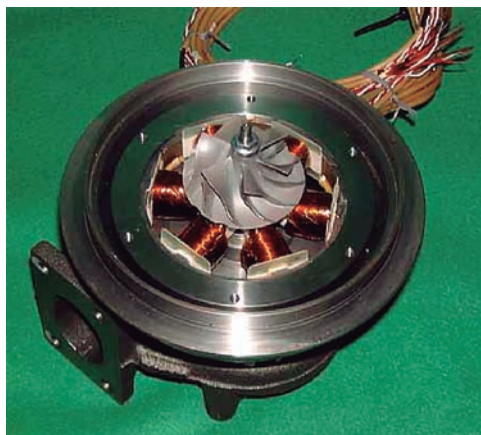


特 集 論 文

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

Development of electrically assisted turbocharger, "Hybrid turbo"



茨木 誠^{*1}
Seiichi Ibaraki

山下 幸生^{*2}
Yukio Yamashita

住田 邦夫^{*3}
Kunio Sumida

荻田 浩司^{*4}
Hiroshi Ogita

陣内 靖明^{*5}
Yasuaki Jinnai

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、電動化が進んでいる。ターボチャージャに高速モータ発電機を内蔵した電動アシストターボ、すなわち“ハイブリッドターボ”はエンジン低速域ではモータアシストによるレスポンスとトルクの向上、燃焼改善と排ガスの浄化、高速域では余剰排気ガスエネルギーの発電回収による高効率化が図れ、将来のターボチャージャとして期待される。当社ではハイブリッドターボの開発を行い、エンジン試験の結果、従来ターボに比べ、エンジントルク、レスポンスが向上し、その有効性を確認した。

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⁽¹⁾。また、ハイブリッド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も進んでおり、バッテリー電源の36V化も始まっている。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。更にはパワーエレクトロニクスの進歩により10万rpm以上の超高速モータ発電機が開発され、ターボチャージャとこれを融合したハイブリッド化が可能となった。バッテリー電源の36V化が普及すると数kW以上の電気負荷が使用できるため、ハイブリッドターボは将来のターボとして期待される。

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”であり、図1にシステムを、図2に試作機を示す。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

