



## 超電導電気自動車の開発

尾山 仁\*・新里 剛・林 和彦  
北島 健二・有吉 剛・澤井 孝典

Development of Prototype Superconducting Electric Vehicle — by Hitoshi Oyama, Tsuyoshi Shinzato, Kazuhiko Hayashi, Kenji Kitajima, Takeshi Ariyoshi and Takanori Sawai — In recent years, global warming has become a serious environmental issue. Development efforts are currently underway toward achieving practical application of high-temperature superconducting wires. A high-temperature superconductor has zero electrical resistance at the temperature of liquid nitrogen, so it can reduce the power losses in electrical equipment. The authors have developed a prototype electric vehicle equipped with a motor system that uses bismuth superconducting wire to verify the potential and problems of superconductors. It was verified that the prototype superconducting motor has a torque of 70 Nm, an output of 18 kW and a maximum speed of 70 km/h. The maximum torque can be achieved at low rotations, and therefore a smooth start and acceleration is possible. After six months of test driving, there has been no problem.

### 1. 緒言

近年、環境問題が大きくクローズアップされる中で、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>。しかし、陸上輸送機器としての自動車分野に関しては、超電導技術を用いた研究報告は少ない。今回、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。

### 2. 地球温暖化問題

**2-1 深刻な地球温暖化** 近年、世界規模での異常気象が深刻化し、地球温暖化は外交上の主要課題としても浮上している。地球規模での温度上昇が10万年周期の氷期／間氷期の長期的な地球の気候変動に過ぎないとの議論もあったが、産業革命から現在までの100年間における温度上昇率は、かつての間氷期の上昇率に比べ十倍近い早さにもなっている。地球温暖化の原因は人間活動による温暖化ガス排出によるものとして、20年来の議論にもほぼ終止符が打たれている。昨年発表された国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次報告書<sup>(4)</sup>では今世紀末の地球の平均気温が二十世紀末に比べ最大6.4℃も上昇すると試算し、化石燃料に頼った経済優先の社会が加速度的に環境を悪化させる可能性に対して警告を発している。

**2-2 京都議定書の役割** 1997年12月に開かれた第3回気候変動枠組条約締約国会議（地球温暖化防止京都

議、COP3）にて議決された京都議定書は1990年を基準として各国別に温暖化ガスの排出量を定めている。2008年から5年間の削減率として先進国平均5%のCO<sub>2</sub>削減を目標とし<sup>(5)</sup>、日本に対しては6%のCO<sub>2</sub>削減目標が定められている。地球温暖化の進行を食い止めるために、京都議定書は各国における削減対策を求めるとともに、排出量取引等の国際連携の手法も併せて導入し、地球規模での環境課題を解決するための決議である。

**2-3 CO<sub>2</sub>総量規制** 日本は2度の石油ショックを経て独自の省エネルギー技術を蓄積し、主要産業のエネルギー効率は世界の最高水準を有する。2003年統計で見ると、実質GDP（国内総生産）あたりのエネルギー消費量は、日本を1として英国1.43、米国2.06、独2.41となっており、日本のエネルギー効率の高さが分かる。しかし、一定の経済成長率（GDPの変化）を維持した上でのCO<sub>2</sub>総量規制（エネルギー消費量削減）は容易ではない。日本は京都議定書にてCO<sub>2</sub>削減率6%を求められているが、実質的なCO<sub>2</sub>削減目標は0.6%であり、森林吸収分（3.8%）、排出権取引（1.6%）の寄与を見込んで目標達成を見込んでいる。しかし、景気浮揚に伴うCO<sub>2</sub>の排出増に歯止めがかからず、2006年度は6.4%と逆に増加した。2012年までの目標達成のためには、2.7%に相当する新たな追加対策（産業界の自主行動計画拡大、住宅・自動車等の省エネ、クールビズ等の国民運動、他）が盛り込まれることとなっている。CO<sub>2</sub>の排出量寄与率で23%に達する運輸部門に注目して見ると、2010年度で10~12%の増加が予想されており、今後も大幅な燃費改善が求められる可能性が高い。

環境立国としての日本の立場からすると、12年までの約束達成は当然であるが、ポスト京都と呼ばれる2013年以降もかなりの削減義務が生じると予想される。環境と経済が両立する持続可能な低炭素社会を実現するためには、今後革新的な技術の開発が必須になる。

### 3. 環境対策車両開発の動向と超電導モータ

陸上輸送機器としての自動車は、大半がガソリン自動車やディーゼル自動車に占められ石油を大量に消費する。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、石油代替燃料への転換が必要である。環境問題に対する対策車として、HEV (Hybrid Electric Vehicle)、EV (Electric Vehicle)、FCV (Fuel Cell Vehicle) 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>(6),(7)</sup>。HEVは動力源をエンジンと電気モータを併用したシステムであり、1997年量産販売され、ガソリン自動車と同じインフラが活用できるため、EV、FCVに先行して普及が進んでいる。EV、FCVは走行時はゼロエミッションの究極エコカーである。EVは電力の構成では石油依存が少なく、原子力、ガス発電、水力などCO<sub>2</sub>排出の少ないエネルギー源を利用できるため、総合的にエネルギー環境改善の効果が大きい。FCVも水素を原料とするため、様々なエネルギー源から製造でき、CO<sub>2</sub>削減効果が大きい。将来、電池容量拡大、コスト低減、インフラの整備等課題が解決すれば、急速に普及、化石燃料を使用した従来の内燃機関車と置き換わっていくと考えられる。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。モータの高効率、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、自動車向けに超電導モータを適用して、さらに高効率のシステムが構築できないか、その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、通常のモータに比べ大

