

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

交通システム部

水間 毅 佐藤 安弘

1. はじめに

近年、様々な都市交通システムが開発され、一部は実用化されている。特に、ヨーロッパにおいては、LRV(Light Rail Vehicle)等の高性能な車両を導入し、都市計画とリンクしてLRT(Light Rail Transit)システムとして発展を遂げている都市が増えている。一方、日本においてもLRVの導入の動きが見られる他、リニアモーターや磁気浮上式技術を利用した新しい都市交通システムの開発、実用化の動きも見られ始めている。従って、今後は、このような新しいシステムが、どのような地域に適用可能性があるのかを客観的に評価することが、よりよい都市空間創造のためには重要になってくる。

これまでの研究⁽¹⁾⁽²⁾において、各交通システムの技術的特徴を整理して、それらを点数化することにより相対的に評価し、評価項目ごとの重み付け値と掛け合わせて、交通システムの優先度を評価するという、AHP(Analytic Hierarchy Process)を応用する手法を提案しており、この手法を用いて、導入する交通システムを決定するという例も見られるようになってきた。しかし、多様な都市交通システムが開発されつつある現在、この手法の、より高精度化が望まれるようになってきた。

従って、本稿では、従来の手法に、当研究室で新たに開発した各種シミュレータによる計算結果を考慮した、新しい都市交通システム導入に関する評価手法について、述べることとする。

2. シミュレーションの概要

開発中の都市交通システムを評価するには、与えられた路線を実際に走行して、得られたデータを基に行うことが最善であるが、現実には不可能に近く、実験線等を通じて基礎的データを収集して評価している

例が多い。従って、こうした基礎的データを基にシミュレーションにより、実走行と同等のデータが取得できれば、より高精度なシステム評価が可能となると考えられる。

2.1. 地図上走行シミュレータの概要

実地図上に線形(曲線半径、勾配)、駅位置等を作成し、その路線に適用可能な交通システムの仕様を入力することにより、走行をシミュレートし、各種データを収集するシミュレータを開発した。

基本的には、各交通システムは(1)式の運動方程式に基づいて走行し、(2)式により走行消費電力を計算して、走行電力量を求める。

$$(F+Fr \cdot m) \cdot g = m \cdot a \quad \dots(1)$$

ただし、F:引張力(kg)、Fr:走行抵抗+曲線抵抗(kg/t)、g:重力加速度、m:車両重量(定員乗車)(t)、a:加・減速度(m/s²)

$$W = (1/2) \cdot m \cdot v^2 \cdot \{ 1 + (\mu/100) \cdot (1/v) \} \cdot k / t \quad \dots(2)$$

ただし、W:消費電力(W)、v:走行速度(m/s)、μ:車輪摩耗率(%)、k:摩耗反映率(%), t:サンプリング時間(s)

さらに、その時の走行に関わるCO₂削減量を、回生電力量を基礎として(3)式のように定義した。

$$\text{CO}_2 \text{削減量}(t/\text{年}) = (\text{回生電力量}:kWs) \cdot \alpha / 3,600 \quad \dots(3)$$

ただし、α:電力受電端CO₂排出係数(kg/kWh)

以上により、設定した路線、駅、車両性能(F,Fr等)を用いて走行シミュレーションを実行し、平均速度、走行電力量、CO₂削減量を求める。

2.2. 軌道 - 道路混合交通シミュレータの概要

新しい都市交通システムとして脚光を浴びているLRVも都市中心部では、道路交通と混合して走行する場合もある(併用軌道)。その場合、道路交通信号に制御されて運行することになるが、自動車交通の流れとの協調は重要なテーマである。従って、軌道交通と

道路交通が混合している路線の走行が可能なシミュレータを開発した。

基本的には、2.1 と同様な条件(路線、車両性能)を入力するが、道路上を走行し、停留所での乗降時間により走行条件が大きく異なるため、車両の項目に長さを追加し、交通信号機の建植位置、制御タイミングや各停留所における乗降客数が入力可能となっている。

