

CAEによるエンドミルの熱状態解析に関する研究*

長友 良行^{*1}・塚田 美由紀^{*1}・竹山 隆仁^{*1}・外山 真也^{*1}

Study on Thermal Condition for Cutting Tool with CAE

Yoshiyuki NAGATOMO, Miyuki TSUKADA, Takahito TAKEYAMA and Masaya TOYAMA

実際の現象を観察することができない場合に数値計算で現象を予測する技術にCAEがある。本研究では、CAE解析によりエンドミルの切削時における刃先温度予測解析を行うため、実際の切削実験から得られるデータと比較しながら精度を高めることを試みた。その結果、実際のエンドミル加工における低速回転領域では、刃先温度とほぼ同程度の解析結果を得られるようになった。

キーワード：CAE，エンドミル，切削温度

1 はじめに

平成21年度は実際のエンドミル形状をモデリングし、塑性解析や熱伝導解析が行える解析ソフト：Deformで解析を進めたが刃先温度を十分に解析できなかった¹⁾。そこで、平成22年度は、解析形状を単純化し、刃先からの入熱をパルス状にして解析を実施した。また、解析結果の検証を目的として、いくつかの切削実験を実施し、実際の切削時に発生する温度データと比較しながら、CAEに必要なパラメータ設定（工具の密度・比熱・熱伝導率、工具が接触する環境との境界条件等）を行った。今回はエンドミル回転数を 100min^{-1} とし、低速回転領域で解析をどのように進めたかについて報告する。

2 実験方法

2-1 解析CAEソフト

解析には、CADソフトSolid Worksに連動するCAEソフトCOSMOS Worksを使用した。

2-2 モデルの設定

エンドミル刃先のモデル形状を図1に示すように、エンドミル先端のみに着目し、三角形の単純形状にした。

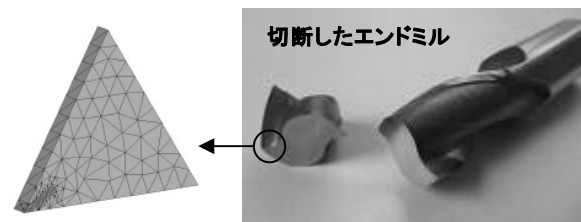


図1 単純化した刃先形状

2-3 入熱・放熱条件設定

エンドミルによる断続切削においては、刃先から入ってくる熱量も断続的である。本研究では、図2のようにエンドミルによる側面切削で、エンドミル直径を20mm、回転数を 100min^{-1} 、側面切込量を0.2mmと想定した。

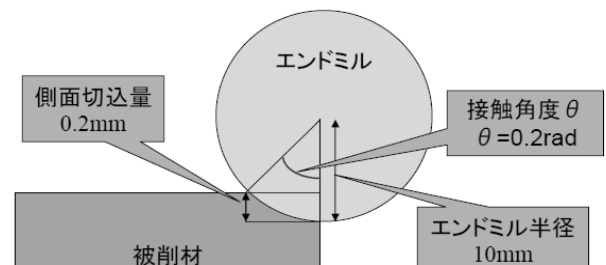


図2 入熱時間計算モデル

この場合、エンドミルの一刀が一回転する時間は0.6秒となり、そのうち入熱時間は0.019秒となるが、解析では0.02秒とした。その入熱タイミングを図3に示す。矩形状の入熱パターンでは、

*CAEによるエンドミルの熱状態解析に関する研究(第2報)

*1 機械電子部

CAE 解析ソフトウェアの特性上、同一時間に2つの入熱量を設定することになるため、立上りと立下り時の解析が行われない。

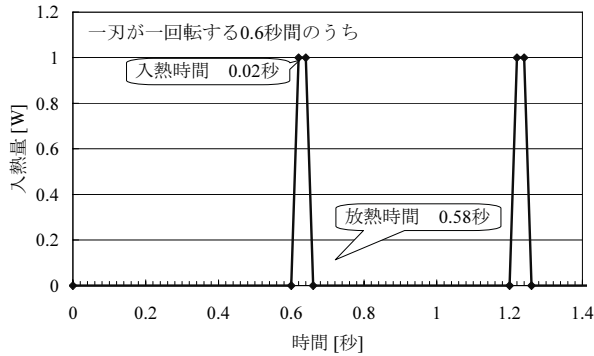


図 3 断続切削に合わせた入熱タイミング

そのため、入熱パターンは解析のタイミングを考慮して、図3のように立上りと立下り時の設定に傾斜を持った台形状のパルスで設定した。解析ステップ時間は入熱時間に合わせて、0.02 秒とし、総解析時間を 60 秒とした。

