

費用便益分析指標を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法*

Risk Analysis of Project Adoption based on Cost-Benefit Criteria *

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

社会基盤整備プロジェクトの経済的評価法として費用便益分析の重要性が広く認識されている。また、公共事業の効率性と事業実施過程の透明性確保に対する社会的要請が高まり、国民の納得が得られる形での説明責任(アカウンタビリティ)の遂行が強く求められている。費用便益分析は、事業実施以前にプロジェクト採択の経済的妥当性を評価する事業評価法であり、プロジェクトの効果・必要性を国民に理解し易い形で公表し得る事業評価法としても期待されている。しかしながら、現在のところ費用便益分析の実施に際しては、推計された費用や便益の平均値(期待値)等の代表値を用いた評価が主体となっており、分析に用いられたデータ、分析方法等のプロセスや評価の精度等に関する情報が十分に提供されているとは言い難い。費用や便益がデータから推定される以上、本来、これらの指標がばらつきを持つことは避けがたい。このため、推計された費用と便益の平均値をもとに純現在価値や費用便益比が算定され、採択基準を満たしたとしても、このばらつきのために純現在価値や費用便益比等の指標が採択基準を満たさないリスクが存在することとなる。これらの指標の有するリスク評価を可能な限り併せ示しておくことは、事業評価の説明力を高める上で重要な事項であると考えられる。

著者らは、費用便益分析に際して推計された便益の信頼性を客観的に評価することが重要性であるとの認識の下で、特殊な形式のCVMモデルについて個人の支払意思額の期待値の信頼区間を解析的に求める方法¹⁾や離散選択モデルを用いた個人旅行費用法により推定されるレクリエーション便益の信頼区間推定法²⁾の開発を行ってきている。そのため、開発された推計便益の信頼性評価法を拡張し、費用便益分析の代表指標を基にしたリスク分析の開発

が可能であると考えている。

費用便益分析の有する不確実性へのアプローチとしては、感度分析とリスク分析が存在する³⁾。感度分析は、費用便益分析を行うための幾つかの投入要素に、それぞれの不確実性に応じたある幅の値を与え、プロジェクト評価の経済的安定性を確認するものである。一方、リスク分析は費用便益分析の投入要素に対して生起する確率分布を与える分析法である。そのため、リスク分析では評価指標も確率分布として表現され、評価指標が許容できない採択基準以下になる確率を定量的に示すことができる。従って、リスク分析ではプロジェクトの経済評価の評価軸として収益性の他に、信頼性を考慮することが可能となる。

本研究では、費用便益分析指標を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法として、費用便益分析の代表的評価指標である純現在価値と費用便益比を対象に、純現在価値と費用便益比の信頼区間推定法およびプロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値と費用便益比の採択基準を満たす確率(プロジェクト採択確率)を求める方法を提案する。以下、2.では費用と便益の推計結果が得られた場合のプロジェクト採択リスク分析法として純現在価値の信頼区間推定法およびプロジェクト採択確率を求める方法を提示する。3.では、費用と便益の精度とプロジェクト採択リスクに関する数値検証を行い、4.で既往データを基にした試算を行うことで当リスク分析法の適用可能性に関して考察を行う。最後に、5.で本研究で得た知見をとりまとめる。

2. 費用便益分析指標を基にしたリスク分析法の定式化

ここでは、費用便益分析の代表的な評価指標である純現在価値と費用便益比をもとに、推計された費用と便益の推計精度を考慮したリスク分析法を定式化する。単一複合プロジェクトを例として、プロジェクトの主要施設と公園等の周辺環境施設の整備を想定する。単一複合プロジェクトの各年の主要施設・周辺環境施設の建設費、維持管理費、および主要施設、周辺環境施設の便益が表-1に示すとおり推計されているものとする。また、その費用

*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

**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 大阪市中央区高麗橋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 0774-38-4043，
Fax 0774-38-4044)

表ー 1: 単一複合プロジェクトにおける費用と便益の推計例と発生期間例

項 目		推計値	発生期間(年) $t =$ 1 T_1 T_2	n
費用	C_1 主要施設・周辺環境施設建設費	c_{1t}	*****	
	C_2 維持管理費	c_{2t}	*****	
便益	B_1 主要施設	b_{1t}	*****	
	B_2 周辺環境施設	b_{2t}	*****	

と便益が設定した期間に発生するものとする。

通常の費用便益分析においては、推計された各年の費用と便益の推計値をもとに、主要施設・周辺環境施設の建設費 C_1 および維持管理費 C_2 について $t = 0$ を基準年とした現在価値を式 (1), (2) として求める。ここで、 r は割引率を示している。

$$C_1 = \sum_{t=1}^{T_2} \frac{c_{1t}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

$$C_2 = \sum_{t=T_1+1}^n \frac{c_{2t}}{(1+r)^t} \quad (2)$$

また、主要施設の便益 B_1 および周辺環境施設の便益 B_2 の現在価値も同様に式 (3), (4) として求められる。

$$B_1 = \sum_{t=T_1+1}^n \frac{b_{1t}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

$$B_2 = \sum_{t=T_2+1}^n \frac{b_{2t}}{(1+r)^t} \quad (4)$$

さらに、費用便益分析においては、代表的な評価指標として式 (5) に示す純現在価値 NPV (Net Present Value) および式 (6) に示す費用便益比 CBR (Cost Benefit Ratio) をもとにプロジェクトの経済評価が行われる。(なお、これは排他的代替案が存在しない条件下の採択基準であり、そうでなければ、 $\max NPV_i$ を満たすプロジェクト i について式 (5) が成立しなければならない。)

$$NPV = \sum B - \sum C = (B_1 + B_2) - (C_1 + C_2) \geq 0 \quad (5)$$

$$CBR = \frac{\sum B}{\sum C} = \frac{(B_1 + B_2)}{(C_1 + C_2)} \geq 1 \quad (6)$$

