

学[電] ○伊藤智昭(横浜国大院) 正[電] 河村篤男(横浜国大院)

Construction of Evaluation Simulation of Hybrid Railway Vehicle
Which Aims to Prolong Life of Hydrogen Fuel CellAtuso Kawamura, Yokohama National University, Tokiwadai 79-5, Hodogaya, Yokohama City, Kanagawa
Tomoaki Ito, Yokohama National University

The hybrid railway vehicle consists of hydrogen fuel cell and battery. In this hybrid railway vehicle, the maintenance costs is higher than existing diesel vehicle since this system has to replace the fuel cell. To solve this problem, it is necessary to decrease in starting and stopping frequency for longer life of fuel cell. In this paper, first, we introduce the method to evaluate the starting and stopping frequency of fuel cell qualitatively. Next, we developed the simulation program to measure energy supply in order to achieve longer life of fuel cell.

Key word: hybrid railway vehicle, fuel cell, operating time, number of start-stop

1 はじめに

地球環境問題の観点から様々な分野において環境に負荷をかける CO_2 や NO_x などの排出量削減が取り組まれている。特に自動車ではプリウスのようなハイブリッド自動車の研究・開発が盛んに行われている⁽¹⁾。そして近年、鉄道業界もバッテリーを用いたハイブリッド車両の研究が世界で盛んに行われるようになってきている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。ハイブリッド車両の利点としては以下の3点が挙げられる。

- 電化区間と非電化区間の相互運転が可能になる
- ハイブリッド車両により燃料消費の削減が認められるため、車両からの排気ガスが減少し既存のディーゼル車両に比べて環境への負荷が低減する
- エンジンから発生する振動・騒音が減少するため車内・車外の快適性の向上が可能になる⁽⁵⁾。

以上のように、従来の気動車に比べてメリットの多いハイブリッド車両であるが、特に水素燃料電池(FC:Fuel Cell)を用いたハイブリッド鉄道車両も研究されており、更なる CO_2 などの削減が実現している。しかし、FCの寿命による交換にかかる費用は、燃料電池1個当りの値段が高いことに加え⁽⁶⁾、鉄道車両ということでFCの容量が大きいため、非常に高価なものになってしまう。また、FCハイブリッド鉄道車両のエネルギーマネジメントを考えた論文⁽⁷⁾はあるがFCの寿命と交換コストや燃料代まで考慮されているものがない。

FCを長く使用するためには、電池の起動停止頻度および連続運転時間を減らし効率よく運用することが重要である。そこで、本研究では実際の平坦線区をモデルとして用意し、FCの寿命をできるだけ長く用いることができるような出力エネルギーの制御モデルを構築する。

2 前提条件

2.1 車両性能

本研究で対象とする車両の主回路システム構成を図1に、表1に本研究で想定する車両諸元を示す。主回路電圧を1500Vとし、FCの出力電圧を600~900Vと仮定する。チョップパを2つ用いることで、変換効率による電力ロスが生じるもののFCおよびバッテリー出力電圧の高压化を不要として

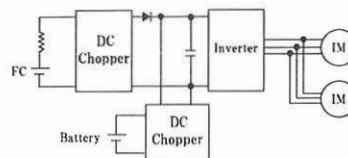


Fig. 1 車両の主回路システム構成

Table 1 車両諸元

車両編成	n	2[cars]
重量	M_v	33.0[t]
起動加速度	α	2.1[km/h/s]
常用減速度	β	2.1[km/h/s]
モーター数	N	4[motors]
IM 効率	η_{im}	92%
インバータ効率	η_{inv}	97.5%
チョップパ効率	η_{chop}	97.5%
バッテリー変換効率	η_{bat}	91%
バッテリー容量	E_{bat}	36.0[kWh]

