

# 非線形効用関数を用いた AHS 整備のコンジョイント分析\*

## Conjoint Analysis of AHS Introduced Non-Linear Utility Function\*

橋田将季\*<sup>1</sup>・武藤慎一\*<sup>2</sup>・秋山孝正\*<sup>3</sup>・高木朗義\*<sup>3</sup>

By Masaki HASHIDA\*<sup>1</sup>, Shinichi MUTO\*<sup>2</sup>, Takamasa AKIYAMA\*<sup>3</sup> and Akiyoshi TAKAGI\*<sup>3</sup>

### 1. はじめに

深刻化する交通事故問題に対し、国土交通省では、走行支援道路システム(AHS)の導入が検討されている<sup>1)</sup>。AHSの導入は、交通事故の抑止とともに、危険感や不安感の軽減といった心理的効果も期待されている。これに対し、筆者らは、コンジョイント分析を適用し、心理的効果を含むAHS導入効果の計測を行ってきた<sup>2)</sup>。しかし、そこで扱われていた効用関数が線形であったため、複数のサービスを整備した場合の優加法的効果あるいは劣加法的効果については検討できていないという問題があった。また、AHSの導入による交通事故あるいはその被害額そのものの軽減といった物理的効果については、コンジョイント分析の中では考慮できていないという問題もあった。

そこで、本研究では、AHSの導入による物理的効果を評価の中で考慮するとともに、コンジョイント分析で用いる効用関数の非線形化を試みる。なお、コンジョイント分析が理論的基礎とする離散選択分析における一連の研究では、既に、効用関数の非線形化の試みがなされている。これに対し、本研究は、それらの成果を踏まえ、現実に整備が進められようとしているAHSについて、実証的観点から知見を得ることを目的としたものである。

### 2. 既往コンジョイント分析の概要

本章では、筆者らがAHS整備の評価を行ったコンジョイント分析の概要を示す。

#### (1) AHSの概要と具体的サービス

まずここでは、国土交通省のホームページ<sup>1)</sup>に基づき、AHSの簡単な全体像を示すとともに、本研究で対象としたAHSサービスの概要を示す。

AHSは、道路や自動車に取り付けられたセンサーに

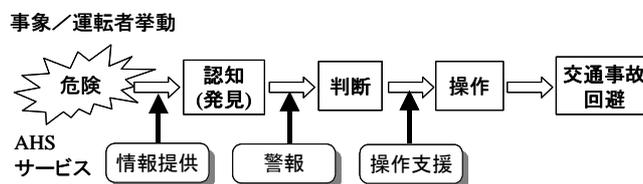


図-1 運転者挙動と AHS サービス

より、交通事故の原因となる情報を収集して、自動車運転者に提供し注意喚起や警報を与える。さらに、場合によっては、ブレーキやハンドルの操作等、交通事故回避のための操作支援を行うシステムである(図-1)。

現在、国土交通省では7種類のAHSサービスが検討されている。本研究では、このうち次の4種類のサービスに着目して評価を行うこととした。

- ・前方障害物衝突防止支援
- ・車両逸脱防止支援
- ・出会い頭衝突防止支援
- ・横断歩行者衝突防止支援

#### (2) プロファイルの作成

本研究では、AHSサービスの導入を対象とするにあたり、以下のようなプロファイルを作成した。即ち、4種類のサービスの有無と、整備に必要な負担額からなる組合せとした。なお、負担額は自動車を購入する際、購入代金とともに支払われるものとした。

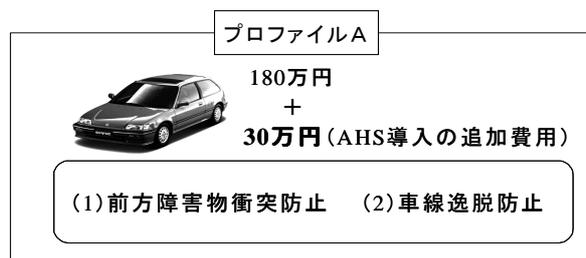


図-2 コンジョイント分析にて用いたプロファイルの例

そして、AHSサービスと負担額との組合せを変えたプロファイルをいくつか作成し、一対比較による嗜好調査を行った。

#### (3) プロファイル選択確率の定式化と支払い意思額

前節の一対比較分析に対し、選択確率を定式化する。その定式化には、ロジットモデルが使われるのが一般的である。即ち、例えばプロファイルAの選択確率で

\* キーワード：整備効果計測法，交通安全，ITS

\*<sup>1</sup> 学生員 岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻 (岐阜市柳戸 1-1, TEL:058-293-2445, FAX:058-230-1248)

