

燃料電池電車のエネルギーシミュレーション手法

小川 賢一* 米山 崇* 小川 知行*
長谷川 均* 山本 貴光**

Method of Energy Simulation of Fuel Cell Train

Kenichi OGAWA Takashi YONEYAMA Tomoyuki OGAWA
Hitoshi HASEGAWA Takamitsu YAMAMOTO

Recently, an expectation for the practical use of a fuel cell railway vehicle has been growing, and a simulation technology of energy consumption of the vehicle is needed for a design study of the vehicle. At this time, we have developed a simulation model of the fuel cell railway vehicle by using “Hybrid-Speedy” that is the existing energy calculation simulator, and confirmed that the simulation model has certain accuracy, based on comparison with the actual running data. With the simulator developed by us, we evaluated consumed hydrogen energy by conditions of line alignments, environmental performance, and cruising performance of the vehicle.

キーワード：燃料電池，鉄道車両，走行シミュレーション，水素エネルギー，CO₂ 排出量

1. はじめに

昨今，燃料電池自動車の市販化や家庭用燃料電池の導入台数増加など，国内では水素・燃料電池技術の社会的普及が一段と進んでいる。このような影響も受けて，鉄道においても燃料電池電車に対する関心が一層高まっており，国内のみならず ALSTOM や中国中車のような鉄道の海外メーカもその開発を進めている。このような状況の中で，燃料電池電車の導入検討を行うため，水素消費量や CO₂ 排出量の評価が可能な汎用性の高いシミュレーション技術が求められていた。

こうした要望に応えるため，これまで鉄道総研が開発してきた車両走行エネルギーシミュレータである Hybrid-Speedy を応用した燃料電池電車シミュレーション手法を考案した。Hybrid-Speedy は，元来，走行時の運転曲線を生成し，走行による消費エネルギーを自動計算するシミュレータであるが，燃料電池電車には未対応であった。

そこで今回，既開発のシリーズ式ハイブリッド気動車用エンジンモデルと発電機モデルを組み合わせ燃料電池モデルを構成する方法を考案し，燃料電池電車の水素消費エネルギーの自動計算を可能とした。構成した燃料電池モデルについて，所内試験線にて実施した走行試験データを用いて精度を確認したところ，本シミュレーションによる水素消費エネルギーの予測値は試験データに対して 5% 程度の誤差であることを確認した。

さらに，燃料電池電車の導入検討に必要な燃料電池所要出力や CO₂ 排出量の試算などについて，考案したシミュレーション手法を用いて評価を行ったので報告する。

2. Hybrid-Speedy の概要

本章では，これまで鉄道総研が開発してきた Hybrid-Speedy の概要について述べる。Hybrid-Speedy は前述のように，運転曲線を生成しながら消費エネルギーを自動計算する車両走行エネルギーシミュレータであり，その計算フローは図 1 のようになっている。入力データとして，線路データ，車両モデル（主に車両性能），機器モデル（効率や出力など），走行状態による駆動系機器の動作モードがあり，それぞれについて必要な設定を行う。設定を完了しプログラムを実行すると，運転シミュレーションとエネルギーシミュレーションが相互に関連して進められる。

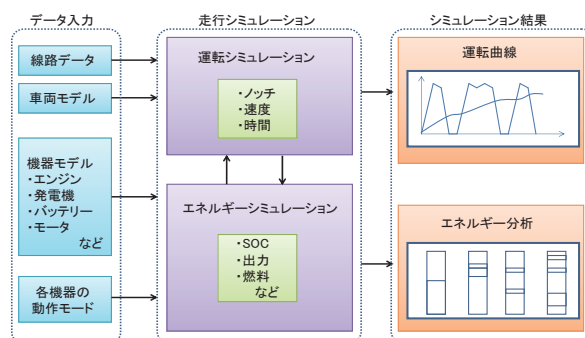


図1 Hybrid-Speedy の計算フロー¹⁾

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室

** 車両制御技術研究部

特集：車両技術

運転シミュレーションでは、指定した運転ノッチに基づき、車両速度や運転時分が計算される。一方、エネルギーシミュレーションでは、運転シミュレーションで決定された運転ノッチに応じて消費エネルギーが自動計算される。なお、蓄電池を搭載した車両についてはバッテリーの SOC (State of Charge = 充電率) も計算される。最終的に、運転曲線や燃料消費量などの走行シミュレーション結果が CSV 形式でデータ出力され、走行曲線やエネルギー損失の割合がグラフ化される。

