

# ライトレールシステムの導入評価に関する研究

水間 毅\*

佐藤 安弘\*

大野 寛之\*

松本 陽\*

## Study of evaluation for introducing LRT

by

Takeshi Mizuma \*

Yasuhiro Sato \*

Hiroyuki Ohno \*

Akira Matsumoto \*

### Abstract

New transportation systems representative of LRT (Light Rail Transit) are developing mainly 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.. But it is not easily to say that LRT systems are developing favorably in Japan because it is difficult for operators to clarify the effect of introducing LRT systems quantitatively. Therefore, in this study, we clarify the characteristics of transportation systems and execute the quantitative analysis through dynamic simulations for them. Moreover, new evaluation method using AHP (Analytic Hierarchy Process) method that we proposed formerly are developing and some calculation results are shown.

## 1. はじめに

近年、新しい都市交通システムとして、LRT(Light Rail Transit)システムがヨーロッパを中心に発展している。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。このことにより、従来の自動車中心の交通体系を公共交通中心の交通体系に変化させることができ、環境に優しい街作りにも貢献できると言うことで、ヨーロッパにおいては、LRV 等の公共交通機関は「都市の装置」として位置づけられ、ガス、水道、電気と同様、市民に必要なものとして行政当局からの支援を受けて整備がなされている。

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、鹿児島市交通局等も LRV の導入を決定しているなど、発展の兆しを見せているものの、路面電車と自動車交通の関係において、必ずしも、LRT システムの発展が順調に進んでいるとは言いがたい。これは、LRV の導入が、現状の自動車中心の交通体系に比してどの程度効果があるかが確定できないためと思われる。

従って、本研究では、LRV の導入効果をできる限り定量化し、日本における LRT の導入を促進させるための評価法を検討したのでその結果を報告する。

## 2. 研究の目的と概要

LRT を中心とする新しい都市交通システムは、多様なものがあり、その特徴を整理することが重要である。その上で、それらの特徴を数量化することにより、評価することとする。数量化の手段として、シミュレーションを利用し、新しい都市交通システムをコンピュータ上で走行させて、その結果を数値化することとした。シミュレーションの方法としては、地図上に専用軌道の路線を設定して、その上を都市交通システムを走行させて、平均速度、電力消費量を求めるものと、自動車交通との併用軌道を想定した路線を設定して、交通信号機に従って走行させ、表定速度や、混雑率を求めるものの2種類を開発した。また、このようなシミュレーションにより得られた数値を、AHP (Analytic Hierarchy Process : 分析的階層手法)を応用したモデルに適用して、一義的な評価を行う手法も開発した。

このようにして、LRT を中心とした新しい都市交通シ

ステム導入の効果を評価することを目的とする研究を実施した。

## 3. LRT を中心とした新しい交通システム

### 3.1. LRT システム

ヨーロッパで導入が進められている LRT システムは、本来は、トランジットモールや優先レーン走行といった都市計画とリンクさせた総合的なシステムであるが、LRV という高性能な低床式車両を中心として展開されているため、LRV を LRT システムと呼ぶことも多い。従って、ここでも、LRV を LRT システムとして扱うこととする。

写真 1 に、熊本市交通局が導入した LRV(旧・AD トランツ社と新潟鉄工により納入)の外観を示すが、在来の路面電車と比して車両ドアの底面がより軌道(路)面に近く、低床化が図られていることが確認される。



Photo.1 LRV in Kumamoto

LRV の大きな特徴は、車両の低床化にあり、これにより停留所における乗降が易しくなり、人に優しい交通システムが実現されている。

この低床化を実現させるために、車輪の軸をなくしたり、電動機を鉄車輪内に搭載したりと台車に工夫を施している。写真 2 に、広島電鉄が採用した LRV(グリーンムーバ)の台車構造を示す。これは、電動機を台車側はりの両側に各 1 台装荷し、カサ歯車とゴム継手により、それぞれの電動機が前後方向の 2 つの車輪を駆動する方式である。このことにより、左右の車輪間に車軸、電動機がなくなり、車体を低床化することが可能となっている。

この方式は、シーメンス社のコンビーノと呼ばれている LRV において採用されている。

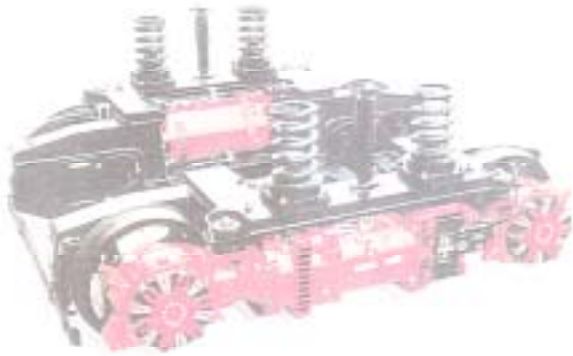


Photo.2 Car bogie at Combino

単編成の路面電車が日本では、比較的輸送需要の多い広島や熊本で、まずヨーロッパ製の LRV の導入が始まったが、日本製の小容量向けの LRV の開発も進められてきた。2000 年には、部分低床式ではあるが、単編成車両の LRV(日本車輛製)が名古屋鉄道・美濃町線で導入された。また、アルナ工機では 100%低床ではないが、モジュール化し、輸送需要に対応して車両を構成できるリトルダンサーのシリーズを開発している。

