

# CLARITY FUEL CELL 用エア供給システムの開発

## Development of Air Supply System for CLARITY FUEL CELL

菅 原 竜 也\*

Tatsuya SUGAWARA

立 花 優\*

Yu TACHIBANA

金 沢 卓 磨\*

Takuma KANAZAWA

今 井 直 樹\*

Naoki IMAI

### 要 旨

CLARITY FUEL CELL の燃料電池システムをフロントフード内に搭載するために、小型のエア供給システムを開発した。従来のリショルム型に対して静粛性に優れる電動ターボ型のコンプレッサを採用することにより、消音補機類の体積で 50% の小型化を実現した。

空気の清浄性を求められる燃料電池のために、軸受けにオイルが不要なエアベアリングを採用した。

ターボ化の課題である運転領域の制約に関しては、斜流式コンプレッサの採用とコンプレッサを 2 段にすることで、運転領域のワイド化と従来比 1.7 倍の供給圧力向上を達成した。

また新規でレゾルバレス制御用インバータを開発することで、モータを回転角センサレスとすることが可能となり、モータの高回転化と小型化に寄与した。さらにパワーモジュールのフルモールド化とプレスフィット接続によりインバータ本体の小型化を達成した。

### ABSTRACT

A compact air supply system has been developed for the CLARITY FUEL CELL fuel cell system in order to make it possible to fit the system under the front hood of the vehicle. The use of a motorized turbo compressor realizing greater quietness than a conventional Lysholm compressor made it possible to reduce the volume of the noise-reducing auxiliary devices by 50%.

Air bearings that do not require oil were used as the compressor bearings based on the necessity of supplying pure air to the fuel cell system.

To address the issue of restriction of the operating range of the compressor as a result of turbocharging, a mixed-flow compressor was used, and two-stage compression was applied. This realized a wide operating range and made it possible to increase air supply pressure 1.7-fold compared to a conventional compressor.

The development of a new inverter using resolver-less control made it possible to do away with the rotation angle sensor in the motor, contributing to increased motor speed and increased compactness. The use of a full-mold power module and a press-fit connection method reduced the size of the inverter unit.

### 1. ま え が き

燃料電池を発電させるためには、燃料電池内の発電面に水素および空気を連続して供給することが必要である。そのために燃料電池システムは大きく分けて Fig. 1 の四つのシステムで構成されている。

水素は車両に搭載されている水素タンクから水素供給システム中の減圧工程を経て燃料電池に供給され、空気はエア供給システム内のエアコンプレッサで吸入圧縮して燃料電池に送られる。

Honda では 2002 年に開発した FCX<sup>(1)</sup>よりエアコンプレッサとして電動リショルム型コンプレッサを用いてきた

が、CLARITY FUEL CELL において燃料電池システムをフロントフード内に搭載するために<sup>(2)</sup>、システムの小型化を目指して電動ターボ型コンプレッサを用いた次世代のエア供給システムを開発した (Fig. 2)。

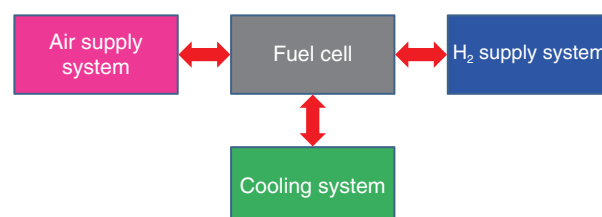


Fig. 1 Overview of fuel cell system

\*四輪 R&D センター

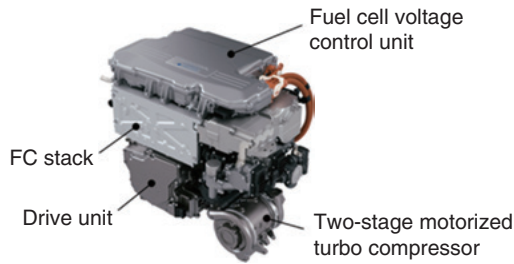


Fig. 2 Downsized fuel cell powertrain

## 2. 開発のねらい

従来のリショルム型コンプレッサは、コンプレッサのロータ内部で一度空気を圧縮してから放出する構造のために、動作圧力を高くするほど吐出音が大きくなる。そのため、吐出音を減衰させる消音デバイスは動作圧力を高くするほど容量および容積を大きく取らなければならない課題があった。一方ターボ型ではリショルム型のような内部圧縮工程は無く吐出音が低いため、動作圧力を高めても消音デバイスの削減や、システムの小型化が可能と考えた。

