

所要時間の不確実性を考慮した都市内集配トラックの確率論的配車配送計画
 Probabilistic Routing and Scheduling of Urban Pickup/Delivery Trucks with Variable Travel Times

谷口栄一*・山田忠史**・柿本恭志***

By Eiichi TANIGUCHI*, Tadashi YAMADA**, Yasushi KAKIMOTO***

1. はじめに

近年、都市内物流は顧客のニーズの多様化によって、高度なサービスを低料金で提供することが求められている。特に顧客への集配送における時間指定が厳しくなり、ジャスト・イン・タイム輸送が普及しつつある。一方、社会的な観点から見ると、交通渋滞・交通環境の改善、エネルギー消費の削減などのために、都市内物流の合理化が求められている。

このような様々な要求を満たしながら合理的な都市内物流システムを構築するために、都市内集配トラックの配車配送計画を効率化することが必要である。そのために谷口ら¹⁾は、都市内集配トラックの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構築し、配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響を分析している。本研究では、その研究をさらに発展させて、所要時間の不確実性を考慮した確率論モデルを構築する。それを道路ネットワークに適用し、所要時間の不確実性を考慮することによって、企業のコスト削減、交通環境の面において、どの程度の便益が得られるかを示す。

2. モデル

(1) モデルの概要

モデルは、2つのサブモデルからなっている。1つは、時間指定付き確率論的配車配送計画モデル(PVRP-TW : Probabilistic Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model)である。

キーワード：ネットワーク交通流、物資流動

- * フェロー会員 工博 京都大学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 TEL 075-753-5126 FAX 075-753-5907
- ** 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科
〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL/FAX 06-6368-0964
- *** 学生会員 京都大学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 TEL 075-753-5126 FAX 075-753-5907

他の1つは動的交通シミュレーションモデルである。

PVRP-TW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送する。その時、次のような条件を仮定する。

- a) トラックは、一日に複数回顧客を巡回できる。
- b) 顧客はトラックの配送ルートのも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送される。
- c) 1つの配送ルートの商品重量の合計は、トラックの積載容量を超えることはできない。
- d) 所定のトラック運行可能時間を設定する場合は、それを超えてトラックを運行することはできない。

(2) PVRP-TW モデル

PVRP-TW モデルは、運輸企業の集配トラックの時間指定付き確率論的配車配送計画を記述するものである。このモデルは、所要時間の確率分布を考慮しており、分布形として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、そのまま用いており、トラックの容量や時間指定に関して、前節で述べた4つの配車配送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。このようなモデルを定式化すると、次のようになる。

Minimize

$$C(t_0, \mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m c_{f,i} \cdot \delta_i(\mathbf{x}_i) + \sum_{i=1}^m E[C_{i,l}(t_{i,0}, \mathbf{x}_i)] + \sum_{i=1}^m E[C_{p,i}(t_{i,0}, \mathbf{x}_i)] \quad (1)$$

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

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

Subject to

$$n_{l,0} \geq 2 \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad (5)$$

$$\sum_{n(i) \in \mathbf{x}_l} D(n(i)) = W_l(\mathbf{x}_l) \quad (6)$$

$$W_l(\mathbf{x}_l) \leq W_{c,l} \quad (7)$$

$$t_s \leq t_{l,0} \quad (8)$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad (9)$$

ここに、

$$t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{e,n(i+1)} \right\} \quad (10)$$

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。)

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

\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

$$\mathbf{x}_l = \{n(i), d(j) | i=1, N_l, j=1, n_{l,0}\}$$

$n(i)$: あるトラックが i 番目に訪問する顧客のノード番号

$d(j)$: 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 \mathbf{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)

$\delta_l(\mathbf{x}_l) = 1$: トラック l を使用する時

= 0: その他の場合

$C_{i,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l の運行費用 (円)

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

$c_{i,l}$: 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 $n(i+1)$ の間における平均所要時間

$t_{e,n(i)}$: 顧客 $n(i)$ における貨物の積み降ろし時間

$p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l)$: 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

$W_l(\mathbf{x}_l)$: トラック l の積載量 (kg)

$W_{c,l}$: トラック l の積載容量 (kg)

ペナルティ (円/分)

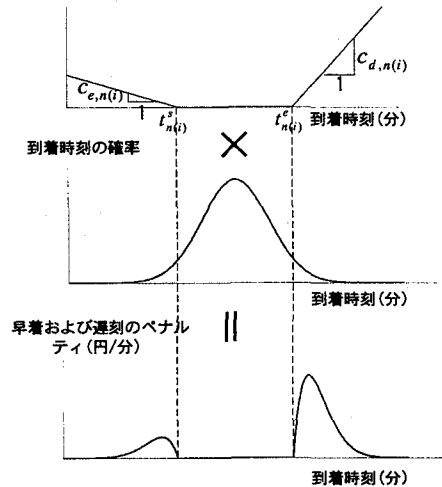


図-1 早着および遅刻ペナルティ

上記の定式化においては、各顧客における早着・遅刻ペナルティを確率論的に表現している点が従来の研究と異なる点である。図-1に早着および遅刻ペナルティの考え方を示す。

なお、PVRP-TW モデルを用いた計算結果と比較するために、リンク所要時間として1つの値を用いる時間指定付き確率論的配車配送計画モデル(FVRP-TW: Forecasted Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window model)も考える。

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. 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-2に示すようなノード数25、リンク数40の仮想道路ネットワークに適用した。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、トラックが訪問する顧客ノードにもなり得る。今回の計算では10社の運輸企業があり、それぞれ12台ずつのトラックを有していると仮定する。トラックの種類は、積載容量が2トン、4トン、10トンの3種類であり、それぞれ4台ずつで、計12台である。図-3に、今回の計算のフローチャートを示す。まず、配車配送計画モデルと、動的交通シミュレーションモデルを用いて、10回(10

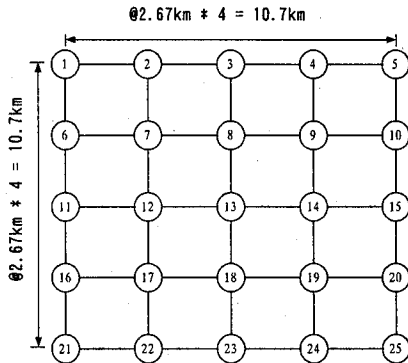


図-2 計算に用いた仮想道路ネットワーク

日間の繰り返し計算を行う。これは、各運輸企業が自社にとって最適な配車配送計画を立案し、実際にトラックを走行させることを10回繰り返し行うことに相当する。そのとき、ネットワーク全体の乗用車の総発生量は、基準発生量(4375台/日)±10%の範囲でランダムに変動させた。なお、基準発生量は、ネットワーク内の交通が、ほぼ自由走行速度(40km/h)に近い速度で流れるような状態を、試行錯誤により求めたものである。その結果得られたリンクの所要時間を用いて、次の日の配車配送計画を立案する。これを10日間繰り返した後、11日目の配車配送計画を立案する。11日目には、乗用車の総発生量を変化させて、ネットワークの混雑状況を3種類に変化させた。ケース3は過去10日間の平均と同じ混雑状況であるが、ケース1、ケース2ではそれよりもさらに混雑している。ネットワークの平均

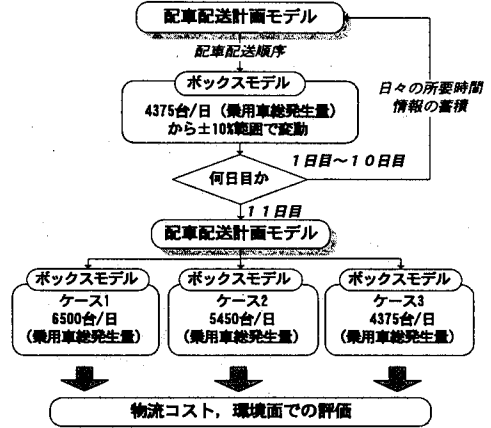


図-3 計算のフローチャート

走行速度は、ケース1, 2, 3においてそれぞれ30km/h, 35km/h, 38km/hであった。

(2) 計算結果

表-1にFVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルを用いた場合の物流費用を比較したものを示す。表-1中の総費用の変化の符号を逆転させたものをVSS(Value of Stochastic Solution)と定義する。VSSIは、FVRP-TWモデルに比べて、PVRP-TWモデルを用いることによって得られる便益の大きさを表す指標である。ケース1, 2, 3においてVSSの値は11-17%となっており、PVRP-TWモデルを用いることによって、FVRP-TWモデルに比べて総費用削減による便益がかなり発生していることが分かる。交通混雑が激しいケース1, 2の方がケース3よりも総費用の削減率が高い。ただし、ケース1の方がケース2より削減率が小さくなっている理由としては、あまり混雑が激しくなると、遅刻ペナルティが増えるためであると考えられる。

また、総費用の内訳を見ると、PVRP-TWモデルを用いた場合には、遅刻ペナルティが24-35%減少しているが、逆に早着ペナルティは、8-11%増加している。遅刻ペナルティが減少していることは、顧客へのサービスレベルが向上していることを示している。固定費用は3ケースともに約5%増加し、運行費用はほとんど変化していない。固定費用が少し増加している原因は、10社で使用するトラックのうち、2トン車が1台減って、4トン車が2台増えたため

表-1 物流費用の比較 (10社の総計)

| モデル | 費用 | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|----------------|---------|-----------|---------|---------|
| FVRP-TW モデル | 固定費用 | 238,043 | 238,043 | 238,043 |
| | 運行費用 | 214,207 | 197,634 | 188,051 |
| | 早着ペナルティ | 20,608 | 22,496 | 24,356 |
| | 遅刻ペナルティ | 789,125 | 507,169 | 363,604 |
| | 総費用 | 1,261,983 | 965,342 | 814,054 |
| PVRP-TW モデル | 固定費用 | 250,671 | 250,671 | 250,671 |
| | 変化(%) | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| | 運行費用 | 212,495 | 195,822 | 187,991 |
| | 変化(%) | -0.8 | -0.9 | 0.0 |
| | 早着ペナルティ | 22,764 | 24,970 | 26,287 |
| | 変化(%) | 10.5 | 11.0 | 7.9 |
| | 遅刻ペナルティ | 601,797 | 331,945 | 256,786 |
| 変化(%) | -23.7 | -34.5 | -29.4 | |
| | 総費用 | 1,087,742 | 803,423 | 721,748 |
| | 変化(%) | -13.8 | -16.8 | -11.3 |

費用の単位 円/日

表-2 総走行時間の比較

| モデル | 車種 | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| FVRP-TW モデル | 乗用車 | 66,497 | 49,001 | 36,134 |
| | 2トン車 | 65 | 40 | 39 |
| | 4トン車 | 499 | 447 | 417 |
| | 10トン車 | 3,398 | 3,111 | 2,964 |
| | トラック小計 | 3,962 | 3,598 | 3,419 |
| | トラック | 957 | 1,049 | 1,139 |
| | 計 | 71,416 | 53,648 | 40,693 |
| PVRP-TW モデル | 乗用車 | 68,198 | 49,082 | 36,111 |
| | 変化(%) | 2.6 | 0.2 | -0.1 |
| | 2トン車 | 0 | 0 | 0 |
| | 4トン車 | 932 | 813 | 761 |
| | 10トン車 | 3,125 | 2,856 | 2,716 |
| | トラック小計 | 4,057 | 3,670 | 3,477 |
| | 変化(%) | 2.4 | 2.0 | 1.7 |
| | トラック | 1,093 | 1,208 | 1,271 |
| | 変化(%) | 14.2 | 15.2 | 11.6 |
| | 計 | 73,348 | 53,960 | 40,859 |
| | 変化(%) | 2.7 | 0.6 | 0.4 |

走行時間・待ち時間の単位:分/日

ある。

表-2に総走行時間の比較を示す。この表によると、総走行時間は、FVRP-TWモデルに比べて、PVRP-TWモデルを用いた場合に若干増加している。内訳を見ると、乗用車・トラック共に、実際の走行時間はあまり増加していないが、トラックの待ち時間は12-15%の増加となっている。このことは、PVRP-TWモデルにおいて、遅刻ペナルティを避けるためにトラックは顧客の所にできるだけ早く到着しようとするために起こったものと考えられる。

次に、表-3にFVRP-TWモデル・PVRP-TWモデルを用いた場合のCO₂排出量の比較を示す。表-3において乗用車のCO₂排出量については、FVRP-TWモデルとPVRP-TWモデルの差はほとんど見られないが、トラックについては、PVRP-TWモデルを用いた場合、各ケースで約6%の減少となっている。

表-3 CO₂排出量の比較

| モデル | 車種 | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|----------------|--------|------|------|------|
| FVRP-TW モデル | 乗用車 | 1686 | 1313 | 988 |
| | 2トン車 | 2 | 1 | 1 |
| | 4トン車 | 19 | 18 | 17 |
| | 10トン車 | 789 | 745 | 721 |
| | トラック小計 | 809 | 764 | 739 |
| | 計 | 2495 | 2077 | 1727 |
| PVRP-TW モデル | 乗用車 | 1709 | 1314 | 987 |
| | 変化(%) | 1.4 | 0.1 | 0.0 |
| | 2トン車 | 0 | 0 | 0 |
| | 4トン車 | 34 | 32 | 31 |
| | 10トン車 | 723 | 683 | 662 |
| | トラック小計 | 756 | 715 | 693 |
| | 変化(%) | -6.5 | -6.4 | -6.3 |
| | 計 | 2466 | 2029 | 1680 |
| | 変化(%) | -1.2 | -2.3 | -2.7 |

CO₂排出量の単位 kg-C/日

このCO₂排出量の削減は、主として10トン車のCO₂排出量の削減によってもたらされたものである。また、表-2に示すように、トラックの総走行時間が若干増加してもCO₂排出量が減少したのは、CO₂排出原単位の大きい10トン車の走行時間が減少したためであると考えられる。

表-3において、乗用車とトラック合計のCO₂排出量においても1-3%の減少となっており、環境改善効果が見られる。従って、PVRP-TWモデルを用いて、所要時間を確率論的に取り扱うことによって、物流費用の削減のみならず、環境の改善も期待できる。

4. 結論

本研究においては、所要時間の不確実性を考慮した確率論的配車配送計画モデル(PVRP-TWモデル)を定式化し、動的交通シミュレーションモデルと組み合わせたモデルを開発した。このモデルを仮想道路ネットワークに適用した結果、総費用を削減できるのみならず、集配トラックのCO₂排出量を約6%削減できることがわかった。このことは、確率論的配車配送計画が運輸企業にとって便益があるのみならず、環境の改善において、社会的にも便益があることを示している。

【参考文献】

- 1) 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/IV-44, pp.149-159, 1999.