人流（GPS）データを用いた バスルート及び運行時間帯の最適化

小竹　輝幸[1]・廣川　典昭[2]

[1]正会員　KPMG モビリティ研究所/KPMG コンサルティング株式会社　ビジネスイノベーションユニット
（〒100-0004 東京都千代田区大手町 1 丁目 9 番 7 号 大手町フィナンシャルシティ サウスタワー）
E-mail: teruyuki.kotake@jp.kpmg.com

[2]非会員　株式会社 KPMG アドバイザリーライトハウス　アドバンスドアナリティクス
（〒100-0004 東京都千代田区大手町 1 丁目 6 番 1 号 大手町ビルヂング）
E-mail: noriaki.hirokawa@jp.kpmg.com

パーソントリップ調査や大都市交通センサス等の有益な移動情報は一部の都市圏に限られ，地方や地区内のバスルートの設計にあたっては，歩行量調査やアンケート結果等を用いて作成されているものが多く，質・量ともに十分とは言えない．加えて，時刻と紐づいた詳細な出発・到着地点（OD）が判明したとしても移動需要を満たすような経路設計を行うことは容易ではない．そこで本研究では，大規模 GPS データと経路最適化技術を用いて，観測された移動需要を満たす最適な経路を生成する手法を開発した．密度ベースクラスタリングにより GPS からユーザの滞留点と適切な粒度での時刻表の候補を作成し，時刻表と訪問順序の制約を満たしながら，移動需要を少ないコストで満たす経路を探索することで最適な運行経路を生成した．

Key Words: *bus routes, route optimization, routing, public transportation, GPS data, AI*

1. はじめに

(1) 背景と目的

令和 2 年の地域公共交通活性化再生法の改正[1]（令和 2 年改正法）により，すべての地方自治体による地域公共交通計画の作成が努力義務化され，地方自治体による地域公共交通への関わりがより一層求められるようになった．その結果，1,700 を超える全国の市町村において，令和 2 年改正法が提出される前の令和 2 年 3 月末時点での計画策定件数は 585 件にすぎなかった状態が，令和 5 年 6 月末時点では 869 件と過半数を超えるに至っている[2]．

交通計画の策定や交通政策を立案・推進するにあたっては，定量的な情報に基づき，関係者間で同じデータや分析結果を基に議論や検討を進めていくことが望ましいが，パーソントリップ調査（PT 調査）や大都市交通センサスに代表される移動情報は一部の都市圏に限られており，過去に実施されたことのある都市圏でさえも前回調査から 20 年以上も調査が実施されておらず[3]，古いデータを用いて検討しているケースも散見される．

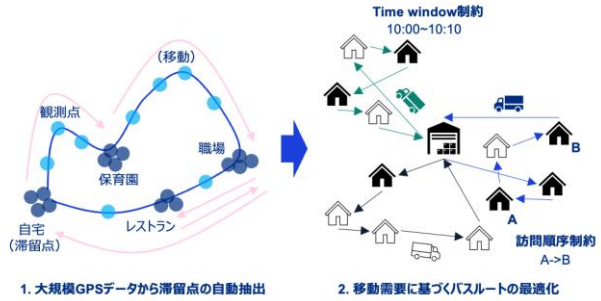


図-1 本研究の全体像

また，それら大規模な PT 調査などの対象地域になっていない中小規模以下の地方においては，そもそも地域の人がどのように動いているかといった移動の実態を把握できていない状況にある自治体も少なくなく，こうした地方での公共交通（主としてバス）の施策の展開やバスルートの設定にあたっては，歩行量調査やアンケート結果等を用いて作成されてはいるものの質・量ともに十分とは言えない．加えて，時刻と紐づいた詳細な出発・到着地点（OD）が判明したとしても移動需要を満たす

ような経路設計を行うことは容易ではない.

