

世帯不在率を考慮した 訪問最適化手法の基礎研究

向井 明都¹・円山 琢也²

¹学生会員 熊本大学大学院自然科学教育部土木建築学専攻（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
E-mail: 226d8370@st.kumamoto-u.ac.jp

²正会員 熊本大学教授 大学院先端科学研究部（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
E-mail: takumaru@kumamoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

宅配便の再配達は配送車両の運転手の労働時間の増加等につながる社会的に重要な問題である。再配達
の要因の一つに、単身世帯や女性就業者の増加による世帯の不在率が上昇したことが挙げられ、世帯不在
の実態を、交通調査や社会調査を活用して明らかにした研究が蓄積されている。そこで本研究では、世帯
不在の実態を踏まえた効率的な訪問最適化問題を考える。具体的には、巡回セールスマン問題に世帯の不
在率を考慮することで、移動距離を減少させながら、世帯不在を避けるような訪問順序を決定する問題で
ある。本稿では、その定式化、不在率を考慮した場合の経路選択例を示す。

Key Words: *traveling salesman problem, households with every member out-of-home, home delivery, household travel survey*

1. はじめに

(1) 背景及び目的

近年、ライフスタイルの変化とともに電子商取引が急速に拡大し、宅配便の取り扱い個数が増加している。宅配便の取り扱い個数は 2021 年までの直近 5 年で約 9.3 億個増加し、2021 年度は約 49.5 億個に上っている^{注1)}。一方で、宅配便の個数のうち約 11.7% が訪問時の不在により再配達となっている^{注2)}。トラックが利用される配達における再配達の増加は二酸化炭素の排出量増加やドライバーの労働力増加等の大きな社会的損失を引き起こしている。再配達削減のための施策として、宅配ボックスの設置や郵便局・コンビニエンスストアなどで一時的な荷物預かりサービスは存在するが、再配達は依然として発生している。そもそも生鮮食品、冷凍食品等の配達では自宅の宅配ボックスの利用がしにくい場合もある。

また、宅配便のみならず、訪問調査においても世帯不在は効率的な調査の障害となる。例えば、2016 年 4 月の熊本地震の応急仮設住宅での住まい意向調査を目的とした聞き取り訪問調査においても、訪問時の不在により、仮設団地を何度も巡回することとなり、調査の長期化及び調査員の身体的・精神的負担増が報告されている^{注3)}。このように、世帯不在による再配達、再訪問は、重大な社会問題の 1 つといえる。

本研究では、世帯の不在状況を考慮した訪問順序最適化問題を構築することを目的とする。本研究で用いる世帯の不在状況は、既往研究で提示された世帯不在率を活用する。世帯構成員全員が不在の時間帯を世帯不在の状態と定義し、ある時間帯において、対象世帯のうち世帯不在の状態にある世帯の割合が世帯不在率と定義される^{注4)}。既往研究の事例では、パーソントリップ調査（以下、PT 調査）や社会生活基本調査等の、人の移動や生活時間の配分に着目した社会調査から世帯不在率が算出されている。方法論として、既存の巡回セールスマン問題について、世帯不在率を考慮して改良する。

(2) 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

配送計画問題や巡回セールスマン問題に関する研究はこれまで数多く蓄積されている。Kris *et al.*^{注5)}は 2009~2013 年に発行された配送計画問題の研究の分類を行なった。時間枠制約や容量制約を考慮した基本的な配送計画問題のみならず、配送車両の均一性や道路状況の不確実性に着目した研究など幅広く行われていることが明らかになった。一方、世帯の不在に着目した研究については言及されていなかった。