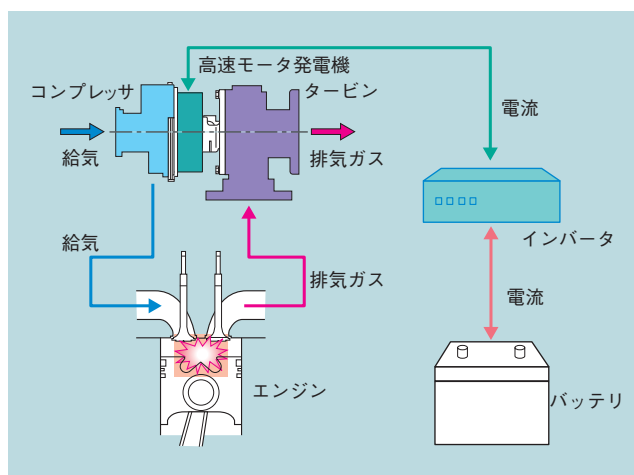


図1 ハイブリッドターボのシステム図
エンジンの負荷に応じ、ハイブリッドターボの高速モータ発電機はインバータを介してバッテリーと電気の授受を行う。

^{*1} 技術本部長崎研究所ターボ機械研究室主席

^{*2} 技術本部名古屋研究所パワーエレクトロニクス・制御研究室

^{*3} 技術本部長崎研究所ターボ機械研究室

^{*4} 汎用機・特車事業本部ターボ部ターボ設計課主席

^{*5} 汎用機・特車事業本部ターボ部ターボ設計課

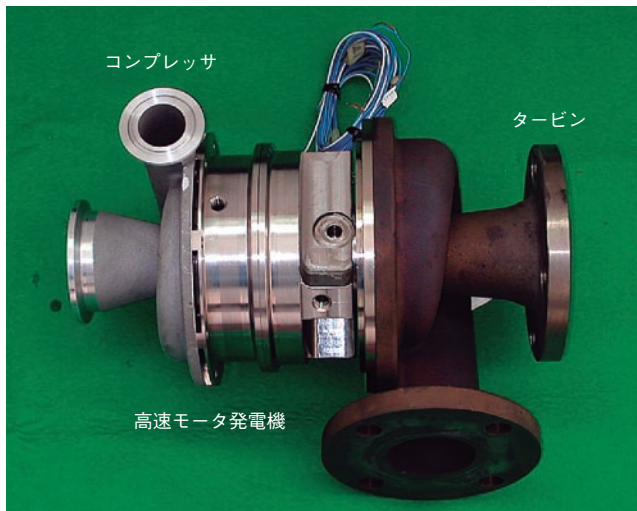


図2 ハイブリッドターボ
ハイブリッドターボの試作機外観を示す。コンプレッサとタービンの間に高速モータ発電機を内蔵する。

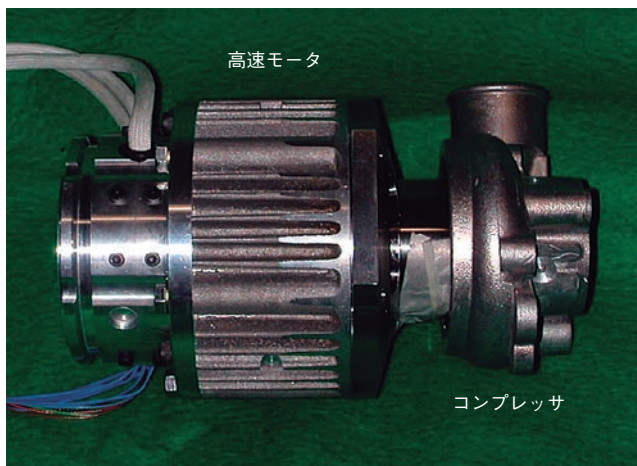


図3 電動コンプレッサ
電動コンプレッサの試作機外観を示す。遠心コンプレッサを高速モータが駆動する。

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。

もう一つは排気ガスを利用しないスーパーチャージャ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3に遠心コンプレッサと高速モータを組合せた電動コンプレッサの試作機を示す⁽¹⁾。

3. ハイブリッドターボの開発

3.1 開発目標

ハイブリッドターボの開発目標はエンジンシミュレーションによる性能検討を行い、以下に定めた⁽²⁾。

- エンジン低速域での燃費を 10 % 向上
- エンジン低速域でのエンジントルクを 50 % 向上
- 加速時のターボラグを 70 % 低減

エンジンシミュレーションは 2L インタークーラー付ディーゼルエンジンを想定し、必要なモータ出力とエンジン性能の関係を推定した。尚、モータ効率は 90 % と仮定し、タービン、コンプレッサは性能試験データを用いた。

シミュレーションの結果を図4に示す。定常特性のエンジントルクは 1 kW のモータアシストで 50 %、2 kW で 100 % 向上する。また、燃費は 1 kW のモータアシストで 8 %、2 kW で 12 % 向上する結果が得られた。過渡特性においては、1.3 kW のモータアシストで 50 % のターボラグ低減、2.0 kW で 70 % のターボラグ低減が得られた。

以上のシミュレーション結果から試作モータの出力を 2.0 kW とした。

3.2 構造と特徴

試作したハイブリッドターボは高速モータ発電機をコンプレッサとタービンの間に配置した構造とした。モータ発電機を内蔵することで軸長と外径の増加は避けられないが、従来ターボ並みのエンジン搭載性を確保するため、軸受、マグネットロータ（回転子）、ステータ（固定子）の形状及び配置を工夫し、軸長と外径の増加を極力抑えた。また、タービン、コンプレッサは従来のターボと同じものを使用し、その他の部品も実績ある従来ターボの部品を流用することで信頼性の確保と低コスト化を図った。

