【土木計画学研究・論文集 No.16 1999年9月】

支払意思額の異質分散性を考慮したＣＶＭによる推計便益の信頼区間推定法*

An Interval Estimation Method for Contingent Valuation Surveys with heterogeneous variances of WTP

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．その一方で，公共事業の説明責任の遂行や透明性の確保を背景とした費用便益分析の観点から，環境整備プロジェクトの実施に際しても，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も経済評価を実施する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，代替的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，ＣＶＭは非利用価値等の他の手法では計量化できない環境便益の計量化が可能であることから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いる[13]．中でも，最も問題視されてきたのは戦略バイアスである．このバイアスに関しては，ＣＥＣＶＭ（Closed-ended Contingent Valuation Method，or take-it-or-leave-it, or referendum method）により技術的な進歩がもたされた．ＣＥＣＶＭは，個人に対し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（提示額）について支払い意思があるか否かを尋ねる方法をとっており，個人が意図的に過大な（過小な）支払意思額を申告することを不可能としている．

しかしながら，このような技術的な向上がみられたものの，ＣＥＣＶＭによる便益推計の信頼度については，未だ批判が多いのも事実である．一方で，従来平均値（期待値）主体で議論がなされてきた推計便益の信頼性の評価手法として，推計便益の信頼区間を推計する幾つかの手法が現在までに開発されてきている．しかし，これらの手法についても，推計便益の信頼区間をシミュレーション等を適用することで近似的に求めるものや，信頼区間の解析的な直接推計を可能とするために推計便益の分散は各個人において一定であると仮定した推定法となってしまっている．

支払意思額の分散は個人属性に依存し，属性毎に異なると考えることがより一般的であろう．評価対象となる環境財（環境質）に日頃から慣れ親しんでいる個人とそうでない個人を考えた場合，支払意思額の分散に有意な差が生じてもおかしくはない．個人属性の変化に依存して支払意思額の分散が変動する場合（支払意思額に異質分散性がある場合）において，均質な分散を仮定したモデルを用いると，異質分散性を考慮したモデルに比べてモデルの適合度が低くなり，推計された支払意思額の信頼性が低下するものと考えられる．また，このようなモデルに基づいて個人の支払意思額や集計化された推計便益の信頼区間を推定したとしても，それ自体の信頼性は疑わしいものとなる．従って，少なくとも支払意思額に異質分散性を考慮しうるような，信頼区間の推定法が必要であろう．そして，それが解析的な手続きで定式化可能であれば，操作性が高いという意味でより望ましいであろう．

本研究では，支払意思額の異質分散性を考慮したＣＶＭによる推計便益の信頼区間推定法を定式化することを目的とする．具体的には，個人の均質分散性の制約を与えることなく，異質分散性を考慮した個人の支払意思額平均値の信頼区間および支払意思額母平均の信頼区間を直接推計する信頼区間推定法の定式化を行う．次いでモンテカルロ法を用いた数値実験を行うことでパラメータの推定精度と支払意思額の信頼区間の関連性について考察を行い，最後に本研究で得られた知見をとりまとめることで本研究のまとめとする．

2．既往の研究と本研究の特徴

Bishop and Herberlein(1979)[2]による先駆的な研究に始まったＣＥＣＶＭは，その後の Hanemann(1984)[8]による適切な効用理論への展開以来，多くの知見が得られてきた．

---

* キーワード；環境計画，整備効果計測法，意識調査分析
** 正員，工修，京都大学大学院 工学研究科 博士課程
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町，TEL 075-753-5070)
株式会社 日建設計 土木事務所 環境計画室
(〒541-8528 大阪市高麗橋4-6-2，TEL 06-6229-6384/ FAX 06-6203-4302)
*** 正員，工博，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)

初期の研究における便益の推定法は，ロジットモデルを主体とした提示額の最大値を打切り上限とする近似的な平均値の推定法が多く用いられてきた．ここでは，推計便益の信頼性の評価は回答の選択モデルのｔ値や尤度比他によって評価したり，サンプル上での回答の分散の大きさをもとに評価がなされてきた．

現在までに，推計便益の直接的な信頼性評価手法としては，幾つかの信頼区間推定法が開発されてきている．Park,Loomis and Creel(1989)[14]は Krinsky and Robb(1986)[12]によるシミュレーション手法を適用することで近似的な推計便益の信頼区間を求めている．この手法は推計パラメータとその分散共分散行列をもとに，推計パラメータの多変量正規性を援用することで乱数を発生させ，平均値の近似的な信頼区間を求めるものであった．Duffield and Patterson(1989)[7]は，Bootstrap 法によるシミュレーション手法を適用することで近似的な推計便益の信頼区間を推計している．この手法は推計した集計型の分布関数をもとに，提示額設定レベル毎の肯定比率とサンプル数を与件とした２項分布乱数を発生させ，分布関数を繰返し推計することで平均値の近似的な信頼区間を求めるものであった．一方，Cameron and James (1987)[3]，Cameron (1991)[4]は，支払意思額関数をもとに推計便益の分散を解析的に直接推計する簡便な手法を提示した．このモデルは，個人の支払意思額は個人属性の線形関数であると仮定することで，提示額との支出差をもとにプロビットモデル（Censored Probit Model）を適用することで，支払意思額の平均値と分散を同時に推計するものであった．しかし，このモデルは，所得の限界効用項を１に特定化したプロビットモデルであり，支払意思額の信頼区間推計に際しての操作性は向上したものの，支払意思額の分散は各個人において一定であるという強い仮定を置くこととなっている．

