

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業（予備費）

「原子力など重電機器分野の深穴加工部品に用いる自励振動理論と
応力可変PVD技術による高精度・長寿命BTA工具の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年9月

委託者 九州経済産業局

委託先 財団法人九州産業技術センター

目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-2 研究体制	4
1-2-1 研究組織（全体）	4
1-2-2 管理体制	4
1-2-3 管理員および研究員	6
1-2-4 経理担当者および業務管理者	7
1-2-5 他からの指導・協力者および指導・協力事項	7
1-3 研究成果概要	8
1-3-1 パターン形成現象解析モデルの高精度化および刃形状・配置の最適化	8
1-3-2 三次元振動測定および加工穴の高精度三次元形状測定	8
1-3-3 ドリルヘッドの製作と高精度研削技術の確立	8
1-3-4 超厚膜PVD成膜技術の確立と工具寿命測定	9
1-4 本研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論（1）パターン形成現象解析モデルの高精度化および刃形状・配置の最適化	10
2-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値	10
2-2 研究開発の方法【1-1】【1-2】	10
2-2-1 時間遅れによる解析モデル	10
2-3 研究開発の結果および成果【1-1】【1-2】	11
2-3-1 中間支持部を考慮したボーリングバーの固有振動数および固有モード	11
2-3-2 ガイドパッドの最適配置に関する検討	12
第3章 本論（2）三次元振動測定および加工穴の高精度三次元形状測定	13
3-1 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置付け	13
3-2 研究開発の高度化目標および技術的目標値	13
3-3 研究開発の方法【2-1】【2-2】	14
3-3-1 BTA加工機および加工試験条件	14
3-4 研究開発の結果および成果【2-1】【2-2】	15
3-4-1 基準条件における加工試験	15
3-4-2 3Dスキャニングレーザードップラー振動計による加工時の振動解析	16
3-4-3 真円度測定結果および新型刃形状工具のスパイラルマーク抑制効果	17
第4章 本論（3）ドリルヘッドの製作と高精度研削技術の確立	18
4-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値	18
4-2 研究開発の方法【3-1】【3-2】	19
4-2-1 新型刃形状および3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発	19
4-2-2 新型刃形状ロウ付けドリルヘッドの試作および加工試験	19
4-2-3 ガイドパッドの曲率変化形状研削技術の確立	20
4-3 研究開発の結果および成果【3-1】【3-2】	20
4-3-1 新型刃形状および3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発	20

4-3-2 新型刃形状ロウ付けドリルヘッドの問題点	20
4-3-3 ガイドパッドの曲率変化形状研削技術の確立	20
第5章 本論（4）超厚膜PVD成膜技術の確立と工具寿命測定	21
5-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値	21
5-2 研究開発の方法【4-1】【4-2】【4-3】	21
5-2-1 プラズマ中のイオン分布および中性粒子の観測	21
5-2-2 HIPIMSによるTiAlNおよびCrAlSi系皮膜成膜条件の最適化	22
5-2-3 SFC皮膜ドリルヘッドの寿命評価	22
5-2-4 超厚膜PVD処理自公転治具システムの設計および製作	23
5-3 研究開発の結果および成果【4-1】【4-2】【4-3】	23
5-3-1 放電開始からのプラズマ中イオン分布の経過時間依存性および中性粒子の観測	23
5-3-2 HIPIMSによるTiAlNおよびCrAlSi系皮膜成膜条件の最適化	24
5-3-3 SFC皮膜ドリルヘッドの寿命評価	24
5-3-4 超厚膜PVD処理自公転治具システムの性能評価.....	25
第6章 全体総括	26
参考文献・引用文献	26
添付資料1	I
専門用語等の解説	I

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

B T A 工具による深穴加工（図 1）は、加圧水型炉（PWR、図 2a）の蒸気発生器（図 2a 赤枠部）に代表される原子力発電プラント熱交換器管板（図 2b 赤枠部）の管穴（図 2c）加工において、高速かつ高精度加工を両立する最良の方法である。

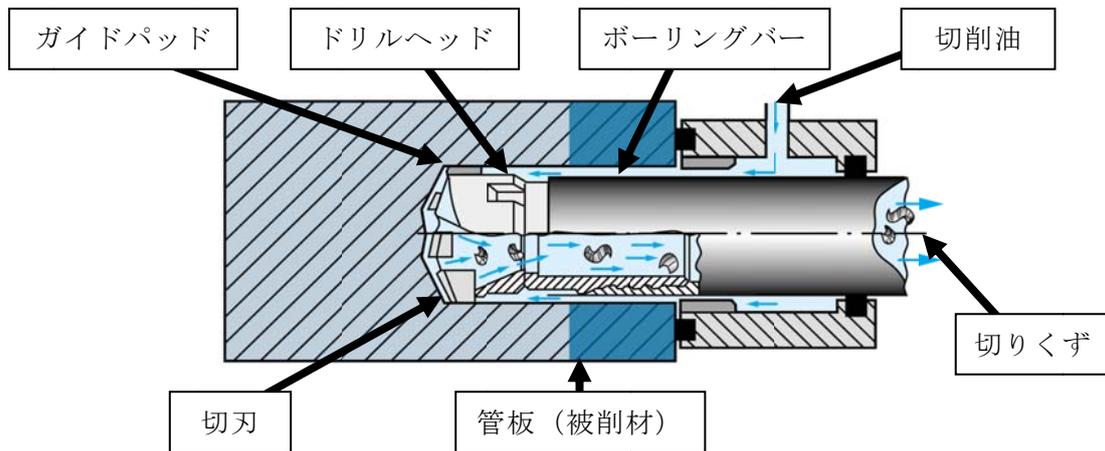


図 1 B T A 加工システム概略（STS 方式）
（出典：SANDVIK 社カタログ、各名称は加筆）

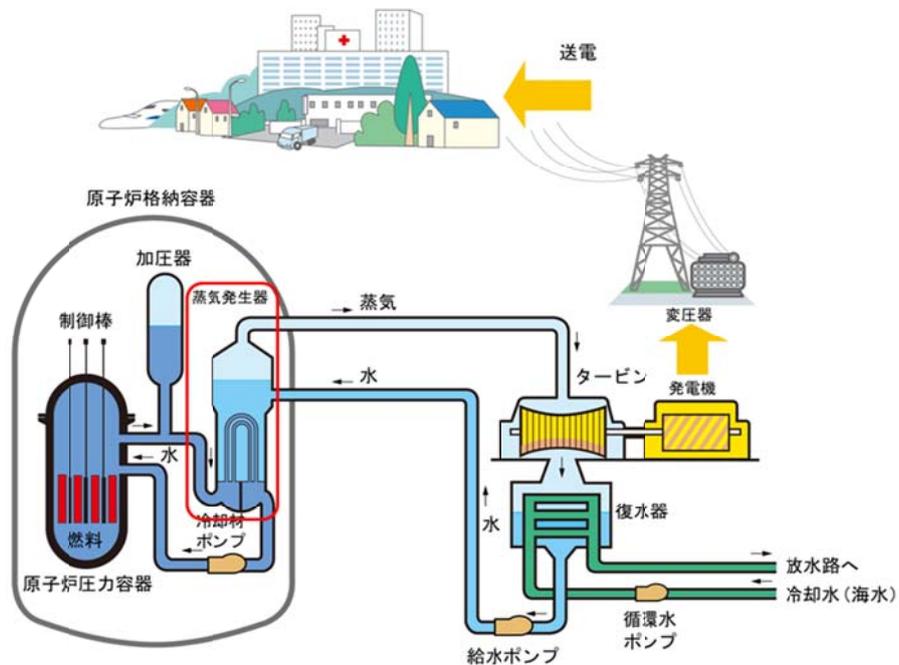


図 2a 加圧水型炉（PWR）原子力発電のしくみ
（出典：資源エネルギー庁「原子力 2009」、赤枠部は加筆）

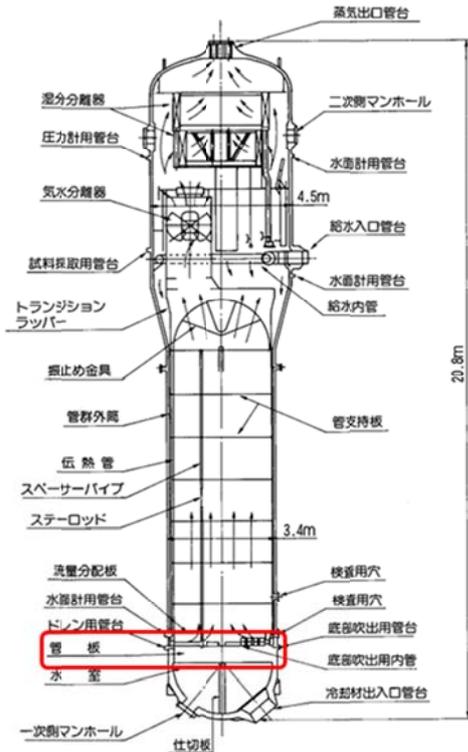


図 2b 蒸気発生器の構造
 (出典：原子力安全研究協会「軽水炉発電所のあらし」1992、赤枠部は加筆)

図 2c 管板の深穴加工
 (加工試験用サンプル)

このような長所を持った B T A 加工の用途は、原子力発電プラントに限らず、火力発電プラントの復水器 (図 2d 赤枠部) や化学プラント用熱交換器など多岐にわたっている。

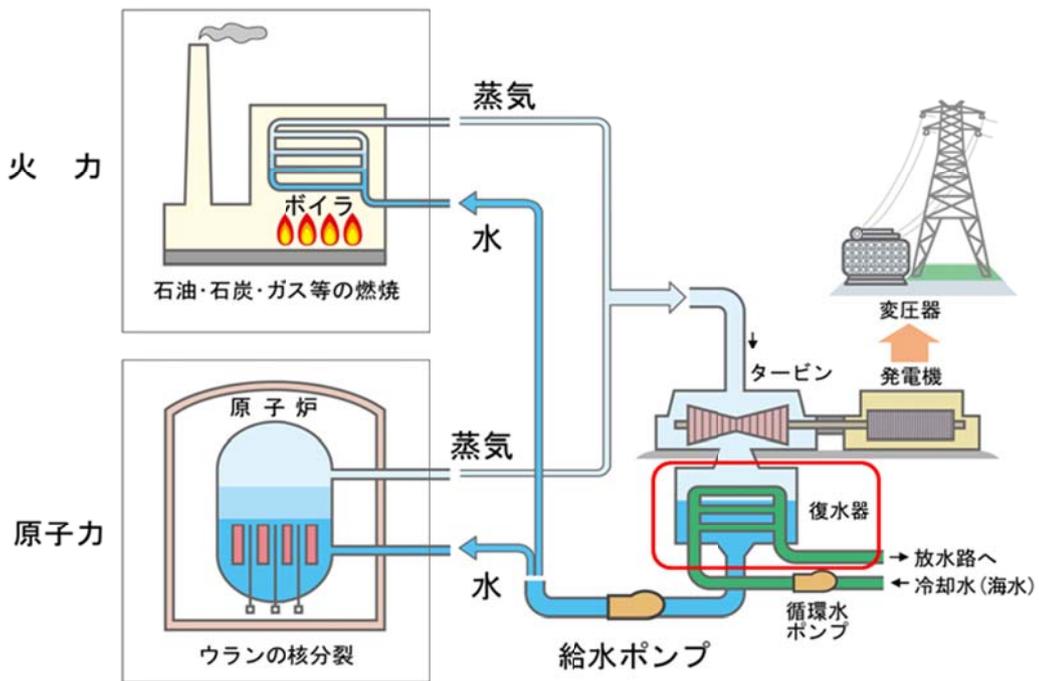
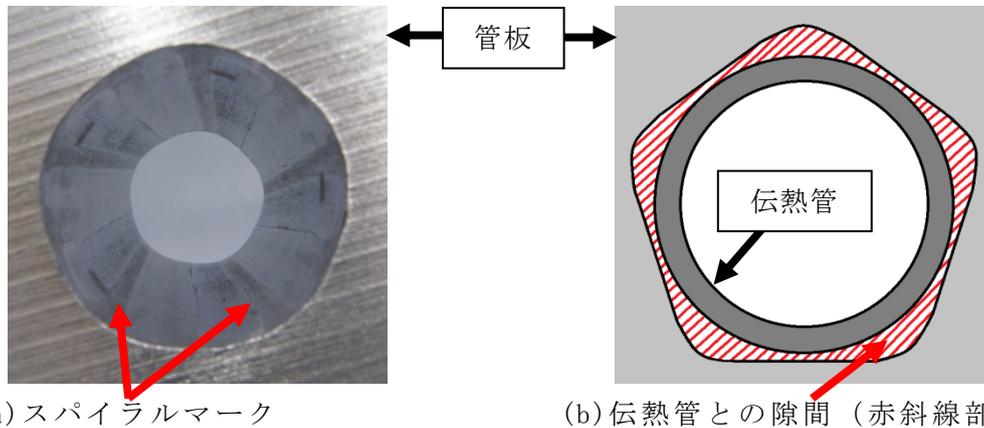