世帯の不在に着目した研究例として、橋本^{注6)}は、顧客の在宅率に着目した配送経路の構築手法を提案している。提案手法により、訪問時の世帯の在宅率を向上させた。

ただ、在宅状況は実際のデータの裏付けのない仮想的な設定で行われている。van Duin *et al.*⁶⁾は、配送履歴データから配送結果を予測する方法を提案し、それを基に配達効率化のための提案を行った。その結果、宅配前に顧客に配達時間について連絡を取ることが効率化に有効な手段であることを示した。また、配達効率がその地域の人口特性と密接に関係していることを明らかにした。Shenle *et al.*⁷⁾は、世帯や中小企業の電気使用データから、世帯不在率を算出し、配送計画問題に適用した。その結果、不在率を考慮した結果が、訪問成功率を向上させ、総移動距離を減少させることになった。Ohsugi and Koshizuka⁸⁾は、電力スマートメータから取得されるデータをもとに、在宅不在の予測を行い、経路選択に活用することで、87.5%の不在配達を減少させた。他にも、Ohsugi *et al.*⁹⁾は、不在率と不在配達のコストを考慮した巡回セールスマン問題である Traveling Salesman Problem with Occupancy Prediction を提案している。片橋ら¹⁰⁾は、2016年4月に発災した熊本地震の応急仮設住宅における聞き取り調査の訪問データを利用し、世帯属性別の時間別在宅傾向を基にした訪問の効率化法を構築した。

このように、世帯不在率を考慮した研究は蓄積されつつある。ただ、実際の社会調査より算出した世帯不在状況を活用した事例はない。社会調査から算出した不在率の推定値は、スマートメータが未設置である場合や、そのデータが利用できない場合も適用可能である利点があり、研究の価値は少なくないと考えられる。

次に世帯不在率を算出した研究の事例を示す。高橋ら⁴⁾は熊本市圏 PT 調査のデータを用いて、個人及び世帯不在率の算出法を構築し、不在率の実態を把握した。経年比較を行い、15年間で個人不在率に大きな変化はないが、世帯不在率は大幅に向上したことを明らかにした。深堀ら¹¹⁾は、社会生活基本調査を用いた個人及び世帯不在率の算出法の構築、経年変化を分析した。また、社会生活基本調査と PT 調査を比較することで、PT 調査におけるトリップ記入漏れの可能性を示唆した。このように、世帯不在を算出する事例はあるが、その実績を課題解決に活用した事例は見当たらない。

そこで、本研究では、実際の社会調査に基づく世帯の不在状況を考慮した訪問の最適化手法を構築し、訪問調査等の効率化に貢献する。本手法は PT 調査や社会生活基本調査の新たな活用例にもつながると考えられる。

2. 使用データ

本研究で使用した世帯不在率は、Fukahori and Maruyama¹²⁾で利用されているデータを再度集計して作成した。具体的には、1987, 1997, 2005, 2015 年の計 4 回

分の全国 PT 調査の全国 41 都市データから算出した世帯不在率を活用している。世帯属性の分類は、15 歳以下の子供がいる世帯、現役世帯 (20-64 歳世帯)、高齢世帯 (65 歳以上の人のみで構成される世帯)、その他の世帯の 4 種類である。算出した世帯属性別の世帯不在率を図-1 に示す。

本研究では、図-2 のように xy 平面で、 $0 \leq x \leq 100, 0 \leq y \leq 100$ の範囲に顧客世帯が分布するとする。その顧客世帯の分布をいくつかのパターンに分けて、分析する。また、顧客世帯には、上記の 4 種類の中からいずれかの世帯属性を付与する。出発地点である depot は $(x, y) = (50, 50)$ に設定する。

3. 方法

(1) 問題設定

以下を仮定する。

- ・ 8:00~20:00 の時間帯の間に、一台の配送者が全顧客世帯を 1 日で訪問する
- ・ 顧客先での対応にかかる時間は無視し、0 とする。
- ・ 顧客が不在により訪問が失敗した場合には、後日再訪問する。
- ・ 再訪問は、訪問に失敗した顧客世帯をまとめて訪問し、再訪問は必ず成功する。

