

AHPを適用した通学バス利用意識調査*

Research for User Perception of School Bus by AHP*

杉浦伸**・木下栄蔵***

By Shin SUGIURA**・Eizo KINOSHITA***

1. はじめに

近年、オペレーションズ・リサーチや土木計画などの計画手法適用の場で AHP (Analytic Hierarchy Process) ^{1)~4)} がよく利用されている。AHP は、定量的な問題だけでなく定性的な事物をも対象とし、あいまいかつ複雑な状況における意思決定を人々の主観や経験を上手に利用することで解決へと導く問題解決型の意思決定支援モデルである。AHP の中にも、多くの理論的研究や応用事例により、特徴を持ったモデルが複数提案されている。本稿では、AHP を通学バスの利用意識調査に適用した事例を紹介する。本稿では、従来から利用されている基本的な AHP である従来型 AHP と、評価基準の重みが代替案ごとに異なることを考慮した発展モデルである ANP (Analytic network Process) ^{3)~6)}、さらに AHP とは異なる視点を持つ重み一斉法 ^{4)~7)}、さらにその発展モデルである総合評価値一斉法 ⁹⁾ の 4 つのモデルの適用事例を示す。

2. AHP^{1)~4)}の概要

本章では基本となる AHP^{1)~4)}の概要について述べる。

AHP (Analytic Hierarchy Process) はアメリカ人 OR 学者 T. L. Saaty によって開発された意思決定支援システムである。AHP は人間の主観的評価を基本とし、様々な問題を数学的手法により解決へと導く手法である。

AHP の最大の特徴は評価基準や代替案の総当り的な一対比較を行うことにある。そして、その一対比較行列から各要素の重要度を導出するのである。

つまり、比較する要素の一対比較表を作成し、行におけるある要素が列におけるある要素と比較してどれくらい重要であるかを、数値を用いて表現することにある。

そのプロセスは、解決すべき問題を総合目的、評価基準、代替案の 3 段階に分け、階層構造を構築する。

*キーワードズ：計画基礎論，計画手法論

**学生員，都市情報修，名城大学大学院都市情報学研究科
(岐阜県可児市虹ヶ丘四丁目三番地の三)

TEL:0574-69-0100, E-mail:p0681501@urban.meijo-u.ac.jp)

***正員，工博，名城大学都市情報学部都市情報学科
(E-mail:kinoshita@urban.meijo-u.ac.jp)

階層構造の最上段には総合目的を置き、それより下のレベルに評価基準を置く。評価基準はいくつかの階層に分割され、また個別に親子関係を構築することもある。つづいて要素間の重み付けを行う。つまり、評価基準同士の一対比較、さらにある評価基準のもとでの代替案同士の一対比較を行うのである。仮に一対比較の中に n 個の比較要素がある場合、意思決定者は、 nC_2 回の一対比較を行うことになる。

そしてこの一対比較行列の最大固有値に対する固有ベクトルを評価要素の重みとする。

各レベルの要素間の重みを計算し、この結果を用いて階層全体の重み付けを行う。これにより、総合目的に対する各代替案の優先順位が決定される。総合目的の下にある評価基準の重みを次々と計算し、代替案のすぐ上の評価基準の重みを W とし、代替案に直接かかる各評価基準からの各代替案の評価値 M とすると総合評価値 E は

$$E = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = M \cdot W \quad (1)$$

として得られる。

3. 調査の概要

本章では通学バス利用調査についての概要を述べる。

著者らの所属する大学においては、講義開始時刻に合わせた、最寄り駅からの通学バスが運行している。しかし、曜日や開始時限によってバスの乗車状況に偏りが出ていると考えられる。そのため、バスの運行本数に関して AHP を用いて利用者である学生を対象に調査することとした。適用にあたって、この通学バスの運行本数を代替案とし、総合目的を「効率的なバスの運行」とし、評価基準を 2 つ、「利便性」、「費用負担」に設定した。そして、代替案は 3 つ、「バスの本数増加」、「現状維持」、「バスの本数減少」に設定した。本調査における AHP の階層図を図-1 に示す。

