

20. 都市内災害復旧過程の時空間パターンの把握 携帯電話位置情報集計データの活用

Spatio-temporal pattern in a city during a disaster recovery process
Based on aggregated positioning data of mobile phones

奥村 誠*
Makoto Okumura*

When a city is hit by a huge disaster, activities and functions of the city necessary for people are lost and damaged. Total loss of the disaster is not only determined by the direct damage but also by recovering speed. The aim of this analysis is to extract spatio-temporal patterns in a city during a disaster recovery process based on aggregated positioning data of mobile phones. In this analysis, we classified activities and functions decreased through spatial patterns of population distribution during a disaster recovery process based on a factor analysis, and confirmed difference in recovering speed. Moreover, we suggested that each spatial pattern is related to the spatial pattern of activities in normal time.

Keywords: disaster recovery process, spatio-temporal pattern, regional structure, positioning data, factor analysis
災害復旧過程, 時空間パターン, 地域構造, 位置情報データ, 因子分析

1. はじめに

都市が巨大災害に見舞われた場合、その影響の大きさは Bruneau のレジリエンスの三角形¹⁾と呼ばれ、発災直後の被害だけでなく、失われた活動や機能が回復するスピードにも規定される。この回復のスピードを上げる取り組みは、災害研究における国際的な関心事項となっており、専門の学術雑誌も発行されている²⁾。しかしながら、都市における活動や機能の低下がどのような空間パターンで発現し、どのようなスピードで回復するのかについては、まだ十分な研究がなされているとは言えない。

復旧過程における時空間パターンは平常時の空間パターンとの関連性があると考えられる。例えば、平常時に行われている何らかの活動が困難となって活動レベルが低下すれば、平常時のその活動の空間パターンが弱まることになる。他方、災害時に新たなニーズが発生して、役場や避難所、学校等の施設の重要性が増し、これらの施設へ平常時には見られないような人の動きが出現する可能性もある。

本研究では、東日本大震災前後の携帯電話位置情報データを用いて、復旧過程の時空間パターンの分類を行い、平常時の空間パターンとの関連性を分析する。実際には、仙台市域におけるゼンリンデータコム社（以下、ZDC）の250mメッシュ「流動人口統計データ」の2011年3月から4月の61日間の1時間毎のデータを分析する。

2. 既往研究と本研究のアプローチ

2.1 平常時における地域構造分析の既往研究

地理学分野における地域構造分析では、「地域」を等質地

域と結節地域という2つの異なる概念で把握することが多い。等質地域とは類似した特徴をもつ空間的な広がりを目指す。他方、結節地域は機能地域とも呼ばれ、ある場所を中心として交通や通信などにより機能的なまとまりをもつ空間的な広がりを目指す。これらには相互に関連性が存在する。作野³⁾は山陰地方を対象に、1965年と1985年の人口・世帯・産業に関する42変数への因子分析と通勤・通学流動データに基づくクラスター分析を行い、等質地域構造と結節地域構造との対応を明らかにしている。

複数年次間の等質地域の変化を捉える研究として、根田⁴⁾の宮城県仙台市の小売業31種の分布パターンの変化の考察、富田ら⁵⁾の東京大都市圏による58種の人口・世帯・産業変数から得られる因子の分布変化の研究などがある。他方、土井ら⁶⁾は複数時点のパーソントリップ調査に基づく結節地域構造の変化を捉え、産業構造変化と対応させた。

平日と休日の違い、あるいは1日の中で時刻ごとのデータを用いて、定期的に繰り返される都市活動のリズムを把握する研究も行われている。伊藤⁷⁾は東京都区部の秋季平日の2時間ごとの自動車交通流に因子分析を適用し、結節地域の時間帯別の特性を明らかにしている。

本研究では1時間毎に集計された携帯電話位置情報に基づく滞在者数を用いる。地域の滞在者数という特性を用いる点では等質地域構造分析に相当するが、分布の時間的相違の背後に通勤などの流動が存在していることを考えれば、結節地域としての構造が現れてくる可能性がある。

2.2 災害時における地域構造分析の既往研究

災害時における地域構造分析の既往研究として、被害の空間パターンを扱い、自然条件や不燃構造、建物寿命、道

*正会員 東北大学災害科学国際研究所 (Tohoku University)

