メカニズムデザインに基づく 駐車場割当決定および動的駐車代金設計

中西 啓晃*・吉原 美祐*・滑川 徹*,**

Parking Lot Allocation and Dynamic Parking Fee Design Based on Mechanism Design

Hiroaki NAKANISHI*, Miyu YOSHIHARA* and Toru NAMERIKAWA*,**

In this paper, we discuss the smart parking system in urban traffic network. In recent years, the decline in vehicle speed when searching for parking lots has been caused traffic jam in urban traffic network. Then, in this paper, we aim at shortening the searching time for parking lots, which is one of the causes of traffic jam, by allocating parking lots being available to drivers. Furthermore, we design the dynamical parking fee and redistribute parking lots to level the multiple parking manager's profit in traffic area. Finally, we confirm the effectiveness of proposed algorithm in numerical simulation.

Key Words: smart parking system, parking lot allocation, parking fee design, mechanism design, ITS

1. はじめに

近年、交通量の増加や道路インフラの未発達による交通渋滞が世界的に問題となっている。特に交通が密集する都市部ではその問題が深刻となっている。都市部における交通渋滞のうち、30%が駐車場やパーキングスペースを探索する車両の速度低下によるものであるといわれており¹⁾、駐車場を探索しているドライバーが所望の駐車場に辿り着くまでには平均 7.8 分もの時間を要することが知られている²⁾。これらの交通渋滞は社会に対して環境汚染や経済損失をもたらしており、早急に解決されるべき問題である。

これらの問題に対する解決策として、高度道路交通システム (Intelligent Transport System : ITS) と呼ばれる技術が近年急速に発達してきている。ITS とは情報通信技術 (Information Communication Technology : ICT) を活用して得られるリアルタイムの交通情報を基に、ヒト、道路インフラストラクチャ、車両を有機的に統合、連携し、道路交通の管理、運用の高度化、効率化、そのほか交通にかかわる諸問題を解決するためのシステムの総称である。

この ITS の技術の 1 つとして近年注目を浴びているのが「スマートパーキングシステム」である。スマートパーキング

システムとは、ITS を活用することで駐車場探索ドライバーの情報や駐車場の利用状況をリアルタイムで取得し、その情報を基にドライバーに適切な駐車場を割当・案内するシステムのことである。このスマートパーキングシステムにより、駐車場探索に伴う交通渋滞の発生を抑制できることが期待される。

また一方で駐車場のリアルタイムの空き状況を検知し、混雑状況に応じて動的に料金を変更されるような新しいサービスの提供も期待されている³⁾。このようなサービスを実現するには、各種センサーから時々刻々と発生するデータに対するリアルタイム処理が必要となるが、今後 ITS の技術が発展するにつれ、急速に普及していくことが予想される。さらに動的駐車代金の設計は特定の駐車場に人気が集中することを防ぐことができ、交通ネットワーク内における駐車場の利用率の平準化にもつながる。また、人気の集中による出入り口付近エリアの混雑を緩和したり、駐車場周辺の混雑状況に応じて駐車代金を変更すれば渋滞の拡大を防ぐ効果も期待できる。

スマートパーキングシステムに関しては、さまざまな研究が行なわれている⁴⁾。文献 5) では、駐車場の運用状況や道路状況の変化に伴う駐車場所の選択行動が分析されている。文献 6) では、利用可能な駐車場の情報を駐車場探索ドライバーに提示することで、駐車場の探索時間が短縮されることが示唆されている。さらに文献 7) では、その情報に対するドライバーの駐車場選択行動が定式化されている。これらの駐車場の利用状況に関する情報提供は、対象となる駐車場の平均利用率が高ければ高いほど有用であることも述べられている。駐車場の利用率、回転率に着目した研究として、文献 8) では特定のユーザーのみが使える駐車場を、利用が少ない時間帯

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

* Graduate School of Science and Engineering, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

** Faculty of Science and Engineering, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

(Received February 28, 2018)

(Revised July 4, 2018)

にはほかのコミュニティのユーザーに開放することで、利用率の向上を図っている。またドライバーに対して駐車場までの道程を案内することで、渋滞が発生している経路におけるさらなる渋滞発生を抑制する案内システムも盛んに研究されている⁹⁾。

駐車場割当に関する先行研究としては、文献 10) ではその基本的な概念や構造が述べられており、交通渋滞の原因である駐車場探索時間を短縮するために、駐車場割当を決定するための最適化問題が定義されている。しかしながらその駐車場割当においては、駐車場探索ドライバーの要望、利益が考慮されているのみであり、駐車場管理者の利益に関しては言及されていない。文献 11) では、ドライバーにとって利用可能で最も近い駐車場をできるだけ早く探索するためのアルゴリズムが提案されている。文献 12) では、メカニズムデザインにおける耐戦略性と呼ばれる性質に関して議論しており、駐車場割当を決定するにあたり、各ドライバーが正直に自身の情報を申告することが社会全体の利益の最大化につながると述べている。しかし文献 10) と同様に、文献 11), 12) においても、ドライバー側の行動様式のみを表現するに留まっており、駐車場管理者の行動や意思決定に関しては触れられていない。

一方で動的駐車代金設計に関しては、文献 13) では駐車場の満車率によって駐車代金を変更することで、特定の駐車場への集中を防いでいる。文献 14) では各駐車場の空車/満車率に応じて適切な駐車代金を動的に設計することで、ドライバーの金銭的コストの最小化と駐車場の利用率の最大化を図っている。さらに文献 15) においては、オークション理論による駐車スペースの割当および駐車料金の決定を行なっている。しかしながら上記の文献においては、動的駐車代金の設計アルゴリズムの妥当性に関して、理論的な解析が行なわれていない。

以上を踏まえ、本稿ではマッチング理論に基づいた、駐車場探索ドライバーと駐車場管理者の双方の利益を考慮した駐車場割当アルゴリズムを提案する。またメカニズムデザインに基づいた駐車場の再分配アルゴリズムを提案することで、メカニズムデザインにおいて理論的に望ましいような駐車場割当を導出し、交通ネットワーク内に存在する駐車場管理者の利益の平準化、かつ交通ネットワーク内の利益の最大化を図る。

2. 問題設定

本章では、駐車場探索時間を短縮するために駐車場割当を決定するスマートパーキングシステムの概要について述べる。さらに本論文におけるスマートパーキングシステムが対象とする交通ネットワークの詳細について述べる。

2.1 スマートパーキングシステム

本稿ではある交通ネットワーク内に存在する駐車場に対して、それらの駐車場に駐車するために探索しているドライバーに適切な駐車場を割り当てることで、交通渋滞の発生原因で

ある駐車場探索時間の短縮を図る。ここで駐車場割当を決定するのがスマートパーキングシステムである。

スマートパーキングシステムは駐車場探索ドライバーと駐車場管理者の双方の要望、利益を考慮したうえで駐車場割当を決定する。駐車場探索ドライバーと駐車場管理者はそれぞれ自身の要望を満たすように独自に要望を決定し、その情報をスマートパーキングシステムに送信する。スマートパーキングシステムはその情報をもとに、双方の要望を考慮したうえで駐車場割当を決定し、決定した割当をドライバー、駐車場管理者それぞれに送り返す。そして各駐車場探索ドライバーは割り当てられた駐車場を予約し、予約した駐車場に到着し次第、その駐車場に駐車する。これらの操作を各時刻で流入してきた駐車場探索ドライバーに対して行なうことで、駐車場割当を達成する。

2.2 交通ネットワーク

スマートパーキングシステムの目的から、その対象とするエリアは以下のような条件を満たすエリアが好ましい。

- (1) 駐車場が比較的密集して存在している。
- (2) 駐車場に対する車両の出入りが激しく、慢性的に満車状態の駐車場が多数存在する。
- (3) 路上にパーキング・メーターなどの障害が存在している箇所が多く、車両の通行の妨げとなっている。

