

リアルタイム所要時間情報を用いた動的配車配送計画*

Dynamic vehicle routing and scheduling with real time information on travel times*

谷口栄一**・山田忠史***・玉石宗生****

By Eiichi TANIGUCHI**・Tadashi YAMADA***・Muneo TAMAISHI****

1. はじめに

都市における物流は、国際競争に打ち勝つために、より一層効率化を進める必要があるとともに、環境、渋滞、エネルギー、交通安全などの諸問題にも対処しなければならない。そのような困難な問題を解決するために、谷口・根本¹⁾は、シティロジスティクスの考え方を提案している。

シティロジスティクスにおける一つの重要な方法として、企業がITS(高度道路交通システム)を活用した配車配送計画を採用することがある。ここでは、ITSを活用して、リアルタイムの所要時間情報が得られた場合の、動的な配車配送計画について、定式化を行い、仮想ネットワークに適用した場合の結果について考察を加える。

2. モデル

(1) 概要

ここでは、2種類の配車配送計画モデルを用いる。1つは、所要時間として、1つの予測所要時間を用いるVRPTW-F (Vehicle Routing and scheduling Problems with Time Window -

Forecasted) モデルであり、他の1つは、リアルタイムの所要時間変動を考慮したVRPTW-D (Vehicle Routing and scheduling Problems with Time Window - Dynamic)モデルである。いずれのモデルにおいても、デポと呼ばれる物流拠点から集配トラックが出発し、何件かの顧客のところを巡回して貨物を集荷または配達して、また同じデポに帰還する。各顧客は、トラックに訪問してほしい時間帯を持っている。

VRPTW-Fモデルにおいては、動的交通シミュレーションモデルを用いて、道路ネットワークのリンク旅行時間を与える。その値を用いて、配車配送計画問題を解き、最適な顧客訪問順序および経路を決定する。このような作業は、前日に行われ、配車配送の当日は変更をしない。

一方、VRPTW-Dモデルにおいても、VRPTW-Fモデルと同じプロセスを経て、前日に最適な顧客訪問順序および経路を決定する。さらに、当日においても、時々刻々と与えられるリアルタイム情報に対応して、顧客訪問時に、もう一度配車配送計画問題を解き直し、再度最適解を求める。とくに、VRPTW-Dモデルは、交通事故によって道路のリンクの交通容量が長時間に渡って減少するような場合に、威力を発揮するものと期待される。

(2) VRPTW-Fモデル

VRPTW-Fモデルにおいては、総費用を最小化することとする。総費用は、(a)固定費用、(b)運行費用、(c)遅刻ペナルティからなっている。モデルは、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \text{Min. } C(t_0, \mathbf{X}) = & \sum_{l=1}^m c_{f,l} \cdot \delta_l(\mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) \\ & + \sum_{l=1}^m C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) \end{aligned} \quad (1)$$

*キーワード：物流、動的配車配送計画、リアルタイム情報

**フェロー、工博、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻（京都市左京区吉田本町、TEL075-753-5125, FAX075-753-5907）

***正員、工博、広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻（東広島市鏡山1-4-1、TEL0824-24-7812, FAX0824-22-7194）

****正員、工修、国土交通省関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所、（横浜市中区北仲通5-5、TEL045-211-7451）

ここに,

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

$$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) = \sum_{i=0}^{N_l} [c_{d,n(i)} \cdot \max\{0, t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) - t_{n(i)}^e\} + c_{e,n(i)} \cdot \max\{0, t_{n(i)}^s - t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)\}] \quad (3)$$

Subject to

$$n_0 \geq 2 \quad (4)$$

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

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

$$W_l(\mathbf{x}_{l,j}) \leq W_{c,l} \quad (7)$$

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

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

ここに,

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

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

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

$\mathbf{X}$: 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.)

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

$\mathbf{x}_l$: 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

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

$n(i)$: 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 : 数列 $\mathbf{x}_l$ 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)

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

$C_{l,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: 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)

$c_{l,l}$: 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

$c_{d,n(i)}(t)$: 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).

ここに定式化された問題は、NP-困難な組み合わせ最適化問題であり、通常は、近似解を求めるためにヒューリスティクス手法を用いるが、今回は、顧客数が少ないため、数え上げ法を用いる。

(3) VRPTW-Dモデル

VRPTW-Dモデルの特徴は、各顧客のところに到着する毎に、リアルタイムの所要時間情報を用いて、再度配車配送計画問題を解き直すところにある。VRPTW-Dモデルの構造は、VRPTW-Fモデルとほとんど同じであるが、最短経路探索を行う場合にVRPTW-Dモデルにおいては、現在旅行時間を用いている。

(4) 動的交通シミュレーション

道路ネットワークのリンク所要時間を推定するために、交通シミュレーションが必要であり、ここでは、ブロック密度法によるシミュレーションを用いた。ブロック密度法はマクロシミュレーションであるが、車群がノードに達する毎に目的地が同じ車群の最短経路探索を行う点で、ミクロシミュレーションの要素も入っている。

3. リアルタイム情報を用いる便益

(1) 解析に用いた道路ネットワーク

図1に解析に用いた道路ネットワークを示す。この道路ネットワーク上に物流事業社が1社あり、1つのデポを有している。今、2トントラックを1台使用していると仮定する。図1に示すように、7つの顧客があり、需要はそれぞれ500kgであるとする。

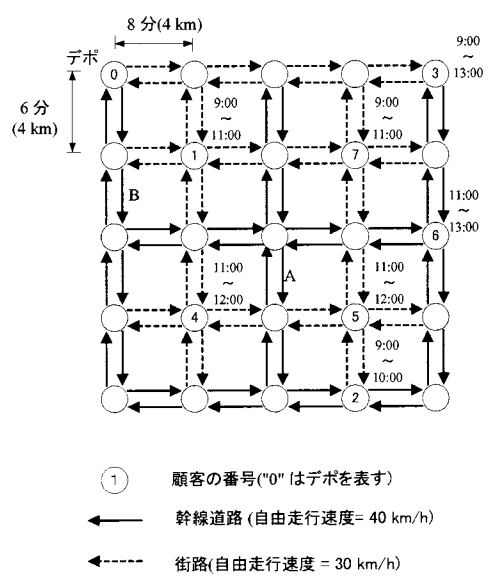


図1 解析に用いた道路ネットワーク

各顧客の指定時間帯を図1に示す。このネットワーク上に計5,000台の乗用車を発生させた。各時間毎の発生パターンは、広島市における調査の結果を用いた。

最初は、交通事故のない状態でシミュレーションを行い、次に、図1のリンクAおよびBの部分に交通事故が発生させ、1時間に渡って、このリンク交通容量を半減させた。事故の発生時刻を午前7時、8時、9時の3種類に変化させた。

(2) 結果

表1にVRPTW-FモデルとVRPTW-Dモデルを用いた場合の総費用の比較を示す。リンクAあるいはBで交通事故が発生する両方の場合において、VRPTW-Dモデルの総費用がVRPTW-Fモデルよりもかなり小さくなっている。従って、リアルタイムの所要時間情報を活用することによって、かなりのコスト削減が実現できることがわかる。特に交通のピークと一致する午前8時に事故が発生する場合には、総費用が24.5%も削減されている。リンクAで交通事故が発生した場合の方がリンクBの場合に比べて総費用の削減率が高いのは、リンクAの方が交通が混雑するネットワーク中央に位置しているためであると考えられる。

表1 VRPTW-FとVRPTW-Dの総費用の比較

交通事故発生リンク	A			B		
発生時刻	7:00	8:00	9:00	7:00	8:00	9:00
VRPTW-F(円)	19,504	19,644	14,828	15,570	16,690	14,828
VRPTW-D(円)	15,766	14,828	14,800	14,926	14,884	14,800
完全情報がある場合のVRPTW(円)	15,570	14,828	14,800	14,884	14,884	14,800
変化(円)	-3,738	-4,816	-28	-644	-1,806	-28
変化率(%)	-19.2	-24.5	-0.2	-4.1	-10.8	-0.2

”変化”は、VRPTW-FからVRPTW-Dへの変化を示す。

表2 VRPTW-FとVRPTW-Dの総走行時間の比較

交通事故発生リンク	A			B		
発生時刻	7:00	8:00	9:00	7:00	8:00	9:00
VRPTW-F(分)	249	249	215	228	238	215
VRPTW-D(分)	232	215	213	222	219	213
変化(分)	-17	-34	-2	-6	-19	-2
変化率(%)	-6.8	-13.7	-0.9	-2.6	-8.0	-0.9

また、表1において、VRPTW-Dモデルを用いた場合の総費用は、所要時間の完全情報が得られている場合に等しいか若干高めになっている。したがって、VRPTW-Dモデルは、ほぼ最小の費用を与えているといえる。

また、リンクAで8時に交通事故が発生する場合の、顧客訪問順序をみると、VRPTW-Fモデルの最適解は、デポ→顧客7→顧客2→顧客1→デポ→顧客4→顧客5→顧客6→顧客3となっていた。これに対し、VRPTW-Dモデルの最適解は、デポ→顧客2→顧客7→顧客1→デポ→顧客4→顧客5→顧客6→顧客3となっており、顧客7と顧客2が入れ替わっているだけである。しかしこの変更によって遅刻ペナルティが大幅に減少し、結果として総費用が減少した。

表2に、VRPTW-FモデルとVRPTW-Dモデルを用いた場合の集配トラックの総走行時間の比較を示す。この表によると、VRPTW-Dモデルを用いることによって、総走行時間がかなり減少していることがわかる。このことは、道路ネットワークの渋滞緩和に役立つものと思われる。したがって、リアルタイムの所要時間情報を用いて動的な配車配送計画を立案することは、企業にとってコスト削減のメリットがあるばかり

でなく、社会的に渋滞緩和の便益もあることを示している。

なお、ここでは、乗用車のドライバーは、リアルタイムの交通情報を得ていないと仮定している。乗用車のドライバーにも同じ情報が与えられる場合は、別途検討が必要である。

4. 結論

ここでは、リアルタイムの所要時間情報が得られる場合に、動的配車配送計画を立案するモデル(VRPTW-Dモデル)を構築した。その結果、交通事故などによって、あるリンクの交通容量が急減するような場合には、VRPTW-Dモデルを用いると、VRPTW-Fモデルを用いる場合に比べて総費用がかなり削減されることが明らかになった。また、VRPTW-Dモデルを用いると、総走行時間も短縮され、交通渋滞緩和にも役立つことが分かった。

(参考文献)

- 1) 谷口栄一，根本敏則：シティロジスティクス-----効率的で環境にやさしい都市物流計画論，森北出版，2001