

大径内面研削技術開発に関する研究

安達 和彦

大久保 元博（大久保精工株式会社）

本研究課題では内面研削技術の確立を目指し、①スピンドル開発、②ホイールアーバ開発、③特性評価技術開発の三つの研究課題の内、③特性評価技術開発をターゲットとした。ホイールアーバ式内面研削スピンドルユニットを試運転台上で無負荷運転（停止→昇速→最高回転数→降速→停止）を行い、ホイールアーバ先端振れを静電容量型変位センサおよび渦電流型変位センサでそれぞれ実測評価したので報告する。

1. はじめに

著者らは内面研削技術の確立を目指し、①スピンドル開発、②ホイールアーバ開発、③特性評価技術開発の三つの研究課題に対して2019年度から順次取り組んできた。研究課題「①スピンドル開発」と「②ホイールアーバ開発」の成果として、2021年度にBT50のホイールアーバ式内面研削スピンドルユニット（外観を図1に諸元を表1に示す、以下「開発品」と表記）が共同研究先（大久保精工株式会社）で完成した^{1a, 1b}。

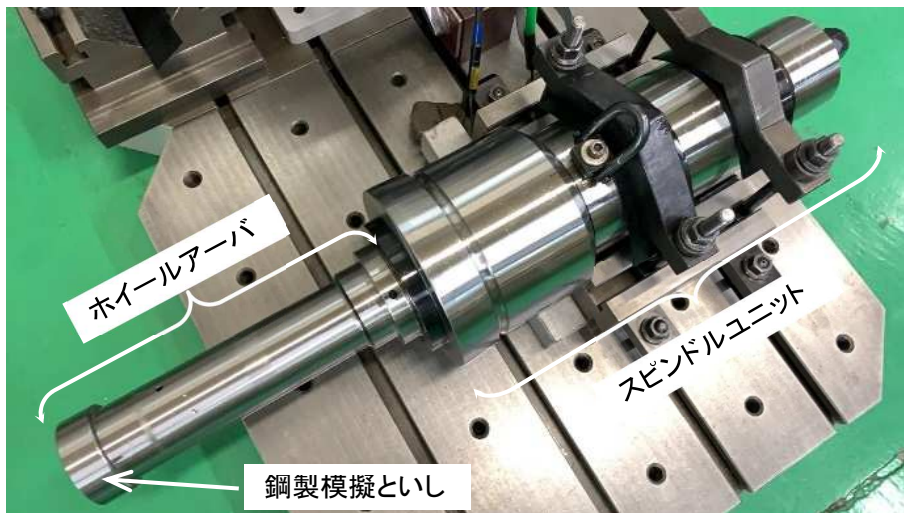


図1 スピンドルユニット外観（試運転台上）

表1 スピンドルユニット代表諸元

型式	1207BT
ユニット全長	約 500 mm（ホイールアーバを除く）
胴径	120 mm
駆動方式	ベルト駆動
最高回転数	7,000 min ⁻¹
インターフェース	BT50
ホイールアーバ	中実タイプ、L220 mm×D60 mm（といしを除く）
重量	約 48 kg（ホイールアーバおよび模擬といしを含む）

2022年度に開発品の試運転台上での無負荷運転特性を実測評価した²⁾。そこでは渦電流型変位センサを用いてホイールアーバ先端に取り付けた鋼製模擬といし(図1)の振れを測定した。渦電流式変位センサによる変位測定では、測定対象の残留磁気等の電磁特性による Electrical Runout の影響を受けるが、振動数成分の同定については回転同期成分/非同期成分等の分離技術により Electrical Runout と推定される成分が検出できる。一方で、渦電流型変位センサでは運転回転数でのホイールアーバ先端(今回の場合は模擬といし)の回転振れの定量評価が困難となる。文献3)ではスピンドルに取り付けた3種類の金属製ターゲット(アルミ合金, チタン合金, 炭素鋼)の回転振れを容量型変位センサと誘導型変位センサで測定した結果の一例を図示している。炭素鋼製ターゲットの回転振れ測定において、誘導型変位センサの測定データが Electrical Runout の影響を非常に強く受けることを指摘している。

