

運転曲線予測による貨物列車向け運転支援システムの開発

小川 知行* 横内 俊秀** 武内 陽子***

Development of Driver Advisory System Using Speed Estimation for Freight Train

Tomoyuki OGAWA Toshihide YOKOUCHI Yoko TAKEUCHI

In this study, we have developed a driver advisory system for freight trains using a speed estimation technique aiming to improve energy-saving and punctuality. The driver advisory system focuses on the maneuvering of freight trains in cruising mode, with the aim of passing through stations on time. The driver advisory system proposes a recommended driving operation for each passing station. We have developed a method for assigning driving operations using the speed estimation, which switches between constant-speed and saw-toothed driving operations depending on speed and load characteristics. Then, we present a trial result with regard to energy consumption. We confirm the energy-saving effect by comparing the energy consumption with and without the developed driver advisory system.

キーワード：消費エネルギー，省エネ運転，定時運転，定速運転，のこぎり運転

1. はじめに

鉄道車両の運転士を対象として、運転品質の向上を目指した運転支援システムが各種開発され実用に至っている。その中で、駅通過を主体とする列車（以下、通過主体列車）に対しては、運転士への乗務負担を軽減した上で、定時通過を促進したり、消費エネルギーを低減したりすることが期待されている。本報告では、定時性や省エネ性の向上を狙って、運転曲線をリアルタイムに予測するシミュレーション組み込んだ運転支援システムについて報告する。

運転支援システムに関する研究開発は以前より様々行われているが^{1)~7)}、予め定められた地点や速度に応じた支援内容とするものが一般的である。省エネ性の向上を狙った運転支援システムについては、停車を主体とする列車を対象に車両システムに組み込む形でのシステム開発による試験事例がいくつか報告されている^{3) 4)}。一方で、車両システムから独立して衛星測位システムを活用することによるタブレット端末を用いた運転支援システムの運用が増えている^{5) 6) 7)}。衛星測位システムを活用することで、車両モニタ装置をはじめとする車両システムとの連携が不要であり、導入に要するコストが低いという利点がある。そこで、本研究においては、衛星測位システムを活用し、運転曲線予測による高度な運転支援を組み込んだシステムにて、通過主体列車に対する運転支援システムに取り組む。

本システムでは、通過主体列車である貨物列車を対象として、運転曲線予測により複数の運転方法に対する駅の通過時刻を計算して、その中から推奨される運転方法を運転士に提示することにより、定時性の向上を目指す。また、駅の通過時刻の調整のための加減速操縦を抑制することや、車両効率の良い運転方法を提示することで省エネ性の向上を目指す。

なお、本システムのコンセプトは、計算機の優れた計算能力と、人間の優れた総合的な判断能力を組み合わせることにより、定時性と省エネ性を向上させることである。本システムは、運転操縦を指示する装置ではなく、運転士に対して支援情報を与える装置という位置付けとし、運転支援内容の採否は運転士の判断に任せることとする。すなわち、運転支援システムが考慮できていない信号現示や天候等を考慮しつつ、運転支援システムの提示内容を参考にして、必要に応じてより望ましい運転操縦に補正することを運転士に期待する設計思想とする。このような位置付けとすることで、運転支援システムは車両システムから独立して衛星測位システムからの信号のみで動作する簡便な機器構成とするとともに、要求される信頼度も低く設定することが可能となる。

2. システム構成

運転支援システムは、タブレット端末に衛星測位システムとスピーカーを接続して構成される。運転支援システムの処理概要を図1に示す。衛星測位システムから、緯度・経度と速度を取得する。取得した緯度・経度に対しては、予め取得した緯度経度変換テーブルにより走行線区のキロ程を取得する。また、列車設定に基づいて、

* 車両技術研究部 水素・エネルギー研究室

** 車両技術研究部 駆動システム研究室

*** 信号技術研究部 運転システム研究室

線路データベース、機関車諸元、貨車諸元を用いて、線路情報、機関車情報、貨車情報を取得する。これらの情報を基に、走行地点の速度及びキロ程からの運転曲線予測シミュレーションにより運転曲線を計算する。運転曲線予測の際には、複数の運転状態（力行運転、定速運転、惰行運転等の状態の別）を定めて、それらを組み合わせた複数の運転曲線候補を計算する。併せて、キロ程から通過駅を判定して時刻表の通過時刻情報を取得する。推奨運転方法選定では、それらの運転曲線候補に対して最も評価指標の良いものを推奨運転方法として選定する。支援タイミング判定では、推奨運転方法の運転状態の変化点に対して、適切なキロ程にて音声情報及び表示情報を出力する。