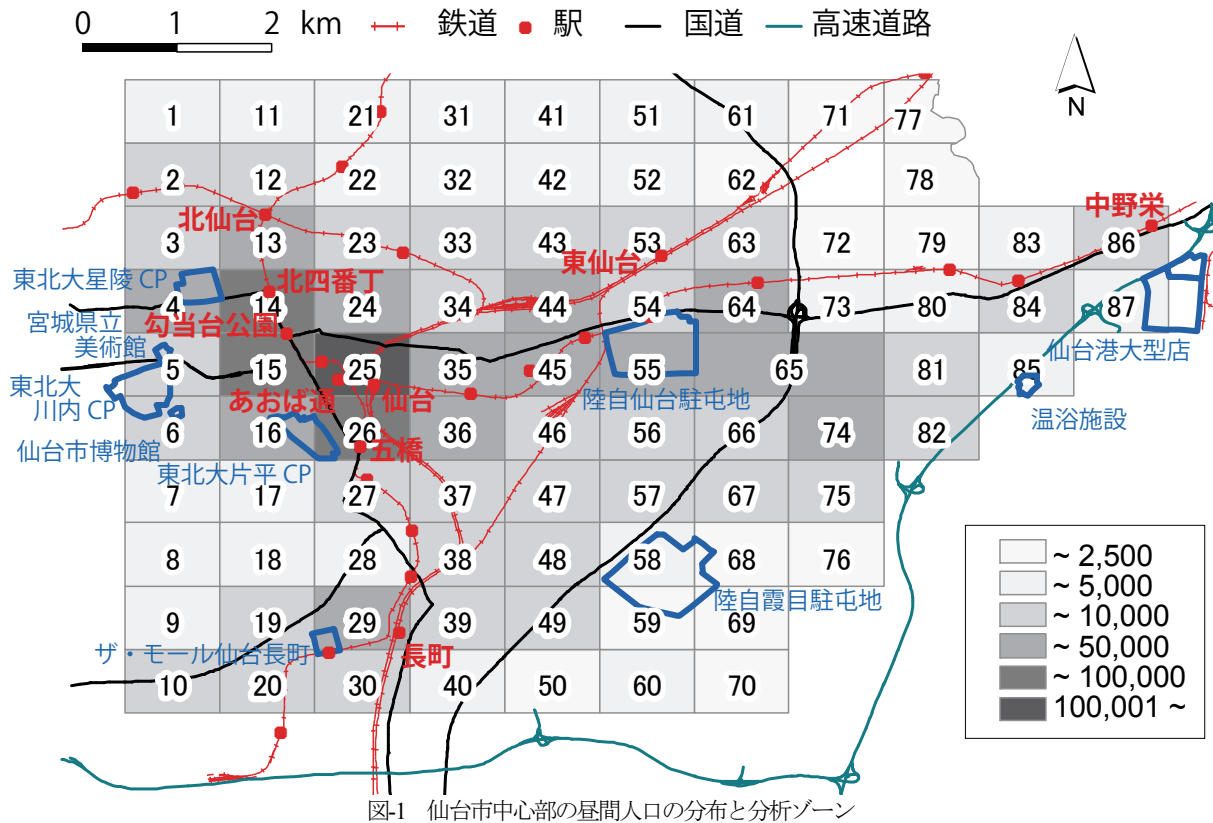


図-1 仙台市中心部の昼間人口の分布と分析ゾーン

幅などの自然条件、構造的条件との関係を分析した研究が多数発表されている。

近年、災害直後の状況の時間的変化を把握できるデータとして携帯電話位置情報が注目され、関本ら⁸⁾の東京都市圏における東日本大震災発災当日から翌朝にかけての帰宅困難状況の分析、宋ら⁹⁾の福島原発事故からの全国的な避難行動の分析がある。Baglowら¹⁰⁾は爆撃、地震、停電、コンサートなどが当日の携帯電話の通話の時間的、空間的な分布に与える影響の分析を行っている。より長期的な復旧過程に着目したものとしては、ハイチ国首都のポルトープランスを対象に、2010年1月のハイチ地震発生後から約半年間にわたる流出人口の時系列変化を分析したBengtssonら¹¹⁾やLuら¹²⁾がある。そこでは、地震発生までの長期間にわたる都市圏への人口移動パターンを反映する形で逆方向に流出人口が発生し、それが週間の変動を伴いながら、徐々に回復していく様子が示されている。

2.3 流動人口統計データと本研究の内容

NTTドコモ社はGPS付き携帯電話利用者にナビゲーション機能を備えたガイド・地図サービスを提供しており、その運用業務をZDCに委託している。ZDCは位置情報を個人が特定できない形で集計・統計処理して、1時間毎の250mメッシュ単位の滞在者数に集計した「流動人口統計データ」^①を作成して法人・商用サービスとして提供して

おり¹³⁾、本研究ではこのデータを用いる。

本データを用いて2011年3月～4月の1時間ごとの宮城県仙台市の総人口の推移を確認した結果、3月11日から3月14日はデータの採集状況が不安定であった。そこで、本研究では今後の分析では3月11日から3月14日の4日間は除外する。本データでは、端末ごとの前月の位置情報に基づく推定自宅位置を用いて、各時点の滞在人口の自宅からの距離分布を知ることができる。例えば自宅が50km以上の人口は、復旧支援活動やボランティアなどの目的で都市圏外から流入した人々である可能性がある。しかし、仙台市の総人口に占める50km以上の人口の総数の変化をみると、震災前の1.2万人が震災直後に0.5万人に減少し、3月下旬に0.8万人、4月上旬に0.9万人、4月下旬に1.1万人にとどまっている^②。これらは総人口の1%以下に過ぎず、前月後半以降の転入者である可能性もあるため、全体から切り出して分析することは困難であると判断した。以下の分析では自宅からの距離による区別を行わない滞在人口全体を用いている。

