建設マネジメント研究論文集Vol.7　1999

# 連絡橋プロジェクトにおける合意形成型費用配分法の有用性に関するゲーム論的考察

○藤村秀樹*　熊本大学
溝上章志**　熊本大学
柿本竜治***　熊本大学

Hideki Fujimura, Shoshi Mizokami, Ryuji Kakimoto

中央政府および地方公共団体の財政事情の逼迫化を契機として，社会基盤整備の方策を見直す動きが見られるが，開発利益を見込んだり，民間活力を生かしたような費用負担システムは存在しない．よって，効率的な社会基盤整備が円滑に推進されない面があり，実務者の間では，社会に合意が得られるような公正で公平な費用配分方式の開発が強く求められている．筆者らは，複数の事業主体により実施される公共基盤整備や新しい事業手法の導入に際し最も問題となる費用配分法として，新たに合意形成型費用配分法を提案している．この配分法は，従来の分離費用身替り妥当支出法などでは考慮できなかった関係者の意見を集約する機能を備えている．本研究においては，北九州市の第二若戸連絡道路プロジェクトを対象として，評価委員会を組織し，実際のプロジェクトを対象に配分解の試算を行い，提案した費用配分法の有用性をゲーム論の立場から検証したものである．
キーワード：プロジェクト論，費用負担，ゲーム理論，Ｐ.Ｆ.Ｉ.

## 1．はじめに

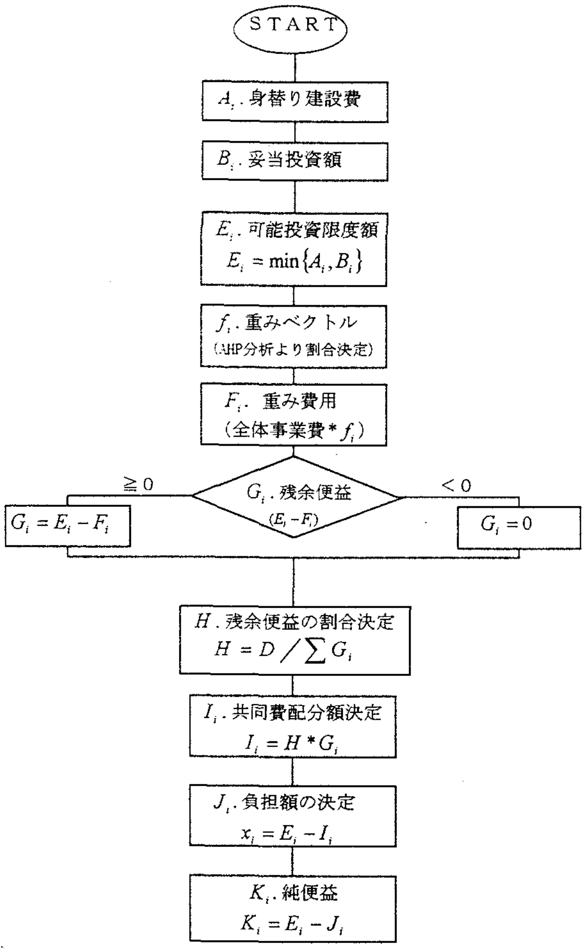
近年，中央政府および地方公共団体の財政事情の逼迫化を契機として，社会基盤整備の方策を見直す動きが見られる．これらの方策の内代表的なものにP.F.I.方式(Private Finance Initiative)がある．この方式は，効率性と採算性を重視し，公共と民間のそれぞれの役割分担を生かした社会基盤整備手法であり，これまでの公共主導による社会基盤整備から，大きく方向転換を図るものと期待されている所である．従来，橋梁整備の一般的な費用負担形式は，国が1/2の補助金を支出して地方自治体と折半するというものであり，開発利益を見込んだり，民間活力を生かしたような費用負担システムは存在しない．よって，効率的な社会基盤整備が円滑に推進されない面があり，実務者の間では，社会に合意が得られるような公正で公平な費用配分方式の開発が強く求められている．また，北九州市のように積極的な社会基盤整備を通じて活力ある地域社会の創造を目指している都市においては，国や他の関係機関の予算措置が整うまで，一時的に負担を肩代わりしてでもプロジェクトを推進したい気持ちもあり，このような観点からの費用配分法の開発が望まれているところである．筆者らは，複数の事業主体により実施される公共基盤整備や新しい事業手法の導入に際し最も問題となる費用配分法として，新たに合意形成型費用配分法[1)]を提案している．この配分法は，従来の分離費用身替り妥当支出法などでは考慮できなかった関係者の意見を集約する機能を備えている．以下，2章においては提案した費用配分法の考え方について説明すると共に，委員会の評価値を優先させた場合において，他の配分法との解の比較・考察を行った．3章では，北九州市の第二若戸連絡道路プロジェクトを対象として，評価委員会を組織し，実際のプロジェクトを対象に配分解の試算を行った．4章では，提案した費用配分法の有用性をゲーム論を用いて検証した．5章において，配分方法の違いによる合意形成のプロセスの差について考察した後，6章にて研究による成果を取りまとめた．

## 2．合意形成型費用配分法による配分解の特性

### （1）合意形成型費用配分法の考え方

本費用配分法は，可能投資限度額と別途設置する評価委員会の評価値である重み費用との調和を図ることを最大の特徴としている．従来の慣用的費用配分法においては妥当投資額や身替り建設費等の費用だけが配分法の基準となっていたが，今回提案した費用配分法では，各事業主体固有の緊急性や必要性，利便性等の要因を考慮することに特徴がある．本費用配分手法の考え方と具体的な計算手順を図－1に示し，以下で説明する．

* 工博 熊本大学大学院自然科学研究科（〒860-8555, 熊本市黒髪2丁目39-1, TEL096-344-2111, FAX342-3507)
** 工博 熊本大学 教授 工学部環境システム工学科
*** 博(学術) 熊本大学 助教授 大学院自然科学研究科




