



# 超電導電気自動車の開発

新里 剛\* 荒川 聡・尾山 仁  
坂 寛 延・早崎 俊 克

Development of High-Temperature Superconducting Motor for Automobiles — by Tsuyoshi Shinzato, Satoshi Arakawa, Hitoshi Oyama, Hironobu Saka and Toshikatsu Hayasaki — As the electrification of automobiles progresses, hybrid electric vehicles have been in widespread use and the development of commercial electric vehicles has started. However, the heavy weight of these large vehicles leads to relatively short driving distances. To overcome this problem, the authors have been working on the development of high-efficiency motors using DI-BSCCO® high-temperature superconducting (HTS) wire. They have recently developed an HTS motor and conducted a demonstration test using a prototype electric vehicle equipped with this motor and a cryogenic refrigerator. The motor produced a high torque of 136 Nm and output of 30 kW, and the prototype electric vehicle recorded a maximum speed of 80 km/h.

Keywords: superconductor, motor, electric vehicle

## 1. 緒 言

近年急速に進展している自動車の電動化の流れを、車両のサイズで大別してみると、乗用車に関してはハイブリッド自動車 (HEV) が普及期を迎えており、電気自動車 (EV) も量産車が市場に投入され実用化の段階に入った。一方、大型商用車に関してみると、稼働率の高い車両の電動化による省エネに対する要請が高まりつつあり、特に公共交通機関としての電動バスの実用化が先行すると予想される。すでに電動バスの実証試験が2010年より各地で開始されており、今後、環境意識の高い観光都市での導入や、スマートシティ構想の一部をなす移動手段としての導入を皮切りに、市場の成長が期待される。また、トラック分野でも比較的近距离の物流を担う、宅配便の車両、郵便配送用車両、コンビニ配送用車両等から電動化が進むと見られる。

大型商用車の電動化における課題として、車体重量に加えて積載重量が大きく、搭載可能な電池容量に比べて駆動に必要なエネルギーが大きいため、航続距離が伸ばせないことが挙げられる。電池エネルギー密度の向上が鋭意研究開発されているところであるが、一方で消費エネルギーの削減も有力な解決策であり、特に効率の良いモータの採用が有効である。現在、原理的に最も効率の良いモータは永久磁石同期モータ (PMSM) であり、市場投入された乗用車クラスのHEVやEVでも広く用いられている。大型車の電動化実証試験車両等においても、駆動用モータにはPMSMもしくは誘導モータ (IM) が用いられている。しかしPMSMやIMは技術的にほぼ確立されたものであり、大幅な効率向上の見通しは示されておらず、革新的な高効率モータの開発が求められている。

近年、液体窒素温度で電気抵抗がゼロとなる高温超電導

線材がめざましい性能の進歩を遂げており、電力ケーブル、船舶駆動用モータ、他への実用化に向けた応用開発が進められている<sup>(1)~(3)</sup>。

当社は、2007年から2008年にかけて高温超電導材料のポテンシャルと課題を検証することを目標に、ビスマス系超電導線材を用いたモータとそれを搭載した電気自動車を試作した<sup>(4)</sup>。このときの超電導モータは単純な液体窒素浸漬式であったが、今回新たに車載冷却システムの実証を目指して、極低温用冷凍機と一体化した超電導モータを開発し車両に搭載した。

## 2. HEV/EV 開発の動向と超電導モータ

現在の自動車の大半はガソリン自動車やディーゼル自動車に占められているが、化石燃料の枯渇やCO<sub>2</sub>排出による地球温暖化問題に対応し、持続的なモータリゼーションの進展のためには、エネルギー効率の大幅な向上や石油代替燃料への転換が必要である。環境対策車両として、HEV、EVや燃料電池自動車 (FCV) の開発が自動車メーカーや各研究機関により進められている<sup>(5)、(6)</sup>。HEVは動力源としてエンジンと電気モータを併用したシステムであり、1997年に量産販売され、ガソリン自動車と同じインフラが活用できるため、EVやFCVに先行して普及が進んでいる。EVやFCVは走行時ゼロエミッションとなるいわば究極のエコカーであり、CO<sub>2</sub>排出の少ないエネルギー源 (原子力、水力、再生可能エネルギーなど) との組合せにより総合的にエネルギー環境改善の効果が期待できる。これらの環境対策車はいずれも電気を使用してモータで動力を発生させて