そこで本研究では，大規模な調査や移動実態が把握できていない中小規模以下の地方においても適切なバス運行を行えることを目的として，大規模GPSデータと経路最適化技術を用いて，観測された移動需要を満たすような最適な経路を生成する手法を開発した．密度ベースクラスタリングによりGPSからユーザの滞留点と適切な粒度での時刻表の候補を作成し，時刻表と訪問順序の制約を満たしながら，移動需要を少ないコストで満たす経路を探索することで最適な運行経路を生成した（**図-1**）．

(2) 本研究の構成

本研究は，6 章で構成される．2 章にて，交通計画等に人流データを活用する既往研究やバスルートに関する既往研究，実務への人流データの活用の整理，3 章で大規模 GPS データに基づく需要の抽出，4 章で経路最適化に基づくバスルートの提案，5 章でバスルートの効率性評価，6 章で本研究の成果と今後の課題について記載する．

2. 既往研究や実務での取り組み

大規模な PT 調査などの対象地域になっていない中小規模以下の地方での定量データの活用や PT 調査の対象となっているような都市圏でも調査に多大な費用がかかることから，全国の地方都市の OD 表を推計する手法として，全国都市交通特性調査（全国 PT 調査）の都市規模別セグメントデータを用いて，OD 表を推計したうえで，携帯電話基地局データの観測 OD 交通量を用いて補正を行う実務的な推計手法の開発[4]や近年の自治体の都市交通計画分野におけるニーズが詳細化していることから PT 調査データと携帯電話基地局データを用いてゾーンを詳細化した目的手段別の OD 表の推計する研究[5]など，既存調査と人流データを組み合わせることで OD 交通量を推計する研究や，携帯電話基地局データの 1km メッシュや居住大字別滞在人口を基に地域内 OD データを推定し，推定された OD データを考慮したバスルートを設計する研究[6]，バスの車両位置情報とスマートフォンの位置情報を組み合わせることで，ユーザの移動手段を推定し，PT調査なしに需要推定を行う手法の開発[7]など交通計画等に人流データを活用する研究が進んできているところである．実務における人流データの活用を推進するため，国土交通省不動産・建設経済局がセンサーやカメラ，スマートフォン等の機器等から取得できる人やモノの位置情報を活用するにあたってのデータの選定方法，取得，提供，利用におけるポイントやユースケースなどをまとめた『地域課題解決のための人流データ利活用の手引き Ver1.0』[8]の公表や，データの交通への適用の観点から2007年9月に改定された『総合交通体系調査の手引き（案）』[9]を補完する形で，『スマート・プランニング実践の手引き』[10]，『総合都市交通体系調査におけるビッグデータ活用の手引き』[11]，『総合交通体系調査の事例集』[12]などが公表されている．

3. 大規模 GPS データに基づく需要の抽出

(1) GPS データの概要

大都市圏以外も含めた日本全国での分析案件を考慮し，大規模GPSデータによる移動需要の分析を行う．具体的には，静岡県裾野市の 2021 年 10 月の 1 ヶ月間の移動需要を例に分析する．このデータでは，5分から15分間隔で位置情報が観測され，全体で約 3.6 億レコード，ユニークユーザ数を見ても約 7.8 万人からなる大規模な GPS データセットである（**表-1**）．対象地域内で 2 地点以上滞在したユーザ数は，7,803 名と裾野市の人口が約5万人[13]であることを考慮すると，約15%のサンプリングレートと推察される．参考として，**表-2,3** に性別と年齢の分布も示す．これらのデータは WEB アンケートなどに基づくため，属性が不明の割合がやや高く，回答へのバイアスも懸念されることから，これらの情報に基づく，詳細な分析は行わないこととした．これらの情報の活用や機械学習に基づく移動需要の精緻な拡大推計などは今後の課題としたい．

