

- はじめに
- まとめ

# [論文紹介] 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

水上 和秀 (Kazuhide Mizukani)  
u355020@st.pu-toyama.ac.jp

富山県立大学 工学部 電子情報工学専攻

May 31, 2024

# 1 はじめに

2/19

## 背景

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、元請け、下請けの各主体によって公平かつ経済合理的に実装される必要がある。

## 目的

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、加重シャープレイ値と順序位を公共工事のサプライチェーンに適用し、費用分配の公平性と経済合理性を評価した。

# シャープレイ値とは

3/19

## シャープレイ値とは

協力ゲーム理論において複数のプレイヤーの協力によって得られた利得を各プレイヤーの貢献度に応じて構成に分配するための手段の一つ

1. はじめに  
4. まとめ

- 3人のプレイヤー (1.2.3) が協力してゲームに挑戦し、利得として、以下の賞金が得られるとする
- このときの 1.2.3 にそれぞれどのようにお金を分配するか。

表1 協力ゲームの例

参加プレイヤー	賞金/万円
1	4
2	6
3	10
1, 2	16
1, 3	22
2, 3	30
1, 2, 3	60

# シャープレイ値とは

1. はじめに
4. まとめ

- このとき各プレイヤーの限界貢献度を導入する。限界貢献度とは、プレイヤー  $i$  が参加したときの利得の増加分である。
- 例えば、プレイヤーの参加順「1 → 2 → 3」のときのプレイヤー 3 の限界貢献度は、 $v(1, 2, 3) - v(1, 2) = 60 - 16 = 44$  のように計算できる。
- 各プレイヤーのシャープレイ値は以下のようになる

$$\text{プレイヤー 1: } (4 + 4 + 10 + 30 + 12 + 30)/6 = 15$$

$$\text{プレイヤー 2: } (12 + 38 + 6 + 6 + 38 + 20)/6 = 20$$

$$\text{プレイヤー 3: } (44 + 18 + 44 + 24 + 10 + 10)/6 = 25$$

表2 限界貢献度

プレイヤーの参加順	各プレイヤーの限界貢献度		
	1	2	3
1 → 2 → 3	4	12	44
1 → 3 → 2	4	38	18
2 → 1 → 3	10	6	44
2 → 3 → 1	30	6	24
3 → 1 → 2	12	38	10
3 → 2 → 1	30	20	10

# モデルケース

5/19

1. はじめに  
4. まとめ

本システムの利害関係者として、発注者、元請け業者、下請け業者を設定する。  
本システムを導入することによる各利害関係者への影響因子を整理したのが以下の通りとなる

- a: 本システムにより手形やファクタリング等による手数料や金融費用が軽減される
- b: 検査が自動化されることによる人件費や事務コストが削減される
- c: 施工後の不備による葉中責任を問われるリスクが軽減される
- d: 本システムの新規導入に当たり必要な、公共工事における基準変更のコスト
- e: 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教育コスト
- f: ブロックチェーンネットワークの運用コスト
- g: 本システムの開発・運用にかかる費用  
→共同費用を公平かつ経済合理的に行う手法を考える

表3 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	-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	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	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
	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	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
	d. 既存制度を変更する業務コストの費用負担	<input type="radio"/>	-	-
費用 C	e. システムの研修にかかる教育コストの費用負担	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
	f. ブロックチェーン・ノード運用にかかる個別費用	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	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

# 定式化

1. はじめに
4. まとめ

- 本システムに参加する任意のプレイヤーを  $i$  とし、プレイヤーの集合を  $N = 1, 2, 3 \dots N$  で表す
- $N$  を全体連携、 $i$  を単独連携と呼び、任意の連携の特性関数を  $v(S)$  と表す。
- 任意の連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、連携における便益及び費用の合計として  $B(S) = \sum_{i \in S} B_i(S)$  および  $C(S) = \sum_{i \in S} C_i(S)$  と表される。したがって、特性関数は  $v(S) = B(S) - C(S)$  で表される。
- 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  $i$  が連携  $S$  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

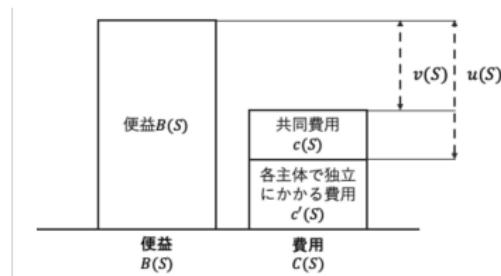


図1 便益および費用に関する変数の定義(提携S)

# 定式化

## シャープレイ値の定式化

- 一般的には、プレイヤー  $i$  のシャープレイ値は次式によって定式化される。ただし、 $s$  は連携  $S$  に含まれるプレイヤー数である。

1. はじめに

4. まとめ

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

## 加重シャープレイ値の定式化

- 参加順序の各家庭において任意の確立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。ただし、 $p(sUT, T)$  は任意の提携  $S, T (S \cap T \neq \emptyset)$  に対して、提携  $T$  が参加したうえで、その後に提携  $S$  が参加する過程の生起確率を表す

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

## 順序仁の定式化

- 順序仁は特性関数系ゲームにおける配分解のひとつであり、配分の解ベクトルを  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  としたときの任意の連携  $S$  に対する「不満」  $e(X : S)$  を考える。この時仁は任意の連携に対する最大の「不満」を最小化することで得られ、次式で表される。

$$e'(X:S,T) = \{v(S \cup T) - v(T)\} - \sum_{i \in S} x_i$$
$$(\forall S \subset N, S \cap T = \emptyset, T \in F)$$

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

## 加重シャープレイ値の適用

- 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、元請け、下請けを  $A, B, C$  とすると  $N = (A, B, C)$  である。
- 各主体の連携は単独での参加のみ考える。したがって、 $p_3 = p_4 = p_5 = 0$  となる

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

# モデルの適用

10/19

## 順序仁の適用

$e'(X : S)$  の最大値を  $M$  年、「最大不満」と定義する。この時実行可能な提携家庭の不満の身を考慮すると、以下の式を得る。

- はじめに
- 基礎知識
- 提携家庭
- まとめ

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

これら全てを満たす最小の  $M$  は  $M = 1/2v(AB)$  となり、これは下請けの提携参加とは独立であることがわかる、したがって、順序仁による配分は以下の通りとなる

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

# モデルの有効性の検証

11/19

## 実験概要

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。

1. はじめに
4. まとめ

表4 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・監督とその業務コストを算出	-
	c. 塗装や施工不良による法的責任を追及されるリスクの低減	会計検査報告で不当と認め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らなかった場合の被害額と発生頻度から算出	-
	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(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	-
費用 C	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なうノードにかかるサーバコストを算出	トランザクションと検証を行なうノードにかかるサーバコストを算出	トランザクションのみを行なうノードにかかるサーバコストを算出
	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	トランザクションと検証を行なうノードにかかるサーバコストを算出	トランザクションのみを行なうノードにかかるサーバコストを算出

# モデルの有効性の検証

12/19

## システムの効果の検証

検討期 2 年、試行期 6 年ののちに、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た。この時の各影響項目の便益・費用の推定値を算出すると以下の通りとなる。

表4 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
	b	9,121	3,464
	c	35	98
費用	d	-12	-
	e	-1	-
	f	-7	-7
g		9,775	-2

# モデルの有効性の検証

1. はじめに
4. まとめ

## 実験結果 1

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。各手法による利得の配分結果は以下の通りとなる。

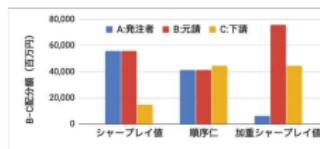


図2 各手法の利得の配分結果(鋼橋上部工事)

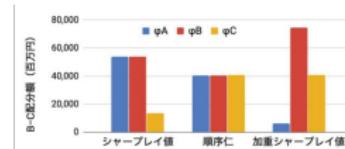


図3 各手法の利得の配分結果(PC橋上部工事)

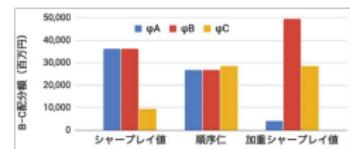


図4 各手法の利得の配分結果(築堤工事)

# 適用結果に関する考察

## 実験結果 1 に対して

### 利得配分から読み取れる点に関して

- 下請け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に考慮しており、特に下請けの連携における優位性を相対的に低く考慮しているためと考えられる。
- 発注者と元請け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は開きが生まれている。
- これは前社 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連携における優位性の違いを、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

# モデルの有効性の検証

1. はじめに
4. まとめ

## 実験結果 2

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

$v(N) = B(N) - C(N) = \sum_{i \in S} u_i(S) - c(S)$  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  $u_i(N)$  を引くことで求めることができる。

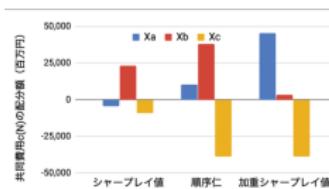


図5 各手法の共同費用c(N)の配分結果(鋼橋上部工事)

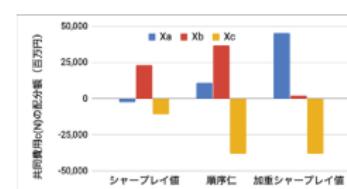


図6 各手法の共同費用c(N)の配分結果(PC橋上部工事)

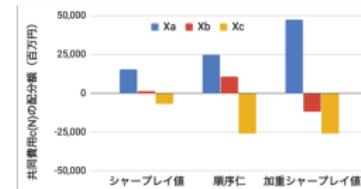


図7 各手法の共同費用c(N)の配分結果(築堤工事)

# 適用結果に関する考察

16/19

1. はじめに  
4. まとめ

## 実験結果 2 に対して

共同費用の配分結果から読み取れる点に関して

- 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あげられる。
- シャープレイ値及び順序位を用いる手法では橋梁上部工事で元請け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

# 適用結果に関する考察

モデルを適用した際の各変数の値について

- 築堤工事の場合は橋梁上部工事に比べて元請けの効用  $u_B(N)$  が相対的に小さいことがわかる。これは、元請け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。
- つまり共同費用の配分解が全体連携時の効用  $u_i(N)$  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プレイヤーほど共同費用の負担が大きくなる応益負担の減速を反映していることがわかる。

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

# 適用結果に関する考察

18/19

## 費用分担後の B/C

幅根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 の値について

- 両者ともに全プレイヤーにおいて 1 を上回っているため、投資判断としては前向きである。
- 加重シャープレイ値による配分では、順序位に対し、値が元請け、下請け、発注者の順に大きく、民間主体である元請け泳ぎ下請の投資効率性を優先している経済合理的な配分であるといえる
- 以上より加重シャープレイ値の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いえる。



図8 各手法による最終B/Cの比較

## おわりに

- 本研究では、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あ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つの工種で検討した。
- 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・応用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った。
- 配分後の最終  $B/C$  が 1 を上回りかつ、大きい順に元請け、下請け、開発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わかった

## 今後の課題

- 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ので解に対する感度が低い関数へ置換する手法の検討