

5.X 電気自動車の将来性

(堀)

概要

環境問題を直接の契機として電気自動車の開発に熱が入り、何度めかのブームがおとずれている。さまざまな見方はあるが、今回は本物になるかも知れない。

本節では、電気自動車の現状について述べ、その将来性について考えるよすがとしたい。また、筆者の考えとして、内燃機関(エンジン)には望むべくもない電気モータの高度な制御性を生かさなければ電気自動車に将来はない、という主張をする。そしてそのために行った基礎実験などを紹介する。

5.X.1 電気自動車の動向

(1) 実用レベルの電気自動車

1996年大阪で開かれた電気自動車専門の国際会議EVS-13では、各自動車メーカーから実用レベルの車がそろって発表された(表5.X.1)。1997年オランダのEVS-14を経て、1998年10月ブリュッセルで開催されたEVS-15には1600人以上もの参加があった。直前にパリで開かれた、自動車関係では世界最大の国際会議FISITAの参加者は3000人であったと報じられている。FISITAは2年に1回の開催である。電気自動車の普及率はほとんどゼロであるにもかかわらず、内燃機関車をベースとする権威ある学会と同等以上の関心を、電気自動車単独で集めているのである。工業製品が、研究 開発 生産という道をたどるとすれば、電気自動車の将来は約束されていると言ってよい。¹⁾



GM EV 1



Nissan Altra EV

図5.X.1 実用レベル電気自動車の例

表5.X.1 実用レベルの電気自動車(1999年現在)²⁾

	トヨタ	ニッサン	ホンダ	GM	Ford	Chrysler
車種	RAV4L EV	R'nessa EV	EV Plus	EV1	Ranger EV	Epic
電池	Ni-MH	Li Ion	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH
モータ	PM	PM	PM	IM	IM	IM
航続距離	215km	230km	220km	160miles	100miles	215km
最高速度	125km/h	120km/h	130km/h	80mph	75mph	80mph

現在、電気自動車の最高速度や加速性能は満足できるレベルに達し、一充電走行距離は200km台になった。モータは、日本では、IMからPMモータへ進む傾向がはっきりした。アメリカでは大型化や耐環境性で有利なIMが依然主流である。電池は、シール形鉛 Ni-MH Liイオンという流れがはっきりしてきた。最後は燃料電池になるといわれるが、技術的問題も少なくない。充電器は接触形と非接触形が両立している。信頼性の高い充電状態(SOC: State Of Charge)指示計は依然開発途上であり、充電システムのインフラも不十分である。

(2) 超小型電気自動車

1996年大阪でのEVS13以降、車両に関する限り大きな変化はない。その中で超小形EVとでも呼ぶべき高性能PEV(Pure Electric Vehicle: 二次電池のみを用いる純電気自動車)が、各社から出そろったことは注目に値する(図5.X.2)。これは、PEVの生きる道は、最高速度100km/h、航続距離100km程度の2人乗り小形EV(ただし高性能で高級感もある)であるという認識の表われである。



Toyota "e-com"



Eco-Vehicle "Luciole"
(環境庁の実験車)
(右は普通の軽自動車)

図5.X.2 最近の超小形電気自動車の例

EVはガソリン車とはまったく違った新しいジャンルの乗物であり、走らないがゆえに、われわれはライフスタイルそのものを見直さざるを得なくなる。いいかえれば、クルマ中心の社会をこのまま続けるのか、不十分な性能をものを使いこなす社会に転換するのか、われわれはいま選択を迫られていると言ってよい。性能のよい最近のハイブリッド車では、このような視点は育たない。

5.X.2 電気自動車のエネルギー効率

電気自動車とガソリン自動車では、どちらのエネルギー効率がいいのだろうか。図5.X.3によれば、1次エネルギー（原油）換算にして、定速走行では、電気自動車20%、ガソリン自動車15%、加速走行では、電気自動車15%、ガソリン自動車10%といずれも電気自動車の方が効率がよい。多くのステップを経るが各要素の効率が高いために、全部かけあわせてもガソリン車を凌ぐのである。

電気自動車は、石油を燃やす火力発電所だけではなく、原子力発電所から太陽光にいたるあらゆる種類の電気を用いることができる。これはエネルギーセキュリティの面でも有利である。（最近話題の二酸化炭素放出量は、発電所のタイプによって異なってくるので一概には言えない。）

しかし、最近では、直噴エンジンなどの進歩によってガソリン車のエネルギー効率（燃費）は著しく向上しており、図に見るようなエネルギー効率面での電気自動車のメリットは徐々に薄らいでいくものと考えられる。

