

交通機能低下に対する産業部門のレジリエンスファクターの推計

黒田望¹・梶谷義雄²・多々納裕一³

Estimation of Resilience Factor on Industrial Sector Under Transport Network Deteriorations

Nozomu KURODA¹, Yoshio KAJITANI² and Hirokazu TATANO³

Abstract

The remaining amount of production under lifeline disruptions are called lifeline resilience factors, and are basic indicator to estimate economic impacts on industrial sector. This indicator reflects resistance and adaptability characteristics of each firm under lifeline disruptions and it depends on business contents. This paper estimates resilience factor under transport network deteriorations, which have not been thoroughly investigated and quantified in previous research. The recovery process of sales levels and transport network performances under transport network deteriorations in the heavy rain event of July 2018, are estimated based on questionnaire and mobile data. The relationship between sales levels and transport network performances are modeled. As a result of modeling, it is shown that sales levels decrease to zero on the case of decreasing transport network performances to 40%.

キーワード：平成30年7月豪雨，レジリエンスファクター，交通機能低下，携帯電話位置情報，産業被害

Key words: the heavy rain event of July 2018, resilience factor, transport network deterioration, mobile data, economic impact on industry

1. はじめに

災害によって被害を受けた事業所の操業能力や売上水準等の回復は，事業所自体の設備等の復旧に加えて，ライフラインの復旧状況にも大きく影

響を受ける。そのため，災害の経済的影響を評価する観点から，ライフライン供給停止による事業所への影響評価に関する様々な研究がおこなわれてきた¹⁻⁴⁾。特に，ライフラインの途絶下におい

¹ 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

² 香川大学創造工学部
Faculty of Engineering and Design, Kagawa University

³ 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

でも残存する生産やサービスの遂行能力はライフラインレジリエンスファクター（ライフライン途絶抵抗係数）と定義され、専門家アンケート¹⁾や事業所調査²⁻³⁾に基づいた推計がなされている。また、個別の災害における実証的な研究として、東日本大震災で被害を受けた事業所へのアンケートを通じて、ライフラインレジリエンスファクターが推計され、既往研究と整合的な結果が報告されている⁵⁾。

一方、ライフラインの中でも交通インフラのレジリエンスファクターについては、実証的な研究が進められていないのが現状である。東海豪雨災害を事例とした事業所被害の分析では、営業に支障を与えた要因として、交通状況の悪化による通勤不能、部品の供給不能が挙げられている⁶⁾が、その影響についての定量的な分析まではなされていない。また、パキスタンで2010年に発生した洪水においては、交通インフラに依存している事業者やサプライチェーンが混乱した状況下にある事業者ほど、回復に時間がかかることが示されている⁷⁾が、回復に与える影響までは示されていない。本研究の成果に近い研究としては、ATC-25¹⁾による仮想的な状況下におけるアンケート調査を基に、高速道路、鉄道、航空のそれぞれの機能停止状況下における各産業の生産能力への影響を定量的に示した事例がある。

しかし、実際の災害を対象とした研究事例はほとんど存在しない。この原因として、災害時の交通インフラの状態の定義が難しいことがある。ライフラインのうち、電気、ガス、水道については、使用可、使用不可の2区分で考えられることが多い。一方、交通インフラの場合、ある道路が通行止めとなっても、う回路があり、時間をかければ移動可能な場合が多い。また、通行止めの復旧過程の中で、片側通行が可能になり、平常時の半分程度の通行量となることもある。さらに、復旧車両等による交通量の変化も考慮する必要がある。すなわち、産業部門の生産能力に影響を与える要因の一つである交通インフラについて、道路ネットワーク全体を対象とした交通機能を評価できる指標が必要となる。ここで、本論文では、交通機

能として、ある地点からある地点に移動する交通量やその水準と定義し、道路ネットワークの交通機能といった場合は、ある地点から他の地域に移動、あるいは他の地域からある地点に移動する交通量やその水準を指す。このような問題に対して、交通量又はその水準を通じた交通機能の把握は、プローブ情報、携帯電話の位置情報、車両感知器データ等を用いて様々な方法が試みられてきた。例えば、平成30年7月豪雨時の呉市における交通量と旅行時間の変動特性の把握⁸⁾、熊本地震における車両感知器データを基にした交通量の推計⁹⁾、函館市における滞留人口データを基にした平常時の交通手段別OD交通量推計¹⁰⁾がある。しかし、これらの研究⁸⁻⁹⁾は、災害時の特異な変動を確認しているものの、平常時との差異を定量的に比較し、指標とできるかどうかの検討は行われていない。着目する地点あるいは地域を含む広域的な道路ネットワーク全体の交通機能を評価するためには、すべての道路あるいは幹線道路の状態を把握する必要がある。参考になる事例として、道路ネットワークのリスク・レジリエンスの推計において、利用者の時間損失と距離損失を基に指標が作成されている¹¹⁾が、道路ネットワークを設定する必要がある、広域の道路ネットワークを対象とする場合は対象が複雑になるといった問題がある。以上が原因と想定されるが、交通インフラの回復状況に合わせたレジリエンスファクターの推計はまだなされていない。

そこで、今回着目したのが、前述したような交通量の推計にも用いられている携帯電話の位置情報を基にした滞在人口データ（NTT Docomo）である。携帯電話の位置情報は、鎌倉市での移動人口の推定¹²⁾、東日本大震災時の仙台市の復旧過程の把握¹³⁾、豪雨時の人の行動分析¹⁴⁾、熊本地震時の行動パターンの回復過程の推計¹⁵⁾、2014年の広島市における土砂災害後の人口移動の分析¹⁶⁾に使われており、高い空間分解能で広範囲の時空間情報であるといった特徴がある。筆者らは、災害により被害を受けた事業所の経済被害の推計を目的としており、任意の場所の交通機能を推計するために、携帯電話の位置情報の活用を検討した。本