### 3.2. ゴムタイヤ式交通システム

LRT システムは、人に優しいシステムとして、ヨーロッパを中心として発展を続けているが、LRV の基本は軌道系の一次元のシステムである。従って、LRT 路線の沿線に住んでいる人は、停留所から直接トランジットモール等の都市中心部へ乗り入れることができるが、路線沿線外の人には、LRT の駅までバスか自動車または自転車で乗りつける必要がある。そのため、LRT の停留所付近に駐車場を設置したり、バスの発着場を設けて、乗換の不便さをなくす工夫がされている地域も多いが、バスのような二次元交通システムで、都心部では軌道系交通システムとして走行も可能なシステムを導入する地域もある。

ドイツでは、ガイドウェイバスとして導入されており、日本でも 2001 年 3 月から名古屋で志段味線として実用化されている。

このシステムは、バスに案内輪を内蔵して、郊外では普通の路線バスとして走行し、都心部では、案内輪を出して、専用軌道の案内レールに接触させながら走行するシステムである(写真 3 参照)。ただし、専用軌道にガードレールを設ける必要があるため、LRT のような人や自動車交通との共存は難しい。

一方、フランスでは、路面電車の軌道のように、道路内



Photo.3 Guide mechanism on guideway bus

にレールを埋め込み、そこを小径案内輪を内蔵したバス型車両が走行するというシステムの開発がなされ、一部は実用化されている。

写真 4 に Lohr 社の Translohr 車両の概要を示し、写真 5 に案内のメカニズムを示す。



Photo.4 Translohr and Bus

写真 4 の右側の車両が Translohr で、中央にレールが埋め込まれ、車両内の案内輪により案内がなされる。車両の支持はゴムタイヤで行うため、路面をバス(写真 4 の左側)と並行して走行することも可能となっている。これは、パリ市郊外で実証実験走行を行った時の様子である。ただし、車両の駆動は電動機で行うため、架線を空中に張ってある。

写真 5 は Translohr の案内機構を示したもので、軌道に埋め込まれたレールの両側を車両内に搭載した小径の案内輪が挟み込んで案内をする構造となっており、簡易な軌道構造でバスや自動車との併用走行が可能となっている。このシステムでは架線のないところではバッテリーでも走行することは可能であるが、架線による集電を基本としている。



Photo.5 Guide mechanism of Translohr

#### 4. LRTシステム評価のためのシミュレーション開発

3.で述べたように、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特性を入力した上で、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。

##### 4.1. 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)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。

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、さらにダイアログが表示され、別途設定を行う(図1参照)こととした。

Table 1 Contents of vehicle performance

| 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 |



Fig.1 Example of setting up image of vehicle performance

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(図2参照)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り過ぎ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。



Fig.2 Example of setting limit speed at curve radius



また、速度 - 引張力特性については図 3 のように設定する。

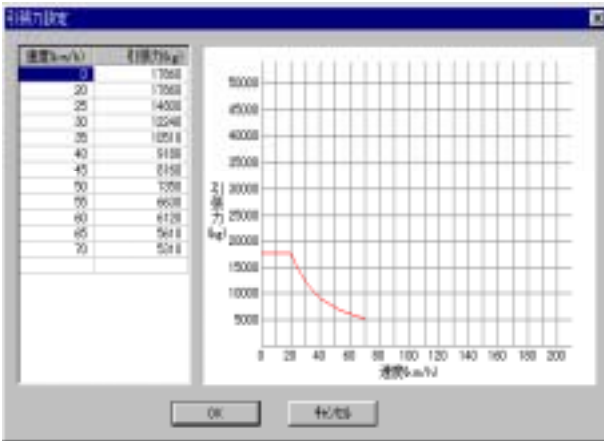


Fig.3 Example of traction force characteristics with speed

走行抵抗 ( $F_r$ (kg/t))については、直線抵抗 ( $F_1$ )と曲線抵抗 ( $F_2$ )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  $R$  に反比例することとして(3)式のように設定することとした。

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

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

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

ただし、 $a, b, c, d$ 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(4)式のように定義し、車両は運動方程式より求めた(5)式で得られる加・減速度 ( $m/s^2$ )で走行することとした。

$$M = (\text{定員} \cdot \text{乗車率} \cdot 1 \text{人あたりの平均体重}) + \text{車両重量} \quad \dots (4)$$

$$= (F - F_r \cdot M) \cdot g / M \quad \dots (5)$$

ただし、 $F$ :引張力(kg・重)、 $g$ :重量加速度 ( $m/s^2$ )

