

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「工具折損検知手法によるノズル穴の高精度微細加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 九州経済産業局

委託先 財団法人北九州産業学術推進機構

## 目 次

第1章 研究開発の概要	
[1] 研究開発の背景・研究目的及び目標	P. 2
[2] 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	P. 5
[3] 成果概要	P. 8
[4] 当該研究開発の連絡窓口	P. 9
第2章 本論	
[1] 微細穴加工専用機の制御装置製作と導入	
[1]－1 制御装置の製作・搭載	P. 10
[1]－2 製品化を目指した機能や性能の検討	P. 14
[2] 微細穴加工の加工精度向上	
[2]－1 加工精度の高度化	P. 15
[2]－2 市販工具の種類や装置剛性が 加工精度に及ぼす影響	P. 16
[3] 加工力および折損検出データの収集と分析	
[3]－1 市販工具の種類による加工力の相違	P. 16
[3]－2 折損時のトルク検出データの収集	P. 16
[3]－3 折損検出の閾値の検討	P. 17
第3章 全体総括	
[1] 研究開発成果	P. 17
[2] 研究開発後の課題・事業化展開	P. 18
用語の説明	P. 19

## 第1章 研究開発の概要

ディーゼルエンジン車の低燃費化・低公害化には、燃料の高圧噴射化や噴霧微細化が課題である。解決策として燃料噴射ノズル穴の小径化が挙げられるが、小径化と共に加工精度の向上が必須である。低コストで高精度な微細穴加工を実現するには、切削加工での穴加工が強く要望されている。本研究では、高速スピンドル\*<sup>1</sup>を有し工具摩耗や折損をリアルタイム検知可能な、切削加工機による高精度な微細穴加工技術の開発を行う。

### [1] 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車川下製造業者等の抱える課題ニーズとしては、燃費向上が挙げられる。当該川下製造業者では、燃費向上やCO<sub>2</sub>排出抑制に寄与する技術開発として、ディーゼルエンジンでの理想的噴射制御が行えるコモンレールシステムを開発している。ディーゼル車は、ハイブリッド車や電気自動車の世界規模での普及が達成するまで、今後も欧州をはじめとしてBRICs等の新興国や世界各地で普及していくものと思われる。

ディーゼルエンジンでは、更なる低燃費・低公害化に向けて燃料の高圧噴射・噴霧微細化技術の確立が重要課題となっている。燃料の高圧噴射・噴霧微細化は燃料噴射部品が担い、それらは直径1mm以下の穴の集合体であり、小径化と共に加工精度の向上が必須となっている。なかでも燃料噴射ノズル穴(以下「ノズル穴」と表記)は、φ0.1mmと微細であり、この形状(穴径精度、穴内面粗さ\*<sup>2</sup>等)が燃料噴射特性に大きな影響を及ぼすため、高精度な微細穴加工技術の確立が望まれている。

本事業で開発予定のリアルタイム工具折損検知システムは、プロジェクトリーダー(福岡県工業技術センター、竹下研究員)が発明した特許技術(「回転加工装置及びその加工力測定方法」特願 2003-109179)を使用するものである。本技術は2個の磁石を互いにドリル軸に直行に配置し、工具摩耗等に伴うトルクの変化を磁石の回転角の位相差\*<sup>3</sup>で検知する技術に関するものである。本技術を使用することで、感度調整可能で極微小なトルク変化を検出するためのシステム構築が可能となる。これにより、放電加工\*<sup>4</sup>での穴加工領域であるφ0.15mm以下の穴加工用途(自動車燃料噴射部品、金型、不織布用ノズル、医療関連ノズル、インクジェットノズル、流体制御部品、センサ部品等)を凌駕する切削加工技術の高度化を図るとともに、切削加工では不可能とされているφ0.1mm以下の穴明け加工機の開発を行う。

#### (1) 小径穴加工用スピンドルの回転振れの抑制

川下企業における小径穴加工は、穴径により放電加工と切削加工に棲み分けされている。放電加工は、被削物と放電用電極間に生じるアーク熱により被削物を溶融除去する加工法である。本法は、φ0.15mm以下の穴加工に用いられているが、①加工後に生じる加工変質層(微小亀裂や細孔)除去工程が必要(要研磨・洗浄)、②穴径以下の小径電極が必要、③装置コスト高などの問題がある。

他方、切削加工はドリル工具を用いて被削物を機械的に除去する加工法である。切削加工は、穴径が小さくなる程、加工中の工具折損が生じやすくなるため、φ0.15mmより大きな穴径の加工に用いられている。しかし、切削加工は放電加工と比較して低コストで高精度・高効率化が実現できる工法であるため、切削加工による微細穴加工が強く要望されている。

切削加工で高精度微細穴加工を実現するには、①主軸振れを抑制した高精度スピンドルの開発、②機上での工具折損検知システムの構築が、必須の課題となっている。特に、加工中に突発的に生じる工具折損は、破損した工具の一部が穴に詰まり、著しい歩留まり低下を招く。また、加工中の工具摩耗程度をリアルタイムに検知する方法が無いため、機上でのリアルタイム工具折損検知システムの構築が切望されている。

小径の穴加工の場合、工具径に対しての回転スピンドルの振れ精度が真円度に大きく影響してくる。実用に耐えるスピンドルの動的回転振れ<sup>\*5</sup>精度は、工具直径の1/40程度であると学会等では報告されている。これに基づき、 $\phi 0.1\text{mm}$ の穴加工での回転中のスピンドルの動的振れ精度は $2.5\mu\text{m}$ を目標とする。また、スピンドルの静的回転振れ<sup>\*6</sup>は、経験値から動的回転振れの2/5以内が望ましいため、スピンドルの静的回転振れ精度は $1\mu\text{m}$ 以内を目標とする。

