

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560262

研究課題名(和文) BTA深穴加工における工具の振動抑制手法に関する研究

研究課題名(英文) A Study for Vibration Suppression method of Tool in BTA Deep Hole Drilling Process

研究代表者

松崎 健一郎 (MATSUZAKI, Kenichiro)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80264068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：BTA深穴加工におけるライフリングマーク発生現象について、実機の構造に基づいた詳細な解析モデルを提案し、実機の打撃試験などから物理パラメータの同定を行った。さらに、得られた解析モデルを用いた数値解析結果と、実機における加工試験での振動測定結果および加工穴の形状測定結果を比較し、解析モデルの妥当性および発生メカニズムの検証を行った。また、提案しているガイドパッド追加配置による防止対策について、数値解析および実機実験によってその効果を確認した。その他には、ガイドパッド曲率の影響、動吸振器による振動抑制対策の効果、工具回転型BTAでのライフリングマーク発生現象などについて検討を行った。

研究成果の概要(英文)：BTA deep hole drilling is used for producing holes of high aspect ratio. In this process, a chatter vibration sometimes occurs and a rifling mark is formed on the surface of a hole. The rifling mark generating phenomenon was considered as a self-excited vibration caused by time delay. The analytical model was proposed considering the structure of the real BTA deep hole drilling machine. In the real machine, the boring bar is supported at the oil pressure head and at the intermediate support as well as at the base. The uncertain parameters are identified by the vibration test of the real machine. Furthermore, the stability of the self-excited vibration was analyzed numerically, and the result of numerical analysis is compared with the experiment. It is confirmed that the theoretical and experimental results agree well with each other. Also, the effect of a countermeasure by an additional guide pad is evaluated theoretically and experimentally.

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：BTA 深穴加工 ライフリングマーク パターン形成 自励振動

1. 研究開始当初の背景

BTA 深穴加工では、切削中に工具が振動して加工穴が多角形化し、それに伴ってライフリングマークと呼ばれるらせん状の模様が加工穴に形成される現象が問題となっている。しかしながら、発生メカニズムの解明や防止対策の確立には至っていなかった。

一方、研究代表者らは、BTA 深穴加工における振動現象を時間遅れによる自励振動としてとらえた解析モデルを提案し、数値解析による基礎的研究により発生メカニズムの検討を行った。さらに、この研究をもとに、ガイドパッドの追加配置による自励振動の防止対策を提案し、数値解析によってその効果を確認した。

2. 研究の目的

- (1) 実機実験による現象の確認と解析モデル・数値解析結果の検証
- (2) ガイドパッドの形状・配置方法の影響とガイドパッド追加配置による振動抑制対策の効果の検証
- (3) 工具回転型 BTA への理論の拡張
- (4) 新たな振動抑制対策の検討

3. 研究の方法

まず、実機におけるボーリングバーの振動特性を調べ、それを用いて実機条件に基づいた解析モデルを構築した。

次に、実機による加工実験によって、加工時のボーリングバーの振動を測定し、ライフリングマーク発生時の振動の特徴を調べた。また、実験結果と解析結果を比較し、解析モデルの妥当性を検証した。さらに、加工穴の形状測定により、ボーリングバーの振動とライフリングマークの相関について調べた。

その後、ガイドパッド追加配置などの振動抑制対策について、得られた解析モデルを用いて検討し、実機実験によってその効果を検証した。

4. 研究成果

図1に典型的な BTA 工具の形状を示す。円筒形状の工具には切れ刃と二つのガイドパッドが取り付けられており、工具には切りくずと切削油を排出するための穴が貫通している。

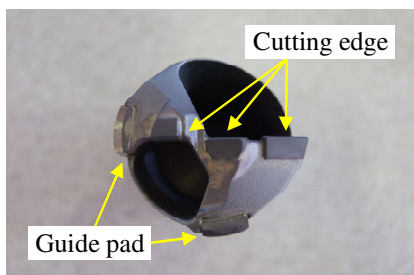


図1 BTA 工具

図2に示すように、この工具をボーリングバーと呼ばれる細長い中空棒の先端にとりつけ、工具または被削材を回転させながら送ることにより穴あけが行われる。なお、被削材とボーリングバーの隙間から高压の切削油が注入され、切りくずと一緒にボーリングバーを通して排出される仕組みとなっている。

