

Technology Reports (特集)

シェアサイクルの事業効率化

移動需要予測

再配置最適化

サービス向上・社会課題解決に貢献するAI

ドコモ・バイクシェアにおける AIを活用した自転車の再配置作業 最適化の取組み

クロステック開発部

いしぐろ 石黒 慎 三村 知洋

かわさき 川崎 仁嗣

サービスイノベーション部

ふかざわ 深澤 佑介^{†1}

スマートライフ推進部

むろずみ 室住 篤子^{†2}

近年、シェアサイクルの利用が増えることで、専用駐輪場の自転車溢れ・不足の問題が顕在化している。そこでドコモは、ドコモ・バイクシェアの集配トラックのための自転車の再配置最適化システムを開発した。このシステムは自転車の利用需要予測を行い、将来予測に基づいて自転車の再配置計画を最適化し、集配トラックに再配置作業のレコメンドを行う。本システムを用いて再配置を行うことで、各駐輪場における自転車の不足および溢れが軽減され、利用者にとってより使いやすいシェアサイクル環境の維持が可能になると期待できる。

1. まえがき

近年、都市交通や観光において、電車站から目的地の施設までや、複数の目的地間を移動するために、短距離移動がしやすい交通手段の1つとして自転車の人気が高まっている。さらに新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行以来、個人利用が可能で、三密回避が実現しやすい自転車需要はますます高まってきている。しかし、個人が自転車を所有し

て都市空間で使うには、駐輪場の空きスペースを定期契約することや、電車で自転車を携行して都市間を移動することが必要となるため、一般には扱いづらい。このような背景から、近年、シェアサイクルが注目され利用が増加している。

ドコモ・バイクシェア社は、シェアサイクル事業「ドコモ・バイクシェア」を展開しており、ドコモは本事業の業務支援を行っている。ドコモ・バイクシェアのサービスでは、街のさまざまな場所に専用

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

†1 現在、総務部

†2 現在、人事部

の駐輪場が設置されており、利用者は希望する駐輪場を選んで自転車の貸出し・返却をすることが可能である。また、借りた自転車を任意の駐輪場に返却できるため、貸出元の駐輪場に戻る必要は必ずしもなく、短い距離の移動の際に利便性が高い。ドコモ・バイクシェアの利用は増加し続けており、年間の総利用回数では、2011年度は約4万回であったところが、2019年度は約1000万回と急速に拡大した。これを受け、ドコモ・バイクシェア社は2019年時点で、東京では駐輪場約830カ所、自転車約8,300台を提供している。

ドコモ・バイクシェアでは、貸与される自転車は電動アシスト付きとなっており、坂道の多い日本の街事情においても気軽に利用しやすいサービスを提供している（写真1 [1]）。また、自転車故障時の



写真1 ドコモ・バイクシェアの電動アシスト付き自転車

メンテナンスやバッテリー充電もサービスの一環として行っており、利用者は常に整備された自転車を利用することが可能である。

ドコモ・バイクシェアを代表とするシェアサイクルは、ある駐輪場から別の駐輪場へ自由に移動できるサービスとして設計されており、利用者に貸与された自転車は貸出時の駐輪場と異なる駐輪場へも返却可能である。このため、自転車利用に伴って配置が局所的に偏り、特定の駐輪場において利用可能な自転車が不足することで利用者に貸出しできないことや、多数の自転車が駐輪場に配置されることで、満車となり返却できないことがある（写真2）。このような自転車配置の不均衡を緩和することは、一般に、シェアサイクルのサービス運営において共通の課題となっている。特にドコモ・バイクシェアでは、駐輪場のラック位置以外への駐輪が可能であり、多数の自転車が返却され、駐輪場のスペースから溢れて駐輪されることがあり、地権者や通行人に不便益を与えてしまう（写真2(b)）。

