

平成21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」

研究開発成果報告書

平成22年 5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. 3
[2] 実施計画内容	P. 4
[3] 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	P. 7
[4] 成果概要	P. 10
[5] 当該研究機関の連絡窓口	P. 12
第2章 本論	
[1] 現状スピンドルの振動特性把握	
[1]－1 振動測定	P. 13
[1]－2 動的回転振れ量の測定	P. 13
[1]－3 静的回転振れ量の測定	P. 14
[1]－4 3次元解析のシミュレーション	P. 14
[2] 開発スピンドルの設計	
[2]－1 川下企業での聞き取り調査	P. 17
[2]－2 熱影響の抑制	P. 17
[2]－3 回転振れ抑制	P. 18
[2]－3－1 空気静圧軸受を用いた実験による検証	P. 18
[2]－3－2 3次元解析によるシミュレーション	P. 18
[2]－3－3 スピンドル構造の決定	P. 20
[3] 試作機の製作	
[3]－a センター研磨機による予備実験	P. 21
[3]－b 平面研削盤による予備実験	P. 23
[3]－1 シャフトの製作精度	P. 25
[3]－2 シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度	P. 26
[3]－3 シャフトの軸心に対する同心度	P. 27
[3]－4 質量バランス修正	P. 28
[3]－5 ドリルユニットの試作	P. 28
[4] 切削加工実験と加工精度の評価	P. 31
[5] スピンドル構造の確立	P. 33
第3章 総括	
[1] 結論	P. 34
[2] 今後の課題	P. 34

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

当該川下製造業者等では、理想的な燃料噴射制御による低燃費、低公害型のディーゼルエンジンを開発・製造している。更なる低燃費化を実現するには、燃料の高圧噴射化や噴霧微細化技術を確立し、燃焼効率の向上が課題となっている。燃料の高圧噴射化や噴霧微細化には、燃料噴射ノズルの穴（以下、ノズル穴と記す）を微小径化し、複数個配置した構造にする必要がある。また、ノズル穴の形状（面精度、表面粗さ）は燃料の流れに大きな影響を及ぼし、燃焼効率に反映される。このようなことから、燃料噴射ノズルでは穴径： $\phi 0.1\text{mm}$ 、穴内面粗さ（Rz）^{*1}： $2\sim 3\mu\text{m}$ 以内の高精度な微細穴加工技術の確立が望まれている。

穴加工方法は、放電加工^{*2}と切削加工に2分されるが、一般的に歩留まりやコストの面から、 $\phi 0.15\text{mm}$ 以上の穴加工には切削加工を用い、それ以下の微細穴加工には放電加工が用いられている。しかしながら、放電加工では加工変質層等除去目的の研磨を余儀なくされており、穴内面精度に限界（現状、Rz： $2\sim 3\mu\text{m}$ 以内は困難）があること等から、低コストである切削加工による微細穴加工が強く要望されている。切削加工における高精度な微細穴加工は、超高速回転（ $50,000\text{rpm}$ 程度）での加工機が必要であるが、高速回転になるほど加工中の工具摩耗や突発的な工具折損を生じる。これらを防止するため、本テーマでは工具を支持するスピンドル^{*3}の回転振れ抑制技術や、加工中の工具摩耗・折損の事前検知システムを開発し、切削加工技術の高度化を図ることで高精度微細穴加工技術の開発に繋げることを目的としている。本事業ではその一部である $\phi 0.1\text{mm}$ の穴加工が可能なドリルユニットの開発を行い、事業終了後の補完研究により、工具摩耗及び折損検知に係るセンサー一部を開発し、事業化に繋げる予定である。

これらの目的を達成するために、本事業では以下の技術的目標を設定している。

◆技術的目標

面精度向上と加工形状の微細化（H21年度）

- (1) スピンドルの静的回転振れ^{*4}精度： $1\mu\text{m}$ 以内
- (2) スピンドルの動的回転振れ^{*5}精度： $2.5\mu\text{m}$ 以内

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 μmを目標とする。

また、スピンドルの静的回転振れは、(株) タック技研工業の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 μm以内を目標とする。

[2] 実施計画内容

それぞれの研究項目と分担は次のとおりである。

1. 現状スピンドルの振動特性把握 (担当：タック技研工業)

スピンドルは超高速回転を行う（最高回転数：50,000rpm 以上）ため、スピンドル先端部に装着した工具には動的回転振れが発生し、加工精度を低化させる。

ボールベアリング仕様の実験用スピンドルを用い、シミュレーションによる振動解析値と振動測定の実測値との関係について把握し、下記2のバックデータとする。

図1に実施フローを示す。

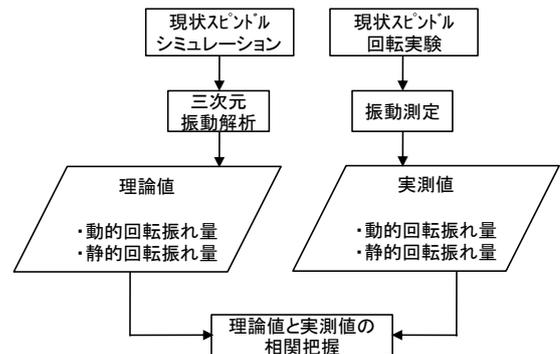


図1 現状スピンドルの振動特性把握

2. 開発スピンドルの設計 (空気静圧軸受*6仕様)

(1) 川下企業での聞き取り調査 (担当：タック技研工業)

ノズル穴加工の現状と課題抽出のため情報交換を行う。

(2) 熱影響の抑制 (担当：タック技研工業)

スピンドルの回転時に生じる熱による熱膨張を抑制するために、熱伝導の小さい空気静圧軸受を採用した実験を行う。スピンドルの温度上昇：15℃以下となる、スピンドル軸受の隙間及び高压空気供給圧力の決定を行う。実施フローを図2に示す。

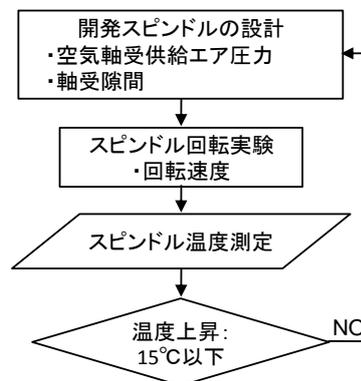


図2 熱影響の抑制実験フロー

(3) 回転振れ抑制 (担当：タック技研工業)

スピンドルの剛性は隙間厚さや高压空気供給圧力により変化する。このため、

(2) で絞り込んだ条件下で更に回転実験を行い、動的回転振れ・静的回転振れとスピンドル構造の関係を把握する。三次元解析によりシミュレーションを行い、振動特性を評価する。1項でのデータを基に、解析値と実測値との補正を考慮した隙間厚さ、高压空気供給圧力を決定する。実施フローを図3に示す。

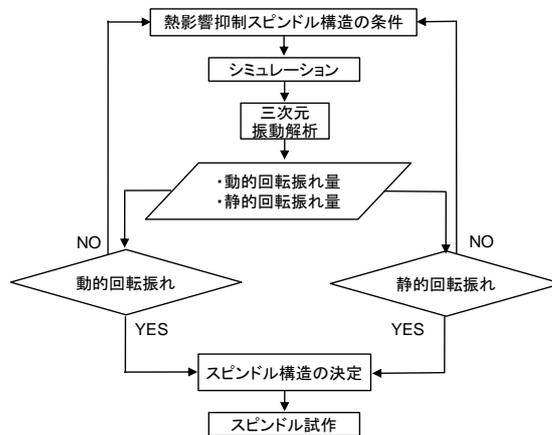


図3 回転抑制実験フロー

3. 試作機の製作

スピンドル軸の試作では、高速スピンドルの動的回転振れと振動を抑えるために部品1つ1つの加工精度を向上させる必要がある。センター研磨機及び平面研削盤を用いた加工を行う。加工実験や検証の効率化を図るため、試作機は2台とする。試作機の作製からスピンドル構造の確立までの実施概略のフローを図4に示す。

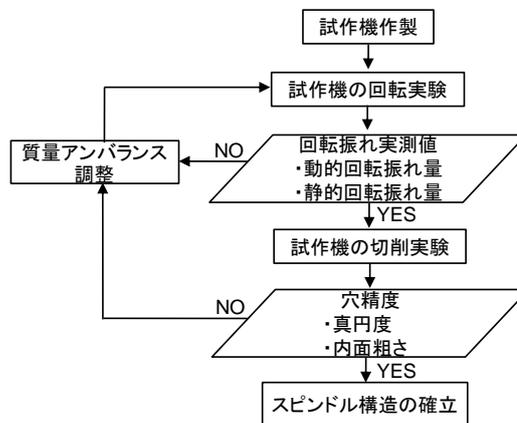


図4 試作機の作製からスピンドル構造の確立までの実施概略のフロー

(1) シャフト (担当：タック技研工業)

特に回転体になるシャフトについては製作精度が重要である。仕上げ精度は表面粗さ：Ra0.05 μm以内、真円度：2 μm以内とする。

(2) シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度 (担当：タック技研工業)

シャフトと空気静圧軸受が接触する端面は、回転振れ抑制のため平行度：3 μm 以内とする。これに付随する取付部品に対しても平行度：3 μm 以内の精度となる加工を行う。

(3) シャフトの軸心に対する同心度（担当：タック技研工業）

シャフトの軸心に対する同心度：2 μm 以内の加工を行う。

(4) 質量バランス修正（担当：タック技研工業）

50,000rpm 程度の回転領域になると、回転するロータが受ける遠心力が非常に大きくなる。低振動化のために、経験値から質量アンバランス：5mg 以内とする質量アンバランス修正^{*7}を行い、動的振れ精度を向上させる。

4. 切削加工実験と加工精度の評価

(1) 切削加工実験（担当：タック技研工業、福岡県工業技術センター）

工具径の違いによる加工状態を把握するため、製作した試作機を用いた切削穴加工実験を行う。被加工物と工具先端の距離はベースマスターマイクロを使用する。被加工物はノズルと同等材質（ステンレス鋼）を用いる。福岡県工業技術センターの指導下でタック技研工業が加工実験を行う。

(2) 切削加工精度の評価（担当：福岡県工業技術センター）

切削加工後の穴の精度（真円度、内面の粗さ）について評価する。穴内面粗さは、表面形状測定機で測定を行い、穴内部の真円度は鹿児島大学のシーズである、特殊微細プローブでのレーザ測定を行う。