いるため、モータの高効率化、高性能化はいずれのシステムにおいても共通の課題である。

近年の高温超電導線材の高性能化、冷却断熱技術の進展により、自動車駆動用に超電導モータを適用して、さらに高効率のシステムを構築する可能性が検討されている。図1にモータのコイルを超電導化した場合の特長を示す。超電導コイルによる高磁束密度駆動が可能のため、大きなトルクが得られる。また、超電導モータは銅損がなく、将来的には空芯化により鉄損を低減してモータ効率が向上する可能性もある。自動車用モータの場合、低回転数から高回転数まで、また車両が一定速度で巡航するような低トルクから加速時の高トルクまで、モータの駆動範囲が広い。通常の高トルク出力時に銅損が増大し、効率が低下するが、超電導モータは広範囲で高効率である。

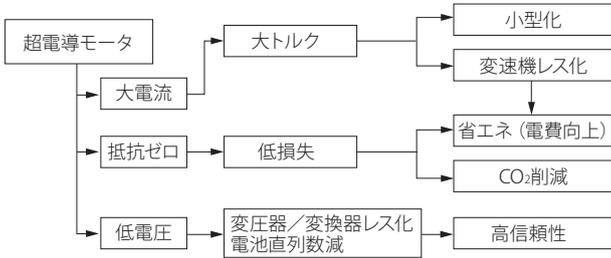


図1 超電導モータの特長

自動車に超電導モータを適用する場合の課題は、超電導コイルを臨界温度以下の低温に保持しなければならない点である。高温超電導線材を用いることにより、液体窒素など取扱いやすい冷媒を用いて超電導状態を作ることができるが、冷媒を補充せずに長時間運転するためには、車載式の冷凍機が必要となる(図2)。

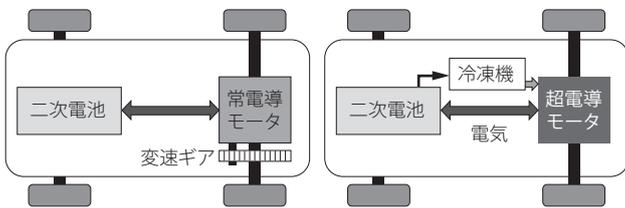


図2 超電導モータ車両システム構成(冷凍機搭載)

### 3. 超電導モータの開発

3-1 モータの仕様(原理、構造ほか) 今回試作した超電導モータの仕様を表1に示す。基本原理は直巻DCモータとし、固定界磁を形成するためのコイルにはポリイミドフィルムで絶縁被覆したビスマス系高温超電導線材DI-BSCCO® Type Hを用いた。超電導コイルは真空断熱層を有する容器(銅およびSUS製)に収納し、液体窒素に浸漬して冷却する。2重構造の容器のうち液体窒素に触れる内側槽を熱伝導率の高い銅製とし容器壁自体を熱伝達経路として利用することにより、超電導コイルから冷凍機への熱伝達を促す構造とした。固定界磁コア(鉄心)は4極のクローポール型とし、超電導コイルはテープ状の超電導線材を単純なパンケーキ状に巻いたものとした。クローポール型のメリットとして、コイルの大径化が可能で、コイル数を極数に比べて減らすことができ、冷却構造を含めた設計の簡略化ができるため採用した。モータの軸長が長いこと、図3のように超電導コイルは2個に分割して個別に真空断熱容器に収納した。ロータ(電機子)は市販のDCモータのものを流用した。

表1 線材、コイルおよびモータの仕様

線材仕様	線材タイプ	DI-BSCCO® Type H (ポリイミドフィルム絶縁)
	寸法	4.2mm × 0.22mm
	臨界電流 (Ic)	140A
	最大引張強度 (77K)	150MPa
コイル仕様	最小曲げ半径 (室温)	70mm
	コイル形状	内径: ø216mm、 外径: ø241mm、幅: 40mm
モータ仕様	コイルターン数	186ターン/コイル
	モータ形式	直巻DCモータ(界磁超電導)
	超電導コイルの冷却方法	液体窒素浸漬+車載冷凍機冷却
	最大電圧	144V
	最大電流	500A
	寸法	ø307mm × 400mm
質量	約110kg	