\*<sup>2</sup> 正会員 博(工) 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 (大阪市旭区大宮 5-16-1, TEL:06-6954-4203, FAX:06-6957-2131, E-Mail: muto@civil.oit.ac.jp)

\*<sup>3</sup> 正会員 工博 岐阜大学工学部社会基盤工学科

あれば、以下のように表される。

$$P_A = \frac{\exp(\theta V_A)}{\exp(\theta V_A) + \exp(\theta V_B)} \quad (1)$$

$$V_j = \sum_k \alpha_k x_k + \beta Z_j \quad (2)$$

ただし、 $P_A$ ：プロファイル A の負担金、 $\theta$ ：ロジットパラメータ( $\theta=1$ )、 $V_j$ ：プロファイル j ( $j=A, B$ ) を選択したときの効用、 $Z_j$ ：プロファイル A の選択確率、 $x_k$ ：AHS サービス k の整備の有無を表すダミー変数(整備あり： $x_k=1$ 、整備なし： $x_k=0$ )、 $\alpha_k$ ：AHS 導入効果に関わるパラメータ、 $\beta$ ：支払い意思額に関わるパラメータ。

式(2)の効用関数を展開することにより、支払い意思額が誘導される。即ち、式(2)を全微分し  $dV_j=0$  として整理すると、AHS サービス k の単位変化に対する限界的な支払い意思額が得られる。

$$\frac{dZ_j}{dx_k} = -\frac{\alpha_k}{\beta} \quad (3)$$

#### (4) AHS 導入に伴う支払い意思額の計測結果

式(1)~(3)の選択確率式を推定するために、平成 13 年 12 月に岐阜大学の学生を対象としたアンケート調査を実施した。調査では、155 名の学生にアンケートを実施し、そのうち有効となる回答が 141 得られた。なお、今回は、運転者の立場に立って、アンケートへ回答してもらっている。

アンケート調査より得られたデータを基に、最尤推定法により式(1),(2)のパラメータ推定を行った結果が表-1 である。そして、表-1 の結果を用いて、AHS 導入に伴う支払い意思額の算定を行ったものが図-3 である。これを見ると、横断歩行者衝突防止サービスに対する支払い意思額が突出している。歩行者衝突事故は、多大な被害をもたらす可能性があるため、その防止支援に対する評価が高くなったものと考えられる。一方、車線逸脱防止の支払い意思額は、非常に小さい値となっている。ただし、これはあくまで被験者の主観的な評価であり、この結果から直ちに車線逸脱防止支援サービスの重要性が否定されるものではない。

続いて、図-3 の結果を踏まえ、岐阜市の交差点を対象とした AHS サービスの導入効果を計測した。その結果が表-2 である。表-2 における交差点 WTP とは、単年度の交差点あたり支払い意思額、交差点総 WTP とは、対象期間 20 年、社会的割引率 4% として計算した総便益額である。なお、AHS サービスの(1)と(2)については、交差点に設置されるものではないため、交差点あたりの支払い意思額の導出に直接的な意味はないが、ここでは参考値として示したものである。

表-1 パラメータ推定結果

パラメータ	推定結果	t値
$\alpha_1$	0.342	8.824
$\alpha_2$	0.028	0.380
$\alpha_3$	0.390	4.670
$\alpha_4$	0.602	9.838
$\beta$	-0.016	-4.525

的中率:58.0%

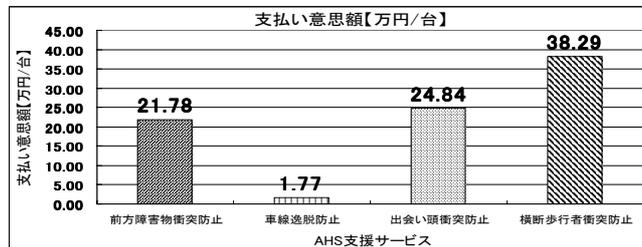


図-3 購入自動車一台あたりの支払い意思額

表-2 交差点あたり AHS 導入効果 (対象：岐阜市)

