

〈一般研究課題〉 次世代切削加工を実現する革新的モデルベース  
サイバーフィジカルシステムの基盤となる高精度モデルの探求  
助成研究者 名古屋大学 鈴木 教和



次世代切削加工を実現する革新的モデルベース  
サイバーフィジカルシステムの基盤となる高精度モデルの探求  
鈴木 教和  
(名古屋大学)

Development of high-accuracy model for the basis of innovative model-based Cyber-Physical-System to realize next-generation cutting process

Norikazu Suzuki  
(Nagoya University)

**Abstract :**

A new approach to predict chatter stability in cutting considering process damping is proposed. Traditional chatter stability analysis methods enable to predict stable or unstable conditions. Under unstable conditions, the chatter vibration can increase theoretically infinitely. However, chatter vibration is damped at a certain amplitude in real process due to process damping, i.e., the cutting process stabilizes by means of tool flank face contact against the machined surface. To consider the influence of the process damping, a simple process damping force model is developed. The process damping force is assumed to be proportional to the structural displacement and process damping coefficients which are the function of the vibration amplitude and the wavelength. To identify the coefficients, a series of finite element analysis is conducted in the present study. Identified coefficients are introduced into the conventional zero-order-solution in frequency domain. The proposed model calculates chatter stability limit assuming process damping with finite amplitude. Hence, this analysis enables to estimate the amplitude-dependent quasi-stable conditions. Analytical results for the face turning operation demonstrated influence of process damping effect on resultant vibration amplitude quantitatively.

## 1. はじめに

びびり振動は切削工程における生産効率を制限するためたびたび問題となる。高い効率を得るには、この不安定現象を生じない安定条件を適切に設定する必要がある。びびり安定性の予測技術を用いた主軸回転数や他の加工条件等の最適化手法[1,2]など、様々な手法が生産現場においては試行錯誤的に適用される。びびり振動を回避する主要な手段の一つとして、プロセスダンピングが系の安定性改善に寄与することが知られている[3]。プロセスダンピングとは、工具の逃げ面が工作物の仕上げ面に接触することで減衰効果を発現する現象である。プロセスダンピングは主に低切削速度条件で発現するため、生産性の低下を伴う。このため、他の手法では十分な効果が得られない場合の最後の手段としてよく使用される。一方、切削速度が比較的遅い難削材の加工においては有効に積極活用できる可能性がある[4]。プロセスダンピングを有効に活用するには、プロセスダンピングの影響を定量的に推定するシミュレーション技術が必要となる。この現象を考慮したびびり安定性予測を達成するため、多くの従来研究で数理モデルが利用されてきた。Altintasらは、振動速度と振動加速度に比例するプロセスダンピング力をモデル化[5]した。この単純なモデル化により、低切削速度条件下でのびびり安定性の向上効果を推定することができる。Budakらは、機械構造伝達関数に対する付加減衰としてプロセスダンピング効果をモデル化した[6]。減衰係数は、逃げ面の接触の運動学的シミュレーションに基づいてモデル化される。びびり安定性を正確に推定するには、これらのモデルに対して適切なパラメータを同定する必要がある。Altintasらは、高速工具サーボを利用してプロセスダンピング力を実験的に分析した[5]。Budak[6]とKurata[7]は、逆解析に基づく実験的分析アプローチを提案した。ただし、従来のアプローチでは、プロセスダンピングの影響を受ける現象を評価するために専用に設計された実験を実行する必要がある。この現象を精度よく推定する上で把握すべき最も重要な特性は、構造変位とプロセスダンピング力の関係である。しかし、実験的アプローチによってプロセスダンピングを伴う実際の切削現象を分析するのは容易ではなく、これが技術開発を妨げてきた。動的切削力を実験的に計測するのは不可能ではないが、プロセスダンピング力を区別して求めることは困難である。

本研究では、有限要素解析を用いた計算実験によりプロセスダンピング現象を解析するための基本的な手法を提案する[8]。相対振動とプロセスダンピング力の関係は、市販の有限要素解析ソフトウェアを利用した一連のシミュレーションを通じて推定する。シミュレーション結果に基づいて、力と振動の関係を周波数領域でモデル化し、プロセスモデルの係数を同定する。次に、単純な端面旋削を対象とした安定性限界解析手法を考案し、解析モデルを定式化する。提案手法を利用することにより、プロセスダンピングの特性を分析する。同時に検証実験を通じて有効性を確認する。