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(6)式で、減速時は(7)式で表現する。

$$W = E \cdot (1 + (\mu/100) \cdot (1/100)) / t \cdot e \quad \dots (6)$$

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

ただし、 $\mu$ :車輪摩擦率、 $\lambda$ :摩擦反映率

$e$ :機器効率、 $Re$ :回生率

車輪が摩擦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。

(6),(7)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生電力量の差で求める。

## 4.2. 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、各停留所のキロ程と各交差点における交通信号機のキロ程を上下線別に設定可能としているところにある(図 4 参照)。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。

さらに、勾配区間をキロ程により設けることが可能となっている。

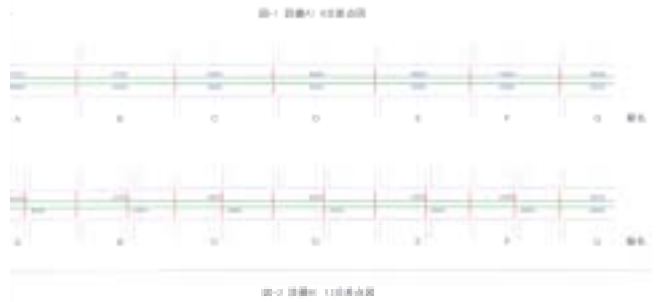


Fig.4 Example of setting route, stops and crossing

### (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(表 2 参照)。

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

Table 2 Example of setting the limit speed

|     | A    | B       | C          |
|-----|------|---------|------------|
| 103 | キロ程～ | キロ程(m)  | 制限速度(km/h) |
| 104 |      |         |            |
| 105 | 0    | 49.99   | 20         |
| 106 | 50   | 249.99  | 60         |
| 107 | 250  | 349.99  | 40         |
| 108 | 350  | 1399.99 | 60         |
| 109 | 1400 | 1449.99 | 20         |
| 110 | 1450 | 1899.99 | 60         |
| 111 | 1900 | 1949.99 | 20         |
| 112 | 1950 | 3049.99 | 60         |
| 113 | 3050 | 3099.99 | 20         |

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。
- 6) 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(図 5 参照)。
- 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(図 6 参照)と混雑率を計算する。
- 4) 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。

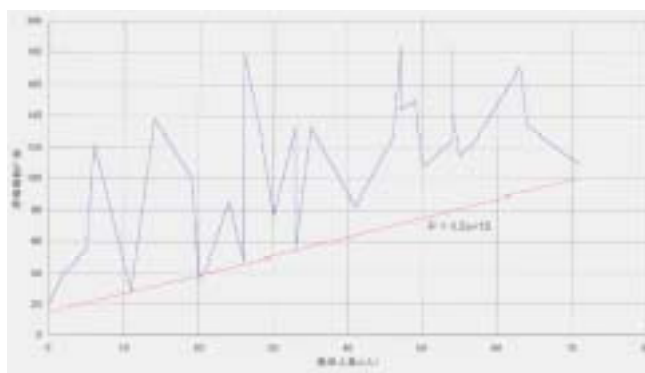


Fig.5 Example of getting on passengers on stops

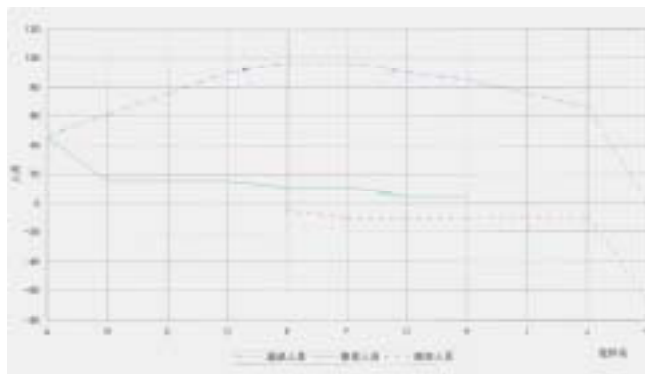


Fig.6 Example of passing through passengers

##### 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。
- 2) 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。

## 5 . シミュレーションの実行

### 5.1. 設定路線と想定交通システム

LRT を評価する場合、新たに路線を引く時に、LRV と同種の交通システムの比較を行う場合と、現状で自動車と路面電車が走行している路線に LRV を導入する場合が考えられる。前者の例を地図上走行シミュレータで、後者の例を軌道 - 道路混合交通シミュレータでシミュレートした結果を示すこととする。

## 5.2. 地図上走行シミュレータの設定と実行

### (1) 設定

具体的な路線を、8000分の1の地図上の西武柳沢 - 調布間 9.5km で設定し、21の駅を設定した。ただし、最小曲線半径 40m、勾配は 0 とした。

対象とする交通システムは、従来の都市内交通の主力である新交通システム、発展を遂げている LRT システム、バスを利用した、隊列走行可能な無人自動運転システム IMTS(Intelligent Multi-mode Transit System)を設定した。

