

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246081

研究課題名(和文) 移動体シミュレーションと連動した災害時交通ネットワークの信頼性評価

研究課題名(英文) Theoretical system incorporating with mobile observation and simulation for evaluating risks of transport networks in hazardous situation

研究代表者

朝倉 康夫 (Asakura, Yasuo)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80144319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円、(間接経費) 10,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、研究代表者らがこれまでの研究で蓄積した、交通行動データ収集と分析、ネットワーク解析および信頼性・リスク評価に関する研究成果をさらに展開し、災害時における交通ネットワークの信頼性評価の理論体系を構築するとともに、実際の都市・地域空間への適用を通じて、開発した方法論の有効性を検証することにある。具体的には、「災害時を想定したヒトの交通行動データの収集および分析」、「災害時における交通ネットワーク上での移動体の流動シミュレーションモデル」、「移動体シミュレーションを内包したネットワークの信頼性評価モデル」を有機的に連携させ、信頼性評価の具体的方法論を構築した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop and validate a theoretical system for evaluation of transportation network reliability considering natural disasters. Based on outcomes of our previous research conducted in Grant-in-Aid for Scientific Research (A) (Research Project Number: 17206053), we developed "Data collection and its analysis systems for travel behavior" and "Evaluation theories for reliability of road network in natural disasters". These systems and theories were realized by incorporating the following three parts: (i) Behavioral survey and analysis considering situations in a disaster, (ii) Traffic simulation on transportation network affected by disaster, and (iii) Evaluation model for reliability utilizing traffic simulation. The proposed system was confirmed to be applicable for evaluating transportation network reliability considering possible natural disasters in Japan.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木計画学・交通工学

キーワード：災害時交通行動 交通ネットワーク信頼性 ネットワーク交通流理論 プローブパーソン調査 リスク評価

1. 研究開始当初の背景

交通ネットワークの信頼性に関する国内外での研究は、豊富な観測データを活用した時間信頼性研究や、悪天候や災害時の交通ネットワークの信頼性評価に関する理論研究が発表されているが、災害時のデータを得ることが容易でないこともあり、実証を伴う総合的研究の蓄積は十分ではない。とくに、災害時の交通ネットワーク上での移動体シミュレーションについては、平常時の方法論の援用にとどまっており、災害時交通現象の持つ複雑な動的特性を反映したモデル開発は、ほとんど手がつけられていない状況にある。

本研究に先行する基盤研究 A「移動体観測に基づく災害時交通ネットワークのリスク評価システム」では、GPS(Global Positioning System)等を搭載した移動体通信システムによる位置特定機能を用いた Probe Person(PP)調査システムの開発に成功したが、実空間の行動(RP, Revealed Preference)データだけでは、災害時のような現実と大きく異なる交通空間での行動記述モデルの開発には限界があることもわかってきた。このことから、PP調査システムによって収集した実行動と、仮想交通空間での行動(SP, Stated Preference)調査を統合することで、現実の交通行動を反映した上で災害時の行動を従来方法に比べて確からしく収集できるシステムの構築が求められている。

一方、災害時の交通ネットワーク流の記述には、動的交通理論やシミュレーション手法に関する知見を基盤として、ネットワーク利用者(エージェント)の複雑な相互作用を考慮した方法論を開発することが必要である。従来の災害時の交通ネットワーク信頼性評価は、同じ行動規範を持つ同質な利用者を前提としたものであり、利用者の多様性・異質性が結果に影響を及ぼすことはなかった。そこで、既往の成果であるリスク評価システムの基本フレームを拡張し、エージェント型の移動体シミュレーションと連動した信頼性評価手法を開発することで、利用者の多様性・異質性を表現した方法論が構築できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者らが平成17年度から4年間にわたって科学研究費補助金を得て進めてきた基盤研究 A「移動体観測に基づく災害時交通ネットワークのリスク評価システム」により蓄積した、交通行動データ収集と分析、ネットワーク解析および信頼性・リスク評価に関する研究成果をさらに展開し、災害時における交通ネットワークの信頼性評価の理論体系を構築するとともに、実際の都市・地域空間への適用を通じて、開発した方法論の有効性を検証することである。具体的には、下記を目的とする。

(1) 災害時を想定したヒトの交通行動データ

の収集および分析手法の開発

プローブパーソンシステムを拡張し、実行動データをもとに災害時を想定した行動データを収集できる調査システム(PP+SP)を開発し、災害時の交通行動モデルを構築する。

