

共分散構造分析及びCVMを用いた水害による精神的被害を考慮した防災投資の便益評価*

Economic Evaluation of Disaster Prevention Investment Incorporating Mental Damage*

大西正光**・湧川勝巳***・松島格也****・伊藤弘之*****・小林潔司*6

by Masamitsu ONISHI**, Katsumi WAKIGAWA***, Kakuya MATSUSHIMA****

Hiroyuki ITOH***** and Kiyoshi KOBAYASHI*6

1. はじめに

水害によって被災した家計は、家屋や家財といった物的な資産の損失にとどまらず、生命の危険に対する恐怖感、大切なものを失った喪失感、水害後の後片づけによる疲労感等、精神的にも大きな苦痛を受ける。中には、精神的なショックのために、日常生活への復帰が困難になるようなケースも珍しくはない。Greenら¹⁾やTunstall²⁾らは、災害によって一般家庭が受ける被害のうち、物的被害よりも精神的被害のような無形の被害の方が深刻であることを指摘している。つまり、災害の可能性を軽減する防災投資による効果は、単に物的資産の被害を軽減するだけにとどまらず、精神的な苦痛を回避する効果も存在する。1999年に作成された現在提案されている治水関連事業の経済便益評価マニュアルである「治水経済調査マニュアル(案)³⁾」では、治水事業が被災者が受ける精神的な苦痛といった被害を軽減する効果を有することに言及している。しかし、まだその経済的評価の方法論については、議論が進展していないのが実情である。

栗城ら⁴⁾、高木ら⁵⁾は田崎⁶⁾が提案したFSM(Fuzzy Structural Method)法を用いて、洪水による家計の精神的被害の構造モデルを作成して、被害額の計測モデルを提案している。これらの研究では、精神的影響の調査項目それぞれに対して尋ねたWTP(willingness to pay; 支払い意思額)を積み上げ、作成した構造モデルに基づいて、項目間の重複を差し引くという手法を取っている。ところが、積み上げのアプローチでは、調査項目を増加

させれば、WTPが増加する傾向が強くなり、精神的被害の総計が過大に評価される可能性があると考えられる。

本研究では、治水整備事業が精神的被害を軽減する便益を経済評価する際に、既存の方法で生じる上記のような問題を克服するために、共分散構造分析を用いて、被災家計が被る精神的な被害を構成する潜在的な要因を明らかにした上で、CVM(Contingent Valuation Method)法により、精神的被害を考慮した家計の効用関数を推定する。すなわち、共分散構造分析を用いるメリットは後述するように、CVMのアンケート調査項目が増加することによる支払い意思額の過大推計を回避できる点にある。

2. 精神的被害軽減便益の分析方法

防災投資の精神的被害の軽減効果を経済的に評価するために、精神的被害を家計の厚生水準の低下として解釈しよう。厚生水準の大きさは、所得と水害によって受けた精神的影響によって決まる。この厚生水準は、被験者の所得及び精神的影響の大きさに対する選好を反映している。ここで、精神的被害は、精神的影響と区別されることに注意しよう。精神的影響は、水害による被災という外的な要因によって、生理的に自覚するものであり、被験者の意思あるいは選好を反映したものではない。しかし、精神的被害は、厚生水準の低下として定義しており、観測されたWTPは、所得と精神的影響の大きさに対する家計の選好を反映している。

本研究における精神的被害の軽減便益評価の方法を図-1に簡略化して示す。本研究では、精神的被害の構造を分析するために、共分散構造分析手法⁷⁾を用いる。この手法は、直接観察できないような特性である「構成概念」を定量的に扱うことができる。また、このような構成概念という存在を仮定することにより、複雑に込み入った現象を比較的単純に理解することができる。水害による精神的被害の具体的な例は、挙げれば極めて多岐にわたる。しかし、被災者がさまざまな状況で直面する不快感は、いくつかの潜在的な要因によって生み出されると考えられる。例えば、被災直後のさまざまな不快感

*キーワード：防災投資、経済評価、共分散構造分析、CVM

**正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL・FAX 075-753-5073)

***正会員 財団法人 国土技術研究センター
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ虎ノ門ビル 7階 TEL・FAX 03-4519-5001)

****正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL/FAX 075-753-5072/5073)

*****正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL/FAX 029-864-4237/2547)

*6フェロー会員 京都大学経営管理大学院
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL・FAX 075-753-5071)