3. 運転曲線予測

3.1 運転曲線予測範囲

運転曲線予測による運転支援を提示する範囲は、各走行地点から2駅先の通過駅までとした。通過駅毎に区切って運転曲線を予測すると、運転曲線の区切りにおいて、急激な速度変化が発生し、無駄な運転操縦やエネルギーの消費が発生したりすることが懸念される。一方で、停車駅毎に運転曲線を区切って運転曲線を予測することは、長距離の運転曲線作成が必要となり、計算処理に時間を要することとなり、リアルタイムでの運転支援が困難になる。そこで、直近の通過駅に対して運転曲線の区切りを生じさせず、最低限度の範囲で運転曲線を作成することとして、運転曲線予測範囲を2駅先の通過駅までとした。

3.2 運転状態パターン

運転曲線予測をするためには、予測対象範囲の各地点

の運転状態を決定する必要がある。通過主体列車で多用される運転状態は、力行運転、定速運転、惰行運転となるが、これらの運転状態の組み合わせを運転状態パターンと呼ぶこととする。本システムが採用する、次々駅までの運転曲線予測を想定した運転状態パターンの代表例を図2に示す。走行区間に応じて運転状態パターンをいくつか選定し、途中の運転状態を切り替える速度や地点を適宜変更して運転曲線候補を作成する。それぞれの運転状態パターンの概要を以下に示す。

(a) 定速

全区間を定速運転にて走行する運転方法である。

(b) 惰行

全区間を惰行運転にて走行する運転方法である。

(c) 定速→惰行

定速運転の後に惰行運転に移る運転方法である。1駅間目に比べて2駅間目の駅間平均速度が低い場合に有効である。なお、定速運転から惰行運転に移る地点は、1駅目の通過前でも通過後でも良い。

(d) 惰行→定速

惰行運転の後に定速運転に移る運転方法である。1駅間目に比べて2駅間目の駅間平均速度が高い場合に有効である。なお、惰行運転から定速運転に移る地点は、1駅目の通過前でも通過後でも良い。

(e) 力行→定速

力行運転の後に定速運転に移る運転方法である。駅間平均速度が高い駅間にさしかかった場合に有効である。なお、力行運転から定速運転に移る地点については、規定しないが1駅目の通過前となることが多い。

