新しい交通システム導入に際しての定量的比較評価法

正 員 水 間 毅 (交通安全公害研究所)

正 員 曾 根 悟 (東京大学)

Quantitative Evaluation of Transportation Systems by AHP
upon Introduction of New Transportation Systems

Takeshi Mizuma ,Member(Traffic Safety and Nuisance Research Institute) Satoru Sone ,Member (The University of Tokyo)

At present, many kinds of new transportation systems have been developing and some were used as practical urban traffic systems in Japan. But, these developments are not necessarily contributed to the solution of urban traffic problems. Therefore, this research and study that aim to grasp the characteristics and the adaptability of new transportation systems and to evaluate the suitability of these system applications quantitatively have been started. We show the evaluation of suitability of transportation system applications to the model routes by AHP(Analytical Hierarchy Process). Moreover, by using the same technologies, changes in traffic demand and in transportation share ratio are calculated when a new system is introduced into a region already being served by other systems.

キーワード：新交通システム、AHP、交通需要

1. はじめに

交通サービスの多様化に対応して、新しい都市交通システムが開発され、漸次実用化に至っている。しかし、こうしたシステムが、どういう特徴を有するかの技術的検討はされているものの、どういう地域に適用可能かについての定量的な議論は少ない。

本論文では、こうした新しい交通システムの導入時における比較評価やその時の交通需要変化等をAHPを応用して、定量的に行う手法を開発したので、その結果について述べる。

2. AHPを利用した交通システムの比較評価法の提案

＜2.1＞ 評価項目の設定と点数化⁽¹⁾ 交通システムの評価を行う手法は従来からなされてきたが、評価項目が多岐に亘っていることから一意的に評価されることはなかった。また、交通システムを定量的に比較する手法もなかった。しかし、AHP(Analytic Hierarchy Process：分析的階層手法)は、多種類の評価項目を互いに相対比較(点数化)し、それらの固有ベクトルを正規化することで、重要度の数値化が可能となることより、これを利用した交通システムの定量的比較評価法を提案する。

計算手順は以下のとおりである。

まず、利用者、事業者、社会性の観点から評価項目を設定した。表1にその一覧を示す。

評価項目は、大・中・小に分類し、大項目は、各観点から見て、定性的な評価が可能な項目として、中項目は、これらの大項目を評価するにあたり、必要な項目をいくつか挙げることにした。そして、小項目は、この中項目を評価

するための数値化が可能な項目(複数)とした。

各交通システムの評価は、この表中の中項目を点数化することにより行う。点数化は、小項目で記述される数値を基に、バス、地下鉄などの既存の交通システムと比べて、有意差のあるものをグループ化し、整数値をつけることにより行う。表2に、点数化を行うための分類を示す。

表1 都市交通システムの評価項目

Table 1 Evaluation items for adaptability of transportation systems

評価の観点	評価項目(大)	評価項目(中)	評価項目(小)
利用者	旅行時間が短い	高速性	表定速度、最高速度
		高頻度性	最小運転時隔
		定時性	専用・併用軌道、気候
	乗降・乗換のしやすさ	駅へのアクセス	平均駅間距離
		乗降の容易さ	乗降面高さ、段差、ドア
		乗換の容易さ	複数モード、乗り入れ
	快適性	乗り心地	振動加速度、ジャーク
		車内空間確保	車両寸法、定員、面積
事業者	輸送需要への対応	安心感	空調の容易性
		輸送能力	閉鎖性、交通事故
		輸送力の調整	最大輸送力、運転時隔
	導入のしやすさ	輸送力の調整	輸送力調整方法、即応性、動力方式
		路線の自由度	高架、地上、曲線半径
		導入空間	勾配、断面空間
	運営のしやすさ	インフラコスト	断面空間、建築限界、車両重量、専用軌道
		インフラ外コスト	車両、地上設備
		段階建設の容易性	延伸、地下化・高架化
		運転要員	自動化度
社会性	社会性	エネルギー消費	走行電力消費量
		保守費	保守費、保存費
		信頼性	運転稼働率
		異常時対応容易性	避難・誘導方法
		低騒音	車外騒音レベル
		低振動	地盤振動、軌道構造
		排気ガス	排ガス(一次エネルギー)
		景観性	専有空間、断面、集電

