



導入が進む 省エネ電車



写真はJR東日本が開発した最新のE231系電車

電車は鉄輪で鉄レール上を走行することを特徴とする。走行時の摩擦抵抗は非常に小さく、極めてエネルギー効率の高い輸送機関である。輸送コストの低減とともに、二酸化炭素削減など地球規模での環境維持・保全に関心が高まる中、鉄道各社が導入を進めている、よりエネルギー効率の高い省エネ電車を紹介する。

鉄道車両の省エネルギー

東日本旅客鉄道株式会社(以下、JR東日本)の年間電力消費量は、2000年度には64.5億kWhに達した。その約59%を鉄道車両自身が消費している。この電力エネルギーは、一般家庭の約100万戸が1年間に消費するものに相当する。鉄道車両に係わる省エネルギー化の重要性は容易に想像できよう。

鉄道車両に係わるエネルギーを削減する対策としては、1)走行・停止に係わるエネルギーの節減、2)運転方法や運行計画の改善による節減、3)製作、保守、解体リサイクルで消費されるエネルギーの節減がある。

今回は、車両に係わる省エネルギー技術である1)項の走行・停止に係わるエネルギーの節減を中心に述べる。これまでに鉄道各社が行ってきた主な対策は、①回生ブレーキ技術、②VVVF(可変電圧・可変周波数)インバータ技術など制御技術、③軽量化(モーターの性能

向上や小型化、軽量車体材料の採用など)、④走行抵抗の削減などである。

エネルギーを有効利用する回生ブレーキ

電車の減速時に主電動機(以下、モーター)により加速された電車の持つ運動エネルギーを電気エネルギーとして有効回収する技術の一つに電気ブレーキがある。電気ブレーキは、電力の有効活用を狙いとしたブレーキであり、減速時には、モーターを発電機として作用させ、この発電時の負荷をブレーキ機能として利用するものである。

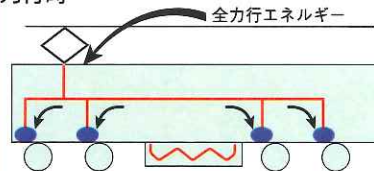
1960年代、最初に登場したのが発電ブレーキであり、これは発電した電力を抵抗器により熱エネルギーとして消費する方式である。次に1980年代後半になると、発電した電力を回生(再利用)する回生ブレーキが登場した。回生電力は、架線を通して他の力行(動力によって加速しながら走行すること)電車に利用される。現在は、省エネルギー性に優れたこの回生ブレーキが主流とな

っている。

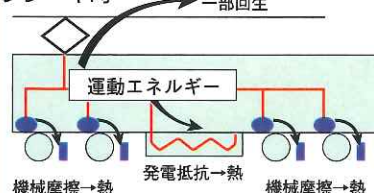
しかし、回生発電能力が高くても、返す架線側の電圧レベルが高いときは、電力を返せなくなる。電気は電圧の高い方から低い方に流れる原理には逆らえない。すなわち、電車密度が低く電力負荷が小さい区間では、架線側の電圧は通常高く、電気を架線に返すことができなくなること(回生失効)が起き、ブレーキ効果が小さくなるのである。

電力回生システム

力行時



ブレーキ時



このため、電車のブレーキシシステムでは、こうした電力回生負荷不足等による電気ブレーキ力の不足時には、空気圧式機械ブレーキ(以下、空気ブレーキ)によるブレーキ力の補足、あるいは電気ブレーキから空気ブレーキへの切替が行われる。

起電力が低下する速度 15km/h 以下から停止にかけての低速度域においても、電気ブレーキ力を徐々に絞りつつ空気ブレーキ力を立上げ、最終的には空気ブレーキに置換えられている。最近、鉄道各社の新型車両に、停止まで電気ブレーキをかけるシステムを採用する動きが広がっている(コラム1参照)。

