

静圧空気軸受における回転誤差と軸形状 －マルチステップ法の実用化に向けた評価法の確立－

Profile of Spindle and Run-out of Aero Static Bearing - Evaluation method for the practical use of Multi-step Method -

富田 宏貴¹⁾, 小泉 孝一²⁾

Hiroataka Tomita¹⁾, Kouichi Koizumi²⁾

Abstract : This paper examine a practical method necessary to measure the run-out of the aero static bearing by multi-step method. It is impossible for reasons of the bearing structure to measure the run-out of the aero static bearing directly. Therefore multi-step method is used. The construction of measurement system and evaluation method are necessary to practically use multi-step method. In this study, examined an original evaluation method experimentally. As a result, high-precision measurement of the run-out became possible. In addition, We clarified the most suitable parameter (Number of step) in multi-step method.

Keywords : Aero static bearing, Multi-step method, Run-out , Measurement accuracy

1. 緒言

精密加工機や測定機の回転案内運動機構として用いられる静圧空気軸受には高度な「剛性」「負荷容量」「運動精度」が必要となる。運動精度は軸受部品の加工精度が影響することが経験上知られているが、両者の因果関係を定量的に実証した例は少なく、現場技術者の技能に依存した部品加工が行われているのが現状であり、剛性や負荷容量とは異なり明確な設計指針が確立されていない。

軸受の生産性を高める上で目標の運動精度を満足する軸受部品の精度設計の確立が必要であり、本研究はこれまでに軸部品形状と軸受の運動精度との因果関係を実験と解析から定量的に明らかにした¹⁾²⁾。研究成果の実用化に向けた次の取り組みとして軸受性能の高度化と、それに伴う高精度な運動精度測定法の確立を検討する。

図1に自成絞り形式静圧空気軸受の構造を示し、表1には軸受の仕様を示す。図1に示す軸受構造は主に真円度測定機の回転テーブルとして用いられる。真円度測定機の測定精度は回転テーブルの回転運動精度が直接影響するため、回転テーブルを構成する静圧空気軸受の運動精度検証が必要となる。

軸受の運動精度を評価するためには軸受内で軸が回転運動する際に生じる軸心の振り回り（以下、回転誤差と称す）を高精度に測定する必要がある。

図1に示す軸受構造の場合は回転誤差を直接測定出来ないため、仕上げ精度の高い基準物を回転軸の軸心に合わせ設置し、基準物の外周を測定することで間接的に回転誤差を測定する方法がある。

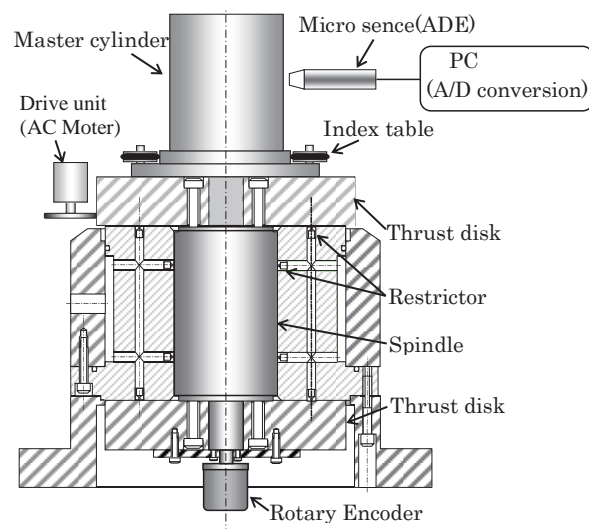


図1 自成絞り形式静圧空気軸受の構造

表1 自成絞り形式静圧空気軸受の仕様

Radial bearing		Thrust bearing	
Number of inherent orifice restrictor	2×12	Number of inherent orifice restrictor	12
Clearance	10μm	Clearance	20μm
Diameter of inherent orifice restrictor	0.2mm	Diameter of inherent orifice restrictor	0.25mm
Load capacity	309.7N	Load capacity	1862.0N
Stiffness	77.4N/μm	Stiffness	190 N/μm

