



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
No. 25-2

研究テーマ

物流の効率化と環境負荷の低減の両立を
目指した道路政策についての研究開発

研究代表者： 京都大学教授 谷口 栄一
共同研究者： 京都大学准教授 Ali Gul Qureshi
京都大学助教 中村 有克
京都大学研究員 Joel S. E. Teo

平成 28 年 7 月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式3を挿入）	1
第1章 はじめに	3
1.1 都市における貨物車交通マネジメントの概要	3
1.2 マルチエージェントモデルの概要	3
第2章 土地利用および学校・病院・老人ホームなどを考慮した配車配送計画	5
2.1 土地利用を考慮した配車配送計画	5
2.2 学校・病院・老人ホームなどを考慮した配車配送計画	9
第3章 マルチエージェントモデルを用いた都市物流施策の評価	14
3.1 マルチエージェントモデルにおける利害関係者の行動のモデル化	14
3.2 都市内物流施策の評価	17
3.3 マルチエージェントモデルの適用性の評価	21
第4章 まとめ	22
4.1 貨物車交通マネジメントの活用シーンおよび必要となる情報・データ	22
4.2 今後の展開	23

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 25 年度採択)
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.25-2	物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した道路政策についての研究開発	京都大学 教授 谷口 栄一

物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した道路政策を立案することを実現するため、貨物車交通マネジメントの方法論を確立することを研究目的として、都市物流施策を評価するためのタイムウィンドウ付き配車配送計画モデル及びマルチエージェントモデルに関する研究開発。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

道路政策において、物流の効率化を考える場合、一般的にはより所要時間が短く、信頼性の高い道路ネットワークを構築することが基本となる。しかし、交通渋滞が慢性化し、環境問題・交通事故の問題を抱える大都市においては、既存の道路ネットワークを活用し、物流を効率化するとともに、環境の改善・省エネルギー・交通安全に資する貨物車交通マネジメントを実施することが重要な課題となる。荷主・物流事業者にとっては、物流の効率化すなわちコスト削減が目標となるが、一方、住民にとっては、環境の改善・省エネルギー・交通安全が目標となる。両者のバランスをとり、物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した道路政策を立案することが日本の経済発展にとって重要な課題である。このような背景のもと、本研究においては、物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した道路政策を立案するための貨物車交通マネジメントの方法論を確立することを目的とする。

2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

大阪府域における物流事業者4社の集配トラック(合計115台)の走行履歴を、GPS付プローブ装置を用いて1か月間にわたって収集した。これらのデータを用いて主に土地利用との関連について分析を行うとともに、土地利用を考慮したタイムウィンドウ付き配車配送計画モデルを開発し、プローブデータとの比較を行った。さらに、荷主、物流事業者、共同配送事業者、行政、顧客などの都市物流に関連する利害関係者の行動をモデル化したマルチエージェントモデルを開発し、大阪府の道路ネットワークに適用した。このモデルでは、利害関係者が強化学習を通じて行動を決定するものとした。共同配送、NO_x排出量の少ない道路リンクを通過したときにエコポイントを行政が荷主に与えるグリーン物流、パーキングマネジメントなどの複数の都市物流施策を実施した場合の効果について検証を行った。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

大阪府域において、土地利用を考慮したタイムウィンドウ付き配車配送計画モデルを適用して計算した結果とプローブデータによる測定値との比較を行った。その結果、土地利用を考慮したタイムウィンドウ付き配車配送計画モデルの最適経路は、プローブデータの測定値と比べて住居専用地域を通過する走行時間を削減できることがわかった。したがって、このようなモデルを活用することによって、コスト削減とともに住居専用地域における環境の改善に貢献できると考えられる。また、大阪府域において、VRPTW-SFモデルを適用して計算した結果とプローブデータによる測定値との比較を行った。その結果、VRPTW-SFモデルの最適経路は、プローブデータの測定値と比べて病院・学校・老人ホームなどの近くを集配トラックが通過する回数・距離を削減できることがわかった。したがって、このようなモデルを活用することによって、コスト削減とともに病院・学校・老人ホームなどの近くにおける環境の改善に貢献できると考えられる。

複数の利害関係者の行動をモデル化したマルチエージェントモデルを用いて大阪府域を対象として複数の都市物流施策の評価を行った。その結果、共同配送とグリーン物流の併用は、経済

的観点・環境的観点からみてバランスのとれた成果が期待できることがわかった。また、グリーン物流施策を単独で実施するよりも共同配送と組み合わせるほうが大きい効果が得られることが示された。すなわち、マルチエージェントモデルを用いることによって、コスト削減や環境負荷低減を両立させ、各利害関係者のそれぞれの目的をある程度満足させるような施策の組み合わせを見つけることができる。

本研究において提案している貨物車交通マネジメントの方法は、都市部における貨物車交通マネジメントの公民連携の協議会(Freight Quality Partnership : FQP)において活用することができる。このような協議会において、都市物流施策を実施した場合の効果についてマルチエージェントシミュレーションを行って予め把握し、効率性と環境負荷低減を両立させる貨物車交通マネジメントを実施することができる。

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- 1) Teo, J.S.E., Taniguchi, E. and Qureshi, A.G. Evaluation of urban distribution centers using multiagent Modeling with Geographic Information Systems, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2478, pp.35-47, 2015.
- 2) Teo, J.S.E., Taniguchi, E., Qureshi, A.G., Mai, V.P. and Uchiyama, N., Towards a safer and healthier urbanization by improving land use footprint of last-mile freight delivery, 94th Annual meeting of Transportation Research Board, 2015.
- 3) 小川慶輔、谷口栄一、Ali Gul Qureshi、中村有克、Joel S.E. Teo、マルチエージェントシステムを用いた都市内物流施策の評価に関する研究、第50回土木計画学研究発表会、2014.

5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

今後、本研究で得られた成果を実際に行政が都市物流施策を実施する場合に適用するために、配車配送計画モデルにおいて、顧客の需要、配送トラックの動き、貨物の動きなどについて、これまでよりも格段にデータ数が多いビッグデータが使用できるようになってくるので、より高速で配車配送計画の最適解を求めることができるようなアルゴリズムを開発することが課題である。そのためにたとえば並列計算によるメタヒューリスティクスのアルゴリズムの開発が期待される。また、都市物流施策を評価するためのマルチエージェントモデルにおける各利害関係者の行動を記述する際に用いる強化学習モデルについて、動的に変化する環境に適切に対応するために、シミュレーションの各エピソードにおいて、取るべき方策を選択できるような学習モデルを開発することが課題である。そのためにたとえばAdaptive Dynamic Programmingなどによるより高度な学習アルゴリズムの開発が期待される。

6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

本研究で得られた研究成果のうち、最も重要なものはマルチエージェントシミュレーションを用いた貨物車交通マネジメントのシステムである。このシステムを実務に反映させるために最もふさわしいのは各利害関係者が一堂に会する公民連携の協議会(Freight Quality Partnership: FQP)であり、その協議会において、荷主、物流事業者、行政、住民などがそれぞれ持っている情報・データを提供して共有することが重要である。そのような情報・データを用いてマルチエージェントシミュレーションを行い、これから実施しようとする貨物車交通マネジメント施策の事前評価を行い、コスト削減、CO₂・NO_x・SPM排出量削減、渋滞緩和効果などの項目について高い効果が得られる複数の施策の組み合わせを選択することができる。その後、実際に施策を実施して、その効果を評価し、もし予想外の結果が出れば、またフィードバックをして同じプロセスとたどる。このようなPDCAサイクルのマネジメントを行うことによって、効率的かつ環境にやさしい都市物流システムを構築することができる。このような方法は、道路の賢い使い方につながるものであり、道路政策の質の向上に資するものである。また、物流は地域経済の土台となっているので、地域の社会経済的発展に大きな貢献をすると期待される。

7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等)

特になし。

第1章 はじめに

1.1 都市における貨物車交通マネジメントの概要

物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した貨物車マネジメントが可能となったのは 21 世紀に入ってからであると考えられる。21 世紀に入って ICT (Information and Communication Technology) および ITS (Intelligent Transport Systems) を活用することが可能になり、これらの新技術を用いて効率的かつ環境にやさしい貨物車交通マネジメント施策を実施することができるようになった。表-1.1 は貨物車交通マネジメント施策の例を示す。

表-1.1 貨物車交通マネジメント施策の例 (PIARC TC2.3 報告書, 2012)

施策		例		
交通マネジメント	市街地通過マネジメント	インフラ整備	- 環状道路、バイパス	
		交通マネジメント	- 市街地通過規制、地区内通過規制 - 通過ルートに主要幹線を指定	
	市街地流入・流出マネジメント	インフラ整備	- 都市内道路ネットワーク内の道路機能の明確化 (高速度道路、主要幹線道路、幹線道路) - 市街地外積み替え拠点	
		交通マネジメント	- トラックルートに主要幹線を指定 - 市街地中心部や住宅街へのトラック進入禁止	
	駐車場マネジメント	インフラ整備	- 配達施設	
		交通マネジメント	- トラック専用駐車場の指定	
	時間マネジメント		- 市街地中心部や住宅街へのトラック進入可能時間帯指定 - トラックと乗用車の駐車場タイムシェアリング - 夜間早朝配達	
	車両マネジメント		- 配達車両の小型化 - 配達車両の低排出化	
	の改善方法	共同配送	インフラ整備	- 共同配送センター - 市街地外積み替えターミナル (大型車から小型車への積み替え)
			交通マネジメント	- 共同配送の合意
インターモーダル輸送		インフラ整備	- インターモーダル輸送ターミナル (輸送モード間の積み替え設備)	
調和都市の	土地利用計画	インフラ整備	- 主要幹線道路沿いの環境緩衝帯設置	
		土地利用マネジメント	- 主要幹線道路沿いの住宅建築規制	
その他	車両の流れを改善		- ITS, ICT	
	組織の活動		- Freight Quality Partnership	

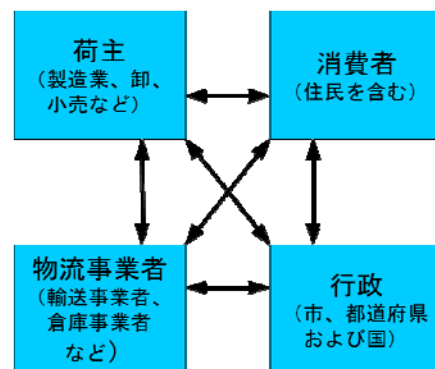


図-1.1 都市における貨物車交通マネジメントにおける利害関係者

しかし、都市における貨物車交通に関連する利害関係者は多く、図-1.1 に示すように荷主、物流事業者、行政、消費者が主な利害関係者である。行政が貨物車交通マネジメント施策を実施する場合に、各利害関係者がその施策に対してどのような対応行動をとるのか、また目標とする環境改善効果が本当に発揮できるかどうかをあらかじめ知る必要がある。そのために本研究において、ITS を活用して貨物車の動きをプローブデータとして観測し、マルチエージェントモデルを用いて貨物車交通マネジメント施策の評価を行う方法を提案する。

1.2 マルチエージェントモデルの概要

複数の利害関係者を内包する貨物車交通システムは複雑とされているが、マルチエージェントモデルを適用することによりそのシステムを再現できる。一般に、マルチエージェントモデルは複数のエージェントの行動及び相互作用を表現することができるため、都市内交通システムに係る利害関係者の振る舞いを理解するのに、また都市内物流施策の実施に対する利害関係者の反応を理解するのに適切なモデ

ルであるといわれている。また、マルチエージェントモデルは、交通マネジメントにおける意思決定をサポートするモデルでもあるとされている。マルチエージェントモデルにおいて相互作用する複数のエージェントの存在が許容されている。それぞれは与えられた環境の中で、その意思決定に際して外的指示を受けずとも、自身の目的を達成すべく自己判断する。マルチエージェントシステムにおけるエージェントの特徴は以下のようになる。

- 明確な判断基準を持って問題解決を行う主体
- 与えられた環境の状態を知覚し、それを元に行動できる主体
- 決められた目標を持つ主体
- 自身の行動をコントロールできる主体
- 受動的であり能動的でもあり得る主体