本研究では，所得の限界効用項が個人の属性に依存していることを仮定することで，標準的な離散選択モデル（プロビットモデル）をもとにしたＣＥＣＶＭモデルを定式化する．このことにより，個人の支払意思額の平均および分散の推定量は異質分散性を考慮した推定量として定式化される．さらに，推計便益について２つの信頼区間推定法を定式化する．一つは個人の支払意思額平均値の信頼区間推定法であり，他方は支払意思額の母平均の信頼区間推定法である．後者はプロジェクト評価に際しての集計化した推計便益の信頼区間を解析的に直接推計する操作性の高い手法であり，費用便益分析における推計便益の信頼性の評価手法としての適用を意図したものである．一方，前者は個人毎の支払意思額の信頼区間を求めることで，適正な効用関数の推計や便益推計を行うに際してのセグメント区分の有用な指標を提供しうる手法と考えている．

３．個人の支払意思額平均値の信頼区間推定法

(1) 異質分散性を考慮した離散選択モデルの定式化

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)[1]を適用することで，異質分散性を考慮したＣＥＣＶＭモデルの定式化を行う．

現状の環境質をq_0とし，改善後の環境質をq_1として、このような環境改善に対する個人の支払意思額の分布を推計する．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_{in}は式(1)のように定義される．

$$Y_{in} = \begin{cases} Y_n - c_n & (i = 1) \\ Y_n & (i = 0) \end{cases} \tag{1}$$

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$Z_n = (z_{1n}, \cdots\cdots, z_{mn})$とすると，個人の効用関数は式(2)で表される．

$$U_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) \quad (i = 0,1) \tag{2}$$

個人ｎが選択肢$i = 1$を選ぶ条件は式(3)である．

$$U_{1n} \geq U_{0n} \tag{3}$$

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(4)のように示す．

$$U_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) = V_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) + \varepsilon_{in} \tag{4}$$

ここで，所得の限界効用項に環境財へのアクセス頻度やアクセス距離を想定した個人属性の違いを考慮すると，効用関数は式(5)で示される．

$$U_{in} = V_{in}(Y_{in}, Z_n, q_i) + \varepsilon_{in} = \sum_{j=1}^{m_1} a_j(q_i) z_{ajn} + \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j z_{\beta jn} Y_{in} + \varepsilon_{in} \tag{5}$$

ここで個人属性Z_nは$Z_n = (z_{\alpha 1n}, \cdots, z_{\alpha m_1 n}, z_{\beta 1n} \cdots, z_{\beta m_2 n})$の２つに区分されている．

選択肢間の効用差は式(6)で示される．

$$U_{1n} - U_{0n} = V_{1n} - V_{0n} + \varepsilon_{1n} - \varepsilon_{0n} = \sum_{j=1}^{m_1} \alpha_j z_{\alpha jn} - \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j z_{\beta jn} c_n + \varepsilon_n \tag{6}$$

ここで，$\sum_{j=1}^{m_1} \alpha_j z_{\alpha jn} = \sum_{j=1}^{m_1} a_j(q_1) z_{ajn} - \sum_{j=1}^{m_1} a_j(q_0) z_{ajn}$である．

$\varepsilon_n = \varepsilon_{1n} - \varepsilon_{0n}$が正規分布（平均０，分散$\sigma^2$）に従うものと仮定すると，個人ｎの選択確率$P_{1n}$は式(7)のプロビットモデルとして定式化される．

$$P_{1n} = \Phi\left(\frac{V_{1n} - V_{0n}}{\sigma}\right) = \Phi\left(\left(\sum_{j=1}^{m_1} \alpha_j z_{\alpha jn} - \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j z_{\beta jn} c_n\right) / \sigma\right) \tag{7}$$

ここでΦは標準正規分布の分布関数である．

この際，誤差項ε_nの標準偏差σとα_jおよびβ_j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推計が行われる．しかし，次節で述べるように，パラメータを$\alpha'_j = \alpha_j / \sigma$と$\beta'_j = \beta_j / \sigma$と置換することによっても，最尤推定法を適用することでパラメータの最尤推定量$\theta = (\alpha'_1, \cdots, \alpha'_{m_1}, \beta'_1, \cdots, \beta'_{m_2})$を求めることが可能となる．

なお，ここでは効用関数に均質分散性を仮定しているが，次節に示す支払意思額の平均値と分散の推定量の定式化によって，支払意思額の推定量には異質分散性が考慮されることとなる．

(2) 個人の支払意思額の分布関数

ここでは，異質分散性を考慮した個人の支払意思額の平均・分散の点推定量の定式化を行う．

個人 n の環境質改善に対する支払意思額を $S(Z_n)$ とする．また，個人 n の支払意思額の分布関数を $G(s|Z_n)$ とする．もし個人の支払意思額 $S(Z_n)$ が提示額 c_n より小さければ，「いいえ」と答えることに着目すると，個人の支払意思額の分布関数 $G(s|Z_n)$ の値は，個人の支払意思額 $S(Z_n)$ が特定の支払意思額 s より小さいという確率を示している．それゆえ，$G(s|Z_n)$ は $P_{0n}(s|Z_n)$ と同値である．

$$\begin{aligned}G(s|Z_n) &= P_{0n}(s|Z_n) = 1 - P_{1n}(s|Z_n)\\ &= 1 - \Phi\left(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j z_{\alpha jn} - \sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j z_{\beta jn} s\right)\end{aligned} \tag{8}$$