測定値には回転誤差と基準物の形状誤差が含まれるため測定値から形状誤差を分離する必要があり、有効な手法としてマルチステップ法³⁾がある。

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 医療福祉工学コース ²⁾株式会社ナガセインテグレックス

マルチステップ法は真円度測定機の精度検証にも利用され原理的にも優れた既存の手法であるが、生産現場で運用するために必要な具体的資料はまだ少ない。マルチステップ法を実際に運用するには測定装置の構築や測定条件の最適パラメータの割り出し、数値演算用ソフトの作成、測定結果の評価方法などについて十分に検討する必要がある。

本報告では表1に示す自成形り形式静圧空気軸受を実機としてマルチステップ法の実用化に向けた評価法の確立を目的とした実験的検討を実施し、その成果として高精度に測定された回転誤差の結果について報告する。

2. マルチステップ法の測定原理と実施方法

マルチステップ法の測定原理は、回転軸の軸心上に設置した基準物の角度位相を等角度で位置決めしながら繰り返し測定し得られた測定値を数値演算することで基準物の形状誤差を数値的にキャンセルし回転誤差を求める方法である。

基準物の角度位相の大きさはマルチステップ法における測定条件のパラメータであり、目標とする測定精度に合わせて適切に設定する必要がある。角度位相の設定は機械式に行うため、位置決め機構を測定装置に組み込む。

図2(a)に本研究で開発した回転誤差測定装置を示す。スラスト板上にインデックステーブルをボルトで締結固定し、その上に基準物を設置することでマルチステップ法を実施する。インデックステーブルは直径の異なる2枚の円板で構成され、二つの調整ツマミを同時に回すと基準物を載せている側の円板が回転し、基準物の角度位相を変えることが出来る。角度位相の設定は、基準物上に固定された角度スケールの目盛と指針で合わせる。

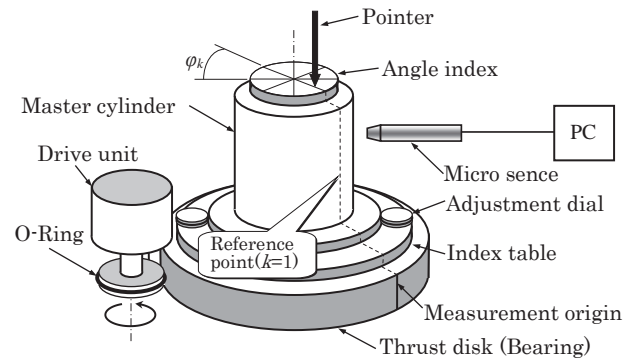
角度位相を φ_k とし、 φ_k の大きさはステップ数 $k=2m$ で決定する。 φ_k は基準物の円周をステップ数 $k=2m$ で等分割した時の角度となり次式で表される。

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{2m}(k-1) = \frac{\pi}{m}(k-1) \quad (k=1, \dots, 2m \text{ } m:\text{整数}) \quad (1)$$

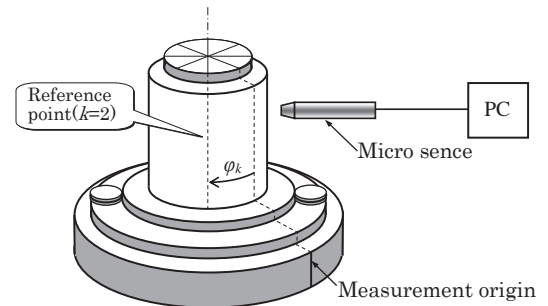
図2を用いて測定手順を説明する。図2(a)は最初の測定時($k=1$)を示し、測定開始点と基準物の基準点を一致させて行う。

この時の角度位相 φ_1 は初期状態の0である。この状態で軸受を回転させ、軸受一回転分の測定値を取得する。測定開始点は軸受の軸心直下に取り付けたロータリエンコーダのトリガー信号を用い、軸受の回転に対して常に同じタイミングで測定開始する位置に設定している。

