自転車シェアリングにおける企業の最適戦略に関する研究

原田 拓実[1]・瀬木 俊輔[2]・小林 潔司[3]

[1]学生会員　京都大学 大学院工学研究科 都市社会工学専攻（〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail: harada.takumi.57u@st.kyoto-u.ac.jp
[2]正会員　京都大学助教　大学院工学研究科　都市社会工学専攻（〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail: segi.shunsuke.6e@kyoto-u.ac.jp
[3]フェロー会員　京都大学教授　経営管理研究部（〒 606-8501 京都市左京区吉田本町）
E-mail: kobayashi.kiyoshi@kyoto-u.ac.jp

自転車シェアリング事業において空車・満車による不効用は主要な問題として考えられ, 事業者はそれらを考慮し, システムを効率的に供給するための最適な料金・自転車台数・自転車再配置間隔等を決定しなければならない. 本研究では離散イベントシミュレーションを用い, 遺伝的アルゴリズムを援用することで, 事業者の最適戦略を求めるアルゴリズムを開発し自転車シェアリングにおける規模の経済を示した. また 2 企業が存在し, 競争の結果, ある均衡に達する場合を考えることで, 需要の大小により社会的余剰の面で独占状態が好ましい場合, 複占状態が好ましい場合のそれぞれが存在することを示した.

Key Words : *bike sharing, economies of scale, discrete event simulation*

1. 序論

(1) 研究の背景

自転車シェアリングは欧州では主として環境意識の高まりから導入され, 日本においても近年主に都市部において社会実験や事業化などの動きの広がりが見られる. 今後自転車シェアリング事業が拡大していく中で, 主要な問題として考えられるのは空車・満車により事業者の収入減・評判の低下, またユーザーの不効用が生じる点である. 自転車シェアリングでは利用者が一定のエリア内に複数設置された拠点から任意の駐輪場を選択し, 貸出・返却可能であるという特徴から利用者が柔軟な移動の選択肢を得られる一方で, 需要の不確実性により需要に偏りが生じ, 一部の駐輪場に自転車が集中し, 需要と自転車数の不均衡という状況が発生する. 需要と自転車数の不均衡により, 空車によって利用者がその駐輪場において自転車を借りられないという状況や, 満車によって返却された自転車がラックの外に置かれ監視費用が発生し自業者の評判が低下してしまうといった問題が存在する. このように自転車シェアリング事業において空車・満車は避けるべき最たるリスクとして認識されている. 空車満車を避け, 需要と自転車数の不均衡を是正するため, 事業者は実務においてトラック等による貨物輸送によって自転車の再配置を行うほか, 各駐輪場の初期自転車配置台数と駐輪容量を調整する. このようなシステムを効率的に供給する事業者の最適戦略として, 事業者の期待利潤を最大化する, または社会的総余剰を最大化するような, 最適な料金・自転車台数・自転車再配置間隔等を決定することが必要となるが, 需要の不確実性とそれによる空車・満車の損失を考慮した事業者の最適戦略を決定する手法は確立されていない. 自転車シェアリングでは駐輪場が多数存在し状態の遷移が複雑であり, 企業の最適戦略を解析的に分析することはできず, 最適な駐輪台数等の決定に際しては, シミュレーションによる分析が必要となる. しかしそのようなシミュレーションによる企業の最適戦略に関する分析手法も十分に開発されていない. そこで本研究では理論的な自転車シェアリングにおける企業の最適戦略の基本的特性を捉えることを目的とする. そのために特に本研究では自転車シェアリングにおける規模の経済に着目して議論をする. ここで派生する議論として, 規模の経済が存在する中で, どのような場合に企業の参入が有効であるかという問題がある. 実務において今後の自転車シェアリング事業の拡充にあたって, 自治体等が補助金を出すなどして推進すべきかどうか政策に生かすことの出来る議論をすることも肝要である. 企業が参入する場合, 価格等で企業間の競争が発生しある均衡に達すると考えられるが, そのような企業間の競争がもたらす効果に関する研究事例も少なく, 企業の参入について分析することは有用であるといえる.

(2) 研究の目的

自転車シェアリングにおける需要の不確実性, 需要と自転車数の不均衡により発生する空車・満車が引き起こす損失（利用者の不効用・事業者の収入減）を考慮したモデルを作成し, 事業者の期待利潤を最大化するような, システムを効率的に供給するための最適な駐輪場数・料金・初期自転車配置台数・駐輪容量・自転車再配置間隔を決定するための最適化アルゴリズムを開発する．作成したプログラムを用いて独占の場合についてシミュレーションを行うことで自転車シェアリングにおける規模の経済を示す．さらに 2 企業が存在する場合について, 料金等について競争が発生する状況について考えることで, 1 企業の場合と比較して社会的総余剰が改善可能な場合, 独占の方が社会的余剰が大きくなる場合のそれぞれが存在することを示し, 自転車シェアリング事業において企業の参入を推進すべきかどうかについての政策的な知見を得ることを目的とする.

以下，**2.** で本研究の基本となる自転車シェアリングシミュレーションモデルと本研究で用いる離散イベントシミュレーションについて述べる．また企業の最適戦略を自動的に求めるため遺伝的アルゴリズムを援用する．**3.** では独占の場合について分析を行い, 本研究の自転車シェアリングモデルにおける規模の経済を示す. **4.** では 2 企業の複占について考えるため, 複占の場合のプログラムを作成し, 企業間の競争が発生し均衡に達する過程をシミュレーションすることで, 1 企業の独占と 2 企業の複占のそれぞれが社会的余剰の面で最適となる場合が存在することを示す．**5.** で本研究の概要をまとめ, 結論を示す.

