

自転車共同利用システムにおける 自転車管理方法の最適化

慶應義塾大学 理工学研究科
古城 翔麻

自転車共同利用システム(コミュニティサイクルシステム)

- ・借りた場所と異なる場所に返却可能な
乗り捨て型レンタル自転車
(実施事例)パリ・台北・横浜
- ・自転車の貸出返却をポートで行う
- ・ICカード等を利用した無人貸出
- ・利用時間が長い程, 累進的に高額にする
料金システム(短時間の利用を促進)
- ・放置自転車対策や都市内での移動の
利便性を高める目的等で導入



横浜市のポート
(貸出・返却を処理を行う)

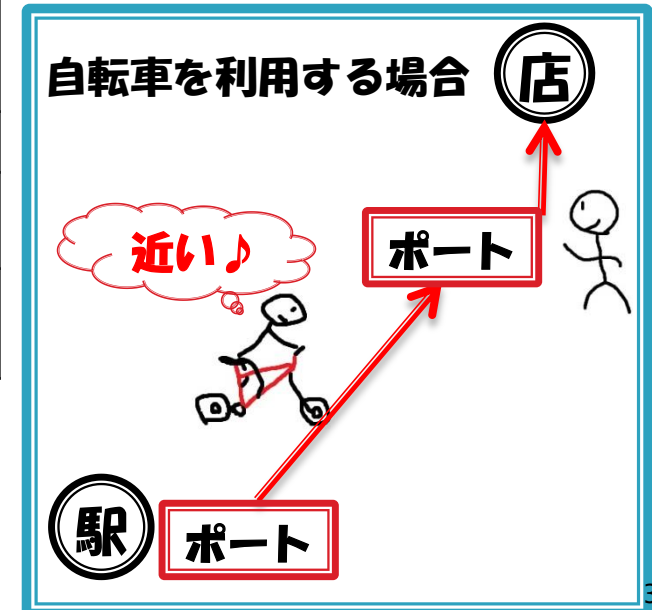
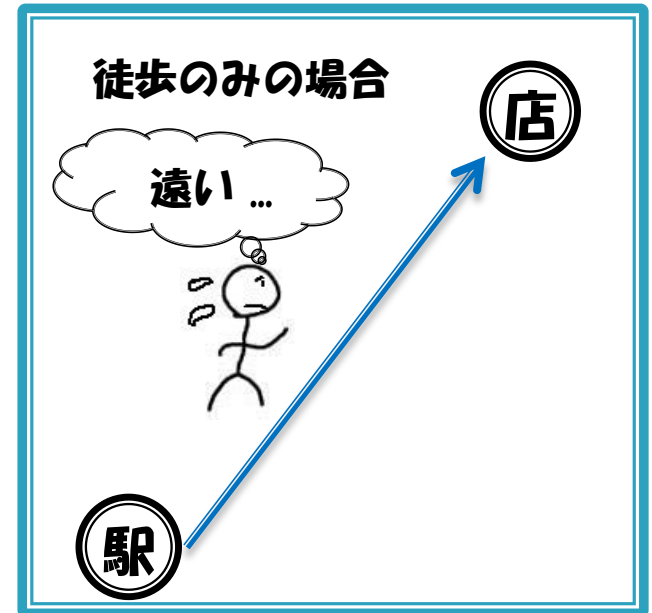
利用イメージ

(例) 駅から1~2km程度離れた店へ移動

- ・駅の近くで自転車を借り、店の近くのポートで自転車を返却する
- ・徒歩では遠いが、バスやタクシーを使う程でない距離を移動する時などに便利

従来のレンタル自転車システムとの違い

	従来	コミュニティサイクル
料金体系	1回1000円程度	基本料金+追加料金 (例)100円+30分ごとに100円
利用時間	1日	30~60分程度
主な利用目的	観光など	通勤通学などの移動 (駅⇔学校・会社)
貸出返却場所 (ポートの数)	少ない (1,2ヶ所程度)	多数 (300mに1つ設置)

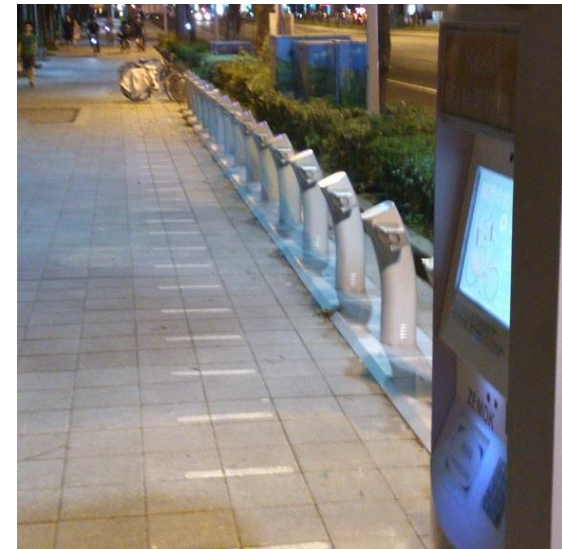


コミュニティサイクルの問題点

- ・ポートの個数, 位置の決定方法
- ・収益性が低い(維持費が高い)
- ・各ポートの自転車の偏り

⇒ 自転車の貸出・返却ができない

- ・貸出ができないと他の手段で移動することになる
- ・返却ができないとポートで足止めされてしまう
- ・自転車が使えないリスクをできるだけ減らす必要がある



空車



満車

貸出や返却できない問題の対策

- ①ポートの自転車の台数を増やす ⇒ 借りられない人が減少
 - ②ポートの自転車容量(ラック数)を増やす ⇒ 返却できない人が減少
 - ③再配置をする(自転車をトラックで運ぶ) ⇒ 各ポートの自転車の偏りが緩和
- ・コスト等を考えると①～③のバランスの取り方が難しい
 - ・現状では決定的な運営手法は確立されていない

本研究の目的

- ・横浜市 of 横浜baybikeを例として現状を分析
- ・自転車台数やラック数など、規模が適切か考察する
- ・貸出・返却需要を満たす効率の良い自転車台数、容量を求める

本研究の事例：横浜baybike

- ・横浜市コミュニティサイクル
- ・11年4月～：社会実験開始
14年4月～：本格運用開始
- ・横浜みなとみらい地区に34ポート
- ・営業時間6:00～21:30
- ・webで各ポートの自転車台数を確認可能
- ・横浜市とNTTドコモが運営
- ・30分まで100円その後30分ごとに100円
- ・月額利用の場合、30分以内の利用であれば何度使っても無料
- ・クレジットカード決済のみ



ポートマップ

料金体系

基本料金	100円(30分)
超過金	100円(30分ごと)
1回利用	基本料金+超過金
月額会員	1500円+超過金

横浜baybikeの運営方法

- ・自転車の配置台数220台程度
(全体で400台管理しており, 残りは倉庫に)
- ・大半のポートのラック数は7~14台程度
- ・営業終了後に毎日トラックで台数調整
- ・ポートに自転車が無い場合, 運営側に連絡をすれば, 自転車を
持ってきてもらえる
- ・ポートが満車の場合, 運営側に連絡をすれば返却処理を行ってもらえる
(自転車はラックに入れず後で運営側が回収)
- ・運営側は営業時間中も定期的にトラックで台数調整をしている
(方法は運営側の勘と経験)
- ・隣接するポートの距離は300m~400m程度