つまり、代替案である「バスの本数増加」、「現状維持」、「バスの本数減少」は評価基準「利便性」と

「費用負担」のもとに評価されることを意味している。通学バスの利用調査のため、利用者へのアンケートを実施した。図-2 に調査に使用したアンケートを示す。被験者は通学バスを利用する可能性のある学生を無作為に抽出し、32 名に回答してもらった。図-2 に示すアンケートを提示して説明し、回答者に理解できるようにアンケートを行った。これにより、通学している学生の通学方法と大学が提供する通学バスの利用頻度が明らかになり、AHP における対比較表が作成される。アンケート結果から集計した対比較表による評価基準「利便性」、「費用負担」の重みを図-3 に示す。同様に評価基準の下での各代替案の評価の結果を、図-4 に示す。

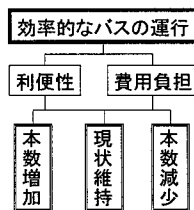


図-1 通学バス利用調査の階層図

る人、時々利用する人、ほとんど利用しない人の個別累計の評価基準を表したものである。通学バスの利用頻度の多少により代替案ごとに区別した評価基準の重みを導出している。利用頻度別により代替案ごとの個別の評価基準の重みとみなしている。ANP、重み一斉法、総合評価値一斉法では、評価基準の重みが代替案ごとに異なることを考慮したモデルがあるため、通学バス利用者を利用頻度別にし、代替案ごとの評価基準にみなした重みについては 5 章の ANP、6 章の重み一斉法、7 章の総合評価値一斉法を用いた際に利用する。

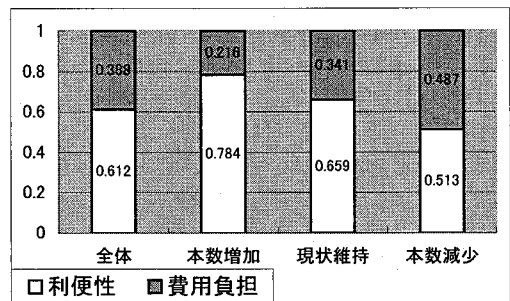


図-3 評価基準の重み

都市情報学部通学バス運行に関する意識調査

現在、都市情報学部では午前・午後(行き・帰り)に各5本ずつ通学バスが運行しています。この件につきまして以下のアンケートにご協力ください。

Q1 西可児駅～大学間(大学～西可児駅間)の通学バスを利用していますか？
☐ よく利用している。
☐ ときどき利用している(週に 回くらい)。
☐ ほとんど利用していない(徒歩・自転車あるいは、車で通学している)。

Q2 以降の回答例)「学生の利便性をやや優先すべき」と考えられる方は、左から2番目のチェックボックスに印をつけてください。

学生の利便性を 優先すべき やや優先すべき 両者とも同じ程度 やや優先すべき 費用負担を 優先すべき

Q2 効率的なバスの運行に関して「学生の利便性」と「費用負担」という基準が、どちらが重要かお答えください。

学生の利便性を 優先すべき やや優先すべき 両者とも同じ程度 やや優先すべき 費用負担を 優先すべき

Q3 「学生の利便性」に関して、仮にバスの「本数の増加」「現状維持」「本数減少」の三つの案があるとして、それらを比較してください。

本数増加を 優先すべき 現状維持を 優先すべき 本数減少を 優先すべき

Q4 「費用負担」に関して、仮にバスの「本数の増加」「現状維持」「本数減少」の三つの案があるとして、それらを比較してください。

本数増加を 優先すべき 現状維持を 優先すべき 本数減少を 優先すべき

自由記入欄 何か意見等ございましたら、自由にご記入ください。

ご協力ありがとうございました

図-2 調査に使用したアンケート

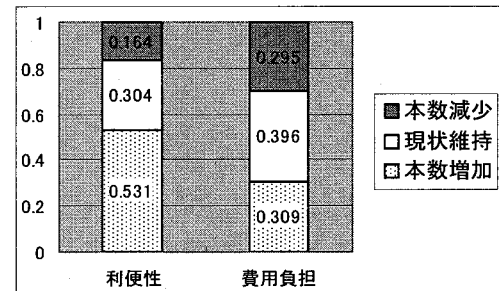


図-4 評価基準ごとの代替案の評価値

4. 従来型 AHP¹⁾⁻⁴⁾を用いた結果

本章では、アンケート調査によって得られた結果の従来型 AHP による決定を示す。2 章でも説明したように、AHP による代替案の選定は評価基準の重みと評価基準における代替案の評価値の加法和によって導かれる。図-3 より、評価基準の重み W は、(2) 式となる。

$$W^T = (0.612, 0.388) \quad (2)$$

そして、図-4 より代替案の評価値 M は (3) 式となる。

図-3 における、本数増加、現状維持、本数減少の 3 つの項目は、アンケート Q1 におけるバスをよく利用す

$$M = \begin{bmatrix} 0.531 & 0.309 \\ 0.304 & 0.396 \\ 0.164 & 0.295 \end{bmatrix} \quad (3)$$

