# 顧客の在宅の不確実性を考慮した訪問最適化

向井　明都[1]・安藤　宏恵[2]・円山　琢也[3]

[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　熊本大学助教　くまもと水循環・減災研究教育センター
（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
E-mail: hiroeando@kumamoto-u.ac.jp

[3]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)

近年では，物流システムの円滑化における再配達がもたらす課題が国際的に認識されており，再配達の減少を目的にした研究が蓄積されている．再配達を減少させるために，顧客の在宅状況の不確実性に着目した事例も存在し，家庭エネルギー使用データや宅配履歴データの活用により在宅の不確実性を表現する事例がある．本稿では，社会調査に基づいた顧客の在宅の不確実性を活用した訪問最適化法を構築する．具体的には，顧客の在宅の不確実性を考慮した確率的配送計画問題による訪問最適化である．最初の訪問時に不在と判定された顧客を全顧客訪問後に再度訪問することを前提に，最初の訪問の移動距離と再訪問の移動距離の期待値の合計を最小とする定式化を行なった．既存研究で提案されている Sample Average Approximation 法に基づく計算方法を構築し，構築した手法の妥当性を検証した．その結果，構築した手法が厳密解に近い値を算出できていることを確認した．

***Key Words:*** *traveling salesman problem, vehicle routing problem, 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1)]．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時間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，生鮮食品，冷凍食品等では宅配ボックスが利用しにくい場合もあり，依然として再配達の負担は少なくない．

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[1)2)]．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，これらの問題に対して，顧客の在宅の不確実性を考慮した確率的訪問順序最適化問題を構築することを目的とする．本研究で用いる顧客世帯の在宅の不確実性は，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[3)]．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．

### (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．Braekers *et al.*[4)]は

2009~2013 年に発行された配送計画問題の研究を分類した．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，顧客の在宅の不確実性に着目した研究については言及されていなかった．

顧客の在宅の不確実性に着目した研究例として，橋本[5]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，それを基に配達の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．Pan *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た．Ohsugi and Koshizuka[8]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．Zhang *et al.*[11]は，宅配履歴データから顧客の在宅確率を算出し，顧客の不在という不確実性下でのロバスト最適化を行った．手法は強化学習を活用した，ヒューリスティクスを用いた．

一方，Florio *et al.*[12]によって Availability Profiles (以下，APs)と定義された顧客の在宅の不確実性を用いて最適化を行っている事例が複数みられる．APs は宅配可能時間を複数の時間枠に分割し，各時間枠内を訪問した場合に訪問が成功する確率を対応付けたデータである． Florio *et al.*[12]は APs を用いて，配送ルートの配達成功率を最大化する定式化を構築し，分岐価格法で最適化を行った．Voigt *et al.*[13]は，既存の VRP に APs を考慮する VRP with APs (VRPAP)を提案した．また，イギリスの時間使用調査から APs を算出後，個人の年齢，職業従事の状態で分類し，APs を利用した最適化を行った．その結果，訪問失敗を防ぐための移動距離を 6%増加させた場合に，配達失敗率を 12%減少させることができることを示した．Özarik *et al.*[14] は，予め訪問経路に訪問失敗時の再配達を組み込んだ，確率的配送計画問題を定式化した．並列計算により効率よく計算可能になる pALNS を提案し，Sample Average Approximation 法に組み込んで最適化を行った．

このように，顧客の在宅の不確実性を考慮した研究は蓄積されつつある．しかしながら，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少なく，世帯単位での不在状況を活用した事例はない．訪問は顧客の世帯を対象に行うため，個人単位の不在状況だけでなく，世帯全体の不在状況を活用することは重要である．また，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る．

次に世帯不在率を算出，または，分析した研究の事例を示す．高橋ら [3]は熊本都市圏 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 [15]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．Maruyama and Fukahori[16]は，世帯不在率の変化を分解する新たな手法を用いて変化の考察を行った．その手法では，世帯不在率の変化を世帯属性の割合と各世帯属性における世帯不在率のそれぞれの変化に分解し，分析した．同じく，Fukahori and Maruyama[17]は，世帯不在率の日本の市町村別の経年変化の分析を行った． Kikuchi and Maruyama[18]は，1984，1997，2012 年の熊本都市圏 PT 調査データから世帯不在時間の空間的な変化を分析した．このように，世帯不在を算出，分析している事例はあるが，その実績を配達や訪問の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 Maruyama[17] 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

