

## 架線レス LRV 導入へのコスト面の フィージビリティスタディ

門脇 悟志\* 田口 義晃\* 小笠 正道\*  
山本 貴光\*\* 寺内 伸雄\*\*\* 秦 広\*\*\*

### Study on Cost of Contact-wire-less LRV to be Introduced

Satoshi KADOWAKI Yoshiaki TAGUCHI Masamichi OGASA  
Takamitsu YAMAMOTO Nobuo TERAUCHI Hiroshi HATA

Recently LRT project is discussed for activation of urban function in several cities. Especially, contact-wire-less type LRV is expected for energy saving and clear cityscape. However the cost is an important factor for railway operator to adopt this system. This paper described the comparison of the economies for the case of a conventional tram system based on catenary type and those for the three cases of a contact-wire-less LRV powered by batteries. We calculated the initial cost and running cost including costs for battery, substation, charging station and cost reduction of electricity energy saving and so on. Based on this calculates, we carried out a simulation to evaluate the economy. Finally, this paper reports results of the simulation using the parameters of length of railway line, battery unit price, headway and so on.

キーワード：架線レス，LRV，フィージビリティ，コスト，バッテリー

### 1. はじめに

近年，LRT (Light Rail Transit) 導入による低炭素社会の構築や都市中心部の活性化をめざす動きが全国各地で起きている。こうした流れの中で，架線レス LRV (Light Rail Vehicle) は，回生エネルギーを有効に活用でき省エネルギーになる，架線を張り巡らさなくても良いことから都市景観の向上が期待できる，などのメリットがあり注目されている。しかし，架線レス方式の導入を検討する事業者や自治体にとってバッテリーなどの導入コストに対する懸念がある。

そこで，本稿では架線レス LRV の導入効果を判断する一指標となるように架線方式を採用した場合と，架線レス方式を採用した場合の両者の経済性比較を行う。ここで架線レス方式は，①新たな路線敷設を想定した「完全架線レス方式」，②既存路線の中間部架線を撤去し架線レスとする「中間部分架線レス方式」，③既存路線の末端部を延伸しその区間を架線レスとする「延伸部分架線レス方式」の3ケースを想定し試算を行う。試算には，筆者らがエネルギー回生型架線レス LRV の研究で蓄積してきた技術的成果も盛りこむ<sup>1), 2)</sup>。これまで，架線レ

ス方式で公開されたフィージビリティ検討例はなく，多くの事例において検討材料に成り得るようなパラメータスタディを行って，一般的な傾向を求めることを目的とする。

### 2. 経済性試算の前提条件

#### 2.1 車両に関する前提条件

表1には試算に用いる LRV の仕様を示す。これは，全国の軌道事業者が有する超低床 LRV の平均的仕様をベースとし，それにバッテリーと電力変換器の質量増加分を 3.0[t] と仮定した車両である。

#### 2.2 運転に関する前提条件

表2は運転に関する条件である。まず，表1の LRV が全国軌道線の平均駅間距離380[m]を走行するのに，途中の交差点で1回停車すること想定し，発進停止を2回繰り返すランカーブを策定した(図1)。ある事業者における実地調査から所要時間の55%を走行，45%を停車としている。このランカーブよりキロ当たりの電力消費率を算出し各種試算に用いる。また，1日の営業時間，ピーク時間とオフピーク時間の運行本数比，ピーク時間帯の長さは全国軌道線の系統別平均値である。

\* 車両制御技術研究部 (駆動制御)  
\*\* 車両制御技術研究部 (動力システム)  
\*\*\* 車両制御技術研究部

特集：車両技術

表1 LRVの前提条件

想定車両	単車またはショート2連接車 2軸駆動車
空車質量 (ベース車両)	23.4 t
乗車定員	82名
100%乗車時質量	4.5 t (55kg/人換算)
バッテリーシステム質量	3.0 t (バッテリー+電力変換器)
積車質量	30.9 t
力行時最大電力	212.8 kW + 補機電力
補機電力	28 kW
加速度	3.0 km/h/s
減速度	3.0 km/h/s

