# 連続協力ゲームにおける提携構造の慣性を考慮した 提携形成シミュレーション機構の試作

A Preliminary Approach on a Coalition Formation Simulator with Inertia on Continuous Cooperative Games

堀江将章 *1	福
Masaaki Horie	N

福田直樹 \*2 Naoki Fukuta

\*<sup>1</sup>静岡大学情報学部 Department of Infomatics, Shizuoka University \*2静岡大学学術院情報学領域

College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University

There is a possibility of change from the best coalition structure formation at the moment to the best coalition structure at the next moment in a real-world coalition formation scenario. In this paper, we present a preliminary approach about constructing a continuous cooperative game simulator, which is focused on the situation where a coalition structure can be changed by adding new conditions of coalition formations. This preliminary simulator takes a list of pair of timing and a MC-nets rule added as a continuous cooperative game. We define a distance between two coalition structure as its costs of changes to model Inertia. We present how a coalition formation simulation can be done with such as inertia.

### 1. はじめに

協力ゲームは,組み合わせ最適化問題からのアプローチ [Lesca 17, Aadithya 11, Conitzer 06],重み付きグラフ分割 問題からのアプローチ [Bachrach 13] が提案されているが,そ の最適な提携構造を求めることは一般には NP-hard であると される [Lesca 17, Bachrach 13].これらの研究では,協力ゲー ムの議論の前提として事前に全ての提携とその値が求められて いると仮定している.

協力ゲームの適用先の一つの例として、市場における複数企 業の提携などがあるが、企業をとりまく環境は時間の経過とと もに変化することを考えると,前述のアプローチには可能な提 携構造の時系列的変化がモデルには必ずしも含まれない. この ことから, すでに構成されている協力ゲームの中での最良の提 携構造を見つけることができても、外的要因などから変化する ことを考慮していないため,必ずしも長期的に安定な提携構造 を構成できなかったり、環境の変化に伴う提携構造の変化をモ デル上でうまく扱えない可能性がある.本研究では,提携構造 の変化を外部から与えるコストに基づく慣性によって調整し, コストを越えたときに初めて変化が起こるような提携構造の変 化をモデル化し、その提携構造の変化モデルのシミュレーショ ン機構を試作することで、どのようにコストが提携形成に影響 を与えるかを観測できるようにする.本シミュレーション機構 は、協力ゲームの構成が時間とともに変化することを想定し、 プレイヤーは常に利得を向上させようと行動することを仮定 した際の提携構造の変化を、連続協力ゲームとしてシミュレー ション可能とする.

### 2. 背景

#### 2.1 協力ゲーム

協力ゲームはプレイヤー間に存在する提携とその利得の組 の集合が与えられ,ゲームに参加しているプレイヤーが各自 の利得を最大化するようなプレイヤーの組み合わせを求める 問題である [Aumann 74, Driessen 13, Rothe 15]. Aumann ら [Aumann 74] によると特性関数で構成されたゲームであり, 事前に全ての提携に対応する価値が与えられている. 非協力



図 1: 協力ゲームの条件の例

ゲームにおいて、そのゲームに参加するプレイヤーはそれぞれ の行動を個別に選択し、その行動は自分自身のゴールを実現す る、もしくは自分自身の利益を最大化するものである.

それに対して協力ゲームにおいては、プレイヤーは提携とも 呼ばれるグループを構成し、協調した選択を行なうことでそれ ぞれのゴールを実現する.しかし全てのプレイヤーが利他的で あるとは想定しておらず、彼らは自分自身に割り振られる利益 が増える場合にのみ提携に参加する.プレイヤーは彼ら自身の 働きによって集団労働の利益を分割しなければならないので, 競争は、協力ゲームにおいて重要な働きをする.