本研究では上述したように、平常時の都市活動の空間分布との対応を見るため、まず国勢調査及び企業事業所統計調査の地域メッシュデータに整合するように基準地域メッシュ(第3次地域区画)1kmメッシュへの集計を行う。人口が少ない地域を除き図-1に示す87のゾーンに集計した。図-1には震災前の昼間人口を示しており、仙台駅(ゾーン25)、あおば通駅(ゾーン15)勾当台公園駅(ゾーン14)

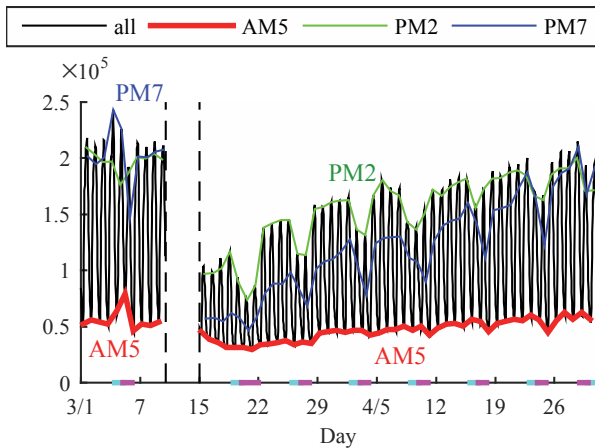


図-2 仙台市中心部の2つのゾーンの滞在人口の推移(人)

長町駅(ゾーン26)周辺の活動が多い。つぎに震災後の各時間帯の滞在人口について、震災前の対応する時間帯の滞在人口からの差分を取り、因子分析を用いて主要な空間成分を抽出し、その時間別の得点の推移を通して回復速度の違いを検討する。さらに各因子の空間パターンと社会・経済変数の空間パターンとの相関係数を確認し、各因子に対応する活動や機能を考察する。

3. 復旧過程の概観

まず、仙台市中心部の人口変動から、復旧過程を概観する。図-2は仙台中心部のゾーン25と15(仙台駅、あおば通駅周辺)の1時間ごとの人口変動を黒の実線で図示したものである。横軸は土曜、日祝日を太く着色している。図-2では、明らかに24時間単位での変動が見られるとともに、週末には人口が減少するという週間変動が観察される。多くの日について14時台の人口(PM2)が最も多く、逆に早朝5時台の人口(AM5)が最も人口が少ない。さらに夕方(PM7)の人口が最も多い日もみられる。そこで、以降ではこれら3つの時間帯の人口に着目して考察するため、図中にもこれらの時間帯の値だけをつないだ3本の実線を記入している。

図-2から、平常時(3月1日から10日、以下同じ)は昼間と夕方(PM2とPM7)において仙台中心部に流入・滞在して活動を行っていた人が多い。また週末は人口が減少するという週間変動が観察される。震災後は3月15日には10万人以上減少している。その後、時間の経過とともにPM2とPM7の人口が回復していき、4月26日前後にはほぼ回復が見られる。PM2に比べPM7の人口の回復が遅く、震災後の休日においてPM7がPM2を上回ったのは4月29日、30日のみであることから、夕方や休日に行われていたような活動は、回復の速度が遅いことが示唆される。

さらに、4月8日におけるPM2とPM7の人口が前日に比べ減少していることから、4月7日深夜23:32の余震(M7.2, 最大震度6強)の影響も確認できる。

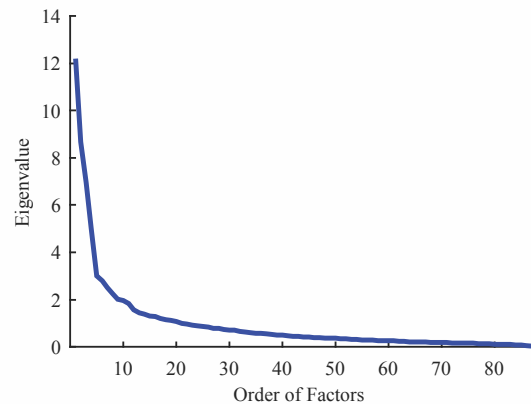


図-3 因子分析で抽出された固有値の分布

以上のように、流動人口統計データから震災後の数週間には都市活動や機能が縮小したが、4月末にはほぼ平常時の状況に回復したことが、また、余震による昼間と夕方時間の人口における回復の後戻りが起こったことが確認できた。

