

ライトレールの高度化に関する研究

水間 毅* 佐藤 安弘* 大野 寛之* 山口 知宏* 松本 陽*

Study of integration of LRT

by

Takeshi Mizuma * Yasuhiro Sato * Hiroyuki Ohno * Tomohiro Yamaguchi * Akira Matsumoto *

Abstract

LRT (Light Rail Transit) system has many merits in the view point of access to vehicle and friendly to silver ages. Therefore, in Europe, this LRT system is developing in the center of introducing low floor and high performance vehicles and formed of transit mall among persons and vehicles in the city center and of exclusive high speed line in the suburban area. In Japan, some LRVs (Light Rail Vehicles) are gradually starting to introduce in some urban cities that operate tram networks for examples, Kumamoto, Hiroshima and etc.. However, in the present stage, it remains the only changes from old fashioned tram car. Accordingly, it is desired earnestly to introduce Japanese style of LRT. Therefore, we study the integration of LRT fitting for Japanese cultures. We developed the simulator for evaluating introducing LRT quantitatively and effect of train operation control. Moreover, we compared several trolley-less transportation systems and executed the experimental running tests using by hybrid vehicle and magnetic guidance control systems. And we appointed the possibility of real use for magnetic guidance. Besides, we studied the possibility new truck bogies for LRT and developed new train operation control system using GPS systems.

1. はじめに

路面電車を利用するシステムは、アクセス性が良く高齢化社会に最適であり、建設費、環境にも優れた新しい都市交通システムとして見直されつつある。特に、LRT(Light Rail Transit)システムとしてヨーロッパを中心に発展しているが、これは、高性能で低床式の路面電車(LRV:Light Rail Vehicle)の導入を中心に、都心部を人と LRV とのトランジットモールとして構成したり、郊外は専用軌道で高速走行して速達性を図るなど、都市の機能を公共交通機関を中心に発展させようというものである。これに対して、日本では、熊本市交通局や広島電鉄がヨーロッパの LRV の導入を行い、また、岡山電気軌道がヨーロッパの LRV をベースに独自の車両を導入したり、鹿児島市交通局、伊予鉄道等で日本独自の LRV を導入しているが、必ずしも LRT システムとして発展しているわけではない。

従って、日本において、実情に適した LRT システムの導入が望まれており、そのための基礎的な研究を実施する必要がある。本稿では、日本に適した走行システムの高度化、運行システムの高度化に関する研究を実施したので報告する。

2. 研究の目的と概要

研究の目的としては、日本に適したライトレールシステムの技術を検討し、実用化への導入促進を図ることである。具体的には、(1)景観を損ねない「架線レスライトレールシステム」の可能性の検討、(2)急曲線をスムーズに通過可能な独立回転台車や道路上の運行速度を向上可能な優先信号システム等の要素技術の開発、評価をおこなうものである。

研究の概要としては、(1)LRT システム評価シミュレータを開発し、LRT 導入の効果を定量的に評価し、(2)その中で、架線レス走行が可能な各種システムに関して、その技術的可能性を比較、検討する。その上で可能性のあるシステムに関する基礎的な走行実験を行い、評価を行う。(3)また、走行システムの高度化に関しては独立回転台車や1軸台車のLRTへの適用性を実験装置により検討する。(4)運行システムの高度化に関しては、GPS を利用したLRT用信号システムの開発について述べる。

3. LRTシステム評価シミュレータの開発

現在、都市交通システムは、LRT システムを始めとして多様な交通システムが開発されているが、これらはそれぞれ独立した線区に投入されるかあるいは試験線での走行が行われていて、同一路線におけるシステム相互の比較といった、定量的な評価はなされていない。

従って、本研究では、同一の路線を各種交通システムが走行して、その結果を数値的に比較可能とするシミュレータの開発を行うこととした。

シミュレータとしては、実地図上に専用路線を作成して、各種交通システムの入力した上で、路線を走行した結果を示すことが可能な(1)地図上走行シミュレータと、自動車交通との混合走行の模擬が可能で、優先信号機等の交通信号機に従って走行し、その結果を示すことが可能な(2)軌道 - 道路混合交通シミュレータの2種類を開発した。