シミュレーションの実行に必要な各システムの主要諸元を表 2 に示す。

Table2 Main specifications of each system

| 主要諸元         | LRV | 新交通 | IMTS   |
|--------------|-----|-----|--------|
| 給電方式         | 架線  | 架線  | なし     |
| 定員 (人)       | 100 | 100 | 100    |
| 空車重量 (t)     | 21  | 30  | 10×2隊列 |
| 最小曲線半径 (m)   | 40  | 40  | 20     |
| 最高速度 (km/h)  | 60  | 60  | 60     |
| 回生率 (%)      | 40  | 10  | 0      |
| 加速度 (km/h/s) | 3   | 3.5 | 3.5    |
| 減速度 (km/h/s) | 3.5 | 3.5 | 3.5    |
| 車輪摩耗率 (%)    | 5   | 15  | 10     |
| 摩耗反映率 (%)    | 5   | 15  | 10     |

最高速度は、現行法規では路面電車は 40km/h であるが、LRT の高性能化を利用することとして 60km/h とした。新交通システムについては現状の 60km/h を IMTS では一般道路上を走行可能なため 60km/h とした。

加減速については、鉄輪支持方式の LRV とゴムタイヤ支持方式の新交通は既存の設定例を参考に設定したが、IMTS はゴムタイヤ支持方式ということで新交通と同様とした。

回生率については、実路線でのデータを参考に決定したが、IMTS は現状では CNG やディーゼル等の液体燃料で走行するため 0 とした。車輪摩耗率、摩耗反映率については、鉄輪とゴムタイヤの違いを考慮して設定した。

図 7 に各交通システムの速度 - 引張力特性を、図 8 に走行抵抗、図 9 に曲線半径別制限速度特性を示す。

速度 - 引張力特性については実データを参考に設定し、速度 - 走行抵抗特性については実データにより (8)、(9) 式で算定した。

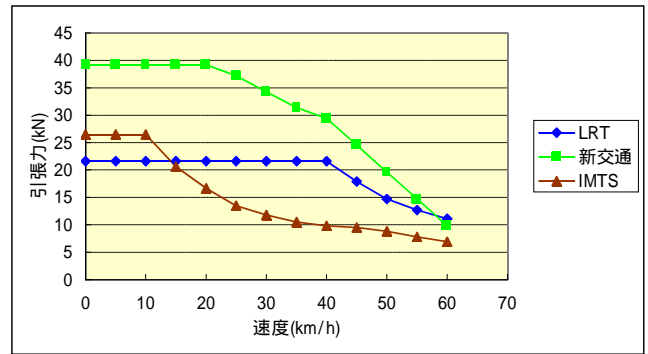


Fig.7 Traction force characteristics with speed

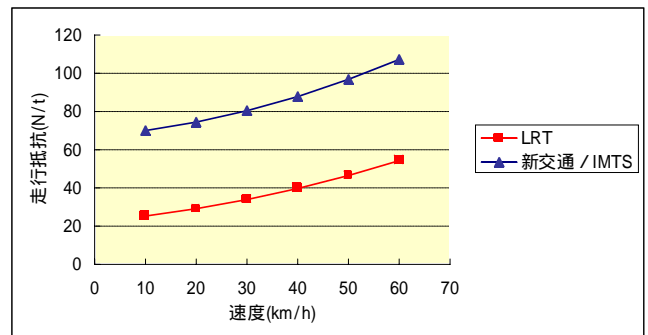


Fig.8 Running resistance of each system

$$R_{LRT} = 22.5 + 0.23v + 0.005v^2 \quad \dots (8)$$

$$R_{IMTS/新交通} = 67.0 + 0.20v + 0.0075v^2 \quad \dots (9)$$

ただし、R:走行抵抗(N/t),v:速度(km/h)

新交通システムや IMTS はゴムタイヤのため LRT に比して走行抵抗は大きくなっている。

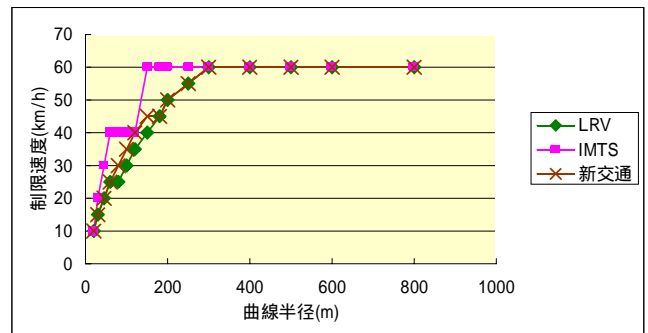


Fig.9 Limit speed characteristics with speed

曲線半径ごとの制限速度については、新交通は実路線のデータに基づき、IMTS は道路構造令を参考に設定したが、LRT については実験結果を基に(10)式のように設定した。

$$v < 3.7R \quad \dots (10)$$

ただし、v:速度(km/h)、R:曲線半径(m)

(2)結果

写真 6 に出力結果例を示す。



Photo 6 Output example of simulation

設定された地図上の路線を交通システムが動的に進行し、画面右側の上部に、その時の車両位置における速度が、下部に走行消費電力がリアルタイムに表示されていく。

写真 6 では、LRV が西武柳沢を出発し、調布に到着した時の出力画面を表示している。右側上部画面で、速度が 20km/h から 60km/h に上昇している部分は、曲線部における速度制限を受けた後再加速して速度 60km/h まで上昇し、その後、調布駅に到着している様子を示している。また、下部画面で電力がマイナス方向に行っている部分は回生モードであることを示している。

