

## 共有資源の社会的利用に関する分析と考察

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

道路交通などの社会における共有資源の利用をモデル化した共有資源利用問題において、ユーザ間の利得の均衡解であるナッシュ均衡解の中で全ユーザの利得の総和が最大化されるような利用方法である社会的利用の実現を目指し、モデルに基づいたシミュレーション結果に基づいて分析と考察を行う。

### Analysis and Consideration about Social Utilization of Shared Resources

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

To deal with utilization method of goods by more than one person more applicative, this paper proposes Service Infrastructure Use Problem, and Social Utilization as a desirable condition of society on Service Infrastructure Use Problem. To make sure Social Utilization whether realizable or not, this paper formulates Service Infrastructure TSP as a specific model of Service Infrastructure Use Problem and an extended TSP model. Lastly, this paper does experiment simulation and verifies that.

#### 1. はじめに

人口増加や化石燃料の消費による食糧や石油等の資源枯渇が現実味を帯びてきたことにより、資源利用を効率化するための研究が盛んになってきている。例えば需給バランスを自律的に調整するなどして電力の配送を最適化するスマートグリッドは数年前から注目を浴び、研究分野のみならず官民挙げて既に計画、実施段階に入っているケースもある。また、複数人が共通の資源を使うという観点では交通における渋滞や鉄道の混雑なども資源利用

問題の枠組みで扱うことができるであろうが、これらの問題は土木計画や交通工学の分野で盛んに研究が行われておりフレックスタイム制度<sup>1)</sup>や道路の通行権市場取引制度<sup>2)</sup>、混雑検知を利用したカーナビゲーションシステムである VICS などの形で既に実用化が進んでいる。これらの社会的インフラは現代社会における生活の上でもはや欠かすことができない存在となっており、利用効率を向上させることによりサステナブルな社会的インフラを実現するため、前述の取り組みに対し日々注目が高まっているし、これからこれらの取り組みはますます必要不可欠なものとなっていくと考えられる。

一方で、現状行われている取り組みの多くはヒューリスティックな手法に過ぎず、真の意味での最適化となっているとは言いがたい。例えば VICS においてはユーザが多数を占めた場合、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発生することが問題視され実社会においても観測されている<sup>7)</sup>。このように社会問題に対する理論的な厳密解法であるかは不明ものがほとんどであり、将来より良い手法が発見され取って代わられる可能性は十分あり得る。前述のような日進月歩の取り組みも当然重要ではあるが、理論的に最も効率的な利用法は何かという検証も今後必要とされてくるであろう。本研究では後者のスタンスに立ち、これらの共有資源利用問題をゲーム理論の枠組みで捉えることでこれらの問題が内包している問題点や性質を見出し、可能であるならば厳密解を得る手法またはその理論的アプローチを提案することを目的とする。

本研究における重要なテーマとしてユーザの意思の介在という点がある。例えば土木計画における研究である社会的最適化においては社会の効用を最大化するため、ユーザの行動をコントロールすることを前提としている研究もあるが、本研究においては利用効率向上のためとはいえ個々のユーザが自由に共有資源を利用するという欲求を第三者が恣意的に妨げるということは現実社会にそぐわないと考え、個々のユーザが共有資源を自分の取りうる手段の中で最も効率的に利用しているという状態を満たしつつ、ユーザ全体で見た時の社会の効用もできる限り向上することが本研究の最終的な目標である。

個々のユーザの合理的(利己的)行動とユーザ全体からなる社会の効用の葛藤は、囚人のジレンマが非常に有名であることからわかるように、古くからゲーム理論の分野において盛んに研究が行われてきた。ゲーム理論における従来研究として共有資源を表した問題である Congestion Game<sup>3)</sup>や Selfish Routing Game の理論的性質が議論されており、その一般的な性質について様々な研究がされている。これらの研究も本研究の目的と一致するところがあると考えられるため、調査を進めていきたい。