(2) 災害時における交通ネットワーク上での移動体の流動シミュレーションモデルの開発

様々な行動規範と情報量を持つ利用者が交通ネットワークを共有するときの移動体シミュレーションを行うための、動的交通理論と整合したシミュレーションモデルを構築する。

(3) 移動体シミュレーションと連動したネットワークの信頼性評価モデルの構築

移動体の行動特性を考慮したネットワークの信頼性評価を可能とする理論モデルを構築する。

これらの研究開発の結果を通じて、災害直後の帰宅と避難を想定した行動データの収集、帰宅交通と避難交通が錯綜するネットワーク上でのシミュレーション、およびネットワーク信頼性評価を行い、モデルの有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究は、移動体シミュレーションと連動した災害時交通ネットワークの信頼性評価の方法論を構築し、実際の都市・地域空間への適用を通じて、開発した方法論の有効性を検証することを狙いとしている。そのため、方法論を構成する3つのサブテーマ(行動調査・分析手法の開発、ネットワークシミュレーション手法の開発、信頼性・リスク評価モデルの構築)について相互に連携しながら研究開発を行い、実証研究を通じた方法論の改良と検証を進めていく。なお、各節の番号は2.における3点それぞれに対応する。

(1) 行動調査・分析手法の開発

先行研究で開発済みのプローブパーソン(PP)システムを拡張し、実行動データをもとに交通ネットワークの途絶等、災害時を想定した交通行動データを収集できる調査システム(PP+SP)を開発する。

開発した調査システムにより収集できる行動データに基づき、離散選択モデルを基盤に、災害時を想定した交通行動(とくに経路選択)のモデル化手法を開発する。行動データ収集・分析プロセスの一体化を図り、少数サンプルデータの収集・分析を行う。

開発した災害時を想定した行動データの収集・分析手法の実用性を確認するため、交通ネットワーク上での帰宅・避難を想定したPP調査およびWEB上でのSP調査とデータ分析を行う。

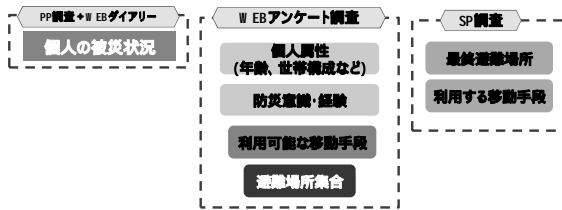


図1 調査システムの構成と収集データ



図2 調査システム画面

(2) ネットワークシミュレーション手法の開発

平常時の動的交通流理論と整合する形で、災害時の交通ネットワークフローモデルの必要条件を整理し、災害時の移動体シミュレーションモデルの基本フレームを設計する。基本フレームに従い、移動体シミュレーションによる災害時のネットワークフローモデルと連動した信頼性・リスク評価モデルを構築する。また、被災レベルをシナリオとして与え、帰宅・避難交通のシミュレーションと信頼性評価を実行する。被災レベルの差がネットワークフローと信頼性評価指標値に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 信頼性・リスク評価モデルの構築

モデルが具備すべき必要条件を整理し、ネットワークの信頼性評価に関する理論モデルの基本フレームを設計する。基本フレームに従い、災害時のネットワークフローモデルと連動した信頼性・リスク評価モデルを構築する。信頼性評価指標を交通ネットワーク上に実装し、ネットワーク規模での指標の挙動を調べる。また、任意の起終点ペア間を対象に、災害時の帰宅・避難交通の信頼性指標を出力できるようにシステム化する。

以上で構築したシステムを適用し、交通ネットワークのリンクを補強する計画と、ネットワーク上に一時避難所を配置する計画の評価を通して、本研究で提案する方法論がリンク強化策とノード強化策の適切なバランスを実ネットワーク上で評価する際に有効に機能することを示す。

4. 研究成果

(1) 行動調査・分析手法の開発

本研究では、プローブパーソン (PP) システム、WEB ダイアリーシステム、WEB 上での SP (Stated Preference) 調査システムを統合 (図1) するとともに、災害時の避難行動における交通行動のモデルを記述した。行動データの収集・分析手法の実用性を確認するため、静岡県浜松市に在住する 20 名を対象として、平成 23 年 12 月に調査を実施した (図2)。なお、調査では、津波災害を想定し、調査対象者は、必ず沿岸部を通るトリップを持つ、浜名湖沿岸もしくは太平洋沿岸に自宅あるいは勤務先がある者に限定している。開発したシステムを用いた本調査による成果を以下に示す。

