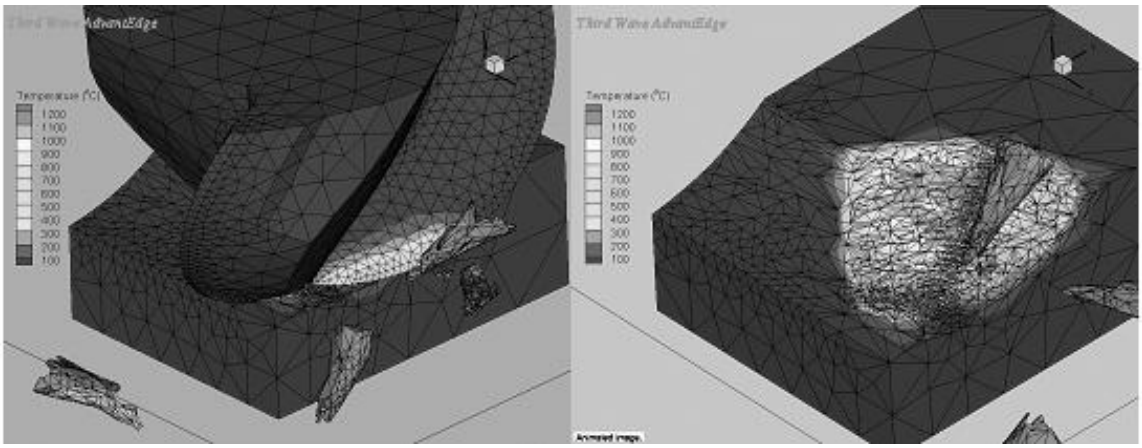
表 1　工具の仕様

	前回の報告	本解析
直径	8 mm	10 mm
刃数	2	3
ねじれ角	20°	30°

表 2　切削条件

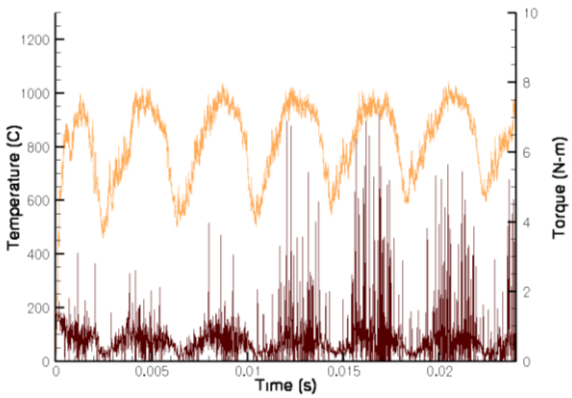
		前回の報告	本解析
被削材		インコネル 718	
初期温度		20 ℃	
主軸回転速度		5000, 10000, 20000, 40000 min^{-1}	
一刃当たりの送り		0.15 mm/tooth	
切込み	軸方向	5 mm	1 mm
	半径方向	2 mm	
切削方式		下向き削り	
冷却		乾式切削	

しない。一方，切削中の最高温度が最も低くなるときの値は，主軸回転速度の上昇に伴って徐々に増加し，20000min^{-1} を超えても頭打ちの傾向は顕著には見られない。切削抵抗に関しては，主軸回転速度が低いときには値の振幅が極めて大きく正確な値を求めることは困難であるものの，主軸回転速度の上昇に伴って低下する傾向は明確には見られない。