また、図 10 にシミュレーション結果例を示す。

この例では、IMTS の消費電力量は 1 両あたりの結果であるので、2 両隊列の場合、2 倍となることを考慮すると、消費電力量、二酸化炭素排出削減量については LRT が、平均速度は IMTS が最も優れていることが示されている。なお、二酸化炭素削減量は、節減される電力量を回生電力量として、それに電力受電端二酸化排出係数を乗じて求めたもので、ここでは 1990 年のデータを採用して、係数は 0.423 としている。

このようにして、地図上の路線を走行したデータが計算され、各交通システムの特徴が定量化可能となる。

5.3. 軌道 - 道路混合交通シミュレータの設定と実行

(1)設定

現状が自動車と路面電車の混合交通となっている併用軌道を想定し、300 ~ 450m 間隔の 7 駅(停留所)を道路上に設定し、各駅と駅中間に計 12 台の交通信号機を設定した。対象とする自動車、路面電車(TRAM)、LRT の主要諸元を

表 3 に示す。

ここで、LRT は最高速度 60km/h で走行可能とし、減速度は路面電車と同程度となるように設定したため、大きな



Fig.10 Example of simulation results

Table3 Main specifications of transport systems

|             | 自動車   | TRAM | LRV |
|-------------|-------|------|-----|
| 最高速度(km/h)  | 系統速度  | 40   | 60  |
| 加速度(km/h/s) | 5.0   | 2.5  | 4.7 |
| 減速度(km/h/s) | 10.8  | 3.0  | 6.9 |
| 車両長 (m)     | 7/ 1台 | 14   | 20  |
| 停車時分 (秒)    | -     | 30   | 30  |

値となっている。また、交通信号機のサイクル長は 180 秒としている。

(2) 結果

図 11 に、自動車、在来の路面電車、LRT を走行させた場合の S-T(距離-速度)特性結果例を示す。

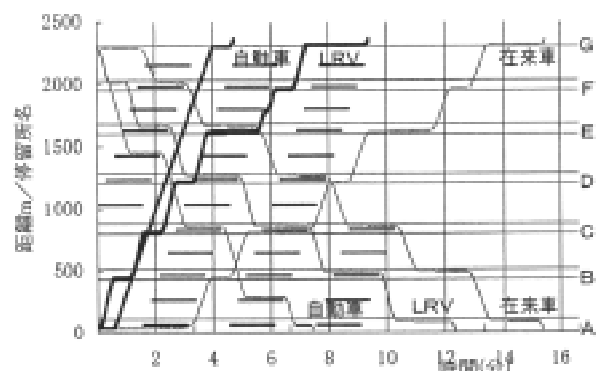


Fig.11 Example of running results by each transport



上りの自動車は、交通信号機の系統制御速度 40km/h に従って走行しているため、信号機に支障されことなく走行していることが確認されるが、最高速度が 60km/h と高く、高加・減速が実現可能な LRT もある程度は交通信号機に支障されずに走行可能であることも示された。在来の路面電車は最高速度、加・減速度とも低いため交通信号機に支障される回数が増加し、走行時間が大幅に拡大している。

図 12 に、在来の路面電車が 90 秒時隔で走行中、A(K) 停留所において 40 秒の遅れを生じた場合に、遅れがどのように拡大し、後続車との間隔がどのようになるかをシミュレートした結果を示す。

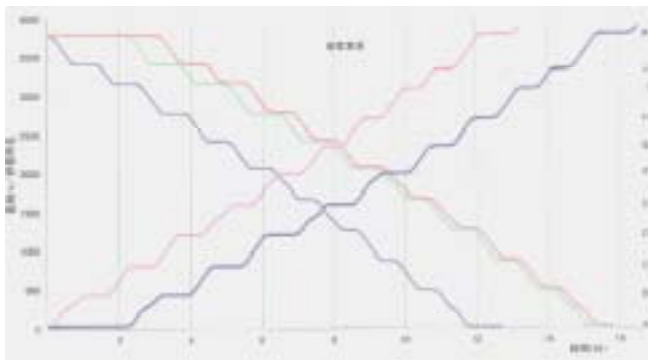


Fig.12 Simulation results in case of delay by all trams

A(K) 駅で 40 秒遅れると、その間 B(J) 駅では乗車待ち客が増加し、その分遅れた車両が B(J) 駅に到着した場合、停車時分が延びることになる。それが、また遅れを拡大させることとなり、C(I) 駅、D(H) 駅とますます遅れが拡大することになる。そのことが後続車との接近となり、いわゆるだんご運転状態となっていることが確認される。

一方、図 13 には、同様の路線において、在来の路面電車に LRT を導入した場合、もし、LRT が A(K) 停留所で 40 秒の遅れを生じた場合に遅れがどのようになるかを示したものである。

