

9 びびり安定度に基づく最適ホルダ選択技術の開発

姫宮一輝、西川隆敏

Development of Optimal Holder Selection Technology Based on Chatter Stability Index

HIMEMIYA Kazuki and NISHIKAWA Takatoshi

An optimum holder selection system based on the chatter stability index was developed. Tooling frequency response function required for chatter vibration analysis was calculated by Resptance Coupling tool FRF and holder FRF. The system is verified by groove cutting experiments. In the experiment, the optimal holder was selected from four types of holders with different lengths. As a result of cutting with each holder, it was confirmed from the machined surface and surface roughness parameters that chatter vibration did not occur only with the selected holder.

キーワード：Frequency Response Function、Receptances Coupling、びびり安定度、ホルダ選択

1 緒 言

エンドミルを用いた金型切削加工では、加工に使用されるツーリング（工作機械にホルダ、工具を取り付けたもの）の動剛性の低さから、しばしばびびり振動を生じることが問題となっている。びびり振動とは加工中に生じる異常振動であり、その中でも自励びびりの場合は徐々に振動が増大するため、加工面の悪化や工具摩耗の助長、欠損を引き起こす要因である¹⁾。

びびり振動を机上で評価するための指標について様々な研究が行われており、社本らはびびり振動の安定性のプロセスゲイン余裕²⁾をびびり安定度として求めている。びびり安定度の算出にはツーリングのたわみややすさを表すツーリングの周波数応答関数（Frequency Response Function、以降 FRF）を事前に測定する必要がある。ツーリング FRF は構成される要素の組合せによって都度変化するので、同一工具であっても工具ホルダの種類に応じてびびり安定性が異なるという問題がある。そのため、適切な工具ホルダを選択し、切削条件を変えずともびびり振動を抑制することが望ましい。

また、ツーリング FRF の取得にはインパルスハンマによる加振測定が一般的であるが、工具と工具ホルダの組合せが変わる度に測定することは多くの工数やコストがかかることから、測定をなるべく減らすことが求められている。

そこで、本研究ではあらかじめ加振測定で取得したホルダ FRF に円柱の片持ち梁として計算した工具 FRF と合成（Receptances Coupling³⁾以降 RC）してツーリン

グ FRF を推定し、びびり安定度⁴⁾を算出した。この一連の計算を複数ホルダについて行い、各ツーリングのびびり安定度に基づいて最もびびり振動が発生しにくい最適なホルダを選択する技術を開発した。

2 最適ホルダ選択方法

2.1 フローチャート

図 1 にびびり安定度に基づく最適ホルダ選択のフローチャートを示す。事前に工作機械に取り付けた状態の工具ホルダを加振測定し、ホルダの情報とともに FRF をリスト化しておく。そして、対象とする工具の

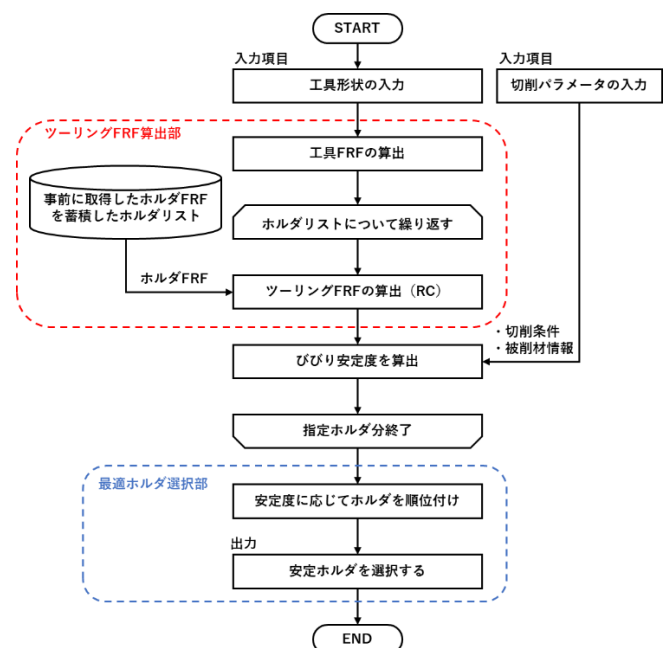


図 1 最適ホルダ選択手法のフローチャート

直径、刃数、突出し長、材質などの入力情報から工具を円柱とみなし、Timoshenko Beam 理論による片持ち梁モデル⁵⁾から工具 FRF を算出する。その後、上記ホルダリストからホルダ FRF を呼び出し、工具 FRF と合成し、ツーリング FRF を算出する。次に、入力された回転数、切込量などの切削条件や被削材の被切削抵抗からプロセスゲイン等を計算し、びびり安定解析により、各ツーリングのびびり安定度を算出する。以上の一連の計算を全てのホルダリストについて繰り返し行い、びびり安定度の大きさとホルダごとに順位付けし、最も安定なホルダを選択する。