自動車保有台数(H5)		204,253 台		
主要交差点数		450 箇所		
	一台WTP	市全体WTP	交差点WTP	交差点総WTP
前方障害物衝突防止	3.63	74.1	1,647	2.40
車線逸脱防止	0.29	6.0	133	0.19
出会い頭衝突防止	4.14	84.5	1,878	2.74
横断歩行者衝突防止	6.38	130.3	2,895	4.22

(万円/年・台) (億円/年) 万円/年・交差点 (億円/交差点)

この結果によれば、例えば、岐阜市の主要交差点 450 箇所に、横断歩行者衝突防止用 AHS サービスが整備されたとすると、一交差点あたり 2,900(万円/年)弱の便益が得られる。なお、20 年の対象期間の下では 4.2(億円)の便益が得られる結果となる。

### 3. 既往コンジョイント分析の問題点の整理

以上示したコンジョイント分析による AHS 導入効果の評価には、いくつかの問題が残されている。

#### (1) 物理的效果の考慮の欠如

一点目は、実際の交通事故やその被害額の軽減といった物理的效果が評価の際に考慮されないことである。これは、式(2)における AHS 整備の有無を表す変数  $x_k$  が 0 or 1 のダミー変数となっているため、いずれの AHS が整備された場合にも、一律に  $x_k=1$  と扱われる。そのため、各 AHS ごとの整備に伴う客観的な効果の違いが考慮されなくなるのである。

#### (2) 線形効用関数を用いることによる問題点

二点目は、複数の AHS サービスの整備に対する優加法的あるいは劣加法的効果が把握できないという問題である。例えば、表-2 の結果を基に、(4)横断歩行者衝突防止サービスに加え、(3)出会い頭衝突防止サービスの整備も行った場合を考える。ここで、式(2)の線形効用関数を用いると、AHS サービスの(3)と(4)とを同時に実施した場合の効果は、各サービスの支払い意思額を

足し合わせるにより求められることとなる。即ち， $[2.74+4.22=6.96]$ 億円の便益が発生する結果となる。しかし，各サービスを別々に実施した場合と，同時に実施した場合とは発現する効果が異なると考えられる。例えば，AHS サービスの(3)と(4)を同時に実施した場合，利用者は，出会い頭事故に対する注意に加え，歩行者事故に対する注意も行ってくれる AHS サービスに対し，より高い効果を感じるかもしれない。また，逆に，出会い頭事故に対する注意喚起のみで，歩行者事故に対しても気を付ける意識を喚起してくれるという意味で，両方の整備は必ずしも必要とはいえないと感じる利用者もいるかもしれない。前者が優加法的効果，後者が劣加法的効果である。

このような評価が，線形効用関数では行うことができない。これは，各 AHS サービスを単独で行うならば問題はないが，最終的に 7 種類の AHS サービスをすべて整備する場合には，互いの相互作用についても注意を払う必要がある。特に，AHS はネットワークで結ばれた道路上に整備されるものであるため，各 AHS が相互に影響を及ぼし合う可能性は高い。

#### 4. 非線形効用関数を用いたコンジョイント分析

##### (1) 物理的效果の考慮

まず，物理的效果のコンジョイント分析への導入について検討する。ここでは，式(2)にて整備ダミー変数として扱った  $x_k$  を，各サービスの物理的效果として死傷者数の減少効果が反映されるように拡張する。これについて，現在，国土交通省では，各 AHS サービスが対象とする事象(例えば，前方障害物事故，出会い頭事故等)における現在の死傷者数が示されている<sup>1)</sup>。この値に，AHS 導入に伴い予測される交通事故削減率を乗じることにより，被害者の減少数が導出される。さらに，被害者あたりの単位物理的被害額を乗じることにより被害軽減額を求め，それを AHS 導入に伴う物理的效果として  $x_k$  に反映させるものである。