3.1. 地図上走行シミュレータの概要

(1)路線の作成

本シミュレータでは、路線を市販の8千分の1電子地図上に対話方式で入力することとし、直線と円弧(曲線半径を指定)、勾配(区間ごとに勾配を指定)で表現することとした。

(2)車両の作成

車両は、定員、乗車率、空車重量、最小曲線半径、最高速度等を表1のように設定し、その特徴を数値化することとした。

表1 シミュレーションに入力する車両諸元

項目	内容
定員	実際の定員
乗車率	実際の乗車率
車両重量	LRV1 編成当たりの重量
最小曲線半径	走行可能な最小の曲線半径
最高速度	走行可能な最高速度
最大加速度	走行可能な最大加速度
最大減速度	走行可能な最大減速度
回生率	電力を架線に返す割合
摩耗	車輪が摩耗している程度
摩耗反映率	車輪の摩耗が電力消費に影響を及ぼす割合

車両の属性のうち、曲線半径別制限速度、引張力、走行抵抗、曲線抵抗については別途行う。

曲線半径別制限速度は、曲線半径と制限速度を表の形で与えて作成するが、走行時に直線から曲線に変化する場所においては、曲線半径によって制限される速度で曲線を通過できるようにあらかじめ直線部で速度を減速させるように走行制御する。

また、速度 - 引張力特性については図1のように設定する。

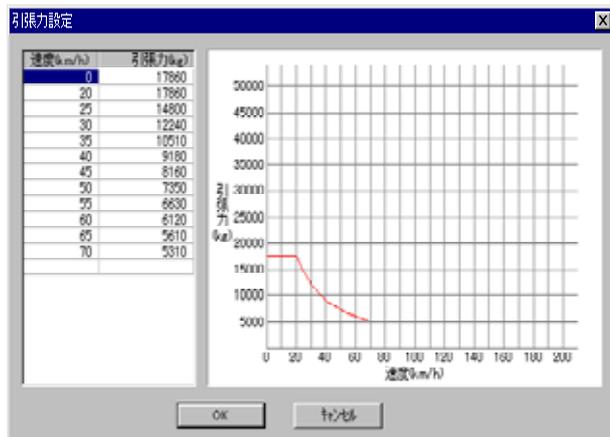


図1 速度 - 引張力特性入力

勾配抵抗については、国土数値情報を基に路線断面図を求めるが、区間を設定して、その区間ごとの勾配の表示も可能である（勾配設定後の地図情報を図2に示す。）



図2 勾配も考慮した路線設定例

走行抵抗 (F_r (kg/t)) については、直線抵抗 (F_1) と曲線抵抗 (F_2) および勾配抵抗 (F_3) の和として(1)式のように表現することとした。

ただし、 F_1 は速度 v の 2 次関数で表現することとし、(2)式のように設定し、 F_2 は曲線半径 R に反

比例するとして(3)式のように設定することとした。また、勾配抵抗は勾配分のみを考慮することとした。

$$F_r = F_1 + F_2 + F_3 \quad \dots(1)$$

$$F_1 = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad \dots(2)$$

$$F_2 = d/R \quad \dots(3)$$

$$F_3 = \pm n \quad \dots(4)$$

ただし、 n :勾配(%), a, b, c, d はシステムごとに決められる定数

(3) 走行計算

車両の全重量 M (kg・重) を(5)式のように定義し、車両は運動方程式より求めた(6)式で得られる加・減速度 (a : m/s^2) で走行することとした。

$$M = (\text{定員} \cdot \text{乗車率} \cdot 1 \text{ 人あたりの平均体重}) + \text{車両重量} \quad \dots(5)$$

$$= (F - F_r \cdot M) \cdot g/M \quad \dots(6)$$

ただし、 F :引張力(kg・重)、重量加速度 g (m/s^2)