表2 点数化の段階

Table 2 Classification of numbering for transport system

利用者	(旅行時間が短い)					
	・高速性	1 都市索道	2 バス	3 新交通	4 地下鉄	⑤
	・高頻度	1	② 地下鉄	3 バス	4 都市索道	
	・定時性	1 バス	2 路面電車	③ 地下鉄		
	(乗降・乗換のしやすさ)					
	・駅へのアクセス	1 地下鉄	② 新交通	3 バス	4 LRT	
	・乗降容易性	① 新交通	2 地下鉄	3 バス	4 LRT	
	・乗換容易性	① 地下鉄	2 ガイドウェイバス			
	(快適性)					
	・乗り心地	1 バス	2	③ 地下鉄	4	
事業者	・車内空間の確保	1 新交通	2 バス	③ 新交通	4 地下鉄	
	・車内設備(空調の容易性)	1 都市索道	② 地下鉄			
	・安心感(閉鎖性、セキュリティ)	1 都市索道	2 バス	③ 地下鉄		
	(輸送需要への対応)					
	・輸送能力	1 バス	2	3 新交通	④ 地下鉄	
	・輸送力の調整	1 地下鉄	② バス	3 無人運転		
	(導入のしやすさ)					
	・路線の自由度・導入空間	1 地下鉄	② 新交通	3 バス	4 バス	
	・インフラ建設費	1 地下鉄	② 新交通	3 都市索道	4 バス	
	・インフラ外建設費	① 地下鉄	2	3	4 バス	
社会性	・段階建設の難易性	1 都市索道	② 地下鉄	3 バス		
	(運営のしやすさ)					
	・運転要員の確保	1 バス	② 無人運転	3 無人運転		
	・エネルギー消費	1 バス	② 新交通	3 地下鉄	4	
	・保守性	1 バス	2 地下鉄	③		
	・信頼性	1 都市索道	2 バス	③ 地下鉄		
	・異常時対応容易性	① 都市索道	2 地下鉄	3 バス		
	(環境性)					
	・低騒音性(車外)	1 バス	2	③ 新交通	4 地下鉄	
	・低振動性(車外)	1 バス	2 地下鉄	③ 都市索道		
・排気ガス	1 バス	② 地下鉄				
・景観性	① 新交通	2 都市索道	3 路面電車	4 地下鉄		

点数化の段階は、既存の都市交通システム（地下鉄、バス、新交通、路面電車）のデータを基準にして、整数値を設定し、データの良いものを高得点とし、最低レベルのものを1点とする。従って、高速性のように、数値がばらつ

くものは段階も多くなり、車内設備のように、空調が容易か否かという単純な比較のものは段階が少なくなる。

新しい都市交通システムを比較、評価する場合、この点数化にあてはめて、各交通システムの持ち点とする。

例えば、都市内磁気浮上式鉄道（常電導磁気浮上式鉄道 HSST）では、高速性は、リニアモータを利用した非粘着駆動ということで、地下鉄以上に高加減速が実現できるので5、高頻度性については、在来の地下鉄程度の信号システムであるので、2というように点数化していく。

表2中の○は、全長5km、駅間600m程度の路線を想定した場合の、HSSTの点数化例を示す。

この得点を、各大項目毎に、満点を1点として正規化（ここでは、単純に平均値）して、交通システムの点数とする。

例えば、上記 HSST の例で、「旅行時間の短さ」は、(1) 式のように計算できる。

$$(5/5+2/4+3/3)/3=0.833 \quad \dots (1)$$

<2.2> 階層構造と計算手順

1) ペア比較行列の作成⁽²⁾ 表1のような評価項目で各交通システムの評価を行うに際し、図1のような階層構造でAHPを適用することとした。

図1 交通システム評価のための階層構造
Fig.1. Hierarchy structure for evaluation of transport systems