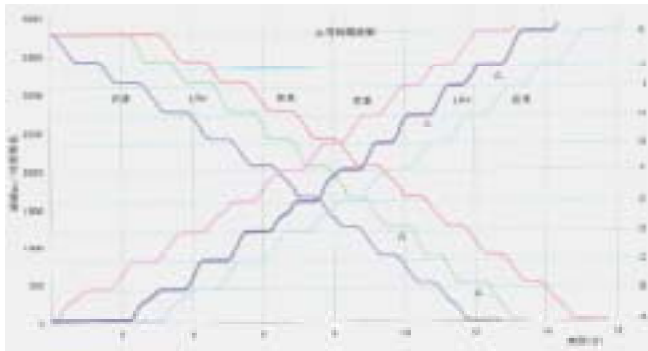


Fig.13 Simulation results in case of delay on LRT

この例では、A(K) 駅で遅れた LRT が高速性 (60km/h)、高加減速性を活かして遅れを回復し、H(D) 駅や J(B) 駅ではむしろ等時隔確保のため出発抑止を行っている例を示している。

この結果を、遅れを生じた車両(図 12 では TRAM、図 13 では LRT)に乗車した客の損失時分(遅れ時間×通過人数)で表現すると図 14 のようになる。

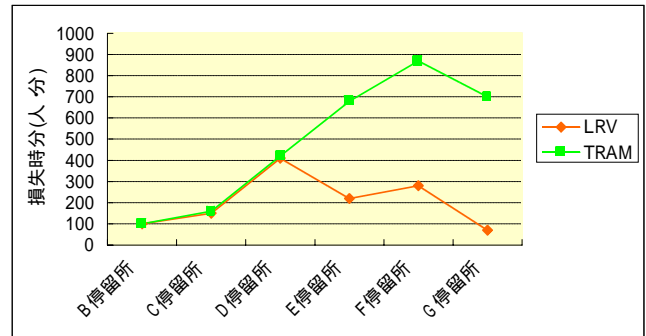


Fig.14 Calculation example of loss time on passengers

TRAM では遅れの拡大とともに損失時分も増大しているが、LRT では高速、高加減速性能を活用して、一旦拡大した損失時分が縮小していく様子が確認される。

このようにして LRT 導入の効果を定量化することが可能となる。

## 6. シミュレーション結果を用いた評価

以上のようなシミュレーションにより、LRT を始めた各種交通システムの特徴のいくつかは数値化されることが確認されたが、交通システムにはさまざまな特徴があり、これらの値をもって直ちに優劣を論じることはできない。それらの特徴を可能な限り数値化して、さらに総合的に評価する必要がある。

本章では、交通システムの様々な特徴を、シミュレーション以外で数値化する試みとそれらのデータを元に、AHP を応用した手法を用いて総合的に評価する手法を開発したのでそれらについて説明する。

### 6.1. 都市交通システムの評価項目

都市交通システムを評価する場合は、事業者、利用者、環境の 3 点から行う必要があり、図 15 のような階層構造を設定した。

これは、一番下層の項目を評価項目とし、これらの項目(ここでは中項目という)により、その上位の階層(ここでは視点という)を評価し、さらに視点間での評価を元に最上位の評価(交通システムの評価)を行う階層構造となって

いる。評価項目はさらに小項目に分割され、この小項目を数値化することとする。

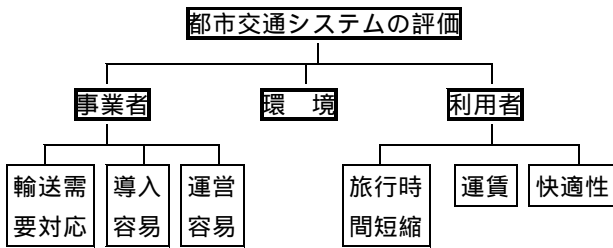


Fig.15 Hierarchy structure for evaluation of transports

中項目をさらに細分化して表4のようにする。

Table4 Classification for evaluation of transports

| 視点  | 評価中項目         | 小項目                 | 評価法      |
|-----|---------------|---------------------|----------|
| 事業者 | 輸送需要<br>対応容易性 | 輸送能力                | シミュレーション |
|     |               | 輸送力調整               | 段階       |
|     | 導入容易性         | 路線自由度               | シミュレーション |
|     |               | インフラ建設費             | 段階       |
|     |               | インフラ外建設費            | 段階       |
|     |               | 段階建設性               | 段階       |
|     | 運営容易性         | 運転要員確保              | 段階       |
|     |               | エネルギー消費             | シミュレーション |
|     |               | 保守性                 | 段階       |
|     |               | 異常時対応性              | 段階       |
| 利用者 | 旅行時間の<br>短さ   | 表定速度                | シミュレーション |
|     |               | 頻度                  | シミュレーション |
|     |               | 定時性                 | シミュレーション |
|     | 快適性           | 乗り心地                | 段階       |
|     |               | 車内空間                | 段階       |
|     |               | 安心感                 | 段階       |
|     | 運賃            | 運賃                  | 同一       |
| 環境  | 騒音・振動         | レベル                 | 測定       |
|     | 景観            | 架線                  | 段階       |
|     | 排気ガス          | CO <sub>2</sub> 排出量 | シミュレーション |

