

共有資源の社会的利用と解構造

A Structure of Solutions and Social Utilization of Shared Resources

小野 良太*¹ 川村 秀憲*¹ 鈴木 恵二*¹
 Ryota Ono Hidenori Kawamura Keiji Suzuki

*¹北海道大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

This paper proposes Shared Resources Use Problem as a model of multiple shared resources and users (society). To make sure Social Utilization whether realizable or not, this paper formulates Shared Resources Use TSP as a specific model of Shared Resources Use Problem and an extended TSP model. Lastly, this paper verifies that mathematically.

1. はじめに

日常生活における社会的活動の多くはサービスを恒常的に提供するインフラ設備によって成り立っている。例えば、移動手段としての電車や道路、電力を提供する送電網などである。これらの多くはユーザ個人がそれぞれ単独に所有し独占的に利用するのではなく、社会的に提供されているものを複数のユーザで共有して利用している。また、このような設備の多くはユーザに開放的に提供されており、誰でも同じ料金を支払えば利用する権利を得ることができる。しかしながら、いつでも誰でも自由かつ平等に利用可能という訳ではなく、ユーザが設備のキャパシティを超えて集中し過ぎると例えば道路であれば渋滞、電力であれば大規模停電が発生するなど社会的損失が発生する。かといって単純に設備のキャパシティを拡大すれば良いとも限らず、混雑発生による社会的損失と

したがって、設備側の供給だけでなくユーザ側の需要を調整することによる需給バランスの最適化の試みが重要視されており、土木計画や交通工学の分野で盛んに研究が行われている。例えばフレックスタイム制度 [1] や道路の通行権市場取引制度 [2]、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ものもある。しかしながら、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 [3] し、実際、祝日などの需要増加の際にいまだに渋滞が発生している例などを考えるにこれらの取り組みによる効果は完璧とは言えず、改善の余地はあるものと考えられる。

本研究では、このようなインフラ設備などの複数のユーザが共有して利用する資源（共有資源）を数理モデルを用いて定式化し、複数人で用いる際にどのような問題が生じるのかを理論的に分析し、またその問題を回避するためにはどのような手段を取ればよいのか、社会全体で最も効率的な資源の利用状態を達成するためにはどうすればよいのかを見出すことが目的である。

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

連絡先: 小野 良太, 北海道大学 大学院情報科学研究科,
 ono@complex.eng.hokudai.ac.jp

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、囚人のジレンマや共有地の悲劇という典型的ケースで広く知られているように、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 [4] や Selfish Routing Game [5] 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。本研究と本質的な部分で類似する点が少なからずあるので、これらの研究で得られた知見が本研究と関連してくることも当然あると考えられる。

また、群ユーザ支援 [6] 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 [7] やカーナビゲーション問題 [8] 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を実験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。効用に関しては現実社会において数値化可能なものか、比較可能なものかという議論がつきものであるが、本研究では数値化でき比較可能なものとして扱うこととする。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他的かつ競合的な財である。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ではでき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（競合性）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。

$$u = \sum_{a=1}^n p_a(X_a)$$

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。

2.4 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、

$$X_a^* = \operatorname{argmax} p_a(X_a)$$

となる最適反応戦略 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 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ と $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 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 x は利得ベクトル 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。

2.5 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くという状態である。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、上述した共有資源利用問題の本質的な部分をより具体的に分析するために、巡回セールスマン問題 (TSP) に基づいて共有資源の利用法などの制約条件を加え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。

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

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

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

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 g_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、

$$g_e \geq 0$$

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

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

と定義する。コスト $c(r)$ 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。

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

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、 $g_e < 0$ 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

このような問題を分析する上でナッシュ均衡が存在するか否かによって、協力ゲームの枠組みで扱うべきかなどゲームの性質に非常に大きな影響があるため、まずナッシュ均衡が存在するかを検討することは重要である。言い換えると、都市数 m においてエージェント n 人の共有資源利用型 TSP を考えたときに、いかなる m, n においてもナッシュ均衡が存在するかを確かめる必要があるが、その第一歩として今回は都市数 m と

