再配置不要なバイクシェアリング・システムのための線形価格決定法

土居　史弥[1]・長江　剛志[2]

[1] 学生非会員　東北大学大学院工学研究科（〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816）
E-mail:fumiya.doi.p8@dc.tohoku.ac.jp

[2] 正会員 東北大学大学院工学研究科（〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814）
E-mail: nagae@tohoku.ac.jp

近年，新たな短距離移動手段としてバイクシェアリングが注目されている. バイクシェアリングとは，エリア中に複数設置された拠点（ポート）において，利用者がどこでも自転車を貸出・返却できる交通手段である. しかし，自転車のポート間の再配置には多大なコストがかかるため，多くのバイクシェアリング事業が赤字経営を強いられている. 再配置コスト削減手段として，本研究では，需給ミスマッチを軽減する方法であるリニアフプライシング制度を提案する. 具体的には，貸出時にそのポートの価格分の金額を保証金として支払い，返却時にそのポートの価格分の金額を払戻金として受け取るシステムを考える. 返却ポートの価格の方が高い場合に収入を得ることも可能である．ポート価格の決定プロセスには競り上げオークションを導入する. これにより，利用者の利便性を担保しつつ，需給ミスマッチの軽減が期待できる.

Key Words : *Bike-sharing, Assignment Problem, Mechanism Design, Multi-item Auction, Linear Programming Problem*

1. はじめに

近年，世界中でバイクシェアリングの導入が進んでいる. バイクシェアリングとは，乗り捨て可能な自転車共同利用システムであり，エリア内に複数設置された自転車貸出拠点（ポート）全てで自転車を貸出・返却できる新しい交通手段である. バイクシェアリングはその利便性から都市部におけるラストワンマイルの移動手段として注目されている．一方，国内における既存のバイクシェアリング事業の多くは，自転車のポート間の移動（再配置）にかかるコストが原因で赤字経営となっている. 再配置が必要になる背景には，乗り捨て型というバイクシェアリングの利用方式が深く関わっている. 通勤時間帯などにおいて空間的な需要の偏在が発生すると，自転車が溢れる（返却できない）ポートや自転車が無くなる（貸出できない）ポートが発生する. 本研究ではこうした需給ミスマッチを軽減する方法として，貸出時にそのポートの価格分の金額を保証金として支払い，返却時にそのポートの価格分の金額を払戻金として受け取るリニアフプライシング制度を提案する.

バイクシェアリングをはじめとした乗捨て型共同利用交通システムでの需給ミスマッチに関する先進的な研究として，Hara & Hato[1)] の利用権取引制度がある．Hara & Hato は時間帯ごとにシェアサイクルを利用できる権利（利用権）を導入し，VCG メカニズムによって社会的余剰を最大化する割当を行う手法を確立した．一方，加藤[2)] は Hara & Hato モデルにおいて定式化された最適配分問題を LP 緩和することで，利用者にとって利便性の高い競り上げオークションを導入できる可能性を示した．そこで本研究では，競り上げオークションによるポート価格決定プロセスをリニアプライシングと名付け，定式化とメカニズム構築の方向性を示す.

本稿ではまず，2. で車両配分モデルの定式化を行う．次に，3. で配分問題の分解とリニアプライシングのコンセプトについて説明を行う.

2. 車両配分モデルの定式化

(1) 状況設定

図 1 に本研究の状況設定を示す．離散時点$t \in T := \{1,2,\cdots,T\}$とすると，利用者は時点$t$に開始したトリップを次の時点$t+1$までに終了させる必要がある. ポートを$n \in N := \{1,2,\cdots,N\}$，トリップの OD ペア集合を$nm \in L := \{12,\cdots,1N,\cdots,nm,\cdots,NN\}$とする．利

用者は$j \in J := \{0,1,2,\cdots,J\}$と表す．各利用者は時点$t$における任意の OD ペアの利用権に対して評価値$v_{nm}^{j}(t)$を持っている．$j=0$に関しては，ポートに留まる車両を配分するためのダミーの利用者として扱う．そのため，$j=0$の評価値は$v_{nn}^{0}(t)=0$となる．また，利用者が車両を利用可能か表す(利用権割当)変数として$y_{nm}^{j}(t) \in \{0,1\}$を導入する．1 人の利用者に利用権が割り当てられる回数は最大で 1 回とする．時点tにポートnにある自転車の台数は$x_n(t)$と表し，$x_n(1)$は管理者が運用開始前までにポートnに配置する自転車の台数を表す．車両台数の総数はμと表す．

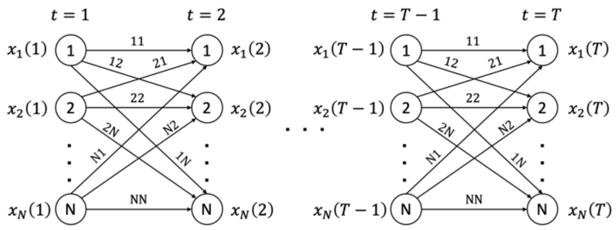

図-1 車両配分の状況設定

(2) 目標とする利用権の最適配分

本研究では，利用者及び供給者の和である社会的余剰を最大化するような利用権の配分を目標とする．この時，総車両台数，各時点におけるポートの車両台数，利用権割当回数を制約条件として考慮した利用権の最適配分問題は以下の最大化問題として定式化できる．

$$\max_{y} \sum_{j\in J}\sum_{nm\in L}\sum_{t\in T} v_{nm}^{j}(t) y_{nm}^{j}(t) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{n\in N} x_n(1) \le \mu \tag{2}$$

$$y_{nn}^{0}(t) + \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{m\in N} y_{nm}^{j}(t) = x_n(t) \qquad \forall (n,t) \in N \times T \tag{3}$$

$$-y_{mm}^{0}(t) - \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{n\in N} y_{nm}^{j}(t) = -x_m(t+1) \qquad \forall (m,t) \in N \times T \tag{4}$$

$$\sum_{nm\in L}\sum_{t\in T} y_{nm}^{j}(t) \le 1 \qquad \forall j \in \{1,2,\cdots,J\} \tag{5}$$

$$x_n(t) \ge 0 \qquad \forall (n,t) \in N \times T \tag{6}$$

$$y_{nm}^{j}(t) = \{0,1\} \qquad \forall (j,nm,t) \in J \times L \times T \tag{7}$$

3. 最適配分問題の分解とリニアプライシング

(1) 最適配分問題の時間分解

前章で定式化した最適配分問題において，任意の時点tにおけるポート台数$x_n(t)$を与件とする．この時，$x_n(t)$を起点供給，$x_n(t+1)$を終点需要と見なすことができる．よって時点$t \to t+1$での最適配分問題は以下のような Hitchcock 輸送問題に類似した形で表現できる．この問題を解くことによって，時点毎の利用権割当が可能となる．

$$\max_{y} \sum_{j\in J}\sum_{nm\in L} v_{nm}^{j}(t) y_{nm}^{j}(t) \tag{8}$$

$$\text{s.t.}\ y_{nn}^{0}(t) + \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{m\in N} y_{nm}^{j}(t) = x_n(t) \qquad \forall n \in N \tag{9}$$

$$y_{mm}^{0}(t) + \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{n\in N} y_{nm}^{j}(t) = x_m(t+1) \qquad \forall n \in N \tag{10}$$

$$\sum_{nm\in L} y_{nm}^{j}(t) \le 1 \qquad \forall j \in \{1,2,\cdots,J\} \tag{11}$$

$$x_n(t) \ge 0. \qquad \forall n \in N \tag{12}$$

$$y_{nm}^{j}(t) = \{0,1\} \qquad \forall (j,nm) \in J \times L \tag{13}$$

(2) 時間分解した最適配分問題の LP 緩和

前節で導出した最適配分問題は組み合わせ最適化問題であり，有限時間内で解を導出することが困難となる可能性がある NP 困難という性質を持つ．有限時間内に解を得る方法として LP 緩和がある．LP 緩和を行うことで加藤が提案した競り上げオークションが可能となる．前節で導出した問題を LP 緩和すると以下のように表現できる．

$$\max_{y} \sum_{j\in J}\sum_{nm\in L} v_{nm}^{j}(t) y_{nm}^{j}(t) \tag{14}$$

$$\text{s.t.}\ y_{nn}^{0}(t) + \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{m\in N} y_{nm}^{j}(t) \le x_n(t) \qquad \forall n \in N \tag{15}$$

$$y_{mm}^{0}(t) + \sum_{j\in\{1,2,\cdots,J\}}\sum_{n\in N} y_{nm}^{j}(t) \le x_m(t+1) \qquad \forall n \in N \tag{16}$$

$$\sum_{nm\in L} y_{nm}^{j}(t) \le 1 \qquad \forall j \in \{1,2,\cdots,J\} \tag{17}$$

$$x_n(t) \ge 0 \qquad \forall (n,t) \in N \times T \tag{18}$$

$$y_{nm}^{j}(t) \ge 0 \qquad \forall (j,nm) \in J \times L \tag{19}$$

(3) 双対問題とその解釈

前節で導出した LP の双対問題は以下のように表現できる．

$$\min_{\boldsymbol{\pi},\boldsymbol{p}} \sum_{j\in J} \pi^j(t) + \sum_{n\in N} \big(x_n(t)p_n(t) - x_n(t+1)p_n(t+1)\big) \tag{20}$$

$$\text{s.t.}\ p_n(t) - p_m(t+1) + \pi^j(t) \geq v_{nm}^j(t)$$
$$\forall(n,nm) \in N \times L, \qquad \forall j \in \{1,2,\cdots,J\} \tag{21}$$
$$p_n(t) - p_m(t+1) \geq 0$$
$$\forall n \in N, j = 0 \tag{22}$$
$$\pi^j(t) \geq 0 \qquad \forall j \in \{1,2,\cdots,J\} \tag{23}$$
$$p_n(t) \geq 0 \qquad \forall n \in N \tag{24}$$

ここで注目すべきは，価格が利用権毎ではなく，ポート毎に付与されている点である．$p_n(t)$は任意の時点t，ポートnからの貸出価格，または時点$t-1$にポートnに車両を供給することに対する報酬と解釈できる. よって，時点tにおける利用権nmの価格$p_{nm}(t)$は以下のように表現できる.

$$p_{nm}(t) = \begin{cases} p_n(t) - p_m(t+1) & \forall n \in N, t = 1,2,\cdots,T-1 \\ p_n(T) & \forall n \in N \end{cases} \tag{25}$$

このように利用権の価格が，利用時点における出発ポートの価格と次時点における到着ポートの価格の差で表されているのは，利用者にとって分かりやすい価格体系であると言える．本研究では，この価格体系をリニアプライシングと呼称する.

$p_n(t) < p_m(t+1)$の場合は利用権nmを利用者が行使することで正の利潤を得る．これは，従来管理者側が担っていた低需要ポートから高需要ポートへの輸送を利用者が肩代わりしていると解釈できる.

(4) 競り上げオークションによる価格決定法の考察

競り上げオークションは評価値を直接申告する必要のない間接顕示メカニズムに分類される．この間接顕示メカニズムの利点として，利用者が評価値を直接申告する必要がなく利便性が高い点，利用者が虚偽の申告をしなければ最適配分の実現が保証されている点がある．競り上げオークションのメカニズムは, LP に対して主双対アルゴリズムを適用することで説明できる．本節では，初めに主双対アルゴリズムについて説明を行う．その後，本研究で導出した LP に主双対アルゴリズムを適用し，競り上げオークションによるポート価格決定法を構築できる可能性について考察を行う.

a) 主双対アルゴリズム

主双対アルゴリズムの基本的なステップは以下の通りである.

Step1 双対実行可能解に対し，相補性条件を満たすよう主変数を構築する.

Step2 主変数が主実行可能解であれば最適解，そうでなければ双対変数を改訂し Step1 へ.

Step1 において, 主実行可能な主変数の存在を確認するため，制約つき問題を構築する必要がある．この制約つき問題は補助変数$\boldsymbol{z}^{(k)}$を用いて以下のような形で表現される.

$$\min_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}} \sum_{m\in M} z_m^{(k)} \tag{26}$$
$$\text{s.t.} \sum_{m\in M} a_{m,n} x_m^{(k)} + z_m^{(k)} = b_m (>0) \qquad \forall m \in M \tag{27}$$
$$x_m^{(k)} = 0 \qquad \forall n \in N^{(k)} \tag{28}$$
$$x_m^{(k)} \geq 0 \qquad \forall n \notin N^{(k)} \tag{29}$$
$$z_m^{(k)} \geq 0 \qquad \forall m \in M \tag{30}$$

$N^{(k)}$は双対実行可能解$\boldsymbol{y}^{(k)}$に対し，相補性条件（$\sum_{m\in M} a_{m,n} y_m < c_n \rightarrow x_n = 0$）を満足する添字の集合である．この制約つき問題において最適値が 0 の場合, $\boldsymbol{x}^{(k)}, \boldsymbol{y}^{(k)}$は最適解となる．一方，最適値が 0 より大きい場合は，制約つき問題の双対実行可能解を用いて$\boldsymbol{y}^{(k)}$よりも最適解に近い双対実行可能解$\boldsymbol{y}^{(k+1)}$を求める．制約つき問題の双対問題を以下に示す.