また、サンプリング時間 (t) あたりの走行消費電力 (W) は加速時は(7)式で、減速時は(8)式で表現する。

$$W = E \cdot (1 + (\mu/100) \cdot (1/100)) / t \cdot e \quad \dots(7)$$

$$W = E \cdot (1 + (\mu/100) \cdot (1/100)) / t \cdot Re/e \quad \dots(8)$$

ただし、 μ :車輪摩耗率、 e :摩耗反映率

e :機器効率, Re :回生率

車輪が摩耗していればその分電力消費が増えるというアルゴリズムとし、鉄輪、ゴムタイヤ、リニアモータによる差が現れるようにしている。

(7),(8)式で得られたサンプリング時間あたりの電力を走行時間で積分して力行電力量、回生電力量を求める。総消費電力量は力行電力量と回線電力量の差で求める。

3.2. 軌道 - 道路混合交通シミュレータ

(1) 路線の作成

本シミュレータの特徴は、自動車交通との混合シミュレーションが可能であることより、各停留所の

キ口程と各交差点における交通信号機のキ口程および各区間における勾配を上下線別に設定可能としているところにある。また、交通信号機には、優先信号の機能が付加されており、青信号延長や赤信号短縮可能な機能となっている。優先信号を実現する方式としては、トロリーコンタクター、軌道回路、GPSによる方式が選択可能で、トロリーコンタクターで検知する場合は、検知不能率を設定して、実システムに合わせることが可能としている。

(2) 車両の作成

車両条件としては、最高速度、加・減速度、速度範囲ごとの加速度、車両長を入力することとする。

(3) 運転条件の作成

各車両ごとに始発時刻、運転方向を入力し、速度制限区間の制限速度を設定可能としている。

また、各停留所における停車時分、2 車両間の安全余裕停止距離も設定することとする。

(4) その他の設定

交通信号機制御条件

路線における系統制御速度(この速度で走行すれば一連の交通信号機を青で通過可能となる)や信号のサイクル長、交通流量(1 秒あたりの通過車両台数)を設定する。

旅客流動条件

各停留所ごとの乗車人員、降車人員を上下線別に設定する。また、一人あたりの乗車時間、降車時間も設定でき、これらの設定により、駅停車時分が変化することになる。

(5) 走行計算

車両の走行は、以下の機能を満足するよう行われる。

車両走行処理機能

- 1) 先行車両との間隔がブレーキ距離と安全余裕停止距離以上に離隔し、下記の項目に該当しない場合、指定の加速度で車両を加速する。
- 2) 車両ごとに指定された最高速度に達したとき、一定速度で定速走行する。

3) 先行列車との間隔がブレーキ距離と安全余裕停止距離以内に接近した場合、指定の減速度で減速し、停止させる。

4) 停留所の停止位置に接近した場合、定点停止処理する。

5) 交通信号機が設備されている軌道併用区間において、赤信号の交通信号機に接近した場合、交差点の停止点に停止する機能を有する。

1) 速度制限区間に接近した場合、制限速度以下に減速する。

旅客流動処理機能

1) 各車両は、各停留所に到着し、先行車両との時隔により乗車人員を計算し、乗車時分を計算する。

2) 各車両は、各停留所に到着し、指定の降車率より降車人員と降車時分を計算する。

3) 各車両は各停留所において、乗車時分と降車時分より停車時分を計算し、次駅までの通過人員と混雑率を計算する。

2) 標準停車時分と計算された停車時分から遅れ時分を算出し、通過人員との積で損失時分を計算する。

出発抑止機能

1) 先行車両が遅れを生じ、後続車両との間隔が接近した場合、停留所において出発を抑止し、標準的な出発間隔に戻す制御が可能である。

3) 先行車両との出発間隔が確保されるまで後続車両の出発を抑止した後、再出発する。

電車優先信号機能

1) 青信号延長、赤信号短縮制御が可能ないように信号機の前に固定点を設け、その点から信号機前まで制御が可能にする。

2) 青信号延長、赤信号短縮時間は 10 秒を限度とする。

4 . シミュレーションの実行

4.1. 各交通システムの比較

地図上走行シミュレータによる計算結果例を図

3、4、5に示す。

図3は、出力計算例であり、3次元の俯瞰電子地図上に路面電車が走行し、その間の時間 - 速度データ、時間 - 消費電力量データがリアルタイムに計算、表示される。



図3 シミュレーション走行データ例(3次元)

