

平成28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

「量産加工ラインに対応した「省スペース・トラブル
レス・高剛性」な横形マシニングセンタの開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 3月

	担当局	中部経済産業局
補助事業者		公益財団法人三重県産業支援センター

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

1－2 研究体制

1－3 成果概要

1－4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2－1 要素研究開発

2－2 パワーガイド（振動・たわみ抑制機構）を組み込んだロングノーズ型コラム トラバース方式横形マシニングセンタの設計・製作

2－3 剛性評価および安定精度への取り組み

第 3 章 全体総括

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

現在自動車は世界で年間約 9000 万台生産され、その生産には多くの機械が必要となっており、特に以下が強く要求されている。

(1) 面積当たりに多くの機械を設置するため、生産設備には省スペースである事が求められる。

(2) 高稼働率維持のためには機械停止の原因となるトラブルは許されない。

(3) 自動車パーツの中でも足回り・ブレーキ部に関する、ブレーキキャリパー・マウンティング・ローター等は、「硬い」素材であるダクタイル鋳鉄が使用されているが、これらを高精度・高能率加工するにはさらなる高剛性が必要。

しかしながら、従来の量産加工ライン対応の横形マシニングセンタとしてクイル型コラムトラバース方式、ショートノーズ型コラムトラバース方式、テーブルトラバース方式があるが以下の問題点を有しており、抜本的な改善が必要である。

(1) 省スペース性に優れたクイル型コラムトラバース方式（図 1）は主軸部分が前後に移動する構造のため機械剛性が低く、ダクタイル鋳鉄・鉄等の加工には対応できない。

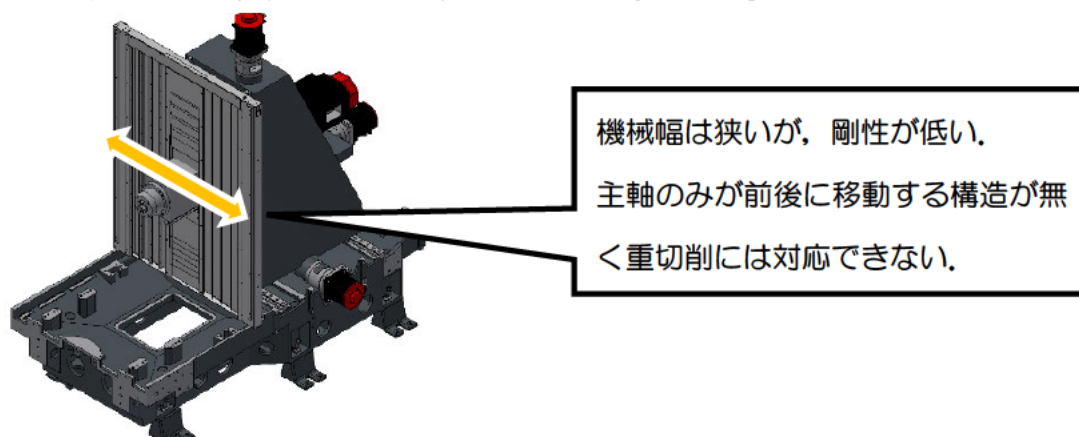


図 1 従来型のクイル型コラムトラバース方式

(2) 表 1 のように従来の横形マシニングセンタでは省スペースと剛性がトレードオフ関係となり、省スペースと高剛性の両立は困難である。

表 1 従来方式の課題・問題点

従来方式	① 省スペース	② 剛性	③ 駆動部への切りくず・クーラント液侵入対策	④ 異種接合材の加工
クイル型 コラムトラバース方式	○	×	△	×
ショートノーズ型 コラムトラバース方式	×	△	×	×
テーブルトラバース方式	×	○	×	×

(3) 加工ラインの工作機械では、連続加工で発生する多量の切りくず・クーラント液が機械駆動部に侵入すると機械トラブルにつながる。また当社および他社調査において、機械トラブル全体の 70%が切りくず・クーラント液に関するトラブルである事が明らかになっている。

- (4) 従来型のショートノーズ型コラムトラバース方式では、切りくず排出性が悪く、カバのシール性も劣るため、駆動部へクーラント液が侵入してしまう。
- (5) テーブルトラバース方式（図 2）では、Z 軸駆動部が加工室側にあるため駆動部にクーラント液が侵入する、また切りくずの排出処理が困難でワーク大きさの制限もある。

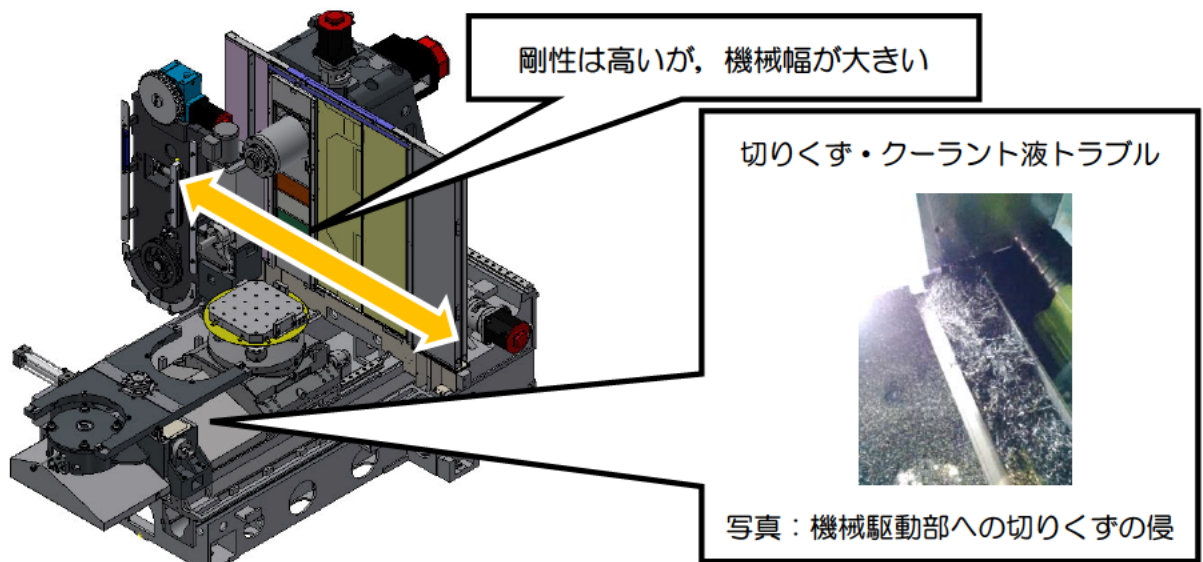


図 2 従来型のテーブルトラバース方式の課題

これらの問題解決のため、本事業では「ロングノーズ型コラムトラバース方式」の提案を行った。

【課 題】 従来方式の量産加工ライン対応横型マシニングセンタでは、
「①省スペース」、「②高剛性」、「③切りくず・クーラント液対策」
 のすべてを満足させる事が困難であり、今後市場ニーズの高まりが見込まれる。
「④異種接合材の加工」への対応も出来ない。

提案：ロングノーズ型コラムトラバース方式

- ・主軸が上下に移動
- ・コラム一体で前後左右に移動
- ・テーブル固定

【特 徴】
 ○省スペースかつ高剛性
 ○切りくず・クーラント液対策されたトラ
 ブルレス機

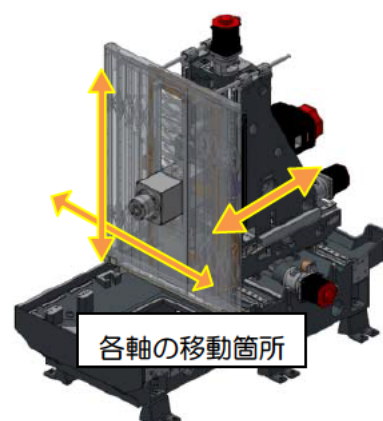


図 3 ロングノーズ型コラムトラバース方式

表 2 提案方式の優位性

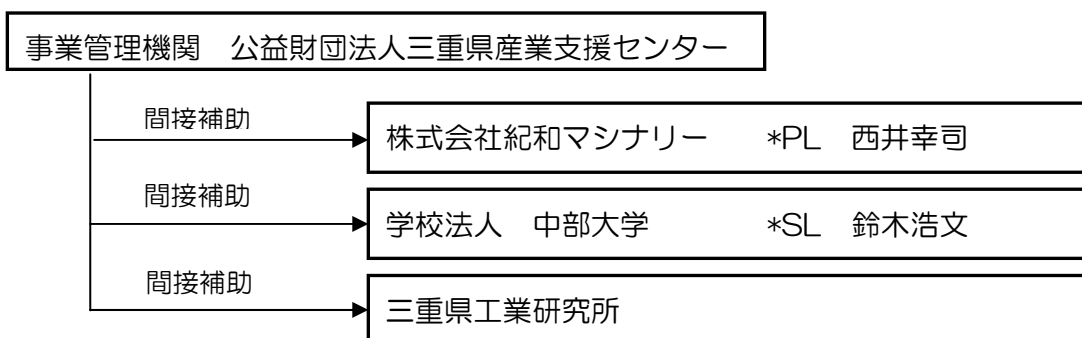
	①省スペース	②剛性	③駆動部への切りくず・クーラント液侵入対策	④異種接合材の加工
提案方式： ロングノーズ型 コラムトラバース方式	○	○	○	○

これは、クイル型の省スペースとカバーシール性能を活かしながら、主軸を長くしたコラムトラバース方式により、高剛性で切りくず・クーラントの排出性も両立を目指すものである。しかしながら主軸を長くすることにより、切削能力の低下の恐れがあるため、以下の機構を同時に開発した。

- (1) パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)
- (2) 熱変位補正機能

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制



(2) 管理員

【事業管理機関】公益財団法人三重県産業支援センター

氏 名	所属・役職
田中 幹也	高度部材イノベーションセンター センター事務局長
赤塚 浩子	総務・企画・事業調整課 総務財務班 課長補佐
菊田 繁樹	高度部材イノベーションセンター 技術支援コーディネーター

(3) 研究者名

株式会社紀和マシンリー

氏 名	所属・役職
西井 幸司	代表取締役 社長
紀和 伸政	取締役 副社長
松山 恭男	製造部 次長
東 勝也	製造部製造 2 課 課長
福田 真一	設計部機械設計課 課長代理
木村 壮太郎	設計部機械設計課機械設計係
堀内 尚行	設計部機械設計課機械設計係
浦西 晃	設計部電気設計課 課長代理
辻本 善幸	設計部電気設計課
甲野 徹也	製造部製造 1 課生産技術係 主任
松下 裕子	営業部営業課営業係 係長代理
四方 実	営業部営業課営業係

学校法人 中部大学

氏 名	所属・役職
鈴木 浩文	中部大学 工学部機械工学科 教授
岡田 睦	中部大学 工学部機械工学科 研究員

三重県工業研究所

氏 名	所属・役職
森本 和邦	ものづくり研究課 研究員
増井 孝実	ものづくり研究課 主幹研究員
増田 峰知	電子機械研究課 課長

(4) アドバイザー

会社名
株式会社豊田自動織機
光洋機械工業株式会社
株式会社タンガロイ

1-3 成果概要

【 1 】 要素研究開発

【1-1】 ロングノーズ型コラムトラバース方式の基本構造の研究および設計

従来の量産ライン加工機は機械幅と幅方向のストローク比で比較した場合多くはその比率が 2.9～3 である。本開発機は、以下のスペック目標値とし、更に省スペース化を目指し開発を進めた。

- ・機械幅 1.4m 以下
- ・幅方向の移動ストローク 510 mm 以上（機械幅と幅方向のストローク比 2.7 以下）

試作機（ベース機）の構造解析を行いボールネジ/リニアガイドの配置を研究した後、機械幅（ベッド幅）1.2m（1205.4mm）、幅方向のストローク510mmの基本構造が実現でき、機械幅と幅方向のストローク比2.3（目標=2.7以下）を達成できた。

【1-2】ハイブリッドガイドの改良

【1-3】パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)の開発

当社が独自に開発した振動制御機構であるハイブリッドガイドは油圧シリンダにより滑りガイドを転がりガイドの上面 1 面のみに押し当てる構造である。この構造を 2 面押し当て構造に変更し、従来では 3 軸設置が必要であったものを X 軸の 1 軸設置のみで多方向の機械変位・振動抑制を可能にした。

【2】パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)を組み込んだロングノーズ型コラムトラバース方式横形マシニングセンタの設計・製作

【2-1】設計・製作

当社のテーブルトラバース方式の機械の主軸端面から 100mm 先端に推力を加えた場合の変位量から、ロングノーズ型的主軸変位量を推定した場合、5kN の推力で変位量は 500 μm 程度となる事が予想される。パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)を組み込んだロングノーズ型コラムトラバース方式横形マシニングセンタを完成させ、主軸の端面から 100 mm 先端で 5kN の力を加えたときの主軸先端部の変位を当社テーブルトラバース型横形マシニングセンタと同等の 300 μm 以下の変位に抑えられた。また、本格的事業化の為に本研究開発機の技術課題を実施するとともに重点的にアプリケーションの具体化対応を進めてきた。

【2-2】パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)の制御方法の研究

本研究開発機の完成後、剛性評価の基準として水平方向の推力においてのパワーガイドの制御圧を変えながら変位量を測定し適切な制御条件を研究してきた。

パワーガイド OFF（無効状態）でも推力 5kN において変位量が 308 μm と高い結果を得た。

一方、制御圧による機械本体の姿勢の変化もあり加工精度への影響も考慮した適切な制御条件を探ることが必要であった。

技術目標である制御圧 5MPa の時の変位量は、261 μm であったが、上記の研究で制御圧 3MPa が適切な制御条件と判断し決定をした。

制御圧 3MPa の時の変位量は、275 μm で目標 300 μm 以下を達成できた。

【3】剛性評価および安定精度への取り組み

【3-1】加工評価（加工剛性・加工精度）

一般的に振動が大きいとされるエンドミル加工、フルフェイスミル加工における各切削条件での振動測定、ワークの加工面を形状測定して評価してきた。パワーガイドの無い状態でもテーブルトラバース方式既存機に近い剛性をもったことでパワーガイドの効果をユーザーへ明確にすることが出来ておらず、引続き検討課題である。

一方、技術目標の加工評価については材料 S45C を $\phi 100$ mm のフルフェイスミルで切込み 1 mm の切込み量でテーブルトラバース方式既存機、本研究開発機のパワーガイド OFF（無効状態）パワーガイド ON（制御圧 3MPa）の条件で加工テストを実施し加工面の面粗さを面粗さ計で測定し比較した。

