

貨物共同輸配送のモデル化と効果および成立に関する一考察*

Modelling Co-operative Freight Transport Systems for Investigating Their Effects and Profitability

山田忠史**・谷口栄一***・伊藤 裕****

By Tadashi YAMADA, Eiichi TANIGUCHI, 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、個々の荷主・運送業者の貨物を共同で輸配送することの必要性が、以前から指摘されている^{1),2)}。貨物共同輸配送（以下、共同輸配送とする。）は、企業の流通システムの合理化策として注目されており³⁾、また、都市交通・環境問題を解消するための物流 TDM の一方策としても期待されている⁴⁾。これまでも国内外において、いくつかの共同輸配送の実施例が見られる。例えば、福岡天神地区^{5),6)}やドイツのカッセル市都心部^{7),8)}の地区内共同集配送である。地区内共同集配送は、特定の地区や地域を対象にして、複数の荷主や運送業者が共同で集配送する輸配送形態である。地区内共同集配送以外にも、特定の荷主間、運送業者間、建物内（高層ビルなど）における共同輸配送が実施されてきた。

これらの導入事例や効果試算例^{9)~11)}の多くから、車両運行台数削減、積載率向上、物流コスト削減、環境負荷抑制などの効果が得られることが明らかになっている。しかし、それと同時に、共同輸配送の成立には、共同輸配送事業に要する費用、参加企業の数、事業主体、貨物量の確保、共同輸配送を行うための施設整備など、様々な問題や障害^{1),12)~15)}が存在することも指摘されている。さらには、厳しい競争下において荷主・運送業者が独自に物流合理化を図っている中で、公共が果たすべき役割についても検討する必要がある。

このような状況を踏まえ、本研究では、貨物共同輸配送の中でも都市内の共同配送¹¹⁾に焦点を当て、その成立過程¹²⁾を考慮した上で効果分析を行う。また、企業の物流合理化策として配車配送計画の高度化に注目し、その導入効果を共同配送システムと比較する。これらの分析に際して、本研究では、共同輸配送システムの利用状況が考慮可能な配車配送計画モデル（共同輸配送シミュレーションモデル）を構築する。このモデルは、既存の時間指定付き配車配送計画モデル¹⁶⁾（Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model: 以下、VRPTW

モデルと称する。）と比較して、共同輸配送システムの利用と共同輸配送用物流ターミナルの配置に関する意志決定が含まれている点に特徴がある。なお、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、荷主・運送業者などの物流関連企業（以下では、これを企業と略す。）に注目し、これら3主体をモデル化の対象とする。

2. モデルの構造と定式化

図-1は、共同輸配送シミュレーションモデルの構造を簡潔に示したものである。各企業は、提示された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（図-1の①、④）、配車配送パターンを決定する（図-1の②）。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¹⁷⁾。つまり、自社保有の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の利用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（車両費（税金・保険含む）・人件費）、運行費用（運行三費・人件費）、早着・遅刻費用から構成される。また、共同輸配送システムの利用に要する費用は、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。

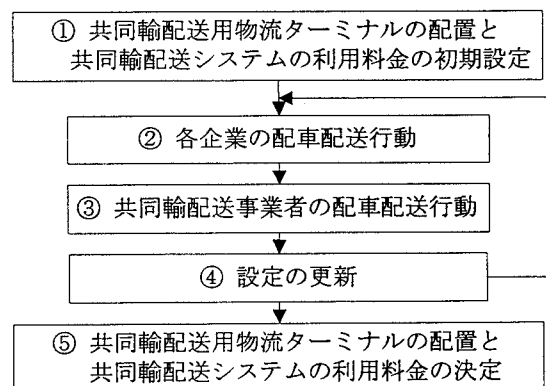


図-1 モデル構造

*Keywords : 物資流動, TDM

** 正会員, 博士 (工学), 広島大学大学院工学研究科,

(東広島市鏡山 1-4-1, TEL 0824-24-7812 FAX 0824-22-7194)

*** 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

(京都市左京区吉田本町, TEL 075-753-5125, FAX 075-753-5907)

**** 学生員, 関西大学大学院博士前期課程土木工学専攻

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。

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

ただし、

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

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

subject to

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

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

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

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

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

ここに、

TC : 総費用 (円)

l : 輸配送車両の識別番号 ; given

m : 使用可能なトラックの台数 ; given

$n_l(i)$: 車両 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 : 車両 l が訪問する総顧客 (デポ含む) 数