S⁴を用いたシミュレーション

自転車台数変化のシミュレーション

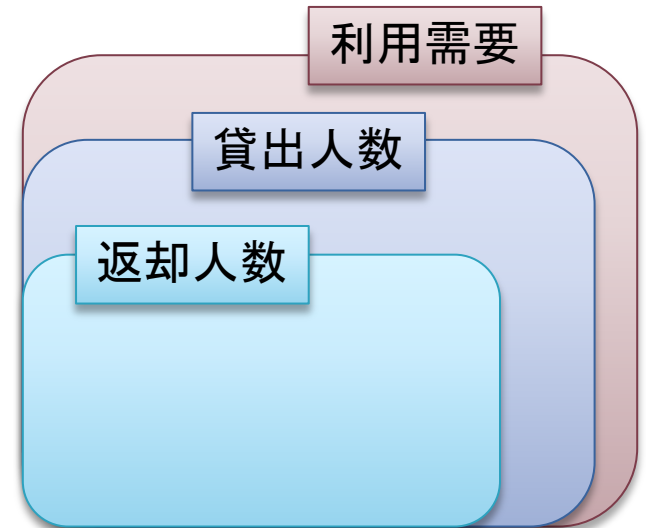
- ・S⁴を利用して横浜baybikeの1日の利用状況を社会実験報告書のデータを使用して再現する
- ・各ポートにおける自転車台数の変化によって自転車を借りられない人や返せない人がどれくらいいるのか調べる
- ・利用者が自転車を貸出できる確率 P_O 、返却できる確率 P_D 、貸出返却ともにできる確率 $P_O P_D$ を求める

$$P_O(\mathbf{B}, \mathbf{R}) = \frac{(\text{貸出人数})}{(\text{利用需要})} \quad P_D(\mathbf{B}, \mathbf{R}) = \frac{(\text{返却人数})}{(\text{貸出人数})}$$

ポート k において初期自転車台数 B_k 、ラック数 R_k

$$\mathbf{B} = (B_1, \dots, B_n), \quad \mathbf{R} = (R_1, \dots, R_n)$$

* P_O と P_D の積 $P_O P_D$ は貸出・返却ともにできる確率



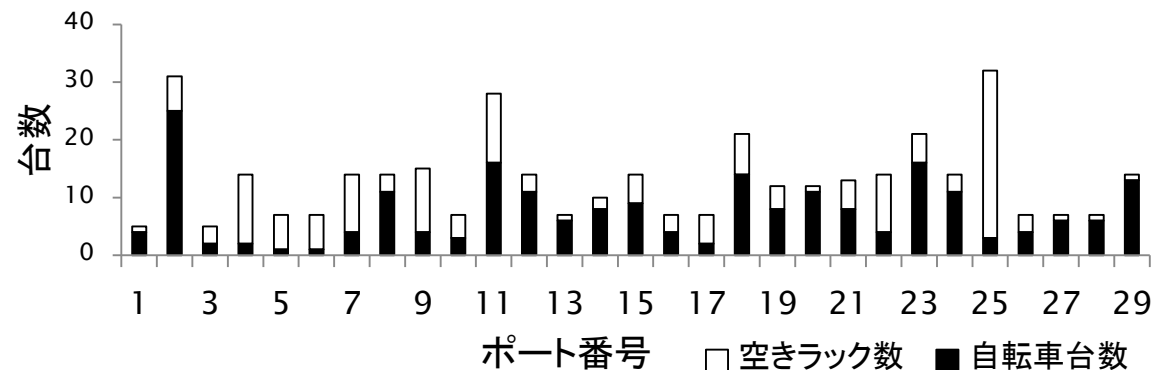
シミュレーションに必要なデータ

- ・利用者の到着頻度(各時刻に何人が利用するのか)
- ・ポートのODペア数(どのポートで自転車を借りどのポートで返しているのか)
- ・自転車の利用時間(利用者が何分自転車を利用しているのか)

⇒ 社会実験報告書のデータを使用

- ・各ポートのラック数
- ・営業開始時の各ポートの自転車台数

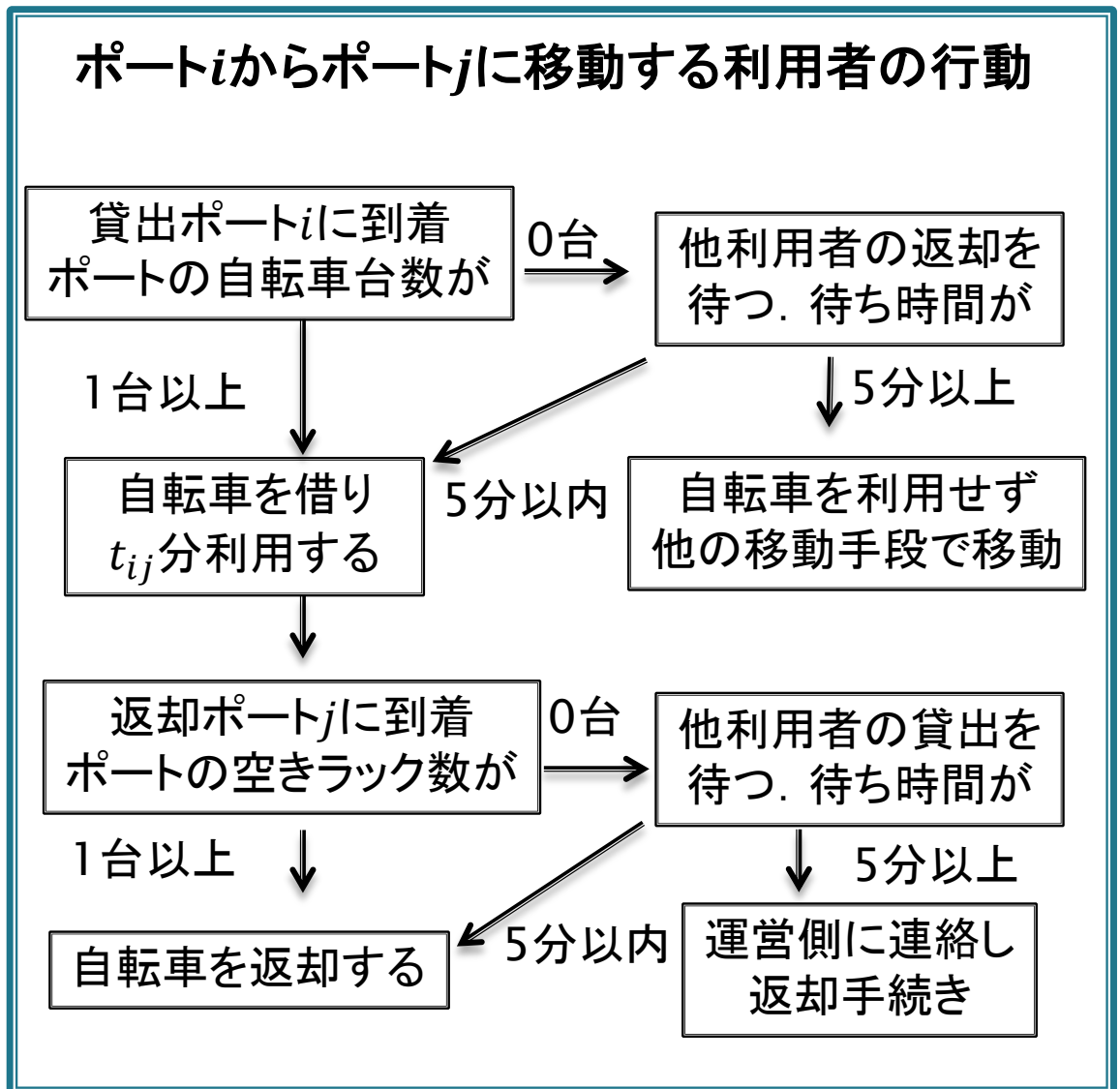
⇒ 横浜baybikeのホームページから確認
(自転車台数217台, ラック数380台)