プロビットモデルによる推計パラメータの点推定値を $\hat{\theta} = (\hat{\alpha}'_1,\cdots,\hat{\alpha}'_{m_1},\hat{\beta}'_1,\cdots,\hat{\beta}'_{m_2})$ とすると，個人 n の支払意思額の平均値 $\mu(Z_n,\hat{\theta})$ と分散 $\sigma^2(Z_n,\hat{\theta})$ の推定量は式(9)，(10)として定式化される．

$$\begin{aligned}\mu(Z_n,\hat{\theta}) &= \int_{-\infty}^{\infty} s\cdot dG(s|Z_n,\hat{\theta})\\ &= \left(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha_j z_{\alpha jn} \Big/ \sum_{j=1}^{m_2}\beta_j z_{\beta jn}\right) = \sum_{j=1}^{m_1}\hat{\alpha}'_j z_{\alpha jn} \Big/ \sum_{j=1}^{m_2}\hat{\beta}'_j z_{\beta jn}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\sigma^2(Z_n,\hat{\theta}) &= \int_{-\infty}^{\infty}(s-\mu(Z_n,\hat{\theta}))^2\cdot dG(s|Z_n,\hat{\theta})\\ &= \left(\sigma^2 \Big/ \left(\sum_{j=1}^{m_2}\beta_j z_{\beta jn}\right)^2\right) = 1 \Big/ \left(\sum_{j=1}^{m_2}\hat{\beta}'_j z_{\beta jn}\right)^2\end{aligned} \tag{10}$$

ここで，$\hat{\alpha}'_1$ は定数項，$\hat{\beta}'_1$ は所得項のため，$z_{\alpha 1n} = 1$，$z_{\beta 1n} = 1$ である．

このように，個人の支払意思額の平均値と分散は α_j'，β_j' のみの関数となり，σ が α_j，β_j と独立に求まらなくとも通常のプロビットモデルにより点推計値を求めることが可能である（ロジットモデルにおいても同様）．

また，式(9)，(10)は個人属性を内在化させることで，個人属性の違いに依存した支払意思額の平均値，分散の推定を可能としている．このことは個人の支払意思額の分散は一定と仮定してきた従来の研究[e.g. 2), 3), 4), 8), 15)]とは異なり，本研究における推定量が支払意思額の異質分散性を考慮しうることを示している．また，式(9)，(10)は所得の限界効用項が β' のみを考えた場合，Cameron らの式[3), 4)]と一致する．

なお，式(9)の支払意思額の平均値の推定量に着目する限り，以降の議論は同様な展開を行うことでロジットモデルにも適用可能である．この点に関しては，今後の機会に報告したい．

(3) 個人の支払意思額平均値の信頼区間推定法

次に，個人の支払意思額平均値の信頼区間推定量を定式化しよう．

プロビットモデルでは，最尤法によりパラメータの点推定量 $\hat{\theta} = (\hat{\alpha}'_1,\cdots,\hat{\alpha}'_{m_1},\hat{\beta}'_1,\cdots,\hat{\beta}'_{m_2})$ と分散共分散行列 $V(\hat{\theta})$ が推計される．推計されたプロビットパラメータは漸近的に，平均 $\hat{\theta}$ と分散共分散行列 $V(\hat{\theta})$ を有する多変量正規分布で示される．

そのため，個人の支払意思額平均値の点推定量の期待値と分散は次式から求められる．

$$E(\mu(Z_n)) = \int_{\theta_1=-\infty}^{\infty}\cdots\int_{\theta_n=-\infty}^{\infty}\mu(\theta|Z_n)\cdot\phi(\theta)d\theta_1\cdots d\theta_n \tag{11}$$

$$V(\mu(Z_n)) = \int_{\theta_1=-\infty}^{\infty}\cdots\int_{\theta_n=-\infty}^{\infty}(\mu(\theta|Z_n)-E(\mu(Z_n)))^2\cdot\phi(\theta)d\theta_1\cdots d\theta_n \tag{12}$$

ここで，ϕ は標準多変量正規分布の確率密度関数である．

ただしこの場合，$\mu(\theta|Z_n)$ が θ の非線形関数であることから，$E(\mu(Z_n))$ と $V(\mu(Z_n))$ の近似値を求めることを目的に，$\mu(\theta|Z_n)$ をその平均値の周りでテーラー展開し，2次以降の項を無視した式(13)をもとに推計を行なった．

$$\mu(\theta|Z_n) \approx \mu(\hat{\theta}|Z_n) + \sum_{i=1}^{l} C_i(\theta_i - \hat{\theta}_i) \tag{13}$$

ここで，$C_i = \left.\dfrac{\partial\mu(\theta|Z_n)}{\partial\theta_i}\right|_{\theta=\hat{\theta}}$ である．

以上をもとに，個人の支払意思額平均値の点推定量の期待値と分散の近似値は，式(14)，(15)となる．

$$E(\overline{\mu(Z_n)}) = \sum_{j=1}^{m_1}\hat{\alpha}'_j z_{\alpha jn} \Big/ \sum_{j=1}^{m_2}\hat{\beta}'_j z_{\beta jn} \tag{14}$$

$$V(\overline{\mu(Z_n)}) = \sum_{i=1}^{l} C_i^2\cdot \mathrm{Var}(\hat{\theta}_i) + 2\sum_{i=1}^{l-1}\sum_{j=i+1}^{l} C_i\cdot C_j\cdot \mathrm{COV}(\hat{\theta}_i,\hat{\theta}_j) \tag{15}$$

個人の支払意思額の平均値の分布形は未知であるが，サンプル数が十分大きい場合，支払意思額の平均値は大数の法則における中心極限定理より正規分布で近似できる．このことを援用すると，個人の支払意思額の平均値は平均 $E(\mu(Z_n))$ と分散 $V(\mu(Z_n))$ を有した正規分布に近づく．

$U_{\gamma/2}$ を標準正規分布の片側 $\gamma/2$ の確率を与える値とすると，個人の支払意思額の平均値の $(1-\gamma)\times 100\%$ 信頼区間は式(16)となる．

$$\left[E(\mu(Z_n)) - U_{\gamma/2}\sqrt{V(\mu(Z_n))},\ E(\mu(Z_n)) + U_{\gamma/2}\sqrt{V(\mu(Z_n))}\right] \tag{16}$$

そのため，近似的な個人の支払意思額平均値の信頼区間は式(17)で求めることが可能となる．

$$\left[E(\overline{\mu(Z_n)}) - U_{\gamma/2}\sqrt{V(\overline{\mu(Z_n)})},\ E(\overline{\mu(Z_n)}) + U_{\gamma/2}\sqrt{V(\overline{\mu(Z_n)})}\right] \tag{17}$$

