

第2世代MIRAI向け エアコンプレッサの開発

Development of Air Compressor for Second-Generation MIRAI

加藤 弘晃^{*1}
Hiroaki Kato

光田 聡^{*1}
Satoru Mitsuda

榎山 亮^{*1}
Ryo Umeyama

福山 了介^{*1}
Ryosuke Fukuyama

鈴木 希幸^{*1}
Noriyuki Suzuki

*1 コンプレッサ事業部 FCプロジェクト

要旨

2020年末にトヨタ自動車(株)より第2世代となるFCEV(燃料電池自動車)MIRAIが発売された。第1世代からFCシステム全体が一新され、高性能化、小型軽量化とともに低コスト化が推し進められた^[1]。我々はこれまで技術実証段階から第1世代MIRAIまで、車両のニーズに合わせてコンプレッサ型式をスクロール式、ヘリカルルーツ式と都度システムでの使われ方に最適にしながら、エアコンプレッサを製品化してきた。今回もFCEV普及拡大に貢献するため、高性能化、小型軽量化、低コスト化を両立する新たな増速ターボ式電動エアコンプレッサを開発したため、以下にその取り組みを紹介する。

キーワード: FCEV、増速ターボ式電動エアコンプレッサ、可動ローラ、トラクションドライブ

Abstract

At the end of 2020, Toyota Motor Corporation released the second-generation FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) MIRAI. The entire FC system was completely redesigned from the first-generation, and cost reduction was promoted along with higher performance, smaller size and lighter weight^[1]. From the technical demonstration stage to the first-generation MIRAI, we have commercialized Air Compressor by optimizing the compressor type to scroll type, helical roots type and the usage in the system each time according to the needs of the vehicle. In order to contribute to the spread of FCEVs, we have developed a new accelerating centrifugal electric air compressor that achieves high performance, smaller size, lighter weight, and lower cost.

Keywords: FCEV, Accelerating centrifugal electric air compressor, Movable roller, Traction drive

1. はじめに

2020年10月、日本政府より2050年までにカーボンニュートラル・脱炭素社会の実現を目指す宣言がなされ、これまでの化石エネルギーを主とした体制からの転換が図られるなか、自動車の電動化トレンドがさらに加速している。「究極のエコカー」であるFCEVの真の普及に向けて、トヨタ自動車(株)から第2世代の新型MIRAIが発売され、FCEVの新たなステージが幕を開けた。

我々は、車両の進化に合わせてコンプレッサ型式を都度システムでの使われ方に最適にしながら、エアコンプレッサの開発を進めてきた。第1世代MIRAIでは主に高効率化・高応答性を狙ってヘリカルルーツ式を選定し製品化した^[2]。第2世代MIRAI向けでは、システム出力アップに対応した、さらなる高効率化に加えて、小型軽量化、コスト低減を実現するために、型式の再選定から検討をはじめ、新たなチャレンジにより増速ターボ式電動エアコンプレッサ(図1)を開発したため、これらについて概説する。

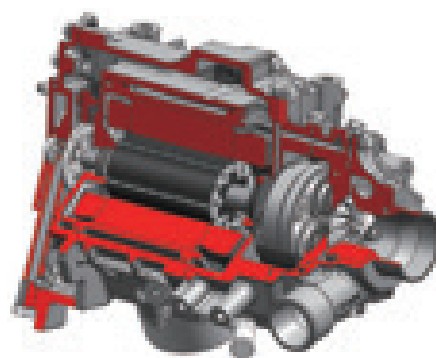


図1 エアコンプレッサ カットモデル
Fig.1 Cut model of Air Compressor

2. FCシステムの概要と エアコンプレッサの機能

FCEVは、酸素と水素との化学反応によって得られる電気を使用して走行する電動自動車である。発電を行うFCスタックは車両のフロントフード内に搭載され、エアコンプレッサはFCスタックを固定するFCフレームに防振マウントを介して取り付けられている(図2)。

