

# 切削加工システムの動特性バランスが振動安定性へ与える影響\*

## Effect of Machining System Dynamic Characteristic Balance on Vibration Stability

橋本高明 T. HASHIMOTO

In order to achieve high-precision cutting, vibration that occurs during machining must be suppressed. The vibrations that are generated change due to the dynamic characteristic balance of the machining system. In this study, the physical mechanisms of vibration phenomena were considered based on the zero-order approximation method for end milling.

**Key Words:** cutting, machining, vibration, dynamic characteristics, dynamics, anisotropy

### 1. はじめに

自動車や航空機などの金属部品の生産には、工作機械を用いた切削加工が広く利用されている。生産加工における普遍的な課題は“良いものを早く安く”生産することであり、切削加工工程でも高能率かつ高精度な加工が追求されてきた。それに伴う問題の一つとして、“びびり”と呼ばれる切削加工中の振動（以下、加工振動）がある。この振動は、切削工具と工作物の間に生じる相対的な振動で、仕上げ面性状の悪化や（図1）、工具の異常損耗、機械構造の損傷などを引き起こし、生産能率を低下させる<sup>1)</sup>。そのため、加工振動の抑制は切削加工の重要な課題である。

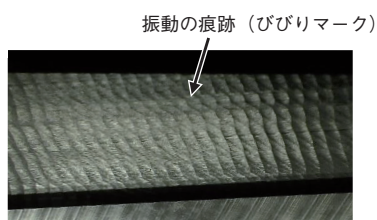


図1 加工振動による仕上げ面性状の悪化  
Chattered surface

加工振動の発生メカニズムを図2で模式的に表す。切削加工を開始すると工具の切込み量に応じた切削力が発生し、その力が工具、工作物、工作機械本体などで構成される機械システムに加わると、その機械的コンプライ

アンスの周波数応答特性（以下、動特性）に応じて工具と工作物の間に相対振動が生じる。その振動の振幅は切込み量に重畳される。図2の振動系全体を、本報では切削加工システムと呼ぶ。

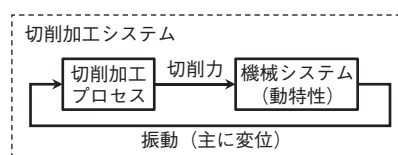


図2 切削加工システム  
Definition of cutting system

加工振動は、発生メカニズムによって“強制振動”と“自励振動”に大別され、いずれにも動特性が影響する。近年、切削加工システムの動特性の異方性が、加工振動へ与える影響の研究が進められている。たとえば、エンドミル加工において、切削方向と切削加工システムの動特性のバランスで振動の発生しやすさ、すなわち自励振動の安定限界は変化することが分かっている<sup>2), 3)</sup>。ただし、これまでの研究は加工シミュレーションや加工実験による現象の確認と、数学的な考察にとどまり、メカニズムの物理的な説明はできていない。

そこで本報では、まず加工振動の発生メカニズムと自励振動の安定限界解析方法を解説し、続いてエンドミル加工の自励振動の安定限界が、動特性バランスで変化する現象のメカニズムについて、ゼロ次近似法<sup>4), 5)</sup>に基づいて考察した結果を紹介する。

\* 本資料は、京都大学博士(工学)学位論文 甲第 24145 号(2022年)を基に作成した。

## 2. 加工中の振動について<sup>6)~8)</sup>

切削加工システムで発生する加工振動は、前述のとおり“強制振動”と“自励振動”に分けられ、加工振動が問題となった場合は、まず振動の発生メカニズムと要因の特定が必要となる。以下に強制振動と自励振動について、それぞれ要因と対策の概要を説明する。

### 2.1 強制振動の要因と対策

切削加工システムで発生する強制振動は、力や変位の強制的な変動に起因する振動であり、“力外乱型”と“変位外乱型”に分類される<sup>9)</sup>。

力外乱型の強制振動の代表的な要因は、エンドミル加工などの断続的に周期変動する切削力である。この振動を低減する方策には、共振状態の回避、すなわち、切れ刃通過周波数（工具の回転周波数と工具刃数の積）とその整数倍が、切削加工システムの固有振動数と一致しない加工条件の選定や、切削力の低減、あるいは工具系や工作物系の動剛性の向上などがある。

変位外乱型の強制振動の要因には、工作機械を構成する軸受、歯車、モーターに起因する振動、液圧ポンプの脈動、地盤振動などがある。この振動の場合は加工条件の変更が必ずしも有効な手段とならず、振動源の制振対策や振動の伝達経路の遮断などが必要となる。