また、モデル材料の物性値はエンドミルの材種である高速度鋼を用いた(表 1)。

表 1 高速度鋼の物性値

密度	8100 kg/m ³	
熱伝導率	[°C]	[W/(mK)]
	20	19.3
	100	22.2
	200	23.6
	400	26.2
比熱	[°C]	[J/(kgK)]
	20	460.24
	300	585.76
	500	669.44
	700	836.8

表 2 単純形状モデルの解析条件

入熱量 [W]	0.5~10	
対流	熱伝達率 [W/(m ² K)]	100 / 200 / 250
輻射率	0.3	
初期温度 [°C]	20	

解析の境界条件については、表 2 の内容とし、入熱量と熱伝達率を組み合わせ、合計 21 パターンとした。熱の入出力は図 4 のように設定して非定常熱伝導解析を行った。モデルの厚み方向には熱の出入りは考慮せず断熱状態とした。実際の切削実験では、内部温度を計測できるように刃先から 2mm の位置に熱電対を埋め込んでいるため、同じ位置の温度についても解析した。

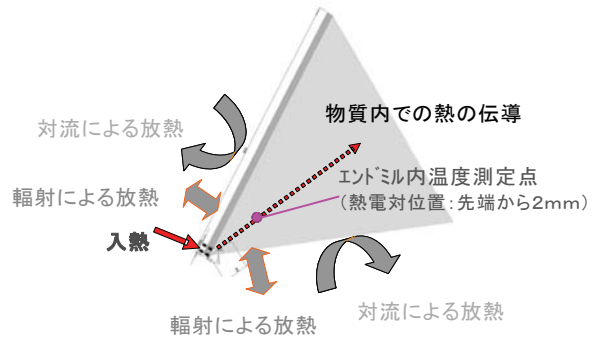


図 4 熱の入出力概念

2-4 解析検証実験

2-4-1 旋盤による断続切削温度測定

CAE による解析結果を検証するために、旋盤により工具に発生する温度計測を実施した。切削工具は、刃先から 2mm の位置に熱電対を埋め込んだ直径 20mm のエンドミルを用いた。被削材は板厚 5mm の塩ビ板とした。断続切削を実現するために、図 5 に示す固定具に被削材を装着した。温度計測は、データロガー(株東京測器研究所製 DC-204R)で行った。切削条件は、エンドミルをフライス盤に取付けて加工した場合と同等になるようにセットした。また、比較のために同一切削速度で連続切削も実施した。



図 5 旋盤による被削材固定具

2-4-2 易融合合金埋め込み材切削

刃先の温度を直接測定するのではないが、目安を得るために、被削材に低温で熔融する易融合合金を埋め込んで被削材と共削りし、易融合合金が溶けるか否かで刃先温度の状況を観察した。被削材は塩ビ板とし、幅2mm、深さ8mm、長さ80mmの溝を加工した。そこに易融合合金（本実験ではUアロイ47, 58, 64, 70）を埋め込んだ（図6）。

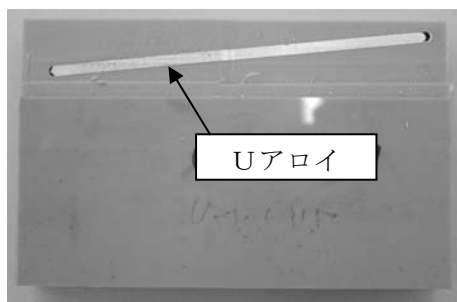


図6 塩ビに埋め込んだUアロイ

この被削材をCNC治具中ぐり盤（三井精機工業株製 J4DN）でエンドミルにより側面切削した。加工条件は、側面切込み量を0.2mm、送り速度0.1mm/刃、主軸回転数を 100min^{-1} と 1591min^{-1} とした。

