

平成27年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高回転制御可能な高加減速クローズド制御、軽量高生産性スピンドル  
システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成28年11月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人にいがた産業創造機構

## 目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	・・・3
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、協力者）	・・・8
1-3 成果概要	・・・10
1-4 当該研究開発の連絡窓口	・・・11
第2章 本論	
2-1-1 ツールホルダーの高剛性化と軽量化	・・・11
2-1-2 クランプ装置のコンパクト化	・・・12
2-1-3 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討	・・・12
2-1-4 スピンドルの軽量化	・・・16
2-1-5 高速回転、高加速度スピンドルの実現	・・・19
最終章 全体総括	・・・21

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

航空機の世界保有台数は年々増加傾向にあり、2033年にかけて100-299席のいわゆる細胴機が増加するという予想がある(図1)。これは、LCCの台頭も起因しているが、図2に示す通り、1983年から2013年まで航空機運賃は減少傾向にあり(図2)、将来においても減少していくことが予想される。一方では、川下産業である航空機メーカーから航空機部品メーカーに対して納期やコストダウンに対する要求も高まるなか、昨今の重大事故や部品不良の現状もあり、航空機部品メーカーでは、生産性向上、コストダウン、高精度品質の全てを向上させる必要がある。特に、耐熱合金(インコネル等)やチタン等の難削材においては、高精度、コストダウン、納期の全ての要求を満たすためには、マシニングセンターの設備投資も必要となる。経済成長が著しいアジア各国の新興国の台頭等、国際競争が益々激化している状況のもと、国内においては航空機部品業界を支える裾野産業である中小企業は依然資金力に乏しく、高額なマシニングセンター等の投資は大きな負担となり、国際競争力の後塵を配する懸念がある。

高精度、コストダウン、納期の3つの課題を同時に解決するためには、部品加工に必須となるマシニングセンター等の工作機械の性能を高める必要がある。特に利用頻度の高いマシニングセンターは主に、機械本体、ATC装置、制御装置(コントローラ)、スピンドルで構成されているが、国内の工作機械メーカーは、各社とも性能向上に努めているおかげもあり、世界シェアは2009年に中国に抜かれているものの依然として高いシェアを保っている(図3)。

しかし、その中心であり心臓部とも言えるスピンドル(図4)においては、1979年の工作機械の形状・寸法規格において、ドイツ(DIN)、アメリカ(ANCI)がISO規格として採用され、日本(MAS)が不採用になって以来、工作機械の進化はドイツ、ア

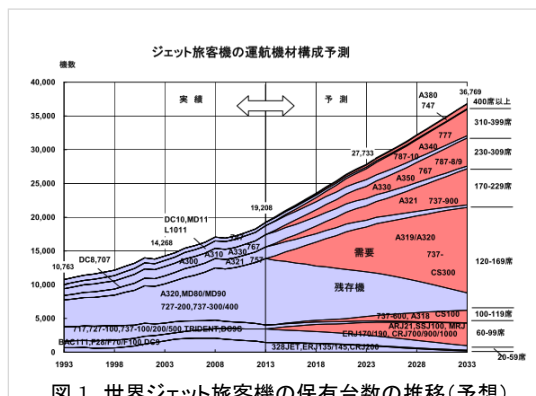


図1 世界ジェット旅客機の保有台数の推移(予想)  
※平成26年3月 日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測(2014-2033)」より

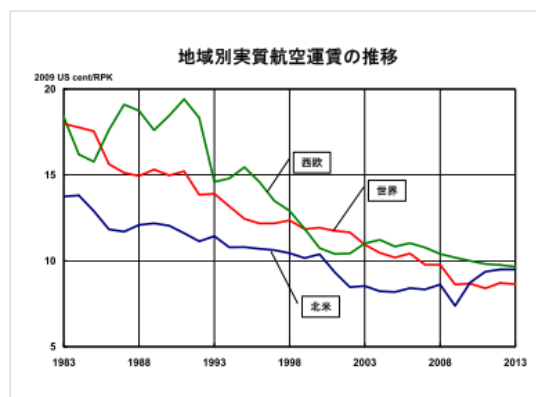


図2 航空運賃の推移  
※平成26年3月 日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測(2014-2033)」より

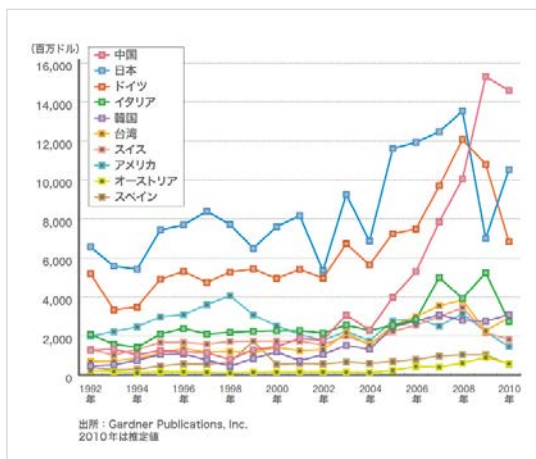


図3 工作機械の世界シェア動向  
※nippon.com サイトより抜粋

アメリカの規格の影響力が大きく、進化の障壁になっている事には変わりはない。その中でもスピンドルの構造部の1つであるクランプ装置においては、ドイツが新たに提唱し、グローバルスタンダード化されている HSK 規格 (図 5) が主流且つドイツの特許で固められており、残念ながらほぼドイツ製のものを使用せざるを得ない状況となっている。従って、短期間でスピンドルの性能を上げて工作機械を製品化するためには、海外製の高出力モーターまたは安価な誘導モーターを組み込む以外に選択肢は無く (図 4)、国内の工作機械メーカーは、多大なライセンス料をドイツの各メーカーに毎回支払う事となり、工作機械の性能向上に関する技術的な障壁も然る事ながら、製造原価にも大きな影響を及ぼしている。本事業である「高回転制御可能な高加減速クローズド制御、軽量高生産性スピンドルシステムの開発」(以下、「本事業」という。)では、国際的な障壁に制約されないスピンドル構造とし、それにより、材質、加工工法(熱処理、切削加工等)の見直しが可能となり、部品の軽量化、短納期化により部品コストを下げ、また、高速回転機構と加工中の加速・減速の繰り返しによるイナーシャの影響を無くし、リアルタイムな応答性により、工作機械の性能を向上させる。この課題解決は、日本再興戦略にある「オールジャパンの対応で『技術立国、知財立国日本』を再興する」一端を担うものと考える。

我社は、創業以来、精密部品やゲージ類の製造に携わり、金属部品の高精度加工技術を蓄積し、1990 年以降は一貫して工作機械を中心としたスピンドル事業に重点を置き、あらゆる工作機械メーカーへスピンドルを供給してきた。昨今では工作機械業界、自動車等の量産産業のみならず、航空宇宙業界、医療機器業界、エネルギー・環境業界等への供給が増えてきており、各社の性能向上要求にできてきた実績がある。しかしながら、スピンドルの開発においては、国際的な制約も痛感しており、スピンドルの各種構造、部品選定においては自由が効かず、HSK 規格は高精度を重視した規格であるため、単価の高い部品を採用せざるを得ない事情もあり、顧客のコスト要求を満たすことができないでいた。幸いにも、最近ではヨーロッパ市場における MAS 規格の採用率が 50%となる等、改めて、国産発のスピンドルによる性能