図4は、出力結果例であり、全走行を通じての力行、回生電力量、平均速度が各交通システムごとに表示される。

図5は、それらの結果を評価した例である。これは、LRVを導入すると、最高速度が40km/hのままでは、路面電車に比して電力消費量は優位であるが、60km/hとすると、電力消費量は若干悪くなるが、平均速度が大幅に増加するという結果を定量的に示している。また、ゴムタイヤで走行する新しいIMTSシステムを導入した場合は、平均速度、電力消費量で優位になるものの、CO₂排出量の削減がなされないことを示している。

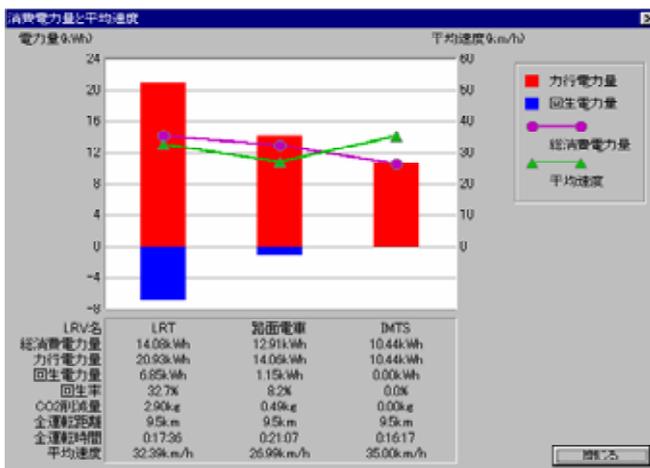


図4 走行結果出力例

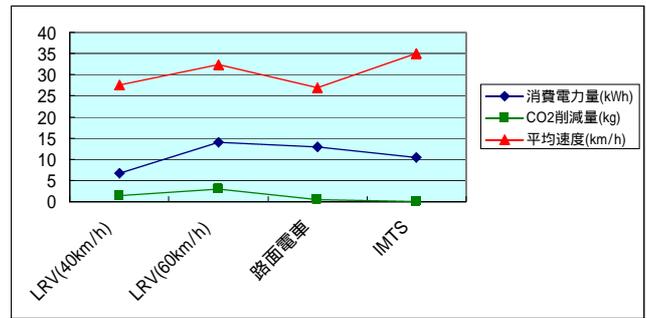


図5 走行結果評価例

4.2. 運行の高度化の効果

軌道 - 道路混合交通シミュレータを利用して、運行システムの高度化を行った場合の効果を示した例を図6、7、8に示す。

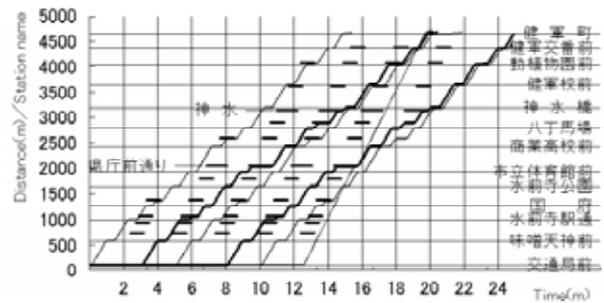


図6 遅れが発生した場合のシミュレーション例

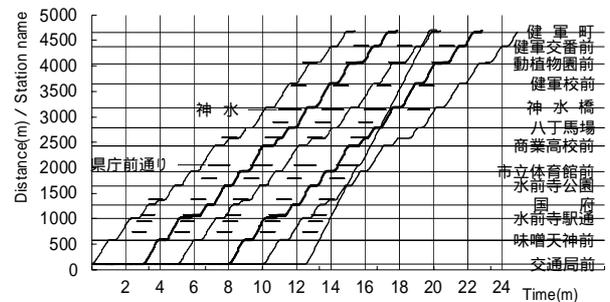


図7 回復運転によるシミュレーション例

図6のような遅れが発生した場合に、運行管理センターから遅れた車両に回復運転指示を出した場合と、後続車両に出発抑止指令を出した場合のシミュレーション結果をそれぞれ、図7、8に示す。