一方、 NPV と CBR は式 (7) の関係を満たすことから、 NPV と CBR の信頼性評価は純現在価値 NPV を代表指標として評価することが可能である。

$$\sum B - \sum C \geq 0 \iff \frac{\sum B}{\sum C} \geq 1 \quad (7)$$

そのため、以下、費用便益分析指標として純現在価値 NPV を代表指標としたリスク分析法の定式化を進める。

ここで、式 (5) の NPV について各項目各年の費用と便益を確率変数 $X = (X_{c_{1t}}, X_{c_{2t}}, X_{b_{1t}}, X_{b_{2t}})$ として取り扱う。そのため、 NPV の確率変数 NPV_X は式 (8) として定式化される。

$$NPV_X = \sum_{t=T_1+1}^n \frac{X_{b_{1t}}}{(1+r)^t} + \sum_{t=T_2+1}^n \frac{X_{b_{2t}}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{T_2} \frac{X_{c_{1t}}}{(1+r)^t} - \sum_{t=T_1+1}^n \frac{X_{c_{2t}}}{(1+r)^t} \quad (8)$$

式 (8) は、確率変数 X で表されている。そのため、

NPV_X および NPV_X を純現在価値の $(1-\alpha) \times 100\%$ 信頼上限、信頼下限とすると、これらの信頼限界は式 (9), 式 (10) の解として定式化される。

$$P(NPV_X \geq NPV_X) = \alpha/2 \quad (9)$$

$$P(NPV_X \leq NPV_X) = \alpha/2 \quad (10)$$

また、式 (8) につき、各々の変数の確率分布が既知のとき、 NPV_X の確率密度関数 $f_{NPV_X}(n)$ は式 (11) として求められ、プロジェクト採択が妥当視される確率として、プロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ は、式 (12) によって求められる。

$$f_{NPV_X}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_X(g^{-1}, x_{c_{12}}, \dots, x_{b_{2n}}) \cdot \left| \frac{\partial g^{-1}}{\partial n} \right| dx_{c_{12}} \dots dx_{b_{2n}} \quad (11)$$

$$P(NPV_X \geq 0) = \int_0^{\infty} f_{NPV_X}(n) dn \quad (12)$$

ここで、 f_X は各項目各年の費用と便益の同時確率密度関数を示しており、 g^{-1} は、 $n = g(x_{c_{11}}, x_{c_{12}}, \dots, x_{b_{2n}})$ の $x_{c_{11}}$ についての逆関数である。

費用便益分析過程において計測された費用と便益の各項目の確率分布が、再生性⁴⁾を有した同一の確率分布形で計測される場合には、解析的に信頼区間やプロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ を求めることが可能である。しかし、そうでない場合や非線形の推定量から推計される場合にはこれらを解析的に求めることは困難である。

一方、費用や便益の各項目の確率分布が既知の場合、それらの確率分布をもとにパラメトリック・シミュレーション法²⁾を適用することで、 NPV_X の近似的な確率分布の推計が可能となる。パラメトリック・シミュレーション法では、費用と便益の各項目の確率分布をもとに $X^* = (X_{c_{1t}}^*, X_{c_{2t}}^*, X_{b_{1t}}^*, X_{b_{2t}}^*)$ を乱数として発生させ、式 (8) に X^* を適用することで NPV_X のシミュレーション値 NPV_X^* が推計される。また、乱数を任意に (R 回) 発生させることで、 NPV_X^* の分布が形成される。

以下、パラメトリック・シミュレーション法をもとにした、純現在価値 NPV の信頼区間推定法および、プロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値 NPV の採択基準を満たすプロジェクト採択確率を求める方法を提示する。

a) 純現在価値の信頼区間推定法

純現在価値 NPV の信頼区間は、パラメトリック・シミュレーション法による NPV_X^* の推計値をもとに順列評価を行い、乱数の発生回数 R に対する、 $R/2$ 番目の推計値が中央値であり、 $(1-\alpha) \times 100\%$ 信頼区間は $\alpha/2 \times R$ 番目が

表－3：仮想データをもとにしたプロジェクト採択のリスク分析結果

項 目		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		$B_2 \sigma = 3$	$B_2 \sigma = 12$	$B_2 \sigma = 24$	$B_2 \sigma = 48$
純現在価値； NPV		48.2			
費用便益比； $CBR (B/C)$		1.5			
解析解	$E(NPV_X)$	48.2	48.2	48.2	48.2
	$V(NPV_X)$	1014.7	1745.8	4085.4	13443.7
	NPV_X 2.5%信頼上限	110.7	130.1	173.5	275.5
	NPV_X 中央値	48.2	48.2	48.2	48.2
	NPV_X 2.5%信頼下限	-14.2	-33.7	-77.0	-179.0
プロジェクト採択確率		93.5%	87.6%	77.5%	66.1%

信頼下限, $(1 - \alpha/2) \times R$ 番目が信頼上限となる。

b) プロジェクト採択確率の推計法

プロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ は, パラメトリック・シミュレーション法による NPV_X^* の推計値をもとに順列評価を行い, 乱数の発生回数 R に対する $NPV_X \geq 0$ の超過個数 r より, 超過確率 $P = r/R$ を求めることで推計される。

