

# 配車集配送計画モデルを用いたe-コマースの普及による都市内交通への影響分析\*

## Evaluation of the effects of e-commerce on urban freight transport by applying models of pickup and delivery vehicle routing and scheduling problem with time windows \*

高井健司\*\*・谷口栄一\*\*\*・山田忠史\*\*\*\*

By Kenji TAKAI\*\*・Eiichi TANIGUCHI\*\*\*・Tadashi YAMADA\*\*\*\*

### 1. はじめに

近年の情報化の進展によってもたらされた商取引の新しい形態が、e-コマースである。e-コマースの普及は都市内交通にも影響を及ぼすことが予想される。従来のB2B型のe-コマースに加え、B2C型やC2C型のような消費者e-コマースは今後ますます都市生活に浸透していくことが見込まれる。その結果、物流においては、配送および集荷の需要増大、個別輸送機会の増加、時間指定の複雑化などが予想される。

一方、都市内交通においては、交通安全、交通渋滞、環境・エネルギー問題などの諸問題が深刻化してきている。これらを緩和するためにさまざまな都市物流施策の導入が検討されてきており、より効率的な貨物車の運用が望まれている。

本研究においては、貨物車の都市内集配送の効率化を目的として、一巡回において集荷と配送の両方を行なうことの効果を検証する。一巡回において集荷と配送の両方を考慮できる配車集配送計画モデル(PDP: Pickup and Delivery vehicle routing and scheduling Problem)によって、物流事業者による貨物車の配車配送を表現し、集荷と配送を個別に行う従来の配車配送計画モデル(VRP: Vehicle Routing and scheduling Problem)との結果比較を行う。さらに、PDPモデルを用いて、e-コマースの普及が都市内交通に及ぼす影響、および、都市物流施策の1つであるピックアップポイントの設置が都市内交通に及ぼす影響について分析を行う。

### 2. 配車配送計画モデル, 配車集配送計画モデル

#### (1) モデル概要

物流事業者はそれぞれに課せられたさまざまな制約を満たしながらも効率的な貨物輸送活動を行うと考えられる。物流事業者がそのような活動を行う場合に立案する計画の支援としてVRPおよびPDPを利用することは有効であると考えられる。VRPおよびPDPは、さまざまな制約条件下においてすべての顧客の需要を満たすための最適な貨物車の台数およびそのルートを求める問題であり、NP-困難な組み合わせ最適化問題に属する。

PDPに関して、Gaborら<sup>1)</sup>によって述べられているように、顧客からの集荷の形式によって、問題をB-PDP (delivery-first, pickup-second; Backhaul), M-PDP (Mixed pickups and deliveries), S-PDP (Simultaneous pickups and deliveries) という3種類に分類した。以下にその概要を記す。

B-PDP: デポで積み込んだ貨物の配送をすべて終えなければ、集荷をすることができない。  
また、帰り荷と呼ばれることもある。

M-PDP: 順序の制約無く集荷と配送を行なうことができるが、一度の訪問によって集荷需要と配送需要を同時に満たすことができない。

S-PDP: 順序の制約無く集荷と配送を行なうことができ、一度の訪問によって集荷需要と配送需要を同時に満たすことができる。

#### (2) 定式化

以下にVRPおよびPDP共通の目的関数を示す。配車配送コストは固定コスト、運行コスト、早着ペナルティ・遅刻ペナルティから構成される。

Minimize

$$C(t_0, X) = \sum_{l=1}^m C_{f,l} \cdot \delta_l(x_l) + \sum_{l=1}^m C_{r,l}(t_{l,0}, x_l) + \sum_{l=1}^m C_{p,l}(t_{l,0}, x_l)$$

(1)

\*キーワード: 物流計画, 道路計画

\*\*学生員, 工修, 京都大学大学院工学研究科  
(京都府京都市西京区京都大学桂C1-2,  
TEL075-383-3232, FAX075-950-3800)

\*\*\*フェロー, 工博, 京都大学大学院工学研究科  
(京都府京都市西京区京都大学桂C1-2,  
TEL075-383-3229, FAX075-950-3800)

\*\*\*正会員, 工博, 京都大学大学院工学研究科  
(京都府京都市西京区京都大学桂C1-2,  
TEL075-383-3230, FAX075-950-3800)

ただし、

$C(t_0, X)$  : 総配車配送コスト (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 ;  $t_0 = \{t_{l,0} \mid l = 1, m\}$

$X$  : 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 ;  $X = \{x_l \mid l = 1, m\}$   
( $X$  の中には、全ての  $n(i)$  が必ず含まれる.)

$x_l$  : 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  $x_l = \{n(i) \mid i = 1, N_i\}$

$n(i)$  : あるトラックが  $i$  番目に訪問する顧客のノード番号 (デポは 0 とする.)

$c_{f,l}$  : トラック  $l$  の固定コスト (円/台)

$\delta_l(x_l) = \begin{cases} 1 & \text{トラック } l \text{ を使用するとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases}$

$C_{t,l}(t_{l,0}, x_l)$  : トラック  $l$  の運行コスト (円)

$C_{p,l}(t_{l,0}, x_l)$  : トラック  $l$  の早着・遅刻ペナルティ (円)

$t_{l,n(i)}$  : トラック  $l$  の顧客  $n(i)$  における出発時刻

式 (1) において、第 1 項が固定コスト、第 2 項が運行コスト、第 3 項が早着ペナルティ・遅刻ペナルティを示している。

また、VRP、PDP における制約条件は以下のとおりである<sup>2)</sup>。

- ・ デポを出発した貨物車が顧客を経由し再びデポに戻る。
- ・ デポに待機している貨物車の種類およびそれぞれの台数、最大稼働時間および最大積載量は既知である。
- ・ 顧客の位置および顧客の需要量は既知である。
- ・ 各顧客の需要は、1 台の貨物車によって満たされる。
- ・ 地点間の移動時間、移動距離、移動費用は既知である。
- ・ 貨物車の最大積載量を超えない。
- ・ 貨物車の台数が決められた上限を超えない。
- ・ 貨物車の稼働時間が決められた上限を超えない。

VRP、B-PDP、M-PDP、S-PDP の違いは上記の制約条件のうちの容量制約および顧客需要に関する点に表れる。すなわち、VRP においては 1 巡回において集荷顧客が配送顧客のどちらかしか扱わず巡回中の貨物車の積載量が単調に増加もしくは単調に減少するため、1 巡回に含まれる顧客の需要の合計が貨物車の最大積載量を超えなければよいが、PDP においては 1 巡回に集荷顧客と配送顧客が混在する可能性があり貨物車の積載量が単調に変動しないので、配送需要の合計が最大積載量を超えず、か

つ巡回中に集荷によってトラックの最大積載量を超えないことに注意する必要がある。なお、制約条件の具体的な定式化については紙面の都合上省略する。

また、本研究においては、各顧客が時間指定 (ソフトタイムウインドウ) を持つ時間枠付きの問題を対象とするため、PDP と VRP のいずれにおいても、近似解法の 1 つである遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms) を解法として採用する。GA を適用する際には交叉率および突然変異率を設定する必要があるが、この値は事前に行なった計算結果をもとにして、交叉率 0.8、突然変異率 0.02 とした。また、経路の所要時間は、平均値などの確定的な値として取り扱う (すなわち、確定論的配車集配送計画モデル)。なお、貨物車は顧客までの経路を最短所要時間で走行すると仮定する。最短所要時間を算出するためには最短経路探索を行う必要があるが、本研究においては、Dijkstra 法を用いた。

### 3. ケーススタディ

#### (1) 問題設定

本研究において用いたメインネットワークとサブネットワークから構成される仮想道路ネットワークを、図 1 に示す。メインネットワークはノード数 25、リンク数 80、リンク間距離 4km であり、自由走行速度 20km/h、自由走行速度 15km/h の 2 種類のリンクから成ると設定する。サブネットワークはノード数 9、リンク数 24、リンク間距離 2km、自由走行速度 15km/h、のリンクで構成されると設定した。また、サブネットワークはメインネットワークの小売店が存在するノードに接続されており、メインネットワークの各ノードとサブネットワークの中心ノードが対応しているとした。

物流事業者のデポ所在地はノード番号 5 であるとした。また、物流事業者が集配送を行なう対象としてメインネットワークの偶数番号ノードに小売店を、サブネットワークのすべてのノードに消費者を設定し、物流事業者は 2t トラックを 20 台まで使用して集配送を行なうことが出来るとした。

#### (2) VRP と PDP の結果比較

このケーススタディにおいては、上記仮想道路ネットワークにおけるメインネットワークのみを用いた。顧客数に関して 2 種類の設定を行い、物流事業者 1 社が小売店に対して集配送を行なうケーススタディによって VRP と PDP を比較した。

比較の際の VRP の集配送に関して、本研究においては、1 巡回において集荷顧客と配送顧客のどちらかのみを取り扱うという条件を考慮して、1 つのトラックで集荷と

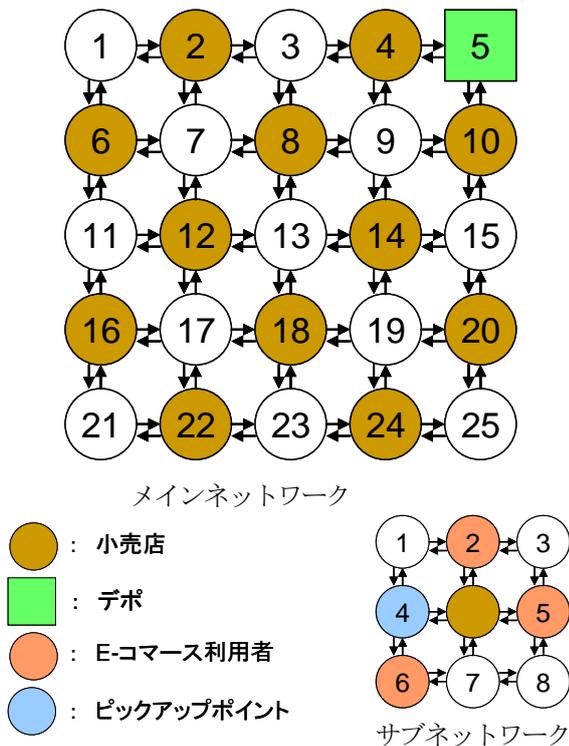


図1 仮想道路ネットワーク

配送の両方を行なう場合は集荷と配送を切り替える時に1度デポへ帰還し再度出発しなければならないとした。比較のケース設定について表1に示し、計算結果を図2に示す。

結果より、総集配コストがVRP,B-PDP,M-PDP,S-PDPの順に小さくなっており、PDPを適用することによって集配コストが改善されていることが示されている。特にVRPは固定コストの面でPDPに比べて不利になるといえる。また、PDP間においては、顧客からの集荷に関する制約条件が緩和されるにしたがってコスト改善されることが示されている。一方、集荷顧客数と配送顧客数の割合の違いによって、このケースの範囲内では結果に明確な変化は表れなかった。

### (3) e-コマース普及による都市内交通への影響分析

このケーススタディ以降は上記仮想道路ネットワークにおけるメインネットワークおよびサブネットワークの両方を用いる。e-コマースの影響を評価するに際し、本研究においては、e-コマース利用消費者の需要は物流事業者による個別集配送によって満たされ、e-コマース非利用消費者の需要は消費者が小売店を訪問することによって満たされるとした。また、小売店訪問時の交通手段は30%が自家用車、残りの70%が自転車もしくは徒歩によるものとした。一方、物流事業者はS-PDPを適用するとし、小売店へ集配送を行なう企業と消費者へ集配送を行なう企業の2社を設定した。また、消費者は必ず集荷および配送の需要をもち、そのe-コマース利用率をサブ

表1 ケース設定

ケース	モデル	顧客数
CASE1	VRP	配送顧客9
CASE2	B-PDP	集荷顧客2
CASE3	M-PDP	集荷と配送を
CASE4	S-PDP	同時に行う顧客1
CASE5	VRP	配送顧客8
CASE6	B-PDP	集荷顧客3
CASE7	M-PDP	集荷と配送を
CASE8	S-PDP	同時に行う顧客1

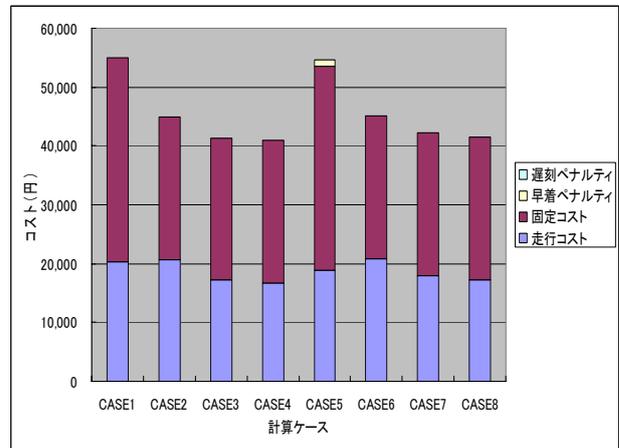


図2 計算結果 (ケース比較)

ネットワークにおいてe-コマースを利用する消費者の存在するノードをサブネットワークにおける小売店を除く全ノードで除したものであると設定した。都市内交通への影響を分析するための評価指標としては貨物車および自家用車の総走行距離、CO<sub>2</sub>排出量を考慮した。以上の設定の下でe-コマース利用率を変化させてケーススタディを行なった計算結果を図3、図4に示す。

まず、総走行距離の結果より、e-コマース利用率が増加するにしたがって個別集配送による貨物車の走行距離が増加する一方で小売店を訪問する自家用車の走行距離が減少していることがわかる。また、e-コマース利用率50%まではこれらを加算した総計は減少しているが、100%になると増加に転じている。これはe-コマース利用率が100%となることで多数の顧客の時間枠指定を満たしつつ集配をしなければならないなど、物流事業者の負担が増大し、非効率な集配活動が生まれているためであると考えられる。

次に、CO<sub>2</sub>排出量の結果をみると、全体的には総走行距離と同様の傾向がみられるが、e-コマース利用率50%から100%への増加によって個別集配送によるCO<sub>2</sub>排出量増加が著しい。このことから、e-コマース利用率の急激な増加によって物流事業者の負担が増大し、非効率な集配を行なっているということがうかがえる。

以上より、e-コマースの普及はある段階までは都市内交通に正の影響を与えるが、物流事業者に想定外の負担がでるレベルになると、逆に負の影響を与えるようになるということが示唆された。

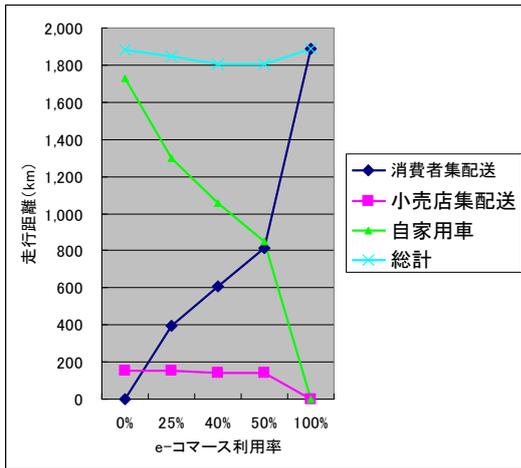


図3 計算結果 (総走行距離)

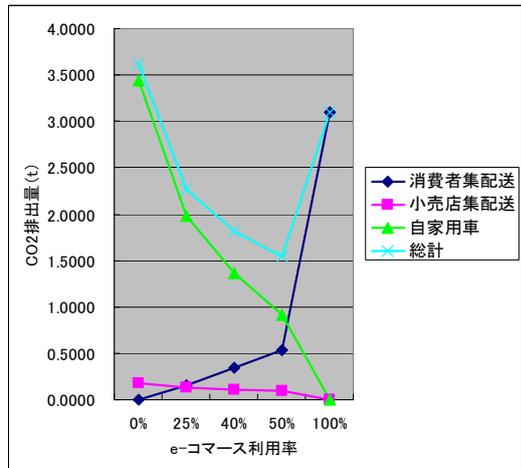


図4 計算結果 (CO<sub>2</sub>排出量)

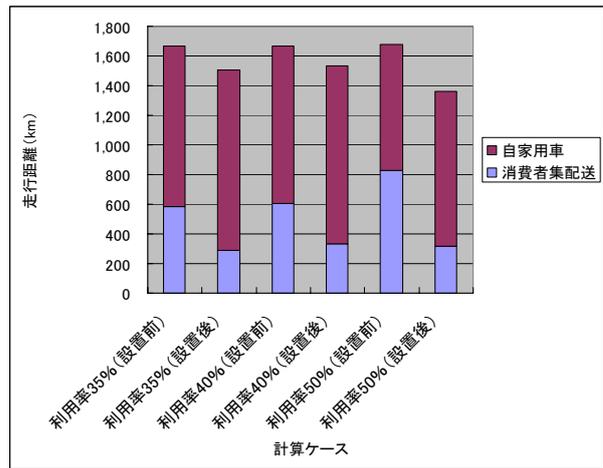


図5 計算結果 (総走行距離)

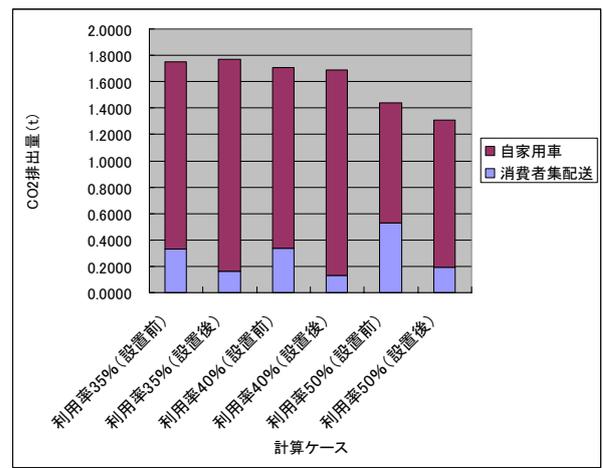


図6 計算結果 (CO<sub>2</sub>排出量)

#### (4) ピックアップポイント設置による都市内交通への影響分析

3.3 節における e-コマース普及の影響分析と同様の設定を用いる。ピックアップポイントが設置されることによって変化する点は、物流事業者の e-コマース利用消費者に対する個別配送がピックアップポイントへの配送になり、e-コマース利用消費者はピックアップポイントを訪問して需要を満たすという点である。ピックアップポイントの配置場所は e-コマース利用者から 2km (1 リンク) 以内に少なくとも 1 つは存在するとした。以上の設定の下、ピックアップポイント設置前後で比較した計算結果を図5, 図6に示す。

結果より、ピックアップポイント設置によって、e-コマース利用率 35%の時を除いて総走行距離およびCO<sub>2</sub>排出量が減少していることがわかる。また、e-コマース利用率が大きいとき、すなわち、対象が増加するほど効果が大きくなっていることがいえる。これらのことからピックアップポイント設置に必要なコスト次第であるが、物流事業者の集配送が増加したことに対する都市物流施策としてピックアップポイントの設置が効果的であることが示唆された。

#### 4. 結論

本研究では、3種類のPDPモデルを構築し、VRPと比較を行った。その結果、PDPによって集配コストが削減できることが示された。また、e-コマースの普及は物流事業者に多大な負担が生じない程度であれば総走行距離やCO<sub>2</sub>排出量が削減されるなど都市内交通に正の影響を与えることが示唆された。さらに、ピックアップポイントの設置は集配送需要が増加した都市における物流施策として効果的であることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) Gabor Nagy et al. : Heuristic algorithm for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries, European Journal of Operational Research, 162, pp.126-141, 2005
- 2) 谷口栄一, 山田忠史, 細川貴志 : 都市内集配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, pp.149-159, 1997