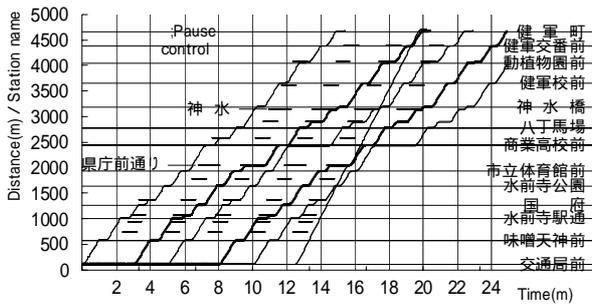


図 8 出発抑止によるシミュレーション例

回復運転を行った場合の損失時分による評価例を
図 9 に示すが、その効果が大きいことが確認される。

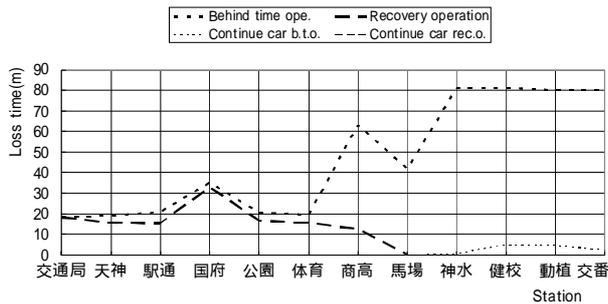


図 9 損失時分による評価例（回復運転）

抑止運転を行った場合の損失時分による評価例
を図 10 に示すが、抑止を行うと、混雑率は平均
化されるが出発を抑止された車両の乗客の乗車時
間が増大するため、損失時分での効果は少ないこ
とがわかる。

このように運行を高度化すれば最適な運転制御
が可能となり、混雑率の均一化や損失時分の最小
化が可能となって、便利な LRV が実現可能とな
る。

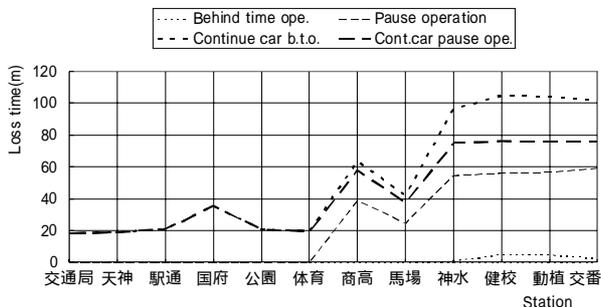


図 10 損失時分による評価例（出発抑止）

5. 架線レスライトレールシステムの研究

以上のようなシミュレーションにより、LRT を
始めとした各種交通システムの特徴が定量化され
ることが可能となり、ライトレールシステムにと
って有利な地域への導入を定量的に示すことが可
能となった。しかし、今後、さらなるライトレール
システムの発展を考える場合、架線レスライトレール
システムの可能性に言及する必要がある。なぜなら
ば、架線レスとすることにより、景観によいこと
は無論だが、二次元走行や無公害走行によるメリ
ットも考えられるからである。ここでは、いくつ
かの架線レスシステムについて検討した結果を示
し、基礎的な実験結果を示す。

5.1. 各種架線レス方式の比較

架線レス走行には各種方式が考えられるが、そ
のいくつかの例を示す。

(1) 地中集電

この方式は、地中に電車線を敷設し、車両下部
に搭載した集電子により、集電しながら走行す
るシステムであり、イタリアのトリエステ市で実
験走行を行った実績があるシステム（図 11 参照）
である。



図 11 地中集電システム例（ストリーム）

地中内の電車線は、車両が通過する時のみ、集
電子に付随した永久磁石により引き上げられて、
集電子と接触するため、車両非通過時は、他の
自動車や人が感電するおそれはない。また、集
電線上に他の自動車が停車していても、バス型
車両はそこを避けて走行し、再び、集電線上で
集電可能となる、二次元的な走行も可能である。
ただし、集電線の絶縁性、耐久性等の検証が不
十分なまま実験は中止された。

(2) 電気二重層キャパシタ搭載車

近年、その技術が進化している電気二重層キャ

シタを搭載したシステムでは、充電が十分行われていれば、一定区間は集電せず走行することが可能である。その概念図を図12に示す。基本的には、集電しながら走行し、回生時には充電をして、架線がない所では、電気二重層キャパシタからの電源供給により走行するシステムである。

