

自動車用モータの技術動向

Motor Technical Trend for Automotive

山村 真史
Masashi YAMAMURA

諸井 英祐
Hidehiro MOROI

中村 佑太
Yuta NAKAMURA

河村 亮
Ryo KAWAMURA

DENSO history can be replaced with the history of improvement, challenge and creation. We have actively promoted electrification since the foundation period and have repeated a number of technological innovations. In addition to the electric traction motor, we also have provided a highly efficient electric motors that control comfort and safety, then realized vehicle energy management by connecting such electric motors. DENSO will realize a mobility society fulfilled with the rich environment and joy of driving, by active development of the electrified area for every scene in the future.

Key words :

electromechanical motor, sensorless control

1. はじめに

エンジンを手回ししようとして起きた不慮の事故で友人をなくした技術者が、人々の夢を壊すまいと、バッテリーとモータの組み合わせで安全な始動装置（スターター）を開発し、1912年にキャデラックに初採用され、その2年後には車両の90%に採用されるようになった。このときに採用された「バッテリーとモータの組み合わせ」

から今日の自動車用モータの発展が始まったのである。
2017年の4輪車生産台数（グローバル）は、乗用車にトラック・バスを含めると9730万台〔日本自動車工業会 H/P より〕。車両1台に使われているモータ台数は大衆車クラスで約50個、高級車では130個にも上り、自動車用モータの全世界の総生産量は2018年でおおよそ30億個と推定される。
今後更に厳格化される安全・環境・省燃費規制に向け

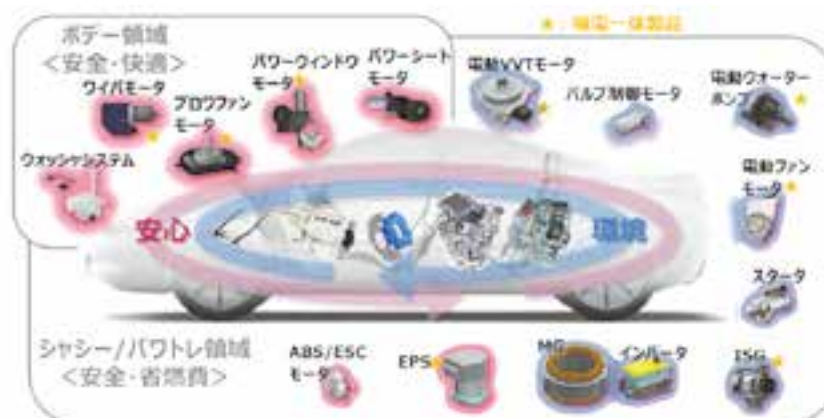


Fig. 1 Products for Denso Electrification system

た電動化・自動運転対応に伴う新用途の拡大により、車両1台あたりの搭載個数も増える見込みである。そして自動車需要の堅調な伸びが見込まれる中国・新興国市場での車両増により、2025年には自動車用モータの年間総生産量は40億個を越すことが見込まれる。

デンソーにおけるモータ開発の歴史は、スタータ・オルタネータから始まり、豊かな環境と走る喜びをかなえるモビリティ社会の実現のため、創業期から積極的に電動化に取り組んできた。限られた車両空間の中で、積極的にあらゆるシーンの電動化開発に取り組み、モータ開発に関しても数々の技術革新を繰り返すことで、システム・機能の実現を支えてきた (Fig. 1)。

2. 自動車用モータ技術開発

1990年以前、自動車用モータといえば補機向けのブラシ付モータが中心であった。フェライト磁石の性能進化や高占積巻線技術の進歩と改善の積み重ねにより、モータの出力密度と量産性を向上させてきたことで、一部の高級車から始まった“利便・快適”を目的とする製品が一般車へと普及拡大した時代であった。1990年代後半になるとシャシー系の“安心・安全”を目的とする製品 (ABS等) が法規・規制化により伸展、さらに“環境・省燃費”の規制厳格化に対応するパワートレイン系補機製品の電動化が加速し始める。

