

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420179

研究課題名(和文) ボーリング加工における加工穴多角形化現象の防止対策の確立

研究課題名(英文) Countermeasure against polygonal deformation phenomenon of borehole in boring process

研究代表者

松崎 健一郎 (Matsuzaki, Kenichiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：80264068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：様々なボーリング加工において加工穴が真円とならず多角形状に変形する現象が発生している。本研究では主にリーマ加工における加工穴多角形化現象を対象として、加工実験による現象の確認、解析モデルの提案と数値解析、多角形化抑制のための切れ刃配置の検討を行った。一般的な等分割刃リーマにおける解析結果は実現象と定性的によく一致する結果となり、モデルの妥当性を確認した。さらに、様々なパターンの不等分割刃リーマの多角形化抑制効果について数値計算により評価した。

研究成果の概要(英文)：In various types of boring process, a chatter vibration often occurs and the drilled hole is deformed in a polygonal shape. In this research, the reaming process is treated mainly. The phenomenon is confirmed by experiment. Then, the analytical model is proposed, and the numerical analysis is performed. Furthermore, the tooth spacing which is effective as a countermeasure is studied. The analytical result for the regular tooth spacing reamer agree well with the real phenomena qualitatively. It is confirmed that the analytical model is valid. Also, the suppression effect against the polygonal deformation phenomena of various types of irregular tooth spacing is evaluated numerically.

研究分野：機械力学

キーワード：ボーリング加工 リーマ 加工穴多角形化 自励振動 パターン形成

1. 研究開始当初の背景

ドリル加工に代表されるボーリング（穴あけ）加工においては穴の真円度や真直度などが重要であり、穴あけの精度は加工される製品の性能や信頼性に大きく影響する。しかしながら様々な方法のボーリング加工において、加工穴が真円とならず、多角形状になってしまう現象がしばしば発生しており、製品の高性能化や加工の高効率化において大きな課題となっている。

研究代表者らは、BTA 深穴加工における加工穴多角形化現象を時間遅れによる自励振動としてとらえ、解析モデルの提案と数値的解析による現象の基礎的研究を行い、この解析をもとに、ガイドパッドの追加配置による防止対策を提案し、数値解析によってその効果を調べた。さらに、BTA 深穴加工を行う企業の協力を得て、実機を用いた実験を行い、解析モデルの妥当性を確認するとともに提案した防止対策の有効性について確認してきた。

2. 研究の目的

様々な種類のボーリング加工において問題となっている加工穴の多角形化現象について、統一的な防止対策の手法を確立することを目的とした。BTA 深穴加工におけるライフリングマーク発生現象の発生メカニズムと防止対策に関する今までの研究により得られた知見を基礎として、主にリーマ加工について、時間遅れによる自励振動の解析モデルの検討、数値解析結果と実験結果の比較による解析モデルの確立を行い、さらに、切れ刃の数や配置の影響を詳しく調べるとともに、穴多角形化防止のための切れ刃配置について解析および実験の両面から検討した。

3. 研究の方法

(1) 加工実験による現象の確認

マシニングセンタを用いたリーマ加工の実験により、固有振動数の測定、加工時の工具や被削材の振動の測定、加工穴の形状測定などを行い、測定データの解析から、多角形化現象が発生しているときの振動の特徴、加工穴形状と振動の相関、切削条件の影響、工具形状の影響について検討した。

(2) 解析モデルの検討と数値解析

リーマ加工における穴多角形化現象の解析モデルを検討し、数値計算による現象の解析を行った。また、数値解析結果と実験結果を比較することにより解析モデルの妥当性を検証した。

