

電動車の開発

－戦略的基盤技術導入促進事業－

泉川達哉、松本幸礼、伊口明高*、普久原健二*、宮城秀康*

平成28年度から30年度にかけて、沖縄県内における機械製品製造業などのサポーター産業を高度化するため、様々な技術を必要とする電動車の開発を行い、駆動用モータおよびコントローラ、アルミ製シャーシフレーム、FRP製ボディを製作することができた。電動車の開発を通じて蓄積された電磁界設計技術やモータ制御技術、樹脂成形技術は、今後、県内企業における新製品開発や事業化での活用を促していきたい。

1 はじめに

2014年（平成26年）の工業統計によると沖縄県におけるサポーター産業（金属製品製造業と生産用機械器具製造業）の出荷額は約390億円（全国平均：5,939億円）となっており、依然として全国最下位に低迷している。これは、沖縄県の場合、本土から遠く離れているため自動車や家電などの大手メーカーと協力体制にある工場が殆ど無く、製造技術を高度化する機会が極端に少ないのが一つの要因だと考えられている。

本事業は、県工業技術センターと県内企業が技術力を高度化するための課題として、様々な技術を必要とする「電動車の開発」に取り組み、波及効果が期待できる基盤技術を蓄積することで、県内サポーター産業の高度化を図ったものである。

電動車の部品と、それらに関連する基盤技術について図1に示す。駆動系部品であるモータおよびコントローラ、ボディ系部品であるシャーシやブラケット類、ボディに関連して8つの基盤技術が挙げられる。本事業では図中の5つの部品の開発に取り組んだが、ここではその内、モータとコントローラについて報告する。

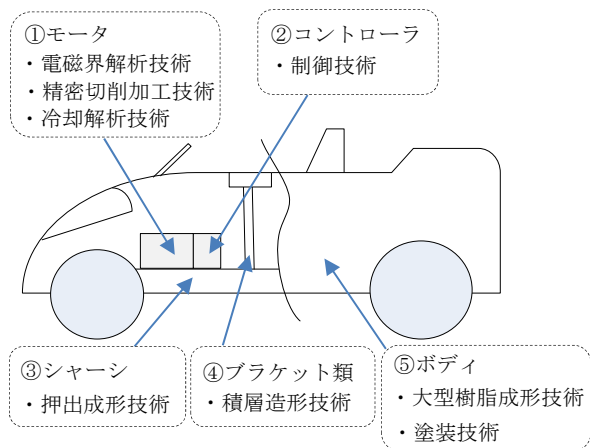


図1 電動車に関連する基盤技術

2 モータの開発

2-1 仕様検討

電気自動車には表1に示すように様々なカテゴリがあるが、本事業で開発する電動車は将来的に国土交通省が提唱しているグリーンスローモビリティとしての活用を想定しているものである。グリーンスローモビリティとは、時速20km未満で公道を走る4人乗り以上の電動車のことである。現在、沖縄県内では図2のようにリゾートホテルやテーマパークなどでゴルフカートを改造した電動車が使用されているが、高齢者による交通事故が多発し社会問題となる中、他県ではグリーンスローモビリティを高齢者の地域内移動手段として活用する社会実験が行われるようになってきている。今後は沖縄県においても、高齢化が進む地域や公共交通機関の無い地域での安全な移動手段として、このような電動車が使用されるようになると考えている。

表1 電気自動車のカテゴリ

	カテゴリ名	備考
1	普通乗用車のEV	日産リーフなど
2	コンバートEV	既存車両の車体を流用
3	グリーンスローモビリティ	20km/h未満、4人乗り以上
4	超小型モビリティ	1～2人乗り



図2 県内で活用されている電動車の例（中城城跡）

*一般社団法人ものづくりネットワーク沖縄

電動車に使用するモータのトルクや出力は、図3に示すように車両総重量と走行状態によって定まる走行抵抗から算出することができる¹⁾。車両総重量は車体重量と乗員重量（定員×55kg）の合計であり、走行状態には、加速度や道路勾配の有無、速度の大きさによって5つのパターンがある。走行抵抗には、空気抵抗や転がり抵抗、勾配抵抗、加速抵抗の4種類があるが、走行状態によって、それらの組み合わせが変わってくる。例えば、平地における発進の場合、車両に作用する抵抗力は、転がり抵抗と加速抵抗の合計（空気抵抗と勾配抵抗は0）となり、坂道における走行では、空気抵抗、転がり抵抗および勾配抵抗の合計（加速抵抗は0）となる。

4種類の抵抗力を算出する式は以下のようになる。

$$\text{空気抵抗(N)} : Ra = 0.5C_d \rho AV^2$$

$$\text{転がり抵抗(N)} : Rr = \mu mg \times \cos \theta$$

$$\text{勾配抵抗(N)} : Re = mg \times \sin \theta$$

$$\text{加速抵抗(N)} : Rc = (m + mi) \alpha$$

ここで、 ρ :空気の密度(1.2kg/m³)、 C_d :抵抗係数(0.3)、 A :車両前面投影面積(m²)、 V :走行速度(平地最大速度:19km/h=5.3m/s、平地定格速度:8km/h=2.2m/s、登坂速度:6km/h=1.7m/s、発進:0m/s)、 μ :転がり抵抗係数(0.01)、 m :車両総重量(kg)、 g :重力加速度(9.8m/s²)、 θ :道路勾配(平地:0、坂道:20deg)、 mi :等価慣性質量((車両総重量×0.05)kg)、 α :発進時加速度(1.567m/s²)である。

最終的にモータに要求されるトルクT、出力Pは以下の式で求める。

$$T(\text{Nm}) = F \times r / \eta / Gr$$

$$P(\text{kW}) = F \times V / 1000$$

ここで、 F :走行状態に応じた各種抵抗力の合計値(N)、 r :タイヤ半径(0.25m)、 η :伝達効率(0.9)、 Gr :減速機のギア比(15.7)、 V :走行速度(上記同様)である。