		7月		8月		9月	
呉市	広島方面	7/6通行止め	←○	広島呉道路			9/27解除
			7/13一部解除				
	東広島方面	7/6通行止め	←○	国道31号			
			7/11解除				
	江田島方面	7/6通行止め	←○	東広島・呉自動車道			一部解除は一部の区間のみ 通行可能な状態を表す
			7/10解除				
江田島方面	江田島方面	7/6通行止め	←○	国道375号			
			7/11片側交互		8/18解除		
江田島方面	江田島方面	7/6通行止め	←○	国道487号等			
			7/12一部解除	7/31解除		9/9通行止め	
						9/10解除	

図1 道路の復旧経緯¹⁸⁻²²⁾

論文では、携帯電話の位置情報を基に広域的な道路ネットワークの交通機能を示す代理指標（以下、交通機能の指標）を提案した。地域間流動人口の減少量に応じて交通機能に制約が生じたものと仮定している。実際の道路の復旧過程ではなく、その結果として生じる、人口流動に着目した指標である。本指標から推計される交通インフラの回復過程とともに、事業所アンケートから得られた事業所の回復過程より、両者の関係をモデル化し、交通のレジリエンスファクターを推計した。さらに、推計結果をもとに、交通機能の指標と売上水準の関係を考察する。

2. 対象とする災害と研究方法

2.1 研究で使用するデータの概要

平成30年（2018年）6月以降、西日本を中心として全国的に広い範囲で発生した記録的な大雨により、広域のかつ同時多発的に、河川の氾濫、がけ崩れ等が発生した。その結果、浸水等による直接的な被害により操業停止を余儀なくされた事業所の他、ライフライン被害により操業停止せざるを得ない事業所も発生した。また、部品工場の被災や主要道路の通行止めによりサプライチェーンが寸断され、広島県を拠点とする自動車メーカーをはじめ、多くの工場で操業停止が発生したことが報告されている¹⁷⁾。

呉市においては、7月6日に大雨特別警報が発表された後、図1に示すように、同日に広島市と

呉市を結ぶ国道31号、高速道路（広島呉道路）が被災し通行止めとなった。同時に、その他の幹線道路ネットワーク（東広島・呉自動車道、国道375号等）も完全に寸断される状況となった。その後、段階的に通行止めが解除された。そのほかの地域では、おおむね1～2週間程度で主要な道路の通行止めは解消されている。これらの状況下における、携帯電話の位置情報及び事業所アンケートを分析する。

携帯電話の位置情報は、500 m メッシュ（4次メッシュ）単位の滞在人口を示したもので、平成30年7月豪雨前後となる2018年6月1日～2018年9月30日について1時間毎に計測されている。分析の範囲は、平成30年7月豪雨において被害が大きかった広島県である。滞在人口に加えて、図2に示すように、市区町単位の居住地情報を有しており、これを用いて後述する流動人口を推計した。また、利用交通機関や来訪頻度は把握できない、個人を特定できないように10人未満の人口データが除去されている、といった点に注意が必要とな

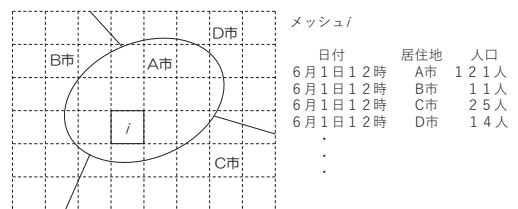


図2 携帯電話の位置情報概要



図3 交通機能の指標及び事業所回復過程の推計箇所（アンケートを回答した事業所の位置）

る。なお、前述した居住地情報を付加したデータ（以下、データ1）に加えて、筆者らは居住地情報を付加していないデータ（以下、データ2）の2種類を保有している。データ1は、居住地情報を付加することにより、各時刻の人口データが分割されて10人未満のデータが除去されているため、データ1における人口総数はデータ2より少ない。

事業所アンケートは、平成30年7月豪雨により被害を受けた事業所に対して実施したもので、ライフラインの被害の影響を含んだ操業水準及び需要の影響を含んだ売上水準等の回復過程を聴取した。さらに、各種ライフライン被害日数等の被害様相やその他事業所属性についても設問した。これらの詳細については、既往研究²³⁾を参照とする。アンケートの回答により、浸水被害や交通インフラ以外のライフライン被害が生じていない事業所を抽出し、分析対象とした。図3に示した箇所のもので、交通機能の指標の計算も、同様の箇所で行った。

2.2 交通機能の指標の計算方法

以下では、携帯電話の位置情報から交通機能の指標を計算する方法を説明する。まず、交通の遮

断が90日と長期に渡った呉市について、人口変動から道路の復旧過程が概観できることを示す。図4は、呉市における非住民の人口変動を時間単位で示したものである。携帯電話の位置情報によると、呉市の非住民は、居住地が広島方面（広島市、安芸郡）、東広島方面（東広島市）、江田島方面（江田島市）の人が9割以上であり、これらについて示す。6月は規則的な変動を示しているが、市内各所で通行止めが生じた7月6日以降、不規則な変動を示し、その後、徐々に元の規則的な変動に戻る（回復する）傾向を示している。広島方面の場合、国道31号の通行止めが解除された7月11日、広島呉道路の通行止めが一部解除された7月13日以降、徐々に回復している。お盆（8月11日～8月19日）に変動の状況が変わっているが、お盆の後は概ね水害前の変動に近い傾向を示している。東広島方面の場合、東広島・呉道路が復旧した7月10日以降になると、変動幅が小さいが水害前と同様な規則的な変動を繰り返している。その後、徐々に変動の下端が元の水準まで戻り、国道375号の通行止めが解除後の平日となる8月20日ごろから、変動の上端も元の水準に戻りつつある。江田島方面の場合、7月末には呉市の道路が

