

ボールエンドミルの切れ刃形状に関する研究

Studies on Cutting Edge Geometry of Ball End Mills

加藤明

Akira Kato

ボールエンドミルの切れ刃形状は、経験により定義されている場合が多い。しかし、切削力などの数値解析には、切れ刃形状の定義が必要である。そこで、本研究では、測定した切れ刃形状の座標値を用いて、切れ刃形状を定義し、切削力の予測を行った。

Cutting edges of ball end mills are defined by experience in many cases. However, a definition of cutting edge geometry is needed for numerical analysis. Then, the cutting edge was defined using the value that measured the cutting edge, and the cutting force was simulated.

1. はじめに

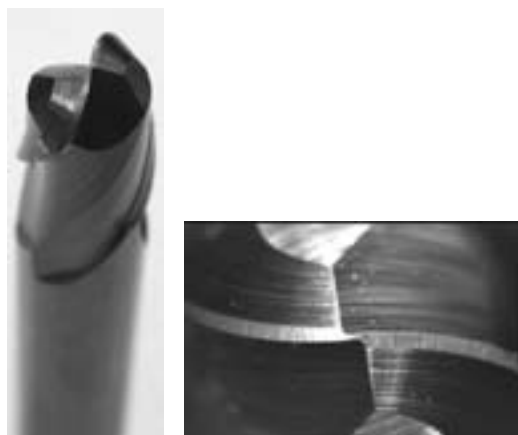
ボールエンドミルは、自動車や飛行機部品の金型のような、曲面を有する部品の加工に広く用いられる工具である。この工具は、切れ刃の位置により切削力が大きく変化する。切削力は加工誤差や表面粗さ、工具摩耗との相関が高く、切削力を推測することは、加工性能を評価するために重要である。しかし、一般的にボールエンドミルの切れ刃形状は、経験により定義されており、切れ刃形状の数値化が行われていないことから、切削力の推測が困難である。

そこで、本研究では、ボールエンドミル切れ刃形状を数値的に定義し、切削力を推測することを試みた。

2. ボールエンドミル切れ刃形状

工具顕微鏡を用いて図1の市販のボールエンドミル（超硬、半径5 mm）の切れ刃稜線を測定し、解析することで切れ刃形状を数値化した。なお、測定方法は次のとおりである。

- ① XY平面における切れ刃稜線の座標値を測定した。このとき、一つの切れ刃について、測定点数は約50点とした。測定結果を図2に示す。
- ② 切れ刃は、球上に配置されることから、Z軸座標値をX軸、Y軸座標値より計算した。



(a) 外観 (b) 切れ刃

図1 ボールエンドミル

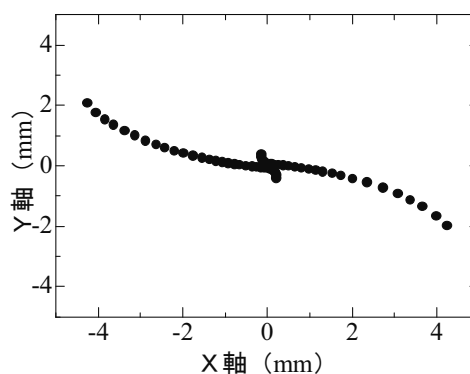


図2 切れ刃測定結果

③ 切れ刃位置角 ϕ と切れ刃ねじれ角 γ を図3のように定義し、②で求めた座標値を変換し、近似することにより、切れ刃形状のねじれを示す式 (1) および図4を求めた。

$$\gamma = -0.0005 \phi^2 + 0.1767 \phi + 4.6089 \quad (1)$$

3. 理論的切削抵抗

図5に示すボールエンドミル切れ刃微小要素における、切削力 dF_r および dF_t は式 (2) ¹⁾ により示される。

$$\begin{cases} dF_r(\psi, \phi) = (k_r + k_{rc} S(\psi, \phi)) r_b d\phi \\ dF_t(\psi, \phi) = (k_t + k_{tc} S(\psi, \phi)) r_b d\phi \end{cases} \quad (2)$$