2. 自転車シェアリングシミュレーションモデル

(1) モデルの前提条件

事業者が管理する駐輪場が都市内に合計 N 存在する．簡単のため駐輪場は円周上に等間隔に存在していると仮定する．円周の長さを L として, 時計回りを正とする座標をとり, i 点の座標を x_i のように表す．利用者は $U(0, L)$ の一様分布に従い確率的に発生する円周上のある点からある点へ, ここでは x^{START} から x^{GOAL} に向かって発生するとする．円周上に発生する利用者の潜在的需要は到着率 λ のポアソン過程に従い確率的に発生する．利用者は自転車シェアリング以外に代替交通手段を持ち, このように発生する潜在的需要のうち，自転車シェアリングにかかる費用が代替交通手段にかかる費用を下回った場合のみシェアリングを利用する．実務において, 利用者はスマートフォン等で駐輪場の情報を得られるものと想定されるため, 利用者は最寄りの自転車が借りられる（空車でない）駐輪場を予約し利用するとする．よってここでは利用者が駐輪場に赴き、駐輪場が空車状態で利用を諦めるということはないものとする．利用者は自転車シェアリングを利用する際, 最寄りの空車でない駐輪場を経由して自転車を借り, 目的地へと向かう費用の最も小さい最適な経路を選択するものとする. 利用者はシェアリングの利用時間に比例して，1 分当たり p 円の料金を支払う必要がある．また利用者は 1 分当たり β 円の時間価値を持つとする．ここで利用者の出発地と目的地を x^{START}, x^{GOAL}, 経由する駐輪場の貸し出し地と返却地を x_i, x_j とすると, 利用者は出発地 x^{START} から自転車を借りる駐輪場 i のある x_i まで徒歩で移動し,x_i から自転車を返却する駐輪場 j のある x_j まで自転車で移動し、x_j から目的地 x^{GOAL} までは再度徒歩で移動することになる．これより自転車の速度と歩行速度を s^{CYCLE}, s^{WALK} として, 利用者の自転車シェアリングの利用にかかる費用は,

$$cost^{CYCLE} = (p + \beta) \cdot \frac{dist(x_i, x_j)}{s^{CYCLE}} + \beta \cdot \frac{dist(x^{START}, x_i) + dist(x_j, x^{GOAL})}{s^{WALK}} \tag{1}$$

と表せる．ここで $dist(x_i, x_j)$ は, x_i と x_j との距離を表す関数である．一方で, 代替交通手段は出発地 x^{START} から目的地 x^{GOAL} まで直接向かうことが出来るものとし、代替交通手段にかかる費用は

$$cost^{ALT} = \beta \cdot \frac{dist(x^{START}, x^{GOAL})}{U(\underline{s}^{ALT}, \bar{s}^{ALT})} \tag{2}$$

と表せる．ここで $\underline{s}^{ALT}$ と $\bar{s}^{ALT}$ は代替手段として想定される交通手段の速度の最小値と最大値を表しており, 代替交通手段の速度は $U(\underline{s}^{ALT}, \bar{s}^{ALT})$ の一様分布に従い確率的に定められるものとする．このようにして利用者の自転車シェアリングの利用にかかる費用と代替交通手段にかかる費用が定義され, x^{START} から x^{GOAL} に向かって発生する利用者のうち, $cost^{CYCLE} \leq cost^{ALT}$ である利用者のみがシェアリングを利用するとする.

時刻 t における駐輪場 i の駐輪台数を $Q_i(t)$ で表し, 予約されている自転車を除いた駐輪台数を $Q_i^{FREE}(t)$ で表す．駐輪場 i が空車状態（$Q_i^{FREE}(t) = 0$）であるときには，利用者は駐輪場 i で自転車を借りることができず, 他の空車でない駐輪場を利用する.

駐輪場 i の容量（ラック数）を S_i で表す．駐輪場 i の駐輪台数が容量を超過した（$Q_i(t) > S_i$）場合でも，利用者は駐輪場 i への自転車の返却を行える．ただし，超過分の自転車はラックの外に停めなければいけないため，これらの自転車を監視する費用が必要になるほか，溢れた自転車が利用者の通行を妨害して不快感を与え，事業の評判を貶める．これらの問題のために事業者に生じる費用は，超過分の自転車の台数に比例すると考える．具体的に，時刻 t においてこの問題のために発生する 1 分当たりの費用は

$$c^o[Q_i(t) - S_i]^+ \tag{3}$$

と表される．ただし，$[]^+$ は [] 内の値が正のときにその値を，そうでないときに 0 を返す関数である．c^o は定数である．

事業者は一定の時間間隔（T 分）を置いて自転車の再配置を行う．事業者が再配置を行う際には，全ての駐輪場に対して一括して再配置を行う．再配置後における駐輪場 i の目標駐輪台数を $\bar{Q}_i$ で表す．$\sum_{i=1}^{N} \bar{Q}_i$ は事業者が保有する総自転車台数に一致する．再配置は以下のように行われる．事業者は各駐輪場から何台の自転車を運び出し，何台の自転車を運び込むかを決定する．この決定を表す変数として $q_i(t)$ を定義する．$q_i(t)$ は時刻 t に行われる再配置において，駐輪場 i に向けて輸送される自転車の台数である．$q_i(t)$ は負の値も取ることができ，その場合は駐輪場 i から自転車が運び出されることを表すとする．$q_i(t)$ は以下の 2 つの制約条件を満たす必要がある．

$$\sum_{i \in \boldsymbol{I}} q_i(t) = 0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{Q^{FREE}}(t) + \boldsymbol{q}(t) = (Q_1^{FREE}(t) + q_1(t), \cdots, Q_N^{FREE}(t) + q_N(t)) > \boldsymbol{0} \tag{5}$$

式 (2.4) は運び出される自転車台数と運びこまれる自転車台数が一致することを意味する．式 (2.5) は，各駐輪場から予約されている自転車を除いた駐輪台数以上の自転車を運び出すことはできないことを意味する．$\boldsymbol{Q^{FREE}}(t)$, $\boldsymbol{q}(t)$ はそれぞれ，$Q_i^{FREE}(t)$ と $q_i(t)$ を並べたベクトルである．$\boldsymbol{q}(t)$ は式 (2.4), (2.5) を満たす整数ベクトルとして決定される必要がある．再配置にかかる輸送時間は出発地・目的地の駐輪場によらず一律（τ 分）であり，時刻 $t + \tau$ に自転車が届けられる．なお，再配置が行われている間も貸し出し中, 予約中の自転車があるため，$Q_i^{FREE}(t) + q(t) = \bar{Q}_i$ になるように再配置を行うことはできない．

以上の前提の下で，$\boldsymbol{q}(t)$ の決定ルールを以下のように設定する：$Q_i^{FREE}(t) + q(t)$ が目標駐輪台数 $\bar{Q}_i$ に比例するように $q(t)$ を決定する．$\bar{Q}_i$ が高い駐輪場は需要も高いと考えられるため，再配置後の駐輪台数が $\bar{Q}_i$ に比例するような配分は，空車状態を防ぐ上で有用だと考えられる．また，$\bar{Q}_i$ が高い駐輪場は容量も大きいと考えられるため，満車状態を防ぐ上で有用だと考えられる．ただし，$q(t)$ が整数であるため，以上のルールは厳密に適用できない．そこで，近似的な比例配分ルールを定式化する．

$$Q_i^{FREE}(t) + \hat{q}_i(t) = \bar{Q}_i \cdot \frac{\sum_{j \in \boldsymbol{I}} Q_j^{FREE}(t)}{\sum_{j \in \boldsymbol{I}} \bar{Q}_j} (i \in \boldsymbol{I}) \tag{6}$$

まず，$q_i(t)$ が実数値を取れると仮定して，$Q_i(t) + \hat{q}_i(t)$ が $\bar{Q}_i$ に比例するような $\hat{q}_i(t)$ を求める．これは式 (2.6) によって求められる．このように求められた $\hat{q}_i(t)$ を四捨五入して $q_i(t)$ とする．ただし，単純な四捨五入では式 (2.4) が満たされないことがあるので，その場合は $\hat{q}_i(t)$ と $q_i(t)$ の乖離が小さくなるように適宜調整する．具体的には，単純な四捨五入では $\sum_{i \in \boldsymbol{L}(t)} q_i(t)$ が正になる場合には,「$q_i(t) - \hat{q}_i(t)$ が最大の i を探して $q_i(t)$ を 1 減らす」という作業を繰り返す．逆に，$\sum_{i \in \boldsymbol{L}(t)} q_i(t)$ が負になる場合には,「$q_i(t) - \hat{q}_i(t)$ が最小の i を探して $q_i(t)$ を 1 増やす」という作業を繰り返す．以上の決定ルールは，$Q_i^{FREE}(t)$ と $\bar{Q}_i$ のベクトルから $q_i(t)$ のベクトルを決定するものである．そこで，表記の簡略化のために，このルールをベクトル関数 $\boldsymbol{G}$ として定義する．

$$\boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{Q^{FREE}}(t), \bar{\boldsymbol{Q}}) \tag{7}$$

再配置には 1 回当たり F^d 円の固定費用が発生する．さらに，輸送される自転車 1 台につき c^d 円の可変費用が発生する．したがって，時刻 t の再配置にかかる費用は，

$$F^d + c^d \sum_{i \in \boldsymbol{I}} [q_i(t)]^+ \tag{8}$$

と表される．

(2) 離散イベントシミュレーション

以上でモデルの前提条件を全て記したが，残念ながら，このモデルにおける事業者の費用や利潤（の期待値）を解析的に分析することはできない．なぜなら，このモデルは連続時間のマルコフモデルであるものの，モデル内の状態変数が取り得る値の組み合わせは膨大であり，それらを列挙して状態遷移行列を定式化するようなことはできないためである．このようなモデルを分析するためには，離散イベントシミュレーションが必要となる．システムの状態が不連続に変化する場合には状態を変化させる事象が生起する時刻に合わせて時間を進行させる可変時間増分法という時間の進行法が取られる。可変時間増分法によるシミュレーションでは、状態を遷移させる事象を列挙した Event transition table を用意し、それを基に最早事象を探索し、その生起時刻まで時間を進めるとともに、生起事象に応じてシステムの諸状態の遷移処理を行い、Event transition table を更新するという形で構成される。本研究では可変時間増分法による離散イベントシミュレーションを行い自転車シェアリング事業の分析を行う。

(3) Event transition table

上記モデルの Event transition table は次のようになる．

イベント 0 は初期化を表す．イベント 1 は x^{START} から x^{GOAL} に向かう利用者の発生を表す．イベント 2_{ij} は駐輪場 i から j に向かう利用者の駐輪場 i への到着を表す．イベント 3_i は自転車シェアリングの利用を終了した利用者の駐輪場 i への到着を表す．イベント 4 は再配置の開始を表し, イベンと 5 は再配置の終了を表す．

表–1 Event transition table

No.	Event
0	$Q_i = \bar{Q}_i(\forall i \in \boldsymbol{I})$; $Q_i^{FREE} = \bar{Q}_i(\forall i \in \boldsymbol{I})$; $x_i = \frac{i-1}{N}L(\forall i \in \boldsymbol{I})$; $t_i^- = 0(\forall i \in \boldsymbol{I})$; $C = 0$; $R = 0$; $V = 0$; $schedule(1, Exp(\lambda))$; $schedule(4, T)$;
1	$x^{START} = U(0, L)$; $x^{GOAL} = U(0, L)$; $Find(i, j)\, that\, minimizes\, cost^{CYCLE} =$ $(p+\beta)\frac{dist(x_i,x_j)}{s^{CYCLE}} + \frac{\beta[dist(x^{START},x_i)+dist(x^j,x^{GOAL})]}{s^{WALK}}$ $and\, that\, satisfies\, Q_i^{FREE} > 0$ $If\, not\, found,\, set\, cost^{CYCLE} = \infty$; $cost^{ALT} = \beta \cdot \frac{dist(x^{START},x_{GOAL})}{U(\underline{s}^{ALT},\bar{s}^{ALT})}$; $If\, cost^{CYCLE} \leq cost^{ALT}\, then\, \{$ $Q_i^{FREE} -= 1$; $R += p \cdot \frac{dist(x_i,x_j)}{s^{CYCLE}}$; $V += cost^{ALT} - cost^{CYCLE}$; $schedule(2_{ij}, \frac{dist(x^{START},x_i)}{s^{WALK}}$; $\}$ $schedule(1, Exp(\lambda))$;
2_{ij} $(ij \in \boldsymbol{\Omega})$	$C += (t - t_i^-) \cdot c^o[Q_i(t) - S_i]^+$; $t_i^- = t$; $Q_i -= 1$; $schedule(3_j, \frac{dist(x_i,x_j)}{s^{CYCLE}})$;
3_i $(i \in \boldsymbol{I})$	$C += (t - t_i^-) \cdot c^o[Q_i(t) - S_i]^+$; $t_i^- = t$; $Q_i += 1$; $Q_i^{FREE} += 1$;
4	$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{Q^{FREE}}, \bar{\boldsymbol{Q}})$; $C += (t - t_i^-) \cdot c^o[Q_i(t) - S_i]^+(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $t_i^- = t(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $Q_i += q_i(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $Q_i^{FREE} += q_i(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $C += F^d + c^d \sum_{i \in \boldsymbol{I}}[q_i]^+$; $schedule(5, \tau)$; $schedule(4, T)$;
5	$C += (t - t_i^-) \cdot c^o[Q_i(t) - S_i]^+(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $t_i^- = t(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $Q_i += q_i(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$; $Q_i^{FREE} += q_i(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_i < 0)$;

$\boldsymbol{I}$ は駐輪場の集合を表す．イベント 2 は各 OD に対応する N^2 種類, イベント 3 は各駐輪場に対応する N 種類存在する．

イベント 0 では，時刻 0 における変数の設定を行う．駐輪場 i の時刻 0 における駐輪台数は $\bar{Q}_i$ に等しいとし，Q_i^{FREE} は $\bar{Q}_i$ に等しいとする．このことは，時刻 0 において，自転車を借りている利用者が一人もいないことを意味する．駐輪場は円周上に等間隔に配置する．t_i^- は駐輪場 i で駐輪台数の変化が生じた最後の時刻を表す変数であり，その初期値は 0 に設定する．C, R, V はそれぞれ，時刻 0 以降に発生した事業者の費用、事業者の収入、利用者の直接効用の総額であり，定義より，時刻 0 においては 0 である．イベントは全てプログラムのコード形式で書かれている．$\forall$ は繰り返し処理を表す記号であり，例えば $(\forall i \in \boldsymbol{I})$ は「全ての $\boldsymbol{I}$ の要素 i について当該の命令を実行せよ」という意味である．$schedule(n, \Delta t)$ はイベントの設定（スケジュール）を行うサブルーチンであり,「イベント n の発生を Δt 分後に設定せよ」という命令である．$Exp(\lambda)$ は平均 $1/\lambda$ の指数分布に従う乱数を意味する．時刻 0 においては，イベント 1 の全種類と，イベント 4 をスケジュールする．イベント 1 は $Exp(\lambda)$ に従う確率的な間隔を置いて発生するため，$Exp(\lambda)$ 分後にイベント 1 をスケジュールする．イベント 4 は T 分の間隔を置いて発生するため，T 分後にイベント 4 をスケジュールする．

x^{START} から x^{GOAL} に向かう利用者の発生イベントでは, $U(0, L)$ の一様分布に従い確率的に発生する円周上のある点からある点へ, すなわち x^{START} から x^{GOAL} に向かう利用者が発生する. 利用者は自転車シェアリングと代替交通手段のコストを比較して, 自転車シェアリングにかかる費用が下回った場合これを利用し，　その場合 Q_i^{FREE} が 1 台減少し, 利用時間に応じた収益 R が加算され, $cost^{ALT} - cost^{CYCLE}$ が利用者の効用 V として加算される．そして $dist(x^{START}, x_j)/s^{WALK}$ 分後にイベント 2_{ij} をスケジュールする. 利用者の自転車シェアリングの利用の有無によらず，イベント 1 は $Exp(\lambda)$ に従う確率的な間隔を置いて発生するため，$Exp(\lambda)$ 分後にイベント 1 をスケジュールする.

駐輪場 i から j に向かう利用者の駐輪場 i への到着イベントでは，利用者への自転車の貸し出しが行われる．このとき，駐輪場 i の駐輪台数が容量を超過している場合には，前回に駐輪台数の変化が生じた時刻から現在時刻までの間に発生した容量超過費用を C に加算する必要がある．$+=$ と $-=$ は C 言語などで使われる，右辺の数値を左辺の変数に加算，減算する命令を表す記号である．前回に駐輪場 i に駐輪台数の変化が生じた時刻は t_i^- であり，現在時刻は t であるから，この間に生じた容量超過費用は $(t - t_i^-) \cdot c^o[Q_i - S_i]^+$ と表される．この操作は駐輪台数の変化が生じる度に行われる．イベント 3, 4, 5 においても同様の操作があるが，それらの説明は省略する．容量超過費用の加算が完了したら，t_i^- 現在時刻 t に更新する．駐輪場 i から j に向かう利用者への貸し出しが行われると，駐輪台数 Q_i が 1 台減少する．この利用者は，自転車を $dist(x_i, x_j)/s^{CYCLE}$ 分間利用した後に，自転車を駐輪場 j に返却するため, 駐輪場 j への利用者の到着イベント，イベント 3_j を $dist(x_i, x_j)/s^{CYCLE}$ 分後にスケ

ジュールする.

駐輪場 i への利用者の到着イベントでは，駐輪場 i の駐輪台数が 1 台増加する.

再配置の開始イベントでは，輸送される自転車の台数 q の計算と，$q_i < 0$ を満たす駐輪場 i からの自転車の運び出しが行われる．$\forall i \in \boldsymbol{I} | q_i < 0$ は「$q_i < 0$ を満たす全ての $\boldsymbol{I}$ の要素 i について当該の命令を実行せよ」という意味である．さらに，再配置費用の加算が行われる．τ 分後には再配置が完了するため，イベント 5 をスケジュールする．イベント 4 は T 分の間隔を置いて発生するため，T 分後にイベント 4 をスケジュールする.

再配置の完了イベントでは，再配置対象の自転車が輸送先の駐輪場に届けられる.

(4) 事業者の最適戦略の分析

以上の離散シミュレーションモデルを用いて，十分に長い時間シミュレーションを行えば，事業者が長期的に得る利潤の単位時間当たり期待値 $E[\Pi]$ を

$$E[\Pi] \cong \frac{1}{\bar{t}}(R - C) - c^q \sum_{i=1}^{N} \bar{Q}_i - c^s \sum_{i=1}^{N} S_i \qquad (9)$$

と求められる．$\bar{t}$ はシミュレーションを行う時間の長さであり，c^q は自転車 1 台当たりの事業者の資本費用であり、c^s はラック 1 つ当たりの土地費用・資本費用である．$E[\Pi]$ の近似値を最大化するような駐輪場数 N・料金 p・再配置間隔 T・初期自転車配置台数 $\bar{Q}_i$・駐輪容量 S_i を求めることにより，事業者の最適戦略を分析できる.

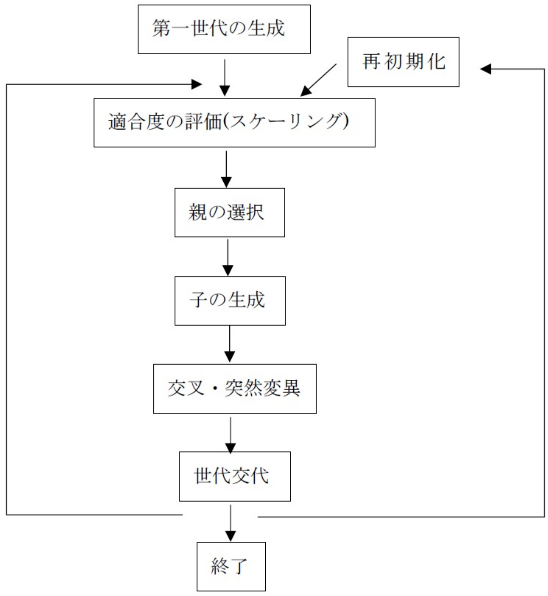
なお, 社会的総余剰を最大化する最適戦略を求める際には,

$$E[W] \cong \frac{1}{\bar{t}}(V - C) - c^q \sum_{i=1}^{N} \bar{Q}_i - c^s \sum_{i=1}^{N} S_i \qquad (10)$$

を最大化すれば良い.

以上より, 前述の Event transition table を基にプログラムを作成した．プログラムでは企業の利潤最大化を最適化の条件として, 到着率 λ とその他各パラメータをインプットしたとき, 最適な駐輪場数 N・料金 p・再配置間隔 T・初期自転車配置台数 $\bar{Q}_i$・駐輪容量 S_i を出力するとともに, 単位時間当たりの社会的余剰・消費者余剰・利潤・収益・費用を出力するようにした．ここで最適化のため遺伝的アルゴリズムを援用している.

(5) 遺伝的アルゴリズム



図–1 遺伝的アルゴリズムのフロー

ここに本研究で用いた遺伝的アルゴリズムのフローを示す. 一世代の個体数と突然変異率は, Haupt and Haupt [6] を参考に Population=8、MutationRate=0.15 とし, 突然変異には Gaussian mutation を利用した．適合度の評価（スケーリング）においては Mitchell [4] を参考に σ スケーリングを利用し, 親の選択においてはルーレット選択を利用した．また交叉には Line crossover を利用した．世代交代の際, DivergenceRate=0.25 として, Population × DivergenceRate × (1- DivergenceRate) 回より連続して子の全滅が起きた場合には再初期化を実行するようにした.

3. 独占の場合のシミュレーション

(1) パラメータの設定

この章では独占の場合について需要（ポワソン到着率）λ を 1.0 ~ 7.0 で変化させインプットした場合について分析を行った．これにより単位時間当たりの期待利潤、社会的余剰が規模に関して逓増することを確認し, 本研究の自転車シェアリングモデルにおける規模の経済を示す．パラメータの設定については以下の表のように行った．シミュレーション時間は 100000 分とし, λ = 1.0 ~ 7.0 のそれぞれの場合についてシミュレーションを行った.

(2) 結果の考察

シミュレーションの結果は分析結果 1 のようになった． 分析結果 2 は社会的余剰 W と利潤 Pi を λ で割っ

表–2 パラメータの設定

F^d	c^d	c^q	c^s	c^o	τ	λ
10000.0	0.0	1.0	2.0	20.0	30.0	1.0 ～ 7.0
L	β	s^{CYCLE}	s^{WALK}	$\underline{s}^{ALT}$	$\bar{s}^{ALT}$	
20000.0	30.0	250.0	80.0	80.0	250.0	

た値を表している.

	λ =1.0	λ =2.0	λ =3.0	λ =4.0	λ =5.0	λ =6.0	λ =7.0
W	13.9	122.0	266.4	360.5	502.6	666.7	815.6
Pi	-37.7	19.3	77.9	129.1	209.0	279.3	364.9
V	51.6	102.7	188.5	231.3	293.7	387.4	450.7
R	59.1	128.7	233.3	306.6	425.0	536.6	618.4
C	96.7	109.4	155.4	177.5	216.0	257.4	253.5
N	12	17	15	17	15	18	19
p	19.2	20.9	20.8	21.8	23.2	22.6	22.5
T	1329.9	1303.1	1303.2	1387.2	1413.5	769.3	716.8
Qbar	1	1	2	2	3	3	3
S	3	2	3	3	4	4	3

図–2 分析結果 1

	λ =1.0	λ =2.0	λ =3.0	λ =4.0	λ =5.0	λ =6.0	λ =7.0
W/λ	13.9	61.0	88.8	90.1	100.5	111.1	116.5
Pi/λ	-37.7	9.6	26.0	32.3	41.8	46.5	52.1

図–3 分析結果 2

2 つの図から, 規模に対して利潤 Pi, 社会的総余剰 W は逓増していることが確認でき、本研究の自転車シェアリングモデルにおける規模の経済が示された. ここで規模の経済が働く理由は需要の不確実性のためである. 等間隔に需要が発生するような場合規模の経済は働かない.

この結果より 2 企業の場合について考えてみる. 一般的に独占状態は社会的に好ましくないとされるが, 先程の結果よりこのモデルでは規模の経済が働くため, 複占状態では需要を企業間で分け合ってしまうために規模の経済を生かせなくなる負の影響が考えられる. そのため 1 企業の独占と 2 企業の複占のそれぞれが社会的に最適となる場合について分析するために, 複占の場合については企業間の競争により料金 p 等を双方が変化させていき均衡に達する状況を考える.

4. 独占と複占の比較分析

(1) 複占の場合のプログラム

複占の場合には, 駐輪場の配置は企業 1 の駐輪場と企業 2 の駐輪場が円周上に等間隔に交互に立地していると仮定する. 各企業の駐輪場数は独占の場合の駐輪場数と同じとし, 全体の駐輪場数は独占の場合の 2 倍になるとものと仮定する. また利用者は企業 1,2 どちらかの駐輪場のみしか利用できない（企業 1 の駐輪場で借りた自転車を企業 2 の駐輪場に返却することは出来ない）ものとする. 以上の前提を基に Event transition table を作成し, 複占の場合のプログラムを作成した.

表–3 複占の場合の Event transition table

No.	Event
0	$Q_{1i} = \bar{Q}_{1i}(\forall i \in \boldsymbol{I_1});$ $Q_{1i}^{FREE} = \bar{Q}_{1i}(\forall i \in \boldsymbol{I_1});$ $Q_{2i} = \bar{Q}_{2i}(\forall i \in \boldsymbol{I_2});$ $Q_{2i}^{FREE} = \bar{Q}_{2i}(\forall i \in \boldsymbol{I_2});$ $x_{1i} = \frac{i-1}{N_1}L(\forall i \in \boldsymbol{I_1});$ $x_{20} = \frac{x_{10}+x_{11}}{2}, x_{2i} = x_{20} + \frac{L-x_{20}}{N_2-1}(i-1)(\forall i \in \boldsymbol{I_2});$ $t_{1i}^{-} = 0(\forall i \in \boldsymbol{I_1});$ $t_{2i}^{-} = 0(\forall i \in \boldsymbol{I_2});$ $C_1 = 0;$ $C_2 = 0;$ $R_1 = 0;$ $R_2 = 0;$ $V = 0;$ $schedule(1, Exp(\lambda));$ $schedule(4_1, T_1);$ $schedule(4_2, T_2);$
1	$x^{START} = U(0, L);$ $x^{GOAL} = U(0, L);$ $Find(i,j)\, that\, minimizes\, cost_1^{CYCLE} =$ $(p_1+\beta)\frac{dist(x_{1i},x_{1j})}{s^{CYCLE}} + \frac{\beta[dist(x^{START},x_{1i})+dist(x^{1j},x^{GOAL})]}{s^{WALK}}$ $and\, that\, satisfies\, Q_{1i}^{FREE} > 0, i \in \boldsymbol{I_1}, j \in \boldsymbol{I_1}$ $If\, not\, found,\, set\, cost_1^{CYCLE} = \infty;$ $Find(i,j)\, that\, minimizes\, cost_2^{CYCLE} =$ $(p_2+\beta)\frac{dist(x_{2i},x_{2j})}{s^{CYCLE}} + \frac{\beta[dist(x^{START},x_{2i})+dist(x^{2j},x^{GOAL})]}{s^{WALK}}$ $and\, that\, satisfies\, Q_{2i}^{FREE} > 0, i \in \boldsymbol{I_2}, j \in \boldsymbol{I_2}$ $If\, not\, found,\, set\, cost_2^{CYCLE} = \infty;$ $Choose\, h\, that\, minimizes\, cost_h^{CYCLE};$ $cost^{ALT} = \beta \cdot \frac{dist(x^{START},x_{GOAL})}{U(\underline{s}^{ALT},\bar{s}^{ALT})};$ $If\, cost^{CYCLE} \leq cost^{ALT}\, then\, \{$ $Q_{hi}^{FREE} -= 1;$ $R_h += p_h \cdot \frac{dist(x_{hi},x_{hj})}{s^{CYCLE}};$ $V += cost^{ALT} - cost_h^{CYCLE};$ $schedule(2_{hij}, \frac{dist(x^{START},x_{hi})}{s^{WALK}};$ $\}$ $schedule(1, Exp(\lambda));$
2_{hij} $(h \in 1, 2)$ $(ij \in \boldsymbol{\Omega_h})$	$C_h += (t - t_{hi}^{-}) \cdot c^o[Q_{hi}(t) - S_{hi}]^+;$ $t_{hi}^{-} = t;$ $Q_{hi} -= 1;$ $schedule(3_{hj}, \frac{dist(x_{hi},x_{hj})}{s^{CYCLE}});$
3_{hi} $(h \in 1, 2)$ $(i \in \boldsymbol{I_h})$	$C_h += (t - t_{hi}^{-}) \cdot c^o[Q_{hi}(t) - S_{hi}]^+;$ $t_{hi}^{-} = t;$ $Q_{hi} += 1;$ $Q_{hi}^{FREE} += 1;$
4_h	$\boldsymbol{q_h} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{Q_h^{FREE}}, \boldsymbol{\bar{Q}_h});$ $C_h += (t - t_{hi}^{-}) \cdot c^o[Q_{hi}(t) - S_{hi}]^+(\forall i \in \boldsymbol{I_h} \mid q_{hi} < 0);$ $t_{hi}^{-} = t(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$ $Q_{hi} += q_{hi}(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$ $Q_{hi}^{FREE} += q_{hi}(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$ $C_h += F^d + c^d \sum_{i \in \boldsymbol{I}}[q_{hi}]^+;$ $schedule(5_h, \tau);$ $schedule(4_h, T_h);$
5_h	$C_h += (t - t_{hi}^{-}) \cdot c^o[Q_{hi}(t) - S_{hi}]^+(\forall i \in \boldsymbol{I_h} \mid q_{hi} < 0);$ $t_{hi}^{-} = t(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$ $Q_{hi} += q_{hi}(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$ $Q_{hi}^{FREE} += q_{hi}(\forall i \in \boldsymbol{I} \mid q_{hi} < 0);$