そこで本稿では慢性的な渋滞が問題となっている日本における銀座駅の周辺の長辺が約 1km、短辺が約 0.5km の規模のエリアを対象とする。本稿においてスマートパーキングシステムが対象とする交通ネットワークを Fig. 1 に示す¹⁶⁾。

Fig. 1 Traffic network around Ginza station

Fig. 1 において、太線で囲まれるエリアに対して 14 ケ所の流入経路から流入してきた駐車場探索ドライバーに対して、エリア内の駐車場を割り当てることを考える。ここで交通ネットワーク内において、正方形のマーカーが駐車場を表わしており、三角形のマーカーが各ドライバーが目指す最終的な目

的地を表わしている．各駐車場探索ドライバーは5ヶ所の共通の目的地のうちいずれかを指してエリア内の駐車場を探索，駐車するものとする．

本稿で対象としている交通ネットワーク内の駐車場に関する詳細を Table 1 に示す^{17), 18)}．

Table 1 Parking information

index j	Parking fee (Yen/min)	Capacity
1	300/30	26
2	600/10	13
3	300/30	54
4	300/30	50
5	500/30	29
6	500/15	2
7	400/15	19
8	400/15	15
9	400/60	50
10	500/20	2
11	400/20	12
12	400/30	56
13	300/30	30
14	200/10	2

Table 1 において，インデックス $j = 1, 2, 4, 6, 8, 9, 11$ が駐車場管理者 $h = 1$, $j = 3, 7, 10, 12, 13, 14$ が $h = 2$, $j = 5$ が $h = 3$ が管理する駐車場である．すなわちエリア内には3者の駐車場管理者が存在しており，駐車場管理者は1ヶ所あるいは複数ヶ所の駐車場を管理している．

ここで交通ネットワーク内に存在する駐車場の集合を P とする．先述したように本稿で対象とする交通ネットワークにおいては， $|P| = 14$ である．また駐車場管理者 h が管理している駐車場の集合を $P_h \subset P$ とする．駐車場 $j \in P$ の位置座標は $(y_{j,x}, y_{j,y})$ で表わされ，駐車場 j における料金加算時間を τ_j [min]，料金加算時間あたりに加算される料金を f_j [円] とする．つまり駐車場 j においては τ_j 分ごとに f_j 円加算されていく料金体系である．また駐車場 j における駐車スペース数を N_j とし，駐車場 j の空車スペース数 e_j は以下のように表わされる．

$$e_{j,k+1} = e_{j,k} - |\mu_k(j)| + n_{j,k}^{out} \quad (1)$$

ここで $n_{j,k}^{out}$ は時刻 k に駐車場 j を退場する車両の数である．駐車場に駐車した各ドライバーは予定駐車時間 o_i が経過すると，駐車場を退場していくものとする．そして $\mu_k(j)$ が時刻 k において駐車場 j に駐車を予約するドライバーであり， $|\mu_k(j)|$ が時刻 k において駐車場 j に駐車予約をするドライバーの数である．ドライバーの流入が単位時間当たり平均 λ 回起こるポアソン分布で表現される事象とすると，各ドライバーの流入する間隔 o_i は指数分布に従う．

また各時刻で交通ネットワーク内に流入するドライバーの集合を $\mathcal{V}_{in,k}$ とする．またドライバー i が最終的に目指す目的地を d_i とし，その座標を $(d_{i,x}, d_{i,y})$ と表わす．時刻 k におけるドライバー i の現在地の位置座標を $(z_{i,x,k}, z_{i,y,k})$ と

表わす．

ここで Fig. 1 の交通ネットワークに関して以下の仮定 1 を置く．

[仮定 1] 時刻 k においてネットワーク内に流入するドライバー数は，時刻 k におけるエリア内の総空車スペース数以下である．つまり (2) 式が成り立つ．

$$|\mathcal{V}_{in,k}| \leq \sum_{j \in P} e_{j,k} \quad (2)$$

3. マッチング理論に基づく駐車場割当決定

本章では，スマートパーキングシステムが駐車場割当を決定するためのアルゴリズムを述べる．駐車場探索ドライバーと駐車場管理者の双方の要望を満たしたうえで駐車場割当を決定するために，本論文ではマッチング理論に基づき駐車場割当を決定する．

3.1 選好決定

マッチング理論について議論するにあたり，駐車場探索ドライバーはエリア内に存在するすべての駐車場に対して，駐車場管理者は時刻 k にエリア内に流入するすべてのドライバーに対して，選好をもっているものとする．本節では，ドライバーと駐車場管理者のそれぞれが選好を決定する問題について述べる．

[定義] 集合 X 上の個人 i の選好 $\succeq_i$ とは，以下の条件を満たす X 上の二項関係である．

- (1) $x \succeq_i x, \forall x \in X$
- (2) $[x \succeq_i y \text{ and } y \succeq_i z] \Rightarrow x \succeq_i z, \forall x, y, z \in X$
- (3) $x \succeq_i y \text{ or } y \succeq_i x, \forall x, y \in X$

$x \succeq_i y$ とは，個人 i の選好のもとで， y より x を同程度以上に好むことを表わす．

3.1.1 駐車場探索ドライバー選好

対象のエリア内に流入した各駐車場探索ドライバーは，エリア内のすべての駐車場に対して，明確な選好 P_i をもつ．選好 P_i を決定するにあたり，各ドライバーは対象のエリア内において駐車場を探索する際に，以下の条件をもつ．

- 駐車場から最終的な目的地までの距離
- 現在地から駐車場までの距離
- 駐車代金

1 点目に関しては，駐車場から最終的に目指している目的地までの距離であり，ドライバーが駐車場に駐車してから降車して目的地まで徒歩で向かうのに要する距離である．駐車場 j からドライバー i の目的地までの距離 D_{ij} を以下のように表わす．

$$D_{ij} = |d_{i,x} - y_{j,x}| + |d_{i,y} - y_{j,y}| \quad (3)$$

また 2 点目に関しては，ドライバーが時刻 k に存在している現在地から駐車場までの距離であり，ドライバー i の現在地から駐車場 j までの距離 $R_{ij,k}$ を以下のように表わす．

$$R_{ij,k} = |z_{i,x,k} - y_{j,x}| + |z_{i,y,k} - y_{j,y}| \quad (4)$$

さらに3点目に関しては、各ドライバーが駐車場に駐車する際の駐車代金であり、ドライバー i が駐車場 j に駐車する際の駐車代金 F_{ij} を以下のように表わす。

$$F_{ij} = \left\lceil \frac{o_i}{\tau_j} \right\rceil f_j \quad (5)$$

ここで $\lceil \bullet \rceil$ は天井関数であり、実数に対しそれ以上の最小の整数を対応付ける関数である。上記を踏まえ、ドライバー i の駐車場 j に対する評価関数 J_{ij}^d はつぎのように表わすことができる。

$$J_{ij,k}^d = \frac{D_{ij}}{D_i} + \frac{R_{ij,k}}{R_i} + \frac{F_{ij}}{F_i} \quad (6)$$

つまり(6)式で表わされる評価関数は駐車場を探索、駐車する際に費やすコストを表わしており、 J_{ij}^d はドライバー i が駐車場 j に対してもつ評価値であるとみなすことができる。また D_i, R_i, F_i はドライバー i がそれぞれ独自に決定するパラメータであり、非負の実数値を取る。これらの値は探索条件の各要素に対する重み係数の役割を果たし、これらの値が小さければ小さいほど対応する要素の値は大きくなるので、その要素を重要視して駐車場探索を行なうような構造となっている。逆に大きければ大きいほど対応する要素は考慮しないことを表わす。