(f) 力行→惰行

力行運転の後に惰行運転に移る運転方法である。1駅間目に比べて2駅間目の駅間平均速度が低い場合に有効である。なお、力行運転から惰行運転に移る地点につ

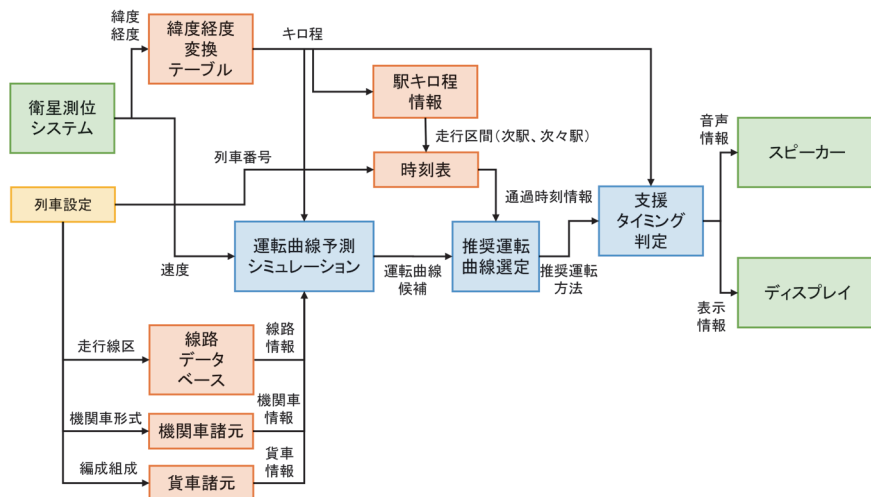


図1 運転支援システムの処理概要

いては、規定しないが1駅目の通過前となることが多い。

(g) 力行→惰行→力行→惰行

途中で再加速する運転方法であり、駅毎にいわゆるのこぎり運転（力行と惰行を繰り返す運転）を実施するパターンである。駅間平均速度が高い駅間にさしかかった場合

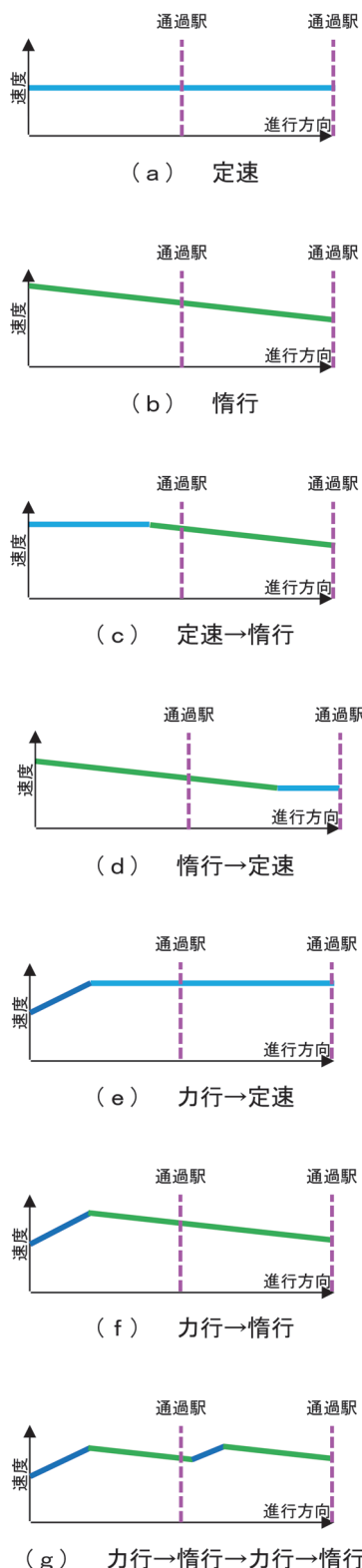


図2 運転状態パターンの代表例

や駅間によって駅間平均速度が異なる場合に有効である。

3.3 選定方法

以上のような運転状態パターンから作成された運転曲線候補毎に走行時分を基本にエネルギー効率や運転操縦性も考慮した評価値 F を算出して、評価値が最小となるものを推奨運転方法として選定する。評価値の計算式を式 (1) に示す。

$$F = T_1 + T_2 + P_D + P_E \quad (1)$$

ただし、

$$T_x = |T_{xp} - T_{xe}|$$

T_x : x 駅間目に対する通過時分ずれ [s]

T_{xp} : x 駅間目に対する計画通過時刻

T_{xe} : x 駅間目に対する予測通過時刻

P_D : 運転操縦性に対するペナルティー [s]

P_E : エネルギー効率に対するペナルティー [s]

である。評価値の算出には、次駅および次々駅の定時からのずれの秒数を基本として、必要に応じてそれ以外のペナルティーを追加した。なお、ペナルティーの計算方法については、適宜調整しているため、本論文で示す走行試験実施日を通じて一定ではない。

3.4 運転方法評価

通過駅間の代表的な運転方法としては、定速運転とのこぎり運転が挙げられる。両者は定時通過のしやすさや、消費エネルギーの観点で得失があるため、はじめに定時性と省エネ性の観点で定速運転とのこぎり運転を比較する。定速運転とのこぎり運転の単純化した比較を図3に示す。青色が力行運転、水色が定速運転、緑色が惰行運転である。定速運転は一定速度で走行するように機関車の定速運転機能で実現される。のこぎり運転は、力行と惰行を繰り返す運転となる。定速運転とのこぎり運転のうち、車両効率の良い運転方法を提示することで消費エネルギーの低減が期待される⁸⁾。消費エネルギーの観点で定速運転とのこぎり運転を比較した事例を図4に示

