

鉄道におけるエネルギー管理のシステムデザイン System design of energy management for Railway

東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター
環境技術研究所長 (現ジェイアール東日本ビルテック株式会社)

真保 光男



1. はじめに

環境技術研究所は、より環境負荷の小さい鉄道システムの実現を目指して、研究開発を継続しています。そのため個別テーマは各論文をご覧くださいこととして、ここでは、目指すべきエネルギー管理のデザインを展望してみたいと思います。

話を、負荷とは何か、最適化とは何かということから始めましょう。

エネルギー消費は、図1のように、まず提供すべきサービスがあり、これが車両や設備の機器容量を要求し、さらにこれがエネルギー消費を要求する、という構造を持ちます。要求(負荷)を減らさず、エネルギー消費だけを減らすことは出来ません。従って、省エネルギーの実現には、負荷を知るための測定と評価、無駄を減らす工夫、さらに負荷に見合った最適システムの構築というアプローチが求められます。

最適化の基本は負荷に合わせた機器容量の設定です。しかし、実際の負荷は時間によって変動することも多いため、ハードの最適化とは別に、最適運転という課題が残ります。また、異なる負荷パターンが一つのエリアに混在するときは、それらを合わせた負荷の平準化とか相互の助け合いなどによる、エリア全体の最適化という課題も出て来ます。

以上が、エネルギー管理をシステム化して行くための基本的な考え方です。

具体的なシステムデザインについては、次章から、列車運転系と建物系に分けて説明することとします。

エネルギー使用

↑ 要求

機器容量

↑ 要求

サービス・効用
(列車運転/建物)

図1 負荷とは何か

2. 列車運転系の省エネルギー

2.1 主回路システムの高効率化

列車運転のエネルギーは、車両システムの駆動系(電車では駆動電動機と制御装置からなる)と、冷房・照明などの補助機器系統で消費されます。省エネルギーには、まず、駆動系と補機の高効率化が期待されます。なかでも、ウェイトが大きい駆動系の高効率化に向けた技術革新動向を眺めてみましょう。

この分野にパワーエレクトロニクスの技術が入ってから、パワー素子の進化が主回路システムの技術革新を牽引して来たと言って良いでしょう。

表1にパワー素子の進化と電車への応用の関係を示します。整流器が制御機能を持つようになって、チョップ制御やVVVF制御が登場しました。次にIGBTが登場し、トランジスタ系が主回路素子の主役を担うことになります。次なる主回路素子としてはSiC(シリコンカーバイド)を用いたMOSFETが期待されています。半導体の技術進化を電車システムにどう活かすかが我々の課題です。

表1 パワー素子の進化と電車への応用の関係

	パワー素子の進化
整流器系	SCR → GTO (201系) (207系、209系)
トランジスタ系	IGBT (Si) → MOSFET (SiC) (E231系、E233系) (E235系)

これまでSiCは、製造技術やコストの面から電車に使うにはハードルが高かったようですが、ようやく普及段階に入りました。その順序としては、まず耐圧の低いものから高いものへ、部品種別ではダイオードへの応用からトランジスタ(MOSFET)も含めたフルSiC化へ、となっているようです。電車応用における可能性を探るべく、2013年に、実際に主回路システムを試作しました。蓄電池駆動電車の試験プラ

Special feature article

トホームであるNE-Trainは、600VのVVVF主回路を搭載しているため、そこへ試作主回路を搭載して評価を行いました。パワー素子としては、ダイオードのみをSiCとし制御素子をIGBTとしたハイブリッドタイプを用いました。

第一ステップではVVVFのみを試作して、第二ステップでは新たにモータも試作しこれに合わせて制御ソフトも変更しました。図2でみるように、素子を変えただけで大きな効果はありませんが、スイッチング周波数を高く取れる強みを活かして、専用のモータを設計し、これを効率良く動作させるよう制御ソフトを変更したところ、主回路トータルでの省エネ効果を確認出来ました。

この評価結果は、2015年に営業列車として登場するE235系電車へ活かされました。表2に、E235系の主回路制御をE231系と比較して掲げます。

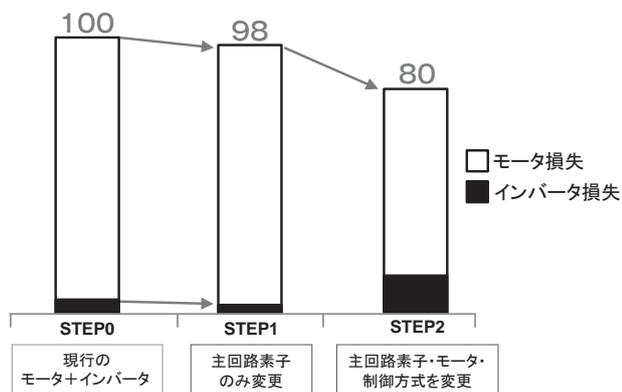


図2 SiC主回路システムの評価

表2 235系の主回路制御

		E231series	E235series
VVVF	パワー素子	IGBT	MOSFET(SiC)
	搬送周波数	非同期 156Hz→同期 3P→1P	非同期 1200Hz→1800Hz→同期 27P
	V/F	1100V/60Hz	1050V/77Hz
MOTOR	すべり	2.0%	0.7%
	効率	92.5%	94.5%