表2 運転の前提条件

営業時間	18時間/日
末端駅折返し時間	5分
ピーク/オフピーク時間 運行本数比	1.2
ピーク時間帯の長さ	2.1時間
最高速度	40 km/h
表定速度	11.9 km/h
編成予備率	20%

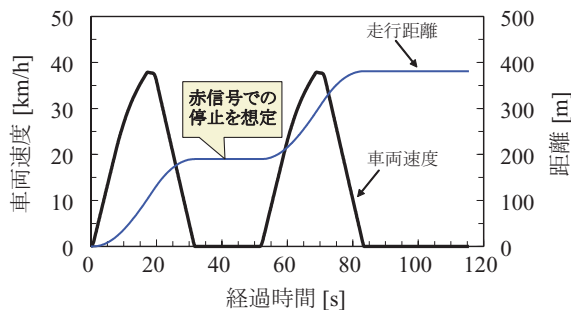


図1 単位ランカーブ

2.3 電池に関する前提条件

表3には電池に関する条件を示す。車載する蓄電媒体はリチウムイオン二次電池とし、期待寿命は車両の検査周期と合わせ8年と定めた。筆者らは現在までに鉄道車両への適用を想定した繰り返し充放電試験を実施し、この試験結果から電池の寿命を予測する手法を提案している<sup>3)</sup>。これは放電深度 (DOD: Depth of Discharge) から式(1)の近似式を用いて電池寿命サイクル ( $N_{cycle}$ ) を予測するもので、本試算では式(1)よりも若干厳しい条件で8年の期待寿命となるようにバッテリー搭載量を決定する。なお、搭載量の下限値とは所定の表1の力行性能パワーの要求を満足するために必要な最低限のバッテリー搭載量のことである。

表3 電池の前提条件

種類	リチウムイオン二次電池
期待寿命	8年
バッテリー効率	0.90 ~ 0.97 (電流依存)
バッテリー充放電器効率	0.95
エネルギー密度	40 kWh/t
搭載量の下限値	0.63 t

$$N_{cycle} = \frac{2400}{DOD^{1.8}} \dots\dots\dots(1)$$

2.4 建設費・維持費

表4は本試算に用いる設備建設費、維持費である。立地条件等による多少の増減はあるが概算費用を反映している。電路保存費は、鉄道統計年報に掲載された軌道事業者毎の経費<sup>4)</sup>を単線キロ当たりへに換算した額の中央値を用いる。

表4 建設費・維持費

架線方式	電車線路	40.0百万円/複線キロ
	変電所 (定格出力1000kW)	168.0百万円/箇所
	電路保存費	2.78百万円/単線キロ/年
架線レス方式	末端駅充電所 (250kW × 1機)	145.6百万円/箇所
	中間駅急速充電所 (500kW × 上下計2機)	202.5百万円/箇所
	管路埋設き電延長工費 (L=3kmの場合)	108.4百万円
	末端駅剛体架線設備	3.84百万円/箇所

2.5 評価指標

本稿では、評価指標として  $B/A$  [年] を定める。 $A$  はランニングコスト節約額、 $B$  は初期コスト増加額でありそれぞれ式(2)、式(3)に示す。これらは、従来の架線方式と架線レス方式で差額が生じる費目のみを計上する。ランニングコストは、電気料金、架線等の保守費である電路保存費、単年度あたりに換算したバッテリー交換費を対象とする。初期コストは、電力変換器も含むバッテリーシステム導入費、変電所や充電所などの地上設備費、電車線路建設費を対象とする。

$$A = \text{ランニングコスト節約額} = \text{架線方式ランニングコスト} - \text{架線レス方式ランニングコスト} \dots\dots\dots(2)$$

$$B = \text{初期コスト増加額} = \text{架線レス方式初期コスト} - \text{架線方式初期コスト} \dots\dots\dots(3)$$