この評価関数(6)式が小さい駐車場が、ドライバー i にとってより好ましい駐車場となる。したがって各駐車場に対しこれを計算し、値を昇順に並べその駐車場のインデックスを得ることで、エリア内に存在するすべての駐車場に対するドライバー i の選好を P_i とすると、 $P_i = (x_{ij,1}^{d*}, x_{ij,2}^{d*}, \dots, x_{ij,t_d}^{d*}, \dots, x_{ij,|P|}^{d*})$ を求めることができる。

3.1.2 駐車場管理者

駐車場管理者も駐車場探索ドライバーと同様に、ドライバーに対して明確な選好をもっているとする。駐車場管理者は時刻 k にエリア内に流入するすべてのドライバーに対して、選好 $P_{j,k}$ を決定する。

ここでマッチング問題として扱う際は、エリア内に存在するそれぞれの駐車場が各ドライバーとペアを組むことになる。つまり選好は各駐車場ごとに決定する必要があるが、そのため $P_{h,k}$ ではなく $P_{j,k}$ としている。しかし実際に利益を享受するのはそれぞれの駐車場ではなく、それらの駐車場を統括的に管理するそれぞれの駐車場管理者である。よって駐車場管理者 h は自身の利益が最大化されるように、自身の管理するすべての駐車場 $j \in P_h$ に関して、選好 $P_{j,k}$ を決定する。

ここで駐車場管理者の利得は以下の2点であるとする。

- 駐車代金による金銭的利益
- 平均利用率

まず1点目に関しては、ドライバーが駐車場に駐車する際に支払う駐車代金による金銭的な利益であり、(5)式で表わされる。

また2点目に関しては、駐車場管理者が管理する駐車場の平均利用率であり、以下のように表わす。

$$U_{ij} = \frac{e_{j,k}}{N_j} \left(1 - \int_0^{o_i} \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} dx \right) \quad (7)$$

上式における λ は、サンプリング時間内にエリア内に流入する平均車両数である。前半部分は駐車場 j における駐車スペース数に対する空車スペース数の比率であり、後半部分はドライバー i の予定駐車時間 o_i の間にほかの車両が流入してこない確率である。つまり上式は、ドライバー i を現時刻で受け入れることがふさわしいかどうかを表わす評価値に相当する。

上記を踏まえると、利得関数はつぎのように表わすことができる。

$$J_{ij}^m = F_{ij} + w_m U_{ij} \quad (8)$$

w_m は重み係数である。評価関数(8)式が大きいドライバーが、駐車場 j にとってより好ましいドライバーとなる。したがって各ドライバーに対しこれを計算し、値を降順に並べそのドライバーのインデックスを得ることで、時刻 k にエリア内に到着したドライバーに対する駐車場 j の選好を $P_{j,k}$ として、 $P_{j,k} = (x_{ij,1}^{m*}, x_{ij,2}^{m*}, \dots, x_{ij,t_m}^{m*}, \dots, x_{ij,|V_{in}(k)|}^{m*})$ を求めることができる。

3.2 マッチング理論に基づく駐車場割当決定アルゴリズム

前節で決定した駐車場探索ドライバーと駐車場管理者のそれぞれの選好をもとに、マッチング理論に基づき駐車場割当を決定する。一般的にマッチング問題においてはプレイヤー数が増えるに従って問題の規模が大きくなり、イテレーション回数が増えてしまう。しかしながら本稿におけるマッチング問題は時刻 k ごとに解かれ、そのイテレーション回数は最大で $|P| \times |V_{in,k}|$ である。すなわちイテレーション回数は各時刻にエリア内に流入する駐車場探索ドライバー数に依存する。本稿においては比較的小規模な交通ネットワークを対象としているので、各サンプリング時刻間に流入する車両数が少なく、さらにそのうちスマートパーキングシステムはエリア内の駐車場を探索する車両のみを対象とすることから、イテレーション回数はそれほど問題とならないことが期待できる。よって本研究では、アルゴリズムとしての性能が優れているゲール-シャブレイアルゴリズム (GS アルゴリズム)¹⁹⁾ を用いる。

ここで時刻 k における空車スペース数 $e_{j,k}$ や流入台数 $|V_{in,k}|$ によって、各時刻で駐車場 j が受け入れることのできるドライバー数の上限が異なる。時刻 k に駐車場 j が受け入れることのできるドライバーの上限数 $c_{j,k}$ を以下のように表わす。

$$c_{j,k} = \begin{cases} |V_{in,k}|, & \text{if } |V_{in,k}| < e_{j,k} \\ e_{j,k}, & \text{if } 0 < e_{j,k} \leq |V_{in,k}| \\ 0, & \text{if } e_{j,k} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

以上を踏まえ、GS アルゴリズムに基づく駐車場割当決定アルゴリズムを以下に表わす。なお下記のアルゴリズムにおいて、時刻 k におけるドライバーと駐車場の仮マッチングの集合を X'_k と表わし、この仮マッチングを各ステップで更新

することで最終的なマッチング X_k を決定する。また仮マッチング X'_k において、駐車場 j のペアである $X'_k(j)$ の中で選好 $P_{j,k}$ の下で最も選好の低いドライバーを $X'_k(j) \succ_j$ と表わす。

駐車場割当決定アルゴリズム

Step 1 : 選好決定

時刻 k にエリア内に流入した各駐車場探索ドライバーは (6) 式に基づき、駐車場に対する選好 P_i を決定する。また各駐車場は (8) 式に基づき、エリア内の駐車場探索ドライバーに対する選好 $P_{j,k}$ を決定する。仮ペア $X'_k(j) = \{\}$ とする。

Step 2 : 選好 P_i に基づく駐車申請

駐車場探索ドライバー i は自身の選好 P_i に基づき、現状で最も選好度が高い駐車場に駐車を申請する。

Step 3 : 駐車申請の受入/拒否

ドライバーに駐車申請を受けた駐車場 j は自身の選好 $P_{j,k}$ と受入上限 $c_{j,k}$ に基づき、駐車申請を仮受諾しドライバーと仮ペアを成立する、あるいは申請を拒否する。以下の3つの状況が生まれる。

if $|X'_k(j)| < c_{j,k}$

このとき駐車場 j はドライバー i の駐車申請を受け入れ、ドライバーと仮ペアを成立する。さらに $X'_k(j) \succ_j$ を更新し、 $i \rightarrow i+1$ として Step 2 へ戻る。

elseif $|X'_k(j)| = c_{j,k}$ かつ $i \succ_j X'_k(j) \succ_j$

このとき駐車場 j の仮ペアの中で最も選好度の低いドライバーとの仮ペアを解消し、ドライバー i の申請を受け入れる。さらに $X'_k(j) \succ_j$ を更新する。 i' の選好から駐車場 j を除外し、 $i \rightarrow i'$ として Step 2 へ戻る。

else $|X'_k(j)| = c_{j,k}$ かつ $i \prec_j X'_k(j) \succ_j$

このとき i の選好から駐車場 j を除外し、Step 2 へ戻る。

Step 4 : マッチングの決定

エリア内に存在するすべての駐車場探索ドライバーに駐車場との仮ペアが成立した時点で、その時点でのドライバーと駐車場のペアの集合 X'_k を時刻 k におけるマッチング、つまり次式とし、アルゴリズムを終了する。

$$X_k = X'_k \quad (10)$$

Step 5 : 反復

$k \rightarrow k+1$ として Step 1 へ戻る。

3.3 マッチングの安定性

前節の駐車場割当決定アルゴリズムにより導出される、駐車場探索ドライバーと駐車場とのマッチングの性質に関して議論する。マッチング理論における望ましい性質として安定マッチングが存在する。マッチング問題において望ましいとされる基準は、今組んでいるペアを解消して新たに別の相手とペアを組むメリットが生まれないことであり、その性質はマッチングの安定性として定義される。

