

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560219

研究課題名（和文） BTA深穴加工における振動発生メカニズムの解明と防止対策の検討

研究課題名（英文） A Study for generation mechanism and countermeasures of vibration on BTA Deep Hole Drilling Process

研究代表者

松崎 健一郎 (MATSUZAKI KENICHIRO)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80264068

研究成果の概要（和文）：BTA 深穴加工において、工具の振動が発生し、穴にライフリングマークと呼ばれる模様が形成される現象が問題となっている。本研究では、この現象を時間遅れによる自励振動現象と考えて解析モデルを構築し、主に数値解析によって現象の発生メカニズムの解明を行った。また、BTA 工具のガイドパッドを追加配置することによる振動防止対策を提案し、その効果について数値解析によって調べるとともに、ガイドパッドの最適配置についても検討した。さらに、実機実験において、解析結果や防止対策の効果について検証した。

研究成果の概要（英文）：In the BTA deep hole drilling process, a chatter vibration sometimes occurs and a rifling mark is formed on the surface of the hole. The generating mechanism of the rifling mark in BTA deep hole drilling process is studied numerically as a self-excited vibration caused by time delay. Also, the preventing method by an additional guide pad is proposed, and the effect of the preventing method and the optimal location of the guide pads is studied. Furthermore, the results of numerical analysis and the effect of the preventing method is confirmed by experiments using an actual BTA deep hole drilling machine.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
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 ・ 機械力学・制御

キーワード：BTA, 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が、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。

また、研究代表者らは、ロールが他のロールなどと接触しながら回転する接触回転系

におけるロールの多角形化現象について、接点でロールに発生した変形が再び接点に戻ってくるロールの1回転後に系に影響を及ぼす「時間遅れ効果」により発生する自励振動と考へ、モデル化、解析、実験および防止対策の検討を行ってきた。

BTA 工具には切削を行う切れ刃および被削材の加工穴と接触して切削力の反力を受ける数カ所のガイド部分があり、切れ刃によ

り切削された部分は、ある時間においてガイド部および切れ刃に接触する。このことから、工具の振動によって生じた切削量の変動が、ある時間においてガイド部および切れ刃と被削材との間の接触力の変動を生じる時間遅れ系の自励振動として BTA 深穴加工の振動現象をとらえ、その発生メカニズムの解明に着手した。

2. 研究の目的

- (1) BTA 深穴加工における振動現象を切削量変動の時間遅れによる自励振動現象としてモデル化し、数値解析により現象の発生メカニズムを解明すること
- (2) ガイドパッドの最適な配置やガイドパッドの追加配置による自励振動の防止対策について検討すること
- (3) より複雑な解析モデルの検討
- (4) 実験による解析結果の検証

3. 研究の方法

ボーリングバーを一様なはり、工具を質点としたモデルを基本的な解析モデルとし、被削材から工具に作用する切削力と接触力を考える。切れ刃の振動によって穴形状が変化し、それによって接触力が一定の時間において変化する時間遅れの効果を考慮する。導出された運動方程式から系の特性根を数値的に求めることにより、発生する角形数と回転数・固有振動数の関係やガイドパッドの配置と系の安定性の関係などを詳細に調べる。

また、ガイドの数やその配置を変更することによる自励振動の防止対策について、同様の解析モデルを用いて数値解析で検討する。

さらに、より複雑な解析モデルの検討や、実験による解析結果の検証を行う。

4. 研究成果

図 1 に 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深穴加工が行われる。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構造となっている。