表-1 GPS データの概要

名称	内容
データプロバイダ	株式会社ブログウォッチャー
対象地域	静岡県裾野市
期間	2021年10月1日～31日
レコード数	365,276,205
ユニークユーザ数	78,626
対象地域内滞留者*	7,803
10分以上滞留者数	10,171,374
30分以上滞留者数	6,230,655
平均取得日数	27日

表-2 属性の分布

属性	人数	割合(%)
男性	17,869	22.8
女性	10,405	13.2
不明	50,325	64.0

表-3 年齢の分布

年代	人数	割合 (%)
20	2,889	3.67
30	5,822	7.40
40	6,097	7.75
50	9,974	12.7
60	3,519	4.48
不明	50,325	64.0

(2) 時刻情報と DBSCAN による滞留点抽出

膨大な移動データから，ユーザの移動需要（OD）を把握するために，教師なしの機械学習アプローチを採用する．また，億単位のレコードを効率的に処理するために，Google Cloud 上のサーバレスデータウェアハウスである，BigQuery を用いて滞留点を抽出する．具体的には，密度ベースのクラスタリング手法の一つである Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)[14]により，ユーザごとに滞留点の候補を抽出する．DBSCAN の主なハイパーパラメータは，近傍と判断するための最大距離 eps と，コアポイントとみなすために必要な近傍のデータ数 min_samples であり，これらの情報に基づき，各観測点の周辺の密度を判断し，密度が高い場合は，クラスタとして，密度が低い場合には，ノイズとしてラベリングを行うアルゴリズムである．そのため，今回のケースのように事前にクラスタ数が不明な場合であっても，適切なクラスタ（滞留点）を抽出することが可能である．加えて，移動時などの観測点の密度が低い部分を，どのクラスタにも属さないノイズとすることを許容するため，今回の目的に適している．

ただし，本研究のように，時刻を含むデータを扱う場合は，自宅－職場－自宅や，職場－ランチ－職場などの移動のように複数回の訪問を考慮する必要がある点に注意する．本来 DBSCAN は 2 次元空間のみを対象としたアルゴリズムではないため，適切なスケーリングなどを行った上で時刻も含めた 3 次元データとして適用することも可能である．また，DBSCAN の時空間拡張である ST-DBSCAN[15]や階層化することでハイパーパラメータを削減した HDBSCAN[16]なども提案されている．一方で，本研究では，効率性の点から BigQuery を用いて滞留点を抽出する必要があるため，これらの手法を直接適用することは容易ではない．そこで，滞在の連続情報や観測点のノイズ等を考慮して，最終的な滞留点を抽出した（図-2）．

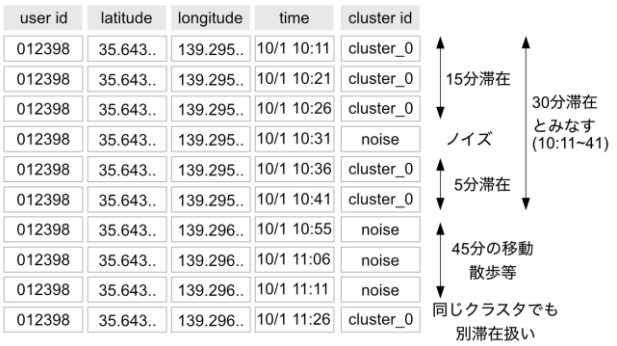


図-2 時刻情報を考慮したノイズ除去方法

(3) POI とのマッチング

本研究では，詳細なバスルートの提案を行うため，125m メッシュなどに基づく集計データではなく，滞留点に基づく最小粒度での分析を行う．一方で滞留点は，ユーザ単位の需要を把握する都合上，ユーザごとに独立して抽出しており，ユーザ間で直接結合することができない．そのため，まず抽出した滞留点を病院やレストラン等の施設（Point of interest, POI）に集約する．POI の情報は，Open Street Map から取得した．Open Street Map は，ボランティアベースで作成されており，特に本研究で対象とするような地域においては，POI の網羅性は十分でないものと推察される．そこで，Open Street Map 上の POI のみでなく，滞留点が密集する地点を別途 DBSCAN により抽出しバス停の候補とした．これらのバス停の候補に対して，K-Dimensional (KD) Tree を構築し，滞留点と最近傍でマッチングを行った．

