

技術論文



Technical Paper

強制びびり振動条件下における工具寿命と 表面粗さにおよぼす振動変位の影響

中川純一*, 杉野 敦*, 八田武士*

Influence of Vibration Displacement on Tool Life and Surface Roughness under Forced Chatter Vibration Conditions

Junichi NAKAGAWA, Atsushi SUGINO and Takeshi HATTA

Synopsis

In recent years, cost reduction by high productivity machining is in demand for difficult to cut materials. However, when the cutting conditions grow more severe in order to achieve high productivity, the chattering vibration occurs more often because of high cutting resistance. Recently, vibration control system have been developed to suppress this chattering vibration. Generally, some vibration control systems define a threshold value of chatter vibration displacement in advance; when chatter vibration reaches the threshold value, the machine will change the rotating speed to reduce vibration displacement. In this study, we investigated vibration displacement, tool life and roughness of surface to determine the threshold value of the relationship among these three elements.

1. 緒 言

近年、エネルギー産業では燃焼機関の高効率化のため、より高強度で耐熱性の高い材料が数多く使われるようになった。これらの構成部品は、回転ロスを少なくするための薄肉化や流体解析技術の向上により複雑形状化が進んでいる。一方で切削加工の観点からみた場合、被削材の高強度化により切削抵抗は増加し、加工形状の複雑化によりワークとの干渉回避を目的に切削工具が長尺化した結果、低剛性化が進み、さらに製品の薄肉化によりワーク剛性が低下するため、高精度、高能率かつ低コストで加工することが困難になってきている。

これら製品の切削加工工程では、切削抵抗が高く、かつ切削工具とワークの剛性が低いためびびり振動が発生しやすく問題となる。びびり振動が発生すると、寸法精

度の悪化により加工品質を満たせず、また、切削工具の低寿命化を招くこともある。びびり振動対策の従来技術として安定限界解析^{1), 2)}があり、連続加工（旋削加工、ドリル加工）と断続加工（フライス加工、エンドミル加工）において、びびり振動を回避する有効な手段として知られている。最近では、安定限界解析ツールや³⁾、工作機械の主軸に設置した加速度センサにより、加工中の振動を測定、解析し、自動で回転数を変更する工作機械も実用化されている⁴⁾。しかしながら、これらの装置、工作機械は切屑厚みの変動起因による自励びびりの回避を対象としたものが多く、周期的な切削力起因の強制びびりの回避まで対象としたシステムの事例がほとんどないのが現状である。また、これらのシステムは事前に振動加速度や変位などを閾値に設定し、加工中においてそれらの値が閾値を超えるか否かで、びびり振動の発生

2016年6月11日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

有無を判別しているが、現状、この閾値は作業者の経験と感覚で決定するしか方法がない。

そこで、本報では、びびり振動の制御システムにとって重要となるびびり振動発生時の判定閾値の同定手法を検討するため、強制びびり条件下における振動変位と工具寿命、表面粗さの関係を調査した結果について報告する。また、本結果を応用した加工システムを開発したので装置概要、制御アルゴリズムについて報告する。

2. 切削におけるびびり振動の種類と閾値

2.1 自励びびりとは

びびり振動は大きく分けて自励びびりと強制びびりに分類され、対処方法が異なることが知られている⁵⁾。自励びびりは、切削過程の中に振動をフィードバックして拡大する閉ループが存在する場合に発生する不安定現象である。自励びびりは Fig. 1 に示すような1回転前に切削する際に生じていた振動が加工面の起伏として残り、その振動が現在の切削において切取り厚さの変動として再生され、増幅することで発生する⁶⁾。自励びびりの一般的な定式化に基づく安定限界切込量 a_{lim} を式 (1) に示す。ここで、 K_t は主分力方向の比切削抵抗、 Λ (実部 Λ_R 、虚部 Λ_I) は式 (2) の固有値問題を解くことで求められる変数であり、 I は単位行列、 $[A_0]$ は切削力係数行列の直流成分、 $[G(i\omega_c)]$ は伝達関数行列、 ω_c はびびり振動の角振動数を示している。また、自励びびりは切取り厚さが一定になる回転数で加工することで抑制できる。この回転数 n は式 (3)、(4) より、係数 $k=0, 1, 2, \dots$ に対して算出される⁷⁾。ここで、 ε は位相差、 N は刃数を示す。