ここで、視点間、大項目間のレベルでのペア比較は等比級数数列（1,2,4,8,16）を用い、項目間の重みを計算した。

例えば、（利用者、社会性、事業者）で、利用者和社会性の重要度は1:1（同程度の重要度）、利用者和社会性の重要度は1:2（事業者の方がやや重要、1:4ならば、かなり重要、1:8ならば非常に重要、1:16ならば極めて重要と評価する。）とすると、ペア比較行列は(2)のように表すことができ、この行列の最大固有値で正規化した固有ベクトルは(3)のように表せる。

$$\begin{matrix} & \text{利} & \text{社} & \text{事} \\ \text{利用者} & 1 & 1 & 1/2 \\ \text{社会性} & 1 & 1 & 1/2 \\ \text{事業者} & 2 & 2 & 1 \end{matrix} \quad \dots (2) \quad \begin{matrix} & \text{利} & \text{社} & \text{事} \\ & [0.25, 0.25, 0.5] & \dots (3) \end{matrix}$$

そして、このベクトルの値が各視点（利用者：社会性：事業者）間の重要度の比を表すこととする。

これを、さらに、各大項目間どうしても行い、各大項目の重要度を決定する。

例えば、利用者の視点の各大項目間の重要度を表す行列を(4)とすると、正規化された固有ベクトルは(5)のようになる。

$$\begin{matrix} & \text{旅} & \text{乗} & \text{快} \\ \text{旅行時間} & 1 & 1 & 1/2 \\ \text{乗降乗換} & 1 & 1 & 1 \\ \text{快適性} & 2 & 1 & 1 \end{matrix} \cdots (4) \quad \begin{matrix} \text{旅} & \text{乗} & \text{快} \\ [0.260, 0.327, 0.413] \end{matrix} \cdots (5)$$

同様に、事業者の視点の各大項目間の重要度を表す行列を(6)とすると、正規化された固有ベクトルは(7)のようになる。

$$\begin{matrix} & \text{輸} & \text{導} & \text{運} \\ \text{輸送需要} & 1 & 1/2 & 1/4 \\ \text{導入容易} & 2 & 1 & 1/2 \\ \text{運営容易} & 2 & 4 & 1 \end{matrix} \cdots (6) \quad \begin{matrix} \text{輸} & \text{導} & \text{運} \\ [0.143, 0.286, 0.571] \end{matrix} \cdots (7)$$

このようにして、（利用者：事業者：社会性）の重要度、利用者内の、（旅行時間：乗降・乗換：快適性）の重要度、事業者内の、（輸送需要：導入容易：運営容易）の重要度が計算され、各々を乗ずることにより、各大項目の重要度が計算される。

ここでの例では、利用者の重要度 0.25 に、(5) の各値を乗じ、事業者の重要度 0.5 に、(7) の各値を乗じる。社会性は大項目が 1 項目のため、そのまま 0.25 が重要度となる。このようにして、想定路線における、各評価項目間の重要度が計算され、(8) のような結果となる。

また、これらの値を成分に持つベクトルを、評価項目重要度ベクトル $\mathbf{x}$ とする。

$$\begin{pmatrix} \text{旅行時間：乗降・乗換：快適性：輸送需要：導入容易：運営容易：社会性} \\ (0.065 : 0.082 : 0.103 : 0.072 : 0.143 : 0.286 : 0.250) \end{pmatrix} \cdots (8)$$

表 3 に、全長 5km、駅間距離 600m 程度を想定した路線における、各交通システムの点数化例を示す。

また、この数値行列を点数化行列 $[A]$ とする。

表 3 各交通システムの点数化例

Table 3 Example of scoring on each transportation system

	旅行時間 の短さ	乗降乗 換容易	快適性	輸送需要 対応容易	導入の 易しさ	運営の 易しさ	社会性
自家用車	0.644	1	1	1	0.938	0.833	0.458
バス	0.494	0.833	0.667	0.583	0.875	0.700	0.458
LRV	0.606	0.667	0.875	0.708	0.813	0.617	0.667
HSST	0.833	0.417	0.938	0.833	0.479	0.633	0.750

