

災害後の人口移動の空間相互作用が復興に及ぼす影響 —兵庫県南部地震を対象とした分析—

Effect of Spatial Interaction in Immigration After Disaster
- A Study on the 1995 Kobe Earthquake -

上田 遼¹

Ryo UEDA¹

¹ (株)小堀鐸二研究所 構造研究部

Research Division of Structural Engineering, Kobori Research Complex Inc.

Population dramatically decreases after severe earthquake, and it sometimes leads to disparity in recovery. Analysing the case of the Kobe earthquake, this research represents that the recovery process is influenced by strength of tie in population movement, so called spatial interaction. Parameter estimations based on the gravity model are carried out. It shows that movement from the metropolitan district in Osaka attenuates by spatial distance. Power value of distance, which indicates the resistance toward far movement, increases directly after earthquake. To discuss the effect of interaction between concentrated metropolitan area and others systematically, numerical experiments of population movement in some patterns of large and small cities, are carried out. In order to mitigate the spatial disparity problem, it is necessary to consider the balance of city scale, in other word, gravity equilibrium.

Keywords: Gravity Model, Spatial Interaction, Recovery, Population, Resilience, the 1995 Kobe Earthquake

1. はじめに

激甚災害後は被災地の人口が著しく減少し、回復に地域格差が生じることも少なくない。阪神淡路大震災後、被災地域において深刻な人口減少が生じ、一部の区においては長期間にわたり人口が低迷したことが知られている(例えば¹⁾。長田区では今日においても震災前の人口水準には至っていない。復興計画の策定上、復興に影響を及ぼす要因のモデル分析は重要である。本研究では、人口変動要因としての人口移動の構造に着目して検討を行う。

既往研究(例えば²⁾では、主に地域の人口の減少・回復(転出入等の結果としての総人口の変化)を対象に分析することが行われている。この人口変動の多くは、地震および復興を契機とした転入・転出によって生じると考えられるが、地域間相互の転出入の構造まで踏み込んだ研究は少ない。個々の地域の人口推移の検討に比べ、地域間相互の人口移動ではデータ量、分析としてはより複雑となるが、復興を深く理解する上で重要と考える。既往研究²⁾によれば、地域の回復力と大都市との距離に相関がみられ、地域の回復力の格差の要因と考えられる。定性的には各区の立地や大都市とのネットワークの緊密さが復興の特性に影響を与えたと考えられ、人口の移動の量の空間依存性、いわゆる空間相互作用の存在が示唆されたが、より踏み込んだ分析的検証必要であろう。

空間相互作用の研究は、後述のようにこれまで平常時の人口移動への適用が多く、激甚災害後に同様に適用可能であるか、また地震被害の違いがどのような影響を及ぼしているか等に関して、十分には明らかにされていない。震災後の人口移動の空間相互作用の分析は、復興計

画上有用であると考えられる。それにより、主に平常時を対象としてきた空間相互作用に関する既往研究に対して、相補的知見が得られると共に、重力モデルの災害時への適用性の拡大が期待できる。また、空間相互作用を人口還元力との関係から論じること新しい観点となる。

そこで、本稿では震災後の空間相互作用の分析を目的として、重力モデルを用いて兵庫県南部地震後の神戸市内外の人口移動を分析するとともに、既往のモデルとの関係、整合性を解析的展開を通じて論じる。また近年では、全国の人口減少問題とも関連して大都市への人口の過度な一極集中への対策が検討されている中、本論では大都市への人口集中が復興に及ぼす影響についても指摘する。

(1) 既往研究

上田²⁾は、地震応答解析の質点系モデルのアナロジーを用いて人口の減少と回復の挙動を分析する方法を提案し、実際の人口データに対する一定の適用性を示した。これは、阪神淡路大震災後の神戸市各区を対象に、人口の変化を衝撃力を受けた過減衰の質点系モデルの変位とみて分析を行う手法^{補注}であり、建築物の角振動数や減衰および初速度が評価対象のパラメータとなった。分析の結果、回復の速さの工学的指標とした角振動数が、大都市(大阪)からの距離が小さいほど大きいことがわかり、例えば大都市に近い東灘区などでは回復が速やかとなり、大都市から遠い長田区などでは回復が滞ったものと理解された。