ここで重要なことは、全てのプレイヤーは事前に提携が与えられた状態で、自身の利益を最大化するように動くことで結果として協力しているように見えるという点であり、n人のプレイヤーの集合Aを考えたとき、 $S \subseteq A$ となるような集合Sを提携と呼ぶ. プレイヤーAとプレイヤーBが個々で行動を起こした場合に得ることのできる効用をv(A), v(B)とし,  $v(A) + v(B) \ge v(A+B)$ となったときにv(S) = v(A+B) - (v(A) + v(B))で表されるv(S)を提携から得られる効用として定義する手法がある.

実世界に協力ゲームのような現象が見られる例としては,企 業間の提携事業などが挙げられる.例えば図1のような状況 が挙げられる.

#### 2.2 Marginal Contribution Net

Marginal Contribution Net(MC-net)は、Ieong[Ieong 05] らによって提案された協力ゲームの表現方法のひとつであり、 協力ゲームを提携ルールの集合として表現するものである。 MC-net の強みは、そのサイズがエージェント間の相互関係の 複雑さに依存する点であるとされ、それまでの表現方法はゲー

連絡先: 堀江将章, 静岡大学情報学部情報科学科, 〒 432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, horie.masaaki.14@shizuoka.ac.jp



図 2: 提携事業 A を選択した場合の提携構造の変化



図 3: 提携事業 B を選択した場合の提携構造の変化

ムに参加するプレイヤーの数に依存してルールのサイズが増加 する問題を解決したといえる.

MC-net による協力ゲーム *G* は提携ルールの集合  $\Phi$  とプレ イヤー集合 *A* との組で表される,ルール集合  $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, ...\}$ であり,それぞれのルールは定義 1 に沿う形で表現される.

定義 1. *MC-net* ルール 提携ルール  $\phi$  は,提携に属するプレ イヤー集合  $P = \{a_i, a_j, ...\}$  と提携に属してはいけないプレ イヤー集合  $N = \{a_q, a_p, ...\}$  と提携から得られる利得 v の組 である.

$$\phi_i = \{P_i, N_i, v_i\}(P_i \cap N_i = \phi)$$

MC-net によるルール表現は LISP[McCarthy 60] の S 式に よる表現も可能である.本研究では、S 式による MC-net の協 力ゲーム,提携のルール,提携構造の表現を,表1に示した 表記により記載する.集合をリストとして表現し,一つのルー ルは必要なプレイヤー集合,不要なプレイヤー集合,提携の効 用の組で表現する.

#### 2.3 連続協力ゲーム

本研究では、連続協力ゲームは、複数のタイムステップから 構成されている協力ゲームであり、タイムステップごとに協力 ゲームのプレイヤーと提携によって得られる効用が変化するも のと定義する.このような状況においては、時間が経過するに つれて、ある時点で最良であった提携構造が別の時点では最良 ではなくなることが考えられる.こうした状況を引き起こす実 際の要因としては、市場に新たな技術を持った企業の参加や、 提携事業の追加が考えられる.

この状況を協力ゲームとして見ると、図4のように提携を 示すルールの追加やプレイヤーの追加で協力ゲームの設定が 変化したとみなすことができる.ここで、実社会での提携の変 化をモデルに反映することを考えると、この提携構造を変化さ せるためには、現在の状況から提携を変更するために契約を 変更したり提携事業から離脱するためのコストが必要となる.



図 4: 既存の提携と衝突する提携の追加による協力ゲームの 変化



図 5: プレイヤーの追加による協力ゲームの変化

本研究においては,提携構造を変化させるためのコストを提携 構造の慣性を表すものとして定義する.

実社会では図5のように新たなプレイヤーの参加によって 協力ゲームの設定が変化することが予想できる.このとき,追 加される前の状態で提携事業 Bが選択されていると,その提 携構造を破棄して同等の提携を構成できるプレイヤーCが存 在する.このプレイヤーCは,その立ち位置により提携事業 Bと提携事業 Cのどちらを選んでも同等の効用を得ることが できる上,全てのプレイヤーが一つの提携に属するのであれば 提携事業 Bと提携事業 Cをの二つの提携から利得が得られる.