パワーガイド ON の状態での加工面の粗さが若干ではあるがテーブルトラバース方式既存機より良い結果を得られ安定した加工面精度が得られ目標を達成できた。

【3-2】熱変位補正機能の開発

従来機械では、コールドスタートから加工プログラム運転を繰り返した時の Z 軸方向の変位量は、機械本体温度が飽和し精度が安定するまでに、熱膨張によって主軸端は変位を起こす、本研究開発機では約 $80\mu\text{m}$ の変位を起こしていて、加工精度に悪影響を与えている。本研究の熱変位補正機能を完成し、同測定条件において $5\mu\text{m}$ 以下の精度安定を目標とし、さらに加工したワークの形状測定により補正機能の効果を評価し $2\mu\text{m}$ 以内に収めることが出来、技術目標を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 紀和マシナリー

製造部 松山恭男

〒518-0752 三重県名張市蔵持町原出 522-51

TEL : 0595-64-4758 FAX : 0595-64-7529

E-Mail : kiwa@kiwa-mc.co.jp

第2章 本論

2-1 要素研究開発

2-1-1 ロングノーズ型コラムトラバース方式の基本構造の研究および設計

機械幅と幅方向のストローク比2.7以下を達成する基本構造の研究順序として、まず当社の既存のテーブルトラバース機(既存機)の各種特性を測定した、次にパワーガイドを載せられる本開発機が完成してから全てを検証していたら本研究のスケジュールもタイトになり、問題への対処も遅れる可能性が考えられたのでベッド幅1205.4mm、幅方向のストローク510mmのロングノーズ型コラムトラバース方式の試作機(ベース機)を設計し製作をし、既存機と同様に各種特性を測定実施した。それらの測定結果と構造解析した結果を比較しながら本研究開発機のロングノーズ型コラムトラバース方式の基本構造設計を完成した。

主な取組内容は、

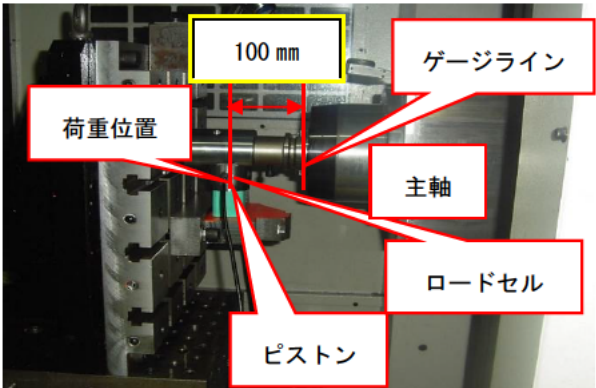
◎テーブルトラバース機（既存機）の特性データ採取

テーブルトラバース方式の主軸ゲージラインから100mmの位置を油圧ピストンでロードセルを用いて推力を確認しながら1kNから1kNずつ5kNまで推力を上げ、主軸端の推力方向の各推力に対する機械各ポイント(5点)変位量をレーザ計測装置で測定した(表3)。

測定は、垂直方向の推力と水平方向の推力で行い、各ポイントの測定結果では、特に主軸端付近の変位量を各機械の比較として採取し、角度量合わせて比較し、その変位量がたわみ

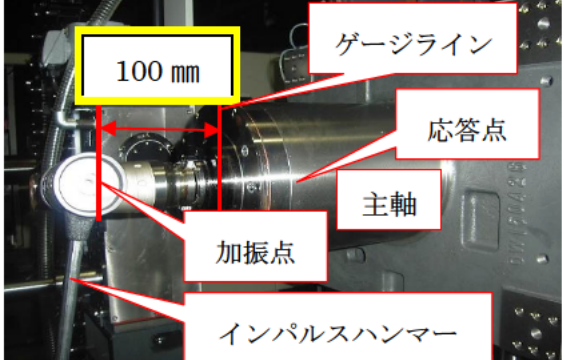
なのか、傾きなのかを確認した(表4)。

表3 実験条件 (テーブルトラバース機の垂直方向の測定)

推力を与えた位置： 主軸 GL より 100mm 荷重 (1 kN~5 kN)： ピストンにより付加 (ロードセルにより計測) 測定点：主軸フランジ部 コラムY軸リニアブロック (前側) コラムY軸リニアブロック (後側) サドルX軸リニアブロック (前側) サドルX軸リニアブロック (後側) 計測器：精密レーザ計測システム (レニショーXL-80)	
---	--

テーブルトラバース方式の主軸ゲージラインから100mmの位置をインパルスハンマーで加振をし、主軸端 (フランジ部) の振動応答特性を振動解析装置で測定した。

表4 実験条件 (テーブルトラバース機の振動測定)

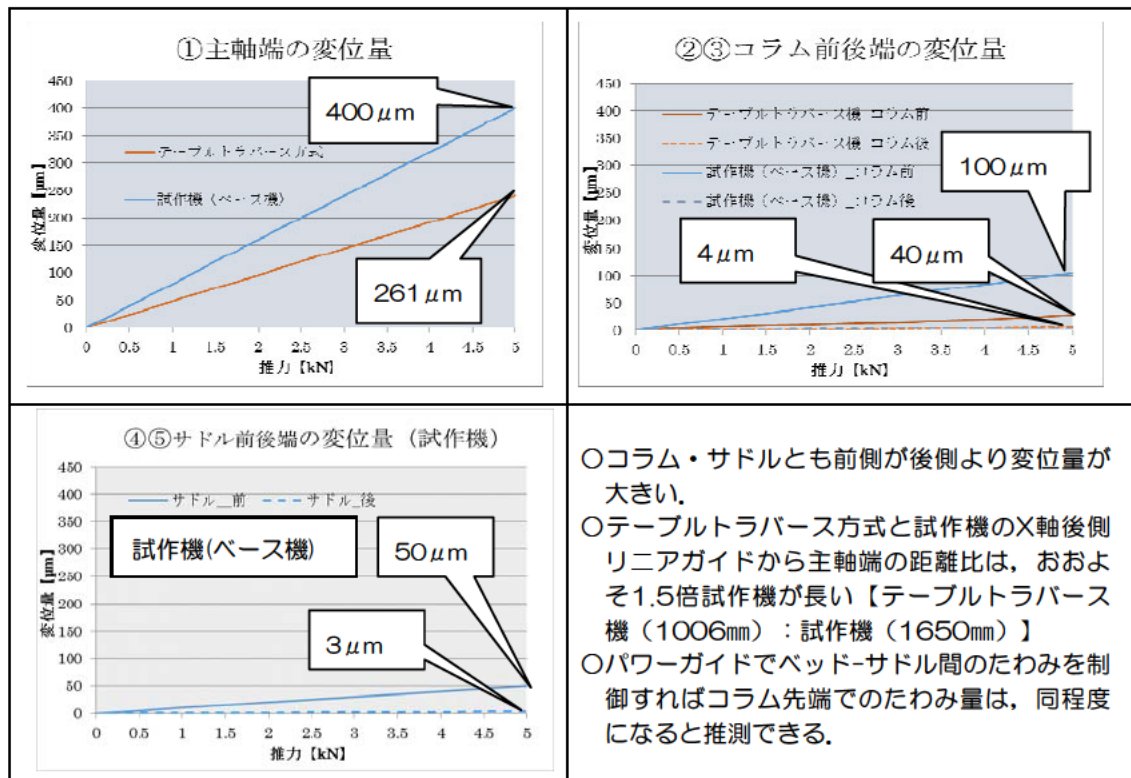
加振位置：主軸 GL より 100mm 加振方法：インパルスハンマー 応答位置：主軸フランジ部 応答計測器：振動センサ (主軸中心を対象にX軸方向に2か所) 測定機：振動解析装置 (小野測器：DS3200)	
---	---

◎ロングノーズ型コラムトラバース方式の試作機(ベース機) 製作及び特性データ採取

パワーガイドを載せられる本開発機が完成してから全てを検証していたら本研究のスケジュールもタイトになり、問題への対処も遅れる可能性が考えられたので機械幅と幅方向のストローク比2.7以下が可能なベッド幅1205.4mm、幅方向のストローク510mmの試作機(ベース機)を設計し製作をした。

テーブルトラバース方式同様に推力に対する変位量を測定し、変位量と測定位置と推力点までの寸法(距離)及びリニアガイド、ボールネジの取付け位置までの寸法(距離)の関係をテーブルトラバース機(既存機)と試作機(ベース機)と比較し、主軸部の変形なのか各部位組み合わせによる傾きなのか関係なのか分析した。(表5)

表5 各部位ごとの水平方向の推力に対する変位量の比較



同様にインパルスハンマーで加振し、主軸端の振動応答特性を振動解析装で測定した。

次年度パワーガイドでの振動抑制の効果を比較するため、試作機(ベース機)の振動応答特性を主軸端以外に下図(図4)に示すコラム、サドル、ベッドの応答点についても採取し(図5)、コンプライアンス(動的剛性)の振動状態を図6に示すようにアニメーション化した。

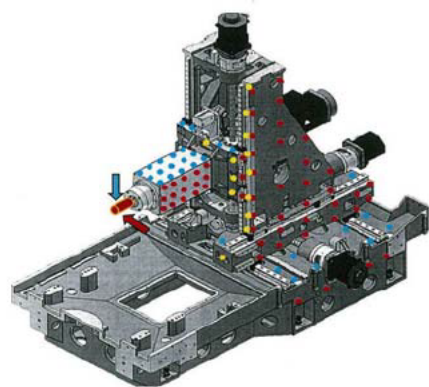


図4 応答点位置とDOF 区分図

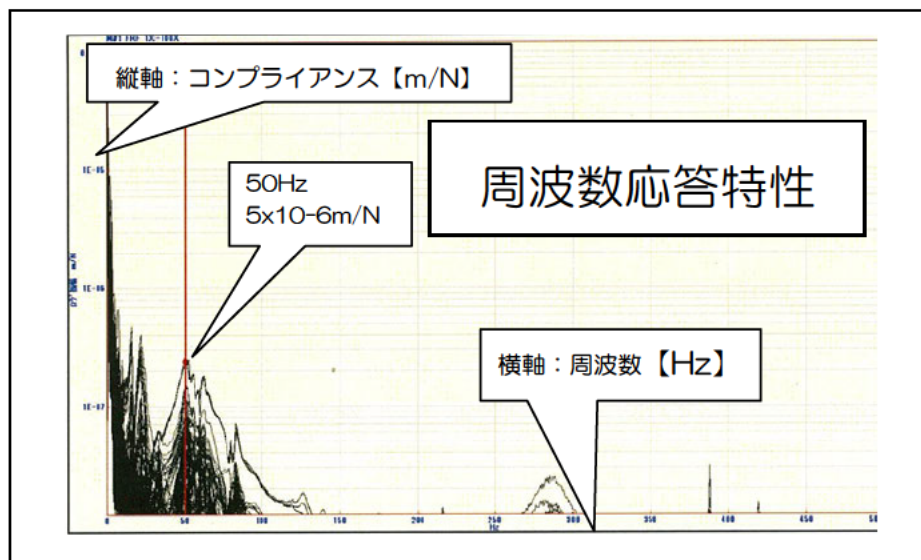


図5 コンプライアンス（動的剛性）の振動状態

アニメーション図6により、主軸先端部の変位量が長い主軸がたわんで発生したものなのか、組まれた本体の各部位のたわみ、ずれ、ねじれによるものなのか推測が出来た。

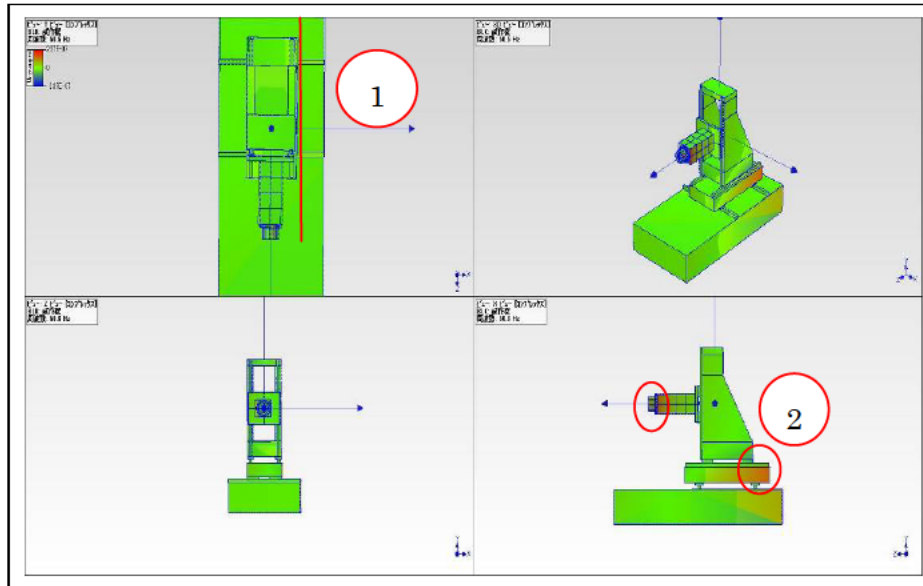


図6 周波数 50Hz 時のアニメーション化による変位量分布

【考察】

- ① 主軸の左側への傾きに伴い、サドルも傾きが発生している。
- ② 主軸端及サドル後端での振幅が大きい。

主軸自身のたわみもあるが、サドルから主軸端にかけて傾いている状況が推測される。つまりパワーガイド（振動・たわみ抑制機構）の効果に期待

◎構造解析

- ・ 構造解析を行うために主軸、コラム、サドル、ベッド等各部位の図面を3DCADにて製作した。
- ・ 全てをソリッドという条件で上記ひずみ測定と同じ最大推力5 k Nを与えた時の変形を解析し、主軸先端の変位量を算出した。（図7）

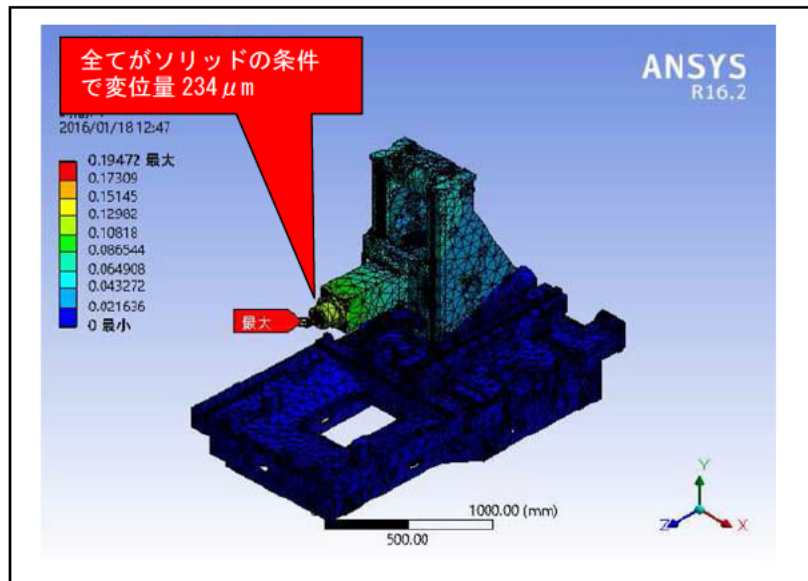


図7 主軸先端の変位量

テーブルトラバース型（既存機）と試作機（ベース機）の変位量の測定結果と解析結果より得た変位量が同じ程度になるように上記（全てがソリッド）で得た変位量から試作機（ベース機）のリニアガイドの剛性値を算出し、それにより適切なボールネジ及びリニアガイドの配置寸法を見直し、剛性値を向上させるボールネジの位置を算出した。（図8）