このような中でシステム・機能の新しい価値を具現化するため、モータは常に小型・高効率・軽量・静粛性が求められてきた。このような普遍的な要求に加え、“電動化”で置き換わる機能を実現するためにモータへの要求も厳しくなっており、複雑化するシステムに必須となるEMC性能要求、更なるシステム小型化の実現、高応答性、冗長性等の新ニーズ対応のため、デンソーではいち早くモータと制御回路を一体化した「機電一体構造」の開発を推進し、新しいシステム提供価値の実現に貢献してきた (Fig. 2)。

本稿では、デンソー独自の取り組みとして、磨き上げてきた「モータ技術開発」と、「機電一体技術開発」および「制御技術開発」について紹介する。

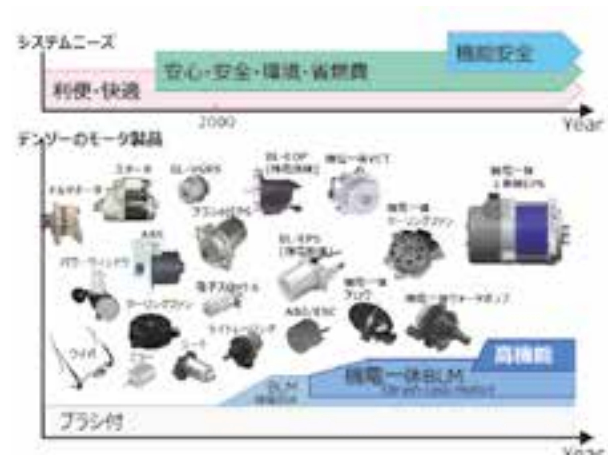


Fig. 2 Motor Technical development

3. 機の革新

3.1 資源リスクへの取り組み

次世代EV/HVモータ・家電・産業機器向けの需要が増える中で、小型/高効率に高性能磁石の活用は効果的であるため、ネオジム磁石 (NdFeB) の使用が一般的となっている。ネオジム磁石を使い続ける限り、成分の重希土類系金属がもつ供給リスクを常に抱えていることになるため、世界各社で省重希土類化の材料技術の開発が推進され、日本でも官民一体でプロジェクトが発足するなど、国を挙げて取り組む事態となり、デンソーでも資源リスク回避と低コスト化の両立を目指し、重希土類を含む磁石使用量そのものを低減するモータ技術開発に取り組んできた。

まずはじめに取り組んだのが磁束有効活用によるネオジム磁石使用量1/2を掲げた技術開発である。開発対象として小径の補機モータへの適用を考えた場合、磁石単品をサイズダウンさせる上で、例えば薄型化への機械加工制約や製造上のハンドリング困難さ等の課題があった。そこで小型モータに効果的な技術として開発されたのがコンシクエントポール型ロータである (Fig. 3) 磁石の代わりに鉄を配置することで、鉄の表面には疑似的にS極が現れる。これがコンシクエントポール (結果的に現れる極) と言われる理由である。磁石数を半分にできるモータであることから、デンソーでは通称ハーフマグネットモータと呼んでいる。

しかしながら従来N極とS極は等分で配置されていたのに対し片側の磁極が鉄になるので、磁気バランスが

崩れるのは必然であり、トルク減少や、トルク脈動の増加といったデメリットが発生する。この崩れた磁気バランスと整えるために磁路形状の工夫 (Fig. 4) が必要であったため、形状自由度が大きい鉄極の形状を最適化 [特許第 5483582 号他] させることで、トルク減少とトルク脈動を最小限に抑え、磁石が持つ性能を有効利用でき、磁石量を半減させることに成功した。このデンソー独自の磁気回路開発により、現在ハーフマグネットモータは EPS モータやインバータ冷却用ウォーターポンプに採用され、量産化されている。

