

不確実性下における都市交通サービスの 予約システム設計に関する研究

佐津川 功季¹・原 祐輔²・川崎 洋輔³・井料 隆雅⁴

¹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 (Corresponding author)

²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

³正会員 日本大学准教授 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

⁴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

都市交通サービスへの需要を容量に見合うよう制御する方法の一つにサービス利用権の予約制度が存在する。しかし、予約システムを介さずサービスを利用しようとする突発的な需要に対してはこの制度は機能せず、一方で予約制度の全面的な導入によりこれらの需要を排除することは社会的に望ましくない。本稿は、交通サービスを定常的に利用する主体と突発的に利用する主体が混在する状況において、超過需要を抑制しつつ交通システム全体の効率性を改善する新たな予約制度を提案する。さらにこの制度をオークション市場と組み合わせることで、適切な利用権価格が設定され社会的余剰が期待的に最大化されるサービス配分が実現することを示す。

Key Words: reservation system, service bundling, resource allocation, uncertainty

1. はじめに

都市が提供する交通サービスは容量、すなわち単位時間あたりの適切な供給量に上限を持つ。多くの場合、需要量の変動に対してサービス供給量や容量を迅速・柔軟に対応させることは困難である。容量を超える需要がサービスに流入しようとした場合、希望する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。一方、需要量に合わせて一時的に容量拡大することで超過需要がサービスを受けられたとしても、容量以上の需要が流入することで混雑をはじめとする様々な負の外部性が生じうる。この計画容量の一例としては、鉄道の混雑率計算に使われる輸送力（あるいは定員数）が考えられよう；立ち乗りを許容することで超過需要のトリップを完遂させることはできるが、安全性・快適性の低下など様々な悪影響が旅客全員に及ぼされうる。

需要を供給に見合うよう制御する方法の一つは、サービスの利用権を利用者と事前にマッチングさせること、すなわち「予約」である。予約システムを導入し数量規制を行うことで、超過需要がサービスに流入することを防ぎ、混雑や待ち行列の発生による経済損失を回避することができる¹。また、予約行動を通して利用者は

どのサービスが利用可能（i.e. 容量に余裕がある）か事前に把握することができる。こうした情報提供を通して容量に余裕があるサービスに需要が適切に分散すれば、利用者側の経済損失を回避するのみならず、サービスの稼働率改善やこれに伴う収益の増加など、サービス提供者側も望ましい結果を得られよう。

一方で、予約システムを都市交通サービスに全面的に導入することは難しい。都市における交通需要の多くは派生需要であり、交通サービスを予約することは自身が将来行う行動・目的を確定させることになる。これは、通勤・通学といった定常的な行動を営む主体（これを「リカレント利用者」と呼ぶ）に対しては大きな問題とはならないと考えられる。しかし、何らかの余暇活動など非定常的な行動目的を持つ主体（「ノンリカレント利用者」と呼ぶ）にとっては、自身の将来行動に強い制約をかけることは好ましくないだろう。実社会でも、観光やイベントにおいて前売り券の販売システムが整備されているにも関わらず、当日券を購入しようとする利用者が過剰に流入するといった事態が報告されている。買物・通院・ビジネス等の目的でも突発的にノンリカレント利用者が発生することも考えられ、これらに関しても事前に予約をすることが難しい状況は十分に考えられる。都市交通サービス利用者全体に

益に着目している。

¹ 小林ら¹⁾ は予約システムの経済便益として個別家計行動の合理化便益と、システム全体での便益である集会的需要再配分便益の二種類が存在することを主張している。本稿は特に後者の便

対して厳密な数量規制を導入することは、こうした需要を排除することにも繋がらうるものであり、社会的にも望ましくない。

予約システムを介さずにサービスを利用しようとする主体に対して数量規制は当然ながら機能しない。そして、この超過需要により生じる負の外部性はサービスを事前に予約した利用者にも波及しうる。例えば、鉄道・バスなどでの交通サービスにおいて超過需要が形成する待ち行列は、乗降時間の増大を招きサービスの円滑かつ安定した運行を妨げる。また、乗車人数が適切な数量（e.g. 座席数）を超える場合、前述したように車両内の混雑状況は悪化し移動の快適性や安全性等を損ねる。近年では感染症リスクといった交通行動における新たな種類のコストも取り上げられており、これらもサービスを共有する利用者全体にとって大きな損失をもたらさうる。従って、予約システムを都市交通サービスに十全に適用するには、システムを介さないノンリカレントな利用者が流入しうる状況という、いわば予約システムへの外乱を考慮した制度設計が求められるだろう。

本稿では、リカレント・ノンリカレント利用者が容量制約のある都市交通サービスを共有する状況を考え、超過需要に対するサービス利用権の再配分を通して交通システムを効率的に運用するための新たな予約システムを提案する。このシステムでは、リカレント・ノンリカレント利用者の交通サービス選択や選好について、次のような状況を仮定する：

- ・リカレント利用者は、ある一定期間の日々、複数の交通サービスから一つを選択して特定の起終点を繰り返し移動する。特定の交通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。
- ・ノンリカレント利用者は日毎に確率的に発生し、行動目的と紐づけられた特定の交通サービスを（需要が発生したとき）常に利用する、i.e. サービス選択の意思決定を行わない。

この状況で超過需要の発生を防ぐために、システム管理者は起こりうるノンリカレント利用者の流入パターンを予測した上で、「バンドル定期券」という交通サービスの確率的な利用権を期間の初めに設定し、リカレント利用者に対し販売する。各バンドル定期券には、予測されるノンリカレント利用者の各流入パターンに対して利用可能な交通サービスが if-then ルールの形式で提示されており（i.e. サービスがバンドルされている）、その再配分ルールのリスクが定期券価格に反映されている。このルールに基づき、リカレント利用者に対しては、ノンリカレント利用者の流入によるサービス容量逼迫の度合いに応じて、日々異なる交通サービスの

利用権が再配分される。このようにリカレント利用者にはバンドル定期券の購入を通して交通サービスを確率的に予約してもらうことで、不確実なイベントの発生に対して容量に余裕のある交通サービスを再配分する、といった柔軟な制御が可能となる（図-1 も参考）。一方、突発的故に事前予約が見込めないノンリカレント利用者に対しては、リカレント利用者の再配分による影響が価格に反映された当日券価格を販売する。すなわち、特定の交通サービスの利用を保証する代わりに、リカレント利用者に与える外部性を、混雑課金を通じて内部化する。

上記のシステムは超過需要を抑制できるものの、社会的に最適なサービス利用パターンを実現するには、リカレント利用者の選好を踏まえて交通サービスを再配分する必要がある。しかし、道路管理者と利用者間には情報の非対称性が通常存在し、利用者の支払意思額・サービス評価値などの私的選好情報を正確に把握することが困難である。また、システムが持続的であるためには、予約システムに参加することが望ましくなる（i.e. 当日券を購入しないことで損が生じない）ように、サービス再配分のルールやバンドル定期券・当日券価格の適切な設計方法を構築する必要がある。これらの問題を解決するために、本稿では確率オークション理論を活用したバンドル定期券・当日券の設計手法を構築し、この手法をベースに交通サービス利用権の取引市場を設計する。提案市場では、リカレント利用者は各交通サービスの評価値を管理者に表明する。管理者は、その情報と需要予測から得られるノンリカレント利用者の流入パターンに基づき、バンドル定期券を設計・販売するとともに当日券価格を設定する。本研究では、この市場のモデリング・理論解析を通して、前述した問題が解決され、制度下でのサービス配分パターンが期間を通じた社会的余剰を期待的に最大化することを示す。最後に、数値計算を通して、制度下で日々実現する社会的余剰や利用者効用について分析する。

本稿の構成は次の通りである。続く 2. では、予約制度に関する既存研究を整理する。3. では、状況設定を説明したのち、提案する浮動型定期通行権制度の概要を述べる。4. では、確率オークションを活用して、提案制度が取り扱うバンドル定期券の取引制度および当日券価格設定のメカニズムを設計する。そして、提案メカニズムが持つ特性を明らかにする。5. では、数値計算を通して提案システムの効率性や性質について分析する。最後に 6. で、本研究のまとめと今後の課題を述べる。

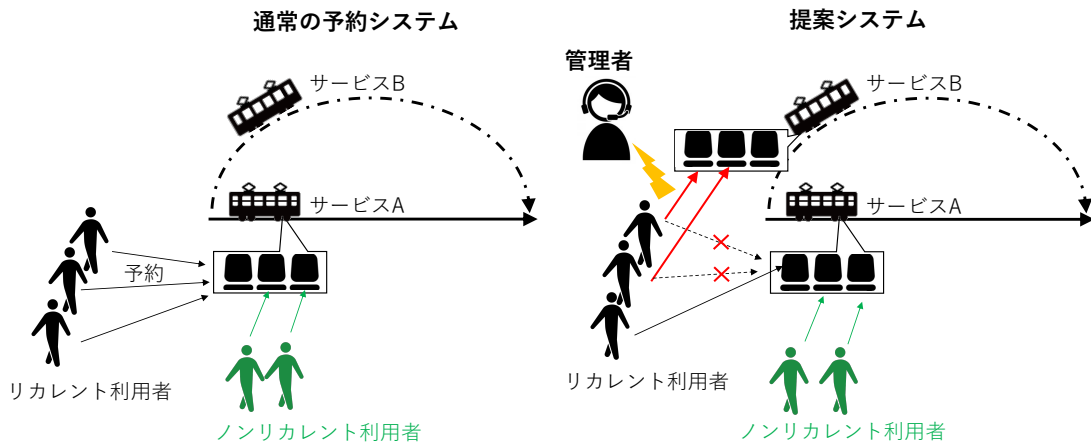


図-1 既存予約システムと提案予約システムとの違いを示す概念図。

2. 既存研究のレビュー

(1) 予約の経済便益と交通サービスとの関係

予約の考え方自体は目新しいものではなく、制度下における利用者の行動モデルや企業のサービス供給モデルの定式化、および経済分析などは広く行われている。松島ら²⁾は、家計(利用者)の予約行動をリアルオプション理論を用いてモデル化した。ここでは、サービスを購入するか意思決定を留保することにより生じる情報価値の便益・サービス購入の失敗に対するリスク回避の価値を考慮した、家計の予約行動を表現している。小林ら¹⁾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利用者の経済厚生や社会システムの便益に及ぼす影響を分析している。菱田ら³⁾は、航空サービス市場において顕著に見られる事前割引料金システムとしての予約システムに着目し、システムの導入が社会的厚生を改善する一方、利用者の厚生を下げうることを示した。また Simhon and Starobinski⁴⁾は、事前予約に必要な料金や他利用者の行動を考慮して、戦略的に事前予約をするか選択する行動をモデリングし、サービス提供者が得る収益を分析している。