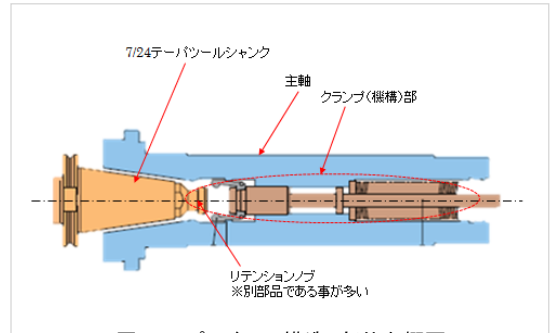


図 4 スピンドルの構造、部位名概要  
 ※平成 19 年度 経済産業省委託事業「基準認証研究開発事業」報告書より

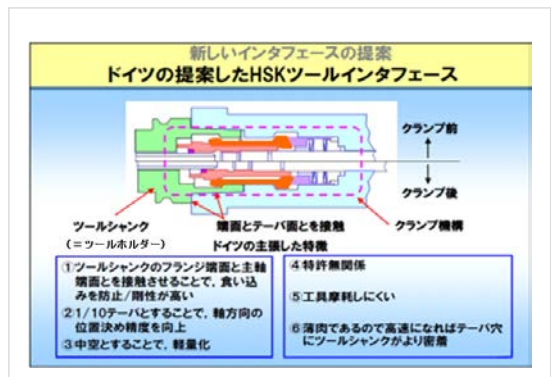


図 5 ドイツの HSK 規格  
 ※平成 19 年度 経済産業省委託事業「基準認証研究開発事業」報告書より

向上を図る事で日本のスピンドル（技術）の競争力強化に大きく貢献できると確信している。部品コストにおいては、HSK 規格に該当するためには部品加工の後、熱処理を加え、最終的に熱変形を校正する必要があるため、治具研削盤、成形研削盤等で研削加工する必要がある。このためコストのかかる加工プロセスとなってしまうが、熱処理方法（温度、降下時間時間等）を見直し、また、各部品の精度（公差）を見直すだけでも、加工プロセスが短縮され、コストダウンに貢献できることが分かっている。また、高速回転の機構においても、従来は機構改良が主である為、高速回転仕様になるほど、スピンドルの全体サイズが大きくなり、重量が増すことでイナーシャや振動等の影響を受けやすく、コストアップの傾向にあったが、昨今では高トルクで軽量のモーターも開発されており、増速機構にモーターを採用することによりスピンドルサイズもコンパクトに収まり、軽量で高速回転可能なスピンドルとなる。また、航空宇宙業界の川上ユーザーであり裾野産業である中小の加工事業者にとっては、従来のスピンドル価格が約 300～600 万円に対し、200 万円程の投資で工作機械の性能を向上させる事ができるため、投資負担の懸念も解消され、技術力向上に確実に貢献する。

#### 【研究目標】

ア.静音化・低振動化・低発熱化のための技術の向上

イ.小型化・軽量化のための技術の向上

ウ.高速化・高精度化のための技術の向上

エ.高強度・高耐久性のための技術の向上

上記を踏まえ以下の5テーマに分け開発を行う。

#### 1. ツールホルダーの高剛性化と軽量化（サブテーマ1）

高価な海外製の部品を購入する事なく、部品の加工工程及び加工時間短縮の相乗効果により、コスト 1/3、軽量化 1/3 を達成する。

#### 2. クランプ装置のコンパクト化（サブテーマ2）

クランプ装置をコンパクトするために、クランプカが小さい状態でも十分に固定される仕組みとクランプスプリングの開発を行う。コンパクト化するために小型化も視野に入れる。

### 3. 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討（サブテーマ 3）

モーターによる増速機構およびエンコーダの中空化構造により高加速、高減速を可能にする。具体的には従来比 2 倍の回転数、加速度を達成する。

### 4. スピンドルの軽量化（サブテーマ 4）

スピンドル重量を抑えるためには、主軸の長さ及び直径を短くし、全体の体積を減らすことと、ハウジングの材質を軽量金属に置き換えられるようにベアリングの位置をフロントにできるだけ接近させるシャンク形状にし、フランジ部に密着する構造とすることで、スピンドル全体長さを従来比 1/2 以下を達成し、軽量化 1/2 に貢献する。

### 5. 高速回転、高加速度スピンドルの実現

スピンドルの回転が高い状態でもモーターの回転数を極めて低回転で精密に制御できるようにエンコーダの密度を 10 倍にすること、回転数が従来比 2 倍の状態でも極めてイナーシャが減ることで、自在な回転制御を可能とし、スピンドル全体重量については従来比 30%低減を目指す。