地域で活用する電動車には様々な利用形態が想定され、乗車定員も大きく変動するが、今回は表2に示すように乗車定員を最大15名として各走行パターンに応じたモータ仕様を確認している。

モータに必要なトルクは坂道発進時に最大となるが、その最大トルクが必要とされるのは車両発進時の極めて短い時間であること、坂道発進時に求められるトルクが他の走行パターンに比べ突出して大きいことから、ここでは、坂道での通常走行時(1.7m/s)のトルクを最大要求性能とした。また最高回転数は最大速度 v (5.3m/s)とタイヤ半径 r (0.25m)、ギア比 Gr (15.7)を用いて以下の式で求める。

$$\text{最高回転数(rpm)} : N = (v / 2r\pi) \times 60 \times Gr$$

以上のことから、開発するモータの仕様を表3のように設定する。

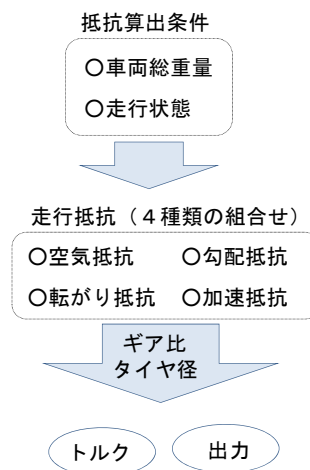


図3 モータ仕様の算出手順

表2 要求仕様の確認

車体重量	乗車定員	車体総重量	走行パターン	トルクT(Nm)	出力P(kW)
660kg	15人	1485kg	平地発進	45.3	-
			平地定格速度走行	2.6	0.3
			平地最大速度走行	3.0	0.9
			坂道発進	132.3	-
			坂道走行	89.6	8.5

表3 開発するモータの仕様

最大出力	9kW以上
最大トルク	90Nm以上
最高回転数	3,200rpm

2-2 モータタイプの選定

一般的に電動車用のモータには、同期モータもしくは誘導モータが使用されている。同期モータは交流電流によってステータに生じる回転磁界と、ロータの永久磁石が作る磁界との相互作用によって回転力を生み出している。同期モータは、磁界とロータの回転にズレが無いため回転数に関わらず効率が良いことや、起動/停止を瞬時に行える応答性の高さが特徴である。一方、誘導モータはステータの回転磁界の作用で生じたロータの誘導電流によって回転しており、ロータに永久磁石は使われていない。誘導モータは構造がシンプルで比較的安価であるが、回転磁界とロータ間にすべりがあるため低回転での効率が低くなってしまふ欠点がある。電動車での使用を考えた場合、特に高速走行での活用が多いのであればコスト的に有利な誘導モータを選定することが可能であるが、渋滞が多く発車/停車を繰り返すような走行環境であれば、効率を優先し同期モータを選定するのが望ましいと言える。ここでは渋滞の多い沖縄の道路事情を勘案し、モータタイプとして同期モータを選定することにした。

2-3 設計

同期モータの性能は、モータを輪切りにした断面におけるステータとロータの形状、ロータに埋め込まれた磁石の位置や形状によってほぼ決定される。ここでは電磁界解析ソフト「JMAG」を用いて、モータ断面における磁束密度を求めトルクを算出し、要求仕様を満たす構造を決定する。

図4に磁石をV字型に配置した同期モータの断面形状を示す。ロータやステータの形状を定める際には、単にトルクを大きくするだけでなく、当然ながらコストや作り易さを考慮する必要がある。例えばステータについては、磁気の流れのみを考えるとコアバックやティース幅を大きくするのが有利であるが、それではモータが大きくなったり、巻線が入れ難くなったりするなどの不都合が生じる。ロータについても、磁石の角度やフラックスバリア（磁気を遮る空気層）の形状によって比較的容易に発生トルクを調整することができるが、あまりに複雑な形状では製作が困難になる。特に今回は、電磁鋼板の加工にワイヤーカット放電加工機を用いるため、断面形状はできるだけシンプルにすることにした。

図4の断面形状について、磁束密度分布と回転角度によるトルク変化を求めた結果を図5、6に示す。図5はモータ断面の1/6形状で表している。磁束密度分布図では、磁気飽和で磁束の流れが滞っている領域が赤色で表示され、磁束が殆ど流れていない領域が濃い青色で示される。ここでは水色で表示された領域（0.9T）が磁束密度として望ましい状態である。図5によると磁束は比較的きれいに流れているが、一部、シャフト側（モーター中心側）へ漏れる磁束が確認できる。また、図6ではトルクの最大値が要求仕様である90Nmに達していること、回転角度によるトルク変化の大きいことが示されている。

