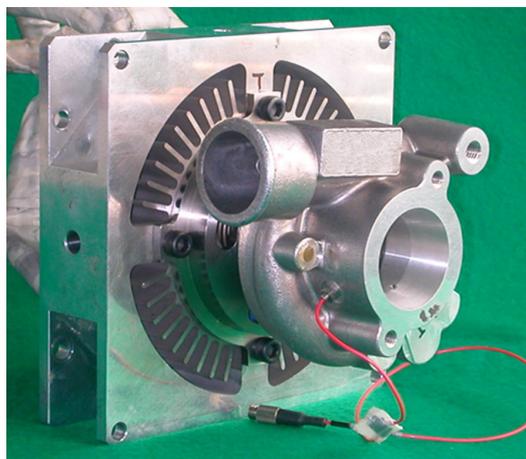


自動車用エンジンのダウンサイジングに貢献する 電動スーパーチャージャの開発

Development of Electric Supercharger
Contributing to the Downsizing of Automobile Engine



山下 幸生*¹
Yukio Yamashita

茨木 誠一*²
Seiichi Ibaraki

住田 邦夫*³
Kunio Sumida

恵比寿 幹*⁴
Motoki Ebisu

安 秉一*⁵
Byeongil An

荻田 浩司*⁶
Hiroshi Ogita

環境保全とドライバビリティの両立を目指し、自動車用エンジンには高度な制御が要求され、電動化が進展している。過給用コンプレッサを排ガスタービンやベルト駆動に替わり高速モータで駆動する電動スーパーチャージャは、モータの高速応答性をいかしたターボラグ解消、自然吸気エンジン並みの燃費、エンジンのダウンサイジングを実現できる手段として、実用化が期待されている。今回、当社で開発した電動スーパーチャージャの単体試験によって、2kW-140000rpmのコンプレッサ負荷作動点への加速時間が 1.0sec となる高速応答を確認できたので、これを紹介する。

1. はじめに

地球環境保全の世界的な取組みが進み、自動車の排気ガス、燃費規制は強化の一途にある。ターボチャージャはこれまでディーゼルエンジンの高性能化に用いられ、現在ではほぼ全てのディーゼル車がターボチャージャを搭載している。また、ガソリンエンジンでもダウンサイジングによる小型軽量、高効率化の手段として、ターボチャージャの適用率が拡大している⁽¹⁾。

近年では環境、運転性能の向上のため、エンジンの制御はますます多様化しており、これに対応して、タービン容量をエンジン負荷に応じて可変できる VG ターボ (Variable Geometry Turbocharger) が急激に普及している。また、ハイブリッド自動車や電気自動車に代表されるように自動車の電子制御化、多様な電気機器の搭載が進んでおり、これに対応してバッテリーも継続的に高性能化していくものと考えられる。ターボチャージャにおいても電子制御アクチュエータの適用など電動化が進んでいる。さらにはパワーエレクトロニクス技術の進歩により 100000rpm 以上の超高速モータ発電機が開発され、ターボチャージャへの適用が可能となった。

電動スーパーチャージャは、コンプレッサと超高速モータが直結され、モータの回転数を制御することで、排ガスタービンによらず自由にコンプレッサ吐出圧力を制御可能であることから、エンジンの排気損失の低減とエンジンダウンサイジング効果によって、燃費向上に貢献できる将来の過給システムとして期待されている。

*1 技術本部長崎研究所 技術士(電気電子部門)

*2 技術本部長崎研究所室長 工博, 技術士(機械部門)

*3 技術本部長崎研究所

*4 汎用機・特車事業本部ターボ技術部課長

*5 汎用機・特車事業本部ターボ技術部 工博

*6 MHI さがみハイテック株式会社 設計部主務 技術士(機械部門, 総合技術監理部門)

2. 電動ターボの分類

超高速モータ発電機を適用した電動ターボは2種類に分類できる。一つは従来のターボチャージャに高速モータ発電機を内蔵した“ハイブリッドターボ”である⁽²⁾。従来のターボチャージャは、エンジンの排気ガスで駆動されるタービンが同軸のコンプレッサを回し、高圧空気をエンジンに供給する。これにモータ発電機を内蔵することで、排気ガスエネルギーが不足するエンジン低速時はターボをモータアシストし、ターボの弱点である過渡応答遅れ(ターボラグ)を改善できる。