3 結果および考察

3-1 解析結果

3-1-1 単純形状モデルの解析結果

単純形状モデルでの温度分布例を図7に示す。

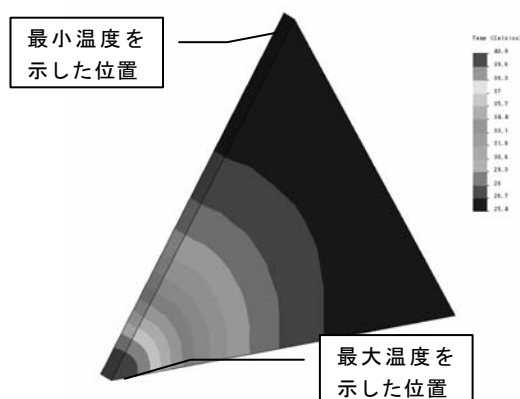


図7 単純形状モデルの解析結果の一例
(対流 $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 入熱量 3W , 30秒)

図7より、刃先より加えられた熱が内部へ伝わっていることが確認できる。

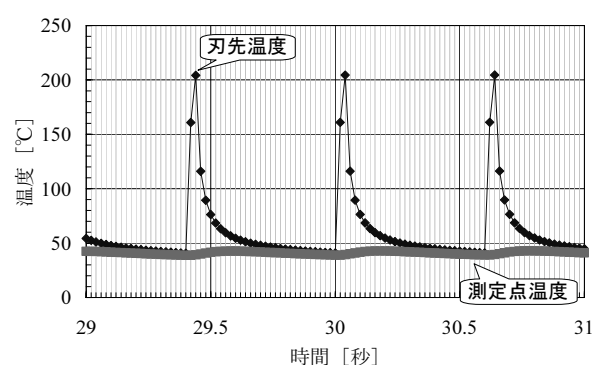
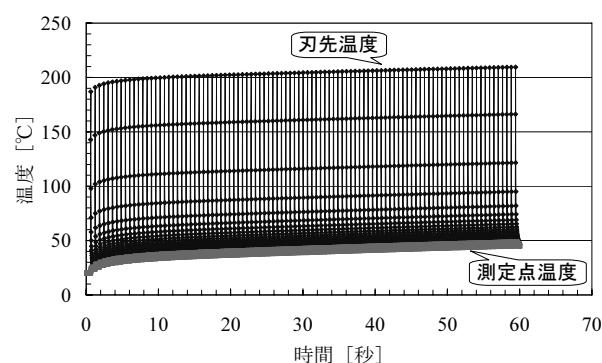


図8 刃先温度と測定点の温度変化
(対流 $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 入熱量 3W)
上: 0~60秒, 下: 29~31秒

単純形状モデルでの時間対温度の解析結果を図8に示す。図8より、刃先温度は被削材に接触している間は温度が高くなるが、被削材と接触しなくなるとすぐに温度が下がっており、入熱パターンに対して解析結果が追従している。このことから、対流による放熱やエンドミル内部への熱伝導による温度変化が実際の断続切削を再現していることを確認できる。

3-1-2 モデルサイズによる差異

エンドミル刃先のみを単純形状モデルで解析したが、モデル形状の妥当性を確認するために、一辺が10mmと20mmの単純形状モデルの刃先から10mm地点（図9）での温度を比較した（図10）。比較した結果、一辺10mmモデルの温度が高くなった。このことは、熱の流れる範囲が一辺20mmのモデルの方が広範囲であるため、熱の移動が滞りなかったためと考えられる。このことより、モデルサイズが解析対象より小さいと、熱の移動を十分に表現できないことがわかる。