### 2.2 自励振動の種類と要因

切削加工システムで発生する自励振動は、強制的な要因がなくても、切削加工と動特性の相互作用で発生する不安定振動である。その主な分類として“再生型”と“モードカップリング型”がある<sup>9)</sup>。

再生型の自励振動は“再生びびり”とも呼ばれ、**図3**に示すとおり、切削時の振動による切り残しで仕上げ面に起伏が生じ、1回転して同じ位置を切削するときその起伏が切削力を変動させる現象である。この再生効果は多くの切削加工法で発生する。

一方、モードカップリング型の自励振動は、2方向の固有モードが近い固有振動数をもつ場合、それらが連成して振動する現象である。**図4**に示すエンドミル加工などの回転工具を用いる切削加工法では、このモードカップリング効果の影響も問題となる。

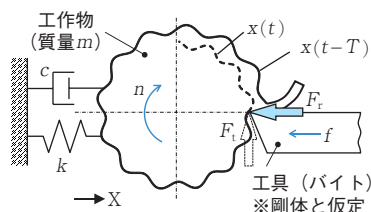


図3 再生型自励振動を伴う突切り加工プロセス  
Plunge turning process with regenerative chatter

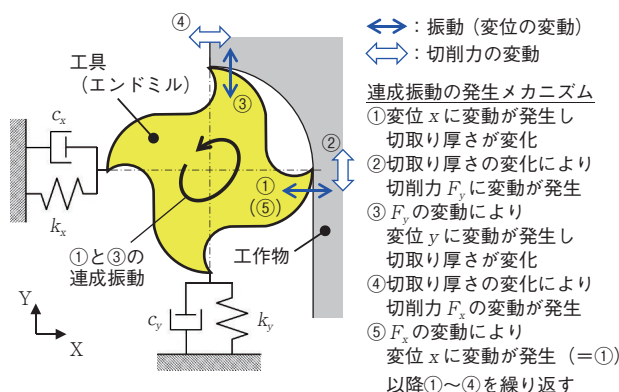


図4 エンドミル加工時のモードカップリング効果  
Mode coupling in milling

### 2.3 再生型自励振動の安定限界解析

自励振動への対処には、自励振動の発生しやすさ、すなわち“安定限界”を理解する必要がある。そこで、まず再生型自励振動の安定限界の解析方法を前述の**図3**で説明する。工具側は剛体で、工作物側が弾性体とした突切り加工（旋削の一形態）であり、**図3**中の  $m$ ,  $c$ ,  $k$  はそれぞれ工作物の質量、減衰係数、ばね定数である。工作物を回転速度  $n$  で回転させ、工具を送り量  $f$  で送って加工しているとき、偶発的に  $X$  方向の振動  $x$  が生じると、その瞬間の切り厚さが変動するだけでなく、1回転後（時間差  $T$ ）の切り厚さも変動する。これにより、切削力の背分力成分  $F_r$  が変動し、工作物は再び加振される。このときの振動  $x(t)$  の振幅が、1回転前の振動  $x(t - T)$  の振幅より大きくなると、加工の進行で振動振幅は増大し続ける。再生型自励振動は、このように発生し、そのメカニズムは**図5**のブロック線図で表される。

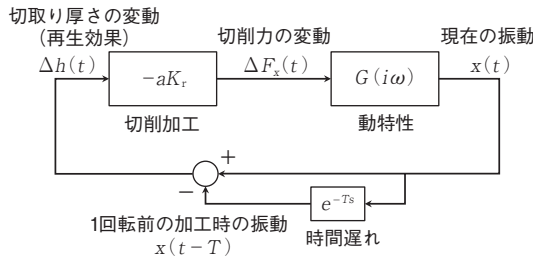


図5 突切り加工システムのブロック線図  
Block diagram of plunge cutting system

図5中の  $a$  は切削幅、 $K_r$  は背分力方向の比切削抵抗 (単位切削断面積あたりの切削力) である。

また  $G(i\omega)$  は工作物の動特性であり、前述の  $m, c, k$  を用いて式(1)で表される。

$$G(i\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + ic\omega + k} \quad (1)$$

ここで  $i$  は虚数単位であり、 $\omega$  は振動の角振動数である。なお、工具が工作物より柔軟であれば  $G(i\omega)$  は工具の動特性となる。また、切削力の主分力成分  $F_t$  とその方向の振動は、図3に示す突切り加工での再生型自励振動へ影響しないことが多いため、図3、図5では省略している。