## 2. プロセスダンピングの解析手法

低切削速度と高切削速度での同一振幅のびびり振動を伴う切削プロセスの模式図を図1に示す。図に示すように、低切削速度条件では逃げ面が仕上げ面に干渉しやすいことが分かる。ここでは、周波数 $\omega_c$ で切込み方向のみにびびり振動が発生すると仮定している。従って、見かけの切削送りとびびり振動を組み合わせた刃先の相対運動軌跡は正弦波状になる。見かけの切削方向に対して工具の運動軌道がなす角度、すなわち軌道角度が逃げ角より大きくなると逃げ面が加工面に接触する。

この逃げ面接触が動的なプロセスダンピング力を引き起こす。下向きの振動速度が最大の瞬間に軌道角が最大になる。従って、プロセスダンピング力は振動速度に概ね同期して生じると考えられる。この性質を考慮して、従来の研究においては振動速度と切削速度の関係に着目してモデル化が行われている。一方で、実際の切削現象において生じるプロセスダンピング力を緻密に分析した研究はなく、その現象はほとんど明らかにされていない。

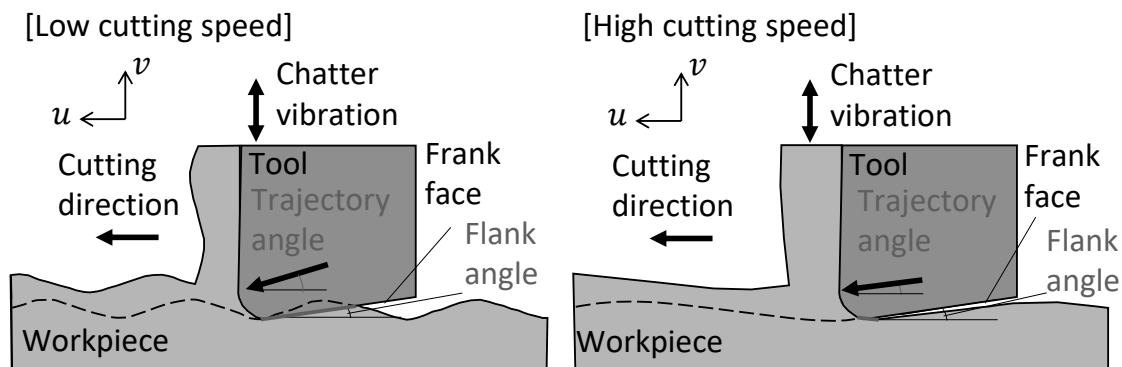


図1 プロセスダンピングに対する切削速度の影響を示す模式図

本研究においては、プロセスダンピングの影響を詳細に考慮するため、2次元切削を仮定した有限要素解析を実施した。ここでは、市販の切削プロセス解析ソフトウェアAdvantEdge FEMを利用して計算を実施した。2次元切削シミュレーションにおいては、切込み方向に生じる単一周波数のびびり振動を考慮して動的な計算を実施する。びびり振動を伴う2次元切削シミュレーションの例を図2に示す。切削速度は40m/min、びびり周波数は800Hz、切削幅は1mm、逃げ角は7度とし、被削材は真鍮(JIS : C3772)を仮定した。計算結果から、逃げ面に生じる圧縮およびせん断応力成分 $\sigma$ 、 $\tau$ を抽出する。これらの応力を線積分することによりプロセスダンピング力 $F_{pd}$ が得られる。