図 2d 火力・原子力発電プラントの復水器
 (出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2009」、赤枠部は加筆)

一般に、穴加工には、スパイラルマークと呼ばれるパターン形成現象による加工穴の面粗度や真円度が悪化する問題（図 3a）が存在する。これは、B T A加工においても、品質管理上の重要な課題である。

熱交換器の製造工程では、スパイラルマークが生じた加工穴と伝熱管との隙間の不整（図 3b）が、拡管の際、局所的に不均一な残留応力を残す懸念がある。その程度によっては、加工穴の修正や施栓などの、追加工程を検討しなければならない。



(a) スパイラルマーク (b) 伝熱管との隙間（赤斜線部）
図 3 管板の製造工程（伝熱管挿入時）におけるスパイラルマークの問題点

B T A加工は、熱交換器以外にも、発電機のタービンシャフト、ディーゼルエンジンのクランクシャフト、航空機のエンジンシャフトやランディングギアおよび油井管など様々な分野の重要部品に使われている。これらの分野では、近年、チタン合金、ニッケル基合金などに代表される難削材の採用が進み、加工の高速化と工具の長寿命化の必要性が顕在化している。

そこで、重電機器分野、航空宇宙分野および鉄鋼分野など多くの川下製造業者が抱える、

<高精度化>

- スパイラルマークによる加工穴精度不良
- 伝熱管など挿入部材との隙間の不整
- 手作業による加工穴の修正の負荷大

<高効率化>

- 切刃およびガイドパッド部に施されたPVD皮膜の内部応力大、厚膜化が困難
- 刃先の摩耗拡大による穴曲がりなどを配慮した、加工条件の抑制
- 工具寿命と難削材加工の限界

などの課題を解決することを、本研究開発の目標とした。

本研究開発では、スパイラルマークを抑制するために、九州大学松崎准教授らの発明による、時間遅れ系の自励振動理論に基づくパターン形成現象の解析予測から導かれた独創的な刃先形状およびその配置^{[1][2]}と、アヤボが開発した曲率変化ガイドパッド^[3]を有機的に融合した独創的な刃形状のB T A工具を開発することにより、深穴加工の高精度化を図った。

また、東北大学と共同研究を進めるPVD蒸発源のプラズマ解析技術を活用し、B T A工具の長寿命化、加工条件の高速化および難削材加工対応が可能な超厚膜PVD耐摩耗皮膜を開発することにより、深穴加工の高効率化を図った。

さらに、本研究開発の成果の国際的な知財戦略を図ることで、次世代B T A工具の国際基準を確立するとともに、国内外の市場制覇を目指した。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織（全体）

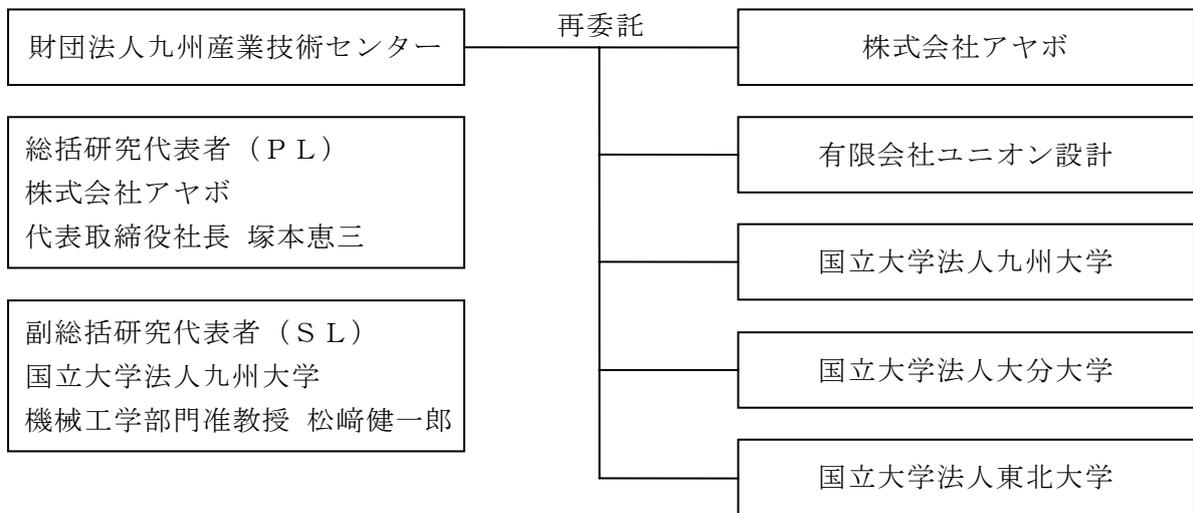


図4 研究組織（全体）

1-2-2 管理体制

① 事業管理者

財団法人九州産業技術センター

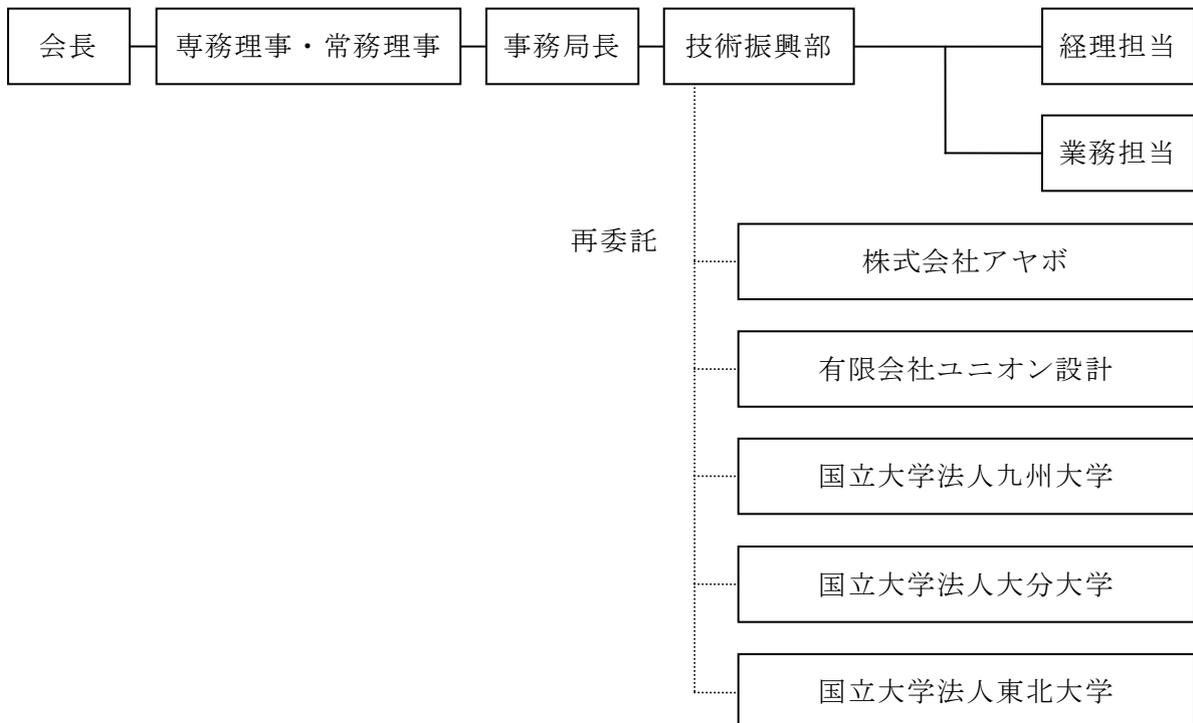


図5 管理体制（事業管理者）

② 再委託先

株式会社アヤボ



図 6 管理体制（株式会社アヤボ）

有限会社ユニオン設計



図 7 管理体制（有限会社ユニオン設計）

国立大学法人九州大学

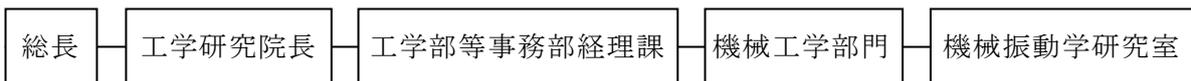


図 8 管理体制（国立大学法人九州大学）

国立大学法人大分大学

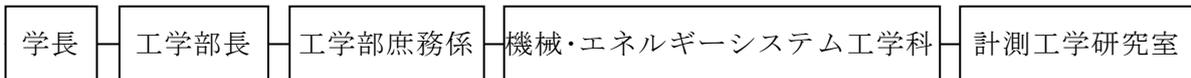


図 9 管理体制（国立大学法人大分大学）

国立大学法人東北大学

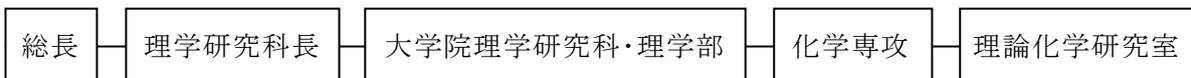


図 10 管理体制（国立大学法人東北大学）

1-2-3 管理員および研究員

① 総括研究代表者（P L）

氏名	所属・役職
塚本 恵三	株式会社アヤボ・代表取締役社長兼A T G マネージャー

②副総括研究代表者（S L）

氏名	所属・役職
松崎 健一郎	国立大学法人九州大学機械工学部門・准教授

③ 事業管理者

財団法人九州産業技術センター

氏名	所属・役職
二階堂 正憲	技術振興部・部長
大久保 寿	技術振興部・部長
中原 洋一	技術振興部・部長

④ 再委託先

株式会社アヤボ

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
塚本 恵三	代表取締役社長 A T G ・ マネージャー	【2-1】【2-2】【3-1】【3-2】 【4-1】【4-2】【4-3】
麓 稔	センタン研・所長	【2-2】
藤井 勝志	センタン研・主任研究員	【2-1】【2-2】【3-2】【4-3】
山本 宏晃	A T G ・ リーダー センタン研・研究員	【2-2】【3-1】【3-2】【4-1】 【4-2】
石原 太樹	A T G ・ 研究員	【4-1】【4-2】【4-3】

有限会社ユニオン設計

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
弓削 和義	代表取締役社長	【3-1】
小山 敬寛	工場長	【3-1】【4-1】
平川 亨	研究員	【3-1】【4-1】
松井 力矢	研究員	【3-1】【4-1】

国立大学法人九州大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松崎 健一郎	大学院工学研究院機械工学部門・准教授	【1-1】【1-2】【2-1】【2-2】

国立大学法人大分大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
劉 孝宏	工学部機械・エネルギーシステム工学科・教授	【1-1】【1-2】【2-1】【2-2】