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

$$\det [I + \Lambda [A_0 [G(i\omega_c)]]] = 0 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \pi - 2 \tan^{-1} \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \quad (3)$$

$$n = \frac{60\omega_c}{N(2k\pi + \varepsilon)} \quad (4)$$

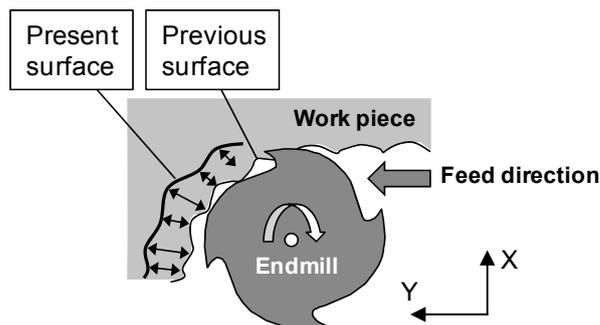


Fig. 1. Milling process with regenerative chatter.

2.2 強制びびりとは

強制びびり振動は、何らかの強制的な振動原因が機械の振動特性によって拡大されて発生する。この振動源には、Fig. 2 に示すようなエンドミル加工、フライス加工などの断続切削における周期的な切削力、Ni 基合金、チタン合金の切削時に発生する鋸状の切屑生成時の周期的な切削力の変動、工作機械内部の軸受、歯車、モータのコギングなどの振動、回転軸の不釣り合い、加速度による慣性力、油空圧の変動、床から伝わる振動などがある。この振動変位の周波数成分 U の解析は、式 (5) で示す数式より、周波数領域での強制力 F と加工機もしくは工具の伝達関数 G の積を求めることで計算することができる⁸⁾。

$$\begin{Bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

強制びびりを抑制するには、強制力を減らすこと、機械構造と工具の動剛性を向上させることが基本的な対策となる。

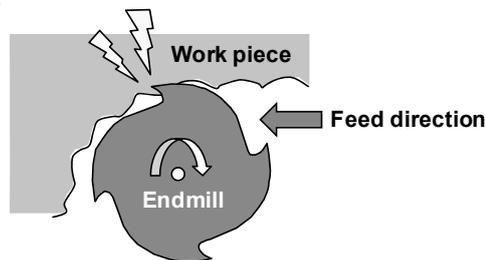


Fig. 2. Milling process with forced chatter.

2.3 びびり振動の種類判別方法

びびり振動の種類は、切削加工中の振動を測定し、FFT (Fast Fourier Transform) 解析することで判別することができる。強制びびりは、エンドミルなどの断続加工時における切削力で表される切削基本周波数の整数倍に

において振動が大きくなることがわかっている。切削基本周波数 f_c を式(6)に示す。

$$f_c = \frac{N_c \times N_t}{60} \quad (6)$$

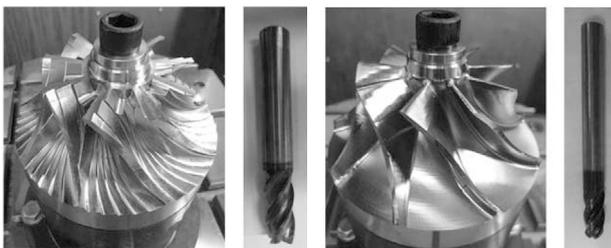
このとき N_c は回転数、 N_t は刃数である。切削基本周波数は、工具の刃数と回転数によって計算することができ、切削基本周波数の整数倍と振動の周波数が一致した場合は強制びりり、整数倍と一致しない周波数が発生した場合は自励びりりと判別することができる。

2. 4 びりり振動発生時の閾値の考え方

びりり振動制御システムを実加工において実現するには、さまざまな制御パラメータを決定する必要がある。例えば、回転数と送り速度の上下限値、びりり振動と判定する振動変位の閾値が挙げられる。回転数、送り速度の上下限値については各工具メーカーが公開している切削条件や加工現場での経験からおおよそ決定できる。しかしながら、びりり振動と判定する振動変位の閾値については、工具寿命や必要とする表面粗さから決定する必要があり、これらは機械や工具の種類によって異なるため容易に決定することができない。

