高速回転するエンドミル周りの熱伝達に関する研究 *

笹原 弘之** 浅野 譲***

Study on Heat Transfer around End Mill under High Rotation Speed

Hiroyuki SASAHARA and Yutaka ASANO

In this study, heat transfer from an end mill affected by the rotation speed, tool shapes, and cooling conditions is studied and the heat transfer coefficient is identified. Heat flux is given to the tool by using the induction heating system, instead of actual cutting. The advantage of using the induction heating is that constant heat flux can be given without dependence on the tool rotation speed and tool shapes. As a result, it was shown quantitatively that the heat transfer coefficient increases as the rotation speed increases. And it was revealed that the influence of the tool shape difference on the heat transfer coefficient is rather small. However, the heat transfer area varies depending on the number of flutes and the helix angle. The difference of the heat transfer area is considered to be a dominant factor that determines the temperature of the end mill in these cases. The effect of air blow or MQL was also examined. When the air blow or the MQL is used, temperature of the specimen drastically decreases because of the high flow speed. Furthermore, tool temperature analysis in milling operation was performed with using the identified heat transfer coefficient. Then it was confirmed that appropriate heat transfer coefficient depending on the cutting conditions is necessary for a precise temperature prediction.

Key Words: end mill, high rotation speed, heat transfer coefficient, air blow, MQL

1. ま え が き

切削時に発生する熱は工具寿命の低下、工具の熱膨張にともなう仕上げ面精度の低下、仕上げ面における熱変質層の生成など様々な問題を引き起こす。近年の加工の高速化に伴い、エンドミル加工時の主軸回転速度は数万回転毎分と高くなっているが、金型の仕上げ加工のような小径ボールエンドミルを用いた高速軽切削条件では、場合によっては加工後のエンドミルの温度がほとんど上昇していないような状態も経験する。このような工具温度上昇が抑えられる加工条件設定は、工具寿命や精度の向上に寄与しているが、それを実現するための最適条件設定に対する定量的な指針が無いのが現状である。

一方で、そのような要求に対し、切削条件と工具温度の関係を数値解析により明らかにすることを目的とする研究が行われてきた^{1)~5)}。工具寿命を延長する観点からは、切削点温度が重要である⁶⁾が、他方、熱膨張に起因する加工精度の低下を抑えるために、エンドミル本体の全体的な温度変化を小さくすることも重要である。しかし、エンドミルは切れ刃を有した複雑な形状をしており、回転するエンドミル周りの空気の流れに大きな影響を与え、エンドミル表面からの熱伝達量が変化する可能性があることは、先行研究の解析において考慮されていない。単純な回転円柱の周りの熱伝達に関する研究によれば、回転速度が高くなるにつれて熱伝達率は大となることが知られている^{7,8)}。その熱伝達の状態は周囲の空気の流れによっても変化し、層流の場合と乱流の場合とではその状態は大きく異なる。また、島田ら⁹⁾によれば、回転円柱に板状の突起を取り付けることにより熱伝達は促進されることが示されている。これらの結果から類推すれば、エンドミルに関しても回転速度が高くなるにつれて表面からの熱伝達は促進され、単なる円柱と比較し

て大きい熱伝達率になると考えられるが、その値は不明である。また、冷風を効果的に加工点に供給するためのノズル形状に関する研究¹⁰⁾も行われているが、エンドミル自身の回転による熱伝達量への影響についての報告は見あたらない。

近年の数万回転毎分という高速エンドミル加工についても、解析的な手法により加工状態や温度状態が予測できることが期待されており、解析の境界条件として高速回転するエンドミル表面からの熱伝達量について知る必要があるが、そのような研究はほとんど見あたらない。そこで、本研究ではエンドミルの工具径・刃数といった形状や回転速度、冷却の条件などが熱伝達に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 電磁誘導加熱を用いた実験方法の提案