3. 燃料電池電車モデル

本章では、既存の Hybrid-Speedy を応用した燃料電池電車モデルの構成方法について述べる。以下に、

- ・燃料電池電車モデルの基本諸元
- ・燃料電池モデルの構成方法
- ・燃料電池電車モデルの構成方法

の順に説明する。

3.1 燃料電池電車モデルの基本諸元

燃料電池電車のシミュレーションモデルを構成するにあたり、モデル化の対象として、鉄道総研所有の燃料電池試験電車 R291 (図 2) を選定した。車両諸元を表 1 に、主回路構成を図 3 に示す。なお、車両質量は概算値である。また、最高速度は所内試験線の最高制限速度によるものである。



図 2 燃料電池試験電車 R291

表 1 燃料電池電車の基本諸元

両数	2
列車長 (m)	40
車両質量 (kg)	70,000
最高速度 (km/h)	45
MT 比	0.5M1.5T
その他	ギア比 : 7.07, 車輪径 : 860 (mm)

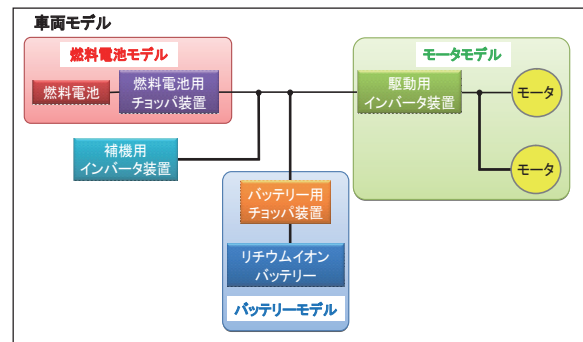


図 3 燃料電池電車の主回路構成

3.2 燃料電池モデルの構成方法

燃料電池モデルを構成するにあたり、設定が必要な項目は「燃料電池出力」と「水素消費率」である。この設定を行うため、シリーズ式ハイブリッド気動車で用いる「発電機モデル」で燃料電池出力を、「エンジンモデル」で水素消費率を設定し、これらを組み合わせることにより燃料電池モデルを構成する。

3.2.1 燃料電池出力の設定方法

発電機モデルでは、「回転速度」、「トルク」、「出力電力」、「効率」の間に次の関係がある。

$$\text{出力電力} = \text{回転速度} \times \text{トルク} \times \text{効率}$$

シリーズ式では発電機の運転状態は車両の運転状態から独立しているので、上記パラメータの内、任意の 3 つを任意に設定してモデルを構成できる。本シミュレーションでは、この出力電力を燃料電池出力と等価として検討を行う。

まず効率の設定方法について述べる。通常は発電機単体の効率を設定すべきであるが、ここでは電源部出力端の値として設定する。すなわち、設定する効率は主回路構成によって異なり、燃料電池に VVVF インバータ制御装置が直結で接続される構成では効率を 100% として設定するが、燃料電池の出力端に昇圧チョッパ装置を接続する構成では昇圧チョッパ装置の効率を設定する。なお、本検討では、効率を 98% 一定として設定した。

次にトルクの設定方法について述べる。まず、ある回転速度を設定し、この時の想定燃料電池出力（出力電力）と効率から逆算してトルクを求める。上記は燃料電池出力が一定の場合であるが、燃料電池の出力を車両速度やバッテリー SOC に応じて段階的に変化させる制御を行う場合には、各出力段ごとに計算したトルクを用いる。なお、発電機モデルでトルクを変更した場合は、次に述べるエンジンモデルのトルクも同じ値に変更する必要があるため留意が必要である。