一般的なマッチング問題について考える。まず個人を $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ と $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ の2つのグループに分類する。ここで個人 $a \in A$ のペア相手は1人、個人 $b \in B$ は $c_b \geq 1$ の定員をもっており、最大 c_b 人とペアを組むことができるような多対一マッチング問題を考える。マッチングすべてから成る集合を X とする。マッチング x に関して $x(a) \in B$ で個人 a が個人 $x(a)$ とペアを組んでいることを表わし、 $x(a) = a$ で個人 a は誰ともマッチしないことを意味する。この多対一マッチング問題において安定性を議論するため、個人合理性という概念を導入する。

【定義】 多対一マッチング問題においてマッチング x が個人合理的であるとは、つぎの条件を満たすことである。

$$x(a) \succeq_a a \quad \forall a \in A \quad (11)$$

$$a \succ_b b \quad \forall b \in B, \forall a \in x(b) \quad (12)$$

つまりマッチングが個人合理的である場合、各個人は自身の選好よりも低い相手とはペアを組まないことを意味している。さらにマッチングの安定性は以下のように定義される。

【定義】 多対一マッチング問題においてマッチング x が安定であるとは、個人合理的で、かつ $b \succ_a x(a)$ と $a \succ_b b$ が成り立つ任意の $a \in A$ と $b \in B$ に関して、以下を満たすことである。

$$|x(b)| = c_b \text{ かつ } a' \succ_b a \quad \forall a' \in x(b) \quad (13)$$

本稿における駐車場割当決定アルゴリズムにより導出されたドライバーと駐車場管理者によるマッチングに関して以下の命題が成り立つ。

【命題】 仮定1が成り立つとき、駐車場割当決定アルゴリズムにより導出される、時刻 k におけるドライバーと駐車場とのマッチング X_k は安定である。

【Proof】 まずマッチング X_k が個人合理的であることを証明する。各ドライバーの選好 P_i には駐車場に対する選好しか含まれておらず、すべてのドライバーは自身に対する選好よりも選好の低い駐車場とペアを組むことはない。よって以下が成り立つ。

$$X_k(i) \succeq_i i, \quad \forall i \in \mathcal{V}_{in}(k) \quad (14)$$

同様に時刻 k における各駐車場の選好 $P_{j,k}$ にはドライバーに対する選好しか含まれておらず、すべての駐車場は自身の選好よりも低いドライバーとペアを組むことはない。よって以下が成り立つ。

$$i \succ_j j, \quad \forall i \in X_k(j), \forall j \in P \quad (15)$$

したがってマッチング X_k は個人合理的である。

また $j \succ_i X_k(i)$ と $i \succ_j j$ が成り立つ場合、ドライバー i は $X_k(i)$ とペアを組む以前に、駐車場 j に駐車申請を拒否されているはずである。このとき以下が成り立つ。

$$|X_k(j)| = c_{j,k} \quad (16)$$

さらに駐車場 j のペア相手である $X_k(j)$ はより選好の高い

ドライバーにしか更新されないので、駐車場 j がペアを組んでいるいずれのドライバーよりも、拒否されたドライバー i の選好は低いはずである。よって以下が成り立つ。

$$i' \succ_j i, \quad \forall i' \in X_k(j) \quad (17)$$

以上よりマッチング X_k は安定的である。 $\square$

以上の命題より、駐車場割当アルゴリズムにより導出される駐車場割当は、ドライバーと駐車場管理者の双方にとって不満のない駐車場割当であることが保証できる。

4. メカニズムデザインに基づく動的駐車代金設計と再分配

本章では動的駐車代金設計と、それに伴う駐車場の再分配アルゴリズムについて述べる。前章ではマッチングアルゴリズムに基づく駐車場割当決定アルゴリズムについて述べたが、その問題点として駐車場管理者間での利益の不均衡が挙げられる。そこで本章では、前章で決定した駐車場探索ドライバーと駐車場とのマッチング X_k から、利益の少ない駐車場管理者へドライバーを再分配することで、駐車場管理者の利益の平準化、かつエリア内に存在する駐車場管理者の総利益最大化を図る。その再分配において安定マッチングの性質を侵さず、かつメカニズムデザインにおいて望ましい性質である個人合理性、効率性を満たすような動的駐車代金設計、およびドライバーの再分配アルゴリズムを提案する。

4.1 動的駐車代金設計

本章の目的は利益の少ない駐車場管理者にドライバーを再分配することで、駐車場管理者の利益を平準化することである。しかしながら前章において、マッチング X_k において安定なマッチング、すなわちほかのドライバーや駐車場に対して不満がないようなマッチングを導出しているため、各ドライバーが不当にほかの駐車場に割り当てられることは許されない。そこで利益の少ない駐車場管理者が、自身が管理する駐車場の駐車代金を動的に設計することで、安定マッチングの性質を侵さないような再分配を行なうことを考える。

動的駐車代金設計にあたり、以下の仮定 2 を置く。

[仮定 2] スマートパーキングシステムはドライバーの評価関数 (6) 式の構造と、各ドライバーの予定駐車時間 $o_i[\text{min}]$ に関する情報を取得することができる。

ここで駐車場探索ドライバーの選好を決定するための最適化問題における評価関数 (6) 式に関して、駐車場管理者が設計することのできる変数は f_j のみである。マッチング X_k においてドライバーとのペアをもっていない駐車場は、この駐車代金に関するコストを削減することで対象のドライバーの選好 P_i を変更させ、自身の駐車場に誘導し利益の向上を図るとする。

ここで駐車場 j における動的駐車代金を $\rho_{j,k}[\text{円}]$ とするとき、設計できる駐車代金の範囲を以下のように設定する。

$$0 < \rho_{j,k} \leq f_j \quad (18)$$

ここでマッチング X_k においてドライバーとのペアを有していない駐車場管理者を h' とし、 h' が管理する駐車場の集合を $P_{h'}$ とする。このとき $j' \in P_{h'}$ が動的駐車代金 $\rho_{j',k}$ を (18) 式の範囲の中で設計することで、マッチング X_k において組んでいるペア $X_k(i)$ よりも駐車場 j' の選好が高くなり得るドライバーの集合 $D_{j',k}^w$ は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} D_{j',k}^w &= \{i : \frac{D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{ij',k}}{R_i} < J_{iX_k(i)}^d \\ &\leq \frac{D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{ij',k}}{R_i} + \frac{F_{j'}}{F_i}, j' \in P_{h'}\} \quad (19) \end{aligned}$$

ここで駐車場を非分割財と捉えたとき、駐車場の再分配問題はメカニズムデザインにおける非分割財交換問題として扱うことができ、ここでは非分割財である駐車場をドライバー間で交換する、非分割財交換問題を考える。

非分割財交換問題とは、分割することが適切でない、あるいは不可能な財を、初期保有財に考慮しつつ再分配する問題のことである。非分割財交換問題においては、各個人は財に対して異なる選好をもっており、どの個人に対しても初期保有財より選好の低い財を与えることなく、皆にとって望ましい財の再分配を行なうことが目的である。

各個人 $i \in I$ は初期保有財 ω_i を所有しており、初期保有財ベクトルを $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ とする。非分割財の集合を $\Omega \equiv \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ とするとき、非分割財交換問題における配分とは、初期保有財ベクトル ω の並び替え $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ であり、以下を満たすベクトルのことである。

$$x_i \in \Omega \quad \forall i \in I \quad (20)$$

$$i \neq j \implies x_i \neq x_j \quad \forall i, j \in I \quad (21)$$

ここで $x_i \in \Omega$ は個人 i が与えられる非分割財を表わし、配分 x すべてから成る集合を X で表わす。さらに非分割財交換問題において望ましい性質は、各個人が初期に保有している財よりも再分配後に与えられる財を好むことである。この性質は個人合理性と呼ばれ、以下のように定義される。

【定義】 非分割財交換問題において、配分 x が個人合理的であるとは、以下を満たすことである。

$$x_i \succeq_i \omega_i \quad \forall i \in I \quad (22)$$

(22) 式は初期保有財に対する選好よりも再分配後の財に対する選好のほうが高いことを表わしている。すなわち個人合理性とは財の再分配により損をしないことを意味する。

