

# 複数選択肢をバンドルする予約システムによる 効率的な資源配分の理論解析

佐津川 功季<sup>1</sup>・原 祐輔<sup>2</sup>・川崎 洋輔<sup>3</sup>・井料 隆雅<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北大学助教 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: satsukawa@tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学准教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: hara@tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 日本大学専任講師 工学部土木工学科 (〒 963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)  
E-mail: kawasaki.yosuke@nihon-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: iryo@tohoku.ac.jp (Corresponding author)

都市活動における利用者意思決定の不確実性は予約行動や実交通行動・都市活動のキャンセルや no show といった問題を引き起こす一方で、予期しない需要の集中を生み出すこともあり、需要の動的な性質の予測困難性が知られている。一方、供給側においても、さまざまな不確実性をもった突発事象により、予期しない供給不足が発生することもよくあり、それに伴い利用者の損害や需要の消滅が往々にして発生する。本研究は、供給側の不確実性の問題を解決するものとして、複数の選択肢をバンドルする予約システムを提案し、それによりどのように効率的な資源配分を時空間上で達成できるのかを理論的に解析した結果を紹介する。

**Key Words:** Reservation system, service bundlling, resource allocation, capacity uncertainty

## 1. はじめに

交通システムをはじめとする都市が提供するサービスの多くは一定の容量、すなわち単位時間あたりのサービス提供量の上限を持ち、かつ、多くの場合はそれを眼前の需要量に合わせて即座にコントロールすることができない。容量を超える需要がやってきた場合は待ち行列を形成させるしかないが、待ち行列をつくったところで、容量に上限がある以上は、希望する時間帯にサービスを受けられない利用者が発生することは避けられない。サービスを受けられない利用者は待ち行列による時間損失を被るか、サービスを受けられずに多大な機会損失を被ることになってしまう。

需要量を容量に見合うように制御するもっとも確実な方法は、個々のサービスの利用権を事前に利用者にマッチングさせること、すなわち「予約」である。これにより、サービス提供時に容量を超過する需要がやってくることはなくなる。容量からあふれた利用者は、事前にそのことを知ることができるので、受けることができないサービスは早々にあきらめて、事前に別の活動を計画することによって機会損失を避けることが可能となる。もちろん、長大な待ち行列の発生も防止できる。

予約の考え方自体は当然ながら目新しいものではなく、古くから運輸、旅行、飲食、興業などの多くのサー

ビス業で用いられている。プライシングとあわせた利益向上施策 (Yield Managemnt) が航空業界で盛んであることもよく知られている。都市交通においても、ボトルネック渋滞解消の手段として予約制<sup>1)</sup> や通行権取引制度<sup>2)3)</sup> が提案されている。

予約は最終的に提供可能な容量を事前に確実に把握できることが前提となるシステムだが、この前提は実社会では必ずしも堅牢とはいえない。容量が事前に減少することはさまざまな理由で起きる。しかし、日常的に発生する小規模な容量低下であれば、予備容量を確保するなどの素朴な方法論で対処可能である。例えば航空業界では、Airline Disruption Management と呼ばれる方法論がある<sup>4)</sup>。この中では、供給側 (機材や乗務員) のほか、欠航便の旅客の最適再配置も取り扱われている。

一方で、実社会では日常的とはいえない大幅な容量低下が発生することもある。地震や台風のような大規模な災害やテロ、また最近問題となった疫病など、事前の予測が難しかったり不可能であり、かつ、対象となるサービスの大部分に障害を与えるものに起因することが一般的である。この場合は上述のような方法で供給側が対処することは難しく、結果的にサービス不履行とならざるをえない。それにより事前に構築したマッチングは崩壊し、不利益は顧客を失う供給側と機会損失をこうむる旅客の双方に発生する。

このような大幅な容量低下の発生に備えるためには、利用者が事前に複数の選択肢を確保して、実際に消費可能なものの中もっともよいサービスを選ぶという方策が考えられる。しかしこの方策には、利用者が個別に選択肢を列挙しなくてはいけない、不要な予約に対して大きいキャンセル料がかかる（供給側からは、利用者の優先順位は見えていないことにも注意）など、問題点は多い。結果として、このような方策をとる利用者は実際の世の中には多くは存在しないと考えるのが妥当であろう。

本研究では、大幅な容量低下の発生に備えた複数の選択肢をバンドルを、個々の利用者ではなく 1 つの市場で仲介する主体の存在を前提とし、サービス提供直前の容量の突発的な低下が発生したときに容量を最適に再配分する予約システムを提案する。この予約システムでは、以下の 2 つの条件が成立することを前提としている：

- 多くの利用者は、唯一の指定したサービス以外を無価値とするのではなく、類似のサービスでも許容することができる。
- 需要には時空間的なムラがあり、容量低下の影響を受けるところもあれば、そうでないところもある。

1 点目については希少価値の高い特殊なサービス（特別なイベントや特定の記念日など）を別にすれば、多くの場合において成立すると考えるのが自然であろう。2 点目については、少なくとも時間的なムラについては多くのサービスに繁忙期と閑散期があることを考えればよく成立するといえる。空間的にも、それぞれのサービスの人気度に差異があれば、通常は人気度が高くはないサービスまで予約で埋まるほどの繁忙期でなければ、通常は成立するといえよう。本研究ではもっとも簡単な例として、選好に差がある複数のサービスをバンドルすることにより、サービス提供直前の突発事象に伴う容量低下による社会的厚生への低下がどこまで抑えられるかを数理モデルによる数値計算を用いて示す。

本稿の構成を以下に示す。まず 2. では予約システムに関する既往研究を整理する。3. では本稿で想定する状況を説明し、通常の予約システムのモデリングを行う。4. では本稿で提案する複数選択肢をバンドル化する予約システムについて説明する。5. では提案システムの効率性を確認するために数値計算を行う。6. では本稿のまとめを行う。

