

# 高速回転機械の電動化を支える要素技術

## Elemental Technologies Supporting Electrification of High Speed Rotating Machinery

吉 永 誠一郎 技術開発本部プロジェクトセンター電動化開発グループ 部長  
青 山 茂 一 技術開発本部技術基盤センター振動工学グループ 課長  
山 口 浩 二 技術開発本部プロジェクトセンター電動化開発グループ 主査 技術士（電気電子部門）  
軸 丸 武 弘 技術開発本部プロジェクトセンター電動化開発グループ

高速回転機械の電動化を支える要素技術として、定置式は高効率化・メンテナンスフリー化、移動体は小型化・軽量化および制御性向上への期待が高まっている。近年、パワーエレクトロニクス技術の飛躍的な発展に伴い、ターボ機械を高速モータにより直接駆動、つまりダイレクトドライブ化し、オイルフリー軸受を採用することで、これらの期待に応える流れがメガトレンドになっている。本稿では、高速オイルフリーのターボ機械に必要な要素技術を紹介する。

The stationary type is expected to be more efficient and maintenance free and the mobile type is expected to be smaller, lighter and more controllable. In recent years, with the rapid development of power electronics technology, it has become a mega-trend to meet these expectations by driving turbomachines directly with high-speed motors and adopting oil-free bearings. This article introduces the elemental technology required for high-speed oil-free turbomachinery.

### 1. 緒 言

高速回転機械の電動化を支える要素技術として、定置式のターボ機械では、一般的に増速歯車やすべり軸受・転がり軸受が用いられる。しかし、潤滑油やグリースを用いるためメンテナンスが欠かせないだけでなく、歯車や転がり軸受には寿命があるため交換が必要となることも多い。そこで、歯車の代わりに高速モータによりターボ機械を駆動し、かつ潤滑油を用いないガス軸受や磁気軸受を採用することで、高効率化・メンテナンスフリー化を図ることが期待されている。他方、移動体に搭載するターボ機械では、潤滑油システムを廃止し、応答性の低いタービン駆動からモータ駆動に置き換えることで、小型化・軽量化および制御性改善を図ることが期待されている。

近年、パワーエレクトロニクス技術の飛躍的な発展に伴い、ターボ機械を高速モータにより直接駆動するダイレクトドライブ型とし、合わせてオイルフリー軸受を採用することで上述した期待に応える流れがメガトレンドになっている。

### 2. 高速回転機械の電動化技術

超高速化・高出力化の実現に必要な高速回転機械の電動化システムを支える要素技術として、高速モータ技術、回

転体を支持するガス軸受技術およびモータ駆動のためのインバータ技術がある。装置の小型化・軽量化の要求により高速モータも小型化が求められるため、高出力化を図る必要がある。モータの小型化・高出力化における課題は冷却である。磁石や絶縁のための樹脂は耐熱性が低いため、高出力化を図りながら低損失化を実現しなければならない。また、モータのロータには強度面の課題もあるため電磁設計と強度設計の最適化がキーとなる。

次に、潤滑油を用いないオイルフリー軸受の一つに、装置の小型化・軽量化を可能とするガス軸受がある。特に、動圧式ガス軸受は、外部からの加圧も不要であり、回転により生じるガス膜の力のみで回転体を支持することができる。オイルフリー化により油交換が不要となるだけでなく、回転中は非接触で回転体を支持することから長寿命化を図ることができる。

また、高速モータを駆動するインバータは、高速回転させるためにスイッチング周波数を高くする必要がある。スイッチング損失およびノイズが増加することから、対策としてインバータの低損失化、さらに小型化・軽量化が求められる。