ここで、シミュレーションによる評価という項目は、本研究で開発したシミュレータにより求められる結果を用いて計算する。段階評価というのは、シミュレーションでは数値化されない項目を、既存の交通システムとの比較において、段階を付けて評価するものである。例えば、「インフラ建設費」では、既存の交通システムとして、新交通シ

ステム、地下鉄、路面電車、バスを選び、コストが高い順に点数(昇順)をつけていく(図16参照)。そして、対象とする交通システムがどこに位置するかで点数化する。

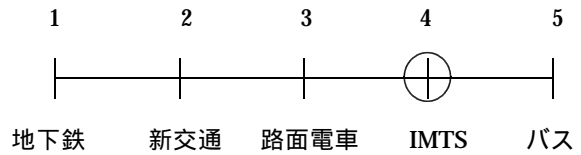


Fig.16 Numbering for transportation systems

図16の例では、地下にトンネルを掘るということで地下鉄が一番コスト高と考えられ、以下、高架構造物となる新交通、路面上に建設する路面電車、路面のみを利用するバスという順にコストが低くなるという段階を設ける。次に、対象とする交通システムのIMTSの段階付けとしては、道路面上に磁気ネイルを埋め込み、ガイドレール等を敷設することより、バスよりはコスト高になるものの、レールを敷設する路面電車よりはコスト低下が期待されるということで、バスと路面電車との間のランクとして位置づける。以上のようにして、一番コストが低いバスから5点、次のIMTSが4点と点数化を行っていく。

シミュレーションによる値は、そのまま交通システムの評価値とするが、例えば、エネルギー消費のように大きいものほど評価が低いものについては、逆数をとってそのシステムの評価値とする。

このようにして求めた評価値は、次元が異なるので、正規化する。

基本的には、最も良いシステムの評価値を1として正規化する。例えば、図16の例で、インフラ建設費について、各交通システムの評価値は(11)式のように表現される。

$$(バス, IMTS, 路面電車, 新交通, 地下鉄) = (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2) \quad \dots (11)$$

## 6.2. 都市交通システムの評価法

各小項目について求められた評価値は、さらに中項目ごとに正規化するが、ここではべき乗平均を取って求める。例えば、導入容易性において、LRT、新交通システム、IMTSで、各小項目で(12)式のような点数化がなされた場合、(13)式のようにして中項目としての評価値を求める。

|       |       |       |       |          |
|-------|-------|-------|-------|----------|
|       | LRT   | 新交通   | IMTS  |          |
| 自由度   | 0.667 | 0.667 | 1.000 | ... (12) |
| インフラ  | 0.600 | 0.400 | 0.800 |          |
| インフラ外 | 0.750 | 0.500 | 0.500 |          |
| 段階    | 0.667 | 0.333 | 0.667 |          |

$$\begin{aligned} (LRT, \text{新交通}, \text{IMTS}) &= ({}^4 (0.667 \cdot 0.6 \cdot 0.75 \cdot 0.667), \\ & {}^4 (0.667 \cdot 0.4 \cdot 0.5 \cdot 0.333), {}^4 (1 \cdot 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.667)) \\ &= (0.719, 0.493, 0.772) \quad \dots (13) \end{aligned}$$

以上のようにして各中項目ごとに、各交通システムの評価値が求められる。今回の評価例で用いた、LRT、新交通、IMTS における各中項目ごとの評価値を(14)式に示し、これをシステムの点数化行列[A]として表す。

$$[A] = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{需要} & \text{導入} & \text{運営} & \text{時間} & \text{快適} & \text{運賃} & \text{環境} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{LRT} \\ \text{新交通} \\ \text{IMTS} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.817 & 0.719 & 0.522 & 0.943 & 0.826 & 1 & 0.721 \\ 1 & 0.493 & 0.587 & 0.898 & 0.55 & 1 & 0.506 \\ 1 & 0.772 & 0.622 & 0.983 & 0.55 & 1 & 0.651 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots (14)$$

一方、各視点間、各中項目間に関する評価については重み付け関数を用いて行列で表すこととする。

すなわち、それぞれの項目を相互に比較して、重要度を、1を基本として2のべき乗の等比級数で評価して、それを行列形式で表現することとする。

例えば、各視点間において重要度が、事業者が利用者や環境に対して2倍であると判断し、利用者と環境は同程度の重要度であるという判断をした場合、(15)式のような行列が作成される。

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} \text{事業者} & \text{利用者} & \text{環境} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{事業者} \\ \text{利用者} \\ \text{環境} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots (15)$$