また、エンジン高速域では、余剰排気ガスエネルギーを電力として回収し、バッテリーへの蓄電またはISG(Integrated Starter Generator)を介してエンジンのアシストに利用できる。

もう一つが今回開発した、排気ガスを利用しない電動スーパーチャージャである。遠心コンプレッサを高速モータで駆動するもので、モータが発生するトルクのみでコンプレッサを駆動し、高圧空気をエンジンに供給する。図1に単体で用いられる場合のシステム構成を、図2に試作機を示す。また、電動スーパーチャージャはターボチャージャと組み合わせて2ステージターボに用いるのも有効である。図3は1.4リットルガソリンエンジンにおいて目標トルクに到達するまでのエンジンの過渡解析結果であり、従来ターボチャージャに比べて立ち上がり時間を35%低減できることを示している。

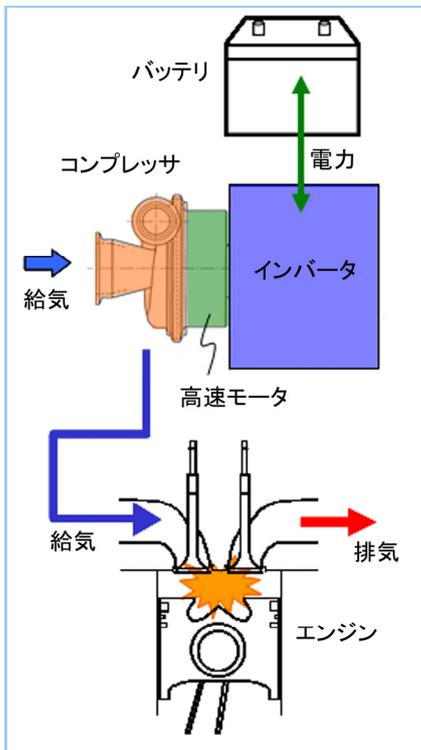


図1 電動スーパーチャージャのシステム図
エンジンの給気圧力要求に応じ、電動スーパーチャージャの超高速モータはインバータを介してバッテリーから電力を受けてコンプレッサを回転させる。

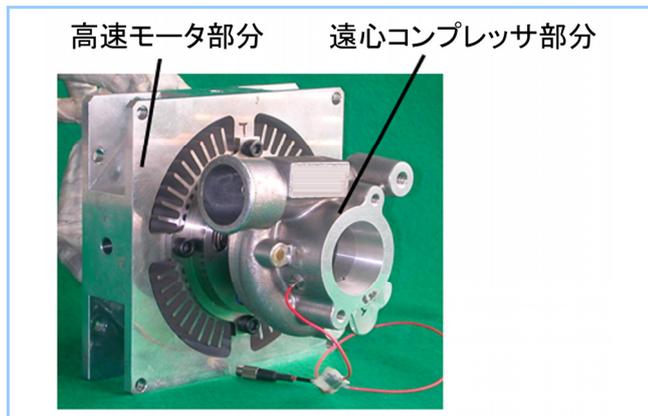


図2 電動スーパーチャージャ
電動コンプレッサの試作機外観を示す。遠心コンプレッサを高速モータが駆動する。

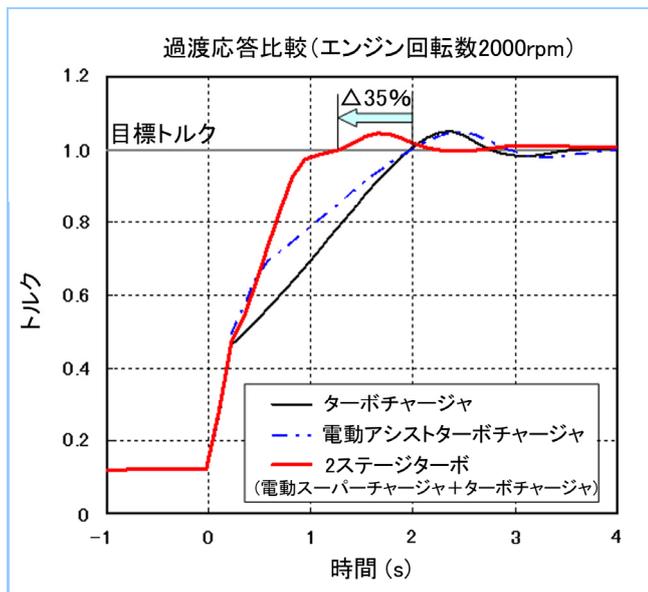


図3 エンジンの過渡応答解析結果
1.4リットルガソリンエンジンの目標トルクに到達するまでの推移を示す。

3. 電動スーパーチャージャの開発

3.1 開発コンセプト

既存車両システムへの適用性から、以下のコンセプトで開発を行った。

- ・ 使用する電源電圧は直流 12V とする。
- ・ コンプレッサ・モータ・インバータを一体型とする。
- ・ 冷却のための別置きファンや水冷装置を使用しない。