以上の経緯からホイールアーバ先端の「動的回転振れの定量評価」実現のため、2023年度は静電容量型変位センサを導入し、静電容量型変位センサと渦電流型変位センサでそれぞれ実測した回転振れを比較することで、静電容量型変位センサによる測定の優位性を検証する。以下、第2章では試運転台上での無負荷運転でのホイールアーバ先端(模擬といし)の振れ測定方法を述べ、第3章では測定結果を示し考察を行う。第4章は本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2. ホイールアーバ先端(模擬といし)の振れ測定方法

開発品は試運転台上に設置し、模擬といし部に振れ測定用のセンサを固定するリング状の治具を配置する。図2にリング状の治具の配置状況を示し、図3にリング状治具への静電容量型変位センサ(LION PRECISION 製, プローブ: C8-2.0, ドライバ: CPL190)と渦電流型変位センサ(KEYENCE 製, プローブ: EX-110V, ドライバ: EX-02)の取り付け状況の詳細を示す。図3で示すように、静電容量型変位センサと渦電流型変位センサが模擬といしを中心に対向する位置に配置でき、かつそれぞれのセンサがホイールアーバの回転軸に対して直交する二軸方向の振れが測定できるように取り付けた。便宜上、図3に示すようにホイールアーバの回転軸に対して直交する二軸をそれぞれ X 軸と Y 軸とした。

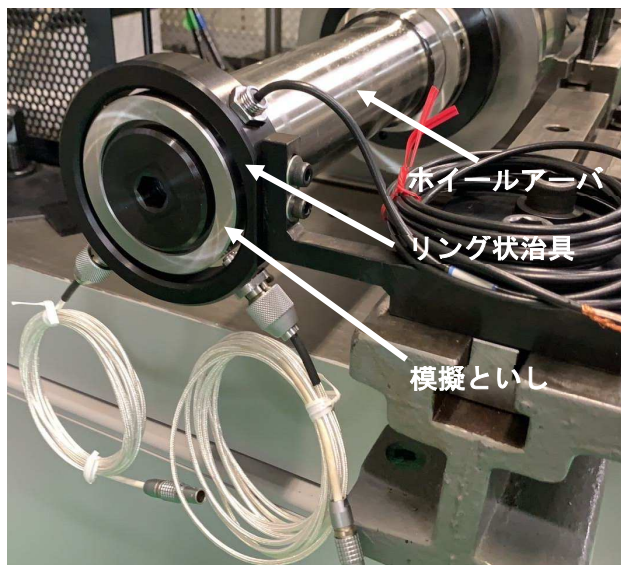


図2 リング状の治具の配置状況

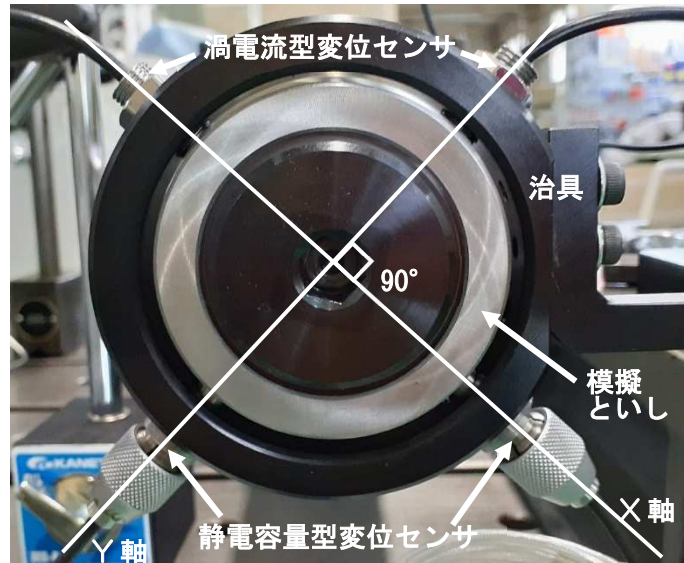


図3 リング状治具への静電容量型変位センサと渦電流型変位センサの取り付け状況

模擬といしの振れ測定は、手動の速度制御により開発品を回転させ、「停止→昇速→最高回転数→降速→停止」の運転パターンで測定する。開発品の回転数は、ホイールアーバロ元に貼付したマーカーがアーバの回転によって渦電流型変位センサ（回転数測定用）を通過する際に生じるパルス状の信号（以下「回転同期パルス」と表記）を検出し、単位時間あたりのパルス数から計算する。