なお、 ψ は工具回転角、 k_r 、 k_t は被削材により決定される係数、 S は切り屑厚さ、 r_b は工具半径である。また、 k_{rc} および k_{tc} は式 (3) ¹⁾ から導かれる。式 (3) の α_e 、 β 、 ϕ_s はそれぞれ有効すくい角、摩擦角、およびせん断角である。

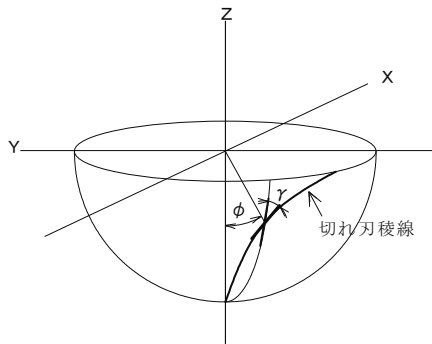


図3 切れ刃位置角 ϕ と切れ刃ねじれ角 γ

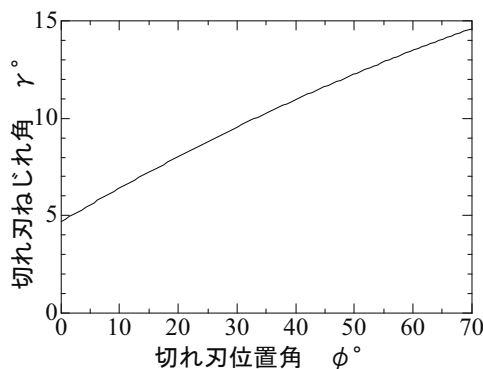


図4 切れ刃ねじれ位置角とねじれ角の関係

$$\begin{cases} k_{rc} = \frac{\tau_s \sin(\beta - \alpha_e)}{\sin \phi_s \cos(\phi_s + \beta - \alpha_e)} \\ k_{tc} = \frac{\tau_s \cos(\beta - \alpha_e)}{\sin \phi_s \cos(\phi_s + \beta - \alpha_e)} \end{cases} \quad (3)$$

さらに、式 (2) は式 (4) ¹⁾ に変換できる。

$$\begin{cases} F_x = -\int_{\phi} \cos \psi dF_t - \int_{\phi} \sin \phi \sin \psi dF_r \\ F_y = \int_{\phi} \sin \psi dF_t - \int_{\phi} \sin \phi \cos \psi dF_r \\ F_z = \int_{\phi} \cos \phi dF_r \end{cases} \quad (4)$$

式 (1) および (4) を用いて、図1のボールエンドミルの切削力を数値解析した。なお、解析に用いた加工概要を図6に、解析に用いた定数を表1に示す。被削材傾斜角については、工具先端付近の切れ刃が切削に關与する傾斜角 15° および、工具外周付近の切れ刃が關与する傾斜角 60° とした。傾斜角が 15° のときの解析結果を図7に、 60° のときの解析結果を図8に示す。

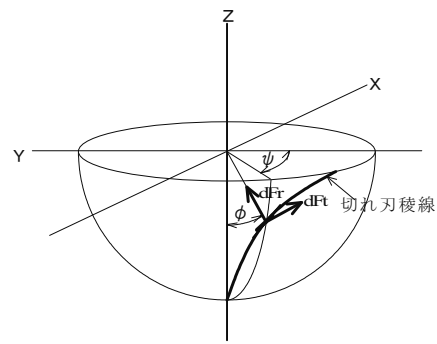


図5 ボールエンドミル切れ刃の切削力

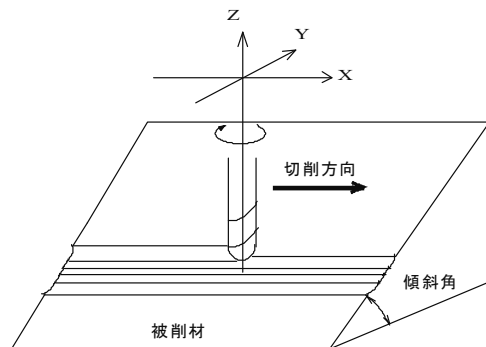


図6 理論解析で用いた加工概要

4. 考察

図4のボールエンドミル切れ刃位置角とねじれ角の関係より、今回測定した工具は、切れ刃のねじれが、ボール部頂点から工具外周にかけて、徐々に増加していることがわかる。このことから、切削中にボール部切れ刃から徐々に外周部切れ刃が被削材に切れ込むことがわかり、切削力や加工熱の発生が緩やかなものとなる。