動的駐車代金 $\rho_{j',k}$ を伴い成される再分配後の配分を μ_k とするとき、以下の定理 1 が成り立つ。

《定理 1》 駐車場割当アルゴリズムにより導出されるマッチング X_k に対して、仮定 2 が成り立ち、かつドライバー $i \in D_{j',k}^w$ に対して設計される動的駐車代金 $\rho_{j',k}$ が以下の条件を満たすとき、動的駐車代金 $\rho_{j',k}$ を伴う再分配後の配分 μ_k は駐車場探索ドライバーに対して個人合理性を満たす。

$$0 < \rho_{j',k} \leq \frac{F_i}{\lceil \frac{o_i}{\tau_{j'}} \rceil} \left(\frac{D_{iX_k(i)} - D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{iX_k(i),k} - R_{ij',k}}{R_i} \right) + \frac{\lceil \frac{o_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil}{\lceil \frac{o_i}{\tau_{j'}} \rceil} f_{X_k(i)} \quad (23)$$

[Proof] ドライバー $i \in D_{j',k}^w$ への駐車場再分配について考える. ドライバー i はマッチング X_k において駐車場とのペアをもっており, そのペア相手は $X_k(i)$ である. これを再分配前の初期保有財とみなすと, 初期保有財である $X_k(i)$ に対する評価値は (6) 式より $J_{iX_k(i)}^d$ である. 一方で再分配後のドライバー i の保有財は j' であるので, j' に対する評価値は $J_{ij'}^d$ である. よって再分配後の配分 μ_k が個人合理性を満たすための条件は定義よりつぎのように表わされる.

$$J_{ij'}^d \leq J_{iX_k(i)}^d \quad (24)$$

ここで上式は (6) 式より以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} \frac{D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{ij',k}}{R_i} + \frac{F_{ij'}}{F_i} \\ \leq \frac{D_{iX_k(i)}}{D_i} + \frac{R_{iX_k(i),k}}{R_i} + \frac{F_{iX_k(i)}}{F_i} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \rho_{j',k} \leq \frac{F_i}{\lceil \frac{o_i}{\tau_{j'}} \rceil} \left(\frac{D_{iX_k(i)} - D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{iX_k(i),k} - R_{ij',k}}{R_i} \right) + \frac{\lceil \frac{o_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil}{\lceil \frac{o_i}{\tau_{j'}} \rceil} f_{X_k(i)} \end{aligned} \quad (26)$$

(18) 式と (26) 式より, (23) 式が導かれる. よって動的駐車代金 $\rho_{j',k}$ を伴う再分配後の配分 μ_k はドライバーに関する個人合理性を満たす. $\square$

定理 1 より (23) 式の条件が満たされれば, ドライバー i にとっては, 駐車場 $X_k(i)$ よりも駐車場 j' に駐車したいという状況が起こり, ドライバーに関しては再分配により不利益を被ることがない (正確には新たな駐車場に再分配されるドライバーが支払う駐車代金は大きくなる可能性があるが, 選好はマッチング X_k におけるペアの駐車場よりも高いので, 不満が生まれない).

しかしながら本章では, スマートパーキングシステムはエリア内の利益を平準化するよう再分配を行なうので, 上記の議論は利益の少ない駐車場へとドライバーを再分配することを前提としている. ある駐車場管理者がマッチング X_k が決定した時点でドライバーとペアを組んでいたにもかかわらず, 再分配によってほかの駐車場に割り当てが成されるような配分に変更された場合, その駐車場管理者は再分配により不利益を被ることになる. そこで次節では, 再分配により新たにドライバーとペアを組んだ駐車場が, そのドライバーが元々ペアを組んでいた駐車場に金銭を支払うことで利益の損失を補償することを考える.

4.2 インセンティブによる公平な再分配

再分配によりドライバーとのペアを失うことになってしまうことになる駐車場管理者に対して, 金銭的なインセンティ

ブを支払うことで利益の減少分を補償することを考える. ここでドライバーを非分割財と捉えれば, 駐車場の再分配問題はメカニズムデザインにおける公平分担問題と考えることができ, ここでは非分割財であるドライバーを金銭移転を伴い駐車場で交換する問題として扱う.

公平分担問題とは, 非分割財を金銭の移転を伴い配分する問題である. 非分割財交換問題と異なる点は金銭移転を伴うことであり, 金銭移転を伴うことが社会的公平を達成するための手段として用いられるような環境である. $i \in I$ は等しい立場にある個人であり, その個人に対して金銭移転を伴い非分割財を配分する問題を考える. ここで割当ベクトルとはつぎを満たすベクトル $(a_i)_{i \in I} \in \{0, 1\}^I$ である.

$$\sum_{i \in I} a_i = 1 \quad (27)$$

さらに公平分担問題における配分とは以下を満たすベクトル x のことである

$$x = (x_i)_{i \in I} = (a_i, t_i)_{i \in I} \quad (28)$$

個人 i は財に対し評価 $v_i \in \mathbb{R}$ をもち, 選好は金銭移転について準線形であると仮定する. 自身の割当と金銭移転額 $x_i = (a_i, t_i) \in \{0, 1\} \times \mathbb{R}$ が与えられたとき, 各個人 $i \in I$ の準線形効用は以下で与えられる.

$$u(a_i, t_i; v_i) = v_i a_i + t_i \quad (29)$$

すなわち財を得た i の効用は $v_i + t_i$, 財を得ない i の効用は t_i で表わされる.

ここで公平分担問題においては, 個人の集合の内誰か 1 人がコストを負担し, そのほかの個人がその 1 人に金銭を支払うことで不利益を補償するような, 異なる立場にある個人間の公平分担問題が起こり得る. そのような問題における配分に関して各個人に関して望ましい性質は, 財の分配前後で利益の損失がないことである. この性質は公平分担問題における個人合理性と呼ばれ, 以下のように定義される.

【定義】 公平分担問題において, 配分 x が個人合理的であるとは, 以下を満たすことである.

$$u(a_i, x_i; v_i) \geq v_i(w_i) \quad (30)$$

また公平分担問題において, 個人の集合 I の中で最も財に対する価値の高い者に財が割り当てられることは, 社会的な利益が最大化されるような配分であるといえる. この性質は効率性と呼ばれ, 公平分担問題における資源配分に対して望ましい性質である. 公平分担問題における効率性は以下のように定義される.

【定義】 公平分担問題において, 配分 x が効率的であるとは, 以下を満たすことである.

$$v_j = \max_{i \in I} v_i \quad (31)$$

以上を踏まえ, 駐車場管理者 h が管理する駐車場 j に関し

て、駐車場 j がドライバー i の再分配に伴い受け取る金銭的インセンティブを t_{ij} [円] とすると (実際にインセンティブを受け取るのは駐車場管理者である h であるが、インセンティブは駐車場間で行なわれるドライバーの再分配に対して成されることから、本論文では各駐車場がインセンティブを受け取ると考え、 t_{ij} と表記することとする)、駐車場管理者 h の駐車場 $j \in P_h$ におけるドライバー i の再分配に対する利益は以下のように表わすことができる。

$$u_{ij} = \left\lceil \frac{O_i}{\tau_j} \right\rceil f_j a_{ij} + t_{ij} \quad (32)$$

(32) 式における a_{ij} は以下のように定義される。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if user } i \text{ is allocated to resource } j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

またインセンティブ t_{ij} は以下を満たす。

$$\sum_{j \in P} t_{ij} = 0 \quad (34)$$

インセンティブ t_{ij} に関して、 $t_{ij} > 0$ の場合、駐車場 j を管理する駐車場管理者がインセンティブを受け取ることを意味し、 $t_{ij} < 0$ の場合、駐車場 j を管理する駐車場管理者がインセンティブを支払うことを意味する。またインセンティブは駐車場間で譲渡されることを考慮すると、(34) 式は満たされるべき条件である。