軸受自体には回転駆動の機能がないため、スラスト板の側面に駆動ユニットを配置している。駆動ユニットには 3min^{-1} のACシンクロモーターを用い、モーターのドライブ



(a) $k=1$ における測定



(b) $k=2$ における測定

図2 マルチステップ法の測定原理

シャフトにOリングを嵌めたプーリーをスラスト板の側面に軽く押し当て、摩擦駆動で軸受を回転させる。

図2(b)は $k=2$ における測定時を示す。式(1)で $k=2$ とし、 φ_2 だけ基準物をインデックステーブルで回転移動させる。この状態で最初の測定時と同様の測定を行う。

測定開始点および変位計の位置は常に変わらないため、 $k=2$ の測定値には $k=1$ で取得した測定値に対して、基準物の形状誤差が φ_2 の位相差で含まれることになる。 $k=3$ 以降も同様の手順で $k=2m$ まで測定を繰り返す。

軸受の回転誤差を $E(\theta)$ 、基準物の形状誤差を $F(\theta)$ とすると、両者はそれぞれ始点と終点が一致する周期関数とみなすことが出来るため式(2)および式(3)のフーリエ級数で表せる。

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{C_n \cos(n\theta) + D_n \sin(n\theta)\} \quad (\theta=0 \sim 2\pi) \quad (2)$$

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)\} \quad (\theta=0 \sim 2\pi) \quad (3)$$

測定直後の測定値 $S_k(\theta)$ には、回転誤差 $E(\theta)$ と基準物の形状誤差 $F(\theta)$ が同時に含まれる。回転誤差 $E(\theta)$ に対して基準物の位置関係は角度位相 φ_k により位相が変わることから $S_k(\theta)$ は式(4)と表せる。

$$S_k(\theta) = E(\theta) + F(\theta - \varphi_k) \quad (\theta = 0 \sim 2\pi), (k = 1 \sim 2m) \quad (4)$$

測定はステップ数 $k=2m$ まで行い、 $2m$ 回分の測定値 $S_k(\theta)$ の平均値を求めると次式で表せる。

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{2m} S_k(\theta) &= \sum_{k=1}^{2m} E(\theta) + \sum_{k=1}^{2m} F(\theta - \varphi_k) \\ &= 2mE(\theta) + \sum_{k=1}^{2m} F(\theta - \varphi_k) \quad (\theta = 0 \sim 2\pi) \end{aligned} \quad (5)$$

したがって回転誤差 $E(\theta)$ は式(6)で算出できる。

$$E(\theta) = \frac{1}{2m} \left\{ \sum_{k=1}^{2m} S_k(\theta) - \sum_{k=1}^{2m} F(\theta - \varphi_k) \right\} \quad (\theta = 0 \sim 2\pi) \quad (6)$$

式(6)右辺第2項により基準物の形状誤差 $F(\theta)$ は平均化効果で数値的にキャンセルされ 0 に近づくことで回転誤差 $E(\theta)$ が求められる。

3. 系統的誤差の低減対策

3.1 測定環境における温度変化の低減

静圧空気軸受の回転誤差はナノメートルオーダーとなるため測定時に含まれる系統的誤差の低減対策を行う。

温度変化による測定値への影響を抑えるため実験は全て恒温室内で実施した。

測定で使用する基準物の材質が金属製（ステンレス鋼：SUS420J2，熱膨張係数 $\alpha = 10.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）であることを考慮すると温度変化により基準物が熱膨張し測定誤差が生じる可能性があり，測定時の温度変化を抑える必要がある。また，これまでの実験において恒温室内の空調機器から排出される空気流動が変位計に触れると測定値へ僅かに影響することが確認されたためサーマルチャンバーを独自製作し，サーマルチャンバー内に測定装置を設置し実験を行った。

図3に恒温室内に設置されたサーマルチャンバーを示す。測定装置は剛性の高い大型の定盤上に設置し，床からの振動を極力抑えている。サーマルチャンバーの骨組みは定盤全体を囲う様にアングル材でフレーム枠を作り，フレームの各面に耐電性ビニールシートを貼り付けている。