再生型自励振動の安定限界解析とは、図5のブロック線図の振動系の安定性を判別することである。詳細は省略するが、図5の振動系を最も簡易的に定式化すると、安定と不安定の境界条件となる切削幅 (安定限界切削幅)  $a_{lim}$  は式(2)で表される。

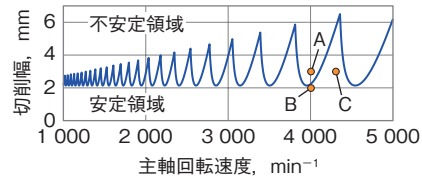
$$a_{lim} = -\frac{1}{2K_r G_R(i\omega_c)} \quad (2)$$

ここで  $G_R(i\omega)$  は動特性  $G(i\omega)$  の実部、 $\omega_c$  は自励振動の角振動数を表す。以上が、再生型自励振動の安定限界解析方法の基礎理論である。

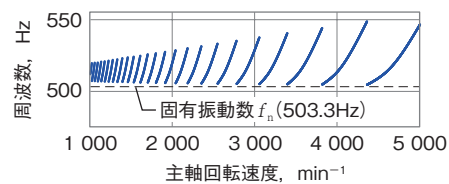
## 2.4 再生型自励振動への対策

続いて、再生型自励振動の対策を説明する。まず、安定限界解析結果の一例を図6に示す。 $m, c, k, K_r$  の各パラメータはそれぞれ  $3\text{kg}, 300\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}, 30\text{N}/\mu\text{m}, 450\text{MPa}$  とした。図6(a), (b) は、それぞれ主軸回転速度  $n$  に対する再生型自励振動の安定限界切削幅  $a_{lim}$  および自励振動の周波数  $f_c (= \omega_c/2\pi)$  を示している。図6(a) は“安定限界線図”とも呼ばれ  $a_{lim}$  より上側は不安定領域、下側は安定領域を示し、 $a_{lim}$  は主軸回転速度  $n$  に応じて周期的に増減する。ここで、たとえば、切削幅  $3\text{mm}$  で加工するとき、主軸回転速度を  $4\,000\text{min}^{-1}$  に

設定すると再生型自励振動が発生する (図6(a)中の点A)。そこで切削幅を  $2\text{mm}$  に低減すれば、安定した加工となる (同B)。ただし、この場合は加工能率の低下が背反となる。一方、切削幅は  $3\text{mm}$  のままで主軸回転速度を  $4\,300\text{min}^{-1}$  に変更することでも安定加工が可能である (同C)。この場合は加工能率の低下がない。



(a) 安定限界切削幅  $a_{lim}$



(b) 自励振動の周波数  $f_c$

図6 突切り加工の安定限界解析結果  
Simulated stability in plunge cutting

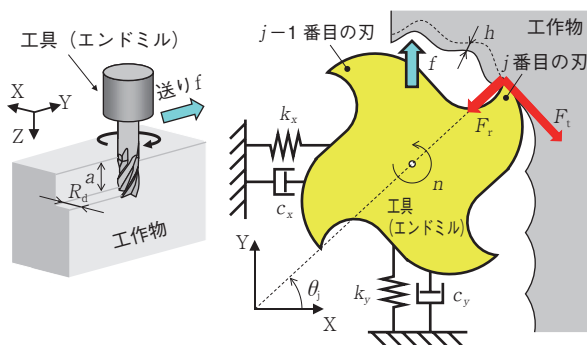
また式(2)より、 $K_r$  や  $G_R(i\omega_c)$  を小さくすれば  $a_{lim}$  を平均的に大きくできる。したがって、工具のすくい角を大きくして  $K_r$  を下げることや、ワークレストを追加して工作物の剛性  $k$  を高めることなども再生型自励振動への対策として有効である。

なお図6(b)より自励振動の周波数  $f_c$  は固有振動数  $f_n$  より高い値となり、かつ主軸回転速度  $n$  に応じて周期的に変動する。これも再生型自励振動の特徴である。

