

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発 【研究終了報告書】

<b>① 研究代表者</b>		氏 名 (ふりがな)	所 属	役 職	
		谷口栄一 (たにぐちえいち)		京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻	教授
<b>② 研究 テーマ</b>	名称	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			
	政策 領域	[主領域]	道路ネットワークの形成と有効活用	公募 タイプ	
		[副領域]			
<b>③ 研究経費</b> (単位: 万円)  ※端数切り捨て。		平成25年度	平成26年度	平成27年度	総 合 計
		1,260	577	195	2,032
<b>④ 研究者氏名</b> (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏 名		所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
Ali Gul Qureshi		京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻准教授			
中村有克		京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻助教			
Joel S. E. Teo		京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻研究員			
<b>⑤ 研究の目的・目標</b> (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>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。</p>					

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

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。(データ収集は外注)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。(担当: Qureshi、中村)その結果、土地利用を考慮した配車配送計画モデルを用いた最適化によって集配トラックが住居専用地域を通過する時間が減少し、コスト削減とともに環境改善効果があることがわかった。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。(担当: Teo)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<sub>x</sub>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都市物流施策の効果について検証を行った。その結果、複数の都市物流施策の実施により単独の施策を実施するよりも大きい効果が得られることが分かった。物流事業者のコスト削減とともに、集配トラックからのCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SPMの排出量も削減され、本研究において目的としている効率化と環境負荷低減の両立を目指した貨物車交通マネジメントを実施するための方法論が提案できた。(担当: 谷口)

## ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

1. 配送実態とモデルによる最適経路の違いについて、どのように説明・評価し、実務として具体的にどう対処すべきか、その考え方を整理すること。

実際のトラックによる配送実態と配車配送計画モデルによる最適経路とは異なっている場合が多く、この差は実際の配送が最適かされていないことに起因する。この違いを埋めるためには、実際のトラックの配送経路を測定する必要があり、実務では、ETC2.0などのプローブ情報を活用して得られる実際の配送経路を用いて分析を行うことが考えられる。

2. 将来的に道路行政として役立つ成果を得るために、その成果の活用シーンを具体化した上で、これまでの貨物車プローブデータの分析の適用限界を示すとともに、今後に向けて必要となる情報・データ等を具体的に整理すること。

貨物車交通マネジメントの活用シーンとして、都市貨物車交通マネジメントの公民連携協議会(Freight Quality Partnership: FQP)が挙げられる。本研究で提案したマルチエージェントシミュレーションを活用することによって、実施しようとする貨物車マネジメント施策のプラスの効果あるいは予想外のマイナスの効果について事前に知ることができ、利害関係者間で議論し、効果的な施策の組み合わせを選択できる。また、今後に向けて必要となる情報・データについて、プローブデータのみではなく、貨物の種類・需要、配送指定時間、荷さばき駐車場の位置などをあげ、利害関係者毎に整理した。

## ⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究においては、都市内貨物車交通について、効率の向上と環境負荷低減の両立を目指したマネジメント手法の確立をめざしており、そのために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。それらのプローブデータに基づいてタイムウィンドウ付き配車配送計画モデルを用いて土地利用との関係について分析を行った。また、これらのデータを用いて都市物流施策の効果についてマルチエージェントモデルを開発し、複数の利害関係者の行動を考慮した分析を行った。本研究において得られた知見・成果は以下の3つにまとめられる。

### (1) 土地利用を考慮した都市内配車配送計画

従来の都市内配車配送計画においては物流事業者がデポから顧客に貨物を配送する場合のコストを最小化することに重点が置かれていた。本研究においては、それに加えて住居専用地域などの環境への配慮が必要な地域に集配トラックが配送経路を選択する場合、あるいは病院・学校・老人ホームなどの近くを集配トラックが走行する場合に、環境負荷を削減するような配送経路について検討を行った。従来のタイムウィンドウ付き配車配送計画モデル(Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Windows: VRPTW)モデルを改良して、集配トラックが住居専用地域などを通過する場合にペナルティを課すような新しいタイムウィンドウ付き配車配送計画モデル(Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Windows - Land Use: VRPTW-LU)を開発した。大阪府域において、VRPTW-LU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-LU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。

次に、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場合にペナルティを課すような新しいタイムウィンドウ付き配車配送計画モデル(Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Windows - Sensitive Facility: VRPTW-SF)を開発した。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。

### (2) マルチエージェントモデルによる都市物流施策の評価

都市物流システムに関係する荷主、物流事業者、共同配送事業者、行政、顧客などの利害関係者の行動を考慮したマルチエージェントモデルを開発した。このモデルにおいては各利害関係者の行動による相互関係を表すことができる。各利害関係者の行動について、強化学習の一種であるQ-学習を

## ⑧研究成果（つづき）

用いた学習過程として表現し、行政が実施する都市物流施策に対して各利害関係者がどのように応答し、その応答に対して他の利害関係者がどのように応答するかをシミュレーションによって計算することができる。なお、物流事業者の行動については上述のVRPTWモデルを用いて集配トラックの行動を記述している。このモデルを大阪府域の道路ネットワークに適用した。都市物流施策としては、①共同配送事業者が配送を行う「共同配送」、②NO<sub>x</sub>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」、③共同配送の集配トラックのみの駐車料金を無料にする「パーキングマネジメント」の3つについて検討した。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て実施す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。

### （3）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

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した。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。また、マルチエージェントシミュレーションにおいて必要となるデータについてまとめた。

#### （学内外等へのインパクト）

本研究は、複数の利害関係者がそれぞれの目的をもって行動する複雑な都市物流システムに対して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しており、学術的に価値の高い研究となっているのみならず、実務においても公民連携の協議会などにおいて、実際的な活用が期待される。米国のTRB(Transportation Research Board)の国際ジャーナルに本研究の論文(Teo et al,2015)が掲載されていることは、本研究の成果が学術面および実務面の両面において高く評価されていることを示している。

### ⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

- 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, 94<sup>th</sup> 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.

### ⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

ウェブや新聞掲載、公開イベントは特になし。

### ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

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。

### ⑪研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

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、CO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>・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。

### ⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

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しており、本研究の目的は十分達成できたと考えられる。本研究においては、各利害関係者の行動を記述できるマルチエージェントモデルを構築し、貨物車交通マネジメント施策を評価できるシステムを作成した。このシステムを用いることによって物流の効率化のみならず環境負荷低減を同時に達成できるような複数の施策の組み合わせを選択できるようになった。従来は物流の効率化と環境負荷低減を両立することが難しかったが、この点を克服できるようになった。したがって、このシステムを活用することによって道路政策の質の向上に大きく寄与することができる。本研究の成果は全国のどの地域においても適用可能であり、また、地域経済の基礎となる物流の高度化・グリーン化に寄与するところが大きいため、研究費の投資価値は高いと考えられる。今後は、実際の公民連携の貨物車交通マネジメント協議会において、この研究成果を活用するために、荷主・物流事業者・行政・住民の各利害関係者がお互いに持っている情報・データを共有し、一致協力して貨物車交通マネジメント施策について議論し、最適な施策を選択して実施し、評価することによって、貨物車交通マネジメントが普及することが望まれる。