

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220906

研究課題名(和文) 移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメント

研究課題名(英文) Dynamic Risk Management of Transport Networks based on Mobile Observation

研究代表者

桑原 雅夫 (Kawahara, Masao)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50183322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 150,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動体データを用いた行動分析として、新たに開発した対話学習型プローブパーソン調査と既往調査を融合させ、周囲の人間との関連を考慮した避難行動を明らかにした。情報伝播を考慮した交通流モデルを構築し、石巻市への適用を通して情報と避難行動との関係を明らかにした。動的リスクマネジメントとして、陸前高田などの実データを用いて、災害時の公共交通マネジメント、最適避難戦略、グリッドロック回避制御の在り方を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対話学習型プローブパーソン調査および災害時の交通行動を平常時行動を考慮しながら分析する手法は、独創的かつ有用である。また、情報伝播と利用者の異質性を考慮した避難交通流分析は、行動主体間の相互作用や創発性を組み込んだ独創的な理論に基づくもので、災害時の情報提供の在り方について有用な結果を導いている。さらに、災害時の最適避難戦略、公共交通マネジメント、グリッドロック回避制御は、いずれも社会的ニーズがきわめて高い課題であり、実データに基づいた有用な知見を得ている。

研究成果の概要(英文)：This project has delivered the following outcomes which are academically and practically appealing. (1) Evacuation behavior is investigated in relation to emergency situations of the relatives and friends based on the probe-person survey by the newly developed interactive learning method fused with conventional stated preference surveys. (2) An emergent flow model considering information propagation is developed and reveals impacts of information provision on the evacuation performance through the application to Ishinomaki. (3) For dynamic risk management, the public transport management scheme, the optimal evacuation policy and strategies that avoid gridlocks are investigated using real field data observed in our recent disasters.

研究分野：交通工学，交通データ解析，交通ネットワーク解析

キーワード：移動体観測 交通行動 交通流モデル 動的リスクマネジメント

### 1. 研究開始当初の背景

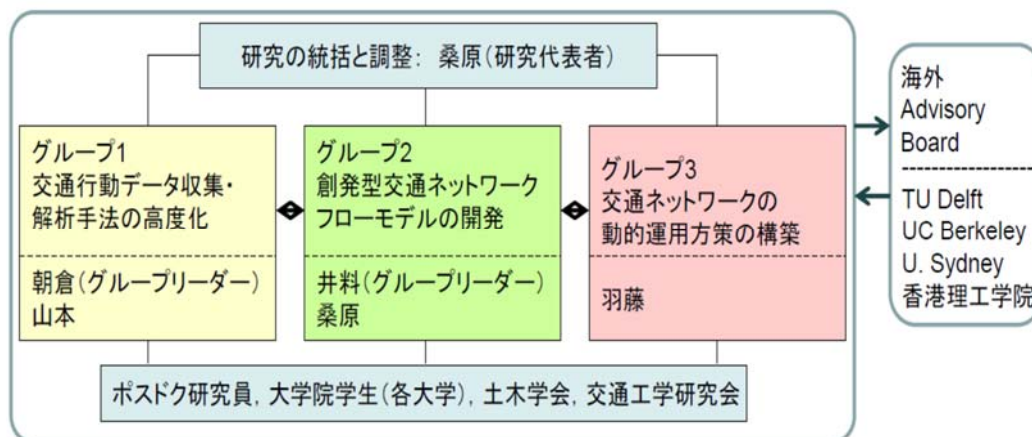
我が国では自然災害や突発事象が頻発してきた。さらに今日の高度情報化社会では、交通ネットワーク上で起こる自然災害や突発事象による影響が加速度的に拡大する危険性が高い。これらの異常事象による社会的影響を最小限に抑えるには、高度化が進む移動体データを最大限活用しながら、交通ネットワーク利用者の行動を理解した上で、迅速な規制と制御を含む動的リスクマネジメントを実行する必要がある。

### 2. 研究の目的

このような背景の中、本研究の目的は、①移動体観測技術による交通システム利用者の行動モニタリング手法を高度化し、②時空間解像度の高い行動データを用いた動的ネットワーク交通流解析モデルを開発するとともに、③突発事象や災害によりシステム障害が発生した交通ネットワークの信頼性を回復させるための動的なリスクマネジメント手法を構築することにある。さらに、新たな行動調査・分析手法、ネットワーク解析手法およびリスクマネジメント手法を一体化して実際の都市空間に適用することによって、方法論の有用性を検証し、移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメントシステムを確立する。

### 3. 研究の方法

サブテーマごとに3つのグループ（①交通行動データ収集・解析手法の高度化、②創発型交通ネットワークフローモデルの開発、③動的ネットワーク運用方策の構築）を組織するとともに、海外の主要研究者から成るAdvisory Boardを設置する。成果は、数回の国際シンポジウム、WSの開催を通じて、内外に発信する他、国際ジャーナルへの投稿を積極的に行う。また、本研究課題を通してポスドク等の若手研究者の育成を行う。



サブテーマごとに担当を配置し、研究代表者の統括の下、研究の進捗管理を兼ねた研究打ち合わせを2~3か月に1回実施し、相互の連携を緊密に保ちながら研究した。また、成果の積極的な発信のため、以下の国際ワークショップ、国際シンポジウムを開催した。

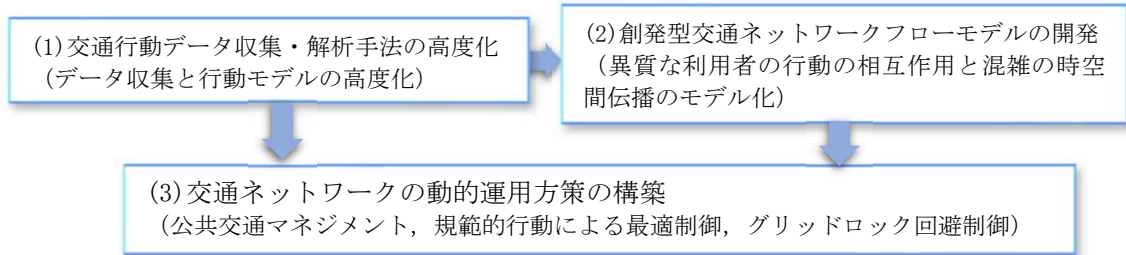
- ・国際シンポジウム「International Symposium of Transport Simulation & International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardization 2018」, 2018年8月4-6日, 参加者数(約200名)。冊子体Proceedingsと電子版Transportation Research Procedia, Elsevier, Vol.34, December, 2018.
- ・国際ワークショップ「Dynamic Risk Management of Transport Network - Social Interaction, Monitoring and Simulation」, 2017年3月4-5日, 参加者数(約50名).
- ・国際セミナー「Traffic Flow and Control」, 2016年11月24日, 参加者数(約80名).
- ・国際シンポジウム「21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT 21)」, 2015年8月5-7日, 参加者数(約200名)。冊子体Proceedingsと電子版Transportation Research Procedia, Elsevier, Vol.7, July, 2015。Transportation Research Part B(2015年11月), Part C(2015年10月)でのISTTT Special Issues発刊。
- ・国際ワークショップ「International Research Seminar on Dynamics of Transport Networks」, 2015年8月4日, 参加者数(約30名).
- ・国際シンポジウム「6th International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR

2015)」、2015年8月2-3日、参加者数(約120名).

- ・土木計画学研究発表会スペシャルセッション「移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメントへの期待」、2015年6月7日、参加者数(約90名).

#### 4. 研究成果

各サブテーマを下図矢印の関連を持たせながら実施し、以下に示す研究成果を得ている.



##### (1)交通行動データ収集・解析手法の高度化

移動体観測による交通行動データの収集と解析手法の高度化に関する研究を進めた. 過去 10 数年にわたって世界に先駆けて開発してきたプローブパーソン手法 (GPS 携帯と WEB ダイアリーによる追跡型の交通行動調査手法) を発展させ, スマートフォン上でも長期間にわたって稼働する新たな行動調査手法を開発した. さらに, 通常のプロブパーソン調査では, 長期間の行動調査の際に被験者が回答する労力が大きいとため, 被験者が回答した行動履歴をもとに設問を自動生成する学習機能を組み込んだ対話学習型の行動調査システムを新たに開発した.

災害時を想定した交通行動データを得るために, 平常時の行動調査を実施した上で, 個々の被験者ごとに過去の行動側面を切り出し, その状況で災害が発生したと仮定して **Stated Preference (SP)** 調査を実施するという 2 段階の調査手法を開発した. スマートフォンからも利用可能な生活時間調査とプローブパーソン調査により平常時の交通行動を収集するとともに, SP 調査により津波災害を想定した避難行動を調べるフィールド調査を静岡市および浜松市で実施した. さらに, 高知市で対話学習型 PP 調査の被験者と WEB モニターに対し, 日ごろの防災意識と災害時の避難行動を調査し, 想定されている災害の種類と避難までの時間的余裕の違いによる避難行動の差異を分析した.

平常時に基づく異常時の交通行動分析に関しては, 北海道函館市で 20 名の被験者から収集した 8 か月間のプローブパーソンデータを用いて, GPS の軌跡からトリップと活動場所を自動的に判別し, トリップの利用交通手段と目的を推定するアルゴリズムを構築した. 図 A にカーネル密度法による生活行動圏の推定例 (左), サポートベクターマシンによる活動場所判別例 (中), 決定木によるトリップ目的推定精度例 (右) を示す. さらに, 活動・交通パターンの定常性や季節変動, 天候による影響に関する分析を進め, 平常時の行動パターンからの行動変化を予測する方法を検討した.

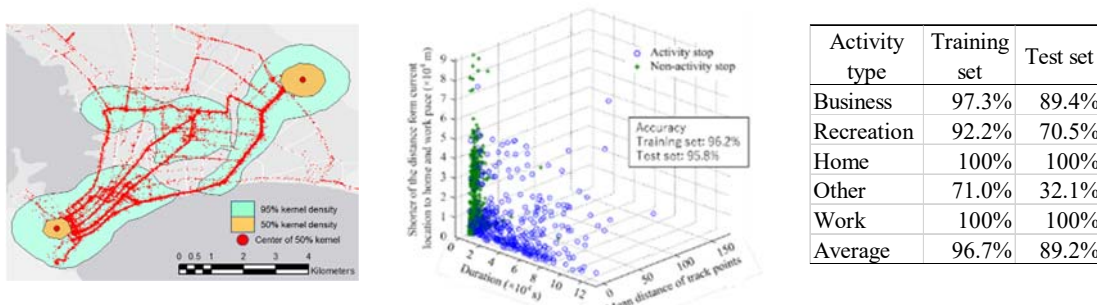


図 A GPS 軌跡からの交通行動推定例 (左: 生活行動圏, 中: 活動場所, 右: トリップ目的)

これらのプローブパーソン調査および WEB モニターに対する防災意識と災害時の避難行動の調査データを用いて, 被験者間の避難行動の関係性を中心に分析を進め, 個人単独で

の避難だけでなく、家族・友人を pick-up する（あるいは待つ）行動、避難余裕時間と避難行動との関連について分析した。また、GPS 位置データからトリップ目的、手段を推定する手法を開発するとともに、集計された携帯電話位置データによる推定 OD 交通量の更新手法を開発した。さらに、集計された携帯電話位置データを用いた災害時の帰宅困難者数の推定に取り組んだ。

以上のように、研究目的①移動体観測技術による交通システム利用者の行動モニタリング手法を高度化は、十分に達成できた。

## (2) 創発型交通ネットワークフローモデルの開発

知識や行動規範の異なるネットワーク利用者の行動の相互作用と混雑の時空間伝播を表現できる交通流シミュレータを開発し、交通システム供給能力の機能低下と発災直後における交通状態の変容を記述することを目的とした。開発の工程は、①創発型ネットワーク交通流モデルの基礎理論構築、②動的交通流シミュレータの開発、③動的交通流シミュレータの適用であり、以下順を追って説明する。

①創発型ネットワーク交通流モデルの基礎理論構築においては、エージェント間の相互作用の収斂プロセスの解析に重点を置いて研究を行った。ネットワーク交通流モデルにおけるエージェント間の相互作用で特に重要になるものは混雑と情報伝播であり、主にこれらの要素に重点を置いた理論構築を行った。理論構築の際には、最終的に得られるマクロ的特性に対してミクロ的基礎 (Micro foundation) の作用を明確化するために、「エージェント間の情報伝播のメカニズムをマイクロレベルで定式化する」ことに注力した。この収斂プロセスの解析の結果、一意でない均衡解への収束や、複数の解軌道への収束のような、様々なパターンの解が創発される事例を、解析的手法によって発見している。これらの現象は、既存の交通ネットワーク理論では触れられておらず、新規性のある成果を得ており、学会等で順次報告をした他、その一部を交通工学分野で最も著名な国際学術誌である Transportation Research Part B で公開している。