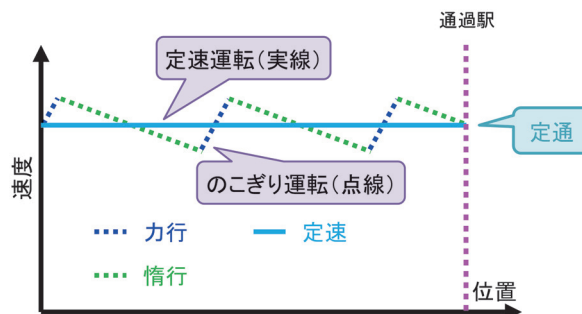


図3 定速運転とのこぎり運転の運転方法の比較

す⁹⁾。この事例は、走行抵抗及びモータ効率を考慮して消費エネルギーの観点での優劣を示している。図4において、横軸が正となるとのこぎり運転の方が省エネとなり、横軸が負となると定速運転の方が省エネとなる。このように、速度・編成質量・勾配などの条件に応じて、定速運転とのこぎり運転の優劣が変わることが確認されている。このため、速度・編成質量・勾配などの条件により、定速運転とのこぎり運転を使い分けることが消費エネルギーの削減につながる。

次に、運転曲線を予測する計算方法の観点で定速運転とのこぎり運転を比較する。説明の簡略化のため1駅分に簡略化した予測の概念図を図5に示す。定速運転で通過駅を定時通過するには、駅までの残りの距離を残りの時間で除して平均速度を計算すればよい。このため、運転士による運転操縦においては通過時刻に合わせた運転操縦はしやすく、運転支援システムでも定時通過のための速度は計算しやすい。一方、のこぎり運転は惰行時の速度の低下度合いにより所要時間が変わってくるため、定時通過のための速度を正確に計算するには運転曲線予測シミュレーションによる時々刻々の速度推移の計算が必要となる。このため、運転士による運転操縦でもシステムによる運転支援でも、定速運転の方が定時通過が容易と考えられる。本システムでは、定速運転とのこぎり運転の両方について運転曲線予測を行い、定速運転時にはモータ効率が低い動作点となることが予想される場合には、評価値にエネルギー効率に関するペナルティー P_E を与えることとした。これにより、勾配が小さい場合（平坦に近い場合）やけん引質量が小さい場合などの条件においては、のこぎり運転が選ばれるようになる。

また、運転操縦性に対するペナルティー P_D としては、運転操縦性が悪いと考えられる運転操縦に対してペナルティーを与えるものである。一例としては、頻繁な運転

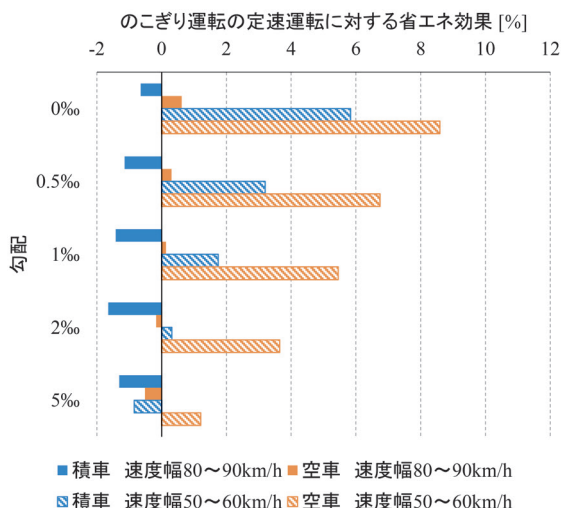


図4 定速運転とのこぎり運転の消費エネルギーの比較⁹⁾

状態の変更を避ける意味で、運転状態の1回の変更に付き、10[s]相当のペナルティーを与えることとした。

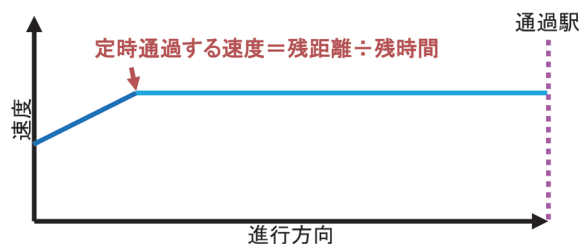
なお、定速運転とのこぎり運転のいずれにおいても、全ての場合に運転曲線予測が成功するわけではない。具体例としては、定速運転は、走行抵抗による速度低下を上回るような下り勾配により速度が一定以上上昇した場合には定速運転の機能が失効してしまうため、そのような場合には運転曲線予測は失敗する。また、のこぎり運転は上り勾配では頻繁に力行を行う必要があるが、開発システムの運転曲線予測では探索回数が肥大化しないように力行回数を制限しているため、そのような場合には運転曲線予測は失敗する。これらのように運転曲線予測が失敗した場合には、推奨運転方法の選定から外れることとなる。