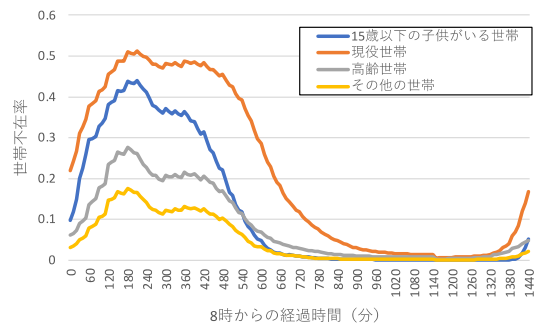


図-1 世帯属性別の世帯不在率

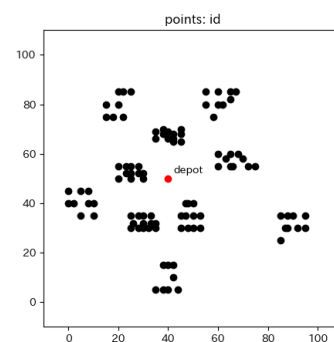


図-2 世帯の設置パターン例

(2) 定式化

まず、最初の訪問の最適化を定式化する。デポのノードを $\sigma(0)$ とし、顧客間で形成される有向グラフを $G = (V^+, A)$ とする。顧客の集団を $V = \{\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(i), \dots, \sigma(n)\}$ とし、 $V^+ = V \cup \{\sigma(0)\}$ がノードの集合、 A はリンクの集合とする。ノードは顧客、リンクは顧客間の経路を示している。リンク $(\sigma(i), \sigma(i+1)) \in A$ の移動距離 $d_{i,i+1}$ 、移動時間 $t_{i,i+1}$ は0以上である。また、移動時間は、訪問者の移動速度に依存するが、速度は一定を仮定する。訪問順序 $S = [\sigma(1), \dots, \sigma(n)]$ とし、 n を訪問する顧客数とする。目的関数はデポから最後に訪問する顧客までの移動距離と不在率、最後に訪問する顧客からデポまでの距離を合計したものとし、この最小化を行う。また、顧客 $\sigma(i)$ 訪問時の不在率を $P_{g(i)}(time)$ とする。 $g(i)$ は顧客 $\sigma(i)$ の世帯属性を示す。 $time$ は顧客の訪問時刻を示し、訪問開始時刻の8時を0分として、終了時刻の20時までの720分を値域とする。 $\alpha (\geq 0)$ は不在率の重みであり、 α の値により目的関数に不在率が与える影響が変化する。

$$\min f(S) = \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ d_{k,k+1} + \alpha P_{g(k+1)} \left(\sum_{l=1}^k t_{l-1,l} \right) \right\} + d_{n,0} \quad (1)$$

なお、今回の定式化では制約条件を設定しない。今後の展開として時間枠制約、容量制約、複数の訪問者等の制約条件を導入することを検討している。

次に、顧客訪問時の不在判定について説明する。 pr を $[0,1]$ の一樣乱数とする。

$$pr > P_{g(i)}(time) \quad (2)$$

上記の場合に、顧客が在宅と判定され、訪問が成功したとする。また、訪問失敗した顧客は後日再度訪問される。再訪問時には、必ず訪問は成功するとする。なお、再訪問の目的関数は、最初の訪問の定式化と異なり、不在率を考慮せず、距離のみで構成される。再訪問順序 $S' = [\sigma(1), \dots, \sigma(m)]$ と定義し、 m を再訪問する顧客数とする。以下に再訪問時の定式化を示す。

$$\min f(S') = \sum_{k=0}^{m-1} \{d_{k,k+1}\} + d_{m,0} \quad (3)$$

(3) ソルバー

本研究では、メタヒューリスティクスの1つである反復局所探索法を用いた。反復局所探索法の近傍操作には2-opt法を用いている。汎用ソルバーである混合整数計画ソルバーでは、不在の判定などの表現が困難だと判断し、自由な設計が可能なメタヒューリスティクスを採用した。

4. 結果と考察

仮想の状況を設定して、目的関数に世帯不在率を考慮した場合の結果を検証した。なお、式(1)において、不在率導入前は不在率の重み α が0の状態であり、 $\alpha > 0$ にすることで不在率を目的関数に導入する。徐々に α の値を大きくすることで、目的関数に不在率が与える影響を大きくすることができる。