図4にサーマルチャンバー内部および外部の温度変化をデジタル温度計で測定した結果を示す。測定は同時刻開始で得られた30分間の測定結果を示す。この時の恒温室内は 23°C で温度制御している。測定結果によるとサーマルチャンバーの内部と外部では平均値で 0.67°C の違いが表れている。時間を追う毎の温度変化はチャンバー内部の方が少ないことが分かる。30分間の温度変化は 0.13°C に抑えられた。

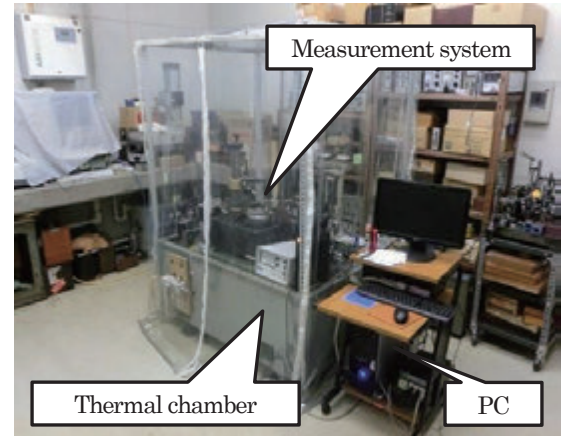


図3 サーマルチャンバー

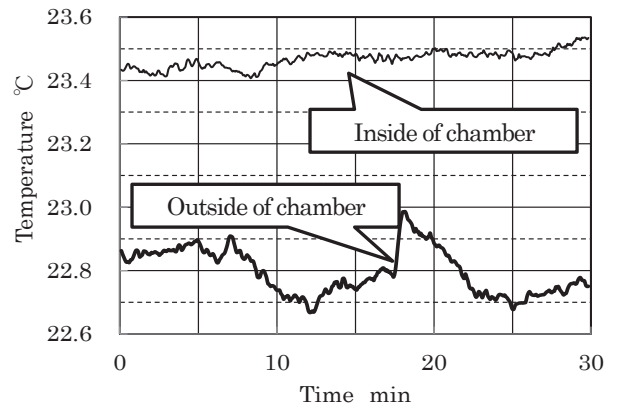


図4 サーマルチャンバー内部および外部の温度変化

直径 $\phi 60$ の基準物について温度変化による直径方向の寸法変化量を算出すると，サーマルチャンバー内の温度変化 0.13°C では $0.08 \mu\text{m}$ と微量となる。

軸受一回転分の回転誤差に要する計測時間は20秒から30秒であり，実際の温度変化による変化量は算出値の1/10以下となることから測定値へ与える影響は更に小さくなる。

なお，恒温室内は人が長時間滞在すると温度変化を生じるため，基準物の角度位相を設定する際の作業以外は室外に退避し，同室内に設置されている測定用端末機の場合は室外の別端末機からネットワーク経由でリモート操作している。

3.2 測定機器の精度検証

本実験では静電容量型変位計（マイクロセンス：分解能 10nm ，ADE社製）を使用し，正確な測定値を得るために初期ドリフトの時間を事前調査した。変位計の出力値は $\pm 10\text{V}/\pm 25 \mu\text{m}$ （フルスケール）となっている。

変位計の電源投入後にゼロ点調節し、そのまま 3 時間放置した状態で電圧変化を測定した。測定は 5 日間において同時刻で測定し、統計データから測定機器が安定するまでの所要時間を算出した。