## 【実施結果】

ア.H26 年度

### 1. ツールホルダーの高剛性化と軽量化（サブテーマ 1）

従来の鋼製をアルミ製に変更したツールホルダーの設計、解析の完了、部品製作の手配を実施した。

### 2. クランプ装置のコンパクト化（サブテーマ 2）

クランプ装置の設計、部品製作手配を完了した。

### 3. 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討（サブテーマ 3）

制御及び増速機構を含むスピンドルシステムの設計、製作手配を完了した。

### 4. スピンドルの軽量化（サブテーマ 4）

従来鋼製部品をアルミへ変更し、強度解析、部品設計を行い、部品製作の手配を完了した。

## イ.H27 年度

### 1. ツールホルダーの高剛性化と軽量化（サブテーマ 1）

ツールホルダーの製作完了し評価の実施を行った。

### 2. クランプ装置のコンパクト化（サブテーマ 2）

クランプ装置の製作完了、耐久性の評価を行った。

### 3. 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討（サブテーマ 3）

スピンドルシステム、増速機構を製作し試験運転評価を行った。

試験評価を基に増速機構部の改造設計、製作、再評価を行った。

### 4. スピンドルの軽量化（サブテーマ 4）

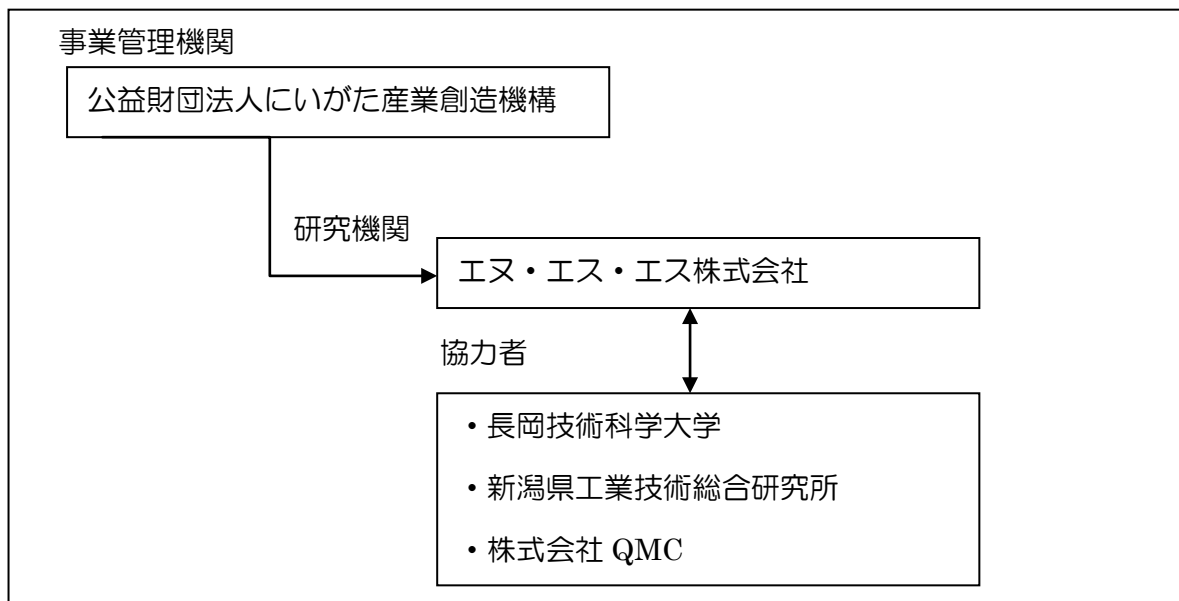
初年度製作部品を組立て、初回評価の後、再度軽量化の設計変更、部品加工を行った。

### 5. 高速回転、高加速度スピンドルの実現

サブテーマ 1~4 をまとめスピンドルシステムとし組上げ、全体評価を実施した。

## 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、協力者）

### ①【研究組織】



### ②【研究員】

<研究機関>

[エヌ・エス・エス株式会社]

氏名	所属・役職	備考
山田 雅人	設計技術部 部長	PL
間宮 貴文	設計技術部	SL
関口 弘一	製造部 部長	
乗原 英郎	生産技術部 部長	
野澤 聡史	品質保証部 品質保証課 課長	
鈴木 友和	製造部 製造一、二課 課長	
樋口 博信	製造部 製造三課 課長	
水落 拓	製造部 製造四課 課長	
平澤 武	製造部 加工技術課 課長	
小川 貴之	製造部 製造四課 グループリーダー	
吉澤 春男	製造部 加工技術課	
南雲 克義	製造部 加工技術課	
藤巻 国彦	品質保証部 品質保証課	
涌井 裕之	生産技術部 生産技術課	



③【経理担当者及び業務管理者】

【事業管理機関】

公益財団法人にいがた産業創造機構

(経理担当者) 産業創造グループ 産学連携チーム マネージャー 長谷川 満

(業務管理者) 産業創造グループ 産学連携チーム シニアエキスパート 諸橋 春夫

【研究等実施機関】

エヌ・エス・エス株式会社

(経理担当者) 総務部 部長 新田 裕康

(業務管理者) 設計技術部 部長 山田 雅人

④【協力者・推進開発委員会 委員】

氏名	所属・役職	備考
中町 剛	エヌ・エス・エス株式会社 代表取締役社長	
中町 圭介	エヌ・エス・エス株式会社 取締役専務	
関口 弘一	エヌ・エス・エス株式会社 取締役製造部長	
山田 雅人	設計技術部 部長	PL
間宮 貴文	設計技術部	SL
新田 裕康	総務部 部長	
岡田 伸夫	公益財団法人にいがた産業創造機構 ディレクター	
諸橋 春夫	公益財団法人にいがた産業創造機構 シニアエキスパート	
柳 和久	国立大学法人 長岡技術科学大学 教授	アドバイザー
野中 敏	新潟県工業技術総合研究所 所長	アドバイザー
野田 浩一郎	株式会社 QMC 代表取締役社長	アドバイザー
利根川 雄大	新潟県産業労働観光部 産業振興課 課長	

H26年11月12日、H27年2月24日、H27年8月18日、H28年2月2日の計4回推進委員会を開催し、アドバイザーを含む推進委員の他、新潟県産業労働観光部産業振興課担当様にも参画頂き、進捗状況確認、技術面、知的財産権、営業展開などの多面的なアドバイスを受けた。

1-3 成果概要

#### 1. ツールホルダーの高剛性化と軽量化（サブテーマ 1）

試作のため製作数が少数のため量産効果が得られず、コスト面では、目標未達となった。  
従来の鋼製に比較し、強度的には劣るものの、使用に際し十分な強度は得られ、重量面では、従来の鋼製品に対し、軽量化 1/3 を達成した。

#### 2. クランプ装置のコンパクト化（サブテーマ 2）

従来のクランプ装置に対し、長さ 10%減、重量 5%減となった。また市販の安価なバネを使用することにより製造コスト 50%を達成した。また市販バネのメーカー使用保証回数は、100 万回であったが、200 万回で 1~2%のバネ力低下、800 万回でも 5%以下の低下という結果が得られた。

#### 3. 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討（サブテーマ 3）

従来スピンドルの回転数  $12000\text{min}^{-1}$  に到達させるため 1 秒~1.5 秒程度要する時間を、8 倍の増速機構を設けることにより駆動モーター回転数を低速回転としつつ、スピンドルは高速回転可能な駆動方式とすることにより  $24000\text{min}^{-1}$  の回転数に到達させる為に要する時間を 0.5 秒まで短縮した。

#### 4. スピンドルの軽量化（サブテーマ 4）

スピンドル重量は、強度面などの関係で、目標の従来比 50%減は未達の 43%減となった。  
全長は、クランプ装置などの関係もあり、目標の従来比 50%減は未達の 25%減となった。

#### 5. 高速回転、高加速度スピンドルの実現

スピンドルの加減速目標時間を達成するために、ツールホルダー、クランプ装置、回転部品類の軽量化の達成が、不可欠と想定していたが、増速機構の採用、低回転でも高トルクを発揮できるサーボモーターの搭載により、目標加速時間 0.6 秒 ( $24000\text{min}^{-1}$ ) を達成できた。

また、本スピンドルシステム全体重量の 30%軽量化目標は、33%減（当社従来比）となり目標を達成した。

エヌ・エス・エス株式会社

設計技術部 部長

山田 雅人

TEL 0258-82-2255

FAX 0258-82-0277

E-mail : m-yamada@e-nss.com

## 第2章 本論

### 1. ツールホルダーの高剛性化と軽量化

高加減速可能なスピンドルシステムを達成するために、回転体となる全ての物の軽量化を行うため従来鋼製で製作されているツーリングホルダーを、機能、強度を低下させず、かつ安価となるよう開発を実施した。