また、このシミュレータは、表定速度、車両混雑率、損失時間(遅れ時間×乗客数の総和)を評価項目として計算可能となっている。

このシミュレータの特徴は、道路上を走行する自動車の流れを群として扱う点にある。自動車の群を乗用車に換算して1つの群としてまとめ、これをパケットとして走行させることにより、一種の移動閉そくのような走行で模擬する。即ち、交通信号現示の1サイクルを6等分し、その時間内に自動車が一様に到着するものとして、それを1パケットとして処理する。その際のパケット長Pは以下のような式で計算する。

$$P=(C/6) \cdot (1/3600)Q \cdot (L+K) \quad \dots(4)$$

ただし、P:パケット長(m)、C:交通信号サイクル長(秒)、Q: 秒あたりの交通流量(台/秒)、L: 換算乗用車長m、K:信号待ち時車間距離m

ここでは、求められた1自動車群の長さの半分をパケット長に、残りを安全停止距離に割り当てる考えとしている。

3. シミュレーションの実行

3.1. 設定路線と想定交通システム

都市空間に新しい交通システムを導入する場合としては、新たに都市交通システムを建設する場合と、既存の路線を改良して新しい都市交通システム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ションした例を示す。

3.1.1. 地図上走行シミュレータの設定 本シミュレータの特徴としては、具体的な地図上に路線設定をすることなので、西武柳沢 - 調布間に全長9.5km、総数21駅の路線を1/8000の地図上に設定した。ただし、最小曲線半径は40mとし、勾配は0とした。比較する交通システムとしては、在来の都市内交通システムである路面電車(TRAM)、発展を遂げているLRV、およびバスを利用した、隊列走行可能な無人自

動運転システム IMTS(Intelligent Multi-mode Transit System:トヨタが開発し、淡路島で実証運行中)の3種類を想定した。

シミュレーション実行に必要な主要諸元を表1に示す。

表1 各交通システムの主要諸元

主要諸元	LRV	TRAM	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)	20	20	20
最高速度(km/h)	40/60	40	60
回生率(%)	40	10	0
加速度(km/h/s)	3	2.5	3.5
減速度(km/h/s)	3.5	3	3.5
車輪摩耗率(%)	5	5	10
摩耗反映率(%)	5	5	10

最高速度は、LRVとTRAMについては、現行法規では40km/hとなっているが、LRVの性能上では60km/hも可能なので両方設定できるようにした。IMTSについては、一般道路上を走行可能な60km/hとした。

加・減速度については、鉄車輪支持方式のLRV、路面電車は既存での設定例を参考に、ゴムタイヤ支持方式のIMTSについては、粘着性能と乗り心地を考慮して設定した。

回生率については、実路線のデータを参考に決定したが、IMTSでは、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1に各交通システムの速度 - 引張力特性を、図2に走行抵抗、図3に曲線半径別制限速度特性を示す。