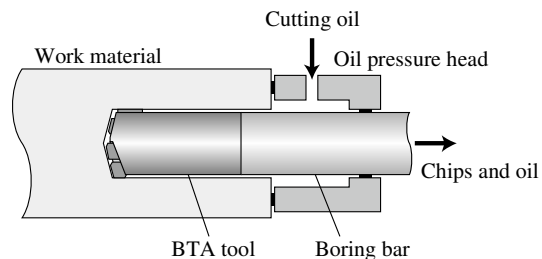


図2 BTA 深穴加工

本研究では、ボーリングバーを一様な対称はり、工具を質点と考え、図3のように中間サポートおよびオイルプレッシャーヘッド(OPH)の部分でボーリングバーが外部から支持された状態として厳密なモデル化を試みた。工具に作用する力として図4に示すように、工具に作用する切削力の反力である主分力 P_c と背分力 Q_c 、工具に作用する接触力である垂直抗力 N_c と摩擦力 F_c 、ガイドパッドに作用する接触力である垂直抗力 N_i と摩擦力 F_i (ただし、 i はガイドパッドの番号) を考慮した。

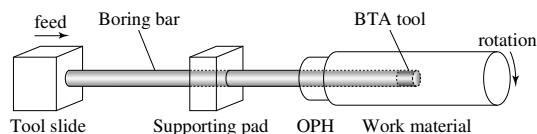


図3 解析モデル

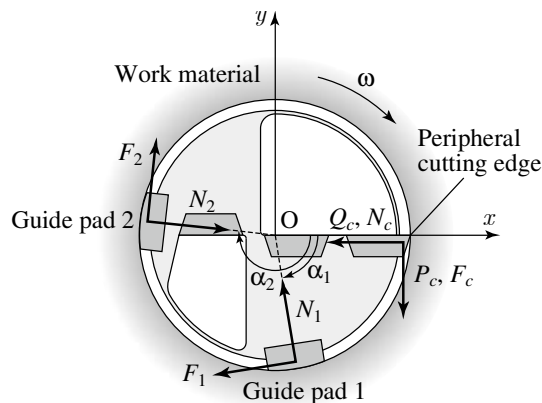


図4 工具先端に作用する力

工具の切れ刃方向 (x 方向) の振動は被削材の切削量を変化させ、被削材の穴形状に変動を生じさせる。ガイドパッドは被削材に接触しているため、穴形状の変動はガイドパッドと被削材との接触力の変動を生じる。さらに接触力の変動は工具の振動を生じる。工具とガイドパッドの位置が異なるため、工具の振動によって生じた穴形状の変動は時間においてガイドパッドとの接触力に変動を及

ぼすこととなり、この時間遅れを考慮して、解析モデルを構築した。

(1) ボーリングバーの固有振動数

BTA 実機においては加工穴の深さに応じてボーリングバーの支持状態が変化するため、固有振動数も穴深さによって変化する。図5にボーリングバーの固有振動数の穴深さによる変化を示す。○印は実機の打撃試験により得られた実験結果を示し、実線は数値解析によって得られた1～3次の固有振動数の計算結果を示す。実験結果と解析結果は良く一致しており、ボーリングバーの支持状態のモデルが妥当であることが確認された。

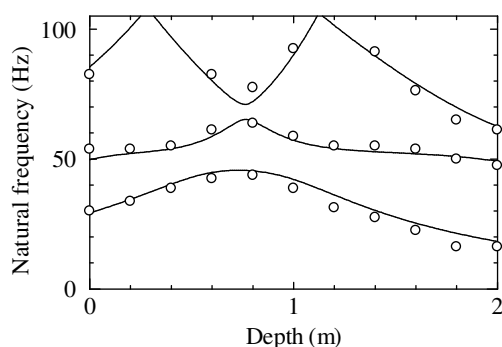


図5 ボーリングバー固有振動数の実験結果と数値解析結果

(2) 数値解析結果

数値解析により、加工時における系の特性指数の変化を調べた。特性指数の実部は不安定度を表し、特性指数の虚部は発生角形数を表す。5角形の特性指数の変化を図6に示す。横軸に穴深さを、縦軸に不安定度（上図）および角形数の整数値からのずれ（下図）をとっている。不安定度が正の場合ライフリングマークが発生することを意味する。図から分かるとおり、穴深さが0.8～1.3mの範囲で不安定度が正となり、数値解析では、この範囲で5角形のライフリングマークが発生する結果が得られた。