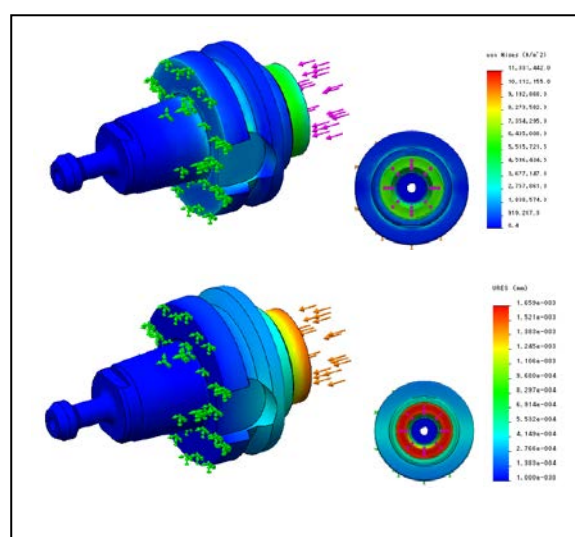
鋼製（比重 7.8）



アルミ製（比重 2.85）

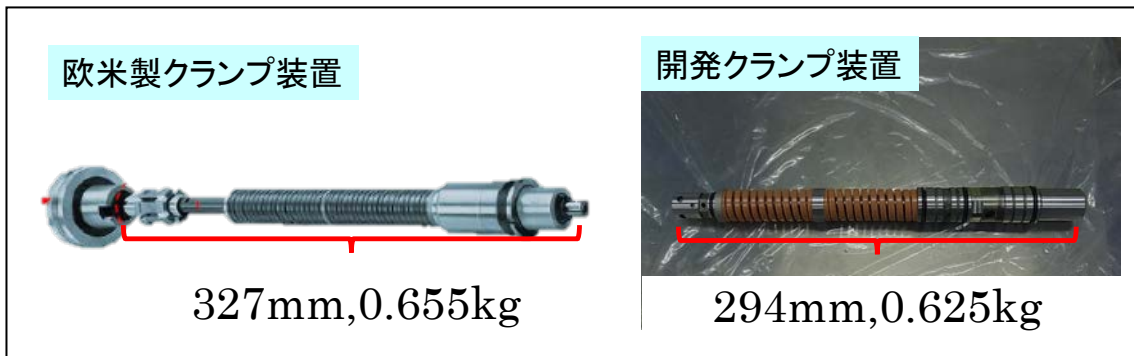
アルミ製ツールホルダーの強度解析を行い使用時、製作上の問題点など洗い出しを行い、耐摩耗性向上のための表面処理などの検討、調査など実施しツールホルダーの試作を行い、ツールホルダーのスピンドルへの着脱繰り返し試験を実施した。

結果重量的には、当然の結果では、あるが鋼製に対し約 1/3 になり、耐摩耗性も、着脱繰り返し実験の結果 100 万回可能である結果が得られた。



### 2. クランプ装置のコンパクト化（サブテーマ 2）

コンパクト化、コスト削減のため、自社製クランプ装置の設計、製作、検証を実施した。



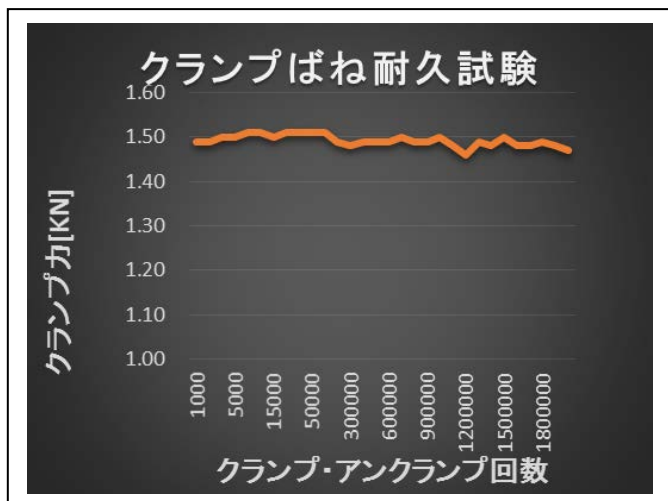
クランプ装置長さ 10%減、重量 5%減となった。

開発開始当初、専用仕様のバネの検討を行ったが、コスト面、入手性等の関係から、量産品の市販品を開発クランプ装置に搭載することとし、バネの耐久試験を実施した。

機械搭載時と同様となるようツールホルダーのクランプ、アンクランプ動作繰り返し 200 万回の実験を行い右グラフの様約 1~2%程度のクランプ力低下の結果が得られた。

(バネのメーカーの保証値は、100 万回)

その後の継続試験により 800 万回を実施し 5%低下となる結果を得た。



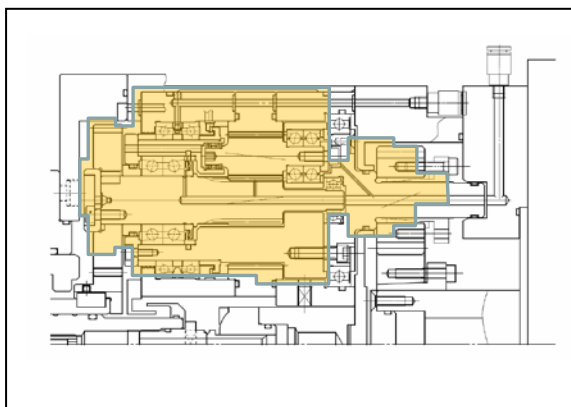
クランプ装置の製作コストは、試作の少数であっても海外製約 30 万円に対し 50%減の約 15 万円で製作可能であった。(量産時には、試作費の 20%削減が見込まれる。)

### 3. 高速回転のための増速機能と高加速化のための制御システムの検討 (サブテーマ 3)

モーターの高加減速化のため市販のサーボモーターに標準品の 10 倍の密度をもつ高精度エンコーダを搭載した。モーターとスピンドルの間に 8 倍の増速機構を設け、モーター回転 3000min<sup>-1</sup> 時にスピンドル回転数 24000min<sup>-1</sup> となるスピンドルシステムを製作した。

初年度増速機構内の潤滑方式をグリス密封式とし開発を行った。運転動作等基本構造に問題はなかったが、長時間連続運転、ユーザー長期使用を考慮し、2 年目 (H27) はオイルミスト潤滑方式での設計製作を実施した。また初年度のグリス仕様増速機構は、内蔵され

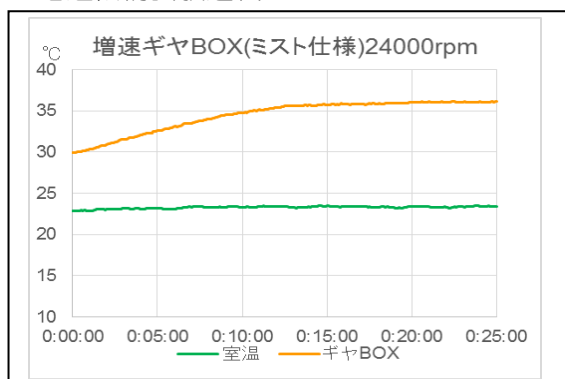
るギヤのかみ合いバックラッシュが大きいものであったため、改良時は、ギヤのかみ合いをきつくし仮組立後、共ラップによりバックラッシュを少なくする手法も取り入れた。



