

平成22年 6月 2日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760154
 研究課題名(和文) ハイブリッドモデルを用いたマシニングセンタの動的シミュレーション解析法の開発
 研究課題名(英文) Development of dynamic simulation of machining center with hybrid model
 研究代表者
 中野 寛 (NAKANO YUTAKA)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号：70433068

研究成果の概要(和文)：事前に切削実験や振動試験を行なうことなく、工具形状、被削材の剛性、保持方法などの変更に伴う機械構造の伝達特性や切削剛性を求め、びびり振動を発生させない切削条件を予測し、びびり振動を回避するシステムを構築する。切削点近傍の工具・主軸系に加え、被削材を含む複合モデルでびびり振動発生限界を予測し、切削実験結果と比較・検証を行なった。その結果、切削実験で得られたびびり振動発生限界線図と本手法で予測した解析結果が定性的に一致することを確認し、本手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This work deals with the development of the analytical method in order to predict the stability chart of regenerative chatter in spite of the change of the mechanical transfer characteristics, the cutting condition and the cutting stiffness. The stability chart of regenerative chatter was predicted by the proposed analytical method with the hybrid model composed of the tool and spindle system modeled by continuum model and the workpiece model. It was confirmed that the stability chart of regenerative chatter predicted by the eigenvalue analysis coincided well with the experimental result.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御，モデル化，振動解析，びびり振動

1. 研究開始当初の背景

切削加工中に発生するびびり振動は、仕上げ面精度の悪化、激しい振動による工具の破損や摩耗、工作機械の主軸軸受け損傷などを引き起こす原因になっている。びびり振動を防ぐためには、工具の突き出し長さや切削幅を小さくして加工することで、ある程度回避可能ではあるが、加工能率の点では不利とな

る。高速・高精度な加工が求められる条件では、びびり振動を発生させないことが極めて重要である。びびり振動は一般に切削幅が大きいほど発生しやすいが、主軸の回転数によってびびり振動が発生する切削幅は異なる。各回転数に対するびびり振動の発生限界となる切削幅の関係を正確に予測して、適切な回転数や切削幅に設定して加工を行なうこ

とでびびり振動を回避することが可能となる。したがって、びびり振動の発生限界を正確に予測することができれば、びびり振動を起こさず安定して加工が行え、加工効率の向上につながる。

これまでびびり振動の発生限界の予測に関する研究は数多く行なわれている。1950年代に、びびり振動の発生メカニズムや発生条件を求めるモデルが土井らや、S.A.Tobias, J.Tlusty らによって提案された。近年では、Altintas らがフライス加工時のびびり振動に対する簡易解析法を提案している。フライス加工は旋削の場合と異なり、切削力の方向が工具の回転とともに変動するとともに、断続切削となる特徴があり、Altintas らは回転数に依存して周期的に変動する切削力の方向係数をフーリエ級数展開して、0 次のフーリエ係数から切削抵抗の平均成分で近似することで、旋削と同じ解析アルゴリズムで大まかな予測ができることを提案している。また T. Insperger らは遅延微分方程式の理論に基づいた安定解析である semi-discretization 法を提案して、更に精度良く発生限界を予測している。しかし、いずれの予測法においても伝達特性などの計算パラメータのわずかな変化でも予測精度が大きく変化し、実際の加工現場では工具形状、被削材の種類、その保持方法、切削条件など様々な条件が変わる中、その都度、機械構造の伝達特性や切削剛性など計算に用いるパラメータを算出するために事前に切削実験や振動試験を行なう必要があるのが現状である。加工を行なう前にびびり振動を回避する条件を示すことができれば、各ユーザ独自の切削データベースなしに誰でも安定して加工できると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、工具や被削材の変更などにも対応可能なマシニングセンタの動的シミュレーション解析モデルを構築し、事前に実験を行なうことなく、びびり振動が発生する切削条件を予測し、びびり振動を回避するシステムを構築することを目的とする。マシニングセンタを用いて切削実験を行ない、エンドミル加工時のびびり振動の発生限界を精度良く求めるための検出方法を提案する。また、びびり振動発生限界の解析においては、工具主軸系に加えて被削材の保持剛性も含めた複合モデルを提案し、時間とともに周期的に変動する切削力の方向、断続切削力の影響に対して、工具回転角に対する固有値の変化に着目して数値計算を行ない、実験結果と比較、検証を行なう。

