小惑星探査機「はやぶさ」の技術を応用した列車運行電力デマンド制御に関する列車走行試験

野村　悟司，大和　永世，山下　満弘，川口　淳一郎，大木　優介，
神尾　純一，養田　新一，武内　陽子，小川　知行，森本　大観

電力制限がある中での電力配分問題は，宇宙技術で積極的に取り組まれており，筆者らは，小惑星探査機「はやぶさ」発信の電力制御技術を用いて，鉄道における列車運行電力デマンド（ある時間帯ごとの列車運行の平均使用電力）を制御するための共同研究を実施している．開発した電力デマンド制御アルゴリズムの基礎検証のため，東京急行電鉄株式会社での列車走行試験を行った．その結果，無制御時に対して電力デマンドを約 3 割下げた状態で，その後の約 1 時間，試験ダイヤ終了時まで，電力デマンドを目標値付近で維持できることを検証した．本稿では，列車走行試験の概要を報告する．

キーワード：鉄道，自律分散制御，消費電力，電力デマンド，列車運行電力シミュレーション，運転操縦

1.　はじめに

宇宙機は一度打ち上げられると，電力補給ができないため，電力制限の中で多数のヒーターに適切に電力割り振りをする電力制御方式が活用されている．電力制限がある中での電力配分問題は，宇宙技術で積極的に取り組まれており，そうした宇宙技術としての電力制御技術からの着想を，鉄道へ応用するための研究開発を実施している．

具体的には，2015 年 11 月より，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下，「JAXA」），公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下，「鉄道総研」），東急テクノシステム株式会社（以下，「東急テクノシステム」）において，小惑星探査機「はやぶさ」発信の電力制御技術 [1] を鉄道に応用し，各車両が電力を融通し合うことによって，鉄道における列車運行電力デマンド（ある時間帯の列車運行の平均使用電力，以下「電力デマンド」）の制限値を遵守し，電力デマンドのピークカットを試みる研究を行っている．

本稿では，開発した電力デマンド制御アルゴリズムの基礎検証のため，東京急行電鉄株式会社（以下，「東急電鉄」）の田園都市線長津田駅～中央林間駅にて実施した 2 編成による列車走行試験について報告する．

のむら　さとし，やまと　えいせい，やました　みつひろ
東京急行電鉄株式会社
かわぐち　じゅんいちろう
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
おおき　ゆうすけ
東京大学
かみお　じゅんいち，ようだ　しんいち
東急テクノシステム株式会社
たけうち　ようこ，おがわ　ともゆき，もりもと　ひろあき
公益財団法人鉄道総合技術研究所

2.　鉄道における電力デマンドと本研究の目的

各列車が各駅間を走行する際には，加速させるための操作（以下，「力行」），減速させるための操作（以下，「ブレーキ」），加速させる操作も減速させる操作もしない状態（以下，「惰行」）の 3 パターンの運転操作のうちのいずれかを実施している．列車が力行しているときは，架線から供給される電力を消費して運動エネルギーを増加させて加速している．また，近年，ブレーキ時にモーターを発電機として動作させて発電することが可能な回生ブレーキを保有している車両が多く導入されており，このような車両は，ブレーキ時には，回生電力を架線に返している．

鉄道の電力供給システムでは，架線を通じて，変電所から供給される電力を各列車に供給しており，時刻に対する電力の変動が非常に大きいことが特徴である．同時に力行している列車が多数存在すると，多くの電力が必要となるが，ブレーキをかけている列車が多いと，ほとんど電力を供給しなくてすむ．

また，鉄道事業者の契約電力は，30 分間の電力積算値のピークに合わせて設定されており，電気料金を決める一つの指標となっている．そのため，本研究では，ピークカット対象を 30 分間の列車運行電力の使用電力の移動平均とし，以後，本稿での「電力デマンド」とは，この値を意味するものとする．

Copyright ⓒ by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

電力デマンドは，その時刻で走行している列車本数などに依存するが，ダイヤ乱れが発生した場合には，通常よりも列車本数が多くなる時間帯が存在し，電力デマンドのピークが通常よりも高くなることがある．このような状況では，電力デマンドのピークを平常時と同等の値に抑えたうえで，列車の遅延を平準化する方法が望ましい．電力デマンド制御アルゴリズムを活用して，このような状況へと近づけることが，本研究の最終目的である．