2.2 ツーリング FRF 推定

ツーリング FRF を算出するに当たり、各 FRF 行列を計算及び計測から求めていく。FRF 行列の下付き文字は順に加振、応答の位置を示すものである。

工具 FRF 行列 $[R_{11}]$ は式(1)、(2)で示される垂直変位 x_1 と力 f_1 、回転方向変位 θ_1 、曲げ力 m_1 から導出でき、回転軸方向のねじれも考慮した Timoshenko Beam 理論による円柱の片持ち梁で定義した。

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} = [R_{11}] \begin{Bmatrix} f_1 \\ m_1 \end{Bmatrix} \text{ or } \{u_1\} = [R_{11}]\{q_1\} \quad (1)$$

$$[R_{11}] = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{f_1} & \frac{x_1}{m_1} \\ \frac{\theta_1}{f_1} & \frac{\theta_1}{m_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & l_{11} \\ n_{11} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ホルダの FRF については加振測定により求めた。図2にホルダの加振一応答の位置 (U_{2b} 、 U_3 、 Q_{2b}) を示

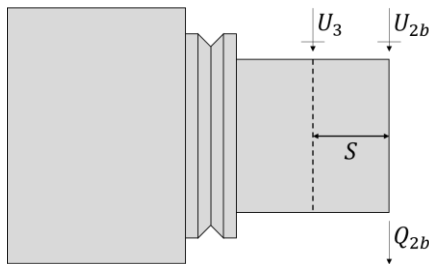


図2 ホルダ FRF の導出 (U:加振、Q:応答)

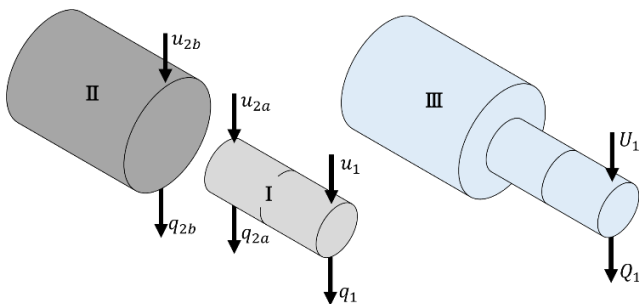


図3 Receptances Coupling モデル図

しており、各加振位置での FRF とその間の距離情報から式(3-a)~(3-c)に適用してホルダ FRF 行列 $[R_{2b2b}]$ を求める。

$$[R_{2b2b}] = \begin{bmatrix} h_{2b2b} & l_{2b2b} \\ n_{2b2b} & p_{2b2b} \end{bmatrix} \quad (3-a)$$

$$l_{2b2b} = n_{2b2b} = \frac{h_{2b2b} - h_{32b}}{S} \quad (3-b)$$

$$p_{2b2b} = \frac{n_{2b2b}^2}{h_{2b2b}} \quad (3-c)$$

ツーリング FRF $[G_{11}]$ は工具 FRF とホルダ FRF を式(4)、図3に示される合成 (RC) により求められる。

$$[G_{11}] = \frac{u_1}{q_1} = R_{11} - R_{12a}(R_{2a2a} + R_{2b2b})^{-1}R_{2a1} \quad (4)$$

2.3 びびり安定度計算

本報告におけるびびり安定度とは、現在の切込状態が安定限界までどの程度余裕があるかを示す値であり、1 を超えるときに安定で、1 未満のときに不安定 (びびり) となることを示す指標である。

図4に周波数領域法を用いたびびり安定度算出のブロック線図を示す。入力された回転数、切込量などの切削条件や被削材の被切削抵抗からプロセスゲイン (単位振動変位当たりの切削力増分量) とプロセスダンピング (単位振動速度当たりの切削力増分量) を算出する。びびり周波数 ω_c を走査し、一巡伝達関数A (式(5)) の固有値を求めることで、ゲイン余裕 G_m を得る。びびり安定度はゲイン余裕 G_m の虚部が0となるときの実部の値を用いて求める。

$$A = \{(1 - e^{-i\omega_c T})P_{g0} + i\omega_c P_{d0}\}G(i\omega_c) \quad (5)$$

