蓄電技術でエネルギー効率を向上する

小笠　正道（おがさ　まさみち）
車両制御技術研究部
（駆動制御　研究室長）

小西　武史（こにし　たけし）
電力技術研究部
（き電　副主任研究員）

清野　寛（せいの　ひろし）
浮上式鉄道技術研究部
（低温システム　主任研究員）

はじめに

電気鉄道が省エネな理由の1つに，“電力回生ブレーキ”を標準的に用いていることが挙げられます。しかし，近傍に他の電気車が居ないなど電気負荷がない場合，架線にエネルギーを返せない“回生失効”が発生します。車載または地上設置の蓄電装置があれば，回生失効の軽減による運行エネルギーの削減が可能です。

近年，回生エネルギー有効活用を皮切りに，架線電圧の低下防止による損失低減，変電所における電力波動吸収と負荷平準化（電力ピークカット）による設備効率の向上，などの観点から，各種蓄電技術の研究，開発が盛んです。最近では世界各地の鉄道で実用化され始めています。

実用的な蓄電媒体として，最近の高性能バッテリー，電気二重層キャパシタ，その中間的なハイブリッドキャパシタ（リチウムイオンキャパシタ），古くから存在しつつ改良が加えられてきているフライホイールが挙げられます。

一般論として，バッテリーはエネルギー量が大きいものの瞬時パワーが小さく，寿命もそれほど長くありません。

キャパシタは瞬時パワーが大きいものの，その継続時間であるエネルギー量は小さいです。しかし，サイクル寿命はバッテリーの1～2桁以上長いといった長所があります。

フライホイールは回転電機ですので，パワーとエネルギーのバランスは，やはり回転電機を用いている電気車のパワーとエネルギーに適合しやすいという特長があります。一方で，軸受寿命が短いこと，高回転時の風損（空気抵抗による損失）など常時発生するエネルギー損失があること，さらに車載時にはコリオリの力への対処が必要といった課題もあります。

ここでは，蓄電技術によるエネルギー効率向上策として，各種蓄電媒体の長所を活かし，短所を克服してシステムとして成立させるための適用対象選定の考え方や，架線下を走る電気車および電力を供給するき電系を対象とした蓄電技術について，鉄道総研における取り組みを中心に紹介します。

鉄道車両における蓄電技術とエネルギー効率向上

(1) 車載蓄電技術による電源ハイブリッド化の効用

ブレーキ時に架線へ返せない電力を自車の蓄電媒体に吸収し力行時に再利用することで，回生効率の向上と省エネ化が見込まれます。また，回生ブレーキの信頼度向上，摩擦ブレーキの保守軽減，力行時のき電電圧低下抑制，省エネと時分短縮の両立，架線レス走行，電化／非電化区間の直通運用，などが可能となります。

(2) 蓄電搭載車両による省エネルギー化の例

架線レス走行が可能な架線・バッテリーハイブリッドLRV“Hi-tram（図1）”は，車載蓄電媒体としてリチウムイオンバッテリー（図2）を使用しています。車載用途で架線レス走行も行なうため，軽くてかつエネルギー量が大きいことが要求されるからです。開発した蓄電システムは，公称電圧605V，定格電流120A，蓄電量260MJ（72kWh），充放電電流±1,000A（最大パワー600kW）で，定格電流による充放電効率は98％です。機器箱も含めた質量2,000kgですから，パワー密度300W/kg，エネルギー密度36Wh/kgとなります。

