

交通情報を活用した確率論的配車配送計画に関する研究*

Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling based on Traffic Information*

谷口栄一**・安東直紀***

By Eiichi TANIGUCHI**・Naoki ANDO***

1. はじめに

交通渋滞や排出ガスによる都市環境の悪化などの諸問題を抱える都市内交通において、これらの問題の解決は急務とされているが、道路改築等の抜本的解決策を採ることは現在の社会情勢・経済情勢を鑑みると今後は益々困難になると考えられる。一方で諸外国に対する産業競争力を維持するため、物流コストの削減も求められている。都市内交通に大きな影響を与える都市内集配トラックについて着目したときに、効率的な配車配送計画を行った場合に、物流コスト・環境負荷が削減可能であることが示されている¹⁾。谷口ら²⁾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は、旅行時間として一つの予測値を用いる確定論的配車配送計画モデルを用いた場合と比べ、物流総費用等の削減が可能であることを示した。

ITSの一環として近年整備が進んでいる VICS (Vehicle Information Communication Systems)により、都市内の多数の区間において各種の交通情報が収集・提供されている。これにより以前は入手が困難であった旅行時間等の交通情報を入手することが可能となってきた。

確率論的配車配送計画についてはかねてより多数研究が行われてきている。大別すると需要が確率的に変化する VRPSD (The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands)^{3) 4)}、顧客が確率的に変化する VRPSC (The Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers)^{5) 6)}、および顧客・需要の両者が確率的に変化する VRPSCD (The Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers and Demands)^{7) 8)}などがある。さらにこれらに指定時間帯を組み合わせた研究も行われてきた⁹⁾。また旅行時間の不確実性を考慮した確率論的配車配送計画の研究としては Laporte et al.¹⁰⁾ や松本ら¹¹⁾、Malandraki and Daskin¹²⁾、Powell et al.¹³⁾、Kenyon and Morton¹⁴⁾などが行っているが、

*キーワード：物流計画，ITS，交通情報

**フェロー，工博，京都大学大学院都市社会工学専攻
(京都市左京区吉田本町，TEL:075-753-4789，
E-mail:taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

***学生員，工修，京都大学大学院都市社会工学専攻
(京都市左京区吉田本町，TEL:075-753-4788，
E-mail:n-ando@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

時々刻々変化する都市内の交通状況に対応したものはなっていなかったり、数理的に車両のデポへの帰着時間の確率最大化を行ったりするものであった。これに対し本研究では顧客の指定時間帯と遅刻・早着ペナルティを設定し、総コストの最小化による最適化を試みた。

そこで本研究では VICS が提供している各種の交通情報のうち旅行時間情報に着目し、(1)現実の都市内道路の旅行時間の分布形状の検討および、(2)それらの旅行時間情報を確率論的配車配送計画および確定論的配車配送計画に適用する際の基礎的な検討として、旅行時間の更新間隔の影響を、仮想ネットワークを用いた数値シミュレーションにより分析した。

2. 確率論的配車配送計画モデル

本研究において、物流企業における最適な配車配送計画とは次のような配送条件の下で総コスト（固定コスト，運行コスト，遅刻・早着ペナルティ）を最小化するものであると考え、確率論的配車配送計画モデルの定式化を行った²⁾。

[配車配送条件]

- トラックは一日に複数回の巡回を行うことが出来る。
- 顧客はトラックの配送ルートのもれに必ず割り当てられ、貨物はトラックの一回の訪問で全て集荷あるいは配送される。
- 一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が出来ない。
- 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出来ない。

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。

なお各顧客が集配トラックに配送してほしい指定時間帯(time window)をもち、トラックがその指定時間帯より早着・遅刻した場合にはペナルティを支払うことにより配送を続けることが出来るものとした。

Minimize

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

ただし,

$C(t_0, \mathbf{X})$: 総コスト (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 $t_0 = \{t_{l,0} | l=1, \dots, m\}$

$\mathbf{X}$: 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.)

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

$\mathbf{x}_l$: 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

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

$\mathbf{x}_{l,j}$: トラック l の j 回転目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

$n(i)$: 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

m : 使用可能なトラック台数の上限

$c_{f,l}$: トラック l の固定コスト (円/台)

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

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

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

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

図1に早着・遅刻ペナルティの考え方を示す。確率論的配車配送計画では旅行時間の確率分布を用いて遅刻・早着ペナルティを算出する。一方確定論的配車配送計画では旅行時間情報として確率分布ではなく一つの予測値を用いて遅刻・早着ペナルティを算出する。

例えば図1の確率分布において、確率分布の平均値を予測値として用いて確定論的配車配送計画のペナルティを計算した場合、予測値が指定時間帯の内側にあるため、遅刻・早着ペナルティは生じない。一方確率論的配車配送計画では、ペナルティの算出に確率分布を用いるため、図1のように平均値が指定時間帯の内側であってもペナルティが発生するケースも生じることとなる。このように計算された遅刻・早着ペナルティと固定コスト、運行コストとの和で表される総コストを最小化するような訪問順序・配送開始時刻の組み合わせを求めることとした。

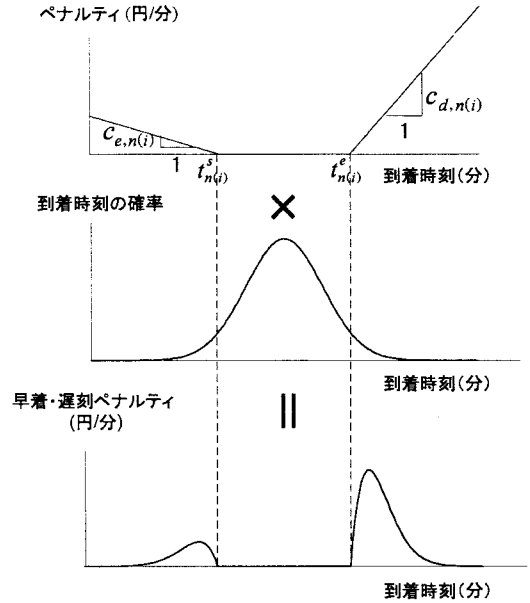


図1：早着および遅刻ペナルティ

3. VICSによる旅行時間情報の分析

VICSはITSの一環として平成8年より整備が進められ、平成14年4月現在では全国で78,000リンク以上の区間で交通情報が収集・提供されている。平成14年度より道路交通法が改正され、従来は公安委員会などが管理していたVICS情報が一般の利用も可能となり、面的な交通情報が利用可能な状況となりつつある。そこで本研究では平成13年2月1日から平成14年3月31日までのVICS情報入手し、近畿圏のいくつかの幹線道路を対象に分析を行った。

VICSより得られる情報としては、旅行時間情報や渋滞延長などがあるが、本研究では確率論的配車配送計画等の入力情報として使用するため旅行時間情報に着目した。VICSにおいては、すべてのVICSリンクについて旅行時間情報が提供されているわけではないが、対象としているリンクについては5分毎の旅行時間情報が提供されている。VICS情報は車両に対しリアルタイムで提供されているが、一方で長期間の情報を蓄積することで履歴データとして旅行時間の分布を得ることも可能である。

本研究では大阪府下でVICSにより旅行時間情報が得られているリンクのうち、61リンクを対象にJarque-Beraの正規分布検定を行った。JB値は自由度2のカイ2乗分布に従い、有意水準5%の5.991以下であれば当該分布は5%の有意水準で正規分布であると言えるとする検定法である。各リンクの1時間毎の旅行時間分布のうちJarque-Beraの検定により、28.3%(415時間・リンク)で分

布の正規性が確認された。

本研究において履歴データの分析を行った区間のうち、もっとも正規性の高い旅行時間の分布を含む区間の例を図2に示す。

図2は平日の一般国道1号浪速国道前～守口出口間における上りの所要時間を各時刻毎の頻度分布で表示したものである。この区間は約6.7kmの延長に対し、深夜23時頃から早朝4時にかけて、旅行時間は概ね8分以下であるが、5時を境に旅行時間の分布形状が変化し、20時まで道路が混雑している様子が分かる。

その中の平日8時台の旅行時間分布を図3に示す。当該頻度分布はJarque-Beraの正規分布検定を行ったところ、JB値は2.3764となり、本研究で検証した分布中最も低いJB値が得られた分布である。

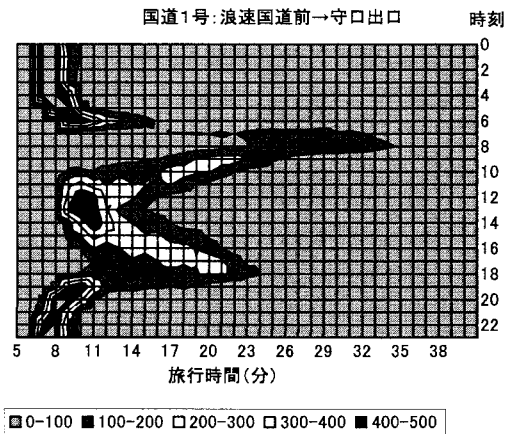


図2：旅行時間頻度分布
(一般国道1号：浪速国道前～守口出口)

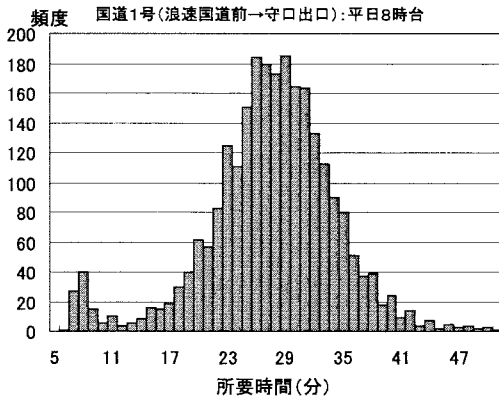


図3：旅行時間頻度分布(8時台・平日)

4. 旅行時間情報の精度が配車配送計画に与える影響に関する基礎的検討

前章で検討したVICSは地域ごとに管理主体が異なり、収集・提供される旅行時間情報の精度は管理主体毎に大きく異なることが分かっている。そこで本研究では履歴情報としてVICSにより得られる旅行時間情報の更新間隔が配車配送計画に与える影響を考察することとした。旅行時間情報の更新間隔を変化させてその影響を評価するためには、ネットワーク全体にわたる詳細な旅行時間情報を取得することが必要である。本研究では仮想的なネットワークを対象としてブロック密度法を用いた交通流シミュレーションを実施し、シミュレーションより得られた交通情報をもとに、確率論的配車配送計画等に入力データとして与える旅行時間分布の更新間隔を変化させることで交通情報の更新間隔が配車配送計画に与える影響について考察した。

(1) ブロック密度法による交通流シミュレーション

本研究で用いる交通流シミュレーションは基本的にマクロ単純連続モデルであるブロック密度法¹⁵⁾に基づいたものである。しかし交通の最小単位を車両1台とし、目的地等の情報は各車両が持つ離散モデルとなっており、実質的にはマクロとミクロのハイブリッドモデルとなっている。車両はノードに到着する毎に予想平均旅行時間を用いて時間最短経路を選択するものとしている。ブロック密度法は図4のようにフローシミュレーションと経路選択シミュレーションの2つの要素からなり、ネットワーク内のリンクを表すために連続するブロックが用いられる。

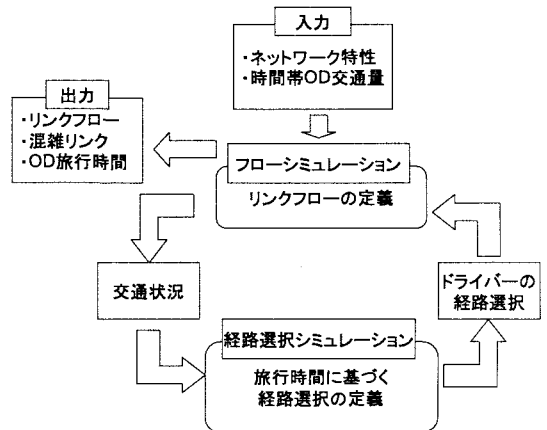


図4：ブロック密度法の構造

スキニングインターバル毎にブロックから次のブロックに移動する車両がリンク上の流れを表している。

ブロックから次のブロックへの車両の動きは次式により表される。

$$\Delta n_{i,i+1} = \min\{\Delta n_i^{OUT}, \Delta n_{i+1}^{IN}\} \quad (2)$$

$$\Delta n_i^{OUT} = NINT\left(n\left(1 - \frac{n}{n_j^J}\right)\right) \quad (3)$$

$$n = \min(n_i, n_i^C) \quad (4)$$

$$\Delta n_i^{IN} = NINT\left(n'\left(1 - \frac{n'}{n_i^J}\right)\right) \quad (5)$$

$$n' = \max(n_i, n_i^C) \quad (6)$$

ただし、

$\Delta n_{i,i+1}$: ブロックiからブロックi+1への移動台数(台)

Δn_i^{OUT} : ブロックiからの流出需要(台)

Δn_i^{IN} : ブロックiへの流入可能量(台)

n_i : ブロックiの車両台数(台)

Δn_i^J : ブロックiの最大(飽和)車両台数(台)

Δn_i^C : ブロックiが臨界密度となる時の車両台数(台)

$NINT$: 引数を四捨五入する関数

式(3)、式(5)は交通流－密度関係を表す関数として Greenshieldsの式⁶⁾を用いて以下の等式により求めた。

$$\begin{aligned} Q\Delta t &= kvw\Delta t \\ &= kv_f\left(1 - \frac{k}{k_j}\right)w\Delta t \\ &= k\Delta Lw\left(1 - \frac{k\Delta Lw}{k_j\Delta Lw}\right) \\ &= n\left(1 - \frac{n}{n_j}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、

Q : 交通量

Δt : 単位時間

ΔL : ブロック1つの長さ

k : ブロック内の交通密度

v : ブロック内の速度(km/h)

w : ブロック内の車線数

v_f : 自由走行速度(km/h)

k_j : 飽和密度(台/km)

n : ブロック内の車両台数

n_j : ブロック内の最大車両台数

$$(= k_j\Delta Lw = k_jv_f\Delta Lw)$$

フローシミュレーションでは先入れ先出し(First In First Out)法を用いており、リンクにおける車両の順序は常に保たれている。

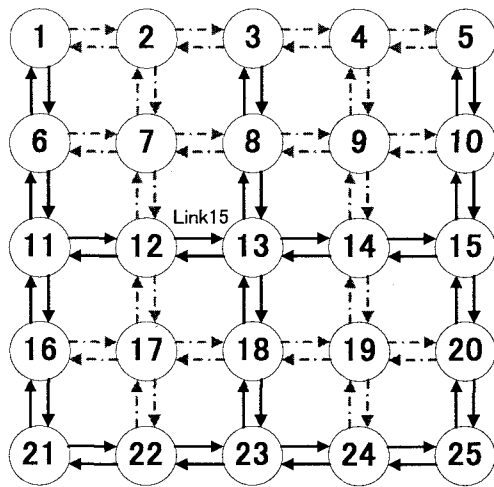
経路選択シミュレーションではノードに到着した車両は現在旅行時間情報をもとに目的地までの時間最短経路探索を行う。

本研究では図5に示す仮想的な道路ネットワークを用いた。ブロック密度法による交通流シミュレーションによって都市内の混雑した状況を再現し、確率論的配車配送計画の入力となる旅行時間分布を作成した。

本研究で対象とする道路ネットワークは図5に示すようなノード数25、リンク数80のネットワークとし、すべてのノードを車両の発生・集中が起こるセントロイドとした。各リンクの延長は4km、リンクにより自由走行速度は20km/hおよび15km/hとした。飽和密度は阪神高速道路のデータを参考に150台/km・車線とした。

この仮想道路ネットワークに対し、車両を30日間で表1のOD選択確率および図6の時間帯別発生交通量分布に従い1日50万台±5%、平均約49万9千台をランダムに発生させることで都市内の交通状況を再現した。ODは隣接ノードへのトリップが半数程度となるようにすることで短距離トリップが支配的となるよう作成した。また時間帯別発生交通量分布は阪神高速道路より得られたデータをもとに作成した。これらにより得られた30日間の交通状況を各リンクの履歴情報として用いた。一例として最も旅行時間変動の大きかったリンク(リンク15: ノード12→13)の例を図7、図8に示す。

その後、確率論的配車配送計画を実施し得られた配送パターン毎の配送コストを検証するため、同様にしてさらに10日分の交通流シミュレーションを実施した。この間の交通量は平均約49万6千台であった。



21 : 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5: 仮想道路ネットワーク

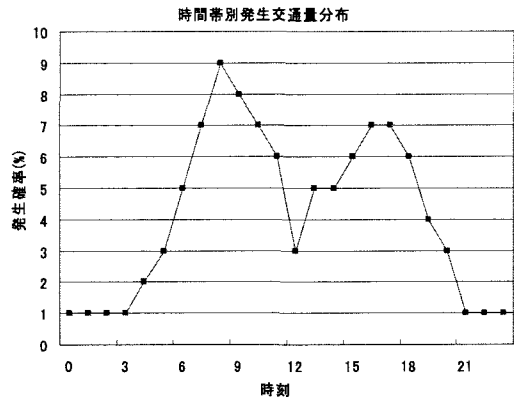


図6: 時間帯別発生交通量分布

表1: OD選択確率(%)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	25	6	3	2	25	6	3	2	1	7	3	2	1	1	3	2	1	1	1	2	1	1	1	0
2	19	0	19	5	2	5	18	5	2	1	2	5	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1
3	5	19	0	18	5	3	5	17	5	3	1	1	3	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1
4	7	5	19	0	19	1	2	5	15	5	1	1	2	5	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
5	2	3	6	26	0	1	1	3	6	25	1	1	2	3	7	1	1	1	2	3	0	1	1	1	2
6	20	5	2	1	8	0	13	5	2	1	19	5	2	1	1	5	2	1	1	1	2	1	1	1	0
7	5	9	5	3	2	9	0	9	5	3	5	9	5	3	2	3	5	3	2	2	2	3	2	2	2
8	3	4	10	4	3	4	10	0	10	4	3	4	9	4	3	2	3	4	3	2	2	2	3	2	2
9	2	3	5	9	5	3	5	9	0	9	2	3	5	9	5	2	2	3	5	3	2	2	2	3	2
10	5	1	2	5	20	1	2	5	15	0	1	1	2	5	18	1	1	1	2	7	0	1	1	1	2
11	5	2	1	1	1	18	5	2	1	1	0	18	5	2	1	18	5	2	1	1	5	2	1	1	1
12	8	4	3	2	2	4	5	4	3	2	10	0	9	4	3	4	8	4	3	2	3	4	3	2	4
13	2	3	4	3	2	3	4	9	4	3	4	9	0	9	4	3	4	9	4	3	2	3	4	3	2
14	2	2	3	4	8	2	3	4	5	4	3	4	10	0	9	2	3	4	8	4	2	2	3	4	5
15	1	1	1	2	5	1	1	2	5	18	1	2	5	18	0	1	1	2	5	18	1	1	1	2	5
16	2	1	1	1	3	5	2	1	1	1	17	5	2	1	1	0	14	5	2	1	20	5	2	1	6
17	2	3	2	2	2	3	5	3	2	2	5	9	5	3	2	9	0	9	5	3	5	9	5	3	2
18	2	2	3	2	2	2	3	4	3	2	3	4	10	4	3	4	9	0	9	4	4	4	10	4	3
19	2	2	2	3	2	2	2	3	5	3	2	3	5	9	5	3	5	9	0	9	2	3	5	9	5
20	1	1	1	1	2	1	1	1	2	5	1	1	2	5	19	1	2	5	13	0	6	1	2	6	20
21	2	1	1	1	1	3	2	1	1	1	7	3	2	1	1	24	6	3	2	1	0	25	6	3	2
22	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1	2	5	2	1	1	5	14	5	2	1	20	0	19	5	8
23	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	5	2	1	2	5	17	5	2	5	18	0	19	5
24	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	5	2	1	2	5	14	5	8	6	18	0	19
25	0	1	1	1	2	1	1	1	2	3	1	1	2	3	7	1	2	3	7	24	2	3	7	24	0

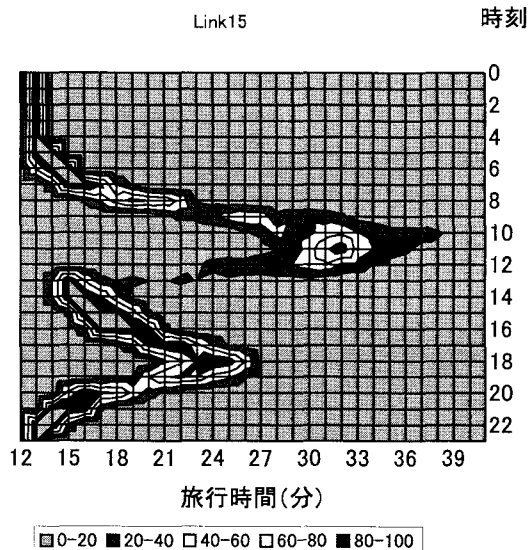


図7：旅行時間頻度分布(リンク15)