2.2 省エネ列車運転

列車の省エネルギーのためには、車両機器単体の高効率化だけでなく、上手に運転することも大切な課題です。

その効果を定量化すべく、2013年に山手線E231系電車において運転エネルギーの測定を行いました。電車の列車情報管理装置を活用してエネルギーデータを先頭車両の仮設メモリーへ蓄積し、電車が車庫に入った際にこれを読み出しました。専用の解析ツールによりデータ解析を行った成果を紹介します。図3、4は、区間と運転時間が同じデータ群から、エネルギーの最大のもつと最小のものを比較したその結果です。

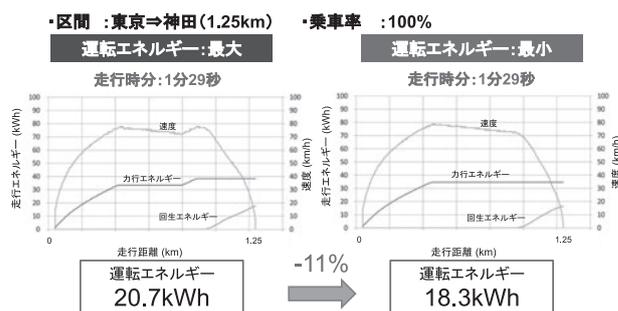


図3 ランカーブによる消費エネルギー比較 (1)

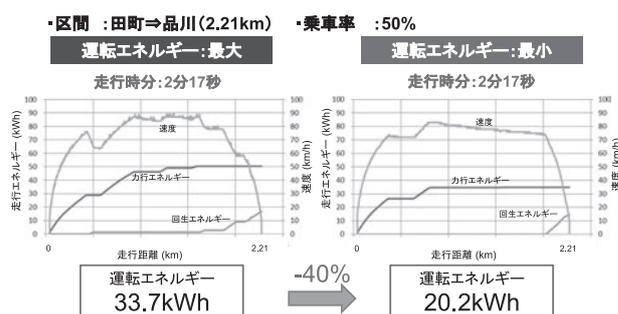


図4 ランカーブによる消費エネルギー比較 (2)

ハードと運転ダイヤが同じでも運転エネルギーにこれほどの差が出ることに驚かされます。ランカーブを比べて見ると、惰行を上手に使い、力行時間を最小にする運転が省エネとなることがわかります。図3のように区間に速度制限を持つ場合は、予めこれを考慮し、運転操作の無駄を回避することが省エネにつながります。長い勾配が続く場合においても、予めその効果を勘定に入れたランカーブが省エネに効果的と考えられます。

惰行を上手に使うことが省エネに有効であることは古くから知られていて、経済運転というような模範運転が提案されたこともあります。最新のVVVF制御においては列車制御に情報技術が用いられているので、運転士の技量に頼らないような、スマートな省エネ運転の実現が希求されています。次に、そのためのアプローチを紹介します。

主回路システムは、列車運転に必要なトルクを供給しますが、トルク需要は地点と速度によって変わるためモータの動作点もめまぐるしく動いて行きます。もし、速度・トルク空間に誘導電動機の効率MAPを重ねれば、モータ効率はMAP上をめまぐるしく動き回ることになります。ここで、列車運転のトルク需要に応じてシステムの供給能力をフィットさせる編成制御が可能なら、効率MAP上のモータ効率は高く維持されることとなります。

