

平成 29 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

「走行機能付次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 3 月

担当局 中部経済産業局

補助事業者 公益財団法人 石川県産業創出支援機構

---

## 目 次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 研究開発の概要                  | 3  |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標         | 3  |
| 1-1-1 研究開発の背景                | 3  |
| 1-1-2 研究概要と目標                | 4  |
| ① 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発       | 4  |
| ② 走行ユニットの開発                  | 4  |
| ③ 非接触無線式ワーク測定装置の開発           | 5  |
| 1-2 研究体制                     | 6  |
| 1-2-1 実施体制                   | 6  |
| 1-2-2 研究者等氏名                 | 6  |
| 1-3 成果概要                     | 7  |
| 1-3-1 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発   | 7  |
| 1-3-2 走行ユニットの開発              | 7  |
| 1-3-3 非接触無線式ワーク測定装置の開発       | 8  |
| 1-3-4 総合評価                   | 8  |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口              | 9  |
| 第2章 本論                       | 10 |
| 2-1 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発     | 10 |
| 2-1-1 高剛性化                   | 10 |
| 2-1-2 位置決め精度の向上              | 11 |
| 2-1-3 位置決め時及び加工時の振動抑制        | 16 |
| 2-2 走行ユニットの開発                | 18 |
| 2-2-1 走行ユニットのモジュール化設計        | 18 |
| 2-2-2 位置決め精度の検証              | 19 |
| 2-3 非接触無線式ワーク測定装置の開発         | 22 |
| 2-3-1 測定ソフトの開発               | 23 |
| 2-3-2 無線転送システムの開発            | 23 |
| 2-3-3 バッテリーパック充電方式と充電サイクルの開発 | 24 |
| 2-3-4 測定精度の検証                | 25 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 2-4 総合評価        | 26 |
| 2-4-1 静的精度の検証   | 26 |
| 2-4-2 動的精度の検証   | 30 |
| 2-4-3 最適加工条件の抽出 | 42 |
| 最終章 全体総括        | 47 |

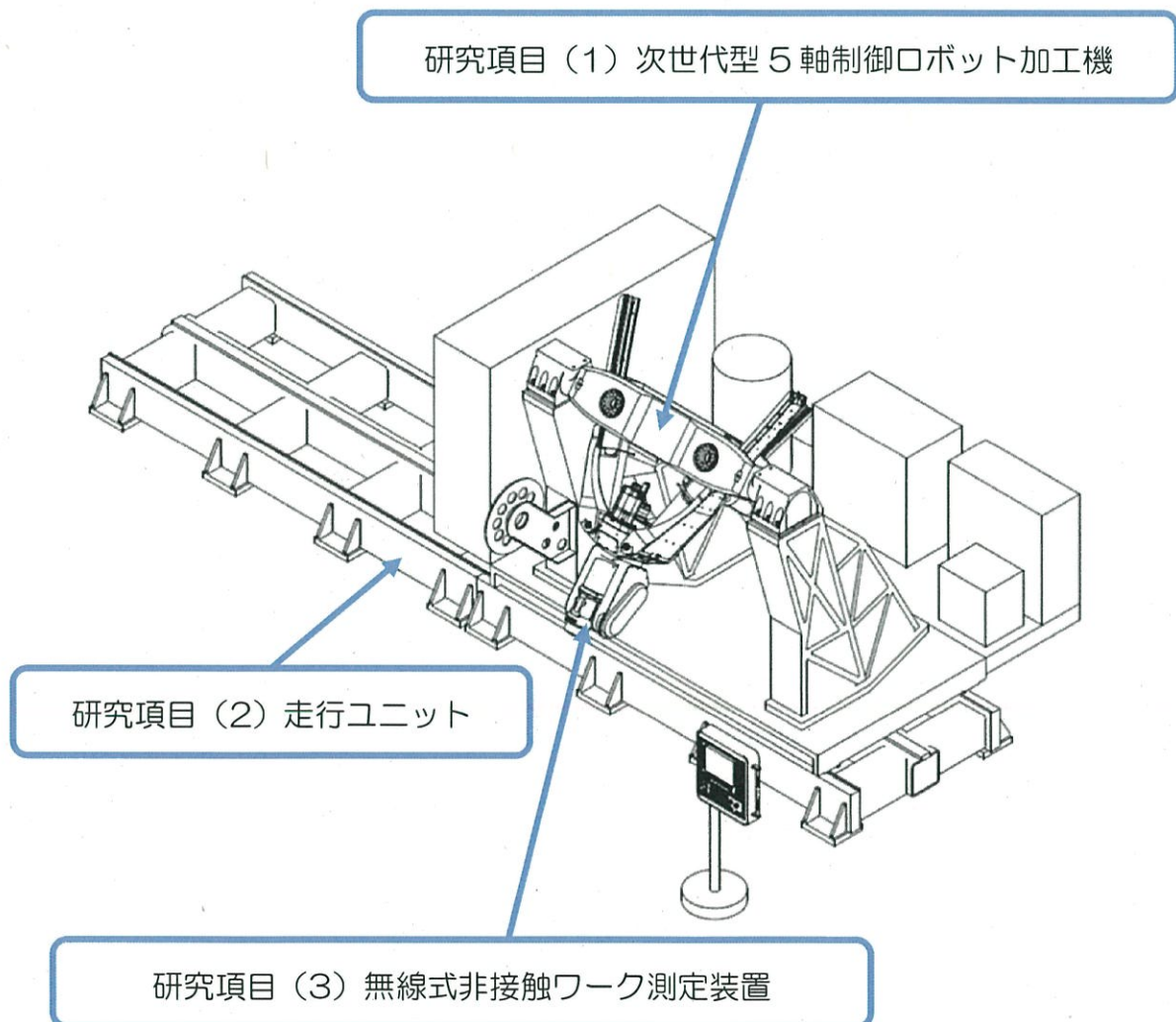
## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 研究開発の背景

航空機業界では、機体の翼や内部のリブ部品／胴体部品のリベット穴／皿ビス穴／位置決め穴加工を多関節ロボットや手作業にて加工を行っているため、加工時の精度不良や加工時間が長く生産性が問題となっている。

川下企業からは、フレキシブルで高速／高精度な5軸制御ロボット加工機が必要とされている。そこで上記問題を解決し、さらに前述部品をワンチャック加工出来る「走行機能付次世代型5軸制御ロボット加工機」の開発を行う。



## 1-1-2 研究概要と目標

### (1) 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発

航空機業界では、大型部品や複雑形状の部品加工を多関節ロボットや手作業にて行っており、精度や生産効率の面で不向きである。このため、航空機メーカーはフレキシブルで且つ高精度な加工機を必要としており、これを実現するために次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発を行う。

#### (1-1) 高剛性化

主軸先端での外力に対する剛性値 目標値： $30\text{N}/\mu\text{m}$

#### (1-2) 位置決め精度の向上

繰り返し位置決め精度 目標値： $10\mu\text{m}$

真円度精度 目標値： $40\mu\text{m}$

真直度精度 目標値： $20\mu\text{m}/200\text{mm}$

#### (1-3) 位置決め時及び加工時の振動抑制

構造設計段階で振動解析と構造解析を十分に行い、事前に動的・静的剛性について検討を重ね、最適な形状を決定する。

### (2) 走行ユニットの開発

航空機業界では、大型部品を加工する際に部品の段取り替えなどに多くの時間を費やしており、生産性向上のネックとなっている。そこで、この問題を解決し、生産性の向上を図るために、次世代型 5 軸制御ロボット加工機を搭載し走行させる高精度走行ユニットの開発を行う。また、この走行ユニットは工作物に合わせた構成が可能となるようモジュール化した部品構成になるように設計を行う。

#### (2-1) 走行ユニット架台のモジュール化設計

最長 40m の大型部品加工を想定し、最適な長さのモジュール化設計を行う

#### (2-2) 位置決め精度の検証

繰り返し位置決め精度 目標値： $15\mu\text{m}$

ピッチ送り精度 目標値： $\pm 15\mu\text{m}$

真直度精度 目標値： $\pm 30\mu\text{m}/1\text{m}$

### (3) 非接触無線式ワーク測定装置の開発

従来のマシニングセンタなど航空機部品加工機では接触式プローブにて部品基準位置の基準点位置決めを行うのが一般的となっている。接触式プローブでは製品に傷を付けたり、測定に時間がかかることが問題となっており、これを解決するために主軸チャック部に把持可能な工具同様のインターフェースを有したレーザセンサを用いた非接触無線式ワーク測定装置の開発を行う。

#### (3-1) 測定ソフトの開発

高さ、段差、穴径、穴位置、エッジ部角度と位置の測定が可能なソフトウェアの開発を行う。

#### (3-2) 無線転送システムの開発

測定データを NC コントローラーに無線転送させるシステムの開発を行う。

#### (3-3) バッテリーパック充電方式と充電サイクルの開発

バッテリー容量と使用量のバランスを考慮した効率の良い充電システムを開発する。

#### (3-4) 測定精度の検証

測定項目内全てで $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下とする。

### (4) 総合評価

次世代型 5 軸制御ロボット加工機及び走行ユニット主要部品の加工精度の測定を行う。また、開発機の加工性能評価として、動的精度の検証と最適加工条件の抽出を行う。

#### (4-1) 静的精度の検証

三次元測定器にて主要部品の加工精度を管理、また、組み上がり後の位置決め精度、真直度、真円度測定を行い検証する。

#### (4-2) 動的精度の検証

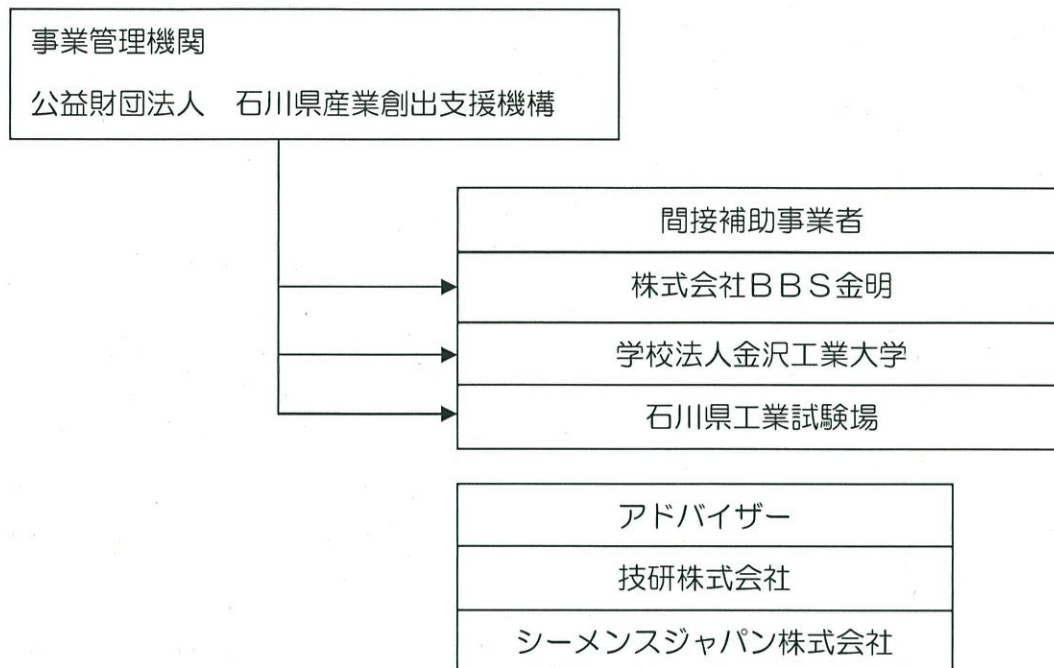
位置決め停止時及び加工時の振動測定を行い検証する。

#### (4-3) 最適加工条件の抽出

航空機に使用される難削材料であるチタン合金およびインコネル材料に適切な切削工具の選定と加工条件の抽出を行う。

## 1-2 研究体制

### 1-2-1 実施体制



### 1-2-2 研究者等氏名

#### 1) 委員

| 所属・役職                 | 氏名        |
|-----------------------|-----------|
| 株式会社BBS金明 専務取締役       | 前江田 秀康    |
| 株式会社BBS金明 品質サービス管理部部長 | 南 茂樹      |
| 株式会社BBS金明 技術部開発部長     | 伊藤 洋之（PL） |
| 学校法人金沢工業大学 機械工学科 教授   | 森本 喜隆（SL） |
| 学校法人金沢工業大学 機械工学科 准教授  | 山岡 英孝     |
| 石川県工業試験場 機械金属部 部長     | 舟木 克之     |
| 石川県工業試験場 機械金属部 主任研究員  | 廣崎 憲一     |
| 石川県工業試験場 機械金属部 研究員    | 山下 順広     |

#### 2) アドバイザー

| 所属・役職                | 氏名    |
|----------------------|-------|
| 技研株式会社 常務取締役         | 前波 将  |
| シーメンスジャパン株式会社 工作機械部長 | 角田 裕也 |

## 1-3 成果概要

### 1-3-1 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発

高剛性、高精度な 5 軸制御ロボット加工機の設計を行う上で、金沢工業大学及び石川県工業試験場と共同で主要部品の形状について解析評価を行い、最適な設計検証を行えた。又、三次元測定機を導入設置し、これまで行えなかった大型の 5 軸制御ロボット加工機部品の精度測定と品質管理を行い、組立を実施、剛性面と精度面で目標値を達成した。

#### 1) 高剛性化

主軸先端での外力に対する剛性値 目標値： $30\text{N}/\mu\text{m}$  実績値： $33\sim 50\text{N}/\mu\text{m}$

#### 2) 位置決め精度の向上

繰り返し位置決め精度 目標値： $10\mu\text{m}$  実績値： $0\sim 4\mu\text{m}$

真円度精度 目標値： $40\mu\text{m}$  実績値： $15.1\sim 23.3\mu\text{m}$

真直度精度 目標値： $20\mu\text{m}/200\text{mm}$  実績値： $2.5\sim 18.5\mu\text{m}/200\text{mm}$

#### 3) 位置決め時及び加工時の振動抑制

金沢工業大学、石川県工業試験場と共同で設計段階からの解析評価及び、位置決め動作時の振動測定を実施し、十分な検討を行った。

### 1-3-2 走行ユニットの開発

最長 40m までの大型部品加工への対応を考慮し、1 モジュール 4m ごとに延長可能な走行軸のモジュール化設計を行い、製作を完了した。最終調整段階では、石川県工業試験場と共同で位置決め精度を向上させるため、NC 補正データに用いる位置決め誤差量を測定し補正量を決定し、次いで NC 補正後の位置決め精度の測定を実施した。これにより、最適な調整法と補正量が割り出すことができ、走行ユニットの真直度及び、繰り返し位置決め精度、ピッチ送り精度に対し目標値を達成した。

#### 1) モジュール化設計

最長 40m の大型部品加工を想定し、最適な長さのモジュール化設計を行った。

#### 2) 位置決め精度の検証

繰り返し位置決め精度 目標値： $15\mu\text{m}$  実績値： $7\mu\text{m}$

ピッチ送り精度 目標値： $\pm 15\mu\text{m}$  実績値： $-10.6\sim +11.0\mu\text{m}$

真直度精度 目標値： $\pm 30\mu\text{m}/1\text{m}$  実績値： $22.3\mu\text{m}/1\text{m}$

### 1-3-3 非接触無線式ワーク測定装置の開発

#### 1) 測定ソフトの開発

特有の座標軸を持つ5軸制御ロボット加工機と測定データを連携させるソフトウェアの開発については、協力機関である EXECHON 社の都合により期間内に完了させることが出来なかった。

#### 2) 無線転送システムの開発

測定データを無線方式でNCコントローラーへ転送させるシステムの開発を行った。

#### 3) バッテリーパック充電方式と充電サイクルの開発

バッテリーパックの開発とバッテリーパックへの無線給電システムの開発を行った。

#### 4) 測定精度の検証

構築したシステム構想を基に、測定装置の筐体を設計製作し、測定装置単体での精度調整と、測定精度の検証を行った。

### 1-3-4 総合評価

#### 1) 静的精度の検証

導入した三次元測定器を使用し、次世代型5軸制御ロボット加工機及び、走行ユニットの主要部品の加工精度測定を実施した。また、各軸方向の位置決め精度、真直度、真円度の測定を行った。

#### 2) 動的精度の検証

次世代型5軸制御ロボット加工機の剛性値測定を行った。また、金沢工業大学、石川県工業試験場と共同で、位置決め停止時及び、加工時の振動測定を実施、分析評価を行った。

#### 3) 最適加工条件の抽出

航空機に使用される難削材料としてチタン合金およびインコネル材料を対象にフライス加工またはドリル加工を実施し、その材料に適切な切削工具の選定と加工条件の抽出を行った。また、アルミ材料を加工ワークとして、5軸制御ロボット加工機の加工ピッチ精度について評価を行った。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社BBS金明

