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 1 報）

須貝　裕之*

CAE Analysis about Cutting of Inconel718 by Ball-nosed endmill

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。最初に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。次に，ボールエンドミルとスクエアエンドミルの切削挙動の違いについて調査した。最後に，従来の実験結果に対する計算結果の比較を行った。その結果，ボールエンドミルがスクエアエンドミルに比べて切削抵抗が緩やかに変化する現象や，切削速度の上昇に伴う切削抵抗の低下現象を再現できることを確認した。

1.　緒　　言

従来より，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，実際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。

本研究では，市販の切削専用ソフトウエアによりボールエンドミルによる高速切削現象を解析し，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している。本報では，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や，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報告する。次報では，現在研究を進めている小径ボールエンドミルについて報告する。

＊ 研究開発センター

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。これは切削シミュレーション専用のソフトウエアであり，解析対象としては 2 次元，3 次元の旋削，ミーリング，ドリリングなどの様々な現象を計算できる。

図 1 にソフトウエアのメイン画面を示す。

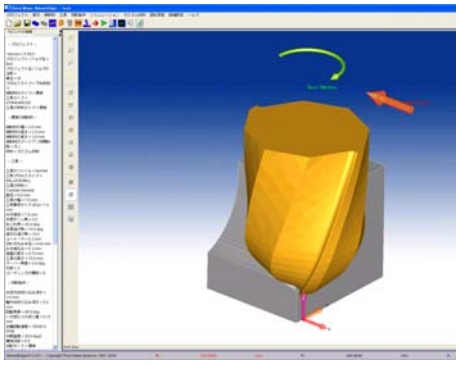
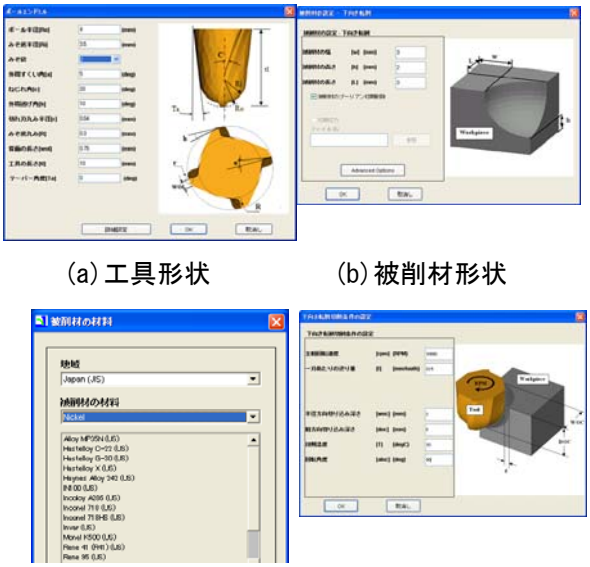


図 1　ソフトウエアのメイン画面

画面左側に切削条件，右側には設定した工具と被削材の形状が表示される。図 2 に工具形状や被削材形状，それらの材料特性と切削条件の設定画面を示す。



(a) 工具形状　(b) 被削材形状

(c) 材料特性　(d) 切削条件

図 2　解析設定画面

工具や被削材の解析モデル形状や要素分割は，標準的な形状であれば，すくい角や被削材の幅などを入力することで自動的に作成される。このような GUI により，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。その一方，材料特性に関しては材料名は表示されるものの，それぞれ材料にどのような材料特性が定義されているかは秘密となっており，解析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　標準条件におけるアルミニウムの切削

最初にソフトウエアの動作検証をかねて，ソフトウエアの標準切削条件でシミュレーションを行った。切削条件を表 1 に示す。ソフトウエアの標準条件ではアルミニウム合金（A6061-T6）を直径 8mm，2 枚刃のボールエンドミルを用いて主軸回転速度 20000 min^{-1} で切削する。

