

モバイルブリッジを用いた道路網の 復旧力に関する研究

モバイルブリッジを用いた道路網の
復旧力に関する研究プロジェクト

2022年7月

公益社団法人日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究
成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印
刷に付して順次刊行するものである。
2. シリーズは A より E に至る 5 つの系列に分かれる。
シリーズ A は、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。
シリーズ B は、シリーズ A に対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、折
にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によってと
りまとめたものを収める。
シリーズ C は、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。
シリーズ D は、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査
活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。
シリーズ E は、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和 2 年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事 山 内 弘 隆
同 原 田 昇

令和 2 年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番
号を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-6

守住ビル 4 階

公益社団法人日本交通政策研究会

電話 (03) 3263-1945 (代表)

Fax (03) 3234-4593

E-Mail: office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-851

令和 3 年度共同研究プロジェクト

「モバイルブリッジを用いた道路網の復旧力に関する研究」

刊行：2022 年 7 月

モバイルブリッジを用いた道路網の復旧力に関する研究
On the Improvement of Road Network Resilience using Mobile Bridge

主査：藤原 章正（広島大学）

Akimasa Fujiwara (Hiroshima University)

要 旨

本研究では、現場到着後 1 時間で供用開始できるモバイルブリッジ（MB）の活用を念頭に、MB 導入による道路網のパフォーマンス改善効果に関する実証分析を行う。具体的には、まず、平成 30 年 7 月豪雨時の道路網被災パターンに対して MB が導入された場合の道路網パフォーマンスの改善の程度を、MB 導入前後における総旅行時間（利用者均衡配分により算出）の比較を通じて定量的に評価した。実証分析の結果、MB の導入がかえって道路網のパフォーマンスを低下させる Braess のパラドクスが発生することが確認された（ケーススタディでは、約 20%のシナリオで Braess のパラドクスが発生）。

上記結果を受け、Braess パラドクスの発生条件を探索する追加分析を行った。具体的には、パラドクスの発生は道路網構造と交通需要パターンに依存すると考え、(1) 仮想的な道路網と交通需要パターンを生成する方法を提案した上で、(2) 生成した複数の道路網および交通需要パターンに対し、道路網上の一部の道路リンク削除前／削除後の総旅行時間、及びその差分から定義される Braess のパラドクスの発生有無の情報を格納したデータセットを作成、(3) (2)で生成したデータセットを用いて、道路網、交通需要パターンに関する変数を説明変数、Braess のパラドクス発生有無を目的変数とした決定木分析を実施し、Braess のパラドクス発生条件を探索的に明らかにした。

また、総旅行時間は需要と供給の双方のバランスで決定することから、時空間解像度の高い交通行動データである Agoop データの災害時交通マネジメントの文脈における有用性を確認するための基礎分析を行った。その結果、測位点数が平均 100 点／人・日を下回ることから一部の移動については補足できていない可能性が高いこと等を確認した。

キーワード：モバイルブリッジ、レジリエンス、Braess のパラドクス

Keywords: Mobile bridge, Resilience, Braess's Paradox

目 次

1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景・目的	1
1.2	モバイルブリッジ (MB)	2
1.3	報告書の構成	4
2 章	MB 導入効果の定量的検証：平成 30 年 7 月豪雨災害を事例に	5
2.1	目的	5
2.2	災害時の道路網の脆弱性と復旧過程に関する既往研究	5
2.3	使用データ	7
2.4	研究方法	10
2.5	実証分析結果	11
3 章	Braess のパラドクス発生条件の探索	15
3.1	はじめに	15
3.2	本研究の概要	15
3.3	Braess のパラドクス	17
3.4	道路ネットワーク生成方法	18
3.5	計算方法	21
3.6	シミュレーション分析結果	22
3.7	本章のまとめ	26
4 章	災害時の交通需要の観測可能性に関する基礎分析	27
4.1	はじめに	27
4.2	使用データ	27
4.3	基礎分析結果	27
4.4	本章のまとめ	30
5 章	おわりに	32
5.1	主要な知見	32
5.2	今後の課題	32

研究メンバーおよび執筆者（敬称略・順不同）

主査 メンバー	藤原 章正（広島大学・教授）
	伊藤 雅（広島工業大学・教授）
	神田 佑亮（呉工業高等専門学校・教授）
	清家 美帆（広島大学・助教）
	バルン・バギス（広島大学・助教）
	楠橋 康広（西日本高速道路エンジニアリング中国(株)・土木事業部上級主幹）
	桑野 将司（鳥取大学・教授）
	小笹 俊成（(株)福山コンサルタント・支社長）
	嶋本 寛（宮崎大学・准教授）
	瀬谷 創（神戸大学・准教授）
	力石 真（広島大学・准教授）
	張 峻屹（広島大学・教授）
	塚井 誠人（広島大学・准教授）
	福井のり子（(株)バイタルリード・課長）
	布施 正暁（広島大学・准教授）
	宮崎 耕輔（香川高等専門学校・教授）
	森山 昌幸（(株)バイタルリード・代表取締役）
	吉野 大介（復建調査設計(株)・係長）
	渡邊 一成（福山市立大学・教授）

1 章 はじめに

1.1 研究の背景・目的

近年、2011 年の東日本大震災、2018 年の平成 30 年 7 月豪雨、2020 年の令和 2 年 7 月豪雨など、数十年に一度と評される災害が立て続けに発生している。とりわけ初動対応時には、発災後数日以内に人命救助を行う必要があることから、被災地に発災後すぐに到達できるように早急に道路を復旧することが求められる。数ある社会基盤構造物の中でも橋梁は道路インフラ設備において重要な構造物の一つであり、橋梁の被災は道路ネットワーク性能に重大な影響を及ぼす。橋梁が崩壊すれば道路ネットワークが途切れる事による集落の孤立を引き起こしかねない。実際に平成 30 年 7 月豪雨においては、呉市安浦町女垣内地区にかかる約 10m の橋が流橋し集落が孤立したとの報告があった。

本研究では、このような道路網被災による孤立解消の手段として、応急復旧用の橋梁の利用に焦点を当てる。構造工学分野では、道路リンクの迅速な復旧を可能にする橋梁に関する研究が広く実施されている。例えば、福田・加藤(1961)は、応急復旧用の橋梁の形状や材料、役割分担などについて初めて言及を行い、素早く復旧できる橋のコンセプトを提示している。平沢ら(2016)は、応急復旧用の橋梁を木製にすることにより機動性が高く軽い応急復旧用のトラス橋の開発に成功している。渡辺ら(2016)は、木材による小規模な応急復旧用の橋梁に関する提案を行い、コスト及び耐力の考察を行っている。Yeh et al. (2015)は、ケーブルを用いた応急復旧用の橋梁の開発を行った後に仮設・架橋実験を行い、応急復旧用の橋梁における材料特性や応力解析をまとめている。また、有尾(2009)、中沢ら(2009)、有尾ら(2009)、田中ら(2009)は、展開可能なプレアッセンブル橋であるモバイルブリッジ(以下 **MB** とする)を開発している。**MB** はマジックハンド等で用いられるシザーズ構造を有しており、緊急時に伸ばすことで現場到着後 1 時間で供用開始できる折りたたみの橋梁である。

しかし、以上の先行研究においては、応急復旧用の橋梁により道路網全体のパフォーマンスがどの程度改善するのか等は検証されておらず、その結果、どの程度、応急復旧用の橋梁に予算を投資すべきか等の意思決定につながっていない現状にある。そこで本研究では、**MB** の利用を念頭に、平成 30 年 7 月豪雨災害時に **MB** が利用可能であった場合、どの程度道路網のパフォーマンスは向上していたのかについて検証を進める。また、後述するように、**MB** の架設がかえって道路網のパフォーマンスを低下させる **Braess** のパラドクスが生じうることが確認されたことから、パラドクス発生要因を探るシミュレーション分析を追加的に行って

いる。以下、次節にて MB の特徴を整理し、その後、本報告書の全体構成について述べる。

1.2 モバイルブリッジ (MB)

まず、MB の力学的特徴、及び、他の応急復旧用の橋梁と比較した際の特徴について整理する。

棒部材 2 本の中央をヒンジ接合し、その中央に位置するピポッド部分によりそれぞれの部材が独立し回転することのできる構造を単一シザーズ構造と呼ぶ。近年、この単一のシザーズ構造を左右の境界でピン結合し重ね合わせることで展開可能となるシザーズ構造が防災工学分野及び宇宙工学分野で注目を集めている。この構造の利点は骨格のみで構成されており軽量である点や容易に展開可能である点である。このシザーズ構造及びオリガミを用いた弾性不安定（座屈）の一般論（有尾、2009）、座屈分岐問題（中沢ら、2009）、位相最適化理論（有尾ら、2009）をもとに考案された応急復旧用の橋梁がモバイルブリッジ(MB)である（写真 1.1、1.2）。MB の規格は表 1.1 に示すとおりである。



写真 1.1 架橋中の MB



写真 1.2 架橋後の MB

表 1.1 MB 架橋実験結果から推定した規格と交通容量

内径	2055mm	外径	2978mm
設計荷重	120kN	設置人数	2 人
長さ	21.5m	高さ	4m
展開時間	10 分	供用開始時間	1 時間
システム	油圧	実行交通容量	7274 台/日
平均速度	2.62km/h	最大交通容量	10911 台/日

次に **MB** の応急復旧用の橋梁の中での位置付けを整理する。今紹介した **MB** をはじめ応急復旧用の橋梁に関する橋梁は、応急組立橋、仮復旧橋、作業復旧用仮橋、緊急橋という 4 つの種類がある。それぞれの橋梁の特徴は以下のとおりである。

応急組立橋

国土交通省地方整備局が国道等の維持管理のために保有し、組み立て前提の橋梁である。既存の道路橋示方書相当に基づく設計仕様であり、被災前の橋とそん色のないスペックを要し 4 つの区分の中で供用までに最も時間がかかる。また、一度建設されると年単位の長い期間にわたり使用されるため、復興の時に使用されるのが特徴である。

仮復旧橋

工事用車両が通ることができ、性能は応急組立橋にやや劣る程度。供用までの時間は応急組立橋より早く、作業復旧用仮橋よりも遅い。また、応急組立橋より短い期間で作業復旧用仮橋より長い期間で使用されるため、災害の本復旧で使用される特徴を持つ。民間企業がリース橋として保有しており、迂回路の確保などで用いられることもある。

作業復旧用仮橋

仮橋を架橋する際に基礎工事を必要とせず、地域孤立解消や緊急車両の通行をやむを得ず確保するための仮橋の仮橋である。小規模な交通及び緊急車両を通行させることが目的となっている。しかし、早期復旧の支援を目的にしたがゆえに高度な架橋技術が求められ、車両制限荷重下で建設される。供用までの時間が 2 番目に短く、広域災害などで迅速な復旧の支援を行うことができる。また、供用期間が短いため、仮復旧などの被災直後に使われる。

緊急橋

緊急事態を想定し緊急車両や小型車両が通行できるための橋のカテゴリー仕様案であり、72 時間以内に架橋され荷重制限のある橋梁と本研究論文では定義する。作業復旧用仮橋よりも小規模な交通及び緊急車両を通行させることのみを目的にする橋である。供用までの時間が最も短く、災害後すぐに供用開始できるという特徴を有する。限られた交通（緊急車両など）の緊急的な仕様に使われる。

MB は、その特性から、作業復旧用仮橋または緊急橋としての利用が期待される。

1.3 報告書の構成

以下、2章では、平成30年7月豪雨時の道路網被災パターンに対してMBが導入された場合の道路網パフォーマンスの改善の程度を、MB導入前後における総旅行時間（利用者均衡配分により算出）の比較を通じて定量的に評価する。また、実証分析の結果、MBの導入がかえって道路網のパフォーマンスを低下させるBraessのパラドクスが発生する可能性があることについても確認する。3章では、2章の結果を踏まえ、Braessパラドクスの発生条件を探索するシミュレーション分析を実施する。4章では、Braessパラドクス発生が総旅行時間に依存し、また、総旅行時間は需要と供給の双方のバランスで決定することから、時空間解像度の高い交通行動データであるAgoopデータの災害時交通マネジメントの文脈における有用性を確認するための基礎分析を行う。5章にて本研究の成果をまとめる。