このような偏りを軽減し、自転車の配置台数を適正化するため、ドコモ・バイクシェアでは、集配トラックによる再配置を行っている。再配置では溢れている駐輪場から自転車を積み込み、不足している駐輪場へ運ぶことで配置台数の偏りを解消する。一



(a)自転車不足



(b)自転車溢れ

写真2 自転車配置の偏り状況

方で、シェアサイクルの利用回数は増加の一途をたどっており、限られた台数の集配トラックを効率的に運用することで、配置の不均衡に対応することが求められている。

そこでドコモでは、バイクシェアの利用実績や周辺の人口統計値をリアルタイムに収集し、各駐輪場における自転車の貸出し・返却の需要を予測することで、将来の溢れや不足を緩和するように再配置を行うべき駐輪場を選定し、各駐輪場への訪問順序、および、回収・配置すべき台数を作業者に対して提示する再配置最適化システムの開発を行った(図1)。本稿では、ドコモ・バイクシェアにおける自転車の再配置作業最適化の取組みについて解説する。

2. ドコモ・バイクシェアのサービス設計と配置の偏り問題

ドコモ・バイクシェアが提供する各自転車駐輪場では、自転車配置用のラックが設置されているものの、ラック自体には貸出し・返却機能はなく、近辺の自転車位置情報を検出するためのビーコンが配備

されており、自転車とビーコンとの間で短距離の通信を行うことで駐輪場周辺の自転車の返却状態が把握できる。このようにビーコンによって、自転車の状況を検出できるため、自転車配置の最大数はラックの数に縛られない、このため、ラックの数を越えた台数の自転車配置を物理的に制限することはできないサービス設計となっている。この設計により、駐輪場のスペースを有効に活用し、多くの自転車を駐輪することが可能になる一方で、多量の自転車が返却される際には、自転車が駐輪スペースから溢れる場合もある。

そこで、ドコモ・バイクシェアでは、駐輪場における自転車の溢れ状況を評価するために、駐輪場ごと、時間帯ごとに異なるしきい値により自転車配置溢れの目安となる溢れ制約台数を運用上定めている。

また、駐輪場の自転車配置台数以上の需要が予見される場合、利用の機会損失が生じると考えられる。機会損失を評価するため、駐輪場ごとに自転車不足の目安となる不足制約台数を定める。多くの一般的な駐輪場においては、自転車が一台もない状態で自転車の貸出需要があることを機会損失と考え、不足

