

ITSを活用した高度な配車配送計画について*

Advanced vehicle routing and scheduling problems with ITS *

安東直紀**・谷口栄一***・山田忠史****

By Naoki ANDO**・Eiichi Taniguchi***・Tadashi YAMADA****

1. はじめに

都市内集配トラックは今日の社会生活を維持する上で欠かせない存在である一方、都市内交通に大きな影響を与えていることもまた事実である。多くの場合、都市内集配トラックの配送計画はドライバー自身が自らの経験に基づいて配送順序・経路を決定しているか、あるいは熟練した配車係がこれらを作成しているが、効率的な配車配送計画が実現した場合、物流コスト・環境負荷の削減が可能であることが知られている¹⁾。

一方現在進められているITSの展開により都市内道路ネットワークの多数のリンクに対し、旅行時間情報等の交通情報がVICS (Vehicle Information Communication Systems)等により提供され、近年では一般でも入手可能となってきた。

そこで本研究では、このようにして得られる旅行時間情報を蓄積し、履歴情報として旅行時間分布を用いる確率論的配車配送計画 (VRPTW-P) モデルを構築した。そして仮想道路ネットワークにおいて、VRPTW-Pに用いる旅行時間情報を変化させ、旅行時間分布を用いる利点について考察した。またこのモデルにより得られる最適解を検証するため、大阪市南部地区の道路ネットワークにおいて都市内配送実験を実施し、分析を行った。またVRPTW-Pにおいて経路選択に学習を行うモデルを構築し、その効果を確認するため大阪市中央部の道路ネットワークにおいて都市内配送実験を実施した。

2. 確率論的配車配送計画 (VRPTW-P) モデル

本研究において、物流企業における最適な配車配送計

*キーワード: 物流計画, ITS, 交通情報

**正員, 工修, 京都大学大学院都市社会学専攻

(京都市左京区吉田本町,

TEL075-753-4788, FAX075-752-5303)

***フェロー, 工博, 京都大学大学院都市社会学専攻

(京都市左京区吉田本町,

TEL075-753-4789, FAX075-752-5303)

**正員, 工博, 京都大学大学院都市社会学専攻

(京都市左京区吉田本町,

TEL075-753-4787, FAX075-752-5303)

画とは次のような配送条件の下で総コスト(固定コスト, 運行コスト, 遅刻・早着ペナルティ)を最小化するものであると考え、確率論的配車配送計画モデルの定式化を行った²⁾。

[配車配送条件]

- トラックは一日に複数回の巡回を行うことができる。
- 顧客はトラックの配送ルートのどれかに必ず割り当てられ、貨物はトラックの一回の訪問で全て集荷あるいは配送される。
- 一つの配送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が出来ない。
- 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出来ない。

このモデルではトラックの出発時刻, 顧客の配送ルートへの割り当て, 顧客の訪問順序を決定する。

なお各顧客が集配トラックに配送してほしい指定時間帯 (time window) をもち、トラックがその指定時間帯より早着・遅刻した場合にはペナルティを支払うことにより配送を続けることができるものとした。