VVVF インバータによる交流モーター採用の実現

電車の速度制御は、速度に応じて駆動力やブレーキ力を必要な値に制御することであり、実質的にはモーターの制御と同じことであるといっても差し支えない。制御を最適に行うことは、安全性はもとより、走行時のエネルギー効率を高めることでもある。電車の速度制御方式は、その時代の制御技術を反映して種々の方式が開発されてきた。中でも画期的なものが、1980年代に実用化されたインバータ制御である。

当初、電車のモーターには、比較的簡単な電圧制御で回転数やトルクが可能である直流モーターが使用されていたが、ブラシと整流子との機械的な摩擦部を有し、そのメンテナンスに多くの時間が必要であった。このため、電車への誘導電動機(以下、交流モーター)の導入が求められていた。

その実現には、電車に搭載可能な直流から交流に変換するインバータの開発が必須であった。そのためには、電圧と周波数を連続的に変化させて直流電流を交流電流に変換するが、その際、直流電流を高速でオン・オフさせて擬似的な交流電流波形をつくる必要があった。それを可能にしたのが、1970年代に開発されたGTOサイリスタ(Gate



Turn-Off Thyristor)などの高耐圧かつ大容量のスイッチング素子の出現である。この素子により、電車に搭載可能なVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータが実用化され、ようやく電車に交流モーターが採用された。

VVVFインバータと交流モーターの採用は、より効果的な電力回生を可能にし、電車の省エネルギーに対しても大きな貢献をした。

半導体素子などエレクトロニクスの貢献

インバータを実現させたのは、GTOサイリスタであった。しかし、1980年代になると、GTOサイリスタに代わってより高速なIGBT素子(Insulated Gate Bipolar Transistor)が登場した。現在では、IGBT素子がVVVFインバータにおいて主流となっている。

「スイッチング周波数が高いほど電流波形はきれいになります。その効果は二つあって、一つは磁歪音の発生が抑えられて静音化につながります。もう一つは、制御がやり易くなることです。スイッチングの回数が多いということは、それだけ、制御のチャンスが増えることになります」(株式会社東芝 社会インフラシステム社)。

IGBT素子のスイッチング周波数は、

1.5kHzとGTOサイリスタの3倍あり、消費電力もGTOサイリスタの1/5以下で済む。さらに、素子を動かす駆動回路も小さくできて、VVVFインバータのさらなる小型・軽量化も可能となった。

さらに、1995年にはベクトル制御技術が電車の速度制御に適用され、制御精度の向上により回生率も増加するなど、省エネルギー化に貢献した。

ベクトル制御とは、簡単にいえば、トルクに寄与する電流だけを分離して制御するもので、応答性が高まり、より細かいトルク制御が可能となる。電車では、動輪の回転力が動輪とレール間の粘着力を越えたときに動輪がスリップして空回りする空転が起こるが、ベクトル制御の適用により、より空転ぎりぎりのところでのトルク制御が可能になり、回生ブレーキを使える領域が広がる。

磁性材料の研究開発

モーターを小型・軽量化する上で重要な要素は、モーター特性を支配しかつ質量の主要部分を占める鉄芯材料の磁気特性の向上である。具体的には、飽和磁束密度が高く、鉄損が少ないこと(たくさんの磁束を通すことができ、損失が少ないこと)が小型・軽量化には有効である。さらにモーターの鉄芯材

料の実用化には、コスト面、加工の容易性、材料の安定性なども要求される。こうした要求を満

表1 回生率の比較

	従来制御(すべり周波数制御)			ベクトル制御		
測定機関	1997年1月17日～1997年9月3日			1997年9月3日～1998年1月21日		
走行距離	47,372km			23,163km		
部 位	M1車	M2車	M3車	M1車	M2車	M3車
力行(kWh)	197,350	210,353	200,966	93,764	94,386	95,927
回生(kWh)	52,610	52,032	54,942	31,499	31,337	32,740
回生率	26.7%	25.8%	27.3%	33.6%	33.2%	34.1%

(株式会社東芝調べ)

コラム1

純電気ブレーキの開発

近年、電気ブレーキのみによる停止技術（純電気ブレーキ）の研究開発が進められ、1998年には、新京成電鉄で純電気ブレーキを適用した8000形電車が営業運転を開始するなど、すでに実用化の段階に入っている。