3. 費用と便益の精度とプロジェクト採択リスク

ここでは, 費用と便益の推計精度が費用便益分析指標の信頼性にどのように影響を及ぼすかを分析するために, 解析的に NPV_X の信頼区間およびプロジェクト採択確率の推計が可能な枠組みにて数値計算を実施する。単一複合プロジェクトの表－1の例を想定し, 費用と便益の年推計値およびその発生期間を表－2に示すとおり設定する。ここでは, 簡単のため, C_1, C_2, B_1 の推計結果の分散は変動係数=1.0を満たすよう設定し, B_2 の分散のみが変動係数=1.0, 4.0, 8.0, 16.0(以下, Case1～Case4と称する)を満たすよう変化するように設定した。

表－2：仮想データの概要

注1) C_1, C_2, B_1 の標準偏差は変動係数=1.0を基準として設定				
注2) B_2 の標準偏差のみ変動係数=1.0, 4.0, 8.0, 16.0 を適用				
項 目		年推計値 μ	標準偏差 σ	t=
費用	C_1 主要施設・環境施設建設費	10	10	1～10
	C_2 維持管理費	1	1	6～55
便益	B_1 主要施設	6	6	6～55
	B_2 環境施設	3	3, 12, 24, 48	11～55
主要施設耐用年数		50年		
割引率 r		4%		

ここで, 数値検証として費用と便益の全項目が独立な正規分布であると仮定する。このとき, 式(13)～式(14)より, 式(15)の NPV_X の $(1 - \alpha) \times 100\%$ 信頼区間および式(16)のプロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ が解析的に求められる。

$$\begin{aligned}
 E(NPV_X) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} NPV_X f_X dx_{c11} \dots dx_{b2n} \\
 &= \sum_{t=T_1+1}^n \frac{b_{1t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=T_2+1}^n \frac{b_{2t}}{(1+r)^t} \\
 &\quad - \sum_{t=1}^{T_2} \frac{c_{1t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=T_1+1}^n \frac{c_{2t}}{(1+r)^t} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V(NPV_X) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (NPV_X - E(NPV_X))^2 f_X dx_{c11} \dots dx_{b2n} \\
 &= \sum_{t=T_1+1}^n \frac{V(b_{1t})}{(1+r)^{2t}} + \sum_{t=T_2+1}^n \frac{V(b_{2t})}{(1+r)^{2t}} \\
 &\quad + \sum_{t=1}^{T_2} \frac{V(c_{1t})}{(1+r)^{2t}} + \sum_{t=T_1+1}^n \frac{V(c_{2t})}{(1+r)^{2t}} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$[Lower_{NPV_X}, Upper_{NPV_X}] \quad (15)$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 Lower_{NPV_X} &= E(NPV_X) - z_{\alpha/2} \sqrt{V(NPV_X)} \\
 Upper_{NPV_X} &= E(NPV_X) + z_{\alpha/2} \sqrt{V(NPV_X)}
 \end{aligned}$$

$$P(NPV_X \geq 0) = 1 - \Phi \left(\frac{0 - E(NPV_X)}{\sqrt{V(NPV_X)}} \right) \quad (16)$$

ここで, $z_{\alpha/2}$ は標準正規分布の片側 $\alpha/2$ 確率を与える値を示し, Φ は標準正規分布の分布関数を示している。

純現在価値 NPV のリスク分析を行った結果を表－3に示す。

いずれのケースでも当プロジェクトの費用および便益の期待値は一定であり, これらを基に純現在価値 NPV は 48.2, 費用便益比 CBR は 1.5 と推計されている。通常の平均値主体の経済性評価ではプロジェクト採択が妥当な結果と判断されることとなる。ところが, 便益 B_2 の推計精度が悪くなる ($\sigma = 3 \rightarrow 48$) に従い, 分散 $V(NPV_X)$ は増大していくことが確認される。この結果, B_2 の推計精度の低下に伴い, NPV_X の信頼区間は拡大し, プロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ は 93.5% $\rightarrow$ 87.6% $\rightarrow$ 77.5% $\rightarrow$ 66.1% と低下していく。このプロジェクト採択確率の変化は, B_2 の推計精度が悪くなるに従い, 採択基準を満たさないリスク $P(NPV < 0)$ が 6.5% $\rightarrow$ 12.4% $\rightarrow$ 22.5% $\rightarrow$ 33.9% と増大していくことを示している。

さらに, 特定の $CBR = B/C = a$ (定数) を所与として, 費用の総現在価値 $\sum C$ の変動係数 η_C と便益の総現在価値 $\sum B$ の変動係数 η_B の関係 (図－1 注) 参照) から, プロジェクト採択確率を図－1のように示すことができる。本研究では以下, この図をプロジェクト採択リスクの「簡易評価図」と呼ぶ。図－1では, 代表的な例として, $B/C \approx 1.0 (= 1.04)$, $B/C = 1.5$, $B/C = 2.0$, $B/C = 3.0$ を満たす簡易評価図を示している。図－1からは, $B/C = a$ (