## 2.5 エンドミル加工の自励振動の安定限界解析と対策

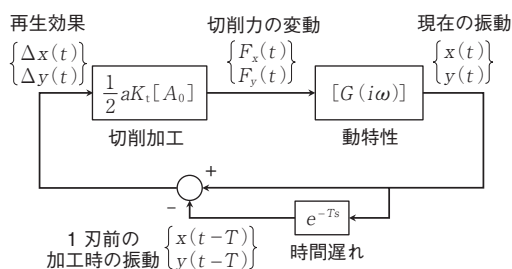
エンドミル加工はフライス加工の一形態であり、旋削と並ぶ代表的な切削加工法である。その切削モデルを図7に示す。エンドミル工具は細長く、その剛性不足から加工振動、特に自励振動が問題となりやすい。また、エンドミル加工は再生効果とモードカップリング効果が同時に作用する切削加工法である。再生効果は任意の切れ刃が切削した加工面を、その次の切れ刃が切削する際に生じるため、エンドミル加工の再生効果にかかわる時間周期  $T$  は切れ刃通過周期となる。切れ刃通過周期の単位を秒、主軸回転速度  $n$  の単位を  $\text{min}^{-1}$  とし、刃数を  $N$  で表すとき、切れ刃通過周期は  $60/(nN)$  で求められる。また、エンドミル加工では常に切削力の方向が変化するため、振動を2自由度以上でモデル化する必要

がある。簡易的には工具の回転軸方向（Z 方向）の微小な振動は無視し、工具半径方向の直交 2 軸でモデル化される。本報では、**図 7**に示すように送り方向を Y 方向、送りに直交する工具半径方向を X 方向とする 2 自由度モデルを想定する。これによりモードカップリング効果も考慮される。**図 7**中の  $a$  は軸方向の切込み深さ、 $R_D$  は半径方向の切込み深さ、 $f$  は 1 刃あたりの送り量、 $k_x$ 、 $k_y$  はエンドミル加工システムの X 方向と Y 方向のばね定数、 $c_x$ 、 $c_y$  は同じく X 方向と Y 方向の減衰係数である。



**図 7** エンドミル加工の切削モデル  
Schematics of cutting model for end milling

エンドミル加工での自励振動発生メカニズムは、“ゼロ次近似法”を適用して**図 8**のブロック線図で表される。**図 8**中の  $K_t$  は主分力方向の比切削抵抗、 $[A_0]$  は“切削力係数行列”と呼ばれる方向変換行列の直流成分、 $[G(i\omega)]$  はエンドミル加工システムの動特性行列を表している。



**図 8** エンドミル加工システムのブロック線図  
Block diagram of end-milling system

本来の切削力係数行列は時間関数であり、エンドミル加工の断続的に変動する切削力を求めるために適用されるが、自励振動の安定限界を求めるうえではその直流成分、すなわちゼロ次成分のみを考慮すればよいことが 1990 年代に Altintas と Budak によって明らかにされ<sup>4), 5)</sup>、ゼロ次近似法 (Zero order approximation)

などの呼称で広く利用されている。この切削力係数行列の直流成分  $[A_0]$  は式(3)で表される。

$$[A_0] = \begin{bmatrix} \alpha_{0xx} & \alpha_{0xy} \\ \alpha_{0yx} & \alpha_{0yy} \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{0xx} = \frac{N}{4\pi} [-\cos 2\theta - 2k_r\theta - k_r\sin 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}$$

$$\alpha_{0xy} = \frac{N}{4\pi} [-\sin 2\theta + 2\theta + k_r\cos 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \quad (3)$$

$$\alpha_{0yx} = \frac{N}{4\pi} [-\sin 2\theta - 2\theta + k_r\cos 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}$$

$$\alpha_{0yy} = \frac{N}{4\pi} [\cos 2\theta - 2k_r\theta + k_r\sin 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}$$

ここで  $k_r$  は分力比 (主分力に対する背分力の比)、 $\theta_{st}$  は切削開始角度、 $\theta_{ex}$  は切削終了角度である。切削方向がアップカットの場合は  $\theta_{st}$  を  $0^\circ$ 、ダウンカットの場合は  $\theta_{ex}$  を  $180^\circ$  として扱う。安定限界には角度  $\theta_{ex} - \theta_{st}$  の大きさが影響する。本報では、この角度を切削関角と呼ぶ。

また、一般的な機械構造では動特性の非対角成分は主対角成分より小さいため、本報でも動特性  $[G(i\omega)]$  の非対角成分は無視し、式(4)で定義する。

$$[G(i\omega)] = \begin{bmatrix} G_{xx}(i\omega) & 0 \\ 0 & G_{yy}(i\omega) \end{bmatrix}$$

$$G_{xx}(i\omega) = \frac{1}{-m_x\omega^2 + ic_x\omega + k_x} \quad (4)$$

$$G_{yy}(i\omega) = \frac{1}{-m_y\omega^2 + ic_y\omega + k_y}$$

詳細は省略するが、以上の条件や仮定に基づいて定式化すると、安定限界となる軸方向切込み深さ  $a_{lim}$  は式(5)で求められる。

$$a_{lim} = -\frac{\Lambda_R}{K_t} \left[ 1 + \left( \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ここで、 $\Lambda_R$ 、 $\Lambda_I$  はそれぞれ特性方程式の解  $\Lambda$  の実部および虚部である。動特性行列の非対角成分を無視した場合の特性方程式は  $[A_0]$  と  $[G(i\omega)]$  の各行列成分を用いて式(6)で表される。