#### 2.1 高速モータ技術

##### 2.1.1 高速モータ

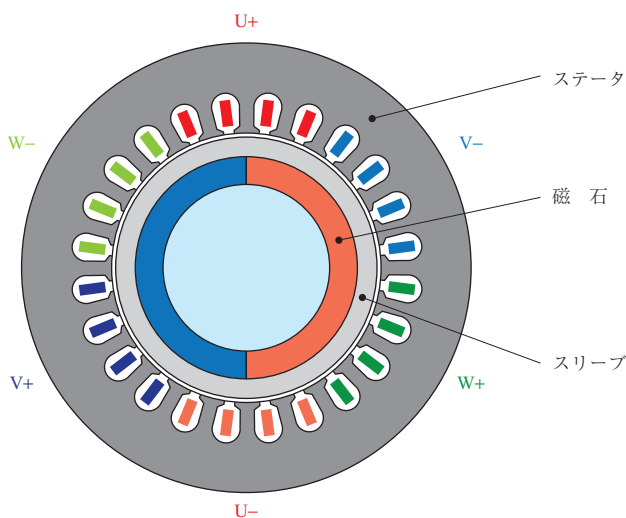
モータの出力  $P$  は、(1) 式で表すことができる。

$$P = KD^2Ln \dots\dots\dots (1)$$

- K: 出力係数
- D: ロータ外径
- L: ロータ長さ
- n: 回転速度

(1) 式により、トルクはサイズに依存し、出力はサイズと回転速度で決まることが分かる。回転速度はターボ機械の空力仕様によって決まるため、必然的に最適なサイズも決まることになる。したがって、出力係数をいかに高められるかが重要となる。高速モータには、かご形誘導機(IM)や表面磁石型同期モータ(SPMSM)などの方式が存在する。高磁力材料を適用できるSPMSMは、出力密度をほかのモータ方式よりも高くできる。一方で、SPMSMは磁石のバーストを防止する必要があるため、磁石外周にスリーブを設けることで超高速化を実現する。このように、高速モータの開発では電氣的・磁氣的な課題だけでなく、材料強度や冷却方式など機械的な課題解決が求められる。

開発したモータの一例を紹介する。第1図に1.2 kW、定格回転100 000 rpmの高速モータ断面を示す。ステータコアに用いる電磁鋼板は、高速回転に起因する損失を抑制するため、家電などに適用される電磁鋼板よりも薄い鋼板を適用している。また、ティース形状や巻線方式の工夫で、周方向の磁束密度の変化を小さくし、ロータ表面で生じる渦電流損失の低減を図っている。ロータは磁性材料のシャフトとリング状のネオジウム磁石、飛散防止用スリーブで構成している。スリーブには比強度が高い材料を適用し、高周速化を実現した。高速モータでは、低インダクタ



第1図 高速モータ断面  
Fig. 1 Cross-sectional view of the high-speed motor

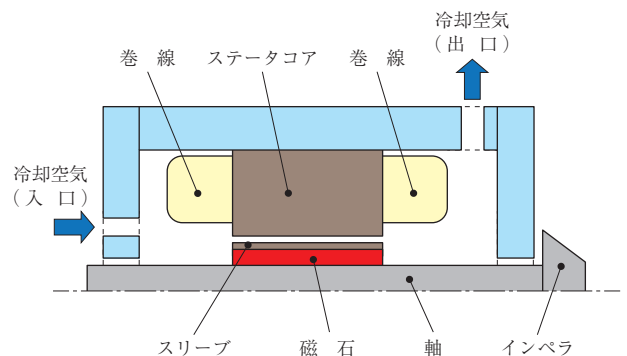
ンスになりやすいため、駆動電流のリプルにより漂遊負荷損が増加する傾向にある<sup>(1)</sup>。モータの冷却方式は空冷を採用しており、自励式ファンを内蔵して機内を冷却する。冷却空気は第2図に示すようにインペラと反対側から冷却空気を吸い込み、ステータとロータ間を通過して、インペラ側から排気させている。ステータ側で生じる熱は冷却空気からの抜熱に加え、ケーシングからの放熱によって冷却している。