3.2 構造と特徴

試作した電動スーパーチャージャは、遠心コンプレッサの羽根車と高速モータのロータ(回転子)をボールベアリングで支持する構造とし、機械損失の低減による応答性向上を図った。また、グリース潤滑を採用し、潤滑油配管を不要とした。

ロータイナーシャ低減による応答性向上をねらい、モータロータはロータダイナミクスの成立範囲で可能な限り小径長軸形状とした。

モータおよびインバータの冷却にはコンプレッサ吸込み空気を利用した。コンプレッサ吸込み空気流路の上流にインバータとモータを配置することで、電動スーパーチャージャが回転しているときは常にモータ・インバータともに冷却することが可能である。コンプレッサ作動点によって冷却流量が異なることになるが、モータ・インバータの消費電力はおおむね大流量時に大きくなることから好都合である。FEM(Finite Element Method)磁界解析並びに回路シミュレーション結果にもとづく損失発熱計算値と、CFD(Computation Fluid Dynamics)解析による冷却流路内の流速分布計算値から、モータ・インバータ各部の温度上昇を予測し流路の改良を行った。図4に CFD 解析による流速分布計算結果の一例を示す。また同時に冷却流路の圧損の計算も行い、圧損分の仕事によってモータ・インバータの必要動力が過度に増加しないよう流路の改良を行った。

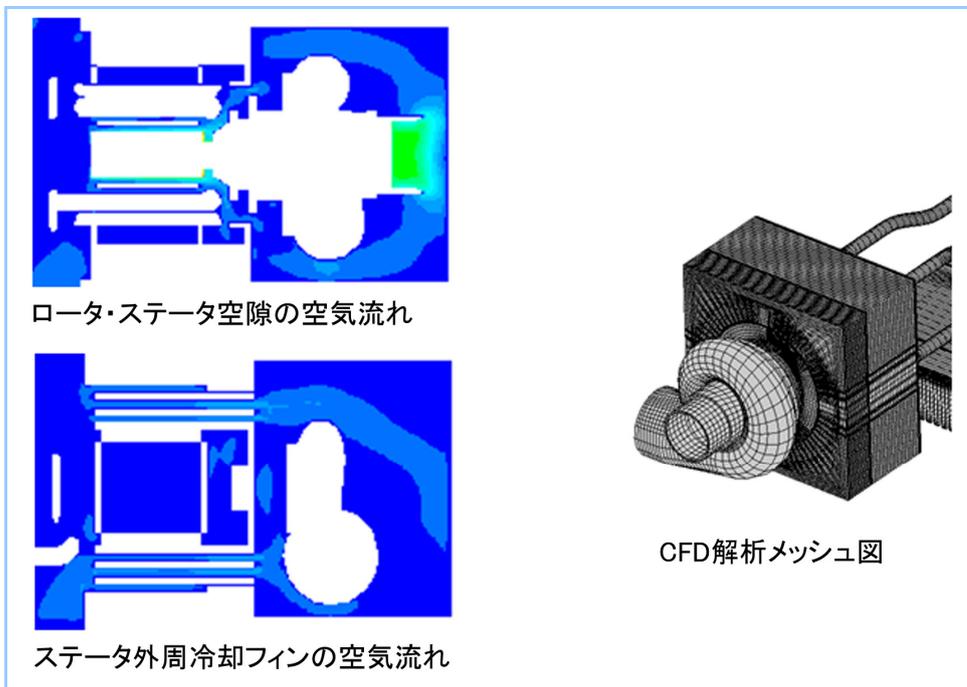


図4 CFDによるモータ部分の冷却空気流速計算

コンプレッサ吸込み空気の流路に配置されているモータのロータ・ステータ各部の冷却空気流速を計算

3.3 パワーエレクトロニクス技術

3.3.1 超高速モータ

モータ形式は三相永久磁石同期型を採用した。小型化のために、ロータの磁石は磁力が強く、かつ耐熱性の高いサマリウムコバルト系希土類磁石を使用した。また、超高速モータにおい