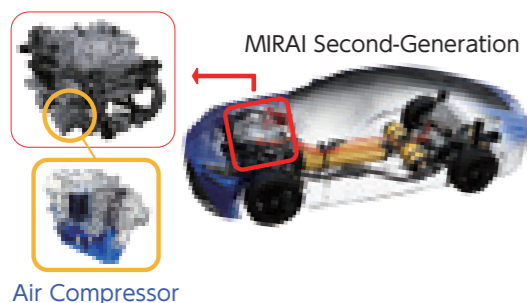


図2 エアコンプレッサの車両搭載位置^[3]
Fig.2 Air Compressor installation to MIRAI

エアコンプレッサは発電に必要な酸素を大気から吸引して、絶えずFCスタックへ空気を圧送する機能を担い、FCEVの「走る・曲がる・止まる」の内の「走る」に関わる重要機能部品である(図3)。送り込む空気量は、ユーザのアクセルワークに応じてアイドル時の小流量から加速時の大流量まで求められる。さらに圧力比の制御範囲はワイドレンジなほど効率よく発電できる領域が広がることから、エアコンプレッサの性能が車両性能に大きく影響を与える^{[4][5]}。

Air Compressor

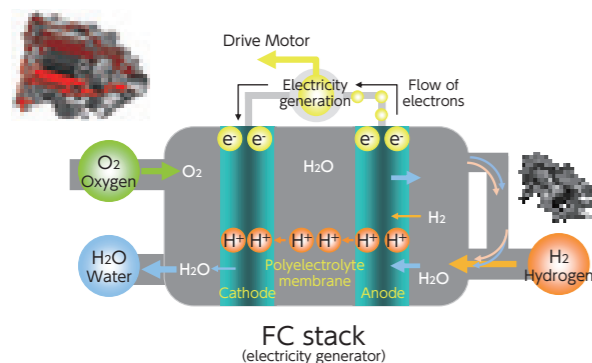


図3 FC発電の概略図
Fig.3 Schematic diagram of FC power generation

3. エアコンプレッサの構成

図4にエアコンプレッサの断面図を示す。圧縮部、増速部、モータ部にて構成され、高電圧駆動のモータを動力源に一軸上で作動する。トルク制御されたモータ回転を増速部にて11倍の回転数まで高め、インペラを超高速回転させることで空気を圧送する。増速機構の詳細は後述する。

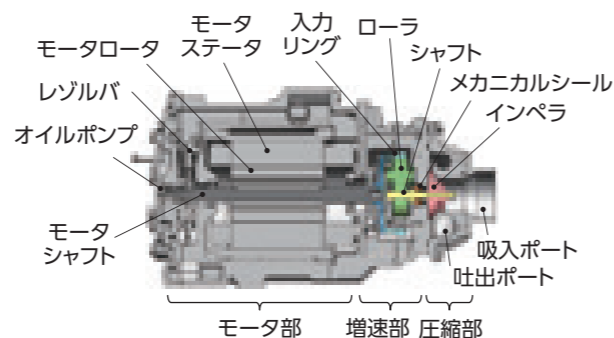


図4 第2世代エアコンプレッサの断面図
Fig.4 Cross-section of Air Compressor

4. 型式の再選定

第2世代に適応するコンプレッサ型式について日々議論し、ターボ式を主軸に再選定を進めた。ターボ式は超高速回転により小型化が可能であり、連続的に空気を吸い込んで流体すべてをインペラ外周から吐き出せるため、大きな圧力上昇を得ることができる。また、脈動音がないためレゾネータやサイレンサ等の消音補機類を廃止することができる。

表1 車両ニーズに対するコンプレッサ型式の星取表
Table.1 Matrix of compressor type for vehicle needs

圧縮機の型式	体格	(悪) ×⇔△⇔○⇔◎ (良)			
		高吐出圧力	NV	コスト	信頼性
スクロール式	×	◎	○	×	○
ヘリカルルーツ式	△	○	○	△	◎
ターボ式	直結	○	○	◎	△
	増速	○	◎	○	◎