1-1 スピンドルの静的回転振れ精度： $1\mu\text{m}$ 以内

1-2 スピンドルの動的回転振れ精度： $2.5\mu\text{m}$ 以内

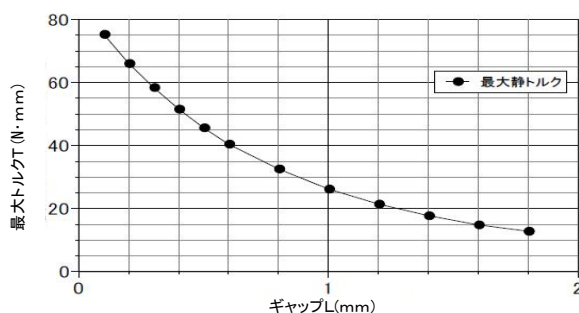


図 1. 磁性体隙間とトルクの関係

## (2) 切削力検出器の高度化

2-1 検知器である磁性体<sup>\*7</sup>の着磁精度(回転角度誤差)： $\pm 0.5$ 度以内を目標とする。

検出磁性体の着磁精度は、非接触伝達機構として動作するため3度程度の回転角度誤差を持っている。微細な加工力を測定するには磁性体配置の精度を向上させる必要がある。

スピンドルの静的な最大トルクは、図1に示すように、磁性体の間隙が1mmの時、約 $25\text{N}\cdot\text{mm}$ である。仮に回転の一周期(360度)において1度の着磁精度であると $0.07\text{N}\cdot\text{mm}$  ( $25/360 \times 1$ )の不確かさを持つことになる。

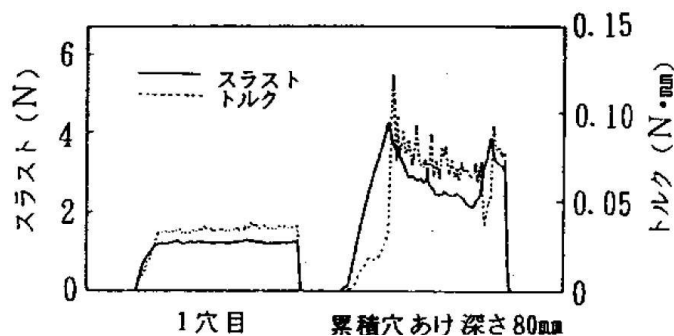


図 2. 穴加工とトルク変化

新品工具から加工により摩耗が進行した場合の加工トルクの変化は、図 2 に示すように  $0.04\sim 0.1\text{N}\cdot\text{mm}$  まで変化する。

従って、摩耗の程度を判断するため着磁精度は  $\pm 0.5$  度 ( $0.035\text{N}\cdot\text{mm}$ ) 以内が必要となる。

2-2 刃物直径  $\phi 0.1\text{mm}$  の工具にかかる加工力： $7.1\times 10^{-4}\text{kgf}\cdot\text{cm}$  程度の検出

ドリルの切削抵抗は半径方向成分が両刃で相殺されるため、軸方向の推力および円周方向のトルクとして現れる。しかし、切削力を解析的に求めるのは切削機構が複雑なため非常に難しい。このため、実験的手法により加工力を求める式 ( $T=4.04\times k_1\times S^{0.8}\times D^{1.8}$ ) が存在する。 $\phi 0.1\text{mm}$  のドリルの加工力 ( $k_1=1.6$ ,  $S=0.002$ ,  $D=0.1$ ) は、 $7.1\times 10^{-4}\text{kgf}\cdot\text{cm}$  ( $0.071\text{N}\cdot\text{mm}$ ) 程度となることから、加工力： $7.1\times 10^{-4}\text{kgf}\cdot\text{cm}$  程度の検出を目標とする。

### (3) 穴切削加工システムの高度化

3-1 試作機による  $\phi 0.1\text{mm}$  穴加工での真円度： $\pm 2\mu\text{m}$  以内の精度を目標とする。

放電加工による穴加工の真円度は、欠け等の発生もあり、 $\pm 5\mu\text{m}$  が限界となっている。燃料の流量制御能力は穴入口と出口の形状に大きく依存するため、川下企業では、真円度： $\pm 2\mu\text{m}$  以内を求めている。

3-2 試作機による  $\phi 0.1\text{mm}$  穴加工後の内面粗さは、 $R_z : 1\mu\text{m}$  以内の精度を目標とする。

放電加工による穴加工後の内面は、一般に放電による影響でクレータ状となるため、研磨による平滑化が行われている。そのため、穴内面粗さは  $R_z : 2\sim 3\mu\text{m}$  が限界となっている。

