

気体軸受を利用した空気搬送用ロータリージョイント

Rotary Joint for Air Transfer Using Gas Bearing

○学 近藤 貴巳^{*1}, 中島 賢治^{*1}

松山 史憲^{*1}, 城野 祐生^{*1}, 小野 文慈^{*2}

Takumi KONDOH^{*1}, Kenji NAKASHIMA^{*1},

Fuminori MATSUYAMA^{*1}, Yuki JOHNO^{*1} and Bunji ONO^{*2}

^{*1} 佐世保工業高等専門学校 National Institute of Technology, Sasebo College

^{*2} 佐賀大学 Saga University

The asymmetric gas bearing is a bearing developed to improve the maintainability of a large vibrator used for ground investigation. We also investigated the vibration characteristics of asymmetric gas bearings and ordinary symmetric gas bearings, and found that the vibration damping performance of asymmetric gas bearings is excellent at about 15 Hz or higher. For this reason, we will apply gas bearing technology to newly design and develop a rotary joint for transporting air, and evaluate its performance. First, a static levitation test was performed without rotation, and the theoretical value and the experimental value were compared. We found that they match quantitatively in the thrust direction and qualitatively in the radial direction. Then, the change in the number of revolutions due to the shaft diameter of the rotor was investigated, and the optimum diameter in the experimental equipment of this study was found. Next, numerical analysis was performed using the DFM (Divergence Formulation method). Here, we confirmed how the pressure distribution changes due to eccentricity.

Key Words : Rotary Joint, Gas Bearing, Air transfer, Asymmetric Gas Bearing, Self-forming Squeezed Shape

1. 緒 言

非対称気体軸受⁽¹⁾、⁽²⁾の高速回転での運転を実現するために必要なロータリージョイントを新規開発する。現在、大型の偏心軸を備えた地盤地質調査を行うためのシステムに用いられる加振機にはボールベアリングが用いられているが、発熱や摩耗によりボールベアリングの交換が必要となっている。ところで、非対称気体軸受は、地盤地質調査に用いる大型の起振機について、そのメンテナンス性を向上するために開発された軸受である。伊勢ら⁽³⁾は、非対称気体軸受と通常の対称気体軸受について振動特性を調査し、約 15 Hz 以上で非対称気体軸受の制振性能が優れることを示した。約 20 Hz までの実験が行われたが、高速回転での運転に対応可能なロータリージョイントが存在しないため、20 Hz 以上の性能評価はできなかった⁽⁴⁾。実際の地盤地質調査では約 200 Hz までの振動が用いられるため、高速回転での運転に対応可能なロータリージョイントの新規開発が必要である。さらに、機械構造物の固有振動数調査へ応用する場合には、約 2 kHz までの振動発生が必要である。そのため、非対称気体軸受を搭載する振動発生器を実用化するためには、高速回転での運転に対応可能なロータリージョイントの新規開発が必要である。

伊勢らは 20Hz までの振動発生機の実験を行い、非対称気体軸受と対称気体軸受の性能を比較した。非対称気体軸受では回転数が 0~15Hz までの範囲では対称軸受と比べてラジアル方向の振幅が大きくなり、回転数が 15Hz を超えると性能が逆転し、ラジアル方向の振幅が小さくなることが分かっている。このことより、非対称気体軸受の性能が対称気体軸受の性能を 15Hz 以上で上回ることが確認された。これらから、非対称気体軸受は、高速回転で運転する際に、既存の対称気体軸受よりも高い性能を示し、地盤地質調査や機械構造物の固有振動数調査に対して有効であることを示した。

本研究の目的は、高速回転に対応可能な気体軸受技術を応用したロータリージョイントを新規に設計・製作し、その性能評価を行うことである。

本報告では、設計理論の簡単な説明と提案するロータリージョイントの構造を紹介し、静止浮上試験と回転浮上試験の実験結果、DF法での数値解析結果について報告する。

2. 提案するロータリージョイントの構造

Fig.1(a)は提案するロータリージョイントの分解図である。赤色の部分はロータを示しており、ロータが気体軸受技術により浮上、回転する。Fig.1(b)は提案するロータリージョイントの作動原理図を示す。ラジアル方向とスラスト方向から圧縮空気を供給することでロータを浮上させる。ロータは周囲の部品と非接触のため高速回転に対応可能になる。搬送空気はロータ外筒の溝を通り、側面の穴から供給され、ロータ内部を通り図の右側に配置される非対称気体軸受に搬送される。