モータ発電機のマグネットロータがコンプレッサの

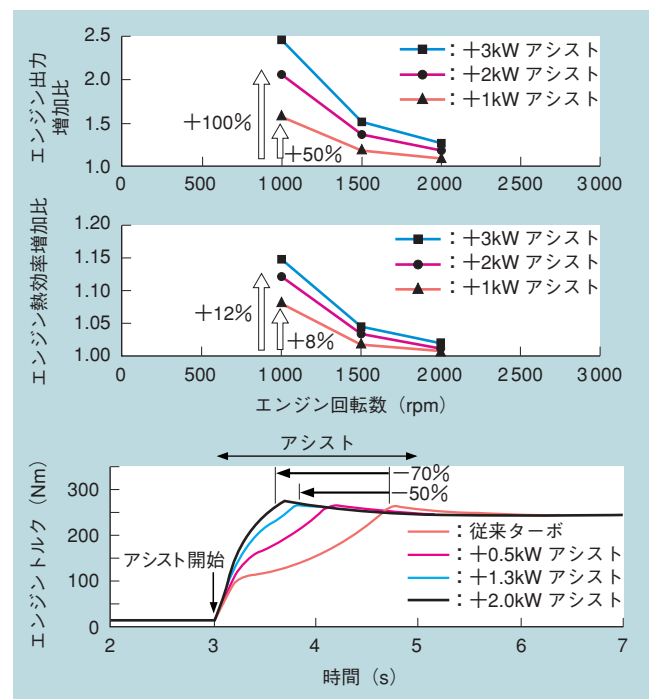


図4 エンジンシミュレーション結果
ハイブリッドターボによりエンジン低速でのトルク、熱効率が向上し、レスポンスも改善される。

背面に位置するオーバーハング軸系であり、軸系の危険速度は従来ターボに比べ低下する。そこで、高速回転時の軸振動抑制の効果が高く、かつ、従来ターボで実績の豊富なフルフロート軸受を採用し、軸受隙間のチューニング等により、共振倍率を低く抑え、振動解析と検証試験で問題の無いことを確認した。

3. 3 パワーエレクトロニクス

3. 3. 1 超高速モータ発電機

超高速モータ発電機には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の強いネオジウム系希土類磁石を使用した。ステータの小型化については、巻線端部の形状を小さくできる集中巻を採用した。更に、ロータとステータの間のギャップ（空隙）を比較的大きくし、電流変化を妨げる働きをするインダクタンスを低減した。また、超高速モータ発電機において特に重要な、ロータの遠心力に対する磁石保持にはカーボンファイバーによる補強で対処した。

モータ発電機を小型化すると、モータ損失による発熱密度が高くなり、冷却が問題となる。冷却が不十分であれば、巻線の過度な温度上昇による絶縁劣化やロータ磁石の磁力が減少する不可逆減磁などにつながる。特に超高速モータ発電機においては、ロータに発生する渦電流損が無視できず、十分に低減しておく必要がある。試作機では、磁場解析の結果から、ロータ渦電流損を低減できるステータ形状として6スロット構造を採用した⁽²⁾⁽³⁾。また、良好な冷却を得るために、ステータを強制油冷、ロータを強制空冷している。試作機とステータの外観を図5に示す。

3. 3. 2 インバータ

永久磁石モータ発電機を駆動するインバータとして、一般的には電圧形PWM（Pulse Width Modulation）インバータが広く用いられている。しかし、対象としているモータ発電機は超高速であり、

電氣的周波数が基本波で数kHzに達する。このため、電圧形PWMで良好な正弦波電流波形を形成することは困難と考え、試作機では擬似電流形インバータを採用した⁽²⁾⁽³⁾。この方式は、電流の値と位相の制御が比較的簡単であり、超高速モータの制御に適している。インバータ回路は、電流値を制御する昇降圧チョップと電流位相を制御する6ステップインバータ回路から構成され、昇降圧チョップの昇圧と降圧の切換えによって力行（モータリング）と回生（発電）の双方向の運転が可能である。また、安定したトルクを発生するために必要なマグネットロータの回転位置検出は、ステータに発生する誘起電圧波形を基に行っており、ホール素子やレゾルバのような外付けの位置検出器は不要とした。但し、起動時や極低速時には誘起電圧が小さく検出が困難なため、開ループで制御を行っている。

尚、インバータの電源は一般の乗用車車載バッテリーの12V、商用車用の24V、または将来の36Vへの対応を想定しているが、まずはハイブリッドターボ自体の性能、有効性の確認を優先するため、高電圧でかつ、既存バッテリーの整数倍である72Vとした。

3. 4 試験結果

3. 4. 1 単体試験結果

ハイブリッドターボ試作機の基本性能を確認するため、ターボの単体試験を行った⁽²⁾。試験はターボチャージャのテストベンチで行い、タービン駆動には空気源を使用した。また、インバータの電源としては長時間の安定した運転と測定のために、72V直流安定化電源を使用した。

表1は試作機のモータアシスト前後におけるターボ回転数とコンプレッサ吐出圧力比の比較を示す。単体試験において、モータは0.16 Nm（120 000 rpm、2 kWに相当）の一定トルクに制御した。