増速機構（オイルミスト潤滑仕様）



増速機構試験運転



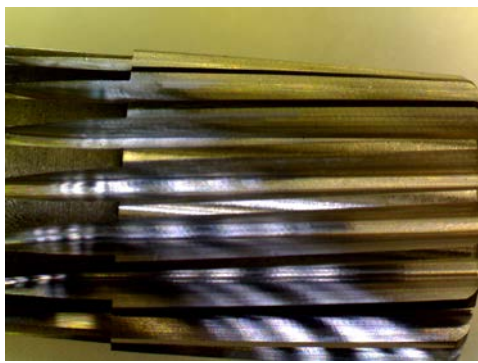
温度試験結果



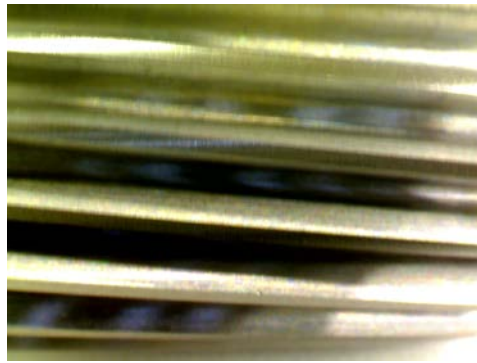
増速機構外観・内部

増速機構内増部品

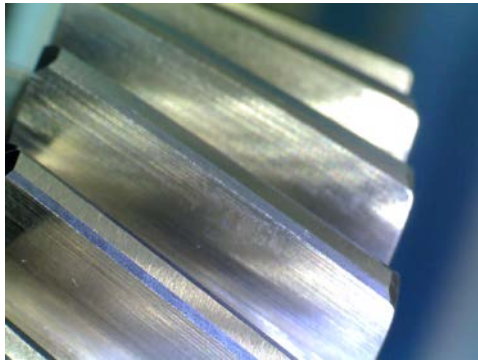
増速機構部を連続運転し温度上昇を測定した結果、室温+13°Cで安定し、回転状況（騒音、振動）も良好であった。初年度に試作したグリス仕様の発熱は、室温+25°Cであった。試験運転後、グリス仕様、オイルミスト仕様それぞれの増速機構部を分解し、各ギヤの損傷状況を確認した。



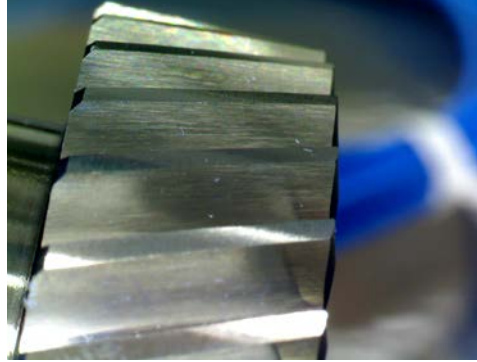
サンギヤ



プラネットギヤ



モータギヤ



出力ギヤ

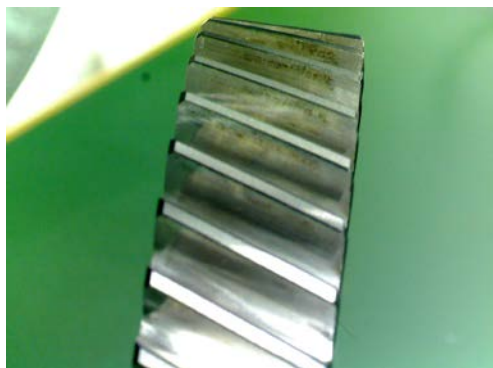
組込み前のギヤ歯面



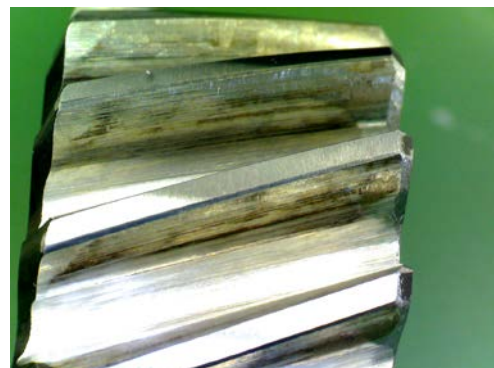
サンギヤ



プラネットギヤ



モータギヤ



出力ギヤ

グリス仕様の回転試験後のギヤ歯面状況

グリス仕様品は、歯面にバックラッシュによるものと思われるフレッチングが、発生して

いた。回転時もバックラッシュによるものと思われる歯面の叩き音が出ていた。

(オイルミスト仕様での音は、感じられない。)

本研究開発の前に行った基礎研究では、増速機構をもたずモーター直結でスピンドルを  $0\text{min}^{-1}$  から  $2400\text{min}^{-1}$  まで  $0.5$  秒で加速可能な状態とするためには、 $25\text{kW}$ 、最高回転数  $24000\text{min}^{-1}$  の高出力モーター(特注品)が必要であった。またモーターの軸受温度が数分間の運転で  $100^{\circ}\text{C}$  を超え、その後も温度上昇が、継続されることが見込まれ、焼付きの危険性から実用では問題ありと判断した。

本研究で採用したサーボモーターは、市販品にエンコーダのみ変更した  $2.5\text{kW}$ 、最高回転数  $3000\text{min}^{-1}$  のサーボモーターである。価格も標準品にオプション費用  $10$  万円程度と割安であり、納期的にも標準品納期に  $2$  週間程度付加されるのみで、製作上特に問題とならないレベルであった。