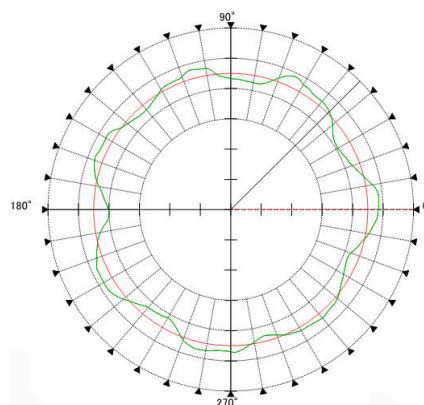
(3) 穴多角形化防止のための切れ刃配置の検討

切れ刃配置が加工穴の多角形化現象に及ぼす影響を数値解析によって詳しく調査するとともに、防止対策について数値解析により検討した。

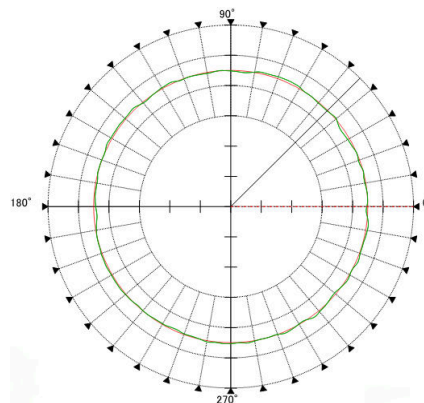
4. 研究成果

(1) 加工穴の真円度測定

マシニングセンタを用いた加工実験でスピンドルおよび被削材の振動計測と加工穴の真円度測定を行った。図1には加工穴の真円度測定結果の例を示す。(a)は切れ刃が等間隔で配置されている一般的な6枚刃リーマで加工した穴の真円度測定結果を緑色の線で示した図であり、7角形を主な成分とする多角形化が確認できる。一方、(b)は切れ刃の配置を不等分割とした市販されているタイプの6枚刃リーマを用いた場合の結果であり、多角形化が等分割刃リーマと比べて抑制されていることを確認した。



(a) 等分割 6 枚刃リーマ



(b) 不等分割 6 枚刃リーマ

図1 加工穴の真円度測定結果

(2) 解析モデル

基本的な特性を解明することを目的とし、解析モデルとして単純な工具固定・被削材回転の場合を取り扱った。図2に6枚刃の場合のリーマ加工の解析モデルを示す。図はリーマを刃先正面から見たものであり、リーマは回転せず、被削材が時計方向に回転している。リーマおよびスピンドルは一体で運動するものとして面内の並進運動のみを考慮し、リーマおよびスピンドルはばねおよびダッシュポットで等方的に支持されているとする。それぞれの切れ刃には切削力と接触力が作用すると考える。切削は工具の軸方向先端のみで行われると仮定し、切削部分では切削力の主分力と背分力が作用するものとする。ま

た、切れ刃の工具先端以外の部分では、加工穴との接触による垂直抗力と摩擦力を考慮する。工具の振動によって切削量が変動すると、それが穴表面の形状として残り、再び切れ刃と接触したときに垂直抗力や摩擦力の大きさに影響する。このような被削材に残された工具の振動履歴による時間遅れの効果を考慮して解析モデルを構築した。

解析モデルの運動方程式から特性方程式を導出し、複素固有値解析により加工穴多角形化現象の安定性解析を行った。

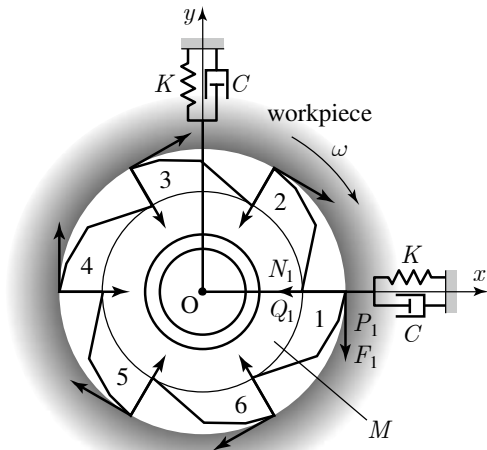


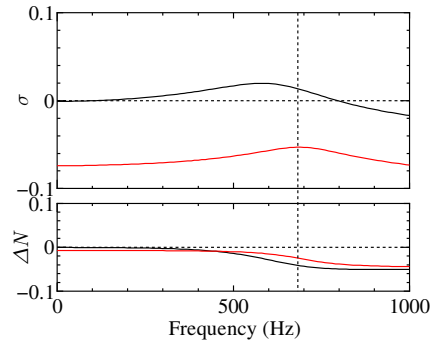
図2 解析モデル

(3) 等分割6枚刃リーマの解析結果

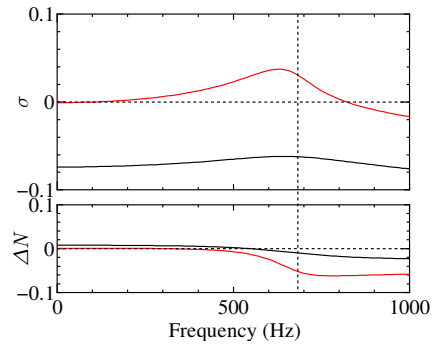
切れ刃が60 deg 間隔で均等に配置された等分割6枚刃リーマの解析を行った。等分割刃リーマでは、切れ刃と被削材の接触剛性を考慮した場合でも支持が等方的となり、すべての方向で固有振動数は等しく683 Hz となった。