図7の結果より、被削材傾斜角が 15° では、切削に関与する切れ刃は工具回転角 -1° から 24° 程度と広範囲である。このことから、切れ刃による実切削時間が長くなり、アブレッシブ摩耗が大きくなると推測される。また、切削力が小さく切削力の発生する回転角が広いことから、被削材傾斜角が小さい場合は、切り屑は細長い形状になると推測される。

図8の結果より、切削力Y軸成分 F_y が図7よりも絶対値が大きく、マイナスの切削力であるため、被削材傾斜角が大きい場合は、切り残しによる加工誤差が大きいことが推測される。

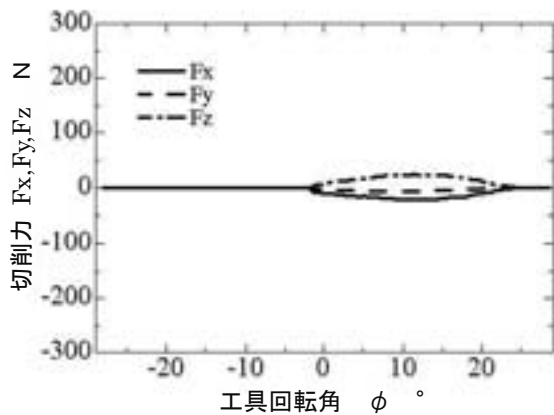


図7 被削材傾斜角 15° の理論的切削

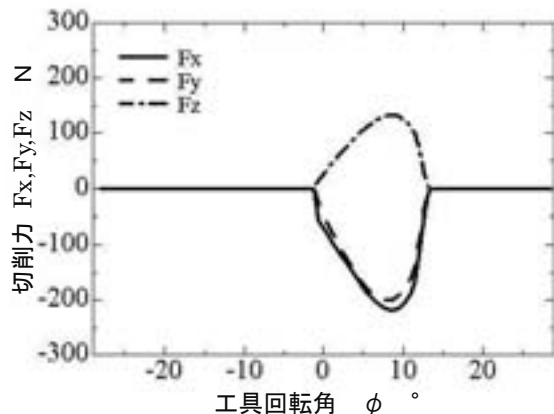


図8 被削材傾斜角 60° の理論的切削力

5. おわりに

本研究では、ボールエンドミル切れ刃形状を測定し、数値化することにより、切削力を解析した。今後は、解析条件の拡大と、実加工との比較を行う予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたりご指導・ご助言をいただきました、国立大学法人鳥取大学 田中久隆教授に厚くお礼申し上げます。また、本研究は、日本自転車振興会から競輪の収益金の一部である機械工業振興資金の補助を受けた設備を利用して研究したものです。

文 献

- 1) BERNAED W. IKUWA, HISATAKA TANAKA, FUMIO OBATA, SATOSHI SAKAMOTO; PREDICTION OF CUTTING FORCES AND MACHINING ERROR IN BALL END MILLING OF CORVED SURFACES -1 THEORETICAL ANALYSIS, Precision Engineering, 25, P.269-270 (2001).

表1 理論解析で用いた定数

| | |
|-------------------|--------------------------|
| 被削材 | |
| 材質 | SKD11 (60HRC) |
| 剪断強さ τ_s | 981 N/mm ² |
| 接線力係数 κ_t | 27.0 N/mm |
| 法線力係数 κ_r | 13.0 N/mm |
| 摩擦角 β | 65° |
| 切削工具 | |
| 材質 | 超硬 |
| 工具半径 | 5 mm |
| 有効すくい角 α_e | 5° |
| 切削条件 | |
| 切削方向 | アップカット アップピック フィード |
| 切り込み h | 0.1 mm |
| 送り f | 0.1 mm/tooth |
| ピックフィード Pf | 0.35 mm |