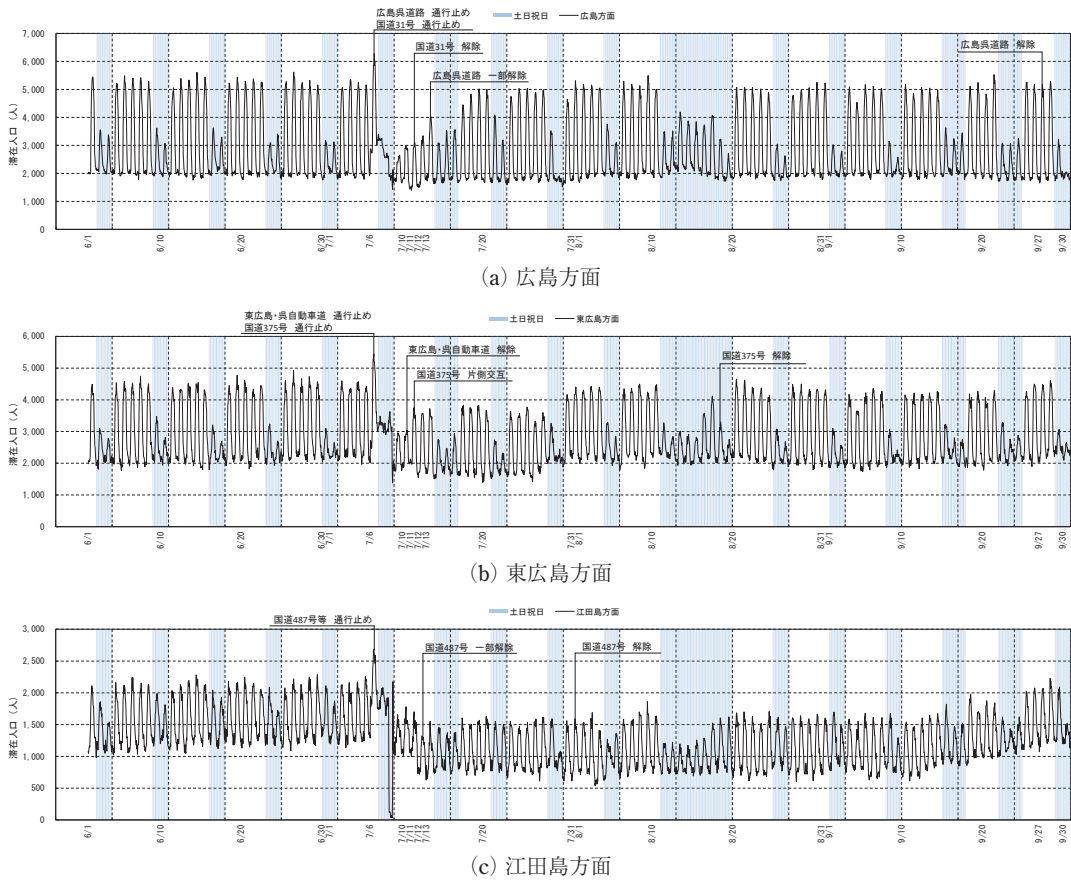


図4 呉市の人口変動

復旧しており、変動の幅は同時期に元の水準に戻っているが、下端は元の水準に戻っておらず、9月末に戻っている。江田島市では多数の土砂災害が発生し、これらの復旧の影響と考えられる。このように、非住民の人口変動が、概ね道路の復旧状況を反映していることがわかる。今回、分析を行った広島市安芸区、熊野町、尾道市及び福山市でも同様の傾向があり、人口変動と道路の復旧過程に概ね関係があることがわかる。

次に、人口変動から想定される人口流動が事業に及ぼす影響について整理し、道路の復旧過程と事業への影響について概観する。表1は、住民と非住民の流動について整理したものである。①は、住民の市内の移動を想定している。通行止め等により、市内の移動が制限されると、通勤、出入荷、

需要の変動を通じて、事業への影響も大きいことが想定される。ただし、①は浸水地域で生じることが想定され、浸水による事業所の施設被害及び回復が卓越するため、交通機能低下の影響は小さいケースが多く、本研究では考慮しない。また、携帯電話の位置情報では、市内の動きを直接観測することはできず、指標として用いることができ