$$a_0 \Lambda^2 + a_1 \Lambda + 1 = 0$$

$$a_0 = (\alpha_{0xx} \alpha_{0yy} - \alpha_{0xy} \alpha_{0yx}) G_{xx}(i\omega_c) G_{yy}(i\omega_c) \quad (6)$$

$$a_1 = \alpha_{0xx} G_{xx}(i\omega_c) + \alpha_{0yy} G_{yy}(i\omega_c)$$

続いて、ゼロ次近似法によるエンドミル加工の安定限界解析結果の特徴を説明する。一例として  $m_x$ 、 $m_y$  は



3kg,  $c_x, c_y$  は 300N・s/m,  $k_x, k_y$  は 30N/ $\mu\text{m}$  の動特性条件と表1の加工条件での解析結果を図9に示す。図9の構成はおおむね図6と同様であり、相違点は図9(a)の安定限界線図の縦軸が軸方向切込み深さとなる点である。また解析結果の相違点としては、図9(b)に示す自励振動の周波数  $f_c$  が回転速度によっては固有振動数  $f_n$  より低い値をとる点が挙げられる。これは再生効果に加え、モードカップリング効果も同時に作用することで表れる特徴である。

表1 安定限界解析に与えた加工条件  
Cutting model parameters

項目	条件
刃数	2枚
切削方向	アップカット
切削開始角度, 終了角度	0, 60°
主軸回転速度	1 000 ~ 5 000min <sup>-1</sup>
接線方向の比切削抵抗	1 500MPa
分力比	0.3

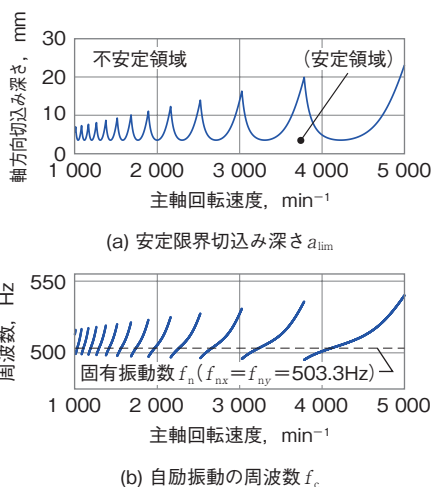


図9 エンドミル加工の安定限界解析結果  
Simulated milling stability

以上より、エンドミル加工で発生する自励振動への主な対策は、以下の項目が挙げられる。

- ①安定限界線図に基づく安定加工条件の選定（軸方向切込み深さ  $a$  の低減、切れ刃通過周期  $T$ （直接的には主軸回転速度  $n$ ）の変更）
- ②工具主軸系や工作物系の動特性の向上（動特性行列  $[G(i\omega)]$  のゲインの低減）
- ③刃数の削減、半径方向切込み深さ低減や工具刃先径増大による切削関与角の低減（切削力係数行列の直流成分  $[A_0]$  のゲインの低減）

④比切削抵抗  $K_t$  の低減

⑤適切に設計した不等ピッチ・不等リードエンドミルの使用、主軸回転速度の変動制御の適用（ $T$  の非一定化による再生効果の抑制）

なお、モードカップリング効果を抑制する方策として、 $X$  と  $Y$  の2方向の動特性の固有モードの固有振動数を互いに遠ざけること、すなわちエンドミル加工システムの動特性バランスの調整が考えられるが、これについては次章で説明する。

### 3. エンドミル加工システムの自励振動の安定限界と動特性バランスとの関係

#### 3.1 シミュレーションおよび実験による検証<sup>2), 3)</sup>

図9に示したエンドミル加工の自励振動の安定限界解析では、動特性を  $X$  方向と  $Y$  方向で同一とした。これは理想的な条件であるが、現実の切削加工システムの動特性は異方性を示すことが多い。またモードカップリング効果が最も強く発生する条件でもある。ただし、以下に述べるとおり、2方向の動特性の固有振動数を互いに遠ざけても、自励振動の安定限界は必ずしも向上しないことが分かっている。