さらに、燃料電池に投入する空気の圧力を上げることで酸素分圧が上昇し、高出力時における燃料電池の電圧降下が改善される。そのため圧力上昇に必要なエアコンプレッサ消費電力増加分を差し引いても、Fig. 3 に示すように燃料電池システム全体の出力を上昇させることが可能となる。この効果によりスタック必要セル数を削減し、小型化とコスト低減に寄与できると考えた。

また、運転圧を高圧化することで Fig. 4 に示すようにスタック内部の相対湿度を上げることができる。このことにより必要となる加湿量が低減し、加湿器の小型化が実現できる。その上で運転圧の高圧化により運転温度が上がる条件でも適度な湿度を維持することが達成できる。このことにより急坂登坂時のような走行風が少なくラジエータ冷却能力が低いために運転温度が上がるシチュエーションでも、燃料電池の発電性能を保持し、車両動力性能を高い状態で維持することが可能となる。

以上より CLARITY FUEL CELL のエア供給システムを開発するにあたり、ねらいを以下のように定めた。

- (1) エア供給圧力の上昇により燃料電池出力の向上で燃料電池に必要なセル数を削減し、小型化とコスト低減をおこなう。
- (2) エア供給圧力上昇により必要となる加湿量の低減で、加湿器の小型化と燃料電池の高温運転領域を拡大する。
- (3) 電動ターボ型コンプレッサ採用による静粛性向上で消音デバイス類を削減し、エア供給システムを小型化する。

- (4) フロントフード内搭載を実現するために、モータの小型化が可能なレゾルバレスモータとし、センサレス制御可能なインバータを開発する。

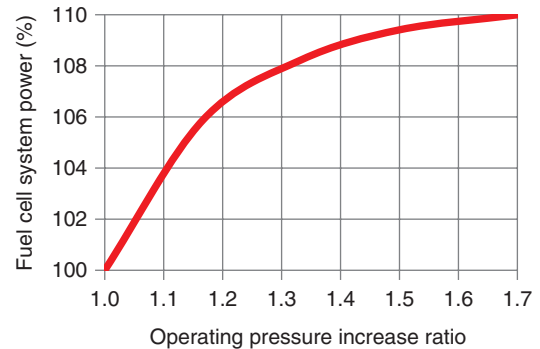


Fig. 3 Correlation between cathode operating pressure and fuel cell system power

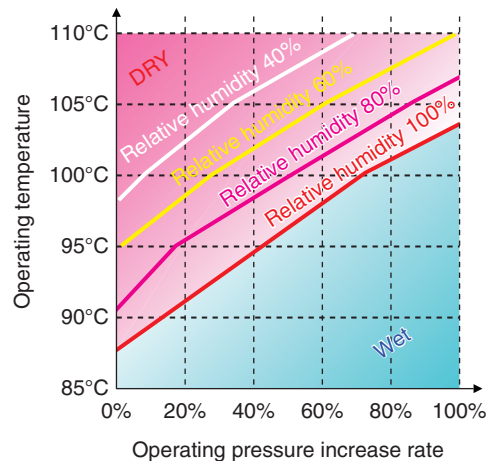


Fig. 4 Correlation between stack humidity and pressure and temperature

## 3. 2 段過給電動ターボ型コンプレッサの特徴

Fig. 5, Fig. 6 に今回 Honeywell 社と共同開発した 2 段過給電動ターボ型コンプレッサの外観と断面図を示す。

本構造の特徴を下記に挙げる。

- (1) エアベアリングを用いた軸受け構造
- (2) 低圧側コンプレッサと高圧側コンプレッサをロータの両端に備えた、2 段過給構造
- (3) コンプレッサのターボ化による静粛化

### 3.1. 軸受け構造

通常、内燃機関用のターボ軸受けはオイル潤滑式を採用している。しかし燃料電池システムにターボ型コンプレッサを採用するにあたっては、軸受けより流出するオイルが燃料電池を被毒させ発電能力を劣化させる懸念が

あった。そこで、航空機の空調システム用ターボで実用されているエアベアリングを自動車用として世界で初めて採用した。構造例としてラジアル側のエアベアリングを Fig. 7 に示す。