4．支払意思額の母平均の信頼区間推定法

ここでは推計便益の集計化手法として支払意思額の母平均の信頼区間推定法を定式化する．

個人属性の母集団空間を Ω，個人属性 Z の分布関数を $F(Z)$ とすると，支払意思額の母平均 μ は式(18)から求められる．

$$\mu = \int_{\Omega}\mu(Z)dF(Z) = \int_{\Omega}\left(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j z_{\alpha j} \Big/ \sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j z_{\beta j}\right)\cdot dF(Z) \tag{18}$$

ただし，式(18)は $\mu(Z)$ が Z の非線型関数であることから，前章同様に $\mu(Z)$ について式(13)のたテーラー展開を適用することで，支払意思額の母平均 μ の近似解を式(19)として求めることが可能となる．

$$\mu = \sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j} \Big/ \sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j} \tag{19}$$

ここで，$\bar{z}_{\alpha j}$ と $\bar{z}_{\beta j}$ は母集団空間の個人属性平均値である．

一方，式(18)の $\mu(Z)$ がについて，所得の限界効用項が β' のみを考えた式(20)の場合，

表－1　支払意思額の母平均の信頼区間（信頼限界）推定量

$$\text{信頼限界：}\ \bar{s} = \mathrm{Max}\left(\frac{-b+\sqrt{b^2-ac}}{a}, \frac{-b-\sqrt{b^2-ac}}{a}\right),\ \underline{s} = \mathrm{Min}\left(\frac{-b+\sqrt{b^2-ac}}{a}, \frac{-b-\sqrt{b^2-ac}}{a}\right) \tag{29}$$

$$a = \left[U_{\gamma/2}{}^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^{m_2} \bar{z}_{\beta j}{}^2 \cdot \mathrm{Var}(\beta'_j) + 2\sum_{j=1}^{m_2-1}\sum_{k=j+1}^{m_2} \bar{z}_{\beta j}\cdot \bar{z}_{\beta k}\cdot \mathrm{COV}(\beta'_j, \beta'_k)\right) - \left(\sum_{j=1}^{m_2} \hat{\beta}'_j \bar{z}_{\beta j}\right)^2\right]$$

$$b = \left[U_{\gamma/2}{}^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{m_1}\sum_{j=1}^{m_2} \bar{z}_{\alpha i}\cdot \bar{z}_{\beta j}\cdot \mathrm{COV}(\alpha'_i, \beta'_j)\right) + \left(\sum_{i=1}^{m_1}\sum_{j=1}^{m_2} \bar{z}_{\alpha i}\cdot \bar{z}_{\beta j}\cdot \hat{\alpha}'_i \cdot \hat{\beta}'_j\right)\right]$$

$$c = \left[U_{\gamma/2}{}^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^{m_1} \bar{z}_{\alpha j}{}^2 \cdot \mathrm{Var}(\alpha'_j) + 2\sum_{j=1}^{m_1-1}\sum_{k=j+1}^{m_1} \bar{z}_{\alpha j}\cdot \bar{z}_{\alpha k}\cdot \mathrm{COV}(\alpha'_j, \alpha'_k)\right) - \left(\sum_{j=1}^{m_1} \hat{\alpha}'_j \bar{z}_{\alpha j}\right)^2\right]$$

注）$\hat{\alpha}'_1$ は定数項，$\hat{\beta}'_1$ は所得項のため，$\bar{z}_{\alpha 1}=1$，$\bar{z}_{\beta 1}=1$ である．

$$\mu = \int_\Omega \mu(Z)dF(Z) = \int_\Omega (\sum_{j=1}^{m_1} \alpha'_j z_{\alpha j}/\beta')\cdot dF(Z) \tag{20}$$

個人属性の分布として正規分布または一様分布を仮定することで，支払意思額の母平均 μ の厳密解は式(21)として求めることが可能である．

$$\mu = \sum_{j=1}^{m_1} \alpha'_j \bar{z}_{\alpha j}/\beta' \tag{21}$$

$\bar{s}$ と $\underline{s}$ を支払意思額母平均 μ の信頼区間 $(1-\gamma)\times 100\%$ の上方限界，下方限界とする．一方，所得の限界効用が正であることから，$\sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j z_{\beta j}$ （または β' ）が正となることに留意すると，両者は $\Pr(T(\bar{s})\ge 0)=\gamma/2$ と $\Pr(T(\underline{s})\le 0)=\gamma/2$ を満足する式(22)，(23)を得る．

$$\Pr(\mu \ge \bar{s}) = \Pr(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j}/\sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j} \ge \bar{s}) = \Pr(T(\bar{s})\ge 0) \tag{22}$$

$$\Pr(\mu \le \underline{s}) = \Pr(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j}/\sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j} \le \underline{s}) = \Pr(T(\underline{s})\le 0) \tag{23}$$

ここで，$T(s) = \sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j} - \sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j}\cdot s$ である．

また，$T(s)$ は平均 $M(s)$ と分散 $V(s)$ を有する正規分布に従うことから，式(24)，(25)を得る．

$$M(s) = \sum_{j=1}^{m_1}\hat{\alpha}'_j \bar{z}_{\alpha j} - \sum_{j=1}^{m_2}\hat{\beta}'_j \bar{z}_{\beta j}\cdot s \tag{24}$$

$$V(s) = \mathrm{Var}(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j}) + 2\mathrm{COV}(\sum_{j=1}^{m_1}\alpha'_j \bar{z}_{\alpha j}, \sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j})s + \mathrm{Var}(\sum_{j=1}^{m_2}\beta'_j \bar{z}_{\beta j})s^2 \tag{25}$$