2 章 MB 導入効果の定量的検証：平成 30 年 7 月豪雨災害を事例に

2.1 目的

本章では、モバイルブリッジ (MB) の導入によるエリア内の混雑を減少させる効果を定量的に把握する。具体的には、MB を用いて被災リンクを迅速に復旧を行う場合とそうでない場合の比較から、MB 敷設効果を評価する。

2.2 災害時の道路網の脆弱性と復旧過程に関する既往研究

過去数十年間、自然災害の数は劇的に急増していることから、災害に対するレジリエンス向上を目的として研究が急増している。ここでレジリエンスとは、「ハザードにさらされたシステム、コミュニティ、社会が、リスク管理を通じてその本質的な基本構造や機能の維持・回復を含め、ハザードの影響に適時かつ効率的に抵抗、吸収、収容、適応。変形、回復する能力」(UNDRR、2009) と定義される。交通研究では、Serulle et al. (2011) がレジリエンスを「システムが実証されたサービスレベルを維持する能力、または特定の時間枠内でそのサービスレベルに回復する能力」と定義している。これは、Balal et al. (2019) のレジリエンスの定義、すなわち「リンク閉鎖、ノード閉鎖、容量減少を引き起こす破壊的事象に耐え、そこから迅速に回復する交通網の運用能力」と本質的に同義といえる。

Serulle et al. (2011) 及び Balal et al. (2019) の定義に従うと、道路ネットワークの回復力は(1) ネットワークへの最初の影響に焦点を当てた初期段階と(2) 災害から受けた損傷からの回復速度の2つの段階から構成される。以下では、道路ネットワークの脆弱性という概念のもとで行われてきた第1フェーズに関する研究を概観し、次に道路ネットワークの回復プロセスを探る第2フェーズに関する研究を概観する。

2.2.1 道路網の脆弱性に関する研究

道路網の脆弱性に着目した研究は数多く存在する。例えば Pan et al. (2021) は、交通の脆弱性と回復力の研究に用いられる定量的手法を、トポロジー分析、モデル最適化、シミュレーション、データベースに分類している。彼らの約 140 件の文献レビューの結果に基づくと、24%がトポロジー分析を、48%がモデル最適化を、18%がシミュレーションを採用し、データベースの研究はわずか 10%であった。

ネットワークトポロジーは、ノードと相互接続リンクからなる交通システムの抽象的な表現である (Zhang et al., 2015)。交通ネットワークのトポロジー構造を分析する研究では、道路をリンク、ノードをインフラストラクチャまたはこれらの道路が接続されている重要な場所として考える。この方法を用いて道路の脆弱性を分析した研究としては、Chen et al. (2021), Furno et al. (2018), Gao et al. (2019), Hu et al. (2022), Santos et al. (2021), Tang and Huang (2019), Zhang and Yao (2019) などがある。

Santos et al. (2021) が行った広島市の 2018 年 7 月豪雨災害の降雨データを用いた研究では、重要な道路セグメントと土砂災害の発生確率を示すリスクマップを作成している。また、分析の結果、ハザードエリア内に位置する道路や流域境界内にあるリンクは、土砂災害により寸断される可能性が高いことが示された。Singh et al. (2018) は洪水シナリオに焦点を当て、水位に基づいて異なるステージを持つ洪水リスクマップを作成している。Zhu et al. (2022) は、中国海南省における 3 つの熱帯サイクロンに伴う道路被害の記録を用いて、道路網の脆弱性と熱帯サイクロン強度の関係を分析している。この研究では、特に地上 10m における最大風速と熱帯サイクロン期間中の累積降水量という 2 つの強度ハザード指標に着目している。分析の結果、道路の脆弱性機能、累積降水量と最大風速の両方から共同して影響を受けることが確認された。Bíl et al. (2015) は、チェコ共和国において 1997 年から 2010 年の間に異常降雨や急激な融雪による洪水や地滑りによって発生した災害に着目し、その経済、人、インフラ、接続性、サービス性への影響を評価している。

2.2.2 道路網の復旧過程に関する研究

道路の復旧過程は、災害から受けた損傷からのシステムの回復速度を規定する (Balal et al., 2019; Serulle et al., 2011)。大規模災害からの社会的・経済的復興は、交通インフラの復興速度に大きく影響される (Rouhanizadeh and Kermanshachi, 2020)。道路復旧は、災害の初期段階において重要な役割を果たすだけでなく、地域社会が平常の状態に戻るまでの間に大きな影響を与える (Lacuarin and Palmiano, 2020)。

Çelik (2016) は、ネットワークの回復過程に関する研究を、決定変数、目的関数、解決方法の観点から分類している。具体的には、交通インフラの復旧や復興といった問題を扱う研究 (HPourmohammadi, 2008; Iloglu and Albert, 2020; Rouhanizadeh and Kermanshachi, 2020; Wang and Hu, 2005; Zhao and Zhang, 2020)、瓦礫処理 (Ajam et al., 2019; Berktaş et al, 2016; Sayarshad et al., 2020)、復旧・復興活動のシーケンスとスケジューリング (Gokalp et al., 2021; Rey and Bar-Gera, 2020; Tadano et al., 2017) など、異なる目的関数のセットと解決方法を必要とする一連の研究を体系的に整理している。しかしながら、著者らが知る限り、道路網の復旧過程におけるモバイルブリッジ実装の効果を定量的に評価した研究は存在しない。

2.3 使用データ

本分析を実施するに当たって必要なデータは OD 表、道路ネットワークデータ、通常時の交通量データ、道路網被災データである。OD データは平成 27 年度の道路交通センサスをもとに作成した。また、道路網被災データには、被災区間、被災区間長さ、被災箇所、被災原因、啓開日、交通規制、片側交互交通開始日時などが含まれる。本データを整備するため、国道の被災データは国土交通省に、県道や県管理下にある国道の被災データは広島県に尋ねてデータを入手した。また、市道等については、国土交通省が現地調査・ETC2.0・民間プローブデータを基に作成した広島市・呉市通れるマップ、東広島市が Google map 上で提供した道路網被災データ、呉市が提供した道路通行規制情報、各種道路管理者 HP、株式会社福山コンサルタント提供データなどを用いて作成した。作成したデータを表 2.1~表 2.2 に示す。なお復旧日時が正確に把握できなかった区間に関しては、確実に復旧が確認された日を復旧日時とした。山陽道に関しては、東の制限を尾道 IC として分析対象道路網に含めることとする。併せて、表内に MB 架設可能リンクを記載している。以下の条件を満たしたものを MB の架橋可能リンクとして扱った。

- 土砂災害もしくは陥没により不通区間になった
- 崩壊の長さが 30m 以内である
- 崩壊の規模が軽微であった区間

表 2.1 呉市周辺の被災データ 1

番号	情報元	状態	場所	完全復旧日	片側交互交通復旧日	MBかけれるかどうか
1	国土交通省	通行止め	国道31号かるが浜	7月7日	-	○
2	国土交通省	通行止め	国道31号平成ガ浜	7月7日	-	-
3	国土交通省	通行止め	国道2号海田町	7月7日	-	-
4	国土交通省	通行止め	国道31号小屋浦	7月8日	-	○
5	国土交通省	通行止め	国道2号下見	7月9日	-	-
6	通れる道マップ	通行止め	市道30号線平谷線	7月9日	-	-
7	通れる道マップ	通行止め	県道174号線	7月9日	-	-
8	国土交通省	通行止め	国道2号上三永	7月9日	-	-
9	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
10	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	○
11	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
12	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
13	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	○
14	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
15	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
16	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
17	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
18	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
19	国土交通省	通行止め	東広島呉道路	7月10日	-	-
20	国土交通省	通行止め	国道185蒲刈前のトンネル	7月11日	-	x
21	東広島道路情報Googlemap	通行止め	国道185号木谷	7月11日	-	○
22	国土交通省	通行止め	国道31号水尻	7月12日	-	x
23	国土交通省	通行止め	国道2号上瀬野	7月12日	-	x
24	道路公社	通行止め	広島呉道路坂北-仁保JCT	7月13日	-	x
25	国土交通省	通行止め	国道185竹原高崎	7月14日	-	x
26	東広島道路情報Googlemap	通行止め	造賀田万里線	~7/17	-	-
27	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	造賀田万里線	~7/18	7月7日	-
28	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	国道432号	~7/19	7月7日	-
29	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	上三永竹原線	~7/20	7月7日	-
30	東広島道路情報Googlemap	通行止め	別府河内線	~7/21	-	-
31	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	小田白市線	~7/22	7月7日	-
32	東広島道路情報Googlemap	通行止め	造賀田万里線	~7/23	-	-
33	国土交通省	通行止め	国道2号中野東	7月21日	-	x
34	国土交通省	通行止め	国道2号八本松	7月21日	-	x
35	国土交通省	通行止め	国道2号線竹原市田万里	7月21日	7月13日	x
36	呉市道路通行規制情報	片側交互通行	広仁方停車場線	7月24日	-	○
37	呉市道路通行規制情報	片側交互通行	広仁方停車場線	7月24日	-	○
38	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	瀬野川福富本郷線	~7/24	-	-
39	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	瀬野川福富本郷線	~7/24	-	-
40	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	安芸津下三永線	~7/24	-	-
41	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	安芸津下三永線	~7/24	-	-
42	東広島道路情報Googlemap	通行止め	安芸津停車場線	~7/24	-	-
43	通れる道マップ	通行止め	下瀬野海田線	~7/24	-	-
44	通れる道マップ	通行止め	矢野安浦線	7月30日	-	x
45	通れる道マップ	通行止め	矢野安浦線	~7/31	-	x

表 2.2 呉市周辺の被災データ 2

番号	情報元	状態	場所	完全復旧日	片側交互交通復旧日	MBかけれるかどうか
46	東広島道路情報Googlemap	通行止め	吉川大多田線	~7/31	-	-
47	呉市道路通行規制情報	通行止め	呉環状線	7月31日	-	x
48	通れる道マップ	通行止め	矢野安浦線	~8/1	-	x
49	東広島道路情報Googlemap	通行止め	河戸豊栄線	~8/7	-	-
50	東広島道路情報Googlemap	通行止め	東広島白木線	~8/7	-	-
51	通れる道マップ	通行止め	国道432号	~8/7	-	x
52	通れる道マップ	通行止め	本郷大和線	~8/7	-	-
53	呉市道路通行規制情報	片側交互通行	呉環状線	8月11日	7月7日	○
54	通れる道マップ	通行止め	国道375号	8月18日	-	○
55	呉市道路通行規制情報	片側交互通行	国道185号仁方	9月9日	7月11日	○
56	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
57	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
58	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
59	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
60	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
61	通れる道マップ	通行止め	広島呉道路	9月27日	-	x
62	通れる道マップ	通行止め	ブルーパール	8/7-	-	x
63	通れる道マップ	通行止め	呉環状線	8/7-	-	x
64	通れる道マップ	通行止め	焼山吉浦線	8/7-	-	x
65	通れる道マップ	通行止め	小河原志和線	8/7-	-	x
66	通れる道マップ	通行止め	瀬野呉線	8/7-	-	-
67	東広島道路情報Googlemap	通行止め	高屋河戸線	8/7-	-	-
68	東広島道路情報Googlemap	通行止め	瀬野川福富本郷線	8/7-	-	x
69	通れる道マップ	通行止め	川尻安浦線	8/7-	-	x
70	通れる道マップ	通行止め	東広島向原線	8/7-	-	x
71	通れる道マップ	通行止め	下三永吉川線	8/7-	-	-
72	通れる道マップ	通行止め	下三永吉川線	8/7-	-	-
73	通れる道マップ	通行止め	下三永吉川線	8/7-	-	-
74	通れる道マップ	通行止め	高屋河戸線	8/7-	-	-
75	通れる道マップ	通行止め	河戸豊栄線	8/7-	-	-
76	東広島道路情報Googlemap	通行止め	東広島向原線	8/7-	-	-
77	通れる道マップ	通行止め	国道432号	8/7-	-	-
78	通れる道マップ	通行止め	瀬野川福富本郷線	8/7-	-	x
79	通れる道マップ	通行止め	下徳良本郷線	8/7-	-	-
80	通れる道マップ	通行止め	南方竹原線	8/7-	-	-
81	通れる道マップ	通行止め	三原竹原線	8/7-	-	-
82	東広島道路情報Googlemap	通行止め	国道486号	2年弱	-	x
83	東広島道路情報Googlemap	通行止め	市道	-	-	-
84	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	津江八本松線	-	-	-
85	東広島道路情報Googlemap	通行止め	三和大和線	-	-	-
86	東広島道路情報Googlemap	通行止め	河戸豊栄線	-	-	-
87	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	大和福富線	-	-	-
88	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	大和福富線	-	-	-
89	東広島道路情報Googlemap	片側交互通行	大和福富線	-	-	-
90	東広島道路情報Googlemap	通行止め	農道	-	-	-