ロータが浮上する原理を Fig. 8 に示す。ロータの回転と共に、空気の粘性作用でくさび状の隙間に空気が押し込まれ、圧力(動圧)が生じることでロータを浮上させる。

浮上後、Fig. 9 に示すように発生した圧力はトップフォイルを介してバンプフォイルに伝達される。バンプフォイルが変形することにより圧力変動を吸収し、フォイル間の

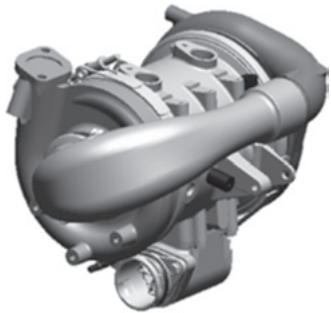


Fig. 5 Two-stage motorized turbo compressor

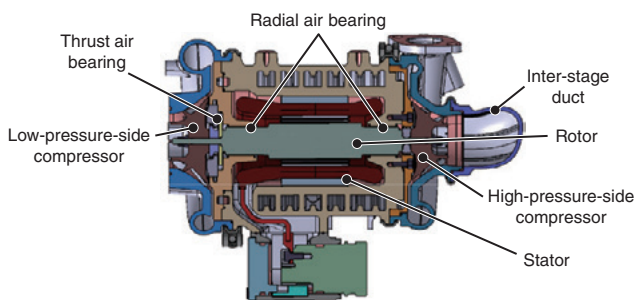


Fig. 6 Sectional view of motorized turbo compressor

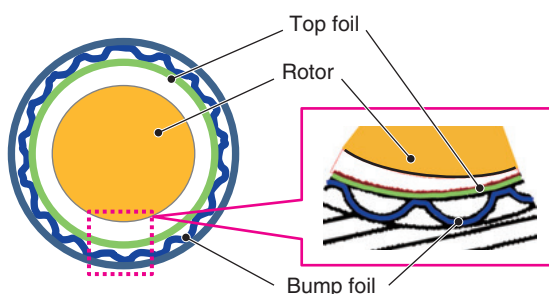


Fig. 7 Structure of radial air bearing

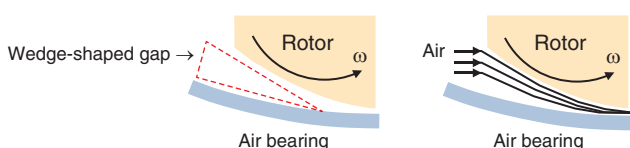


Fig. 8 Rotor lift-off mechanism

摩擦力で変動を減衰することで、ロータ回転数変動に伴う圧力変動に対しても最適な空気薄膜厚さ (Thin air layer thickness) を維持し、ロータを浮上し続けることができる。

### 3.2. コンプレッサ構造

燃料電池システムの小型化のために、燃料電池へのエア供給圧力の高圧力化が求められた。また、燃料電池システム用エアコンプレッサとして、負荷や温度、気圧などの環境変化に応じた圧力、流量の制御と加減速に代表される過渡領域の制御が必要なため、コンプレッサとしてワイドな運転領域の確保が求められた。

一般的なターボコンプレッサを Fig. 10 に示す。エンジン用のターボコンプレッサとしては遠心式 (Centrifugal) が良く用いられている。遠心式では流体のすべてが羽根車の外周から流出するので大きな圧力上昇が可能である<sup>(3)</sup>。しかし、流量を減少させていくと、系の圧力や流量が変動し始める<sup>(4)</sup>サージにより運転領域が狭くなる傾向にある。

他方、航空機のジェットエンジンで使われている軸流式 (Axial) は流量を大きく取れるが、羽根車単段では大きな圧力上昇が確保できず、高い圧力上昇が必要な場合には羽根車を多段化する必要が生じる。

そこでワイドな運転領域を確保するために、遠心式と軸流式の間の特徴を持つ、斜流式 (Mixed-flow) を2段化することで高い吸入圧力と吐出圧力の比 (圧力比) と流量の両