人口移動を空間相互作用モデルによって分析する研究は、平常時においてはさまざまな既往研究³⁾⁴⁾⁵⁾があり、

石川⁵⁾は日本の経済成長期における人口移動の変化と産業の関係等を論じている。青木・大佛⁶⁾は、ロジットモデルと空間影響モデルを連動させて居住地選択行動をモデル化しており、一連の研究によりカテゴリー変量ほか多様な説明変数について考察している。栗田⁷⁾はエントロピーモデルから無制約重力モデルへの導出をもとに重力モデルに新たな解釈を加えるとともに、パラメータ推定方法についても提案を行っている。本研究は、用いる空間相互作用モデルは基礎的なものであるが、研究対象の違いから新たな知見が得られると考える。

阿部⁸⁾は、東日本大震災の被災3県を対象として、被災後の他県への転出移動に重力モデルが適用できることを指摘し、福島とその他の県の比較などを行っている。Gröschl⁹⁾は、諸国の災害後5年、10年の多国間移動における空間相互作用に着目し、統計的検定から被災国からの出国者数が有意に増加することを示したが、定量的な分析には踏み込んでいない。水谷¹⁰⁾は、関東大震災後における東京から他の道府県への人口流出者数に重力モデルが適用できることを指摘している。ただし、既往研究では震災前と震災後の比較は行われておらず、また、距離のべき乗を1.0に固定していること等から、知見を直接応用すること、定量的な比較を行うことは困難である。災害後の移動行動に関しては、阪田ほか¹¹⁾¹²⁾が、神戸市灘区における被災者の避難所の選択行動の調査結果を分析し、選択においてポロノイ分割による圏域構造が存在すること、および選択率には避難所の面積・距離に基づきハフモデルが適用できることを指摘している。これに対して本研究は、避難所の選択ではなく長期的な移住を対象としているとともに、対象とする空間も広域である。

被災者の居住に関しては、木村ほか¹³⁾¹⁴⁾は住民基本台帳データと独自の調査から、すまいの再建パターンを類型化している。佐藤ほか¹⁵⁾は、住宅再取得意向アンケート調査に基づき、選好度の最大化や仮設住宅の計画検討に有用なシミュレーション手法を提案している。

池田・中林¹⁶⁾は、災害が人口変動、商工活動に及ぼす影響を検討している。立木ほか¹⁷⁾は、被災者アンケート等に基づき被災者の長期的な生活復興過程や復興感の構造をモデル分析している。梶谷¹⁸⁾は、人口構造における長田区と神戸市・県の階層性に着目して人口変動の要因を分析している。

以上のように、災害の空間相互作用については一定程度知られているものの、空間相互作用が被災地の人口増加や復興に及ぼす影響について重点的に検討した研究、及びそのための区・市町村単位での詳細な検討は少ない。本研究では、被災地と全国、及び被災地内における地域間の空間相互作用を検討するとともに、より長期的な観点から、災害直後の空間相互作用のみならず、経年変化や、最終的な復興格差についても着目して議論する。

(2) 研究の流れ

本研究では、研究手法として、基本的かつ汎用的な空間相互作用モデルのひとつである無制約型重力モデルを用いる。分析は、神戸市-全国都道府県間のマクロ的な分析と、神戸市各区-市町村間の詳細分析の2段階を経ている。このように段階を分けた理由は、一つには着目する集計単位や対象範囲を変えることで、集計単位問題²⁾も含め、一面的な分析、評価を避ける意味を持つ。また、データ上の整備状況により、神戸市-都道府県の移動のマトリクスデータは毎年のデータが得られるため時系列的考察に適するのに対して、神戸市各区のデータは集