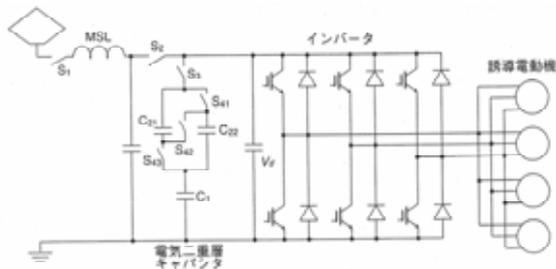


図12 電気二重層キャパシタを利用したシステム例

(3) 燃料電池 + キャパシタ搭載車

燃料電池はその実用化が期待されている、究極の無公害電源であるが、それを利用したライトレールシステムも考えられる。図13にその概念図を示すが、燃料電池とキャパシタ(またはバッテリー)のハイブリッドにより、力行時は燃料電池からの電源供給で走行し、回生時にはキャパシタに充電することにより、燃料電池のバックアップを行うシステムである。

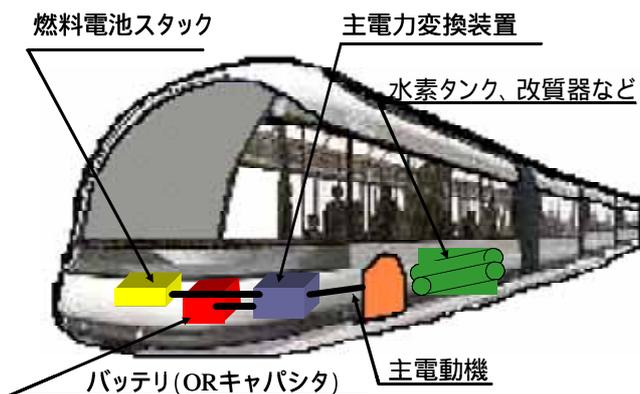


図13 燃料電池車両システム構成例

(4) 内燃機関 + バッテリーハイブリッドシステム

次世代 LRT として考えられるシステムとして、バス型車両を利用した2次元走行システムが考えられるが、その場合、現在普及しつつあるハイブリッ

ド技術を利用して構成する可能性もある(図14参照)。

このシステムは、バス型ハイブリッド車両を基本としながら、磁気による案内を行うことによって、鉄道としての一元的動きを行うものである。

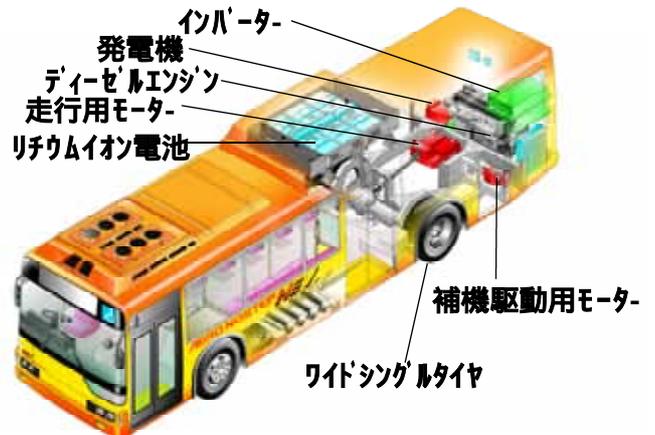


図14 ハイブリッドシステム構成例

以上のような架線レスシステムに関して、比較検討を行うと表2のような結果となる。

表2 架線レスシステムの比較

	利点	課題
地中集電	鉄道と同様の集電	インフラコスト大
電気二重層キャパシタ	省コストの可能性	充電、搭載場所の制約
燃料電池	完全な架線レスが可能	現状ではコスト大
ハイブリッド	省コスト、確立技術	環境負荷がやや大