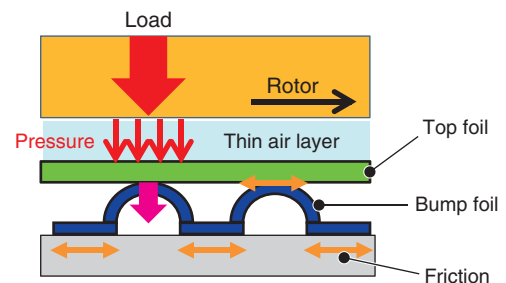


Fig. 9 Operation of air bearing

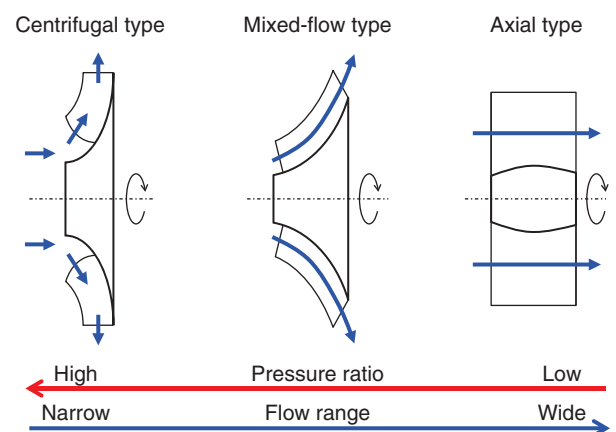


Fig. 10 Compressor wheel type

方を確保する構造とした (Fig. 11).

この構造により Fig. 12 および Table 1 に示すように遠心1段階式と比較して、従来比 1.7 倍の高い圧力比とワイドな運転領域を両立することができた。

### 3.3. コンプレッサのターボ化による静粛化

燃料電池自動車は内燃機関を持たないため、走行中も静粛である。そのためエアコンプレッサの作動音を低減することが重要である。

Fig. 13 に従来使用していたリショルム型コンプレッサの構造を示す<sup>(5)</sup>。リショルム型は二つのロータで内部の空気を圧縮して断続的に吸入し、吐出をする構造のため、吸気と吐出側に脈動音が発生する。さらにロータがギヤを介して駆動する機構のためギヤ音もコンプレッサの作動音としてキャビン内に侵入する。そのため燃料電池自動車の特長である、走行時の静粛性を確保するために消音用の補機類が多数必要となっていた。

今回ターボ型のコンプレッサを採用することで脈動を低減し、Fig. 14, Fig. 15 で示すように吸気側と吐出側で発生する騒音の低減を達成した。

またリショルム型では二つのロータはギヤ駆動であったが、コンプレッサとロータを同軸化することによりギヤは不要となり Fig. 16 で示すように本体からの放射音も低減した。

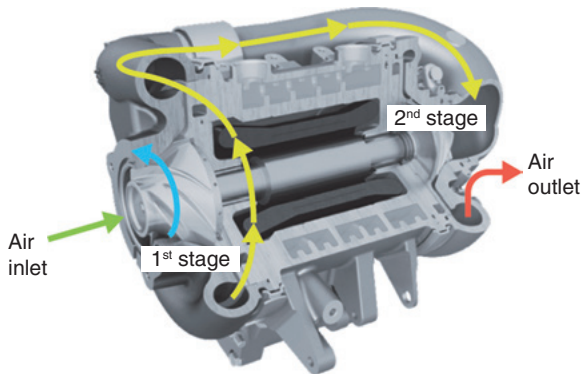


Fig. 11 Internal air flow of two-stage motorized turbo compressor

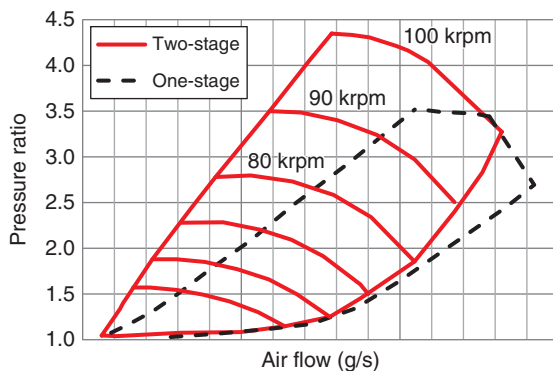


Fig. 12 Performance map

Table 1 Specifications

|                        | One-stage   | Two-stage  |
|------------------------|-------------|------------|
| Wheel type             | Centrifugal | Mixed-flow |
| Maximum rotation speed | 100 krpm    | 100 krpm   |
| Maximum pressure ratio | 3.5         | 4.2        |