物体表面からの熱伝達の状態は、物体まわりの流体の種類、流れの状態（流速、層流・乱流）、物体の形状、表面の性質と形状、温度差などに影響される。エンドミルの場合、ねじれた切れ刃およびフルート部からなり、毎分数千から数万回転という高速で回転するため、円柱の場合⁷⁾のように半解析的に求められる値とは大きく異なることが予想される。また、より実加工に近い状態で、工具への熱流入と伝熱状態および放熱の状態を把握することが望ましいが、実切削により工具温度を上昇させる場合、刃数やねじれ角が異なる複数のエンドミルに対しては切削力が異なり、切削仕事のうち熱として工具へ流入する割合も異なるため、エンドミルへの流入熱量を制御し一定に保つことが難しい。そこで本研究では実際にエンドミル加工を行うのではなく、エンドミル形状の試験体を高速回転させながら、その先端部分を電磁誘導加熱する実験手法を新たに提案する。加熱の手法はいくつか考えられるが、まず、高速回転するので固体熱源と接触させ熱を与えることはできない。また、回転体から周囲への熱伝達率はその回転速度によって変化する⁷⁾。したがって、流体を介したり、電熱ヒータなどを用いて外部から熱伝達やふく射で熱を与える方法では、回転速度によってエン

* 原稿受付 平成17年11月4日

** 正 会 員 東京農工大学大学院 (小金井市中町2-24-16)

*** 東京農工大学大学院 (現、東洋製罐グループ総合研究所；横浜市保土ヶ谷区岡沢町 22-4)

Table 1 Specification of specimens (No. 1~3)

No.	Tool diameter mm	Shank diameter mm	Heating section diameter mm	Total length mm	Cutting edge length mm	Heating section length mm	Number of flutes	Helix angle °
1	8	10	4	70	15	15	2	30
2	8	10	4	70	15	15	4	30
3	8	10	4	70	15	15	3	50

Fig. 1 Schematic view of heating test with IH system

Fig. 2 Example of measured thermal images

Fig. 3 Three types of specimens

ドミルに与える熱量が変化してしまう。それに対し電磁誘導加熱は、高周波磁界内の導体にうず電流が生じ、自己の電気抵抗により対象物自体が発熱するものである。これによればエンドミル自体が発熱するため、回転速度に依存せず一定の熱量を与えることが可能となる。

図1に実験装置の概略図を示す。加熱するエンドミルは、先端に円筒形状の加熱部を設けてある。温度測定部となるエンドミル本体の形状が異なる場合でも、加熱部分の形状を直径4mm、長さ15mmの円柱とし、与える熱量を一定とすることができる。エンドミルはツールホルダにチャッキングし、マシンングセンタの主軸に取り付ける。エンドミルを回転させ電磁誘導加熱により加熱部に一定の熱量を与え、エンドミルの温度分布を赤外線放射温度計により測定する。図2(a)に測定例を示す。同図(b)には炭素鋼S45Cを主軸回転速度10000min⁻¹、送り0.1mm/tooth、軸切り込み5mm、半径切り込み0.5mm、ダウンカットで肩削りしている場合の測定例であるが、これと類似した温度分布になっていることがわかる。なお、エンドミル表面には放射率0.95の耐熱塗料を塗布した。また、熱電対を用いた予備実験により、130℃程度以下では、塗膜の有無による温度への影響は無視できることを確認している。測定対象であるエンドミルは円柱ではなく、ねじれ刃とフルートからなり高速回転しているが、赤外線放射温度計のフレーム時間は1秒であり

Fig. 4 Effect of rotational speed on temperature distribution (End mill No. 1, 2 flutes, helix angle: 30°)

時間分解能は高くないため、熱画像を構成する測定点の空間的位置における平均温度が測定されていると考えられる。本研究では切削点の断続的かつ高速な温度変化を測定することが目的ではなく、工具全体の温度分布を測定することが目的であり、過不足ない温度データが得られる。

図3に、用いた3種類のエンドミル形状の試験体の写真を示す。エンドミル先端を研削し加熱部の形状を作成した。エンドミルの仕様を表1に示す。材質は粉末ハイスである。エンドミルNo. 1は2枚刃・ねじれ角30°であり、これを基準にエンドミルNo. 2では刃数を増やし4枚刃に、エンドミルNo. 3では3枚刃・ねじれ角50°とし形状を変化させた。その他の長さ、直径などは同一となるようにした。このエンドミル形状の影響の他、回転速度、エアブローやMQLなど冷却条件の違いによる温度分布への影響を調べた。

