

公共工事のサプライチェーンへの ブロックチェーン技術を活用したシステム導入 に伴う費用分担に関するゲーム論的考察

後藤 大輝¹・小澤 一雅²

¹シンプレクス株式会社 (〒105-6319 東京都港区虎ノ門1-23-1虎ノ門ヒルズ森タワー19階)

Email: goto.d@simplex.ne.jp (Corresponding Author)

²フェロー会員 東京大学大学院特任教授 工学系研究科 (東京都文京区本郷7-3-1)

Email: ozawa@civil.t.u-tokyo.ac.jp

公共工事のサプライチェーンで活用する情報システムを社会実装するにあたり関係者間の合意形成を行うには、各利害関係者が個別に負担する費用に加え、開発や運用にかかる費用分担は、発注者、元請、下請の各主体によって公平かつ経済合理的に実現される必要がある。本論文では、ブロックチェーンとスマートコントラクト技術を活用した施工管理情報システムを対象に、その開発や運用に関する費用分担の在り方を検討することを目的として、協力ゲーム理論に基づき、提携順序に時間的前後関係を考慮した加重シャープレイ値と順序仁を公共工事のサプライチェーンに適用し、費用分担の公平性と経済合理性を評価した。その結果、加重シャープレイ値を用いたモデルは、適切な配分手法となり得ることを示した。

Key Words: blockchain, smart contracts, cost allocation, game theory, supply chain

1. はじめに

我が国の生産年齢人口の減少が予想されている中、建設分野の生産プロセスにおいて、その生産性を向上すべく i-Construction が提唱されている。ICT 技術等を活用したデジタルトランスフォーメーションが進められており、近年特にブロックチェーンやスマートコントラクト技術の活用可能性が注目されている。ブロックチェーン技術は、分散的に配置されたノードがチェーン状に連なった一連のデータブロックを同期することで、耐改竄性、トレーサビリティ、(事実上の)ゼロ・ダウンタイムを実現し、国家や大企業といった中央集権的権威主体を介さずに信用の担保を可能にする技術である¹⁾。またそのブロックチェーン上にスマートコントラクトをデプロイ(実装)することで、デジタル・コントラクト(電子契約)を用いた契約の締結や履行を、実質的に改竄不可能なプログラムとして自動実行処理することが可能となる²⁾。

これらの技術や仕組みを公共工事のサプライチェーンに対して適用することで、検査業務の効率化とそれに基づく代金支払の自動化が実現できると注目されており、将来の施工情報管理システム(以下、本システム)とし

て研究開発が進められている³⁾。

しかしながら、本システムの導入を視野に入れた場合、その検討、試行、開発、実用の各段階において検討が必要な一般的な課題として、事業スキームの検討、費用分担方法の検討、資金調達方法の検討、組織及びガバナンス等が存在する。本論文ではこの中で特に、投資意思決定の観点から重要な費用分担方法の検討について取り上げる。

本論文では、本システム実装にあたり関係者それぞれがシステム導入に伴う費用を個別に負担するだけでなく、連携して運用するシステムの開発と運用に伴う共同費用の分担を考慮した上で合意形成を行う必要があることに着目し、その分担の在り方を検討することを目的としている。ここでの費用分担は、応益負担や応能負担が考慮されているかという「公平性」の観点と、配分後の便益と費用がバランスしているかという「経済合理性」の観点で検討する必要がある。

本論文では、協力ゲーム理論に基づき、費用分担の在り方を検討すると共に、その費用分担モデルの有効性を検証するために、国土交通省地方整備局が発注する工事を対象に配分結果を定量的に分析する。

2. はじめに

本システムは、許可されたノードのみが参画可能な「コンソーシアム型ブロックチェーン」を基調とし、発注者、元請業者、下請業者の各整備局事務所や企業から成るサプライチェーン上のネットワークを想定する。本システムの概要は図-1のようになっており、ここでブロックチェーン・スマートコントラクト技術により可能なことは以下の3点である。

- 1) 設計・施工・検査情報の入力値に応じた電子契約書の発行及び執行
- 2) 出来高・出来形等の施工情報に応じた代金支払の自動執行
- 3) データハッシュ値の記録によるデータの改竄防止とトレーサビリティの実現

また、本システムの利害関係者として、発注者、元請業者、下請業者を設定し、各利害関係者への影響因子を整理したのが表-1である。以下 a)~g)では各項目の概略を説明する。

a) キャッシュフロー改善による金融費用の削減

本システムにより支払いが自動化されることで、日払い・週払いを基本とした出来高部分払いが可能となり、売掛金回転期間が短縮するため、手形やファクタリング等による手数料や割引費用等の金融費用が削減される。

b) 検査業務自動化による業務コスト削減

検査が自動化されることで、検査・監督職員による現場での検査・監督業務及びそのために必要な歩掛り測定と書類作成が不要になるため、人件費や事務コストが削減される。

c) 法的責任の主体の追及リスク低減

土木構造物の施工中もしくは施工後に何らかの不備が認められた場合、発注者は会計検査における不当事業として扱われ発注責任を問われるケースがあり、元請業者は粗雑工事として扱われ瑕疵担保責任を問われるケースがあるが、このリスクがブロックチェーンの耐改竄性、トレーサビリティ等の特性により低減する。

d) 既存制度変更による業務コストの費用負担

本システムの新規導入にあたり必要な、公共工事における制度・基準変更の事務的コスト。

e) システム研修による教育コストの費用負担

既存システムからの移行時に発生する検査職員や現場監督職員に対する研修等の教育コスト。

f) ブロックチェーン・ノード運用コスト

ブロックチェーンネットワークに参加するにはトランザクションの発行及び保存データの検証を目的とするノードとしてネットワークに同期する必要がある、そのノード運用コスト。

g) システム開発・運用コスト

本システムの開発・運用にかかる費用。この費用は特定の利害関係者が単独で負担するのではなく、参加関係者が分担して負担する。

これらの便益・費用に関して a)~f)は利害関係者ごとに個別に発生する項目であり、g)は利害関係者間で共同負担する項目である。したがって本論文では、この共同費用の配分を公平かつ経済合理的に行う手法を考える。

3. 費用分担に関する既往の研究

公共事業における費用配分の慣用的な手法に関しては、特に水資源開発において歴史的な実績と経験的な有用性が高く評価された手法が存在する⁹⁾。共同事業費から分離費用を差し引いた残余共同費を身替わり建設費または妥当投資額のうち少ない方の額により按分する「分離費用身替わり妥当支出法」は特定多目的ダム法施行令で定められている。



図-1 新施工情報システムの概要図

表-1 各利害関係者と影響因子の整理

影響		発注者	元請業者	下請業者
便益 B	a. キャッシュフロー改善による手形発行等の金融費用の削減	-	○	○
	b. 検査業務の自動化による実地検査と書類作成の業務コスト削減	○	○	-
	c. 瑕疵や施工不良による法的責任を追及されるリスクの低減	○	○	-
費用 C	d. 既存制度を変更する業務コストの費用負担	○	-	-
	e. システムの研修にかかる教育コストの費用負担	○	○	-
	f. ブロックチェーン・ノード運用にかかる個別費用	○	○	○
	g. システムの開発と運用にかかる共同費用	共同費用を分担		

