

CVMによる推計便益の信頼区間推定法*

An Efficient Interval Estimation Method for Contingent Valuation Surveys

川除 隆広**・多々納 裕一***・岡田 憲夫***

By Takahiro KAWAYOKE, Hirokazu TATANO and Norio OKADA

1. はじめに

開発の進展による自然環境の減少, 地球環境問題等に触発された環境に対する意識の変化により, 環境質の改善や自然環境保全に対する社会的要請が高まってきている。また, 多自然型河川整備や貯水池環境保全等の新しく環境の保全・改善を目的とした社会基盤整備も実施されるようになってきている。

このような背景のもと, 環境整備プロジェクトの実施においては, 公共事業の効率性や事業決定順位の透明性等の観点から, 環境質の改善便益や生態系の保全価値(存在価値)等, これまで定量的に評価されてこなかった事業効果について経済評価を行なうことが必要となってきた。

環境質改善に関する便益の計量化手法としては, 代替の評価法としての旅行費用法(Travel Cost Method)やヘドニック・アプローチ(Hedonic Approach)、および仮想的な環境質変化に対する支払意思額をアンケート調査等により直接被験者に質問する仮想的市場評価法(Contingent Valuation Method, 以下CVM)が代表的である。

中でも, 離散選択モデルを用いたCVMアプローチが近年盛んに研究されつつある。しかし, CVMの使用には, 多くのバイアスに注意を払う必要があることが指摘されており¹⁾, 最も問題視されてきたのが戦略バイアスである。戦略バイアスに関しては, CECVM(Closed-ended Contingent Valuation Method)により技術的な進歩がもたされた。この方法は, 個人に支払意思額を直接尋ねるのではなく,

予め調査者によって指定された金額に対し支払い意

思があるか否かを尋ねる方法である。この方法により, 個人が意図的に過大な(または過小な)支払意思額を申告することを不可能とした。しかし, 未だCVMによる推定便益の信頼度に関して批判が多いのも事実である。

本研究では, CVMによる推計便益の信頼度の評価手法として, 支払意思額の平均値の信頼区間推定法を示すこととする。この際, さらにモンテカルロ法を用いた数値実験を行ないパラメータの推定精度と支払意思額の信頼区間との関連性等に関して考察する。

2. 既往の研究と本研究の特徴

Bishop and Herberlein による先駆的な研究以来, CECVMに関して多くの知見が得られてきた¹⁾。

また, Cameron and James(1987)²⁾は, 推定便益の分散を直接計量化する簡便な方法を提案した。

一般にCECMでは, 選択問題として個人毎に異なる金額 c_n が提示され, その金額を支払い環境の質の変化を望むか, 支払いをせず現状の水準に留まるかを2項選択形式で回答を求めるものが多い。

個人 n のプロジェクトに対する支払意思額を S_n とする。さらに, 個人 n の属性ベクトル $Z_n=(z_{1n}, \dots, z_{kn})$ が得られたものとする。Cameronらの方法では, 支払意思額 S_n が式(1)のように個人属性 Z_n とパラメータ β_j により構成される部分と平均0, 分散 σ^2 の正規分布に従う互いに独立な誤差項 ε_n により構成されると仮定する。

$$S_n = \sum_{j=1}^k \beta_j z_{jn} + \varepsilon_n \quad (1)$$

このとき, 個人 n がプロジェクトの実施に賛意を示すのは, 支払意思額が提示金額を上回る時であるから, 「はい」が回答される確率 P_{in} は式(2)で示される。

* キーワード: 公共事業評価法, 整備効果計測法, 意識調査分析, CVM

** 正員, 工務, 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

株式会社 日経設計 (〒541-8528 大阪市高麗橋4-6-2 TEL 06-229-6389/ FAX 06-203-4302)

*** 正員, 工務, 京都大学防災研究所総合防災研究部門

(〒611-0011 宇治市五ヶ庄 TEL 0774-38-4308/ FAX 0774-38-4044)

$$P_{1n} = \Pr(S_n \geq c_n) = 1 - \Phi\left((c_n - \sum_{j=1}^I \beta_j z_{jn}) / \sigma\right) \quad (2)$$

ここで、 $\Phi(\bullet)$ は標準正規分布の分布関数である。よって、データを所与とし、最尤推定法を適用すれば、パラメータの最尤推定値 $(\beta_1, \dots, \beta_I, \sigma)$ が求まる。