したがって、代替案の選定順位は

$$E = M \cdot W = \begin{bmatrix} 0.531 & 0.309 \\ 0.304 & 0.396 \\ 0.164 & 0.295 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.612 \\ 0.388 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.445 \\ 0.340 \\ 0.215 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となり、バスの本数増加 (0.445) > 現状維持 (0.340) > バスの本数減少 (0.215) の順序になるのである。

5. ANP³⁾⁻⁶⁾を用いた結果

本章では AHP の発展モデルである ANP (Analytic Network Process) を用いた通学バス利用調査の結果について述べる。

従来型 AHP は AHP の中でも最も基本的なモデルである。総合目的、評価基準、代替案の関係は、常に代替案が評価基準のもとで評価される一方向的な意思決定のメカニズムとなっている。しかし、現実の意思決定場面には様々な状況が存在し、従来型の AHP のみでは対応しきることは困難である。そこで Saaty は AHP を拡張し、ANP と呼ばれる新しい AHP のモデルを提案している。ANP はそれまで代替案が評価基準から受けている評価に加え、代替案そのものにも評価基準への影響が加わったものである。ANP の概念図を図-5に示す。



図-5 ANP の概念図

代替案からの影響とはすなわち、選定される代替案にも評価基準の重みの配分に影響を与える局面が存在するということである。代替案ごとの評価基準における重みの違いとは、例えば製品開発において価格と機能という評価基準を考えたときに、A 製品はとにかく価格にのみ重点をおき開発がなされ、B 製品は高価格になろうとも機能を重視し開発がなされたとすると、A 製品と B 製品には評価をする以前に評価基準の比較の段階で両者に違いがあることになり、その決定が困難となる。一方向的な意思決定でなく、このような代替案から評価基準への影響を考慮したモデルが ANP である。

ANP は、評価基準の重みと代替案の評価値による行列を収束するまで何度も掛け合わせるにより結果を導出するのが最大の特徴である。代替案からの影響を受けた評価基準の重みを W とし、代替案の評価値を M とする。 W, M は列和が 1 であり、行列 E を (5) 式のように表現する。

$$E = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{評価基準} & \text{代替案} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{評価基準} \\ \text{代替案} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & W \\ M & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

行列 E も同様に各列の縦の和が 1 となる遷移確率行列で (6) 式における E^* に収束する。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E^{2k+1} = E^* \quad (6)$$

つまり、 E^* は E と同じ形の行列として収束し、

$$E^* = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{評価基準} & \text{代替案} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{評価基準} \\ \text{代替案} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & W^* \\ M^* & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

となるのである。

さて ANP を通学バス利用調査に適用させるにあたり、代替案ごとの評価基準の重みが必要になる。そのため、本調査ではバスをよく利用する人、時々利用する人、ほとんど利用しない人によって 3 つの代替案「バスの本数増加」、「現状維持」、「バスの本数減少」の立場とし、それを各評価基準の重みとして採用した。その結果が図-3 である。つまり、図-3 における本数増加の評価基準の重みはバスをよく利用する人の視点を表したものであり、現状維持、本数減少の結果はそれぞれ「現状維持」、「バスの本数減少」からの視点を表現している。そして、図-3 より評価基準の重みである W は、

$$W = \begin{bmatrix} 0.784 & 0.659 & 0.513 \\ 0.216 & 0.341 & 0.487 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。評価値 M に関しては (3) 式の従来型 AHP と同じ評価値を用いる。(3)、(8) 式から E は

$$E = \begin{bmatrix} 0 & W \\ M & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.784 & 0.659 & 0.513 \\ 0 & 0 & 0.216 & 0.341 & 0.487 \\ 0.531 & 0.309 & 0 & 0 & 0 \\ 0.304 & 0.396 & 0 & 0 & 0 \\ 0.164 & 0.295 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。(9) 式の E は収束して (10) 式となる。

$$E^* = \begin{bmatrix} 0 & W^* \\ M^* & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.688 & 0.688 & 0.688 \\ 0 & 0 & 0.312 & 0.312 & 0.312 \\ 0.462 & 0.462 & 0 & 0 & 0 \\ 0.333 & 0.333 & 0 & 0 & 0 \\ 0.205 & 0.205 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