特に重要な、ロータ遠心力に対する磁石保持には、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)製のカーボンシートを円筒状に積層したリングを磁石外周に設置することで対処した。カーボン円筒の製作においては、シートの繊維方向や端末処理に留意することで剥離や膨張を防止した。ロータはスピントストを行い、定格回転数の1.2倍でも破損しないことを確認している。図5はモータ駆動による温度上昇試験後のロータ切断面であり、ロータの変形やカーボンの剥離がなく健全である。ステータ巻線は各相1ターンでスター結線されている。1ターンという極小ターン数となる理由は、低電圧超高速仕様であるがゆえに、必要なトルクを出し得るモータ誘起電圧定数とインダクタンス値の成立範囲が1ターンでしか実現できないためである。ステータの外観を図6に示す。

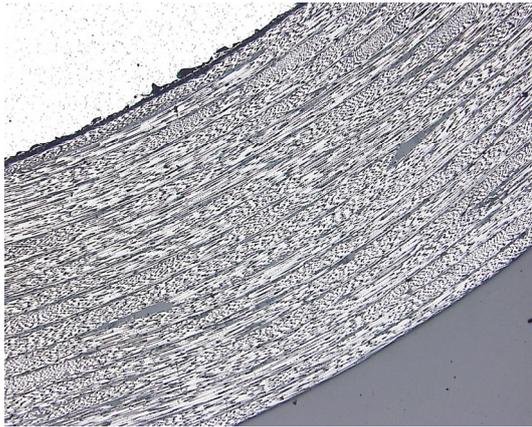


図5 モータ駆動試験後の磁石ロータ保持リング断面写真
ロータの変形やカーボンの剥離がないことが確認した。



図6 モータステータ(固定子)
低電圧超高速仕様のため、巻線ターン数は極小の1ターンとなる。

モータ定格出力は2kW-140000rpmである。高速応答を実現するために瞬時2倍過負荷を許容している。インバータ回路シミュレーションで得た電流波形を使用したモータ FEM 磁界解析によって、磁石渦電流損失を含めた損失計算を実施している。

3.3.2 インバータ

インバータ形式は一般的な電圧形 PWM(Pulse Width Modulation)インバータを採用した。半導体スイッチング素子には高速スイッチングが可能な FET(Field Effect Transistor)を使用した。制御演算には汎用のモータ制御マイコンを使用した。制御方式は、モータの電気的基本周波数が2kHz を越えており、本格的なベクトル制御を行うにはマイコンの処理速度が不足するため、部分的な電流閉ループ制御を追加した V/f 制御を採用した。また、ホール素子やレゾルバのような位置検出器は使用せず、電流検出値をもとにした位置推定によるセンサレス制御とした。高速応答時に位置推定誤差によって脱調したり過電流が発生したりすることを防止するために、電流値と回転数による電流位相補正制御も実施している。

3.4 試験結果

当社製ターボチャージャのコンプレッサインペラをベースとした改良インペラと上述のモータ・インバータからなる電動スーパーチャージャの単体試験結果を示す。コンプレッサ負荷はコンプレッサ吐出配管の出口弁を開閉して変化させた。

図7に示しているのはコンプレッサの特性を表す圧力比-流量マップ上の代表作動点への軌跡である。サージライン寄り、チョーク寄り、インペラ効率最大ラインの各軌跡でモータアイドリング回転数 10000rpm からモータ定格回転数 140000rpm へ 1.0sec の応答性を確認した。図8はこのときのインペラ効率最大ラインでの時系列応答波形である。到達作動点でのモータ出力は2kW、回転数は 140000rpm である。