現状の技術水準においては、ハイブリッドシステムが有望と判断される。

5.2. ハイブリッド走行システムによる磁気誘導実験

実際のハイブリッド車両を利用して、磁気センサを搭載し、道路上に敷設した永久磁石を検知して誘導案内するシステム(図15参照)を構築して実験した結果を図16に示す。

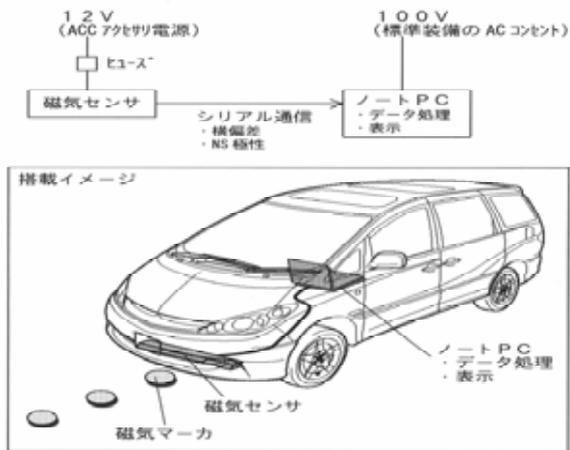


図 15 ハイブリッド・磁気誘導方式を利用した次世代 LRT の実験システム概要

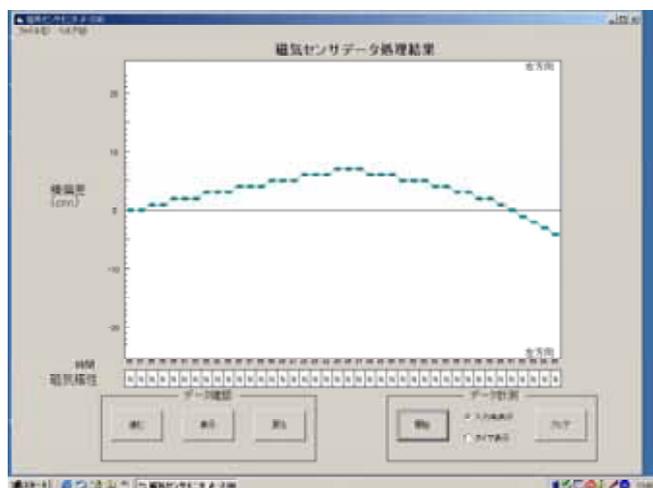


図 16 磁気誘導案内試験結果例

この結果により、永久磁石と磁気センサにより、精度の高い案内制御が可能となり、ハイブリッド車両を用いた架線レスシステムの実用性が確認された。

6. システムの高度化に関する研究

ライトレールシステムの高度化については、既存の走行システム、運行システムの高度化の可能性についても研究を実施した。

6.1. 走行システムの高度化

ライトレールシステムは、都市内を走行するため、急曲線走行や一方向運転の可能性はある。従って、特殊な台車構造を開発することにより実現の可能性

がある。

本研究では、新たに考案された独立回転台車や 1 軸台車等の LRT への適用性を実験装置（図 17 参照）で検討した結果、1 軸台車は低床式車両における適合性、後輪独立回転台車は一方向運転への適合性に優れており、ライトレール車両の急曲線通過に適応できる見通しを得た。

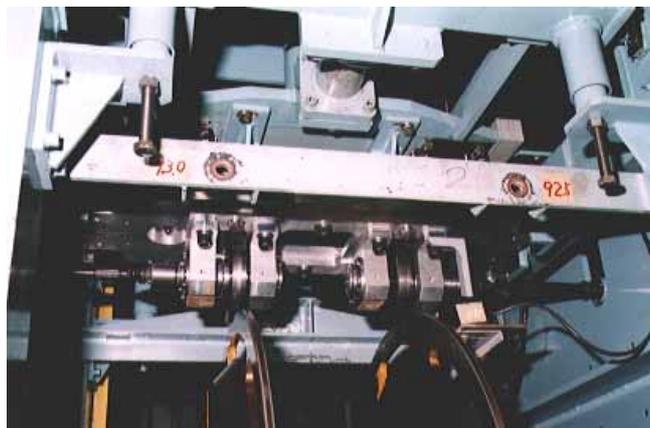


図 17 模型実験装置による 1 軸台車実験例

6.2. 運行システムの高度化

路面電車は道路上を走行するため、自動車信号に従うことになるが、その結果、停留所での停止との兼ね合いや、自動車の高加減速との差により、表定速度（停留所停車時間も含めた平均速度）が遅くなる印象を受ける。4 章でのシミュレーション結果からもわかるように、適切な運転指示や優先信号により表定速度は向上することが期待されるため、それが可能となる運行システムを開発した。