**図－1　合意形成型費用配分法の概要**

step-1：各事業主体別に，身替り建設費（各事業主体が単独で同等の事業効果を有する施設を建設する時の建設費）$A_i$ を算出する．

step-2：妥当投資額 $B_i$ を，各事業主体の便益の見積額か，プロジェクトの推進による地価の上昇額か，または便益額を資本還元した額により算出する．この妥当投資額は，現在価値に変換される．

step-3：$E_i = \min\{A_i, B_i\}$ より，身替り建設費 $A_i$ と妥当投資額 $B_i$ のうちの小さい方を可能投資限度額 $E_i$ として採用する．

step-4：緊急性や重要性，経済性などの評価項目ごとのウェイトを総合化して事業主体別の負担比率である重みベクトル $f_i$ を算出する．ここでは，別途専門家から構成される評価委員会を設置し，この意見の取り纏めにAHP(Analytic Hierarchy Process)法を採用した．AHP法は，抽象的な評価項目を具体的に点数化して集約できるという利点を有する．

step-5：全体事業費 $F$ を主体別のウェイト $f_i$ で各主体別に割振ることで重み費用 $F_i$ を求める．

step-6：可能投資限度額 $E_i$ から重み費用 $F_i$ を差引いた額のうち，この値が正の場合のみ $E_i - F_i$，負の場合は0を与える．つまり，$G_i = \max\{E_i - F_i, 0\}$ より残余便益 $G_i$ を求める．

step-7：残余便益比 $H$ を $H = D / \sum_{i \in N} G_i$ より求める．ここに $D = \sum_{i \in N} E_i - F$，$G = \sum_{i \in N} G_i$ である．

step-8：$I_i = H \times G_i$ により，残余便益 $(E_i - F_i)$ を残余便益比 $H$ に割振ることで共同費配分額 $I_i$ を算出する．

step-9：$x_i = E_i - I_i$ により，可能投資限度額 $E_i$ から共同配分額 $I_i$ を差引くことで負担額 $x_i$ を求める．

step-10：$K_i = E_i - x_i$ により可能投資限度額 $E_i$ から負担額 $x_i$ を差引くことによって純便益 $K_i$ を求める．

**（2）合意形成型費用配分法の配分解の特性**

合意形成型費用配分法は，可能投資限度額 $E_i$ から残余便益 $G_i = \max\{E_i - F_i, 0\}$ に $D/G$（残余便益比）を掛け合わせたものを差し引くことにより求められるので，最終的には可能投資限度額 $E_i$ と委員会の総合評価値 $F_i$ を $D/G$ で内分したものとして定義されることになる．よって，配分解は次式で表される．

$$X_i = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{D}{G}\right) * E_i + \dfrac{D}{G} * F_i & (if \quad E_i \geq F_i) \\ E_i & (if \quad E_i \leq F_i) \end{cases}$$

ここに，$i$ は事業主体，$N$ は事業主体数，$E_i$ は可能投資限度額，$F_i$ は重み費用であり，$G = \sum_{i \in N} \max\{E_i - F_i, 0\}$，$D = \sum_{i \in N} E_i - F$ である．合意形成型費用配分法において，委員会の評価値である重み費用の値が個人合理性基準を上回るプレイヤーが一人か二人かの違いによって配分解がどのような特性の違いを示すかを把握するため，

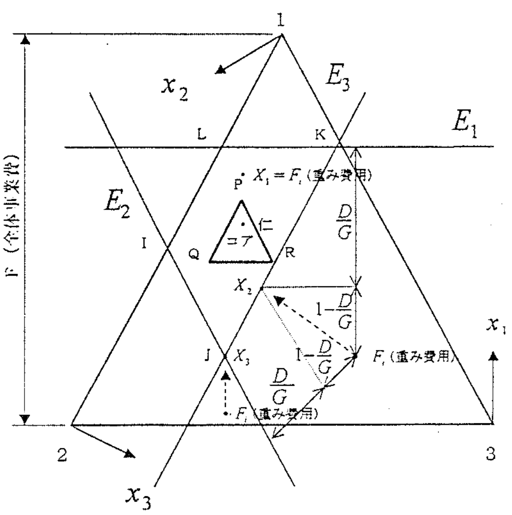
- Case1：全てのプレイヤーにおいて $F_i \leq E_i$ の場合．
- Case2：一人のプレイヤーが $F_i \geq E_i$ の場合．$(i=3)$
- Case3：二人のプレイヤーが $F_i \geq E_i$ の場合．$(i=2,3)$

の３ケースを設定し，配分解を求める．表－１は各ケースにおける配分解の算出式である．

**表－１　配分解 $X_i$ の計算式**

| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
|---|---|---|---|
| Case 1 $(X_1)$ | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ |
| Case 2 $(X_2)$ | $(1 - D/G) * E_1 + D/G * F_1$ | $(1 - D/G) * E_2 + D/G * F_2$ | $E_3$ |
| Case 3 $(X_3)$ | $F - E_2 - E_3$ | $E_2$ | $E_3$ |

ここで，$X_i$は配分解の集合，$x_i$は各事業主体別の配分額，$E_i$は可能投資限度額，$F_i$は委員会の評価値を表す．本配分法から得られる配分解は，重み費用$F_i$が個人合理性基準$E_i$を満足する場合は，その重み費用の値のままとなる(Case1)．一方，重み費用の値が個人合理性基準を上回る場合($F_i > E_i$)は，全体合理性が確保されている限りにおいて，事業参加者が妥当投資額以上の支出を行うことはないから，配分解は個人合理性の線上(Case2)，または２者の交点にシフトする(Case3)．図－2は，配分解の特性を表したものであり，点$x_1$がCase1に相当する場合であり，各事業主体は個人合理性基準を満足している．点$x_2$においては，まず$x_3$が個人合理性を満たすように$E_3$にシフトする，一方，二つの事業主体$(i=1,2)$の配分解は$E_i$と$F_i$を$D/G:(1-D/G)$で内分したものとなっている．点$x_3$はCase3の場合であり，配分解は$E_2$と$E_3$の交点にシフトする．なお，図－２には比較のためコアとその仁の位置を示している．




図－２　配分解$x_i$の特性図

**（３）配分解のゲーム論的考察**

委員会の評価値である重み費用$F_i$が，計算された可能投資限度額$E_i$より大きく，両者の調整を要するような場合が生じることも考えられる．このような場合には，委員会の評価値を優先させるために，従来のゲーム論の定義から少し離れて，提携$(s)$に対する提携合理性基準を$v(s)=\alpha\left[v'_{(i)}+v'_{(i+1)}\right]$，個人合理性基準を$v'_{(i)}=\max\{F_i,E_i\}$のように定義し直すことにより，配分解を求めることが必要となる．ここで，$\alpha\ (0\le\alpha\le1.0)$は提携によるメリットを表す指標である．このような場合の配分解の求め方として，下記のような3通りの配分方法を提案し，解の比較を行う．