表－ 4: 各事業の計画時と竣工時の事業費比較

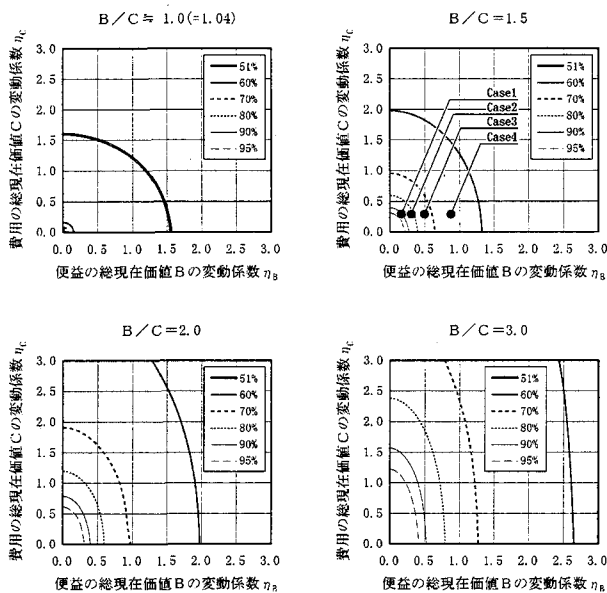
注) 事業費の単位は百万円

事業名	事業計画		事業概要		計画年次 価値 (2)	(2)/(1)
	計画年次	事業費 (1)	事業期間 (開始～竣工)	総事業費		
首都高速道路 湾岸線第1期	昭和45年 (1970年)	25,000	昭和45年～昭和51年 (1970年～1976年)	38,436	31,820	1.27
京都市地下鉄 烏丸線	昭和47年 (1972年)	57,533	昭和47年～昭和57年 (1972年～1982年)	123,607	72,956	1.27
定山溪ダム	昭和54年 (1979年)	53,000	昭和55年～平成2年 (1980年～1990年)	79,992	71,188	1.34
阪神高速道路 湾岸線4期(兵庫)	昭和55年 (1980年)	70,900	昭和56年～平成6年 (1981年～1994年)	152,300	157,548	2.22
関西国際空港	昭和59年 (1984年)	1,000,000	昭和59年～平成7年 (1984年～1995年)	1,458,156	1,559,266	1.56

定数) の設定が大きくなるに従い、費用と便益の総現在価値の変動係数の変化に対する同一の採択確率を満たす領域が拡大していくことが確認できる。また、費用便益比の定式上の関係から、 $B/C = a$ (定数) の設定が大きいくほど、費用の推計精度 (費用の総現在価値の変動係数) の変化に比べ、便益の推計精度 (便益の総現在価値の変動係数) の変化がプロジェクト採択確率に対する影響度が大きいことが確認できる。

費用と便益の総現在価値の変動係数をもとに、各々のケースのプロジェクト採択確率を図－1の $B/C = 1.5$ の簡易評価図に図示した。仮想データにおいては B_2 のみの推計精度を変化させたことから、費用の総現在価値 $\sum C$ の変動係数 η_C は一定であり、Case1→Case4の便益の総現在価値 $\sum B$ の変動係数 η_B が大きくなるに従い、プロジェクト採択確率の小さな領域に図示されていくことが確認できる。

以上の数値計算においては、費用と便益の推計精度が費用便益分析指標の信頼性にどのように影響を及ぼすかを分析するために、費用と便益の全項目の確率分布が正規分布に従うものと仮定し、解析的に NPV_X の信頼区間およびプロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ の推計が可能な枠組みにて数値検証およびプロジェクト採択リスクの簡易評価図の提示を行った。次章では、推計された費用と便益の各項目の確率分布が異なり、解析的にプロジェクト採択確率が求められない場合における数値計算を行う。



図－ 1: プロジェクト採択リスクの簡易評価図
(仮想データのケース)

注) 特定の $CBR = B/C = a$ (定数) を所与として、費用の総現在価値 $\sum C$ の変動係数 η_C と便益の総現在価値 $\sum B$ の変動係数 η_B の関係から、プロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ は以下のように求まる。なお、 N は正規分布を示す。

$$NPV_X = \sum B - \sum C$$

$$\sum B \sim N(\mu_B, \sigma_B), \eta_B = \frac{\sigma_B}{\mu_B} \quad \sum C \sim N(\mu_C, \sigma_C), \eta_C = \frac{\sigma_C}{\mu_C}$$

$$CBR = \frac{\mu_B}{\mu_C} = a \iff \mu_B = a\mu_C$$

$$P(NPV_X \geq 0) = 1 - \Phi\left(\frac{0 - E(NPV_X)}{\sqrt{V(NPV_X)}}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{1 - a}{\sqrt{a^2\eta_B^2 + \eta_C^2}}\right)$$

ここで、仮想データに基づく各々のケースのプロジェクト採択確率の試算結果は一つの点で与えられる。推計した

4. 既往データを基にした試算

ここでは、費用と便益の確率分布に既往データから得られた確率分布を適用することで、費用と便益の推計精度がプロジェクト採択に及ぼすリスクの影響度について数値検証を行う。

まず、費用につき、既往プロジェクト 5) 6) 7) 8) 9) の計画時と竣工時の事業費を表－4に示す。竣工後の総事業費については、物価上昇等の影響を受けていることから、計画時点の事業費との直接比較は困難である。そのため、事業年次の事業費変遷が把握可能であった京都市地下鉄烏丸線および関西国際空港については、実際の事業費変遷をもとに、それ以外の3事業については暫定的に総事業費を工事期間で除した年平均事業費を算定し、デフレータ¹⁰⁾を用いて、計画年次時点での現在価値化を実施している。結果として、計画時点の事業費と計画年次価値で評価した総事業費との比較では、1.27倍～2.22倍の事業費増大傾向が確認される。なお、当結果については、検討事業数が少なく、事業内容、実施時期等も異なる事例をもと

