

# 運賃と輸配送量を内生化した都市内共同配送モデル：共同配送事業者が存在する場合

答島 宗史<sup>1</sup>・福井 一彬<sup>2</sup>・山田 忠史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kotajima.soushi.47r@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail: fukui.kazuaki.46m@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学准教授 経営管理大学院 (同上)

E-mail: yamada.tadashi.2x@kyoto-u.ac.jp

都市内共同配送は、都市内の貨物交通に起因する諸問題の解決・緩和に有用とされている。本研究では、都市内共同配送を専門で行う物流業者（共同配送事業者）が存在するような共同配送形態に着目し、輸配送量や運賃が内生的に決定される共同配送モデルを提案する。輸配送ネットワーク均衡モデルの枠組みでモデル化を行い、荷主、消費者（消費市場）、物流業者、共同配送事業者を対象に、それらの分権的な意思決定や行動の相互作用を考慮して定式化を行う。輸配送ネットワーク全体の均衡条件を導出するとともに、モデルの定性的特性、解法、および、運賃の導出について、その概略を示す。

**Key Words :** cooperative freight transport systems, cooperative freight organization, freight transport network equilibrium, urban freight delivery

## 1. はじめに

近年、在庫の抑制、消費者ニーズの多様化や、ネット通販をはじめとしたダイレクトマーケティングの隆盛により、多頻度小口配送がいつそう増加する傾向にある。それに伴い、配送車両の増加に伴う道路混雑の悪化、環境負荷や交通事故のリスク増大など、都市内物流問題の悪化が懸念される。物流業者においても、配送効率の悪化や、それによる配送費用上昇の問題が生じている。その有効な対応策の一つが、異なる荷主や物流業者の貨物を共同で配送すること（以下、共同配送と称する）である。

共同配送の必要性は、国内外で以前から継続的に指摘されている<sup>1)5)</sup>。実際に、これまでも、国内外において、都市内共同配送の実施例が見られる<sup>6)</sup>。これらの事例や効果試算例<sup>6)</sup>の多くから、共同配送が、配送車両の台数削減や積載率向上、配送費用削減や環境負荷抑制に効果的であることが示されている。一方で、必要な貨物量の確保、適切な運賃設定、採算性の確保が容易ではないために、様々な形態の共同配送が考案されていたとしても、実際に実現までは至らないことが多い（例えば、文献 6), 7)）。

都市内共同配送に関する既存研究は、事例紹介や数値シミュレーションなど様々であるが<sup>6)</sup>、共同配送システムをモデル化して、その成立要因を考究している研究はほとんどない。既存研究<sup>8)9)</sup>においては、i) 最適な配送を算出する配送計画問題を基にしている場合には、実際の行動とは乖離しており、ii) 配送量と運賃は、相互に影響しながら内生的に決まるものであるが、それらが外生的に与えられているという問題を有する。福井ら<sup>10)</sup>は、上記のような問題を解消するために、規模の異なる物流業者間での都市内共同配送に着目して、自社配送運賃、共同配送運賃、および、輸配送量を内生化したモデルを構築し、都市内共同配送の成立要因に関して基礎的考察を行っている。しかし、共同配送には、行政や地域の主導で設立された共同配送を専門で行う業者（以降、共同配送事業者と称して、物流業者と区別する）が存在する事例<sup>4)6)</sup>も見られる。

そこで、本研究では、福井ら<sup>10)</sup>による共同配送モデルを基にして、都市内の配送を受託する共同配送事業者が存在するモデルへと拡張する。モデル化の対象となる主体として、荷主、消費者（消費市場）、物流業者、共同配送事業者を設定する。物流業者は、荷主から消費市場までの輸配送を請け負うが、都市内での

配送については、その一部もしくは全部を、共同配送事業者に委託料（共同配送運賃）を支払って配送を委託することができるものとする。

## 2. モデルの定式化

図-1のように、荷主、消費者（消費市場）、物流業者、共同配送事業者の行動は、輸配送量、運賃、購入量、販売価格、委託量を介して、相互に影響し合うものとする。その相互作用の結果として、輸配送量、運賃、購入量、販売価格、委託量が内生的に決定される。モデル化において、複数の物流業者は $h(i=1, \dots, H)$ で表現し、共同配送事業者は1社として、 $\bar{H}$ で表して区別する。