### 2.1.2 高速モータの解析・評価

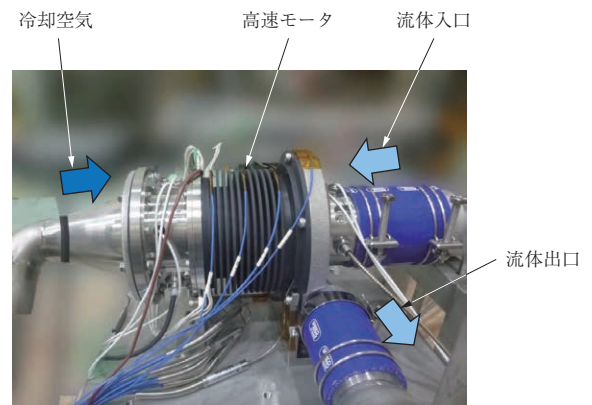
一般的に、トルクメータを介して計測の対象となる駆動モータと負荷モータを対向して設置し、性能評価を実施する。しかし、高速回転下ではカップリングや装置の制約によりトルク計測が困難となるため、今回、開発した高速モータは流体負荷を用いて評価した。

評価方法は、電磁界解析により求めた損失を入力し、熱解析で温度分布を算出したものと実際に計測された各部位の温度を比較して行う。第3図に試験装置を示す。温度分布計測のため、リグの周りに多数の温度センサを用いた。

100 000 rpm/1.2 kW の定格点では、モータ効率(機械



第2図 高速回転機械  
Fig. 2 High-speed rotating machinery



第3図 試験装置  
Fig. 3 Test rig

損を含む) 89.5%, 出力密度として 20 kW/l (電磁部品のみ) を達成した<sup>(2)</sup>。現在は、さらなる高出力密度化を図り、小型化・軽量化に取り組んでいる。

## 2.2 ガス軸受技術

### 2.2.1 ガス軸受

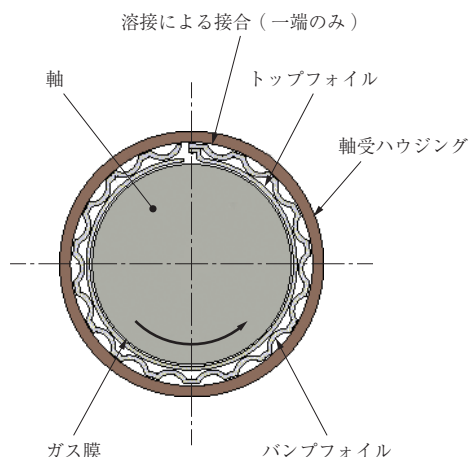
ガス軸受は、潤滑流体としてガス(気体)を用いる。軸を回転させると、周囲に存在するガスが軸と軸受の狭い隙間に巻き込まれるため、薄いガス膜が隙間に形成される。ガス膜で発生する圧力が軸を浮上させた結果、軸は接触しない状態で高速回転が可能となる。ガス軸受は潤滑流体にガスのみを用いるため、油を使えない環境下でも適用可能で、メンテナンス性にも優れている。また、油供給装置が不要なため、装置全体の小型化・軽量化にも寄与している。

一方で、ガス軸受は潤滑油を用いる流体潤滑すべり軸受と比較し、狭い軸受隙間の確保が必要であり、温度変化にも敏感である。さらに、減衰も小さいため、振動安定性にも課題がある。

IHI はこれらの課題を克服するため、温度変化による隙間の影響を受けにくく、かつ安定性に優れたフォイル式ガス軸受の開発に取り組んできた。

#### (1) ラジアル軸受

第4図に一般的なフォイル式ガス軸受の断面模式図を示す。主として、波板形状の薄い板ばね(バンプフォイル)、低速時には回転軸と直接接触する金属製の薄い板(トップフォイル)で構成される。バンプフォイルとトップフォイルはおおの全周1枚から成り、それぞれ一端のみが軸受ハウジングと溶接固定されている。軸が回転すると、軸とトップフォ