表－ 5: 検証モデル

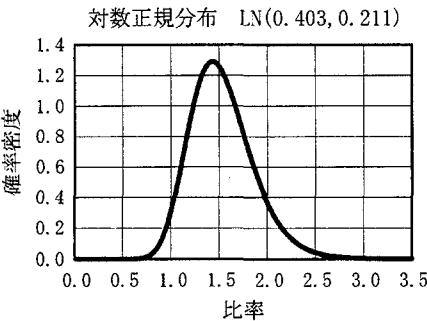
注1) 年齢ダミーは30才未満を1とする		注1) 単位：教育年数は年，距離はkm	
注2) 一般化費用の単位は千円		注2) 単位：提示負担額は千円／月	
		注3) 現地アクセス頻度ダミーは年1回以上を1とする	
旅行費用モデル		CVM モデル	
		調査地点 No. モデルケース	4 基本
α 定数項	-15.24 (t値) (-1.91)	α_1 定数項	1.570 (3.70)
β_1 散策目的ダミー	330.97 (33.14)	α_2 ln(教育年数)	-0.518 (-2.51)
β_2 釣り目的ダミー	304.19 (30.53)	α_3 ln(自宅～現地距離)	
β_3 パーベキュー目的ダミー	131.55 (13.34)	α_4 現地アクセス頻度ダミー	0.444 (2.36)
β_4 年齢ダミー	210.18 (21.29)	β 所得項(提示負担額)	0.023 (6.15)
γ 所得項(一般化費用)	165.43 (17.36)		0.029 (6.46)
ρ^2 尤度比	0.329	ρ^2 尤度比	0.136
HitRatio 的中率	0.787	HitRatio 的中率	0.688
N サンプル数	643	N サンプル数	269
	63.9826		0.180004
	3.1955		-0.084417
	5.0691		-0.002165
	-9.8907		0.000346
	9.4827		0.042739
	-18.1473		-0.002081
	99.7165		-0.000055
	-0.4497		0.035234
	0.8775		0.000194
$\Sigma(\hat{\theta})$	-0.8413	$\Sigma(\hat{\theta})$	0.000015
	1.6101		
$\Sigma(\hat{\theta}_i, \hat{\theta}_j j \geq i)$	99.2866	$\Sigma(\hat{\theta}_i, \hat{\theta}_j j \geq i)$	
	1.3920		
	-1.3346		
	2.5541		
	97.2839		
	2.6040		
	-4.9834		
	97.5034		
	4.7778		
	90.8565		

表－ 6: 検証データの概要

注1) 年便益はモデルの中央値を設定
注2) 年費用はB/C=1.0, B/C=1.5およびB/C=2.0を満たすよう設定

項目		費用		便益	
		t=1～10		t=11～60	
		年費用 c_t	確率分布	年便益 b_t	確率分布
旅行費用モデル	B/C=1.0	0.110	対数正規分布		
	B/C=1.5	0.073	LN(0.403, 0.211)	0.062	$MVN[\hat{\theta}, \Sigma(\hat{\theta})]$
	B/C=2.0	0.055			
CVM No.4 基本モデル	B/C=1.0	53.55	対数正規分布		
	B/C=1.5	35.70	LN(0.403, 0.211)	29.93	$MVN[\hat{\theta}, \Sigma(\hat{\theta})]$
	B/C=2.0	26.78			
CVM No.7 基本モデル	B/C=1.0	57.09	対数正規分布		
	B/C=1.5	38.06	LN(0.403, 0.211)	31.91	$MVN[\hat{\theta}, \Sigma(\hat{\theta})]$
	B/C=2.0	28.55			
施設耐用年数		50年			
割引率r		4%			

にした試算結果であることに留意する必要があるが、計画時点と竣工時点の概略の事業費変動を捉える基礎情報としては有用であるといえよう。



図－ 2: 既往プロジェクトを基にした計画年次と竣工時の事業費比率分布の確率密度関数

次に、事業費の確率分布としては、表－4に示す計画時点の事業費と総事業費の計画年次価値との比率が、対数正規分布に従うものと仮定する。結果として、事業費比率の確率分布 ϵ は、図－2に示す対数正規分布LN(0.403,0.211)となり、年費用を c_t とおけば、年費用の確率変数 X_{c_t} は、 $X_{c_t} = c_t \cdot \epsilon$ として与えられる。ここで、事業費比率の確率分布 ϵ について正規分布変換を行うと、 $\epsilon \sim LN(0.403, 0.211) \approx N(1.531, 0.327)$ となり、このことは、既往データを基にした試算では、年費用の期待値が概ね1.5倍に増大することを示している。

次に、便益としては、筆者らの既往の研究成果をもとに、表－5に示す琵琶湖の水質改善施策案に対するCVMモデル¹¹⁾および木津川の河川利用に関する旅行費用モデルを検証モデルとして用いる。CVMモデルは、平成8年

表-7: 既往データをもとにしたプロジェクト採択のリスク分析結果

[B/C=1.0のケース]				
項 目		旅行費用モデル	CVM No.4 基本モデル	CVM No.7 基本モデル
純現在価値: NPV		0.0	0.0	0.0
費用便益比: CBR (B/C)		1.0	1.0	1.0
パラメトリック・ シミュレーション法 ($R=50000$)	NPV_X 2.5%信頼上限	1.933	42.99	35.64
	NPV_X 中央値	-0.454	-214.38	-227.67
	NPV_X 2.5%信頼下限	-1.744	-564.18	-596.32
	プロジェクト採択確率	34.2%	5.3%	4.8%
[B/C=1.5のケース]				
項 目		旅行費用モデル	CVM No.4 基本モデル	CVM No.7 基本モデル
純現在価値: NPV		0.298	144.79	154.36
費用便益比: CBR (B/C)		1.5	1.5	1.5
パラメトリック・ シミュレーション法 ($R=50000$)	NPV_X 2.5%信頼上限	2.358	197.16	200.39
	NPV_X 中央値	-0.027	0.35	3.02
	NPV_X 2.5%信頼下限	-1.156	-242.28	-249.52
	プロジェクト採択確率	49.0%	50.2%	51.1%
[B/C=2.0のケース]				
項 目		旅行費用モデル	CVM No.4 基本モデル	CVM No.7 基本モデル
純現在価値: NPV		0.447	217.19	231.54
費用便益比: CBR (B/C)		2.0	2.0	2.0
パラメトリック・ シミュレーション法 ($R=50000$)	NPV_X 2.5%信頼上限	2.579	280.17	285.54
	NPV_X 中央値	0.218	108.77	117.14
	NPV_X 2.5%信頼下限	-0.859	-83.12	-79.99
	プロジェクト採択確率	57.9%	87.7%	88.9%