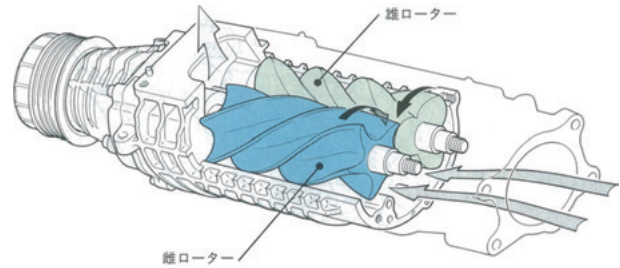


Fig. 13 Cross-section of Lysholm compressor

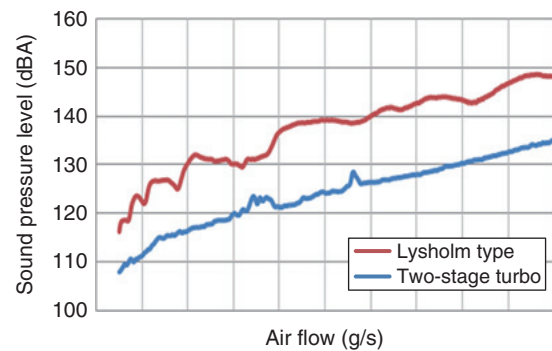


Fig. 14 Inlet noise comparison

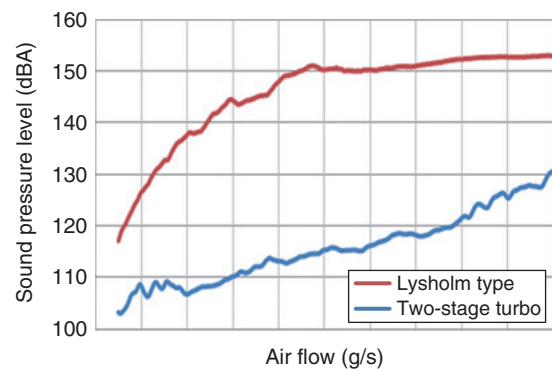


Fig. 15 Outlet noise comparison

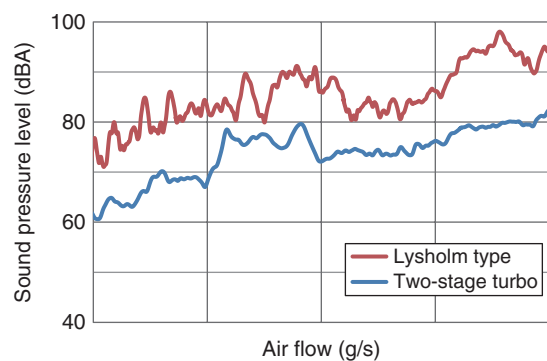


Fig. 16 Comparison of radiation noise near compressor

コンプレッサの静粛性が向上することで、これまでフロントフード内で多くのスペースを必要としていた吸気脈動対策のレゾネータの小型化、吐出脈動対策のサイレンサおよび放射音低減カバーの廃止をすることができた。その結果、Fig. 17 に示すように消音補機はエアクリーナと一体化することによって、前モデルの FCX クラリティ<sup>(6)</sup> 比で体積 -50% の小型化を達成することができた。

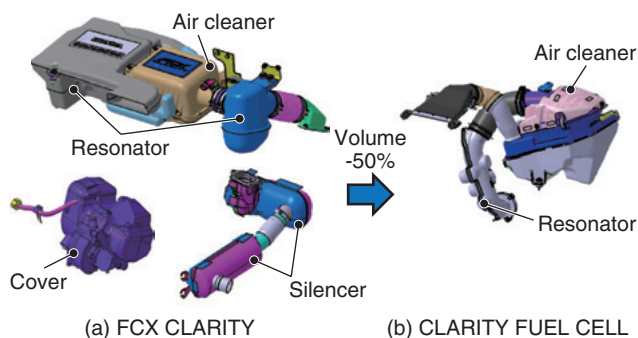


Fig. 17 Downsized noise reduction devices

#### 4. 2 段過給電動ターボ駆動用インバータ

Fig. 18 に示す BRUSA 社と共同開発したインバータユニットは下記の特徴を有する。

限られた空間内に搭載可能とするために Intelligent power unit (IPU) ボックスとの一体化構造にし、またコンプレッサ軸回転数 10 万 rpm でのセンサレス制御を達成するための高速スイッチングに対応したデバイスおよび冷却構造である。