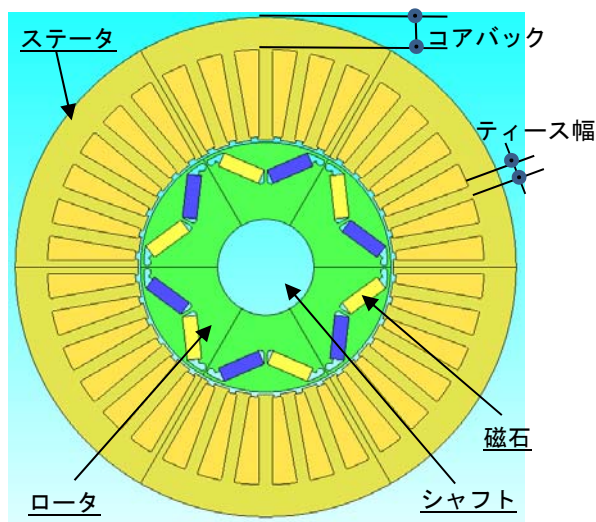


図4 モータ断面（初期形状）

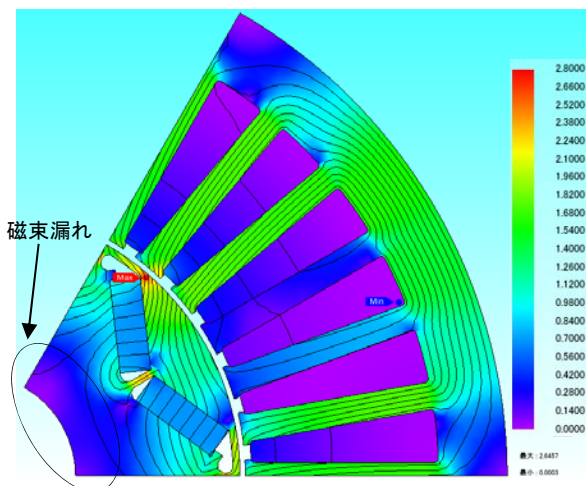


図5 磁束密度分布（初期形状）

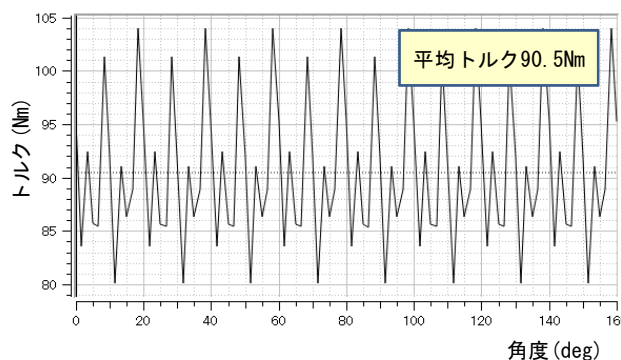


図6 トルク変化（初期形状）

モータの断面形状は、電磁界解析を行いながら形状を少しずつ調整するという手法で定め、その結果、モータの断面形状は図7のようになった。これは初期の断面形状に対して、電磁鋼板のワイヤーカット時に必要となるボルト穴と、シャフト側への漏れ磁束を防ぐための

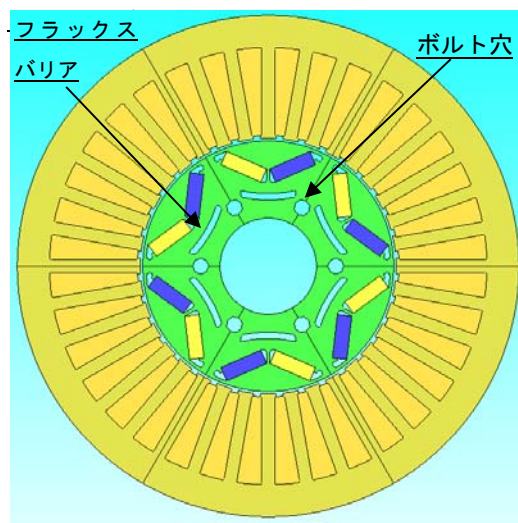


図7 モータ断面（最終形状）

フラックスバリアを設けたものである。フラックスバリアは、磁束を遮るために意図的に配置した空気層のことである。

モータ断面の最終形状について、磁束密度分布とトルク変化を図8および図9に示す。漏れ磁束がほぼ無くなったこと、平均トルクが向上したことが確認できる。

図10は回転数に対する発生トルクと出力の変化である。最大出力は16kW程度、最大トルクは90Nm以上、最高回

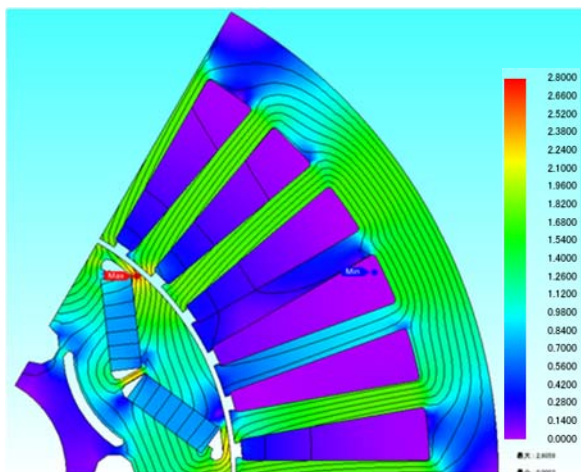


図8 磁束密度分布(最終形状)

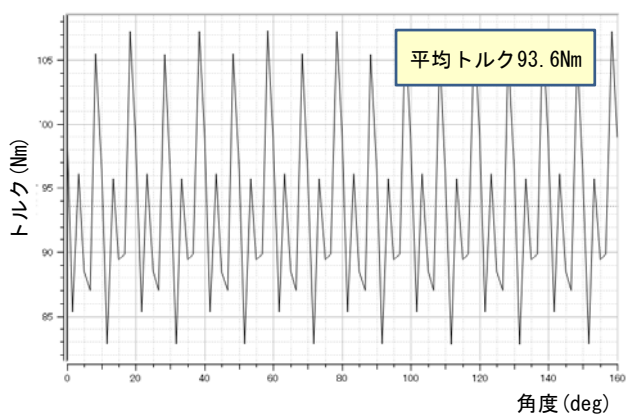


図9 トルク変化(最終形状)

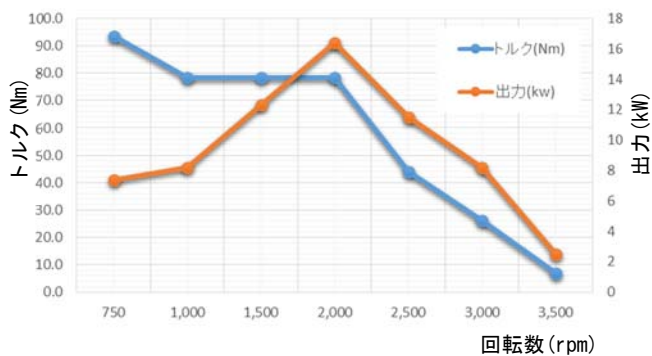


図10モータの性能曲線(設計時)

