

輸送分野の二酸化炭素排出量削減に向けて 列車のエネルギーの流れをさぐる



齋藤 達仁
Tatsuhito Saito
車両技術研究部
水素・エネルギー研究室
副主任研究員



小川 知行
Tomoyuki Ogawa
車両技術研究部
水素・エネルギー研究室
主任研究員

はじめに

鉄道は、ほかの輸送機関と比較して省エネルギーであるという特徴があります¹⁾。そのため、鉄道の利用割合を増加させることで輸送分野全体としての省エネ化や低炭素化が期待できます。輸送分野全体で見たときの鉄道の優位性は広く知られていますが、鉄道利用による省エネ効果を精度良く見積もるには、鉄道の利用区間ごとの消費エネルギーを把握しておく必要があります。

列車の消費エネルギーを把握する手法として、実際の走行を再現してその速度推移に基づいて消費エネルギーを計算する、走行シミュレーション²⁾が広く用いられますが、列車の走り方の再現のために運転操作を地点ごとに入力することなどに時間を要します。測定により列車の消費エネルギーを把握することも考えられますが、測定自体や結果の分析に時間を要します。

そこで、車両のエネルギーの流れに着目して考えてみます。車両の走行に必要なエネルギーは、電気や軽油から供給され、車両を動かす動力となった後、最終的には熱として失われます。このような車両のエネルギーの流れに着目して、列車の消費エネルギーを簡易に計算する手法を開発しました。この手法により、例えば自動車から鉄道に変えた場合の省エネ効果を利用区間

に応じて簡易かつ精度良く計算できます。本稿では、その概要を説明します。

車両のエネルギーの流れ

例として電車が1駅間を走行する場合について、架線からの電気エネルギーがどのように消費されるかを図1(a)に示します。図1(a)に示すように、架線から供給された電気エネルギーを用い、インバーターやモーター、歯車、車輪を通して車体を推進することで、車体を加速させたり登坂させたりすることができます。このときに、加速に使われたエネルギーは速度に応じた運動エネルギーとなり、登坂に使われたエネルギーは標高差に応じた位置エネルギーとなります。その過程で一部のエネルギーは各機器で熱となり損失となります。さらに、運動エネルギーは次の駅に停車するまでに走行抵抗やブレーキなどにより損失となります。最終的には図1(a)上側に示すとおり、架線から車両に供給された電気エネルギーは、主に車両が熱とし

② 走行シミュレーション

運転士の力行や制動などの操作を地点ごとに設定し、車体にかかる推進力や制動力、走行抵抗、勾配による力などを考慮して、計算機を用いて車体の運動方程式を数値的に解き、時々刻々の速度や消費電力を計算する手法です。

て失ったエネルギーになり、位置エネルギーも考慮すればエネルギー保存則が成り立ちます。始点と終点の位置エネルギーの差は、始点より終点の方が高い場合はその分のエネルギーが登坂のために必要となり、始点より終点の方が低い場合はその分のエネルギーは走行に使うことができます。このときの各エネルギーの時間変化を図1(b)に示します。前半では車両が力行して加速や登坂のために電力を使用し、運動エネルギーと位置エネルギーになります。後半ではブレーキにより運動エネルギーが損失になります。なお、今回は簡単のために力行、惰行、制動を1回ずつ行い、**回生**しない車両の場合を説明しましたが、回生する車両の場合は、モーターで発電することで運動エネルギーの一部を電気エネルギーに戻すことができ、その分は損失にはなりません。