この電車のブレーキシステムは、純電気ブレーキとして通常の回生ブレーキから停止直前にモーターを逆相モードにして逆相ブレーキにて制動力を得るもので、速度ゼロの時点で空気ブレーキを併用するものである。このように低速域から停止まで使用することで、回生ブレーキの有効範囲速度を拡大することによる省エネルギー促進とともに、空気ブレーキによる機械摩擦量の軽減が可能となる。

一方、高速度域のブレーキ力は加速力より大きな力が要求される。しかし、これまでの電気ブレーキは、モーターを発電機として使用してブレーキ力を得るので、加速時とほぼ同等の出力が限界となってしまう。このため、高速度域での電気ブレーキの性能向上を狙い研究開発中である。



2002年2月に登場した最新の小田急電鉄3000形電車にも純電気ブレーキが採用されている

たす磁性材料として、現在は無方向性のけい素鋼板が広く用いられている。

一方、けい素鋼板よりも優れた磁性特性を有する磁性材料を鉄芯に使ったモーターの開発も試みられている。財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）では、電管用モーターのさらなる小型・軽量化を目指し、パーメンジュールを鉄芯としたモーターを試作した。パーメンジュールは、鉄とコバルトの合金で、実用磁性材料の中で飽和磁束密度が最も高く、しかも、大きな透磁率と鉄損が小さい特性を有するものである。

「比較のため、パーメンジュールと従来のけい素鋼板を使用した同一出力のモーターを試作した結果、寸法で10%小型化、質量で15%の軽量化に成功しました。この試作モーターの質量出力比は1.2kW/kgです。これに対して300系新幹線の主電動機は0.77kW/kgです。フランスの新幹線TGV-Aは0.76kW/kg、ドイツの新幹線IECは0.61kW/kgと日本の300系より劣ることから、世界的にも最軽量であるといえます」(元・鉄道総研 電気動力研究室長 現・株式会社テス 松岡孝一氏)。

しかし、コスト面や材料調達の問題があり、このモーターは、まだ実用化には至っていない。

永久磁石同期モーターを使用した車輪一体形直接駆動方式車両の開発

従来の交流モーターに続く次世代モーターの有力候補は、電気自動車や省エネエアコン用のモーターとしても注目を集めている永久磁石同期モーターである。同期モーターも交流モーターの一種（交流モーターには、誘導電動機と同期電動機がある）で、このモーターの最大の特徴は、励磁電力損がないこと、つまり電磁石を作るための電流を流す必要がなく発熱量が小さいことである。

鉄道総研が試作した永久磁石同期モーターのデータでは、モーター単体の効率(分母が電気的な入力で分子が機械的な出力)は、95~97%で、従来の交流モーターの90~92%程度に比べ、損失は半減している。電車1編成あたり10台のモーターを使用しているとすると、永久磁石同期モーターを使用すれば、1編成あたり100kWの電力を節約できるという。これまでの研究開発により、

表2 永久磁石同期モーターと交流モーター(誘導電動機)の効率比較

	カルダン駆動方式		直接駆動方式
	交流モーター	永久磁石同期モーター	
歯車効率	97.5	97.5	100
主電動機効率	90.7	96.3	95.5
インバータ効率	99.4	97.4	97.2
フィルタリアクトル効率	97.3	98.2	98.2
総合効率	85.5	89.7	91.5

(東芝調べ)
注：表のデータは、通勤電車(時速50km/h)での効率試算例

コラム2

電車と鉄鋼プラントにおける制御の差異

鉄鋼プラントでは、直流モーターに代わって交流モーターを可変速運転するインバータ制御システムが早くから適用され、VVVFインバータもベクトル制御も早い時期から適用されてきた。

電車の場合は、インバータの設置場所の制約から、その小型化が絶対条件であった。また、乗客もいるので、静音化も求められた。これらの点からすると、電車のモーター制御は、インバータ制御を行っているエレベータに近いと言える。