技術部 開発部長 伊藤 洋之

itou@bbskinmei.co.jp

## 第2章 本論

### 2-1 次世代型 5 軸制御ロボット加工機の開発

高剛性化、位置決め精度の向上、位置決め時及び、加工時の振動抑制の目標を定め、設計開発を実施した。

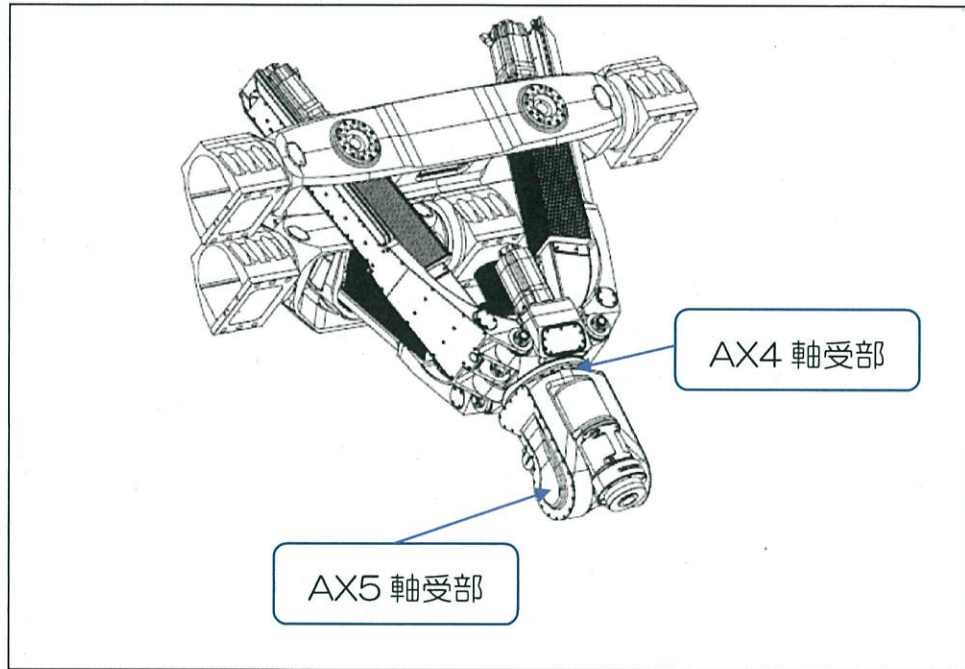


図 1. 次世代型 5 軸制御ロボット加工機

#### 2-1-1 高剛性化

##### ① AX4 軸受部（図 1）の高剛性化設計

AX4 軸受部のメイン軸受（図 2）に複列式クロスローラーリングを採用することで従来比 1.4 倍の剛性値を達成した。（図 3）

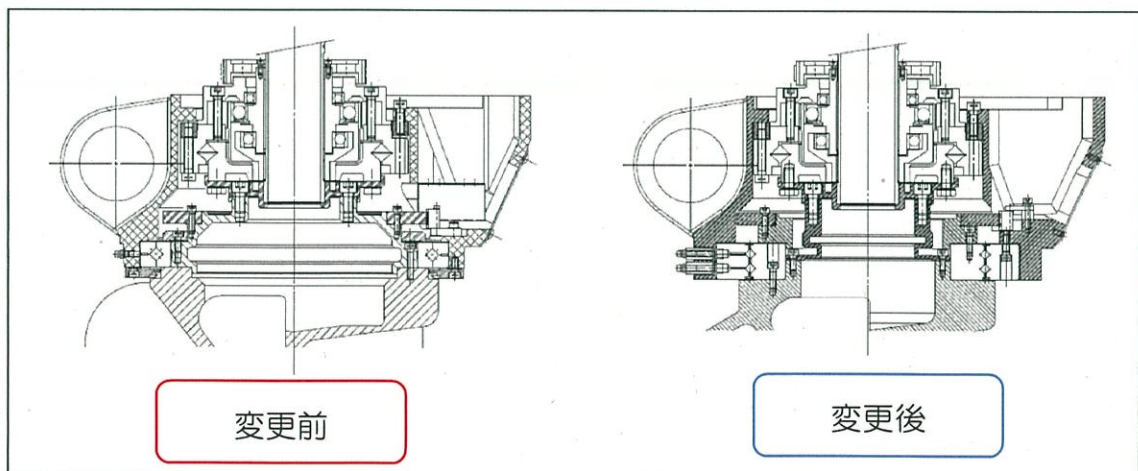


図 2. AX4 メイン軸受比較

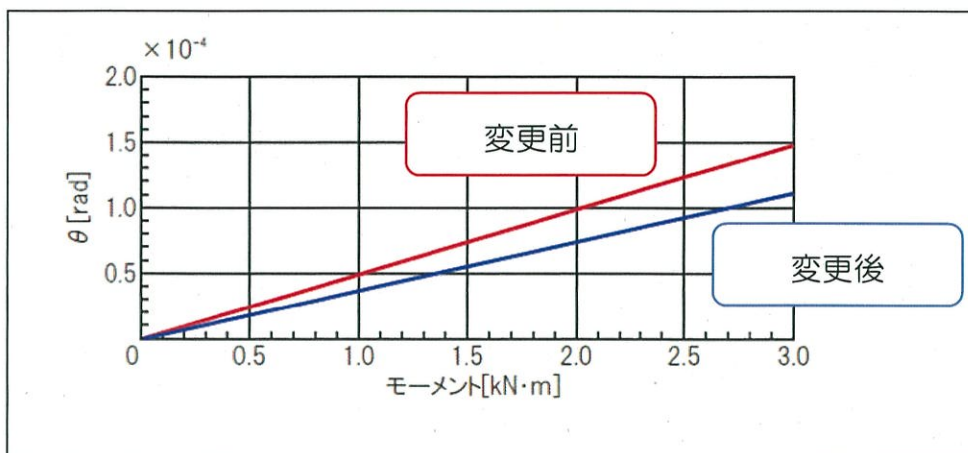


図3. 軸受剛性値

## 2-1-2 位置決め精度の向上

### ① AX4 軸受部の高精度化設計

複雑な形状の部品に取り付けられていたエンコーダーリングの回転精度不良により読み取り値が不安定だった従来設計を見直し、剛性がありシンプルな部品形状にすることで位置決め精度の向上を図った。また、減速機とメインベアリングの回転振れの相違がAX4 出力軸へ影響しており、ドライブシャフトをスラスト方向へ柔軟にすることで面振れを吸収し、回転精度の向上を図った。(図 4)

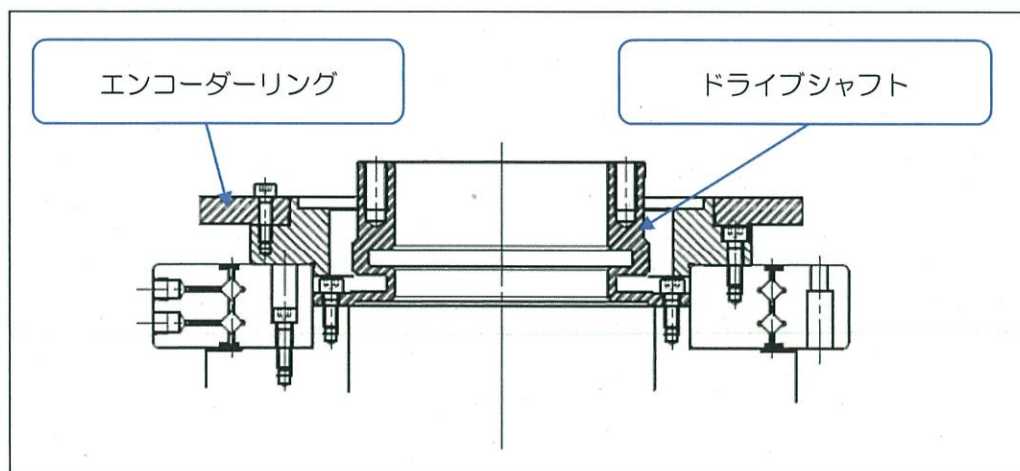


図 4. AX4 軸受部詳細

## ② A X 5 軸受部の高精度化設計

減速機内蔵の軸受をメインベアリングとして使用していたが、より高精度な市販品に置き換えることで回転精度の向上を図り（図 5）、外力や熱変位による偏った変形を抑えることを目的とし、ハウジング形状を左右対称形に変更した。（図 6）

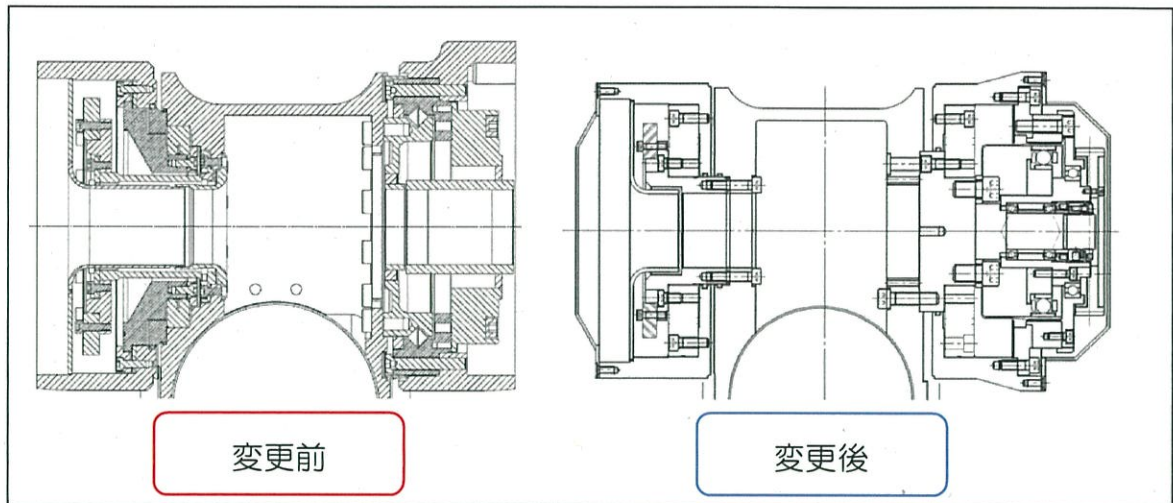


図 5. A X 5 軸受部比較

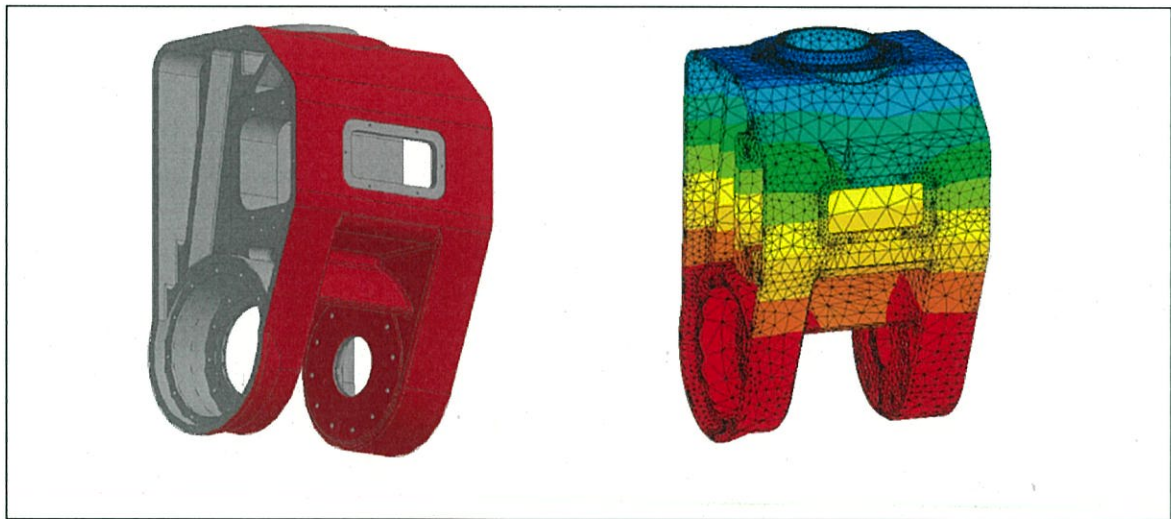


図 6. リストハウジングの熱伝導解析

### 2-1-3 位置決め精度の向上

#### ① リンケージベアリング部の締結方式の検討

高い部品精度と複雑な組立作業が必要だった従来のシュパンリング方式を、単純且つ、組立作業が容易な割クランプ方式へ変更した（図 7）。また、締結部の強度、剛性に影響を与える締結部品の公差域を決定するため、石川県工業試験場及び、金沢工業大学と共同で測定試験、解析評価（図 8）（図 9）を行った。

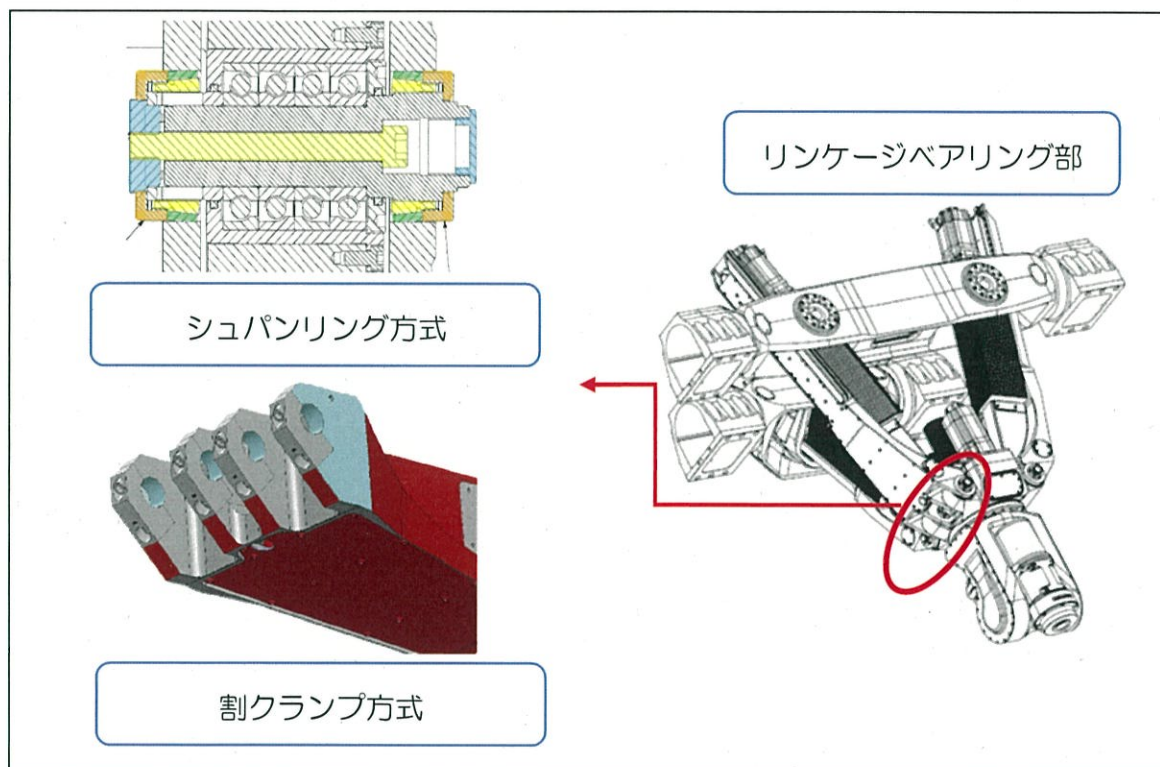


図 7. リンケージベアリング部クランプ方式

## 1) 部品変形状態の検証

締結部剛性を確保するため、シャフト径に対しクランプ部品をタイトな公差で締結させた時に発生する部品の変形状態を検証し、最適な公差域を決定した。

応力解析：応力分布の検証

ひずみ測定：応力が集中している箇所を実際に測定

テストピース材質：FC250（引張強さ 216MPa）

テストピース穴径： $\phi 33.00\text{mm}$

テストピース軸径： $\phi 33.02\text{mm}$ ,  $\phi 33.04\text{mm}$ ,  $\phi 33.06\text{mm}$ ,  $\phi 33.08$

