

サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化

機械加工科 主任研究員 福田 洋平
応用技術部 部長 瀧内 直祐
機械加工科 主任研究員 梅木 宣明

本研究は、既に長崎県内で構築されている航空機エンジン部品のサプライチェーンを強化することを目的としている。航空機エンジン部品の製造を行う県内企業からのニーズに基づき、①ブレードの高品位仕上加工技術の開発、および②ブレード形状と加工条件から仕上面品質を予測するシステムの開発に取り組むとともに、宇宙・エネルギー産業への拡大を図りたいという県内企業の要望に応えるため、③超耐熱合金の加工技術開発に取り組む。本報告は①に関連し、工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について評価した結果を報告する。

1. 緒言

平成30年度の長崎県航空機産業クラスター協議会の発足を契機に航空機産業進出に向けた県内企業の意欲が高まり、工業技術センターでは令和元年度から令和3年度の3年間、県内企業の航空機産業への新規参入を促すため、戦略プロジェクト研究「航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化」に取り組んできた^[1-3]。しかしその間、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により航空機機体部品の需要は一時的に減少し、新規参入への足踏みが余儀なくされた。一方、航空機エンジン部品は、定期的な部品交換による安定した需要が見込めることから、長崎県内でサプライチェーンが構築され、今後のウィズコロナにおいても受注拡大が見込める。本研究では、長崎県の航空機産業の拡大に向け、航空機エンジン部品の製造技術の高度化に取り組み、サプライチェーンの更なる強化を図る。

本研究は航空機エンジン部品のブレード加工における生産性の向上と表面性状の向上との両立を図るものである。県内企業は、表面性状と工具寿命の突発的なばらつきを抑えたいという課題を抱えており、①従来よりも高度なプロセス管理（切れ刃管理、主軸の動的振れ管理、切れ刃の転写性管理）を提案し、現場への適用を図る。また、②新製品立ち上げ時のNCプログラミングのトライ&エラーを削減するため、AI技術を活用し、ブレード形状と加工条件をインプットすることで仕上げ面の表面粗さを予測するシステムを開発する。更に、③宇宙・エネルギー産業への横展開を目指した超耐熱合金加工への技術応用を図る。

本報告は①に関連し、工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について評価した結果を報告する。

2. 渦電流式変位計による主軸の2軸振れ測定

2.1 実験方法

アンブ内蔵型渦電流式変位計（ML-06：株式会社電子応用製）を用いて主軸の2軸振れ測定を実施した。実験状況の写真を図1に示す。渦電流式変位計への供給電源はノイズ低減のために9V乾電池を用いた。

平成22年に導入した牧野フライス製作所製のマシニングセンタD500を使用し、工具ホルダは大昭和精機のMEGA13E-105、測定対象は直径12mmのハイスシャンクとした。シャンクの突出し量は43mmとし、インジケータで静的振れを測定した結果、口元1.5 μ m、先端3.0 μ mであった。

工具軸方向の測定位置はシャンク先端から約21.5mmとし、シャンクとセンサヘッドの距離は渦電流式変位計の感度が最も高い0.2mmとした。また、渦電流式変位計の変位出力特性は、マシニングセンタのテーブル移動量を基準として機上で取得した。

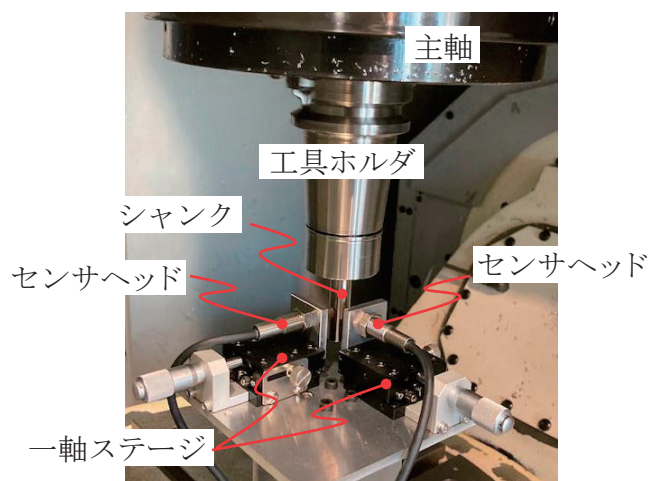
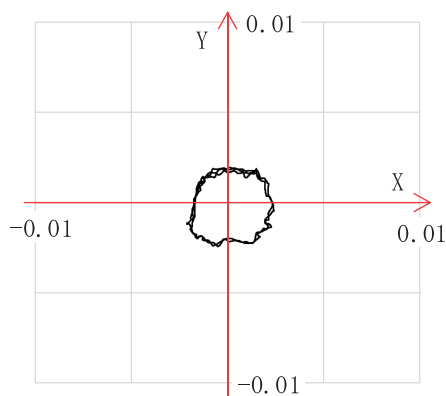