表 1　切削条件（シミュレーション条件）

被削材	アルミニウム合金(A6061-T6) 初期温度 20℃，幅 2mm， 送り方向 3mm，厚さ 3mm
工具	ボールエンドミル 材種 超硬，直径 8 mm, 2 枚刃， すくい角 5°，ねじれ角 20°
主軸回転速度	20000 min^{-1}
1 刃当たりの送り	0.15 mm/tooth
軸方向切込み	5 mm
半径方向切込み	2 mm
切削方式	下向き削り
冷却	乾式切削
工具回転角度	0～720°

なお，今回の計算条件では工具が 720°，すなわち 2 回転するまでの現象を計算する。わずか 2 回転では工具や被削材の温度分布がマクロ的に定常に達するには甚だ不足ではあるが，現状の計算機の計算速度と，このソフトウエアが採用する陽解法による解析手法ではこれを計算するだけでも約 12～24 時間の時間を要する。したがって現状では，3 次元切削の解析を行う場合，切削初期の過渡状態の結果にもとづいて評価せざるを得ない。

図 3 に工具が 720°回転したときの温度分布を示す。2 刃目までの切りくずは切刃により切削された後，被削材に付着するが，3 刃目以降は被削材から離れて空中を飛散する。温度分布の最高値は約 400℃となっている。

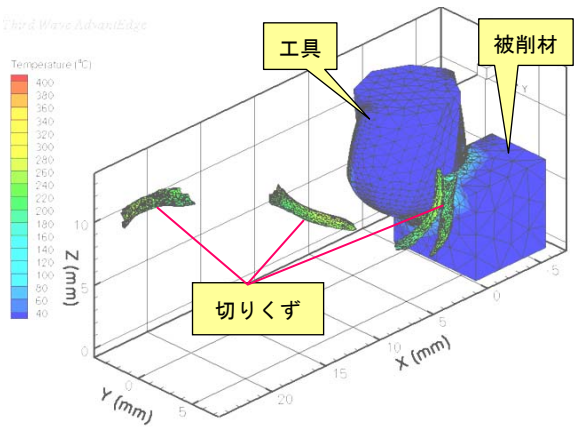


図 3　アルミニウム合金切削時の温度分布

図 4 には計算によって得られる時刻歴データの一例として，切削抵抗と最高温度のグラフを示す。

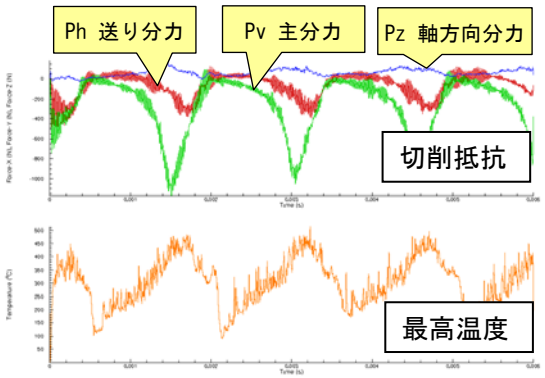


図 4　切削抵抗と最高温度の時刻歴

今回の切削条件は 2 枚刃の工具を 2 回転させているため，切削抵抗，温度ともに 4 回のピークが現れているのがわかる。このほかにも工具，被削材の応力分布や動力の時刻歴データなどを出力することができる。

3.2　標準条件におけるインコネル 718 の切削

次に被削材をインコネル 718 に変更してシミュレーションを行った。ここでは工具形状を含む切削条件は先のアルミニウム合金の切削と同様とし，主軸回転速度を 5000，10000，20000，40000 min^{-1} に変化させて計算を行い，切削速度と切削抵抗の関係を調べた。

図 5 に主軸回転速度 20000 min^{-1} における温度分布を示す。被削材がアルミニウムの場合，温度の上限が 400℃程度であったのに対し，インコネルでは 1200℃と高い温度になっている。