エージェント数 n が等しい場合に n 人のエージェントは各々最適反応戦略を取っておりナッシュ均衡となっているとしたとき、ここに新たに $n+1$ 人目のエージェントが参加しゲームを $n+1$ 人ゲームに拡張したときに、他のエージェントが戦略を変えないという条件のもとでナッシュ均衡が存在する場合はあるのか例を挙げて検証する。

4.2 検証

都市数 n とエージェント数 n の共有資源利用型 TSP を考える。エージェント a が戦略 \mathbf{X}_a を取ったときの効用の総和を $G_a(\mathbf{X}_a)$ 利得の総和を $P_a(\mathbf{X}_a)$ とすると、前提条件より、全てのエージェント $a = 1, 2, \dots, n$ はナッシュ均衡の定義に従い、取りうる全ての戦略集合 \mathbf{X} に対し、

$$P_a(\mathbf{X}_a^*) \geq P_a(\forall \mathbf{X}_a \in \mathbf{X})$$

となる戦略 \mathbf{X}_a^* を取っている。

ここでエージェント $a = n+1$ は他のエージェントが戦略を変更することは無いという条件より、

$$P_{n+1}(\mathbf{X}_{n+1}^*) \geq P_{n+1}(\forall \mathbf{X}_{n+1} \in \mathbf{X})$$

となる戦略 \mathbf{X}_{n+1}^* が最適反応戦略となる。

例えば、この都市集合における TSP の最適解を

$$E^* = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

としたときに、 e_i を始めに使うエッジとして、1 ステップごとに順番に E^* の経路に沿って時計回りにエッジを使っていく戦略を \mathbf{X}_{E_i} とし、エージェント $a = 1, 2, \dots, n$ は戦略 $\mathbf{X}_{E_1}, \mathbf{X}_{E_2}, \dots, \mathbf{X}_{E_n}$ を取りナッシュ均衡となっているとする。

エージェント $a = n+1$ が戦略 $\mathbf{X}_{E_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ を取ると $n(x) = 2(x \in X_{E_i})$ となるため、

$$P_a(X_{E_i}) = 2 \cdot G_a(\mathbf{X}_a)$$

となるが、ここで

$$P_a(\mathbf{X}_{E_i}) \geq P_a(\forall \mathbf{X}_a \in \mathbf{X})$$

であるとするならば、戦略 \mathbf{X}_{E_i} が最適反応戦略となる。また、エージェント $a = i$ 以外の $a = 1, 2, \dots, n$ の全てのエージェントは元々の戦略が明らかに最適反応戦略である。エージェント $a = i$ は $P_a(\mathbf{X}_{E_i}) \geq P_a(\forall \mathbf{X}_a \in \mathbf{X})$ より戦略 \mathbf{X}_{E_i} が最適反応戦略となる。

したがって、この時得られている戦略の組はナッシュ均衡であり、都市数 n とエージェント数 n においてナッシュ均衡となっているときに、 $n+1$ 人ゲームに拡張したときもナッシュ均衡が存在することを示せた。

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。さらに問題の性質を調査するため、共有資源利用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、数学的な分析を行い、その解の性質を分析した。今後の課題として、共有資源利用型 TSP において常にナッシュ均衡が存在するかどうかの検証、Price of Anarchy の観点に基づくナッシュ均衡解の評価を行うことなどがある。

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] 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 pp.799-804, 2004
- [4] Igal Milchtaich: Congestion games with player-specific payoff functions, Games and economic behavior, pp.111-124 (1996)
- [5] T. Roughgarden: Selfish Routing and the Price of Anarchy. The MIT Press, 2005.
- [6] 車谷浩一: 群ユーザ支援: コピキタス情報環境を用いた社会的調整サービス, 信学技報, AI2003-87, pp.35-40(2004-3).
- [7] 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).
- [8] 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)