転数は3,500rpm程度あることが示されており、表3で示した開発するモータの仕様を満たしていることが確認できる。

電磁界解析を用いて断面形状を決定した後に、ハウジングやシャフトなどの設計を行った。ハウジングの設計では巻線を納める領域の確保に留意した。今回は試作であるためハウジングも削り出しを想定した形状となっている。設計したモータの外観を図11、断面を図12に示す。

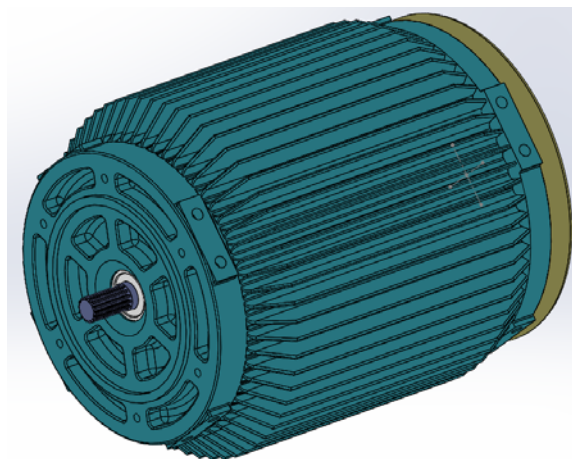


図11モータの外観

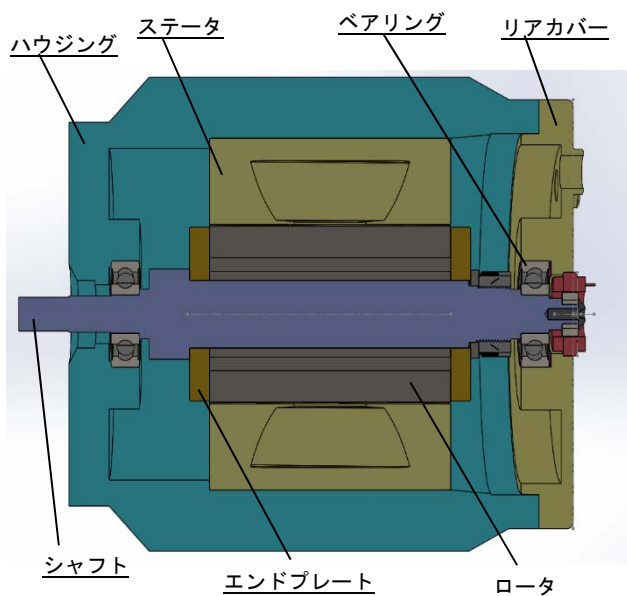


図12モータの断面

2-4 製作

ステータとロータの製作工程を図13に示す。

ステータの製作では特に巻線加工に苦心した。モータの設計段階で線径と巻数が決められているが、実際に巻線を作ってみると、思った以上に外形が大きくなり、ステータへの組み込み作業が困難になった。

ロータの製作ではワイヤーカットでの加工精度が悪く、そのままでは磁石を入れられずに、ロータ内面を磨く作業が必要となった。

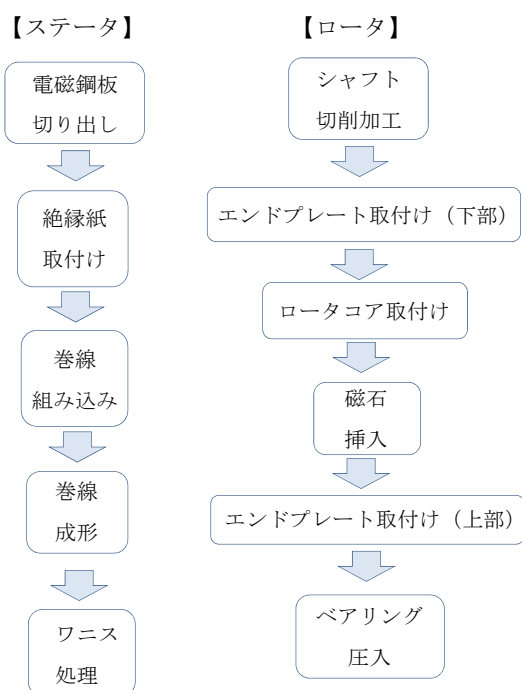


図13ステータとロータの製作工程

図14はワイヤーカットによる電磁鋼板加工の様子である。ステータとロータは、無方向性電磁鋼板を積層した状態から切り出している。積層した電磁鋼板は、板同士の電気導通を確保するため、断面を溶接している。電磁鋼板から切り出したステータに、手巻きにて製作した巻線を組み込み、相间絶縁紙を取り付けた状態が図15である。この後、プレスを用いてステータの上下に膨らんだ巻線の形を整え、ワニス処理しステータが完成する。完成後のステータは、各相の巻線抵抗を測定し組立上の不具合が無いか確認している。

図16はワイヤーカットにて切り出したロータコアにシャフトを組み付け、磁石を挿入している様子である。

シャフトの両側にベアリングを圧入し完成したロータは、釣合試験機にてその回転バランスを測定しておりJIS B0905で示されている釣合の良さ等級G6.3を満足する状態であることを確認した。