また、群ユーザ支援<sup>4)</sup>においては個々のユーザのみならず複数のユーザを集めた群として

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

の利用効率の向上を目標としており、本研究の目的と類似している。群ユーザ支援の具体例として実社会における問題も研究されており、テーマパーク問題<sup>5)</sup> やカーナビゲーション問題<sup>6)</sup> といったものがある。これらの研究でも効率的な手法がどのようなものかという提案がされており、将来的には本研究の枠組みにおいてこれらの手法がどの程度効果的かということとを理論的に考察したいと考えている。

## 2. 共有資源利用問題

### 2.1 概要

本章では本研究にて扱う共有資源の定義、共有資源とユーザの関係をモデル化した共有資源利用問題の定式化についての説明を行う。

### 2.2 エージェントと共有資源

共有資源の利用モデルでは共有資源を利用する人々(ユーザ)をエージェントと定義する。エージェントが共有資源を利用すると共有資源が提供するサービス資源を得ることで効用が得られる。共有資源利用問題では共有資源を扱うゲームである以上、経済学でいうところの財の一種である共有資源と同じく非排除的かつ競争的な財である。すなわち予約やフリーパスのような他者を排除する制度が存在しない非協力ゲームであり、他のエージェントに左右されず自由に共有資源を利用できる。また、同時に同じ共有資源利用するエージェントが多いほど得られる効用は減少するものとする。共有資源の例としては先述したような道路、鉄道、娯楽施設などが挙げられるであろう。2.3 定式化エージェント集合  $A$  と共有資源が提供するサービス資源の集合  $R$  を以下のように定義する。

$$A = \{a | a = 1, 2, \dots, n\}$$

$$R = \{r | r = 1, 2, \dots, m\}$$

$R$  において同じ資源でも提供される時間が異なるものは競合することが無いと考え別の資源として扱われるものとする。次に、あるエージェントが利用する全ての資源の組は  $R$  のべき集合  $2^R$  で表されそのうち実行可能なものの集合をその部分集合

$$S_a = \{S_1, S_2, \dots\} \subseteq 2^R$$

と定義する。実行可能であるという意味は、全ての資源の組のうち実行不可能であるものの存在を仮定しているということであり、例えば資源が道路であるときに同じ時間に複数の道路を走ることはいないので同じ時間に複数の資源を使うという戦略は実行不可能であ

るということなどを意味している。

あるエージェント  $a$  がとりうる戦略すなわち利用する資源の組は  $S_a$  を用いて

$$X_a \in S_a$$

と表される。また、エージェント  $a$  を除いた全エージェントのとりうる戦略の集合を  $X_{-a}$  と表すこととする。

そのエージェント  $a$  がとった戦略  $X_a$  に対して得られる効用を  $g_a(X_a)$  とする。本研究では効用は正のみならず負の値も取りうるものとする。効用に対し、資源  $r$  を複数のエージェントが使った時に利得が減少する性質(競争性)を表現するためにコストを導入する。コストは以下のように定義する。

$$c(r) = h(n_r(X_a, X_{-a}))$$

ここで  $h(n_r(X_a, X_{-a}))$  は  $x > y$  ならば  $h(x) > h(y)$  となる狭義単調増加関数であり、 $h(1) = 0$  であるものとする。また、 $n_r(X_a, X_{-a})$  は資源  $r$  を利用しているエージェント数であり各エージェントが戦略を決定した後に、以下の関数で定義される。

$$n_r(X_a, X_{-a}) = \sum_{a=1}^n f(r, X_a)$$

$$f(r, X_a) = \begin{cases} 1 & \text{if } r \in X_a \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

なお、 $n_r(X_a, X_{-a})$  は共有資源を使うエージェントの数であるので非負の整数となる。さらに、効用  $g_a(B)$  とコスト  $c(r)$  を用いてエージェント  $a$  が戦略  $X_a$  により得られる利得を効用とコストの差として以下のように定義する。

$$p_a(X_a) = g(X_a) - \sum_{r \in X_a} c(r)$$

このとき、各々のエージェントがそれぞれ得られる利得の組を  $n$  次元のベクトルで表した利得ベクトルを  $p$  として、

$$p = (p_1(X_1), p_2(X_2), \dots, p_n(X_n))$$

と表現する。最後に、社会全体の利得として社会の利得  $u$  を以下に定義する。

$$u = \sum_{a=1}^n p_a(\mathbf{X}_a)$$

社会の利得は全てのエージェントの利得の総和であり、社会の利得  $u$  を最大化することこそが社会全体での利用効率最大化に他ならない。

### 2.3 エージェントの戦略決定原理

共有資源全てのエージェントは合理的に戦略を決定するものとする。つまり、

$$\mathbf{X}_a^* = \operatorname{argmax} p_a(\mathbf{X}_a)$$

となる最適反応戦略  $\mathbf{X}_a^*$  をとる。すなわち、全てのエージェントは最適反応戦略を取るためその時に得られる利得ベクトルはナッシュ均衡であるということが言える。一方、2つの利得ベクトル  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  と  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  で、 $i = 1, 2, \dots, n$  において

$$x_i \geq y_i$$

が常に成り立つ時、利得ベクトル  $\mathbf{x}$  は利得ベクトル  $\mathbf{y}$  をパレート支配すると言い、利得ベクトルが他のどの戦略にもパレート支配されていないことをパレート最適であるという。

### 2.4 共有資源の社会的利用

本論文では社会の望ましい状態として共有資源の社会的利用を定義する。具体的には社会の利得が最大化されており、かつナッシュ均衡であるような解が達成されている共有資源の利用法であり、この状態では個々のエージェントが各々最適反応原理を満たしつつ、全体としても効率的に共有資源の利用ができているという状態である。本研究では、共有資源の利用問題において、社会的利用が実現可能かどうか明らかにすることがひとつの大きな目的である。

## 3. 共有資源利用型 TSP

本章では、上述した共有資源の社会的利用が実現可能かどうか確かめるために、前章にて定義した共有資源の利用モデルのより具体的でシミュレーション実験が行いやすい巡回セールスマン問題 (TSP) に基づいたモデルである共有資源利用型 TSP を定義する。

### 3.1 定式化

エージェント集合  $A$ 、都市集合  $V$ 、エッジ集合  $E$  を以下のように定義する。共有資源利用型 TSP では、都市間を繋ぐエッジが共有資源として扱われる。

$$A = \{a | a = 1, 2, \dots, n\}$$

$$V = \{v | v = 1, 2, \dots, m\}$$

$$E = \{e | e = 1, 2, \dots, k (k = \frac{n(n-1)}{2})\}$$

ここまでは従来の典型的な TSP と全く同じであるが、共有資源利用型 TSP の特徴は時刻  $t$  が定義されるという点である。時刻が 1 進むごとにエージェントは 1 都市ずつ移動することができるものとする。すなわち、 $t = m$  となった時に各々のエージェントは巡回路を得る。また、各エッジに対し都市間の距離に相当する効用  $c_e$  が定数で定義される。これは共有資源利用問題における効用  $g(\mathbf{X}_a)$  に相当するものであり TSP では距離が大きいかほど効用が減少すると考えられるので、全ての  $e$  に対して、

$$c_e \geq 0$$

であるとする。

各エージェントはそれぞれ巡回路を表す  $x_{aet}$  を持つ。巡回路は以下のように定義される。

$$x_{aet} = \begin{cases} 1 & \text{エッジ } e \text{ が時刻 } t \text{ における } a \text{ の経路である} \\ 0 & \text{エッジ } e \text{ が時刻 } t \text{ における } a \text{ の経路でない} \end{cases}$$

これは共有資源の利用モデルではエージェントの戦略  $\mathbf{X}_a$  に相当する。次に、エッジ  $e$  を時刻  $t$  に使う時にかかるコスト  $d_{et}$  を

$$d_{et} = c_e \cdot \left( \sum_{a=1}^n x_{aet} - 1 \right)$$

と定義する。コスト  $c_e$  と対応しており、エッジを利用するエージェント数を表す  $\sum_{a=1}^n x_{aet}$  に関する単調増加関数であり、 $\sum_{a=1}^n x_{aet} = 1$  の時  $d_{et} = 0$  となっている。さらに、利得  $p_{aet}(x_{aet})$  を以下のように定義する。

$$p_{aet}(x_{aet}) = c_e - d_{et}$$

これは共有資源の利用モデルのエージェントの利得  $p(\mathbf{X}_a)$  に相当しており、 $c_e < 0$  および  $d_{et} > 0$  より  $p_{aet}(x_{aet}) < 0$  である。以上の変数を用いて目的関数を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} & \min \sum_{a=1}^n \sum_{e=1}^k \sum_{t=1}^m p_{aet}(x_{aet})x_{aet} \\ \text{s.t. } & \sum_{e=1}^k x_{aet} = n \quad a=1,2,\dots,n \\ & \quad \quad \quad t=1,2,\dots,m \text{ について} \\ & x_{aet} \in (0, 1) \quad a=1,2,3,\dots,n \quad e=1,2,\dots,k \\ & \quad \quad \quad t=1,2,\dots,m \text{ について} \\ & a=1,2,\dots,m \text{ について全ての解は} \\ & \quad \quad \quad \text{巡回路を生成する} \end{aligned}$$

全エージェントの利得の総和である社会の利得を最大化することが共有資源利用型 TSP における社会全体の利用効率向上に相当する。これは共有資源利用問題における社会の利得と全く同様となっている。

#### 4. 実 験

##### 4.1 概 要

都市数が大きくなった場合に社会の利得を最大化する解を得ることが可能であるか、エージェントの持つ初期戦略と最終的な解の関係を確認するために、TSP の都市セットとしては比較的小規模な 20 都市の都市集合において 20 エージェントがそれぞれ独自に解を改善して行った時に得られる共有資源利用型 TSP の解の評価値を調べた。共有資源利用型 TSP が TSP と異なる点として巡回路の形状のみならず、辺を使う順番すなわち巡回路の開始地点と回る方向も利得に関係する。したがって、探索すべき解空間の大きさは通常の TSP に比べ  $2m$  倍になる。さらに、全エージェントに対して巡回路を探索する必要があるため、総当たり方式による探索時間は最大  $2mn$  倍になることがわかる。

したがって、この実験においては解を全列挙することが計算機のリソース上の問題から困難であるので、近似解放である焼きなまし法を用いて各々のエージェントが交互に自分の評価値を更新していき収束したときの社会の利得を求め、200 回試行した際の社会の利得の分布と平均、最適解からの誤差を調査した。利用した都市セットは TSP の都市セットを提供するライブラリである TSPLib から 51 都市の二次元ユークリッド TSP である `eil51.tsp` の先頭から 20 都市を用いた都市セット (1) を実験データとして用いた。なお、この問題の TSP の最適解は 243、共有資源利用型 TSP の最適解は初期状態で 20 都市それぞれに 1 エー

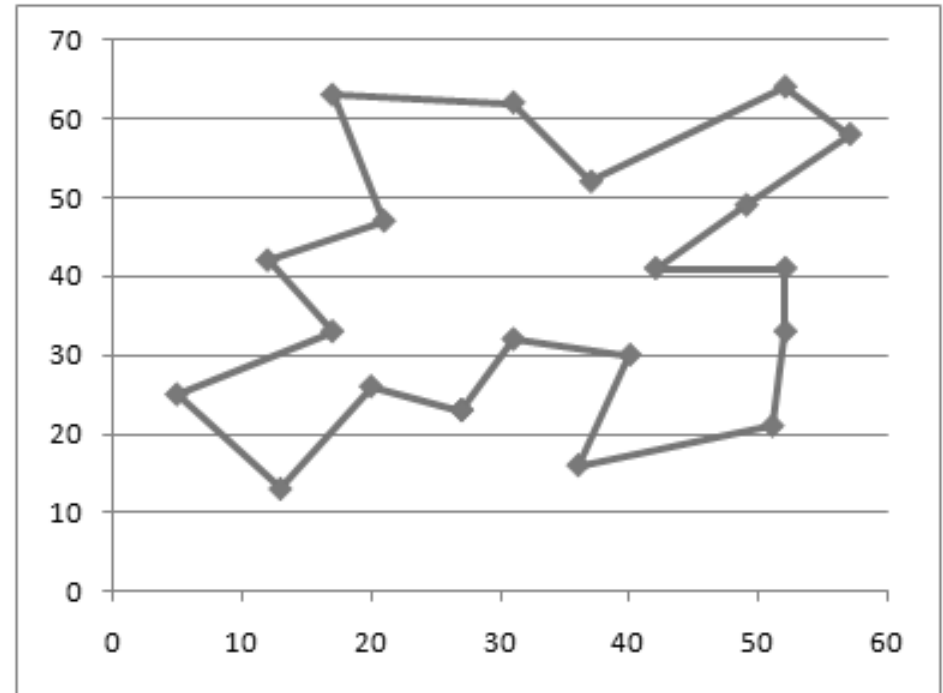


図 1 20 都市の都市配置と最適経路

ントずつがあり、TSP の最適巡回路を 1 都市ずつずれる形で回るもの (例として 10 都市 10 エージェントのイメージを図 2 に示した) であり、その時の社会の利得は 4860 である。今回は初期値としてでたらめな値 ( $n$  ステップ目に  $n$  番目の都市を回る経路) と TSP の最適解 (スタート地点は 1 番目の都市) を入れて共有資源利用型 TSP のモデルに基づきそれぞれについて実験を行った。

##### 4.2 結果と考察概要

結果のグラフを図 3,4 に示した。最適解が得られている回数は図 4 のほうが多いが、社会の利得の平均では図 3 のほうが高い。一度も得られていないということがわかる。2 つの結果にそれほど大きな差異は見られず、初期値として TSP の最適解を持っていることが必ずしも共有資源利用型 TSP の社会の利得向上につながるものではないということがわかった。

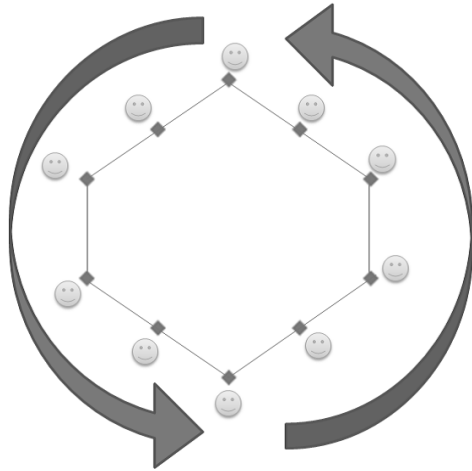


図2 10都市10エージェントの場合の最適解のイメージ

## 5. おわりに

本研究では近年高まりつつある資源の効率的利用を目指し、複数のユーザによる共有資源の利用をモデル化した共有資源利用問題を定義した。さらに実験を行い問題の性質を調査するため、共有資源問題のさらに具体的なモデルである共有資源利用型 TSP を定義し、シミュレーションにより実験を行い、その解の性質を分析した。今後の課題として、都市セットとエージェント数を変化させた場合にどのような挙動が生じるか、さらに細かな調査が必要である。

