

エンドミル加工における再生びびり振動の研究

Study on Regenerative Chatter Vibration in End Milling

m00111084 井上 潤
指導教官 藤澤 政泰

加工面精度の劣化の原因の 1 つである再生びびり振動の理論解を求め、加工機の伝達関数の実測値と 2 次元の切込み剛性から不安定な加工条件を求めるエクセル VBA プログラムを作成した。その計算結果から加工機の共振周波数 4kHz を整数で割った値である 3000rpm と 4000rpm で振動が大きくなっていることが分かった。

1. 緒言

マシニングセンタの主軸や送りテーブルの高速化により、高速加工が可能になってきている。しかし、低剛性で低減衰性の工具を用いるエンドミル加工では、再生びびり振動が高速化の妨げになっている。実際の加工ではびびり振動が発生したら切削条件を変えろといった経験に基づいた切削条件の設定が一般的である。これに対し、びびり振動の発生限界を求めることができれば、精度の確保や、高速切削が可能になる。

エンドミル加工の精度については従来多くの研究が行われているが、振動の安定性そのものに関する研究は少なく、振動発生限界とその他パラメータの関係は明らかではない。国内²⁾⁻⁴⁾ではダンパを用いた一自由度系で論じており、他軸からも振動を受けるエンドミル加工では実際に用いるには不十分である。国外¹⁾の研究では本研究同様、伝達関数を用いているが、フーリエ係数の時間項を近似しており、正確なシミュレーションができていない。

本研究では、加工機の振動の伝達関数を実測し、さらに切削力の測定から 2 次元の切込み剛性を求めた。これに基づいて再生びびり振動の切削の安定性への影響を理論的に求めた。

2. 理論解析

図 1 にエンドミルの切削モデルを示し、図 2 に振動のブロック線図を示す。本研究では、エンドミルの側面だけで切削する X, Y の 2 次元の再生びびり振動を解析した。図 1 で e は刃 1 枚当たりの送り量で、力 f_t は接線方向の切削力、 f_n は法線方向の切削力

であり、 f_x は Y 方向の切削力、 f_y は X 方向の切削力である。

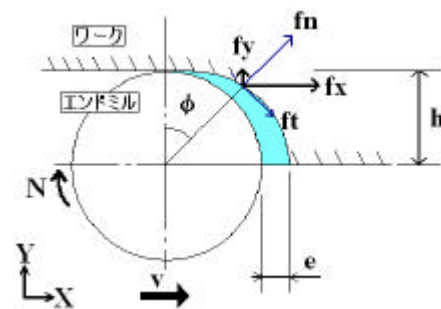


図 1 エンドミル切削モデル

ただし、 N : 回転数(rpm), v : 送り速度(mm/min), h : 切込み幅(mm), $e = 2 \pi n t / T$, (n : 整数, t : 時間, T : 回転の半周期)。

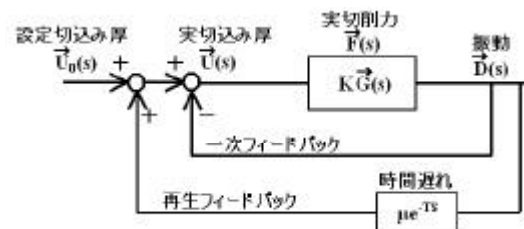


図 2 振動ブロック線図

2.1 設定切込み厚さ

設定切込み厚さ \vec{u}_0 は、

$$\vec{u}_0 = \begin{pmatrix} u_{0x} \\ u_{0y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e \sin^2 \frac{2npt}{T} \\ e \sin \frac{2npt}{T} \cos \frac{2npt}{T} \end{pmatrix} \quad (1)$$

となり、これのラプラス変換 $L\{u_0(t)\}=U_0(s)$ より、 $s=j$ とすると、

$$\vec{U}_0(s) = \vec{U}_0(j\omega) = \begin{pmatrix} U_{0x}(j\omega) \\ U_{0y}(j\omega) \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。 U_{0x} 、 U_{0y} は u_{0x} 、 u_{0y} のフーリエ係数である。

2.2 実切込み厚さ

図 2 より、切削力は切込み深さ d_z を含めた

$$\vec{f}(t) = d_z K \vec{u}(t) \text{ と表せ、}$$

$$K = \begin{pmatrix} k_{cn} & k_{ct} \\ -k_{ct} & k_{cn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{f}(t) = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = d_z \begin{pmatrix} k_{cn} & k_{ct} \\ -k_{ct} & k_{cn} \end{pmatrix} \vec{u}(t) \quad (4)$$