交通サービスの予約制度設計に関しても、オペレーションズ・リサーチの分野を中心として研究が蓄積されてきた。特に航空業界では、プライシングと合わせた利益向上施策(revenue management)による航空機の座席資源の効率的な配分に関する研究が盛んであり、オーバーブッキングの最適化問題・事前割引問題といった形で研究者の関心を呼んでいる^{5),6),7),8),9)}。ただし、これらの研究はサービス供給側の利潤最大化戦略に着目しており、利用者余剰については考慮されていない。また利用者の予約行動に関しては需要関数・購入確率といった形式で表現されており、予約行動に関する行動論的な基礎を有していないため、利用者・サービス提

供者間の相互作用や、その市場均衡状態を分析できる枠組みではない。

都市交通サービスにおける予約制度については、高速道路^{10),16)}や駐車場^{11),12),13)}等に対して予約制度に関する研究が行われている。Akahane and Kuwahara¹⁴⁾は、高速道路の予約システムの有効性や社会的受容性を、SP調査を通じて確認した。de Feijter et al.¹⁵⁾は、容量以上の車両が道路に流入しないように、早い者勝ち(first-comes-first servers; FCFS)の原則に従い予約リクエストを捌いていく、シンプルなシステムを提案している。Edara and Teodorović¹⁶⁾は、ニューラル・ネットワークを用いた需要予測を組み合わせた、より効率的な予約システムを高速道路を対象に提案した。またこの中で、都市交通サービスの多くはperishable asset、ある時点を通り過ぎた瞬間に価値が消滅する資産であること(cf.航空機の座席など)を指摘し、交通サービスに予約システムを導入することの必要性を論じている。

駐車場への予約制度導入に関しては特に多くの研究が蓄積されており、既に民間が利用できるサービスとして実装されてもいる。Ayala et al.¹¹⁾は、駐車場予約における利用者の意思決定行動をゲーム理論の枠組みで定式化し、均衡状態を求めるアルゴリズムを提案している。Ayala et al.¹⁷⁾では混雑課金を導入し、交通システム全体の効率性を改善するメカニズムの設計を行った。またこれにより、課金額の調整と予約が相互に繰り返し行われることで、駐車場予約の配分パターンと価格が最適近似状態へ調整されていくことを示している。Yang et al.¹⁸⁾は、Vickreyのボトルネック・モデル¹⁹⁾に駐車場モデルを組み合わせたシステムを定式化・理論解析を行い、駐車場の容量が一定以下の場合、全てのスペースを予約専用を設定することが総旅行時間を改善する上で最も良い施策であることを示している。ただし、容量が一定以上の場合、予約をしない当日需要用にスペースを取り分けることで、このスペー

スを利用したい主体が需要のピーク時刻を自発的に回避するという交通需要の時間分散が促され、よりシステム性能を改善できることを明らかにした。また、Liu et al.²⁰⁾ は上記のモデルを拡張し、規定時刻より遅れた利用者の予約が取り消される状況を分析している。

なお、本稿が提示する利用者のサービス予約にある種の柔軟性を持たせるといった方向性の研究もこれまでに行われている。例えば、乙村・富井²¹⁾ は、鉄道の座席予約において、予約後に即時かつ硬直的に一つの座席とマッチする現状のシステムには非効率な点があることを指摘した。その上で、厳密な座席指定を必要とせず許容可能な時間帯の座席に対して一括して予約を試みることを可能とするシステムを考え、これとオークション・メカニズムを組み合わせることで効率的なサービス配分を実現する制度を提案している。また宮下²²⁾ は、「融通予約」と呼ばれる制度を提案、ゴルフ場や宿泊施設に適用した事例を紹介している。ここでは、ある特定のサービス予約にこだわらない利用者に対応するべく、予約価格を割引くなどのインセンティブを与える代わりにサービス予約の確実性が担保されず、別利用者が割増料金を入札することで予約を追い出されるリスクが存在する予約方式を、通常の前予約と組み合わせて導入している。原・羽藤²³⁾ も同様の予約システムを共同利用型交通サービスに対して適用することを提案している。Wang and Wang²⁴⁾ は、駐車場予約は、同一空間を異なる時間帯に異なる利用者によって共有することであるという事実に着目し、駐車時刻が何らかの不確実性により延長してしまった場合には、同一空間を予約した後続の利用者の予約が崩れうる点を指摘した。そして、予約変更への許容度を表明させた上で、こうした予約の失敗を駐車場予約の再配分を通して解消する柔軟な予約システムを提案している。ただし、これらの研究では予約制度下で実現する状態の数理特性に関する分析は十分ではなく、また予約システムに対する外乱を取り扱えてはいない。

(2) 予約とオークション制度

前節で示したように、都市交通サービスにおいても、効率的な需要管理施策としての予約システムの発展が期待されているといえるだろう。ただし、予約システムをサービス供給者・管理者のみならず利用者厚生を含めた社会全体の効率性を改善するよう活用するためには、利用者とシステム管理者間にある情報の非対称性 (e.g. 利用者のサービスに対する選好情報、支払い意思額) に対応しなければならない。また、多くのシステムでは FCFS 原則に従い予約リクエストを受け入れる構造を持っているが、この場合、より評価値の高い利用者のリクエストが棄却され、効率的なサービス

配分が実現しないことも起こりうる。こうした問題を解決し効率的なサービス配分を達成するための方法論としてはオークション理論があり、交通工学の分野においても研究が実施されている^{25),26),27),28),29)}。

Hashimoto et al.²⁶⁾ は、電気自動車の vehicle-to-grid (V2G) 技術を考慮した、駐車場予約のオークションシステムを提案した。このシステムでは、利用者は予約リクエストの詳細 (e.g. 希望時間帯や支払い意思額) の他に、駐車場利用時に供給できる電力量を表明してもらい、管理者はこれらの情報に基づき受け入れるリクエストを決定している。Chen et al.³⁰⁾ や Zou et al.³¹⁾ は、駐車場予約制度に VCG メカニズムを適用し、評価値の正直表明 (耐戦略性) や社会的余剰の効率性といった良い性質が満たされることを確認している。また、全時間帯の駐車場スペースを一括して予約させるのではなく、日内を通して繰り返し予約リクエストとオークションによるスペース配分を行う、動的な状況における予約システムのデザインやその数理特性の解析を行った。

数量規制とオークション理論の組み合わせに関しては、赤松ら^{32),33),34)} により提案された通行権取引制度も興味深い。この制度では、交通ネットワーク上で渋滞が頻発しているボトルネック地点を対象に、特定の時刻のみ通行できる権利 (通行権) を設定・発行する。通行権を自由に売買取引できる市場を創設することで、制度導入下での均衡状態が交通渋滞を発生させず、かつ総旅行時間を最小化する通行権配分パターンと一致することが理論的に示されている。この通行権取引市場の具体的な取引メカニズムを、赤松・和田はオークション理論に基づき構築した^{35),36),27)}。そして、利用者の通行権に対する評価値表明の耐戦略性や、制度下での交通状態が有限回のオークションを通して総旅行時間最小化状態へと収束することを示した。また、原・羽藤は、カーシェアリング市場に対してサービス利用権の取引制度を提案している^{37),29)}。この制度では、異なる時刻に異なる起終点間でのトリップを希望する利用者が同一の車両を共有する必要がある、シェアリング制度の時空間 OD 接続性を考慮した利用権取引制度を、オークション理論を活用しながら設計している。

(3) 不確実性下におけるサービス予約制度と本研究の位置付け

以上のように予約制度に関する研究が進められているが、これらの研究では予約した主体に対してサービスが常に一定の品質・数量で提供されることを前提としている。一方で、予約システムを介さない需要の存在やそれがサービスを共有する状況を取り扱いつつ、社会的に効率的な資源配分を実現するためのメカニズムに関する研究は少ない。

航空業界では、航空機の運行に障害があったときに事後的な対処を行う *airline disruption management* ³⁸⁾ と呼ばれる方法論がある。この中では機材や乗務員の他、欠航便の旅客 (i.e. 超過需要) の最適再配置といった問題も取り扱われているが、再配置されるサービスに対する利用者の選好・評価値といった利用者余剰の観点では考慮されていない。また、需要側の不確実性と関連して、オンラインメカニズムによるリアルタイムの予約割当メカニズムが提案されている ³⁹⁾。これは、時間変動によって予約システムへの参加者が変化する動的な市場環境においても、一般的なオークションメカニズムが持つ良い性質を担保できるようなメカニズムであり、電気自動車の充電市場などへの応用が行われている ^{40),41)}。しかし、これらの研究が取り扱う不確実性は、システムに参加する需要の不確実性である。サービスが提供できる供給量・容量そのものは確定的であり、前述したような容量変動やシステム外の利用者がサービスを利用しようとする事で容量を圧迫するといった状況を取り扱ってはいない。