## 参考文献

- 1) 小林潔司, 奥村誠:「鉄道通勤交通における出発時刻分布に関する研究」土木計画学研究・論文集, 1997
- 2) 赤松隆:「一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度」土木学会論文集 D vol.63 No3 pp.287-301, 2007
- 3) Igal Milchtaich: Congestion games with player-specific payoff functions, Games and economic behavior, pp.111-124 (1996)
- 4) 車谷浩一:「群ユーザ支援:ユビキタス情報環境を用いた社会的調整サービス」信学技

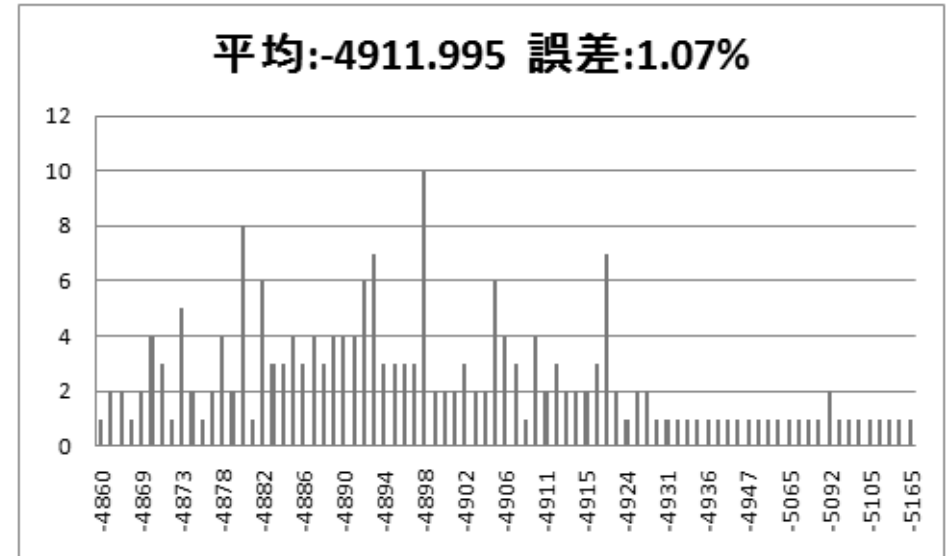


図3 初期値がでたらめな場合の解200個の分布と平均、最適解との誤差

- 報, AI2003-87, pp.35-40(2004-3).
- 5) 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).
- 6) 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)
- 7) 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)

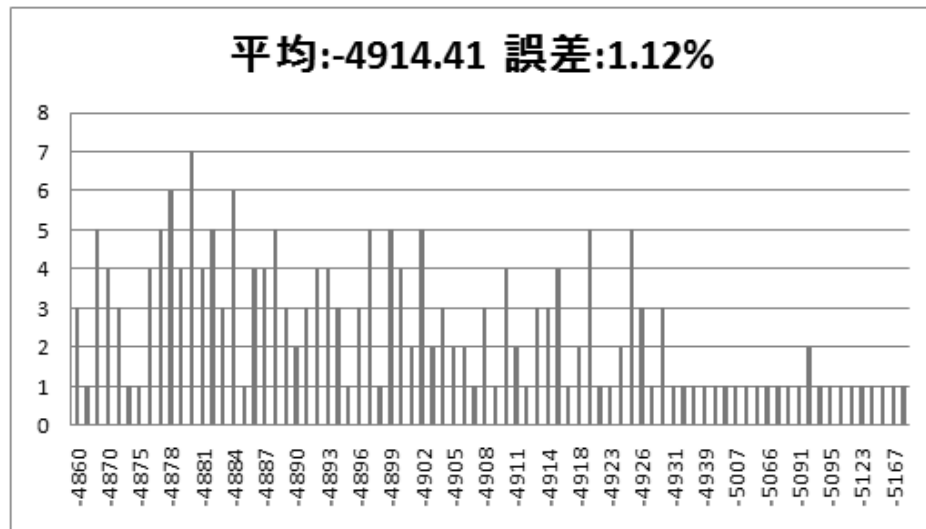


図4 初期値が TSP の最適解の場合の解 200 個の分布と平均、最適解との誤差