連続回転においてモーター全体の温度が、室温  $+20^{\circ}\text{C}$  程度で通常の使用範囲内であった。



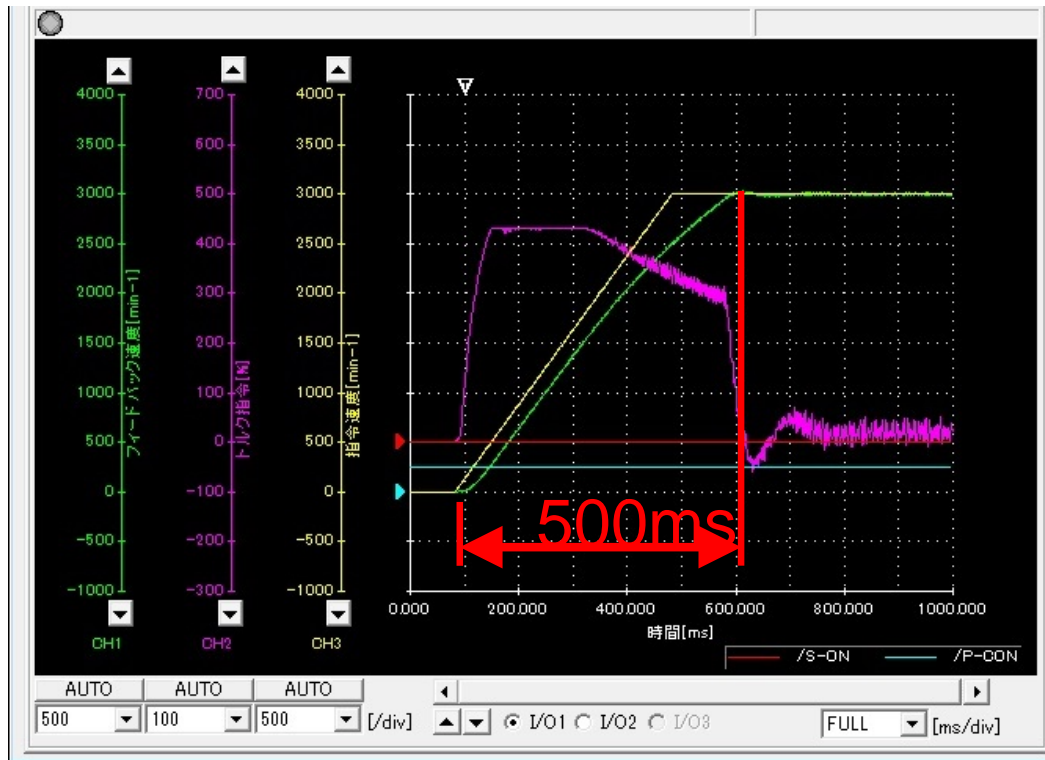
25kW モーター直結仕様  
スピンドルユニット



スピンドルユニット・制御盤

スピンドルユニット





スピンドルユニット加速時間実測データ（アルミ製ツールホルダーでの実験結果）  
 グラフは、駆動用サーボモーターの  $3000\text{min}^{-1}$  までの到達時間を表す。（増速機構によりスピンドルは、8 倍の  $24000\text{min}^{-1}$ ）

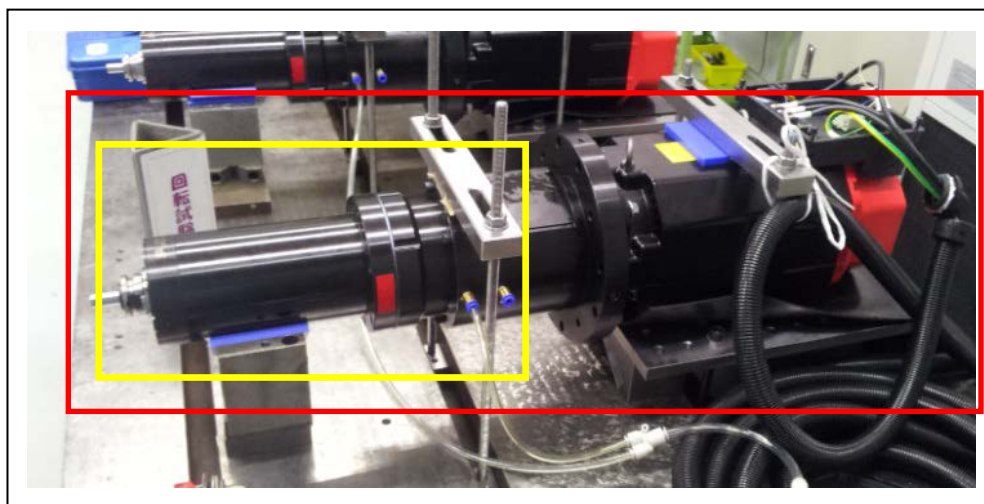
- \*黄色の線は、制御装置からの指令値をグラフ化したもの。
- \*緑色の線は、実際のモーターに内蔵されたエンコーダが検出した回転数。
- \*紫色の線は、モータトルクの負荷率。



鋼製ツールホルダーでの加減速時間の測定も実施したが、アルミ製ツールホルダーとほぼ変わらず（0.1 秒に満たない応答遅れ）ツールホルダー材質の制約が緩和される為、ユーザーへのPRには好材料と考える。

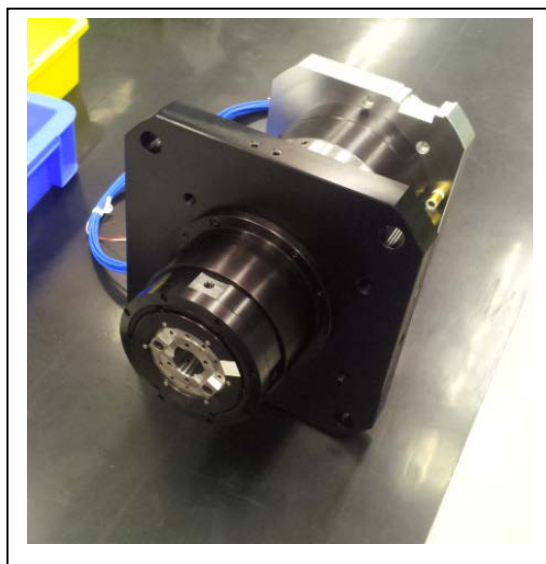
#### 4. スピンドルの軽量化（サブテーマ 4）

スピンドル重量を抑えるためには、主軸の長さ及び直径を短くし、全体の体積を減らすことと、ハウジングの材質を軽量金属に置き換え、ベアリングの位置をフロントにできるだけ接近させる形状にし、フランジ部に密着する構造とすることで、剛性を確保し、スピンドル全体長さの短縮を図るべく、強度不足とならぬ様、解析を用いスピンドルの設計、製作を実施した。



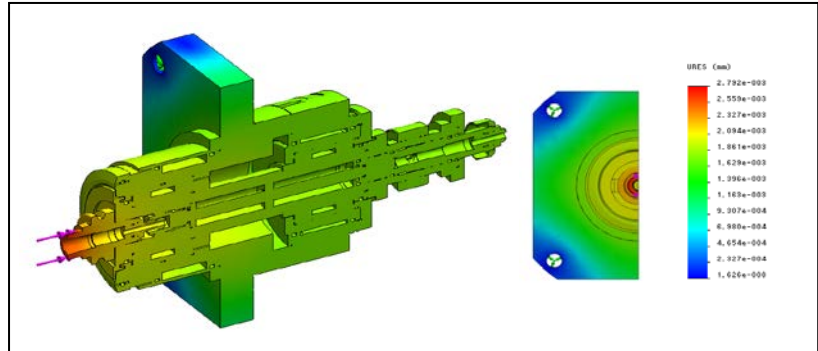
実績スピンドルユニット（BT30 12000min<sup>-1</sup>）（重量 85kg）