しかし、この時に追加される提携が図4に示すような既存 の提携構造と衝突するような提携構造であった場合、C社が提 携事業Bから離れて提携事業Cを形成することがある.提携 構造の変化に対する慣性を考えない場合には、得られる効用が 同等であるにも関わらず提携構造の変更が続く可能性がある.

実社会においては、そのような提携構造の変化が緩慢にし か働かず、よりよい提携が存在したとしてもその提携に参加し ない場合もありえる。その理由として考えられるのが、一つの 市場を独占することを禁止する法律や提携事業の契約期間に 関する制約、これらを含めた提携構造を変化させるために必 要なコストが生じることであり、これら協力ゲームの設定の変 化を提携構造の変化に即座に反映することを抑止するものを、 本研究では提携構造の慣性とする。提携形成の過程に慣性を導 入することにより、同等の効用を持つ提携構造から提携構造へ の変化は抑止され、不要な提携構造の変化を減少させる状況を モデルとして表現し、その変化の様子をシミュレーションでき ることが期待される。

	MC-net	対応する S 式
協力ゲーム	$G = \{A, \Phi\}$	(A Φ)
提携ルール	$\phi = \{\{a_i, a_j, \dots\}, \{a_p, a_q, \dots\}, v\}$	$((a_i a_j \ldots) (a_p a_q \ldots) v)$
提携構造	$CS = \{\{a_1, a_2\}, \{a_3\},, \{a_{n-1}, a_n\}$	$((a_1 \ a_2) \ (a_3) \ \dots \ (a_{n-1} \ a_n))$

#### 表 1: MC-net による表現と S 式の対応表

### 3. 本研究のアプローチ

本研究では、各エージェントが他のエージェントと何らかの プロトコルを経由して提携を組んで、提携形成を行う.形成さ れた提携構造を評価して現在の提携構造との距離を算出する. もし、生成された提携構造が距離を越えるような利益を持って いる場合、各エージェントが提携を移動するかどうかの判断を 行い、移動すると判断したエージェントがある提携から別の提 携へ移動を行う.この結果、提携構造が変化する.この提携形 成の過程では、一部のエージェントのみが提携から離脱する場 合があり、得られる利得が減ることも考えられる.その次のラ ウンドの再移動によって提携構造の効用が向上しつづけている 場合には、段階的に提携構造が変化する.

本研究では,提携構造間の距離を求めるために,提携構造の 提携ごとの Jaccard 指数を利用することを考える.ある状態 における二つの提携の距離を求められると仮定する.

ここでは、まず、どんな提携構造であったとしても N 人の プレイヤーが参加している協力ゲームなら N 個の提携が含ま れているとみなして Jaccard 指数を求めることを考える.

単純な Jaccard 指数を求めると,提携構造((A B C))と提 携構造((A B) (C))の類似度が0となり,提携構造((A B C))と提携構造((A) (B) (C))の類似度についても0となる ため,提携構造の間のコストとして単純に Jaccard 指数を求 める手法はあまり効果的には機能しない.

この条件で類似度が 0 となってしまう課題の解決手法とし て, どのような提携構造であっても、参加しているプレイヤー の人数分の提携を仮定して,あるプレイヤーが一つ提携を構成 するとプレイヤーが一人も属さない提携が生まれるとみなす ことで次元を揃える方法がある.この方法では N 人のプレイ ヤーが存在したときに, N<sup>2</sup> 回だけ提携間の Jaccard 指数を計 算する必要がある.

他の方法として,二つの提携構造 *CSa*, *CSb* の間の類似度 を求める場合に *CSa*\*CSb* と *CSb*\*CSa* について Jaccard 指 数を求める方法についても検討する.これは,提携構造の同じ 部分を類似度 1 として計算を省略し,異なっている部分の類 似度を求めることで提携構造の慣性を表すパラメータとして利 用するものである.

### 4. 提携形成シミュレーション機構の概要

図6に、シミュレーション機構の構成を示す.本シミュレー ション機構は、提携構造の評価器と、最適な提携構造を近似的 に高速に求めるための遺伝的学習モジュールを実装したマルチ エージェントによる提携構造生成器からなる.協力ゲームの表 現は MC-nets に沿って、提携に属するプレイヤーの集合とそ れに対する提携の価値の組のルール集合として表される.シ ミュレーション初期状態として、ランダムな遺伝子を持つエー ジェントを複数体生成し、そのエージェントの遺伝子から提携 構造を生成する.その後、得られる提携構造を Listings 1 に 示す提携構造評価器によって提携構造の効用を求め、ルーレッ ト法によって個体を選択し、交叉、複製、もしくは突然変異を



図 6: 提携形成シミュレータの構成

起こす. 交叉の手法は確率 0.5 での一様交叉を使用している.

Listing 1: 提携構造の評価関数

```
;ルールを適用する関数;
(defun apply-rule (coalition rule)
 (not (or (set-difference (positive-player-set rule)
        oalition)
           (intersection coalition (negative-player-set
                rule))))
  (rule-value rule)
 0))

    提携の値を求める関数

(defun coalition-value-of (coalition game)
(loop for i in game
sum (apply-rule coalition i)))
  提携構造の値を求める関数
(defun coalition-structure-value-of (coalitionstructure
    game)
 (loop for i in coalitionstructure
  um (coalition-value-of j game)))
```

# 5. 提携形成シミュレーション機構の動作例

図7と図8に、本研究で試作したシミュレータによる提携 構造変化の動作例を示す.本動作例に使用したルール追加のタ イミングと追加するルールは、図9に示す.

図7は、提携構造の距離を考慮せず常に提携構造生成器から出力された提携構造を選択した場合の結果である.ここで、 ALICE、BOB、CHARLEY、DAN、ELLY、およびFUKUはそれぞれ異なるプレイヤーを示し、丸括弧で括られた名前同士は同じ提携に属しているプレイヤーを表している.たとえば、 (ALICE BOB)は、ALICEとBOBという2つのプレイヤーが同じ提携に属していることを示す.EFFICIENCYはその提携構造から得られる利得を表わしている.このとき、2タイムステップ目と3タイムステップ目において同じ効用であるにもかかわらず、異なる提携構造が出力されている.

それに対して、図8では、提携構造の距離をどのような変化 も3であるとして動作をさせた場合の結果を示している.この とき、1タイムステップ目に提携構造が形成されると、その時 点から7タイムステップ目まで変化していない.これは、新た

```
IMESTEP :1 ((DAN) (BOB FUKU) (ALICE) (CHARLEY ELLY))
EFFICIENCY :0
TIMESTEP :2 ((DAN) (ALICE BOB CHARLEY) (ELLY FUKU))
EFFICIENCY :4
TIMESTEP :3 ((ALICE BOB CHARLEY DAN) (ELLY FUKU))
EFFICIENCY :4
IMESTEP :4 ((ALICE BOB CHARLEY DAN) (ELLY FUKU))
EFFICIENCY :5
TIMESTEP :5 ((BOB) (ELLY FUKU) (ALICE CHARLEY DAN))
EFFICIENCY :7
TIMESTEP :6 ((BOB ELLY FUKU) (ALICE CHARLEY DAN))
EFFICIENCY :
TIMESTEP :7 ((ELLY FUKU) (BOB CHARLEY) (ALICE DAN))
EFFICIENCY :7
TIMESTEP :8 ((CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU) (ALICE))
EFFICIENCY :10
IMESTEP :9 ((CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU) (ALICE))
EFFICIENCY :14
TIMESTEP :10 ((CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU) (ALICE))
EFFICIENCY :14
```

図 7: 提携構造の変化にコストを掛けなかった場合の動作例

TIMESTEP :1 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :3
TIMESTEP :2 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :3
TIMESTEP :3 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :3
TIMESTEP :4 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :4
TIMESTEP :5 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :4
TIMESTEP :6 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :4
TIMESTEP :7 ((CHARLEY) (ELLY FUKU) (ALICE BOB DAN))
EFFICIENCY :4
TIMESTEP :8 ((ALICE CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU))
EFFICIENCY :10
TIMESTEP :9 ((ALICE CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU))
EFFICIENCY :12
TIMESTEP :10 ((ALICE CHARLEY) (BOB DAN ELLY FUKU))
EFFICIENCY :12

図 8: 提携構造の変化のコストを3と定義した場合の動作例

に形成された提携構造の効用が7を越えないため現在の状況 を維持しようとしているものと考えられる.3タイムステップ 目から4タイムステップ目で効用が1増加しているのは,4ス テップ目で新たに追加されたルール((alice dan)()1)に よって既存の提携構造に新たな効用が追加されたからである.

# 6. まとめと今後の課題

本研究では、連続協力ゲームの提携形成シミュレーション機 構の試作について述べた.シミュレーション中において提携形 成過程に慣性を導入することにより、異なった構造を持つ提携 構造への変化が阻害され、段階的な提携構造の変化が起きる ことを観測した.提携構造の慣性の導入により、等しい効用を 持つ提携構造への変化が提案される状況であったとしても、変 化に対するコストの影響で提携構造が変化しないことを観測 した.

今後の課題としては、提携構造の距離の定義方法の洗練や、 プレイヤーのゲームからの離脱および参入を考慮することが挙 げられる.本シミュレーション機構においては、提携構造の慣 性をハイパーパラメータとして設定可能としておりシミュレー ション中に変化することはないものの、提携構造の間の距離を

(defparam	neter *RULE-WITH-TIME*
'((1 .	((alice bob charley) () 1))
(1 .	((fuku elly) (charley) 3))
(4.	((alice dan) () 1))
(4.	((alice) (bob) 3))
(7.	((bob dan fuku) (alice) 4))
(9.	(() (fuku) 1))))

図 9: ルール追加のタイミングのリスト例

慣性の指標とすることで提携構造が変化する際により近い提携 構造を選択することが可能になる.

# 参考文献

- [Aadithya 11] Aadithya, K., Michalak, T., and Jennings, N.: Representation of Coalitional Games with Algebraic Decision Diagrams, Technical Report UCB/EECS-2011-8, EECS Department, University of California, Berkeley (2011)
- [Aumann 74] Aumann, R. J. and Dreze, J. H.: Cooperative games with coalition structures, *International Journal of Game Theory*, Vol. 3, No. 4, pp. 217–237 (1974)
- [Bachrach 13] Bachrach, Y., Kohli, P., Kolmogorov, V., and Zadimoghaddam, M.: Optimal Coalition Structure Generation in Cooperative Graph Games, in *Proceedings* of the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI'13, pp. 81–87, AAAI Press (2013)
- [Conitzer 06] Conitzer, V. and Sandholm, T.: Complexity of constructing solutions in the core based on synergies among coalitions, *Artificial Intelligence*, Vol. 170, No. 6, pp. 607 – 619 (2006)
- [Driessen 13] Driessen, T. S.: Cooperative games, solutions and applications, Vol. 3, Springer Science & Business Media (2013)
- [Ieong 05] Ieong, S. and Shoham, Y.: Marginal Contribution Nets: A Compact Representation Scheme for Coalitional Games, in *Proceedings of the 6th ACM Conference* on Electronic Commerce, EC '05, pp. 193–202, New York, NY, USA (2005)
- [Lesca 17] Lesca, J., Perny, P., and Yokoo, M.: Coalition Structure Generation and CS-core: Results on the Tractability Frontier for games represented by MCnets, in *Proceedings of the 16th Conference on Au*tonomous Agents and MultiAgent Systems, pp. 308– 316International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2017)
- [McCarthy 60] McCarthy, J.: Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I, Commun. ACM, Vol. 3, No. 4, pp. 184–195 (1960)
- [Rothe 15] Rothe, J. and Rothe, I.: Economics and Computation: An Introduction to Algorithmic Game Theory, Computational Social Choice, and Fair Division, Springer Texts in Business and Economics, Springer Berlin Heidelberg (2015)