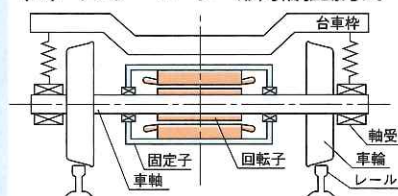
また、鉄鋼の圧延ラインでは、均一な製品を作るため、一定速度を保つ制御が重視されるのに対し、電車を制御する速度範囲は非常に広いことや空転の防止制御が必要なこととも差異である。

電管用の永久磁石同期モーター自体は実用化の域に達している。しかし、車載システムとして、永久磁石同期モーターに適応するインバータの軽量化およびシステム全体としての低コスト化などの課題が残されている。

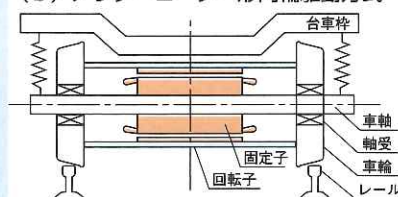
一方、減速制動装置を介さない直接駆動方式の研究開発も進められている。

車輪一体形モーターの基本構造

(a) インナーローター形両輪駆動方式



(b) アウターローター形両輪駆動方式



(a)は回転子が車軸と一体となったインナーロータ構造のモーターであるが、(b)のようなアウターロータ構造のモーターとすることにより、モーターの軸受が不要となり、より単純な構造となる



鉄道総研が試作した車輪一体形モーター(RMT 3A形)の外観 (写真・図提供/鉄道総研)

これまでの電車の駆動方式は、モーターを台車枠に取り付け、モーター軸から減速歯車装置を介して車輪に出力を伝達するカルダン方式が一般的である。この方式では、減速歯車装置などがあるため、出力の伝達損失や騒音などの問題がある。これらの諸問題を解決する方法として、車輪一体形直接駆動方式が考えられているが、そこに永久磁石同期モーターを活用しようとする動きもある。

「鉄道総研では、車輪一体形の直接駆動方式の研究を1990年頃から始めています。直接駆動方式のモーターには、減速歯車装置を補う高トルクの要求、またばね下質量が大きくなるので軽量化が極めて重要となります。そこで、Nd-Fe-B系の高性能希土類永久磁石を採用することとしました。その結果、誘導電動機を用いた場合に比べて約2/3の質量にすることができました」(松岡氏)。

なお、JR東日本が開発中の次世代通勤電車A Cトレイン(Advanced Commuter Train)には、鉄道総研も開発に寄与した永久磁石同期モーターを使用した車輪一体型モーターが採用されており、現在、試験走行が行われている。実用化されれば、さらなる省エネルギーが期待される。

アルミ車両とステンレス車両

電車車体(構体)の軽量化が進み、鋼製車両は姿を消しつつある。今日、新造される電車の車体は、アルミニウム合金車両(以下、アルミ車両)かステンレス車両のいずれかである。2001年現在、我が国におけるアルミ車両の累積生産総数は11,500両を超え、一方、ステンレス車両の累積生産総数も14,000両を超えている。

当初、普通鋼の1/3の比重でそれと同等の強度を持つアルミ合金は、電車の車体材料として、なかなか普及しなかった。主な理由は高価であることや高度な加工技術が必要であることである。しかし、アルミ合金の特性を生かした押し出し工法(複雑な断面形状でも一

電車の省エネ技術革新の変遷(JR東日本)

103系(1963～ 総武線等)



モーター車6両/トレーラー車10両
直流モーター
抵抗制御(電力回生なし)
鋼製車体

電力
使用量
100

車両重量
100
(36.3t)

205系(1985～ 山手線等)



モーター車6両/トレーラー車10両
直流モーター
添加励磁制御(電力回生)
ステンレス車体

66%

81%
(29.5t)

209系(1993～ 京浜東北等)



モーター車4両/トレーラー車10両
交流モーター
VVVF制御(高度電力回生)
軽量ステンレス車体

47%

68%
(25.0t)

