

所要時間の不確実性を考慮した都市内集配 トラックの確率論的配車配送計画

谷口栄一¹・山田忠史²・柿本恭志³

¹フェロー会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 博士(工学) 関西大学講師 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究においては、所要時間の不確実性を考慮した確率論的配車配送計画モデルを定式化している。このモデルは、顧客への訪問指定時間および早着・遅刻ペナルティを考慮し、到着時刻を確率論的に取り扱っている。このモデルと動的交通シミュレーションを統合したモデルを開発し、仮想ネットワークに適用した。その結果、確率論的配車配送計画モデルを用いた場合、所要時間として一つの予測値を用いる配車配送計画モデルよりも物流総費用は11-17%削減されることが分かった。また物流総費用のみならず、トラックのCO₂排出量も削減される結果となり、確率論的配車配送計画は、費用削減を通じて運輸企業に便益をもたらすのみならず、環境改善によって社会的便益も発生させることが明らかになった。

Key Words : city logistics, vehicle routing and scheduling, probabilistic model, variable travel time

1. はじめに

近年、都市内物流は顧客のニーズの多様化によって、高度なサービスを低料金で提供することが求められている。特に顧客への集配送における時間指定が厳しくなり、いわゆるジャスト・イン・タイム輸送が普及しつつある。一方、社会的な観点から見ると、交通渋滞・交通環境の改善、エネルギー消費の削減などのために、都市内物流の合理化が求められている。

このような様々な要求を満たしながら合理的な都市内物流システムを構築するために、都市内集配トラックの配車配送計画を効率化することが必要である。そのために谷口ら¹⁾は、都市内集配トラックの配車配送計画と動的交通シミュレーションを組み合わせたモデルを構築し、配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響を分析している。本研究においては、その研究をさらに発展させて、所要時間の不確実性を考慮した確率論モデルを構築する。それを道路ネットワークに適用し、所要時間の不確実性を考慮することによって、企業のコスト削減、交通環境の面において、どの程度の便益が得られるかを示す。

このような研究を実施する背景として次の2点が重要である。第1に、都市内の交通混雑が激化し、交通事故等の突発事象の発生によって、所要時間の変動が非常に激しくなっていることがあげられる。それにもかかわらず、運輸企業は、指定時刻に間に合うように配送をしなければならない状況にある。第2に、近年高度道路交通システム(ITS)の開発が進み、所要時間分布の履歴データを容易に入手できるシステムが開発されつつある²⁾。したがって、ITSに支えられた確率論的配車配送計画モデルは、Ruske³⁾、谷口⁴⁾、Kohler⁵⁾、Taniguchi et al.⁶⁾らが提案しているシティロジスティクスの実現に向けて非常に重要な役割を果たすものと期待される。

確率論的配車配送計画(Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling Problems)については、いくつかの研究がこれまでにに行われている。

Jaillet and Odoni⁷⁾は、確率論的巡回セールスマン問題および確率論的配車配送計画についての問題設定、解法についてレビューを行っている。ここで想定している問題においては、顧客がある確率で訪問を希望していると仮定している。この論文のように、顧客の発生が不確実である場合の確率論的配車配送計画に関する研究は何人かの研究者によって行

われている。(Dror et al.⁸⁾, Powell et al.⁹⁾, Gendreau et al.¹⁰⁾, Bertsimas¹¹⁾)

しかし、所要時間の不確実性を考慮した確率論的配車配送計画に関する研究は非常に少ない。Laporte et al.¹²⁾は、所要時間の変動を考慮した確率論的配車配送計画モデルを2種類構築している。1つは、配送ルートにおける全所要時間が所定の値より大きくなる確率をあるレベル以下にするような機会制約モデル(chance constrained model)である。他の1つは、ある配送ルートの所要時間が所定の値より大きくなると、ペナルティを課すようにして、固定費、輸送費およびペナルティの総和を最小にするようなリコースモデル(recourse model)である。このモデルを顧客数20までの場合について適用し、切除平面分枝限定法(branch and cut algorithm)を用いて厳密解を求めている。

松本、白水¹³⁾は、到着時刻が指定されている物資輸送に対して、旅行時間の不確実性及び影響を遅刻リスクと有効旅行時間を用いて評価している。この論文で取り扱っているトリップは、複数の顧客を巡回するのではなく、一箇所の顧客を訪問する場合であり、遅刻確率、有効旅行時間等からなる目的関数を最適化するように出発時刻を決定するモデルを構築している。

Malandraki and Daskin¹⁴⁾は、所要時間の変動をステップ関数で与え、配車配送計画を、近傍探索手法(nearest-neighbor heuristic)を用いて解いている。この研究では、所要時間の一日の変動を考慮しているが、所要時間は、確定論的に与えられており、確率論的な取り扱いは行っていない。

これに対し、本研究において構築するモデルが従来のモデルと異なっている点は次の点である。

(1) 各顧客間の移動に要する所要時間を確率論的に取り扱う。Laporte, et al.¹²⁾は、巡路の全所要時間を一括して取り扱っているが、この点において、本研究のモデルはより詳細になっている。また、各顧客は集配トラックに訪問してほしい指定時間帯(lime window)を有し、トラックが、その指定時間帯より早着したり、遅刻した場合にはペナルティを支払うこととする。各顧客間の所要時間の確率分布を推定することによって、このペナルティについても確率論的に取り扱うことができる。この点が本モデルの1つの重要な特徴である。(2) 所要時間の変動について、動的交通シミュレーションを行い、その結果得られる道路ネットワークの各リンク所要時間分布を用いて確率論的配車配送計画問題を解く。これによって、各運輸企業のトラックの運行計画と道路交通状況の変化の相互関係を考慮することがで

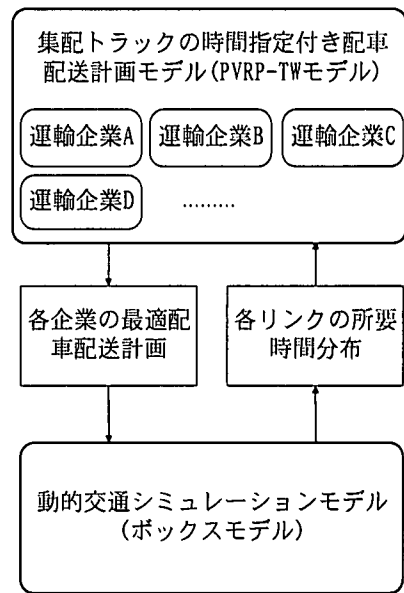


図-1 モデルの構造

きる。従来の研究では、この相互関係を考慮していない。

このような時間指定付き確率論的配車配送計画問題(probabilistic vehicle routing and scheduling problem with time window)は、NP-困難(Non-deterministic Polynomial-hard)な組み合わせ最適化問題となり、厳密解を求めることは困難であるので、近似解法として、遺伝的アルゴリズム(genetic algorithms)を用いる。なお、NP-困難とは、顧客の数が増加すると解の数が指数関数的に爆発的に増加するようなクラスの難しさを指す¹⁵⁾。

この他に、ネットワーク解析において、リンクの所要時間コストの変動を考慮した交通量配分に関する多くの論文が見られる¹⁶⁾。たとえば確率的利用者均衡モデルにおいては、確率的配分と利用者均衡配分の考え方を統合した確率的利用者均衡配分を導入している。このような一連の研究の流れに対し、本研究においては、トラックの交通行動を記述するモデルとして配車配送計画モデルを用いている点、および動的交通シミュレーションによってリンク所要時間の確率分布を求めている点が異なっている。

2. モデル

(1) モデルの概要

図-1に、本研究で用いるモデルの概要を示す。モデルは、2つのサブモデルからなっている。1つは、

時間指定付き確率論的配車配送計画モデル (Probabilistic Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model, 以下では、PVRP-TWモデルと称する)である。他の1つは、動的な交通シミュレーションモデルである。

PVRP-TWモデルにおいては、各運輸企業が1つのデポを持ち、そこから複数の集配トラック (以下では単にトラックと称する) が、顧客を巡回して貨物を集荷あるいは配送する。その時、次のような条件を仮定する。

[配車配送条件]

- a) トラックは、一日に複数回の巡回を行うことができる。
- b) 顧客はトラックの配送ルートのもれかに必ず割り当てられ、貨物はトラックの1回の訪問で全て集荷あるいは配送される。
- c) 1つの配送ルートの貨物重量の合計は、トラックの積載容量を超えることはできない。
- d) 所定のトラック運行可能時間を設定する場合は、それを超えてトラックを運行することはできない。

このモデルでは、トラックの出発時刻、顧客の配送ルートへの割り当て、顧客の訪問順序を決定する。

このモデルにおいては、所要時間の確率分布を考慮している。この分布形としては、任意の確率分布を用いることができるが、ここでは、後述の動的な交通シミュレーションモデルによって計算される所要時間の頻度分布を、そのまま用いている。

PVRP-TWモデルにおいて、最適なトラックの出発時刻、顧客の配送ルートへの割り当て、顧客の訪問順序が決定されると、これらのものが動的な交通シミュレーションモデルの入力データとなる。ここで用いる動的な交通シミュレーションモデルは、飯田ら¹⁷⁾が開発したボックスモデルを改良して、都市内集配トラックの配車配送行動を明示的に考慮できるようにしたものである。このシミュレーションモデルを用いて、ネットワークの各リンクの旅行時間分布を算定する。このようにして求められた各リンクの旅行時間分布を、もう1度、PVRP-TWモデルに入力し、最適な集配トラックの出発時刻、顧客の配送ルートへの割り当て、顧客の訪問順序を再計算する。このようなイテレーションを繰り返し、所定の判定基準に達すると計算を終了する。

このようなPVRP-TWモデルと動的な交通シミュレーションを統合したモデルを構築することによって、運輸企業のトラックの交通行動とネットワークの交通現象の相互連関を動的に考慮することができる。また、道路交通は、時間とともに変化するものであ

り、動的な交通シミュレーションの中で集配トラックの運行状況を取り扱うことによって、より正確な現象分析が可能となる。

なお、PVRP-TWモデルを用いた計算結果と比較するために、リンク所要時間として1つの予測値を用いる時間指定付き配車配送計画モデル (Forecasted Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model, 以下では、FVRP-TWモデルと称する)も考える。FVRP-TWモデルにおいては、リンク所要時間として平均値のみを用い、分布は考慮しない。FVRP-TWモデルを用いる場合は、図-1のPVRP-TWモデルをFVRP-TWモデルに置き換え、動的な交通シミュレーションの出力を各リンクの平均所要時間にすればよい。

(2) PVRP-TWモデル

PVRP-TWモデルは、運輸企業の集配トラックの時間指定付き確率論的配車配送計画を記述するものである。このモデルは、トラックの容量や時間指定に関して、前節で述べた4つの配車配送条件を満たしながら、総費用を最小化することを目的としている。ここで、総費用は、次の3つの費用の和である； a) トラックを運行させる時の固定費用、 b) トラックを運行させる時の運行費用、すなわち運行時間に比例する費用、 c) 指定時刻に早着・遅刻した時のペナルティー。この3つの費用の和を最小化するようなモデルを定式化すると、次のようになる。

Minimise

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

ここに、

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

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

Subject to

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

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad (5)$$

$$\sum_{n(i) \in x_{l,j}} D(n(i)) = W_l(x_{l,j}) \quad (6)$$

$$W_l(x_{l,j}) \leq W_{c,l} \quad (7)$$

$$t_s \leq t_{l,0} \quad (8)$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad (9)$$

ここに,

$$t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (10)$$

ただし,

$C(t_0, \mathbf{X})$: 総費用 (円)

t_0 : トラック l がデポを出発する時刻を表すベクトル

$$t_0 = \{t_{l,0} \mid l=1, m\}$$

\mathbf{X} : 全トラックの配送ルートへの顧客の割り当てと訪問順序を示す数列 (\mathbf{X} の中には、全ての $n(i)$ が必ず含まれる.)

$$\mathbf{X} = \{x_l \mid l=1, m\}$$

x_l : トラック l の配送ルートへの顧客の割り当てと訪問順序を示す数列

$$x_l = \{n(i), d(j) \mid i=1, N_l, j=1, n_{0,l}\}$$

{ } 内の番号の順序が訪問順序を表す

$n(i)$: あるトラックが i 番目に訪問する顧客のノード番号

$d(j)$: デポを表す番号(ここでは=0)

N_l : トラック l が訪問する顧客の総数

$n_{0,l}$: 数列 x_l 中の $d(j)$ の個数

m : 使用可能なトラック台数の上限

$c_{f,l}$: トラック l の固定費用 (円/台)

$\delta_l(x_l) := 1$; トラック l を使用する時
= 0; その他の場合

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

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

$c_{t,l}$: トラック l の単位時間当りの運行費用 (円/分)

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

$\bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1))$: トラック l の時刻 $\bar{t}_{l,n(i)}$ 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降ろし時間

$P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, x_l)$: 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

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

$c_{e,n(i)}(t)$: 顧客 $n(i)$ における単位時間当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 : トラックの稼動可能時間の開始時刻

t_e : トラックの稼動可能時間の終了時刻

$W_l(x_{l,j})$: トラック l の j 番目の 1 回の巡回にお

ける積載量 (kg)

$W_{c,l}$: トラック l の積載容量 (kg).

式(1)-(10)によって定式化された問題は、総費用が最小となるように、全トラックの配送ルートへの顧客の割り当ておよび訪問順序を示す \mathbf{X} 、およびトラックがデポを出発する時刻 t_0 を決定する組み合

わせ最適化問題である。

前述のように、上記の定式化においては、各顧客における早着・遅刻ペナルティを確率的に表現している点が従来の研究と異なる点である。図-2に早着および遅刻ペナルティの考え方を示す。顧客が望む到着指定時間帯は、 $(t_{n(i)}^e - t_{n(i)}^s)$ で表わされる。

ただし、 $t_{n(i)}^s$ 、 $t_{n(i)}^e$ は、顧客 $n(i)$ における指定時間の開始および終了時刻をそれぞれ表す。もしトラックが時刻 $t_{n(i)}^s$ より早く顧客の所に到着した場合、指

定時刻まで待つ必要がある。この待ち時間に対して、時間に比例した費用がかかると考える。また、トラックが遅刻した場合には、遅刻時間に比例したペナルティが課せられる。このペナルティ関数とトラックの到着時刻の確率を掛け合わせることで、早着および遅刻ペナルティの確率を計算することができる。

式(4)は、前節で述べた配車配送条件のa)に対応して、複数の巡回が可能であることを示している。

すなわち、1台のトラックの訪問順序を示す数列 \mathbf{x}_l

が、たとえば $(0, 3, 8, 5, 1, 0)$ であれば、デポ (0で表す) を出発してNo. 3, 8, 5, 1の顧客を訪問してデポに戻っているの、1回だけ巡回したことになる。

しかし、 $(0, 3, 8, 0, 5, 1, 0)$ であれば、途中で0が入っているの、トラックが途中でデポに一度戻ったことを示し、このトラックは、2回巡回したことになる。したがって、数列中にデポを表す0が2個以上あることを表す式(4)は、複数の巡回を許すことを示している。

式(5)、(6)と、「 \mathbf{X} の中には、全ての $n(i)$ が必

ず含まれる」という条件と合わせて、配車配送条件のb)に対応している。また、式(7)は、配車配送条件のc)を表し、式(8)-(10)は、配車配送条件のd)を表している。

上記の問題は、NP-困難な組み合わせ最適化問

ペナルティ (円/分)

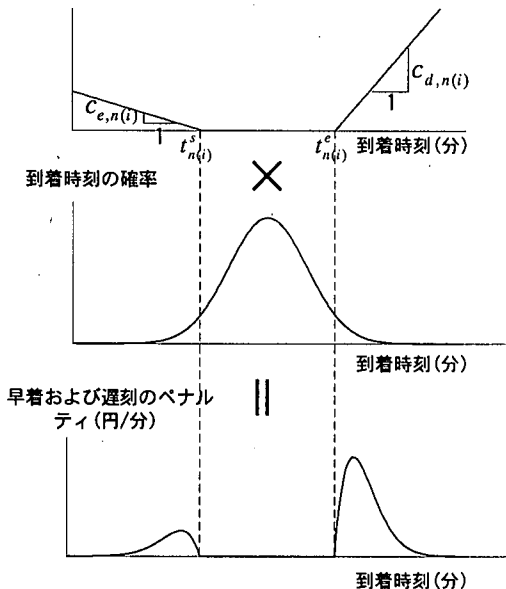


図-2 早着および遅刻ペナルティ

題である。したがって、大規模な問題に対して短い計算時間で解を得るためには、ヒューリスティック手法を用いる必要がある。VRPTWに対して、ヒューリスティック手法を適用した研究は、いくつか行われている。たとえば、Thangiahら¹⁸⁾は、遺伝的アルゴリズム(GA)を、Kokubugataら¹⁹⁾は、焼きなまし法(SA)を、Potvinら²⁰⁾は、タブーサーチ(TS)を適用して近似解を求めている。本研究においては、参考文献1)と同様に、GAを用いて近似解を求めることとする。GAを用いる理由は、本研究においては、顧客の配送ルートへの割り当てや訪問順序の他に、トラックの出発時刻も同時に表現する必要がある。その場合に、GAを用いると簡単に表現できるが、SAやTSでは、困難であるためである。

GAの計算過程においては、まず初期の個体を発生させ、淘汰・増殖を繰り返す。今回の計算においては最初に300個の個体を発生させ、300世代まで淘汰・増殖を繰り返した。淘汰・増殖の過程では、ルーレット選択法を用い、各世代で、適合率の高い個体30個をエリート個体として残すようにした。また、解の精度を高め、局所解に陥るのを防ぐために、交叉・突然変異を起こさせる。今回の計算では、交叉方法として順序交叉法を用い、交叉率を0.9とした。突然変異の方法としては、削除・挿入法を用い、突然変異率を0.01とした。これらのパラメータの値は、最も安定した解が得られるように、試行錯誤により