表1 人口流動の特徴

	移動	事業への影響*	計測の容易さ	指標
①	住民 近傍	○	×	×
②	住民 遠方	○	△	△
③	非住民 近傍	△	×	×
④	非住民 遠方	○	○	○

※ 通行止め等による道路機能低下時を想定

ない。②は、住民の市外への移動を想定している。市外への移動が制限されると、市外事業所への通勤、出入荷等に影響し、事業への影響も大きいと想定される。一方、携帯電話の位置情報は、行先情報を有しておらず、また居住地情報が市単位であることから、広域でしか把握できず、指標として用いるには後述する④に比べて不適である。③は、非住民の市内の移動を想定しており、市外からの通勤者や旅行者等の市内での活動を表す。市内での移動が制限されても、観光地等でのサービスを除くと事業への影響は少なく、また観測することができないため、指標として用いることができない。④は、非住民が通勤、出入荷で市内に移動することを想定している。非住民の市内への移動が制限されると、事業への影響が大きく、また観測も容易であるため、指標として用いることができる。水害の被災地では、復旧のためにより多くの人的資源を必要とするため、地域間移動の需要減少は発生せず、むしろ混雑が問題となることが多い。呉市においても渋滞が問題となり、通行止め区間における都市間バスの緊急通行の許容、バス・災害車両等の専用レーンの設置等の対策が取られた^{18,20)}。また、災害後は平常時とは異なる移動者（通勤者の代わりに復旧関係者）が含まれるが、総体としての流動人口の減少量の主要因は、交通インフラ被害による交通機能の低下と想定している。ただし、復旧関係者により流動人口が災害前を上回ることもあり、時間帯別滞留人口の分析などによって、操業時間外の流入人口についても分析するなどの追加検討が必要となる。こうした全時間帯の滞留人口を考慮した交通機能の指標の定義については今後の課題としている。

以上を踏まえて、非住民の流動人口を交通機能の指標として用いる。非住民人口は、夜間に0人となっていないことが多く、何らかの事情により夜間も滞在している。そこで、非住民の昼間人口と夜間人口の差を流動人口（流入を正とする）と定義し、交通機能の指標とした。曜日ごとの変動や土日祝日の変動を除くため平日平均を実施するとともに、流動人口の変動を各メッシュ間で比較するために、災害前の平均値で正規化した。なお、

居住地情報を付加したデータ1は、前述したように居住地情報を付加していないデータ2と比較して除去されたデータが存在し、平均して10人/時・メッシュ程度の差異が生じている。事業所が存在するような滞在人口が多いメッシュでは、住民データが10人未満となり除去されることは少ないため、データ1とデータ2の差異を除去された非住民データとみなして、データ1の非住民人口に加えて補正した。また、携帯電話の位置情報では今回示したように非住民の遠方データのみしか把握できず、他のデータと組み合わせる等により、住民の近傍の移動データを用いた場合に、指標の精度が上がるかどうかについても、さらなる検証が必要となる。

2.3 交通機能低下時の売上水準の推計方法

事業所アンケートでは、図5に示す回復過程の例のように、各水準に達した日数を得ており、これを基に、回復過程を推計した。浸水被害や交通インフラ以外のライフライン被害が生じていない事業所についてのみ推計したものである。これを、交通機能低下時の売上水準とみなした。その結果、前述の図3に示したように、分析の対象が極端に少なくなっている。各種被害の影響を個別に考慮でき、交通インフラ被害のみの影響を抽出できるような回復モデルを作成し、本論文では分析対象外としたアンケートを分析の対象とすることが、今後の課題となっている。

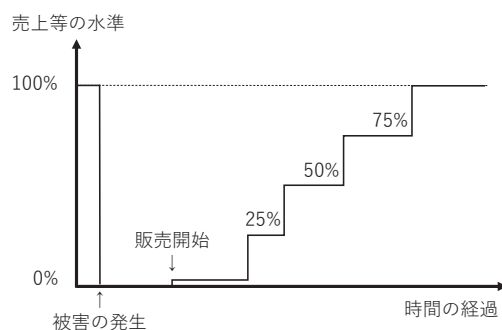


図5 回復過程の例

2.4 交通レジリエンスファクターの推計方法

アンケートを回答した事業所の立地場所（4次メッシュ単位）を基に、交通機能の指標の回復過程と事業所の売上水準の回復過程を関連付ける。その結果、各事業所において、交通機能の指標と売上水準の関係が複数の時間断面において得られるため、これらを以下の式でモデル化した。

$$R(Ft) = \exp(w(1 - Ft)) \quad (1)$$

ここで、 Ft が交通機能の指標を示し、その範囲は0～1である。ただし、災害後は元の水準以上に交通機能の指標が増加することもあり、1以上を示す場合もあるが、元の水準を意味する1を上限としている。 R が売上水準を示し、0～1の範囲となる。 w がパラメータであり、今回得られた標本に適合するように求める。交通機能の指標が1に回復すると、事業所の売上水準が1に回復するようなモデルとしている。パラメータの推計にあたっては、式(1)の両辺について対数を取り、最小二乗法で推計した。交通機能の指標と売上水準の関係式については、他の関数や誤差項を含んだモデル等も想定され、今後の課題としている。

3. 推計結果及び考察

3.1 交通機能の指標の計算

本項では、2.2で示した方法により計算した交通機能の指標を示す。まず、通行止めが最大で90日と長期に渡った呉市について、平均的な回復過程を図6に示す。指標の計算ができた185メッシュの平均である。同時に、呉市における上位

5%から下位5%の回復過程の範囲を示した。平均的な回復過程では、6月の交通機能の指標は比較的安定しているが、7月6日の国道31号及び広島呉道路の通行止め後に交通機能が低下し、休日明けの7月9日にはさらに大きく低下している。その後、道路機能は徐々に回復し、8月末～9月末に元の水準に回復している。上位5%、下位5%の回復過程を見てわかるように、回復過程には幅があり、水害前の水準を大きく上回る結果も得ている。これらは、図7に赤いメッシュで示したような場所で、土砂災害により通行止めが発生した箇所や道路の復旧後に交通が集中した箇所で見られている。復旧のための流入人口の増加や迂回してきた流入人口の増加により、災害前の水準を上回っているものと考えられる。これらの箇所での流入人口を居住地別に分析したところ、災害前後ともに近隣の市からの流入であり、これ以上詳細な分析が難しい。事業所活動に影響を与える交通機能の変動と復旧活動等のための交通機能の変動を分離する必要があるが、本指標の課題となっている。また、前述したように10人未満のデータの除去により、水害前から規則的な人口変動が測定されず、指標の計算ができないメッシュもある。図7に示したように、山間部であれば事業所が立地することが少ないため指標の算出ができなくても経済被害の推計に影響はないが、主要な道路付近のメッシュについて指標が計算できないことは本手法の課題となっている。

次に、呉市において、交通インフラ被害のみが生じた事業所が立地する個別のメッシュ（図3及び図7に示した呉市（1）～呉市（4））の結果を

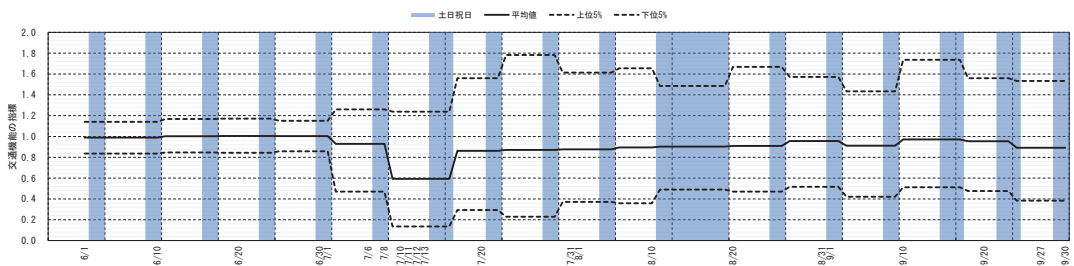


図6 交通機能の指標の計算結果（呉市全体）



図7 交通機能の指標の算出メッシュ (呉市)

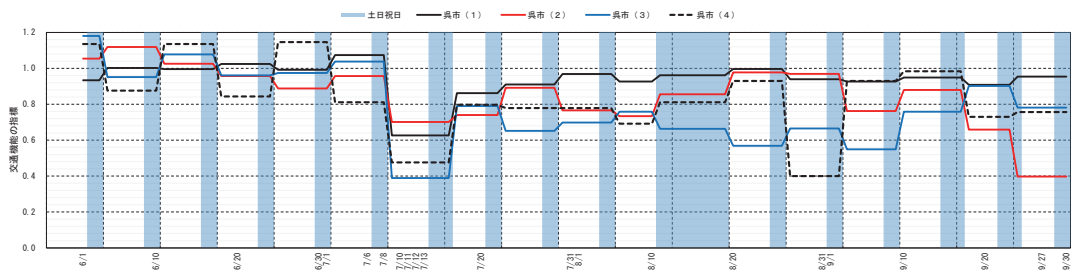


図8 交通機能の指標の計算結果 (呉市の個別結果)

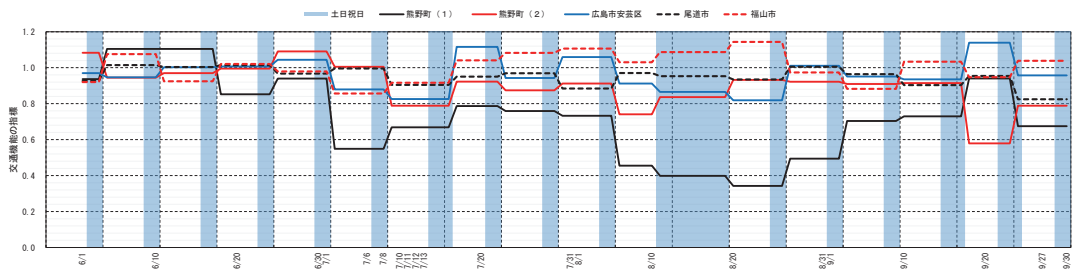


図9 交通機能の指標の計算結果 (熊野町, 広島市安芸区, 尾道市, 福山市)

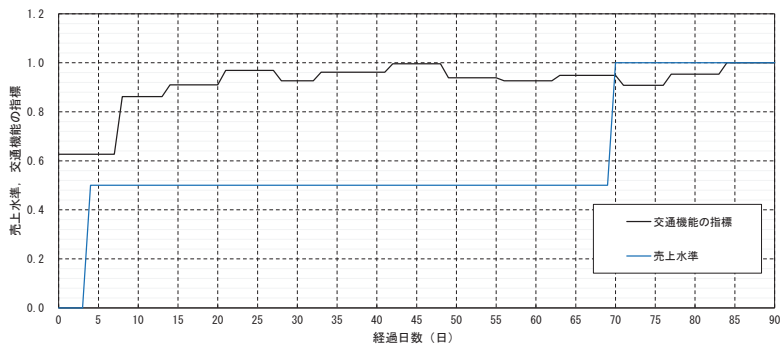
図8に示す。呉市内でも、場所によって交通機能の指標の低下度合いや回復の過程が異なる。図中の呉市(1)及び呉市(2)は国道31号、東広島・呉自動車道の通行止めが解除された次の週から徐々に回復しており、これらに依存する流入交通が災害前後で多いことがわかる。ただし、呉市(2)では、9月頃から指標が再低下している。市外居住者の夜間滞在人口の増加に伴い流入交通量が減少したもので、災害後における居住場所の変化等が影響している可能性もある。一方、呉市(3)は、国道31号の通行止め解除後も元の水準まで戻らず、0.6~0.8程度を推移している。広島呉道路に依存する流入交通が多く、このような結果になっているものと推測される。江田島方面に近い呉市(4)でも、国道487号の通行止めが段階的に解除されるに応じて徐々に回復している。ただし、8月末に極端な指標の低下が生じている。呉市(4)の流入交通は江田島方面からが多数であるものの、データ1から確認できるものは20人/日程度であり、もともとの交通量が少ない箇所、交通インフラ被害以外が大きく影響したものと考えられる。