##### 4.1. インバータと IPU ボックスとの一体化

インバータユニットを車両へ搭載するに際しパッケージとして二つの項目を満足する必要があった。

一つはキャビン外配置でインバータユニットの一次側に繋がる直流高圧配線 (DC 配線) を IPU ボックスと一体接続することである。もう一つは各衝突要件試験にてユニットのケースに損傷を受けないレイアウトとすることである。

これらを満たすパッケージサイズは、IPU ボックスの前面側で各衝突試験にて剛体が侵入してこないエリアに収まる必要がある。要求性能を満足した上でそのエリア内に搭載できるように、専用インバータを開発し、IPU ボックス一体のパッケージとした (Fig. 19)。

メンテナンスの際に作業者の電気安全を確保するために、車載状態では DC 配線接続部へのアクセスができない構造とした。この構造を実現するために DC 配線を IPU ボックスからインバータユニットへ直接引き込むレイアウトが必要となった。その際の課題となる IPU ボックスの防水性能を確保するために IPU ボックスとユニット間の接

続をフレキシブルなゴムダクトにて対応した (Fig. 20)。また浸水が想定される床下に搭載されることから (Fig. 21)、防水や防食への設計上の配慮として、防錆性の高いアルミ材料をケースへ適用した。またケースとリッドの隙間の腐食対策として防水構造に Formed-in-placed gasket (FIPG) を採用した。

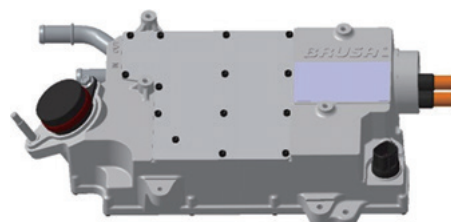


Fig. 18 Air pump inverter unit

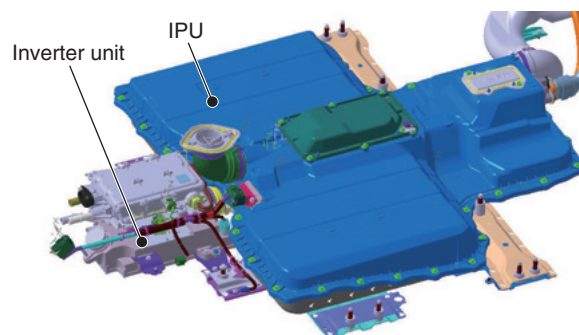


Fig. 19 Potential area for fitting of controller unit

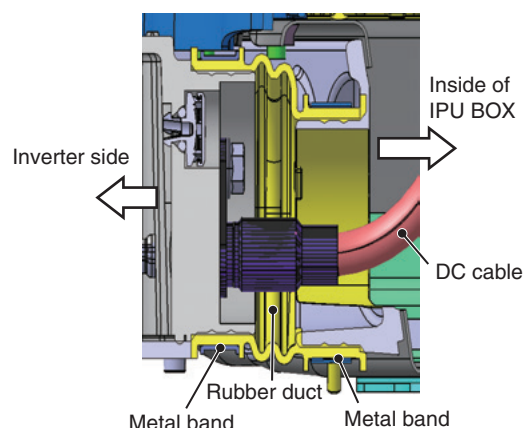


Fig. 20 Sectional view of duct



Fig. 21 Inverter mounting position

#### 4.2. 高速スイッチング対応技術と小型化技術

小型化と高効率化を達成するために下記三つの要素技術を適用した。

フルモールドモジュールによる高放熱化とプレスフィット接続による小型化を適用した。さらに、センサレス制御によるモータの小型化である。

まずフルモールドモジュールは、Direct Copper Bonding (DCB) 基板をトランスファモールドにて封止したパワーモジュール (Fig. 22, Fig. 23) を採用することで、半導体チップからベースプレートまでの熱抵抗を小さくすることによる高効率な放熱が可能となり、従来の Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) のスイッチング周波数を超える 24 kHz でのスイッチングが可能となった。

次にパワーモジュールピンへ適用したプレスフィット接続は、パワー基板間との電氣的接続としてプレスフィットピンを基板スルーホールに強圧入とすることで、熱衝撃に起因する半田クラック発生による信頼性の低下を排除できた。さらに配線の簡素化と部品間の距離を短縮したことによりユニットを小型化できた。また開発期間短縮のため IEC 規格に基づく設計製造ライセンスの取れたプレスフィット端子を採用することとした。仕様上重要となる大電流通電接触部 (Fig. 24) の温度上昇値と接触抵抗値の関係性を明確にして管理することで、電氣的接続部の耐久信頼性が確保できた。