第4図 フォイル式ガス軸受(ラジアル)の断面模式図

Fig. 4 Cross-sectional schematic view of foil-type dynamic radial gas bearing

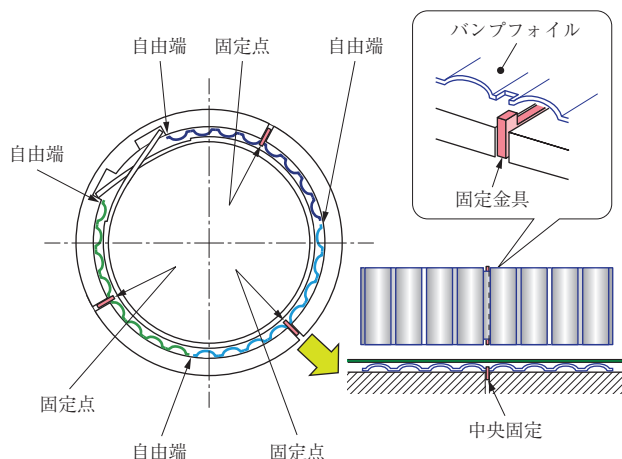
イルの間の僅かな隙間にガス膜による圧力が発生し、その圧力によって非接触の状態では軸を支持する。

前述のとおり、振動安定性の確保が課題の一つである。軸の回転に伴って、ガスが軸受内部を回転方向に旋回し、励振力が生じて安定性が低下する。これにより、運転できない程度の大きな振動が発生する可能性がある(自励振動)。また、軸受内部で発生するせん断によって軸が熱膨張し、軸と軸受の隙間が小さくなることで焼付きが発生する。

これらの課題を解決するため、IHI が独自設計<sup>(3)</sup>している空気軸受の断面図を第5図に示す。バンプフォイルは周方向に3分割され、中央部でハウジングと固定金具を用いて締結されている。3分割することによって、回転軸の挙動に合わせ、おのおののバンプフォイルが変形するため、不安定化力(潤滑ガスが軸受内部を回転方向に旋回することで発生する力)を抑制する。また、締結方法を変更してバンプフォイルの可動範囲を広げることで、しゅう動による摩擦減衰が得られ、さらなる安定化が可能となる。熱膨張に関しても、軸の膨張に合わせてバンプフォイルも径方向に変形するため、軸と軸受の隙間を確保することが可能となる。

#### (2) スラスト軸受

スラスト軸受には、ラジアル軸受と同様に外部環境による加速度が作用することに加えて、インペラの圧力差による軸方向荷重として作用する。これらの荷重が作用した場合でも十分な負荷能力を有し、かつ軸受損失が極力小さくなるような設計とした。



第5図 フォイル式ガス軸受(ラジアル)の断面図

Fig. 5 Cross-sectional view of foil-type dynamic radial gas bearing

## 2.2.2 軸系設計（ロータダイナミクス）

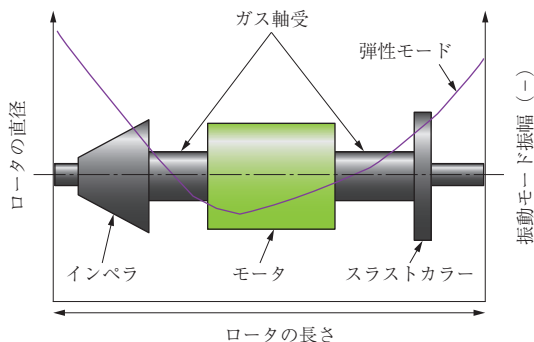
定格回転速度での安定した回転を実現するには、運転回転速度の範囲内に有害な振動を発生させる危険速度が存在しないことが求められる。回転中に励起される振動モードとして、剛体モード（軸受が主体となって振動するモード）と弾性モード（ロータが主体となって振動するモード）がある。第6図に限界速度解析の結果を示す。図中の弾性モードは、振動する危険速度を定格回転速度よりも十分に高速側となるように軸系設計を行った。

## 2.3 インバータ技術

### 2.3.1 SiC パワーデバイス

シリコン（Si）に代わる次世代半導体材料として、SiC（Silicon Carbide：炭化けい素）や GaN（Gallium Nitride：窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ半導体材料の実用化技術の開発に期待が寄せられている。特にハイブリッド車や電気自動車（EV）などのモビリティの電動化においては、搭載機器の質量が燃費・排ガス性能に大きく影響を与えることから搭載機器の小型化・軽量化が強く求められている。Si パワーデバイスよりも低損失動作が可能である次世代パワーデバイスによって、従来の Si パワーデバイスでは実現できなかった、さらなる小型化・軽量化が可能になると期待されている。