ここで $D_{j',k}^w$ から実際に駐車場 j' に再分配されるドライバーの集合を $D_{j',k}^r$ とすると以下の定理が成り立つ。

《定理 2》 駐車場割当アルゴリズムにより導出されるマッチング X_k に対して、仮定 2 が成り立ち、かつインセンティブ t_{ij} が以下の条件を満たすとき、動的駐車料金 $\rho_{j',k}$ とインセンティブ t_{ij} を伴う再分配後の配分 μ_k は駐車場管理者に対して個人合理性を満たす。

$$\left\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \right\rceil f_{X_k(i)} \leq t_{iX_k(i)} \leq \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k}, \quad \forall i \in D_{j',k}^r \quad (35)$$

[Proof] ドライバー i に関して、マッチング X_k におけるドライバー i のペアである駐車場 $X_k(i)$ から、金銭移転を伴い駐車場 j' に再分配する状況を考える。マッチング X_k においてドライバー i のペアである駐車場 $X_k(i)$ はドライバー i とのペアをもっているため、これを初期保有財と考え、(32) 式において $a_{ij} = 1$ が成り立ち駐車場 $X_k(i)$ のドライバー i に対する初期利益は $u_{iX_k(i)} = \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \right\rceil f_{X_k(i)}$ で表わされる。また再分配後は $a_{ij} = 0$ となるため、再分配後の利益は $u_{iX_k(i)} = t_{iX_k(i)}$ で表わされる。よって駐車場 $X_k(i)$ が再分配により不利益を被らないためには以下が成り立つ必要がある。

$$t_{iX_k(i)} \geq \left\lceil \frac{O_i}{\tau_j} \right\rceil f_j \quad (36)$$

一方で駐車場 j' はマッチング X_k においてドライバーとのペアをもっていないため、(32) 式において $a_{ij'} = 0$ が成り

立ち、初期保有財に対する利益は $u_{ij'} = 0$ である。再分配後は $a_{ij'} = 1$ が成り立ち、また駐車場 j' における駐車代金は動的駐車料金 $\rho_{j',k}$ に変更されているため、再分配後の利益は $u_{ij'} = \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k} + t_{ij'}$ で表わされる。よって駐車場 j' が再分配により不利益を被らないためには以下が成り立つ必要がある。

$$\left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k} + t_{ij'} \geq 0 \quad (37)$$

ここで駐車場管理者間で移転されるインセンティブに関して、インセンティブはドライバー i の交換を伴い、駐車場 j' から駐車場 $X_k(i)$ に支払われるため、(7) 式より以下が成り立つ。

$$t_{ij'} = -t_{iX_k(i)} \quad (38)$$

(37) 式、(38) 式より、以下が成り立つ。

$$t_{iX_k(i)} \leq \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k} \quad (39)$$

(36) 式、(39) 式より以下が成り立つ。

$$\left\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \right\rceil f_{X_k(i)} \leq t_{iX_k(i)} \leq \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k} \quad (40)$$

さらに再分配後の配分 μ_k がエリア内のすべての駐車場管理者に対して個人合理的となるためには、再分配が行なわれるすべてのドライバーに対して (40) 式が成り立てば良い。よって (35) 式が導かれる。□

定理 2 より、(35) 式の条件を満たすような動的駐車料金とインセンティブを設計すれば、それらを伴う再分配は駐車場管理者に対して不利益とならないことが保証できる。

ここで $D_{j',k}^w$ に複数のドライバーが属する場合、マッチング X_k においてドライバーとのペアをもたない駐車場 j' が $\rho_{j',k}$ を小さく設計すればするほど選好が変更されるドライバーの数は多くなるため駐車料金による利益は大きくなる。しかしながらその分支払うべきインセンティブは大きくなってしまいうため総利益は減少する。よってこのトレードオフの関係を考慮したうえで、適切に動的駐車料金 $\rho_{j',k}$ を設計する必要がある。

再分配におけるスマートパーキングシステムの目的は、駐車場管理者の総利益の最大化と駐車場管理者の利益の平準化であり、スマートパーキングシステムの目的は、再分配により効率的な配分 μ_k を導出することであるといえる。

ここで以下の定理が成り立つ。

《定理 3》 駐車場割当アルゴリズムにより導出されるマッチング X_k に対して、仮定 2 が成り立ち、かつ動的駐車価格 $\rho_{j',k}$ とインセンティブ t_{ij} を (42)、(43) 式のように設計するとき、それらを伴う再分配後の配分 μ_k は駐車場探索ドライバー、かつ駐車場管理者に対して個人合理性を満たし、かつ効率性を満たす。

$$\left\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \right\rceil \rho_{j',k} \geq \left\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \right\rceil f_{X_k(i)}, \quad \forall i \in D_{j',k}^r \quad (41)$$

$$\rho_{j',k} = \max_{i \in D_{j',k}^r} \left\{ \frac{F_i}{\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \rceil} \left(\frac{D_{iX_k(i)} - D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{iX_k(i),k} - R_{ij',k}}{R_i} \right) + \frac{\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil}{\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \rceil} f_{X_k(i)} \right\} \quad (42)$$

$$t_{iX_k(i)} = \lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil f_{X_k(i)}, \quad \forall i \in D_{j',k}^r \quad (43)$$

[Proof] 再分配後の駐車場管理者の利益が最大となるためには、再分配の対象となる駐車場を管理する駐車場管理者の利益の増分の合計が最大となればよい。再分配後の配分 μ_k において、再分配の対象となる駐車場を管理する駐車場管理者の利益の合計は以下のように表わされる。

$$\sum_{j \in P_{h'} \cup X_k(i)} \sum_{i \in D_{j',k}^r} u_{ij} \quad (44)$$

そして (44) 式は (32)~(34) 式よりつぎのように変形することができる。

$$\sum_{j \in P_{h'} \cup X_k(i)} \sum_{i \in D_{j',k}^r} u_{ij} \quad (45)$$

$$= \sum_{j \in P_{h'}} \sum_{i \in D_{j',k}^r} u_{ij} + \sum_{j \in X_k(i)} \sum_{i \in D_{j',k}^r} u_{ij} \quad (46)$$

$$= \sum_{i \in D_{j',k}^r} \sum_{j \in P_{h'}} \left[\frac{O_i}{\tau_j} \right] \rho_{j,k} a_{ij} + \left(\sum_{i \in D_{j',k}^r} \sum_{j \in P_{h'}} t_{ij} + \sum_{j \in X_k(i)} \sum_{i \in D_{j',k}^r} t_{ij} \right) \quad (47)$$

$$= \sum_{i \in D_{j',k}^r} \sum_{j \in P_{h'}} \left[\frac{O_i}{\tau_j} \right] \rho_{j,k} a_{ij} \quad (48)$$

(48) 式は再分配によって新たにドライバーが分配される駐車場 j' における、駐車代金による利益の合計であることがわかる。すなわち、スマートパーキングシステムが解くべき駐車場管理者の総利益の最大化問題は、駐車場 j' の総利益を最大化する問題に書き換えることができる。ここで再分配により駐車場 j' の利益を最大化するためには、再分配前後で利益が増加するドライバーのみを受け入れる必要がある。すなわち、ドライバー i の再分配に関して、支払う金銭的インセンティブよりも駐車代金による利益のほうが大きくなる必要があり、以下が成り立たなければならない。

$$\left[\frac{O_i}{\tau_{j'}} \right] \rho_{j',k} \geq t_{iX_k(i)}, \quad \forall i \in D_{j',k}^r \quad (49)$$

$$\left[\frac{O_i}{\tau_{j'}} \right] \rho_{j',k} \geq \left[\frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \right] f_{X_k(i)}, \quad \forall i \in D_{j',k}^r \quad (50)$$