3. 「はやぶさ」発信の電力制御技術の鉄道への応用

本研究は，JAXA で開発した主に二つの電力制御技術を用いている．「限られた電力を優先度に応じて配分する技術」と「自律分散制御の技術」である．

3.1 限られた電力を優先度に応じて配分する技術

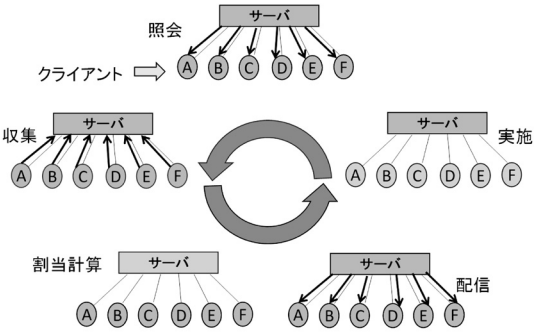
遅延が発生せず，平常どおりの輸送サービスを提供しているときには，電力デマンドを制御する必要はない．一方で，何かのトラブルで列車遅延が発生した後，停車していた列車が一斉に走り出し，だんご運転が発生するような状況を想定すると，電力デマンドを平常時と同等に抑制するためには，電力デマンド制御を適用する必要がある．

電力デマンドを制御するために，走行中の各列車に対して，優先度を設定しながら，使用可能な電力を配分する．具体的には，遅れの大きい列車へは高い優先度で列車運行電力を割り当てることで，「電力の上限内での運転」と「列車遅延の平準化による利便性の向上」の両立を図る．制御アルゴリズムの詳細は，3.3 節で述べる．

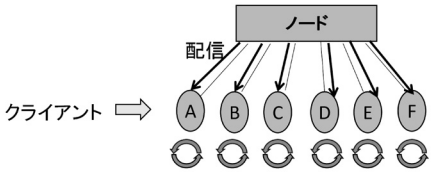
3.2 自律分散制御の技術

電力デマンド制御を行う方式として，一般的には，電力を消費する「クライアント」の電力を，電力供給者である「サーバ」が一括管理する「サーバ・クライアント方式」があるが，この方式ではサーバとクライアント間の双方向通信を要するので，通信コストや電力デマンド制御への参加・離脱が不自由になるなどの欠点がある（図 1(a)）．

そのため，サーバと双方向通信を要しない「自律分散方式」の電力制御を提案している [2–4]．自律分散制御方式は，全クライアントの合計消費電力のみを管理する「ノード」である変電所が，「クライアント」である各列車に合計消費電力を配信する．各クライアントは，合計消費電力を基に，自分の電力使用可能量を，自律的に，かつ，並列に計算することで制御が達成される（図 1(b)）．自律分散制御方式は片方向の低速な通信のみを必要とするため，初期投資や通信コストが小さい．また，制御への自由な参加・離脱が可能であり，鉄道の電力制御にも適している．



（a） サーバ・クライアント方式



（b） 自律分散方式

図 1 制御方式の比較

3.3 列車運行電力デマンド制御アルゴリズムの概要

文献 [5] では，3.2 節の自律分散制御を活用した列車運行電力デマンド制御アルゴリズムを開発し，鉄道運行における電力デマンドの削減への適用可能性を検討した．

列車運行電力は，力行ノッチオフ速度[1]に大きく依存する．そこで，本アルゴリズムでは，変電所の消費電力の積算値である電力デマンドが，力行ノッチオフ速度で決まると仮定したうえで，各列車の各駅間での力行ノッチオフ速度を，各列車が自律的に制御し，電力デマンドを目標値付近に漸近収束させる．

列車 i の駅間 j での力行ノッチオフ速度を $V_{i,j}$ とすると，電力デマンド積算単位時間 t の間の電力デマンドを制御するための，力行ノッチオフ速度 $V_{i,j}$ を決める具体的な制御則は，式 (1) となる．

$$V_{i,j} = \overline{V}_i(t) - \frac{1}{Q_{i,j}} \times c \times (P - P^*) \qquad (1)$$

ここで，t は電力デマンド積算単位時間，$\overline{V}_i(t)$ は，直近 t 時間において列車 i が走行した全駅間の力行ノッチオフ速度の平均値，$Q_{i,j}$ は列車 i の駅間 j の優先度，