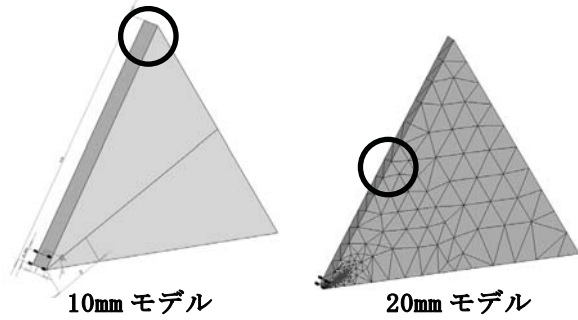


図 9 各モデルの刃先から 10mm 地点

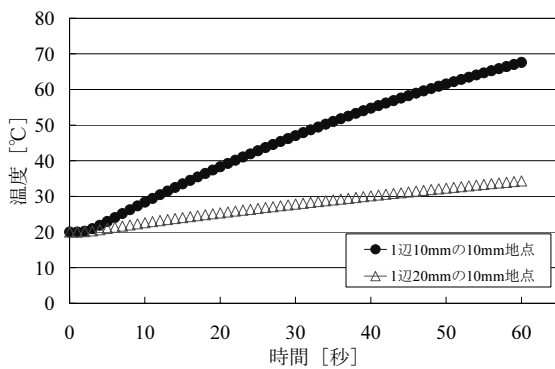


図 10 刃先から 10mm 地点での温度分布
(対流 100W/m²K, 入熱量 3W)

3-1-3 モデル変更

今回、図 1 で設定した単純形状による解析を進めてみて、想定した熱の移動は概ね設定できた。しかし、モデルサイズの影響があることがわかり、実切削実験で使用しているエンドミルは直径が 20mm であるため、単純形状モデルのままでは、適切な解析が実施できない。実際のエンドミルは立体形状であるため、軸方向への熱移動も考慮しなければならないことから、モデルを単純形状モデルから実際のエンドミル形状に近いものにする必要がある。

新しいモデル作成のため、実際のエンドミル形状を CNC 三次元測定機で倣い測定した。測定した断面形状を元に、図 11 に示すような実際のエンドミルに近い直刃型モデルを作成し、解析を試みた。また、単純形状モデルと同じようにエンドミル内部に埋め込んでいる熱電対の位置（刃の側面・底面からそれぞれ 2mm 内部）の温度についても解析した。

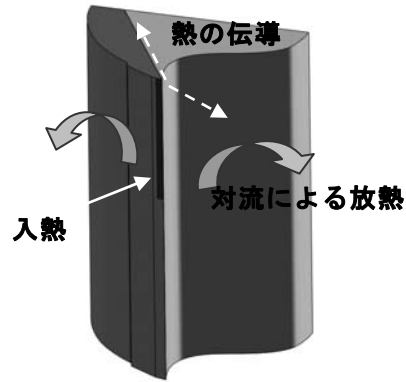


図 11 エンドミルに近い形状モデル

3-1-4 モデル変更後の解析結果

変更したエンドミルに近い形状モデルで、表 3 の境界条件の合計 21 パターンで非定常熱伝導解析を行った。材料の物性値は単純形状モデルのときと同じ高速度鋼を使用した。

表 3 エンドミルに近い形状モデルの解析条件

入熱量 [W]	10~250
対流	熱伝達率 [W/(m ² K)] 50 / 100 / 200
輻射率	0.3
初期温度 [°C]	20

エンドミルに近い形状モデルでの温度分布例を図 12 に示す。これから、刃先で与えた熱がエンドミルの半径方向だけでなく、軸方向へも伝わっていることが確認できる。

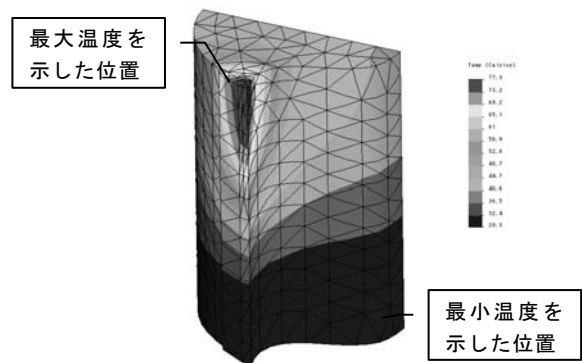


図 12 エンドミルに近い形状モデルの解析結果の一例 (対流 100W/m²K, 入熱量 100W, 30 秒)