流通と輸配送の経路を図示すると、図-2のようになる。物流業者 $h$ は市外に存在する $I$ 個の荷主から市郊外の中継ターミナル（以下、ターミナルと略称する） $T_h$ まで商品を輸送し、さらに、ターミナルから市内の配送デポ（以下、デポと略称する） $D_h$ まで輸送して、デポから市内の $J$ 個の消費市場まで配送する。共同配送事業者 $\bar{H}$ は、都市内の配送のみを受託し、配送デポ $\bar{D}$ を保有しているものとする。輸配送経路については2種類、すなわち、i) 物流業者が自らのターミナルとデポを経由して消費市場まで自社で輸配送する経路、および、ii) 物流業者が共同配送事業者の配送デポまで輸配送して、以降の都市内配送は共同配送事業者が請け負う経路を想定する。荷主 $i$ から消費市場 $j$ までは、経路によらず運賃を同一とする。物流業者が共同配送事業者に対して配送を委託する際には、共同配送運賃を支払うものとする。共同配送事業者に委託する貨物量と共同配送運賃は、モデル内で内生的に決定される。

以下に、対象とする各主体の行動を定式化する。なお、式中の\*は均衡解を表す。

### (1) 荷主の行動

荷主は、消費市場（消費者）に対して商品を販売し、その輸配送を物流業者に委託する。荷主 $i$ の行動は、利潤 $P_i(\bullet)$ の最大化を目的として、以下のように表される。

$$\text{Max}_{Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}} P_i(Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) = \sum_{j=1}^J \rho_{ij}^* \sum_{h=1}^H (q_{i T_h D_h j} + q_{i T_h \bar{D} j}) \quad (1)$$

$$- f_i(Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) - \sum_{j=1}^J \beta_{ij}^* \sum_{h=1}^H (q_{i T_h D_h j} + q_{i T_h \bar{D} j})$$

subject to  $q_{i T_h D_h j} \geq 0 \quad \forall h, \forall j, q_{i T_h \bar{D} j} \geq 0 \quad \forall h, \forall j \quad (2)$

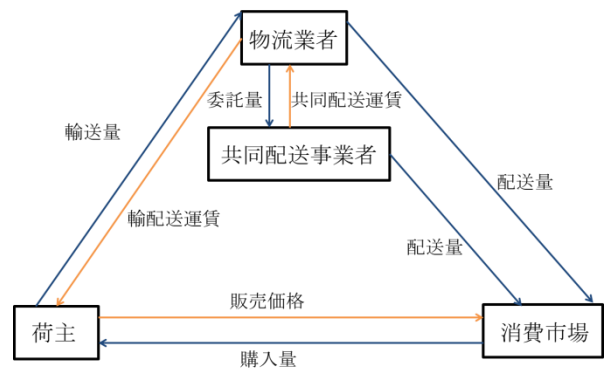


図-1 モデル化の対象とする主体間の関係

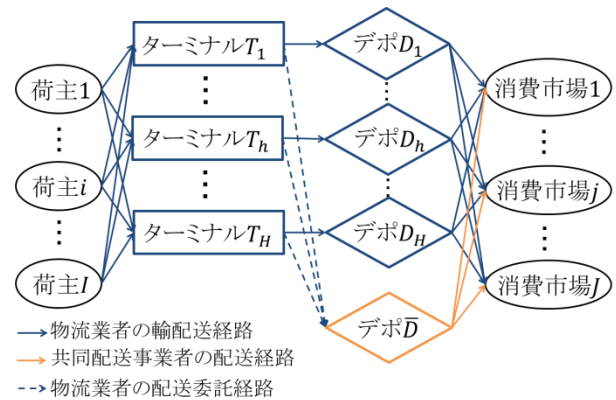


図-2 対象とする輸配送の経路

ここに、

$q_{i T_h D_h j}$  : ターミナル $T_h$ とデポ $D_h$ を経由して $ij$ 間の輸配送を行う物流業者 $h$ の自社輸配送量（重量）

$q_{i T_h \bar{D} j}$  : ターミナル $T_h$ と共同配送事業者 $\bar{H}$ のデポ $\bar{D}$ を経由して $ij$ 間の輸配送を行う物流業者 $h$ の輸配送量（重量）

$Q_{T_h D_h}$  :  $q_{i T_h D_h j}$ を要素とする $IHJ$ 次元ベクトル

$Q_{T_h \bar{D}}$  :  $q_{i T_h \bar{D} j}$ を要素とする $IHJ$ 次元ベクトル

$\rho_{ij}$  : 荷主 $i$ から消費市場 $j$ への商品の販売価格

$f_i(\bullet)$  : 生産、保管、取引、施設に要する荷主 $i$ の費用関数

$\beta_{ij}$  : 貨物輸配送において荷主が物流業者に払う運賃

$q_{i T_h \bar{D} j}$ は、物流業者 $h$ が共同配送事業者 $\bar{H}$ に配送を委託する貨物量に相当するので、共同配送による配送量を表す。

費用関数 $f_i(\bullet)$ が連続かつ凸であり、すべての荷主の最適性条件が同時に成り立つ場合、この問題は以下の変分不等式を満たす $(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)$ を求める問題と等価である。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial f_i(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} + \beta_{ij}^* - \rho_{ij}^* \right] \times [q_{i T_h D_h j} - q_{i T_h D_h j}^*] + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial f_i(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \beta_{ij}^* - \rho_{ij}^* \right] \times [q_{i T_h \bar{D} j} - q_{i T_h \bar{D} j}^*] \geq 0 \quad (3)$$

$$\forall (Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) \in R_+^{HJ+IHJ}$$

(2) 物流業者の行動

物流業者  $h$  の行動は、利潤  $P_h(\bullet)$  を最大にすることを目的関数として、以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \text{Max}_{Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}} P_h(Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \beta_{ij}^* (q_{i T_h D_h j} + q_{i T_h \bar{D} j}) \\ &- \alpha_{h\bar{H}}^* \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I q_{i T_h \bar{D} j} - \sum_{i=1}^I c_{i T_h} (Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) - C_{T_h D_h} (Q_{T_h D_h}) \quad (4) \\ &- C_{T_h \bar{D}} (Q_{T_h D_h}) - \sum_{j=1}^J C_{D_h j} (Q_{T_h D_h}) - c_{T_h} (Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) \\ &- g_{D_h} (Q_{T_h D_h}) \\ \text{subject to } q_{i T_h D_h j} &\geq 0 \quad \forall i, \forall j, \quad q_{i T_h \bar{D} j} \geq 0 \quad \forall i, \forall j \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、

$\alpha_{h\bar{H}}$  : 物流業者  $h$  から共同配送事業者  $\bar{H}$  に対して支払われる共同配送運賃

$C_{i T_h}(\bullet)$  :  $i T_h$  間における物流業者  $h$  の運行費用

$C_{T_h D_h}(\bullet)$  :  $T_h D_h$  間における物流業者  $h$  の運行費用

$C_{T_h \bar{D}}(\bullet)$  :  $T_h \bar{D}$  間における物流業者  $h$  の運行費用

$C_{D_h j}(\bullet)$  :  $D_h j$  間における物流業者  $h$  の運行費用

$g_{T_h}(\bullet)$  : 物流業者  $h$  のデポの施設費用

$c_{T_h}(\bullet)$  : 物流業者  $h$  のターミナルの施設費用

施設費用は、施設の整備や維持管理などに要する費用である。運行費用は、貨物車の運行に要する費用であり、貨物車の固定費用も含む。

デポやターミナルの施設費用関数、運行費用関数が連続かつ凸であり、すべての物流業者の最適性条件が同時に成り立つ場合、この問題は、 $(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)$  を求める以下の変分不等式問題と等価である。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial c_{T_h}(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} + \frac{\partial g_{D_h}(Q_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \right. \\ \left. + \frac{\partial c_{i T_h}(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} + \frac{\partial C_{T_h D_h}(Q_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} + \frac{\partial C_{D_h j}(Q_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \right. \\ \left. - \beta_{ij}^* \right] \times [q_{i T_h D_h j} - q_{i T_h D_h j}^*] \\ + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial c_{T_h}(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial c_{i T_h}(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} \right. \\ \left. + \frac{\partial C_{T_h \bar{D}}(Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \alpha_{h\bar{H}}^* - \beta_{ij}^* \right] \times [q_{i T_h \bar{D} j} - q_{i T_h \bar{D} j}^*] \geq 0 \quad (6) \\ \forall (Q_{T_h D_h}, Q_{T_h \bar{D}}) \in R_+^{HJ+IHJ} \end{aligned}$$