これらの値をシミュレータに入力し、地図上の路線を走行させることにより、各種データを計算する。

速度 - 引張力特性については、実データを参考に設定した。

速度 - 走行抵抗特性については実データにより(5),(6)のような式で算定した。

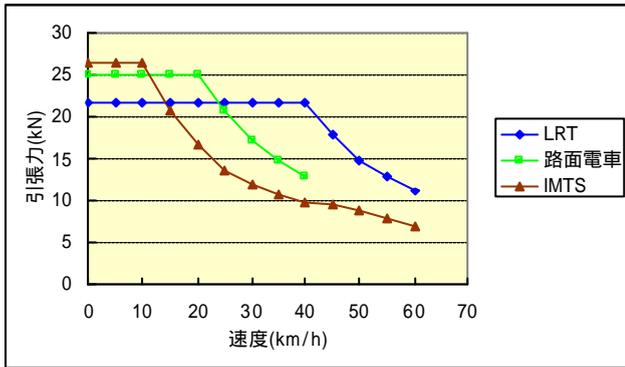


図1 速度 - 引張力特性

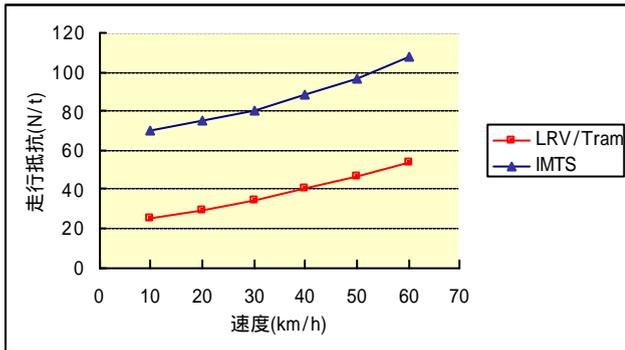


図2 速度 - 走行抵抗特性

$$R_{LRV/TRAM} = 22.5 + 0.23v + 0.005v^2 \quad \dots(5)$$

$$R_{IMTS} = 67.0 + 0.20v + 0.0075v^2 \quad \dots(6)$$

ただし、R:走行抵抗(N/t)、v:速度(km/h)

IMTS はゴムタイヤ駆動のため、鉄輪式の LRV や TRAM に比して走行抵抗が大きくなっている。

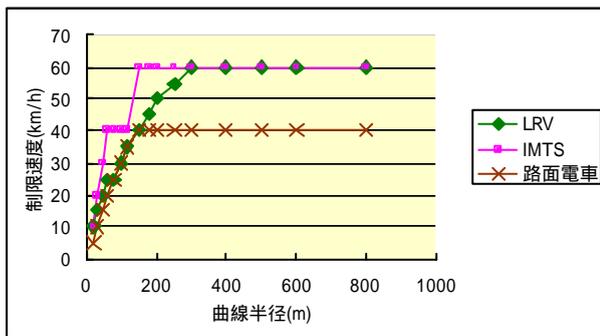


図3 曲線半径 - 制限速度

曲線半径ごとの制限速度については、路面電車は実路線データに基づき、LRV は実験結果を基に(7)式により設定した。IMTS については、道路構造令を参考に設定した。

$$v < 3.7 R \quad \dots(7)$$

ただし、v:速度(km/h)、R:曲線半径(m)

3.1.2. 軌道 - 道路混合交通シミュレータの設定

現状の道路交通と混在して路面電車が走行する区間に、LRV を導入する効果を確認するための設定をした。モデル線区として 300 ~ 450m 間隔の 7 駅(停留所)を道路上に想定し(併用軌道)、各駅と中間に計 12 台の交通信号機を設定した。

対象とする自動車、TRAM、LRV の主要諸元を表 2 に示す。

表 2 各交通システムの主要諸元

	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

ここで、LRV は最高速度 60km/h で走行可能とし、減速度は、路面電車のブレーキ距離と同等となるように設定したため大きな値となっている。また、系統速度というのは、自動車が、信号機の系統制御(連続する交差点の信号機を順次制御する)に従い、赤信号に支障されずに走行できる速度である。また、交通信号機のサイクル長は 180 秒とし、軌道系交通システムが交通信号機手前で停止できない場合は、青信号延長により通過可能(優先信号)とする。

3.2. シミュレーション結果

以上の想定路線により、各種交通システムデータを基にシミュレーションを実行する。

3.2.1. 地図上走行シミュレーション結果 写真 1 に出力結果表示例を示す。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、下部に消費電力が、リアルタイムに表示される(横軸が時間)。

写真 1 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が、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、再加速して最高速度 60km/h に到着している様子を示している。また、下部画面で、電力がマイナスになっているのは、回生モードであることを示している。