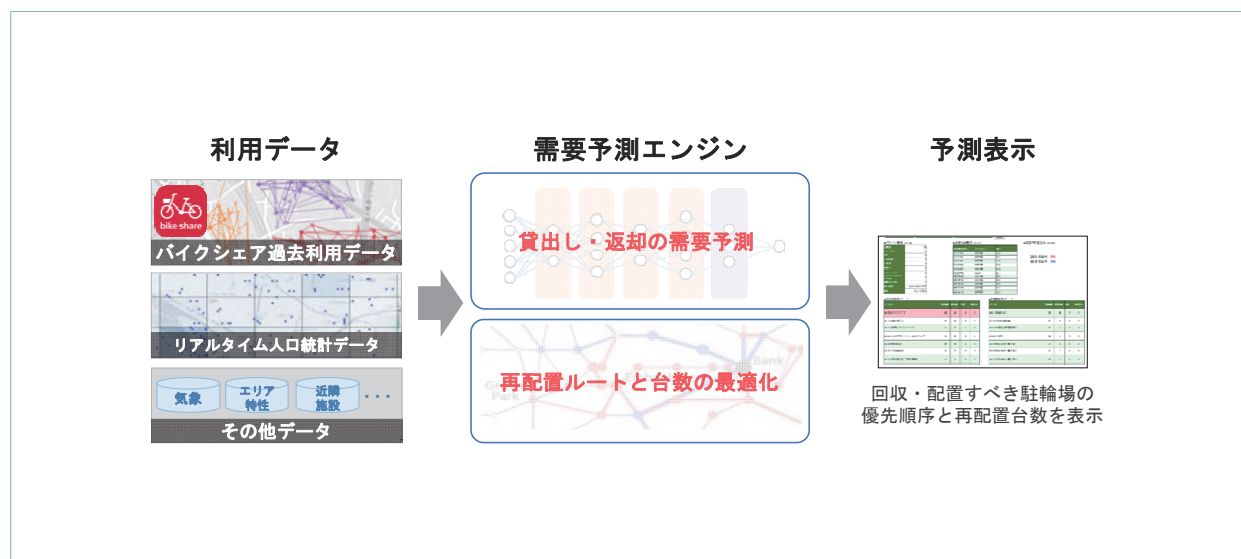


図1 再配置最適化システムの全体概要

制約台数を0に設定する。

ここで、自転車の配置台数が溢れ制約台数以下であり、かつ、不足制約台数以上であるとき、適正台数の自転車が配置されていると定義する。

これらの制約を超えて自転車の貸出し・返却が行われることで、駐輪場における自転車の配置台数が溢れや不足の状態となることがある。その模式図を図2に示す。

これまで、ドコモ・バイクシェアでは、自転車の再配置は過去の利用実績や天気予報の情報を考慮することにより、作業員自身が将来の需要を判断することで行われてきた。しかしながら、時々刻々と変化する自転車の需要に対して、人手による作業計画では必ずしも最適に再配置できない場合がある。

そこで需要予測に基づき再配置作業の効率化を行う再配置最適化システムの開発を行った。本システムの開発目標は、駐輪場ごとに将来の溢れや不足を予測し、各駐輪場間で自転車台数の不均衡を平均化するように配置・回収するための手順を計画した上で、作業員に情報を伝え、それに基づいた再配置作業を行うことで駐輪場における自転車の極端な溢れや不足を緩和することである。

3. 再配置最適化システムの概要

3.1 需要予測機能

シェアサイクルの自転車貸出し・返却は、移動する人の人数、時間帯、曜日、天候、イベントの開催状況など、さまざまな要因に影響されて変化する。このように時々刻々と変化する需要を予測に反映するように、需要予測のモデル化を行った。需要予測モデルとしてはXGBoost (eXtreme Gradient Boosting)*1、および、時系列の深層学習手法*2を拡張したものを用いた [2]。

需要予測機能の概要を図3に示す。予測では24時間先の将来まで1時間ごとに、当該時刻から1時間経過するまでの間に発生する貸出しの回数、返却の回数をそれぞれ予測の目的変数とする。貸出し、返却ごとに24時間分、合計48モデルの作成を行い、各時間帯の貸出回数、返却回数を予測結果として算出する。各時刻の貸出回数と返却回数の差分を求めることで、該当時刻における自転車配置台数の変化量を算出することが可能となる。自転車配置台数の変化量を用い、現在時刻の配置台数を初期値として累積和を求めることで、各時刻の配置台数の予測値を算出することが可能となる。