そして、(10) 式から、代替案はバスの本数増加 (0.462) > 現状維持 (0.333) > バスの本数減少 (0.205) の順序になるのである。

さて、従来型 AHP は ANP に内包されており、従来型 AHP における加法和の演算は ANP の演算でも行うことができる。つまり、(2) 式、(3) 式の結果をそれぞれ (5) 式に代入すると、

$$E = \begin{bmatrix} 0 & W \\ M & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.612 & 0.612 & 0.612 \\ 0 & 0 & 0.388 & 0.388 & 0.388 \\ 0.531 & 0.309 & 0 & 0 & 0 \\ 0.304 & 0.396 & 0 & 0 & 0 \\ 0.164 & 0.295 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

となり、(11) 式の ANP は収束して (12) 式となる。

$$E^* = \begin{bmatrix} 0 & W^* \\ M^* & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.612 & 0.612 & 0.612 \\ 0 & 0 & 0.388 & 0.388 & 0.388 \\ 0.445 & 0.445 & 0 & 0 & 0 \\ 0.340 & 0.340 & 0 & 0 & 0 \\ 0.215 & 0.215 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

そして、従来型の AHP と同じ結果であるバスの本数増加 (0.445) > 現状維持 (0.340) > バスの本数減少 (0.215) が導出でき、従来型 AHP の演算が ANP でも行えることがわかる。

6. 重み一斉法⁴⁻⁷を用いた結果

前章までに、従来型 AHP と ANP を用いた場合における通学バス利用調査の代替案の選定結果を説明した。本章では、重み一斉法⁴⁻⁷を適用した通学バス利用調査の代替案の選定結果を示す。Saaty は従来型 AHP から ANP へとそのモデルを発展させている。意思決定の構造が一方向的な従来型 AHP だけでは対応できないため、それに答えるのが代替案から評価基準への影響を考慮した ANP であった。ANP では導出方法が行列の積の繰り返しという演算を行うのに対し、重み一斉法は演算の方法が ANP とは異なる構造をしている。ただし、重み一斉法も ANP 同様に代替案がそれぞれ評価基準へ

の重みの配分に対して視点を持っている、という点で同じである。重み一斉法は木下・中西⁷⁾によって提案されたモデルであり、もともと「一斉法」という名で提案されたが、「一斉法」とは別のモデルとして「評価値一斉法」が杉浦・木下⁸⁾によって提案され、その論文の中で評価値一斉法と従来の「一斉法」を区別するために重み一斉法と呼んでいる。そのため現在では両者を区別するために従来の「一斉法」は重み一斉法と呼ばれている。

重み一斉法についてはすでにいくつかの一般式や数学的説明が木下・中西⁴⁻⁷⁾、高橋⁹⁾によりなされている。

評価基準 2 つ (I, II), 代替案 3 つ (X, Y, Z) の場合について説明する。評価基準の重みを

$$W^1 = (W_X^1, W_Y^1, W_Z^1) \quad (13)$$

とする。(13) 式における添付文字の 1 は初期値を示すものとし、アルファベットは代替案を示している。

さらに評価基準の下での代替案の評価値を M とし、評価単価比行列 M_i をそれぞれ次のように定義する。

$$M = \begin{bmatrix} a_{XI} & a_{XII} \\ a_{YI} & a_{YII} \\ a_{ZI} & a_{ZII} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$M_i = M \cdot \begin{bmatrix} 1/a_{iI} & 0 \\ 0 & 1/a_{iII} \end{bmatrix} = M \cdot A_i^{-1} \quad (15)$$

ただし、 $A_i = \begin{bmatrix} a_{iI} & 0 \\ 0 & a_{iII} \end{bmatrix}$ とする。

重み一斉法は ANP 同様に代替案の視点によって、複数の評価基準が存在する意思決定状況である。

重み一斉法では重みの導出値は、最初に与えられる複数存在する代替案からの導出値の平均値によって求められる。評価基準は合計が 1 であるため、 e をすべてが 1 の列ベクトルとすると、代替案 X における評価基準の重みの導出値 W_X^2 は

$$W_X^2 = \frac{1}{3} \left\{ \frac{A_X A_X^{-1} W_X^1}{e^T A_X A_X^{-1} W_X^1} + \frac{A_X A_Y^{-1} W_Y^1}{e^T A_X A_Y^{-1} W_Y^1} + \frac{A_X A_Z^{-1} W_Z^1}{e^T A_X A_Z^{-1} W_Z^1} \right\} \quad (16)$$

