

## TSPに基づく共有資源の 社会的利用モデルに関する研究

小野良太<sup>†1</sup> 川村秀憲<sup>†1</sup> 鈴木恵二<sup>†1</sup>

複数の独立なサブシステムが、限られた共有資源の利用を最適化しようとする共有資源の利用問題を TSP の理論を用いてモデル化し、その意義と有用性について述べる。また、このような問題に対し効率的に解を求める社会的利用の例として行動調整アルゴリズムを提案する。さらに、小規模な例題を解くことでこの問題の解空間の構造をゲーム理論の観点から分析し、行動調整アルゴリズムによって得られる解の効率性について検証する。

### A study on social utilization model of shared resource based on TSP

RYOTA ONO,<sup>†1</sup> HIDENORI KAWAMURA<sup>†1</sup>  
and KEIJI SUZUKI<sup>†1</sup>

Model shared resource using problem that independent subsystems want to optimize limited shared resource on TSP theory and discuss this model's meaning and availability. And, propose the Action Coordinate Algorithm as an example of social utilization that can effectively provide good answers. In addition, analyze structures of solution spaces in this problem through solving small examples, and verify efficiency answers provided by the Action Coordinate Algorithm.

#### 1. はじめに

アルゴリズムの改良や計算機の性能向上によりサブシステムが各々独立にある程度の近似度で最適化問題を解くということは困難ではなくなってきた。しかし、共有資源の利用を個々のサブシステムが他のサブシステムの行動を考慮せずに最適化を行うと、多数のサブシステムが同時に同じ共有資源を利用するという場面(同期)が発生する。共有資源の利用には限りがあるので、同期が発生すると利用効率が低下し、結果としてサブシステムの利用状況が最適化されないということが起こりうる。特に、サブシステムの数が増えるにつれ同期を回避することが困難となるため、サブシステムの行動や共有資源の利用状況を把握し、サブシステム間の相互作用をうまく設計することで同期をできるだけ回避し、個々のサブシステムの最適化を妨げることなく、システム全体の利用効率を考慮に入れた支援を設計することは重要である。

同様の視点の研究としては群ユーザ支援<sup>1)2)</sup>が挙げられる。群ユーザ支援では、ユビキタス情報環境において、個人の利益のみならず、社会の利益も考慮に入れたユーザ支援を行うことを目標としている。郡ユーザ支援の具体例として、交通渋滞<sup>3)4)</sup>やテーマパーク<sup>9)12)</sup>における混雑の緩和が研究されてきた。混雑が発生する要因としてはユーザ(サブシステム)の利用の同期が広く知られている。同期を回避するための一般的な手法としてはユーザに混雑情報を提示するという手段が取られているが、その時実際の混雑発生と混雑情報利用の時間差に起因するハンチング現象が問題視され実社会においても観測されている<sup>10)</sup>。

テーマパーク問題やカーナビゲーション問題は群ユーザ支援のひとつのテストベッドとして研究が行われてきたが、本研究では、これらをさらに一般化することにより汎用性を高めることを目標としている。また、これらの研究ではどのような手法を用いると混雑をより緩和できるのかというアルゴリズム的な観点からの解決策を重視してきたが、本研究ではそもそもこの種の問題がどのような構造になっているのかを追究し、そこからどのような手法が解決策と成り得るのかという提案を統括的に行うことができるのではないかと期待している。

#### 2. 同期による混雑の発生とその回避

本章では、混雑の原因となる同期と同期回避によるハンチング現象について説明し、従来の研究において、どのような混雑緩和手法が提案されてきたかを述べ、その上で、本研究で行うことと、その手順を述べる。

<sup>†1</sup> 北海道大学  
Hokkaido University

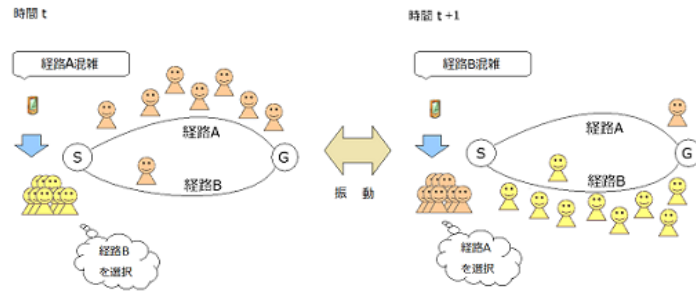


図 1 ハンティング現象の例

## 2.1 混雑の原因

### 2.1.1 同期

交通渋滞や、テーマパーク、レストランなどにおける混雑の主な原因として考えられるのが同期である。同期とは、同じシステムに属する複数のサブシステムが”同時に”，”同じ共有資源を”利用することと定義する。同期発生の原因として、共有資源に対し多数のサブシステムが存在する場合、特定の共有資源に対する需要が高い場合、なおかつ、ユーザが共有資源の混雑状況を手し得ない場合などが考えられる。同期が発生すると、共有資源の利用に片寄りが生じ非効率的な状況となることが知られており、ユーザの行動を調整し同期の発生をできる限り少なくすることが共有資源の効率的な利用のためには重要である。