計単位が詳細であることの引き換えに5年ごとの国勢調査に依拠するため、時系列的な考察には制約があり、相互の観点を補い合うためである。

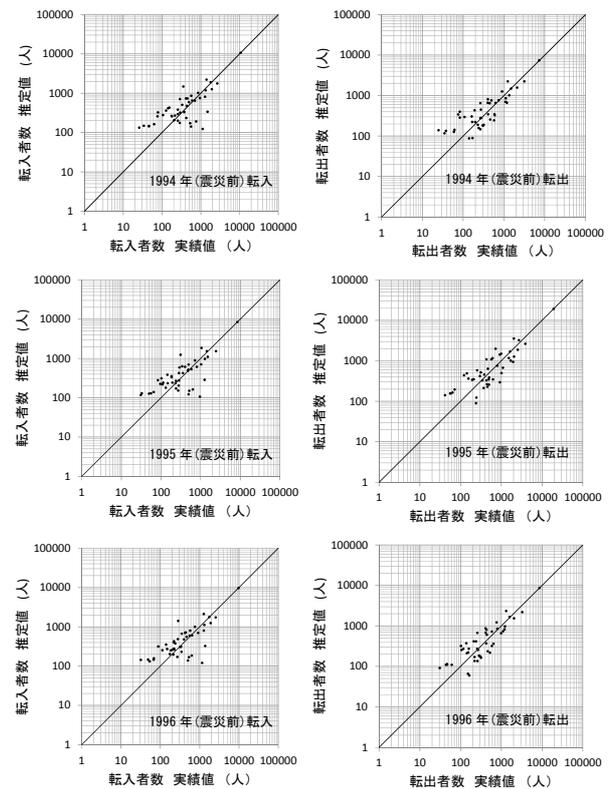


図1 神戸市の転入・転出者数の推定値・実績値の比較 (1994年～1996年までを抜粋)

2. 神戸市と全国の都道府県のマクロな空間相互作用

ここでは、はじめに神戸市と都道府県のマクロな空間相互作用に着目し、人口移動に関する分析を行う。人口データは、毎年10月の住民基本台帳人口の人口転入・転出者数¹⁹⁾とする。なお、神戸市と兵庫県(神戸市外)との空間相互作用は、距離の評価方法が一意とはならないため、神戸市-兵庫県間は分析の対象としていない。したがって神戸市と46都道府県間の空間相互作用を対象とした。なお、市および都道府県の距離の評価は、代表地点として市庁、都道府県庁の位置を用いた。

(1) 重力モデル

重力モデルは、2点間の人口移動(または利用者数等)を万有引力の法則のアナロジーから説明するモデルである。人口移動が両地域の人口の積に比例し、距離の2乗に反比例するというオリジナルの基本形をはじめとして、今日までにさまざまな影響要因を考慮したパラメータおよび解析手法が考案されてきている。本研究では、基本形に加えて距離のべき乗数をパラメータとした重力モデルを用いて都道府県*i* (*i* = 1, 2, ...)から神戸市への人口転入者数のモデルは、

$$t_i = G_{IN} \frac{m_i m_0}{d_{i0}^{\beta_{IN}}} \quad (1)$$

とした。

ここで、 G_{IN} は転入における比例定数、 m_i は転入元の

都道府県の人口、 m_0 は神戸市の人口、 d_{i0} は市(県)庁間の距離、 β_{IN} は距離のべき乗パラメータである。これらのパラメータを後述の手法により、パラメータを1年ごとに推定した。

同じく神戸市から都道府県 j ($j=1, 2, \dots$)への人口転出者数のモデルは、

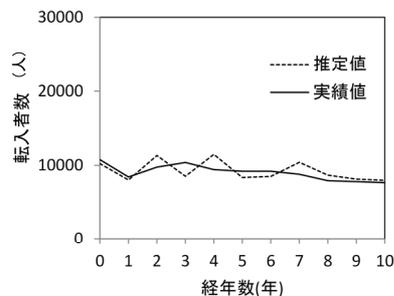
$$t_j = G_{OUT} \frac{m_0 m_j}{d_{0j}^{\beta_{OUT}}} \quad (2)$$

とした。ここで G_{OUT} は転出における比例定数、 m_0 は神戸市の人口、 m_j は転出先の都道府県の人口、 d_{0j} は市(県)庁間の距離、 β_{OUT} はべき乗パラメータである。