**(A)M.C.R.S.法[2]　(最少費用残余便益法)**

$\min\{E_i,F_i\}$を最小費用$x_{i\min}$とする．全体事業費$v(N)$と最小費用の総和$(\sum_{i\in N}x_{i\min})$との差を残余便益$(RC)$とし，これを次式に示すように，各事業主体ごとに投資限度額$x_{i\max}=\max\{E_i,F_i\}$と最小費用$x_{i\min}$の差によって配分し，配分解とする．

$$x_i = x_{i\min} + \beta_i * (RC)$$

ここに，$\beta_i = (x_{i\max}-x_{i\min})/\sum_{i\in N}[x_{i\max}-x_{i\min}]$，$RC=v(N)-\sum_{i\in N}x_{i\min}$，$x_{i\max}=\max\{F_i,E_i\}$，$x_{i\min}=\min\{F_i,E_i\}$である．

**(B)仁（Nucleus）[3]の考え方による配分解**

個人合理性基準を$v'_{(i)}=\max\{F_i,E_i\}$と定義し直し，それに伴い変化する提携合理性基準$v'(s)$との差のmin max値，つまり，$x_i=\min_{x_i\in A^*}\max_{s}\{\ \sum_{i\in s}x_i - v'(s)\ \}$を配分解とする方法である．数値解は，以下のLPを解くことによって求められる．

$$\min\ \mu,\quad subject\ to\ \ x_i\le v'_{(i)}+\mu,\ \sum_{i\in s}x_i\le v'(s)+\mu,\ \sum_{i\in N}x_i=v(N)$$

各制約条件式は，個人合理性，提携合理性，全体合理性を表している．

**(C)ナッシュ解の考え方による配分解**

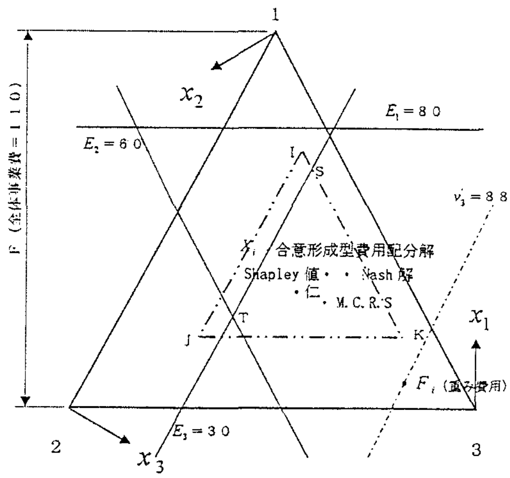
次式のように$v'_{(i)}=\max\{F_i,E_i\}$と配分解$x_i$との差の積が最大となるような値(ナッシュ解)を配分解とする方法であり次式で表される．

$$x_i=\max_{x_i\in A^*}\{\ \prod_{i\in N}(v'_{(i)}-x_i):\ s.t.\ x_i\le v'_{(i)}\ \}$$

以下では，$E_1=80, E_2=60, E_3=30, F_1=11.0, F_2=11.0, F_3=88.0, v(1,2)=84.0, v(1,3)=100.8, v(2,3)=88.8, v(N)=110.0$の設定のもとで試算を行い，各配分法から得られる配分解の比較を行った．各方法による配分解の計算結果を表－２に示す．なお，表中にはコアに左右されない配分解であるShapley値を併記した．図－3に，これらの配分解を基本三角形に表す．

表－２　重み費用$F_i$を優先した場合の配分解

| 配分解 | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
|---|---|---|---|
| Shapley値 | 39.8 | 23.9 | 46.3 |
| 合意形成型費用配分法 | 44.9 | 35.1 | 30.0 |
| (A)M.C.R.S法 | 33.8 | 27.1 | 49.1 |
| (B)仁の考え方 | 35.3 | 34.6 | 40.1 |
| (C)ナッシ解の考え方 | 40.7 | 20.7 | 48.6 |
| 委員会の評価を重視した個人合理性基準$\max\{E_i,F_i\}$ | 80 | 60 | 88 |



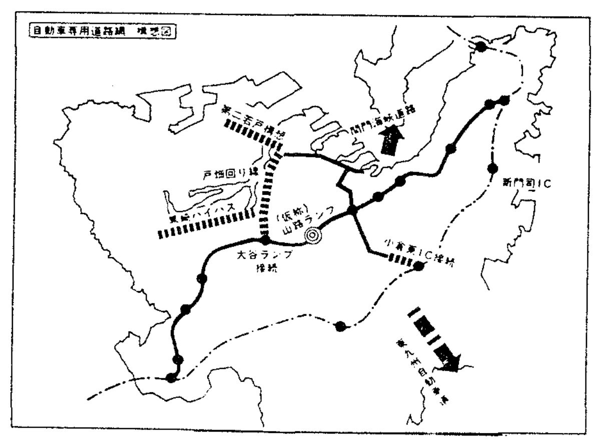

**図—3　委員会の評価値を優先した場合の配分解**

図－3に示すように，個人合理性基準$E_i$で囲まれる領域が比較的コンパクトで，かつ重み費用との差が大きいような今回の例では，最小費用残余便益法，ナッシュ解の考え方，Shapley値，仁の考え方，合意形成型費用配分法の順に，重み費用$F_i$に近い値を示す．つまり，この順序で委員会の意見を反映しやすいと言えよう．しかし，この関係は重み費用との相対的な位置関係により定まるものであり，一般的な特性とまでは言えない．ここで，配分解$x_i$が重み費用$F_i$と直接の関係を持っているのは，合意形成型費用配分法の場合のみであり，この両者には配分$F_3$が提携$\{1,2\}$を通して$x_3$を支配する$F_3DOM_{\{1,2\}}x_3$（外部支配性）の関係が成立している．つまり，$x_3$が$E_3$より小さい値の配分解を主張すると，評価委員会の重みベクトル$F_3$からゴネ得であるとの批判を受けることになり，$E_3$上に留まらざるを得ないであろう．また，この$E_3$上の配分解$x_i$は$x_i=\{(x_1,x_2,E_3);\ x_1+x_2=F-E_3\}$のように表現でき，$x_1$と$x_2$が互いに牽制しあっているので，内部安定性である．ここで，何らかの方法により，$x_i=c\quad(c\le E_i : i=1,2)$の値を定めることが出来れば唯一解を規定することが可能となる．合意形成型費用配分法では，これの解決に残余便益比$(D/G; G=\sum_{i\in N}(E_i-F_i),\ D=\sum_{i\in N}E_i-F)$を用いて，$E_i$と$F_i$を内分することで配分解を規定している．また，$E_3$上の配分解$(x_1,x_2)$は$x_1+x_2$＝一定であり，互いにけん制し合い自ら動こうとはしない性質を持っている．従って合意形成型費用配分法により得られた配分解は，内部安定性を有すると言える．