3.2.2 水素消費率の設定方法

エンジンモデルでは、「回転速度」、「トルク」、「燃料消費率」が設定パラメータとなっている。回転速度およびトルクは発電機モデルで設定した値を設定し、燃料消費率（水素消費率）は燃料電池出力に対応する値を設定する。本検討では、鉄道総研が開発した100kW級固体高分子形燃料電池システムの実験結果から上記の関係を求め、燃料消費率を設定した。燃料電池出力に対する水素消費率は、使用する燃料電池システムにより異なるため、実際に合わせた設定が必要である。

以上の方法により、燃料電池出力と水素消費率の設定を行い、燃料電池モデルを構成した。

3.2.3 燃料電池電車モデルの構成方法

燃料電池電車モデルを構成するには、前項で構成した燃料電池モデル以外にモータ、バッテリー、補機のモデル設定と運転状態に応じた駆動系機器の動作モードの設定が必要である。各種機器モデルの設定を完了すると、車両モデル画面にて設定した機器モデルを選択できるようになり、燃料電池電車モデルを構成できる。以下に、燃料電池電車モデルの構成方法について述べる。

(1) バッテリーモデル

バッテリーモデルは、「内部抵抗モデル」または「効率モデル」のいずれかを選択できる。

内部抵抗モデルは、バッテリーがVVVFインバータ制御装置に直結される場合などに有効であり、「内部抵抗」のほか、「SOC-バッテリー電圧」の関係を設定する。バッテリー出力とバッテリー電圧からバッテリー電流を逆算して求めることができるため、バッテリーを仕様範囲内で使用できているかの確認も行うことができる。

効率モデルは、バッテリーの出力端にバッテリー用チョップ装置などの電力変換装置を接続する場合などに有効であり、「バッテリー容量」と「バッテリー充放電効率」が設定パラメータとなっている。

本検討では、図3に示した通り、バッテリーの出力端にチョップ装置を接続した主回路構成であるため効率モデルを採用し、バッテリー充放電効率を90%一定として設定した。なお、バッテリーの仕様は、鉄道総研の燃料電池試験電車で使用しているものと同様とした（表2）。

表2 バッテリーの仕様

タイプ	リチウムイオン
容量	36 (kWh) (60Ah × 600V)
最大充放電パワー	± 360 (kW)
SOC 使用範囲	20 ~ 80 (%)

(2) モータモデル

モータモデルでは、まず車両性能を決定し、これを基に「モータトルク」、「モータ回転数」、「効率」を設定する。効率は、モータ単体の効率ではなく、電源出力端～モータ端までの間に接続される全ての機器の総合効率を設定する点に留意が必要である。本検討では、インバータ効率を97.5%、誘導電動機効率を92%と仮定し、これらに乗じて総合効率を90%と設定した。また、車両性能は所内試験線での実車走行データを基に、表3のように設定した。