いる。また、FCとバッテリーそれぞれにDC/DCチョップパを接続することで、独立に出力を決定することができる。

また、車両の加減速性能を図2に示す。

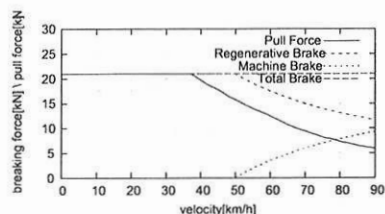


Fig. 2 加減速性能

加速における最大引張力を21kNとする。さらに、減速時におけるブレーキ力 F_{bmax} も21kN一定とする。ただし列車

の速度が高速である場合、回生ブレーキ力は低下するため機械ブレーキを併用して、ブレーキ力を一定に保つ。車両速度 v [km/h]における機械ブレーキで消費されるエネルギー E_{mb} は(1)式より求め⁽⁸⁾。

$$E_{mb} = \begin{cases} 0 & \text{for } v < v_b \\ \frac{E_{bmax}}{2\beta} (v - v_b)^2 & \text{for } v \geq v_b \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 v_m は機械ブレーキ終端速度で50[km/h]と仮定する。

2.2 燃料電池性能

車両に搭載することを想定したFCの性能を表2に示す。FCの種類は固体高分子形燃料電池(PEFC)とする。

Table 2 燃料電池の性能

水素ガス容量	0.720m ³
FCの最大出力電力	120[kW]
FC変換効率	48.4%
FCの燃費	0.030[kg/kWh]

2.3 想定線区

シミュレーションを行う上で列車の走行を仮定するため線区を想定する必要がある。今回、勾配変化の少ない平坦路線をモデルとした。線区の勾配変化と駅的位置を示したグラフを図3に示す。想定線区では停車駅数を14駅、総走行距離34.23kmとした。図3の路線は標高が約30mあたりで推移しており、急勾配区間がほとんどない。また、駅間も平均すると約2.2km程度と短という特徴も持っている。すなわち、駅付近の加速減速の影響が大きく、エネルギー変化は少ないのではないかと考えられる。

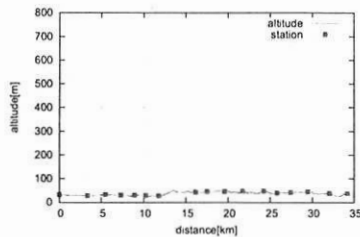


Fig. 3 平坦路線

3 燃料電池およびバッテリーのエネルギー配分制御方法

3.1 制御手法

制御手法を提案する上で目標条件を以下のように設ける。

- FCの起動停止頻度の最小化
- FCの連続運転時間の最小化
- 消費燃料の最小化

上の2つはFCの長寿命化に必要なことで、最後の条件は燃料代削減を実現するためのものである。これをFCの交換コストすなわち電池代の燃料代の合計で評価を行う。

以上の条件を満たすためのエネルギー制御法を提案する。SOCの最大値 SOC_{max} と最小値 SOC_{min} を決定した後、図4のような出力を行う。

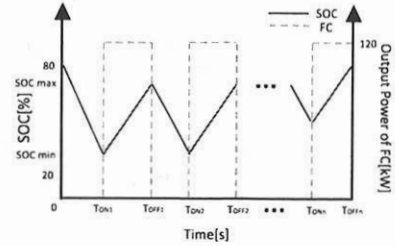


Fig. 4 制御手法の概略図

なお今回、SOCの最大値は80%固定とする。まず、 SOC_{min} までバッテリーのみで走行する。次に、SOCが80%に達するまでFCの出力120kWを出力する。80%に達したらFCの運転を停止、再びバッテリーのみで走行する。以下このサイクルを繰り返す。そして終点に近づいたらSOCを80%に戻すため、途中からFCの出力を開始する。

次に、車両走行状態(加速・惰行・減速・停止)におけるFCおよびバッテリーのエネルギー配分方法を以下に記述する。なお、SOCが20から80%に回復するためにFCから電力120kWを出力している条件である。

- 加速： $P \leq P_{FC} = 120$ [kW]のときは必要電力 P を全てFCから供給を行う。一方、 $P > P_{FC}$ のときFCおよびバッテリーから出力を行う。すなわち、加速時のFCおよびバッテリーの出力電力は図5のようになる。