幅なトルク向上が見込める。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、低速から高速、一定速度の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。通常のモータでは高トルク出力時は銅損が増大し、効率が悪くなるが、超電導モータは広範囲で高効率である。

一般的な電気自動車のシステムとモータを超電導化した場合のシステム構成について図2に示す。一般のモータでは、モータは毎分数千~1万超の回転数で駆動して、変速ギアにより回転数を落とし、トルクを増加させて駆動輪をドライブする構成としている。一方超電導モータではトルクを大幅に大きくできるため、変速ギアを介せず、モータで直接ドライブシャフトを駆動するシステムの構成が可能となり、変速ギアによる伝達ロス分の低減が期待できる。

自動車に超電導モータを適用する場合の課題は、超電導材料の臨界温度以下の低温に超電導コイルを保持しなければならない点である。使用開始時にコイルを低温状態しておく必要があり、車両稼働時も常に低温状態に保つ必要があるため冷凍機が必要となる。そのため、自動車への応用では稼働率が高い用途でメリットが大きいと考えられる。また、大きな出力が必要な大型車ではモータ効率向上、伝達ロス低減量に対して、冷凍機電力量の影響が小さくなる。さらに、大型車の加速時や減速の回生時には大きな出力が必要となるため、バスや都市交通システムのようなストップ&ゴーの頻度の多い用途、また、高速バスなど連続稼働するような用途では特にメリットが大きいと考えられる。

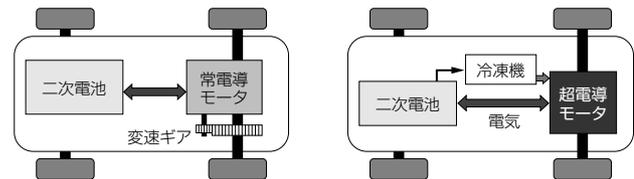


図2 超電導モータ車のシステム構成例

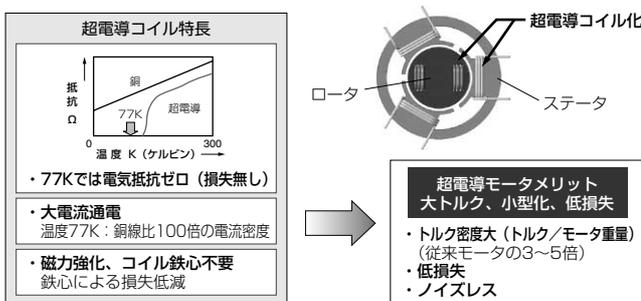


図1 超電導モータの特徴

### 3. 超電導モータの開発

3-1 モータ仕様(原理、線材、コイル仕様、他) 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ラッピングしたTypeHの超電導線材を用いている。また、超電導コイル部分の冷却は液体窒素への浸漬とし、保冷のための容器は真空断熱層を有するSUS製とした。鉄心構造は4極のクローポール型とし、コイルはテープ状の超電導線材を186ターン単純なパンケー

表1 線材仕様、コイル仕様、モータ仕様

線材仕様	線材タイプ	TypeH (ポリイミドフィルム絶縁)
	寸法	4.2mm × 0.22mm
	Ic 値	140A
	最大引張り強度 (77K)	150MPa
	最小曲げ半径 (室温)	70mm
コイル仕様	コイル形状	内径: φ186mm、外径: φ210mm 幅: 40mm
	コイルターン数	186 ターン/コイル
モータ仕様	モータタイプ	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
	最大電圧	144V
	最大電流	500A
	寸法	φ 267mm × 370mm
	重量	約 70kg

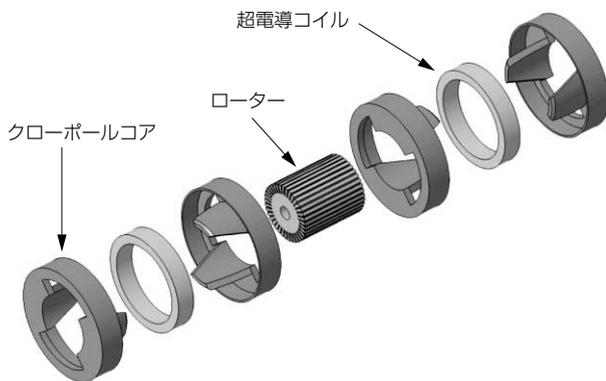


図3 超電導モータの構成

キ形状に巻いたものを用いた。クローポール型は、コイルの大径化が可能でコイル数を減らすことができ、冷却構造を含めた設計を簡略化できるため採用した。モータの軸長が長いので、図3のようにコイルは2個に分割している。電機子ロータには市販されている DC モータのものを流用した。

