

交通ネットワーク被災時の発生・集中・内々交通 量及び旅行時間の変動特性

力石 真¹・浦田淳司²・吉野大介³・藤原章正⁴

¹正会員 広島大学准教授 大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
 E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 東京大学助教 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
 E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 復建調査設計株式会社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町 3-8-15)
 E-mail: d-yoshino@fukken.co.jp

⁴正会員 広島大学教授 大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
 E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

本稿では、平成 30 年 7 月豪雨により周辺的高速道路（広島呉道路）並びに鉄道（呉線）が被災し、国道 31 号の交通渋滞が慢性化した呉市天応を対象に、複数のパッシブデータを用いて、交通ネットワーク被災時の発生・集中・内々交通量及び旅行時間の変動特性を解析する。解析の結果、被災地と災害拠点を行き来する災害関連の短距離トリップが多数発生したことに伴い、国道 31 号では通過交通量が最大で約 300 台/時まで落ちたこと、JR 呉線の復旧等に伴う旅行時間の改善は確認できず、平時の 1.5 倍を超える交通時間が発災後 2 ヶ月強にわたり続いたこと、発災後 1 ヶ月間は極めて大きな旅行時間の変動が観測されており、曜日や時間帯といった変数では旅行時間の全変動の 1/3 程度しか説明できない状態であったことなどが明らかとなった。

Key Words: *disrupted transport network, trip generation and attraction, intra-zonal trips, travel time*

1. はじめに

集中豪雨に伴う土砂災害は、交通ネットワークに甚大な被害をもたらす。一方、地震等の災害とは異なり、住民の多くは直接被災しておらず、災害直後においても平時に近い水準の交通需要が発生し得る。日常生活を営む交通需要に加えて、人命救助対策やその後の土砂搬出等、災害に関連した交通需要が発生する点を踏まえると、特に土砂災害による交通ネットワーク被災時には、交通供給と需要のバランスが崩れる可能性が高く、供給と需要の双方を適切にマネジメントすることが重要といえる。

平成 30 年 7 月豪雨は、まさに上記の交通マネジメント上の課題に直面した災害といえる。とりわけ広島市と呉市を結ぶ国道 31 号では、並行する高速道路（広島呉道路）並びに鉄道（呉線）が被災し復旧に 2 か月以上要したことから、長期にわたり交通渋滞が慢性化した。災害時 BRT の導入や臨時船の運行、緊急交差点改良、右左折レーンの延伸・追加、災害時における公共交通情報提供といった対策が実施され一定の成果を上げた一方で、

後述するように、交通渋滞の大幅な緩和にまでは至らなかった。国道 31 号沿いに天応や小屋浦といった甚大な被害を受けた地区が点在し、これらの地区に発着する緊急性の高い災害関連交通の円滑な通行を確保する観点からも、更なる渋滞緩和策が必要であったと考えられる。そのためには、どのような交通需要の増加が渋滞の発生に寄与しているか、災害に伴う交通流の質的な変化はどの程度かといった点を迅速に把握し、適応的に渋滞対策を実施する必要があると考えられる。

交通需要及び交通状態の把握は、プローブ情報や携帯電話の位置情報、車両感知器データといったパッシブデータをできる限り活用することが、調査実施に付随して発生する被災者の負担を最小化する観点からも望ましい。既存研究^{2,3,4,5,6,7,8)}では、携帯 GPS データを元にした滞在人口データを用いて、異常時における人口分布の推移の特徴を分析している。携帯 GPS データを元にした滞在人口データによって、通常とは異なる人口密度が生じている場所を特定することができる。また、統計分析手法を

滞在人口データに組合せることで、復旧・復興過程の人口分布や活動の特徴を抽出している⁵⁾。しかしながら、滞在人口分布からは明確な OD 需要を把握することはできず、分析は限定的となる。また、プローブデータを用いて道路の交通状態や自動車の旅行時間を分析した研究^{9,10)}もある。特に Kawasaki et al.¹⁰⁾では復旧期の交通状態の回復過程に着目し、同一 OD 異経路の旅行時間が徐々に均衡していく状況やネットワーク上での渋滞状況、目的地施設別のトリップ数推移等を分析し、熊本地震からの復旧期に生じた交通問題を定量的に明らかにしている。しかしながら、複数のパッシブデータを用いた研究蓄積は限られており、今後の災害対応時に重要となるデータプラットフォームの整備を促進するためには、複数データを用いることによってどのようなことが把握でき、また、どのような形で災害時交通マネジメントに寄与し得るかを示す実証分析事例を積み上げていくことが重要といえる。

本研究では、平成 30 年 7 月豪雨災害をケースに、複数のパッシブデータを同時に利用することにより、発災後の交通需要の変動特性ならびに旅行時間の増大に影響を与える要因の把握が一定程度可能であること、また、それらの情報から幾つかの有用な政策示唆が得られることを示す。以上を通じて、災害時において複数のパッシブデータをできる限りリアルタイムに利用できるプラットフォームを準備しておくことの重要性を確認する。

本稿では、まず、平成 30 年 7 月豪雨災害時の交通ネ

ットワークの被害状況について簡単に整理する。その後、ETC2.0 データや広島県警車両感知器データを用いて、交通ネットワーク被災時においては、平時とは大きく異なる交通状態が発生することを示す。次に、甚大な被害のあった呉市天応地区における発生・集中交通量、及び旅行時間の経日変動、経時変動について考察する。具体的には、モバイル空間統計データ及び ETC2.0 データを用いた集計分析から、災害後の交通量の増加は、主にボランティアや災害対応車両を含む地区外からの交通需要によってもたらされることを明らかにする。その後、教師無し機械学習手法の一つである変化点検知を用いて、旅行時間の統計的特性（平均・分散）が有意に変化した時点特定する。変化点においてデータを分割した各データセットに対して、交通量の変動がどの程度旅行時間の変動に寄与しているのかを解析する。解析を通じて、災害に伴う内々交通量の増加が旅行時間の増加に影響していた可能性が高いことを示す。最後に、上記の解析結果をもとに、災害時交通マネジメントへの示唆及び課題を整理する。

2. 平成 30 年 7 月豪雨時の交通網の被災状況

(1) 交通ネットワークの被災状況

平成 30 年 7 月豪雨は、西日本を中心に各地で土砂災害や河川氾濫による洪水などの甚大な被害をもたらした

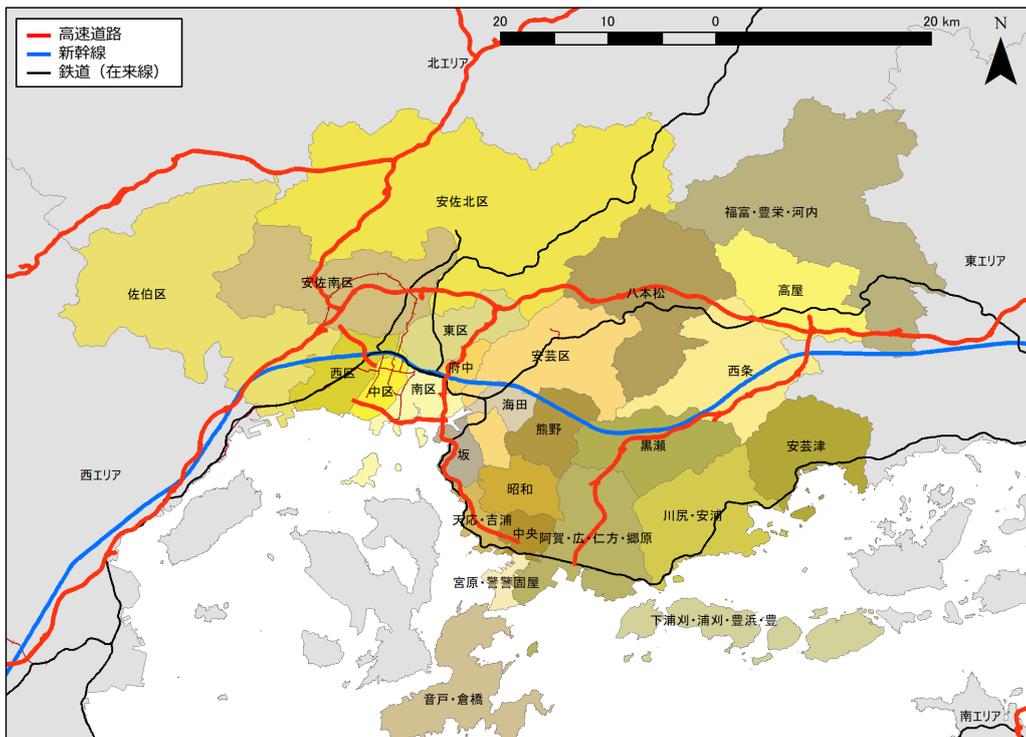


図-1 広島市・呉市・東広島市の主要交通網とゾーン区分

た。とりわけ安芸郡坂町や呉市天応といった広島市と呉市中心部を結ぶ海岸沿いの地域で発生した土砂災害は、人的被害・住宅被害だけでなく、広島市・呉市・東広島市を結ぶ交通網に甚大な被害をもたらした(図-1 内「中区」が広島市中心部、「中央」が呉市中心部、「西条」が東広島市中心部に該当)。とりわけ呉市は広島呉道路や JR 呉線をはじめ、市域と近隣自治体を連絡する幹線道路・鉄道網が同時多発的に被災したことに加え、瀬戸内海と山地に囲まれた地理的条件が相まって、発災後一部の地域が一時的に孤立した。その後、段階的にネットワークの復旧作業が進められたものの、JR 呉線(呉～広島間)の復旧は同年 9 月 9 日、広島呉道路の復旧は平成 30 年 9 月 27 日と、2 ヶ月以上のネットワークの寸断が生じた。平成 27 年国勢調査によると、広島・呉間では、約 1.6 万人の通勤・通学者が存在しており、長期間かつ膨大な交通需要に対しネットワーク寸断の影響が及んだことが確認できる。

(2) 本研究の分析対象

以上の交通ネットワークの被災状況を踏まえ、本研究では、国道 31 号の片側一車線区間(図-2)のに着目して分析を進める。対象区間は、7 月 11 日に国道 31 号が復旧して以降、通行を妨げるような道路の物理的損傷は見当たらない区間である。従って、災害前後で道路の交通性能が変化していると考えれば、その原因は道路の使い方方に起因するものと考えられる。特に、対象区間には甚大な被害があった坂町小屋浦(図-2 内 loop3 付近。被災状況は写真-1 参照)及び呉市天応(図-2 内 loop7 付近。被災状況は写真-2 参照)が含まれ、ボランティアや土砂搬出といった災害関連需要が発生しており、平時とは異なる交通需要が発生した。以降の分析では、対象区間でも特に渋滞が激しかった下り区間(広島から呉に向かう区間)に焦点を当てる。約 9km の分析対象区間には、23 個の信号交差点が存在する。信号交差点の交通容量は、理論的には、飽和交通流率とスプリットによって規定され、これを超える需要が流入すると捌け残りが生じて渋滞が発生する¹⁾。また、渋滞により生じる遅れは、超過需要の累積(待ち行列の長さ)とボトルネック容量の関係で決まる。従って、理論的には、各信号交差点の飽和交通流率とスプリット、超過需要が分かれば、渋滞による遅れを把握することができると考えられる。しかしながら、飽和交通流率が非常に広い範囲で変動すること²⁾、今回の災害においては渋滞による待ち行列が複数の信号に跨って延伸していたこと、渋滞への応急的な対策としてスプリットが日々変更されていたこと等を踏まえると、各信号交差点における遅れを観測し積み上げて渋滞の全容を把握するという方法は、多数のパラメータを観測・再調整する必要があり、災害対応の場面に