## 2. 既往研究のレビュー

本節では、サービスや交通システムに関わる予約システムに関する既往研究を整理する。ここで、予約システムとは事前に売り出されるサービス・交通システ

ムの枠を購入し確定する狭義の予約システムだけでなく、通行権取引制度・利用権取引制度のように事前に枠に対して入札し、割り当てを行う広義の予約システムも合わせて整理する。

### (1) 予約システムの経済便益評価

小林ら<sup>5)</sup>は独占的サービス市場における市場均衡モデルを構築し、予約システムの導入が家計の経済厚生や社会的厚生に及ぼす影響を分析している。ここでは、予約のオプション価値と私的情報開示の顕示メカニズムに着目している。赤松<sup>2)</sup>や Akamatsu and Wada<sup>3)</sup>は交通ネットワーク上の通行権取引制度を提案することで、道路利用者に私的評価値を表明させることによって、渋滞の発生しない最も効率的な割当が実現できることを理論的に示した。Hara and Hato<sup>6)</sup>は利用権取引制度として、カーシェアリング市場に拡張し、異なる利用者間での利用の接続性を担保することで、最適な割当が実現できることを示している。原・羽藤<sup>7)</sup>は早い者勝ちではない予約システムを提案し、社会的厚生観点からは利用権取引制度(オークション)と通常の予約システムの間である一方で、公平性の観点からは早い者勝ちの順序からあまり入れ替ええない仕組みであることを示している。

上記の既往研究が事前予約・事前割当に対応する研究であるのに対し、オンラインメカニズムによるリアルタイムのメカニズムも研究されている。Gerding et al.<sup>8)</sup>や Stein et al.<sup>9)</sup>は電気自動車の充電システムの割当について、各車両が充電可能な時間やどの車両に割り当てるかなどについて、刻一刻と状況が変わる中で割当を行う方法を提案している。不確実性におけるオークションのもう一つのアプローチとして、Bergemann and Välimäki<sup>10)</sup>は事後インセンティブ整合性と事後参加制約を満たす dynamic pivot mechanism を提案している。これは各入札者が時間経過と共に、その財の真の評価値がわかるような反復オークション下において効率的なメカニズムである。このように、狭義・広義の予約システムが経済便益を改善しうることは多くの研究で示されており、また利用者の不確実性が存在する特定の状況下にも対応する割当メカニズムが多く提案されている。

### (2) 利用者の予約行動

利用者の予約行動に着目した研究として松島ら<sup>11)</sup>はサービスに対してより大きな効用を持つ家計は事前にサービス消費を予約する誘因を持つことを示している。別のアプローチとして、より行動論的に予約行動を捉える研究を紹介する。心理学の分野では Construal Level Theory (CLT) (Liberman et al.<sup>12)</sup>) という考え方が知られ

ている。これは物理的距離、時間的距離、心理的距離などで遠いものの解像度が低く、近づくにつれて解像度が高くなることが実験的に知られている。Lieberman et al.<sup>13)</sup>は近日中にキャンプに行く群と将来キャンプに行く群に分けて、キャンプに必要なものをグルーピングさせた実験において、両者のカテゴリズの解像度が異なることを示した。これらの研究は予約行動の2つの側面を示している。1つはサービスに対する効用が高い利用者は早めに予約を行うだろうという顕示選好性である。その一方で、時間的に遠いサービス・イベントについては、どのサービスを予約すべきかが本人の中でも決定されづらいという曖昧性も存在する。これらが不確実性とも合わさり、将来意思決定の難しさを生み出していると考えられる。

### (3) 不確実性に対する供給側の方策

サービス供給者にとって、予約制度は事前割引制度等と同時に実施されることが多い。例えば、航空会社等は事前割引制度やオーバースタッキングに対して、利潤最大化を目的として精力的に研究・実務展開がなされている(Beckmann<sup>14)</sup>, Subramanian et al.<sup>15)</sup>, Chatwin<sup>16)</sup>, McGill and Van Ryzin<sup>17)</sup>)。このようなオーバースタッキングは利用者の不確実性を考慮しつつ、利潤最大化することが目的である。Kohl et al.<sup>4)</sup>は Airline disruption management に関する包括的なレビュー論文である。Airline disruption management は Irregular Operations (IROPS) と呼ばれ、航空機の運行に障害があったときに顧客、機材、乗務員の3つの視点から事後的な対処を行う管理手法である。

このような不確実性に対する供給側の方策は交通事業のみならず、調達オークションなどの分野でも研究が進められている。Cheaitou and Cheaytoui<sup>18)</sup>は、単一の製品を2期モデルによるオークションで供給するモデルを構築している。「供給者(リスクあり・なし)」「小売業者(仲介)」「輸送業者」「需要者」の4主体を対象に、第1期では小売業者は主要な輸送業者(リスクなし)の輸送オプションを購入し、第2期では確率的な需要が発生することを想定したモデルである。Qian et al.<sup>19)</sup>は、ディスラプション・リスクを伴う輸送問題を2段階のオークションモデルで解いている。輸送品の削減確率を導入し、輸送品フルと削減シナリオ間の差が小さくなるように最適化問題を解いている。

### (4) 本研究の位置付け

これまで挙げた多くの研究において、需要側と供給側のそれぞれの不確実性に対して、それらを同時に解決するメカニズムは存在しない。利用者側は自身の不確実性や利用意向を反映したオプション価値、事前割引料金等を考慮して予約を行うが、供給側の不確実性

が発生し、供給量不足になってしまった場合にその問題を事前に取り扱う予約システムは存在しない。一方で、供給側にとっては、需要の不確実性に対処するために予約システムや Revenue management を用いるが、供給側の不確実性が発生した際は、事後的な対処に集中している。そこで、本研究は利用者の不確実かつ曖昧な需要を束ねるとともに、供給側のサービスを束ね、それらを状況に合わせてマッチングさせることで、両者の問題を解決するメカニズムを提案する。