システムの概要は GPS 受信機を路面電車に搭載し、その位置情報を停留所に設置した基地局でやりとりし、その情報をセンター局に伝送して、センター局から適切な走行指示（出発抑止、回復等）を行うというものである。

図 18 に GPS 車載装置構成例を、図 19 に試験システム構成例を、図 20 にセンター局構成例を、図 21 に走行実験例を示す。

【車載装置1】



図 1 8 GPS 車載装置構成例



図 2 1 走行実験例

試験システム構成

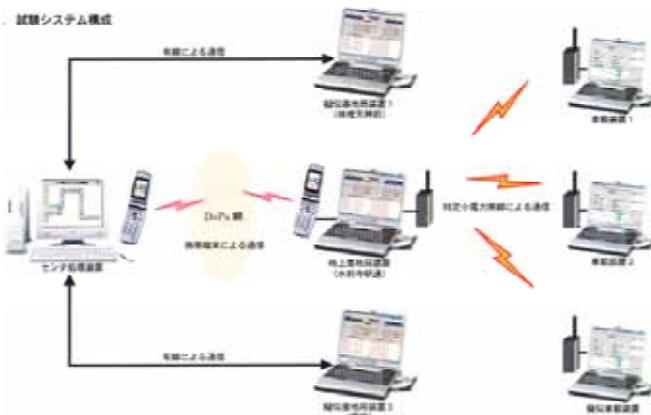


図 1 9 試験システム構成例

図 22 にセンター局からの各車両への指令の様子を示した例を示し、図 23 に GPS 受信データの様子を示す。

センター局では、列車接近表示により、各車両の位置情報を知り、その状況により出発抑止や回復運転指示を行う。



図 2 2 センター基地局における表示、指示例

【交通局内の設置風景】



図 2 0 センター基地局構成例



図 2 3 GPS による位置検出例

図 23 で、赤い丸が実際に得られた GPS の位置データを示し、青い丸は、そのデータを路面電車路線上にマップマッチングしたものである。基本的には数 m 以内の誤差で位置検知が行われ、運行制御上は問題ないことが確認された。

7. おわりに

以上、ライトレールの高度化に関して、(1)シミュレータを開発し、LRT 等新しい都市交通システムの定量的な比較や運行管理センターからの車両への適切な走行指示による高速性、快適性のアップが可能となったこと、(2)架線レスライトレールシステムの技術的比較を行い、現状で実現可能性の高いハイブリッド方式車両を用いて、誘導案内実験を実施して、実用可能性が高いこと、(3)模型実験装置を用いて、1軸台車や独立回転台車のライトレールシステムへの適用可能性について検討したこと、(4)GPS 受信機を路面電車車両に搭載し、停留所基地局、センター局との情報のやりとりにより車両への的確な運行指示が可能なこと等が確認された。新しい都市交通システムを導入しようと言う動きは、各自治体等でも出てくる機運にはあるが、最終的にはコスト等がネックとなって進んでいないのが現状である。しかし、ライトレールシステムは道路上に軌道を敷設することを基本としているため、他の専用軌道システムに比して大幅なコスト低減が見込まれるため脚光を浴び始めている。ただし、道路上を走行するという制約を如何に緩和するかが、利用者の利便性向上につながるため、実導入への鍵を握っていると言っても過言ではない。従って、これらの研究成果がその基礎となることを望む。

参考文献

- (1)水間他「LRT システム評価シミュレータの開発(2)」第 22 回 日本シミュレーション学会大会 発表論文集 pp247-250,2003.6
- (2)大野「日本における LRT の可能性」平成 15 年度(第 2 回)交通安全環境研究所講演会 講演概要 pp19-32,2003.7
- (3)山口他「GPS を利用した信号システムの開発」電気学会研究会資料 TER-03-29,pp.11-16, 2003.7

(4)水間他「GPS を利用した LRT 信号システムの導入効果」電気学会研究会資料 TER-03-30,pp17-22,2003.7

(5)水間「新しい都市交通システムの実用化をめざして」平成 15 年度(第 2 回)交通安全環境研究所講演概要 pp.79-104,2003.7