2008年初頭の札幌市交通局の軌道営業線における営業ダイヤ走行[1)]では，架線・バッテリーハイブリッド走行に

図1　Hi-tram（2008年2月4日　札幌にて）

図2　リチウムイオンバッテリー
28.8V-30Ah　モジュール

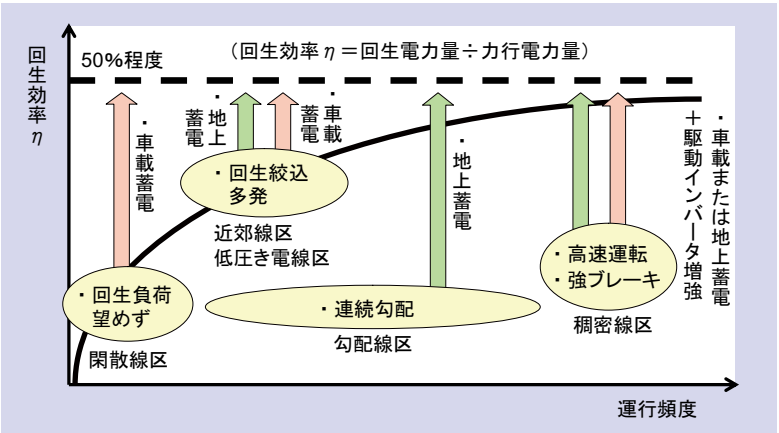

図3　車載蓄電と地上蓄電の分担範囲

より，架線と授受する力行電流の最大値を約30％に抑制して架線電圧降下を回避しつつ，車両の加速度を向上できました。また，インバータの直流側でみた回生効率の比較では，バッテリー搭載がなかったとした場合の回生効率5.7％からバッテリー搭載により回生効率34.1％に上昇しています。10％以上のエネルギー削減効果が得られました。

(3) 蓄電装置による質量増加の考慮（地上との分担）

蓄電装置を車載する場合の留意点は，車両の質量及び製造コスト増加を伴うことです。車両の質量増加は消費エネルギー増大につながります。しかし，その増大分よりも，回生時に吸収し再利用するエネルギー増加分が上回るなら，現状に対し運行エネルギーは削減され，省エネとなります。鉄軌道では走行抵抗が小さいことに加え，さらに回生機能を持ち頻繁に発進停止を繰り返す車両では，質量増加ほどには消費エネルギーが増大しない特長があります。

運行頻度と回生効率の関係（図3）が一般的なライン上にある場合，運行頻度が中程度以上の場合は地上蓄電が，閑散線区では車上蓄電が有利です。ラインから外れている場合は以下の2つの要因に分けられます，1つめは位置エネルギーが関与する場合で，連続勾配では地上蓄電が有利です。2つめは運行頻度が高いのに回生効率が低い電化線区で，運転速度が高い，強いブレーキが扱われている，などが要因です。この場合は，車載蓄電，地上蓄電いずれも対応可能です。

なお，回生効率が常時最高値に近い稠密線区での車載蓄電は，走行エネルギー削減とは異なる，別の観点からの有効性に基づいて行われます。架線事故の波及区間を最小化するため，無電圧または無架線区間を途中に設けるとか，旅客閉じ込め防止のため，架線停電時でも最寄り駅まで自力走行可能とするなどです。

地上における蓄電技術とエネルギー効率向上

(1) 地上における蓄電技術の適用効果

地上における蓄電技術の適用効果のイメージを図4に示します。エネルギー効率向上，CO_2排出量削減の原理は，車載蓄電技術と同様で，車両のブレーキ時の電力回生エネルギーを地上に設置した蓄電設備に吸収し，力行時に再利用します。地上設備の場合，蓄電設備の重量や寸法の制約が少ないのが長所です。反面，蓄電設備と車両の間のエネルギーのやりとりは電車線（き電線）を介するため，電線の抵抗分による電力損失が生じるのが短所です。

地上における蓄電技術の適用は，電気鉄道の電力供給安定化にも貢献することができます。蓄電設備が電力回生エネルギーを充電することで電車線電圧の上昇を抑制し，逆に放電することで電車線電圧の降下を補償することができます。また，車両の回生エネルギーを吸収する負荷が近くに存在しないと電気ブレーキが有効に機能しない現象（回生失効）が生じることがありますが，蓄電技術の適用により回避することができます。さらに，蓄電設備が電力供給