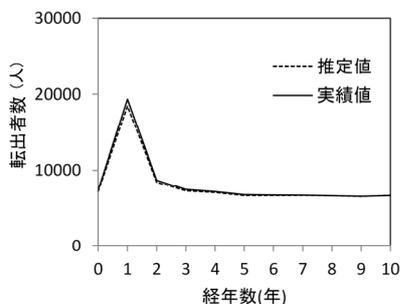
(2) パラメータの推定

地震災害が空間相互作用に及ぼす影響を検討するため、地震後の毎年の人口データに基づき、式(1)、式(2)を用いて、各年の G_{IN} 、 G_{OUT} 、 β_{IN} 、および β_{OUT} を推定した。べき乗パラメータ (以下適宜単に β と表記) がパラメータとなっており、非線形最小二乗法となるため、 β を漸増させて、推定値と実績値の誤差の二乗和が最小となるように、 β を小数点第2位まで推定した。

モデルの妥当性を確認するため、震災前の1994年、震災のあった1995年、及び1年後の1996年について、転入者数・転出者数の推定値と実績値を縦横の軸に比較して図1に示す。多少の誤差、ばらつきはあるが、推定値と実績値は概ね対応しており、特に震災を境に乖離するような変化はない。したがって、災害後の人口移動にも重力モデルの関係は成立していると考えられる。また、1997年以降も同様に適合することを確認している。ここで、神戸市-大阪府間の移動を例として、大阪府から神戸市への転入者数と、神戸市から大阪府への転出者数について、推定値と実績値を比較して図2に示す。ここで経年数0は震災前1994年10月の値を表し、経年数1は震災後約1年目の1995年10月の値を表す。(a)に示す転入者数の推定は、年ごとに若干の誤差はあるが、転入者数



(a) 転入



(b) 転出

図2 神戸市-大阪府間の転入転出者数の推定結果と実績値

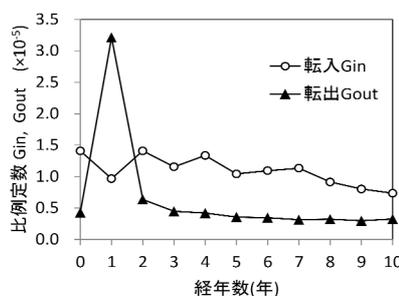
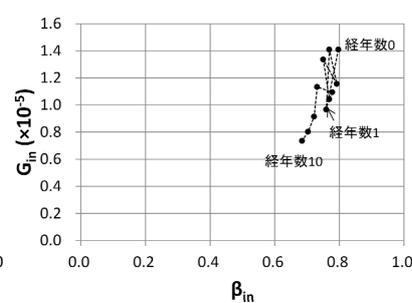


図3 重力定数(G)の推移



(a) 転入

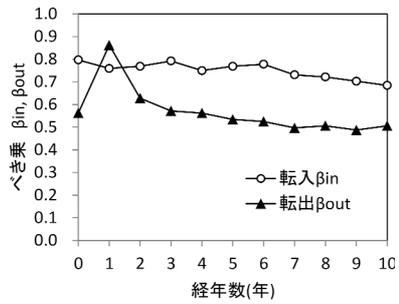
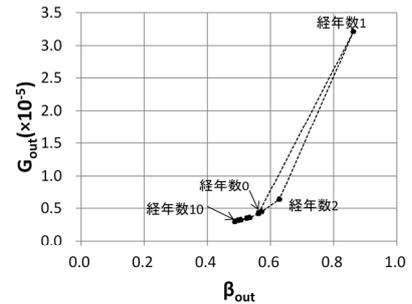


図4 べき定数 β の推移



(b) 転出

図5 β と G の変動と相関

が概ね一定している傾向は大局的に再現され、実績値と対応している。また、(b)に示す転出者数の推定は、実績値と概ね合致しており、増減の時系列も対応している。経年数1年目に転出者数が増大しており、震災による影響が表れている。