3. 結果と考察

3.1 振れ測定結果

ホイールアーバ先端の模擬といし部分で Y 軸方向（図3参照）の変位（回転振れ）の時刻歴波形を回転数の時間変化と重ねて図4に示す。図4では、上の図が静電容量型変位センサの測定結果を、下の図が渦電流型変位センサの測定結果を、両図に重ねて示した赤線が回転数の時間変化を、それぞれ示す。

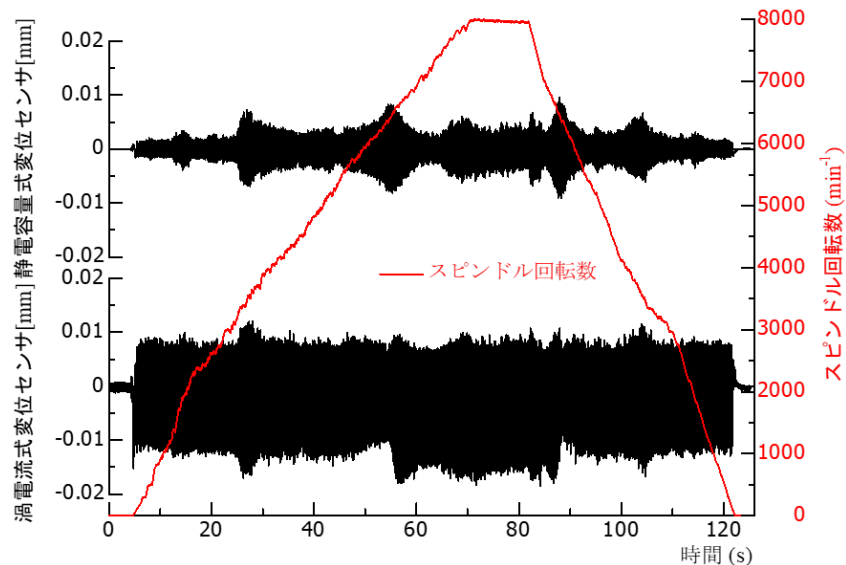


図4 模擬といし部分での Y 軸方向の変位（回転振れ）の時刻歴波形および回転数の時間変化

図4では回転数の変化に対する振れの振幅変化がセンサの種類によって異なることが観察できるが、1回転あたりの変位(回転振れ)の状況が観察できない。そこで、図5に低速回転数(約 920 min^{-1})での回転同期パルス(上)、静電容量型変位センサの測定波形(中)、渦電流型変位センサの測定波形(下)を示す。同様に最高回転数(約 $7,990\text{ min}^{-1}$)での測定波形を図6に示す。