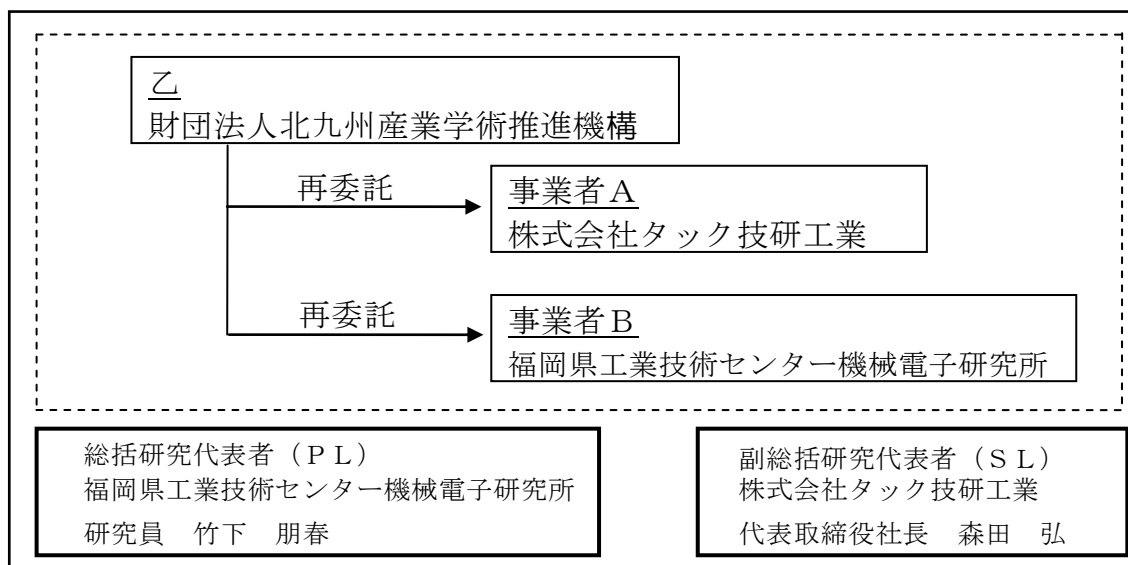
燃料噴射ノズルでは通過する燃料の粒子が乱流にならないようにするため穴内面粗さは  $R_z : 1\mu\text{m}$  を求めている。

本研究開発では、試作スピンドル及び試作検出器で構成する燃料噴射ノズル穴加工機を試作し、試作機による工具外径  $\phi 0.1\text{mm}$  での加工実験を行ない、真円度： $\pm 2\mu\text{m}$  以内及び穴内面粗さ  $R_z : 1\mu\text{m}$  以内が確保できる「微細穴切削加工システム」としての機能の高度化を図る。

市販工具の種類、装置剛性等が真円度、 $R_z$  に及ぼす影響を調べ、その要因を製品化時のスピンドル構造に反映させる。また、試作機は現在市販されている工作機械よりも安価で製造できて、かつ川下企業の要求である占有面積及び全体的高さを抑えたものとする。