数量規制という予約制度を含む大きな枠組みについては、不確実性下における価格規制との比較問題が、経済学の分野で取り扱われている。Weitzman ⁴²⁾ や Laffont ⁴³⁾ の研究では、規制を行う主体が需要 (供給) 側に関して不確実な情報しか持っていない状況を、需要 (供給) 関数の不確実性として表現している。そして、不確実性が存在しない状況では二つの制度が同一の最適状態をもたらす (i.e. 制度間に優位性はない) 一方で、不確実性が存在する状況では、優位性は限界費用・限界利益曲線の傾きの大小関係に依存することを示した。

交通分野では、混雑課金と通行権制度の比較という文脈で同様の解析が行われている。Shirmohammadi et al. ⁴⁴⁾ は、不確実性が存在する状況では両制度導入下での均衡状態が一致しないことを、数値計算を通して示した。また、de Palma and Lindsey ⁴⁵⁾ は Weitzman の理論研究を、利用者の需要集中が彼ら自身に負の影響をもたらすというフィードバック関係などの特徴を踏まえて、交通混雑問題を取り扱えるように拡張している。この研究では単一道路上の混雑問題を取り扱っていたが、Lindsey et al. ⁴⁶⁾ はマルチモーダル型の交通システムへと拡張し、同様の解析を行なった。しかし、これらの研究ではサービスの容量は明示的に取り扱われておらず、表現される外部性のメカニズムは本稿で取り扱うものとは異なる。また、数量規制に束縛されない需要の存在を取り扱ってはいない。

以上の研究に対して、本研究では、予約制度 (あるいは数量規制) を介さずに都市交通サービスを利用しようとするノンリカレント利用者が存在することを前提とした定式化や制度設計を行う。具体的には、利用

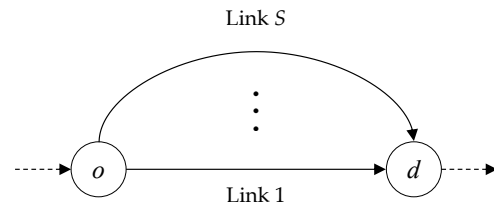


図-2 容量制約付きネットワーク；各リンク (経路) は交通サービスを表していると解釈でき、起点 o から起点 d へのトリップは、何らかのサービスを利用することで各自の目的を達成しようとする状況とも解釈できる。

者が許容可能な複数のサービスをバンドルし、不確実性に生起するイベントに合わせて柔軟に配分するといった予約制度の新たな枠組みを提案している。また、本研究ではこの制度の数理解特性を理論的に明らかにしており、この点も本研究の独自の貢献点であるといえる。

3. 状況設定

(1) 容量制約付き交通ネットワークと交通需要

図-2 に示すようなネットワークを考える。このネットワークは単一起点・単一終点の起終点構造を持っており、起点はノード o 、終点はノード d で表されている。起点から終点までは S 本のリンクが並行接続されており、終点への移動にあたってはいずれか一つのリンクを移動経路として選ばなければならない (以降、リンクと経路は同義の単語として適切に言い換えながら用いる)。リンクの集合は $\mathcal{S} \equiv \{1, \dots, S\}$ で表す。任意のリンク $s \in \mathcal{S}$ には利用可能数に上限 (容量) があると仮定し、その容量を μ_s と表す。

これらリンクは起終点を空間的に接続する道路としてのみならず、様々な交通行動の選択肢として解釈できることに注意されたい。例えば、鉄道・バス・シェアリングサービスといった交通機関の選択を表すものとして解釈できる。また、後述するように本稿では容量を超過する交通需要が流入しない制御スキームを提案しており、その下では単一ボトルネックでの出発時刻選択を、空間的に表現したものとみなせよう。すなわち、このネットワークにおける経路は、道路インフラ・交通機関といった「交通サービス」を抽象化したものであり、様々な状況に適用することができる。また、異なる起終点間で同一の交通サービスを共有するような状況についても容易に拡張することができる：多起点多終点の単経路・一ボトルネックネットワークを考えれば良い。

本稿では一定期間の日々 $\mathcal{D} \equiv \{1, \dots, D\}$ を考え、二種類の利用者がこのネットワークを日々繰り返し利用する状況を考える。一つ目は、通勤・通学などを目的と

して終点 d までの移動を毎日（定常的に）行う利用者であり、「リカレント利用者」と呼ぶ。リカレント利用者の集合を $N \equiv \{1, \dots, N\}$ と表す。リカレント利用者は終点 d に移動するにあたり、並行接続されている経路の中からいずれか一つを選択する。経路には移動時間や安全性・快適性などに差異があり、利用者は通過した経路に応じて異なる効用を受け取る。なお利用者は異質性を有しており、同一の経路でも利用者に応じて異なる効用が経験される。

もう一つは、余暇活動などを目的として確率的に発生する交通需要であり、これを「ノンリカレント利用者」と呼ぶ。ノンリカレント利用者は終点 d に移動する際に、予め設定された経路を固定的に選択し、通過するものとする。これは例えば、ある経路上に配置された集客施設で行われるイベントに参加するために移動するといった、特定の時空間スポットに到達することを目的として動く交通需要を表現するものである。

日々発生しうるノンリカレント利用者のパターン、i.e. 各経路にどれだけ固定数の利用者が流れるかの組み合わせ（これをイベントと呼ぶ）、の集合を \mathcal{E} と表す。この集合にはノンリカレント利用者が発生しないことを表す ϕ も含まれる。あるイベント $e \in \mathcal{E}$ の発生確率を π^e で表す。ただし、 $\sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e = 1$ を満たす。また、イベント e 発生時に各経路 $s \in \mathcal{S}$ に流れる固定需要を N_s^e と表す。すなわち、このイベントが発生することで、リカレント利用者が利用可能な経路 s の容量（残余容量と呼ぶ）は $\mu_s^e \equiv \mu_s - N_s^e$ へと低下することになる。イベント e のときの全リンクへの流入需要を表すベクトルを $\mathbf{N}^e \equiv \{N_s^e\}_{s \in \mathcal{S}}$ と表す。

(2) 道路システムにおける行動主体

本稿のモデルにおいて意思決定を行う主体は、システム管理者とリカレント利用者である。管理者は、確率的に変動する需要・供給を考慮しながらネットワークで発生しうる渋滞現象を抑制し、社会的余剰が最大化された状態を目指す主体である。そのために管理者は、リカレント・ノンリカレント利用者それぞれに対して異なる制御を実施する。これらを統括したものを「浮動型定期通行権システム」と呼ぶ。

まずリカレント利用者は、前述したように、ある一定の期間中に起点から終点へ毎日一回のトリップを行う主体である。システム管理者は、この利用者に対して「バンドル定期券」と呼ばれる、ノンリカレント利用者の需要変動を見込んだ‘確率的な’交通サービスの利用権を設定・発行する。利用者は該当期間に交通サービスを定期的に利用する（i.e. 各リンクを通過する）にあたり、期間の最初に、期間中に経験する自身の期待効用が最大となるようにバンドル定期券を選択・購入

することになる。従って、交通サービスの選択は、利用を希望する交通サービスと対応したバンドル定期券の購入と連動している。

一方、交通サービスの定期的な利用が見込めないノンリカレント利用者に対しては「当日通行券」を設定・発行する。各イベント時に発生するノンリカレント利用者は、対応した交通サービスの当日通行権を購入する。当日通行券の価格にはノンリカレント利用者の需要変動がリカレント利用者に与える影響が反映されており、前述したバンドル定期券の価格より基本的に高額に設定される。

なお、本稿では、ノンリカレント利用者の価格弾力性は非常に低く、当日通行券の価格が変化しても流入需要パターン \mathbf{N}^e , $\forall e \in \mathcal{E}$ は変化しないものとする。そのため、本稿で考えるモデル上、ノンリカレント利用者は戦略的選択を行う余地はない（i.e. 意思決定を行わない）ことに注意されたい。こうした仮定はノンリカレント利用者の設定上妥当であると考えられる。すなわち、イベントに参加するなど非日常的な目的のために移動する需要は、特定の時空間スポットに到達するための交通サービスに対して、日常的な交通需要より大きな評価値を持つと考えられる；そのため、価格が変動しても交通サービスの利用から大きな効用を得られると想定されるため、需要変動は無視しても差し支えない。こうした仮定は、ノンリカレント利用者を優先して交通サービスに割り当てつつ社会的に効率的な状態を目指す、本制度の仕組みをサポートするものでもある。

(3) バンドル定期券の概要

本稿が提案する浮動型定期通行権システムでは、日々確率的に変動する残余容量（i.e. ノンリカレント利用者の交通量）に合わせて、リカレント利用者を柔軟かつ効率的に交通サービスに配分することを目指している。このために管理者は、利用できる交通サービスを if-then ルールの形式で提示する「バンドル定期券」を、期間の初めにリカレント利用者へ販売する。

バンドル定期券には、対象期間中の日々において、各イベント $e \in \mathcal{E}$ が生じたときに利用できる交通サービスの情報が記述されている。バンドル定期券は一種類とは限らず、同一のイベントに対して利用できる交通サービスが異なる複数種類のバンドル定期券が同時に販売される。バンドル定期券の種類を \mathcal{B} と表そう。数学的には、あるバンドル定期券 $b \in \mathcal{B}$ は、交通サービス利用権の配布確率ベクトル $\mathbf{p}^b \equiv \{p_s^b\}_{s \in \mathcal{S}}$ と、その定期通行権の購入価格 Q^b の組み合わせで構成され、異なる定期券はこれらの変数が異なる。バンドル定期券間での各イベント発生時に利用可能な交通サービス

の違いは利用権配布確率の違いで表現されており、この違いはその交通サービスへの「優先権」の違いと解釈できる。優先権の違いはバンドル定期券の価格と連動しており、利用者は自身が各サービスを利用することで得る効用と価格とを考慮しながら、適切なバンドル定期券を購入することになる。