車両のエネルギー損失

図1(a)下側に示した車両の走行時の主なエネルギー損失と、補機でのエネルギー消費について説明します。

回生

モーターにより制動力を発生させて発電した電気エネルギーを架線に戻すことです。

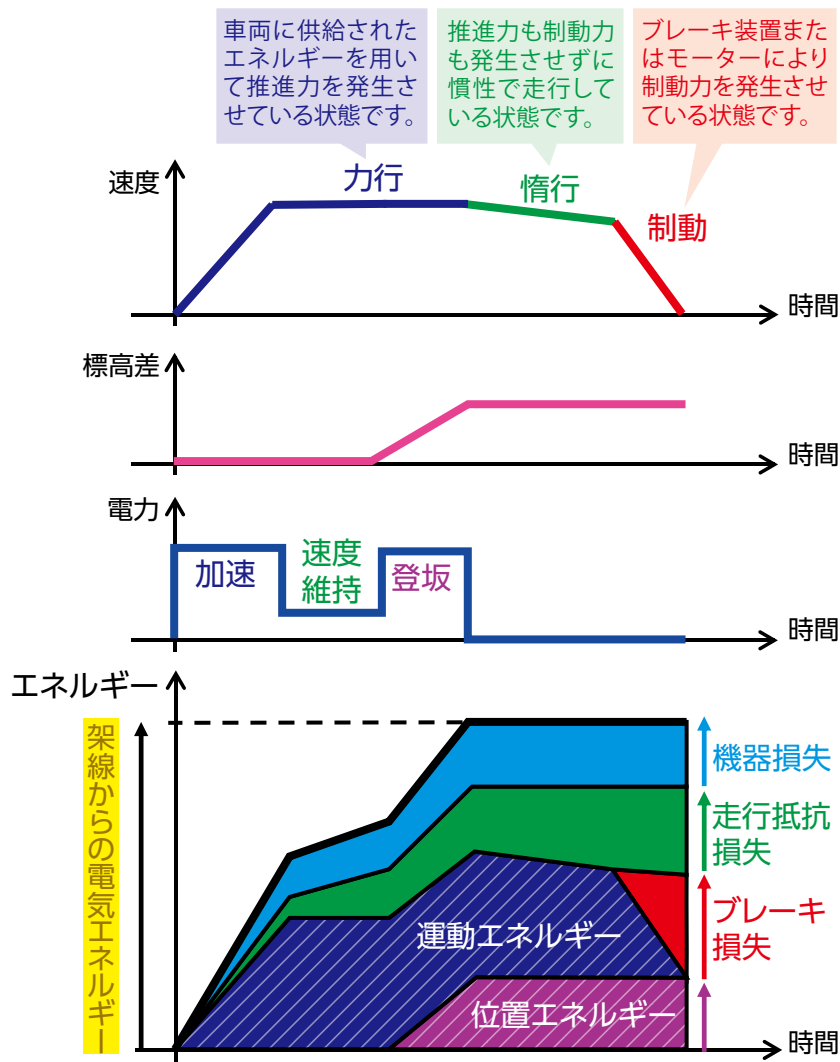
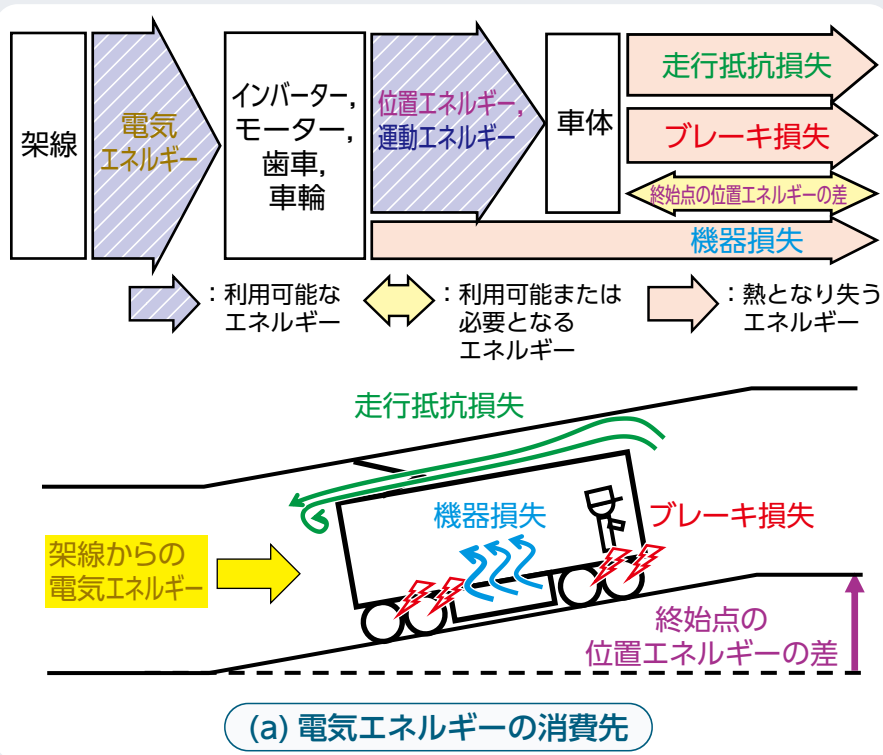