また、図 4 にシミュレーション結果例を示す。



写真 1 出力結果例

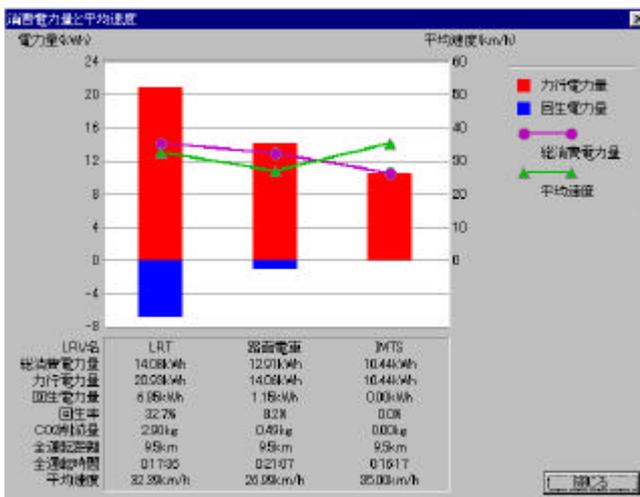


図 4 シミュレーション結果例

この例では、最高速度 60km/h の LRV と 40km/h の路面電車を比較すると、平均速度は LRV が、消費電力量(力行 - 回生)は路面電車が優れていることが数値的に示される。さらに、平均速度、電力量とも IMTS が一番優れていることが示されるものの、CO₂ 削減量においては他のシステムに劣ることが示される。

また、シミュレーション結果を整理したものを図 5 に示す。

ここで、LRV(40km/h)というのは、同一路線を路面電車と同じ最高速度で走行した結果で、LRV(60km/h)というのは、LRV の最高速度である 60km/h で走行した結果を示している。60km/h で走行すると、平均速度が約 12% 増加するものの、電力消費量が約 96% 増加することを示している。

このように、地図上の路線を走行した結果が数値的に示されることにより、交通システムの優劣を明確化することが可能となる。

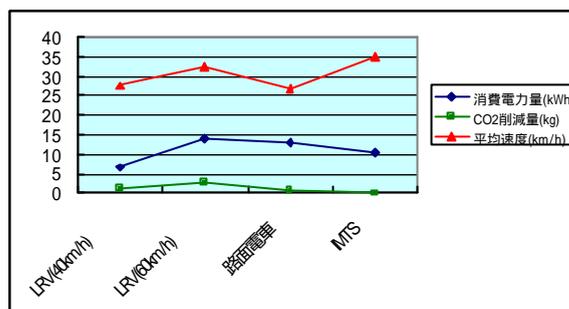


図 5 シミュレーション結果整理例

3.2.2. 道路 - 軌道混合交通シミュレーション結果例 図 6 に、自動車、LRV、路面電車(在来車)を走行させた場合の、S-T(距離 - 時間)特性結果例を示す。

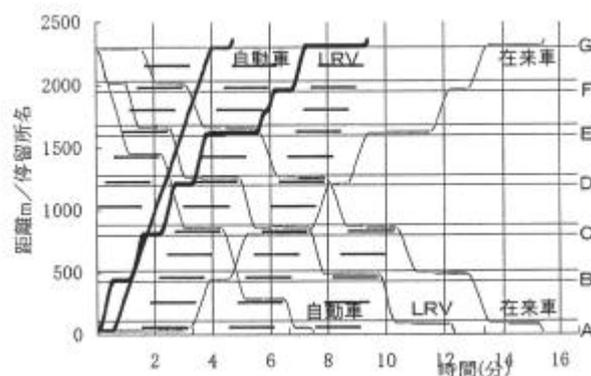


図 6 併用軌道上のシミュレーション結果例

上りの自動車が、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、信号機に支障されずに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・減速度が実現可能な LRV もある程度は交通信号機に支障されずに走行可能なことが確認された。在来車は速度が低いこともあり、交通信号機に支障され大幅に走行時間が拡大している。

図 7 には、在来車 (TRAM) が 180 秒時隔で運行中に、A 停留所 (図 6 中：始発) で 80 秒の遅れを生じたとき、当該車両の損失時分 (遅れ時間 × 通過人数) がどのようになるかを示したもので、遅れを生じる車両が TRAM の場合と LRV の場合を比較したものを示す。