3. エンドミル表面の伝熱状態の測定

電磁誘導加熱装置を用いエンドミルに一定の熱量を与え、様々な実験条件でエンドミルの温度分布を測定、比較した。エンドミルに与える熱量は常に一定であるから、エンドミルの温度はエンドミルとチャックの間の熱伝導、エンドミルの熱容量、エンドミルから空気中への熱伝達に依存して決定される。各実験条件での温度分布を比較することで、この3つの要素をあわせた“エンドミル温度の上昇しやすさ”を論じることができる。

3.1 回転速度の工具温度への影響

加熱を行いながら回転速度を0, 5000, 10000, 15000, 20000min⁻¹の5とおりに設定し、エンドミルの温度分布の違いを調べた。図4に、各回転速度において加熱開始から120秒後のエンドミルNo. 1の温度分布を例として示す。グラフの横軸は、エンドミルとチャックとの境界点を原点として、エンドミル軸方向の距離を示す。温度分布は加熱点に近いほど高く、チャック部へ近づくほど低くなっている。そして、与えた熱量は同じであっても、回転速度が高くなるにつれて温度は低下す

Fig. 5 Effect of tool shapes on temperature

Table 2 Volume and surface area of specimens

No.	Number of flutes	Helix angle °	Volume mm³	Surface area mm²
1	2	30	3549	918.61
2	4	30	3597	857.98
3	3	50	3521	821.34

ることが明らかであり、20000min⁻¹では、0min⁻¹の場合と比べ20℃近く低下しており、エンドミル表面からかなりの熱エネルギーが空気中へ放散していることがわかる。ただし、この測定結果からは工具内部の温度は分からないので、放散された熱の絶対量は分からない。なお、どの形状のエンドミルでも同様に回転速度が高くなるほど表面温度は低下した。

3.2 形状変化の工具温度への影響

図5に、形状の異なる各エンドミルに対して、加熱開始後120秒での、温度が最高となるエンドミル最下部の温度と回転速度との関係を示す。加熱部に与えた熱量はいずれの場合も同一である。2枚刃・ねじれ角30°のエンドミルNo.1の場合、どの回転速度においても最も温度が低くなった。回転速度0min⁻¹の状態に着目すると、No.3と比べて20℃以上の差が生じている。回転速度0min⁻¹の状態では自然対流による熱伝達が支配的であり、エンドミル形状が異なっても熱伝達率への影響はほとんどないと考えられる。したがって、この温度差の要因は熱伝達率以外にあるはずである。ここでエンドミルの温度を決定する要因として挙げられるのは、エンドミルとチャックの間の熱伝導量、エンドミルの熱容量、エンドミルから空気中への熱伝達量である。この3つの要因の中から原因を探っていく。

まず、エンドミルとチャックの間の熱伝導量について考える。エンドミルの材質、マシニングセンタのチャック、エンドミルのシャンク径、チャックでの把持長さは全ての実験条件で同一である。したがって、エンドミルとチャックの間の熱伝導量はすべての条件でほぼ等しいと考えられる。

次に、エンドミルの熱容量を比較する。エンドミルの材質はすべて同一の粉末ハイスであるから、比熱の値は全エンドミルで等しい。よって、熱容量の差はエンドミルの体積に依存する。しかし、各エンドミルの体積差は表2に示すように2%以下であり非常に小さい。体積が小さいほど熱容量も小さくなり、同じ熱量を与える条件では熱容量が小さいほど高温となるが、エンドミルの体積の順に各エンドミルの熱容量CはC3<C1<C2である。しかし、実験による各エンドミルの最高温度TはT3>T2>T1であった。熱容量から予想されるエンドミルの最高温度の順位とは異なる結果である。したがって、エンドミルの熱容量差によるエンドミルの最高温度変化も小さいと考えられる。

最後に、エンドミル表面から空気中への熱伝達量は、熱伝達率および伝熱面となるエンドミルの表面積によって定まるので、そのエンドミルの表面積に着目する。表2に各エンドミルの切れ刃およびフルート部といった側面の表面積も示した。エンドミルNo.1が最も表面積が大きく、エンドミルNo.3との差は12%ほどある。エンドミルの表面積SはS3<S2<S1であり、実験による各エンドミルの最高温度TはT3>T2>T1である。これは伝熱面積の差から予想されるエンドミルの最高温度の順と一致する。したがって本報告の実験条件では、各エンドミルにおける表面積の差に起因する熱伝達量の変化が、温度変化に最も大きく影響していると考えられる。すべての回転速度において、刃数やねじれ角といった形状自体の影響よりも、形状により定まる伝熱面積がエンドミルの温度を決定する要因として大きく影響している。