バンドル定期券を販売した後、管理者は日々生じるイベントを観測（あるいは予測）し、販売したバンドル定期券の情報に基づき利用可能な交通サービスを各利用者に通達する。利用者は、受け取った情報に従って定められた交通サービスを日々利用することになる。実用的には、利用者には定常的に利用できる交通サービスを提示した上で、そのサービスがノンリカレント利用者の流入というイベントのために利用不可能になったとき、その事実と代替となる交通サービスを提示する、といった仕組みが考えられる。言い換えれば、本稿が提案するバンドル定期券とは、普段利用する交通サービスの利用権に加え、利用不可能になったときの「保険」となるサービスの利用権を組み合わせ提示するものである。これが、定期券を「バンドル」と名づけている理由である。

管理者は、いずれのイベントが生起しても、各交通サービスの利用権を取得する利用者が残余容量以下となるように、各バンドル定期券の内容（i.e. 交通サービス利用権の配布確率）と販売枚数を決定する。こうした発行条件下では、常に、各交通サービスのリカレント・ノンリカレント利用者の合計数はその容量以下となり、容量超過に起因する損失は発生しない。

(4) 利用者効用と実現目標とする交通サービス割当の定式化

浮動型定期通行権システム導入下では、リカレント利用者は異なるタイミングで異なる効用を知覚する。まず、バンドル定期券を購入した後、期間中の日々一回のトリップで経験する「事後的な」効用である。この効用は、利用者が各交通サービスに対して持つ私的評価値から、一日あたりのバンドル定期券価格を差し引いたもので表現される。ここで、ある日 $d \in \mathcal{D}$ において利用者 $i \in \mathcal{N}$ が交通サービス $s \in \mathcal{S}$ に対して持つ評価値 $v_s^{i,d}$ は、期待値が V_s^i である何らかの確率分布に従うものとする；これは、日毎に異なる環境のゆらぎ（e.g. 天候変動や各サービスに対する選好のゆらぎ）により評価値が変動する状況を表現している。この利用者がバンドル $b \in \mathcal{B}$ を購入し、実際に交通サービス s に割り当てられたときに経験する効用は、次のように定式

化される：

$$u_s^{i,d}(b) = v_s^{i,d} - q^b, \quad (1)$$

$$\text{where } q^b = Q^b/|\mathcal{D}|. \quad (2)$$

ここで、 q^b はバンドル定期券価格 Q^b を一日あたりの価格に換算したものである。

次に、バンドル定期券を購入するとき（i.e. トリップをまだ行っていないとき）に知覚する「事前的」なトリップ効用を考える。この時点では日々経験する効用は不明なので、利用者は記述されている交通サービスの利用確率および評価値の期待値に基づき、バンドル定期券を購入することで得られる効用を評価する。ここで、利用者の不確実性に対する態度がリスク中立的であると仮定しよう。バンドル定期券 $b \in \mathcal{B}$ を購入した利用者が知覚する（一日あたりの）期待効用は次のように定式化される：

$$U^i(b) = \sum_{s \in \mathcal{S}} p_s^b V_s^i - q^b. \quad (3)$$

こうした設定の下、管理者はバンドル定期券の内容（i.e. 各イベント生起時の配分パターンと価格）を、各イベント生起時の「期待社会的余剰」を最大化する交通サービス配分を実現するように設定する。期待社会的余剰は、リカレント利用者が配分される交通サービスの、私的評価値の期待値の和として定義する。ここで私的評価値の期待値を用いるのは、管理者がバンドル定期券の内容を設定する時点は実際にトリップを行う期間の前であり、各日に実現する値はわからないためである。なお、バンドル定期券・当日券の売買による金銭的取引は全て主体間の所得移転に過ぎないため、社会的余剰には含まれない；また、ノンリカレント利用者は交通サービスを固定的に選んでおり、社会的余剰に加えるのは冗長なため省略している。以上をまとめると、管理者は、あるイベント $e \in \mathcal{E}$ が生じた場合に、次の最適化問題 [e-SO] を解くことで得られる配分パターンを実現するようバンドル定期券を設定することになる：

$$\max_{a^e} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{N}} V_s^i a_s^{i,e} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \sum_{s \in \mathcal{S}} a_s^{i,e} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} a_s^{i,e} \leq \mu_s^e \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (6)$$

$$a_s^{i,e} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}. \quad (7)$$

この問題は組み合わせ最適化問題であり、一般的には解くことが困難である。しかし、本稿で扱う問題は制約条件の係数行列が totally unimodular の性質を満たしているため、容易に解くことができる^{35),37)} すなわち、変数の整数性を緩和した線形計画問題を解くことで、元

の整数計画問題の解と一致する整数解を得ることができ (47,48)。

しかし、最適化問題を実際に解きその結果をバンドル定期券の内容へと反映するにあたっては、二つの問題点がある。一つ目は、最適化問題のパラメータである各利用者の評価額は私的情報であり、一般に管理者が正確に観測することが困難である、ということである。私的评价額を誤って設定して上記の最適化問題を考えたとしても、社会的余剰を最大化できる保証は存在しない。そのため、管理者が利用者の評価額を正確に評価できるように、利用者が自身の評価値を正直に表明するようなメカニズムの設計が求められる。

二つ目は、最適化問題の解をバンドル定期券の内容や当日券価格に反映する方法を確立する必要がある、ということである。特に、当日券価格はバンドル定期券の価格と連動して決定されなければならないことに注意されたい。なぜならば、当日券と比較してバンドル定期券の価格が高額な場合、リカレント利用者にとっても当日券価格を購入する方が経験する効用が高くなる可能性があるからである；すなわち、利用可能な交通サービスが確率的にしか与えられないというリスクを適切に見込んで価格を設定しない場合、リカレント利用者にとってバンドル定期券を購入するインセンティブが存在せず、全利用者が当日券を購入するという選択が合理的な帰結となる、i.e. 提案システムは破綻する。

システムが機能しないならば、利用者の利己的・近視眼的な行動選択により容量を超過した需要が交通サービスを利用しようとし、超過需要が原因となる損失が発生するだろう。また、仮に超過需要に反応して自律的に分散する (i.e. 超過需要が自発的に容量が余っているサービスを選択する) としても、結果として実現するサービス配分パターンが社会的に効率の良いものになるとは限らない。これは当然だが、各交通サービスに対して効用の高い利用者が割り当てられるとは限らないためである：例えば、交通サービスの利用権が FCFS 原則に基づきで割り当てられる場合、実現する配分パターンは (利用者間の選択順序に依存して) 「ランダムな」ものになってしまう。本稿では各利用者のバンドル定期券・当日券購入選択の意思決定について明示的にはモデリングしていないが、この意思決定に関するリカレント利用者の個人合理性を考慮した価格設定が必要となる。

4. 確率オークションを活用した交通サービスのバンドリング・メカニズム

本章では、前章で指摘した問題を解決するためのメカニズムを、確率オークション理論の枠組みを用いて

構築する。まず、確率オークションについて概説する。次に、確率オークションを用いてバンドル定期券・当日券を設定するメカニズムを説明する。そして、提案メカニズムの性質を述べる。

(1) 確率オークションの概要

確率オークション (stochastic auction) とは、入札者のメッセージに対して、各財の割当確率および総支払い額を決めるメカニズムである。直接メカニズムを想定して、各入札者 $i \in \mathcal{N}$ のメッセージ (財の評価の表明値) が、ベクトル $\mathbf{m}^i \equiv \{m_s^i\}_{s \in \mathcal{S}} \in \mathbb{R}_+^{|\mathcal{S}|}$ で表されるとしよう。確率オークション (あるいは確率メカニズム) は、全入札者のメッセージ $\mathbf{m} \equiv (\mathbf{m}^1, \dots, \mathbf{m}^N)$ と、メッセージに対して各入札者 $i \in \mathcal{N}$ への各財 $s \in \mathcal{S}$ の配分確率 $y_s^i \in [0, 1]$ を返す配分ルール (allocation rule)、および各入札者の支払い額 w_i を決定する支払いルール (payment rule) から構成される。

確率オークションの枠組み自体は古くから研究が行われている。Matthews⁴⁹⁾ や Maskin and Riley⁵⁰⁾ は、単一財を想定し入札値に対して勝者となる確率を返すオークションを考えた。そして、入札者がリスク回避的である場合に、売り手側が期待収益を最大化するための最適戦略について考察している。Meek et al.⁵¹⁾ は、検索連動型広告オークションにおける確率オークションの有効性を分析している。この研究では、確率オークションが耐戦略性を有するための十分条件を理論的に明らかにした他、オークションの敗者が勝者の支払額を吊り上げるように入札する ‘vindictive bidding’ を抑制する効果を持つことを示した。

また、確定的なオークションでは勝者になれない入札者にも勝者となる機会を与えることは、情報収集・アップデートの観点からも有用であることを述べている。例えば、検索連動型広告は web 上に表示された広告をクリックされることで初めて入札者に利益と支払いが発生する仕組み (条件付き支払いオークション; contingent payment auction) を持つ。こうしたシステムでは参加者の効用は彼らが把握する「広告をクリックされる主観確率」に依存するが、確定的なオークションではこの情報は勝者の広告に関するものしか更新されることはない。一方で確率オークションでは多様な入札者の広告に関する情報が更新されうるため、オークションを繰り返し行うことで真の評価値を把握することができる。これと同様のメリットは Tomita⁵²⁾ によっても指摘されている。

(2) 提案メカニズム

本稿では、「入札に対して財の獲得確率を返す」という確率オークションの枠組みを活用して、バンドル定

期券の内容や当日券の価格を設定する方法を構築する。すなわち、リカレント利用者は確率オークションによって価格と購入者および定期券内容が決定される取引市場に参加して、バンドル定期券を購入することになる。確率オークションの具体的なデザインには様々な方法が考えられるが、本稿では組み合わせオークションのベンチマークである Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズムを基盤としたバンドル定期券取引市場を構築する。

a) VCG メカニズムの概要

VCG メカニズムは Vickrey⁵³⁾ の同種複数財のオークションに端を発するオークション・メカニズムである。Clarke⁵⁴⁾ と Groves⁵⁵⁾ の公共財に関する研究により、異種複数財のメカニズムへと一般拡張されており、この拡張されたメカニズムを VCG メカニズムと呼ぶ。

