

高硬度金型材のエンドミル加工 (第3報) —ラジラスおよびボールエンドミルの切削抵抗の解析と制御—

大塚裕俊・中川平三郎*・廣垣俊樹*・垣野義昭**・佐々木将志**・喜田義宏***
機械電子部・*滋賀県立大学工学部・**京都大学工学部・***大阪工業大学

Endmilling of Hardened Die(3rd Report) -Analysis and Control of Cutting Force in Endmilling of Hardened Steel-

Hirotooshi OHTSUKA・H. NAKAGAWA*・T. HIROGAKI*・Y. KAKINO**・M. SASAKI**・Y. KITA***
Mechanics & Electronics Division・*The University of Shiga Prefecture・**Kyoto University・***Osaka Institute of Technology

要旨

近年金型加工の高効率化のため、(Al, Ti)N コーテッド工具を用いた高硬度材のエンドミル加工が必要となっている。しかし高精度化と効率化を実現するには、適切な工具経路の選択による切削抵抗の制御を行う必要がある。とりわけ高硬度材のエンドミル加工においては工具への過負荷が工具寿命に大きく影響を与えるため、内側コーナ部加工で工具負荷の制御が一層重要となる。そこで高硬度材のラジラス及びボールエンドミル切削について切削抵抗予測モデルの適用を検討した上で、それを基にコーナ部を含む2次元切削加工における切削抵抗一定制御アルゴリズムを考案した。実験の結果その有効性が確かめられた。

1. はじめに

近年、高硬度材の切削に適した (Al, Ti)N コーテッド工具の開発により、HRC53 程度の高硬度材からなる金型の高精度切削加工が可能となった¹⁾。そのためエンドミルによる切削加工の高効率化を実現する必要がある。

現在の一般的な金型加工用 CAD/CAM システムでは、CAD データから加工用 CAM データ、即ち CL データを生成する際、熟練作業者がその都度送り速度などの加工条件を与える必要がある。これは金型加工高効率化の妨げになるため、適切な加工条件を加味した熟練者以外でも利用できる CAD/CAM システムの開発が望まれる。このため様々な加工条件のデータベース化が必要となる。

とりわけ高硬度材のエンドミル加工においては、工具への過負荷が工具寿命に大きく影響を与える。そのためコーナ部の加工などで工具負荷を制御することが一層重要となり、この点を考慮して CL データ作成を支援しなければならない。そのためには切削抵抗の解析により工具負荷の予測を行うことが必要となる。

そこで本稿では金型加工に不可欠である高硬度材のエンドミル切削 (ラジラスおよびボールエンドミル) について、切削抵抗予測モデルによりシミュレーションを行い実測値との比較を行った。またこの予測モデルを用いて、コーナ部を含む2次元切削加工における切削抵抗一定制御アルゴリズムを考案し、その有効性について検討した。

2. 実験装置

ラジラスおよびボールエンドミルによる高硬度材の切削実験を、半径 5mm、ねじれ角 45° で 6 枚刃の (Al, Ti)N コーテッド微粒超硬エンドミルを用いて立形 MC で行った (ボールエンドミルはねじれ角 30° で 2 枚刃)。また被削材は SKD61 (HRC53) を用いた。ラジラスエンドミルでの標準切削条件は、直線・コーナ部加工とも主軸回転数 1,200rpm (切削速度 37.7m/min)、送り 0.1mm/tooth、径方向切込 0.5mm、軸方向切込 10.0mm とし、ダウンカットにて行った。またボールエンドミルでの標準切削条件は、主軸回転数 1,200rpm (切削速度 37.7m/min)、送り 0.1mm/tooth、径方向切込 1.0mm、軸方向切込 5.0mm とし、直線ピックフィード加工をダウンカットにて行った。いずれもクーラントは用いず、切りくず除去のためのエアブローのみを行い、乾式切削にて加工した。