となる。同様にして、代替案 Y, Z からみた重みの導出値 W_Y^2, W_Z^2 はそれぞれ次のようになる。

$$W_Y^2 = \frac{1}{3} \left\{ \frac{A_Y A_X^{-1} W_X^1}{e^T A_Y A_X^{-1} W_X^1} + \frac{A_Y A_Y^{-1} W_Y^1}{e^T A_Y A_Y^{-1} W_Y^1} + \frac{A_Y A_Z^{-1} W_Z^1}{e^T A_Y A_Z^{-1} W_Z^1} \right\} \quad (17)$$

$$W_z^2 = \frac{1}{3} \left\{ \frac{A_z A_x^{-1} W_x^1}{e^T A_z A_x^{-1} W_x^1} + \frac{A_z A_y^{-1} W_y^1}{e^T A_z A_y^{-1} W_y^1} + \frac{A_z A_z^{-1} W_z^1}{e^T A_z A_z^{-1} W_z^1} \right\} \quad (18)$$

重み一斉法を繰り返し、 n 回目の手順における評価基準の重み W_i^n ($i=X, Y, Z$) と $n-1$ 回目の手順の重み W_i^{n-1} との値が一致し収束するまでこの手順を繰り返す。そして、評価単価比行列 M_i と収束した評価基準の重み W_i^* との積 $M_i \cdot W_i^*$ によって各代替案の評価値が得られる。

$$E_i = M_i \cdot W_i^* \quad (19)$$

そして、(19) 式は代替案 X, Y, Z の数だけ導出されるが列和を 1 に正規化したものは唯一となり総合評価値として得られるのである。以上が重み一斉法の手順である。

さて、重み一斉法を適用した通学バスの代替案の選定結果を示す。初期値となる評価値 M 、代替案ごとの評価基準の重み W はそれぞれ (3)、(8) 式に示される。重み一斉法の演算結果を表-1 に示す。

表-1 重み一斉法による結果

	本数増加		現状維持		本数減少	
	利便性	費用負担	利便性	費用負担	利便性	費用負担
①	0.784	0.216	0.659	0.341	0.513	0.487
			0.619	0.381	0.541	0.459
	0.812	0.188			0.584	0.416
②	0.787	0.213	0.624	0.376	0.546	0.454
			0.623	0.377	0.545	0.455
	0.787	0.213			0.546	0.454
③	0.787	0.213	0.624	0.376	0.546	0.454
			0.624	0.376	0.546	0.454
	0.787	0.213			0.546	0.454
④	0.787	0.213	0.624	0.376	0.546	0.454

評価単価比行列と表-3 から得られた収束した評価基準の重みの積をとる。

$$M_{\text{増加}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.573 & 1.282 \\ 0.31 & 0.955 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.787 \\ 0.213 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.724 \\ 0.447 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$M_{\text{維持}} = \begin{bmatrix} 1.745 & 0.78 \\ 1 & 1 \\ 0.54 & 0.745 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.624 \\ 0.376 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.382 \\ 1 \\ 0.617 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$M_{\text{減少}} = \begin{bmatrix} 3.23 & 1.047 \\ 1.851 & 1.342 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.546 \\ 0.454 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.238 \\ 1.62 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

そして、(20)、(21)、(22) 式における評価値をそれぞれ全体で 1 に正規化すると、総合評価値は $E^T = (0.461, 0.333, 0.206)$ となり、バスの本数増加 (0.461) > 現状維持 (0.333) > バスの本数減少 (0.206) の順序になっていることがわかる。この結果は、ANP の結果とほぼ同じ値であり、従来型 AHP の結果とは数値が異なっているが選好順序は同様である。ANP の結果と重み一斉法の結果は非常に近い値が導出される場合やあるいは、極めて乖離した結果が得られることが近年指摘されているが、現在のところ両者の厳密な関係は明らかになっていない。