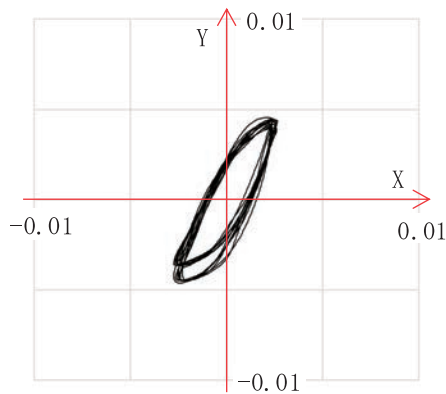
図1 渦電流式変位計による振れ測定

2. 2 実験結果

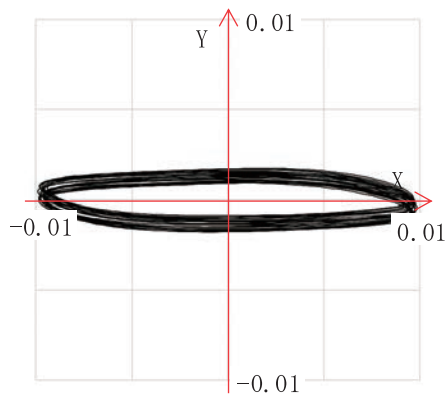
渦電流式変位計によるリサージュ図形を図2に示す。主軸回転数 100 min^{-1} は1.5秒間、主軸回転数 7000 min^{-1} および 11000 min^{-1} は0.15秒間のデータである。主軸回転数 100 min^{-1} は円形に近い結果であったのに対して、 7000 min^{-1} はY軸方向に長軸をもつ楕円形状、 11000 min^{-1} はX軸方向に長軸をもつ楕円形状であった。各回転数におけるX軸方向およびY軸方向の最大値と最小値の差を振幅とし、図3に示す。



(a) 100 min^{-1}

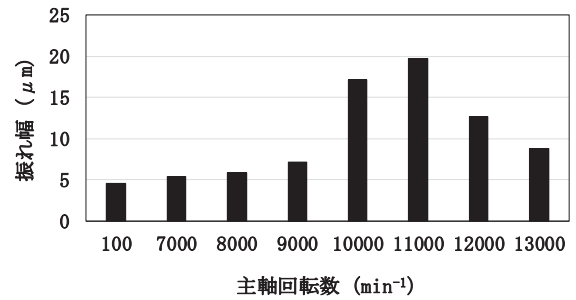


(b) 7000 min^{-1}

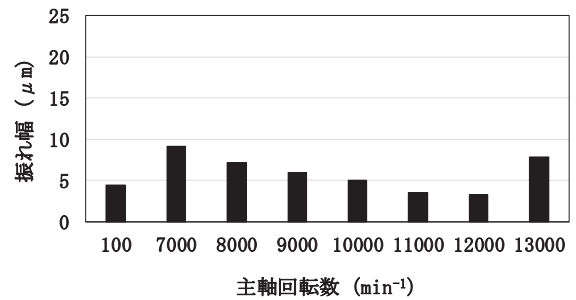


(c) 11000 min^{-1}

図2 渦電流式変位計によるリサージュ図形



(a) X 方向



(b) Y 方向

図3 各回転数における振幅 (渦電流式)

実験前の静的振れ測定結果から測定位置の静的振れは $2.25 \mu\text{m}$ 程度と想定されるが、極低速回転の 100 min^{-1} においても測定結果には約 $4.5 \mu\text{m}$ の振れが測定された。これは渦電流式変位計の変位出力特性が測定対象の金属組織に影響を受けることが原因の一つとして考えられる。

3. 光学式変位計による主軸の振れ測定

3. 1 実験方法

渦電流式変位計の変位出力特性は測定対象の金属組織の影響を受けるとともに、測定点はセンサヘッド近傍領域の比較的広い領域の平均変位となる。そこで、測定点の明確化と測定結果の信頼性向上のため、三角測量方式の光学式変位計 (LK-H022: 株式会社キーエンス製) による主軸の振れ測定を実施した。測定状況の写真を図4に示す。

光学式変位計は金属組織の影響を受けずピンポイントに変位測定ができるが、金属光沢面を測定する場合には表面粗さの影響を受け、測定結果に高周波の外乱を含む。そのため、外乱の影響を低減する適切なローパスフィルタを適用する必要がある。今回はローパスフィルタに相当するフィルタリング処理としてアンプに内蔵された平均化処理を採用した。測定条件を表1に示す。