呉市以外について、交通インフラ被害のみが生じた事業所が立地する個別のメッシュの結果を図9に示す。呉市に近い熊野町(1)では、主だった幹線道路である広島熊野道路の通行止めが7月7日に解消したが、その他の道路の通行止めの影響で、長期に渡って指標の低下が生じている。また、お盆前の8月10日ごろから再低下が生じており、呉市において渋滞対策が行われた7月~9月の間に、付近の交通の様相が変化した可能性がある。また、熊野町(2)でも呉市ほどではないが水準が低下している。その後も徐々に回復しているが元の水準に戻るまでは時間がかかっており、呉市の交通の混乱の影響が波及していることがわかる。広島市安芸区においても、周辺道路の通行止めが生じた後に指標が低下し、通行規制が解除された7月20日以降に指標が回復し始めている。ただし、広島市安芸区では災害後に指標が1.0を超える期間が生じている。付近には浸水した箇所もあり、浸水対応により流入人口が増加し、指標

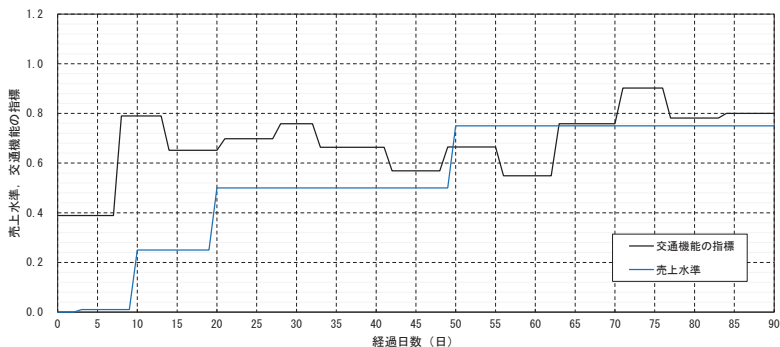
が災害前を上回った可能性がある。一方、呉市から離れている尾道市では、周辺道路(国道2号)の通行止めが行われた7月6日以降、交通機能が0.9程度に減少し、その後0.9~1.0を推移している。国道2号の通行止めは7月9日に解除されたが、付近では土砂災害が発生しており、これらの影響により、交通機能の低下が生じていたものと推測される。国道2号が主たる幹線道路となる福山市においても、指標が0.9程度に低下後、1.0以上に回復しているが、福山市では広い範囲で浸水被害が生じたため、これらの対応により短期間に流入人口が上昇したものと見られる。以上のように、各幹線道路の復旧状況と交通機能の指標には、特に災害発生直後について整合的な部分が多い。

3.2 交通機能低下時の事業所の回復過程の推計

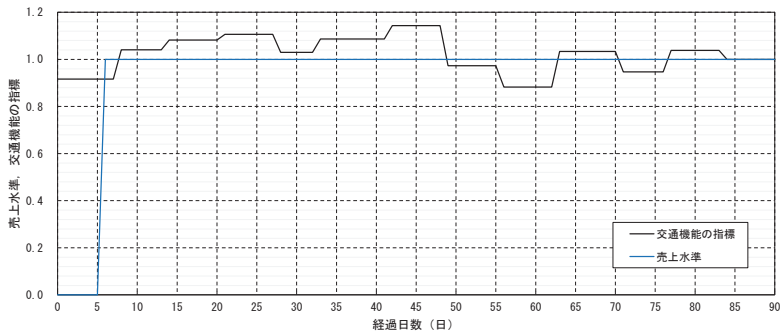
以下では、2.3に示した方法により、交通機能低下時における事業所の回復過程を推計する。9事業所について回復過程を推計しており、呉市(1)、呉市(3)、福山市の例を図10に示す。通行止め等が生じた後の月曜日である7月9日を0日目として、交通機能の推計結果も同時に示した。呉市全域において、各道路の通行止めが生じているものの、初めの一週間は、呉市(1)で0.6程度、呉市(3)で0.4程度の交通機能の指標を維持している。一方、そのような状況でも売上水準は0となっている。時間の経過とともに、交通機能の指標が0.8程度に回復した時期と合わせて、売上水準が0.25~0.5まで回復している。その後は、呉市(1)では交通機能の指標が0.9~1.0を推移し、約70日目に、売上水準が元の水準となる1.0に回復している。アンケートの自由記述によると、約70日目に渋滞が解消し元の水準に回復したとあり、呉市内での渋滞対策の効果と考えられる。呉市(3)では交通機能の指標が0.8程度まで回復後、0.6~0.9を推移しており、そのような状況下であるが、売上水準は徐々に回復している。また、福山市では、約1週間程度で付近の通行止めが解消し、同時期に交通機能の指標は1.0以上に回復し、売上水準も1.0まで回復している。



(a) 呉市 (1)



(b) 呉市 (3)



(c) 福山市

図10 事業所回復過程の推計例

事業所の回復と交通機能の回復の時期には、一部で不整合が見られる。売上水準は各事業所の回復過程を示したもので、従業員の居住地や取引先のある場所によって、影響を及ぼす道路が異なる。一方で、交通機能の指標は広域的な道路ネットワーク全体の指標となっており、これらの差異により両者の回復の時期は一致していないものと考えられる。

3.3 交通レジリエンスファクターの推計

以下で、3.1及び2により求めた交通機能の指標の回復過程及び事業所の回復過程から、2.4に示す方法により交通に関するレジリエンスファクターを推計した。図11は、9事業所における、複数の時間断面における交通機能低下時の事業所の売上水準をプロットしたものである。なお、交通機能の指標が1.0を上回る場合は、便宜的に1.0に