図1 車両の走行用エネルギーの流れ

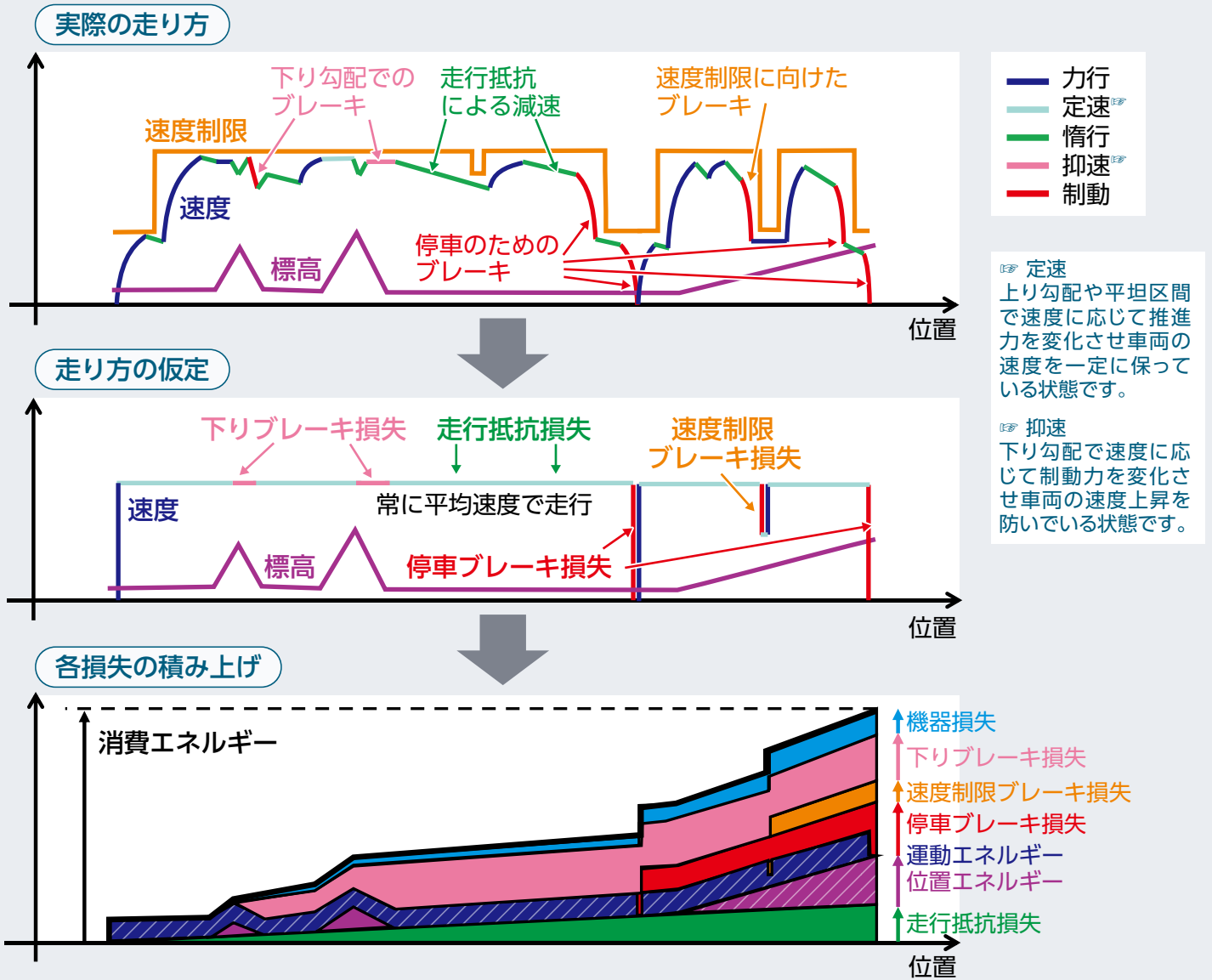


図2 走り方の仮定と損失の積み上げ

走行抵抗損失

車両の走行時には、車体が受ける空気抵抗や、駆動部の潤滑剤などの粘性抵抗、車輪とレールの転がり抵抗など、さまざまな要因で進行方向と逆向きの抵抗を受けます。これらをまとめて走行抵抗と呼びます。走行抵抗に逆らって走行することで損失が発生します。

ブレーキ損失

車両が制動する際には、回生されたエネルギーを除いて、機械ブレーキでの摩擦熱やブレーキ抵抗器でのジュール熱としてエネルギー

が消費されます。

機器損失

車両が力行する際には、インバーターやモーターではジュール熱、エンジンでは廃熱などが発生し、供給されたエネルギーの一部は失われます。回生時にも機器損失が発生します。

補機電力量

車両の空調や照明、空気圧縮機などの走行用以外の機器に使われるエネルギーです。厳密には損失ではありませんが、空調や照明などは連続的に使用されるため、車両全体の消費エネル