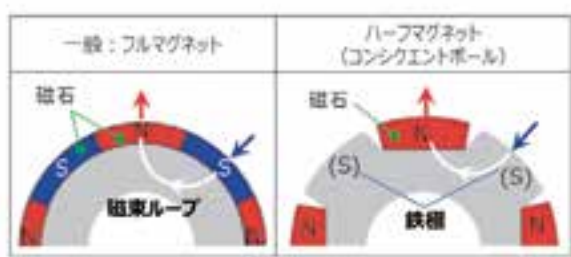


Fig. 3 Half-magnet rotor

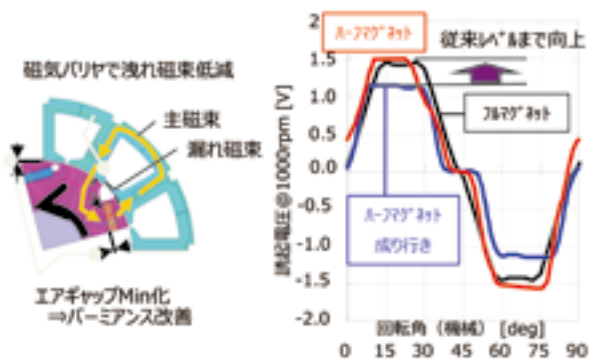


Fig. 4 flux shield design

3.2 ネオジム磁石 0 化への挑戦

次に取り組んだのが、ネオジム磁石使用量 1/N ではなく“0”を目指す開発である。ネオジム磁石ゼロにより低下する磁束量を、基本構造のギャップ面積で補う方針で開発をスタートさせた。資源リスクが低くコストパフォーマンスに優れた磁石はフェライト磁石であり、磁束量はネオジム磁石の 1/3 と小さく、それを補うため磁石面積 3 倍を確保する構造へ見直す必要があった。着眼点は磁気回路構成を従来の 2 次元から 3 次元へと大きく変えるという視点であり、ここで参考にしたのは、オルタネータでも使われているクローポール (爪極) ロータである。

これを実現する上では構造的にクローコア間の磁束漏れの処置という重課題があったが、これに対してはクローの間に磁束を整流する補助磁石を配置し、且つ補助磁石の面積を加えることで磁束の有効活用率を上げ、ネオジム磁石と同等の磁束量を確保する構想で技術開発に取り組んだ。

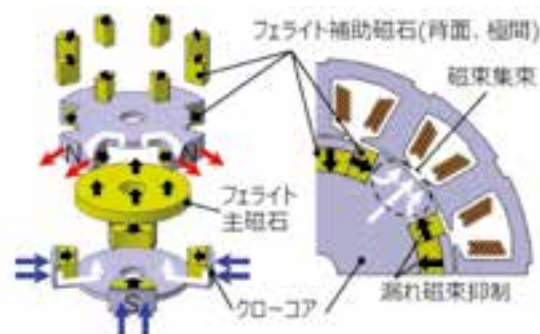


Fig. 5 Lundell type rotor with Auxiliary magnet

開発当初は、補助磁石を 12 個 (8 極の場合) と主磁石 1 個の計 13 個のランデル型ロータ構造 (Fig. 5) であった。しかしながら本構造では量産組付け性に課題があり、補助磁石個数の削減が必須であった。そのために取り組んだが補助磁石の極異方配向リング磁石化である。

デンソーの総知総力を結集し、極異方配向成形技術を手の内化し、補助磁石の機能である磁束の整流を達成できたことで、補助磁石 1 個と主磁石 1 個の計 2 個と磁石個数を削減、すなわち量産化の目処を付けたことでこの開発技術は電動 VVT (エンジンの可変動弁機構駆動用モータ) として採用され現在量産化されている (Fig. 6)。今後は磁場配向成形技術をさらに磨き上げ、新たな磁気回路の基礎技術開発へ適用検討していく。