5月に琵琶湖湖岸の複数地点を対象とし仮想的な水質改善案に対するCVM調査を行った結果をもとに、個人の支払意思額の推計を目的としてプロビットモデルを適用したCECVMモデルである。また、旅行費用モデルは、平成12年10月に木津川の河川利用者を対象に実施した着地(現地)調査とともに、併せて実施した郵送調査結果をもとに、個人のオプション価格の推計を目的としてロジットモデルを適用した旅行費用モデルである。なお、旅行費用モデルの詳細は今後の機会に報告予定である。ここで、便益の確率変数 X_{b_i} の確率分布には各モデルの推計パラメータの多変量正規分布 $MVN[\hat{\theta}, \Sigma(\hat{\theta})]$ を適用する。

以下、検証モデルと既往プロジェクトの事業費比率分布を適用した数値検証を行う。ここでは、費用の発生期間を $t=1\sim 10$ 年と設定し、主要施設の耐用年数を50年と設定することで、便益の発生期間を $t=11\sim 60$ 年と設定した。また、割引率 r は4%としている。便益は表-5に示す検証モデルに属性平均値を適用した中央値を年便益 b_t と設定し、費用は $B/C = 1.0$, $B/C = 1.5$ および $B/C = 2.0$ を満たすよう年平均事業費 c_t を設定した。検証データの概要を表-6に示す。

以上をもとに、パラメトリック・シミュレーション法 ($R = 50000$) を適用した純現在価値 NPV のリスク分析結果を表-7に示す。また、 NPV_X の再現分布を図-3に示した。以下、表-7に示す試算結果について考察を行う。試算を行った全ケースについては、設定した検証データに基づいた費用便益比 CBR が推計されている。また、 B/C の設定ケースの変化 ($B/C=1.0\rightarrow 1.5\rightarrow 2.0$) に伴い、純現在価値 NPV は増大していく。 B/C の設定ケース毎にみると、 $B/C=1.0$ のケースにおいては、全検証モデルとも NPV_X の信頼区間推計の中央値は負に推計されてお

り、プロジェクト採択確率も設定ケース中、最も低い推計値となっている。 $B/C=1.5$ のケースにおいては、旅行費用モデルのみ NPV_X の中央値が負であるが、他の2モデルについては正に転じている。また、プロジェクト採択確率も概ね50%程度に推計されている。 $B/C=2.0$ のケースでは、全検証モデルとも NPV_X の中央値は正に推計されており、プロジェクト採択確率は設定ケース中、最も高い推計値となっている。検証モデル間の比較を行うと、CVM No.7 基本モデル $\rightarrow$ CVM No.4 基本モデル $\rightarrow$ 旅行費用モデルという便益の推計精度が良好なモデル[基礎検討における便益の信頼区間推計の結果、変動率(=レンジ/中央値)が小さい]の順に、 B/C の設定ケースが大きくなるに伴い ($B/C=1.0\rightarrow 1.5\rightarrow 2.0$)、プロジェクト採択確率の増大傾向が大きく、便益の推計精度の影響度が大きいことが確認できる。逆に、 B/C の設定が小さなケース(特に $B/C=1.0$) では、便益の推計精度が良好なモデルほど、プロジェクト採択確率が費用の確率変動に包含されてしまい、プロジェクト採択確率が小さく推計されていることが確認できる。以上の結果を踏まえると、当既往プロジェクトの事業費比率分布を適用した場合の試算の枠組みにおいては、プロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値の採択基準 ($NPV \geq 0$) を概ね50%以上で信頼するには、平均値を適用した費用便益分析の結果として $B/C=1.5$ 以上を確保しておくことが望ましいことが示唆されよう。

さらに、仮想データの数値検証時に作成したプロジェクト採択リスクの簡易評価図を既往プロジェクトの事業費比率分布を考慮した簡易評価図に拡張を行った。図-4に、代表的な例として、 $B/C = 1.0$, $B/C = 1.5$, $B/C = 2.0$, $B/C = 3.0$ を満たす簡易評価図を示している。なお、

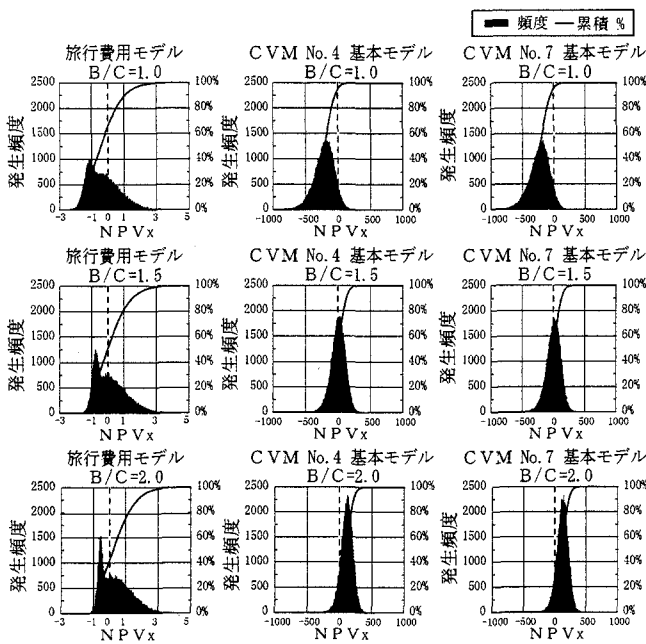


図-3: NPV_X のパラメトリック・シミュレーション法による再現分布 ($R=50000$)