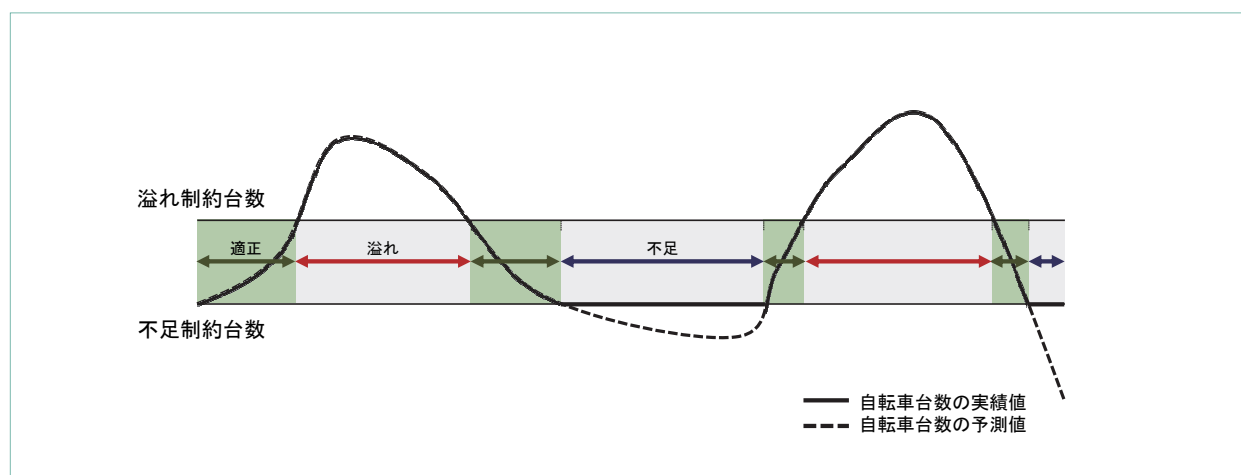


図2 駐輪場自転車の溢れと不足の模式図

- *1 XGBoost：多数の異なる決定木による予測モデルから多数決を取ることで、高い精度での回帰予測を実現する機械学習手法。
- *2 深層学習手法：再帰型のニューラルネットワークにより、時系列の変化を考慮した回帰予測を実現する機械学習手法。

