

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

谷口栄一¹・山田忠史²・細川貴志³

¹フェロー会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³正会員 工修 野村総合研究所 (〒240-8511 横浜市保土ヶ谷区神戸町134)

本研究においては、都市内集配トラックの最適配車配送計画および動的交通シミュレーションを統合したモデルを開発した。このモデルは、都市内集配トラックの最適配送ルートおよび出発時刻を決定する運輸企業の行動を記述し、そのような行動によって、道路ネットワークの交通状況にどのような影響を与えるかを推定することができる。このモデルを仮想道路ネットワークに適用した結果、高度な配車配送計画あるいは輸送の共同化を導入することにより、輸送に関わる総費用を減少させるとともに、乗用車も含めた総走行時間を削減できることが明らかになった。したがって、このような方策は、交通混雑の緩和や交通環境の改善にも貢献すると考えられる。

Key Words : freight transportation, heuristics, routing and scheduling, simulation, time window

1. はじめに

我が国の経済の発展に伴って、多様化・高度化する消費者のニーズに対応するため、物流システムも高度なもののが要求されるようになってきた。特に都市内の集配送においては、時間指定が厳しくなり、いわゆるジャスト・イン・タイム輸送が普及しつつある。このような状況において、都市内物流は、物流コストの削減や、渋滞・環境・省エネルギー・省労働力等の様々な問題を抱えている。

このような難しい問題を解決するために、Ruske¹、谷口²は、地域ロジスティクスの考え方を提案している。地域ロジスティクスは、民間運輸企業のロジスティクスを尊重しながら、交通渋滞・環境等の公共的な問題の解決を目指す、地域マネジメント手法である。地域ロジスティクスにおいては、共同化、情報化、官民の協力等が重要となる。共同化・情報化については、今までに多くの研究がなされている（たとえば根本³、松本⁴、Koehler⁵）。また共同化・情報化を推進するための広域物流拠点のあり方や配置についてもいくつかの研究がなされている（たとえばJanssenら⁶、谷口ら⁷、高橋⁸）。

本論文は、地域ロジスティクスを念頭において、都市内集配トラックの配車配送計画に着目する。すなわち、

運輸企業による配車配送計画の高度化や共同化がネットワーク上の道路交通にどのような影響を及ぼすかという点について、動的交通シミュレーションにより明らかにしようとするものである。近年都市内の集配送においては、時間指定をされる場合が増加している。阪神地域における調査によれば、都市内の配送の52%、集荷の45%において、時間指定あるいは時間帯指定がなされている。

都市内集配トラックの時間指定付き配車配送計画 (Vehicle Routing Problem with Time Window; VRPTW) については、オペレーションズ・リサーチの分野において、すでに多くの研究が行われている。（たとえばSolomon⁹、Koskosideisら¹⁰、Russell¹¹、Bramelら¹²）。後述のように、最近ではVRPTWについて、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms)、焼きなまし法 (Simulated Annealing)、タブーサーチ (Tabu Search) 等の解法を用いた研究が行われており、そのソフトウェアも市販されている。（たとえば久保ら¹³）しかし、これらの研究においては、主として企業ロジスティクスの観点から、トラックの配車配送計画の効率化について研究が行われており、地域の交通あるいは環境に与える影響については示されていない。すなわち、個々の企業にとって最適な配車配送計画とはどのようなものであるかということは数多く研究されているが、そのような各企業の交通行動が交通渋滞や交通

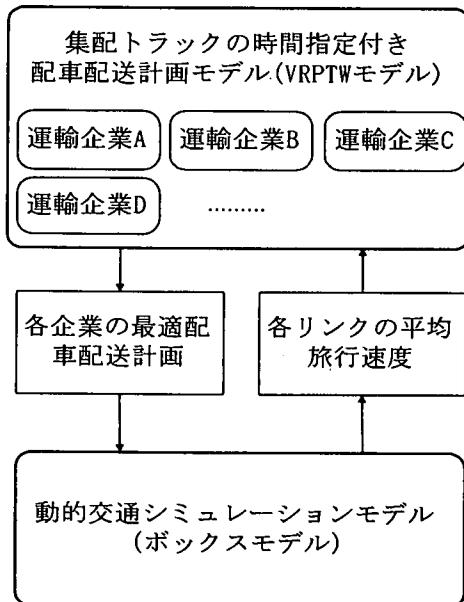


図-1 モデルの概要

環境の改善の観点から、社会的にどの程度貢献するのかということは、あまり研究されていない。そこで本研究においては、企業のみではなく、地域にとっての便益を考慮できるように、都市内集配トラックの時間指定付き配車配送計画と、動的交通シミュレーションを統合したモデルを開発する。さらにそのモデルを仮想ネットワークに適用し、配車配送計画の高度化あるいは共同化が実施された場合に、それが地域の道路交通および環境にどのような影響を与えるのかを、シミュレーション手法により検討する。

2. モデル

(1) モデルの概要

図-1に、本研究で用いるモデルの概要を示す。モデルは、2つのサブモデルからなっている。1つは、都市内集配トラックの時間指定付き配車配送計画モデル(以下では、VRPTWモデルと称する)であり、他の1つは、動的交通シミュレーションモデルである。

VRPTWモデルにおいては、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達する。その時、トラックは、一日に複数回顧客を巡回することができる。また顧客はトラックの配達ルートのどれかに必ず割り当てられ、貨物はトラックの1回の訪問で全て集荷あるいは配達されると仮定する。1つの配達ルートの貨物重量の合計は、トラックの積載容量を超

えることはできない。このモデルでは、トラックの出発時刻、顧客の配達ルートへの割り当て、顧客の訪問順序を決定する。

VRPTWモデルにおいて、最適なトラックの出発時刻、顧客の配達ルートへの割り当て、顧客の訪問順序が決定されると、これらのものが動的交通シミュレーションモデルの入力データとなる。ここで用いる動的交通シミュレーションモデルは、飯田ら¹⁰が開発したボックスモデルを改良して、都市内集配トラックの配車配達行動を明示的に考慮できるようにしたものである。このシミュレーションモデルを用いて、ネットワークの各リンクの平均旅行速度を算定する。このようにして求められた各リンクの平均旅行速度を、もう1度、VRPTWモデルに入力し、最適な集配トラックの出発時刻、顧客の配達ルートへの割り当て、顧客の訪問順序を再計算する。このようなイテレーションを繰り返し、リンクの平均旅行速度の変化が決められた値以下になれば計算を終了する。

このようなVRPTWモデルと動的交通シミュレーションを統合したモデルを構築することによって、運輸企業のトラックの交通行動とネットワークの交通現象の相互連関を動的に考慮することができる。また、道路交通は、時間とともに変化するものであり、動的な交通シミュレーションの中で集配トラックの運行状況を取り扱うことによって、より正確な現象分析が可能となる。

(2) VRPTWモデル

VRPTWモデルは、運輸企業の集配トラックの時間指定付き配車配送計画を記述するものであり、トラックの容量や時間指定の条件を満たしながら、総費用を最小化することを目的としている。ここで、総費用は、次の3つの費用の和である；a) トラックを運行させる時の固定費用、b) トラックを運行させる時の時間費用、すなわち運行時間および待ち時間に比例する費用、c) 指定時に遅刻した時のペナルティー費用。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、次のようにになる。

$$\min C(t_0, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^m c_{f,l} \cdot \delta_l(\mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m c_{t,l} \cdot T_l(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$$

$$+ \sum_{l=1}^m c_d \max\{0, t_{l,n(l)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) - t_{n(l)}^e\} \quad (1)$$

ただし、

$$T_l(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) = \sum_{i=0}^{N_l} [\max\{t_m, t_{n(i+1)}^s\} + t_{c,n(i+1)} - t_{l,n(i)}] \quad (2)$$

$$t_m = t_{l,n(i)} + d(t_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) \quad (3)$$

subject to

$$W_l(\mathbf{x}_l) \leq W_{c,l} \quad (4)$$

ここに、

$C(t_0, \mathbf{X})$: 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

$$\mathbf{t}_0 = \{t_{l,0} | l=1, m\}$$

\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

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

\mathbf{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

$$\mathbf{x}_l = \{n(i) | i=1, N_l\}$$

$n(i)$: あるトラックが i 番目に訪問する顧客のノード番号

N_l : トラック l が訪問する顧客の総数

m : ある運輸企業が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)

$\delta_l(\mathbf{x}_l) = 1$; トラック l を使用する時
= 0; その他の場合

$c_{t,l}$: トラック l の時間費用 (円/分)

$T_l(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l の運行時間 (分)

c_d : 遅刻ペナルティー費用 (円/分)

$t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l がデポを時刻 $t_{l,0}$ に出発した時のノード $n(i)$ への到着時刻

$t_{n(i)}^e$: 顧客 $n(i)$ における到着指定時間帯の終了時刻
(図-2 参照)

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

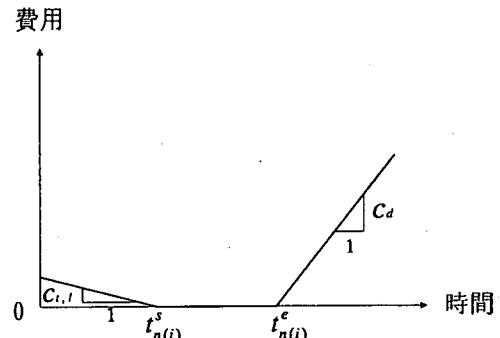


図-2 早着における待ち時間費用および遅刻ペナルティ

$d(t, n(i), n(i+1))$: 時刻 t における顧客 $n(i)$ から

顧客 $n(i+1)$ への最小旅行時間

$t_{n(i)}^s$: 顧客 $n(i)$ における到着指定時間帯の開始時刻

(図-2 参照)

$t_{c,n(i)}$: 顧客 $n(i)$ における貨物の積み卸し時間

$W_l(\mathbf{x}_l)$: トラック l の積載量 (kg)

$W_{c,l}$: トラック l の積載容量 (kg)

式(1)-(4)によって定式化された問題は、総費用が最小となるように、全トラックの配送ルートへの顧客の割り当ておよび訪問順序を示す \mathbf{X} 、およびトラックがデポを出発する時刻 t_0 を決定する組み合わせ最適化問題

である。上記の定式化は、従来の研究に比べると、費用を明示的に3つに分けて取り扱っている点が異なっている。

図-2に、トラックが顧客ノードに早着および遅刻した場合の待ち時間費用およびペナルティー関数を示す。

顧客が望む到着指定時間帯は、 $(t_{n(i)}^e - t_{n(i)}^s)$ で表わされ

る。もしトラックが時刻 $t_{n(i)}^s$ より早く顧客の所に到着した場合、指定時刻まで待つ必要がある。この待ち時間に対して、時間に比例した費用がかかると考える。また、トラックが遅刻した場合には、遅刻時間に比例したペナルティーが課せられる。

上記の問題は、NP-困難な組み合わせ最適化問題である。したがって、大規模な問題に対して短い計算時間で解を得るために、ヒューリスティク手法を用いる必

要がある。VRPTWに対して、ヒューリスティク手法を適用した研究は、いくつか行われている。たとえば、Thangiahら¹⁹は、遺伝的アルゴリズム(GA)を、Kokubugataら²⁰は、焼きなまし法(SA)を、Potvinら²¹は、タブーサーチ(TS)を適用して近似解を求めている。本研究においては、GAを用いて近似解を求めることがある。GAを用いる理由は、本研究においては、顧客の配送ルートへの割り当てや訪問順序の他に、トラックの出発時刻も同時に表現する必要がある。その場合に、GAを用いると簡単に表現できるが、SAやTSでは、困難であるためである。

GAの計算過程においては、まず初期の個体を発生させ、淘汰・増殖を繰り返す。今回の計算においては最初に300個の個体を発生させ、150世代まで淘汰・増殖を繰り返した。淘汰・増殖の過程では、ルーレット選択法を用い、各世代で、適合率の高い個体30個をエリート個体として残すようにした。また、解の精度を高め、局所解に陥るのを防ぐために、交叉・突然変異を起こさせる。今回の計算では、交叉方法として部分一致交叉法を用い、交叉率を0.7とした。突然変異の方法としては、削除・挿入法を用い、突然変異率を0.04とした。これらのパラメータの値は、最も安定した解が得られるように、試行錯誤により求めた。具体的には、以下の手順でパラメータを設定した。まず、計算時間を考慮して、固体数を300、世代数を150とした。次に、交叉率を0.4から0.7まで変化させ、突然変異率を0.03から0.07まで変化させて計算を行った。また、突然変異の方法としては、3種類のものについて計算を行った。そのような計算において、最もよい解を与えるパラメータを決定した²²。

(3) 動的交通シミュレーションモデル

動的交通シミュレーションモデルとして、様々なもののが考えられるが、ここでは、ボックスモデルを改良したモデルを用いる。ボックスモデルは、交通流を車群として表しているので、基本的にはマクロモデルである。しかし、各車両のODを情報として持っており、車両がノードに到着する毎に最短経路選択を行う点において、ミクロモデルである。したがって、マクロとミクロのハイブリッドモデルであると言える。図-3にボックスモデルの構造を示す。ボックスモデルは、フローシミュレーションと経路選択シミュレーションから成っている。リンクのモデル化に当たって、次の2つの仮定を設けている；(a)リンク上のどの断面においても、スキヤニング間隔中の最大流出量は、同じである。(b)リンクの途中での流入出はない。(a)の仮定から、リンクの最下端のみがボトルネックになる可能性があり、そこから渋滞の行列が上流へ伸びる。

交通流の状態としては、自由流と渋滞流の2つを想定しており、渋滞流中の行列ある車両が通過するのに要

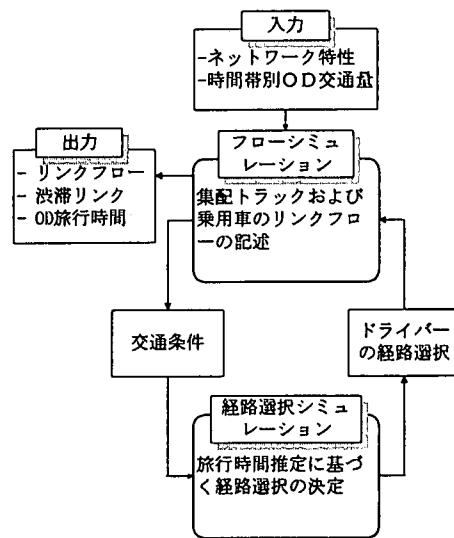


図-3 ボックスモデルの構造

する時間は、次式で与えられる。

$$T_c = \frac{F_c}{C_e} \quad (5)$$

ここに、 F_c ：渋滞行列中の車両の数

C_e ：流出交通量。

流出交通量 C_e は、リンクの最下端から下流のリンクに流出する交通量である。渋滞のない自由流における所要旅行時間は、次式で与えられる。

$$T_f = \frac{L_f}{V_f} ; K \leq K_0 = \frac{Q_{\max}}{V_f} \text{ の場合} \quad (6)$$

$$T_f = \frac{L_f \cdot K}{Q_{\max}} ; K > K_0 = \frac{Q_{\max}}{V_f} \text{ の場合} \quad (7)$$

ここに、 L_f ：自由流の長さ、 V_f ：自由流の速度

K ：交通密度、 K_0 ：限界交通密度

Q_{\max} ：最大交通量。

図-4は、ボックスモデルのフローシミュレーションにおけるリンクの表現方法を示している。すなわちボックスの連なりがリンクを表しており、あるスキヤニング間隔で、車群があるボックスから流出し、次のボックスに流入することで交通流を表現する。なお乗用車と集配トラックは分けて取り扱っている。ここでは、集配トラックは必ずデポを出発して顧客を巡回してまたデポに

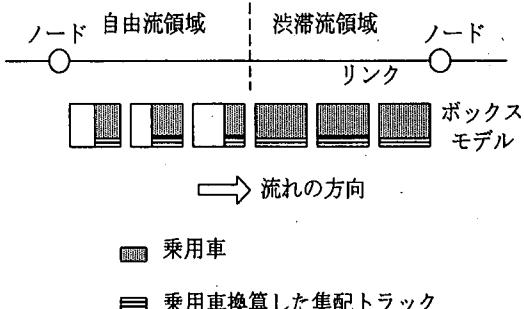


図-4 ボックスモデルによるリンクの表現

戻るものと仮定している。したがって、集配トラック以外の非巡回型のトラックは、乗用車の中に含まれている。また集配トラックの台数は、乗用車に換算した台数となっている。すべてのリンクで、first-in-first-outの規則を適用している。従来のボックスモデルでは、あるデポから出発して顧客を巡回してまたデポに戻る巡回型交通を取り扱えないでの、これを取り扱えるように改良した。具体的には、顧客ノードにそこを訪問する集配トラックの番号を割り当てておき、その番号の集配トラックが到着したことを確認できるようにした。

ボックスモデルの経路選択シミュレーションにおいて各ドライバーは、フローシミュレーションから推定されたリンク費用に基づいて、各自の認知マップを構成する。なお、リンク費用は、リンクの旅行時間から計算される。そして、ドライバーは、あるノードに到着すると、この認知マップを用いて、目的地までの費用が最小となるような経路を選択する。ここでは、全てのドライバーがネットワーク上の運転経験があると仮定する。リンク費用の推定は、次式により行う。

$$C_k = T_{kt} + \eta_k \quad (8)$$

ここに、 C_k ：リンク k における費用の推定値

T_{kt} : リンク k の時刻 t における旅行時間

η_k : 誤差項.

ここでは、誤差項 η_k は、平均値が 0、分散が σ_η^2 の正規分布に従うと仮定する。

3. 仮想道路ネットワークへのモデルの適用

(1) 計算条件

上述のモデルを図-5に示すようなノード数25, リンク

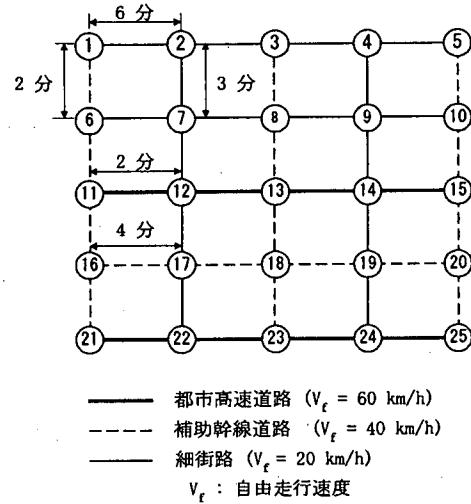


図-5 計算に用いた仮想ネットワーク

数40の仮想道路ネットワークに適用した。この仮想道路ネットワークには、都市高速道路、補助幹線道路、細街路の3種類の道路があり、自由走行速度は、それぞれ60km/h, 40km/h, 20km/hと仮定した。このネットワークは、仮想のものであるが、神戸市を念頭において作成した。図-5は、ネットワークの概要を示しており、リンクの長さは必ずしも正確ではない。このネットワーク上の各ノードは乗用車が発生・集中するセントロイドであり、集配トラックが訪問する顧客ノードになり得る。

今回の計算では10社の運輸企業があり、それぞれ12台ずつの集配トラックを有していると仮定する。集配トラックの種類は、積載容量が2t, 4t, 10tの3種類であり、それぞれ4台ずつで、計12台である。各運輸企業は、表-1に示すようなノードの位置にそれぞれ1つのデポを持っている。デポは、ネットワーク内にランダムに配置されている。顧客の数は、5-24の間の数になるように、ランダムに選択し、顧客ノード位置もランダムに選択した。ただし、ある運輸企業の顧客は、1ノード内には、1個所のみが存在すると仮定している。なお表-1のケースは、1つの例であり、このようなデポおよび顧客のパターンを10個設定し、それぞれの最適化計算を行った。

表-2に3種類の集配トラックの特性を示す。集配トラックの費用は、固定費用と運行時間に比例する時間費用とからなっている。これらの値は、運輸企業へのヒアリングにより得られたものである。

顧客を訪問する時の時間指定は、3種類のものを考えた。すなわち、幅1時間の時間帯指定、午前・午後の時間帯指定、および時間指定なしである。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に基づいて決定した。各リンクの平均旅行

表-1 各運輸企業のデポの位置および顧客数の例

運輸企業	デポのノード番号	顧客数
A	19	8
B	13	22
C	3	11
D	24	17
E	1	18
F	2	15
G	15	5
H	6	19
I	18	10
J	17	20

表-2 集配トラックの特性

積載容量 (トン)	乗用車換算係数 (pcu/台)	時間費用 (円/10分)	固定費用 (円/日)
2	1	140.2	10,417.5
4	1.5	175.4	11,523.1
10	2	232.7	13,789.7

時間は、動的シミュレーションによりスキャニング時間毎に与えられる。今回の計算におけるスキャニング時間は30分である。ただし、第1回目のイテレーションにおいては、自由走行時間を平均所要時間とした。

顧客の場所における荷さばきの時間は、本シミュレーションにおいて重要な要因である。ここでは、取り扱い貨物量と荷さばき時間の関係について、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式¹⁹を用いて表わしている。

$$t_s = 4Q + 9 \quad (9)$$

ここに、

t_s : 荷さばき時間 (分)

Q : 貨物量 (トン)

なお、本計算では、ある運輸企業の顧客は1ノードに1個所存在すると仮定しているが、複数の顧客が存在する場合には、各顧客の取り扱い貨物量に応じて式(9)より荷さばき時間時間を求めればよい。

動的交通シミュレーションにおいては、集配トラックの行動と共に、乗用車の行動に関する情報が必要となる。集配トラックの行動は、デポを出発する時刻と顧客の訪問順序によって記述され、これらの情報は、VRPTWモデルにより与えられる。乗用車の時間OD表については、各セントロイドにおける発生交通量およびOD選択確率により推定する。各時間における乗用車の発生量は、神戸市における道路交通センサスのデータを用

いて図-6に示すようなパターンとした。また、OD選択確率は次式により計算した。

$$p_{ij} = \frac{q_i q_j}{l_{ij}^2} \quad (10)$$

ここに、

p_{ij} : セントロイド*i*で発生した乗用車交通がセントロイド*j*を目的地として選択する確率

q_i : セントロイド*i*の魅力度

l_{ij} : セントロイド*i*とセントロイド*j*の距離。

式(10)の魅力度 q_i が最も高いのは、図-5のノード18で、 $q_i=4$ とした。ここがCBDであり、その周辺のノード番号13, 14, 15, 17, 19, 20, 23, 24は、 $q_i=3$ 、さらに外側のノード番号8, 9, 10, 11, 12, 16, 22, 25は、 $q_i=2$ とし、その他は、 $q_i=1$ とした。

動的交通シミュレーションとVRPTWの最適化の間において、イテレーションを繰り返して解を収束させる。その時の収束判定は、次式により行った。

$$\sum_i \sum_k \left(\frac{T_{ki}^n - T_{ki}^{n-1}}{T_{ki}^n} \right)^2 \leq 0.05 \quad (11)$$

ここに、

T_{ki}^n : n 回目のイテレーションにおけるリンク*k*における時間インターバル*i*の旅行時間。

このシミュレーションにおいては、理論的に解の収束性が保証されているわけではない。今回の計算において、5%の誤差に収束させることは、計算時間との関連において、現実的な判定条件であると考えられる。

(2) 計算結果

a) 現状のシミュレーション

都市内集配トラックの運行管理について、VRPTWモデルによる高度な配車配送計画を導入した時の効果を知るために、比較の対象として、導入前の現状のシミュレーションを行う必要がある。しかし、現状を正確に再現することは困難であるので、ここでは、VRPTWの最適化において、最良の解に比べて目的関数値が1.2-1.5倍になっており、トラックの積載率が約20%低いものを、

表-3 高度な配車配送計画導入による各費用の変化（10パターン）

ARSSの導入率(%)		固定費用(円/日)	時間費用(円/日)	遅刻ペナルティ(円/日)	総費用(円/日)	ケース(1)との比較(%)	標準偏差(%)
0	企業A-E	298,270	144,258	10,358	453,186		
	企業F-J	310,650	163,033	10,454	484,137		
	計	608,920	307,291	20,812	937,323		
50	企業A-E	206,097	79,582	1,619	287,298	-36.6	7.1
	企業F-J	322,929	173,621	11,364	507,914	4.9	14.4
	計	529,026	253,203	12,983	795,213	-15.2	8.3
100	企業A-E	194,871	76,770	2,007	273,647	-39.6	6.6
	企業F-J	239,001	93,129	3,555	335,685	-30.7	6.9
	計	433,871	169,899	5,561	609,332	-35.0	4.1

標準偏差:各パターンにおけるケース(1)からの変化の標準偏差

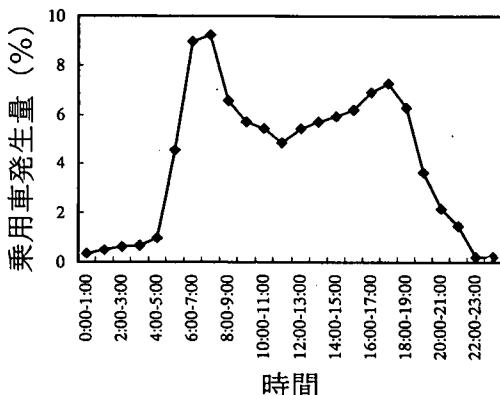


図-6 1日における各時間帯の乗用車の発生量

高度な配車配送計画を導入する前の状態として採用した。この差は、阪神地区における運輸企業が高度な配車配送計画を導入した時に実際に得られた効果に対応している。この時の集配トラック交通のネットワーク上の割合は約14%で、これは、阪神地域における実際の割合と大体一致している。

b) 高度な配車配送計画を導入した時の効果

ここでは、運輸企業が高度な配車配送計画（以下では、ARSS:Advanced Routing and Scheduling Systemと称する）を導入した時の、道路交通に与える影響について考察する。本論文におけるARSSとは、ある運輸企業が、前章で述べたVRPTWモデルを用いてトラックの出発時刻および顧客の配送ルートへの割り当ておよび訪問順序を、自社のトラック運行管理の範囲内において最適化することを指す。ここでは、次の3ケースを想定する：ケース(1)；ARSSを全く導入しない場合、ケース(2)；運輸企業10社のうち5社（表-1の運輸企業A, B, C, D, E）がARSSを導入した時、ケース(3)；運輸企業10社全てがARSSを導入した時。このうち、ケース(1)が現状を表していると考える。

表-3にARSSを導入した時の総費用の変化を示す。この結果は、先に述べたデポや顧客ノードを10パタ

ーンに変化させた場合の平均である。表-3によると、ARSSを10社全部が導入した場合には総費用が35.1%減少しており、かなりの効果が見られる。また50%の導入率の場合には、導入した5社の総費用は、36.5%減少しているが、導入していない5社については、若干の費用増となっている。

表-3には10パターンの総費用について、ケース(1)からの変化の標準偏差も示されている。これによると、ケース(2)のARSSを導入していない企業の費用については、ばらつきが少し大きくなっている、総費用が11.8%減少したケースから29.5%増大したケースまでみられた。他のケースではばらつきは比較的小さくなっている。

次に表-4は、ARSSを導入した時の総走行時間の変化を表している。この表によると、トラックと乗用車を合わせた総走行時間は、50%の導入率の時に8.9%減、100%の導入率の時に19.9%減となり、かなりの減少が見られる。これは、主として待ち時間の減少によるものである。総走行時間の減少は、ネットワーク上の交通混雑の緩和に貢献するものと考えられる。なお乗用車の総走行時間は、ARSSの導入率が50%、100%の両方のケースにおいて1%程度の増加となっている。ここでは、待ち時間と実走行時間による費用を同一としている。これは、2つの費用は、企業にとっては同一であると考えていることを意味している。一方、交通混雑に与える影響については、走行中と待機中ではかなり異なっている。

また、トラックが待つ場所によって他の交通への影響が異なる。このような点を考慮するためには、ここで用いているマクロシミュレーションではなく、車両1台ずつを制御するミクロシミュレーションを行う必要がある。またARSSの導入率が0%のときの待ち時間がかなり大きくなっているが、このような状態が現状をよく表わしているかどうかは、実際のデータがないため不明である。しかし、今回考えているような厳しい時間指定の下では、十分あり得るものと考えられる。

表-4 高度な配車配送計画導入による総走行時間の変化(10パターンの平均)

ケース(1)	ARSSの導入率=0%			
	実走行時間(分)	待ち時間(分)	総走行時間(分)	
運輸企業A-E	1,636	4,604	6,240	
運輸企業F-J	1,763	4,288	6,051	
乗用車	19,904	0	19,904	
計	23,303	8,892	32,194	
ケース(2)	ARSSの導入率=50%			
	実走行時間(分)	待ち時間(分)	総走行時間(分)	ケース(1)との比較(%)
運輸企業A-E	1,423	1,444	2,867	-54.1
運輸企業F-J	1,759	4,604	6,363	5.2
乗用車	20,111	0	20,111	1.0
計	23,293	6,048	29,341	-8.9
ケース(3)	ARSSの導入率=100%			
	実走行時間(分)	待ち時間(分)	総走行時間(分)	ケース(1)との比較(%)
運輸企業A-E	1,450	1,262	2,712	-56.5
運輸企業F-J	1,604	1,371	2,975	-50.8
乗用車	20,140	0	20,140	1.2
計	23,194	2,590	25,784	-19.9

表-5, 6に総費用および総走行時間の10パターンにおける計算結果を示す。ARSSの導入による総費用、総走行時間の減少効果は、各パターンで極端な差異は見られない。ARSSを100%導入したときのケース(1)との比較を見ると、総費用についてはケース4, 6が-29.4%であり、若干効果が低くなっている。また、総走行時間については、ケース6, 8が-10.2%, -11.8%となり、他のパターンに比べて効果が低くなっている。この理由としては、ケース6, 8ではARSSの導入率が0%のときに、既に待ち時間がかなり少ないような配車配送計画になっており、そのためにARSSを導入したときの待ち時間の削減効果があまり現れなかったものと考えられる。待ち時間が少いのは、顧客位置での到着指定時間帯、顧客間の距離、貨物需要量の関連において、集配トラックが短時間で巡回できるような好条件になっていたものと推定される。

表-7に、総走行時間、実走行時間、走行距離、台数における集配トラックの割合を示す。この表によると、ARSSの導入率が上昇するといずれの項目においても集配トラックの割合は、減少している。また台数や実走行時間における集配トラックの割合に比べて、待ち時間も含めた総走行時間における割合がかなり大きくなっている。このことが集配トラックが台数の割合に比べて渋滞や環境に与える影響が大きくなる1つの原因と考えられる。

表-5 各パターンにおける総費用

パターン	ARSSの導入率(%)	総費用(円/日)	ケース(1)との比較(%)
1	0(ケース(1))	1,098,743	
	50	930,540	-15.3
	100	707,242	-35.6
2	0(ケース(1))	816,862	
	50	643,009	-21.3
	100	543,926	-33.4
3	0(ケース(1))	839,260	
	50	783,602	-6.6
	100	508,618	-39.4
4	0(ケース(1))	1,120,847	
	50	918,555	-18.0
	100	790,807	-29.4
5	0(ケース(1))	771,828	
	50	614,933	-20.3
	100	466,557	-39.6
6	0(ケース(1))	691,351	
	50	704,826	1.9
	100	487,927	-29.4
7	0(ケース(1))	990,273	
	50	900,551	-9.1
	100	675,195	-31.8
8	0(ケース(1))	896,304	
	50	691,101	-22.9
	100	580,765	-35.2
9	0(ケース(1))	949,002	
	50	813,439	-14.3
	100	583,808	-38.5
10	0(ケース(1))	1,051,854	
	50	793,897	-24.5
	100	638,700	-39.3

表-8は、集配トラックの使用台数の変化の例を示している。この表に見られるように、ARSSの導入率が上昇すると、集配トラックの使用台数が減少し、効率化が図られている。

表-9に各ケースのCO₂排出量を示す。この表によると、全体としては、ARSSの導入率が50%, 100%となるにしたがってCO₂排出量は、1.1%, 2.7%の減少となっており、ARSSの導入効果が現れている。なお、ケース(3)の運輸企業A-Eにおいては、CO₂排出量が増えている。この原因としては、表-4に示すように、運輸企業A-Eのケース(3)における全体の実走行時間はケース(1)に比べて減少しているが、2t車・4t車よりも10t車を利用するケースが増え、CO₂排出量が増えるケースがあったためと推定される。また、ここでは待ち時間の減少によるCO₂排出量の減少を考慮していないが、ARSSを導入した場合、待ち時間がかなり削減されるので、待ち時間中のアイドリングによるCO₂排出量削減の効果を考慮すれば、運輸企業A-EにおいてもCO₂排出量が減少する可能性がある。なお、運輸企業F-Jでは、

表-6 各パターンにおける総走行時間

パターン	ARSSの導入率(%)	ケース(1)		50		100	
		総走行時間(分)	総走行時間(分)	ケース(1)との比較(%)	総走行時間(分)	ケース(1)との比較(%)	総走行時間(分)
1	運輸企業	15,348	10,596	-31.0	5,164	-66.4	
	乗用車	19,555	19,412	-0.7	20,375	4.2	
	計	34,903	30,008	-14.0	25,539	-26.8	
2	運輸企業	11,442	8,004	-30.0	5,397	-52.8	
	乗用車	20,339	20,981	3.2	20,212	-0.6	
	計	31,781	28,985	-8.8	25,609	-19.4	
3	運輸企業	10,497	9,942	-5.3	4,393	-58.1	
	乗用車	20,151	20,142	0.0	20,096	-0.3	
	計	30,648	30,084	-1.8	24,489	-20.1	
4	運輸企業	16,610	9,065	-45.4	7,366	-55.7	
	乗用車	19,013	19,837	4.3	20,150	6.0	
	計	35,623	28,902	-18.9	27,516	-22.8	
5	運輸企業	11,070	8,862	-19.9	4,552	-58.9	
	乗用車	20,142	20,135	0.0	20,056	-0.4	
	計	31,212	28,997	-7.1	24,608	-21.2	
6	運輸企業	8,447	8,455	0.1	5,421	-35.8	
	乗用車	19,794	20,091	1.5	19,933	0.7	
	計	28,241	28,546	1.1	25,354	-10.2	
7	運輸企業	13,114	11,443	-12.7	6,761	-48.4	
	乗用車	20,152	20,207	0.3	20,116	-0.2	
	計	33,266	31,650	-4.9	26,877	-19.2	
8	運輸企業	9,506	8,256	-13.1	5,754	-39.5	
	乗用車	19,790	20,077	1.4	20,095	1.5	
	計	29,296	28,333	-3.3	25,849	-11.8	
9	運輸企業	13,900	8,689	-37.5	5,657	-59.3	
	乗用車	20,289	20,296	0.0	20,193	-0.5	
	計	34,189	28,985	-15.2	25,850	-24.4	
10	運輸企業	12,971	8,987	-30.7	5,970	-54.0	
	乗用車	19,810	19,929	0.6	20,178	1.9	
	計	32,781	28,916	-11.8	26,148	-20.2	

表-7 各項目における集配トラックの割合 (10パターンの平均)

ARSSの導入率(%)	総走行時間(%)	実走行時間(%)	走行距離(%)	台数(%)
0	38.2	14.6	9.6	13.8
50	31.5	13.7	8.9	12.8
100	22.1	13.2	8.6	12.4

CO₂排出量が大幅に減少しており、運輸企業全体としては減少している。CO₂排出量は地球温暖化現象に関係しており、このネットワーク全体の排出量が減少していることは評価できる。

c) 輸送の共同化を導入した時の効果

本節では、輸送の共同化を導入した時の効果について検討する。共同化の方式としては様々なものがあるが、ここでは2つの運輸企業が自分のデポに近い地域内で、他社の貨物も配送する交換配送方式を考える。図-7に示すように、運輸企業DとHが共同化を実施すると仮定し、それぞれが配送を担当する配送区域ができるだけ重ならないように、顧客の再割り当てを行った。このようにすることによって、運輸企業DとHが配送する貨物の輸送距離が減少することになる。

表-10に計算の結果得られた共同化による総費用の変化を示す。これによると、共同化に参加した運輸企業の総費用は、19.4%の減少となっており、かなりの効果が見られる。これは、輸送距離の減少

表-8 集配トラックの使用台数の変化の例 (パターン1)

ARSSの導入率(%)	0			50			100		
	トラックの容量(トン)	2	4	10	計	2	4	10	計
企業A	0	2	0	2	1	0	1	2	1
企業B	2	3	3	8	4	1	3	8	3
企業C	1	1	0	2	0	1	0	2	0
企業D	3	3	2	8	3	2	2	7	2
企業E	3	2	3	8	3	1	3	7	2
企業F	1	2	4	7	1	2	4	7	1
企業G	0	0	1	1	0	0	1	1	0
企業H	3	4	4	11	3	3	3	9	3
企業I	1	1	2	4	2	2	0	4	0
企業J	2	3	3	8	2	3	2	7	2
計	16	21	22	59	19	15	19	53	14
									45

表-9 高度な配車配送計画導入によるCO₂排出量の変化 (10パターンの平均)

	ケース(1)		ケース(2)		ケース(3)		
	CO ₂ 排出量(t/日)	CO ₂ 排出量(t/日)	ケース(1)との比較(%)	CO ₂ 排出量(t/日)	ケース(1)との比較(%)	CO ₂ 排出量(t/日)	ケース(1)との比較(%)
運輸企業A-E	34.6	33.1	-4.4	37.4	8.1		
運輸企業F-J	44.2	43.1	-2.5	36.0	-18.6		
乗用車	523.4	527.6	0.8	528.0	0.9		
計	990.4	979.5	-1.1	964.0	-2.7		

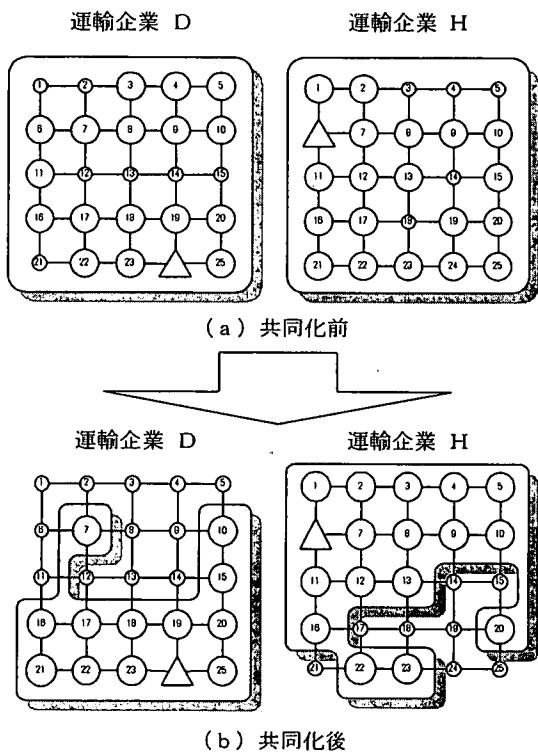
によってもたらされたものと考えられる。また共同化に参加していない運輸企業においても6.1%の費用削減効果があった。

表-11は、共同化による総走行時間の変化を示している。総走行時間においても、共同化の効果が現れており、共同化に参加した運輸企業では、33%もの削減効果があった。この場合には、他の輸送業者とともに、乗用車の総走行時間も若干減少しており、全体で、4.7%の削減効果が見られた。このように、共同化によるメリットは、運輸企業にとってもかなり大きいものであるとともに、社会全体にとっても、総走行時間の減少によって渋滞の緩和や環境改善効果が見込める。

今回の計算結果においては、共同化による総費用あるいは総走行時間の減少効果は、共同化を導入していない企業にもかなり見られた。共同化は、直接トラックの積載率の向上につながるために、トラック台数や走行距離の減少等の効果が現れやすく、それが他の企業のトラックの交通にも影響を与えたものと推定される。

4. 結論

本研究では、都市内集配トラックの最適配車配送計画と動的交通シミュレーションを統合したモデル



(a) 共同化前
 運輸企業 D
 運輸企業 H
 (b) 共同化後
 ②1 : 顧客ノード
 ① : その他のノード
 △ : デポ

図-7 共同化による配達区域の変更

表-10 共同化による総費用の変化

	共同化前 (円/日)	共同化後 (円/日)	変化 (%)
運輸企業 D	92,014	74,134	-19.4
運輸企業 H	134,281	108,189	-19.4
小計	226,295	182,323	-19.4
他の運輸企業	483,735	454,226	-6.1
合計	710,030	636,550	-10.3

表-11 共同化による総走行時間の変化

	共同化前 (分)	共同化後 (分)	変化 (%)
運輸企業 D	664	353	-46.9
運輸企業 H	777	613	-21.2
小計	1,441	965	-33.0
他の運輸企業	3,668	3,177	-13.4
乗用車	20,308	20,082	-1.1
合計	25,416	24,224	-4.7

を開発した。このモデルを用いることによって、集配トラックの運行管理を行っている運輸企業の行動を記述するとともに、その最適化行動が、道路ネットワーク上の交通に与える影響を推定することができる。このモデルを仮想道路ネットワークに適用し

た結果、次の点が明らかになった。

- (1) 10社の運輸企業のうち、5社および10社が高度な配車配送計画を導入した場合、その総費用は、それぞれ15.5%および35.1%減少した。また、乗用車を含む全体の総走行時間は、それぞれ8.9%および19.9%減少した。この総走行時間の減少は、主として、集配時間指定のある顧客の所における待ち時間の減少によるものであった。このような総走行時間の減少は、CO₂排出量の減少にも貢献し、CO₂排出量は、高度な配車配送計画の導入率が50%、100%の場合にそれぞれ1.1%、2.7%の減少となった。
- (2) 10社の運輸企業のうち2社が輸送の共同化を実施した場合、共同化参加運輸企業の総費用は、19.4%減となり、共同化非参加運輸企業の総費用も6.1%減となった。また乗用車を含めた全体の総走行時間も4.7%の減少となった。

したがって、以上の結果より、高度な配車配送計画や輸送の共同化は、運輸企業の総費用をかなり減少させるのみではなく、地域全体の交通混雑の緩和や、交通環境の改善に貢献するものと考えられる。これらの方針は、地域ロジスティクスの実現に向けて、有力な手段となり得る。

今後の課題として、高度な配車配送計画や共同化による企業および社会全体に対する便益がより高くなるための地域的条件、需給条件について分析を行う必要がある。また、今回の研究においては、モデルを構築し、仮想ネットワークへ適用したが、今後実際のネットワークに適用し、より現実的な交通条件におけるモデルの適用性について研究する必要がある。特に、現実のデータを収集し、現状再現をより精度よく行うことが重要であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、有益な御助言を賜りました京都大学大学院工学研究科土木工学科の飯田恭敬教授ならびに関西大学工学部土木工学科の則武通彦教授に深謝致します。また、研究にご協力いただきました建設省近畿地方建設局阪神国道工事事務所の各位に心から感謝いたします。最後に、データ整理等でご協力を得ました京都大学大学院の玉川大氏、玉石宗生氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ruske, W.: City logistics – Solutions for urban commercial transport by cooperative operation management, *OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies*, 1994.
- 2) 谷口栄一：地域ロジスティクス、交通工学、Vol. 30, No. 6, pp. 3-6, 1995.
- 3) 根本敏則：都市内物流の共同化の効果とその促進施策—福岡天神地区共同集配事業をケーススタディとして—、都市計画学会研究論文集 No. 27, pp. 349-354, 1992.
- 4) 松本昌二：土木計画からみた都市内物流共同化の効果、土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp. 25-28, 1992.

- 5) Kochler, U.: An innovating concept for city-logistics, *4th International Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin, CD-ROM, 1997.
- 6) Janssen, B.J.P. and Oldenburger, A.H.: Product channel logistics and city distribution centers; the case of the Netherlands, *OECD Seminar on Future road Transport Systems and Infrastructures in Urban Areas*, pp.289-302, 1991.
- 7) 谷口栄一, 則武通彦, 山田忠史, 泉谷透: 物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 583, IV-38, pp. 71-81, 1998.
- 8) 高橋洋二: 効率的な物流拠点のあり方について, 道路交通経済, No. 80, pp. 10-14, 1997.
- 9) Solomon, M. M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, Vol. 35, pp.254-265, 1987.
- 10) Koskosidis, Y.A., Powell, W.B. and Solomon M.M.: An optimization-based heuristic for vehicle routing and scheduling with soft time window constraints, *Transportation Science*, Vol. 26, pp.69-85, 1992.
- 11) Russell, R.A.: Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows, *Transportation Science*, Vol. 29, pp.156-166, 1995.
- 12) Bramel, J. and Simchi-Levi, D.: Probabilistic analysis and practical algorithms for the vehicle routing problem with time windows, *Operations Research*, Vol. 44, pp.501-509, 1996.
- 13) 久保幹雄, 毛利裕昭 : 配送計画支援システム METRO(METa Truck Routing Optimizer)とその適用事例, オペレーションズリサーチ, Vol.41, No.8, pp.429-435, 1996.
- 14) 飯田恭敬, 藤井聰, 内田敬: 動的交通シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, Vol. 31, No. 6, pp. 19-29, 1996.
- 15) Thangiah, S. R., Nygard, K. E. and Juell, P. L.: GIDEON: a genetic algorithm system for vehicle routing with time windows, *Seventh IEEE International Conference on Artificial Intelligence Applications*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp.322-328, 1991.
- 16) Kokubugata, H., Itoyama, H. and Kawashima, H.: Vehicle routing methods for city logistics operations, *IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems*, Chania, Greece, eds. M. Papageorgiou & A. Poulios, pp.755-760, 1997.
- 17) Potvin, J.-Y., Kervahut, T., Garcia, B.-L. and Rousseau, J.-M.: The vehicle routing problem with time windows; Part I: tabu search, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, pp.158-164, 1996.
- 18) Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T. and Izumitani, T.: Optimal size and location planning of public logistics terminals, *Transportation Research*, Vol.35E, No.3, pp. 207-222, 1999.
- 19) 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.

(1998. 8. 10受付)

ANALYSES ON EFFECTS OF IMPROVEMENT AND COOPERATION IN URBAN PICKUP/DELIVERY TRUCK ROUTING AND SCHEDULING ON ROAD TRAFFIC

Eiichi TANIGUCHI, Tadashi YAMADA and Takashi HOSOKAWA

This research presents a model for urban pickup/delivery truck traffic using dynamic traffic simulation with optimal vehicle routing and scheduling. This model describes the behavior of urban pickup/delivery trucks for determining the optimal delivery route and the departure time from a depot and estimates its effects on the traffic condition of road network. The model was successfully applied to a test network. The results showed that the advanced routing and scheduling system or cooperative freight transportation system can reduce the total costs for freight carriers and also contributes to reduce the total travel time. This leads to alleviate the traffic congestion on road network and improve the environment.