4. 走行試験

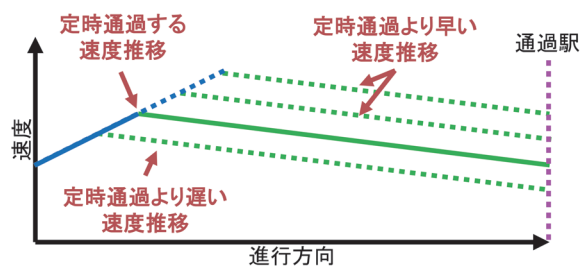
4.1 試験条件

定速運転制御機能を有するインバータ制御の電気機関車が、タンク車をけん引する貨物列車を対象に走行試験を実施した。タンク車は積車・空車時の車両質量を比較的正確に把握することができる。評価区間の条件を表1に示す。停車駅単位で分割して、積車の2区間と空車の2区間を評価の対象とした。なお、当該列車の最高速度は75km/hである。また、当該電気機関車では電力回生は行われないため、回生電力に関する評価は行わない。

走行試験では、運転台に運転支援システムを搭載して、支援内容を参考にして運転するように運転士に依頼し



(a) 定速運転



(b) のこぎり運転

図5 定時通過するための運転曲線予測の概念図

た。運転支援システムの設置例を図6に示す。また、運転支援システムを用いない場合の運転についてもデータを取得した。

走行試験により記録した運転支援画面の例を図7に示す。現在の推奨運転方法（図の例では力行）と、その後の推奨運転方法（図の例では惰行）と、次駅と次々駅の予測通過時分が表示される。また、運転支援システムは、運転支援内容が変更となったタイミングでは、画面表示が更新され、音声により運転支援内容を通知する。

図7の場面における運転曲線予測の例を図8に示す。これらは、走行中に当該箇所にて探索された運転曲線候補である。青色が力行運転を行う区間、水色が定速運転を行う区間、緑色が惰行運転を行う区間であり、灰色が推奨運転方法として選定されたものを示している。前述のように、複数の運転曲線候補を計算した上で、評価値が最も優れているものを推奨運転方法として選定する。

また、各機関車には衛星測位システムを活用した駅の進入／進出時刻を管理するシステムが搭載されている。本システムから得られた進入／進出時刻から駅探時位置の通過時刻を推定した。併せて、通過駅毎に列車遅延を

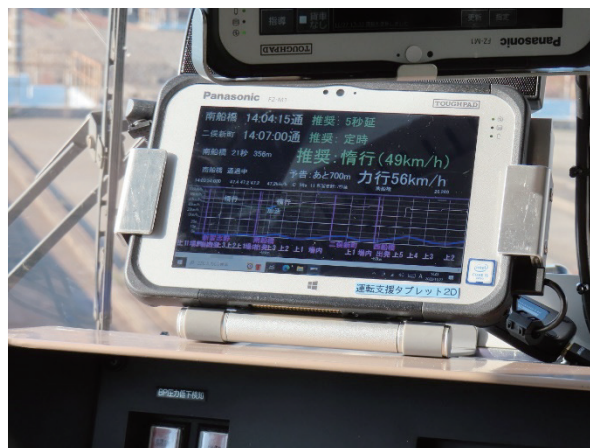


図6 運転支援システムの設置例

4.2 評価方法

車両モニターデータを取得して消費エネルギーの評価に用いた。日によってけん引質量が異なるため、消費電力量を編成質量で除して比較することとした。また、けん引質量が極端に異なると質量に比例しない走行抵抗分の影響が大きくなり編成質量当たりでの比較も難しいため、編成質量の範囲を限定した。

表1 評価区間条件

| | 区間A | 区間B | 区間C | 区間D |
|-----------|------|------|------|------|
| 走行距離 [km] | 71.4 | 51.1 | 70.3 | 72.4 |
| けん引条件 | 積車 | 積車 | 空車 | 空車 |

