

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03949

研究課題名（和文）自励振動理論を基軸とした高精度ボーリング加工工具開発への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to develop high-precision boring tools based on self-excited vibration theory

研究代表者

劉 孝宏（Ryu, Takahiro）

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：60230877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：4, 6, 7および8枚刃リーマの加工穴の多角形化現象について、遺伝的アルゴリズム等を活用した理論解析を行うことにより、最も多角形化現象を抑制可能な不等分割刃リーマの角度配置を検討した。その結果、不等分割の効果により、不安定度を低下できること、6, 7, 8枚刃リーマでは、安定化できる角度配置が存在することがわかった。選定した角度配置の不等分割刃リーマと等分割刃リーマについて、加工実験を実施したところ、選定した不等分割刃リーマを用いた場合の真円度が、等分割刃と比較して著しく向上することがわかった。また、最適角度配置を求めるため、刃数に依存しない理論的基準を提案することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、リーマを主たるターゲットとしたボーリング加工における多角形化現象を完全に抑制可能な、切れ刃角度配置を求めること、および多角形化現象を完全に抑制可能な角度配置を、統一的に評価できる理論的基準値（QCR値）を決定し、実験的に有効性を検証することが目的である。不等分割刃リーマに対する多角形化現象を完全に抑制できる手法を提案することは極めて有用性が高い。また、対策を定量化できるQCR値は、リーマ形状や刃数によらず、不安定性を評価できる基準値であるため、不等分割刃リーマの開発における設計指針となる。

研究成果の概要（英文）：Theoretical analysis was performed using genetic algorithm to determine the angular arrangement of irregular-pitch reamer that can suppress the polygonal formation phenomenon of borehole with 4, 6, 7, and 8-flute reamers. As a result, it was found that the effect of optimized angular arrangement of cutting edges can reduce instability, and that there exists an angular arrangement that can stabilize polygonal deformation with 6, 7, and 8-flute reamers. Experiments were conducted using the irregular-pitch reamers with the optimized angular arrangements and regular-pitch reamers with even-pitch cutting edges. It was found that the roundness of the irregular-pitch reamer was significantly improved compared to that of the regular-pitch reamer. An evaluation criterion that is not dependent on the number of cutting edges was also proposed.

研究分野：機械力学

キーワード：自励振動 回転体の振動 多角形化現象 リーマ加工 不等分割刃

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車業界では、電動化の波が押し寄せる中、世界の中で確固たるリーダーシップを築くための競争が激化している。自動車の主要部品であるエンジン、トランスミッション等の駆動部品、特に、エンジン周辺のボーリング加工や、トランスミッションのボア部において、加工精度が燃費や基本性能に直結するため、極めて高い精度が要求される。そのような加工では、リーマ加工と同様の加工法を用いた専用工具が使用されている。自動車用駆動部品に限らず、ボーリング加工は、高精度が要求される様々な機械加工に使用されている。このような機械加工分野では、中国をはじめとするアジア諸国の低価格競争に打ち勝つ競争力のある高度な加工技術の確立が、新たな付加価値を備えることになる。高精度が要求されるボーリング加工では、加工時に加工面が周期的に波打つ多角化現象と呼ばれる自励振動が発生し、加工精度が著しく低下する現象が発生し、問題となっている。旋削、研削、穴あけ加工等の機械加工の分野では、このような現象はびりり現象と呼ばれ 1900 年代中盤から広く研究されている。これらの研究では、安定ポケットと呼ばれる回転数範囲で運転したり、安定限界となる加工条件を選択したりする手法が主流であり、抜本的な自励振動の解決には至っていない。ボーリング加工の一種であるリーマ工具では、通常等分割である切れ刃角度を不等分割にすることで、加工精度の向上を図る手法がとられている。しかしながら、市販の不等分割刃リーマの角度は、単に経験に基づいて配置されているにすぎず、期待される加工精度には至っていない。研究代表者らは、これまで BTA 深穴加工工具の多角化現象に対し、独自の自励振動理論を適用することにより、最適な位置にガイドパッドを追加した新たな工具を提案することで、多角化現象が発生しない工具を製品化することに成功した。本研究は、同様の自励振動理論をリーマ等のボーリング加工工具に適用することで、多角化現象を完全に抑制する新たなボーリング加工工具を開発する実用的な研究である。