また、高速回転機械駆動用の高速モータは電流ひずみが増大する傾向と、汎用モータよりも損失が増加するという課題があった。加えて、小型化・軽量化を進めると、より損失密度が高くなる傾向があり、高速モータの損失・温度低減技術の開発が重要課題であった。高速モータの損失・温度の課題解決には、パワーデバイスのスイッチング周波数を高くして電流ひずみを低減することが効果的である<sup>(4)</sup>。従来の Si パワーデバイスよりも高周波スイッチングを可能とする次世代パワーデバイスは、スイッチングの高周波化により高速モータの損失・温度、それぞれの低



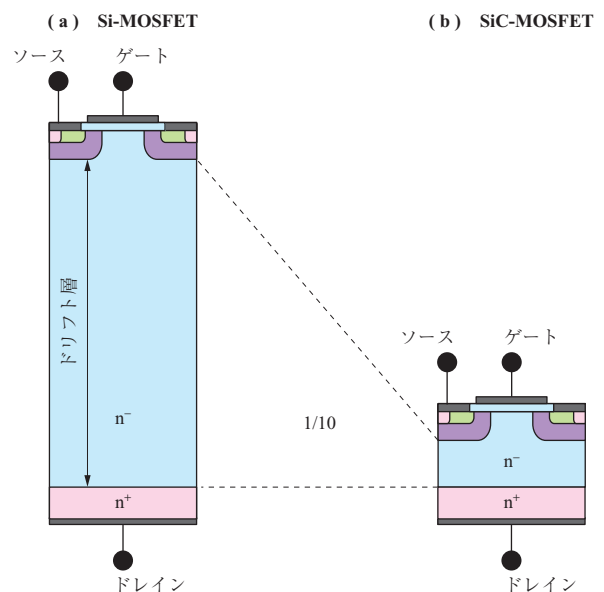
第6図 限界速度解析の結果  
Fig. 6 Result of the critical speed analysis

減が実現可能となる。この背景から IHI では、高速回転機械の電動化、車載・船用システムの電動化、航空機の電動化をパワーエレクトロニクス技術で加速させるため、SiC-MOSFET 応用技術の開発を行ってインバータの小型化・軽量化に取り組んできた<sup>(5)</sup>。

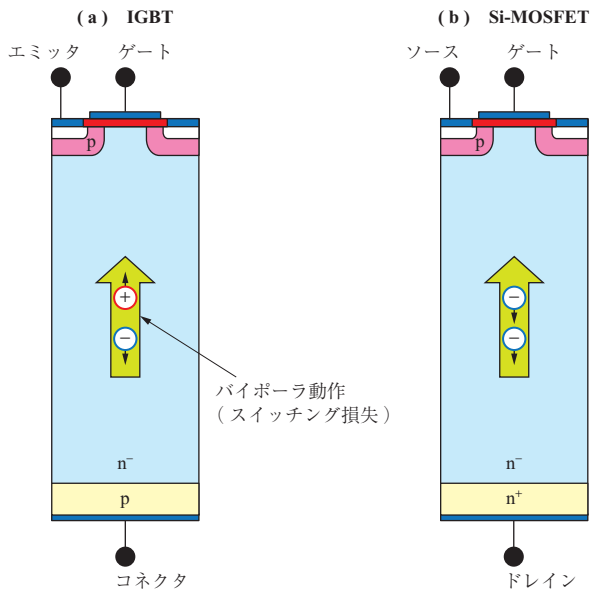
代表的な Si パワーデバイスには、MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）と IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）がある。MOSFET はユニポーラデバイスであるため動作速度は速いが、Si-MOSFET は耐圧特性があまり高くなかった。一方、Si-IGBT は高耐圧特性であるもののバイポーラデバイスであるため、スイッチング特性の損失が大きいという課題があった。SiC などのワイドバンドギャップデバイスは、従来の Si パワーデバイスと比較して、高耐電圧特性・高耐熱特性・低損失特性などのメリットがあり、この二つの課題を解決できる。