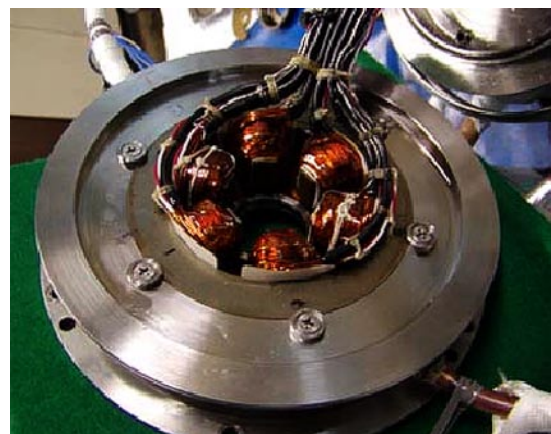
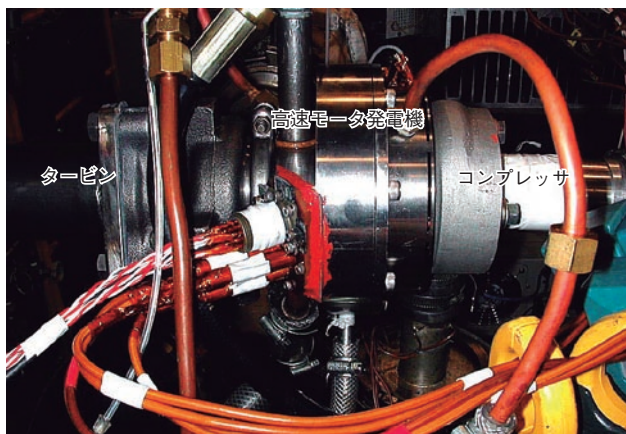


図5 ハイブリッドターボの試験状況及びモータステータ外観
エンジン試験中のハイブリッドターボ。モータステータは6スロット集中巻きで低損失小型化を図った。

表1 モータアシスト前後でのターボ回転数と吐出圧力比の比較

ターボ回転数 (rpm)	アシスト前	40 000	81 000	100 000	122 000
	アシスト後	85 000	109 000	121 000	138 000
コンプレッサ 吐出圧力比	アシスト前	1.05	1.21	1.33	1.50
	アシスト後	1.23	1.41	1.51	1.66

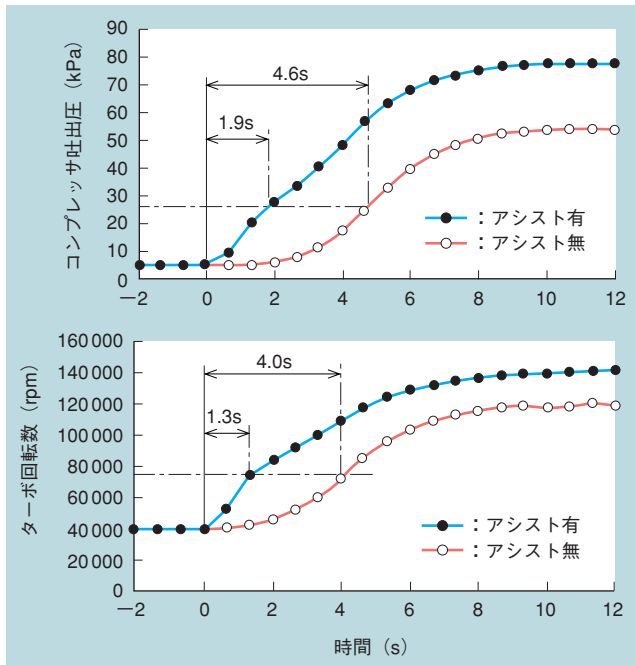
図6 モータアシスト有無によるターボ回転数と吐出圧力比の過渡応答比較
モータアシストにより回転数と給気圧の立ち上がり時間が大幅に短縮される。