従来スピンドルの黄線枠内が、開発スピンドルに相当し、赤線枠内がスピンドル+クランプ機構+モーターのスピンドルユニット全体



### 開発スピンドル

スピンドル軽量化の為  
CAE 解析を用い強度不足  
とならぬ様設計を実施し  
試作を行った。



スピンドル解析結果

### 初年度の軽量化結果

実績スピンドルの黄線枠内のスピンドル

⇒ 32kg

開発スピンドルを従来の鋼製で製作した場合

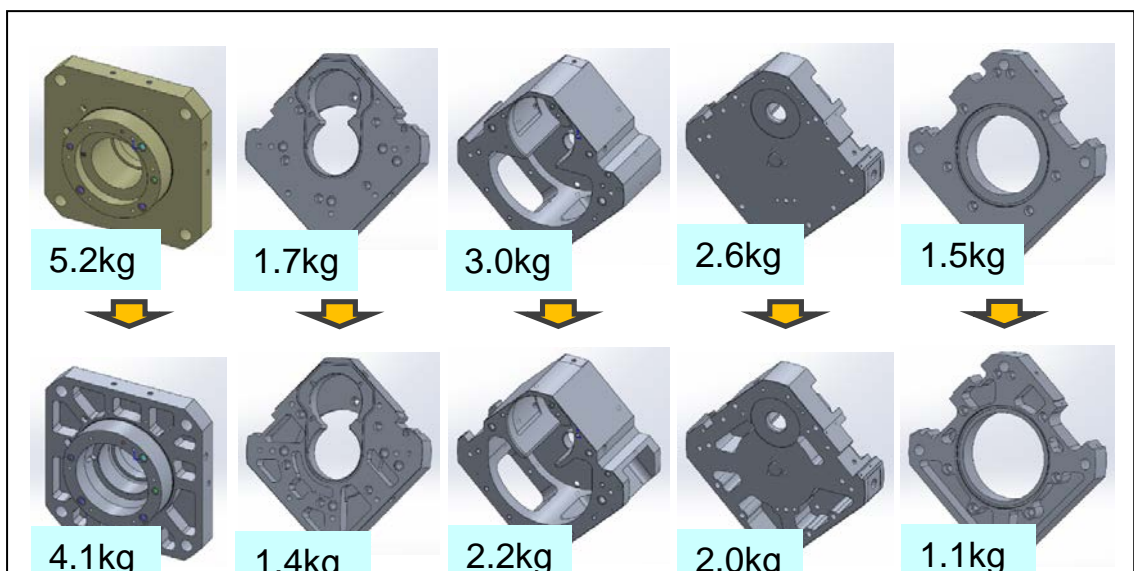
⇒ 26kg (実績品比 20%減)

開発スピンドルの部品をアルミなどに変更した場合

⇒ 18kg (実績品比 43%減)

初年度は、開発品スピンドルユニット全体で 56.6kg  
と実績スピンドルユニットに対し 33%を達成した。

2 年目 (H27) は、さらに部品の軽量化を実施した。



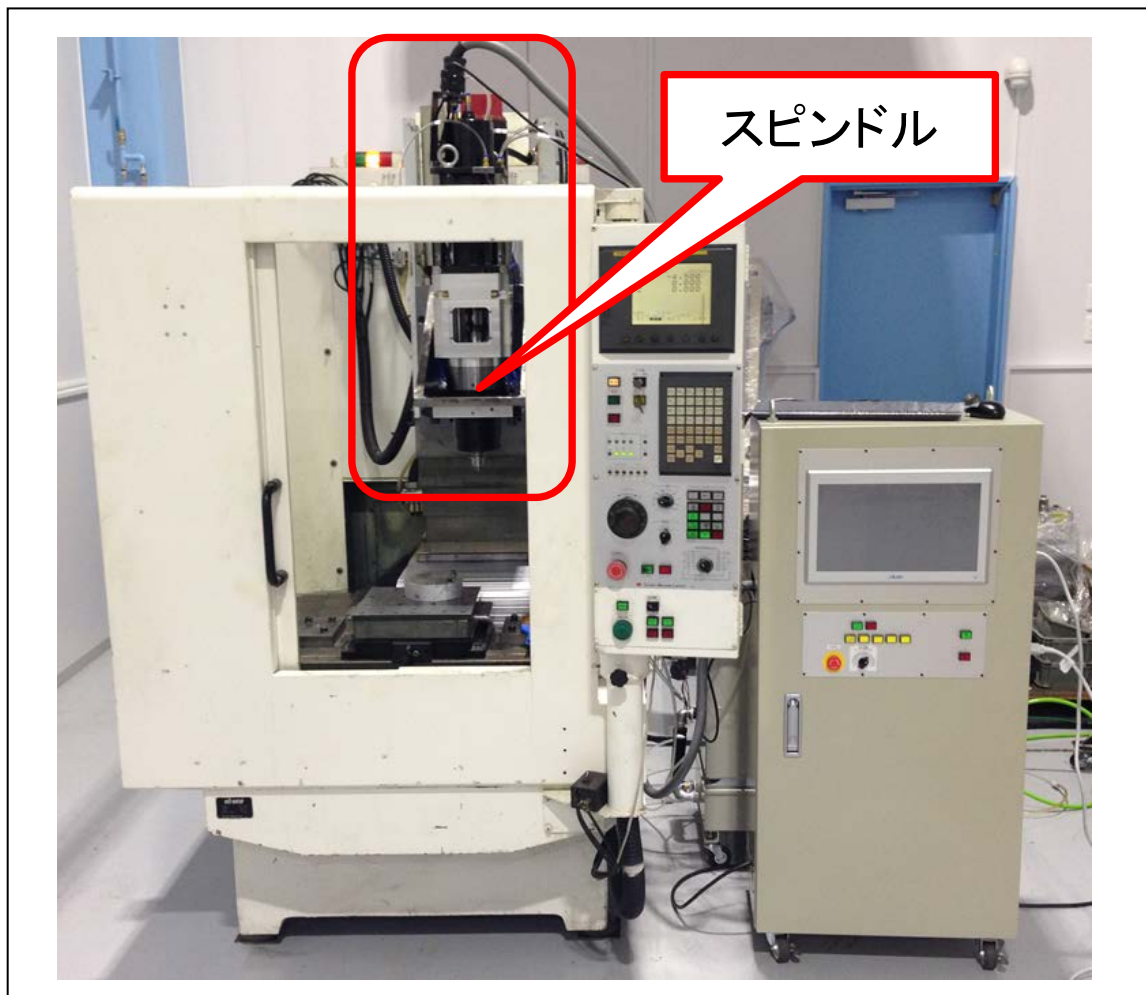
2年目の軽量化（3.2kg減）によりスピンドル部では32kgの50%減（16kg）に対し16.8kgと45%の重量削減となった。