## 3．第二若戸連絡橋プロジェクトに対する実証例

### （1）プロジェクトの概要

北九州市は，1988年12月に策定した『ルネッサンス構想』の中で，「アジアに開かれた国際技術情報都市」を目指すべき都市像として掲げ，21世紀に向けた公共基盤整備の方向を明らかにした．この構想の主要課題であり，2005年を計画目標年次としてその整備が進められようとしているひびき灘開発地区へのアクセス道路である「第二若戸連絡道路」を本モデルの適用対象プロジェクトとする(図－4参照)．既に，現況のデータを用いて，a）交通量の予測モデルの設定，b）地価関数の推定，c）第二若戸連絡道路の整備による交通量の予測と各事業者ごとの便益の算定を行ってきた[1]．以下，d)実際に評価委員会を設置して，e)負担の割振りの設定，等を通して，開発利益と費用負担の試算を行い，提案した費用配分法，およびこれから得られた配分解についての妥当性の検討を行う．




**図－4　対象プロジェクトの位置図**

### （2）実際のプロジェクトにおける配分解の試算

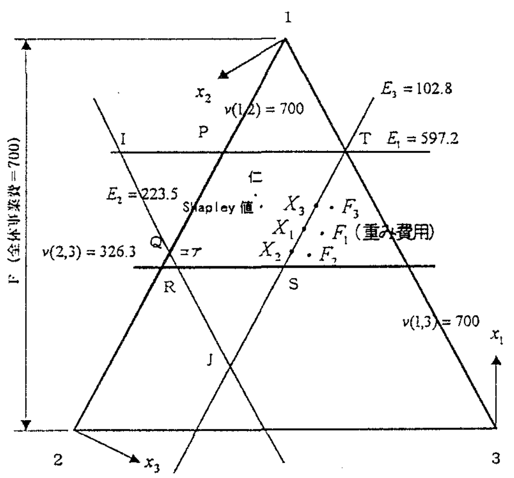
委員会の評価値である重みベクトルの時系列的変化に対応した費用配分の試算を行う．表－3に計算の条件と結果を合わせて示す．ここでは，全体事業費$v(N)$=700とし，公共（国＋地方自治体）の可能投資額限度額$(E_1)$は，全体事業費$v(N)$から都市高速道路公社の可能投資限度額$(E_3)$を差し引くことで得られると仮定している．第1回目の調査時点(1996.6)は，国の港湾計画である「第9次港湾整備計画」が閣議決定された時期であるため，国際競争力の強化

や物流ネットワークの形成の必要性および信頼性の向上などへの認識が新たなものとなり，「必要性」(23.9%)や「利便性」(21.4%)，および「経済性」(18.9%)などが高い評価を得ている．第２回目の調査時点(1997.6)においては，震災による神戸港の機能低下を始めとして，日本の港湾の国際競争力の低下が懸念されていた時期であることから，港湾施設の拡充に関する「必要性」(28.2%)や「緊急性」(20.4%)が高い評価値を得ている．第３回目の調査時点(1998.2)においては，中央政府の財政改革と地方自治体における第３セクターの行き詰まりを背景にして，「経済性」(23.8%)と「資金力」(20.2%) が大きな評価値を示している．一方，「利便性」(21.4%→17.3%→21.2%)は，調査期間を通じて安定した評価値を示している．

公共の負担額は，合意形成型では409.6(58.5%)～453.5(64.8%)まで変化している．これは全て，委員会の評価値である重みベクトルの変化に起因するものである．第三セクターの負担額については，143.7(20.5%)～171.5(26.8%)まで変化している．第２回目の調査時点においては第１回目の調査に比べ2.3%増加し，その後３回目の調査時点には6.3%減少した．これは，地価に対する信頼性の低下と埋め立地の開発利益が確定していないことを委員会が考慮したものと考えられる．一方，道路公社の負担額は，102.8(14.7%)で一定である．これは，委員会の評価値である重みベクトル($f_i$=0.204～0.215)から計算した重み費用($F_i$)が，道路公社の可能投資限度額($E_i$=102.8)を上回っているため，負担額は可能投資限度額となったためである．図-５にアンケートの集計結果とこれに基づく計算結果を基本三角形に表す．上記２．(3)で検討した場合と同様，委員会の評価値$F_i$が可能投資限度額$E_i$を上回っている状態である．また，いずれの調査時点においても，委員会による評価値($F_3$)は，都市高速道路公社($x_3$)に対し計算された可能投資限度額額($E_i$)以上の負担を求めていることが明らかとなった．しかし，都市高速道路公社($x_3$)は配分解が$E_3$以上であると個人合理性基準を満たさず，事業の採算性が成り立たないことになるので，配分解の$E_3$までの引き下げを強く要求すると予想される．よって，この$E_3$線上に位置する配分解は，個人合理性基準と委員会の評価値のバランスにより成立していることが理解できる．

表－３　実際のモデルにおける配分解の変化

| 設計条件 | $E_1=597.2$　$E_2=223.5$　$E_3=102.8$<br>$F_1=422.8$　$F_2=126.7$　$F_3=150.5$<br>$v(1,2)=700$ $v(1,3)=700$ $v(2,3)=326.3$ | | |
|---|---|---|---|
| プレーヤー | 公共$x_1$ | 三セク$x_2$ | 高速公社$x_3$ |
| 合意形成１回目 | 425.7 | 171.5 | 102.8 |
| 合意形成２回目 | 409.6 | 187.6 | 102.8 |
| 合意形成３回目 | 453.5 | 143.7 | 102.8 |
| Shapley 値 | 502.6 | 128.9 | 68.5 |
| 仁 | 511.2 | 137.5 | 51.3 |
| S.C.R.B.法 | 495.8 | 139.9 | 64.3 |