国立大学法人東北大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
美齊津 文典	大学院理学研究科・教授	【4-1】【4-2】
小安 喜一郎	大学院理学研究科・助教	【4-1】【4-2】

1-2-4 経理担当者および業務管理者

① 事業管理者

財団法人九州産業技術センター

(経理担当者)	技術振興部・次長	濱田 和彦
(業務管理者)	技術振興部・部長	大久保 寿
	技術振興部・部長	中原 洋一

② 再委託先

株式会社アヤボ

(経理担当者)	MMS・マネージャー	塚本 美津子
(業務管理者)	センタン研・主任研究員	藤井 勝志

有限会社ユニオン設計

(経理担当者)	代表取締役社長	弓削 和義
(業務管理者)	工場長	小山 敬寛

国立大学法人九州大学

(経理担当者)	工学部等事務部経理課経理係・係長	安東 裕之
(業務管理者)	大学院工学研究院機械工学部門・准教授	松崎 健一郎

国立大学法人大分大学

(経理担当者)	工学部総務係・総務係長	酒井 智子
(業務管理者)	工学部長	井上 正文

国立大学法人東北大学

(経理担当者)	大学院理学研究科・理学部事務部経理課・経理係長	鈴木 秀輝
(業務管理者)	理学研究科長	花輪 公雄

1-2-5 他からの指導・協力者および指導・協力事項

① 研究推進委員会委員

外部推進委員

氏名	所属・役職	備考
廣末 英晴	国立大学法人大分大学・客員教授	アドバイザー
若山 宏明	ミューアイ技研・代表	アドバイザー

② 研究小委員会委員

外部推進委員

氏名	所属・役職	備考
廣末 英晴	国立大学法人大分大学・客員教授	アドバイザー
若山 宏明	ミューアイ技研・代表	アドバイザー

1-3 研究成果概要

1-3-1 パターン形成現象解析モデルの高精度化および刃形状・配置の最適化

① 中間支持部を考慮したボーリングバーの固有振動数および固有モード

加工試験に使用したワーク回転型B T A加工機のボーリングバー支持構造を、理論解析モデルに組み込んだ。その結果、固有振動数および固有モードが、穴深さによって複雑に変化することが分かった。

② ガイドパッドの最適配置

ガイドパッド位置による準静的な特性根実部の変化を調べることにより、ガイドパッドの最適配置を検討した。系の固有振動数・固有モードなどの振動特性や運転の回転速度などを考慮して、発生する可能性がある角形数を求め、それらの角形数に対して特性根実部が全体的に小さくなるような位置から、ガイドパッドの最適配置を導出可能なことを確認した。

1-3-2 三次元振動測定および加工穴の高精度三次元形状測定

① 基準条件における、レーザー変位計による振動解析加工試験

回転数と角形数5をかけた値が、ボーリングバーの固有振動数近くになるように回転数を設定した基準条件では、回転信号とボーリングバーの位相差を見ることにより、スパイラルマークが安定的に成長しているかどうかを判断できることを明らかにした。

② ドリルヘッド刃先部における振動測定

ドリルヘッド刃先部の振動測定を、3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドを用いて、レーザー変位計によるボーリングバーの測定と同時に行った。ドリルヘッド刃先部の挙動の検出に成功し、その振幅が非常に大きいことが分かった。

③ 3Dスキャニング振動測定システムによる振動モード測定

3Dスキャニング振動測定システムと既存の測定系の融合に成功し、ボーリングバーの振動モードの測定を、想定していたよりも少ない検出ポイント数で観測することに成功した。

④ 真円度測定結果および新型刃形状工具のスパイラルマーク抑制効果

高精度深穴真円度測定機により、被削材の真円度測定を行ったところ、振幅成長曲線とスパイラルマークの成長が良く一致した。基準条件における新型刃形状工具の加工試験では、振動解析および真円度測定のどちらにも、目立ったスパイラルマークは出現せず、その卓越した性能を再確認することができた。真円度は6.3%まで抑えられ、技術的目標値を大幅に超えることができた。

1-3-3 ドリルヘッドの製作と高精度研削技術の確立

① 新型刃形状および3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発

新型刃形状刃先交換式ドリルヘッドを設計、製作し、加工試験において、驚異的なスパイラルマーク抑止効果を確認した。また、様々な改良を重ね、ドリルヘッド刃先部の挙動検出を可能とする、2種類の3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発に成功した。

② 新型刃形状ロウ付けドリルヘッドの問題点

従来型刃形状と新型刃形状3種^[4]の間に、スパイラルマーク発生と成長について、有意な差を見出すことができなかった。検討した対応策を、補完研究により評価する。

③ ガイドパッドの曲率変化形状研削技術の確立

砥石レイアウトを設計し、3Dシミュレーションによる加工プログラムの作成に着手した。試加工では、新たに設計、製作した内張りコレット式ホルダの剛性が不足し、研削面の精度を得ることができなかった。この研削加工法の開発は、補完研究により継続する。

1-3-4 超厚膜PVD成膜技術の確立と工具寿命測定

① パルス放電開始からのプラズマ中イオン分布の経過時間依存性および中性粒子の観測

HIPIMS放電パルスの時間分解質量分析法を確立し、パルス放電開始からのプラズマ中イオン分布の経過時間依存性を明らかにした。光イオン化機構を設計、開発し、HIPIMS放電パルスから発生する中性粒子の光イオン化実験を行い、信号の観測に成功した。

② HIPIMSによるTiAlNおよびCrAlSi系皮膜成膜条件の最適化

HIPIMSパルス条件を見直したところ、皮膜硬度が20%向上した。耐摩耗加工試験も良好であった。また、TiAlNおよびCrAlSi系皮膜について、超厚膜成膜条件の検討と予備試験を行った。どちらも、密着度が多少不足したが、ほぼ10 μ mの超厚膜の成膜に成功した。

③ SFC皮膜ドリルヘッドの寿命評価

ロウ付けドリルヘッドに、SFCによる超厚膜TiAlN皮膜を施し、ワーク回転加工試験を行ったが、工具寿命は従来品に及ばなかった。皮膜硬度が6%ほど低いことが原因ではないかと推定した。

④ 超厚膜PVD処理自公転治具システムの性能評価

新たに超厚膜PVD処理自公転治具システムを設計開発し、膜厚分布試験を行った。従来の治具システムより、成膜速度は15.7%上昇し、外周刃前逃げ面の膜厚は10.7%向上した。1バッチの搭載量も約80%増えているので、処理量は従来の約2倍に達する。驚異的なコスト削減が可能になった。

1-4 本研究開発の連絡窓口

①総括研究代表者（PL）

株式会社アヤボ 代表取締役社長兼ATGマネージャー 塚本 恵三
〒446-0045 愛知県安城市横山町赤子1番地71
TEL: 0566-71-1060 FAX: 0566-71-1062 E-mail: keizo@ayabo.com

②事業管理者

財団法人九州産業技術センター 技術振興部部長 中原 洋一
〒812-0013 福岡市博多区博多駅東二丁目13番24号
TEL: 092-411-7394 FAX: 092-472-6688 E-mail: nakahara@kitec.or.jp

第2章 本論 (1) パターン形成現象解析モデルの高精度化および刃形状・配置の最適化

B T A加工における加工穴のスパイラルマークの発生メカニズムは、時間遅れによる自励振動によるパターン形成現象と考えられる。本テーマでは、実機を用いた加工試験結果と解析結果を比較することによって、解析モデルの精度向上を図り、実際に発生する現象をより正確に説明し、また、より正確に発生現象を予測できるモデルの確立を目指した。また、高精度化した時間遅れモデルを用いて、切れ刃およびガイドパッドの最適配置や最適形状について検討した。

2-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値

S G管板の管穴加工では、スパイラルマークの発生による加工不良率の削減が限界に達している。そこで、管穴加工の高精度化により加工不良率を激減させることを目的とし、スパイラルマークの発生と成長を抑える、自励振動理論に基づく新しい刃形状を採用したB T A工具を開発する。

S G管板管穴加工用ロウ付けドリルヘッド（加工径 19.27mm）の加工精度

従来の技術： 真円度平均 0.02mm 前後（判定基準値 0.02 mm の加工不良率 0.5%）
目標値： 真円度平均 0.005 mm 以下（判定基準値 0.02 mm の加工不良率 0.02%）

2-2 研究開発の方法【1-1】【1-2】

2-2-1 時間遅れによる解析モデル

ボーリングバーは一様な対称はり、工具は質点としてモデル化し、工具には、切れ刃およびガイドパッドを介して被削材から切削力・垂直抗力・摩擦力が作用すると考える（図 11）。工具が振動すると、切削量の変動が生じ、被削材の穴表面が変形する。ガイドパッドは被削材と接触しているため、一定の時間が経過し、変形した穴表面がガイドパッドと接触するときに接触力の変動を生じることとなる。この時間遅れが原因の自励振動として、解析モデルから数式モデルを導出し、系の特性根を計算することによって本現象を解析した。なお、特性根の実部が正の場合にスパイラルマークが発生し、その値が大きいほど速く成長する。また、発生するスパイラルマークの角形数は特性根の虚部で示される。

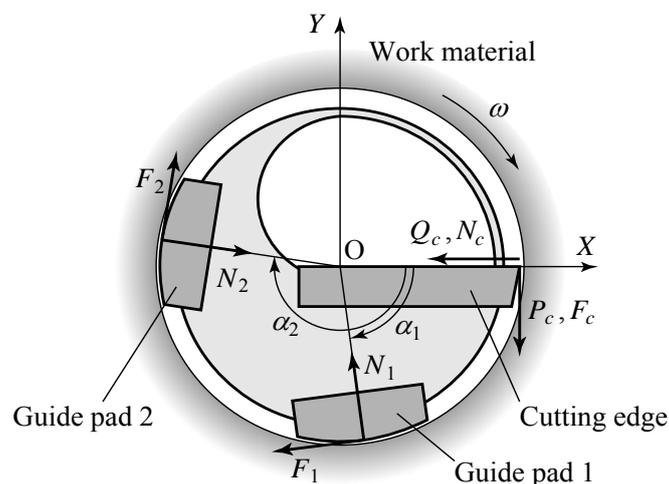


図 11 工具に作用する力

2-3 研究開発の結果および成果【1-1】【1-2】

2-3-1 中間支持部を考慮したボーリングバーの固有振動数および固有モード

一般に、B T A加工を行う実機では、ボーリングバーの根元と先端の間に支持パッドとプレッシャーヘッド(OPH)が存在し、ボーリングバーが外部から支持されている。したがって、ボーリングバーのモデル化を精密に行うためには、これらの支持を適切にモデルに組み込むことが必要である。ここでは、図12に示すようにボーリングバーに支持パッドとプレッシャーヘッドの支持剛性を追加したモデルを用いて、固有振動数および固有モードの解析を行った。なお、加工試験に用いた実機では支持パッドが1カ所であったことから、図12のようなモデルとした。支持パッドおよびプレッシャーヘッドの支持部(パッキン)には支持形状に応じた分布ばねを考慮した。また、ボーリングバーの根元は固定端、ボーリングバーの先端は集中ばねによる支持と仮定し、先端には工具の質量を質点として考慮している。

B T A加工では穴深さの変化に伴い、ボーリングバーの中間の支持位置が変化するため、穴深さによって固有振動数および固有モードが変化する。加工試験に用いた実機のパラメータを用いて求めた固有振動数の計算結果を図13に示す。横軸に穴の深さを、縦軸に固有振動数を取り、1次から3次までの固有振動数の穴深さに伴う変化を示している。中間の支持を考慮した場合、穴深さによって固有振動数が複雑に変化することが分かる。

図14には、例として2次の固有モード形状の穴深さによる変化を示す。横軸はボーリングバーの根元を原点とする長手方向座標を示し、縦軸は振動振幅比を表している。なお、太線で支持パッドおよびプレッシャーヘッドの支持部を示している。図14から、固有モード形状も穴深さによって複雑に変化することが分かる。