3.3 冷却条件の温度分布への影響

大量の切削油剤を用いない場合、エアブローもしくはエアークと共にオイルミストを供給するMQLが用いられる。ここではエアブロー、MQLによる、高速回転するエンドミルの温度への影響について検討した。エンドミルはNo. 1を用いた。図6に示すように、エンドミルとノズルの距離は50mmとし、エンドミルの温度測定部にノズルを向けて設置した。実験条件をまとめて表3に示す。エアブロー、MQL供給の場合とも吐出圧力は0.1MPa、空気流量は75NL/minとした。ノズル出口内径は3mmである。

図7に回転速度0, 5000, 20000 min⁻¹において、エアブローした場合と、しない場合とについて、120秒間加熱した際の温度分布を例として示す。いずれの回転速度においても、エアブローせず静止大気中でエンドミルを回転させた場合よりも、エアブローした場合にはエンドミル温度は大幅に低下した。直径8mmのエンドミルが20000min⁻¹で回転したときの周速は502m/minであるのに対し、流量とノズル径から計算したノズル出口直後の流速は10600m/minとなる。ノズルから50mm離れたエンドミル近傍での流速はこれより低くなることは明らかであるが、それでもエンドミルの周速よりはるかに高いと考えられる。したがって、エンドミル周囲では回転周速による流れよりもエアブローによる流れが支配的となり、同図に示すように、回転速度による温度分布の差はほとんどなくなるものと考えられる。

図8に20000min⁻¹でのエアブロー時とオイルミスト供給時との温度分布を示す。オイルミスト供給時にはエアブロー時と比べて、わずかではあるが温度が低くなること分かる。結果は省略するが、回転速度0, 5000min⁻¹でも同様にエアブロー使用時と比較した場合、MQL使用時の温度が低くなる結果となった。エアブローとオイルミスト供給時とで、空気の供給量および流速はほぼ同じであるから、オイルミストが工具表面に付着し工具から熱を奪う効果および表面に付着したオイルミストが気化する際に気化熱を奪うことに起因していると考えられる。

ここで、エアブロー使用の場合とMQL使用の場合とで、エンドミル表面の温度の平均値の差に、エンドミルの体積および比熱を乗じて、MQLにおけるミストの効果によりエンドミルから奪われた熱量を概算してみる。粉末ハイスの比熱は460J/kg・℃(20℃)であるから、エアブロー使用時と比較してMQL使用時では、0min⁻¹では7.55J、5000min⁻¹では5.95J、20000min⁻¹では5.70 Jだけ多い熱がエンドミルから奪われていることになる。用いたMQL装置の毎分のオイルミスト吐出量は0.1～0.2g

Fig. 6 Nozzle position

Table 3 Experimental conditions

Specimen		No. 1
Rotational speed	min ⁻¹	0, 5000, 20000
Cooling condition		Calm state, Air blow (0.1MPa), MQL (0.1MPa)
Heating time	sec	120

Fig. 7 Effect of air blow on temperature
(End mill No. 1, Heating time : 120sec, Pressure : 0.1MPa)

Fig. 8 Comparison of cooling effect between air blow and MQL
(Specimen : No. 1, Heating time : 120sec, Rotation speed : 20000min⁻¹)

であり、加熱中の120秒間に吐出されるオイルの質量は0.2～0.4gとなる。室温でのオイルミストの比熱は0.103J/kg・°C程度であるから、吐出された0.2～0.4gのオイルが温度上昇することによって工具から奪う熱量は0.06～0.16Jと非常に小さい事がわかる。仮にこのMQL使用時にエンドミルから奪われる熱量の増分はすべて切削油の蒸発潜熱のみによるものと想定し、切削油の蒸発量を計算してみる。MQLの切削油剤の蒸発潜熱として、エチルアルコールの値47.77J/gを用いると、加熱開始から2分間の切削油の蒸発量は0min⁻¹では0.16g, 5000min⁻¹では0.12g, 20000min⁻¹では0.12gとなる。これは供給されたオイルの1/4～