$\mathbf{X}$: 顧客の割当と訪問順序を示す数列

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

$\mathbf{x}_l$: 車両 l の顧客の割当と訪問順序を示す数列 ;

$$\mathbf{x}_l = \{n_l(i) | i = 0, N_l\}$$

$\mathbf{T}^d$: 出発時刻を表すベクトル ; $\mathbf{T}^d = \{t_l^d | l = 1, m\}$

t_l^d : 車両 l の各顧客 (デポ含む) での出発時刻 ;

$$t_l^d = \{t_{l,n(i)}^d | i = 0, N_l\}$$

$\mathbf{T}^a$: 到着時刻を表すベクトル ; $\mathbf{T}^a = \{t_l^a | l = 1, m\}$

t_l^a : 車両 l の各顧客 (デポ含む) への到着時刻 ;

$$t_l^a = \{t_{l,n(i)}^a | i = 0, N_l\}$$

$\mathbf{a}$: 共同輸配送システムの利用を表すベクトル ;

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

a_l : 車両 l が自社輸配送する場合は 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_l : 各車両が自社輸配送する際に要する費用 (円)

CC_l : 各車両が共同輸配送システムを利用する際に要する費用 (円)

FC_l : 車両 l の固定費用 (円)

RC_l : 車両 l の運行費用 (円)

PC_l : 車両 l の早着・遅刻費用 (円)

UC_l : 車両 l の共同輸配送システム利用費用 (円)

c_l^f : 車両 l の単位固定費用 (円/台・日) ; given

c_l^t : 車両 l の単位運行費用 (円/台・分) ; given

c_l^p : 車両 l の単位ペナルティ費用 (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 (t) ; given

D_j : 顧客 j の貨物量 (t) ; given

$\mathbf{y}$: 物流ターミナルの配置パターン

$$\mathbf{y} = \{y_k | k = 1, J\}$$

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

$\mathbf{p}$: 共同輸配送システム利用料金 (円/t)

$$\mathbf{p} = \{p_k | k = 1, J\}$$

p_k : 候補地 k のシステム利用料金 (円/t)

J : 物流ターミナルの候補地数 ; given

$W_l(\mathbf{x}_l)$: 車両 l の積載量 (t)

W_l^c : 車両 l の積載容量 (t) ; 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、輸配送車両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 台の車両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、輸配送車両の稼働時間に関する制約式である。式(1)~(8)で示されたモデルは、リンク所要時間に単一の予測値を用いる VRPTW モデル¹⁰⁾ (Forecasted Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model : 以下では、FVRPTW モデルと称する。)に、共同輸配送システムの利用が組み込まれたものである。

現実には、各企業は VRPTW モデルのような高度な配車配送計画システム (Advanced Vehicle Routing and Scheduling System : 以下では、AVRSS と称する。)を用いて配車配送を行っているわけではない¹⁸⁾。したがって、共同輸配送システムの導入効果を検討する際には、AVRSS 導入前の配車配送行動、すなわち、現状の標準的な配車配送行動と比較すべきであろう。しかし、現段階では、現実の配車配送行動については、行動理論などが明確にされていない。そこで、本研究では、実際の都市内集配送車両の積載率が 30%前後であること^{14), 19)}に着目し、式(9)の積載率制約が付与された FVRPTW (式(1)~(8))

を解いた結果を、現状の配車配送行動とする。

$$W_l(x_l)/W_l^c \leq W^{MAX} \quad (9)$$

ここに、

W^{MAX} : 積載率の上限値 (本研究では、0.32 とする.)

各企業の配車配送パターンが決定すると、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 (図-1の③)。共同輸配送事業者は、共同輸配送に要する総走行時間の抑制を図り^[3]、共同輸配送用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。

$$\begin{aligned} \min \quad & TT^{cop}(X^{cop}, T^{d,cop}, T^{a,cop}) \\ & = \sum_l RT_l^{cop}(x_l, y, t_l^{d,cop}, t_l^{a,cop}) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、

TT : 総走行時間 (分)

RT_l : 車両 l の走行時間 (分)

l' : 共同輸配送車両の識別番号 ; given

制約条件は、式(4)～(8)と同様であるが、共同輸配送事業者の採算性を考慮する場合には、次の制約式が付加される。

$$\sum_l (FC_l^{cop} + RC_l^{cop} + PC_l^{cop}) + LC(y, a) \leq \sum_u \sum_l UC_l^u \quad (11)$$

ここに、

LC : 物流ターミナル費用 (円)

u : 各企業の識別番号 ; given

物流ターミナル費用は、建設費・運営費・管理費から構成され、候補地の地価や取扱貨物量に影響される。この共同輸配送事業者の配車配送計画モデルも、FVRPTW に基礎を置いたモデルである。共同輸配送システムの導入により、積載率が向上することが予想されるので、共同輸配送事業者の配車配送計画モデルにおいては、式(9)の積載率制約は考慮されない。

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。このとき、共同輸配送システムの利用料金も決定されるものとする^[4] (図-1の④、⑤)。

公共サイドの目的関数は、各企業と共同輸配送事業者の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輸配送車両の台数・サイズ、共同輸配送に要する走行時間などに依存する。

公共サイドの目的関数は、次のように表される。

$$\min \quad TT(y, p) = \sum_u \sum_l RT_l^u(x_l, y, p, a, t_l^d, t_l^a)$$

$$+ \sum_l RT_l^{cop}(x_l, y, t_l^{d,cop}, t_l^{a,cop}) \quad (12)$$

このモデルの構造は、既存の物流ターミナル最適配置モデル^[20, 21]に類似する。

上述のいずれの数値計画問題も 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容易ではない。そのため、本研究では、近似解法として、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms : 以下、GA と略す)を用いる。VRPTW モデルや物流ターミナルの最適配置モデルへの GA の適用については、既にいくつかの事例^[20~22]が見られる。本研究で GA を適用した理由は、計算時間の節約と、輸配送車両の決定変数 (顧客割当、訪問順序、出発時刻) が同一遺伝子内で表現できることにある。

GA の遺伝的オペレータとパラメータについては、各企業と共同輸配送事業者の配車配送計画モデルの場合、既存の FVRPTW モデル^[10]に習い、個体数 400、世代数 150~300、ルーレット選択とエリート保存選択 (エリート個体数 30) による再生、順序交叉 (交叉率 0.7)、削除・挿入法による突然変異 (突然変異率 0.01) とした。世代数は、適用する問題のサイズ、すなわち、訪問する顧客数に応じて増減させる。また、物流ターミナルの配置とシステム利用料金の決定モデルについても、既存の物流ターミナル最適配置モデル^[20, 21]の遺伝的オペレータとパラメータを利用した。すなわち、個体数 50、世代数 30、ルーレット選択とエリート保存選択 (エリート個体数 10) による再生、一様交叉 (交叉率 1.0)、対立遺伝子への置換による突然変異 (突然変異率 0.05) である。本研究で構築したモデルでは、システム利用料金を考慮しているが、システム利用料金を 2 進文字列で表現することにより、既存モデル^[20, 21]と同様の遺伝子列が適用できる。

3. 問題設定

上述のモデルを用いて、都市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。対象地域は、図-2のような格子状の道路網を持つ仮想地域である。対象地域の大きさは、表-1に示すように、10km 四方と 20km 四方の 2 通りとする。前者のサイズは都市内を、後者のサイズは都市圏を想定している。道路網上の各リンクの走行時間は、時間帯 (朝夕の道路混雑時、昼間のオフピーク時、夜間・早朝) により変化するものとし、各時間帯内では一定値をとるものとする。また、都心部 (図-2の斜線部) のリンクでは、交通混雑を考慮して、各時間帯ごとに比較的大きな走行時間を設定した。

共同配送用の物流ターミナルの候補地は 3 箇所とする。図-2に示されるように、物流ターミナル候補地は、郊外部に 2 ヶ所、都心部に 1 ヶ所である。都心部の候補地は、地価が高価となるように設定した。ノード番号 23 の候補地は、郊外部の企業デポ集積地区に位置している。なお、以降の分析においては、ノード番号 5 の候補地を候補地

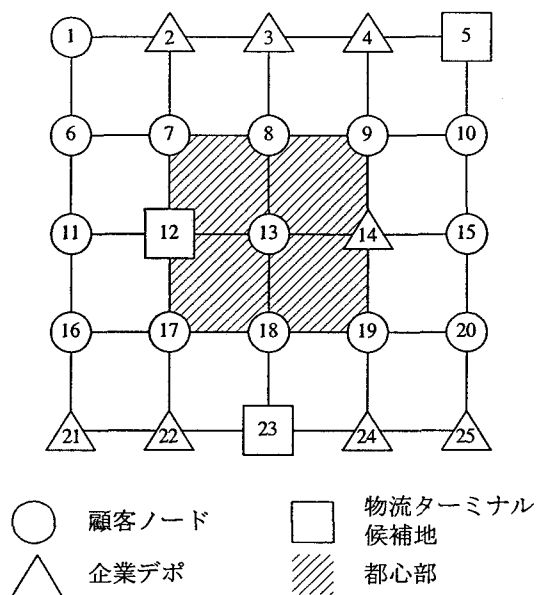


図-2 対象地域

1, ノード番号 12 の候補地を候補地 2, ノード番号 23 の候補地を候補地 3 と呼ぶことにする。

対象地域内の企業は 8 社であり、各企業は、それぞれ自社デポを保有している（図-2）。顧客数の相違による影響を調べるために、顧客数を 5, 11, 20 の 3 通り設定した。したがって、表-1 に示すように、対象地域の大きさと顧客数によって、のべ 6 通りの問題が設定される。

表-2 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。本研究では、顧客データを当該企業の一日の配送分とみなしている。すなわち、本研究の考察対象期間は一日である。顧客の分布は都心部中心型であり、都心部に近い顧客ほど取扱貨物量が大きくなるように、貨物需要を設定した。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を 2 時間に設定した。また、時間帯指定の場合、指定時間帯が午前か午後のいずれかに設定される。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¹⁹⁾に基づいて決定した。顧客分布については、企業によって多少の相違を設けているものの、分布形態は概ね表-2 に類似する。なお、各顧客の荷捌き時間は、取扱貨物量に比例するものとし、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関係式²³⁾を用いて計算されている。

各企業は、配送に 2t トラックを使用するものとし、共同配送事業者は、2t トラックと 4t トラックが使用できるものとする。ある大手の運送業者へのヒアリング調査結果などを基にして、単位固定費用については、2t トラックが 10418 (円/台・日)、4t トラックが 11523 (円/台・日)、単位運行費用については、2t トラックが 14.0 (円/台・分)、4t トラックが 17.5 (円/台・分) と設定した。各トラックの単位ペナルティ費用は、早着と遅刻で区別

表-1 問題設定

設定	地域サイズ	顧客数
1	10km×10km	5
2		11
3		20
4	20km×20km	5
5		11
6		20

表-2 顧客データの一例（設定 5）

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 (t)	到着時刻 制約
1	2	6	0.1	時間帯指定
		7	0.5	なし
		8	0.5	なし
		11	0.1	時刻指定
		13	1	時刻指定
		13	1	時刻指定
		13	1	時刻指定
		13	1	時刻指定
		16	0.1	なし
		17	0.5	時間帯指定
		18	0.5	時刻指定

することとし、早着ペナルティは上述の単位運行費用に等しいと仮定した。また、遅刻ペナルティは、87.7 (円/台・分) と仮定した⁵⁾。

4. モデルの適用

共同配送の効果・成立について分析するに際して、本研究では、複数の物流形態を比較する。共同配送システムの有無や配車配送計画のレベルによって、以下の 4 通りの物流形態を想定する。

- ・ Case A (現状) …各企業は、自社の顧客の貨物を自社配送する。共同配送システムも AVRSS も導入されない。このとき、各企業の配車配送計画は、式(1)～(8)に式(9)が付与されたモデルで表される。
- ・ Case B (共同配送システム導入後) …Case A に共同配送システムが導入された状態。各企業は、自社の顧客の貨物について、自社配送を行うか、共同配送事業者へ委託するかを選択する。なお、共同配送事業者の採算性を考慮した場合を Case B とし、考慮しない場合を Case B' として区別する。採算性は、式(11)の制約条件の付与によって考慮される。
- ・ Case C (AVRSS 導入後) …自社配送を行う際に、各企業は AVRSS を導入する。ただし、共同配送システムは導入されない。このとき、各企業の配車配送計画は、式(1)～(8)で表される。
- ・ Case D (共同配送システム・AVRSS 導入後) …Case C に共同配送システムが導入された状態。なお、共同配送事業者の採算性を考慮しない場合を Case D' とする。Case A の物流形態は、他の物流形態の効果を調べる際に、比較対象として重要な役割を果たす。Case A におけ

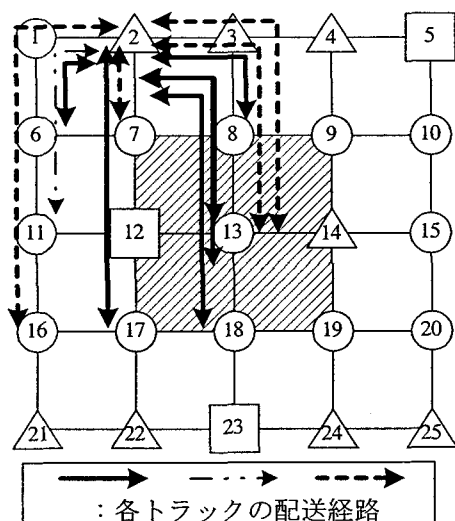


図-3(a) 配送経路 (Case A, 企業 1, 設定 2)

る各企業の配車配送行動を確認するために、一例として、企業 1 の設定 2 における配送行動を図-3(a)に示す。このとき、配送トラックの積載率は 31%であった。積載率の数値と、図-3(a)に示されたデポ帰還回数の多さを併せて考えると、式(1)~(9)で表された配車配送計画モデルは、現状の物流形態の多頻度小口の側面について、概ね表すことができたと見えよう。

一方、AVRSS 導入後の物流形態 (Case C) における、配送行動を示した図が、図-3(b)である。図-3(b)には、図-3(a)と同様に、企業 1 の設定 2 における配送行動が示されている。Case A (図-3(a)) と比較して、Case C では、配送トラックの稼働台数とデポ帰還回数が大幅に削減されており、1 台のトラックで顧客を巡回訪問しながら効率よく配送することが窺える。このとき、配送トラックの積載率は 52%であり、Case A に比べて、総配送費用が 39%、総走行時間が約 27%、それぞれ削減されている。この結果は、AVRSS が、企業だけでなく、社会的にも効果をもたらすことを示している。

(1) 共同配送の成立

表-1に示された各問題設定について、Case B を対象にモデルを適用した。その結果、設定 5 と 6 の時のみ共同配送システムが成立した。つまり、他の問題設定では、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下では、いずれの企業も共同配送システムを利用しなかった。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。

表-3には、設定 5 と 6 の時の、共同配送の効果と採算性が示されている。表中の太線で囲まれた結果が最適解を表している。表中の最適配置とは、共同配送用物流ターミナルの最適な配置パターンを表しており、左から順に候補地 1, 2, 3 を意味し、整備されない場合が 0、整備される場合が 1 である。利用料金とは、共同配送システムの利用料金を表しており、システム利用率とは、企

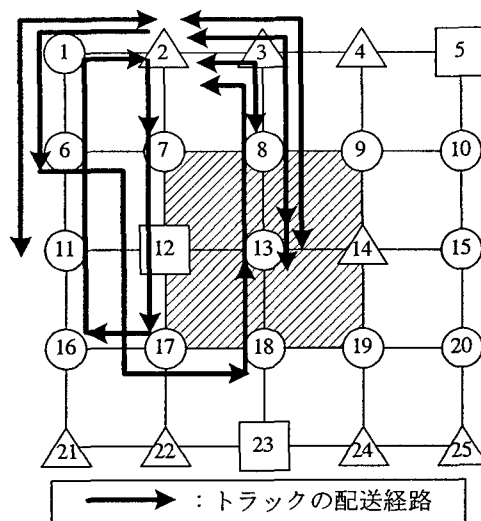


図-3(b) 配送経路 (Case C, 企業 1, 設定 2)

表-3 共同配送の効果と採算性(Case B)

設定	最適配置	利用料金 (円/t)	採算性	総走行時間削減率*	システム利用率
5	0,1,0	7000	101.8%	15.4%	33.8%
	0,0,1	7500	114.1%	11.2%	24.2%
6	0,1,0	7000	104.2%	14.4%	18.1%
	0,0,1	7000	108.7%	15.1%	17.3%

*Case A との比較による。

業の総配送貨物量に対する共同配送システム利用貨物量の比率を示したものである。

表-3より、設定 5 では物流ターミナルが候補地 2 のみに設置され、設定 6 では候補地 3 のみに設置されるのが最適解となった。表-3には、比較のために、最適解ではないが、共同配送事業者の採算性が確保されている他の解も示されている。設定 6 の場合、物流ターミナルを候補地 3 に整備するのと候補地 2 に整備するのとでは、総走行時間の削減効果にそれほど差が生じない。したがって、共同配送事業者の採算性を考慮した上で、総走行時間を削減するためには、共同配送用物流ターミナルを都心部周辺に整備することが望ましいと言えよう。都心部周辺の物流ターミナルは、都心部へのアクセスに優れるため、共同配送事業者が委託貨物を効率よく配送できるものと考えられる。

共同配送事業者の採算性が確保されなかった設定 1~4 について、Case A と比較して総走行時間が削減される範囲で、採算性が最大になる解を調べた。その結果、採算性は 70~90%、総走行時間削減率は 11~14%であり、対象地域が大きくなるほど、また、顧客数が多いほど、採算性と総走行時間削減に優れることがわかった。

これらの結果から、共同配送システムの成立には、対象地域の大きさや対象企業の顧客数が関係するものと判断される。対象地域のサイズが関係する理由は、配送圏域が大きくなれば、自社トラックの走行時間が増加し、運行費用が増大することにある。このことは、対象地域が小さくても、道路網形状や顧客分布によっては、走行

時間が増大するので、共同配送システムが成立する可能性があることを意味する。

Case B と同じく、共同配送システムが導入された状態である Case D について、各問題設定にモデルを適用した。その結果、共同配送事業者の採算性は確保されず、最適解も得られなかった。この結果は、前述の AVRSS の導入効果を考えると、妥当であろう。なぜなら、各企業は、AVRSS の導入によって、費用が削減されるので、共同配送システムに参加する動機に乏しくなるからである。

(2) 共同配送の効果

次に、共同配送システムの導入効果を確認するために、Case A～C の各 Case について、総走行時間（図-4）と各企業の総費用の平均値（図-5）を比較した。なお、これらの図が示す傾向は、設定 5 以外の問題設定においても同様であった。

共同配送事業者の採算性が考慮されずに共同配送システムが導入された Case B' では、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った。このとき、システム利用率は 100%，すなわち、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。また、Case B の結果から、共同配送の導入効果が窺えるが、その効果は Case C に比べて小さく、逆に、AVRSS の導入効果の大きさが明確になった。こうした傾向は、各企業の総費用において、より顕著である。ただし、Case B' では、総走行時間と平均総費用のいずれにおいても、Case C よりもさらに大きな削減効果が認められる。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。すなわち、共同配送事業者に金銭的支援が適用されれば、総走行時間の大幅な削減による社会的効果と多大な費用抑制による企業の経営面での効果を、同時に得られる可能性がある。

前述のように、Case D では、共同配送事業者の採算性が確保されるケースは見られなかった。そこで、共同配送事業者の採算性を考慮しない Case D' について、総走行時間と各企業の平均総費用を算出した。その結果、Case D' でも Case B' と同じく、ターミナル利用料金が無料で、物流ターミナルが 3 箇所の候補地すべてに整備するのが最適となった。このような物流形態は、Case B' に同じであるので、算出結果も Case B' と同じになる。したがって、Case D' においても、総走行時間と費用が、いずれも大幅に抑制された。

Case B' と Case D' の結果は、共同配送事業者に何らかの金銭的支援が適用されるという条件付きではあるが、共同配送システムの導入効果の優位性が示唆されたものと考えられる。

次に、共同配送と配送トラックの都心部流入規制が同時に実施された状態を想定する。すなわち、

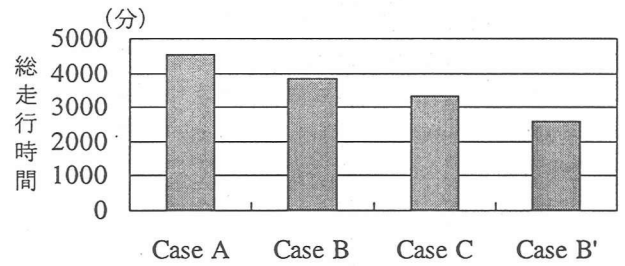


図-4 総走行時間の比較（設定 5）

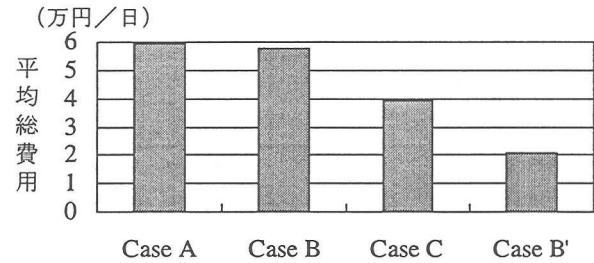


図-5 一社あたりの総費用の比較（設定 5）

表-4 都心部流入規制の効果（Case E，設定 5）

最適配置	利用料金 (円/t)	総走行時間 削減率*	システム 利用率	平均費用 増加率*
1,0,1	8000	28.2%	90.0%	23.2%

*Case A との比較による。

・ Case E（都心部流入規制・共同配送システム導入後）
…Case B で都心部流入規制が実施された場合。

このとき、各企業は、都心部の顧客の貨物を配送するために、共同配送事業者に貨物を委託せざるを得ない。したがって、共同配送システムは必然的に成立することになる。図-2の斜線部が都心部に相当し、そのエリア内では、企業保有の配送トラックは走行できず、共同配送用トラックのみが走行できるものとする。なお、分析するに際して、対象道路網、企業数、顧客数・顧客分布、取扱貨物量、到着時刻指定、共同配送用物流ターミナルの候補地などの各条件については、これまでと同様であるとする。

表-4は、設定 5 を対象として Case E の計算結果を示したものである。計算上、Case E では、システム利用料金をいくら高額にしても、都心部流入規制のために、共同配送システムが成立してしまう。したがって、Case E では、共同配送システムの利用料金を段階的に低下させ、道路網の総走行時間が削減され、かつ、共同配送事業者の採算性がわずかでも確保できる状態を解とした。