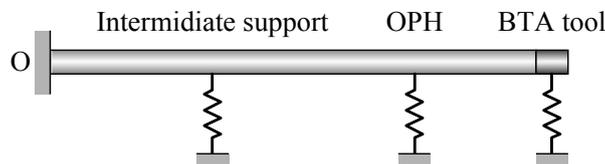


図12 中間支持部およびプレッシャーヘッドによる支持を考慮した解析モデル

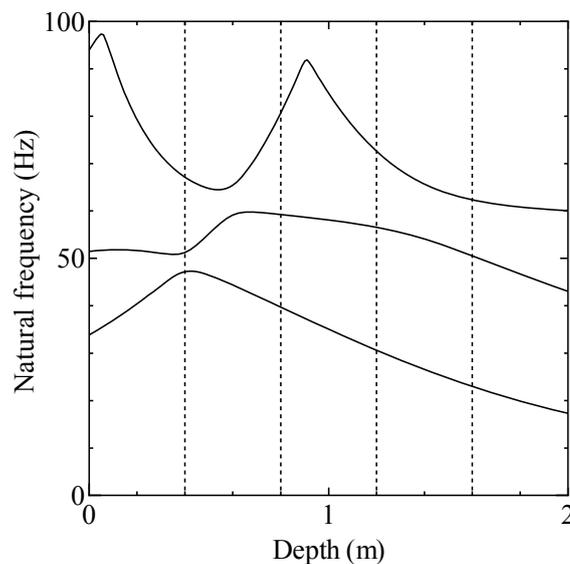


図13 穴深さと固有振動数の関係

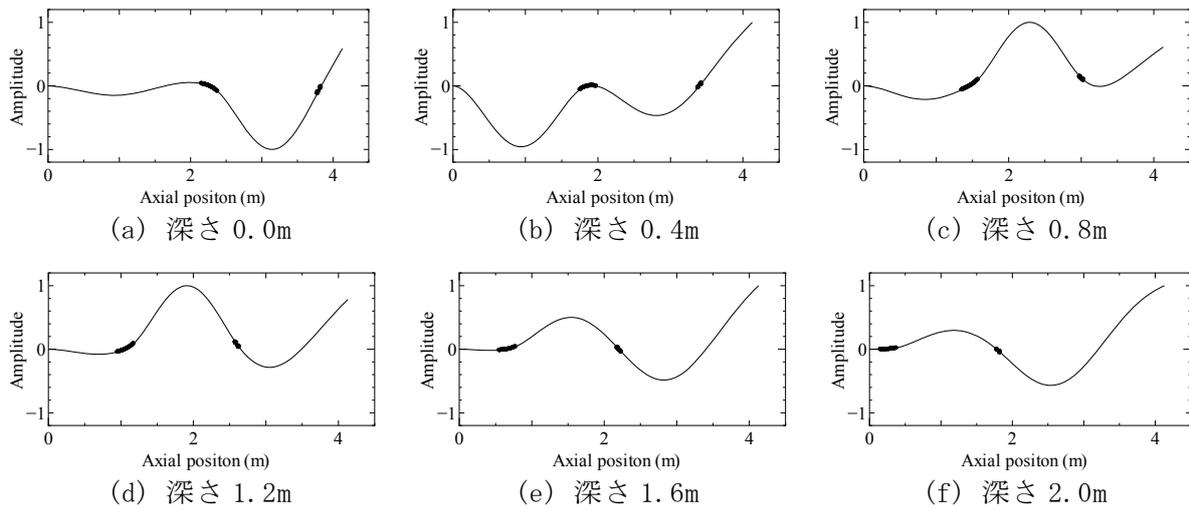
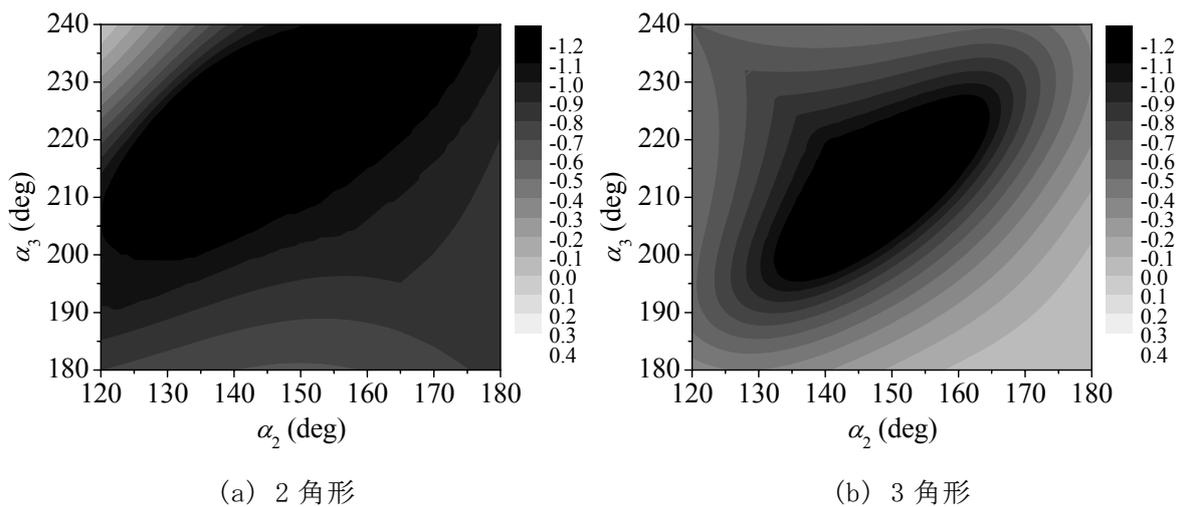
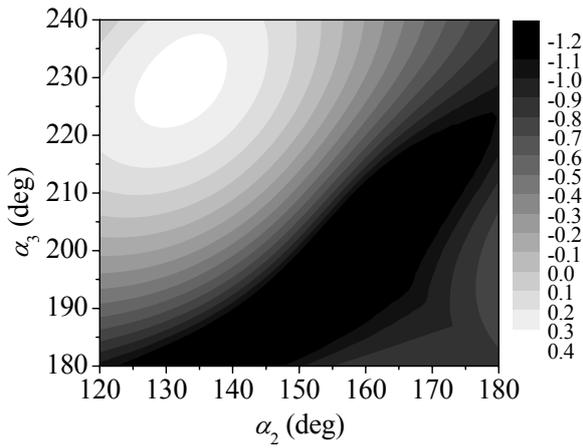


図 14 2 次の固有モード形状の穴深さによる変化

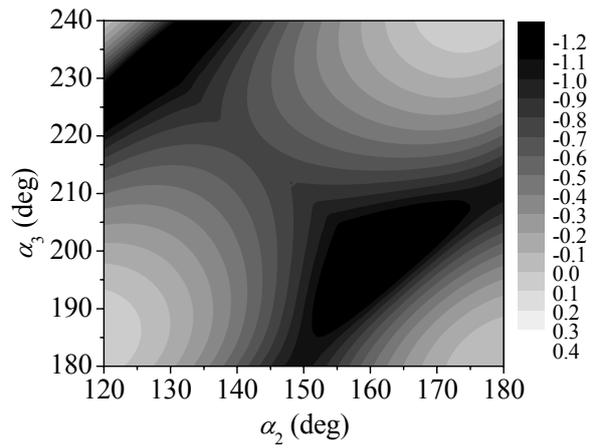
2-3-2 ガイドパッドの最適配置に関する検討

ガイドパッド位置による準静的な特性根実部の変化を調べることで、ガイドパッドの最適配置について検討した。ガイドパッド 1 の位置を 90° に固定したときの、ガイドパッド 2 およびガイドパッド 3 の位置による特性根実部の変化を図 15 に示す。図の横軸と縦軸にはそれぞれガイドパッド 2 と 3 の配置角度をとり、色の濃淡によって特性根実部の大きさを示している（色が濃いほど特性根実部が小さい）。図 15 から分かるように、特性根実部が小さくなるガイドパッド配置が存在し、角形数が近い場合は、その位置が比較的近いことが分かる。したがって、系の固有振動数・固有モードなどの振動特性や運転の回転速度などから発生する可能性がある角形数を推定し、それらの角形数の特性根実部が全体的に小さくなるような位置から、ガイドパッドの最適配置を導出することが可能である。

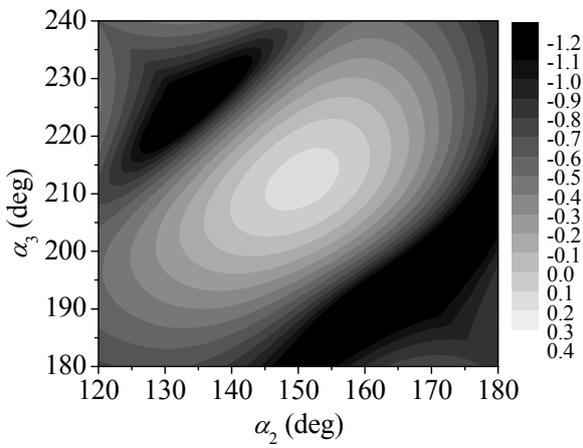




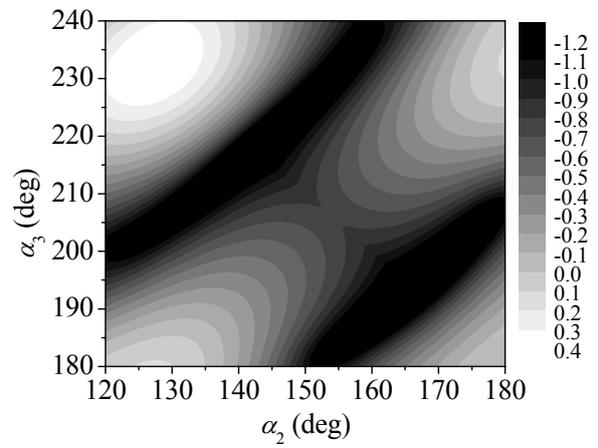
(c) 4 角形



(d) 5 角形



(e) 6 角形



(f) 7 角形

図 15 ガイドパッド位置による準静的な特性根実部の変化

第 3 章 本論 (2) 三次元振動測定および加工穴の高精度三次元形状測定

3-1 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置付け

B T A加工穴のスパイラルマークについて時間遅れ系による自励振動理論に基づき、九州大学、大分大学および株式会社アヤボは、革新的な形状を有する新型刃形状工具を開発した。本研究では、3 Dスキャニング振動測定システムを活用したモード測定法の確立および高精度深穴真円度測定機を活用したスパイラルマークの高精度解析を行い、現象の発生状況の詳細な検討と新型刃形状工具の効果を検証した。

3-2 研究開発の高度化目標および技術的目標値

S G管板の管穴加工では、スパイラルマークの発生による加工不良率の削減が限界に達している。そこで、管穴加工の高精度化により加工不良率を激減させることを目的とし、スパイラルマークの発生と成長を抑える、自励振動理論に基づく新しい刃形状を採用したB T A工具を開発する。

SG管板管穴加工用ロウ付けドリルヘッド（加工径 19.27mm）の加工精度

従来の技術： 真円度平均 0.02mm 前後（判定基準値 0.02 mm の加工不良率 0.5%）

目標値： 真円度平均 0.005 mm 以下（判定基準値 0.02 mm の加工不良率 0.02%）

工具回転系の振動測定・解析技術の確立

従来の技術： 1次元変位測定によるワーク回転系の測定 1ポイント

目標値： 3Dスキャニング振動計による工具回転系の精密測定 512X3
ポイント

3-3 研究開発の方法【2-1】【2-2】

3-3-1 BTA加工機および加工試験条件

図 16 および 17 に加工試験に使用した BTA 加工機の写真およびセンサーの配置図を示す。今回の加工試験では、再現性を確保するためワーク回転型を使用することとした。ワーク回転数は 400rpm (6.67Hz) である。振動の計測には、ボーリングバーの振動測定を測定する 2 台のレーザー変位計、工具位置での振動を測定する 3 軸加速度計、ボーリングバーの振動モードを計測する 3D スキャニングレーザー Doppler 振動計および被削材の回転信号を測定するためのレーザー変位計を用いた。