すなわち、 $B/A$  とは従来架線方式に対して架線レス方式を採用した場合に、初期コスト増加分をランニングコスト節約額の積算額が何年で上回るかを示し、 $B/A$  が短いほど架線レス方式を採用した方が経済的に有利といえる。

### 3. 試算結果

#### 3.1 完全架線レス方式の試算結果

これから新たな路線を敷設する際に、従来通り架線方式で建設した場合と、図2に示すような完全架線レス方式で建設した場合の試算を行う<sup>5)</sup>。完全架線レス方式とは、路線全線に亘り一切架線を張らず両端折返し駅とある間隔で設置する中間駅充電所で充電を繰り返しながら走行する方式である。中間駅での充電時間は、実際の乗

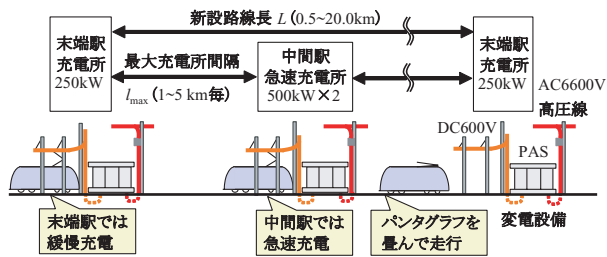


図2 完全架線レス方式のイメージ

表5 完全架線レス方式の分析に用いたパラメータ

パラメータ	標準値	変動範囲
路線長 $L$ [km]	7.0	0.5 ~ 20.0
ピーク運転時隔 $H_p$ [分]	8.8	2 ~ 20
最大充電所間隔 $l_{max}$ [km]	3	1 ~ 5
バッテリー単価 $C_b$ [円/Wh]	150	100 ~ 300

表6 架線方式と完全架線レス方式のコスト比較例

単位：百万円

完全架線レス方式 $L=7.0\text{km}, H_p=8.8\text{分}, l_{max}=3\text{km}, C_b=150\text{円/Wh} \Rightarrow$ 所要 12 編成						
ランニング	費目	電気料金		電路 保存費	バッテリー 交換費	合計
		基本料金	電力量料金			
コスト	架線方式	17.4	28.0	38.9	0	84.3
	架線レス方式	16.6	27.6	0	20.4	64.5
年間ランニングコスト節約額 $A$ 19.8						
初期	費目	変電・充電 設備	電車線路 設備	バッテリー 初期費		合計
コスト	架線方式	168.0	280.0	0.0	—	448.0
	架線レス方式	696.2	0	163.1	—	859.3
初期コスト増加額 $B$ 411.3						
評価指数						
$B/A$ 20.8 年						
バッテリー搭載量 2.26 t						

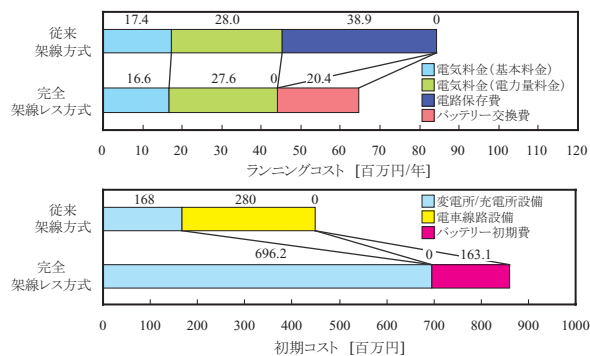


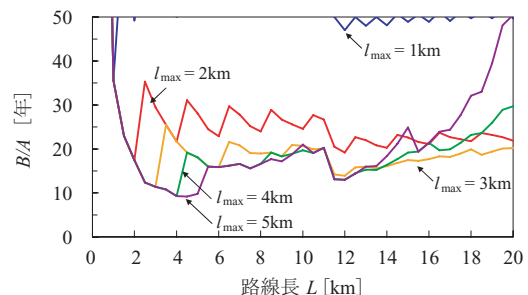
図3 コストに占める費目別割合 (表5標準値)

