

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760097

研究課題名（和文）

動剛性の異方性を積極的に利用するびびり振動抑制法の提案

研究課題名（英文）

Proposal of novel chatter suppression method by utilizing anisotropic dynamics

研究代表者

鈴木 教和 (SUZUKI NORIKAZU)

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：00359754

研究成果の概要（和文）：機械構造の動剛性の異方性を積極的に利用して切削プロセスにおける見かけの動剛性を無限大化することで、劇的にびびり振動に対する安定性を向上する手法を提案する。本研究では、びびり振動が特に問題となりやすい中ぐり加工を対象とし、中ぐり工具を所望の異方性伝達特性となるように設計することで見かけの動剛性を向上する。提案手法に基づいて試作・評価を行った結果、所望の動特性の実現に成功し、安定限界を従来比で約15倍向上し得ることを確認した。

研究成果の概要（英文）：A novel chatter suppression method in boring operation is proposed. The anisotropic boring tool with a step portion and notches on the cylinder periphery is designed, which has anisotropic dynamic characteristics. Since the direct and the cross transfer function components of the proposed tool are designed to cancel out each vibration, the nominal compliance of the boring tool in cutting process can be reduced significantly. Hammering tests of the developed tool clarified that appropriate anisotropic frequency response function is roughly attained by the proposed design. The developed tool was subsequently applied to turning experiments, and it was clarified that the stability limit in the radial depth of cut significantly increases by using the proposed boring tool as compared to the ordinary boring tool.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：びびり振動，切削，中ぐり加工，旋削加工，不安定振動

1. 研究開始当初の背景

切削加工はものづくりにおいて最も重要な基盤技術の一つである。日本はこの技術分野において世界をリードしており、これが日本の“ものづくり”を根本から支えている。その切削加工技術において、重要であるにもかかわらず解決されずに残されてきた課題として、“びびり振動”の問題が挙げられる。

生産性に大きな制約を与えるため、びびり振動の解決に対する需要は極めて大きく、半世紀以上わたって国内外で多くの研究が行われてきている。しかし、その高精度解析や制御は困難な場合が多く、回避/抑制することのできる決定的な手段は未だ確立されていない。このような背景から、びびり振動の問題は日本が世界に先駆けて解決しなければな

らない最重要課題であるといえる。

一般に、びびり振動が発生する場合、最初に機械構造の高剛性化について検討がなされる。しかし、エンドミル加工や中ぐり加工等の場合には必然的に工具が低剛性となり、高剛性化による改善が困難な場合が多い。解析に基づいて危険な条件を予測して回避する手法もあるが、根本的に剛性は改善されないため、現実にはこの手法が有効なプロセスは極めて少ない。その結果、低速/浅切込み条件を選択せざるを得なく、著しい生産効率の低下を招くことが多い。

2. 研究の目的

本研究では、機械構造の動剛性の異方性を利用して切削プロセスにおける見かけの動剛性を無限大にすることでびびり振動の抑制を実現する手法を提案する。突切り加工プロセス(図1)で提案手法の概念を説明する。図に示すように一回転前に加工した面の振動が現在の加工における切取り厚さ変動を引き起こす“再生効果”によって、自励びびり振動が生じる。びびり振動によって切取り厚さが変動すると、これに同期して2方向の切削力成分(主分力方向と背分力方向)が変動し、これが機械構造を加振する。このとき、切取り厚さ変動をもたらす方向(切込み方向)の振動 x は、図のブロック線図に示すように主分力変動に対する伝達特性 G_{xy} と背分力変動に対する伝達特性 G_{xx} によって生じる各振動成分の総和となる。