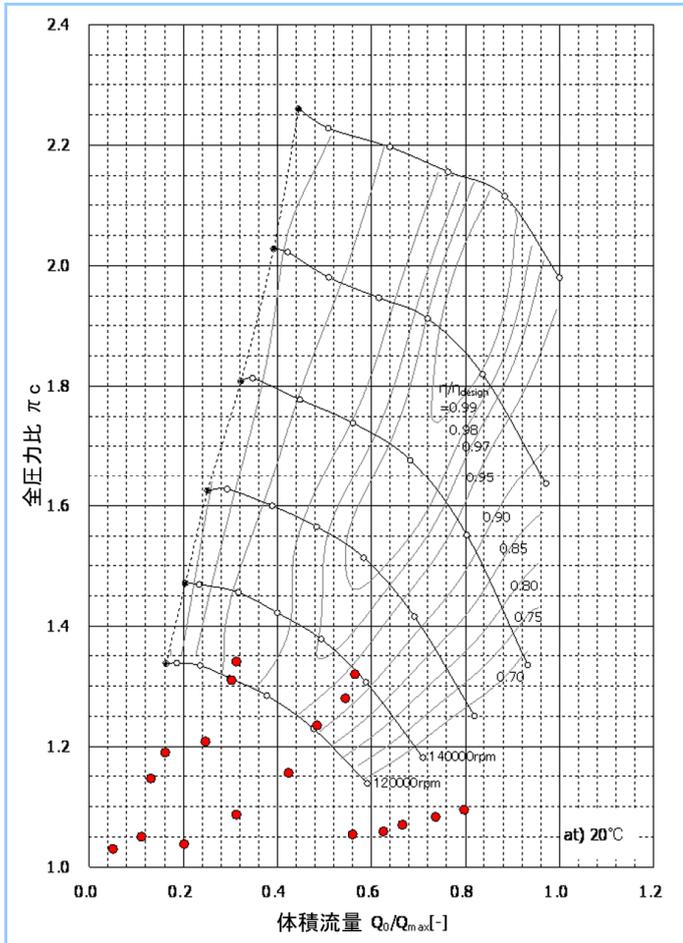


図7 試験で確認したコンプレッサ作動点
コンプレッサ吐出弁の開度を調整することで広い作動範囲で運転可能なことを確認した。

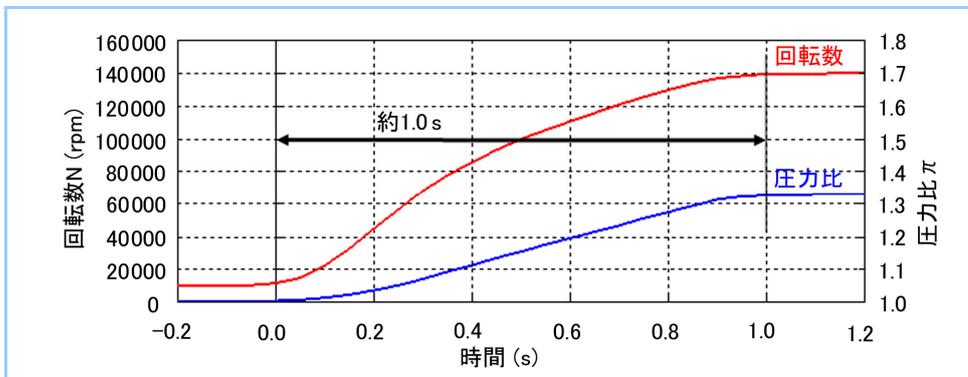


図8 電動スーパーチャージャの高速応答波形
モータ定格である 2kW-140000rpm のコンプレッサ作動点まで約 1.0sec で到達できることを確認した。

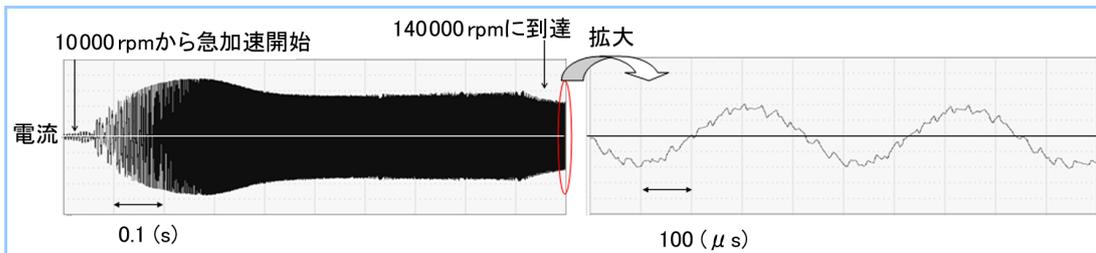


図9 モータの電流波形
高速回転においても PWM 制御により正弦波に近い電流波形で駆動できている。

実測したモータ電流波形の一例を図9に示す。アイドリング回転数 10000rpm から定格回転数 140000rpm へ急加速した例である。脱調することなく低回転から高回転まで制御できている。また、高速回転においても PWM 制御により正弦波に近い電流波形で駆動できている。