[2] 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

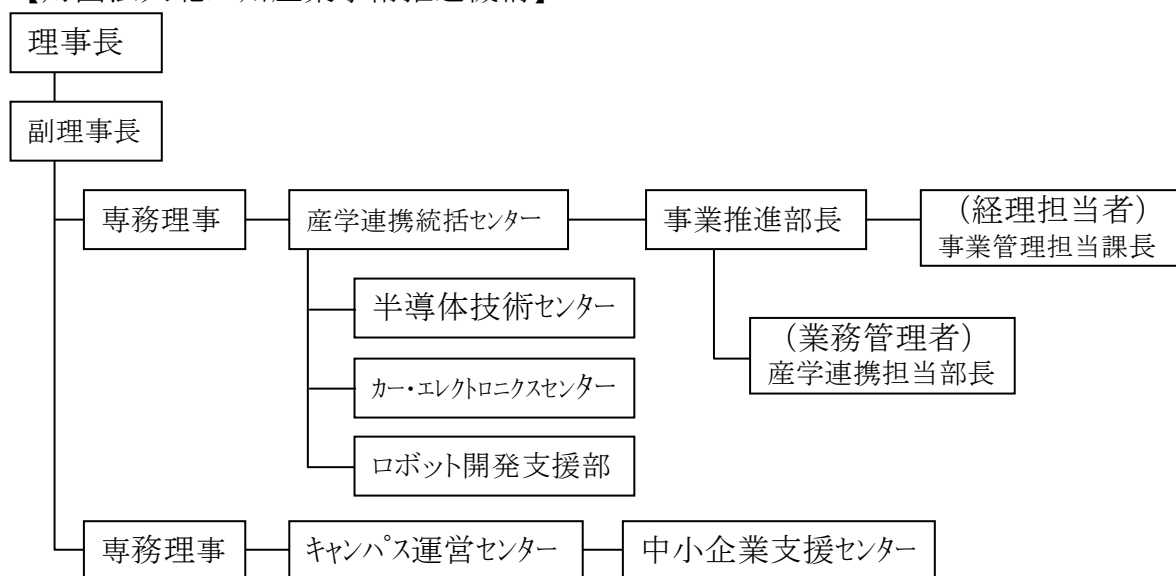
1. 研究組織（全体）



2. 管理体制

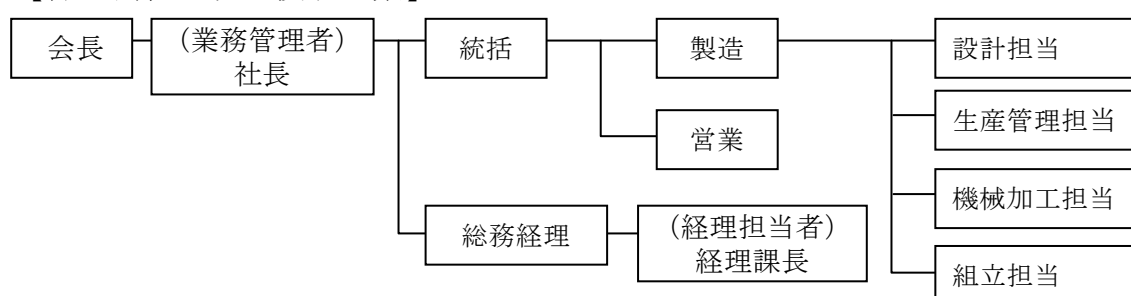
(1) 事業管理者

【財団法人北九州産業学術推進機構】

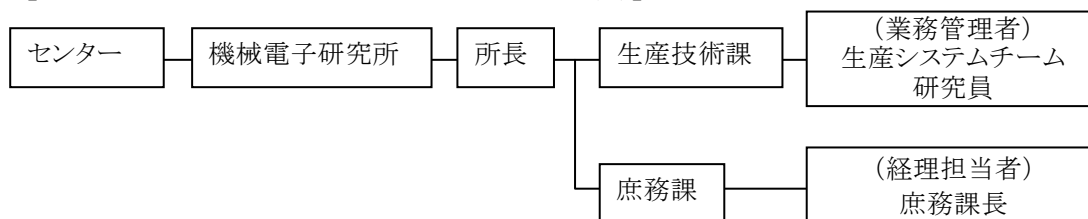


(2) (再委託先)

【株式会社タック技研工業】



【福岡県工業技術センター機械電子研究所】



3. 管理員及び研究員

(1) 事業管理者

財団法人北九州産業学術推進機構  
管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
土山 明美	産学連携統括センター事業推進部・産学連携担当部長	④
森 直樹	産学連携統括センター・知的クラスター担当部長 兼 知的財産部担当部長	④
湯村 隆史	産学連携統括センター事業推進部・事業管理担当課長	④
宮崎 さやか	産学連携統括センター事業推進部・事業管理担当課員	④
大崎 朋子	産学連携統括センター事業推進部・事業管理担当課員	④

(2) 再委託先 ※研究員のみ

株式会社タック技研工業

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
後藤 龍也	設計担当・主任研究員	①～③
河原 孝亮	組立担当・研究員	①～③
小畑 浩和	設計担当・研究員	①～③
岡田 秀俊	設計担当・研究員	①～③
動田 良博	設計担当・研究員	①～③

福岡県工業技術センター機械電子研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
竹下 朋春	生産技術課 生産システムチーム・研究員	②

実施内容(番号)

- ① 微細穴加工専用機の制御装置製作と導入
- ② 微細穴加工の加工精度向上
- ③ 加工力および折損検出データの収集と分析
- ④ プロジェクトの運営管理

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人北九州産業学術推進機構

(経理担当者)産学連携統括センター 事業推進部 事業管理担当課長 湯村 隆史

(業務管理者)産学連携統括センター 事業推進部 産学連携担当部長 土山 明美

(再委託先)

株式会社タック技研工業

(経理担当者) 総務経理 取締役・経理課長 森田 ふみ子

(業務管理者) 代表取締役 社長 森田 弘

福岡県工業技術センター機械電子研究所

(経理担当者) 庶務課 庶務課長 松本 啓

(業務管理者) 生産技術課 生産システムチーム 研究員 竹下 朋春

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
小林 明義	(株)キラ・コーポレーション・執行役員 技術顧問	アドバイザー
鬼鞍 宏猷	九州大学・名誉教授	アドバイザー
村上 洋	九州産業大学工学部機械工学科・講師	アドバイザー
加納 史義	(株)デンソー 生産技術開発部第2生技開発室長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
重松 義廣	(株)タック技研工業・代表取締役会長	S L [委] [委] [委] [委] [委] P L
森田 弘	同上・代表取締役社長	
後藤 龍也	同上・主任研究員	
河原 孝亮	同上・研究員	
小畑 浩和	同上・研究員	
岡田 秀俊	同上・研究員	
動田 良博	同上・研究員	
竹下 朋春	福岡県工業技術センター機械電子研究所 生産技術課生産システムチーム・研究員	
廣瀬 政憲	同上・生産技術課長	
土山 明美	財団法人北九州産業学術推進機構・産学連携担当部長	
森 直樹	同上・知的クラスター担当部長兼知的財産部担当部長	
湯村 隆史	同上・事業推進部 事業管理担当課長	[委]

(5) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望。

(6) その他

なし。



### [3]成果概要

当初設定したスピンドルの高精度化、切削力を検出するための高度化および微細穴加工用としての専用機の試作の全てにおいて設定した目標が正しかったといえ、本研究開発は十分満足のいく結果を得ることができた。

以下に平成23年度に実施した穴切削加工システムの高度化についての成果の概要を記す。

#### 1. 微細穴加工専用機の制御装置製作と導入

今年度は制御装置を製作し、昨年度製作した微細穴加工専用機本体に導入して（組み込み）、微細穴加工専用機の試作機（以下、試作微細穴加工専用機と記す）を製作した。試作微細穴加工専用機は微細穴加工テストに供し、その性能を評価した。また、製品化を目指したシステムとしての完成度向上について検討した。

##### (1) 制御装置の製作・搭載

制御装置の開発にあたっては①製品化し易い、②これまでの工作機と違和感なく使用できる、③開発コストの低減、を事業化の目標とするため、特に次の2点に注力した。

1) スピンドルユニットを種々の装置に搭載可能とすること。

2) 現状の工作機械の操作性と制御を可能な限り踏襲できること。

主操作の手段となるタッチパネルを備え、ここから折損検出機能に必要な加工条件を入力・設定する方式とし、機械本体側の操作は従来方式を踏襲することにして完成させた。次に、微細穴加工専用機の制御装置導入直後（試作微細穴加工専用機）の性能確認のために評価試験を行った。**その結果、設定した項目に対してすべて満足のいく結果を得ることができた。**