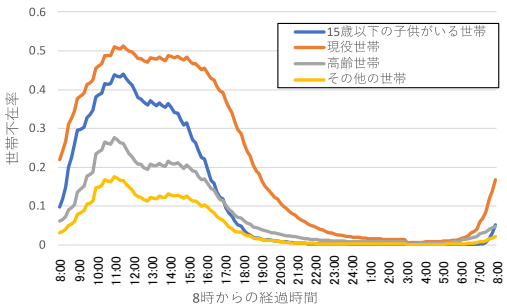



**図-1**　世帯属性別の世帯不在率

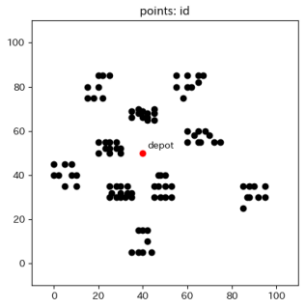



**図-2**　世帯の配置パターン例

**表-1**　定式化に用いる記号の説明

| 記号 | 説明 |
|---|---|
| $V$ | 最初の訪問時の顧客と depot の集合，顧客数は$n$ |
| $V^c$ | $V$の集合から depot を除いた，最初の訪問時の顧客の集合 |
| $\bar{V}$ | 再訪問の顧客と depot の集合 |
| $\bar{V}^c$ | $\bar{V}$の集合から depot を除いた，再訪問の訪問時の顧客の集合 |
| $t$ | 訪問可能時間を一定の時間ごとに分割した時間の枠 |
| $T$ | 時間枠$t$の集合 |
| $p_{it}$ | 顧客$i$の時間枠$t$における訪問時の不在の確率 |
| $\xi_{it}$ | 訪問成功確率$p_{it}$をもつベルヌーイ分布に従う実現値(訪問成功時に 1，失敗時に 0) |
| $w$ | 各顧客の時間枠ごとの在宅・不在のシナリオ |
| $W$ | シナリオ$w$の集合 |
| $c_{ij}$ | リンク$ij$の距離 |

| 決定変数 | 説明 |
|---|---|
| $x_{ij}$ | 配送経路がリンク$ij$を通過する時に 1，通過しない時に 0 |
| $q_{ij}^w$ | シナリオ$w$で，リンク$ij$を追加時に 1，それ以外は 0 |
| $r_{ij}^w$ | シナリオ$w$で，リンク$ij$を削除時に 1，それ以外は 0 |
| $y_{it}$ | 顧客$i$が時間枠$t$に訪問された時に 1，それ以外は 0 |

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．

## 3. 方法

### (1) 問題設定

以下の前提条件を仮定する．

- 8:00~20:00 の時間帯の間に，1 人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
- 顧客が不在により最初の訪問が失敗した場合には，後日再訪問する．最初の訪問が成功した顧客には，再訪問は行わない．
- 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．
- 再訪問の訪問順序は，最初の訪問時の訪問順序から訪問に成功した顧客を除いた順序とする．

### (2) 定式化

Özarik *et al.*[14]の定式化を，本研究の問題設定に合わせて変更する．式(5)~(15)はより精査したい．利用する記号を**表-1** に整理する．有向グラフ$G = (V, A)$を定義し，$V \cup \bar{V}$をノードの集合，$A$をリンクの集合とする．$V = \{\{0\}, V^c\}$，$\bar{V} = \{\{0\}, \bar{V}^c\}$とし，0 を depot，$V^c = \{1, \dots, n\}$を最初に訪問する顧客の集合，$\bar{V}^c = \{n+1, \dots, 2n\}$を再訪問する顧客の集合とする．また，ノード$i \in V^c$と$n+i \in \bar{V}^c$は同一の位置情報を持つ．従って，ノードは，顧客を表現し，リンクは，その顧客間の移動を表現する．

