

### 貨物共同輸配送の効果と成立に関する一考察\*

#### Effects and Possibility of Realization of Cooperative Freight Transportation

山田忠史\*\*・谷口栄一\*\*\*・則武通彦\*\*\*\*・伊藤裕\*\*\*\*\*

By Tadashi YAMADA, Eiichi TANIGUCHI, Michihiko NORITAKE and Yutaka ITOH

#### 1. はじめに

交通混雑や環境汚染などの都市交通問題を改善するために、個々の企業の貨物を共同で輸配送することの必要性が指摘されている。この貨物共同輸配送は、物流コストの削減や労働力不足への対応などの企業ニーズに応え得るものである。また、貨物共同輸配送の導入により、物流交通量の削減、環境負荷の低減などの社会的効果も期待できる。しかし、その成立には、共同輸配送事業に要する運営資金や参加企業の数、貨物量の確保や共同化事業を行うための施設整備など様々な問題が存在する。

本研究では、貨物共同輸配送の中でも都市内の貨物共同配送に焦点を当て、共同配送の効果と成立に関して基礎的考察を行う。その際、VRP(Vehicle Routing Problem)モデル<sup>1)</sup>を基礎とした、共同輸配送システムの利用状況が考慮可能な配車配送モデル(共同輸配送シミュレーションモデル)を構築する。物資の輸配送には、複数の主体の行動が関係しているが、本研究では、公共サイド、共同輸配送事業者、企業(物流関連企業)に注目し、これら3主体をモデル化の対象とする。

#### 2. モデルの概要

図-1は、モデルの構造を簡潔に示したものである。初めに、所与の共同輸配送用物流ターミナルの配置と共同輸配送システムの利用料金の下で、各企業が

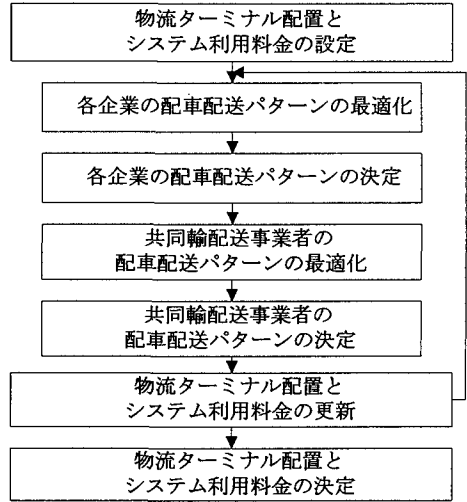


図-1 モデル構造

配車配送パターンを決定する。このとき各企業は、より低廉な費用で輸配送するために、自社輸配送を行うか共同輸配送事業者に委託するかを選択するものとする<sup>2)</sup>。つまり、自社保有の物流車両で顧客に輸配送するか、共同輸配送事業者に委託するために共同輸配送用物流ターミナルまで物資を輸送するかが決定される。

選択の際には、自社輸配送に要する費用と、共同輸配送システムを利用する場合に要する費用が比較されるものとする。自社輸配送に要する費用は、固定費用、運行費用、早着・遅刻費用から構成される。また、共同輸配送システムを利用する場合に要する費用は、固定費用、運行費用、システム利用費用から構成されるものとする。後者の固定費用と運行費用は、自社デポから共同輸配送用物流ターミナルまで輸送する際に生じるものである。

これらのことから、各企業の配車配送計画は、次のように定式化される。

\*キーワード：物資流動，TDM  
 \*\*正会員，博士（工学），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, E-MAIL tyamada@ipcku.kansai-u.ac.jp)  
 \*\*\*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  
 \*\*\*\*正会員，工博，関西大学工学部土木工学科  
 \*\*\*\*\*学生会員，関西大学大学院博士前期課程土木工学専攻  
 (TEL/FAX 06-6368-0964, E-MAIL gj9m781@ipcku.kansai-u.ac.jp)

$$\begin{aligned} \min \quad & TC(\mathbf{X}, \mathbf{T}^d, \mathbf{T}^a, \mathbf{a}) \\ & = \sum_l \{a_l \times SC_l + (1-a_l) \times CC_l\} \quad (1) \end{aligned}$$

ただし,

$$SC_l = FC_l(c_l^f, \mathbf{x}_l) + RC_l(c_l^r, D_{n(i)}, \mathbf{x}_l, t_l^d, t_l^a) + PC_l(c_l^p, t_{n(i)}^s, t_{n(i)}^e, \mathbf{x}_l, t_l^d, t_l^a) \quad (2)$$

$$CC_l = FC_l(c_l^f, \mathbf{x}_l) + RC_l(c_l^r, D_{n(i)}, \mathbf{x}_l, \mathbf{y}, t_l^d, t_l^a) + UC_l(D_{n(i)}, \mathbf{x}_l, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (3)$$

subject to

$$W_l(\mathbf{x}_l) \leq W_l^c \quad (4)$$

$$\sum_l \sum_i n_l(i) = \sum_j n_j \quad (5)$$

$$\sum_l W_l(\mathbf{x}_l) = \sum_j D_j \quad (6)$$

$$t_l^d \leq t_{l,n(i)}^d \quad (7)$$

$$t_{l,n(i)}^a \leq t^a \quad (8)$$

ここに,

$TC$  : 総費用 (円)

$\mathbf{X}$  : 顧客の割当と訪問順序を示す数列

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

$m$  : 使用可能なトラックの台数 ; given

$\mathbf{x}_l$  : トラック  $l$  の顧客の割当と訪問順序を示す数列 ;  $\mathbf{x}_l = \{n_l(i) \mid i=0, N_l\}$

$n_l(i)$  : トラック  $l$  が  $i$  番目に訪問する顧客の番号 ( $n_l(i)=0$  はデポを表す.  $n_l(0) = n_l(N_l) = 0$ )

$N_l$  : トラック  $l$  が訪問する総顧客 (デポ含む) 数

$\mathbf{T}^d$  : 出発時刻を表すベクトル ;

$$\mathbf{T}^d = \{t_l^d \mid l=1, m\}$$

$t_l^d$  : トラック  $l$  の各顧客 (デポ含む) での出発時刻 ;  $t_l^d = \{t_{l,n(i)}^d \mid i=0, N_l\}$

$\mathbf{T}^a$  : 到着時刻を表すベクトル ;

$$\mathbf{T}^a = \{t_l^a \mid l=1, m\}$$

$t_l^a$  : トラック  $l$  の各顧客 (デポ含む) での到着時刻 ;  $t_l^a = \{t_{l,n(i)}^a \mid i=0, N_l\}$

$\mathbf{a}$  : 共同輸配送システムの利用状況 ;

$$\mathbf{a} = \{a_l \mid l=1, m\}$$

$a_l$  : トラック  $l$  が自社配送する場合は 1, 共同輸配送システムを利用する場合は 0 の 0-1 変数

$SC$  : 自社輸配送に要する費用 (円)

$CC$  : 共同輸配送システム利用に要する費用 (円)

$FC$  : 固定費用 (円)

$RC$  : 運行費用 (円)

$PC$  : 早着・遅刻費用 (円)

$UC$  : 共同輸配送システムの利用費用 (円)

$c_l^f$  : 単位あたり固定費用 (円/台) ; given

$c_l^r$  : 単位あたり運行費用 (円/台・分) ; given

$c_l^p$  : 単位ペナルティー費用 (円/台・分) ; given

$t_{n(i)}^s$  : 顧客  $n(i)$  の到着指定時間帯の最早時刻 ; given

$t_{n(i)}^e$  : 顧客  $n(i)$  の到着指定時間帯の最遅時刻 ; given

$D_{n(i)}$  : 顧客  $n(i)$  の貨物量 (kg)

$D_j$  : 顧客  $j$  の貨物量 (kg) ; given

$\mathbf{y}$  : 物流ターミナルの配置パターン ;

$$\mathbf{y} = \{y_k \mid k=1, J\} ; \text{given}$$

$y_k$  : 物流ターミナルが候補地  $k$  に整備されるとき 1, そうでなければ 0 の 0-1 変数 ; given

$\mathbf{p}$  : 共同輸配送システム利用料金 (円/kg)

$$\mathbf{p} = \{p_k \mid k=1, J\} ; \text{given}$$

$p_k$  : 候補地  $k$  のシステム利用料金 (円/kg) ; given

$J$  : 物流ターミナルの候補地数 ; given

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

$W_l^c$  : トラック  $l$  の積載容量 (kg) ; given

$n_j$  : 顧客  $j$  の顧客番号 ; given

$t^d$  : 輸配送活動の開始可能時刻 ; given

$t^a$  : 輸配送活動の終了限界時刻 ; given

式(4)は, トラックの積載量に関する制約式であり, 式(5), (6)は, 各顧客の貨物需要が 1 台のトラックの訪問で満足されることに関する制約式である. また, 式(7), (8)は, トラックの稼働時間に関する制約式である. この最適化問題を解くことによって, 各企業は, 顧客への輸配送を自社輸配送と共同輸配送利用とに振り分けるものとする.

各企業の配車配送計画が決定すると, 共同輸配送システムの利用状況を基にして, 共同輸配送事業者の配車配送パターンが決定される. 共同輸配送事業者は, 総走行時間の抑制を目的とし, 物流ターミナルの運営と共同輸配送に関する配車配送行動を計

画・管理するものとする。

共同輸配送事業者の配車配送計画は次のように定式化される。なお、以下の定式化において、添字 *cop* は、共同輸配送システムに関連することを意味する。

$$\begin{aligned} \min \quad & TT^{cop}(\mathbf{X}^{cop}, T^{d,cop}, T^{a,cop}) \\ & = \sum_{l'} RT_l^{cop}(\mathbf{x}_{l'}, \mathbf{y}, t_{l'}^{d,cop}, t_{l'}^{a,cop}) \end{aligned} \quad (9)$$

*TT* : 総走行時間

*RT<sub>l</sub>* : トラック *l* の走行時間 (分)

*l'* : 共同輸配送用トラックの番号 ;given

制約条件は、式(4)~(8)と同様であるが、共同輸配送事業の採算性を考慮するために次の制約式が付加される。なお、以下では、各企業を区別するために、添字 *u* を用いる。

$$\sum_{l'} (FC_l^{cop} + RC_l^{cop} + PC_l^{cop}) \leq \sum_u \sum_l UC_l^u \quad (10)$$

各企業と共同輸配送事業者の配車配送モデルは、いずれも VRP に基礎を置いたモデルである。

各企業と共同輸配送事業者の配車配送行動を基にして、公共サイドは、共同輸配送に必要な物流ターミナルの最適配置を決定するものとする。このとき、物流ターミナルの配置だけでなく、システム利用料金も決定される。公共サイドの目的関数は、輸配送に要する総走行時間の最小化とする。システム利用料金には、共同輸配送システムに集まった貨物の量、共同輸配送に必要なトラックの台数・サイズ、共同輸配送に要する走行時間などが関係する。

公共サイドの目的関数は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \min \quad & TT(\mathbf{y}, \mathbf{p}) = \sum_u \sum_l RT_l^u(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{a}, t_l^d, t_l^a) \\ & + \sum_{l'} RT_{l'}^{cop}(\mathbf{x}_{l'}, \mathbf{y}, t_{l'}^{d,cop}, t_{l'}^{a,cop}) \end{aligned} \quad (11)$$

各主体に関するこれらの数理計画問題は、いずれも NP-困難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を用いる。

### 3. 共同配送の効果と成立

上述のモデルを用いて、共同輸配送の中でも都市

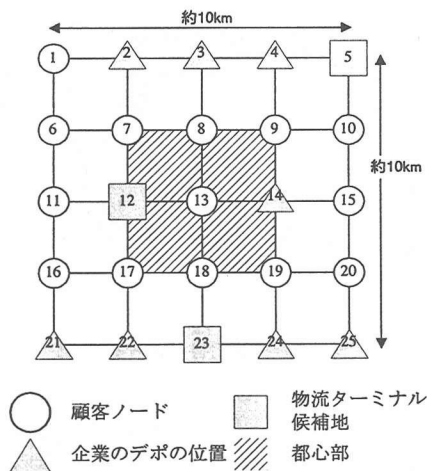


図-2 対象道路網

表-1 顧客データの一例

企業番号	デポ位置 ノード番号	顧客位置 ノード番号	貨物量 (kg)	到着時刻 制約
1	2	6	100	なし
		8	500	なし
		10	100	時刻指定
		13	4000	なし
		16	100	時間帯指定
		18	500	時間帯指定
		19	500	時刻指定
		20	100	時間帯指定

内共同配送に注目して、その効果と成立に関して基礎的考察を行った。対象道路網は、図-2のような仮想道路網である。この仮想道路網上の各リンクの走行時間は、時間帯により変化するものとし、都心部のリンクでは、交通混雑を考慮して比較的大きな走行時間が設定されている。