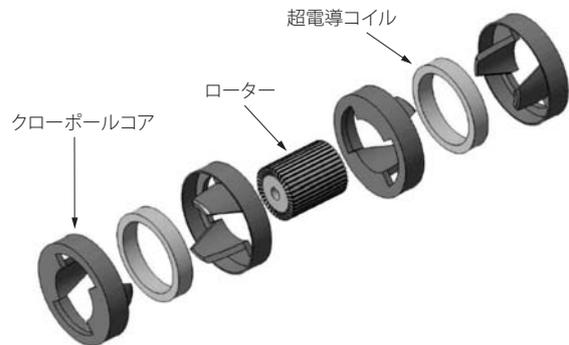


図3 超電導モータの構成

**3-2 モータの設計** 冷凍機を用いて超電導コイルを効果的に冷却する構造の実現のため、真空断熱容器の内側槽の設計にはCAEによる熱解析を適用した。図4に示すように、冷凍機の温度を65K（低温端）としたときに、冷凍機から最も遠い超電導コイルの下端で74Kに到達するとの結果が得られた。

銅製の内側槽を断面積の大きい銅製伝熱部材を介して冷凍機の低温端に直接接続し、熱伝導が得られるようにした。エンジンルーム内に冷凍機を配置する際の自由度を持たせるために、冷凍機を大きく2つのコンポーネントに分割し（圧縮機と膨張器）、これらをフレキシブルチューブで接続している。特にボンネットとの干渉を避けるために、モータ上部に取付ける膨張器については通常上方に展開される要素部品類を下方への延伸配管を用いて退避させ、全高を抑える設計とした。

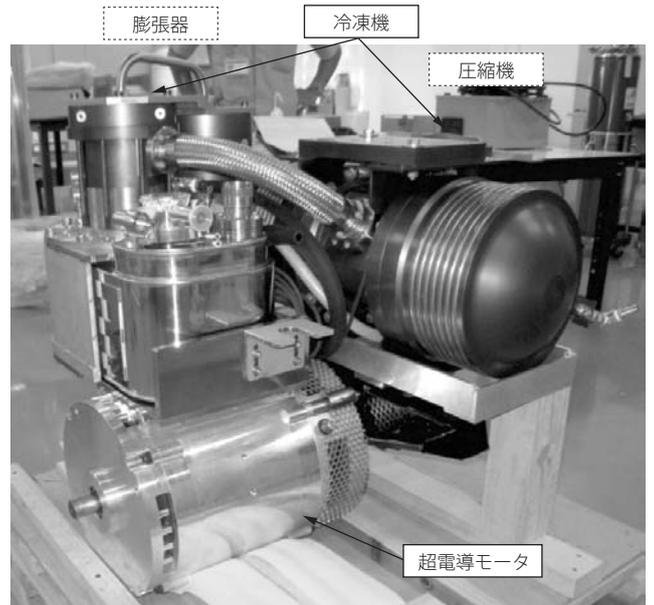


写真1 超電導モータの外観

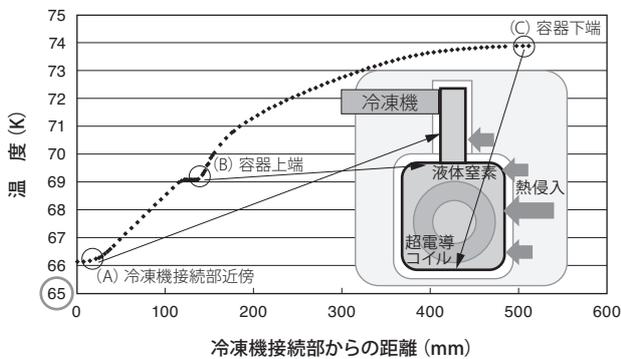


図4 超電導コイル容器の温度分布 (CAE)

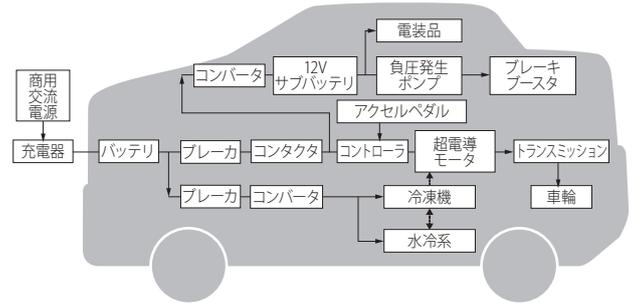


図5 超電導電気自動車の駆動系構成

**3-3 モータの構造と外観** 写真1に冷凍機と一体化した超電導モータの外観写真を示す。超電導コイルは真空断熱容器内で液体窒素に浸漬されて冷却されており、モータ上部にはリザーバタンクを搭載している。モータを運転するには、まず予冷のために液体窒素を供給した後、冷凍機を運転して液体窒素を冷却する。液体窒素の温度が沸点以下になると窒素の蒸発はなくなるため、冷凍機の連続運転が可能な状態であれば液体窒素の補充は不要となる。