訪問可能時間（8:00~20:00）を一定の時間枠$t$に分割し，$t$の集合を$T$とする．世帯不在率を時間枠$t$ごとに分割することで，顧客$i$の訪問可能時間中の世帯不在率を$p_{i1}, \dots, p_{i|T|}$と表す．時間枠$t$における顧客$i$の訪問可否の情報をもつ独立な確率変数を$\xi_{it}$とする．$\xi_{it}$は成功確率$\bar{p}_{it}$のベルヌーイ分布に従い，訪問成功時に 1，失敗時に 0 の値をとる．訪問経路の各顧客の在宅・不在のシナリオを$w$として，全ての在宅・不在シナリオの集合を$W$と定義する．全在宅・不在シナリオ数は，各顧客の時間枠$t$ごとの在宅と不在の組み合わせを掛け合わせるため，$|W| = 2^{n|T|}$となる．在宅・不在シナリオ$w$における$\xi_{it}$の実現値を$\xi_{it}^w$で表す．在宅・不在シナリオ$w$における確率は$p_w = \prod_{i \in V^c} (p_{it})^{\xi_{it}^w} (1 - p_{it})^{1-\xi_{it}^w}$と表現される．

本研究では，問題を 2 段階線形確率計画問題として定式化する．再訪問の移動距離をペナルティとして，償還請求費用(recourse cost)に導入する．償還請求費用は$Q(x, \xi)$と定義し，その期待値$\mathbb{E}[Q(x, \xi)]$を目的関数に加

える．

$$\min_{x\in X}\{g(x) \coloneqq cx + \mathbb{E}[Q(x,\xi)]\} \quad (1)$$

$Q(x,\xi)$は，第 1 段階の最初の訪問経路の決定係数$x \in \mathbb{R}^n$を考慮した，第 2 段階問題である再訪問の移動距離の期待値となる．

第 1 段階では，コスト$cx$に加え，第 2 段階の期待コストを最小化するように決定が行われる．$\xi$が$W$の実現値の有限集合で表現できる場合，確率計画問題を確定論的な最適化問題とみなすことができる．具体的に，$\mathbb{E}[Q(x,\xi)]$を以下のように定義することができる．

$$\mathbb{E}[Q(x,\xi)] = \sum_{w\in W} p_w Q(x,w) \quad (2)$$

$$= \sum_{w\in W} p_w \left( \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}(x_{i,j} + q_{ij}^w - r_{ij}^w) \right) \quad (3)$$

シナリオ$w$は訪問経路の各顧客が在宅かどうかを表しているため，実現値$\xi$の数は，$2^{n|T|}$となる．従って，顧客の増加によって，指数関数的に計算量が増加する．

$$min \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}x_{ij}$$

$$+ \sum_{w\in W} p_w \left( \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}\left(x_{ij} + q_{i+n,j+n}^w - r_{i+n,j+n}^w\right) \right) \quad (4)$$

Subject to

$$\sum_{j\in V} x_{ij} = 1 \qquad i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{j\in V} x_{ij} - \sum_{j\in V} x_{ji} = 0 \qquad i \in V \quad (6)$$

$$\sum_{t\in T} y_{it} = 1 \qquad i \in V^c \quad (7)$$

$$\sum_{t\in T} \xi_{it}^w y_{it} = d_{i+n}^w \qquad i \in V^c, w \in W, t \in T \quad (8)$$

$$d_i^w + d_j^w \geq r_{ij}^w \qquad i,j \in \bar{V}, w \in W \quad (9)$$

$$d_i^w - \sum_{j\in V}\left(r_{ij}^w - q_{ij}^w\right) = 0 \qquad i \in \bar{V}, w \in W \quad (10)$$

$$d_i^w - \sum_{j\in V}\left(r_{ji}^w - q_{ji}^w\right) = 0 \qquad i \in \bar{V}, w \in W \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad i,j \in V \quad (12)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \qquad i \in V^c, t \in T \quad (13)$$