3. 切削抵抗予測モデル

エンドミル加工における切削抵抗予測モデルについては、エンドミル切れ刃のすくい面上で形成される切りくずとすくい面との幾何学的な定式化に基づく力学的モデル²⁾を用いて切削抵抗の解析を行った。なおラジラスエンドミルについては、本モデルは高硬度材の直線切削の切削抵抗の予測について十分適用可能である事がこれまでの検討により判明している³⁾。そこで今回はボールエンドミルの切削抵抗の予測を中心に検討を行った。ボールエンドミ

ルの先端切れ刃部は、形状が幾何的に複雑に変化している⁴⁾。そのため先端部（R部）を工具軸方向に垂直に分割し、多数のテーパエンドミルの集合体とすることでモデル化した。分割数は20，最大スライス厚さは0.4mmとした。

4. 切削抵抗一定制御アルゴリズム

一般に内側コーナ部の加工は、切削抵抗の増加により工具損傷や加工精度の低下を招くため高精度化や高能率化の妨げとなる。そのためその切削機構の解析や加工法の提案が行われている⁵⁾。本稿では予測モデルに基づいて切削抵抗を制御するアルゴリズムについて検討した。Fig.1の幾何的關係に示されるようにコーナ部の加工での切削抵抗の増加は、切削関与角と最大切りくず厚さの増加に起因している。また最大切りくず厚さが数十 μm 程度と小さい加工条件となるため、その寸法効果を無視できない。そこで予測モデルに必要な比切削抵抗（ K_n ）などの係数は、最大切りくず厚さを変化させて実験的に求め、切削抵抗データベースとして利用した（Fig.2）。アルゴリズムの概略をFig.3に示す。本アルゴリズムではエンドミル中心の送り（ mm/tooth ）を操作パラメータとし、これを漸減して直線部加工と等しい切削抵抗値となる時の送りを繰り返し計算により求めた。実験では求められた解（送り）により半径10，15，20mmのコーナ部切削加工を行い、切削抵抗の予測値と実験値を比較し考察を行った。

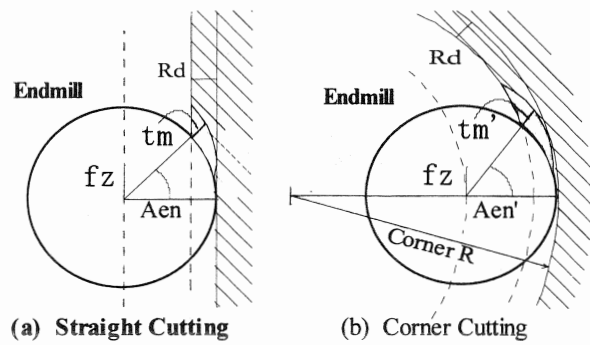


Fig. 1 Geometric parameters

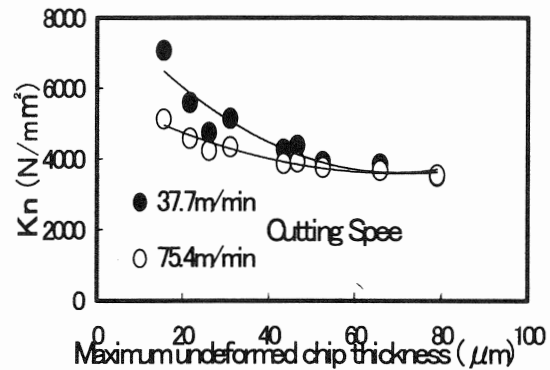


Fig. 2 Database for K_n

5. 解析結果と実験結果

ボールエンドミルの切削抵抗についての解析結果と実験結果について Fig.4 に示す。図は切削抵抗値の変化をエンドミル一刃について示したものである。 F_x 、 F_y は急峻なカーブを持つ曲線となりその最大値は F_z に比べて大きくなっている。いずれの場合でも予測値と実験値は同様の変化を示しており、実験結果は解析結果と良く一致していることがわかる。