### 2. 研究の目的

本研究は、リーマを主たるターゲットとしたボーリング加工における多角化現象を完全に抑制可能な、革新的切れ刃角度配置を求めることが第一の目的である。リーマの刃数や直径は多様であり、特に、刃数の多いリーマについては、刃の角度配置が無限に存在するため、固有の技術として確立するためには、統一した評価基準が必要となる。そこで、本研究では、多角化現象を完全に抑制可能な角度配置を、統一的に評価できる理論的基準値 (QCR 値と呼ぶ) を決定し、実験的に有効性を検証することが第二の目的である。研究代表者らは、市販の不等分割刃リーマに対する多角化現象について、時間遅れによる自励振動として解析を進めており(機論 2017)、この解析手法を応用して、多角化現象を抑制するリーマ切れ刃の最適角度配置を求める。

### 3. 研究の方法

リーマの刃数は、一般に使用されている 4, 6, 8 枚刃と刃数が奇数となる代表として 7 枚刃を選定した。まず、研究代表者らの理論解析モデル(機論, 2017)を応用して、理論解析を行った。各刃数のリーマについて、特性根を求め、その実部の大きさを評価を行う。最適角度配置は、遺伝的アルゴリズム(以後 GA と呼ぶ)を用いて選定するとともに、可能な範囲で全探索も実施した。等分割刃と選定した最適角度配置のリーマについて、複数の回転数や送りの条件の下、加工実験を行った。加工実験後、加工穴の真円度測定を実施し、理論解析結果と実験結果との整合を図った。また、工具の善し悪しを統一的に評価できる QCR 値については、8 枚刃について、検証を行った。

また、今後の展望として、エンドミル加工における理論解析を開始した。

### 4. 研究成果

#### (1) 理論解析

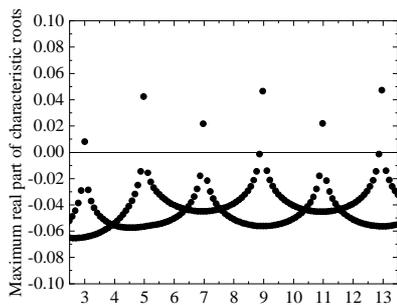
理論解析モデル(機論, 2017)を応用し、4, 6, 7 および 8 枚刃リーマについて、不等分割刃リーマの最適角度配置を求めた。数値計算の範囲は、(刃数 $\times$ 2+1)角形以下で、回転数 100 Hz 以下とした。各特性根の軌跡における実部最大値を計算し、それらの中で最も大きな実部の値 $\sigma_{\max}$ を工具の評価基準とした。刃数ごとに選定したリーマ角度配置および実部最大値 $\sigma_{\max}$ の値を表 1 に示す。4 枚刃については、他の角度配置における実験で、10 角形以上の多角化が発生したことがあったため、13 角形以下の範囲で求めた $\sigma_{\max}$ を示している。最適角度配置の選定は、GA を使用した。

図 1 は、各工具における特性根の軌跡における実部最大値と特性根の虚部  $N$  の関係を示す。以後、4 枚刃リーマについては、13 角形までの範囲で結果を示す。等分割刃リーマでは、実部が正の特性根が存在しており、刃数の整数倍 $\pm 1$ 角形の多角化現象が発生する可能性が高いことがわかる。4 枚刃で最適化を図った図 1(b)では、9 角形以下での最適化を図ったため、10, 12 角形の不安定度が大きくなっているが、図 1(a)の等分割刃の結果と比較すると、不等分割刃の効果で不安定度がかなり低減されていることがわかる。13 角形までの範囲で GA により最適角度配置を求めた結果、 $\sigma_{\max}$ の値を $9.79 \times 10^{-3}$ まで低減できることもわかった。6, 7 および 8 枚刃で最適化を図った図 1(d), (f)および(h)では、 $\sigma_{\max}$ が負の値であり、適切に角度配置をすることで、

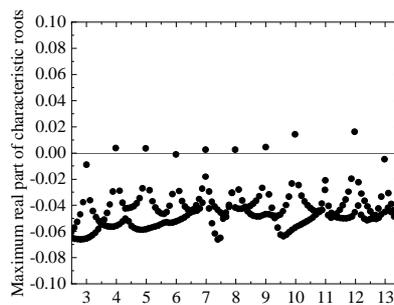
系を安定化できることおよび刃数が多くなるほど安定化しやすいことがわかった。

表 1 Angular arrangement of cutting edges ( $n=4$ )