$$\max_{\boldsymbol{\psi}} \sum_{m\in M} b_m \psi_m^{(k)} \tag{31}$$
$$\text{s.t.} \sum_{m\in M} a_{m,n} \psi_m^{(k)} \leq 0 \qquad \forall n \notin N^{(k)} \tag{32}$$
$$\psi_m^{(k)} \leq 1 \qquad \forall m \in M \tag{33}$$

この時，制約つき問題の双対実行可能解$\boldsymbol{\psi}^{(k)}$を用いて$\boldsymbol{y}^{(k)} + \delta^{(k)}\boldsymbol{\psi}^{(k)}$ ($\delta^{(k)}$は正の定数) となる新しい双対実行可能解$\boldsymbol{y}^{(k+1)}$を得ることができる．$\boldsymbol{y}^{(k)} + \delta^{(k)}\boldsymbol{\psi}^{(k)}$は

$$\sum_{m\in M} b_m \big(y_m^{(k)} + \delta^{(k)} \psi_m^{(k)}\big) > \sum_{m\in M} b_m y_m^{(k)} \tag{34}$$

を満足するので，$\boldsymbol{y}^{(k)}$よりも最適値に近いと言える.

b) 競り上げオークションによるポート価格決定法

本研究で導出したLPに前項で説明した主双対アルゴリズムを適用する場合, 競り上げオークションの手順は以下のようになる.

Step1 双対実行可能解$\boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{p}$に対し，相補性条件を満たすよう主変数$\boldsymbol{y}$を構築する.

Step2 主変数$\boldsymbol{y}$が主実行可能解であれば最適解, そうでなければ双対変数を改訂し Step1 へ.

Step1 において，$\boldsymbol{\pi}$は利用者の最大余剰と解釈できる．各利用者が価格$\boldsymbol{p}$に対して最適な意思決定を行うと仮定すれば，$\boldsymbol{\pi}$は$\boldsymbol{p}$により自動的に定まる．よって主双対ア

ルゴリズムによって改訂の対象となる変数はポート価格 $\boldsymbol{p}$ となる．価格の改訂はポートを財と見なした時の財サブ集合の需要量が供給量を上回った際に行われる．

こうした主双対アルゴリズムをポート価格決定のための競り上げオークションに導入する場合のメカニズムを図 2 に示す．利用者は提示されたポート価格に対し，利用の意思を管理者側に通知するだけでポート価格が決定される．

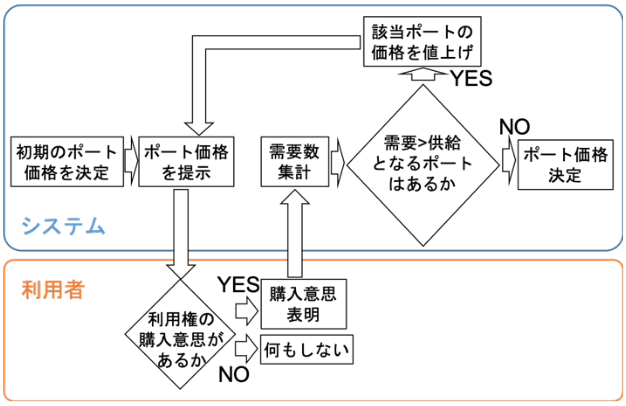

図-2 ポート価格決定フローチャート

4. おわりに

本研究では，競り上げオークションによるポート価格決定プロセスをリニアプライシングと名付け，定式化とメカニズム構築の方向性を示した．

まず，本研究で扱う車両配分モデルにおける最適配分問題を整数計画問題として定式化した．次に，最適配分問題の LP 緩和と双対問題の導出を行ない，リニアプライシングのコンセプトを説明した．最後に，主双対アルゴリズムの説明とそれを用いた競り上げオークションによるポート価格決定プロセスの構築可能性について考察を行なった．

具体的な価格決定メカニズム及びそれを用いた配置台数の改訂方法については発表会で報告する予定である．

参考文献

1) Y. Hara, E. Hato.: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions, *Transportation Research Part B*, Vol 117, pp723-739
2) 加藤桃子：利用権取引制度を活用した自律分散的なバイクシェアリングの需給ミスマッチ解消，東北大学修士論文， 2015

(2019. 10. 4 受付)