開発したシステムを用いて、被験者が滞在する蓋然性が高い地域場所の抽出が行え、一日のアクティビティの中での被災リスクの抽出が可能となった。

被災リスクがある地域についての避難場所等の知識的要因についてのデータ収集が可能となった。

被災リスクがある地域での災害発生時の行動モデルの推定に必要なデータを収集することが可能となった。

(2) 交通シミュレーション

研究方法で示したシミュレーション手法を構築し、仮想ネットワーク (表1) 上で、一日の交通が主に通勤及び帰宅交通であると単純化した上で、日中に発生した災害の直後に帰宅交通が集中的に発生するというシナリオを用いて、シミュレーション手法の検証を行った。検証では、帰宅交通の発生レベルに応じて、ネットワーク上でのネットワークフローに差が生じることが確認され、「総旅行時間」、「最遅帰宅完了時刻」、「総待機時間」、「総待機人数」などの指標を用いて評価し得ることを示した。また、一例として、帰宅開始時間を遅らせるなどの帰宅交通の発生を抑制することにより、ネットワークフローへの影響をとどめることが確認できた。特に、災害発生直後に一斉に帰宅交通が発生した場合には、グリッドロックが生じていたが、帰宅交通の発生時刻を 3 時間に渡って分割するだけでも、交通流を円滑にし得ることを示した (表2)。

表1 仮想ネットワークの一例 (Sioux Falls 市街地ネットワーク)

ノード数	24
リンク数	76
OD ペア数	552
車線数	2 (全道路)
総 OD 需要	57,696 台

表2 シミュレーションの結果の一例

総旅行時間	3714.65 時間
最遅帰宅完了時刻	17:10
総待機時間	50,484 時間
総待機人数	36,060 人

(3)信頼性・リスク評価モデルを用いた交通ネットワークのリンクを補強計画

耐震補強に投資する費用と、地震が発生したときに生じるリスクとして不便益を明示的に考慮した社会的 LCC (ライフサイクルコスト) 評価が行える枠組みを提案した(図3)。モデルが具備する要件を整理すると、「OD (発生・集中) 交通需要」、「(リンク) 補強費用」、「復旧費用」、「復旧期間」、「社会的割引率」および「地震発生確率」、「地震外力」、「リンクの地震外力への強度 (フラジリティ)」を与件とし、必ずしも全てのリンクを補強できないことを前提として、リンク補強のパターンを求めることである。本研究では、LCC が最小となる戦略を求めるモデルを構築し、その解法の開発を行った。

具体的には、耐震化することによって最尤状態が変化しない橋梁は、耐震化の対象とせず、ある地震外力のシナリオにおいて、耐震化することで最尤状態が変化する橋梁を“s-有効橋梁”，その橋梁群を“s-有効橋梁群”とし、発生確率を加味した複数の地震外力のシナリオに対してLCCが最小になるようにs-有効橋梁群ごとに「耐震化する/しない」の耐震化性能を割り当てる。

本モデルを実際に神戸市ネットワーク(図4)に適用した場合の計算を行い、LCCが最小となる戦略を求めた。それに加え、LCCを最小化とする戦略よりも、社会受容性が高い、あるいは実行可能性が高い、いくつかの代替的な戦略を求めた。OD交通需要関数は、平成11年度に行われた道路交通センサスのパーソントリップ調査に基づき作成した。対象エリアを通過する交通については、対象エリアの境界にあるノードを起点あるいは終点として、通過OD交通量を集約させるものとした。作成したODペア数は17287ペア存在し、(平常時の)OD交通需要は2960160台/日である。ここで、トリップ不能OD(経路が存在しないOD)の利用者が支払う機会費用、およびトリップを中止する利用者の機会費用を、等しく8時間 (=24,000円)とした。この値は、1日の活動時間を睡眠時間の8時間を引いた16時間と仮定し、活動時間のうち8時間以上が旅行時間に費やされれば、たとえトリップできたとしても本来の目的である活

動が不可能となる上限として設定した。地震外力シナリオは、表3のように与えた。

図5は、本研究の手法による算出結果を示したものである。図では、各リンクを新たに以下の4つに分類している:1) 橋梁を持たないリンク(地震外力での破損の対象がないリンク);2) 4つのシナリオ全てで“非損壊”となるリンク;3) 1つ以上のシナリオで -有効となるリンク;4) それ以外のリンク。この内、4)は、1つ以上のシナリオで“損壊”となるが、耐震化しても効果がないリンクである。以下では、これを無効果リンクと呼ぶ。図より、以下の2点がわかる。まず、s-有効リンクは広範囲に分布し、局所的な偏りはみられない。つまり、s-有効リンクを用いて戦略集合を縮約することは、必ずしも耐震補強の候補となる橋梁数を減らすことにはならない。次に、無効果リンクに接するリンクには、必ずs-有効リンクが存在する。これより、耐震化によって、無効果リンク損壊時の迂回路の確保が期待できることが分かった

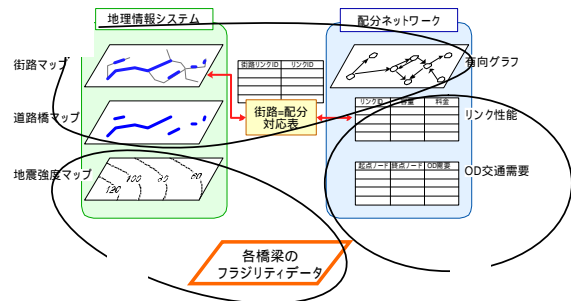


図3 信頼性・リスク評価モデルの枠組み

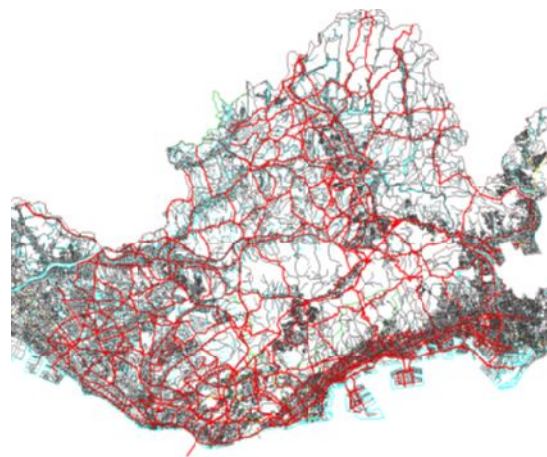
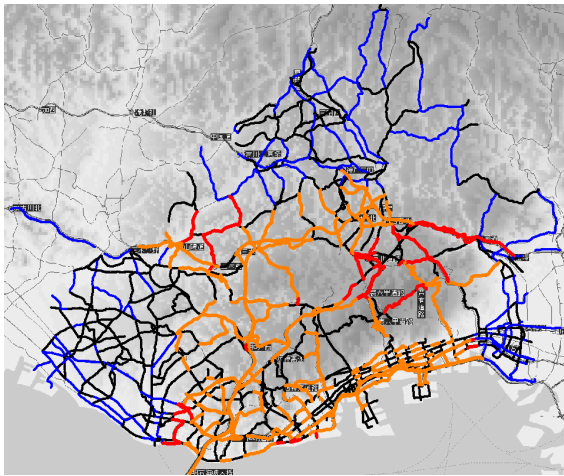


図4 対象ネットワーク(神戸市)

表3 地震外力のシナリオ

地震シナリオ	代表活動域	年生起確率(1/年)	再現期間(年)
A	地殻内	2.72E-04	3,681
B	有馬高槻	2.05E-04	4,866
C	大阪湾	1.63E-04	6,139
d	六甲	1.28E-04	7,818



- : 橋梁をもたないリンク
- : 非損壊リンク
- : 1つ以上のシナリオで有効となるリンク
- : 無効果リンク

図5 分析結果の一例

(4) 成果のまとめ

(1) ~ (3) で示した成果を統合することにより、以下のようなことが可能となった。

(1) で開発した調査システムより、災害時のヒトの避難行動に関するパラメータを取得し、交通行動主体の異質性を考慮した交通ネットワーク上での交通行動を記述することが可能となる。

(1) の方法で取得した行動パラメータと(2) で構築したシミュレーションモデルにより、災害時において交通ネットワークで発生するリスクについて、予測・評価をより精緻に行うことができ、発生するリスクの抑制方法を検討できるようになる。

(2) で構築したシミュレーションと(3) の信頼性・リスク評価モデルを統合することにより、リンク強化策の策定及びリンクの被災リスクを加味した災害時の帰宅・避難交通の信頼性指標を出力することが可能となる。

以上のように、本研究課題では、当初の目的であった、災害直後の帰宅と避難を想定した行動データの収集、帰宅交通と避難交通が錯綜するネットワーク上でのシミュレーション、およびネットワーク信頼性評価を行う方法論を構築することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計30件)

朝倉康夫; 突発事象の検出と交通運用, 高速道路と自動車. 57(3), pp.1-4, 2014. 査読無.

Wei, C., Asakura, Y. and Iryo, T.; The posterior probability distribution of traffic flow: a new scheme for the assignment of stochastic traffic flow. *Transportmetrica A: Transport Science*, 9(8), pp.753-771, 2013. 査読有.

Akamatsu, T., Osawa, M., Nagae, T. and Yamaguchi, H.; Spatio-Temporal Analysis of Gasoline Shortages in the Tohoku Region after the Great East Japan Earthquake, Special Issue (Invited Papers) on 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of JSCE*, 1(1), pp.447-469, 2013. 査読有.

Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.; Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network. *Transportation Research Part A*, 46(5), pp.813-827, 2012. 査読有.

中山晶一郎; ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便宜評価の一考察. *土木学会論文集*, 67(2), pp.147-166, 2011. 査読有.

Akamatsu, T. and Nagae, T.; A network of options: Evaluating complex interdependent decisions under uncertainty. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 35, pp.714-729, 2011. 査読有.

森田勝也, 吉井稔雄, 北村隆一; エントロピーを用いた歩行者交通流解析. *交通工学研究発表会論文報告集*, 29, pp.161-164, 2009. 査読有.

Yamamoto, T., Miwa, T., Takeshita, T. and Morikawa, T.; "Updating Dynamic Origin-destination Matrices using Observed Link Travel Speed by Probe Vehicles. *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*. pp.723-738, 2009. 査読有.

Iryo, T., Asakura, Y., Onishi, R. and Samma, C.; Modelling Dynamic Generation of a Choice Set in Pedestrian Networks. *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*. pp.723-738, 2009. 査読有.

[学会発表](計31件)

吉田麻由美, 日下部貴彦, 朝倉康夫; 津波発生時を想定した避難行動調査手法の開発. 第45回土木計画学研究発表会, 2012年

6月2-3日, 京都.

杉山裕一, 山本俊行, 金森亮, 廣井悠,
名古屋都市圏における広域災害発生時の交通渋滞に関する分析. 第45回土木計画学研究発表会, 2012年6月2-3日, 京都.

浦田淳司, 羽藤英二; 災害時の世帯間状態差と空間的特性を考慮した協調行動の形成に関する研究. 第44回土木計画学研究発表会, 2011年11月25-27日, 岐阜.

Yoshii, T., Yonezawa, Y. and Kitamura, R.; Evaluation of an Area Metering Control Method Using the Macroscopic Fundamental Diagram. The 12th World Conference on Transport Research, 2010.7.11-2010.7.15, Lisbon, Portugal.

Kusakabe, T., Sadakane, K., Yamanaka, I., and Asakura, Y.; Development of Stated-Preference Survey System on the Combined WEB and GPS Mobile Phones. Seventh Triennial Symposium on Transportation Analysis, 2010.6.20-2010.6.25, Tromso, Norway.

Wei, C., Iryo, T. and Asakura, Y.; Posterior probability distribution of travel behavior in networks. 89th Annual Meeting of Transportation Research Board. 2010.1.13, Washington D. C., USA.

Nagae, T. and Sasaki, S.; A Mean-Variance Approach to Mixed Strategies for Dispatching Problems under Travel Time Uncertainty. 14th Hong Kong Society of Transportation Studies International Conference, 2009.12.10, Hong Kong, China.

〔その他〕

ホームページ等

http://www.transport-titech.jp/seminar_visitor/2013/TSU-IWORKSHOP2013-01/TSU-IWORKSHOP2013-01.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝倉 康夫 (ASAKURA, Yasuo)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80144319

(2) 研究分担者

羽藤 英二 (HATO, Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 60304648

山本 俊行 (YAMAMOTO, Toshiyuki)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授
研究者番号: 80273465

中山 晶一郎 (NAKAYAMA, Shoichiro)
金沢大学・環境デザイン学系・准教授
研究者番号: 90334755

吉井 稔雄 (YOSHII, Toshio)
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 90262120

井料 隆雅 (IRYO, Takamasa)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10362758

圓山 琢也 (MARUYAMA, Takuya)
熊本大学・政策創造研究教育センター・准教授
研究者番号: 20361529

赤松 隆 (AKAMATSU, Takashi)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90262964

多々納 裕一 (TATANO, Hirokazu)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 20207038

長江 剛志 (NAGAE, Takeshi)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30379482