

# 期待最短経路探索手法を用いた配車配送計画問題に関する研究\*

## Vehicle Routing and Scheduling Problem Using Expected Shortest Paths\*

中村有克\*\*・谷口栄一\*\*\*・山田忠史\*\*\*\*・安東直紀\*\*\*\*\*

By Yuki NAKAMURA\*\*・Eiichi TANIGUCHI\*\*\*・Tadashi YAMADA\*\*\*\*・Naoki ANDO\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

近年、経済の発展に伴い人間の生活行動は多様になっている。人々の多様な生活を支える物流活動も多様化せざるを得なくなっている。たとえば、ITの普及に伴うeコマースの浸透やJust-in-Time輸送をはじめとする高度な物流サービスの要求など、物流システムの変革が求められている。一方、配送活動を行う企業は、これらの要望に応えるため多頻度・小口配送を増加させており、しばしば非効率な配送活動が行われている。しかしながら、昨今の道路交通混雑、大気汚染、原油高などの問題により、貨物車輸送の効率化は重要な課題となっている。

本研究では、これらの問題の解決を図るべく、高度な配車配送計画システムの導入効果に注目する。具体的には、配送活動を行う企業側の配送費用の削減を目的として、配車配送計画時の経路選択において、動的かつ確率的な変動に対応可能な経路探索法の利用を検討する。各経路探索法の優劣を、それを用いた配車配送計画の結果において比較することにより、配車配送計画問題の顧客間経路決定に有用な経路探索法を検討する。

### 2. 本研究の位置付け

#### (1) 配車配送計画問題

配車配送計画問題は、1959年に提案されて以来、オペレーションズリサーチ(OR)の分野を中心として盛んに研究されている<sup>1)</sup>。ORの分野では、主にモデル構築および解法を中心に研究されている。近年では、容量制約、

\*キーワード：物流、配車配送計画、最短経路探索

\*\*学生員、工修、京都大学工学研究科

(京都府京都市西京区京都大学桂、

TEL075-383-3231, FAX075-950-3800)

\*\*\*フェロー会員、工博、京都大学工学研究科

(京都府京都市西京区京都大学桂、

TEL075-383-3229, FAX075-950-3800)

\*\*\*正会員、工博、京都大学工学研究科

(京都府京都市西京区京都大学桂、

TEL075-383-3230, FAX075-950-3800)

\*\*\*正会員、工博、京都大学工学研究科

(京都府京都市西京区京都大学桂、

TEL075-383-3231, FAX075-950-3800)

時間枠制約などの現実的な制約条件を加えたモデルにおいて、顧客数の多い大規模な問題への適用も行われている<sup>2)</sup>。

ORの分野における配車配送計画問題はユークリッド平面において適用され、顧客間のコストは一定とみなされる。しかし、実際の交通ネットワークにおいては、交通状況の変化に伴い、顧客間コストつまり顧客間の所要時間は変動する。

したがって、交通状況を考慮した交通ネットワークに対して配車配送計画を適用するため経路選択モデルを内包した高度な配車配送計画モデルの構築を目指す。本研究では、配車配送計画における顧客間経路選択の重要性を確認し、配車配送計画に対して有用な経路探索モデルを検討する。

#### (2) 最短経路探索

最短経路探索問題は、1950年代後半よりさまざまなアルゴリズムが提案されている。最短経路問題において代表的な手法としてDijkstra法<sup>3)</sup>が挙げられる。Dijkstra法は、各リンク長が非負の場合の1始点最短経路問題に対するアルゴリズムである。一方、近年ではネットワーク上のリンク長が決定的ではなく、時間依存あるいは確率的な変動を考慮した場合の経路探索モデルが構築されている。Hall<sup>4)</sup>は、リンク所要時間がランダムかつ時間依存する交通ネットワークにおいて、最短経路探索モデルによる最短経路が期待最短経路を選択できていないことを説明した。

本研究では、実際の交通状況の変化を考慮し、経路選択行動を行うための交通ネットワークのリンクの所要時間が時間的かつ確率的に変化するネットワークにおける期待最短経路探索モデルの有用性を調べる。

### 3. 配車配送計画問題

#### (1) モデルの概要

本研究では、都市内の集荷活動に注目し、最適な配車配送計画とは、総集荷費用(すなわち、固定費、走行費、遅刻・早着ペナルティの総和)を最小化するように、顧客の割当・訪問順序・出発時刻などを算定すると考える。

(紙面の都合上、配車配送計画問題の定式化などの詳細については参考文献5)を参照されたい。)

## (2) 配車配送計画における顧客間経路

配車配送計画問題では一般に、顧客間コスト、つまり顧客間所要時間は単一値(例えば、地点間の直線距離の移動に要する所要時間)で捉えられる。したがって、この類のモデルでは、デポと顧客のみから構成されるネットワークに対して配車配送計画を立案する。

本研究では、交通ネットワークを用いて配車配送計画を検討する。それゆえ、交通ネットワークにおける多数の経路の中から有用な顧客間経路を定めて、配車配送計画に適用する必要がある。顧客間経路は、配車配送計画問題における走行費、遅刻・早着ペナルティに大きな影響を及ぼす。これらの影響により、当然ながら、訪問順序、出発時刻などの決定変数も異なる値となる。また、顧客間経路の選択は、時間帯によるリンク所要時間の変動を考慮する必要があり、問題が複雑化する。

## 4. 経路探索モデル

### (1) 既存のモデルの概要と問題点

配車配送計画は、計算時間などの問題から多くの場合事前計画である。したがって、精度の高い計画を立案するためには、当日の状況予測や特異な状況にも適応しうる安定した経路選択をすることが求められる。既存の研究においては、配車配送計画における顧客間経路の探索のために、リンク所要時間の平均値を用いた最短経路探索法やリンク所要時間を学習して経路探索を行う手法などが用いられている。

代表的な最短経路探索法としてDijkstra法が挙げられる。Dijkstra法は、計算時間が短く配車配送計画問題における顧客間経路探索が容易である。しかし、このアルゴリズムでは、顧客間の各リンクにおいて単一の所要時間(例えば、平均値)を用いる。したがって、リンク所要時間の分散が大きく不安定なリンクを選択してしまう可能性がある。

一方、アンツルーティングは強化学習を経路探索に応用した手法であり、対象ネットワークのリンク所要時間の変化への適応力に優れている。安東ら<sup>6)</sup>は、単一のリンク所要時間を基にしたDijkstra法と、リンク所要時間の変動を考慮したアンツルーティングにより求めた顧客間経路を配車配送計画に適用して、その結果比較を行っている。その結果、アンツルーティングの方が、顧客間経路所要時間の分散の安定した経路を選択していることが確認されている。しかし、アンツルーティングは強化学習による手法であり、学習に多大な計算時間を要するだけでなく、学習の結果として良好な経路を選択する仕組

みが不明瞭であるという問題を有している。

本研究では、顧客間経路選択モデルとして対象道路ネットワークのリンク所要時間を動的かつ確率的な値として扱う経路選択モデルを適用する。このようなモデルは、交通ネットワークを動的かつ確率的に扱うことにより、リンク所要時間の変動や安定性が考慮できると考えられる。したがって本研究では、動的かつ確率的な期待経路探索法を用いる。具体的には、Fuら<sup>7)</sup>による手法とMiller-Hooks<sup>8)</sup>による期待経路探索手法の活用を試みる。

### (2) 期待経路モデル

Fuらによる期待経路モデルは、動的かつ確率的な最短経路探索問題として次のように定義されている。動的かつ確率的な最短経路探索問題とは、リンク所要時間が連続時間確率過程としてモデル化される交通ネットワーク上において期待最短経路を見つけることとして定義される。まず、以下のようにリンク所要時間と確率密度関数を定義する。

$X_a(t)$ :時刻 $t$ にリンク $a$ へ進入した車両のリンク所要時間

$f_{X_a}(x_a, t)$ :リンク所要時間の1次確率密度関数

このとき、確率過程 $X_a(t)$ の平均と分散は以下のように表される。

$$\mu_{X_a}(t) = E[X_a(t)] = \int_0^{+\infty} x_a f_{X_a}(x_a, t) dx_a \quad (1)$$

$$v_{X_a}(t) = E[(X_a(t) - \mu_{X_a}(t))^2] = \int_0^{+\infty} (x_a - \mu_{X_a}(t))^2 f_{X_a}(x_a, t) dx_a \quad (2)$$

続いて、ノード $i$ からノード $j$ へリンク $a$ を通る際の経路所要時間の平均と分散を算出する。ノード $i$ およびノード $j$ における到着時刻を表す確率変数を $Y_i$ および $Y_j$ とする。また、リンク $a$ におけるリンク所要時間の確率変数を $Z_a$ とする。このとき、経路所要時間の平均と分散は以下のように表される。

$$E[Y_j] = E[Y_i] + E[Z_a] \quad (3)$$

$$\text{Var}[Y_j] = \text{Var}[Y_i] + \text{Var}[Z_a] + 2\text{COV}(Y_i, Z_a) \quad (4)$$

経路所要時間の平均の第2項は $E[Z_a|Y_i] = E[\mu_{X_a}(Y_i)]$ と変形できる。さらに、第2項を決定するため $\mu_{X_a}(t)$ を $t = E[Y_i]$ の周りでテーラー展開する。テーラー展開により、経路所要時間の平均の2次近似モデルは以下のように表される。

$$E[Y_j] \cong E[Y_i] + \mu_{X_a}(E[Y_i]) + \frac{1}{2} \mu_{X_a}''(E[Y_i]) \cdot \text{Var}[Y_i] \quad (5)$$

同様に、経路所要時間の分散の1次近似モデルは、以下のように表される。

$$\text{Var}[Y_j] \cong \{1 + \mu'_{x_a}(E[Y_i])\}^2 \text{Var}[Y_i] + \nu_{x_a}(E[Y_i]) \quad (6)$$

式(5),(6)を再帰的に用いることで、ODペア間の期待所要時間が求められる。

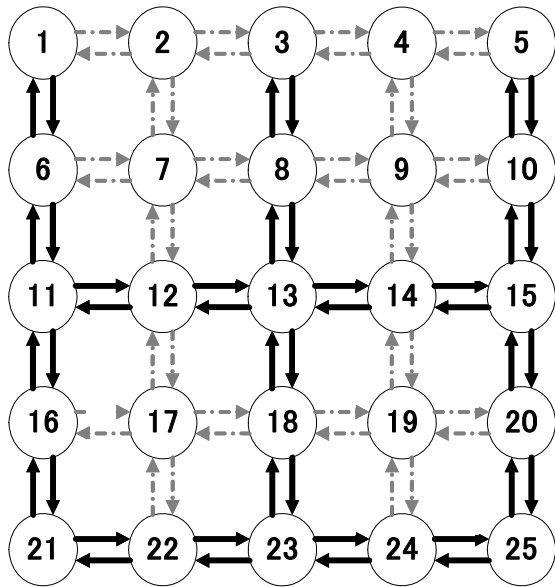
### (3) 最小期待時間経路探索手法

Miller-Hooksによる期待経路探索手法は、リンク所要時間が時間依存し、不確実性を伴うようなネットワークに対し適応し、最小となる期待時間経路を探索する手法である。この手法は、ラベル確定法に基づいたアルゴリズムを用いている。各出発時刻 $t$ 、リンク $(i,j)$ におけるリンク所要時間を $\tau_{ij}^k(t)$ とする。ここで、 $k=k=1, \dots, K_{ij}(t)$ をとり、発生しうるリンク所要時間のケース数を表す。さらに、 $\tau_{ij}^k(t)$ が発生しうる確率を $\rho_{ij}^k(t)$ と