加工精度の評価については川下企業、九州大学、鹿児島大学と情報交換を行いながら進める。また、微細穴加工技術の高度化は、業界ではしのぎを削っている。このため、微細加工用スピンドルやドリル加工に関する世界最先端技術、製品事例が展示される「ナノテクノロジー総合展」において技術動向を把握し、目標値の妥当性の検討を行いながら研究を進める。

5. スピンドル構造の確立（担当：タック技研工業）

4 項の切削加工実験と加工精度の評価結果を基に構造設計を決定する。更に、耐久性の確認及び加工対象としているステンレス系以外の素材での実験や、目標値以上の深穴加工（L（長さ）/D（内径）：5）を行い、回転振れ精度、加工穴の精度の確認を行い、スピンドル構造を確立する。

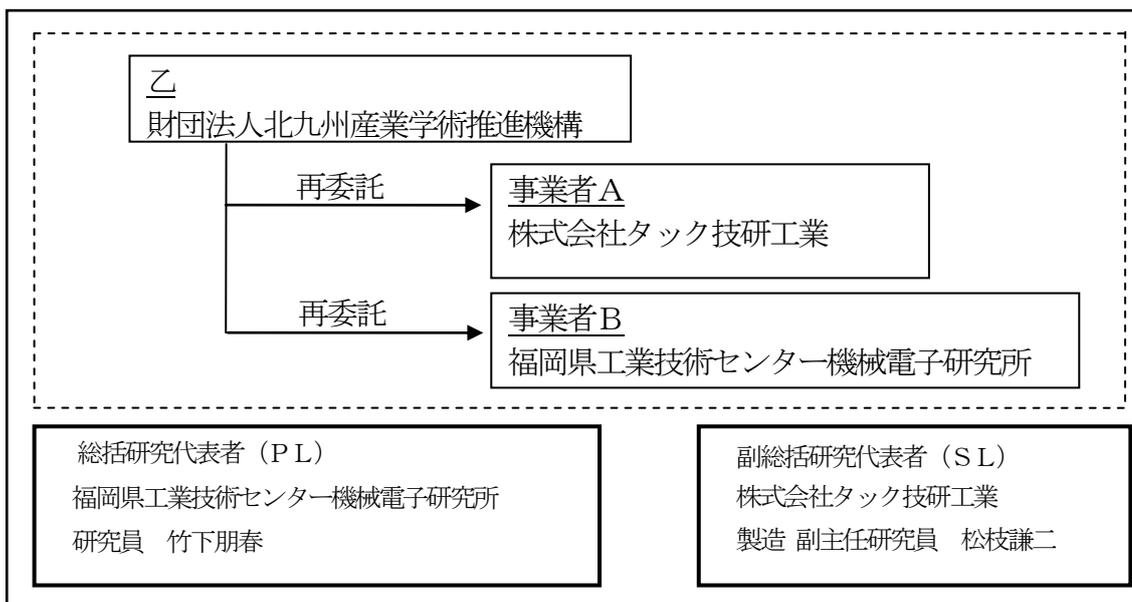
6. プロジェクトの管理・運営（担当：財団法人北九州産業学術推進機構）

事業推進委員会の開催、実務者会議の開催等、当該プロジェクトが円滑に運営され、かつ目標が確実に達成できるように、プロジェクト全体の運営と進捗管理を行う。

また、本年度の研究開発の実施内容を整理し、経理報告書と成果報告書の取りまとめを行う。

[3] 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

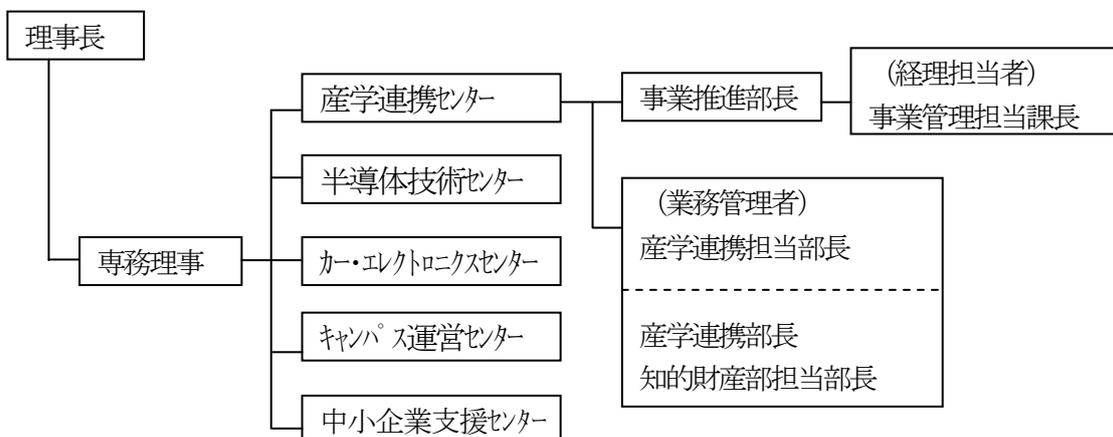
1. 研究組織 (全体)



2. 管理体制

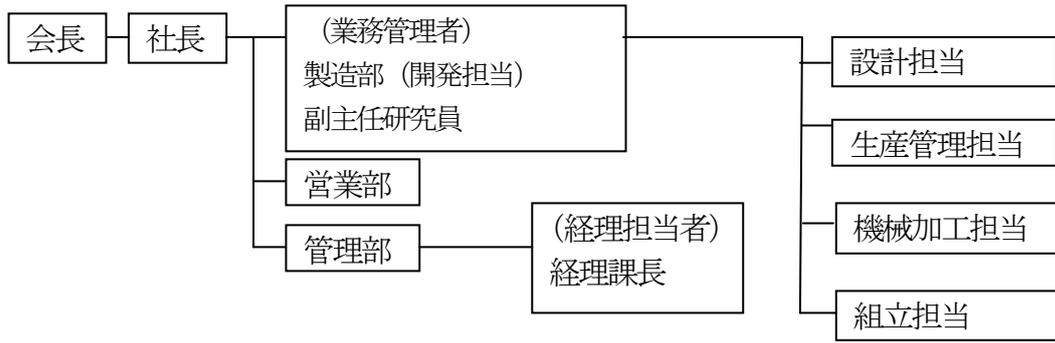
(1) 事業管理者

【財団法人北九州産業学術推進機構】

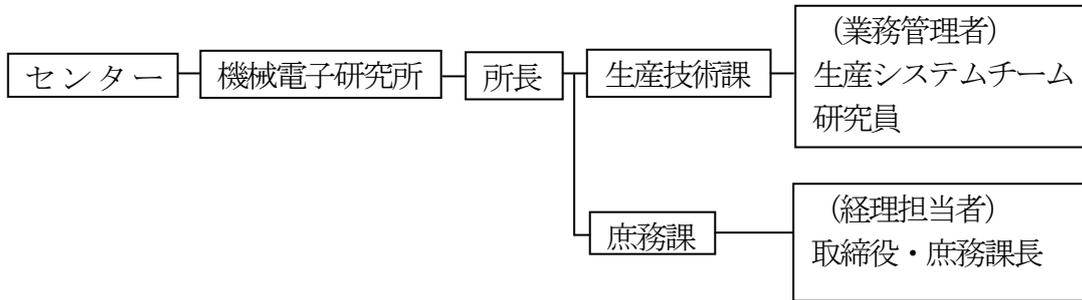


(2) 再委託先

【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
春日 伸一	産学連携センター・産学連携部長
土山 明美	同上 ・産学連携担当部長
森 直樹	同上 ・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
玉眞 直紀	同上事業推進部・事業管理担当課 主任

(2) 再委託先 ※研究員のみ

1) 株式会社タック技研工業

氏名	所属・役職
松枝 謙二	開発担当・副主任研究員
後藤 龍也	設計担当・主任研究員
河原 孝亮	組立担当・研究員
小畑 浩和	組立担当・研究員
岡田 秀俊	設計担当・研究員

2) 福岡県工業技術センター機械電子研究所

氏名	所属・役職
竹下 朋春	生産技術課 生産システムチーム・研究員

(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) 産学連携センター 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) 管理部 取締役・経理課長 森田ふみ子

(業務管理者) 製造 副主任研究員 松枝謙二

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
鬼鞍 宏猷 村上 洋	九州大学大学院工学研究院・教授 鹿児島大学大学院理工学研究科(工学系)・助教	アドバイザー アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
重松 義廣 森田 弘 松枝 謙二 後藤 龍也 竹下 朋春	(株)タック技研工業・取締役会長 同上・代表取締役社長 同上・副主任研究員 同上・主任研究員 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	委SL 委 委PL
中村 憲和 春日 伸一	同上・生産技術課長 (財)北九州産業学術推進機構 産学連携セン ター・産学連携部長	
土山 明美 森 直樹 湯村 隆史 玉眞 直紀	同上・産学連携担当部長 同上・知的財産部担当部長 同上事業推進部・事業管理担当課長 同上事業推進部・事業管理担当課 主任	

[4] 成果概要

以下に実施内容の成果概要を記す。

1. 現状スピンドルの振動特性把握

ボールベアリング仕様の実験用スピンドルを用い、振動・動的回転振れ量・静的回転振れ量の実測を行った。更に実験用スピンドルの2次元図面データを3次元図面に変換し、シミュレーションによる振動解析と振動測定の実測値との関係について把握ができた。このことにより、開発スピンドルを設計する際に必要な3次元解析のシミュレーションにおける条件設定を明確にすることができた。

2. 開発スピンドルの設計（空気静圧軸受仕様）

(1) 川下企業での聞き取り調査

ノズル穴加工の現状と課題抽出のため川下企業に出向き、質疑方式で情報交換を行った。これまでに取り組まれた研究の内容や、今回の研究で加工実験を行うにあたってのアドバイス等、踏み込んだ情報交換等も行え、製品開発に対する期待度も大きく、有意義な打ち合わせが実施できた。

(2) 熱影響の抑制

熱伝導が小さく、かつ、剛性に優れる空気静圧軸受として多孔質絞りのタイプを採用した実験を行った。モータ部の発熱等の影響が懸念されたが、スピンドルの温度上昇は13℃であり、15℃以下という目標を達成することができた。スピンドルと軸受の隙間寸法、及び、空気供給圧力の変化による温度上昇への影響についても検証ができた。このことにより、スピンドルの回転時に生じる熱による熱膨張を抑制することができる見通しが行えた。