(3) 重力定数およびべき乗数

得られた重力定数 G_{IN} 、 G_{OUT} 、およびべき乗数 β_{IN} 、 β_{OUT} の経年変化を検討するため、横軸に震災からの経年数をとって、 G 、 β それぞれ図3および図4に示す。図4に示すように、転出の重力定数 G_{OUT} は、震災前に 0.4×10^{-5} 程度であったが、1年後に 3.2×10^{-5} に顕著に増大しており、前述の大阪府の例と同様に、他県への疎開転居者の影響がみられる。翌2年目では震災前と概ね同水準のやや高値となり、その後漸減している。これに対して、転入の比例定数 G_{IN} については震災前に比べ1年後に若干減少している傾向も見受けられるが、前後の変動幅からみて有意とまでは言えず、震災の影響は明確には表れていない。したがって、震災が生じて常にも一定以上の転入者が発生していることがわかる。次に、図5に示すように、距離のべき乗数 β の推移については、転出における β_{OUT} は震災前は0.55であり、1年目には0.88に顕著に増大しており、これは G_{OUT} と同様の変化である。そのため、被災後には G_{OUT} の増大によって転出者の絶対数が増大するとともに、距離逓減の分布も変化することがわかる。 β_{OUT} の増大は、転出者がより近地に集中する傾向を表す。これは、転出者の距離に対する抵抗感を表し、震災時の転出には比較的近地が選好されると解釈できる。これは、被災状況下における移動コストに加えて、避難者の生育地や近親者のつてなど、災害時における選好理由を考えれば、妥当な結果であると考えられる。なお、関東大震災を対象とした既往研究¹⁰⁾においても、被災者の意思決定における避難者の出身地の影響について、言及されている。

(4) パラメータ相互の関係

次に、 G と β の関係を検討するため、両者の年々の値を2軸平面上にプロットして図5に示す。プロット上に、代表年について経年数を付記している。(a)に示す転入のパラメータ(G_{IN} , β_{IN})の相関は、値の変動の絶対量が小さいために必ずしも明瞭ではないが、(b)に示す転出のパラメータ(G_{OUT} , β_{OUT})には正の相関が見受けられる。転出の経年数1年目には G_{OUT} , β_{OUT} ともに増大し、その後は徐々に左下がりとなる。すなわち、転出者数の比例定数が大きいほど、べき乗が大きいため、距離通減が大きくなる、あるいは近地を相対的に強く選好するようになるといえる。

移動者数が距離通減する特性を確認するため、1994年～1997年に関して、式(1)(2)により距離に対する転入者数、転出者数を評価した。図6に示す。ここで、移動者数の絶対数は移動元・移動先の人口に依存することから、条件を揃えるため式(1)(2)の m_0 は神戸市の人口とし、転入元、転出先の人口(m_i , m_j)はいずれも10,000に規準化して評価した。(a)転入に示すように、1995年(経年数1)に転入者数は微減しているが、変化は小さい。他方(b)転出に示すように、1995年の転出が、他の年に比べて突出した値と傾きを持っている。また、翌1996年以降には概ね震災前と同様の値に復帰している。

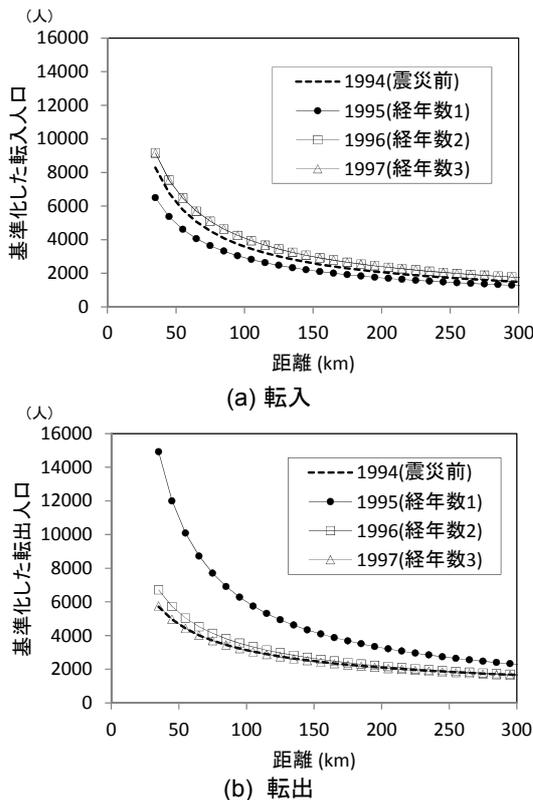


図6 転入者数・転出者数の距離通減と経年変化

3. 神戸市内9区と全国市区町村の空間相互作用

次に、神戸市内におけるローカルな復興の格差の要因を分析するため、神戸市内9区と全国市区町村間の空間相互作用の分析を行う。神戸市9区を図7に示す。それぞれの区の転入者数、転出者数は、住民基本台帳(神戸市)²⁰⁾により毎