3. 研究の方法

(1) 切削実験による発生限界の簡易同定

本研究では、実際の加工で特に振動が激しく問題となる自励型びびり振動を対象として、その中でも主な発生原因となる、切削抵抗の変動による時間遅れに起因した再生びびり振動を扱う。被削材を傾けて加工することで、びびり振動が発生する軸方向切込み深さを効率よく求める。びびり振動の発生は x , y 方向 2 軸の工具振動変位の振幅軌跡や切れ刃周期間の位相差、びびり振動に関連した卓越ピークの周波数をモニタリングすることで検出する。

(2) エンドミル加工時の新たな発生限界予測解析法

エンドミル加工時に発生するびびり振動の解析において、切削力の方向が主軸回転数に比例して周期的に時間変動すること、断続切削の影響を考慮する必要があること、再生効果による時間遅れ項が切削力を表す項に含まれることから、旋削時のびびり振動解析に比べて複雑な運動方程式となる。本研究では時間変動する工具の回転角の変化に対する固有値の変化に着目して、固有値解析を行ない、実際の時刻歴と比較し、回転角の変動に伴う固有値の変化を検出してびびり振動の発生限界の予測を行なう。解析結果と実験結果および時刻歴解析結果お比較を行ない、予測精度の検証を行なう。

(3) 複合モデルによるびびり振動解析

工具主軸系を集中質量系でモデル化した従来の解析モデルに対して、被削材の保持剛性、工具の形状や突き出し量を考慮して解析を行なう複合モデルをたて、本研究で提案する固有値解析法や遅延微分方程式の理論に基づいた semi-discretization 法との比較および、実験結果との比較検証を行なう。

4. 研究成果

(1) 縦型マシニングセンタを用いてエンドミル加工実験を行ない、びびり振動の発生限界を求めた。真鍮の被削材を用い、被削材側面の上向き削りで加工を行なった。図 1 に示すように各軸方向にレーザー変位計、加速度センサ、切削動力計を用いて主軸ヘッド、工具、被削材の切削加工中の振動を測定した。図 2 に示すように、工具振動変位や主軸加速度の周波数分析結果から、切れ刃通過周期間の卓越振動数のピーク値や位相差の変化が切込み深さの増加に関係なく一定値をとる点を見ることで、効率よくびびり振動の発生限界が得られることを加工誤差の測定と比較して確認した。また、びびり振動発生前後の x , y 方向の振動変位や切削力の軌跡を調べることで、動的伝達特性の変化を実験で確認した。

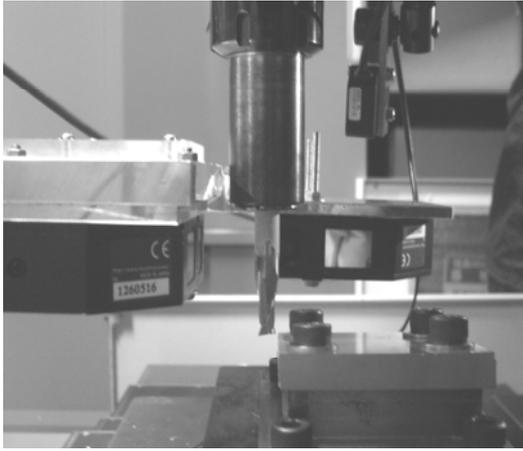


Fig.1 Experimental apparatus

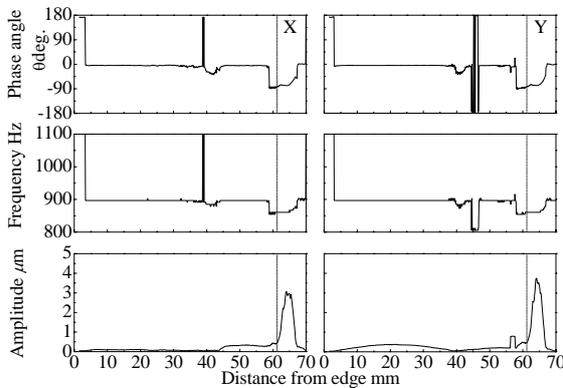


Fig.2 Phase angle, chatter frequency, and amplitude in peak value (5400 rpm)