降時間を考慮して最大40秒の急速充電設備とする。現在までに、1000[A] × 40秒連続通電試験と、急速充電と走行による放電を繰り返す運行形態模擬試験を実施している<sup>6)</sup>。パンタグラフによる集電でも剛体架線との接触点における温度上昇は融点に対し余裕があり溶着も発生することなく、充分実用に耐えうることが確認されている。

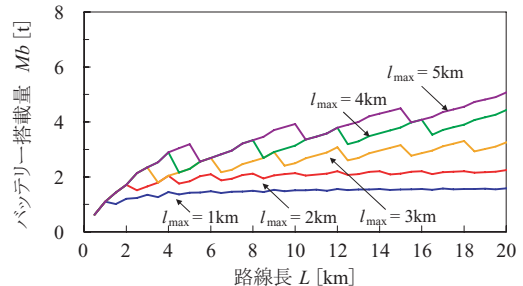
表5は感度分析に用いるパラメータの範囲である。路線長とピーク運転時隔の標準値は、全国軌道事業者の系統別平均値である。バッテリー単価は、数年先の想定価格例である。

表5の標準値を用い  $B/A$  を求めた結果が表6で、その

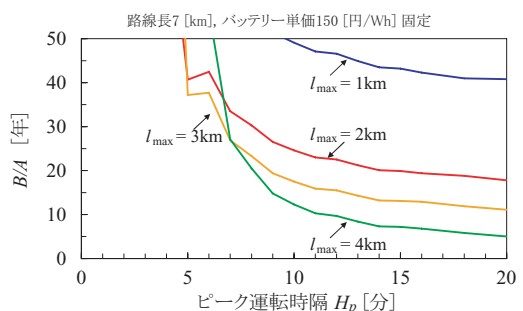
バッテリー単価150 [円/Wh]、ピーク運転時隔8.8 [分]、オフピーク時隔10.5 [分] 固定



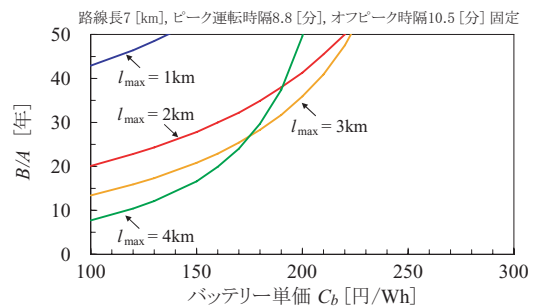
(a) 路線長に対する感度



(b) 路線長に対するバッテリー搭載量



(c) ピーク運転時隔に対する感度



(d) バッテリー単価に対する感度

図4 完全架線レス方式のパラメータ感度

特集：車両技術

費目別割合を示したのが図3である。まず、編成予備率20%でこの路線長と運行頻度では12編成が必要である。この新設路線で完全架線レス方式を採用すると、最大充電所間隔3[km]であるから中間駅充電所2箇所、末端駅充電所が2箇所必要となり、バッテリー初期費を電車線路建設費分で相殺しても、従来の架線方式に比べて初期コストは約4億1千万円の増となる。一方、ランニングコストは電路保存費の削減分が大きく寄与し、12編成分のバッテリー交換費を上乗せしても年間約2千万円の節約が図れる。その結果、借入金利等を無視した場合、21年以上で完全架線レス方式の方が架線方式で建設した場合より経済的に優位になる。