TRAM は 80 秒の遅れのため、後続停留所に次々乗車客が滞留し、乗降時間が延びて遅れが拡大して、損失時分が増加した例を示している。これに対して、LRV では、高速 (60km/h)、高加・減速度を利用して遅れの回復が図れるため、損失時分が拡大せず、交通信号機との制御タイミングによっては縮小する可能性もあることを示している。

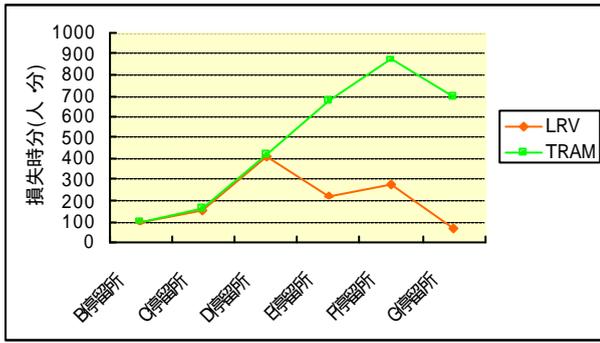


図7 損失時分計算例

なお、乗降客のパターンはあらかじめ設定し、乗車客については、待ち時間とともに拡大するモデルとしている。また、乗降時間は、乗降客数に比例する関数を設定し、定数は、実験データを基礎として(8)式のように算定した。

$$\text{乗(降)時間} = 1.2(0.5) \times \text{乗(降)車人数} + 15 \text{ (秒)} \dots(8)$$

4. シミュレーションによる評価

以上のようなシミュレーションにより、各交通システムの特徴のいくつかは数量化できることが確認されたが、これらの値をもって、直ちに交通システムの優劣を決定することはできない。交通システムは様々な観点から評価されるべきであり、それらを総合的に評価する必要がある。

本章では、シミュレーションにより得られたデータ等を用いて、新しい交通システムを総合的に評価する手法について説明する。

4.1. 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、事業者、利用者、環境の3点から行うこととし、図8のような階層構造を設定した。

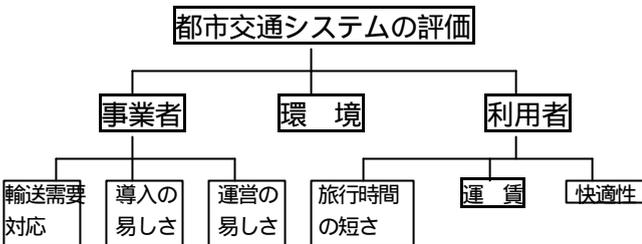


図8 都市交通システム評価の階層構造

各評価項目(以下、中項目という)をさらに表3のよう

に小項目に分類する。

各交通システムを評価する場合は、まず小項目単位で評価することとする。

評価法で「段階」とあるのは、段階を付けて交通システムを評価する手法⁽²⁾で、例えば、輸送力調整の項目では、最も輸送力調整能力が高い無人運転システムを3点とし、増便・増発等が比較的容易なバスシステムは2点、固定編成車両が基本のため、手間のかかる軌道系交通システムが1点というように、あらかじめ最高から最低点を段階的に設定し、新しい交通システムがどのランクに入るかで点数をつけるものである。

「シミュレーション」による評価というのは、シミュレーションで得られた値を各交通システムの点数として割り付けることである。

「測定」、「見積もり」による評価もシミュレーションと同様に、測定値、見積もり値を各交通システムの点数として割り付ける。

さらに、各項目ごとに割り付けられた数値は、最高点のシステムを1として正規化する。

表3 評価項目の細分化

視 点	評価中項目	小項目	評価法
事業者	輸送需要 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	見積もり
		インフラ外建設費	見積もり
		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	見積もり
		異常時対応性	段 階
利用者	旅行時間の 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 ₂ 排出量	シミュレーション

ただし、エネルギー消費や見積もり値のように、数値が大きい方が評価の低い項目については、逆数をとって正規化する。

4.2. 都市交通システムの評価法

4.1.により各小項目で得られた数値(正規化)は、中項目ごとにべき乗平均をとって、さらに数値化する。こうして得られた数値列を交通システムごとに整理すると、交通システム全体の点数化行列([A])が作成される(表4参照)。