共分散構造分析 (MIMICモデル)

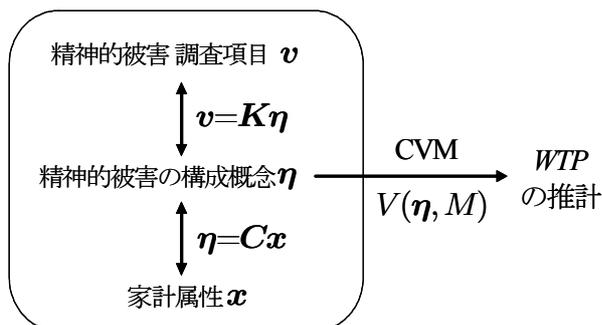


図-1 本研究における精神的被害の概念図

は、具体的には負傷や生命の危機といった恐怖感や自宅が浸水する心配等さまざまであるが、これらの不快感は、おのおの感情の中では不可分であり、その強さは互いに相関があると考えられる。さらに、これらの潜在的な不快な感情を感じる強さは、観察可能な家計属性にも当然依存するであろう。例えば、高齢者世帯が被災後の片づけから生じる苦労は、若年層世帯と比較して強いものであるかもしれない。共分散構造分析を用いれば、このように観測可能な家計属性が潜在的な不快感の強さに与える因果関係についても、定量的な分析を行うことが可能になる。

さらに、CVM調査では、家計の効用関数の説明変数として、共分散構造分析から得られる構成概念の値を用いる。このような、分析手法により精神的被害の計測を行った研究は、筆者らの知る限り、これまでに存在しない。本研究で示す手法は、精神的被害という被災者の心の内部で発生する観測されないものを定量的に示し、効用関数に組み込むことで、精神的被害の経済評価をより精緻にモデル化することを可能にする。

3. 共分散構造分析による精神的被害の構造分析

(1) 精神的被害のアンケート調査

被災者の精神的被害の構造を明らかにするために、表-1に示すような、精神的被害に関する具体化した質問項目に対して、「全然感じなかった」、「あまり感じなかった」、「少し感じた」、「強く感じた」、「非常に強く感じた」の5段階尺度による回答選択肢を設けた。なお、世帯構成員が複数の場合には、回答者が家族を代表して一番重かった人の感じ方を回答してもらう。

(2) 定式化

共分散構造分析の分析方法自体には本研究の新規性はないが、読者の便宜を図るために、ここでは共分散構造分析のMIMICモデル (Multiple Indicator Multiple Cause Model) の定式化を示しておこう。MIMICモデ

表-1 水害による精神的被害項目

1	洪水による生命の危機や負傷に対する恐怖感
2	家族や知人の安否に関する心配
3	水防活動や浸水する前における家財の移動による疲労感
4	雨量の状況、河川の増水や避難に関する情報の不足による不安
5	自宅が浸水するかどうかの不安
6	避難所生活の疲れ・ストレス
7	家屋・家財・自動車・バイク等の資産を失ったことによる苦痛
8	日ごろ、特に大切にしていたもの (思い出の品や貴重品) を失ったことによるショック
9	レジャー等の余暇活動や地域活動、平時の家事活動ができないことによる不満
10	清掃や片付けによる疲労感
11	余計な出費 (代替用品等) による家計の苦しさ
12	ゴミ等による周辺の環境の不快感
13	道路や鉄道、バス等の公共交通機関が使用できないことによる不自由
14	ライフライン (電力・ガス・水道) の停止による不自由
15	食料品や日常生活用品の不足による不自由
16	子どもの勉強が遅れる心配
17	いつになったら普通の生活に戻れるかといった不安
18	再び水害が起こるのではないかとといった不安
19	今までのような近所づきあいができなくなったことへの不満 (心苦しい等)
20	水害前のような生活に戻れない不満や不安
21	水への恐怖を感じるようになった