式(22)-(25)から，信頼限界 $\bar{s}$ と $\underline{s}$ の信頼区間 $(1-\gamma)\times$ 100%は式(26)，(27)を満足する．

$$\gamma/2 = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\cdot V(\bar{s})}}\cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\cdot\frac{(t-M(\bar{s}))^2}{V(\bar{s})}\right)dt = \int_{M(\bar{s})/\sqrt{V(\bar{s})}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{1}{2}x^2)dx \tag{26}$$

$$\gamma/2 = \int_{-\infty}^{-M(\underline{s})/\sqrt{V(\underline{s})}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{1}{2}x^2)dx \tag{27}$$

従って，母平均 μ の信頼限界 $\bar{s}$ と $\underline{s}$ の推定量は式(28)を解くことによって求められる．

$$U_{\gamma/2} = M(s)/\sqrt{V(s)} \tag{28}$$

支払意思額の母平均の信頼区間（信頼限界）の推定量を表－1に示す．

なお，$\hat{\theta} = (\hat{\alpha}'_1,\cdots,\hat{\alpha}'_{m_1},\hat{\beta}'_1,\cdots,\hat{\beta}'_{m_2})$ はプロビットパラメータの点推定値，$\mathrm{Var}(\cdot)$ および $\mathrm{cov}(\cdot)$ は推定パラメータの分散共分散行列の成分を示している．

5．仮想データによる数値事例の検証

ここでは，前章までに定式化した信頼区間推定量について，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ついて考察する．なお，仮想的な数値データを適用した数値事例の検証は，次の２ケースを想定する．

①提示額の設定レンジを変化させた場合

②調査結果の精度（誤差項の標準偏差）を変化させた場合

(1) 仮想データの概要

本研究では，仮想的な数値事例の検証データとして，モンテカルロ・シミュレーションを適用したＣＥＣＶＭデータを作成している．また，モデルは簡単のため式(30)を用いている．

$$\Delta U_n = U_{1n} - U_{0n} = \mathrm{Const.}' + \alpha' z_n - \beta' c_n + \varepsilon_n \tag{30}$$

なお，回答結果は，仮想的なパラメータを設定し，各個人にＣＥＣＶＭデータを適用することで作成している．

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	0～10	－
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， σ=1, 1.5, 2, 3	
N	サンプル数	10,000		
仮想パラメータ		Const.' = 3.0 α' = −0.1 β' = 0.5		

(2) 提示額の設定レンジを変化させた場合

実際の調査では，設定した提示額のレンジに対し，回答

表－3 提示額の設定レンジを変化させた場合

提示額 c_n レンジ	1-5	3-7	5-9
Constant	3.093	2.999	3.108
(t_value)	(49.14)	(47.92)	(34.00)
α個人属性	-0.095	-0.092	-0.097
(t_value)	(-16.65)	(-18.76)	(-17.16)
β提示負担額	0.530	0.508	0.521
(t_value)	(39.98)	(48.12)	(40.00)
ln L(c)	-5190.8	-6931.5	-5224.4
ln L(β)	-4061.7	-5469.5	-4098.0
χ2	2258.2	2923.9	2252.9
ρ2	0.218	0.211	0.216
Hit Ratio	0.804	0.723	0.808
N	10000	10000	10000
個人の支払意思額			
$\mu(Z_n,\hat{\theta})$	4.953	5.002	5.049
$\sigma^2(Z_n,\hat{\theta})$	3.562	3.872	3.689
個人の支払意思額平均値			
$V(\overline{\mu(Z_n)})$	0.0019	0.0007	0.0020
95%信頼限界（上方）	5.038	5.056	5.136
$E(\overline{\mu(Z_n)})$	4.953	5.002	5.049
95%信頼限界（下方）	4.867	4.949	4.962
信頼区間range	0.171	0.107	0.174

注）個人属性値 Z_n は平均値 $\overline{Z} = 4.95$ を適用

表－4 支払意思額の母平均の信頼区間

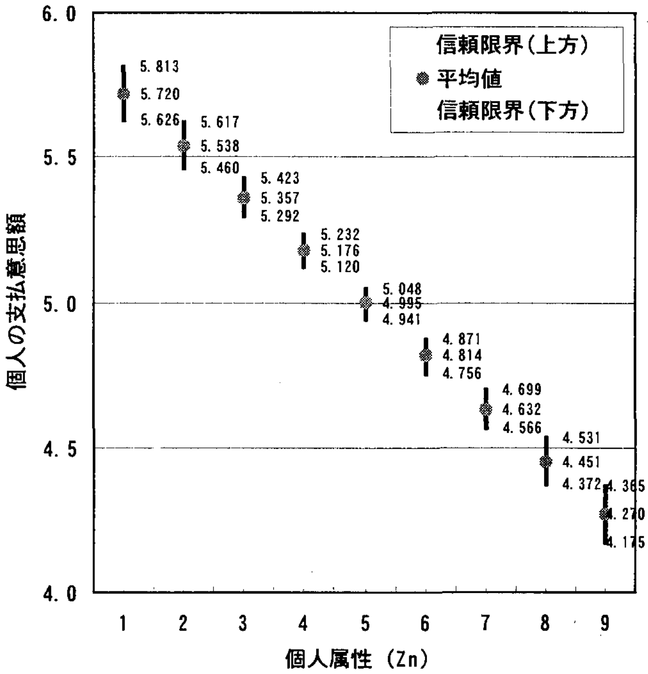
提示額 c_n レンジ	1-5	3-7	5-9
母平均値			
95%信頼限界（上方：$\overline{s}$）	5.402	5.431	5.639
μ	4.973	5.019	5.077
95%信頼限界（下方：$\underline{s}$）	4.545	4.607	4.514
信頼区間range	0.857	0.823	1.125