このような省エネ列車運転のシステムデザインを提案したのが図5です。負荷が軽いところでは一部ユニットを休ませて列車全体の効率を高めています。機器を上手に休ませてエ

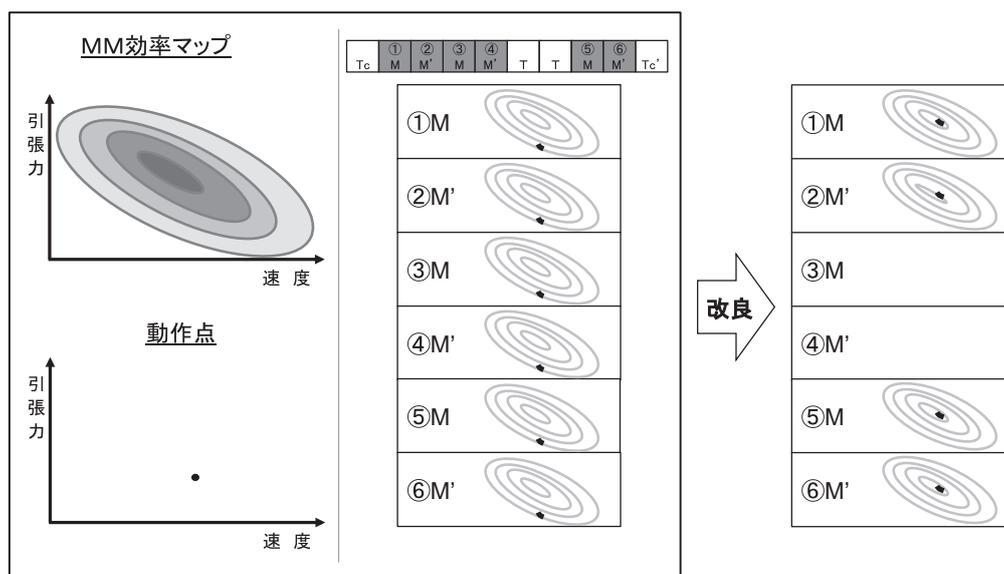


図5 省エネ列車運転のシステムデザイン

エネルギーロスをマネジメントする点は、古い省エネ運転と似ているとも言えるでしょう。

これを行うには高機能的な編成制御が不可欠ですが、前述のE235系電車はEthernetを用いた高機能的なTCN (Train communication network) を備えています。今後、省エネ運転ソフトを試作して、まずは試験車両へ搭載して効果を検証し、将来は営業列車へ反映させて行きたいと思えます。

3. 建物系の省エネルギー

3.1 駅地下空調の最適化

鉄道における建物系負荷として、規模が大きい駅地下空調の省エネルギーについて、以下説明します。

東京駅地下空調について、環境技術研究所が発足した2009年から、負荷の測定・評価とシステムの最適化の研究を継続して来ました。

それは、トンネルやホームという条件を持つような空間における空調の課題は、鉄道技術としてソリューションを出すべきであると考えたからです。もう一つ、現行の設備容量が過大となっているため、大幅な改良余地が期待されたからでもあります。

この研究は、二つの成果を出しました。一つはホーム階空調における最適設計を提案したことであり、2013年から2015年の総武地下空調省エネ改良へと活かされました。

二つ目は、地下駅空調負荷評価においてより精度の高いシミュレーション技法を提案したことであり、その成果を大宮駅や仙台駅などの老朽過大設備へ適用すれば多大な省エネ効果を得られると期待しています。

さて、エネルギーの消費規模が大きく鉄道技術としてソリューションが期待されるものとして、もう一つ、新幹線の消雪設備があります。これまでの研究により課題が明確化になったので、今後は、高効率システムと省エネ運転を開発して行きたいと考えています。

3.2 エネルギーのエリアマネジメント

複数の建物をエネルギーネットワークと情報通信でつないで、エネルギーの供給と消費を、エリア全体において最適化することは社会に希求されているテーマとなっています。

これに向けた開発アプローチを紹介します。

図6は2009年度に環境技術研究所で描いた絵です。朝ラッシュの負荷の大きい駅、昼間負荷の大きいショッピングセンター、夜間の負荷が大きいホテルの各負荷を平準化し、分散型電源や蓄熱技術も用いながら、トータルにエネルギーマネジメントをすることを想定しています。

実際にこれを実現することは容易ではありません。一つ一つの建物は、オーナー、経年、システムを構築したベンダー

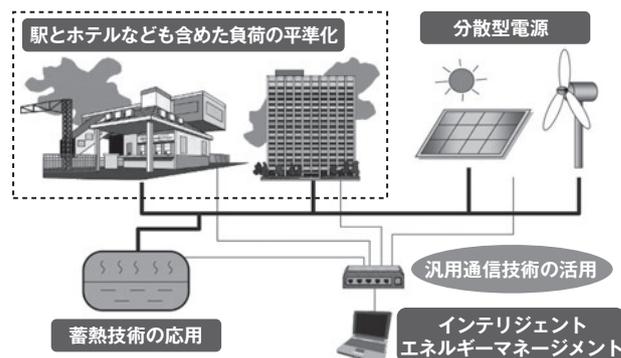


図6 エリア全体の最適化

Special feature article

等が異なります。それを超えてこのようなマネジメントを実現するには、エリア内における何らかの約束事（システム設計と制度設計）が必要となります。

東京駅においても、その空間規模の大きさや、各機能の増強・開発経緯から、オーナー、経年、ベンダーを異にする設備が混在しています。これを一つの駅としてマネジメントするにもシステムと制度の裏付けが求められます。図7は東京駅全体の改良ビジョンを描いた2006年当時の絵ですが、フィールド制御にベンダーの技術を許容しながら、インターネットの技術を用いて上位系においてエリアマネジメントを実現するビジョンです。