$$r_{ij}^w \in \{0,1\} \qquad i,j \in \bar{V}, w \in W \quad (14)$$

$$q_{ij}^w \in \{0,1\} \qquad i,j \in \bar{V}, w \in W \quad (15)$$

目的関数は，式(4)に示すように，最初の訪問距離と再訪問の移動距離の期待値の和である．再訪問は，最初の訪問と同じ順序を基本とし，初回訪問を成功した顧客を除いて行く．よって期待値は，最初の訪問距離の合計値から訪問成功した顧客に関するリンクの距離を除き，新たに追加されたリンクの距離を追加することで算出する．式(5)は，最初の訪問ですべての顧客が 1 度訪問されることを表している．式(6)は，ノードに入るリンクの数の合計と出るリンクの数の合計が等しくなるフロー保存則である．式(7)は，最初の訪問にて，顧客$i$はある時間枠$t$の中で 1 度のみ訪問されることを表している．式(8)~(11)は再訪問の移動距離の期待値計算に関する制約条件である．式(8)は，シナリオ$w$で，顧客$i$の最初の訪問が成功したときに限り，顧客$i$は再訪問の経路から削除されることを表している．式(9)は，リンク$ij$が削除される場合は顧客$i$か顧客$j$のいずれか，または両方が削除された場合のみに限定されることを表している．式(10)は，再訪問の経路構築時の以下の操作を成立させるための制約である．顧客$i$が再訪問経路から削除時と非削除時の挙動を説明する．顧客$i$の削除時は，再訪問の経路からリンク$ij$が削除されるのみである．一方，顧客$i$が非削除時，つまり，顧客$j$が削除されることでリンク$ij$が削除された場合，顧客$i$は代わりに新たな経路が追加されることを表している．

### (3) 計算手法

本研究では，Özarik *et al.*[14]の提案する Sample Average Approximation 法 (以下，SAA 法) を用いて，最適化を行った．SAA 法は，確率的な最適化問題に対してモンテカルロ法を使って解く方法であり，サンプリングした解を基に平均値の信頼区間を算出し，解の評価を行う．2 段階確率計画問題における第 2 段階問題のシナリオ$w$の数は，$|W| = 2^{n|T|}$であり，顧客の数の増加に伴い，指数関数的に値が増加する．従って，一定以上の顧客数の場合には計算が極めて困難になる．よって，全シナリオ$W$から$|W'|$個のシナリオをサンプリングし，サンプリングした値で平均値を算出することで，$\mathbb{E}[Q(x,\xi)]$の近似を行う．

$$\mathbb{E}[Q(x,\xi)] \approx$$

$$\frac{1}{|W'|}\sum_{w\in W'} \left( \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}\left(x_{i,j} + q_{i+n,j+n}^w - r_{i+n,j+n}^w\right) \right) \quad (16)$$

従って，目的関数全体を以下のように表すことができる．

$$min \sum_{i\in V}\sum_{j\in V}\sum_{k\in K} c_{ij}x_{ijk} +$$

$$\frac{1}{|W'|}\sum_{w\in W'} \left( \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}(x_{i,j} + q_{i+n,j+n}^w - r_{i+n,j+n}^w) \right) \quad (17)$$

上記の目的関数と式(5)~(15) を合わせて，SAA 問題とする．また，$|W'|$の値の設定は，計算量を考慮しながら，第 2 段階問題の最適値に対し，分散が小さくなるような，十分に大きな値に設定する．

近似計算で算出された候補解$\tilde{x}$が，近似前の問題の最適解と差があるか，評価を行う必要がある．よって，厳密解を$v^* = min_{x\in X}\{g(x) \coloneqq cx + \mathbb{E}[Q(x,\xi)]\}$と定義し，候補解$\tilde{x}$との差を以下のように表現する．

$$gap(\tilde{x}) = g(\tilde{x}) - v^* \tag{18}$$

$gap(\tilde{x})$は解を評価する際の指標の 1 つとして，活用することができる．また，$g(\tilde{x})$の値は，標本平均として，以下のように推定される．

$$\hat{g}_{|W'|}(\tilde{x}) = c\tilde{x} + \hat{q}_{|W'|}(\tilde{x}), \tag{19}$$

ここで，$\hat{q}_{|W'|}(\tilde{x}) = \frac{1}{|W'|}\sum_{w\in W'} Q(\tilde{x},w)$とし，標本分散は以下のように計算される．

$$\hat{\sigma}^2_{|W'|}(\tilde{x}) = \frac{1}{|W'|(|W'|-1)} \sum_{w\in W'}\left[Q(\tilde{x},w) - \hat{q}_{|W'|}(\tilde{x})\right]^2 \tag{20}$$