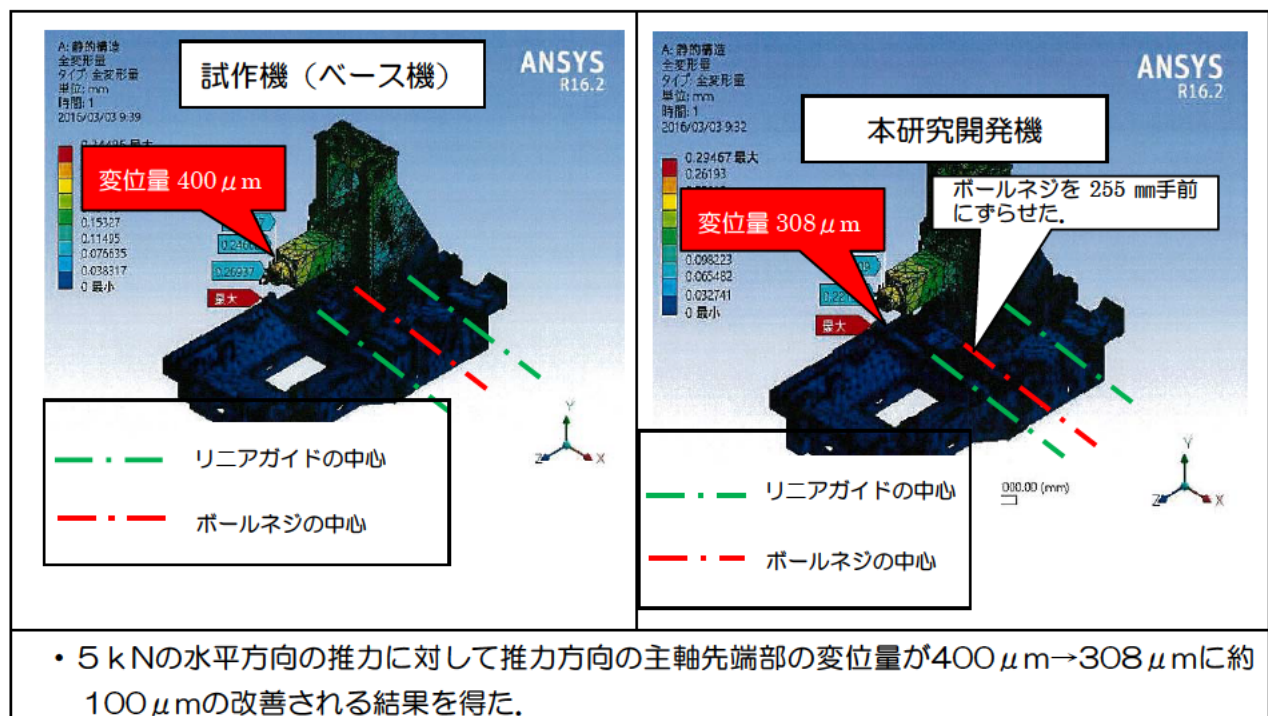


図8 剛性値を向上させるボールネジの位置の算出

主軸が長いので主軸単体での外力によるたわみ状態を解析し、主軸との一体化で剛性が上がる長いスピンドル構造を採用し本研究開発機の要素研究は完了した。

2-1-2 ハイブリッドガイドの改良

当社で開発した振動抑制機構であるハイブリッドガイドは、滑りガイド面にDLC膜をコーティングし、重切削加工時のみ油圧シリンダにて滑りガイドを転がりガイド上面（1面）を押し当てる構造であった。

従来、押し当てられるガイドとして各軸の転がりガイドを利用していたが、今回の改造では、ハイブリッドガイドの問題点を改善し、山形をなす2種の傾斜面に対して滑りブロックを押し付ける構造にした。（図9）

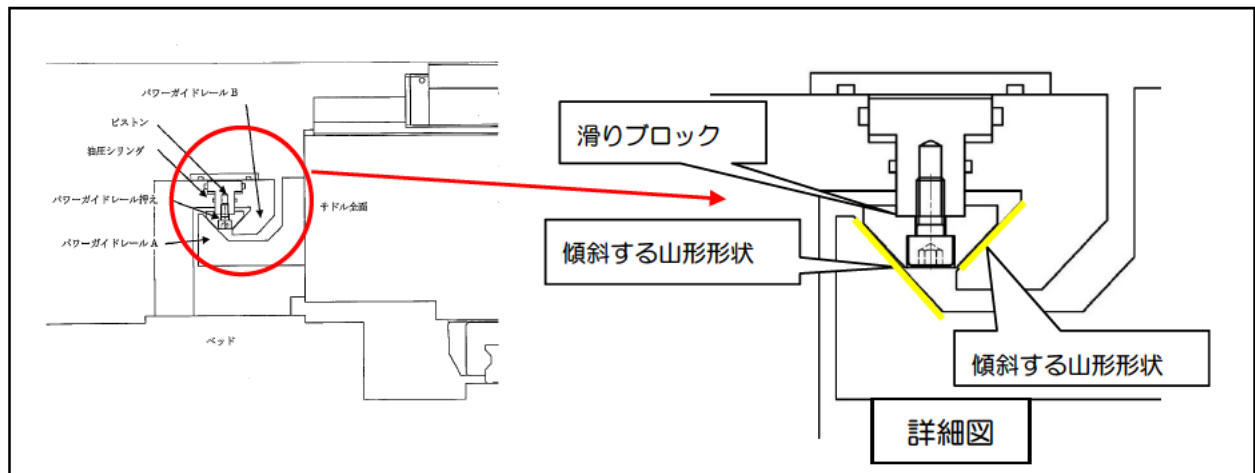


図9 山形をなす2種の傾斜面に対して滑りブロックを押し付ける構造

2-1-3 パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)の開発

ハイブリッドガイドを上記“2-1-2”で傾斜する山形形状 2 面への押し当て構造に改良し、機械加工時スピンドル回転軸を中心として発生する機械振動＝機械変位を一方向からの押し付けで抑制する方式を考案し、名称をパワーガイドと呼ぶようにした。

本考案構造にて加工時に発生する多方向の機械変位をパワーガイド一本にて抑制する事ができるようになっている。基本構造決定後、各部品設計・製作し組立完成した。（図10）

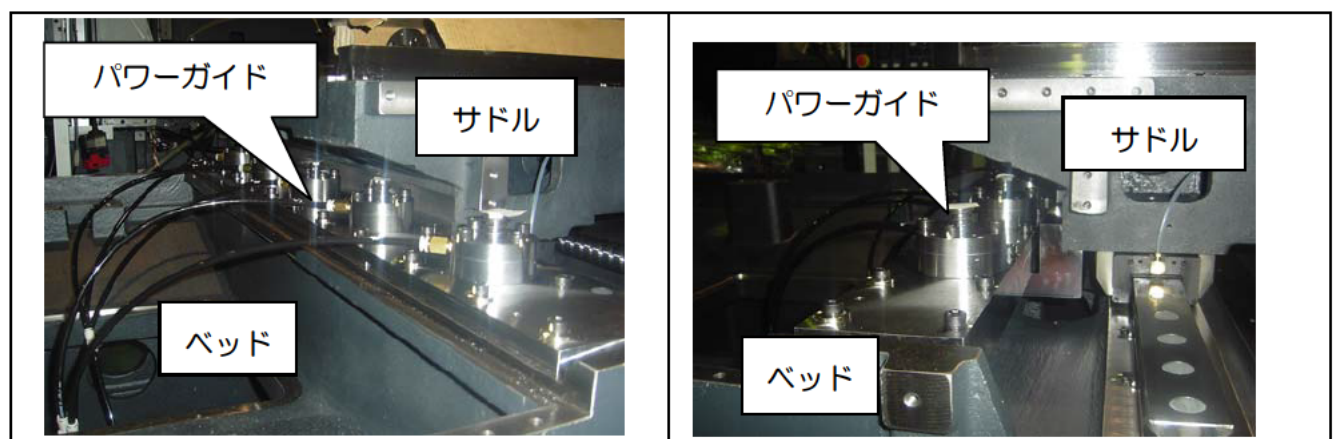


図10 機械に組込完成したパワーガイド

2-2 パワーガイド（振動・たわみ抑制機構）を組み込んだロングノーズ型コラム

トラバース方式横形マシニングセンタの設計・製作

2-2-1 設計・製作

パワーガイドを組み込んだロングノーズ型コラムトラバース方式横形マシニングセンタ（本研究開発機）の本機的设计，製作を実施し完成した。

本研究開発機の事業化に向け市場調査及び本研究開発機の JIMTOF（日本国際工作機械見本市）への出展を行う一方，ディーラやユーザーからのアプリケーションの創案を具体化するのに 3D 図面管理ソフトを導入し使用して迅速な対応をしてきた。