VCG メカニズムでは、次の手順に従い財の割当および支払額を決定する：(i) 各入札者 $i \in \mathcal{N}$ は入札しうる全ての財に対して入札を行う、i.e. オークション管理者に財の評価値 \mathbf{m}^i を送る；(ii) 管理者は全入札者の評価値ベクトル \mathbf{m} に基づき、入札者が財を取得することで得る評価値の総和が最大となるように、制約条件を考慮して財を割り当てる、(iii) 財を落札した入札者の支払額 (Vickrey payment) は、入札者が入札することで生じる他者の社会的余剰の減少分とする。

VCG メカニズムは一般的に次のような望ましい性質を持つことが知られている：a) 各入札者にとって、自分の真の評価値を正直に表明することが支配戦略となる (耐戦略性；strategy-proofness)；b) 表明された真の評価値に基づき、効率的な資源配分が達成できる (効率性；efficiency property)；c) 任意の評価値パターンに対して、各入札者が事後的に経験する効用は非負である；すなわちシステムに参加することで損をすることはない (個人合理性；individual rationality)。次節では、これらの性質を引き継ぐように確率オークションを設計する。

b) VCG メカニズムに基づく確率オークションの設計

浮動型定期通行権システムにおけるバンドル定期券・当日通行権設計のための確率オークションは、次のように設計できる。まず、リカレント利用者は管理者に交通サービスの期待的な評価値 \mathbf{m} をメッセージとして送る；なお、この時点では利用者が最終的に落札するバンドル定期券は構築されておらず、利用者の入札対象ではないことに注意されたい。

続いて、管理者は交通予測などから、ノンリカレント利用者の流入イベント集合 \mathcal{E} を推測する。そして、推測された各イベント $e \in \mathcal{E}$ に対して、表明された評価値 \mathbf{m} をパラメータ \mathbf{V} に代入した上で (i.e. $V_s^i := m_s^i$, $\forall i \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}$) 最適化問題 [e-SO] を解き、各イベント時の配分パターン \mathbf{a}^e を得る。これにより、各イベン

ト生起時の if-then ルール形式の配分パターンが得られることになる。

同時に、各イベントにおける Vickrey payment を求める。イベント e が生じたときの、利用者 $i \in \mathcal{N}$ に課される Vickrey payment c_i^e は、その利用者が入札することで生じる他の参加者の社会的余剰の減少分 (i.e. 外部性) であり、次のように定義される：

$$c_i^e(\mathbf{m}) = Z^e((\phi, \mathbf{m}_{-i})) - Z_{-i}^e(\mathbf{m}). \quad (8)$$

ここで、 (ϕ, \mathbf{m}_{-i}) は利用者 i 以外が評価値ベクトル $\mathbf{m}_{-i} \equiv (\mathbf{m}^1, \dots, \mathbf{m}^{i-1}, \mathbf{m}^{i+1}, \dots, \mathbf{m}^N)$ を管理者に表明することを意味している。 $Z^e(\cdot)$ は所与の評価値ベクトルの下で最適化問題 [e-SO] を解いたときの最適値を表し、 $Z_{-i}^e(\cdot)$ は $Z^e(\cdot)$ の値から利用者 i が得る余剰 (i.e. 割り当てられたサービスの評価値) を除いた値である。この Vickrey payment は最適化問題の双対を解くことでも得られる⁴⁸⁾。

最後に、管理者は、得られた配分パターン・Vickrey payment とイベントの生起確率とを集約し、各利用者ごとにチューニングされたバンドル定期券を提示・料金を徴収する。具体的には、利用者 $i \in \mathcal{N}$ は、下記で定義されるサービス $s \in \mathcal{S}$ への配分確率 y_s^i および価格 w_i のバンドル定期券 b を購入したものとす ($p_s^b := y_s^i$, $q^b := w_i$)：

$$y_s^i = \sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e a_s^{i,e}, \quad (9)$$

$$w_i = \sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e c_i^e. \quad (10)$$

すなわち、各イベントの発生確率で重みづけられた配分パターンおよび外部性課金をバンドル定期券として構築する。

さらに、上記で得られた課金パターンを用いて、ノンリカレント利用者に課す混雑課金、すなわち当日券の価格を決定する。いま、交通サービス $s \in \mathcal{S}$ の当日券価格を r_s と表そう。この価格は、各イベント $e \in \mathcal{E}$ 生起時にそのサービスを配分されたリカレント利用者が支払う Vickrey payment を、そのイベントの発生確率で重みつけて集計した値か、それ以上の値で与えられるものとする。当日券価格の最低値をここまでで用いた変数で数学的に表現すると、

$$r_s = \sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e \frac{\sum_{i \in \mathcal{N}} \delta(1, a_s^{i,e}) \cdot c_i^e}{\sum_{i \in \mathcal{N}} \delta(1, a_s^{i,e})}, \quad (11)$$

と表される。ここで、 $\delta(a, b)$ はクロネッカー・デルタであり、 $a = b$ のとき $\delta(a, b) = 1$ 、それ以外のときはゼロとなる。このことより、式 (11) の右辺の分数について、分母はイベント e のときにサービス s が配分された人数を表し、分子はサービス s が配分された人数が支払った Vickrey payment の合計を表していることがわかる。VCG メカニズムにおいて同種の財を購入した入札

者が支払う額は等しいため、結局のところ、右辺の分数はサービス s を利用するプレイヤーに課せられた Vickrey payment, 外部性課金相当額を表していることになる。従って、この定式化により、 r_s を前述の定義と整合的に表現できていることが確認できる。なお、以降の議論では当日券価格は式 (11) で与えられる値に設定されるものとする。

式 (11) で設定される当日券価格は、ノンリカレント利用者が流入することでリカレント利用者に与える期待的外部性に相当する金額を表している。言い換えれば、ノンリカレント利用者が全員リカレント利用者より大きなサービス評価値を持っていると仮定して確率オークションに参加したときの（期待的な）Vickrey payment と等価である。その意味で、ノンリカレント利用者に式 (11) で設定されるレベルの混雑課金を課すことは自然な制御であると言えるだろう。

(3) 提案メカニズムの性質

本稿が提案するメカニズムは、VCG メカニズムを財の数が不確実に変動するケースへと素朴に拡張したものであり、それゆえに VCG メカニズムの望ましい性質を受け継いでいる。具体的には、前述した耐戦略性、効率性が確率オークションを実施する時点で、「事前的に」成立することが示される。これは次の命題としてまとめられる：

命題 1. 提案メカニズムにおいて、各利用者が式 (3) で表される期待効用を最大化する上で、自身の評価値を正直に表明する (i.e. $m_s^i = V_s^i, \forall i \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}$) ことは（弱）支配戦略である。また、利用者が評価値を正直に表明するとき、各イベント $e \in \mathcal{E}$ に対する期待社会的余剰 $Z^e(\mathbf{V})$ は最大化される。

証明.（耐戦略性）正直表明が支配戦略でないならば、少なくとも一人の利用者 $\exists i \in \mathcal{N}$ が、その利用者だけ真の評価値以外を表明することで期待効用を改善することができる。配分確率 (9) および価格 (10) を代入して変形することで、期待効用は次のように表される：

$$U^i(b) = \sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e \left\{ \sum_{s \in \mathcal{S}} V_s^i a_s^{ie} - c_i^e \right\}. \quad (12)$$

ここで、括弧の中身は各イベント生起時の期待効用を表している。

式からは、偽の表明により期待効用を改善できる場合、イベント生起時の期待効用を改善できるようなイベントが少なくとも一つは存在する必要があることがわかる。しかし VCG メカニズムを用いているため、いずれのイベントに対しても偽の表明をすることで期待効用を改善できないことは自明である。従って、偽の表明により期待効用を改善することはできない。以上

より、背理法から正直表明が支配戦略であることが示される。□

（効率性） $Z^e(\mathbf{V})$ は最適化問題 [e-SO] の目的関数そのものであり、提案メカニズムではこの最適化問題に従い配分パターンを決定している。そのため定義上、期待社会的余剰は最大化される。以上より、真の評価値が表明される限り、効率性が満たされる。□

各イベントに対して期待社会的余剰が最大化されるとき、全イベントに関して期待社会的余剰を集計した値 $\sum_{e \in \mathcal{E}} \pi^e Z^e(\mathbf{V})$ も最大化される。この意味で、提案メカニズムは配分結果を全イベントを踏まえても期待的に最大化するものとみなされる。

加えて、リカレント利用者のバンドル定期券・当日券購入の意思決定に関する個人合理性についても有用な知見が得られる。いま、リカレント利用者 $i \in \mathcal{N}$ が該当期間の始まりに、バンドル定期券を購入するか任意の交通サービス $s \in \mathcal{S}$ の当日券を日々購入するかを選択できるとする。ここで解析を容易にするためのテクニカルな条件として、次の仮定が成立するものとしよう：任意のイベント $e \in \mathcal{N}$ に対して $N_s^e < \mu_s$ ($\mu_s^e > 0$) が満たされるものとする。すなわち、利用者が当日券を購入することを意思決定するタイミングでは「日々選択する交通サービスは必ず利用できる (i.e. 容量不足のために利用できなくなることはない)」と認識していても整合がとれているものとする。以上に基づき、当日券を日々購入するとき得られる一日あたりの期待効用 $\bar{U}^i(s)$ を次のように定義する：

$$\bar{U}^i(s) = V_s^i - r_s^{-i}. \quad (13)$$

ここで、 r_s^{-i} は、リカレント利用者 i がバンドル定期券を購入するための確率オークションに参加しなかったときの、交通サービス s の当日券価格を表す。