よって，近似した$100(1-\alpha)$%信頼区間の上界は，以下のようにあらわすことができる．

$$U_{|W'|}(\tilde{x}) = \hat{g}_{|W'|}(\tilde{x}) + z_\alpha \hat{\sigma}_{|W'|}(\tilde{x}) \tag{21}$$

ここで，正規分布の信頼係数$\alpha$に対応する臨界値を$z_\alpha$とする．

一方，信頼区間の下界は，複数の SAA 問題に同じサンプル数を与えて，計算した結果を基に算出する．下界計算時のサンプルサイズ$|W''|$を与えた SAA 問題の解を$\hat{v}_{|w''|}$と表し，$M$回繰り返した場合のそれぞれの SAA 問題の最適解を$\hat{v}^1_{|w''|},\dots,\hat{v}^M_{|w''|}$と表現する．それぞれの SAA 問題は，独立同一分布に従うサンプル$|W''|$個のシナリオを持つとする．また，シナリオ集合同士の関係は$W \subset W', W \subset W''$ であり，大小関係は$|W| \gg |W'| \gg |W''|$となる．下界値は以下のように推定される．

$$L_{|W'|,M} = \bar{v}_{|W''|,M} - t_{\alpha,M-1}\hat{\sigma}_{|W''|,M} \tag{23}$$

ここで，$\bar{v}_{|W''|,M} = \frac{1}{M}\sum_{p=1}^{M}\hat{v}^p_{|W''|}$と定義し，$t_{\alpha,M-1}$は信頼係数$\alpha$を持ち，自由度$M-1$のt分布に従う，臨界値とし，$\hat{\sigma}_{|W''|,M} = \frac{1}{M(M-1)}\sum_{p=1}^{M}(\hat{v}^p_{|W''|} - \bar{v}_{|W''|,M})$と定義する．結果的に，信頼度$100(1-2\alpha)$%の統計的に有効な信頼区間の幅を以下のように算出することができる．

$$\widehat{gap}(\tilde{x}) = U_{|W'|}(\tilde{x}) - L_{|W''|,M} \tag{24}$$

それぞれの SAA 問題は，ヒューリスティックである ALNS アルゴリズムを用いて，解かれている．また，SAA 問題における解の評価は，上界算出時の解を採用する．

以下では，SAA 問題を解くための局所探索法を拡張した手法である，ALNS(Adaptive Large Neighborhood Search )を説明する．ALNS は様々な大規模の最適化問題に対応するためのアルゴリズムであり，これまでの改善履歴に応じて，適応的に最適化戦略を変更することが特徴である．ALNS は解の破壊操作と修正操作を繰り返すアルゴリズムであり，それぞれの破壊操作，修正操作において複数の戦略から確率的に操作を選択し，解の改善を行う．手法の構築には，Wouda et.al[19]が実装したアルゴリズムを基本にして，本研究の問題設定に合わせた再構築を行い，SAA 法の中に ALNS を組み込んだ．

## 4. 結果と考察

構築した手法の計算結果と総当たり法で計算した厳密解の結果を比較して，構築した手法の妥当性の検証した．検証用データとして，ランダムに配置した顧客を 9 世帯と depot を配置したデータを合計 10 パターン作成した．世帯配置の例を**図-3** に示す．総当たり法の計算に計算量の限界があるため顧客世帯数を 9 とした．総当たり法の計算量は，考えられる訪問経路数と各経路の全ての在宅・不在シナリオを掛け合わせることで算出することができる．顧客数を$n$としたとき，考えられる訪問経路数は$n!$となり，全ての在宅・不在シナリオは，各顧客が時間枠$t$ごとに在宅と不在の 2 つの状態のいずれかを持つ可能性があるため，$2^{n|T|}$となる．しかし，今回の検証では，顧客の在・不在が確定した時点で訪問時間は確定し，それ以外の時間枠の在・不在シナリオを考慮する必要はない．よって，各顧客の訪問時間の時間枠の在宅・不在シナリオのみを考慮することで，最適解の計算が可能になる．従って，計算回数は，$n!\,2^n$と表現することができる．9 世帯の場合は，考えられる訪問経路数が，$9! = 362880$，各経路の顧客世帯の不在パターンが，$2^9 = 512$となるため，$1.8\times10^8$回となる．