2.4 研究方法

本研究では、MB を敷設した際の道路ネットワークのパフォーマンスを評価するため、被災により不通となったリンクのうち MB の敷設が可能なリンクに MB を敷設した際のパフォーマンスの変化を評価した。リンク交通量の算出には利用者均衡配分を用いた。また、評価においては、各リンク交通量から算出した、研究対象エリアにおける総混雑度、総旅行時間、総走行時間費用の3つの指標を用いた。ここで混雑度は各リンクにおける（交通量÷実交通容量）、走行時間費用は各リンクにおける（交通量×旅行時間×時間価値）とした。また、利用者均衡配分は Flank-Wolfe 法⁴⁾により行った。具体的には、各リンクの移動費用には以下の BPR 関数を用いた。

$$t_a(x_a) = t_{a0}\{1 + \alpha(x_a/C_a)^\beta\} \quad (2.1)$$

ここで t_a はリンク a における旅行時間、 x_a はリンク a における交通量、 t_{a0} はリンク a の自由流時における旅行時間、 C_a はリンク a における交通容量、 α および β はパラメータを表す。本研究では、少量の交通を通すことが出来る MB の規格を持ったリンクを道路ネットワーク上で表現するため、MB を敷設するリンクの BPR 関数パラメータを別個に設け、そのリンク抵抗が高くなるように調整した。MB の交通容量及び平均速度については、MB の架橋実験の動画から算出した。具体的には、平均速度 2.62km/h、実交通容量 7274 台/日、最大交通容量 10911 台/日とした。また、本研究では MB 以外のリンクの BPR 関数パラメータを吉田ら⁵⁾の先行研究をもとに、表 2.3 の通り設定した。MB リンクの BPR 関数については、($\alpha=1.92, \beta=9.87$) として推計を行った。

表 2.3 エリア内の BPR 関数パラメータ

道路規格	α	$\beta 1$	$\beta 2$	自由流時の速度
高速道路	0.74	2.5	2.82	制限速度
多車線道路	0.31	1.1	2.82	制限速度
市街地2車線	0.2	1.2	2.82	制限速度
平地2車線	0.1	2.3	2.82	制限速度
山地2車線	0.1	3.7	2.82	制限速度
一車線	0.48	2.82	2.82	制限速度

2.5 実証分析結果

本研究では、広島市、呉市、東広島市を中心とするエリア（リンク数 31020、ノード数 20830、ゾーン数 1339）を対象に、MB 敷設効果の検証を行った。また、被災直後から本復旧までの異なる復旧段階で MB 敷設時の影響を動的に評価するため、2018/7/7~2018/8/8 のうち道路ネットワークの回復状況が異なる計 16 日を対象に解析を進めた。

MB の敷設可能な全てのリンクにおいて MB を敷設した時のネットワーク効果を推定した結果を、エリア内の総混雑度、総旅行時間、総走行時間費用の 3 つの観点で評価した。

2.5.1 総混雑度及び総旅行時間の結果

前述した解析条件で総混雑度及び総旅行時間の結果を求めた。その結果、呉エリア内の総混雑度は MB を敷設することによって平均で 6.0%混雑率が減少することが示された。中でも、発災直後である 3 日目までの総混雑度軽減率の平均は 15.6%であり、発災後迅速に MB の敷設をした方が総混雑度の減少効果が高いという事が確認された。

2.5.2 総走行時間費用

MB 敷設による呉エリア内の総走行時間費用の変化を確認した結果を図 2.1 に示す。図より、MB を敷設することで全ての日において総走行時間費用を減少させることができることが確認された。

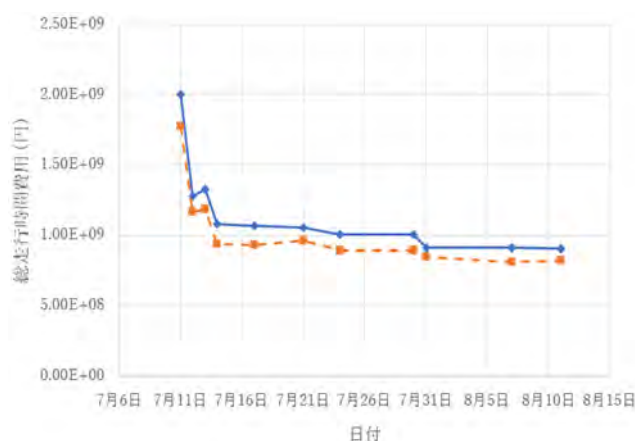


図 2.1 呉エリアにおける総走行時間費用の変化グラフ

以上の結果をまとめると、総一般化費用の減少分により、MB 敷設効果を評価したところ、MB の使用により基本的には総一般化費用は低下することが確認された。しかしながら、図 2.2 に示す 6 箇所の道路リンクについて MB の設置有無の全 64 パターンの組み合わせ（表

2.4) について道路網のパフォーマンスを評価したところ、全ての道路に MB を置くよりも総旅行時間が小さくなるパターンが 12 パターン存在することが確認された (表 2.5)。このことは、MB の設置がかえって道路網のパフォーマンスを低下させてしまう Braess のパラドクスが生じる可能性があることを示唆している。この結果を受けて、次章では、Braess のパラドクスが発生する条件を調べるシミュレーション分析を実施する。

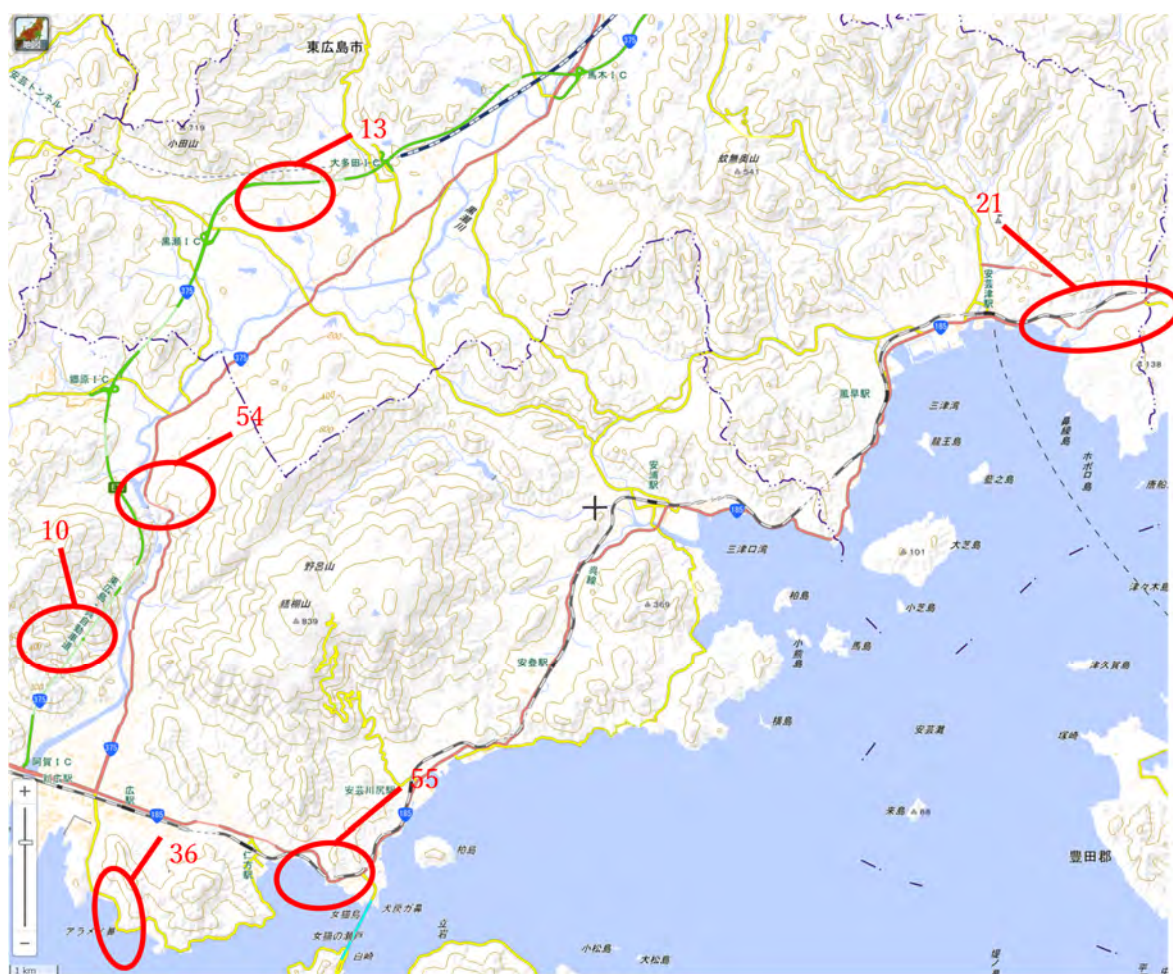


図 2.2 MB 設置箇所

表 2.4 MB の設置有無の全 64 パターンの組み合わせ

	リンク番号		10	13	21	36	54	55
7月9日	ケース番号	79-1	○	○	○	○	○	○
		79-2	○	○	○	○	○	×
		79-3	○	○	○	○	×	○
		79-4	○	○	○	○	×	×
		79-5	○	○	○	×	○	○
		79-6	○	○	○	×	○	×
		79-7	○	○	○	×	×	○
		79-8	○	○	○	×	×	×
		79-9	○	○	×	○	○	○
		79-10	○	○	×	○	○	×
		79-11	○	○	×	○	×	○
		79-12	○	○	×	○	×	×
		79-13	○	○	×	×	○	○
		79-14	○	○	×	×	○	×
		79-15	○	○	×	×	×	○
		79-16	○	○	×	×	×	×
		79-17	○	×	○	○	○	○
		79-18	○	×	○	○	○	×
		79-19	○	×	○	○	×	○
		79-20	○	×	○	○	×	×
		79-21	○	×	○	×	○	○
		79-22	○	×	○	×	○	×
		79-23	○	×	○	×	×	○
		79-24	○	×	○	×	×	×
		79-25	○	×	×	○	○	○
		79-26	○	×	×	○	○	×
		79-27	○	×	×	○	×	○
		79-28	○	×	×	○	×	×
		79-29	○	×	×	×	○	○
		79-30	○	×	×	×	○	×
		79-31	○	×	×	×	×	○
		79-32	○	×	×	×	×	×
		79-33	×	○	○	○	○	○
		79-34	×	○	○	○	○	×
		79-35	×	○	○	○	×	○
		79-36	×	○	○	○	×	×
		79-37	×	○	○	×	○	○
		79-38	×	○	○	×	○	×
		79-39	×	○	○	×	×	○
		79-40	×	○	○	×	×	×
		79-41	×	○	×	○	○	○
		79-42	×	○	×	○	○	×
		79-43	×	○	×	○	×	○
		79-44	×	○	×	○	×	×
		79-45	×	○	×	×	○	○
		79-46	×	○	×	×	○	×
		79-47	×	○	×	×	×	○
		79-48	×	○	×	×	×	×
		79-49	×	×	○	○	○	○
		79-50	×	×	○	○	○	×
		79-51	×	×	○	○	×	○
		79-52	×	×	○	○	×	×
		79-53	×	×	○	×	○	○
		79-54	×	×	○	×	○	×
		79-55	×	×	○	×	×	○
		79-56	×	×	○	×	×	×
		79-57	×	×	×	○	○	○
		79-58	×	×	×	○	○	×
		79-59	×	×	×	○	×	○
		79-60	×	×	×	○	×	×
		79-61	×	×	×	×	○	○
		79-62	×	×	×	×	○	×
		79-63	×	×	×	×	×	○
		79-64	×	×	×	×	×	×

