

列車運行電力デマンド制御の検証走行試験

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###

Verification Running Test of Train Operation Power Demand Control

Tomoyuki OGAWA Yoko TAKEUCHI Hiroaki MORIMOTO
 Tetsuo UZUKA Junichiro KAWAGUCHI Yusuke OKI

Train operation power demand control based on decentralized control is proposed in order to reduce the power cost of train operation. To verify the train operation power demand control, we planned a verification running test using two trains. This paper shows the planning process and result of the verification running test. The verification running test was planned in such a way that it is suited for the examination of train operation power demand control from a point of view of train timetable, train driving operation, measurement of power demand at a substation, communication between trains and a substation. The verification running test has confirmed the convergence and stability of the train operation power demand control.

キーワード：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

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構，公益財団法人鉄道総合技術研究所，および，東急テクノシステム株式会社は，小惑星探査機「はやぶさ」の技術に端を発した電力ピークカット制御に係る技術を，鉄道へ応用するための共同研究を行っている。鉄道事業者の契約電力は，30分間の電力積算値（以下，電力デマンド）で設定されている。このため，電力デマンドを低く抑える電力制御技術の確立が望ましい。そこで，列車運行時の電力デマンドを抑制する技術として，分散電力制御技術を基礎とした列車運行電力デマンド制御の検討を進め，別途開発してきた「列車運行電力シミュレータ」に本制御のアルゴリズムを組み込み，列車運行電力デマンド制御の効果予測を行ってきた。開発した制御アルゴリズムにより，ある時間帯毎の列車運行の平均使用電力を指定した目標値付近に漸近収束させられることが，理論およびシミュレーションで示されている¹⁾。

開発した制御アルゴリズムの基礎的検証のため，列車走行試験の計画を策定し，東急電鉄田園都市線の長津田～中央林間にて列車走行試験を実施した^{2) 3)}。具体的には，開発した制御アルゴリズムを検証するのに適した列

車運行となるように，試験列車の列車ダイヤ，列車運転操縦，変電所測定，通信方式等の実施計画を策定した。この結果，列車運行計画で想定した範囲の列車遅延で試験を進めることができ，制御アルゴリズムを検証するのに相応しい列車走行試験が実現できた。そして，開発した制御アルゴリズム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。

以下，2章では列車運行電力デマンド制御の制御アルゴリズムの概要，3章では列車走行試験計画，4章では列車走行試験結果について，それぞれ述べる。

2. 制御アルゴリズムの概要

2.1 分散電力制御の概要

開発した制御アルゴリズムは，小惑星探査機「はやぶさ」の技術に端を発した電力ピークカット制御に基づく技術である。小惑星探査機「はやぶさ」では，電力制限下において，サーバ・クライアント方式により，各設備に対して電力を配分する制御を実施していた（図1(a)⁴⁾。しかし，本方式には，サーバとクライアント間の双方向通信が必要であり，初期投資が大きいこと，クライアント数が増えると通信コストが飛躍的に増加すること，サーバは，あらかじめ決められたクライアントしか制御できず，制御への参加・離脱を自由に行うことができないという欠点がある。

そのため，自律分散方式の電力制御（以下，「分散電力制御」）が提案されている^{5) 6) 7)}。分散電力制御では，サーバを必要とせず，全クライアントの消費電力の合計

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室
 ** 信号・情報技術研究部 運転システム研究室
 *** 電力技術研究部 き電研究室
 # 電力技術研究部
 ## 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
 ### 東京大学

特集：車両技術

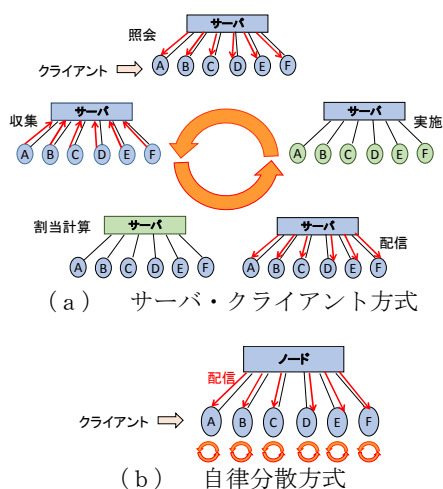


図1 制御方式の比較

のみを計測しているノードが、各クライアントへ総消費電力を配信する(図1(b))。各クライアントは、総消費電力を基に、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。必要な通信機能は一方方向の低速なものであるため、初期投資や通信コストが小さいこと、制御への参加・離脱がクライアント側で自由に行えることが利点である。