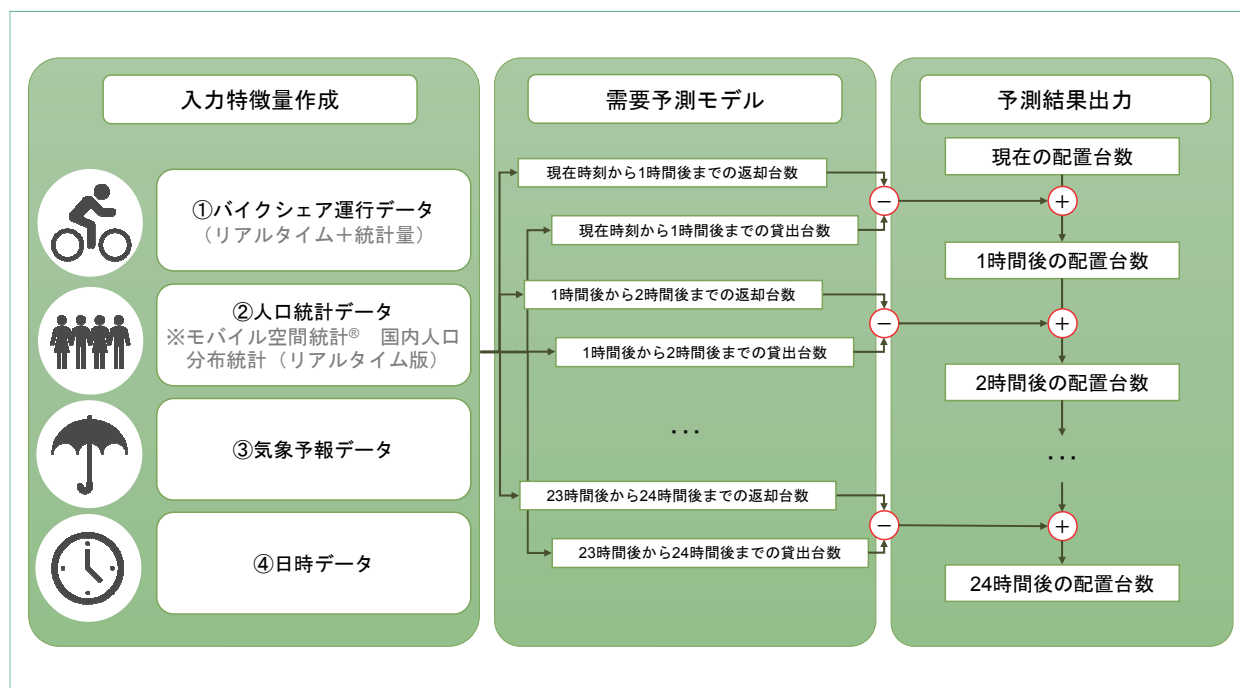


図3 需要予測機能の概要

学習時の入力特徴量では、①バイクシェア運行データ、②人口統計データ、③天気予報データ、④日時データを用いる。これらの特徴量をモデル学習に用いることで、人口、天候、バイクシェアの過去の利用実績と将来需要の変化についての相関関係が機械的に求められ、より高精度な将来需要の予測が実現されることが期待できる。

- ①バイクシェア運行データでは、各駐輪場における該当時刻までの自転車の貸出台数、返却台数、および、その変化量を用いる。また、過去の同曜日・同時時間帯における貸出台数、返却台数の平均値、変化量の平均値も統計量として利用する。
- ②人口統計データでは、各駐輪場の周辺500mの人口および変化量を用いる。リアルタイムデータを用いることで、特に直近1~2時間の予測において人の移動の変化をとらえることが期待される。

③気象予報データでは、該当の予測対象時刻に対する雨量、風量、気温、湿度、気圧の最新の気象予報データを入力として用いる。

④日時データでは、予測対象時刻を表す日時（時間、年、月、日、曜日）に関するデータを入力として用いる。

3.2 再配置計画機能

図4に示す再配置計画機能について、詳細を以下に解説する。

(1) 予測結果に基づく溢れ・不足台数の推定

前述の需要予測機能により自転車配置台数の将来予測値が得られる。ここで求められた各時刻の配置台数は、配置台数の変化量の累積和であり、図2に示すように予測値は負の値を取ることもあり得る。各駐輪場における各時刻の自転車台数の予測値が、駐輪場ごとに決められた溢れ制約台数を上回るときに、上回った台数分の自転車配置台数が溢れると推



図4 再配置計画機能の概要

定され、逆に不足制約台数を下回るときに、下回った台数分の自転車台数が不足すると推定される。

(2) 評価値による作業レコメンド

これらの溢れ・不足分の自転車を回収・配置するための作業計画を立て、集配トラックを派遣する。この際、再配置では溢れた自転車を積み込み、自転車が不足する駐輪場で自転車を降ろすという一連の作業となることから回収と配置は一对であり、さらに、車両は再配置作業の過程で移動することから、回収においては車両の現在地から回収駐輪場までの距離を、配置においては回収駐輪場から配置駐輪場までの距離を計算する。ここで求められた距離を考慮して、駐輪場ごとに溢れの評価値、および、不足の評価値の算出を行う。溢れの評価値は、溢れの台数が多く距離が近いほど大きい値を取り、回収優先度が高く評価される。不足の評価値は、不足の台数が多く距離が近いほど大きい値を取り、配置優先度が高く評価される。ただし、各評価値は、再配置作

業による時間経過や車両の移動、および、自転車の需給の変動により時々刻々と変化する。したがって、作業終了時点で車両からの要求に基づいて、評価値を再算出することで、その時点で最も評価値が高い駐輪場を優先して作業順序を決定する。

(3) 評価値に基づく回収・配置台数の決定

評価値に基づいて選択された駐輪場の自転車台数が、回収作業では溢れ制約台数未満となる台数まで、配置作業では不足制約台数を超える台数まで、自転車の回収・配置を行うように作業台数を決定する。