表 2.5 ケース別総混雑度・総旅行時間の推計結果 (7/9)

	採用				採用			
	ケース番号	総混雑度	総旅行時間	総混雑度	総旅行時間	ケース番号	総混雑度	総旅行時間
7月9日	79-1	1003.5	142358	○		79-33	1058.68	196205.6
	79-2	1143.32	1265578*			79-34	1224.5	1821738*
	79-3	1045.97	183028.9			79-35	1069.17	180027.2
	79-4	1189.86	1438391*			79-36	1193.84	1342432*
	79-5	1033.65	196418.3			79-37	1068.55	133165.4
	79-6	1163.41	1292839*			79-38	1240.12	1821812*
	79-7	1051.94	137784.2			79-39	1079.25	142483.4
	79-8	1203.74	1438418*			79-40	1207.42	1342454*
	79-9	1064.81	279889.2			79-41	1068.52	120508.6
	79-10	1144.48	1257554*			79-42	1194.91	1520479*
	79-11	1044.26	138467.1			79-43	1119.06	224997.4
	79-12	1200.73	1436463*			79-44	1199.62	1338622*
	79-13	1075.82	292596.9			79-45	1042.52	110755
	79-14	1160.87	1286913*			79-46	1210.44	1514317*
	79-15	1162.31	857405.5			79-47	1134.61	222021.4
	79-16	1214.22	1437138*			79-48	1212.8	1338536*
	79-17	1024.7	107726.5	○		79-49	1043.63	124106.6
	79-18	1174.64	1333921*			79-50	1209.99	1467520*
	79-19	1157.12	802072.9			79-51	1125.22	221959.4
	79-20	1236.78	1458992*			79-52	1234.48	1441014*
	79-21	1039.7	136607.6			79-53	1062.94	122949.3
	79-22	1187.53	1369321*			79-54	1229.99	1481152*
	79-23	1082.32	176575.5			79-55	1125.18	144634.4
	79-24	1249.85	1459030*			79-56	1249.04	1441042*
	79-25	1064.69	180411.3			79-57	1059.49	128392.9
	79-26	1174.17	1328757*			79-58	1222.69	1544111*
	79-27	1060.52	159470.9			79-59	1118.72	145628.9
	79-28	1237.16	1471185*			79-60	1221.46	1349175*
	79-29	1070.73	155106.1			79-61	1063.31	117159.7
	79-30	1188.66	1356545*			79-62	1239.47	1544112*
	79-31	1084.9	127611.6			79-63	1134.38	144624.8
	79-32	1250.86	1470565*			79-64	1235.59	1349202*

3 章 Braess のパラドクス発生条件の探索

3.1 はじめに

本研究では、Braess のパラドクス (Braess et al., 2005) が発生する状況を探る決定木分析を行う。Braess のパラドクスとは、移動時間の短縮を目的として新たに道路リンクを追加することにより、逆に移動時間が増加してしまう現象のことを指す。この現象は、現存する都市でも発生することが確認されており、封鎖することによって渋滞が改善される道路が存在することを示唆する。しかしながら、Braess のパラドクスが発生する諸条件については、一般的な知見が得られていない状況にある。本研究では、決定木分析を通じてパラドクス発生条件を明示することで、次に述べる政策論展開の足掛かりとしたい。第一に、ある道路区間を封鎖することで道路網全体のパフォーマンスが向上する場合、例えば当該道路区間を歩行者専用空間に割り当てる方策が考えられる (Bagloee et al., 2019)。第二に、前章にて議論したように、災害時に複数道路が被災し、通行止めとなった際の道路網の復旧課程においても Braess のパラドクスが発生し得ることが確認された。Braess のパラドクスが生じる諸条件を明らかにすることで、パラドクスの発生を回避した道路の復旧順序の検討につなげたい。

Braess のパラドクスが発生する状況を探る研究はいくつか存在するが、ある特定のネットワークでのみの定式化やシミュレーションに留まっており、知見の一般化が図られていない。そこで、Braess のパラドクスが道路網の構造と交通需要パターンに依存すると考え、それらを変数とした分析を行う。分析には決定木分析を用いるとともに、現実の都市においてみられる道路網構造と交通需要パターンを模した仮想状況を生成するアルゴリズムを構築する。

3.2 本研究の概要

本研究の全体像を次の図 3.1 に示す。本研究の最終目的は、平常時だけでなく、災害時の特殊な状況におけるパラドクスの発生状況探索である。本論文では、図 3.1 中の上側の平常時の発生状況探索を行い、図 3.1 下側の災害時の分析は、これからの課題とする。様々な道路網構造と交通需要条件下における Braess のパラドクスの発生状況を確認することを企図した分析を行う。

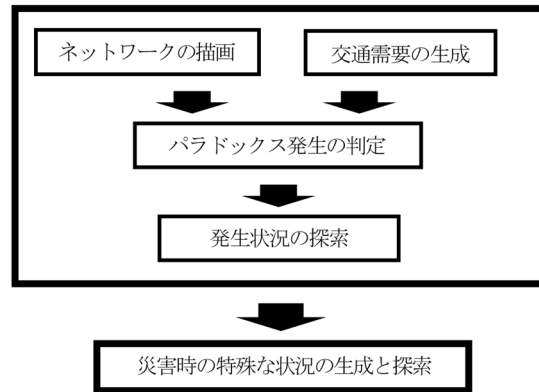


図 3.1 研究のフロー

Braess のパラドックスの発生有無を判別するために、利用者均衡配分を用いて以下の 2 つの道路網条件下における旅行時間を算出する。

$$TTT = F(D, G(A, E)) \quad (3.1)$$

$$TTT' = F'(D, G(A, E, P)) \quad (3.2)$$

ここで、 TTT は移動時間、 D は交通需要、 A はリンク(道路)、 E はノード、 $G(E, A)$ は道路網、 TTT' はリンクを封鎖した時の移動時間、 P は実際に封鎖したリンクとする。

イメージ式において、 TTT と TTT' を比較し、

$$TTT > TTT'$$

となったとき、Braess のパラドックスが発生したと判断する。

決定木分析において道路網の変数として π 指標、交通需要の変数として媒介中心性を用いる(延原ら、2020)。 π 指標は、道路の混み具合を示す指標であり、値が大きいほど都市化が進んでいるといえる。媒介中心性は、対象のノードを通る交通がどれだけあるかを表した値であり、この媒介中心性が高いほど、中心部に位置するノードと判断できる。また、決定木分析の説明変数は、交通需要の媒介中心性パラメータ、 π 指標、取り除くリンク両端のノードのそれぞれの媒介中心性(媒介中心性 1、媒介中心性 2)、取り除いたリンクの種類、平均移動時間(min)とした。

3.3 Braess のパラドクス

Braess のパラドクスとは、利用者均衡モデルが適用されるネットワークにおいて、旅行時間の短縮を目的としてネットワークに新たにリンクを追加することにより、逆に旅行時間が増加してしまう現象のことを指す。まず、Braess のパラドクスについて、簡単な例を用いて説明する。利用者均衡モデルが適用された図 3.2 のネットワークを考える。図 3.2 のネットワークで、ノード a から z まで移動することを考える。すると移動経路は、経路 1 : a→b→z と通る経路、経路 2 : a→c→z と通る経路、経路 3 : a→b→c→z と通る経路、の 3 種類となる。通常、リンクを通過するのにかかる時間は交通量に依存すると考えられるから、 $t_\alpha(\varphi)$ 、 $T_\beta(\Phi)$ 、 $T(\Phi)$ 、およびネットワーク上の各リンクの通過時間をそれぞれ

$t_\alpha(\varphi)$: リンク α に $\varphi=\varphi_\alpha$ の流量があるとき、

リンク α を通過するのに必要な時間

$T_\beta(\Phi)$: 経路 β に Φ の流量があるとき、

経路 β を使用して移動するのに必要な時間

$T(\Phi)$: ドライバー一人当たりの旅行時間

$$\begin{aligned} t_1(\varphi) &= t_3(\varphi) = 10\varphi \\ t_2(\varphi) &= t_4(\varphi) = 50 + \varphi \\ t_5(\varphi) &= 10 + \varphi \end{aligned} \quad (3.3a)$$

と定義する。ここに、ノード a から z まで移動する総交通量を与え、すべてのドライバーの移動時間が最小となるように配分計算を行う。ここでは 2 パターンの例を取り上げる。

- ・総交通量が 20 台の場合

それぞれの経路を通過する交通量は、式(3b)のようになる。

$$\Phi_{abcz} = 0, \quad \Phi_{abz} = \Phi_{acz} = 10 \quad (3.3b)$$

と配分すると、利用者均衡配分となる。この時のドライバー一人当たりの旅行時間 $T(\Phi)$ は、

$$\begin{aligned} |T(\Phi)| &= (10 \times 10) + (50 + 10) \\ &= 160 \end{aligned} \quad (3.3c)$$

となる。

- ・総交通量が 6 台の場合

それぞれの経路を通過する交通量は、式(3.3d)のようになる。

$$\Phi_{abcz} = 0, \quad \Phi_{abz} = \Phi_{acz} = 3 \quad (3.3d)$$

と配分すると、利用者均衡配分となる。この時のドライバー一人当たりの旅行時間 $T(\Phi)$ は、

$$\begin{aligned} |T(\Phi)| &= (10 \times 3) + (50 + 3) \\ &= 83 \end{aligned} \quad (3.3e)$$

しかし、この時、経路 3 : $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow z$ の旅行時間を計算すると

$$|T(\phi)| = (10 \times 3) + (10 + 0) + (10 \times 3) = 70 \quad (3.3f)$$

となり、全てのドライバーは最も旅行時間の短い経路を選択する、という Wardrop の第一原則に反してしまう。従って、経路 3 にドライバーが移動するため、最終的な利用者均衡配分は、次の式 (3.3g)、(3.3h) のようになる。

$$\phi_{abcz} = \phi_{abz} = \phi_{acz} = 2 \quad (3.3g)$$

$$|T(\phi)| = (10 \times 4) + (50 + 2) = 92 \quad (3.3h)$$

よって、リンク⑤が存在することにより、旅行時間が長くなってしまふ。これを Braess のパラドクスという。

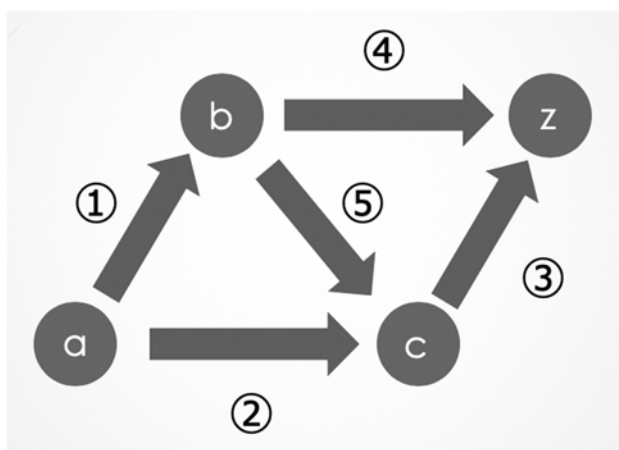


図 3.2 ネットワーク例

3.4 道路ネットワーク生成方法

(1) L-system

道路ネットワーク生成手法はいくつか提案されている。その中で、本研究では、L-system (加藤ら、2000) と呼ばれる自己相似性を持った図形を描画することができるアルゴリズムによるネットワーク生成の手法を用いる。