本報では、インペラーディスク加工をモデルケースにびりり振動の閾値の検証を行った。インペラーディスクの切削加工工程では、旋削加工した後、Fig. 3に示すようにラジラスエンドミルなど刃先強度の強い工具で重切削することで仕上げ手前まで形状をつくり、その後、ボールエンドミルで最終仕上げをする流れが一般的である。粗加工では重切削の過負荷による低寿命化が原因となるため、ユーザー側が必要とする工具寿命からびりり振動の判定閾値を設定しなければならない。一方、仕上げ加工では表面粗さが重要となるため、表面粗さが規定値を超えないようにびりり振動の判定閾値を設定する必要がある。

そこで、粗加工と仕上げ加工における双方のびりり振動発生時の判定閾値を検討するため、工具欠損におよぼす振動変位の影響と表面粗さにおよぼす振動変位の影響について調査を行った。



(a) Rough machining (b) Finish machining

Fig. 3. Outlook of machining process of an impeller disk.

3. 実験方法

3. 1 供試材

本実験で用いたSUS630の化学組成をTable 1に示す。SUS630は時効熱処理を行うことで強度が増す材料であり、難加工材として位置づけられ、主に石油・ガス発掘、石油精製、石油化学、天然ガス液化(LNG)、製鉄、製紙業においてインペラーディスクなどのコンプレッサー用部品に使用される。素材は、熱間鍛造後、Fig. 4に示す溶体化熱処理と時効熱処理を施し、HRC 30~33に調質した後に縦68 mm×横68 mm×高さ100 mmの試験片形状へと加工した。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Material	C	Ni	Cr	Cu	Nb	Fe
SUS630	0.30	3.00 ~ 5.00	5.00 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	0.15 ~ 0.45	Bal.

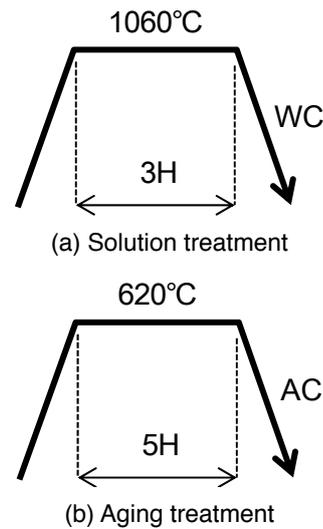


Fig. 4. Heat treatment procedure.

3. 2 実験方法と実験条件

インペラーディスクの加工を想定して、粗加工では重切削に耐えうる刃先強度をもったラジラスエンドミル、仕上げ加工では翼面の工程を想定し、ボールエンドミルを選定した。それぞれの工程において、以下に示す実験方法にて振動変位と工具寿命および表面粗さの関係を調査した。

3. 2. 1 粗加工の実験方法

Fig. 5に粗加工試験の実験方法を示す。ラジラスエンドミルで肩削り加工を行い、切削抵抗と振動の測定、お

よび工具寿命の評価を実施した。切削抵抗は、切削動力計 (Kistler 製) により測定し、3 軸成分の合力を求めた。振動は、加速度センサ (PCB Piezotronics, Inc. 製) を被削材の側面に設置し 3 軸成分を合成した値を測定した。このときの振動は、加速度測定値を FFT 解析後、2 重積分をして変位に変換した値のことを示す。工具寿命の評価では、エンドミルの刃先が破損するまでの加工距離を求めた。切削工具は直径 12 mm の 4 刃のラジラスエンドミル、工作機械は(株)森精機製作所製の複合 5 軸加工機 NT4200 を使用した。Table 2 に切削条件を示す。本実験では、送り速度と径切込量を種々変化させた。

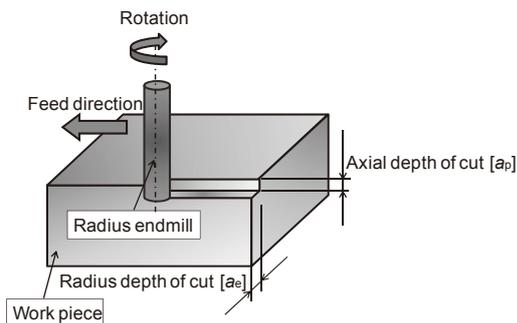


Fig. 5. Schematic illustration of rough machining with radius endmill.