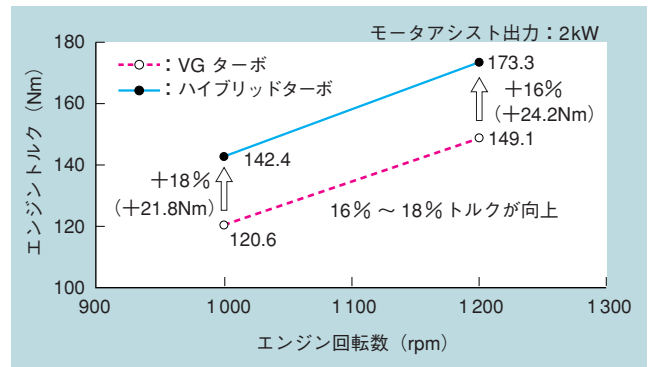
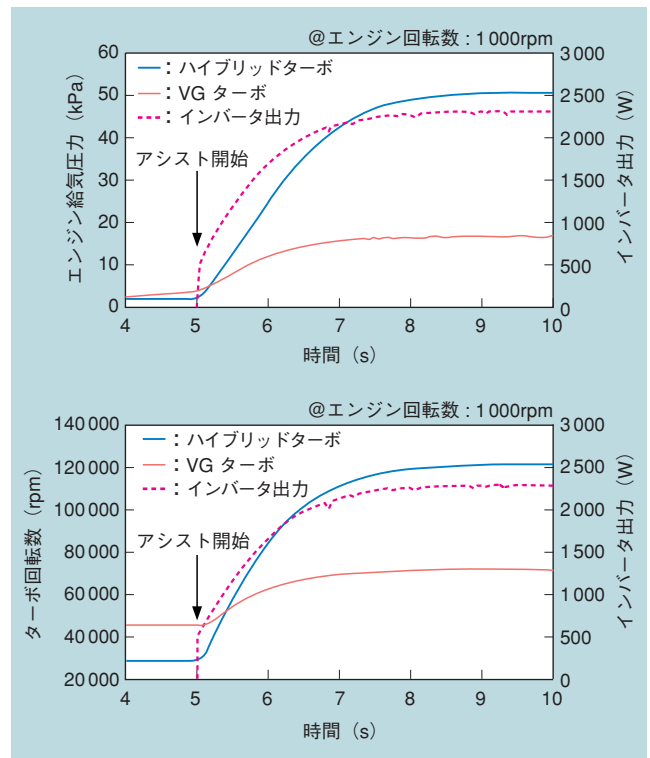
図6にモータアシスト有無によるターボ回転数と吐出圧力比の過渡応答の比較を示す。モータアシストによる効果が顕著な加速時に注目すると、ターボ回転数74 000 rpmに達するまでの時間は33%に低減され、またコンプレッサ吐出圧が26 kPaに達するまでの時間は41%に低減された。加速後数秒経過すると、タービントルクが支配的となるため、表1に示した定常的な差が残る。

3. 4. 2 エンジン試験結果

エンジンテストベンチにてハイブリッドターボのエンジン組合せ試験を実施した⁽²⁾。試験に使用したエンジンは、2Lクラスのインタークーラ付き直噴ディーゼルエンジンで、通常はVGターボが搭載されている。

エンジン試験ではハイブリッドターボは120 000 rpm以下で0.16 Nmの一定トルク制御、120 000 rpm以上で2.0 kWの一定出力制御とした。

図7にハイブリッドターボを用いた場合と、VGターボを用いた場合のエンジン定常トルクの比較を示す。エンジン回転数1 000 rpm、1 200 rpmにおいて約

図7 ハイブリッドターボとVGターボのエンジン定常トルク比較
モータアシストによりエンジン低速時に16-18%のトルク向上が得られる。図8 ハイブリッドターボとVGターボのターボ回転数、給気圧力の過渡応答比較
ハイブリッドターボはVGターボと同等以上の過渡性能を有する。

17%のエンジン定常トルクの向上を確認した。この効果は、主に空燃比の増加に起因していると考えられる。

図8にハイブリッドターボを用いた場合と、VGターボを用いた場合のターボ回転数の過渡応答比較を示す。エンジンの初期状態はハイアイドル状態で、エンジン負荷の上昇と同時に、エンジン出力とハイブリッドターボのモータ出力を発生させている。ハイブリッドターボ使用時のターボ回転数の昇速レートはVGターボ使用時よりも速く、少なくともVGターボ同等以上の加速性能が得られることを確認した。

4. 課題と今後の展望

自動車用エンジンにハイブリッドターボを適用することにより、エンジントルクの向上、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、次の取り組みを行う。

- 既存の車載バッテリー 12V, 24V, または将来普及が予想される 36V 仕様で電氣的・熱的に成立する超高速モータ、インバータの技術の確立。
- エンジン、排気ガス後処理装置との組合せで、システムとして最適なハイブリッドターボの制御方式の確立。
- ハイブリッドターボと他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. おわりに

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术として期待されているハイブリッドターボの試作試験を行い、その有用性を確認した。超高速モータ発電機の適用製品として、今回主に紹介したハイブリッドターボ以外にも、電動スーパーチャージャやそれを応用した燃料電池用電動コンプレッサの開発も進めている⁽¹⁾。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) 茨木誠一ほか、三菱重工における過給機の要素開発、日本ガスタービン学会誌 Vol.33 No.4 (2005) p.288
- (2) Takahashi, I. et. al., A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter, Industry Applications, IEEE Transactions, Vol.30 Issue 3 (1994) p.683
- (3) 高田陽介ほか、ターボチャージャ用 220 000 r/min - 2 kW PM モータ駆動システム、電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) Vol.125-D (2005) p.854
- (4) Yamashita, Y. et al., Development of Electrically Assisted Turbocharger for Diesel Engine, 8th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, IMechE Paper, p.147



茨木誠一



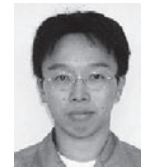
山下幸生



住田邦夫



萩田浩司



陣内靖明