谷口ら¹⁾は、貨物車交通システムにおいて、物流事業者・荷主・行政の3エージェントをマルチエージェントモデルの中に想定した。ここでは、物流事業者と荷主、荷主と行政、そして物流事業者と行政は相互にコミュニケーションをとっている。一方で、物流事業者同士、荷主同士、そして行政同士の間のコミュニケーションは存在しない。各エージェントは各々の行動価値を最大化するように行動し、エージェント間の協力を想定されていない。エージェントに環境への適応性の機能を保持させる方法の一つとして、エージェントに学習能力を持たせる方法がある。これによりエージェントは、与えられた環境について適切な状態を的確に知覚するとともに、過去の経験を踏まえ今後の行動を改善することが可能になる。実際、谷口ら¹⁾は、マルチエージェントモデルに強化学習を取り入れた。強化学習とは、外的指示を受けずに、エージェント自身が試行錯誤によって、行動価値を最大化するような状態を発見しようとする学習方法である。強化学習では、エージェントがとった行動に対する評価結果がエージェントに提示され、各エージェントは提示された評価結果を学習することにより、自身にとって望ましい行動を探索する。評価結果の学習とは、学習主体が自身の行動の結果得られる様々な報酬を手掛かりとしながら、単位時間ないし最終的に受け取る報酬の総量を最大化する方策を獲得するということである。また、動的配車配送計画モデルとモンテカルロ学習モデルが、マルチエージェントモデルのもとで、物流事業者の利益の向上及び荷主のコスト削減に貢献することが示されている。さらに、ロードプライシングと共同配送の導入に一定の効果があることが示されている。その他の研究として玉川ら²⁾は、リンク所要時間を単一値で捉えた配車配送計画モデルとQ学習を組み合わせ、高速道路課金制度等の導入が行政・物流事業者・荷主・住民・そして高速道路事業者に対して与える影響を評価した。

このように、マルチエージェントモデルは複数の利害関係者を内包する貨物車交通システムのシミュレーションを可能にするモデルであり、実際にはその枠組の中で様々な手法が用いられることにより、利害関係者の行動を適切に表現できる。本研究ではマルチエージェントモデルの枠組の中で、行政・荷主・物流事業者・顧客・共同配送事業者を利害関係者として想定し、強化学習及び配車配送計画問題を用いたモデルを構築する。

(参考文献)

- 1) Taniguchi, E., Yamada, T. and Okamoto, M., (2007). Multi-agent modelling for evaluating dynamic vehicle routing and scheduling systems. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Volume 7, pp. 933-948.
- 2) Tamagawa, D., Taniguchi, E. and Yamada, T. (2010). Evaluating city logistics measures using a multi-agent model. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol 2, Issue 3, pp 6002-6012.

第2章 土地利用および学校・病院・老人ホームなどを考慮した配車配送計画

2.1 土地利用を考慮した配車配送計画

(1) プローブデータの収集

本研究では、大阪市域を中心とした京阪神都市圏における貨物集配トラックの走行実態を把握するため、運送業者4社（便宜上、以降A社、B社、C社、D社と称する）に協力を仰ぎ、平成25年9月30日（月）～10月30日（水）（一部10月31日（木）のデータ取得あり）までの間、通常通りの配送業務を行っていただき、貨物車両の走行データを収集した。A、B、C社が29台、D社が28台の合計115台を調査対象とした。調査協力車両は、最大積載量が2t～4tの車両であり、主に宅配などで数十軒の集配送先を訪問する車両を選定いただいた。



図-2.1 プローブ端末

図-2.1にプローブ端末を示す。プローブ端末は、エンジンを始動すると同時に計測を開始し、その後自動的に2秒程度の時間間隔で計測を繰り返す。

調査期間内（9月23日（月）～10月31日（木））に取得したデータ総数を表-2.1に示す。ここで、エンジンを始動させてからエンジンを切るまでの運行を1トリップとする。最も特徴的なのは、会社によって総トリップ数に大きな差が出ていることである。具体的にA社とD社を比較すると、総トリップ数・1台あたりの平均トリップ数ともに3倍以上の開きがあることがわかる。この差異は、顧客の位置や営業所

の位置との関係など各社の営業形態に依存すると考えられる。

表-2.1 収集データ総数

運送業者	総車両数 (台・日)	総トリップ数	1台あたり平均 トリップ数
A社	764	38,400	50.3
B社	800	33,774	42.2
C社	769	21,966	28.6
D社	716	11,529	16.1
合計	3,049	105,669	34.7

(2) 用途地域

用途地域は12種類に分類されているが、本研究では、図-2.2のように、住居地域、商業地域、工業地域の3種類に分ける。また、住居地域を住居専用地域（用途地域A）とその他の住居地域（用途地域B）に分ける。商業地域と工業地域を合わせて、用途地域Cとする。

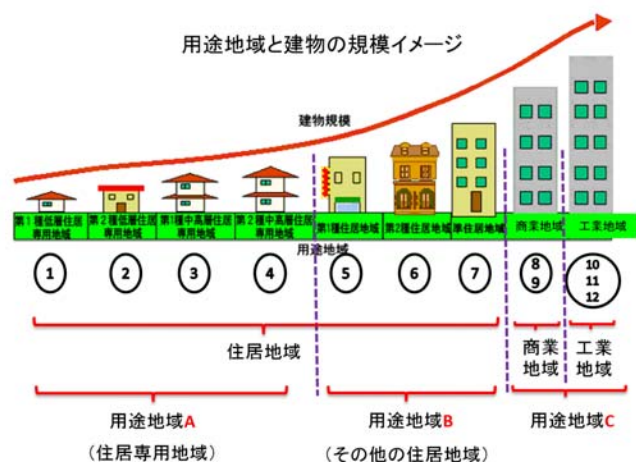


図-2.2 本研究における用途地域の分類

(3) 土地利用を考慮した配車配送計画モデル

本研究では、トラックの走行が望ましくない用途地域にペナルティを設定することで、望ましくない用途地域の走行を減らす仕組みを組み込んだ配車配送計画モデル (VRPTW-LU) を開発する。

用途地域 A (住居専用地域) を、最も走行の望ましくない地域、次いで、用途地域 B (その他の住居地域)、用途地域 C (商業地域・工業地域) と続くとする。具体的には、3 つの用途地域において、それぞれ p_A, p_B, p_C と、単位走行距離当たりのペナルティ値を設定する。

$$c'_{ij} = c_{ij} \left(1 + \frac{\sum_{u \in U} d_{iju} p_u}{\sum_{u \in U} d_{iju}} \right) \quad (2.1)$$

$$c''_{ij} = \begin{cases} c'_{ij}, & \text{if } a_j \leq s'_{jk} \leq b_j \\ c'_{ij} + c_l (s'_{jk} - b_j), & \text{if } b_j < s'_{jk} \leq b'_j \end{cases} \quad (2.2)$$

ただし、

- c'_{ij} : 土地利用を考慮した顧客 i から顧客 j へ移動する際に必要な費用
- c''_{ij} : 土地利用と到着指定時間を考慮した顧客 i から顧客 j へ移動する際に必要な費用
- U : 用途地域の集合 {A, B, C}
- u : 用途地域
- d_{iju} : 顧客 i - j 間における用途地域 u の区間を通過する経路長
- p_u : 用途地域 u におけるペナルティ

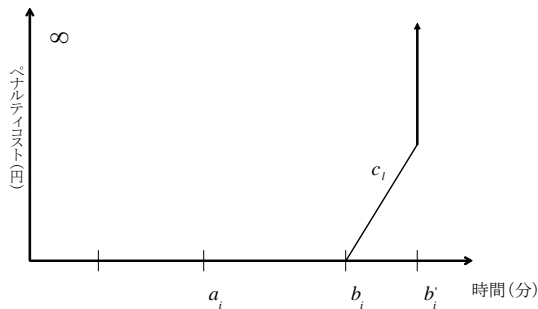


図-2.3 遅刻に関するペナルティ関数

遅刻に関するペナルティ関数を図-2.3 に示す。

この運行費用 c''_{ij} を用いると、ソフトタイムウィンドウ付きの配車配送計画モデルは次のように定式化できる。

Minimize

$$z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c''_{ij} x_{ijk} \quad (2.3)$$

subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K \quad \forall i \in N \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N, \forall k \in K, \quad (2.7)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq q \quad \forall k \in K \quad (2.8)$$

$$s'_{ik} \leq b'_i \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (1.15) \quad (2.9)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b'_i \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (2.10)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - s_{jk} \leq (1 - x_{ijk}) M_{ijk} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (2.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (1.16) \quad (2.12)$$

ただし、

- z : 総運行費用
- i, j, h : 顧客番号, 0は配送拠点を表す
- N : 顧客の集合
- d_i : 顧客 i における需要量
- K : 配送トラックの集合
- k : 配送トラック番号
- A : リンクの集合
- s'_{ik} : 配送トラック k が顧客 i に到着する時刻
- s_{ik} : 配送トラック k が顧客 i にて貨物を引き渡す時刻
- c'_{ij} : 顧客 i から顧客 j へ移動する際の運行費用
- x_{ijk} : 配送トラック k が顧客 i - j 間を移動するときは1, それ以外ときは0をとる変数
- V : 顧客及び配送拠点の集合
- S : V の部分集合
- q : 配送トラックの積載容量

式(2.3)は目的関数であり、全ての顧客に貨物を配送するのに必要な運行費用である。また、これ以降に示される式(2.4)~式(2.12)は制約条件式である。式(2.4)は、各顧客は必ず1台の配送トラックによって貨物が届けられることを意味する制約である。式(2.5)は、顧客へ向かう配送トラックは必ず配送拠点から出発することを意味し、逆に式(2.6)は顧客へ向かった配送トラックが必ず配送拠点を終着点とすることを意味する制約である。式(2.7)は、顧客に到着した配送トラックは、必ず他の顧客または配送拠点へ移動するという収束条件を意味する。式(2.8)は、

配送トラックの積載容量に関する制約条件である。式(2.9)は、各顧客および配送拠点への到着時刻があらかじめ与えられたソフトタイムウィンドウ内であるということの意味する制約である。なお配送拠点のタイムウィンドウとは、配送拠点の営業時間帯のことである。式(2.10)は、貨物の引き渡しを行う時刻に関する制約であり、顧客の希望する到着指定時間帯開始時刻より早く到着した場合でも必ず待機し、到着指定時間帯開始時刻以降に貨物の引き渡しを行うという意味である。式(2.11)は、トラックが顧客*i*から*j*へ訪問する際に、顧客*j*での貨物の引き渡し時刻が顧客*i*での貨物の引き渡し時刻より前になることを禁止する時間枠に関する制約条件である。式(2.12)は、 x_{ijk} が0-1の整数変数であることを示している。

ここでは配車配送計画の近似的最適解を求めるために遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms)を用いる。

(3) 大阪府域への適用

上述の土地利用を考慮した配車配送計画モデルを大阪府域の道路ネットワークに適用した。本研究では、A社のある拠点の10月12日のデータとC社のある拠点の10月14日のデータに対し、土地利用を考慮した配車配送計画モデルを適用した。表-2.2のように、単位走行距離当たりのペナルティ値 p_A , p_B , p_C を変えた3ケースを設定した。

表-2.2 単位走行距離当たりのペナルティ値の設定

ケース	p_A	p_B	p_C
1	0	0	0
2	1	0	0
3	1	0.1	0

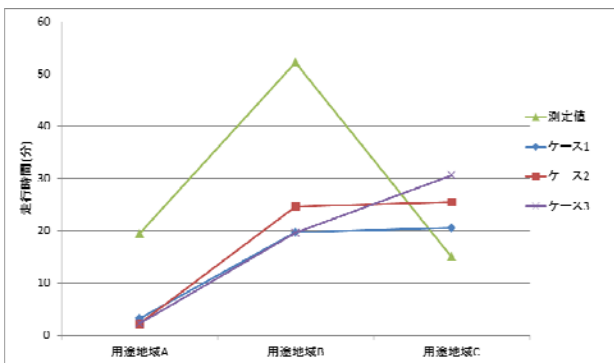


図-2.4 各ケースにおける用途地域区別の走行時間 (A社, 用途地域3区分)

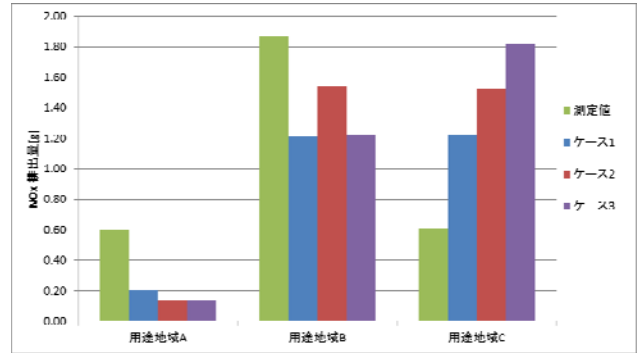


図-2.5 各ケースにおける用途地域区別のNOx排出量 (A社)

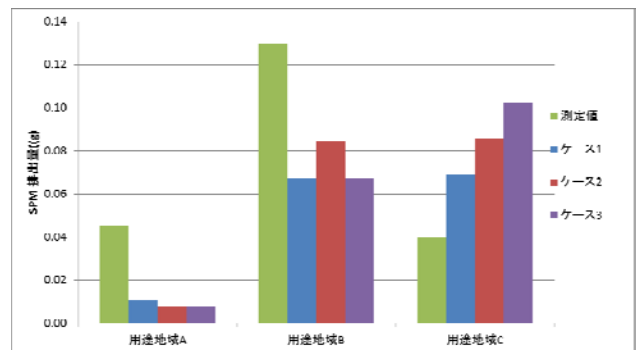


図-2.6 各ケースにおける用途地域区別のSPM排出量 (A社)

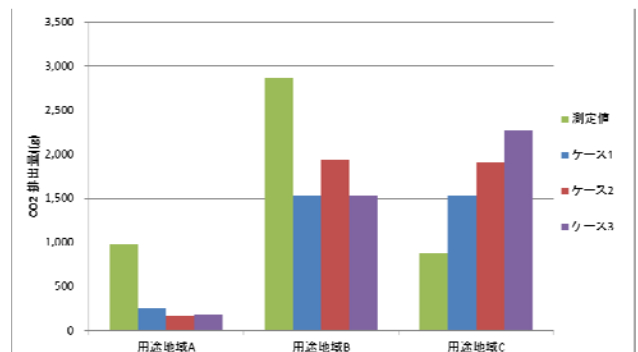


図-2.7 各ケースにおける用途地域区別のCO2排出量 (A社)

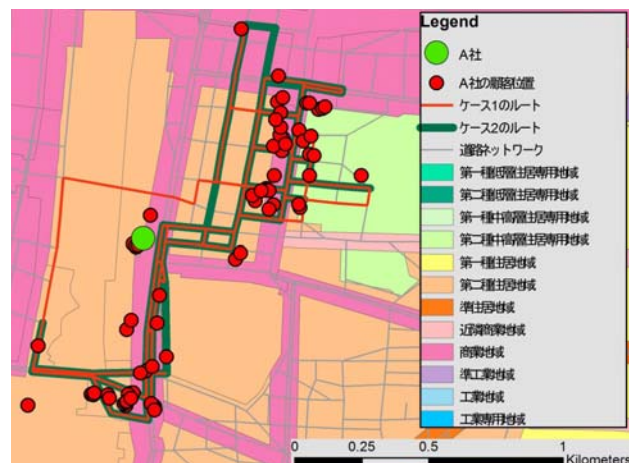


図-2.8 ケース1とケース2におけるトラックの走行経路の比較 (A社)

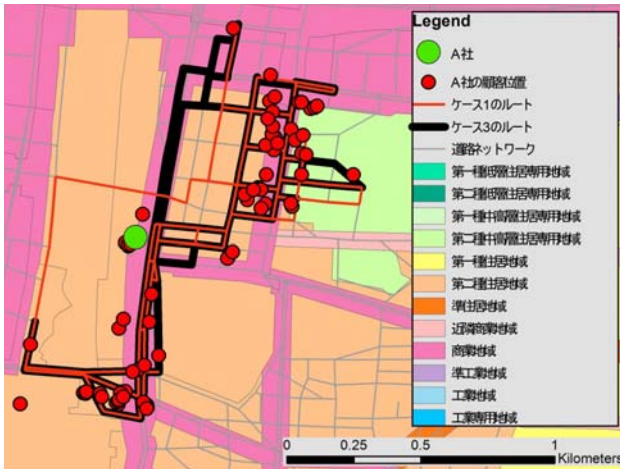


図-2.9 ケース1とケース3におけるトラックの走行経路の比較 (A社)

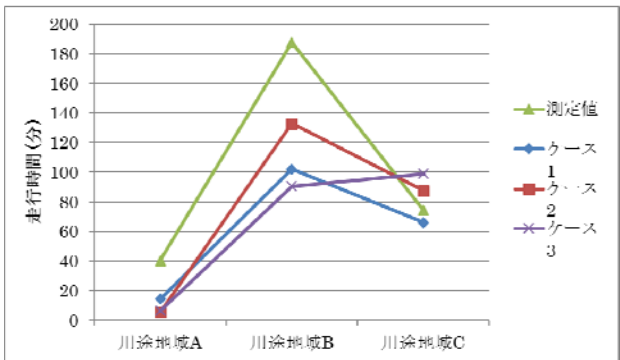


図-2.10 各ケースにおける用途地域区別の走行時間 (C社, 用途地域3区分)

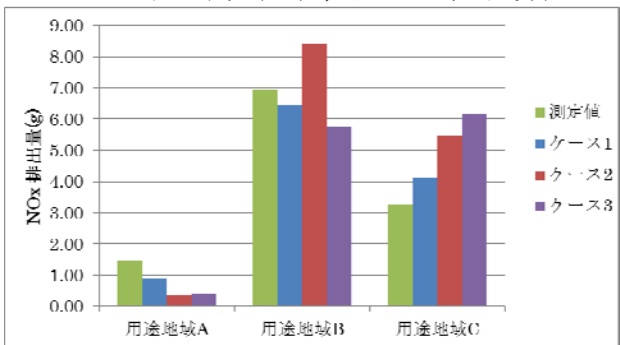


図-2.11 各ケースにおける用途地域区別のNOx排出量 (C社)

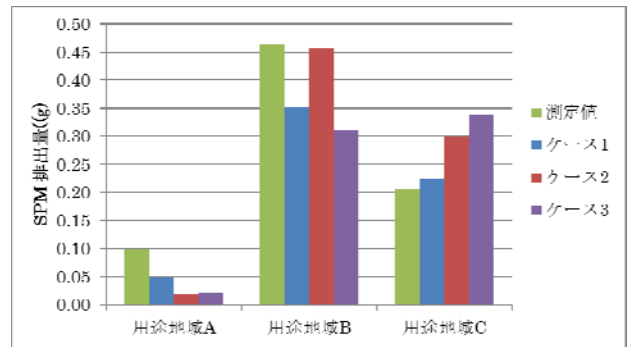


図-2.12 各ケースにおける用途地域区別のSPM排出量 (C社)

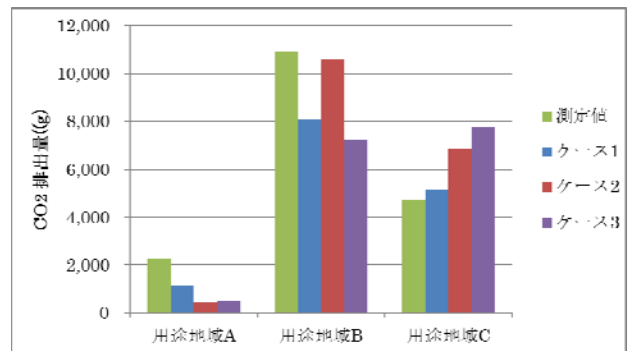


図-2.13 各ケースにおける用途地域区別のCO2排出量 (C社)

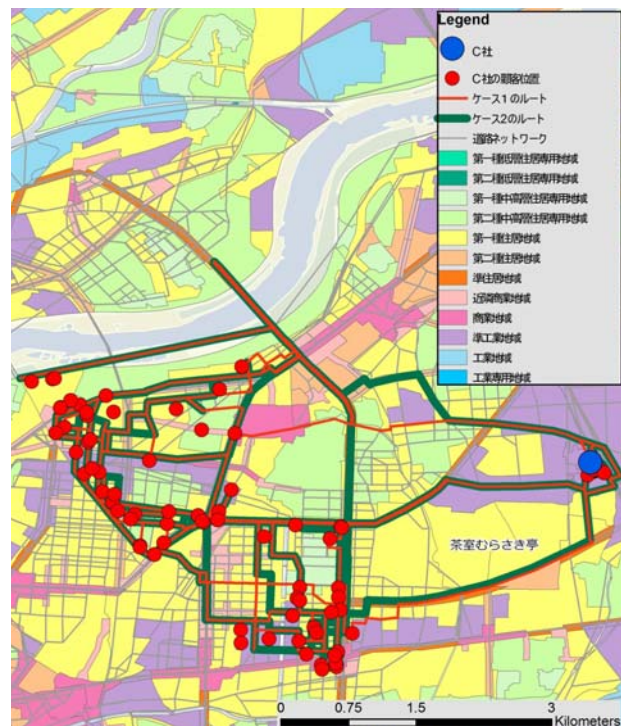


図-2.14 ケース1とケース2におけるトラックの走行経路の比較 (C社)

A社, C社の走行時間, NO_x, SPM, CO₂排出量の計算結果を図-2.4-2.9および図-2.10-2.15

に示す。これらの結果によるとA社においては、プローブデータの測定値に比べて、VRPTW-LUモデルによる走行時間、NO_x、SPM、CO₂排出量がともに用途地域A（住居専用地域）、B（その他の住居地域）において減少している。C社についてもほぼ同じような傾向がみられる。したがって、VRPTW-LUモデルを用いることによってできるだけ住居地域を避けて、商業地域、工業地域を通るような配送経路を選択できることが分かる。

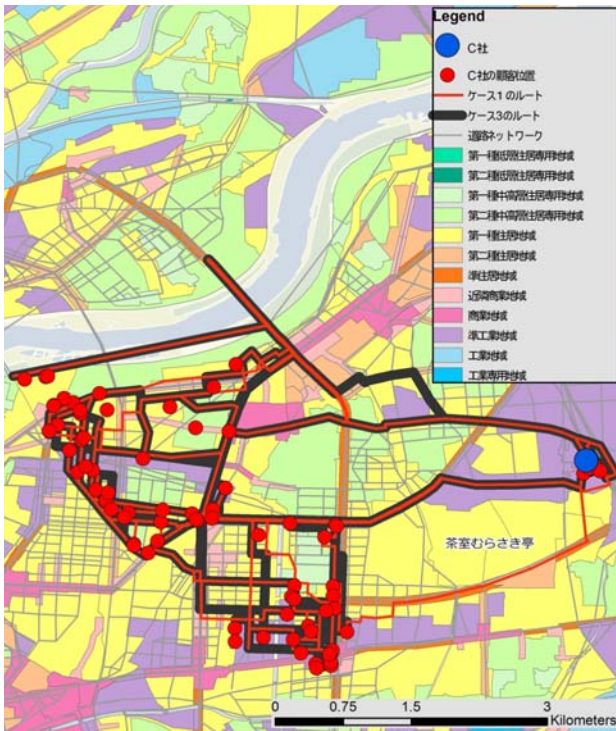


図-2.15 ケース1とケース3におけるトラックの走行経路の比較（C社）

2.2 学校・病院・老人ホームなどを考慮した配車配送計画

(1) 学校・病院・老人ホームなどを考慮した配車配送計画モデル

ここでは、学校・病院・老人ホームを可能な限り避けることを可能とする配車配送計画モデルを構築する。具体的には、まずネットワーク全体を約100m×100mの格子状(100mメッシュ)に区切る。そして既存の道路ネットワークと100メッシュを組み合わせた新しい道路ネットワークを構築する。既存の道路ネットワークとして、大阪市における道路ネットワークを使用する。各格子には、病院・学校・老人ホームがそれぞれいくつ存在するのかというデータが内包されており、その領域を通る際にペナルティが課される。その領域をペナルティゾーンと呼ぶ。

学校・病院・老人ホームの周辺への影響を考慮した運行コストは、2.1で述べた土地利用を考慮した配車配送計画と基本的に同じであるが、式(2.1)のペナルティ p_u について、以下のように定義した。

$$p_u = \alpha_S n_S + \alpha_H n_H + \alpha_A n_A \quad (2.13)$$

ただし、

- α_S : 学校に対するペナルティ係数
- α_H : 病院に対するペナルティ係数
- α_A : 老人ホームに対するペナルティ係数
- n_S : ペナルティゾーン u 内に含まれる学校の個数
- n_H : ペナルティゾーン u 内に含まれる病院の個数
- n_A : ペナルティゾーン u 内に含まれる老人ホームの個数

式(2.13)において、それぞれの係数はそれぞれの施設に対する重みを表している。それぞれの係数を変えることで、ペナルティのかけ方に傾斜をつけることを可能としている。

$$\text{式(2.1)における } \frac{\sum_{u \in U} p_u d_{iju}}{\sum_{u \in U} d_{iju}} \text{ は、顧客 } i \text{ から顧客 } j$$

までの経路について、それがどれだけペナルティゾーン内を通過しているのかという割合を示している。すなわち、ペナルティゾーンを通過すれば、その割合が多いほどこの値は大きくなり、運行費用は大きくなるように設定されている。この特性から、ペナルティゾーンを通過する際は、コストが高くなり、コストを下げるために可能な限りペナルティゾーンを避けるようになる。