L-system は、植物や細胞などのような自己相似性を持った図形を描画することができるアルゴリズムである。初期文字列を書き換え規則に従って変換することによって、自己相似性を持った複雑な図形が記述できる。本研究では、次の表 3.1 の書き換え規則を設定した。また、書き換え規則によって生成された文字列の意味は、道路種類によって異なるという設定

にしている。その設定を、次の表 3.2 から表 3.5 に示す。また、上記の各道路の揺らぎ角度は $\pm 5^\circ$ としている。

(2) 描画と基本条件

書き換え規則を `python` のタートルグラフィックを用いて描画する。また、道路ネットワーク描画時の条件を次のように設定した。

- ① 描画する線の太さを変えることで、道路の種類分けを行う。
- ② 道路の種類は「高速道路」、「国道」、「県道」、「市町村道」の 4 種類とする。
- ③ 高速道路が生成される確率は 90% とする。
- ④ 高速道路と他の道路の交差確率は、すべての道路で 20% とする。
- ⑤ 高速道路以外の道路どうしは 100% 交差する。
- ⑥ L-system の書き換えの回数は、「高速道路」、「国道」が 3 回、「県道」が 5 回、「市町村道」が 7 回であり、「市町村道」は異なる 2 地点から合わせて 2 回描画させる。
- ⑦ ノード数が 50 以下、または 200 以上のネットワーク

は破棄する。

また、描画したネットワークに、配分計算に必要な基本条件を設定する。今回生成するネットワークは、中心部からの距離が 3~5km 程度の都市を想定している。生成の基本条件は次のように設定する。

- ① 道路の種類別に交通可能容量を設定する。
「高速道路」：2000 (pcu)
「国道」：1500 (pcu)
「県道」：1000 (pcu)
「市町村道」：700 (pcu)
- ② 道路の長さ(km)を設定する。
タートル座標系で
(タートルの出力のリンク長/100)とする。
- ③ 道路の自由旅行時間(km/h)を設定する。
道路の長さと同じとする。

表 3.1 L-system の書き換え規則

置き換え 規則の識別子	規則①	規則②
Tree1	“A” → “A”	“B” → “A+B”
Tree2	“A” → “B-A”	“B” → “B”
Tree3	“A” → “B+”	“B” → “B+A”
Tree4	“A” → “A-B”	“B” → “A-”
Tree5	“A” → “[B+A]”	“B” → “[A]-B[”
Tree6	“A” → “A[B”	“B” → “B]A”

表 3.2 高速道路の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	100、125、150 のいずれかの長さだけ前進
“B”	100、125、150 のいずれかの長さだけ前進
“+”	10°～30°の中のランダムな角度だけ右に回転
“-”	10°～30°の中のランダムな角度だけ左に回転
“[”	意味なし
“]”	意味なし

表 3.3 国道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	60、75 のいずれかの長さだけ前進
“B”	70、80、90 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(15°±揺らぎ角度)だけ右に回転
“-”	(15°±揺らぎ角度)だけ左に回転
“[”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“]”	十字に分岐する(十字路となる)

表 3.4 県道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	30、50 のいずれかの長さだけ前進
“B”	50、60、70 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(90°±揺らぎ角度) だけ右に回転
“-”	(90°±揺らぎ角度) だけ左に回転
“[”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“J”	十字に分岐する(十字路となる)

表 3.5 市町村道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	15、30 のいずれかの長さだけ前進
“B”	30、40、50 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(90°±揺らぎ角度) だけ右に回転
“-”	(90°±揺らぎ角度) だけ左に回転
“[”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“J”	十字に分岐する(十字路となる)

3.5 計算方法

生成したネットワークによるパラドクスの発生への影響を決定木で調べるため、数値化したネットワークの指標を計算する。本研究では、ネットワークの指標として π 指標を用いる。 π 指標は、道路の混み具合を示す指標であり、値が大きいほど都市化が進んでいるといえる。 π 指標は、次に示す式(3.4a)で計算できる。

$$\pi = \frac{\text{道路の総延長}}{\text{ネットワークの直径}} \quad (3.4a)$$

また、交通需要の指標として、媒介中心性を用いる。媒介中心性は、対象のノードを通る交通がどれだけあるかを表した値であり、媒介中心性が高いほど、都心部に位置するノードと判断できる。媒介中心性³⁾は、次に示す式(3.4b)で計算できる。

$$BC_i = \sum_{s=1(s \neq i)}^n \sum_{t=1(t \neq s, i)}^n \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (3.4b)$$

ここで、 BC_i はノード i の媒介中心性、 σ_{st} はノード s からノード t へ移動する最短経路の個数で、 $\sigma_{st}(i)$ は、 σ_{st} の中でノード i を通る経路の数を表す。配分時には、以下に示すように、この媒介中心性を考慮し、値が大きいノードほど交通量が集中するように設定する。

生成したネットワークに即した交通需要を設定する。ネットワークによって、ノードやリンクの数が異なるため、ネットワーク生成後に、即した交通需要を設定する必要がある。交通需要の設定に用いた数式を(3.4c)に示す。

$$V_i = \frac{V_{OD} \times (BC_i / BC_{Sum})}{E - 1} - P \times \left| \frac{V_{OD} \times (BC_i / BC_{Sum})}{E - 1} - \frac{V_{OD} \times (BC_{Ave} / BC_{Sum})}{E - 1} \right| \quad (3.4c)$$

ここで、 V_i ：ノード i に集まる交通量、 V_{OD} はあらかじめランダムに作成したネットワーク全体の交通量、 BC_i はノード i の媒介中心性、 BC_{Sum} は全媒介中心性の合計値、 E はノード数、 P は媒介中心性の考慮の度合いを表すパラメータ、 BC_{Ave} は媒介中心性の平均値である。総交通量 V_{OD} は、5万から15万の間のランダムな整数とし、交通需要の変化がパラドクス発生の要因であるかを検証するためのパラメータ P の値は、0.0、0.225、0.450、0.675、0.900の5つに設定した。

利用者均衡配分時に必要となるリンクパフォーマンス関数にはBPR関数を用い、パラメータとして、溝上ら(1989)にて使用されている $\alpha = 0.96$ および $\beta = 1.20$ を用いた。また、利用者均衡配分の計算方法として逐次平均法(MSA)を利用した。パラドクスの発生状況の探索には、決定木で分類した。決定木は、木の深さを5層とし、データの2割を教師データとして学習させた。

本研究では、より多くのネットワークを生成し、配分計算を行うために、取り除く道路の数を20本に限定して取り除いた。20本の取り除かれる道路はランダムに選ばれるようにした。よって、1つのネットワークに対して100パターンのパラドクス発生の検証ができ、150個のネットワークを生成するため、15000パターンのパラドクスの発生の検証を行うことができた。

3.6 シミュレーション分析結果

3.6.1 ネットワーク生成結果

ネットワークの生成結果を以下に示す。作成したネットワークの数は膨大であるため、ここでは一部のみを示す。また、ネットワークの指標として用いる π 指標の値も併記する。図中の赤い線は高速道路で、黒い線は太い順に国道、県道、市町村道である。また、高速道路と

その他の道路が一割の確率で交わった場所を黒三角形で示している。図で交差していても、黒三角形が描画されていない場合は、立体交差として扱い、ジャンクションにはなっていないものとして設定した。

ネットワークの現実性を示す指標は定められていないため、現実的かどうかの解釈は分かれることが予想される。例えば、図 3.3 では、高速道路を挟んで国道と県道および市町村道が分かれて生成している。都市と考えれば現実的ではないと思えるが、山間部と考えれば高速道路を挟んで集落があり、国道によって他の地域につながっているならば、現実的であるとも捉えられる。このように、地理的条件などの他の条件などによって判断に差が生じるため、ネットワークの現実性を判断する明確な指標の検討は、今後の課題の一つである。

加えて、今回のネットワーク生成では、高速道路→国道(3 回成長)→県道(6 回成長)→市町村道(5 回成長が 2 回)という順序で描画し、種類ごとの生成であったため分岐先の道路は分岐前の道路と同じ種類となっている。しかし、多くのネットワークでは国道の分岐先は県道、その分岐先は市町村道という構造が多く、この点においても改善の余地があるといえる。



図 3.3 ネットワーク例 1 (π 指標: 36.44)



図 3.4 ネットワーク例 2 (π 指標: 50.55)



図 3.5 ネットワーク例 3 (π 指標: 80.14)



図 3.6 ネットワーク例 4 (π 指標: 117.59)

3.6.2 決定木分析結果

決定木分析の結果を次の図 3.7 と図 3.8 に示す。モデルの精度は 98% と高い値となった。

図 3.7 中のノードの媒介中心性 1、媒介中心性 2 は、取り除いたリンクの媒介中心性を表

することができないため、リンクの両端のノードのそれぞれの媒介中心性であり、どちらにも違いはない。また、図 3.8 中の π index は π 指標、time_average (min) はネットワーク全体の平均移動時間、cut_o_bc と cut_d_bc は取り除くリンクの両端のノードの媒介中心性、cut_road_type は取り除いた道路の種類で、i は交通需要の媒介中心性パラメータを表す。取り除いた道路の種類について、高速道路を 1、国道を 2、県道を 3、市町村道を 10 として値を設定した。

始めに、図 3.7 の特徴量を見ると、ネットワーク全体の平均移動時間の値が大きいことがわかる。Braess のパラドクスの発生には、この平均移動時間の値が大きいかかわっており、逆に、取り除くリンクの種類や交通需要の中心媒介性の考慮については大きな影響力がないことがわかる。Braess のパラドクスの発生に、ネットワークの状況は多少関わっていると証明できたが、交通需要パターンによる発生分類はできなかった。

次に、図 3.8 の決定木分析の Tree の構造について考察する。この結果から、Braess のパラドクスが特に発生しやすいネットワーク状況をまとめると、次の表 3.6 のようになる。表 3.6 について、赤く囲われた二つノードに注目する。この二つのノードの分類は、ネットワーク全体の平均移動時間が 3.887 分以下かつ π 指標の値が 31.571 以上で、リンクの両端のノードのうち一方のノードの媒介中心性の値が 0.015 以上のネットワーク状況であれば、パラドクスは発生することがわかる。すなわち、比較的都市化の進んだネットワークの中心の道路ほど、パラドクスが発生しやすいといえる。加えて、カットする道路は、国道などの大きな道路ではなく、小さな市町村道の方が 2 倍近く発生しやすいという結果になった。また、緑で囲われたノードでは、平均移動時間が 2.786 分以下かつ π 指標の値が 31.571 以下のネットワークであれば、完全にパラドクスが発生するということがわかる。

また、図 3.8 の他のノードを解説する。青く囲われたノードに注目すると、平均移動時間が 5.9 分以上かつリンクの両端のノードのうち一方のノードの媒介中心性の値が 0.016 以上のネットワーク状態では、パラドクスはほとんど発生しないという結果となった。そのほかに、黄色く囲われた二つのノードに注目すると、二つは π 指標の値の大小によって分類されているが、 π 指標の値が 68.627 以上、すなわち都市化が進んでいるとパラドクスは発生しないという結果となった。都市化が進んだ複雑な道路ほどパラドクスが発生しやすい訳ではなく、都市化の度合いによって、パラドクス発生の有無は大きく変わるということがわかる。