## 3. 状況設定と予約システムのモデリング

### (1) 状況設定

いま、ある離散的なプレイヤー(利用者)を考え、これらの利用者がある共通した目的(e.g. 共通した二地点間の移動)を持っているものとする。各利用者はこの目的を達成するために何らかのサービスを利用しながら活動するが、そのためにはサービスを事前に予約しなければならないものとする。この目的を達成するための活動を「本来活動」と呼ぶ。利用者の集合を  $N \equiv \{1, \dots, |N|\}$ , 本来活動を行うためのサービスの集合を  $S \equiv \{1, \dots, |S|\}$  と表す。

利用者は、二つの離散的な時点  $t = \{0, 1\}$  のいずれかでサービスの予約を試みる。 $t = 0$  はサービスの提供時期から十分遡った時期である。この時期は、不確実性が生じることによる各サービスの容量変化を事前に把握することができない(詳細は後述する)。これを考慮して、利用者は本来活動を諦め、代替となる別の目的を達成するための活動(以降、「代替活動」と呼ぶ)に切り替えられるとする。代替活動を行うためのサービスを  $a$  と表す。 $t = 1$  はサービス提供の直前期であり、各サービスの正確な容量値を把握できるが、代替活動への切り替えができないものとする。なお、サービスを予約できなかった利用者は本来活動や代替活動を行うことができない「無活動」状態となる。無活動を行うことを表すサービスを  $\phi$  と表す。

利用者は各サービスに対して異なる評価値(選好)を持っている。ある利用者  $i \in N$  がサービス  $s \in S \cup \{a\}$  に対して持つ評価値を、正の実数値  $v_i^s$  で表す。簡単のために、各利用者が全サービスに持つ評価値は全て異なっているものとする、i.e.  $\forall s, s' \in S \cup \{a\} \rightarrow v_i^s \neq v_i^{s'}$ 。また、サービス  $\phi$  の評価値はゼロであるものとする。全てのサービスの評価値を並べたベクトルを評価値ベクトルと呼び、 $\mathbf{v}_i \equiv (v_i^1, \dots, v_i^s, \dots, v_i^{|S|}, v_i^a)$  で表す。

各サービスは提供量に上限(サービス容量)を持つ。あるサービス  $s \in S$  の容量を  $C^s$  と表す。この容量は、ある確率  $p^s$  で特定の比率  $r^s$  ( $0 \leq r^s < 1$ ) をかけたものへと減少するものとする(i.e.  $C^s \rightarrow r^s C^s$ )。これは、何

らかのアクシデントが生じることでサービス本来の供給性能が発揮できなくなった状況を示している。容量が減少したかどうかは、 $t=1$ になったときにはじめて分かるものとする。ただし、代替活動用のサービス  $a$  は、常に利用者の数より大きい容量を持つものとする。言い換えれば、 $t=0$ の段階で本来活動を諦め代替活動に切り替えるのであれば、それは常に実現できるとする。

以上のサービス評価値および容量について、本稿では次の二つの仮定が成立するものとする：

**仮定 1.** 次を満たすサービス  $\exists s^m \in \mathcal{S}$  が少なくとも一つ存在する：

$$p^{s^m} = 0, \quad C^{s^m} > |\mathcal{N}|, \quad v_i^{s^m} < v_i^s, \\ \forall i \in \mathcal{N}, s \in \{\mathcal{S} \setminus \{s^m\}\} \cup \{a\}. \quad (1)$$

**仮定 2.** 仮定 1 が成立すると仮定する。サービス  $s^m$  以外の任意のサービス  $s \in \mathcal{S}$  の評価値は、サービス  $a$  のそれより高いか少なくとも等しい：

$$v_i^a \leq v_i^s, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \quad (2)$$

また、 $s^m$  以外のサービスの容量和は、総利用者数より小さい：

$$\sum_{s \in \mathcal{S} \setminus \{s^m\}} C^s < |\mathcal{N}|. \quad (3)$$

**仮定 1** は、品質が最低水準であり（代替活動を含めた）任意のサービスより評価値が低いが、容量は大きいサービス  $s^m$ （以降、「最低水準サービス」と呼ぶ）が存在することを意味している。**仮定 2** は、本来活動は基本的に代替活動より好ましいが、サービス容量が限られているため、全利用者が本来活動を行うことは不可能であることを意味している。すなわち、利用者は、容量が限られているが好ましい活動のためのサービスの予約を試みるが、それを諦め代替活動あるいは最低水準のサービスを予約するかを判断する状況にある。

## (2) 通常の予約システムにおける予約行動

前節の設定の下で、通常の予約システムにおける利用者の予約行動について記述する。本稿では、通常の予約システムを、利用者が各自の探索可能回数の範囲内で、各サービスに‘一つずつ’評価値を表明・予約行動をとるシステムと定義する。つまり、各サービスが個別に市場を形成しており、利用者は探索コストを考慮しながらこれら市場で販売されるサービスを探索していると解釈する。

各主体の行動について、サービスの予約が各利用者に割り当てられる一連の流れを追いながらモデル化していこう。ただし、本稿では記述を簡略化するために、 $t=0$  または  $t=1$  のいずれか片方の時期において、全利用者が一斉に予約を行う状況を仮定する。

まず、各利用者  $i \in \mathcal{N}$  は、自身の評価値ベクトル  $\mathbf{v}_i$  に基づき、予約行動をとる（評価値の表明を行う）サービスを探検・決定する。 $k$  回目のサービス探索における利用者  $i$  の予約先サービスを  $d_i^k \in \mathcal{S}$  で表す。入力とする評価値ベクトルと出力である予約先サービスとを対応させる関数（写像）の設定についてはいくつかの考え方がある<sup>1</sup>。本稿では、一番簡単な考え方に基づき、これまで予約先サービスとして選んでいないサービスの内、評価値が一番高いサービスを予約先サービスとして選択するものとする。数学的には次のように表される：

$$d_i^k = \arg \max_{s \in \mathcal{S}_i(k)} v_i^s, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \quad (4)$$