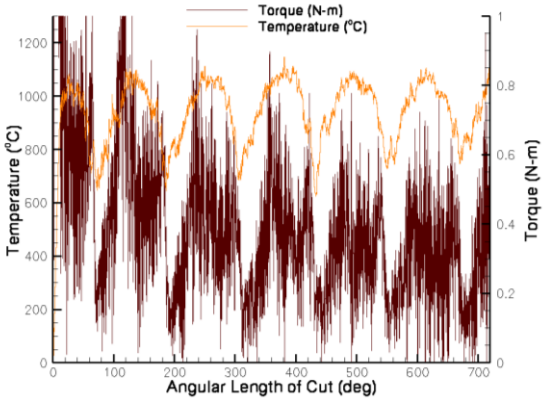


(a) 工具，切りくず，被削材を表示　　(b) 工具非表示，切りくずと被削材のみ表示

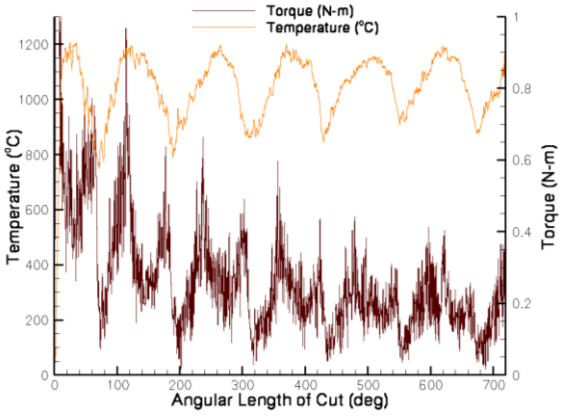
図 3　計算結果の一例（切削時の温度分布）



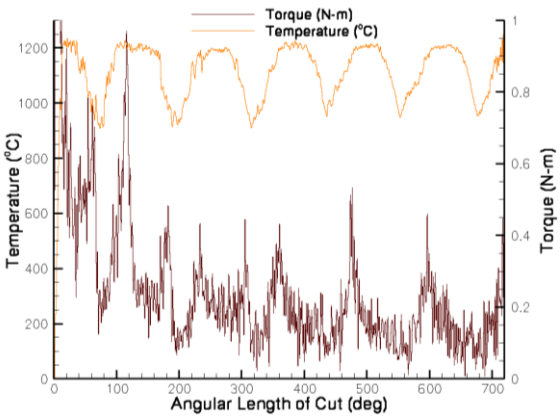
(a) 5000 min^{-1}



(b) 10000 min^{-1}



(c) 20000 min^{-1}

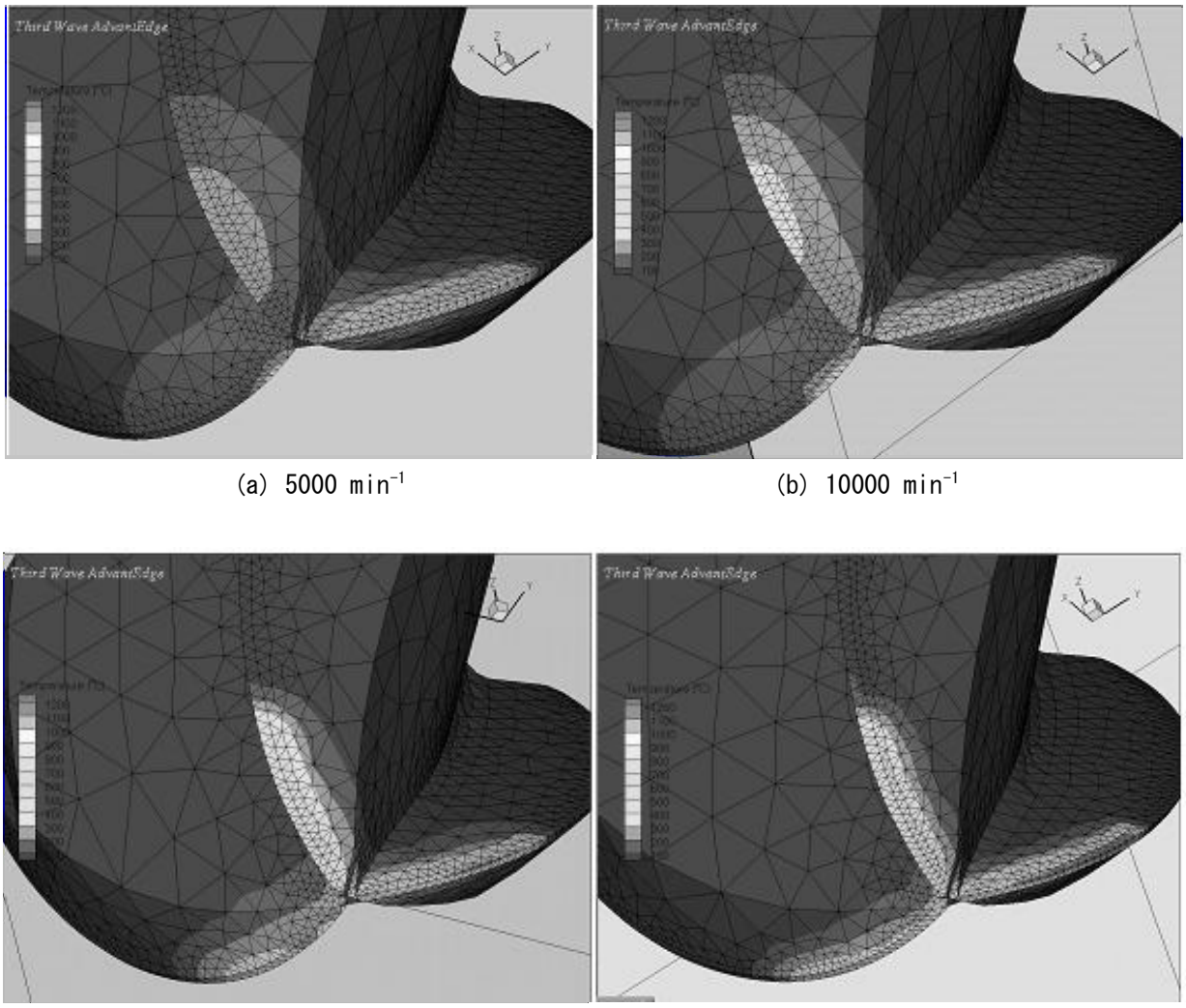


(d) 40000 min^{-1}

図 4　切削時の最高温度と動力の時間変化

図 5 に切削中に工具の刃先温度が最も高くなった瞬間（切削開始から 864 ° 回転）の温度分布を主軸回転速度毎に示す。主軸回転速度の増加に伴って刃先の最高温度が増加している。主軸回転速度が 5000 min^{-1}，10000 min^{-1}，20000 min^{-1}，そして 40000 min^{-1} に増加するに従って，最高温度も約 1000℃，1100℃，1200℃そして，1200℃を超える値まで増加している。一方，主軸回転速度の増加に伴い，工具刃先の高温領域は狭まってゆく。このように主軸回転速度の増加に伴って最高温度が増加し，高温領域が狭くなる原因としては以下が考えられる。

主軸回転速度の増加により一刃が切削を行う時間は短くなる。これに対して，一刃が切削を行う際に発生する発熱量が同じだとすれば，熱が拡散する時間が短くなる分だけ最高温度は増加し，その領域は狭くなる。前述の切削時の最高温度と動力の時間変化において，切削中に最高温度が最も低くなるときの値は，主軸速度の増加に伴って徐々に増加すると述べた。これに関しても主軸回転速度が速くなるほど，切削を終えた切れ刃（図 5 各図の左下の刃先）の温度が高くなっていることから明らかなように，切削を終えた刃先が冷却される時間が短くなるためこのような現象を生じていると考えられる。



(a) 5000 min^{-1}　(b) 10000 min^{-1}

(c) 20000 min^{-1}　(d) 40000 min^{-1}

図 5　工具の刃先温度分布

3.2　切削速度の増加に対する切削抵抗減少