各ポートの自転車台数とラック数の現状

シミュレーションの設定: 利用者の行動

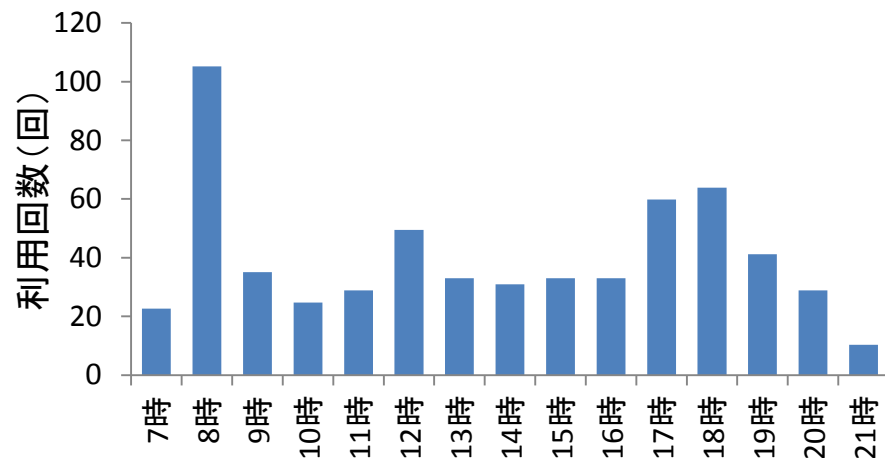
- ・ポート*i*からポート*j*に移動する利用者をランダムに発生させる.
- ・利用者の到達頻度, 貸出ポートと返却ポートの決定方法, 利用時間は横浜baybikeの社会実験報告書のデータを参考にした.



シミュレーションの設定：発生頻度，貸出・返却ポート

利用者の発生頻度

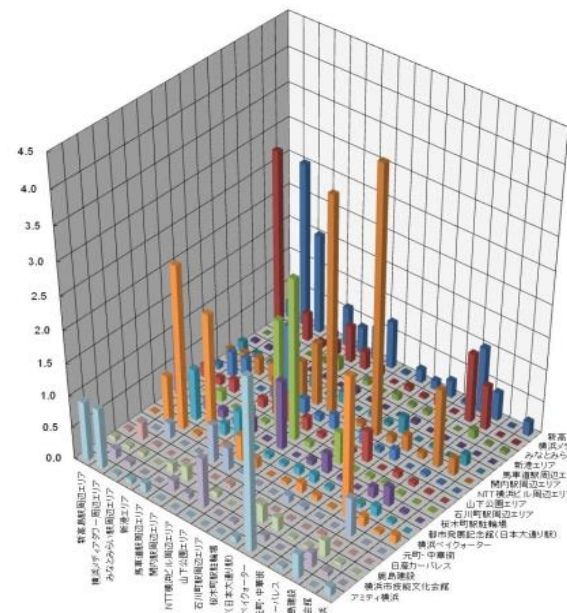
- ・全ポートで1日平均600人利用と設定
- ・利用者の到着間隔はポアソン到着
- ・時間帯ごとに利用者数を重み付け



各時間帯による平均利用回数

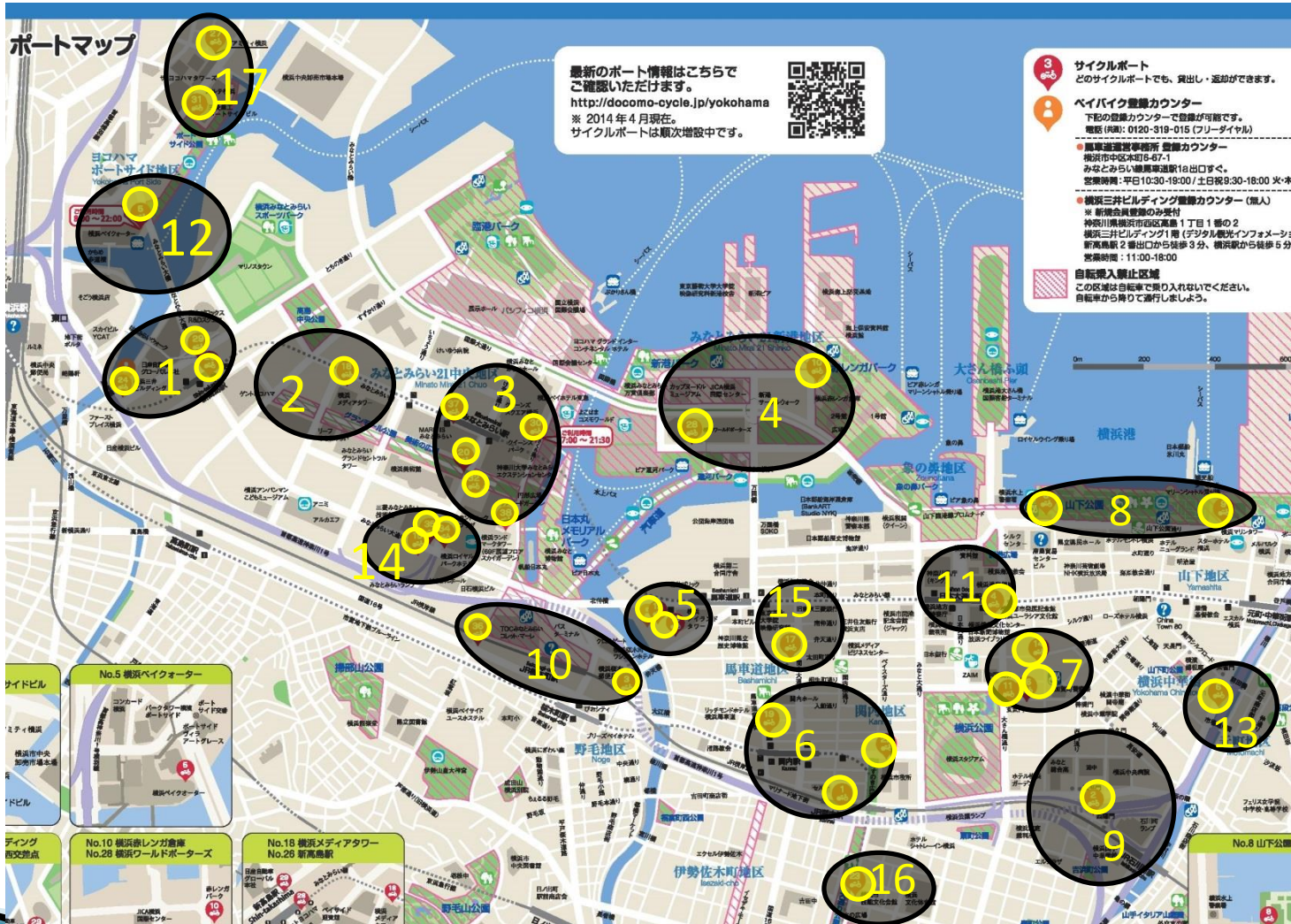
貸出・返却ポート

- ・エリア全体を17エリアに分けたエリア間のODデータ(出発点と到着点への移動回数を使用)
- ・ODデータは時間帯によって変わる
- ・距離の近いポート(50m以内)を1つのポートとして考える(34→29ポート)