##### (2) 製品化を目指した機能・性能の検討

試作微細穴加工専用機の加工時の動作軸であるZ軸は、**振動も無く非常に円滑な動作を達成した。加工実験結果では、使用した数社の市販ドリルメーカー各社の加工精度と比較し、いずれも良好な結果が得られた。**

これらの結果を踏まえて、試作微細穴加工専用機を製品化するための総合評価を行った。

#### 2. 微細穴加工の加工精度向上

##### (1) 加工精度の高度化

**川下企業の要求精度から設定した真円度および面粗さの目標値を達成した。**

目標値：真円度  $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内      面粗さ Rz  $1 \mu\text{m}$ 以内  
達成できた主な要因として、

①高精度なスピンドルユニットの試作

②円滑な動作を実行する微細穴加工専用機の開発と試作

③本テーマで入手できた機器設備の活用

などが上げられる。

##### (2) 市販工具の種類や装置剛性が加工精度に及ぼす影響

**加工精度は、国内の工具ではいずれも良い結果を得ている。**これは、試作

微細穴加工専用機の良い性能と安定した装置剛性により得られたものである。

### 3. 加工力および折損検出データの収集と分析

#### (1) 市販工具の種類による加工力の相違

市販の各種工具について調査した結果、工具メーカーにより推奨加工条件、工具刃型形状、表面のコーティングなどその仕様は異なっていることが分かった。しかしながら、それら**仕様の相違は加工力や折損検知に対して影響しなかった。**

#### (2) 折損時のトルク検出データの収集

**工具折損時のトルク形状は大別して以下の2種類**であることが分かった。

- ①加工しているはずの加工力が突然消滅するタイプ
- ②加工途中で突然通常の数倍の加工力が現われ、次の瞬間に加工力が消滅するタイプ

#### (3) 折損検出の閾値の検討

工具折損における前項の2つのタイプから折損検知方法を検討した。

- ①に対して：加工途中で加工力が消滅することから、加工開始および終了を認知することにより、この間に必ず存在しているはずである加工力の消滅を検知させ、折損として認識する方法が採用できる。
  - ②に対して：通常の加工力から数倍大きな加工力を閾値として設定し、この閾値を検出した場合に折損として認識する方法が採用できる。
- 以上の2つを折損検出方法とすることで**折損検出は可能**となる。  
今後は実用化検証を経て製品化に向けた補完研究を実施する。

以上、実施計画書に設定した研究開発テーマは全て完遂することができた。

#### [4] 当該研究開発の連絡窓口

財団法人北九州産業学術推進機構

産学連携担当部長 土山 明美

TEL：093-695-3006

FAX：093-695-3018

E-mail：a-tsuchiya@ksrp.or.jp

## 第2章 本論

### [1] 微細穴加工専用機の制御装置製作と導入

今年度は制御装置を開発し、昨年度製作した微細穴加工専用機本体（制御装置なし）に搭載し、微細穴の加工テストに供する試作機（以下、試作微細穴加工専用機と記す）を完成させた。

さらに、試作微細穴加工専用機を使用して評価および加工テストを実施し、その結果を装置性能に反映させ、製品化を目指したシステムとしての機能と性能を検討した。

#### [1]－1 制御装置の製作・搭載

製作する制御装置は、以下の2つに大分される。

- ①昨年度までに開発した加工力検出センサーを保有するスピンドルユニット（(株)タック技研工業で開発）と微細穴加工専用機の工作機械との通信を担うタッチパネルからなる制御装置（以下、スピンドルユニット部制御装置と記す）。
- ②操作部を含む工作機械本体部を動かす制御装置（以下、NC制御装置と記す）。操作部は、マシニングセンタ（MCマシン）などに通常みられる装置である。これについては、微細穴加工専用機製作メーカーで製作する。

制御装置を開発するにあたっては製品化し易く、これまでの工作機と違和感なく使用できること、および開発コストの低減を目標とし、特に以下の2点に注力した。

①スピンドルユニットは種々の装置に搭載可能であること。

②現状の工作機械の操作性と制御を可能な限り踏襲できること。

ただし、折損検出機能は確保し、現状の工作機にオプション的に付加できるようにする。

##### (1) 制御装置全体構成

制御方式は多岐に渡るため、制御装置は製作部分を前述のように2つに大別した。まず、個別機器に必要な機能や性能を決め、全体構成を検討することにした。次に、個別機器を詳細に検討した。

ここでの課題は、①スピンドルユニット部制御装置とNC制御装置をつないで一体化するための通信方式、②操作の主体部、であった。これらに関しては、前述のように注力する2点を決めていたため解決することができた。

次にこれまでの設計思想からタッチパネルを操作の主体部とした。具体的には、タッチパネルに折損検出に必要な加工条件などをすべて入力し、NC側には加工するために必要な情報を通信によって伝達することにした。これにより、NC側のプログラミングは基本的には現状のままとなり、特殊な機能のみを作り込むことで対応できるようになった。