先に紹介した総武地下駅空調改良の工事規模が莫大であったため、千載一遇のチャンスと考え、監視ネットワークの

オープン化改良を並行で実施した。これにより出来た設備監視センターの写真が図8です。更にこれを駅周辺へ広げて行くなら、きっと図9のようなデザインとなるのではないのでしょうか？

建物系の省エネルギーのためには負荷に合わせたシステム容量の最適設計、そのための設計技術の前進が必要となります。

さらにエリアマネジメントによる全体最適の実現には、そのためのシステムと制度の構築が不可欠ですが、通信手順の標準化と管理業務の融合が前提となります。そのアプローチは列車運転系と極めて似ていることに気づきます。

当面の開発課題を一つずつ達成してシステムデザインを具現化し、社会のモデルなるエネルギーマネジメントをJR東日本から発信して行きたい、と念じています。

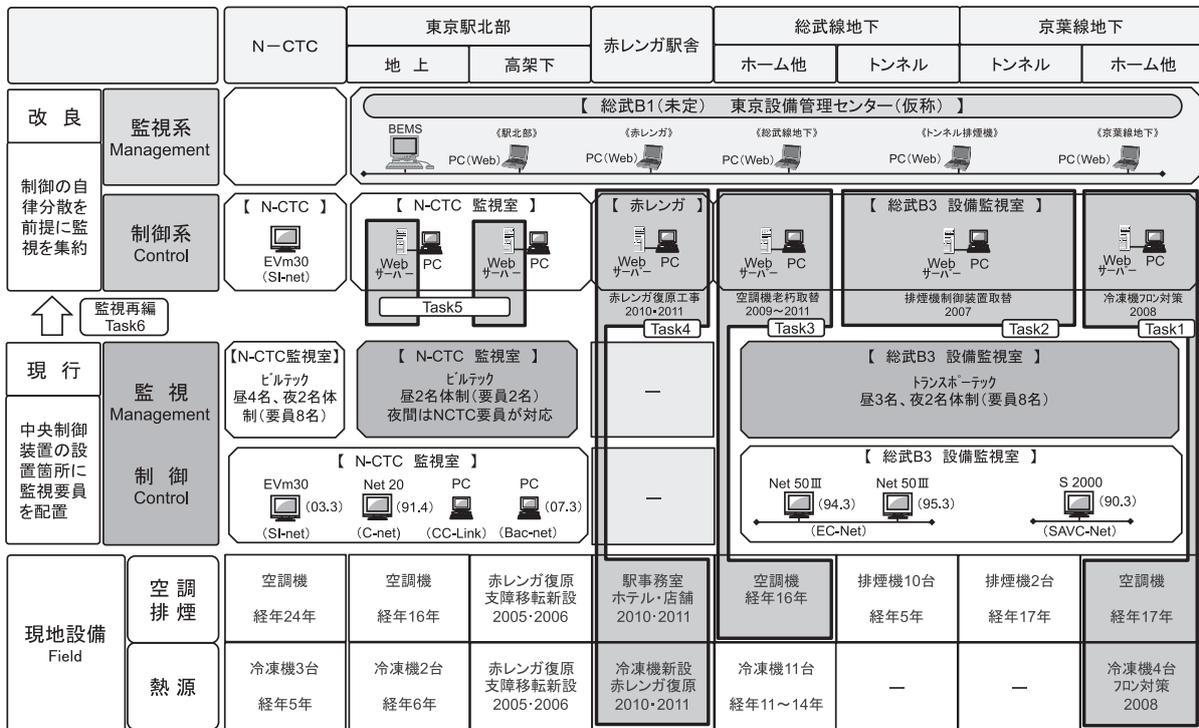


図7 東京駅設備監視ネットワーク改良計画



図8 東京駅設備監視センター

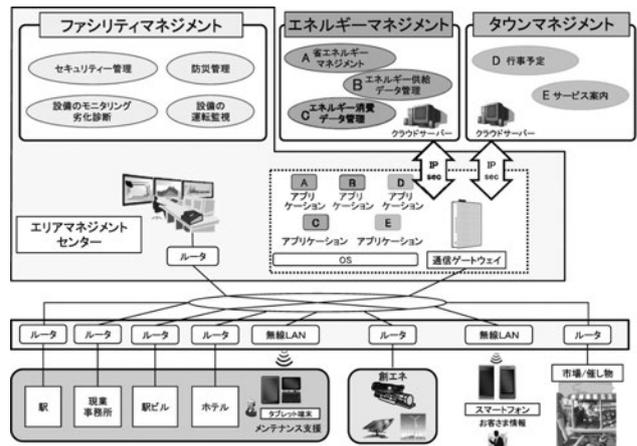


図9 エリアマネジメントのビジョン