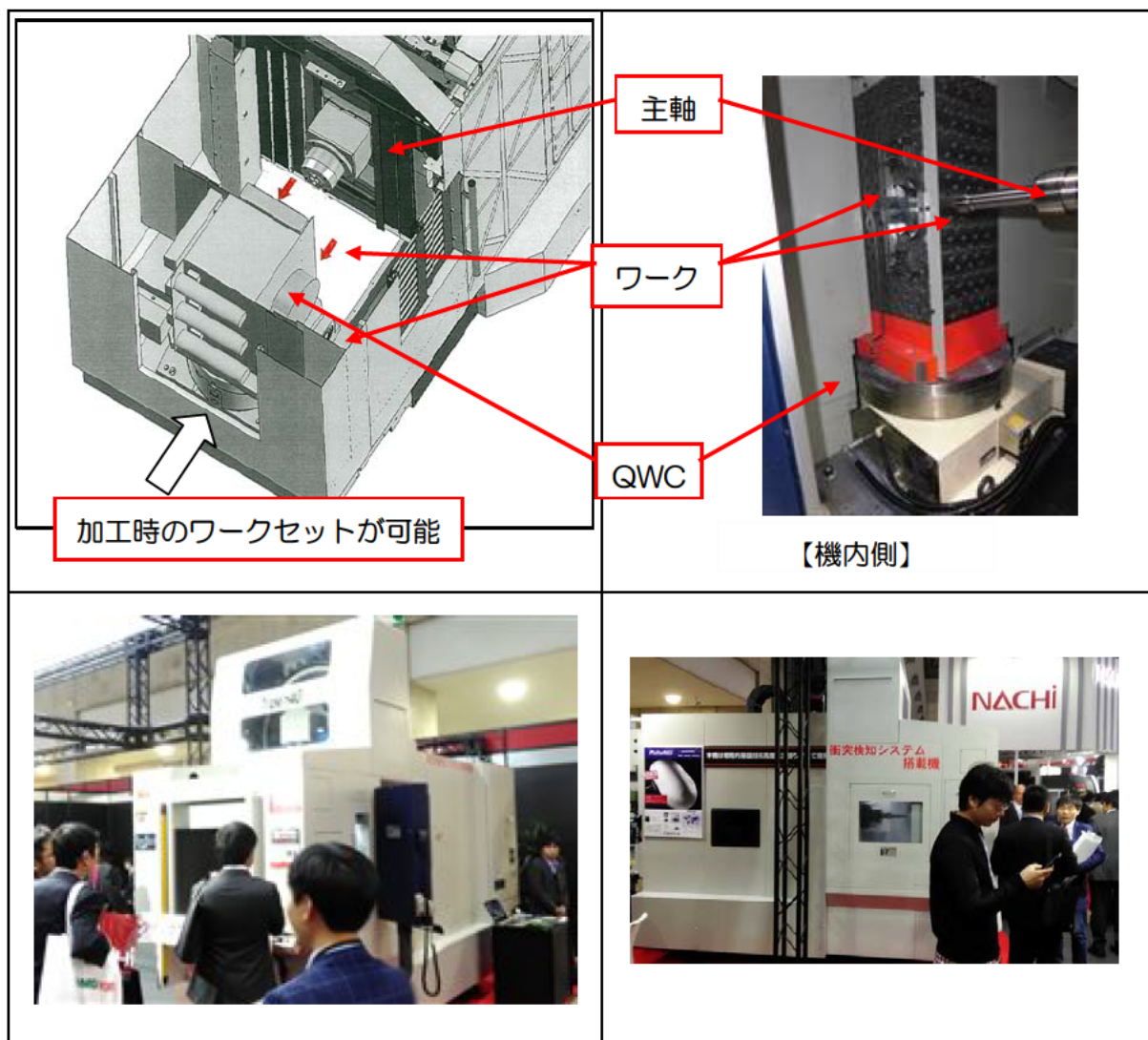


図 11 USA ディーラのアプリケーションの創案を具体化した QWC 搭載の本研究開発機（JIMTOF の弊社ブースの様子）

2-2-2 パワーガイド(振動・たわみ抑制機構)の制御方法の研究

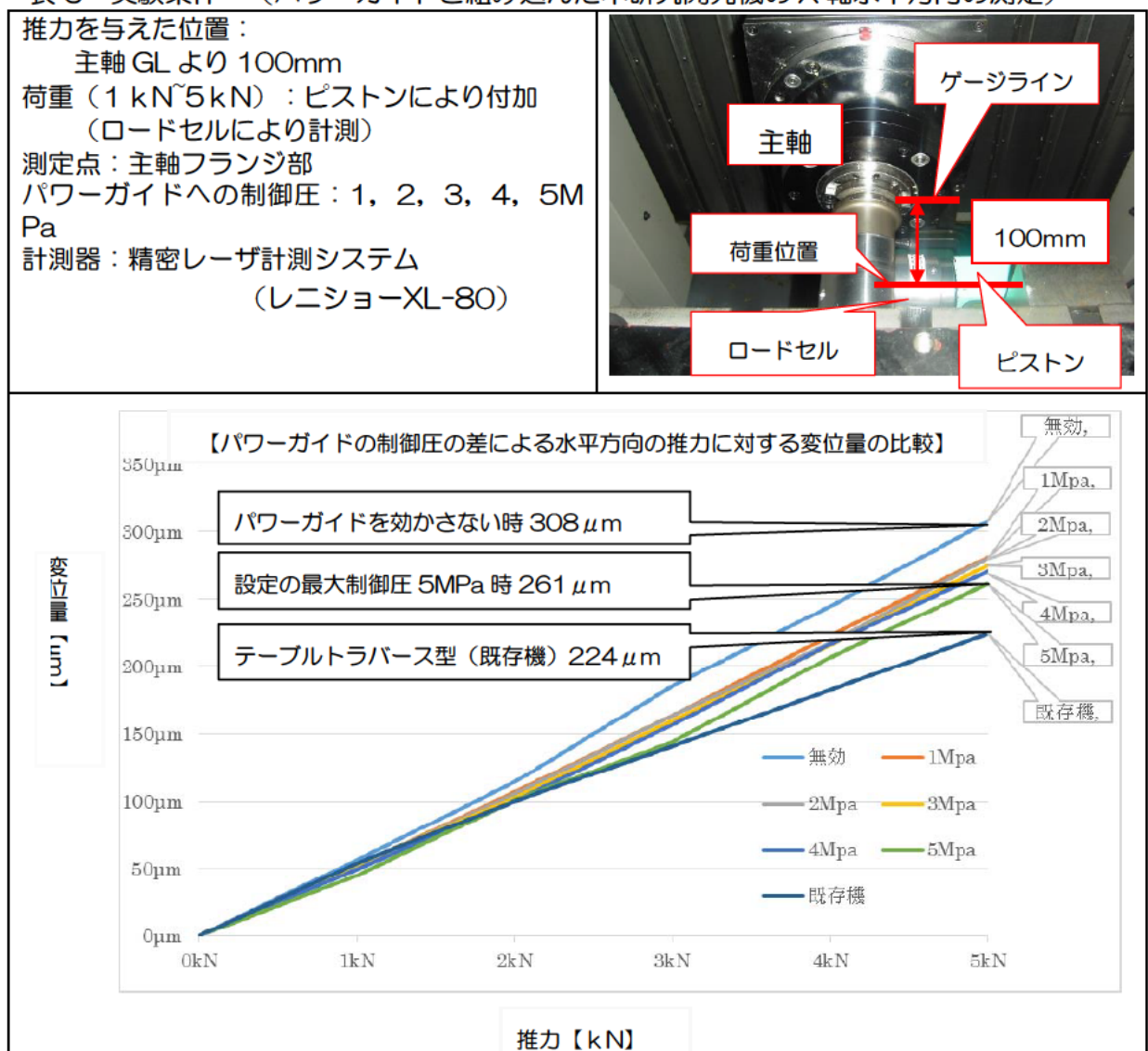
“2-2-1”で組立完成させたパワーガイド(振動・たわみ抑制機構)を組み込んだロングノーズ型コラムトラバース方式横形マシニングセンタ（本研究開発機）の推力に対する変位量を確認するためパワーガイドの油圧シリンダに投入される制御圧を変えながら各制御圧

での推力に対する変位置量，制御圧により機体へ姿勢変位，加工での影響を考察し適切な制御圧を決定した。

◎パワーガイドの特性データ採取

組立完成させたパワーガイド(振動・たわみ抑制機構)を組み込んだロングノーズ型コラムトラバース方式横形マシニングセンタ（本研究開発機）のパワーガイドの制御圧を1MPaから1MPaずつ5MPaまで順に変えながら主軸のゲージラインから100mmの位置を油圧ピストンでロードセルを用いて推力を確認し1kNから1kNずつ5kNまで推力を上げ，主軸端の推力方向の各推力に対する主軸フランジ部の変位置量及び主軸本体の傾きをレーザ計測装置で測定した。（表6）

表 6 実験条件 （パワーガイドと組み込んだ本研究開発機の X 軸水平方向の測定）



【考察】

パワーガイド搭載の本研究開発の制御圧 5MPa 時の推力 5kN に対する変位置量は 261 μm であり，パワーガイドを効かせた本研究開発機の変位置量がテーブルトラバース型に近い結果を得られた。

また、それはテーブルトラバース型既存機と比較すると推力 3kN までは同等の変位量があるものと分かった。

◎制御圧の決定

パワーガイドの特性を知るために各制御圧が外力に対してどのくらいの変位量になるか測定してきた。それぞれの測定結果にテーブルトラバース方式（既存機）、試作機（ベース機）と本研究開発機のリニアガイド部を剛体とし構造解析し計算された変位量を並べて整理した。（図 12）

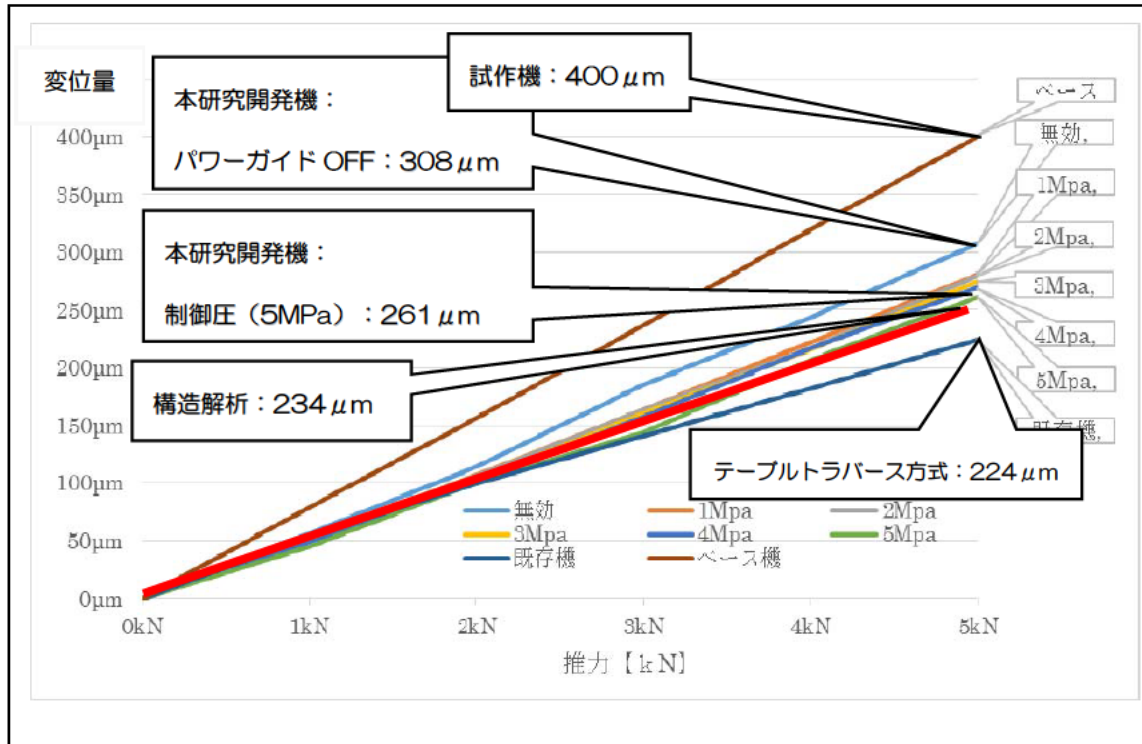


図 12 水平方向の推力に対する変位量比較【考察】

- ・ パワーガイドを効かせた本研究開発機は、構造解析で計算された変位量に近い結果が得られている。
- ・ 3kN 辺りまでの変位量は比較目標であるテーブルトラバース方式（既存機）に近い結果が得られている。
- ・ 試作機（ベース機）からボールネジの配置を変更した本研究開発機は、パワーガイドを効かせなくともかなり改善されていることが確認できた。

上記、考察より我々がターゲットとするユーザーの使用範囲を調べ、想定される推力をアドバイザー（タンガロイ様）から算出してもらった。

想定する最大加工推力に基準を 材料 S50C でのエンドミルの側面加工時の推力と決め、その推力 2 から 2.5kN 時の変位量を重視することにした。

また、パワーガイドは、山形をなす 2 種類の傾斜面に対して滑りブロックを押し当てる構造の為その押し当てる推力そのものが機械本体への変位を発生させ加工精度に影響を及ぼすと考えた。

その確認のため各制御圧での機体本体の姿勢の変位量を測定した。

測定は、各制御圧による変位量測定と同じ測定装置同じ方法で行った。

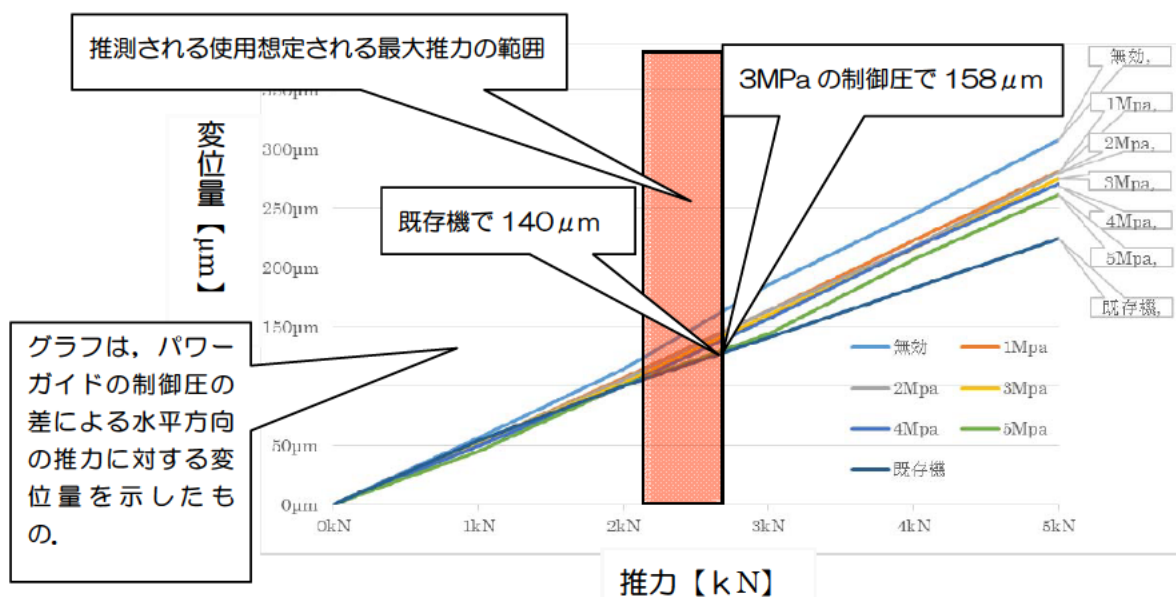
パワーガイド OFF（無効状態）から各制御圧でパワーガイド ON させその時の主軸端の変位量を測定した結果、Y 軸方向、Z 軸方向の変位量は、制御圧に比例して上昇している、パワーガイドの押す方向に直交する X 軸方向は制御圧の影響を受けにくいということがわかった。

制御圧決定の条件を整理し下記（表 7）に示す。

表 7 制御圧決定の条件

【制御圧決定の条件】

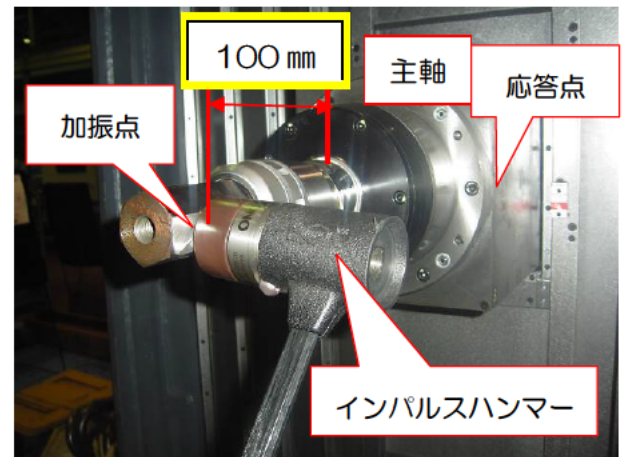
- 想定される加工時の外力の範囲でショートノーズ機を同等の変位量で抑えられること。
* 本研究開発機と同等の主軸サイズ NT-40 で材料 S50C のワークをエンドミル（ $\phi 25$ ）で側面切削時の主軸ラジアル方向の推力はおおよそ 2 から 2.5kN と推測される。
- パワーガイドは、山形をなす 2 種類の傾斜面に対して滑りブロックを押し当てる構造の為その押し当てる推力そのものが機械本体への変位を発生し加工精度に影響を及ぼさないこと。
* 制御圧 3MPa 以上では、主軸端に $10\mu\text{m}$ 以上の変位をもたらす。



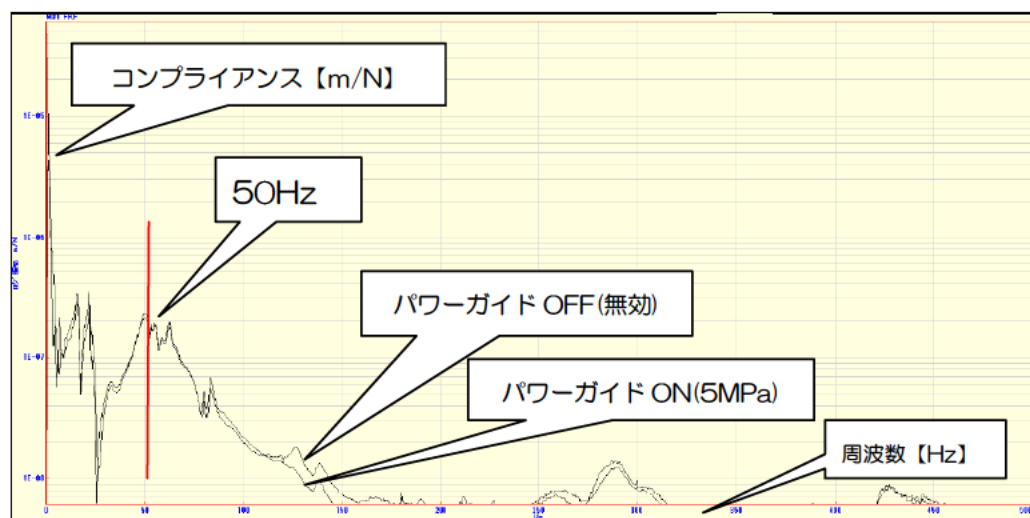
- 主軸先端を導入の振動解析装置に含まれるインパルスハンマーを使用して加振し、本研究開発機のパワーガイド OFF(無効の状態)、パワーガイド ON の状態の周波数応答を導入の振動解析装置を使用して測定しパワーガイドの効果を確認した。(表 8)

表 8 実験条件（振動測定）

加振位置：主軸 GL より 100mm
 加振方法：インパルスハンマー
 応答位置：主軸フランジ部
 応答計測器：振動センサ
 （主軸中心を対象にX軸方向に2か所）
 測定機：振動解析装置
 （小野測器：DS3200）



パワーガイドON/OFFの周波数応答特性の比較



【考察】

課題目標：50Hz でのコンプライアンスがパワーガイドあり（制御圧 5MPa）、なし（パワーガイドを無効状態）でともに $5 \mu\text{m/N}$ 付近であり差がなかったが、100Hz 付近以上では、差が生じパワーガイドありの方が低い値を得た。