表3 車両性能

最大引張力	31 (kN/編成)
最大加速度	1.5 (km/h/s) 程度
最大制動力	31.5 (kN/編成)
最大減速度	1.5 (km/h/s) 程度

(3) 補機電力

補機電力は一定とみなして設定する。本検討では、実車走行データから補機消費エネルギーを求め、走行時間で除して平均電力を設定した。

(4) 駆動系機器の動作モード

運転状態に応じて駆動系の動作モードを設定する。本検討では燃料電池出力が実車走行データと同様の動作になるよう設定を行った。詳細は、4.1項で述べる。

以上の設定を行い、燃料電池電車モデルを構成した（図4）。

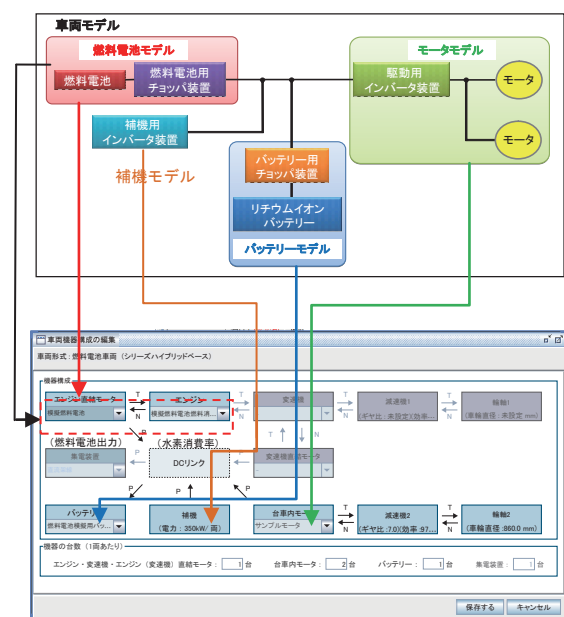


図4 燃料電池電車モデルの構成

特集：車両技術

4. 燃料電池電車モデルの精度検証

前章で構成した燃料電池電車モデルの精度検証を、所内試験線にて実施した走行試験データを用いて行ったので、以下に述べる。

4.1 精度検証に用いる実車走行条件の抽出

燃料電池電車モデルの精度検証のため、所内試験線での実車走行データから表4に示す2つの走行条件を抽出し、同条件の走行シミュレーションで計算した水素消費量を比較して精度を検証した。各走行条件の違いは、回生動作をOFFとする速度が異なることと燃料電池出力および補機消費電力が異なることである。

実車では、車両速度、バッテリーSOC、車両の運転状態により燃料電池出力を変化させる制御を行っており、回生時はバッテリーが過充電とならないように一時的に燃料電池出力を抑制している。走行データにおいても、回生時とそれ以外の運転状態で燃料電池出力がほぼ2値で切り換わる波形となっていたため、これと同様の出力動作になるように燃料電池の動作モードを設定した。なお、実車では燃料電池の劣化を抑制するため、回生動作の切換時に燃料電池用チョップ装置で5秒程度の時定数を設けて出力を変化させているが、シミュレーションでは時間遅れなしで応答するものとした。

表4 精度検証に用いた走行条件

走行条件	内容
走行条件 A	(a) 走行方法 ・加速：力行 5N で最高速度 45km/h まで加速 ・惰行：45km/h を超えたらノッチオフ ・減速：定点から回生ブレーキのみで速度 15km/h 以下まで減速。惰行後、機械ブレーキ単独で定点に停車 (b) 燃料電池出力 ・力行時、惰行時、停車時：85kW 一定 ・回生時：10kW 一定 (c) 補機消費電力 12kW (1 走行あたりの平均電力)
走行条件 B	(a) 走行方法 ・加速：力行 5N で最高速度 45km/h まで加速 ・惰行：45km/h を超えたらノッチオフ ・減速：定点から回生ブレーキのみで速度 5km/h 以下まで減速。惰行後、機械ブレーキ単独で定点に停車 (b) 燃料電池出力 ・力行時、惰行時、停車時：43kW 一定 ・回生時：14kW 一定 (c) 補機消費電力 17kW (1 走行あたりの平均電力)

4.2 実車走行データとの比較

走行条件 A での走行曲線の比較を図5に、各運転時間を表5に示す。走行シミュレーションの方が力行時間、回生時間、全走行時間がやや短くなっている一方で、惰行時間が長くなっている。この原因として、引張力や走行抵抗、路線データなどに実態と差異がある可能性が考えられる。各運転時間に若干の差異はあるものの、概ね実車に近い走行曲線を模擬できていることを確認した。

次に、走行条件 A で所内試験線を1片道走行した時のモータあたりのパワー曲線の比較を図6に示す。

モータの電力曲線の比較からも、力行状態からノッチオフするタイミングが走行シミュレーションの方が若干早くっており、これに伴ってモータパワーが実車よりも早く立ち下がっている状況を確認した。一方、回生時は概ね同様の波形となっていた。走行条件 A の燃料電