ODデータ

シミュレーションの設定:ポートマップ・エリア分け



シミュレーションの設定：利用時間決定方法

- ・利用時間を各ODペアの移動時間分布より決定
- ・一部のODは社会実験のデータを使用
- ・利用時間分布データは一部のODのみ存在
⇒ 利用時間分布がOD間の距離(最短移動時間)に依存していると仮定して分布を推定
(OD間が遠いほど利用時間のばらつきが大きい)

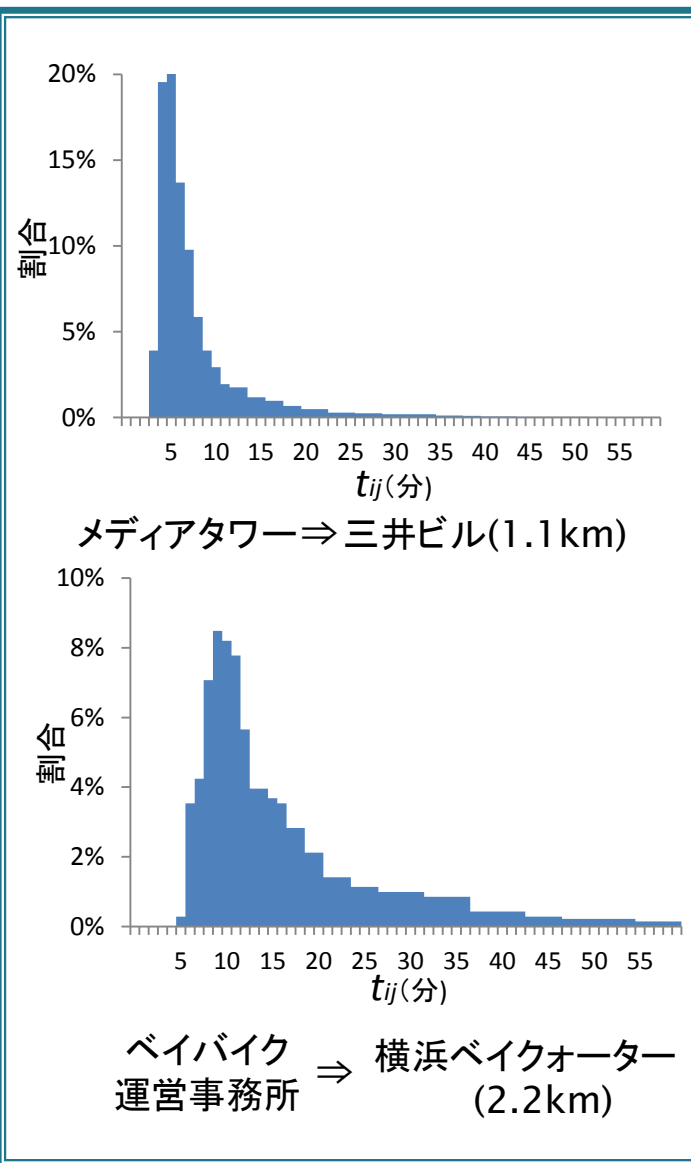
$$t_{ij} = t_{\min} + t_c$$

t_{ij} : ある人の*i*ポートから*j*ポートへの利用時間

t_{\min} : 区間の最短移動時間

t_c : t_{\min} から余分に利用した時間

t_c は対数正規分布に近い分布をしており,
 t_{\min} から利用時間分布を決定する



シミュレーションの設定： t_c の分布の推定

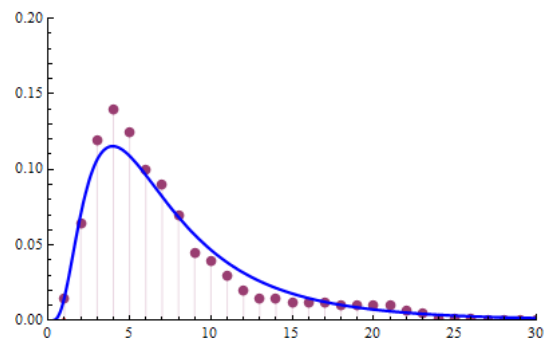
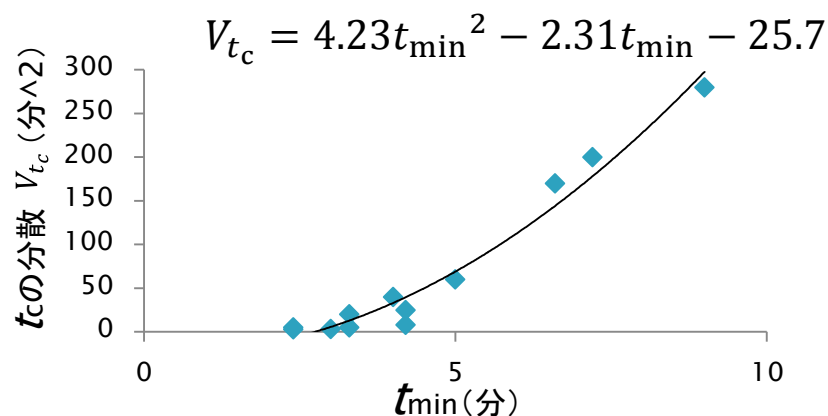
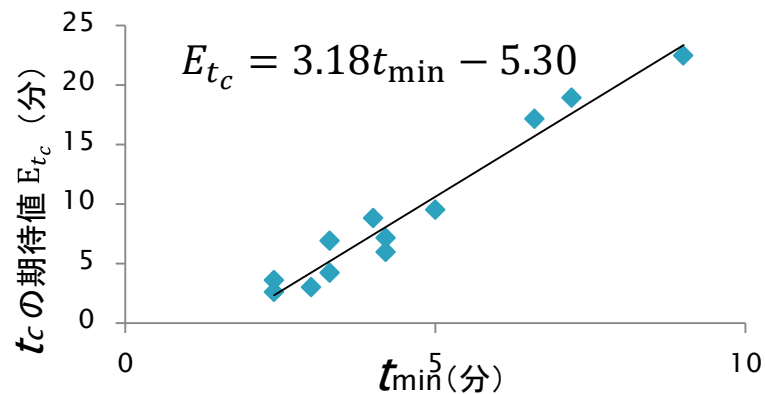
- t_c と t_{\min} の関係について、 t_c の期待値 E_{t_c} は1次関数、分散 V_{t_c} は2次関数で近似
- t_c が対数正規分布に従うとし、 t_c の期待値と分散から対数正規分布のパラメータ推定
- t_c の分布 $f(t_c)$ は

$$f(t_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma t_c} e^{-\frac{(\ln t_c - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

(対数正規分布の定義より)

$$\mu = \ln \frac{E_{t_c}^2}{\sqrt{E_{t_c}^2 + V_{t_c}}} \quad \sigma = \sqrt{\ln \frac{E_{t_c}^2 + V_{t_c}}{E_{t_c}^2}}$$

- t_{\min} が決まると利用時間分布が決まる
- OD間距離が大きいほど余分に利用する時間が長く、ばらつきが大きい



分布の推定結果の例

現状のシミュレーション結果

横浜baybike全体の貸出・返却確率

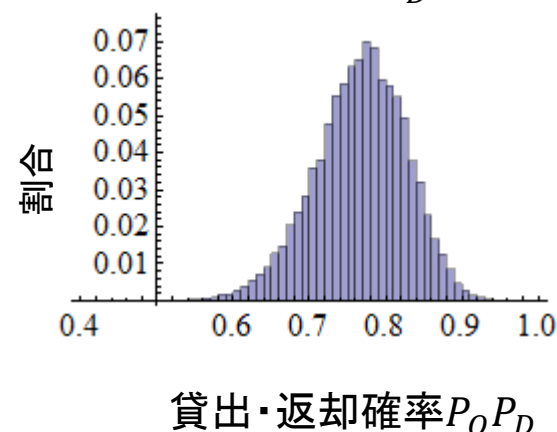
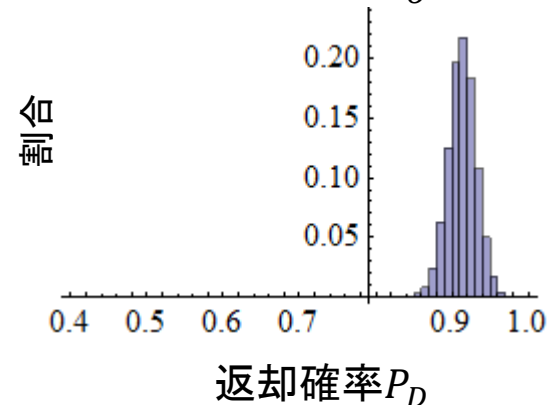
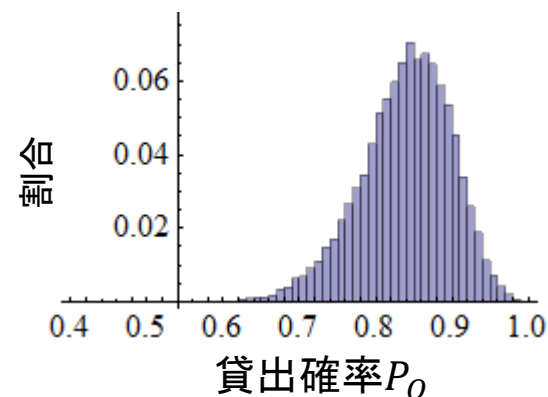
- 各ポートの自転車の初期配置とラック数を
実際と同じ台数(自転車台数214台ラック数380台)
にした場合の各確率を求めた
- シミュレーションを複数回行った結果、
貸出・返却確率 $P_O P_D$ の変動が大きいことがわかる



利用者が多い日は自転車を借りられない、
返却できない人が多く存在している

各確率の平均と標準偏差と中央値

	貸出確率	返却確率	貸出・返却確率
平均値	83.9%	91.3%	76.7%
中央値	84.4%	91.4%	77.0%
標準偏差	0.060	0.018	0.060



各確率のヒストグラム

現状のシミュレーション結果

各ポートの貸出確率と返却確率

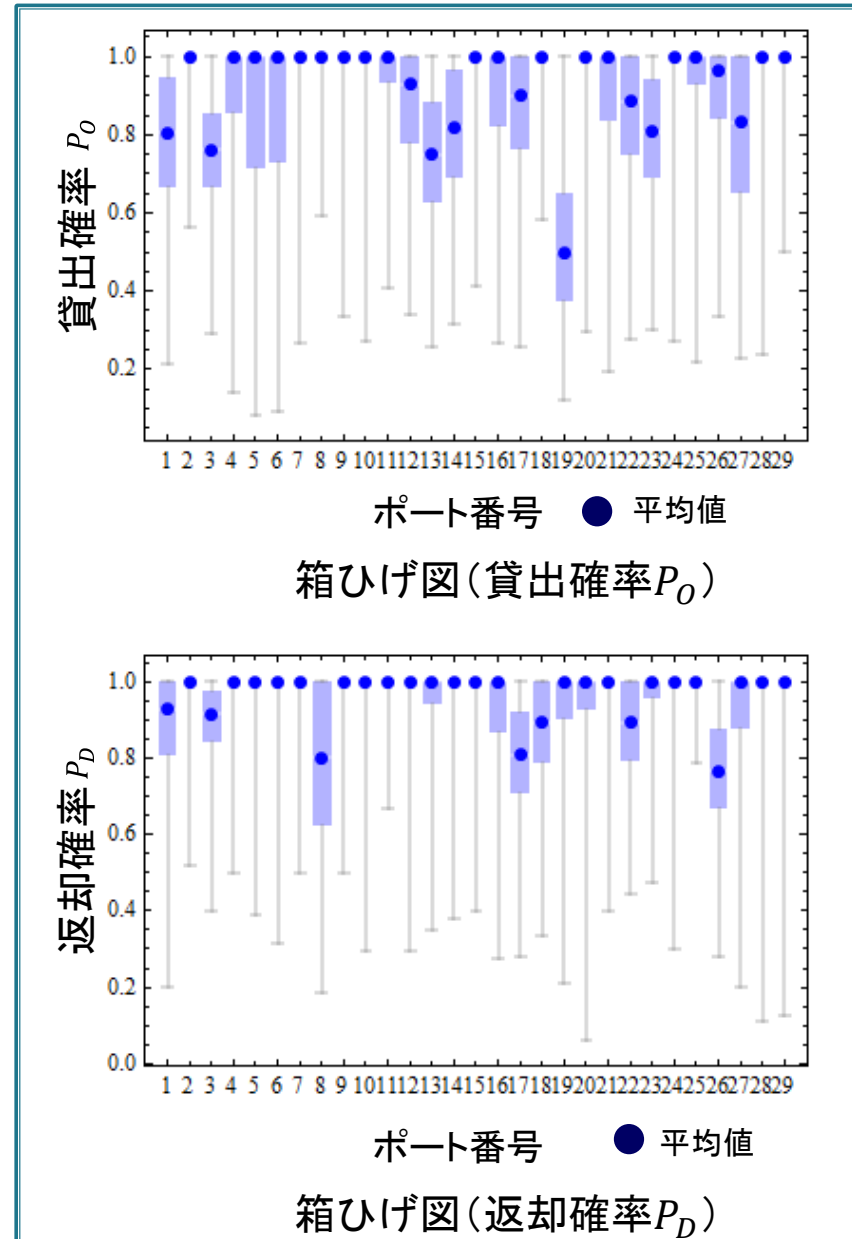
現状では貸出確率 P_O が全体的に低い

自転車台数の調整で改善できるポート

- ・貸出確率 P_O のみ低い(ポート12など)
⇒自転車の台数を増やす
- ・返却確率 P_D のみ低い(ポート8など)
⇒自転車の台数を増やす

台数調整だけで改善できないポート

- ・貸出確率 P_O , 返却確率 P_D の両方が低い場合(ポート17など)
⇒自転車台数のみでは改善できない。
ラック数を増やすor再配置の必要がある



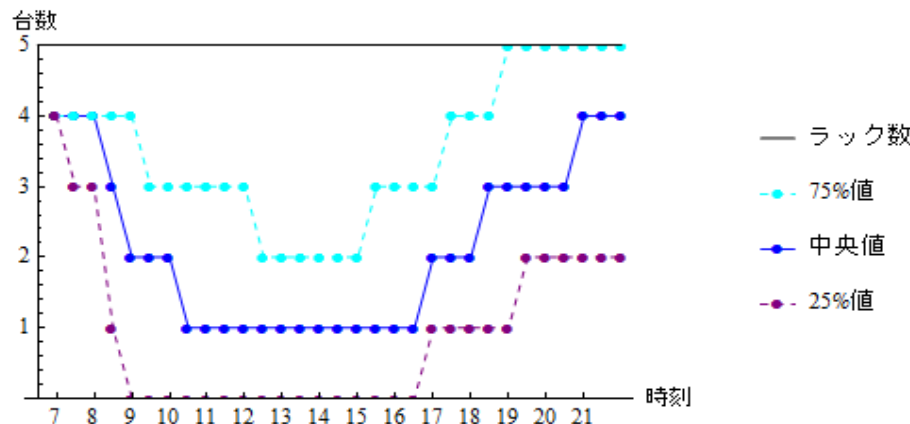
現状のシミュレーション結果：各ポートの自転車台数の変化

・ポートによって台数の変化に特徴が見られた

(1) 朝に貸出が多く・夜に返却が多い

(例) 横浜駅, 関内駅, 桜木町駅周辺のポート

- ・自転車台数を朝多くする必要がある
- ・鉄道を利用後, 通勤通学で使用されているポートと考えられる

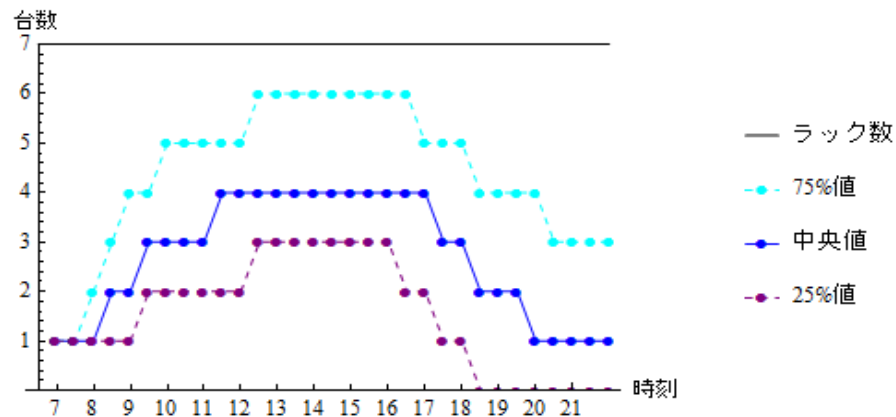


ポート1 (エリア1)
横浜三井ビルディング

(2) 朝に返却が多く・夜に貸出が多い

(例) ランドマークプラザ, 山下公園周辺のポート

- ・朝空きラック数に余裕を持たせる必要がある
- ・通勤通学場所に近いポートと考えられる



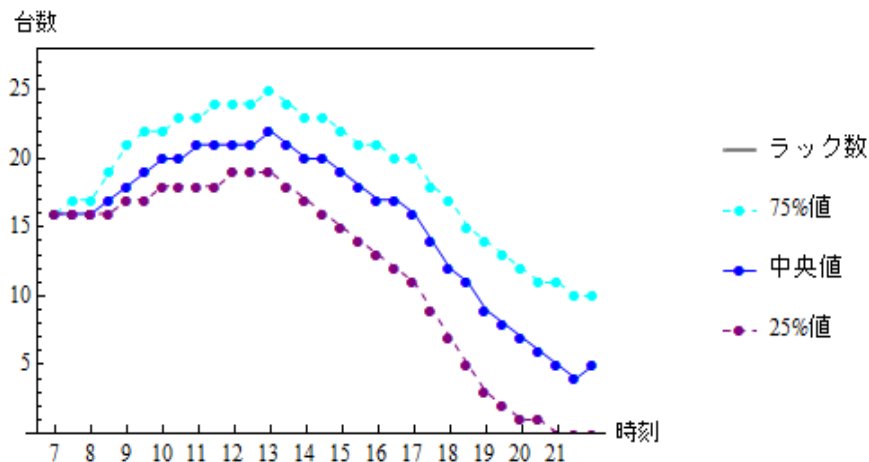
ポート3 (エリア5)
クイーンズパーク

現状のシミュレーション結果:各ポートの自転車台数の変化

(3)貸出または返却が偏る

(例)馬車道駅周辺のポート

- ・通勤通学以外の利用者が多い可能性
- ・自転車台数, ラック数に余裕を持たせるか自転車の再配置をする必要がある

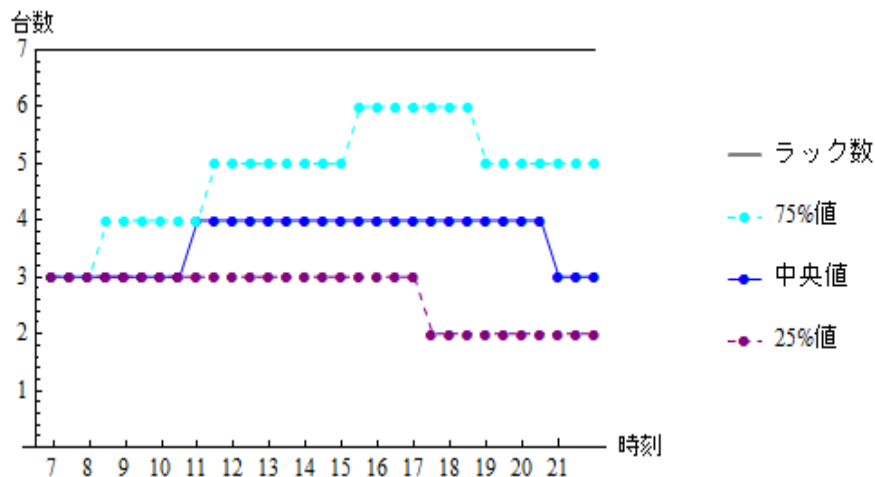


ポート11(エリア5)
横浜アイランドタワー

(4)貸出・返却に偏りが少ない

(例)赤レンガ倉庫,新高島駅周辺のポート

- ・貸出, 返却利用の数が同程度
- ・自転車の過不足が起こりにくい



ポート10(エリア4)
横浜ワールドポーターズ

最適化計算

- ・横浜baybikeについて自転車台数 B とラック数 R を変更しながらシミュレーションを繰り返し実行し, 貸出返却確率 $P_O P_D$ を改善する
- ・以下の順で3つの最適化問題を解いていく

自転車台数 B とラック数 R についての最適化問題

- (1)現状と同じラック数で貸出返却確率 $P_O P_D$ が最大となる自転車の初期配置 B^* を求める最適化問題
- (2)ラックの制限がなく, 総自転車台数が N_B のとき, 貸出確率が最大となる自転車の初期配置 B^* を求める最適化問題
(貸出確率 P_O を一定水準にするために必要な自転車台数 B^* を求める)
- (3) (2)で求めた初期配置 B^* で, 総ラック数が N_R のとき, 貸出返却確率 $P_O P_D$ が最大となるラック数 R^* を求める最適化問題
(貸出返却確率 $P_O P_D$ を一定水準にするために必要なラック数 R^* を求める)