また、分離費用身替わり妥当支出法等の慣用的手法をゲーム論的に考察した研究⁹⁾が行われている。中でもダム事業の優先度支出法をゲーム論的観点からモデル化し、水資源開発事業への参加者の提携において、時間的優先性の違いを参加順序の差として取り入れた手法⁹⁾は、同様にシステムへの参画が、発注者／元請→下請の順で時間的前後関係の基に実現する本システムでの提携においても適用の可能性がある。したがって、次章においてはこれらのモデルの適用可能性を検討する。

ゲーム理論の適用にあたっては、経済効率性や参加者間の公平性、収支均衡性や提携参加へのインセンティブのモデル化が必要であり⁷⁾、特に本論文では公平性と経済合理性という2つの観点から費用配分手法の評価を行った。

4. 費用分担の基本モデルの選択と定式化

(1) 本システムの特徴と適用モデル

適用する費用分担モデルを考えるにあたり、本システムに関して考慮すべき特徴を整理する。

a) 提携の時間的前後関係や実現可能な提携の制約

本システムは建設業のサプライチェーンの構造上、下請が率先してシステム導入への提携を行うことは考えにくく、そのインセンティブも乏しい。図-2を見ると、本システム実現には発注者と元請の合意形成が不可欠であり、構造的に下請が時間差で提携するシナリオが現実的である。

b) 利害関係者間における効用の依存関係

本システムから得られる効用は、ブロックチェーンの技術的特性上、利害関係者間で互いに依存し合っており、単独でシステム構築するメリットが乏しいという特徴がある。例えば、代金支払の自動化による便益は、元請の単独提携では代金を支払う側の発注者が本システムを導入していないので、その便益自体が発生し難い。また、検査の自動化による便益でも、発注者の提携無くしては検査主体が不在のため、便益そのものが実現し得ない。したがって、表-1に示した各項目は利害関係者間の提携を前提に成立するものが存在する。

提携順序に優先性が存在する費用分担モデルとして、協力ゲーム理論の加重シャープレイ値と順序仁による配分手法が岡田ら⁹⁾により提案されている。

モデル適用にあたり、本システムにおいてはまずプロジェクト単位での適用を考え、その後産業全体に拡張することを考える。またプロジェクトでは、発注者、元請、下請から成る3人ゲームを仮定し、その後実際のサプライチェーンの階層構造を考慮するため、 n 人ゲームに拡張することを考える。さらに、費用分担モデルを特

性関数形ゲームによって定式化するにあたり、利害関係者間での効用が互いに依存関係にあることから、成瀬・前田⁹⁾を参考に特性関数は便益から費用を差し引いた利得と定義する。

(2) 基本モデルの定式化

まず、加重シャープレイ値、順序仁を用いた配分解を定式化する。

本システムに参加する任意の主体(プレイヤー)を i とし、主体の集合を $N = \{1, 2, \dots, n\}$ で表す。任意の主体から成る N の任意の部分集合を提携と呼び、これを S で表す。 N を全体提携、 $\{i\}$ を単独提携と呼び、任意の提携の特性関数を $v(S)$ と表す。また、任意の提携における各主体の便益の合計を $B_i(S)$ 、費用の合計を $C_i(S)$ と表すと、提携における便益及び費用の合計として $B(S) = \sum_{i \in S} B_i(S)$ 及び $C(S) = \sum_{i \in S} C_i(S)$ と表される。したがって、特性関数は上記の定義より $v(S) = B(S) - C(S)$ と表される。さらに、 $C_i(S)$ の中で各主体が独立に負担する費用を $c'_i(S)$ 、共同費用の主体 i の負担分を $c_i(S)$ と表し、主体 i が提携 S から独自に享受できる効用 $u_i(S)$ として $u_i(S) = B_i(S) - c'_i(S)$ と定義すると、特性関数は、 $v(S) = \sum_{i \in S} u_i(S) - c(S)$ と定義でき、個別に発生する便益マイナス費用の和と、共同費用の合計の差分として表すことができる。これを図示したのが図-3である。

また、主体の参加順序はゲームの順序提携構造で表すことができる。すなわち $N = \{1, 2, 3\}$ の3人ゲームにおいて ϕ の状態から各主体が1, 2, 3の順に参加する時、その過程における提携として $\phi, \{1\}, \{1, 2\}, N$ が形成されることになる。したがって、本論文ではこれらを「実行可能な順序提携構造と呼び、集合族 F で表す。

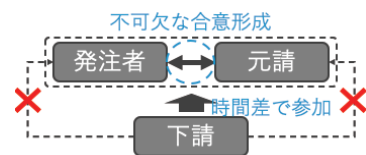


図-2 利害関係者間の提携における関係性

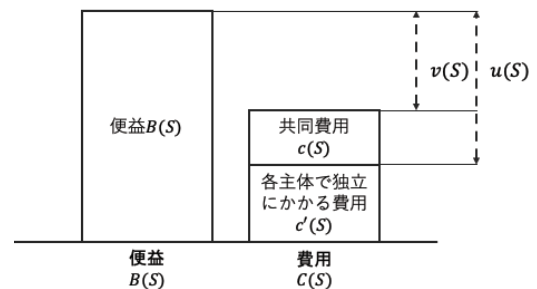


図-3 便益及び費用に関する変数の定義（提携 S ）

$$F = \{\phi, \{1\}, \{1,2\}, N\} \quad (1)$$

シャープレイ値は協力ゲーム理論の特性関数形ゲームにおける配分解の1つであり、全提携 N を形成する過程において、各主体の参加順序を考慮する。配分は、各主体が提携に最後に参加する際に生じる限界利得を割り振ることを考え、全体提携が成立する過程は $n!$ 通り存在することから、その期待値を求めた解がシャープレイ値となる。すなわち任意の主体 i のシャープレイ値は次式で表される。なお N 及び S に含まれるプレイヤー数を n 及び s で表す。

$$\phi_i = \sum_{i \in S, S \subset N} \frac{(n-s)!(s-1)!}{n!} \cdot \{v(S) - v(S - \{i\})\} \quad (2)$$

シャープレイ値は各主体の提携に対する限界貢献度（ここでは利得）の期待値を考慮しており、この時の提携順序の各過程は等確率に生起するものとして扱っている。すなわち、 $n!$ 通り存在する提携過程を等価に扱っており、特定の提携の起こりやすさや実現可能性等は考慮されていない。

これに対し、参加順序の各過程において任意の確率を与えることでシャープレイ値を拡張した加重シャープレイ値が提案されており、次式で表される。

$$\phi_i = \sum_{i \in S, S \subset F} p(S, S - \{i\}) \cdot \{v(S) - v(S - \{i\})\} \quad (3)$$

ただし、 $p(S \cup T, T)$ は、任意の提携 $S, T (S \cap T = \phi)$ に対して、提携 T が参加した上で、その後に提携 S が参加する過程の生起確率を表している。 $p(S \cup T, T)$ の値が大きい程、それに対応する参加順序で形成される提携の相対的比重が高くなるように期待配分量が算出される。

一方で、仁も特性関数形ゲームにおける配分解の1つであり、配分の解ベクトルを $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ とした時の任意の提携 S に対する「不満」 $e(X; S)$ を考える。この時仁は任意の提携に対する最大の「不満」を最小化することで得られ、次式で表される。

$$e(X; S) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (4)$$

$$\max_{S \subset N} e(X; S) \rightarrow \min \quad (5)$$

仁における「不満」を参加順序の観点から解釈すると、 ϕ に提携 S が参加する際の「不満」であると考えられる。これは全ての提携を ϕ から形成することを考慮し

ており、特定の提携の実現可能性は考慮されていないため、起こりえない提携過程の不満を考慮していると考えることができる。

これに対し、順序仁は $v(S)$ （ここでは $v(S) - v(\phi)$ と考えることができる）を $v(S \cup T) - v(T) (\forall T \in F, S \cap T = \phi)$ とすることで、考え得る提携過程のみの不満を考慮した配分解である。したがって次式のように定式化することができる。

$$e'(X; S, T) = \{v(S \cup T) - v(T)\} - \sum_{i \in S} x_i \quad (6)$$

$$(\forall S \subset N, S \cap T = \phi, T \in F) \quad (7)$$

$$\max_{S \subset N, T \in F} e'(X; S, T) \rightarrow \min \quad (8)$$

(3) モデルの適用

次にこれらのモデルの適用を考える。先述したように、まずプロジェクト単位での3人ゲームでの適用を考え、発注者、元請、下請をそれぞれプレイヤー A, B, C と対応させると、プレイヤーの集合は $N = \{A, B, C\}$ となる。

ここで考え得る全体提携の形成過程を図4で表す。提携の形成は基本的に発注者又は元請から起こり、その後下請による単独又は残りの主体との共同での参加のみが実行可能だと想定する。また図中において $o_j (j = 1, 2, \dots, 5)$ は参加順序の各過程の認識番号であり、 $p_j (j = 1, 2, \dots, 5)$ はそれに対応する形成過程の生起確率である。但し、 $\sum_j p_j = 1$ である。なお図中で初期状態 ϕ は省略している。この時実行可能な順序提携構造は $F = \{\{A\}, \{B\}, \{AB\}, N\}$ である。

以上のような問題設定から加重シャープレイ値を求めるにあたり、シャープレイ値の定義より各主体の提携は単独での参加のみを考える。つまり、ある提携状態から複数主体が同時に参加することを想定しない。したがって、 $p_3 = p_4 = p_5 = 0$ である。よって、式(9)のように加重シャープレイ値が得られる。なお単独提携や空集合では、本システムの特性上効用 $u(\{i\})$ や共同費用 $c(\{i\})$ は0であるから、 $v(A) = v(B) = v(C) = 0$ かつ $v(\phi) = 0$ となる。

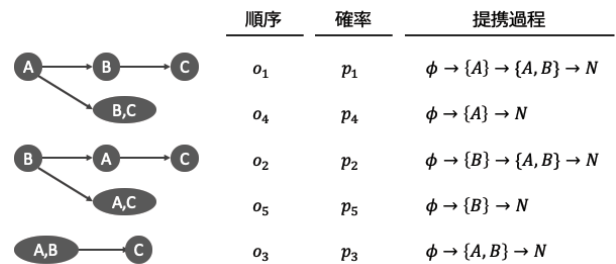


図4 3人ゲームにおける実行可能な提携形成過程

$$\begin{cases} \phi_A = (1 - p_1) \cdot v(AB) \\ \phi_B = p_1 \cdot v(AB) \\ \phi_C = v(N) - v(AB) \end{cases} \quad (9)$$

次に順序仁を求める。 $e'(X:S)$ の最大値を M とし「最大不満」と定義する。この時実行可能な図-4における提携過程の不満のみを考慮すると、 M について式(10)の不等式を得る。

$$\begin{cases} M \geq \frac{1}{2} v(AB) \\ M \geq 0 \\ M \geq \frac{1}{3} v(AB) \end{cases} \quad (10)$$

したがって $v(AB) > 0$ を仮定すると、これらすべてを満たす最小の M は $M = \frac{1}{2} v(AB)$ となり、これは下請の提携参加とは独立であることがわかる。よって、順序仁による配分は式(11)で表され、これは、加重シャーププレイ値による配分における $p_1 = \frac{1}{2}$ の時の解と同じであることがわかる。

$$\begin{cases} x_A = \frac{1}{2} v(AB) \\ x_B = \frac{1}{2} v(AB) \\ x_C = v(N) - v(AB) \end{cases} \quad (11)$$

5. 本システムの特徴を考慮した費用分担モデルの構築

(1) 公共工事サプライチェーンを考慮した n 次下請構造への拡張

ここまでプロジェクト単位での発注者、元請、下請

から成る 3 人ゲームについてその配分を考えてきたが、実際のプロジェクトにおいて、下請は契約関係に基づく階層構造を成す。発注者と直接契約を結ぶ元請業者の下には、工事の一部を請け負う一次下請業者、さらにその一次下請の業務の一部を請け負う二次下請業者以下が存在し、これら建設工事そのものの請負業者とは別に測量業者、資材業者、運搬業者、警備業者等が存在している。

このようなサプライチェーンを考慮すると、二次下請の提携順序は必ず一次下請の提携の後に起きることが分かる。これは二次下請が元請や発注者と直接提携を組むことは考えにくいためである。したがって、下請の提携はその階層構造に沿った提携順序を考えることができ、より一般的に n 次下請まで考えた場合においても、より契約の上流の業者から順に提携していくと考えられる。これをモデル化するためにまず二次下請以下の下請を一括りにして、図-5 のような 4 人ゲームへの拡張を考える。ここでは一次下請業者を一括りにしてプレイヤー C と置き、二次下請業者以降をまとめてプレイヤー D と置く。ここで考え得る提携過程は図-6 に示す。

このような問題設定から改めて加重シャーププレイ値を求める。シャーププレイ値の定義上、提携への参加は単独での参加のみを考慮することを踏まえると、式(12)、(13)の 2 つの提携過程のみを考慮することになる。

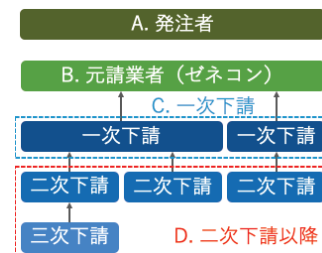


図-5 サプライチェーン構造を考慮した 4 人ゲームの概略図

提携遷移	順序	確率	提携過程
	o_1	p_1	$\phi \rightarrow \{A\} \rightarrow \{A, B\} \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$ $\phi \rightarrow \{A\} \rightarrow \{A, B\} \rightarrow N$
	o_5	p_5	$\phi \rightarrow \{A\} \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$ $\phi \rightarrow \{A\} \rightarrow N$
	o_2	p_2	$\phi \rightarrow \{B\} \rightarrow \{A, B\} \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$ $\phi \rightarrow \{B\} \rightarrow \{A, B\} \rightarrow N$
	o_6	p_6	$\phi \rightarrow \{B\} \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$ $\phi \rightarrow \{B\} \rightarrow N$
	o_3	p_3	$\phi \rightarrow \{A, B\} \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$ $\phi \rightarrow \{A, B\} \rightarrow N$
	o_4	p_4	$\phi \rightarrow \{A, B, C\} \rightarrow N$

図-6 4 人ゲームにおける実行可能な提携形成過程

$$\phi \rightarrow \{A\} \rightarrow \{AB\} \rightarrow \{ABC\} \rightarrow N \quad (12)$$

$$\phi \rightarrow \{B\} \rightarrow \{AB\} \rightarrow \{ABC\} \rightarrow N \quad (13)$$

それぞれの生起確率を p_1 及び p_2 とすると加重シャープレイ値は式(14)で表される。但し、 $p_1 + p_2 = 1$ である。ここで、 $\phi'_C = \phi_C + \phi_D$ とすると、 ϕ'_C に関して式(15)が成り立つ。

$$\begin{cases} \phi_A = (1 - p_1) \cdot v(AB) \\ \phi_B = p_1 \cdot v(AB) \\ \phi_C = v(ABC) - v(AB) \\ \phi_D = v(N) - v(ABC) \end{cases} \quad (14)$$

$$\phi'_C = \phi_C + \phi_D = v(N) - v(AB) \quad (15)$$

したがって、一次下請Cと二次下請以降Dを合計したシャープレイ値は、3人ゲームにおける下請Cの加重シャープレイ値と等しくなる。つまり、3人ゲームにおける下請を分割して4人ゲームに拡張しても、参加する下請全体で見た場合、そのシャープレイ値の合計は同じになる。

これは4人ゲームにおける順序仁についても同様である。したがって、 n 次下請構造では下請を一括りにして3人ゲームに帰着できることが明らかになった。したがって、モデルでは下請におけるサプライチェーン構造を下請の集合に集約することで、発注者、元請、下請への費用分担を考えることとする。

(2) モデルの産業全体への拡張

最後に、ここまでプロジェクト単位でのモデル化を考えてきたため、産業全体への拡張を考える。公共工事のサプライチェーンを考えた場合も先述したような階層構造があることは同様である。それに加え、提携に関して地域的な限定性や工種による制限が存在する。つまり、互いに離れた地域における業者同士の契約関係は考え難く、下階層ほど地域的な提携の限定性が発生する。また、下階層ほど専門性が高くなるため、特定の工種や特定の業者との提携以外考え難い。このような制約が存在するため、プロジェクト単位での費用配分モデルを直接適用することは現実的ではない。したがって、モデルの単なる線形拡大ではなく、非線形に連続的に拡散していくモデルを適用することでそのような制約を内包的に考慮することを考える。

この拡散モデルを考えるにあたり、システムの産業全体への導入がプロジェクト単位での導入の連続によって実現されると考える。図-7で示すように、プロジェクトにおける3主体全員が、本システムの導入に未経験の状態から出発し、次のプロジェクトでは、それらの主体

がシステム導入を経験済みの状態で参加することになり、時間経過とともに導入経験済み主体が増大していくようなモデルを考える。つまり、前回プロジェクトでシステム導入を経験した主体は次プロジェクトでは即座に提携を組むことを考え、プロジェクト単体でのゲームが連続し、最終的に経験済主体が全体を占めると想定する。

このような拡散モデルを定義すると、各プロジェクト開始時の状態として図-8の5通りを考えることができ、各Caseがどの程度の確率で存在しながら拡散していくかを考えることに帰着できる。ここでこのモデルを「段階拡散確率モデル」と呼び、Case j の生起確率 q_j から加重シャープレイ値における提携形成過程の生起確率 p を求めると表-2のようになる。なお、提携形成過程の確率を考慮するのは加重シャープレイ値のみであるため、順序仁ではこれは考慮しない。また加重シャープレイ値における提携過程は単独での参加を前提とするため、計算

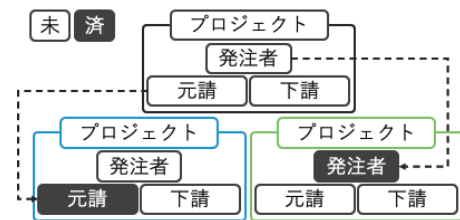


図-7 プロジェクト単位での段階拡散のモデル化

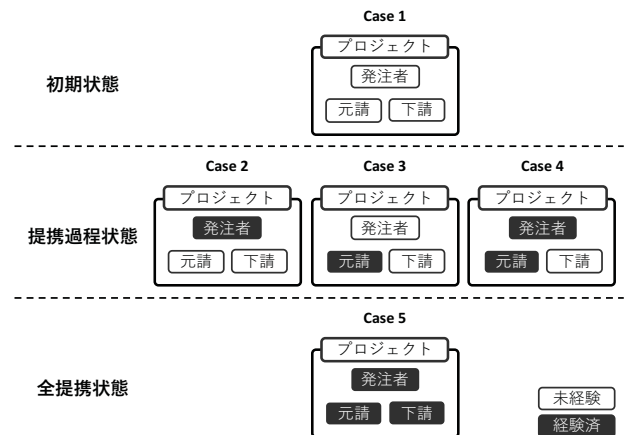


図-8 プロジェクト開始時の想定し得る状態種類

表-2 各Caseの確率と各提携過程の生起確率

	θ_1	θ_2	確率 q_j
Case 1	0.5	0.5	0.05
Case 2	1.0	0	0.9
Case 3	0	1.0	0.05
確率 p_i	0.925	0.075	1.0

表-3 各便益・費用の算出方法

	影響	発注者	元請業者	下請業者
便益 B	a. キャッシュフロー改善による手形発行等の金融費用の削減	-	各企業の支払手形発行にかかる金融費用を企業の財務データから算出	工事業ごとに手形の受取による金融費用(割引費用等)を算出
	b. 検査業務の自動化による実地検査と書類作成の業務コスト削減	検査・監督業務により発生する実地検査に要する業務コストを算出	実地で行う検査・監督とその資料作成等にかかる業務コストを算出	-
	c. 瑕疵や施工不良による法的責任を追及されるリスクの低減	法会計検査報告で不当と認められた工事の金額と発生頻度から算出	認められた工事の金額と発生頻度から算出	粗雑工事等で指名停止になった場合の被害額と発生頻度から算出
費用 C	d. 既存制度を変更する業務コストの費用負担	過去の制度変更を参考に制度変更にかかる人件費等を算出	-	-
	e. システムの研修にかかる教育コストの費用負担	検査を行う課長職相当以上の全職員への教育費用(人件費)を算出	検査に立ち会う現場職員への教育費用(人件費)を算出	-
	f. ブロックチェーン・ノード運用にかかる個別費用	トランザクションと検証を行うノードにかかるサーバーバコストを算出	トランザクションと検証を行うノードにかかるサーバーバコストを算出	トランザクションのみを行うノードにかかるサーバーバコストを算出
	g. システムの開発と運用にかかる共同費用	開発費: システム要件を満たす開発工程に必要なエンジニア資源から算出 運用費: 開発費と運用費のバランスを考慮した必要なエンジニア資源を基に算出	開発費: システム要件を満たす開発工程に必要なエンジニア資源から算出 運用費: 開発費と運用費のバランスを考慮した必要なエンジニア資源を基に算出	

上 Case4 は Case2 及び 3 に含めた。さらに、 q_j の推定にあたり、国土交通省関東地方整備局では年間 946 件の落札工事を 45 事務所で処理している点、元請はその件数の工事を年間 400~500 社程度が受注している点から、元請に比べ発注者の方が本システムの導入意思決定に参加する頻度が極めて高いことを考慮し、各 Case1,2,3 が 0.5:9:0.5 程度の割合で発生し得ると仮定して定量化した。なお、割合の算出に当たって用いた数値は、国土交通省関東地方整備局が公開する「建設工事の入札結果データ(平成 30 年度分)」を参照した。工事件数は落札工事を、事務所数は各工事の担当部局を、受注元の元請企業数は入札業者を、それぞれ重複を除いて合計して算出している。

6. モデルの有効性の検証

公共工事の代表として国土交通省関東地方整備局発注の 3 工種(鋼橋上部工事、PC 橋上部工事、築堤工事)を抽出し、構築したモデルの有効性を検証した。便益及び費用の算出根拠を示す。

表-3 は各便益・費用の算出方法をまとめた表である。各影響因子の算出方法を以下で説明する。

a) キャッシュフロー改善による金融費用の削減

まず、元請が従来支払手形の発行に支払っていた振出手数料が、本システムの導入によりどの程度削減可能かを算出した。企業の貸借対照表より算出した支払

手形・借入金・現金預金の割合が、その企業の工事代金調達方法の割合と一致すると仮定し、手形振出手数料を算出した。この時、(一社)全国銀行協会「2019 年度版決済統計年報」によると、手形発行 1 回あたりの平均発行額が 5,806 千円であること、国税庁が定める印紙税額の一覧表(国税庁, 2020)によると、その額の手形発行にかかる印紙税額は 2,000 円であることを用いて算出した。

一方で、下請は手形受取時に発生する追加費用として、手形管理費用、手形割引費用を算出した。こちらも企業の貸借対照表より算出した受取手形・現金の割合が、その企業の工事代金受取方法の割合と一致すると仮定し、手形受取手数料を算出した。この時、手形発行 1 回あたりの管理手数料は 3,000 円、割引手数料率は、2009 年以降短期プライムレートの最頻値 1.475% にクレジット・スプレッド 2.0% を加えた 3.4735%、手形サイトは、国土交通省「平成 26 年度構造実態調査の調査結果」によると躯体工事業の平均値が 115.15 日であるため、一律 120 日とした。

b) 検査業務自動化による業務コスト削減

まず、発注者・元請が検査・監督業務で行う実地検査の際に発生する業務コストを算出した。これは現場に臨場する品質証明員の臨場コストと考えられるため、以下の式(16), (17)を用いて求めた。当式は、(国土交通省「施工者と契約した第三者による品質証明業務運用ガイドライン(案)」における算出方法を一部修正している。

$$C = DP \quad (16)$$

$$D = t/7(\text{日}) \cdot 3(\text{回/週}) \cdot 0.25(\text{人日/回}) \quad (17)$$

C : 第三者による品質証明に係る費用

D : 臨場日数, P : 基準日額, t : 工期

ここでは、2時間/日に渡る臨場業務を週3回実施すると仮定し、基準日額は、発注者については、国土交通省大臣官房技術調査課「平成31年度設計業務委託等技術者単価について」における設計業務委託等技術者単価の技師Bの日額を、元請は多くの場合、派遣社員が臨場することが多いため16,000円とした。また、工期の算出には平成30年度関東地方整備局工事の受注額と工期の関係性を求め、工種ごとに線形な関係性があることに着目し、発注者の発注額、元請の受注額より工期を推定した。

一方、元請については臨場コストに加えて実地検査の資料作成等にかかる業務コストも算出した。これは書類作成時間を作成書類枚数に置き換え、1枚あたりの平均作成時間を15分とした。工種により必要書類が異なり、工事資料の開示請求結果から橋梁上部工事は土工事系工事に比べ、3倍の作成書類があったことを考慮して必要書類枚数を推定した。

c) 法的責任の主体の追及リスク低減

発注者は、会計検査報告で不当と認められた工事の金額と発生頻度から期待損失額を求め、それがシステムにより低減すると考える。会計検査院が公表する平成11年度～平成30年度の不当事項を整理すると直轄工事の不当事項は平均1.167件、不当事業費は60,657千円である。この件数は直轄工事の件数13,399件⁹⁾のうち0.00871%であり、この確率分布がポアソン分布に従うとして期待コストを算出した。

一方元請は、粗雑工事等により指名停止になった場合の被害額と発生頻度から期待損失額を求め、それがシステムにより低減すると考える。関東地方整備局が公表する平成29年～平成31年の指名停止業者とその事由の中から「不正又は不誠実な行為」「過失による粗雑工事」のうち本システムによる便益となりうる項目を抽出すると対象工事は5件、その平均業務停止期間が1.7ヶ月であった。平成30年度の関東地方整備局の工事件数が1,047件⁹⁾なので、発生確率は0.16%であり、したがって、指名停止期間の期待値が0.054日となる。元請企業の完成工事高にこの日数を乗じた額を指名停止コストとした。

d) 既存制度変更による業務コストの費用負担

本費用負担は、過去の類似の制度変更の事例を基に、そのプロセスに関わる主体と期間を参考に推定した。過去の事例として「出来高部分払方式」と「第三者品質証明制度」の議論プロセスを参考にし、それぞれ議論開始から実施開始まで5年4ヶ月、8年2ヶ月であった。これらの期間は、国土交通省国土技術政策総合研

究所社会資本マネジメント研究センター「社会資本システム研究室」HPの情報を参照し算出している。本システム成立において変更の必要がある制度・基準は「会計法」「監督技術基準」「検査技術基準」「出来高部分払要領」とブロックチェーンを利用した施工マネジメント促進に関する新基準である。したがって、ここでは「年次20年目程度の国土交通省国土技術政策総合研究所の研究官が30%程度の業務量でおよそ10年の年月をかけて実装可能な制度」であると仮定し、人事院給与局が公開する給与¹⁰⁾を参考に人的コストを算出した。

e) システム研修による教育コストの費用負担

本システムは基本的に従来の書類業務を電子化し自動化するものであるため、新たな検査手法の習得等は生じない。実際、現場職員はシステム・ユーザインターフェイスの使用法の習得のみが必要であり、それに要する時間は長くない。実際にプロトタイプを用いた本システムへの理解度に関する実証実験を行ったところ、1時間半にわたるワークショップの結果、参加者より「手間がない」等の発言が得られていることから、ここでは1時間半程度の研修を行うことを想定した。この時間を、発注者は課長職相当以上の事務所職員の機会費用を人事院が公開する給与¹⁰⁾を基に、元請は全現場職員の機会費用を有価証券報告書の平均給与データを基に算出した。なお、ヒアリングにより国土交通省関東地方整備局では対象職員は405人程度と推定される。

f) ブロックチェーン・ノード運用コスト

発注者、元請は、トランザクションと検証を行うノードにかかるサーバコストを算出した。下請は、検証を行わないため、トランザクションノードのみのサーバコストを算出した。Azure Blockchain Serviceを用いてプロトタイピングを行なったため、その結果から推定して算出した(表4参照)。

g) システム開発・運用コスト

開発費は、システム要件を満たす開発工程に必要なエンジニア資源から算出した。エンジニア資源は、大手ベンダ各社の一定レベル以上のスキルを有するSE標準価格(日本電子計算機株式会社(JECC)に登録されたSE単価を参照)として210.0万円/月を使用した。運用費は、開発費との割合から算出した。

表4 Azure Blockchain Serviceを用いたノード同期コスト

コスト種別	課金モデル
ノードコスト	メンバ数×ノード数
	×0.5936(単価)×43,800(月換算)
ストレージコスト	メンバ数×ノード数
	×ストレージ容量×5,600円

日本情報システム・ユーザー協会「企業 IT 動向調査 2018」より、同会員企業の IT 予算に占める開発費と保守運用費の平均額の比率は 45 対 55 である。すると、開発費は開発期間 2 年間で 1,769 百万円（年間 884.5 百万円）、運用費は年間 1,081 百万円であった。同協会が会員企業 715 社に対して行った「企業 IT 動向調査 2018」によると、IT 予算に占める年間開発費の平均額は 935 百万円であることから、数値は概ね調査結果に近い。詳細な内訳は付録を参照。

以上より国土交通省の全地方整備局が発注する工事における各影響項目の便益・費用の推定値を算出すると表-5 のようになる。なお、算出においては工種を橋梁上部工事（鋼橋・PC 橋梁）と築堤工事に限定し、表-5 は鋼橋上部工事について示している。またデータは、関東地方整備局が発注する工事データ及びそれを受注する企業データを用い、それを完成工事高の占める割合に応じて線形拡大し、全国の整備局における推定値を求めた。さらに、各推定値は検討期 2 年、試行期 6 年の後に、開発期 2 年、導入期 2 年、実用期 8 年の計 20 年での実装を仮定し、特に試行期が終了してから 12 年間の NPV を割引率 4% で考慮して値を算出した。

本論文では、ベンチマークとして一般的なシャープレイ値と今回適用する加重シャープレイ値と順序仁を用いた手法を比較する。各手法による $B - C$ すなわち利得の配分結果を図-9～図-11 に示す。

また実際に支払うべき共同費用の負担額を算出する。特性関数は $v(N) = B(N) - C(N) = \sum_{i \in N} u_i(N) - c(N)$ より共同費用の各主体の負担額 $c_i(N)$ は利得の配分解から各主体の効用 $u_i(N)$ を引くことで求められる。その結果を図-12～図-14 に示す。

表-5 各便益・費用算出結果（鋼橋上部工事，単位：百万円）

	影響	発注者	元請	下請
便益	a	-	51	7
	b	9,121	3,464	-
	c	35	98	-
費用	d	-12	-	-
	e	-1	-	-
	f	-7	-7	-2
	g	9,775		

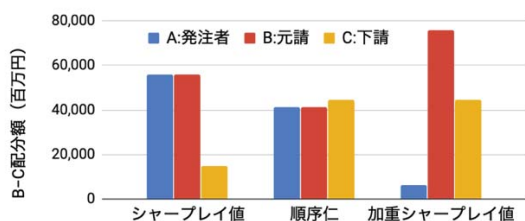


図-9 各手法の利得の配分結果（鋼橋上部工事）

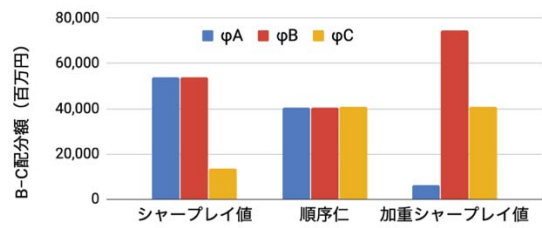


図-10 各手法の利得の配分結果（PC 橋上部工事）

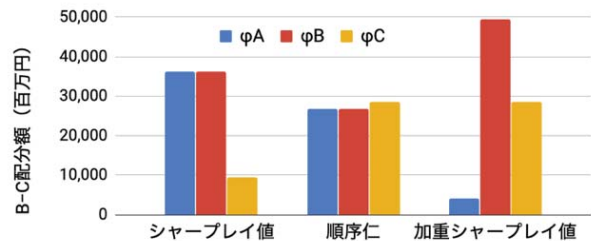


図-11 各手法の利得の配分結果（築堤工事）

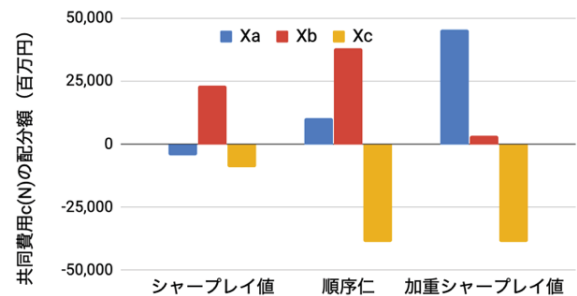


図-12 各手法の共同費用 $c(N)$ の配分結果（鋼橋上部工事）

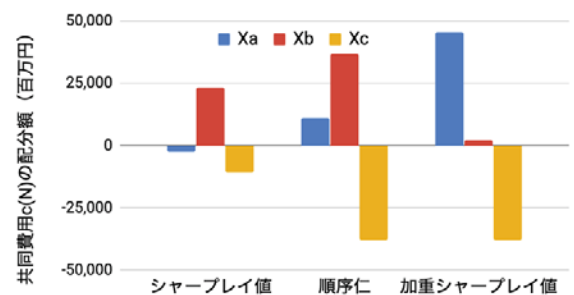


図-13 各手法の共同費用 $c(N)$ の配分結果（PC 橋上部工事）

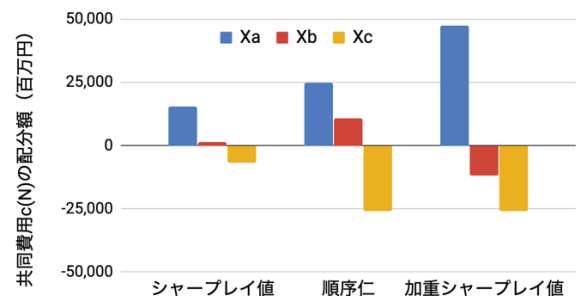
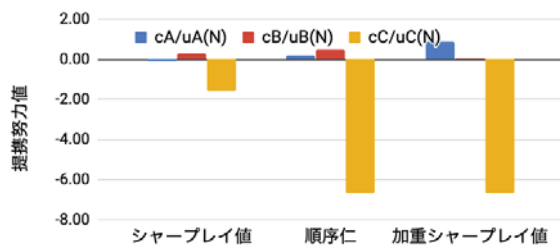


図-14 各手法の共同費用 $c(N)$ の配分結果（築堤工事）

表-6 モデルにおける変数値(工種毎, 単位: 百万円)

変数	鋼橋上部	PC 橋上部	築堤
$u_A(N)$	51,460	51,460	51,460
$u_B(N)$	79,034	77,009	37,609
$u_C(N)$	5,785	4,130	4,130
$u_A(AB)$	35,574	35,574	35,574
$u_B(AB)$	54,963	53,625	26,379
$c(N)$	9,775	9,775	9,775
$c(AB)$	8,471	8,471	8,471

図-15 各手法による提携努力値 $c_i(N)/u_i(N)$
(鋼橋上部工事)

7. 適用結果に対する考察

まず図-9～図-11 に関して利得の配分結果から読み取れる点を考察する。

下請の配分額に着目すると、順序仁や加重シャープレイ値を用いた手法は一般的なシャープレイ値を用いた手法に比べて利得の配分が大きくなっている。これは本システムでは提携過程の実現可能性を考慮しており、特に下請の提携における優先性を相対的に低く考慮しているためと考えられる。

発注者と元請の配分に着目すると、シャープレイ値及び順序仁を用いた手法では互いに配分が同額になっているのに対し、加重シャープレイ値を用いた手法では開きが生きている。

これは前者2つの手法では互いを同等に扱っているためモデルにおいて対称である一方、加重シャープレイ値による配分では双方の提携における優先性の違いを、確率 p を用いて重み付けしているため配分結果にも差が生まれると考えられる。

さらに図-12～図-14 に関して共同費用の配分結果から読み取れる点として、こちらは利得の配分に比べて工種による違いが顕著に出ていることが挙げられる。シャープレイ値及び順序仁を用いる手法では、橋梁上部工事で元請の負担額が最も大きいのに対し、築堤工事では発注者が最も大きい。表-6はモデルを適用した際の各変数の値である。築堤工事の場合は橋梁上部工事に比べて元請の効用 $u_B(N)$ が相対的に小さいことがわかる。これは、元請が享受できる便益のうち検査業務自動化による業務

コスト削減の寄与が大きく、かつ築堤工事のような土工事に比べて橋梁工事の方が、作成書類が多く、業務コストが大きいためである。

したがって、共同費用の配分解が全体提携時の効用 $u_i(N)$ による影響を受けやすいということが言える。つまり、得られる効用が大きい主体ほど共同費用の負担が大きくなる応益負担の原則を反映していることがわかる。これはシャープレイ値及び順序仁を用いた配分においては顕著に見られるが、加重シャープレイ値による配分においても同様である。

また、加重シャープレイ値による配分結果の主体間差異に着目すると、いずれの工種においても発注者→元請→下請の順に負担額が小さくなるという結果を得た。制度・システム成立のイニシアチブを握る主体が実現に対する交渉力を持つこと、税金を投下できる主体は投資の損失に対して民間企業ほど敏感でないことを考えると発注者は負担能力があると言え、その意味において加重シャープレイ値による配分は応益負担の概念が含まれていると言える。

次に、各主体の $c_i(N)/u_i(N)$ という指標を用いて分析する。これを本論文では「提携努力値」と呼ぶこととし、各主体の効用 $u_i(N)$ に対する共同費用の配分額 $c_i(N)$ の割合を表す。この指標は提携による共同費用の配分によって減少した個人の効用を表し、小さい程費用分担に対する貢献度が低く、大きい程貢献度が高いと言える。鋼橋上部工事についてこれを各手法で計算したものが図-15である。

これを見るとまずシャープレイ値による配分では発注者の提携努力値が負になっている。これは民から官への資金の移動を意味し、利益追求志向を前提とした民間企業にとっては賛同しかねる政策だと言え、合意形成の妨げになると考えられる。

また順序仁による配分では発注者及び元請の提携努力値が0を上回っている一方で、元請の方が大きくなっている。これは同様に民の視点では、官である発注者よりも民が努力しなければならないことを意味し、合意形成の場において元請からの抵抗や不満を招く可能性があると考えられる。

したがって、このような立場上の選好を考慮しても加重シャープレイ値は提携努力値の値は適切な値に収まっていると言える。

最後に、費用分担後の B/C について分析を行う。

図-16は鋼橋上部工事に対して各手法を適用した結果として最終的に得られる B/C の値の比較である。なお、シャープレイ値による最終 B/C は発注者の値が478となり違いが見難くなってしまうためグラフからは除外した。また、共同費用の配分額が負になる場合はその絶対値を便益として加算している。

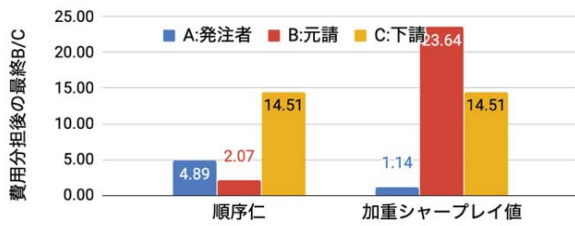
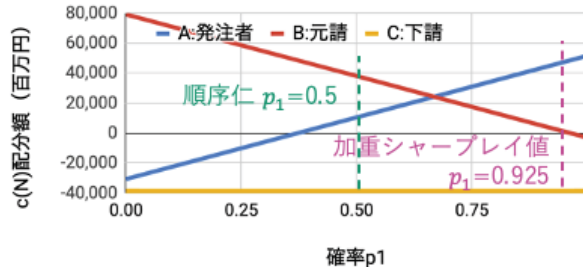


図-16 各手法による最終B/Cの比較 (鋼橋上部工事)

図-17 p の値に応じた共同費用の配分額の変化 (鋼橋上部工事)

これを見ると、両者共に全主体において1を上回っているため、投資判断としては前向きである。また、加重シャープレイ値による配分では、順序仁に対し、値が元請、下請、発注者の順に大きく、民間主体である元請及び下請の投資効率性を優先している経済合理的な配分だと言える。

なお、提携努力値及び最終B/Cについての結果及びその傾向は他工種でも同様に見られた。

1) 提携努力値

- PC 橋上部工…発注者：0.88, 元請：0.03, 下請：-9.19
- 築堤工…発注者：0.92, 元請：-0.32, 下請：-6.25

2) 最終B/C

- PC 橋上部工…発注者：1.13, 元請：30.11, 下請：9.51
- 築堤工事…発注者：1.08, 元請：216.24, 下請：7.05

以上より、加重シャープレイ値を配分手法は公平性と経済合理性の観点で実務上適した手法であると言えるが、課題として各提携形成過程の生起確率として定義した p の値に対する感度が高いことが挙げられる。図-17は共同費用 $c(N)$ の配分額 p による変化を表しており、これを見ると発注者及び元請において一次関数的に変化していることがわかる。

これに対する解決方針として、 p の値が大きい範囲において傾きの緩やかな p の関数に置換することを考える。例えば式(18), (19)に示す2つの関数が例として挙げられる。

1) p^a ($a < 1$)の関数

$$\begin{cases} \phi_A = v(AB) \cdot p_1^a + \{u_A(N) - v(AB)\} \\ \phi_B = -v(AB) \cdot p_1^a + u_B(N) \end{cases} \quad (18)$$

2) $\sin \frac{\pi}{2} p, \cos \frac{\pi}{2} p$ の関数

$$\begin{cases} \phi_A = v(AB) \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2} p_1 + \{u_A(N) - v(AB)\} \\ \phi_B = v(AB) \cdot \cos^2 \frac{\pi}{2} p_1 + \{u_B(N) - v(AB)\} \end{cases} \quad (19)$$

また p の値はゲーム理論的背景から絶対的に決まるといよりも実務においては話し合い等により総合的に決めるべきパラメータであると考えられる。本研究では「段階拡散確率モデル」を定義したが、その他に各利害関係者の意欲や間接的な便益・費用等も考慮し、各関係者が納得した形で合意形成を行う必要があると考えられる。

8. 結論

本論文では、ブロックチェーン技術等を活用した施工管理情報システムを公共工事のサプライチェーンに導入する際の費用分担の在り方を協力ゲーム理論に基づき検討することを目的とし、その有効性を国土交通省関東地方整備局の3つの工種で検証した。

本システムは、ブロックチェーン技術の特性や産業構造に基づく提携形成における時間的前後関係や実現可能な提携の制約があるため、ゲーム理論の内、提携順序の優先性の差異を考慮した配分解である加重シャープレイ値や順序仁に着目し、階層構造を成す公共工事のサプライチェーンや産業全体への拡張を考慮し4人ゲームへの拡張や「段階拡散確率モデル」を適用し、基本モデルの構築を試みた。

その結果加重シャープレイ値による配分結果は、実行可能な提携順序のみが考慮された配分になったことに加えて、応益負担・応能負担の双方が考慮された配分になったことから公平な配分であることが明らかになり、また配分後の最終B/Cが1を上回りかつ、大きい順に元請、下請、発注者となり合意形成時の官民の立場上の志向が反映された配分になったことから経済合理的な配分であることが明らかになった。この手法は、公平性かつ経済合理性が確保された実務上適した費用分担手法の一つとなる。

一方で、提携形成過程の生起確率 p の定め方によって解が大きく変わってしまうという点が課題として挙げられたため、 p^a や $\sin^2 \frac{\pi}{2} p$ という p が大きい範囲で解に対する感度が低い関数へ置換する方法やこの値を話し合いによって総合的に決定する方法を改善の方向性として示した。

今後は具体的な費用分担に関わる合意形成手続きの検討や、システムを運用する組織の形成、連携する任意の関係者をWeb上で効率的に繋ぐ技術の開発、システ

付録表-1 システム開発に係るコスト一覧

コスト項目	コスト内訳	コストの内容	期間[人月]	費用[千円]
WebApp 開発	ブロックチェーン App 開発	ブロックチェーンプロトコル上にデプロイする分散型アプリケーション開発	96	201,600
	API 開発	ブロックチェーン上のスマートコントラクトに命令を送る機構とクライアントからのエンドポイント開発	120	252,000
	クライアント開発	発注者・元請・下請が操作するダッシュボード作成	54	113,400
	インフラ開発	IT インフラの構築等にかかるコスト	24	50,400
	ゲートウェイ開発	建機等からの情報を外部サービスから受け取るゲートウェイの開発	12	25,200
	検査システム開発	保存データのハッシュ値の整合性確認と設計値との誤差が許容範囲内かを確認するロジックの開発	72	151,200
要件定義等	要件定義や仕様策定	開発そのものの上流部分にかかるコスト	-	5,000
マネジメント PM		開発プロジェクトのマネジメント	48	100,800
PoC	技術選定等コスト	使用する技術の選定やアーキテクチャの設計	36	75,600
テスト	各種テストコスト	ユニットテストからインテグレーションテスト等	378	793,800
合計			840	1,769,000

ム開発のための資金調達手法やシステムのガバナンス等を含めた制度の構築が必要である。

謝辞：本研究は筆頭著者の東京大学大学院工学系研究科修士論文として実施されたものです。i-Construction システム学寄付講座の松下文哉研究員には研究にあたり大変お世話になりました。

付録 本論文で想定するシステム開発費算出に関する詳細

本論文で想定したシステムの開発コストの算出の詳細を付録表-1 に示す。

参考文献

- 1) 総務省：平成 30 年度版 情報通信白書，第 1 部第 3 章 第 3 節 3 ブロックチェーン，pp. 128-130, 2018.
- 2) 株式会社日本総合研究所：平成 29 年度我が国におけるデータ駆動型社会に係る基盤整備（分散型システムに対応した技術・制度等に係る調査），pp. 44-56, 2018.
- 3) 松下文哉，小澤一雅：施工管理情報の非改竄性を担保するブロックチェーンを用いた出来形検査システ

ム，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），第 77 巻 1 号，pp. 1-11, 2021.

- 4) 岡田憲夫：公共プロジェクトの費用配分法に関する研究：その系譜と展望，土木学会論文集，No. 431/IV-15, pp. 19-27, 1991.
- 5) 岡田憲夫，谷本圭志：多目的ダム事業における慣用的費用割振り法の改善のためのゲーム論的考察，土木学会論文集，No. 524/IV-29, pp. 105-119, 1995.
- 6) 岡田憲夫，谷本圭志，榊原弘之：水資源開発事業における優先支出法のゲーム論的考察，土木学会論文集，No. 555/IV-34, pp. 27-39, 1997.
- 7) 浅野浩志：アンシラリーサービスの新しい費用配分のルール，電力経済研究，No. 43, pp. 51-54, 2000.
- 8) 成瀬喜則，前田隆：テレビ会議の利用促進のための費用分担モデル，日本教育工学雑誌，日本教育工学会，22 巻 suppl 号，pp. 81-84, 1998.
- 9) 国土交通省：国土交通省直轄工事等契約関係資料（令和元年度版），pp. 1-2, 2018.
- 10) 人事院給与局：平成 31 年度国家公務員給与等実態調査報告書，pp. 28, 2017.

(Received September 23, 2020)

(Accepted December 17, 2021)

A GAME-THEORETIC APPROACH TO COST ALLOCATION WITHIN PUBLIC WORKS SUPPLY CHAINS FOR SYSTEMS UTILIZING BLOCKCHAIN AND SMART CONTRACTS

Daiki GOTO and Kazumasa OZAWA

The digital transformation of industries has recently impacted the construction industry, as stakeholders are beginning to consider the application of blockchain and smart contract technologies for construction supply chains. When installing such innovative technologies, the fair and economically rational allocation of development and operation costs of information systems is a fundamental challenge facing public works stakeholders. Without a reasonable understanding of the costs and advantages to be borne across the supply chain, consensus among stakeholders is infeasible. The purpose of this research is to analyze the cost allocation of development and operational cost for a construction management information system that utilizes blockchain and smart contract technology. Based on cooperative game theory, the Weighted Shapley Value and Priority-Ordering Nucleolus were applied to the supply chains of public works projects, and the fairness and economic rationality of arrangements were evaluated. The results show that cost allocation models based on the Weighted Shapley Value can represent an appropriate allocation method for public works stakeholders.