ターボ式で効率良く空気を圧送するためには、インペラの回転数を少なくとも15万回転以上で使用したいが、モータの回転で直結駆動する場合、制御周波数の制約からインバータの新規開発が必須である。一方、モータの回転を増速駆動する場合は、増速機構の部品追加が発生するものの、THSII(トヨタハイブリッドシステム)のMG1(ジェネレータ)用インバータを完全流用でき、コストメリットを生かしつつ、かつ汎用性を持たせることが可能であった。これらをまとめた表1の星取表から総合的に増速ターボ式を選定した。

5. 増速機構を用いた高回転化

従来、増速機構としては歯車タイプが一般的だが、今回低振動を狙ってトラクションドライブを活用したローラタイプの増速機を採用した。この方式の特徴は高い圧力下で固化するオイルの性質を利用し、部品間はオイルを媒介にして非接触状態でトルク伝達が行われる(図5)。金属同士の接触がないため最大18万回転を超える高回転域においても振動が少なく、長時間の運転でも摩耗が極めて少ないといった利点がある。

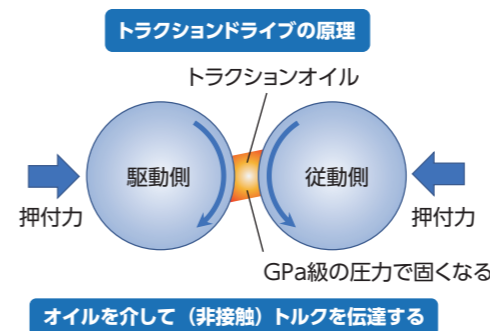


図5 トラクションドライブの原理
Fig.5 Principle of traction drive

一方、すべりなくトルクを伝達するためには先に述べた部品間に介在するオイルを高い圧力(GPa級)にする必要がある。必要な圧力は温度やトルクの大きさにより変化するが、圧力が過剰の場合は消費電力の増加や部品の疲労破壊といったクルマの「走る」に直結するフェイルに至るため、最小限での圧力付与が望まれる。

このような背景から、今回世界初(当社調べ)となるトルクの大きさに応じて圧力が付与できるトルク感応型を新たに考案した。

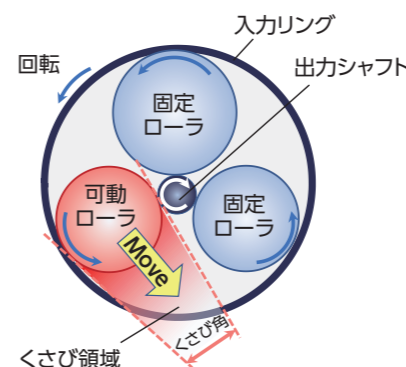


図6 可動ローラの配置
Fig.6 Illustration with a moveable roller

トルク感応型は、わずかに径の異なるローラを組合せて「くさび領域」を形成し、三つのローラのうち一つが可動できるように配置する(図6)。可動するローラは運転時のトルクの大きさに比例してくさび領域への食い込み量が自動的に決まるため、トルクを伝達するのに過不足ない圧力で調圧されるしくみである(図7)。この原理を具現化する際には、トルク感応型が効果的に機能するように、トルクレンジをくさび角度や可動量から決め、すべりに対するロバスト性を確保するため各部の寸法公差を緻密に補正しながら設計を進めた。

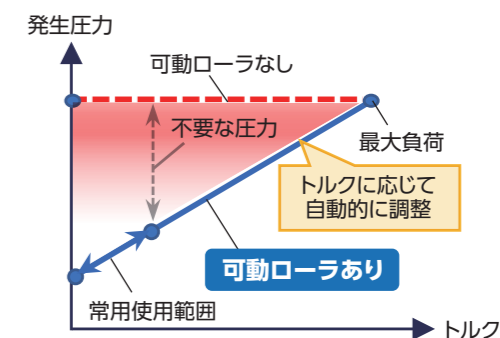


図7 トルクと発生圧力の関係
Fig.7 Relationship between torque and pressure

さらに疲労破壊への対策として、入力リングをはじめとする各形状の寸法は、オイルの圧力を高めつつ部品に発生する応力がより小さくなるように、CAEによる解析(図8)と応答曲面法を活用して最適な組み合わせを選択している。このような創意を加えることで、可動ローラを用いない場合に対し、エアコンプレッサの消費電力は低速側で約15%低減、増速機の信頼性は約7倍に向上した。