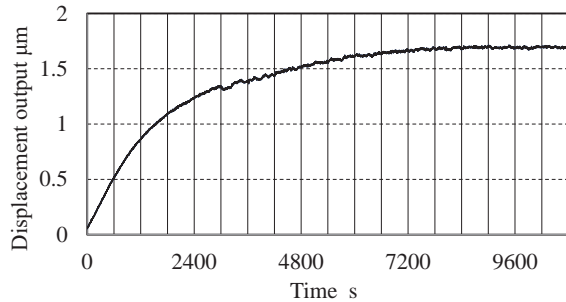


図 5 変位計の初期ドリフト

図 5 は恒温室内のサーマルチャンバー内部に設置した変位計の初期ドリフトを示す。

データは 5 日間の平均値となっている。変位計の電源投入から 3 時間経過する間に $1.7\mu\text{m}$ 程度まで変化していることが分かる。

図 5 に示す波形を 1 次遅れ系とした近似式を求め、定常状態になるまでの時間を定量的に求めた。算出した結果、変位計を起動してから 3 時間後に測定を始めることで初期ドリフトによる影響は無視できるものとした。

4. 実験方法

本実験で用いる自成絞り形式静圧空気軸受の動作条件は真円度測定機相当とし、軸受への供給圧力を 0.6MPa 、軸の回転数は 3min^{-1} とした。

回転誤差のサンプリング数は軸受直下に設置したロータリーエンコーダにより軸一回転につき 2048 点とした。変位計から出力されるアナログ電圧は AD 変換器（分解能 16bit、フルスケール 10V）を介して PC へ取り込みデジタルデータ化している。

軸の回転数 3min^{-1} に対し変位計の応答周波数は 100kHz 、AD 変換器のサンプリングレートは $2\mu\text{sec}$ あるため、データ 1 点当たりの時間分解能は十分な速度となっている。なお、AD 変換器の分解能と変位計の出力電圧 ($2.5\mu\text{m/V}$) から 1bit 当たりの量子化誤差を算出すると 0.38nm となり測定値に含まれる。これに加えて測定値には変位計のノイズを含む測定系ノイズのほか、軸受内における加圧空気の僅かな圧力変動や流れ変動等による作動系ノイズが含まれる。

与えられた測定環境から不規則に発生するノイズに考慮し、ステップ k 毎に軸受を連続で 10 回転させた時の回転誤差を測定した。測定直後の測定データは JIS（真円度測定機）⁴⁾を参考に本研究室で作成したガウシアンフィルタ ⁵⁾を用いて 50UPR（Undulation per revolution：1 周当たりの山数）のカットオフ値でノイズ除去した。山数は軸受一回転分の

回転誤差を波形に置き換えた場合の波形の凹凸数を表しており信号処理では周波数に相当する。

ステップ k 毎に測定した 10 回転分のデータ $S_k(\theta)$ を一度に平均するとデータの平滑化により回転誤差の情報が失われる可能性があるため、回転誤差を算出する式(6)で演算する前に 1 回転目の測定データ $S_{k1}(\theta)$ 、2 回転目の測定データ $S_{k2}(\theta)$ 、・・・10 回転目の測定データ $S_{k10}(\theta)$ とに分け、周回毎の回転誤差を式(6)で演算する。周回数を i 、周回毎の回転誤差を $E_i(\theta)$ とし以下の式から求める。

$$E_i(\theta) = \frac{1}{2m} \left\{ \sum_{k=1}^{2m} S_{ki}(\theta) \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (\theta = 0 \sim 2\pi) \quad (7)$$

各 $E_i(\theta)$ を計算した後に平均して得られた回転誤差 $E_{ave}(\theta)$ を最終的な評価とした。計算式は以下となる。

$$E_{ave}(\theta) = \frac{1}{10} \left\{ \sum_{i=1}^{10} E_i(\theta) \right\} \quad (\theta = 0 \sim 2\pi) \quad (8)$$

インデックステーブル上に基準物を設置した際、基準物の軸心が軸受の中心に対して僅かに偏心する。また、インデックステーブル面の僅かな傾きに伴い基準物の設置角度にも傾きが生じる。

測定値には基準物の偏心による正弦波成分と傾きによる楕円成分が含まれる。偏心成分と楕円成分は調和解析により測定値から数値的に除去し、マルチステップの演算からは除外した。