実機制御装置の構成について、NC側は既製品の微細穴加工機の形態を採用し、操作盤は微細穴加工専用機本体の右横に設置した。制御装置本体は別置きとした。

スピンドルユニット側は主操作部となるタッチパネルをNC側操作盤の下側に斜め上向きに設置した。制御装置本体は微細穴加工専用機本体の右下に配置

し、NC側操作盤よりも右側に飛び出さないようにした。制御装置全体のレイアウトを図1に示す。

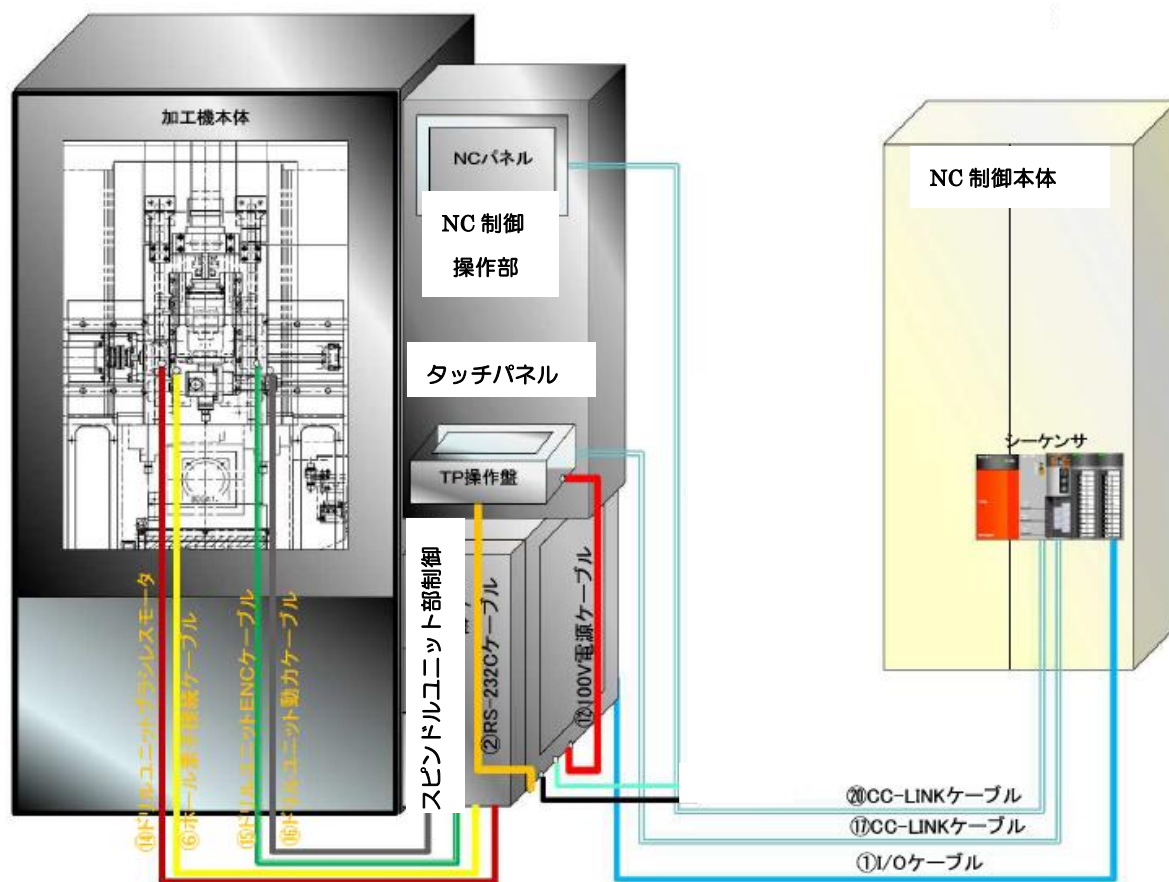


図1 制御装置構成

## (2) スピンドルユニット部制御装置

昨年度は、二重化ホール素子を使用することで加工力の検出精度の向上につなげた。

本年度は、さらなる検出精度の向上を目指して新たなホール素子について検討した。この新たな素子の検出精度は、昨年度に使用したホール素子と比較した結果、5～6倍向上した。



写真1 試作機に搭載したスピンドルユニット部制御盤

タッチパネルは、スピンドルユニット部制御とNC制御間をつなぐ通信の役割と微細穴加工専用機の主操作部とし、折損検出機能を指令する役割を持たせた。また、製品化時の加工力の表示やメンテナンス機能の確保に適した仕様を選定した。



写真2 微細穴加工専用機の操作パネル外観



写真3 タッチパネル表示例

### (3) NC制御装置

NC制御装置は既製品の機能や性能を基本とし、通信機能や非常停止機能のためなどに専用の入出力信号（I/O）を追加している。また、折損検出用機能や性能の向上に向けた改造も加えて構成した。写真5に制御盤の外観と内部を示す（操作パネルは写真2および3を参照）。



(a) 制御盤外観



(b) 制御盤内部

写真4 NC制御装置の外観

### (4) 完成品外観



写真5 試作微細穴加工専用機の外観

## (5) 試作機の評価試験

制御装置を搭載した試作微細穴加工専用機について、基本的なマシン性能を調べ、微細穴加工に必要な性能を確保するために導入後の評価試験、すなわち試作微細穴加工専用機の評価試験を実施した。評価試験結果のまとめを表1に示す。

表1 試作微細穴加工専用機の試験結果

No	項目	評価仕様	(判定基準)	結果
1	Z軸動き	①Z軸振動(加速度、振幅) ②テーブル振動測定 ③周波数分析	異常な振動	○ 特になし(振動加速度は測定器のノイズレベル以下)
2	Z軸0.1μm応答	最小設定単位応答測定(上下両方向)	0.1μm以下で応答	○ 良好
3	Z軸両方向繰返し精度	同じポイントに両方向から動かした時の精度(試験成績書参照)	1μm以下(参考値)	○ 良好
4	各軸の剛性	①固有振動数(Z軸剛性、主軸ヘッドにて) ②ガタ ③ロストモーション量* <sup>8</sup>	参考値	○ ①各軸方向とも十分 ②なし ③微少
5	試験成績書	試験成績書で評価	参考値	○ 特に問題なし

## [1]ー2 製品化を目指した機能や性能の検討

### (1) 市販工具メーカーの影響

加工条件は任意で設定し実験を行った結果、加工精度は特徴ある結果が得られた。高精度と工具寿命は相反する傾向がみられた。

### (2) 装置剛性の影響

スピンドルユニットを搭載したZ軸は、重力負荷をバランスさせるためのシリンダを用いることで、慣性負荷の制御の効果が生じ非常に良い動作が実現できた。

微細な穴加工に関してのみ評価した場合、マシニングセンタでの加工テストと比較して、試作微細穴加工専用機を使用の方が安定した加工ができています。懸念していた微少な動きに対しても、円滑に安定した動作をしていることが分かった。

以上のことから、開発した試作微細穴加工専用機は評価試験結果に示すように、十分満足がいくものができています。

### (3) 総合評価

表2に総合評価を示す。

表2 総合評価

項目	製品化条件（実計等より）	製品化を前提にした評価
①製品まとめ	①現工作機より安価 ②専有面積・高さを抑える	①不要機能を排除し、低コスト化
②大きさ	上記②参照	
③盤まとめ	タッチパネルを含む機能と配置： 既工作機に追加可能な構造	単体売り：構造から見直して製品化が必要（現状は試作品）
④機能・性能	①加工精度の確保 ②既工作機+ $\alpha$ （単体売り） ③大型MCより安定した加工	①達成 ②上記単体売りおよび通信機能への対応も必須

### (4) スピンドルユニットの評価

微細穴加工専用機に搭載した結果からは、大きさ、性能、機能ともすべて満足しており、一切の不具合等見当たらない良好な状況であった。これは、スピンドルユニットに設定した目標値が適正であったためと推察している。ただし、製品化を考えた場合、製造コスト面に応じた機能や性能の設定が必要になると思われる。これについては補完研究の課題としている。

#### [2] 微細穴加工の加工精度向上

川下企業からの要求事項は真円度および面粗さであり、この2点を達成するため、微小ドリルを製造販売している工具メーカを訪問した。微細穴加工についての情報交換を目的にヒアリングを行った。その結果、微細穴加工技術は各メーカのノウハウであり、技術における論理的な整理はなされていないことが分かった。しかしながら、ヒアリングを基に評価テスト実施にあたって、以下のように4つに留意した。

- ①切粉の排出。
- ②回転数の設定：遅過ぎると焼き付き、負荷が大、面粗さも悪い。  
速過ぎると負荷が大、折損発生率大、面粗さも悪い。
- ③実験を繰り返し、悪要因を解明する。
- ④評価方法は、加工時間の長短とするが、工具刃先のヘタリ、負荷、面粗さ、折損発生状況を加味する。

#### [2]-1 加工精度の高度化

微細穴加工専用機を試作するにあたって、特に川下企業の要求事項である加工精度（真円度、面粗さ）を達成するために、微細穴加工専用機本体部分の製作委託メーカの選定条件としては、微細穴加工装置製作に実績のあることを前提とした。その結果、制御装置と高速スピンドルユニットを搭載させた試作微細穴加工専用機用制御装置での評価試験結果は全く問題点がなく、加工テストにおいても円滑な動作を達成し、良好な結果を得ている。

加工精度の評価は、

- ①工具の種類によっては十分満足いく結果が得られた。
- ②分析結果をみると精度の悪化を招く要因の一つとして、切粉が絡み付



いて面精度を悪化させている傾向がある。

③メーカーによって傾向がある程度明確に出ている。

- ・バラツキ小さく、安定した加工ができています。
- ・寿命は長いですが、条件次第で精度悪化。

結論として平成22～23年度に試作したスピンドルユニットおよび試作微細穴加工専用機が十分に機能したため、良好な結果が得られたといえる。特に今年度においては、試作微細穴加工専用機のZ軸の動作が非常に円滑であることや、振動がないことなどが全体に大きな効果を発揮したと思われる。

## [2]－2 市販工具の種類や装置剛性が加工精度に及ぼす影響

### (1) 市販工具が加工精度に及ぼす影響

市販工具が加工精度に及ぼす影響は、市販の各メーカーのドリルの特徴を加味して評価した。

加工テストの結果から、真円度は、基本的にはどのメーカーの工具も良い結果を得ているが、この結果は、切粉排出の良否に影響されていることが分かった。つまり、切粉の排出、形状、大きさなどが精度に大きく影響することが示唆された。

### (2) 微細穴加工専用機の剛性が加工精度に及ぼす影響

微細穴加工専用機の導入にあたって実施した評価試験の剛性に関する結果の評価として、非常に高い剛性があることが判明した。さらに、動作性については加工テストや評価試験結果で使用したマシニングセンタよりも円滑な動作を体感した。これらのことから、剛性による振動やビビリなどの影響は全く無視できるレベルであり、動特性においても全く問題のない結果を試作微細穴加工専用機で実現できたといえる。

加工精度については、試作微細穴加工専用機の評価試験項目において、いずれも十分に満足した結果が得られており、影響を与えないレベルにあることが示されている。

## [3] 加工力および折損検出データの収集と分析

加工力および折損検出データの収集を行うための穴加工実験を行った。また、前項の加工精度の高度化で行ったテストデータからも検討を加えた。

### [3]－1 市販工具の種類による加工力の相違

加工精度は加工力が小さいから精度が良いのではなく、加工中に発生する切粉の状態に影響されていると思われる。

### [3]－2 折損時のトルク検出データの収集

これまでのテスト結果から、折損した場合の主なパターンとして以下の2種類あることが分かった。

- (1) 工具折損時に突然トルク波形が消滅するパターン
- (2) 工具折損時に急激に増大したトルク信号が発生するパターン

### [3]ー3 折損検出の閾値の検討

工具折損時のトルク測定結果から、折損検出の閾値について検討した。工具折損時のトルク波形の挙動は上記に示している2種類に分類できた。この例も含めて工具折損の閾値を検討した。