図－５　実際のモデルにおける配分解の計算結果

### ４．合意形成型費用配分法の有用性のゲーム論的考察

プロジェクトの合意形成過程を，最初は全く協力関係が成立していない状態であり，プレーヤが交渉を重ねるうちにお互いにゲームの状況を認識するにつれ，協力することのメリットを認識していくような非協力ゲームとして捉える．続いて，合意形成型費用配分法やSyapley値および仁による配分解の安定性をナッシュ均衡点を用いて検討し，提案した費用配分法の有用性を検証する．

#### （１）合意形成型費用配分解の安定性の検討

上記２．（２）において，合意形成型費用配分法による配分解は，委員会の評価値である重み費用($F_i$)と，可能投資限度額($E_i$)の大小関係で，３ケースに分轄できることを見い出した．また，２．（３）において，合意形成型費用配分法による配分解の集合には，次のような特性が存在することが明らかとなった．

$X_i=\{(x_1,x_2,E_3);\ x_1+x_2=F-E_3\}$（内部安定性）　(1)

$F_3 DOM_{\{1,2\}} x_3$ （外部支配性） (2)

ここに，$X_i$ は各ケースごとの配分解の集合，$x_i$ は各事業主体別の配分額，$E_i$ は可能投資限度額，$F_i$ は委員会の評価値，$i$ は事業主体，$N$ は事業主体数，を表す．この分類した３ケースの配分解の安定性を非協力ゲーム理論を用いて検討する．まず，それぞれのケースにおいて利得表を作成し，この配分解が，ナッシュ均衡点であるかどうかの検討を行うことにより，配分解の安定性を判断することとする．なお，以下では，$x_1$（公共）$x_2$（三セク）$x_3$（高速道路公社）の３人のプレーヤーを２・（２）に掲載した表－１の各ケースに従い，２人ゲームとして取り扱っているが，各々のプレーヤーの特性はそのまま生かされているので，ｎ人ゲームを２人ゲームとして取り扱っても，解の本質を損なうことはない．

Case 1：全てのプレーヤーにおいて $F_i \le E_i$ の場合．

このケースでの利得表は，プレーヤー(1)が参加する確率を $(p_i)$，プレーヤー(2)が参加する確率を $(q_j)$ で表すと，表－４のようになる．ここで，$(p^*,q^*)=(1,1),(0,0)$ が均衡点となるためには，以下の条件が満足される必要がある．ここに，$(p^*,q^*)=(1,1)$ は(参加する，参加する)の組み合わせ，$(p^*,q^*)=(0,0)$ は，(参加しない，参加しない)の組み合わせである．(1, 1)が均衡点であるための必要条件は以下の通りである．

$$(E_1 - F_1) + (E_2 - F_2) \ge 0 \quad (3)$$

$$E_3 - F_3 \ge 0 \quad (4)$$

式(3), (4)が成立するのは，仮定の条件 $F_i \le E_i$（$i = 1,2,3$）より明らかである．一方，(0, 0) が均衡点であるための必要条件式は，以下のとおりである．

$$E_3 - F \le 0 \quad (5)$$

$$(E_1 + E_2) - F \le 0 \quad (6)$$

式(5)は，$E_i = \min\{A_i, B_i\} \le F$ より明らかである．式(6)は，必ずしも成立しない．よって，Case1において(1, 1)はナッシュ均衡点であるが，(0, 0)は必ずしも均衡点とは言えない．

Case 2：一人のプレイヤーが $F_i \ge E_i$ (ここでは, $i=3$) の場合の利得表は，表－５のように表される．$(p^*,q^*)=(1,1),(0,0)$ が均衡点となるためには，以下の条件を満足する必要がある．(1, 1)が均衡点であるための必要条件は以下のとおりである．

$$(E_1 + E_2) - (F - E_3) \ge 0 \quad (7)$$

配分解 $x_i$ を用いると，$x_1 + x_2 = F - E_3$，$x_1 + x_2 \le E_1 + E_2$ より，$E_1 + E_2 \ge F - E_3$ となることより式(7)は，証明される．一方，(0, 0)が均衡点であるための必要条件は，以下のとおりである．

$$E_3 - F \le 0 \quad (8)$$

$$(E_1 + E_2) - F \le 0 \quad (9)$$

式(8)は証明済みである．一方，式(9)は必ずしも成立しない．

Case 3：二人のプレイヤーが $F_i \ge E_i$ (ここでは，$i = 2,3$) の場合の利得表は，表－６のように表される．$(p^*,q^*)=(1,1),(0,0)$ が均衡点となるためには，以下の条件を満足する必要がある．(1, 1)が均衡点であるための必要条件は，以下のとおりである．

$$(E_1 + E_2 + E_3) - F \ge 0 \quad (10)$$

$F = \sum_{i \in N} x_i$ の関係より，

式(10)の左辺$=(E_1 + E_2 + E_3) - (x_1 + x_2 + x_3)$

$=(E_1 - x_1) + (E_2 - x_2) + (E_3 - x_3)$

また，$x_2 = E_2, x_3 = E_3$ $x_1 \le E_1 = \min\{A_1, B_1\}$ より，

式(10)$=E_1 - x_1 \ge 0$ であることから，式(10)は証明された．(0, 0)が均衡点であるための必要条件は，以下のとおりである．

$$(E_2 + E_3) - F \le 0 \quad (11)$$

$$E_1 - F \le 0 \quad (12)$$

式(11)は，$F_i \ge E_i$ $(i = 2,3)$ より明らかである．また，式(12)も，$E_1 = \min\{A_1, B_1\} \le F$ より明らかである．

表－７は，以上の結果を整理したものである．この表から，合意形成型費用配分法によって得られる配分解(1, 1)=(参加する，参加する)は，ナッシュ均衡解であり，安定性を有していると言える．一方，配分解(0, 0)=（参加しない，参加しない）は，Case1, Case2では必ずしも均衡解とはなり得ないことが判明した．つまり，$F_i \le E_i$，ここで $i = 1,2,3$ の Case1，$F_3 \ge E_3$ のCase2の状態では，費用の配分が容易である言える．しかし，Case3の状態では，(1, 1)=(参加する，参加する)と同様に，(0, 0)=(参加しない，参加しない)も均衡点となり得ることが判明した．このケースは，委員会の評価値 $(F_i)$ が，２人のプレーヤーに対し，可能投資限度額 $(E_i)$ 以上の負担を求めている状態であり，配分解も２人のプレーヤーは共に利得がゼロの状態である．よって，２人のプレーヤー $(x_2, x_3)$ が，事業に参加しようとする動機を持たないことは，十分理解できることである．Case3における