(2) 分析の手法

前述のプログラムを用いてシミュレーションを行い, 独占の場合の最適戦略と複占の場合の均衡となる戦略を求め, 需要（ポワソン到着率）の大小によって社会的余剰について比較したとき, 独占の方が好ましい場合と複占の方が好ましい場合がそれぞれ存在することを示す. 分析の手法であるが, 具体的な手順を以下に示す.

step 1 独占の場合のプログラムを用いて, あるポワソン到着率における最適な駐輪場数・料金・再配置間隔・初期自転車配置台数・駐輪容量を求め, 独占の場合の社会的余剰を求める.

step 2 複占の場合について独占の場合の企業の戦略を企業 2 の戦略として所与とし, 企業 1 の最適応答としての最適戦略を求める.

step 3 先程求めた企業 1 の戦略を企業 2 の戦略として同じように所与としたときの企業 1 の最適戦略を求める. このようにしてプログラムを回していき企業 1,2 の戦略が等しくなったとき均衡に達したとみなす.（実際には厳密に企業 1,2 の戦略が一致することはないため, 値が近しくなったとき均衡に達したと考える）

ここで均衡となる戦略を求める際, 最適化する変数を増やすと戦略が収束しないため, 最適化し均衡を求める変数は料金 p・初期自転車配置台数 $\bar{Q}_i$・駐輪容量 S_i としている. （再配置間隔 T はシミュレーション時間にも依存すると考えられ, 均衡を求めることは容易でないと考えられるため, 最適化する変数からは除外し, 独占の場合と複占の場合で同一の戦略をとるものとしている）また, 料金・初期自転車配置台数・駐輪容量を同時に最適化しようとすると企業がとり得る戦略の組み合わせは膨大になるため, それぞれ個別で均衡を求める作業を行った. シミュレーション時間は 100000 分に設定し, 各パラメータは第 3 章で用いたものと同様に設定をし, $\lambda = 1.0 \sim 7.0$ の範囲で分析を行った. 独占の場合の結果**図-4** は前章の**図-2** と同じものであるが複占の場合との比較のため付した.

表–4 パラメータの設定

F^d	c^d	c^q	c^s	c^o	τ	λ
10000.0	0.0	1.0	2.0	20.0	30.0	1.0 ∼ 7.0
L	β	s^{CYCLE}	s^{WALK}	$\underline{s}^{ALT}$	$\bar{s}^{ALT}$	
20000.0	30.0	250.0	80.0	80.0	250.0	

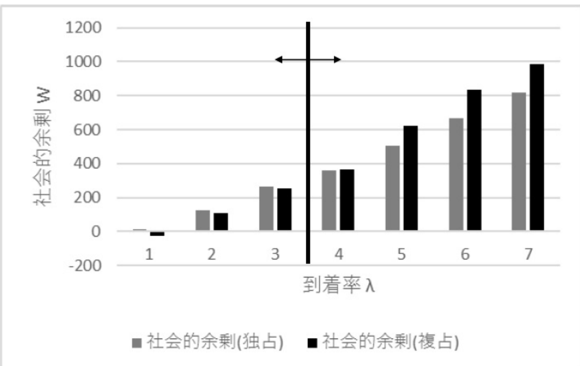
(3) シミュレーション結果とその考察

	λ=1.0	λ=2.0	λ=3.0	λ=4.0	λ=5.0	λ=6.0	λ=7.0
W	13.9	122.0	266.4	360.5	502.6	666.7	815.6
Pi	-37.7	19.3	77.9	129.1	209.0	279.3	364.9
V	51.6	102.7	188.5	231.3	293.7	387.4	450.7
R	59.1	128.7	233.3	306.6	425.0	536.6	618.4
C	96.7	109.4	155.4	177.5	216.0	257.4	253.5
N	12	17	15	17	15	18	19
p	19.2	20.9	20.8	21.8	23.2	22.6	22.5
T	1329.9	1303.1	1303.2	1387.2	1413.5	769.3	716.8
Qbar	1	1	2	2	3	3	3
S	3	2	3	3	4	4	3

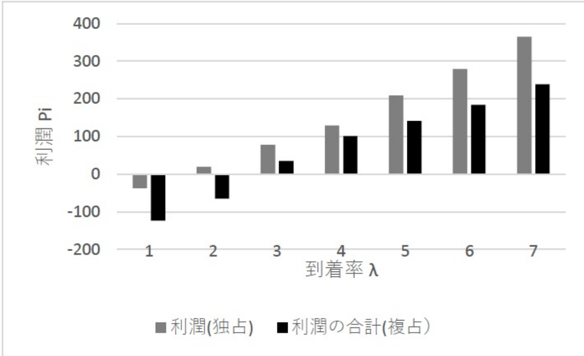
図–4 分析結果 (独占)

	λ=1.0	λ=2.0	λ=3.0	λ=4.0	λ=5.0	λ=6.0	λ=7.0
W	-33.7	106.5	256.0	362.9	621.7	833.6	984.4
Pi[0]	-56.4	-33.4	18.6	54.8	80.5	107.0	131.3
Pi[1]	-67.7	-31.6	16.8	46.4	60.4	76.8	107.4
V	95.5	171.4	229.0	261.6	480.7	649.8	745.7
R[0]	39.6	99.5	110.5	157.4	230.7	281.3	310.9
R[1]	35.7	81.4	109.7	151.7	219.1	263.8	297.8
C[0]	96.0	112.8	91.9	102.5	150.1	174.2	179.6
C[1]	103.3	133.0	92.9	105.2	158.7	187.0	190.4
N[0]	12	17	15	17	15	18	19
p[0]	14.6	18.6	17.3	19.9	16.8	15.4	14.9
T[0]	1329.9	1303.1	1303.2	1387.2	1413.5	769.3	716.8
Qbar[0]	1	1	1	1	2	2	2
S[0]	3	2	2	2	3	3	3
N[1]	12	17	15	17	15	18	19
p[1]	14.6	18.3	17.1	20.1	16.9	15.7	15.0
T[1]	1329.9	1303.1	1303.2	1387.2	1413.5	769.3	716.8
Qbar[1]	1	1	1	1	2	2	2
S[1]	3	2	2	2	3	3	3