なお，ここでは最も効果の大きい値を 1，効果の小さい値を 0 として，各サービスの被害軽減効果を 0~1 の範囲に基準化して適用することとした。0~1 への基準化は，後に示すファジィ積分にて用いる際に有効となる。なお，3.(3)にて定式化した線形効用関数は，物理的效果の考慮にあたり，以下のように修正される。

$$V_j = \sum_k \alpha_k h(x_k) + \beta_1 Z_j \quad (4)$$

ただし， $h(x_k)$ ：AHS サービス k の導入に伴う物理的效果を 0~1 の値にて評価したもの。

式(4)の形状は式(2)と変わっておらず，よって通常の

最尤推定法によりパラメータを推定することが可能である。その後の展開は，3 章におけるものと全く同様である。

##### (2) 効用関数の非線形化

効用関数の非線形化については，CES 型とファジィ積分型を用いた定式化を試みる。

###### a) CES 型効用関数

CES 型関数は，経済モデルにおいてしばしば適用されるものである。その関数形は，以下のように表される<sup>3), 4)</sup>。ただし，支払い意思額を表す  $Z_j$  に対しては線形としている。

$$V_j = -\frac{1}{\rho} \ln \left[ \sum_k \alpha_k h(x_k)^{-\rho} \right] + \beta_2 Z_j \quad (5)$$

ただし， $\rho$ ：代替の弾力性を表すパラメータ。すなわち， $-1 \leq \rho \leq 0$ ：代替的， $0 < \rho \leq \infty$ ：補完的であることを表す。なお，代替的とは劣加法性，補完的とは優加法性を示すものと考えられる。

このように CES 型関数は， $\rho$  の値に応じて，優加法性，劣加法性を表現することが可能となる。また， $\rho$  の値により，線形関数( $\rho = -1$ )およびコブ=ダグラス型関数( $\rho = 0$ )を含むこととなり，一般性を有する関数形であることも特徴とされる。

CES 型効用関数を用いた場合，支払い意思額は以下のように計算される。

$$\frac{dZ_j}{dh(x_k)} = \frac{\partial V_j / \partial h(x_k)}{\partial V_j / \partial Z_j} = -\frac{1}{\beta_2 \alpha_k h(x_k)^{\rho+1} \left\{ \sum_k \alpha_k h(x_k)^{-\rho-1} \right\}} \quad (6)$$

###### b) ファジィ積分型効用関数

ファジィ積分とはいくつかの評価項目をあげ，これらの重視度を，一対比較法などを用いて計測し，全体の総合評価値を決定する方法である。既存研究で用いたコンジョイント分析も，ファジィ積分と同様に複数の属性と解答結果より属性単位の価値を評価し，これを人々の効用という概念で捉えている。そこで，本研究ではファジィ積分による総合評価値を効用水準と捉える。

ファジィ積分は菅野によって提案されたものであり，事象をあいまいな測度で評価するものである。特に，加法性よりもゆるい単調性をもつファジィ測度を用いて評価している点に特徴がある<sup>5), 6), 7)</sup>。これにより，優加法性や劣加法性が計測可能となっている。なお，ファジィ積分には様々な種類のものが提案されている。ここでは，そのうち菅野積分およびシヨケ積分を用いて，効用関数の定式化を図ることとする。

## 菅野積分

菅野積分は、ファジィ測度を提案した菅野により示されたファジィ積分概念である。この菅野積分を、小川(1999)<sup>8)</sup>は、非集計ロジットによる経路選択問題に適用している。本研究でも、小川モデルを参考として、菅野積分の AHS 導入効果評価モデルへの導入を試みる。

まず、式(4)の線形モデルにおける各 AHS サービスに対する重み係数  $\alpha_k$  を、単調性のみを有するファジィ測度  $g$  によって表す。なお、AHS サービスを  $x_1$  から  $x_2, \dots$  として  $x_k$  まで整備した際のファジィ測度は以下のように表される<sup>9)</sup>。

$$g_\lambda\left(\bigcup_{k=1}^n x_k\right) = \frac{1}{\lambda} \left[ \prod_{k=1}^n \{1 + \lambda g(x_k)\} - 1 \right] \quad (7)$$

ただし、 $\lambda$  : 複数の AHS サービス間の加法性を規定するパラメータ ( $-1 < \lambda < \infty$ )。なお、 $\lambda > 0$  : 優加法性、 $\lambda = 0$  : 加法性、 $\lambda < 0$  : 劣加法性を表す。

続いて、AHS 整備による物理的効果を表す  $h(x_k)$  について検討する。これは A.(1)での導入にて示したように、区間  $[0, 1]$  の変数と定義とされているため、ファジィ積分へそのまま導入することができる。その結果、 $h(x_k)$  と  $g_\lambda$  からなる菅野積分型効用関数は以下のように表される。

$$V_j = \bigvee_{k=1}^n [h(x_k) \wedge g_\lambda(X_k)] + \beta_3 Z_j \quad (8)$$

ただし、 $X_k = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 、 $\wedge, \bigvee$  : それぞれ最大値(Max)、最小値(Min)を表す。