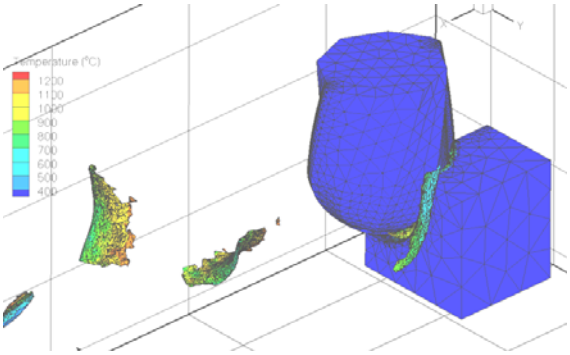


図 5　インコネル 718 切削時の温度分布

図 6 に主軸回転速度と最高温度，切削抵抗の計算結果の時刻歴データを示す。

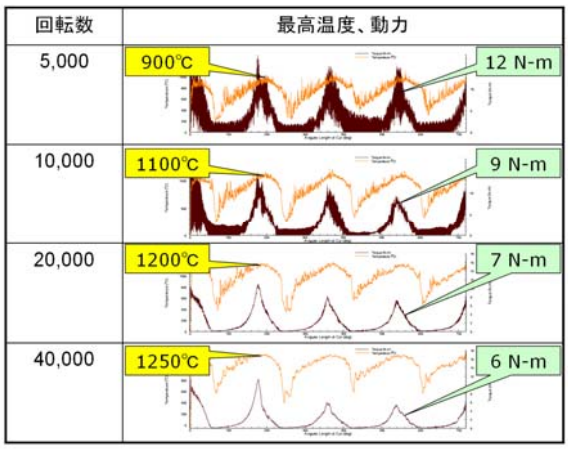


図 6　切削抵抗と最高温度の時刻歴

主軸回転速度の増加に伴って最高温度は 900℃から 1250℃に上昇し，逆に工具を回転させるために必要な動力は 12N･m から 6 N･m に低下している。なお，回転速度が低い条件では動力や温度の波形が小刻みに振動している。これについては調査中であるが，考えられる原因の一つに解析では工具先端部分や被削材の一部のみしかモデル化しておらず，それ以外の部分を剛体として取り扱っている。このため，系の固有振動数が悪影響を及ぼしていることが挙げられる。

図 7 に切削抵抗と主軸回転速度の関係を示す。また図 8 に嶽岡がボールエンドミルとスクエアエンドミルを用いて実験により，主軸回転速度と切削抵抗の関係を調べた結果 [1] を示す。

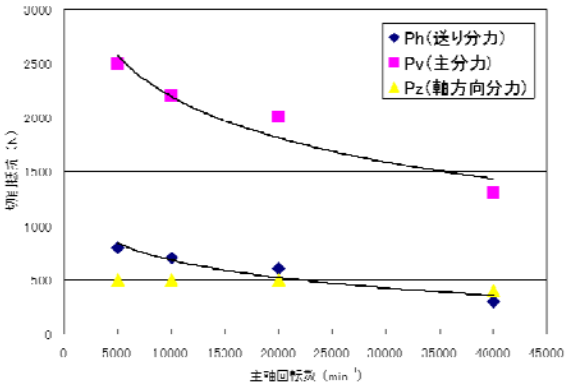


図 7　主軸回転速度と切削抵抗の関係
（シミュレーション）

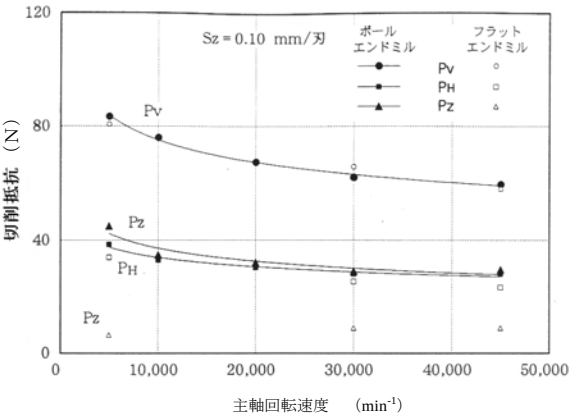


図 8　主軸回転速度と切削抵抗の関係（実験）

図 8 に示すように，ミーリング加工では切削速度の上昇にともなって切削抵抗が減少する領域が存在する。今回のシミュレーションの結果も，切削条件等は異なるものの，これを再現している。