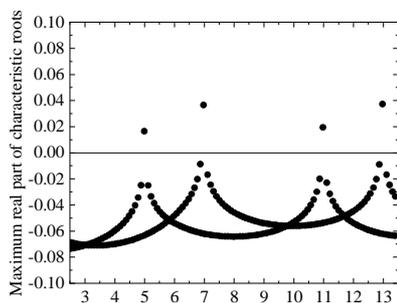
Number of cutting edges	Tool	Angular arrangement deg	$\sigma_{\max}$
4	Tool 4A	90, 90, 90, 90	$4.73 \times 10^{-2}$
	Tool 4B	44, 86, 81, 149	$1.64 \times 10^{-2}$
6	Tool 6A	60, 60, 60, 60, 60, 60	$3.74 \times 10^{-2}$
	Tool 6B	66, 36, 78, 87, 44, 49	$-2.32 \times 10^{-4}$
7	Tool 7A	51, 52, 51, 52, 51, 52, 51	$3.41 \times 10^{-2}$
	Tool 7B	43, 90, 47, 30, 48, 72, 30	$-8.68 \times 10^{-3}$
8	Tool 8A	45, 45, 45, 45, 45, 45, 45, 45	$3.19 \times 10^{-2}$
	Tool 8B	30, 57, 46, 47, 37, 64, 48, 31	$-9.42 \times 10^{-3}$



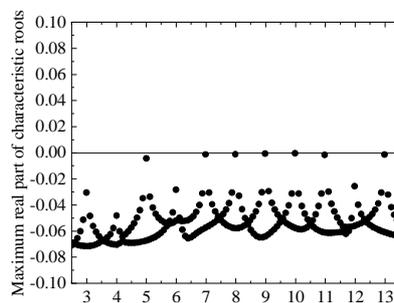
(a) Tool 4A



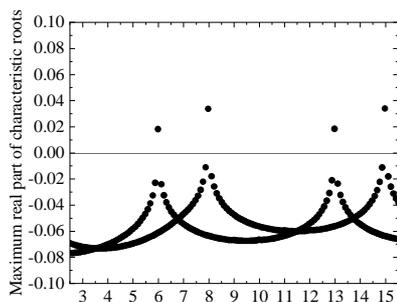
(b) Tool 4B



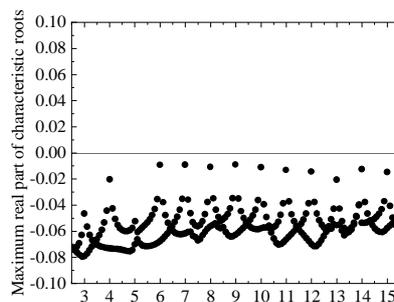
(c) Tool 6A



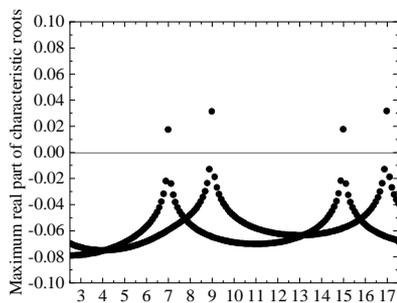
(d) Tool 6B



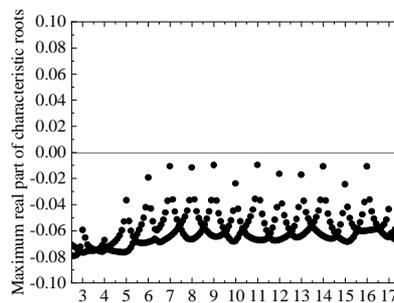
(e) Tool 7A



(f) Tool 7B



(g) Tool 8A



(h) Tool 8B

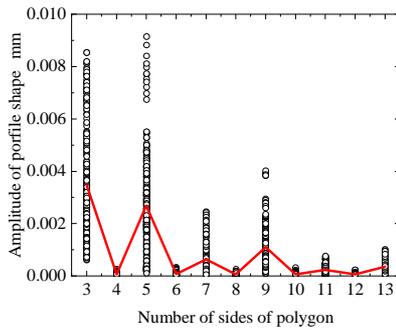
図 1 Relationship between maximum real part and imaginary part of characteristic root

## (2) 実験結果

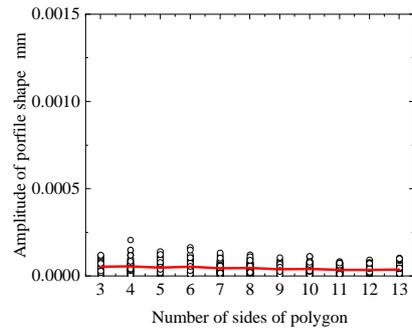
マシニングセンターを使用して表 1 に示した工具について実験を行った。表 2 に実験条件を示す。加工後の穴形状について、真円度測定を行った。加工前半部分は、穴の開きが見られるこ

