

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760357

研究課題名(和文) 鉄道における車両・ダイヤ・運転の最適化による統合的省エネルギー化の進展

研究課題名(英文) Development of Comprehensive Energy-saving Methodology of Vehicles, Scheduling and Driving of Railway Systems

研究代表者

宮武 昌史 (Miyatake, Masafumi)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：30318216

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：理論に裏付けされた、鉄道における車両・ダイヤ(運行スケジュール)・運転の最適化による統合的省エネルギー化を検討した成果として、(a)車両の検討では、車載電力貯蔵装置による回生エネルギーマネジメントの可能性について示した。(b)運行ダイヤの検討では、研究代表者が省エネルギーなダイヤのあり方として提唱した「等増分消費エネルギー則」が鉄道関係者の間で広く知られることとなり、さらに災害等による電力供給不足時の効果的な運行ダイヤを利用者の利便性をも考慮して導く方法を示した。(c)運転においては、列車密度が限界まで高まっている際の運転方法、および長距離運転での運転方法について解析する方法を示した。

研究成果の概要(英文)：The researcher developed comprehensive energy-saving methodology of vehicle design, scheduling and driving of railway systems based on theoretical analyses. The achievements are; possibility of energy management of on-board energy storage systems, the improved scheduling method based on the proposed "Law of Identical Incremental Energy Consumption" to apply it to real railway operators, the scheduling method in power crisis such as disasters considering energy and passenger trip times, and solving optimal train speed profiles considering long distance driving and signalling systems for high-density operation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：電気鉄道 エネルギーマネジメント 省エネルギー 運転理論 運行計画 最適制御

1. 研究開始当初の背景

運輸部門の省エネ対策の一つとして、環境負荷の圧倒的に小さい電気鉄道の活用が重要となる。現在、その低環境負荷性は、特に我が国においては通勤時の「詰め込み」による面もあり、快適な通勤を実現しつつ低環境負荷性を維持するには、さらなる省エネルギー化が必須である。一方、コストのかかる対策は、運賃の上昇を招き、利用者が環境負荷の大きい交通機関に逃げてしまうと逆効果であり、対策には低コスト性が求められる。従来省エネルギー化は、車両や地上設備個別の対策でかなり実現されてきたが、鉄道システムを包括的に捉えた分野融合形の省エネ実現策の検討はほぼ皆無であった。

本課題の研究計画策定時にはなかった大きな変化は、東日本大震災と福島第一原発事故による電力危機の経験であった。これは、これまでの鉄道が安定な電力供給を前提としていたことを浮き彫りにし、鉄道システムのパラダイムシフトの必要性が求められるようになった。

そのため、研究開始段階では、従来省エネ対策に加え、本研究課題が目指す新たな対策に期せずして注目が集まった。また、災害等による電力供給の不安定性を考慮することの重要性も高まった。実際の研究遂行時には、そのようなニーズを考慮し、異常時の対応について当初よりもやや深く検討を行うこととなった。

2. 研究の目的

本研究では、理論に裏付けされた、鉄道における車両・ダイヤ(運行スケジュール)・運転の最適化による統合的省エネルギー化の方法を明らかとすることを目的とした。研究代表者のこれまでの車両、運転面での研究成果を踏まえ、鉄道特有の様々な現実的制約条件を考慮しつつ、利用者の利便性やコストの面も評価しつつダイヤの最適化を目指した。さらに、実用的な観点から、変電所故障に加え、災害等による電力供給異常時の運転法とその効果も明らかとすることも目指した。

鉄道における近年の省エネ化の研究は、日本よりも欧州の方が積極的で、研究代表者がここでさらに成果を上げないと、この分野で欧州に後れを取る可能性があるため、本研究で日本の優位性を確保することも狙った。

3. 研究の方法

本研究では、関連文献調査、実務的専門家や海外の研究者へのヒアリング、モデル化と計算機シミュレーション、という一連の流れで研究を行った。具体的な方法については、実施年度毎にまとめて次に示す。