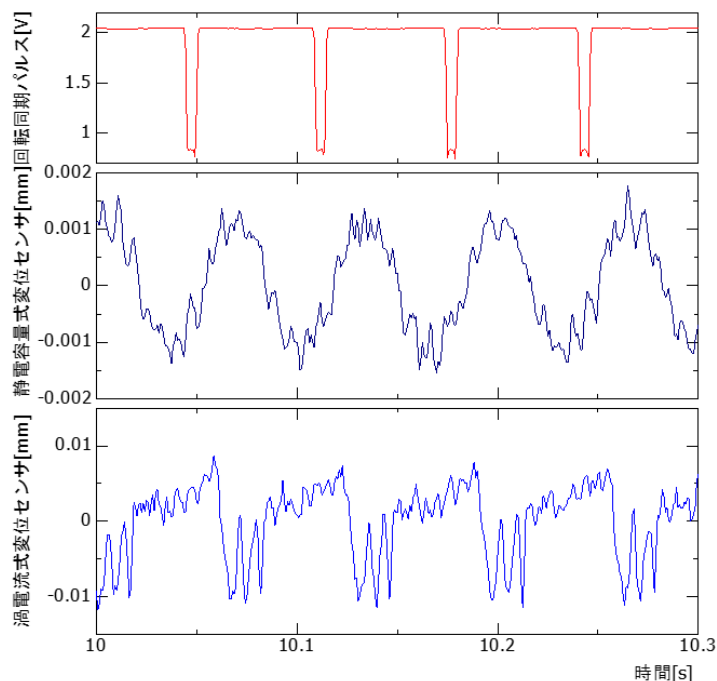


図5 低速回転数(約 920 min^{-1})での回転同期パルス(上)、静電容量型変位センサの測定波形(中)、渦電流型変位センサの測定波形(下)

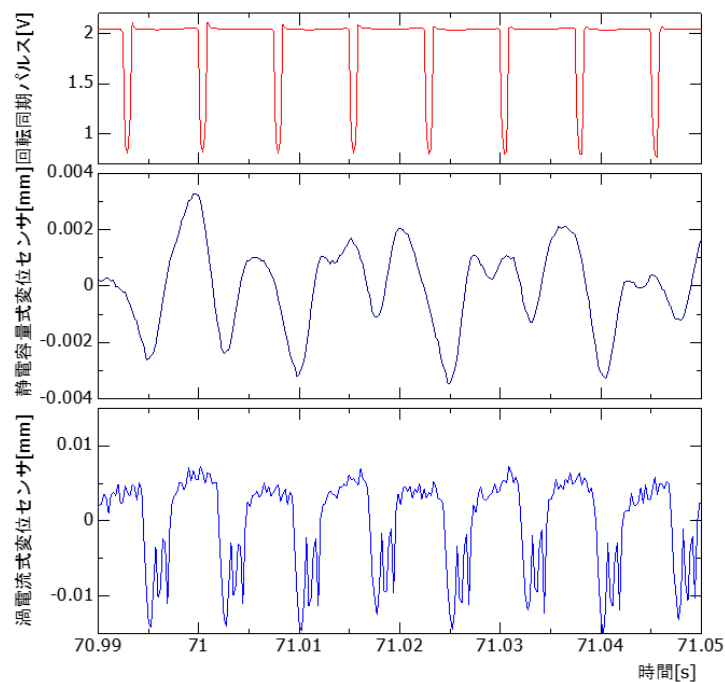


図6 最高回転数(約 $7,990\text{ min}^{-1}$)での回転同期パルス(上)、静電容量型変位センサの測定波形(中)、渦電流型変位センサの測定波形(下)

3.2 振れ測定結果に対する考察

図4から、静電容量型変位センサで測定した変位（回転振れ）は、回転数に応じて変位振幅が変化し、試運転台上での開発品の固定の仕方に起因する剛体モード他の共振特性を測定できていると考えられる。一方、渦電流型変位センサで測定した変位（回転振れ）は回転数によらず概ね一定となり、2022年度の測定結果²⁾の再現性が確認できた。2022年度の無負荷運転試験では、試運転台上での開発品の固定の仕方に起因する剛体モード（約50 Hzおよび約100 Hz）が生じることが明らかになっている²⁾。これらの剛体モードに近い回転数において静電容量型変位センサで測定した変位（回転振れ）振幅が極大化する様子が図4において観察されることから、静電容量型変位センサは実際の変位（回転振れ）を測定できているものと推定される。

次に開発品の1回転あたりの変位（回転振れ）の状況について図5と図6を比較して考察する。図5と図6で上の図は回転同期パルスの時刻歴波形を示し、ホイールアーバ上のマーカが回転数測定用の渦電流型変位センサを通過する都度センサ出力電圧立ち下がる。図5と図6で中央の図が静電容量型変位センサの測定波形を示し、下の図が渦電流型変位センサの測定波形を示す。

図5は開発品が約920 min⁻¹の低速で回転している時点での測定波形を示す。図5の時間軸で約10.05秒から約10.25秒の約0.2秒間にホイールアーバが3回転し、3回転分の変位（回転振れ）がそれぞれ静電容量型変位センサと渦電流型変位センサで測定され、図5の中央の図と下の図に示す。静電容量型変位センサと渦電流型変位センサのどちらの測定波形もホイールアーバの回転に同期した波形を示す。静電容量型変位センサの測定波形は、高調波成分が含まれているものの、回転体の不釣り合い応答に特有の正弦波状の波形となる。しかし、渦電流型変位センサの測定波形は正弦波状の波形と異なって歪んだ波形となり、かつ1回転につき特定の位置で負の変位方向に3波生じる。

図6は開発品が約7,990 min⁻¹の最高回転数で回転している時点での測定波形を示す。図6の時間軸で約70.9925秒から約71.045秒の約0.0525秒間にホイールアーバが7回転し、7回転分の変位（回転振れ）がそれぞれ静電容量型変位センサと渦電流型変位センサで測定され、図6の中央の図と下の図に示す。静電容量型変位センサと渦電流型変位センサのどちらの測定波形もホイールアーバの回転に同期した波形を示す。静電容量型変位センサの測定波形は、図5に示した低速での回転時の波形に比べると1回転毎に波形が変動し、正弦波状の波形からやや歪んでいる。さらに、回転同期パルスとの関係から、図6に示す最高回転数での回転時の波形は、図5に示した低速での回転時の波形と比べて位相が逆転していると考えられる。静電容量型変位センサの測定波形について、最高回転数での回転時に波形の位相が逆転する原因については現時点では不明である。図4の各時刻で回転同期パルスと静電容量型変位センサの測定波形を調査する必要がある。渦電流型変位センサの測定波形は図5に示した低速での回転時の波形と似た波形となり、1回転につき特定の位置で負の変位方向に3波生じる状況も同様である。また、回転同期パルスとの関係から、図6に示す最高回転数での回転時の波形は、図5に示した低速での回転時の波形と同じ位相となる。

図5と図6の渦電流型変位センサの測定波形では1回転につき特定の位置で負の変位方向に3波生じたので、模擬といし外形真円度を測定した。外形真円度は、小坂研究所製 Roncorder EC1600W（測定ソフトウェア：ERG11 Ver.1.07.24）で測定した。外形真円度の測定状況を図7に、測定結果を図8にそれぞれ示す。測定結果は1.77 μmで、渦電流型変位センサの測定波形に現れる3波に対応する凹凸形状は図8に示すように測定されなかった。このことから、渦電流型変位センサの測定波形に現れる3波は模擬といし自体が有する Electrical Runout の影響と考えられる。