### 2.1.2 同期の回避とハンティング現象

近年は情報通信インフラの整備が進み、ユーザに対する情報提供が容易になったことを踏まえ、VICS (Vehicle Information and Communication System)<sup>11)</sup>をはじめとする混雑情報提示が行われるようになってきた。しかし、情報が提示された時間と実際にユーザが行動する時間に開きがあるため、一度に多数のユーザが同じ混雑情報に従い行動すると図 1 に示すようなハンティング現象と呼ばれる混雑の振動が発生する。したがって、単純に混雑情報を提示するだけでなく、ユーザの行動も考えた情報提示のあり方を考える必要がある。

## 2.2 関連研究

### 2.2.1 テーマパーク問題やカーナビゲーション問題

同期やハンティング現象による混雑を回避する手法として、テーマパーク問題<sup>9)12)13)14)</sup> やカーナビゲーション問題<sup>3)4)</sup>の研究分野で混雑緩和手法が提案されている。これらの研究は群ユーザ支援という観点では共通しているが、問題設定の部分などにおいて相違がありどの

手法がどのような点で優れているか比較が行いにくい。将来的にはこれらの手法を本研究のモデル化に基づき実装し、個々のサブシステムの最適化が達成されているのか、全体として見たときの利用効率がどうなっているかなどについて検証を行いたい。

### 2.2.2 最適化理論における類似研究

本研究における共有資源の利用モデルと一般的な対称ユークリッド TSP とは、都市間のコストが同時に利用するサブシステムの数により動的に変化するという点で異なるが、コストが動的であるという点においては TSP の変形問題である動的 TSP<sup>6)</sup> に類似すると考えられる。しかし、動的 TSP では単一のサブシステムのコスト最適化を目的としているのに対し、本研究は複数のサブシステムを同時に最適化しようとする点で異なる。また、大規模な問題に対して複数のエージェントに処理を分散させて解決を図るという点で分散制約充足アルゴリズム<sup>5)</sup>とも関連があると考えられる。

### 2.2.3 ゲーム理論における類似研究

ゲーム理論における類似の研究分野としては、非協力  $n$  人ゲームでジレンマ構造をもつゲーム (社会的ジレンマゲーム) である共有地の悲劇と深い関係がある。数軒の農家が共同の農地を持っており、その共有地には牧草が生い茂っており、各農家はそこに牛を自由に放牧することができる。共有地の牧草には限りがあるので、自分の利益を追い求める限り、農家たちは先を争って牛を放牧しようとする。そうしていくとやがて牧草は枯渇し共有地は荒廃してしまう。結果として利益を最大化しようとしたはずが、共有地の荒廃という”悲劇”が起こってしまうため共有地の悲劇と呼ばれている。もし、農家たちが同時に牛を放牧するのであれば自分の利益を最大化しようと放牧できるだけ牛を放牧し”悲劇”となってしまうが、放牧を始める時期にずれがあると、後のほうに放牧を始める農家は牧草の枯渇に気づいて放牧を止めるだろう。本研究では、サブシステムに優先順位をつけ順番に行動を決定させることで、共有地の悲劇の回避を試みる。これについては第 4 章にて行動調整アルゴリズムとして詳しく解説する。

他には、純戦略ナッシュ均衡が常に存在するゲームのクラスとして渋滞ゲームが知られており<sup>7)</sup>、このゲームのクラスに属する対称ネットワーク渋滞ゲームに対してナッシュ均衡を求める効率的なアルゴリズムも提案されており、本研究と密接な関係があると考えられる。また、情報が不完全な場合でもナッシュ均衡に到達しうる条件やアルゴリズムについての研究も行われている<sup>8)</sup>。

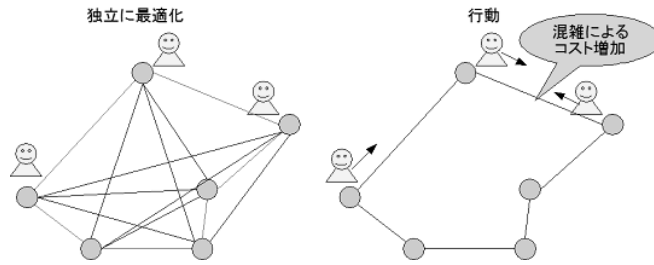


図 2 共有資源の利用時の混雑発生

### 3. 共有資源とその社会的利用

本章では、本研究における共有資源と、その社会的利用について具体的な例を示しながら詳しい定義を行う。

#### 3.1 共有資源

本研究における共有資源とは、サブシステムが利用することでなんらかの利益を得ることができるものと定義する。資源には、たくさん使うと消耗して無くなってしまふもの(石油、水、牧草など)と、利用効率が低下するものがあるが、本研究で扱う資源は後者とし、共有資源の利用に同期が発生すると混雑により得られる利益が減少するものとする(図2)。実社会における例としては道路、レストランの座席、テーマパークのアトラクション搭乗権、インターネットのネットワーク帯域などが考えられる。なお、サブシステムとは共有資源の利用を最適化しようとするプレイヤーであり、ユーザが持つ携帯端末、カーナビゲーション、あるいはユーザ自身などに相当する。サブシステムは自身が持つ情報に基づき自己の利益を最大化することのみを考えており、他のサブシステムの利益のために譲り合ったりするという行動を取ることはない。サブシステムはあくまで自身が持っている情報に基づき最適化を行うため、実際の最適解が得られるとは限らない。

#### 3.2 社会的利用

サブシステム  $A_i$  が戦略  $S_a$  を取っていると、本来の利益  $W_a$  を受け取れず混雑による利益の低下により  $W'_a$  しか受け取れていないと気づいたとき、 $A_i$  は混雑が発生した共有資源を使い続けるという戦略  $S_a$  を取るかか使うのを止めるという戦略  $S_b$  を取るかという選択に迫られていると考えられる。 $A_i$  が  $S_a$  の戦略を継続して選択するとき、同じ共有資源を利用しているサブシステム  $A_j$  が使うのを止める戦略  $S_b$  を取れば  $A_i$  は本来の利益  $W_a$

	$A_j$	$S_a$	$S_b$
$A_i$			
$S_a$		$W'_a, W'_a$	$W_a, W_b$
$S_b$		$W_b, W_a$	$W'_b, W'_b$

表 1 共有資源の社会的利用の利益表

を受け取ることができる。しかし、 $A_j$  も利用し続けるという戦略  $S_a$  を選択し続けるとき、 $A_i$  も  $A_j$  も混雑により減少した利益  $W'_a$  を受け取り続けるということになる。また  $A_i$  が共有資源の利用を止めるという戦略  $S_b$  を選択したとき、 $A_j$  が  $S_a$  を選択し続けた場合は両者とも混雑を避けることができ  $W'_a < W_b$  であれば一応利得は向上する。しかし、 $A_j$  も  $S_b$  を選択した場合は、両者とも本来得られる利益を得られないばかりか、場合によってはそこに新たな混雑が発生するということもありうる。

以上をまとめると、サブシステム  $A_i$  と  $A_j$  が同じ戦略  $S_a$  を選んだ時、混雑を回避するために戦略を変えるべきか否かという判断に迫られていると考えられる。本研究において、このように他のサブシステムの行動を考慮した上で、自己の利益をできるだけ最大化しようとする試みを社会的利用と定義する。個々のサブシステムは一般に、自己の力のみでは他のサブシステムの行動全てを把握することはできず行動を決定する基準を決められないので、共有資源を社会的に利用しようとするときマクロな視野で共有資源やサブシステムから情報を受け取りサブシステムに情報を提供するシステムが必要とされるであろう。そのような共有資源の社会的利用モデルの概念図を図4に示す。

一般に、共有資源の変更(アトラクションの乗員数増加や道路の拡張)による混雑緩和には莫大なコストが掛かる。また、混雑が一時的なものであれば、一時的な混雑緩和のために莫大なコストをかけて共有資源を変更することは効率的ではない。一方でサブシステムは自己の最適化のみを目的としており、他のサブシステムの利益についてはまったく考慮していない。仮に、他のサブシステムの利益を考えて特定のサブシステムの行動を制限するということがあれば、それはユーザに我慢を強いるということであり、このシステムに従うインセンティブが無くなってしまふ。そこで、本研究では行動調整システムを巧く設計することで共有資源を変更することなく、かつ、サブシステムに我慢を強いることもなく共有資源の利用効率を上げることを目標とした。

### 4. 行動調整アルゴリズム

本章では、都市数およびサブシステム数が多の場合でも現実的な時間でナッシュ均衡解

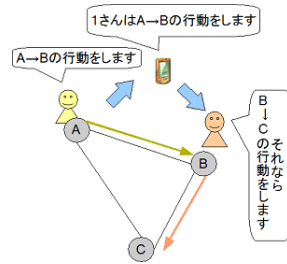


図 3 行動調整アルゴリズムの概要

を実現しうるアルゴリズムの例として行動調整アルゴリズムを提案する。

#### 4.1 行動調整アルゴリズムの概要

行動調整アルゴリズムの概要を 3 に示した。まず、全てのサブシステムに優先順位をつけ、優先順位が高いものから順番に自分の行動予定を行動調整システムに宣言していく、ここで宣言された行動に従って行動調整システムが追加コストを計算し、次のサブシステムに渡す。一周して戻ってきた時、前に自分が宣言した行動がその時点での最適反応戦略でなくなっている可能性があるため、その場合はもう一度宣言しなおす。この過程を繰り返す、全てのサブシステムの行動宣言が変化しなくなったとき、行動を開始させる。この時、行動宣言に変化がなくなったということは全てのサブシステムが最適反応戦略を選択しているはずであるため、ここで実現している解はナッシュ均衡となっていることが保証される。ただし解の構造によっては、囚人のジレンマに挙げられるようにナッシュ均衡がシステム全体で見た時に効率的で無い場合や、行動宣言が収束せず変化を繰り返すということが発生しうるため、解構造がどうなっているか検証を行う必要があるだろう。

以降の章においては、共有資源の社会的利用をモデル化し、実際にジレンマが生じていることを実験により確かめる。

### 5. モデル化

本章では共有資源の社会的利用モデルについて説明する。まずモデル化に用いる巡回セールスマン問題 (TSP) の概要及び数式モデル、そして、共有資源の利用問題を TSP に基づきモデル化する。

#### 5.1 モデル化の背景

共有資源の利用問題の特徴として、

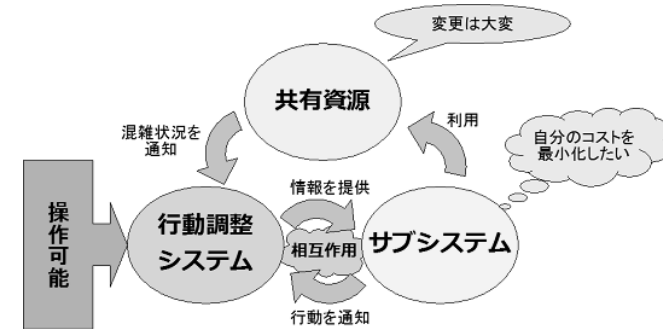


図 4 社会的利用モデルの概念

- 個々のサブシステムが独立に最適化を行う
- 多くのサブシステムが同時に同じ資源を使おうとする (混雑が発生する) ほど利用効率が低下する
- 全てのサブシステムは同じ問題を解く

という点が挙げられる。共有資源の利用問題は最適化問題であるため、同じ最適化問題のひとつである TSP を拡張することでこれらの特徴をうまく表現できると考えた。TSP を用いてそれを拡張することで共有資源の特徴を以下のように対応させることができる。

- サブシステムは都市間のコスト行列さえ与えられれば独立に最適化を行うことができる
- 都市間のコストを動的にすることで混雑を表現することができる
- 同じ都市の集合を使うことで同じ問題を解くことができる

以上の理由により、本研究では TSP に基づき共有資源の利用問題をモデル化する。

#### 5.2 巡回セールスマン問題の概要

巡回セールスマン問題とは、複数の都市集合があるとき、その全てを 1 度だけ通る最短の閉路を求める組合せ最適化問題である。都市集合  $V$  を

$$V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$$

とし都市  $ij$  間の移動にかかるコストを  $c_{ij}$  とする。さらに生成された巡回路  $x_{ij}$  を以下のように定義する。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{辺 } ij \text{ が経路である} \\ 0 & \text{辺 } ij \text{ が経路でない} \end{cases}$$

これらを用いて TSP の目的関数および制約条件を以下に示す .

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t. } & \sum_{j, j \neq i} x_{ij} = 1 \quad i=1,2,\dots,n \text{ について} \\ & \sum_{i, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad j=1,2,\dots,n \text{ について} \\ & x_{ij} \in (0, 1) \quad i,j=1,2,\dots,n, i \neq j \text{ について} \\ & \text{解は巡回路を生成する} \end{aligned}$$

$c_{ij} = c_{ji}$  となる問題を対称巡回セールスマン問題,  $c_{ij} \neq c_{ji}$  となる問題を非対称巡回セールスマン問題といい, 都市が平面上に配置され  $c_{ij}$  が  $v_i$  と  $v_j$  の直線距離で定義される問題をユークリッド巡回セールスマン問題という .

TSP の解空間は都市数  $n$  に依存し, 解の全数は  $\frac{(n-1)!}{2}$  となる .  $n$  の数が増えると解空間が爆発的に増加するため, ある程度都市数が多い問題に対しては厳密解を求めることは困難とされている . TSP は NP 困難なクラスに属する問題として盛んに研究が行われてきたが, 厳密解を多項式時間で求めるアルゴリズムは発見されていない . しかし, 厳密解を効率的に求めるアルゴリズムや様々なヒューリスティックなアルゴリズムが TSP の研究の過程で生まれ, 他の問題へ応用されている .

本研究では, TSP の理論に基づき, 都市間を繋ぐ辺を共有資源とみなすことでモデル化を行う . モデル化に TSP を用いる動機としては, 往年の研究による厳密解法や近似解法を求める様々なアルゴリズムが蓄積されており, それらのアルゴリズムを本研究にも用いることができると考えたためである .

### 5.3 共有資源の利用問題の定式化

TSP の理論に基づき, 共有資源の利用問題を定式化する . まず, TSP における都市間の移動コストを共有資源の利用コストとみなすことにより共有資源をモデル化する .

サブシステム  $k$  がもつ変数として, 巡回路  $x_{kij}$  と追加コスト情報  $g_{kij}$  を持つ . 巡回路の定義は TSP に準ずるものとするが, 辺を通る時間によってコストが異なる可能性があるため, 対称 TSP とはならず, 解表現は有向であり, ある解とそれを転置して得られる解が同じコストになるとは限らない .

追加コスト情報  $g_{kij}$  の定義は次項にて行う .

#### 5.3.1 追加コスト

共有資源の社会的利用モデルが TSP と異なる点として, 混雑による追加コストの発生が

ある . 追加コスト  $d_{ij}(t)$  を時間  $t$  と全てのサブシステムの経路情報  $x_{kij}$  に依存する関数として以下のように定義する .

$$d_{ij}(t) = f(t, x_{kij}) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m$$

ただしサブシステムの総数を  $m$  とする . 本稿ではこの関数  $f(t, x_{kij})$  を,

$$f(t, x_{kij}) = (1 - a_{ij}(t)) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$a_{ij}(t)$  は時間  $t$  において辺  $ij$  を利用しているサブシステムの数である . これに従い時間  $t$  における混雑による利用効率低下を含めた辺  $ij$  の利用コスト  $e_{ij}(t)$  は以下のように更新される .

$$e_{ij}(t) = c_{ij} + d_{ij}(t) \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

つまり, 実際にかかる利用コスト  $e_{ij}(t)$  は時間  $t$  において辺  $ij$  を利用しているサブシステムの数  $a_{ij}(t)$  × 元の利用コスト  $c_{ij}$  として求められる . たとえば, 共有資源を使うサブシステムが自分だけだとすると,  $a_{ij}(t) = 0$  であり,  $e_{ij}(t) = c_{ij}$  となり通常の TSP と同じコストが発生する . なお, これは先述した動的 TSP のように移動コストが動的になるというのみで, 本質的な最適化問題としては TSP と問題の構造は変わらないため, TSP に用いられる様々なアルゴリズムがはそのまま使えるものと考えられる . また, サブシステムの変数である追加コスト情報  $g_{kij}$  はサブシステムは辺  $ij$  を通った時の追加コスト  $d_{ij}(t)$  が代入される .

これらの定義に基づき共有資源の利用問題の目的関数および制約条件を以下に示す .

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (c_{ij} + g_{kij}) x_{kij} \\ \text{s.t. } & \sum_{j, j \neq i} x_{kij} = 1 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad k=1,2,\dots,m \text{ について} \\ & \sum_{i, i \neq j} x_{kij} = 1 \quad j=1,2,3,\dots,n \quad k=1,2,\dots,m \text{ について} \\ & x_{kij} \in (0, 1) \quad i,j=1,2,3,\dots,n, i \neq j \quad k=1,2,\dots,m \text{ について} \\ & k=1,2,\dots,m \text{ について全ての解は巡回路を生成する} \end{aligned}$$

制約条件の一行目は, 個々のサブシステムの最適化が達成されなければならないということを表している . なお, この問題の解の全数は  $\left(\frac{(n-1)!}{2}\right)^2$  となりサブシステムの数や都市数が増えると爆発的に解の数が増加するため, 組合せ最適化の観点からのアプローチだけでは近似解の精度を上げることは困難であると考えられる . ただし, 個々のサブシステムの最適化はあくまで TSP の最適化と等価であるので, 巡回路の生成および改善には TSP に用いられてきたヒューリスティックを用いることが有効であるだろう .

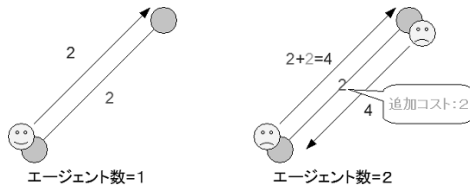


図 5 追加コスト発生例

## 6. ゲーム理論からの分析

### 6.1 非協力ゲームの理論

戦略(行動計画)を持つプレイヤーが  $n$  人存在し、それぞれの戦略の組合せによりプレイヤーの利得が一意に定まりプレイヤー同士が話し合ったり相談して戦略を決めることができないゲームを非協力  $n$  人ゲームと呼ぶ。

プレイヤー  $i$  の持つ戦略とその集合を  $S_i = s_i$  とおく。プレイヤー  $i$  の得る利得  $x_i$  は、全てのプレイヤーの取る戦略の関数として、

$$x_i = f_i(s_1, s_2, \dots, s_n)$$

と表される。

#### 6.1.1 ナッシュ均衡

非協力  $n$  人ゲームにおいて、プレイヤー  $i$  の持つ戦略の集合を  $S_i = s_i, i = 1, 2, \dots, n$  とする。戦略の組の集合を、

$$S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n = \{s = (s_1, s_2, \dots, s_n) : s_1 \in S_1, s_2 \in S_2\}$$

と置く。プレイヤー  $i$  の持つ利得関数を

$$x_i = f_i(s_1, s_2, \dots, s_n) = f_i(s) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

とする。全てのプレイヤーは、このゲームを非協力ゲームと認識して、さらに他のプレイヤーが非協力ゲームと認識していることを知っている。このとき全ての  $i$  について、

$$f_i(s^*) = \max_{s_i} f_i(s_1^*, s_2^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

を満たす点  $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$  をこのゲームのナッシュ均衡点という。ナッシュ均衡点では、他のプレイヤーが戦略を変えない限りは利得を増加させる戦略が存在せず、自分が戦略を変えるインセンティブが無い。

なお、ナッシュ均衡計算問題は、2人ゲームに限定しても多項式時間で計算できるかどうかかわかっておらず、PPAD 完全と呼ばれる問題のクラスに属することがわかっている<sup>15)</sup>。

都市数/人数	2	3	4	5
1	2	6	24	120
2	4	36	576	14400
3	8	216	13824	1.73E+006
4	16	1296	331776	2.07E+008
5	32	7776	7962624	2.49E+010
6	64	46656	1.91E+008	2.99E+012
7	128	279936	4.59E+009	3.58E+014
8	256	1.68E+006	1.10E+011	4.30E+016

図 6 都市数と人数と解の総数の関係

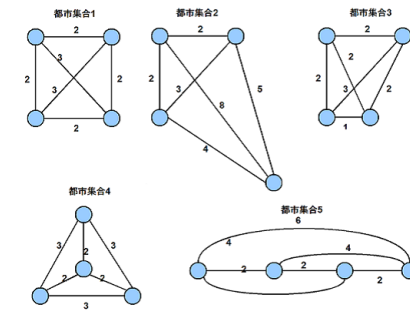


図 7 実験に用いた都市集合

#### 6.1.2 パレート効率性

非協力  $n$  人ゲームにおいて利得ベクトルの組を  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  とするとき、他のプレイヤーの利得を下げることなくある一人のプレイヤーの利得を増加させることができるような戦略が存在しないならば、 $x$  はパレート効率的であるという。パレート効率性はプレイヤー全体で見たときの合理性の概念であるから、パレート効率性が満たされるのであれば、全体合理性がもたらされていることを示している。

### 6.2 実験設定

以上を踏まえ、全探索によりナッシュ均衡、パレート効率性、およびその両方を満たす解の数と解の平均値を求め、問題の構造がどのようになっているか考察を行う。まず、都市数と人数(サブシステム数)ごとの解の総数を図 6 に示した。赤線で囲われている部分が今回実験を行った範囲である。この範囲に限定して実験を行った理由としては、

- 計算リソースの問題で  $1.00E+008$  以上のオーダーの計算が困難であること
- 都市数未満のサブシステム数で実験を行っても混雑が一度も発生しない解がパレート効率的かつナッシュ均衡となることが自明であること
- 都市数が 3 以下の場合では戦略の数が少なく解の構造が明快であるということなどがあげられる。よって、今回は主に都市数が 4 の問題に注目してサブシステム数と都市構造を変化させた時に解にどのような影響が表れるかについて考察する。

#### 6.2.1 ナッシュ均衡な解の数とコストの平均値

以下図 8 ~ 12 に、都市集合 1 ~ 5 とサブシステム数を 3 ~ 5 人と変化させた時のナッシュ均衡となる解の個数と、その時の一人あたりのコストの平均値を示す。左の縦軸と棒線グラフがナッシュ均衡となる解の個数、右の縦軸と折れ線グラフがナッシュ均衡な解の一人あた

りのコストの平均値，横軸がサブシステム数を表している．なお，一人あたりのコストの平均値は，

$$\frac{\text{ナッシュ均衡となる解の全員のコストの総和}}{\text{ナッシュ均衡となる解の個数} \times \text{サブシステム数}}$$

として求めた．サブシステム数が増えると解の総数が爆発的に増加するため，ナッシュ均衡となる解の個数も解の総数に比例して増加することがわかった．また，都市の構造によりナッシュ均衡となる解の個数もかなり変化するということが見受けられる．特に都市集合4はナッシュ均衡解の数が多く，これが都市の幾何的な構造によるものなのか，辺のコストの関係によるものなのか今後さらに追究していく必要がある．

### 6.3 結果及び分析

#### 6.3.1 ナッシュ均衡な解とパレート効率的な解のコストの平均値の比較

次に，ナッシュ均衡な解とパレート効率的な解のコストの平均値の比較を図13～17に掲載する．縦軸がそれぞれの解のコストの平均値，横軸がサブシステム数である．全ての都市集合，サブシステム数においてナッシュ均衡な解のコストの平均値がパレート効率的な解のコストの平均値を下回っていることがわかる．これは，パレート効率性を満たすには，他のサブシステムの利益をかなり犠牲にしなければならず，全体としてみるとそれほど効率的な解ではないものも入っているからと推測される．

#### 6.3.2 ナッシュ均衡な解の数とナッシュ均衡かつパレート効率的な解の数の比較

最後に，サブシステム数が5のときのナッシュ均衡となる解の個数とコストの平均値，ナッシュ均衡かつパレート効率的となる解の個数とコストの平均値の比較を図18，19に載せる．図18は縦軸がそれぞれの解の個数，横軸がサブシステム数である．この図より都市集合1と都市集合2において，ナッシュ均衡だがパレート効率的ではない解が存在していることがわかる．つまり，都市集合1と2においては，ナッシュ均衡に到達したからといってそれが必ずしもパレート効率性を満たすとは限らないということが言える．ただし，ナッシュ均衡な解とパレート効率的な解のコストの平均値の比較で見たように，全体の効率性を考えたときにはパレート効率的な解がナッシュ均衡な解より優れているとは言い難い．図19のナッシュ均衡となる解の個数とコストの平均値，ナッシュ均衡かつパレート効率的となる解の個数とコストの平均値の比較は，差がわずかであるので数値データを表として載せた．これらのデータよりナッシュ均衡と，ナッシュ均衡およびパレート効率性を同時に満たす解のコストの平均値の差はわずかであるので，ナッシュ均衡な状態が達成されればひとまず全体の効率化が図れたといっても問題ないだろう．

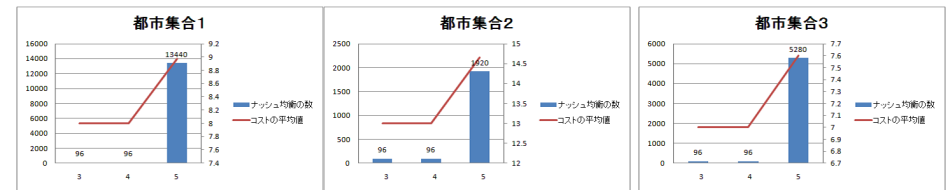


図8 都市集合1におけるナッシュ均衡 図9 都市集合2におけるナッシュ均衡 図10 都市集合3におけるナッシュ均衡

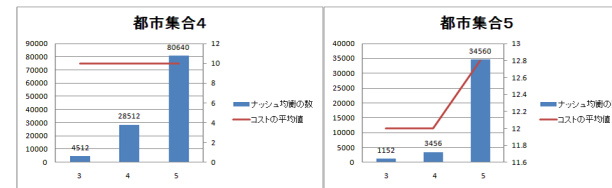


図11 都市集合4におけるナッシュ均衡 図12 都市集合5におけるナッシュ均衡

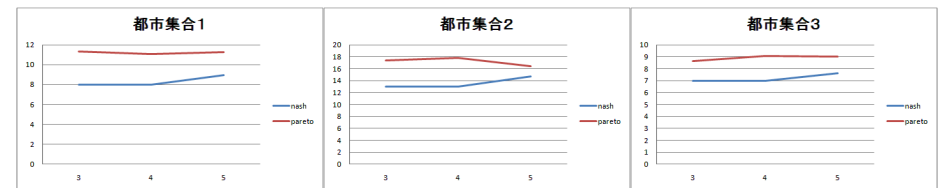


図13 都市集合1におけるコストの平均値の比較 図14 都市集合2におけるコストの平均値の比較 図15 都市集合3におけるコストの平均値の比較

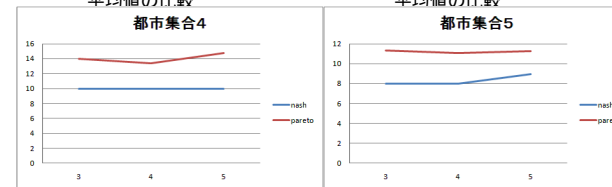


図16 都市集合4におけるコストの平均値の比較 図17 都市集合5におけるコストの平均値の比較

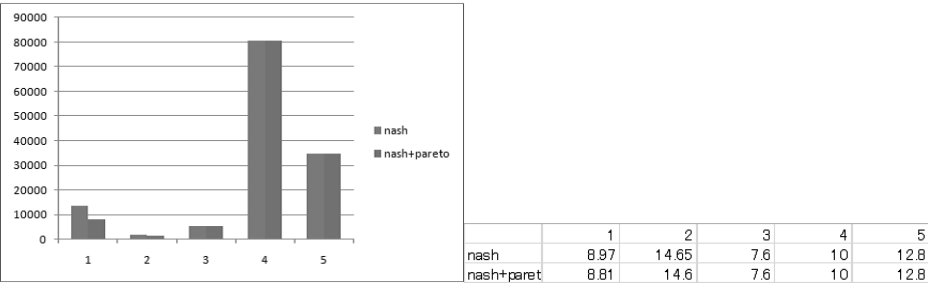


図 18 ナッシュ均衡の数とナッシュ均衡，パレート効率性 図 19 ナッシュ均衡とナッシュ均衡，パレート効率性を同時に満たす解の数 (サブシステム数 = 5) 同時に満たす解のコストの平均値の比較 (サブシステム数 = 5)