注）個人属性平均値は $\overline{Z} = 4.95$ を適用

結果が上限または下限に偏ることが想定される．そのため，ここでは共通の仮想データ（誤差項は平均=0，σ=1を適用）と共通の仮想パラメータをもとに，提示額の設定レンジとして1～5，3～7，5～9の3つのケースを与えた場合について回答結果の偏りの影響について検証を行った．モデルの推定結果を表－3に示す．

設定した1-5，3-7，5-9の3モデルとも，仮想データを適用していることから，各パラメータのt値，尤度比などの統計指標は有意な結果を示している．また，パラメータの符号条件も一致している（個人属性は距離等を想定している）．

推定したモデルについて考察すると，まず特徴的なこととして，個人の支払意思額の平均値はほぼ5前後で一定しており，またモデルの統計的精度についても尤度比，的中率ともほぼ同値であることから，支払意思額平均値が提示額の設定レンジに入っていれば，モデルの信頼性・安定性は統計値上では明確な差を評価することができない結果となっている．



図－1 個人属性の変化による個人の支払意思額の変動（提示額 c_n レンジ3-7モデルをもとに）

一方，パラメータのt値で見ると3-7モデルにおいて最も有意な結果が得られている．さらに，個人の支払意思額の平均値の信頼区間でみると，平均値はほぼ同値であるものの，その信頼区間のレンジは3-7モデルで最も狭く，他のモデルでは約1.7倍の広がりとなっている．また，表－4に示す支払意思額の母平均の推計値でみても，3-7モデルの信頼区間レンジが最も狭く現れており，これらの結果は，推計便益の信頼性指標としてモデルの統計値のみならず，信頼区間を用いた評価を行うことの重要性を示唆しているといえる．さらに，この結果は，調査設計段階における模擬調査等の実施による慎重な提示額の設定（検討）の必要性も示唆しているといえる．

次に，支払意思額の母平均の信頼区間推定法の有用性についてみると，3-7モデルをもとに個人の支払意思額平均値（属性平均を代入した場合）の信頼区間と支払意思額母平均の信頼区間を比較すると，母平均の信頼区間のレンジは約8倍の広がりを示している．この結果は，プロジェクトの経済性評価の際のリスクの評価法としては，個人の支払意思額平均値の信頼区間推定量に属性平均を代入するという簡易な平均値法を用いるのではなく，本研究で提示した支払意思額母平均の信頼区間推定を行うことが必要であるという結果であると解釈できる．

さらに，提示額レンジ3-7モデルを代表として，個人属性の変化による個人の支払意思額平均値とその信頼区間の変動について検証を行った．結果を図－1に示す．

個人属性 Z_n について1～9の値を代入し感度を検証した結果，個人の支払意思額の平均値は属性値の変化に応じて変動し，その信頼区間についても一定ではない．具体的には，属性値の平均値周辺を信頼区間レンジの最小域として，極値に向うに従い，その信頼区間レンジが広

がる傾向がある．この結果から，平均的な属性を有する個人（集合）と特異な属性を有する個人（集合）とでは，推計便益の信頼性が異なることが理解できる．

また，図－１の事例では，感度分析による属性別の便益の信頼性にはそれほど大きな違いは認められないが，現実の調査においては，その差はより顕著となる場合も考えられる．特定の属性の個人（集合）が享受する便益の信頼区間レンジが大きければ，推定に用いたモデル自体がこのような属性の個人の享受便益を精度良く推定し得ていないこととなる．従って，このような場合には，信頼区間レンジを指標にセグメントを行い，レンジの大きいモデルの推定をやり直すことで，信頼性の向上が期待できると考える．

(3) 調査結果の精度(誤差項の標準偏差)を変化させた場合

次に，調査自体の精度が変化した場合の影響度について検証を行った．ここでは，表－２の仮想データと共通の仮想パラメータをもとに式(30)の誤差項 ε_n の標準偏差が $\sigma=1$，1.5，2，3 と変化させた場合について検証を行っている．結果を表－５に示す．

設定した４モデルとも，仮想データを適用していることから，モデルは適切に再現されおり，パラメータの符号条件は一致し，$\sigma=1$ を基準とした σ 比も妥当な結果が得られている．

推定したモデルについて考察すると，調査結果の精度低下（誤差項の標準偏差が大きくなる）に応じ，各パラメータの t 値，尤度比，的中率などの統計指標は低下している．また，信頼区間の推計結果においても，調査精度の変化に応じて平均値自体は変化しないものの，その信頼区間は個人の支払意思額平均値および母平均とも拡大していく傾向を示している．また，母平均 μ に対するその信頼区間レンジの比率でみると，$\sigma=1$ モデルの場合は母平均 μ に対する信頼区間レンジは約 13％程度であるが，$\sigma=3$ のモデルでは約 24％と拡大しており，この結果は，本研究のような仮想的（理想的）な状況下ではなく，実際の調査結果にもとづいた便益推計ではさらに信頼区間レンジを拡大させる危険性を示唆している．

また，図－２に示した各モデルの支払意思額の分布関数でみると，各モデルの支払意思額の平均値は概ね一致するものの，その分布形は設定した精度（標準偏差）の低下に応じて，緩やかな形状を示すことが確認できる．