図14電磁鋼板の切り出し加工



図15巻線組み込み後のステータ

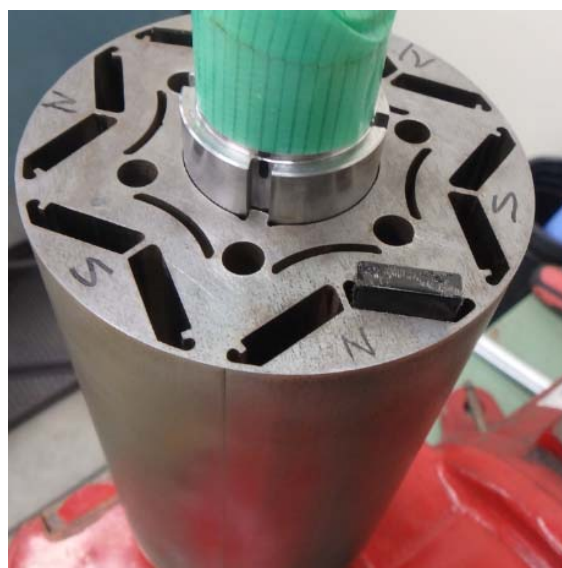


図16ロータへの磁石挿入

ステータをハウジングに焼き嵌めし、ロータを組み込んで完成したモータを図17に示す。



図17完成したモータ

3 コントローラの開発

3-1 コントローラ概要

図18に示すようにコントローラは制御回路と駆動回路から構成されている。制御回路はメインCPUからのトルク指令を受け、各種演算処理を行った後、駆動回路にPWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 信号を送る。駆動回路はPWM信号によってIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor: 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) のスイッチングを行いモータへ三相電流を出力する。PWMはインバータ回路で一般的に活用されている技術で、パルス列のオンとオフの一定周期におけるオンの時間幅を変化させることで出力電流を制御する方法である。優れた制御性と効率の高いことが特徴で、バッテリーの直流電圧から、モータ駆動に適した擬似的正弦波を作っている。IGBTは半導体スイッチとして活用されるパワー半導体デバイスの一種で、高速スイッチング特性と低オン抵抗特性をバランス良く備えていることが特徴である。

開発するコントローラの仕様は、中型自動車までを駆動することを想定し表4のように設定した。

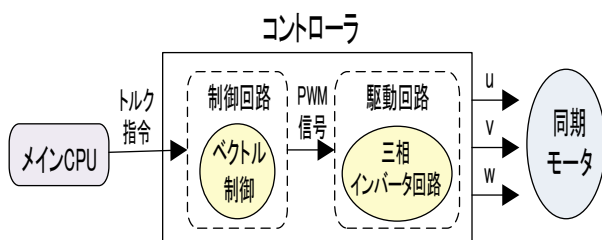


図18コントローラの構成

表4 開発するコントローラの仕様

最大入力電圧	360V
定格出力	88kW
最高回転数	9,000rpm

3-2 制御回路の設計

制御回路はCPUボードとインターフェース回路から構成されている。CPUには、モータ制御用タイマやCAN通信インターフェース、セキュリティチップなどを備えたルネサスRH850/P1Mを採用している。制御プログラムにはベクトル制御を用い、MATLAB/Simulinkを使ったシミュレーションで動作を確認しながら回路設計を行っている。特に今回は、一般的なベクトル制御に比べ応答性、安定性に優れた新しい制御方式（たすき掛け制御）を考案し活用している。

図19はMATLAB/Simulinkを用いて、プログラム中で行っている最大トルク制御の有用性を確認した結果である。最大トルク制御を行った場合の相電流は、制御無しの場合と比較し、トルクが50Nmでは1.43%、200Nmでは12.49%減少していることが分かる。このように、最大トルク制御を行った場合、モータのトルクが大きいほど供給される電流を小さくすることが可能である。電流を小さくすることで、巻線抵抗による熱損失やパワー回路で消費される電力を減らし、効率的なモータ制御を実現することができる。

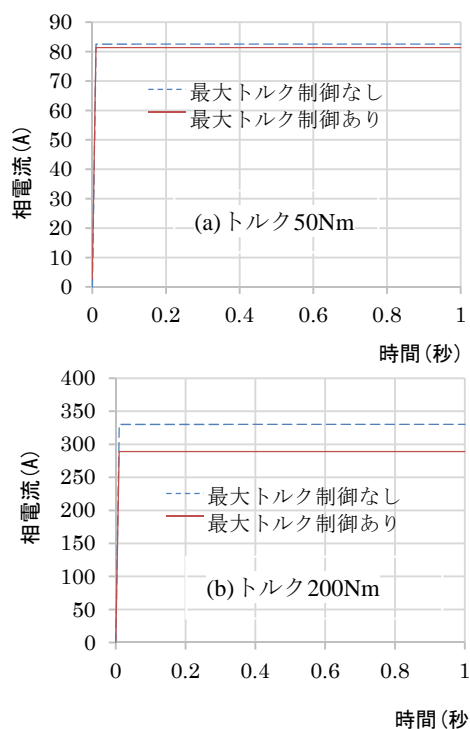


図19最大トルク制御の確認

3-3 駆動回路の設計

駆動回路の役割は、高圧バッテリーからの直流電流をIGBTのスイッチングによって三相巻線電流とし、モータへ供給することである。同期モータを効率的に駆動するには、永久磁石によるマグネットトルクとロータによる磁気抵抗の変化（インダクタンス変化）から生じるリラクタンストルクを有効に活用することが必須であり、駆動回路には、そのための適切な三相巻線電流を作り出すことが求められる。

駆動回路では、IGBTがスイッチングする際、インダクタンスに流れる電流が急激に変化するためサージ電圧が発生する。サージ電圧が大きくなり、回路を構成するIGBTなどの許容電圧を超えてしまうとデバイスが破壊されてしまうこともある。ここでは、IGBTによって構成される回路にESR（等価直列抵抗）やESL（等価直列インダクタンス）の小さなキャパシタを組み込み、インダクタンスに蓄えられたエネルギーを吸収することで、発生するサージ電圧を抑制している。