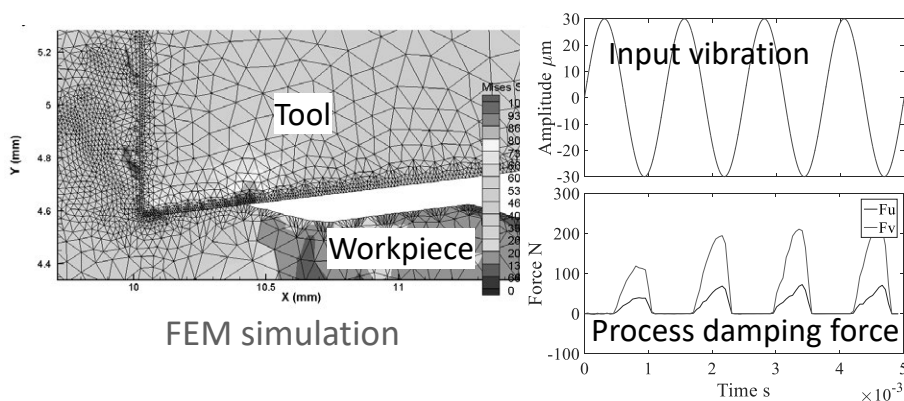


図2 FEMシミュレーションとプロセスダンピング力の動的変動

図に示すように、逃げ面が加工面に接触するとプロセスダンピング力が発生する。このプロセスダンピング力の周期的な変動について周波数領域で考える。周波数領域において複素関数として表されるプロセスダンピング力 $F_{pd}$ を変位 $u$ に比例する関数としてモデル化する。比例係数をプロセスダンピング係数 $K_{pd}$ とする。簡単のため、切込み深さ方向の1自由度振動を考慮すると、次の関係式が得られる。

$$F_{pd} = K_{pd}u = (K_{pdk} + iK_{pdc})u \quad (1)$$

ここで、 $K_{pdk}$ と $K_{pdc}$ は、複素プロセスダンピング係数 $K_{pd}$ の実部と虚部である。

この2次元切削シミュレーションをびびり周波数と振動振幅を変更して繰り返すことで、振幅 $u$ と振動波長 $\lambda (= 2\pi v_c / \omega_c)$ の影響を調査した。被削材は炭素鋼(JIS : S45C)とした。図3に計算されたプロセスダンピング係数を示す。図から波長 $\lambda$ が短いほど、プロセスダンピングの影響が大きくなること分かる。