初めに、開発したソルバーが想定通りの挙動をするかどうか検証する。対角上に現役世帯とその他の世帯を合計4世帯設置した状況を想定する。この世帯の組み合わせが最も不在率の差が大きくなるため、この設定を採用した。この場合の最短経路の例は図-3のようになる。ここで図-1より、時間経過すると現役世帯の不在率が特に大きくなる。よって、不在率を考慮すると先に現役世帯の顧客を2世帯訪問してからその他の世帯を2世帯訪問する経路になることが推測される。この仮説を検証した。

不在率を導入し、 α を大きくした結果、 $\alpha=846$ の時に経路変更が行われ、2つの現役世帯の顧客を先に訪問する、図-4のような経路になった。従って、仮説通りの結果となり、ソルバーが正常に機能していることが確認できた。訪問経路は不在率を導入することで、世帯不在を避けることを優先した経路になり、走行距離は124.85から148.28に変化した。また、今回の検証では、 α を大きくしないと経路変更は発生しなかった。これは、図-1より、現役世帯とその他の世帯の不在率の差のオーダーが0.01~0.1単位であり、顧客間の距離と比べて、非常に小さいためであると考えられる。

次に、世帯属性が同じである顧客の集団を2つ設定した結果を示す。図-5の左の顧客の集団の世帯属性をその他の世帯、右の集団の世帯属性を現役世帯と設定する。次に検証結果を示す。不在率導入前の経路選択の結果を図-5、不在率導入前後の比較結果の例を表-1に示す。なお、表-1の結果は同じ条件下で、80回検証を行った結果の平均を示している。今回の検証では、不在率導入前は、その他の世帯の顧客集団を先に訪問していたが(図-5)、不在率導入後は現役世帯の顧客集団を先に訪問する経路選択を行っている。これは先ほどの検証と同じく、図-1より、現役世帯の時間経過による不在率の増加が、その他の世帯の不在率の増加よりも大きいことが原因だと考えられる。従って、先に現役世帯を訪問する結果となったと考えられる。

また、不在率導入の結果、訪問時の顧客の平均不在率が2%減少する結果となった。よって、不在率を導入することで、顧客の訪問が成功しやすくなりうることが示唆された。初回訪問時の不在件数も、不在率導入後の方

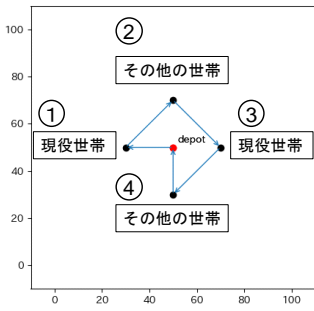


図-3 不在率導入前の経路選択

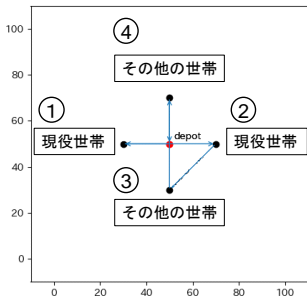


図-4 不在率導入後の経路選択

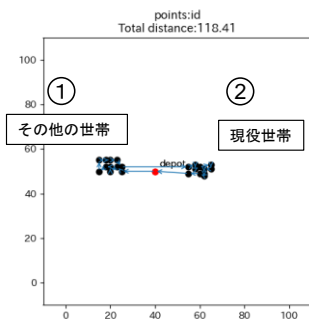


図-5 不在率導入前の経路選択

表-1 不在率導入前後の比較結果

	導入前 ($\alpha=0$)	導入後 ($\alpha=10$)	
式(1)	目的関数 評価値*	118.4	151.7
	移動距離	118.4	117.8
	不在率 評価値	0	33.9
	平均不在率(%)	18	16
	不在件数	4.75	3.54
式(4)	目的関数評価値 (移動距離)	68.47	64.37
	目的関数評価値 の合計	186.87	216.07
	移動距離の目的 関数値の合計	186.87	182.17

