

配車集配送計画モデルを用いたe-コマースの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。

e-コマースと物流を関連付けている既往の研究については、Visser *et al.*¹⁾が、それまで研究では明確にされていなかった e-コマースの都市内物流に及ぼす影響について定性的に示し、e-コマースが購買活動および販売店の大きさや場所に対して影響を与えることなどを述べている。Thompson *et al.*²⁾は、e-コマースによる配送システムが交通状況に与える影響を評価するモデルを提案している。また、谷口ら³⁾は、e-コマースの普及に伴う影響をコスト、交通、環境面から定量的に評価している。最近では、Denis *et al.*⁴⁾が、実店舗による販売とe-コマースによる販売の両方を考慮した拠点配置および配車配送問題を提案している。これら既往研究が示すように、e-コマースが物流および交通に及ぼす影響がさまざまな角度から検討されてきている。

*キーワード：物流計画

**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)

わが国においては、例えばインターネットを利用した消費者間オークションが広く普及してきているなど、物流事業者は従来の個別配送だけではなく、個別集荷も考慮した日々の集配送計画を立案する必要性がでてきている。

そこで、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、自動車が主要な依存手段となっている地域における 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。

ピックアップポイントの設置によって、物流事業者の宅配活動はすべての顧客に対して個別に住居を訪問するものではなく、数ヶ所に配置したピックアップポイント機能をもつ施設に宅配するものになる。顧客はそれにとまって、ピックアップポイント機能をもつ施設に荷物をとりに行くことになる。このような制度をピックアップポイントの設置という。ピックアップポイント施設は長時間の営業を行っているため、このような施設を宅配先とすることによって、顧客はそれぞれの都合のよい時間に荷物を受け取りにいくことが可能になる。また、物流事業者にとっては顧客の不在による再配送を避けることが出来、路上での待ち時間や貨物の持ち帰りなどの削減に繋がり、より効率的な宅配活動を行うことが可能になることが想定される。

2. 配車配送計画モデルと配車集配送計画モデル

(1) モデル概要

物流事業者は、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、立案する計画の支

援システムとして、VRP および PDP を利用することは有効である。VRP および PDP は、ある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 は VRP の制約条件を緩和した問題であり、一般に、求解は VRP に比べて困難になるとされている。そのため、厳密解法の研究よりも、近似解法を用いた研究が中心となっている。また、解法や解の精度に関する研究は多数あるが、本研究で取り扱っている物流など実際の問題への適用例は少ない⁵⁾⁸⁾。

本研究においては、PDP に関して、Gabor *et al.*⁹⁾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。
帰り荷と呼ばれることもある。

M-PDP : 順序の制約無しに、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 : 順序の制約無しに集荷と配送を行なうことができ、かつ、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。本研究における配車配送コストは、車両コスト、運行コスト、および早着ペナルティ、遅刻ペナルティから構成されるものとする¹⁰⁾。

Minimize

$$C(t_0, X) = \sum_{i=1}^m c_{f,i} \delta_i(x_i) + \sum_{l=1}^m C_{t,l}(t_{l,0}, x_l) + \sum_{l=1}^m C_{p,l}(t_{l,0}, x_l) \quad (1)$$

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値 ;

$X = \{x_l \mid l = 1, m\}$ (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値

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

m : 使用可能なトラック台数の上限

$n(i)$: 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。)

N_l : トラック l が訪問する顧客の総数

$c_{f,l}$: トラック l の車両コスト (円/台)

$$\delta_l(x_l) = \begin{cases} 1 & \text{トラック } l \text{ を使用するとき} \\ 0 & \text{使用しないとき} \end{cases}$$

$C_{t,l}(t_{l,0}, x_l)$: 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 項が車両コスト、第 2 項が運行コスト、第 3 項が早着ペナルティと遅刻ペナルティを表している。

また、VRP、PDP における制約条件は以下のとおりである。

- ・ 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、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、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か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。一方、PDP においては、1 巡回に集荷顧客と配送顧客の訪問が混在する可能性があり、貨物車の積載量が単調には変動しないので、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てはいけないうことに注意する必要がある。

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

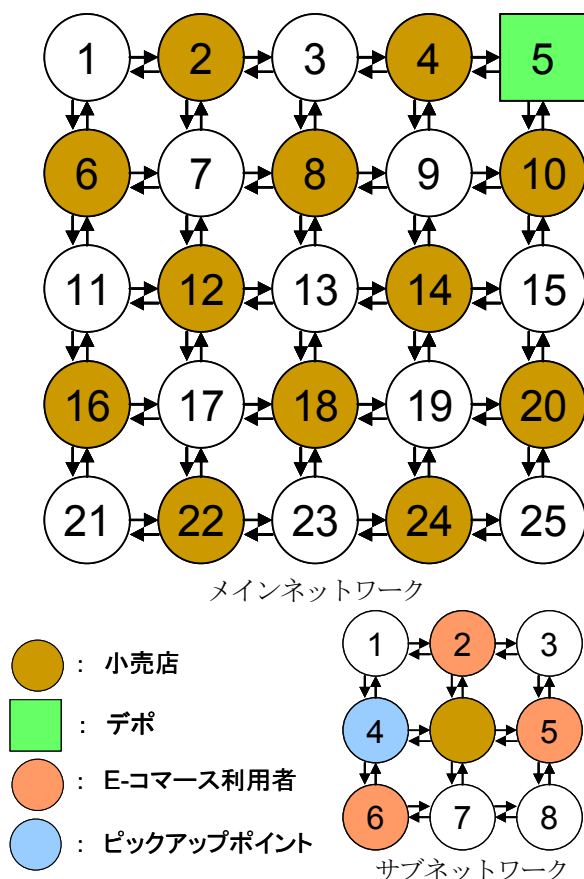


図1 仮想道路ネットワーク

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など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、自由走行速度はノード番号8,12,14,18に接続しているリンクは15km/h、それ以外のリンクは20km/hの2種類のリンクから構成される。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ている。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

表1 計算ケース

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
CASE9	VRP	配送顧客6
CASE10	B-PDP	集荷顧客4
CASE11	M-PDP	集荷と配送を
CASE12	S-PDP	同時に行う顧客2

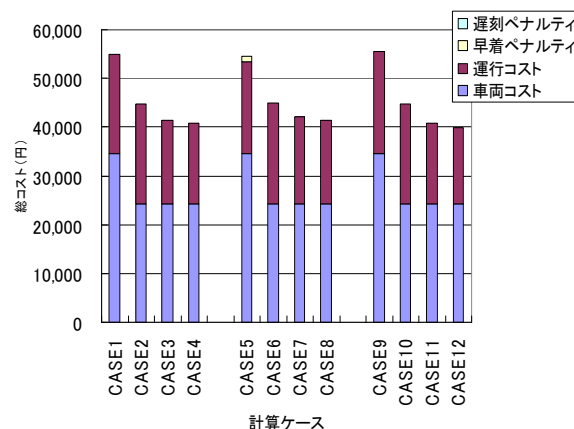


図2 ケース比較

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全ノードに消費者を設定した。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できるとした。また、運行コストは87.7円/min、早着ペナルティは運行コストと等しく87.7円/min、遅刻ペナルティは運行コストの5倍の438.5円/minと設定した。

(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3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という想定の下、VRP と PDP を比較した。

比較の際、VRP を用いた場合の集配送に関して、本研究においては、VRP では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。

図2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

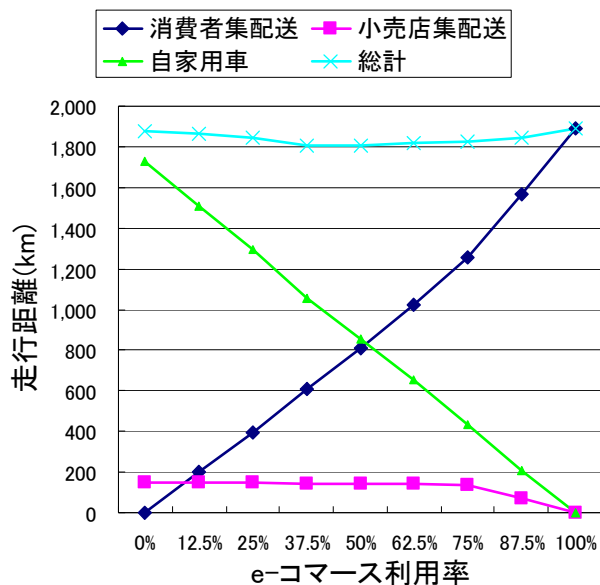


図3 e-コマース利用率と走行距離

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、車両コストの面でPDPに比べて不利になるといえる。また、PDPにおいては、S-PDPが最も有利である、すなわち、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が改善されることが示されている。一方、CASE1~4とCASE9~12を比較すると、VRPを適用した場合は、集荷顧客の倍増によってコストが微増したが、PDPを適用した場合は集荷顧客が倍増したにもかかわらずコストが微減するという結果になっている。集荷顧客割合の増加によってPDPがいつそう有効となる可能性が示唆されている。

(3) e-コマースの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-コマースにはさまざまな形態があるが、本研究におけるe-コマースはインターネット上で商品の購入手続きを行うことであるとし、宅配の対象品目は食料品や生活用品などの日常的に消費される商品を設定した。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-コマースを利用する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-コマースを利用しない消費者（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ものとした。また、小売店訪問時の交通手段はアンケート³⁾に基づき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を適用することとし、小売店へ集配送を行う企業と消費者へ集配送を行う企業の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「各サ

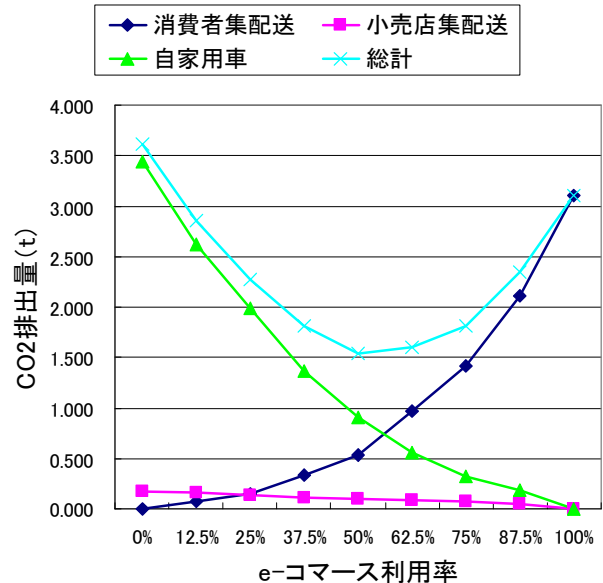


図4 e-コマース利用率とCO₂排出量

ブ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の数を、そのサブネットワークにおける小売店を除く全ノード(=8)で除した値」であると定義した。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、消費者および小売店に対して集配送を行なう貨物車と、小売店で商品を購入するために用いられる自家用車の総走行距離、CO₂排出量を考慮した。CO₂排出量は、改良トンキロ法に基づき、輸送トンキロとCO₂排出原単位の積で算出した。排出量原単位については、2tトラックは668g-CO₂/トンキロ、自家用車は3443g-CO₂/トンキロとした。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（消費者集配送）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-コマース利用率が50%までは、これらを加算した総計は減少しているが、62.5%になると増加に転じている。このことは、e-コマース利用率が高くなることで、多数の顧客の時間枠指定を満たしながら集配送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じるためであると考えられる。小売店集配送に関して、e-コマース利用率75%を超えると急に減少している。これは、12個ある小売店への総輸送量がへったことによって必要なトラック台数が減少したためである。

次に、CO₂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-コマース利用率が50%以降の個別集配送（消費者集配送）によるCO₂排出量の増加が著しい。このことから、e-コマース利用率

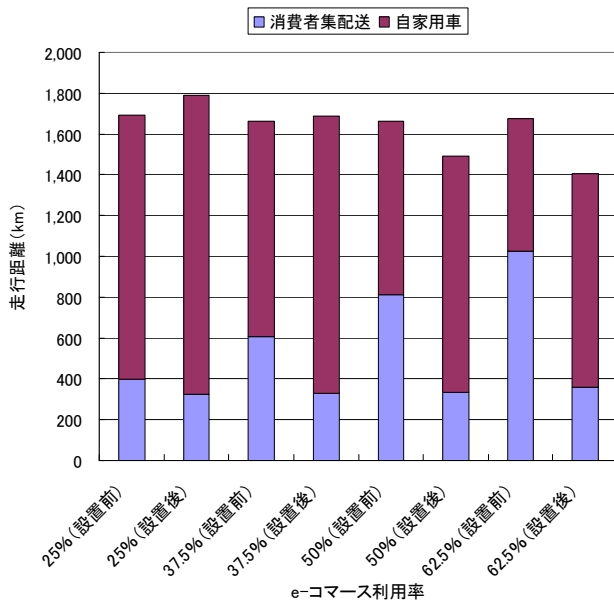


図5 ピックアップポイント設置前後の走行距離

の急激な増加によって物流事業者の負担が増大し、非効率な集配になることが伺える。

以上より、e-コマースの普及は、ある程度までは都市内交通に良い影響を与えるが、物流事業者に過度の負担が生じるレベルに達すると、負の影響を与える可能性が示唆された。

(4) ピックアップポイントの設置による都市内交通の影響分析

計算において、前節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へと変わり、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。その際の交通手段は小売店訪問時と同様に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。また、ピックアップポイントの配置場所については、e-コマース利用者から2km(1リンク)以内に少なくとも1つは存在するという条件のもとで、配置数が最小となるような場所に配置した。さらに、ピックアップポイントは長時間利用可能であることが特徴となるため、タイムウインドウは無くいつでも利用出来るとした。以上の設定の下、ピックアップポイント設置前後で走行距離およびCO₂排出量を比較した計算結果を図5、図6に示す。

ピックアップポイントの設置によって、e-コマース利用率が37.5%までは総走行距離およびCO₂排出量が増加し、50%以降は、総走行距離およびCO₂排出量が減少に転じていることがわかる。これは、ピックアップポイントが設置されることによって、例えば、隣り合っている

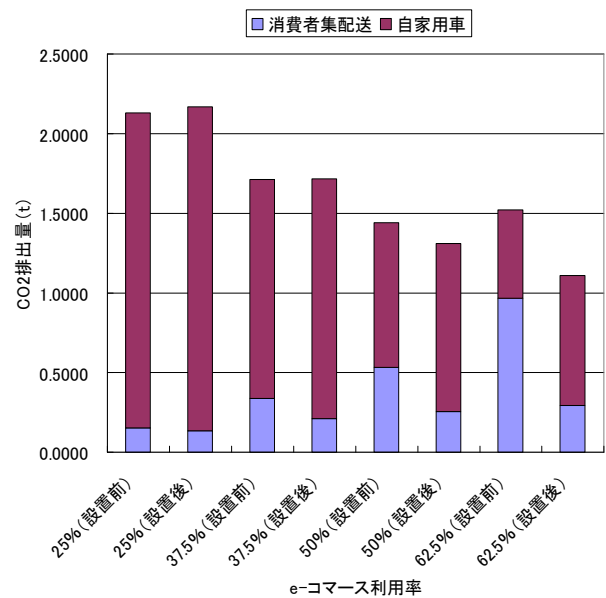


図6 ピックアップポイント設置前後のCO₂排出量

ノードであっても時間指定どおりの集配送を行なうためにトラックを複数台使用しなければならないというような非効率な集配送が緩和されたためであると考えられる。また、e-コマース利用率が大きいとき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の設置に必要となるコスト次第ではあるが、物流事業者の集配送が増加することに対して、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とのパフォーマンス比較を行った。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。さらに、集荷需要をもつ顧客が増加した場合においても、PDPの適用により、効率的な貨物車運用ができる可能性があることが示唆された。また、自動車が主要な交通手段の1つとなっている都市における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CO₂排出量が削減されるなど、都市内交通に良い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された。

今後の課題として、本研究にて行なった仮想ネットワークへの適用だけではなく、実ネットワークへ適用することによりPDPの効果を検証することが必要である。

また、物流事業者だけではなく消費者の行動も考慮したモデルを構築することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) J. Visser and T. Nemoto and J. Boerkamps :
E-commerce and city logistics, City Logistics, Vol.2,
pp.35-66, 2001.
- 2) Thompson R.G. and Chiang C. and Jeevaptsa M. :
Modeling the effects of E-commerce, City Logistics,
Vol.2, pp.99-110, 2001.
- 3) 谷口栄一, 柿本恭志 : 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, 土木計画学研究・講演集,
Vol.25, No.29, 2002.
- 4) Denis Aksent and Kemal Altinkemer : A location-routing
problem for the conversion to the “click-and-mortar”
retailing: The static case : European Journal of
Operational Research, Vol.186, pp.554-575, 2008.
- 5) M.W.P. Savelsbergh and M. Sol : The general pickup
and delivery problem, Transportation Science, Vol.29,
pp.17-29, 1995.
- 6) T. Sexton and L. Bodin : Optimizing single vehicle
many-to-many operations with desired delivery times :
transportation science, Vol.19, pp.378-435, 1985.
- 7) J. Jaw : A heuristic algorithm for the multi-vehicle
advance request dial-a-ride problem with time windows,
Transportation research, Vol.20, pp.243-257, 1986.
- 8) 久保幹雄, 田村明久, 松井知己編 : 応用数理計画ハン
ドブック, 朝倉書店, 2002.
- 9) Gabor Nagy et al. : Heuristic algorithm for single and
multiple depot vehicle routing problems with pickups and
deliveries, European journal of operational research,
Vol.162, pp.126-141, 2005.
- 10) 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.

配車集配送計画モデルを用いたe-コマースの都市内交通への影響分析*

高井健司**・谷口栄一***・山田忠史****

本研究では、貨物車運用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配車集配送計画モデルの効果を検証した。従来の集荷と配送を個別に行なう配車配送計画モデルとの比較を行うとともに、配車集配送計画モデルを用いて、e-コマースが都市内交通に及ぼす影響の分析および、さらには、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の分析を行った。

その結果、配車集配送計画モデルの適用により、物流事業者の集配コストが削減されること示された。また、e-コマースの普及は都市内交通に正のよい影響を与える可能性があることや、集配送需要の増加した都市におけるピックアップポイント設置の有用性が示唆された。

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 *

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

This paper develops the PDP (pickup and delivery vehicle routing problem) models, where customers can both receive and send goods. The performance of these models is compared to that of the classical vehicle routing problem. The effects of e-commerce as well as of establishing pickup points, which is one of the measures for city logistics on urban freight transport, are investigated using a PDP model. Results indicate that the PDP models are effective in reducing the total costs of pickup and delivery.

Applications of the models to a test road network also indicates that introducing e-commerce could lead to reduction in total travel distance and CO₂ emissions as well as that the establishment of pickup point could be a good measure.