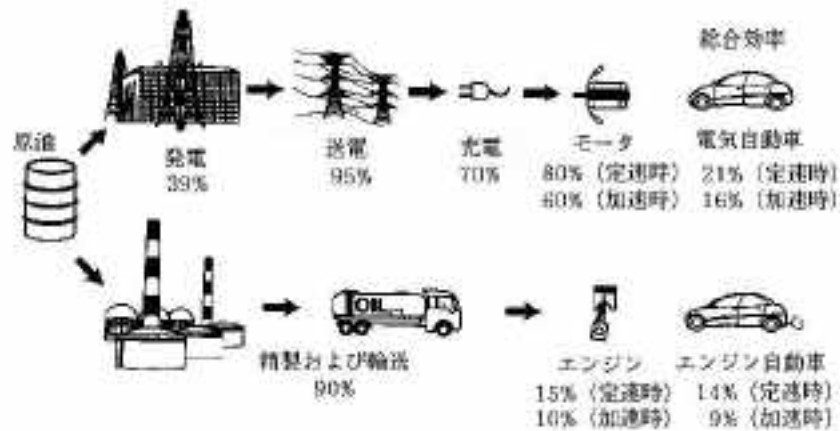


図5.X.3 電気自動車とガソリン自動車のエネルギー効率の比較¹⁾

5.X.3 乗物に適した速度-トルク特性

図5.X.4の点線で示すように、乗物には、始動時や低速域では大きなトルクが必要（定トルク領域という）であるが、高速域では速度に反比例してトルクが低下する（定出力領域という）速度-トルク特性が適している。（#1）

エンジンが効率よくトルクを発生できる回転数はごく狭い範囲に限られるため、トランスミッション（変速機）を用いてこの特性を満足させる必要がある。

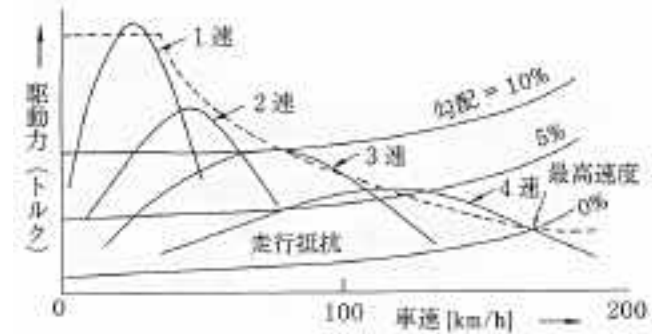


図5.X.4 乗物の駆動力特性³⁾

一方、電気モータは、広い速度域で効率よくトルクを発生することが可能であり、変速機を用いる必要がないばかりか、中速から高速域における電気モータのトルクの立ち上がりには目を見張るものがある。高速道路での追い越し時の加速特性などは素晴らしく、ガソリン車をはるかに凌駕する。

ガソリン車が減速時の運動エネルギーを熱にして捨てているのに対し、電気自動車では電力回生ブレーキが可能である。これは電気モータを発電機として

#1 ほぼ一定電圧の直流架線から直接モータに電力を供給してきた電気鉄道では（電流はレールを伝わって変電所に返る）、長く直流直巻モータが用いられてきた。これは、架線とモータの間に抵抗を挿入する抵抗制御と呼ばれる簡単な方式によって、この特性を実現できるためである。速度ゼロにおいては車輪がすべらないという条件で最大トルクが決定される。定トルク領域では、速度の上昇とともに抵抗を抜きながら電流をほぼ一定に保つ。抵抗を全部抜き終わって、架線が直接モータに接続されると、今度は界磁を弱める（実際には抵抗などに分流することによって、速度を上げてゆく（定出力領域）。ここでは、出力（トルクと速度の積）が一定となる。

しかし、最近の鉄道では、このような原始的な制御方法は、VVVF方式の実用化によって過去のものとなりつつある。

用いてエネルギーを電池に回収するもので、電気鉄道では常識となっている方式である。ACモータ駆動の車では回路を切り換える必要さえなく、インバータ制御のみによって加速から減速への滑らかな移行が可能である。

5.X.4 注目される新しいモータ制御技術

誘導モータ（IM）は同期モータ（とくにPMモータ）に比べて効率が悪いと言われてきたが、これは励磁電流の大きさを一定に保つベクトル制御のせいである。励磁電流を可変にして最大効率運転を行えば、効率はPMモータに優るとも劣らない。（その原理は1.4.5を参照されたい。）