最後にセンサレス制御では、スイッチング周波数を可聴域外の 24 kHz とし、モータを 1 極対にすることにより、スイッチングノイズの低減と共に最高回転数 10 万 rpm でのモータ制御安定性を確保した。センサレス制御での制御値と実回転数の挙動を Fig. 25 に示す。本制御では回転停止時間の短縮を目的とした減速時に PWM 制御を用いた電力回生をすることで、加速時のみならず減速時にも高い応答性を達成した。

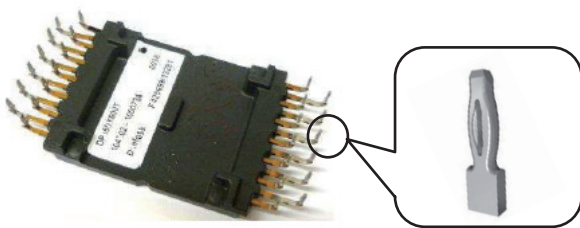


Fig. 22 Full-mold module and press-fit pin

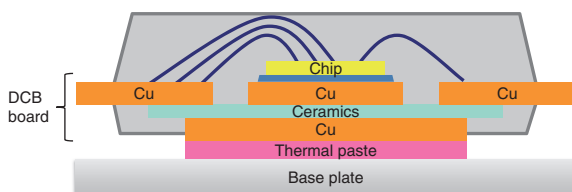


Fig. 23 Sectional image of full-mold module

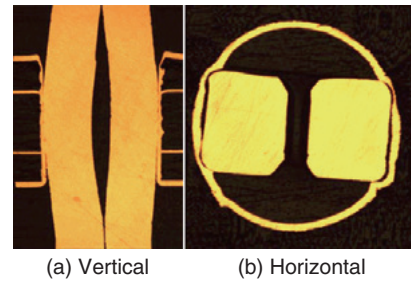


Fig. 24 Cross-section of press-fit connection

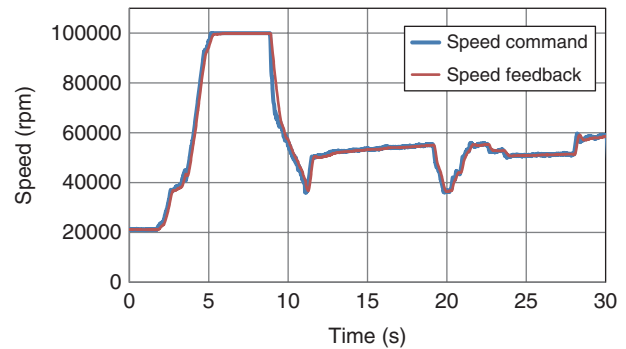


Fig. 25 Rotor speed behavior with sensor-less control

## 5. まとめ

燃料電池へのエア供給圧力向上および静粛性向上をねらい、2 段過給電動ターボ型コンプレッサの開発をおこない、以下の成果を得た。

- (1) 斜流式コンプレッサを 2 段化することで、従来比 1.7 倍のエア供給圧力向上を達成した。
- (2) 清浄な空気を必要とする燃料電池システムへターボコンプレッサを適用するために、エアベアリングを採用し、オイルが不要な高速軸受けを実現した。
- (3) 電動ターボ型のコンプレッサを採用することにより、消音補機類の体積で 50% の小型化を実現した。
- (4) 衝突安全、電気安全を確保するため IPU ボックスと一体化をしたインバータにフルモールドモジュール、プレスフィット接続技術を導入することで小型な高回転センサレス制御インバータを実用化し、モータの小型化に寄与した。

## 参考文献

- (1) 川崎聡志, 小野徹, 小椋正己, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗車用 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 1-6
- (2) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7

- (3) 日本機械学会:機械工学便覧応用編 B5 流体機械, 日本機械学会出版, p. 11, 68, (1986)
- (4) ターボ機械協会:ターボ機械入門編, 日本工業出版, p. 99, (1989)
- (5) 星嶋浩:世界初の自動車用ミラーサイクルエンジンとヨーレート感応型4WSに注目!, モーターファン別冊, ユーノス 800 のすべて, p. 14-21, (1993)
- (6) 松永稔, 福島達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行: FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 21, No. 1, p. 7-14

■ 著 者 ■



菅原 竜也



金沢 卓磨



立花 優



今井 直樹