締付トルク：170N・m

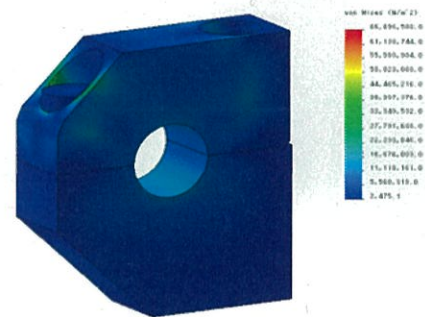


図 8. 応力解析

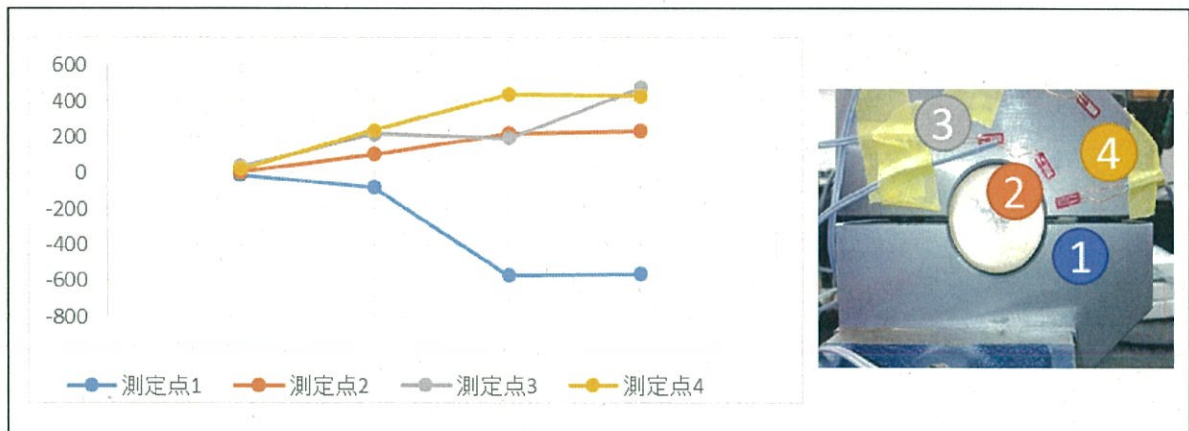


図 9. ひずみ測定

最大応力 75MPa (FC250 耐力 151Mpa:引張強さ 216MPa の 70%設定)

4 種類の軸径全てにおいて安全率 2 倍が確保されている

## 2) 合せ面スキマ量の検証

部品公差ごとの締結部合せ面のスキマ量を測定し、最適な公差域を決定した。

測定方法①：非接触三次元測定器による画像測定

使用機器：測定機 NEXIV VMH-300N 解析装置 UPMC550

測定方法②：浸透試験

使用薬液：染色探傷剤 DYE MARK C-7

テストピース条件：穴径  $\phi 33.00\text{mm}$

軸径  $\phi 33.02\text{mm}$ ,  $\phi 33.04\text{mm}$ ,  $\phi 33.06\text{mm}$ ,  $\phi 33.08\text{mm}$

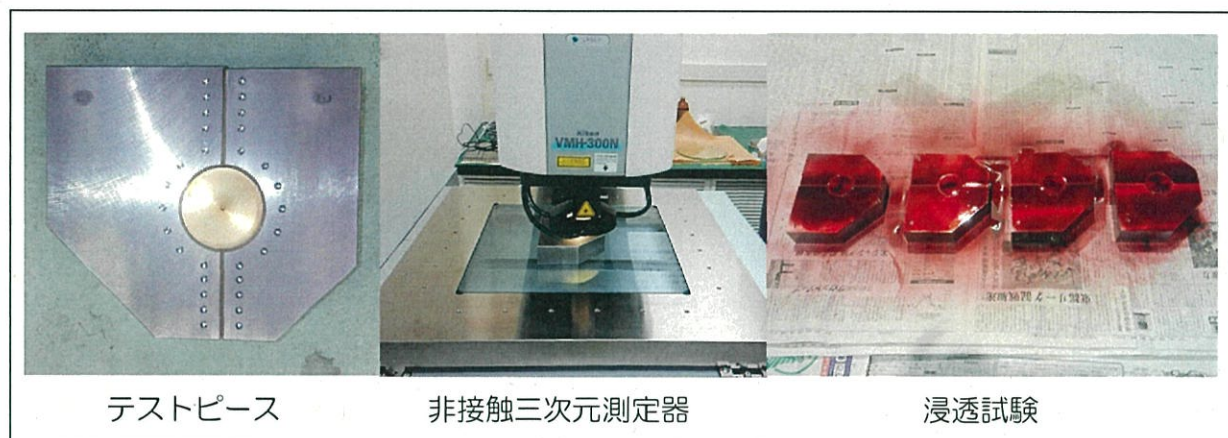


図 10. 合せ面スキマ量の検証

表 1. 軸径とスキマ量

| 軸径   | $\Phi 33.02\text{mm}$  | $\phi 33.04\text{mm}$  | $\phi 33.06\text{mm}$   | $\phi 33.08\text{mm}$   |
|------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| スキマ量 | 0                      | $17\ \mu\text{m}$      | $32\ \mu\text{m}$       | $52\ \mu\text{m}$       |
| 観察結果 | 平面:ほぼ全面密着<br>R面:ほぼ全面密着 | 平面:中央部は密着<br>R面:ほぼ全面密着 | 平面:穴付近のみ密着<br>R面:ほぼ全面密着 | 平面:ほぼ全面で隙間<br>R面:ほぼ全面密着 |

画像測定によるスキマ量測定と浸透試験による検証（図 10）（表 1）の結果及び、軸と穴の部品公差域から次のシャフト径が最適であると判断した。

シャフト径  $\phi 33.04\text{mm}$

軸径公差：0～-0.016 穴径公差：+0.025～0

## 2-1-4 位置決め時及び加工時の振動抑制

- ① 金沢工業大学と共同で、モーションセンサによる挙動を測定し、上下方向振動の評価を行った。

測定装置：XT500

使用機器

- ・東京航空計器株式会社:CSM-MG100
- ・HEIDENHAIN:LC483

測定条件

- ・サンプリング周波数：100Hz，500Hz

X方向移動（上下振動に着目）

- ・送り速度：20000mm/min，40000mm/min

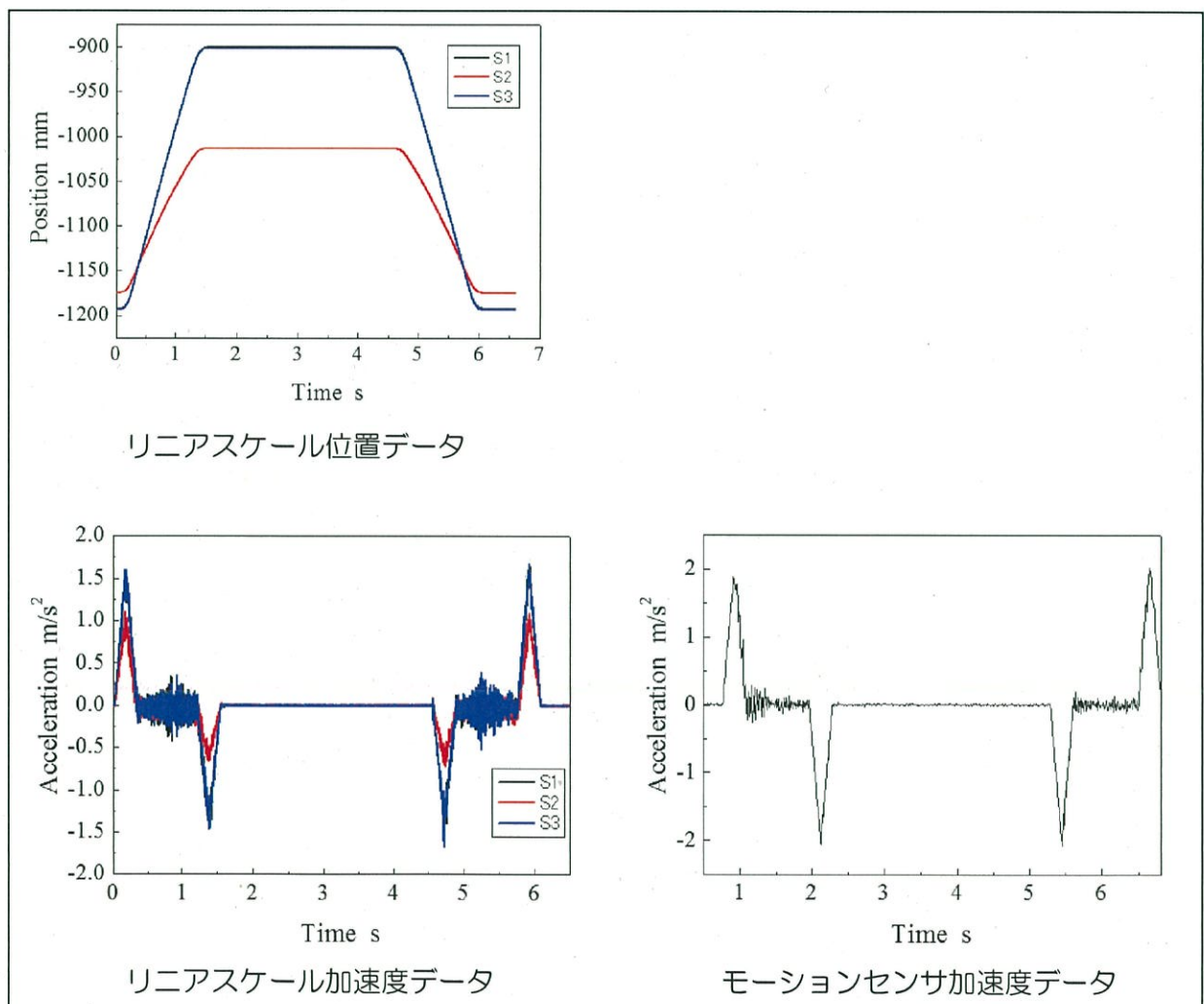


図 11. リニアスケール加速度とモーションセンサ加速度比較

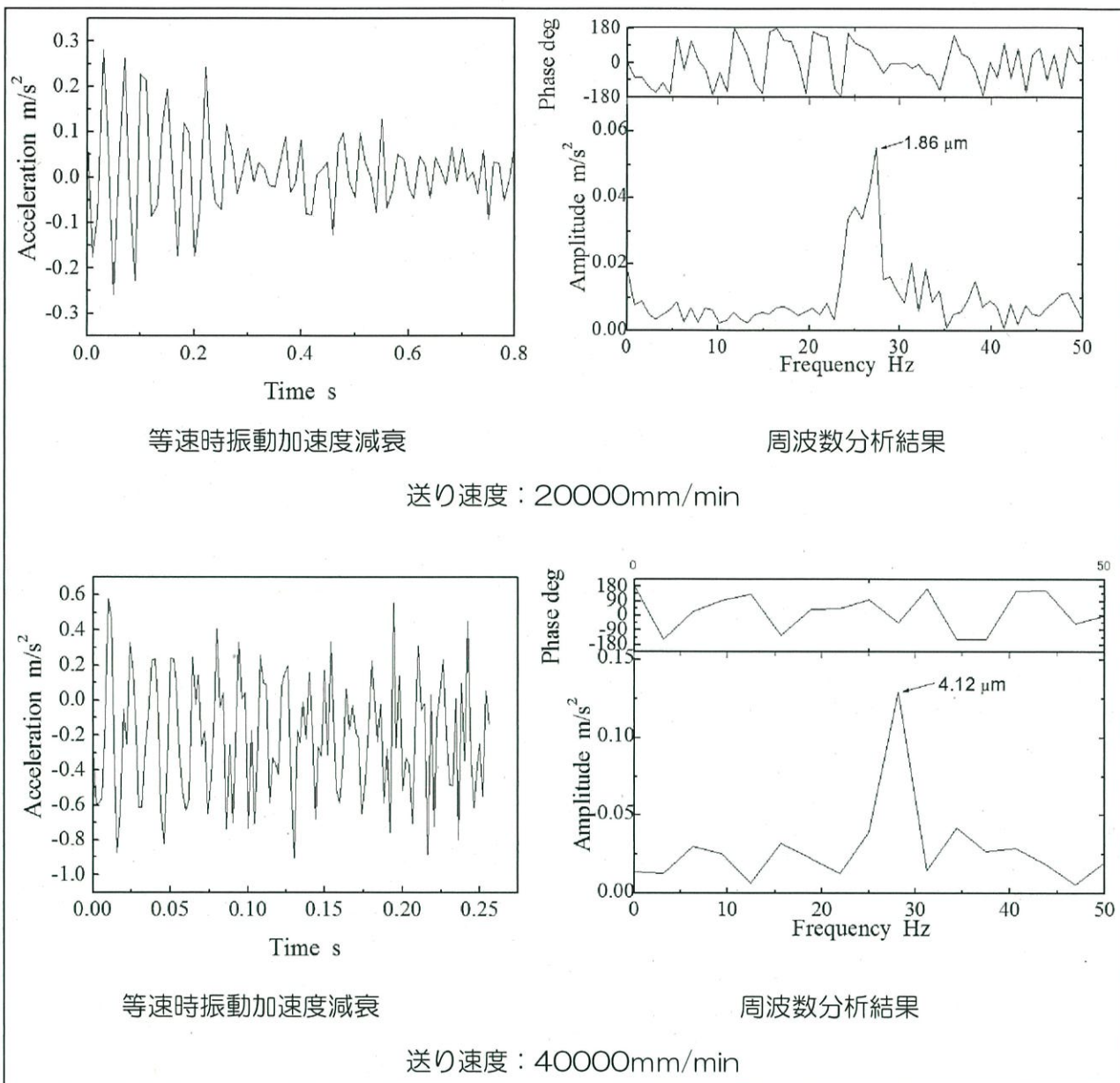


図 12.上下動振動分析

## 2-2 走行ユニットの開発

### 2-2-1 モジュール化設計

フレームを1モジュール4mと設定し、客先ニーズに合わせ最長40m程度まで、自在に延長可能なものにするというコンセプトに沿って走行ユニットのモジュール化設計を完了した。(図13)

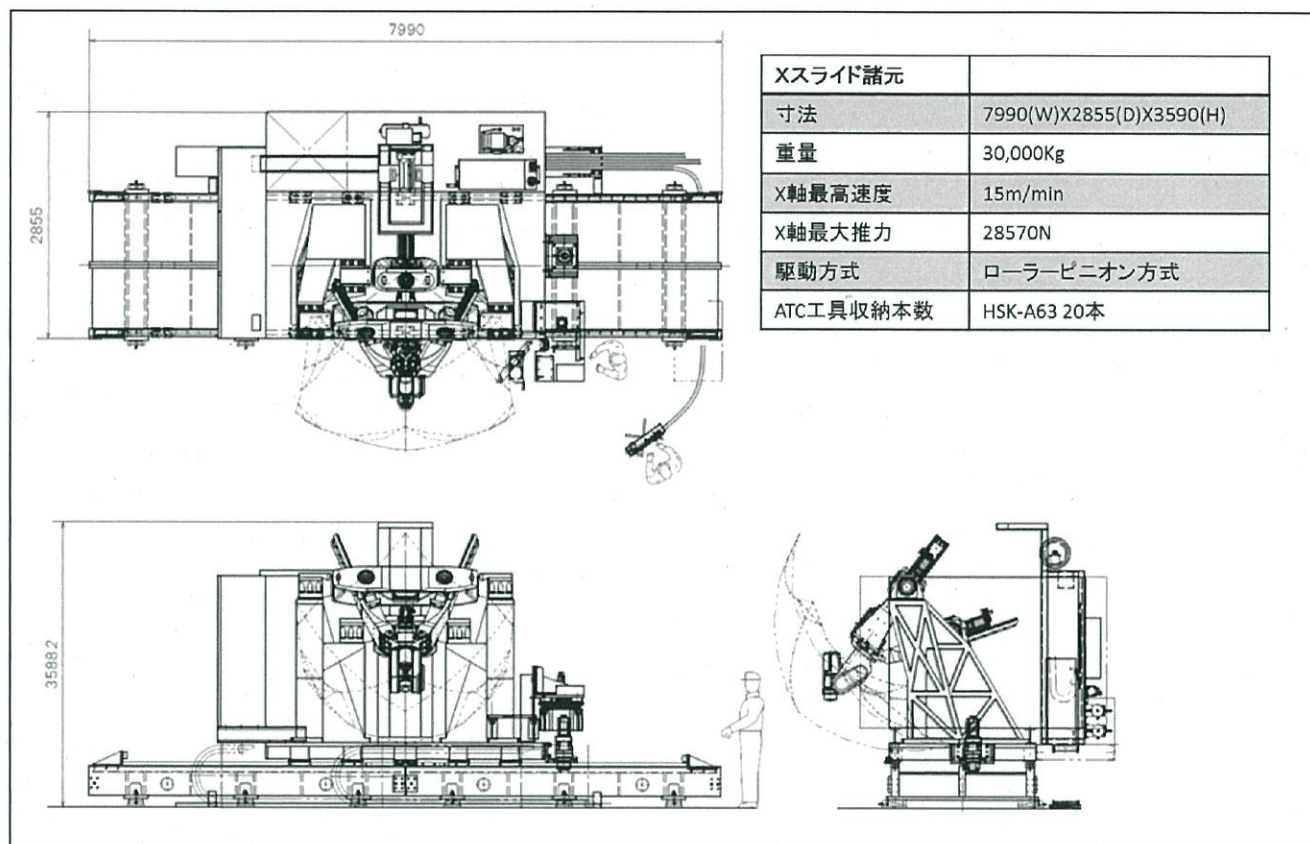


図 13. 走行スライドの全体図と諸元

## 2-2-2 位置決め精度の検証

石川県工業試験場と共同で走行軸の繰返し位置決め精度、ピッチ送り精度、真直度の測定を行い、最適な調整法を検証・実施し目標値を達成した。

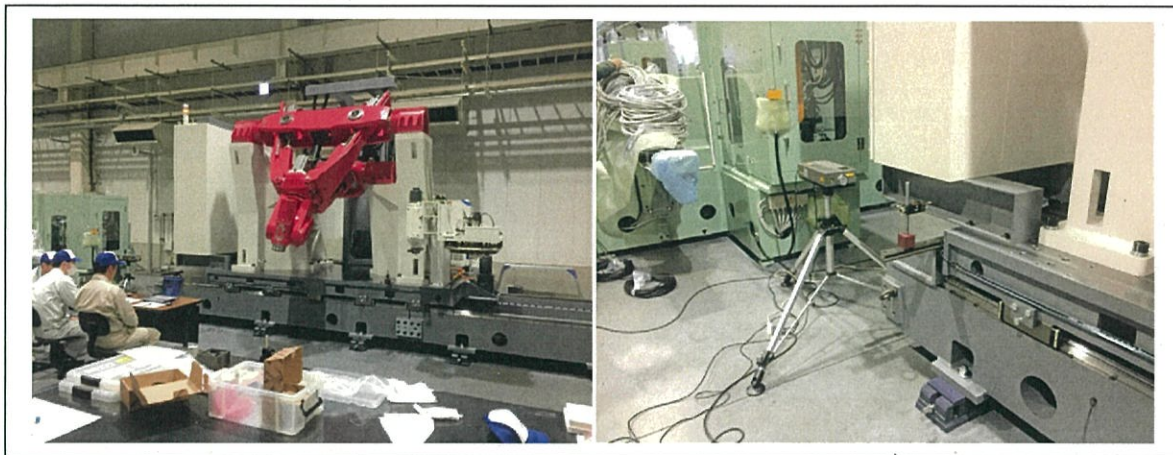


図 14. 位置決め精度測定

### ① 繰返し位置決め精度の検証：目標値 15 $\mu\text{m}$ 以下

実施機関：石川県工業試験場、(株)BBS金明

実施場所：(株)BBS金明本社工場

測定機器：レニショー製精密レーザ測長システム ML10

表 2. 繰返し位置決め精度

|      | 0  | 500   | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 |
|------|----|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1 回目 | 0  | -6.8  | 0.9  | 0.2  | -0.3 | 3.0  | -1.2 | 11.0 |
| 2 回目 | 0  | -10.6 | -4.8 | -4.2 | -4.7 | -4.2 | -4.2 | 4.8  |
| 3 回目 | 0  | -6.8  | -2.6 | -2.4 | -1.0 | -3.7 | -2.6 | 7.6  |
| 誤差   | 0  | 3.8   | 5.7  | 4.4  | 4.4  | 7.2  | 3.0  | 6.2  |
| 判定   | 達成 |       |      |      |      |      |      |      |

表 2 に示す通り、目標値 15  $\mu\text{m}$  以下を達成した。

② ピッチ送り精度の検証：目標値±15μm 以下

実施機関：石川県工業試験場、(株)BBS金明

実施場所：(株)BBS金明本社工場

測定機器：レニショー製精密レーザ測長システム ML10

表 3. ピッチ送り精度

|      | 0  | 500   | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 |
|------|----|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1 回目 | 0  | -6.8  | 0.9  | 0.2  | -0.3 | 3.0  | -1.2 | 11.0 |
| 2 回目 | 0  | -10.6 | -4.8 | -4.2 | -4.7 | -4.2 | -4.2 | 4.8  |
| 3 回目 | 0  | -6.8  | -2.6 | -2.4 | -1.0 | -3.7 | -2.6 | 7.6  |
| 誤差   | 0  | -10.6 | -4.8 | -4.2 | -4.7 | -4.2 | -4.2 | 11.0 |
| 判定   | 達成 |       |      |      |      |      |      |      |

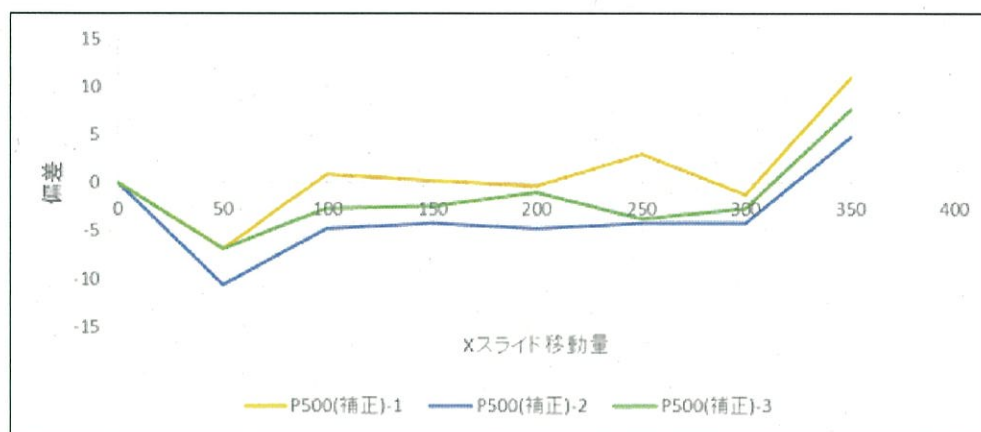


図 15. ピッチ送り精度

表 3. 図 15 に示す通り、目標値±15μm 以下を達成した。

③ 真直度の検証：目標値 $\pm 30\mu\text{m}/1000\text{mm}$

実施機関：石川県工業試験場、(株)BBS金明

実施場所：(株)BBS金明本社工場

表 4. 真直度測定

|      | 0                                    | 500    | 1000   | 1500   | 2000                                  | 2500   | 3000   | 3500  |
|------|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|-------|
| 水平方向 | 0.000                                | -0.009 | -0.028 | -0.032 | -0.033                                | -0.027 | -0.017 | 0.000 |
| 垂直方向 | 0.000                                | 0.063  | 0.078  | 0.078  | 0.066                                 | 0.051  | 0.031  | 0.000 |
| 判定   | 水平方向： $9.4\mu\text{m}/1000\text{mm}$ |        |        |        | 垂直方向： $22.3\mu\text{m}/1000\text{mm}$ |        |        |       |

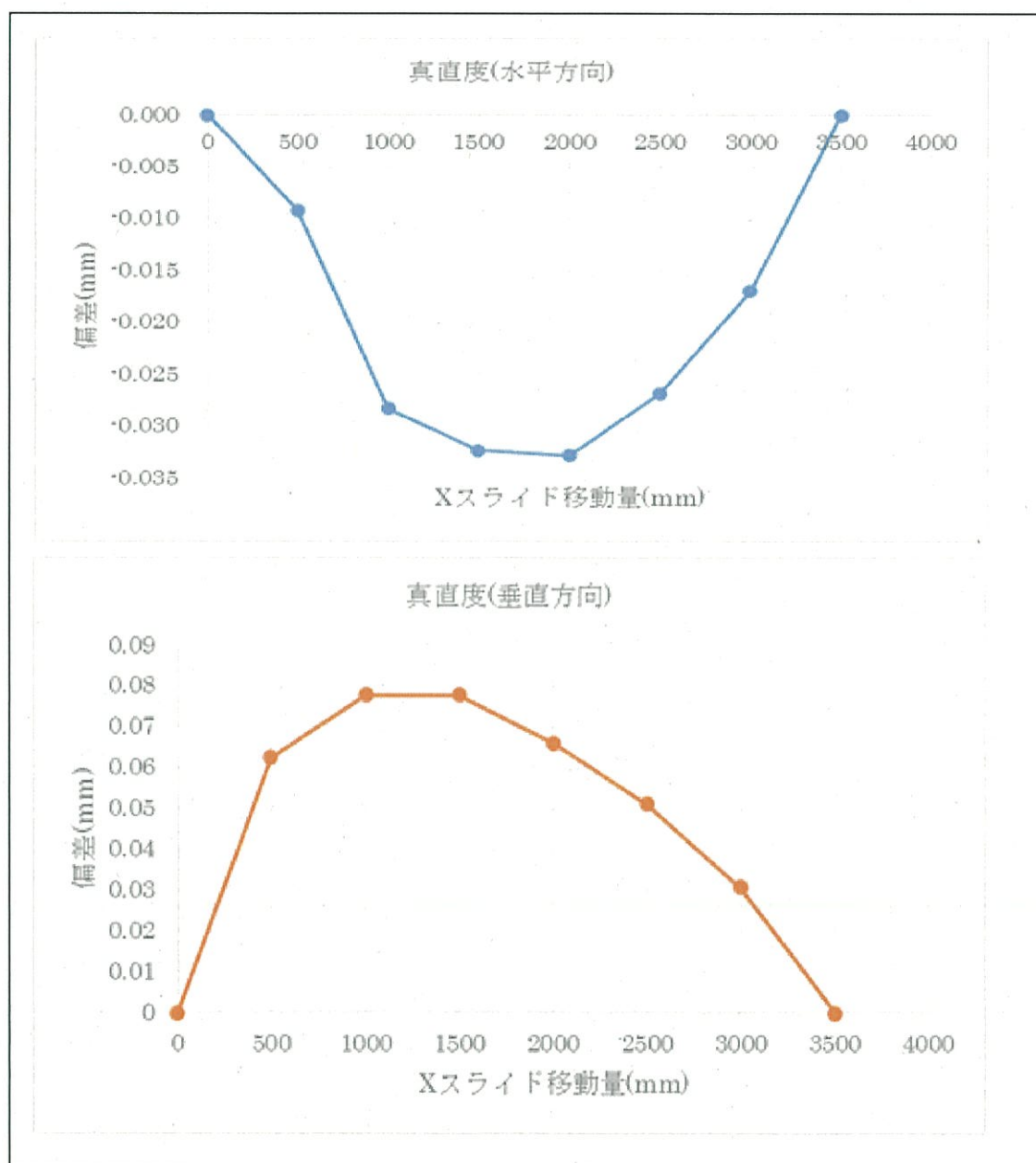


図 16. 水平・垂直方向真直度

表 4. 図 16 に示す通り、目標値 $\pm 30\mu\text{m}/1000\text{mm}$ を達成した。

### 2-3 非接触無線式ワーク測定装置の開発

主軸チャック部に把持可能な工具同様のインターフェースを有し、レーザセンサ、バッテリーパック、無線給電ユニット、測定データを無線転送する通信機器を備えた非接触無線式ワーク測定装置の設計開発を行った。

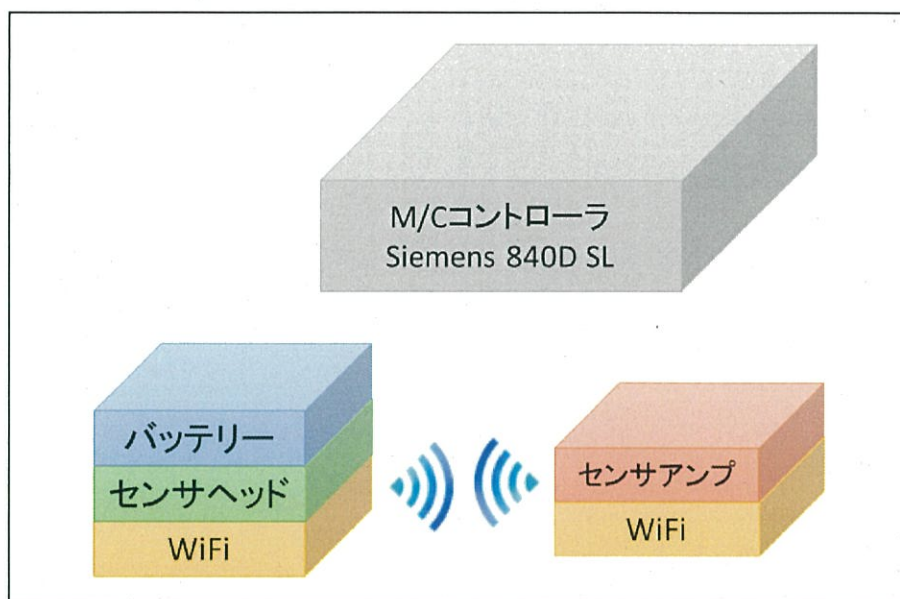


図 17. 非接触無線式ワーク測定装置システム構想図

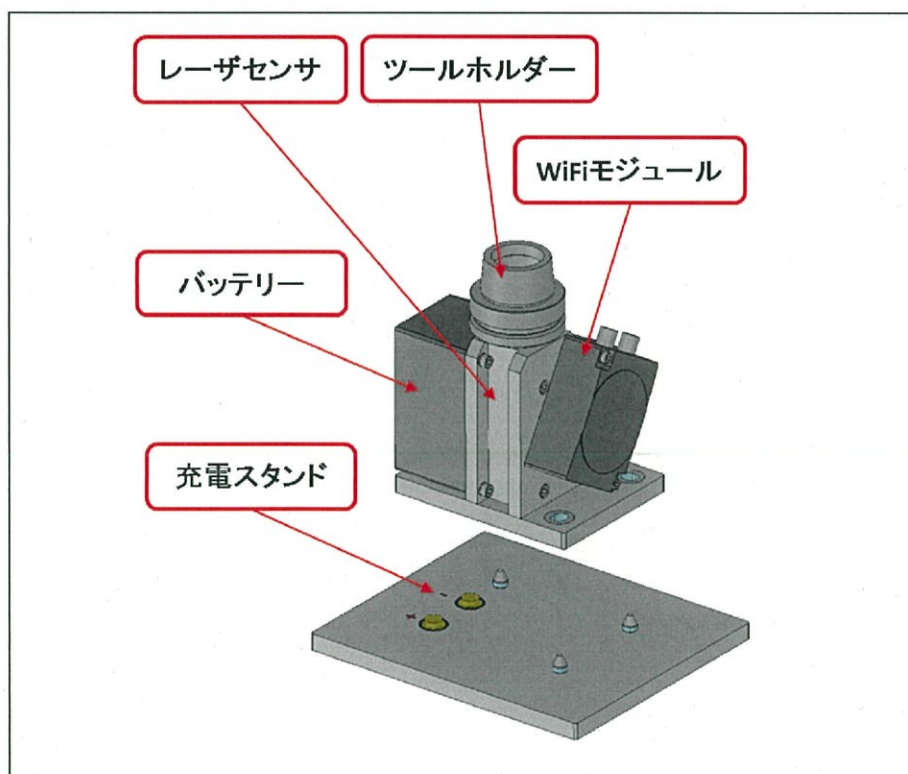


図 18. 非接触無線式ワーク測定装置コンセプト図

### 2-3-1 測定ソフトの開発

測定器単体での測定を実施し、測定精度の検証は行えたが、特有の座標軸を持つ5軸制御ロボット加工機と測定データを連携させるソフトウェアの開発については、協力機関である EXECHON 社の都合により期間内に完了させることが出来なかった。

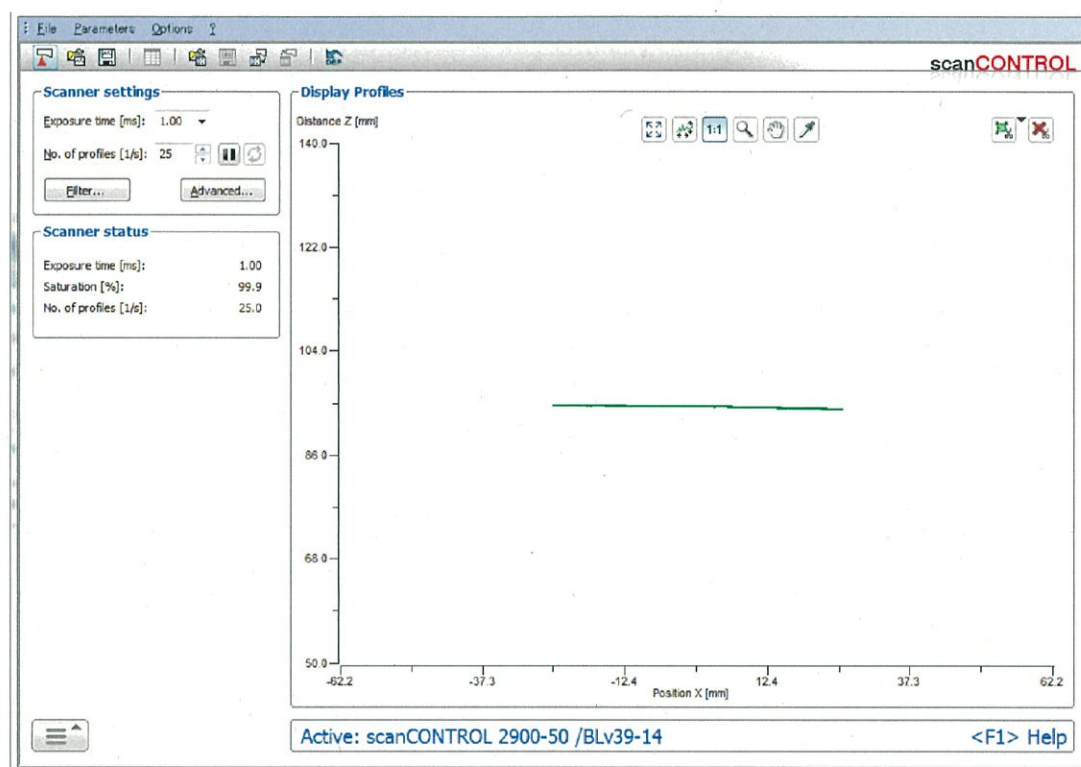


図 19. 測定画面

### 2-3-2 無線転送システムの開発

通信機器仕様

型式：BR-300AN

規格：IEEE802.11a/b/g/n

最大消費電力：5.5W

重量：120g

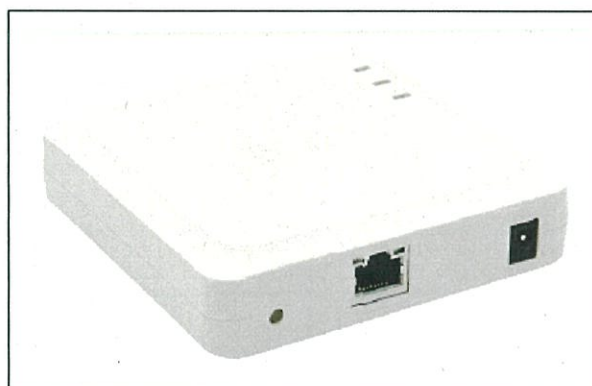


図 20.通信機器 BR-300AN

### 2-3-3 バッテリーパック充電方式と充電サイクルの開発

#### ① バッテリーパック：BAYSUN 社製特注品

定格容量：4300mAh

最大充電電圧：16.6V

最大充電電流：2A

定格電圧：14.6V

パック重量：580g

#### ② 給電システム：B&PLUS 社製 RVE-210-2

給電原理：電磁誘導

定格伝送距離：4～10 mm

ドライブ電圧：12V

ドライブ電流：2.5A

保護構造：IP67

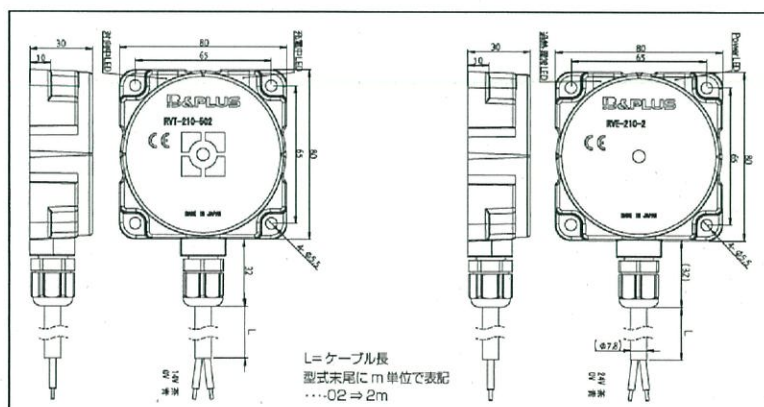


図 21.無線給電ユニット外観図

#### 2-3-4 測定精度の検証

構築したシステム構想（図 17. 図 18）を基に、測定装置の筐体を設計製作し、測定装置単体での精度調整と、測定精度の検証を行った。（図 22）（図 23）



図 22. 非接触無線式ワーク測定装置



図 23. ワーク形状測定

## 2-4 総合評価

次世代型 5 軸制御ロボット加工機及び走行ユニット主要部品の加工精度を測定すると共に、開発機の加工性能評価として、動的精度の検証と最適加工条件の抽出を行った。

### 2-4-1 静的精度の検証

#### ① 三次元測定器の導入効果

導入した三次元測定器を導入したことで大型部品の検査が可能になり、主要部品の加工精度測定を実施した。(図 24)

ミットヨ製 CRYSTA-Apex5 S9106

主な検査部品とサイズ

リストハウジング (W370×D615×H345)

アクチュエータベース (W390×D1800×H240)

アウタージンバル AX2 (W480×D800×H300)

インナージンバル AX2 (W400×D350×H360)

ロアプラットフォーム (W530×D560×H210)



図 24.三次元測定器による主要部品測定

## ② 繰り返し位置決め精度の検証

5 軸制御ロボット加工機主軸部を±X/Y/Z方向それぞれ 100 mm移動させた後、元の位置へ戻し、その時の精度を3回繰り返し測定した。(図 25)

目標値：10 $\mu$ m 以下

計測機器：ミットヨ製リニアゲージ LBH-110H

表 5. 5 軸制御ロボット加工機の繰り返し位置決め精度

| 軸方向  | 1 回目 ( $\mu$ m) | 2 回目 ( $\mu$ m) | 3 回目 ( $\mu$ m) |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| +X方向 | 0               | 1               | 1               |
| -X方向 | 0               | 1               | 0               |
| +Y方向 | 3               | 1               | 1               |
| -Y方向 | 4               | 0               | 1               |
| +Z方向 | 1               | 1               | 1               |
| -Z方向 | 1               | 2               | 0               |

表 5 に示す通り、最大値で 4 $\mu$ m となり目標値を達成した。

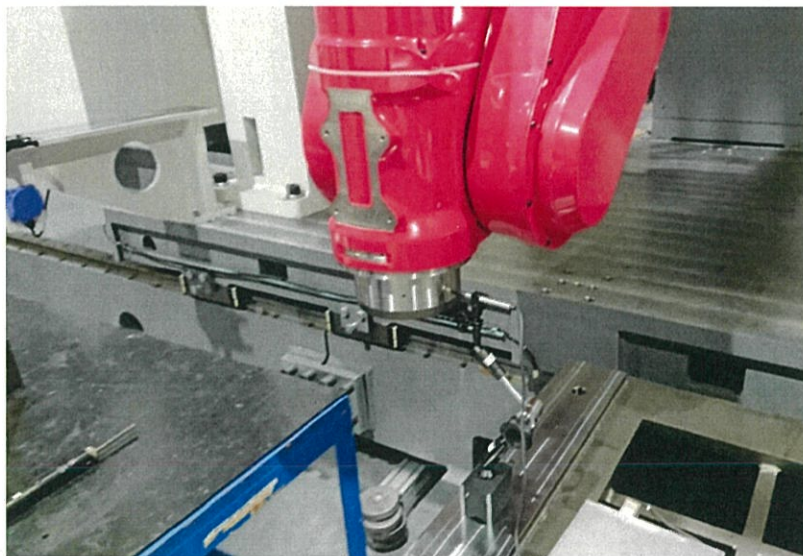


図 25.繰り返し位置決め精度測定

### ③ 真直度の検証

5 軸制御ロボット加工機主軸部にダイナテストバーを取り付け、X/Y/Z軸方向それぞれ 200 mm 各軸に対し平行に移動させ、その真直度を測定した。

目標値：20  $\mu\text{m}$ /200mm 以下

計測機器：ミットヨ製リニアゲージ LBH-110H

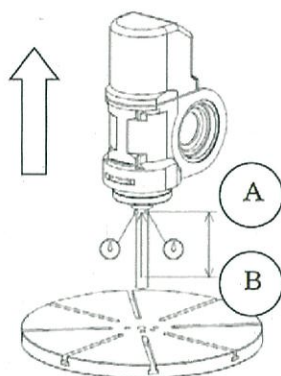


表 6. Z軸方向真直度

|     |    | X方向変位           | Y方向変位             |
|-----|----|-----------------|-------------------|
| A   | 振れ | 0~2             | 0~2               |
|     | 中心 | 1               | 1                 |
| B   | 振れ | -6~2            | -6~3              |
|     | 中心 | -2              | -1.5              |
| 真直度 |    | 3 $\mu\text{m}$ | 2.5 $\mu\text{m}$ |

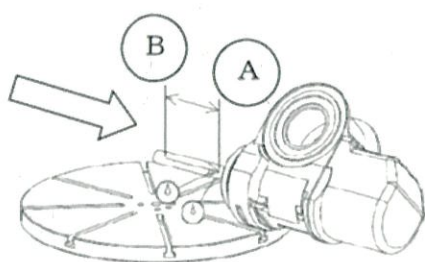


表 7. X軸方向真直度

|     |    | Y方向変位              | Z方向変位            |
|-----|----|--------------------|------------------|
| A   | 振れ | 0~2                | 0~2              |
|     | 中心 | 1                  | 1                |
| B   | 振れ | 13~22              | -20~-10          |
|     | 中心 | 17.5               | -15              |
| 真直度 |    | 16.5 $\mu\text{m}$ | 16 $\mu\text{m}$ |

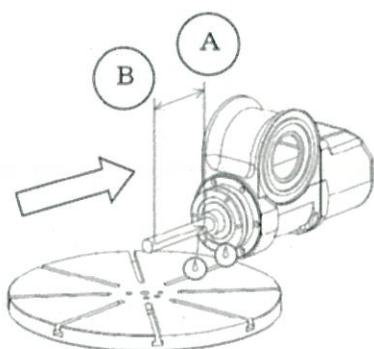


表 8. Y軸方向真直度

|     |    | X方向変位             | Z方向変位              |
|-----|----|-------------------|--------------------|
| A   | 振れ | 0~2               | 0~2                |
|     | 中心 | 1                 | 1                  |
| B   | 振れ | -6~3              | -20~-15            |
|     | 中心 | -1.5              | -17.5              |
| 真直度 |    | 2.5 $\mu\text{m}$ | 18.5 $\mu\text{m}$ |

表 6. 7. 8 に示す通り、各軸方向共に目標値を達成した。

#### ④ 真円度の検証

5 軸制御ロボット加工機主軸にボールバーを取り付け、XY/YZ/XZの3方向について真円度測定を行った。

目標値：40 $\mu$ m 以下

計測機器：レニショー製 QC20-W Ballbar system

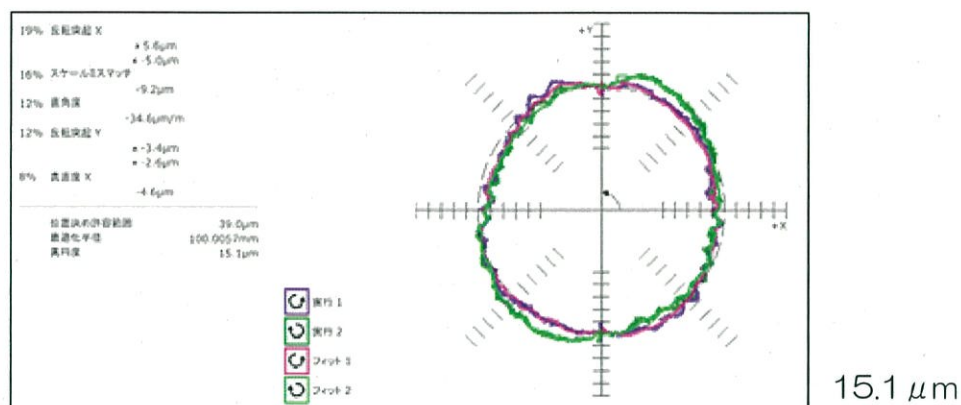


図 26. XY方向真円度

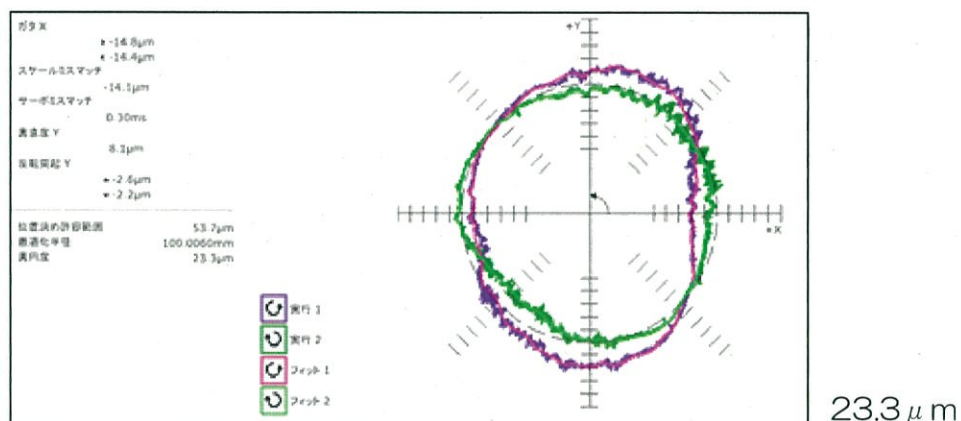


図 27. YZ方向真円度

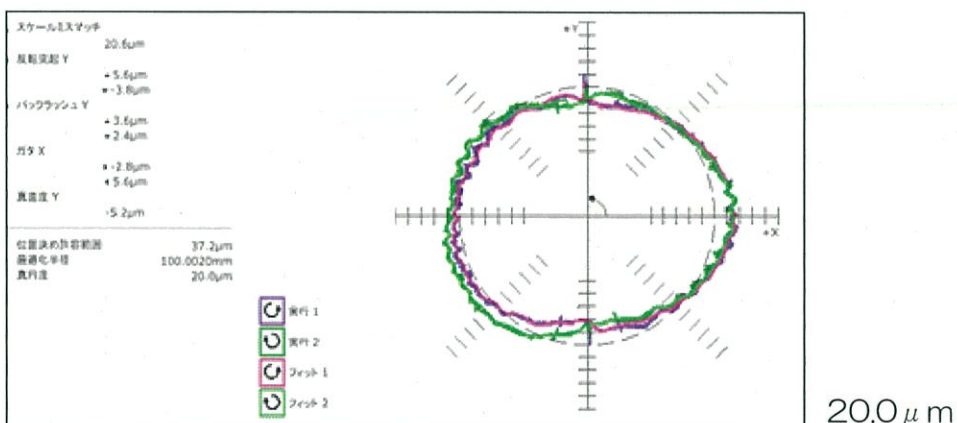


図 28. XZ方向真円度

図 26、27、28 に示す通り、3 方向共に目標値を達成した。

## 2-4-2 動的精度の検証

### ① 剛性値の測定

5 軸制御ロボット加工機主軸先端付近に、±X/Y/Z それぞれの方向に 100N の外力を与え、その変位量を測定した。(図 29)

目標値：30N/ $\mu$ m

計測機器：Mitsutoyo リニアゲージ LBH-110H

負荷外力：100N



図 29. 剛性値測定

表 9. 各軸方向の変位量と剛性値

| 軸方向  | 変位量 ( $\mu$ m) | 剛性値 (N/ $\mu$ m) |
|------|----------------|------------------|
| +X方向 | 3              | 33               |
| -X方向 | 3              | 33               |
| +Y方向 | 2              | 50               |
| -Y方向 | 2              | 50               |
| +Z方向 | 2              | 50               |
| -Z方向 | 2              | 50               |

表 9 に示す通り、全ての軸方向において目標値を達成した。

## ② 位置決め停止時の振動測定

使用機器

- ・加速度計 AccStick6
- ・電流計
- ・HEIDENHAIN:LC483

測定条件

- ・サンプリング周波数：800Hz，500Hz
- ・各 3 軸方向（プラス・マイナス方向）
- ・移動量：5mm，加速度  $1.2\text{m/s}^2$
- ・測定箇所 図 21 に示す 3 箇所
- ・測定方向 図 21 に示す直交座標系