注) LRV:Light Rail Vehicle ; 超低床式高性能路面電車

自家用車に関しては、所有者個人を対象として点数化するため、乗降・乗換のしやすさや快適性は全て満点として、1 点となっており、輸送需要への対応も、個人としては全て対応可能として満点としている。

2) 交通システムの優先度計算 このようにして得られた交通システムの点数化行列（表 3 の値を持つ行列）に、評価項目重要度ベクトル（各大項目間のペア比較行列の、最大固有値に対する正規化された固有ベクトルに、視点間の正規化された固有ベクトルを乗じたもの：式 (8) の値）を乗じて、各交通システムの優先度とする。

即ち、(9) により各交通システムの優先度が計算される。

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

3) 交通需要の計算 さらに、上記 2) の計算中、表 3 中の、利用者に関する大項目の行列（これを $[A_1]$ とする：表中の網掛け部）と式 (8) のベクトルのうち、利用者に関する成分（これを $\mathbf{x}_1$ とする：式中の網掛け部）を乗じた結果は、利用者にとっての優先度を表すと考えられるため、計算値が、そのシステム導入時における推定輸送需要となるとした（式 (10) 参照）。

$$[A_1] \cdot \mathbf{x}_1 = (\text{各システム交通需要量}) \cdots (10)$$

これにより、事業者にとってメリットの少ないシステム（例えば建設費が高い等）であっても、利用者により利便な交通システムは、交通システムの優先度（式 (9) の値）としては低くても、導入後の需要としては大きくなるという効果が数量化可能となった。また、現在ある交通システムに新たに交通システムを導入する場合は、表 3 の点数の正規化を見直す（便利になれば、既存交通システムの点数も変化する）ことにより、交通システムの点数化行列値が変化するため、既存の交通システムの優先度、交通需要も変化するることになり、交通需要の誘発効果や分担比率変化も数量化可能となる。

3. モデル路線での計算例⁽³⁾

<3.1> モデル路線とモデルケース 以上の点数化行列と評価項目重要度ベクトルを用いて、モデル路線に適用して、各種交通システムを比較評価する例を示す。

ケース 1：全長 5km 程度の路線で、現状、自動車、バス、路面電車で交通需要を賄っている地域に、新たに LRV を導入するか、町づくりと一体化して LRT 化するか、路面電車を廃止して新交通システムを導入するかを検討する場合
 ケース 2：全長 5km 程度の路線で、現状、自動車とバスしかない地域に、バスを廃止して、新交通システム、常電導磁気浮上式鉄道、LRT のどれを導入するかを検討する場合

(注) ここで、LRT (Light Rail Transit) というのは、LRVを導入して、専用軌道化、トランジットモール化を図り、都市計画とリンクした路面電車のシステムを言う

<3.2> レーダーチャートによる比較評価 交通システムを評価する場合、点数化行列の値そのもので評価する方法が考えられる。これは、各軸に大項目 (ここでは7項目) をとり、各交通システムの点数をそのままプロットする方法である。

図2に、ケース1での点数化行列の値をレーダーチャートで表現した例を示す。

図2 レーダーチャートによる交通システム評価
Fig. 2. Radar chart for system adaptability

この方法によれば、各交通システムの特徴が定性的に把握可能となる。

本例においても、新交通システムは、旅行時間の短さ、輸送需要対応においては有利性を有しているものの、乗降のし易さ、導入のし易さの点数が低く、レーダーチャート上の波形に凸凹が見られるのに対し、LRTでは、高い得点でほぼ7角形に近い波形が得られており、その特徴の違いを示していると言える。