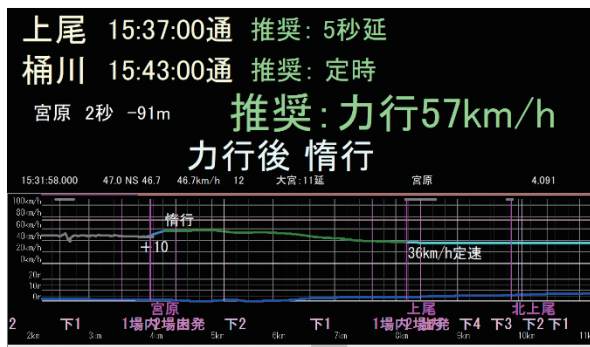


図7 運転支援システムの画面例

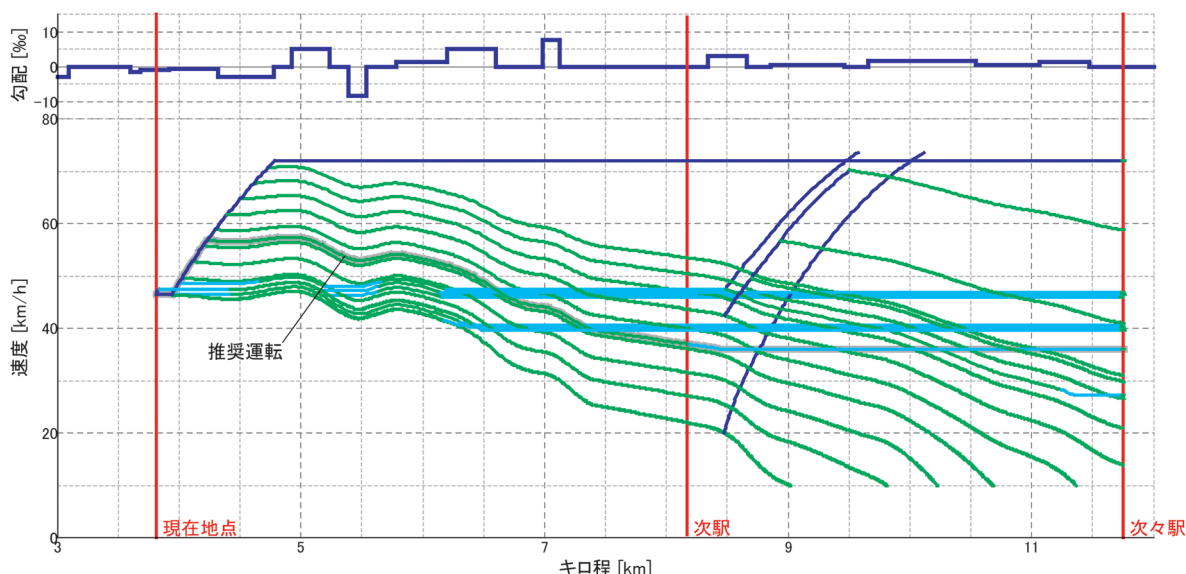


図8 運転曲線予測例

取得して最大遅延 5 分以上の列車については、比較の対象外とした。評価対象の条件を表 2 に示す。

4.3 省エネ性の評価

編成質量当たりの消費電力量（以下、消費エネルギー）の比較を図 9、図 10 に示す。図 9 に示すように、日々の消費エネルギーにはばらつきがある。図 10 に示すように、それぞれの平均値で比較すると、区間によってその効果は異なるが、運転支援システムを用いることにより、4.0～13.6[%] の省エネ効果が確認できる。

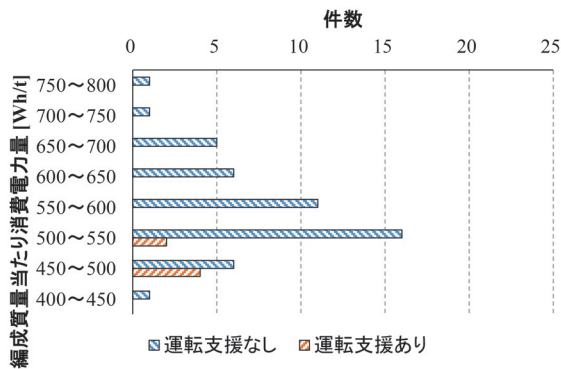
また、消費エネルギーのばらつきについて着目すると、運転支援システムを用いた場合のデータ数は限られているが、運転支援システムを用いることにより消費エネルギーのばらつきも低減できていると考えられる。区間別に着目すると、図 10 より、運転支援を用いない場合に

ばらつきの多い区間 A（変動係数：0.118）の省エネ効果は 12.1[%] であり、運転支援を用いない場合にばらつきの小さい区間 B（変動係数：0.082）の省エネ効果は 4.0[%] である。これより、消費エネルギーのばらつきの多い区間では、運転支援の省エネ効果が発揮されやすいものと推測される。