ただし、 k_{cn} ：法線方向の切込み剛性、 k_{ct} ：接線方向の切込み剛性。さらに、 $L\{f(t)\}=F(s)$ 、 $L\{u(t)\}=U(s)$ とし、振動 $\vec{d}(t)$ のラプラス変換を $\vec{D}(s)$ とすると、

$$\vec{D}(s) = \vec{G}(s) \vec{F}(s) \text{ . ここで } \vec{G}(s) \text{ は}$$

$$\vec{G}(s) = \begin{pmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

であり、加工機の振動の伝達関数を表す。

以上から実切込み厚さ $\vec{U}(s)$ を設定切込み厚さ $\vec{u}_0(s)$

と振動 $\vec{D}(s)$ 時間遅れ e^{-TS} を考慮して計算すると、

$$\vec{U}(s) = \vec{U}_0(s) + \vec{D}(s) (1 - \mathbf{m} e^{-TS}) \quad (6)$$

$$\vec{U}(s) = \{E - (1 - \mathbf{m} e^{-TS}) \vec{G}(s) \vec{K}(s)\}^{-1} \vec{U}_0(s) \quad (7)$$

ただし、 E ：単位行列、 μ ：減衰比とする。

となる。この理論解を基に振動解析を行い実切込み厚 $U(s)$ のゲインと位相を求めた。

3. 実験結果

本解析条件として、エンドミルをスクエア型ハイエンドミルの 2 枚刃、ねじれ角 30° 、直径 5mm とし、アップカットで切削。ワークはアルミブロックとする。

3.1 切削機の伝達関数

理論解析するに当たり、加工機の振動の伝達関数を求めた。マシニングセンタ (ROBODRILL a-T14iCs, FANUC) を本研究では使用した。インパルスハンマで叩いた力とその時の振動を加速度センサで読み取り、伝達関数を導いた。

3.2 切削力

ひずみゲージ型 3 分力計 (LSM-B-500NSA1, KYOWA) を用い、加工条件を変えて切削力 f_x 、 f_y を測定した。

3.3 切込み剛性

切削力 f_x 、 f_y の測定値から式(4)に基づいて切込み剛性 k_{cn} 、 k_{ct} を求め、 $k_{cn}=2454.28[\text{N/mm}^2]$ 、 $k_{ct}=2556.64[\text{N/mm}^2]$ を得た。

4. 解析結果

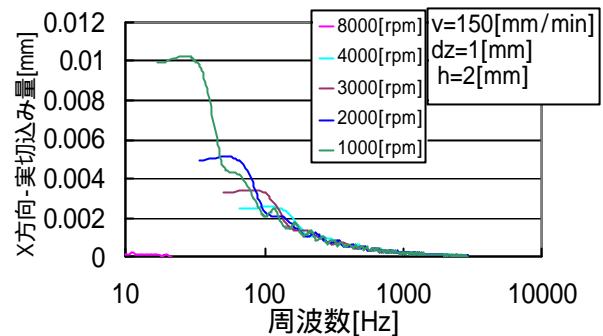


図 3 X 方向の実切込み量

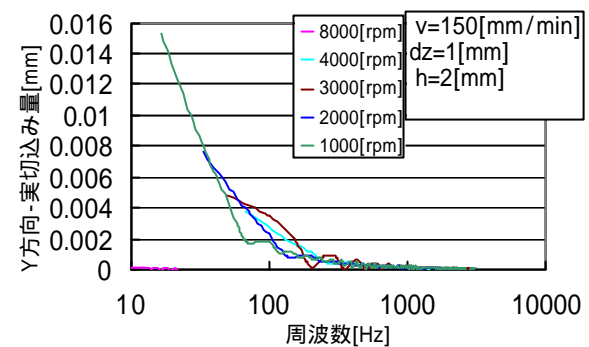


図 4 Y 方向の実切込み量

式(7)に基づいて計算した周波数領域における実切込み量を図 3、図 4 に示す。この図から加工機の共振周波数 4kHz を整数で割った値である 3000rpm と 4000rpm で振動が大きくなっていることが分かった。

5. 結言

本研究では振動を実測し、自作プログラムで算出した伝達関数と切込み剛性から実切込み厚さを理論的に解析した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 加工機の伝達関数の実測値から不安定な加工条件を求める Excel-VBA プログラムを作成した。
- (2) 解析結果より、3000rpm と 4000rpm で振動が増加し、不安定となることが分かった。

参考文献

- 1) Y. Altintas(2), E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, Annals of the CIRP, 44, 1(1995), 357.
- 2) 田中久隆, 小幡文雄, 足森雅巳, 松原十三生: エンドミル加工の再生びり振動に関する研究, 精密工学会誌, 62, 8(1996), 1136.
- 3) 白瀬敬一, 佐野雅基, 平尾政利, 安井武司: エンドミル加工におけるびり振動の解析と抑制, 精密工学会誌, 64, 3(1998), 465.
- 4) 田中久隆, 小幡文雄, 足森雅巳, 松原十三生: ボールエンドミル加工の再生びり振動に関する研究, 精密工学会誌, 64, 7(1998), 1047.
- 5) 小野浩二, 河村未久, 北野昌則, 島宗勉: 理論切削工学, 現代工学社, (1979), 135.