図10は図9の計算条件（切削方向はアップカット）に対し、 $X$  方向のばね定数  $k_x$  のみ、または  $Y$  方向のばね定数  $k_y$  のみを 5N/ $\mu\text{m}$  増やし、35N/ $\mu\text{m}$  へ変更した条件でのエンドミル加工の安定限界解析結果である。図10(a)(b)のそれぞれ上段は安定限界線図であり、下段は自励振動の周波数  $f_c$  を示している。また図10中の  $f_{nx}, f_{ny}$  は  $X$  方向と  $Y$  方向の固有振動数を表している。図10より明らかなように  $f_{nx}$  と  $f_{ny}$  の大小関係で安定限界線図は大きく異なり、図10(b)に示す  $f_{nx} < f_{ny}$  の条件では、図10(a)に示す  $f_{nx} > f_{ny}$  の条件より安定限界が高くなる。この傾向は図11に示すセットアップでの切削実験でも確認されている。なお、切削方向をダウンカットとした条件では逆の傾向となり、 $f_{nx} > f_{ny}$  とすると安定限界は向上する。この動特性バランスによる安定限界向上効果は、分力比と半径方向切込み深さにも依存し、アルミニウム合金や炭素鋼などを、鋭利な切れ刃で切削する場合に効果を得やすい。また、半径方向切込み深さを工具直径の2分の1程度にすると安定限界の向上効果は大きくなる。

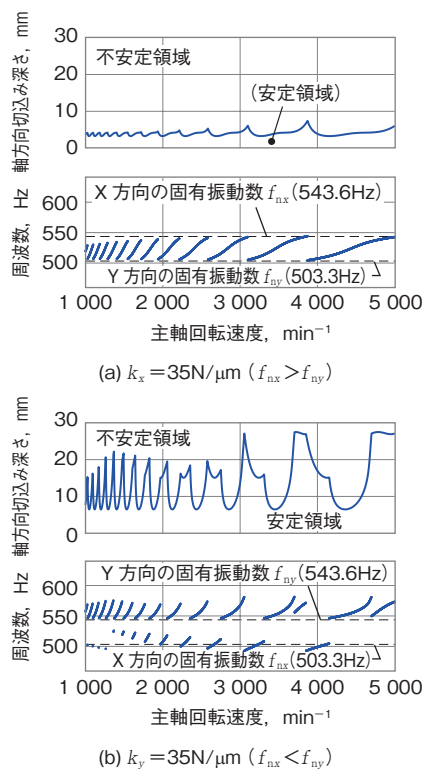


図10 動特性に異方性がある条件でのエンドミル加工の安定限界解析結果  
Simulated milling stability in anisotropic dynamics

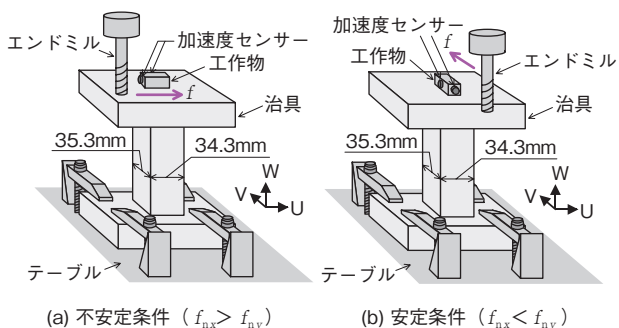


図11 切削実験のセットアップ  
Experimental setup

### 3.2 動特性バランスによる安定限界向上メカニズム

本節では、エンドミル加工の自励振動の安定限界が動特性バランスの影響で変化する現象の物理的なメカニズムを考察する。

ゼロ次近似法を適用し、動特性行列の非対角成分をゼロと仮定したエンドミル加工システム (図8) において、モードカップリング効果、すなわち X 方向と Y 方向の相互作用を生じさせる要因は、式(3)に示した切削力係数行列の直流成分  $[A_0]$  の非対角成分  $\alpha_{0xy}$  と  $\alpha_{0yx}$  であり、そのため  $[A_0]$  の主対角成分  $\alpha_{0xx}$  と  $\alpha_{0yy}$  は主に再生効果へ関与すると考えられる。この考えに基づき、図8のエンドミル加工システムで、 $[A_0]$  の主対角成分または非対角成分をゼロと仮定する仮想的な条件で安定限界解析を行う。計算条件はおおむね図9と同じ(切削方向はアップカット)とし、動特性は図9の等方性条件および図10の二つの異方性条件の合計3条件を計算する。なお、エンドミル加工システムの自励振動の安定限界が以下の傾向になることも重要である。すなわち、再生型自励振動が支配的なときには、安定限界はアップカットでは主に Y 方向の動特性  $G_{yy}$ 、ダウンカットでは主に Y 方向の動特性  $G_{xx}$  によって決定される。その理由は、 $[A_0]$  の主対角成分  $\alpha_{0xx}$  と  $\alpha_{0yy}$  の絶対値の大小関係が、アップカットでは  $|\alpha_{0xx}| < |\alpha_{0yy}|$ 、ダウンカットでは  $|\alpha_{0xx}| > |\alpha_{0yy}|$  となる場合が多いためである。