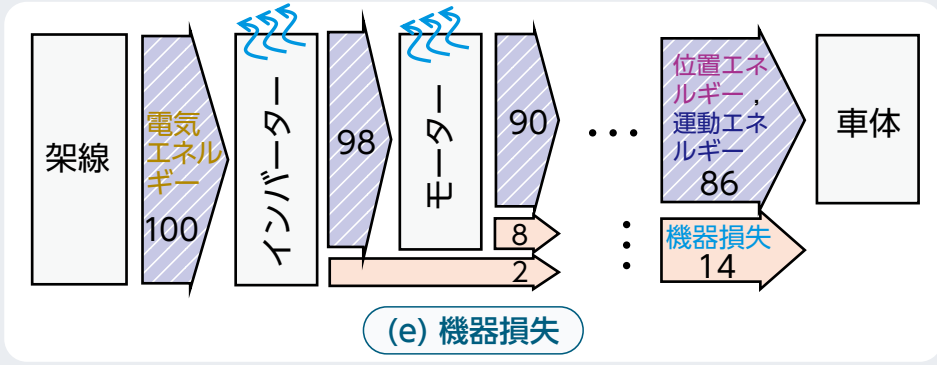
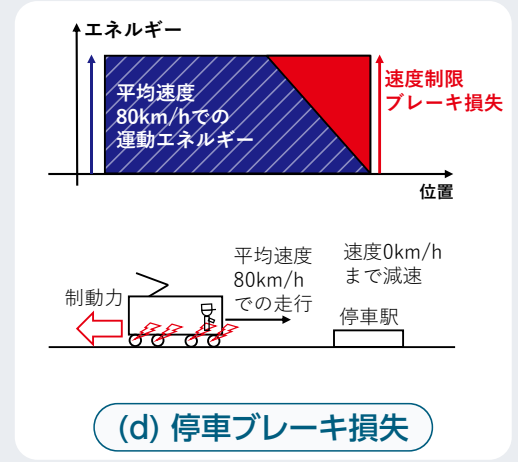
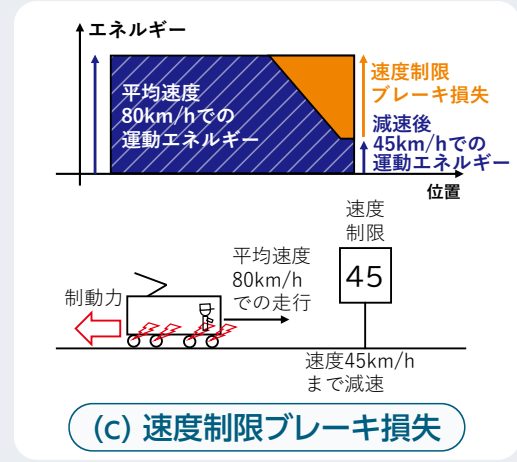
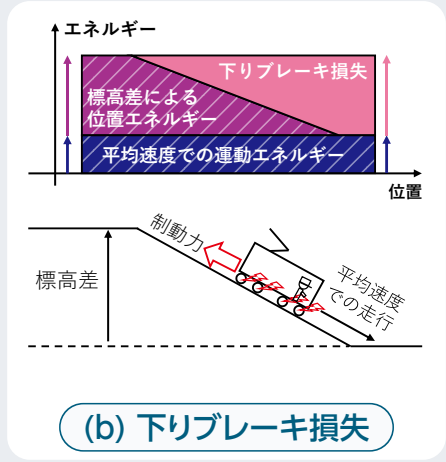
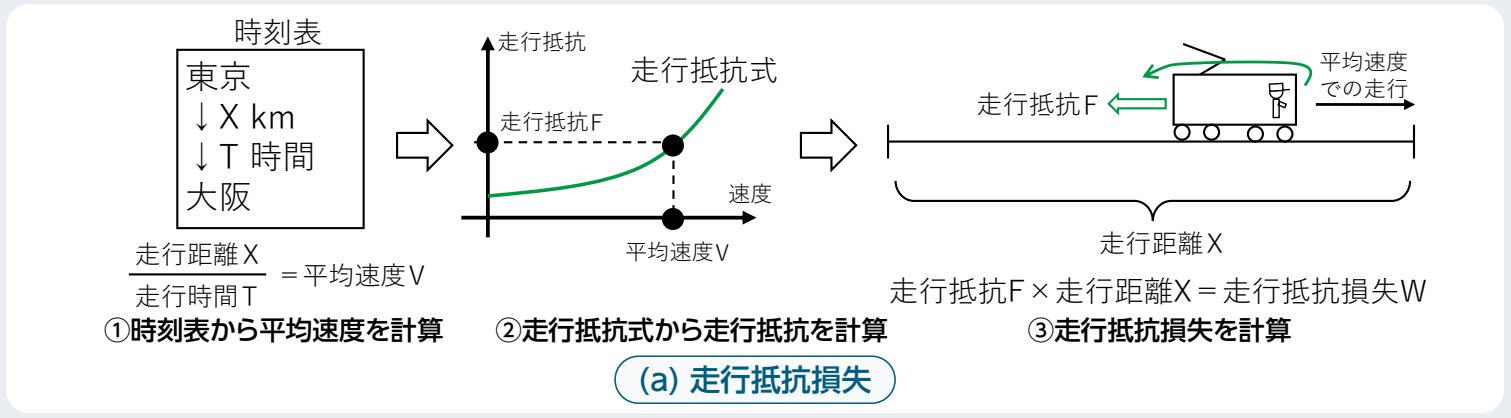


図3 主な損失の計算方法

ギーを求める際には考慮します。

消費エネルギー概算手法

鉄道総研が開発した、各損失の積み上げによる長距離列車向けの消費エネルギーの計算方法³⁾について説明します。図2に本手法の基本的な考え方を示します。本手法は貨物列車や特急列車のように長距離を多くの駅を通過して走行する列車を対象とします。そのような列車の走り方は、図2上段に示すように力行、惰行、制動などが複雑に組み合わせたり、このままでは