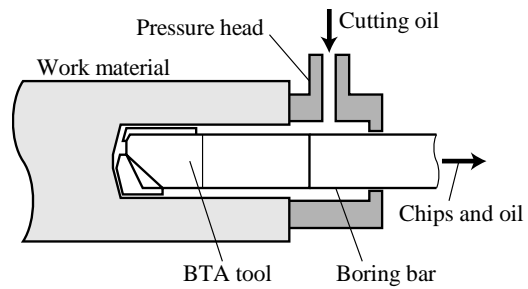


図 2 BTA 深穴加工

本研究では、ボーリングバーを一様な対称はり、工具を質点として、図 3 のような片持ちはりでモデル化した。

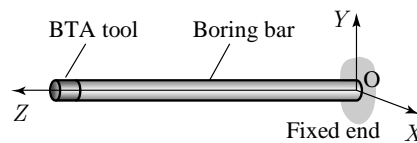


図 3 解析モデル

また、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。

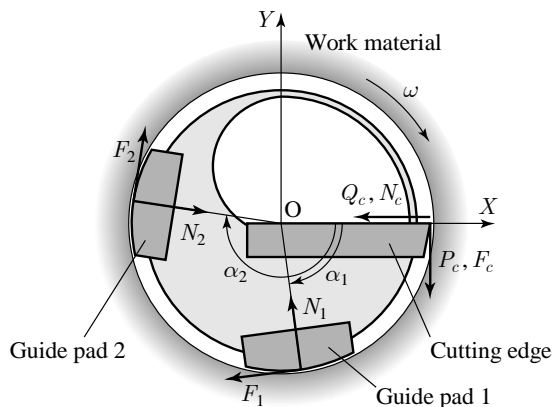


図 4 工具先端に作用する力

工具の切れ刃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。

解析は主に系の特性根を数値的に求めることによって行った。特性根の実部からは多角形化現象の安定性が分かり、特性根の実部からは発生する角形数が定まる。

(1) 標準的な工具の場合の解析結果

二つのガイドパッドが切れ刃から 90° と 180° の位置に配置された標準的な工具の場合について、数値計算により解析を行った。

図5に工具の回転速度に対する特性根実部の変化を示す。図の横軸には角形数と回転速度の積をとっており、対応する振動の振動数を表す。図の縦軸には特性根の実部をとっており、この値が正であれば多角形化が発生する。図には2~5角形の結果を線種を替えて示しており、3本の縦の点線は左からそれぞれ系の1~3次の固有振動数を表している。図から奇数角形のみが系の固有振動数の近傍で発生することが分かる。この結果は実際の現象とよく一致している。

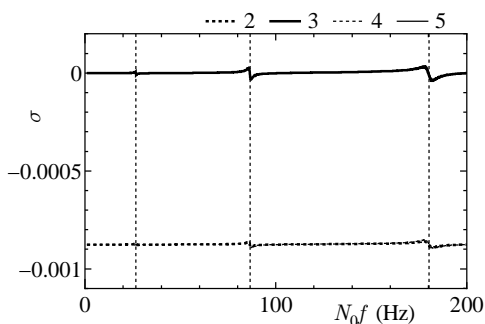


図5 一般的な工具での解析結果

また、図6は、横軸に工具の回転速度、縦軸に角形数を取り、多角形が発生する領域を太い実線で示したものである。図中の細かい曲線は、角形数と回転速度の積が系の1~5次の固有振動数と一致する条件を示している。図から、奇数角形が多角形化が、系の固有振動数の低振動数側で発生することが分かる。

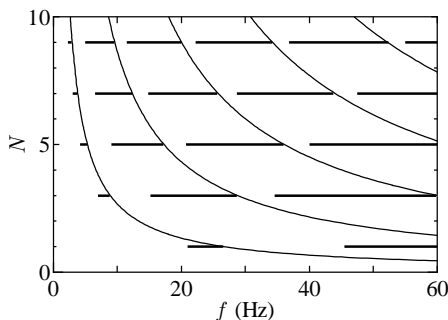


図6 不安定領域

(2) ガイドパッド位置の影響

ガイドパッドの位置を変化させて解析を行うことにより、多角形化に対するガイドパッド位置の影響を調べた。

図7は、ガイドパッド1の位置を $30^\circ \sim 150^\circ$ の範囲で変化させ、ガイドパッド2の位置を 180° に固定して、2~9角形の特性根実部の最大値を調べたものである。横軸にはガイドパッド1の位置を、縦軸には特性根実部の最大値をとっている。図から、ガイドパッド1の影響は比較的小さいことが分かる。

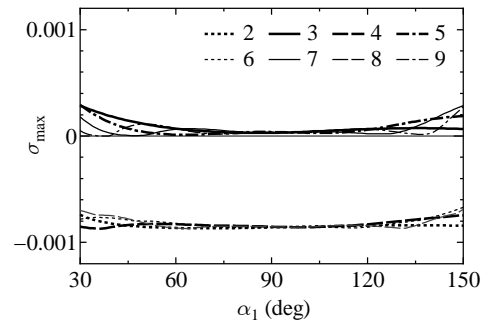


図7 ガイドパッド1の位置の影響

次に、ガイドパッド1の位置を 90° に固定し、ガイドパッド2の位置を $120^\circ \sim 240^\circ$ の範囲で変化させたときの特性根実部の最大値の変化を図8に示す。図から、ガイドパッド2の位置によって、発生する角形数が大きく変化することが分かる。