表4 点数化行列イメージ

	需要	導入	運営	時間	運賃	快適	環境	
[A] =	交通 1
	2
	n

次に、図8の階層構造について、AHP(Analytic Hierarchy Process)を適用する。

視点間、中項目間を相互比較して、ペア比較行列を作成し、その行列の最大固有値で正規化した固有ベクトルを求める。その上で、視点間の固有ベクトルに、各小項目間の固有ベクトルを乗じて得られるベクトルを、評価項目重要度ベクトル(x)と呼ぶ。

ここで、(9)(10)のような計算をし、(9)で得られた値を各交通システムの優先度、(10)での値を交通需要量とする。ただし、[A_i]は表4のうち、利用者に関する中項目の行列を表し、x₁はxのうち利用者に関する成分を表すベクトルである。

$$[A] \cdot x = (\text{各交通システム優先度}) \quad \dots(9)$$

$$[A_i] \cdot x_1 = (\text{各交通システム交通需要量}) \quad \dots(10)$$

4.3. 都市交通システム評価例

3.1.1.で設定した路線と3.2.1.で得られたシミュレーション結果を用いて、本手法を適用した結果を示す。

表3に基づき、シミュレーション結果や段階評価結果を適用し、[A]を作成する。また、利用者、事業者、環境の重み付けを1:2:1として、各中項目の重みは全て等しいとしてxを計算すると、以下のようになる。

また、図9に評価結果例を示す。

これによると、システム優先度の一番高いシステムはIMTSであり、輸送需要が最も高いシステムがLRV

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0.707 & 0.543 & 0.967 & 1 & 0.550 & 0.651 \\ 0.817 & 0.639 & 0.620 & 0.819 & 1 & 0.825 & 0.721 \\ 0.817 & 0.707 & 0.582 & 0.756 & 1 & 0.630 & 0.488 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{IMTS} \\ \text{LRV} \\ \text{TRAM} \end{matrix}$$

$$x = (0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.1665, 0.1665, 0.1665, 0.25)$$

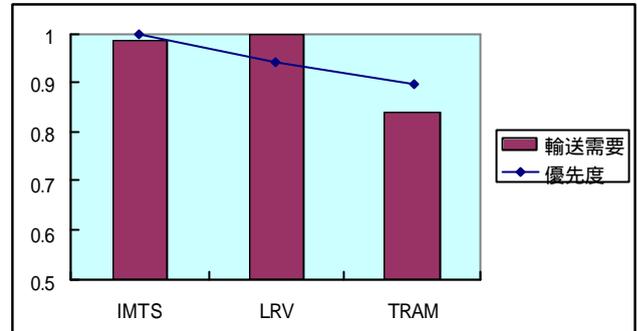


図9 評価結果例

であることが示されている。これは、IMTSは、事業者、景観等の環境に優れ、LRVは乗り心地等の利用者にとって優れている評価がされたためと思われる。

5. おわりに

以上、新しい都市交通システムを評価する手法として、シミュレーションを用いて得られたデータ等を基にAHPを応用して、優先度、輸送需要量を求める手法を紹介した。

本手法により、様々な特徴を有する新しい都市交通システムを定量的に評価することが可能となり、またその定量化の精度が、シミュレーション等を基にしていることにより高められたものと考えられる。

ただし、シミュレーションや測定で得られない評価項目については、段階評価という評価値(1,2)としていたので、今後はこうした項目の定量的評価法について検討する必要がある。

また、自動車と軌道系交通システムの混合交通については、今後、日本において、環境に優しい路面電車(LRTシステムを含め)が復活するかの重要な鍵となるので、よりシミュレーションの高度化が望まれる。

参考文献

- (1)水間「新しい交通システム導入に際してのシステム評価と感度分析法に関する研究」交通安全公害研究所発表会 1999.11
- (2)水間他「新しい交通システム導入に際しての定量的評価法」電気学会論文誌 産業応用部門誌 P.193-198 2000.2