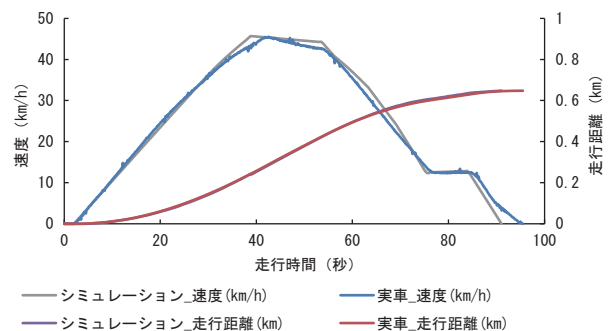


図5 1片道分の走行曲線の比較（走行条件 A）

表5 1片道の各走行状態の運転時間比較

各運転時間	実車走行	シミュレーション
力行時間 (秒)	41	39
惰行時間 (秒)	10	15
回生時間 (秒)	24	22
全走行時間 (秒)※	94	91

※回生後の惰行時間および減速・停車時間を含む。

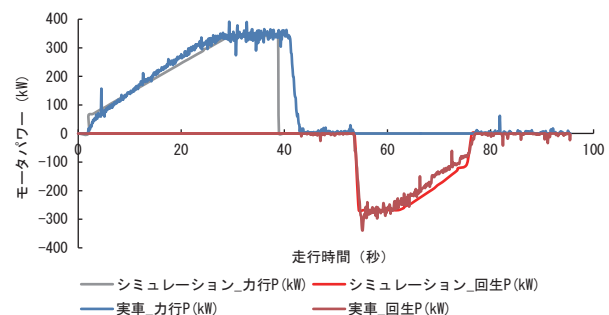


図6 モータあたりの電力曲線の比較（走行条件 A）

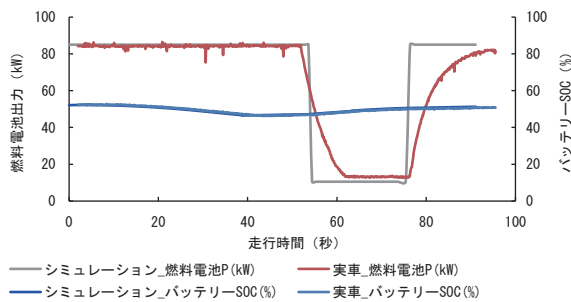


図7 燃料電池出力とバッテリー SOC の比較

表6 水素消費量等の比較（条件 A, 1 往復）

	実車 走行	シミュレ ーション	誤差 (%)
走行距離 (km)	1.297	1.296	0.1
走行時間 (s)	185.3	180	2.9
バッテリー放電量 (kWh)	1.008	1.026	1.8
FC 出力エネルギー (kWh)	3.38	3.41	0.9
水素消費量 (kg)※	0.21	0.20	5.0

※1 走行あたりの水素圧力データは測定ノイズが大きく適切な値を把握できないため、水素圧力の時間に対する変化（温度、圧縮係数等も考慮）を一次線形近似により行い水素消費量を求めた。

池出力とバッテリー SOC の比較を図7に示す。

前述したように、走行シミュレーションでは燃料電池の過渡的な出力変化を考慮していないため、出力変化の状況に差異が見られたが、バッテリー SOC は、概ね実車と同様の波形となっていることが分かった。

次に、実車とシミュレーションで位置エネルギーの差異による誤差が出ないように、所内試験線 1 往復分のシミュレーションを行い、水素消費量について比較を行った。なお、停車中の消費量は、評価の対象から除外した。表6にその比較を示す。