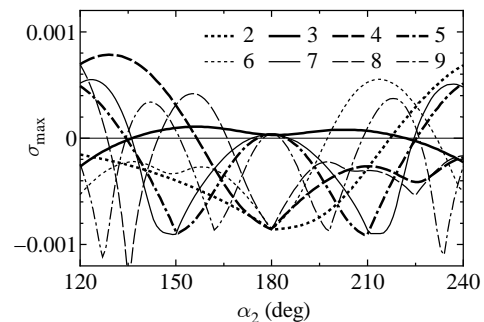


図8 ガイドパッド2の位置の影響

(3) 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を提案し、その効果について数値解析により検証した。

図9は、ガイドパッド1とガイドパッド2の位置をそれぞれ 90° と 180° に固定し、第3のガイドパッドを $180^\circ \sim 270^\circ$ の範囲に取り付けた場合の効果を解析したものである。横軸にはガイドパッド3の位置を、縦軸には2~9角形の特性根実部の最大値をとっている。図から、ガイドパッド3の位置が 189°

～212° の範囲にある場合、全ての角形数の特性根実部の最大値が負となり、多角形化を防止できることが示された。

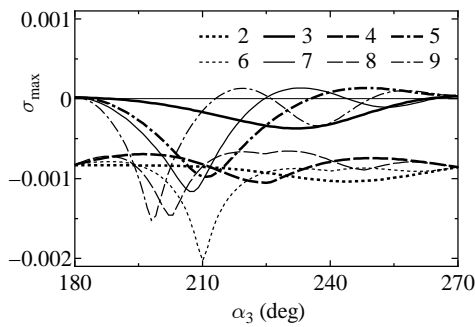


図9 ガイドパッド3による防止対策

次に、ガイドパッド1の位置を90°に固定し、ガイドパッド2とガイドパッド3を180°の位置から対称に配置する防止対策についても検討した。結果を図10に示す。横軸にはガイドパッド2とガイドパッド3の間の角度を、縦軸には2～9角形の特性根実部の最大値をとっている。図から、ガイドパッド2とガイドパッド3の間の角度を8°～39°の範囲にとると、全ての角形数の特性根実部の最大値が負となり、多角形化を防止できることが示された。

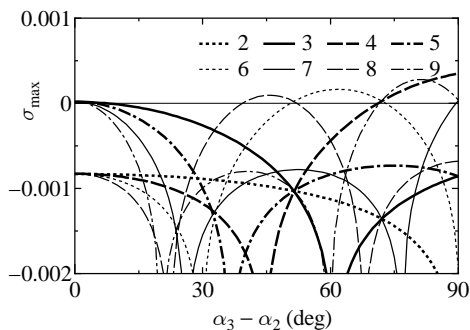


図10 ガイドパッド2,3による防止対策

(4) 最適なガイドパッド配置の検討

図5から、工具回転速度が小さいときの特性根実部は工具回転速度が変化するときの特性根実部の平均的な値に相当することが分かる。このことに着目し、準静的な解析により、ガイドパッドの位置と安定度について調べた。

図11にはガイドパッドが二つの場合の検討結果を示す。図の横軸にはガイドパッド1の位置を、縦軸にはガイドパッド2の位置をとり、濃淡によって2～9角形の準静的な特性根実部の最大値を示している。図から、特性根実部が小さい領域が存在するものの、切

削力の反力を受けるというガイドパッド本来の役割を考慮すると不適な位置であった。

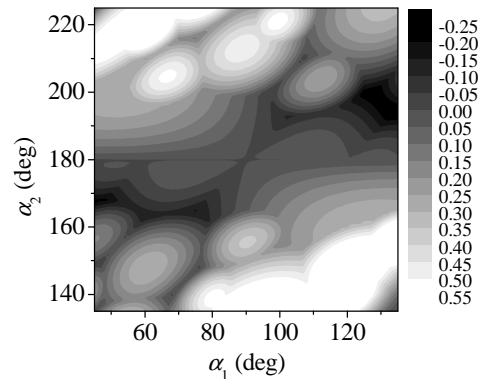


図11 ガイドパッド1,2の位置の影響

ガイドパッドが三つの場合について、ガイドパッド1を90°に固定し、ガイドパッド2とガイドパッド3の位置を変化させたときの解析結果を図12に示す。図の横軸にはガイドパッド2の位置を、縦軸にはガイドパッド3の位置をとり、濃淡によって2～9角形の準静的な特性根実部の最大値を示している。図から、ガイドパッドが二つの場合と比較して、全体的に安定度が高く、特性根実部が小さい領域が広く存在することが示された。