表 2 Experimental conditions

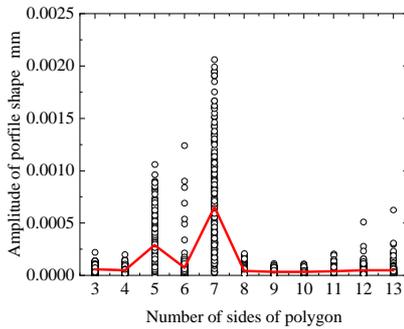
Number of cutting edges		4	6	7	8
Spindle speed	rpm	3200 ~ 9600	2000 ~ 6000	1333 ~ 4000	1333 ~ 4000
Feed per revolution	mm/rev	0.067, 0.2, 0.4	0.1, 0.3, 0.6	0.133, 0.4	0.133, 0.4, 0.8
Hole length	mm	24	24	36	36
Hole diameter	mm	5	8	12	12
Workpiece material		FC250			
Cutting oil		FGE207			



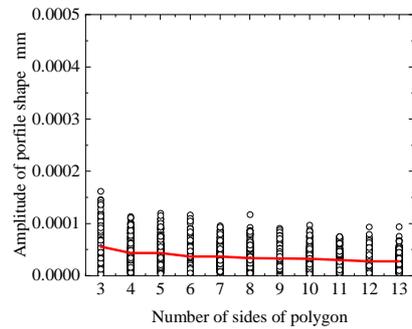
(a) Tool 4A



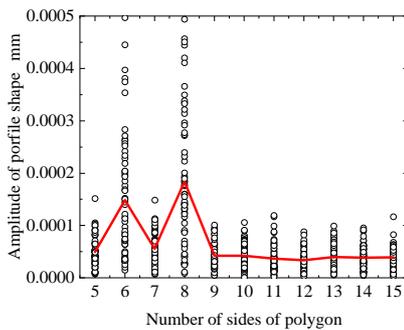
(b) Tool 4B



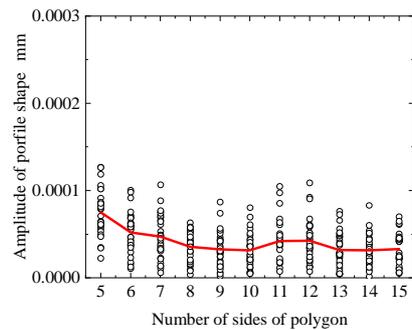
(c) Tool 6A



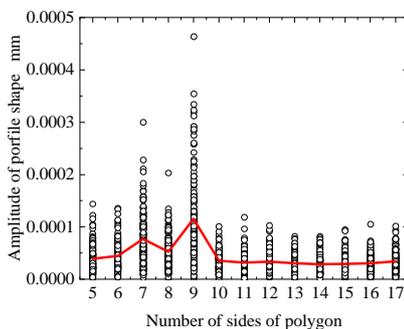
(d) Tool 6B



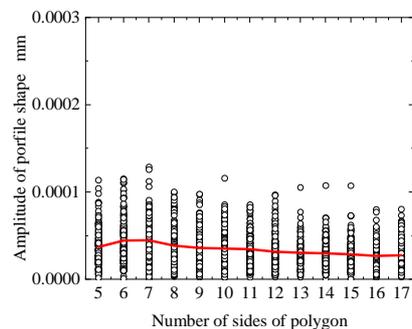
(e) Tool 7A



(f) Tool 7B



(g) Tool 8A



(h) Tool 8B

図 2 Amplitude of each number of polygon sides

とがあったため、真円度の評価は、加工の後半部分で実施した。各真円度の計測結果を周波数分析することで、加工穴の各角形数成分の振幅を算出した。図2は、加工穴の角形数とその振幅の関係を示す。赤線は各角形数の振幅の平均値である。図2(a), (c), (e)および(g)の等分割刃リーマを使用した場合であり、特に刃数 $\pm 1$ 角形の振幅が大きくなっていることがわかる。また、図1中の不安定な角形数のうち、角形数が大きいものは、振幅が小さい傾向がある。等分割刃リーマと最適化された不等分割刃リーマを使用した図2(b), (d), (f)および(h)の結果とを比較すると、振幅が全体的に低減されていることがわかる。なお、割愛しているが、最適化されていない角度配置の不等分割刃リーマを用いた実験も行った結果、最適角度配置リーマより振幅が大きくなる傾向があることが確認できた。これらの結果は、理論解析結果と定性的に一致する。図2(b)に示す4枚刃リーマの理論解析では、9角形以下で最適化した角度配置を用いたが、特に際立った振幅成長が見られず、不等分割刃の効果を確認できた。4枚刃リーマについては、今後、13角形以下で最適化したリーマを用いて実験を行いたい。