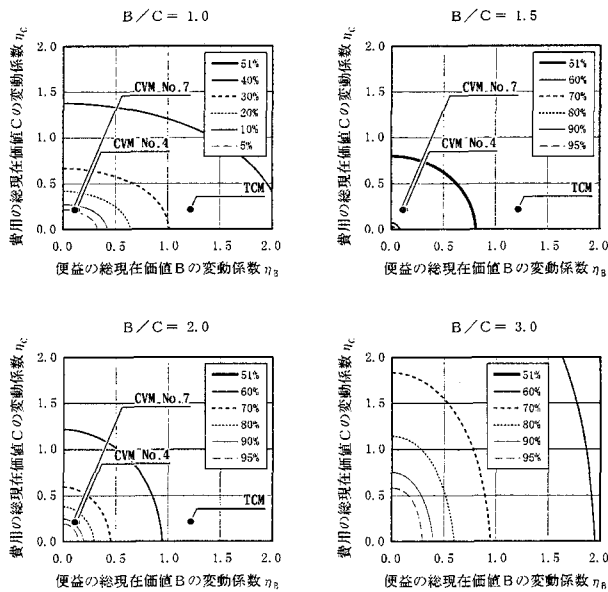


図-4: プロジェクト採択リスクの簡易評価図
(既往データのケース)

注) 特定の $CBR = B/C = a$ (定数) を所与として、費用の総現在価値 $\sum C$ の変動係数 η_C と便益の総現在価値 $\sum B$ の変動係数 η_B の関係から、プロジェクト採択確率 $P(NPV_X \geq 0)$ は以下のように求まる。なお、 N は正規分布を示す。

$$NPV_X = \sum B - \sum C = \sum \frac{X_{Bt}}{(1+r)^t} - \sum \frac{X_{Ct}}{(1+r)^t}$$

ここで、 $X_{Ct} = c_t \cdot \epsilon$ 、

$$\sum B \approx N(\mu_B, \sigma_B), \quad \eta_B = \frac{\sigma_B}{\mu_B}$$

$$\sum C \approx C \cdot N(\mu_C, \sigma_C), \quad C = \sum \frac{c_t}{(1+r)^t}, \quad \eta_C = \frac{\sigma_C}{\mu_C}$$

$$CBR = \frac{\mu_B}{C} = a \iff C = \frac{\mu_B}{a}$$

$$P(NPV_X \geq 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_C - a}{\sqrt{a^2 \eta_B^2 + \mu_C^2 \eta_C^2}}\right)$$

図-4の作成においては、事業費比率分布は正規分布変換 [$\epsilon \approx N(1.531, 0.327)$] を行い、便益分布には正規分布を仮定している。図-4においては、事業費分布に既往プロジェクトの事業費比率分布を適用したことから、正規分布を仮定した仮想データの簡易評価図(図-1参照)に比べ、特に費用の推計精度(費用の総現在価値の変動係数)の変化の影響度が大きくなり、費用の推計精度(費用の総現在価値の変動係数)の変化に対する同一の採択確率を満たす領域が縮小している。既往データの試算結果は、正規分布変換した事業費比率分布 [$\epsilon \approx N(1.531, 0.327)$] をもとに費用の総現在価値の変動係数 η_C を算定し、便益については正規分布近似として基礎検討における各検証モデルのエッジワース展開²⁾ ¹²⁾ から得られた年便益の平均と標準偏差 [旅行費用モデル $\approx N(0.062, 0.076)$, CVM No.4 基本モデル $\approx N(29.931, 3.818)$, CVM No.7 基本モデル $\approx N(31.909, 3.506)$] をもとに便益の総現在価値の変動係数 η_B を算定し、図-4の $B/C = 1.0$, $B/C = 1.5$, $B/C = 2.0$ の簡易評価図に図示した。当試算においては、費用に既往プロジェクトの事業費比率分布を適用したことから、費用の総現在価値 $\sum C$ の変動係数 η_C は一定である。一方、便益については各検証モデルの便益推計精度に応じて総現在価値 $\sum B$ の変動係数 η_B が異なることから、各々の検証モデルの便益推計精度を反映したプロジェクト採択確率が図示されている。当試算の枠組みにおいては、既往データから得られた費用と便益の推計精度がプロジェクト採択リスクに及ぼす影響度として、費用の推計精度に比べ、特に便益の推計精度の影響が大きいことを示唆する結果が得られている。また、当図示に際しては、費用・便益とも正規分布変換および近似を行ったが、プロジェクト採択リスクの概略傾向を掴む観点からは良好な図示が行えているといえよう。

5. おわりに

本研究では、社会基盤整備プロジェクトの事前の経済評価のリスク分析として、費用便益分析の代表的評価指標である純現在価値を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法の開発を行った。具体的には、費用便益分析指標を基にしたリスク分析法が純現在価値を代表指標として定式化可能なことを示し、プロジェクト採択のリスク分析法として純現在価値の信頼区間推定法およびプロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値の採択基準を満たすプロジェクト採択確率を求める分析法の提示を行った。

仮想データ(全項目正規分布を仮定)を適用した数値検証からは、費用と便益の推計精度を費用便益分析の枠組みに考慮することで、従来の平均値主体の評価のみならず、プロジェクト採択のリスク分析として確率表現を用いることの有用性を肯定する結果が得られている。また、