5. 回転誤差の測定結果とマルチステップ法の評価

5.1 回転誤差の測定結果

図 6 にマルチステップ法でステップ数 $k=2m$ を 24 として実施した回転誤差 $E_{ave}(\theta)$ の測定結果を示す。 $2m=24$ の測定では基準物の角度位相 φ_k は 0° 、 15° 、 30° 、 45° ・・・ 345° となり 15° 刻みで位相を変えながら計 24 回の繰り返し測定となる。

測定の再現性を確認するため最初の測定開始日を基準に、数日間の間隔を空けて繰り返し測定した。回転誤差 $E_{ave}(\theta)$ のグラフは視覚的に判別し易くするため基準円に測定値をプロットして表している。回転誤差 $E_{ave}(\theta)$ の定量的な評価はグラフの P_V(Peak to Valley) 値とした。

図 6(a) の初日に測定した結果と図 6(b) の一ヶ月後で測定した回転誤差の結果を比較すると波形の細かな凹凸まで良く一致しており、測定結果の再現性が確認できる。

図 7 に初日、一週間後、二週間後、一ヶ月後の測定で得られた計 4 回の回転誤差を P_V 値で比較する。回転誤差 P_V 値の平均値は 54.4nm となった。

平均値に対して初日の回転誤差 P_V 値は+8.3nm, 二週間目は-3.0nm, 三週間目は-1.0nm, 一ヶ月後は-4.2nm となり平均値の一割程度の誤差内に収まることを確認した。

5.2 ステップ数の違いによる測定結果の比較

マルチステップ法はステップ数を多くして測定すると原理的に回転誤差の測定精度が向上する。一方で、ステップ数を増やすことは作業時間の増大に繋がるため、実際に用いる場合は目標とする測定精度に見合う作業コストを考慮して適切なステップ数を選択する必要がある。

そこで、ステップ数の違いによる回転誤差をシミュレーション解析と実験から検証した。ステップ数 $k=2m$ を 8, 16, 24, 32 の 4 パターンとして実験およびシミュレーション解析を実施した。

本測定装置の精度を更に検証するため、先行研究で試作開発した自成紋形式静圧空気軸受を用いた⁶⁾。試作した空気軸受の構造や各部の寸法は図 1 とほぼ同様であるが、軸受隙間内の圧力分布をより均一化させるため軸受面に配置する自成紋の個数を 24 個に増やしている。

図 8 にマルチステップ法のステップ数の違いによる回転誤差 P_V 値の比較で示す。

実験では各ステップ数で 2 回ずつ実施した結果を示している。シミュレーション解析では基準物の形状誤差および回転誤差を実験値データからモデル化したデータを用いている。

シミュレーション解析結果および実験結果は共にステップ数が増えると回転誤差が小さくなる。ステップ数を増やすことにより基準物の形状誤差のキャンセル率が高まることで、回転誤差をより正確に得ることが出来る。

シミュレーション解析結果と実験値との差については、実験値には環境温度変化や加圧空気の圧力変動などの誤差が混在した繰り返し性の低い成分を含んでいるためである。また、変位計の測定ノイズや零点の揺らぎなども測定値には含まれる。これらの誤差をシミュレーション解析では考慮していないため、実験値との差となって表れている。

実際の測定ではガウシアンフィルタで測定ノイズを処理しているが、実測値で確かめると 10nm 程度の測定ノイズが処理しきれずに残っており、変位計の測定限界を超える測定は出来ないことを確認している⁷⁾。

実際にマルチステップ法を運用すると、変位計の初期ドリフトを抑えるのに必要な時間も含めると測定にはかなりの時間を要する。

作業手順の中にも、基準物をインデックステーブル上で軸受の回転中心に合わせる際は変位計の読み取り値で偏心量を $0.1\mu\text{m}$ 以下にする必要があり熟練度を必要とする。偏心量が大きいと基準物の角度合わせでインデックステーブルを回すと変位計の測定レンジを超えてしまうため、測定前に基準物を載せた状態でインデックステーブルを 360° 回

