

都市内集配トラックの確率論的配車配送計画に関する研究

Probabilistic routing and scheduling of urban pickup/delivery trucks

谷口 栄一*・山田 忠史**・玉川 大***

by Eiichi TANIGUCHI, Tadashi YAMADA, Dai TAMAGAWA

1.はじめに

近年、都市内物流において、物流サービスの高度化および物流コスト削減対策の一環として配車配送計画システムを高度化する動きが見られる。谷口ら¹⁾は、集配トラックを対象として、経路の平均所要時間をもとに物流コスト最小化を図る配車配送計画モデルを構築し、配車配送計画システムの高度化が都市内道路交通に与える影響について分析を行っている。その結果、企業が配車配送計画システムを高度化するのに伴い、物流コストが削減されるだけでなく、都市内道路交通の総走行時間の削減やCO₂排出量の低減といった社会的な効果も期待できることが確認されている。

本研究では、経路の所要時間が本来、時々刻々と変動することに注目して、確率論的な配車配送計画モデルを構築する。その際、経路の所要時間を正規分布として取り扱い、上述のモデルと同じく各企業は物流コストの最小化を目指すものとする。確率論的な配車配送計画モデルと所要時間の平均値を用いた配車配送計画モデルの導入効果を比較・検討することにより、配車配送計画において、所要時間の不確実性を考慮することの効果をも明らかにする。

2.確率論的配車配送計画モデル

モデル化に際して、都市内集配トラックがデポを出発して複数の顧客を訪問し、貨物を集荷（あるいは

は配送）した後、再びデポに戻るような物流形態を考える。各顧客は、集配トラックに対して、到着時刻指定を設けているものとする。さらに、デポと顧客間、および各顧客間の所要時間の不確実性を考慮する。評価基準は物流コストの最小化であり、決定変数は、集配トラックの顧客への割り当て、訪問順序、およびデポの出発時刻である。このような確率論的配車配送計画モデル(P-VRP-TW; Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window) は、以下のように定式化される。

$$TC(t_0, X) = \sum_{l=1}^m E[RC_l(t_{l,0}, x_l)] + \sum_{l=1}^m \delta_l \cdot FC_l + \sum_{l=1}^m E[PC_l(t_{l,0}, x_l)] \quad (1)$$

$$E[PC_l(t_{l,0}, x_l)] = \sum_{i=1}^{N_l} \int_0^{\infty} P_{l,n_i}^a(t_{l,0}, t, x_l) \cdot (c_{d,n_i}(t) + c_{e,n_i}(t)) dt \quad (2)$$

$$E[RC_l(t_{l,0}, x_l)] = c_l \cdot \sum_{i=0}^{N_l} [\bar{x}(\bar{t}_{l,n_i}, n_i, n_{i+1}) + t_{c,n_{i+1}}] \quad (3)$$

$$\text{subject to } w_k \leq w_k^{\max} \quad (4)$$

ここに、

- $TC(t_0, X)$: 企業の物流コスト (円)
- t_0 : 各トラックの出発時刻 (ベクトル)
- X : 各トラックの割当てと訪問順序 (数列)
 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_1, \dots, x_m\}$
- $RC_l(t_{l,0}, x_l)$: トラック l の稼働時間コスト (円)
- $t_{l,0}$: トラック l のデポ出発時刻
- x_l : トラック l の割当てと訪問順序 (数列)
 $x_l = \{n_i \mid i = 1, N_l\}$

キーワード：物流流動，ネットワーク交通流，ITS

* フェロー会員 工博 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 TEL 075-753-5125 FAX 075-753-5907

** 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科
〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL/FAX 06-6368-0964

*** 正会員 阪神高速道路公団大阪管理部
〒552-0006 大阪市港区石田 3-1-25 TEL 06-6576-3881 FAX 06-6576-1918

- δ_l :トラック l を使用するとき 1, そうでない場合は 0 の 0-1 変数
- FC_l :トラック l の備車コスト (円/台)
- $PC_l(t_{l,0}, \mathbf{x}_1)$:トラック l の遅刻および早着ペナルティー (円)
- c_l :トラック l の単位時間費用 (円/分)
- N_l :トラック l の総訪問顧客数
- n_i : i 番目に訪問する顧客のノード番号 (n_0, n_{N_l+1} はデポを表現する)
- t_{l,n_i} :トラック l が顧客 n_i を出発する時刻
- $x(t_{l,n_i}, n_i, n_{i+1})$:時刻 t_{l,n_i} におけるトラック l の顧客 n_i と顧客 n_{i+1} との間の所要時間 (分)
- t_{c,n_i} :顧客 n_i における荷役作業時間 (分)
- w_l :トラック l の積載量 (t)
- $w_l^{\max}$:トラック l の最大積載量 (t)
- $p_{l,n_i}^a(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_1)$:時刻 $t_{l,0}$ にデポを出発したトラック l が顧客 n_i に時刻 t に到着する確率
- $c_{d,n_i}(t)$:顧客 n_i の遅刻ペナルティー関数 (円)
- $c_{e,n_i}(t)$:顧客 n_i の早着ペナルティー関数 (円)

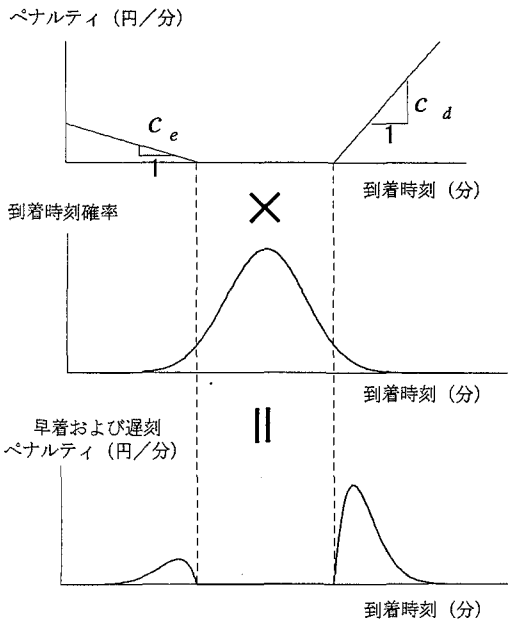


図1 遅刻および早着ペナルティーの算出方法

このモデルでは、トラックの稼働時間コストは、各経路の所要時間の平均値を用いて計算を行い、トラックの遅刻および早着ペナルティーに関しては、顧客における遅刻および早着ペナルティー関数とその顧客における到着時刻の確率分布とを掛け合わせた値とする。遅刻および早着ペナルティー算出方法の概要を図1に示す。

一方、所要時間の平均値を用いた配車配送計画モデル (F-VRP-TW; Forecast Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window) においては、稼働時間コストは確率論的配車配送計画モデルと同様の方法で求められるが、遅刻および早着ペナルティーは、所要時間の平均値を用いて、

$$PC_l(t_{l,0}, \mathbf{x}_1) = \sum_{i=0}^{N_l} [c_{d,n_i} \cdot \max\{0, t_{l,n_i}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_1) - t_{n_i}^e\} + c_l \cdot \max\{0, t_{n_i}^s - t_{l,n_i}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_1)\}] \quad (5)$$

と表される。

以上のように定式化された配車配送計画問題は NP-hard な組み合わせ最適化問題となるため、厳密解を求めることが困難である。そのため、ヒューリスティック手法の一つである遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて近似解を求めることとする。

3. 動的交通流シミュレーション

物流企業によって配車配送計画システムが導入された場合の都市内交通状況を表現するために、上述の配車配送計画モデルと交通流シミュレーションモデルとを包含した都市内交通状況再現モデルを構築する。図2に示されるように、モデル内では二つのサブモデルが循環的な関係を有しており、都市内の交通状況が安定するまで繰り返し計算を行う。なお本研究では、ボックスモデル²⁾をベースに、集配トラックのような巡回型交通にも対応できるように改良したものを、交通流シミュレーションモデルとして用いている。