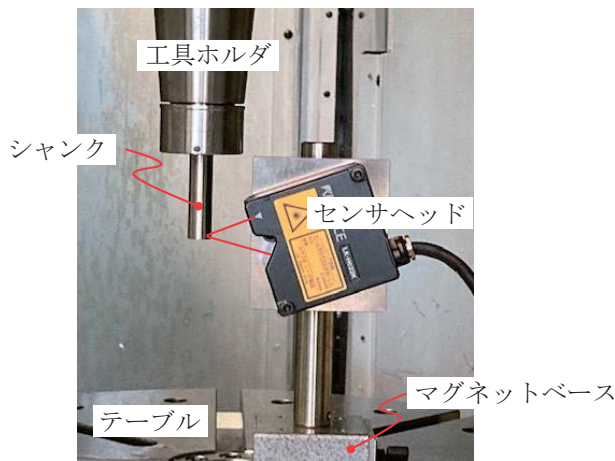


図4 光学式変位計による振れ測定

表1 測定条件

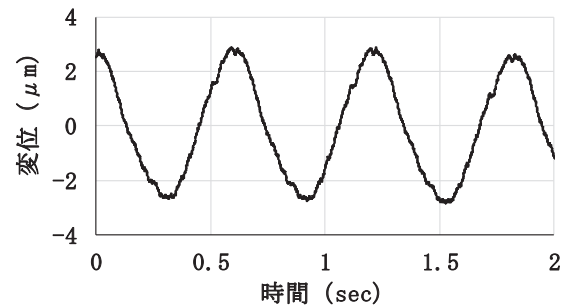
主軸回転数 (min^{-1})	サンプリング速度 (Hz)	平均化処理 (Point)
100	2k	256
7000	200k	
8000		
9000		
10000		
11000		
12000		
13000		

3.2 実験結果

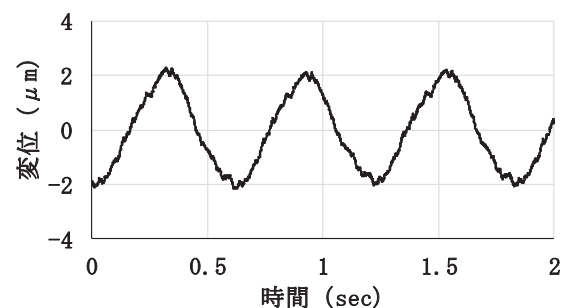
主軸回転数 100 min^{-1} の条件で測定した光学式変位計の変位出力を図5に示す。使用した変位計は一つであり、X方向とY方向測定結果は同期していない。振れの周期毎に定期的に繰り返されている高周波成分は測定面の表面粗さに起因する外乱である。X方向の振れ幅は $5.86 \mu\text{m}$ 、Y方向の振れ幅は $4.47 \mu\text{m}$ であり、主軸を起動した場合、 100 min^{-1} の極低速回転でも、手回しによる静的振れの測定値より大きな振れが刃先に生じることとなった。

各回転数におけるX軸方向およびY軸方向の振れの測定結果を図6に示す。X方向の振れ幅は 11000 min^{-1} において最大となり $34.21 \mu\text{m}$ であった。Y方向の振れ幅は 13000 min^{-1} において最大となり $8.98 \mu\text{m}$ であった。主軸の暖機状態等により振れの状況は一定でないことが想定されるが、光学式変位計と渦電流式変位計による振れの測定結果は同様な傾向であった。

これらの測定結果から、各回転数における主軸の動的振れ特性を把握することは、加工面品質の管理や工作機械主軸の負担軽減に対して重要であることが分かった。

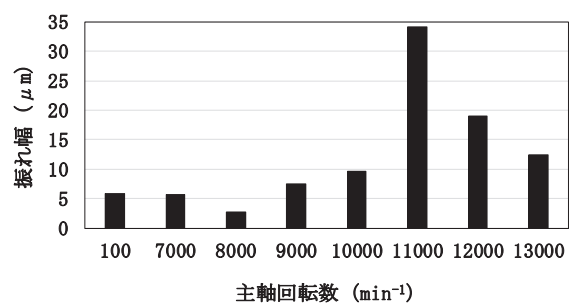


(a) X方向

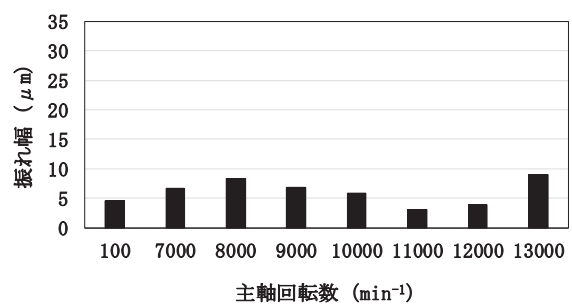


(b) Y方向

図5 光学式変位計による変位出力



(a) X方向



(b) Y方向

図6 各回転数における振れ幅 (光学式)