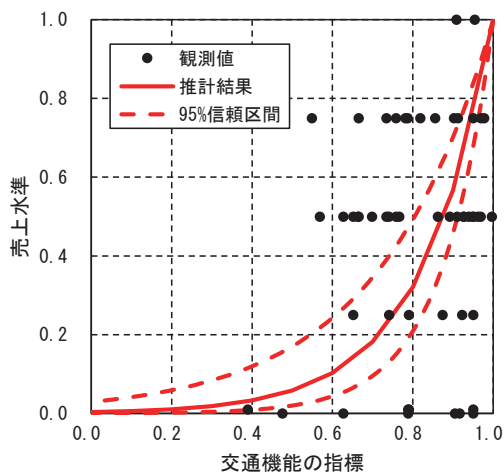


図11 レジリエンスファクターの推計結果

表2 モデルの推計結果

パラメータ w	-5.685*** (1.068)
標本数 N	52
R^2	0.357
F検定統計量	28.310***

(注) 1. *10%有意, **5%有意, ***1%有意。
2. ()内の数値は標準偏差を示す。

変換している。また、パラメータの推計結果を表2に示す。同時に、図11に、推定値の95%信頼区間を示す。モデルの特性として、信頼区間の上端、下端を示す曲線も交通機能の指標が1に回復すると、事業所の売上水準が1に回復するようになっている。

図11より、交通機能が0.4程度に低下すると、売上水準はほぼ0になることがわかる。ATC-25¹⁾では、高速道路が使用できない場合、操業水準が各産業で平均して0.3程度(0.1:木材・木製品製造業~0.6:建設業)に低下すると示されている。呉市の事例では、高速道路が使用できない1週間程度の期間も一般道やう回路により道路ネットワークは機能しており、平均して0.6程度の交通機能は確保されていた。一方で、ATC-25¹⁾は専門家に対するアンケートであり、このような一般道等が機能している影響を十分に考慮できていない可能性がある。

また、ある事業所にとっては移動が不可能な状

況であっても、道路ネットワーク全体で見ると何らかの交通量が生成しており、今回作成した交通機能の指標は0にならない。アンケートの自由記述によると、交通機能が0.6以下の状況で、事業所によっては移動が不可能な状況が生じ、操業水準や売上水準が0となることがあった。図11に示すパラメータの推計結果によると、交通機能が0.6の場合の売上水準は0.1程度であり、ATC-25¹⁾における高速道路のみが使用できない場合の操業水準である0.3と近い結果となった。

4. まとめ

本論文では、携帯電話の位置情報を基に、広域的な道路ネットワーク全体の交通の状態を推計するための代理指標(交通機能の指標)を作成した。非住民の流入人口に着目したもので、道路ネットワークの寸断が広範囲かつ長期に及んだ平成30年7月豪雨において、道路ネットワークの回復過程と整合性があることを確認した。さらに、事業所アンケートから、交通被害のみによる回復過程を抽出した。これらを基に、事業所の回復過程と交通機能の指標の回復過程の関係を定式化した。その結果、交通機能低下時の売上水準をモデル化し、交通のレジリエンスファクターを推計することができた。本モデルによると、交通機能の指標が0.4程度に低下すると、売上水準はほぼ0になることが示され、交通機能の低下が事業所の売上に大きな影響を及ぼしていることが定量的に示された。また、交通機能の指標が0.6程度のときに、事業所にとって移動が不可能になる状況が生じ、このような条件下では先行研究であるATC-25¹⁾が想定している条件と近いと考えられる。この場合、ATC-25¹⁾では操業水準が0.3程度である。今回の推計結果では0.1となり、比較的近い結果が得られたことから、今回の結果の妥当性を確認することができた。

今後、これらの結果を基に、平成30年7月豪雨により被害を受けた地域のメッシュにおいて交通機能の指標を算出し、さらに他のライフライン被害等の影響も含めて、水害により被害を受けた事業所の売上回復過程を推計し、経済被害の推計に

表3 研究の課題

課題	
交通機能の指標	<ul style="list-style-type: none"> ・住民の近傍の移動データを用いた場合に、指標が改善するかどうかを検証(再掲) ・事業所活動に影響を与える交通機能の変動と復旧活動等のための交通機能の変動を分離する方法を検討(再掲) ・操業時間外の流入人口に着目する等、全時間帯の滞留人口を考慮して指標を再定義(再掲) ・主要な道路付近の地域メッシュで指標が計算できないことへの対策を検討(再掲) ・取引先の被災による需要や供給の低下により、交通量が低下することも想定され、指標が実際の交通インフラ被害以外にも様々な影響を含んでいる可能性を含めて指標を解釈
ライフラインレジリエンス	<ul style="list-style-type: none"> ・交通機能の指標と売上水準の関係式について、他のモデル等との比較検討(再掲) ・本論文で分析対象外とした事業所アンケートを含めた分析(再掲) ・産業分類や事業所の規模別の推計 ・交通機能の指標が0.6以上の条件について、比較できる事例を調査し、さらなる検証
交通インフラ被害	<ul style="list-style-type: none"> ・交通インフラ被害は、労働力の制約、原材料等の中間財の供給制約、需要の制約、出荷の制約等、様々な要因を経由して事業所の経済活動に影響を与えることが想定され、これらの要因を整理 ・要因ごとの寄与の内訳や因果関係は不明確な点が多く、交通インフラ被害と事業所の経済活動に対する因果関係を把握するような設問を含んだアンケート等を通じて、因果関係を明確化