図7 模擬といしの外形真円度の測定状況

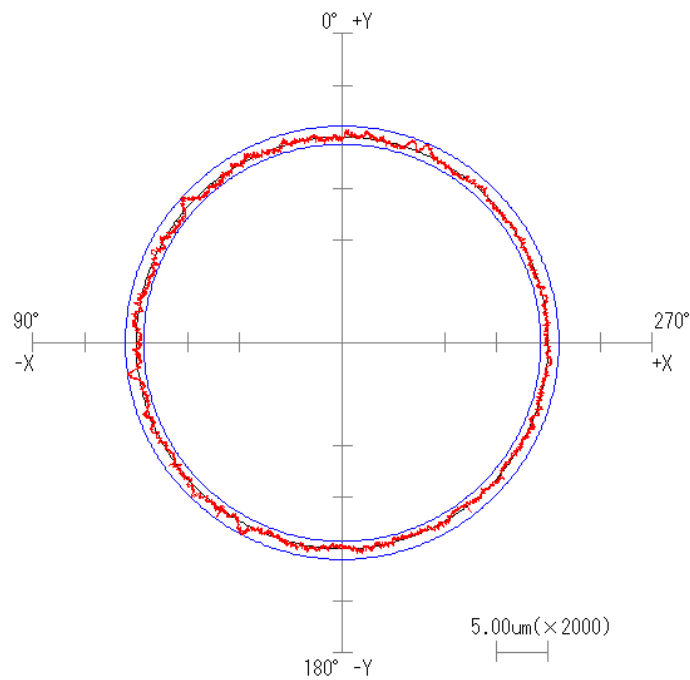


図8 模擬といしの外形真円度の測定結果

3.3 振れ測定データの周波数分析

静電容量型変位センサと渦電流型変位センサでそれぞれ測定した変位（回転振れ）データを周波数分析器に読み込み、横軸：回転数／縦軸：周波数成分のカラーコンター図を作成し、図9と図10に示す。図9が静電容量型変位センサの測定データに対する分析結果で、図10が渦電流型変位センサの測定データに対する分析結果となる。両者を比較すると、図9の方が図10に比べて回転数の高調波成分（回転数の3倍、4倍、5倍、…）が低減されていることが観察できる。このことは、静電容量型変位センサの方が渦電流型変位センサに比べて模擬といし自体が有する Electrical Runout の影響を受け難いことに整合する。