4. 主軸の振れ特性が表面粗さに及ぼす影響

4. 1 実験方法

主軸の動的振れには異方性があること、また、回転数により振れ方が変化していくことが確認された。これらの特性が加工面の表面粗さに及ぼす影響を確認するために加工実験を実施した。

図7に示すとおり、スクエアエンドミルによる側面加工を45°刻みで実施し加工面の表面粗さを評価した。実験条件を表2に示す。

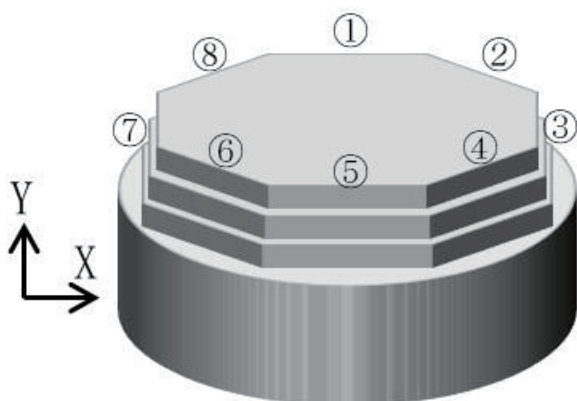


図7 加工実験図

表2 実験条件

工具	三菱マテリアル(株) C-2SS φ6.0 2枚刃
ホルダ	大昭和精機(株) MEGA13E-105
工具突出し	18 mm (先端振れ1.0 μm以内)
被削材	A2014
主軸回転数	7000 min ⁻¹ , 9000 min ⁻¹ , 11000 min ⁻¹
送り量	0.15 mm/tooth
軸方向切込み	5.0 mm
径方向切込み	0.15 mm

4. 2 実験結果

表面粗さの測定結果を図8に示す。各回転数において対向する加工面の表面粗さを比較した場合、同様な傾向になっており、半数の条件でRzの差は0.1 μm以下に抑えられていた。また、X方向とY方向の振れ幅の差が顕著であった11000 min⁻¹の条件において、Rzの最大値と最小値の差が最も大きく現れ、2.89 μmであった。これらの結果により、主軸の動的振れ特性は加工面に影響を及ぼしていると言える。

11000 min⁻¹の条件において、測定位置③もしくは⑦ではなく、④のRzが最大値となったことについては、

主軸のオリエンテーション位置に対する工具切れ刃の取り付け位相が影響していると考えられる。

5軸制御マシニングセンタにおけるブレード加工においては、加工対象のブレード形状と工作機械傾斜軸の方向に合せ、動的振れの異方性と工具切れ刃の取り付け位相を管理することが重要であると考えられる。

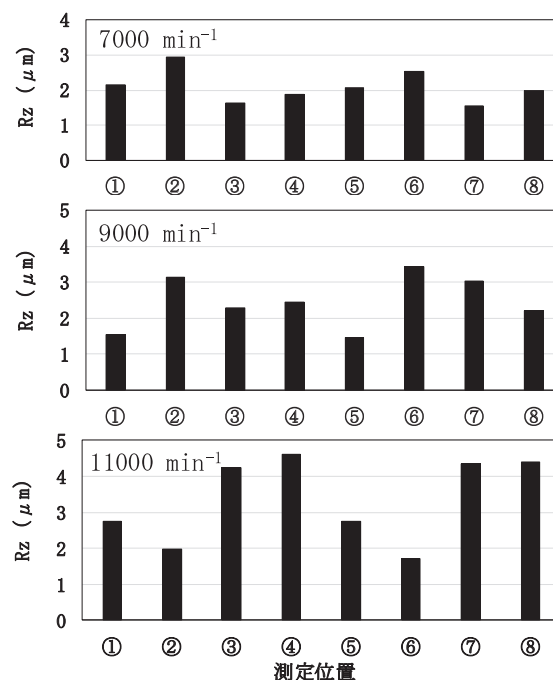


図8 表面粗さ

5. 結言

工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 渦電流式変位計および光学式変位計を用いて、主軸の動的振れ特性（異方性および回転数依存）を評価することができた。
- 2) 主軸の動的振れ特性が加工面に及ぼす影響を確認した。

参考文献

- [1] 福田、瀧内、三木：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 49, pp. 1-5, 2020.
- [2] 福田、瀧内、三木：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 50, pp. 1-4, 2021.
- [3] 福田、瀧内、三木、小林、荒井、佐藤、水野：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 1-5, 2022.