(2) 工具、主軸ヘッド、被削材取り付けテーブル、コラムなどのマシニングセンタ全体の機械構造の振動試験を行ない、図3に示すマシニングセンタ全体の固有振動数および振動モードを調べた。その結果、マシニングセンタ全体が振動するモード、スピンドルヘッドとテーブルが逆位相で振動するモード、スピンドルと工具系のみの振動モードの中にびびり振動と関連するモードがあることを確認した。

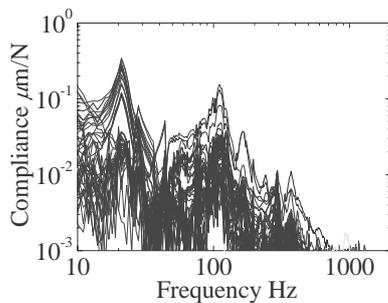


Fig3. Frequency response functions

(3) 工具・主軸系を2自由度集中質量系でモデル化した運動方程式を求め、図4に示す計算手順に従い、工具回転角の方向に対する逐次固有値解析を行なうことでびびり振動の発生限界線図を求め、実験結果と比較検証した。工具系を支持する動剛性が固定座標系に対して異方性を有し、さらに工具系の振動試験結果から固有振動数および剛性に差があるモデルを考慮した結果、発生限界が極大値となる回転数が上向き削りと下向き削りともに実験結果と定性的によく一致した。図5は上向き削りを行なったときのびびり振動の発生限界線図を表し、白抜ききの○が実験結果、黒抜ききの■が解析結果を表す。図5からびびり振動の発生限界となる切込み深さの高さが異なっているのは、実験ではねじれ刃のエンドミルを使っているのに対して、解析ではねじれ刃を考慮していないために、びびり振動が発生しやすい結果となっているためである。一方、発生限界の極大値と極小値になる回転数の位置は、実験結果と解析結果でよく一致することが確認された。切削中の切れ刃と1つ前に切削した切れ刃との振動の位相差を見た結果、発生限界が極大値となる位相差は 0° 付近であり、位相差をみることでおおよそのびびり振動の発生限界の予測が可能となった。2自由度の簡易モデルで、実験結果をおおよそ予測することができたが、切り込みが小さい場合や下向き削りの結果が実験結果とあまり合わなかった。下向き削りは切り厚さが始めに大きく、刃と被削材の衝突の影響も考慮して解析を行なう必要があると考えられる。