4. 仮想ネットワークへの適用結果

(1) 問題の設定

図3に示す仮想ネットワークを対象として、P-VRP-TW および F-VRP-TW の導入効果を比較・検討

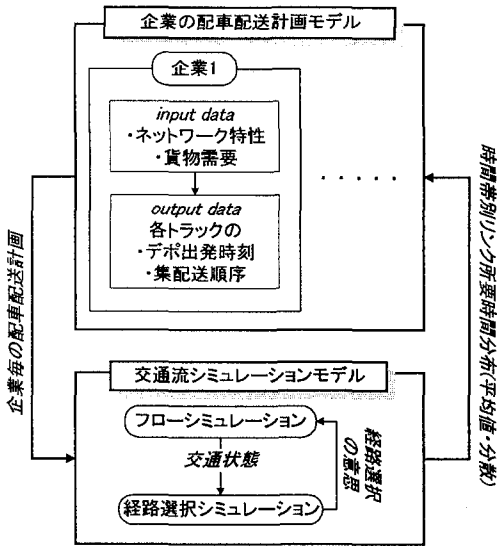
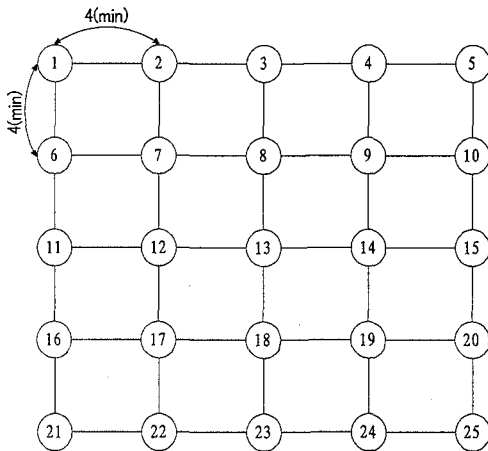


図2 都市内交通状況再現モデル



ノード間の数字はそれぞれのリンクにおける自由走行時間を表す。

図3 計算対象道路ネットワーク

する。

ネットワーク内には物流企業が10社存在するものと仮定し、各企業が保有するデポ(各社とも一箇所とする)の位置、顧客の位置・数は一様乱数により設定した。各顧客における到着指定時刻および貨物量については、京阪神地域における貨物特性に基づいて設定した。

乗用車はネットワーク内の全てのノードにおいて

表1 物流コストの比較

	混雑している場合		混雑していない場合	
	平均値 モデル	確率論 モデル	平均値 モデル	確率論 モデル
備車コスト	388895	404376	378335	377607
稼働時間	207997	213742	175148	181443
コスト		104.0%		99.8%
早着	39290	38709	37306	40637
ペナルティー		102.8%		103.6%
遅刻	177373	145021	133681	127963
ペナルティー		98.9%		108.9%
計	813555	801848	724470	727651
		98.6%		100.4%
基本ケースとの差	89085	77378	基本ケース	-
		86.9%		

*各欄下段に示されているパーセント表示は、平均値を用いた単位:円/日
配車配送計画モデル導入時の結果に対する比を表したものである

発生・集中するものとする。乗用車の発生台数については、2通りを想定した。すなわち、ネットワーク内が比較的混雑しない場合と比較的混雑する場合である。そして、各交通状態の下で両配車配送計画モデルの導入効果を検討する。このようにネットワーク内の混雑状況を考慮したのは、所要時間の不確実性を考慮することが効果的な状況について知見を得るためである。

以上のような問題設定の下で、対象ネットワーク内の全企業がP-VRP-TWおよびF-VRP-TWそれぞれを導入した場合について計算を行った。なお、各企業はそれぞれの企業単位で物流コスト最小化を計るものとする。

(2) 計算結果

表1は、両配車配送計画モデル導入時の物流コストを比較したものである。なお、ネットワーク内が混雑していない場合のネットワーク内平均走行速度は約40km/hとしており、混雑している場合における平均走行速度は約30km/hとした。ネットワーク内が混雑していない状況の下では、両システム導入時の物流コストに明確な差は見られない。一方、ネットワーク内が混雑している状況下では、P-VRP-TWを導入した場合の方が、物流コストが約1.4%減少しており、僅かではあるが物流コスト削減効果が得られることになる。

物流コストを構成する各項目に注目すると、遅刻ペナルティーの削減幅が大きい一方で備車コストが増加している。

表 2 使用トラック台数の比較

	混雑している場合		混雑していない場合	
	平均値 モデル	確率論 モデル	平均値 モデル	確率論 モデル
2t車	6.9	6.6 95.7%	6.9	5.2 75.4%
4t車	9.8	9.4 95.9%	10.2	9.4 92.2%
10t車	14.8	16.4 110.8%	13.7	15.6 113.9%
計	31.5	32.4 102.9%	30.8	30.2 98.1%

*各欄下段に示されているパーセント表示は、平均値を用いた単位:台/日
配車配送計画モデル導入時の結果に対する比を表したものである

表 2 は、ネットワーク上を実際に走行したトラック台数を示したものである。表 2 によると、混雑している状況下では、P-VRP-TW を導入した場合に 2t 車、4t 車の台数が削減され、10t 車が増加している。つまり、道路混雑が激しくなり、所要時間の不確実性が増すに従って、P-VRP-TW においては、遅刻のリスクを回避するために、大型トラックを用いて一度に集配する傾向が強まり、集配デポへの一時的な帰還を避けている。

さらに、混雑していない交通状況下における物流コスト（表 1 の基本ケース）と、混雑している交通状況下における両配車配送計画モデル導入時の物流コストを比較してみた。その結果、P-VRP-TW を導入した場合の方が、物流コスト上昇額が約 13.1% 小さくなっており、P-VRP-TW には、混雑状況が厳しくなることによる物流コスト上昇を抑制する効果があることが確認できた。

次に、両配車配送計画モデル導入時のネットワーク内における総走行時間を調べる（表 3）。混雑している状況下では、P-VRP-TW を用いた場合の総走行時間が、F-VRP-TW を用いた場合よりも 1.2% 減少している。一方、混雑していない状況下では、P-VRP-TW を用いた場合の方が、F-VRP-TW を用いた場合よりも 0.8% 増加している。しかし、いずれの交通状況下においても、総走行時間については、配車配送計画モデルの違いによる顕著な相違は見られない。

混雑していない状況下で F-VRP-TW を用いた場合に得られた結果（表 3 の基本ケース）と比較すると、混雑した状況下で F-VRP-TW を用いた場合、総走行時間は 840 分の増加となる。一方、混雑した状況下で P-VRP-TW を用いた場合には、764 分の増加に

表 3 総走行時間の比較

	混雑している場合		混雑していない場合	
	平均値 モデル	確率論 モデル	平均値 モデル	確率論 モデル
乗用車走行時間	69,505	69,832 100.5%	35,989	36,067 100.2%
トラック 走行時間	4,592	4,535 98.7%	3,690	3,708 100.5%
待ち時間	2,037	2,018 99.0%	2,099	2,126 101.3%
計	6,630	6,552 98.8%	5,789	5,834 100.8%
計	76,134	76,384 100.3%	41,778	41,900 100.3%
基本ケースとの差	840	764 91.0%	基本ケース	

*各欄下段に示されているパーセント表示は、平均値を用いた単位:分/日
配車配送計画モデル導入時の結果に対する比を表したものである

とどまり、総走行時間の上昇が 9.0 削減される。

5. 結論

本研究では、所要時間の分布を考慮した確率論的配車配送計画モデル(P-VRP-TW)を構築し、所要時間の平均値を用いた配車配送計画モデル(F-VRP-TW)と比較することにより、その導入効果を検討した。その結果、P-VRP-TW を導入することにより、道路混雑の激化に伴う物流コスト上昇や遅刻ペナルティーが抑制されることが明らかとなった。後者は、顧客サービスの向上にもつながる。さらに、P-VRP-TW の導入は、混雑の激化に伴う総走行時間の上昇も抑制できることがわかった。このことは、P-VRP-TW の導入が、交通渋滞緩和にも寄与することを示している。

（謝辞）本研究を遂行するに当たり、貴重な御助言を頂いた京都大学大学院土木工学専攻の飯田恭敬教授に心から感謝の意を表します。また計算を実施するに当たり、ご協力頂いた、建設省阪神国道工事事務所の各位、ならびに京都大学大学院の玉石宗生氏、大阪市の高内寿恵氏に深く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) 飯田恭敬、藤井聡、内田敬：“道路交通流シミュレーションを用いた道路網交通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.