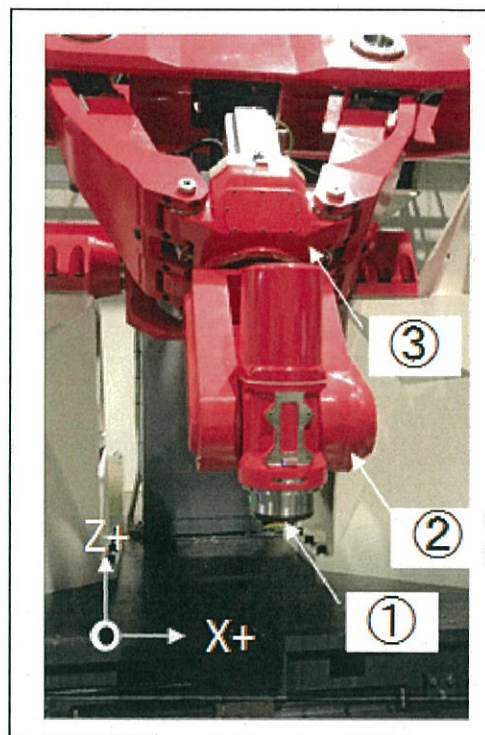


図 30. 振動測定概要

まず、走行機能付き5軸ロボット加工機の走行軸にステップ状の動作指令を与えたときの挙動を測定し、その挙動を評価する。

図 31 はその時の加速度測定結果を示す。走行軸は図 30 に示すロボット加工機の座標系 X と一致するため、X 方向の加速度に影響していることが分かる。この時の挙動を周波数解析した結果が図 32 である。静止時の振動成分には 7.8Hz の 1 次振動成分がみられる。これはロボット加工機全体が振動するロッキングモーションと考えてよい。この時の振動を変位に換算すると約  $50\mu\text{m}$  程度である。また、24.6Hz 付近および 54.3Hz 付近のピークはロボット加工機本体と主軸部の振動モードと推察できる。これも変位に換算するとそれぞれ約  $2.3\mu\text{m}$ 、 $0.26\mu\text{m}$  であり減衰が大きいことが伺える。次に走行軸は固定して、ロボット加工機の主軸部が同じ距離だけ図 21 に示す X 方向に同様にステップ状の動作を与えたときの振動測定結果を図 33 に示す。加速度測定結果は動作に伴う典型的な加速度波形を示している。このときの周波数解析結果を図 34 に示す。57.8Hz にピークが見られるが変位量としては  $0.27\mu\text{m}$  程度であり、このロボット加工機は走行軸を固定して加工することを基本としているので、振動面から見た性能は十分にあるといえる。

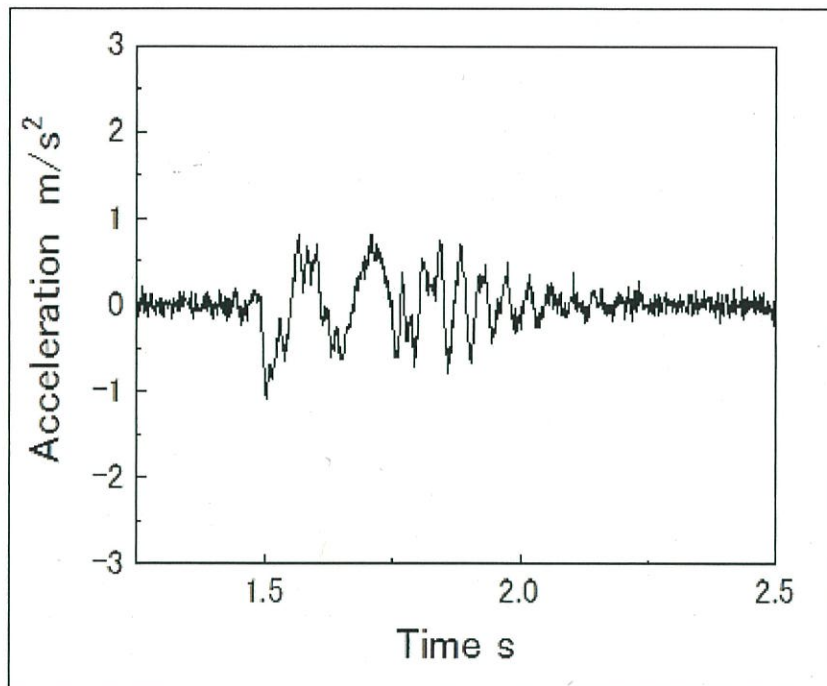


図 31. 全体がステップ移動した時の加速度 (X 方向)

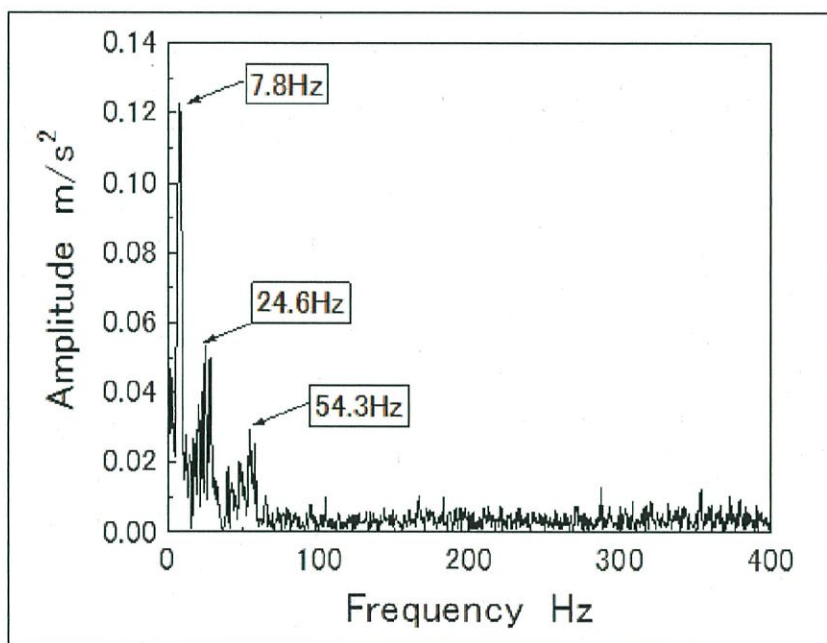


図 32. 全体がステップ移動した時の周波数応答 (X 方向)

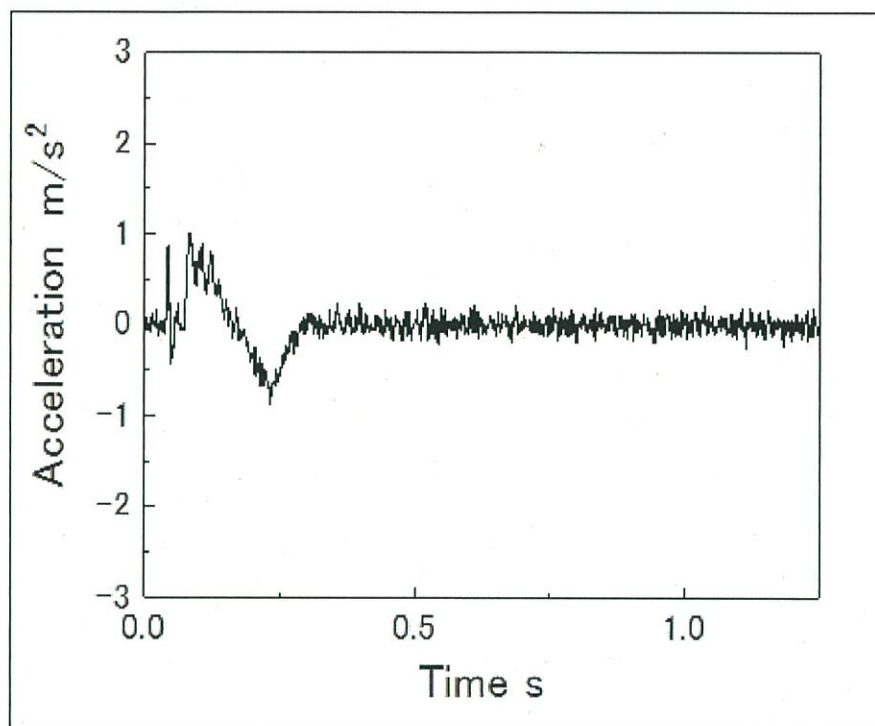


図 33. ロボット加工機の工具位置移動時における主軸先端位置の加速度

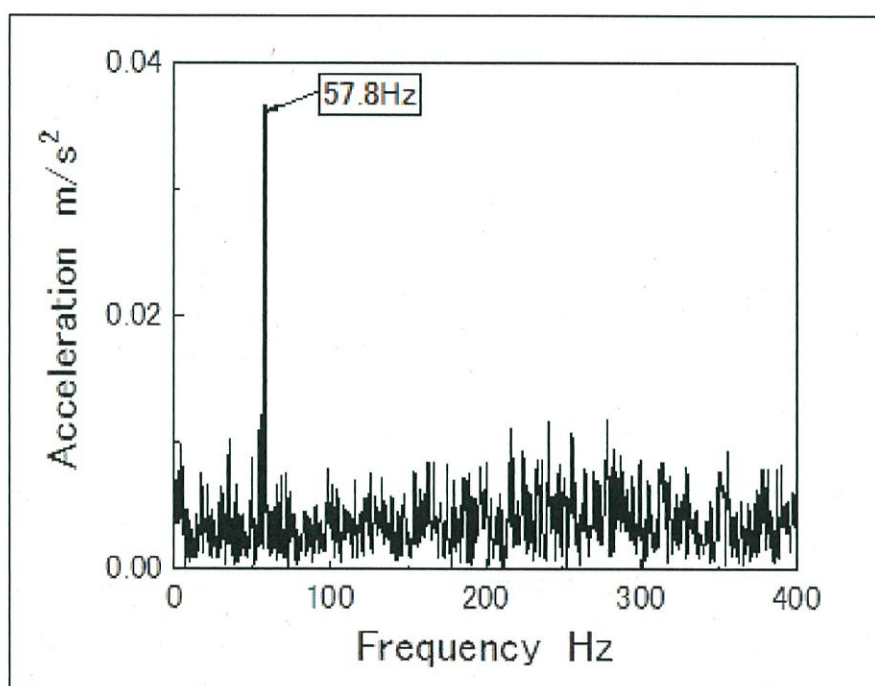


図 34. ロボット加工機の工具位置移動時における主軸先端位置の挙動の周波数解析結果

### ③ 加工時の振動測定

#### 使用機器

- ・ 加速度計 AccStick6
- ・ 電流計
- ・ HEIDENHAIN:LC483

#### 測定条件

- ・ サンプリング周波数：800Hz , 500Hz
- ・ 各 3 軸方向（プラス・マイナス方向）
- ・ 移動量：5mm, 加速度 1.2m/s<sup>2</sup>
- ・ 測定箇所 図 1 に示す 3 箇所
- ・ 測定方向 図 1 に示す直交座標系
- ・ 工作物 SUS304
- ・ 加工条件 主軸回転数 1990rpm, 半径方向切込量 10mm, 軸方向切込量 0.5mm

実際にロボット加工機を用いて図 30 に示す座標系で X,Y 方向に加工実験を行い、その時の挙動を評価した。まず、工具半径方向切込み量 20mm で軸方向切込み量を 0.5mm とした時の図 30 中①～③における三方向の加速度を測定した。図 35～37 にその結果を示す。Y 方向の振動は X 方向の振動の約 50%程度であり、ここでは省略する。

まず、3 方向の振動加速度が同等に発生していることが特徴的である。ロボット加工機の構造上 3 本の基本軸で回転・傾斜軸を支持していることから、動剛性は XZ 方向に均等、Y 方向は構造上他の方向より高いことが予想される。実際の加工実験でも振動方向の内 X,Z 方向がほぼ同じ振幅で、Y 方向が 50%程度となっている。

また、図 35～37 の結果から主軸端→A 軸取付部付近→C 軸取り付けプレートの順に振動が減少している。加工時の振動測定であることから、当初の予想通りの結果が得られている。そこで、特に工作物の表面性状に明確に作用する垂直方向振動に着目し、図 38～40 は垂直方向振動の時間データ 2048 点を抽出し、周波数解析を行い、さらに変位に換算した結果である。時間領域の振動測定結果とほぼ同様に、主軸端→A 軸取付部付近→C 軸取り付けプレートの順に概ね振動変位は減少しているが主軸端で主軸回転数と同期した周波数 99.5Hz 付近において、約 9.5  $\mu$ m と大きな振動振幅が算出さ

れた。工作物表面は工具－工作物の相対変位で決定されるため、主軸端の振動変位のみで特定はできないが、想定より大きな値を示している。

そこで、図 41 に示すように主軸 5 回転相当の時間軸に拡大し、主軸端の挙動を詳細に検討した。図より X,Z 方向は、ほぼ同様の振幅・位相を示している。これに対し Y 方向は振幅が約 50%、位相は逆位相を示し、さらに 3 枚刃が加工することで生じる主軸一回転あたり 3 回の振動が見て取れる。この挙動を図 42 に主軸一回転に相当する加速度の合成値を 3 次元軌跡として示す。

次に最も加工時の振動が大きく現れると思われる Y 方向におり、押し方向の加速度測定結果を図 43 に、引き方向のそれを図 44 に示す。加工方向によって各方向の加速度の出方に特徴があり、これが工作物表面粗さに影響することとなるが合成加速度自体は両方向とも同じであるため、結果的にはどの方向に加工しても同様の加工面性状が得られることになる。

この結果、ロボット加工機の主軸端は、加工中に 3 枚刃の刃先が工作物に侵入して 1 回転する間に斜め上方に楕円運動することが伺える。このため一見、強制振動による大きな振動振幅を示しているが、工作物表面粗さは工具刃先と工作物の相対距離により決定されるために、刃先形状から決まる幾何学的な表面粗さとの関係により、 $Ra2.1\mu m$  と当初の目標値に収まっている。また、この傾向は SUS304 の加工においては、半径方向切り込み量 20mm 切込量 1mm も十分加工できる範囲であることを確認している。