図4 (a) は路線長と最大充電所間隔を可変として  $B/A$  を求めた結果で、図4 (b) は同条件下での期待寿命8年を満たすために必要な1編成あたりのバッテリー搭載量を示したものである。 $B/A$  はマクロ的には路線長に対する依存性は弱く、最大充電所間隔に依存し変化している。充電所間隔が長いほど  $B/A$  は短くなるが、逆にバッテリー搭載量に着目すると空車質量の10%を超え、質量、容積の両面から車載は難しくなってしまう。図4 (c) は路線長、バッテリー単価を固定としたピーク運転時隔に対する  $B/A$  の試算結果である。ピーク運転時隔が5分より短いと所要編成数が増えバッテリー初期費が膨大になる。よって、運転時隔の長い方が  $B/A$  は短くなる傾向が確認できる。図4 (d) は路線長、ピーク運転時隔を固定としたバッテリー単価に対する  $B/A$  の試算結果である。バッテリー単価が200円/Whを下回らなければ厳しい結果となった。

以上の試算結果から、完全架線レス方式は現実的に車載可能なバッテリー搭載量と  $B/A$  の感度を考慮すると、比較的運行頻度の低い路線で中間充電所を2~3[km]毎に設置した場合にその導入効果がより大きいと言える。

3.2 中間部分架線レス方式の試算結果

次に、既存路線において図5に示すように路線中間部の架線を一部撤去して部分架線レス化した場合と、現状のまま全線で架線方式を維持した場合について表7をパラメータとして分析する<sup>5)</sup>。中間部分架線レス方式は、完全架線レス方式と異なり末端駅や中間駅に充電所を設けず、架線残存区間（架線を撤去しない区間）で走行しながら充電する。車両は両方式とも新造とし、変電所設備、電車線路設備建設費は同一のため対象としない。

表8は、表7の標準値を用いて  $B/A$  を試算した結果である。完全架線レス方式と同様の手法で  $B/A$  を求めると、8年以上で部分架線レス化した方が経済的に優位になる。表8において年間ランニングコスト節約額  $A$  の大部分は電気料金の節約による。これは、架線区間でのブレーキ時に、従来インバータ車では回生失効や送電ロスによ

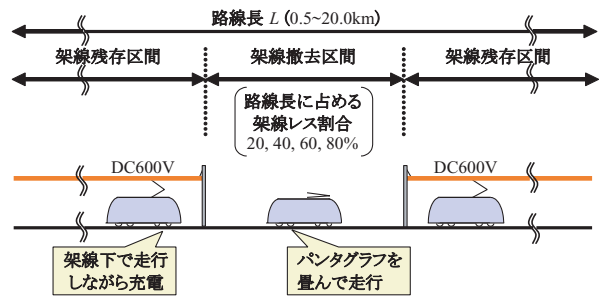


図5 中間部分架線レス方式のイメージ

表7 部分架線レス方式の分析に用いたパラメータ

パラメータ	標準値	変動範囲
路線長 $L$ [km]	7.0	0.5 ~ 20.0
ピーク運転時隔 $H_p$ [分]	8.8	2 ~ 20
架線レス割合 $\lambda$ %	40	20, 40, 60, 80
バッテリー単価 $C_b$ [円/Wh]	150	100 ~ 300

表8 架線方式と中間部分架線レス方式のコスト比較例

単位：百万円

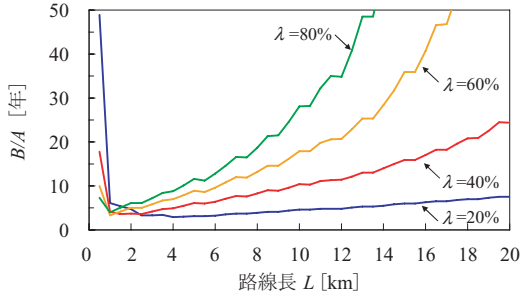
中間部分架線レス方式 $L=7.0\text{km}, C_b=150\text{円/Wh}, H_p=8.8\text{分}, \lambda=40\% \Rightarrow$ 所要12編成						
ランニングコスト	費目	電気料金		電路保存費	バッテリー交換費	合計
		基本料金	電力量料金			
	架線方式	17.4	28.0	38.9	0	84.3
	架線レス方式	12.4	20.1	23.4	13.9	69.8
年間ランニングコスト節約額 $A$						14.5
初期コスト	費目	変電所設備	電車線路設備	バッテリー初期費	-	合計
	架線方式	-	-	0.0	-	0.0
	架線レス方式	-	-	111.5	-	111.5
初期コスト増加額 $B$						111.5
評価指数				$B/A$	7.7	年
				バッテリー搭載量	1.55	t