図 18(a) および (b) はそれぞれ BTA 加工に用いる従来型刃形状工具と新型刃形状工具の写真である。新型刃形状工具には理論解析結果に基づき第 3 のガイドパッドが設置してある。

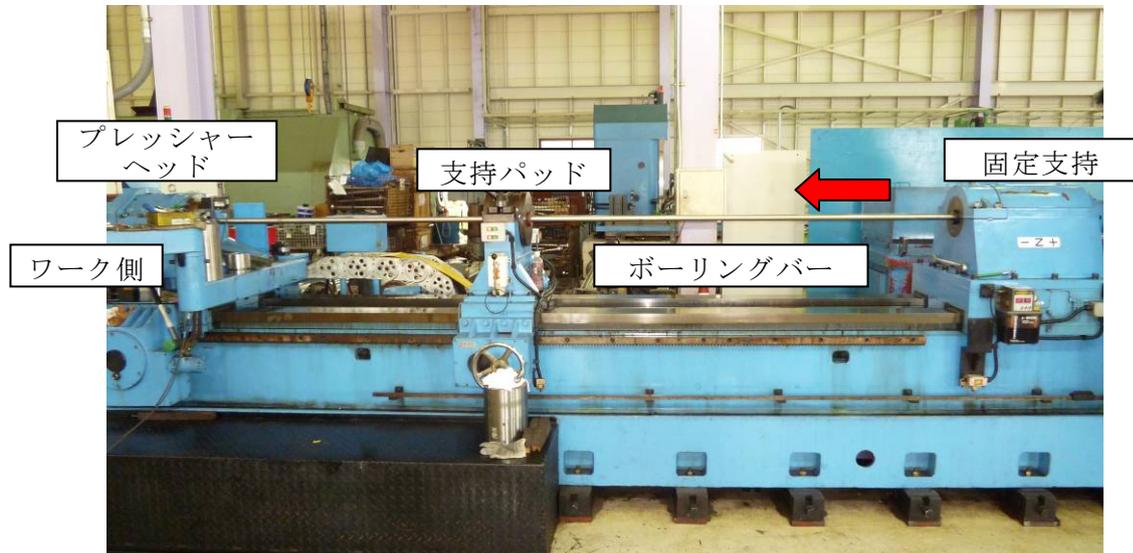


図 16 BTA 深穴加工機（ワーク回転型）

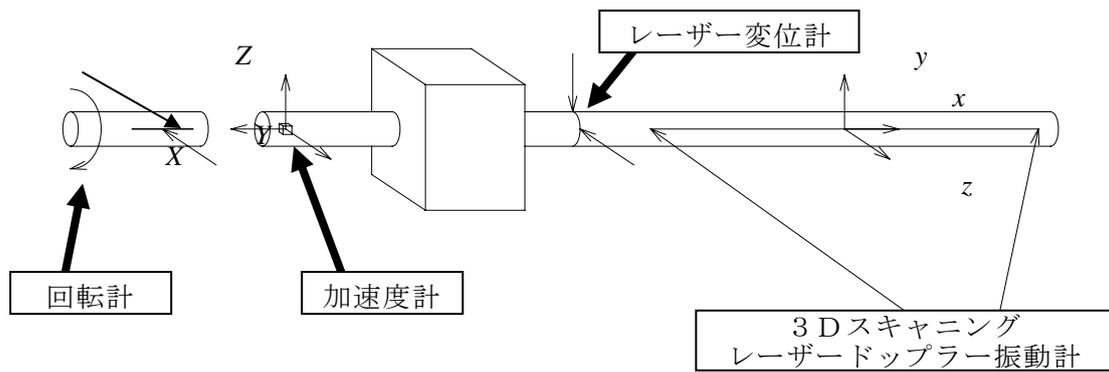
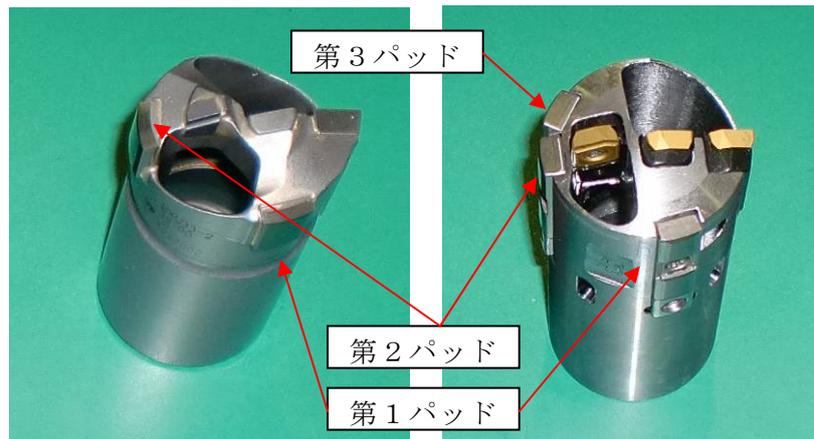


図 17 センサーの配置図



(a) 従来型刃形状工具

(b) 新型刃形状工具

図 18 B T A 工具

3-4 研究開発の結果および成果【2-1】【2-2】

3-4-1 基準条件における加工試験

図 19(a)および(b)はそれぞれ従来型刃形状工具を取り付けた場合の加工試験開始から 29min50s 後のレーザー変位計による振動波形および周波数分析結果を示している。図 19 から、ワーク回転数の約 5 倍である 33.75Hz の成分 (矢印部) の振幅が非常に大きく、5 角形のスパイラルマークが発生しているものと思われる。図 20(a)および(b)はそれぞれ従来型刃形状工具を取り付けた場合の約 30Hz 成分の振幅成長曲線および回転信号との位相差を示したものである。加工試験開始 900s 後あたりから徐々に振幅が成長し、1500s 以降大きな振幅で振動をしている。一方、位相は 1500s 過ぎからほぼ一定の割合で安定的に変化しており、スパイラルマークがほぼ一定の回転角でねじれていることがわかる。

図 21 は、従来型刃形状工具で加工試験を行ったときの、加工試験開始から 18min40s 後の水平方向の振動加速度を周波数分析した結果である。3 軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発により、測定に成功した。図 21 から加速度振幅は約 -40dB、変位に換算すると振幅は約 0.47mm であり、非常に大きく振動していることがわかる。

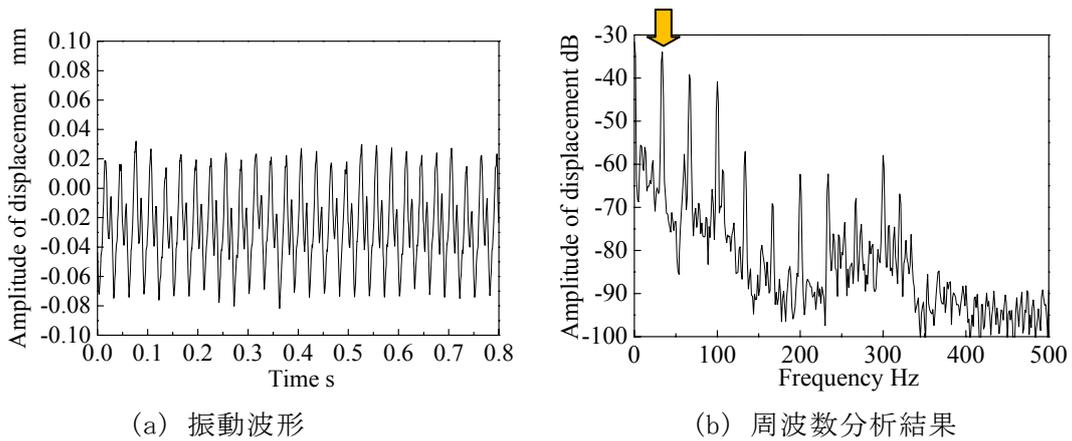


図 19 基準条件における振動解析（水平方向）

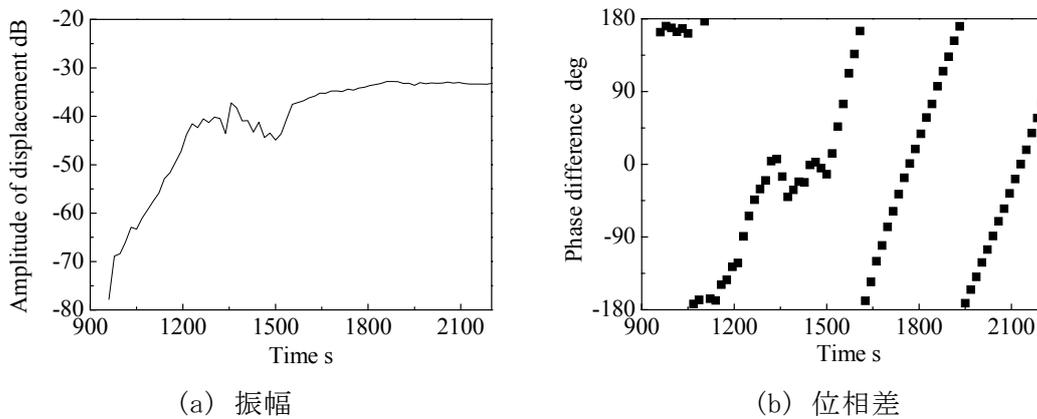


図 20 基準条件における振幅の成長と位相差（水平方向）

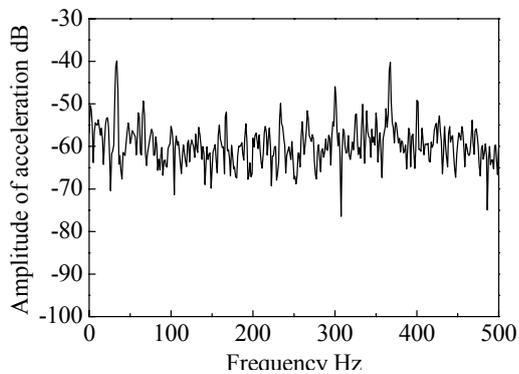


図 21 工具位置における振動加速度（水平方向）

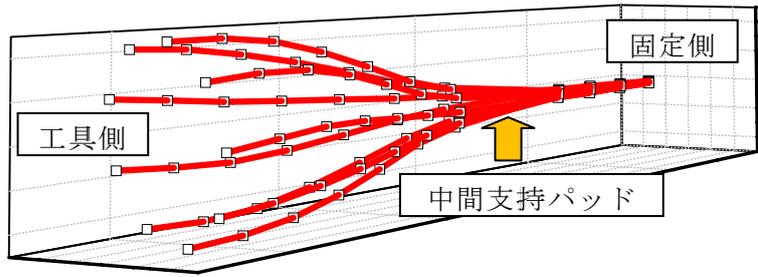
3-4-2 3Dスキャニングレーザードップラー振動計による加工時の振動解析

図 22(a)および(b)に3Dスキャニングレーザードップラー振動計の写真およびスパイラルマーク発生時のボーリングバーの振動モードを示す。スパイラルマーク発生時にボーリングバーは縄跳び状に回転しながら半径方向に振動していることがわかった。

図 23(a)～(c)は加工開始から約 30min 経過後の振動が大きい状態で運転を中断し、ハンマリング試験を行った場合の、周波数分析とその振動モードを示す。両固有モードとも中間支持パッドから工具側が大きく振動しており、図 22(b)に示す振動モードと類似している。