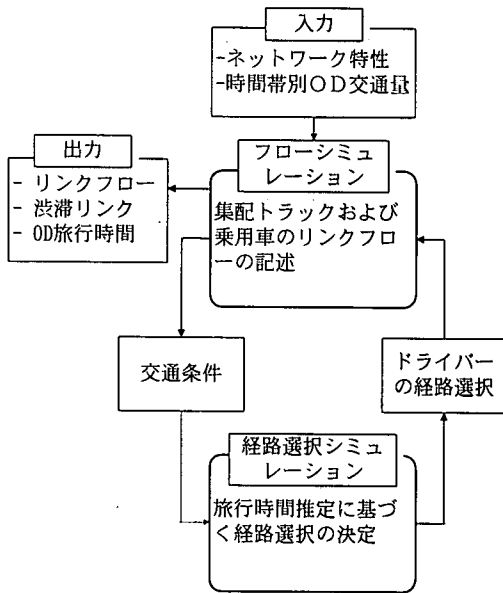


図-3 ボックスモデルの構造

求めた。具体的には、以下の手順でパラメータを設定した。まず、計算時間を考慮して、固体数を300、世代数を300とした。次に、交叉率を0.05から1.0まで変化させ、突然変異率を0.01から0.03まで変化させて計算を行った。そのような計算において、最もよい解を与えるパラメータを決定した。

(3) 動的交通シミュレーションモデル

動的交通シミュレーションモデルとして、様々なものが考えられるが、ここでは、ボックスモデルを改良したモデルを用いる。ボックスモデルは、交通流を車群として表しているの、基本的にはマクロモデルである。しかし、各車両のODを情報として持っており、車両がノードに到着する毎に最短経路選択を行う点において、ミクロモデルである。したがって、マクロとミクロのハイブリッドモデルであると言える。ここで用いた動的交通シミュレーションモデルは、参考文献1) に示したモデルと同じである。(詳細については、参考文献1), 17)を参照されたい。) PVRP-TWに対応するシミュレーションにおいて、車両が各ノードに到着したときの最短経路選択は、計算時間短縮のために各リンクの平均所要時間を用いて行った。最短経路探索においても所要時間の変動を正確に考慮するためには、各リンクの所要時間の標準偏差間の相関も考慮する必要があるが、そのような計算はかなり煩雑になるので、ここでは、平均値のみを用いることとした。また、平

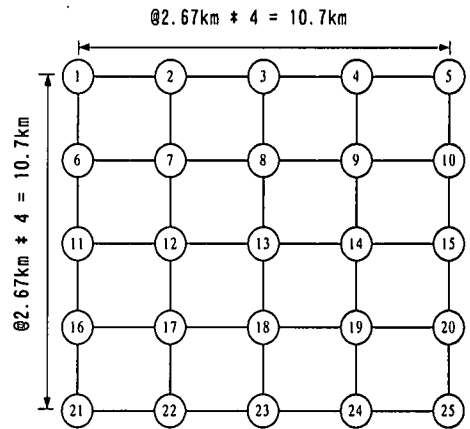


図-4 計算に用いた仮想道路ネットワーク

均所要時間は、1時間ごとに更新することとした。

図-3にボックスモデルの構造を示す。ボックスモデルは、フローシミュレーションと経路選択シミュレーションから成っている。リンクのモデル化に当たって、次の2つの仮定を設けている；(a)リンク上のどの断面においても、スキャンニング間隔中の最大流出量は、同じである。(b)リンクの途中での流出入はない。(a)の仮定から、リンクの最下端のみがボトルネックになる可能性があり、そこから渋滞の行列が上流へ伸びる。

3. 仮想道路ネットワークへのモデルの適用

(1) 計算条件

上述のモデルを、図-4に示すようなノード数25、リンク数40の仮想道路ネットワークに適用した。車両が自由走行速度40km/hで各ノード間を4分で走行できるとし、ノード間距離を2.67kmと仮定した。このネットワーク上の各ノードは乗用車が発生・集中するセントロイドであり、トラックが訪問する顧客ノードにもなり得る。今回の計算では10社の運輸企業があり、それぞれ12台ずつのトラックを有していると仮定する。トラックの種類は、積載容量が2トン、4トン、10トンの3種類であり、それぞれ4台ずつで、計12台である。各運輸企業は、表-1に示すようなノードの位置にそれぞれ1つのデポを持っている。デポは、ネットワーク内にランダムに配置されている。顧客の数は、14-22の間の数になるように、ランダムに選択し、顧客ノード位置もランダムに選択した。ただし、ある運輸企業の顧客は、1ノード内には、1箇所のみが存在すると仮定している。

表-1 各運輸企業のデポの位置および顧客数

運輸企業	デポのノード番号	顧客数
A	19	17
B	13	22
C	3	16
D	24	17
E	1	18
F	2	15
G	15	16
H	6	19
I	18	14
J	17	20

表-2 集配トラックの特性

積載容量 (トン)	乗用車換算係数 (pcu/台)	時間費用 (円/分)	固定費用 (円/日)
2	1	14.02	10,417.5
4	1.5	17.54	11,523.1
10	2	23.27	13,789.7

表-2に3種類のトラックの特性を示す。トラックの費用は、固定費用と運行時間に比例する時間費用とからなっている。これらの値は、運輸企業へのヒアリングにより得られたものである。なお、トラックの運行可能時間は0時から24時までの24時間とする。

顧客を訪問する時の時間指定は、3種類のものを考えた。すなわち、幅1時間の時間帯指定、午前・午後の時間帯指定、および時間指定なしである。各顧客の時間指定の種類および指定時刻の分布については、阪神地域における調査に基づいて決定した²¹⁾。2トン、4トン、10トン車の早着ペナルティは、表-2に示す各車種のトラックの時間費用に等しいと仮定した。また、遅刻ペナルティについては、顧客が設定するものであり、実データがないため、ここでは、車種に関係なく、4トン車の時間費用の5倍の87.7円/分と仮定した。この値については、今後、実際の調査が必要であるが、ここで5倍に設定したことは、遅刻に対して厳しいペナルティとなっていると考えられる。

なお、遅刻ペナルティの値は、本来、企業の業種・貨物の品目・輸送目的・指定時間帯の幅などによって異なると考えられるが、上述のように、実データがないため、本研究では一定値とせざるをえなかった。この点については今後の課題である。

図-5に、今回の計算のフローチャートを示す。ま

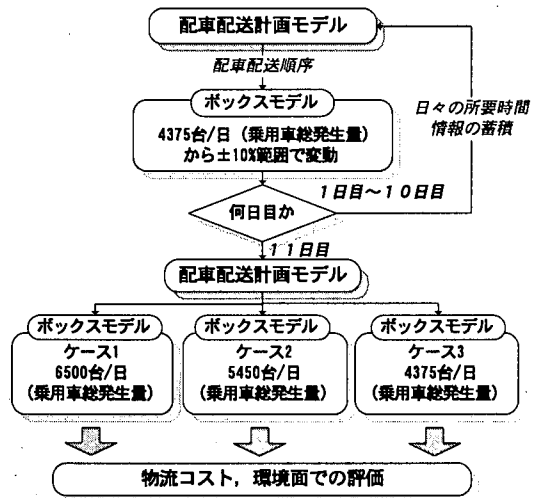


図-5 計算のフローチャート

ず、配車配送計画モデルと、動的な交通シミュレーションモデルを用いて、10回(10日間)の繰り返し計算を行う。これは、各運輸企業が自社にとって最適な配車配送計画を立案し、実際にトラックを走行させることを10回繰り返し行うことに相当する。ボックスモデルによるシミュレーションにおいては、トラック交通と乗用車交通の両方を含めてシミュレートしている。そのとき、ネットワーク全体の乗用車の総発生量は、基準発生量(4,375台/日)±10%の範囲でランダムに変動させた。なお、基準発生量は、ネットワーク内の交通が、ほぼ自由走行速度(40km/h)に近い速度で流れるような状態を、試行錯誤により求めたものである。その結果得られたリンクの所要時間を用いて、次の日の配車配送計画を立案する。これを10日間繰り返した後、11日目の配車配送計画を立案する。11日目には、図-5に示すように、乗用車の総発生量を変化させて、ネットワークの混雑状況を3種類に変化させた。ケース3は過去10日間の平均と同じ混雑状況であるが、ケース1、ケース2ではそれよりもさらに混雑している。ネットワークの平均走行速度は、ケース1、2、3においてそれぞれ30km/h、35km/h、38km/hであった。

なお、ここで平均走行速度38km/hよりも混んでいないケースを計算していない理由は、そのようなケースではFVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルを用いた結果にほとんど差が現れないと推定されるためである。

図-6に乗用車の発生量が±10%でランダムに変動した場合の10日間における経路所要時間分布の一例

を示す。これは図-4のノード23からノード7への経路の所要時間分布を示す。図-6に示すような所要時間分布を正規分布あるいは対数正規分布で近似することは困難であるので、ここではこのヒストグラムをそのままPVRP-TWモデルへの入力として用いることとする。

この3種類のケースについて、配車配送計画モデルにFVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルを用いた結果を総費用や環境面において比較した。

3種類のケースを設定した意図は、以下のとおりである。まず、10日間の交通量変動がある場合と同程度の交通混雑を示すケース3において、所要時間分布を確率分布として考慮しているPVRP-TWモデルと、所要時間を平均値で考えているFVRP-TWモデルの比較を行いたい。次に、10日間の交通量変動がある場合よりも激しい交通混雑が発生するケース1,2において、PVRP-TWモデルとFVRP-TWモデルの比較を行いたい。

顧客の所における荷さばきの時間は、計算結果に大きな影響を及ぼす。ここでは、取り扱い貨物量と荷さばき時間の関係について、実際のトラックターミナルにおける実測値から求められた次式²²⁾を用いて表わしている。

$$t_c = 4Q + 9 \quad (11)$$

ここに、

t_c : 荷さばき時間 (分)

Q : 貨物量 (トン)

動的交通シミュレーションにおいては、集配トラックの行動と共に、乗用車の行動に関する情報が必要となる。乗用車の時間OD表については、各セントロイドにおける発生交通量およびOD選択確率により推定する。各時間における乗用車の発生量は、神戸市における道路交通センサスのデータを用いて図-7に示すようなパターンとした。各ノードにおける発生数は同数である。また、OD選択確率は、ネットワーク内の4隅のノードから発生する乗用車については、ノード間距離の2乗に反比例し、その他のノードから発生する乗用車については、ノード間距離に反比例するとし、距離の近いノード程、選択確率が高くなるようにした。

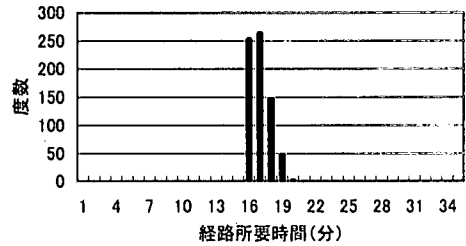


図-6 (a) 所要時間分布の一例 (ノード23→ノード7, 午前8時~9時)

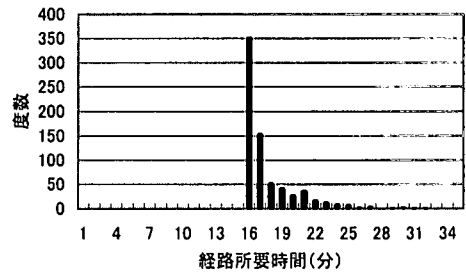


図-6 (b) 所要時間分布の一例 (ノード23→ノード7, 午後2時~3時)

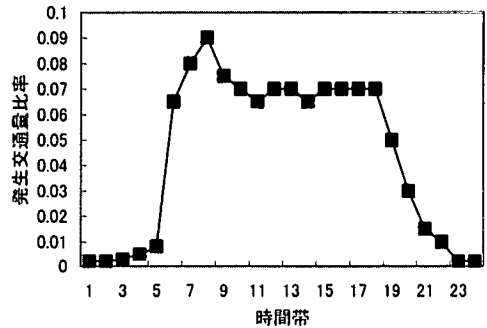


図-7 1日における各時間帯の乗用車の発生量

(2) 計算結果

表-3にFVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルを用いた場合の物流費用を比較したものを示す。ケース1, 2, 3において総費用の削減率は11-17%となっており、PVRP-TWモデルを用いることによって、FVRP-TWモデルに比べて総費用削減による便益がかなり発生していることが分かる。交通混雑が激しいケース1, 2

表-3 物流費用の比較(10社の総計)

モデル	費用	ケース1	ケース2	ケース3
FVRP-TW モデル	固定費用	238,043	238,043	238,043
	運行費用	214,207	197,634	188,051
	早着ペナルティ	20,608	22,496	24,356
	遅刻ペナルティ	789,125	507,169	363,604
	総費用	1,261,983	965,342	814,054
PVRP-TW モデル	固定費用	250,671	250,671	250,671
	変化(%)	5.3	5.3	5.3
	運行費用	212,495	195,822	187,991
	変化(%)	-0.8	-0.9	0.0
	早着ペナルティ	22,764	24,970	26,287
	変化(%)	10.5	11.0	7.9
	遅刻ペナルティ	601,797	331,945	256,786
変化(%)	-23.7	-34.5	-29.4	
総費用	1,087,742	803,423	721,748	
変化(%)	-13.8	-16.8	-11.3	

費用の単位 円/日

表-4 トラック台数の比較(10社の総計, 各ケース共通)

モデル	車種	台数
FVRP-TW モデル	2トン車	1
	4トン車	3
	10トン車	14
	計	18
PVRP-TW モデル	2トン車	0
	4トン車	5
	10トン車	14
	計	19

の方がケース3よりも総費用の削減率が高い。ただし、ケース1の方がケース2より削減率が小さくなっている理由としては、あまり混雑が激しくなると、遅刻ペナルティが増えるためであると考えられる。また、総費用の内訳を見ると、PVRP-TWモデルを用いた場合には、遅刻ペナルティが24-35%減少しているが、逆に早着ペナルティは、8-11%増加している。遅刻ペナルティが減少していることは、顧客へのサービスレベルが向上していることを示している。固定費用は3ケースともに約5%増加し、運行費用はほとんど変化していない。固定費用が少し増加している原因は、表-4に示すように、10社で使用するトラックのうち、2トン車が1台減って、4トン車が2台増えたためである。

ここで、PVRP-TWモデルを用いるとなぜ総費用が減少するのかについて考察を加える。図-8、図-9は計画段階において、それぞれFVRP-TWモデルおよびPVRP-TWモデルを用いた場合の、トラックの最適配送ダイヤグラムの例を示している。図-8、9中の水

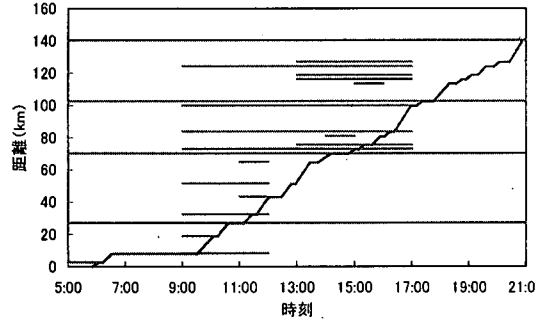
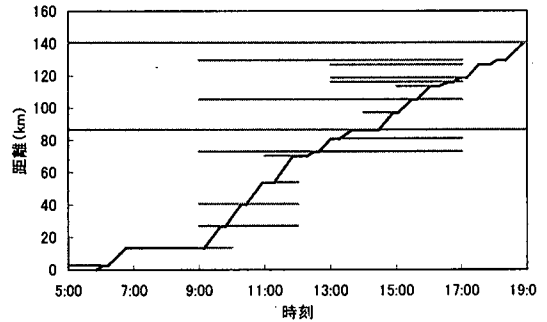
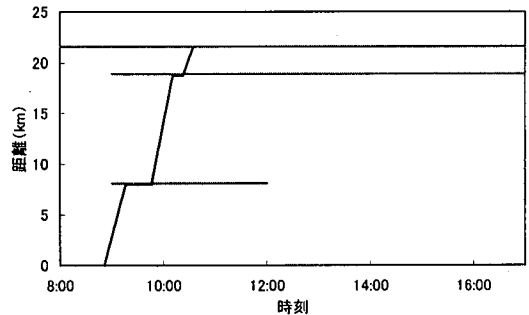


図-8 トラックの最適配送ダイヤグラムの例 (FVRP-TW, 10トン車)



(a) 1台目のトラック(10トン車)



(b) 2台目のトラック(10トン車)

図-9 トラックの最適配送ダイヤグラムの例 (PVRP-TW)

平線のうちグラフの両端に達しているものは、デポを表しており、それ以外は各顧客の指定時間帯を表している。これらの図によると、FVRP-TWモデルよ

表-5 指定時間帯の終了時刻までの総余裕時間
(10社の総計)

	総余裕時間(分)
FVRP-TWモデル	19,469
PVRP-TWモデル	23,452
変化(%)	20.5

りも、PVRP-TWモデルを用いた場合の方が、指定時間帯の中の早い時刻に到着する傾向が見られる。この例における総遅刻時間は、PVRP-TWモデルが99分、FVRP-TWモデルが907分であり、PVRP-TWモデルの遅刻時間が、FVRP-TWモデルに比べて約1/10に減少している。このように、PVRP-TWモデルを用いた場合の方が、できるだけ遅刻をしないような計画になることを示している。

トラックが顧客の場所に到着してから指定時間帯の終了時刻までの余裕時間の総計を比較したものを表-5に示す。この表によると、PVRP-TWモデルを用いた場合には、FVRP-TWモデルを用いた場合よりも余裕時間が20.5%多くなっている。このようにPVRP-TWモデルを用いた場合には余裕時間が多いため、交通渋滞によって所要時間が増加した場合にも遅刻する確率が減少し、遅刻ペナルティの削減に貢献している。このことが総費用の削減につながっている。PVRP-TWモデルを用いた場合に、トラックが余裕をもって顧客の所に到着しようとするのは、図-2に示すように、遅刻ペナルティを早着ペナルティよりかなり大きく設定しており、到着時刻分布の幅があるので、遅刻ペナルティを避けるためには早く到着する必要があるためである。一方、FVRP-TWモデルを用いた場合には、到着時刻が1つの時刻で与えられるため、指定時間帯の終了時刻を超えない限り、遅刻ペナルティを課せられない。したがって指定時間帯の終了時刻付近に到着するケースも現れることになる。

なお、FVRP-TWモデルを用いた場合には、トラック1台を使用するケースが最適解になっているが、PVRP-TWモデルを用いた場合にはトラック2台を使用するケースが最適解になっている。PVRP-TWモデルを用いた場合には、図-2に示すように、確率分布の平均値が到着指定時間帯内に入っているにもかかわらず、遅刻ペナルティの値は0ではない。したがって、PVRP-TWモデルでは、できるだけ遅刻ペナルティを減らすことが総費用を最小化することにつながるため、2台のトラックでできるだけ指定時間内に到着するような計画になったものと推定される。

表-6 総走行時間の比較

モデル	車種	ケース1	ケース2	ケース3
FVRP-TWモデル	乗用車	66,497	49,001	36,134
	2トン車	65	40	39
	4トン車	499	447	417
	10トン車	3,398	3,111	2,964
	トラック小計	3,962	3,598	3,419
	待ち時間	トラック	957	1,049
	計	71,416	53,648	40,693
PVRP-TWモデル	乗用車	68,198	49,082	36,111
	変化(%)	2.6	0.2	-0.1
	2トン車	0	0	0
	4トン車	932	813	761
	10トン車	3,125	2,856	2,716
	トラック小計	4,057	3,670	3,477
待ち時間	トラック	1,093	1,208	1,271
	変化(%)	14.2	15.2	11.6
	計	73,348	53,960	40,859
	変化(%)	2.7	0.6	0.4

走行時間・待ち時間の単位:分/日

表-6に総走行時間の比較を示す。この表によると、総走行時間は、FVRP-TWモデルに比べて、PVRP-TWモデルを用いた場合に若干増加している。内訳を見ると、乗用車・トラック共に、実際の走行時間はあまり増加していないが、トラックの待ち時間は12-15%の増加となっている。このことは、PVRP-TWモデルにおいて、遅刻ペナルティを避けるためにトラックは顧客の所にできるだけ早く到着しようとするために起こったものと考えられる。

なお、表-6によると、ケース3においてトラックの走行時間は、乗用車・トラックの合計走行時間の約9%になっている。平成9年度の道路交通センサスによると、都市部の全交通量のうち、小型貨物車は約23%を占めている。京阪神都市圏物流調査²¹⁾によると、そのうちの約1/3が巡回型の交通であると推定されるので、約8%が巡回型のトラック交通となる。これを走行時間に変換すると、比率は若干大きくなると予想される。今回の計算ケースは、特定の都市をモデル化したわけではないが、オーダーとしては、わが国の都市部の巡回型のトラック交通の比率とほぼ同等か少し少なめであろうと思われる。

また、表-6において、トラックの走行時間は、乗用車の走行時間の6-9.5%になっており、トラックの走行が、ネットワーク全体の交通に影響を与えているものと考えられる。このネットワーク上に発生する乗用車の台数は、図-5に示すように4,375-6,500台/日であり、それに対してトラックの台数は

表-7 CO₂排出量の比較

モデル	車種	ケース1	ケース2	ケース3
FVRP -TW モデル	乗用車	1686	1313	988
	2トン車	2	1	1
	4トン車	19	18	17
	10トン車	789	745	721
	トラック小計	809	764	739
	計	2495	2077	1727
PVRP -TW モデル	乗用車	1709	1314	987
	変化(%)	1.4	0.1	0.0
	2トン車	0	0	0
	4トン車	34	32	31
	10トン車	723	683	662
	トラック小計	756	715	693
	変化(%)	-6.5	-6.4	-6.3
	計	2466	2029	1680
	変化(%)	-1.2	-2.3	-2.7

CO₂排出量の単位 kg-C/日

表-4に示すように18-19台であり、非常に少ない。しかし、トラックは図-8, 9に示すように、朝早くから夜遅くまで1日中この道路ネットワーク上をトリップチェーンとして走行しているのに対し、乗用車のトリップは、このネットワーク上の1つのノードから他のノードへの短時間の1トリップになっている。このために、トラックの台数が少ないにもかかわらず、走行時間が大きなものとなっていると推定される。したがって、トラックの配車配送計画の変更が道路交通状況に影響を与えているものと考えられる。

次に、表-7にFVRP-TWモデル・PVRP-TWモデルを用いた場合のCO₂排出量の比較を示す。なおCO₂排出量は、各トラックの平均走行速度から推定した²³⁾。表-7において、乗用車のCO₂排出量については、FVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルの差はほとんど見られないが、トラックについては、PVRP-TWモデルを用いた場合、各ケースで約6%の減少となっている。このCO₂排出量の削減は、主として10トン車のCO₂排出量の削減によってもたらされたものである。また、表-6に示すように、トラックの総走行時間が若干増加してもCO₂排出量が減少したのは、CO₂排出原単位の大きい10トン車の走行時間が減少したためであると考えられる。

表-7において、乗用車とトラック合計のCO₂排出量においても1-3%の減少となっており、環境改善効果が見られる。したがって、PVRP-TWモデルを用いて、所要時間を確率的に取り扱うことによって、物流費用を削減できるのみならず、環境の改善も期待できる。

4. 結論

本研究においては、所要時間の不確実性を考慮した確率論的配車配送計画モデル（PVRP-TWモデル）を定式化し、動的交通シミュレーションモデルと組み合わせたモデルを開発した。このモデルを仮想道路ネットワークに適用した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) PVRP-TWモデルを用いることにより、FVRP-TWモデルを用いる場合に比べて、物流の総費用を11-17%削減することができる。その主な原因は、PVRP-TWモデルにおいては、顧客における遅刻ペナルティをできるだけ少なくするために、トラックは、指定時間帯の中で余裕を持って到着する傾向があり、その結果、交通混雑によって所要時間が増加しても、遅刻する確率が低いためである。遅刻確率の低下は、顧客へのサービスレベルの向上につながる。
- (2) PVRP-TWモデルを用いる場合、総費用を削減できるのみならず、集配トラックのCO₂排出量を約6%削減できることがわかった。このことは、確率論的配車配送計画が運輸企業にとって便益があるのみならず、環境の改善において、社会的にも便益があることを示している。

今回の計算において、所要時間を確率分布として取り扱うことによって、交通混雑による所要時間の増大を考慮にいれて、余裕のある配車配送計画を立案するために、そのような状況が発生したとしても、指定時間に遅れることが少なくなるということが明らかになった。その結果、所要時間の変動を考慮にいれないFVRP-TWモデルに比べると、コスト削減に貢献し、さらにはCO₂排出量の削減にも寄与することがわかった。

所要時間の不確実性を考慮するPVRP-TWモデルの方が、FVRP-TWモデルよりも交通混雑が激しい場合には、総費用を削減することができることを示した。それに対し、FVRP-TWモデルにおいても、所要時間の不確実性を考慮して、平均値ではなく、平均値+2×(標準偏差)のような安全側の所要時間を用いて配車配送計画を立案すればどうなるかという質問が出るかもしれない。これについては、2×(標準偏差)をとるのがよいのか、3×(標準偏差)をとるのがよいのかを決めるのが難しいので、結局PVRP-TWモデルを用いる方がよいと思われる。

表-6にも示したように、トラックの総走行時間は、

乗用車・トラック合計の総走行時間の約9%であり、トラック交通の行動は交通状況に影響を与える。この影響を動的交通シミュレーションにおいて考慮し、その結果得られる新しい所要時間を用いて配車配送計画を再立案する。このような繰り返し計算を行うことによって、日々の配車配送計画における学習過程をシミュレートできる。

今回の計算は、1つのケースについて実行したものである。今後の課題としては、ここで開発したモデルを、種々の条件下において、実際の道路ネットワークに適用し、その適用性を検討する必要がある。

図-5に示した計算において、今回は11日目のみの評価を行ったが、今後、12日目以降の交通変動を考慮した評価を行うことも考えられる。

遅刻ペナルティの値について、ここでは一つの値を用いたが、実データを収集し企業の業種や品目などによって変化させてその影響を調べることも、今後の課題である。

今回の計算では道路ネットワーク全体に、均一に交通混雑が発生すると仮定しているが、局所的に混雑が発生する場合についても今後検討する必要がある。また、実際の交通の所要時間の分布を入手することは難しいのが現状であるが、ITSの普及とともに将来は実際のデータを用いて解析することも可能となろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、有益な御助言を賜りました京都大学大学院工学研究科土木工学専攻の飯田恭敬教授に深謝致します。また、研究にご協力いただきました建設省近畿地方建設局阪神国道工事事務所の各位に心から感謝いたします。最後に、データ整理等でご協力を得ました京都大学大学院の玉石宗生氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷口栄一, 山田忠史, 細川貴志: 都市内集配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.
- 2) 交通工学研究会編: インテリジェント交通システム, 丸善, 1997.
- 3) Ruske, W.: City logistics - Solutions for urban commercial transport by cooperative operation management, *OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies*, 1994.
- 4) 谷口栄一: 地域ロジスティクス, 交通工学, Vol. 30, No. 6, pp. 3-6, 1995.
- 5) Kohler, U.: An innovating concept for city-logistics, 4th *International Congress on Intelligent Transport Systems*,

Berlin, CD-ROM, 1997.

- 6) Taniguchi, E., Thompson, R.G. and Yamada, T.: Modelling city logistics. In E. Taniguchi and R.G. Thompson (eds.), *City Logistics I*, Institute of Systems Science Research, Kyoto, pp.3-37, 1999
- 7) Jaillet, P. and Odoni, A.R.: The probabilistic vehicle routing problem. In B.L. Golden, A.A. Assad (eds.), *Vehicle routing; Methods and studies*, North-Holland, Amsterdam, pp. 293-318, 1988.
- 8) Dror, M., Laporte, G. and Trudeau, P.: Vehicle routing with stochastic demands: properties and solution frameworks. *Transportation Science*, Vol.23, pp.166-176, 1989.
- 9) Powell, W.B., Jaillet, P. and Odoni, A. R.: Stochastic and dynamic network and routing. In M.O. Ball, T.L. Magnanti, C.L. Monma, G.L. Nemhauser (eds.), *Network Routing*, North-Holland, Amsterdam, pp. 141-295, 1995.
- 10) Gendreau, M., Laporte, G. and Seguin, R.: Stochastic vehicle routing. *European J. Oper. Res.* Vol.88, pp.3-12, 1996.
- 11) Bertsimas, G. J.: A vehicle routing problem with stochastic demands. *Oper. Res.* Vol.40, pp.574-585, 1992.
- 12) Laporte, G., Louveaux, F.V. and Mercure, H.: The vehicle routing problem with stochastic travel times, *Transportation Science*, Vol.26, pp.161-170, 1992.
- 13) 松本昌二, 白水義晴: 旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.353/IV-2, pp.75-82, 1985.
- 14) Malandraki, C. and Daskin, M. S.: Time dependent vehicle routing problems: Formulation, properties and heuristic algorithms. *Transportation Science*, Vol.26, pp.185-200, 1992.
- 15) Reeves, C.R 編: モダンヒューリスティクス, 日刊工業新聞社, 1997.
- 16) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析, 1998.
- 17) 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬: 動的交通シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, Vol. 31, No. 6, pp. 19-29, 1996.
- 18) Thangiah, S. R., Nygard, K. E. and Juell, P. L.: GIDEON: a genetic algorithm system for vehicle routing with time windows, *Seventh IEEE International Conference on Artificial Intelligence Applications*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp.322-328, 1991.
- 19) Kokubugata, H., Itoyama, H. and Kawashima, H.: Vehicle routing methods for city logistics operations, *IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems*, Chania, Greece, eds. M. Papageorgiou & A. Pouliezios, pp.755-760, 1997.
- 20) Potvin, J.-Y., Kervahut, T., Garcia, B.-L. and Rousseau, J.-

- M.: The vehicle routing problem with time windows; Part I: tabu search, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, pp.158-164, 1996.
- 21) 京阪神都市圏交通計画協議会：京阪神都市圏総合都市交通体系調査，1997.
- 22) 谷口栄一，則武通彦，山田忠史，泉谷透：トラックターミナルの最適バース数決定法に関する研究，土木学会論文集，No.548/IV-33,pp.23-33,1996.
- 23) Taniguchi, E., and van der Heijden, R.E.C.M.: An evaluation methodology for city logistics, *Transport reviews*, Vol.20, No.1, pp.65-90, 2000.
- (2000. 5. 19 受付)

PROBABILISTIC ROUTING AND SCHEDULING OF URBAN PICKUP/DELIVERY TRUCKS WITH VARIABLE TRAVEL TIMES

Eiichi TANIGUCHI, Tadashi YAMADA and Yasushi KAKIMOTO

This paper presents a probabilistic vehicle routing and scheduling model with variable travel times. The model incorporates the uncertainty of travel times and soft time windows with the penalty for delay and early arrival at customers. The model was integrated with a dynamic traffic simulation model. The probabilistic model showed the reduction of total costs by 11-17% compared with the forecast model when applying to a test road network. The probabilistic model can also contribute to decrease CO₂ emissions by pickup/delivery trucks with the comparison of the forecast model. It indicates that the probabilistic model produces benefits both for the cost reduction and environment improvement.