4. 復旧過程の構造分析

4.1 震災による差異の算出

ここでは、平常時に見られるどのような機能が縮小を余儀なくされ、どのような速度で復旧してきたのか、また復旧過程において初めて露見してきた動きはあるのかを考察する。

まず、87の各地域の時間帯の人口のスケールを揃えるため、対象地域における人口の時間平均値から、その空間的な分散の大きさを求め、標準偏差で各メッシュ、各時間帯の人口値を除した。次に各時間帯の震災後人口から平常時の同じ曜日(祝日は日曜)の同じ時間帯の人口を差し引いて、震災による変化量を求めた。

次に行方向に時間、列方向に地域を配置した行列である1368時間×87地域の二次元データに因子分析(S技法)を適用する¹⁴⁾。これにより、87地域間の時系列変動の類似性を少数の因子に集約したものが得られ、因子負荷量の類似性に基づいて地域をグループ分けすることができる。また、因子得点を用いて各因子の時系列的変動を把握できる。

因子の解釈を容易にするために因子軸のバリマックス回転を行った。因子分析で得られた全因子の固有値を図-3に示す。固有値1以上の因子は21個あるが、第6因子以降の固有値はなだらかに減少しているため、5つの因子を抽出する。この5因子までの累積寄与率は約37%となった。

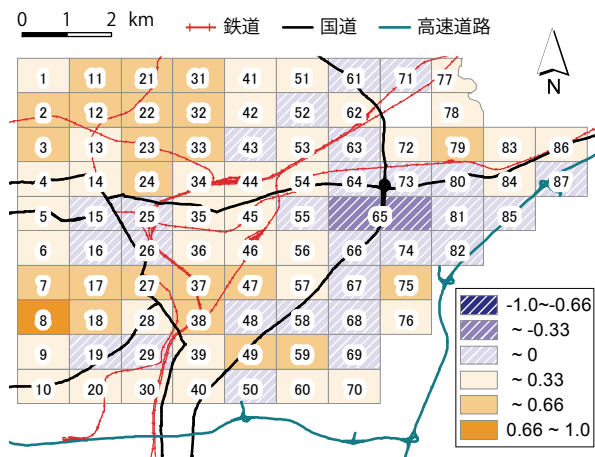


図4 因子1の因子負荷量の空間分布

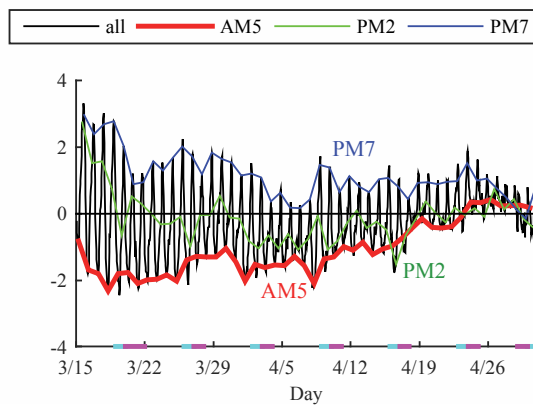


図5 因子1の因子得点の時間的変化

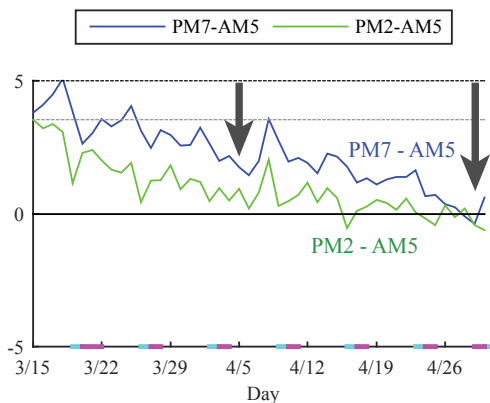


図6 PM2,PM7の因子得点のAM5との差異の変化(因子1)