H23年度には、正確な消費エネルギー評価

のための電力測定と、「等増分消費エネルギー則」に基づいたダイヤの最適化プログラムの完成を行った。また、実例の把握として現実の鉄道のダイヤの最適性について評価を行った。H24年度には、ダイヤ、運転、車両の統合的な改善手法を、利用者の効用なども考慮しつつ省エネルギーの定量的可能性を評価した。最終年度のH25年度には、災害や変電所のトラブル等の異常時への対応法と最適化の効果の評価を行い、理論を実際の鉄道システムで実行するための方策も検討した。

4. 研究成果

本研究の成果は、ダイヤ、運転、車両の3つの部分からなる。前者2つについては単独で大きな成果を得ることができた。車両については、単独というより統合的見地での検討が進んだ。ここでは、その3つについて順に説明する。

(1) 列車ダイヤに関する検討 平常時の計画ダイヤ

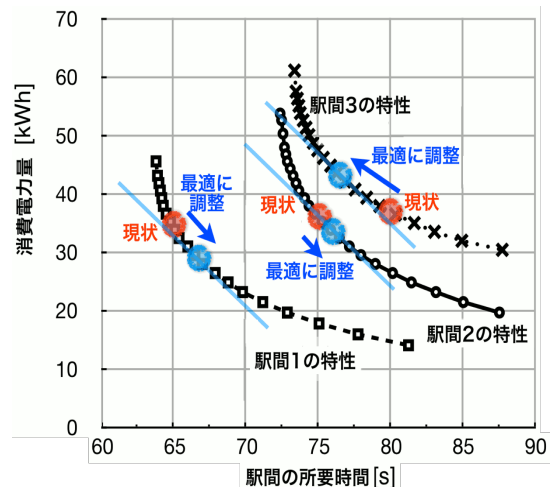


図1 所要時間と消費電力量の関係例

図1に示すように、列車は、所要時間が短くなるにつれて加速度的にその消費電力量を増やす。駅間毎に設定所要時間をうまく配分してやれば消費電力量を全体で抑えることができるが、それにはその所要時間における図1の曲線の傾きを全ての駅間で同じにするというのが、普遍的原理となる「等増分消費エネルギー則」である。

その考え方を、ダイヤ設定上のより複雑な制約条件、例えば他路線との列車間接続からくる複数区間の所要時間の設定などを考慮できるように拡張し、最適解を数値的に得られるようにプログラムを開発した。特に、これまで駅間運転時分と消費エネルギーの関係が陽な関数で記述できることを前提としてきたものが、陰関数表示、あるいは折線近似といったより現実的な関係記述を許容させることができた。その手法の有効性を評価

するための最適化シミュレーションを実施し、ダイヤの最適化に関する議論のベースを完成させた。

本理論はその直観的な分かりやすさから、鉄道関係者の間で広く知られることとなった。それに伴い、本理論によるダイヤの省エネルギー性を評価しようという試みがなされつつあり、事業者主体でダイヤの省エネルギー性評価が進みつつある。

異常時の緊急計画ダイヤ

災害等で電力供給が不足する異常時に対し、利用者の利便性と消費電力量とをバランスさせる運行計画法として、実際の運行取扱上の問題点を含めて様々な手法を比較検討した。その中で、減速運転および停車駅削減（列車本数は同じ）の有効性に着目した。

今回は特に、これまで検討例がない停車駅削減を中心に具体的検討を行った。この方法では、停車駅を削減する分列車を早くするのではなく、速度を遅くして停車駅での着発時刻を変えないのが特徴である。列車毎にどの駅を通過させるのかを、停車・通過のパターンとしてあらゆる組み合わせを考えて、最も良いパターンを選び出すことを提案した。

しかし、利用者の時間的効用と消費電力量との間には決して双方を同時に良くすることのできないトレードオフ関係がある。従って、両者の多目的な評価が必要となるが、図2のように優劣の付けられない解の群であるパレート最適解を得る方法論を確立した。これにより、従来の電力量削減方法である列車の間引きよりも、通過列車を織り交ぜた新しい運転方法の方が、利用者の効用と電力量の面で有利であることを示せた。実際の適用時には、パレート最適解の中から旅行時間と削減電力量をどれだけ重視するかを決めて解を選べば良い。

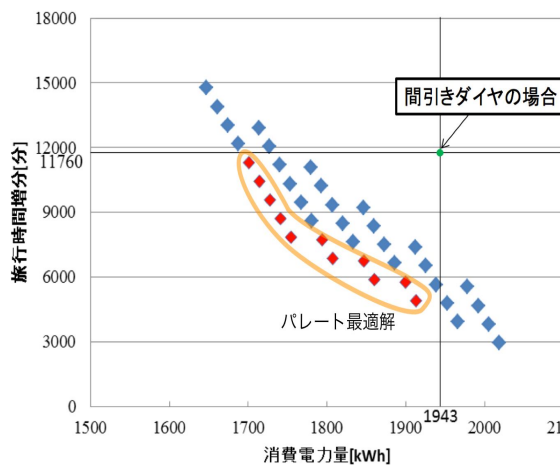


図2 消費電力量と旅行時間の多目的最適化

(2) 運転に関する検討

運転のしやすさを考慮した手法
まず、設定された駅間の所要時間に対して最

適な運転速度パターン（運転曲線）を求める手法について、既に研究代表者が確立している動的計画法をベースとした手法をさらに改良し、運転上目標となる架線柱や信号機毎に制御指令を切り替えることをも可能とする手法に発展させ、手動運転時における運転のしやすさを考慮することができた。

長距離の計算への対応

以前の方法では、計算量の問題で3km程度の最適化にしか成功していなかった運転曲線の計算を、10kmまで計算できるよう、計算手法を改良した。具体的には、動的計画法の並列計算の容易性に着目し、並列計算手法の適用ができるようプログラム構造を改良したことで、計算量と計算精度を両立できるよう位置・速度・時間のメッシュの切り方を工夫したことである。これにより、本手法の適用範囲が、都市部の駅間の短い区間での各駅停車から、もっと郊外の路線、あるいは優等列車に拡張することが可能となった。

列車密度の高い時の検討

ダイヤ乱れ時や朝ラッシュ時の列車密度が限界まで高まっている時には、加速して先行列車に追い付いて減速、あるいは停止するという運転が起きがちである。それは列車間隔を詰めるためにある程度有効であるが、大きなエネルギーが無駄になっている。

その分析には、信号システムから定まる先行列車との安全距離を保つ数式モデルが必要である。そこで、これまでの運転曲線最適化手法の一つである逐次二次計画法を用いた手法を拡張し、信号システムの挙動を実装した。

シミュレーションにより、図3のように節電を図りつつスムーズな運転により遅れの回復を図る運転方法を計算することに成功した。

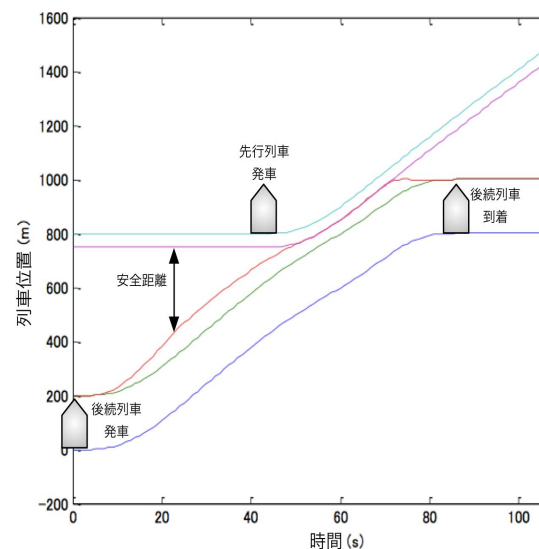


図3 信号の挙動を考慮した運転曲線

(3) 車両を考慮した統合的検討

車両に関しては、蓄電装置を搭載した車両を無架線下で走らせることについて、基礎的な検討を行った。この車両は、駅にある急速充電設備でエネルギーを継ぎ足しながら走る車両であり、電気自動車と同じく、積み込んだエネルギーのみで走る必要がある。

従って、蓄電装置のエネルギーマネジメントは即ち速度（運動エネルギー）のマネジメントを意味する。また、蓄電装置搭載車両用にダイヤを考慮する必要がある。さらには、急速充電の時間を長く取るには駅での停車時間を長く取る必要があるが、それには駅間の走行時間を削る、つまり走行エネルギーを増やす必要がある。蓄電装置搭載車両にはこういった複雑な関係があり、まさに統合的な検討が不可欠である。

今回は、充電時間・停車時間と走行時間との関係に着目して、望ましい時間配分の検討を複数駅間で行い、満充電にならなくとも短く充電を済ませて駅間をゆっくり走るのが得策であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

溝口 肇, 宮武 昌史, 布施 孝志: 「使用電力量制限下の列車運転計画における乗客利用時間最小化に関する考察」電気学会論文誌 D, **133**-7, 2013. 【査読有】

DOI: 10.1541/ieejias.133.700

宮武 昌史: 「省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル」電気学会論文誌 D, **131**-6, pp.860-861, 2011. 【査読有】

DOI: 10.1541/ieejias.131.860

[学会発表](計 13 件)

G. Matsuura & M. Miyatake “Optimal Train Speed Profiles by Dynamic Programming with Parallel Computing and Fine-tuning of Mesh” COMPRAIL 2014. 【発表確定】

N. Kimura & M. Miyatake “Strategy of Speed Restriction Allowing Extended Running Times to Minimize Energy Consumption and Passenger Disutility” COMPRAIL 2014. 【発表確定】

中村 優, 宮武 昌史: 「高密度線区における信号を考慮した電車の省エネルギー運転理論の基礎検討」H26 年電気学会全国大会, No.5-120, p.206, 松山, 2014.

宮武 昌史, 仲佐 翔: 「消費電力量と旅行時間とを考慮した電力使用制限時の列車運行計画」電気学会産業応用部門大会, No.5-37, pp.V-229-230, 山口, 2013.

宮武 昌史, 仲佐 翔: 「電力供給が制限された緊急時の列車運行計画案の作成方法論」電気学会 交通・電気鉄道研究会, No. TER-13-053, pp.51-54, 東京, 2013.

溝口 肇, 宮武 昌史, 布施 孝志: 「複数路線電力量合計値制約下の列車運転計画における乗客利用時間最小化に関する考察」鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL 2012), No. 2114, pp.631-634, 東京, 2012.

宮武 昌史, 仲佐 翔, 桑原 梨瑛子: 「駅間運転時分調整による省エネダイヤに関する一考察」電気学会 交通・電気鉄道研究会, No. TER-12-039, 東京, 2012.

溝口 肇, 宮武 昌史, 布施 孝志: 「使用電力量制限下の列車運転計画における乗客利用時間最小化に関する考察」電気学会 交通・電気鉄道研究会, No. TER-12-044, 東京, 2012.

K. Ishino, K. Sakamoto & M. Miyatake “Energy-saving Operating Strategy of a Catenary Free Light Rail Transit” International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), No.DS2G1-4, Sapporo, Japan, 2012.

M. Miyatake, R. Kuwahara & S. Nakasa “A Simple Adjustment of Runtimes between Stations for Saving Traction Energy by Means of Mathematical Programming” Computers in Railways (COMPRAIL 2012), Vol. XIII, pp.451-460, New Forest, UK, 2012.

宮武 昌史: 「数理計画モデルによる各駅間運転時分の最適調整法」平成 24 年電気学会全国大会, No. 5-075, pp.124-125, 広島, 2012.

宮武 昌史: 「数理計画モデルによる省エネ列車ダイヤの生成法」鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL 2011), No.S3-3-1, pp.585-588, 東京, 2011.

宮武 昌史: 「節電に貢献する鉄道の省エネ運転・省エネダイヤに関する理論的検討」電気学会 交通・電気鉄道・ITS 合同研究会, No. TER-11-068/ITS-11-043, pp.53-58, 富山, 2011.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://miyatake.main.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮武 昌史 (MIYATAKE, Masafumi)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号：30318216

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし