

# 配車配送計画における所要時間変動を考慮した顧客間経路選択の効果に関する研究\*

## Effects of Shortest Paths with Variable Travel Times on Vehicle Routing and Scheduling\*

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

#### (1) 研究の背景と目的

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、集配送を担う企業は、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が行われている。しかしながら、昨今の道路混雑、大気汚染、燃料高騰などの問題により、貨物車輸送の効率化は重要な課題となっている。

近年、ITS技術の普及により所要時間に関するデータの取得が進んでいる。取得された所要時間は高度な物流サービスを行うための計画策定に重要な役割を果たす。しかし、実際の集配送時における所要時間の変動を考慮することは困難であり、詳細な所要時間履歴と高度な事前計画が必要とされる。

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。ここで、本研究における配車配送計画システムは、事前に得られている所要時間履歴に基づき将来の集配送に対する車両使用台数、顧客訪問順序、車両出発時刻を決定するものとする。このシステムに基づき、集配送活動を行う企業側の集配送費用の削減を目的として、配車配送計画時の顧客間の経路選択において、所要時間の変動に対応可能な経路探索モデルの適用を検討する。各モデルを用いた配車配送計画の結果を比較することにより、配車配送計画問題に有用な経路探索モデルを検討する。

\*キーワード：物流計画、経路選択

\*\*学生員，修士（工学），京都大学工学研究科  
（京都府京都市西京区京都大学桂，  
TEL:075-383-3231, 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，  
TEL:075-383-3229, FAX075-950-3800）

\*\*\*\*正会員，博士（工学），京都大学工学研究科  
（京都府京都市西京区京都大学桂，  
TEL:075-383-3230, FAX075-950-3800）

\*\*\*\*\*正会員，博士（工学），京都大学工学研究科  
（京都府京都市西京区京都大学桂，  
TEL:075-383-3231, FAX075-950-3800）

#### (2) 本研究の位置付け

##### a) 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、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において、顧客間のコストは一定とみなされ、一般にユークリッド距離を用いる。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、顧客間の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顧客間の経路選択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。

##### b) 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経路探索モデルの有用性を調べる。

## 2. 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、車両費用、運行費用、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考える。本研究において用いる確率論的配車配送計画モデルの定式化を以下に記す。

Minimize

$$C(t_0, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^m c_{f,l} \cdot \delta_l(\mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] + \sum_{l=1}^m E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] \quad (1)$$

ここに、

$$E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = c_{t,l} \left\{ \bar{T}(t_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (2)$$

$$E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = \sum_{i=0}^{N_l} \int_0^{\infty} p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \{c_{d,n(i)}(t) + c_{e,n(i)}(t)\} dt \quad (3)$$

Subject to

$$n_{0,l} \geq 2 \quad (4)$$

$$n(0) = 0 \quad (5)$$

$$n(N_l) = 0 \quad (6)$$

$$\prod_{l=1}^m \prod_{i=1}^{N_l} \{n(i) - k\} = 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad (8)$$

$$\sum_{n(i) \in \mathbf{x}_{l,j}} D(n(i)) = W_l(\mathbf{x}_{l,j}) \quad (9)$$

$$W_l(\mathbf{x}_{l,j}) \leq W_{c,l} \quad (10)$$

$$t_s \leq t_{l,0} \quad (11)$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad (12)$$

ここに、

$$t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(t_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (13)$$

ただし、

$C(t_0, \mathbf{X})$  : 総集荷費用

$t_0$  : トラック  $l$  がデポを出発する時刻を表すベクトル  $t_0 = \{t_{l,0} | l=1, \dots, m\}$

$\mathbf{X}$  : 全トラックの集配送ルートへの顧客の割当と訪問順序を示す数列（ $\mathbf{X}$  の中には、すべての  $n(i)$  が必ず含まれる。）

$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_l | l=1, m\}$

$\mathbf{x}_l$  : トラック  $l$  の集配送ルートへの顧客の割当と訪問順序を示す数列

$\mathbf{x}_l = \{n(i) | i=1, N_l\}$

$\mathbf{x}_{l,j}$  : トラック  $l$  の  $j$  回転目の集配送ルートへの顧客の割当と訪問順序を示す数列

$n(i)$  : あるトラックが  $i$  番目に訪問する顧客のノード番号

$N_l$  : トラック  $l$  が訪問する顧客の総数

$n_{0,l}$  : 数列  $\mathbf{x}_l$  中のデポを訪問する総数

$m$  : 使用可能なトラック台数の上限

$c_{f,l}$  : トラック  $l$  の単位車両費用（円/台）

$\delta_l(\mathbf{x}_l)$  :  $=1$ ; トラック  $l$  を使用するとき  
 $=0$ ; その他の場合

$C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$  : トラック  $l$  の運行費用（円）

$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$  : トラック  $l$  のペナルティ（円）

$c_{t,l}$  : トラック  $l$  の単位時間あたりの運行費用（円/分）

$t_{l,n(i)}$  : トラック  $l$  の顧客  $n(i)$  における出発時刻

$\bar{T}(t_{l,n}, n(i), n(i+1))$  : トラック  $l$  の時刻  $t_{l,n(i)}$  における顧客  $n(i)$  と顧客  $n(i+1)$  の間における平均所要時間

$t_{c,n(i)}$  : 顧客  $n(i)$  における貨物の積み卸し時間

$c_{d,n(i)}(t)$  : 顧客  $n(i)$  における単位時間あたりの遅刻ペナルティ（円/分）

$c_{e,n(i)}(t)$  : 顧客  $n(i)$  における単位時間あたりの早着ペナルティ（円/分）

$N$  : 顧客の総数

$D(n(i))$  : 顧客  $n(i)$  の需要（kg）

$t'_{l,0}$  : トラック  $l$  が最後にデポに到着する時刻

$t_s$  : トラックの稼働可能時間の開始時刻

$t_e$  : トラックの稼働可能時間の終了時刻

$W_l(\mathbf{x}_l)$  : トラック  $l$  の積載量（kg）

$W_{c,l}$  : トラック  $l$  の積載容量（kg）

$p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l)$  : デポを時刻  $t_{l,0}$  に出発したトラックが時刻  $t$  に顧客  $n(i)$  に到着する確率

上記の配車配送計画モデルにおいて、式(2)は顧客間移動に要する費用の期待値を表し、式(3)は顧客訪問時に生じるペナルティの期待値を表す。ペナルティは、顧客訪問の時間枠に対し、遅刻あるいは早着した際に生じると設定する。物流事業者へのヒアリング調査結果に基づいて、単位時間あたりの早着ペナルティはトラックの単位時間あたりの運行費用と等しく設定し、遅刻ペナルティは早着ペナルティの5倍の値を設定した。各顧客におけるペナルティは、式(3)により、到着時刻の確率に単位時間あたりのペナルティを掛け合わせた期待値として算出される。

上記の配車配送計画モデルにおいて顧客数が増加すると、解の組み合わせ数が指数関数的に増えてしまうため、遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた近似解により配車配送計画を求解する。

### (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（たとえば、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策定する。

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選択し、配車配送計画に適用する必要がある。顧客間経路は、配車配送計画における運行費用、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る、問題が複雑化する。

### 3. 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、精度の高い計画を策定するためには、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の経路選択のために、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、経路探索が容易である。しかし、このアルゴリズムでは、各リンクにおいて単一の所要時間（たとえば、平均値）を用いる必要がある。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法による顧客間経路と、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、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小さい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、経路探索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探索モデルを適用する。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>によるモデルとMiller-Hooks<sup>8)</sup>によるモデルの活用を試みる。

#### (2) Fu et al.モデル

Fu et al.モデルは、動的かつ確率的な最短経路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。Fuらは、ITSにより事前に、完全な履歴情報が、得られている場合の動的かつ確率的な最短経路問題を解く手法の精度確認を行っている。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。

$$\mu_{X_a}(t) = E[X_a(t)] = \int_0^{+\infty} x_a f_{X_a}(x_a, t) dx_a \quad (14)$$

$$\nu_{X_a}(t) = E[(X_a(t) - \mu_{X_a}(t))^2] = \int_0^{+\infty} (x_a - \mu_{X_a}(t))^2 f_{X_a}(x_a, t) dx_a \quad (15)$$

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。

$$E[Y_j] = E[Y_i] + E[Z_a] \quad (16)$$

$$\text{Var}[Y_j] = \text{Var}[Y_i] + \text{Var}[Z_a] + 2\text{COV}(Y_i, Z_a) \quad (17)$$

経路所要時間の平均の第2項は $E[Z_a|Y_i] = E[\mu_{X_a}(Y_i)]$ と変形できるため、式(16)は、式(14)を参考にして以下のように表すことができる。

$$E[Y_j] = E[Y_i] + \int_0^{+\infty} \mu_{X_a}(y_i) f_{Y_i}(y_i) dy_i \quad (18)$$

式(18)は $f_{Y_i}(y_i)$ に関して再帰式となる。したがって、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。

$$E[Y_j] \cong E[Y_i] + \mu_{X_a}(E[Y_i]) + \frac{1}{2} \mu_{X_a}''(E[Y_i]) \cdot \text{Var}[Y_i] \quad (19)$$

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。

$$\text{Var}[Y_j] \cong \{1 + \mu_{X_a}'(E[Y_i])\}^2 \text{Var}[Y_i] + \nu_{X_a}(E[Y_i]) \quad (20)$$

式(19),(20)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) Miller-Hooksモデル

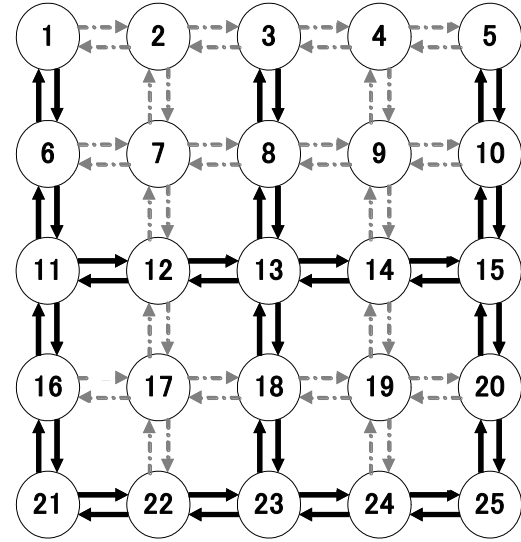
Miller-Hooksモデルは、リンク所要時間が時間依存し、不確実性を伴うようなネットワークに対し適応し、最小となる期待時間経路を探索する手法である。この手法は、ラベル確定法に基づいたアルゴリズムを用いている。各出発時刻 $t$ 、リンク $(i,j)$ におけるリンク所要時間を $\tau_{ij}^k(t)$ とする。ここで、 $k$ は $k=1, \dots, K_{ij}(t)$ を取り、発生しうるリンク所要時間のケース数を表す。さらに、 $\tau_{ij}^k(t)$ が発生しうる確率を $\rho_{ij}^k(t)$ と表し、 $\rho_{ij}^k(t)$ は、 $\sum_{k=1}^{K_{ij}(t)}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

$$\lambda_i(t) = \min_{j \in \Gamma^{-1}(i)} \sum_{p=1}^{K_{ij}(t)} (\tau_{ij}^p(t) + \lambda_j(t + \tau_{ij}^p(t))) \cdot \rho_{ij}^p(t) \quad (21)$$

式(21)に基づきODペア間の最小期待所要時間が求められる。

### (4) 各経路探索の特徴

上述の各経路探索の特徴と性質について述べる。Dijkstra法は、リンクの所要時間が変動しない静的なネットワークにおいて適用可能である。計算アルゴリズムは簡明であり、短い計算時間で一始点最短経路を求めることができる。しかしながら、リンク所要時間に変動が生じる場合、アルゴリズムにおける最適性が保証されないため、所要時間変動を直接考慮して最短経路を求めることはできない。Fu et al.モデルは、所要時間を連続時間確率過程としてモデル化している。したがって、出発時刻による所要時間変動および日々の変化による所要時間変動が、モデルにおいて記述されている。ただし、モデルが複雑であるため、最適性を保証し期待最短経路を探索することは困難であり、Fuらは近似解を求める手法を提案している。一方、Miller-Hooksモデルは、最適性を保証しつつ、期待経路を探索している。この手法においても、出発時刻と日々の変化による所要時間の変動が、モデルに内包されている。Fu et al.モデルとMiller-Hooksによる期待経路探索モデルの主な相違点として、所要時間の分散の考慮が挙げられる。Fu et al.モデルは、式(17)に表されているように、経路における共分散も考慮されており、経路としての安定性も考慮していると考えられる。したがって、本研究における安定な配車配送計画の策定に有用であると考えられる。



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

## 4. 仮想道路ネットワークにおけるケーススタディ

### (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における顧客の位置・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。

### (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、ブロック密度法<sup>9)</sup>に基づく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。所要時間の変動を与えるため、仮想道路ネットワークにおける発生交通量を±5%の範囲において変動させた。こうして得られた所要時間を所要時間履歴として扱い、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最短経路と呼ぶ。さらに、平均所要時間を単一値として用い、最短経路を算出するモデルを、最短経路モデル

と記す。ただし、各時刻における所要時間履歴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 et al.モデルでは、30日間に及ぶ1分ごとの所要時間履歴により、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次多項式として近似する。この近似式により式(19),(20)に用いられる平均の微分係数が得られる。なお、関数形による影響に関する考察は、Fuらの論文<sup>7)</sup>を参照されたい。また、各時刻の所要時間履歴より  $\mu_{x_a}(t)$ 、 $v_{x_a}(t)$  が求められる。期待最短経路は、ネットワークの形状を考慮し数え上げに基づき探索した。期待最短経路は、リンクへの進入時刻に依存するため、数え上げは出発時刻ごとに行う必要がある。

Miller-Hooksによる期待経路探索手法では、式(21)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30日間の所要時間履歴をそれぞれ発生しうる所要時間とみなす。

### (3) 比較方法

本研究では、上述のように所要時間履歴を設定・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集荷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集荷活動が実行されることを想定し、各経路探索モデルのパフォーマンスを比較・検証する。

### (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の結果を用いて、30日間の所要時間に基づく配車配送計画の策定を行う。対象ネットワークにおいて2tトラック2

台による集荷が可能であるため、2tトラック2台を用いる解を探索する。得られた近似解のうち最良の解における総集荷費用を表-1に示す。さらに、これらの解における車両出発時刻、顧客訪問順序を表-2に示す。以上の各経路探索モデルによる顧客間経路選択の結果を用いた配車配送計画に基づき、10日間集荷活動を行うと想定した場合の総集荷費用および各費用を表-3～表-5に示す。

表-2の結果より、配車配送計画モデルの決定変数である車両出発時刻、顧客訪問順序は、各経路探索モデルを用いた場合において異なることが確認された。制約条件により出発時刻、訪問順序の大きな相違はみられないが、顧客間の経路選択の相違により期待費用に差異がみられる。表-3～表-5に示した仮想の集荷における費用は各経路探索モデルにより大きく異なる。それぞれ、車両使用台数は、2tトラック2台であり、車両費用は同じである。運行費用は、Miller-Hooksモデルを用いたケースが、総じて最も小さな値となった。

次に、ペナルティに関して比較すると、最短経路モデルは、遅刻・早着ペナルティが大きく生じている。この主な理由として、最短経路探索に用いられるDijkstra法が、時系列にリンク所要時間を考慮できないためであると考えられる。一方、他の手法は、リンクにおける出発時刻をモデルにおいて考慮していること、および配車配送計画モデルにおける単位時間当たりの遅刻ペナルティに早着ペナルティの5倍の値を設定しており、遅刻を避けるよう配車配送計画を策定していることにより遅刻ペナルティが、最短経路モデルの場合と比べて、ほとんど発生していない。したがって、最短経路モデルによる顧客間経路選択は、リンク所要時間を時系列に計算していないため経路所要時間の推定の精度が低く、安定な配車配送計画が策定されるとは限らないことが確認された。

表-1 配車配送計画における期待費用（仮想道路ネットワーク）

|                 | 総集荷費用<br>(円) |
|-----------------|--------------|
| 最短経路モデル         | 35,611       |
| Fu et al.モデル    | 35,798       |
| Miller-Hooksモデル | 35,743       |

表-2 配車配送計画結果

|                 | 出発時刻 | 訪問順序（顧客番号）                                  |
|-----------------|------|---------------------------------------------|
| 最短経路モデル         | 6:45 | 6-16-22-18-19-20-25-24-23-17-21-11-12-13-15 |
|                 | 8:00 | 10-14-9-4-2-3-8-7-1                         |
| Fu et al.モデル    | 6:40 | 6-16-22-18-19-25-20-24-23-17-21-11-12-13-15 |
|                 | 7:55 | 10-14-9-4-3-8-2-7-1                         |
| Miller-Hooksモデル | 6:40 | 6-16-22-18-19-20-25-24-23-17-21-11-12-13-15 |
|                 | 7:55 | 10-14-9-4-3-8-2-7-1                         |

表-3 仮想の集荷における費用（仮想道路ネットワーク、最短経路モデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 14,225      | 2,192          | 5,262          | 42,515       |
| 2日目    | 20,835      | 14,295      | 2,280          | 3,508          | 40,918       |
| 3日目    | 20,835      | 14,192      | 2,104          | 5,700          | 42,832       |
| 4日目    | 20,835      | 13,844      | 4,121          | 0              | 38,800       |
| 5日目    | 20,835      | 14,091      | 2,981          | 877            | 38,785       |
| 6日目    | 20,835      | 14,310      | 1,929          | 6,139          | 43,213       |
| 7日目    | 20,835      | 14,333      | 1,929          | 7,016          | 44,113       |
| 8日目    | 20,835      | 14,634      | 438            | 17,101         | 53,009       |
| 9日目    | 20,835      | 14,595      | 701            | 13,155         | 49,287       |
| 10日目   | 20,835      | 15,123      | 0              | 24,117         | 60,075       |
| 10日間平均 | 20,835      | 14,364      | 10,156         |                | 45,355       |

表-4 仮想の集荷における費用（仮想道路ネットワーク、Fu et al. モデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 14,052      | 4,648          | 0              | 39,535       |
| 2日目    | 20,835      | 14,067      | 4,472          | 0              | 39,375       |
| 3日目    | 20,835      | 14,029      | 4,823          | 0              | 39,687       |
| 4日目    | 20,835      | 13,797      | 5,788          | 0              | 40,420       |
| 5日目    | 20,835      | 13,779      | 5,875          | 0              | 40,490       |
| 6日目    | 20,835      | 14,247      | 3,508          | 0              | 38,590       |
| 7日目    | 20,835      | 14,131      | 3,420          | 0              | 38,387       |
| 8日目    | 20,835      | 14,001      | 4,911          | 0              | 39,747       |
| 9日目    | 20,835      | 14,384      | 2,806          | 438            | 38,464       |
| 10日目   | 20,835      | 14,898      | 1,578          | 10,524         | 47,835       |
| 10日間平均 | 20,835      | 14,139      | 5,279          |                | 40,253       |

表-5 仮想の集荷における費用（仮想道路ネットワーク、Miller-Hooksモデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 14,022      | 4,735          | 0              | 39,593       |
| 2日目    | 20,835      | 14,155      | 4,034          | 0              | 39,024       |
| 3日目    | 20,835      | 14,129      | 3,858          | 0              | 38,823       |
| 4日目    | 20,835      | 13,724      | 6,314          | 0              | 40,874       |
| 5日目    | 20,835      | 13,773      | 6,051          | 0              | 40,659       |
| 6日目    | 20,835      | 14,221      | 3,420          | 0              | 38,476       |
| 7日目    | 20,835      | 14,124      | 3,595          | 0              | 38,555       |
| 8日目    | 20,835      | 13,965      | 5,262          | 0              | 40,062       |
| 9日目    | 20,835      | 14,495      | 2,367          | 3,069          | 40,767       |
| 10日目   | 20,835      | 15,110      | 964            | 16,224         | 53,134       |
| 10日間平均 | 20,835      | 14,172      | 5,989          |                | 40,997       |