以上の結果は，従来の平均値主体の評価法ではあまり考

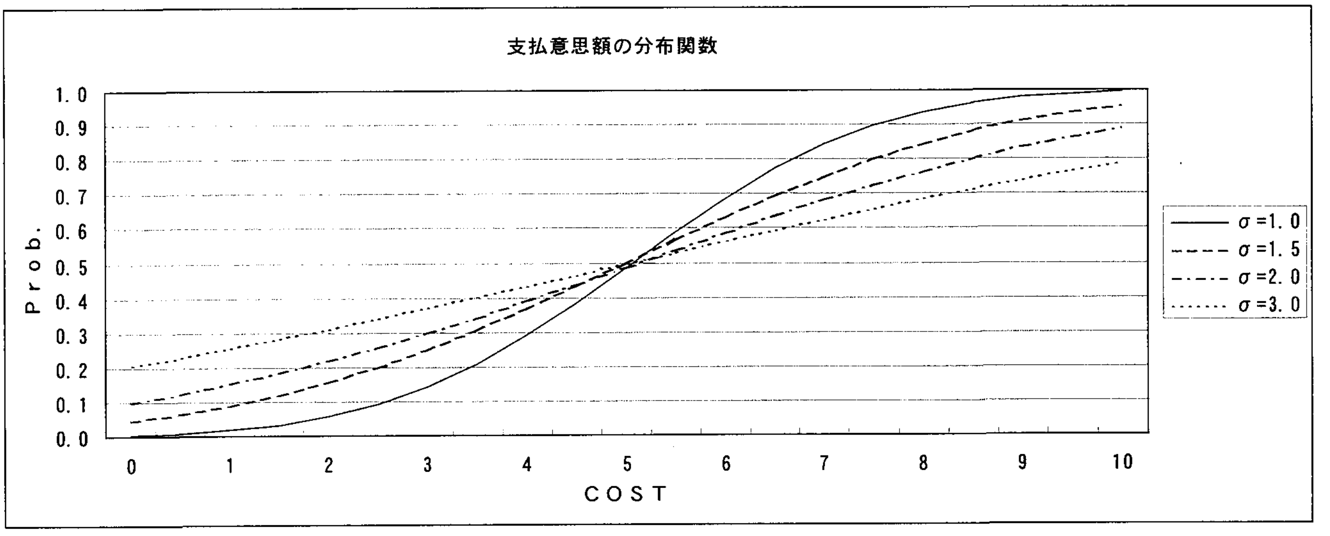
表－５　調査結果の精度（誤差項の標準偏差）を変化させた場合

$\sigma=$	1	1.5	2	3
Constant	3.119	2.054	1.475	0.970
(t_value)	(50.62)	(45.26)	(36.90)	(26.32)
α 個人属性	-0.099	-0.074	-0.039	-0.030
(t_value)	(-15.99)	(-14.28)	(-8.15)	(-6.55)
β 提示負担額	0.519	0.337	0.250	0.163
(t_value)	(60.25)	(56.49)	(48.36)	(34.75)
ln L(c)	-6893.8	-6892.2	-6914.3	-6917.0
ln L(β)	-3425.8	-4750.8	-5549.3	-6259.1
$\chi 2$	6935.9	4282.8	2730.0	1315.8
$\rho 2$	0.503	0.311	0.197	0.095
Hit Ratio	0.845	0.776	0.727	0.654
N	10000	10000	10000	10000
個人の支払意思額				
$\mu(Z_n,\hat{\theta})$	5.064	5.006	5.124	5.037
$\sigma^2(Z_n,\hat{\theta})$	3.709	8.828	16.018	37.573
《σ 比》	1.00	1.54	2.08	3.18
個人の支払意思額平均値				
$V(\overline{\mu(Z_n)})$	0.0011	0.0019	0.0030	0.0065
95%信頼限界（上方）	5.128	5.092	5.232	5.196
$E(\overline{\mu(Z_n)})$	5.064	5.006	5.124	5.037
95%信頼限界（下方）	4.999	4.920	5.016	4.879
信頼区間range	0.129	0.172	0.216	0.317
母平均値				
95%信頼限界（上方：$\overline{s}$）	5.413	5.384	5.581	5.683
μ	5.064	5.006	5.124	5.037
95%信頼限界（下方：$\underline{s}$）	4.736	4.652	4.702	4.458
信頼区間range	0.676	0.732	0.879	1.225

注 1）個人属性値 Z_n は平均値 $\overline{Z}=4.95$ を適用

注 2）個人属性平均値は $\overline{Z}=4.95$ を適用

注 3）《σ 比》は $\sigma=1$ を基準



図－2　調査結果の精度（誤差項の標準偏差）を変化させた場合の各モデルの分布関数

慮されてこなかった，推計便益の精度の問題を顕著に示しており，実際のプロジェクトの経済性評価においては，推計便益の信頼性評価指標として，構築モデルの統計値のみならず，推計便益の信頼区間推定に基づいた評価を行う必要性を示唆しているといえよう．

6．おわりに

以上、本稿では支払意思額の異質分散性を考慮したＣＥＣＶＭによる推計便益の信頼区間推定法の定式化およびその推定量の数値事例による検証を行なってきた．

本研究の特徴としては，まず，ＣＥＣＶＭモデルとして標準的な離散選択モデル（プロビットモデル）をもとに，所得の限界効用項が個人属性に依存していると仮定することで，支払意思額の均質分散性を仮定することなく，個人属性の違いが支払意思額の分散に影響を及ぼす異質分散性を考慮した推計便益の推定量および推計便益の信頼区間推定法の定式化を行ったことである．さらに，通常の離散選択モデル（プロビットモデル）を適用したことから，推計便益の信頼区間推定法として，個人の支払意思額平均値の信頼区間推定法および支払意思額母平均の信頼区間推定法について直接的な推定法を導出することが可能となったことである．

また，特に，実証データによる検証は行なっていないが，モンテカルロ法を適用した仮想的な数値検証を行うことで，支払意思額母平均の信頼区間推定法は，集計化した推計便益の信頼区間について直接的な推計が可能な操作性の高い手法であり，プロジェクト評価の費用便益分析に際しての推計便益の信頼性評価手法として非常に有用であること，また，個人の支払意思額平均値の信頼区間推定法は，推計便益の精度を向上させることを目的として，個人毎の支払意思額平均値の信頼区間を再推計することで，適正な効用関数の推計や便益推計を行うに際しての適正なセグメント区分の指標を提供する有用な手法であることを示唆する知見を得られたといえよう．