においては多数の困難を伴う。実際、次章において示すように、災害直後においては、前日の交通状態に基づいて、ボトルネックが発生する時間的/空間的パターンを正確に捉えることが困難な状態が続いた。従って本研究では、渋滞の発生メカニズム自体に焦点を当てるよりはむしろ、(渋滞の結果として生じる)旅行時間の変動や、その原

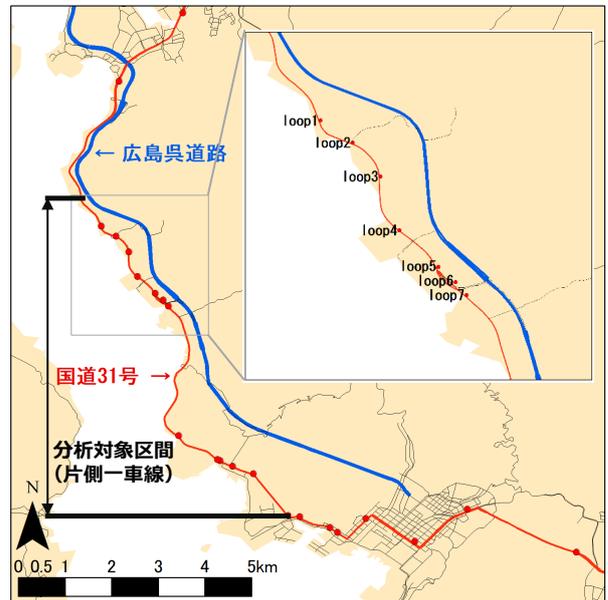


図-2 分析対象区間



出典：国土地理院ウェブサイト (<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html>)

写真-1 被災後の航空写真(天応)



出典：国土地理院ウェブサイト (<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html>)

写真-2 被災後の航空写真(小屋浦)

因となる発生・集中・内々交通量の変動に焦点を当てる。

3. 使用データ

本稿では、災害時の交通マネジメントにおいて有用と思われるデータとして、ETC2.0 プローブデータ、車両感知器データ、モバイル空間統計（携帯電話基地局情報）の3つを用いた分析を実施する。以下、それぞれのデータの概要を述べる。

(1) ETC2.0 プローブデータ

ETC2.0 プローブデータは、ETC2.0 車載器を搭載している車両から取得されたGPS移動軌跡データであり、高速道路や国道を中心に設置されている経路情報収集装置設置個所を通過する際に移動軌跡情報が収集される。ETC2.0 車載器を搭載にしている車両台数が限られていること（平成31年3月時点で約370万台）、過去の走行履歴80km分程度の情報のみ収集されること、細街路等には装置が設置されていないことなどから、交通量の把握や経路分担率の把握等には適さないものの、GPS移動軌跡データからボトルネック箇所が判断できる点、また、任意の区間における正確な旅行時間を得ることができる点が利点である。本研究では、主に図-2に示す区間の旅行時間を得る目的でETC2.0データを使用する。期間は、2018年6月1日～9月30日の4か月間である。

(2) 広島県警車両感知器データ

対象区間下り方向には13カ所に広島県警が管理する車両感知器データが設置されている。車両感知器データは定点観測データであるため、対象区間における交通状態を空間的にもれなく把握することはできないものの、交通量及び時間占有率（または交通密度）が把握できる。災害対応の一環として車両感知器データの利用許可を得たことから、2018年7月1日～8月31日の2か月間のデータのみ利用可能である。

(3) モバイル空間統計

モバイル空間統計データは、株式会社ドコモ・インサイトマーケティングが販売する携帯電話の基地局情報に基づく人口統計データであり、時間帯別のエリア滞在人口データ（人口分布統計）と時間帯別OD(Origin-Destination)データ（人口流動統計）の2種類が存在する。本研究では後者のデータを利用する。使用するデータは、基地局エリア間の距離が1kmを超えた場合に移動と判断するルールのもと作成されたODデータである。また、登録住所によって居住地を把握することが可能であるため、住民のどの程度が災害によってトリップを取りやめ

たか、どのようなタイミングでどの程度のボランティアや土砂搬出などの災害関連需要が発生していたかを一定程度把握できる利点がある。本研究では、2018年6月1日～9月30日までの図-1に示す30ゾーン間のODデータを使用する。

4. 交通ネットワーク被災時の交通状態

以下では、ETC2.0 プローブデータ及び車両感知器データを用いて、交通ネットワーク被災直後の交通状態について考察する。

図-3に2018年7月16日～7月20日における分析対象区間のタイムスペース図を示す（ETC2.0 プローブデー

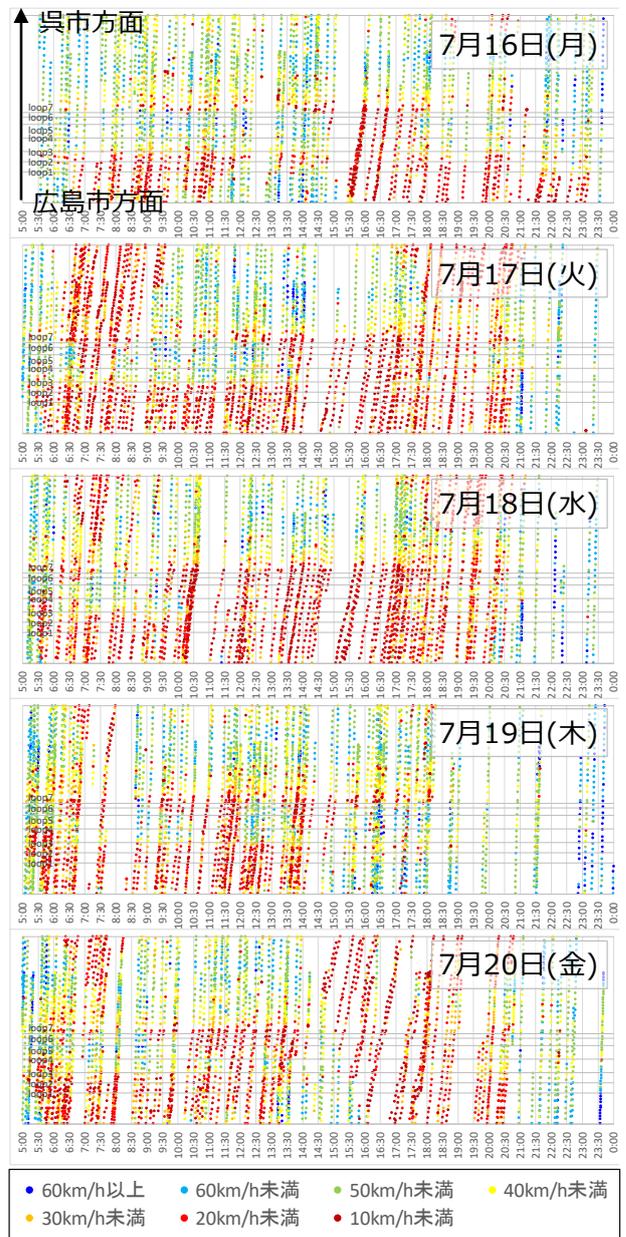


図-3 分析対象区間のタイムスペース図（7月16-20日）

タに基づき作成)．図より，甚大な被害のあった坂町小屋浦 (loop3 付近) や呉市天応 (loop7 付近) が主要なボトルネック箇所となっている可能性が高いことが分かる．一方，例えば 7 月 20 日 15:00-18:00 では上流側から渋滞が延伸した結果として当該区間全域の旅行速度が低下しているなど，渋滞の時間的／空間的パターンは安定していないことが確認できる．

図4～図10に車両感知器 loop1～loop7 (図2 参照) の 1 時間交通量と時間占有率(%)の関係を示す．図より，災害後 (7 月 12 日～) においては，渋滞領域内の観測点が増加しており，最大で 1 時間当たり通過交通量が 300 台程度にまで落ちていることが確認できる (loop7 を除く)．信号交差点飽和交通流率の基本値が 2,000pcu/青時間であることを踏まえると極めて低い値といえる．

loop7 においては，交通量と時間占有率の間に明確な関係性は確認できない．この原因として，以下の 2 点が考えられる．第一に，車両感知器設置地点から下流側約 300m の箇所に歩行者用の押しボタン式信号機が設置されている大屋橋北詰交差点，及び，甚大な被害のあった呉市天応 (山側に立地．国道 31 号を呉市方面に向かって左折すると天応) につながる大屋橋東詰交差点があり，ボランティア活動に伴う歩行者や土砂搬出のための右左折交通の増加の影響を直接受けている可能性が指摘できる．特に押しボタン式信号をはじめとする当該区間の信

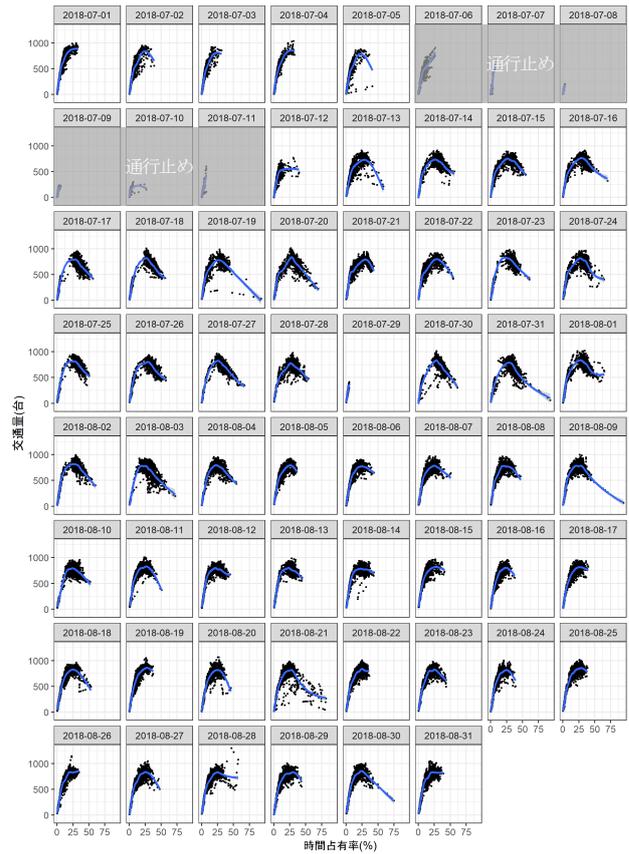


図-5 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop2]

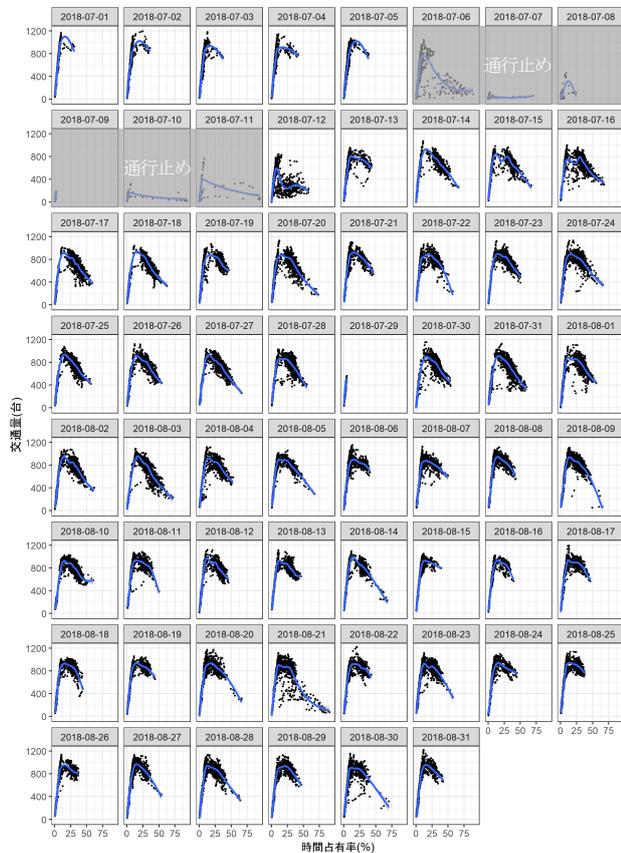


図-4 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop1]

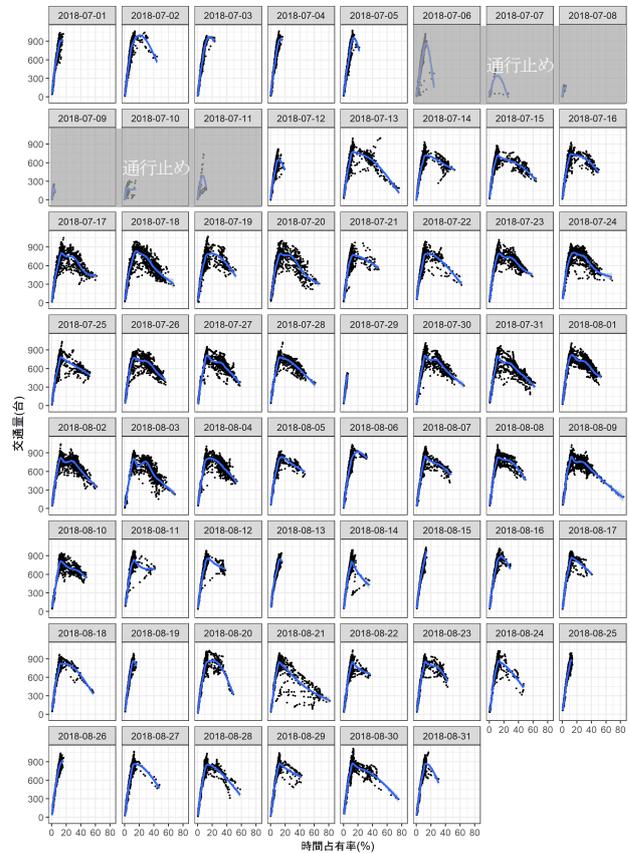


図-6 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop3]

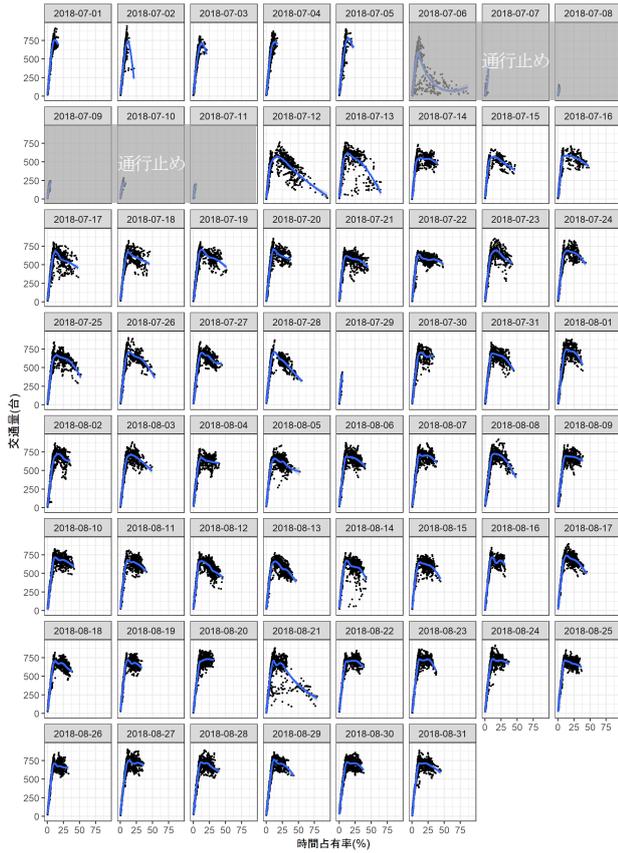


図-7 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop4]

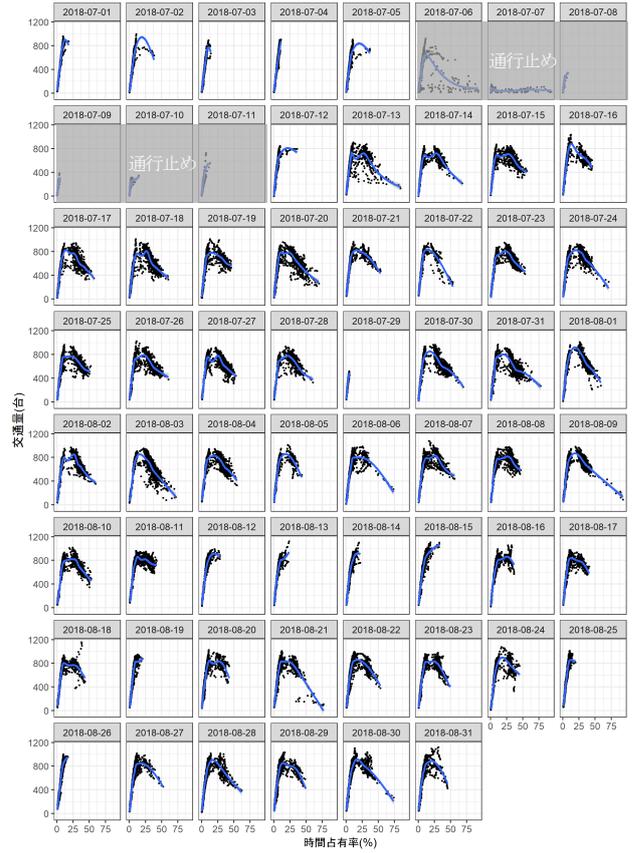


図-9 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop6]

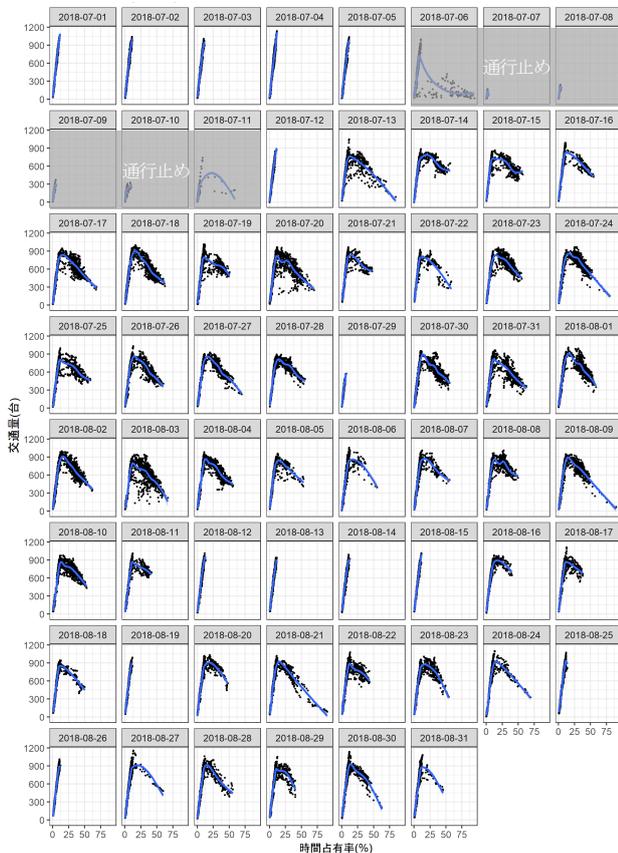


図-8 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop5]

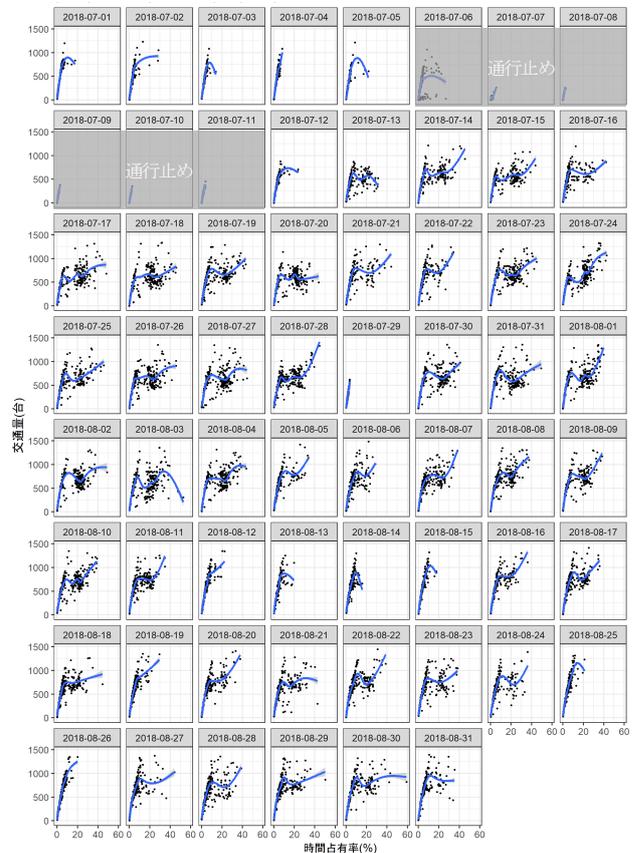


図-10 1時間交通量(台)―時間占有率(%) [loop7]

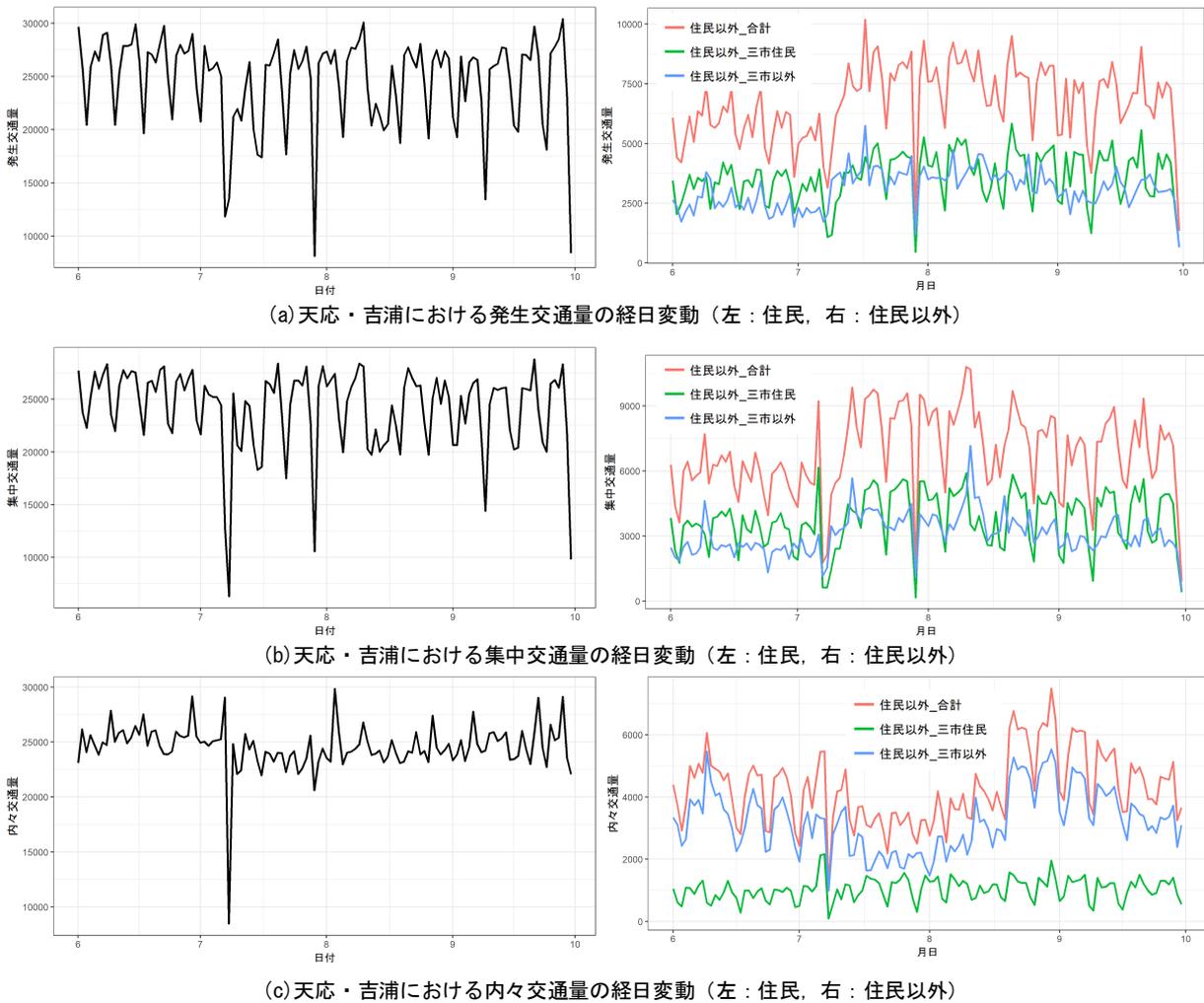


図-11 発生・集中・内々交通量の経日変動

号制御は、災害期間中は主道路側を最大限優先するように介入がなされている上、大屋橋東詰交差点では警察による交通整理が行われたことによる影響が考えられる。第二に、観測地点の上流側約 100m の海側にある呉ポートピアパーク（海側に立地。国道 31 号を呉市方面に向かって右折すると呉ポートピアパーク）は、ボランティア向けの駐車場、被災者の入浴支援、土砂等の仮置き場等に利用されたことから、被害を受けた天応と呉ポートピアパークを行き来する短距離の交通需要が多数発生したことが挙げられる。実際、他の感知器データとは異なり、loop7 では時間占有率が 20%を超える状況であっても高い通過交通量が維持されていることが確認できる。

以上から、(1)災害時には1時間当たりの通過交通量が最大で約 300 台にまで落ちていたこと、(2)考えられる原因として、天応をはじめとした被災地と災害拠点として利用された呉ポートピアパーク間を行き来する災害関連の短距離交通需要の増加が交通容量の低下を招いた可能性があることが示唆された。しかしながら、当然のことながら車両感知器データからはトリップ長の

情報を得ることができない。そこで次章では、モバイル空間統計を用いて、災害時の天応地区における発生・集中・内々交通量の経日変動及び経時変動について分析・考察する。

5. 発生・集中・内々交通量の変動特性

本章では、モバイル空間統計を用いて天応地区（図-1の天応・吉浦ゾーン）の発生・集中・内々交通量の変動特性について考察する。以下では、日単位の交通量の変動を経日変動、時間帯単位の交通量の変動を経時変動と呼称する。上述したように、モバイル空間統計では、登録されている住所情報を用いて居住地を特定することができる。以下の分析では、(1)住民（天応・吉浦ゾーン内に居住）、(2)住民以外（天応・吉浦ゾーン外に居住）に分けて考察を進める。なお、住民以外であっても、周辺に居住し生活交通を営むための交通需要と、遠方からのボランティアをはじめとする災害関連交通需要を識別

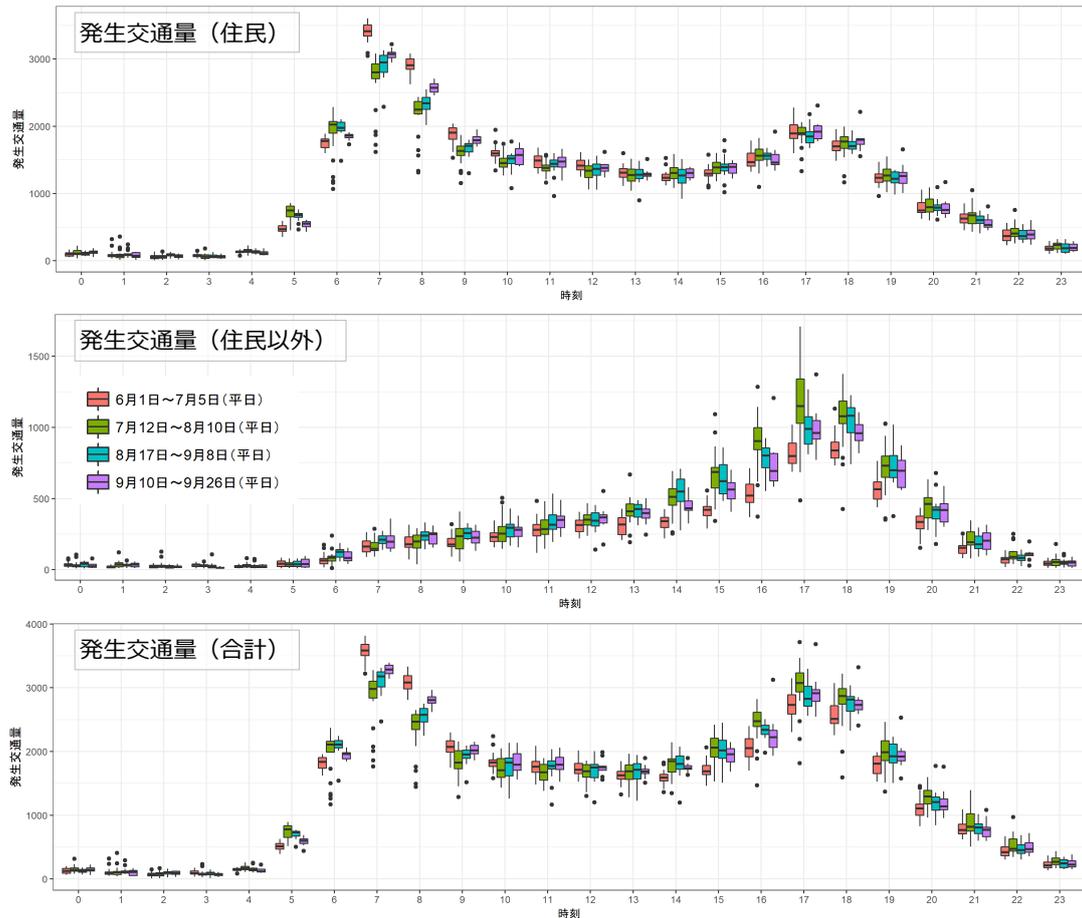


図-12 発生交通量の経時変動

することが望ましい。以下では、必要に応じて、両者を識別する目的で広島市・呉市・東広島市住民（三市住民と呼称）とそれ以外とを分ける。なお、モバイル空間統計はあくまでも人の移動を捉えるものであって車両台数ではない点に注意する必要がある。

(1) 発生・集中・内々交通量の経日変動

図-11 に天応・吉浦における発生・集中・内々交通量の経日変動を示す。まず住民の発生・集中・内々交通量をみると、発生・集中・内々交通量いずれも災害前の水準に比べて大幅に増加している状況は確認されない。むしろ、災害直後に発生、集中、内々交通量が若干減少し、2 か月の間に徐々に元の水準に戻る傾向にあることが確認できる。一方、住民以外の発生・集中・内々交通量を確認すると、三市住民、三市住民以外双方において、災害直後に発生・集中交通量が增大していることが確認できる。ただし、住民以外の天応・吉浦への発生・集中交通量はお盆以降減少する傾向にある。一方で、内々交通量についてみると、災害直後は減少しているものの、お盆明け以降、急激に増加していることが確認できる。これは、上述した呉ポートピアパークと被災地の間を行き来する交通の増加や、8月20日の学校再開等によるもの

と思われる。なお、図中の7月29日の交通量の落ち込みは、台風接近による避難によるものである。

(2) 発生・集中・内々交通量の経時変動

ここでは、平日の発生・集中・内々交通量の経時変動について、期間を以下の4つに分けて考察を進める。

- 1) 災害前【6月1日～7月5日の平日】
- 2) 災害後からお盆前まで【7月12日～8月10日の平日】
- 3) お盆明けから JR 呉線復旧前まで【8月17日～9月8日の平日】
- 4) JR 呉線復旧後から広島呉道路復旧前まで【9月10日～9月26日の平日】

図-12～図-14 に発生・集中・内々交通量の経時変動をそれぞれ示す。なお、箱ひげ図は、ボックス内の線は中央値、ボックスの上端/下端は四分位範囲、ひげは四分位範囲の1.5倍を上下限とするデータ観測範囲を示している。黒丸は四分位範囲の1.5倍を超える値を取る観測点データである。

a) 発生交通量

まず発生交通量（住民）の経時変動を確認すると、災害発生後、7～8時の交通量が大幅に減少し、その後、緩やかに災害前の水準に戻る傾向にあることが確認でき

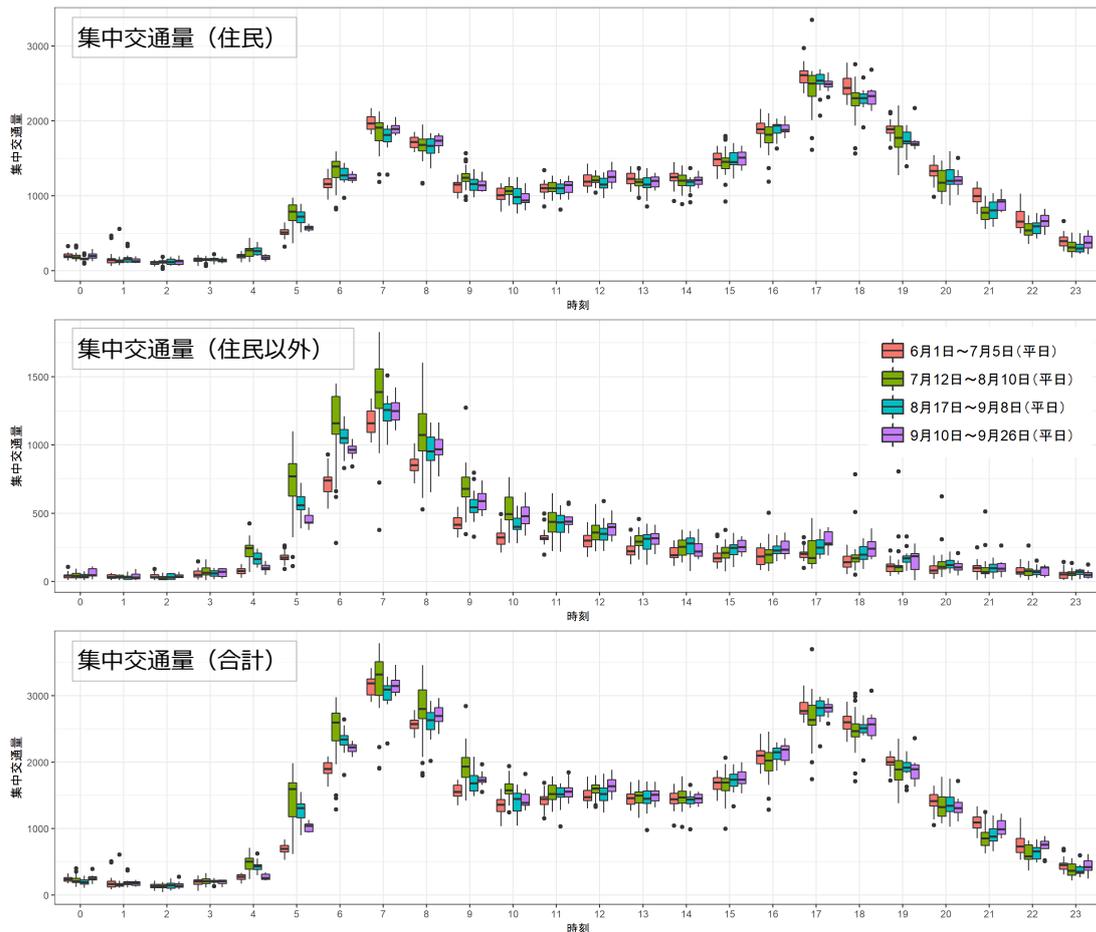


図-13 集中交通量の経時変動

る。一方、5～6時の交通量をみると、災害直後に増加し、その後、緩やかに減少傾向にあることが分かる。以上から、渋滞を避ける目的で出発時刻を早めた住民が一定程度存在していたことが推察される。なお、5～9時を除き、災害前後で住民の発生交通量及びその時間帯に大きな変化はみられない。

次に発生交通量（住民以外）の経時変動を確認すると、17時をピークに時間あたり最大700人程度の需要の増加が確認された。また、その他の大きな特徴として、特に災害直後の7月12日～8月10日の期間においては、発生交通量の変動が極めて大きいことが挙げられる。このような需要の変動は、渋滞を避けようとする需要層の学習プロセスを妨げ、結果的に（自発的に生じる出発時刻の調整等を通じた）道路の有効的活用を妨げる要因になっている可能性がある。

住民、住民以外を合わせた全体の発生交通量を見ると、平時においてピークがみられる7～8時の交通量が減少し、5～6時、17時前後の交通量の増加が確認された。

b) 集中交通量

集中交通量（住民）の経時変動を確認すると、5～6時の移動が増加していること、21時以降の移動が減少していることが分かる。発生交通量とどのように、発災

直後に発生交通量及びその時間帯に一定の変化が生じているものの、徐々に災害前の水準に戻る傾向にあることが確認できる。

集中交通量（住民以外）の経時変動を確認すると、とりわけ4～11時の集中交通量が災害直後に大幅に増加していることが確認できる。これらはボランティアをはじめとした災害関連需要である可能性が高い。また、災害直後の7月12～8月10日の期間においては、同じ時間帯であっても交通量が日々大きく変わっていたことが確認できる（四分位偏差は最大で150[人]程度）。

全体としては、災害後、朝5～10時の集中交通量の増加が顕著にみられ、その多くは住民以外の移動に起因するものである。

c) 内々交通量

内々交通量（住民）の経時変動を確認すると、全時間帯にわたり災害直後は内々交通量が減少していることが確認できる。一方、災害から時間が経過するにつれ、特に7～17時の時間帯において内々交通量が増加し、平時を上回る内々交通量が発生していることが確認できる。

内々交通量（住民以外）についても、災害直後の7月12日～8月10日においては内々交通量が減少しているも

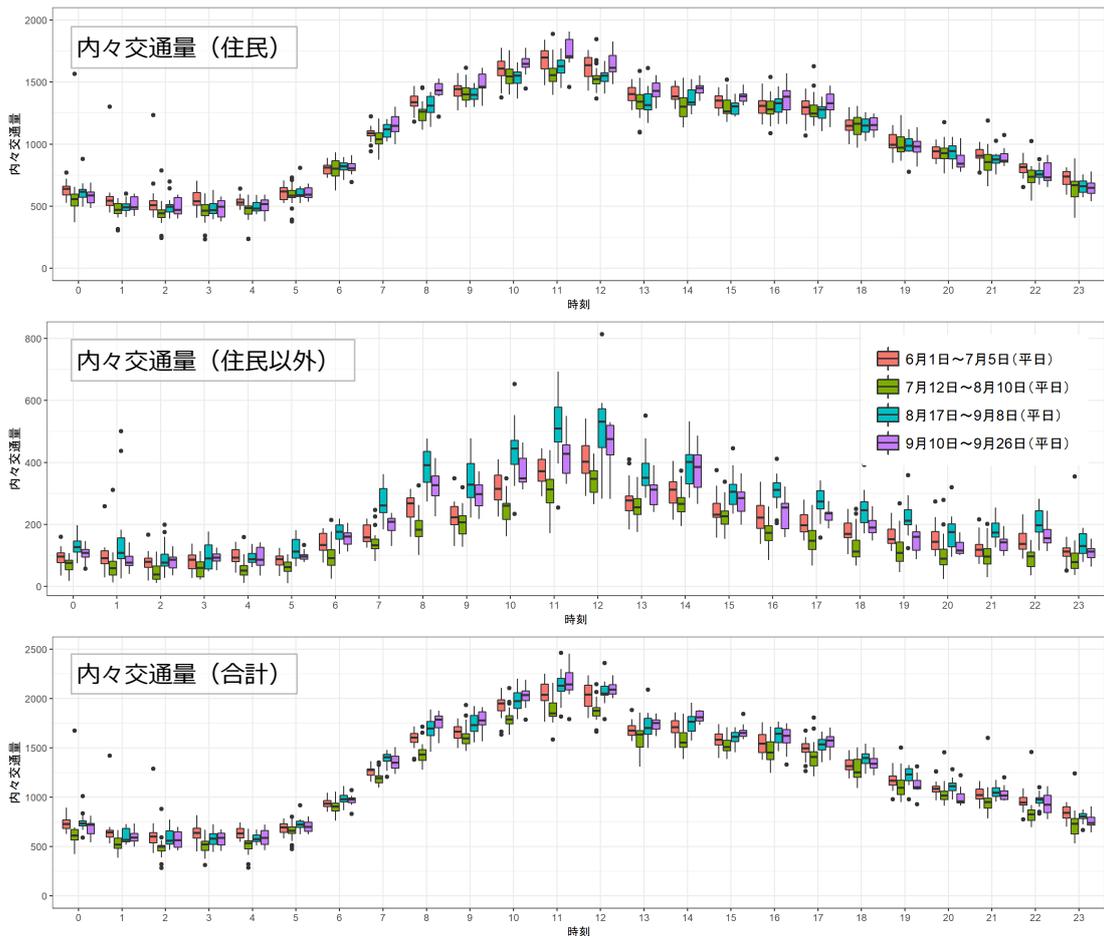


図-14 内々交通量の経時変動

の、その後、1時間当たり200人程度の内々交通量の増加がみられる。ただし、9月10日以降は減少傾向にある。

全体としては、災害直後は減少したものの、お盆以降、特に7～17時の時間帯において平時以上の内々交通が発生していることが確認された。考えられる要因として、上述したように、呉ポートピアパークが災害対応の拠点として使用された点が指摘できる。なお、1km未満の移動は内々交通としてカウントされないこと、天応の一部のエリアは呉ポートピアパークまで1kmに満たないことを鑑みると、実際には図-14を上回る水準の内々交通が発生している可能性がある。

以上の分析から得られた主要な知見として、(1)住民ではなく住民以外の発生・集中交通量が大幅に増加していること（発生・集中ともに2,500人/日程度の需要増）、(2)特に5～8時台における住民以外の交通需要の変動が大きいこと（四分位偏差が最大で150[人]程度）、(3)（恐らくは呉ポートピアパークと被災した天応間の移動を中心とした）内々交通需要が災害後2か月間にわたり継続的に増加していたこと、が挙げられる。当然のことながら、これらの需要変動が渋滞及び旅行時間の増大に影響を及ぼす。次章では、旅行時間の変動を確認し

た後、その交通量との関係について分析・考察する。

6. 旅行時間の変動特性

以下ではまず、ETC2.0プローブデータを用いて算出した旅行時間の経日変動及び経時変動について考察する。その後、変化点検知手法を用いて、旅行時間が大きく変わったタイミングを把握し、各期間毎に発生・集中・内々交通量と旅行時間の関係について考察する。

(1) 旅行時間の経日変動及び経時変動

図-15に平均旅行時間の経日変動を示す。図より、災害前は対象区間の日平均旅行時間は12-15分程度で推移していたのに対し、災害後は、15-30分と、平均値及びその分散が極めて大きくなっていることが確認できる。災害前/災害後ともに週末の旅行時間は比較的短い。

図-16に平日における旅行時間の経時変動を示す。図より、災害前は7時台の旅行時間が最も長く、平均約22分、四分位偏差は5分程度であることが確認できる。また、災害後は、観測期間を通じて平均、四分位偏差ともに大きく増加している傾向にあるが、その旅行時間及び分散は、災害後の経過日数により異なる。具体的には、災害直後の7月12日～8月10日の期間においては、(1)4

時台であっても（他の期間と比べて）旅行時間が長くな 交通状態が改善されると期待されていたが、大きな旅行

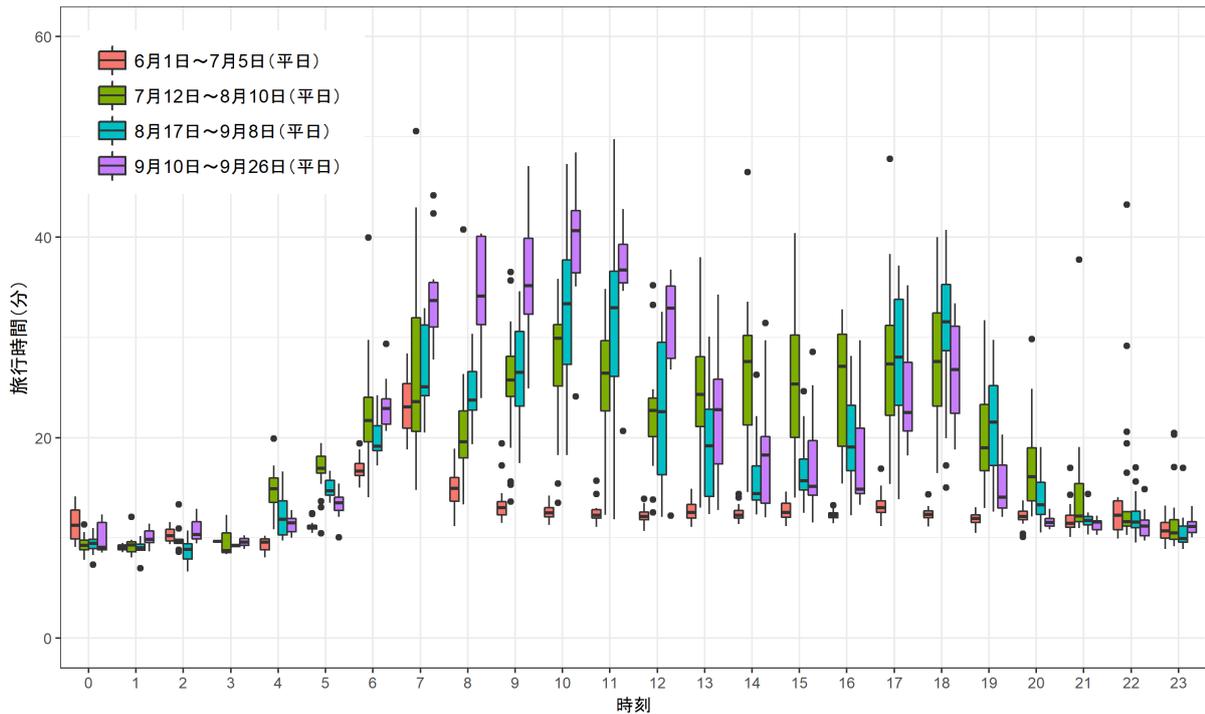


図-16 旅行時間の経時変動

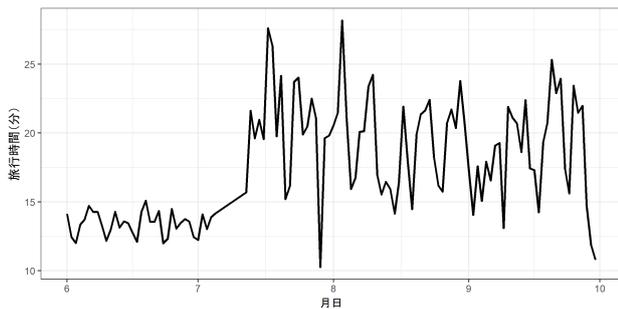


図-15 旅行時間の経日変動

る傾向にあること、(2) 7~18 時すべての時間帯において旅行時間が長くなる傾向にあること、(3) 特に 7 時台や 15-16 時台において旅行時間変動が大きくなること（四分位偏差が 10 分を超えること）が確認できる。8 月 17 日~9 月 8 日においては、(1) 7-12 時及び 17-19 時の時間帯においては、災害直後よりも旅行時間が長いこと、(2) 特に 10-12 時では災害直後よりも旅行時間の変動が極めて大きくなっていること（四分位偏差 10 分程度）が確認できる。9 月 10 日~9 月 26 日においては、(1) 8 月 17 日~9 月 8 日の期間にも増して 10-12 時の旅行時間の増大していること、(2) ただしその分散については、一期前と比べて比較的小さな値をとることなどが確認できる。

以上より、発災後二か月にわたり、当該区間の旅行時間は、平均値で見ると、ほとんど改善していないことが分かる。とりわけ 9 月 9 日の JR 呉線の復旧は、道路側で担っていた交通需要の一部が鉄道にシフトすることで

時間の短縮は確認されない。

上記の状況が発生した原因として、JR 線は、比較的足の長い交通需要に対してのみ有効であり、内々交通については、JR 呉線復旧後も自動車交通に頼らざるを得ない状況にあったと考えられる。4 章において考察したように、内々交通が主要な渋滞発生要因であるとするれば、内々トリップを担うことが困難な JR 線が交通状態の改善に寄与しなかった点も理解できる。そこで次節では、主に内々交通量と旅行時間の関係に焦点を当てた分析を行う。

(2) 交通量と旅行時間の関係

2 章において述べたように、交通量と旅行時間の関係は超過需要の累積等にも依存するため、簡単な統計解析ではその因果関係を把握することができない。一方 2 章で述べたように、災害時における交通状態は非定常であり、かつ、信号制御パラメータの度重なる変更や交通整理の実施といった渋滞対策が打たれた状況を鑑みると、交通量と旅行時間の関係を理論と整合的な形で記述することは困難である。非定常状態であることを考慮しつつ変数間のモデリングを行う状態空間モデルの利用を試みたが、背後のデータ生成過程の仮定如何で大きく結果が異なり、また、正しいデータ生成過程を仮定できているかどうかの判断が難しいことも相まって、信憑性のある分析結果に基づく推論が困難であった。

そこで以下では、まず、できる限り旅行時間の変動パ

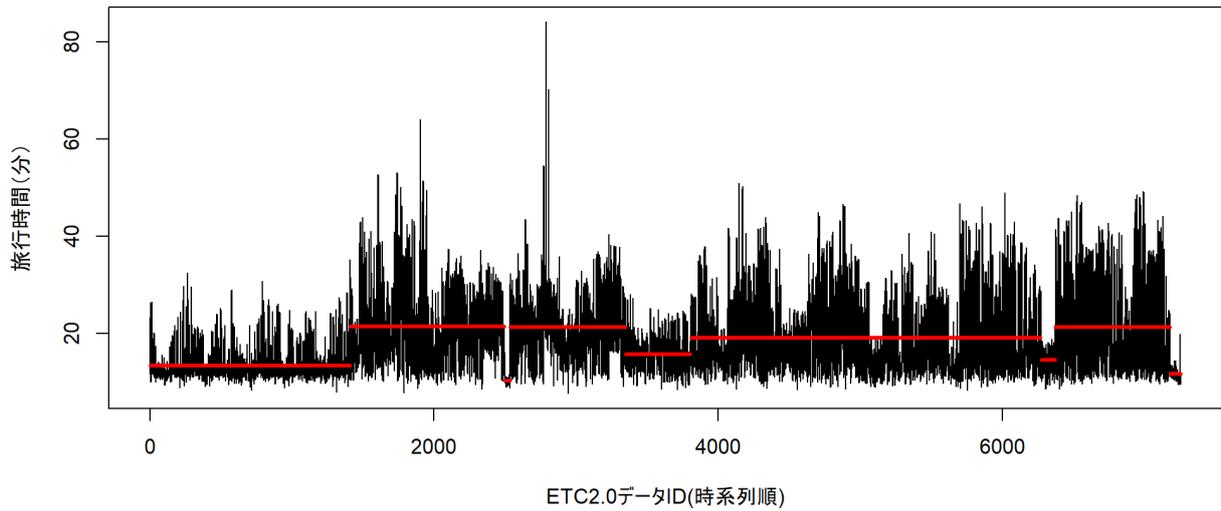


図-17 変化点検知結果

ターンが同質で安定している期間を変化点検知の手法を用いて特定し、抽出された期間別に交通量と旅行時間の相関関係を計算するとともに、交通量が旅行時間の変動成分のどの程度を説明し得るかを検証する回帰分析を実施する。

a) 変化点検知

以下、変化点検知の概要を述べる（変化点検知の詳細はレビュー論文¹⁴⁾等を参照されたい）。変化点とは、時系列データの統計的特性が急激に変化する時点の意味する。変化点検知では、時系列データ $y_{1:n} = (y_1, \dots, y_n)$ を $\{y_1, \dots, y_\tau\}$ と $\{y_{\tau+1}, \dots, y_n\}$ に分割した際、分割後の2つのデータ間の統計的特性がある定められた基準に基づき異なると判断されるとき、時間 $\tau \in \{1, \dots, n-1\}$ を変化点と判断する。変化点は複数存在するケースも考えられ、例えば仮に m 個の変化点が存在する場合、時系列データ $y_{1:n}$ は変化点 $\tau_{1:m} = (\tau_1, \dots, \tau_m)$ で $m+1$ のデータセットに分割される。ここで、 $\tau_0 = 0$ 、 $\tau_{m+1} = n$ とすると、 i 番目の分割後のデータは $y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i}$ となる。

本研究では、尤度に基づく変化点検知を用いる。変化点検知の問題は、一般的に以下の関数の最小化問題として定式化できる。

$$\sum_{i=1}^{m+1} [LL(y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i})] - \beta f(m) \quad (1)$$

ここで、 $LL(y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i})$ のデータ $y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i}$ に対する対数尤度関数であり、本研究では正規分布（未知パラメータは平均・分散）を仮定する。旅行時間の平均・分散に大きな変化があったと判断される時点でデータを分割する。 $\beta f(m)$ は過学習を防ぐ目的で導入されたペナルティ項であり、赤池情報量基準やバイズ情報量基準、Hannan-Quinn 情報量基準等が用いられる。ただし、旅行時間の変化点検知の文脈において上記の情報量基準を採

表-1 変化点に基づく期間毎の旅行時間の平均・標準偏差

	期間	平均(分)	標準偏差
1	6月1日0時台~7月6日6時台	13.46	3.35
2	7月6日7時台~7月29日6時台	21.49	8.01
3	7月29日7時台~7月30日16時台	10.38	0.72
4	7月30日17時台~8月11日7時台	21.35	7.61
5	8月11日8時台~8月16日15時台	15.76	3.62
6	8月16日16時台~9月16日9時台	19.11	7.65
7	9月16日20時台~9月18日17時台	14.63	2.50
8	9月18日18時台~9月28日15時台	21.37	9.98
9	9月28日15時台~9月30日23時台	11.71	1.45

用すると、朝のピーク時間帯等の *within-day* の変動についても同様に変化点として検出してしまうため、本研究では、*within-day* の変動を検出しない程度にまでペナルティ項を手動で調整する。なお、平均及び分散パラメータの変化点の検知は、例えば Franck et al.¹⁵⁾において扱われている。推定はRパッケージ *changepoint*¹⁶⁾を用いた。

b) 変化点検知結果

ETC2.0 プローブデータより得られた旅行時間に対して変化点検知を適用した結果を図-17及び表-1に示す。ここで図-17の横軸は、ETC2.0 プローブデータのトリップ毎のIDを時系列順に並べたものである。結果より、変化点は多少のずれは存在するものの、災害発生（7月6日）、台風12号の接近（7月29日）、お盆期間（8月11-16日）、連休（9月15-17日）、広島県道路の復旧（9月27日）が変化点として検出された。各期間の旅行時間の平均・標準偏差を確認すると（表-1）、災害発生後、40日以上経過した9月18-28日の期間であっても旅行時間の平均・標準偏差は災害発生直後と同程度の水準となっていることが確認できる。また、前章において確認したように、JR呉線の復旧（9月9日）は変化点として検知されておらず、災害前の水準に戻ったのは、広島県道路の復旧以降であることが確認できる。

c) 旅行時間と発生・集中・内々交通量との相関関係

変化点検知で検出された台風、お盆、連休といった期間で分割された[期間1]6月1日～7月5日、[期間2]7月12日～8月10日、[期間3]8月16日～9月15日、[期間4]9月19日～9月27日の4つの期間における旅行時間と発生・集中・内々交通量との相関関係を図-18～図-20に示す。

旅行時間と発生交通量の関係をみると、災害前[期間1]においては、住民の発生交通量と旅行時間の間にのみ高い正の相関が確認できる。出勤等午前ピーク時間帯に対応するものと推察される。一方、災害後においては、住民以外の発生交通量についても旅行時間と高い相関を示しており、災害発生時特有の昼間の旅行時間のピーク（図-16 参照）に対応するものと推察される。なお、旅行時間の平均・分散については全ての期間において大きな違いはないものの、旅行時間と発生交通量の相関関係は発災後時間が経過するに従って災害前の状態に戻っていく傾向が確認できる。

旅行時間と集中交通量の関係についても、発生交通量と同様、出勤等午前ピーク時間帯に対応し、住民以外の集中交通量と旅行時間の間に高い正の相関が確認できる。災害発生後は、住民以外の集中交通量と旅行時間との相関は低下する一方、住民の集中交通量との相関が高くなる傾向にあることが確認できる。また、発災後時間が経過するに従って災害前の状態に戻っていく点についても発災交通量と同様である。

旅行時間と内々交通量の相関をみると、発災前においては相関関係はみられないものの、発災後は正の相関に転じていることが確認できる。さらに、発生・集中交通量とは異なり、災害発生後時間が経過するにつれ、旅行時間と内々交通量との相関が高くなっていることが確認できる。なお、住民と住民以外で相関関係の変化パターンに大きな差異は見られない。

d) 旅行時間の分散分解

次に、旅行時間のどの程度の変動成分が交通量により説明され得るかを検証するために、3種類の回帰モデルを期間別に構築した。モデル1は、曜日ダミー及び時間帯ダミーのみを含むモデルであり、週末や通勤等、周期的な成分の影響が卓越する平時においてはこれらの変数のみで旅行時間変動成分の多くが説明できるものと考えられる。モデル2は、モデル1に発生・集中交通量を説明変数として追加したモデルであり、仮に曜日や時間帯で説明できない交通量の変動により旅行時間が変動しているとすれば、発生・集中交通量の説明変数を追加することにより決定係数は向上するはずである。なお、交通量と曜日ダミー/時間帯ダミーの間に強い相関があり、両者を入れて構築したモデルのパラメータ値自体を考察することの意義はほとんどないことから、以下では、決

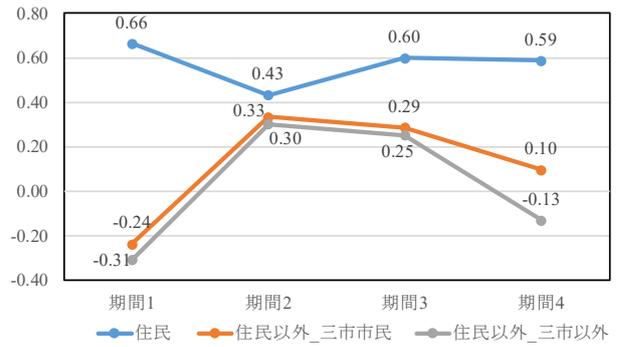


図-18 旅行時間と発生交通量の相関関係 (縦軸：相関係数)

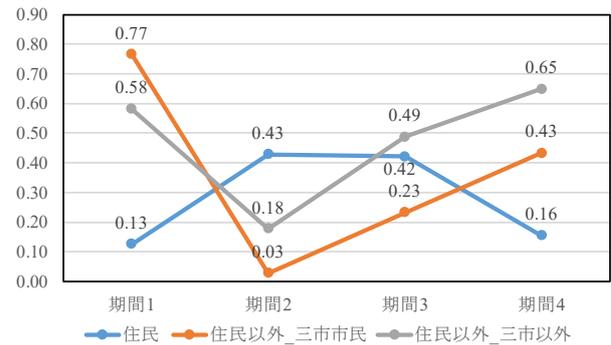


図-19 旅行時間と集中交通量の相関関係 (縦軸：相関係数)

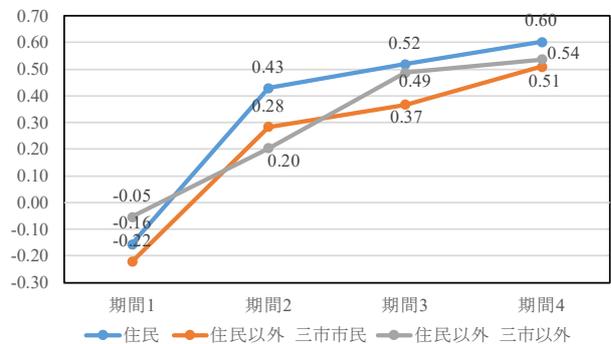


図-20 旅行時間と内々交通量の相関関係 (縦軸：相関係数)

表-2 旅行時間を目的変数とした回帰モデルの適合度

期間	モデル1の決定係数	モデル2の決定係数	モデル3の決定係数
[1]6月1日～7月5日	0.691	0.693	0.694
[2]7月12日～8月10日	0.342	0.385	0.392
[3]8月16日～9月15日	0.628	0.658	0.665
[4]9月19日～9月27日	0.802	0.811	0.826

注：モデル1～モデル3は全て重回帰モデル。使用した説明変数は以下のとおり：【モデル1】曜日ダミー、時間帯ダミー、【モデル2】曜日ダミー、時間帯ダミー、住民、住民以外(三市市民)、住民以外(三市市民以外)の発生・集中交通量、【モデル3】曜日ダミー、時間帯ダミー、住民、住民以外(三市市民)、住民以外(三市市民以外)の発生・集中・内々交通量

定係数の変化にのみ着目する。モデル 3 は、モデル 2 に内々交通量を説明変数として追加したモデルである。

表 2 に回帰モデルの結果（決定係数）を示す。各期間の標本数はそれぞれ、1366, 1755, 2311, 693 である。決定係数は、旅行時間の全変動に対する回帰変動の割合であることから、直接、旅行時間のどの程度の変動成分が導入した説明変数により説明できているかを表す。主要な知見は以下の 4 点である。第一に、災害前は、発生・集中・内々交通量を導入したとしても、決定係数にほとんど変化は見られない。このことは、交通量の変動による旅行時間の変動は、ほとんど曜日及び時間帯ダミーによって説明可能であることを示唆する。第二に、災害直後（7月 12 日～8月 10 日）においては、特に発生・集中交通量を説明変数として追加することにより、決定係数が 0.043（全変動の 4.3%）改善していることが確認できる。このことより、曜日及び時間帯ダミーでは説明できない発生・集中交通量の変動が旅行時間の変動を生んでいたことが確認できる。ただし、内々交通量を説明変数として追加することによる決定係数の改善は限定的である。第三に、災害後時間が経過するにつれ、発生・集中交通量が決定係数の改善に寄与する割合は減少する一方（7月 12 日～8月 10 日 4.3%、8月 16 日～9月 15 日 3.0%、9月 19 日～27 日 0.9%）、内々交通量が決定係数の改善に寄与する割合は増加する傾向にある（7月 12 日～9月 15 日 0.7%、9月 19 日～27 日 1.5%）ことが確認できる。第四に、全てのモデルを通じて、災害直後（7月 12 日～8月 10 日）においては決定係数が大幅に落ち込むもののお盆明け（8月 16 日～）には災害前に近い水準に戻っていることが確認できる。

以上の分析は、あくまでも旅行時間と交通量の相関関係及び分散分解を実施したに過ぎず、直接因果関係は検証できていない点に注意する必要があるが、結果より以下のような状況であったことが推察される。

- 1) 災害直後（7月 12 日～）は、恐らくは交通状態が読めずに試行錯誤で出発時刻を変更する利用者の行動が発生するなどに起因して、時間帯ダミー、曜日ダミーでは説明できない変動成分が卓越した。そのような状態は、お盆以降は概ね落ち着き、曜日と時間帯の情報のみで平時と同程度の旅行時間の推測ができる状態に至った。
- 2) 災害直後（7月 12 日～）は、主に住民以外の発生・集中交通量の増加（主に災害関連需要と推察される）に伴い旅行時間の増加がみられたが、後半では内々交通量の変動が旅行時間の変動に大きく影響していた。結果として、平時の 1.5 倍を超える旅行時間が、発災後～広島呉道路の復旧までの 2 ヶ月を超える期間において観測された。