被削材の回転数を変化させた場合の特性指数を数値計算により求めた。実部が正の特性指数が1つでも存在すれば系は不安定となり、そのときの虚部は発生する角形数を表す。図3に5角形と7角形に対応する特性根の回転速度に伴う変化を示す。特性根は加算無限個存在するが、ここでは虚部の値が整数に最も近い2つの解を黒または赤の実線で示した。図の横軸は対応する角形数が形成された被削材表面の回転に伴う形状変動の振動数であり、回転角速度と角形数の積となる。図の縦軸は特性根の実部(上段)および虚部の整数値からのずれ(下段)を表している。なお、切れ刃と被削材の接触剛性を考慮したリーマの固有振動数を縦の点線で示している。5, 7角形では特性根の実部が正となる回転数があり、加工穴の多角形化が発生することが示された。実験結果で示したように、リーマ加工では、一般的に[刃数の整数倍±1]角形の加工穴多角形化現象が発生しやすいことが経験的に知られており、このことと一致する結果となった。また、固有振動数の近傍で特性根が大きく変化し、固有振動数の若干低

振動数側で最も不安定度が大きくなっていることが分かる。これは、この種の時間遅れによるパターン形成現象に共通して見られる特徴である。さらに、不安定領域では虚部の整数値からのずれが常に負となっており、多角形状のパターンは被削材の回転方向の逆向き(被削材から相対的に見た工具の回転方向)にねじれることを示している。



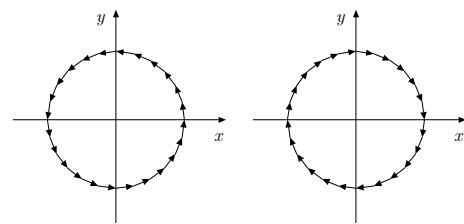
(a) 5角形



(b) 7角形

図3 等分割6枚刃リーマの解析結果

図4には、5角形および7角形において固有値実部が最大となるときの工具の振り回り軌道を示す。図から分かるように振り回りの軌道は真円形状となり、5角形では左回り、7角形では右回りとなる。被削材から相対的に工具の運動を観察した場合、工具は左回りに回転していることから、5角形は前向き、7角形は後向きの振り回りで不安定化していることが分かる。なお、図3の黒線と赤線はそれぞれ前向きおよび後向きに対応する解を示している。



(a) 5角形

(b) 7角形

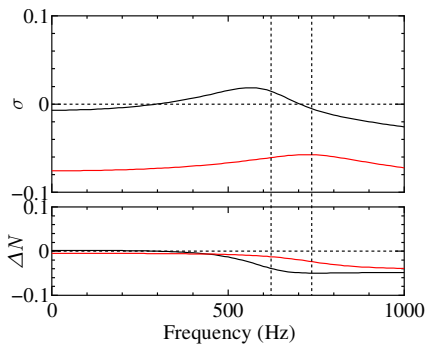
図4 工具の振り回り(等分割)

(4) 不等分割 6 枚刃リーマの解析結果

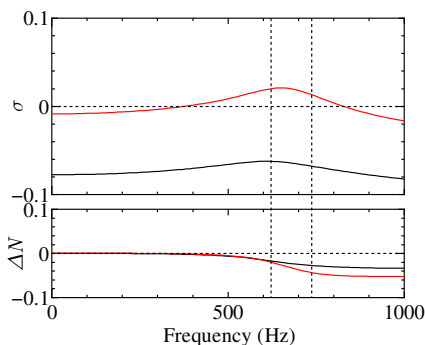
隣り合う切れ刃同士の間隔が 45-60-75-45-60-75 deg の不等分割 6 枚刃リーマについて、特性根の解析を行った。

不等分割刃リーマでは、切れ刃と被削材の接触剛性を考慮すると支持が等方的ではなくなるため、2 つの固有振動数が存在し、1 次が 622 Hz、2 次が 738 Hz となった。図 5 に 5 角形および 7 角形に対応する特性根の変化を示す。図の構成は図 3 と同様であるが、固有振動数を示す縦の点線は 2 本となる。等分割刃リーマの解析結果と比較すると、5、7 角形の両方において、特性根の実部が全体的に小さくなり、不安定領域が減少することが確認された。一方、結果は示していないが、9 角形では不安定となる回転速度の範囲が発生した。