最適化(1)現状の改善

・貸出返却確率 $P_O P_D$ を改善する方法

①自転車台数を変える

②ラック数を変える

③自転車の輸送

⇒①が最も低コスト

・現状のラック数と同じ状態で
最適な自転車の初期配置 B
を求める

・貸出・返却確率 $P_O P_D$ を最大化
する組み合わせ最適化問題

・目的関数 $P_O P_D$ はシミュレーション
の度に変化するので複数回
繰り返した平均 $\overline{P_O P_D}$ とした

$$\max \overline{P_O}(\mathbf{B}, \mathbf{R}) * \overline{P_D}(\mathbf{B}, \mathbf{R}) \quad \dots (1)$$

$$\text{s. t.} \quad 0 \leq B_k \leq R_k \quad \dots (2)$$

$$\sum_k B_k = N_B \quad \dots (3)$$

$$\sum_k R_k = N_R \quad \dots (4)$$

ポート k

初期自転車台数 B_k 総自転車台数 N_B

ラック数 R_k 総ラック数 N_R

貸出確率 P_O 返却確率 P_D

最大化 : 貸出・返却確率(1)

制約条件 : 各ポートの容量(2)

総自転車台数(3)

総ラック数(4)

最適化(1)最適解の導出

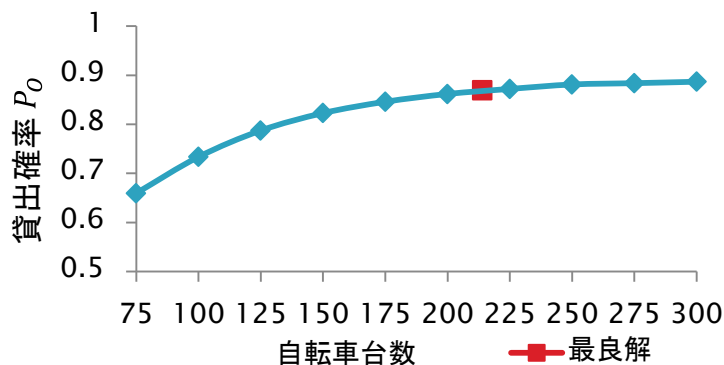
- ・組み合わせ最適化問題(解の候補が膨大に存在)
⇒メタヒューリスティクスを用いる
- ・近傍探索法を取り入れた遺伝的アルゴリズムで解を求めた

アルゴリズムの流れ

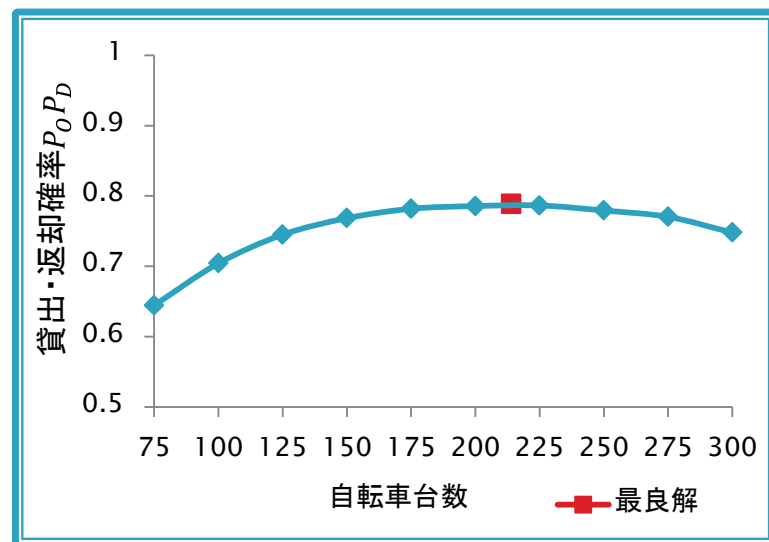
- (1)各ポートの自転車台数をランダムに決定した染色体を S 個生成する
- (2)各染色体の適応度関数を求める
- (3)適応度関数順に並べ替えた E 個の染色体を保存し、それ以外を淘汰する
- (4)保存した親から子を生成する($\alpha\%$ を交叉, $(1 - \alpha)\%$ を突然変異)
- (5)子の染色体について近傍探索をし、改善した子を追加する
- (6)(3)~(5)を一定回数繰り返して終了する

最適化(1)最適化の結果

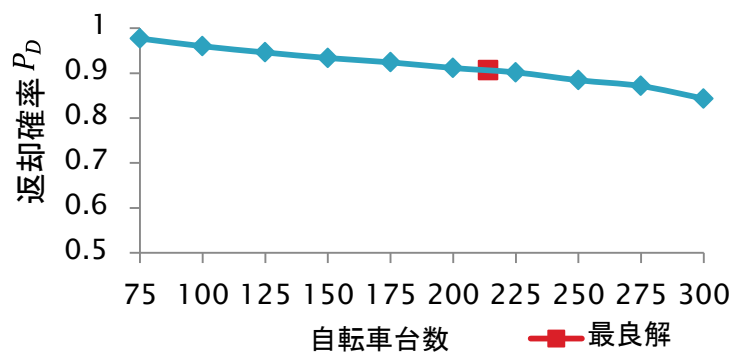
- ・総自転車台数 N_B を変えながら最適化問題を解いていった
- ・ $N_B = 214$ 台のときに貸出返却確率 $P_O P_D$ が最大となった
- ・自転車台数を増やすと貸出確率 P_O が増加するが、空きラック数が少なくなり返却確率 P_D が減少してしまう



貸出確率



貸出返却確率



返却確率

最適化(1)改善結果

最適化の結果

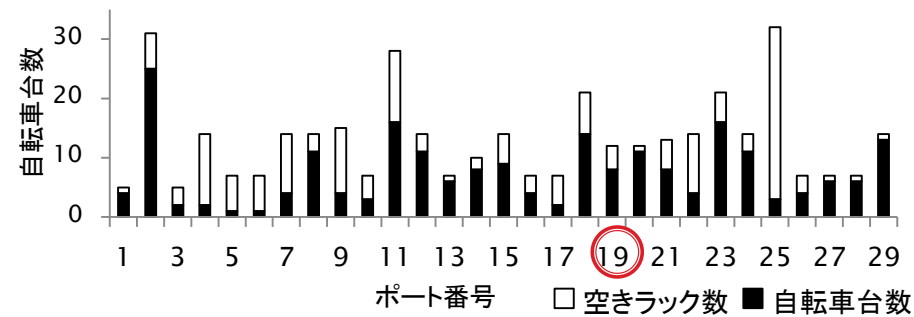
	自転車台数	ラック数	貸出返却確率
変更前	217	380	76.7%
変更後	214	380	78.9%