$CBR = B/C = a$ (定数)を所与とし、費用と便益の総現在価値の変動係数をもとにしたプロジェクト採択リスクの簡易評価図を提示することで、費用と便益の推計精度が採択基準に及ばず影響度を明示することが可能となっている。

既往のデータを基にした試算では、現時点把握が困難な事業費の確率分布について、5つの既往プロジェクトをもとに基礎情報の検討を行い、事業費変遷等につき特定の仮定は設定したものの、計画時点と竣工時の事業費比率が1.27倍～2.22倍に変動する概略傾向を確認している。また、検証モデルと既往プロジェクトの事業費比率分布を適用した試算結果からは、当事業費比率分布を適用した場合の試算の枠組みにおいては、プロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値の採択基準を概ね50%以上で信頼するには、平均値を適用した費用便益分析の結果として $B/C=1.5$ 以上を確保しておくことが望ましいことが示唆されている。さらに、既往プロジェクトの事業費比率分布を適用し拡張を行ったプロジェクト採択リスクの簡易評価図においては、費用・便益とも正規分布変換および近似を行ったが、プロジェクト採択確率の概略傾向を掴む観点からは良好な図示が行えていたといえよう。

以上、本研究では、社会基盤整備プロジェクトの経済評価のリスク分析として、費用便益分析指標を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法の適用可能性に関する有用な知見が得られたものと考え、このことにより、プロジェクト採択のリスクマネジメントとして、評価対象プロジェクトの有するリスクを定量的に評価可能な方法論の一つを提案できたものと考え。また、本研究で提案したプロジェクト採択リスクの簡易評価図は、今後とも改善が必要であるものの、利用可能性は高いものと考えている。なお、今後は当リスク分析法の実用化および精度向上に向けて、既往プロジェクトの費用・便益の計測事例の収集とともに、特に事業費データの収集による事業費分布の把握が重要な課題であると考えている。

参考文献

- 1) 川除隆広・多々納裕一・岡田憲夫：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，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.319-326，1999。
- 2) 川除隆広・多々納裕一・岡田憲夫：離散選択モデルを用いたレクリエーション便益に関する信頼区間推定法，土木計画学研究・論文集，No.17，pp.431-438，2000。
- 3) 土木学会編：第四版土木工学ハンドブックII，第53編プロジェクトの評価，pp.2163-2192，1989。
- 4) 日本数学会編集：岩波数学辞典第3版，岩波書店，1985。
- 5) 首都高速道路公団：東京湾トンネル工事誌，土木学会，1977。
- 6) 京都市交通局：京都市高速鉄道烏丸線建設小史，京都市交通局，1986。
- 7) 北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所監修：定山溪ダム工事記録，北海道開発協会，1992。
- 8) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速湾岸線東神戸大橋工事誌，阪神高速道路公団，1994。
- 9) 関西国際空港株式会社10年史編さん委員会：関西国際空港株式会社10年史，関西国際空港株式会社，1995。
- 10) 日本銀行調査統計局：経済統計年報(平成9年)，日本銀行，1998。
- 11) Kawayoke, T., H. Tatano and N. Okada: Reliability analysis of contingent valuation surveys for measuring the benefit of environmental quality improvement - An empirical study on Lake Biwa area in Japan -, *Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, pp.V973-V978, 1999。
- 12) Hall, P.: *The Bootstrap and Edgeworth Expansion*, Springer Series in Statistics, 1992。
- 13) Johansson, P.-O.: *Cost-Benefit Analysis of Environmental Change*, Cambridge University Press, 1993。
- 14) Krinsky, I. and A.L. Robb: On Approximating the Statistical Properties of Elasticities, *The Review of Economics and Statistics*, 68, pp.715-719, 1986。
- 15) Kring, C.L.: Estimating the Precision of Welfare Measures, *Journal of Environmental Economics and Management*, 21, pp.244-259, 1991。
- 16) 日本リスク研究学会編：リスク学事典，TBSブリタニカ，2000。
- 17) 依田高典：不確実性と意思決定の経済学，日本評論社，1997。
- 18) 多々納裕一：不確実性下のプロジェクト評価：課題と展望，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.19-30，1998。
- 19) 中村英夫編：道路投資の社会経済評価，東洋経済新報社，1997。
- 20) 土木学会土木計画学研究委員会編：非集計行動モデルの理論と実際，土木学会，1995。

費用便益分析指標を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法

川除 隆広，多々納 裕一，岡田 憲夫

本研究は、社会基盤整備プロジェクトの経済評価のリスク分析として、費用便益分析の代表的評価指標である純現在価値および費用便益比を基にしたプロジェクト採択のリスク分析法の開発を目的としたものである。具体的には、リスク分析が純現在価値を代表指標として評価可能であることを示し、純現在価値の信頼区間推定法およびプロジェクト採択が妥当視される確率として純現在価値の採択基準を満たすプロジェクト採択確率を求める分析法を提示している。仮想プロジェクトおよび既往データを基にした試算からは、社会基盤整備プロジェクトの経済評価として、費用と便益の推計精度を考慮したリスク分析の有用性を肯定する結果が得られている。

Risk Analysis of Project Adoption based on Cost-Benefit Criteria

By Takahiro KAWAYOKE, Hirokazu TATANO and Norio OKADA

This paper presents risk analysis methods of project adoption based on cost-benefit criteria. One is confidence interval estimation method of net present value in consideration of reliability of estimated costs and benefits on project. Second is Probability estimation method of net present value is over zero in consideration of reliability of estimated costs and benefits on project. Both methods use parametric simulation method. Illustrations are executed with hypothetical project data and real project data to evaluate performances of these proposed methods.