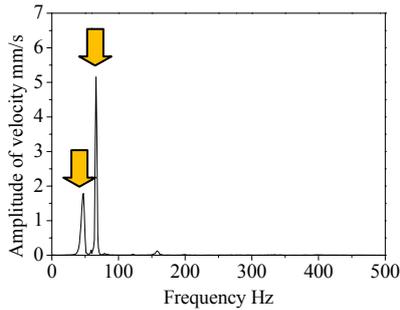


(a) 振動計の写真

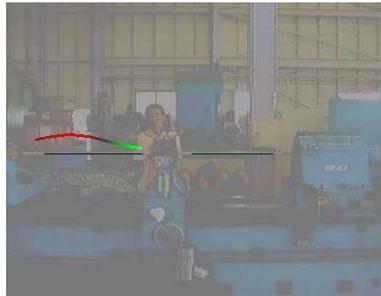


(b) ボーリングバーの振動モード (3D)

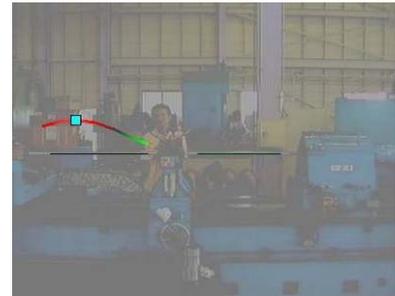
図 22 3D スキャニングレーザー ドップラー振動計



(a) 打撃試験結果



(b) 46.25Hz の振動モード



(c) 66.25Hz の振動モード

図 23 約 30min 経過後の 3D スキャニングレーザー ドップラー振動計による打撃試験

3-4-3 真円度測定結果および新型刃形状工具のスパイラルマーク抑制効果

図 24 は高精度深穴真円度測定機により従来型刃形状工具加工でスパイラルマークが発生した被削材の真円度を測定した結果である。左は加工時間の約 1 / 3 経過後の結果であり、加工試験終了までの結果を右方に示す。赤枠および青枠はそれぞれ単位目盛が 20 および 50 μm の結果である。図 24 から、加工試験中盤から終盤にかけてスパイラルマークが成長していく様が見て取れる。

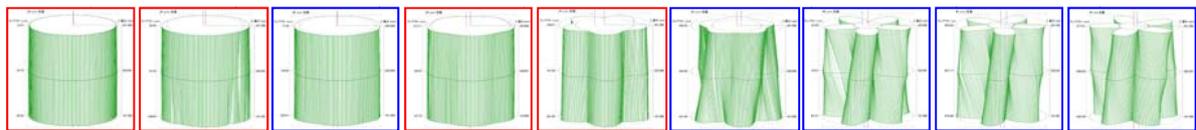


図 24 高精度深穴真円度測定機による加工穴の形状測定 (従来型刃形状工具)

図 25(a) および(b) は、図 18(b) の新型刃形状工具を用いた場合の振幅の成長曲線と位相の図である。加工試験を通して振幅が低い値を維持しているとともに、位相も安定しておらずスパイラルマークが成長していないことがわかる。

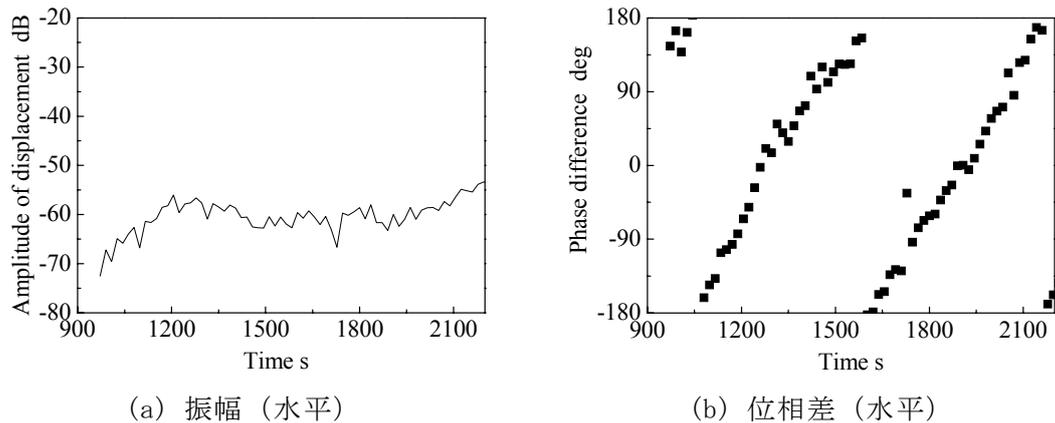


図 25 新型刃形状工具を用いた場合の振幅の成長と位相差（水平方向）

一方、新型刃形状工具を用いて真円度測定を行った結果（図 26）、従来型刃形状工具の $701.5\mu\text{m}$ に対し、新型刃形状工具は $44.5\mu\text{m}$ 、約 6.3%程度となり、技術的目標値（ 0.02mm から 0.005mm 、25%まで抑制）を大幅に上回るスパイラルマーク抑制効果が確認された。

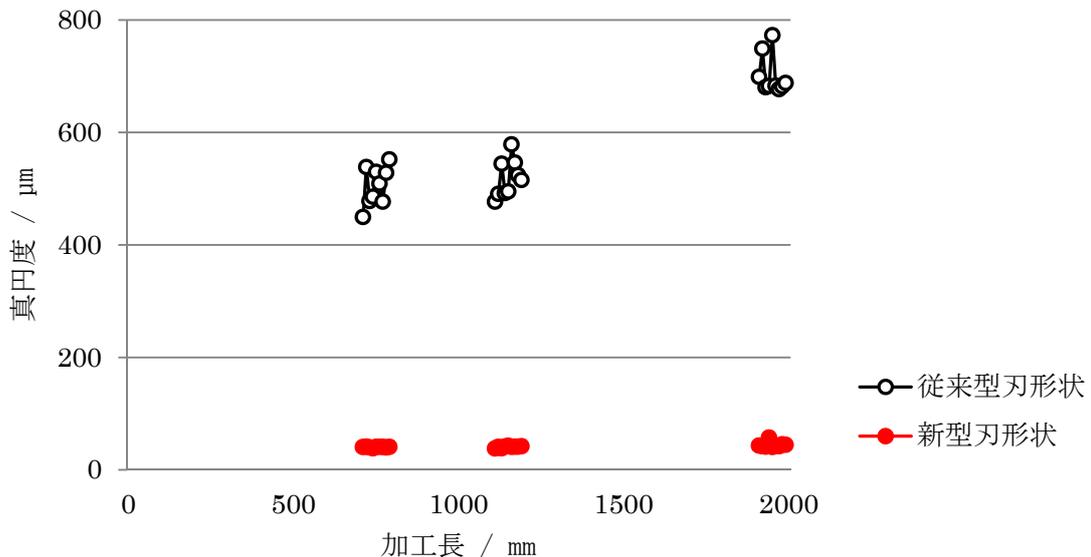


図 26 新型刃形状工具のスパイラルマーク防止効果

第 4 章 本論（3）ドリルヘッドの製作と高精度研削技術の確立

自励振動理論から導かれた独創的な刃形状による高精度化 B T A 工具の実用化には、工具製造技術の革新が不可欠である。本テーマでは、新型刃形状工具のドリルヘッドおよび 3 軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの設計、製作を試みた。また、ロウ付けドリルヘッドのガイドパッドの高精度曲率変化形状加工法の開発を行った。

4-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値

S G 管板の管穴加工では、スパイラルマークの発生による加工不良率の削減が限界に達している。そこで、管穴加工の高精度化により加工不良率を激減させることを目的とし、スパ

イラルマークの発生と成長を抑える、自励振動理論に基づく新しい刃形状を採用したB T A 工具を開発する。

ガイドパッドの高精度研削

従来の技術： 外径公差 5 μ m (円筒研削盤による研削)

目標値： 外径公差 3 μ m (多軸CNC工具研削盤による曲率変化形状加工)

4-2 研究開発の方法【3-1】【3-2】

4-2-1 新型刃形状および3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発

ワーク回転用加工試験に用いる 38mm 新型刃形状刃先交換式ドリルヘッドを設計、製作した(図 27)。刃先交換式は、切刃およびガイドパッドが摩耗しても、新たなインサートを交換することにより、ドリルヘッド本体を替えることなく、安定した加工試験を行うことができる。また、第3ガイドパッド位置に組込む、従来型刃形状用スペーサーを作成し、従来型刃形の加工試験にも使用可能とした。

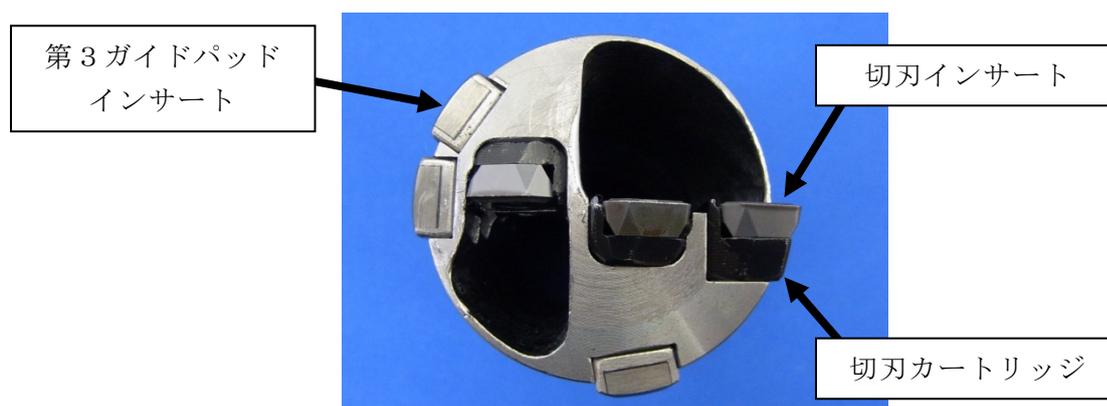


図 27 38mm 新型刃形状刃先交換式ドリルヘッド

レーザー変位計によるボーリングバーの振幅測定では、穴加工の進行により測定位置が移動するため、ドリルヘッド刃先部の挙動を正確に観測することが難しい。そこで、ドリルヘッド内部に加速度計を取付けることにより、ドリルヘッド刃先部挙動の直接検出を試みた。

ドリルヘッド内部に組み込んだ加速度計の信号ケーブルは、ボーリングバー内部を貫通させ、B T A加工試験機 DAEYANG ENGINEERING 社製 DMBL100-2500CNC の加工油排出部から外部に取出し、シグナルコンディショニング・アンプに接続した。増幅された信号を、レーザー変位計からの信号と同時に、F F Tアナライザに取り込み、振動解析を行った。

4-2-2 新型刃形状ロウ付けドリルヘッドの試作および加工試験

ロウ付けドリルヘッドに新型刃形状を適用する際に、製造工程の簡略化およびコストの削減を配慮し、計3種のバリエーションを提案した^[4]。従来型刃形状を含めた計4種について、ワーク回転用(外径38mm)および工具回転用(外径20mm)にロウ付けドリルヘッドを製作し、加工試験を行った。

4-2-3 ガイドパッドの曲率変化形状研削技術の確立

これまで、ロウ付けドリルヘッドのガイドパッド研削に使われてきた円筒研削盤では、ガイドパッド面の曲率変化形状加工は難しい。そこで、5軸CNC工具研削盤による曲率変化形状加工を実現するために、内張りコレット式ホルダ、専用砥石レイアウトおよび研削加工プログラムの設計、開発を行った。また、ボーリングバーとの接合取付け精度を保証する2箇所との嵌合部と、外周刃およびガイドパッド間の精度を向上させるために、5軸CNC工具研削盤による、全研削部位のワンチャック同時加工試験を実施した。