役立てる予定である。後述する課題にも示すように、本指標は実際の交通インフラ被害以外にも様々な影響を含んでいる可能性があり、個別にこれらを考慮する場合は、経済被害の二重計上にも注意して分析を進めていきたい。

一方で、本研究を通じて、交通機能の指標、ライフラインレジリエンスファクター、交通インフラ被害に関して、表3に示すような課題が明らかとなっており、これらについても引き続き検討を進めていきたい。

謝辞

アンケート調査にご協力くださいました、広島県、岡山県、愛媛県の企業の皆様には、心より御礼申し上げます。現地調査においては、商工会連合会や行政の方々に多大なご協力をいただきました。ここで、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Applied Technology Council (ATC-25): Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States, 1991.
- 2) 梶谷義雄・多々納裕一・山野紀彦・朱牟田善治：製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定，自然災害科学，Vol.23，No.4，pp.553-564，2005.
- 3) 梶谷義雄・多々納裕一・山野紀彦・朱牟田善治：非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定，自然災害科学，Vol.24，No.3，pp.247-255，2005.
- 4) 大東開智・伊香賀俊治・村上周三・工月良太・川除隆広：ライフラインの途絶に備えた対策がもたらす地域のレジリエンス向上効果の評価手法の提案，地域レベルのエネルギーシステムによるレジリエンス向上効果の貨幣価値評価，日本建築学会環境系論文集，Vol.82，No.735，pp.471-479，2017.
- 5) Liu, H., Tatano, H. and Kajitani, Y.: Estimating lifeline resilience factors using post-disaster business recovery data, Earthquake Spectra, Vol.37, No.2, pp.567-586, 2021.
- 6) 木村秀治・石川良文・片田敏孝・浅野和広・佐藤尚：都市型水害における事業所被害の構造的性質に関する研究，土木学会論文集D，Vol.63，No.2，pp.88-100，2007.
- 7) Ali, A., Muhammad, I. A., and Nooreddin, A.: Disaster recovery and business continuity after the 2010 flood in Pakistan: Case of small businesses, Int. J. Disaster Risk Reduct., Vol.2, pp.46-56, 2012.
- 8) 力石真・浦田淳司・吉野大介・藤原章正：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，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75，No.1，pp.214-230，2019.
- 9) 溝上章志・中村豪志・田村亮：被災直後から平常時復旧までの交通変動パターンの逆推計，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol.74，No.5，pp.647-656，2018.
- 10) 金森亮・水野敬太・野田五木樹・中島秀之：滞留人口データを利用した交通手段別OD交通量

- 推計手法の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.178, No.8, pp.1-6, 2015.
- 11) 石橋寛樹・小島貴之・秋山充良・越村俊一: 南海トラフ地震による強震動と津波を受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手法の提案と構造物の補強優先度判定への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp.32-46, 2020.
 - 12) 米澤実保・瀬尾亨・布施孝志: 携帯電話のGNSSとWi-Fiデータの統合による滞在人口分布と移動人口の同時推定手法の構築, 第59回土木計画学研究発表会・講演集, 2019.
 - 13) 奥村誠: 都市内災害復旧過程の時空間パターンの把握, 都市計画論文集, Vol.50, No.3, pp.402-408, 2015.
 - 14) 銭谷直樹・山口裕通・中山晶一郎: 携帯電話位置情報を用いた豪雨時の人の移動行動分析, 第59回土木計画学研究発表会・講演集, 2019.
 - 15) 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, No.5, pp.105-117, 2017.
 - 16) Wu, L., Chikaraishi, M., Nguyen, H. and Fujiwara, A.: Analysis of post-disaster population movement by using mobile spatial statistics, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, Vol.54, 2021.
 - 17) 社会資本整備審議会: 第1回大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策検討小委員会配布資料 (【資料2】平成30年7月豪雨における被害等の概要), <https://www.mlit.go.jp/common/001256692.pdf>, 2022年3月19日.
 - 18) 呉市復興総室: 平成30年7月豪雨災害呉市災害記録誌, 2020.
 - 19) 呉市災害対策本部: 平成30年7月豪雨による被害状況等について (第66報), <https://www.city.kure.lg.jp/uploaded/attachment/33744.pdf>, 2022年3月19日.
 - 20) 国土交通省中国運輸局: 平成30年7月豪雨災害における渋滞・交通対策, 平成30年度交通実践セミナー in 広島, <https://www.tb.mlit.go.jp/chugoku/content/000093807.pdf>, 2022年3月19日.
 - 21) 国土交通省中国地方整備局: 平成30年7月豪雨, 中国地方整備局 災害対応の記録, 2019.
 - 22) 国土交通省: 平成30年7月について, <https://www.mlit.go.jp/common/001248491.pdf>, 2022年3月19日.
 - 23) 黒田望・梶谷義雄・多々納裕一: 浸水時における事業所資産のフラジリティ曲線の推計, 平成30年7月豪雨を対象として, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.1, pp.70-80, 2020.
- (投稿受理: 2022年3月31日
訂正稿受理: 2022年7月4日)

要 旨

ライフラインの途絶時において残存する企業の生産能力は、ライフラインレジリエンスファクターと呼ばれ、経済影響評価の基礎的な指標となってきた。本指標は、ライフライン途絶に対する企業の生来的な耐性や適応能力を示しており、事業内容によっても異なる。本研究では、これまでの調査では十分に調査及び定量化されてこなかった道路機能低下に対するレジリエンスファクターを推計したものである。携帯電話の位置情報及び事業所アンケートを基に、平成30年7月豪雨における交通機能及び事業所の売上水準が回復する過程を推計し、これらの関係をモデル化したものである。モデル化の結果、交通機能が4割程度に低下すると、事業所の売上水準が0まで低下することが示された。