・わずかであるが貸出・返却確率を改善することができた

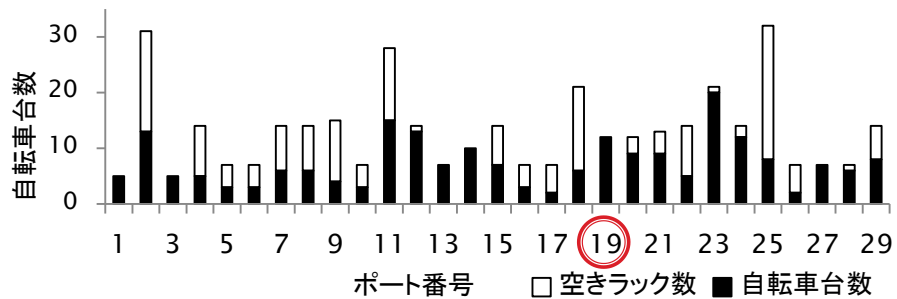
・さらなる改善にはラック数の増加が必要

(例)ポート19の場合 ○

	自転車台数	ラック数	貸出確率	返却確率
変更前	8	12	50.0%	100.0%
変更後	12	12	67.5%	91.7%



変更前



変更後

自転車台数を最大まで増やしたが
貸出確率が改善されなかった

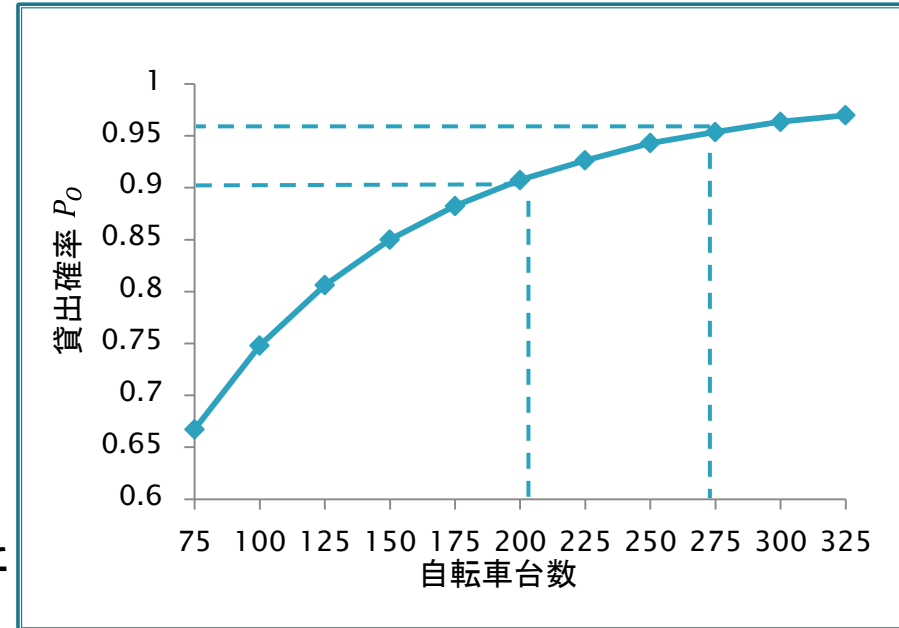


ラック数,自転車台数を増やす必要がある

最適化(2)必要自転車数

貸出確率 P_0 を一定水準にするために
必要な自転車台数を求める

- ・ラック台数が十分大きいと仮定
(どのポートにも自由に自転車を配置できる)
- ・総自転車台数が N_B ($N_B = 75, 100, \dots, 325$)
のときに貸出確率が最大となる自転車の
初期配置の組み合わせを同様に解いていった
- ・ N_B が200台のときに90%
275台のときに95%を超える



貸出確率

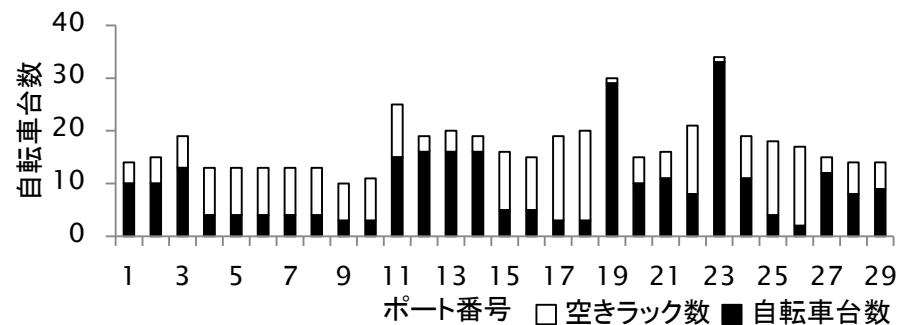
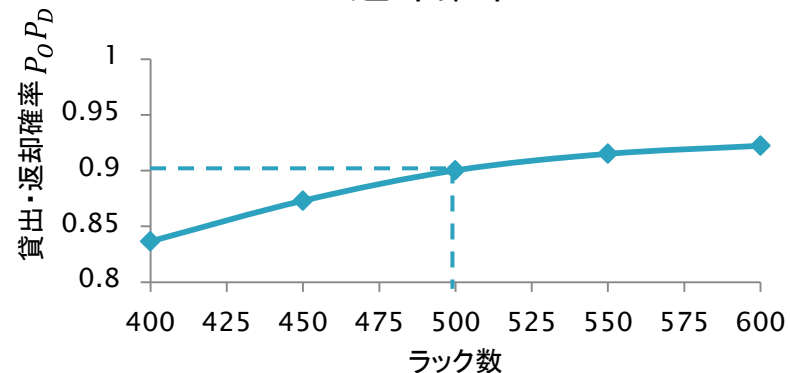
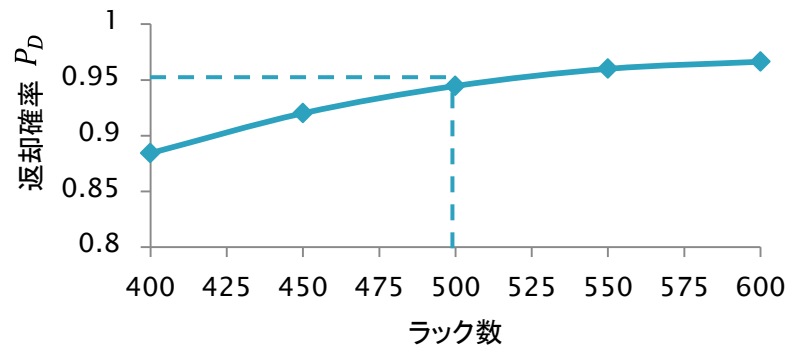
最適化(3)必要ラック数

貸出返却確率 $P_O P_D$ を一定水準にするために必要なラック数を求める

(例)貸出確率95%, 返却確率 P_D 95%
 貸出返却確率 $P_O P_D$ 90%としたい場合
 最適化(2)より $N_B = 275$ のとき貸出確率が95%
 ラック数 $N_R = 500$ のときに返却確率95%
 貸出返却確率90%となった

$N_B = 275, N_R = 500$ のときラック数が
 15~20台程度のポートが多い

ラック数が30以上のポートもあり
 現実的に可能でない場合,
 トラックでの再配置が必要となる



各ポートの自転車配置

まとめ・今後の課題

- ・各ポートの自転車台数をシミュレーションすることによって、需要を満たさない可能性が高いポートを予測することができた
- ・横浜baybikeの場合、自転車台数の変更のみでは大幅な改善は難しく、ラック数を増やす必要がある
- ・ポートの規模が大きくなってしまい設置スペースが限られるポートにはトラックによる再配置が必要
- ・トラックによる再配置した場合のシミュレーション
- ・最適化の精度の向上
⇒プログラムの高速化と最適化アルゴリズムの工夫が必要
- ・費用を考慮した運営方法の最適化(改善策の実現可能性の考察)

参考文献

- [1] 諏訪嵩人(2010)：自転車共同利用システムの計画手法に関する基礎的研究，
東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻修士論文
- [2] 横浜市都市整備局(2013)：平成24年度横浜都心部コミュニティサイクル社会実験
効果検証等調査検討委託報告書
- [3] 藤原博幸 (2008)：多目的勤務スケジューリング問題への遺伝的アルゴリズム
およびタブーサーチの適用—近傍解の考察と遺伝的操作の改良—，慶應義塾大学
大学院理工学研究科修士論文
- [4] 都市型コミュニティサイクル研究会(2010)：コミュニティサイクル—公共交通を補完
する新自転車システム—，化学工業日報社