(3) 共同配送事業者の行動

共同配送事業者  $\bar{H}$  の行動は、利潤  $P_{\bar{H}}(\bullet)$  の最大化を目的として、以下のように表される。

$$\text{Max}_{Q_{T_h \bar{D}}} P_{\bar{H}}(Q_{T_h \bar{D}}) = \sum_{h=1}^H \alpha_{h\bar{H}}^* \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I q_{i T_h \bar{D} j} - \sum_{j=1}^J C_{\bar{D} j}(Q_{T_h \bar{D}}) - g_{\bar{D}}(Q_{T_h \bar{D}}) \quad (7)$$

$$\text{subject to } q_{i T_h \bar{D} j} \geq 0 \quad \forall i, \forall h, \forall j \quad (8)$$

$C_{\bar{D} j}(\bullet)$  :  $\bar{D} j$  間における共同配送事業者  $\bar{H}$  の運行費用

$g_{\bar{D}}(\bullet)$  : 共同配送事業者  $\bar{H}$  のデポの施設費用  
デポの施設費用関数、運行費用関数が連続かつ凸であれば、この問題は以下の不等式を満たす  $Q_{T_h \bar{D}}^*$  を求める問題と等価である。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial g_{\bar{D}}(Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial C_{\bar{D} j}(Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} - \alpha_{h\bar{H}}^* \right] \times [q_{i T_h \bar{D} j} - q_{i T_h \bar{D} j}^*] \geq 0 \quad (9)$$

$$\forall Q_{T_h \bar{D}} \in R_+^{HJ}$$

(4) 消費市場の均衡条件

需要関数が連続であるとし、消費市場  $j$  では以下の均衡条件（相補性条件）が成立すると仮定する。

$$d_j(\rho^*) \begin{cases} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I q_{i T_h D_h j}^* + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I q_{i T_h \bar{D} j}^* & \text{if } \rho_{ij}^* > 0 \\ \leq \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I q_{i T_h D_h j}^* + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I q_{i T_h \bar{D} j}^* & \text{if } \rho_{ij}^* = 0 \end{cases} \quad (10)$$

ここに、

$\rho$  :  $\rho_{ij}$  を要素とする  $IJ$  次元ベクトル

$d_j(\rho^*)$  : 消費市場  $j$  での需要関数

均衡状態において、式(10)は、すべての消費市場について同時に満たされる必要があり、そのことは以下の変分不等式で記述できる。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I [(q_{i T_h D_h j}^* + q_{i T_h \bar{D} j}^*) - d_j(\rho^*)] \times [\rho_{ij} - \rho_{ij}^*] \geq 0 \quad (11)$$

$$\forall \rho \in R_+^{IJ}$$

(5) ネットワーク全体の均衡条件

均衡状態においては、荷主、物流業者、共同配送事業者の最適性条件、および、消費市場の均衡条件が同時に満たされる。変分不等式における和と各成分との関係を考慮すれば、輸配送ネットワーク全体の均衡条件は、式(3),(6),(9),(11)の左辺の和が非負となるような  $(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*, \rho^*) \in R_+^{HJ+IHJ+IJ}$  を求めることと数理的に等価であるので<sup>11)13)</sup>、以下のように表される。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial f_i(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} - \rho_{ij}^* + \frac{\partial c_{T_h}(Q_{T_h D_h}^*, Q_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial g_{T_h}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} + \frac{\partial C_{i T_h}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial C_{T_h D_h}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \\
 & + \frac{\partial C_{D_h j}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \times [q_{i T_h D_h j} - q_{i T_h D_h j}^*] \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\partial f_i(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} - \rho_{ij}^* + \frac{\partial c_{T_h}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} \right] \\
 & + \frac{\partial C_{i T_h}(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial C_{T_h \bar{D}}(\mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial g_{\bar{D}}(\mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} \\
 & + \frac{\partial C_{\bar{D} j}(\mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} \times [q_{i T_h \bar{D} j} - q_{i T_h \bar{D} j}^*] \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I [(q_{i T_h D_h j}^* + q_{i T_h \bar{D} j}^*) - d_j(\rho^*)] \times [\rho_{ij} - \rho_{ij}^*] \geq 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\forall (\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*, \rho) \in R_+^{HJ+IHJ+IJ}$$