つの型で製作できる)の進歩もあり、アルミ車両の導入が進んだ。ちなみに、我が国初のアルミ車両は、1962年に完成した山陽電鉄2000形車両である。

当時、アルミ車両が採用された背景には、輸送力の増強のため、高速特性と加速特性の向上には軽量化が必要であった。また経済性の面からは、車両の軽量化により力行電力量の削減が期待できた。力行電力量は、走行線区や加減速度などで変化するが、在来線の通勤型電車程度の速度パターンでは、ほぼ車両重量に比例するからである。アルミ車両は、車体の構造物が鋼製の1/2の質量で製作できることにより車両全体で10～15%の軽量化が実現され、アルミ合金使用によるコスト増加以上に力行電力量の節減が期待できる。

一方、我が国初のステンレス車両は、1958年に登場した東急電鉄5200形電車である。「当初のステンレス車両は、構造的に鋼製と同じであり、重量的にも大差ないものでした。導入されたのは、車体の美観や腐食対策からであり、特に無塗装化によるメンテナンスフリーが評価されていたのです」(新日本製鐵株式会社 ステンレス事業部)。

しかし、車両の高性能化に伴い車両重量は増加傾向にあり、ステンレス車両にも軽量化を望む声が高まってきた。

そのため、アルミ車両に匹敵する車体重量、鋼製並の価格、従来のステンレス車両と同等以上の強度・剛性を目標に軽量ステンレス車両の開発がスタートした。当時、考えられる最も軽く単純な車体構造を試作し、構造解析と加重試験を繰り返し、1978年に軽量ステンレスの東急電鉄8400形車両が完成した。この車両は鋼製車両(約36t)より4t、従来ステンレス車両より2tの軽量化を実現し、その後生産された軽量ステンレス車両の始まりとなった。

省エネ電車の具体例1(在来線/JR東日本)

省エネ電車の具体例を紹介しよう。JR東日本では、国鉄時代から車体軽量化、制御方式の改善などを積み重ねてきているが、省エネルギーを意識して「省エネ電車」と初めて自ら称したのは、1992年から投入した209系電車である。この電車は、軽量ステンレス車体でVVVFインバータ(GTO素子)を搭載している。209系電車と1964年から投入された鋼製車体の103系電車を比較した場合、車両重量は103系電車の68%であり、電力消費量は47%と大幅な削減が実現された。

さらにJR東日本は、209系電車を改良してTIMS(Train Information Management System)と呼ばれる列車情報管理装置、

0系新幹線 (1964～)



300系新幹線 (1992～)



700系新幹線 (1999～)



IGBT素子のVVVFインバータ、ベクトル制御の採用など、最新の技術成果を搭載した新型車両E 231系電車を2000年3月から投入した。

209系以前の列車では、力行・ブレーキの制御がユニット(通常2両)毎に行われていたため、回生制御時に架線電圧に対し、各ユニット間にアンバランスが生じて回生失効するユニットも存在した。TIMSが導入され、編成一括制御が可能となったE 231系車両では、各ユニットでのアンバランスが生じないように制御(回生バランス制御)することができるようになり、回生ブレーキ力を最大限に発揮できるようになった。

車両単位で測定した電力量(回生率)実績を表3に示す。E 231系電車は、ベクトル制御やTIMSなどの採用により、回生率は209系500代電車と比較して約10ポイント上昇しており、消費電力量は、約12%の低減が図られている。なお、同表において、E 231系電車と209系500電車の力行電力が京浜東北線209系電車と比較して増加しているが、これは、混雑緩和のために車体幅を拡げており、車体重量と定員が増加しているためである。

省エネ電車の具体例2 (新幹線/JR東海)

高速走行する新幹線では、走行抵抗

が省エネルギーに大きな影響を持つ。新幹線の場合、走行における消費エネルギーの約8～9割が走行抵抗に起因するものであり、走行抵抗の低減が消費エネルギー低減に有効である。

走行抵抗は、列車質量に比例する機械抵抗と速度の二乗に比例する空気抵抗に分類される。東海旅客鉄道株式会社(JR東海)は1999年に700系新幹線を投入したが、その700系新幹線を例にしてみると、180km/h走行では、機械抵抗と空気抵抗の比率は、1:1であるが、300km/h走行では、ほぼ1:2となる。