### (3) 統一的に評価できる理論的基準値 (QCR 値)

図1に示すように、特性根の実部最大値 $\sigma_{\max}$ は、刃数により異なるため、それらを統一的に評価できるQCR値の設定が求められる。また、特性根の計算は、特に刃数が多くなると膨大な計算量を必要とするため、計算の高速化が望まれる。そこで、回転数全体に渡り特性根を計算することなく、回転数が0近傍の特性根を準特性根として定義し、準特性根の最大値を代表値として評価する。不等分割刃リーマおよび等分割刃リーマの準特性根の最大値をそれぞれ $\sigma_{\max}^i$  および  $\sigma_{\max}^r$  とおくと、QCR値 $\sigma_q$ は、次式のように定義される。

$$\sigma_q = \sigma_{\max}^i - \sigma_{\max}^r$$

等分割刃リーマの準特性根の最大値との差を取ることで、刃数によらない統一的な基準値を得ることができる。

図3は、代表として8枚刃リーマにおいて、あらゆる不等分割パターンにおける特性根の実部最大値 $\sigma_{\max}$ およびQCR値を計算した結果である。図から相関係数は0.917であり、両者には非常に強い相関があることがわかる。等分割刃リーマであるTool 8Aは、 $\sigma_{\max}$ およびQCR値ともに最大であり、最も多角形化現象が発生しやすい角度配置ということがわかる。一方、最適角度配置であるTool 8Bは左下に位置するため、いずれの評価基準においても良い選定を行っていることがわかる。 $\sigma_q$ について、実験との整合を図った上、しきい値となる $\sigma_q$ を設定し、しきい値以下となるような切れ刃の角度配置を選定することで、良好な真円度を得ることが可能となる。

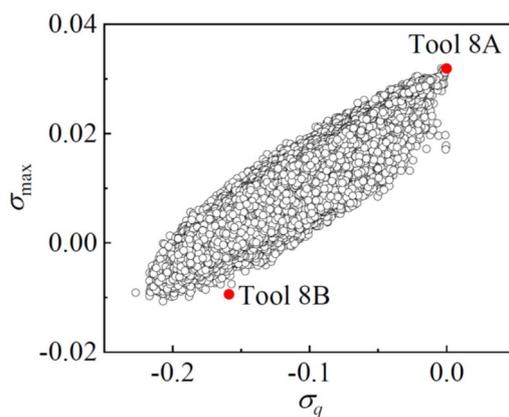


図3 Relationship between  $\sigma_q$  and  $\sigma_{\max}$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ryu T, Nakae T, Matsuzaki K, Matsumoto Y, Adachi S, Kitamura J, Tsukamoto K, Hirata N	4. 巻 1
2. 論文標題 Countermeasures against polygonal deformation of borehole in reaming process and its detection method for 7-flute reamer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of ICSV30	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryu T, Nakae T, Matsuzaki K, Matsumoto Y, Tsukamoto K, Hirata N	4. 巻 2643
2. 論文標題 Countermeasures against polygonal deformation of borehole in reaming process	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012002 ~ 012002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2643/1/012002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 松崎 健一郎, 劉 孝宏, 中江 貴志, 塚本 恵三, 鮫島 隆汰	4. 巻 90
2. 論文標題 エンドミル加工における工具支持剛性の異方性の自励びびりへの影響	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.24-00019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本 雄大
2. 発表標題 リーマ加工における加工穴多角形化現象の防止対策と検出方法に関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鯨島 隆汰
2. 発表標題 非等方的に支持されたエンドミルの剛性の主軸が自励びびりの安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丁 浩
2. 発表標題 スパイラルマークを抑制するリーマ工具に関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎 圭佑
2. 発表標題 エンドミル加工において工具の非等方的支持が自励びびりに及ぼす影響
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下 夏暉
2. 発表標題 不等間隔刃を用いたリーマ加工における多角形穴抑制対策
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐畑 友輝
2. 発表標題 エンドミル加工における自励びびりの安定性解析手法に関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松崎 健一郎  (Matsuzaki Kenichiro)  (80264068)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授   (17701)	
研究分担者	中江 貴志  (Nakae Takashi)  (80579730)	大分大学・理工学部・准教授   (17501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------