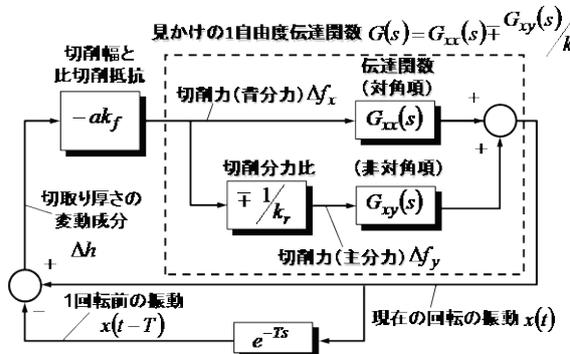
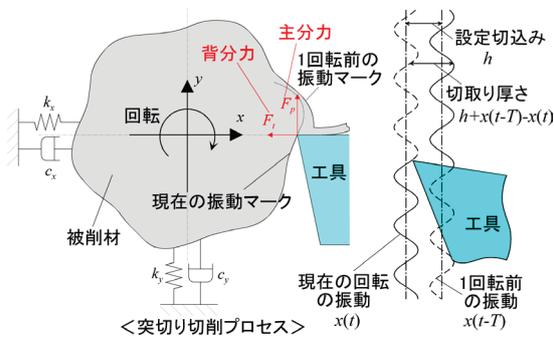


図1 突切りプロセスモデル

この特徴を利用して、主分力と背分力に起因する振動変位がお互いに相殺するように各伝達関数成分を設計することができれば、見かけの動剛性は無限大となる。これを利用することにより、例え機械構造自体の剛性は低い場合でも、プロセスにおける見かけの剛性を調整することで、根本的に自励/強制びびり振動が発生し得ない理想的なシステムを作り出すことができる。本研究では旋削で特にびびり振動が問題となりやすい中ぐり加工を対象とし、見かけの動剛性を無限大とする中ぐり工具の開発を行う。

図2に事前検討で設計した中ぐり工具と、FEM解析で求めた伝達関数に基づき安定限界解析を行った例を示す。図に示すように市販工具の側面に切り欠きを設けることで剛性に異方性を与えて、振動モードの調整を行う。これにより伝達関数の対角項 G_{xx} と非対角項 G_{xy} が所望の異方性を持つように調整し、見かけの伝達関数の低コンプライアンスを実現する。解析例は、設計した工具と通常工具の安定限界切削幅であり、実線の下側でびびり振動が発生しないことを示している。図の例では、提案手法によって安定限界が約16倍に拡大されることを示しており、生産効率を劇的に向上し得ることが分かる。

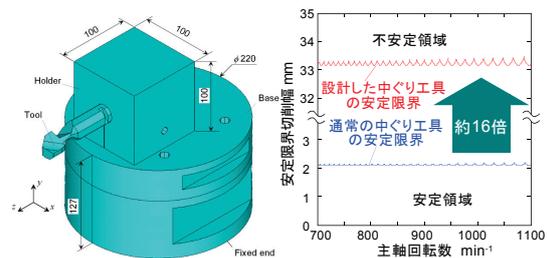


図2 設計した中ぐり工具と安定限界解析

3. 研究の方法

本提案手法では、機械構造に対して所望の伝達特性を精度よく実現できるかが最も重要な課題となる。事前検討において、中ぐり工具形状の初期設計はすでに完了している。そこで、以下の方法により検討を進める。

(1) 工具の試作と伝達関数の調整

設計した工具を試作して伝達関数およびびびり振動の測定・評価実験を行い、工具形状の修正と評価を繰り返す。これにより条件を最適化して、見かけの動剛性を無限大とすることのできる機械構造の実現を目指す。図3に予備検討で設計した中ぐり工具の形状を示す。図に示すように、中ぐり工具側面の根元側と先端側に切り欠きを与えることで、共振周波数を一致させた状態でコンプライアンスの大きさに差を与える。さらに、切り欠きの回転位置を調整して異なるコンプライアンスの伝達要素を混合することで、伝達関

数の対角項 G_{xx} と非対角項 G_{xy} に所望の周波数特性（所望の比で相似となる特性）を与える．これにより切削プロセスにおける見かけの伝達関数では、 G_{xx} と G_{xy} の影響が相殺してコンプライアンスがゼロ（動剛性が無限大）の状態を作り出すことができる．

