

# ガス軸受が支える電動圧縮機の進化と次世代エネルギーシステムの実現

## Advancements in Electric Compressors Supported by Gas Bearings: Realizing Next-Generation Energy Systems

IHI（正）\*古野 晃久 IHI（非）佐々木 暢彦 IHI（非）石川 尚ノ助 IHI（非）兼富 友希 IHI（非）濱田 真伍  
 Akihisa Furuno\*, Masahiko Sasaki\*, Shonosuke Ishikawa\*, Yuki Kanedomi\*, Shingo Hamada\*, \*IHI

### 1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現は持続可能な社会を目指すうえで最も重要な課題の一つである。そのために、エネルギー変換効率の向上が求められており、あらゆる産業分野で用いられるターボ圧縮機も例外ではない。とくに、電動ターボ圧縮機は、高効率化、オイルフリー化による環境負荷および運用コスト削減の観点で今後ますます重要となる。本稿では電動ターボ圧縮機の進化と、それを支えるガス軸受技術について述べる。

### 2. 電動ターボ圧縮機の進化

従来、数百 kW の産業用圧縮機の多くはモータの回転数をギヤボックスで増速し、圧縮機本体に動力を伝達するギヤードタイプが主流であった。しかし、構造が複雑・大型のため、数十 kW クラスへの適用に課題を抱えていた。近年、インバータ制御の高速モータの発展により、ギヤを介さず直接圧縮機を駆動するダイレクトドライブ型電動圧縮機が実用化されている(Fig.1)。この方式は構造の単純化による信頼性向上、トルク伝達ロス低減による高効率化、さらにオイルフリー化によるメンテナンス性や環境適合性の向上など多くの長所を有しており、廃水浄化施設の曝気用ブローアや燃料電池に空気を供給する圧縮機<sup>1)</sup>、小型の空冷システム<sup>2)</sup>などで採用されている。Fig. 2 に各社のオイルフリー電動ターボ圧縮機の仕様を示した。小型かつ高出力、すなわち、高出力密度の実現を目指して各社がしのぎを削っている。

### 3. オイルフリー電動ターボ圧縮機を支える軸受

オイルフリー化の実現には潤滑油を必要としない軸受が不可欠である。代表的な軸受としては磁気軸受とガス軸受が挙げられる。油潤滑軸受も含めて各軸受の特徴を示す (Table 1)。磁気軸受はガス軸受と比較して荷重支持能力が高く、制御により安定した軸支持が可能である。しかし、タッチダウンベアリングや変位センサ、制御器、補助電源などが必要となるためサイズやコストの観点では輸送機器へ搭載するターボ機械では不利となる。一方、ガス軸受は油循環系統だけでなく、磁気軸受で必要となるセンサ、電源などを必要としないため低コストでコンパクトなシステムを実現できる。高回転にも対応できるため、さらにシステムを小型にできる。しかし、潤滑油と比較して粘性の低い気体を用いるため、潤滑膜の圧力が低く、荷重を支えるという点では不利といえる。

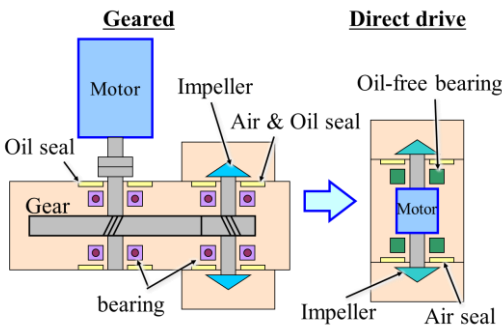


Fig.1 Schematic view of Geared turbo compressor and Direct drive compressor.

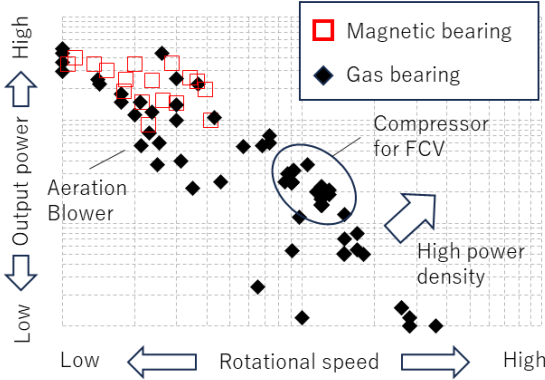


Fig.2 Performance map of direct drive electric turbo compressor.