(0, 0)がナッシュ均衡点ではなくなるためには，事業規模の再検討や経費の削減により，２人のプレーヤーの個人合理性の改善$\{E_1 - F' \geq 0, (E_2 + E_3) - F' \geq 0\}$などの戦略の変更に，非協力ゲーム理論による検討を通じて解明された．ここに，$F'$は見直された新たな事業費である．なお，表－７には，Shapley値と仁による配分解の安定性を別途検討し掲載した．表－７から，Shapley値の配分解はいずれも安定ではなく，仁による配分解は協力状態(1, 1)においてのみ安定であることが分かる．また，コアが形成される限りにおいて，仁による配分解は安定であることが明らかとなった．

表－４　連絡橋プロジェクトの利得表（Case1）

$F_i \leq E_i \quad \forall i = N$

| $x_1 + x_2$ | $x_3$ | |
|---|---|---|
| | $q_1$ | $q_2$ |
| $p_1$ | $(E_1 - F_1) + (E_2 - F_2)$, $(E_3 - F_3)$ | $(E_1 + E_2) - F$ , 0 |
| $p_2$ | 0,　$E_3 - F$ | 0, 0 |

表－５　連絡橋プロジェクトの利得表（Case2）

$F_3 \geq E_3$

| $x_1 + x_2$ | $x_3$ | |
|---|---|---|
| | $q_1$ | $q_2$ |
| $p_1$ | $(E_1 + E_2) - (F - E_3)$ , 0 | $(E_1 + E_2) - F$ , 0 |
| $p_2$ | 0,　$E_3 - F$ | 0, 0 |

表－６　連絡橋プロジェクトの利得表（Case3）

$F_2 \geq E_2, F_3 \geq E_3$

| $x_1$ | $x_2 + x_3$ | |
|---|---|---|
| | $q_1$ | $q_2$ |
| $p_1$ | $(E_1 + E_2 + E_3) - F$ ,　0 | $E_1 - F$ , 0 |
| $p_2$ | 0,　$(E_2 + E_3) - F$ | 0, 0 |

表－７　均衡解の検討結果

| | （1，1） | (0，0) |
|---|---|---|
| Case1 $F_i \leq E_i \forall i = N$ | ○ | × |
| Case2 $F_i \geq E_i \ (i = 3)$ | ○ | × |
| Case3 $F_i \geq E_i \ (i = 2,3)$ | ○ | ○ |
| Shapley値 | × | × |
| 仁 | ○ | × |

注 ○は，安定解(ナッシュ均衡解)を示す．
×は，安定解が保証されない場合を示す．

## ５．合意形成プロセスにおける均衡解の考察

### （１）合意形成型費用配分解に基づく期待値の分析

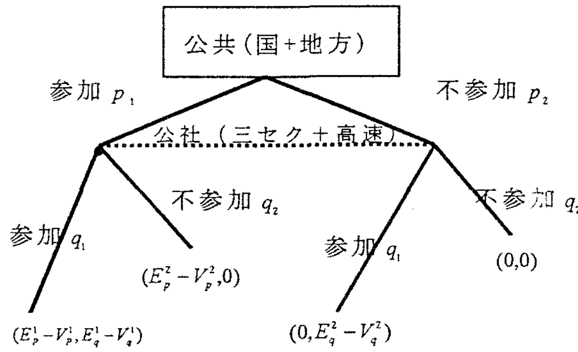
３．（２）において算定した合意形成型配分解を用いて，各々のプレーヤーの利得を算定したものが，表－８である．表－８では，プレーヤーは二人とし，共同でプロジェクトに参加する場合の④利得と，一人でプロジェクトに参加する場合の⑤リスクを算定し掲載した．なお，ここで取り扱うプレーヤーは，公共（国＋地方公共団体）と公社（第三セクター＋高速道路公社）の二人としているが，各々のプレーヤーには同質性があり，ｎ人ゲームを二人ゲームに縮小しても各々の解の本質を損なうことはない．

表－８　連絡橋プロジェクトにおける利得の算定

| プレーヤー | 公共$(x_1)$ | 公社 $(x_2)$ | 備考 |
|---|---|---|---|
| ①可能投資限度額$E_i$ | 597.2 | 326.3 | |
| ②配分解 $(x_i)$ | 453.5<br>502.6 | 246.5<br>197.4 | ③=総事業費 $\Sigma_{i \in N} x_i = 700$ |
| ④=①-② 利得 | 143.7<br>94.6 | 79.8<br>128.9 | 協力が成立 |
| ⑤=①-③ リスク | -102.8<br>-102.8 | -373.7<br>-373.7 | 協力が不成立の場合 |

注 上段は合意形成型費用配分法
下段はShapley値による配分解及び利得を示す．

図－６は，連絡橋プロジェクトにおけるプレーヤーの協力過程を表したものである．図中の二つの結節点を結ぶ点線は，公共と公社が同時手番（静学的）であることを示している．図中$E_p^1, V_q^2$の$E$は便益額，$V$は費用，１は協力が成立，２は不成立を示す．




図－６　連絡橋プロジェクトにおける協力過程

表－9は，表－8に基づいて算定された利得表である．$p_i$ は公共が参加する確率を，$q_j$ は公社が参加する確率を示している．

**表－9 連絡橋プロジェクトの利得表（I）（静学的モデル）**

| 公共（国+地方） | 公社（三セク+道路公社） | |
|---|---|---|
| | 参加する $q_j$ | 参加しない $q_{j+1}$ |
| 参加する $p_i$ | 143.7, 79.8<br>94.6, 128.9 | −102.8, 0<br>−102.8, 0 |
| 参加しない $p_{i+1}$ | 0, −373.7<br>0, −373.7 | 0, 0<br>0, 0 |