4-3 研究開発の結果および成果【3-1】【3-2】

4-3-1 新型刃形状および3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発

製作した新型刃形状刃先交換式ドリルヘッドによる加工試験結果を図26に示した。

最初に設計した3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの加工試験では、切刃から排出される切りくずの処理がうまく行かず、切刃および切刃カートリッジを破損してしまった。そこで、切刃ポケットの断面積の拡大と形状の改良などを行い、再度加工試験を実施したところ、ヘッド刃先部の挙動の検出に成功した。



図28 3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッド（中間刃内蔵型）

4-3-2 新型刃形状ロウ付けドリルヘッドの問題点

ワーク回転用外径38mmおよび工具回転用外径20mmのロウ付けドリルヘッド加工試験において、スパイラルマークの発生と成長について、従来型刃形状と新型刃形状3種の間に優位な差が認められなかった。原因を検討し、その対策法を特許出願予定案件とした。

4-3-3 ガイドパッドの曲率変化形状研削技術の確立

5軸CNC工具研削盤の3Dシミュレーションソフトに、内張りコレット式ホルダおよび専用砥石レイアウトデータを入力し、曲率変化形状の研削加工プログラムを作成した。従来型刃形状ドリルヘッドの加工を試みたところ、内張りコレット式ホルダの剛性が不足し、研削面の精度を得ることができなかった。補完研究では、内張りコレット式ホルダの改良を実施する。

第5章 本論（4）超厚膜PVD成膜技術の確立と工具寿命測定

本研究開発プロジェクトにおける二大主要テーマの一つである、応力可変PVD技術を応用した超厚膜PVD耐摩耗皮膜によるBTA工具の長寿命化が本研究開発部分に該当する。

東北大学と共同研究を進めるPVD蒸発源のプラズマ解析技術を活用し、BTA工具の長寿命化、加工条件の高速化および難削材加工対応が可能な超厚膜PVD耐摩耗皮膜を開発することにより、深穴加工の高効率化を目指した。

5-1 研究開発の高度化目標および技術的目標値

SG管板材料の総耐熱合金化が検討されているが、従来の工具は刃先の損傷が甚大であり、管穴加工の難しさがその実用化の障壁となっている。管穴加工の難削材対応問題を解決するために、超厚膜PVD皮膜による工具寿命の向上を図る。

また、超厚膜PVD皮膜の耐熱性を向上し、高速化による管穴加工の高効率化を実現する。

ロウ付けドリルヘッド用超厚膜PVD皮膜の開発（皮膜硬度、耐熱温度および膜厚のすべてが向上）

従来の技術： TiAl系：皮膜硬度 2,700HV、耐熱温度 800℃、膜厚 2.5μm
目標値： CrAlSi系：皮膜硬度 3,100HV、耐熱温度 1,100℃、膜厚 10μm

SG管板管穴加工用ロウ付けドリルヘッドの工具寿命（インコネルクラッド鋼板）

従来の技術： 加工数 20穴/工具以下
目標値： 加工数 40穴/工具以上

次世代SG管板管穴加工用ロウ付けドリルヘッドの工具寿命（インコネル鋼板）

従来の技術： 加工数 2穴/工具未満
目標値： 加工数 4穴/工具以上

SG管板管穴加工用ロウ付けドリルヘッドの高速化対応（インコネルクラッド鋼板）

従来の技術： 送り速度 90mm/min以下
目標値： 送り速度 200mm/min以上

5-2 研究開発の方法【4-1】【4-2】【4-3】

5-2-1 プラズマ中のイオン分布および中性粒子の観測

PVD成膜の応力緩和および制御を実現するためには、蒸発源の放電により放出されるイオン粒子と中性粒子の存在比の測定が欠かせない。すでに、現行のプラズマ解析用飛行時間型質量分析計により、イオン粒子の種類、存在量およびサイズ分布を測定することが可能であるが、中性粒子は観測されない。そこで、本分析計に、新開発の光イオン化機構^{[5][6]}を導入し、中性粒子の測定を試みた。

これまでに、スパッタソースにイオン検出器を組み合わせて、スパッタによって発生したプラズマ中のイオン組成を解析するための装置を開発してきており、本研究開発においても、このプラズマ解析装置を用いた（図29）。

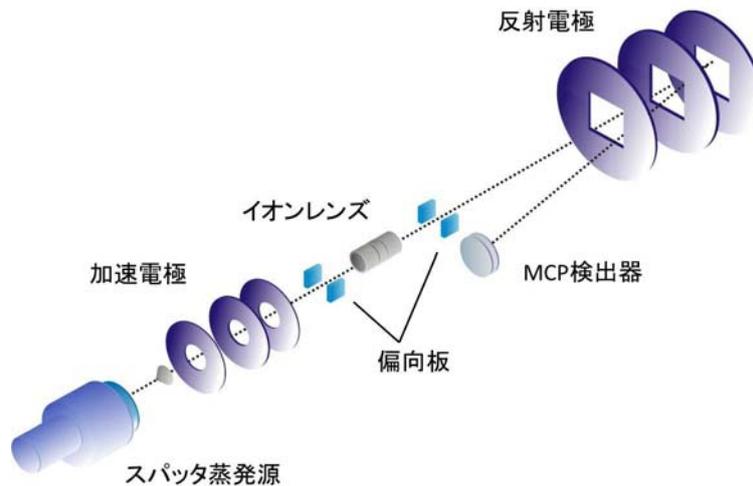


図 29 プラズマ解析装置概略図

また、発生したプラズマに含まれるイオン種のターゲット上の位置依存性を観測するため、アパーチャに対する蒸発源の位置（前後・左右）を観測中にリアルタイムで調整可能なように、可動式のスパッタ蒸発源（カソード）を設計・製作した（図 30）。

さらに、プラズマ中のイオン量検出に加えて中性種の量も同定するため、光イオン化機構を装置に導入して評価した。

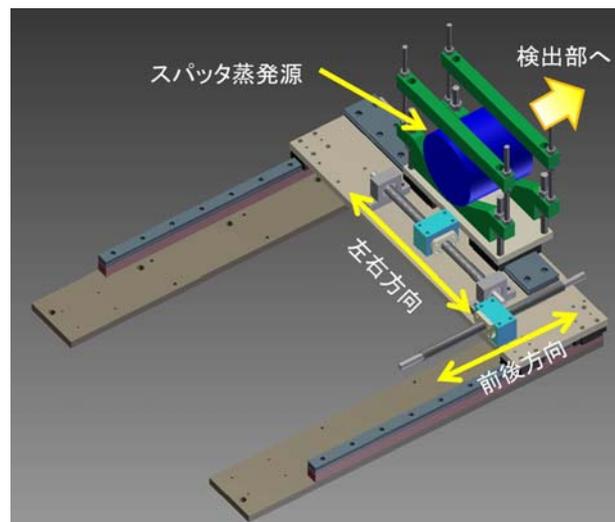


図 30 可動式のスパッタ蒸発源（カソード）

5-2-2 H I P I M S による TiAlN および CrAlSi 系皮膜成膜条件の最適化

H I P I M S による TiAlN および CrAlSi 系皮膜成膜条件を最適化するために、パルスの波形および幅の検討を行った。得られた皮膜について、NID による微小硬度、密着度および XRD による結晶配向などの機械的および物理的物性評価、さらに、ボールエンドミルを用いた耐摩耗加工試験による性能評価を行った。さらに、この最適化された条件により、超厚膜成膜を行い、機械的および物理的物性を評価した。

5-2-3 S F C 皮膜ドリルヘッドの寿命評価

株式会社神戸製鋼所に S F C による成膜処理を依頼し、TiAlN 10 μ m の厚膜を施した外径

20mm ロウ付けドリルヘッドを入手した。その寿命向上効果を調べるために、工具回転加工試験を実施した。また、NID による微小硬度、密着度および XRD による結晶配向などの機械的および物理的物性評価を行った。

5-2-4 超厚膜 PVD 処理自公転治具システムの設計および製作

新たに設計、製作した超厚膜 PVD 処理自公転治具システムを用いて、ロウ付けドリルヘッドの成膜試験を行い、切刃およびガイドパッドの工具内膜厚分布とテーブル軸方向の膜厚分布を測定した。また、回転動作の耐久試験を行った。

5-3 研究開発の結果および成果【4-1】【4-2】【4-3】

5-3-1 放電開始からのプラズマ中イオン分布の経過時間依存性および中性粒子の観測

発生したプラズマ中に含まれるイオン分布の経過時間に対する依存性の結果を図 31 に示す。結果から、パルス放電開始から $350 \mu\text{s}$ 程度して立ち上がる放電電流とほぼ同じタイミングで、まずは Ar+イオンが発生し、その後、徐々に Cr+のイオン量が増加することが明らかになった。また、光イオン化機構による、中性粒子の観測結果を図 32 に示す。帰属などは未解決ではあるが、今後プロジェクトを進めるにあたって、有効な手段が導入できた。

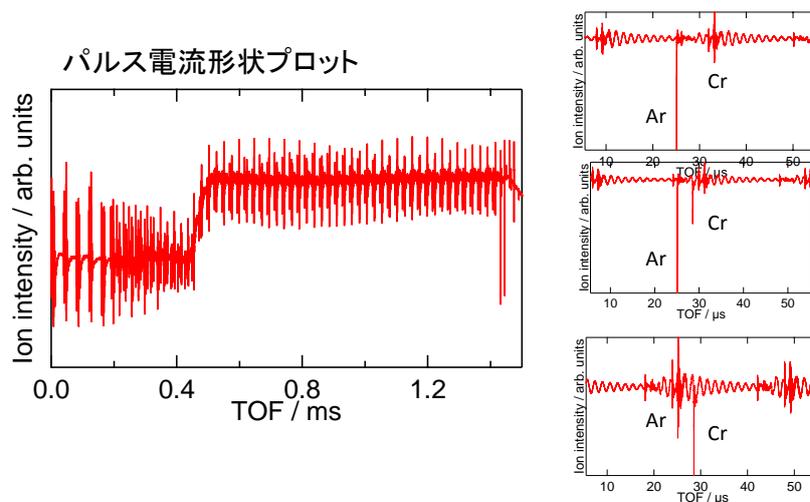


図 31 放電電流の時間変化と蒸発時間からのイオン分布の変化

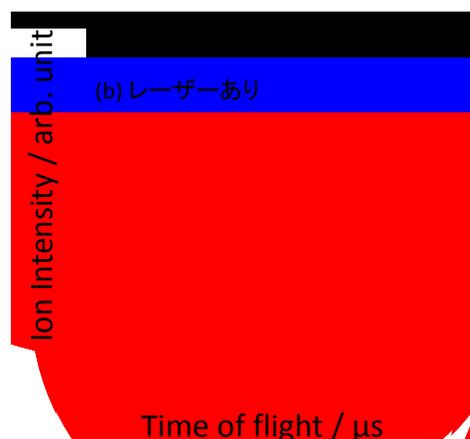


図 32 導入した光イオン化法によって得られた中性粒子の生成分布

5-3-2 H I P I M SによるTiAlNおよびCrAlSi系皮膜成膜条件の最適化

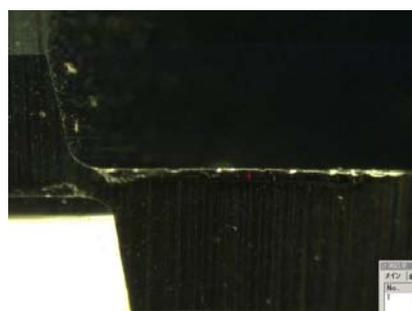
H I P I M S成膜時のパルス条件を最適化したところ、皮膜硬度が大幅に上がった。また、ボールエンドミルによる耐摩耗加工試験においても、耐摩耗性の向上が確認された。表1および図33にその結果を示す。

表1 H I P I M SによるCrAlSi系皮膜の物性と耐摩耗性

処理方法	膜厚 / μm	硬度 / HV	逃げ面摩耗幅 VB / mm
H I P I M S 従来条件	2.3	2,600	0.079
H I P I M S 新条件	2.1	3,100	0.055