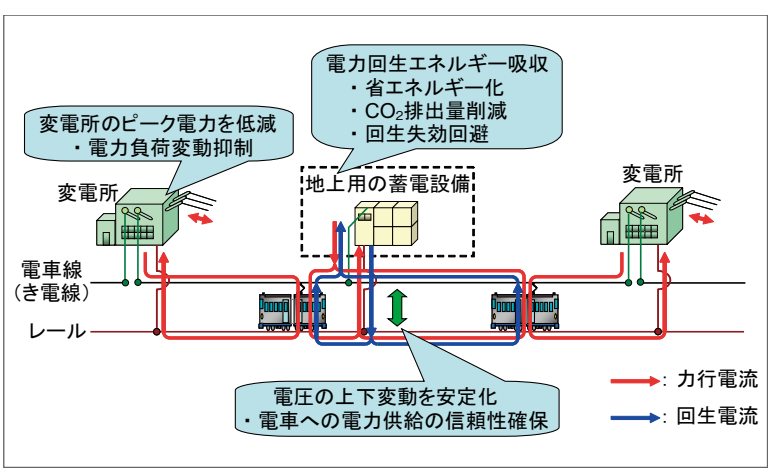

図4　地上における蓄電技術の適用効果

をアシストすることにより，変電所が供給する電力のピーク削減かつ電力負荷変動の抑制が可能です。

(2) 地上における蓄電設備の構成

地上における蓄電設備の構成例を図５に示します。蓄電媒体が直接電車線とレールの間に電気的に接続されるケースは少なく，そのほとんどは充放電の制御装置として昇降圧チョッパを採用しています。蓄電媒体へ充電する場合は降圧動作を行い，蓄電媒体から放電する場合は昇圧動作を行うチョッパとして動作します。電車線電圧が高いときは電気ブレーキの使用による電力回生エネルギーが発生したと判断して充電し，逆に低いときは電車が付近で加速しているものと判断して放電するというのが，基本的な充放電制御の仕組みです。また，大きな電圧降下が生じた場合に蓄電媒体から電車線に流れる電流を防止するために高速度遮断器が，チョッパのスイッチング高周波成分を抑制するためにコンデンサ，リアクトルのフィルタ装置が設置されます。さらに，蓄電設備と隣接する変電所が何らかの影響により停止した場合，蓄電設備も即座に停止させる連絡遮断装置を設けることにより，電気設備の安全性を確保しています。

(3) 地上における蓄電技術による省エネルギー化の例

日本における地上用蓄電技術の適用の歴史は比較的古く，鉄道電化が始まって間もない頃の明治末期には信越線の碓井峠の丸山変電所と矢ヶ崎変電所に設備され，大正初期には山手・京浜線の川崎変電所，大井町変電所，永楽町変電所，原宿変電所に適用されていました。当時の電力系統は弱く，変電所から供給される電源が不安定でした。そのため，蓄電設備（鉛蓄電池）の設置は短時間の電力供給として有効でした。ただし，当時使用された電池に蓄積できるエネルギー密度，出力密度は現在と比べて非常に小さいため，蓄電設備は非常に大きい建物でした。15年ほど使用されましたが，電源事情の好転に加え，維持管理が難しいことから廃止に至りました。

その後，新たな蓄電媒体の技術向上が図られ，最近の約20年間に，フライホイール（常電導），リチウムイオン電池等の二次電池，電気二重層キャパシタを適用した蓄電技術が日本の電気鉄道の本格的な地上設備に実用化されるようになりました。特に，車両が回生ブレーキを使用する頻度が高い連続勾配の区間に適用されるケースが増えてきました。今後も，電気鉄道のエネルギー効率向上，電気鉄道の電力供給安定化を指向した地上用の蓄電技術の適用が増えるものと期待されます。