**表-2**に，各パターンの厳密解の計算結果，**表-3**に SAA 法と ALNS のパラメータ，**表-4** に SAA 法と厳密解の計算結果の比較を示す．はじめに，**表-3** の ALNS のパラメータについて説明する．破壊操作は，基本的な 3 種類を採用している．最悪除去は，最も距離の長いリンクを除去，ランダム除去は，ランダムでノードを除去，ランダムリンク除去は，ランダムに連続したノードを除去し，リンクを除去するアルゴリズムである．なお，破壊操作によって破壊される量は破壊度によってコントロールされる，顧客数が少ないため，今回の検証では比較的大きな数字である 30%を採用した．従って，一度の破壊操作で解全体の 30%が破壊される．修正操作は，貪欲法のみを採用している．貪欲法は，各段階における最適な選択を行うアルゴリズムであり，各ノードから最も近いノードを次の訪問されるノードとする．解の受容条件は，山

登り法を設定する．山登り法は，暫定的な最適解の評価値の悪化を許容せず，より評価値の良い結果であったときのみ受容する．

次に，検証の結果を考察する．**表-2** の結果より，いずれの場合も，1 度目の訪問距離の方が大きくなり，再訪問の移動距離の期待値の方が小さい結果となった．基本的に一度目の訪問世帯数よりも再訪問の訪問世帯数が少ないことが反映されたと考えられる．**表-4** の SAA 法と総当たり法による厳密解の比較結果によると，10 パターンのうち SAA 法により算出した信頼区間内に該当したのは 9 パターンであった．本検証の SAA 法のパラメータは信頼区間を 90%に設定しているため，妥当な結果であると言える．よって，SAA 法は乱数を用いた近似解を算出する手法であるが，厳密解に近い解を算出することができていることが明らかになった．

## 5. 結論

本研究では，顧客世帯の在宅の不確実性を考慮した訪問最適化の定式化を構築した．顧客への最初の訪問経路の決定を第 1 段階問題，顧客世帯への再訪問の移動距離の期待値の算出を第 2 段階問題とすることで，2 段階確立計画問題として問題の構築を行った．また，確率的最適化問題を解くための Sample Average Approximation 法のアルゴリズムを実装した．最後に，構築した手法の計算結果と厳密解との比較により，妥当性の検証を行い，構築した手法が厳密解に近い値を算出できていることを明らかにした．

今後は，構築した手法の安定性やパラメータ設定の変更による影響の検証を予定している．構築した手法は乱数を用いた手法であり，試行のたびに結果が大きく変化する可能性があるため，複数回繰り返した場合の結果のばらつきを確認する．また，構築した SAA 法，ALNS ともに多くのパラメータが存在し，パラメータ設定により，計算結果や計算効率が変化する可能性があるため検証する必要がある．これらの解法に関する安定性や再現性の検証後に，構築したモデルによる解析を予定している．具体的には，都市部や過疎地を想定した世帯配置に設定した検証，世帯属性を変更することで不在率の影響を確認する検証，訪問車両台数を増加させた場合の検証等を考えている．

**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

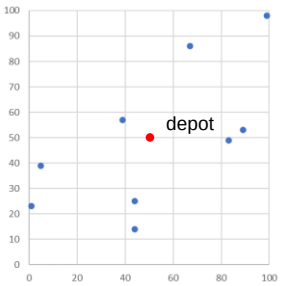



**図-3** 厳密解法との比較検証用の世帯配置例

**表-2** 総当たり法による厳密解の計算結果

| パターン | 1 度目の訪問距離 | 再訪問の移動距離の期待値 | 合計 |
|---|---|---|---|
| 1 | 296.0 | 97.5 | 393.5 |
| 2 | 282.1 | 84.2 | 366.3 |
| 3 | 333.4 | 81.1 | 414.5 |
| 4 | 308.3 | 104.8 | 413.1 |
| 5 | 279.7 | 74.8 | 354.5 |
| 6 | 300.7 | 110.2 | 410.9 |
| 7 | 286.6 | 94.51 | 381.1 |
| 8 | 256.7 | 47.6 | 304.3 |
| 9 | 320.9 | 84.1 | 405 |
| 10 | 279.7 | 74.82 | 354.5 |

**表-3** SAA 法と ALNS のパラメータ

| 手法 | パラメータ |
|---|---|
| SAA 法 | $\|W'\| = 1000, \|W''\| = 10, \|M\| = 5$<br>信頼係数 =90 %<br>終了条件：アルゴリズムの一連の流れを 2 回 |
| ALNS | 初期解：貪欲法<br>破壊度：30%<br>破壊操作：[最悪除去，ランダムリンク除去，ランダムノード除去]<br>修正操作：[貪欲法]<br>解の受容条件：山登り法 |

**表-4** SAA 法と厳密解の計算結果の比較

| パターン | 下界 | 最適解 | 上界 | 信頼区間幅 | 信頼区間内かどうか |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 360.8 | 393.5 | 419.0 | 58.2 | ○ |
| 2 | 336.6 | 366.3 | 394.6 | 58 | ○ |
| 3 | 366.9 | 414.5 | 438.9 | 72 | ○ |
| 4 | 368.8 | 413.1 | 436.6 | 67.8 | ○ |
| 5 | 335.1 | 354.5 | 390.2 | 55.1 | ○ |
| 6 | 374 | 410.9 | 436.1 | 62.1 | ○ |
| 7 | 381.7 | 381.1 | 412.1 | 30.4 | × |
| 8 | 290.8 | 304.3 | 323.8 | 33 | ○ |
| 9 | 363.6 | 405 | 436.2 | 72.6 | ○ |
| 10 | 427.8 | 465.6 | 486.3 | 58.5 | ○ |

**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) 渡邉 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) Braekers, K., Ramaekers, K. and Van Nieuwenhuyse, I.: 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. and 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) Pan, S., Giannikas, V., Han, Y., Grover-Silva, E. and Qiao, B.: 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. and 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. and 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) Zhang, J., Sun, Y., Feng, Q., Zhao, Y. and Wang, Z.: Data-driven robust optimization of the vehicle routing problem with uncertain customers, *Complexity*, Vol. 2022, 9064669, 2022.
12) Florio, A. M., Feillet, D. and Hartl, R. F.: The delivery problem: Optimizing hit rates in e-commerce deliveries, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 117, pp. 455-472, 2018.
13) Voigt, S., Frank. M., Fontaine, P. and Kuhn, H.: The vehicle routing problem with availability profiles, *Transportation Science*, Vol. 57, No. 2, pp. 289-572, 2022.
14) Özarik, S.S., Lurkin, V., Veelenturf, L.P., Van Woensel, T. and Laporte, G.: An Adaptive Large Neighborhood Search heuristic for last-mile deliveries under stochastic customer availability and multiple visits, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 170, pp. 193-220, 2023.
15) 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.
16) Maruyama, T. and Fukahori, 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, 102632, 2020.
17) Fukahori, T. and Maruyama, T.: Evolutions of households with every member out-of-home across Japanese cities from 1987 to 2015, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 89, 101683,2021.
18) Kikuchi, K. and Maruyama, T.: Spatiotemporal change in duration of households with every member out-of-home: a case in Kumamoto, Japan, *International Journal of Urban Sciences*, Vol. 27, No. 2, pp. 260-279, 2023.
19) Wouda, N. A. and Lan, L.: ALNS: a Python implementation of the adaptive large neighbourhood search metaheuristic, *Journal of Open Source Software*, Vol. 8, No. 81, 5028, 2023.


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

Akito MUKAI, Hiroe ANDO and Takuya MARUYAMA