・パワーガイドの制御圧の差により加工時発生する加工振動が共振振動し、加工精度に影響を及ぼすと考えられ制御圧の差による振動を調べるため、FC200、S50C等をフルフェイス、エンドミルで加工し、加工時の振動を導入の振動解析装置を使用して振動測定した、また加工した材料の硬度を導入した硬度計を使用し管理し、振動結果に影響を与える工具のクランプ条件も導入した引き込み力測定ツールを使用して管理のうえ、導入の振動解析装置を使用して各制御圧での振動差の確認を実施した。

【考察】

パワーガイドの制御圧の差による加工振動測定では、顕著な差はみられなかった。制御圧の差による直接加工振動へ影響の差は、はっきりと表れにくいと判断した。

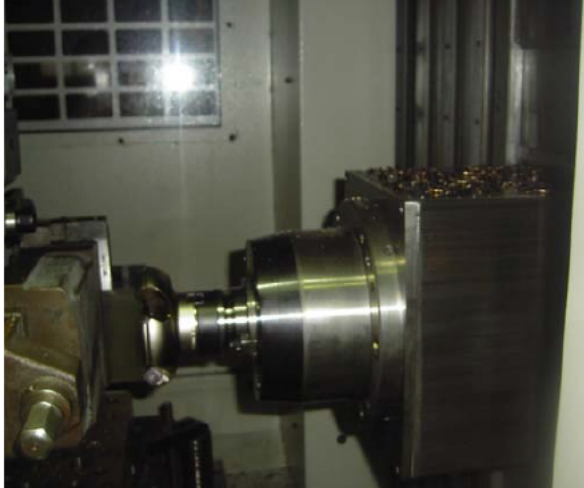
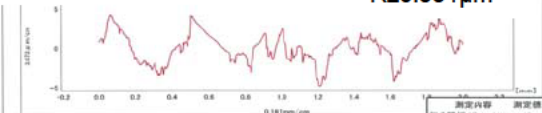
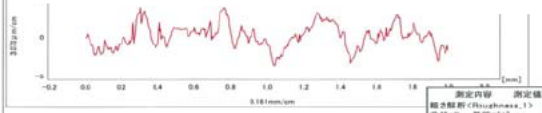
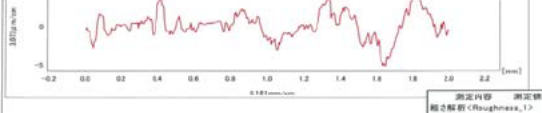
2-3 剛性評価および安定精度への取り組み

2-3-1 加工評価（加工剛性・加工精度）

A. 加工能力の評価は以下手法で行った。

(A-1) 紀和マシナリーでは、テーブルトラバース方式（既存機）と本研究開発機のパワーガイド OFF（無効状態）、パワーガイド ON（制御圧 3MPa）の条件で加工テストを実施し、それらの加工面の面粗さを面粗さ計で測定し比較した（表 9）。

表 9 加工条件と面粗さ比較

【切削条件】 ワーク材質：S45C 刃具：フルフェイスミル (5 枚刃/タンガロイ製) 工具径：φ100mm チップタイプ：AH130 切削幅：100mm 切削速度：150m/分 (S500) 送り速度：0.1 mm/Rev (F250) 送りの方向：X 軸 切削油：なし 面粗さ測定機： 表面形状測定機 SV-C3200H8 【ミットヨ製】	【切削の様子】 
【面粗さ計】  【ワーク】 左から既存機, パワーガイド OFF, 	測定結果 既存機(テーブルトラバース方式) Rz6.881μm  測定内容 測定機 粗さ検査 (Roughness, 1) 曲線+P - 箇所=1 Rz 6.881 μm Ra 1.478 μm Rq 4.44 μm パワーガイド off Rz7.303μm  測定内容 測定機 粗さ検査 (Roughness, 1) 曲線+P - 箇所=1 Rz 7.303 μm Ra 1.539 μm Rq 4.68 μm パワーガイド on Rz5.734μm  測定内容 測定機 粗さ検査 (Roughness, 1) 曲線+P - 箇所=1 Rz 5.734 μm Ra 1.222 μm Rq 3.034 μm Rt 5.734 μm
・微小ではあるがパワーガイド ON の結果は、テーブルトラバース方式既存機よりよい数値を示していた。	

【考察】

実施したほとんどの加工評価テストにおいて、振動測定、負荷測定、精度測定のいずれの測定においても、テーブルトラバース方式既存機、本研究開発機のパワーガイド OFF、パワーガイド ON の差には顕著な差が生じなかった。

これは、研究テーマ【1】において本研究開発機的设计・製作に当たりベッドの構造解析をした結果によりボールネジの配置を見直して、ボールネジの配置変更したことで本研究開発機が既存機と近い切削能力に到達したと判断している。この加工比較テストは、このことを確認することが出来たと考える。

(A-2) 中部大学では、形状評価ソフトを導入し平成 27 年度に引き続き、株式会社紀和マシナリーにおいてエンドミル加工を実施した。導入した形状評価用回転テーブルを使用してワークの形状精度を測定し、導入した形状評価ソフトを使用して加工精度の評価を行った。

開発対象である Triple H40 (ロングノーズコラムトラバース機) を用いて図 13 に示すように切削実験を行った。工作物としては図 14 に示すような六角形の SUS304 部品 (HRC35) の外周を切削加工した。工具としてはφ20 の超硬製エンドミル (日進工具製) を用いた。工具の形状は 4 枚刃で、回転数は 955rpm であった。切削条件は、送り速度：191mm/分と固定し、切込みを 0.1, 0.3, 0.5mm と変化させた。形状および表面粗さは図 15 に示すようにレーザプローブ式非接触測定機に平成 28 年度に導入した形状評価ソフトと平成 27 年度に導入した形状評価用回転テーブルを使用して評価した。

パワーガイド有無により、形状を評価した結果を図 16 に、パワーガイドの有無による形状精度測定結果の一例を図 17 に示す。パワーガイド有りの時は無しに比べて、剛性が上がるために平面度が若干良くなっているのが確認できる

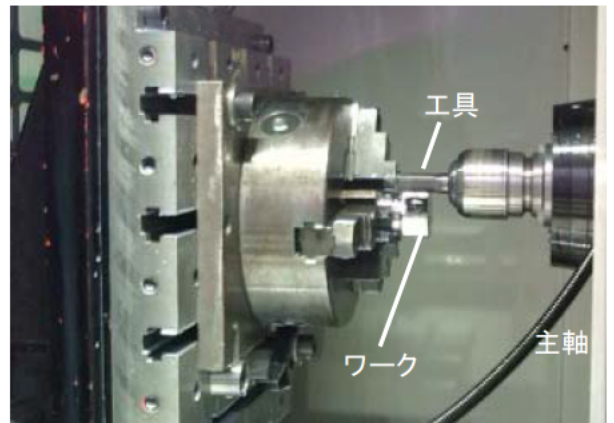


図 13 SUS304 部品 (HRC35) の切削実験

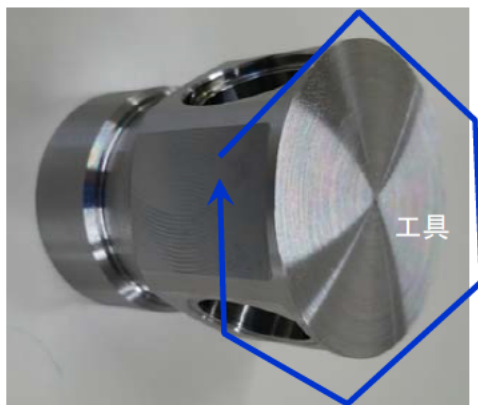


図 14 工作物 (SUS304) と工具軌跡



図 15 形状計測 (非接触測定器+回転テーブル)

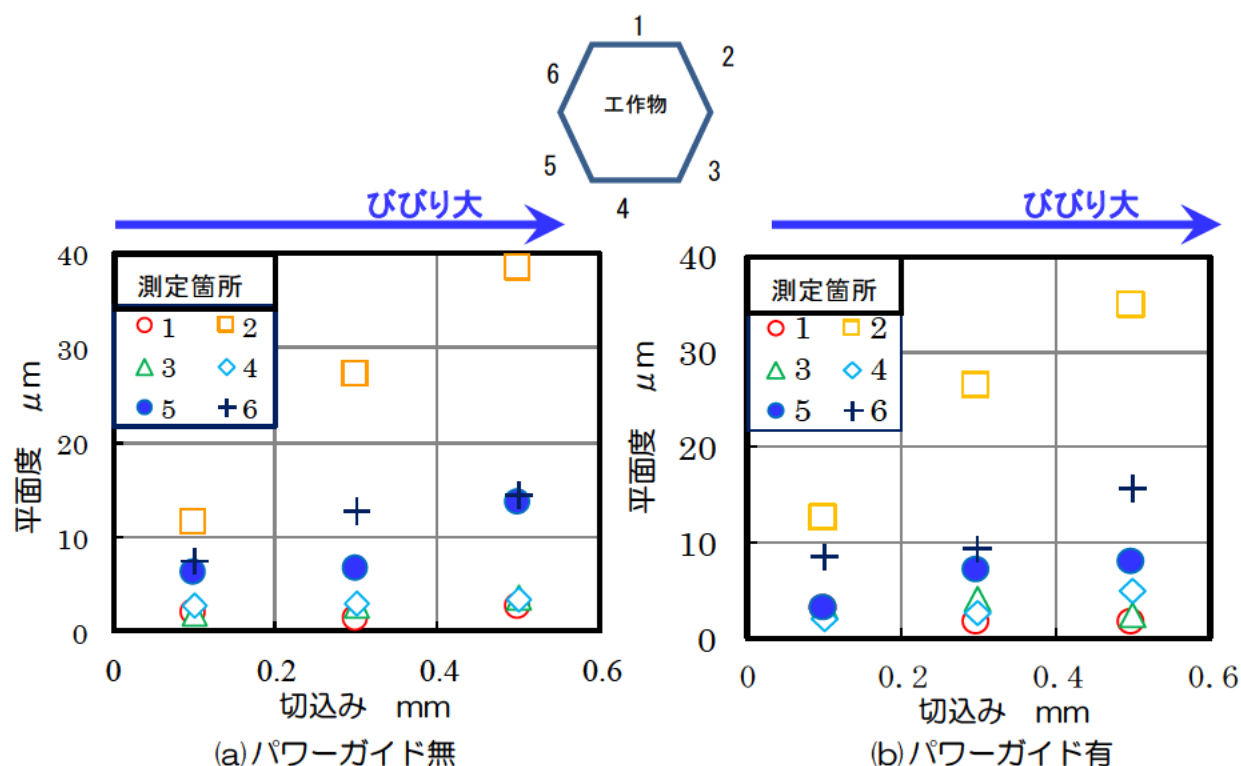


図 16 パワーガイドの有無による形状精度の比較

また、パワーガイド有無により、表面粗さ R_z を評価した結果を図 18 に示す。パワーガイド有りの時は無しに比べて、剛性が上がるために表面粗さが若干良くなっているのがわかる。(図 19)