ルでは、複数の観測変数によって構成概念が規定され、その構成概念が複数の観測変数の原因となっている⁷⁾。構成概念とは実際には観測されないが、観測変数間に相関をもたらす潜在した共通原因を意味する。このように、構成概念の存在を仮定することによって、アンケートによって観測された多数の精神的被害を比較的単純に理解することが可能になる。このような構成概念を示す変数は、潜在変数とも呼ばれる。

MIMICモデルにおける世帯の属性を表す変数をサイズ $n_x \times 1$ の列ベクトルを $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{n_x})$ 、アンケートの各項目に対する回答をサイズ $n_y \times 1$ の列ベクトル $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{n_y})$ として表す。また、世帯の潜在変数をサイズ $n_\eta \times 1$ の列ベクトル $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_{n_\eta})$ で表す。このとき、精神的被害の構造を示すMIMICモデルは、

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{u} \quad (1)$$

のように表現できる。ただし、 \mathbf{t} は構造変数ベクトルであり、 $\mathbf{t}' = [\boldsymbol{\eta}', \mathbf{x}', \mathbf{y}']$ である。また、 \mathbf{u} は残差ベクトルであり、 $\mathbf{u}' = [\boldsymbol{\zeta}', \mathbf{d}', \mathbf{e}']$ と表される。ただし、 $\boldsymbol{\zeta}'$ 、 \mathbf{d}' 、 \mathbf{e}' は、それぞれ、構造変数ベクトル $\boldsymbol{\eta}'$ 、 \mathbf{x}' 、 \mathbf{y}' に対応する残差ベクトルを表す。

\mathbf{A} は構造変数の間の因果関係を示す係数行列である。MIMICモデルでは、潜在変数から潜在変数への係数および観測変数から観測変数への係数はゼロであるので、

係数行列 \mathbf{A} は,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{A}_d & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{A}_b & \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される. ただし, \mathbf{A}_d は, 世帯の属性ベクトルが潜在変数ベクトルに与える影響を表す係数行列を, \mathbf{A}_b は, 潜在変数ベクトルが世帯の回答ベクトルに与える影響を表す係数行列である.

(3) モデルの推計方法

式(1)は, 逆行列 $\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ が存在することを仮定すれば,

$$\mathbf{t} = \mathbf{T}\mathbf{u} \quad (3)$$

と表される. ここで, $\mathbf{G} = [\mathbf{O} \ \mathbf{I}]$ のようにゼロ行列と単位行列を横に並べたサイズ $(n_x + n_y) \times (n_f + n_x + n_y)$ の矩形の定数行列とすると,

$$\mathbf{v} = \mathbf{G}\mathbf{T}\mathbf{u} \quad (4)$$

となる. ただし, \mathbf{v} は, 観測変数で構成された観測変数ベクトル, すなわち $\mathbf{v} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}]$ である. したがって, 観測変数の共分散構造は,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Sigma} &= E[\mathbf{v}\mathbf{v}'] = E[\mathbf{G}\mathbf{T}\mathbf{u}(\mathbf{G}\mathbf{T}\mathbf{u})'] \\ &= \mathbf{G}\mathbf{T}\boldsymbol{\Sigma}_u\mathbf{T}'\mathbf{G}' \end{aligned} \quad (5)$$

である. ここで, 観測変数の共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}$ は, 未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ を用いて構造化されていることを明示的に示すために, $\boldsymbol{\Sigma}$ を $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ を表現しよう. 構造方程式モデルでは, 観測変数 \mathbf{v} が多変量正規分布にしたがっているものと仮定する. いま, 世帯 k のデータ (観測変数) $\bar{\mathbf{v}}_k = [\bar{\mathbf{x}}_k, \bar{\mathbf{y}}_k]$ が利用可能であると考えよう. パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ を所与として, 観測変数の組 $\bar{\mathbf{v}}_k = [\bar{\mathbf{x}}_k, \bar{\mathbf{y}}_k]$ が観測される確率は,

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{v}}_k | \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\theta}) &= (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})|^{-\frac{1}{2}} \\ &\exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{v}_k - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1} (\mathbf{v}_k - \boldsymbol{\mu}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