2.2 列車運行への適用

この分散電力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¹⁾。ノードは変電所、クライアントは運行中の各列車であり、時間帯に応じて列車数が増減しても、列車運行電力デマンド制御が可能である。

本アルゴリズムでは、変電所における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(駅出発時の力行から惰行に移行する速度)で決まると仮定した上で、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。

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

ここで、*t*は電力デマンド積算単位時間、 $\bar{V}_i(t)$ は、直近*t*時間における列車*i*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、*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、各列車の駅間毎に設定することができるため、たとえば、

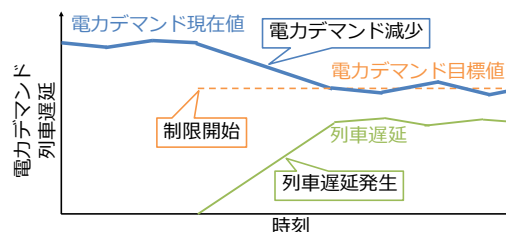


図2 列車走行試験の電力デマンドと列車遅延の推移のイメージ

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通りとなる。

- 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、電力デマンド制限により、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。

3. 列車走行試験計画

3.1 列車走行試験の目的

列車走行試験の目的は、開発した列車運行電力デマンド制御アルゴリズムの基礎検証であり、具体的には、電力デマンドが設定した目標値付近に収まることの検証である。また、制限時に発生する遅延の程度についても確認した。

図2に示したような制御の実現可能性の検証を目的として、東急電鉄田園都市線の長津田～中央林間にて、2編成の列車を使用した列車走行試験を実施した。列車走行試験方法の概要を図3に示す。

本走行試験は、電力デマンドの収束性を評価する基礎検証であるため、式(1)の優先度 $Q_{i,j}$ は一定値とした。具体的には、制御が安定する条件¹⁾を満たすよう、 $Q_{i,j} = \text{全クライアント数} = 2$ とした。なお、本試験は試験編成数が限られている基礎検証であるため、力行と回生のタイミングにより回生電力に大きなばらつきが生じることが見込まれ、回生ブレーキは使用しないこととした。

3.2 列車走行試験計画の策定

列車走行試験における試験条件を表1に示す。この試験条件に対して、列車運行電力を高精度に推定するために開発している「列車運行電力シミュレータ」⁸⁾、および、運転曲線作成と車両エネルギー計算を行う車両走行エネルギーシミュレータ「Hybrid-Speedy」⁹⁾を活用した机上検討を実施しながら、列車走行試験計画を策定した。

以下では、主な検討内容の詳細を述べる。

3.2.1 運転操縦の固定

列車走行試験の目的は、2章で述べた式(1)の制御則に則って電力デマンドが決定される状況を再現し、制御アルゴリズムの効果を検証可能な試験データとして取得することである。そのため、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。これらに加えて、安全な列車走行を確保することも必須である。具体的には、以下を考慮する必要がある。

- 電力デマンドが力行ノッチオフ速度の関数となるような運転操縦を実施する
- 運転操縦による駅間走行時分のばらつきを小さくする
- 終端駅では、停止目標を超えずに停車させる

上記を満たすため、運転操縦固定ルールを設定し、これに基づく運転指示を実施した。また、電力デマンド制御を実施しない駅間（以後「制御対象外駅間」とよぶ）と、制御を実施する駅間（以後「制御対象駅間」とよぶ）を設定した。運転操縦固定ルールは、以下の通りである。

- 力行→惰行→ブレーキでの運転操縦を原則とする（図4）
 - 駅出発時に、運転指示者が運転士に対して、力行ノッチオフ速度を指定する
 - 最大ノッチで力行し、力行ノッチオフ速度で惰行に移行する
 - ブレーキノッチを変化させない一括ブレーキノッチで、所定の停車位置に停車可能と思われる位置を運転士が判断し、ブレーキをかける
 - 再力行は実施しない

表1 列車走行試験の試験条件

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～中央林間
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