上記の定式化において、次の個人合理性が成立する：

命題 2. リカレント利用者 $i \in \mathcal{N}$ が確率オークションに参加して購入するバンドル定期券 b から得る期待効用は、当日券を日々購入することで得られる期待効用より小さくない。すなわち、任意の交通サービス s に対して、次の関係式が成立する：

$$U^i(b) - \bar{U}^i(s) \geq 0. \quad (14)$$

証明. まず、イベント集合 \mathcal{E} を次の二つのイベント集合に区分する：利用者 i が確率オークションに参加するとき交通サービス s が割り当てられる (i.e. $a_s^{ie} = 1$) イベント集合 \mathcal{E}^a と、割り当てられないイベント集合 \mathcal{E}^b 。次に、利用者 i が確率オークションに参加しない状況を考え、イベント e が生起したときにサービス s に割り当てられる利用者が課される Vickrey payment を \bar{c}_s^e と表そう。この変数は、 r_s^{-i} と次の関係を持つ： $r_s^{-i} = \sum_{e \in \mathcal{E}} \bar{c}_s^e$ 。

これらの変数を用いることで、式 (14) の左辺は次のように変化させることができる：

$$U^i(b) - \bar{U}^i(s) = \sum_{e \in \mathcal{E}^a} \pi^e \left\{ (V_s^i - c_i^e) - (V_s^i - \bar{c}_s^e) \right\} \quad (15)$$

$$+ \sum_{e \in \mathcal{E}^b} \pi^e \left\{ \left(\sum_{s' \in S \setminus \{s\}} V_{s'}^i a_{s'}^{i,e} - c_i^e \right) - (V_s^i - \bar{c}_s^e) \right\}. \quad (16)$$

ここで、上記の式の第一項について $c_i^e = \bar{c}_s^e, \forall e \in \mathcal{E}_a$ が成立する：両方とも、利用者 i をサービス s に割り当てている状況における、サービス s が配分された利用者に課される外部費用を示している（同種の財を購入したときの費用は利用者間で同じであることに注意されたい）、従って、第一項は差し引きゼロとなる。

次に、第二項を考える。式をわかりやすくするために、利用者 i が確率オークションに参加したとき、イベント $e \in \mathcal{E}$ に対して $a_{s'}^{i,e} = 1$ となるサービス s' を $x^i(e)$ で表そう。これを用いると、あるイベント e に対して括弧の中身は次のように整理される：

$$\left(\sum_{s' \in S \setminus \{s\}} V_{s'}^i a_{s'}^{i,e} - c_i^e \right) - (V_s^i - \bar{c}_s^e) = (V_{x^i(e)}^i - c_i^e) - (V_s^i - \bar{c}_s^e) \quad (17)$$

この式の第一項は確率オークションにおいて正直表明をしたとき、イベント e 生起時に得られる期待効用である；一方で第二項は、イベント e 生起時にサービス s に割り当てられる場合に得られる期待効用であり、すなわち偽の評価値表明をすることで得られる期待効用に他ならない。この事実と VCG メカニズムが耐戦略性を満たしている事実、i.e. 偽の表明により期待効用を改善することができないこと、を組み合わせると、式 (17) が非負の値を持つことが導かれる。従って、式 (16) の第二項も非負の値を持つことがわかる。

以上をまとめると、式 (16) が非負の値を持つことが示される。従って命題は示された。□

このことは、提案システムに参加することは、何らかの交通サービスの当日券を逐次的に購入することに対する（弱）支配戦略であることを意味する。言い換えれば、リカレント利用者は、提案システムに参加することで期待的には損をすることはしない。

以上より、提案システムによって利用者に評価値を正直に表明させること、およびその評価値に基づき効率的な配分を実現できることが示された。また、リカレント利用者が提案システムに参加することで損をしないような価格設定法も明らかとなり、提案システムから利用者が逸脱するようなインセンティブがない (i.e. 制御不可能となる利用者が増加していかない) という意味で、システムの安定性をも担保できることがわかる。

Notation	N_1^e	Probability
ϕ	0	0.646
e_1	150	0.183
e_2	200	0.095
e_3	250	0.048
e_4	290	0.027

表-1 ノンリカレント利用者の流入イベントについて、流入量とイベント生起確率；ガンベル分布パラメータを $\alpha = 0, \beta = 70$ と設定して導出。

5. 数値計算

最後に、提案システムの性質を他のシステムと比較考察しながら確認するために数値計算例を示す。まず、数値計算の状況設定について説明する。次に、比較対象とするシステムとその定式化について説明する。最後に数値計算結果を示す。

(1) 状況設定

本数値計算では、 $S = 2$ (i.e. 二経路 (リンク)) のネットワークにおいて、 $D = 100$ 日間のトリップが行われている状況を考える。交通需要として、 $N = 1,000$ 人のリカレント利用者を考える。各個人 $i \in \mathcal{N}$ が交通サービス 1 に対して持つ評価値の期待値 V_1^i は、平均 300、分散 20 の正規分布 ($N(300, 20)$) を用いてランダムに設定する。日々の評価値も同様に正規分布 $N(V_1^i, 20)$ に従ってランダムに決まるものとする。一方、サービス 2 の評価値は、サービス間比較のための基準値として、常に 100 の値を取るものと設定する。

ノンリカレント利用者はサービス 1 のみを利用するものとする。前述した通り、こうした予約システム外からの固定的な交通需要は、この経路上に位置する集客施設などに赴くことを目的として行動するような交通需要の流入を表しているものと解釈することができる。ノンリカレント利用者の流入イベントはガンベル分布に基づき生成する。まず、生じうるノンリカレント利用者の流入需要パターンを与件として設定する：生じうるイベント数 $|\mathcal{E}|$ および各イベント時の流入パターン $\mathbf{N}^e, \forall e \in \mathcal{E}$ を決定する。次に、各流入量がガンベル分布に従うものとし、その値 x と対応する確率密度を次の式に基づき求める：

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left\{ - \left(\frac{x - \alpha}{\beta} \right) \right\} \exp \left[- \exp \left\{ - \left(\frac{x - \alpha}{\beta} \right) \right\} \right]. \quad (18)$$

ここで α, β はパラメータであり、特に α は最頻値を示す。そして、イベント生起確率の合計が 1 となるよう

に得られた確率密度を正規化することで各イベントの生起確率を求める。本稿ではサービス 1 のみ利用すると仮定しているため、イベント e の生起確率はサービス s への流入交通量を用いて次のように表すことができる：

$$\frac{f(N_1^e)}{\sum_{e' \in \mathcal{E}} f(N_1^{e'})} \quad (19)$$

以上の手続きに基づき生成したイベントを表 1 に示す。最後に、リンク 1 の容量は 300、リンク 2 の容量は 1,000 と設定した：これにより、需要を適切に分散させれば、いかなるイベントが生じても全ての利用者がトリップを完遂できる。

(2) 比較対象とするシステムとその定式化

本稿では提案システムに加え、サービス予約無しの場合、当日券価格に相当する混雑課金を導入したケースおよび事後最適ケースの数値計算を行い、その結果から提案システムの特徴を比較考察する。以下では、比較対象とする二つのシステムの設定およびリカレント利用者の意思決定について概説する。

まずサービス予約無しの場合では、各利用者は実現した評価値に基づき日々利用する交通サービスを選択する。交通サービス選択はロジットモデルに基づき行われるものとする。ある日 $d \in \mathcal{D}$ に交通サービス 1 への評価値が $v_1^{i,d} \sim N(V_1^i, 20)$ で与えられるリカレント利用者 $i \in \mathcal{N}$ を考えよう。この利用者がサービス 1 を選択する確率は次の式で与えられる：

$$\frac{\exp(\theta v_1^{i,d})}{\exp(\theta v_1^{i,d}) + \exp(\theta v_2^{i,d})} \quad (20)$$

ここで θ はスケールパラメータであり、本稿では $\theta = 0.05$ に設定した。なお、選択の結果、あるサービスに容量以上の利用者が集中する状況が起こりうる。その場合は、サービスを利用できる利用者をランダムに決定し、利用できなかった利用者は別サービスを利用するものとする。

次に混雑課金導入ケースでは、利用者は全員当日券を購入するものとして、日々の実現評価値から当日券価格を差し引いた効用の値に基づき交通サービスを選択する。当日券価格は、リカレント利用者全員が確率オークションに参加したときの価格 (11) を用いる。交通サービス選択は、サービス予約無しの場合と同じくロジットモデルに従うものとする。

事後最適ケースでは当日実現した評価値に基づき、社会的余剰を最大化するように配分する。すなわちシステムが実現しうる最適値を導出する、効率性評価の上でのベンチマークとなるケースである。