式(12)の解の存在と一意性については、既存のネットワーク均衡モデル<sup>11)-13)</sup>と同様に証明できる。なお、 $f_i(\bullet), C_{i T_h}(\bullet), C_{T_h D_h}(\bullet), C_{T_h \bar{D}}(\bullet), C_{D_h j}(\bullet), C_{\bar{D} j}(\bullet), g_{T_h}(\bullet), g_{\bar{D}}(\bullet), c_{T_h}(\bullet)$ が凸関数であり、 $d_j(\bullet)$ が単調減少関数であり、これらの凸関数族の中に一つでも狭義凸関数族が含まれ、 $d_j(\bullet)$ が狭義単調であれば、解の一意性を保証できる<sup>11),13),14)</sup>。式(12)の解法には、Meng *et al.*<sup>15)</sup>の方法を用いる。

### (6) 運賃の導出

運賃については式(3)より、 $q_{i T_h D_h j} > 0$ のとき、

$$\beta_{ij}^* = \rho_{ij}^* - \frac{\partial f_i(\mathcal{Q}_{T_h D_h}^*, \mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h D_h j}} \tag{13}$$

と導出される。また、共同配送運賃については、式

(9)より、 $q_{i T_h \bar{D} j} > 0$ のとき、

$$\alpha_{h\bar{H}}^* = \frac{\partial C_{\bar{D} j}(\mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} + \frac{\partial g_{\bar{D}}(\mathcal{Q}_{T_h \bar{D}}^*)}{\partial q_{i T_h \bar{D} j}} \tag{14}$$

と導出される。

## 3. おわりに

本研究では、都市内の配送車両の走行抑制に有用とされる都市内共同配送の一形態である、共同配送事業者が存在する場合の共同配送に注目し、輸配送量、運賃や共同配送運賃を内生的に決定する輸配送ネットワークモデルを構築した。なお、講演時には、以下のことを追加する予定である。

- 1) 提案したモデルにおいて、具体的に関数とパラメータ値を設定して、先行研究<sup>10)</sup>の結果との比較を行うなどして、構築したモデルの基本的性能を示す。
- 2) モデルを用いて数値計算を行うことにより、共同

配送の成立要因について基礎的検討を行う。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費15K06251の助成を受けたものである。

## 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) Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T., Duin, J.H.R, van: *City Logistics - Network Modelling and Intelligent Transport Systems*, Pergamon, 2001.
- 4) 苦瀬博仁, 高田邦道, 高橋洋二：都市の物流マネジメント, 勁草書房, 2006.
- 5) Yamada, T.: Cooperative freight transport systems, *City Logistics: Mapping The Future* in Taniguchi, E. and Thompson, R.G. (Eds), pp.167-176, CRC Press, 2014.
- 6) 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.
- 7) Ieda, H., Kimura, A and Yi, Y. : Why don't multi-carrier joint delivery services in urban areas become popular? - A gaming simulation of carriers' behavior-, *City Logistics II*, pp.155-167, 2001.
- 8) 山田忠史, 谷口栄一, 伊藤裕：貨物共同輸送のモデル化と効果および成立に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.3, pp.409-416, 2001.
- 9) 山田忠史, 谷口栄一, 茂里一紘：顧客分布と共同化形態に着目した都市内共同配送の効果と成立に関する分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.3, pp.657-663, 2003.
- 10) 福井一彬, 山田忠史：運賃と輸配送を内生化した共同配送モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.52, 2015.
- 11) Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, *Transportation Research Part E*, Vol.38, pp.281-303, 2002.
- 12) Yamada, T., Imai, K., Nakamura, T. and Taniguchi, E.: A supply chain-transport supernetwork equilibrium model with the behavior of freight carriers, *Transportation Reserch Part E*, Vol.47, pp.887-907, 2011.
- 13) Nagurney, A.: *Network Economics: A Variational Inequality Approach*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1999.
- 14) Kinderlehrer, D. and Stampacchia, G.: *An Introduction to Variational Inequalities and their Application*, Academic Press, New York, NY, 1980.
- 15) Meng, Q., Huang, Y. and Cheu, R.L.: A note on supply chain network equilibrium models, *Transportation Research Part E*, Vol.43, pp.60-71, 2007.