Table 4 Material properties of the tool model

Thermal conductivity	W/mK	28.465
Density	kg/m ³	8190
Specific heat	J/kgK	590

Fig. 9 FEM model of specimen No. 1

Fig. 10 Effect of specimen shape on heat transfer coefficient

1/2が気化する際の蒸発潜熱により工具を冷却していることになるが、この程度の蒸発量ではいずれにしても大きな冷却効果とはならない。

4 エンドミル表面の熱伝達率同定

次に、実験値と解析値とを比較することによりエンドミルから空気への熱伝達率の同定を試みる。まず、所定の条件で一定時間エンドミルを加熱し、加熱停止後の冷却過程におけるエンドミルの時間的温度変化を測定する。これに対し、実験での加熱停止時のエンドミルの温度分布を初期温度として有限要素モデルに与え、一定時間経過後のエンドミルの温度分布が実験値と解析値とで一致するよう表面の熱伝達率を変えて計算を繰り返し、熱伝達率を同定する。実験条件は、No. 1, No. 2, No. 3の各エンドミル形状に対して、回転速度 0, 5000, 10000, 15000, 20000 min⁻¹で、加熱時間を60秒, 120秒, 180秒の3とおりとし、その後、60秒間放置した後の温度分布を調べた。なお、解析には有限要素法コードMSC Nastranを用いた。図9に解析に用いた3次元モデルの例としてエンドミルNo. 1の場合を示す。また、エンドミルの熱特性値を表4に示す。エンドミルのチャック把持部は、チャックへの接触熱抵抗を熱伝達境界として規定し、その熱伝達率は無回転の円柱の解析と実験から5000 W/m²・Kと同定した値を用いた。

各形状のエンドミルに対する回転速度ごとの熱伝達率の同定結果を図10に示す。いずれの形状においても、回転速度0min⁻¹と5000min⁻¹の熱伝達率は20～40W/m²・Kであり、その変化は比較的小さい。しかし5000min⁻¹より高い回転速度では熱伝達率は急激に高くなり、20000min⁻¹では無回転時と比較して熱伝達率は50W/m²・K程度高くなった。エンドミル表面近傍の空気流れの状態が層流から乱流へ変化したと予想されるが、さらに検討を要する。刃数やねじれ角といった形状の違いによる影響に

については同定の誤差を考えると明確ではない。むしろ、回転速度の影響が大きいことに着目すべきであることがわかる。

5. エンドミル加工時の工具全体の温度解析例

高速回転しているエンドミルから空気への熱伝達率は、無回転時に比べて非常に大きいことが同定結果から分かった。そこで、同定した熱伝達率を切削時の工具温度解析に適用し、エンドミル全体の温度に及ぼす影響を検討する。

解析に用いたエンドミルは直径8mm、刃数2、工具長24mm、ねじれ角 30° のソリッドスクエアエンドミルである。主軸回転速度 20000min^{-1} 、送り速度 2000mm/min (0.05mm/tooth)、半径切り込み 0.5mm 、軸切り込み 5mm とした。S45Cを被削材とする予備実験より、切削仕事の7.6%が工具に流入すると仮定した¹¹⁾。切削仕事率は、実験的に求めた比切削抵抗の切削速度方向成分 $k_d=4400\text{N/mm}^2$ に切削断面積、切削速度を乗じて求めた。エンドミル加工は切れ刃が切削と空転を繰り返す断続切削であるが、本報告ではエンドミル全体の温度変化に着目しているので、時間平均した熱量が断続切削の場合と等しくなるよう一定の熱流束を切削点に与えた¹¹⁾。これにより、切れ刃近傍においても断続切削に伴う急激な温度上昇降下は得られないが平均的な温度が計算される。断続切削に伴う切れ刃近傍の温度変化を求めるには、以下の解析に続けて、既報¹¹⁾のように断続的に熱流束を与える解析を行えばよい。解析に使用するエンドミルから空気への熱伝達率は前章までに同定した値を用い、回転速度 20000min^{-1} では $88\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、無回転時 $29\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ とした場合の工具温度を比較する。