*移動距離と不在率評価値の合計が
目的関数評価値となる。

が平均で 1.21 件少なく、再訪問時も含めた総移動距離も少なくなることが明らかになった。

5. 結論

本研究では、既往研究の世帯不在率を活用した訪問最適化問題を定式化した。経路選択に不在率を踏まえることで、訪問時の不在や再訪問時も含めた総移動距離を減少しうる試算結果を示した。また、まだ検討の初期段階であるが、社会調査から算出した世帯不在率の活用例について示すことができた。課題と今後の展開を以下に述べる。

- 1) 世帯配置を都市部や過疎地等の日本の世帯の配置の様々な状況で検証を行う。
- 2) 時間枠制約、容量制約、複数の訪問者等のより現実に近い状況を再現する。

これらの課題を解決することで、訪問調査や宅配便における効率化に貢献できると考えている。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19K21997 の支援を受けた成果の一部です。

NOTES

注1) 国土交通省：宅配便の再配達削減に向けて、
https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/re_delivery_reduce.html

REFERENCES

- 1) 円山 琢也：熊本県益城町における仮設住宅聞き取り調査と復興計画策定状況，住宅，Vol. 66, pp. 48-55, 2017
- 2) 渡邊 萌，佐藤 嘉洋，円山 琢也：熊本地震の復興初期における益城町仮設住宅入居者の居住地選択意向，都市計画論文集，Vol. 52, No. 3, pp. 1094-1100, 2017.11.
- 3) 高橋 瑠衣，川野 倫輝，佐藤 嘉洋，円山 琢也：PT 調査に基づく世帯単位の時間帯別不在率の経年比較分析，土木学会論文集 D3, Vol.74, No.4, pp. 387-397, 2018.
- 4) Kris, B., Katrien R. and Inneke V. N.: The Vehicle Routing Problem: State of the art Classification and Review, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 99, pp. 300-313, 2016.
- 5) 橋本 哲也：顧客の在宅率を考慮した配送経路の構築，中央大学大学院研究年報 理工学研究科編，2021.
- 6) Van Duin, J.H.R., De Goffau, W., Wiegmans, B., Tavasszy, L.A., Saes, M.: Improving home delivery efficiency by using principles of address intelligence for B2C deliveries, *Transportation Research Procedia*, Vol. 12, pp. 14-25, 2016.
- 7) Shenle, P., Vaggelis, G., Yufei, H., Etta, G. and Bin, Q.: Using customer-related data to enhance e-grocery

- home delivery, *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 117, No. 9, pp. 1917-1933, 2017.
- 8) Ohsugi, S., Koshizuka, N.: Delivery route optimization through occupancy prediction from electricity usage, *In: 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 842–849, 2018.
- 9) Ohsugi, S., Negishi, S., Okada, K., Yoshii, H., Tanaka, K., Koshizuka, N.: Traveling Salesman Problem on Smart Meter Infrastructure, *2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2021.
- 10) 片橋 匠, 佐藤 嘉洋, 円山 琢也: 世帯属性別の時間帯別調査可能率に基づく仮設住宅訪問調査の効率化に関する基礎研究, 土木学会論文集 D3, Vol.74, No.5, pp. I_191-I_200, 2018.
- 11) 深堀 達也, 円山 琢也: 社会生活基本調査による個人・世帯不在率の経年変化: 交通調査のトリップ記入漏れ分析への示唆, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.78, No.3, pp. 93-104, 2022.
- 12) Fukahori, T. and Maruyama, T.: Households with every member out-of-home (HEMO): Comparison using the 1984, 1997, and 2012 household travel surveys in Kumamoto, Japan, *Journal of Transport Geography*, Vol.82, 2020.

PRELIMINARY STUDY ON DELIVERY ROUTE OPTIMIZATION
CONSIDERING HOUSEHOLDS WITH EVERY MEMBER OUT-OF-HOME

Akito MUKAI and Takuya MARUYAMA