3.3　切削におけるボールエンドミルとスクエアエンドミルの違い

次に，切削時におけるボールエンドミルとスクエアエンドミルの違いを調べた。表 2 に計算した切削条件を，表 3 にそれぞれの工具の仕様を示す。

表 2　切削条件

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

表 3　工具の仕様

工具	ﾎﾞｰﾙｴﾝﾄﾞﾐﾙ	ｽｸｴｱｴﾝﾄﾞﾐﾙ
直径	8 mm	
刃数	2	
すくい角	5°	
ねじれ角	20°	

同条件で比較するため，工具の仕様は可能な限り同じとした。図 9 にスクエアエンドミルの切削中の温度分布を示す。なお，ボールエンドミルの計算結果は前項と同様のため省略した。

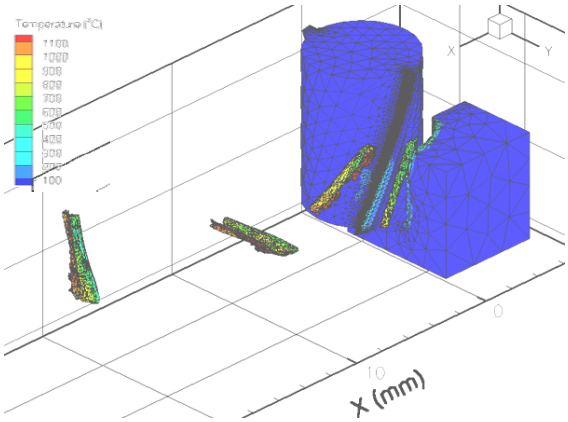


図 9　スクエアエンドミル切削時の温度分布

切りくずの形状はボールエンドミルと比較すると厚みが増しているが，切削中の温度は両者ともほとんど変わらない。

次に，切削中の工具刃先の温度分布について調べた。図 10，図 11 にボールエンドミルとスクエアエンドミルの温度分布を 0.2 ms ごとに示す。ここではシミュレーションの利点を活かし，回転するエンドミルに観察視点を固定した。また，観察の障害となる被削材や切りくずを非表示とし，エンドミルのみを表示した。

図より，ボールエンドミルの高温域は，工具先端の中心から周辺に向かって移動する。一方，スクエアエンドミルは，工具先端の刃先から根元に向かって移動する。図ではわかりにくいが，スクエアエンドミルでは刃先より若干上の部分が最も早く温度が低下する。この原因としては，刃先ではエンドミル底面と側面の 2 面で切削が行われているため，他の部分より発熱が大きいことや，熱伝導する領域が少ないことなどが考えられる。