エンドミルに近い形状モデルでの時間対温度の解析結果例を図 13 に示す。図 13 より、変更した

モデルについても入熱パターンに解析結果が追随していることがわかる。

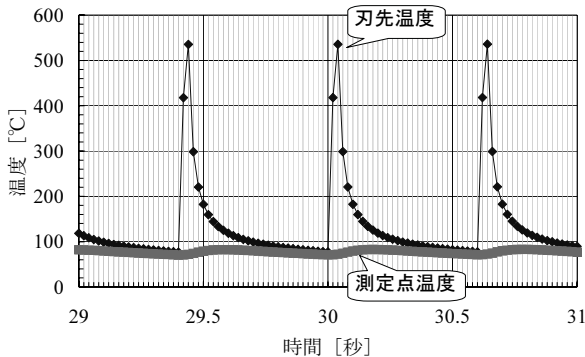


図 13 刃先温度と測定点の温度変化例
(対流 $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 入熱量 100W , 29-31 秒)

刃先から 2mm の測定点温度と刃先温度について解析時間内での最高温度の相関図を図 14 に示す。対流による熱伝達が一定の場合、刃先から 2mm の測定点温度と刃先温度は直線で表される比例関係にある。この比例関係から、エンドミルに埋め込んである熱電対で温度測定ができれば、刃先の温度を予測可能であると考えられる。

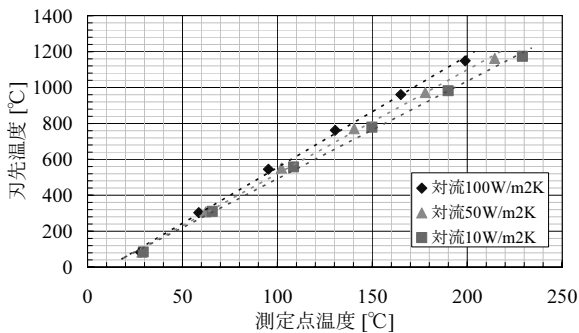


図 14 2mm の測定点温度と刃先温度の相関図

3-2 旋盤による断続切削結果

旋盤による連続切削と断続切削で得られた刃先から 2mm の位置での温度状況例を図 15 に示す。エンドミルを回転数 100min^{-1} で加工した場合、あまり温度変化が得られなかったため、図 15 は切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ (エンドミル回転数 1591min^{-1}) で加工した場合に相当するデータを示す。図から連続切削では切削工具に熱が蓄積されて温度が上昇するが、断続切削では切削しない時間に放熱が行われ