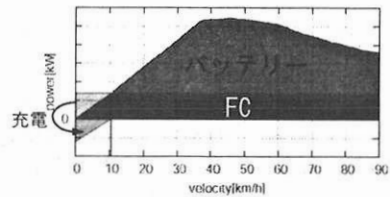


Fig. 5 加速時のエネルギー配分

なお、必要電力 P [kW]は引張力 F [kN]、速度 v [km/h]としたとき次式から求める。

$$P = \frac{1000 \cdot F \cdot v}{9.8 \cdot 367} \quad (2)$$

- 惰行・停止：FCの出力電力 P_{FC} をバッテリーへ充電する。
- 減速：FCの出力電力 P_{FC} と回生エネルギーをバッテリーへ充電する。

3.2 コスト計算方法

コストを計算する上で必要となるのがFCの交換コストと水素の燃料代である。FCの交換は寿命条件に達したときに行うものとする。FCのコストについては2015年に電池代が今の1/10となると予想し、1回あたりの交換コストを1200万円とする。FCの寿命に大きく関係する耐久性は主に連続運転時間と起動停止回数によるものである。今回、NEDO(新エネルギー・産業技術開発機構)を参考とし、5000時間作動および6万回の起動停止頻度を可能とするFCを仮定する。また、燃料代もNEDOを参考とし445円/kgとする。

Table 3 コストと耐久性

	値段	連続運転時間	起動停止回数
水素	445 円/kg	—	—
FC	10 万円/kW	5000 時間	60000 回

まず、1往復当りの連続運転時間 T_{day} は図4より次式で求める。

$$T_{day} = \sum_{i=1}^n (T_{OFFi} - T_{ONi}) \quad (3)$$

ここで、 T_{OFFi} はFCの運転が停止する時間[s]、 T_{ONi} は運転が開始する時間である。想定路線の1日当りの運転を4往復と仮定したとき、1往復当りの起動停止回数を F_{day} 、連続起動運転時間を T_{day} からそれぞれの耐久性によるFCの寿命は次式となる。

$$D_F = \frac{60000}{4F_{day}} \quad (4)$$

$$D_T = \frac{5000}{4T_{day}} \quad (5)$$

式(7)は起動停止回数に、式(8)は連続運転時間によってFC寿命の日数が依存する式である。また、2つの結果から値の小さいほうを耐久日数 D_n として用いる。

次に、運行日数 D_n 、燃料代 C_{fuel} [万円]としたときの全コスト C_{total} [万円]は次式から求める。

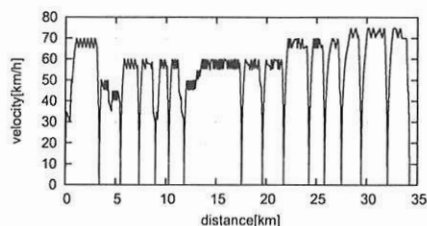
$$C_{total} = 1200 \cdot \left(1 + \frac{D_{run}}{D_n}\right) + C_{fuel} \cdot D_n \quad (6)$$

ただし、 D_{run}/D_n の分数の部分は小数点以下を切り上げる。年間運転日数を350日とし10年間車両を使用したときの全コスト C_{total} [万円]を求める。

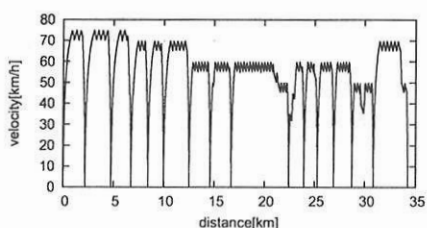
4 提案方式の数値シミュレーションによる評価

4.1 シミュレーション条件

提案する手法のコストを走行シミュレーションによって検証を行う。想定線区におけるシミュレーションでは、実際の平坦路線を参考としており列車の走行速度は駅間により変化している。図6に走行パターンを示す。なお(a)が往路運転、(b)が復路運転である。なお、列車は各駅運転を想定している。駅間において設定されている最高速度または曲線などによる制限速度に達したら惰行に入り、走行抵抗により速度が低下したら再加速する「のこぎり運転」をおこなう。また、各駅での停車時間を30sと仮定する。



(a) 往路運転



(b) 復路運転

Fig. 6 運転曲線

4.2 FC寿命およびコスト計算結果

SOCの最大値 SOC_{max} を80%に固定しSOCの最小値を20~75%に変化させたときの、1往復当りのFC連続運転時間を図7に起動停止回数を図8に示す。