表し、 $\rho_{ij}^k(t)$ は、 $\sum_{k=1}^{K_{ij}(t)} \rho_{ij}^k(t) = 1$ を満たす。目的地ノードを $N$ 、発生しうるリンク所要時間のケースを $p$ とすると、出発時刻 $t$ 、ノード $i$ からノード $N$ へ向かう適応的期待時間 $\lambda_i(t)$ は以下のように表される。

$$\lambda_i(t) = \min_{j \in \Gamma^{+1}(i)} \sum_{p=1}^{K_{ij}(t)} (\tau_{ij}^p(t) + \lambda_j(t + \tau_{ij}^p(t))) \cdot \rho_{ij}^p(t) \quad (7)$$

式(7)に基づきODペア間の最小期待所要時間が求められる。



- ⑬ : ノード
- ← : リンク (自由走行速度 : 20km/h、自由走行時間12分、2車線)
- ←--- : リンク (自由走行速度 : 15km/h、自由走行時間16分、2車線)

図-1 対象道路ネットワーク

## 5. ケーススタディ

### (1) 問題設定

図-1に、本研究で用いた仮想道路ネットワークを示す。デポに待機しているトラックの数、種類、ならびにネットワーク上の顧客の位置・需要量は既知とする。物流事業者は1社とし、デポの位置はノード5に設定する。使用可能なトラックは、デポに2t、4t、10tトラック各2台ずつである。顧客の配置については、デポ以外のノードから選び、顧客数を24個とした。

また、顧客は全て集荷先であると仮定し、集荷量は113.5~150kg、作業時間は10分とした。なお、到着時刻制約は9:00~18:00の時間帯でランダムに設定した。

### (2) リンク所要時間

本研究では事前に、上述のように設定した仮想道路ネットワークに対して交通シミュレーションを適用することにより、30日間に渡って1分ごとのリンク所要時間を得られているとしておく。この所要時間を履歴データとして扱い、配車配送計画のための顧客間経路を求める。

本研究における最短経路探索では、1分ごとの所要時間履歴データについて30日分の平均所要時間を算出し、この平均所要時間を単一値として経路を決定する。経路探索手法は、Dijkstra法を用い、こうして得られた経路を本研究における最短経路と呼ぶ。ただし、各時刻における所要時間情報を用いて経路を決定するため、出発時刻により最短経路は異なる可能性がある。

Fuらによる期待経路モデルでは、30日間に及ぶ1分ごとの履歴データにより、リンクへの進入時刻を変数としてリンク所要時間の平均値を2次の線形関数として近似する。この近似式により式(5),(6)の平均の微分係数が得られる。また、各出発時刻の履歴データより $\mu_{x_a}(t)$ 、 $\nu_{x_a}(t)$ が求められる。

Miller-Hooksによる期待経路探索手法では、式(7)において $p$ で表されるリンク所要時間のケース数が存在する。本研究では簡略化のため30日間の履歴データを数個の階級を持つヒストグラムとして用いる。各階級は、母集団の最大値と最小値の間を等間隔に分割し、標本値は、各階級の中央値とする。

### (3) 比較方法

本研究では、上述のように履歴データを設定・使用し、事前計画としての顧客間経路選択および配車配送計画を策定する。これらの計画に基づいて配送を行った場合の効果を検証するために、交通シミュレーションにより追加的に10日間のリンク所要時間を計算し、その所要時間の基で計画された配送活動が実行されることを想定し、経路探索手法のパフォーマンスを比較・検証する。

表一 各手法における通過ノード（ノード1→25間）

	選択された経路(通過ノード番号)
最短経路探索	6,11,12,13,14,15,20
期待経路モデル	6,11,12,17,18,23,24
最小期待時間経路探索手法	6,11,16,21,22,23,24

表三 各手法による選択経路の平均・分散（10日間）

	平均(分)	分散(分 <sup>2</sup> )
最短経路探索	160.0	71.0
期待経路モデル	158.3	42.3
最小期待時間経路探索手法	166.8	44.8

表二 各手法による選択経路の所要時間（10日間）

	顧客間所要時間(分)									
	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
最短経路探索	147.5	157.7	169.8	166	148.9	149.6	172.4	161.3	165.4	161.6
期待経路モデル	158.5	161.8	167.6	154.6	147.7	155.7	169.4	152.3	161.1	153.8
最小期待時間経路探索手法	159.2	167.3	154.8	160.9	167.9	166.5	166.5	175.6	172.4	176.9

#### (4) 結果比較

上述の各手法によって算出された顧客間経路選択結果について検討する。各手法がもたらす結果の相違を示す一例として、ある時刻におけるノード1からノード25へ向かう場合の各手法による通過ノードを表一に示す。

さらに、各手法が探索した経路を用いて10日間の仮定の配送を行った場合の表一に示した経路の実際の所要時間を表二に、10日間の平均および分散を表三に示す。

表一、二より、同様の履歴データを用いているにもかかわらず、各手法における選択経路が異なっており、同じ経路であっても10日間の各日によって顧客間所要時間が変動していることが確認できる。表三から、3つの手法うち、動的かつ確率的な考慮を行っている期待経路モデル、最小期待時間経路探索手法はともに、最短経路探索と比べて、分散が小さな値となっている。したがって、動的かつ確率的な考慮を行っている経路探索モデルは、リンク所要時間の変動が小さい安定的な経路を選択していることが確認できる。さらに、期待経路モデルによる期待最短経路は、最短経路探索による経路の平均経路所要時間より小さな平均経路所要時間となっている。これは、交通ネットワークのリンク所要時間の変動によっては経路所要時間においても有効な経路が選択できることが確認されたといえる。このような結果が得られた理由として、最も大きな要因はリンク所要時間の変動によると考えられる。モデルの観点では、期待経路モデルにおいてリンク所要時間の微分係数と経路の分散を用いており、リンク所要時間の変動の傾向および経路の安定性が考慮されているためと考えられる。結果的に最短経路より小さな平均経路所要時間の経路を選択できたと思われる。

なお、各経路探索法により算出された顧客間経路を用いた配車配送に関する結果については発表時に示す。

## 6. おわりに

本研究では、配車配送計画における顧客間経路に着目し、従来の平均リンク所要時間に基づく最短経路に対し、

動的かつ確率的な交通ネットワークに適用可能な期待経路モデルの有効性について検討した。交通ネットワークにおいて、リンク所要時間の履歴データを用いて当日行動を計画し、配車配送計画を数日間実行することにより各経路探索法の効果を検討した。その結果、平均リンク所要時間に基づくDijkstra法による最短経路と比べて、動的かつ確率的な交通ネットワークに適用可能な経路探索モデルの顧客間所要時間は分散が小さく、このような経路探索モデルは顧客間所要時間の安定的な経路を選択していると考えられる。このような結果は、配車配送計画が事前計画、時間制約に厳しいなどの性質において有効であると考えられ、安定した配送計画の策定に有用である。

本研究では、仮想データに基づき経路探索モデルの効果について検証を行った。今後、これらの結果を配車配送計画に適用し、リンク所要時間の分散の安定的な経路を配車配送計画において用いる有効性の確認が必要である。

#### 参考文献

- 1) Toth, P. and Vigo, D.: The Vehicle Routing Problem, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- 2) Kallehauge, B., Larsen, J. and Madsen., OBG.: Lagrangian Duality Applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows, Computers & Operations Research 33, pp.1464-1487, 2006.
- 3) Dijkstra, E.W.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, 1, pp.269-271, 1959.
- 4) Hall, R.: The Fastest Path through a Network with Random Time-Dependent Travel Time, Transportation Science 20(3), pp.182-188, 1986.
- 5) 谷口栄一, 山田忠史, 細川貴志: 都市内集配送トラックの配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響分析, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.149-159, 1999.
- 6) 安東直紀, 谷口栄一, 山田忠史, 川本宗由: 経路学習を用いた配車配送計画厳密解の実配送への適用に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.35, 2007.
- 7) Fu, L. and Rilett, L.R.: Expected Shortest Paths in Dynamic and Stochastic Traffic Networks, Trans Res B, Vol.32, No.7, pp.499-516, 1998.
- 8) Miller-Hooks, E.: Adaptive Least-Expected Time Paths in Stochastic, Time-Varying Transportation and Data Networks, Networks, Vol.37(1), pp.35-52, 2001.