第7図に Si と SiC の MOSFET の断面模式図を、第8図に IGBT 構造と MOSFET 構造の断面模式図を示す。MOSFET の耐電圧はドリフト層（Drift layer）（第7図）で受けるため、MOSFET を高耐電圧化するには、ドリフト層を厚くする必要がある。従来の Si パワーデバイスでは、ドリフト層が厚くなるのに比例して、導通抵抗が増大するため、200 V を超える高耐電圧 MOSFET の実現は困難であった。

SiC デバイスはその高耐電圧特性から、Si パワーデバイスと比較してドリフト層の厚みを薄く抑えることが可能



第7図 MOSFET の断面模式図  
Fig. 7 Cross-sectional schematic view of MOSFETs



第 8 図 IGBT 構造と MOSFET 構造との断面模式図  
 Fig. 8 Schematic cross-sectional view of IGBT and Si-MOSFET structures

となる。同じ耐電圧を実現するドリフト層厚を 1/10 程度にできるため、導通抵抗が抑えられ、Si パワーデバイスでは不可能であった 1 200 V 以上の高耐電圧 MOSFET が可能となっている。IGBT 構造を用いていないため、スイッチング特性の損失の課題はなくなった。

SiC-MOSFET のスイッチング特性を把握し、駆動技術を開発することで、IHI の目指す高速回転機械の電動化が実現できる。

### 2.3.2 SiC-MOSFET 駆動技術

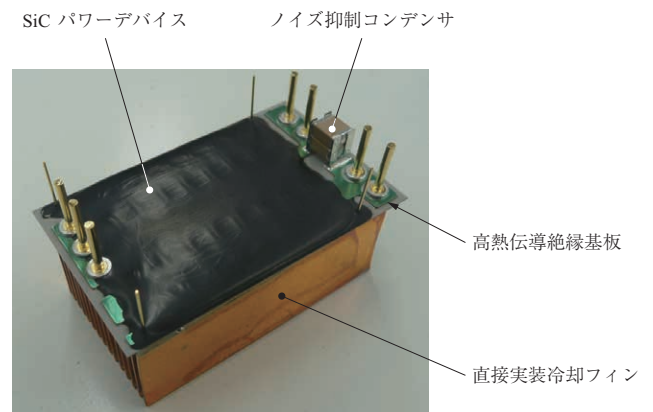
第 9 図にパワーデバイスのスイッチングにおけるトレードオフを示す。スイッチング特性においては、スイッチング損失・スピードとスイッチングノイズの間にはトレードオフの関係がある。スイッチングノイズを抑えると、スイッチング損失は大きく、スイッチングスピードは

遅くなる。逆にスイッチング損失を抑えると、スイッチングスピードが速くなり、スイッチングノイズが増大してしまう。インバータの小型化・軽量化において、スイッチングのトレードオフは冷却器の小型化とノイズフィルタの小型化の間のトレードオフという形で現れる。スイッチング損失を抑えることで冷却器は小型化されるが、スイッチングノイズ対策のため、ノイズフィルタは大型化する恐れがある。逆にスイッチングノイズを抑えればノイズフィルタは小型化・省略が可能となるが、スイッチング損失増加のため冷却器が大型化してしまう。