ここでは配車配送計画の近似的最適解を求めるために遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms)を用いる。

(2) 大阪府域への適用

ここでは2.1で述べたプローブデータのうち、A社、B社、C社の3社の平成25年10月1日の配送を対象に配車配送計画の最適化計算を行う。D社はかなり広範囲にわたって配送を行っているので、ここでは計算対象から除外した。顧客の数について、A社は105、B社は331、C社は204である。ここで使用する道路ネットワークについて、そのリンク数は141,637、ノード数は18,737である。道路の各リンクに学校・病院・老人ホームの個数が属性として与えられている。

ケース0として、ペナルティを考慮しない場合の検証を行う。表-2.3にケース0における通過した施設周辺の道路の数を示す。

表-2.3 ケース 0 における通過した施設周辺道路の数

	学校	病院	老人ホーム
A社	10	108	48
B社	20	438	50
C社	4	222	38

次にケース 1 として、各ペナルティ係数を表-2.4 に示すように変化させる場合の検証を行う。

表-2.4 各ケースにおける各ペナルティ係数の値

ケース	α_S	α_H	α_A
ケース 1-1	1	1	1
ケース 1-2	1	0	0
ケース 1-3	0	1	0
ケース 1-4	0	0	1

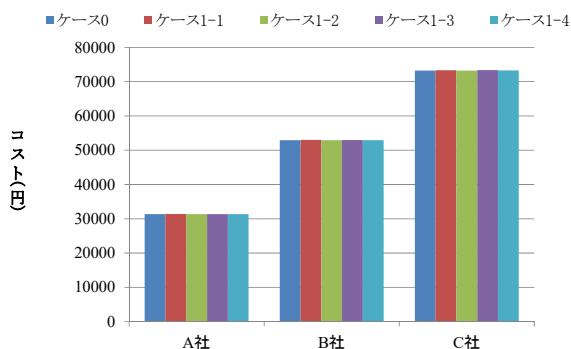


図-2.16 配送コストの平均値の比較

図-2.16 に各ケースの配送コストの平均値の比較を示す。このように、すべてのケースで配送コストがほぼ同じ値となったことは、学校・病院・老人ホームを避けながら配送を行っても配送コストはあまり変化しないことを意味している。このような結果になった要因として、顧客が密に集まっていることが考えられる。いずれの会社でも、顧客の位置は一部に固まっているために、ペナルティゾーンを避けようにも大した距離の遠回りにはならない可能性が高かったと考えられる。

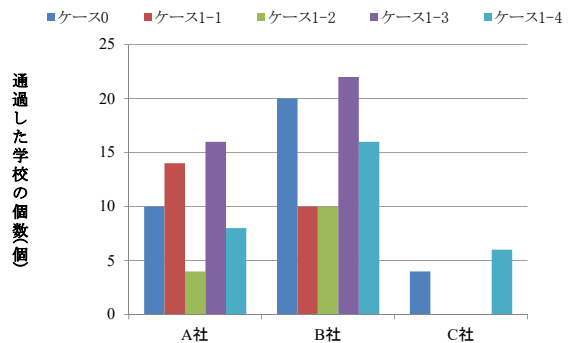


図-2.17 通過した学校の個数の比較

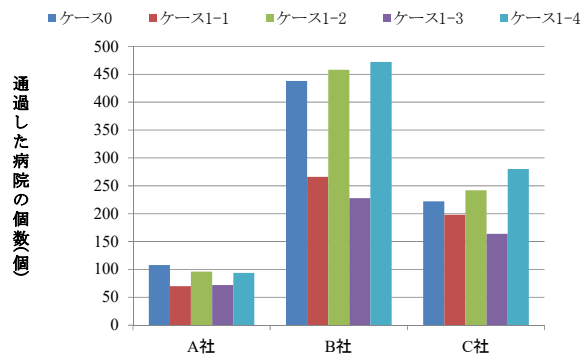


図-2.18 通過した病院の個数の比較

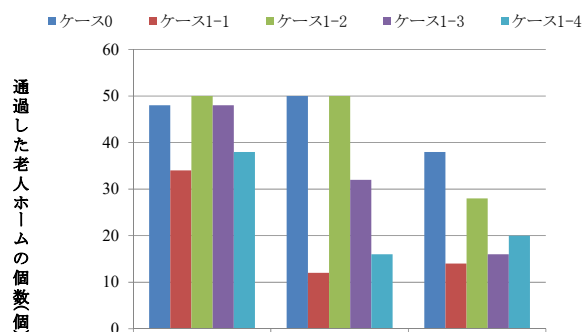


図-2.19 通過した老人ホームの個数の比較

図-2.17-19 に通過した各施設の個数の比較を示す。ケース 1-2 は通過する学校の個数、ケース 1-3 は通過する病院の個数、ケース 1-4 は通過する老人ホームの個数がそれぞれ少なく、概ねペナルティを課した通りの結果が得られた。

通過した学校周辺道路の個数について注目してみる。A社におけるケース 1-1 について、ケース 1-1 では学校のペナルティ係数に対してもペナルティが課されているにもかかわらず、ペナルティが課されていないケース 0 やケース 1-4 よりも多くの学校を通過している。これは、他の施設も考慮に入れているために、学校だけを可能な限り避けるということができなかったと考えられる。特に、全学校の個数は少ないために、すべてのペナルティ係数を同一のものとして考慮した場合、相対的に学校周辺道路の通

過量は多くなり、結果として多くの学校を通過してしまっただと考えられる。

通過した病院の個数について注目してみる。病院にペナルティを課したケース 1-1、ケース 1-3 が少なく、ペナルティを課していないその他のケースが多くなり、ペナルティの効果が表れていると考えられる。ペナルティを課したケース 1-1 とケース 1-3 で多少の差が見られたのは、ケース 1-1 では病院だけでなく、他の施設周辺道路も避ける必要があり、相対的に病院周辺道路の通過量が増えたためと考えられる。

通過した老人ホームの個数について注目してみる。A社・B社については、老人ホームにペナルティを課したケース 1-1、ケース 1-3 が少なく、ペナルティを課していないその他のケースが多くなり、ペナルティの効果が表れていると考えられる。しかしながら、C社についてはペナルティを課したケース 1-4 が、ペナルティを課していないケース 1-3 を上回っている結果となった。その理由として、先述のように老人ホーム周辺道路に課すペナルティの影響力の小ささが考えられる。

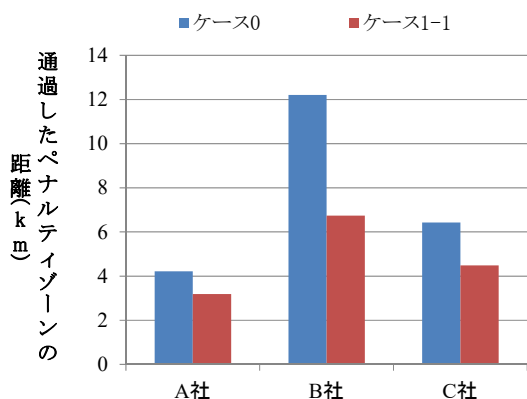


図-2.20 通過したペナルティゾーンの距離の比較

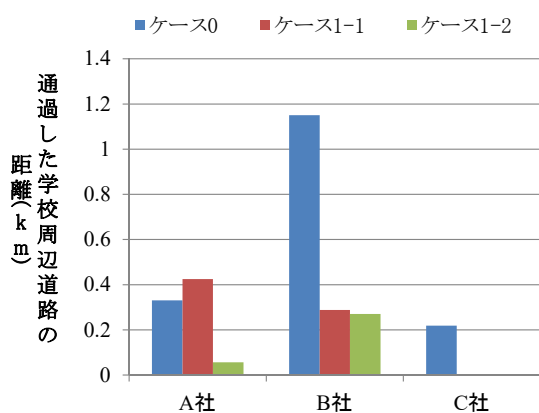


図-2.21 通過した学校周辺道路の距離の比較

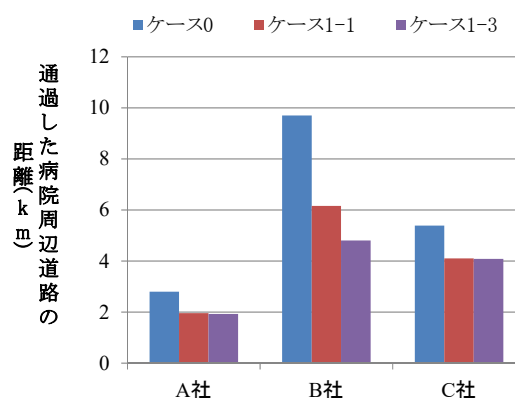


図-2.22 通過した病院周辺道路の距離の比較

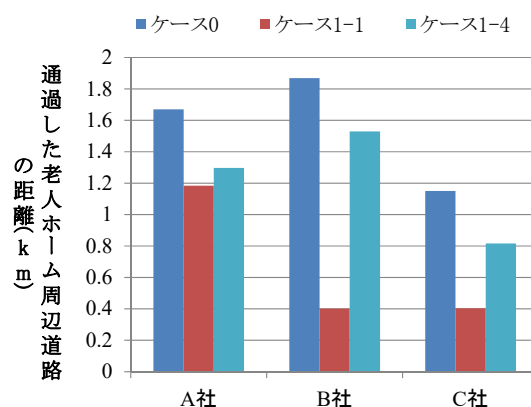


図-2.23 通過した老人ホーム周辺道路の距離の比較

図 2.20-23 にペナルティを課した場合に通過したペナルティゾーンの距離および各施設周辺道路の距離の比較を示す。

図-2.20 について、すべての施設にペナルティを課したケース 1-1 は、ペナルティを課していないケース 0 と比べて、ペナルティゾーンの通過距離は、A社では 25%、B社では 45%、C社では 30%の減少が見られた。ペナルティの効果が表れたと考えられる。

図-2.21 について、学校周辺道路の通過距離は、B社・C社については、学校にペナルティを課していないケース 0 に比べて、ペナルティを課しているケース 1-1 およびケース 1-2の方が小さいことがわかる。しかしながら、A社については、ケース 0 よりもケース 1-1の方が大きくなってしまっている。その理由として、先述の通り、学校の全体数が少ないために、相対的に通過する学校の数が多くなってしまっていることが考えられる。

図-2.22 について、病院周辺道路の通過距離は、ペナルティを課していないケース 0 と比べて、ペナルティを課したケース 1-1 およびケース 1-3 の通過距離は小さくなっているため、ペナルティの効果が表れていると考えられる。

図-2.23 について、ペナルティを課していないケース 0 に比べて、ペナルティを課したケース 1-1 お

よびケース 1-4 の方が小さくなっているため、ペナルティの効果が表れていると考えられる。

次にケース 2 として、学校・病院・老人ホームを 3 つ以上含む領域をすべて通行止めとした場合の検証を行う。この場合に訪問することができない顧客が出てしまう。そこで、それらの顧客に対しては、まず一旦は確実に訪問することができ、元々の位置から最も距離の少ないノードで配送トラックを停車し、そこからは歩いて持っていくという形をとるようにする。

図-2.24-26 に各社のケース 2 の配送経路を示す。

図-2.27 に示すコストの比較について、両者に大きな違いは得られなかった。

図-2.28 に示す通過したペナルティゾーンの距離について A 社・B 社はケース 2 が、C 社はケース 1-1 が小さくなった。図-2.29-31 に示す NO_x, SPM, CO₂ 排出量については、ケース 2 の方が少ない値が得られた。