式(1)の構造から、推定された分散は支払意思額の分散 σ^2 の推定値であり、個人 n の支払意思額の平均の推定値 S_n は $\sum_{j=1}^I \beta_j z_{jn}$ により求められる。

しかし、このモデルは、提示金額の係数を1に特定化したプロビットモデルと同値である。また、Cameronらのアプローチは、支払意思額の分散は各個人において一定であるという仮定を置いている。

以上を踏まえ、本研究では支払意思額の平均・分散の点推定値を求めるにおいて、誤差項の分散は他のパラメータと独立に求まる必要がないこと、および個人属性の違いが支払意思額の平均値の信頼区間推定値に影響を及ぼしうるアプローチを提示する。

3. 推計便益の信頼区間推定法の定式化

(1) 支払意思額の平均・分散の点推定値

ここでは、標準的な離散選択モデルとしてプロビットモデル(Binary Probit Model)³⁾を用いて支払意思額の平均・分散の点推定値の算定方法を示す。

現状の環境質を q_0 とし、改善後の環境質を q_1 とし、このような環境改善に対する個人の支払額の分布を推計しよう。いま、個人 n が環境質 q_1 の享受を望む場合には c_n の支出が必要となるものとする。個人 n の将来(事後)の所得は、現在の所得を Y_n とすると、将来の所得 Y_m は式(3)のように定義される。

$$Y_m = \begin{cases} Y_n - c_n & (i=1) \\ Y_n & (i=0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、改善後の環境質 q_1 の享受を望む($i=1$)、現状の環境質 q_0 を望む($i=0$)と設定している。さらに、個人の属性を $Z_n = (z_{1n}, \dots, z_{In})$ とすると、個人の効用関数は式(4)で表される。

$$U_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) \quad (i=0,1) \quad (4)$$

個人 n が選択肢 $i=1$ を選ぶ条件は、

$$U_{1n} \geq U_{0n} \quad (5)$$

ランダム効用理論では、この U_{in} を確率変数とし、確率的に変動する確率項 ε_{in} と変動しない確定項 V_{in} に

分け、線形性を仮定して式(6)のように示す。

$$U_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) = V_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) + \varepsilon_{in} \quad (6)$$

すなわち、選択肢間の効用差は式(7)で示される。

$$\begin{aligned} U_{1n} &= \sum_{j=1}^I \alpha_j(q_1) z_{jn} + \beta(Y_n - c_n) + \varepsilon_{1n} \\ U_{0n} &= \sum_{j=1}^I \alpha_j(q_0) z_{jn} + \beta(Y_n) + \varepsilon_{0n} \\ U_{1n} - U_{0n} &= V_{1n} - V_{0n} + \varepsilon_{1n} - \varepsilon_{0n} = \sum_{j=1}^I \alpha_j z_{jn} - \beta c_n + \varepsilon_n \\ \therefore \sum_{j=1}^I \alpha_j z_{jn} &= \sum_{j=1}^I \alpha_j(q_1) z_{jn} - \sum_{j=1}^I \alpha_j(q_0) z_{jn} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、誤差項 ε_n は確率変数であり、独立かつ同一の確率分布に従うものとする。

$\varepsilon_n = \varepsilon_{1n} - \varepsilon_{0n}$ が正規分布(平均0、分散 σ^2)に従うものと仮定すると、個人 n の選択確率 P_{1n} は式(8)のプロビットモデルとなり、最尤推定法を適用することでパラメータの最尤推定量を求めることができる。

$$P_{1n} = \Phi\left(\frac{V_{1n} - V_{0n}}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\sum_{j=1}^I \alpha_j z_{jn} - \beta c_n}{\sigma}\right) \quad (8)$$

この際、誤差項 ε_n の分散と α_j および β とは分離可能ではない。そのため、通常 $\sigma=1$ の規格化条件を用いてパラメータを推計する。以下で述べるように、支払意思額の平均値および分散の点推定量は、このような分散の規格化に対して不変である。