のように表される. $\boldsymbol{\mu}$ は, サイズ $(n_x + n_y) \times 1$ の観測変数 \mathbf{v} の期待値ベクトルを表す. このとき, すべての観測変数の組 $\bar{\mathbf{v}} = \{\bar{\mathbf{v}}_k (k = 1, \dots, K)\}$ が同時に生起する確率密度関数 (尤度関数) は

$$\mathcal{L}(\bar{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_{k=1}^K f(\bar{\mathbf{v}}_k | \boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

と表せる. 対数尤度関数は,

$$\ln[\mathcal{L}(\bar{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\theta})] = \sum_{k=1}^K \ln f(\bar{\mathbf{v}}_k | \boldsymbol{\theta})$$

$$\begin{aligned} &= \frac{N}{2} \ln |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}| \\ &- \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K [(\bar{\mathbf{v}}_k - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1} (\bar{\mathbf{v}}_k - \boldsymbol{\mu})] \\ &+ \text{パラメータのない項} \end{aligned} \quad (8)$$

となる. 若干の計算の結果, 最尤推定法のための目的関数 (適合度関数) は,

$$f_{ML} = -\text{tr}(\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\mathbf{S}) + \log |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}| \quad (9)$$

のように変形できる. ただし, \mathbf{S} は, 標本分散行列を表す. 式(9)を最大にするようなパラメータ値 $\boldsymbol{\theta}$ の最尤推定量は,

$$\frac{\partial f_{ML}}{\partial \theta_i} = 0 \text{ for all } \theta_i \quad (10)$$

を同時に満足する量なパラメータ $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ として与えられる. ただし, θ_i は, パラメータベクトルの各要素を示す.

(4) 構成概念の値の推計

世帯 k の精神的被害の構成概念である潜在変数 $\boldsymbol{\eta}_k$ を推定しよう. $\boldsymbol{\eta}_k$ を推定するために,

$$\hat{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{w}\mathbf{z} \quad (11)$$

のように, $\hat{\boldsymbol{\eta}}$ を観測変数 \mathbf{z} の重み付き和による合成変数として表す. ただし, $\hat{\boldsymbol{\eta}}$ は, 各世帯の推定された潜在変数ベクトル (列ベクトル) を $\hat{\mathbf{z}}_k$ を K 列並べたサイズ $(n_\eta) \times K$ の行列である. また, \mathbf{z} は, 各観測変数の平均をゼロに規準化したサイズ $(n_x + n_y) \times K$ の観測変数ベクトルである. \mathbf{w} は, サイズ $n_\eta \times (n_x + n_y)$ の重み行列である. ここで, 最小二乗法により \mathbf{w} を推定する方法を考えよう.

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_b\boldsymbol{\eta}_k + \mathbf{A}_b\mathbf{e} \quad (12)$$

であるから, 平均二乗誤差 f_{LS} は,

$$\begin{aligned} f_{LS} &= \frac{1}{N} \text{tr}(\boldsymbol{\eta} - \hat{\boldsymbol{\eta}})^2 \\ &= \text{tr}(\mathbf{S}_\eta + \mathbf{w}\mathbf{S}_x\mathbf{w}' - 2\mathbf{w}\mathbf{A}_b\mathbf{S}_\eta) \end{aligned} \quad (13)$$

となる. ただし, \mathbf{S}_η は $\boldsymbol{\eta}$ の実現値の共分散行列を示す. したがって, 重み行列の推定値は,

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{LS}}{\partial w_{ij}} &= 0 \\ \text{for all } i &= 1, \dots, n_\eta \\ j &= 1, \dots, (n_x + n_y) \end{aligned} \quad (14)$$

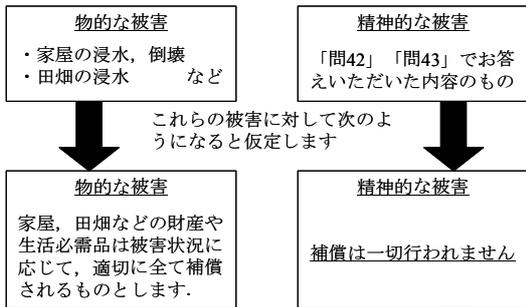
を満たす. 重み行列の推定値及び式(11)を用いることにより, 各世帯の潜在変数ベクトル $\boldsymbol{\eta}_k$ を得る.