ここで、固有ベクトルを求め、固有値の最大値で正規化する。

この例では、各視点間の重要度は(16)式ようになる。

$$(\text{事業者}, \text{利用者}, \text{環境}) = (0.5, 0.25, 0.25) \quad \dots (16)$$

これを中項目どうしでも行うが、本例では、全て同じ重要度と判断して(17)~(19)式で表すこととする。

$$(\text{需要}, \text{導入}, \text{運営}) = (0.333, 0.333, 0.333) \quad \dots (17)$$

$$(\text{時間}, \text{快適}, \text{運賃}) = (0.333, 0.333, 0.333) \quad \dots (18)$$

$$(\text{騒音}, \text{排ガス}, \text{景観}) = (0.333, 0.333, 0.333) \quad \dots (19)$$

(16)式に(17)~(19)を乗ずると、各中項目の重み付けが列ベクトルで表現されることになり、これを評価項目重要

度ベクトル(x)と呼ぶ。

本例では(20)式で表現される。

$$\begin{aligned} x &= (\text{需要}, \text{導入}, \text{運営}, \text{時間}, \text{快適}, \text{運賃}, \text{環境}) \\ &= (1/6, 1/6, 1/6, 1/12, 1/12, 1/12, 1/4) \quad \dots (20) \end{aligned}$$

ここで(14)式と(20)式を乗じて、各交通システムの優先度を求める((21)式参照)。また、(14)式のうち、利用者に関する行列を[A<sub>i</sub>]ベクトルを x<sub>i</sub> とし、[A<sub>i</sub>]・x<sub>i</sub> を各交通システムの輸送需要とする((22)式)。

$$A \cdot x = (\text{各交通システムの優先度}) \quad \dots (21)$$

$$A_i \cdot x_i = (\text{各交通システムの交通需要量}) \quad \dots (22)$$

以上の計算を行い、LRT、新交通、IMTS における優先度、交通需要量を計算した結果例を図17に示す。

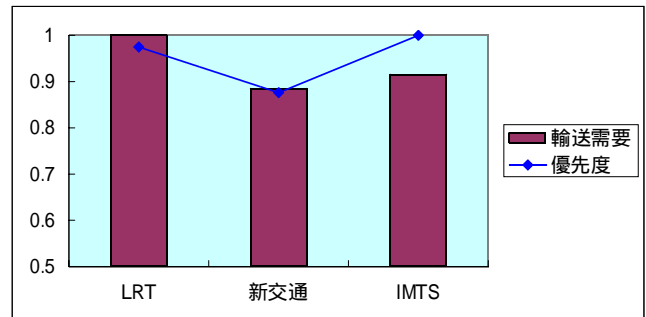


Fig.17 Evaluation results by proposed AHP method

この計算例では、事業者、利用者、環境で総合的に判断した、交通システム導入の優先度はIMTSが一番高いものの、交通需要としてはLRTが一番多いという結果になっている。これは、LRTが人に優しいシステムとしての特徴を備えており、利用者にとっての重要度は高いものの、IMTSは無入、自動運転による事業者のメリット、騒音、景観等の環境面からもメリットが高いと判断されたためと思われる。

このようにして、従来定性的に判断されていたメリット、デメリットをある程度定量的に計算し、それらを一意的に評価することが可能となった。

## 7. おわりに

以上、新しい都市交通システムを評価する手法を提案し、その評価例を示した。即ち、まず、地図上に路線を設定し、その路線を走行することにより各種データ(平均速度、

電力消費量)が得られるシミュレーションや、自動車との混合交通のため、交通信号機とともに走行し、各種データ(遅れ時間、混雑率)が得られるシミュレーションを用い、各交通システムの特徴を数値化したり、既存の交通システムとの段階比較により数値化する等の交通システムの特徴の数値化の例を説明した。次に、交通システム評価の階層を作成して、これらの階層間、評価項目間の重要度を相互比較により等比数列で評価し、その結果を行列で表現して、固有ベクトルで表すという AHP を応用した手法を提案した。その上で、各交通システムの評価値とその重要度を乗じることによりシステムの優先度を決定し、評価値のうち、利用者に係る部分の計算値を交通需要とするモデルを提案して、その結果例を示した。

本手法により、従来、定性的に述べられてきた交通システムの特徴のいくつかは、シミュレーション等によりある程度正確に定量化することが可能となり、また、それらの総合的な評価が計算可能となった。このため、新しい路線に適用する交通システムの選択等がある程度公正に行うことが可能となったと言える。

この AHP を用いた手法は、近年、新しい路線に交通システムを導入する場合の客観的評価を行う手法として、評価を得てきており、愛知県・東部丘陵線での HSST 導入の際にも利用された方式であり、今後もこうした活用方法が増加していくものと思われる。

従って、この手法の、より高精度化が求められており、特に交通需要に関するモデル化は一層の詳細化が必要とされている。

本研究で提案した手法は、従来提案されてきた AHP を応用した手法<sup>(1)</sup>を、より高精度、詳細化を目指したものであり、ある程度の成果を上げたものと判断しているが、今後もさらなる高度化が必要であると考えている。

## 参考文献

- (1)水間他「新しい交通システム導入に際しての定量的比較評価法」電気学会論文誌 産業応用部門誌  
p.193-198,2000.2
- (2)水間他「走行シミュレーションを利用した都市交通システム評価法」交通安全環境研究所発表会 講演概要  
2001.11