- 速度制限などにより、この運転操縦ができない場合は、当該駅間みのルールを設ける
- 終端駅への走行は、力行ノッチオフ速度は常に一定値を指定し、一括ブレーキノッチではなく、通常通りのブレーキ扱いとする（制御対象外駅間）

3.2.2 力行ノッチオフ速度の上下限値の設定

図4のような、通常とは異なる運転操縦を実現するためには、以下の運転操縦のしやすさも考慮する必要がある。

- 一括ブレーキノッチでの停車を実施するため、ブレーキをかけ始める地点に到達する前の惰行時には、ある程度の時間的な余裕を設ける
- 実際の営業走行では実施しないような極端な低速走行となるような力行ノッチオフ速度を避ける

上記を満たすために、指定する力行ノッチオフ速度の上下限値を設定することとした。横軸を走行時間で示した力行ノッチオフ速度の上下限値設定の概念図を図5に示す。力行ノッチオフ速度を高くすると惰行時間が短くなるため、10秒以上の惰行時間を確保するよう上限値を設定した。一方、力行ノッチオフ速度を低くすると、惰行中の速度低下により、極端に走行時間が延びる可能性がある。このため、力行ノッチオフ速度の下限値は、一律50km/hとした。

本試験は、つきみ野変電所の1変電所のみで実施するため、通常走行よりも大きな電圧降下を考慮する必要がある。そこで、「列車運行電力シミュレータ」を用いて、各駅間の力行時の最低電圧を計算した。次に、「Hybrid-

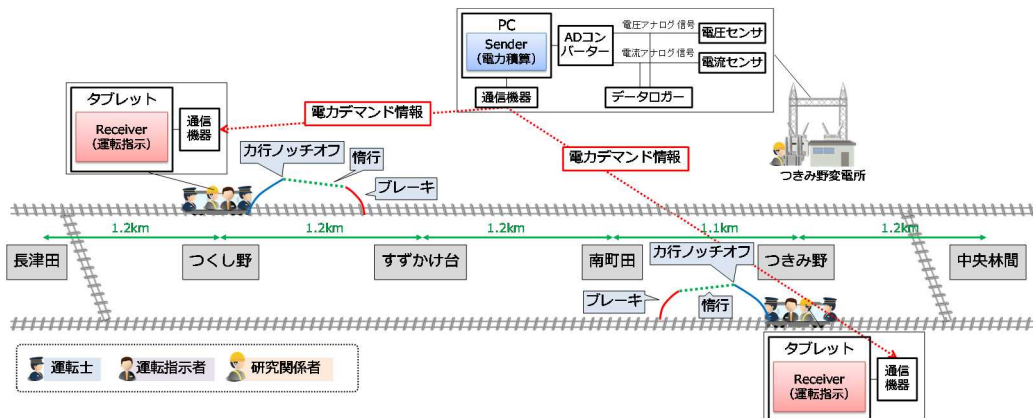


図3 列車運行電力デマンド制御の列車走行試験方法の概要

特集：車両技術

Speedy」の電圧指定機能を用いて運転曲線を推定し、力行ノッチオフ速度の上限値を設定した。その結果、制御対象駅間の力行ノッチオフ速度の上限値は、82～90km/h となった。

3.2.3 試験ダイヤの作成

2 編成で 6 駅の試験区間での試験ダイヤを作成するにあたっては、列車走行試験時の実際の停車時分を管理するため、以下のルールを定めた。

- 電力制限の対象となる複数の列車が、同時に走行中であることが望ましい
- 駅で停車している時間はなるべく短い方が望ましい
- 電力デマンド積算単位である 30 分のパターンダイヤとする
- 停車時に回復可能な遅延時分のばらつきを小さくする
列車運行電力シミュレータでの試算を実施し、試験ダイヤ、および、停車時の遅延回復方針を作成した。試験ダイヤを図 6 に示す。設定方法は以下の通りである。
- 駅間走行時分は、最速走行時分を、5 秒単位で切り下げて設定
 - 最速走行時分は、力行ノッチオフ速度の上限値からシミュレータ算出
- 途中駅の停車時分は、全駅一律 20 秒で設定
 - 遅延時には、最大 5 秒の遅延回復が可能
- 折返駅の停車時分は、入換やエンド交換にかかる時間を考慮し、かつ、30 分のパターンダイヤとなるように設定
 - 遅延時には、最大 20 秒の遅延回復が可能