各損失の見積もりは困難です。そこで、図2中段に示すように平均速度で定速走行すると仮定することで、走行シミュレーションのような実際の走り方の再現を行わなくても、図2下段に示すように路線の標高などのデータに基づいて列車の走行条件を考慮して各損失を積み上げることができます。

図3と以下に、主な各損失の計算方法の基本的な考え方を示します。詳細にはより実際に近い値が得られるよう各種工夫もしています³⁾。本手法は過去に開発した手法⁴⁾と比較して、路

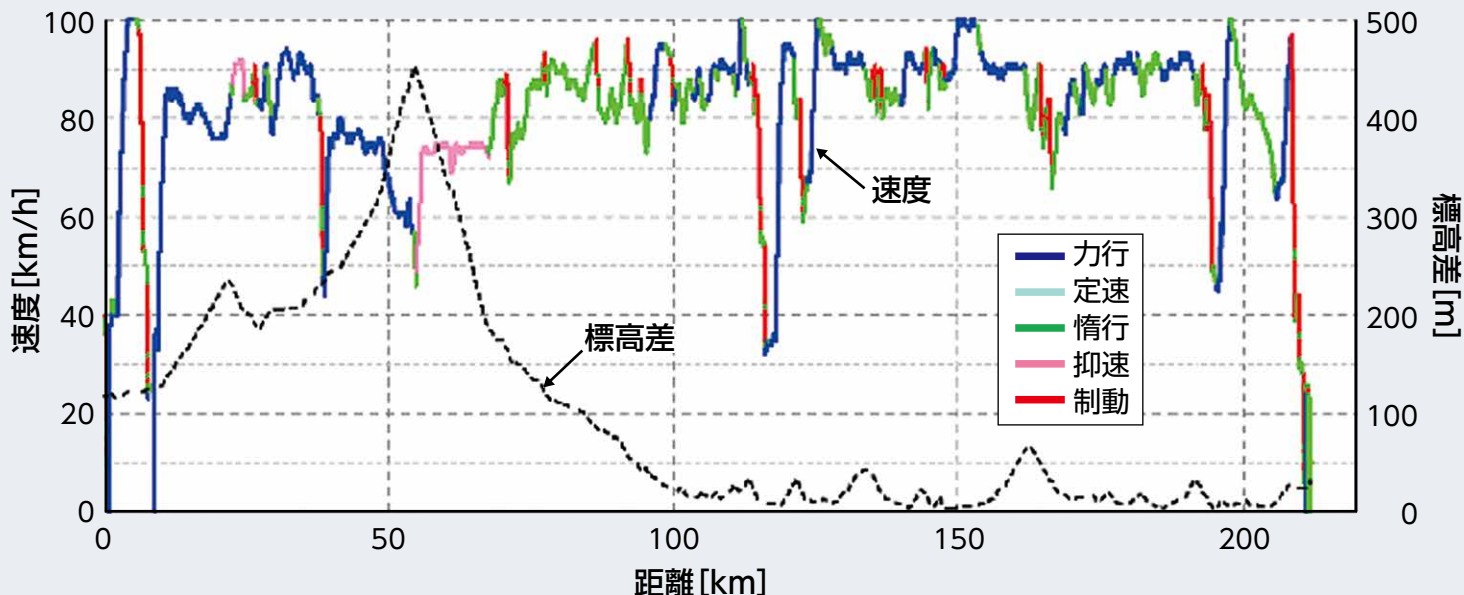


図4 ある列車の速度推移と標高差の例

線に応じた下り勾配や速度制限でのブレーキ損失も計算できることが特徴です。

走行抵抗損失

走行抵抗損失の求め方を図3(a)に示します。一定速度で走行する仮定の下、まず時刻表などを基に走行距離と走行時分から平均速度を求め(①)、次に走行抵抗式^④から平均速度での走行抵抗を求め(②)、最後に走行距離を乗じて走行抵抗損失を計算します(③)。