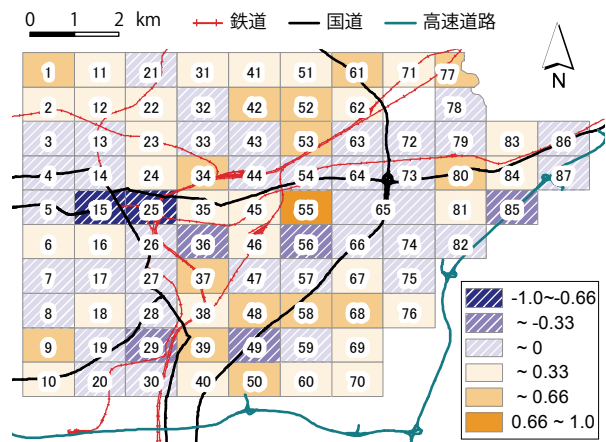


図7 因子2の因子負荷量の空間分布

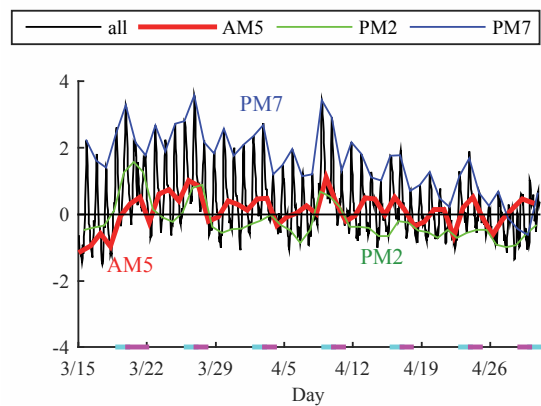


図8 因子2の因子得点の時間的変化

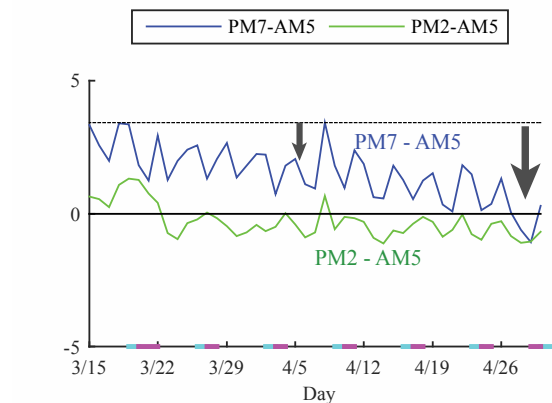


図9 PM2,PM7の因子得点のAM5との差異の変化(因子2)

4.2 抽出された因子の考察

i) 因子1: 外出行動の減少

図4をみると、因子負荷量が正の高い値を示したゾーンはゾーン8、ゾーン23、24などの住宅地である。一方、値が低い値を示したゾーンは従業地となっている。このことから因子1は、平常時に比べて発災後に従業地の滞在者が減

り、住宅地で増えるという外出行動の減少を表している。発災後の因子得点をプロットした図5をみると、PM7の係数が1日のうちで最も大きく、一貫して正であることから、夕方時間において従業地の滞在者が減り、その分住宅地にとどまっていることが推察される。逆にAM5の係数が1日のうちで最も小さく一貫して負であり、深夜から早朝の住宅地の滞在者が減少して都心などの従業地に集まっている。この両者の差異は1日の中での通勤の移動の量が平常