表6から、水素消費量の誤差は5%程度であることを確認した。誤差を生じた要因としては、実車では大量の水素を計測可能な装置が無いため、走行前後の温度、圧力、圧縮係数を考慮して水素消費量を計算で求めている一方で、シミュレーションでは燃料電池出力と水素消費率の関係式を用いて水素消費量を求めているため、これらの誤差が積み重なったことにより生じたものと考えられる。走行条件 B についても走行条件 A と同様の結論となった。

以上の検討から、構成した燃料電池電車モデルについては、実際の水素消費量に対して5%程度の誤差範囲で計算できることが分かり、既存のエンジンモデルと発電機モデルを組み合わせで燃料電池モデルを構成できることが分かった。

5. 燃料電池電車シミュレーション手法の活用

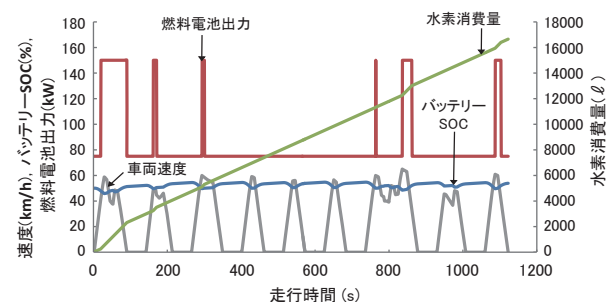
燃料電池電車の導入にあたっては、燃料電池の所要出力や水素搭載量の検討のほか、燃料生成～車両での消費までを包含する総合的な CO₂ 排出量の評価、またバッテリー電車との航続距離による棲み分けの検討などが必要になると考えられる。そこで本章では、考案した燃料電池電車のシミュレーション手法を活用して、上記について検討を行った。

5.1 線形条件による燃料電池出力・水素搭載量

燃料電池の所要出力や水素搭載量は、勾配や路線長などの線形条件によって変わると考えられる。そこで本項では、比較的、平坦な所が多く路線長が10km未満の線形（低勾配・短距離条件）と、30%以上の連続勾配があり、且つ路線長が80km程度の線形（急勾配・長距離条件）の2つを想定して、燃料電池電車のエネルギーシミュレーションを行った。図8に低勾配・短距離の線形条件でのシミュレーション例を示す。

図8から、燃料電池の出力レベルを切り換えて、バッテリーの充電レベルを一定範囲内に保ちながら走行できていることが分かり、また水素消費量の計算も適切に行われていることを確認した。

また、各線形条件について燃料電池の所用出力をシミュレーションにより求めたところ、低勾配・短距離条件では150kW、急勾配・長距離条件では300kWが必要となる結果となった。また、低勾配・短距離条件で、日車キロ250kmを想定して水素搭載量を計算した結果、1両あたり50kgの水素が必要となることが分かった。

図8 燃料電池電車の走行シミュレーション例
（低勾配・短距離の線形条件）

5.2 燃料電池電車の CO₂ 排出量の評価

燃料電池電車の総合的な CO₂ 排出量は、燃料となる水素の製造方法によって変わるため、燃料生成～車両での消費で評価する必要がある。そこで、気動車を比較対象として同路線を燃料電池電車と気動車で走行させた場合の燃料消費エネルギーをシミュレーションにより求め

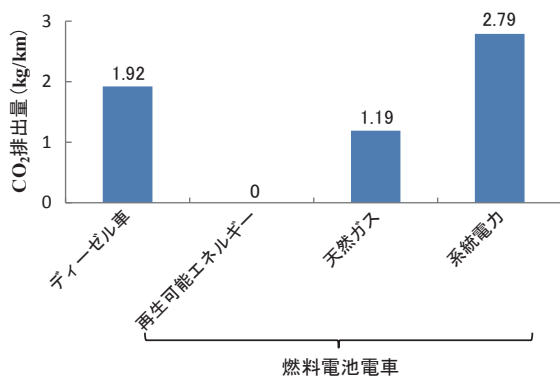
特集：車両技術

表7 消費エネルギーの比較

車種	燃料消費エネルギー
燃料電池電車	16.6 (MJ/km/両)
ディーゼル車	27.8 (MJ/km/両)