て発生エネルギーの2割しか有効に回収できないと仮定しているが、架線レスLRVではバッテリーロス分以外のエネルギーは再利用されるためである。

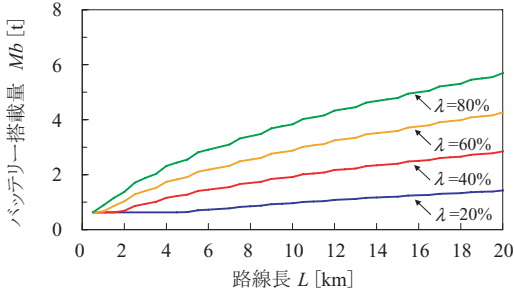
図6 (a) は路線長と架線レス割合を可変として  $B/A$  を求めた結果を、図6 (b) はそのときの1編成あたりのバッテリー搭載量を示したものである。架線レス割合が低い場合は路線長に依存せず  $B/A$  は短くバッテリー搭載量も少なく済む。架線レス割合が高い場合でも路線長が短ければ  $B/A$  は20年以内となった。図6 (c) は路線長、バッテリー単価を固定としたピーク運転時隔に対する  $B/A$  の試算結果である。完全架線レス方式と同様にピーク運転時隔が長い方が  $B/A$  は短くなるが、架線レス割合が低ければピーク運転時隔が短くとも  $B/A$  は非常に短くなる。図6 (d) は路線長、ピーク運転時隔を固定としたバッテリー単価に対する  $B/A$  の試算結果である。バッテリー単価が300円/Wh程度で高止まりした場合でも架線レス割合が20%程度なら  $B/A$  で15年以内になる。

以上の試算結果から、中間部分架線レス方式は架線を

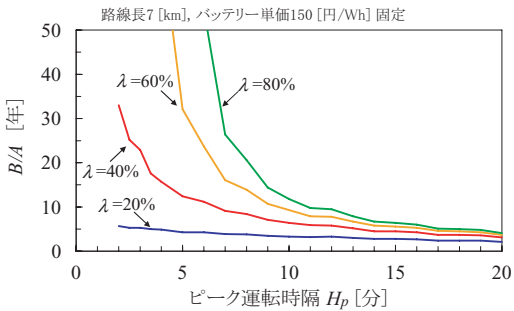
バッテリー単価150 [円/Wh]、ピーク運転時隔8.8 [分]、オフピーク時隔10.5 [分] 固定



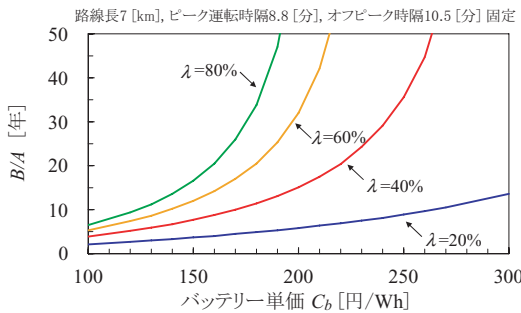
(a) 路線長に対する感度



(b) 路線長に対するバッテリー搭載量



(c) ピーク運転時隔に対する感度



(d) バッテリー単価に対する感度

図6 中間部分架線レス方式のパラメータ感度

取り払いたい区間長を短く絞りこめれば、導入による経済性がより良くなる。

### 3.3 延伸部分架線レス方式の試算結果

最後に、既存路線の末端部から架線レス方式で延伸した場合と、従来通り架線方式で延伸した場合について比較する<sup>7)</sup>。図7に延伸部分架線レス方式のイメージを示す。延伸区間の末端駅に充電所を設置しなければより安価に建設できるが、延伸区間往復分と折返し時の補機分のバッテリー放電深度及び異常時等における安定運用を