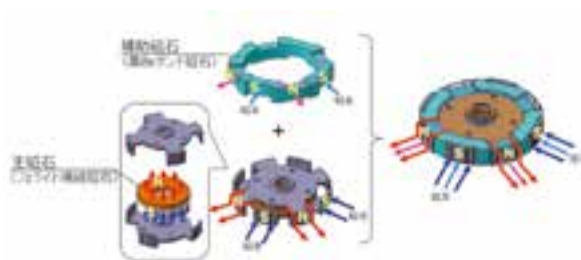


Fig. 6 Lundell type rotor For electric-VVT

3.3 ステータ巻線占積率向上技術

小型軽量・高出力化の課題の一つは発熱の増加である。これらを解決する手段としては内部インピーダンスの低

減、即ちステータの抵抗値を低減することが必須である。特に自動車用モータの多くは、エンジンルームに搭載されるため高温化され温度環境が厳しい。したがって、発熱量の低減に直結するステータの抵抗値の低減は、より必要度が高い。

従来よりステータの進化は巻線占積率向上の歴史であり、モータの効率・出力特性を改善させるために様々な巻線方法が検討されてきた。巻き方等の生産上の改善・工夫に加えスロット形状等の設計面での見直し、導線被膜等の素材改良に取り組んできたが、連続線の低抵抗化は飽和傾向にあり、大きな改善も期待出来なくなってきた。

その壁を破り、更なる小型軽量・高出力化へのニーズに挑戦すべく、デンソーは独自の SC (セグメントコンダクタ) 巻線技術を開発した (Fig. 7)。巻線を丸から平角断面とし、巻線端の重なりを減らし巻線長を短縮することで占積率を 70% 以上へと大幅に向上させると共に、胴体断面積の拡大とコイル長の短縮による低抵抗化を達成した¹⁾。

ただし、集中巻に代表される“連続線”から“分割線”の SC 方式を大量生産を前提に実現させるためには、多くの製造上の工夫が必要である。平角線を予め U 字状に成形加工し鉄心のスロット部分に揃えて差し込み、反対側の端面を連続的に高速溶接・接合する製造技術が必須となる (Fig. 8)。さらに SC 技術には導体の加工に耐えうる強固な導体被膜、銅線が必要であり、高い生産技術力と品質管理体制が不可欠である。

オルタネータで開発した高占積 SC 巻線ステータ技術を利用し、ステータの低抵抗化が有効である MG (Motor Generator)、EPS (Electric Power Steering)、ISG (Integrated Starter Generator) などへ採用され量産化されている。



Fig. 7 SC-Segment Conductor



Fig. 8 Conductor and eld point

4. 機電一体開発

4.1 機を助ける制御技術

2000 年以降に増加する機電一体化のうれしさには、小型軽量化が可能となり車両への搭載性が向上すること、モータと制御回路間のハーネスが不要となりコスト低減、EMC 低減、性能向上すること等がある。

代表でブラシレスプロワモータの断面を (Fig. 9) に示す。モータのハウジング内部に制御回路基板が搭載され、制御回路基板には図に示すように複数の抵抗素子や半導体素子、さらにはマイクロコンピュータ (CPU) 等が搭載され、モータのコイルと電気的に接続する構成となっている。



Fig. 9 Product section & Control circuit

車両 OEM の省燃費ニーズやシステムの搭載性向上を実現すべく、モータには小型化が求め続けられてきており、多極・多スロット化してステータ&ロータの外形寸法の小型化を実現する方向へ進んでいる。但し多極・多スロット化の背反として、ロータ磁石とホールセンサの機械的な「位置ズレ」の影響を受けやすくなるため、適切な通電タイミングで駆動できず性能 (振動による静粛性) を満足できない問題がある。この機械的な位置ズレの影響を制御回路で補正する (機を助ける制御) 事例を紹介する。

基本的な考え方は通常、全回転数領域でホールセンサの位置信号からの通電タイミングで切り替えるところを、起動後、ある回転数に達してから、コイル誘起電圧を入力&補正学習して、位置ズレに影響されない適切な通電タイミングに切り替える方法である。これを達成する回路構成ブロックを (Fig. 10) に示す。