表8 評価に用いた CO₂ 排出係数^{2) 3)}

エネルギー種別	CO ₂ 排出係数
水素 (kg/Nm ³)	・再生可能エネルギー : 0 ・天然ガス : 0.761 ・系統電力 : 1.78
軽油 (kg/ℓ)	2.619

図9 CO₂ 排出量の比較例

た(表7)。

上表の結果から、車両単独で見た場合は、燃料電池電車への置き換えにより4割程度の省エネルギー効果がある結果となった。次に、表8に示すCO₂排出係数を用いて燃料消費エネルギーからCO₂排出量に変換して、燃料電池電車とディーゼル車で比較を行った(図9)。

図9の結果から、燃料電池電車のCO₂排出量は水素製造方法に依存し、太陽光発電による水の電気分解など再生可能エネルギーを用いて水素を製造すればCO₂フリーとなり、系統電力を用いて水素製造を行うとディーゼル車よりもCO₂排出量が悪化する可能性もあることが分かった。

5.3 燃料電池電車の航続性能の評価

路線長の比較的短い非電化区間では、ディーゼル車両の代替としてバッテリー電車の投入が考えられるが、充電ポスト間の走行距離が長くなるとバッテリーの搭載量が増え、質量増加に留意する必要がある。一方、燃料電池電車では水素タンクの本数を増やす必要がある。

そこで、燃料電池電車が質量面で優位性を持つ走行距離を明確にするため、走行距離に対する車両質量増

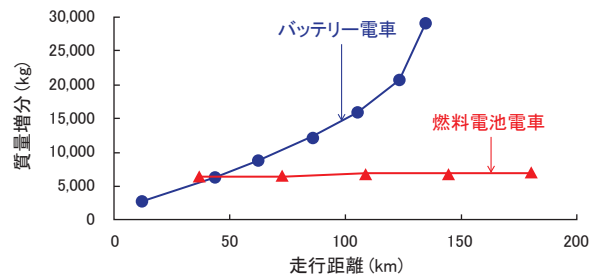


図10 航続距離と質量の比較

加の傾向を求めた⁴⁾。検討にあたり、燃料電池試験電車R291での製作実績から、35MPa 高圧水素タンクの質量あたりのエネルギー密度を1.64 (kWh/kg)とし、リチウムイオンバッテリーを0.03 (kWh/kg)として、航続性能の比較を行った(図10)。

図10から、今回の条件では、走行距離が40km程度で、バッテリー電車よりも燃料電池電車の車両質量が軽くなる可能性があり、また走行距離延伸に対する質量増加がバッテリー電車に比べて緩やかになることが分かった。

6. まとめ

鉄道総研がこれまで開発したHybrid-Speedyを応用した燃料電池電車のエネルギーシミュレーション手法を考案した。実車走行データとの比較により、5%程度の誤差範囲で水素消費量を計算できることが分かり、燃料電池電車の導入検討を行うのに有用であることを示した。さらに、考案したシミュレーション手法を活用して、線形条件による燃料電池の所要出力等の算出や燃料生成～車両での消費でみたCO₂排出量の比較のほか、航続性能の評価など燃料電池電車の導入検討に必要な事柄について検討を行った。今後、より実用的な燃料電池電車のシミュレーション技術の開発に向けて、取り組みを進める。

文献

- 1) 小川知行他：「汎用鉄道車両走行シミュレータの開発」、電気学会交通・電気鉄道研究会 LD-14-067, TER-14-030, 2014.7
- 2) 経済産業省、資源エネルギー庁 燃料電池推進室：水素の製造、輸送・貯蔵について、p.15, 2014.4.14
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁 総合政策課：エネルギー源別標準発熱量一覧表, 2015.4.14
- 4) 小川賢一他：「燃料電池電車とバッテリー電車の航続距離に関する検討」、平成28年電気学会全国大会