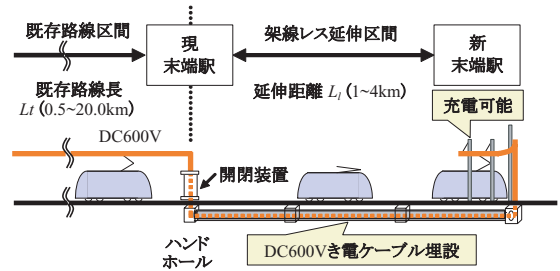


図7 延伸部分架線レス方式のイメージ

考慮して充電所を設けた試算とする。ただし、変電所の増設は初期コスト増大に繋がることから既存架線区間から沿線に管路を埋設し直流き電する方式を提案する。

図8 (a) は既存路線長と延伸距離に対する感度分析結果である。既存路線長7~10km付近でB/Aが急激に低下する傾向が見られる。これは、路線延伸により従来架線方式では新たな変電所増設が必要になるが、架線レス方式ではバッテリーアシストによるピークカット効果を期待して増設の必要がないとしたため初期コストが大幅に節約できるためである。表9にこの条件下での試算例を示す。架線レス方式を採用すると、架線方式に比べて初期コストで約2千9百万円削減でき、年間約2千1百万円のランニングコスト節約が図れる。図8 (b) は既存路線長、バッテリー単価を固定としたピーク運転時隔に対するB/Aの試算結果である。B/Aは両者の所要変電所箇所数の差により変動するが、延伸距離が短ければ運転頻度が高くてもB/Aはととても短い。図8 (c) はバッテリー単価と延伸距離に対する感度分析結果である。バッテリー単価が安価なほど延伸距離によらずB/Aは短くなる。仮に将来の価格が300円/Whで高止まりした場合でも延伸距離が短ければバッテリー搭載量は少なく済むためB/Aは短く、延伸距離1kmなら15年以下である。

以上の試算結果から、延伸部分架線レス方式は延伸距離が短いほどその導入効果が大きくなる。

表9 架線方式と延伸部分架線レス方式のコスト比較例

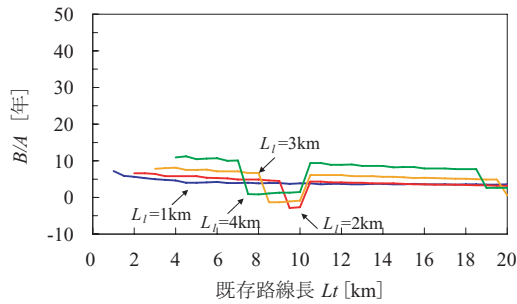
単位：百万円

延伸部分架線レス方式							
L=8.5km, C <sub>b</sub> =150円/Wh, H <sub>p</sub> =8.8分, L <sub>i</sub> =3km ⇒ 所要18編成							
ランニング	費目	電気料金		電路 保存費	バッテリー 交換費	合計	
		基本料金	電力量料金				
コスト	架線方式	29.4	47.3	63.9	0.0	140.7	
	架線レス方式	20.5	33.0	47.3	18.3	119.1	
年間ランニングコスト節約額 A						21.6	
初期コスト	費目	変電所 設備増	電車線路 設備※	バッテリー 初期費	-	合計	
		架線方式	168.0	120.0	0.0	-	288.0
		架線レス方式	0.0	112.3	146.6	-	258.9
初期コスト増加額 B						-29.1	
評価指数		B/A：初期コスト、ランニングコストとも架線レス方式が有利					
					バッテリー搭載量	1.36 t	