**3-2 モータ設計** 本設計では、CAEにより磁束密度の分布、磁気飽和など考慮してクローポールコアの形状の調整を行い、超電導コイルを用いたモータの設計を行った。CAEの解析時の例を図4に示す。設計したモータの電流-トルク特性に実測のトルク値を重ねて図5に示す。最大電流時のトルクは58Nmである。一方、車両に搭載した状態で実測したモータの駆動トルクもほぼ同等の値が得られている。

**3-3 試作モータの構造と外観** 写真1に外観写真を示す。超電導コイルは断熱容器内で液体窒素に浸漬されて冷却されており、モータ駆動中に蒸発する液体窒素を補

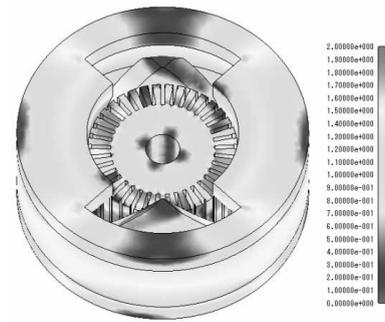


図4 超電導モータの磁束密度分布

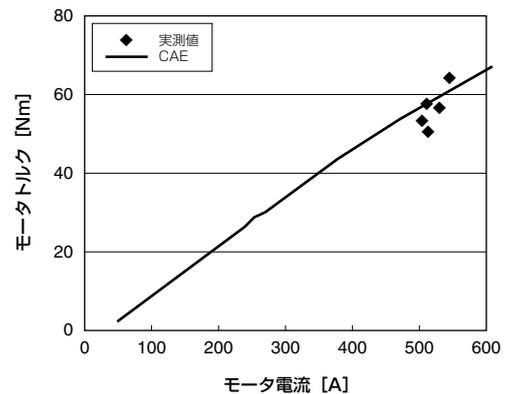


図5 超電導モータ電流トルク特性

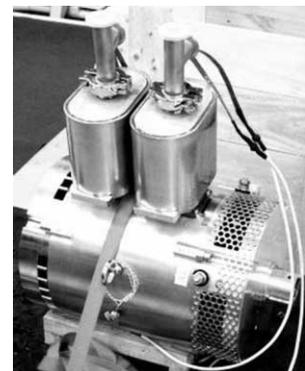


写真1 超電導モータの外観写真

うことが必要である。走行中連続的に液体窒素を供給するために、モータ上部には液体窒素リザーバを搭載している。

#### 4. 超電導電気自動車の開発

過去の研究事例としては2kW出力のバルク超電導体を用いてゴルフカートの走行に成功した報告がある<sup>(8)</sup>。今回は



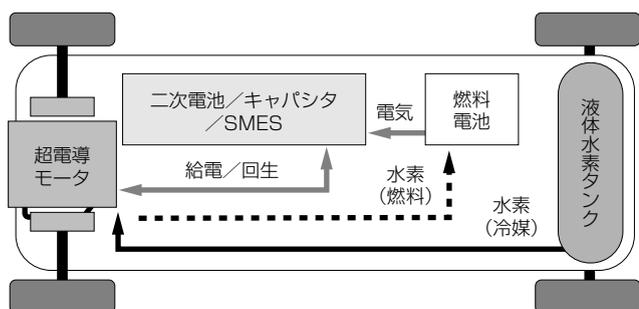


図7 超電導電気自動車（液体水素使用の燃料電池超電導電気自動車）

を冷却する冷凍機が不要、または容量の小さな機種で対応でき、システムコストを抑えて超電導化のメリットを最大限に生かせる可能性がある。

今回、高温超電導線材を用いた超電導モータとそれを駆動源として搭載した電気自動車を試作した。半年間の試験的な走行において特に問題は見られず、2008年4月現在で200kmの走行を経て順調に稼働している。今後、さらに走行実績を重ねて車載超電導モータとしての信頼性検証を継続すると共に、冷凍機の搭載や上記液体水素の利用等により高度なシステムまで踏み込んだ研究を進め、超電導応用製品の実用化に向けた提案をしていく所存である。

#### 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) 杉本ら、「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) IPCC 第4次評価報告書  
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf>
- (5) 環境省HP <http://www.env.go.jp/earth/cop6/3-2.html>
- (6) 「ハイブリッド・電気自動車のすべて2007」、日経BP社
- (7) 「燃料電池車・電気自動車の可能性」、グランプリ出版
- (8) SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol.4 No.1, Feb. 1996, Article3
- (9) 大森ら、「水素エネルギー最前線」工業調査会

#### 執 筆 者

- 尾山 仁\*：電力・エネルギー研究所 グループ長  
 新里 剛：電力・エネルギー研究所 主査  
 林 和彦：電力・エネルギー研究所 所長  
 北島 健二：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部  
 有吉 剛：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席  
 澤井 孝典：自動車技術研究所 所長

\*主執筆者