またコーナ部加工における切削抵抗の予測値（アルゴリズムによる解）と実験値の比較を Table 1 に示す。切削抵抗値はエンドミルの軸方向成分を除いた絶対値である。この実験結果から本アルゴリズムによる解が有効であることがわかる。また本アルゴリズムによれば直線切削で求めたデータを利用してコーナ部の解析を行うことができる。実験結果によれば切削抵抗一定制御のため、コーナ部での送りは（工具中心半径／コーナ半径）比よりもさらに低下させなければならないことがわかる。

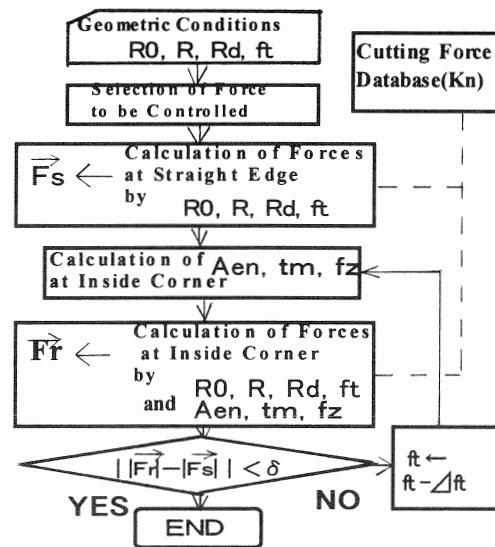


Fig. 3 Algorithm for optimized feedrate

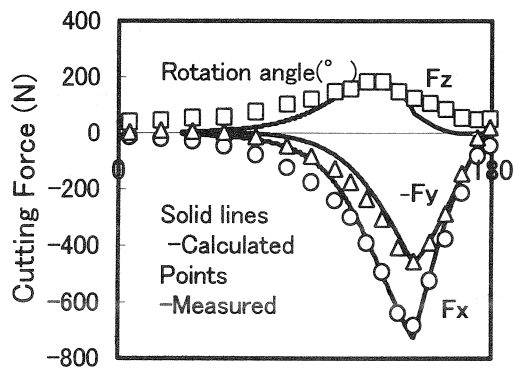


Fig.4 Cutting Forces of Ballendmill

Table 1 Cutting Forces at Inside Corner

Comer Radius(mm)	ft and Fs at straight cut	Optimized ft for corner cut (mm)	Experimental result Fr(N)
10	ft=	0.0335	373(-4%)
15	0.1(mm) Fs=	0.0508	385(-1%)
20	388(N)	0.061	385(-1%)

6. おわりに

高硬度材の切削に適したエンドミルについて、ボールエンドミルの切削抵抗の解析を予測モデルを用いて行い実測値との比較を行った。またエンドミルの側面切削につい

て、コーナ部加工における切削抵抗一定制御アルゴリズムをこの予測モデルに基づいて考案し、その有効性を検討した。

その結果、エンドミル切刃のすくい面上での力学的定式化による切削抵抗モデルを用いた切削抵抗の予測値は、実測値とよく合致しており、高硬度材のボールエンドミルによる切削についてもこのモデルが十分適用できることがわかった。また切削抵抗一定制御アルゴリズムにより求められた解(送り)によりコーナ部のエンドミル加工を行った結果、本制御アルゴリズムが有効であることが確認出来た。

追記

本実験に使用した高速加工機は、日本自転車振興会の補助金を受けて設置したものである。

参考文献

- 1)山田保之, 青木太一, 田中裕介, 脇平浩一郎: コーティッド超硬工具による高硬度材の切削, 日本機械学会論文集(C編), 60, 577, (1994) 2906.
- 2)A. E. Bayoumi, G. Yucsan and L. A. Kendall: An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations, Trans. ASME, 116, 8, (1994) p331
- 3)大塚裕俊, 中川平三郎, 廣垣俊樹, 垣野義昭, 佐々木将志, 喜田義弘: 高硬度金型材のエンドミル加工(第2報): 平成9年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) p139
- 4)G. Yucsan, Y. Altintas: Prediction of Ball End Milling Forces, Trans. ASME, 118, 2, (1996) p95
- 5)岩部洋育, 藤井義也, 斉藤勝政, 岸浪健史: エンドミルによるコーナ部加工に関する研究, 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 841.