個人 n の環境質改善に対する支払意思額を $w(Z_n)$ とする。支払意思額 $w(Z_n)$ が、提示される支出額 s を下回れば、「いいえ」と回答することから、支払意思額 $w(Z_n)$ の分布関数 $F(s|Z_n)$ は式(9)で表される。

$$F(s|Z_n) = 1 - P_{1n}(s|Z_n) = P_{2n}(s|Z_n) \quad (9)$$

パラメータ $\hat{\theta} = (\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \beta')$ が点推計値の場合の支払意思額の平均値 $\mu(Z_n, \hat{\theta})$ および分散 $\sigma^2(Z_n, \hat{\theta})$ は式(10)、(11)のとおり定式化される。

$$\begin{aligned} \mu(Z_n, \hat{\theta}) &= \int_{-\infty}^{\infty} s \cdot dF(s|Z_n, \hat{\theta}) \\ &= \sum_{j=1}^I \alpha_j z_{jn} / \beta = \sum_{j=1}^I \alpha_j z_{jn} / \beta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(Z_n, \hat{\theta}) &= \int_{-\infty}^{\infty} (s - \mu(Z_n, \hat{\theta}))^2 \cdot dF(s|Z_n, \hat{\theta}) \\ &= 1 / \beta^2 = \sigma^2 / \beta^2 \end{aligned} \quad (11)$$

このように、支払意思額の平均値 $\mu(Z_n, \hat{\theta})$ および分散 $\sigma^2(Z_n, \hat{\theta})$ は α', β' のみの関数となり、 σ が α, β と独立に求まらなくとも支払意思額の平均、分散の点推計値を求めることができる。

(2) 支払意思額の平均値の信頼区間推定

最尤法により推計された未知パラメータの統計量

$\hat{\theta}=(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \beta')$ は、サンプル数が十分大きい時は、漸近的に正規分布 $N[\theta, V(\hat{\theta})]$ に近づくことが証明されている⁴⁾⁵⁾。ここで、 θ はパラメータの真値であり、 $V(\hat{\theta})$ は母分散共分散行列である（以後 $\hat{V}$ と表示）。

以上の性質を用いると、統計量 $\hat{\theta}$ が確率変動することを考慮した場合のパラメータの同時確率密度関数 $f(\theta)$ は式(12)の多変量正規分布で示される。

$$f(\theta)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^1 \hat{V}}}\exp\left(-\frac{1}{2}(\theta-\hat{\theta})\hat{V}^{-1}(\theta-\hat{\theta})^T\right) \quad (12)$$

以下では式(10)より定数項、提示金額の他、個人属性変数が1つの場合を想定し、支払意思額の平均値の信頼区間の導出を試みる。支払意思額の平均値

$$\sum_{n=1}^N W(Z_n)/N \text{ が金額 } s \text{ を上回る確率は}$$

$$\Pr\left(\sum_{n=1}^N W(Z_n)/N \geq s\right) = \Pr\left((C' + \alpha' \bar{z} + \sum_{n=1}^N \varepsilon_n / N) / \beta' \geq s\right) \quad (13)$$

$$= \Pr\left(C' + \alpha' \bar{z} - \beta' s + \sum_{n=1}^N \varepsilon_n / N \geq 0\right)$$

となる。支払意思額の平均 $\sum_{n=1}^N W(Z_n)/N$ の信頼区間を推定しよう。いま、信頼区間を $(1-\gamma) \times 100\%$ とし、まず、右側信頼限界 $\bar{s}$ を求めることにする。

$T(s) = C + \alpha \bar{z} - \beta s + \sum_{n=1}^N \varepsilon_n / N$ とおくと、 $T(s)$ は平均 M 、分散 $Var(T(s))$ の正規分布に従う。この点に注意すると、片側 $\gamma/2$ を考慮すると次式が成立する。

$$\gamma/2 = \Pr(T(\bar{s}) \geq 0)$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot Var(T(\bar{s}))}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(t-M)^2}{Var(T(\bar{s}))}\right) dt \quad (14)$$

$$= \int_{-M/\sqrt{Var(T(\bar{s}))}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} x^2\right) dx$$