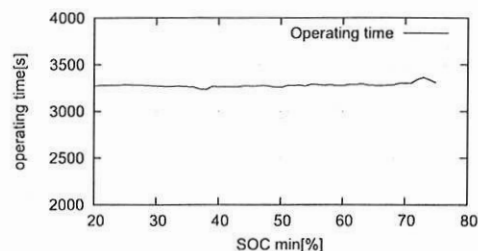


Fig. 7 1往復当りの連続運転時間

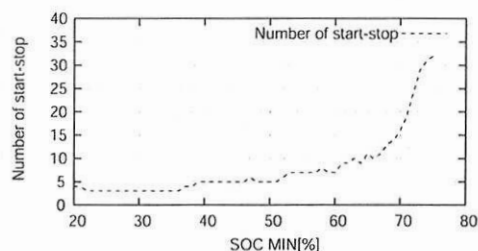


Fig. 8 1往復当りの起動停止回数

図7より連続運転時間はSOCの最小値の値に関係なく、3200s付近ではほぼ一定値となっている。しかし、SOCの最小値が大きくなるにつれ図8より起動停止回数が上昇していることが見受けられる。SOCが50%のところでは回数が5回に対して、75%では32回に増えている。つまり、連続運転時間はSOCの最大値と最小値の差が変わってもほぼ一定となっているが、一方、SOCの差が小さくなると起動停止回数は増加する。すなわち、FCの寿命を考える場合、起動停止回数を減らすためにSOCの差はある程度大きめにとる必要がある。

次に、起動停止回数による寿命日数 D_F と連続運転時間による寿命日数 D_T を表した結果を図9に示す。

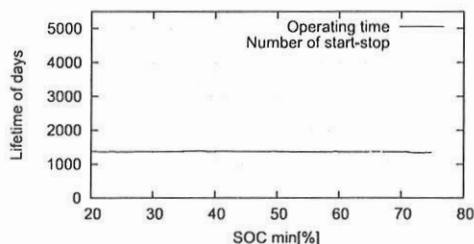


Fig. 9 FCの寿命日数変化

SOCの最小値が66%と64%のところで2つの要素が交わっている。つまり、SOCの最小値が66%より大きければFCの寿命は起動停止回数に依存する。一方、66%より小さければFCの寿命は連続運転時間に依存する。よって、FCの寿命をより長く使用するためには、 D_F と D_T が交差するところよりもSOCの値が低く、かつ D_T の値が最も大きくなる場所である。SOCの最小値が20%の場合、SOCが38%ならば $D_T = 1389$ [日]となり最もFCの寿命が長持ちする。

次に、燃料代を考慮したときの全コストを表した結果を図10に示す。なお、このときのSOCの最小値は20%とする。

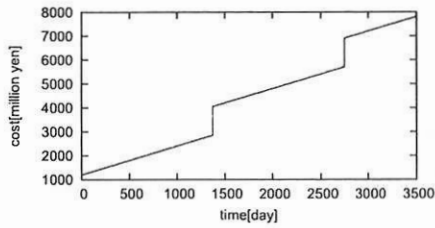


Fig. 10 SOCの最小値20%のときの全コスト変化

図10において、コストを表している線が急に1200万円上昇しているところはFCの交換コストを示している。一方、緩やかに上昇している右肩上がりの直線は水素燃料代を表している。FCの燃料代はFCの出力電力が120kW一定としているため、FCの連続運転時間に依存する。つまり、FCの連続運転時間が短いほど燃料消費量も減少するため燃料代によるコストが低減できると考えられる。さらに、FCの耐久性は連続運転時間5000時間であるため、この時間のみで考慮した場合、さらに交換周期も長くなるため交換回数の減少に伴うFC本体のコストも低減すると考えられる。

次に、SOCの最小値を20%~75%に変化させたときのコストを図11に示す。

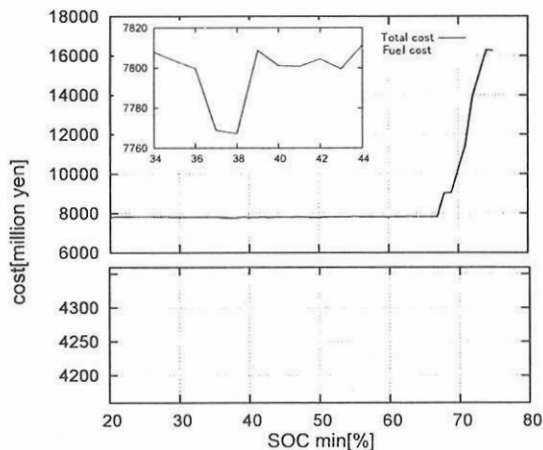


Fig. 11 全コストと燃料代の変化(運転日数3500日)