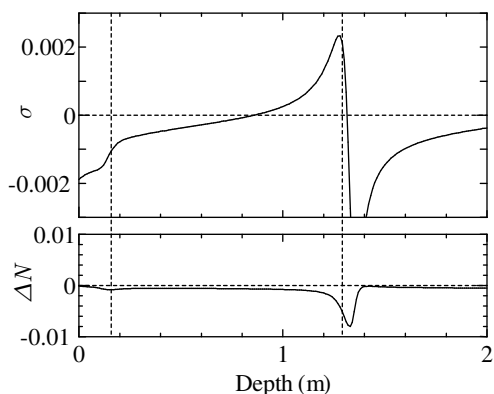


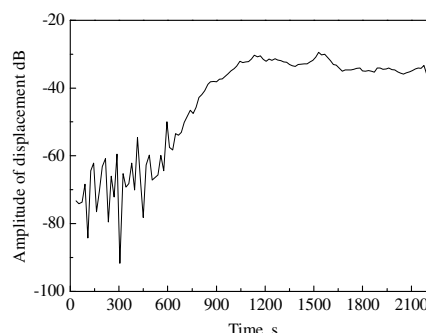
図6 5角形の解析結果

(3) 実験結果

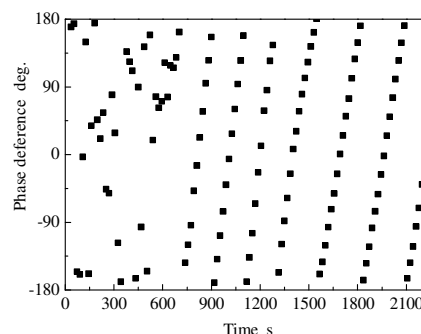
実機を用いた加工実験により、ライフリングマーク発生時の振動を計測した。図7に回

転角速度の5倍の振動数成分の変化を示す。図(a)には振動振幅の変化を、(b)には位相の変化を示す。横軸は加工時間であり、1秒間に約0.9mm送られる。

図(a)から分かるように、700s付近(穴深さ約600mm)から振動振幅が指数的に成長している。これは解析結果とおおむね一致する結果となっている。また、図(b)からは振動振幅が成長すると、位相が時間とともに一樣に変化することが分かる。これはライフリングマークが一様にねじれることを意味しており、ねじれの向きは解析結果と一致する。なお、加工穴には5角形のライフリングマークが形成され、振動計測結果と良く対応していることを確認した。



(a) 振動振幅



(b) 位相

図7 加工時における5角形成分の振動計測結果

(4) ガイドパッド追加による防止対策

ガイドパッドを追加配置することによる防止対策の効果について数値解析および実機実験により検証した。

図8は、製作した対策工具であり、90°および180°付近に位置するガイドパッド1とガイドパッド2に加えて、第3のガイドパッドを220°付近に取り付けている。



図8 対策工具

図9に対策工具を用いた場合の解析結果を示す。図から分かるように、不安定度は常に負となり、5角形は発生しないという結果を得た。

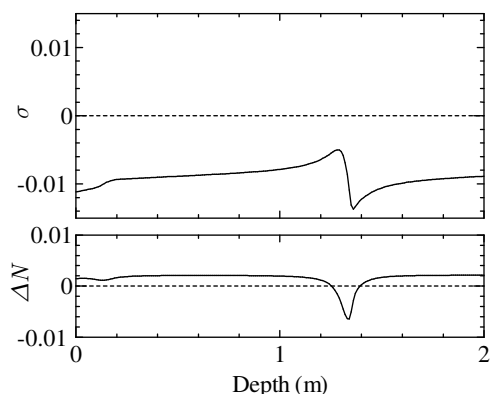
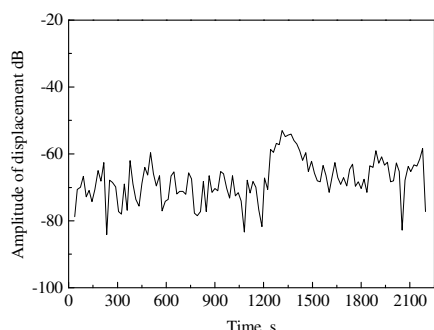
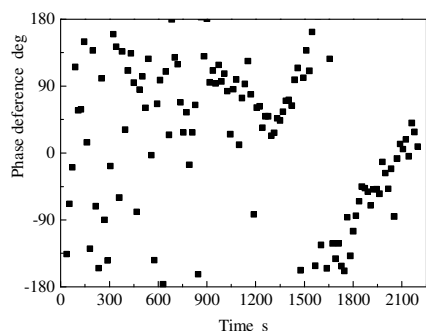


図9 対策工具を用いた場合の5角形の解析結果

図10には対策工具を用いて加工実験を行ったときの5角形成分の振動計測結果を示す。図(a)から分かるように振動は成長しておらず、ライフリングマークが発生しないことが分かる。また、図(b)からは位相の変化がランダムであることが分かり、規則的なパターンは形成されていないことが分かる。なお、加工穴にはライフリングマークが発生していないことを、加工穴の真円度測定結果からも確認している。



(a) 振動振幅



(b) 位相

図10 対策工具を用いた場合の5角形成分の振動計測結果

(5) その他の検討結果

① ガイドパッドの曲率半径

ガイドパッド曲率半径の影響について実験により調べた。ガイドパッド曲率の影響はかなり大きく、特に曲率半径が小さい場合、偶数角形の発生が確認された。理論では考慮していない要素が影響しているものと考えられる。