(b) H I P I M S (1.5 ms)



(c) H I P I M S (3.0 ms)

図33 ボールエンドミルによる耐摩耗加工試験

TiAlNおよびCrAlSi系皮膜について、H I P I M S成膜条件の最適化を行った。表2および表3に得られた皮膜の物性を示す。皮膜硬度は、NIDにより測定した。密着度hfは小さいほど良い。

表2 H I P I M Sによる超厚膜PVD皮膜の物性 (TiAlN)

処理方法	膜厚 / μm	硬度 / HV	密着度 / hf
アーク式PVD標準ルーティン	2.1	2,624	2
H I P I M S	8.7	2,746	4

表3 H I P I M Sによる超厚膜PVD皮膜の物性 (CrAlSi系皮膜)

処理方法	膜厚 / μm	硬度 / HV	密着度 / hf
アーク式PVD標準ルーティン	2.6	3,069	2
H I P I M S	9.6	2,839	4

5-3-3 S F C皮膜ドリルヘッドの寿命評価

S F C皮膜とアーク式PVD標準ルーティン皮膜の工具回転加工試験結果を表4に示す。効果が認められないのは、密着度不足が原因と推測した。皮膜硬度は、NIDにより測定した。

表4 S F C皮膜TiAlNの寿命測定結果 (S45C鍛造材加工)

処理方法	膜厚 / μm	硬度 / HV	逃げ面摩耗幅 VB / mm
アーク式PVD標準ルーティン	2.1	2,624	0.025
S F C	8.1	2,473	0.060

5-3-4 超厚膜PVD処理自公転治具システムの性能評価

膜厚分布試験の測定位置を図 34 に示す。ロウ付けドリルヘッド内の膜厚分布測定では、外周刃前逃げ面の膜厚が 10.7%大きくなっている（表 5）。通常の B T A 加工では、外周刃の摩耗が最も進行するので、この増加は、工具寿命の向上につながると期待できる。また、処理量が約 80%増えているのにも関わらず、成膜速度が 11.2-23.0%（平均 15.7%）上昇している。従来の 2 倍の処理量に当たり、驚異的なコスト削減効果が確認された。

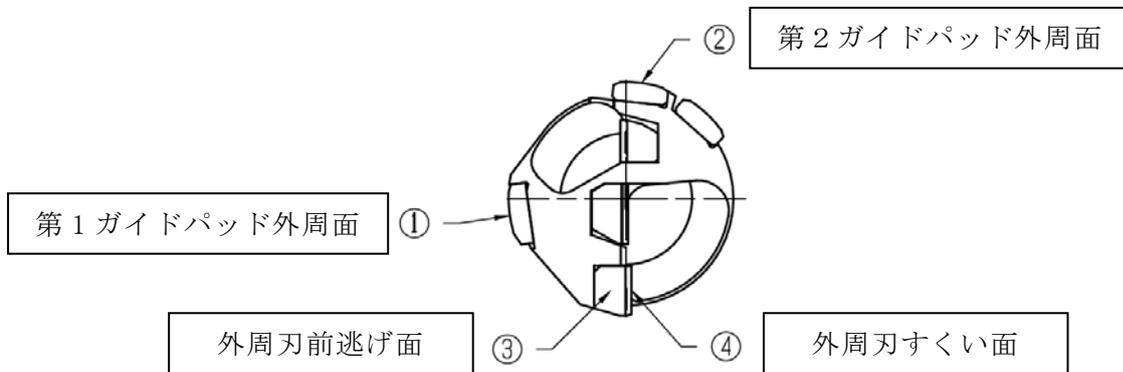


図 34 膜厚測定位置

表 5 ロウ付けドリルヘッド内膜厚分布

項目	膜厚 / μm			膜厚比 / %	
	①② d_{Gav}	③ d_{C1}	④ d_{C2}	d_{C1}/d_{Gav}	d_{C2}/d_{Gav}
従来型治具システム	2.0	2.2	2.0	110.9	102.8
超厚膜 PVD 処理 自公転治具システム	2.2	2.7	2.3	122.7	104.3
増減 / %	+11.2	+23.0	+12.8	+10.7	+1.5

一方、テーブル軸方向の膜厚分布測定の結果を図 35 に示す。従来治具とほぼ同等の均一性が得られた。

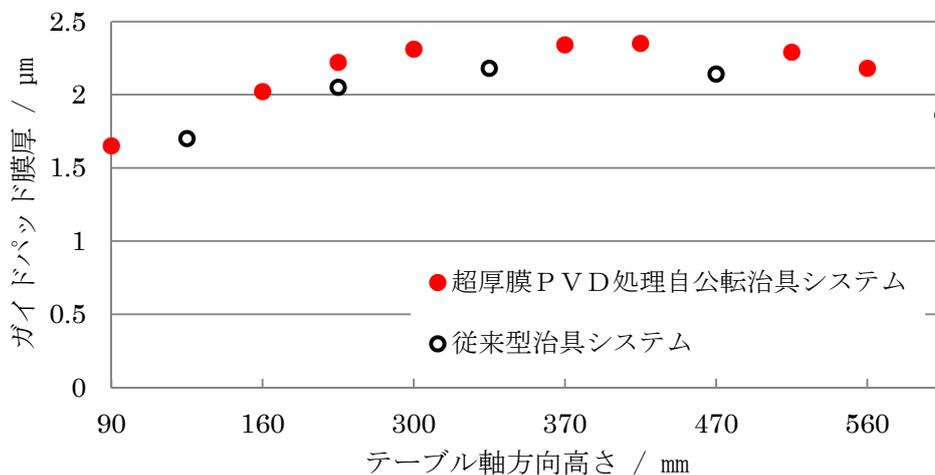


図 35 テーブル軸方向のガイドパッド膜厚分布

第6章 全体総括

8ヶ月に満たない短い事業期間に加え、東北大学の東日本大震災による被災が重なる、非常に厳しいスケジュールと研究環境にも関わらず、各研究機関の努力とチームワークおよび各アドバイザーの支援により、すべての研究テーマにおいて、大きな成果を上げることができた。なかでも、

- ① スパイラルマーク抑止効果に優れる新型刃形状刃先交換式工具を完成させた
- ② 3軸加速度計内蔵刃先交換式ドリルヘッドの開発により、刃先部の挙動検出に成功した
- ③ 3Dスキャニング振動測定システムによるボーリングバーの振動モード測定法を確立した
- ④ 驚異的なコスト削減効果を持つ超厚膜PVD処理自公転治具システムを開発した

以上4点は、特筆すべき成果である。

原発事故により、国内の新設および海外インフラ輸出を見込んだ、原子力発電プラントの熱交換機向けロウ付けドリルヘッドの需要は不透明になった。しかし、本研究開発において驚異的なスパイラルマーク抑止効果を示した、新型刃形状刃先交換式ドリルヘッドは、コンバインドサイクル発電のタービンシャフトや、風力発電プラント用メインシャフトの中空加工に適し、今後大きな需要が期待できる。すでに、第2回研究推進委員会において、川下製造業者から、フィージビリティスタディ（FS）契約交渉の申し入れがあり、現在、専門知財戦略グループの支援を受け、協議を進めている。サポイン事業提案時に掲げた、世界市場への展開および国際標準化に向けた事業化体制が、着実に整備・強化されつつある。

本研究開発の認定計画終了まであと2年。サポイン事業で加速された研究成果、整備された研究環境および強化された研究体制を最大限活用し、さらに発展させながら、補完研究および事業化に邁進したい。

参考文献・引用文献

- [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に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集(C編), 75巻755号(2009), PP. 1918-1925.
- [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の防止対策, 日本機械学会論文集(C編), 76巻767号(2010), PP. 1684-1691.
- [3] 特許出願中
- [4] 特許および意匠出願中
- [5] M. P. McCann, C. H. Chen, and M. G. Payne, Chem. Phys. Lett., 1987, 138, 250.
- [6] Y. Matsuda, N. Mikami, and A. Fujii, Phys. Chem. Chem. Phys., 2009, 11, 1279.

添付資料 1

専門用語等の解説

B T A 工具

ドイツ工具協会を中心とした機関、B T A (Boring and Trepanning Association) が標準化した深穴用工具。切刃、ガイドパッドおよびボディシャンクから構成されるドリルヘッドを、円筒状のボーリングバーの先端に取り付け、加工穴とドリルヘッドとの隙間から高圧の切削油を送り込み、ドリルヘッド先端の内穴からボーリングバー内を通して、切りくずと同時に排出する。高圧給油装置を含む専用の B T A 加工機が必要である。(図 1-1 参照)

時間遅れ

振動系や制御系において、ある時刻の現象が特定の時間経過後、系に影響を及ぼす効果を時間遅れという。この時間遅れによって系が不安定化し、自励振動が発生することがある。パターン形成現象の発生原因は時間遅れである。

自励振動

振動的でない外部からのエネルギーが系の特性によって振動的なエネルギーに変換されて発生する振動のこと。なお、振動的な外力によって起こる振動は強制振動と呼ばれる。

P V D

Physical Vapor Deposition (物理蒸着または物理気相成長) の略称。物質を真空中で蒸着させる技術であり、ワークと大気成分との反応を防ぎ、良質な皮膜を生成できる。P V D 成膜による金属やセラミックスの硬く薄い皮膜は、耐摩耗性の向上、摩擦の低減といった新しい特徴や機能を製品に与え、ウェットプロセスに比べても、環境にやさしい技術である。

アーク式 P V D

P V D 法の一つ。P V D による硬質皮膜を急速に広めた成膜方法。ターゲット表面の放電スポットを、磁場により高速移動させるとともに移動領域を拘束し、蒸発した物質を基板に蒸着させる。蒸発物質はプラズマ中の電子衝撃で再度イオン化し、高いイオン化率を得ることができるため、反応性に富んだ成膜が可能である。

スパッタリング (スパッタ)

P V D 法の一つ。A r などの希ガス雰囲気下で、高電圧をかけてグロー放電を発生させると、ターゲットに向かい加速された希ガスイオンが、ターゲット表面に衝突し、ターゲット表面の原子がはじき出される原理を応用している。窒素やアセチレンなどの反応性のガスを同時に導入すると、窒化物や炭化物の硬質皮膜を得ることができる。得られる皮膜の平滑性に優れる。

H I P I M S (大電力パルススパッタリング)

High Power Impulse Magnetron Sputtering の略称。大電力パルスが発生する電源を用いてプラズマ中のスパッタ蒸発物質のイオン化を促進し、かつコントロールすることが出来る最新のマグネトロンスパッタリング技術である。高いイオン化率と成膜速度はアーク式 P V D、皮膜の平滑性はスパッタリングといった両者の利点を併せ持つため、密着性が良く高密度、また同時に平滑かつ欠陥のない成膜を実現する。

飛行時間質量分析計

イオンを静電場によって加速すると、すべてのイオンに同じエネルギーが与えられる。したがって、その速度は軽いイオンほど大きく、重いイオンほど小さい。この原理を用いて、加速を開始した瞬間から一定距離の飛行管の中をイオンが走って検出器まで到達するまで時間（飛行時間）を測定すると、質量スペクトルが得られることになる。実際には、イオン加速開始時刻（イオン化レーザー光パルス照射時刻や加速電場パルス印加時刻など）をトリガとしてオシロスコープ上で電子増幅検出器アノードの電位変動を観測すると、軽いイオンから次々にイオンが検出器に到達するたびに電圧ピークが表れることになる。この分析計は、原理上測定できるイオンの質量に上限がない、すべてのイオンをロスすることなく検出することができる（高感度）、イオン加速から検出までが数百マイクロ秒（ 10^4 のマイナス 4 乗秒のオーダー）の短時間で完了する、などの特長を持つ。本研究開発では、気相イオン分布をモニターしながらスパッタパルス出力条件の最適化を行うことを試みた。