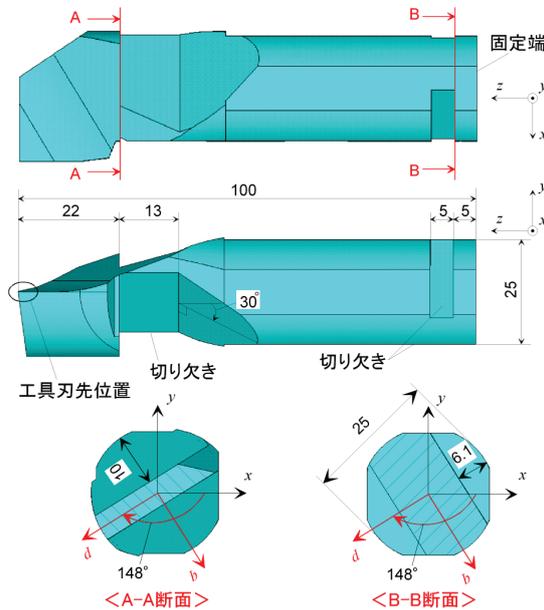


図3 予備検討により設計した中ぐり工具

(2) 高精度びびり振動解析モデルの開発

切削プロセスにおける見かけの伝達関数は、機械構造の伝達関数成分だけでなく比切削抵抗の分力比にも依存する．また、びびり振動の安定限界は工具形状や加工条件にも依存する．このため、旋削加工のための高精度なびびり振動解析モデルを開発し、解析を用いて各パラメータがびびり振動に与える影響について検討を行うとともに、本手法を有効に利用できる条件の範囲や適切なパラメータの範囲を明確にする．

(3) 提案手法の総合的な検証・評価

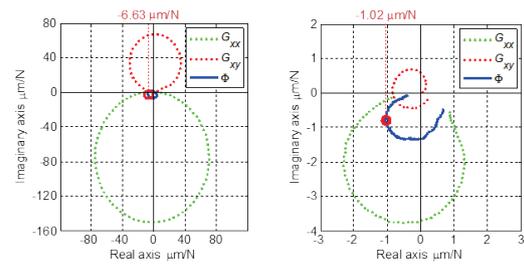
最終的な設計形状に基づいて微調整を施した中ぐり工具により、様々な条件で加工実験を行い、提案手法の実用性について検討を行う．実験結果に基づき、本手法によって従来不可能であった加工を実現し得る可能性についても総合的に検討する．

4. 研究成果

(1) 工具の試作と伝達関数の調整

図3に示す工具を試作し、実際に振動特性評価を行った．びびり振動に対する機械構造の動特性を示す合成伝達関数のベクトル線図を図4に示す．図に示されるように、周波数伝達関数の異方性の影響で合成伝達関数における剛性が向上することがわかる．しかし、調整が難しくその効果は十分ではないため、実質的には、かえって汎用工具よりも

剛性が低下してしまうことが確認できた．

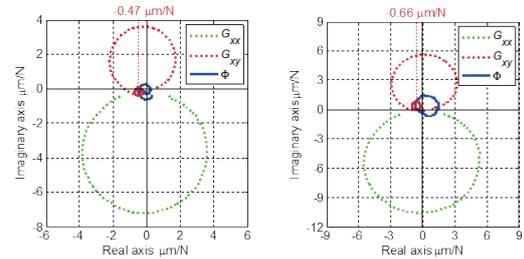


(a) 開発工具 A

(b) 市販工具

図4 測定されたベクトル線図

試作と解析による様々な検討を繰り返し、問題点を検証した．その結果、市販工具の改造では、インサート工具取り付けのための先端部の形状の非対称性に起因して、異方性の調整が難しいことが分かった．そこで、中ぐり工具の再設計を行い、よりシンプルな非対称工具を再設計した．これにより、全体構造の高剛性化が可能となり、異方性伝達特性の設計・調整が容易になった．試作工具の周波数特性の評価を行い、得られたベクトル線図を図5に示す．