(3) 回転振れ抑制

スピンドルの剛性は空気静圧軸受との隙間厚さや高圧空気圧力により変化するため、空気静圧軸受を用いた実験による検証を行った。実験により、設定隙間と剛性の関係等についての把握ができた。スピンドルの形状については、1項で得られたデータを基にした3次元解析のシミュレーションにより振動特性の評価を行い、振動値の小さい形状を設計することができた。また、組み立て後に発生する質量アンバランスについても修正する構造が実現できた。これらにより、スピンドル回転時の振れを抑える見通しが行えた。更に、(1)項で実施した川下企業との情報交換で得た内容や、九州大学大学院工学研究院の鬼鞍教授から頂いたアドバイス等も加味し、スピンドル構造を決定することができた。

3. 試作機の製作

微細穴加工の加工精度向上には、高速スピンドルの動的回転振れと振動を抑制することが不可欠である。そのために部品1つ1つの加工精度を向上させることが必要なことから、高加工精度のセンター研磨機及び平面研削盤を用いた加工を行うこととした。よりよい加工精度を得るために、いかなる条件における加工が望ましいのかを予備実験により検証し、スピンドル部品の加工に適用することで目標とする

加工精度を達成することができた。また、実施計画内容に挙げていない部品についても、加工精度が重要であるものに関しては、その加工精度を検証しながら製作を行った。

(1) シャフトの製作精度向上

仕上げ精度の目標として、表面粗さ：Ra0.05 μm 以内、真円度：2 μm 以内としたが、結果として、表面粗さ：Ra0.035 μm 、真円度：0.40 μm を達成することができた。

(2) シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度向上

シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度と、空気静圧軸受の取り付けに使用するスペーサと呼ぶ部品の平行度について、その両方ともに精度が求められる。目標値として設定した 3 μm 以内に対し、シャフトについてはセンター研磨機を用い、スペーサについては平面研削盤を用い最適な加工条件を見つけ出し適用することで、結果としてシャフトについては 0.2 μm 、スペーサについては 2.25 μm を達成することができた。

(3) シャフトの軸心に対する同心度向上

シャフトの軸心に対する同心度については、目標値として設定した 2 μm 以内に対し、センター研磨機を用い最適な加工条件を見つけ出し適用することで、結果として 0.15 μm を達成することができた。

(4) 質量バランス修正

低振動化のために、経験値から質量アンバランスの目標値を 5mg 以内としたが、よりよい精度を追求するために、先ずシャフト単体での質量アンバランスを 5mg 以内に抑えた。更に、組立てを行いスピンドル回転時においてフィールドバランスを用いることで質量アンバランスを 4mg までに抑えた。このことにより動的回転振れ精度を向上させる見通しができた。

(5) ドリルユニットの試作

駆動側と従動側のスピンドルを組み合わせたドリルユニットの試作を行った。工作機械に取り付けて切削加工実験が行える構造と、後の研究に必要な工具摩耗及び折損検知に係るセンサーを取り付ける構造も実現した。

◆技術的目標について

面精度向上と加工形状の微細化を実現するために以下の数値目標を掲げた。

(1) スピンドルの静的回転振れ精度：1 μm 以内

(2) スピンドルの動的回転振れ精度：2.5 μm 以内

前述(1)～(3)の取り組みを行ない完成した試作機について振れ精度の検証を行なった結果、静的回転振れ精度については 1 μm 、動的回転振れ精度については 2.385 μm の結果を得た。

4. 切削加工実験と加工精度の評価

試作したドリルユニットを用い工具径の違いによる加工状態を把握するため、 $\phi 0.1$ 、 $\phi 0.15$ 、 $\phi 0.2\text{mm}$ の穴切削加工の実験を行った。被加工物はノズルと同等材質のステンレス鋼を計画していたが、川下企業での聞き取りにより SCM415 相当であることが判明したため、SCM415 に変更して実験をおこなった。

加工径により切削の切り込み量や、送り速度の調整を行いながら $\phi 0.2$ 、 $\phi 0.15$ 、 $\phi 0.1\text{mm}$ ともに L (長さ) /D (内径) : 5 の貫通穴の切削加工が実現できた。穴の精度 (真円度、内面の粗さ) については表面形状測定機等による測定を依頼中であり、補完研究として確認を行っていく。

微細加工用スピンドルやドリル加工に関する世界最先端技術、製品事例が展示される「ナノテクノロジー総合展」「インターモールド展」において技術動向の把握を行い、本研究における目標値の妥当性についても検討を行なった。報告を後述の本論に記す。

5. スピンドル構造の確立

4 で実施中の切削加工実験と加工精度の評価をもとに耐久性や加工精度の向上についても検討中である。さらに異材への加工や深穴加工等、実用に耐え得るスピンドル構造の確立について補完研究として取り組んでいく。

[5] 当該研究開発の連絡窓口

株式会社タック技研工業

製造 副主任研究員 松枝謙二

Tel : 093-661-1777

Fax : 093-661-1796

E-mail : matsue@tacgiken.co.jp

第2章 本論

以下に実施内容の成果詳細を記す。

[1] 現状スピンドルの振動特性把握

[1]–1 振動測定

動的回転振動解析装置を用いて振動の実測を行った。図5は回転数を上昇変化させたときのボールベアリングのケース上に取り付けた加速度ピックアップから算出した変位を測定した様子である。質量アンバランスは5mgまで修正を行った状態で測定している。図6は振動値の変化をモニタリングしたものであるが、大きな固有値振動は確認できなかった。



図5 振動値の測定



図6 振動値のモニタリング

[1]–2 動的回転振れ量の測定

非接触変位計を用いてスピンドルが回転したときに生じる動的回転振れの実測を行った。図7は10,000rpmにおける動的回転振れ量のデータで、数値は4.375 μm となっている。

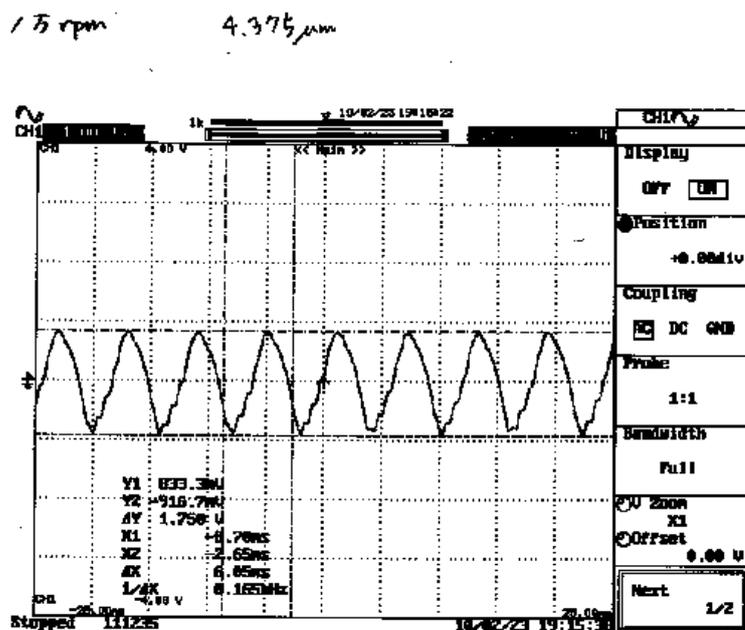


図7 動的回転振れ量 (回転数: 10,000rpm)

更に、スピンドルの回転数を 50,000rpm まで上げていき、10,000rpm ごとに動的回転振れ精度を測定した。図 8 に示すように回転数が上がるにつれて動的回転振れ量も大きくなっていることが確認できる。

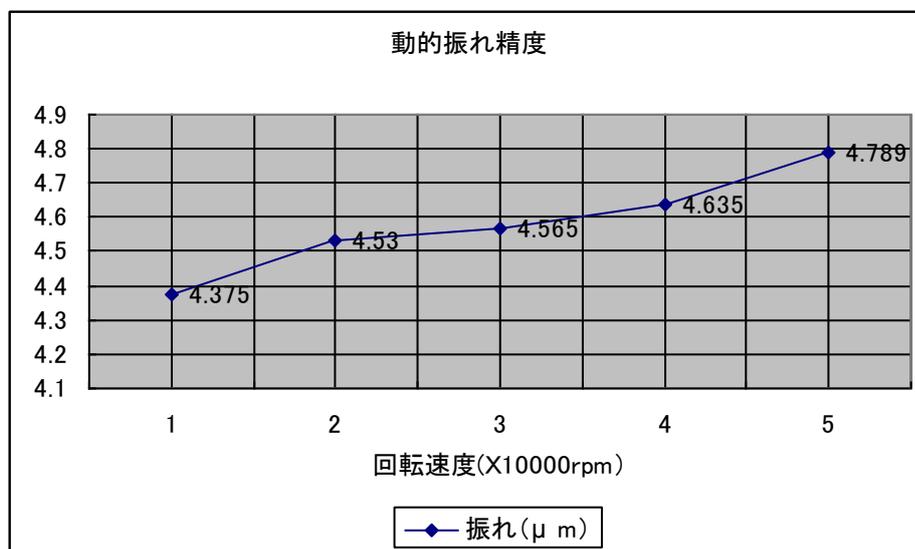


図8 動的回転振れの変化 (回転数：～50,000rpm まで)

[1]－3 静的回転振れ量の測定

接触式の変位計を用い、スピンドルを手動で 1 回転させたときの静的回転振れについて、実測を行った。静的回転振れについては 4 μm であることを確認した。

[1]－4 3次元解析のシミュレーション

本研究では 3 次元解析の方法として、3 次元で作成した形状である連続体を、いくつかの小領域 (要素=メッシュ) に分けておき、その要素を単純な式で表し、それをマトリックスの形に組み上げて全体を解いていく有限要素法を用いた。回転するスピンドル軸には遠心力荷重が作用する。遠心力はゆっくり荷重が作用し回転数が一定であれば、その後時間等の要因では変化しないため、構造解析の分類として線形静解析が適用できる。