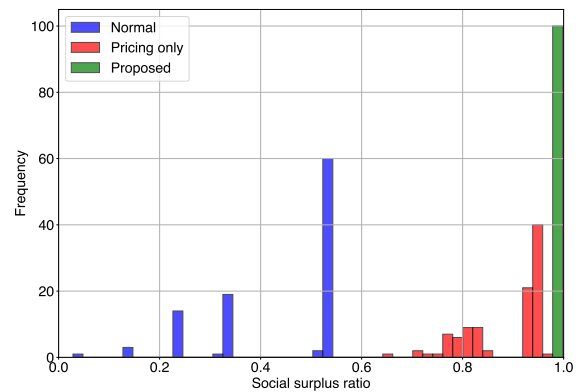


図-3 社会的余剰の頻度分布

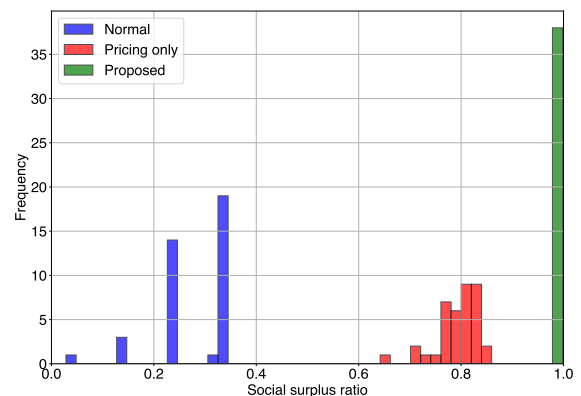


図-4 容量低下時 ($e \neq \phi$) における社会的余剰の頻度分布

(3) 数値計算結果

図-3 に、実現した (事後的な) 社会的余剰の頻度分布を示す。この図では、予約無し・混雑課金導入・提案システム導入の三ケースにおいて日々実現した社会的余剰を、事後最適ケースの社会的余剰で除したものの分布を表している。図を見ると、提案システムは最適状態に近い非常に高い効率性を達成していることが確認できる。すなわち、今回の設定では、利用者の効用が日々 (事後的に) 揺らぐのに対して、予め期待値に基づき配分パターンを決めても高い効率性を発揮できていることが分かる。なお、期間を通した社会的余剰の平均値は、予約無し・混雑課金導入・提案システム導入のそれぞれにおいて 69343.40, 138359.19, 152086.06 であり、提案システム導入時は混雑課金導入時と比較しても 9.92% 程度改善していることがわかった。

また、図-4 に残余容量が低下するイベントが発生した日における社会的余剰の頻度分布を示す。この図を見ると、提案システム導入以外のケースでは効率性が大きく低下していることが分かる。これは、容量低下に関わらず利用者が平常時と同様の選択をおこなった結果、サービスを利用できる利用者数が低下したためである。一方で、提案システム導入時はそうした容量低下イベントに対して利用すべき適切なサービスを

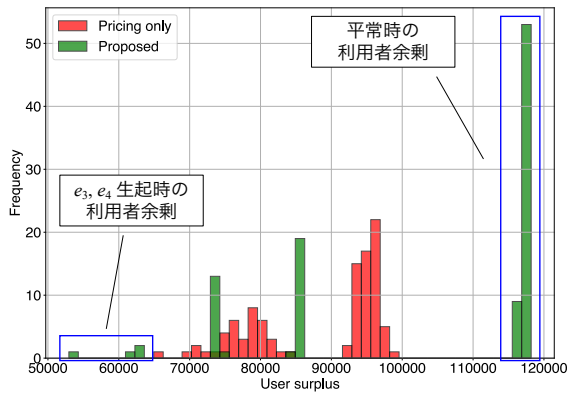


図-5 利用者余剰の頻度分布

指示することで、高い効率性を維持できていることが見て取れる。すなわち、容量あるいはシステム外からの需要の不確実性に対しても、提案システムがロバストであることが確認できる。

次に、社会的余剰を構成する要素として、利用者余剰 (i.e. リカレント利用者が日々経験する事後的な効用の総和) の頻度分布の総和を図-5 に示す。なお、ここではサービス利用料金を明示的に定めている混雑課金および提案システム導入ケースのみについて示す。これを見ると、まず、容量低下イベントが生じない平常時には、提案システムは混雑課金と比較して、安定して高い利用者余剰を実現できていることが分かる。一方で、容量低下時には利用者余剰は大きく低下しており、特に容量が著しく低下するイベント発生時 (i.e. $e = e_3$ or e_4) には、利用者余剰は混雑課金のものを下回っていた。これは、提案システムでは混雑課金とは異なり、イベント発生時にサービス 1 を利用できずサービス 2 へと割り当てられた利用者からも、期の始まりにバンドル定期券を購入するという形で固定的に料金を徴収しているためである。混雑課金導入時は実際にそのサービスを利用できた利用者からのみ料金を徴収しており、そのために利用者余剰は低下しにくい。ただし、期間を通した利用者余剰の平均値は提案システムの方が高い。具体的には、今回の数値計算では、混雑課金導入時では 88395.69 であるのに対し、提案システム導入時では 102461.74 であり、15.91% 程度向上していた。

上記の事実を供給者余剰、i.e. 徴収した料金の日々の総額、の頻度分布から確認したものが図-6 である。図からは、混雑課金導入ケースでは料金収入が日によって大きく異なりうるが見て取れる。これは、サービス 1 の残余容量 (i.e. 利用者数) に収入が依存するため、実現したイベントごとに収入がばらつくことを示している。一方で、提案システムではサービス供給者は常に一定の料金収入を得ていることが確認できる。また平常時の料金を比較すると、提案システムの方がよ

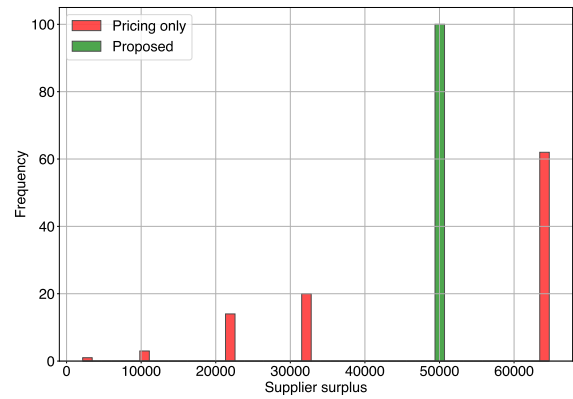


図-6 供給者余剰の頻度分布；提案システムの供給者余剰はバンドル定期券の価格を一日あたりに換算したものをを用いている。

り低いことが分かる。これは前述したように、サービス 1 を利用できずサービス 2 へと割り当てられることのリスクがバンドル定期券の価格に反映されているためである。なお、期間を通した供給者余剰の総和は二つのケースでほとんど変わらず、混雑課金導入時では 49963.50、提案システム導入時では 49624.33 であった。

以上のことは、提案システムはサービス供給者の収入を大きく変化させることなく利用者余剰を改善しており、これにより社会的余剰を改善できていることが分かる。供給者の観点では、バンドル定期券の事前購入を通して、収益を安定化できていることもわかった。ただし同時に、サービス容量が低下し好ましくないサービスに割り当てられても固定的に料金が徴収されるために、日によっては利用者余剰が大きく低下することも確認できる。そのため、提案システムで得られた収入を利用者の損失補填にあてるような方策を構築・組み合わせることが望ましいと考えられる。

6. 終わりに

本稿では、都市交通サービスを日々繰り返し利用するリカレント利用者と突発的に利用するノンリカレント利用者が混在する状況において、予約を通して社会的に効率的なサービス配分を実現するための浮動型定期通行権システムを提案した。この制度では、ノンリカレント利用者の流入パターンに応じてリカレント利用者を再配分することで、容量を超過する需要がサービスに流入することを抑制できる。さらに確率オークションを活用して利用者の選好情報を収集することで、リカレント利用者全体にとって望ましいサービス配分パターンの情報が集約されたバンドル定期券を構築し、外部性課金に相当する適切な価格を設定できる。同時に、リカレント利用者を再配分することの損失に見合うだけの、ノンリカレント利用者に課すべき当日券価

格 (i.e. 混雑課金レベル) を決定することができる。

本研究では、この予約制度の数理モデリングを行い、その数理特性を解析した。その結果リカレント利用者は各交通サービスに対して正直に期待評価値を表明する耐戦略性や、期間中に実現する期待社会的余剰が最大化される効率性、および個人合理性が満たされることを示した。個人合理性に関しては、バンドル定期券を購入する提案システム参加者が、当日券を購入することより損をしないことを示しており、システムのロバスト性が示されたといえる。最後に、数値計算を通して、事後的に実現した社会的余剰が真の最適状態に近い効率的な状態を実現することを確認した。また混雑課金のみを導入したケースと比較した結果、リカレント利用者が経験する効用の総和が改善されることやサービス提供者の料金収入が安定化することがわかった。すなわち、単にシステム全体の効率性を改善するのみならず、利用者・供給者それぞれにとって利便性を高める制度であることが確認できた。

本稿では、ノンリカレント利用者の流入確率やパターンに関する事前情報や日々実現する流入パターンの情報が、交通予測を通して事前に与えられることを前提として、リカレント利用者の予約制度を構築している。言い換えれば、交通システムへの外乱予測を予約制度による数量規制アプローチと組み合わせることで、不確実なシステムの混雑状況に対応できる柔軟な交通制御を実現することを目的としている。一方でそれ故に、提案システムがどれだけ効率的に機能するかは交通予測の精度に依存する。そのため、予測精度とノンリカレントな需要の予測誤差の関係や、これらが提案システムの効率性に与える影響を数理的にモデリングする必要がある。そして、予測をさらに超えた需要に対してもシステムが有効に働くためのバッファ容量の設定・最適化手法の構築や、系統的な数値実験を通じたシステム効率性の評価が求められる。需要変動と関連したトピックとしては、混雑課金スキームに対するノンリカレント利用者の弾力性を考慮した研究拡張も重要となるだろう。

また、本稿では不確実性下における交通サービスの予約制度について考察したが、不確実なイベントが生起あるいはそれを事前予測した際に、その事実をどのように利用者に告知し再配分するかの具体的な手続きは設計していない。これに関しては、イベントの発生を知覚・予測した時点から配分までの時間 (lead time) の長さに応じて様々な展開が考えられる。Lead time が十分長い場合、例えば野球観戦などのイベントが生起する日時が十分前に事前告知できる状況に対しては、本稿の枠組みはおおよそそのまま適用できるだろう：イベント発生日時と利用可能な交通サービスを利用者に

事前告知すれば良い。一方で、lead time が短く、時々刻々観測される情報から生じているイベントの把握および利用者の再配分をリアルタイムに行う必要がある状況ではこのような手法は取れない。サービス配分の日内動学 (within-day dynamics) を明示的に取り扱った上で、観測情報から細かく配分パターンを決定するような確率最適制御などと組み合わせた方法を考える必要があるだろう。こうした方向に研究を拡張していくにあたっては、交通分野に限らず、不確実性下における電力市場や運輸分野における最適配分手法なども参考となるだろう^{56),57),58)}。