図12に解析結果を示す。図12(a)は  $k_x, k_y$  とともに  $30\text{N}/\mu\text{m}$  の等方性条件、同 (b) は  $k_x$  を  $35\text{N}/\mu\text{m}$  とした異方性条件、同 (c) は  $k_y$  を  $35\text{N}/\mu\text{m}$  とした異方性条件である。それぞれ上段は安定限界線図、下段は自励振動の周波数  $f_c$  であり、 $[A_0]$  の“主対角成分のみ”、“非対

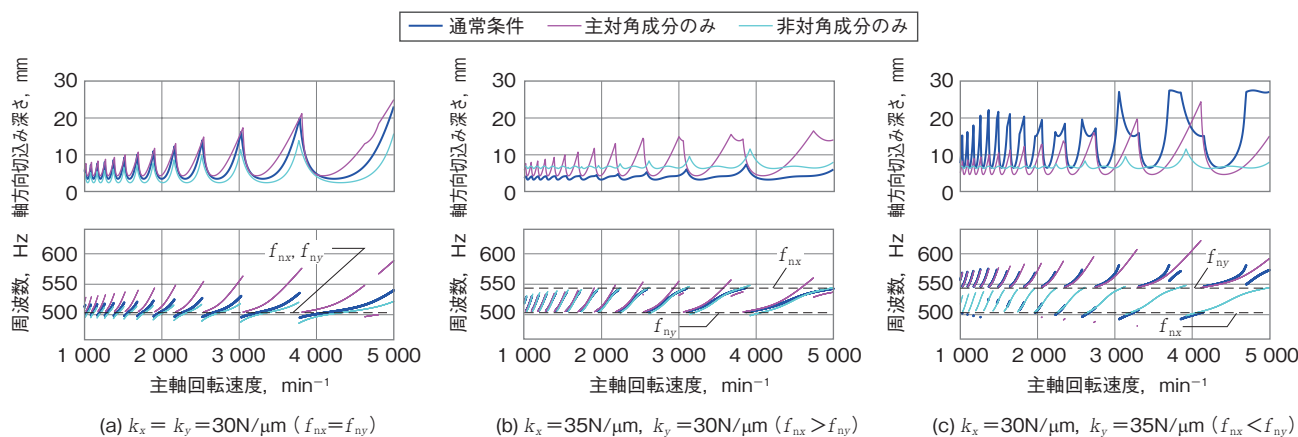


図12 動特性が等方性または異方性を有する条件でのエンドミル加工の安定限界解析結果  
Simulated milling stability in isotropic or anisotropic dynamics

角成分のみ”での解析結果に加え、 $[A_0]$  をそのまま考慮した解析結果（図9や図10と同値）も“通常条件”として示している。

まず図12(a)について考察する。主対角成分のみの条件の $f_c$ は、固有振動数( $f_{nx}$ ,  $f_{ny}$ )より大きくなり、2.3節で述べた再生型自励振動の特徴と一致する。一方、非対角成分のみの条件の $f_c$ は回転速度によっては固有振動数より低くなり、2.4節で述べたモードカップリング効果の影響でこのような傾向を示すと考えられる。すなわち、主対角成分のみの条件と非対角成分のみの条件とで $f_c$ は一致せず、通常条件の $f_c$ はおおむね主対角成分のみの条件と、非対角成分のみの条件の中間値になる。通常条件の $f_c$ が非対角成分のみの条件の $f_c$ に近い値となる理由は、非対角成分のみの条件の安定限界切込み深さ $a_{lim}$ が主対角成分のみの条件の $a_{lim}$ より小さいためと考えられる。