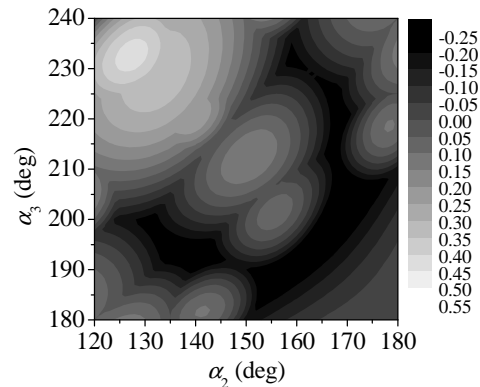


図12 ガイドパッド2,3の位置の影響

(5) より複雑な解析モデルの検討

以下のような解析モデルについても数値解析により検討した。

① 工具を剛体として考慮したモデル

BTA 工具を剛体としてモデル化し、工具に作用する力とモーメントを考慮した。解析結果は工具を質点としてモデル化した場合と概ね同じであったが、不安定領域と固有振動数との関係や角形数の整数値からのずれなど、若干異なる特徴があった。

② ガイドの周方向幅を考慮したモデル

ガイドパッドを微小な幅のガイドパッド

の集合体として考えることで、ガイドパッドの周方向幅を考慮した解析を行った。その結果、ガイドパッドの幅を広くすると平均的な安定度が向上すること、および安定度の向上は角形数が大きいパターンほど顕著であることが示された。

③ 軸力およびボーリングバー内を流れる切削油を考慮したモデル

ボーリングバーに作用する軸力および管内を流れる切削油を考慮した解析モデルを用いて、それらの影響について数値解析により検討した。軸力の増加および切削油流量の増加は、主としてボーリングバーの固有振動数を低下させる効果があり、多角形化現象の発生回転数や角形数に影響する。また、切削油の影響は軸力の影響と比較して小さいことが示された。

④ 工具が回転する場合の検討

工具とボーリングバーが回転する工具回転型について、解析モデルを構築し、数値解析により検討を行った。標準的な工具の場合、被削材回転型と同様に奇数角形の多角形化が発生する。また、工具回転型の場合、ボーリングバーには前向きと後向きのふれ回りが発生し、それぞれのモードで二つの固有振動数が現れるが、前向きと後向き両方の固有振動数で同様の多角形化現象が発生するのではなく、前向きの固有振動数で発生しやすい角形数と後向きの固有振動数で発生しやすい角形数に分類される。この原因は、第1ガイドパッドの影響で、角形数によって励起されるふれ回りの方向が変化するためであった。

(6) 実験による検証

少量の切削油によって切り屑を排出する簡易な機構を有する実験装置を検討したが、解析結果を検証できるような良好な切削状態を実現することができなかった。そこで、BTA 深穴加工業者の協力を得て、実機における加工時のボーリングバーの振動測定と加工穴の形状測定を行った。この実験においては5角形のライフリングマークが発生し、振動解析結果と穴形状の測定結果からは、概ね解析結果と一致する結果を得た。また、標準的な工具を用いた場合に5角形のライフリングマークが定常的に発生する加工条件において、ガイドパッドの追加配置による防止対策を施した工具ではライフリングマークが発生しないことが確認された。今後、さらに様々な条件で実機実験を行い、解析結果のより詳細な検証を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

① 松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊, 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, 日本機械学会論文集C編, 査読有, 76巻767号, 2010, 1684-1691.

② 松崎健一郎, 末岡淳男, 劉孝宏, 森田英俊, BTA 深穴加工におけるライフリングマーク発生現象に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集C編, 査読有, 75巻755号, 2009, 1918-1925.

〔学会発表〕(計3件)

① Kenichiro Matsuzaki, Study for Rifling Mark Generating Phenomena on BTA Deep Hole Drilling Process, 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 2009年11月24日, Christchurch, New Zealand.

② 松崎健一郎, 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に関する検討, 日本機械学会 D&D2009, 2009年8月4日, 北海道大学.

③ 徳久篤弘, パッドの分布接触を考慮したBTA 深穴加工におけるパターン形成現象の解明, 日本機械学会 D&D2008, 2008年9月3日, 慶應義塾大学.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 深穴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, 他3名

権利者: 九州大学, 国立高等専門学校機構

種類: 特許権

番号: 特願2008-334663

出願年月日: 平成20年12月26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)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

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

(2008→2009: 連携研究者)

宗和 伸行 (SOWA NOBUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 40304753