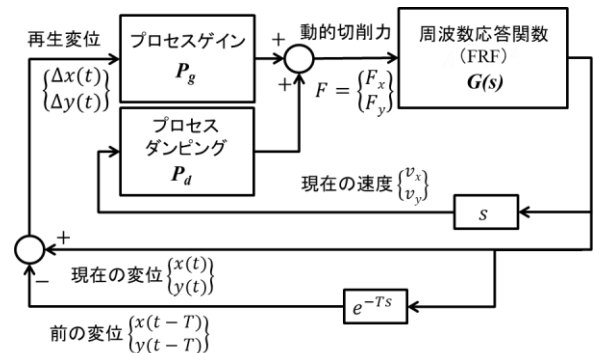


図4 びびり安定度計算のブロック線図

3 適用例

3.1 最適ホルダ選択

図5に示す、長さのみが異なる四つのホルダ (大昭

和精機製 BBT40 メガニューベビーシリーズ 13N-60、13N-90、13N-120、13N-165) を工作機械 (オークマ製 MU-400VA) に取り付けて加振測定し、各ホルダ FRF を取得した。

対象とする工具は直径 8mm 突出し長さが 48mm の超硬ラジラスエンドミル (MOLDINO 製 HG0F2080-20-TH) とし、提案した最適ホルダ選択手法を適用した。なお、切削は SKD61(HRC48)の被削材に等高線溝加工を行うものとし、切削条件は軸方向切込量 0.45mm、工具回転数 10,000rpm とする。

その結果、表 1 に示す計算結果となり、最適ホルダとして 13N-120 が選択された。ホルダ 13N-120 のみびり安定度が 1 を超えており、びびり振動が発生しない最適ホルダであると考えられる。



図 5 4種類のコレットホルダ

表 1 算出したびびり安定度

ホルダ	13N-60	13N-90	13N-120	13N-165
Value	0.53	0.76	2.53	0.82

3.2 FRF 測定結果

最適ホルダ選択計算に用いたツーリングについて RC により推定した FRF と加振測定で得られた FRF とを比較した結果は図 6 のとおりである。縦軸はたわみやすさを表すコンプライアンスゲインで、横軸は周波数で整理したものであり、実線は RC による推定値、破線は加振測定による実測値を表している。

各ホルダを用いたツーリングの FRF 波形はおおむね一致する傾向にあり、特に波形のピークの周波数に相当する固有振動数については良好な結果を得られた。

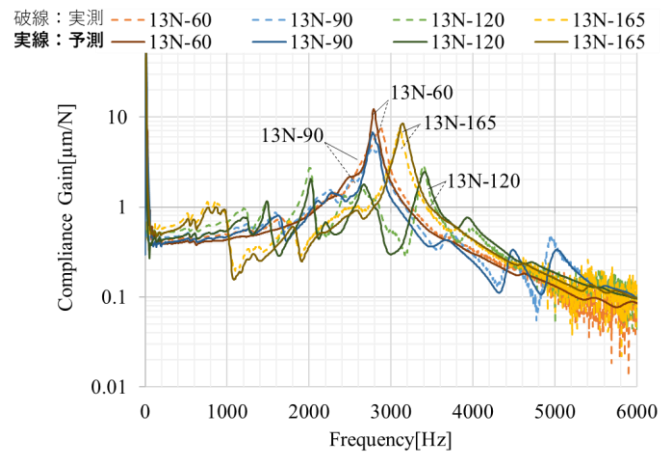


図 6 ツーリング FRF の比較

3.3 加工実験結果

本手法の有効性を確認するために 4 種類のホルダを用いたツーリングで加工実験を行った。図 7 に実験の概要、表 2 に切削条件を示す。3.1 節で実施した最適ホルダ計算の条件 (表 2 実験 No.2) と同様に等高線溝加工を実施し、びびり振動の発生について加工面の状態や表面粗さパラメータから評価する。なお、比較のため、びびり振動が発生しないよう軸方向切込量を小さくした条件 (表 2 実験 No.1) も実施した。

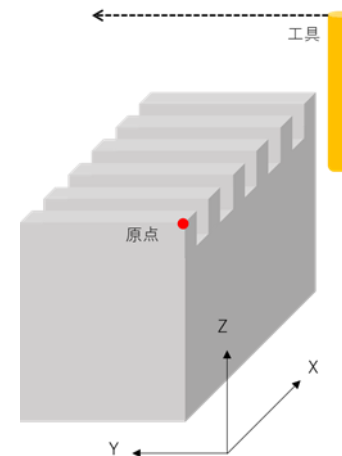


図 7 実験概要

表 2 切削条件

実験 No.	直径 [mm]	突出し [mm]	Z 切込量 [mm]	回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]
1	8	48	0.20	10,000	2,000
2	8	48	0.45	10,000	2,000

加工後の加工面を図 8 に示す。図 8 (a) では実験 No.1 の安定な条件であったため、それぞれのツーリングで加工面にびびりマークは確認されなかった。図 8