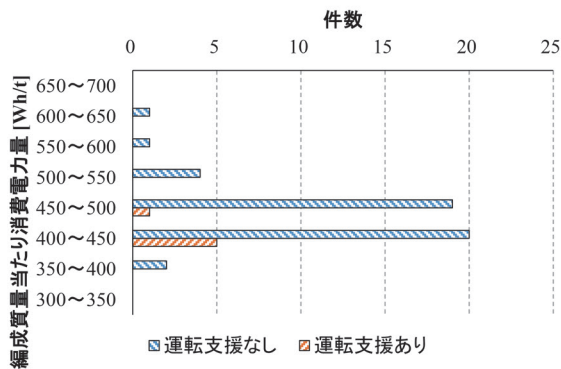
運転支援システムの有無による速度と電力の比較を、一例ではあるが、図 11 に示す。運転支援なしの条件については、定速運転の使用の有無で 2 例を示している。消費エネルギーは、運転支援ありが 481.1[Wh/t]、運転支援なし①（定速運転なし）が 559.2[Wh/t]、運転支援なし②（定速運転あり）が 601.0[Wh/t] である。運転支援ありの条件は、運転支援システムを活用することにより、全般的に力行運転、定速運転及び制動運転が少なくなっていると考えられる。特に、14：13～14：39 頃にかけては、運転支援システムを用いた場合には当該区間の大半を惰行運転で通過している。当該区間は、通過採時駅間が長く、勾配変化も多いため、運転士にとって通過時分の予測が難しく、運転支援システムの効果が発揮されやすい区間であると考えられる。また、運転支援ありの条件を定速運転を用いている運転支援なし②と比較すると、運転支援なし②は消費電力が小さくなっている箇所（概ね 1000[kW] 未満の箇所）が散見され、モータ効率の低い動作点で運転していることが確認できる。

表 2 評価対象条件

| | | 積車 | 空車 |
|------------|--------|-----------|---------|
| 編成質量範囲 [t] | | 1034～1454 | 426～556 |
| 評価対象データ件数 | 運転支援あり | 6 | 7 |
| | 運転支援なし | 47 | 36 |



(a) 区間 A



(b) 区間 B

図 9 消費エネルギー分布の比較⁹⁾

4.4 定時性の評価

運転支援システムの有無による通過時刻の比較を図 12 に示す。対象としたのは衛星測位システムの受信状況が良好と考えられる 12 駅として、時刻表により指定された通過時刻±15 秒以内を定時通過として評価した。これより、運転支援システムにより定時通過できた駅が増加していることが確認できる。