3.2.4 電力デマンドと列車遅延の事前検討

本試験の事前検討のため、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、3.2.2 項の力行ノッチオフ速度の上下限値を設定可能とした。そして、図 6 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。

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小さくなる。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、電力デマンド目標値、制御定数を検討した²⁾。各日の試験条件を表 2 に示す。無制

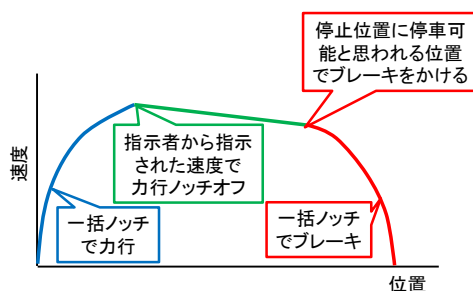


図 4 制御対象駅間における運転操縦

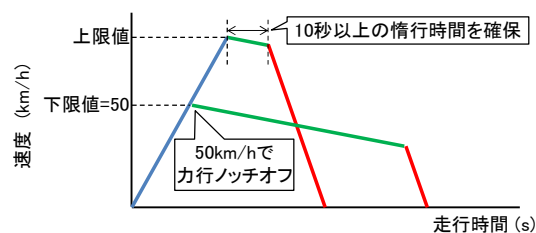


図 5 力行ノッチオフ速度の上下限値

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 1000kW とし、無制御時に対して約 3 割削減する設定とした。

3.3 電力デマンド測定・通信プログラム

列車走行試験の事前準備として、電力デマンドを測定するための測定機器の変電所への設置、通信プログラム作成等を実施した。通信には、変電所と列車の両方にモバイルルータを用いて、携帯電話網によるインターネット接続サービスを活用した。また、今回の試験においては、通信遮断の影響評価は対象外とした。

3.3.1 変電所における電力デマンドの積算と送信

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。

3.3.2 各列車における電力デマンドの受信

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) により、運転指示を行うプログラム (Receiver) を実装した。Receiver の画面を図 7 に

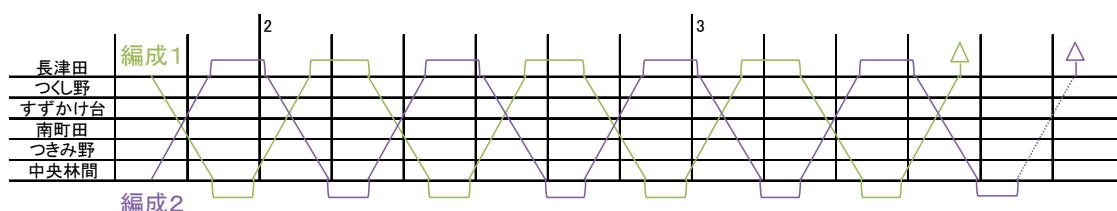


図 6 試験ダイヤ

表2 各試験日の試験条件

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



図7 Receiver 画面イメージ

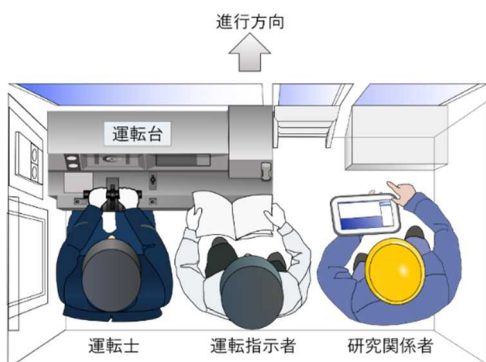


図8 列車走行試験時の運転台の要員配置

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7①) 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7②) が表示される。また、3.2.3 項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7③) が始まる。

3.3.3 運転指示方法

列車走行試験時の運転台の要員配置を図8に示す。到着後のReceiverの操作は、研究関係者が行い、Receiverの表示内容に基づいて、運転指示者が出発時刻及び力行ノッチオフ速度を運転士へ指示した。

4. 列車走行試験結果

4.1 列車運行結果

列車走行試験によって得られた電力デマンドおよび列車遅延と、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および時間的推移を図9に示す。策定した列車走行試験計画に対して、実施した列車走行試験の結果を以下で評価する。