機械抵抗の削減対策は主に車両の軽量化であり、一方空気抵抗のそれは車体の空力特性の改善である。

これまで、JR東海では、700系新幹線の一代前の300系新幹線から交流モーターの採用により、車体の大幅な軽量化、空力特性向上を図り、省エネルギーの実績を上げてきた。700系新幹線では、さらに車体の小断面化、先頭形状の改良、床下や側面の平滑化などが施され、これに伴って走行抵抗がさらに低減されている。1964年の東海道新幹線開業から活躍している0系新幹線と比較した場合、機械抵抗が約50%、空気抵抗は約70%も低減されている。

220km/h走行における消費エネルギーを比較してみると、700系新幹線は0系新幹線に比べて34%低減され、その85%が走行抵抗の低減による効果である。また、東海道新幹線における2000年度の総電力消費量の実績を見ても、1992年に最高営業速度を220km/hから270km/hに上げたにもかかわらず、1990年度と比較して9%の減少である。

表4 全消費エネルギーに対する走行抵抗の割合

No	項 目	0系 (220km/h)	700系 (220km/h)	700系 (270km/h)
1	消費エネルギーの比較	100	71	92
2	機械抵抗による消費エネルギー	[44%]	26 [37%]	29 [32%]
3	空気抵抗による消費エネルギー	45 [45%]	34 [48%]	47 [51%]
4	走行抵抗(機械抵抗+空気抵抗)による消費エネルギー	89 [89%]	60 [85%]	76 [83%]

(JR東海調べ)
注:0系の消費エネルギーを100とした場合の各エネルギーの比較を示す。[]内は0系220km/h走行、700系220km/h走行および700系270km/h走行時の全消費エネルギーに対する各抵抗による損失の割合(%)を示す。

今回は紹介できなかったが、走行エネルギーを電気エネルギーとして蓄積し、再利用する車載エネルギー蓄積の研究開発も活発である。これにより、エネルギー利用率向上、電気ブレーキ使用の拡大などが期待できる。蓄電装置として注目が集まっているのが静電容量が格段に大きい電気二重層キャパシタである。これを鉄道に用いる検討も開始されており、駅ごとで急速充電する架線を持たないステーション充電方式鉄道の構想も国内外で報告されている。

もともと環境優位性の高い鉄道輸送ではあるが、省エネルギーを含めた地球環境保全に向けて努力を続ける鉄道輸送に対する認識を、我々利用者がさらに高める必要があるだろう。

■取材協力・写真提供/小田急電鉄株式会社、東海旅客鉄道株式会社、東日本旅客鉄道株式会社、財団法人鉄道総合技術研究所、株式会社テス、株式会社東芝、株式会社日立製作所、社団法人日本鉄道車両機会協会、社団法人日本鉄道車両工業会、住友金属工業株式会社、新日本製鐵株式会社、NKK

■参考文献/「小型低損失化が進む交通用パワーエレクトロニクス装置」(東芝レビュー、Vol.55、No.7、2000)、「東急車輛におけるステンレス車両開発経緯と最近の構体技術」(鉄道車両と技術、No.67、2001)、「電気ブレーキのみによる電車の停止制御」(JREA、Vol.43、No.5、2000)、「在来線通勤電車の省エネルギーについて」(JREA、Vol.45、No.8、2002)、「新幹線電車の省エネルギー効果」(JREA、Vol.45No.8、2002)、「主電動機をめぐる新技術」(鉄道総研報告、Vol.13、No.6、'99)他

表3 在来線における電力量実績

車 種	中央総武線		京浜東北線		
	E231系 4M6T	209系500 4M6T	209系 4M6T	205系 6M4T	103系 6M4T
力行電力 (kWh/km)	15.05	14.83	12.97	16.16	18.12
回生電力 (kWh/km)	5.97	4.46	4.38	4.19	—
回生率 (%)	39.7	30.0	33.8	25.9	—
消費電力 (kWh/km)	9.08	10.37	8.58	11.97	18.12

(JR東日本調べ)