表-4より、共同配送用物流ターミナルは、候補地 1 と候補地 3 に設置される。都心部周辺の候補地 2 が選択されないのは、都心部流入規制の実施により、企業デボからのアクセスが悪化するためである。Case B とは異なり、複数の物流ターミナルが選択されるのは、流入規制の実施によりシステム利用率が高まるので、複数の物流ターミナルに貨物が分散される方が、総走行時間削減に優れ

るためである。しかし、規制による共同配送への強制参加は、企業にとっては、効率的な配車配送計画を策定する機会を失うことにもなる。したがって、総走行時間が大幅に抑制される一方で、各企業の費用は増加している。都市内流入規制を実施した場合、対象地域内の総走行時間は抑制されるが、各企業の費用負担は大きくなるので、企業の経営面を圧迫する可能性があると言えよう。

5. 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して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、総走行時間は抑制されるが、対象地域の大きさや対象企業の顧客数によっては、共同配送事業の採算性の確保が困難であることが示された。共同配送システムの導入によって、大幅な総走行時間の抑制という社会的効果を楽しむためには、何らかの金銭的補助が有効であることも示唆された。ただし、補助金額を決定するには、走行時間抑制効果との関係に留意すべきであろう。

共同配送システムの成立手段として、都心部流入規制の実施も一案であるが、総走行時間が抑制される一方で、企業の費用は増大する。費用増加分が環境費用であるとの認識が得られるかどうか、都心部流入規制の施行に影響するであろう。

しかしながら、本研究で得られた成果は、限られた問題設定によるものである。今後は、対象地域、道路網形状、到着時刻指定などの影響を詳細に検討する必要がある。また、実在する地域にモデルを適用する必要もある。さらには、計算時間の短縮や共同輸配送システムの導入に伴う顧客の需要変化への対応など、モデルの改良点もいくつか残されている。

最後に、データ整理・計算処理などにおいてご協力を得ました、関西大学工学部荒木信人氏、中野美智子氏に感謝いたします。そして、本研究を遂行する上で、故則武通彦先生（関西大学工学部教授）の研究室における良好な研究環境が不可欠であった。これまでに賜った先生のご指導と併せて、何よりも深謝するとともに、ここに記して、先生のご冥福を心からお祈りいたします。

【補注】

[1] 集配送の多頻度・小口化が、物流交通に起因する都市交通問題の一端を担っている。多頻度・小口化の主要因の一つとして、物資到着の時刻指定が挙げられる。集荷と配送を比較すれば、配送の方が、到着時刻の制約に厳しい²⁴⁾。そのため、本研究では、都市内の配送に焦点を当てた。ただし、本研究で構築したモデルは、集荷や都市間・地域間輸送においても適用可能である。

[2] 本研究では、企業の配送費用の抑制や共同配送事業者の

採算性に注目して、成立過程を考察している。共同輸配送システムの導入を実際に検討する際には、費用以外の成立要因にも留意する必要がある。例えば、業種、品目、輸送方面、貨物形態、荷姿など²⁵⁾である。

- [3] 公共主導の輸配送事業の場合には、事業者として第三セクターのような企業体が妥当であろう。その場合、共同輸配送事業の採算性確保と公共サイドの目的達成の双方に配慮すべきであろう。本研究では、共同輸配送事業者の目的関数を、公共サイドと同じく総走行時間最小化とし、採算性の確保を制約条件とすることで対処した。
- [4] システム利用料金は、本来、共同輸配送事業者によって決定されるものであろう。しかし、解法アルゴリズムの簡略化のためには、物流ターミナル配置とシステム利用料金を同一の遺伝子で表現するのが有効であった。そのため、モデルの構造上、システム利用料金の決定を公共サイドの目的関数に組み込むこととした。つまり、本研究において、公共サイドによって明示的に決定されるのは、物流ターミナルの配置である。
- [5] 遅刻ペナルティは、本来、顧客が設定するものであるが、実測データを得ることができなかった。そのため、既存の研究¹⁰⁾に習い、車種に関係なく、4tトラックの単位運行費用の約5倍を仮定した。5倍という数値は、遅刻に対して厳しい対応であると考えられる。遅刻ペナルティの値については、今後、調査を実施して明らかにする必要がある。その際、業種、品目、輸配送目的、指定時間帯の大きさなどに留意すべきであろう。