刃先温度が上昇した後，再度室温付近まで低下するのに要する時間は，ボールエンドミルの 1.4 ms に対して，スクエアエンドミルは 1.0 ms と短い。

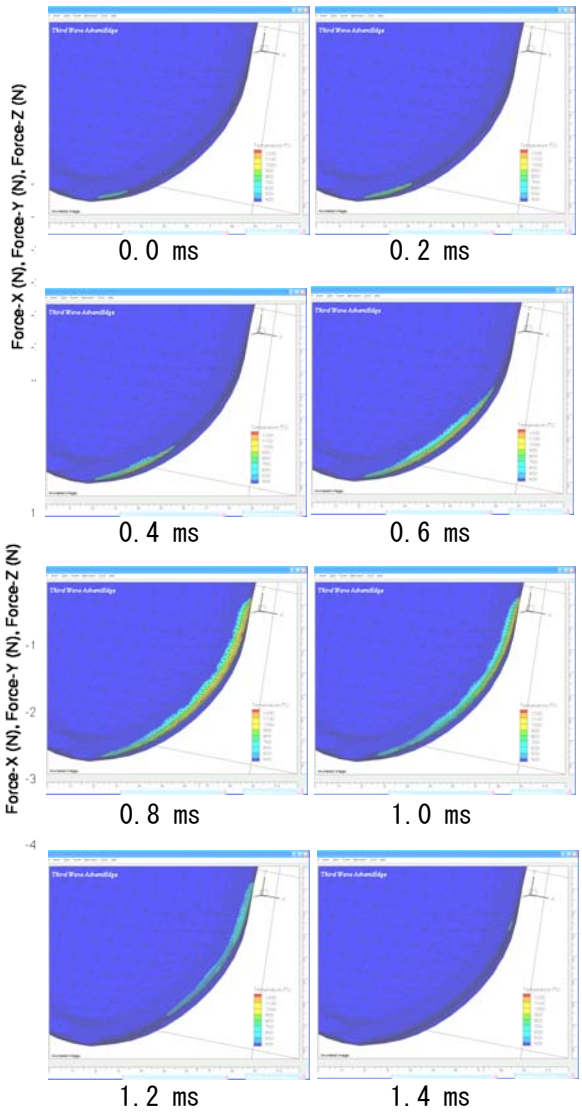


図 10　ボールエンドミル刃先の温度変化

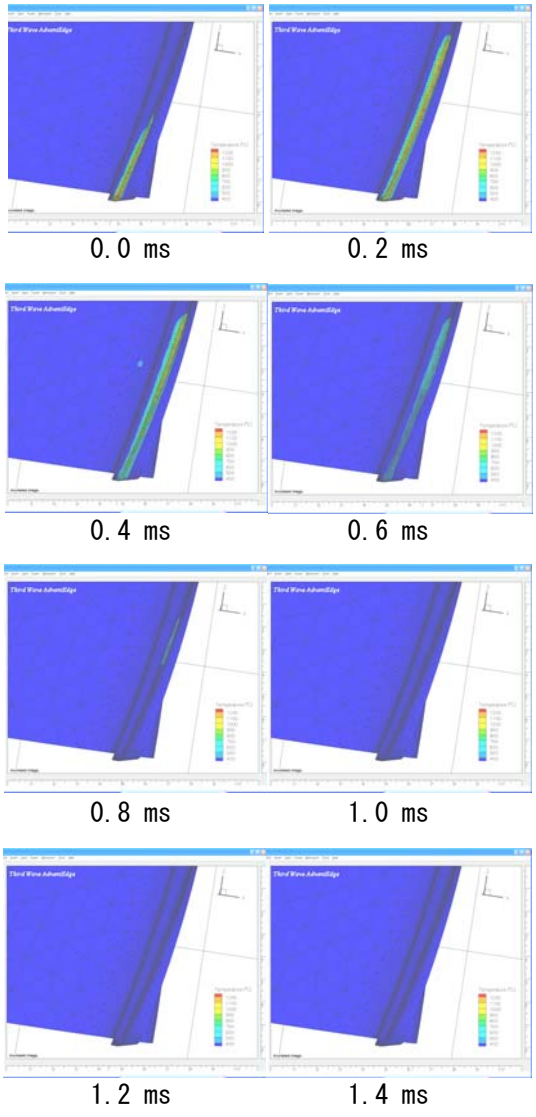
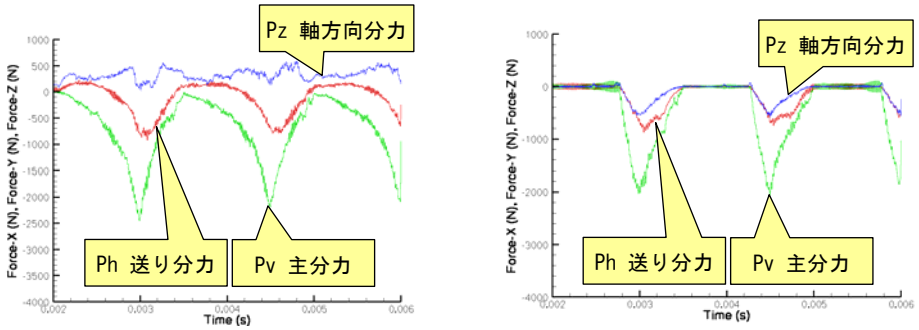