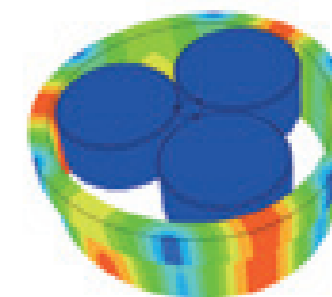


図8 リングのCAE応力解析
Fig.8 Ring stress analysis by CAE

6. オイル循環の構成

上述したトラクションドライブのために使用するオイルは、ベアリングをはじめとする各部品の潤滑も兼ねている。オイルがコンプレッサ側からFCスタック側へ漏れると、FCスタックの発電性能や自身の信頼性に影響を及ぼす。そのため、圧縮部へ増速部からオイルを漏れ出さないようにシールすることが課題であった。

圧縮部を構成しているインペラは最高18万回転以上で超高速回転するため、回転軸のシールは、従来のシールリングやオイルシールでは、合口隙間からの漏れやしゅう動発熱が大きく、要求性能を満足できない。

そこで高周速に対応したメカニカルシールを採用した。表面テクスチャリングと呼ばれるしゅう動面上に微細な凹凸加工を施す新技術を取り入れ、漏れたオイルを吸い戻すポンピング効果とレーリーステップ効果による非接触状態の実現により、オイル漏れ量および摩擦損失を低減した。

さらに増速部の内圧を開放するブリーザ機構を採用した(図9)。増速機構のしゅう動発熱により起こる内圧上昇を抑える工夫を取り入れ、防水透湿性素材を介して大気と連通させることによって、差圧を減少させて漏れ量を低減した。

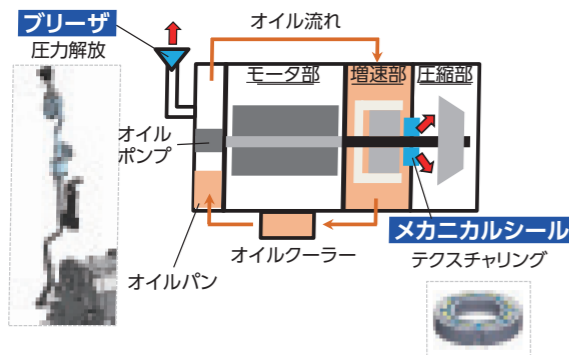


図9 オイル循環の構成
Fig.9 Structure of oil circulation

このように、メカニカルシールとブリーザ機構とのマッチングにより、FCスタック側へのオイル漏れ量を当初の1/10以下に低減することができ、FCスタックの劣化を抑制しつつ自身の信頼性も確保することができた。

7. インペラ形状の最適化

増速機構を成立させることでターボ式のうれしさが発揮できるインペラ回転数を実現したが、FC特有のワイドな作動領域に対応するため、インペラの改良にも着手した。FC用で制御する圧力比は、内燃機関用

ターボチャージャよりも全体的に高い(図10)。特に図中の高地出力点では、高地においても平地と変わらない車両の運動性能を確保するためには、圧送する空気密度を上げることが重要となる。

FCスタック内のガス拡散層は非常に狭い通路であり、スタックの発電部位にあるイオン交換膜の乾燥を防ぐよう蒸気圧を高く保たねばならず、これらからも高圧力比が求められ、最大の圧力比は3近辺までに及ぶ。ここでの着目点は、ターボチャージャでは経験のない小さな流量で高圧力比が必要な点である。

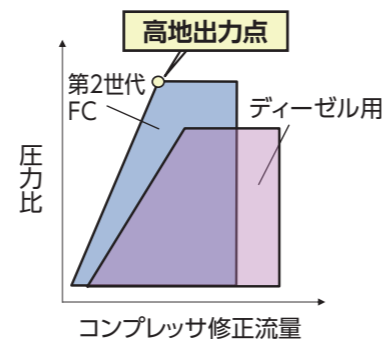


図10 空気流量と圧力比MAP
Fig.10 Map of air flow rate and pressure ratio

ターボ式のインペラでは、昇圧させた空気を慣性力により下流側へ圧送するが、流量が小さくなると翼面に剥離が発生して慣性力が落ちる。その後は下流に向かって昇圧する圧力に打ち勝てなくなり、ついには逆流が発生してしまう。これがサージと呼ばれるターボ式特有の現象で、このサージ現象が発現しないように要求動作点を網羅するインペラを設計しなければならない。