Table 2. Cutting conditions.

Cutting tool	
Material	Cemented carbide
Type of tool	Radius endmill
Diameter	12 mm
Corner R	0.75 mm
Number of teeth	4 teeth
Cutting conditions	
Cutting velocity	90 m/min
Cutting feed rate	0.04 - 0.25 mm/tooth
Axial depth of cut	2.0
Radius depth of cut	3.0, 5.0, 7.0 mm

3. 2. 2 仕上げ加工の実験方法

Fig. 6 に仕上げ加工試験の実験方法を示す。ボールエンドミル工具にて所定の軸切込量で溝加工を 1 パス行った後、工具の径方向に所定の径切込量だけ加工パスをシフトして加工を行った。Table 3 に切削条件を示す。そして、このときの振動と加工面の表面粗さを測定した。振動は、前項と同様に加速度センサを被削材の側面に設

置して測定し、加速度を 2 重積分することで変位とした。加工後の被削材の表面を粗さ計 (株)東京精密製) で測定した。測定方向は、エンドミルの送り方向とした。切削工具は直径 6 mm、突出し長さ L/D を 3 ~ 7、送り速度を 0.025 ~ 0.125 mm/tooth へ変更して試験を実施した。

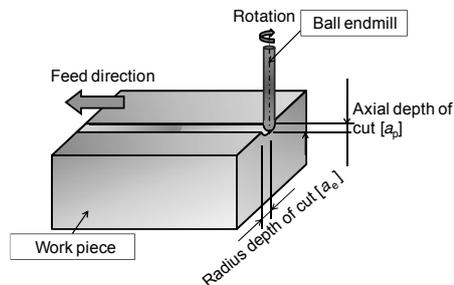


Fig. 6. Schematic illustration of finish machining with ball endmill.

Table 3. Cutting conditions.

Cutting tool	
Material	Cemented carbide
Type of tool	Ball endmill
Diameter	6 mm
Number of teeth	4 teeth
Cutting conditions	
Cutting velocity	90 m/min
Cutting feed rate	0.025 - 0.125 mm/tooth
Axial depth of cut	1.0 mm
Radius depth of cut	1.1, 2.2 mm

4. 結果および考察

4. 1 びびり振動の種類の判別

加工中のびびり振動種類を判別するため、得られた振動測定値の FFT 解析を行った。一例として、Fig. 7 に粗加工試験 (1 刃の送り速度 0.08 mm/tooth, 径切込量 7.0 mm) の FFT 解析結果を示す。FFT 解析から得られた振動変位のピーク値の周波数と式 (6) より求めた切削基本周波数が一致しており、強制びびりが発生していることが確認できた。粗加工のその他の実験条件と仕上げ加工の実験条件においても同様な手法でびびり振動の種類を判別し、強制びびりが生じていることが確認された。

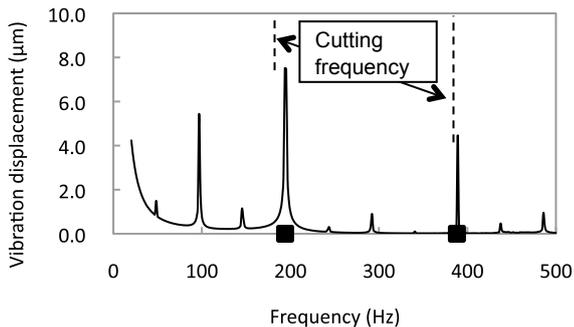


Fig. 7. Relationship between vibration displacement and frequency.