また、 $h(x_k)$  は以下の関係を満たすものとする。

$$0 \leq h(x_1) \leq h(x_2) \leq \dots \leq h(x_k) \leq \dots \leq 1 \quad (9)$$

式(8)で表される効用関数の未知パラメータ  $g, \lambda$  は、通常の最尤推定法に推定される。

支払い意思額は、補償的偏差 CV の定義に基づき計測される。即ち、AHS 整備の有無に対し、その効用差を埋め合わせるような補償的偏差 CV が支払い意思額となる。

## シヨケ(Choquet)積分

シヨケ積分<sup>10)</sup>は、シヨケの定義した汎関数が、ファジィ測度に関する積分と見なせることをウェーバが指摘し、考案されたものである<sup>5)</sup>。シヨケ積分と菅野積分は互いに似た形をしており、具体的にはシヨケ積分を用いた効用関数は以下のように表される。

$$V_j = \int_0^1 g_\lambda(X_k) dh + \beta_4 Z_j \quad (10)$$

式(10)の積分部分がシヨケ積分である。なお、 $h(x_k)$  は菅野積分の場合と同様、以下の関係を満たすものとする。

$$0 \leq h(x_1) \leq h(x_2) \leq \dots \leq h(x_k) \leq \dots \leq 1 \quad (11)$$

また、支払い意思額の計測についても、菅野積分にて説明した、補償的偏差 CV の定義に基づき計測する。

## 5. おわりに

本研究では、高度技術をいかした交通安全対策である AHS の導入に対し、コンジョイント分析を用いた経済評価を行った。まず、既往のコンジョイント分析の枠組みにより、AHS 導入に伴う心理的効果も含む支払い意思額の計測を行った。その結果、最も効果が大きい結果となった「横断歩行者衝突防止支援サービス」の導入に対しては、交差点あたり約 4.2 億円の総便益が得られる結果となった。次に、既往のコンジョイント分析における問題点を指摘した上で、それに対するコンジョイント分析の拡張を行った。具体的には、1) 物理的効果の評価への導入、2) 効用関数の非線形化の二点である。特に、効用関数の非線形化においては、現在検討されている AHS を今後実際に導入するにあたり、優先的に整備すべきサービスの組や逆に同時に整備することにより効果が相殺してしまうような場合を指摘できる点に意義があると考えている。しかし、本稿では、拡張コンジョイント分析手法については、その枠組みを示したにとどまっている。それらの計算結果については、講演時に発表する予定である。

なお、本研究は、土木学会・土木計画学研究小委員会「ITS 社会に向けた交通事故分析」における研究成果の一部であり、関係各位に謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局 ITS ホームページ : <http://www.its.go.jp/ITS/j-html/ahs/20010607-4.html> .
- 2) 橋田将季(2002) : 心理的効果に着目した走行支援道路システム整備の経済評価, 岐阜大学卒業論文 .
- 3) 大野栄治(2000) : 環境経済評価の実務, 勁草書房 .
- 4) 土木学会(1995) : 非集計行動モデルの理論と実際, 第 3 章, pp.59-62, 土木学会 .
- 5) 菅野道夫, 室伏俊明(1993) : ファジィ測度, 日本ファジィ学会編, 講座ファジィ, 第 3 巻, 日本工業新聞社 .
- 6) 浅居喜代治, C.V.Negoita 編著(1978) : あいまいシステム理論入門, 第 7 章, pp.135-146, オーム社 .
- 7) 古田均他(1992) : ファジィ理論の土木工学への応用, 第 2 章, pp.26-35, 森北出版株式会社 .
- 8) 小川圭一(1999) : ファジィ積分型効用関数を用いた経路選択行動モデル, 日本ファジィ学会誌, Vol.11, No.4, pp.690-694 .
- 9) 村上周太監修, 九州産学官協会会議編(1992) : ファジィシステム演習問題集, 第 5 章, pp.87-111, 工業調査会 .
- 10) 中島信之・竹田英二・石井博昭(1994) : ファジィ理論入門, 裳華房 .