るため温度の上昇が小さいことがわかる。

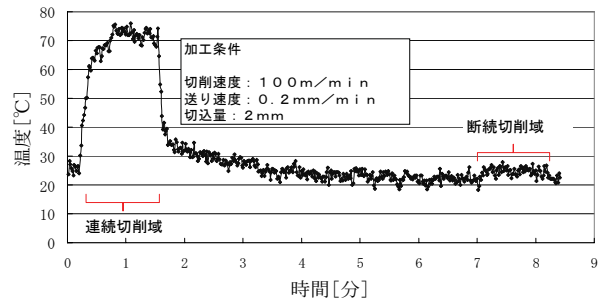


図 15 旋盤による塩ビ切削温度測定結果例

図 16 に断続切削の際に室内温度も測定した場合の結果のみを示す。刃先から 2mm の位置での温度状況ではあるが、 3°C 程度しか上昇していないことがわかる。

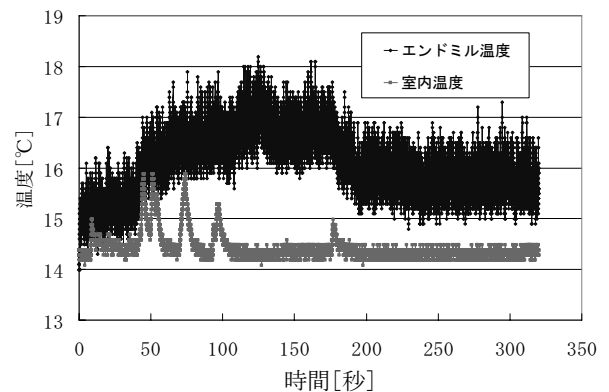
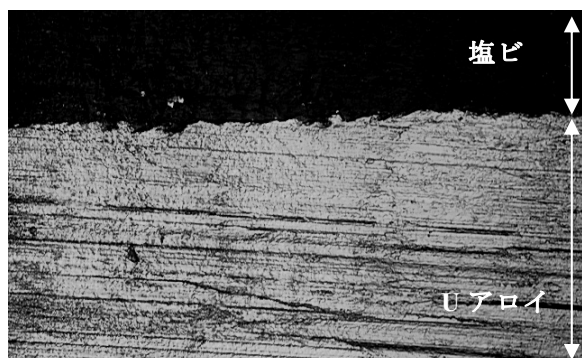


図 16 旋盤による塩ビの断続切削温度測定結果

3-3 易融合金切削結果

塩ビ切削後の刃先が触れた易融合金切削面を観察すると図 17 と図 18 のようになる。図の易融合金は U アロイ 47 で、エンドミル回転数は図 17 が 100min^{-1} 、図 18 が 1591min^{-1} である。各図の光沢のある下部分が U アロイ である。刃の切れ味の状態により発生する温度が変わると考えられるが、同一エンドミルによる加工であるため、エンドミルの刃の切れ味は同一と考えた。

回転数が 100min^{-1} では、易融合金表面が溶けた状況は観察されないが、 1591min^{-1} では丸で囲まれた部分等に溶けた状況が観察できる。このことから、 100min^{-1} では刃先温度は 47°C 以下であることが推定できる。

図 17 エンドミル回転数 100min⁻¹の場合図 18 エンドミル回転数 1562min⁻¹の場合

3-4 解析結果と実切削の比較

回転数が 100min⁻¹ の解析結果と旋盤による断続切削について、刃先から 2mm の測定点温度と熱電対の実測温度を比較した。旋盤による断続切削では加工時の室温が 15℃だったため、解析での参考周囲温度、初期温度と合わせるために、実測温度に 5℃を加えた値と、入熱量が 10W の場合の解析結果を比較した。しかし、旋盤による断続切削での測定温度との差が大きかったため、入熱量と参考周囲温度、初期温度を変更して再度解析を行った。再解析結果と実切削との比較を図 19 に示す。

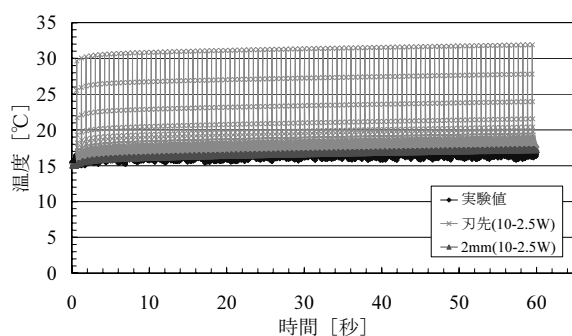


図 19 解析結果と旋盤による断続切削結果
(対流 10W/m²K, 入熱量 2.5W, 初期温度 15℃)

再解析結果と旋盤による断続切削での実測温度がほぼ同じになった。そのときの刃先温度は 30~33℃であった。これは、易融合金切削結果と一致する。

4 まとめ

今回はエンドミルを 100min⁻¹ で回転させた解析結果と塩ビの実切削測定結果との比較に関して良好な結果を得た。今後は、塩ビ以外の材料を実切削した場合との比較を行う必要がある。また、今回はエンドミルを 100min⁻¹ で回転させた解析を行ったが、実加工に近い結果を得るために、1000min⁻¹ 以上の回転数での解析をする必要がある。これらを今後の課題と考える。

5 参考文献

- 1) 佐藤征臣他:宮崎県工業技術センター・食品開発センター研究報告, **54**, 39-42(2009)