7. 総合評価値一斉法⁹⁾を用いた結果

前章において重み一斉法を用いた結果を示した。ところで、5 章の ANP を用いた結果において従来型 AHP の結果が ANP の演算で実行可能であることを示した。つまり、広義の意味で従来型 AHP は ANP に内包されているのである。それと同様にして、重み一斉法も総合評価値一斉法¹⁰⁾に内包される。本章では、総合評価値一斉法を用いた結果を示す。まず、総合評価値一斉法の構造について記述し、その後、本事例に当てはめる。評価基準 n 個、代替案を m 個とする。各評価基準の下での代替案の評価値を

$$M = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1j} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ U_{i1} & \cdots & U_{ij} & \cdots & U_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ U_{m1} & \cdots & U_{mj} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

と表現する。評価基準の重みを

$$W^1 = (W_1^1, \dots, W_i^1, \dots, W_m^1) \quad (24)$$

と表現する。このときの W_i は代替案 i を視点とした評価基準の重みである。そして、代替案 i の評価基準の重み W_i には評価基準 n 個分の重みが含まれているため、

$$W_i^1 = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

と表現できる。ただし、評価基準の重みは全体で 1 となるため、 $\sum w_k = 1$ である。つづいて、(15) 式に対応

する評価単価比行列として (26) 式を定義する。

$$M_i = M \cdot \begin{bmatrix} 1/U_{i1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/U_{in} \end{bmatrix} \quad (26)$$

(26) 式は最初に与えられた代替案の評価値から代替案 i を視点とし、言い換えると代替案 i の評価値を 1 にするような演算を行っているのである。

そして、導出式として

$$E_i^1 = M_i \cdot W_i^1 = M \cdot \begin{bmatrix} 1/U_{i1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/U_{in} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^i \\ \vdots \\ u_n^i \end{bmatrix} \quad (27)$$

として初期値を得る。ここで、(27) 式における初期値は代替案の数 m だけ存在するため、全体で平均し新たに

$$E_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{E_1^i}{u_k^i} \quad (28)$$

が導出される。同様にして、

$$E_i^{n+1} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{E_n^i}{u_k^i} \quad (29)$$

となる。そして、ステップを繰り返し $E_i^{n+1} = E_i^n$ と

なったとき演算は収束となる。そして、収束した E_i^* から、

$$E_i^* = \begin{bmatrix} u_1^i \\ \vdots \\ u_m^i \end{bmatrix} \quad (30)$$

が導かれ、最終的な総合評価値 E は (30) 式を列和を 1 に正規化し、

$$E = \frac{u_k^i}{\sum_{k=1}^m u_k^i} \quad (31)$$

として得ることができる。つまり、総合評価値一斉法では最終的に収束した値は各代替案の評価値を 1 とする評価値が代替案の総数である m だけ存在する。しかし、それらはいずれも正規化することにより、唯一の総合評価値として導出できるのである。

総合評価値一斉法を適用した通学バス代替案の選定結果を示す。ANP や重み一斉法の場合と同様に代替案の評価値 M 、評価基準の重み W はそれぞれ、(3)、(8) 式である。各代替案の評価単価比行列はそれぞれ、

$$M_{\text{増加}} = \begin{bmatrix} 0.531 & 0.309 \\ 0.304 & 0.396 \\ 0.164 & 0.295 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/0.531 & 0 \\ 0 & 1/0.309 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.573 & 1.282 \\ 0.31 & 0.955 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$M_{\text{維持}} = \begin{bmatrix} 0.531 & 0.309 \\ 0.304 & 0.396 \\ 0.164 & 0.295 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/0.304 & 0 \\ 0 & 1/0.396 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.745 & 0.78 \\ 1 & 1 \\ 0.54 & 0.745 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$M_{\text{減少}} = \begin{bmatrix} 0.531 & 0.309 \\ 0.304 & 0.396 \\ 0.164 & 0.295 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/0.164 & 0 \\ 0 & 1/0.295 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.23 & 1.047 \\ 1.851 & 1.342 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

となる。

代替案ごとの導出初期値は、

$$E_{\text{増加}}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.573 & 1.282 \\ 0.31 & 0.955 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.784 \\ 0.216 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.726 \\ 0.449 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$E_{\text{維持}}^1 = \begin{bmatrix} 1.745 & 0.78 \\ 1 & 1 \\ 0.54 & 0.745 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.659 \\ 0.341 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.416 \\ 1 \\ 1.61 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$E_{\text{減少}}^1 = \begin{bmatrix} 3.23 & 1.047 \\ 1.851 & 1.342 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.513 \\ 0.487 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.167 \\ 1.604 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