プレイヤー1（公共）およびプレイヤー2（公社）の期待値は，それぞれ次式のように表される．

$$E_1(p,q)=\sum_{i\in 2}\ \sum_{j\in 2} p_i q_j B_1(p_i,q_j) \qquad (10)$$

$$E_2(p,q)=\sum_{i\in 2}\ \sum_{j\in 2} p_i q_j B_2(p_{i,},q_j) \qquad (11)$$

**（2）均衡解の静学的考察**

表－9の利得表を用いて均衡点に関する分析を行う．非協力ゲームの代表的な均衡解であるナッシュ均衡点（以下，均衡点と略す）は，次式で定義される．

$$E_1(p^*,q^*)=\max_p E_1(p,q^*) \qquad (12)$$

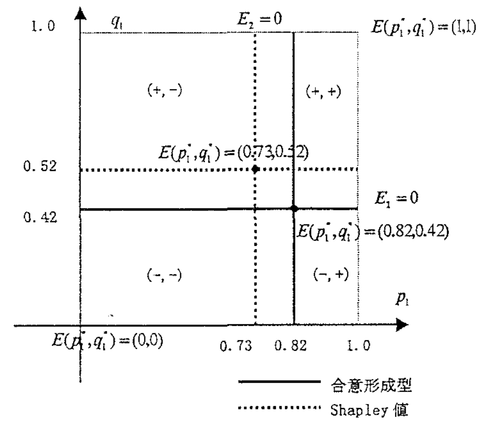
$$E_2(p^*,q^*)=\max_q E_2(p^*,q) \qquad (13)$$

また，混合戦略による均衡点は各プレーヤの max min 値として定義されているので，上記式を(12)，(13)をそれぞれ $p,q$ で偏微分した次式を解くことにより得られる．

$$\frac{\partial E_1(p,q)}{\partial p}=0 \qquad (14)$$

$$\frac{\partial E_2(p,q)}{\partial q}=0 \qquad (15)$$

上記の関係から，純粋戦略の均衡点として，$(p_1^*,q_1^*)=(0,0),(1,1)$ が得られ，合意形成型費用配分法における混合戦略の均衡点として，$(p_1^*,q_1^*)=(0.82,0.42)$ が得られる．一方，Shapley値の場合は，$(p_1^*,q_1^*)=(0.73,0.52)$ が，均衡点として得られる．この均衡点の関係をグラフに表すと図−7のようになる．




**図－7 合意形成型費用配分法における均衡経路**

図－7より，以下の①〜④の関係が理解できる．

① $p_1\geq 0.82, q_1\geq 0.42$ の場合には，公共と公社は両者とも利得を得ることが出来る．(+, +)

② $p_1\leq 0.82, q_1\geq 0.42$ の場合には，公共は(+)，公社は(−)の利得を得ることが出来る．(+, −)

③ $p_1\geq 0.82, q_1\leq 0.42$ の場合には，公共は(−)，公社は(+)の利得を得ることが出来る．(−, +)

④ $p_1\leq 0.69, q_1\leq 0.41$ の場合には，公共と公社は両者とも利得は負である．(−, −)

図－7における原点 $(p^*,q^*)=(0,0)$ は，各プレイヤーがプロジェクトを推進することによるリスクを恐れ，お互いに「躊躇」して何も行動しない状態である．また，混合戦略の均衡点である $E(p^*,q^*)=E(0.82,0.42)$ の時，期待利得は公共と第三セクターの両者とも0である．この場合，各プレイヤが採算ぎりぎりのところで，プロジェクトへの参加をためらっている状況である．よって，非協力な状態から協力な状態に推移するためには，$(p_1^*,q_1^*)=(0,0)$ の点から確実に離脱するとともに，混合戦略における均衡点を如何に通過するかが事業推進の大きなポイントとなる．この為には，ゲームに参加するプレーヤがゲームの全体像を把握し，最終的な配分解を理解することが必要である．ここで，合意形成型費用配分法における $(p_1^*,q_1^*)=(0,0)$ は，ナッシュ均衡点ではなく，離脱は容易である．また，図－7より混合戦略における均衡点も，合意形成型費用配分法の場合には，一方のプレーヤー(今回の公共のような場合)が事業の推進に対して強い意向がある場合には，他の費用配分法に比べ，この均衡点の通過が容易であることが明らかとなった．なお，均衡点の改善には，以下の2つの方法が考えられる．

①全体の事業費を低減し，$E_p-V_p \geq 0$ や $E_q-V_q \geq 0$ で表される個人合理性の条件を改善する．

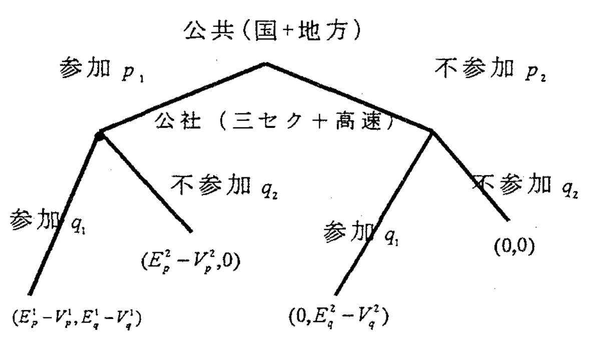
②第三者機関が，各々のプレイヤーに補助金 $\alpha$，$\beta$ を交付し，プレーヤーのリスクを $E_p^2-V_p^2+\alpha \geq 0$, $E_q^2-V_q^2+\beta \geq 0$ となるよう軽減する取り決めを行う．

**（3）均衡解の動学的考察**

公共と公社の間に参加・不参加の意思決定に関する時間差があり，かつ，公社は公共の参加意思を確認した後，プロジェクトへの参加・不参加の選択が可能であるような動学的ゲームを検討する．図－８は，この公共と公社の動学的ゲームをモデル化したものであり，意思決定能力を有する公社は，先行する公共が参加しない場合には，リスクが最小になるように事業規模を小規模（例えば２車線として計画し，その際の事業費を500億円とする）なものに切り替えてプロジェクトの推進が可能とする．表－10は，事業規模の異なるケースにおける便益額と費用負担額を算定したものである．静学的なモデルから動学的なモデルへ推移したことにより，プロジェクトの推進過程で協力関係が成立せず，一人で事業を行った場合のリスクは，$(E_1,E_2)=(-102.8,-373.7)$ から $(E_1,E_2)=(-82.0,-173.7)$ と減少する．表－11は，動学的モデルの場合の利得表である．