Fu et al.モデルとMiller-Hooksモデルの結果を比較すると、両手法とも運行費用はほとんど変わらない値となり、遅刻ペナルティもほとんど発生していない。しかし、早着ペナルティに着目すると、Miller-Hooksモデルを用いたケースと比べて、Fu et al.モデルを用いたケースは早着ペナルティが小さい。これは、Fu et al.モデルにおいて経路所要時間の分散を考慮し、さらに経路における共

分散も考慮していることに起因すると考えられる。このことから、Fu et al.モデルは他の手法と比べて、より安定な配車配送計画の策定に適していることが確認できた。

仮想道路ネットワークにおいて交通シミュレーションにより与えたリンク所要時間、および仮想の集荷条件の下、各経路探索モデルを用いて顧客間経路選択を行い、配車配送計画を策定した。その結果、各手法を用いた期

待費用に大きな差異はみられなかったが、新たなリンク所要時間を与えた仮想の集荷を想定して配車配送計画を実施した場合、遅刻・早着ペナルティを中心に差異が確認された。しかしながら、本ケーススタディによる結果は、交通シミュレーションにより与えた所要時間に大きく依存している。したがって、配車配送計画における経路探索モデルのパフォーマンスを正確に検討するためには、現実の所要時間を用いる必要がある。

## 5. 大阪中央部道路ネットワークにおけるケーススタディ

### (1) 目的

上述のように仮想道路ネットワークにおいて各経路探索モデルを用いて顧客間経路選択を行い、配車配送計画における経路探索モデルのパフォーマンスの検討を行った。しかしながら、交通シミュレーションにより与えた所要時間変動が、適切であるとは限らないので、より現実的な所要時間変動を用いて再度検証を行う。

### (2) 問題設定

図-2に、本研究で用いた大阪中央部道路ネットワークを示す。大阪中央部道路ネットワークは、ノード数225、リンク数781である。大阪中央部道路ネットワークにおけるすべてのリンクはVICSリンクからなる。しかしながら、すべてのVICSリンクにおいて所要時間情報が提供されているわけではない。実際、本研究におけるネットワークの約57%のリンクにおいて所要時間が提供されている。所要時間が提供されていないリンクについては、山根らの手法<sup>10)</sup>により渋滞情報に基づき所要時間

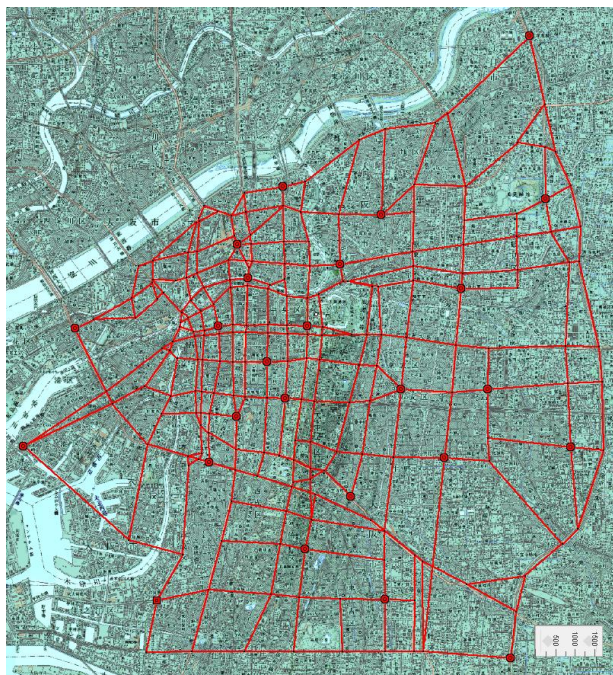


図-2 大阪中央部道路ネットワーク

を推定し用いた。本研究では、配車配送計画の策定のため2004年10月4日～11月16日のうち平日30日間の5分ごとの所要時間履歴、仮想の集荷のため2005年11月17日～11月26日の10日間の5分ごとの所要時間履歴を用いた。本ネットワークにおいて顧客の位置、条件については仮想的に設定し、顧客数は24とした。

顧客間の経路選択は、上述の経路探索モデルを用いるが、Fu et al.モデルにおいて期待最短経路を求めなければならない。仮想道路ネットワークにおけるケーススタディでは、期待最短経路を数え上げにより求めたが、本ネットワークでは道路ネットワークの規模が増大しているので、数え上げによる探索は困難である。そこで、Fuらが提案したk最短経路を利用した近似解法により経路を探索する。k最短経路は、Eppsteinの手法<sup>11)</sup>を参考とし探索する。

### (3) 結果比較

上述の各経路探索モデルによって算出された顧客間経路選択の結果を用いて、30日間の所要時間履歴に基づく配車配送計画の策定を行う。本ネットワークにおいても2tトラック2台による集荷が可能であるため、2tトラック2台を用いる解を探索する。得られた近似解のうち最良の解における総集荷費用を表-6に示す。各経路探索モデルによる顧客間経路選択の結果を用いた配車配送計画に基づき、10日間集荷活動を行うと想定した場合の総集荷費用および各費用を表-7～表-9に示す。

表-6に示したように、各経路探索モデルを用いた配車配送計画における期待費用に大きな差異はみられない。表-7～表-9に示した仮想の集荷における総集荷費用は、概ね同様の値となった。遅刻・早着ペナルティは、それぞれのケースにおいて異なっているが、各日におけるペナルティの総和も概ね同様の値となった。したがって、これらの結果より、配車配送計画における経路探索モデルのパフォーマンスは、同等であるとみなすことができる。

表-7～表-9に示した仮想の集荷における総集荷費用が、概ね同様の値となったことは、配車配送計画の策定に用いた顧客間の所要時間の変動と、仮想集荷における顧客間の所要時間の変動との相違に、大きく依存していると考えられる。そこで、配車配送計画に基づき顧客

表-6 配車配送計画における期待費用  
(大阪中央部道路ネットワーク)

|                 | 総集荷費用<br>(円) |
|-----------------|--------------|
| 最短経路モデル         | 32,107       |
| Fu et al.モデル    | 32,367       |
| Miller-Hooksモデル | 32,191       |

表-7 仮想の集荷における費用（大阪中央部道路ネットワーク、最短経路モデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 10,215      | 5,087          | 0              | 36,136       |
| 2日目    | 20,835      | 11,120      | 1,666          | 0              | 33,621       |
| 3日目    | 20,835      | 10,605      | 3,157          | 0              | 34,597       |
| 4日目    | 20,835      | 9,904       | 5,613          | 0              | 36,352       |
| 5日目    | 20,835      | 9,273       | 9,647          | 0              | 39,755       |
| 6日目    | 20,835      | 10,867      | 2,193          | 438            | 34,332       |
| 7日目    | 20,835      | 9,527       | 7,981          | 0              | 38,343       |
| 8日目    | 20,835      | 10,582      | 3,947          | 0              | 35,364       |
| 9日目    | 20,835      | 10,523      | 3,947          | 875            | 36,179       |
| 10日目   | 20,835      | 10,684      | 2,982          | 0              | 34,501       |
| 10日間平均 | 20,835      | 10,330      | 4,753          |                | 35,918       |

表-8 仮想の集荷における費用（大阪中央部道路ネットワーク、Fu et al. モデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 10,797      | 4,034          | 0              | 35,666       |
| 2日目    | 20,835      | 11,568      | 1,491          | 0              | 33,894       |
| 3日目    | 20,835      | 11,009      | 4,210          | 0              | 36,054       |
| 4日目    | 20,835      | 10,242      | 6,402          | 0              | 37,479       |
| 5日目    | 20,835      | 9,557       | 9,910          | 0              | 40,302       |
| 6日目    | 20,835      | 11,299      | 3,070          | 1,313          | 36,516       |
| 7日目    | 20,835      | 9,770       | 8,770          | 0              | 39,375       |
| 8日目    | 20,835      | 10,985      | 4,034          | 0              | 35,855       |
| 9日目    | 20,835      | 10,978      | 3,859          | 0              | 35,672       |
| 10日目   | 20,835      | 11,138      | 3,070          | 0              | 35,042       |
| 10日間平均 | 20,835      | 10,734      | 5,016          |                | 36,585       |

表-9 仮想の集荷における費用（大阪中央部道路ネットワーク、Miller-Hooksモデル）

|        | 車両費用<br>(円) | 運行費用<br>(円) | 早着ペナルティ<br>(円) | 遅刻ペナルティ<br>(円) | 総集荷費用<br>(円) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1日目    | 20,835      | 10,220      | 4,911          | 0              | 35,967       |
| 2日目    | 20,835      | 11,192      | 1,666          | 1,750          | 35,443       |
| 3日目    | 20,835      | 10,631      | 3,245          | 0              | 34,711       |
| 4日目    | 20,835      | 9,886       | 6,139          | 0              | 36,860       |
| 5日目    | 20,835      | 9,251       | 9,559          | 0              | 39,646       |
| 6日目    | 20,835      | 11,014      | 3,245          | 3,500          | 38,594       |
| 7日目    | 20,835      | 9,324       | 9,121          | 0              | 39,280       |
| 8日目    | 20,835      | 10,577      | 4,297          | 0              | 35,710       |
| 9日目    | 20,835      | 10,491      | 4,210          | 438            | 35,973       |
| 10日目   | 20,835      | 10,685      | 3,157          | 0              | 34,678       |
| 10日間平均 | 20,835      | 10,327      | 5,524          |                | 36,686       |

を訪問する際の顧客間経路の所要時間について、平均所要時間と標準偏差の関係を分析する。本研究の配車配送計画は、出発時刻および訪問順序を決定し、各経路探索モデルにおいて出発時刻ごとの顧客間の経路を決定している。したがって、分析される平均所要時間と標準偏差の関係は、配車配送計画による顧客ペアの各経路探索モデルにおいて選択された顧客間経路の所要時間に基づく

（ゆえに、得られた結果の顧客ペア、経路は、各経路探索モデルにより異なる）。各経路探索モデルにおける顧客間の平均所要時間と標準偏差の関係を、図-3～図-8に示す。

各経路探索モデルにおける、30日間所要時間履歴の結果と10日間の仮想集荷の結果を比較すると、それぞれ大きな差異は見られない。したがって、30日間所要時間

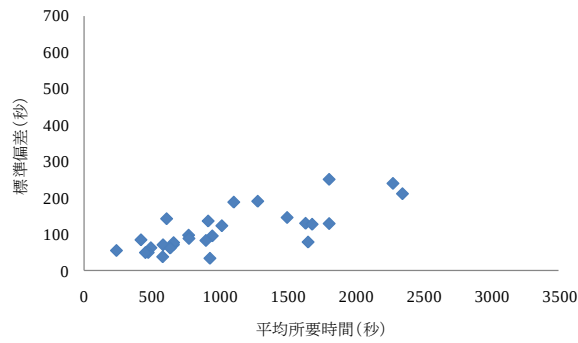


図-3 平均所要時間と標準偏差の関係  
(30日所要時間履歴, 最短経路モデル)

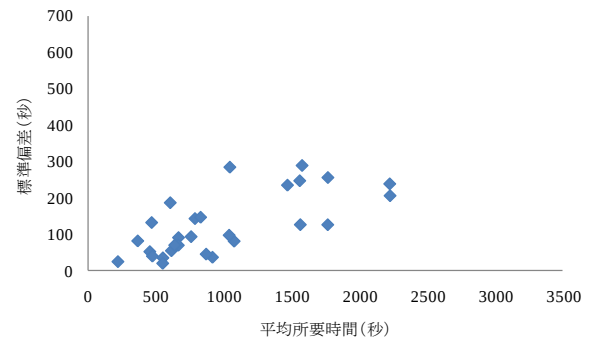


図-4 平均所要時間と標準偏差の関係  
(10日仮想集荷, 最短経路モデル)

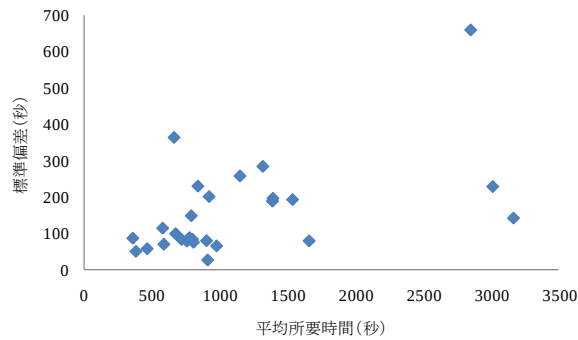


図-5 平均所要時間と標準偏差の関係  
(30日所要時間履歴, Fu et al. モデル)

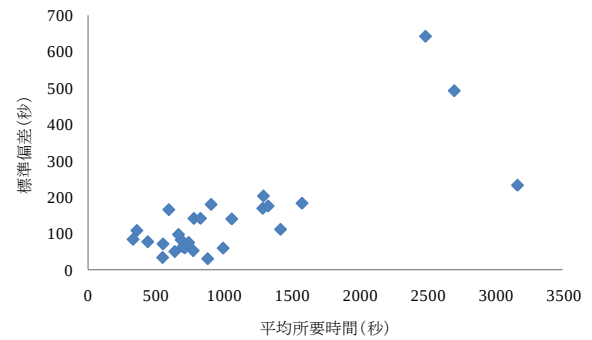


図-6 平均所要時間と標準偏差の関係  
(10日仮想集荷, Fu et al. モデル)

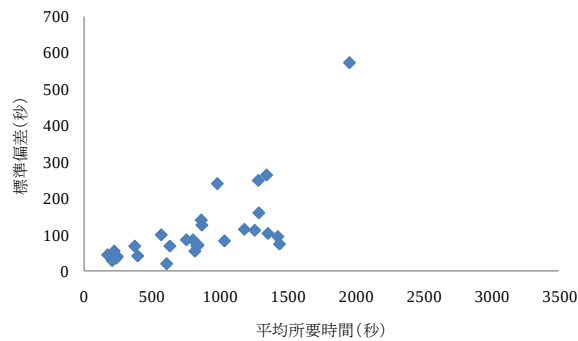


図-7 平均所要時間と標準偏差の関係  
(30日所要時間履歴, Miller-Hooksモデル)

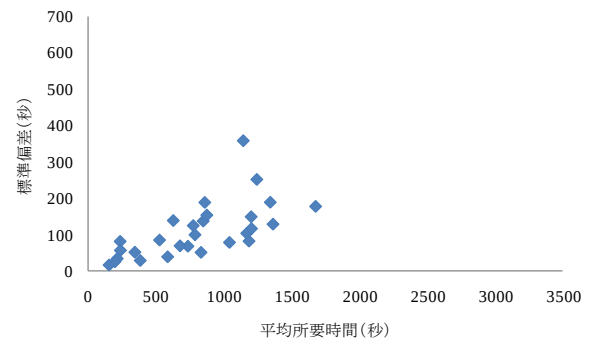


図-8 平均所要時間と標準偏差の関係  
(10日仮想集荷, Miller-Hooksモデル)

履歴に基づき策定した配車配送計画は、所要時間変動にあまり差異の生じていない10日間の仮想集荷において、安定した結果が得られたといえる。

本研究において比較した各経路探索モデルにおいて、最短経路モデルは、平均所要時間のみに基づくため、事前計画に用いたデータと実際の活動のデータに大きな所要時間の変動が生じる場合、安定した結果が得られないと考えられる。平均所要時間と標準偏差の関係において考察したように、本研究において用いた両データ間に、

所要時間の変動が少なく、結果として大きな差異は生じなかった。

また、平均所要時間と標準偏差の関係の特徴的な点として、Fu et al.モデルの結果において、顧客間の平均所要時間の長い顧客間の訪問が、選択されていることが確認できる。顧客間の移動距離が長いと考えられるが、所要時間の変動を考慮することにより、このような性質の経路を配車配送計画に組み込むことができたと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、配車配送計画の高度化を目指し、配車配送計画における顧客間の経路選択に着目した。効率的かつ安定した配車配送計画の策定のため、顧客間の経路選択において、従来の平均リンク所要時間に基づく最短経路に対し、動的かつ確率的な要素を組み込んだ経路探索モデルの有効性を検討した。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、仮想的に数日間実行することにより各経路探索モデルの効果を検討した。

その結果、配車配送計画モデルにより得られた期待費用は、各モデルによる差異がほとんどなかった。しかしながら、数日間の配車配送計画の実施による費用を比較すると、各モデルにおいて差異が確認された。

仮想道路ネットワークにおけるケーススタディでは、平均リンク所要時間に基づく最短経路を用いた配車配送計画において遅刻によるペナルティが大きく生じていた。一方、動的かつ確率的な要素を考慮した経路探索モデルでは、早着によるペナルティは増加するが、遅刻によるペナルティはほとんど発生しなかった。この結果は、動的かつ確率的な要素の考慮により、所要時間変動に対応しやすい安定した顧客間経路を選択することに起因すると考えられる。

大阪中央部道路ネットワークにおけるケーススタディでは、各経路探索モデルにおける差異は少なくなった。これは、10日間の仮想の集荷を行うために用いた所要時間履歴が、変動の少ないデータであることに起因する。実際に、配車配送計画に用いられた顧客間経路の平均所要時間と標準偏差の関係を分析すると、30日間の所要時間履歴と10日間の仮想集荷に用いた所要時間履歴との差異が少ないことが確認された。本ケーススタディにおいて生じなかったが、所要時間の平均は小さく、変動が大きい不安定な経路が、配車配送計画の顧客間経路に選択されてしまう場合、従来の最短経路モデルと比べて、Fu et al.モデルとMiller-Hooksモデルが、有効であると考えられる。このような状況として、交通状況の変化の著しい経路を利用して、ピーク時に集配送しなければならない顧客が存在する場合は、挙げられる。

以上の両ケーススタディの結果より、配車配送計画の顧客間経路選択において、動的かつ確率的な要素を考慮した経路探索モデルは、従来の平均リンク所要時間に基づく最短経路探索と比べて、同等もしくは優れたパフォーマンスであると考えられる。

今後は、多様な所要時間履歴を用いた考察、所要時間が大きく変動したケースにおける配車配送計画の効果に関する分析が必要である。本研究のモデルは、与えられた所要時間に大きく依存するため、現実のデータを用

いることが重要となる。より多くの広範にわたる所要時間を入手し、分析しなければならない。

本研究において、到着時刻に関する制約を有する配車配送計画問題を現実に応用するため、顧客間の経路を適切に選択することが重要であり、出発時刻、日々の変化による所要時間の変動による効果は、大きな影響を及ぼしうることが確認された。したがって、所要時間の変動を考慮した高度な配車配送計画の策定は、効率的かつ安定な物流システムの構築に寄与できると考えられる。

## 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, O.B.G.: 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.
- 9) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太: ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について, 交通工学, Vol.32, No.4, pp.39-43, 1997.
- 10) 山根憲一郎: ITSによる交通情報提供下における旅行時間推定・予測手法に関する研究, 博士論文, 京都大学, 2005.
- 11) Eppstein, D.: Finding the k Shortest Paths, SIAM Journal on Computing, Vol.28, No.2, pp.652-673, 1998.

---

## 配車配送計画における所要時間変動を考慮した顧客間経路選択の効果に関する研究\*

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

本論文では、配車配送計画の高度化に着目し、顧客間の経路選択において所要時間の変動を考慮可能な経路探索モデルを適用する。具体的には、リンクにおける出発時刻による所要時間の変動、日々の変化による所要時間の変動を内包した経路探索モデルを適用する。仮想道路ネットワークと現実的な道路ネットワークにおいて経路探索手法を用いて、顧客間経路を決定し、配車配送計画を策定する。策定した配車配送計画に対し、異なる所要時間を用いて仮想の集荷活動を行った結果、所要時間の変動を考慮した経路探索モデルにおいて効率的かつ安定な配車配送計画が策定されることが確認された。

---

## Effects of Shortest Paths with Variable Travel Times on Vehicle Routing and Scheduling\*

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

This study aims to analyze effects of path choice between customers in vehicle routing and scheduling. In order to choose stable paths between customers for vehicle routing and scheduling, shortest path models including dynamic and stochastic elements are applied to a test road network and to the real road network in central area of Osaka. Using these shortest paths, vehicle routing and scheduling were calculated and simulated in these networks. Results showed that shortest paths which include dynamic and stochastic elements outperformed shortest path based on mean travel time and hence contribute in instituting the stable vehicle routing and scheduling.

---