(b)では最適選択された 13N-120 のホルダを用いた加工面のみびりマークがなく、他の三つの加工面にはびりマークが確認された。

また、加工面の表面粗さを工具送り方向に測定した結果を表3に示す。表面粗さはミットヨ製 CS-5000 を用いて測定した。実験 No.1 では全てのホルダにおいて、粗さパラメータ Ra は 0.4 μ m 程度、Rz は 2 μ m 程度と小さい。実験 No.2 では 13N-120 の結果のみ Ra が 0.452、Rz が 2.361 と実験 No.1 の結果に近い値であるが、他のホルダでは Rz が 4 μ m を超えて大きくなった。これらの結果から今回の実験条件では、13N-120 がびり振動の発生しにくいホルダであると言える。

ここで、13N-120 のびり安定性が高い理由について考察する。ツーリング FRF のコンプライアンスゲインの最大値はびりやすさに影響を及ぼすことが知られており、図6から測定値、計算値ともに 13N-120、90、60、165 の順に大きくなっており、13N-120 が最も小さい。13N-60、90、165 の FRF では1つのピークである波形が確認されるが、13N-120 ではピークが複数に分かれて存在する形となっており、コンプライアンスの最大値を小さくする要因となっている。今回の工具の条件（径、長さ、材質）に対しては本ホルダが適切な動吸振器（ダンパ）として作用したことが要因であると考えられる。

表3 表面粗さ測定結果

	実験 No.1		実験 No.2	
	Ra[μ m]	Rz[μ m]	Ra[μ m]	Rz[μ m]
13N-60	0.419	2.12	0.642	4.36
13N-90	0.482	2.34	1.47	6.38
13N-120	0.437	2.06	0.452	2.36
13N-165	0.472	2.40	1.19	6.16

4 結 言

本研究ではツーリング FRF の推定技術を適用し、びり安定度に基づいて最適なホルダを選択できる技術を開発した。

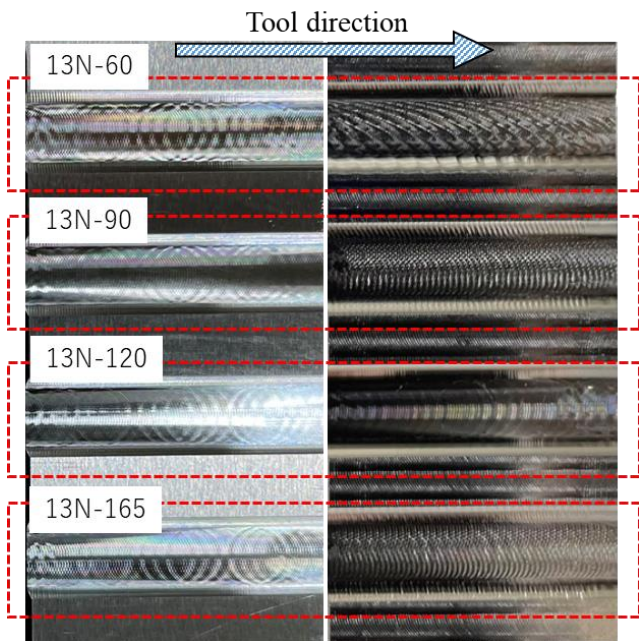
本技術を適用したところ、長さの異なる4種類のホルダ（13N-60、13N-90、13N-120、13N-165）に直径 8mm 突出し長さ 48mm の超硬ラジラスエンドミルを取り付けた各ツーリングにおいて 13N-120 のホルダがびり振動が発生しにくいと予測した。

実際に、SKD61(HRC48)の被削材に等高線溝加工を実施したところ、軸方向切込量が 0.45mm の条件のときに 13N-120 ホルダのみで、加工面の状態や表面粗さからびり振動が生じていないことが分かり、最適なホルダを選択することができた。

今後は焼き嵌めホルダなどの種類の異なるホルダや、小径工具などの円柱片持ち梁のみでは正確に予測できない工具についても本技術の適用範囲を広げていきたいと考えている。

文 献

- 1) Y.Altintas et al. : Transaction of the ASME 121(1999), 586
- 2) E.Shamoto and K.Akazawa : CIPR Annals Manufacturing Technology, 58, 1(2009), 35
- 3) Tony L.Schmitz and K.Scott Smith : Machining Dynamics (2009), 235
- 4) 西川、菊田、姫宮：日本機械学会第12回生産加工工作機械部門講演会、A13(2018)
- 5) A.Erturk, H.H.Ozugen, E.Budak : International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 1901



(a) 実験 No. 1 (b) 実験 No. 2

図8 各実験の加工表面