(a) 開発工具 B

(b) 開発工具 C

図5 測定されたベクトル線図

図から、再設計した工具では、それぞれ市販工具に対してびびり振動に対する安定性を向上し得ることを確認した．

(2) 高精度びびり振動解析モデルの開発

従来のびびり振動解析モデルは突切り加工を対象としていたため、旋削加工に対応した新しい解析モデルを開発した．さらに、開発した解析モデルを用いて、切削プロセスにおけるパラメータの影響について評価を行った．その結果、様々な条件が安定限界に影響することを明らかにした．特に、分力比（主分力に対する背分力の比）が工具の最適形状や最適加工条件に影響することを見出した．そこで、大まかな分力比の値を入力として、最もロバストに安定限界を向上する工具形状を推定する工具設計手法を開発した．さらに、工具刃先の形状と、工作物の物性に基

いてプロセスダンピング係数を考慮する新しい解析モデルを開発した。これによりプロセスダンピングを考慮した旋削加工の解析が可能となった。

(3) 提案手法の総合的な検証・評価

上述の解析に基づき、試作した工具を用いてびびり振動評価実験を行った。実験結果を図6に示す。さまざまな評価実験を行った結果、図に示すように、実験結果は解析と精度良く一致することが確認できた。また、開発工具を用いることにより、市販工具に対して約15倍安定限界が向上することに成功した。

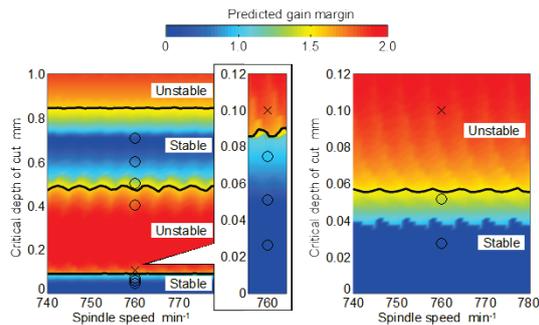


図6 実験結果 (左:開発工具, 右:市販工具)

以上で述べたように、提案手法はびびり振動の安定限界向上に極めて効果的であることを証明することができた。今後、本手法が実用化され、びびり振動抑制技術の一つとして日本のものづくり技術の発展に貢献することを期待する。

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)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① N. Suzuki, Y. Kurata, T. Kato, R. Hino, E. Shamoto; Identification of Transfer Function by Inverse Analysis of Self-Excited Chatter Vibration in Milling Operations, Precision engineering, 査読有, (2012) (in press), DOI:10.1016/j.precisioneng.2012.04.004
- ② T. Yasui, Y. Omoto, K. Osato, N. Kaji, N. Suzuki, T. Naito, M. Watanabe, Y. Okamoto, M. Tokeshi, E. Shamoto and Y. Baba; Confocal Microscopic Evaluation of Mixing Performance for Three-Dimensional Microfluidic Mixer, Analytical Sciences, 査読有, Vol.28, No. 1, pp.57-59, (2012), DOI: 10.2116/analsci.28.57
- ③ T. Yasui, Y. Omoto, K. Osato, N. Kaji, N. Suzuki, T. Naito, M. Watanabe, Y. Okamoto, M. Tokeshi, E. Shamoto and Y. Baba; Microfluidic baker's transformation device for three-dimensional rapid mixing, Lab Chip, 査読有, 2011, 11 (19), pp.3356 - 3360, DOI: 10.1039/C1LC20342H
- ④ E. Shamoto, T. Aoki, B. Sencer, N. Suzuki, R. Hino, T. Koide; Control of chip flow with guide grooves for continuous chip disposal and chip-pulling turning, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, Vol.60/1, pp.125-128, (2011), DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.081
- ⑤ Y. Wang, N. Suzuki, E. Shamoto, Q. Zhao; Investigation of tool wear suppression in ultraprecision diamond machining of die steel, Precision engineering, Vol.35, pp.677-685, (2011), DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.05.003
- ⑥ 橋本洋平, 鈴木教和, 樋野励, 社本英二; CMP プロセスにおける接触応力の動的有限要素法解析, 査読有, 精密工学会誌, 77 巻 5 号, pp.513-519, (2011), DOI: 10.2493/jjspe.77.513
- ⑦ 社本英二, 安田浩一朗, 青木友弥, 鈴木教和, 小出富夫; 切りくずの連続処理と引張り切削に関する研究—すくい面形状による切りくず制御の試み, 精密工学会誌, 査読有, 77 巻 5 号, pp.520-524, (2011), DOI: 10.2493/jjspe.77.520
- ⑧ N. Suzuki, H. Yokoi, E. Shamoto; Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting, Precision engineering, 査読有, Vol. 35, pp.44-50, (2011) <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.006>
- ⑨ Y. Kurata, S.D. Merdol, Y. Altintas, N. Suzuki, E. Shamoto; Chatter Stability in Turning and Milling with in Process Identified Process Damping, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.4. No.6, pp.1107-1118, (2010), DOI: 10.1299/jamdsm.4.1107
- ⑩ S. Amini, E. Shamoto, N. Suzuki and M. J. Nategh; FE Analysis of One-Directional and Elliptical Vibration Cutting Processes, International journal of automation technology, 査読有, Vol.4/3, pp.252-258, (2010)
- ⑪ N. SUZUKI, K. NISHIMURA, E. SHAMOTO, K. YOSHINO; Effect of Cross Transfer