②動的交通流シミュレータは、車両の挙動については一般的な交通流理論をベースとし、それに①での成果を組み合わせることにより構築している。シミュレーションは計算機アプローチであるため、操作的取り扱いの簡便さを重視するよりも、ミクロ的基礎を組み入れることを重視した。そのため、シミュレーションは個々の車両の物理的挙動と情報伝播に関するミクロ的挙動を直接モデル化したエージェントベースのものとしている。

③動的交通流シミュレータの適用については、図 B、C のように石巻市のネットワークでの車による津波からの避難を対象としたシミュレーションを実施し、道路混雑に関する情報伝播の条件の差異により、避難完了時間が大幅に変わりうることを明らかにした。

以上のように、研究目的②時空間解像度の高い行動データを用いた動的ネットワーク交通流解析モデルを開発することは、十分に達成できた。



図 B 石巻市ネットワークでの計算結果例（色が濃いほど混雑が大きい）

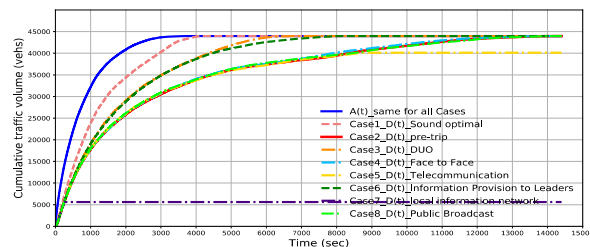


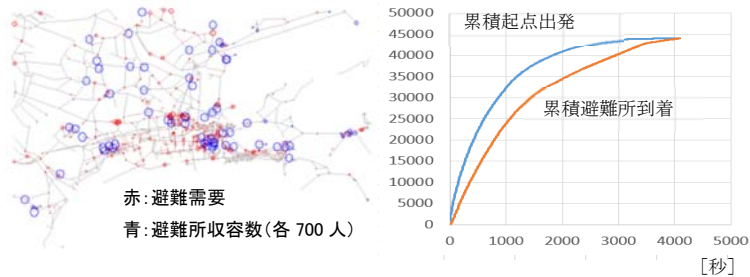
図 C 情報伝播条件による避難所要時間の差異  
(横軸：避難開始からの経過時間、縦軸：累積避難完了台)

## (3) 交通ネットワークの動的運用方策構築

動的な交通ネットワークリスクマネジメントとして、公共交通サービスマネジメント、規範的避難行動に基づいた最適避難制御、グリッドロック回避制御を実施した。災害時の公共交通のマネジメントに向けて、DEA (Data Envelopment Analysis) を援用した公共交通システムの評価と、

ZDD を用いた二段階最適化による公共交通サービスの逐次的な最適化手法の開発を実施し、被災地において刻々と変化する交通需要の変化に対応できる高速処理が可能な交通マネジメント方法を提案することができた。さらに、こうした方法を現実の動的な相互扶助型の公共交通サービスとして開発し、陸前高田市と黒部市で実施実験を行った。陸前高田では復興過程において急速に高齢化が進む地域の相乗り予約サービスを、また黒部市では相乗りサービスに対して潜在的な需要のマッチングを行う今までにないサービス実装を行った。動学的逐次選択行動を記述するための GRL モデルの開発を行い、災害時の時間割引率について実証分析を行い、時間割引率を取り込んだ GNL 型需要モデルの有効性が示した。

規範的避難行動に基づいた最適制御では、住民の避難行動を最適に制御した場合の避難完了時刻や総避難時間を評価するモデルを開発した。本モデルは数多い避難シナリオの中の First-Best なベンチマークシナリオを与えるものである。石巻市ネットワークを対象として、経路、



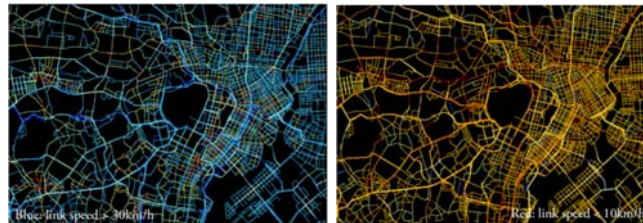
図D 石巻市における最適避難戦略

左: 避難需要と避難所収容数, 右: 最適戦略の累積避難完了時刻

出発時刻、避難所の最適化の組み合わせについて、交通シミュレーションを用いた実証的分析を行った(図D)。その結果、避難所の容量を適切に配分しておくこと、経路を適度に分散させることが迅速な避難に貢献することが明らかになった。

短時間に需要が急増する交通ネットワーク上で生じるグリッドロック大渋滞において、従前の再帰型ロジットモデルを  $\beta$  パラメータによって一般化した意思決定モデルに拡張することで、災害時のリンクベースの意思決定機構

が記述可能な動学モデルを開発した(図E)。東日本震災時の発災時の交通状況に対してモデルの適用を行い、短視眼的な意思決定がグリッドロックの原因であることを確認するとともに、異なる災害時の意思決定問題と、津波常襲地域におけるネットワーク形状の違いが  $\beta$  に与える影響分析を行った。さらに、グリ



図E 平常時(左)とグリッドロック発生時(右)の道路ネットワーク状態 (赤色ほど混雑を表す)

ッドロックに陥った交通ネットワークにおける交通行動を記述するための GRL モデルとその推定法の開発、発災した地域が復旧していく過程で変化する需要の変化に対応する地域公共交通の最適化モデルの構築を行った。以上のように、研究目的③突発事象や災害によりシステム障害が発生した交通ネットワークの信頼性を回復させるための動的なリスクマネジメント手法の構築は、十分に達成できた。

以上の成果は、国内外の 62 件の査読付き雑誌論文として採択されるとともに、国際会議を含む 142 件の学会発表を行い、国内外に積極的な情報発信を行った。また、3 回の国際シンポジウム他、国際セミナー、国際ワークショップ等を開催して、内外研究者との連携や意見交換に努めた。さらに、約 10 人の若手ポスドクと研究員の雇用、約 20 人の博士課程学生を支援しており、人材育成にも十分貢献してきた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 63 件)

1. Iryo Takamasa and Watling David, Properties of equilibria in transport problems with complex interactions between users, *Transportation Research Part B: Methodological*, 査読有, in press, accepted May 13, 2019.
2. Gong, L., Kanamori, R. and Yamamoto, T., Data selection in machine learning for identifying trip purposes and travel modes from longitudinal GPS data collection lasting for seasons, *Travel Behaviour and Society*, 査読有, vol.11, pp.131-140, 2018 (10.1016/j.tbs.2017.03.004)

3. Kuwahara Masao, Ohata Takeshi, Oishi Yukie, Normative behaviour-based first-best analysis for disaster evacuation, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 査読有, vol.1, pp.1-18, 2017 (10.1080/21680566.2017.1378600)
4. Oyama Yuki, Hato Eiji, A discounted recursive logit model for dynamic gridlock network analysis, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 査読有, vol.85,pp.509-527, 2017 (10.1016/j.trc.2017.10.001)
5. Asakura Yasuo, Kusakabe Takahiko, Nguyen Long Xuan, Ushiki Takamasa, Incident detection methods using probe vehicles with on-board GPS equipment, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 査読有, vol.81,pp.330-341, 2017 (10.1016/j.trc.2016.11.023)  
〔学会発表〕(計 142 件)
1. Yoshida, M., Umeda, S., Kawasaki, Y. and Kuwahara, M., Incident Alert by an Anomaly Indicator of Probe Trajectories, *International Symposium of Transport Simulation International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardization (ISTS and IWTDCS'18)* (国際学会), 2018
2. Sugishita, K. and Asakura, Y., Influence of route choice behavior on vulnerability to cascading failure in transportation networks, *Mathematics applied in transportation and traffic systems (MATTs)*, Delft, Netherland (国際学会), 2018
3. Yamamoto, T., Unhappy relationship between water and road traffic: effects of rainfall and inundation on road traffic, *The 9th AUN/SEED-Net Regional Conference on Environmental Engineering* (招待講演) (国際学会), 2017
4. Dharmarathna, W.R.S.S., Hato, E., Route choice behavior under extreme weather events in densified networks: a case study in Tokyo under torrential downpour, *15th ITS symposium* (国際学会), 2017
5. 高安杏奈, 原祐輔, 桑原雅夫, 井料隆雅, 社会的ネットワーク上の情報伝播を考慮した動的交通量配分問題, 第 55 回土木計画学研究発表会 (春大会), 2017

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：朝倉 康夫

ローマ字氏名：(ASAKURA, Yasuo)

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：環境・社会理工学院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：80144319

研究分担者氏名：羽藤 英二

ローマ字氏名：(HATO, Eiji)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：60304648

研究分担者氏名：山本 俊行

ローマ字氏名：(YAMAMOTO, Toshiyuki)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：未来材料・システム研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：80273465

研究分担者氏名：井料 隆雅

ローマ字氏名：(IRYO, Takamasa)

所属研究機関名：神戸大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：10362758