② 第3ガイドパッドの新たな位置

防止対策効果がほぼ等価となる第3ガイドパッドの $180^\circ \sim 270^\circ$ の範囲以外の配置について検討した。標準位置と異なる場合、良好な切削が行えなかったり、異なる種類の多角形パターンが発生したりした。理論で考慮していないガイドパッドの軸方向位置などの影響があるものと考えられる。

③ 動吸振器による振動抑制対策

動吸振器による防止対策について数値解析および実験により検証した。動吸振器はボーリングバーの工具から離れた位置につけざるを得ないため、比較的大きな質量の動吸振器を取り付ける必要があることが数値解析により示された。なお、実験では十分な効果を確認できていない。

④ 工具回転型BTA

工具回転型BTA深穴加工について、数値解析および実験による検討を行った。数値解析からは、被削材回転型と基本的な特徴は同じであるものの、前回り・後回りの固有振動数が存在するため、より複雑な挙動を示すことが確認された。なお、加工試験ではライフリングマークが発生する加工条件の設定が難しく、解析結果の検証までには至っていない。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Takaaki Honda, Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Keizo Tsukamoto, Katsushi Fujii, Yoshikazu Yuge, Atsuo Sueoka, Experimental Study on the Mechanism and Countermeasures of Rifling Mark Generation in BTA Deep Hole Drilling Process, Proceedings of 15th Asia-Pacific Vibration Conference, 査読有, CD-ROM, 2013, pp. 212-217.
- ② Kenichiro Matsuzaki, Takahiro Ryu, Atsuo Sueoka, Keizo Tsukamoto, Takaaki Honda, Numerical study for rifling mark generating phenomena on BTA deep hole drilling process, Proceedings of ISMA2012-USD2012 Conference, 査読有, CD-ROM, 2012, pp. 3033-3046.
- ③ Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Keizo Tsukamoto, Katsushi Fujii, Yoshikazu Yuge, Shotaro Nakao, Takaaki Honda, Atsuo Sueoka, Experimental study for a countermeasure against rifling mark generating phenomena on BTA deep hole drilling process, Proceedings of ISMA2012-USD2012 Conference, 査読有, CD-ROM, 2012, pp. 3071-3082.

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① 松崎健一郎, 眞方山航平, 劉孝宏, 末岡淳男, 塚本恵三, BTA 実機のボーリングバー支持状態を考慮したライフリングマーク発生現象の数値解析, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 2013年9月28日, 鹿児島市.
- ② 本田貴晶, 劉孝宏, 松崎健一郎, 塚本恵三, 藤井勝志, 弓削義和, 末岡淳男, BTA 深穴加工におけるライフリングマークの防止対策に対する実験的研究, 日本機械学会 D&D2013, 2013年8月26日～8月30日, 福岡市.
- ③ Takaaki Honda, Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Keizo Tsukamoto, Katsushi Fujii, Yoshikazu Yuge, Atsuo Sueoka, Experimental Study on the Mechanism and Countermeasures of Rifling Mark Generation in BTA Deep Hole Drilling Process, 15th Asia-Pacific Vibration Conference, 2013年6月2日～6月6日, Jeju, Korea.
- ④ Kenichiro Matsuzaki, Takahiro Ryu, Atsuo Sueoka, Keizo Tsukamoto, Takaaki Honda, Numerical study for rifling mark generating phenomena on BTA deep hole drilling process, ISMA2012-USD2012 Conference, 2012年9月17日～9月19日, Leuven, Belgium.
- ⑤ Takahiro Ryu, Kenichiro Matsuzaki, Keizo Tsukamoto, Katsushi Fujii, Yoshikazu Yuge, Shotaro Nakao, Takaaki Honda, Atsuo Sueoka, Experimental study for a countermeasure against rifling mark generating phenomena on BTA deep hole drilling process, ISMA2012- USD2012 Conference, 2012年9月17日～9月19日, Leuven, Belgium.
- ⑥ 中尾翔太郎, 松崎健一郎, 劉孝宏, 末岡淳男, 大村和久, BTA 深穴加工におけるライフリングマーク発生現象の防止対策—実験的考察—, 日本機械学会 D&D2011, 2011年9月5日, 高知県香美市.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：切削加工用先端工具のガイド部配置構造及びガイド部配置方法

発明者：松崎健一郎, 劉孝宏, 塚本恵三, 藤井勝志

権利者：国立大学法人九州大学, 国立大学法人大分大学, 株式会社アヤボ

種類：特許

番号：特願 2013-001568

出願年月日：2013年1月9日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 健一郎 (MATSUZAKI Kenichiro)

鹿児島大学・理工学研究科・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

宗和 伸行 (SOWA Nobuyuki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40304753

(2012.10～：連携研究者)