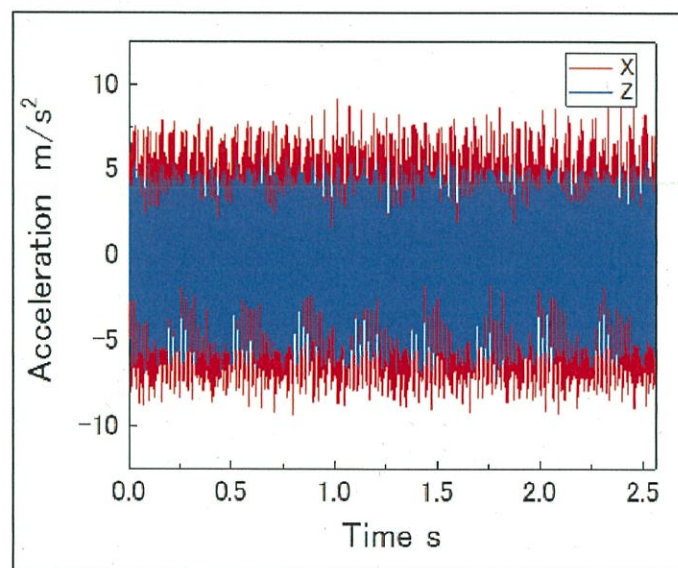


図 35. 加工時の主軸先端における振動測定結果

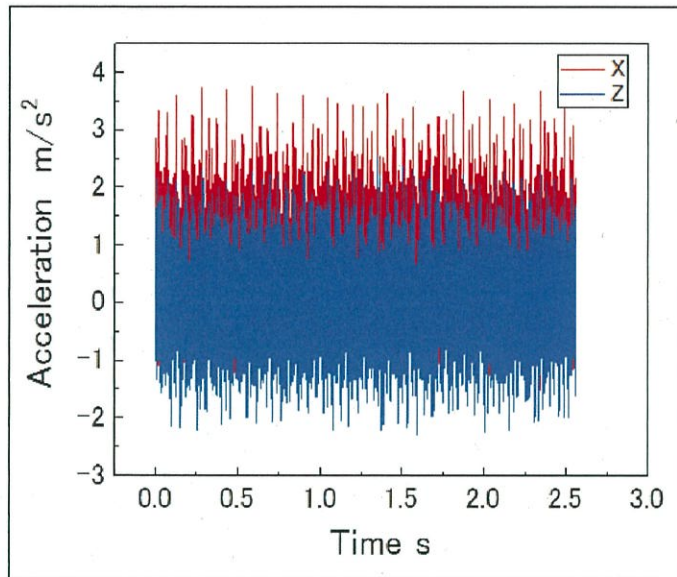


図 36. 加工時の A 軸取付部における振動測定結果

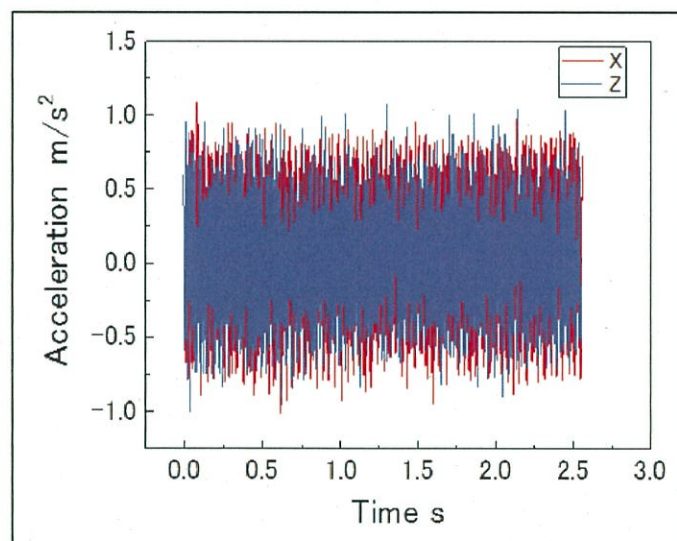


図 37. 加工時の C 軸取付部における振動測定結果

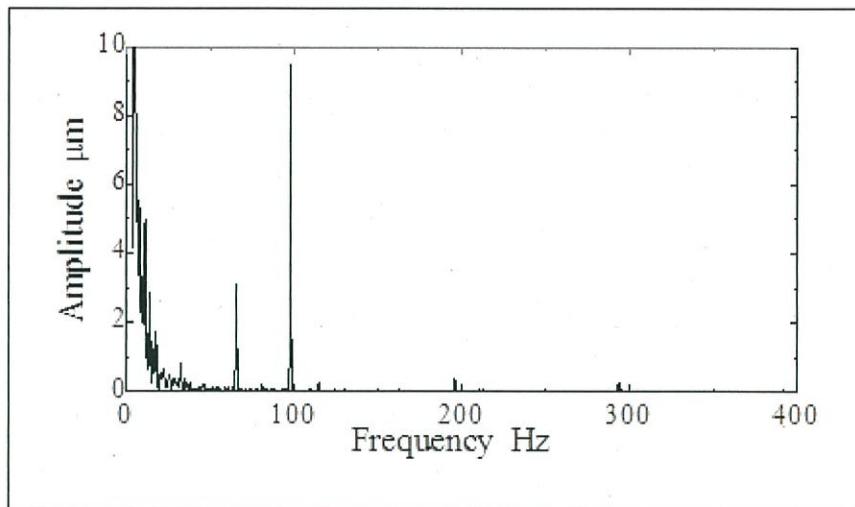


図 38. 加工時における主軸工具取付部垂直方向の周波数分析結果

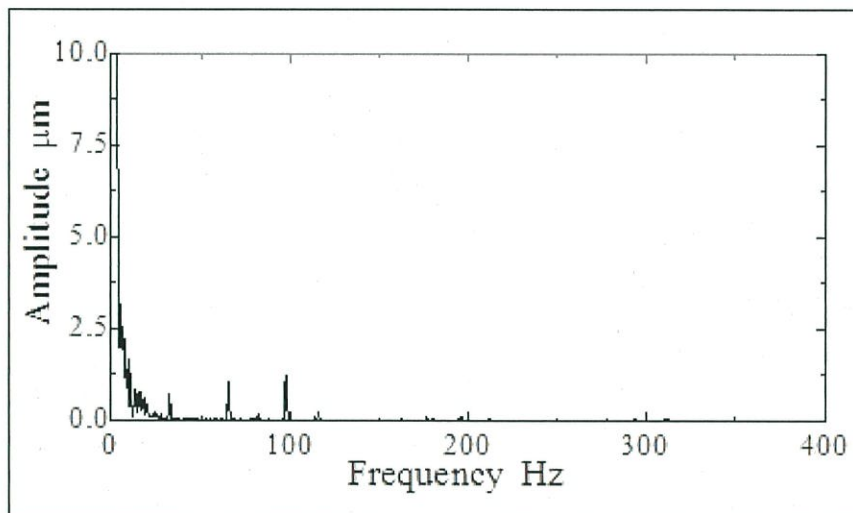


図 39. 加工時における A 軸取付部垂直方向の周波数分析結果

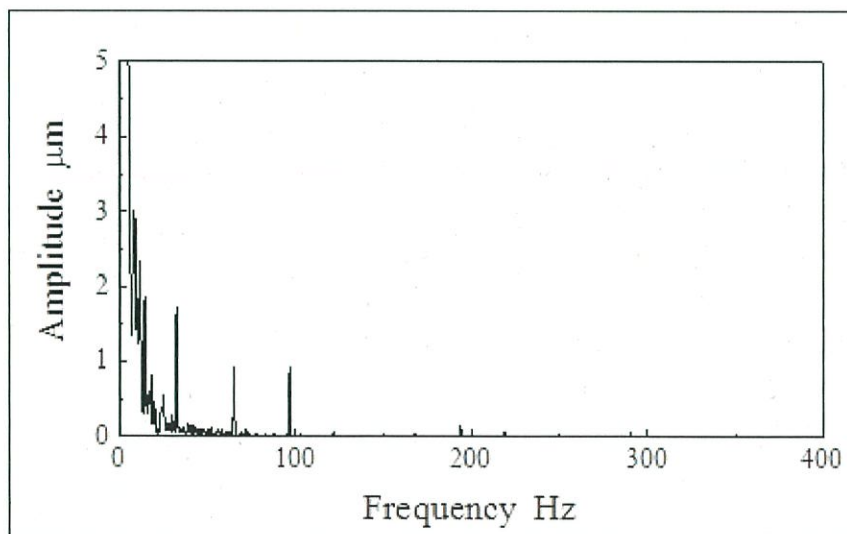


図 40. 加工時における C 軸取付プレート部垂直方向の周波数分析結果

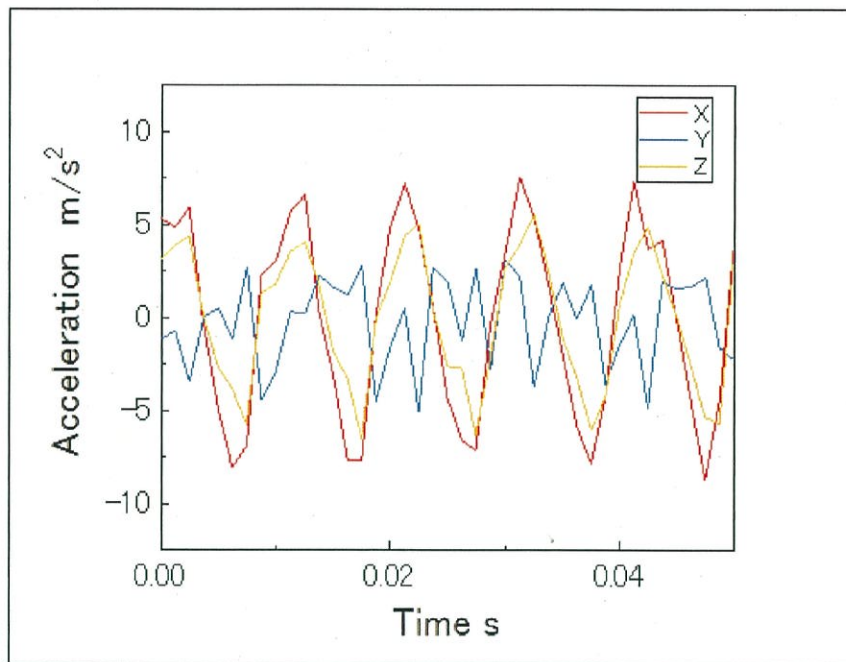


図 41. 加工時における主軸工具取付部の主軸 5 回転の振動測定結果

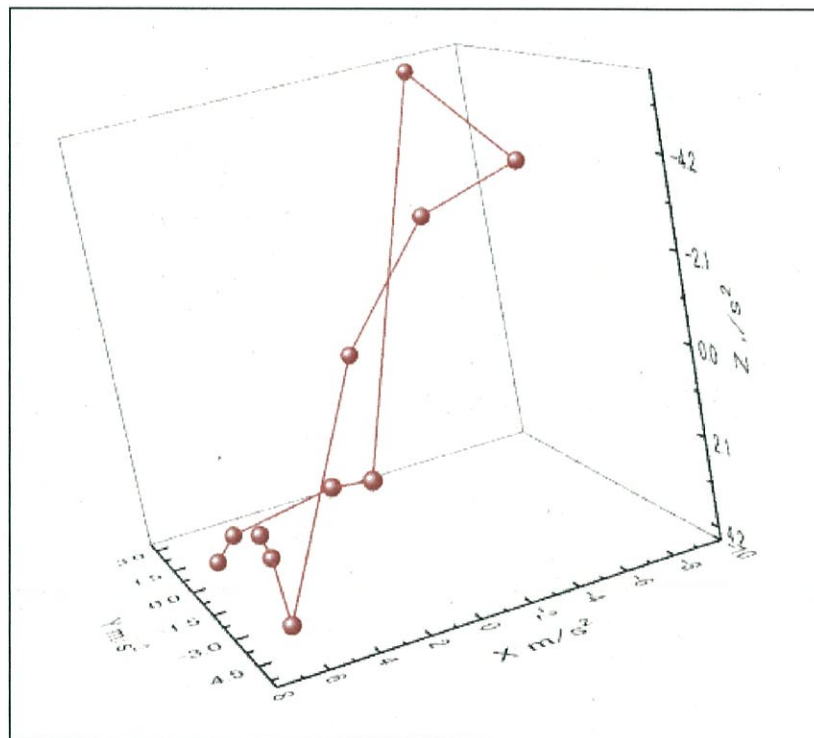


図 42. 図 32 における主軸一周分の 3 軸加速度合成分布

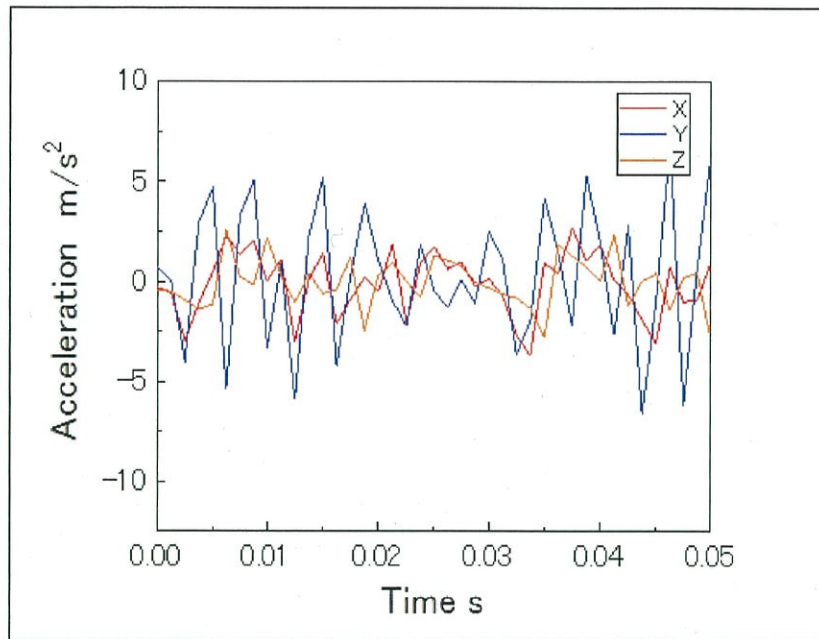


図 43. 加工時における主軸工具取付部の主軸 5 回転の振動測定結果  
Y 方向押し方向加工（時間領域）

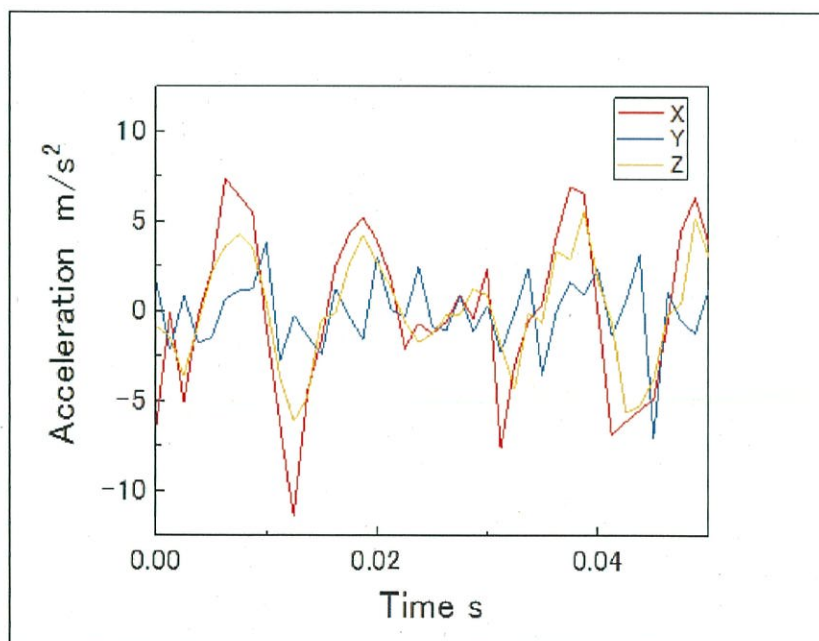


図 44. 加工時における主軸工具取付部の主軸 5 回転の振動測定結果  
Y 方向引き方向加工（時間領域）

#### ④ 電流測定結果

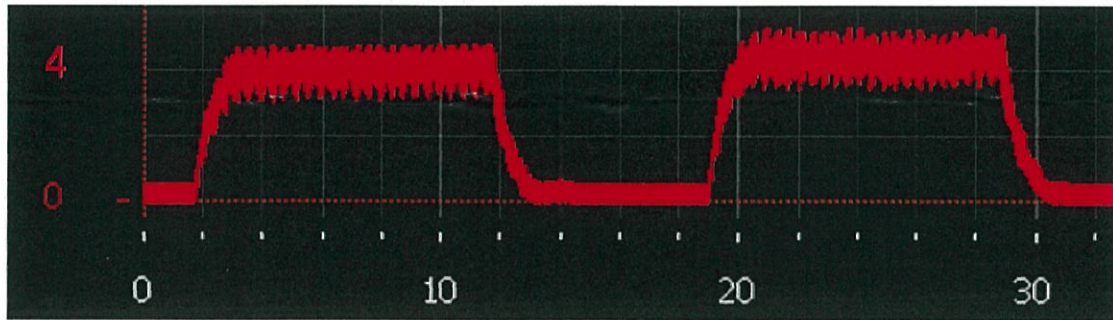
開発した 5 軸ロボット加工機の加工時の主軸電流を計測することにより、円周方向のトルクの傾向を観測できる。図 45(1)～(3)に測定結果を示す。

まず、図 45-(1)に X 方向に往復しながら切削したときの電流測定結果を示す。平均的な電流値はいずれも 4A 程度を示している。動的成分はそれぞれ、0.8A、1.0A 程度でありダウンカットの方が 20%程度動的な電流変動が大きい。

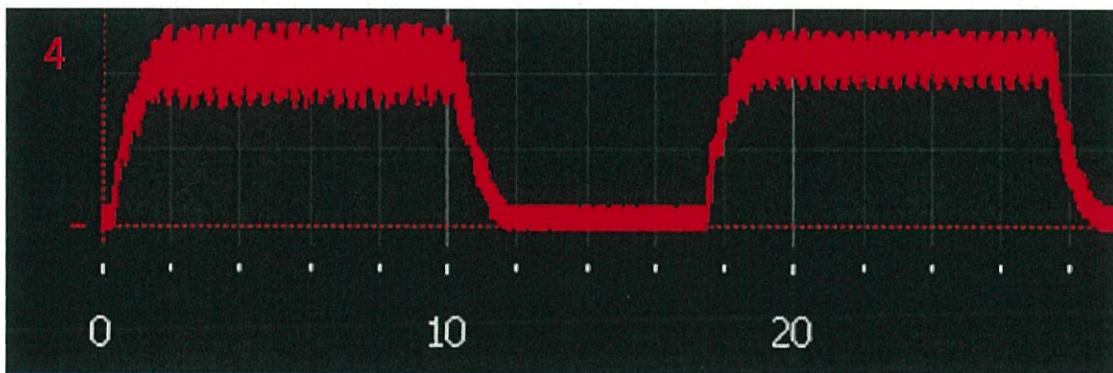
次に、Y 方向での加工実験結果を図 45-(2)に示す。平均的な電流値は 4.2A 程度であり、動的成分は 1.2A、1A 程度と同じ Y 方向でも機械本体に近づく方向でアップカットのときの動的成分の方が機械本体から離れる方向でダウンカットの動的成分よりも大きい。したがって、加工の方向によって主軸の負荷が異なることが確認できた。今回用いたフルバックは 3 枚刃であることから、進行方向には刃の枚数に応じた周期で振動し、直角方向、垂直方向には主軸回転数に同期した振動成分が現れることがわかる。したがって、主軸の鉛直方向の振動成分を抑えるためには、A 軸と C 軸の各中心軸間のオフセットの小さいものが望ましい。