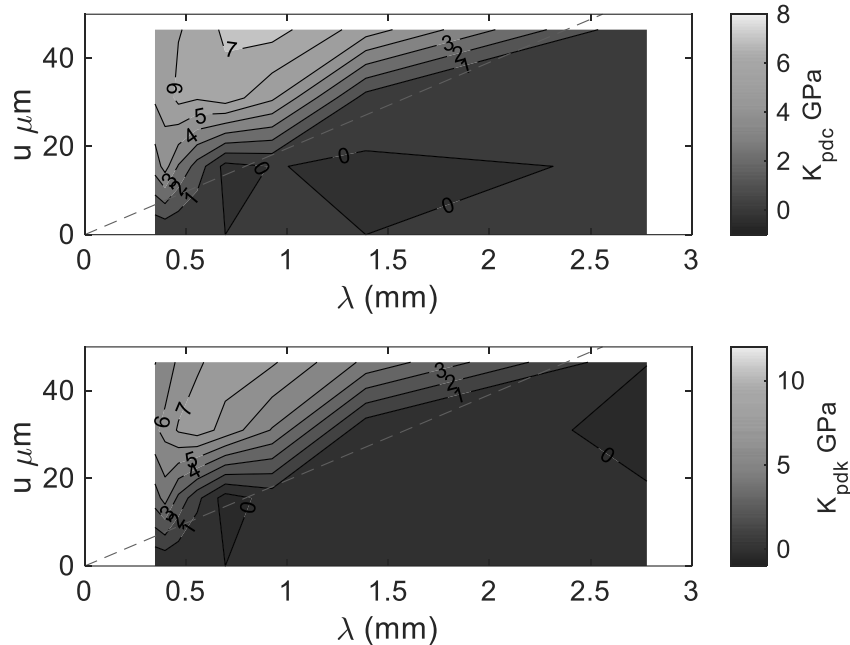


図3 プロセスダンピング係数の計算結果

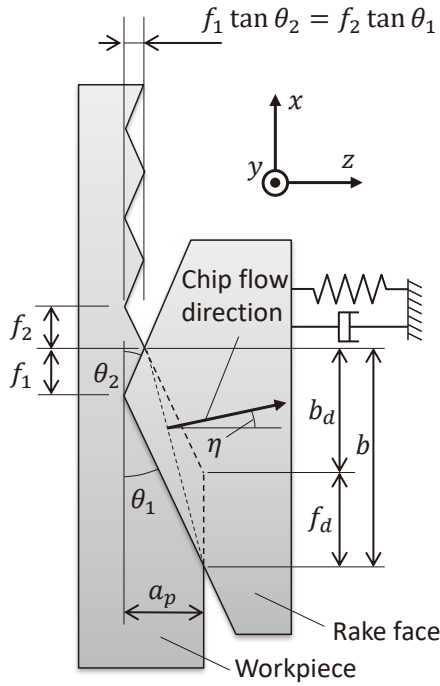
ここで、軌道角と逃げ角が一致する振動振幅を臨界振幅と定義する。幾何学的な関係に基づいて、臨界振幅 $u_{cr}$ はおおよそ次の式で推定される。

$$u_{cr} = \frac{v_c \tan \gamma}{\omega_c} = \frac{\lambda \tan \gamma}{2\pi} \quad (2)$$

式(2)を満たす条件を図中に赤い破線でしめす。図から、破線を境に上側の領域で $K_{pd}$ が増加しており、臨界振幅はプロセスダンピングが発現する境界条件に一致することが分かる。この特性から、プロセスダンピング現象は境界線の上部領域で発現すると考えられる。工具形状や工作物の情報に応じて図3に示すプロセスダンピング係数のデータベースを予め算出することで、任意の振動波長 $\lambda$ と振動振幅 $u$ に対する係数を内挿して推定することが可能である。すなわち、この領域における係数を定量的に推定することにより、プロセスダンピングを考慮した安定限界解析を実行することができる。なお、従来のプロセスダンピングの解析手法においては、プロセスダンピング係数の振幅依存性を無視して固定値を仮定する点で、提案手法と大きく異なる性質を持つ。

### 3. 端面旋削のびびり安定限界解析

端面旋削プロセス用のびびり安定性シミュレーションモデルを構築する。図4に、旋削プロセスの概略図を示す。



Cutting cross-section of face turning

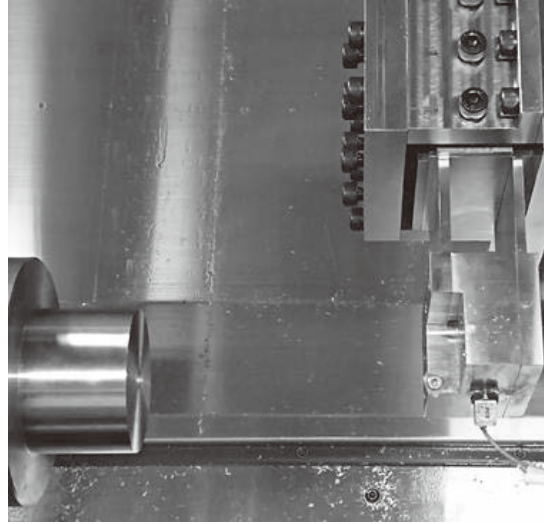


図4 2つの直線切れ刃で構成された工具による旋削加工プロセスの模式図と加工装置

工具刃先は、傾斜角度が $\theta_1$ と $\theta_2$ の前切れ刃と横切れ刃の2本の直線で構成されることを前提とする。横切れ刃の逃げ角は、前切れ刃の逃げ角に比べて低く設定される。このため、プロセスダンピングは、横切れ刃でのみ発現する。初期条件として、切込み $a_p$ と送り速度 $f_d$ を与えると、切削幅 $b$ と再生幅 $b_d$ は、次式で計算される。

$$b = \frac{a_p}{\tan \theta_1} + \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} f_d \quad (3)$$

$$b_d = b - f_d \quad (4)$$

Colwellの法則[9]を仮定すると、切りくず流出角 $\eta$ は近似的に式(6)で推定される。

$$\eta = \text{atan} \frac{a_p - \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} f_d}{b} \quad (5)$$