また、回収・配置作業を行うことで車両に積載中の自転車の台数が変化する。このため、回収台数、配置台数は以下の値を上限として用いる。

$$\text{回収台数} = \min(\text{溢れ台数}, \text{最大積載台数} - \text{現在の積載台数})$$

$$\text{配置台数} = \min(\text{不足台数}, \text{現在の積載台数})$$

(4) 再配置計画の決定

駐輪場ごとに算出された評価値と回収・配置の要

求台数に基づいて、各時間帯における作業の優先度を決定する。回収と配置作業の評価値が最も高くなる駐輪場ペアを抽出し、当該の駐輪場間で、現在積載可能な最大台数の回収と配置の計画を行う。また、回収あるいは配置のどちらかのみ台数が少なく、回収台数と配置台数が異なる場合には、続けて2つの駐輪場の回収・配置を行うことで、回収作業と配置作業の台数の釣り合いを保つこととする。複数台のトラックが再配置を行う場合は、同じ時間帯に同じ駐輪場が再配置対象として選択される可能性があるが、一方のトラックが作業を行っている場合は別の駐輪場ペアが選択されるように複数車両間での再配置計画がなされる。

4. 実証実験

これまで解説した需要予測、再配置計画のシステムについて有効性を確認する実証実験を行った。実証実験では、タブレット型端末を用いたユーザインタフェースを通じて、各時刻において、ある駐輪場から別の駐輪場に向けて、何台の自転車を回収・配置するかを指示するWebアプリケーションを作成し、作業実施者による利用を促した。実証実験の対象エリアとしては、東京地区から江東区、港区、中央区、新宿区、品川区を選定した。各エリアにおける実証実験期間は表1のとおりである。また、実証実験では30台まで積載可能なトラックを集配車両として利用した。東京全域での再配置は複雑となるため、実証実験ではエリアごとに異なる台数の担当トラックを決め、対応するエリアの中で再配置計画を行った。エリアごとの台数は表2のとおりである。学習データとして、バイクシェアの運行データ、モバイル空間統計^{※3} 国内人口分布統計（リアルタイム版）^{※3}、気象業務センターのメソ数値予報モデルGPV（MSM）^{※4}のデータを用いた。学習期間は2017/10～2019/3とした。各データの詳細は表3の

表1 エリアごとのトライアル期間

エリア	期 間
江東区、港区	2019/11/1～15
中央区、新宿区、品川区	2019/11/1～20 2019/12/3～6

表2 エリアごとのトラック台数

エリア	トラック台数
江東区	3
港 区	2
中央区	1
新宿区	1
品川区	1

とおりである。

本システムによる再配置について、トライアル前の期間とトライアル後の期間の不足台数、溢れ台数の評価値を比較した結果を図5に示す。トライアル前においては、作業実施者の判断で再配置を実施している。トライアル後の期間では、本システムからの指示に基づいて再配置を行った。本システムを適用することで、東京5エリアのすべてにおいて不足、溢れともに改善することが確認できた。また、エリアによって不足や溢れの改善割合が異なる結果が見られた。

新宿区での溢れ台数改善の効果は、0.4%とわずかである。集配トラックによる作業は、一度の再配置でより多くの自転車を移動する場合に効率的であることが多い。新宿区には、自転車を数台のみ配置している小型の駐輪場が数多く存在しており、溢れを改善するためには多くの駐輪場を周回するように再配置を実施する必要がある。このため、集配トラックによる再配置では本システムによる効率化の効果が小さくなったと考えられる。

一方、他のエリアにおいては、自転車が多くの配置

※3 モバイル空間統計[®] 国内人口分布統計（リアルタイム版）：モバイルデータを用いた統計分析により、500mごと10分ごとに1時間～30分前までの日本全国の人口を算出したデータ。モバイル空間統計は（株）NTTドコモの登録商標。

※4 メソ数値予報モデルGPV（MSM）：気象庁が導入している3時間ごとに1回、39時間先までを予測する気象予報モデル。

表3 入力特徴量の詳細

データ名称	詳 細
バイクシェア運行データ	約5,900台
	駐輪場：約580カ所
	約730万回の自転車利用
	各数値は2019年3月時点の東京全エリアの延べ数
人口統計データ ※モバイル空間統計 国内人口分布統計 (リアルタイム版)	携帯電話 約7845万台（本台数より法人名義やMVNOを除く）
	2019年3月時点の日本全国の延べ台数。メッシュ状に集計した統計値を利用
	500mメッシュ、10分に一回
気象予報データ ※メソ数値予報モデルGPV（MSM）	雨量、気温、湿度、風量、風向、気圧、雲量
	3時間に1回、39時間先までを予報
	1,000mメッシュ