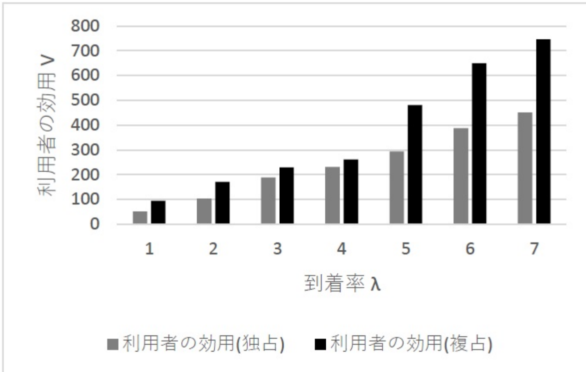
図–5 分析結果 (複占)



図–6 社会的余剰の比較



図–7 利潤の比較



図–8 利用者の効用の比較

分析の結果は図のようになった．$\lambda = 4.0$ 以上のケースでは複占の場合の方が社会的余剰が大きくなる結果となり, $\lambda = 3.0$ 以下のケースでは独占の場合の方が社会的余剰が大きくなるという結果になった．どのケースにおいても複占の場合各企業の利潤の総計は独占の場合に比べて小さくなっていることが確認できる．またどのケースにおいても複占の場合の利用者の効用は独占の場合に比べて大きくなっていることが確認できる．このような結果になる理由について説明をする．複占の場合企業間の競争が発生するほか, 需要を 2 社で分け合うことで, 規模の経済を生かせなくなることにより利潤は小さくなってしまう．一方で, 利用者の効用は企業間の競争により大きくなる．このバランスにより独占と複占のどちらが社会的余剰の面で適しているかが定まるが, 需要が大きくなるほど複占で需要を分け合うことにより規模の経済を生かせなくなる各企業にとっての負の影響が小さくなるため, 結果的に需要が小さいときには独占の場合の方が社会的余剰が大きくなり, 需要が大きいときには複占の方が社会的余剰が大きくなる結果となる．

5. 結論と今後の課題

本研究では自転車シェアリングにおいて主要な問題として考えられる空車・満車状態を考慮するために, 離散イベントシミュレーションを用い, システムを効率的に供給するための企業の最適戦略を求める最適化アルゴリズムを開発した. 独占の場合について考えることで自転車シェアリングにおける規模の経済を示した. 次に 2 企業が存在し, 価格競争等の競争が発生することである均衡に達する状況について考えることで, 企業が利潤を最大化する戦略をとったとき, 独占と複占のどちらが社会的余剰の面で適しているかについて, 需要が小さいときには独占の場合の方が社会的余剰が大きくなり, 需要が大きいときには複占の方が社会的余剰が大きくなる結果になることを示した. これらの結果より自転車シェアリング事業に関して, 需要が十分に大きい場合, 多企業の寡占状態, 需要が十分に小さい場合 1 企業の独占状態が社会的に望ましいといえる. 都市部など十分な需要が見込める場合には, 自転車シェアリング事業を拡充させていくうえで新規参入企業に補助金を出すなど, 積極的に企業の参入を促す方が良いといえ, 他方あまり大きな需要が見込めない地域の場合には, 1 社の独占を認め企業の参入を制限すべきであるといえる.

本研究の主要な問題点を述べる. 本研究では複占の場合の各企業の駐輪場数は独占の場合と同一としており, これは同規模の新規参入企業の存在を仮定しているような形になっているが, 現実的にはその限りではないといえ, 企業の参入過程については議論の必要がある. また複占の場合の各企業の駐輪場数は独占の場合と同一とし, 駐輪場数を最適化を行う変数から除外したことで, 各企業にとって真に最適な戦略をとれているとはいえない. そのため社会的余剰や利潤が過大評価または過小評価されている可能性があり, モデルやプログラム, 分析手法に改良を加える余地があるといえる.

参考文献

1) 今井研太郎：需要の不確実性を考慮した自転車シェアリングの最適料金探索アルゴリズムの開発, 2017.
2) 飯田恭敬, 岡田憲夫： 土木計画システム分析-現象分析編-, 森北出版, 11 章, pp.237-255, 1992.
3) Yourim Yoon and Yong-Hyuk Kim : The Roles of Crossover and Mutation in Real-Coded Genetic Algorithms , Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications, Gao,s. ed. ,Intech , 2012.
4) Mitchell,M. : An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press, 1998.
5) A.A.Hopgood and A.Mierzejewska : Transform Ranking -a New Method of Fitness Scaling in Genetic Algorithms, Research and Development in Intelligent Systems, London, Springer, pp.349-354, 2009.
6) Haupt, R. L. and Haupt, S. E. : Optimum population size and mutation rate for a simple real genetic algorithm that optimizes array factors, ACES Journal, Vol.15, Issue 2, pp.93-102, 2000.
7) 北村亮：レンタサイクル実用化に向けたシミュレーション, 2009.

(2019. 3. 10 受付)

RESEARCH ON THE OPTIMAL STRATEGY OF COMPANY IN BIKE SHARING

Takumi HARADA，Shunsuke SEGI
and Kiyoshi KOBAYASHI

In bike sharing business, disutility by the full and vacant state of parking lots is considered as main problem. Operator is required to take the problem into account and determine optimal price, number of bicycles, interval of redistribution, and so on to supply system efficiently. In this paper, we develop the algorithms to determine the operator's optimal strategy and show the economies of scale in bike sharing. Also, this paper focuses on the process of reaching the equilibrium by the competition between two companies, shows two cases that monopoly or duopoly is suitable for social surplus depending on the size of demand.