C22 ボールエンドミル加工における工具摩耗予測システムの開発

Development of System to Estimate Tool Wear of Ball End Mill

○宋哲源(慶應義塾大学研究院) 正 青山英樹(慶應義塾大学)

Cheolwon SONG, Keio University, Hiyoshi3-14-1, Yokohama-shi, Kanagawa

Hideki AOYAMA, Keio University

Cutting phenomenon of ball end milling is complicated and the cutting point on the cutting edge depends on the normal direction of the points to be cut so that it is extremely difficult to estimate tool wear of ball end milling. This paper deals with a system to estimate tool wear distribution of a ball end mill. In the development of the system, wear forms were investigated in cutting experiments, the equations to predict tool wear from the real cutting length and cutting conditions were derived, and a module to calculate the real cutting length with cutting conditions at a cutting point with different radius was constructed. And the usefulness of the system was clarified.

Key words: ball end mill, flank wear, wear estimation, tool path, CAM, divided tool model

1. 緒言

金型などの自由曲面の加工は、一般的にボールエンドミルを用いて行われており、その工具交換は、主に加工時間に基づいて決定されている。しかし、ボールエンドミルと被削材の接触位置は加工点の法線(加工点の傾き)に依存するとともに、ボールエンドミル切れ刃の各点における摩耗速度は切削時間・切削条件に対して線形でないため、ボールエンドミル切れ刃は加工時間に従って全体が均等に摩耗しない。したがって、加工時間に基づいたボールエンドミルの工具交換管理は有用な手法とはいえず、最適な工具交換時を決定するためには、工具経路、加工点、切削時間などの認識に基づいて切れ刃位置ごとの工具摩耗分布を把握する必要がある¹⁾。

ボールエンドミル加工の切削メカニズムや切削プロセスを詳細に検討した研究²⁾は、これまで、いろいろと行われてきた。一方、ボールエンドミル加工における切れ刃の摩耗分布の予測に関する研究は香山³⁾の成果があるものの、単純な平面加工に適用するものであり、摩耗のモデル化において実用に適するには十分であるとはいえない。

本研究では、実験によりボールエンドミル切れ刃の摩耗形態を明らかにし、摩耗予測式を導出している。また、ボールエンドミル切削加工における工具経路および切れ刃各点の実加工条件を明らかにし、切れ刃位置ごとの工具摩耗予測するシステムを構築し、評価実験により同システムの有用性の評価を行っている。

2. ボールエンドミル摩耗特徴

Fig.1は、直径10mmの超硬ボールエンドミルを用いて機械構造用炭素鋼S55Cを回転数3000rpm、送り速度0.05mm/tooth、軸方向切り込み量5mm、ピックフィード1mmで切削した際の切れ刃半径1, 2, 3, 4, 5mmの点の摩耗進行履歴を示している。横軸は実切削距離、縦軸は逃げ面摩耗幅を表している。同結果より、回転中心付近と外周付近の摩耗速度が速く、回転半径3mmから4mmの付近で摩耗速度が最も遅いことがわかる。これは、低切削速度域と高切削速度域とで摩耗形態が異なることを表している。本研究では、この境界点を摩耗速度最小点とし、 V_{B-min} 点と呼ぶ。

Fig.2は、直径10mmの超硬ボールエンドミルを用いて工具鋼SKD11を回転数3000rpm、送り速度0.025mm/tooth、軸方向切り込み量5mm、ピックフィード1mmで切削した際の切れ刃半径1, 2,

3, 4, 5mmの点の摩耗進行履歴を示している。横軸は実切削距離、縦軸は逃げ面摩耗幅を表している。この場合、実切削距離が200mm以下においては、摩耗速度は切れ刃半径とともに大きくなるが、200mm以上においては、先端部の摩耗速度が急激に大きくなっている。

このように、ボールエンドミルの摩耗形態は極めて複雑であり、工具と被削材の組み合わせによって摩耗形態そのものが変化することがわかる。

Fig.1 Flank Wear Form
(Cemented carbide tool, S55C, 3000rpm, 0.05mm/tooth)

Fig.2 Flank Wear Form
(Cemented carbide tool, SKD11, 3000rpm, 0.1mm/tooth)

3. 摩耗予測式

ボールエンドミル切れ刃摩耗の予測は、代表的な切削条件による摩耗実験データを基に摩耗予測式を導出することに基づいている。ボールエンドミル逃げ面摩耗形態は、代表的な切削条件における摩耗実験結果より、以下の特徴が確認された。

- ① 逃げ面摩耗幅は、実切削距離 L_R の2乗に比例して増加する傾向にある。
- ② 切削工具の中心部と外周部で摩耗速度が大きく、その中間に摩耗速度が小さい領域が存在する摩耗形態⁶⁾となる。
- ③ 実一刃当たりの送り量 f_z の増加とともに摩耗速度は大きくなる。
- ④ 工具径 R_0 の増加とともに、同切れ刃位置ごとの摩耗速度は小さくなる。