<3.3> AHP手法による比較評価 レーダーチャートによる評価の他に、(9)、(10)による、AHPを利用した評価法による計算、評価例を示す。

1) ケース1 図3に、本手法により計算した優先度を示す。ここでは、自動車の優先度を1としている。

また、図4には各システム導入時における、交通需要量、分担比率変化の計算結果例を示す。

この結果により、各システム導入時における優先度は

LRTが一番であることが示されている。また、LRT化以外のシステムは重要度が1未満であるので、導入の効果が小さいことを示している。

図3 ケース1における、各交通システム優先度
Fig. 3. Priority among several systems for case 1

図4 各交通システム導入時の輸送需要変化
Fig. 4. Traffic demand change for introducing each system

これは、一部LRVを導入しても、システム全体が便利にならないと、自動車に対する優位性は得られないことを示しており、また、新交通システムの優先度が低いのは、

利用者にとって乗降の便が、事業者にとって導入の便益が低いためであると思われる。

また、利用者にとって、交通需要、分担率の変化を見ると、需要誘発効果は新交通システム導入が一番大きい。これは、新交通システムでは速達性、定時性が高く評価され、この項目の点数が高くなり、その結果、利用者が増加するという計算結果となったためであり、自動車やバス利用者が減少しているためではない。自動車、バスは快適性、乗降容易性の点数が高く、新交通システムが導入されても、これらの点数に変化がなく、その結果、需要計算に変化はないことを示している。

これに対して、LRT化すると、快適性、乗降容易性での、バス・自動車に対する優位性が高くなり、LRTの点数が高くなり、自動車、バスの点数が低くなるため、自動車・バスからの転移が大きくなるような計算結果となる。

従って、需要誘発効果よりも、転移によりLRTの分担率が増加しているという結果を示している。

また、一部LRVを導入するだけでは、バスに対する優位性が一部認められ、バスからの転移は若干望めるものの、自動車に対する優位性は認められないため、自動車からの転移は望めず、現状の分担率とそう大きな差はないという計算結果となっている。

即ち、本手法では、特徴の類似したシステム（バス、自動車に対してLRV）を導入する場合は、需要の誘発というよりも、転移の効果が大きいことを示すことができる手法と言える。

従って、需要が飽和しているような都心部では、LRT化することによりモーダルシフトが実現でき、新たな需要が喚起できる郊外地域では、速達性、定時性が図られるシステムの導入が効果的であることを、定量的に検討することが可能となった。

2) ケース2 図5に、本AHPを応用した手法により計算した優先度を示す。ここでは、利用者、社会性、事業者の重みを変えるために、ペア比較行列を変化させ、その重みを（固有ベクトルを最大固有値で正規化したもの）、[利用者、社会性、事業者]=[0.25,0.25,0.5]（通常）、[0.571,0.143,0.286]（利用者重視）、[0.167,0.167,0.667]（事業者重視）として計算した。

また、図6には各システム導入時における、交通需要量、分担比率変化の計算結果例を示す。

これによると、事業者を優先すると建設費や運営費の安いバスやLRVの優先度が高く、利用者を優先すると、速度が速く、快適性に富む常電導磁気浮上式鉄道やLRVの優先度が高くなるのがわかる。しかし、通常の場合や事業者優先の場合、どのシステムを導入しても自動車の重要度（1）を超えず、交通システムとしての、この地域での評価が低いという結果になっている。

また、各交通システム導入時における交通需要、分担率変化の結果からは、LRV導入よりも新交通システムや常

電導磁気浮上式鉄道導入の方が需要誘発量が多くなっている。これは、新交通システムや常電導磁気浮上式鉄道が高速性、定時性の点で自動車やLRVに勝り、快適性、乗降のし易さに優位性のある自動車と、数値計算上競合しないためであり、こうした地域では、このようなシステムを導入することが効果的であることを定量的に示すことが可能となった。

図5 ケース2における、各交通システム優先度

Fig. 5. Priority of introducing several systems for model 2

図6 各交通システム導入時の輸送需要変化

Fig. 6. Traffic demand change for introducing each system

これは、特徴の異なるシステム（バス、自動車に対して新交通、常電導磁気浮上式鉄道）を導入する場合は、元の交通システムの需要を転換するというよりも新たに需要を誘発する効果が大きいということを示しているということ、ケース1と同様な結果となっている。