**表－１０　動学的状態を考慮した利得と均衡点**

| | Case１（４車線） | | Case２（２車線） | |
|---|---|---|---|---|
| ①プロジェクト経費 | ７００ | | ５００ | |
| ②ゲームの状況 | 静学的 | | 動学的 | |
| ③プレーヤー | 公共 | 公社 | 公共 | 公社 |
| ④可能投資限度額 | 597.2 | 326.3 | 418.0 | 326.3 |
| ⑤配分解 | 453.5 | 246.5 | 500 | 500 |
| ⑥=④-①　リスク | -102.8 | -373.7 | -82.0 | -173.7 |
| ⑦混合戦略のナッシュ均衡点 | $p_1$=0.82 | $q_1$=0.42 | $p_1$=0.69 | $q_1$=0.36 |




**図－８　動学的ゲームのモデル化**

**表－11 連絡橋プロジェクトの利得表（Ⅱ）**
**（動学的モデル）**

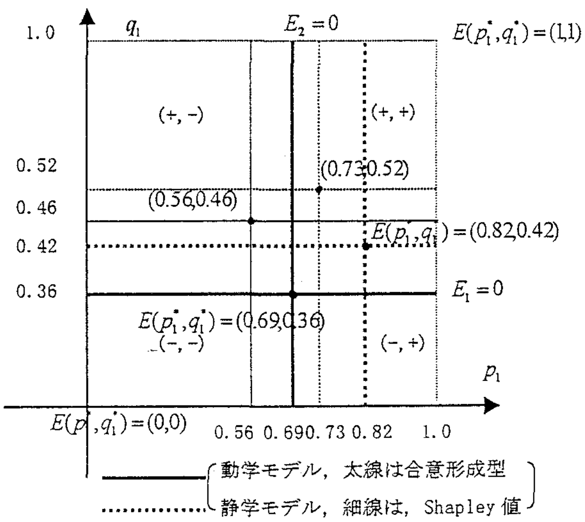
| 公共（国+地方） | 公社（三セク＋道路公社） 参加する $q_1$ | 公社（三セク＋道路公社） 参加しない $q_2$ |
|---|---|---|
| 参加する $p_1$ | 143.7, 79.8<br>94.6, 138.9 | -82.0, 0<br>-82.0, 0 |
| 参加しない $p_2$ | 0, -173.7<br>0, -173.7 | 0, 0<br>0, 0 |

注（上段は合意形成型費用配分法
下段はShapley値による利得を示す．）

図－９は，合意形成型費用配分法とShapley値によるそれぞれの場合における，静学的モデルと動学的モデルの均衡経路の推移を表したものである．合意形成型費用配分法の場合，ゲームを動学的に変化させたことにより，混合戦略による均衡点は，$(p^*,q^*)=(0.82,0.42)$ から $(p^*,q^*)=(0.69,0.36)$ へと低下した．一方，Shapley値の場合は，均衡点は(0.73, 0.52)から(0.56, 0.46)へと変化した．これらの大小関係をプロジェクトに積極的でない公社の参加確率である $q_1$ について比較してみると次の関係が分かる．合意形成（動）＜合意形成（静）＜Shapley(動)＜Shapley(静)

また，この事は，プロジェクトの調整過程において，それぞれのプレーヤーの選択肢を広げること（代替え案の用意）などにより，調整の第１段階として乗り越えなければならない均衡点のハードルが小さくなったことを意味している．そして，図－９における混合戦略の均衡点においては，プレーヤは均衡点を上回る期

待値を獲得しようとすれば，相手の参加確率$(q_1)$を上げなければならない事を認識するに至り，この均衡点に達した後は，合意形成(協力体制)に向けて，相手を説得する行動をとるようになると考えられる．




**図－９ 静学モデルと動学モデルの均衡経路**

## ６．まとめ

本研究では，以下のような成果が得られた．

(1)合意形成型費用配分法における委員会の評価値は，事業の経済性のみでなく，緊急性や必要性・利便性・資金力など，従来の費用配分法では考慮できなかった要因を評価できるという点ですぐれた特色を持つ．

(2)合意形成型費用配分法は，委員会の評価値を優先させる場合$(F_i \geq E_i)$において，残余便益比により個人合理性基準と重み費用とを内分する点を配分解として規定する解であり，重み費用が外部支配性を有している．

(3)要因ごとの比較値には，アンケートのばらつきが見られたが，重みベクトル値そのもののばらつきは小さく安定している．

(4)協力ゲーム理論における代表的な配分解である仁は，コアの成立が条件であり，現実の問題への適用には制約が多い．また，Shapley値には，配分解自体に安定性（ナッシュ均衡点）が確保されなことが明らかとなった．

(5)合意形成型費用配分法における配分解は，ゲーム理論における個人合理性基準を満足する解であり，その配分解は，ナッシュ均衡解であり安定性を有する配分解である．また，一方のプレーヤーがプロジェクトの推進に強い意欲がある場合には，合意形成型費用配分法は特に有用であると考えられる．

**参考文献**：


1)藤村秀樹，溝上章志，柿本竜治，：合意形成型費用配分モデルに関する研究，土木計画学研究・論文集，No. 14，pp35-42，1997. 9

2) JamesP. HeaneyandRobertE. Dickinson, MethodforApportioningtheCostofaWaterResourceProject. WaterResourcesResearch，Vol. 18，No3，pp476-482, 1982. 6

3)鈴木光男，武藤滋夫，協力ゲームの理論，UP応用数学選書，pp43-53


A Game-theoretic Analysis on the Formed Agreement Cost Allocation Model for the Connecting Bridge Project


Hideki Fujimura，Shoshi Mizokami and Ryuji Kakimoto



Recently，from the view point of financial readjustment，both the Central and the Local Government want to reexamine the construction system of Infrastructure. Now，many of the businessman want to make a new allocation system that is recognized by the society that is equity and fair. So，we proposed the Formed Agreement cost-allocation Model for the project composed several sections. This allocation system has a special function that can accommodate the participation's opinion. In this paper，we analysis the elemental factor and try to Game-theoretic analysis to understand the quality of the solution on this proposed cost-allocation model. To illustrate the property of this model，We picked up the case study，the access to the Hibiki New Port in Kitakyushu City，that is recognized as an international leading port by the Ministry of Transport. And we want to construct the Connecting Bridge by use of this model on the point of P.F.I.(Private Finance Infrastructure).



***Keywords***: Infrastructure，Cost-Allocation，Game's Theory, P.F.I.