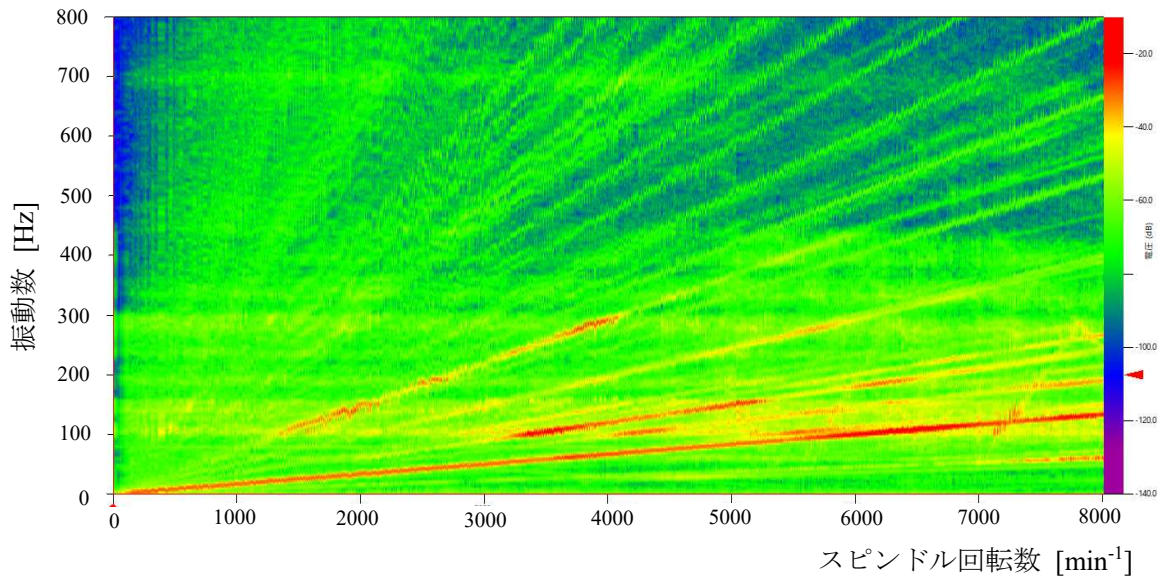


図 9 静電容量型変位センサの測定データに対する分析結果

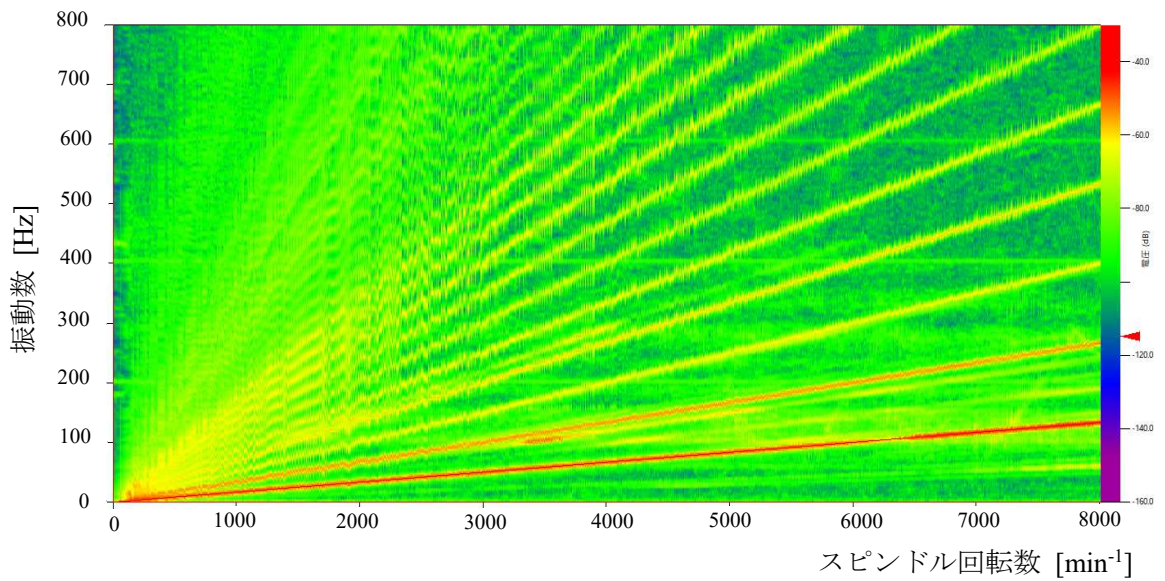


図 10 渦電流型変位センサの測定データに対する分析結果

4. おわりに

本研究課題では、静電容量型変位センサを導入し、静電容量型変位センサと渦電流型変位センサでそれぞれ実測した変位（回転振れ）を比較した。その結果、静電容量型変位センサと渦電流型変位センサのどちらの測定においてもホイールアーバの回転に同期した変位を測定できることが確認できた。静電容量型変位センサは渦電流型変位センサに比べて測定対象（模擬といし）の Electrical Runout の影響を受け難いことが確認できた。しかし、今回の測定では、静電容量型変位センサを用いた場合、低速回転時と最高回転数での回転時で測定波形の位相が逆転していることが、位相逆転の原因が不明である。本研究課題の総括として、静電容量型変位センサでの測定の優位性が確認で

きた。今後、静電容量型変位センサでの測定における低速回転時と最高回転数での回転時で測定波形の位相逆転の原因を特定し、ホイールアーバ先端の「動的回転振れの定量評価」実現を目指す。

参考文献

- 1a) 安達和彦, 大久保信雄, 大久保元博, 向井良平, 高橋宏美: 大径内面研削用ホイールアーバタイプ内面研削スピンドルユニットの開発, IMEC2022(第 19 回国際工作機械技術者会議)論文集, A-3, (2022) p.6.
- 1b) K.Adachi, N.Ohkubo, M.Ohkubo, R.Mukai, and H.Takahashi: Development of a novel quill-type internal grinding spindle unit for large-diameter internal grinding, Proceedings of IMEC2022 (The 19th International Machine Tool Engineers' Conference), A-3, (2022) p.7.清水伸二: 新版 初歩から学ぶ工作機械, 大河出版, (2011) 135.
- 2) 安達和彦, 大久保信雄, 大久保元博, 向井良平, 高橋宏美: 長尺内面研削スピンドルの開発に関する研究(第 12 報: 大径内面研削用ホイールアーバ式内面研削スピンドルの開発), 2022 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2022)講演論文集, D05, (2022) 219-222.
- 3) B.Knapp, D.Arneseon and D.Martin, Electrical runout using an eddy-current sensor for roundness measurements, Proc. of the 28th Meeting of the American Society for Precision Engineering, (2013).