したがって、標準正規分布の片側 $\gamma/2$ を与える値を $U_{\gamma/2}$ とすると以下の関係が成り立つ。（左側信頼限界 $\underline{s}$ についても同様である。）

$$U_{\gamma/2} = -M / \sqrt{Var(T(\bar{s}))} \quad (15)$$

$$-U_{\gamma/2} = M / \sqrt{Var(T(\bar{s}))}$$

なお、 $T(s)$ の平均 M 、分散 $Var(T(s))$ は

$$M = C' + \alpha' \bar{z} - \beta' s \quad (16)$$

$$Var(T(s)) = Var(C) + \bar{z}^2 Var(\alpha') + s^2 Var(\beta) \quad (17)$$

$$+ 2\bar{z} COV(C, \alpha') + s COV(C, \beta) + \bar{z} s COV(\alpha', \beta) + 1/N$$

となる。なお、 $Var(\cdot)$ 、 $COV(\cdot)$ はパラメータの分散共分散行列の成分である。従って、式(15)を解けば、

信頼区間を求めることができる。結果を表-1に示す。

表-1 支払意思額の平均値 $W(Z_n)$ の信頼限界

$$\text{信頼限界} : \underline{s} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - ac}}{a}, \bar{s} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - ac}}{a}$$

ただし、

$$a = [U_{\gamma/2} \cdot Var(\beta') - \beta'^2]$$

$$b = [U_{\gamma/2} \cdot COV(C', \beta') + U_{\gamma/2} \bar{z} \cdot COV(\alpha', \beta') + C' \beta' + \alpha' \beta' \bar{z}]$$

$$c = [U_{\gamma/2} \{Var(C') + \bar{z}^2 \cdot Var(\alpha') + 2\bar{z} \cdot COV(C, \alpha') + \frac{1}{N}\} - C'^2 - \alpha' \bar{z} - 2C' \alpha' \bar{z}]$$

4. 仮想データによる数値事例の検証

(1) CECVMデータの概要

本研究では、定式結果に対する数値検証データとして、モンテカルロ・シミュレーションを適用したCECVMデータを作成した。なお、モデルは簡単のため式(20)を用いている。

$$\Delta U_n = U_{1n} - U_{0n} = C + \alpha z_n + \beta c_n + \varepsilon_n \quad (18)$$

表-2 CECVMデータの概要

変数	乱数	レンジ	備考
z_n	個人属性	一様乱数	0 ~ 1
c_n	提示負担額	任意設定	1 ~ 10 1 間隔
ε_n	誤差項	正規乱数	平均=0, 分散(σ^2)=1を設定
N	サンプル数	10,000	

(2) モデル分析の結果

ここでは、モンテカルロ法を用いて作成したデータから仮想的な選択結果を作成し、あらためてモデル構築を行なうことによって実施した。想定ケースは、基本ケースとして①被験者の肯定率として約30, 50, 70%を設定したケース、次に②被験者の回答に対する散らばり（誤回答率）が20%含まれる（一様乱数により発生）ことを想定したケースとした。モデルの検証結果を表-3に示す。

基本ケース①では、肯定率約30, 50, 70%の3ケースとも、モデルはt値、尤度比など統計的に非常に有意な結果が得られている。支払意思額の平均値は概ね肯定率に比例している。平均値の95%信頼区間については、点推計の場合、各モデルともレンジは0.08程度であるが、パラメータの確率変動を考慮した場合については、0.4~0.8と各モデルの支払意思額平均値の約10分の1程度の結果が得られている。

次に、回答の散らばりを考慮したケース②については、全モデルとも統計的な精度はケース①に比べ低下している。支払意思額の平均値についてはケース①との差は小さいが、信頼区間については、点推計