【参考文献】

- 1) 松本昌二、高橋洋二：土木計画学における物流問題と物流研究の課題，土木計画学研究・講演集，Vol.14(2)，pp.141-147，1991。
- 2) 高田邦道：共同化推進のための公共施設整備，土木計画学研究・講演集，No.15(2)，pp.17-18，1992。
- 3) 苦瀬博仁：付加価値創造のロジスティクス，税務経理協会，1999。
- 4) 高橋洋二：物流交通需要マネジメントの導入に向けて，交通工学，Vol.33 増刊号，pp.32-37，1998。
- 5) 根本敏則：都市内物流の共同化の効果とその促進策 ―福岡天神地区共同集配送事業をケーススタディとして―，第27回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.349-354，1992。
- 6) 家田仁，佐野可寸志，常山修治：マクロ集配輸送計画モデルの構築とその「地区型共同集配送」評価への適用，土木計画学研究・論文集，No.10，pp.247-254，1992。
- 7) Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T. and Duin, R. van.: *City Logistics -Network Modelling and Intelligent Transport Systems-*, Pergamon, 2001。
- 8) Kohler, U.: An innovating concept for City-Logistics, *4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, CD-ROM, 1997。

- 9) 塚口博司, 毛利正光, 松井三思呂: 都心商業地区における物資共同輸送システムの導入に関する一考察, 土木学会論文集, No.401, pp.23-31, 1989.
- 10) 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.
- 11) 高橋洋二, 小林等, 橋本雅隆: 都心商業地区におけるTDM 施策が交通および環境に与える影響評価に関する研究, 交通科学, Vol.30, No.2, pp.12-21, 2000.
- 12) 苦瀬博仁: 都市内物流における共同化の課題, 土木計画学研究・講演集, No.15(2), pp.1-4, 1992.
- 13) 今井昭夫: 大阪機械卸業団地の整備と卸業団地間の共同輸送, 土木計画学研究・講演集, No.16(2), pp.21-24, 1993.
- 14) 高橋洋二, 中村純, 小林等: 端末物流と都市交通, 都市計画, Vol.44, No.5, pp.17-24, 1996.
- 15) 山田忠史, 谷口栄一, 則武通彦, 堀江淳嗣: 貨物共同輸送の促進策に関する一考察, 土木計画学研究・論文集 16, pp.717-724, 1999.
- 16) 例えば, Solomon, M. M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, Vol. 35, pp.254-265, 1987.
- 17) Duin, R. van. and Jagtman, E.: Best of both? Combining modelling insights of Japanese and Dutch practices, *City Logistics I*, pp.117-131, 1999.
- 18) 井上春樹: 実践サプライチェーン革命, 日地出版, 1999.
- 19) 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.
- 20) Taniguchi, E, Noritake, M., Yamada, T. and Izumitani, T.: Optimal size and location planning of public logistics terminals, *Transportation Research E*, Vol.35, No.12, pp.207-222, 1999.
- 21) 山田忠史, 則武通彦, 谷口栄一, 多賀慎: 物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用, 土木学会論文集, No.632, IV-45, pp.41-50, 1999.
- 22) 例えば, Thangiah, S. R., Nygard, K. E. and Juell, P. L.: GIDEON: a genetic algorithm system for vehicle routing with time windows, *7th IEEE International Conference on Artificial Intelligence Applications*, pp.322-328, 1991.
- 23) 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.
- 24) 細川貴志: トラックの配車・配送システムの高度化による道路交通への影響に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 1998.
- 25) 吉本隆一: 民間事業者による物流効率化への取り組み, 道路, 平成 10 年 2 月号, pp.42-46, 1998.

貨物共同輸配送のモデル化と効果および成立に関する一考察

山田忠史・谷口栄一・伊藤 裕

物流交通に起因する都市交通問題への対応策の一つとして, 貨物共同輸配送が注目されている. 本研究では, 公共サイド, 共同輸配送事業者, 物流関連企業の 3 主体を対象として, VRPTW モデルを基礎とした共同輸配送シミュレーションモデルを構築した. このモデルを用いて, 都市内共同配送の効果と成立に関して基礎的考察を行った. その結果, 総走行時間削減において, 共同配送システムは大いに有用であるが, 共同配送事業の採算性の確保は, 対象地域や顧客数に依存することが示された. また, 都心部流入規制と併せて, 共同配送システムを導入した場合, 総走行時間が大幅に抑制される一方で, 企業の費用が増大することも確認された.

Modelling Co-operative Freight Transport Systems for Investigating Their Effects and Profitability

Tadashi YAMADA, Eiichi TANIGUCHI and Yutaka ITOH

Co-operative freight transport systems have the potential for solving many of urban traffic problems. This paper presents a co-operative vehicle routing and scheduling model with optimal location of logistics terminals for investigating the effects and materialisation of co-operative freight transport systems. Applications of the model to an urban goods delivery showed that introducing co-operative freight transport systems could lead to a substantial reduction in delivery cost and total travel time within the whole road network, while the profitability of the co-operative freight organisation depends on the area size and the number of customers.