実測したモータ・インバータ各部の温度変化を図10に示す。全ての温度が許容値以下であり、事前の FEM, CFD による検討結果が妥当であることを確認できた。なお、今回は連続運転仕様で熱設計を実施したが、短時間運転又は間欠運転を前提とすれば全体の小型化設計が可能である。

軸振動については、コンプレッサ軸端での振幅計測を実施し、主成分である回転次数成分が許容値以下となることを確認している。

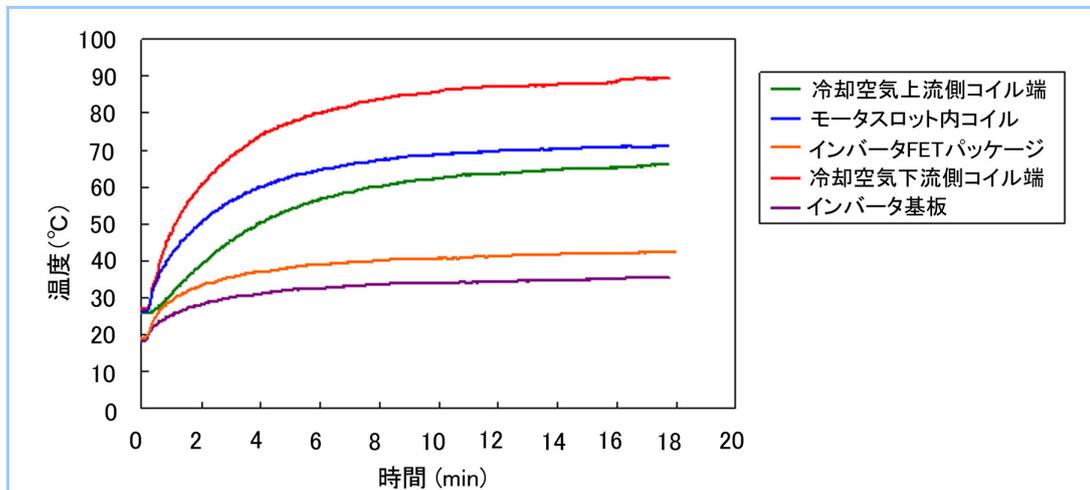


図10 モータ・インバータ各部の温度変化

2kW-140000rpm で運転した際の各部温度変化。全て事前予測どおりに許容値以下となった。

4. 課題と今後の展望

12V 仕様の電動スーパーチャージャの試作・単体試験により、1.0sec という高速応答を実証し、ターボラグの解消に効果があることが実験的に確かめられた。今後は車載機の開発に向け、次の取組を行う。

- ・ 軸受、半導体素子などの耐久性検証。
- ・ 車載性を向上させるための小型低コスト化と低騒音設計
- ・ システムとして最適な電動スーパーチャージャ出力仕様・運転パターンの明確化とそれに対応した制御方式の確立。
- ・ 電動スーパーチャージャとほかの車載電装品が有効に共存する電源マネジメントシステムの確立。

5. まとめ

排気ガス、燃費規制が強化される中、ターボチャージャの新技術として期待されている電動スーパーチャージャの試作試験を行い、その技術的実現性を確認した。超高速モータの適用製品として、今回主に紹介した電動スーパーチャージャ以外にも、電動アシストターボチャージャや燃料電池用電動コンプレッサの開発も進めている。今後もターボチャージャと超高速モータドライブ技術を通して自動車の環境性能と運転する楽しさの追求に貢献していきたい。

参考文献

- (1) Ibaraki, S. et al., Numerical and Experimental Reliability Evaluation of the High Temperature Turbine Wheel for Gasoline Engines, 13th Supercharging Conference, 2008.
- (2) 茨木ほか, 電動アシストターボチャージャ“ハイブリッドターボ”の開発, 三菱重工技報 Vol.43 No.3 (2006)
- (3) Yamashita, Y. et al., Development of Electrically Assisted Turbocharger for Diesel Engine, 8th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, IMechE Paper, p.147
- (4) Toshihiko Noguchi, et al., 220,000-r/min, 2-kW permanent Magnet Motor Drive for Turbocharger, International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005)