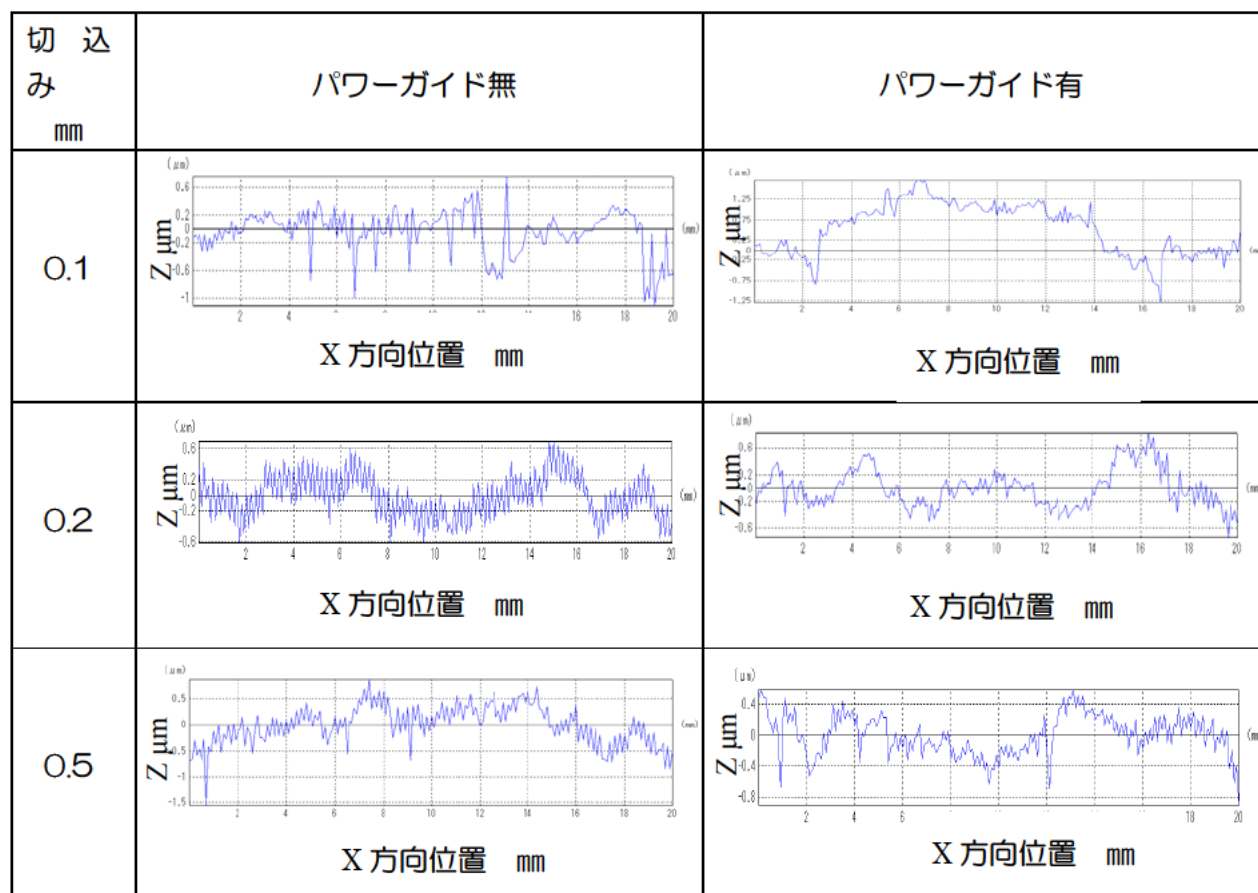


図 17 パワーガイドの有無による形状精度測定結果の一例

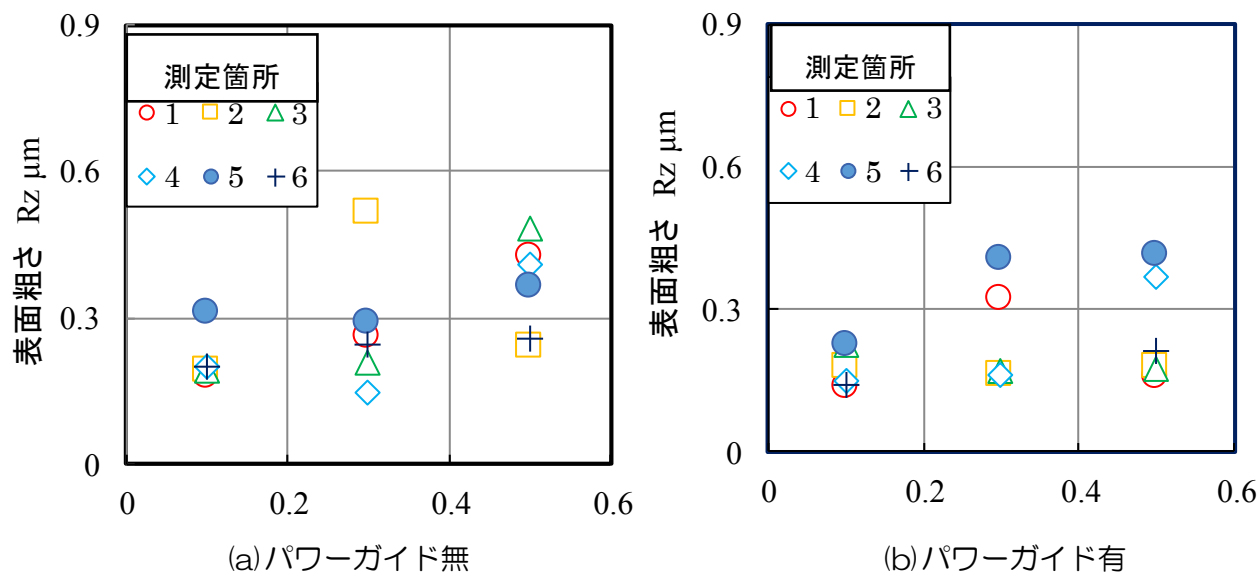


図 18 パワーガイドの有無による表面粗さ Rz の比較

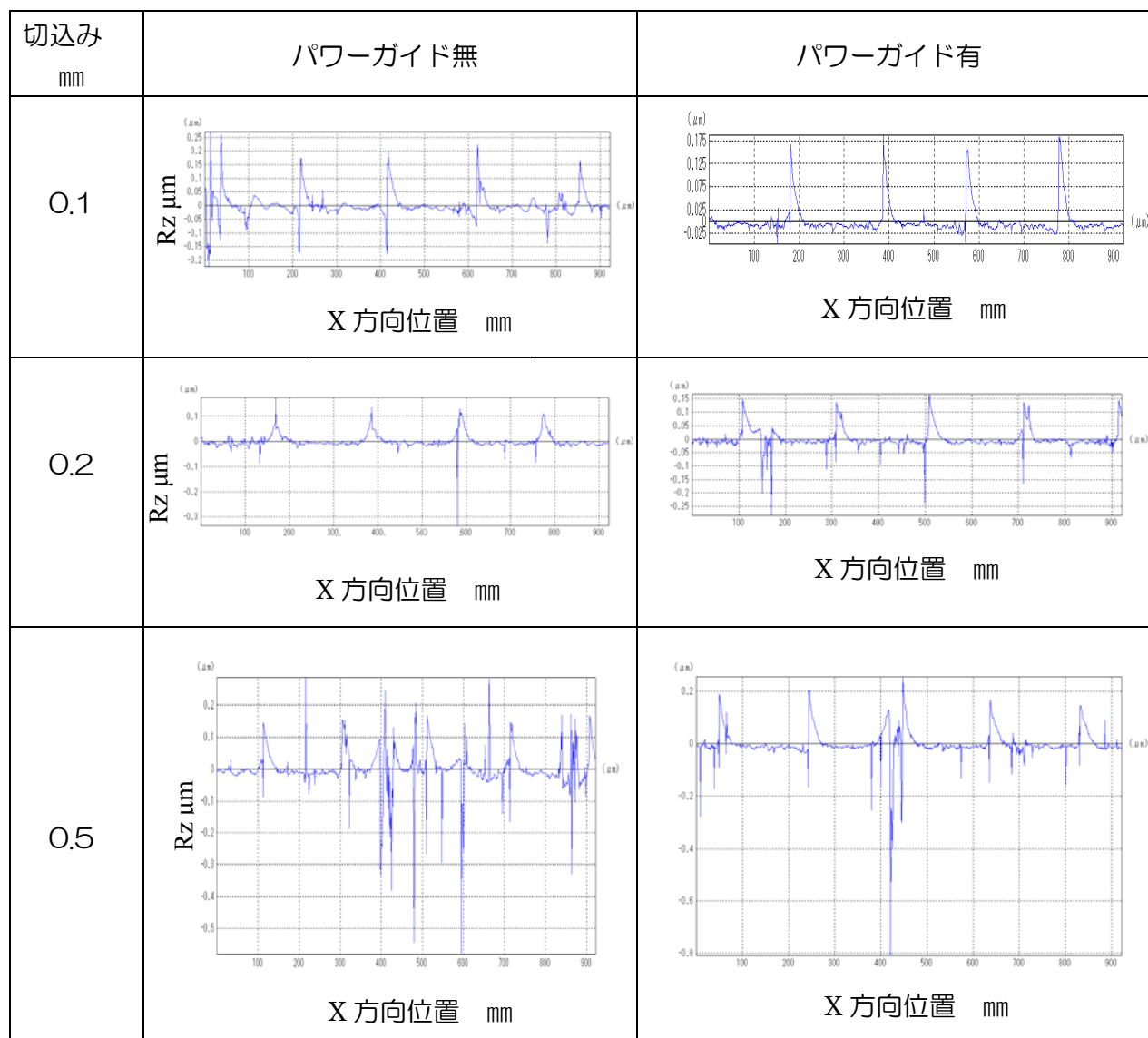


図 19 パワーガイドの有無による表面粗さ Rz 測定結果の一例

B. パワーガイドの評価は以下手法により行った

(B-1) 三重県工業研究所では、株式会社紀和マシナリーでチタン合金加工時の切削抵抗を導入した切削動力計を使用して測定し、工具寿命・加工面粗さへの影響を調べ、切削抵抗、表面粗さからパワーガイドの有効性を評価した。この際、適切な加工条件を選定するため導入のファイバースコープを使用して加工中のワーク表面性状を確認しながら実施した。加工条件、加工物、加工面粗さ測定結果を表 10 に示す。

表 10 加工条件、加工物、加工面粗さ（表面粗さ）の比較

ドリル：サンドビック製 コロドリルφ15.5 切削速度：40m/min，送り量 0.25mm/rev 回転数 822rpm，深さ 35mm，外部給油 フェイスミル：タンガロイ製 DoFEED φ50 切削幅:40mm，切削速度 40m/min，送り量:0.7mm/刃（F1400mm/min），回転数 250rpm，切込み 0.5mm，外部給油 ボーリング：大昭和精機製 EWN ボーリングヘッド 切削速度 90m/min，送り量 0.04mm/rev，回転数 1791rpm，深さ 30mm 外部給油 エンドミル：サンドビック製コロミルブルーラ HDφ25 切削速度 60m/min，回転数 764rpm，送り量 0.05mm/刃（F152mm/min），軸・半径方向切込み 0.3mm 外部給油															
加工条件	切削動力計を使用した加工の様子														
	<table><tr><td colspan="2"></td><td>パワーガイド OFF</td><td>パワーガイド ON</td></tr><tr><td rowspan="3">最大高さ粗さ μm Rz</td><td>フェイスミル</td><td>7.9</td><td>9.8</td></tr><tr><td>エンドミル</td><td>1.3</td><td>1.1</td></tr><tr><td>ボーリング</td><td>3.5</td><td>3.3</td></tr></table>			パワーガイド OFF	パワーガイド ON	最大高さ粗さ μm Rz	フェイスミル	7.9	9.8	エンドミル	1.3	1.1	ボーリング	3.5	3.3
		パワーガイド OFF	パワーガイド ON												
最大高さ粗さ μm Rz	フェイスミル	7.9	9.8												
	エンドミル	1.3	1.1												
	ボーリング	3.5	3.3												
加工物 Ti-6Al-4V （上段：フェイスミル加工用ワーク 100×80×45mm） 下段：ドリル，ボーリング，エンドミル加工用ワーク 100×100×45mm） （左：開発機パワーガイド OFF，右：開発機パワーガイド ON）	表面粗さの測定結果														

切削抵抗のピーク値及び振動のピーク値の測定結果を表 11 に示す。

表 11 切削抵抗・振動のピーク値の比較

		TripleH40（開発機） （パワーガイド OFF）				TripleH40（開発機） （パワーガイド ON）			
		フェイス ミル	エンド ミル	ドリル	ボー リン グ	フェイス ミル	エンド ミル	ドリ ル	ボー リン グ
切削抵抗	Fx[N]	1261	312	125	22.4	1314	—	140	26
	Fy[N]	514	307	78	21.7	588	—	66	24.1
	Fz[N]	1086	80	3098	18.7	1089	—	3051	13.8
Y 軸方向加速度 （振動）[m/s ²]		0.12	0.031	0.065	0.04	0.14	—	0.074	0.06
表における切削抵抗は、切削動力計における X、Y、Z 軸方向における測定値を Fx、Fy、Fz として表記した。パワーガイド ON 時のエンドミルの数値は実験中に工具が破損したため記載していない。									

【考察】

- ・パワーガイドの ON/OFF で表面粗さ、切削抵抗、振動は顕著な差は見られなかったが、表面粗さ、切削抵抗はパワーガイド ON の時に僅かに改善されており、剛性向上の効果があつたと判断している。
- ・工具寿命への影響はパワーガイド ON の時に切削抵抗が減少しており、工具寿命向上が期待できる。
- ・フェイスミル加工において表面粗さに差が見られたが、これは工具の刃先高さが揃っていないことが原因であるため、パワーガイドの効果とは関係がないと考えられる。

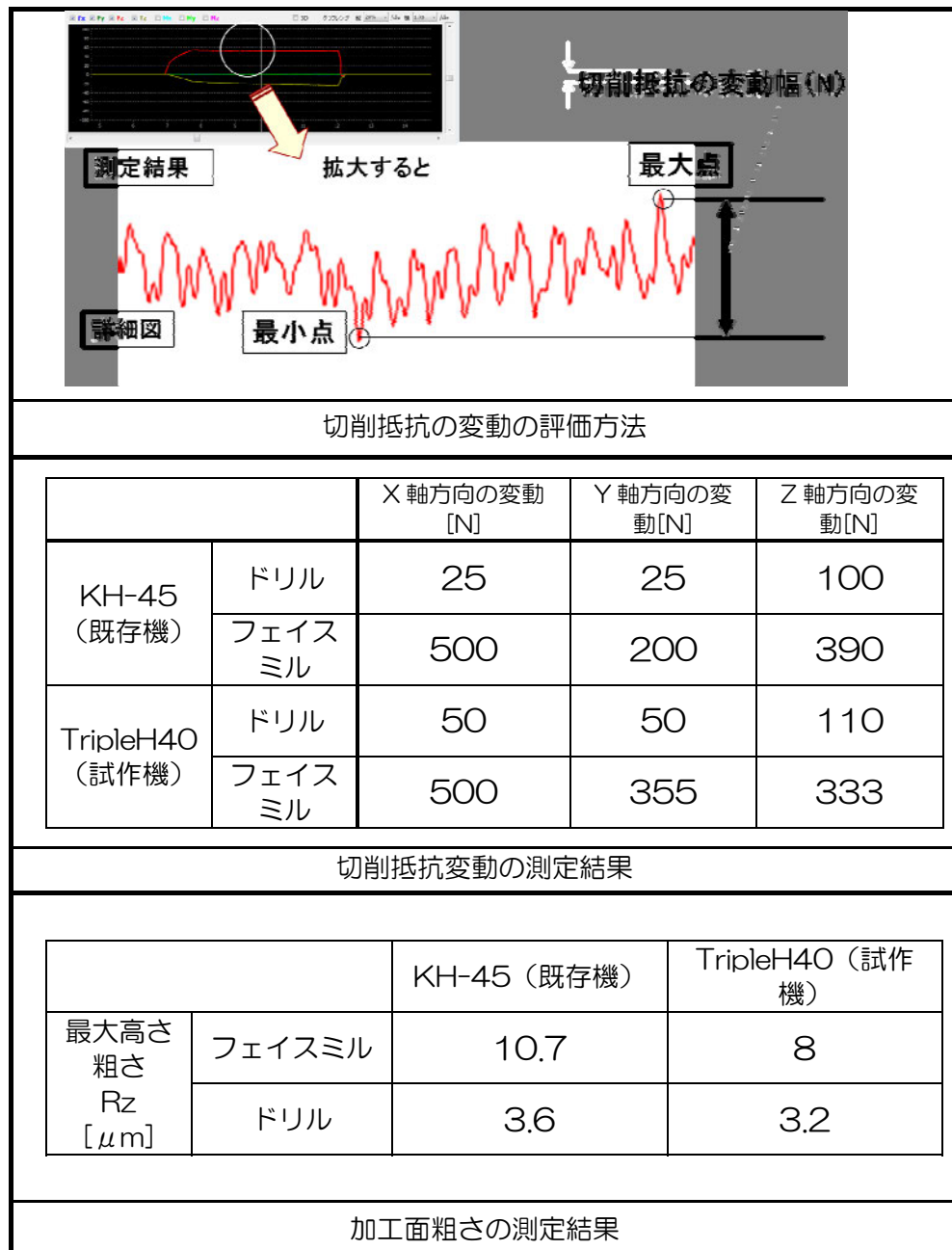
C. 将来ニーズが高まる難削材や CFRP の加工評価は、以下手法により行った。

(C-1) 三重県工業研究所では、チタン素材でフェイスミル、エンドミル、ボーリング、ドリル加工の基礎加工テストを株式会社紀和マシナリーで実施し、導入した切削動力計を使用して加工時の切削動力（切削抵抗）を測定し加工能力を評価した。

（平成 27 年度）

ドリル、フェイスミル加工における切削抵抗の変動を評価した。切削抵抗の変動から振動発生の有無を調べ、また加工後の加工面粗さを測定し、装置の剛性を評価した。表 12 に評価方法および測定結果を示す。