となる。(35) ~ (37) 式の導出初期値から総合評価値一斉法が収束するまでの過程を示したのが表-2 である。

表-2 の結果から step3 の導出において演算は収束し、評価値として、

$$E_{\text{本数増加}}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.724 \\ 0.447 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$E_{\text{現状維持}}^* = \begin{bmatrix} 1.382 \\ 1 \\ 0.617 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$E_{\text{本数減少}}^* = \begin{bmatrix} 2.238 \\ 1.620 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

が得られる。(38), (39), (40) 式を正規化するといずれも

$E^T = (0.461, 0.333, 0.206)$ となり, バスの本数増加

(0.461) > 現状維持 (0.333) > バスの本数減少 (0.206) の順序になっていることがわかる。

そして, これら総合評価値一斉法で得られた結果は6章の重み一斉法を用いた結果と完全に一致していることが分かる。

表-2 総合評価値一斉法の結果

step1	1	1.416	2.167	step2	1	1.381	2.238
	0.726	1	1.604		0.724	1	1.62
	0.449	0.61	1		0.447	0.617	1
		1.377	2.227			1.381	2.237
		1	1.617			1	1.62
		0.618	1			0.617	1
	1		2.227		1		2.238
	0.706		1.617		0.724		1.621
	0.431		1		0.447		1
	1	1.351			1	1.381	
	0.741	1			0.724	1	
	0.461	0.623			0.447	0.617	
	1	1.381	2.238		1	1.381	2.238
	0.724	1	1.62		0.724	1	1.62
	0.447	0.617	1		0.447	0.617	1

さて, 重み一斉法と総合評価値一斉法は同じ値を得るためどちらの手法を用いても結果は同じであるが, 総合評価値一斉法の方が有効であると考えられる。AHP に求められるのは, 合理的な意思決定支援であり, 意思決定者が必要としているのは最終的な代替案の優先度である総合評価値の導出である。そのため, 重み一斉法では評価基準を収束させ, 収束した評価基準の重みと評価単価比行列の積により結果を得るため演算が複雑である。一方, 総合評価値一斉法は導出の演算が重み一斉法に比べて簡便である。

8. 感度分析¹⁰⁾

前章までに, 従来型 AHP, ANP, 重み一斉法および総合評価値一斉法を用いた通学バスの代替案選定結果を示した。そして値はそれぞれ異なっているが選好順序は全てバスの本数増加 > 現状維持 > バスの本数減少であった。従来型の AHP, ANP, 重み一斉法の結果を表-3 に示す。

表-3 代替案の選好結果

	従来型 AHP	ANP	重み一斉法 総合評価値一斉法
本数増加	0.445	0.462	0.461
現状維持	0.340	0.333	0.333
本数減少	0.215	0.205	0.206
選定順序	本数増加 > 現状維持 > 本数減少		

さて, あるモデルにより得られた結果を総合的に分析するには感度分析を行うことが有効となる。感度分析を行うと代替案の選定順序が入れ替わるためには, 評価基準の配分がどのような配分であれば良いかがわかる。つまり, 利便性, 費用負担の評価基準をそれぞれ t_1 , t_2 とすると,

$$E(t) = \begin{bmatrix} 0.531 \\ 0.304 \\ 0.164 \end{bmatrix} t_1 + \begin{bmatrix} 0.309 \\ 0.396 \\ 0.295 \end{bmatrix} t_2 \quad (41)$$

と表現できる。まず, (41) 式から評価基準の重み t_1 , t_2 がどのように変化してもバスの本数減少は常に最下位に位置することがわかる。一方, バスの本数増加と現状維持の入れ替えの起こる範囲は,

$$\begin{aligned} \max. \quad & t_1 \\ \text{s.t.} \quad & 0.531t_1 + 0.309t_2 \leq 0.304t_1 + 0.396t_2 \\ & t_1 + t_2 = 1, t_1, t_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \min. \quad & t_1 \\ \text{s.t.} \quad & 0.531t_1 + 0.309t_2 \leq 0.304t_1 + 0.396t_2 \\ & t_1 + t_2 = 1, t_1, t_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

の最適値によって与えられる。(42), (43) 式の最適値を求めると $0 \leq t_1 \leq 0.277$ の範囲, すなわち利便性の評価基準が 0.277 より小さいとき, つまり費用負担の評価基準を強く重視した場合に代替案「現状維持」が代替案「バスの本数増加」より選定順序が上位になることが判明する。