よって (41) 式の条件が導かれる。

さらに駐車場 j' の利益は以下のように表わされる。

$$u_{ij'} = \sum_{i \in D_{j',k}^r} \left(\left[\frac{O_i}{\tau_{j'}} \right] \rho_{j',k} + t_{ij'} \right) \quad (51)$$

ここで (51) 式における 1 項目が駐車代金による金銭的な利

益を表わし正の値となり、2 項目がほかの駐車場管理者に支払うインセンティブを表わすので負の値となる。つまり $u_{ij'}$ を最大とするためには、1 項目が最大値、すなわち $\rho_{j',k}$ が最大値を、2 項目が最小値、すなわち $t_{ij'}$ が最小値を取ればよい。

ここで 1 項目に関して、定理 1 よりドライバーに対する個人合理性を満たす $\rho_{j',k}$ の最大値は、(23) 式を $D_{j',k}^r$ に属するすべてのドライバーに対して満たしたうえで、最大値を取る $\rho_{j',k}$ である。つまり (42) 式である。

また 2 項目に関して、定理 2 より最小値は (43) 式である。

□

定理 3 より、(41) 式を満たすドライバーに対して、(42) 式、(43) 式で表わされる動的駐車代金、インセンティブを設計することで、個人合理的、かつ効率的な再分配、すなわちドライバー側、駐車場管理者側双方にとって利益の損失がなく、社会全体的としても望ましい再分配が達成される。

4.3 駐車場再分配アルゴリズム

上記で議論した駐車場の再分配に必要な情報にはドライバーの個人的な情報が必要であり、これを駐車場管理者が取得、利用することは現実的に不可能である。また駐車場管理者がそれらの情報を独自に取得できた場合、情報を悪徳に利用して不当に自身の利益を最大化しようと行動する可能性がある。よって本研究では、仮定 2 にも表わすようにこれらの情報はスマートパーキングシステムが取得し、それらの情報を用いた再分配もスマートパーキングシステムが一括で行なうことを想定している。

上記を踏まえ、メカニズムデザインに基づく駐車場の再分配アルゴリズムを以下にまとめる。

Algorithm: Redistributing parking lot algorithm at time k

```

1: Initialization
2: Set  $X_k$ 
3: Set  $D_{j',k}^w = \left\{ i : \frac{D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{ij',k}}{R_i} < J_{iX_k(i)}^d \leq \frac{D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{ij',k}}{R_i} + \frac{F_{j'}}{F_i}, j' \in P_{h'} \right\}$ 
4: if  $D_{j',k}^w = \emptyset$ 
5:    $\mu_k = X_k$ 
6: else
7:   Set  $\rho_{j',k} = \max_{i \in D_{j',k}^r} \left\{ \frac{F_i}{\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \rceil} \left( \frac{D_{iX_k(i)} - D_{ij'}}{D_i} + \frac{R_{iX_k(i),k} - R_{ij',k}}{R_i} \right) + \frac{\lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil}{\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \rceil} f_{X_k(i)} \right\}$ 
8:   if  $\lceil \frac{O_i}{\tau_{j'}} \rceil \rho_{j',k} \geq \lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil f_{X_k(i)}, i \in D_{j',k}^r$ 
9:      $t_{iX_k(i)} = \lceil \frac{O_i}{\tau_{X_k(i)}} \rceil f_{X_k(i)}, \forall i \in D_{j',k}^r$ 
10:     $i \in \mu_k(j')$ 
11:   end if
12: end if
```

5. シミュレーション検証

数値シミュレーションにより、提案アルゴリズムの有効性を確認する。対象とする交通ネットワークは Fig. 1 で表わされるネットワークであり、ドライバーの駐車場探索における

条件は交通ネットワークにおける座標、経路、交通規則に基づき、最短経路に関して算出するものとする。各ドライバーの駐車時間 α_i および各時刻におけるネットワーク外からの流入台数はそれぞれ指数分布、ポアソン分布に従い、それぞれの変数はほかのドライバー、前時刻に影響されることなく、ランダムに決定されるものとする。各時刻に流入する車両台数を **Fig. 2** に示す。

Fig. 2 Inflow vehicles

比較対象としては参考文献 10) の結果と General Parking(GP) とする。前者に関しては、各時刻で流入するすべての駐車場探索ドライバーに対して、ドライバーの要望のみを考慮した以下の (52)~(56) 式で表わされる最適化問題を解くことで得られる駐車場割当を文献 10) の結果とする。

$$\min_{x_{ij}} \sum_{i \in V_{in,k}} \sum_{j \in P} J_{ij} x_{ij} \quad (52)$$

subject to

$$J_{ij} = \frac{D_{ij}}{D_i} + \frac{R_{ij,k}}{R_i} + \frac{F_{ij}}{F_i} \quad (53)$$

$$\sum_{j \in P} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V_{in,k} \quad (54)$$

$$\sum_{i \in V_{in,k}} x_{ij} \leq c_{j,k}, \quad \forall j \in P \quad (55)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (56)$$

また後者に関しては各ドライバーが自身の選好 P_i に基づき、選好の高い順に駐車場を探索し、到着した駐車場が空車であれば駐車、満車であればつぎに選好の高い駐車場を探索するという駐車場探索を GP とする。

シミュレーションにおける設計パラメータを **Table 2** に示す。

シミュレーション結果を以下に示す。**Fig. 3** は駐車場探索ドライバーの探索条件である駐車場から目的地までの距離の合計、**Fig. 4** は駐車代金の合計を表わしている。

Fig. 3 より提案手法は、ドライバーの駐車場探索条件である駐車場から目的地までの距離を比較対象である従来研究¹⁰⁾と GP と同等に削減できていることから、ドライバーの要望を考慮した駐車場割当が成されていることが確認できる。ま

Table 2 Simulation parameters

Parameters	Symbols	Value
Sampling rate (min)	T	1
Number of users	i	1~339
Number of parking spaces	N	361
Mean value of driver's parking time (min)	μ	60
Mean value of inflow interval	λ	6
Weight value for distance between parking lot and destination	D_i	{10 30 50 100 200 300 500 700 1000 2000}
Weight Value for parking fee	F_i	{100 200 300 500 700 1000 1500 2000 3000 5000}
Weight Value for distance between current location and parking lot	R_i	{100 150 200 300 400 500 700 1000 1500 2000}

Fig. 3 Total distance

Fig. 4 Total parking fee

た **Fig. 4** において、比較対象である従来手法¹⁰⁾では駐車代金をドライバーの要望としてのみ考慮しており、駐車代金はより小さいほうが好ましいためにはほかの 2 つの手法に比べ総駐車料金が削減されている。一方、駐車場管理者のみが駐車料金に対して要望をもつ GP では、総駐車料金は大きくなっているのがわかる。この 2 つの手法に対して、提案手法では駐車代金をドライバーの要望だけではなく駐車場管理者の利益としても捉えていることから、両者のバランスをとった駐車代金となっている。ただし駐車場管理者の利益が増加するということは、ドライバーの支払う駐車代金が増える、つまりドライバーの金銭的コストが大きくなることを意味する。しかしながらマッチング理論に基づき導出した駐車場割当にあたる安定マッチングは個人合理性を満たすので、ほかの探索条件を考慮するとドライバーにとって不満のない駐車場割当となっている。

また駐車場探索時間の合計を **Fig. 5** に表わす。

駐車場の空車/満車情報にかかわらず各ドライバーが選好の高い順に駐車場を探索する GP は駐車場探索時間が極端に大きくなっていることがわかる。それに対し、提案手法と従来手法では駐車場探索時間が短縮できていることが確認できる。

Fig. 5 Total searching time

さらに最も利益の少ない駐車場管理者が管理する駐車場 ($j = 5$) における駐車代金を Fig. 6 に、駐車場の再分配に伴い各駐車場管理者が支払う、あるいは受け取る金銭的なインセンティブを Fig. 7 に表わす。