サージ対策としてはケーシングトリートメントと呼ばれるいくつかの改善アイテムがあるが、大幅なコスト低減目標がある中、それらの追加アイテムに頼らないインペラのみでの改良を進める方針とした。図11にCFD

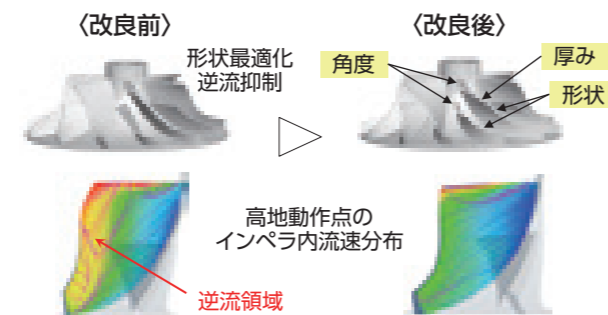


図11 インペラ形状の最適化
Fig.11 Impeller shape optimization

(Computational Fluid Dynamics:数値流体力学)解析した高地出力点でのインペラ内の流速分布を示す。

従来のインペラ形状では入口付近で曲線を描いており、インペラに流入・加速した流れは昇圧する圧力勾配を登り切らず、翼表面に追従することなく剥離している。これらに対して、次の重点ポイント①加速し過ぎないこと、②剥離が小さいこと、③圧損が小さいことをベースに何百回というモデルシミュレーションと評価を重ねた。改良したインペラ形状では、翼面上の加速が緩和されて剥離を抑制できたため、入口付近の翼の曲がりはほぼ直線となった。こうすることでサージ発生をより小流量側へシフトさせ、高地出力点の運転が可能となり、目標効率とサージ発現流量に対し10%以上の余裕を確保できるインペラを作り上げることができた。

8. 静粛性への取り組み

当初の狙い通り、ターボ式では消音補機類に頼らずとも第1世代と同等の放射音特性となったが、いくつかの特定周波数帯域での振動次数が車内官能で耳障りとなり、課題となった。モータ回転を基準として、回転1次、回転2次、回転11次(インペラ回転1次)が代表的な振動現象である。

回転1次と回転11次は主にモータとインペラの回転アンバランスに起因しており、わずかな寸法差で軸の振れまわり量が変化する。そのため、それぞれの回転体の動き量を実機評価により細かく捉え、全体のアンバランスと加工精度の見直しを実施した。量産型に移行した後も実測寸法結果を解析にフィードバックし、1 μ m単位で隙間とアンバランスの微調整をすることで振動低減に繋がった。

それにともない、回転2次についても増速アームから入力される荷重変動が抑えられ、カップリングに起因する振動が減少した。

さらに、ハウジング固有の動きをモーダル解析によ



図12 エアコンプレッサのモーダル解析
Fig.12 Modal Analysis in assembly

り調査し、吸入・吐出ダクトの形状変更や表面リップによる剛性チューニングを施すことで、筐体の共振が使用回転域で突出しない形状に仕上げた(図12)。

このように様々なアイテムを積み上げることで、エアコンプレッサの単体振動を低減した。車両側とのインターフェースにおいても、ダクトの結合方法、防振マウントの感度改良をはじめとして、徹底的に伝達系での遮断および振動低減をトヨタ自動車(株)と一緒に取り組んだ。その結果、走行環境の変化によらず振動騒音が急変しない上質感を損なわない車づくりに貢献できた。

9. 生産性向上の取り組み

モータコイル挿入の特微的な製法によりコスト低減を達成した事例を紹介する。第1世代では性能重視の高占積率モータのため、コイルを人に頼った手挿入で製造していた。そのため、組み立てに多くの時間を要し、生産性に課題があった。