Function on Chatter Stability in Plunge Cutting, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.4. No.5, pp.883-891, (2010)
<http://dx.doi.org/10.1299/jamdsm.4.883>

[学会発表] (計 8 件)

- ① N. Suzuki, Y. Hashimoto, R. Hino, E. Shamoto; Dynamic Structural Analysis of CMP Process Using ALE Method, Proceedings of International Conference on Planarization/CMP Technology (ICPT 2010), pp.249-252, 2010.11.14-17, Arizona(USA)
- ② N. Suzuki, Y. Hashimoto, M. Asaba, E. Shamoto; Consideration of Nonlinear Elasticity of Polishing Pad in CMP analysis, Proceedings of International Conference on Planarization/CMP Technology (ICPT 2011), pp.402-405, 2011.11.09-11, Seoul (Korea)
- ③ N. Suzuki, H. Yokoi, E. Shamoto, S. Hamada, T. Ueyama; Development of Mirror Surface Finishing Technology for Sculptured Steel Molds, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2010), Vol. 2, pp.69-74, 2010.10.24-26, Gifu(Japan)
- ④ Y. Kurata, S.D. Merdol, Y. Altintas, N. Suzuki, E. Shamoto; Chatter Stability in Turning with In Process Identified Process Damping, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2010), Vol. 1, pp.71-74, 2010.10.24-26, Gifu(Japan)
- ⑤ Y. WANG, N. SUZUKI, E. SHAMOTO, Q. ZHAO; Ultrasonic elliptical vibration cutting of plasma nitriding steel, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2010), Vol. 2, pp.75-80, 2010.10.24-26, Gifu(Japan)
- ⑥ R. Hino, T. Hosoi, N. Suzuki and E. Shamoto; Proposal of Schedule-Based Path Planning for Automated Vehicles Guided by Uni-directed Rails, International Symposium on Flexible Automation (CDROM), 2010.7.12-15, Tokyo(Japan)
- ⑦ N. Suzuki, H. Yokoi, R. Hino, E. Shamoto; Development of High Performance Nano Sculpturing System

for Steel Materials by using Elliptical Vibration Cutting, Proceedings of the 2nd International Conference of Process Machine Interactions (PMI2010), CD-ROM, 2010.06.10-11, UBC(Canada)

- ⑧ Y. KURATA, N. SUZUKI, R. HINO, E. SHAMOTO; Prediction of Chatter-Free Cutting Conditions for High Performance Boring Operation, Proceedings of the 2nd International Conference of Process Machine Interactions (PMI2010), CD-ROM, 2010.06.10-11, UBC(Canada)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 教和 (SUZUKI NORIKAZU)
名古屋大学・工学研究科・講師
研究者番号：00359754

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし