

E コマースによる都市内物流への影響評価に関する研究*

Evaluating effects of e-commerce on urban freight transport*

谷口栄一**・柿本恭志***

By Eiichi TANIGUCHI**・Yasushi KAKIMOTO***

1. はじめに

ここ数年で急速に普及したインターネットを背景に E コマースが拡大してきている。E コマースの流通形態は従来型（生産地 物流センター 小売店 消費者）とは異なり、小売店を介さずに商品が直接消費者に配送される。都市内においては、E コマースの普及に伴って宅配企業の消費者への直接配送が増加する一方、買い物目的の乗用車交通量は減少すると考えられる。

そこで本研究は E コマースが普及することで都市内の交通量がどのように変化するかを環境面や企業側からの視点も含めて評価・検討することを目的とする。さらに、消費者の生活様態などに変化が生じた場合や宅配企業が消費者のタイムウインドウをある程度指定したり、共同配送を行ったりするなどの対策を講じた場合の変化について、検討を行う。

2. 確率論的配車配送計画モデル

(1) モデルの概要

本研究で構築するモデルは確率論的配車配送計画モデルであり、このモデルでは、各運輸企業が1つのデポを持ち、そこから複数の集配トラック（以下では単にトラックと称する）が、顧客を巡回して貨物を集荷あるいは配送する。その時、次のような条件を仮定する。

a) デポに待機しているトラックの種類・台数および最大積載重量は既知である。

*キーワード：物流、e - コマース、配車配送計画

**フェロー，工博，京都大学大学院土木システム工学専攻（京都市左京区吉田本町，TEL:075-753-4789，E-mail:taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp）

***正員，工修，大阪市役所

（〒530-8201 大阪市北区中之島1丁目3番20号）

b)顧客のネットワーク上での位置は既知であり，それらの需要量も既知である。

c)顧客を訪問する際，集荷と配送は混在しない。

d)各顧客に到着時刻制約を設ける。

(2) 定式化

本研究のモデルは，シミュレーションモデルによって計算される所要時間の頻度分布をそのまま用いている。また，このモデルは総費用最小化を目的としており，総費用はトラックの備車コスト，稼働時間コスト，遅刻および早着ペナルティの3つで構成されている。この3つの費用の和を最小化するようなモデルを定式化すると，次のようになる。

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

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

$$E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = \sum_{i=0}^{N_l} \int_0^{\infty} p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \{c_{d,n(i)}(t) + c_{e,n(i)}(t)\} dt \quad (3)$$

$$\text{Subject to } n_{l,0} \geq 1 \quad (4)$$

$$\prod_{l=1}^m \prod_{i=1}^{N_l} \{n(i) - k\} = 0 \quad \forall k=1, 2, \dots, N_l \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad (6)$$

$$\sum_{n(i) \in \mathbf{x}_l} D(n(i)) = W_l(\mathbf{x}_l) \quad (7)$$

$$W_l(\mathbf{x}_{l,j}) \leq W_{c,l} \quad j=1, J(l) \quad (8)$$

$$t_s \leq t_{l,0} \quad (9)$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad (10)$$

$$t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (11)$$

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.), $\mathbf{X} = \{x_l | l=1, m\}$

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, $x_l = \{n(i) | i=1, N_l\}$

$x_{l,j}$: トラック l の j 回転目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

$n(i)$: あるトラックが i 番目に訪問する顧客のノード番号

$J(l)$: トラック l の総回転数

$d(j)$: 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

$n_{l,0}$: 数列 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)

$\delta_l(x_l) = 1$; トラック l を使用する時, $= 0$; その他

$C_{l,l}(t_{l,0}, x_l)$: トラック l の運行費用 (円)

$C_{p,l}(t_{l,0}, x_l)$: トラック l のペナルティ (円)

$c_{t,l}$: 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 $n(i+1)$ 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

$P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, x_l)$: デポを時刻 $t_{l,0}$ に出発したトラックが時刻 t に顧客 $n(i)$ に到着する確率

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

$W_l(x_l)$: トラック l の積載量 (kg)

$W_l(x_{l,j})$: トラック l の j 回転目の積載量 (kg)

$W_{c,l}$: トラック l の積載容量 (kg)

上記の問題は, NP - 困難な組み合わせ最適化問題である. そこで, 短い計算時間で解を得るため, ヒューリスティック手法の1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. 都市内交通シミュレーションモデル

本研究では, E コマースが普及したときの都市内交通状況を再現するために, 前章で述べた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組み合わせた都市内交通シミュレーションモデルを構築する. このモデルで, 配車配送計画モデルから得られる配車配送パターンを基に交通流シミュレーション上でトラックを走行させることで, 都市内交通状況の評価するための指標がアウトプットされる. なお, 交通流シミュレーションには, 本研究で対象とするネットワークの規模が大きいことから, マクロシミュレーションモデルの中のボックスモデルを用いることとした.

4. ケーススタディ

(1) 計算条件

本研究で計算対象の仮想道路ネットワークは図 1 に示すように, ノード数 25, リンク数 80 の格子状のメインネットワークとメインネットワークの各ノードから派生する 25 個の格子状のサブネットワークから構成されている. サブネットワークは中心ノードがメインネットワークの各ノードに対応しており, ノード数 9, リンク数 24 の格子状ネットワークである.

メインネットワーク上の全ノードは乗用車が発生・集中するセントロイドであり, トラックが訪問する顧客ノードでもある. ネットワークは高密度地域と低密度地域に分類され, 高密度地域はメインネットワークの中心部 9 ノードとそれらから派生するサブネットワークとし, そのエリアの各ノードには

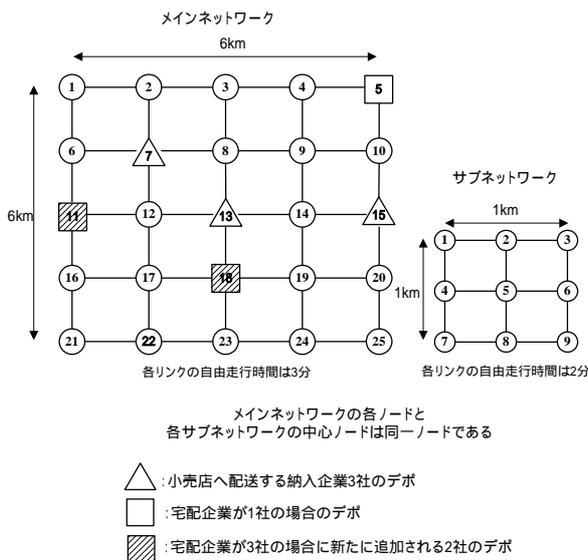


図 1 仮想道路ネットワーク図

130～170 世帯が住み、また、低密度地域は高密度地域以外のエリアで、そのエリアの各ノードには 80～120 世帯が住んでいると仮定する。これより、このネットワークの総世帯数は 26,550 世帯となった。なお、デポ所在地ノードにも消費者は存在しているものとする。

ケーススタディでは、E コマース利用率（ネットワークの各ノードに存在する全世帯の何%が E コマースを利用するかを表現した値）によっては従来型と E コマース型の流通形態が混在することになる。従来型の流通形態とは、貨物が納入企業によってデポから小売店へ配送され、その小売店へ消費者が徒歩や自動車で行くという形態である。一方 E コマース型の流通形態とは、宅配企業によってデポから消費者へ直接配送が行われる形態である。

➤ 小売店

小売店は各サブネットワークの中心ノードに存在し、消費者は住んでいるサブネットワーク内の小売店でしか買い物できないとする。

➤ デポから小売店に配送する納入企業

デポから小売店に貨物を配送する納入企業は 3 社存在し（図 1）、各企業とも 10 トントラック 12 台を保有しているとする。また、3 社とも共通の小売店のタイムウインドウを持つものとする。

➤ デポから消費者に配送する宅配企業

デポから消費者に配送する宅配企業は 1 社あたり 2 トントラック 50 台保有し、各サブネットワー

クあたり 2 台を割り当てる。各顧客ノードのタイムウインドウは 8 時～22 時の 1 時間とし、これをランダムに決定した。またデポ所在地を図 1 に示す。

ここで、ケーススタディの各ケースの説明を表 1 に示す。ケース 1 は基本となるケースであり、1 世帯当たりの需要量を 5kg、宅配企業のデポ位置をノード 5、宅配企業 1 社、EC 利用世帯の内小売店に買い物に行く割合を 0%、消費者のタイムウインドウをランダムとしている。

表 1 各ケースの説明

ケース	説明
1	基本ケース
2	EC利用世帯の需要量が増加した場合
3	EC利用世帯が買い物行動もする場合
4	宅配企業数が3社で別々に配送する場合
5	消費者タイムウインドウが指定された場合
6	宅配企業のデポが中央に配置された場合
7	1トラックの受け持ちエリアを拡大した場合
8	ピックアップポイントに配送する場合
9	宅配企業3社が共同配送した場合

(2) 計算結果

ケース 2～ケース 4 は消費者の生活様式などが変化した場合のケースであり、ケース 5～ケース 9 は対策を講じた場合のケースである。

まず、企業側から検討するために、物流コストの比較をす。なお、総走行時間は買い物目的・買い物目的以外の乗用車走行時間、納入企業・宅配企業のトラック走行時間の和である。

表 2 に示す。なお、物流コストは納入企業と宅配企業の備車コスト、稼働時間コスト、遅刻および早着ペナルティの和である。

EC 利用率が 0% から 3% で急激にコストが増加しているが、これは宅配企業の物流コストが発生するためである。ケース 2 とケース 3 は明確な傾向が現れなかった。ケース 4 の物流コストが大幅に増えた原因は宅配企業が 3 社になり、使用トラック台数もそれとともに増加しているからである。宅配企業の物流コストが減少することで、ケース 5～ケース 8 ではケース 1 に対して、ケース 9 ではケース 4 に対して、それぞれ全体の物流コストが減少しているため、対策を講じることでコストが削減されることが確認できる。中でもケース 9 の宅配企業が共同配送を行った場合のコスト削減率は顕著なものとなっている。

次に、交通の側面から検討するために、トラッ

クの待ち時間を除いた総走行時間の比較を表 3 に示す。なお、総走行時間は買い物目的・買い物目的以外の乗用車走行時間、納入企業・宅配企業のトラック走行時間の和である。

表 2 物流コストの比較

ケースNo.	EC利用率 (%)					
	0	3	5	10	20	50
1	31.36	87.34	85.40	82.65	82.19	82.47
2	0.00	1.77	2.94	0.95	0.03	-3.67
3	0.00	-2.97	-0.74	2.22	-2.12	0.72
4	0.00	122.35	127.52	136.56	128.36	126.58
5	0.00	-28.55	-24.92	-22.78	-24.36	-4.85
6	0.00	-1.29	1.27	-1.82	-1.56	-6.53
7	0.00	-3.59	-6.81	-3.27	-12.62	-5.37
8	0.00	-28.43	-23.38	-21.90	-23.84	-10.92
9	0.00	-56.16	-57.82	-55.74	-57.83	-56.05

単位: ケース1は総物流コスト(万円/日)
 ケース2~8はケース1に対する変化率(%)
 ケース9はケース4に対する変化率(%)

表 3 総走行時間の比較 (待ち時間を除く)

ケースNo.	EC利用率 (%)					
	0	3	5	10	20	50
1	1208.2	1282.5	1256.5	1199.3	1130.0	928.3
2	-	-0.4	-1.8	-0.4	-0.3	-0.3
3	-	0.8	2.4	3.6	5.7	18.5
4	-	12.0	13.3	15.5	12.8	11.4
5	-	-5.3	-4.3	-2.7	-3.2	-3.5
6	-	-1.8	-1.0	-0.9	-1.6	-2.0
7	-	-0.9	-1.4	0.1	-0.6	-0.5
8	-	-5.3	-4.3	-2.7	-3.2	-1.9
9	-	-13.8	-14.2	-15.1	-13.6	-13.6

単位: ケース1は総走行時間(時間/日)
 ケース2~8はケース1に対する変化率(%)
 ケース9はケース4に対する変化率(%)

ケース 1 では、EC 利用率が 0% の場合に比べ、EC 利用率が 3% と 5% の場合には増加しており、ある程度以上 E コマースが普及しなければ、増加する可能性のあることが確認された。また、ケース 3 では EC 利用率が高くなるにつれてケース 1 に対する変化率が増加しているが、これは、買い物をやめる世帯が増えることによる買い物目的の乗用車走行時間の減少の程度が、EC 利用率が高くなるにつれ、ケース 1 より小さくなるためである。ケース 4 でもケース 1 に対して増加しているが、これは宅配企業が増加することでトラック台数が増え、それによる走行時間が増加したためである。ケース 5~ケース 8 ではケース 1 に対して、またケース 9 ではケース 4 に対して、それぞれ宅配企業のトラック走行時間の減少によって総走行時間は減少しており、対策を講じることで、環境に対しても便益のあることが示された。この指標においても、物流コストと同様に共

同配送する場合の効果は非常に大きなものとなった。

さらに、環境面から検討するために、NOx 排出量の比較を表 4 に示す。なお、NOx 排出量は買い物目的・買い物目的以外の乗用車、納入企業・宅配企業のトラックからの排出量の和である。

ケース 1 では、EC 利用率が 0% の場合に比べ、EC 利用率が 3%、5%、10% の場合には増加しており、総走行時間の指標と同様に、ある程度以上 E コマースが普及しなければ、環境が悪化する可能性のあることが認められた。

表 4 NOx 排出量の比較

ケースNo.	EC利用率 (%)					
	0	3	5	10	20	50
1	1813.3	1959.9	1907.3	1860.4	1803.4	1587.2
2	-	-0.8	-0.7	-1.0	-1.9	-2.0
3	-	0.3	2.5	3.5	1.2	9.4
4	-	10.4	13.7	14.7	10.9	9.1
5	-	-6.2	-3.2	-2.5	-5.8	-4.6
6	-	-3.5	0.3	-1.3	-4.1	-3.3
7	-	0.2	0.1	0.1	-2.4	-1.5
8	-	-5.4	-1.8	-3.1	-4.9	-4.0
9	-	-12.7	-14.0	-14.2	-13.9	-12.8

単位: ケース1は総NOx排出量(g/日)
 ケース2~8はケース1に対する変化率(%)
 ケース9はケース4に対する変化率(%)

ケース 3 やケース 4 においては、NOx 排出量は増加しているが、これは、ケース 3 は買い物目的の乗用車からの排出量がケース 1 に対して大きいからであり、ケース 4 は宅配企業のトラックが増えたことで、それらのトラックからの排出量が増加したからである。ケース 5~ケース 8 ではケース 1 に対して、またケース 9 ではケース 4 に対して、それぞれ宅配企業のトラックからの NOx 排出量の減少によって総 NOx 排出量は減少しており、物流コストや総走行時間と同様に、対策を取ることで環境の改善効果が確認できる。

5. 結論

E コマースによる都市内物流交通への影響を検討した。その結果、E コマースがある程度普及しなければ交通混雑や環境の悪化を招く可能性のあることが示された。しかし、宅配企業が共同配送を行ったり、消費者のタイムウインドウをある程度指定することで、コスト削減のみならず、交通状況や環境の改善も期待できる。