#### (1) 波形消滅の場合 (パターン㉔)

本実験では最も頻度の高い波形パターンである。この場合、加工開始から終了までのトルク信号の範囲が予め推定できる。このため、加工開始からのトルク信号の範囲から逸脱する信号(異常信号)を判別することによって工具折損検知が可能となる。

#### (2) 波形突出の場合 (パターン㉕)

トルク信号が瞬時に増大するパターンである。この場合には、閾値を設定することが比較的容易であると考えられる。このため、工具折損検知は閾値の検知により判定するシステムを製作することで可能となる。

以上、これまでに得られた折損パターン形状から類推して折損の検知方法を検討したが、これらの方法によって検知することは可能である。

この検証は補完研究の中で確認して製品化につなげることとする。

## 第3章 全体総括

平成22～23年度における研究開発の総括を記す。

### [1] 研究開発成果

#### 1. 切削力検出器の高度化

微細な加工力を検出するために必要な検出器について高度化を図った。検出器はスピンドルモータから非接触でスピンドルにトルク伝達するためのマグネット、および微細な加工力によってマグネット間の位相のずれを検出するセンサーから構成されている。

マグネットは精度を確保するための専用の着磁装置<sup>\*9</sup>を製作し、所望の精度を確保することができた。また、精度向上を図るべく検出センサーは二重構造を採用して検出のばらつきを低減した。

その結果、ドリル外径0.1mmでの加工力も検出が可能であることを実験で確認できた。

#### 2. 穴切削加工システムの高度化

##### (1) 微細穴加工専用機の試作と評価

完成した試作機は微細穴加工専用機として必要と思われる機能・性能についての評価試験を行ったが、すべてにおいて満足する結果を得ることができた。この主な要因としては、実績のあるメーカーを選定したこと、お互いの協力・協業が円滑になされた結果である。

##### (2) 加工精度の向上と加工力検出

真円度および面粗さとも目標を達成した。

選定した市販工具によっては加工力の大きさに相違はあったが、折損検出

に対しては十分に検知可能なことが分かった。

以上から、当初設定したスピンドルの高精度化、切削力を検出するための高度化および微細穴加工用としての専用機の試作の全てにおいて設定した目標が適正であったといえる。本研究開発では、適切な目標に対して十分満足の結果を得ることができた。

## [2] 研究開発後の課題・事業化展開

### 1. 課題

製品化までの主な課題として、

- 1) 折損・摩耗検知の仕組み作り
- 2) 折損・摩耗検知するための被削材毎への対応
- 3) 製品化設計と商品化
- 4) コストダウン
- 5) 適用（高性能スピンドルの搭載）・用途の開発
- 6) 今後の開発費用の確保

などがあり、補完研究で実施していく予定である。

### 2. 事業化展開

川下企業であり、本研究開発の協力機関を対象に事業展開を図るが、そのためにはさらなる製品化に向けて折損検出の仕組み作り、製品設計、各種被削材への対応や低コスト化など多くの課題を乗り越える必要があると同時に、今後の開発費用、用途・販路の拡大や生産体制の構築が大きな課題になると考えられる。

来年度からはこれらの課題を克服すべく補完研究として活動し、製品化を図る所存である。

◆ 用語の説明 ◆

- \* 1 スピンドル・スピンドルユニット  
スピンドルとは、加工を施す工作物、または工具を取り付けて回転させる最も主要な軸のこと。主軸とも呼ばれる。  
スピンドルモータは、スピンドルを駆動するためのモータのこと。  
スピンドルユニットとは、本研究開発で使用するスピンドルモータとスピンドルを組み合わせたものを指し、本研究開発のための造語。
- \* 2 面粗さ  
面粗さの表記法の一つである。粗さ測定後の断面曲線について、傷とみなされるような並はずれて高い山や深い谷のない部分から、基準長さ  $L$  を抜き取った部分の最大高さを求めてマイクロメートル ( $\mu\text{m}$ ) で表わしたものの。
- \* 3 位相差  
2つの振動または波動の位相の差のこと。ここではスピンドルモータに付したマグネットとスピンドルに付したマグネットの間の位相のずれ量をいう。
- \* 4 放電加工  
電極と被加工物との間で発生させた火花（アーク）放電によって被加工物表面の一部を加熱溶融除去する機械加工の方法である。
- \* 5 動的回転振れ  
運転・負荷状態においてスピンドルの回転による遠心力、振動、熱等によって発生する回転中心軸との変位量。マイクロメートル ( $\mu\text{m}$ ) 等で表わす。
- \* 6 静的回転振れ  
無負荷状態においてスピンドルを手で回転させ、回転中心軸との変位量を測定した数値。マイクロメートル ( $\mu\text{m}$ ) 等で表わす。
- \* 7 磁性体  
磁性を帯びることが可能な物質のこと。
- \* 8 ロストモーション  
進行方向を反転させて同じ量を動かしたときに生じる誤差のこと。
- \* 9 着磁装置  
着磁装置は磁性体を磁化させるための装置（着磁コイルもその一種）と専用の電源部からなる。



**リサイクル適性** 

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。