4. 経路最適化に基づくバスルートの提案

(1) 滞留点情報から OD 情報への変換

コミュニティとしての移動需要に対する適切なバスルートを提案するため，個人の OD を集約し需要の多い路線を検出する．本章以降では，滞留点に絞り分析を行うことから，レコード数は 175,984 まで低減し，BigQuery を利用する必要はない．また，需要の集約に関するルールの設定は容易ではないため，ここでも DBSCAN による自動集約を行った（図-3）．具体的には，出発地点と到着地点で分割した上で，eps：85 分，min_samples：3 として二次元の時間軸に基づき集約し，最終的な OD の数は，456 となった．

user id	origin	departure	destination	arrival	
012398	bus stop 1	**10/1 10:19**	bus stop 2	10/1 10:57	10:19発 10:57着 3名
012399	bus stop 1	10/1 10:21	bus stop 2	10/1 10:59	
012400	bus stop 1	10/1 10:24	bus stop 2	10/1 11:02	
012398	bus stop 1	10/1 **11:23**	bus stop 2	10/1 12:05	11:23発 12:05着 2名
012400	bus stop 1	10/1 11:27	bus stop 2	10/1 12:03	
012401	bus stop 1	10/1 11:28	**bus stop 3**	10/1 12:15	11:28発 12:15着 3名
012398	bus stop 1	10/1 11:32	bus stop 3	10/1 12:20	
012407	bus stop 1	10/1 11:35	bus stop 3	10/1 12:21	
012408	**bus stop 2**	10/1 11:47	bus stop 3	10/1 12:12	
012398	bus stop 2	10/1 11:51	**bus stop 4**	10/1 12:17	

図-3 類似する移動需要の集約

(2) 制約付き Vehicle Routing Problem

これまでに作成された時刻表の候補を可能な限り満たすようなバスルートを提案する．複数台のバスによる運行を想定した経路最適化であることから，ベースとする問題は，巡回セールスパーソン問題（TSP）の拡張である Vehicle Routing Problem（VRP）を採用した．さらに，時刻表を満たすために，出発・到着時刻を設定する必要があること，出発してから到着するというような訪問順序が重要であることから，Time window 制約と Pickup/Delivery 制約を主な制約として加えた．その他にも，営業時間やバスの最大台数等を制約とした．また，通常の TSP や VRP では，各場所への訪問回数は一度のみを想定しているため，今回のケースのように異なる時間帯等での複数回の訪問は想定されていない．そこで，同じ場所であっても異なる訪問である場合には，別の訪問として複製することで対応している．さらに，営業エリアを考慮する必要があることから，対象地域を裾野エリア，岩波中心エリア，広域岩波エリアの 3 地域に分割し，それぞれ独立した問題として解を求めた．

Time window 制約とは，訪問時刻として設定した Time window の中でのみ訪問を許容する制約であり，宅配サービスにおける時間帯指定に相当する．本研究では，出発の場合は，出発予定時刻から 10 分後まで，到着の場合は，到着予定時刻の 10 分前まで許容するように Time window を設定した．Pickup/Delivery 制約とは，訪問順序に関する制約であり，例えば，フードデリバリーサービスでは，先に商品をピックアップしてからでないと，その商品をユーザのもとに届けることができないため（ユーザ宅のあとにレストランへ訪問しても意味がない），この制約を必要とする．今回のケースでは，乗客を出発地点で載せた場合のみ，目的地へ訪問する意味があることからこの制約を追加した．ただし，出発地点から目的地点へ直接訪問する必要はなく，別の場所を経由してから到着地点へ向かうことは許容されることに注意する．