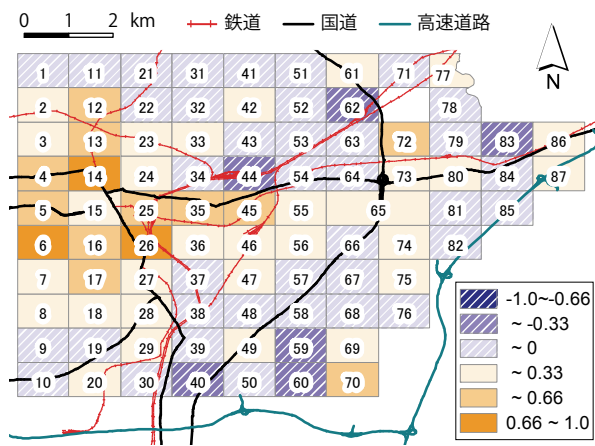


図-10 因子3の因子負荷量の空間分布

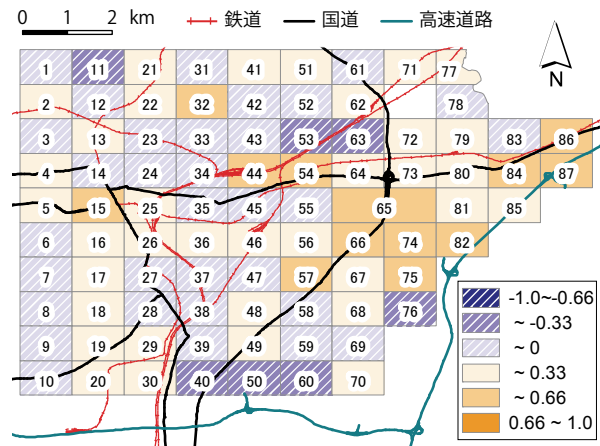


図-12 因子4の因子負荷量の空間分布

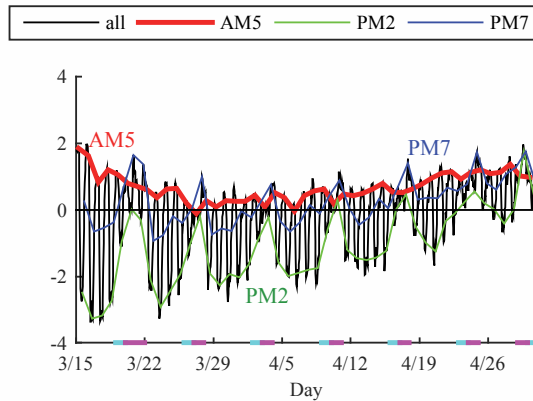


図-11 因子3の因子得点の時間的変化

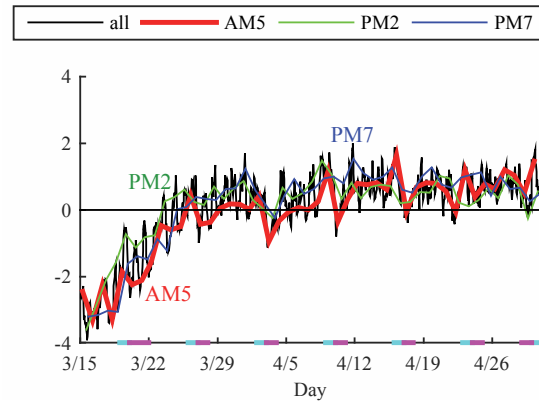


図-13 因子4の因子得点の時間的変化

時に比べて減少したことを表している。

PM2およびPM7の因子得点とAM5との差異をプロットした図-6から、通勤して夕方まで通勤先に滞在している人の変化量の絶対値を見ると4月5日に6割回復し、余震の影響を経て4月28日には完全に回復している。同様に通勤して日中に通勤先に滞在している人の変化量は4月5日に4分の3回復し、4月24日には完全に回復している。これらより、PM7の回復はPM2と比べて遅いこと、4月7日深夜の余震の影響により、PM2及びPM7の係数の回復が一旦後戻りしていることがわかる。

ii) 因子2：夕方活動の減少

図-7より、負の因子負荷量が顕著なゾーンは一番町のゾーン15、仙台駅西口周辺のゾーン25、郊外型温浴施設のあるゾーン85、ザ・モール仙台長町があるゾーン29であり、平常時に買い物や飲食を行うような場所となっている。一方、正の値が大きいゾーンはゾーン55, 58, 68の陸上自衛隊の駐屯地のある場所や、ゾーン9や61などの住宅地である。

次に、図-8の因子得点の時間的変化から、因子得点は24時間を周期として変動し、PM7の値が最大となっている。また、PM7の得点は1週間のなかで土日にピークがくることが多い一方で、AM5からPM2は得点が0に近い小さな値を

とっている。しかし、3月19～21日の週末においてはPM2は正の得点を取り、PM7の値に近づいている。

PM7およびPM2の因子得点とAM5との差をプロットした図-9からその絶対値の変化に注目すると、PM7への影響は3月中は高い水準で推移し、徐々に値が小さくなって4月5日に約半分回復している。4月8日には再び大きくなり、また回復傾向がみられて4月27日には完全に回復している。以上のことから、この因子は平常時の夕方の買い物や娯楽、飲食などの活動が発災後に制限され、その後回復していった様子を表しており、因子2は夕方活動の減少と解釈できる。

iii) 因子3：平日における昼間活動の減少

図-10から、高い因子負荷量を持つゾーンは、東北大学川内キャンパスのあるゾーン6や東北大学片平キャンパスのあるゾーン16、地下鉄北四番丁駅のあるゾーン14や地下鉄五橋駅のあるゾーン26などの、通勤・通学先やそのために利用する駅が含まれるゾーンである。逆に住宅地のゾーンは低い値を持っている。したがって、因子3を平日における昼間活動の減少と解釈し、平常時には通勤・通学先にいる人々が発災後には住宅地にとどまっていることを表現していると考えた。

因子得点の時間的変化を図-11で確認すると、全体とし

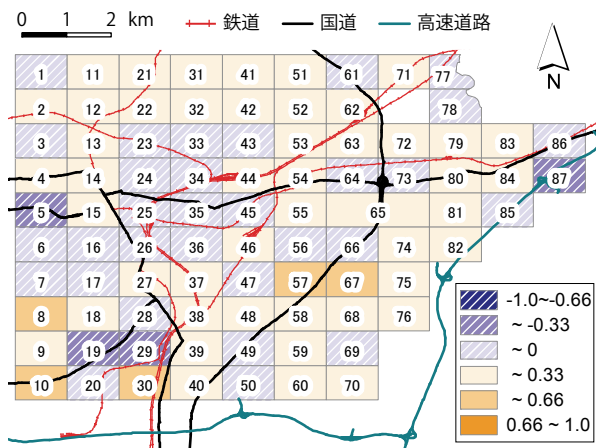


図-14 因子5の因子負荷量の空間分布

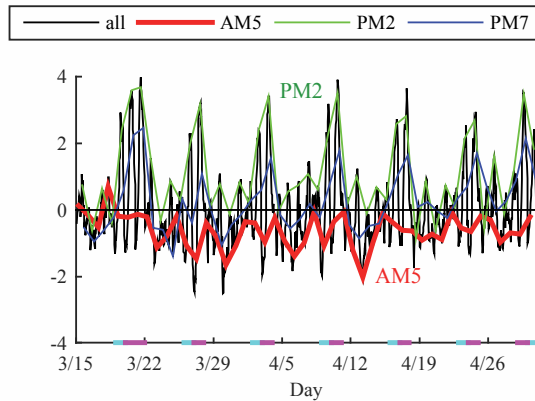


図-15 因子5の因子得点の時間的变化

て24時間の周期変動に従っており、PM2の値は平日のみが絶対値が大きいという強い週変動を持ちながら徐々に0に近づいている。AM5の因子得点との差異に着目すると、PM2の得点は3月29日に半分回復し、4月29日には完全に回復した。

iv) 因子4：居住機能の低下

因子負荷量を図-12で確認すると、対象地域の中でも津波被害の影響がある沿岸部周辺のゾーンで値が正の大きな値を示しており、内陸部では負の値が低い値を示している。よって、因子4は居住機能の低下と解釈でき、発災後に沿岸部の人々が内陸側に移動したことを表している。