図11に解析結果、図12に工具先端から15mmの位置の工具表面温度を切削開始からの時間に対してプロットしたものを示す。温度上昇がほぼ飽和する切削開始180秒後では、回転速度 20000min^{-1} での熱伝達率 $88\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ を用いた場合と、無回転時の $29\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ を用いた場合とを比較すると、前者の方がおよそ 50°C 低い結果となった。したがって、エンドミルの熱伝達率が温度に及ぼす影響は非常に大きく、エンドミルが高速回転していることを考慮した熱伝達率を解析に用いることが必要であることがわかる。

6. 結 論

高速回転するエンドミル周りの熱伝達について検討した。エンドミル形状の試験片先端部分のみを電磁誘導加熱により加熱する実験手法を新たに提案し、常に一定の熱量を与える条件下で加熱実験を行い、回転速度・エンドミルの形状・冷却の状態が工具温度分布に及ぼす影響について調べ以下の結果を得た。

- 1) エンドミルに一定の熱量を与えた場合、回転速度が高くなるにつれて温度が低下する。回転することによりエンドミルから空気中への熱伝達は促進されることが明らかとなり、回転速度が工具温度に非常に大きな影響を及ぼすことを示した。
- 2) エンドミル表面温度に対し、刃数やねじれ角といった形状の影響は小さく、伝熱面となるエンドミル表面積の方が大きな影響を及ぼす。
- 3) エアブロー、MQLを供給した場合には、静止大気中でエンドミルを回転させた場合よりもエンドミル温度は大幅に低下する。このとき、ノズルからの空気流れはエンドミル周速よりもはるかに速いため、前者が熱伝達に対して支配的になり、エンドミルの回転速度が変化しても温度分布の差はほとんど生じない。

Fig. 11 Analyzed temperature distribution of end mill

Fig. 12 Temperature of cutting edge (15mm from tip)

- 4) エンドミルの熱伝達率を同定した結果、回転速度が大となると熱伝達率は増加する。直径8mmのエンドミルの場合、 5000min^{-1} 以上で熱伝達率の増加率が急激に上昇する。

参 考 文 献

- 1) 前川克廣, 仲野義博, 北川武揚: 切削熱挙動の有限要素解析(第2報), 日本機械学会論文集(C編), **62**, 596 (1996) 348.
- 2) Takashi Matsumura, Eiji Usui: Evaluation of Tool Temperature in Milling Operation with Identifying Thermal Characteristics, Technical papers of NAMRI/SME, (1997) 63.
- 3) Hiroyuki Sasahara, Takehiko Nitta, Kazufumi Nishi: Analysis of Tool Temperature in High-speed Milling, Proc. 10th ICPE, (2001) 279.
- 4) Chen Ming, Sun Fanghong, Wang Haili, Yuan Renwei, Qu Zhenghong, Zhang Shuqiao: Experimental Research on the Dynamic Characteristics of the Cutting Temperature in the Process of High-Speed Milling, Journal of Materials Processing Technology, **138** (2003) 468.
- 5) Ismail Lazoglu, Yusuf Altintas: Prediction of Tool and Chip Temperature in Continuous and Interrupted Machining, International Journal of Machine tools & Manufacture, **42** (2002) 1011.
- 6) 細川晃, 小田健作, 山田啓司, 上田隆司, 断続切削における工具逃げ面温度—高速エンドミル加工に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1786.
- 7) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改定第4版, (1986) 236, 丸善.
- 8) Prasad Bvss, Tawfek A. A., Mohanty A. K.: Heat Transfer From a Circular Cylinder Rotating about an Orthogonal Axis in Quiescent Air, Experiment in Fluids, **10**, 5 (1991) 267.
- 9) 島田了八, 熊谷 哲, 武山斌郎: 表面凸起による回転円柱の熱伝達促進, 日本機械学会論文集(B編), **50**, 450 (1984) 486.
- 10) 神田繁人, 立野昌義, 小久保邦雄: 冷風旋削加工における超音速先端細広ノズルの開発とその冷却性, 精密工学会誌, **70**, 1 (2004) 117.
- 11) 西一文, 笹原弘之: 高速エンドミル加工時の工具温度の解析(第2報), 第3回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2001) 131.