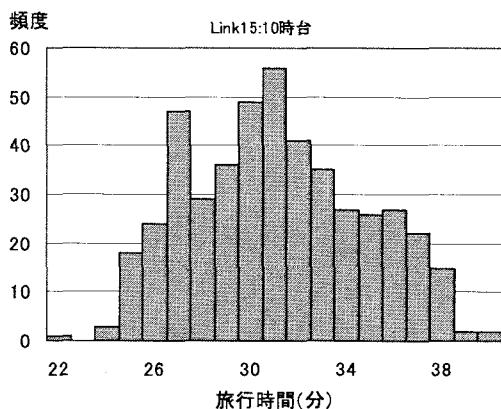


図8：旅行時間頻度分布(リンク15・10時台)

図7、図8は前述したとおり、とりわけ旅行時間変動の大きなリンクであり、一日を通してこれほど大きな時間変動をしなかったリンクも存在したが、大きく変動したいくつかのリンクに関しては、実際の都市内道路においてVICSにより得られた図2、図3のような旅行時間変動と比べても、混雑した都市内の交通状況を再現できたと思われる。

このようにして得られた旅行時間分布より、確率論的配車配送計画等の入力として与える旅行時間情報を作成し、配車配送計画についてケース毎に検討を行った。

(2) 旅行時間情報を用いた確率論的配車配送計画

(a) 計算条件

上述したとおり、現実の旅行時間は各時刻毎に大きく変化しているが、本研究ではVICSによる交通情報を履歴情報として配車配送計画に適用するための基礎的な分析として、旅行時間情報の更新間隔が配車配送計画に与える影響について検討する。

具体的には30日間の交通流シミュレーションの結果得られた旅行時間情報を元に、表2の各条件のように旅行時間分布の更新間隔を変化させた旅行時間分布を作成する。得られた旅行時間情報の例を図9に示す。図9は図7、図8と同じリンク15の、確定論的配車配送計画で用いた予測値である。この予測値は5分～24時間間隔の、30日間のリンク旅行時間の平均値である。確率論的配車配送計画で用いる旅行時間分布は、平均値の代わりに各時間帯毎に図8のような頻度分布を求め、使用することとした。

これらを入力データとして確率論的配車配送計画を実施し物流コストが最小となる最適配送パターン(事前計画)を得る。その後10日間の交通流シミュレーションの中で各ケース毎の事前計画に基づき配送を実施し、物流コスト等の変化について検討する。比較のため、旅行時間情報として一つの予測値を使用する確定論的配車配送計画も同様に実施し、総コスト等について比較する。

表2：入力条件一覧

ケース	条 件
Base	基本ケース：リンク自由走行時間一定
5m～24h	旅行時間情報更新間隔(5分～24時間)
f	確定論的配車配送計画
p	確率論的配車配送計画
例) 1h-p	更新間隔1時間の確率論的配車配送計画

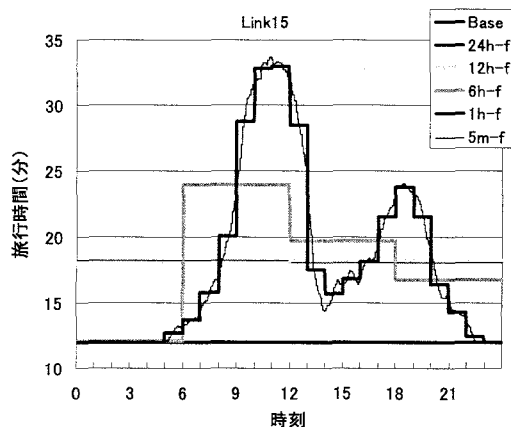


図9：ケース毎の旅行時間情報の例

配車配送計画は、物流企業を1社としデポはノード5の一方所、トラックは10t車4t車2t車を各2台計6台を使用可能、デポを除く24ノードに位置する顧客に対し配送を行うこととした。各顧客に対し、2時間・4時間・10時間幅の時間帯指定がランダムに設定されている。本研究では時間帯指定に遅刻した場合も遅刻ペナルティを払うことで配送が続行可能であるソフトタイムウィンドウを採用することとした。

確率論的配車配送計画は配送ノードへの到着・出発時刻の算出に確率分布を使用し、交通情報として旅行時間情報、顧客情報として位置・貨物量・タイムウィンドウなどを使用する組み合わせ最適化問題であるが、NP困難な問題であり、厳密解を求めることは現実的に困難であることから、本研究ではGA（遺伝的アルゴリズム法）を用いて訪問順序・出発時刻を求めることとした。

テストケースによりパラメータ設定を実施し、以下のようなパラメータおよびGA手順とすることとした。

個体数=300
世代数=1000
エリート個体数=30
顧客訪問順序の交差方法=順序交差
交差率=0.8
突然変異率=0.02

本研究では解の多様性を確保するため、同一条件のGAを1台のコンピュータにつき100回、4台のコンピュータで平行して実施し、計400回のGAを実施した。得られた最適解のうち、目的関数値が最小となる解を事前計画として用いることとした。

上記条件に基づき、各ケース毎に得られた事前計画に基づき配送活動を行った場合に要する総コストについて比較検討を行う。配送活動はあらかじめ事前計画により得られた顧客訪問順序のみを固定とし、配送経路については当日の交通状況に応じて最短経路を選択するものとする。

(b)計算結果

得られた各ケース毎の1日あたりの平均総コストを図10に示す。また、1日あたりの平均走行時間を表3に示す。

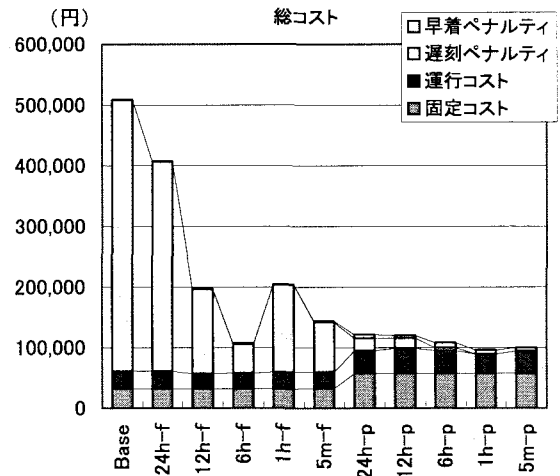


図10: ケース毎の平均総コスト

表3: トラックの走行時間

ケース	走行時間(分)	ケース	走行時間(分)
24h-f	1,921	24h-p	2,251
12h-f	1,763	12h-p	2,434
6h-f	1,804	6h-p	2,190
1h-f	1,879	1h-p	1,963
5m-f	1,668	5m-p	2,094

図10より、すべてのリンクの旅行時間情報を終日自由走行時間一定として配送計画を実施した基本ケース(Base)と比較して、5分毎の旅行時間分布に基づき確率論的配車配送計画を実施したケース5m-pでは、総コストは約80%削減されたが、走行時間は逆に約4.6%増加した。これは交通情報が与えられない基本ケースでは3台のトラックにより配送を行うことで総コストを最小化するような配送パターンを最適解として与えているが、実際の配送活動においては道路の混雑により多大な遅刻ペナルティを課されることで総コストの上昇を招く。これに対し、旅行時間情報として5分毎の分布を与えられるケース5m-pでは6台全てのトラックを用いて配送を行うため、遅刻が全く発生せず配送コストの上昇を抑える代わりに、6台分のトラックの走行に要する走行時間が増える結果となった。また表3よりおおむね旅行時間情報の更新間隔が短いほどトラックの走行時間も短縮される傾向が認められる。

図10より旅行時間情報として単一の値を用いる確定論的配車配送計画では、確率論的配車配送計画に比べ、いずれの更新間隔においても大きな遅刻ペナルティを課されることでコストの上昇を招いていることが分かる。

確定論的配車配送計画において計画時に得られた最

適解の総コストと配送実行時の1日あたりの平均総コストとの比較を表4に示す。基本ケースからケース12h-fまでは計画時の最適解より配送実行時のコストは増加しているが、旅行時間の更新間隔が6時間より短いケースでは最適解よりも実行時のコストの方が小さくなっている。

表4：確定論的配車配送計画における総コストの比較

ケース	最適解(円)	実行時(円)	比率(%)
基本ケース	72,971	509,163	698
24h-f	152,183	407,269	268
12h-f	87,265	197,375	226
6h-f	117,957	107,613	91
1h-f	206,374	204,553	99
5m-f	146,026	144,016	99

また図10より確率論的配車配送計画・確定論的配車配送計画の両者ともに、おおむね旅行時間情報の更新間隔が短くなる程配送コストが減少する傾向が確認できるが、その割合は確定論的配車配送計画ほど顕著である。

今回の解析結果では確定論的配車配送計画において、旅行時間情報を6時間毎に更新するケース6h-fが最も総コストが低い結果が得られた。しかしこの現象は本研究で用いた仮想道路ネットワークの形状や時間帯指定の幅およびその時間帯、旅行時間情報の更新時刻等の諸条件の関係により発生したものであり、基本的な傾向としては旅行時間情報の更新間隔が短くなるほど総コストが減少する傾向にあることは確認した。

各リンクの旅行時間情報に分布形を使用する確率論的配車配送計画においては、24時間という長い旅行時間の更新間隔であっても配送コストは5分の更新間隔を用いた場合のおよそ1.23倍に過ぎないのに対し、旅行時間情報として単一の値を用いる確定論的配車配送計画では、配送コストが最大の旅行時間情報を24時間間隔で更新する場合と最小の6時間間隔で更新する場合ではおよそ3.8倍に及ぶコスト差が生じることとなった。

そこで確定論的配車配送計画・確率論的配車配送計画ともに最も頻繁に旅行時間情報が更新されるケース5m-fとケース5m-pの総コストの変動に着目し比較・検討した。両ケースは図10からもコスト構成が異なることがわかるが、詳細を表5に示す。

表5：ケース5m-pと5m-fのコスト構成

ケース	5m-p	5m-f
固定コスト(円)	57,671	33,464
運行コスト(円)	36,582	28,385
遅刻ペナルティ(円)	0	156,983
早着ペナルティ(円)	5,450	1,982

表5より固定コスト・運行コストは使用する車両台数がケース5m-pが2t車、4t車、10t車各2台の計6台、ケース5m-fは2t車1台、4t車2台であるため、ケース5m-pの方が大きくなっているが、遅刻ペナルティはケース5m-fのみに発生している。

当該2ケースの10日間の配送にかかるコストは1日あたりの平均では約44%異なっていた。本研究では早着ペナルティは運行コストと同一、遅刻ペナルティは運行コストの5倍とした。遅刻ペナルティの影響を考察するため、ケース5m-pと5m-fにおいて、遅刻ペナルティと早着ペナルティを共に運行コストと同一とした場合についても検討を行った。遅刻ペナルティが早着ペナルティに等しい場合でも確率論的配車配送計画は確定論的配車配送計画に比べ総コストが13.8%削減されることを確認した。

ケース5m-pと5m-fの10日間の各日で配送コストを比較した結果を図11に示す。図11において、平均速度とはトラックがネットワーク内を走行する8時から20時までのネットワーク内の全リンクの車両の平均走行速度であり、1日の総走行台数が最小の48万4千台の時に最大値13.5km/h、最大の52万2千台の時に最小値12.3km/hとなり、ほぼ走行台数に反比例する値となったが、その差は高々1.2km/hにとどまるものであった。

図11において、ケース5m-fは平均速度が速い時は安い配送コストをもたらすこともあるが、平均速度が遅い、すなわち混雑した状況では配送コストが大きく上昇しているのに対し、ケース5m-pは旅行速度にかかわらず期間を通してほぼ一定の配送コストで配送を行うことが可能であることが分かった。

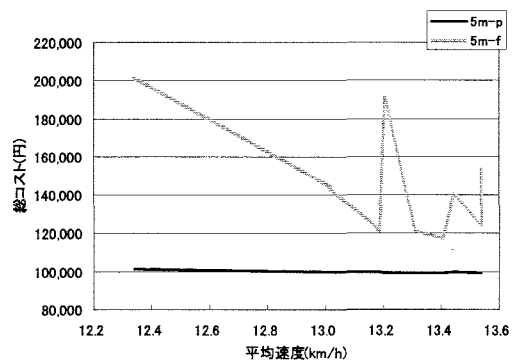


図11：ネットワーク内の平均速度と総コスト(1)

一方ケース5m-fの総コストの変動は遅刻ペナルティに起因するものであることから、確定論的配車配送計画による最適配送パターンは交通量すなわちネットワーク内の走行速度のわずかな変動にも鋭敏に影響を受けている。

次に確率論的配車配送計画において、平均走行速度と総コストの関係を旅行時間情報の更新間隔に分けて表

した結果を図12に示す。図12では残りの旅行時間情報の更新間隔が24時間、12時間、6時間、1時間の4ケースについて示した。この図より旅行時間情報の更新間隔が長いケース24h-pでは平均速度が低下すると配送コストが上昇するケース5m-fと比較的類似した傾向を示している。一方ケース12h-p、ケース6h-pにおいては平均速度と総コストの間に明確な相関は認められない。ケース1h-pはケース5m-pと同様に非常に安定した配送が行われていることがわかる。

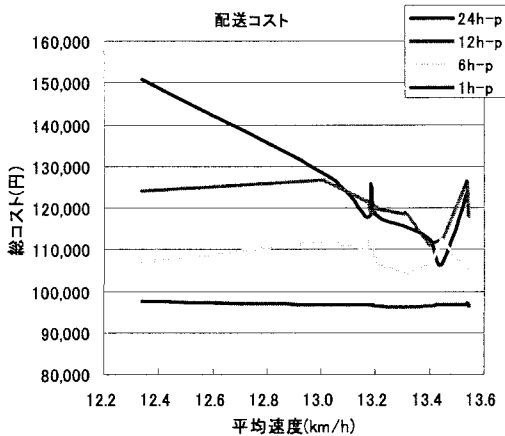


図12：ネットワーク内の平均速度と総コスト(2)

10日間の総コストの最小値と最大値の比をコスト変動と定義し、各ケースのコスト変動を表6に示す。表6より、確率論的配車配送計画を用いた場合のコスト変動の最大値はケース24h-pの142%であった。これは確定論的配車配送計画で最小のケース6h-fの156%よりも少ない。ケース1h-pでは配送コストの変動は101%と非常に安定した配送が行われていることがわかった。

表6：ケース毎のコスト変動

ケース	コスト変動(%)	ケース	コスト変動(%)
24h-f	190	24h-p	142
12h-f	211	12h-p	114
6h-f	156	6h-p	108
1h-f	220	1h-p	101
5m-f	172	5m-p	102

以上より確率論的配車配送計画による最適配送パターンは、旅行時間情報の更新間隔が長い場合であっても交通量すなわちネットワーク内の走行速度の影響を受けにくく、遅刻に起因するサービスレベルの低下を防ぐことが出来る可能性があることを示唆している。

(c)考察

本研究により得られた結果より考察を行う。確率論的配車配送計画において、遅刻ペナルティと早着ペナルティを設定するが、遅刻ペナルティが大きく設定されている場合、これを避けるため最適配送パターンは車両台数を増やし、顧客への到着時刻を前倒しすることにより遅刻ペナルティを避ける解となる傾向がある。最も遅刻ペナルティが少ない状況は、早着ペナルティと同額というケースが考えられる。この場合も顧客の到着指定時間帯の中央に到着するように到着時刻を調整する圧力が作用すると考えられる。このような傾向を持つ最適配送パターンにより、混雑した交通状況においても遅刻の発生を最小限に抑え、コスト変動の少ない安定した配送を実現することが可能となると考えられる。一方確定論配車配送計画では、到着時刻が指定時間帯の内側にあればいかなるペナルティも発生しない。従って、ペナルティが発生しない限り少ない車両台数で多くの顧客に対する配送を行う方が総コストを低く保つことが可能となる。すなわち確定論的配車配送計画により得られる最適配送パターンは、少ない車両台数で到着指定時間帯内に多くの顧客をまわるものとなる。そのため、計画時より交通状況が混雑してくると到着指定時刻に遅刻する顧客が発生し、高い遅刻ペナルティにより総コストが増加すると考えられる。

4. 結論

本研究では今後VICSにより得られる交通情報を活用した確率論的配車配送計画を実施するための基礎的な検討として、入力データとして与える旅行時間分布の精度が物流コストに及ぼす影響について検討を行った。

本研究では入力データとして与えた旅行時間の区分を5ケースに分け確率論的配車配送計画と確定論的配車配送計画の両方で比較・検討を実施した。その結果、旅行時間情報として分布形を用いる確率論的配車配送計画を実施することによって旅行時間分布の更新間隔が長い場合であっても遅刻を避け、サービスレベルを維持することが可能であることが示された。

より効率的な都市圏物流システムの実現に向け、確率論的配車配送計画に加えて動的配車配送計画の実施などについても今後検討が必要である。

参考文献

- 1) 谷口栄一，根本敏則：シティロジスティクス，森北出版，2001
- 2) 谷口栄一，山田忠史，柿本恭志：「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」土木学会論文集No674/IV-51,pp49-61,2001.4
- 3) Bertsimas, D. J.: A Vehicle routing problem with stochastic demand, *Operations Research*, Vol.40, pp.574-585, 1992.
 - 4) Bertsimas, D. J. and Howell, L. H.: Further results on the probabilistic traveling salesman problem, *European Journal of Operation Research*, Vol.65, pp.68-95, 1993.
 - 5) Dror, M., Laporte, G., and Trudeau, P.: Vehicle routing with stochastic demands: properties and solution frameworks, *Transportation Science*, Vol.23, pp.166-176, 1989.
 - 6) Dror, M.: Vehicle routing with uncertain demands: Stochastic programming and its corresponding TSP solution, *European Journal of Operational Research*, Vol.64, pp.432-441, 1992.
 - 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, 293-318, 1998.
 - 8) Gendreau, M., Laporte, G., and Seguin, R.: An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic customers and demands, *Transportation Science*, Vol.29, pp.143-155, 1995.
 - 9) Fischer, M. L.: Vehicle routing, *Network Routing*, Vol.8, pp.1-33, Elsevier Science, Amsterdam, 1995.
 - 10) Laporte, G., Louveaux, F.V. and Mercure, H.: The vehicle routing problem with stochastic travel times, *Transportation Science*, Vol.26, pp.161-170, 1992.
 - 11) 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.
 - 12) Malandraki, C. and Daskin, M. S.: Time dependent vehicle routing problems: Formulation, properties and heuristic algorithms. *Transportation Science*, Vol.26, pp.185-200, 1992.
 - 13) 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.), *TNetwork Routing*, North-Holland, 141-295, 1995.
 - 14) Kenyon, A. S. and Morton, D. P.: Stochastic Vehicle Routing with Random Travel Times. *Transportation Science*, Vol.37, pp.69-82, 2003.
 - 15) 桑原雅夫, 吉井稔夫, 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, No.4 Vol. 32, pp.39-43, 1997.7.
 - 16) Greenshields, B.D. A study in highway capacity. *H.R.B. Proceedings*, 14, p.468, 1935.

交通情報を活用した確率論的配車配送計画に関する研究*

谷口栄一**・安東直紀***

本論文では、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適用し都市内における物流活動を効率化するため、現在VICSにより得られている都市内道路の旅行時間分布について検討し、混雑した都市内交通を再現するため仮想ネットワークによる数値シミュレーションを実施した。これにより得られた交通情報を確率論的配車配送計画に適用する際の旅行時間情報の更新間隔に着目し、確定論的配車配送計画との比較を実施した。その結果、旅行時間情報の更新間隔が長い場合であっても確率論的配車配送計画を実施することによって総コストの上昇を抑制し、遅刻によるサービスレベルの低下を防ぐことが可能であることがわかった。

Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling based on Traffic Information*

By Eiichi TANIGUCHI**・Naoki ANDO***

In order to apply the probabilistic vehicle routing and scheduling model to urban traffic, this paper analyzed the real traffic information given by VICS. We performed numerical simulation on test road network to represent a congested urban traffic. We compared total costs of the probabilistic vehicle and scheduling model with the forecasted vehicle routing and scheduling model for several duration times of travel time information. Even with long duration time of travel time information, the probabilistic routing and scheduling model can decrease the total costs as well as keep high service level by avoiding delay arrival at customers.