#### 4. 超電導電気自動車の開発

車載冷凍機一体型の超電導モータの実使用に近い形での検証を目的として、市販ガソリンエンジン車（トヨタ・クラウンアスリート）を改造して超電導モータを搭載した電気自動車とした。図5に試作車両の駆動系の構成を示す。超電導モータ駆動用の電源は12V鉛蓄電池を12個直列にした144Vとした。ドライバのアクセル操作量をセンサに

検知し、市販の電流コントローラでアクセルペダルの踏み込み量に比例した電流を超電導モータに出力する。モータのトルクは変速機を経由して後輪を駆動する。充電は接触タイプであり、外部の充電器から車両後部の専用コネクタにつなぎ込む形式とした。また、エンジンがなくなることによりブレーキブースタに用いる負圧がなくなるため、新たに電気自動車用に市販されている真空ポンプを搭載している。車両の12V系電装品への電力供給のためにDC-DCコンバータを搭載し、パワーステアリング、カーナビなどほぼベース車両の機能をそのまま使用可能である。

写真2にエンジンルーム内の超電導モータの搭載状況を示す。鉛蓄電池は車両後部のトランクルームに搭載している。

車両の走行評価結果を表2に示す。最高速度はテストコースの制約により80km/hまでの確認となった。一般的な使用には十分耐える性能である。



写真2 エンジンルームへの超電導モータ搭載状況

表2 車両性能

項目		性能
車両性能	最大トルク (1,540 rpm)	136 Nm
	最高出力 (2,200 rpm)	30 kW
	最高速度 (4速)	80 km/h

また冷凍機による冷却性能評価の結果としては、超電導コイルの温度73Kを得ている。

## 5. 結 言

高温超電導線材を用いた超電導モータと冷凍機とを一体化させて搭載した電気自動車を開発した。2011年12月から2012年10月現在までの試験走行において特に問題は見られず順調に稼働している。今回初めて搭載した冷凍機についても、冷凍機電源やコントローラなどの周辺機器を含む冷却系全体として正常に稼働し、超電導コイルを液体窒素の沸点以下に保持できることを確認した。今後走行実績を積み重ねて、超電導モータおよび冷却系の信頼性検証を継続する。

さらに我々は超電導応用製品の実用化に向けて、特に超電導モータの電動バスへの適用を目指した開発を進めている。乗用車に比べて稼働率の高いバスでは、車両待機中の超電導モータの冷却に必要なエネルギーが相対的に小さくなり、総合的な効率向上が期待できる。また、超電導モータは常電導モータに比べて特に低速かつ大トルクが必要となる車両発進時の効率が良いため、市街地でストップ&ゴーを繰り返す路線バスなどへの適用により省エネ効果が期待できる。



写真3 超電導電気自動車走行試験

## 参 考 文 献

- (1) 岡崎徹、「移動体の超電導駆動による高効率化検討」、SEIテクニカルレビュー第168号(2006年3月)
- (2) 杉本 他、「高温超電導電動機の試作」、電気学会全国大会(2005.3.17)徳島大学
- (3) 「長尺三心一括型高温超電導ケーブルによる世界初の実線路建設と商用運転 (Albany プロジェクト)」、SEIテクニカルレビュー第170号(2007年1月)
- (4) 尾山仁、「超電導電気自動車の開発」、SEIテクニカルレビュー第173号(2007年8月)
- (5) 「ハイブリッド・電気自動車のすべて2007」、日経BP社
- (6) 「燃料電池車・電気自動車の可能性」、グランプリ出版

## 執 筆 者

新里 剛\*:自動車技術研究所 主席



荒川 聡 :自動車技術研究所  
 尾山 仁 :自動車技術研究所 グループ長  
 坂 寛延 :自動車技術研究所 主幹  
 早崎 俊克 :自動車技術研究所 所長

\*主執筆者