スピンドルユニット全体での実績スピンドルに対する重量比は37%減となった。

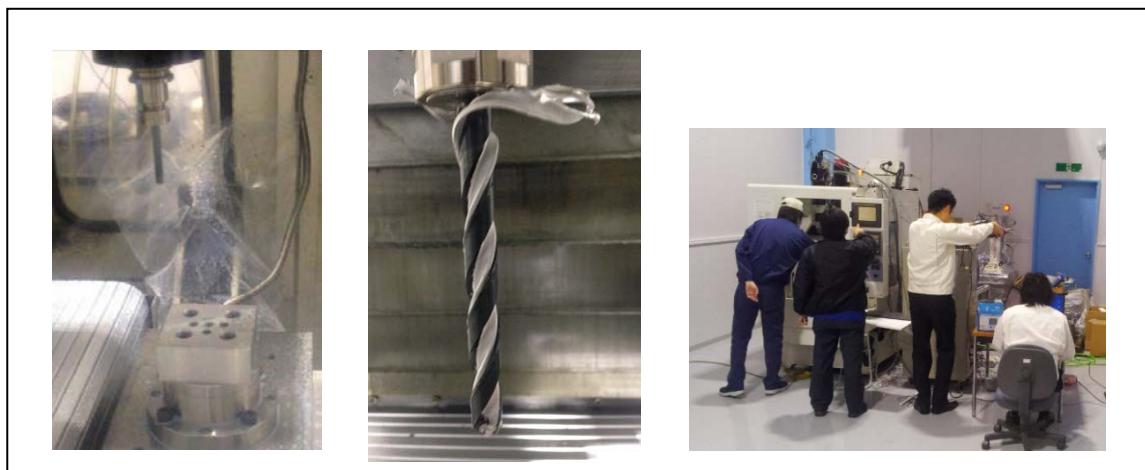
またこの結果は、強度、機能、性能を確保する上でこれ以上の軽量化は、逆効果となるものと判断された。

#### 5. 高速回転、高加速度スピンドルの実現

各サブテーマ1～4をまとめスピンドルユニット、システムの総合評価、川下ユーザーの立会での切削試験評価を実施した。



開発スピンドルユニットを切削加工用のため工作機械へ搭載



ユーザー立会い加工実験の様子

φ9ドリル、φ10リーマ、での切削試験を実施

被削素材は、アルミ鋳物

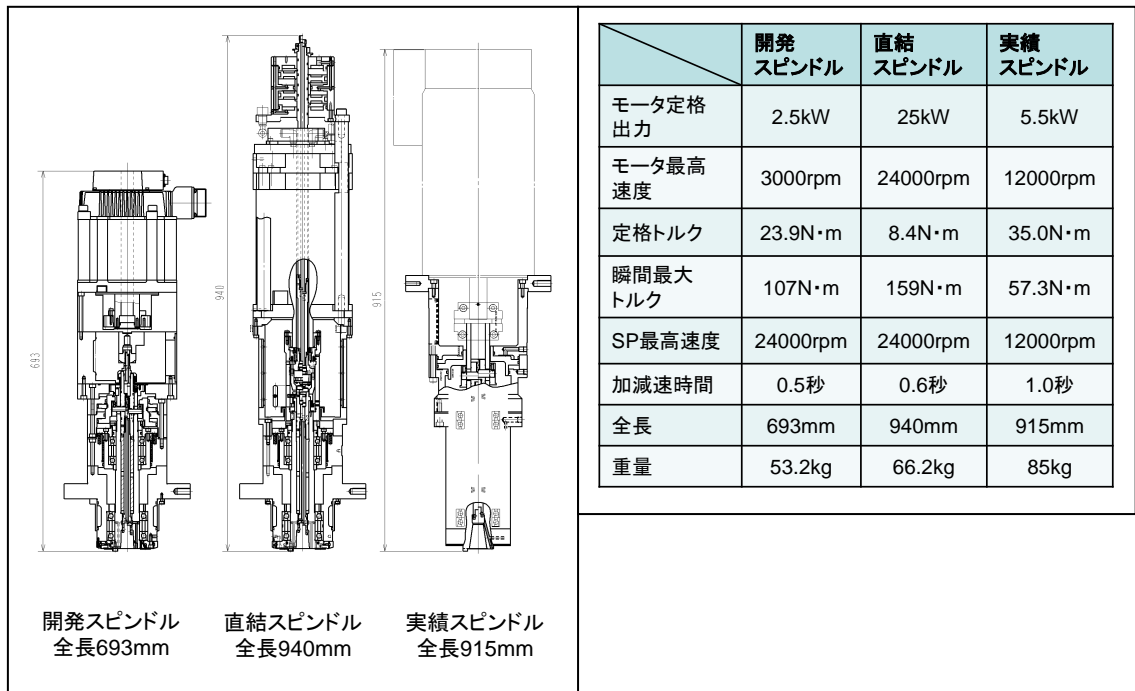
		試験 順番	加工条件		モータ出力 (%)	モータトルク (N・m)	加工状況
			S:回転数(rpm)	F:送り速度(m/min)			
孔明け加工	φ9 ドリル	1	5000	5000	193	46	良好
		2	8000	4800	193	46	良好
		3	10000	6000	194	46	良好
		4	12000	7200	194	46	良好
		5	14000	8400	194	46	良好
		6	16000	9600	199	48	良好
		7	12000	7600	230	55	良好
	φ10 リーマ	1	3000	360	12	3	良好
		2	5000	600	14	3	良好
		3	8000	960	22	5	良好
		4	10000	1200	24	6	良好
		5	8000	1200	25	6	良好

φ9ドリル、φ10リーマでの切削試験結果

ユーザー評価として良好との高評価を得られた。

また低出力モータ(2.5kW)でも切削負荷によるスピンドル回転数の低下も無いことが確認され、自動車部品等に多用されるアルミ鋳物の切削に十分耐えられることが確認できた。

総合評価



開発したスピンドルは以下の点で実績スピンドルに対し優れている。

- ・小型低出力モーターでありながら最高速度を  $24000\text{min}^{-1}$  とした場合加速時間 1/4。
- ・全長が約 25% 短い、重量が約 37% 軽量、コストは 25~30% 減が見込まれる。

## 最終章 全体総括

テーマ 1~5 を総合して、本システムの性能向上、安定化には、構成部品の精度の向上を図るため部品の高精度加工、高精度組立調整が必要であり、高精度な寸法計測、幾何公差（形状、姿勢、位置など）測定が必須となる、そのため高精度計測設備の導入及び精密測定を行うための精密空調を可能とした検査室（室温  $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  で管理）を整えた。また、開発したシステムでの切削加工実験を行うための加工機も調達し、本開発システムを加工機に搭載しユーザー要求の加工条件での切削加工実験も実施した。本研究開発での各サブテーマに対する目標値は、達成できない項目もあったが、それらの項目は、最大の目標である  $24000\text{min}^{-1}$  までの加速時間 0.6 秒以下を達成するための目標値であり実用上問題ないものと捉える。またユーザー立会のもと実施した加工試験により、切削性能においてもユーザー満足を得られる結果であった。本事業終了後も市販化、事業展開に向け研究を継続中でありオイルミスト仕様の増速機構部の分解評価など未実施の項目もあるが今後も、ユーザーと更なる試験など実施予定である。その他本研究開発のサブテーマにより得られた技術は、それぞれを部分的に使用することも可能であり、本システムに搭載した増速機構は、工作機以外の風、水力発電など他の用途や、減速機構としても使用可能であることから多方面への応用展開が可能と考えられる。

最後に本研究開発において様々な方々に多大なご協力を頂いた事に心から感謝し、全体の総

括といたします。