電源電圧を450V、巻線電流を490Aと想定し、スイッチングの際に発生するサージ電圧を回路シミュレーションソフトLTspiceにて解析した。図20にキャパシタの無い場合のサージ電圧波形、図21にキャパシタ（120 μ F）を組み込んだ場合のサージ電圧波形を示す。キャパシタの無い場合のサージ電圧のピークは1000V以上にもなり、発振周波数も大きいことが示されている。キャパシタを組み込んだ場合は、サージ電圧のピークは500Vに抑制され、発振周波数も2kHz程度になった。サージ電圧の振動は、キャパシタに対して直列に抵抗を挿入し抑制することもできるが、今回はサージ電圧の振幅が小さく、周波数も電磁波の悪影響が懸念されるレベルではないこと、抵抗を挿入した場合の損失が大きいことを考慮し、キャパシタのみでサージ電圧を抑制することにした。

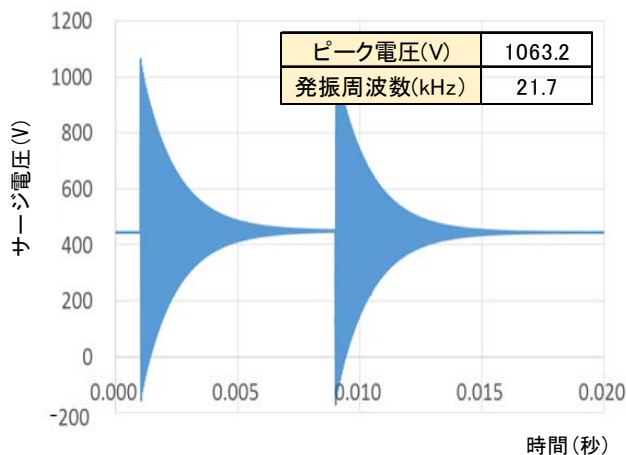


図20サージ電圧（キャパシタ無し）

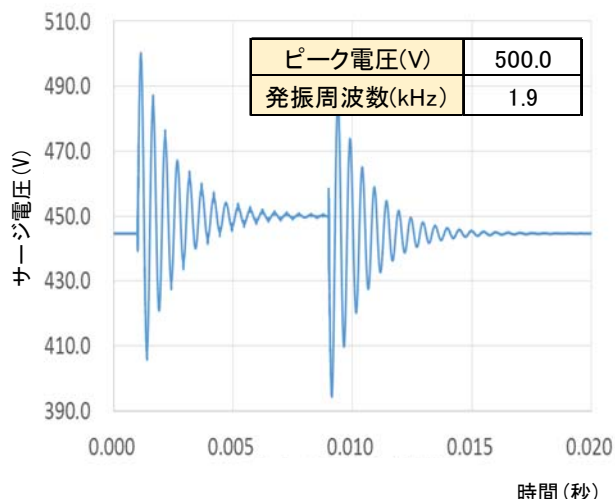


図21サージ電圧（キャパシタ有り）

3-4 製作

コントローラの全体組立図を図22に示す。コントローラは3層構造となっており、下層は冷却水が流れる中空構造、中層にはIGBT等を組み込んだ駆動回路基板、上層に制御回路を構成する制御基板とインターフェース基板を配置している。筐体の材質には、軽量で熱伝導率の高いアルミ材を用いており、制御回路基板（上層）と駆動回路基板（中層）の間にはノイズ対策としてスチール板を挿入した。図23は冷却ベースの上に駆動回路基板をメインとする中層を取りつけた状態である。図24は中層の上部に樹脂製のスペーサを設置した後、制御基板とインターフェース基板を取りつけた状態である。図25に完成したコントローラを示す。

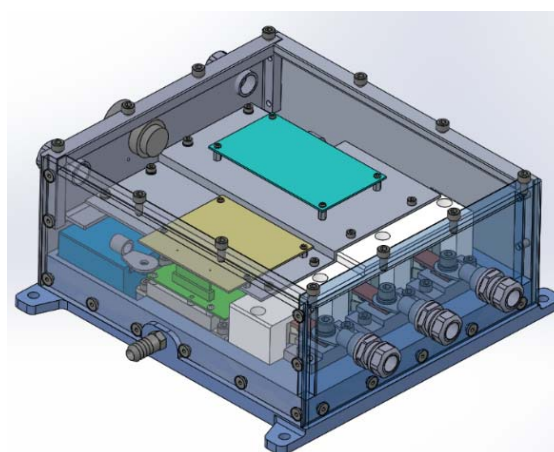


図22コントローラ全体組立図



図23駆動回路基板(中層)の取付け状態

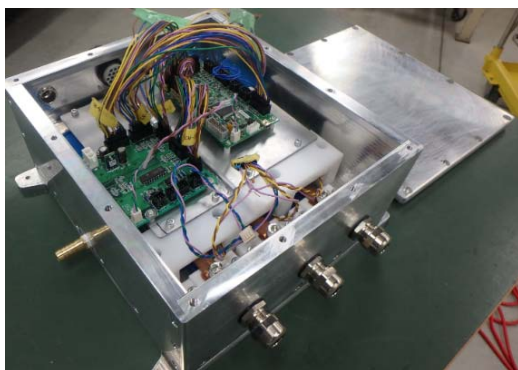


図24制御回路基板(上層)の取付け状態



図25完成したコントローラ

4 性能評価

4-1 測定方法

製作したモータとコントローラの性能を図26に示す方法で測定する。パワーアナライザは機器に出入りする電力を正確に測定するための計測機である。ここではパワーアナライザを用いて、コントローラに入力される電圧 (v_{dc}) と電流 (i_{dc})、コントローラから出力される線間電圧 (v_{uv} 、 v_{vw}) と相電流 (i_u 、 i_w) を測定している。モータのトルク (τ_m) と回転速度 (ω_m) は、モータベンチで測定しパワーアナライザに入力している。