IMの効率最大化制御の効果を評価した結果を表5.X.3に示す。ここでは通常の磁束を一定に保つベクトル制御のIM、効率最大化ベクトル制御を行ったIM、通常のPMモータ（IPM）を用いて走行シミュレーションを行った結果である。IMとPMモータを比べると、最大効率はPMモータの方がよいが、40km/h定速走行時には最大効率制御のIMの方が航続距離が長くなる。しかし、市街地走行を模擬した10-15モードでは、またPMモータの方が長く走る結果となっている。

表5.X.3 走行シミュレーション結果⁵⁾

40km/h 定速走行時の結果			
	ベクトル制御IM	最大効率IM	IPM
走行に必要なパワー[kW]	2,727	2,727	2,727
消費電力[kW]	4,455	3,537	3,897
総合効率[%]	64.9	81.6	74.1
一充電走行距離[km]	150.9	190.0	172.4

10-15モード走行時の結果			
	ベクトル制御IM	最大効率IM	IPM
消費エネルギー[kJ]	2,870	2,619	2,558
回生エネルギー[kJ]	659	649	730
一充電走行距離[km]	113.9	130.3	137.8

このように、街乗りクルマはPM、郊外に出るならIMという住み分けはかなり明確に言えることである。アメリカの電気自動車はIMを用いる理由もこの辺にあるのかも知れない。何がなんでもPMモータがよいというわけでない。世間一般の傾向がそうであるからといって鵜呑みにしてはいけない。IMはなんといっても安価であり、保守がほとんど不要である。鉄道用モータがほとんどIMであることがその実際面での優秀性を証明している。

また、PMモータにおいても、永久磁石材料の進歩によって従来は不可能と言われてきた弱め界磁制御が可能になり高速運転領域を拡大している。さらに、センサレス制御（IMでは速度センサ、PMモータでは位置センサを用いない制御技術）の進歩は注目に値する。早晚、IM、PMモータのいずれにおいても、モータへのびるワイヤは高圧低電流の細い線が3本のみになるだろう。

5.X.5 電気自動車ならではの長を生かす

(1) インホイールモータを用いた駆動系

電気自動車では、図5.X.4に示すように、さまざまな駆動系の構成が可能である。(a)のようにエンジンを単純に電気モータにおきかえるものから、(b)のように変速機を省いたり、(c)のように左右独立のモータを用いてデフをなくす方式、さらに、(d)のように車輪内にインホイールモータを組み込んだ4輪独立方式まで考えることができる。(c)(d)は電気自動車ではなくては実現できない方式である。

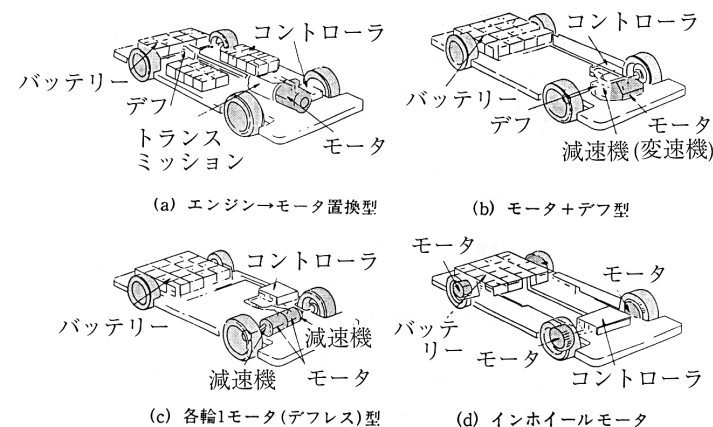


図5.X.4 電気自動車駆動系の構成例³⁾

(d)の例として、1997年に環境庁が開発したエコビークルLuciole（フランス語で"蛍"の意）のインホイールモータの断面図を図5.X.5に載せる。前後2シートの小型車で、車重910kg、最高速度は130km/h、一充電で130km走行可能、燃費は原油1リットル換算50kmである。モータは、36kWのモータ、減速機、ブレーキなどすべてを含んで25kgほどにしかない。

(2) 電気自動車ならではの新しい制御

EVでは電気モータの特長を生かさなければ意味がない。電気モータの最大の特長は、トルク応答がエンジンの2ヶタ速いという点である。エンジンが500msとするとモータは5msである。アクチュエータが速くなるとフィードバック制御が可能になる。たとえば、人間から見た駆動特性を変えることなく、車輪がスリップしたときのトルクの垂下特性だけを調整したりできるようになる。

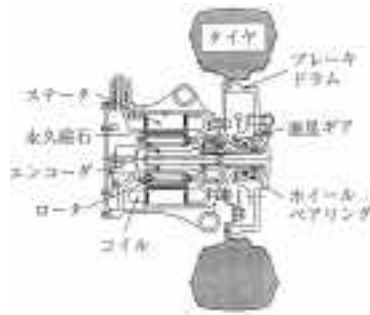


図5.X.5 Lucioleのインホイールモータ（後2輪駆動）³⁾⁶⁾

図5.X.6はMFC（モデル追従制御）という手法を適用して、通常の定トルク制御と比較した実車実験の結果であり、タイヤはたしかにすべりにくくなっていることが確認できる。