ただしこのような状況でも、提案予約システムの基本的な枠組み、例えばバンドル定期券の形式で利用者リスクの情報を提供すること、提供サービスを確率的なものにすることでサービス・マッチングに柔軟性を残しておくこと、およびオークションを通して利用者の選好情報を事前に把握すること、といった性質は、不確実性下における効率的なサービス配分を利用者の個人合理性を確保しつつ (i.e. 受容性のある形式で) 実現するにあたって有用であろう。ここで指摘した事項に加え、利用者リスクに対する評価やサービスへの選好表明手続きコストなども含めた、より実践的なシステムの設計は、今後の重要な研究課題である。

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 222C0203: アフターコロナ社会を形成する ICT) の助成を受けた研究の一環として実施された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 菱田憲輔, 松島格也, and 小林潔司: 事前割引料金システムの経済便益評価, *土木学会論文集 D*, Vol.65, No.3, pp.413-431, 2009.
- 4) Simhon, E. and Starobinski, D.: A game-theoretic perspective on advance reservations, *IEEE network*, Vol.30, No.2, pp.6-11, March 2016.
- 5) Beckmann, M. J.: Decision and team problems in airline reservations, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Vol.26, No.1, pp.134-145, 1958.
- 6) Belobaba, P. P.: Airline yield management: An overview of seat inventory control, *Transportation Science*, Vol.21, No.2, pp.63-73, 1987.
- 7) Chatwin, R. E.: Continuous-time airline overbooking with time-dependent fares and refunds, *Transportation Science*, Vol.33, No.2, pp.182-191, May 1999.
- 8) McGill, J. I. and van Ryzin, G. J.: Revenue management: Research overview and prospects, *Transportation Science*, Vol.33, No.2, pp.233-256, May 1999.
- 9) Subramanian, J., Stidham, S., and Lautenbacher, C. J.: Air-

- line yield management with overbooking, cancellations, and no-shows, *Transportation Science*, Vol.33, No.2, pp.147–167, May 1999.
- 10) 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.
 - 11) Ayala, D., Wolfson, O., Xu, B., Dasgupta, B., and Lin, J.: Parking slot assignment games, Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, GIS '11, pp. 299–308, New York, NY, USA, November 2011, Association for Computing Machinery.
 - 12) Geng, Y. and Cassandras, C. G.: Dynamic resource allocation in urban settings: A “smart parking” approach, 2011 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (CACSD), pp. 1–6, September 2011.
 - 13) Shao, C., Yang, H., Zhang, Y., and Ke, J.: A simple reservation and allocation model of shared parking lots, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.71, pp.303–312, October 2016.
 - 14) Akahane, H. and Kuwahara, M.: A basic study on trip reservation systems for recreational trips on motorways, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transportation Systems, Vol. 660, p. 7987, ce.it-chiba.ac.jp, 1996.
 - 15) de Feijter, R., Evers, J. J. M., and Lodewijks, G.: Improving travel-time reliability by the use of trip booking, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.5, No.4, pp.288–292, December 2004.
 - 16) Edara, P. and Teodorović, D.: Model of an advance-booking system for highway trips, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.16, No.1, pp.36–53, February 2008.
 - 17) Ayala, D., Wolfson, O., Xu, B., DasGupta, B., and Lin, J.: Pricing of parking for congestion reduction, Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems, SIGSPATIAL '12, pp. 43–51, New York, NY, USA, November 2012, Association for Computing Machinery.
 - 18) Yang, H., Liu, W., Wang, X., and Zhang, X.: On the morning commute problem with bottleneck congestion and parking space constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.58, pp.106–118, December 2013.
 - 19) Vickrey, W. S.: Congestion theory and transport investment, *The American economic review*, Vol.59, No.2, pp.251–260, 1969.
 - 20) Liu, W., Yang, H., and Yin, Y.: Expirable parking reservations for managing morning commute with parking space constraints, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.44, pp.185–201, July 2014.
 - 21) 乙村和利 and 富井規雄: 柔軟な列車予約方式に対する組合せオークションによるアルゴリズム, *電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)*, Vol.125, No.4, pp.329–337, 2005.
 - 22) 宮下和雄: 観光サービスへの融通予約の適用, *観光と情報*, Vol.6, No.1, pp.37–48, 2010.
 - 23) 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.
 - 24) Wang, X. and Wang, X.: Flexible parking reservation system and pricing: A continuum approximation approach, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.128, pp.408–434, October 2019.
 - 25) Iwanowski, S., Spering, W., and Coughlin, W. J.: Road traffic coordination by electronic trading, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.11, No.5, pp.405–422, October 2003.
 - 26) Hashimoto, S., Kanamori, R., and Ito, T.: Auction-based parking reservation system with electricity trading, 2013 IEEE 15th Conference on Business Informatics, pp. 33–40, July 2013.
 - 27) Wada, K. and Akamatsu, T.: A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: An auction mechanism with day-to-day capacity control, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.60, pp.94–112, December 2013.
 - 28) Su, P. and Park, B. B.: Auction-based highway reservation system an agent-based simulation study, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.60, pp.211–226, November 2015.
 - 29) Hara, Y. and Hato, E.: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.117, pp.723–739, November 2018.
 - 30) Chen, Z., Yin, Y., He, F., and Lin, J. L.: Parking reservation for managing downtown curbside parking, *Transportation research record*, Vol.2498, No.1, pp.12–18, January 2015.
 - 31) Zou, B., Kafle, N., Wolfson, O., and Lin, J. j.: A mechanism design based approach to solving parking slot assignment in the information era, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.81, pp.631–653, November 2015.
 - 32) 赤松隆, 佐藤慎太郎, and Long, N. X.: 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究, *土木学会論文集 D*, Vol.62, No.4, pp.605–620, 2006.
 - 33) 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.
 - 34) 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, June 2017.
 - 35) 和田健太郎 and 赤松隆: 単一ボトルネックにおける渋滞と混雑を解消する情報効率のメカニズムの設計, *土木学会論文集 D*, Vol.66, No.2, pp.160–177, 2010.
 - 36) 和田健太郎 and 赤松隆: ネットワーク通行権取引市場のオークション・メカニズム, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.67, No.3, pp.376–389, 2011.
 - 37) 原祐輔 and 羽藤英二: 乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.70, No.4, pp.198–210, 2014.
 - 38) 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, May 2007.
 - 39) Parkes, D. C.: Online mechanisms, *Algorithmic Game Theory*, pp. 411–440, Cambridge University Press, September 2007.
 - 40) Gerding, E., Robu, V., Stein, S., Parkes, D., Rogers, A., and Jennings, N.: Online mechanism design for electric vehicle charging, *Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, 2011.
 - 41) Stein, S., Gerding, E., Robu, V., and Jennings, N. R.: A model-based online mechanism with pre-commitment and its application to electric vehicle charging, Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2, AAMAS '12, pp. 669–676, Richland, SC, June 2012, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
 - 42) Weitzman, M. L.: Prices vs. quantities, *The Review of economic studies*, Vol.41, No.4, pp.477, October 1974.

- 43) Laffont, J. J.: More on prices vs. quantities, *The Review of economic studies*, Vol.44, No.1, pp.177–182, 1977.
- 44) Shirmohammadi, N., Zangui, M., Yin, Y., and Nie, Y. m.: Analysis and design of tradable credit schemes under uncertainty, *Transportation research record*, Vol.2333, No.1, pp.27–36, January 2013.
- 45) de Palma, A. and Lindsey, R.: Tradable permit schemes for congestible facilities with uncertain supply and demand, *Economics of Transportation*, Vol.21, pp.100149, March 2020.
- 46) Lindsey, R., de Palma, A., and Rezaeinia, P.: Tolls vs tradable permits for managing travel on a bimodal congested network with variable capacities and demands, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.148, pp.104028, March 2023.
- 47) Vohra, R. V.: Mechanism Design: A Linear Programming Approach, Cambridge University Press, 2011.
- 48) Bichler, M.: Market Design: A Linear Programming Approach to Auctions and Matching, Cambridge University Press, December 2017.
- 49) Matthews, S. A.: Selling to risk averse buyers with unobservable tastes, *Journal of economic theory*, Vol.30, No.2, pp.370–400, August 1983.
- 50) Maskin, E. and Riley, J.: Optimal auctions with risk averse buyers, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Vol.52, No.6, pp.1473–1518, 1984.
- 51) Meek, C., Chickering, D. M., and Wilson, D. B.: Stochastic and contingent-payment auctions, Workshop on Sponsored Search Auctions, ACM Electronic Commerce, 2005.
- 52) Tomita, Y.: Stochastic and strategy-proof auctions for statistical inferences, *SSRN Electronic Journal*, 2020.
- 53) Vickrey, W.: Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders, *The Journal of finance*, Vol.16, No.1, pp.8–37, 1961.
- 54) Clarke, E. H.: Multipart pricing of public goods, *Public choice*, Vol.11, No.1, pp.17–33, September 1971.
- 55) Groves, T.: Incentives in teams, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Vol.41, No.4, pp.617–631, 1973.
- 56) Dahlin, N. and Jain, R.: A two stage stochastic mechanism for selling random power, 2019 American Control Conference (ACC), pp. 2602–2607, July 2019.
- 57) Yang, K., Roca-Riu, M., and Menéndez, M.: An auction-based approach for prebooked urban logistics facilities, *Omega*, Vol.89, pp.193–211, December 2019.
- 58) Cory-Wright, R. and Zakeri, G.: On stochastic auctions in risk-averse electricity markets with uncertain supply, *Operations Research Letters*, Vol.48, No.3, pp.376–384, May 2020.

(Received 2023. 3. 6)

A study on the design of a reservation system for urban transport services under uncertainty

Koki SATSUKAWA, Yusukue HARA, Yosuke KAWASAKI and Takamasa IRYO