さらに，推計便益の評価については，推計便益の信頼性の評価指標としてモデルの統計値のみならず信頼区間の推定に基づいた評価が重要であること，また，推計便益の信頼性確保の事前対処としては，模擬調査等による適正な提示額レンジの設定が必要であることを示唆する知見が得られたといえよう．

以上，本研究で定式化を行った支払意思額の信頼区間推定法は，従来の平均値（期待値）主体で議論がなされてきた費用便益分析における推計便益について，推計便益の不確実性を考慮した有益な信頼性指標を提供するものと考えている．

なお，今後の精度向上としては，実際の調査結果に基づく実証分析や，異質分散性の影響評価に直接焦点をおいた実証的検討を進めていくことを予定している．また，本研究では線形効用モデルに焦点をおいて分析を行ったが，ログサム効用に基づく支払意思額等の信頼分析法等に関しても検討を行っていく必要があり，この点に関しては今後の課題としていきたい．

【参考文献】

1) Ben-Akiva and Lerman : Discrete Choice Analysis, MIT Press, 1985.
2) Bishop R.C. and T.A. Herberlein : Measuring Values of Extra-Market Goods: Are Indirect Measures Biased?, American Journal of Agricultural Economics, 61, pp.926-930, 1979.
3) Cameron T.A.and M.D. James : Efficient Estimation Methods for Closed-ended Contingent Valuation Surveys, The Review of Economics and Statics, 69, pp.269-276, 1987.
4) Cameron T.A. : Interval Estimates of Non-Market Resource Value from Referendum Contingent Valuation Surveys, Land Economics, 67(4), pp.413-421, 1991.
5) Diamond P. : Testing the internal Consistency of Contingent Valuation Surveys, Journal of Environmental Economics and Management, 30, pp.337-347, 1996.
6) Downing M. and Teofilo Ozuna Jr. : Testing the Reliability of the Benefit Function Transfer Approach, Journal of Environmental Economics and Management, 30, pp.316-322, 1996.

7) Duffield J.W. and D.A. Patterson : Inference and Optimal Design for a Welfare Measure in Dichotomous Choice Contingent Valuation, Land Economics, 67(2), pp.225-239, 1991.
8) Hanemann W.M. : Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses, American Journal of Agricultural Economics, 66, pp.332-341, 1984.
9) Hanemann W.M. : Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Response Data: Reply, American Journal of Agricultural Economics, 71, pp.1057-1061, 1989.
10) Johansson P.-O., B. Kristrom and K.G. Maler : Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Response Data: Comment, American Journal of Agricultural Economics, 71, pp.1054-1056, 1989.
11) Johansson P.-O. : The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits, Cambridge University Press, 1987.
12) Krinsky I. and A.L. Robb : On Approximating the Statistical Properties of Elasticities, The Review of Economics and Statistics, 68, pp.715-719, 1986.
13) Mitchell R.C. and R.T. Carson : Using Surveys to Value Public Goods, Resources of the Future, 1989.
14) Park T., J.B. Loomis and M. Creel : Confidence Intervals for Evaluating Benefit Estimates from Dichotomous Choice Contingent Valuation Studies, Land Economics, 67(1), pp.64-73, 1991.
15) Sellar C., J.-P. Chavas and J.R. Stoll : Specification of the Logit Model: The Case of Valuation of Nonmarket Goods, Journal of Environmental Economics and Management, 13, pp.382-390, 1986.
16) Whitehead J.C., G.C. Blomquist, T.J. Hoban and W.B. Clifford : Assessing the Validity and Reliability of Contingent Values: A Comparison of On-Site Users, Off-site Users, and Non-Users, Journal of Environmental Economics and Management, 29, pp.238-251, 1995.
17) 土木学会編：非集計行動モデルの理論と実際, 1995.
18) 蓑谷千凰彦：計量経済学の理論と応用, 日本評論社, 1996.
19) D.W.ピアス：新しい環境経済学, ﾀﾞｲｱﾓﾝﾄﾞ社, 1994.
20) P.-O.ヨハンソン：環境評価の経済学, 多賀出版, 1994.
21) 岩瀬広・林山泰久：ＣＶＭによる幹線交通網整備がもたらすリダンタンシーの経済的評価, 土木計画学研究・講演集, No.20(2), pp.379-382, 1998.
22) 林山泰久：仮想的市場的評価法による環境質の便益評価, JSCE, Vol.83(June), pp.37-40, 1998.
23) 栗山浩一：環境の価値と評価手法, 北海道大学図書刊行会, 1998.

支払意思額の異質分散性を考慮したＣＶＭによる推計便益の信頼区間推定法

川除 隆広・多々納 裕一・岡田 憲夫

本研究は, 従来平均値主体で評価がなされてきた環境プロジェクトの推計便益に関する信頼性の評価手法として, ＣＥＣＶＭ（Closed-ended Contingent Valuation Method）による推計便益の信頼区間について解析的な直接推定法を提示するものである. ここでは, 支払意思額の異質分散性を考慮した推計便益の推定量を定式化することで, 個人の支払意思額平均値の信頼区間および支払意思額母平均の信頼区間を直接的に推計する２つの信頼区間推定法を提示している. また, モンテカルロ法による仮想的な数値実験を行うことで, パラメータの推計精度と支払意思額の信頼区間との関連性について考察を行っている.

An Interval Estimation Method for Contingent Valuation Surveys with heterogeneous variances of WTP

By Takahiro KAWAYOKE, Hirokazu TATANO and Norio OKADA

This paper proposes a new method to estimate confidence intervals of mean willingness to pay (WTP) measured by the closed-ended contingent valuation method (CECVM) surveys in a project which involves changes in environmental quality. One is for the mean WTP of each individual and the other is for the population mean WTP. These two confidence intervals are formulated in firms analytically tractable. Monte Carlo simulations are executed to illustrate performances of the proposed confidence intervals of mean WTP obtained by CECVM surveys.