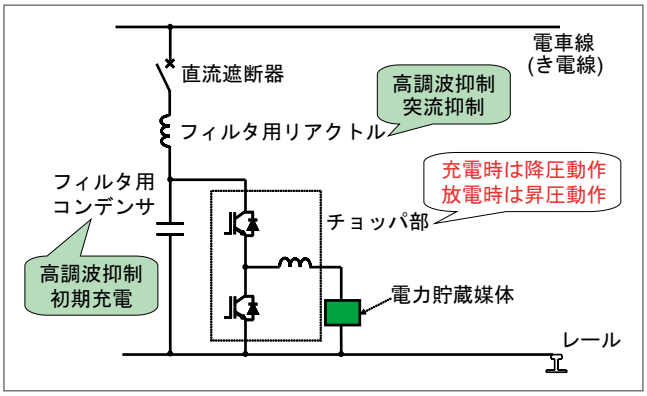

図５　地上における蓄電技術の構成例

地上設置の蓄電媒体における新しい技術の芽 －超電導磁気軸受によるフライホイール蓄電装置－

(1) フライホイール蓄電装置の特徴

フライホイールは回転する弾み車（フライホイール）の運動エネルギーとして電力を蓄積する装置です。バッテリー，電気二重層キャパシタが化学変化を利用してエネルギーを蓄積するのに対して，物理的な原理を使用しているのが特徴です。また，エネルギーを蓄積するフライホイール本体が化学反応を伴う消耗品ではないこと，充放電速度（フライホイール装置の機能としては回転エネルギーの変化する速度），充放電深度（総エネルギー量に対する放電エネルギー量の割合）が寿命に影響しないことから，環境に与える負荷が小さい蓄電装置ともいえます。

その一方で，冒頭に述べたような課題もあります。運転中の回転損失の存在，機械部品の保守，高速回転に耐える材料開発の必要性などです。

回転損失には，おもに回転時の風損と軸受損失が挙げられます。風損は回転体ケーシング内を真空にしたり，ヘリウムなどの分子量の小さいガスを封入したりすることで抑制されます。軸受部の損失については，永久磁石と電磁石を組み合わせた制御式の磁気軸受を使うという手段もあります。この磁気軸受を適用したフライホイールの先行試作プラントの導入がニューヨーク地下鉄で進められています[2),3)]。軸受を磁気支持化すると，保守性が改善され，回転損失が抑制されますが，回転体を支持するための制御電力が常時必要となる一面もあります。

フライホイール材料については，航空機にも適用が進められている炭素繊維強化材が多用されつつあるようです。

(2) 超電導磁気軸受をフライホイールに適用するメリット

超電導には，「電気抵抗がゼロである」，「大きな空間に高磁場を発生できる」，「安定な高磁場を発生できる（永久電流）」といった特徴があります）。また，高温超電導体（第

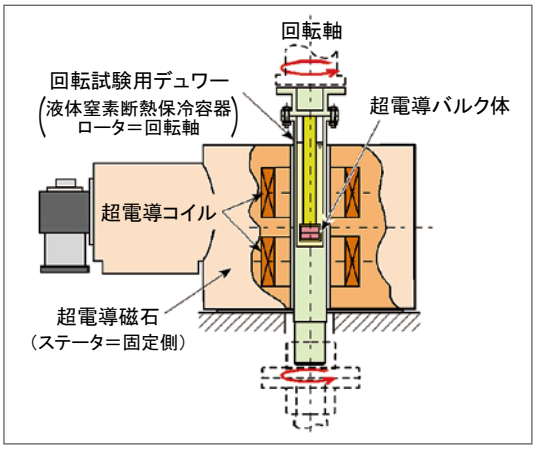

図６　試験用超電導磁気軸受の模式図フライホイール装置模擬軸受回転試験装置

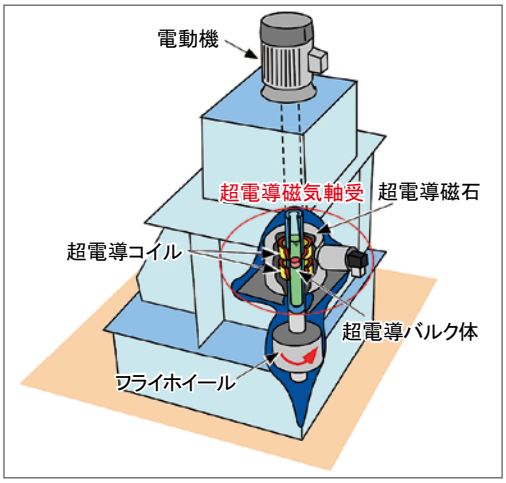

図７　超電導磁気軸受回転試験装置

二種超電導体）を適用すれば，磁束のピン止め効果（磁束を内部に捕捉する効果）で「磁場中での安定浮上」という特徴が得られます。これらの特徴を活かすことで，従来の制御式磁気軸受では難しい軸受の大型・大容量化や，低消費電力化が可能となります。