ここで、 $\mathcal{S}_i(k)$  は、 $k$  回目のサービス探索時において未だ評価値を表明していないサービスの集合である。

次に、各サービス  $s \in \mathcal{S} \cup \{a\}$  は表明された評価値に基づき、予約を受け入れる利用者を決定する。サービスは、時期  $t$  で把握している容量  $C_t^s$  ( $t=0$  ならば  $C^s$ ,  $t=1$  ならば  $C^s$  または  $r^s C^s$ ) に達するまで予約を受け入れる。これを踏まえ、利用者の  $k$  回目のサービス探索の結果、サービスへの予約表明数が予約可能な残りの容量（i.e. 容量  $C_t^s$  から  $k-1$  回目までに予約を済ませた利用者数を引いた数）に達するまでは、予約表明した全ての利用者に予約を割り当てるものとする。しかし、予約表明数が容量を超えるならば、評価値が高い利用者を優先して予約を割り当てるものとする。なお、仮に評価値が同じ利用者が複数存在したならば、ランダムに予約を割り当てる。

予約の割り当てが終了したら、予約が受け入れられた利用者は探索を止める。一方で受け入れられなかった利用者は、与件とする探索可能回数  $n_i (> 0)$  を上限として上記のサービス探索・評価値表明行動を繰り返すものとする。上限に達しても予約を受け入れられなかった場合、利用者はサービスの利用を諦め無活動を行う。

さらに、一連の予約行動が終わった後、 $t=0$  では各サービスの容量が既定の確率に基づき減少するものとする。このとき、評価値が低い利用者はサービスを受けることができなくなり、予約を受け入れられなかった利用者と同様に無活動を行う。なお、 $t=1$  では不確実性が生じた後の容量に基づき予約の割り当てを行っているため、このフェイズは発生しない。以上が、通常の予約システムおよびそのシステム上での各主体の行動モデルである。

<sup>1</sup> 例えば、予約先として評価値が一番高いものを選ぶ、離散選択モデルに基づき確率的に選択する、などといった写像の設定方法がある。

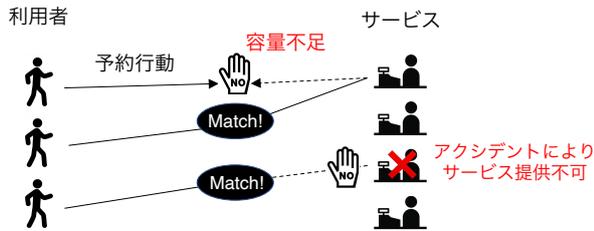


図-1 通常予約システムにおける問題点の概念図

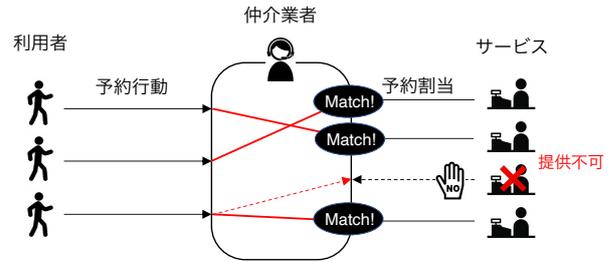


図-2 多段階予約システムの概要

### (3) 通常予約システムで想定される問題点

通常予約システムでは各サービスは個別に市場を形成しているとみなせるが、そのためにいくつかの問題点が発生すると考えられる(図-1も参考)。まず、利用者が各市場を順番に訪れてサービスを予約するため、全体最適となるとは限らないということである。つまり、仮に全員がサービスを予約できたとしても、実現した予約配分は、社会的に効率的な配分であるとは限らない。次に、サービスの探索コストが高い場合、サービスを予約できない利用者が存在するということである。この利用者は無活動を行うことになり、利用者は活動から利得を得ることができない。またサービス側にとっても、利用者がサービスを受ける際に支払う料金などの収入を得ることができず、社会的に純粋な損失をもたらすという意味で大きな問題である。さらに、 $t=0$ では不確実性に起因する容量変動に対して脆弱性を持つ点も問題である。容量低下によりサービスの不履行が発生した場合、利用者とサービスそれぞれが利得や収入を得られず、やはり社会的に純粋な損失となる。

以上を踏まえるとこれらの問題を解決するためには、(1) 予約を完了できなかった・あるいは容量低下によりあふれてしまった利用者を容量に余裕のあるサービスへと移し替える機能、および(2) 社会的に効率的な配分を達成する機能を持った予約システムが、社会的な効率性の観点からは望ましいと考えられる。

## 4. バンドリングを伴った多段階予約システムの構築

前章で指摘した問題点を解消するために、本稿では複数サービスのバンドリングを伴った多段階予約システムを提案する。本章では、この多段階予約システムのコンセプトおよび提案予約システムのモデリングを行う。

### (1) 多段階予約システムのコンセプトと利点

本稿が提案する多段階予約システムのポイントは、利用者の各サービスに対する評価値を取りまとめ、全サービスへの予約の割り当てを決める仲介業者(ブローカー)

を設置するということである。これを図式化したものを、図-2に示す。提案予約システムでは、ブローカーは利用者の予約行動に先立ち、複数のサービスをまとめた(バンドル化した)新たなサービスを構築する。バンドル化されたサービスは $t=0$ の時期に販売され、利用者はブローカーへの評価値表明を通してサービスの購入意思表示を行い、ブローカーはそれに基づきサービス購入者の割り当てを行う。割り当てられなかった利用者は、代替活動への切り替えを行うことになる。そして、 $t=1$ になりサービスの容量が確定した後、ブローカーはサービス購入者の評価値に基づき、バンドル化された各サービスに利用者を割り当てる。

通常予約システムと比較して、上記の多段階予約システムは次の点で効率的になると考えられる：

- まず、バンドル化されたサービスを利用者に提示することで、サービスの探索コストを著しく減少している点である。これにより、容量に余裕があるにも関わらず利用者がそのサービスを探索できなかったことでマッチングが成立しないという事例が減少、あるいはゼロになる。
- 次に、サービスのバンドル化は供給の不確実性に対しても頑健性を有する。すなわち、バンドル化されたサービスの購入可能数を予め制限(e.g. バンドル化された全サービスの容量和より小さく)しておけば、容量に余裕のある他のサービスへとあふれた利用者を移し替えることが簡易となる。
- さらに、バンドル化されたサービスをサービス提供時期より十分遡って販売することで、サービスを購入できない利用者は代替活動へと切り替えることができるようになる。

すなわち、個別に形成されていた市場をまとめて新たな市場を形成することで、(1) 代替活動への切り替え可能性を考慮して販売時期を設定するとともに、(2) 需要・供給間のマッチング成立の失敗を(不確実性の影響も考慮して)減らしながら社会的に効率的な予約の割り当てを達成することが、提案予約システムのコンセプトとまとめられる。

## (2) 多段階予約システムにおける利用者の予約行動

提案予約システムにおける各主体の行動について、通常の予約システムと同様に時系列を追ってモデル化していこう。

### a) $t = 0$ における各主体の行動

まず、ブローカーは集合  $S$  に属するサービスをバンドル化した新たなサービス  $b$  を構築し、その購入者限度となる容量  $C^b$  を設定する。そして、 $t = 0$  においてサービス  $b$  を販売すると、各利用者  $i \in N$  により提示された評価値ベクトル  $\mathbf{v}_i$  に基づき、サービスを購入する利用者を決定する。この際、ブローカーは供給側の不確実性の影響を考慮しながら、実現する期待社会的厚生が大きくなるように容量  $C^b$  およびサービス購入者の決定方法、およびサービス費用を設定する必要がある。ただし、これはバンドル化されたサービスの特性 (e.g. 容量低下確率とその低下値、および代替活動の評価値との大小関係) や、供給側の不確実性に対する利用者やブローカーの情報認知度合い (i.e. 容量低下確率や低下値について知っているか否か) などに依存するところがある。

これに対して本稿では簡単のために、サービス  $b$  の容量値を最低水準サービス  $s^m$  以外のサービスの容量値の合計としてヒューリスティックに設定する：

$$C^b = \sum_{s \in S \setminus \{s^m\}} C^s. \quad (5)$$

これは、サービス供給容量の低下により利用者があぶれた場合、評価値は最低水準ではあるが常にマッチング可能なサービス  $s^m$  に回すことで、サービスの利用可能性自体は保証しようとしていることを意味する。

次にサービス購入者およびサービス費用は、社会的厚生最大化の観点から考慮して、バンドル化されたサービス  $b$  と代替活動用のサービス  $a$  の複数財オークションを行い、このオークションに対して Vickrey-Clarke-Groves メカニズム<sup>20),21),22)</sup> を適用することで決定するものとする。まず、利用者のサービス  $b$  に対する評価値を、 $\langle$ 最低水準サービス  $s^m$  以外のサービス評価値を容量で重み付けし正規化した値 $\rangle$  として定義する。すなわち、各利用者  $i \in N$  について、次の値、

$$v_i^b = \frac{1}{C^b} \sum_{s \in S \setminus \{s^m\}} C^s v_i^s, \quad (6)$$

を評価値とする。これは、サービス供給容量の低下が発生しないときの、サービスを購入することに対する各利用者の期待評価値であり、利用者がそれをサービス  $b$  の評価値として採用、あるいはブローカーがそれを購入者の判断基準として用いていることとして解釈できる。そして、ブローカーは次の最適化問題 (およびその双対問題の変形) を解くことで、購入者および

サービス価格を決定するものとする<sup>23)</sup>：

$$\max \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} v_i^s x_i^s \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in N} x_i^s = C^s, \quad \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{s \in S} x_i^s = 1, \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$x_i^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall s \in S \quad (10)$$

ここで、 $x_i^s$  は利用者  $i$  がサービス  $s$  を割り当てられているか否かを表す 0-1 変数である。

サービス購入者の集合を  $N_b$  と表す。

なお、**仮定 1, 2** より、Eq. (6) の評価値は必ず代替活動の評価値より大きくなることには注意されたい。すなわち、バンドル化サービス  $b$  は代替活動より好ましく、この予約に対して費用が発生することが保証される。

### b) $t = 1$ における各主体の行動

$t = 1$  では、まずブローカーは各サービス  $s \in S$  の正確な容量値  $\hat{C}^s$  を把握する。そして、この容量値およびサービス購入者  $i \in N_b$  の評価値ベクトル  $\mathbf{v}_i$  に基づき、集合  $S$  に属するサービスの複数財オークションを行い、このオークションに対して VCG メカニズムを適用することで、各サービスの購入者およびサービス予約の追加費用を決定するものとする。なお、ここでのサービス予約の追加費用は、いわば最低水準サービス  $s^m$  からより水準の高い他のサービスへのアップグレード費用として解釈される。以上が提案予約システムにおける各主体の行動モデルである。

## 5. 数値実験

最後に、数値計算による比較を通して提案システムの効率性を確認していこう。

### (1) 数値計算を行う予約システムと状況設定

本稿では、提案予約システムと通常の予約システム、および社会的厚生の理論的限界値を導出するベンチマークとなる予約システムの三種類を比較する。ここで、ベンチマークとなる予約システムでは、不確実性による容量低下を事前に把握したうえで、社会的厚生を最大化するように予約を割り当てている。また、通常予約システムの計算にあたっては、全利用者が  $t = 0$  において予約行動をとる状況を想定した。

以下に、各パラメータの設定について記述する。まず、利用者数は  $N = 100$  とし、サービスの種類は  $S = 4$  とする。ここで、サービス  $s \in \{1, 2, 3\}$  については、任意の利用者  $i$  の評価値  $v_i^s$  を次の連続一様分布に従って

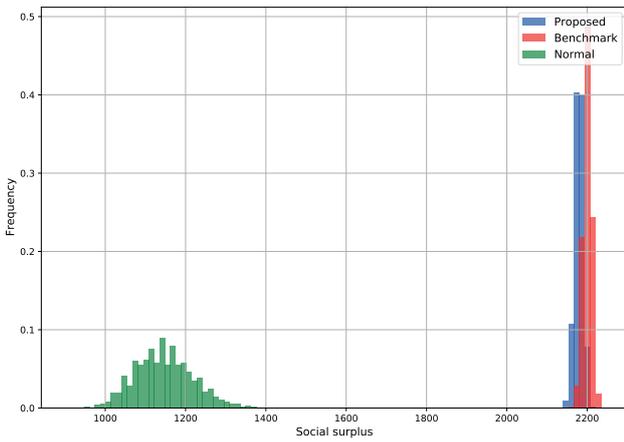


図-3  $(C^1, C^2, C^3) = (10, 20, 30)$  かつ  $n_i^s = 2$  のケースにおける社会的厚生

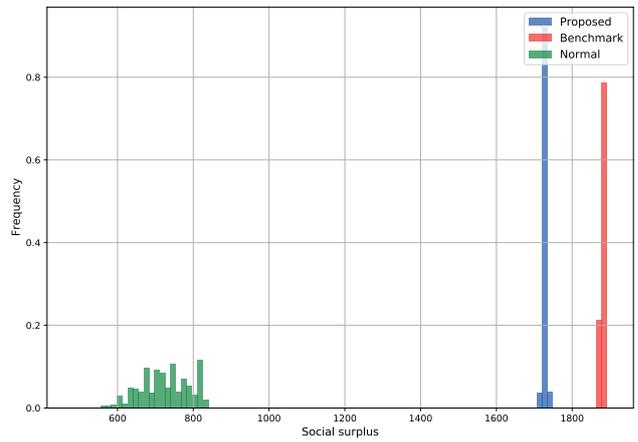


図-4  $\{1, 2, 3\}$  の全てのサービス容量が低下したときの社会的厚生

ランダムに発生させている：

$$f^s(v_i^s) = \begin{cases} \frac{1}{b^s - a^s} & \text{for } a^s \leq v \leq b^s \\ 0 & \text{for } v < a^s \text{ or } v > b^s \end{cases} \quad (11)$$

ここで  $a^s, b^s$  は評価値の下限と上限であり、各サービスの品質を分けるために次のように設定している：

$$(a^s, b^s) = \begin{cases} (25, 35), & s = 1, \\ (20, 30), & s = 2, \\ (15, 25), & s = 3. \end{cases} \quad (12)$$

一方、 $s = 4$  のサービスは最低水準のサービスであるものとし、この評価値は 10 で固定している。また、代替活動用のサービス  $s = a$  の評価値は 15 とする。また、通常予約システムにおける各利用者  $i \in N$  の探索可能数は全利用者で共通しているものとし、これについても  $n_i^s = \{2, 3\}$  の二つのパターンを考える。

各サービスの容量は、需要に対して供給が多いケースから少ないケースにおけるシステムの効率性を考察するために、次の三パターンを考えそれぞれについて数値計算を行う： $(C^1, C^2, C^3) = \{(15, 30, 45), (10, 20, 30), (5, 10, 15)\}$ 。最低水準サービスと代替活動用のサービス容量は総利用者数  $N$  に対して十分大きいものとする。また、各サービスの容量減少確率および容量低下率については次のように設定している：

$$p^s = \begin{cases} 0.1, & s = 1, \\ 0.05, & s = 2, \\ 0.01, & s = 3. \end{cases}, \quad r^s = \begin{cases} 0.5, & s = 1, \\ 0.5, & s = 2, \\ 0.5, & s = 3. \end{cases} \quad (13)$$

以上の設定の下、各効用・容量パターンに対して、各予約システムを適用して社会的厚生などの指標を計算する。ただし、サービスの容量パターンについては、ランダムに生成された効用パターンに対して（各サービス

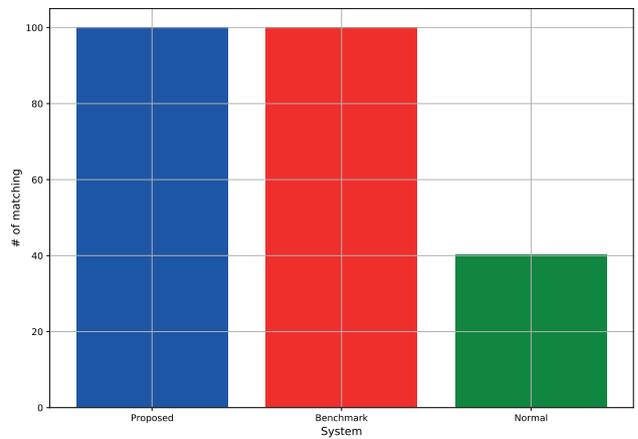


図-5 マッチング数

の容量が低下しない・している状況を組み合わせた）起こりうる全ての容量パターンでの社会的厚生をそれぞれ計算している。そして、容量減少確率を掛け合わせた指標の期待値を導出した。こうした数値計算を 10,000 回繰り返して、指標の比較考察を行った。

## (2) 数値計算結果

まず、 $(C^1, C^2, C^3) = (10, 20, 30)$  かつ  $n_i^s = 2$  のケースについて見ていこう。図 3 に、社会的厚生の期待値について頻度分布を取ったものを示す。この図からは、提案予約システムではベンチマークシステムを除いて社会的厚生が（平均的に）一番高くなっており、高い効率性を達成していることが見て取れる。定量的には、この頻度分布におけるベンチマークシステムでの平均値が 2200.83 であるのに対し、提案予約システムは 2179.82 であり、ほとんど変わっていない。その一方で、通常予約システムでは 1146.92 であり、ベンチマーク・提案予約システムと比較して社会的厚生の差は大きいことがわかる。

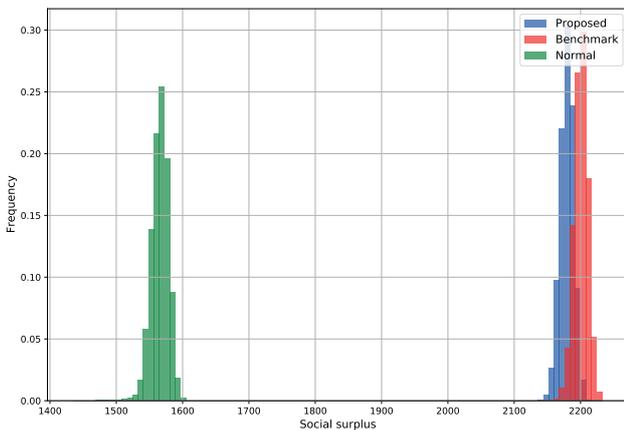


図-6  $(C^1, C^2, C^3) = (10, 20, 30)$  かつ  $n_i^s = 3$  のケースにおける社会的厚生

不確実性に対する予約システムのロバスト性を見るために、容量が低下したケースでの社会的厚生について見ていこう。図 4 に、 $\{1, 2, 3\}$  の全てのサービス容量が低下したケースでの社会的厚生の頻度分布を示す。この図からは、(低下容量を予め知っている) ベンチマークシステムと比較して、提案予約システムはやはり高い効率性を保っていることがわかる。定量的には、前者の平均値が 1880.10 である一方後者では 1728.48 であり、効率性の低下は 8% 程度となっている。一方で通常の予約システムでは 724.89 であり、効率性はかなり落ちていることが見て取れる。

こうした効率性の違いは、マッチング数の違いにあり、これを示すものが図 5 である。これを見ればわかるように、通常の予約システムではマッチング数が他の予約システムと比較して少ない。これは前述した二つの理由からなる。すなわち、探索コストが高くサービスの予約にまで至らなかった利用者が存在すること、およびサービスとマッチできても、不確実性による容量低下によりサービスの不履行が生じるためである。需要が集中する評価値が高いサービス(今回ではサービス 1 や 2) で予約できなかった場合に他のサービスへと移し替える機構が存在しないため、探索回数の上限に達した利用者はサービスを利用することを諦めざるを得なくなっている。また低下後の容量より多い利用者が予約していた場合、それらの利用者はサービスを受けることができず、結果として社会的厚生に損失をもたらすことになる。

一方で、提案予約システムでは、サービスのバンドリングを通して利用者が探索する最大市場数を減らしている： $t=0$  ではバンドル化されたサービスを用いた本来活動と代替活動の二つだけとなる。さらに、バンドル化された各サービスで容量が低下したとしても、それを最低水準サービスに移し替えることができる。これらの要因のために利用者を(今回のケースでは)確

実にサービスとマッチングさせることができ、そのため社会的厚生の観点で効率性が高いことがわかる。

なお、利用者のサービス探索可能回数を増加させたケースにおける社会的厚生を、図 6 に示す。これを見ると、探索可能回数が増加するにつれて社会的厚生は提案予約システムに近くが、それでも提案予約システムの方が効率性が高いことがわかる。これは、提案予約システムでは全サービスへの評価値を表明させ一挙にサービスへの割り当てを行えるため、順番に評価値を表明する通常予約システムと異なり、社会的に最適な配分を行いやすくなっているためである。この点でも提案予約システムは有効に働いていることが見て取れる。

最後に、容量パターンを変えたときの社会的厚生について図 7 に示す。これらの図からは、ここまでの各予約システムの定性的な傾向は、容量パターンが変わっても変わらないことが見て取れる。従って、本数値計算では、提案予約システムは需要と容量の比率(容量が過少か過多加)に依存せず、効率的事であることがわかった。

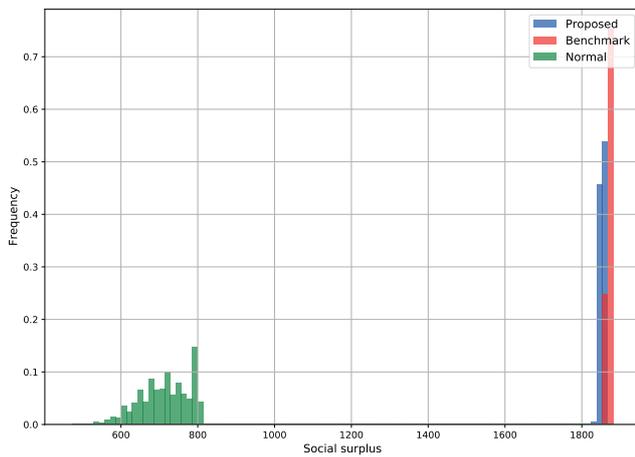
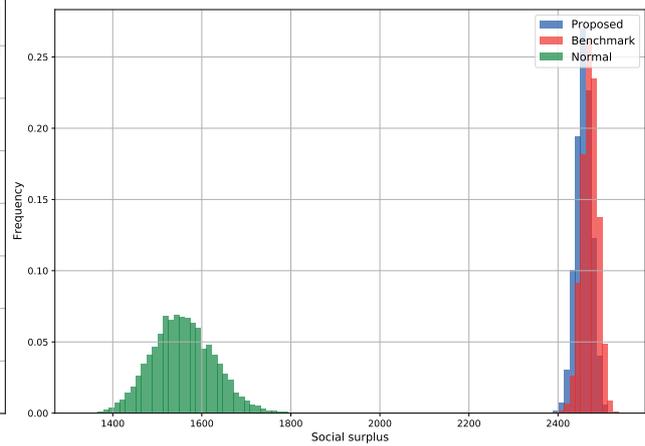
## 6. 終わりに