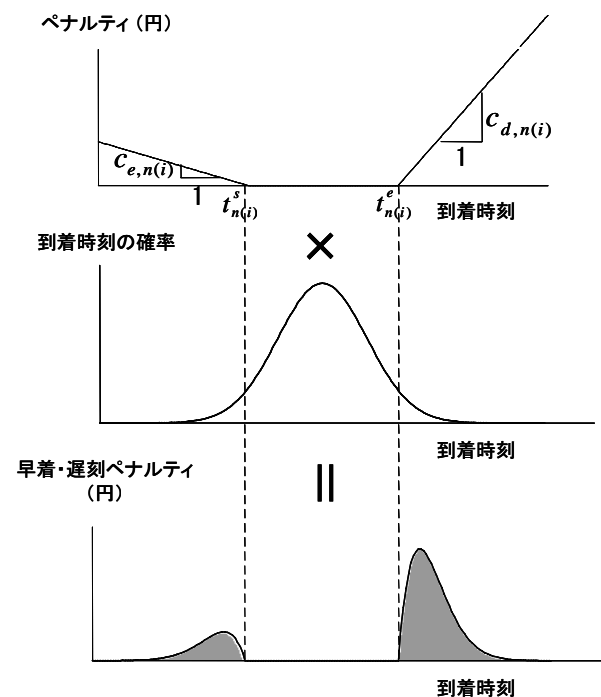


図1: 早着および遅刻ペナルティ

図1に早着・遅刻ペナルティの考え方を示す。確率論的配車配送計画では旅行時間の確率分布を用いて遅刻・早着ペナルティを算出する。このように計算された遅刻・早着ペナルティと固定コスト、運行コストとの和で表される総コストを最小化するような訪問順序・配送開始時刻の組み合わせを求めた。

3. VRPTW-PIにおける交通情報の影響分析

本研究ではノード数 5×5、リンク数 80 の正方形格子状仮想道路ネットワークに対しブロック密度法による交通流シミュレーションによって都市内の状況を再現し、確率論的配車配送計画の入力となる旅行時間分布を作成した。

本研究で対象とする道路ネットワークはすべてのノードをセントロイドとし、各リンクの延長は 4km、リンクにより自由走行速度は 20km/h および 15km/h とした。飽和密度は阪神高速道路のデータを参考に 150 台/km・車線とした。

この仮想道路ネットワークに対し、阪神高速道路の時間帯別発生交通量分布に従い車両を 1 日 50 万台±5%、30 日間で平均約 49 万 9 千台をランダムに発生させ都市内の交通状況を再現した。OD は隣接ノードへのトリップが半数程度となるようにすることで短距離トリップが支配的となるよう作成した。これらにより得られた 30 日間の交通状況を各リンクの履歴情報として用いた。

その後、確率論的配車配送計画を実施し得られた配送パターン毎の配送コストを検証するため、同様にしてさらに 10 日分の交通流シミュレーションを実施した。この間の交通量は平均約 49 万 6 千台であった。

30 日間の交通流シミュレーションの結果得られた旅行時間情報を元に、表1の各条件のように旅行時間分布の更新間隔を変化させた旅行時間分布を作成する。これらを入力データとして確率論的配車配送計画を実施し物流コストが最小となる最適解(事前計画)を得る。その後 10 日間の交通流シミュレーションの中でケース毎の事前計画に基づき配送を実施し、物流コスト等の変化について検討する。

表1 入力条件一覧

ケース	条件
Base	基本ケース：リンク自由走行時間一定
5m~24h	旅行時間情報更新間隔(5分~24時間)

得られたケース毎の 1 日あたりの平均総コストを図 2 に示す。また、1 日あたりの平均走行時間を表2に示す。

図 2 より、すべてのリンクの旅行時間情報を終日自由走行時間一定として配送計画を実施した基本ケース(Base)と比較して、5 分毎の旅行時間分布に基づき確率論的配車配送計画を実施したケース 5m では、総コストは 87.2%、走行時間は 10.7%削減された。この削減量の多くは遅刻ペナ

ルティの削減であったが、実際の物流企業において重視される運行コストについても旅行時間情報の精度が高まるにつれ減少した。なお使用されたトラック台数は、すべてのケースにおいて 2 台であった。また表 2 よりおおむね旅行時間情報の更新間隔が短いほどトラックの走行時間も短縮される傾向が認められる。また、各ケースの総コストの標準偏差も平均と同様の傾向を示し、ケース 5m は標準偏差も最小で、非常に安定した配送を実現可能であることがわかった。また、CO₂、NO_x、SPM と言った環境負荷についても、ケース 5m は基本ケースに対し、それぞれ 9.7%、9.5%、8.2%減少した。

以上より仮想道路ネットワークにおいて、確率論的配車配送計画に旅行時間分布を用いる場合、詳細な旅行時間情報を用いることで総コストのみならず環境負荷も削減可能であることがわかった。