高速切削の特徴の一つに，切削速度の増加に伴う切削抵抗の減少がある。既報[1)]はソフトウエア標準の工具形状と切削条件でインコネル718 の切削シミュレーションを行い，シミュレーションにおいても主軸回転速度の上昇に伴って切削抵抗が減少することを確認した。しかし，既報の切削条件は，実際の切削条件と比較して切り込みや主軸回転速度が大きく異なっている（表 3）。ここでは，実際の切削条件と同じ条件でシミュレーションを行い，切削速度の上昇に伴う切削抵抗の減少が再現されるか調べた。なお，インコネル 718 を切削する今回の研究においては，主軸速度と切削抵抗の関係を調べた詳細なデータがないため，嶽岡がボールエンドミルを用いてプリハードン鋼を切削した実験結果[2)]をもとに，これをシミュレーションにより計算して比較した。表 4，表 5 に工具の仕様と切削条件を示す。実験に使用した被削材は(株)日立金属製プラスチック金型用プリハードン鋼 HPM1(41HRC)であるが，切削シミュレーションソフトウエアには同種の材料が登録されていないため，比較的近いと思われる SKD61（44HRC）を用いた。それ以外の工具形状や切削条件は可能な限り実験に合わせた。

計算結果を図 6 に，また実験とシミュレーションによって得られた切削抵抗と主軸回転速度の関係を図 7 に示す。図 7 より実験条件と同じ条件で行ったシミュレーションでは，各分力の大小関係は

主分力＞送り分力＞軸方向分力

となり、実験と同じ傾向を示しているものの，主軸回転速度の上昇に伴う切削抵抗低下の現象は再現されていない。また切削抵抗の絶対値もシミュレーションの方が 2～3 倍程度大きな値となっている。前回の報告における大きな切り込み量と高い主軸回転速度では，切削抵抗低下の現象がシミュレーションにおいて確認されているにもかかわらず，今回の条件では確認されなかった。このことから，切削シミュレーションソフトウエアの計算アルゴリズムがボールエ

表 3　切削条件の違い

	前回報告のシミュレーションにおける切削条件	実際の切削条件
工具	ボールエンドミル 材種 超硬，直径 8 mm, 2 枚刃	ボールエンドミル 材種 超硬，直径 6 mm, 3 枚刃
主軸回転速度	5000～40000 min^{-1}	2420～14600 min^{-1}
一刃当たりの送り	0.15 mm/tooth	0.05～0.18 mm/tooth
軸方向切込み	5 mm	0.3 mm
半径方向切込み	2 mm	0.5～0.8 mm