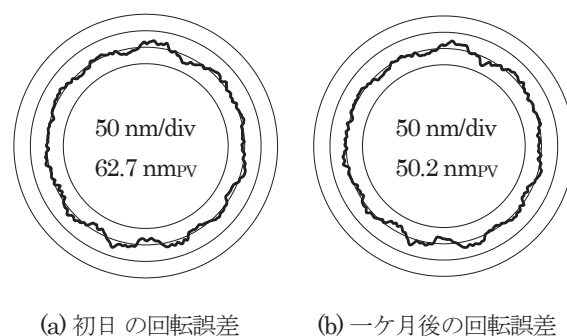


図 6 回転誤差の測定結果 (ステップ数 $k=24$)

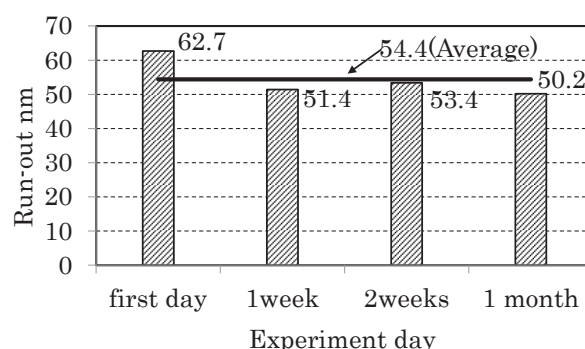


図 7 回転誤差の比較

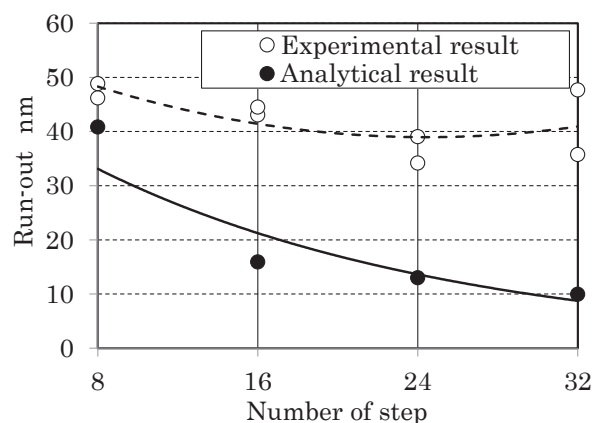


図 8 ステップ数の違いによる回転誤差の比較

し、測定値が常に測定レンジ内に入ることを入念に確認しなくてはならない。

マルチステップ法による測定時間は、作業に慣れた測定者でもステップ数 24 の測定にはトータルで 3 時間程度を要する。ステップ数を増やすと測定時間も比例して増加し、ステップ 32 の測定では半日以上費やすこともあった。ステップ数 32 の測定はシミュレーション解析結果が示すように測定原理上では最も精度が高いが、実際に行ってみると測定時間に見合う測定精度は得られない結果となった。

また、実験でもステップ数 32 では結果が安定せず、繰り返し精度が他のステップ数に比べると低い。測定時間が長くなると、測定環境や測定系を起因とする誤差も累積され、測定精度が安定しなくなると考えられる。

本研究では、測定機に用いられる静圧空気軸受の回転誤差をマルチステップ法で測定する場合、ステップ数 $2m=24$ が最適解であるとの結論に至った。

5.3 静圧空気軸受の回転誤差と軸形状

本実験で得られた回転誤差の測定結果が示す通り静圧空気軸受の回転運動は繰り返し性が高く、回転誤差を低減することが出来れば非常に優れた回転運動が実現可能である。

静圧空気軸受の回転誤差は、軸受隙間内における空気の圧力分布が関係しており、圧力分布が変動すると発生する。

自成絞り形式の静圧空気軸受では、等間隔に配置された複数個の自成絞りにより、主として絞り直下の噴出し圧力で軸を支持している。この時の圧力分布は軸形状に伴う軸受隙間の対称性と均一性に影響する。