ブレーキ損失

ブレーキの要因として、下り勾配での速度上昇防止、速度制限に向けた減速、停車駅への停車を考慮し、それぞれのブレーキ損失を計算して合計します。

下り勾配でのブレーキによる損失(下りブレーキ損失)は、図3(b)に示すように、下り勾配ではブレーキをかけて一定の速度を維持すると仮定して、路線の下り勾配を下った合計の標

高差に相当する位置エネルギーをブレーキで失うとして計算します。

速度制限に向けたブレーキによる損失(速度制限ブレーキ損失)は、図3(c)に示すように、平均速度から各箇所の制限速度まで減速したと仮定した際に失う運動エネルギーを積算します。

停車でのブレーキによる損失(停車ブレーキ損失)は、図3(d)に示すように、各停車駅に平均速度から減速し停車したと仮定した際に失う運動エネルギーを積算します。

機器損失

上に示した各エネルギーを得るまでに車両の各機器で発生した損失を、図3(e)に示すように、各機器の効率を仮定して求めます。

補機電力量

一定の補機電力を走行時間分使用していると仮定して計算します。旅客列車の空調負荷は気温により大きく異なるので必要に応じて気温を考慮した値を設定します。

④ 走行抵抗式

測定試験や走行データ分析などにより求められる、編成の両数や質量をパラメーターとした速度の二次関数で表される走行抵抗を求める計算式です。車両形式ごとに異なります。

これらの計算結果を合計すると消費電力量を計算することができます。回生できる車両の場合は回生電力量も計算します。同様に、気動車

消費エネルギー [kWh]



図5 消費エネルギーの実測値と概算値の比較

の場合もエンジンの熱効率などを基に軽油使用量を計算できます。

計算結果例

本手法の計算結果と実際の消費エネルギーを比較した例を示します。図4にある列車のある区間の速度推移と始発駅からの標高差を示します。速度推移は運転方法により色分けしてあります。この区間は400m程度の標高差のある山間線区であり、急な下り勾配では桃色で示された抑速ブレーキを扱い速度を維持しています。この区間について、本手法による消費エネルギーの概算値と、実際の列車の走行時の消費エネルギー(実測値)を比較した結果を図5に示します。本手法ではこの山間線区では4割程度を占めるブレーキ損失なども考慮したことにより、誤差5%程度で概算できています。

二酸化炭素排出係数

列車の消費エネルギーに二酸化炭素排出係数を乗じることで求めます。二酸化炭素排出係数は電力や軽油を単位使用量だけ使用した際に排出される二酸化の量を表す係数です。環境省が温室効果ガス算定用として排出係数一覧を公表しています⁵⁾。

おわりに

低炭素社会の実現に向け、輸送手段や経路の見直しなどの低炭素化施策の削減効果試算のため、消費エネルギーや二酸化炭素排出量の計算のニーズが高まっています。今回示した長距離列車向けの消費エネルギー概算手法により、鉄道輸送の消費エネルギーを簡易に計算できるようになることで、低炭素化施策の削減効果試算により施策の実施判断に役立ち、輸送分野の低炭素化に貢献できると考えます。今後、より詳細に車両のエネルギーの流れをさぐることで、本手法の精度向上や検証を進めていきます。

RRR

文献

- 1) 国交省：運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (入手日: 2025/06/23)
- 2) 小川知行, 武内陽子, 森本大観: 列車運行電力シミュレータで省エネ効果を予測する, RRR, Vol.75, No.7, 2018
- 3) 齋藤達仁, 小川知行, 清水健人: 長距離列車向け消費エネルギー概算手法, 電気学会論文誌D, Vol.145, No.1, pp.1-8, 2025
- 4) 近藤稔, 小川知行, 村上浩一: 鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.41-46, 2011
- 5) 環境省: 算定方法・排出係数一覧, <https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/calc.html> (入手日: 2025/06/23)