しかし、今回の分析では、 π 指標の値による都市化の明確な基準がないため、どの程度の都市であるかという議論ができない。加えて、(1) のネットワーク生成の結果で挙げたように、ネットワークの現実性を考慮することができていないため、現実性を判断する指標が必要である。さらに、図 3.8 において、分類されたデータ数が極端に少ない終端ノードがいくつか確認できる。これは、現在用いている説明変数では分類できないデータであることや、教師

データとして用いた 2 割に含まれていたハズレ値が反応したことなどが原因で生じていると考えられる。この問題の改善に、説明変数の種類を増やす必要がある。

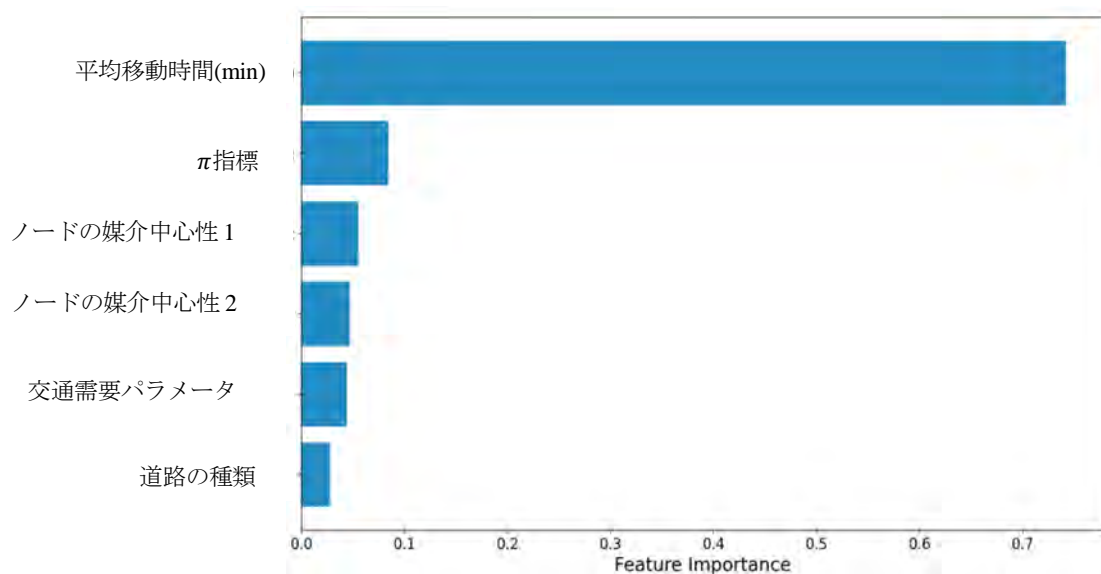


図 3.7 決定木分析結果：変数の重要度指標

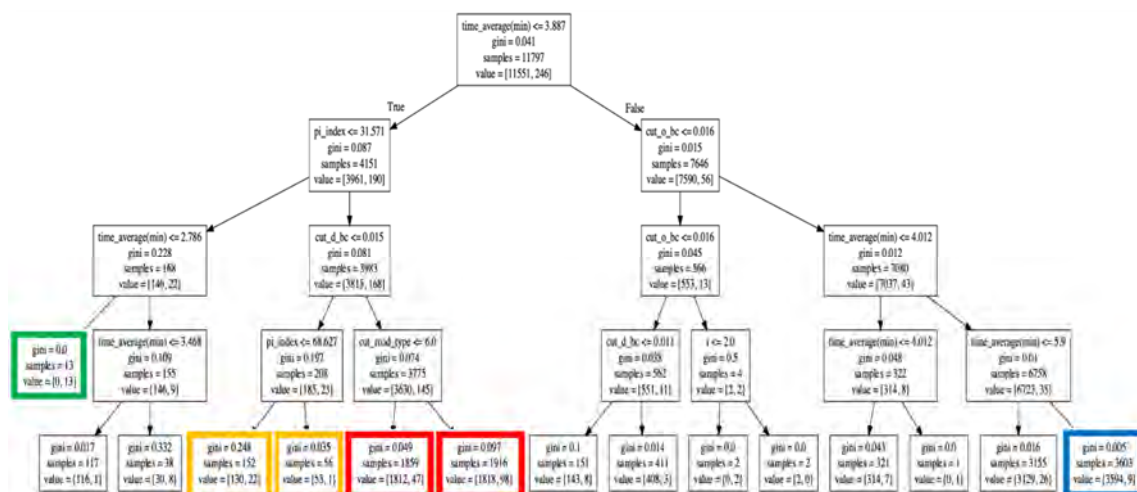


図 3.8 決定木分析結果：樹形図

表 3.6 決定木分析結果（抜粋）

パターン① (図 3.8 赤ノード)	平均移動時間が 3.887 分以下
	π指標の値が 31.571 以上
	媒介中心性が 0.015 以上
	*カットする道路の種類が市町村道ならば、なお発生しやすい
パターン② (図 3.8 緑ノード)	平均移動時間が 2.786 分以下
	π指標の値が 31.571 以下

3.7 本章のまとめ

本論文では、回避によって多くのメリットが期待されるものの、未だ一般的な知見が得られていない **Braess** のパラドクス発生条件を探索した。具体的には、本研究では、**Braess** のパラドクスが発生する状況を探索するため、仮想ネットワークを生成し、利用者均衡配分ののち、決定木分析により状況の探索を行った。ネットワークを生成においては、道路種類別に生成することの課題とネットワークの現実性指標についての問題を示した。また、決定木分析によって、パラドクスの発生しやすいネットワーク状況を発見した。加えて、**Braess** のパラドクス発生状況を探索するうえで、必要となる説明変数の種類や設定条件などの課題を整理した。

4 章 災害時の交通需要の観測可能性に関する基礎分析

4.1 はじめに

前章で確認したように、Braess のパラドクス発生に平均旅行時間が影響することが確認された。平均旅行時間は交通需要の発生パターンに依存することから、発災時の交通需要をできる限りリアルタイムに観測し、意思決定に反映することが重要といえる。そこで以下では、準リアルタイムにデータ取得が可能なスマートフォンアプリを通じて得られた GPS 移動履歴データによる災害時の交通行動変化の観測可能性について基礎的な検証を加える。

4.2 使用データ

本研究では、株式会社 Agoop が取得・販売するスマホアプリの GPS 移動履歴データを用いる。具体的には、広島県全域の 2018 年 6 月 28 日-7 月 14 日の GPS 移動履歴データの観測密度、及び、行動変容の観測可能性について確認する。

4.3 基礎分析結果

表 4.1 に日別の個人 ID 数、及び、測位点数の集計結果を示す。集計結果より、(1) 広島県の人口約 280 万人の約 1%の移動が捕捉できること、ただし、(2) 測位点数が 30 点/日以上であるのはそのうち 60%程度であること、(3) 発災のあった 2018 年 7 月 7 日、翌日の 7 月 8 日については、恐らくは移動を控えたことにより、測位点数が 30 点/日以上の個人 ID 数は減少すること等が確認できる。3 点目については、滞在中は観測しないアルゴリズムを持つアプリを通じて測位していることを示唆しており、「測位点がない／少ない」というデータの特徴が、「トリップをしない」という事実に起因するものなのか、「アプリの機能をオフにする」といった観測ができていないことに起因するものなのかの識別が困難なデータであることを暗示している。言い換えると、経路選択の変更や出発時刻の変更等を把握するためのデータとしては有用と思われるものの、交通発生量の変化を捉えるデータとして活用するためには、幾つかの仮定を置かざるを得ないといえる。

以下の分析では、一日当たりの測位点数が 30 未満の個人については対象外とした。従っ

て、発災により移動を取りやめた個人については分析の対象外となってしまう可能性がある点に注意する必要がある。交通行動を捉えるための事前処理として、まず、移動／滞在判定を行った。本研究では、Python の TrajectoryStopDetector を利用し、ある 500m 以内の範囲に 30 分以上留まった際に滞在と判定した。500m 未満の足の短いトリップについては捕捉できていない点に留意する必要がある。

表 4.2、図 4.1、図 4.2 に移動／滞在判定後のトリップ数の集計結果を示す。表より、概ね 3 トリップ前後の移動が捕捉できていることが確認できる。また、図より、発災直後においては総トリップ、一人当たりのトリップ数双方とも減少する傾向にあることが分かる。ただし、発災直後の週末 (7/7-8) はトリップの減少が見られたものの、翌日の月曜日 (7/9) には概ね先週と同水準のトリップが観測されていることから、通勤や通学といった必須トリップの取りやめが広範囲で生じたわけではないことも確認できる。

表 4.1 日別個人 ID 数及び測位点数の集計結果

日付	測位点数 30 以上の 個人 ID 数(割合)	総個人 ID 数	総測位点数
2018 年 6 月 28 日	15855 (60%)	26502	1909035
2018 年 6 月 29 日	15773 (59%)	26701	1898246
2018 年 6 月 30 日	15058 (58%)	26059	1828325
2018 年 7 月 1 日	14785 (57%)	26161	1777245
2018 年 7 月 2 日	15311 (60%)	25586	1828446
2018 年 7 月 3 日	15166 (59%)	25782	1802841
2018 年 7 月 4 日	15217 (59%)	25949	1798038
2018 年 7 月 5 日	15112 (58%)	26092	1794778
2018 年 7 月 6 日	14981 (59%)	25413	1842320
2018 年 7 月 7 日	13839 (56%)	24814	1715272
2018 年 7 月 8 日	14014 (55%)	25596	1718465
2018 年 7 月 9 日	15302 (58%)	26257	1857249
2018 年 7 月 10 日	15342 (58%)	26476	1846634
2018 年 7 月 11 日	15496 (58%)	26537	1860734
2018 年 7 月 12 日	15404 (58%)	26489	1849950
2018 年 7 月 13 日	15811 (58%)	27160	1888027
2018 年 7 月 14 日	15178 (56%)	26925	1785568

表 4.2 移動／滞在判定後のトリップ数集計結果

日付	トリップ数	一人当たりのトリップ数	人数	サンプル数
6 月 28 日	51084	3.22	15855	1788529
6 月 29 日	50882	3.23	15773	1775514
6 月 30 日	46456	3.09	15058	1706880
7 月 1 日	44001	2.98	14785	1652389
7 月 2 日	48341	3.16	15311	1709270
7 月 3 日	47236	3.11	15166	1683904
7 月 4 日	48188	3.17	15217	1678471
7 月 5 日	46745	3.09	15112	1673348
7 月 6 日	46370	3.10	14981	1724976
7 月 7 日	41948	3.03	13839	1595368
7 月 8 日	40097	2.86	14014	1593516
7 月 9 日	47766	3.12	15302	1737035
7 月 10 日	48483	3.16	15342	1722966
7 月 11 日	49122	3.17	15496	1738633
7 月 12 日	48393	3.14	15404	1725250
7 月 13 日	50040	3.16	15811	1762544
7 月 14 日	46671	3.07	15178	1659416

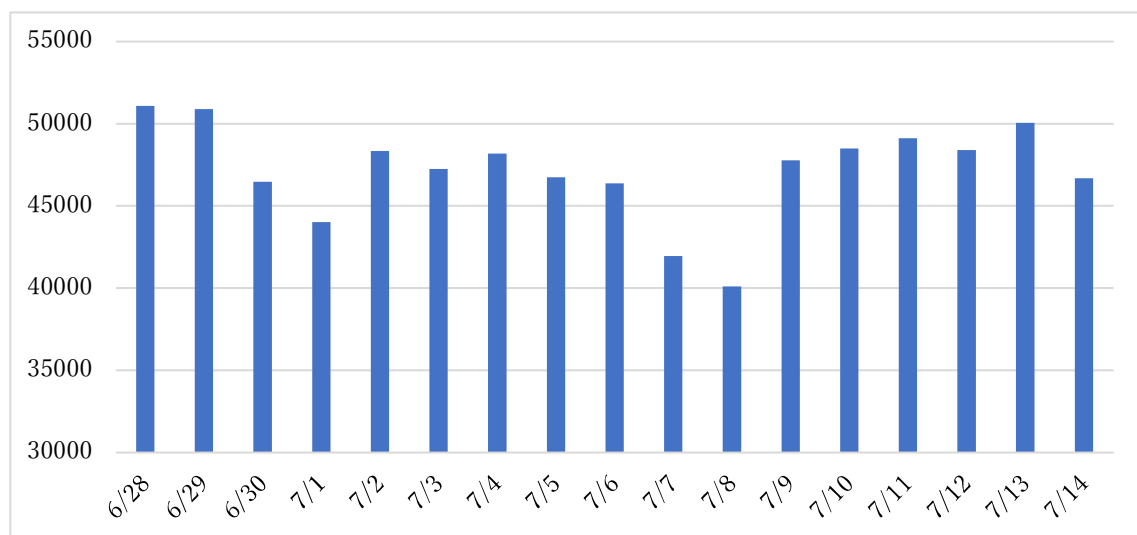


図 4.1 トリップ数の推移

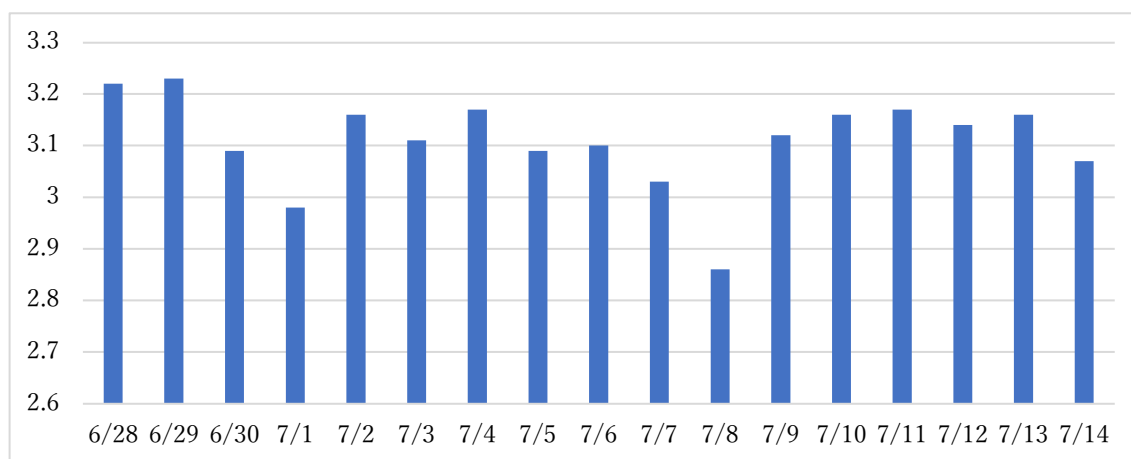


図 4.2 一人当たりのトリップ数の推移

図 4.3、図 4.4 に顕著な行動の変化が観測された個人の移動履歴を図示している。図 4.3 は呉市焼山在住、造船所周辺に通勤する個人の災害前後の移動パターンの変化を表している。図より、7/6 までは連日造船所に通勤していることが確認できるが、7/9 及び 7/10 はそういった移動が確認できず、恐らくはトリップをキャンセルしていることが示唆される。また、図 4.4 は高原氏在住、東広島市に通勤する個人の災害前後の移動パターンの変化を表している。図より、発災直後、被災した国道 2 号を迂回するルートを選んで移動していることが確認できる。また、迂回ルートも 7/7 と 7/9-10 で異なることから、移動や情報収集を通じて学習し、経路の修正を行っている可能性があることが示唆される。

4.4 本章のまとめ

Agoop データによる災害時の交通需要の観測可能性について検討した結果、測位点が 100 点／人・日を下回ることから一部の移動については判別が難しいものの（約 4 割の人・日データは測位点数が 30 未満）、トリップのキャンセルや経路変更等を一定程度捉えることができることを確認した。

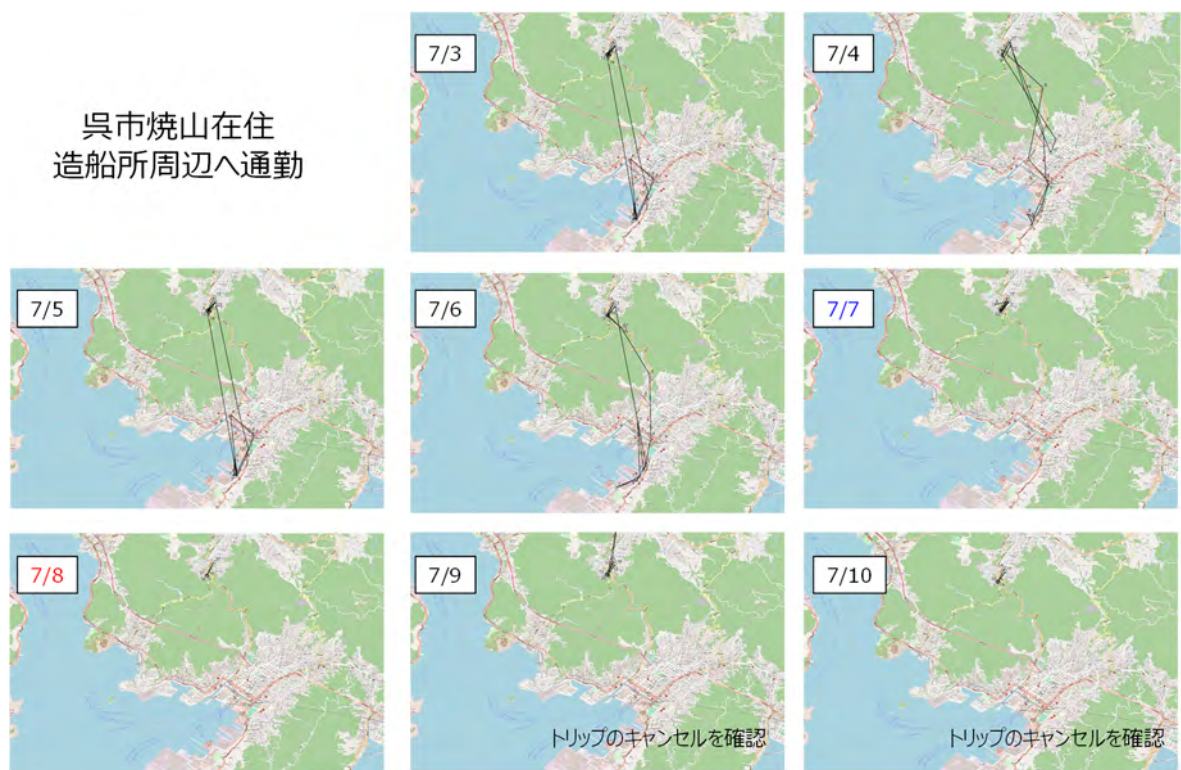


図 4.3 発災に伴う移動パターンの変化（被験者 A）

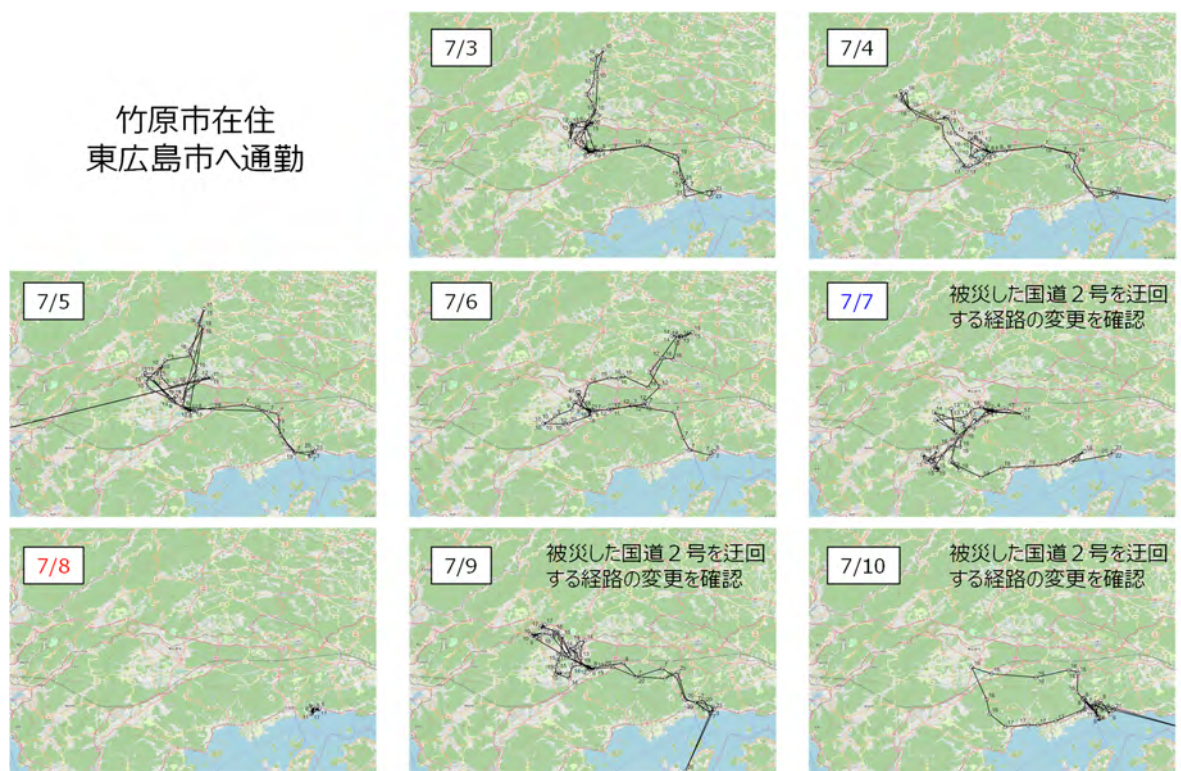


図 4.4 発災に伴う移動パターンの変化（被験者 B）

5 章 おわりに

5.1 主要な知見

本研究の主要な成果は以下のとおりである。

1. 平成 30 年豪雨災害後の呉市エリアにおいて MB を敷設した場合の影響を、確定的な利用者均衡配分により算出された総旅行時間を指標に評価した。その結果、MB の導入がかえって道路網のパフォーマンスを低下させる Braess のパラドクスが発生することを実証的に示した（ケーススタディでは、約 20% のシナリオで Braess のパラドクスが発生）。
2. Braess のパラドクスの発生は、道路網構造と交通需要パターンに依存すると考え、(1) 仮想的な道路網と交通需要パターンを生成する方法を提案した上で、(2) 生成した複数の道路網および交通需要パターンに対し、道路網上の一部の道路リンク削除前／削除後の総旅行時間（利用者均衡配分問題を解くことにより算出）、及びその差分から定義される Braess のパラドクスの発生有無の情報を格納したデータセットを作成、(3) (2) で生成したデータセットを用いて、道路網、交通需要パターンに関する変数を説明変数、Braess のパラドクス発生有無を目的変数とした決定木分析を実施し、Braess のパラドクス発生条件を探索的に明らかにした。
3. Agoop データによる災害時の交通需要の観測可能性について検討した結果、測位点が 100 点／人・日を下回ることから一部の移動については判別が難しく、他のデータを用いて補正する工夫が必要であることが確認された。

5.2 今後の課題

主要な今後の課題は以下のとおりである。

1. 本研究では、利用者が完全情報を有し最短経路を通ると仮定し分析を進めたが、実際には、発災直後の状況下において完全情報をもって交通行動の意思決定を行っている可能性は極めて低い。実際の道路網復旧による便益や Braess のパラドクス発生は、こういった行動モデルの仮定にも依存することから、今後、利用者がどの程度発災後の交通状態を認識し、どのような経路選択行動をとるのか等について検討を加える必要がある。

2. 上記の点を検証するためのデータソースとして、Agoop データをはじめとしたパッシブデータが有効と思われるが、Agoop データの測位アルゴリズム、観測密度では不十分な点が示唆されたことから、分析ニーズに合わせて設計された観測の在り方について改めて整理する必要がある。
3. 一方、現在利用できるデータの範囲内で実務展開することも重要と考えられることから、災害時交通マネジメントを想定した実践的なデータ解析プラットフォーム等を開発し、実践を通じて理論との整合性を高めること、また、そういったプラットフォーム開発を支援することが交通政策上重要と考えられる。

参考文献

- 1) Ajam, M., Akbari, V., & Salman, F. S. (2019). Minimizing latency in post-disaster road clearance operations. *European Journal of Operational Research*, 277(3), 1098–1112.
<https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2019.03.024>
- 2) Saeed Asadi Bagloee, Avishai (Avi) Ceder, Majid Sarvi and Mohsen Asadi: Is it time to go for no-car zone policies? *Braess Paradox Detection, Transportation Research Part A*, Vol. 121, pp. 251-264 ,2019
- 3) Asai, K.. (2015). *Nihon no dōro ga wakaru jiten : shireba shiruhodo omoshiroi*. 7.
- 4) Balal, E., Valdez, G., Miramontes, J., & Cheu, R. L. (2019). Comparative evaluation of measures for urban highway network resilience due to traffic incidents. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(3), 304–317. <https://doi.org/10.1016/J.IJTST.2019.05.001>
- 5) Berktaş, N., Kara, B. Y., & Karaşan, O. E. (2016). Solution methodologies for debris removal in disaster response. *EURO Journal on Computational Optimization*, 4(3–4), 403–445. <https://doi.org/10.1007/S13675-016-0063-1>
- 6) Bíl, M., Vodák, R., Kubeček, J., Bílová, M., & Sedoník, J. (2015). Evaluating road network damage caused by natural disasters in the Czech Republic between 1997 and 2010. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 80, 90–103. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2015.07.006>
- 7) Çelik, M. (2016). Network restoration and recovery in humanitarian operations: Framework, literature review, and research directions. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2), 47–61. <https://doi.org/10.1016/J.SORMS.2016.12.001>
- 8) Chen, H., Zhang, L., & Ran, L. (2021). Vulnerability modeling and assessment in urban transit systems considering disaster chains: A weighted complex network approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102033. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2020.102033>
- 9) Donovan, B., & Work, D. B. (2017). Empirically quantifying city-scale transportation system resilience to extreme events. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 333–346.
<https://doi.org/10.1016/J.TRC.2017.03.002>
- 10) Dietrich Braess, Anna Nagurney, Tina Wakolbinger: On a Paradox of Traffic Planning, *Transportation Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 446-450, 2005
- 11) Furno, A., El Faouzi, N. E., Sharma, R., Cammarota, V., & Zimeo, E. (2018). A graph-based framework for real-time vulnerability assessment of road networks. *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2018*, 234–241. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2018.00096>
- 12) Gao, L., Liu, X., Liu, Y., Wang, P., Deng, M., Zhu, Q., & Li, H. (2019). Measuring road network topology vulnerability by Ricci curvature. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 527, 121071.
<https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2019.121071>
- 13) Gokalp, C., Patil, P. N., & Boyles, S. D. (2021). Post-disaster recovery sequencing strategy for road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 153, 228–245.
<https://doi.org/10.1016/J.TRB.2021.09.007>
- 14) H. Pourmohammadi. (2008). *Urban Transportation Network Recovery Following a Catastrophic Event* | Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Urban-Transportation-Network-Recovery-Following-a-Pourmohammadi/f6b82365944a1c9554db60257504114c289c716b>

- 15) Hu, Z., Wu, G., Wu, H., & Zhang, L. (2022). Cross-sectoral preparedness and mitigation for networked typhoon disasters with cascading effects. *Urban Climate*, 42, 101140.
<https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101140>
- 16) Iloglu, S., & Albert, L. A. (2020). A maximal multiple coverage and network restoration problem for disaster recovery. *Operations Research Perspectives*, 7, 100132. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100132>
- 17) Jenelius, E., & Mattsson, L. G. (2015). Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 136–147.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2014.02.003>
- 18) Joo, S. hyun, Ogawa, Y., & Sekimoto, Y. (2022). Road-reconstruction after multi-locational flooding in multi-agent deep RL with the consideration of human mobility - Case study: Western Japan flooding in 2018 -. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 70, 102780.
<https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102780>
- 19) Kaito, C., Ito, A., Kimura, S., Kimura, Y., Saito, Y., & Nakada, T. (2000). AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC (Vol. 218, Issue 2). <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- 20) Kermanshah, A., & Derrible, S. (2016). A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against extreme earthquakes. *Reliability Engineering & System Safety*, 153, 39–49.
<https://doi.org/10.1016/J.RESS.2016.04.007>
- 21) Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2005). *Survival analysis : a self-learning text*. 590.
- 22) Lacuarin, J. R., & Palmiano, H. S. O. (2020). The Role of Transportation Engineering in Disaster Management. http://ncts.upd.edu.ph/tssp/wp-content/uploads/2017/02/2010-02_lacuarin_final.pdf
- 23) Madsen, C. A., Dimant, Y. S., Oppenheim, M. M., -, al, Cakra Satya, O., & Faruk, A. (2018). The comparison of proportional hazards and accelerated failure time models in analyzing the first birth interval survival data. *Journal of Physics: Conference Series*, 974(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/974/1/012008>
- 24) Nicholson, A., & Du, Z. P. (1997). Degradable transportation systems: An integrated equilibrium model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 31(3), 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(96\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(96)00022-7)
- 25) Pan, S., Yan, H., He, J., & He, Z. (2021). Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 581, 126235.
<https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2021.126235>
- 26) Place and See. (2022). Hiroshima-ken. <https://placeandsee.com/wiki/hiroshima-ken>
- 27) Poser, K., & Dransch, D. (2010). Volunteered geographic information for disaster management with application to rapid flood damage estimation. *Geomatica*, 64(1), 89–98.
https://www.researchgate.net/publication/265619198_Volunteered_Geographic_Information_for_Disaster_Management_with_Application_to_Rapid_Flood_Damage_Estimation/figures?lo=1
- 28) Resilience | UNDRR. (2009). <https://www.undrr.org/terminology/resilience>
- 29) Rey, D., & Bar-Gera, H. (2020). Long-term scheduling for road network disaster recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101353. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2019.101353>
- 30) Rouhanizadeh, B., & Kermanshachi, S. (2020). Post-disaster reconstruction of transportation infrastructures:

- Lessons learned. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102505. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102505>
- 31) Safitri, N. D., & Chikaraishi, M. (2022). Impact of transport network disruption on travel demand: A case study of the July 2018 heavy rain disaster in Japan. *Asian Transport Studies*, 8, 100057. <https://doi.org/10.1016/J.EASTSJ.2022.100057>
 - 32) Santos, J. R., Safitri, N. D., Safira, M., Varghese, V., & Chikaraishi, M. (2021). Road network vulnerability and city-level characteristics: A nationwide comparative analysis of Japanese cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(5), 1091–1107. <https://doi.org/10.1177/2399808321999318>
 - 33) Sayarshad, H. R., Du, X., & Gao, H. O. (2020). Dynamic post-disaster debris clearance problem with re-positioning of clearance equipment items under partially observable information. *Transportation Research Part B: Methodological*, 138, 352–372. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2020.05.011>
 - 34) Serulle, N., Heaslip, K., Brady, B., Louisell, W. C., & Collura, J. (2011). Resiliency of transportation network of santo domingo, dominican republic: Case study. *Transportation Research Record*, 2234, 22–30. <https://doi.org/10.3141/2234-03>
 - 35) Singh, P., Sinha, V. S. P., Vijhani, A., & Pahuja, N. (2018). Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 237–250. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2018.03.017>
 - 36) Tadano, K., Maeno, Y., & Carnevali, L. (2017). Road repair sequencing for disaster victim evacuation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 528, 401–412. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9_37
 - 37) Tang, Y., & Huang, S. (2019). Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 390–402. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.02.003>
 - 38) United Nations News. (2021, September 1). Climate and weather related disasters surge five-fold over 50 years, but early warnings save lives - WMO report || UN News. <https://news.un.org/en/story/2021/09/1098662>
 - 39) Wang C.Y., & Hu S.R. (2005). A study on emergency evacuation and rescue network reconstruction for natural disasters with multiclass travel behavior constraints, J | Signed in. *J. East Asia Soc. Transp. Stud.* https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84970897727&origin=inward&txGid=8de1d187343b7e8471296ff3c7ded6b2&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1
 - 40) Zhang, H., & Yao, Y. (2019). An Integrative Vulnerability Evaluation Model to Urban Road Complex Network. *Wireless Personal Communications* 2019 107:1, 107(1), 193–204. <https://doi.org/10.1007/S11277-019-06248-7>
 - 41) Zhang, X., Miller-Hooks, E., & Denny, K. (2015). Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal of Transport Geography*, 46, 35–45. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGE.2015.05.006>
 - 42) Zhao, T., & Zhang, Y. (2020). Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117,

102700. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2020.102700>
- 43) Zhu, J., Liu, K., Wang, M., Xu, W., Liu, M., & Zheng, J. (2022). An empirical approach for developing functions for the vulnerability of roads to tropical cyclones. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103136. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.103136>
 - 44) Zhu, Y., Ozbay, K., Xie, K., & Yang, H. (2016). Using Big Data to Study Resilience of Taxi and Subway Trips for Hurricanes Sandy and Irene: <https://doi.org/10.3141/2599-09>, 2599, 70–80.
 - 45) 福田武雄・加藤正夫、高力アルミニウム合金製組立応急橋、生産研究、1961. 13 (8). p.241-245.
 - 46) 平沢秀之・戸沼淳・小澤暁栄・藤田好彦・渡辺浩・鈴木譲、応急橋に適した木製トラス橋の開発とリユース、構造工学論文集、2016. Vol62A. p.1323-1330.
 - 47) 渡辺浩・竹下孝一郎・森竹巧、災害時に応急的に利用する小規模木製仮橋の検討、構造工学論文集、2016. p.1316-1322.
 - 48) Yeh, F.Y., Chang, K.C., Sung, Y.C., Hung, H.H., Chou, C.C.: A novel composite bridge for emergency disaster relief: Concept and verification. *Composite Structures*. 2015. 127. P.199-210.
 - 49) 有尾一郎: 「おりがみ」から理想的な構造物への創造、土木学会中国支部研究発表、2009.
 - 50) 中沢正利・有尾一郎・谷倉泉・小野秀一: MFM 概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発、土木学会全国大会、2009.
 - 51) 有尾一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希: 高効率で折畳める橋構造物の開発研究(解析編)、第25回宇宙構造・材料シンポジウム、2009. p.104-107.
 - 52) 田中義和・有尾一郎・中沢正利・古川祐輔・近広雄希: 高効率で折畳める橋構造物の開発研究(実験編)、第25回宇宙構造・材料シンポジウム、2009. p.108-111.
 - 53) 延原玄弥、内田英明、阿部和規、藤井秀樹、吉村忍: 道路ネットワークの特徴量分析とその生成、The 34th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence (2020)
 - 54) 加藤伸子、奥野智江、狩野均、西原清一: L-system を用いた仮想都市のための道路網生成手法、情報処理学会論文誌、Vol. 41, No. 4, 2000
 - 55) 土木学会、1998、交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—、土木学会

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ

http://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください

**A-851 モバイルブリッジを用いた道路網の
復旧力に関する研究**

モバイルブリッジを用いた道路網の復旧力に
関する研究プロジェクト

2022 年 7 月 発行

公益社団法人日本交通政策研究会