図 9 に線形静解析の作業手順を示す。

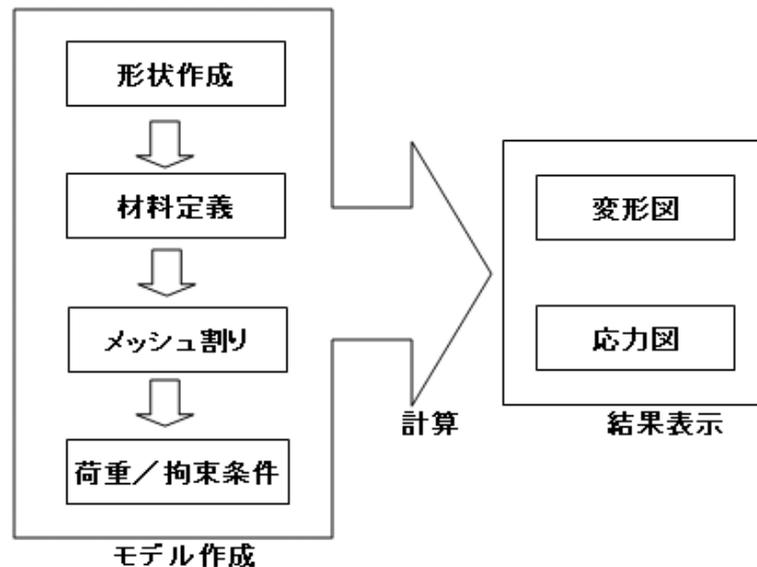


図9 線形静解析の作業手順

拘束条件は軸受で保持されるスピンドル軸の負荷側と反負荷側の 2 箇所を設定し、質量アンバランスの条件も設定した上で遠心力荷重によるスピンドル軸の変位を求めた。更に、遠心力が作用した状態で固有値解析を行い振動特性の確認を行った。

図 10 はスピンドル軸の 3 次元モデルをメッシュ割りしたものである。

図 11 は拘束条件を設定し、遠心力荷重による変位を求めたものである。図中でスピンドル軸の右部端面が大きく膨らんで見えるが、意図的に拡大表示されており、数値としては最大の変位量が $0.87\ \mu\text{m}$ であった。

図 12 は固有値解析を行ったものである。5mg の質量アンバランスをスピンドルの中央部に設定しシミュレーションを行った結果、53,250rpm で最初の固有値振動が生じる結果となった。実測においても 50,000rpm まで確認した結果、大きな固有値振動は確認できていないことから、妥当なシミュレーションが実行されたのではないかと考えられる。

これらの実験とシミュレーションを行ったことで、振動解析と振動測定の実測値との関係について把握ができた。このことにより、開発スピンドルを設計する際に必要な 3 次元解析のシミュレーションにおける条件設定を明確にすることができた。

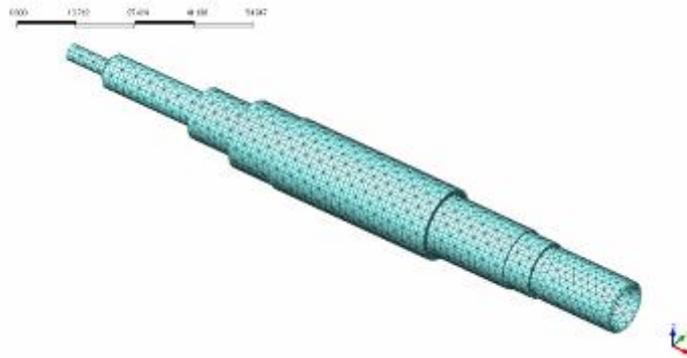


図10 メッシュ割り

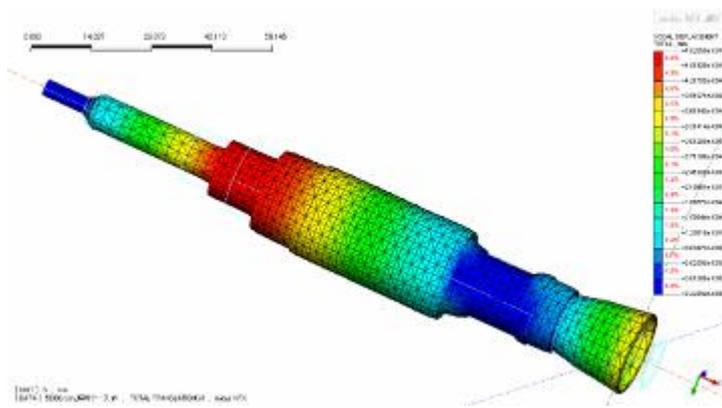


図11 遠心力による変位

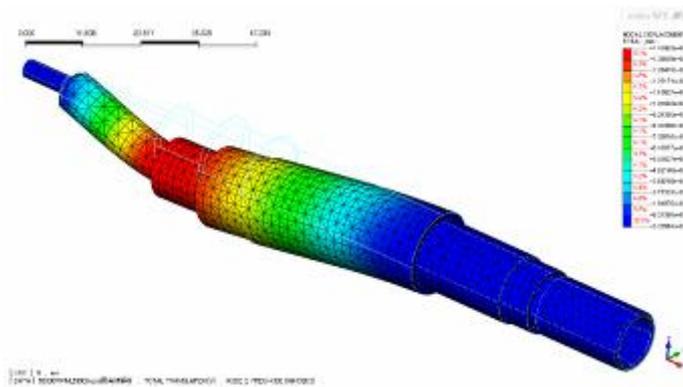


図12 固有値解析

[2]開発スピンドルの設計（空気静圧軸受仕様）

[2]－1 川下企業での聞き取り調査

事業遂行にあたり、研究推進につなげるための情報交換を行った。
この結果を参考に研究開発の方針を確認した。同時に目標設定の妥当性と進め方を検討した。

[2]－2 熱影響の抑制

スピンドルの回転時に生じる熱による熱膨張を抑制するために、熱伝導の小さい空気静圧軸受を採用した実験を行った。空気静圧軸受については、図 13 に示すように負荷能力と剛性に優れた多孔質紋りを用いた設計とした。

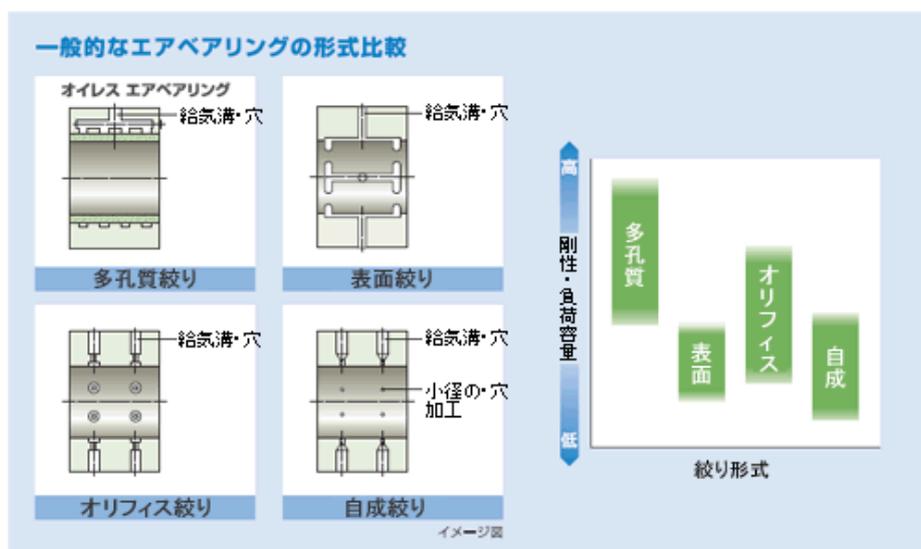


図13 絞り形式の比較

スピンドルと空気静圧軸受との設定隙間が $20\ \mu\text{m}$ で、空気供給圧力を 0.5MPa としたときの温度上昇のデータを図 14 に示す。モータ部の発熱等の影響が懸念されたが、スピンドルの温度上昇は 13°C であり、 15°C 以下という目標を達成することができた。

ボールベアリング仕様の実験用スピンドルでは、金属球のベアリングでは 45°C 、セラミック球では 31°C の温度上昇を確認しており、セラミック球と比較した場合でも、温度上昇を 18°C 抑えることが確認できた。

また、隙間寸法による温度上昇の違いを検証するために設定隙間を $30\ \mu\text{m}$ とし、空気の流量を増やすことによって温度上昇の抑制を試みたが実験中に振動音が発生したため中止した。

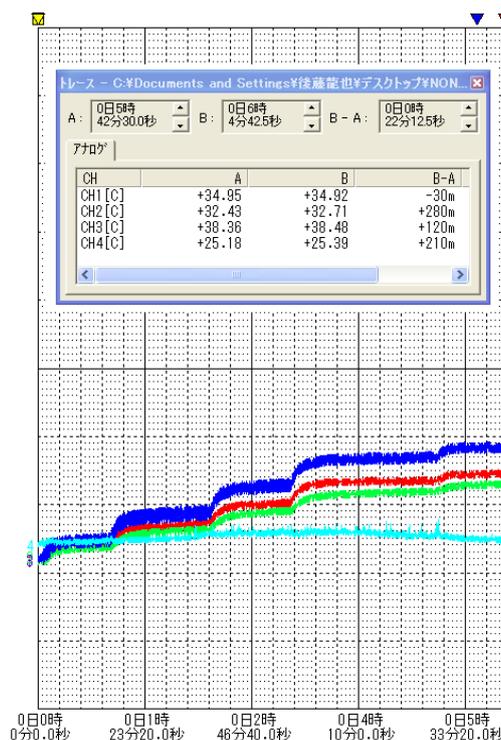


図14 温度上昇 ($20\ \mu\text{m}$ 、 0.5MPa)

空気供給圧力については、0.3MPa まで実験を行ったが、その際の温度上昇値は14.5℃であった。結果を図16に示す。



図15 温度上昇実験の様子

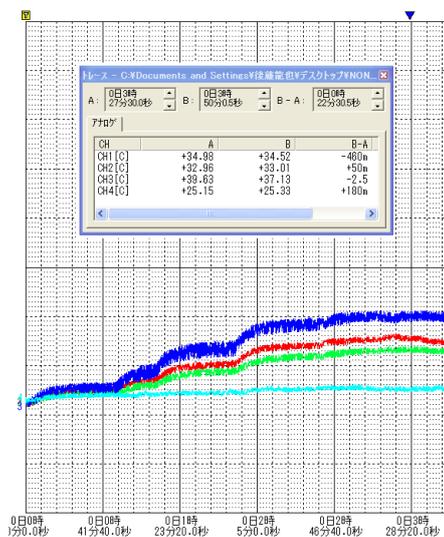


図16 温度上昇 (20 μm、0.3MPa)

[2]ー3 回転振れ抑制

[2]ー3ー1 空気静圧軸受を用いた実験による検証

スピンドルの剛性は隙間厚さや高压空気圧力等により変化するため、空気静圧軸受を用いた実験による検証を行った。

一連の実験より、スピンドル軸と空気静圧軸受の隙間については、10~20 μm 程度の範囲が総合的に安定した特性が得られると判断した。更その隙間の数値については、スピンドル軸の試作において軸径の寸法を段階的に変更したものを用意し、切削加工実験の結果も踏まえた上で確定を行うこととした。

[2]ー3ー2 3次元解析によるシミュレーション

スピンドルの形状については、内蔵するモータ部やマグネット、空気静圧軸受等の必要構成部品からの制約も考慮しながら設計を行った。[1]で得られた振動解析値と振動測定の実測値との関係のデータを基にした3次元解析のシミュレーションを行い、振動値の小さい形状を設計することに留意した。

図17はスピンドル軸の3次元モデルを作成し、メッシュ割りを行ったものである。図中で赤く表示されている部分が軸受部に拘束条件を設定したものである。

図18は遠心力荷重による変位を求めたものである。図中で、スピンドル軸右部のドリル把持用の工具を取り付ける部位において、遠心力により径方向の寸法が大きくなり長手方向の寸法が小さくなっていることが確認できる。図中では、意図的に拡大された表示となっているが、実際の変位は最大で0.61 μmである。変位が最大になっている箇所についてはフランジ形状部であり、実験用のボールベアリング仕様のスピンドルと違い、空気静圧軸受との構成に必要な形

状である。フランジ形状部の根元には後述する直径 2 mm の排気口があり、そのためにいびつに変形が発生したものと考えられる。

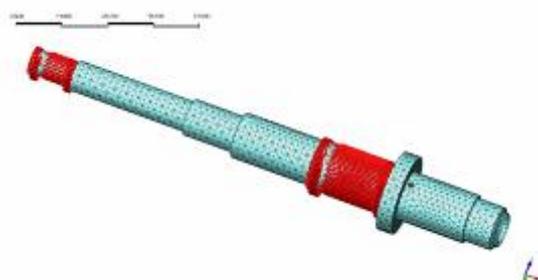


図 17 スピンドルのモデリング～条件設定

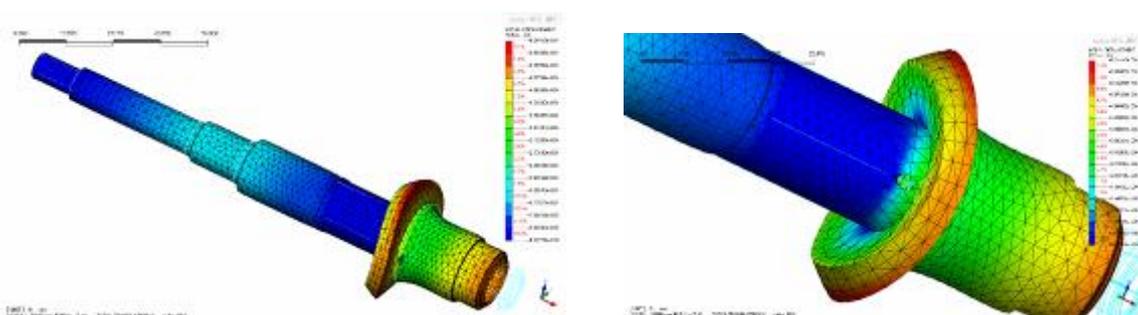


図 18 遠心力荷重による変位

このフランジ形状部については、特に変位が生じやすくスピンドルの回転振動に与える影響が大きいと考えられることから、数パターンの形状を検討しシミュレーションを実行した。最終的には図 18 のようにフランジ部の厚みが 5mm、外径が $\phi 26\text{mm}$ に決定したが、参考データとしてフランジ部の厚みが 10mm、外径が $\phi 30\text{mm}$ のときのシミュレーション結果を図 19、図 20 に示す。図 19 では最大変位量は $0.76\ \mu\text{m}$ 、図 20 では $1.47\ \mu\text{m}$ の結果であった。

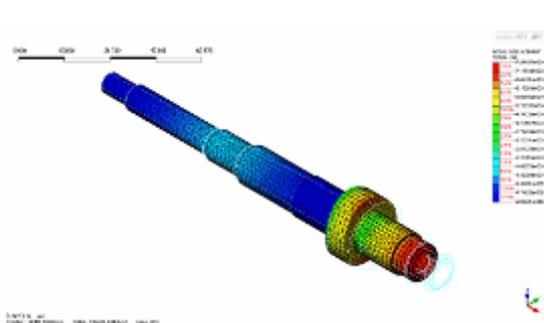


図 19 フランジ部厚み 10mm

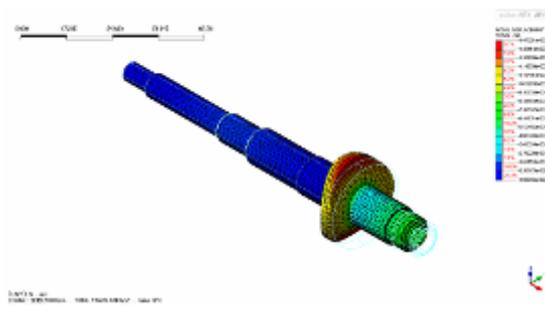


図 20 フランジ部外径 $\phi 30\text{mm}$

図 21 は固有値解析を行ったものである。
スピンドルの中央部に 5mg の質量アンバランス（左図の黒印部）を条件設定

し、遠心力が加わった状態での固有値を算出し、共振点を検証した。シミュレーションの結果、最初に訪れた固有値を回転数に換算すると 47,760rpm であった。後に試作機を製作し、試運転を行った際に回転数を 49,000rpm 近くまで上げたとき共振が起こり異音が生じた。試作機を分解し空気静圧軸受を観察するとスピンドルのフランジ形状部に接触する部分が摩耗していた。このことから、シミュレーションの結果についての妥当性が確認できたと考えられる。

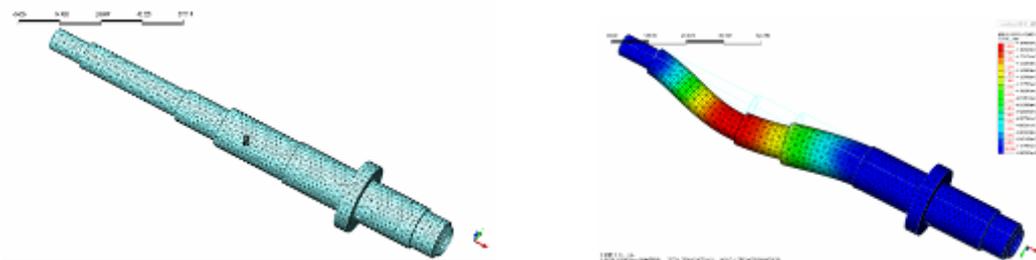


図 21 固有値解析

[2]－3－3 スピンドル構造の決定

駆動側のシャフトにおいて、軸端に取り付けるマグネットホルダーとマグネットを組立ての最後の工程にて取り付ける構造としているが、取り付けに必要なネジ等の部品を含め質量のアンバランスが発生する可能性がある。質量アンバランスが回転時の振動となり、回転中の工具刃先の回転振れ精度に影響するため、組立て後に動的バランス修正（フィールドバランス修正）ができるように 8 箇所修正用おもりを装着できる構造を設計した。

駆動側のシャフト及び従動側のスピンドル軸の両方において、空気静圧軸受によって供給されるエアがわずかな隙間を通過して排気されるときに生じる微振動を抑制するために、直径 2mm の排気口を設けて対策を行った。

今回のスピンドルユニットは高速回転が不可能な工作機械の主軸に取り付けられることを前提に仕様を検討しているが、工作機械への取り付けに関しては、加工実験用として使用する現在所有の工作機械に合わせて B T40 番、小型・軽量化のニーズもあることから B T30 番の両方が対応できる構造を設計した。

図 22 にスピンドル全体の構造を 3 次元化した図面を示す。

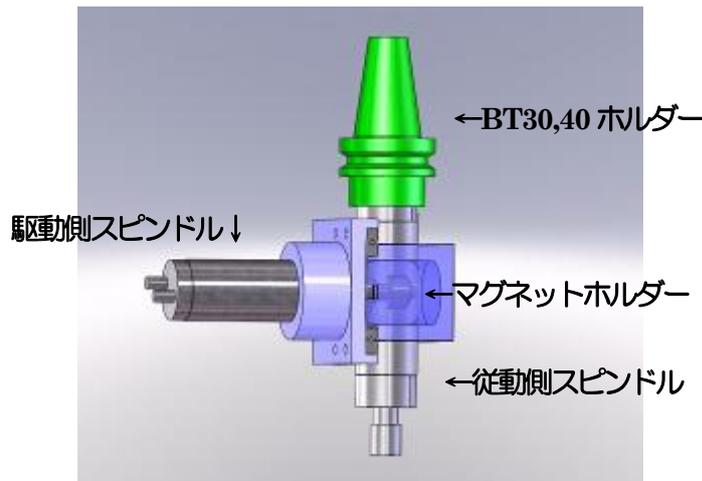


図 22 スピンドル全体の3D図面

[3] 試作機の製作

微細穴加工の加工精度向上には、高速スピンドルの動的回転振れと振動を抑制することが不可欠である。そのために部品1つ1つの加工精度を向上させることも求められる。本研究では、試作品の製作に高加工精度のセンター研磨機及び平面研削盤を用いた加工を行うこととしたが、よりよい加工精度を得るために、いかなる条件における加工が望ましいのかをセンター研磨機及び平面研削盤それぞれにおいて予備実験により検証し、スピンドル部品の加工に適用することで目標とする加工精度を達成できるようにした。

以下に予備実験の結果を記す。

[3]－a センター研磨機による予備実験

本センター研磨機は、シャフト等の両端面にあるセンター穴を、回転する砥石で研削加工するものであり、他の工作機械で大まかな形状に加工した後、センター穴形状の最終仕上げ加工を施すために用いるものである。

高速スピンドルの動的回転振れと振動を抑えるためには加工精度を向上させる必要がある。このためには、シャフトを加工する際にシャフト両端面をチャッキングではなく、精度よく加工されたセンター穴で固定し、センター穴を基準としたシャフト表面の加工精度を保証する必要がある。加工における適正な研削条件算出については、以下のように実験を行った。