第2世代では、コスト低減と高性能化の両立が必要であるため、モータの性能を低下させることなく、コイルインサータによる自動挿入の達成を目標とした。高占積率を維持しようとすると巻き線が多くなるため、リング状に束ねたコイルを一括挿入する場合コイル同士が引っかかり挿入荷重が増加してスロット内に収めることが困難となる。そこで、ティース間にスムーズに挿入するために、2段階で挿入可能な巻き線形状とスロット形状を開発した。巻き線形状は、コイルAをはじめに挿入して覆いかぶさるようにコイルBを重ねる形状とし、加えてスロット形状はコーナーR拡大により絶縁紙の密着性を向上させることで挿入荷重を低減させて、段階挿入での自動化を実現した(図13)。

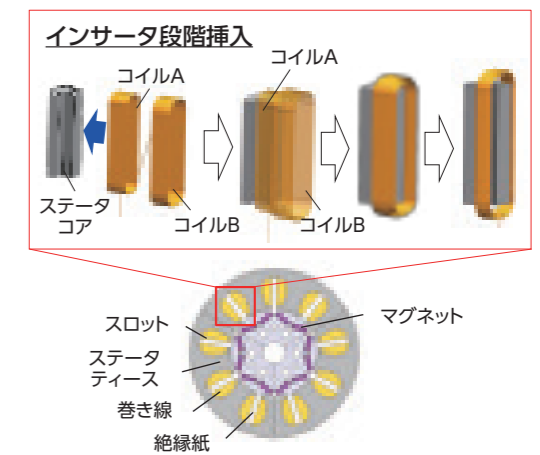


図13 コイルのインサータ段階挿入
Fig.13 Coil inserter stage insertion

このモータコイル挿入自動化を筆頭に多くの生産性向上アイテムを織り込むことで、第2世代での大幅なコスト低減を達成した。

10. まとめ

第2世代のMIRAIに採用いただいたエアコンプレッサは、高性能化、小型軽量化、低コスト化を両立する増速ターボ式とし、第1世代のヘリカルルーツ式から型式を変更した。そして、世界初(当社調べ)となるトルクの大きさに応じて最適な圧力が自動付与されるトルク感応型の増速機構を技術確立し、車両燃費の向上に貢献することができた。また、圧縮性能、静粛性、生産性についても課題を解決することで、最終的に製品化した状態では、第1世代比で45%の小型化、35%の軽量化、24%の圧縮性能向上(高負荷)、1/X以下のコスト低減を実現した。

今後も脱炭素社会の実現に向け、これまでの23年間のFCEV向けで培った技術をベースに競争力のある、お客様ニーズにあわせたエアコンプレッサの開発を行っていく。

■ 参考文献 ■

- [1]トヨタテクニカルレビュー Vol.66 Feb. 2021
- [2]豊田自動織機技報 No.66 2015-10
- [3]トヨタ自動車(株) ホームページ
- [4]日本機械学会 No.13-17 MPT2013シンポジウム
＜伝動装置＞講演論文集(2013)
- [5]自動車技術会 2016年秋季大会学術講演会 No.20166151

■ 著者紹介 ■



加藤 弘晃



光田 聡



楳山 亮



福山 了介



鈴木 希幸

開発者の思い

今回の第2世代もエアコンプレッサは型式を変更して対応したが、やはり新規開発品であり開発要素も多岐にわたったことから、量産化を進める中で多くの課題が発生し苦難の連続であった。これらについて1歩1歩着実に前に進みながら課題解決できたのも、ひとえにトヨタ自動車(株)から多大なご協力をいただいたおかげであり、ときには高地走行性能について、米国アイゼンハワーでの車両評価に同行させていただいたり、ときには弊社亀山テストコース試験場にて、新旧FCEVの乗り比べ会にて意見交換を実施したりと、これらに代表する共有活動に深く感謝いたします。今後もFCEVのさらなる普及に貢献していきたいと思いを。

また、本製品の開発、生産にあたって多大なご指導・ご協力をいただきました社内関係者、仕入先様に深く御礼申し上げます。