9. おわりに

本稿では AHP を適用した通学バス利用調査について述べた。代替案の選定には AHP における最も単純なモデルである従来型 AHP, さらに発展モデルである ANP, 重み一斉法とその発展モデルである総合評価値一斉法を用いそれぞれの選定結果を導出した。総合評価値の数値はそれぞれ異なっていたが代替案の選定順序はいずれもバスの本数増加>現状維持>バスの本数減少となっており, 各手法によって得られた調査結果は整合的な評価を示すものであった。

また, 本研究では感度分析を行い評価基準が選定順序へ変化を及ぼす範囲についても言及した。その結果, 代替案であるバスの本数減少は常に最下位に位置し, 本数増加の優先度が極めて高く, 本数増加と現状維持の優先順位が入れ替わるのは費用負担の評価基準を極めて高くした場合であった。

ANP, 重み一斉法, 総合評価値一斉法は AHP の中でも発展的なモデルであり, 特に重み一斉法と総合評価値一斉法はこれまでにそのモデルを適用した事例は無く, 本稿が初めてであると考えられる。本調査では利用者である学生を調査対象としたが, より客観的な評価を得るためには通学バスを提供する大学側にも調査を行うことが必要である。

ANP と重み一斉法および総合評価値一斉法から導出される結果については, 類似した結果が得られたりあるいは, コンピュータなどを用いたシミュレーションで大きく異なる結果が生じたりすることが著者らの実験で判明し, その数値例を確認している。そのため, 各手法が構造上異なるものであることは判明している。本稿で紹介した通学バス利用調査の事例についてはいずれも優先順位の逆転や結果の乖離は起こっていない。

さらなる理論的研究, 応用研究により ANP と重み一斉法および総合評価値一斉法についての構造を解明し, より良い意思決定支援手法として確立することが今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 木下栄蔵:「AHP 手法と応用技術」, 総合技術センター, 1993.
- 2) 木下栄蔵:「孫子の兵法の数学モデル」, 講談社, 1998.
- 3) 木下栄蔵:「入門 AHP」, 日科技連, 2000.
- 4) 木下栄蔵編著:「AHP の理論と実際」, 日科技連, 2000
- 5) 高橋磐郎:「連載講座 AHP から ANP への諸問題 I ~VI」, 「オペレーションズ・リサーチ」, 1 月~6 月号, 1998.
- 6) 高橋磐郎:「Saaty 型 Supermatrix 法と木下・中西型一斉法の比較」, 第 40 回日本 OR 学会シンポジウム講演集, pp.5-8, 1998.
- 7) 木下栄蔵, 中西昌武:「支配代替案法における追加データの処理手法「一斉法」の提案」, 土木学会論文集 No. 611/IV-42, pp.13-19, 1999.
- 8) 杉浦伸, 木下栄蔵:「評価値一斉法の提案」, 土木計画学研究・論文集 vol.21, pp.33-40, 2004.
- 9) 杉浦伸, 木下栄蔵:「総合評価値一斉法の提案」, 土木計画学研究・論文集 vol.22, pp.39-46, 2004.
- 10) 関谷和之:「ANP を組み込んだ AHP の適用」, オペレーションズ・リサーチ, Vol.48, No.4, pp.259-264, 2003.

AHPを適用した通学バス利用意識調査*

杉浦伸**・木下栄蔵***

本論文では, AHPを適用した通学バス利用意識調査について述べる。通学バス利用意識調査には, AHPにおける4つのモデルを適用させた。従来型AHPを用いた結果, さらにAHPの発展モデルであるANP, 重み一斉法, 総合評価値一斉法を用いた適用事例である。AHPの発展モデルを適用させた事例はあまり無く, 特に重み一斉法や総合評価一斉法を適用させた事例はこれまでに無く, 本稿が初めてであると考えられる。

Research for User Perception of School Bus by AHP*

By Shin SUGIURA**・Eizo KINOSHITA***

This paper shows user perception of school bus by Analytic Hierarchy Process.

AHP is solving problem decision-making model.

This study utilizes 4 methods on AHP, General AHP model, ANP (Analytic Network Process), Weight CCM (Weight Concurrent convergence method) and Total CCM of evaluation value. Especially this is the first application example by Weight CC M and Total CCM ever. And this paper shows possibility and availability of AHP.