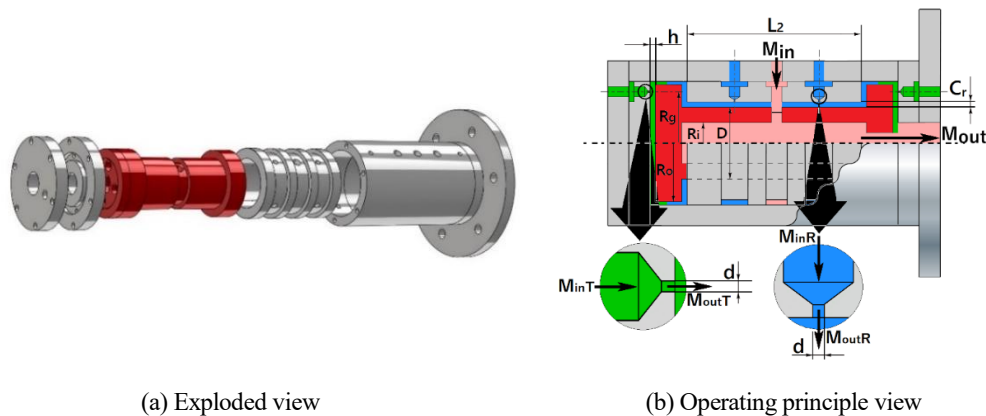


Fig. 1 Rotary joint structure

3. 静止浮上試験

3.1 試験目的

ロータリージョイントの理論式⁶⁾をもとにラジアル方向の半径隙間、スラスト方向の浮上隙間を設計した。そのため、設計理論の通りに作動するかどうかを確認するために、浮上特性に与える軸受隙間の影響を検証した。実験においてはΦ28.30~28.50mmまでの8種類のロータを用いて実験を行う。この試験では気体軸受理論に基づいて設計したロータリージョイントとロータについて浮上することを確認するとともに回転浮上試験に用いるロータを選定するためにこの静止浮上試験を行う。

3.2 試験方法

本実験で用いるロータはΦ28.30~28.50mmまでの8種類でコンプレッサからラジアル方向に圧縮空気を供給し、ロータリージョイントの軸受面を浮上させる。供給する圧力は設計条件である0.7MPaと、浮上する最低圧力である0.4MPaで実験を行った。

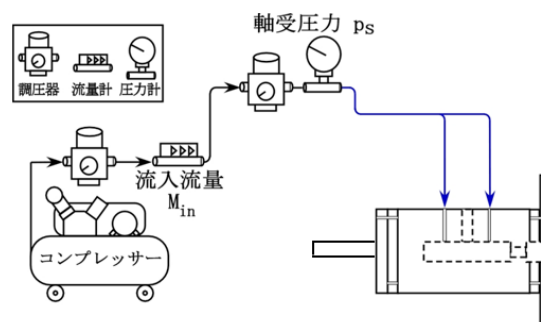


Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipment during static levitation test

3.3 試験結果

Table.1 に静止浮上試験の結果を示す。気体軸受理論⁵⁾より、自成絞りを形成するには半径隙間が $100\mu\text{m}$ 以下でなければならない。また、設計時の試算における最適径である半径隙間 $17.5\mu\text{m}$ 、ラジアル方向供給圧力 0.7MPa で運転した際には、数秒間浮上した後に急停止したという結果になった。また、最も安定した結果が得られたのはロータ D(半径隙間 $22.9\mu\text{m}$)であった。

Table.1 Relationship between radial clearance and radial air supply pressure

ロータ	軸外径 (mm)	半径隙間 (μm)	ラジアル方向給気圧力	
			0.4MPa	0.7MPa
A	$\phi 28.30$	$101\mu\text{m}$	○	○
B	$\phi 28.35$	$75.0\mu\text{m}$	○	○
C	$\phi 28.40$	$51.0\mu\text{m}$	○	○
D	$\phi 28.45$	$22.9\mu\text{m}$	○	○
E	$\phi 28.47$	$17.5\mu\text{m}$	○	△
F	$\phi 28.48$	$12.0\mu\text{m}$	×	×
G	$\phi 28.49$	$8.50\mu\text{m}$	×	×
H	$\phi 28.50$	$3.50\mu\text{m}$	×	×

4. 回転浮上試験

4.1 試験目的

静止浮上試験において浮上したロータ A~E までの 5 種類を用いて回転浮上試験を行う。気体軸受理論においては、半径隙間 $17.5\mu\text{m}$ 、ロータ径は 28.47mm のロータである。設計計算において最適となる半径隙間 $17.5\mu\text{m}$ のサイズのロータを用いる場合、設計理論における最適径は、静止浮上試験では給気圧力 0.4MPa で浮上したものの、給気圧力 0.7MPa で数秒間浮上した後に、急停止する結果になった。このことより、最適径を修正する必要があると考えられるので、その他の径のロータを試した。さらに、今後の回転試験での性能向上を図るために回転浮上試験を行う。