次に、電気モータでは自分の発生するトルクが正確に把握できる。これをいかせば、タイヤの発生駆動力や制動力を容易に推定できるので、路面状態の把握が簡単にでき、雨天や雪道などのようにすべりやすい路面では、ドライバに警告を出したりすることが可能になる。

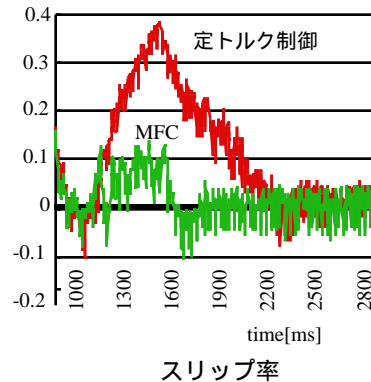


図5.X.6 定トルク制御とMFCの実験結果（東大三月号Iによる）⁷⁾

さらに、モータは分散配置してもそれほどコスト高にならない。たとえば4輪独立駆動にすれば、ヨーレートそのものを制御入力とする新し

い制御系が組め、ガソリン車にはできない高度な運動制御が可能になる。

図5.X.7に示すのは、4輪独立駆動を行う電気自動車の運動制御系の主要部分を描いたものである。「動的駆動力配分制御」と記した部分は、タイヤの横力を時々刻々推定しながら、タイヤの発生力を均一化し、低μ路走行時の安定性

確保をもくろむ手法である。さらに、ヨーレートやすべり角の制御によって、スピンを防止したり、乗り心地を改善したりすることが可能である。これらの電気モータ駆動の特長を生かした制御は、二次電池を用いるPEV（純電気自動車）はもとより、HEV（図5.X.8）や燃料電池車（図5.X.9）では可能であるが、ガソリン車では困難である。このような制御の世界に電気自動車の魅力が存在するのである。

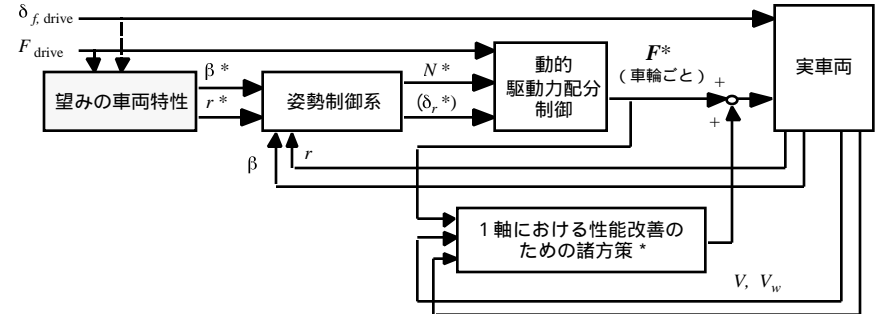


図5.X.7 4輪独立駆動によるモーション制御系



図5.X.8 ハイブリッド車（トヨタPrius）



図5.X.9 燃料電池車（ダイムラクライスラーNECAR4）

参考文献

- 1) 清水: 電気自動車の進歩とそれを支える要素技術, 自動車技術, Vol.53, No.2, 1999
- 2) 堀: 電気自動車の技術動向, 平成9年電気学会全国大会シンポジウム, S.14-1, 1997
- 3) 足利: 電気自動車用モータの新技术, 電気学会誌, Vol.117, No.1, pp.18-21, 1997
- 4) 河村: 電気自動車の駆動系制御の動向と課題-パワーエレクトロニクスとモータドライブの制御-, 計測と制御, Vol.36, No.11, pp.793-799, 1997
- 5) 永山他: 駆動モータの違いによる電気自動車の走行性能比較, 電気学会回転機研究会, RM-95-94, 1995
- 6) 水野: EV用モータについて, '96モータ技術シンポジウム, 1996
- 7) 堀, 坂井: 電気自動車の新しい制御技術, 自動車技術会シンポジウムNo.9801, pp.26-32, 1998
- 8) 特集電気自動車の最前線, 電気学会誌, Vol.117, No.1, pp.9-29, 1997
- 9) 座談会動き出した電気自動車市場, 電気学会誌, Vol.118, No.11, pp.701-705, 1998
- 10) 小椋他: 電気自動車技術の現状と将来, 自動車技術, Vol.53, No.1, 1999