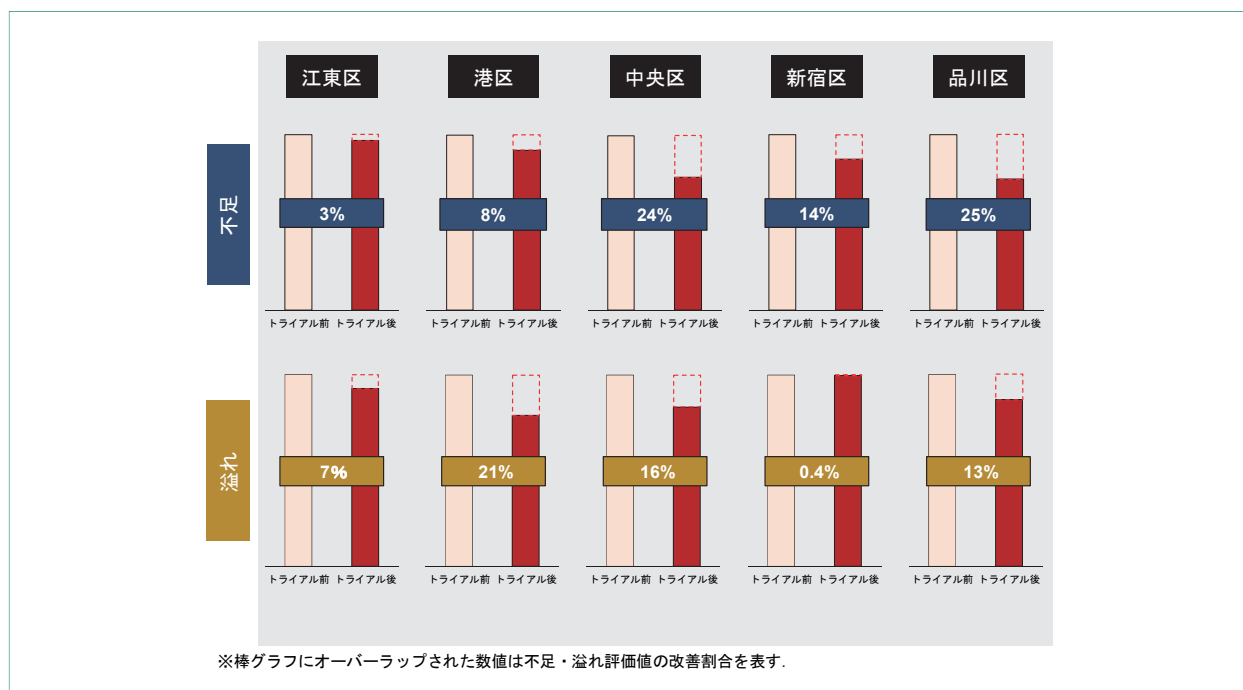


図5 トライアル前後の自転車の不足・溢れの改善量の比較結果

されている大型の駐輪場が存在しており、集配トラックの性質を活かした再配置ができたため、溢れ・不足が改善されたと考える。

次に、イベント時の予測精度に関する実験について解説する。シェアサイクルでは、通勤など乗車される曜日や時間帯が周期的である利用が多く割合

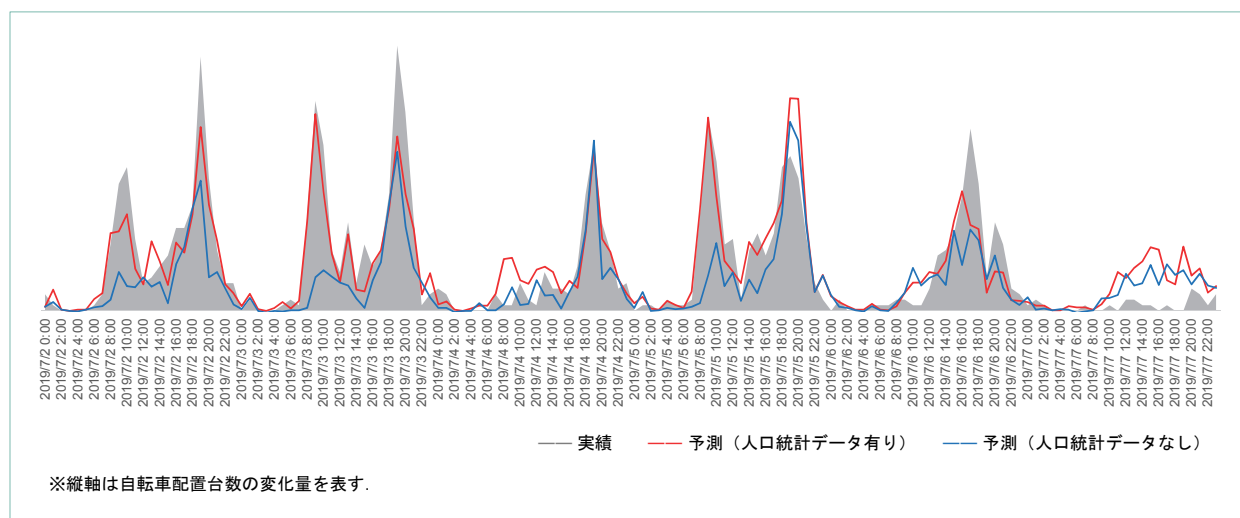


図6 予測が改善された駐輪場の例（2019/7/2～7/7）

を占めている。このような需要については、バイクシェア運行データを統計的に分析することで、十分な予測精度を得ることが可能である。一方、大規模イベントによる特殊な需要が生じている場合、バイクシェア利用の周期性の分析だけでは説明ができず予測を行うことが難しい。このため、本システムでは人口統計データを入力に加えることで、定常時とは異なる周辺人口の変化を取得しイベント時の利用需要の変化を予測する。あるイベント会場周辺の駐輪場における自転車変化量の予測結果を図6に示す。このように、一部の駐輪場においては、需要のピーク時刻に関する予測について、人口統計データを用いることで精度が向上することが確認された。これは、イベント会場など人の移動量や移動時刻が日によって変化しやすい場所で、リアルタイムの人口統計データが周辺人口の増減に伴う需要の変化を説明する役割を果たし、予測精度の向上に寄与したと考えられる。

5. あとがき

本稿ではドコモ・バイクシェアにおける作業改善

のための再配置最適化の取組みについて解説を行った。需要予測機能と再配置計画機能を組み合わせることによって、将来の需要と供給の偏りを予測し、状況に合わせた再配置を提案するシステムを開発した。本システムを用いた再配置を実施することで、東京5エリアについて、溢れ・不足状態となる駐輪場が減少し、再配置効率の改善が確認された。また、人口統計データを用いることで、イベント会場など過去の利用傾向だけでは予測が難しい場所において、需要の変動をとらえ、予測精度を向上できることが確認された。今後は再配置最適化システムの全国での活用を検討し、また、本システムの開発によって得られたノウハウを活用することで、別の交通手段についても最適化の実施などを検討したい。

文 献

- [1] ドコモ・バイクシェアサービス.
<https://docomo-cycle.jp/>
- [2] T. Mimura, S. Ishiguro, S. Kawasaki and Y. Fukazawa :
"Bike-share demand prediction using attention based sequence to sequence and conditional variational autoencoder" In Proc. of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Prediction of Human Mobility, pp.41-44, Nov.2019.