7. 今後の政策への示唆

以上の分析結果より得られる災害時交通マネジメント上の主要な政策的示唆は以下の 2 点である。

第一に、入浴サービス、土砂の仮置き場、ボランティア向け駐車場といった災害対応の拠点の立地が交通状態に及ぼす影響は極めて大きい可能性が高い。今回の分析対象エリアである天応においては、主要な災害対応拠点の一つとして呉ポートピアパークが利用され、500m 未満の距離ではあるものの、被災地から国道 31 号を利用してアクセスせざるを得ない立地であった。当然のことながら、利用可能な土地に限りがあるため、状況に応じて対応せざるを得ないものの、可能な限り主要な道路を利用せずともアクセスできる位置に災害拠点を設けることが重要と思われる。

第二に、特に災害直後の 1 ヶ月間は極めて混乱した交通状態にあり、利用者が完全情報を持って行動をとる均衡状態とは程遠い状況にあった。このような状況下においては、まずは可能な限り交通状態に関する情報を正確に伝え学習プロセスを促進することが重要と考えられる。また、ランダムに変動する旅行時間から適切に学習を進めることは難しいため、（交通容量の絶対的な不足に起因して）渋滞は避けられないにしても、例えばボランティアや土砂搬出などの災害関連需要の発生時間帯を限定し、渋滞の発生パターンを周期化/安定化させ、学習効率を上げる方策も有用と思われる。特に、旅行時間が読めないことにより、時間価値の高い交通需要が渋滞を避けることができずに大きな損失を被ったり、臨時バスのダイヤの設定が難しくなったりするなど、他の関連サービスにまで影響が及ぶ可能性がある。これらを踏まえると、旅行時間そのものの短縮だけでなく、旅行時間の変動を制御する対策についても併せて検討することが重要といえる。

なお、実際には有効な対策は災害毎に異なる可能性が高い。この点を踏まえると、上記のような分析の結果得られた知見そのものにも増して、知見を得るための一連のプロセス（データ取得、分析、考察・施策提案）を災害直後に素早く実施することのできる体制作りが重要といえる。この観点から本研究で利用したデータの入手手続きを顧みると、ETC2.0 については、中国地方整備局がイニシアティブをとり、観測日の翌日には関連機関に情報共有する体制がとられていたものの、モバイル空間統計、広島県警のデータについては、購入/交渉/手作業が必要となるリアルタイム性に乏しいデータ入手手続きであった。上述した災害対応拠点の配置や災害関連需要の発生時間帯の制御は迅速な意思決定が肝要であることから、できる限り複数のデータを、できる限りリアルタイムな形で利用可能になるよう、例えば災害時応援協

定を締結する等の工夫が求められる。なお、本論文において得られた知見は、ETC2.0 データによるボトルネック箇所の特長、広島県車両感知器データによる天応付近（図2のloop7）の異常な交通量の増加の検知、モバイル空間データによる発生・集中・内々交通量の把握と、交通量と ETC2.0 データより得られた旅行速度との関係の把握を通じて明らかとなったものであり、いずれのデータが欠けても同様の実態把握を行うことは一定の困難を伴う。複数のデータを集約し、できる限りリアルタイムにデータ解析が可能な状態を準備しておくことが災害対応において極めて重要と考える。

8. おわりに

本研究では、ETC2.0 プローブデータ、車両検知器データ、モバイル空間統計データを用いて、交通ネットワーク被災時における発生・集中・内々交通量及び旅行時間の変動特性を解析した。特に甚大な被害のあった国道31号の片側一車線区間を分析した結果得られた主要な知見は以下のとおりである。

- 1) 被災後、国道31号では通過交通量が最大で約300台/時まで落ちていた。上流側の一部の区間において、被災地と災害拠点を行き来する災害関連の内々交通が多数発生していたことに起因する渋滞が原因と考えられる。また、恐らくは足の短い内々交通は鉄道では代替が難しいことから、JR線の復旧等に伴う旅行時間の改善はみられず、平時の1.5倍を超える旅行時間が被災後2ヶ月強にわたりに続いた。
- 2) 被災後1ヶ月間は極めて大きな旅行時間の変動が観測されており、曜日や時間帯といった（通常利用者が旅行時間を推測する際に用いると考えられる）変数では旅行時間の全変動の35%程度しか説明できないような状態が続いた。

以上の観測から、主要な道路を避ける形での災害拠点の設置、及び、旅行時間の変動を抑えるための各種施策の実施が有効である可能性が示唆された。また、適切な対策は災害毎に異なる可能性が高いことから、複数のデータをできる限りリアルタイムで利用できるプラットフォームを整備することの重要性を指摘した。

本研究では、特に複数のデータが利用可能な状況であれば、パッシブデータのみからある程度有用な情報が引き出せ、それらをもとに災害時のマネジメント施策に有用な示唆を得ることができることを示した。一方、今回の呉のケースのように災害対応が長期に及ぶ場合、新たな交通サービスを臨時で設計・提供するといった対策も、特に長期の道路ネットワークの被災が経済活動に大きな

影響を及ぼすことを踏まえると極めて重要である。この場合、パッシブデータによる解析では以下のような限界がある。第一に、あくまでも行動結果の情報であるため、「臨時交通サービスが提供された場合、どの程度の人がどのようなトリップ目的でそれを利用したいと考えているか」といった選好情報を含むデータではない。第二に、供給が限られている以上、緊急性の高い車両に対して供給を優先的に割り当てるといった対応が本来的には望ましいと考えられるが、緊急性の程度については通常パッシブデータから推測することは難しい。以上を踏まえると、被災地住民への負担を最小限に抑えつつ必要な情報をリアルタイムに入手するための調査体系の構築¹⁷⁾や、それらのデータを用いた交通供給の割り当てを決定する手続き/アルゴリズムを事前に検討しておく必要がある。

謝辞：本研究で用いたデータの入手やその解釈に当たり、中国地方整備局、広島県警、広島大学塚井誠人准教授、呉工業高等専門学校神田佑亮教授をはじめとする「広島・呉・東広島都市圏災害時交通マネジメント検討会」メンバーの方々、神戸大学井料隆雅教授、立命館大学塩見康博准教授の協力を得た。また、本研究の一部は、新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発：AI技術に基づく短期交通予測手法と総合的な交通需要マネジメントの研究開発」の一環として実施したものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 広島・呉・東広島都市圏災害時交通マネジメント検討会資料 (URL: <http://www.cgr.mlit.go.jp/emergency/koutsuumanagement.htm>),
- 2) Bengtsson, L., Lu, X., Thorson, A., Garfield, R., von Schreeb, J.: Improved Response to Disasters and Outbreaks by Tracking Population Movements with Mobile Phone Network Data: A Post-Earthquake Geospatial Study in Haiti. *PLoS Med*, Vol. 8, pp. e1001083, 2011.
- 3) Bagrow, J.P., Wang, D., Barabási, A.-L.: Collective Response of Human Populations to Large-Scale Emergencies. *PLOS ONE*, Vol. 6, pp. e17680, 2011.
- 4) Shimosaka, M., Maeda, K., Tsukiji, T., Tsubouchi, K.: Forecasting urban dynamics with mobility logs by bilinear Poisson regression, *Proceedings of the 2015 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing*. ACM, pp. 535-546, 2015.
- 5) 佐藤史典, 力石真, 藤原章正: モバイル空間統計を用いた復旧・復興過程の独立成分分析: 2014年8月広島土砂災害を例に. *土木計画学研究・講演集* Vol. Vol. 55, pp., 2017.
- 6) Urata, J., Sasaki, Y., Iryo, T.: Spatio-Temporal Analysis for Understanding the Traffic Demand After the 2016 Kumamoto Earthquake Using Mobile Usage Data, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, pp.

- 2496-2503, 2018.
- 7) 山口裕通, 奥村誠, 金田穂高, 土生恭祐: 携帯電話 GPS 情報から分かる熊本地震による行動パターンの被災・回復過程. *土木学会論文集D3 (土木計画学)*, Vol. 73, pp. I_105-I_117, 2017.
- 8) Yabe, T., Tsubouchi, K., Sudo, A., Sekimoto, Y.: A framework for evacuation hotspot detection after large scale disasters using location data from smartphones: case study of Kumamoto earthquake, *Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, Burlingame, California, pp. 1-10, 2016.
- 9) Hara, Y., Kuwahara, M.: Traffic Monitoring immediately after a major natural disaster as revealed by probe data – A case in Ishinomaki after the Great East Japan Earthquake. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 75, pp. 1-15, 2015.
- 10) Kawasaki, Y., Kuwahara, M., Hara, Y., Mitani, T., Takenouchi, A., Iryo, T., Urata, J.: Investigation of traffic and evacuation aspects at Kumamoto Earthquake and the future issues. *Journal of Disaster Research*, Vol. 12, pp. 272-286, 2017.
- 11) 大口敬: 交通混雑・渋滞に関する概念整理とサービス水準. *土木計画学研究・講演集*, Vol. 23, pp. 761-762, 2000.
- 12) 鹿田成則, 片倉正彦, 大口敬, 河合芳之: 飽和交通流率の基本値変動の実態解析. *土木計画学研究・講演集*, Vol. 23, pp. 2002.
- 13) 佐佐木綱(監修), 飯田恭敬(編著): *交通工学* 国民科学社, 1992.
- 14) Silva, E.G., Teixeira, A.A.C.: Surveying structural change: Seminal contributions and a bibliometric account. *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 19, pp. 273-300, 2008.
- 15) Picard, F., Robin, S., Lavielle, M., Vaisse, C., Daudin, J.-J.: A statistical approach for array CGH data analysis. *BMC Bioinformatics*, Vol. 6, pp. 27, 2005.
- 16) Killick, R., Eckley, I.: changepoint: An R package for changepoint analysis. *Journal of statistical software*, Vol. 58, pp. 1-19, 2014.
- 17) 平井健二, 山下大輔, 吉野大介, 真, 力.: プローブパーソン調査を活用した災害時の行動モニタリングと交通サービス設計. *土木学会論文集「平成30年西本豪雨災害特別企画」* (投稿中), 2019.

(Received October 4, 2019)

VARIATION PROPERTIES OF TRIP GENERATION, TRIP ATTRACTION, INTRA-ZONAL TRIPS, AND TRAVEL TIME UNDER TRANSPORT NETWORK DISRUPTION

Makoto CHIKARAISHI, Junji URATA, Daisuke YOSHINO, Akimasa FUJIWARA

This paper explores variation properties of trip generation, trip attraction, intra-zonal trips, and travel time under transport network disruption in Tenno district happened in July 2018 due to landslides. The empirical results obtained by using multiple passive transport data show that (1) traffic volume per hour went down to around 300 vehicles at maximum due to a large number of short-distance trips traveling between affected area and a disaster response base, (2) recovery of train line did not really reduce the travel time, and the average travel time had been 1.5 times longer compared to that before the disaster for more than two months after the disaster, and (3) travel time variability, which could not be explained by day of week and time of day, had been dominant for the first one month after the disaster.