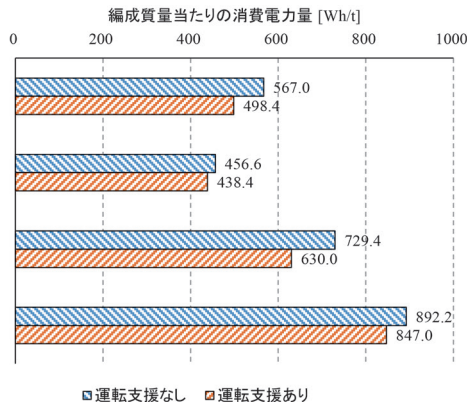


図 10 消費エネルギー平均値の比較⁹⁾

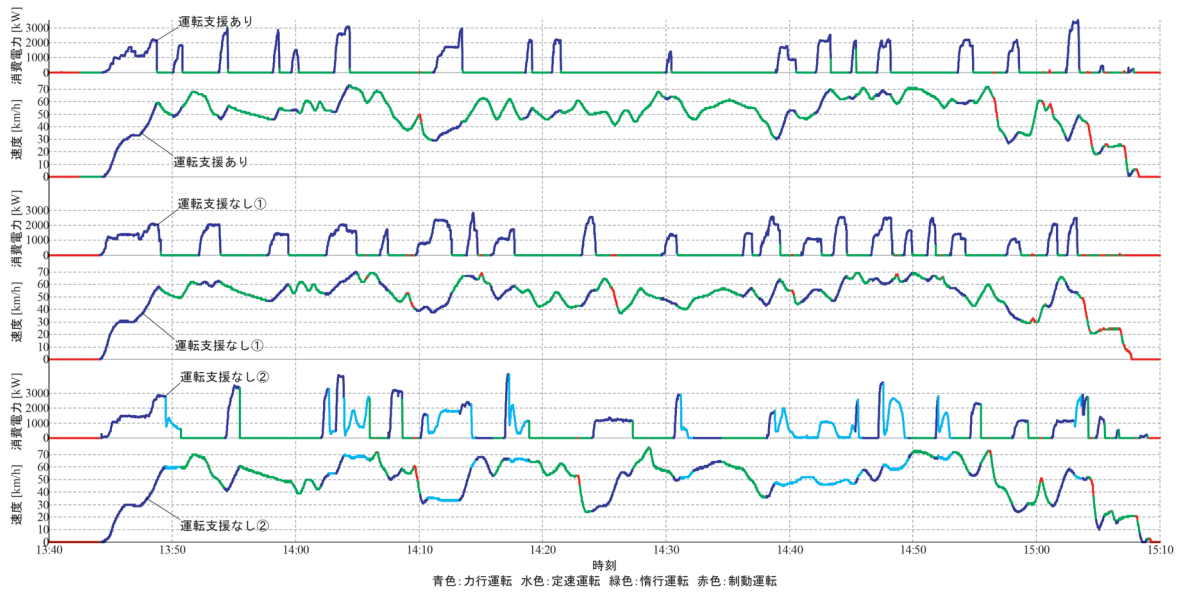


図 11 速度及び電力の推移⁹⁾

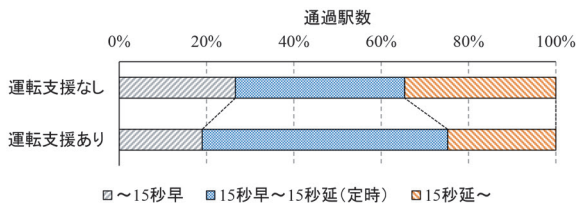


図 12 推定通過時刻の比較

5. おわりに

運転曲線予測により推奨運転方法を提示する運転支援システムを開発し、その定時性と省エネ性を検証した。タンク車をけん引する貨物列車にて検証した結果、運転支援システムにより、定時通過できる運転が増加するとともに、省エネ効果があることが確認された。その要因としては、時分調整のための加減速操縦を抑制できたこと、モータ効率の良い点にて運転できたことが挙げられる。また、消費エネルギーのばらつきの多い区間で運転支援の効果が発揮されやすいものと推測される結果が得られた。

謝 辞

本開発にあたり、日本貨物鉄道株式会社の関係各位に多大な協力を頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

1) 田邊茂人, 市川和男, 米山信三: 高速列車用ナビゲーションシステム, 鉄道総研報告, Vol.5, No.11, pp.47-54, 1991

2) 丸茂喜高, 清水勇介, 竹内亮佑, 網島均, 小島崇: 加減速操作位置提示による列車運転士の運転支援システムに関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.817, 2014

3) 青木健, 辻博史, 井山仁志, 小泉善裕, 外崎幸徳: 都市近郊線向け省エネ運転支援システムの実用化, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 415, 2017

4) 小田篤史, 牧健太郎, 堀聡美, 西野亨, 原田淳一: 省エネ運転支援システムの実証試験, 電気学会全国大会, 5-224, pp.350-351, 2017

5) 重田英貴, 大坪孝彰, 初本慎太郎, 植田和典, 小崎元嗣: 運転支援システム「PRANETS」の開発-On Board, On Demand, On Timeにて安全運転をサポートするシステムの開発-, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 301, 2008

6) 三輪隆, 大塚弘, 竹林貢, 梶原隆, 番匠谷隆, 仲尾浩, 尾崎尚: GPSを活用した運転士支援システムの開発, 第14回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, S7-4-1, pp.397-400, 2007

7) 山元雄太, 藤木登仁, 今永顕一郎: 運転支援用スマートフォンアプリの設計開発, 運転協会誌, Vol.60, No.2, pp.17-20, 2018

8) 小川知行: 走行抵抗特性とモータ効率特性を考慮した貨物列車の省エネ運転方法, 電気学会論文誌D, Vol.142, No.1, pp.50-57, 2022

9) 小川知行, 横内俊秀, 武内陽子, 齋藤達仁: 運転曲線予測による貨物列車向け運転支援システムの省エネ効果検証, 電気学会論文誌D, Vol.144, No.3, pp.87-93, 2024