4.2 試験方法

Fig.3 に実験装置の概略図を示す。実験装置に、静止浮上試験時の装置構成に加え、ロータを回転させるためのタービンを図のように設置した。ラジアル方向給気圧力 0.7MPa 、回転のためのタービンを回転させるノズルに供給する圧縮空気の圧力を 0.2MPa とした。

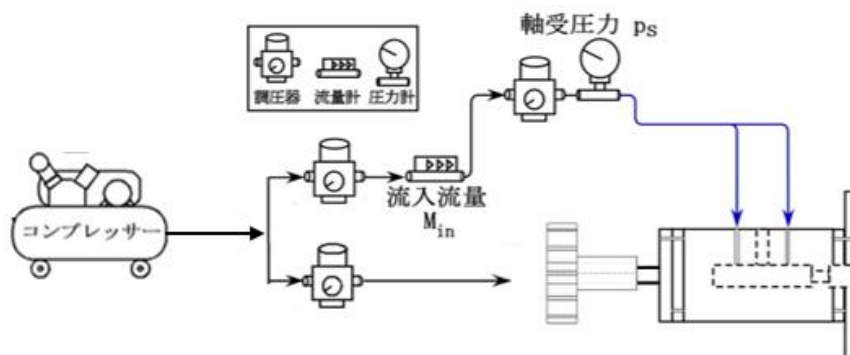


Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment during rotary levitation test

4.3 試験結果

実験結果を Fig.4 に示す. $\Phi 28.30$, $\Phi 28.35$, $\Phi 28.40$, $\Phi 28.45\text{mm}$ の 4 つの軸は回転したが, $\Phi 28.47\text{mm}$ は浮上せず回転しなかった. グラフから分かるように回転したロータ径が大きくなるにつれて回転数が高くなっており, $\Phi 28.45\text{mm}$ で最も高速で回転し, 5061rpm となっている. そして, $\Phi 28.47\text{mm}$ では浮上せず回転しなかった. 急停止した原因として, 空気供給方法により, ロータへ空気が加わるためと考えられる. 周方向の軸受の構造を考えると, 設計計画では供給された空気が周方向に均一に充填され, 給気孔から軸に給気する仕組みになっている. しかし, 実際は周方向に充填してはいるが, 給気孔が 1 つしかないために, ロータの上下で流量の差があることが考えられる. この給気孔からの空気の給気量の不均一により, 軸が片側に押し付けられている可能性がある. また $\Phi 28.45$ より軸が小さいロータの回転数が低くなる原因としては, 隙間が大きくなることで, 振動していることが考えられる. これらよりロータの最適径は $\Phi 28.45 \sim \Phi 28.47$ の間にあることが考えられる.

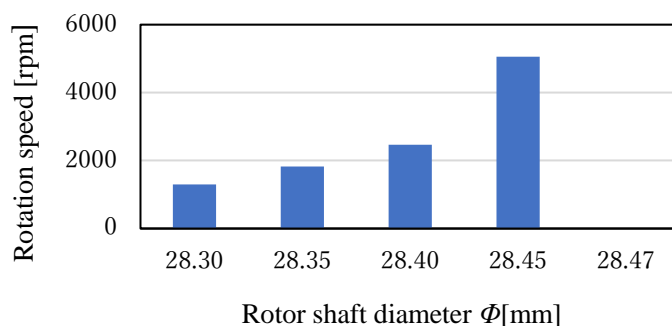


Fig.4 Relationship between rotor shaft diameter and rotation speed

5. DF 法を用いた数値解析

5.1 解析目的

数値解析を用いて, 提案するロータリージョイントが静止し, 偏心している状態でロータリージョイントに供給される圧力が実験装置にどのような作用を及ぼしているかを確認する. また, 静止浮上試験時に偏心した場合の圧力分布を示すことで圧力の極大部が DF 法によって示されるかどうかを検証する.

5.2 微小領域内に給気孔がない場合の計算式

ロータ隙間の空気の状態を数値解析するため, Fig.5 左図のように円筒隙間を平面展開して, DF 法を用いる. 定常状態において Fig.5 右図に示す微小領域内の点に給気孔が存在しない場合の質量流量の連続条件は式(1)で与えられる. 質量流量 $M_{x1} \sim M_{y4}$ の例として, 式(2)に M_{x1} と M_{y1} を示す. これを $p_{i,j}$ について解くことで圧力分布を表せる.

$$M_{x1} - M_{x2} + M_{x3} - M_{x4} + M_{y1} - M_{y3} + M_{y2} - M_{y4} = 0 \quad (1)$$

$$M_{x1} = \frac{h_{i-1,j-1}^3}{24\mu RT} (p_{i,j}^2 - p_{i-1,j}^2) \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad M_{y1} = \frac{h_{i-1,j-1}^3}{24\mu RT} (p_{i,j}^2 - p_{i,j-1}^2) \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (2)$$