共同配送用の物流ターミナルの候補地は3箇所とし、企業は8社とする。各企業は、それぞれ自社保有のデポを有しており、自社デポは、図-2に示された各ノード上に存在する。表-1には、計算に用いられた顧客データの一例が示されている。都心部に近い顧客ほど取扱貨物量が大きくなるように、貨物需要が設定されている。到着時刻制約は、顧客によって相違するものとし、時刻指定・時間帯指定・指定なしの3つに分類される。時刻指定の場合、到着指定時刻の許容幅が2時間に設定されている。また、

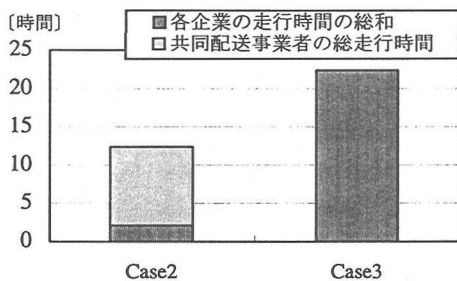


図-3 総走行時間の比較

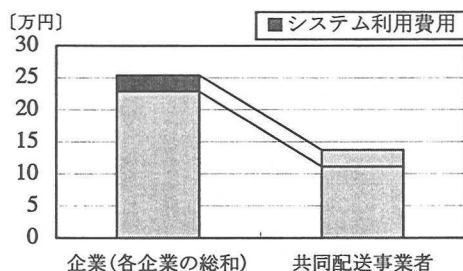


図-4 各主体の配送費用 (Case4)

時間帯指定においては、到着指定時間帯が午前、もしくは、午後のいずれかに設定されている。

このような問題設定においてモデルを適用した結果(Case1)、共同配送事業の採算性が確保されるようなシステム利用料金では、いずれの企業も共同配送システムを利用しないこととなった。つまり、いずれの企業も自社配送のみを行うのである。その原因は、高価なシステム利用料金下では、自社配送の方が配送費用を抑制できることにある。このような配送状況は、共同配送システムがない場合と結果的に同じであるので、走行時間の抑制効果も生じない。

次に、共同配送事業者の採算性を考慮せずに計算を行った(Case2)。すなわち、この計算ケースは、式(10)の制約条件を無視することに相当する。このとき、物流ターミナルが3箇所の候補地すべてに整備され、ターミナル利用料金を無料とするのが、最適となり、各企業は、すべての顧客への配送を共同配送事業者に委託することになった。

Case2と共同配送システムがない場合(各企業が自社配送のみ行う場合(Case3))とを比較すると、Case2では、対象道路網全体で総走行時間が、約45%

削減されている(図-3)。システム利用料金が無料という設定は非現実的であるものの、共同配送システムが成立すれば、その効果が大きいことを、この結果は示唆している。

次に、物流ターミナルの利用料金を段階的に低下させて、共同配送システムの導入効果(Case3と比較した総走行時間抑制効果)が、わずかながら(約10%)生じるようなシステム利用状況に注目した(Case4)。このとき、物流ターミナルはノード番号5の候補地に設置されることになった。図-4は、このときの各企業と共同配送事業者の配送費用を比較したものである。共同配送事業者の配送費用のうち、約13%がシステム利用料金で賄われている。しかし、配送費用に占めるシステム利用費用の割合は小さく、システム利用料金だけでは、共同配送事業者の採算性は確保されない。したがって、この場合、共同配送が成立するためには、何らかの金銭的支援が必要ということになる。

#### 4. おわりに

本研究では、共同輸配送シミュレーションモデルを構築し、都市内共同配送に焦点を当て、その効果と成立に関する基礎的考察を行った。その結果、共同配送システムの導入により、道路網全体の総走行時間に削減効果が見られるが、共同配送事業の採算性の確保が困難であることが明らかになった。

しかし、このような結果は、限られた計算ケースによって得られたものに過ぎない。今後は、道路網形態、顧客数、貨物需要量、到着時刻指定、保有トラック台数などを変動させて、共同配送の効果と成立に関して詳細に分析する必要がある。また、都市内集配送だけでなく、都市間輸送についても検討すべきである。さらには、各企業の配車配送行動が必ずしも最適化されていないことに留意して、モデル化を検討する必要もある。

#### 【参考文献】

- 1) 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。
- 2) R. van Duin and E. Jagtman：Best of both? Combining modelling insights of Japanese and Dutch practices，City Logistics I，pp.117-131，1999。