続いて図12(b)(c)を考察する。前述のとおり、 $[A_0]$ の主対角成分のみを考慮する条件で発生する自励振動は再生型自励振動の特徴を示し、かつ切削方向がアップカットならばその安定限界はY方向の動特性 $G_{yy}$ で決まる傾向がある。これに対し図12(b), (c)では主対角成分のみの条件の $f_c$ がそれぞれY方向の固有振動数 $f_{ny}$ より大きく、矛盾はない。一方、モードカップリング型自励振動の特徴を示す非対角成分のみの条件では、 $f_c$ がおおむね $f_{nx}$ と $f_{ny}$ の間の値となる。その結果、図12(c)の $f_{nx} < f_{ny}$ となる動特性バランスでは、主対角成分のみの条件の $f_c$ と、非対角成分のみの条件の $f_c$ は異なる値となる。これは、再生型自励振動の周波数とモードカップリング型自励振動の周波数が離れる状態と解釈できる。これに加え、通常条件で求めた $f_c$ が、おおむね前記二つの $f_c$ のいずれかと一致するか、または前記二つの $f_c$ の中間値となること、ダウンカットの場合は $f_{nx} > f_{ny}$ となる動特性バランスの場合に図12(c)と同様の結果となることを勘案すると、アップカットでは $f_{nx} < f_{ny}$ 、ダウンカットでは $f_{nx} > f_{ny}$ の動特性バランスのときは、再生効果とモードカップリング効果のいずれか一方が支配的になると解釈できる。すなわち、二つの自励振動が同調しない状態となるか、二つの自励振動が最も不安定となる周波数から、それぞれかい離れた中間の周波数で振動する状態となる。

一方、図12(b)の $f_{nx} > f_{ny}$ となる動特性バランスでは「主対角成分のみの条件の $f_c$ 」と「非対角成分のみの条件の $f_c$ 」は、多くの回転速度でほぼ一致する。また通常

条件で求めた $f_c$ もそれらと一致する。詳細は省略するが、ダウンカットの場合は $f_{nx} < f_{ny}$ となる動特性バランスの場合、図12(b)と同様の結果となる。したがって、アップカットでは $f_{nx} > f_{ny}$ 、ダウンカットでは $f_{nx} < f_{ny}$ の動特性バランスのときには、再生型とモードカップリング型の二つの自励振動が同調して発生すると解釈できる。

以上より、エンドミル加工において、アップカットでは $f_{nx} < f_{ny}$ 、ダウンカットでは $f_{nx} > f_{ny}$ の動特性バランスとすると安定限界を向上できる物理的なメカニズムは、主に以下のように説明できる。

エンドミル加工システムで発生する再生型自励振動とモードカップリング型自励振動には、それぞれ生じやすい周波数帯域があり、その動特性バランスで両者が離れる場合は、再生効果とモードカップリング効果のいずれかが支配的となり、二つの自励振動が同調しない状態となるため安定限界が向上する。

## 4. おわりに

本報では、まず加工振動の発生メカニズムと自励振動の安定限界解析方法について解説し、続いてエンドミル加工の自励振動の安定限界が、動特性バランスの影響を受けて変化する現象の物理的なメカニズムを、ゼロ次近似法を基に考察した結果を紹介した。本報の内容が、製造現場における生産性向上や環境負荷低減へ貢献できることを期待する。また今後は本報の内容を発展させ、次世代のモノづくりに向けた革新技术の創出へ取り組んでいく。

## 参考文献

- 1) Y. Altintas, M. Weck: Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding, CIRP Annals, Vol. 53, No. 2 (2004) 619-642.
- 2) 橋本高明, 河野大輔, 古澤正崇, 松原 厚: 切削加工システムの動特性の異方性が振動安定性に与える影響, 精密工学会誌, Vol. 87, No. 2 (2021) 238-244.
- 3) 橋本高明, 河野大輔, 古澤正崇, 松原 厚: エンドミル加工における振動安定性を向上可能な加工システムの動特性バランス, 精密工学会誌, Vol. 87, No. 11 (2021) 882-888.
- 4) Y. Altintas, E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, CIRP Annals, Vol. 44, No. 1 (1995) 357-362.
- 5) E. Budak, Y. Altintas: Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part I: General Formulation, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, No. 1 (1998) 22-30.
- 6) Y. Altintas: Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design (Second Edition), Cambridge university press, (2012).
- 7) 鈴木教和: 切削加工におけるびびり振動(前編), 精密工学会誌, Vol. 76, No. 3 (2010) 280-284.
- 8) 社本英二: 切削加工におけるびびり振動の発生機構と抑制, 電気製鋼, Vol. 82, No. 2 (2011) 143-155.
- 9) 星鐵太郎: 機械加工 びびり現象—解析と対策, 工業調査会 (1977).

## 筆 者



橋本高明\*

T. HASHIMOTO

\* 研究開発本部 成形プロセス研究部 博士(工学)