4. 支払い意思額の推計

(1) CVM調査の方法

以下の質問は精神的な被害や症状に関する仮想的な質問です。仮に、台風23号と同じような水害が再び起こり、「問42」、「問43」でお答えいただいた精神的な被害や症状を経験すると想定してお答え下さい。

台風23号と同じような水害が再び起こると想定すると、以下の2つの被害が発生すると考えられます。



水害による被害のうち、物的な被害が保険などによりすべて補償されたとしたら、不安は一扫されますか。それでも、『怖い思いをしたくない』などの精神的な不安が残ると思いますか。

水害による『怖い思いをしたくない』『嫌な思いをしたくない』などの精神的な被害から解放されるような安心感がお金で買えるとしたら、あなたは年間()円支払っても良いと思われませんか。

方
ダ
ブ
ル
バ
ウ
ン
ド

注)「問42」「問43」は表-1に示す精神的被害の強さについて質問した設問番号である。

図-2 CVM調査票

被災者の精神的被害を軽減するための防災投資に対するWTP (willingness to pay; 支払い意思額)を尋ねるために、図-2に示すようなアンケートシートを作成した。質問方法として二段階二項選択法(double-bounded dichotomous choice)を採用した。本調査で尋ねたWTPは、すでに水害による精神的被害を経験した人にとっての、精神的被害を軽減することによる補償オプション価値を示している。防災投資を行わない場合に被る精神的な被害のシナリオを明確に定義するために、台風23号で受けた精神的な被害を再度経験することを前提とした。

(2) モデルの定式化

世帯 k の効用関数をランダム効用モデルを用いて推計しよう。効用関数の説明変数として、前章で導いた世帯 k の潜在変数ベクトル η_k を用いる。提示金額 T_i に対して、支払いに応じる場合の効用水準 V_k^a と応じない場合の効用水準 V_k^r の効用水準の差 $\Delta V_k = V_k^a - V_k^r$ を

$$\Delta V_k = a + b \ln \left(1 - \frac{T_k}{M_k} \right) + \gamma \eta_k + \varepsilon_k \quad (15)$$

と表そう。ここで、 M_i は家計 i の世帯年収、 a, b 及び $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_{n_\eta})$ は、未知パラメータである。 ε_k は、平均0、

分散 σ^2 のロジスティック分布に従う確率変数である。このモデルを最尤推定法により推定する。

5. おわりに

本研究では、水害による精神的被害を考慮した防災投資便益の評価に関して、共分散構造分析及びCVMを用いた方法論を提案した。共分散構造分析を用いることによって、極めて多岐にわたって観測される精神的被害のさまざまな事象をいくつかの潜在的な構成概念に集約が可能となる。したがって、これまで提案された積み上げ方式による過大推計の問題を克服することが可能となる。われわれの研究グループは、すでに平成16年10月の台風23号により被災した円山河流域の世帯を対象として、アンケート調査を実施している。このデータを用いた分析結果は、紙面の都合上、講演時に示す。

参考文献

- 1) Green C.H and Penning-Rowsell E.C: Evaluating the Intangible Benefits and Costs of a Flood Alleviation Proposal, *Journal of the institute of water Engineers and Scientists*, 1986.
- 2) Tunstall S., Bossman-Aggrey P., Waltham and Thornwood: Essex: An assessment of the effects of the flood of 29th July, 1987 and the benefits of flood alleviation, *Flood Hazard Research Centre*, 1988.
- 3) 国土交通省河川局 (2000), 「治水経済調査マニュアル (案)」
- 4) 栗城稔, 今村能之, 小林裕明: 水害の精神的影響の経済的評価, *自然災害科学*, Vol.15-3, 231-240, 1997.
- 5) 高木朗義, 大國哲, 阪井宣行: 洪水による精神的被害の構造分析とその金銭的評価に関する実証的研究, *河川技術に関する論文集*, Vol. 6, 225-230, 2000.
- 6) 田崎栄一郎: あいまい理論による社会システムの構造化, *数理科学*, No. 191, 54-66, 1979
- 7) 例えば, 豊田秀樹: 共分散構造分析 [入門編], 朝倉書店, 1998.