表 12 切削抵抗の変動



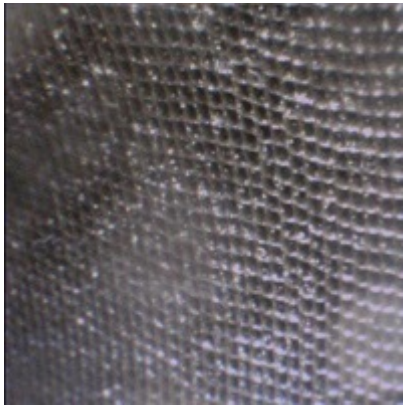
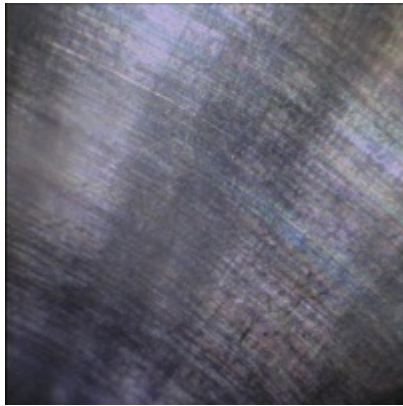
- 加工面の粗さは、フェイスミル・ドリルで試作機は既存機比で僅かに良い値が得られた。
- 切削抵抗の変動は、ドリル、フェイスミル加工では既存機と試作機で大きな差はなく、試作機の各軸方向の剛性は既存機と同等である事が確認できたと考える。

(平成 28 年度)

導入したファイバースコープを使用し加工面状態を観察し、ボーリング加工の加工条件を選定した。切削条件を変えながら最適な加工条件を選定できた。切削抵抗、振動、加工面粗さを測定し、装置の加工能力、装置剛性を評価した。

加工条件選定および加工面粗さの測定結果を表 13 に示す。

表 13 加工条件選定, 加工面粗さ, 加工物

															
切削条件が合っていない加工面 加工面が粗い	切削条件が合っている加工面 加工面が滑らか														
切削条件（ドリル加工） 工具：サンドビック製 コロドリルφ15.5 切削速度：40m/min, 送り量 0.25mm/rev 回転数 822rpm, 深さ 35mm, 外部給油															
切削条件（フェイスミル加工） 工具：タンガロイ製 DoFEED φ50 切削幅:40mm, 切削速度 40m/min, 送り量:0.7mm/刃, 回転数:250rpm, 切込み 0.5mm, 外部給油															
切削条件（ボーリング加工） 工具：大昭和精機製 EWN ボーリングヘッド 切削速度 90m/min, 送り量 0.04mm/rev, 回転数 1791rpm, 深さ 30mm 外部給油															
切削条件（エンドミル加工） 工具：サンドビック製コロミルブルーラ HDφ25 切削速度 60m/min, 回転数 764rpm, 送り量 0.05mm/刃 (F152mm/min), 軸・半径方向切込み 0.3mm 外部給油															
加工物 Ti-6Al-4V 	<table><tr><td colspan="2"></td><td>KH-45 (既存機)</td><td>TripleH4 O (開発機)</td></tr><tr><td rowspan="3">最大 高さ 粗さ μm Rz</td><td>フェイスミル</td><td>14.5</td><td>7.9</td></tr><tr><td>エンドミル</td><td>1.5</td><td>1.3</td></tr><tr><td>ボーリング</td><td>3.6</td><td>3.5</td></tr></table>			KH-45 (既存機)	TripleH4 O (開発機)	最大 高さ 粗さ μm Rz	フェイスミル	14.5	7.9	エンドミル	1.5	1.3	ボーリング	3.6	3.5
		KH-45 (既存機)	TripleH4 O (開発機)												
最大 高さ 粗さ μm Rz	フェイスミル	14.5	7.9												
	エンドミル	1.5	1.3												
	ボーリング	3.6	3.5												
(上段：フェイスミル加工用ワーク 100×80×45mm, 下段：ドリル, ボーリング, エンドミル加工用ワーク 100×100×45mm)) (左：既存機, 右：開発機)	表面粗さの比較														

平成 27 年度は切削抵抗の変動から剛性の評価を試みたが、平成 28 年度は振動と切削抵抗のピーク値を組み合わせる事でより総合的な評価を試みた。切削抵抗、振動のピーク値の測定結果を表 14 に示す。

表 14 既存機および開発機における切削抵抗・振動のピーク値

		KH-45（既存機）				TripleH40（開発機） （振動たわみ抑制機構無）			
		フェイスミル	エンドミル	ドリル	ボーリング	フェイスミル	エンドミル	ドリル	ボーリング
切削抵抗	Fx[N]	1512	497	96.8	25.1	1261	312	125	22.4
	Fy[N]	576	496	92.9	28.6	514	307	78	21.7
	Fz[N]	1320	60.7	2994	7.3	1086	80	3098	18.7
Y 軸方向加速度 （振動） [m/s ²]		0.01	0.03	0.01	0.005	0.12	0.031	0.065	0.04

- ・ 切削抵抗のピーク値は、ドリル、ボーリングの穴加工で開発機は既存機と同じであり、フェイスミル、エンドミルで減少する傾向が見られた。加工面粗さは、エンドミル、ボーリング加工で試作機と同様に開発機は既存機と同等の加工面が得られた。フェイスミル加工では良い値が得られていたが、試作機の実験結果を考慮すると、刃先の高さが揃っていなかった等の要因があり、既存機で加工面粗さが悪化したことが推測される。平成 27 年度の切削抵抗の変動の結果から振動特性にも大きな差はなかったことから、ドリル、ボーリング、フェイスミル、エンドミルの各加工で開発機の加工能力は同等であることが確認できたと考える。
- ・ 振動は、既存機と開発機でほぼ同等であったが、一部測定結果に差が見られた。これは振動測定方法が既存機と開発機で異なることから振動の評価は今後の検証課題とする。

(C-2) 中部大学では、CFRP およびチタン材を株式会社紀和マシナリーにて行い、加工能力の評価を行うとともに、切りくず集塵機を導入し切削時の切りくず排出性を評価し、本開発機の CFRP および CFRP とチタン、アルミニウムとの複合接着材加工への有効性も評価した。

開発対象である Triple H40（ロングノーズコラムトラバース機）を用いてチタン材の切削実験を行った。工作物としては図 20 に示すような四角形のチタン合金（Ti-6Al-4V）にミーリング加工，穴加工，ボーリング加工，正面フライス加工を実施し，加工精度および表面粗さの比較を行った。工具としてはミーリング加工にはコロミルブルーラ HD Φ25 の 4 枚刃エンドミル（サンドビック製），穴加工にはΦ15.5 ソリッドドリル 2 枚刃（サンドビック製），ボーリング加工にはΦ16 ボーリングバイト 1 枚刃（大昭和精機製），正面フライス加工にはΦ50DoFEED 8 枚刃（タンガロイ製）を用いた。

切削条件を表 15 に示す。形状および表面粗さは図 21 に示すようにレーザプローブ式非接触測定機に平成 28 年度に導入した形状評価ソフトを使用して評価した。

パワーガイド有無により切削加工を行い，図 22 に示す箇所において精度の測定を行った。その評価した結果を表 16 に示す。また，パワーガイドの有無による表面粗さ曲線の比較したものを図 23 に示す。パワーガイド有りの場合はパワーガイド無しの場合に比べて，機械剛性が向上するために加工精度が良くなっていると思われる。



(a) 加工精度評価用



(b) 表面粗さ評価用



図 21 形状の計測の様子

図 20 工作物 チタン合金（Ti-6Al-4V）（非接触測定機＋形状評価ソフト）

表 15 加工精度評価のための切削条件

	ミーリング加工	穴加工	ボーリング加工	正面フライス加工
切削速度	100m/分	40m/分	90m/分	40m/分
回転数	1273 min ⁻¹	822 min ⁻¹	1791 min ⁻¹	250 min ⁻¹
送り速度	200mm/分	206mm/分	72mm/分	1400mm/分

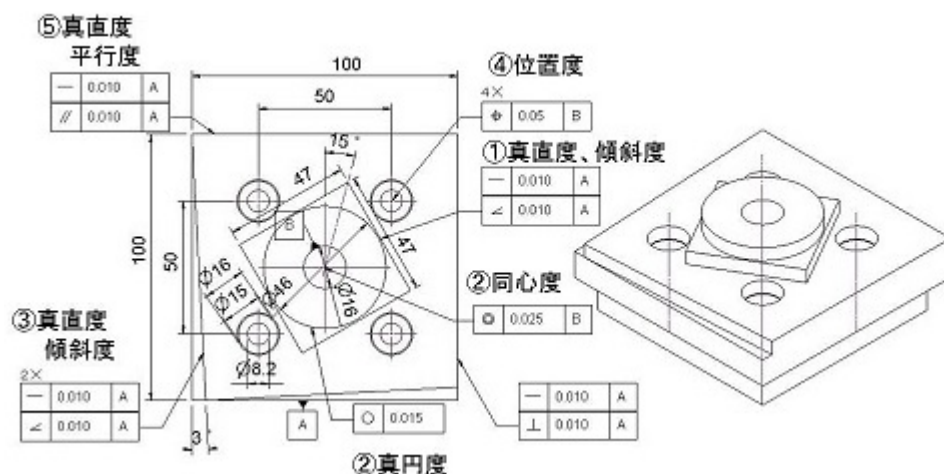


図 22 Ti 合金加工サンプルの精度測定の仕様

表 16 Ti 合金加工時の加工精度の測定結果

(a) パワーガイド有

測定項目	公差	誤差量測定結果			
		A	B	c	d
① 真直度	0.010	0.002	0.005	0.002	0.004
傾斜角度	0.010	-0.011	0.006	0.011	0.009
② 真円度	0.015	0.007	-	-	-
③ 真直度	0.010	0.010	0.006	-	-
傾斜角度	0.010	0.000	0.002	-	-
④ 位置精度 X	0.050	0.054	0.114	0.077	0.026
位置精度 Y	0.050	-0.233	-0.213	-0.175	-0.183
⑤ 真直度	0.010	0.006	-	-	-
平行度	0.010	0.005	-	-	-

誤差:

2 倍以上

公差外

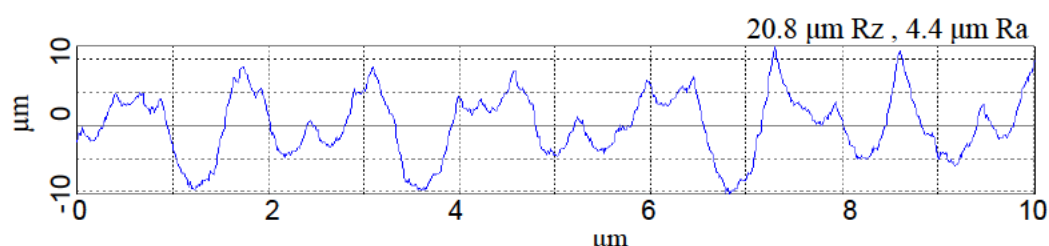
(b) パワーガイド無

測定項目	公差	誤差量測定結果			
		A	B	c	d
真直度	0.010	0.020	0.037	0.013	0.015
傾斜角度	0.010	-0.049	-0.042	-0.019	-0.029
① 真円度	0.015	0.009	-	-	-
② 真直度	0.010	0.048	0.012	-	-
傾斜角度	0.010	-0.040	0.020	-	-
③ 位置精度 X	0.050	-0.136	-0.125	-0.109	-0.135
位置精度 Y	0.050	-0.059	-0.032	-0.018	-0.035
④ 真直度	0.010	0.038	-	-	-
平行度	0.010	0.040	-	-	-

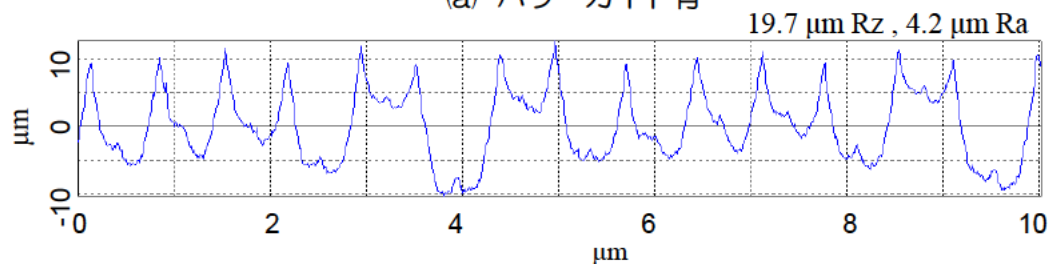
誤差:

2 倍以上

公差外



(a) パワーガイド有



(b) パワーガイド無

図 23 パワーガイドの有無による表面粗さ曲線の比較

さらに、ロングノーズコラムトラバース機（Triple H40）を用いて CFRP ワークを加工した。工具として、 $\phi 20$ のエンドミル（タンガロイ製 EPH 型 TAC）を用いた。工具の形状は 3 枚刃で、回転数は 2300rpm であった。切削条件は外周部の加工時は切込み 2mm、円周部の加工では 0.5mm $\times$ 4 回とし、送り速度を 280, 700, 1400mm/min と変化させた。図 24 にテスト基板の形状を、図 25 に工具の外観写真を示す。また、外周を切削している様子を図 26 に、内周を切削している様子を図 27 に示す。