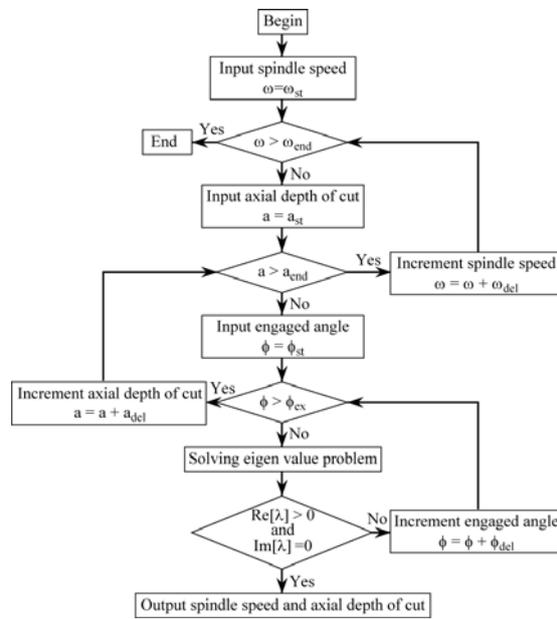


Fig.4 Flow chart of the stability analysis of chatter

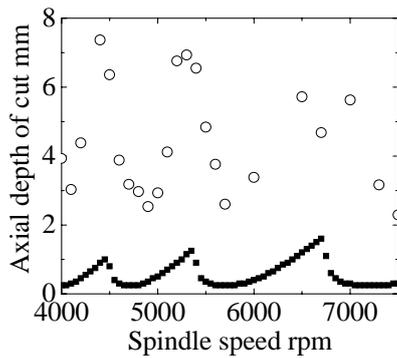


Fig.5 Stability chart of chatter

(4) 図 6 は工具回転角に対する発生限界の切込み深さ、およびびびり振動数の関係を調べた解析結果である。回転角が 0 度から 90 度までが上向き削りに、90 度から 180 度が下向き削りに対応する。工具の回転角に対する固有値の変化をみることでびびり振動が発生しやすい方向角が確認され、実験結果と良く対応することが分かった。上向き削りで切込みが小さいときびびり振動は発生しにくいことが経験的に知られているが、回転角が 0 度付近の発生限界は高くなっており、つまりびびり振動が起きにくいことと対応することが確認された。

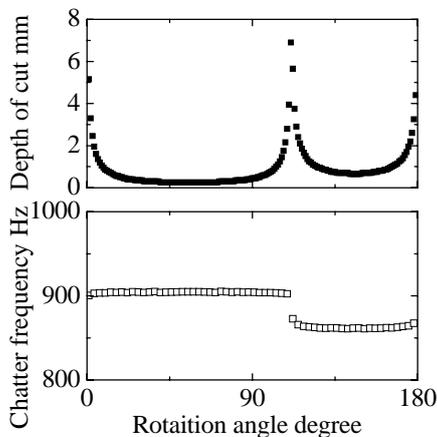


Fig.6 Relationship between rotation angle and depth of cut

(5) 主軸、ツールホルダー、工具を含む系を連続体で、被削材とそれを保持する治具、テーブルを剛体とし、それらを結合した複合モデルで表し、運動方程式を導出した。このモデルに対して、切れ刃の回転方向角ごとの固有値の変化から安定判別を行なう、本研究で提案する逐次固有値解析法を用いて解析を行なった。その結果、切削実験で得られたびびり振動発生限界線図と本手法で予測した

解析結果は定性的に一致することを確認し、本手法の有効性を確認した。

本研究期間に当初目標としていた、事前に切削実験を行わず、びびり振動の発生限界を予測するシステムの構築を完全に達成するまでには至らなかった。課題として残ったのは被削材や工具形状、切削速度などの切削条件が変化したときの切削剛性のモデル化である。現在、切れ刃と被削材の分布接触状態や切れ刃・被削材間の摩擦に対してのびびり振動発生限界線図への寄与率について調べ、課題の解決に向けて取り組んでいる。本研究で得られた知見は、びびり振動の発生限界を工具の回転角の方向性との関係から、簡易的に予測できる解析方法を提案したことである。また、予測精度も解析結果が実験結果より低い発生限界となる点はあるが、安全側に予測するという点で良好な結果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

① Yutaka NAKANO, Eiji KONDO, Hiroki TAKAHARA, Stability Analysis and Countermeasure against Regenerative Chatter in End Milling Process, 13th Asia Pacific Vibration Conference, 2009 年 11 月 23 日, カンタベリー大学 (ニュージーランド・クライストチャーチ)

② 中野 寛, 近藤 英二, 高原 弘樹, 動吸振器を用いたエンドミル加工時に発生する再生びびり振動の抑制対策, Dynamics and Design Conference 2009, 2009 年 8 月 4 日, 北海道大学

③ 中野 寛, 近藤 英二, エンドミル加工中に発生するびびり振動の動的安定性解析, Dynamics & Design Conference 2008, 2008 年 9 月 3 日, 慶応義塾大学

④ 中野 寛, 近藤 英二, 島名 賢児, エンドミル加工におけるびびり振動発生限界の実験的考察, Dynamics & Design Conference 2007, 2007 年 9 月 26 日, 広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 寛 (NAKANO YUTAKA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70433068

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし