

宅配便ドライバーの動的ルートスケジューリング

○藤杰 山本学 寺野隆雄 (東京工業大学)

Dynamic Route Scheduling for Package Delivery Driver

* J. Teng, G. Yamamoto, T. Terano (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— A number of routing methods have been researched on minimizing the overall travel cost when delivering packages in dynamic environment. However, in the present situation, both reducing operational costs and improving quality of services should be considered. Thus, in this thesis, we proposed an approach using simulation to evaluate those routing methods from on both sides. By using what-if analysis in the simulation, we found a tradeoff between travel costs and response time. We conclude the advantages and disadvantages of those routing methods that can be applied in different situations.

Key Words: Routing methods, Simulation, Optimization

1 序論

宅配便の集配作業では不在による再配達は非常に高いコストが掛かっている。その原因は配送途中での再配達依頼は出発前に計画したルートを崩し、走行時間と距離が長くなるためである。一方、再配達サービスの品質に影響を及ぼすことがある。本研究では、宅配便配送ルートを最適化するために再配達依頼などの不確実性を伴う環境を考慮した配送シミュレーションモデルを構築した上で、シミュレーションを用いて提案する動的配達計画方式の距離コストとサービス品質の特徴を解明する。

本稿の構成は以下の通りである。第2章宅配業界の現状と課題を説明する。第3章では、先行研究として巡回セールスマン問題、配送計画問題及び配送シミュレーションについて述べる。第4章では、実データに基づき配送ルートを分析し、改善の可能性を示す。第5章では、動的配達計画方式について説明する。第6章は再配達を考慮した配送シミュレーションモデルを説明する。第7章では、シミュレーションの結果を分析し、配達計画方式の評価を行う。最後に、第8章で結論を述べる。

2 研究背景

2.1 宅配業界の現状

宅配便は社会インフラでありながら、現代社会に重要な役割を果たしている。宅配業界は不況の中で安定的な成長を続けられる分野として注目されている。その成功要因とみなされるのは法人だけではなく、一般消費者の小口荷物運送の市場ニーズを捉え、潜在的な輸送需要を掘り起こしたのである。これまで当日配達、時間帯指定配達やクール宅配便など付加価値が高いサービスを提供すると同時に、配送及び運賃体制を整備したことが考えられている¹⁾。平成24年度の統計によると、前年度と同様インターネットなどを利用した通信販売に係る商品開発による需要拡大や各社の営業努

力による新規需要開拓などにより、前年度を上回った事業者もいたことから、全体の実績として増加していると指摘²⁾し、増加取扱量は35億2600万個までとなった。しかし、荷物取扱量の増加による人手不足、特に繁忙期において荷物処理能力は限界に近づくことは宅配各社に臨んでいる深刻な問題である。そして近年インターネット通販の伸びによって、大口低単価の荷物は急激に増え、宅配業者の利益率を圧迫することが考えられる。その一方、各業者の宅配作業の個人差が存在する。しかし、配送コストをコントロールしながらサービス品質を向上させるためには、そのばらつきを小さくしていく必要がある。これらの現状から見ると宅配業者は競争優位性を築くために、配送コストの削減とサービス品質の向上を目標とした業務改革や新たな配送体制を整えることは非常に重要な課題である。

2.2 宅配の仕組み

2.2.1 配送ネットワーク

宅配業者はこれまで高い付加価値のサービスを提供するためのカギとなるのは全国に渡る配送ネットワークである。その配送ネットワークは(1)基幹拠点と事業所という物流施設(2)基幹拠点間の輸送を担う全国的なネットワーク(3)基幹拠点と事業所を連結地域的なネットワーク(4)事業所と顧客間を結ぶ集配ネットワーク構成されている。

その中で基幹拠点は荷物の仕分けを特化した大型物流施設であり、管轄地域の事業所から収集された荷物はそこで仕分けされ夜間にほかの拠点に輸送される。それと同時にほかの拠点からの宅配物もここで仕分けされ、管轄地域の事業所に送り込む。これに対して、事業所は顧客に近い場所で設置され、主に荷物の配達と収集を担っている。基幹拠点から送られた荷物を事業所でさらに細かく地域別に仕分けされ、そしてドライバーは各自の担当地域で集配作業を進める。このような配送体制で荷物は長距離でも一部エリアで当日配達を実現されている。

2.2.2 事業所業務の流れ

本文である宅配業者の例を挙げて説明する。事業所の一日は大きく分けて、①朝積込②午前中配達③午後配達④集荷⑤夜間配達の5つに分かれる。毎朝に基幹拠点から大型トラックで宅配物が運ばれ、そして、アシストは荷物をセールスドライバーの担当地域に仕分けをし、小型トラックに積み込む作業を行う。朝積込が終わる時点でセールスドライバーは一日の集配業務を始める。現在確立している集配方法として軒先集配、バス停集配及びチーム集配の3つを行っている。軒先集配はドライバーが一軒一軒集配車で集配先を回る方式である。バス停集配はあらかじめ駐車場所を決めておき、その駐車場所から周辺への届け先には台車や自転車・リヤカーに載せ替える方法である。チーム集配はエリア内に載せ替えを行うためのドッキングポイントを設け、ドライバーが集配車で運んできた荷物を、フィールドキャストと呼ばれる複数の人間が台車や自転車・リヤカーに載せ替え、チームに一気に配達を行うというものである。

2.2.3 共同研究の課題

配送コストの削減とサービス品質の向上を実現するために広域ネットワークにおける基幹拠点間配車の最適化などは考えられている。そのほか、事業所業務において効率的な朝積込を実現するために、事業所内のレイアウトを設計し直すことができるが、これらより効果的なのは事業所と顧客間の集配経路の最適化を考えられている。その理由の一つとして宅配サービスは集配業務を通じて、セールスドライバーと顧客が直結しているため、サービス品質に対する影響が大きいであろう。そして、人件費は労働力密集型の集配作業を中心とした宅配業者の総コストの大部分を占める。しかも、各業者の宅配作業はコストとサービス品質は作業員の個人的な作業方法による異なりが存在している。距離コストとサービス品質をコントロールするためには作業の標準化の必要性がある。したがって、集配作業を標準化し、最適化することにより、サービス品質とコスト両方をコントロールしながら改善する可能性が高いと想定している。

集配作業を最適化の対象を考える際に実集配時間を①相対時間（顧客と接する時間）②準備時間（車周りで準備する時間）③移動時間（軒から軒へ移動する時間）の3つに分解することができる。その中で実集配時間の半分を占める移動時間に最も削減可能とみられている。移動時間を最適化する際に多数の課題を抱えている。①出発点から所持荷物を配達完了後に出発点に戻るまでの最短移動距離の経路②バス停集配を行う場合はバス停（チーム集配を行う場合はドッキングポイント）の選択方法③チーム集配の荷物の配分方法④時間帯指定配達を考慮した配送計画⑤それ以外に営業所立地の選択も移動時間に影響を及ぼすと考えられて

いる。これらの課題の基本であるのは①で示した与えられたすべて場所を巡回できる移動経路を最適化することである。

3 先行研究

3.1 巡回セールスマン問題 (Travelling Salesman Problem, TSP)

TSPとは多くの都市と都市間の移動コストが与えられた時、すべての都市を一度だけ巡回し、出発点に戻るルートのうちコスト最小のものを求める問題である³⁾。そのうち、任意の都市間の距離が行きも帰りも同じ場合は対称 TSP (Symmetric TSP) となる。本研究では、全部の問題を対称 TSP として解く。TSP 組み合わせ最適化問題の具体例として組み合わせ最適化問題と同様に NP 困難性に代表サイズが大きくなるにつれ、解集合を構成する要素は指数関数的に増加する。そのため、小規模の問題は分枝限定法や動的計画法のような厳密解法で厳密解は得られるが、大規模の問題に対しすべての解を列挙することは事実上不可能に対して、近似算法で比較的精度が高い解が得られる⁴⁾。代表的なアルゴリズムは構築法のほかにタブー探索法、遺伝アルゴリズム (GA) のようなメタヒューリスティクスと 2-opt 法や Lin-Kernighan 法⁵⁾ (LK 法) などの局所探索法が提案された。GA の中で TSP に特化した局所的交叉を用いた遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm by Localized EAX, GA-EAX) が state-of-the-art 近似解法に匹敵する性能を持つため⁶⁾、本研究の実験では、TSP を解くために GA-EAX アルゴリズムを用いて行う。

3.2 配送計画問題 (Vehicle Routing Problem, VRP)

VRP⁷⁾はデポという荷物を保管する場所から、すべての顧客の需要を満たす運搬車の最適ルートを求めることである。VRP は TSP を一般化した問題³⁾で、TSP と同じように NP 困難である。VRP は制約条件により様々な問題タイプがある。例えば、運搬車の容量を考慮した CVRP、配達時間枠を考慮した VRPTW や集荷と配送の両方を考慮できる PDP などの研究が存在している⁸⁾。この問題は現在、物流最適化の典型的なベンチマークとして研究されている。

Table 1: DVRP の不確実性による分類

	決定的情報	確率的信息
情報既知	静的かつ決定	静的かつ確率
情報変化	動的かつ決定	動的かつ確率

上述した問題のタイプは問題の複雑性を加え、現実問題の不確実性に依じて、届け先の不在情報が事前に把握するか否か、計画は実行する途中で変更するか否かによって、構築するモデル (Table 1) が異なる。この種の実行途中で計画変更の動的配送計画問題は D-VRP と呼ばれる。D-VRP の特徴として配送計画問題は常に時間と共に変化することである。その変化を

表す指標としてダイナミックイズム(Dynamism)がある。この動的特性は走行距離と線形的な関係を持つことが証明⁹⁾された。(本研究で定義した不確実性を表す指標として不在率がある。)この分野の発展は近年、急速に普及したモバイル端末と地理情報システム技術を用いたナビゲーションシステムなどを導入することで移動経路はリアルタイムで更新できるようになるという背景がある。意思決定者は動的に運搬車の経路を計画することで、配車のオペレーターコストの削減、サービス品質の改善と環境の配慮に対し新しい機会をもたらした。そこで、本研究は D-VRP のアルゴリズムを用いて宅配における不在と再配達を考慮した配送モデルを構築しシミュレーションを行う。

3.3 配送シミュレーションモデル

動的配送計画問題などのサプライチェーン最適化問題に対して確率的な情報が得られるという前提があれば、不確実性に対処する方法としてシミュレーションできる¹⁰⁾。シミュレーションは現実問題に良い精度で、what-if 分析を行い、方策の評価を行うことができる。緊急医療支援(EMS)を対象にリアルタイムの交通状況に応じて配車のコスト効果¹¹⁾とその救急車の反応時間を評価¹²⁾するシミュレーションの研究があるが、動的環境で宅配サービスについてはコストとサービス品質を考慮したシミュレーションは存在していない。そこで、本研究は宅配サービスを対象にシミュレーションモデルを構築し、シミュレーションすることで実行可能な4つの配送計画方式のコストとサービス品質を評価する。

4 TSP による最適経路の解析

背景の中で紹介した宅配便配送の流れに示したように、最も重要な時間帯は午前中で、午前中の遅れた配達が起こるのは渉外や午後の集荷にも大きな影響を与える。そこで本章では宅配企業から提供された配送履歴データは3つの都市部密集地域(横浜地域、京都地域、埼玉地域)において午前中を対象にし、巡回セールスマン問題の近似解法 GA-EAX を使い、現場実際の宅配経路と最適な配送経路とを比較する。

4.1 地図情報を含めた分析

4.1.1 実験手順

TSP で最短巡回路を求めるためにはまず住所間の距離行列を計算する必要があるが、今回の実験は地理情報を獲得できないため、手作業で行った上で、道路を考慮した最適値の計算を行った。計算の手順は以下に示す。

- (1)Google Map から道路の経緯度を表す GPS 座標を取り出す (Fig. 1)。(本研究は道路ネットワークの特徴を表す 161 個の GPS 座標を GIS から取り出す。)
- (2)経緯度は日本の測地座標系¹³⁾を用いて平面直角座

標換算する。

- (3)それぞれのポイント間の隣接関係を確認し、道路ネットワークは無向グラフとして扱い、隣接行列 A を作る。

$$A = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{隣接する座標 } i \text{ から座標 } j \text{ への辺がある} \\ 0 & \text{隣接する座標 } i \text{ から座標 } j \text{ への辺がない} \end{cases}$$

- (4)隣接関係がある二点間のユークリッド距離を計算し距離データを含めた隣接行列 A_{dist} を変換できる。

- (5)配送履歴から取り出したセールスドライバー(SD)とフィールドキャスト(FC)の住所データを GPS データに変換し、そして平面直角座標に換算する。道路ネットワークに最も近い座標と結び、隣接行列を拡張する。

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、

$$b_{ij} = \begin{cases} d_{ij} & \text{住所 } i \text{ と一番近い道路座標 } j \text{ である} \\ 0 & \text{住所 } i \text{ と一番近い道路座標は } j \text{ ではない} \end{cases}$$

$$A_{extend} = \begin{pmatrix} A_{dist} & B^T \\ B & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

- (6)Dijkstra 法¹⁴⁾を用い以上で求めた拡張した隣接行列任意の二点の距離 $Dijkstra(i, j)$ を計算すれば、

$$D_{extend} = \begin{pmatrix} D_{dist} & D_{B^T} \\ D_B & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

住所間の距離行列 $D = (d_{ij})$ を求めることができる。

- (7)最後に統計ソフトウェアである R の TSP パッケージ¹⁵⁾を利用することで、2-Opt など7種の近似解法を用い巡回の距離と順番を求めることができる。

4.1.2 実験結果

計算した7種の近似解法の結果から距離の最小値と GPS 装置で取った軌跡データの比較以下の表にまとめる。

Table 2: 最適化ルートと実際距離の結果比較

	住所数	実際距離	最適距離	改善率
SD	41 軒	12400	5374.8	56.6%
FC	32 軒	11390	4406.9	61.3%

(単位:メートル)

Table 2 に示したように SD と FC の移動距離はいずれも5割から6割大幅に短縮したことが明らかになった。その原因として (1)不在の再配達は途中で発生する場合は決めた経路を変更することがある。(2)この地域ではチーム集配の方式で行うため、台車もしくは自転車で配送する後にドッキングポイントに戻る必要がある。(3)GPS 装置による計測は精度が低いいため、実際の

軌跡と多少ズレが発生する。しかし、実際の GPS 軌跡 (Fig. 2) と最適化したルート (Fig. 3) を観察すると

これほどの大きな改善率は集配業務の中で最適化ではない移動があると考えられる。



Fig. 1: 道路ネットワークから抽出する座標点



Fig. 2: 実際 SD の移動軌跡



Fig. 3: 最適化した配送ルート

4.1.3 道路を考慮した距離と直線距離の相関関係

上述した手順で計算した住所の座標で住所間の距離行列 l_{ij} を計算できる。そこで、直線距離と考慮する式(4)で計算した距離 d_{ij} の間との相関係数を求めた。分析した結果、相関係数はSD配達の41軒とFC配達の32はそれぞれ0.976と0.919であるの強い正の相関が明らかになった。距離コストを直線で分析する際に道路ネットワークを考慮した分析は比例した結果が得られることが判断できるため、本研究におけるほかの分析とモデルはすべて直線距離で考える。

4.2 直線距離による分析

最後に証明したように、都市部の密集地であれば、

住所間の直線距離と実際道路を考慮した距離強い正の相関関係があるため、これからの実験はすべての道路データを取得できない前提で、直線距離で巡回経路の分析を行う。直線距離分析ではGA-EAXを利用し京都、埼玉と横浜の3つの地域にそれぞれ最適距離を計算した。

4.2.1 実験手順

直線距離の分析はGA-EAXを用いるため、配送履歴の住所データをGPS座標に変換し、さらに直角座標平面に換算する必要がある。そして、TSPLIBのフォーマットにしてからGA-EAXのアルゴリズムを利用し、計算することができる。

4.2.2 実験結果

Table 3: 直線距離による最適ルートの計算結果

	実際距離	最適距離	改善率
京都 SD	7322	3499	52.21%
京都 FC1	5677	2898	48.95%
京都 FC 2	3834	2079	45.77%
埼玉 SD	8184	2733	66.61%
埼玉 FC	9895	3028	69.39%
横浜 SD	5208	2307	55.70%
横浜 FC	4133	2259	45.34%

(単位：メートル)

本表で示したように道路情報を考慮した最適化の結果をと同じようにこれらの地域においてに 40%から 70%の改善率が得られる。そこで、上述した道路を考慮した実験の結果はさらに直線距離最適値で裏付けられている。しかし、GA-EAX などの TSP アルゴリズムを用いる静的な最適化と分析は宅配便配送ルート最適化する可能性示したが、不確実性の環境においてこの経路は最適ではないと指摘しかねない。そこで、本研究は不在と再配達などの不確実要素を考慮した配送シミュレーションモデルを構築した。

5 動的配送計画方式

本研究では、最初の配送計画は静的分析と同じように GA-EAX のアルゴリズムを利用し、事業所から出発前に配送リストを決めておく。この後の動的配送計画問題は顧客の再配達の依頼に対して、顧客の住所を配送計画に取り入れ、配送リストを更新する。経路を変更する際に計画方式が必要のため、本研究では、配送途中で対応できる配送計画方式は以下の 4 種類を考える。

5.1 First Called, First Service (FCFS)

FCFS 配送方式は再配達依頼を最優先にする方式である。顧客の依頼に対し、配送リストは未配達の荷物があるにもかかわらず、現時点の配達が終わる次第に不在連絡してくる顧客の荷物を配達して行く。

5.2 First Called, Last Service (FCLS)

FCLS 配送方式は再配達依頼を配送リストの最後尾に加える方式である。つまり、順番で配送リストにある配達先を回してから再配達の荷物の配送を行う。

5.3 最短距離挿入方式 (INST)

INST 配送方式は再配達依頼の顧客を配送リスト順番で並んでいる二箇所の間を探索し、距離コストが最小の位置で配送リストに挿入する方式である。

5.4 TSP 更新方式 (TSP)

TSP 更新方式は TSP の近似解法を用いて一定の間隔で再配達依頼を計画に入れて配送リストを更新する方式である。TSP_iを*i*個目の TSP 問題にすると、

$$TSP(t) = \begin{cases} TSP1 & 0 \leq t \leq \Delta t \\ TSP2 & \Delta t \leq t \leq 2\Delta t \\ \vdots & \vdots \\ TSPn & (n-1)\Delta t \leq t \leq n\Delta t \end{cases} \quad (5)$$

その中で Δt は配送計画の更新間隔である。目的によって1からすべての顧客数*N*の範囲で任意に設定することができる。

6 モデルの概要

シミュレーションモデルは一人のセールスドライバーを対象に軒先配達といった集配方式で不在による再配達依頼を考慮しながら、当日の荷物を配達完了まで住所間に集配業務を行うことになっている。シミュレーションの目的としてまず不確実性がある環境が距離コストとサービス品質に及ぼす影響、そして距離コストとサービス品質の関連性を考察し、最後に提案した4つの動的配送計画方式をコストとサービス品質の両面から評価をする。本研究はモデル化の手順は以下の通りである。

- (1) 不確実性がある外部環境
- (2) 顧客の不在連絡依頼
- (3) 宅配物の状態遷移

その後、配送シミュレーションの流れとパラメータの設定に関する情報のまとめを付す。

6.1 外部環境のモデル

本研究で扱う地域は横浜エリア、京都エリアと埼玉エリアである。すべての住所位置は配送履歴データから転換した平面直角座標で表す。例えば、配達先は*N*個からなるとする。

$$C = \{c_i; i = 1, \dots, N\} \quad (6)$$

顧客 c_i の住所位置は平面座標 (x_i, y_i) である。そして一回の集配作業にあたり、配達先集合のすべての顧客 c_i に対して、在宅もしくは初期の在宅状態 na_i から得た不在率 δ は

$$\delta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N na_i}{N}, \quad na_i = \begin{cases} 1(\text{顧客}c_i \text{ 在宅}) \\ 0(\text{顧客}c_i \text{ 不在}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、シミュレーション目的によって顧客が時間帯別に幾つの在宅状態を持つことは可能である。

6.2 顧客の再配達依頼

顧客は不在である場合、SD は不在連絡票を残り、次の住所に移動するが、この時点から顧客 c_i は帰宅して再配達依頼まで掛かる時間は t_i とする。ここでは、 t_i の確率分布はポアソン分布

$$P(t_i) = \frac{\lambda^{t_i} e^{-\lambda}}{t_i!} \quad (8)$$

に従う。本研究では、時間帯サービスを考慮しないため、顧客 c_i は再配達連絡があった場合、 $na_i=1$ になり、顧客 c_i はシミュレーションの最後まで在宅とする。

6.3 宅配物の状態遷移

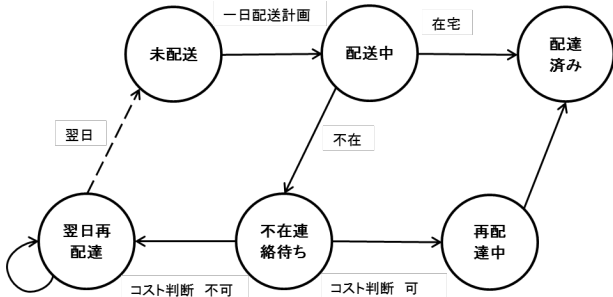


Fig. 4: 宅配物状態遷移図

宅配物の状態は上図のように未配達の荷物は最初の配送計画により、配送リストに入れ、状態は配送中になる。その後、配達先が在宅の場合は配達済みとなり、もし不在の場合は不在連絡待ちの状態に変化する。次に再配達依頼のある配達先にコスト計算をし、設置するコスト（一軒あたり距離）上限を超えると、翌日配達となり、超えなければ、再配達を行い、最終的に荷物の状態は配達済みになる。ただし、本研究では翌日の配送はシミュレーションを行わないため、翌日配達から未配達の状態変換はしない。

6.4 シミュレーションの流れ

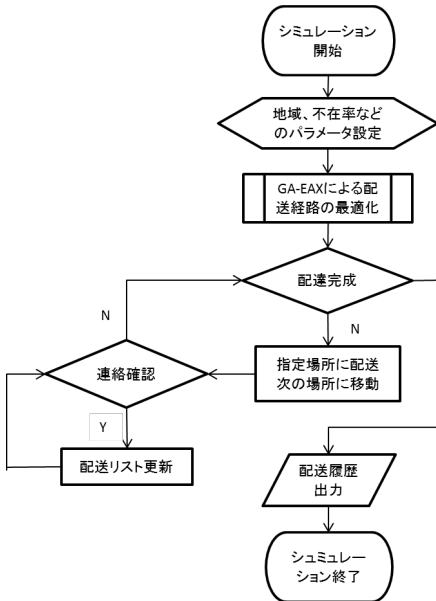


Fig. 5: シミュレーションのフローチャート図

上図はシミュレーションの流れを表すフローチャート図である。まず初めにシミュレーションのパラメータを設定し、初めてのGA-EAXIを用い配送リストを初期生成する。その後、全部の荷物を配達完成まで、リストに書かれた順番に配達する。もし再配達依頼が来ると、セールスドライバーは意思決定(行くべきか否か、如何に計画を直すか)を行い、リストを更新される。配達完成後、配送履歴を外部に出力する。

6.5 モデルのパラメータ

提案モデルに従い、(1)配送地域、(2)不在率、(3)再配達的时间間隔、(4)配送計画方式、(5)一軒あたり距離コスト上限をパラメータとして扱い、それぞれが取れる値はTable 4のようになる

Table 4: モデルのパラメータ範囲

パラメータ	値の範囲
配送地域	横浜、埼玉、京都
不在率 δ	0%-100%
再配達依頼の時間間隔	$\lambda = \{1, 2, \dots, N\}$
配送計画方式	FCFS, FCLS, INST, TSP
距離コスト上限(一軒)	任意の実数

7 シミュレーション

第5章で定義したモデルに基づき、本章では、不在と再配達を考慮した不確実環境において、各種の配送計画方式を用いてシミュレーションを行い、その結果から距離コストとサービス品質両方の視点から動的配送計画の最適化について考察を行う。

7.1 シミュレーションの環境設定

本実験では再配達依頼の時間間隔を一定にし、不在率を変化させることにより、各種の配送計画方式を利用する際に総走行距離とサービス品質（応答時間、サービスの安定性）の変化を調べる。そして、各種の配送計画方式を比較した上で、それぞれの特徴と適用する環境を見極める。

Table 5: 実験1のパラメータ設定

不在率	0%-100%
再配達依頼の時間間隔	$\lambda = 20$
配送計画方式	FCFS, FCLS, INST, TSP
距離コスト上限(一軒)	設定なし

本実験のパラメータ設定は上表に示したようにする。

7.2 シミュレーション結果

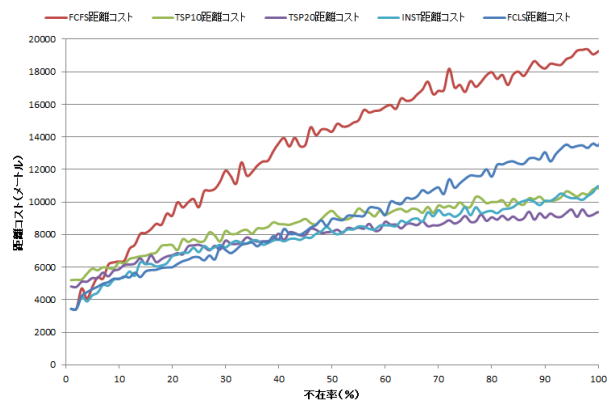


Fig. 6: 不在率と走行距離の関係

Fig. 6 では横軸に不在率、縦軸に距離コストを示している。先行研究⁹⁾の通りにすべての配送計画方式による配送距離コストと不在率は線形の関係があること確認できた。この3つの方式の中で、FCFS 配送方式

の距離コストは FCLS、INST を大幅に上回っている。FCLS と INST は最初にほぼ同様であるが、不在率の増加に連れ、FCLS の距離コストも高くなることが明らかになった。TSP10(更新間隔 $\Delta t = 10$)と TSP20(更新間隔 $\Delta t = 20$)両方は不在率が低い時に距離コストは INST より高いだが、不在率の上昇に伴い、距離コストが収める傾向が見える。その以外に TSP10 より TSP20 のほうの距離コストが高いことがわかった。

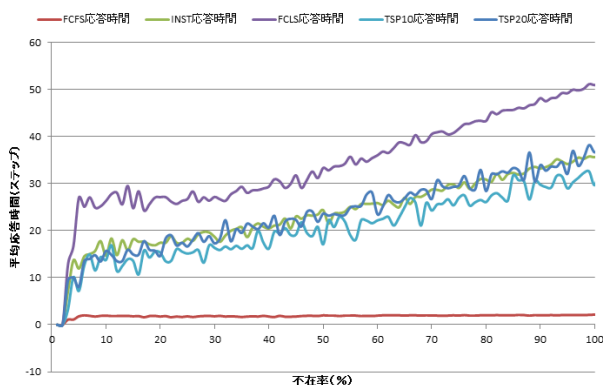


Fig. 7: 不在率と応答時間の関係

その一方で、サービスの品質を計測するために顧客の再配達依頼の平均応答時間も調べることにした。その結果、Fig. 7 を示したように FCFS 方式以外は平均応答時間と不在率も線形関係が表している。その中 FCFS、FCLS、INST、TSP10、TSP20 応答時間の確率分布は Fig. 8 から Fig. 11 に示す。

Fig. 8 から Fig. 11 に示したように応答時間はそれぞれの方式で異なる確率分布を表している。分布の統計的な特性を正確に把握するために Table 6 で応答時間の期待値、最大値、範囲と標準分散をまとめた。

Table 6: 各種の応答時間の統計的特性

	FCFS	FCLS	INST	TSP20	TSP10
平均	2.44	40.2	27.37	28.79	25.24
最大	23	65	125	123	124
分散	1.57	12.08	26.31	19.05	20.1

(単位：ステップ)

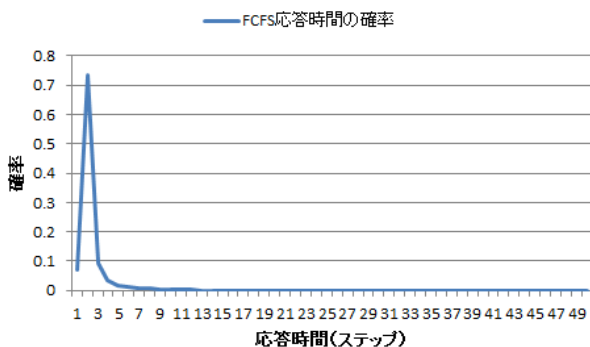


Fig. 8: FCFS 配送方式のサービス応答時間の分布

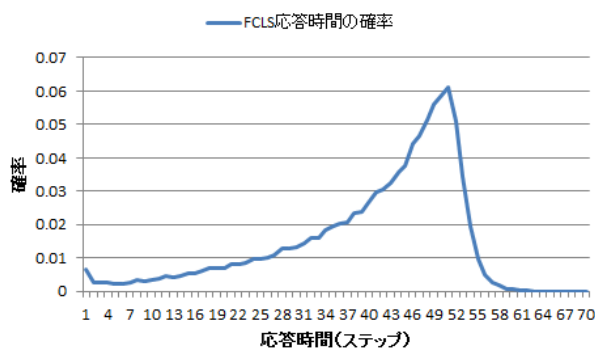


Fig. 9: FCLS 配送方式のサービス応答時間の分布

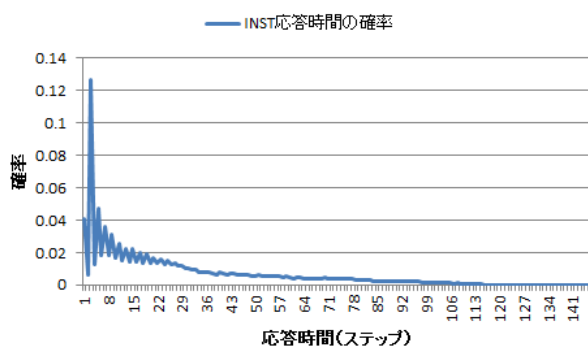


Fig. 10: INST 配送方式のサービス応答時間の分布

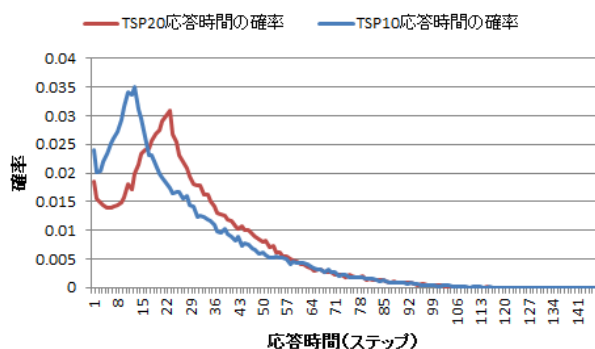


Fig. 11: TSP 配送方式のサービス応答時間の分布

7.3 考察

以上の実験より、4 つの方式の特徴について以下の結果が得られた。FCFS 方式の距離コストは最も高いが、その代わりに再配達の平均応答時間は短く（平均応答時間は 2.44 ステップ）、それに、標準分散は小さいため、応答時間のばらつきもほとんどなく配送は高品質かつ安定に実現できる。

FCLS 方式の距離コストは FCFS より抑えられるが、この方式を利用する場合は平均応答時間が長くなる。しかしながら、応答時間の最大値は 65 ステップを超えないため、再配達の期限の保証が期待できる。

INST 方式は距離コストが一番低く平均応答時間も比較的短いですが、Table 6 から標準分散が最も高いので、応答時間はばらつきがあるため、つまりサービス安定

性の問題が抱えている。

TSP は不在率が低い場合に距離コストはやや高いが、不在率の上昇に連れ INST 方式を超える性能が表している。TSP の平均応答時間は INST と同じぐらいが、標準分散から安定性が INST より良いことが判断できる。

その以外、TSP10 と TSP20 を比較すると、傾向として頻繁に更新を行うとサービス品質は高いですが、その反面、距離コストが高くなることが明らかになった。TSP 方式を用いた配送計画の更新間隔 Δt は実際の状況に応じて設定することで、距離コストと応答時間のトレードオフ関係が明らかになった。これはパラメータを調整するだけで距離コストとサービス品質（応答時間と安定性）のトレードオフ関係をコントロールできる点は業務の性質に適する配送計画を構築可能な利点があると考えられている。

本章では、各種の配送計画方式において距離コストとサービスの品質に明確なトレードオフ関係がある。そこで、前の考察を踏まえて各種の方式の総合的に評価をまとめるものは下表に通りである。

Table 7: 4つの配送計画方式の特性の比較

	距離 C	応答時間	安定性	計算 C
FCFS	×	○	○	○
FCLS	△	×	△	○
INST	○	△	×	△
TSP20	○	△	×	×
TSP10	△	△	×	×

上述したモデルをシミュレーションすることにより、FCFS、FCLS、INST、TSP に対する定性的な分析ができたが、トレードオフが存在しているため、どのような場面でも優れた方式は存在しないことが明らかになった。結論としてシミュレーションで得られた特徴を踏まえてサービス内容とサービスポリシーを応じて適用する動的配送計画の決定を行うことが求められると考えられている。

8 おわりに

本研究では、宅配を対象とする配送ルートを最適化の手法に基づき、求めた最適解と現場の集配業務と比較し、改善させる可能性が高いことが証明した。そして、配送シミュレーションモデルを構築した上で再配達を考慮した不確実性を伴う環境において実行可能な4つの動的配送計画方式に対して距離コストとサービス品質（応答時間とサービスの安定性）の2つの側面から評価を行った。その結果、距離コストとサービス品質間に存在するトレードオフを見つけた。トレードオフがあるため、どれが最も優れた方式とは言えないが、実際の業務内容とサービスポリシーに応じて選択の基準をまとめた。

今後の課題としてまず本モデルは一日分の配達を行う仮定を置いている。距離コストによる総コストの削減を計測するためにシミュレーションモデルは翌日配達を実現し、長いスパンで距離コスト上限設定によるコスト削減を観察する必要がある。そして配送計画方式に関して本研究で提案した TSP 方式より宅配便の動的配送計画を適用可能なオンライン最適化アルゴリズムを提案することは考えられている。さらに、シミュレーションは時間軸を設定し、道路状況などの実際状況を考慮した実用性がある宅配便配送シミュレーターを実現することが考えられる。

参考文献

- 1) 小倉昌男：小倉昌男経営学，日経 BP 社（1999）
- 2) 国土交通省：“平成 24 年度宅配便等取扱実績関係資料，”（2013） [Online]. Available: <http://www.mlit.go.jp/common/001007227.pdf>
- 3) M. Flood, “The traveling-salesman problem,” Oper. Res., vol. 4, no. 1, 61/75（1956）
- 4) 山本芳嗣，久保幹雄，巡回セールスマン問題への招待。朝倉書店（1999）
- 5) S. Lin and B. Kernighan, “An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem,” Oper. Res., vol. 21, no. 2, 498/516（1973）
- 6) 永田裕一，“局所的な交叉 EAX を用いた GA の高速化と TSP への適用，”人工知能学会論文誌，vol. 22, no. 5, 542/552（2007）
- 7) G. Dantzig and J. Ramser, “The truck dispatching problem,” Manage. Sci., vol. 6, no. 1, 80/91（1959）
- 8) V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, and A. Medaglia, “A review of dynamic vehicle routing problems,” Eur. J., 0/28（2012）
- 9) Larsen, O. Madsen, and M. Solomon, “Partially dynamic vehicle routing-models and algorithms,” J. Oper. Res., vol. 53, no. 6, 637/646（2002）
- 10) 久保幹雄，サプライ・チェーン最適化ハンドブック。朝倉書店（2007）
- 11) E. Savas, “Simulation and cost-effectiveness analysis of New York’s emergency ambulance service,” Manage. Sci., vol. 15, no. 12, B/608（1969）
- 12) A. Haghani, Q. Tian, and H. Hu, “Simulation model for real-time emergency vehicle dispatching and routing,”（2004）
- 13) 国土地理院，“日本の測地座標系。” [Online]. Available: <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/datum/main.html>
- 14) 鈴木努，R で学ぶデータサイエンス 8 ネットワーク分析。共立出版（2009）
- 15) “TSP: Traveling Salesperson Problem (TSP).” [Online]. Available: <http://cran.r-project.org/web/packages/TSP/index.html>