VRP の最適解を求めることは，NP 困難であるため，実装コストや計算コストの観点から Local search により解を求めた．目的関数は，最大時間を要する経路の最小時間化であり，バス停間の距離には，直線距離を用いた．また，バスの速度は 12km/h，OD を抽出した際の自家用車の速度は，20km/h を想定し，バスの速度でも到達可能なように移動時間を補正した．また，必ずしもすべてのバス停を巡回することが現実的でない可能性を考慮し，乗車人数に比例するペナルティに基づき，巡回しないバス停の存在も許容している．

表-4 バスルート全体の効率性

（OD ごとの人数をサンプリングレートで拡大した値）

エリア	需要（人）	カバー率（%）	バス台数
裾野エリア	140	100	2
岩波中心エリア	3,415	97.7	4
岩波広域エリア	80	100	1



図-4 バスの経路例

5. バスルートの効率性評価

(1) バスルート全体の効率性

これまでに開発したソルバーを静岡県裾野市のデータで検証した結果を**表-4** に示す．計算コストなどを考慮し，3 名以上の需要がある OD のみを対象とした．一方で少ない需要であっても，他の需要との位置関係等によっては少ないコストで対応できる可能性もある．移動需要全体を考慮した分析は，今後の課題である．需要の集中している岩波中心エリアであっても，4 台という比較的少ないバス台数で全体の 97.7%の需要を満たせていることがわかる．**図-4** に示した経路例を見ると，POI が存在していないバス停の存在がやや目立ち，Time window および Pickup/Delivery 制約により，比較的複雑な経路となってしまっていることも判明した．より適切なバス停の選定方法等についても今後の課題としたい．

6. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では，大規模なGPSデータからユーザの滞留点，および時刻表を自動で作成し，時刻表と訪問順序の制約を満たしながら，移動需要をより少ないコストで満たす経路を探索した．本研究の成果は，以下の通りである．

a) ユーザ滞留点の抽出

様々な測位間隔や測位点数からなる億単位のGPSデータから各ユーザの滞留地点を緯度・経度レベルで網羅的に抽出した．メッシュ単位での集計と比較し，メッシュ境界付近の滞在判定の曖昧さや，同一メッシュ内の行動の欠落などの問題はクリアできたと考えられる．

b) 各ユーザの OD から時刻表の候補の生成

自家用車による現状のすべての移動需要を満たすバスルートの提案は，非現実的であることから，類似するユーザの行動（OD）を自動で集約し，適切な規模の時刻表を生成する手法を開発した．

c) 制約を満たしつつ移動需要を満たすルートの生成

バスの台数や営業時間，時刻表制約や訪問順序制約などの制約と移動需要を満たしながら最小の移動コストでの運行ルートを生成した．

(2) 今後の課題

本研究の課題，改良や活用の方向性として，以下の事項が挙げられる．

a) 移動需要設定の精緻化

本研究では静岡県裾野市における 1 ヶ月間のユーザの移動需要に基づき分析を行った．曜日や季節，他の市区町村での適用可能性の確認は今後の課題である．加えて，本研究では，年代や性別ともに約 6 割が不明であったことから，属性別の傾向の違いについて考慮していない．多くの地方都市においては，自家用車から公共交通へ転換させるハードルは高いため，運転に不安を覚える高齢者や自動車免許を保有していない学生や若年層を対象とした分析も興味深い．

b) 複雑な運行ルートの改善

自家用車による移動をそのまま OD として設定したため，生成された経路が複雑になってしまっている．適切なバス停の選定ロジックの考案は今後の課題としたい．

c) 地域住民との協業

大規模な GPS データを滞留点や OD などの解釈可能な形式に集約し，地理空間上で表現することで，地域住民との協業を促進できる可能性がある．データのみでなく地域住民のドメイン知識を最大限に活用することで，バス停位置の提案や，バス以外も含めたより地域住民の生活に根ざした移動手段の提案等につなげることは重要な課題である．