図11よりSOCの最小値が67%を越えたところで、全コスト C_{total} が急に上昇していることが見受けられる。SOCが67%以上になると図9に示したように、FCの寿命は起動停止回数に依存する。この範囲では起動停止回数が非常に多く、特にSOCの最小値が70%以上の場合、FCの寿命が1000日未満となってしまう。よって、SOCの最小値が大きすぎると全体のコストはFCの交換コストに依存することになる。

一方、SOCの最小値が67%未満ならば全コストの差はFCの燃料代に依存する。今回、列車の運転日数が3500日になっておりSOCの最小値が67%未満ではFCの寿命が1166日以上1750日以下であるため、FCの交換回数は運転日数3500日の間で2回となっている。また、FCの燃料消費量は連続運転時間にも依存するため、運転時間の短い方が全体のコストは最も小さくなるという結果が得られた。

今回、SOCの最小値が38%で列車の運転日数が3500日と

仮定した場合、最小の全コスト C_{total} は7767万円である。

5 おわりに

FCを用いたハイブリッド鉄道車両はFC本体の値段が非常に高価であるためコストを低減することが必要である。また、燃料代自体も減らすことも必要である。この問題を解決するためにはFCの寿命に影響する連続運転時間をできるだけ短くし起動停止回数を減らすように、FCを効率よく使用する必要がある。今回、SOCの最大値を80%に固定し、SOCの最小値によってFCの起動停止を判断する方法を提案した。結果、SOCの最小値と最大値が短すぎるとFCの寿命は起動停止回数に依存する上、回数自体が増加するのでFCの寿命が短くなりコストが増大する。一方、SOCの差がある程度あるとFCの寿命は連続運転時間に依存するようになる。また、燃料代もFCの連続運転時間に比例するという結果も得られた。今回、列車の運転日数を3500日としたが実際はもっと使用することが想定される。このことから、FCの連続運転時間を短くし起動停止回数を減らすことは車両のコスト低減に大きく寄与すると言える。

今後の方針としては、山岳路線においても同様のシミュレーションを行う。また今回、FCの出力は瞬時に最大出力に到達すると仮定しているが、実際はFCが最大出力まで至るまでに時間がかかる。よって、その時間も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 大井敏裕: トヨタ ハイブリッドカー「プリウス」の概要, 日本機械学会誌, 102巻964号, pp.96-97, 1999
- 2) U. Henning, F. Thoolen, M. Lamperth, J. Berndt, A. Lohner, and N. Janig: Ultra low emission traction drive system for hybrid light rail vehicles, the SPEEDAM 2006, pp.S2-12-16, 2006
- 3) 新井静男, 白木直樹, 佐藤春雄: キハ200形ディーゼル気動車のハイブリッドシステム, 平成22年電気学会産業応用部門大会, 1-O4-2, pp.143-148, 2010
- 4) Michael Steiner, Markus Klohr, Johannes Scholten: Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles, presented at the 6th WCRR2008, 2008
- 5) T. Ogawa, S. Wakao, and K. Kondo: A Multiobjective Optimal Design of a Hybrid Power Source System for a Railway Vehicle, IEEJ Trans. IA, Vol.126, No.12, pp.1690-1698, 2006
- 6) 西川尚男: 燃料電池の技術 固体高分子形の課題と対策, 東京電機大学出版局, 2010
- 7) 岡野翔太, 澁谷浩之, 近藤圭一郎: 電気二重層キャパシタを用いたハイブリッド電源鉄道車両のシンプルなエンジン出力制御法, 電気学会論文集(D編), 131巻10号, pp.1246-1253, 2011
- 8) 塚原健太, 岡野翔太, 近藤圭一郎: 燃料電池・EDLCハイブリッド電源鉄道車両の燃料電池出力決定と制御に関する検討, 平成24年電気学会全国大会 2012