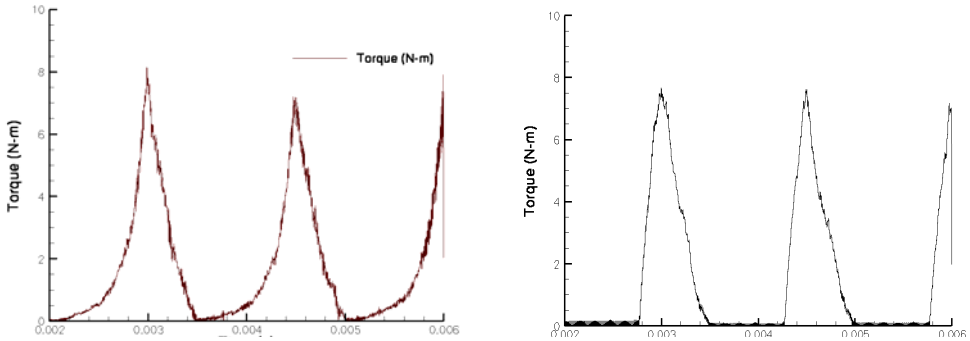
図 11　スクエアエンドミル刃先の温度変化

図 12 にボールエンドミルとスクエアエンドミルの切削抵抗の計算結果を示す。絶対値で見た主分力＞送り分力＞軸方向分力の関係は変わらないものの，ボールエンドミルの切削抵抗が連続的に変化するのに対して，スクエアエンドミルのそれは衝撃的に変化している。また切削



(a) ボールエンドミル　　(b) スクエアエンドミル

図 12　切削抵抗の比較



(a) ボールエンドミル　　(b) スクエアエンドミル

図 13　動力の比較

抵抗の値はスクエアエンドミルの方が若干低い。

図 13 にボールエンドミルとスクエアエンドミルの切削中の動力の計算結果を示す。先の切削抵抗と同様に，ボールエンドミルの動力が連続的に変化しているのに対して，スクエアエンドミルでは衝撃的な変化をしている。ただし，動力の最高値はほとんど同じであった。

前述のエンドミル刃先の温度変化と切削抵抗の変化から考えると，ボールエンドミルはスクエアエンドミルに比べて，熱的にも機械的にも負荷の少ない状況で切削が行われていると考えられる。ただし主軸回転速度と切削抵抗の関係で述べたように，解析モデルの剛性は実際よりも高い。したがって切削抵抗や動力の波形は計算結果よりもなだらかに変化すると考えられる。

また，スクエアエンドミルでは切れ刃全体にわたって切削速度や切込み量が一定であるため，切削現象は比較的単純であるのに対し，ボールエンドミルでは，工具先端の中心から周辺に向かって，切削速度や切込み量も連続的に変化するため，切削現象は極めて複雑となる。したがって今後の検討方法としては，切れ刃をいくつかの領域に分け，各領域ごとに温度や応力状態等を評価することなどが考えられる。

以上，本報告では，ソフトウエア標準条件を中心として調べた結果を報告した。次報では，実際に行っているインコネル 718 の切削条件と同じ条件で解析を行い，その結果を報告する。

4.　結　　言

インコネル 718 に対してソフトウエア標準条件を中心に切削加工シミュレーションを行った結果を下記にまとめる。

（1）主軸回転速度を変化させて切削を行った結果，実験と同様に切削速度の上昇に伴って切削抵抗が低下する現象が現れることを確認した。

（2）ボールエンドミルとスクエアエンドミルの切削中の温度分布や切削抵抗の変化を調べた結果，実験結果と同様に，ボールエンドミルはスクエアエンドミルに比べて連続的・穏やかに温度や切削抵抗が変化することを確認した。

参考文献

1）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.