REFERENCES

1) 国土交通省：地域公共交通の活性化及び再生に関する法律について，<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000055.html>（最終アクセス 2023.10）
2) 国土交通省：地域公共交通計画の作成状況一覧（令和 5 年 6 月末時点），<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/content/001597329.pdf>（最終アクセス 2023.10）
3) 国土交通省：パーソントリップ調査の実施都市圏一覧，<https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/content/001514465.pdf>（最終アクセス 2023.10）
4) 菊池雅彦，岩舘慶多，羽藤英二，茂木渉，森尾敦：全国 PT 調査データと携帯電話基地局データを用いた地方都市での OD 表の実務的推計，土木計画学研究・論文集第 35 巻，pp. I_677-I_691.，2018
5) 越智健吾，関信郎，岩舘慶多，石神孝裕，若井亮太，石井良治，杉田渓：PT 調査データとビッグデータを用いた実務的な詳細スケール目的別手段別 OD 表の作成手法，土木計画学研究・論文集第 36 巻，pp. I_709-I_717.，2019
6) 長谷川大輔，鈴木勉：地域内フローを考慮した地域公共交通システムにおけるバス・デマンド交通併用の効果分析，地理情報システム学会講演論文集，2017
7) 吉羽崇，小林亮博，中管章浩，南川敦宣，冨岡英虎，森本章倫：スマートフォン位置情報データを活用したバス需要予測に関する研究，土木計画学研究・論文集第 38 巻，pp. I_767-I_775.，2021
8) 国土交通省不動産・建設経済局情報活用推進課（政策統括官付）：地域課題解決のための人流データ利活用の手引き Ver1.0（令和 4 年 3 月），2022
9) 国土交通省都市・地域整備局都市計画課都市交通調査室：総合交通体系調査の手引き（案）（平成 19 年 9 月），2007
10) 国土交通省都市局都市計画課都市計画調査室：スマート・プランニング実践の手引き【第二版】（平成 30 年 9 月），2018
11) 国土交通省都市局都市計画課都市計画調査室：総合都市交通体系調査におけるビッグデータ活用の手引き【第 1 版】（平成 30 年 6 月），2018
12) 国土交通省都市局都市計画課都市計画調査室：総合交通体系調査の事例集（平成 30 年 6 月），2018
13) 裾野市：裾野市の月別人口統計 令和 3 年，<https://www.city.susono.shizuoka.jp/soshiki/2/2/4/1/15105.html>（最終アクセス 2023.10）
14) Ester, M., H. P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *In Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Portland, OR, AAAI Press, pp. 226-231. 1996

15) Cakmak, Eren and Plank, Manuel and Calovi, Daniel S. and Jordan, Alex and Keim, Daniel: *Spatio-temporal clustering benchmark for collective animal behavior*, Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Animal Movement Ecology and Human Mobility, pp. 5-8, 2021
16) R. Campello, D. Moulavi, and J. Sander, Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates In: Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, Springer, pp 160-172. 2013

(Received October 10, 2023)
(Accepted October 10, 2023)

OPTIMIZATION OF BUS ROUTE AND OPERATING TIME TABLE BASED ON GPS DATA

Teruyuki KOTAKE and Noriaki HIROKAWA

Useful travel information such as person trip survey and metropolitan traffic census is limited to a part of urban area, and many of them are prepared using walking quantity survey and questionnaire results in designing bus routes in local areas and districts, but both quality and quantity are not sufficient. In addition, even if detailed departure and arrival points (ODs) are identified, it is not easy to design a route to meet the travel demand. In this study, we developed a method to generate an optimal bus route to meet the observed travel demand using large-scale GPS data and a route optimization technique. The optimal operating route is generated by searching the route which satisfies the travel demand with less cost, while the constraint of time table and visit order is satisfied, by making the time table in which the residence point of the user and the appropriate granularity from GPS by the density base clustering.