

所要時間の変動を考慮した到着時間指定付き配車配送行動の評価*
Assessing the Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints
under Travel Time Variation*

芳村洋平**・山田忠史***・茂里一紘****・京谷百恵*****

By Yohei YOSHIMURA**・Tadashi YAMADA***・Kazuhiro MORI****・Momoe KYOTANI*****

1. はじめに

都市圏では、道路交通の約半数を物流交通が占めるに至っている。物資の到着時間指定に伴う、集配送の多頻度少量化が、その一因である。物流関連企業は、顧客の時間指定ニーズを満たした上で、集配送の効率化を図り、物流コストの削減を目指している。

このような状況を踏まえ、本研究では、配車配送計画の高度化による集配送の効率化に注目し、到着時間指定下での配車配送行動について、物流業者と交通計画のそれぞれの視点から評価する。

配車配送計画は概ね二形態に大別される。一つは、配送計画問題(VRP: Vehicle Routing Problem)をベースにして、到着時間制約などの現実的な条件を加えた上でヒューリスティックな手法を用いて最適解を求める、高度な配車配送計画(AVRS: Advanced Vehicle Routing and Scheduling)であり、もう一つは、配車配送担当者の経験や勘に頼る配車配送計画(PVRS: Practical Vehicle Routing and Scheduling)である。

2. AVRSとPVRS

AVRSシステムとしては、リンクの評価値を単一値(例えば、平均所要時間)で捉えた上で、配送費用を最小化するような配車配送パターンを求解するものが代表的である。配送費用は車両の固定費用、運行費用、早着・遅刻費用から構成される。固定費用は車両を稼働させるために必要となる備車費用のことであり、車両の減価償却費用、税金、保険費用、運転手に対しての給与および福利厚生費などの諸経費が含まれる。運

行費用は車両の稼働時間に比例して必要となる費用であり、燃料費や修繕費などの車両関連費用、運転手への諸手当、時間外手当などが含まれる。早着・遅刻費用は、顧客への到着指定時間帯以前、もしくは、到着指定時間帯以後に到着してしまった場合に必要なペナルティ費用である。

既存の研究¹⁾を参考にすれば、AVRSは次のように定式化できる。

Minimize

$$TC(t_0, t_l^a, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^m (C_{f,l} \mathbf{d}_l(\mathbf{x}_l) + C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) + C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)) \quad (1)$$

ここに、

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

$$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) = \sum_{i=0}^{N_l} [c_{d,n(i)} \cdot \max\{0, t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) - t_{n(i)}^e\} + c_{e,n(i)} \cdot \max\{0, t_{n(i)}^s - t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)\}] \quad (3)$$

subject to

$$n_0 = 2 \quad (4)$$

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

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

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

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

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

ここに、

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

ただし、

TC : 総費用(円)

t_0 : 車両 l のデポ出発時刻ベクトル

$$t_0 = \{ t_{l,0} \mid l=1, m \}$$

t_l^a : 車両 l の各顧客の到着時刻ベクトル

$$t_l^a = \{ t_{l,n(i)}^a \mid i=0, N_l \}$$

\mathbf{X} : 全車両の配送ルートへの顧客割り当てと訪問順序を示す数列 $\mathbf{X} = \{ \mathbf{x}_l \mid l=1, m \}$

\mathbf{x}_l : 車両 l の配送ルートへの顧客割り当てと訪問順序を表す数列 $\mathbf{x}_l = \{ n(i) \mid i=1, N_l \}$

*Keywords: 物流計画, ITS

** 学生員, 広島大学大学院工学研究科

*** 正会員, 博士(工学), 広島大学大学院工学研究科
(東広島市鏡山 1-4-1, TEL/FAX: 0824-24-7812,

E-mail: yamada@naoe.hiroshima-u.ac.jp)

**** 工博, 広島大学大学院工学研究科

***** 正会員, 修士(工学), 大阪市

$n(i)$: ある車両が i 番目に訪問する顧客のノード番号

N_l : 車両 l が訪問する顧客の総数

n_0 : 数列 \mathbf{x}_l 中のデポの個数

m : 使用可能な車両台数の上限

$c_{f,l}$: 車両 l の固定費用 (円/台)

$\mathbf{d}_l(\mathbf{x}_l) : = 1$; 車両 l を使用するとき
 $= 0$; その他の場合

$C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: 車両 l の運行費用 (円)

$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: 車両 l のペナルティ費用 (円)

$c_{t,l}$: 車両 l の単位運行費用 (円/分)

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

$\bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1))$: 車両 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

$t_{c,n(i)}$: 顧客 $n(i)$ における荷役時間

$c_{d,n(i)}(t)$: 顧客 $n(i)$ における単位時間当た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たりの早着ペナルティ (円/分)

$t_{n(i)}^s$: 顧客 $n(i)$ における指定時間の開始時刻

$t_{n(i)}^e$: 顧客 $n(i)$ における指定時間の終了時刻

N : 顧客の総数

$D(n(i))$: 顧客 $n(i)$ の需要 (kg)

$t'_{l,0}$: 輸配送終了後の車両 l のデポ帰還時刻

t_s : 車両の稼働可能時間の開始時刻

t_e : 車両の稼働可能時間の終了時刻

$W_l(\mathbf{x}_l)$: 車両 l の1回の巡回での積載量 (kg)

$W_{c,l}$: 車両 l の積載容量 (kg)

一方, PVRS についても, 既存の研究²⁾を利用して, 式(1)~(10)に, 以下の式(11)で表される制約条件を付加した数理計画問題で表現する.

$$W_l(\mathbf{x}_l)/W_{c,l} \leq W^{MAX} \quad (11)$$

ここに,

W^{MAX} : 積載率の上限値 (=0.32 とする)

3. 評価指標

上述の配車配送計画問題から得られる配車配送行動 (デポや訪問先での出発時刻, 訪問順序, 使用車両の台数・サイズを決定する) を以下の4つの指標を用いて評価する. その際, 現実には, リンク所要時間は単一値ではなく, 変動することを考慮し, 評価指標の算出において, 所要時間の分布を考慮する. つまり, 評価指標値は期待値で算出される. このとき, 例えば,

各物流業者の配送費用は, 次式のように算定される.

$$ETC = \sum_{l=1}^m \{ C_{f,l} \mathbf{d}_l(\mathbf{x}_l) + E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] + E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] \} \quad (12)$$

ここに,

$$E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = c_{t,l} \left\{ \sum_{i=0}^{N_l} E[t_{l,n(i)}^a] - t_{l,0} \right\} \quad (13)$$

$$E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = \int_{i=0}^{N_l} p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \{ c_{d,n(i)}(t) + c_{e,n(i)}(t) \} dt \quad (14)$$

$$E[t_{l,n(i)}^a] = t_{l,0} + \sum_{i=1}^{N_l} \left\{ \int_{-\infty}^{t_{n(i)}^s} P_{l,n(i)}^e(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \cdot t_{n(i)}^s dt + \int_{t_{n(i)}^s} P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \cdot t dt + t_{c,n(i-1)} \right\} \quad (15)$$

ただし,

ETC : 期待総配送費用 (円)

$E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)]$: 車両 l の期待運行費用 (円)

$E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)]$: 車両 l の期待ペナルティ費用 (円)

$p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l)$: デポを時刻 $t_{l,0}$ に出発した車両 l が時刻 t に顧客 $n(i)$ に到着する確率

$P_{l,n(i)}^e(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l)$: デポを時刻 $t_{l,0}$ に出発した車両 l が時刻 $t_{n(i)}^s$ 以前に顧客 $n(i)$ に到着する確率

この期待費用の求め方は, 訪問先での出発時刻を, その訪問先での早着による待ち時間を考慮して求めている点で, 既存の研究の期待費用算出法³⁾と異なっている.

物流業者にとっては, 配送に要する費用が低廉であることが望ましい. また, 同一の顧客数や顧客分布であっても, 到着時間指定がない方が, より効率的に配送できるものと考えられる. したがって, 到着時間指定がない場合と比較して, 到着時間指定がある場合の配送費用の変化率が小さい方が, 物流業者にとって望ましいと言える. このことから, 次のような評価指標を設定する.

$$r_{cost} = \frac{ETC'}{ETC} \quad (16)$$

ここに,

$$ETC' = \sum_{l=1}^m (C_{f,l} \mathbf{d}_l(\mathbf{x}_l) + E[C'_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)]) \quad (17)$$

$$E[C'_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = c_{t,l} \left\{ \sum_{i=0}^{N_l} E[t_{l,n(i)}'^a] - t_{l,0} \right\} \quad (18)$$

$$E[t_{l,n(i)}'^a] = t_{l,0} + \int_0^{\infty} P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \cdot t dt + t_{c,n(i+1)} \quad (19)$$

ただし,

r_{cost} : 配送費用の変化率

ETC' : 到着時間指定がない場合の期待総配送費用 (円)

$E[C'_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)]$: 到着時間指定がない場合の車両 l の期待運行費用 (円)

$t'_{l,n(i)}$: 到着時間指定がない場合の車両 l の顧客 $n(i)$ での到着時刻

物流業者にとっては、顧客ニーズが満足されなければ、配送費用を抑制できたとしても、有効な配車配送行動であるとは言えない。そこで、顧客ニーズの充足を、総走行時間における総遅刻時間の割合を用いて表現する。すなわち、

$$r_{delay} = 1 - \frac{TDT}{TRT} \quad (20)$$

ここに、

$$TDT = \sum_{l=1}^m \left(\sum_{i=0}^{N_l} \int_{t_{m(i)}^e}^{\infty} P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) dt \right) \quad (21)$$

$$TRT = \sum_{l=1}^m \left(\sum_{i=0}^{N_l} (E[t'_{l,n(i)}] - t_{c,n(i+1)}) - t_{l,0} \right) \quad (22)$$

r_{delay} : 非遅刻時間率

TDT : 総遅刻時間 (分)

TRT : 到着時間指定下での総走行時間 (分)

物流業者にとって望ましい配車配送計画が、必ずしも都市圏物流問題 (交通混雑、環境負荷など) の解決には繋がらない。したがって、物流業者の立場からの評価だけでなく、社会的な観点からも配車配送行動を評価する必要がある。そこで、物流業者の総走行時間に着目し、配送費用の変化率と同様の考え方を用いて、総走行時間の変化率を調べる。すなわち、

$$r_{time} = \frac{TRT'}{TRT} \quad (23)$$

ここに、

$$TRT' = \sum_{l=1}^m \left(\sum_{i=0}^{N_l} (E[t'_{l,n(i)}] - t_{c,n(i+1)}) - t_{l,0} \right) \quad (24)$$

ただし、

r_{time} : 総走行時間変化率

TRT' : 到着時間指定がない場合の総走行時間

到着時間指定が問題となるのは、物流業者だけではない。指定到着時間以前に到着すれば、訪問先近辺で路上駐停車することが多く、道路が占有されることになり、道路混雑・交通安全・周辺住民の生活環境悪化に繋がる。つまり、社会にとって到着時間指定が問題となるのは、それにより生じる遅刻よりも、むしろ、

早着である。

早着に関する評価指標として、総走行時間に対する総早着時間の割合を用いることとする。すなわち、

$$r_{early} = 1 - \frac{TET}{TRT} \quad (25)$$

ここに、

$$TET = \sum_{l=1}^m \left(\sum_{i=0}^{N_l} \int_0^{t_{m(i)}^s} P_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) dt \right) \quad (26)$$

ただし、

r_{early} : 非早着時間率

TET : 総早着時間 (分)

上述のいずれの指標についても、1 に近いほど望ましいことになる。

4. 問題設定

計算対象地域は、図 - 1 のような 20km 四方の都市圏道路網とし、1 日の配送業務を計算対象とする。1 日を 4 つの時間帯に分類し、各時間帯でリンク所要時間分布を変化させる。このとき、都心部周辺リンクは、他のリンクよりも所要時間を大きな値に設定する。リンク所要時間分布は正規分布に従う⁴⁾と仮定する。

道路網上に存在する物流業者は全部で 8 社とし、各物流業者のデポの位置は、図 - 1 の通りである。各物流業者の使用可能車両は、2t トラック 8 台とし、保有顧客数は、5 顧客、11 顧客、20 顧客の 3 通りとする。顧客分布は、都心部中心型であり、顧客の貨物需要は、都心部の顧客ほど大きくなるよう設定する。また、各顧客の貨物には 3 通りの到着時間指定 (時間

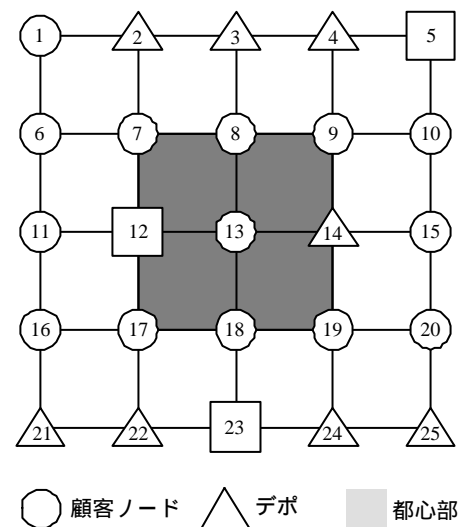


図 - 1 対象道路網

指定なし、時間帯指定（午前もしくは午後）、時刻指定（2時間の許容幅）が考えられることとする。各顧客の指定到着時間の設定については、既存の都市圏物資流動調査から得られた、指定到着時間の分布に従うこととする。

5. 高度な配車配送計画の効果

PVRS と AVRS のそれぞれに関する計算結果が図-2、図-3 に示されている。配車配送計画を高度化することで、配送費用や走行時間の変化率が上昇する。つまり、AVRS の適用によって、時間指定の付加に伴う、費用上昇や走行時間増大が抑制される。しかし、配送費用の変化率は、顧客数の増加に伴い低下することが窺える。顧客数の増加に伴い、指定到着時間が多様化するの、効率的な配車配送計画を策定するのが困難になるからである。

非早着時間率は、配車配送計画の高度化により、わずかに低下する。AVRSが遅刻を避ける傾向にあるので、そのぶん早着時間が増大することを意味する。つまり、AVRSは、道路に負担を強いることによって、遅刻費用を抑制している。時間指定ニーズを満足できずに顧客を失うことを、物流業者は恐れるので、物流業者は、早着よりも遅刻の方を問題視する。つまり、早着と遅刻に関するペナルティの大きさの差が、この結果に深く関与している。非早着時間率の低下傾向は、顧客数の増加に伴い顕著に顕れる。顧客数の増加に伴う指定到着時間の多様化が、ここでも影響を及ぼしている。

6. おわりに

配車配送計画の高度化は、配送費用や走行時間の低減を介して、物流業者にとっても社会にとっても望ましい結果をもたらす可能性がある。リンク所要時間の不確実性を明示的に考慮した配車配送計画システムを構築・利用すれば、その傾向が、より顕著になることが予想される。しかし、社会的にさらに望ましい成果を得るためには、訪問先での早着が抑制されるべきである。

早着による路上駐停車への対策として、路上駐停車スペースの設置も考えられるが、その整備には新たな

費用が発生する。

配送費用の最小化を目的関数とした高度な配車配送計画の場合、最適解では早着時間が大きくなるが、配送費用が高度化以前よりも抑制され、かつ、早着時間がさほど大きくなりすぎないような解も存在する。そのような解は、配送費用最小化の意味では決して最適ではないが、早着を抑制する点で有用である。物流業者の配車配送行動を、そのような解に基づく行動へと導くことも、今後重要となろう。

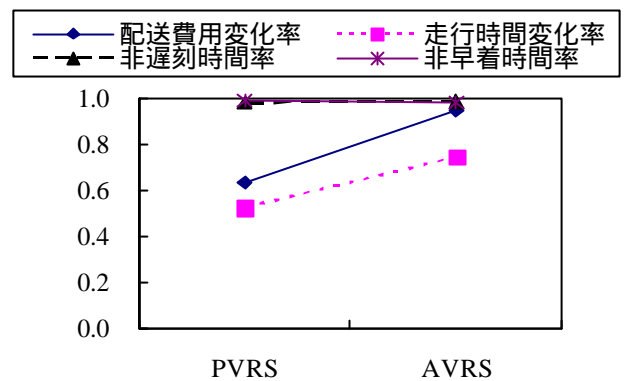


図-2 評価指標の比較（顧客数5）

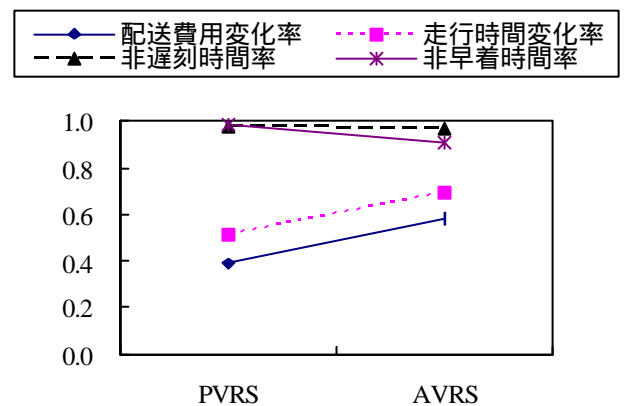


図-3 評価指標の比較（顧客数20）

【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。
- 2) 山田忠史，谷口栄一，伊藤裕：貨物共同輸配送のモデル化と効果および成立に関する一考察，土木計画学研究・論文集，Vol.18，No.3，pp.409-416，2001。
- 3) 谷口栄一，山田忠史，柿本恭志：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的配車配送計画，土木学会論文集，No.674/IV-51，pp.49-61，2001。
- 4) 松本昌二，白水義晴：旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響，土木学会論文集，No.353/IV-2，pp.75-82，1985。