本稿では、不確実性によるサービスの容量低下に備えた、複数選択肢をバンドル化したサービスを通した予約システムを提案した。まず、通常の予約システムを、各利用者が各サービスに一つずつ評価値を表明するシステムとして捉えた上で、その際の問題点を考察した。その問題点を解決するためのシステムとして、複数サービスをバンドリングする仲介業者を置き、その仲介業者が利用者のサービスに対する評価値を取りまとめた上で、社会的厚生を最適化するよう予約を割り当てるシステムを提案した。そして、提案予約システムの効率性を数値計算を通して確認した。

**謝辞：** 本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究(課題 222C:アフターコロナ社会を形成する ICT)により得られたものです。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 赤羽弘和, 桑原雅夫, and 佐藤拓也: 高速道路の利用予約制に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, Vol.2000, No.660, pp.79-87, 2000.
- 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, No.3, pp.287-301, 2007.
- 3) Akamatsu, T. and Wada, K.: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.79, pp.178-195, 2017.

図-7-a  $(C^1, C^2, C^3) = (5, 10, 15)$ 図-7-b  $(C^1, C^2, C^3) = (15, 30, 45)$ 図-7 容量パターンを変化させたときの社会的厚生. なお  $n_i^s = 2$ 

- 4) Kohl, N., Larsen, A., Larsen, J., Ross, A., and Tiourine, S.: Airline disruption management—perspectives, experiences and outlook, *Journal of Air Transport Management*, Vol.13, No.3, pp.149–162, 2007.
- 5) 小林潔司, 松島格也, and 菱田憲輔: 予約システムの経済便益評価, *土木学会論文集 D*, Vol.64, No.2, pp.299–318, 2008.
- 6) Hara, Y. and Hato, E.: A car sharing auction with temporal-spatial od connection conditions, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.118, pp.723–739, 2018.
- 7) 原祐輔 and 羽藤英二: 共同利用型交通サービスにおけるネットワーク上での予約システムの提案, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.67, No.5, pp.67\_I.509–67\_I.519, 2011.
- 8) Gerding, E. H., Robu, V., Stein, S., Parkes, D. C., Rogers, A., and Jennings, N. R.: *Online mechanism design for electric vehicle charging*, 2011.
- 9) Stein, S., Gerding, E., Robu, V., and Jennings, N.: *A model-based online mechanism with pre-commitment and its application to electric vehicle charging*, 2012.
- 10) Bergemann, D. and Välimäki, J.: The dynamic pivot mechanism, *Econometrica*, Vol.78, No.2, pp.771–789, 2010.
- 11) 松島格也, 小林潔司, and 小路剛志: 不確実性下における家計のサービス予約行動, *土木計画学研究・論文集*, Vol.17, pp.655–666, 2000.
- 12) Liberman, N. and Trope, Y.: The psychology of transcending the here and now, *Science*, Vol.322, No.5905, pp.1201–1205, 2008.
- 13) Liberman, N., Sagristano, M. D., and Trope, Y.: The effect of temporal distance on level of mental construal, *Journal of experimental social psychology*, Vol.38, No.6, pp.523–534, 2002.
- 14) Beckmann, M. J.: Decision and team problems in airline reservations, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 134–145, 1958.
- 15) Subramanian, J., Stidham Jr, S., and Lautenbacher, C. J.: Airline yield management with overbooking, cancellations, and no-shows, *Transportation science*, Vol.33, No.2, pp.147–167, 1999.
- 16) Chatwin, R. E.: Continuous-time airline overbooking with time-dependent fares and refunds, *Transportation Science*, Vol.33, No.2, pp.182–191, 1999.
- 17) McGill, J. I. and Van Ryzin, G. J.: Revenue management: Research overview and prospects, *Transportation science*, Vol.33, No.2, pp.233–256, 1999.
- 18) Cheaitou, A. and Cheaytou, R.: A two-stage capacity reservation supply contract with risky supplier and forecast updating, *International Journal of Production Economics*, Vol.209, pp.42–60, 2019, The Proceedings of the 19th International Symposium on Inventories.
- 19) Qian, X., Chan, F. T., Yin, M., Zhang, Q., Huang, M., and Fu, X.: A two-stage stochastic winner determination model integrating a hybrid mitigation strategy for transportation service procurement auctions, *Computers & Industrial Engineering*, Vol.149, pp.106703, 2020.
- 20) Vickrey, W.: Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders, *The Journal of Finance*, Vol.16, No.1, pp.8–37, 1961.
- 21) Clarke, E. H.: Multipart pricing of public goods, *Public Choice*, Vol.11, No.1, pp.17–33, 1971.
- 22) Groves, B. Y. T.: Incentives in Teams, *Econometrica*, Vol.41, No.4, pp.617–631, 1973.
- 23) Bichler, M.: *Market Design: A Linear Programming Approach to Auctions and Matching*, Cambridge University Press, 2017.

(Received October 1, 2021)

(Accepted , )

Theoretical analysis of efficient resource allocation using a reservation system that  
bundles multiple alternatives

Koki SATSUKAWA, Yusukue HARA, Yosuke KAWASAKI and Takamasa IRYO