【実験方法】

実験用ワーク（シャフト）を用い、粗研削を行った後に砥石のドレッシングを施し、その後の仕上げ研削において切り込み量を0.01mm、0.005mmの2段階に、砥石の回転数を30,000rpm、35,000rpm、40,000rpmの3段階に設定しセンター研磨加工を行った。そのワークに外筒研削加工を行い、切り込み量と回転数の違いによる精度への影響を確認した。次に、センター研磨加工の有無による加工精度への影響についても確認を行った。

【実験結果】

図 23 に示すように切り込み量 0.01mm、回転数 35,000rpm の条件下において同心度は最もよい数値を確認できた。しかし真円度については逆に最も悪い数値となっている。次に同心度の結果がよかったのは切り込み量が 0.01mm、回転数 30,000rpm の条件下である。図 24 に測定データを示す。このときの真円度については最もよい数値となっている。そこで本研究におけるセンター研磨の最適加工条件としては、精密研削時の切り込み量を 0.01 mm、回転数を 30,000rpm と決定した。

図 25 にセンター研磨加工の有無による加工精度への影響について確認を行った結果を示す。センター研磨加工無しの場合、同心度については目標と考えていた 2 μm以内を達成しておらず、シャフトの製作精度を向上するためのセンター研磨加工の必要性を当然のことながら確認することができた。図 26 にセンター研磨無しの場合の測定データを示す。

1.研磨条件を変更して加工精度を比較

	切り込み量	回転数	同心度	真円度
	(mm)	(rpm)	(μm)	(μm)
①	0.01	30000	1.6	0.55
②	0.01	35000	1.25	1.85
③	0.005	35000	1.65	0.75
④	0.005	40000	1.7	0.95

粗研磨 → ドレッシング → 仕上げ研磨 → スパークアウト*8(1分間)

図 23 切り込み量と回転数の違いによる加工精度

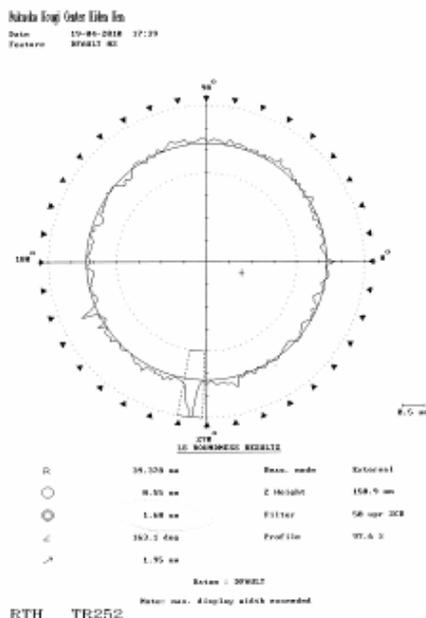


図 24 切り込み量 0.01 mm 回転数 30,000rpm

2.センター研磨の工程有無で加工精度を比較

	切り込み量 (mm)	回転数 (rpm)	同心度 (μm)	真円度 (μm)
研磨有	0.01	30000	1.6	0.55
研磨無	—	—	2.25	0.7

図 25 センター研磨有無の違いによる加工精度

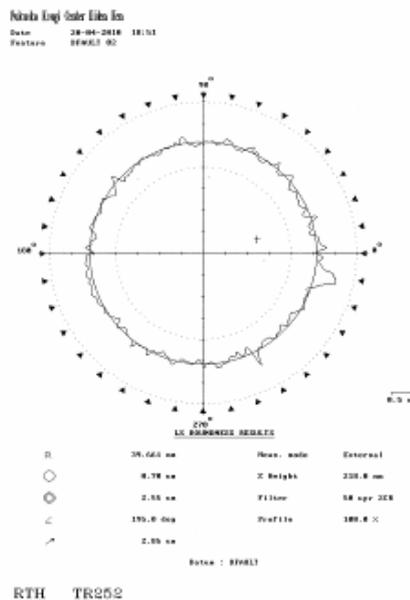


図 26 センター研磨無し

[3]－b 平面研削盤による予備実験

平面研削盤は、拘束された材料（ワーク）の平面を、回転する砥石で研削加工するものであり、他の工作機械で大まかな形状に加工した後、平面部の最終仕上げ加工を施すために用いる。

高速回転用のスピンドルの部品製作には、平面研削盤は必須の機械装置であるが、(株)タック技研工業では、従来、最高回転数：20,000rpm 程度のスピンドル製作しか行っていないため、今回の要求仕様である平行度：3 μm の加工精度が実現できる高精度な平面研削盤は保有していなかった。本事業で予定している最高回転数 50,000rpm の高精度微細加工スピンドル用の部品を製作するには、部品の平行度：3 μm 以内の精度が確保できる平面研削盤が不可欠であるため、本機械装置を導入し、研究を行った。

加工における適正な研削条件算出については、以下のように実験を行った。

【実験方法】

実験用ワークを用い粗研削を行った後の精密研削において、切り込み量を 0.01、0.005、0.001 mm の3段階に設定し切り込み量の違いによる精度への影響と必要な加工時間を確認した。更にスパークアウトの回数による精度への影響と必要な加工時間を確認した。

【装置環境】

切削水型式：TC-350 (流水量：MAX)

XYテーブルの送り速度：

左右方向：167 mm/sec (200 ストローク)

前後方向：0.94 mm/sec (100 ストローク)

テーブル移動：斜め移動

マグネット吸引力：MAX

砥石型式：GRIND-X 15x60H2G

【実験結果】

図 27 に示すように切り込み量 0.001mm ではスパークアウトなしで精密研削の表面粗さである Ra0.05 μm で加工はできている。しかし当然ながら切り込み量が小さい分、加工時間が多くかかっている。そこで、加工時間の短い切り込み量 0.01 mm においてもある程度の表面粗さが確保できていることに注目して、スパークアウトの実行回数で、その表面粗さがどのように変化するかを確認した。結果が図 28 である。スパークアウト 1 回で Ra0.05 μm を達成し、3 回ではさらに精度が向上したが、5 回実行すると Ra0.0643 μm と数値が悪くなってしまった。悪くなった原因は特定できなかったが、本研究における平面研削の最適加工条件としては、精密研削時の切り込み量を 0.01mm、スパークアウト回数を 3 回と決定した。

	切り込み量	加工時間	表面粗さ		
	(mm)	(h)	(Ra)	(Rz)	(Rt)
①	0.01	5分9秒	0.0976	0.9771	1.3543
②	0.005	20分18秒	0.0671	0.575	0.7007
③	0.001	100分32秒	0.0461	0.3622	0.4356

・スパークアウト回数・・・0回

図 27 切り込み量による加工精度と必要加工時間

	スパークアウト回数	加工時間	表面粗さ		
		(h)	(Ra)	(Rz)	(Rt)
① 切込 0.01	1	6分47秒	0.047	0.4347	0.6602
	3	11分8秒	0.0422	0.4258	0.6357
	5	13分55秒	0.0643	0.8123	1.1209

図 28 スパークアウト回数による加工精度と必要加工時間

測定により表面粗さについては、目標値：Ra0.05 μm 以内に対して0.035 μm 、真円度については、目標値：2 μm 以内に対して0.40 μm の結果が確認できた。特に真円度については図 30 を見てもわかるように、拡大した計測形状においても基準の真円に対してほぼ近い形状が確認できている。

[3]ー2 シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度

シャフトと空気静圧軸受が接触する端面の平行度と、空気静圧軸受の取り付けに使用するスペーサと呼ぶ部品の平行度については、回転振れ抑制のためにその両方ともに精度が求められる。目標値として設定した3 μm 以内に対し、シャフトについてはセンター研磨機を用い、スペーサについては平面研削盤を用い前述 [3]-b のように最適な加工条件を見つけ出した上で、その条件を適用した加工を行い、それぞれの平行度について計測を行った。

図 31 にシャフト端面の平行度の測定データを、図 32 にスペーサの平行度の測定データを示す。

要素 No. No	要素 公差	点数	X座標値 X角度 基準 設計値	Y座標値 Y角度 上/下限	Z座標値 Z角度 測定値	直径 面傾/角度 誤差	公差外値
1	9 円筒 最小二乗法	9	431.06346 1.00000	217.63381 -0.00103	200.51385 0.00015	18.97807	0.00047
1	8 点 最小二乗法	1	447.39668	-11.20348	-1.98002		0.00000
2	12 円筒 最小二乗法	6	-17.03308 1.00000	-0.00032 -0.00002	0.00003 0.00006	18.97742	0.00006
1	10 面 最小二乗法	5	-5.00893 -1.00000	0.00003 0.00001	-0.00002 0.00000		0.00081
2	22 面 最小二乗法	5	0.00077 1.00000	0.00000 0.00000	0.00000 0.00001		0.00007
2	23 面 平行度			0.00200		0.00030	**
1	20 面 直角度			0.00200		0.00065	**
2	27 面 直角度			0.00200		0.00023	**

図 31 シャフト端面の平行度

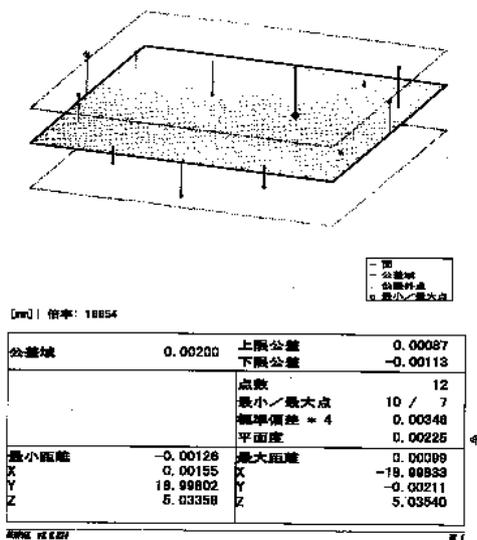


図 32 スペーサの平行度

測定によりシャフト端面の平行度については、目標値：3 μm 以内に対して 0.2 μm 、スパーサの平行度については、目標値：3 μm 以内に対して 2.25 μm の結果が確認できた。