上記の特徴と摩耗実験結果を基に、最小二乗近似により摩耗予測実験式⁵⁾が導出される。式(1)~(4)は、直径10mmの超鋼ボールエンドミルによる機械構造用炭素鋼 S55C の切削に対する摩耗予測式を示している。

$$V_B = AL_R^2 + BL_R + C \quad (1)$$

$$A = A_R \cdot A_f \cdot A_N$$

$$\left. \begin{aligned} A_N &= a_1 \times r^{a_2} + a_3 \times e^{a_4 \times r} \\ a_1 &= 8.85 \times 10^{-13} N^2 - 7.00 \times 10^{-9} N + 1.37 \times 10^{-5} \\ a_2 &= 1.10 \times 10^{-3} N^2 - 8.68 \times 10^{-2} N + 152.55 \\ a_3 &= 4.00 \times 10^{291} N^{-86.29} + 4.00 \times 10^{-33} e^{0.0076 N} \\ a_4 &= -3.80 \times 10^{-6} N^2 + 3.17 \times 10^{-2} N - 60.41 \\ A_f &= a_{f1} \times f_z + a_{f2} \\ a_{f1} &= -3.20 r^4 + 38.73 r^3 - 1.54 \times 10^2 r^2 \\ &\quad + 2.54 \times 10^2 r - 1.43 \times 10^2 \\ a_{f2} &= 0.16 r^4 - 1.94 r^3 + 7.74 r^2 - 12.68 r + 8.14 \\ A_R &= -0.33 R_0 + 2.67 + 1.48 \times 10^{-3} e^{0.87717 r} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= b_1 N^3 + b_2 N^2 + b_3 N + b_4 \\ b_1 &= (3.58 \times 10^{-1} r^3 - 2.99 r^2 + 7.88 r - 6.17) \times 10^{-13} \\ b_2 &= (-3.51 \times 10^{-1} r^3 + 2.99 r^2 - 8.03 r - 6.39) \times 10^{-9} \\ b_3 &= (1.08 \times 10^{-1} r^3 - 9.42 \times 10^{-1} r^2 + 2.56 r - 2.06) \times 10^{-5} \\ b_4 &= (1.03 \times 10^{-1} r^3 - 9.19 \times 10^{-1} r^2 + 2.53 r - 2.12) \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= c_1 N^3 + c_2 N^2 + c_3 N + c_4 \\ c_1 &= (-3.30 \times 10^{-1} r^3 + 2.72 r^2 - 6.76 r + 4.66) \times 10^{-11} \\ c_2 &= (3.20 \times 10^{-1} r^3 - 2.65 r^2 + 6.62 r - 4.56) \times 10^{-7} \\ c_3 &= (-9.43 \times 10^{-2} r^3 + 7.87 \times 10^{-1} r^2 - 1.98 r + 1.37) \times 10^{-3} \\ c_4 &= (8.38 \times 10^{-2} r^3 - 7.05 \times 10^{-1} r^2 + 1.78 r - 1.22) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4. 工具摩耗予測システム

ボールエンドミル切れ刃の摩耗分布を推定するシステムの構築にあたり、1回転当たりの実送り量の算出アルゴリズムを単純にするために、工作物をZ-mapモデルで構築し、ボールエンドミルの切れ刃を複数の平面切れ刃の積層構造とした。Fig.3は、ボールエンドミル平面切れ刃モデルを示している。Fig.4は、構築した工具摩耗推定システムの実行画面を示している。

5. 工具摩耗予測システムの評価

曲面加工におけるボールエンドミル摩耗分布予測システムの有用性について検証するため、評価実験を行った。評価実験では、工具直径10mmの超硬ボールエンドミルを用いて、Fig.5(a)に示す工作物(機械構造用炭素鋼 S55C)に対して、Fig.5(b)に示す形状となるように切削を行った。その切削の条件は、回転数3000 rpm、送り速度0.05 mm/tooth、軸方向切り込み量5 mm、ピックフィード1 mm、ダウンカット、乾式とした。Fig.6は、摩耗分布予測システムにより導出された予測摩耗量と切削実験において測定された摩耗量を示している。予測された摩耗量は、測定

Fig.3 Divided Tool Model

Fig.4 Execution Window of Tool Wear System

(a) Initial Shapes (b) Work Shapes
Fig.5 Shapes of Work Materials

Fig.6 Comparison of Experimental values and Prediction values

摩耗量に対して最大で23%の誤差であった。同結果より、摩耗分布予測システムの有用性について確認できた。

6. 結 言

本研究では、工具分割モデルを用いてボールエンドミル摩耗分布予測システムを提案し、システムを構築した。同システムは、ボールエンドミル切削加工におけるNCデータの分析に基づいて実加工条件(軸方向切込量、回転方向切込量、実切削距離、実一刃当たり送り)を認識し、ボールエンドミル切れ刃の摩耗分布を予測できる。また、評価実験により、開発したボールエンドミル摩耗分布予測システムの有用性について検証した。

参考文献

- [1] 香山仁, 近藤司, 金子俊一, 五十嵐悟: ボールエンドミルの摩耗推定と高精度曲面加工への応用, 精密工学会誌, Vol.67, No.9, (2001), pp1427-1431.
- [2] Y. Altintas, P. Lee: Mechanics and Dynamics of ball end milling, Journal of manufacturing science and engineering - Transactions of the ASME,