[1] 駅出発時の力行から惰行に移行する速度を指す．

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

c は電力デマンドから力行ノッチオフ速度への変換定数，P は電力デマンド現在値，P^* は電力デマンド目標値である．式 (1) の優先度 $Q_{i,j}$ は，各列車の駅間ごとに設定することができるため，たとえば電力デマンド制限下においても，遅延が大きな列車や優等列車には，優先的に電力を供給するような制御が可能である．

式 (1) のうち，列車が取得できない情報は電力デマンド現在値 P および目標値 P^* のみであるため，変電所の電流・電圧から算出した移動平均値である電力デマンド現在値 P が一定間隔で配信される仕組みを導入することによって，各列車が自律的に電力を制限する分散電力制御が可能である．具体的な制御の流れは以下のとおりとなる．

- 変電所で積算した電力デマンド現在値 P と電力デマンド目標値 P^* を一定間隔で各列車へ配信
- 通常運転ではデマンド制限を超過する ($P > P^*$) 場合に，各列車が自律的に力行ノッチオフ速度を制限
- 制御則に基づいた力行ノッチオフ速度の制限により，電力デマンドが目標値付近に維持される

このため，電力デマンド制限のために，力行ノッチオフ速度が低下すると，電力デマンドの制限量に応じた列車遅延が生じる．

4. シミュレーション

3.3 節の電力デマンド制御アルゴリズムを鉄道総研で開発した列車運行電力シミュレータ [6] に組み込み，その効果を検証した [5]．具体的には，路線長 6 km，駅数 6 駅，変電所数 1 箇所の仮想路線と，編成数 5 編成による 5 分間隔の仮想ダイヤを設定した．このシミュレータ上でダイヤどおり運転すると，電力デマンドは 1700 kW で推移した．

まず，通常運転のときに，電力デマンド制御アルゴリズムに電力デマンド 1300 kW の制限条件を与えて，シミュレータ上で走行させた．その結果，制御開始から 30 分ほどで電力デマンドが制限値付近に静定することを確認した（図 2）．

次に，このダイヤからの列車の間隔が狭くなり，その先頭列車が 8 分遅延した状況を作り出し（図 3），電力デマンド制御アルゴリズムに電力デマンド 1300 kW の制限条件に加えて，$Q_{i,j}$ として各列車の遅延の重み付けを与えたときの力行電力を計算させ，シミュレータ上で走行させた．各列車が駅出発のたびにダイヤからの遅延を取り入れて優先度による力行電力を計算して運転することで，変電所の電力デマンド 1300 kW を維持したまま各列車の遅延が平準化され，だんご運転状態から回復できることが実証された（図 4）．

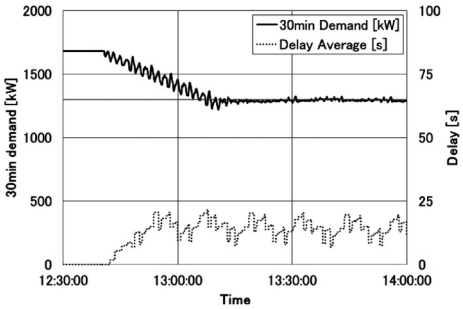


図 2　シミュレーションにおける電力デマンドと列車遅延の推移（平常時）[5]

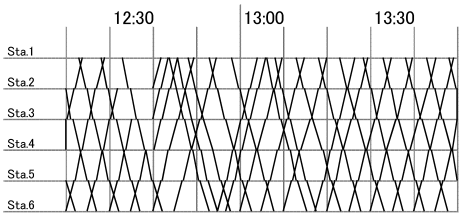


図 3　遅延時のダイヤ [5]

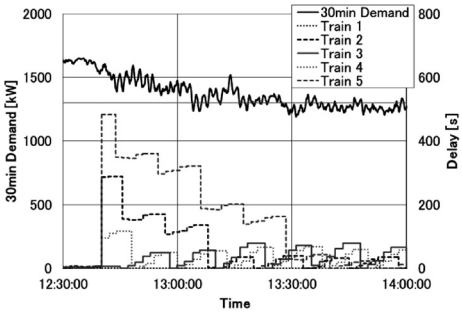


図 4　シミュレーションにおける電力デマンドと列車遅延の推移（遅延時）[5]

5. 列車走行試験

列車運行電力デマンド制御アルゴリズムの収束性をシミュレーションで確認することはできたが，実際の列車運行においても，本制御が適用可能かどうかを検証することは重要である．

そこで，電力デマンドが設定した目標値付近に収まることの実証を目的として，東急電鉄田園都市線にて 5000 系 2 編成による列車走行試験を実施した [7–10]．具体的には，図 2 のような結果を，実測でも示すことを目的とした．試験設定を表 1 に，試験ダイヤを図 5 に，使用編成を図 6 に示す．また，電力デマンド制限時に，発生する遅延の程度についても確認した．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

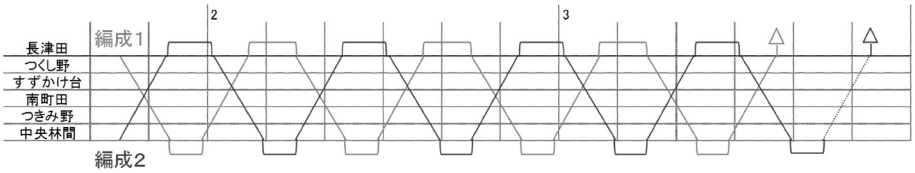


図 5　試験ダイヤ [10]

表 1　試験設定 [10]

試験日数	3 日（夜間）
試験路線	東急電鉄　田園都市線
試験区間	長津田駅～中央林間駅
変電所数	1 変電所
対象変電所	つきみ野変電所
車両編成数	2 編成
車両形式	東急電鉄　5000 系
試験時間帯	1:45～4:00

一般的な列車走行試験においては，シミュレーション上では想定できない，実際の列車運行で発生しうる外乱を含む状況を模擬し，そのうえでの制御を確認することも重要である．しかしながら，本稿での列車走行試験は，制御アルゴリズムの収束性を確認する基礎試験であるため，最も基本的な制御アルゴリズムを適用し，試験時のばらつきをなるべく排除できるよう，試験方法を工夫した．

以下, 列車走行試験の概要と主に工夫した点を述べる．

5.1　制御アルゴリズム

制御アルゴリズムについては，遅延の制御は行わないこととし，式 (1) の優先度 $Q_{i,j}$ は優先度の重み付けは行わず一定値とした．具体的には，制御が安定する条件 [5] を満たすよう，$Q_{i,j}$ ＝全クライアント数＝ 2 とした．

5.2　運転方法の工夫と停車時分管理

営業列車では，運転士は，列車ダイヤを遵守しつつ，駅間で設定されている速度制限を守って，力行・惰行・ブレーキ操作を実施している．一方で，3.3 節で述べたとおり，本制御では，力行ノッチオフ速度が制御パラメータとなっているため，通常の運転操縦ではなく，本試験特有のルールを設けることとした．

具体的には，力行，および，ブレーキ操作時には，加減速の強さを表すノッチを一定にし（「一括ノッチ」と呼ぶ），一括ノッチで力行→指定された速度で力行ノッチオフ→惰行→一括ノッチでのブレーキ操作での運転操縦を原則とした（図 7）．このような工夫は，特にばらつきの出やすいブレーキ操作をあらかじめ規定することで，運転士によるばらつきの極小化を図るためである．さらに，電力デマンドのばらつきを減らすため，回生ブレーキを活用しない運転を実施した．

図 6　使用編成

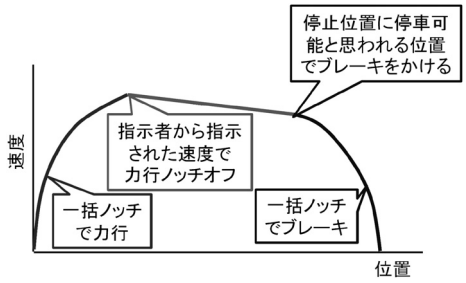


図 7　制御対象駅間における運転操縦 [8]

また，本試験は，電力デマンドを制限するために，意図的に列車遅延を発生させる試験である．限られた駅間での限られた編成数での試験であるため，駅で停車している時間はなるべく短いほうが望ましい．そのため，遅延が発生している場合には，つくし野駅～つきみ野駅での停車時分は最大で 5 秒短縮，長津田駅と中央林間駅での折返し時間は最大で 20 秒短縮と設定した．

5.3　電力デマンド測定と通信プログラム

列車走行試験に先立ち，電力デマンドを測定するための測定機器を変電所へ設置した．また，安定した同報送信を確保するため，LTE 回線を使用した通信方法の開発・検証ならびに電波状況の確認を実施し，良好な結果を得た（図 8）．

列車運行電力デマンド制御のためには，式 (1) の電力デマンド現在値 P と目標値 P^* を各列車に送信する

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

仕組みが必要となる．そのため，電力デマンド現在値の計算ならびに現在値と目標値の配信を行うプログラム (Sender) を実装し，変電所において電流・電圧要素を Sender プログラムへ入力した．なお，配信周期は 1 分とした．

5.4　運転指示プログラム

Sender から送信される電力デマンド現在値，および，目標値を用いて，式 (1) に従って，力行ノッチオフ速度を計算し，停車時分を管理するプログラム (Receiver) を実装した．この Receiver を用いて，運転指示を実施する．Receiver の画面を図 9 に示す．Receiver は，PC またはタブレットで動作し，駅到着時点にボタン（図 9 ①）を押すと，その時点での最新の電力デマンド現在値と目標値を用いて，計算した力行ノッチオフ速度（図 9 ②）が表示される．また，5.2 節で述べたルール通りに，実際の停車時分を管理するため，同時に，停車時分のカウントダウン（図 9 ③）が始まる．

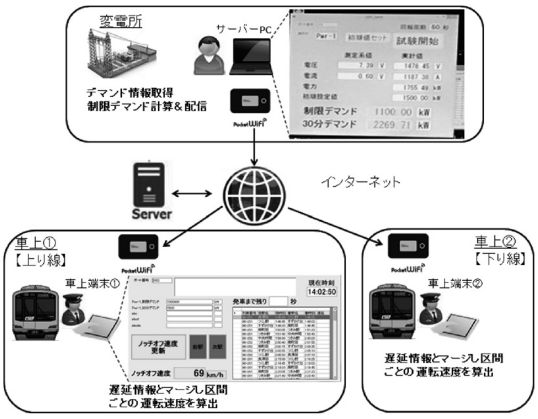


図 8　通信システム概要 [9]

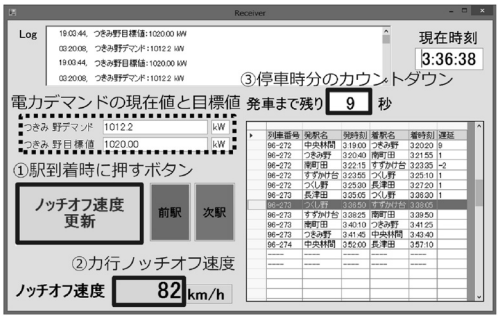


図 9　Receiver 画面イメージ [10]

5.5　試験の流れ

試験の流れを図 10 に，列車走行試験時の運転台の要員配置を図 11 に示す．制御を開始すると，変電所の Sender から車両の運転台にいるスタッフのタブレットに設定した Receiver へ，電力デマンドの現在値および制限値が一定間隔で送信される．駅への到着時にスタッフが Receiver のボタンを押すと次の駅までのノッチオフ速度と停車時分が自動で計算されタブレットに表示される．運転士は指示された出発時刻にノッチを入れ，力行ノッチオフ速度に従ってノッチオフし，一括ノッチでのブレーキ操作を実施し，次の駅まで運転する．

5.6　電力デマンドと遅延の事前検討

1 列車走行試験での電力デマンドと列車遅延を推定し，試験条件を事前検討するため，列車運行電力シミュレータの制御アルゴリズムを改良した．図 5 の試験ダイヤを設定して，無制御時の電力デマンドを推定し，制御開始時刻や式 (1) の変換定数を変更した複数パターンでの試算を実施した [7]．

本列車走行試験は，電力デマンドを制限するために，意図的に列車遅延を発生させる試験である．電力デマンド制限が厳しすぎると列車遅延が大きくなり，試験終了時刻を超えてしまう可能性がある一方で，制限が緩いと制御効果がわかりづらい．遅延が 2 分以内に収まることを条件として，制御開始時刻，電力デマンド目

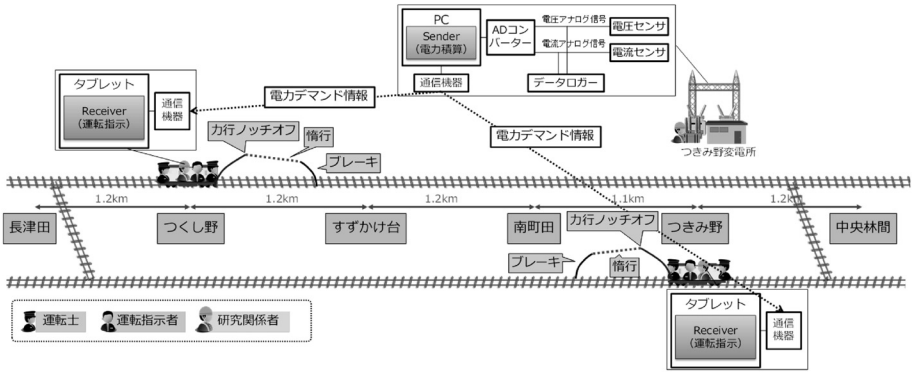


図 10　列車運行電力デマンド制御の列車走行試験方法の概要 [10]

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

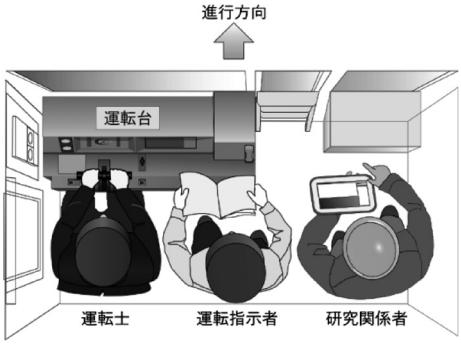


図 11　列車走行試験時の運転台の要員配置 [10]

表 2　各試験日の試験条件 [10]

試験日	目標値	制御開始時刻
1 日目	なし	—
2 日目	1000 kW	試験開始 40 分後
3 日目		

標値，制御定数を検討した．各日の試験条件を表 2 に示す．無制御時の電力デマンドデータを取得するため，制御開始は試験開始 40 分後とした．電力デマンド目標値は 1000 kW とし，無制御時から約 3 割削減する設定とした．

5.7　試験結果

3 日間の列車走行試験においては，5.6 節で述べた列車運行電力シミュレータでの事前検討で想定した列車遅延の範囲で，すべての列車走行試験を実施することができた．また，電力デマンド測定，および，通信プログラムにおいても，列車運行電力デマンド制御に支障をきたす異常は発生しなかった．

3 日目の列車走行試験によって得られた電力デマンドと列車遅延と，事前検討において列車運行電力シミュレータで想定した電力デマンドと列車遅延の時間的推移を図 12 に示す．

5.7.1　電力デマンド

事前検討において列車運行電力シミュレータで想定した電力デマンドとほぼ同等の推移が得られた．電力デマンドの平均値は，無制御時は 1470.9 kW，制御収束時は 1019.9 kW であり，約 3 割の電力デマンドを減少させた．その推移は，制御開始時刻から約 30 分間で，目標値付近まで約 3 割電力デマンドを下げ，その後の約 1 時間，試験ダイヤ終了時まで，電力デマンドを目標値付近で維持できることを検証した．また，制御対象の約 1 時間 30 分間で 25 駅間走行する間に，最大 60 秒程度の列車遅延が発生した．

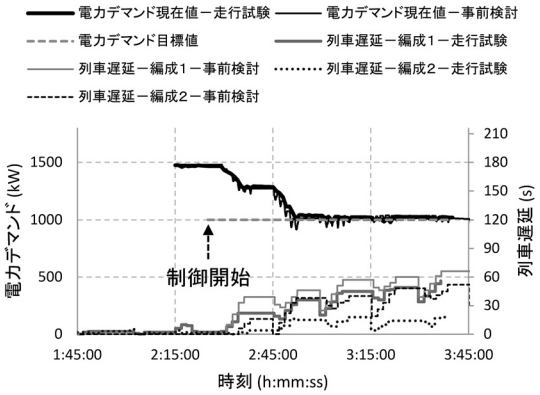


図 12　電力デマンドと列車遅延の推移（試験 3 日目）[10]

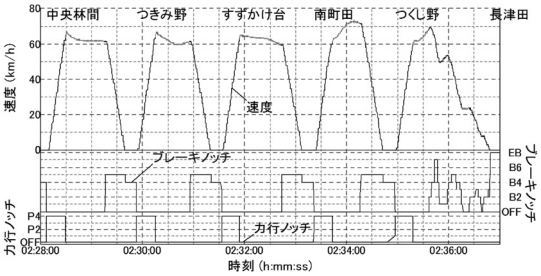


図 13　運転操縦結果の例（試験 3 日目　編成 1）[10]

5.7.2　列車遅延

編成 2 の列車遅延は，5.6 節のシミュレーションによる事前検討よりも小さくなる傾向となった．運転指示の過程において，駅到着時のボタン操作から駅出発時の力行開始の合図までに，編成 1 と編成 2 で 1～2 秒程度の差があったことが確認されている．このため，各駅での停車時間の差が積み重なり，想定と異なる傾向となったと分析している．

5.7.3　運転操縦結果と力行ノッチオフ速度

運転操縦結果の例を図 13 に示す．終着駅へ向かうつくし野駅→長津田駅は，制御対象外としており，それ以外の区間においては，図 7 で示したような一括力行ノッチ，惰行，一括ブレーキノッチの組合せでの運転操縦が実施できていることがわかる．

制御対象駅間における力行ノッチオフ速度の推移を図 14 に示す．制御対象駅間における列車の力行ノッチオフ速度は，制御開始前は 80～90 km/h 程度であったが，制御開始に伴い，60～70 km/h 程度に低下している．

以上より，策定した列車走行試験計画は，実現可能，かつ，列車運行電力デマンド制御の制御アルゴリズムを検証するために適切な計画であったと考えている．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

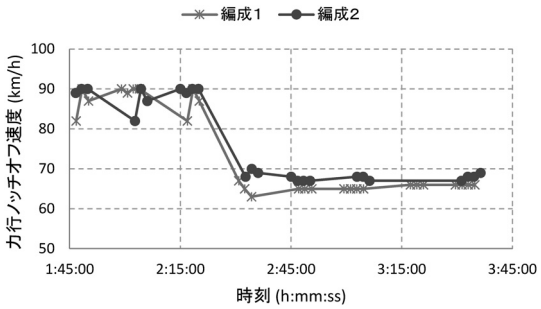


図 14　力行ノッチオフ速度の推移（試験 3 日目）[10]

6.　おわりに

列車運行電力デマンド制御の制御アルゴリズムの基礎検証のため，東急電鉄田園都市線の長津田駅～中央林間駅にて実施した 2 編成による列車走行試験を実施した．

本試験により，開発した列車運行電力デマンド制御の電力デマンド収束性についての基礎検証が実施できたと考えている．今後は，より現実に近い状況を模擬することを目的とした列車走行試験，および，シミュレーションを行っていく．

本研究の一部は，国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した．

参考文献

[1] 荻野慎二，“小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果，” NEC 技法，**64**, pp. 130–138, 2011.

[2] J. Kawaguchi, “Power control system and method, and information communication ability control system and method,” WO/2015/115385, WIPO, 2015.

[3] 川口淳一郎，“電力制御システム，方法，及び，情報伝達能力制御，” PCT/JP/2015/073918, WIPO, 2015.

[4] 大木優介，“自律分散制御系の安定化とその鉄道電力制御への応用，” 平成 27 年度東京大学大学院修士論文，2016.

[5] 大木優介, 小川知行, 川口淳一郎, “自律分散制御を利用した変電所電力ピークカットに関する検討，” 電気学会リニアドライブ／交通・電気鉄道合同研究会, LD-16-062/TER-16-055, 2016.

[6] 武内陽子，小川知行，森本大観，今村洋一，影山真佐富，“電力・車両・運転分野の協調による列車運行電力シミュレータの開発と検証の取り組み，” 平成 29 年電気学会産業応用部門大会，5-S8-9, 2017.

[7] 大木優介, 小川知行, 武内陽子, 齋藤達仁, 川口淳一郎, “自律分散的な列車電力デマンド制御の基礎実験実証，” 電気学会自動車／交通・電気鉄道合同研究会，VT-17-021/TER-17-056, 2017.

[8] 武内陽子，小川知行，齋藤達仁，森本大観，大木優介，川口淳一郎，“列車運行電力デマンド制御アルゴリズムの基礎検証のための列車走行試験，” 第 54 回鉄道サイバネ・シンポジウム，604, 2017.

[9] 川口淳一郎，大木優介，兎束哲夫，武内陽子，小川知行，神尾純一，養田新一，大和永世，野村悟司，山下満弘，“小惑星探査機「はやぶさ」の技術を利用した列車運行電力デマンド制御技術に関する現車試験，” 鉄道と電気技術，**29**(3), pp. 35–39, 2018.

[10] 小川知行，武内陽子，森本大観，兎束哲夫，川口淳一郎，大木優介，“列車運行電力デマンド制御の検証走行試験，” 鉄道総研報告，**32**(8), pp. 5–10, 2018.

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.