4. 2 粗加工の実験結果

4. 2. 1 振動変位と切削抵抗の関係

Fig. 8 に径切込量および送り速度が切削抵抗におよぼす影響について調査した結果を示す。切削抵抗は、切削加工時の合力の最大値を示す。径切込量と送り速度が増加するほど切削抵抗が大きくなった。これは、切取り厚み増加によりせん断変形領域が拡大したためと考えられる。また、切削加工中に送り速度を増減させることで切削抵抗を制御できることがわかった。Fig. 9 に同条件にて振動測定した結果を示す。このときの振動変位は、3軸成分を合成した値の最大値を示しており、200 Hz 付近の切削基本周波数の振動変位を使用した。切削抵抗と同様に、径切込量と送り速度が増大するほど振動変位が大きくなることがわかった。

また、強制びびりは式 (5) に示されるように、振動変位は切削抵抗と伝達関数の積で表されるため、切削抵抗と振動変位の関係は線形の関係になると考えられる。Fig. 10 に切削抵抗と振動変位の相関性を確認した結果を示す。切削抵抗と振動変位が線形の関係にあり、強制びびりの理論と実験結果が一致することが確認された。これらの結果から、強制びびりの振動変位を抑制するためには径切込量、送り速度を低下させて切削抵抗を減少させることが有効であることが示された。

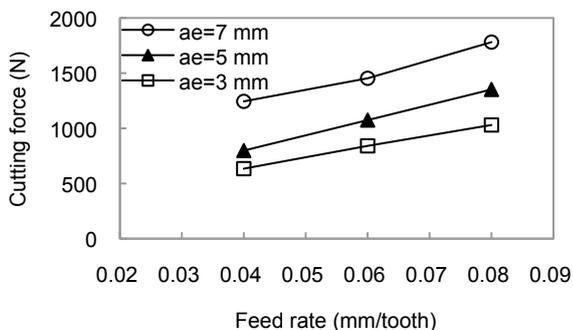


Fig. 8. Relationship between cutting force and feed rate, radius depth of cut.

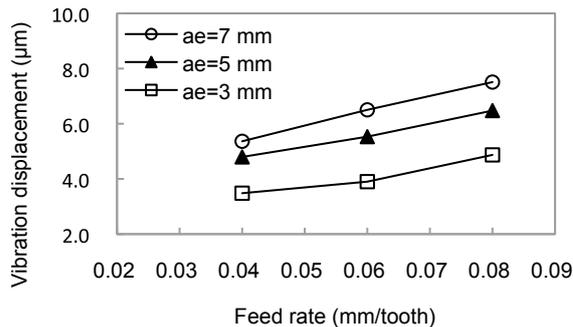


Fig. 9. Relationship between vibration displacement and feed rate, radius depth of cut.

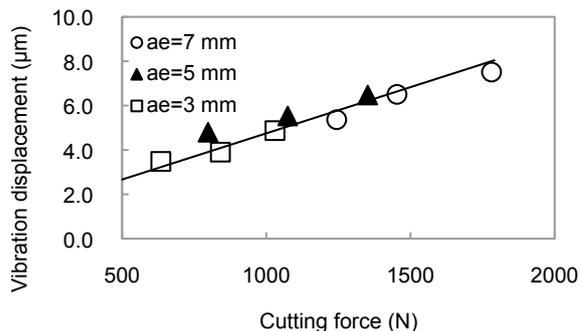


Fig. 10. Relationship between vibration displacement and cutting force.

4. 2. 2 工具寿命と振動変位の関係

Fig. 11 に送り速度と工具寿命の関係を示す。送り速度の増加に伴い、振動が大きくなり工具寿命が短くなった。超硬の工具折損までの寿命と切削抵抗との関係は、上田らの報告⁹⁾によると、何らかの要因で発生した微小なクラックが切削抵抗によって開口し破壊に至るため、工具欠損が生じやすくなると考察されている。Fig. 10 の結果から切削抵抗と振動変位が線形の関係にあることから、振動変位と工具寿命の関係も同様であると推測される。この結果から強制びびり条件下において、工具寿命は振動変位の大きさから推定することができ、必要とする工具寿命からびびり振動の発生閾値である振動変位を決定することが可能であると考えられる。

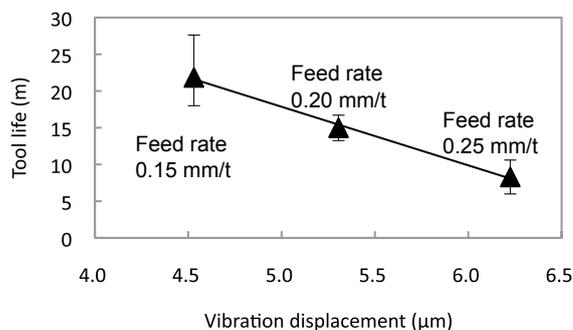


Fig. 11. Relationship between tool life and vibration displacement.