コントローラの効率 η_{ctrl} 、モータの効率 η_{mtr} は以下の式で求めることができる。

(力行時)

$$\eta_{ctrl} = \frac{v_{uv} i_u + v_{vw} i_w}{v_{dc} i_{dc}}$$

$$\eta_{mtr} = \frac{\tau_m \omega_m}{v_{uv} i_u + v_{vw} i_w}$$

(回生時)

$$\eta_{ctrl} = \frac{v_{dc} i_{dc}}{v_{uv} i_u + v_{vw} i_w}$$

$$\eta_{mtr} = \frac{v_{uv} i_u + v_{vw} i_w}{\tau_m \omega_m}$$

ここで、力行時とは、モータの回転方向とトルクが同じ向きの場合であり、コントローラからモータへ電力が供給され車が動いている状態である。一方、回生時とは、モータの回転方向とトルクが逆向きの場合であり、モータの回転エネルギーがコントローラに流れ込んでいる状態である。回生時のモータは車を減速させるために活用される。

実際の測定では、回転速度を増加させるタイミングで振動などが生じ、動作が不安定になる場合もあることから、モータベンチへの回転速度指令を一定に保った状態でコントローラへのトルク指令を10Nmずつ増加させ計測を行っている。回転速度一定の状態ですべてのトルク範囲での測定を終えた後、回転速度を500rpm増やし、同様にトルク10Nm毎の計測を行った。

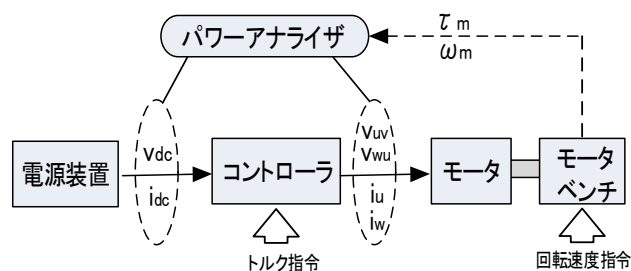


図26測定方法

4-2 測定結果と考察

測定したモータのトルクおよび出力を、設計時における曲線（図10）と比較し図27,図28に示す。表3で示したモータの性能（最大出力9kW、最大トルク90Nm、最高回転数3,200rpm）が得られていることが分かる一方、回転数が1200～2800rpmの領域ではトルク、出力共に設計値を下回った。これは設計時に想定していたよりも巻線抵抗が大きくなったためだと考えている。設計段階での巻線は、線径と巻数については正確に指定できるが、巻線長さはステータコアの寸法と巻数、および導線の曲げにくさなどを反映した補正值から算出されている。この補正值は巻線加工を数多く経験することで得られるものであり、今回はロータコアへの巻線の組み込みが思っていた以上に難しく、設計時点で想定していたよりも実際の巻線が長くなった結果、巻線抵抗が増大してしまった。巻線に流れる電流は巻線抵抗だけでなく、磁石を埋め込んだロータが回転することで生じる誘起電圧の影響も受ける。試作したモータの場合、巻線抵抗が大きいながらも、誘起電圧が小さい1000rpmまでの領域では所定の電流を流すことができ、設計値に近い性能を得ているが、誘起電圧が大きくなる1200～2800rpmの領域では、十分な電流を流すことができずトルクが低下してしまった。今後、モータを製作する際は、巻線が必要以上に長くないように、巻線を組み込み易いコア形状にすることが求められる。また巻線加工を繰り返し行い、巻線長さを見積もる補正值の精度を上げることも必要である。

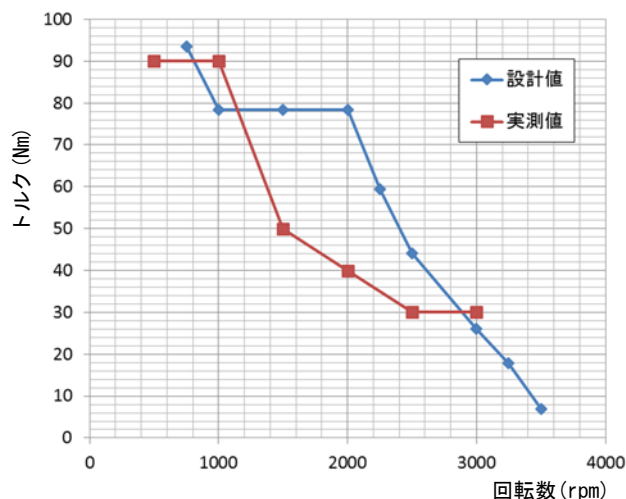


図27モータの性能曲線（トルク）

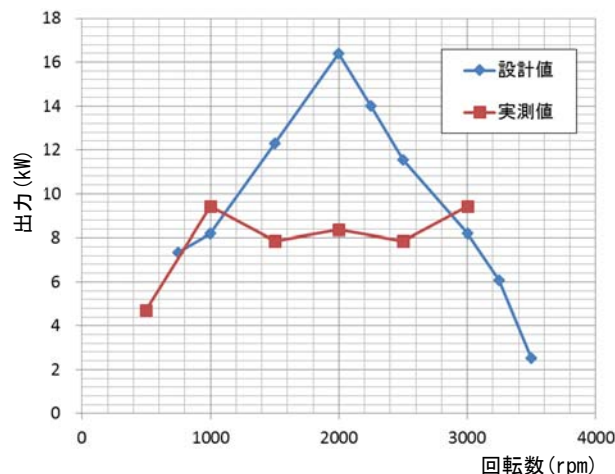


図28モータの性能曲線（出力）

図29および図30は、測定結果を基に作成した効率マップである。ここでは効率80%から100%までの範囲について、赤から緑へ徐々に変化する色で示している。効率マップは、横軸が回転速度、縦軸がトルクの座標平面であり、理想的には第一象限と第三象限（力行時）と第二象限と第四象限（回生時）の効率は、それぞれ同じ値になるのだろうが、モータベンチにおける測定誤差やモータコア加工時に生じた非対称性などのためか、ここでは微妙に値が異なっている。