Dr. Hull（アルゴンヌ研究所）のレビュー[4]では，転がり軸受を基準にして制御式磁気軸受の損失はその1/10，永久磁石と高温超電導体を組み合わせた単純な磁気軸受の実験結果からは1/10000オーダーである，と低摩擦損失の可能性を示唆しています。この数値を実際の機器に展開するのは早計ですが，磁気軸受を超電導化することによる効率向上の可能性は大きいといえます。

その一方で，超電導材を極低温に冷却するための冷凍負荷の存在がデメリットになります。しかしながら，このデメリットは，冷却温度を上げることで小さくできます。液体ヘリウム温度で1Wの寒冷を得るためには室温で1kWの電力が必要ですが，冷却温度が40Kではその1/10，80Kでは1/20になります[5]。高温超電導材の高性能化が一層進めば，冷凍負荷を抑制することが可能となり，実用化に弾みがつきます。

(3) 鉄道総研における超電導磁気軸受の開発

鉄道総研では国土交通省の国庫補助を受けて，フライホイールの軸受損失を改善するための研究開発を進めています。超電導技術を適用した磁気軸受が特徴です。超電導磁気軸受を適用することで，省電力かつ荷重容量の大きな軸受を提供できるというコンセプトのもと，鉄道用の大容量フライホイールの実現を目指しています。

試験用に製作した超電導磁気軸受（図6）を用いて，静荷重試験を行った後に，フライホイールを模擬した回転試験装置（図7）で，軸受機能の確認試験を行いました。

ロータには高温超電導のバルク体を，ステータには超電導コイルを配置しています。どちらも超電導体を適用した他に類のないものです。バルク体とは，超電導材を線材化して巻き線コイルで使用するのではなく，塊（バルク）の状態で使用するものです。この試験軸受では，沸点が77Kの液体窒素でバルク体を冷却しています。試験用電導磁気軸受で約500kgのフライホイールを浮上支持し，電動機で最高速度3000rpmまで回転させて，回転中の電磁力が安定していることを確認しました。本開発では，試験用超電導磁気軸受を実用的な荷重支持容量に能力向上する技術開発を継続しています。

おわりに

蓄電技術でエネルギー効率を向上するための取り組みとして，鉄道車両，変電所やき電線沿線への蓄電装置の設置による省エネルギー化技術を紹介しました。社会の電力ネットワークにおける分散電源化が進展する中，鉄道システムにおいてもバッテリー，キャパシタ，フライホイールなどの蓄電媒体を車載，地上設置など適切に配置して活用する技術，あるいは蓄電媒体そのものを高効率化して実用に供する技術は，21世紀のエネルギー使用合理化に向けた大きな分野となるでしょう。引続き，エネルギー有効活用に向けた研究開発を進めてまいります。RRR

文　献

1) 小笠：「ハイブリッド電車」，電氣評論（ISSN0285-5860），臨時増刊No.524，pp.54～60，2008.6
2) Railway Gazette International記事：「New York orders flywheel energy storage」，2009.8，http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/10/new-york-orders-fly-wheel-energy-storage.html
3) Pentadyne power corporation（PENTADYNE）プレスリリース記事：http://pentadyne.com/site/2009-news/081209.html
4) J.R. Hull：「Superconducting bearings」，Superconducting Science and Technology，Vol.13，No.2，pp.R1-R15，2000.
5) H.J.M. Brake，G.F.M. Wiegerinck：「Low-power cryocooler survey」，Cryogenics，Vol.42，No.11，pp.705-718，2002.