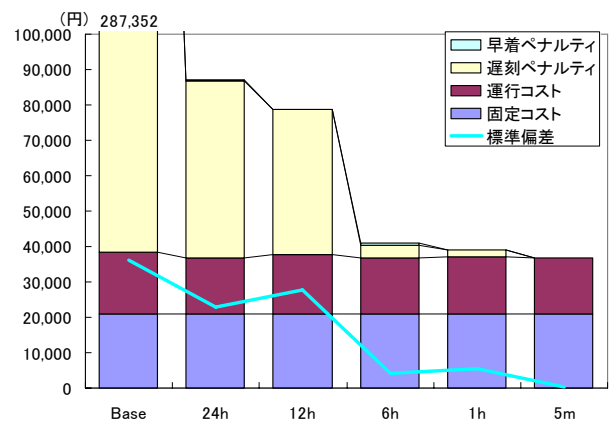


図 2 ケース毎の平均総コスト

表2 トラックの走行時間

ケース	走行時間(分)	ケース	走行時間(分)
24h	1,133	1h	1,170
12h	1,204	5m	1,128
6h	1,134	Base	1,263

4. 大阪市南部地区における都市内配送実験

次に本研究では、確率論的配車配送計画の効果を都市内配送実験により測定することとした。そこで都市内道路ネットワークの旅行時間情報および実際の配送行動を取得するため、大阪市南部地区において家電製品を配送する貨物トラックに、GPSアンテナを装備したPDAをプローブ装置として設置し、これらの車両をプローブカーとして使用し、旅行時間情報・配送情報を取得した。

使用した貨物トラックは2t車1台、延べ66台・日であった。データ収集期間は2004年3月13日~2004年6月2日である。

プローブカーが実際に走行した経路を元に、解析に使

用する道路ネットワークを作成した。使用したネットワークを **図 3** に示す。本ネットワークはプローブカーの走行経路・顧客位置を考慮し、各リンクがおおむね VICS リンクと対応するように設定した。本ネットワークは 69 ノード、218 リンクからなり、デポは 1 ノード、顧客は 22 ノードである。図 3 中の○は顧客ノードを、□はデポノードを示す。また図 3 のリンクのうち、太線で示されるリンクは VICS により旅行時間情報が得られているリンクを示す。本ネットワークにおいて VICS により旅行時間情報が得られているリンクについては VICS の旅行時間情報を、それ以外のリンクについては

はプローブカーにより取得した旅行時間情報を用いて推定した旅行時間情報を用いて旅行時間分布を作成し、確率論的配車配送計画に適用した。

本実験では 22 の顧客ノードより 11 カ所の顧客を選定し、実際の指定時間帯に基づき、それぞれ時間帯指定を設定した。それらの顧客に対し、通常行われる配送と確率論的配車配送計画により得られた最適解に基づく経路・訪問順序に従うトラックをそれぞれ 1 台同時刻にデポより出発させ、それぞれの配送をプローブ装置により記録した。配送実験は 5 日間実施し、配送コスト・環境負荷に関して考察を行う。

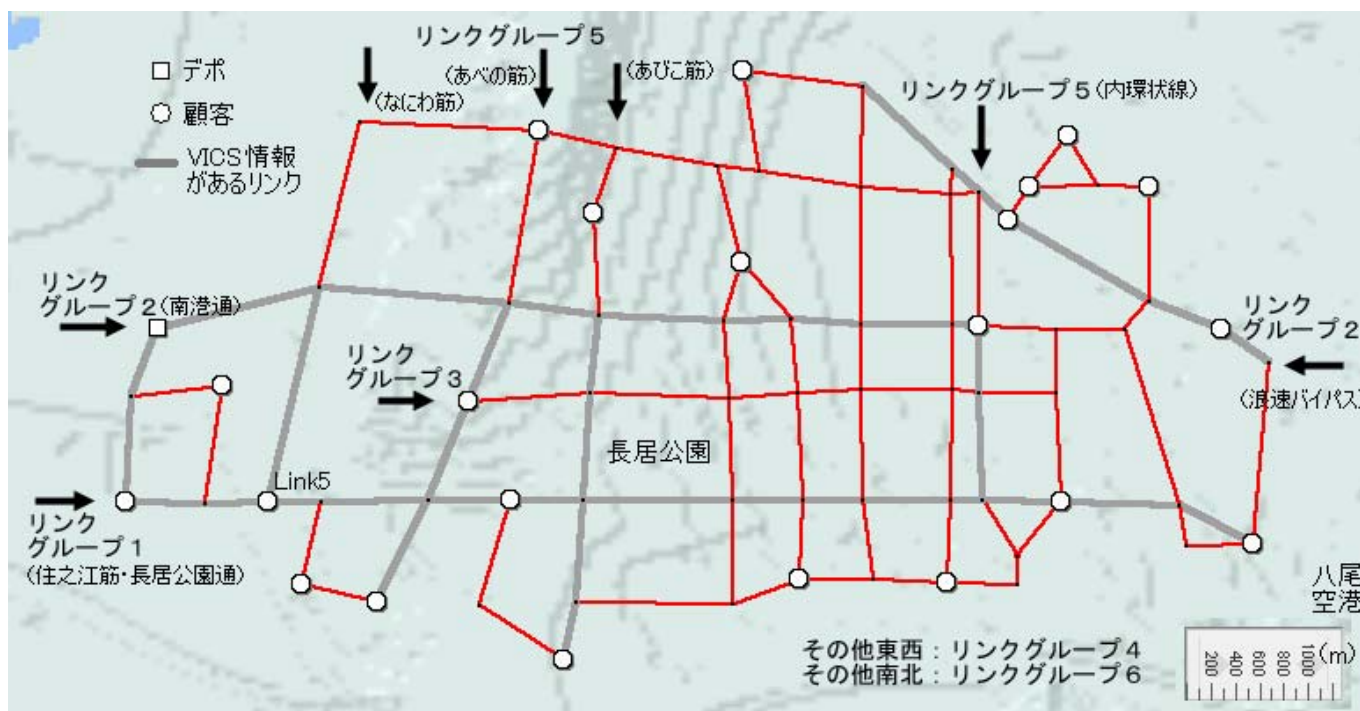


図3大阪市南部の道路ネットワーク

表3コスト比較(5日間)

	通常の配送経路		確率論的配車配送計画			
	平均(円)	標準偏差(円)	平均(円)	削減率(%)	標準偏差(円)	削減率(%)
固定コスト	10,418	0	10,418	0	0	0
運行コスト	3,055	134	2,932	4.0	52	61.2
遅刻ペナルティ	1,018	848	548	46.2	191	77.5
総コスト	14,490	972	13,897	4.1	242	75.1

表3 の固定コストはいずれのケースも使用トラックが 2t 積トラック 1 台のため、同一となっている。運行コストに関しては、確率論的配車配送計画の方が平均・標準偏差とも通常の配送と比べて 4.0%と 61.2%それぞれ低くなっている。遅刻ペナルティに関しては、確率論的配車配送計画の方が通常の配送経路に比べて平均・標準偏差とも小さくなった。この理由として確率論的配車配送計画では遅刻ペナ

ルティをできるだけ小さくしようとする傾向があることがあげられる。すべてを加えた総コストについても確率論的配車配送計画の方が通常の配送経路に比べて平均が 4.1%、標準偏差が 75.1%減少した。

配送活動が環境に与える影響についても検討を行った。その結果、確率論的配車配送計画により得られた最適解は通常の配送経路と比較して、総走行時間が 6.8%、CO₂ 排

出量が 7.6%, NOx 排出量が 6.9%, PM 排出量が 8.0%, それぞれ削減可能であることがわかった。このように確率論的配車配送計画を用いることによって物流コスト削減のみならず渋滞緩和および環境負荷低減に効果があることが実証された。

5. 経路選択に学習を用いた確率論的配車配送計画

確率論的配車配送計画において、顧客の訪問順序を求める際に旅行時間分布を使用するが、それぞれの顧客間の経路選択ではリンク旅行時間の平均値を用いた最短経路探索を用いてきた。経路選択に最短経路を用いる利点は、Dijkstra 法¹⁾に代表される高速な最短経路探索手法が存在することである。また動的配車配送計画のようにリアルタイムに得られる単一の旅行時間情報を用いて経路を求める場合、計算時点で得られている旅行時間情報を用いて求めた最短経路を、最適解とすることは合理的と考えられる。一方履歴情報である旅行時間分布を用いて、事前に最適解を求める確率論的配車配送計画において、経路選択に平均値等の単一値を用いなければならない必然性はない。

そこで本研究では、経路選択において最短経路探索ではなく、学習を用いた経路探索を行い、確率論的配車配送計画に適用するモデルを構築した。また経路学習を確率論的配車配送計画に適用する効果を、大阪中央部において実施した実証実験により測定した。

本研究では学習を経路選択に適用した強化学習手法の一つであるアンツルーティングを用いることとした。アンツルーティングはアリの採餌行動モデルを利用した経路制御手法であり、アリが化学物質(フェロモン)によって巣と餌の間の最短経路を発見する方法を応用し、ノード間の最短経路を見つける経路選択学習手法である。この手法は確率的に良好な経路を選択するため、ある特定の状況の下で、最適な経路を常に保持しようとする手法に比べ、ネットワークの変化に対する適応力に優れている³⁴⁾。

経路選択にアンツルーティングを適用する効果を検証するため、大阪市中央部のネットワークにおいて、従来の最短経路探索を用いた経路選択(VRPTW-P)と、アンツルーティングによる経路学習(VRPTW-PA)を確率論的配車配送計画に適用し、それぞれの解に基づき配送を行う実証実験を実施した。

アンツルーティングでは詳細な旅行時間情報が必要となるため、使用した道路ネットワークはすべて VICS リンクにより構成され、得られた旅行時間情報を学習に用いることとした。実験に用いたネットワークは 225 ノード・789 リンクより構成される。このネットワークに対し、25 の顧客ノードを設定し、それぞれに時間帯指定を設定した。

VRPTW-PA および VRPTW-P により得られた最適解について、前節と同様にプローブ装置を設置したトラッ

クを用いて配送実験を行った。実験期間は 2005 年 11 月 17 日～24 日の平日 5 日間とし、使用トラック台数はいずれのケースも 2 台であった。プローブ装置により記録されたトラックの走行データより得られたコストの内訳を表 4 に示す。

表 4 配送実験結果(円)

	VRPTW-P	VRPTW-PA
運行	9,703	8,955
遅刻	31,115	9,267
早着	61	59
総コスト	61,715	39,116

表4は実施した5日間の配送の平均である。表4より経路選択に学習を用いた確率論的配車配送計画では、最短経路探索を用いた場合に比べ、すべてのコスト項目で削減がなされており、総コストでは36.6%の削減が達成された。またトラックの総走行距離に関してはVRPTW-Pが5.7%少なく、平均速度はVRPTW-PAが14.9%高いという結果であった。その結果、環境負荷に関してはCO₂, NOx, SPMのいずれもVRPTW-Pの方が少なかったが、その差は最大でも2.5%であった。これはいずれのケースも確率論的配車配送計画により得られた最適解であり、実際に物流企業により行われる配送では、これらの最適解の配送より大きな環境負荷を生じせしめているものと推察される。

5. おわりに

ITSにより得られる詳細な旅行時間情報を用いた高度な配車配送計画を実施することで、効率的で環境に優しい都市内配送の実現可能性を数値解析・実証実験により示すことが出来た。

参考文献

- 1) 谷口栄一, 根本敏則: シティロジスティクス, 森北出版, 2001
- 2) 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論的配車配送計画」土木学会論文集No674/IV-51, pp49-61, 2001.4
- 3) Matsuo, H. and Mori, K.: Accelerated ants routing in dynamic networks, 2nd international conf. on software engineering, artificial intelligence, networking & parallel/distributed computing, pp.333-339, 2001.
- 4) 齊藤亨, 松尾啓志: 「動的な環境下における履歴情報を用いた確率的ルーティング」, 電子情報通信学会研究会スペクトル拡散, SST2001-168, pp.289-296, 2002.