モータの効率マップ（図29）では効率の悪い赤色の領域が比較的多く見られる。これは、モータの躯体寸法をコンパクトにした結果、狭い領域内で巻数を確保するために、線径が細くなった影響が大きいと考えている。また、回転速度が2000rpm以上の領域においては、モータコアの回転によって生じる誘起電圧が電源電圧に迫るほど大きくなるため、弱め界磁制御が始まる影響も考えられる。出力（トルクと回転速度の積）の小さい低回転領域においては、トルクが大きい場合の大電流による熱損失が相対的に大きくなることも、赤い領域が目立つ要因となっている。モータの力行時における最大効率は93.6%（回転数：1000rpm、トルク：10Nm）、回生時の最大効率は93.9%（回転数：1000rpm、トルク：-10Nm）となる。電気自動車に活用するモータの一般的な効率は96%以上だといわれており、製作したモータにはまだ改善の余地が多く残されている。

コントローラの効率マップ（図30）では、緑色の領域が多く見られる。コントローラの効率はIGBTのスイッチング動作などに影響を受けるが、既存機器を多く用いているためモータに比べ効率を悪くする要素が少ないのだと考えている。回生時の回転数が小さい領域において、効率の悪い赤色の領域が見られる原因は、回生時におけるコントローラへの入力電力が力行時よりも小さくなるためである。

コントローラの力行時における最大効率は95.8%（回転数：-2000rpm、トルク：-40Nm）、回生時の最大効率は93.9%（回転数：1500rpm、トルク：-40Nm）となる。

5 おわりに

ものづくり基盤技術の県内蓄積を図るため電動車の開発に取り組んだ結果、電磁界解析やモータ制御など、これまで県内では殆ど実施されていなかった分野の技術開

発を行うことができた。本報告では駆動系部品についての記述となったが、本事業では他にもシャーシフレームの押出成形や繊維強化樹脂の成形などについて技術蓄積に努めた。今後は、県内企業と連携しつつ蓄積した技術を活用した新製品の開発や事業化を進めていきたい。

謝辞

本事業における技術開発業務の多くを担って頂いた一般社団法人ものづくりネットワーク沖縄の皆さんに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 茄子川 捷久、宮下 義孝、汐川 満則、自動車の走行性能と試験法、東京電気大学出版局、11-18（2008）

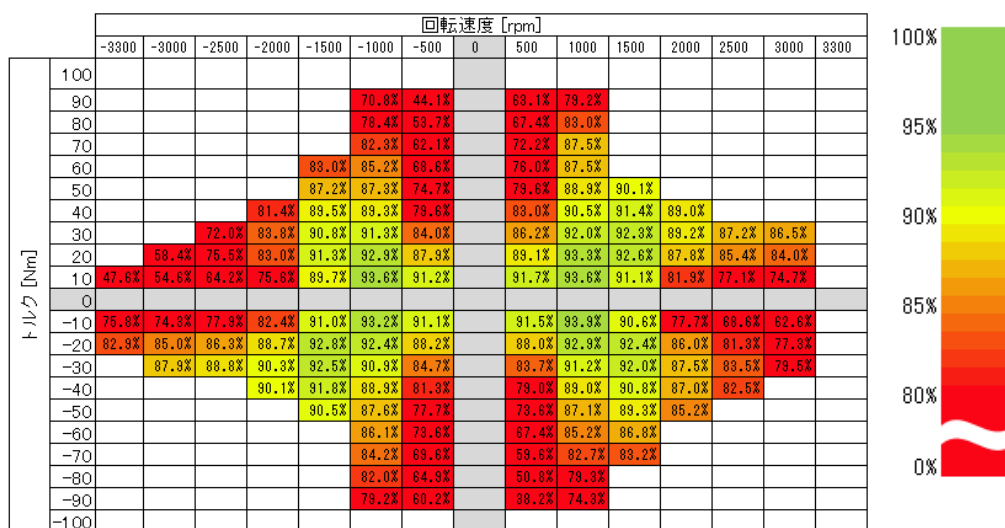


図29効率マップ（モータ）

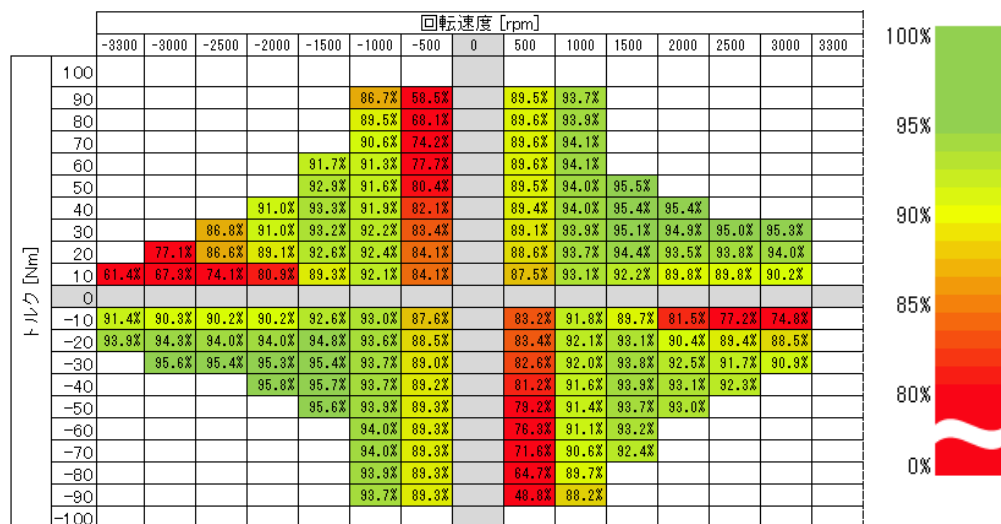


図30効率マップ（コントローラ）