切削方向と切込み方向の比切削抵抗 $K_{ct}$ および $K_r(=K_{ct}/K_r)$ を使用して、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向の比切削抵抗は、次の式で定式化される。

$$\begin{Bmatrix} K_{cx} \\ K_{cy} \\ K_{cz} \end{Bmatrix} = K_{ct} \begin{Bmatrix} \sin \eta \\ 1/K_r \\ \cos \eta \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $K_r$ は主分力方向と背分力方向の成分比(分力比)を表す。本研究では、構造は $z$ 軸方向のみに柔軟であると仮定する。従って、 $z$ 軸方向の変位と力の影響のみを考慮する。 $z$ 軸方向に生じる力 $F_z$ は、切りくず生成に要する力 $F_c$ とプロセスダンピング力 $F_{pd}$ の合成成分として次のように定式化することができる。

$$F_z = F_{cz} + F_{pdz} \quad (7)$$

次に、びびり周波数 $\omega_c$ を仮定すると、z軸の振動変位 $u_z(i\omega_c)$ は、周波数応答関数 $g_z(i\omega_c)$ によって次のように計算される。

$$u_z(i\omega_c) = g_z(i\omega_c)F_z(i\omega_c) \quad (8)$$

以上の定式化によって得られた切削力モデルとダイナミクスモデルの関係式に基づいて、次の特性方程式が導出される。

$$F_z(i\omega_c) = - \left\{ K_{ct} \cos \eta (b - b_d e^{-i\omega_c}) + \frac{a_p \cos \theta_1}{\tan \theta_1} (K_{pdk} + iK_{pdc}) \right\} g_z(i\omega_c) F_z(i\omega_c) \quad (8)$$

この特性方程式を解くことにより安定限界を推定することができる。安定限界推定のためのフローチャートを図5に示します。まず、工具形状や加工条件から得られる各種パラメータを設定する。また、回転半径 $r$ と回転数 $n$ を仮定し、切削速度 $v_c$ を計算する。次に、切込み $a_p$ を設定し、式(3)–(5)を用いてプロセスパラメータを計算する。さらに、びびり周波数 $\omega_c$ と振動振幅 $u$ を走査し、対応するプロセス振幅係数 $K_{pdk}$ と $K_{pdc}$ を用いて、式(9)に示す特性方程式を計算する。 $\omega_c$ と $u$ の適切な組み合わせにおいて特性方程式が成立する。この条件を探索的に繰り返し計算によって求める。

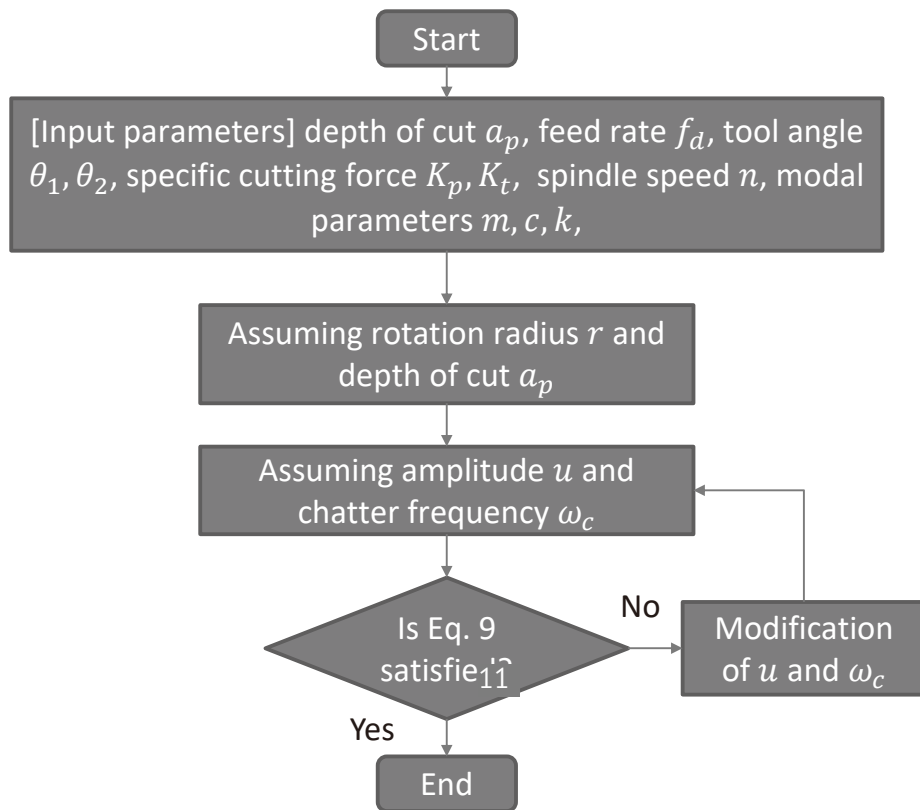
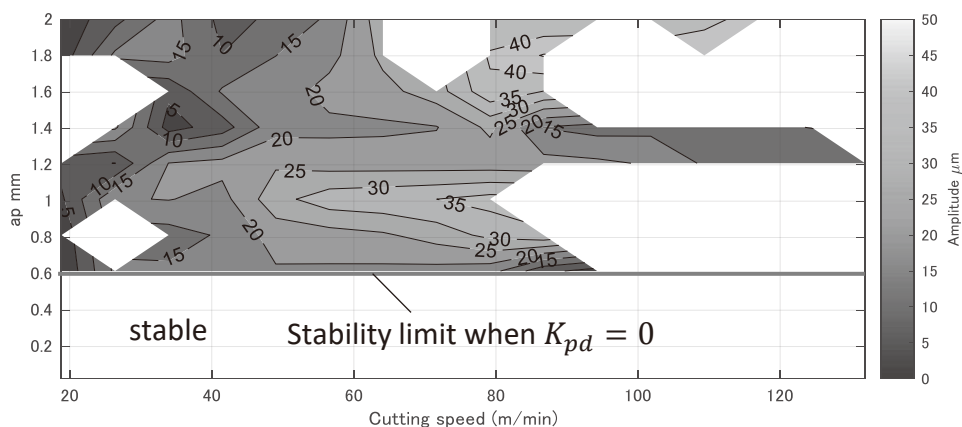