図-2.24 ケース 2 における A 社の走行経路

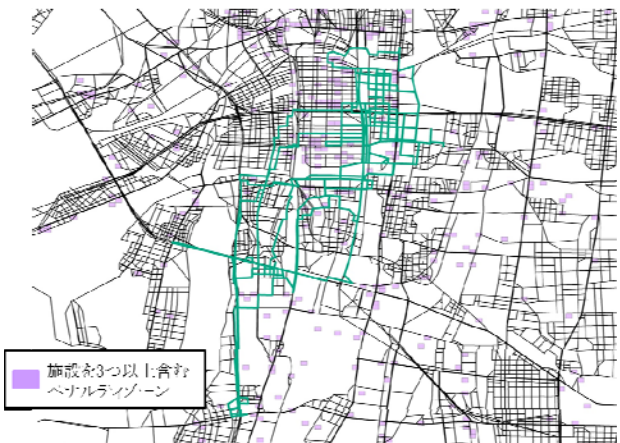


図-2.25 ケース 2 における B 社の走行経路

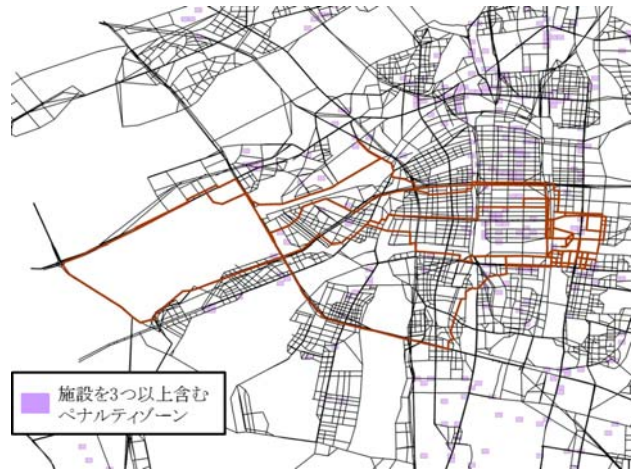


図-2.26 ケース 2 における C 社の走行経路

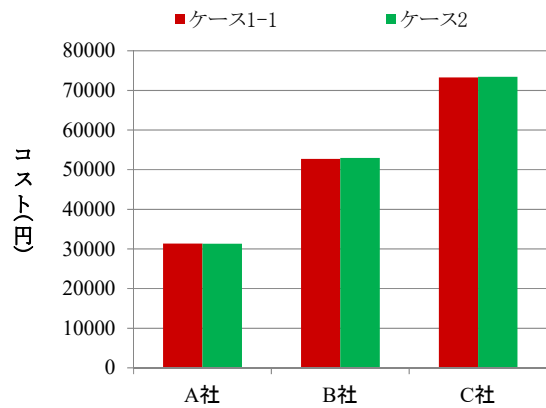


図-2.27 コストの平均値の比較

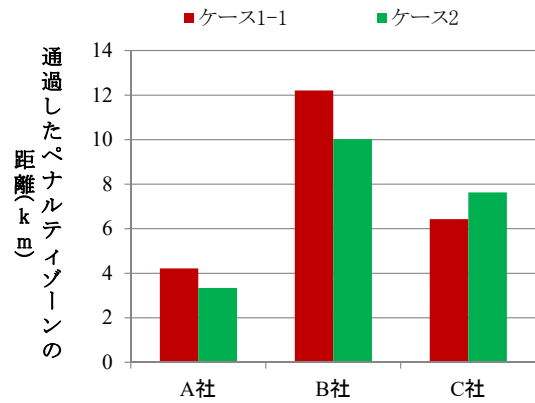


図-2.28 通過したペナルティゾーンの距離の比較

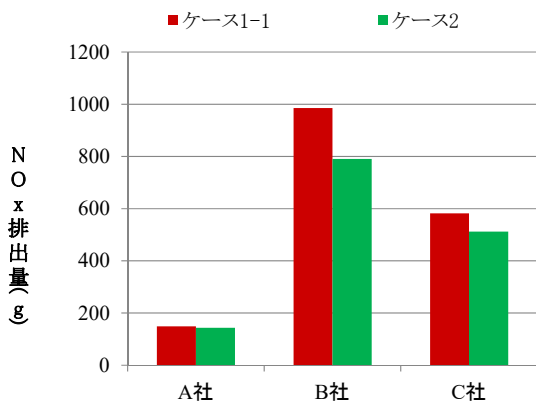


図-2.29 NOx 排出量の比較

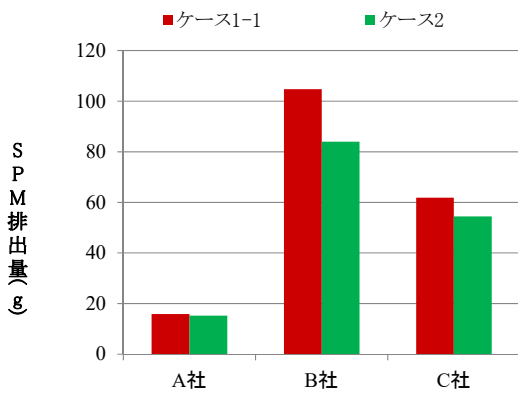


図-2.30 SPM 排出量の比較

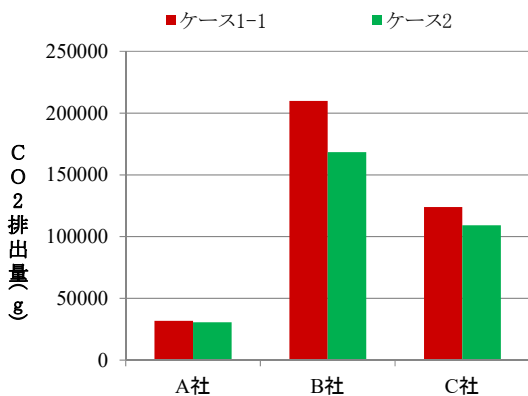


図-2.31 CO₂ 排出量の比較

次にプローブデータとの比較を行った。A社およびC社の比較を図-2.32, 33に示す。結果として、A社では明確な違いが見られなかったが、C社では明確な違いがあった。図-2.33の丸を付けた道路は、非常に多くの施設が沿道に立ち並ぶ幹線道路である。一部では渋滞が慢性化している道路でもある。ペナルティが高ければ、このような幹線道路も配送経路として避けることがわかった。

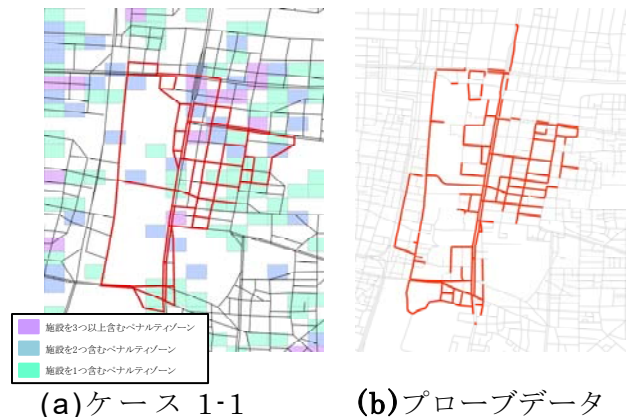


図-2.32 ケース 1-1 とプローブデータにおける A 社の走行経路

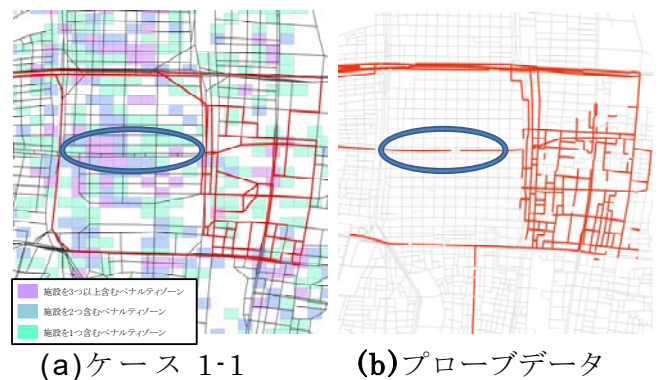


図-2.33 ケース 1-1 とプローブデータにおける C 社の走行経路

第3章 マルチエージェントモデルを用いた都市物流施策の評価

3.1 マルチエージェントモデルにおける利害関係者の行動のモデル化

(1) 各利害関係者の目的・行動

一般に、マルチエージェントモデルは複数のエージェントの行動及び相互作用を表現することができるため、都市内交通システムに係る利害関係者の振る舞いを理解するのに適切なモデルであり、ここでは都市内物流施策の評価に用いる。

都市内物流施策の評価にあたって各主体の行動をモデル化する必要がある、かつその行動モデルは環境の変化に対応可能なものでなければならない。モデル化のためには、各利害関係者の特徴及び目的を把握し、その相互作用を明らかにする必要がある。本研究では、都市内物流施策に係る利害関係者として、行政・荷主・物流事業者・顧客・共同配送事業者を取りあげ、マルチエージェントモデルのエージェントとして扱う。

行政の目標は都市の繁栄であり、都市の持続的な繁栄のためには、経済効率の向上、環境負荷の軽減、交通社会における住民の安全確保が必要となる。しかしここでは単純化して行政の目的を環境の改善と考える。行政の行動としては都市物流施策の実施することとする。都市物流施策が日々変化することは考えにくいいため、行政は非学習主体とする。

荷主は物流事業者への配送委託コストを最小化し、サービスの水準を向上させ、エコ・ロジスティクスへの貢献度合いを最大化することを目的とする。そのためには、委託先の物流事業者を適切に選択し、直接的なコストである貨物輸送料金に加えて指定時間内での配送による顧客からのクレームの低減及びエコポイントの向上を図るという行動をとる。

物流事業者は荷主との契約から得られる利益を最大化することを目的としている。そのためには、荷主から配送委託契約を結んでもらえるような貨物輸

送料金の提示と、顧客への指定時間内の配送を実行するという行動をとる。

共同配送事業者は、物流事業者との契約から得られる利益を最大化することを目的としており、物流事業者から配送委託契約を結んでもらえるような料金を提示するという行動をとる。

顧客は遅延配送の低減を図ることを目的とし、貨物の配送に遅延があった場合に荷主にクレームを出すという行動をとる。

各利害関係者の相互関係を図-3.1に示す。荷主・物流事業者・共同配送事業者を学習主体とする。

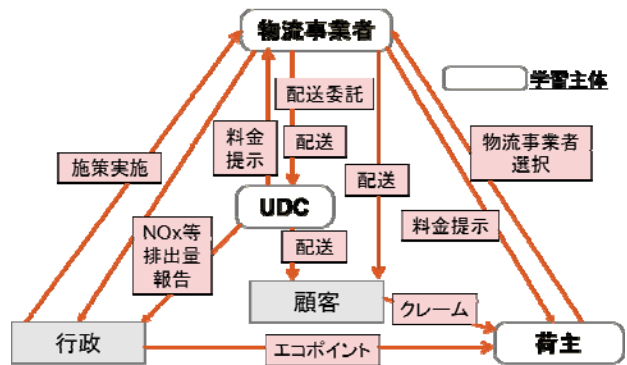


図-3.1 各主体間の相互作用

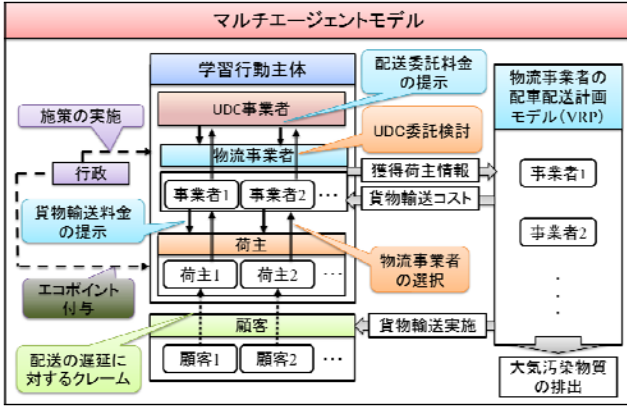


図-3.2 マルチエージェントモデルの全体構造

マルチエージェントモデルの全体構造を図-3.2に示す。マルチエージェントモデルの構造は図-3.1に示すような相互関係に基づいているが、図-3.2では物流事業者の配車配送計画モデルによる顧客への貨物配送や物流事業者の貨物輸送コストが反映されている。また、共同配送事業者と物流事業者の関わりが反映されている。さらに、配送トラックからの大気汚染物質の排出量は、顧客間の経路や配車配送計画にて決定される顧客の訪問順序によって決まる点も反映されている。

(2) 強化学習

強化学習とは、分散学習の一種として分類される学習モデルであり、環境との相互作用を通してエージェントが適切な行動戦略を獲得できる機械学習である。ここでは荷主・物流事業者・共同配送事業者の学習モデルとして、強化学習の1つであるQ-学習を用いる。各利害関係者の学習モデルを以下に示す。

(荷主)

Q学習による荷主の行動価値関数の更新に関する定式化は以下の通りである。

$$Q_p(s_{p,t}, a_{p,t}) \leftarrow (1 - \alpha_p) Q_p(s_{p,t}, a_{p,t}) + \alpha_p \left[r_{p,t+1} + \gamma_p \max_{a_{p,t+1} \in A_p} Q_p(s_{p,t+1}, a_{p,t+1}) \right] \quad (3.1)$$

ここに、

$$r_{p,t+1} = \sum_{i \in C_p^t} \frac{q_p^i}{\omega e_p} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (3.2)$$

Subject to

$$q_p^i = \{0, 1\} \quad \forall p \in P, \forall i \in C_p^t \quad (3.3)$$

$$q_p^1 = 0 \quad \forall p \in P \quad (3.4)$$

$$\forall s_{p,t} \in S_p \quad (3.5)$$

$$\forall a_{p,t} \in A_p \quad (3.6)$$

ただし、

$Q_p(s_{p,t}, a_{p,t})$: 荷主 p が状態 $s_{p,t}$ において行動 $a_{p,t}$ をとる場合の Q 値

$s_{p,t}$: 荷主 p の時間 t における状態 (t 日目)

$a_{p,t}$: 荷主 p が状態 $s_{p,t}$ において実行可能な行動

α_p : 荷主 p の学習率

$r_{p,t+1}$: 荷主 p が状態 $s_{p,t}$ において行動 $a_{p,t}$ をとる場合に実際に受けるクレーム数

γ_p : 荷主 p の割引率

q_p^i : 荷主 p が顧客 i からクレームを受ける場合 1, それ以外の場合 0 をとる変数

e_p : 荷主 p が行政から受け取るエコポイント数

ω : 任意施策導入時に与えられる任意係数

C_p^t : 状態 $s_{p,t}$ における荷主 p の顧客と物流事業者 f のデポからなる集合

S_p : 荷主 p の状態の集合 (1~30 日目)

A_p : 荷主 p の実行可能な行動の集合 (物流事業者の候補)

t : 時間 (日)

T : 時間の集合 (1~30 日)

式(3.1)はQ学習の更新式である。式(3.2)は報酬の算定式であり、荷主 p が持つ全ての顧客 i から受ける配送の遅延によるクレームの総数を、荷主 p が行政から受け取るエコポイント数で除して算出される。また、式(3.3)~式(3.6)は制約条件を表している。式(3.3)および式(3.4)は顧客からのクレームに関する制約条件であり、荷主 p が顧客 i からクレームを受ける場合は 1, それ以外の場合は 0 をとる変数であり、顧客への配送の遅延の有無によって一意に決まる。ただし集合 C_p^t は、物流事業者のデポ ($i=1$) を含むため、 $i=1$ のときのクレーム数 q_p^1 は任意の荷主 p に対して 0 と定めている。式(3.5)および式(3.6)は、荷主の状態と行動に関する制約である。任意の状態において、荷主がとることが可能な行動の候補は変わらない。すなわち、どの状態においても荷主が選択すべき物流事業者の候補は同じである。また後述するが、 ω はモデル内で任意施策導入時に与えられる任意係数であり、この係数は大きいほど、報酬に対するエコポイント数の重みが大きくかけられることを意味する。

(物流事業者)

Q学習による荷主の行動価値関数の更新に関する定式化は以下の通りである。

$$Q_f(s_{f,t}, a_{f,t}) \leftarrow (1-\alpha_f)Q_f(s_{f,t}, a_{f,t}) + \alpha_f \left[r_{f,t+1} + \gamma_f \max_{a_{f,t+1} \in A_f} Q_f(s_{f,t+1}, a_{f,t+1}) \right] \quad (3.7)$$

ここに,

$$r_{f,t+1} = \sum_{p \in P} fee_{p,t}^f \times n_p^f - lc_{f,t} \quad (3.8)$$

$$fee_{p,t}^f = \beta \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in C_p^t} c_{ij}^t x_{ijk}^t \quad (3.9)$$

$$lc_{f,t} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in D_f^t} c_{ij}^t x_{ijk}^t \quad (3.10)$$

Subject to

$$\sum_{f \in F} n_p^f = 1 \quad \forall p \in P \quad (3.11)$$

$$n_p^f \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, \forall f \in F \quad (3.12)$$

$$D_f^t = \{C_p^t \mid p \in P, n_p^f = 1\} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (3.13)$$

$$\forall s_{f,t} \in S_f \quad (3.14)$$

$$\forall a_{f,t} \in A_f \quad (3.15)$$

ただし,

$Q_f(s_{f,t}, a_{f,t})$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとる場合の期待貨物配送利益

$s_{f,t}$: 物流事業者 f の時間 t における状態 (t 日目)

$a_{f,t}$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において実行可能な行動

α_f : 物流事業者 f の学習率

$r_{f,t+1}$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとる場合に実際に得られる貨物配送利益

γ_f : 物流事業者 f の割引率

$fee_{p,t}^f$: 状態 $s_{f,t}$ において物流事業者 f が荷主 p に提示する貨物配送料金

β : 行動 $a_{f,t}$ に対応する利益率

c_{ij}^t : 状態 $s_{f,t}$ において物流事業者 f の配送トラックが顧客 i から j まで移動する際に必要な走行費用

x_{ijk}^t : 状態 $s_{f,t}$ において物流事業者 f の配送トラック k が顧客 i から j まで移動する時は 1, それ以外の時は 0 をとる変数

i, j : 顧客番号, ただし 1 は物流事業者 f のデポを表す

k : 配送トラック番号

K : 配送トラックの集合

C_p^t : 状態 $s_{f,t}$ における荷主 p の顧客と物流事業者 f のデポからなる集合

n_p^f : 荷主 p が物流事業者 f に配送委託した場合 1, それ以外の場合 0 をとる変数

$lc_{f,t}$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとった場合に必要な貨物配送コスト

D_f^t : 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとった場合の貨物配送先の顧客と物流事業者 f のデポからなる集合

S_f : 物流事業者 f の状態の集合 (1~30 日目)

A_f : 物流事業者 f の実行可能な行動の集合 (利益率の候補)

t : 時間 (日)

T : 時間の集合 (1~30 日)

(共同配送事業者)

Q 学習による共同配送事業者の行動価値関数の更新に関する定式化は以下の通りである.

$$Q_u(s_{u,t}, a_{u,t}) \leftarrow (1-\alpha_u)Q_u(s_{u,t}, a_{u,t}) + \alpha_u \left[r_{u,t+1} + \gamma_u \max_{a_{u,t+1} \in A_u} Q_u(s_{u,t+1}, a_{u,t+1}) \right] \quad (3.16)$$

ここに,

$$r_{u,t+1} = \sum_{p \in P} fee_{f,t}^u n_p^u \quad (3.17)$$

$$fee_{f,t}^u = \beta_u \sum_{i \in D_f^t} d_i \quad (3.18)$$

$$lc_{f,t} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in D_f^t} c_{ij}^t x_{ijk}^t \quad (3.19)$$

$$n_p^u = \begin{cases} 1, & \text{if } fee_{f,t}^u + C_p^u < lc_{f,t} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.20)$$

Subject to

$$D_f^t = \{C_p^t \mid p \in P, n_p^f = 1\}$$

$$\forall f \in F, \forall t \in T \quad (3.21)$$

$$\forall s_{u,t} \in S_u \quad (3.22)$$

$$\forall a_{u,t} \in A_u \quad (3.23)$$

ただし,

$Q_u(s_{u,t}, a_{u,t})$: 共同配送事業者が状態 $s_{u,t}$ において行動 $a_{u,t}$ をとる場合の期待配送委託料金

$s_{u,t}$: 共同配送事業者の時間 t における状態 (t 日目)

$a_{u,t}$: 共同配送事業者の状態 $s_{u,t}$ において実行可能な行動

α_u : 共同配送事業者の学習率

$r_{u,t+1}$: 共同配送事業者の状態 $s_{u,t}$ において行動 $a_{u,t}$ をとる場合に実際に得られる貨物配送料金

γ_u : 共同配送事業者の割引率

C_f^u : 物流事業者のUDCまでの走行費用
 $D_{f,t}^l$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとった場合の貨物配送先の顧客と物流事業者 f のデポからなる集合
 $fee_{f,t}^u$: 状態 $s_{u,t}$ において共同配送事業者が物流事業者 f に提示する配送委託料金
 β_u : 行動 $a_{u,t}$ に対応する 1kg あたりの配送委託料金
 n_f^u : 物流事業者 f が共同配送事業者に配送委託した場合 1, それ以外の場合 0 をとる変数
 C_p^t : 状態 $s_{f,t}$ における荷主 p の顧客と物流事業者 f のデポからなる集合
 d_i : 顧客 i の需要量
 $lc_{f,t}$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとった場合に必要の貨物配送費用
 c_{ij}^t : 状態 $s_{f,t}$ において物流事業者 f の配送トラックが顧客 i から j まで移動する際に必要な走行費用
 x_{ijk}^t : 状態 $s_{f,t}$ において物流事業者 f の配送トラック k が顧客 i から j まで移動する時は 1, それ以外の場合は 0 をとる変数
 $lc_{f,t}$: 物流事業者 f が状態 $s_{f,t}$ において行動 $a_{f,t}$ をとった場合に必要の貨物配送費用
 n_p^f : 荷主 p が物流事業者 f に配送委託した場合 1, それ以外の場合 0 をとる変数
 P : 荷主 p からなる集合
 S_u : 共同配送事業者の状態の集合 (1~30 日目)
 A_u : 共同配送事業者の実行可能な行動の集合 (1kg あたりの配送委託料金の候補)
 t : 時間 (日)
 T : 時間の集合 (1~30 日)

(3) 配車配送計画

物流事業者の行動を表すモデルとして、ソフトウェアウィンドウ付き配車配送計画モデルを用いた。モデルは第 2 章で述べたモデルと同様である。最適解の近似解を求める解法として、遺伝的アルゴリズムを用いた。

3.2 都市内物流施策の評価

(1) 計算条件の設定

道路ネットワークに関する設定

大阪の道路ネットワークを対象とする。図-3.3 に概要を示す。詳細は以下に示される。

- リンク数 : 6803

- ノード数 : 2642
- 顧客数 : 48
- 物流拠点数 : 3
- UDC (共同配送センター) 数 : 3

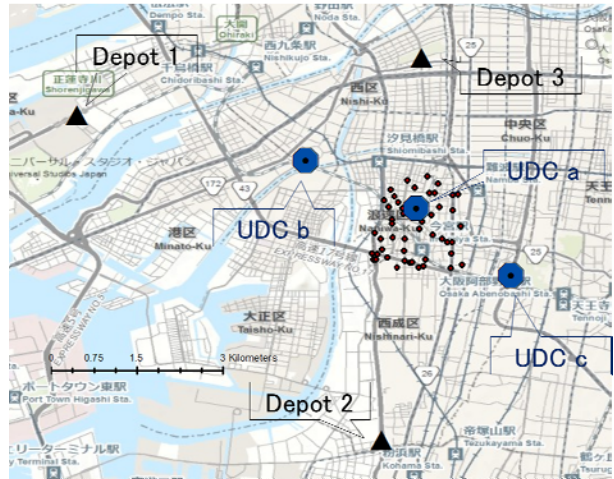


図-3.3 大阪地区の道路ネットワークおよび顧客・デポの位置

各主体に関する設定

(荷主)

荷主は 3 社存在するとする。荷主はこの道路ネットワークの外に存在するものとした。従って本研究では荷主からの集荷を終えた後の、顧客への配送の部分のみが評価の対象となる。

(物流事業者)

物流事業者は 3 社存在するとする。3 社それぞれのデポは、図-3.3 に示されるよう設置される。営業用小型貨物車の単位時間あたりに必要なコストを 14.02 円/分・台と設定した。これに加えて、トラックの固定費用 (車両本体の 1 日・1 回あたりの費用) を 10,417 円/台と設定した。貨物配送に伴うトラック駐車料金については、10 分あたり 100 円を課すこととする。

(共同配送事業者)

1 貨物あたりの配送委託料金の候補を 50 円・75 円・100 円・125 円・150 円の 5 種類与えた。

(2) 都市物流施策の概要

ここでは以下に示す 3 種類の都市内物流施策を扱う。

共同配送

本施策は、道路ネットワーク内に UDC (Urban Distribution Centre) を設置し、物流事業者に対し共同配送を委託する選択肢を与える。共同配送の狙いとは、都市においてコスト削減や環境指標低減を実現させることである。共同配送の利用を選択することで物流事業者は、互いに貨物を持ちより、特定

エリアの配送業務を共同で行うことでトラックの積載効率等を高め必要トラック台数を減らし、コスト削減を実現することができる。本研究では、図-3.3に示されるようUDCの設置位置候補を3箇所用意した。

グリーン物流

ここでは、全道路リンクの内NOxの排出量が少ない、上位25%の道路リンクを行政が設定する。荷主が配送を委託した物流事業者がそれらの道路リンクを使用するたびに1単位のエコポイントが荷主に付与される。荷主の学習過程において、配送を委託する物流事業者を選択する判断基準として、このエコポイント数の総和を勘案しているため、NOx排出量が少ないリンクを多く利用する物流事業者が荷主との配送委託契約を締結しやすくなる。

パーキングマネジメント

本施策は共同配送と並行して実施されることを前提としている。貨物配送に伴うトラック駐車料金については、10分あたり100円が課されている。本施策実施時には、共同配送事業者のトラックの駐車料金は0とし、共同配送非利用時に物流事業者のトラックの駐車料金を10分あたり300円に値上げする。これにより、共同配送の利用を奨励することが本施策の目的である。

表3.1に計算ケースを示す。

表-3.1 計算ケース

ケース	導入施策	
ケース0	施策なし	
ケース1	: 位置a	共同配送
	: 位置b	
	: 位置c	
ケース2	グリーン物流	
ケース3	共同配送+グリーン物流	
ケース4	共同配送+パーキングマネジメント	
ケース5	共同配送+グリーン物流+パーキングマネジメント	

(3) 都市物流施策の評価

ケース1のUDC設置位置候補a・b・cに関して、荷主の配送委託費用の比較結果を図-3.4に示す。施策導入前に対して大きな変化はみられないことがわかる。

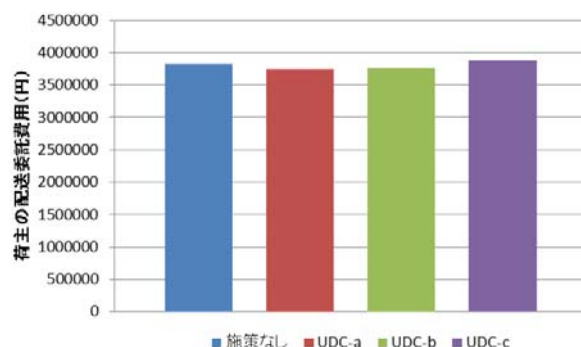


図-3.4 UDC設置位置候補a・b・cに関する荷主の配送委託費用の比較

UDC設置位置候補a・b・cに関して、物流事業者の利潤の比較結果を図-3.5に示す。共同配送実施前後で、利潤は若干減少していることがわかる。候補位置a・b・cそれぞれ、17%、19%、16%程度の減少がみられる。これは、UDC利用時には物流事業者は利潤を獲得しにくいことを意味していると言える。

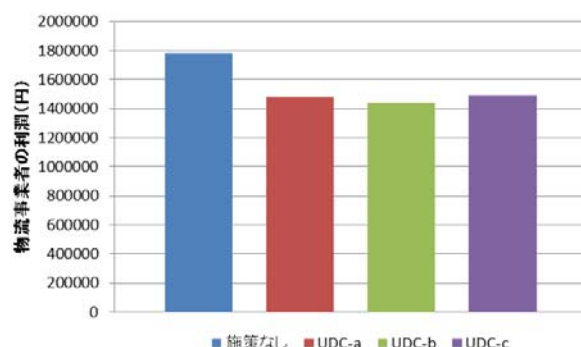


図-3.5 UDC設置位置候補a・b・cに関する物流事業者の利潤の比較

UDC設置位置候補a・b・cに関して、大気汚染物質として取り上げたNOx, SPM, CO2の3種類の排出量の比較結果を図-3.6から図-3.8に示す。共同配送実施前後で、各環境指標は低減されていることがわかる。例えばNOxの排出量に着目すると、候補位置a・b・cそれぞれに対して21%、22%、10%程度減少していることが確認できる。

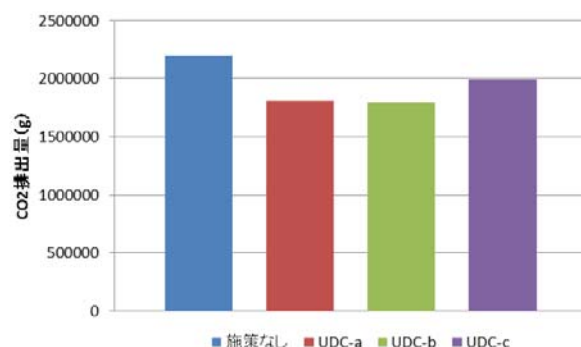


図-3.6 UDC 設置位置候補 a・b・c に関する CO₂ 排出量の比較

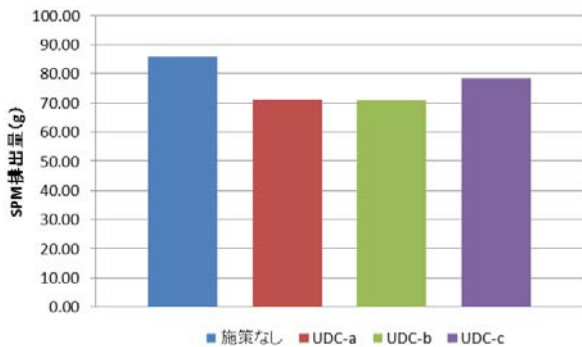


図-3.7 UDC 設置位置候補 a・b・c に関する SPM 排出量の比較

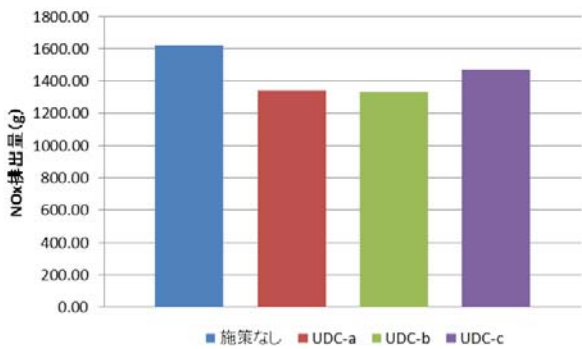


図-3.8 UDC 設置位置候補 a・b・c に関する NOx 排出量の比較

大阪地区における以上の結果を、レーダーチャートにまとめて図-3.9 に示す。各項目の評価値は、施策実施前の指標の数値に対して施策実施後の指標の数値が何倍になっているかを示す。ただし、統一的に 1 より大きいほどその項目を重視する主体にとって好ましい変化となるように、最小化が図られるべき項目（荷主の配送委託費用、および各大気汚染物質の排出量）は、本来の評価値の逆数をその項目の評価値とした。したがってグラフの外側に行くほど費用が減少し、環境が改善されることを示す。

候補位置別にみても、候補位置 c と比較して候補位置 a・b のパフォーマンスは全体として優れているといえる。特に環境指標の低減の寄与が大きい。候補位置 a は繁華街である心斎橋筋近辺かつ顧客の中心に位置する。物流事業者のデポ 1, 2, 3 からみると、拠点 1 からの距離は約 5.15km と遠いものの、拠点 2 からは約 2.62km、拠点 3 からは約 4.08km の距離に位置している。一方で候補位置 b は、繁華街から距離を置き、拠点 2 からの距離は約 5.02km と遠いものの、拠点 1・3 からアクセスの良い場所に位置している（それぞれ約 3.38km・2.43km）。さらに、

候補位置 a の周辺は繁華街であることから交通渋滞等のデメリットが存在している。以上から、本研究の都市物流施策を評価するケース 2-5 において大阪地区の共同配送拠点である UDC は、候補位置 b に設置することとする。

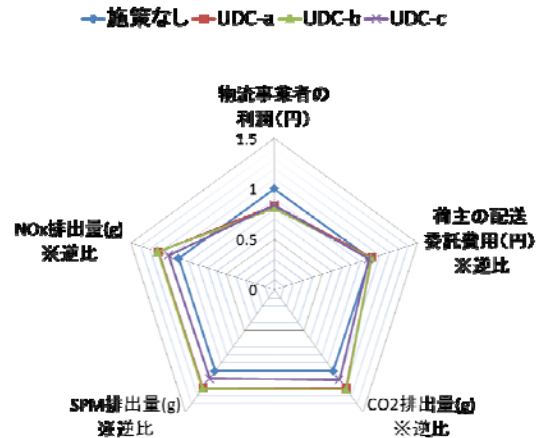


図-3.9 UDC 設置位置候補 a・b・c に関する全体パフォーマンスの比較

設置位置 b の結果をケース 1 における結果とし、残りのケース 2~5 の計算を行い、全てのケースを取りまとめたケーススタディを行った。計算結果は、図-3.10 から図-3.14 のように得られた。

荷主の配送委託費用の比較結果を図-3.10 に示す。概して、施策導入前に対して大きな変化はみられない。

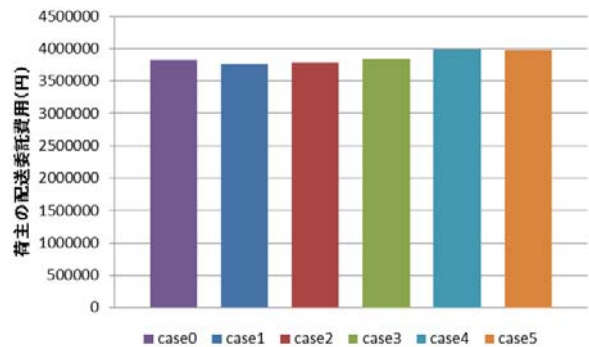


図-3.10 全ケースにおける荷主の配送委託費用の比較

物流事業者の利潤の比較結果を図-3.11 に示す。全体として、各施策導入前後で、利潤は減少していることがわかる。ケース 3 においては、施策導入前とほぼ同じだけの利潤を物流事業者が確保している。

これに続くのがケース2, ケース4, ケース5であり, それぞれ約5%, 9%, 13%の利潤の減少となっている. 最も大きい利潤の減少を記録したのはケース1であり, 約20%マイナスとなっている.

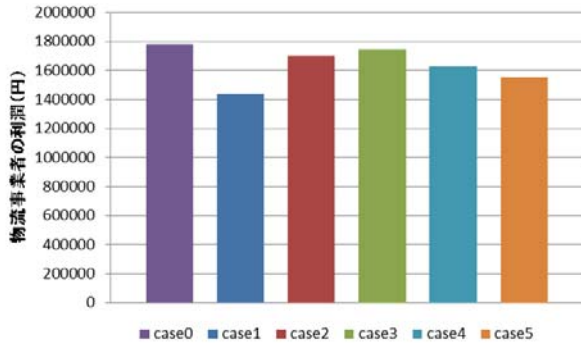


図-3.11 全ケースにおける物流事業者の利潤の比較

大気汚染物質として取り上げたNOx, SPM, CO₂の3種類の排出量の比較結果を図-3.12 から図-3.14 に示す. 全ケースにおいて, 施策導入前と比較して各環境指標は低減したことがわかる. その減少量は各ケースで異なる. 例えばNOxの排出量に着目すると, ケース4においては30%程度の減少が認められる. これは, 約10%と最も減少量の少ないケース2のほぼ3倍の減少効果がみられたことになる. また, 共同配送と他施策を組み合わせたケース3及びケース5の減少量はさほど変わらず, その減少効果はグリーン物流のみを導入したケース2のそれよりも大きい, 共同配送のみを導入したケース1のそれよりもやや小さい.

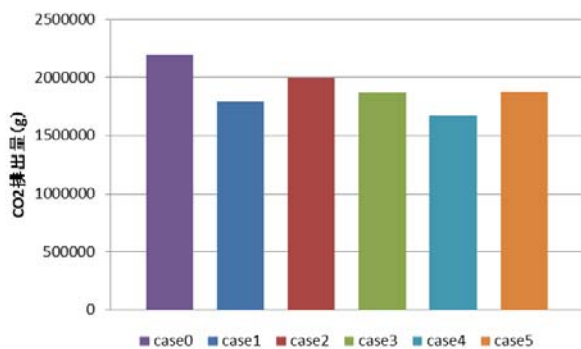


図-3.12 全ケースにおけるCO₂排出量の比較

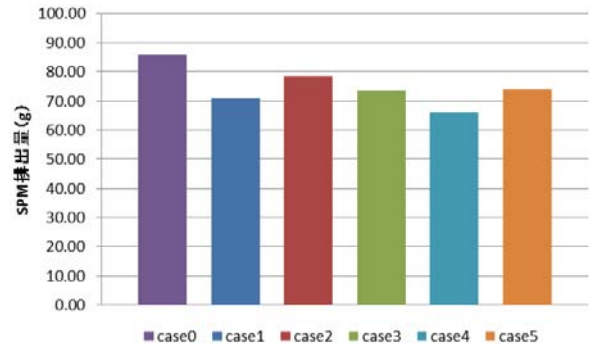


図-3.13 全ケースにおけるSPM排出量の比較

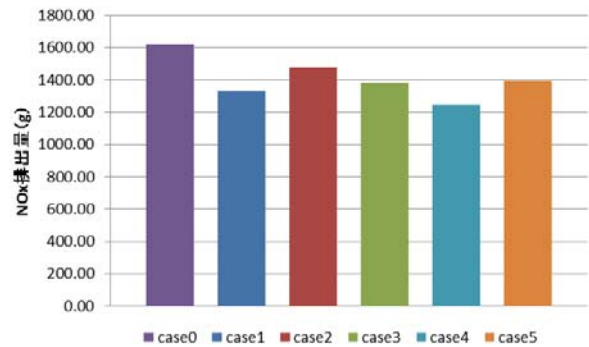


図-3.14 全ケースにおけるNOx排出量の比較

大阪地区における全ケースの結果を, レーダーチャートにまとめて図-3.15 に示す. 結論から述べると, 大阪地区において, ケース3 (共同配送+グリーン物流) が荷主の配送委託費用, 物流事業者の利潤及び環境指標の観点からみて, 最もバランスのとれたパフォーマンスを発揮したケースであると考えられる. 施策導入前と比較して, 物流事業者の利潤はほぼ変わらず, 荷主の配送委託費用は約2%増加したものの, 環境指標はそれぞれ約17%の改善効果を見せている. もちろんそれぞれの指標についてみると, ケース3よりも高いパフォーマンスを出しているケースは存在する. 荷主の配送委託費用においては, ケース1 (共同配送) 及びケース2 (グリーン物流) が施策導入前より安く抑えられているし, 環境指標においては, ケース4 (共同配送+パーキングマネジメント) は極めて大きい効果を示している.

また, 環境指標の観点で共同配送の効果は大きいと思われる. ケース2のように共同配送を単独で導入した時のNOx排出量減少量は大きい. 一方でグリーン物流を単独で導入するケース2においては, ケース1と比較しても効果が少ない. さらに, 共同配送を奨励する仕組みを備えたケース3及びケース4では, ケース2と比べても大きな効果が見られることから, 共同配送の効果の大きさが伺える. また, グリーン物流に関しては, 環境指標の観点で, 他施策の効果打ち消している印象が得られる. ケース5 (共同配送+グリーン物流+パーキングマネジメント) においては, ケース3 (共同配送+グリーン物流)

と比較しても、NOx 排出量は増加している。

パーキングマネジメントを導入しているケース 4 及びケース 5 において、パーキングマネジメントを導入していないケース 2 及びケース 3 と比較して、物流事業者の利潤が減少し荷主の配送委託費用が増加している。これは、パーキングマネジメントによって共同配送の利用頻度が大きく増えたためだと考えられる。

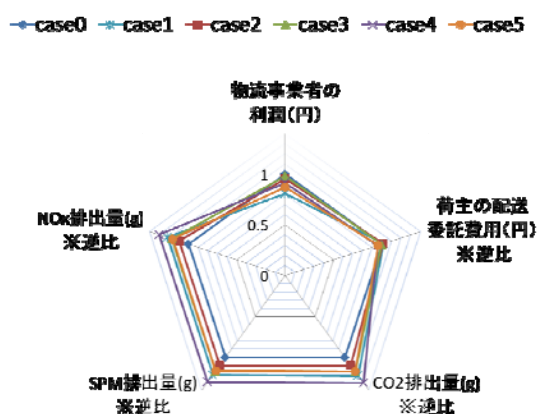


図-3.15 全ケースにおけるパフォーマンスの比較

3.3 マルチエージェントモデルの適用性の評価

(1) 適用性の評価

ここで開発した都市物流施策を評価するためのマルチエージェントモデルの適用性について考察を加える。マルチエージェントシミュレーションは、複数の利害関係者の行動を記述し、それらの利害関係者の相互関係を把握する点において大変優れた方法である。したがって都市物流システムのように、複数の利害関係者が関係する非常に複雑なシステムに適用することは理に適っている。しかし次に問題となるのは、得られた解が本当に正しいかどうかという点であるが、ここで対象としている都市物流システムにおける施策の効果について、正解を得ることは困難である。したがって、マルチエージェントシミュレーションで得られた答えを実際に適用できるかどうかは、様々なケースについてシミュレーションを行った結果、都市物流システムの効率性と環境負荷低減の両立が可能であるかどうかという判断にかかっている。本研究において得られた結果をみると、都市物流施策を実施しない場合に比べて、1つの都市物流施策を実施した場合には環境負荷低減は実現するが、効率性が低下する場合が見られた。しかし、複数の都市物流施策を組み合わせることで実施する

と、効率性と環境負荷低減の両立が可能であって、それぞれの利害関係者の目標がある程度達成されており、バランスのとれた結果となっている。

ここで用いているマルチエージェントモデルの中の物流事業者の行動を表すモデルとして配車配送計画モデルを用いている。シミュレーションでは配車配送計画モデルによって得られる最適配送経路を用いて計算を行っているが、実際の配送トラックの配送経路は最適配送経路とは異なっていることが考えられる。この点について、第2章の結果に見られたように、実際の配送経路は学校・病院・老人ホームなどの施設周辺を通過する最短経路を通過することが多いようであるが、配車配送計画モデルによる最適経路では、そのような施設周辺の通行を避けることを考慮した最適経路を用いることができる。したがって、シミュレーションにおいては、この例を含めていろいろな目的関数を設定できるような配車配送計画モデルを用いることが有用である。特にマルチエージェントシミュレーションにおいては、各利害関係者の行動の結果生じる利害関係者間の相互関係を調べるのが主な目的であるので、目的関数を柔軟に変更できる配車配送計画モデルを活用することは意義があると考えられる。

(2) 全国への展開

ここでは大阪におけるケーススタディについて述べた。しかし、ここで開発したマルチエージェントモデルは、データが得られれば全国のどの都市においても適用可能であると考えられる。しかし、全国の都市について考えると、都市の規模、発展の歴史、産業、道路ネットワークの整備状況などによって都市物流システムの様相が少し異なってくると思われる。都市の規模について、大阪のような大都市においては交通渋滞が激しく、トラックの荷捌き駐車場の確保がむずかしいので共同配送が大きな効果を発揮するが、小規模な地方都市において、交通渋滞があまり見られず、トラックの荷捌き駐車場を容易に確保できる場合には共同配送はあまり効果を発揮しないかもしれない。また大阪のように道路ネットワークがよく整備されている場合にはグリーン物流施策が効果的であるが、地方都市において代替道路の確保が難しい場合にはグリーン物流施策を実施することがむずかしい。そのようなことが起こり得る地方都市においては、その都市にふさわしい別の施策を選択することが重要である。たとえば小規模な地方都市であれば、配送トラックの都市への流入に関するタイムウィンドウを設定する施策、あるいはトラックの積載率規制施策が効果的かもしれない。このように各都市の規模や状況に応じて選択すべき施策は変化するので、マルチエージェントシミュレーションを行う前に施策の選択について十分に検討することが必要である。

第4章 まとめ

4.1 貨物車交通マネジメントの活用シーンおよび必要となる情報・データ

本研究において提案している貨物車交通マネジメントの方法は、都市部における貨物車交通マネジメントの公民連携の協議会 (Freight Quality Partnership : FQP) において活用することができる。FQP においては、貨物車交通マネジメントに関連する様々な利害関係者が一堂に会して都市における物流に関する問題を把握し、問題解決のための施策を立案、検討し、実際に施策を実施する。さらに実施後に評価を行い、さらに問題があれば、再検討を行う。このような過程において、貨物車交通マネジメント施策を実施した場合の効果についてシミュレーションを行って予め把握することが重要である。そのような場合に、本研究で提案しているマルチエージェントシミュレーションを活用することができる。

図-4.1 は東大阪市において実施されている FQP に参加している利害関係者を、図-4.2 は会議の様子を示す。

このような協議会において、マルチエージェントシミュレーションを実施して議論を行う場合に必要となる情報・データについて、その項目と提供が可能と思われる利害関係者を表-4.1 に示す。このようなデータのうち、民間企業が保有しているデータについては、秘密にしておきたいという要望がある場合もある。そのような場合には、特定の物流事業者や顧客の名前、取引については FQP の内部のみの取り扱いとし、外部に漏えいしないような取り決めが必要である。

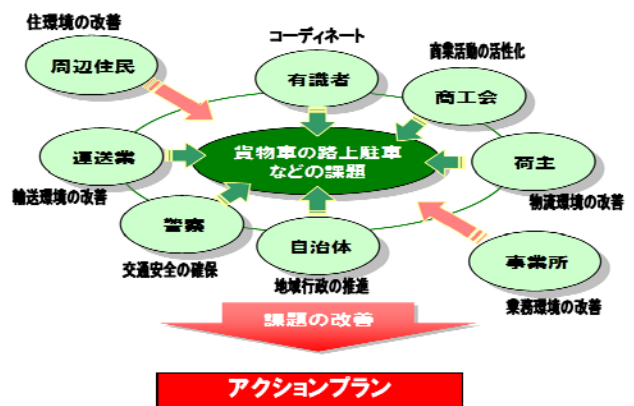


図-4.1 東大阪市における FQP に参加している利害関係者



図-4.2 東大阪市における FQP の会議の様子

表-4.1 マルチエージェントシミュレーションに必要となる情報・データ

利害関係者	必要となる情報・データ	情報・データの入手先（入手方法）
物流事業者	<ul style="list-style-type: none"> ・デポの位置 ・保有トラックの積載重量, 燃料の種類, 台数 ・顧客の位置, 需要, タイムウィンドウ ・貨物配送に用いている貨物の積み下ろしのための駐車場所 	<ul style="list-style-type: none"> ・各物流事業者（ヒアリング）
荷主	<ul style="list-style-type: none"> ・貨物の種類, 需要 ・配送指定時間 	<ul style="list-style-type: none"> ・各荷主（ヒアリング）
行政（国, 都道府県あるいは市町村）	<ul style="list-style-type: none"> ・道路ネットワーク（デジタル道路地図） ・リンク旅行時間 ・CO₂, NO_x, SPM の推定式 ・交通事故データ ・新規道路建設計画 ・交通規制情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・デジタル道路地図協会 ・国土交通省（道路交通センサス） ・国土技術政策総合研究所 ・交通事故総合分析センター ・国土交通省地方整備局, 地方自治体 ・警察
消費者（住民）	<ul style="list-style-type: none"> ・貨物車交通に関する要望 	<ul style="list-style-type: none"> ・住民（住民アンケート）

4.2 今後の展開

今後、ここで開発したマルチエージェントモデルを用いた都市物流施策の評価手法を全国的に展開することについて考えてみる。上述のように FQP のような都市物流に関する利害関係者が一堂に会する公的な協議会を設立することが望ましいが、実際にはそのような協議会を設置することが法的に求められていないため、設置は困難である。しかし、一方で民間企業を中心とした都市物流施策において、大規模な商業施設・オフィス・ホテル・マンションなどが入居するマルチテナントビルにおいて、館内物流

の効率化のプロジェクトが数多く実施されている。例としては東京ミッドタウンや東京スカイツリータウン（ソラマチ）において見られる。このようなプロジェクトにおいて、最近館内物流のシステムを館内のみならず館外の一般都市部へと広げていこうという動きがある。そのような新しいケースにおいては、複数の利害関係者が関係する都市物流システムの効率化と環境負荷低減の両立が問題となってくる。したがってここに、マルチエージェントモデルを用いた都市物流施策の評価手法を適用できる対象システムが存在する。

今回検討した物流の効率化と環境負荷の低減の両立を目指した貨物車交通マネジメントは、主にトラックの走行経路を改善することによって都市の環境を改善することを目指している。従来は、トラック単体の有害排出ガスを削減することによって環境改善を図ることに注目することが多かったが、ここで検討したように、トラックの走行経路を改善することによって NO_x・SPM・CO₂ の排出量を削減することが可能である。また、その場合に配送のコストをあまり上昇させないことも可能である。したがって今後は、トラックの走行経路に着目し、物流の効率化と環境負荷の低減を両立させる道路交通環境政策に結びつけることが考えられる。

国土交通省は、「今後の物流政策の基本的な方向性等について」（平成27年12月25日社会資本整備審議会・交通政策審議会答）において、今後の物流政策を示している。その中で「基本的には、これまでどおり、市場原理に基づく企業間の競争による創意工夫や切磋琢磨による物流サービスの向上を前提としつつ、同時に、国や自治体、荷主、物流事業者等の多様な関係者の中で新たな連携を構築し、社会システムとしての物流システムの更なる効率化、最適化を進めるべきである。」「大型車の都市中心部や住宅地への流入を抑制するための規制的手法や関係者協調による手法（Freight Quality Partnership）を活用したエリアマネジメントについても、ETC2.0等の大型車の走行ビッグデータ等を活用しながら、諸外国の例を参考に組み込んでいく必要がある。」と述べており、本研究で想定しているFQPなどの公民連携の推進を提唱しており、本研究で開発したマルチエージェントシミュレーションを適用できるシーンと一致している。このような公民連携の枠組みができれば都市物流施策を実施する前にその効果について検討する必要がある。本研究で開発したマルチエージェントシミュレーションを活用して、どのような施策を選択し、それを組み合わせて実施するのが最適であるのかを知ることができる。したがって、本研究で開発した方法を実際に活かすことが可能となる。