このように、AHPを用いた評価では、具体的な数値で表現されるので、地域の特徴にあった交通システムに関して、ある程度、定量的な検討が可能となる。

<3・4> 本評価方法に関する検討 以上のように、レーダーチャート、AHPにより、交通システムの評価が可能となり、より、客観性を持った検討が可能となった。

表4に、これらの評価手法の特徴を整理して示す。

表4 本評価方法の特徴

Table 4 Characteristics on proposal evaluation method

	利 点	課 題
レーダーチャート	各交通システムの特徴が定性的、可視的に把握	定量的な議論ができない
AHP	各交通システムの重要度が一意に決定 需要予測等定量的検討が可能	点数化に際しては専門的知識が必要 評価項目の重み付けに関してはコンセンサスが必要

本手法は、各種交通システムの特徴を、定性的、定量的に把握可能ではあるが、点数化、重み付けに際して恣意的な値が入ると、結果が実際と異なる恐れがある。交通システムの点数化に関しては、専門家により協議すれば、ある程度統一的な値が得られると考えられるが、評価項目の重み付けに関しては、立場（事業者、利用者）が異なると値も全く異なることがある。従って、そのような場合は、第3者（学識経験者等）による協議で、ある程度、値を精査する方法や多数のアンケート結果に基づく値をコンセンサスデータとして用いる方法等が考えられる。

また、交通需要予測に関しては、本手法を過去の実例に合わせて、評価項目重要度ベクトル等の変更を図って、より、実態に近い形に調整していく方法も考えられる。

4. おわりに

以上、交通システムを段階的に点数化し、その数値を用いてAHP手法を応用して、交通システムの優先度、需要変化、分担率変化を求める手法について述べた。

その結果、従来定性的に述べられてきたことを数量化し、定量的に説明することが可能となった。

例えば、都心へのアクセス交通機関として新交通システム導入が必要な地域では、その高速性、定時性において需要誘発効果が大きいこと、そして、快適性、乗降容易性においては、既存の自動車、バスといったシステムに対する優位性が確保されず、これらのシステムからの転移は大き

くないこと等定性的にいわれていたことを数値的に解説可能となった。

さらに、現在、欧米を中心に普及が進んでいるLRTについても、単にLRVを導入するだけでは効果が小さく、LRTとして町づくりと一体化して整備することによりモーダルシフトが実現されるということも数値的に解析可能となった。また、その場合でも、あくまでモーダルシフトが主であって、需要誘発効果はそれほど大きくないことも定量的に説明された。

しかし、今回のモデルはあくまでも一例であり、実際にはその路線毎に交通システムの点数化や、利用者、事業者、社会性といった視点の重みや、評価項目間の重要度が異なり、一様な結果にはならず、その地域特性に合った点数化を行い評価する必要がある、どのような場合に、どのような重みを付けるのが妥当であるかを検討することが、大きな課題である。

日本におけるLRT導入の動きや常電導磁気浮上式鉄道導入の動き等、新しい交通システムに対するニーズは今後も増してきていると思われるが、その地域に相応しいシステムでなければ、効果的な開発とは言えない。

従って、どの地域にはどのシステムが適しているかを定量的に論ずる手法が必要であり、本手法がその一助になるよう今後も精査を続けていく予定である。

（平成11年3月10日受付、平成11年10月4日再受付）

文 献

- (1) 水間他：「輸送システム適用性の定量的評価」平成8年 電気学会全国大会講演論文集590
- (2) 木下：「AHP手法と応用技術」総合技術センター
- (3) 水間他：「LRV導入時の効果に関する定量的評価法の検討」平成10年 交通安全公害研究所 発表会 講演

水間 毅

（正員）1955年5月30日生まれ。84年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。同年4月運輸省交通安全公害研究所入所。主として、新交通システムの評価、鉄道からの電磁界評価の研究に従事。工学博士

曾根 悟

（正員）1939年4月23日生まれ。67年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同大学工学部講師、助教授、教授を経て、現在同大学院工学系研究科電気工学専攻教授。工学博士。専門は交通システム工学とパワーエレクトロニクス。電子情報通信学会、日本鉄道技術協会会員。1982年論文賞、1996年産業応用特別賞学術賞受賞。