基本機能を実現する通電部および通電制御部は、エアコン ECU からの回転数指令値と同一回転数となる様に、ホールセンサから回転数、駆動タイミングを検出・制御し、三相インバータを PWM 通電駆動する。またセンサ位置ズレを検出・制御する補正部と補正制御部は、コンパレータ・Ex-OR 回路・CPU で構成される。

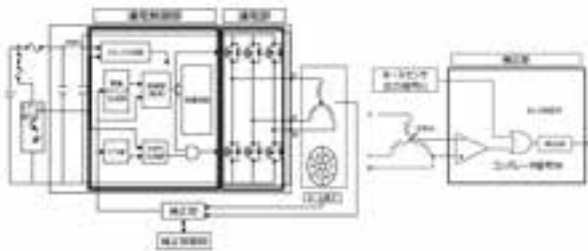


Fig. 10 Circuit block & Corrector system

次に補正動作を (Fig. 11) のフローチャートで示す。モータ起動後、短時間通電遮断しても異音等が発生しない回転数 (500rpm) に達した時、コイル通電を全相遮断する。そしてロータが惰性回転中に誘起電圧が安定した電気角 1 周期経過後に補正開始する。この時のコイル誘起電圧と中性点電圧の比較から、位置ズレに影響されない理想的タイミングを検出。(Fig. 10 コンパレータ信号 W)

このタイミングとホールセンサ信号ズレを電気角として処理。予め定めた基準電気角 30 度との比較で、進み遅れを判断し (Fig. 11)、補正データとして記憶する。それ以降は補正データに基づき、適切な通電タイミングでモータを駆動することにより (Fig. 12)、サイズダウンしたモータでも性能 (振動による静粛性) を満足することができる (Fig. 13)。

この機を助ける制御技術 [特許第 5469520 号 等] がブロワモータ世界シェア No. 1 を支えている。



Fig. 11 flowchart

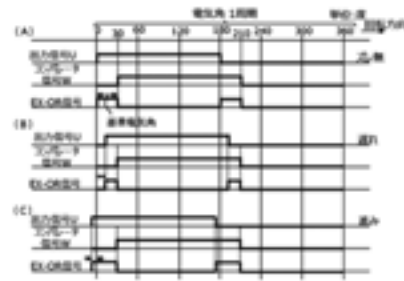


Fig. 12 Timing determination

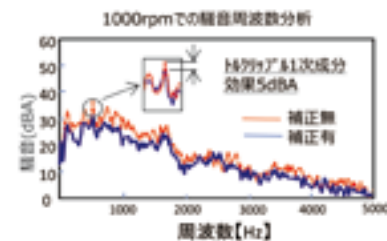


Fig. 13 result

4.2 駆動 2 系統化技術

自動運転時代に必要不可欠となる止まらない EPS を目指し、デンソーは駆動回路を冗長化した世界初の駆動 2 系統 EPS を開発、ステータと駆動回路を 2 系統化することで電氣的に独立した制御を実現 (2015 年より量産) している (Fig. 14)。



Fig. 14 Stator & Distributed winding

30°の電気角シフトをさせた2系統巻線では、各々巻線の位相に合うように個別に最適な制御をかけることで、1系統のものに比べて、3.5%のトルクアップを実現させている (Fig. 15)²⁾。