3日間の全ての列車走行試験を3.2.4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内で実施することができた。また、運転操縦結果の例を図10に示す。指示した力行ノッチオフ速度や停車時分に対して、実際の運転結果に大きな差は生じず、良好な運転指示が実施でき、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。

また、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電力デマンドの推移が得られた。列車遅延については、編成2において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。

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。

4.2 電力デマンド制御結果

電力デマンドの平均値は、無制御時は1470.9kW、制御収束時は1019.9kW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。

制御対象駅間における力行ノッチオフ速度の推移を図11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80～90km/h程度であったが、制御開始に伴い、60～70km/h程度に低下している。

5. 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、列車走行試験の計画を策定し、2編成の列車走行試験を実施した。この結果、想定した列車遅延の範囲となることをはじめとして、制御アルゴリズムを検証するのに適した列車運行を実現できた。また、運転士が容易に実施可能な力行ノッチオフ速度の運転指示という方法により、電力デマンドを制御可能であることが確認できた。

特集：車両技術

そして、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。その際、制御対象の約1時間30分間で25駅間走行する間に、60秒程度の列車遅延が発生した。すなわち、制御対象の約1時間30分間で25駅間走行する間の列車遅延を、60秒程度許容すれば、電力デマンドを約3割減少させる制御が可能であると言える。

以上の結果により、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的検証が実施できたと考えている。

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。

謝辞

東京急行電鉄株式会社、東急テクノシステム株式会社におかれましては、列車走行試験の実施におきまして、多大なるご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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, Vol.29, No.3, pp.35-39, 2018
- 4) 荻野慎二：「小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果」, NEC 技法, Vol.64, No.1, pp.130-138, 2011
- 5) J. Kawaguchi: "Power Control system and Method, and Information Communication Ability Control System and Method", WO/2015/115385, WIPO, 2015.
- 6) 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

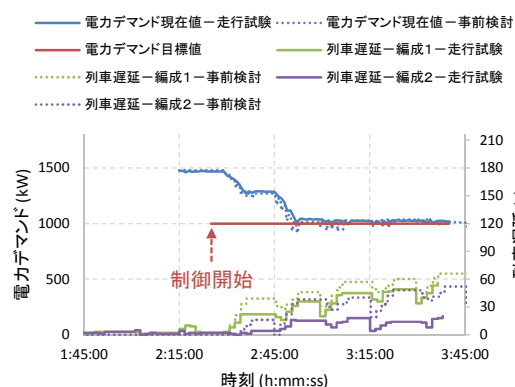


図9 電力デマンドと列車遅延の推移 (試験3日目)

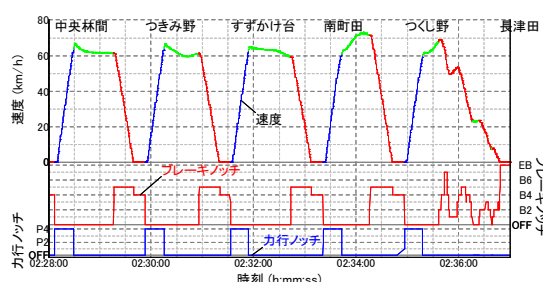


図10 運転操縦結果の例 (試験3日目 編成1)

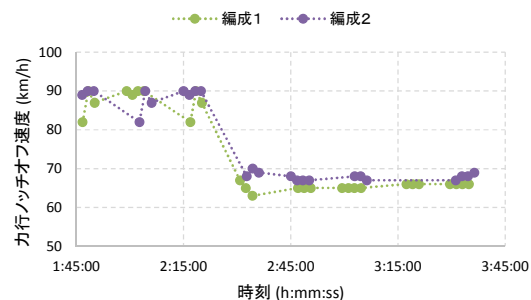


図11 力行ノッチオフ速度の推移 (試験3日目)

- 7) 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
- 8) 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
- 9) 小川知行・近藤稔・熊澤一将・今村洋一・美濃部晋吾・川村淳也・島田直人・添田正・杉山義一：「汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発」, 電気学会リニアドライブ/交通・電気鉄道合同研究会, LD-14-067 / TER-14-030, 2014