図 6 にはそれぞれの固有振動数における振動方向を、図 7 には 5、7 角形において固有値実部が最大となるときに工具の振れ回り軌道を示す。不等分割刃の場合振れ回りの軌道は楕円形状となり、長軸の傾きから、5 角形では 1 次の固有振動数が、7 角形では 2 次の固有振動数が主に参与していると考えられる。



(a) 5 角形



(b) 7 角形

図 5 不等分割 6 枚刃リーマの解析結果

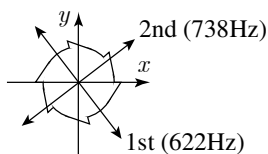
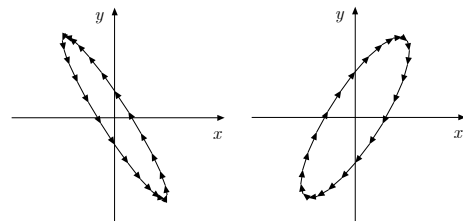


図 6 不等分割 6 枚刃リーマの固有ベア



(a) 5 角形

(b) 7 角形

図 7 工具の振れ回り (不等分割)

(5) その他の検討事項

被削材が固定され工具が回転する一般的な加工状態の場合について、時間遅れを考慮したリーマ加工における穴多角形化現象の解析モデルを新たに提案し、6 枚刃の等分割刃リーマについて解析を行った。工具固定-被削材回転の場合と同様に [刃数の整数倍 ± 1] に相当する 5、7 角形などが不安定化し、多角形化現象が発生することが確認された。一方で、工具に固定された回転座標系で運動を記述することになるため、前向きと後ろ向きの振れ回りで固有振動数が異なることと、[刃数の整数倍 - 1] 角形では前向きの振れ回りで、[刃数の整数倍 + 1] 角形では後ろ向きの振れ回りで不安定化することから、角形数によって生じる振動数が一様でないことが確認された。

また、工具回転数が小さいときの準静的な解析結果が、安定・不安定の指標になることから、これを用いて最適な切れ刃配置について検討し、既存の対策工具よりも大きな抑制効果が得られる角度配置があることを確認した。

さらに、5 枚刃と 4 枚刃のリーマについても、等分割の場合の解析を行い、不等分割刃の効果についても確認した。この場合も等分割刃の場合は [刃数の整数倍 ± 1] 角形が発生することを確認した。また、不等分割刃による抑制効果は、6 枚刃と比較すると、刃数が少ないため切れ刃配置の自由度が小さく、多角形化の抑制効果も小さくなることを確認した。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Kenichiro Matsuzaki, Takahiro Ryu, Atsuo Sueoka, Keizo Tsukamoto, Theoretical and experimental study on rifling mark generating phenomena in BTA deep hole drilling process (generating mechanism and countermeasure), International Journal of Machine Tools and Manufacture, 査読有, Vol. 88, 2015, pp. 194-205.

〔学会発表〕（計4件）

- ① 園田大樹，松崎健一郎，劉孝宏，末岡淳男，塚本恵三，リーマ加工における穴多角形化現象の数値解析（工具回転の場合），日本機械学会 2016 年度年次大会，2016 年 9 月 13 日，九州大学（福岡県・福岡市）。
- ② 眞方山航平，松崎健一郎，劉孝宏，末岡淳男，塚本恵三，リーマ加工における穴多角形化現象の数値計算，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015，2015 年 8 月 28 日，弘前大学（青森県・弘前市）。
- ③ 眞方山航平，松崎健一郎，劉孝宏，末岡淳男，リーマ加工における穴多角形化現象の発生メカニズムに関する研究，日本機械学会九州支部大分講演会，2014 年 9 月 20 日，ホルトホール大分（大分県・大分市）。
- ④ 平瀬圭太，劉孝宏，松崎健一郎，塚本恵三，藤井勝志，末岡淳男，BTA 深穴加工におけるスパイラルマーク発生メカニズムに関する実験的研究，日本機械学会九州支部大分講演会，2014 年 9 月 20 日，ホルトホール大分（大分県・大分市）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 健一郎（MATSUZAKI Kenichiro）

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：80264068

(2) 研究分担者

劉 孝広（RYU Takahiro）

大分大学・工学部・教授

研究者番号：60230877