4. 3 仕上げ加工の実験結果

仕上げ加工においては、表面粗さの規格があるため、要求される規格を満たしつつ加工条件を変更する必要がある。一般的に、加工面の表面粗さを決定する要因として、幾何学要因と加工中の動的要因がある。前者は、ボールエンドミル径とピックフィード量で決まるカスプハイトが挙げられ、後者は工具の加工力によるたわみと振動が挙げられる。幾何学要因はツールパスの設計段階で決まるため、本実験では、動的要因に着目し工具たわみと振動の大小に相当する送り速度、切込量を変化させて、表面粗さへおよぼす影響について調査した。

4. 3. 1 振動変位と切削抵抗の関係

Fig. 12 に切削抵抗と振動変位の関係を示す。ここで得られる切削抵抗と振動変位は、切削加工時の合力の最大値を示す。粗加工と同様に切削抵抗と振動変位には線形関係が認められた。

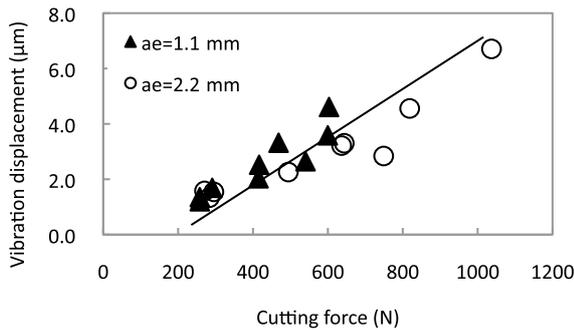


Fig. 12. Relationship between vibration displacement and cutting force.

4. 3. 2 表面粗さと振動変位の関係

Fig. 13 に表面粗さと振動変位の関係を示す。振動変位に比例して表面粗さ Ra が増加する結果が得られた。これは、工具にかかる切削荷が増加することで工具刃先の振動変位が大きくなり、表面粗さが悪くなったと推測される。また、西川らは、ボールエンドミルのたわみに起因する加工誤差を切削力と振動変位から計算しており¹⁰⁾、本結果も同様に低剛性な小径工具を使用していることから工具たわみにより表面粗さが悪化したと考えられる。この結果から強制びびり条件下において、表面粗さは振動変位の大きさから推定することができ、必要とする表面粗さからびびり振動の発生閾値である振動変位を決定することが可能であると考えられる。

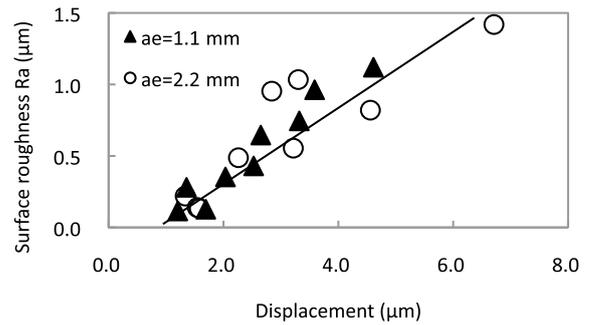


Fig. 13. Relationship between cutting surface and vibration displacement.

5. びびり振動制御システムの構築

5. 1 システム構成

Fig. 14 に開発したびびり振動制御システムの構成を示す。切削加工機の回転主軸のフレーム部に設置した加速度センサにより、切削時の振動を計測機器で測定後、解析し、パソコン内の専用ソフトにて最適な切削条件を計算する。そして、計算から算出された切削条件（回転数と送り速度）をコントロールシステムから工作機械の制御系へ転送し、加工中にリアルタイムで切削条件をフィードバックする構成とした。

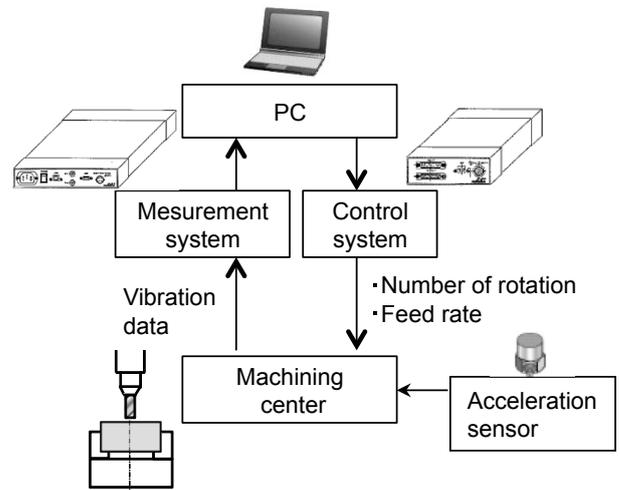


Fig. 14. Construction of vibration control system.

5. 2 振動制御アルゴリズム

Fig. 15 にびびり振動制御システムによって実行される処理フローチャートを示す。まず、回転主軸に設置した加速度センサから振動測定値を取得後、FFT 解析をし、周波数と振動加速度の関係を求める。ここでは、振動加速度を 2 重積分し、振動変位に変換した。そして、

測定から得られた振動変位の最大値が予め設定された閾値以下である場合、双方のびびり振動は生じていないと判定し、送り速度を上昇させる。一方で、設定した閾値を超えた場合、びびり振動と判定され、前述した式(6)で求められる切削基本周波数 f_c の整数倍と一致するときは強制びびり、整数倍と一致しない場合は自励びびりと判定する。そして、自励びびりの場合、回数数を変更

し、強制びびりの場合は、びびり振動の閾値を下回るまで送り速度を低下させることで、びびり振動の種類に応じて振動を抑制する。このときの強制びびりの閾値は、本報に記した実験方法で得られた値を設定する。

今後は、本システムを実機で検証した後、製造現場の切削加工工程に適用し、より高能率な切削加工を実現する。

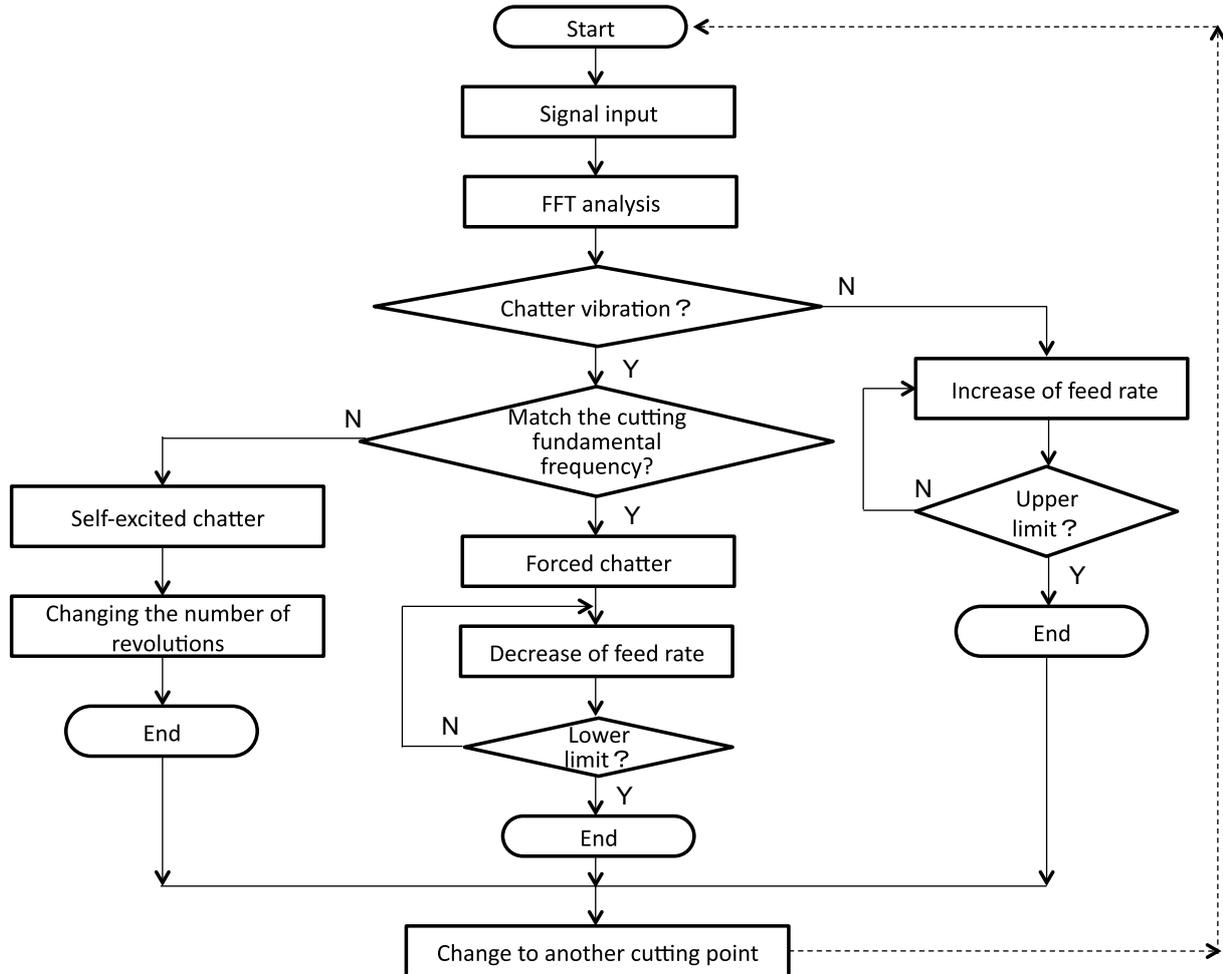


Fig. 15. Flowchart of vibration control.

6. 結 言

びびり振動の制御システムにとって重要となるびびり振動発生判定閾値の同定手法を検討するため、強制びびり条件下における振動変位と工具寿命、表面粗さの関係性を調査し、以下の結果を得た。また、本結果を応用した独自のびびり振動制御システムを開発した。

1) FFT解析から得られた振動変位のピーク値の周波数が切削基本周波数に一致するか否かでびびり振動の種類が判別できる。

2) 強制びびり条件下において、切削力と振動変位に線形関係があることを確認した。

3) 工具寿命は、振動変位の大きさから推定することができ、必要とする工具寿命から振動変位の閾値を決定することができる。

4) 表面粗さは、振動変位の大きさから推定することができ、必要とする表面粗さから振動変位の閾値を決定することができる。

(文 献)

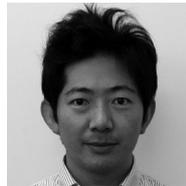
- 1) Y. Altintas: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, *Annals of the CIRP*, **44**(1995), 1, 357.
- 2) E. Budak: An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, *ASME*, **125**(2003), 2, 29.
- 3) Manufacturing Automation Laboratories Inc.: CUTPRO Fundamentals of machining start to finish Guide.
- 4) 千田治光: 工作機械の知能化の現状と加工事例, *精密工学会誌*, **78**(2012), 9, 748.
- 5) 鈴木教和ら: 強制・自励型びびり振動を回避するエンドミル加工条件の統合的検討, *精密工学会誌*, **75**(2009), 7, 908.
- 6) 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*, **82**(2011), 2, 143.
- 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*, **76**(2010), 3, 280.
- 8) 鈴木教和: 切削加工におけるびびり振動(後編), *精密工学会誌*, **76**(2010), 4, 404.
- 9) 上田完次ら: 切削工具のぜい性損傷に関する破壊力学的研究 (第2報), *精密機械*, **49**(1983), 10, 103.
- 10) 西川隆敏ら: ボールエンドミルのたわみに起因する加工誤差の予測(第1報), *精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集*, (2008), 93.



中川純一



杉野 敦



八田武士