行動調整アルゴリズムによって得られる解はナッシュ均衡解であるので，行動調整アルゴリズムは共有資源の効率的利用に一定の効果があると言える。ただし，行動調整アルゴリズムによって解が得られるという保証がないため，今後はその検証が必要となるだろう。

7. ま と め

本研究では，テーマパークやカーナビゲーションに代表されるような共有資源の社会的利用を TSP の理論に基づきモデル化し，典型的な例題として 4 都市の問題を都市の構造やサブシステムの数を変えて解の構造がどのように変化するか検証した。その結果，都市構造によってはナッシュ均衡だがパレート効率性を満たさない解が存在することが明らかとなった。同時に，4 都市においてはナッシュ均衡の解のコストの平均値はパレート効率的な解のコストの平均値を下回ることがわかり，ナッシュ均衡解を得るだけでもシステム全体の利用効率の向上に一定の効果があるということがわかった。

今後の研究としては，どのような条件で解がジレンマ構造となるのかの検証と，5 都市以上においても同様のことが言えるかどうかという考察，また，行動調整アルゴリズムを実装し実際にナッシュ均衡に到達するのか，大規模な都市数，サブシステム数でどのような結果が得られるのか検証する必要がある。更に，都市数やサブシステム数が多い時に効率的に解を求めようアルゴリズムの改善も必要とされるだろう。

参 考 文 献

- 1) Kurumatani, K.: Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS. In Proceedings of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce 2003 (CD-ROM) (2003)
- 2) Kurumatani, K.: Mass User Support by Social Coordination Among Citizens in a Real Environment. In Multiagent for Mass User Support, LNAI 3012, Springer, pp.1-19 (2004)
- 3) 塩瀬隆之，鬼塚俊行，田浦俊春：交通流ナビゲーションにおける効果的な情報提供，知的都市基盤研究発表，(2002)
- 4) 山下倫央，車谷浩一：道路交通流の円滑化に向けた情報共有に基づく協調カーナビの提案，情報処理学会 ITS 研究会，(2006)
- 5) 横尾真：柔軟で動的なエージェントの組織構造を用いた分散制約充足アルゴリズム，人工知能学会誌 11(6),pp933-940, (1996-11)
- 6) 中谷直司，吉田等明，三浦守：動的巡回セールスマン問題への遺伝的アプローチ，計算自動制御学会東北支部第 187 回研究集会，(2000)
- 7) A. Fabrikant et al.: The complexity of pure Nash equilibria, STOC, (2004)
- 8) 山田陽介，小野廣隆，山下雅史：不完全情報渋滞ゲームの近似的ナッシュ遷移の収束性，冬の LA シンポジウム，(2009)
- 9) Hidenori Kawamura, Koichi Kurumatani, and Azuma Ohuchi: Modeling of Theme Park Problem with Multiagent for Mass User Support, Working Note of The IJCAI-03 Workshop on Multiagent for Mass User Support, Acapulco, Mexico pp.1-7 (2003).
- 10) 大口敬，佐藤貴行，鹿田成則：渋滞時の代替経路選択行動に与える交通情報提供効果，土木計画学研究講演集, No. 30, (2004)
- 11) Vehicle Information and Communication System Center: VICS HOME PAGE, <http://www.vics.or.jp/>.
- 12) 片岡崇，川村秀憲，車谷浩一，大内 東：「テーマパーク問題における混雑状況の提示とその効果」，電子情報通信学会技術研究報告，AI2003-89, pp47-52(2004-3)
- 13) 今川孝博：テーマパーク問題における予定情報共有システムの提案と混雑緩和効果の検証北海道大学大学院情報科学研究科 複合情報学専攻 調和系工学研究室 平成 18 年度修士論文 (2007)
- 14) 利根哲也，小原和博：テーマパークでの混雑情報と優先搭乗パスの効果に関するマルチエージェントによる検討，電学論 C (2007)
- 15) 岡本吉央：ナッシュ均衡計算の複雑さ，OR 学会中部支部シンポジウム予稿集，(2008-9)
- 16) 鈴木光男：新ゲーム理論，pp3-104, 勁草書房，(1994)
- 17) 山本芳嗣，久保幹雄：巡回セールスマン問題への招待，pp.85-118, 朝倉書店，(1997)