表 4　工具の仕様

工具	ﾎﾞｰﾙｴﾝﾄﾞﾐﾙ 材種　超硬
直径	2 mm
刃数	2
すくい角	5°
ねじれ角	20°

表 5　切削条件

被削材		SKD61(HRC44)
初期温度		20 ℃
主軸回転速度		5000, 10000, 20000, 30000, 45000 min^{-1}
一刃当たりの送り		0.1 mm/tooth
切込み	軸方向	0.5 mm
	半径方向	0.5 mm
切削方式		下向き削り
冷却		乾式切削

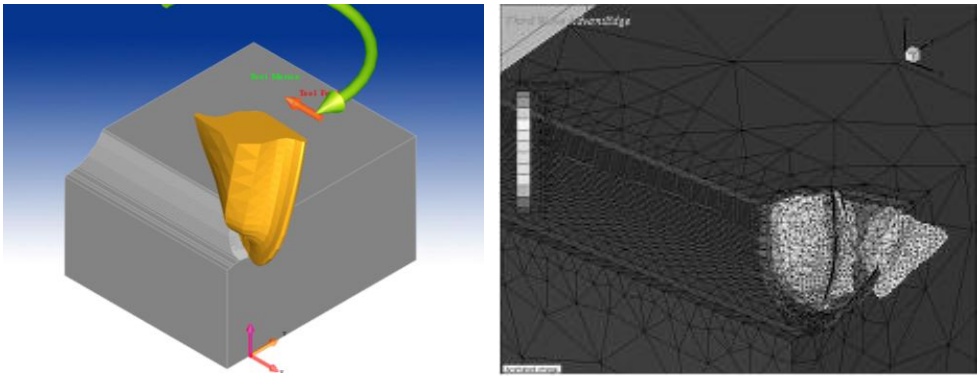
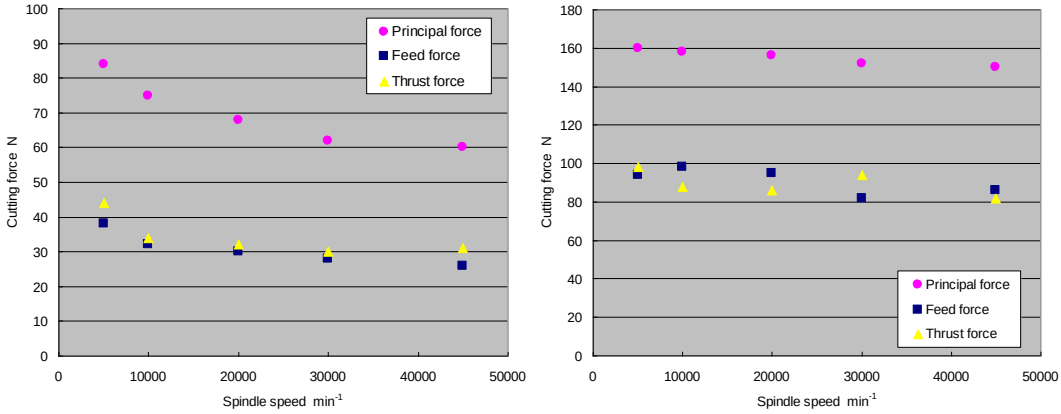


図 6 シミュレーションモデルと切削時の温度分布例



(a) 実験　　(b) シミュレーション

図 7 実験とシミュレーションにおける主軸回転速度と切削抵抗の違い

ンドミルを用いた低切り込み，高送りの高速切削に対応していないことが原因の一つと考えられる。従って，現状では小径ボールエンドミルを用いた高速切削に対して，実現象を定量的に再現しているとは言い難い。ただし，工具形状を変更した場合の効果など定性的な評価を行う場合や，切削時の刃先の温度変化等実測が困難な評価を行うにあたってはその有効性を発揮できる機会も十分にある。

4. 結　　言

切削シミュレーションソフトウエアによってインコネル 718 の切削を解析した結果を下記にまとめる。

(1) 市販の工具を対象として主軸回転速度を変化させて切削シミュレーションを行い，切削速度の上昇に伴って工具刃先の温度分布が高温になるとともに，熱の拡散時間が短くなるため，高温領域が狭まってゆくことを確認した。

(2) 現状の切削シミュレーションは，本研究で行っている小径ボールエンドミルによる低切り込み高送りの高速切削を完全に再現できるまでには至っていない。しかしソフトウエア開発元ではこの原因を検討中であり，将来的には改善されることが期待される。

参考文献

1) 須貝裕之，“インコネル 718 に対するボールエンドミル加工の切削シミュレーション（第 1 報）”，新潟県工業技術総合研究所研究報告書 No.40 平成 22 年度，2010，p8.

2) 嶽岡悦雄，“高速空気静圧主軸による高硬度材のエンドミル加工に関する研究”，東京大学博士課程学位論文，1998，p75.