Table 1 General Characteristics of each bearing

	Gas bearing	Active magnetic bearing	Sliding bearing	Ball bearing
Allowable load, MPa	0.1	0.4	4.0	1.5
Circumferential velocity, m/s	over 200	200 (laminated steel core)	100	100
Allowable temperature, °C	700 (gas cooling)	180 (gas cooling)	120 (oil cooling)	120 (oil cooling)
Necessary equipment	None	Controller, position sensor, Touch-down bearing	Oil circulation system (tank, pump, pipe, filter)	Oil circulation system (tank, pump, pipe, filter)

#### 4. ガス軸受の課題

ガス軸受はコンパクトかつオイルフリーなシステムの実現という点では優れた軸受であるが産業用途での本格的な実用化に向けて克服すべき課題も残されている。ここでは主要な課題とそれに対する当社の取り組みについて述べる。

##### 4.1 耐久性

ガス軸受は、回転軸の周速 0~10m/s 程度の領域において、回転軸と軸受面がしゅう動する。通常、焼き付きを防ぐために回転軸と軸受の少なくとも片側に表面処理が施される。回転軸側には溶射やその他の金属皮膜、軸受側には樹脂被膜などのコーティングが施されることが一般的である。各社とも独自の材料や表面処理技術の組み合わせを採用しており、軸受側にはテフロン系被膜が広く用いられている。航空や自動車では数万から数十万回の起動停止回数が要求されるため、試験での耐久性評価が不可欠である。Fig. 3 に当社で開発した電動ターボ圧縮機を用いて起動停止試験を行った際の結果を示す。10 万回以上の起動停止サイクルに対してもガス軸受としての機能を維持することを確認した。今後は PFAS 規制への対応も求められるため、ガス軸受の被膜に求められる低面圧・高すべり速度に対応した代替材の開発が課題といえる。

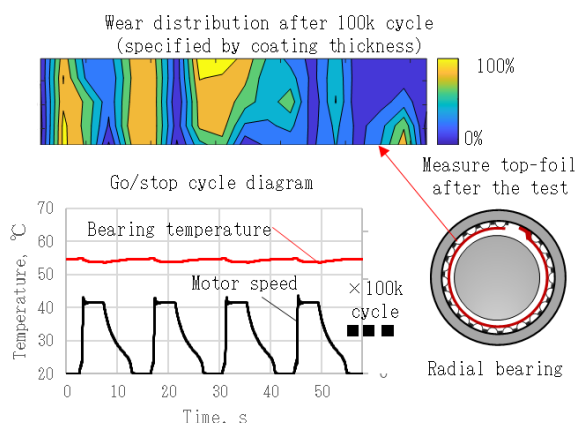


Fig. 3 go/stop cycle test condition and result.

##### 4.2 負荷容量

ガス軸受は原理的に大きな荷重を支えることが苦手であり、このことが電動ターボ機械設計上の大きな制約となる。特にスラスト軸受は、搭載環境で生じる振動荷重に加えて、圧縮機の差圧に伴うスラスト荷重を支持せねばならず、高い負荷容量を求められる。

ガス軸受は厚さ 0.1mm 程度の薄板を組み合わせた構造で軸受面が柔軟である。そのため、性能予測には軸受面の変形を解く構造解析と流体解析を連成する必要がある。さらに、実用上は樹脂被膜の摩擦による軸受面形状の変化も無視できず、解析のみによる性能評価は困難である。このため、解析のみならず試験からも限界性能を把握するアプローチが非常に重要である。

当社では、構造流体連成解析によって高い負荷容量が得られる軸受形状を検討し、設計・試作を行った。加えて、高速で回転する回転軸を介して、ガス軸受に対して任意の荷重を与えることのできる試験機を開発し、ガス軸受の性能を評価した。回転軸の位置は磁気軸受により制御されており、静荷重だけでなく様々な動荷重も付与可能である (Fig. 4)。当該試験機により、高い負荷容量を有することを確認している。現在、同等の仕様のガス軸受を搭載した 70kW クラスの電動ターボ圧縮機の開発に取り組んでいる<sup>2)</sup>。

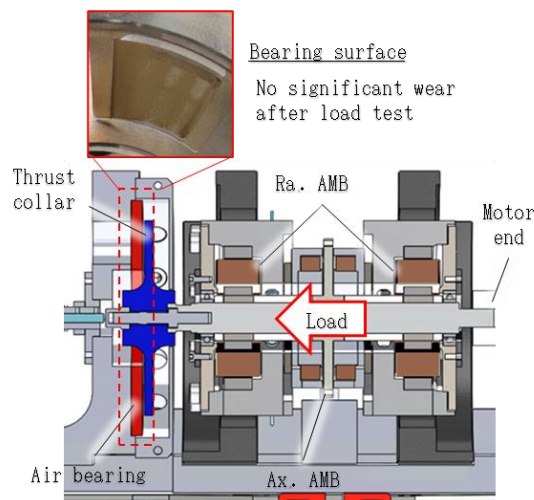


Fig. 4 Foil bearing test rig.

#### 5. おわりに

本稿では、カーボンニュートラル実現に向けた電動ターボ機械の特徴と、ガス軸受技術の現状および課題、当社の取り組みについて述べた。今後は、PFAS 規制対応材料の開発や、大型化・信頼性向上に向けた軸受設計技術の高度化を継続して進める方針である。これにより、より幅広い産業分野への電動ターボ機械の普及を推進し、持続可能な社会の実現に貢献していく。

#### 文献

- 1) 林 克憲 他, IHI 技報 Vol.62 No.1(2022), カーボンニュートラルの実現に貢献する燃料電池向け電動ターボチャージャの開発
- 2) 関 直喜 他, IHI 技報 Vol.64 No.2(2024), 航空機電動化とハイブリッド電動推進の技術開発