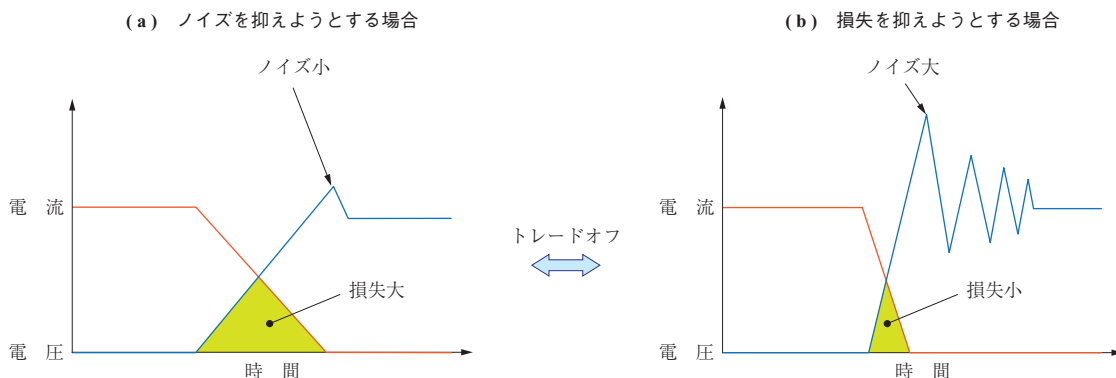
インバータの小型化・軽量化を実現には、スイッチングのトレードオフを解消し、低損失かつ低ノイズを実現する駆動技術の開発が必要となる。IHI では、SiC-MOSFET のスイッチング動作を解析し、低損失と低ノイズを両立する駆動回路技術を開発してきた<sup>(6)</sup>。

### 2.3.3 高電力密度インバータ技術

第 10 図に従来のパワーモジュールと比較し、冷却性能を改善した SiC パワーモジュールを示す。軽量のフォイル状の冷却フィン



第 10 図 SiC パワーモジュール  
 Fig. 10 Prototype of SiC power module



第 9 図 スイッチングのトレードオフ  
 Fig. 9 Trade-off of switching characteristics



第 11 図 高電力密度 SiC インバータ  
Fig. 11 Prototype of high power-density SiC inverter

ことで、小型化・軽量化と高い冷却性能を両立させた。ノイズ抑制コンデンサも内蔵している。

第 11 図に高電力密度 SiC インバータの試作機を示す。上述した駆動回路とパワーモジュールを適用することで、体積約 0.5 l、質量約 660 g で連続出力 35 kW を達成した。また、出力密度で 70 kW/l、50 kW/kg の高電力密度も達成した<sup>(7)</sup>。現在は、開発した高電力密度インバータ技術をベースにして、機電一体型高速回転モータなどの応用技術の開発に取り組んでいる。

### 3. 結 言

高速回転機械の電動化技術を支える要素技術について紹介した。IHI 独自の高速モータ技術、ガス軸受技術およびインバータ技術の開発を進めることで、これまで培ってきた空力設計を組み合わせ、小型化・軽量化・メンテナンスフリー化を実現するターボ機械の実現を目指していく。

### 参 考 文 献

- (1) 軸丸武弘, 山口浩二, 桑田 巖: 低インダクタンスの高速モータにおける損失評価方法の検討, 平成 29 年度電気学会産業応用部門大会予稿集 3-2, 2017 年 8 月
- (2) T. Jikumaru and G. Kuwata : 1.2 kW 100,000 rpm high speed motor for aircraft, 2018 International Power Electronics Conference ( IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia ), 2018. 5
- (3) 古野晃久, 大森直陸: 小型ターボプロア用フォイル式空気軸受の開発および性能検証, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2016, 2016 年 8 月
- (4) K. Yamaguchi, K. Katsura and T. Jikumaru : Motor loss and temperature reduction with high switching frequency SiC-based inverters, 2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications ( WiPDA ), 2017, pp. 127 - 131
- (5) 山口浩二: 小型軽量インバーターで電動化を加速!! , IHI 技報, Vol. 55, No. 1, 2015 年 3 月, pp. 24 - 27
- (6) K. Yamaguchi, K. Katsura, T. Yamada and Y. Sato : Comprehensive Study on Gate Driver for SiC-MOSFETs with Gate Boost, IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 7, No. 3, 2018. 7, pp. 218 - 228
- (7) K. Yamaguchi, K. Katsura, and T. Yamada : Comprehensive evaluation and design of SiC-Based high power density inverter, 70 kW/liter, 50 kW/kg, 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference ( IPEMC-ECCE Asia ), 2016. 5, pp. 1 - 7