図5 提案する安定限界解析手法のフローチャート

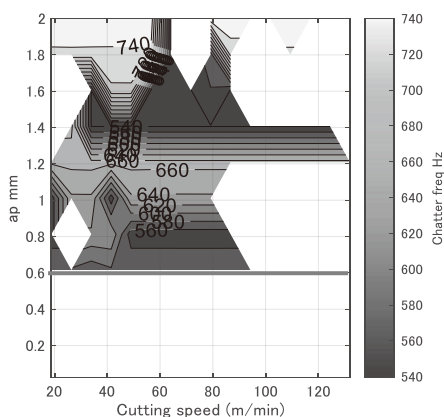
提案手法を用いて切削速度と切込みが系に及ぼす影響について、安定性解析を行った事例を図6に示す。赤い実線は、プロセスダンピングを考慮しない場合の安定限界切込みを示しており、系は赤い線の下側の条件では完全に安定化する。したがって、赤い実線の上側の切込み領域を対象とし

て解析を実施している。特性方程式を満たすびびり振動の振幅、周波数、および波長の解析結果をカラーマップで示している。提案手法では、準安定状態として生じるびびり振動の振幅や周波数を予測することができる。図6に示すように、切削速度の増加に伴い、対応するびびり振動の波長が増加する。図3に示すように、波長が増加すると、 $K_{pd}$ は減少する。したがって、高速切削条件では、びびり振動の振幅が大きくなる傾向がみられる。

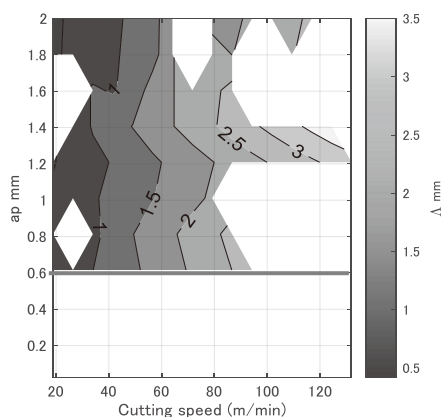
検証実験の結果の一例を図7に示す。形状の違う2種類の工具を用いて端面切削を実施し、その際に検出された切削力の変動と切削速度の関係を示している。臨界切削速度を超えると、切削力変動が生じ、速度が高いほどその変動が大きいことが分かる。びびり安定性の切削速度依存性について、プロセスダンピングモデルを使用した従来の解析手法においても大まかに見積もることができるが、最終的に生じる有限振幅を周波数領域シミュレーションで見積もることはできない。また、臨界切削速度を正確に予測するのは、正確なパラメータを特定しない従来の方法では本質的に困難である。提案方法は、プロセスダンピングシミュレーションに有限要素解析を利用する。これにより、プロセスダンピング係数の信頼性の高い同定が可能になる。また、工具形状の影響についても精度よく推定することができるため、従来の方法と比較して、予測精度を向上することができる。