因子得点の時間的变化を示す図-13より、発災直後にAM5、PM2、PM7をはじめ各時間帯で値が減少しており、その後回復している。時間帯間の違いは小さいが、PM2の回復が早くAM5の回復が遅い。これは、その場所で昼間に仕事や復旧作業を行うことに比べれば、再び居住して夜間も滞在できるようになるにはより長い期間を要していることを意味している。

どの時間帯の人口も3月15日を減少のピークにして3月29日までに回復し、その後は大きな変化がみられない。

v) 因子5：週末における昼間活動の減少

表-1 人口当たり従業者数と因子負荷量との相関係数

	因子1 外出行動 の減少	因子2 夕方行動 の減少	因子3 平日昼間 活動減少	因子4 居住機能 の低下	因子5 週末昼間 活動減少
建設業	-0.400	-0.309	-0.097	0.321	-0.054
電気ガス水道業	-0.200	-0.295	-0.141	0.105	-0.140
運輸業	-0.302	-0.127	0.058	0.378	-0.049
卸・小売業	-0.423	-0.369	-0.098	0.396	-0.138
飲食店・宿泊業	-0.233	-0.442	-0.189	0.132	-0.120
医療・福祉	-0.179	-0.263	-0.246	0.112	-0.092
教育学習支援業	0.016	-0.210	-0.449	-0.058	-0.152
公務	-0.182	0.192	-0.282	-0.136	0.070
全従業者数	-0.403	-0.377	-0.217	0.327	-0.151

注) 従業者数は企業・事業所統計(2006)、国勢調査夜間人口(2010)で基簿化

図-14で因子負荷量をみると、負の値をもつゾーンには、ザ・モール仙台長町があるゾーン29、三井アウトレットパーク仙台港周辺に多数の大型店があるゾーン87、宮城県立美術館や東北大学川内キャンパスがあるゾーン5、仙台市博物館があるゾーン6があり、大型商業施設や大学、美術館が多いゾーンである。他方、正の因子負荷量は、住宅地であるとともにスーパーやコンビニ、ホームセンターが存在しているゾーンが多い。平常時のように大型商業施設に行かずに、自宅から最寄りのスーパー等で必要な物を購入したり、または外出せずに自宅にとどまっていることに対応すると考え、因子5は週末における昼間活動の減少と解釈した。

因子得点の時間的变化を図-15で確認すると、週末をピークとする週変動と日中のPM0~PM2をピークとする日変動が観察される。PM7はPM2よりは小さいものの週末にピークを持つ同様の変動パターンを持っている。これを文化施設などでの週末における日中の行動が制約され、住宅地周辺に留まっていると解釈すると、この制約は4月末までほとんど回復していないことがわかる。

4.3 回復速度の考察

以上の分析から、発災後には平常時の機能が縮小したが、その回復スピードは異なることがわかった。「外出行動(因子1)」、「平日における昼間活動(因子3)」の回復が早く、「夕方活動(因子2)」、週末における昼間活動(因子5)」の回復が遅い。他方、沿岸部を中心とした「居住機能の低下(因子4)」というパターンが発災後に新たに露見したことが明らかになった。

4.4 平常時の都市機能との関連性

平常時の都市構造を理解するために、2006年事業所・企業統計調査の1kmの地域メッシュ統計データを用いて都市活動の分布を表す9つの従業人口指標を作成した。各指

標は、そのメッシュでの2010年国際調査の夜間人口で除して、産業の中心性の強さを表す指標とした。

これらの9つの指標と前節の4因子の因子負荷量との相関係数を表-1に示す。これより、「外出行動(因子1)」は全従業者数との相関係数が-0.403、卸売・小売業との相関係数が-0.423となっており、全般的な勤務先や買い物先の分布と関係がある。また、「夕方の活動(因子2)」は飲食店、宿泊業との相関係数が-0.442、「平日における昼間活動(因子3)」は教育・学習支援業との相関係数が-0.403でありそれぞれ予想された機能に対応している。「週末における昼間活動(因子5)」は9つの指標との強い相関関係がみられなかったが、具体的な場所を確認すると、大型商業施設や文化施設との関係が示唆された。