自成絞り形式では、対向する絞り直下の軸受隙間が軸形状の僅かな誤差により対称性が失われると、軸受隙間内の圧力に差が生じ、軸はバランスを保とうとするために軸受隙間の狭い方から広い方へ移動する。この時の軸の移動が回転誤差となる。

静圧空気軸受では基本的に軸受隙間内の圧力分布を常に均一に保つことが必要となっており、軸部品における形状精度の維持管理が生産現場では重要な項目となっている。

現場技術者の体験談によれば、研削加工軸の形状が加工の際に劣化した場合でも、ラップ加工を施すことによって回転運動精度が向上すると言われている。これは、軸表面の僅かな凹凸形状がラップ加工により平滑化し、軸受隙間に対称性と均一性が得られ、圧力が平衡したことで回転誤差が低減するためである。

6. 結言

マルチステップ法による静圧空気軸受の回転誤差測定を実用化するため、実機を使用した実験的検討から評価法の確立を行った。得られた成果を以下に示す。

- ・マルチステップ法に必要な基準物の位置決め機構として独自のインデックステーブルを製作し、測定装置の構成方法を示した。本実験装置を用いれば複雑な操作を必要とせず、マルチステップ法の実施が可能である。
- ・測定環境の温度変化による測定値への影響を低減するための対策としてサーマルチャンバーを製作し、温度変化に伴う基準物の変化量を確認した。30 分間における変化量は $0.08\mu\text{m}$ となり、サーマルチャンバーが測定誤差低減に効果的であることを示した。

- ・与えられた測定環境から発生する不規則なノイズに考慮した回転誤差の算出方法を示した。正確な回転誤差測定では各ステップで 10 回転分のデータを取得すれば良く、比較的簡単な演算処理で回転誤差が求められることを示した。

- ・一カ月間における測定実験を実施した結果、回転誤差は平均 54.4nm となり本測定手法では妥当性のある回転誤差データが繰り返し得られることを確認した。実際の測定では測定環境の温度変化や加圧空気の変動等による誤差が複合的に測定値に含まれるが、測定誤差は一割程度に収められることを実験的に明らかにした。

- ・ステップ数の異なる回転誤差測定を実験的に実施した結果、測定精度と作業コストを両立する最適なステップ数について本研究では 24 が最適解であることを示した。

- ・マルチステップ法は複雑な装置を必要とせず変位計 1 台で静圧空気軸受の回転誤差を高精度に測定することが可能である。マルチステップ法は比較的簡単な演算処理で回転誤差の算出が可能であり、ハードとソフトの両面で装置構築がし易く実用性および有効性に優れ、生産現場での運用に適した測定方法であるといえる。

謝辞

本研究に用いた実験用静圧空気軸受およびインデックステーブルの製作にご協力頂いた株式会社三鷹精工 代表取締役社長 山下弘洋氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 富田宏貴：静圧空気軸受の回転誤差に関する研究，博士論文，2010.
- [2] 富田 宏貴，高橋 正明，小泉 孝一：静圧空気軸受の回転誤差に関する研究—軸の半径方向における形状誤差に着目した回転誤差の解析—，精密工学会誌，75-4，pp.525-529，2009.
- [3] 塚田忠夫，金田 徹，笹島和幸，周 文豪：円筒形状測定における系統的誤差の補正とその評価，設計製図，23-9，pp.291-296，1988.
- [4] 真円度測定機，日本規格協会 B 7451，pp.4-6，1997.
- [5] 富田宏貴：精密測定におけるガウシアンフィルタの適用—真円度測定機の場合について—，東京都立航空工業高等専門学校研究紀要，41 号，2003.
- [6] 富田宏貴，小泉孝一：静圧空気軸受の精度設計—自成絞り方式静圧空気軸受の高精度化への実験的検討—，第 35 回数理科学講演会，2016.
- [7] 富田宏貴，小泉孝一：静圧空気軸受の回転誤差—マルチステップ法の測定精度に関する解析的考察—，東京都立産業技術高等専門学校研究紀要，12 号，2018.