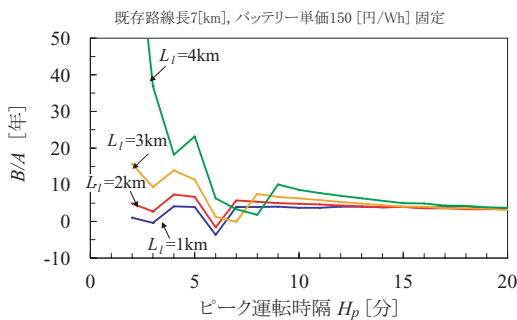
※電車線路設備は延伸区間のみに対して試算  
管路埋設工事費は電車線路設備費に含む

特集：車両技術

バッテリー単価150 [円/Wh] , ピーク運転時隔8.8 [分], オフピーク時隔10.5 [分] 固定

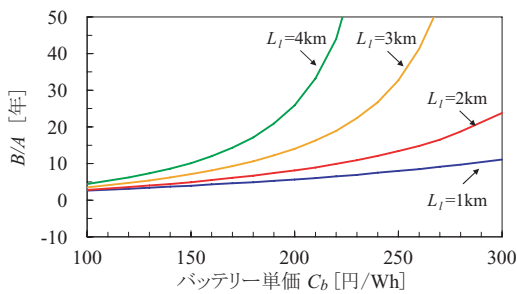


(a) 既存路線長に対する感度



(b) ピーク運転時隔に対する感度

既存路線長7 [km], ピーク運転時隔8.8 [分], オフピーク時隔10.5 [分] 固定



(c) バッテリー単価に対する感度

図8 延伸部分架線レス方式のパラメータ感度

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 従来架線方式と架線レス方式3ケースのコスト計算を行った。路線長, バッテリー単価, 運行頻度などのパラメータを変えながら架線方式に対する架線レス方式の経済性傾向を明らかにした。
- (2) バッテリー消費エネルギーと電池寿命の制約からバッテリー搭載量を減らせるため, 架線レス距離の短い(架線レス割合の低い)方が適している。
- (3) 所要編成数, 充放電サイクル数が少なくなるため

にバッテリー総量が少なくて済む運行頻度が比較的少ない路線に適している。

- (4) バッテリー単価が150円/Wh程度まで安価になれば, 経済的に優位になる事例が増える。

本試算には架線レス化で得られる都市景観の向上効果は反映されていないが, 適切な貨幣換算が行えれば本試算でB/Aが長いと判断された事例でも改善できる可能性が高い。なお, 個別事例の絶対値については路線固有の条件を適用させた精査が必要である。

謝辞

本研究は, 平成17年度から19年度に開催された「LRTに関する技術検討会」のWG架線レストラムFS分科会で議論された。鉄道建設・運輸施設整備支援機構をはじめとする関係各位に謝意を表す。

文献

- 1) 小笠正道: バッテリー駆動架線レストラム(架線・バッテリーハイブリッド), 平成18年電気学会産業応用部門大会論文集, Vol.1, pp.107-112, 2006
- 2) 鮫島博, 小笠正道, 山本貴光: リチウムイオン二次電池搭載のエネルギー回生型トラム, 第10回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2003)講演論文集, pp.87-90, 2003
- 3) 米山崇・田口義晃・小笠正道・山本貴光: リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法, 平成17年電気学会産業応用部門大会, Vol.3, pp.193-196, 2005
- 4) 国土交通省鉄道局監修: 鉄道統計年報 平成15年度, 政府資料等普及調査会, 2005
- 5) 門脇悟志・田口義晃・山本貴光・小笠正道・寺内伸雄・秦広: バッテリー駆動型架線レスLRTのコスト面のフィージビリティ検討, 第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007)講演論文集, pp.115-118, 2007
- 6) 小笠正道・兎東哲夫・菅原淳・毛利哲・前橋栄一・田口義晃・末包洋士: バッテリートラムの停車中急速充電システム試験, 第13回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2006)講演論文集, pp.343-346, 2006
- 7) 門脇悟志・田口義晃・山本貴光・小笠正道・寺内伸雄・秦広: 路線延伸を対象とした架線レスLRTの経済性評価, 平成20年電気学会全国大会, Vol.5, pp.94-95, 2008