5. おわりに

本研究では、東日本大震災前後の携帯電話位置情報データから都市活動や機能等の空間パターンを把握できることに着目し、復旧過程の空間パターンの分類とそのスピードの違いを把握することを目指した。1時間毎に集計された携帯電話位置情報を用いて、災害後に都市内で低下する活動や機能を空間パターンに基づいて分類し、それぞれの回復スピードの違いを確認できた。相関分析の結果、各空間パターンは平常時の従業人口分布との関係性が見られた。これより、震災リスクを抱える他の都市においても、従業人口分布に基づいて都市構造分析を行っておくことにより、被災による都市活動の低下とその回復の空間的なパターンを概略的に想定できる可能性がある。それらは、支援物資の送付先ごとの配分やインフラの復旧順序の計画を事前に立案する際に役立つと考える。

本論文では、位置情報データの使用契約期限である2015年3月末までの作業で得られた分析結果を報告した。現在までのところ、インフラの停止状況や避難所における緊急支援物資のニーズと因子負荷量との関連性について、予期した結果は得られていない。

位置情報の信頼性が低下した3月14日中にほぼ回復した商用電力は別として、水道や交通インフラの復旧状況、緊急支援物資のニーズについて、異なる空間単位間の変換を行って、今後とも継続的に分析を試みたい。

謝辞 本研究には、日本学術振興会科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究24656299)、東北大学災害科学国際研究所プロジェクト研究(拠点B)の支援を受けている。計算および図表作成には、東北大学大学院生加藤雅俊君、山口裕通君の助力を得た。

補注

(1) 「流動人口統計データ」には個人の属性にかかわる情報は含まれていない。データの作成プロセスや代表性などの技術的情報は、ZDC社Webページ¹³⁾から問い合わせが可能である。本研究開始以降、NTTドコモ社も携帯電話の位置情報を集約した「モバイ

ル空間統計」の提供を行っており¹⁵⁾、500mメッシュごとの人口分布を知ることができる。

(2) 分析期間の最後の4/29(祝)と4/30(土)は例外的に50km以遠からの仙台市内滞在者が1.5および1.6万人あり、震災前の値を初めて上回った。ボランティアや新幹線復旧イベント等への来訪者が多く含まれているものと推察される。

参考文献

- 1) Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A. and von Winterfeldt, D. (2003): A framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.
- 2) Science & Engineering Research Support Society: International Journal of Disaster Recovery and Business Continuity, English, <http://www.sersc.org/journals/IJDRBC/>, 2015年8月6日
- 3) 作野広和(1992): 山陰地方の等質地域・結節地域とその変化, *地理科学学会, 地理科学* 47(2), pp.67-90.
- 4) 根田克彦(1985): 仙台市における小売商業地の分布とその変容-1972年と1981年との比較, *日本地理学会, 地理学評論 Ser.A* 58(11), pp.715-733.
- 5) 富田和暁, 河野孝(1990): 東京大都市圏における社会・経済的地域構造の変容, *地理科学学会, 地理科学* 45(2), pp. 60-76.
- 6) 土井健司, 宮津智文, 原伸行(1997): 業務トリップから見た東京圏の産業・地域構造の変容に関する分析, *土木学会, 土木計画学研究・論文集, Vol.41*, pp.243-251.
- 7) 伊藤悟(1997): 都市の時空間構造—都市のコスモロジー—, *古今書院*, pp.131-162.
- 8) 関本義秀, 中村敏和, 増田祐介, 金杉洋(2012): 大規模なGPS位置情報をもとにした東京都市圏における震災時の行動分析, *土木学会, 土木計画学研究・講演集, Vol.45*.
- 9) 宋軒, 関本義秀(2012): 160万人の長期GPS移動データに基づく災害避難行動の分析とシミュレーションモデル構築に関する研究, 平成24年度国土政策関係研究支援事業 研究成果報告書
- 10) Bagrow J. P., Wang D. and Barabasi A.-L. (2011): Collective response of human populations to large-scale emergencies, *PLoS ONE*, 6(3), e17680.
- 11) Bengtsson L., Lu X., Thorson A., Garfield R. and von Schreeb J. (2011): Improved Response to Disasters and Outbreaks by Tracking Population Movements with Mobile Phone Network Data: A Post-Earthquake Geospatial Study in Haiti, *PLoS Medicine* 8(8), e10010838.
- 12) Lu X., Bengtsson L. and Holme P. (2012): Predictability of population displacement after the 2010 Haiti earthquake, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(29), pp.11576-11581.
- 13) 株式会社ゼンリンデータコム: こんな地図サービスもあります「その他」, 日本語, <http://www.zenrin-datacom.net/business/other/#statistic>, 2015年8月6日
- 14) 田中豊, 脇本和昌(2004): 多変量統計解析法, *現代数学社*, pp.179-200
- 15) ドコモ・インサイトマーケティング: モバイル空間統計, 日本語, http://www.dcm-im.com/service/area_marketing/mobile_spatial_statistics/, 2015年8月6日