[3]-3 シャフトの軸心に対する同心度

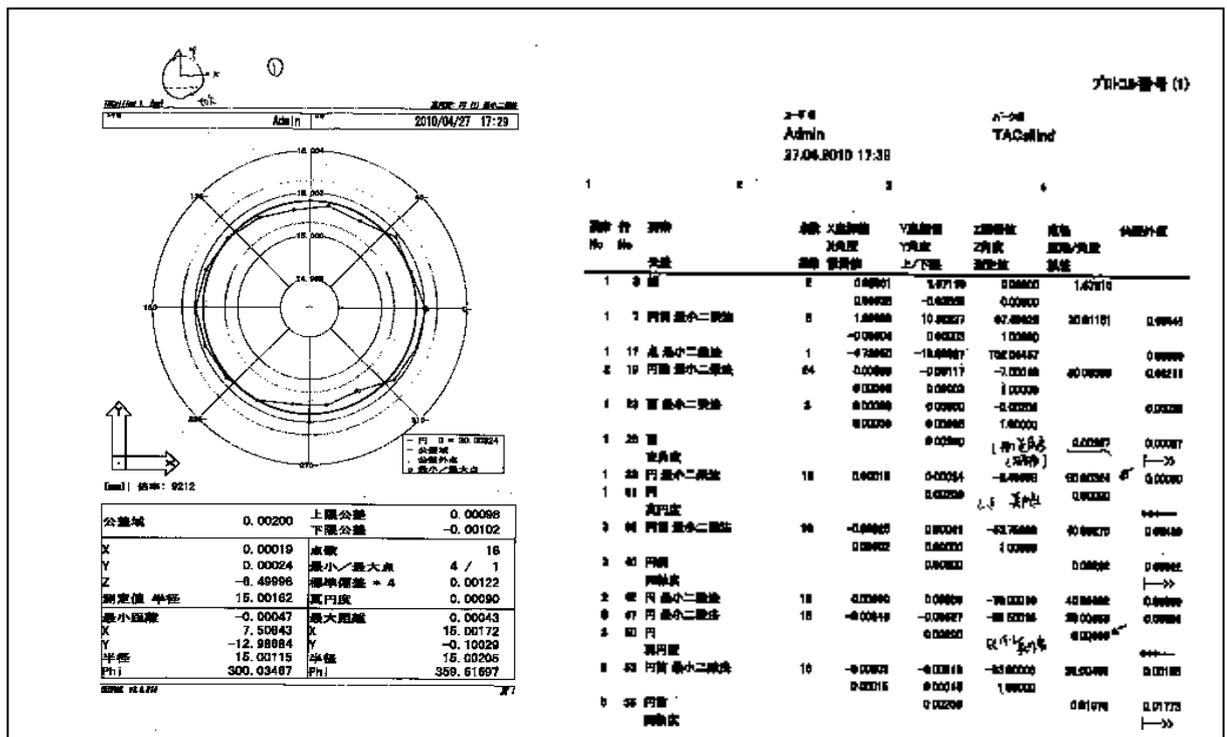
シャフトの軸心に対する同心度についても、[3]-1 のように同時に計測を行った。

図 30 よりシャフトの軸心に対する同心度については、目標値：3 μm 以内に対して 0.15 μm の結果が確認できた。尚、同心度と真円度の測定については、反負荷側となるシャフトの径が $\phi 8\text{mm}$ の箇所で行った結果であり、細径のため研削時のストレス等でひずみが生じやすいところであるが、十分に加工精度を確保することができている。

[その他の部品による検証]

実施計画内容には加工精度の検証を行なう予定にはあげていない部品ではあるが、フレームと呼ぶ部品については空気静圧軸受の取り付けを行う構造としており、加工精度が重要となるため、検証を行った。

図 33 に内径寸法、真円度、直角度の測定データを示す。測定の結果、内径寸法については指定公差範囲 0~13 μm に対して 3.24 μm 、真円度については指定公差 2 μm に対して 0.9 μm 、直角度については指定公差 3 μm に対して 2.8 μm であった。これらの結果より、フレームについては高精度に加工がなされていることが確認できた。



[3]ー4 質量バランス修正

低振動化のために、経験値から質量アンバランスの目標値を 5mg 以内としたが、よりよい精度を追求するために、先ずシャフト単体での質量アンバランスを保有の設備を使用し 5mg 以内に抑えた。更に組立てを行い、軸端に取り付けたマグネットホルダーに設けたバランス調整部を活用し、フィールドバランスによる解析を行いスピンドル回転時における質量アンバランスを 4mg までに抑えることができた。図 34 は回転数を上昇変化させたとき、空気静圧軸受のケース上に取り付けた加速度ピックアップから算出した変位を測定した様子である。

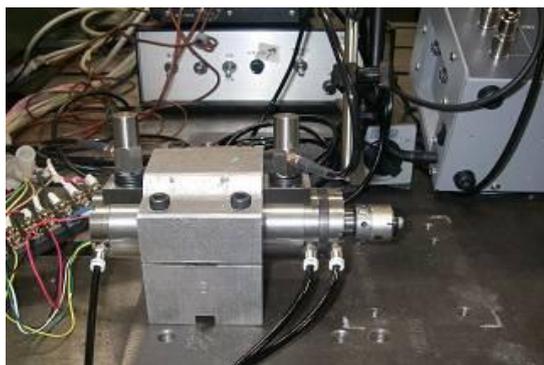


図 34 質量バランス修正の様子



図 35 質量アンバランスのモニタリング

[3]ー5 ドリルユニットの試作

右図に試作したドリルユニットを示す。駆動側スピンドルと従動側スピンドルを組み合わせたドリルユニットである。両スピンドルを適正な位置に構成するために必要なホルダーと、後の研究で実施予定の工具摩耗及び折損検知に係るセンサーを取り付ける構造も考慮した。切削工具を把持する従動側スピンドルには工作機械に取り付けて切削加工実験が行えるように BT ホルダーを装備した。



図 36 ドリルユニットの試作機

◆技術的目標についての成果詳細
面精度向上と加工形状の微細化

(1) スピンドルの静的回転振れ精度：目標 $1\ \mu\text{m}$ 以内

接触式の変位計を用い、スピンドルを手動で1回転させたときの静的回転振れ精度について、実測を行った。結果として精度 $1\ \mu\text{m}$ を確認できた。

図37に測定の様子を示す。

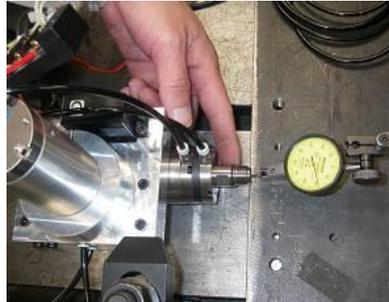


図37 静的回転振れ精度測定

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

スピンドルは加工機として適正な回転振れ精度を満たしている必要がある。組み立て後にフィールドバランスによる質量バランス修正を行なった後に非接触変位計を用いてスピンドルが回転したときに生じる動的回転振れ精度の実測を行った。

図38に測定の様子、図39に測定データを示す。40,000rpmまでの測定を行なった結果 $2.385\ \mu\text{m}$ であり、目標値の $2.5\ \mu\text{m}$ 以内を実現することができた。

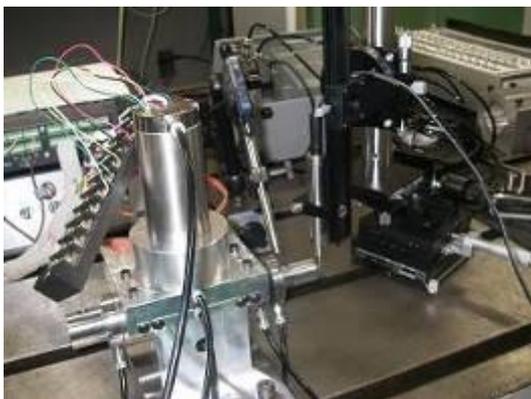


図38 動的回転振れ精度測定の様子

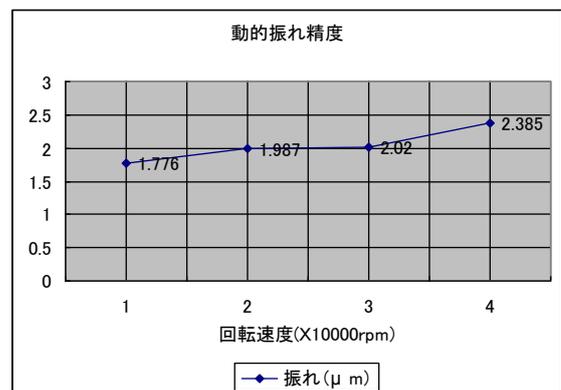


図39 動的回転振れ精度

図 40 にフィールドバランス修正を行なう前の動的回転振れ精度のデータを、図 41 に修正を行なった後のデータを示す。波形の大きさから数値が半分程度に改善されたことが確認できる。

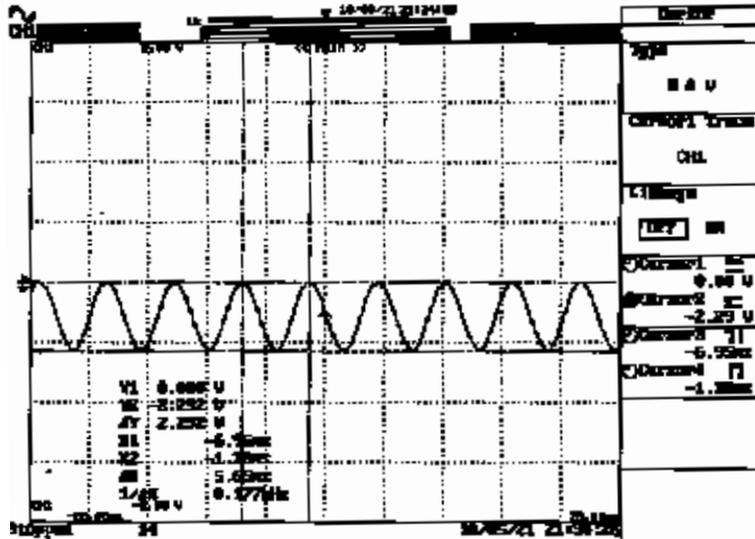


図 40 動的回転振れ (バランス修正前)