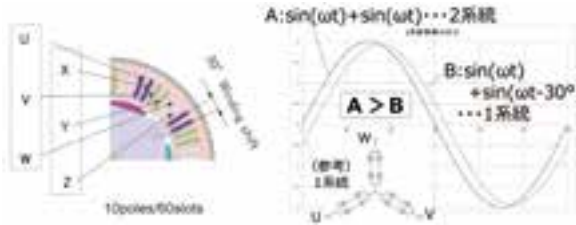


Fig. 15 Phase difference turning on electricity

また同時にPWM1周期内でのキャンセル通電によるコンデンサ容量の削減も実現した。具体的にはコンデンサの充電（ゼロ電圧ベクトル）と放電（有効電圧ベクトル）によるコンデンサ電流の脈動を、系統間で充放電を反転させることで相殺、結果としてコンデンサの必要容量を低減をさせたことでEPSの小型軽量を達成している (Fig. 16)。今後も機電一体のうれしさ実現のため、機・電相互で助け合い、新しい技術を創造しチャレンジしていく。

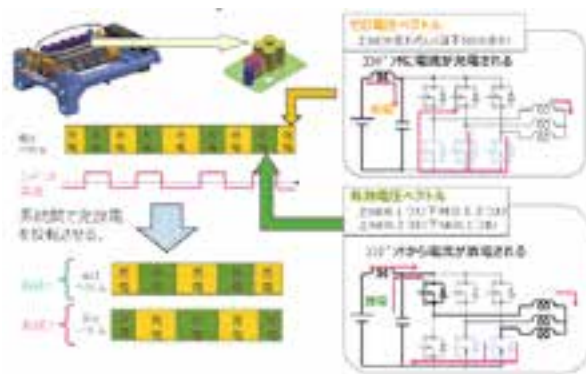


Fig. 16 current cancellation & reduce a capacitance

5. センサレス制御技術

5.1 センサレス制御ロバスト性拡大

機電一体モータの更なる小型化実現にはモータ・回路基板搭載の自由度が重要である。前項で述べているように、ブラシレスモータを駆動するには駆動タイミングを検出する為、ホールセンサが必要である。但しロータ磁束検出には、回路基板上のホールセンサ搭載位置が限定

され、機電一体モータ小型化課題の大きな要因となっている。そこで、ホールセンサなしでセンサつきと同性能を実現し、小型化実現に貢献するデンソー独自のセンサレス制御の取り組みを紹介する。

一般的にセンサレス制御を実現する方式として、センサレスベクトル制御が提案されている³⁾。これはモータモデル式を利用しオブザーバ（状態推定器）を用いて誘起電圧を推定するため、高精度に位置推定が可能であるが、演算負荷が高く、高価なマイコンが必要であり、現実的ではない。

そこで、V/f制御をベースとした演算負荷の少ない位置センサレス制御の開発に取り組んできた⁴⁾。これは位置誤差と相関のあるδ軸電流を用いてPLL(Phase Locked Loop)を構築し状態フィードバック制御を行うことで位置補正を行っている (Fig. 17)。但しδ軸電流 (Fig. 18) の変化が大きく、位置誤差が検出できる高回転駆動時のみ制御可能である。



Fig. 17 Control system

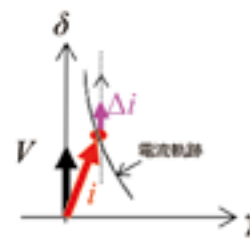


Fig. 18 δ-axis current

一方で自動車用モータの使われ方から、車室内の快適性向上の観点からカーエアコンのプロアモータの超低送風モードや1席集中空調、あるいは燃費向上のため車両待機時のラジエータ電動ファンの低回転連続動作など新しい価値を実現するため、低回転での連続駆動が求められる。このニーズに対し、主機モータ (G:Motor Generator) の技術⁵⁾を応用し、PLLの位置補正の感度を向上させることで低回転駆動を実現させた。

この方法は (Fig. 19) のように電流ベクトルの変動方向に新座標軸 (t 軸) を設定し、回転数に合わせてずれ角 λ を可変させる新座標軸の電流を位置補正に使うことで低・高回転駆動時の感度最大化を実現した。

制御構成は、Fig. 20 に示すようにずれ角 λ が回転数とモータ定数で決まる新軸の座標変換のみで実現している。

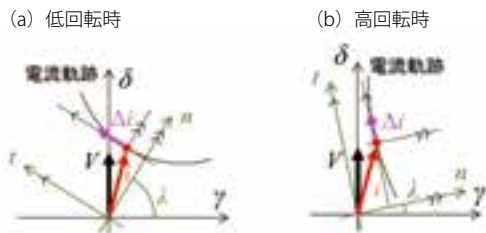


Fig. 19 new t-axis current



Fig. 20 control system

Fig. 21 に低回転時の t 軸電流と位置誤差の相関を示す。従来の PLL に用いる δ 軸電流と比較すると t 軸電流の方が相関が大きく、位置補正の感度が高くなっていることがわかる。Fig. 22 にシミュレーションによる効果検証結果を示す。低回転での負荷トルク変動時の挙動を示しており、従来方式の δ 軸電流ではトルク変動に対して制御できず脱調してしまうのに対して、 t 軸電流を用いた提案方式では脱調することなく速度制御できており、簡素な構成で低回転駆動を実現可能である。

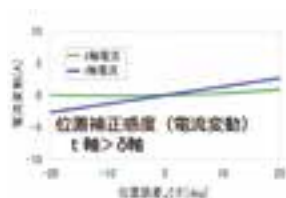


Fig. 21 position error & sensitivity at Low-speed

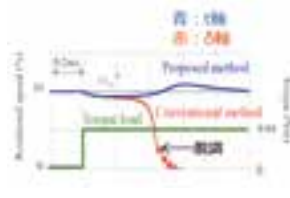


Fig. 22 result

この技術の知見により、多くの機電一体モータへの適用可能範囲が広がった。今後はこれをさらに発展させ、低損失化や高応答化といった開発を継続していく。

6. おわりに

本稿では、これまでデンソーが取り組んできたモータ技術開発において、特に自動車の補機用モータ領域を中心に当て述べてきた。モータの原理原則は、1821 年の誕生から約 200 年経っても変わらず、枯れた技術とまで言われてきたが、誕生から、技術革新、材料開発、開発ツール及び生産技術等の進化、そして機電一体化と制御技術の向上と確実に革新している。

自動車業界では、CASE と言われる 100 年に一度のパラダイムシフトがおきており、特に電動化における車両への影響は環境性能向上に留まらず、走る・止まる・曲がるの基本性能に新たな価値を生み出し、また社会環境の変化によりドローン等の飛行体、ロボットなどの自動車以外の領域への拡大にも繋がってきており、モータシステムの重要性が益々高まってきている。

デンソーは、環境、安心に役立つ電動化技術の進化、次世代の運転支援技術、将来空調システムなど積極的な研究開発に取り組んでおり、そのシステムに使用されるモータにおいて、うれしさを提供すべく、新しい価値の創造、機の革新、電の進化において技術革新に取り組み、より良い社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) 草瀬新：自動車用モータの技術動向、2017・05、OHM
- 2) 大橋正幸：EPS 用駆動 2 系統 MCU、デンソーテクニカルレビュー、Vol.21(2016)
- 3) 電気学会論文誌 D、2002、Vol.122 No.12
拡張誘起電圧モデルに基づく突極型永久磁石同期モータのセンサレス制御
市川真士 他
- 4) デンソーテクニカルレビュー vol.17 (2012-12)
自動車の補機向け正弦波位置センサレス制御法
工藤弘康／青木康明
- 5) 電気学会論文誌 D、2018、Vol.138 No.7
n-t 座標系での状態フィードバック制御を用いた IPMSM の高速トルク応答の実現
松木洋介 他

著者



山村 真史

やまむら まさし

モータ先行開発部
モータおよび電機製品の開発に従事



諸井 英祐

もろい ひでひろ

モータ先行開発部
機電一体製品の電子回路開発に従事



中村 佑太

なかむら ゆうた

モータ先行開発部
モータ制御開発に従事



河村 亮

かわむら りょう

モータ先行開発部
モータおよび電機製品の開発に従事