

# 顧客満足度を考慮した 多期間配送需要マネジメント方策の評価

岡崎 凌太<sup>1</sup>・大山 雄己<sup>2</sup>・井村 直人<sup>3</sup>・西成 活裕<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: ah19098@shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 芝浦工業大学准教授 工学部土木工学科 (〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: oyama@shibaura-it.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 農博 東京大学先端科学技術センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

<sup>4</sup>非会員 工博 東京大学先端科学技術センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

宅配サービスの需要が急増する中で、宅配企業が顧客の満足度を重視したサービスを提供していることは、宅配車両の配送経路の計画に強い制約を課し、配送経路を非効率なものにしている。顧客の配送需要を適切にマネジメントすることで配送効率化を達成できる可能性があるが、方策の実施によるサービスレベルの変更は顧客満足度を低下させる可能性がある。そこで本研究は、顧客満足度と配送効率の両立性の観点から方策評価を行った。EC 利用者を対象として実施した SP 調査に基づき、配送オプション選択モデルを推定する。推定した行動モデルに基づき、day-to-day に発生する宅配需要をシミュレーションし、多期間配送計画問題 (Multi-period VRP) を最適化することにより、顧客満足度と配送効率性の観点から方策を評価する。

**Key Words:** Last-mile delivery, demand management, multi-period vehicle routing problem, delivery option choice, stated preference, satisfaction

## 1. はじめに

近年、電子商取引 (e コマース: EC) 市場が拡大し宅配貨物の取扱個数が増加<sup>1)</sup> する中で、顧客は商品の配送スピードや送料、自身のスケジュール制約を重視し、速達サービスの多用や特定の時間帯への需要集中が発生している。特定日時に対する需要の集中はまた、宅配車両の配送経路の計画に強い制約を課し、その結果配送経路を非効率なものとしている。また、宅配便業界はトラックドライバーの不足や再配達<sup>2)</sup> といった問題にも直面している。対面配達の非効率性を改善するため置き配の実施が推奨されているが、防犯面での不安を感じている顧客の割合が高い<sup>3)</sup> 上、法的な課題も残されている。

特定日時や速達に集中する顧客の配送需要を適切にマネジメントすることで、配送効率化できる可能性があるものの、方策実施によるサービスレベルの変更は顧客満足度の低下に繋がりうる。現実的な需要マネジメントに向けて、顧客の配送オプション選択に関する選好を分析した上で、顧客満足度の維持と配送効率性の向上を同時に達成する方策を明らかにする必要がある。

Amazon 等で選択可能な配送オプションには、時間的制約の緩い通常配送と、制約が厳しく配送効率を低下させる日時指定配送、翌日配送が存在する。これらの選択が配送効率に及ぼす影響を分析するためには、複

数日に渡る期間を対象として配送効率性を評価すべきである。一方、顧客の行動分析に基づく配送効率性の向上を分析した研究<sup>4)5)</sup> では、日時指定配送を対象として単日内での配送コストを算出することで政策を評価しており、翌日配送や通常配送といった日単位の配送オプションの設計上必要となる分析は行われていない。

そこで、本研究は日時指定配送に加え、翌日配送・通常配送といった配送オプションに対する顧客の選択行動を分析し、day-to-day に発生する需要に対応した多期間配送計画を最適化し、顧客満足度と配送効率性を両立する政策を明らかにすることを目的とする。より具体的には図 1 のフレームワークに従い、初めに SP 調査に基づき顧客の配送オプション選択行動モデルを推定する。続いて行動モデル・シミュレーションにより需要を生成し、多期間配送計画問題を最適化することにより、顧客満足度と配送効率性の観点から政策を評価する。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

### (1) EC 利用者の行動分析

これまでに行われた EC 利用者の選好分析<sup>6)7)</sup> の結果、顧客は迅速な配達や配達時間の正確さを求めており、宅配サービスに対する顧客満足度は、商品を販売する企

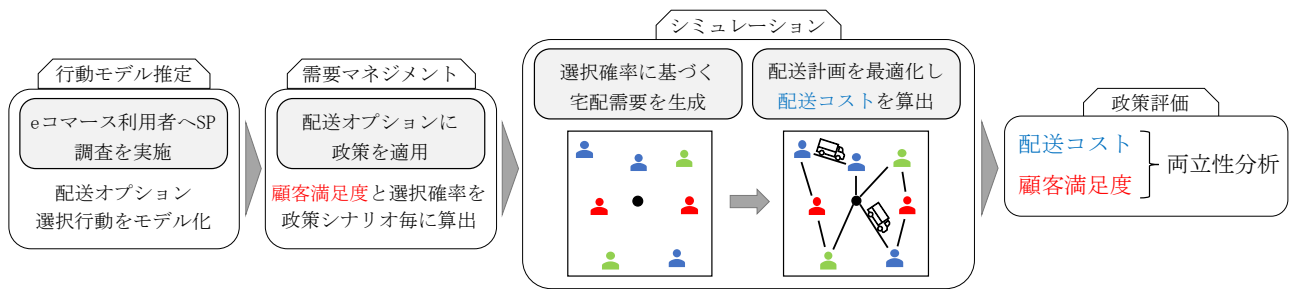


図-1: 本研究のフレームワーク

業の総合的な評価と継続的な顧客維持率に大きく影響することが明らかになった。また, Marium and Arsalan (2018)<sup>8)</sup> は近年の宅配サービスにおいて顧客は荷物が素早く届くことだけで満足しないため, 迅速な配達をすること以外にも様々なオプションを追加しなければ, 企業は販売競争に勝てなくなっていると結論付けた。

EC 利用者の行動分析に関連する文献を体系的にレビューした Nguyen et al. (2018)<sup>9)</sup> が指摘する通り, 配送需要マネジメントに関する文献は限られているが, これまでには送料の割引<sup>10)</sup> に加え, Agatz et al. (2011)<sup>11)</sup> や Köhler et al. (2020)<sup>12)</sup> に代表される配達時間スロットの制御が提案されている。

Agatz et al. (2011) と Köhler et al. (2020) は, 配達時間スロットの幅を拡大することで配送コストを削減できることを示したが, 顧客の選好分析と選択行動のモデル化がなされておらず, 提供されるサービスが顧客の満足するレベルであるかは分析できていない。またこのような配達時間スロット制御に関する研究は, 迅速で正確な対面配達及要求される食料品の時間指定宅配サービスを対象とするものが多く, 本研究が対象とする, 翌日配送や通常配送の選択が配送効率に与える影響の分析には至っていない。

## (2) 配送計画の最適化

配送コストの算出は, 配送計画問題 (Vehicle Routing Problem; VRP) を用い配送経路を最適化する方法が一般的である。VRP は, 配送拠点から複数の車両が各顧客へ配達を行うときに, 必要となるコストを最小化する問題である。実務へ応用する場合, 配達車両の最大積載量や配達時間枠などの制約を追加する必要があり, VRP の派生問題はこれまで様々な文献で扱われている<sup>13)</sup>。大半の VRP は 1 日もしくは 1 つの配達時間枠を対象としており, 本研究が対象とする翌日配送や通常配送といった配送オプションを問題の中に反映させることができない。

そこで, 計画期間を複数日に拡張した多期間配送計画問題 (Multi-period VRP) が提案された<sup>14)15)</sup>。しかし,

Multi-period VRP に関する研究は解の性質や実行速度に焦点を当てたものが多く, 顧客の選択行動に基づいた配送計画の最適化を行った研究は我々の知る限り存在しない。

## (3) 本研究の新規性

以上を踏まえ, 本研究の新規性は次に示す 3 点にある。

### 1. 多様な配送オプションを対象とした行動分析

これまで, 配送需要マネジメントは時間指定配送や日付指定配送といった特定の配送オプションを対象とした研究例が多いが, 本研究では Amazon などでも広く提供されている, 翌日配送, 日時指定配送, 通常配送といった複数の配送オプションを対象として顧客の選択行動を分析した。これは, 商品カテゴリーを問わず宅配事業全般に適用可能であり, 現実的な分析となる。

### 2. 顧客満足度を考慮した方策評価

配送効率化を試みる既往研究の多くは顧客満足度を考慮しておらず, 企業が顧客を維持し, 継続的に方策を実施できるか評価されていない。現実的な需要マネジメントを行うため, 本研究ではシナリオ毎に算出した顧客満足度を方策評価の指標とした。

### 3. 選択行動に基づく複数日の配送計画最適化

これまでに行われた Multi-period VRP による配送計画の最適化において, 顧客の選択行動を反映した研究は存在しない。本研究では翌日配送や通常配送といった配送オプションの選択が配送効率に与える影響を分析するため, Multi-period VRP を用いて複数期間の配送計画を最適化した点が, 新規性である。

## 3. 配送オプション選択行動の分析

### (1) 調査・データ概要

2021 年 4 月 30 日から 5 月 14 日にかけて, 東京大学先端科学技術研究センター, 芝浦工業大学, ヤマト運輸が共同でクロネコメンバーズ (国内会員数 5000 万人

表-1: 配送オプション選択割合

配送オプション (N=18928)	翌日配送	44.8%
	日時指定配送	38.3%
	通常配送	16.8%
配達時間 (N=7253)	午前中	45.9%
	昼間	28.8%
	夜間	25.3%
配達日 (N=7253)	平日	18.5%
	休日	81.5%

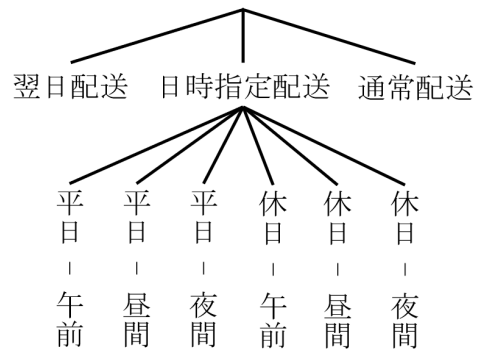


図-2: 適用した Nested Logit モデル

以上)を対象として実施した、「EC ご利用実態に関するアンケート」で得られた回答を基に顧客の嗜好分析を行う。本アンケートでは、回答者が直近に EC サイトで購入した商品に回答日当日に再び購入するという想定のもと、①翌日配送、②日時指定配送(翌々日以降)、③通常配送(日時指定無し)という3つの選択肢から1つの配送オプションを選択し、日時指定配送を選択した回答者については、配達日と配達時間スロットの選択も行う。各回答者は異なる5つのシナリオそれぞれに対して選択行動を実施する。

各シナリオでは、配送料、配達所要日数、時間スロット幅の3つの属性に変化を加えている。調査設計やデータの詳細については、Oyama et al. (2022)<sup>16)</sup>を参照された。調査では4872人から回答を得た(回答率4.87%)。回答者1人当たり5つのシナリオを提示しているため、 $4872 \times 5 = 24360$  サンプルを得ることができた。その後 EC サイトでの商品購入経験の有無や、被支配戦略の選択<sup>1</sup>などを基準としてデータクリーニングを行い、最終的に18928サンプルとなった。

各配送オプション選択割合を集計結果を表1に示す。アンケートの回答者の約45%が翌日配送を選択していることに加え、日時指定配送においても約46%が午前中を選択したことから、顧客がなるべく早く荷物を受け取ろうとする傾向があることが分かった。配達日は休日の選択割合が約81%という結果となったが、調査期間がゴールデンウィーク期間と重なっていた影響があることに注意されたい。

## (2) 配送オプション選択モデル

利用者の選択対象となる配送オプションのうち、②日時指定配送については、配達日(平日・休日の2種類)と時間帯(午前・昼間・夜間の3種類)の組み合わせからなる6つの選択肢から顧客は選択を行うものと

考える。本研究ではこれら6つの選択肢の効用に誤差相関があるという仮定のもとサブグループとし、合計8つの選択肢で構成されるNested Logit (NL) モデルを適用する(図2)。

集合  $N$  に属する個人  $n$  が配送オプションの選択肢  $i$  を選択する時の効用  $V_{ni}$  を次のように定義する。

$$V_{ni} = ASC_i + \beta_{day} \cdot day_i + \beta_{fee} \cdot fee_i + \beta_{slot\_range} \cdot slot\_range_i \cdot \delta_{i, scheduled} \quad (1)$$

ここで、 $ASC_i$  は選択肢  $i$  の定数項、 $day_i$  は荷物の配達所要日数(日)、 $fee_i$  は送料(円)、 $slot\_range_i$  は時間スロット幅(時間)、 $\delta_{i, scheduled}$  は顧客が翌々日以降日時指定配送を選択したときに1、その他のオプションを選択した際に0となるダミー変数である。

NLモデルにおいて、EC利用者  $n$  の配送オプション選択行動は、グループ  $g$  (翌日配送、日時指定配送、通常配送)の選択確率  $P_n(g)$  と、日時指定配送グループに属する選択肢  $i$  (平日・休日、午前・昼間・夜間の組み合わせ)の条件付き選択確率  $P_n(i|g)$  により、以下のように表される。

$$P_n(g, i) = P_n(i|g)P_n(g) \quad (2)$$

グループ  $g$  の中から選択肢  $i$  を選択する条件付確率  $P_n(i|g)$  は、

$$P_n(i|g) = \frac{\exp(\mu_g V_{ni})}{\sum_{i' \in S} \exp(\mu_g V_{ni'})} \quad (3)$$

となる。ここで、 $S$  は日時指定配送グループに属する選択肢の集合、 $\mu_g$  はサブグループ内の誤差相関の程度を表すスケールパラメータである。グループ  $g$  を選択する確率  $P_n(g)$  は、グループ間の誤差相関の程度を表すスケールパラメータ  $\mu$  を用い、

$$P_n(g) = \frac{\exp(\mu \Lambda_{ng})}{\sum_{g' \in G} \exp(\mu \Lambda_{ng'})} \quad (4)$$

ただし  $G = \{ \text{翌日配送, 日時指定配送, 通常配送} \}$

となる。また、 $\Lambda_{ng}$  はグループ  $g$  に含まれる選択肢の期待最大効用(Expected Maximum Utility: EMU)を表

<sup>1</sup> 提示した5つのシナリオのうち、被支配戦略を2度以上選択した回答者の全回答と、被支配戦略を1度だけ選択した回答者の、該当する回答をサンプル単位で除外した。

表-2: パラメータ推定結果

パラメータ	MNL		NL	
	推定値	t 値	推定値	t 値
ASC <sub>翌日配送</sub>	0.628	15.21**	0.638	16.68**
ASC <sub>休日-午前</sub>	0.427	5.68**	0.590	7.59**
ASC <sub>休日-昼間</sub>	-1.152	-1.50	0.150	1.76
ASC <sub>休日-夜間</sub>	0.172	2.19*	0.441	5.11**
ASC <sub>平日-午前</sub>	-1.054	-12.74**	-0.616	-6.02**
ASC <sub>平日-午前</sub>	-1.190	-14.10**	-0.726	-6.87**
ASC <sub>平日-夜間</sub>	-0.922	-10.58**	-0.452	-4.21**
$\beta_{\text{day}}$	-0.221	-18.50**	-0.213	-19.87**
$\beta_{\text{fee}}$	-0.010	-81.91**	-0.009	-77.51**
$\beta_{\text{slot\_range}}$	-0.068	-3.16**	-0.066	-3.08**
$\mu_g$			1.231	28.03**
サンプル数	18928		18928	
初期尤度	-39359.67		-39359.67	
最終尤度	-25503.85		-25489.04	
尤度比	0.3520		0.3524	

\*5%有意 \*\*1%有意

すログサム変数であり,

$$\Lambda_{ng} = \frac{1}{\mu_g} \ln \sum_{i \in S} \exp(\mu_g V_{ni}) \quad (5)$$

と定義される。これは  $G$  に含まれる配送オプションから得られる期待最大効用である。式 (3), (4) より各選択肢の選択確率である同時確率  $P_n(g, i)$  は,

$$P_n(g, i) = \frac{\exp(\mu_g V_{ni})}{\sum_{i' \in S} \exp(\mu_g V_{ni'})} \frac{\exp(\mu \Lambda_{ng})}{\sum_{g' \in G} \exp(\mu \Lambda_{ng'})} \quad (6)$$

と定義される。また、尤度関数は次のように定式化される。

$$L = \prod_{n \in N} \prod_{i \in I} P_n(i)^{y_{ni}} \quad (7)$$

ここで、 $y_{ni}$  は個人  $n$  が配送オプションの選択肢  $i$  を選択したときに 1, そうでないとき 0 となるダミー変数、 $I$  は全選択肢の集合である。この式の両辺の対数を取った次の式を未知パラメータに関して最大化する。

$$\ln L = \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} y_{ni} \ln \{P_n(i)\} \quad (8)$$

### (3) パラメータ推定結果

18928 サンプルを使用し、式 (1) のパラメータを Python Biogeme によって推定した。標準的な多項ロジットモデル (MNL) と NL モデルの推定結果を表 2 で比較す

る。また以下の通り尤度比検定を行った。

$$\begin{aligned} & -2\{L(\hat{\beta}_{\text{MNL}}) - L(\hat{\beta}_{\text{NL}})\} \\ & = -2(-25503.85 + 25489.04) \\ & = 29.62 > 3.84 = \chi_{1,0.05}^2 \quad (9) \end{aligned}$$

両モデルにおいて顕著な差はみられなかったが、尤度比検定の結果と、NL モデルの方で最終尤度が僅かに上昇したことから、適合度は NL モデルの方が僅かに改善したといえる。また、 $\mu = 1$  と定めたときに  $\mu_g = 1.231$  と推定されたことから  $\mu/\mu_g = 0.812$  となり、適切なツリー構造であることが確認された。

EC 利用者の時間価値 (Value Of Delivery Time, VODT) を以下のように計算した。

$$\text{VODT} = \frac{\beta_{\text{fee}}}{\beta_{\text{day}}} = \frac{-0.213}{-0.009} \approx 23.67 \quad (10)$$

結果、約 23.67 円/日となった。これは顧客の配送日短縮に対する支払意思額であり、送料が 24 円程度高くなるのなら、もう 1 日待っても良いと考えていると解釈できる。また、時間スロット幅の拡大も効用を低下させることが明らかになった。これは、顧客が在宅を求められる時間が長くなるためだと考えられる。VODT は顧客の選択行動の変化を予測する上で重要な指標であり、様々な研究<sup>16)17)</sup> で分析が行われている。

## 4. 多期間配送計画問題

配送計画の最適化に用いた多期間配送計画問題 (Multi-period VRP) の定式化を示す。はじめに決定変数  $x_{ijk}^t$  を以下のように定義する。

$$x_{ijk}^t = \begin{cases} 1 & t \text{ 日目に車両 } k \text{ が } i \text{ から } j \text{ へ移動する時} \\ 0 & \text{移動しない時} \end{cases}$$

続いて目的関数を示す。目的関数は輸送コスト項と保管コスト項から構成されており、2 つの総和を最小化する。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{t=1}^T c_{ij} x_{ijk}^t + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{t_1=o_i}^H h_i \left(1 - \sum_{t_2=o_i}^{t_1} \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K x_{ijk}^{t_2}\right) \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、配送拠点と  $n$  人の顧客を含んだ地点の集合  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$  において、地点 0 を配送拠点とし、点  $i, j$  間の移動コスト (2 点間の距離) を  $c_{ij}$ 、計画期間を  $T$  日間、車両が点  $i$  を出発するときに積んでいる荷物の量を  $u_i$ 、地点  $i$  へ到着した時間を  $t_i$ 、車両  $k$  の最大稼働台数を  $m$ 、実際の稼働台数を  $K$ 、最大積載容量は全車両共通で  $Q$  とする。また顧客  $i$  に関して、荷物の保管コストを  $h_i$ 、荷物が最寄りの営業所に到着した日を  $o_i$ 、需要量を  $q_i$ 、配達指定日を  $s_i$  日目  $\sim d_i$  日目 (翌日

配送と日時指定配送の場合は  $s_i = d_i$ ), 配達指定時間を  $e_i$  時 $\sim$  $l_i$  時とする.

条件式を以下に示す.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^n \sum_{t=s_i}^{d_i} x_{ijk}^t = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk}^t = \sum_{j=0}^n x_{jik}^t \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n), \quad (13)$$

$$(k = 1, 2, \dots, K), (t = 1, 2, \dots, T),$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{0jk}^t \leq m \quad (t = 1, 2, \dots, T), \quad (14)$$

$$u_i - u_j + Q \cdot x_{ijk}^t \leq Q - q_j \quad (15)$$

$$(t = 1, 2, \dots, T), (i, j = 1, 2, \dots, n), i \neq j,$$

$$t_i - t_j + M \cdot x_{ijk}^t \leq M - c_{ij} \quad (16)$$

$$(t = 1, 2, \dots, T), (i, j = 1, 2, \dots, n), i \neq j.$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

式 (12) が顧客の指定した日の範囲内で配達を行うよう制約を加えている. また, 式 (13) によって各日で顧客  $i$  の元に到着する車両と出発する車両の台数が等しくなるようにしている. 式 (14) は, 各日において配送拠点を発する車両の台数が最大  $m$  台になるように制約を加えており, 式 (15), 式 (16) はポテンシャル (MTZ) 定式化<sup>18)</sup> と呼ばれる方法で部分巡回路を除去している. なお, 式 (16) における  $M$  は十分に大きな定数を表す. そして, 式 (17), (18) はそれぞれ車両の積載量と配達時間枠の制約を加えている.

## 5. 需要マネジメント方策の評価

本章では配送を効率化するために 2 つの方策を提案し, Multi-period VRP を用いて算出された配送コストと, 行動モデルから推定した顧客満足度の両立性を評価する. そして, 顧客の選択行動の変化が配送効率にどのような影響を与えるのかを明らかにする.

### (1) 顧客満足度の算出

本章で用いる顧客満足度の指標はこの期待最大効用 EMU に基づいて算出した. 全体の期待最大効用は, 第 3 章で推定した行動モデルを用い以下のように導き出される.

れる.

$$\begin{aligned} \text{EMU}_n &= \frac{1}{\mu} \ln \left\{ \sum_{g \in G} \exp(\mu \Lambda_{ng}) \right\} \\ &= \frac{1}{\mu} \ln \left\{ \exp(\mu V_n, \text{翌日配送}) + \exp(\mu V_n, \text{通常配送}) \right. \\ &\quad \left. + \exp \left\{ \frac{\mu}{\mu_g} \ln \left( \sum_{i \in S} \exp(\mu_g V_{ni}) \right) \right\} \right\} \\ &= \frac{1}{\mu} \ln \left\{ \exp(\mu V_n, \text{翌日配送}) + \exp(\mu V_n, \text{通常配送}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu}{\mu_g} \left( \sum_{i \in S} \exp(\mu_g V_{ni}) \right) \right\} \\ &= \frac{1}{\mu} \ln \left\{ \exp(\mu V_n, \text{翌日配送}) + \exp(\mu V_n, \text{通常配送}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu}{\mu_g} \left( \sum_{i \in S} \exp(\mu_g V_{ni}) \right) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

利用者個人は, 効用が最大となる選択肢を選択する. しかし, 実際には効用は確率変数であるので, 値はその時によって変化する. そのため, 得られる効用の期待値が大きい方が, 顧客にとって良い選択肢が提供できていることになり, 満足度が高くなる.

### (2) 方策シナリオ

EC 利用者の配送オプション選択行動の変化が, 宅配サービスの効率性に与える影響を明らかにするため, 本研究では次に示す 2 つの方策の評価を行う.

#### 方策 1: 午前中指定配送への 100 円の追加料金

SP 調査の基礎分析により, 現状では日時指定配送を選択した人の約 45% が午前中を指定しており, 午前中の配送需要が多いことが分かった. そのため, 時間帯によって稼働車両数に偏りがあることが考えられる. 午前中の配送量を分散させるよう, 需要の誘導を行う.

#### 方策 2: 時間スロット幅を, 2~4 時間の間で変更

現在, ヤマト運輸では午後の時間指定配送における時間スロット幅は 2 時間となっている. それに対して, 本研究では 3, 4 時間の時間スロット幅を追加で設定する. 配達可能な時間が長い方が最適経路を求める上で満たすべき制約が緩和され, 配達経路を効率化できる. 一方, 時間スロット幅を長くすると配達時間の不確実性が増し, 顧客満足度の低下が見込まれる.

### (3) Day-to-day 需要発生シミュレーション

本研究では, 追加料金を課さず, 時間スロット幅を 2 時間に設定したベンチマークのほか, 上述 2 つの方策の組み合わせによって 5 つのシナリオを設定した (表 3). 各選択肢の選択確率と顧客満足度を表 4 に示す.

表-3: シナリオ一覧

シナリオ	ベンチマーク	1	2	3	4	5
am +100 円	×	○	×	○	×	○
時間スロット幅	2h	2h	3h	3h	4h	4h

○: 実施 ×: 不実施

表-4: 選択確率と顧客満足度の変化

配送オプション	時間帯	シナリオ					
		ベンチマーク	1	2	3	4	5
翌日配送	—	36.85%	40.06%	37.61%	40.78%	38.35%	41.49%
通常配送	—	20.34%	22.30%	20.80%	22.74%	21.25%	23.17%
日時指定配送	平日・午前	3.78%	1.84%	3.66%	1.78%	3.55%	1.72%
	平日・昼間	3.40%	3.95%	3.30%	3.82%	3.20%	3.70%
	平日・夜間	3.04%	3.52%	2.96%	3.40%	2.87%	3.29%
	休日・午前	14.37%	7.06%	13.97%	6.84%	13.57%	6.63%
	休日・昼間	9.66%	11.33%	9.39%	10.98%	9.12%	10.64%
	休日・夜間	8.55%	9.96%	8.31%	9.66%	8.08%	9.36%
顧客満足度 (EMU)		-2.841	-2.937	-2.866	-2.959	-2.891	-2.979
顧客満足度低下量		0.000	0.096	0.025	0.118	0.050	0.139

午前中指定配送への追加料金は、時間スロット幅の拡大よりも大きく満足度を低下させることが分かる。仮説通り、追加料金によって午前中指定配送の選択者は大きく減少した。特に休日は選択確率がおよそ半分になっており、大きな影響が出たといえる。また、時間スロット幅の拡大はわずかに日時指定配送の選択確率を低下させたが、方策の実施前後で大きな傾向の変化は見られなかった。

計画期間は 1 日目を土曜日とする 24 日間で、土曜日と日曜日を休日として定義する。宅配需要を、24 日間の計画期間内の各日で 1 辺を 100 とする正方形内のランダムな地点に生成する。シミュレーションによって発生した各顧客は選択確率に従い、配送オプションの選択を確率的に行う。顧客の所在や配送オプションの選択に関する情報をまとめた txt ファイルを 100 個作成した。

#### (4) 多期間配送計画の最適化

先述の 2 つの方策を評価するため、図 3 のように複数日に渡る期間の配送計画を最適化し、配送コストを算出する。第 4 章で示した Multi-period VRP の定式化を用い、数理最適化ソルバー Gurobi Optimizer<sup>2</sup> を使用し配

送計画を最適化した。また最適化は、OS: Windows 11 Home, プロセッサ: AMD Ryzen 7 5700U with Radeon Graphic 1.80 GHz, 実装 RAM: 16.0 GB のノート PC を用い、コードを python 言語で作成し Visual Studio Code 上で実行した。

なお、計画期間の序盤は計画期間以前に発生した需要を考慮できていないため、計画期間の 10 日目(月)から 16 日目(日)までの 7 日間の (i) 配達経路の総距離と、(ii) 需要が発生してから配達を行う日までに生じる、営業所での保管コストの総和を配送コストとし、方策の評価に用いた。

## 6. 結果

### (1) シミュレーション結果

需要発生シミュレーションと配送計画の最適化を合計 100 回実行した結果とそのばらつきを、それぞれ表 5 と図 4 に示す。結果として、実施した 2 つの方策はどちらも配送コストの削減に貢献した。また、配送コストの削減量に着目するとシナリオ 5 が最もコストを削減しているが、顧客満足度も最も低下した。午前中指定配送へ追加料金を課した方が時間スロット幅の拡大することよりコスト削減効果は大きいですが、顧客満足度の低下量が大きいことから、最適な方策とは言えない。

<sup>2</sup> HP: <https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/>

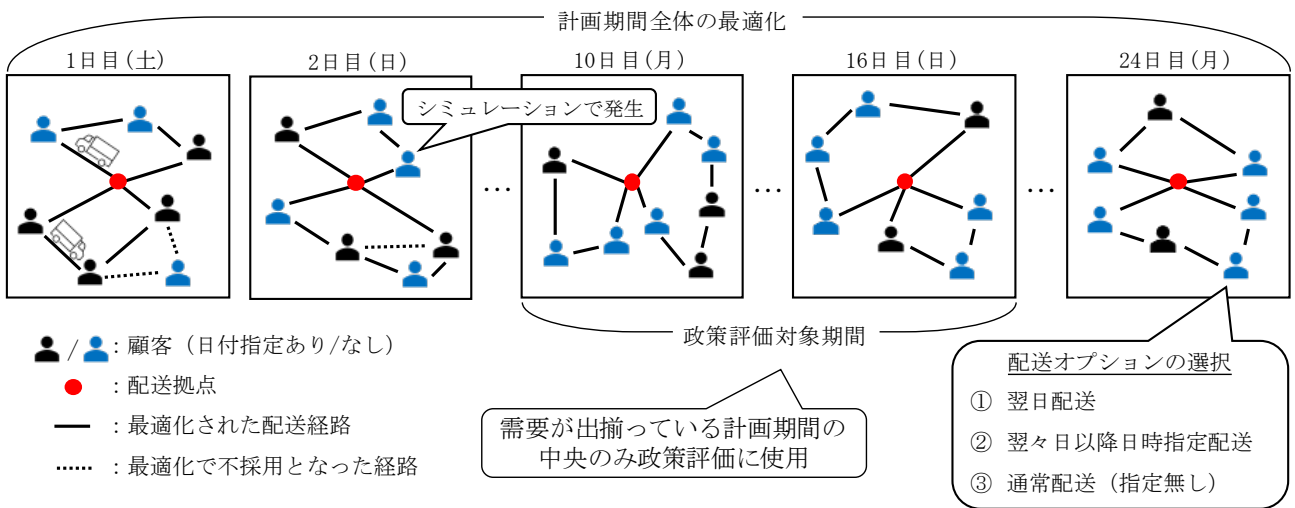


図-3: 本研究で用いた多期間配送計画問題の概略図

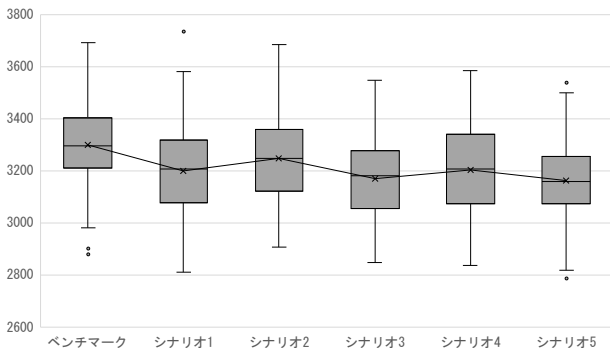


図-4: 各シナリオの配送コスト

配送の効率化と顧客満足度の維持を両立性を評価するため、①コスト削減率を②満足度低下量で除した値を算出し、最右列に示した。結果として、シナリオ2が最も良い値となった。午前中指定配送への追加料金の実施に関わらず、時間スロット幅の拡大は両立性を向上させており、有効な方策であることを明らかにした。

## (2) 曜日別コスト算出

本研究は、Multi-period VRP を用いて休日への需要集中などが配送効率に与える影響も分析した。図 5-a～図 5-c は、かかった輸送コスト、稼働車両台数、保管コストを曜日別に分割し、シナリオ毎に平均値を算出したものである。稼働した車両の台数と輸送コストは同一の傾向を示した。保管コストを曜日別に算出した結果、休日を指定した顧客の荷物が平日の間は保管されているため、金曜日にかけて徐々に増加していくことが明らかになった。また、シナリオ毎に傾向に違いが現れることはなかった。図 5-a～図 5-c が示す通り土曜日に配達が集中しており、休日の指定に対し追加料金を課

すことで需要を分散させられる可能性がある。

## (3) シミュレーション信頼性評価

各シナリオでのシミュレーション回数ごとの二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) の推移を図 5-d に示す。RMSE の値は、次の式 20 から算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}} \quad (20)$$

ここで、 $N$  はシミュレーション回数、 $y_i$  は  $i$  番目のシミュレーションで算出された配送コスト、 $\bar{y}_i$  は  $i$  番目までのシミュレーションで算出された配送コストの平均を指している。シナリオ間でのばらつきは 50 回目以降で収束傾向にあることから、シミュレーション回数は 100 回で妥当であり、シナリオ間での比較結果は十分に根拠のあるものだと言える。

## 7. おわりに

### (1) 本研究の結論

本研究では、配送を効率化させるための方策として①午前中指定配送への 100 円の追加料金と、②時間スロット幅を、2～4 時間の間で変更させることを提案した。2 種類の方策を組み合わせ、ヤマト運輸と同様に時間スロット幅を 2 時間に設定したベンチマークを含む、6 つのシナリオを想定した。ベンチマークを基準として、各シナリオにおける配送コストの削減率を顧客満足度 (EMU) で除すことで、顧客満足度と配送効率を両立できる方策の組み合わせが明らかとなった。また、翌日配送や通常配送の選択が配送効率に及ぼす影響を分析するため、Multi-period VRP を用いて複数期間の配送計画を最適化し配送コストを算出した。

表-5: シミュレーション結果

シナリオ	<方策>		配送コスト (100 回平均)	配送コスト 削減量①	顧客満足度 低下量②	① / ②
	am +100 円	時間スロット幅				
ベンチマーク	×	2h	3300.544	—	—	—
1	○	2h	3200.671	3.12%	-0.096	0.324
2	×	3h	3246.391	1.67%	-0.025	0.654
3	○	3h	3170.717	4.09%	-0.118	0.347
4	×	4h	3202.208	3.07%	-0.050	0.614
5	○	4h	3162.098	4.38%	-0.139	0.316

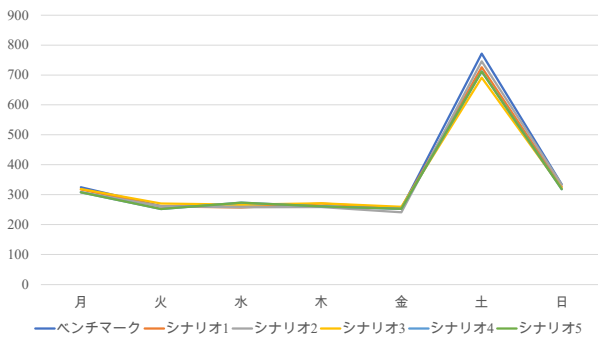


図-5-a: 平均輸送コスト

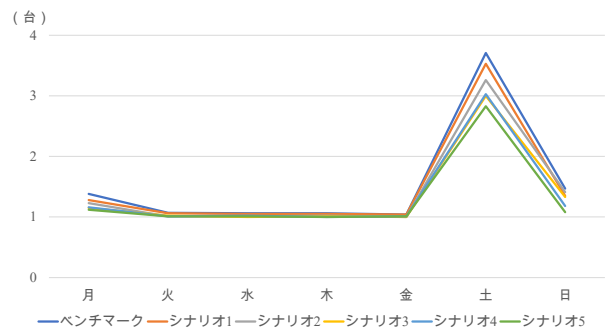


図-5-b: 平均稼働車両台数

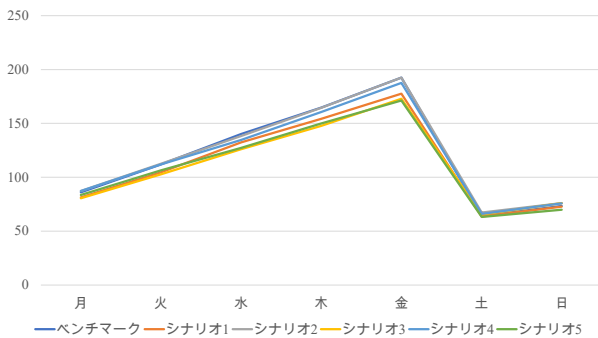


図-5-c: 平均保管コスト

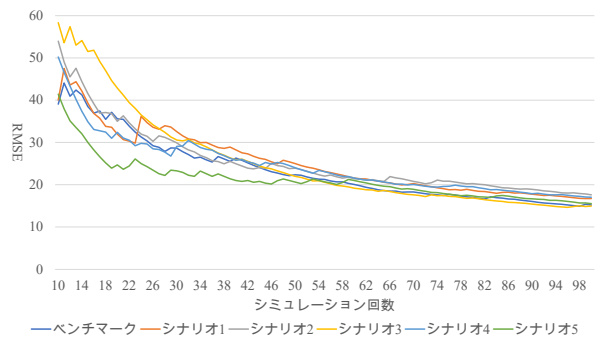


図-5-d: 二乗平均平方根誤差 RMSE

図-5: シミュレーション結果集計

結果として、午前中指定配送への追加料金は配送コストの削減をもたらす反面、顧客の満足度を大きく低下させており最適とはいえない。一方で、時間スロット幅は追加料金の実施有無を問わず 3h の時に最も良い結果となった。以上より、本研究では時間スロット幅を 3h に設定し、午前中指定配送への追加料金は実施しないことが最適であると結論付ける。

(2) 今後の課題

本研究で行った分析に対する課題として、シミュレーション条件の改善が挙げられる。本研究では、生成させる計画期間内の全ての需要を所与としているため、流

動的に発生する需要を考慮できておらず、翌日配送の需要が突発的に発生することによる配送効率の低下を反映することができない。したがって、今後は 1 日単位での需要発生シミュレーションに基づく動的な配送計画最適化へと拡張し、より現実的な方策評価が求められる。

6 章の結果で示した通り、土曜日に宅配需要が集中し稼働車両台数が突出して多くなっていたため、方策による需要分散が求められる。この需要集中を緩和する方策として、本研究で得られた知見を生かし休日の時間スロット幅を拡大すること、また休日の日付指定に対する追加料金を課すことが考えられる。今後は新た

な配送需要マネジメント方策の評価をする必要がある。

また本研究で用いた Multi-period VRP において、各車両が顧客を巡回する回数は 1 回であるが、実際には配達を終え拠点へ戻った車両がもう一度荷物を載せて配達に向かうケースが想定される。このような状況に対応した、Multi-trip VRP<sup>19)20)</sup> のような最適化問題も提案されており、今後は本研究への応用することでより現実性のあるシミュレーションと方策評価が可能となる。

## REFERENCES

- 1) 国土交通省: 令和 3 年度 宅配便取扱実績について, 2022, [https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04\\\_hh\\\_000255.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04\_hh\_000255.html).
- 2) 国土交通省: 報道発表資料 令和 4 年 4 月の宅配便の再配達率は約 11.7%, 2022, [https://www.mlit.go.jp/report/press/tokatsu01\\\_hh\\\_000613.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/tokatsu01\_hh\_000613.html).
- 3) 国土交通省 総合政策局 物流政策課: 国土交通行政インターネットモニターアンケート「通信販売と宅配便の再配達に関する調査」(2018 年 12 月調査), <https://www.mlit.go.jp/monitor/H30-kadai01/9.pdf>.
- 4) Yang, X., Strauss, A. K., Currie, C. S. M., and Eglese, R.: Choice-based demand management and vehicle routing in e-fulfillment, *Transportation Science*, Vol.50, pp.473–488, 2016.
- 5) Agatz, N., Fan, Y., and Stam, D.: The impact of green labels on time slot choice and operational sustainability, *Production and Operations Management*, Vol.30, pp.128–138, 2021.
- 6) Rao, S., Goldsby, T. J., Griffiths, S. E., and Iyengar, D.: Electronic logistics service quality (e-lsq): Its impact on the customer's purchase satisfaction and retention, *Journal of business logistics*, Vol.32, pp.167–179, 2011.
- 7) Xu, X., Munson, C. L., and Zeng, S.: The impact of e-service offerings on the demand of online customers, *International Journal of Production Economics*, Vol.184, pp.231–244, 2017.
- 8) Marium, M. S. and Arsalan, N.: Understanding the impact of service convenience on customer satisfaction in home delivery: evidence from pakistan, *International Journal of Electronic Customer Relationship Management*, Vol.11, pp.23–43, 2017.
- 9) Nguyen, D. H., de Leeuw, S., and Dullaert, W. E.: Consumer behaviour and order fulfilment in online retailing: A systematic review, *International Journal of Management Reviews*, Vol.20, No.2, pp.255–276, 2018.
- 10) Campbell, A. M. and Savelsbergh, M.: Incentive schemes for attended home delivery services, *Transportation Science*, Vol.40, pp.327–341, 2006.
- 11) Agatz, N., Campbell, A., Fleischmann, M., and Savelsbergh, M.: Time slot management in attended home delivery, *Transportation Science*, Vol.45, pp.435–449, 2011.
- 12) Köhler, C., Ehmke, J. F., and Campbell, A. M.: Flexible time window management for attended home deliveries, *Omega*, Vol.91, pp.102023, 2020.
- 13) Braekers, K., Ramaekers, K., and Van Nieuwenhuysse, I.: The vehicle routing problem: State of the art classification and review, *Computers & Industrial Engineering*, Vol.99, pp.300–313, 2016.
- 14) Wen, M., Cordeau, J.-F., Laporte, G., and Larsen, J.: The dynamic multi-period vehicle routing problem, *Computers Operations Research*, Vol.37, No.9, pp.1615–1623, 2010.
- 15) Larrain, H., Coelho, L. C., Archetti, C., and Speranza, M. G.: Exact solution methods for the multi-period vehicle routing problem with due dates, *Computers Operations Research*, Vol.110, pp.148–158, 2019.
- 16) Oyama, Y., Fukuda, D., Imura, N., and Nishinari, K.: E-commerce users' preferences for delivery options, *arXiv e-prints*, 2022.
- 17) Meister, A., Winkler, C., Schmid, B., and Axhausen, K.: In-store or online grocery shopping before and during the covid-19 pandemic, *Travel Behaviour and Society*, Vol.30, pp.291–301, 2023.
- 18) Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A.: Integer programming formulation of traveling salesman problems, *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol.7, pp.326–329, 1960.
- 19) Zhen, L., Ma, C., Wang, K., Xiao, L., and Zhang, W.: Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.135, pp.101866, 2020.
- 20) Pan, B., Zhang, Z., and Lim, A.: Multi-trip time-dependent vehicle routing problem with time windows, *European Journal of Operational Research*, Vol.291, pp.218–231, 2021.

(Received ??)

(Accepted ??)

## Evaluation of day-to-day delivery demand management policies based on customer satisfaction

Ryota Okazaki, Yuki Oyama, Naoto Imura and Katsuhiko Nishinari

As the demand for home delivery increases rapidly, courier companies often offer delivery services focusing on customer satisfaction. This places strong constraints on the planning of delivery routes for courier vehicles, making delivery routes inefficient. The objective of this study is to present a framework to evaluate demand management policies in terms of the balance between customer satisfaction and delivery efficiency. To this end, we first estimate a delivery option choice model using the stated choice data of e-commerce users. Then, based on the estimated model, we simulate the demand for home delivery and optimize a multi-period vehicle routing problem to calculate the delivery efficiency. We implement two policies: a surcharge for morning delivery and an expansion of the time slot range. The results show that the former significantly reduces customer satisfaction, while the latter achieve higher customer satisfaction and delivery efficiency.