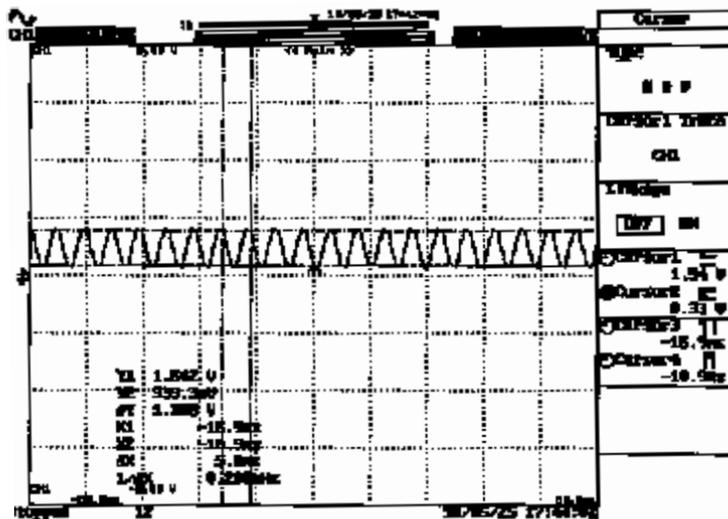


図 41 動的回転振れ (バランス修正後)

[4] 切削加工実験と加工精度の評価

試作したドリルユニットを用い工具径の違いによる加工状態を把握するため、 $\phi 0.1$ 、 $\phi 0.15$ 、 $\phi 0.2\text{mm}$ の穴切削加工の実験を行った。微細な工具先端は目視での確認が行いにくいいため、被加工物と工具先端の距離の測定についてはベースマスターマイクロと呼ばれる測定具を使用した。図 42 に実験の様子、図 43 にその拡大写真を示す。

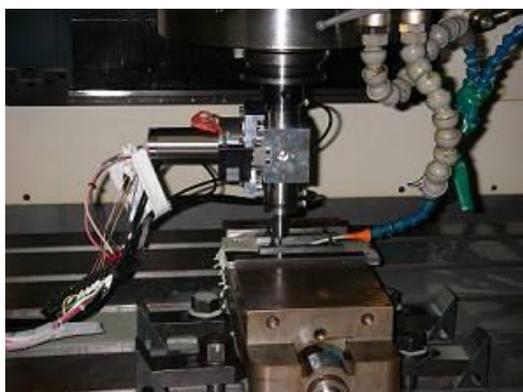


図 42 穴切削加工の様子



図 43 穴切削加工の様子 (拡大)

加工径により切削の切り込み量や、送り速度の調整を行いながら $\phi 0.2$ 、 $\phi 0.15$ 、 $\phi 0.1\text{mm}$ ともに L (長さ) / D (内径) : 5 の貫通穴の切削加工が実現できた。図 44 に $\phi 0.1\text{mm}$ 穴の拡大写真を示す。穴の出口部にはバリが発生しているが、このバリについては別工程で除去可能である。穴の精度 (真円度、内面の粗さ) については表面形状測定機等による測定を依頼中であり、補完研究として確認を行っていく。

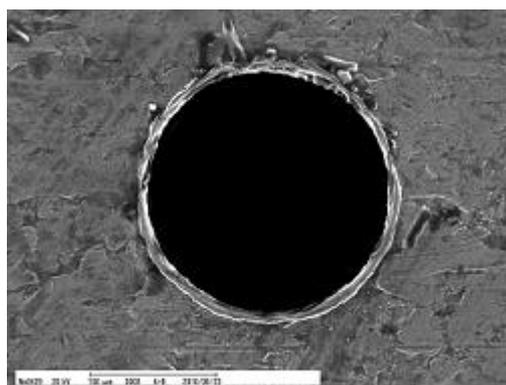


図 44 $\phi 0.1\text{mm}$ 穴 (拡大)

微細加工用スピンドルやドリル加工に関する世界最先端技術、製品事例が展示される「ナノテクノロジー総合展」「インターモールド展」において技術動向の把握を行い、本研究における目標値の妥当性についても検討を行なった。報告を以下に記す。

【ナノテクノロジー展】

ナノ材料・技術研究ばかりでなく微細加工に対しても展示が行われていた。本年度の延べ参加者は4万2千人、出展企業654社であり最新技術動向について把握が可能な規模であった。

《 S社 》

φ0.12 600 穴の加工を行っていた。工具の交換について聞いたところ、150 穴ごとに工具を替えていた。

《 Nノズル社 他 》

φ0.33mm 深さ3.3mm ピッチ0.5mm 間隔で6000 穴をステンレスに加工し、炭素繊維用のノズル部品加工例があった。化繊ノズル用の部品では、1 部品に 18 万個の穴があいており、穴全数を目視で検査していた。仕上げのリーマは機械では感覚が難しいため手加工で行われており、φ50 μ m \times ±1 μ mの精度で作られている。

自社製のPCD 工具なども開発している企業もあり、超硬を幅11 μ mで加工するなどの部品もあった。

《 Si社 》

A5052 のアルミ材に最高φ3 μ m 穴や、φ5 μ m で L20 μ m、石英にφ30 μ m、SUS316L にφ10 μ m L50 μ m の穴加工を行っていた。プリント基板用の穴加工としては、スルーホール穴加工径の最小TH径（仕上り穴径）は、0.15mmとなっていた。

【インターモールド展】

工作機械やCAD/CAMの開発元・販売店だけでなく、中小規模の加工メーカーの出展も多かった。来場者は4万人を超え、地方で行われる展示会では展示されない製品が数多く展示され、最新技術動向について把握が出来た。

《 スピンドルについて 》

出展企業、製品ともに増加している傾向がみられた。各社とも、工作機械にワンタッチで取付けできるタイプで、工作機械の主軸回転を使用せずに機種によっては80,000rpmの回転数を出せるようになっていた。しかし、リアルタイムに折損検知をするようなものはなかった。従って、今回の開発の意義は十分あると考えられた。

《 回転精度について 》

各社レベルアップしており、ベアリングもより高速回転になると空気静圧軸受を使用する企業もあった。空気静圧軸受については、振れ精度が1 μ mを切るものがあり、ダイヤルゲージを置いて実際に動作させるデモも行っていた。本研究開発においても空気静圧軸受の開発を行っているため、ニーズを満たすものである。

《 折損検知等のセンサーについて 》

計測機器メーカーで世界的に有名なR社において、製品としてレーザビーム式の高速度工具折損検出装置が展示されていた。設置性に融通があるようなタイプも出展されており、マーケットが増加していることが感じられた。この装置は、1秒間レーザ光線

上に工具を停止させることで、 $\phi 0.5\text{mm}$ までの小径工具の折損の検知が行えるものである。作動距離を 0.3m から 2m とすることで、計測ポイントまでの移動量を少なくすることで、デットタイムを短くしていた。キャッチコピーには「世界中の製造現場では、恒常的に工具折損という問題に見舞われています。」と記されており、有名メーカーでもまだ折損検知が難しいものであることが確認できた。

《 工具の把持について 》

いかに振れ精度の高いスピンドルを製作しても、工具を把持するチャッキング部についての問題がある。その問題を克服するためスピンドル自体に焼き嵌め機構を搭載した工作機械などが以前からあった。従来より超精密工作機械を製造している T 機械社では、スピンドル部をコレットチャック機構にして、コレットを自動で緩める機構を搭載することで ATC を実現していた。大企業においても工具把持部に苦心していることが実感できた。

《 展示会全体を通して 》

今回の調査により、燃料噴射装置の穴加工ばかりでなく、高付加価値の穴加工部品はたくさんあり市場性があることが分かった。また、加工中の加工力を測定しながら加工できる機械はないため、工具寿命は推定のもとに決まった本数で交換せざるを得ない実体も分かり、本開発のセールスポイントが高いと考えられる。

[5] スピンドル構造の確立

[4] 項で実施中の切削加工実験と加工精度の評価をもとに耐久性や加工精度の向上についても検討中である。実施計画の策定段階においては穴加工の対象素材としてステンレス系を検討したが、川下企業との情報交換では SCM415 等の焼入れ鋼が対象となることが分かった。さらに自動車以外の分野への展開も視野に入れ、黄銅や SUS304 等の異素材への加工や深穴加工等、実用に耐え得るスピンドル構造の確立について補完研究として取り組んでいく。

第3章 総括

[1] 結論

面精度向上と加工形状の微細化を実現するために掲げた数値目標であるスピンドルの静的回転振れ精度：1 μm 以内、動的回転振れ精度：2.5 μm 以内について、実験用のスピンドルを用い振動特性の把握を行い、開発スピンドルの設計に必要なバックデータを得た後に川下企業での聞き取りによる現状把握を反映し、実験と3次元解析のシミュレーションをもとにした設計、部品の製作精度向上に取り組み完成した試作機での実験と検証を行なった。結果として、静的回転振れ精度については1 μm 、動的回転振れ精度については2.385 μm という数値が確認でき、目標を達成することができた。

[2] 今後の課題

切削加工実験と加工精度の評価を反映し、より精度のよいスピンドル構造を確立していくとともに、加工中の工具摩耗・折損の検出器の高度化と、切削加工システムの高度化を図ることで事業化に繋げていく必要がある。

◆ 用語説明 ◆

*1 面粗さ Rz

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 (μm) で表わしたもの。

*2 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解除去する機械加工の方法である。放電加工面は溶解・再凝固を繰り返すため脆化する傾向がある。また、加工された表面には、深部の母材とは質的に異なった「変質層」が形成される。変質層には加工条件によって穴や亀裂（クラック）が発生する。このため、放電加工を施した材料は、表面粗さの低減、微小亀裂等の表面欠陥層の除去、形状精度改善のために、仕上げ研磨工程を経て使用するのが一般的である。

*3 スピンドル

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。

*4 静的回転振れ

無負荷状態においてスピンドルを手作業で回転させ、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 (μm) 等で表わす。



写真 ドリルユニット

* 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 (μm) 等で表わす。

* 6 空気静圧軸受

高圧空気の中で浮上させて動作させる玉のない軸受。ボールベアリング式の軸受と比較して玉の転がりによる高周波振動が発生しにくい。

* 7 質量アンバランス修正

ファンやスピンドル等の回転体を組み込み、運転した状態で発生する回転体の質量アンバランスにより発生する振動を低減するための調整。専用の測定機器を用いアンバランスの位置・アンバランス量を計測し、指定箇所修正錘を取り付けるか、指定箇所を削り込む等の調整を行う。

* 8 スパークアウト

加工の最終段階で、砥石の切り込みを停止して工作物（ワーク）を往復させ、所定の切り込み値に近づけるとともに、表面をなめらかにして仕上げる作業。