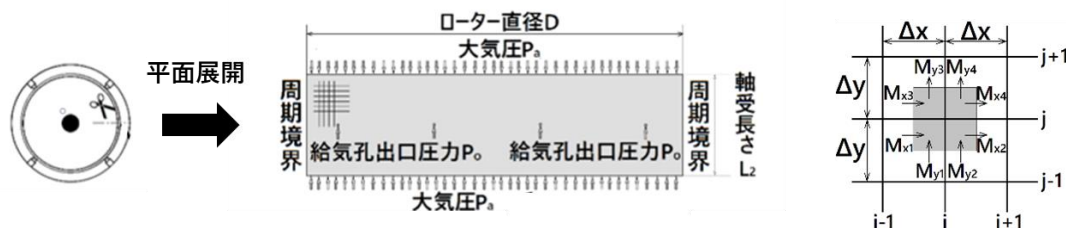


Fig.5 Schematic diagram of gas bearing

5.3 解析結果

Fig.6に偏心時の圧力分布の解析結果を示す。この結果は隙間が大きいところで低圧になり、隙間が小さいところで高圧になっていることが分かる。このことより、圧力の極大部と圧力の極小部ができるためロータは片側に常に押し付けられることなく、ロータがケーシング内で偏心せず中心に保つ調心作用が静止浮上試験時に得られることがこの数値解析からわかった。

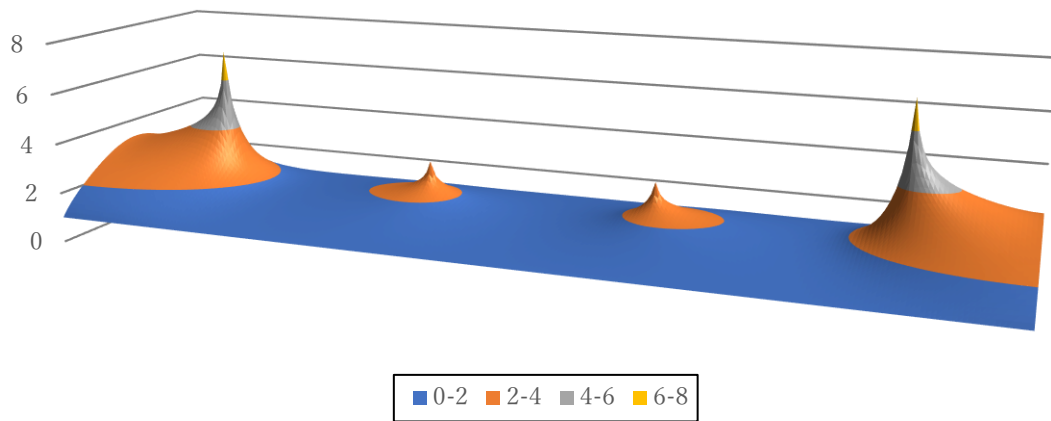


Fig.6 Analysis result of pressure distribution by DF method

6. 結 語

非対称流体軸受へ適用するための高速回転対応型ロータリージョイントを設計・開発し、その性能試験を行った。その結果を以下に示す。

- ・静止浮上試験では8種類のロータ径(A: $\Phi 28.30$, B: $\Phi 28.35$, C: $\Phi 28.40$, D: $\Phi 28.45$, E: $\Phi 28.47$, F: $\Phi 28.48$, G: $\Phi 28.49$, H: $\Phi 28.50\text{mm}$)で実験を行い、ロータ F, G, Hは浮上しないという結果を得た。
- ・半径隙間が理論式から導かれた半径隙間より小さい場合は圧力極大部ができ、圧力の不均一が起きることで浮上しないということが分かった。
- ・回転浮上試験では静止浮上試験で浮上した5個のロータを用いて実験を行い、本研究のロータリージョイントにおいての最適径が $\Phi 28.45$ から $\Phi 28.47$ の間にあることが確認できた。
- ・DF法によって本研究のロータリージョイントで調心作用が働くこと確認された。

文 献

- (1) 独立行政法人産業技術総合研究所, 非対称流体軸受, 特開 2006-207668, 2006-8-10.
- (2) 兵庫県, 流体軸受及びそれを備えた非対称流体供給式流体軸受装置, 特開 2011-99459, 2011-5-19.
- (3) 伊勢智彦ら, 給気孔を非対称に配置した大負荷容量静圧気体軸受, 日本機械学会年次大会, 2015
- (4) 大崎光祥, 大偏心回転軸側から給気する気体軸受の軸振動計測, 豊橋技術科学大学卒業研究論文, 2015
- (5) 十合晋一ら, 気体軸受技術—設計・製作と運転のテクニク—, 2014.