表-3 仮想的な数値事例によるモデル検証結果

(Yes:No)	(散ばりなし)			(散ばり率:2割)		
	3:7	5:5	7:3	3:7	5:5	7:3
定数項 (t値)	1.891	2.989	3.916	0.728	1.264	1.407
個人属性 (t値)	37.6	51.5	51.9	19.7	33.0	36.1
個人属性 (t値)	-0.066	-0.072	-0.065	-0.027	-0.033	-0.028
提示負担額 (t値)	-10.9	-12.4	-10.8	-5.8	-7.0	-6.1
提示負担額 (t値)	0.459	0.478	0.473	0.176	0.206	0.172
	53.6	61.3	53.6	36.3	42.2	36.0
L(c)	-6112.9	-6931.5	-6103.6	-6584.7	-6929.5	-6673.0
L(β)	-3536.7	-3698.0	-3461.1	-5863.2	-5935.3	-5967.2
χ^2	5152.4	6466.9	5284.8	1443.1	1988.3	1411.5
ρ^2	0.421	0.466	0.433	0.110	0.143	0.106
Hit Ratio	0.83	0.83	0.84	0.71	0.70	0.70
N	10000	10000	10000	10000	10000	10000
(Z;ave.)個人属性	4.959	4.959	4.959	4.959	4.959	4.959
(Z;ave.)提示負担額	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500
点推計の場合						
支払意思額平均値 $\mu(Z, \theta)$	3.411	5.508	7.591	3.368	5.354	7.359
支払意思額分散 $\sigma^2(Z, \theta)$	4.746	4.384	4.466	32.349	23.627	33.771
95%信頼区間(min)	3.368	5.467	7.549	3.256	5.258	7.245
95%信頼区間(MAX)	3.453	5.549	7.632	3.479	5.449	7.473
95%信頼区間(range)	0.085	0.082	0.083	0.223	0.191	0.228
確率変動の場合						
支払意思額平均値 $\mu(Z)$	3.411	5.508	7.591	3.368	5.354	7.359
95%信頼区間(min)	3.214	5.256	7.212	3.025	4.989	6.850
95%信頼区間(MAX)	3.617	5.772	7.989	3.736	5.742	7.909
95%信頼区間(range)	0.403	0.516	0.777	0.711	0.753	1.059

値の場合でケース①の約 2.5 倍、確率変動を考慮した場合ではケース①の約 1.5 倍程度となっている。

ここで、設定した肯定率に着目すると、ケース①、②とも、肯定率約 50%がモデル、信頼区間とも最も安定した結果を示しており、事前における慎重な調査設計の重要性を示唆する結果となっている。

次に、ケース①の肯定率約 50%モデルをもとに、個人属性値の変化に対する信頼区間の変動率の検証を行なった。結果を図-1に示す。これまでのモデル構築では、個人属性として連続数かつパラメータの符号がマイナスの項目（距離他）を想定したため、結果は、属性値の増加とともに、支払意思額の平均値は減少する結果となっている。また、信頼区間のレンジについても、微小ながら属性値の増加に伴い、減少する傾向となっている。

5. おわりに

以上、本稿ではプロビットモデルといった標準的な離散選択モデルを用いることにより、CECVMによる個人の支払意思額の信頼区間推定法の定式化およびその数値事例による検証を行なった。

特に、実証データによる検証は行っていないが、CEVMによる推定便益の信頼度評価手法としては、有用な方法論を提示できたものと考ええる。

今後、さらに推計便益の信頼度をより向上させるためには、調査設計において設定した提示額の設定パ

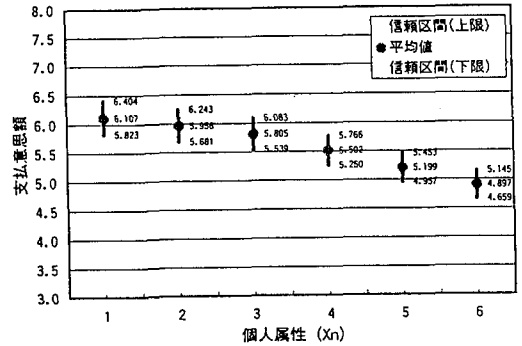


図-1 個人属性値による信頼区間変動

ターン等が、支払意思額の平均、分散の推定量にどのような影響を与えるか、および支払意思額の推計値をいかに集計し、客観的に信頼度を評価するか等、さらなる方法論的な検証が必要である。

【参考文献】

- 1) Mitchell and Carson: "Using Surveys to Value Public Goods", Resources of the Future, 1989
- 2) Cameron and James: "Efficient Estimation Methods for Closed-ended Contingent Valuation Surveys", The Review of Economics and Statics, Vol. 69, pp. 269-276, 1987
- 3) Ben-Akiva and Lerman: "Discrete Choice Analysis", MIT Press, 1985
- 4) 土木学会編: 非集計行動モデルの理論と実際, 1995
- 5) 蓑谷千風彦: 計量経済学の理論と応用, 日本評論社, 1996
- 6) Mark Downing and Teofilo Ozuna, Jr.: "Testing the Reliability of the Benefit Function Transfer Approach", Journal of Environmental Economics and Management, 30, 1996, pp. 316-322