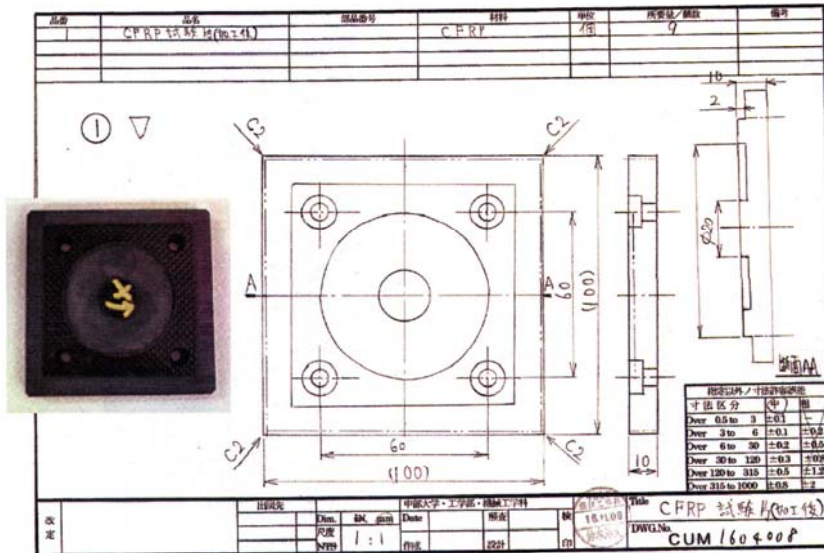


図 24 テスト基板（CFRP）の形状



図 25 CFRP テスト用工具



図 26 CFRP 切削（外周）の様子

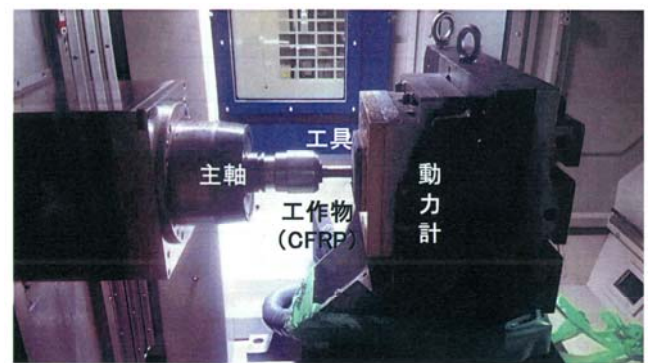


図 27 CFRP 切削（内周）の様子



図 28 CFRP の切りくずの排出状態



図 29 加工後の CFRP 工作物



図 30 平面度および表面粗さ測定の様子

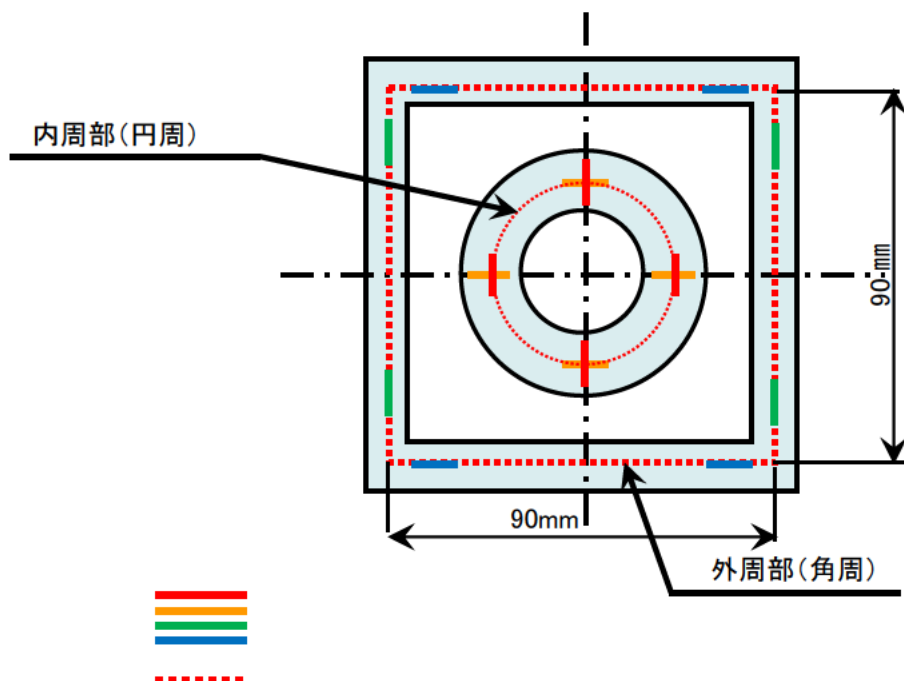
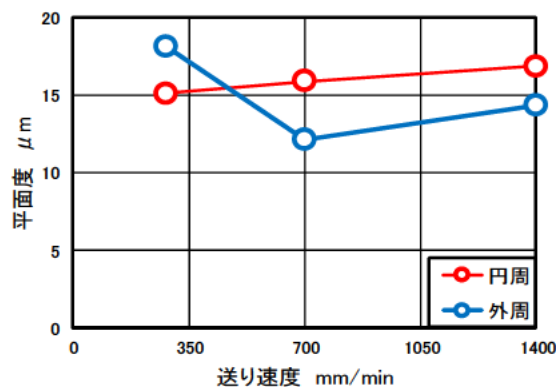


図 31 加工精度評価用 CFRP 切削サンプルの測定箇所

CFRP の切りくずの排出状態を図 28 に示す。加工されたワークを図 29 に、測定の様子を図 30 に示す。測定はレーザプローブ式非接触測定器により行った。図 31 に測定箇所を、図 32 に平面度の測定結果を示す。図 33 および図 34 に表面粗さの測定結果を示す。

いずれの加工条件においても表面粗さは $15\mu\text{mRz}$ ($2\mu\text{mRa}$) 程度となっており、通常のマシンによる切削レベルであり、パワーガイドの有無により特段の変化はない。CFRP 切削においては、CFRP 繊維により表面に凹凸が生じるため、この程度の表面粗さが生じるのは材料特性上やむを得ないものである。悪い場合の毛羽立ちも見られず、工具も適切で切削状態は良好であるといえる。



平面度の数値データ

送り速度 mm/min	平面度 μm	
	円周	外周
280	15.08	18.09
700	15.89	12.08
1400	16.84	14.35

図 32 CFRP 切削サンプルの平面度の測定結果 (CFRP)

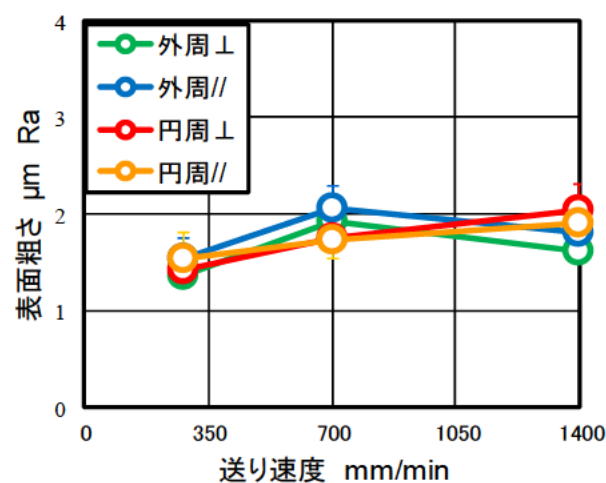
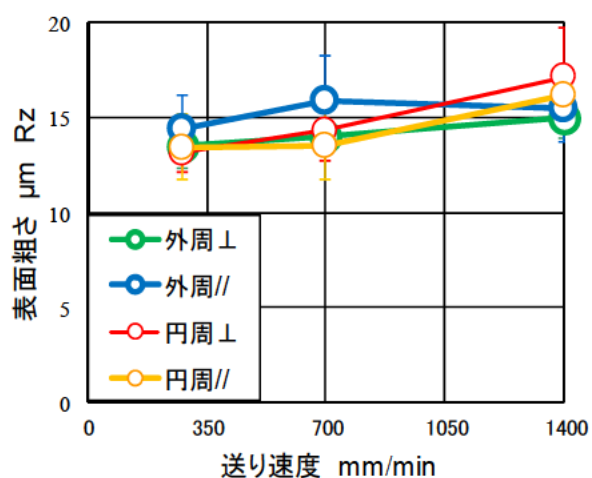


図 33 CFRP 切削サンプルの表面粗さの測定結果

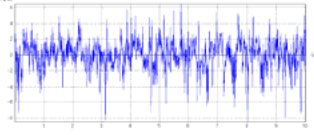
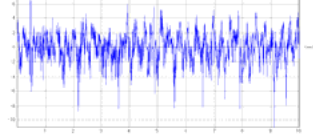
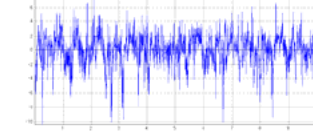
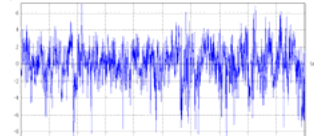
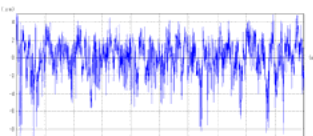
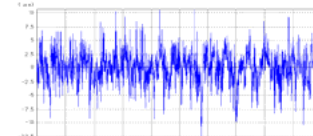
送り速度 mm/min	280	700	1400
外周	13.35 μm Rz 1.38 μm Ra 	14.87 μm Rz 1.61 μm Ra 	16.38 μm Rz 1.70 μm Ra 
円周	14.38 μm Rz 1.69 μm Ra 	12.40 μm Rz 1.58 μm Ra 	20.33 μm Rz 2.23 μm Ra 

図 34 CFRP 切削サンプルの表面粗さ曲線の一例

2-3-2 熱変位補正機能の開発

本研究開発機の機体温度に対する変位量との関係を研究し、機体に取り付けた温度センサでモニターした温度から変位量を補正する熱変位補正機能を完成した。

これらの効果を確認するためコールドスタートと暖気運転後の加工テストを実施し加工精度を比較した。

- 研究は、以下の表 17 に示すプロセスで進められ、導入した熱変位補正装置を本研究開発機に取り付け補正制御の条件を決定し熱変位補正プログラムを完成した。

表 17 熱変位補正機能開発のプロセス

1. 熱変位の基礎データの採取

【基礎データの採取試験条件】

【諸条件】

主軸最高回転：6000 回転

変位量測定位置：

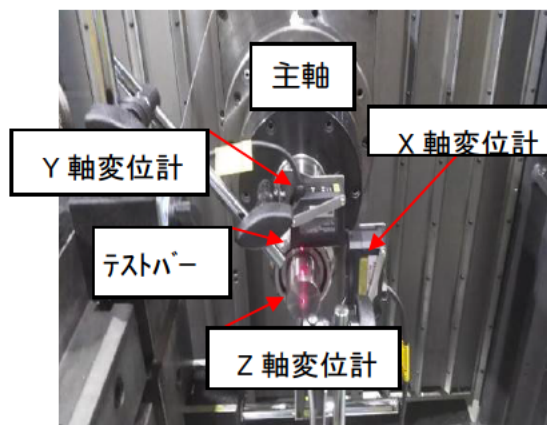
ゲージラインより 100 mm

温度測定位置：10 点

主軸 F/R

コラム U/B

ベッド F/B



2. 諸条件を重ねたデータを採取し、温度と変位の関係を統計的に分析

重回帰分析の技術導入

3. 温度センサの適正取り付け位置を決定

4. 2 の分析データを基に作成された仮の熱変位補正プログラムでクーラント及び冷却装置の稼働条件で熱変位量測定を繰り返し補正精度を高めた。

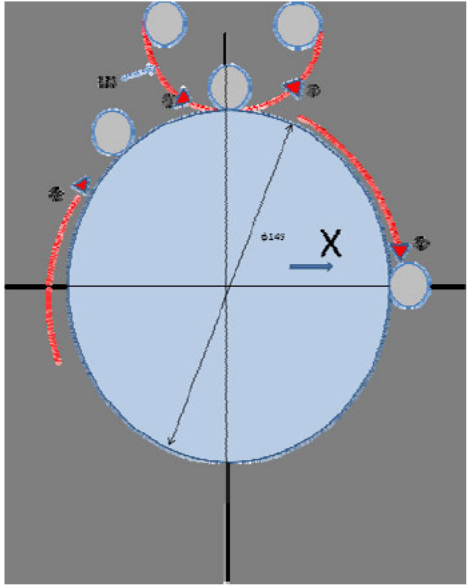
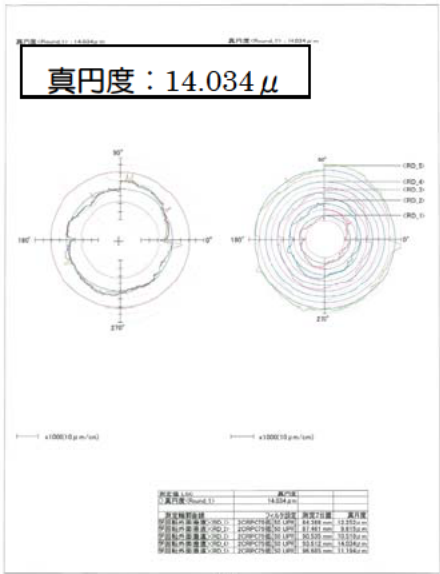
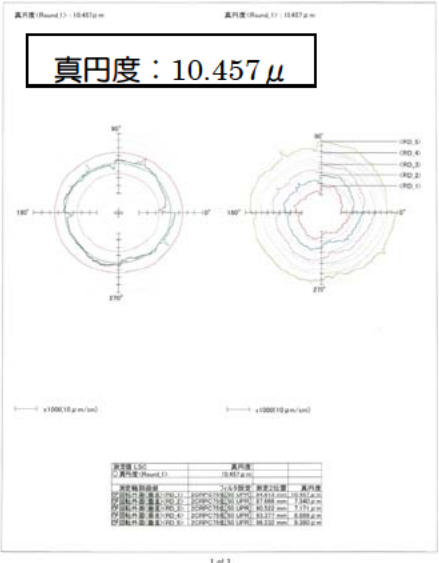
5. 熱変位補正プログラムの作成

6. 熱変位補正プログラムの完成

・ 完成した熱変位補正機能の効果を確認するため、コールドスタート時で円切削を行い、次に暖機運転後(熱変位が飽和した後)に同じ条件で円切削を実施し、導入した真円度測定器を使用し測定し比較を行った。

その結果を表 18 に示す。

表 18 コールドスタートと暖気後の加工精度比較

【加工条件】 材質：アルミ 刃物：φ20 超硬I.D. ミル 切り込み量：0.2mm 加工円直径：φ149 周速：120m(S1910) 送り：fz0.05 0.2/rev(F382) クーラント：ウェット その他条件：ダウンカット 真円度測定器：RA-2200AH 【ミットヨ製】 	【加工プログラムの切削軌道】 
【コールドスタート】  真円度：14.034 μ	【暖気後の加工】  真円度：10.457 μ

【考察】

- ・ 技術目標の 5 μ m 以下の精度安定に対してコールドスタートと暖気後の真円度精度においておおよそ 3.5 μ m の差であり熱変位補正機能の効果があつたと判断できる。

第3章 全体総括

初年度（平成27年度）の研究開発においては、本研究開発機の組立を完成し、各研究テーマのデータ採取も進められ各テーマの技術目標についても達成できた。

本年度（平成28年度）の研究開発事業においては、IMTS2016（シガゴ国際工作機械見本市）への視察や本研究開発機を完成させ JIMTOF（日本国際工作機械見本市）に出展し、ユーザーからのアプリケーションへの対応など事業化への準備を進める一方、パワーガイドの加工評価において技術目標は達成できたが、開発機でのパワーガイド使用有無による差を明確に示す事が出来なかった。この原因として以下のように判断している。

試作機の製作後、機械変位を測定しながら剛性アップのための構造解析を種々検討した。そして開発機の設計・製作を行った。この結果、開発機本体の剛性は非常に向上した。

このためパワーガイド使用時の効果が発揮できない状況になったと理解している。また熱変位補正機能の研究開発は完成した。

以上から各研究テーマ目標はほぼ達成する事ができた。

最後に本開発機械の販売判断を記述する。既に述べているように機械の基本設計は多くのアプリケーションに対応できるようになっているため、川下から色々なアイデアを持ち込んでもらえるようになってきた。その理由は機械加工のコストダウン要求がますます強くなり、ユーザーは標準機を使用していれば価格競争に勝てないと思うようになってきているためである。この状況は当社にとってはビジネスチャンスである。

- ・大手競合メーカーは常に量産を目指しているので、仕様変更対応は基本行なわない。一方、本機械ではユーザーの要望に応じて仕様変更を行う事になるので、大手競合メーカーとの差別化が行なえることから商品販売力が強くなってくる。
- ・営業はこのような対応力をベースにした営業活動が可能になり、より幅広い販路開拓できる。
- ・さらに海外マーケットの販売においても日本国内の経験を生かした売込が出来るようになる。

このようなマーケット状況を生かしながら本機械の特色をレベルアップすべく努力し、販売結果を出すようにしていく所存である。

以上