(a) Chatter vibration amplitude



(b) Chatter frequency



(c) Wavelength

図6 提案手法による安定限界解析の結果

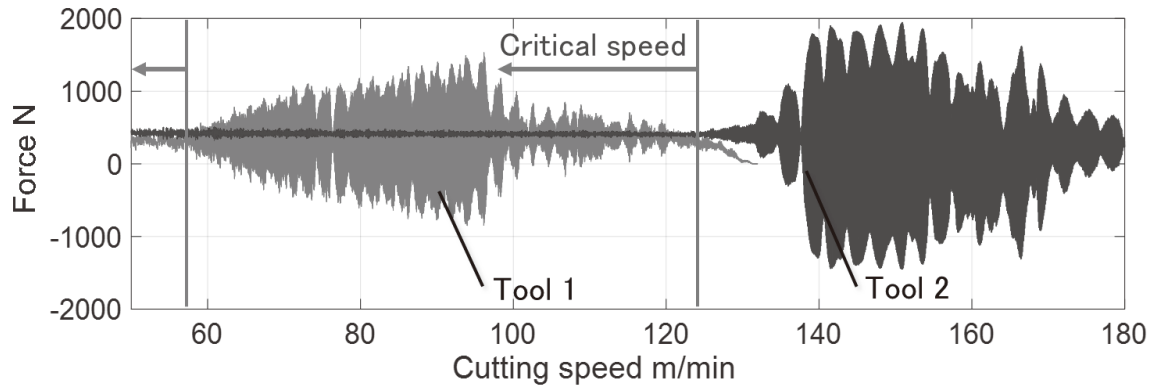


図7 検証実験において計測された切削速度と切削力変動の関係

#### 4. まとめ

本研究では、プロセスダンピング現象を考慮して有限振幅のびびり振動が生じる際の安定性を予測する手法を開発した。有限要素法解析を使用して、推定プロセスダンピング力に対するプロセスダンピング係数を計算する。計算された係数を使用して、びびり安定性を周波数領域で推定する解析モデルを開発した。提案手法は、準安定状態でのびびり振動の周波数及び振幅の予測を可能とする。解析結果は、びびり振動の安定性の削速度依存性を示し、検証実験を同様の傾向を示すことを確認した。本手法を応用することで、プロセスダンピングの影響を精度よく推定することが可能となり、切削シミュレーションの高精度化に寄与することが期待できる。

#### 参考文献

- [1] Tlustý J, Manufacturing Process and Equipment, Prentice Hall, 1999
- [2] Altintas Y, Manufacturing Automation, Cambridge Univ. Press., 2012
- [3] Munoa J, Beudaert X, Dombovari Z, Altintas Y, Budak E, Brecher C, Stepan G, Chatter suppression techniques in metal cutting, CIRP Annals, 65, 2(2016), 785-808.
- [4] Tuysuz O, Altintas Y, Analytical modeling of process damping in machining, J. Manuf. Sci. Eng. 2019, 141(6): 061006
- [5] Altintas Y, Eynian M, Onozuka H, Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, CIRP Annals, 57, 1(2008), 371-374.
- [6] Budak E, Tunc LT, Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach, CIRP Annals, 59, 1(2010), 403-408.
- [7] Kurata Y, Merdol SD, Altintas Y, Suzuki N, Shamoto E, Chatter stability in turning and milling with in process identified process damping, JAMDSM, 4, 6(2010), 1107-1118.
- [8] Suzuki N, Nakanomiya T, Shamoto E, Chatter stability prediction of cutting process with process damping utilizing finite element analysis, Proceedings of Leading Edge Manufacturing/Material Processing (LEMP2020), (2020) LEMP2020-8556.
- [9] Colwell LV Predicting the angle of chip flow for singlepoint cutting tools. Trans ASME 76, 2(1954), 199-204.