Fig. 6 Parking fee at parking $j = 5$

Fig. 7 Incentive

Fig. 6 における破線は動的駐車代金を設計する前の固定価格を表わしており、実線が各時刻における駐車代金を表わしている。Fig. 6 からわかるように、ほかの駐車場とペアを組んでいるドライバーの嗜好を変化させるために、各時刻で固定価格よりも低い駐車代金を動的に設計できていることが確認できる。また Fig. 7 では正の値がインセンティブを受け取り、負の値がインセンティブを支払うことを意味している。再分配によりペアを失うことになる駐車場管理者 $h = 1, h = 2$ がインセンティブを受け取り、新たにドライバーが分配される駐車場管理者 $h = 3$ がインセンティブを支払っていることがわかる。さらにそれらのインセンティブの値は各時刻で合計が 0 となっており、(34) 式が満たされていることも確認できる。

さらに Fig. 8 は各駐車場管理者が管理する駐車場の各時刻における利用率の平均を表わしている。

Fig. 8 における破線が再分配前の利用率表わしており、実線が再分配後の利用率を表わしている。利用率の低い、すなわち利益の少ない駐車場管理者の利用率を再分配により向上できていることが確認できる。

さらに Fig. 9, Fig. 10 は各駐車場管理者の利益を表わしている。

Fig. 9 において、破線が再分配前のマッチング X_k にお

Fig. 8 Average utilization for each parking manager

Fig. 9 Managers' profit ($h = 1, 2$) Fig. 10 Manager's profit ($h = 3$)

る各駐車場管理者の駐車代金による利益である。また、灰色の枠が再分配後の駐車代金による金銭的な利益、破線で囲まれた白枠が各駐車場管理者が受け取るインセンティブを表わしている。両駐車場管理者共に駐車代金による利益は再分配前よりも減少しているものの、再分配による利益の減少分をインセンティブにより補償されていることが確認できる。さらに、Fig. 10 において、破線が再分配前の駐車代金による金銭的な利益、一点鎖線が再分配前の金銭的な利益、灰色の枠がインセンティブの支払額を差し引いた実際の駐車場管理者の利益を表わしている。Fig. 10 より、ほかの駐車場管理者に支払うインセンティブを考慮しても、再分配により駐車場管理者 $h = 3$ の利益を向上できている。以上より提案手法の有効性が確認できる。

6. おわりに

本稿では都市交通網における問題点である、駐車場探索に伴う車両速度の低下による交通渋滞を緩和するために、スマートパーキングシステムによる駐車場割当に着目した。駐車場

割当を決定するにあたり、駐車場探索ドライバーと駐車場管理者の双方の利益を考慮するために、マッチングアルゴリズムの1つであるGSアルゴリズムに基づく駐車場割当決定アルゴリズムを提案した。さらにマッチング理論に基づき決定した駐車場割当の問題点である駐車場管理者間の利益の不均衡を解消するために、メカニズムデザインにおいて望ましい性質を満たすような動的駐車代金とインセンティブ設計を伴う、駐車場の再分配アルゴリズムを提案した。最後に数値シミュレーションにより、提案アルゴリズムの有効性を確認した。

今後の課題としては，車両数を状態変数としたダイナミクスによる表現や動的な選好の決定などが挙げられる．

参考文献

- 1) M. Manville and D. Shoup: *Parking, People, and Cities*, *Journal of Urban Planning and Development*, **131**-4, 233/245 (2005)
- 2) R. Arnott, T. Rave and R. Schob: *Alleviating Urban Traffic Congestion*, CESifo Book Series, The MIT Press (2005)
- 3) 野村総合研究所先端 IT イノベーション部: IT ロードマップ 2014 年版: 情報通信技術は 5 年後こう変わる, 東洋経済新報社 (2014)
- 4) T. Lin, H. Rivano and F. Le Mouel: A Survey of Smart Parking Solutions, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, **18**-12, 3229/3253 (2017)
- 5) 塚口, 小林: 駐車管理のための駐車場所選択行動のモデル化, 土木学会論文集, **1993**-458, 27/34 (1993)
- 6) F. Caicedo: The use of space availability information in “PARC” systems to reduce search times in parking facilities, *Transportation Research Part C*, **17**-1, 56/68 (2009)
- 7) F. Caicedo: Real-time parking information management to reduce search time, vehicle displacement and emissions, *Transportation Research Part D*, **15**-4, 228/234 (2010)
- 8) W. Griggs, J.Y. Yu, F. Wirth, F. Hausler and R. Shorten: On the Design of Campus Parking Systems with QoS Guarantees, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **17**-1, 1428/1437 (2016)
- 9) Y. Jun: A System framework of active parking guidance and information, *WASE International Conference on Information Engineering*, **2**, 133/139 (2010)
- 10) Y. Geng and C.G. Cassandras: New “Smart Parking” System Based on Resource Allocation and Reservations, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, **14**-3, 1129/1139 (2013)
- 11) D. Draskovic and S. Vukicevic: A Model of Software System for Parking Using Search Algorithm, *Proc. 35th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, 1098/1103 (2012)
- 12) B. Zou, N. Kifle, O. Wolfson and J. Lin: A mechanism design based approach to solving parking slot assignment in the information era, *Transportation Research Part B, Part 2*, **81**-19, 631/653 (2015)
- 13) O. Zoeter, C. Dance, St. Clinchant and J.M. Andreoli: New Algorithm for Parking Demand Management and a City Scale Deployment, *Proc. 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1819/1828 (2014)
- 14) A.O. Kotb, Y.-C. Shen, X. Zhu and Y. Huang: iParker—A New Smart Car Parking System Based on Dynamic Resource Allocation and Pricing, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, **17**-9, 2637/2647 (2016)

- 15) 橋本, 金森, 伊藤: 駐車場利用データに基づくオークション型
駐車場予約システムのシミュレーション評価, 情報処理学会研
究報告, **2013-ICS-171-23**, 1/7 (2013)
- 16) 「銀座—Google マップ」, <https://www.google.co.jp/maps/place/%E3%80%92104-0061+%E6%9D%B1%E4%BA%AC%E9%83BD%E4%B8%AD%E5%A4%AE%E5%8C%BA%E9%8A%80%E5%BA%A7/@35.6712835,139.7629653,16.75z/data=!4m5!3m4!1s0x60188be701836fbb:0x604685b30ba99851!8m2!3d35.6721142!4d139.7708253?hl=ja>, 2018 年 1 月 23 日アクセス
- 17) 「銀座周辺の駐車場—NAVITIME」, <https://www.navitime.co.jp/parking/around/?node=00001908>, 2018 年 1 月 23 日アクセス
- 18) 「銀座の駐車場ガイド—三井のリパーク」, https://www.repark.jp/parking_user/information/ginza/, 2018 年 1 月 23 日アクセス
- 19) D. Gale and L.S. Shapley: College Admissions and the Stability of marriage, *American Mathematical Monthly*, **69-1**, 9/15 (1962)

[著者紹介]

中西啓晃

2016 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン
工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合
デザイン工学専攻に入学，現在に至る。スマート
パーキングシステムによる渋滞緩和に関する研究
に従事。

吉原美祐

2017 年度應義塾大学理工学部システムデザイン
工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合
デザイン工学専攻に入学，現在に至る。EV の充
電スケジューリングに関する研究に従事。

滑 川 徹 (正会員)

1994 年金沢大学大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程中退。同年金沢大学工学部電気・情報工学科助手。同講師を経て 2002 年長岡技術科学大学機械系助教授。2006 年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報科学専攻助教授。2009 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科准教授。2014 年同教授となり現在に至る。ロバスト制御理論、分散協調制御理論とその電力ネットワークシステムへの応用に関する研究に従事。博士(工学)。2014 年 SICE 制御部門パイオニア技術賞, 2017 年 SICE 論文賞を受賞。IEEE CSS, システム制御情報学会, 電気学会などの会員。