一方、図 45(3)では(1)、(2)に比較して半径方向に 2 倍の切込み幅 20mm を与えたときの主軸電流である。この場合、切込み幅が増えたことで平均電流が 6.5A 程度に増加した。このとき、フルバックの 3 枚刃の内 2 枚が常に工作物と接触している状態となるため、動的成分は(1)、(2)と比較して著しい減少がみられ、0.5A 程度に収束している。このことは、加工条件の選定を行う際に考慮すべきことである。つまり、切込み幅を増やして常に複数の刃が工作物と接触することにより、安定した主軸の回転状態とすることができることになる。このことは単位時間あたりの除去体積を増やすには、軸方向切り込み量を増やすよりも切込み幅を増やす方向が安定した除去体積率を向上させることが可能となる。

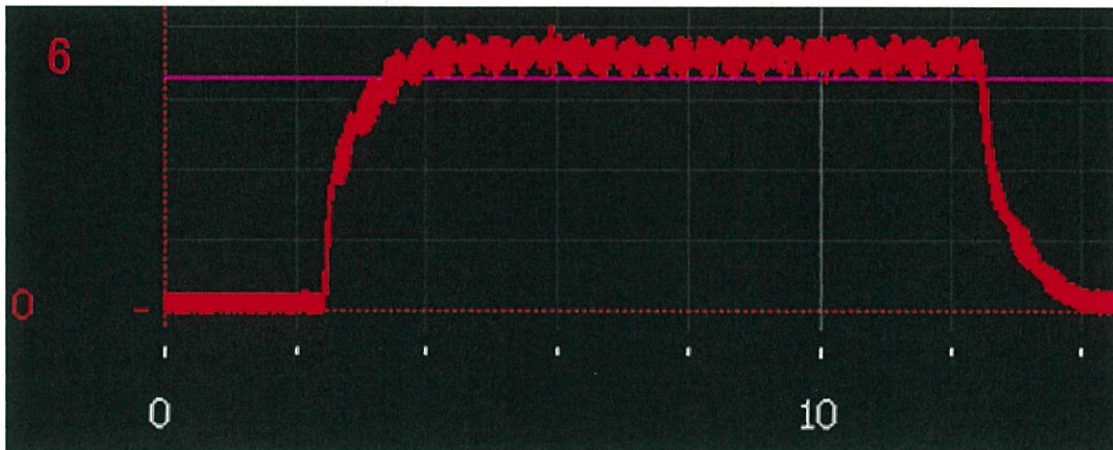
以上、加工条件を変えて電流測定を行った過程で、安定した切削状態を判定する為にも主軸電流の測定は有効である。



(1) X方向, 半径方向 10mm, 引きダウンカット, 押しアップカット, 加工深さ 1.0mm, 電流値



(2) Y方向, 半径方向 10mm, 引きアップカット, 押しダウンカット, 加工深さ 1.0mm, 電流値



(3) X方向, 半径方向 20mm, 加工深さ 1.0mm, 電流値

図 45. 主軸電流の測定結果

### 2-4-3 最適加工条件の抽出

航空機に使用される難削材料であるチタン合金およびインコネル材料を対象にフライス加工またはドリル加工を実施し、その材料に適切な切削工具の選定と加工条件の抽出を行った。

#### ① 64 チタンのフライス加工結果

使用工具：ウェーブミル（φ50 mm 5 枚刃）

インサート：AXMT170504PEER-EACM200

表 10. チタンのフライス加工における最適加工条件

|         |           |
|---------|-----------|
| 回転数     | 318rpm    |
| 送り速度    | 159mm/min |
| 軸方向切込み量 | 0.5mm     |
| 径方向切込み量 | 25mm      |
| びびり     | 有り        |
| 主軸負荷率   | 10%       |
| 表面粗さ    | Ra0.945   |

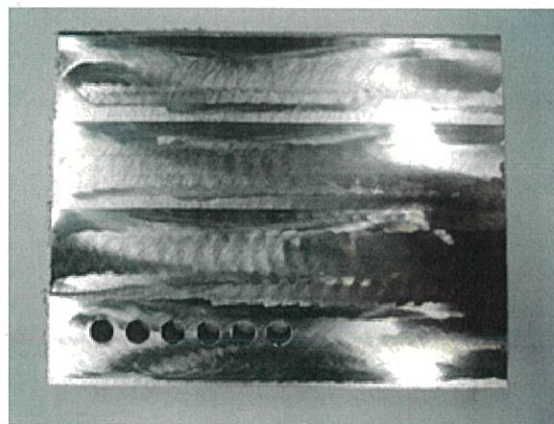


図 46. 抽出条件にて加工後のチタン表面

若干のびびりが見られたが、表面粗さ値としては比較的良好な切削面となった。（図 46）

表 10 にチタンのフライス加工における最適加工条件を記す。

② インコネルのフライス加工結果

使用工具：ウェーブミル（φ50 mm 5 枚刃）

インサート：AXMT170504PEER-EACM200

表 11. インコネルのフライス加工における最適加工条件

|         |           |
|---------|-----------|
| 回転数     | 398rpm    |
| 送り速度    | 159mm/min |
| 軸方向切込み量 | 0.3mm     |
| 径方向切込み量 | 25mm      |
| びびり     | 無し        |
| 主軸負荷率   | 10%       |
| 表面粗さ    | Ra0.572   |

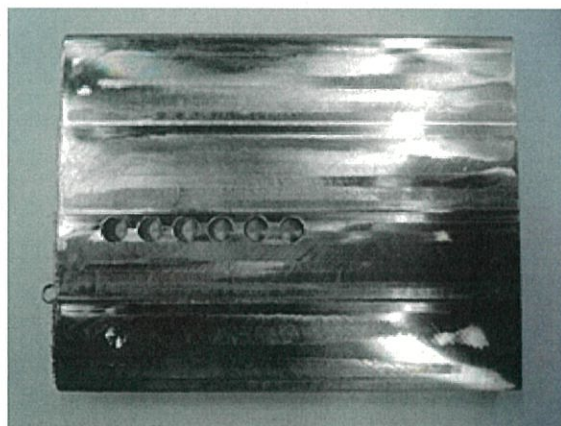


図 47. 抽出条件にて加工後のインコネル表面

ビビリもなく、表面粗さ値としては大変良好な切削面となった。（図 47）

表 11 にインコネルのフライス加工における最適加工条件を記す。

### ③ チタンのドリル加工結果

使用工具：アクアドリル（φ6.8 mm）AQDEXRN0680

穴A～FまでX軸座標 10 mmピッチで連続穴加工を行い、三次元測定機にて穴Aを基準として各穴の中心座標を割出し、ピッチ精度測定を行った。

表 12. チタンのドリル加工における最適加工条件

|         |           |
|---------|-----------|
| 回転数     | 1120rpm   |
| 送り速度    | 192mm/min |
| 軸方向切込み量 | 17mm      |
| 備考      | ドライ加工     |

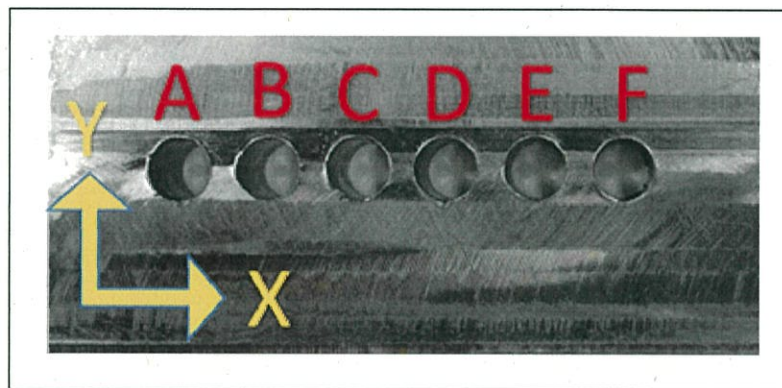


図 48. ドリル加工後の被切削材

表 13. 最適条件でのドリル加工穴ピッチ精度

|         | A     | B      | C      | D      | E      | F      |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X 座標目標値 | 0.000 | 10.000 | 20.000 | 30.000 | 40.000 | 50.000 |
| X 座標測定値 | 0.000 | 9.992  | 19.998 | 29.995 | 40.000 | 49.993 |
| Y 座標目標値 | 0.000 | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  |
| Y 座標測定値 | 0.000 | 0.001  | 0.011  | 0.006  | -0.002 | 0.000  |

#### ④ インコネルのドリル加工結果

使用工具：ノンステップドリル（φ6.8 mm）O5WHNSBO680-TH

穴A～FまでX軸座標 10 mmピッチで連続穴加工を行い、三次元測定機にて穴Aを基準として各穴の中心座標を割出し、ピッチ精度測定を行った。

表 14. インコネルのドリル加工における最適加工条件

|         |           |
|---------|-----------|
| 回転数     | 1400rpm   |
| 送り速度    | 140mm/min |
| 軸方向切込み量 | 15mm      |
| 備考      | MQL 加工    |

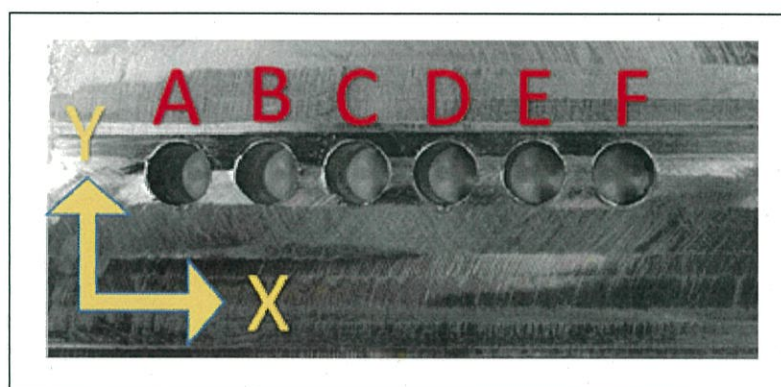


図 49. ドリル加工後の被切削材

表 15. 最適条件でのドリル加工穴ピッチ精度

|         | A     | B      | C      | D      | E      | F      |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X 座標目標値 | 0.000 | 10.000 | 20.000 | 30.000 | 40.000 | 50.000 |
| X 座標測定値 | 0.000 | 10.005 | 20.043 | 29.907 | 39.967 | 49.993 |
| Y 座標目標値 | 0.000 | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  |
| Y 座標測定値 | 0.000 | 0.035  | 0.087  | 0.041  | 0.068  | 0.000  |

# ⑤ モジュール単体での穴加工ピッチ精度測定

Ｘスライドを固定、５軸制御ロボット加工機のみ動作、Ｘ軸方向に 50 mmピッチ 700 mmのスペンでφ15 mm穴加工を行った穴ピッチ精度の測定を行った。  
その測定結果を表 16 に示す。

表 16. 穴加工ピッチ精度測定

|     | X目標値    | X測定値    | Y目標値  | Y測定値  |      | X目標値 | X測定値    | Y目標値  | Y測定値   |
|-----|---------|---------|-------|-------|------|------|---------|-------|--------|
| 0   | 0.000   | 0.000   | 0.000 | 0.000 | 400  | 400  | 399.937 | 0.000 | 0.005  |
| 50  | 50.000  | 49.988  | 0.000 | 0.002 | 450  | 450  | 449.932 | 0.000 | 0.005  |
| 100 | 100.000 | 99.977  | 0.000 | 0.000 | 500  | 500  | 499.928 | 0.000 | 0.002  |
| 150 | 150.000 | 149.965 | 0.000 | 0.001 | 550  | 550  | 549.926 | 0.000 | 0.002  |
| 200 | 200.000 | 199.959 | 0.000 | 0.003 | 600  | 600  | 599.920 | 0.000 | 0.001  |
| 250 | 250.000 | 249.954 | 0.000 | 0.000 | 650  | 650  | 649.917 | 0.000 | 0.001  |
| 300 | 300.000 | 299.947 | 0.000 | 0.002 | 700  | 700  | 699.913 | 0.000 | -0.002 |
| 350 | 350.000 | 349.940 | 0.000 | 0.005 | 最大誤差 | —    | 0.087   | —     | 0.005  |

最大誤差でX軸方向 87  $\mu$ m、Y軸方向 5  $\mu$ mの結果となったが、加工機性能として十分に評価できる数値となっている。なお、X軸座標と比例して誤差が大きくなっている結果から、単純な NC 補正を行うことで更なる高精度化も期待できる。

## 最終章 全体総括

図 50 に開発した走行機能付 5 軸制御ロボット加工機の外観写真を示す。測定機能については未達成ではあるが加工機としてはほぼ完成した。表 17 に本装置の目標値とその達成度について一覧を示す。加工機としての性能は当初の目標値に対して満たすことができている。また、実際に難削材の加工を実施した結果、著しいビビリもなく加工が可能であることを確認した。本装置に関しては国内重工業メーカーからも関心が寄せられており、提供されたサンプルワークのテスト加工により事業化への推進を図っている。なお、測定機能についてはまだ課題が残っており今後も継続的に開発を進めていく。

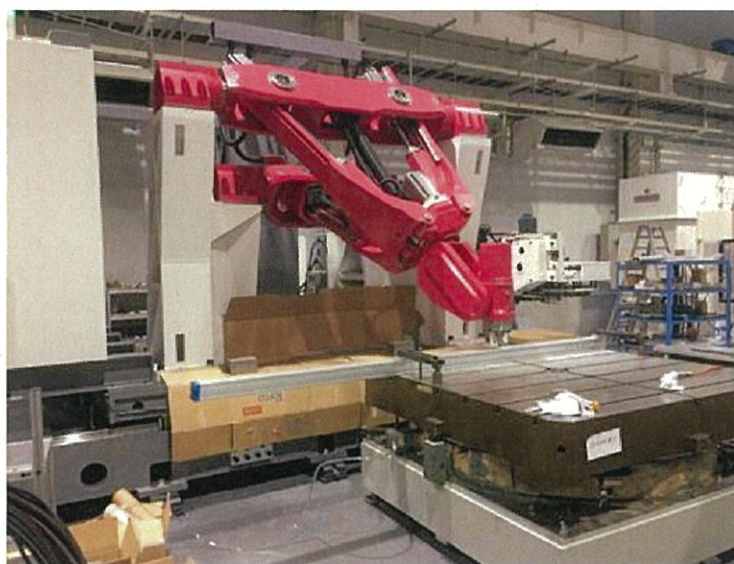


図 50. 開発した走行機能付 5 軸制御ロボット加工機外観

表 17. 目標値一覧と達成度

| 実施項目              | 検証内容        | 目標値                  | 実績                                                  | 達成評価 |
|-------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------------------------|------|
| <b>5軸制御加工機</b>    |             |                      |                                                     |      |
| 高剛性化              | 応力に対する変位量測定 | 30N/ $\mu$ m         | 33~50N/ $\mu$ m                                     | ○    |
| 位置決め精度            | 繰り返し位置決め精度  | 10 $\mu$ m           | 0~4 $\mu$ m                                         | ○    |
| 真円度精度             | 真円度測定       | 40 $\mu$ m           | 15.1~23.3 $\mu$ m                                   | ○    |
| 真直度精度             | 真直度測定       | 20 $\mu$ m/200mm     | 2.5~18.5 $\mu$ m/200mm                              | ○    |
| 振動抑制              | 振動測定        | 初期設計値の検証             | 実施完了                                                | ○    |
| <b>走行ユニット</b>     |             |                      |                                                     |      |
| モジュール化設計          |             | 最短モジュール設計            | 実施完了                                                | ○    |
| 位置決め精度            | 繰り返し位置決め精度  | 15 $\mu$ m           | 7 $\mu$ m                                           | ○    |
| ピッチ送り精度           | 真円度測定       | $\pm 15\mu$ m        | -10.6~+11 $\mu$ m                                   | ○    |
| 真直度精度             | 真直度測定       | $\pm 30\mu$ m/1000mm | 22.3 $\mu$ m/1000mm                                 | ○    |
| <b>非接触レーザー測定器</b> |             |                      |                                                     |      |
| 測定精度              | 各項目測定精度     | $\pm 50\mu$ m        | 筐体設計製作: 実施完了<br>単体での測定: 実施完了<br>NC連携ソフトウェア開発<br>未完了 | △    |