図7 神戸市9区

年10月の数値が得られている。ただし、これは市・内外の移動人数は統計されているが、転入元、転出先の市区町村の区別はなされていない。転入元、転出先を区別したデータは、国勢調査²¹⁾により平成7年と平成12年(1995-2000年)の各10月の間の人口移動者数データ(5年前の常住地域人数)が得られており、これを用いた。分析対象は、神戸市内の区も含め、およそ100市(区)町村となっている。

(1) 神戸市内の人口動態

モデル分析に入る前に、基礎データを用いて人口動態を簡潔に示す。また既往調査^{たとえ22)}においても、人口の移動先、移動元に関する分析は行われていないため、その点にも言及する。

神戸市内において、震災の被害が比較的軽微であった北区、西区、垂水区を除いた、概ね一直線に並ぶ6区の人口推移を、東灘区から順に並べて図8に示す。図は左右両軸によって示しており、棒グラフは人口推移(右縦軸)を表す。折れ線グラフは、転入者数・転出者数(左縦軸)である。まず、人口の推移については、東灘区、灘区など大都市に近い東側の区では、震災直後人口減少した後に比較的順調に人口が回復しているが、長田区、須磨区など西側の区では人口が低迷していることが確認できる。次に、震災1年目に転出者数(総数)が増加する点がいずれの区も共通しており、これは前述2章の分析と対応する傾向が確認できる。2年目以降は、東灘区などの回復が順調な区では転入が転出を上回っているが、人口が低迷した区では、転出と転入がほぼ同程度となっており、人口は増加していない。

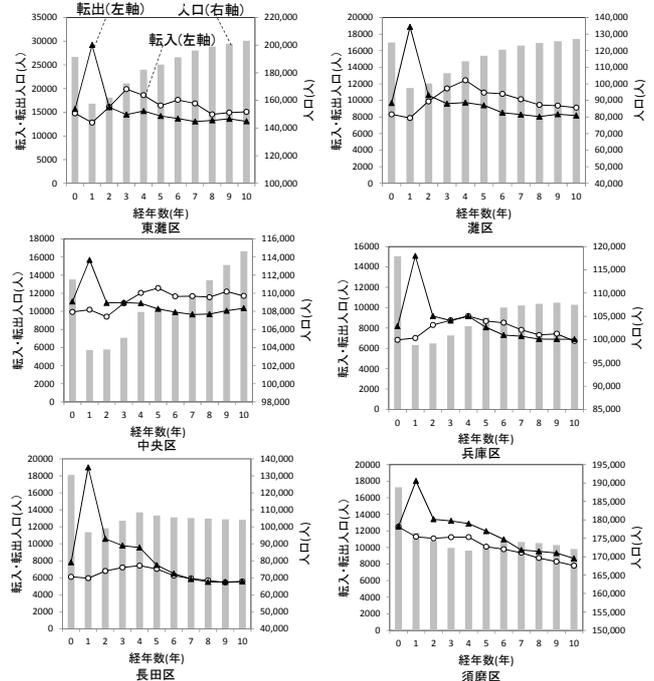


図8 神戸市各区の人口推移と転入・転出者数の推移

(2) 人口の移動先・移動元の分析

これらの人口増加(または低迷)をもたらす人口移動の要因を把握するため、前述の国勢調査²¹⁾(1995-2000年)に基づき、各区への転入者の移動元と転出者の移動先を確認した。その内訳を積み上げグラフとして、大都市(大阪圏)からの距離(近さ)の順に左から並べ図9に示す。

まず、(a)に示す転入者数では、総数が大都市からの距離が離れるにつれて減少することがわかる。内訳としては、神戸市内の移動者数はいずれの区も有意な差は見当たらない。一方、左記以外の神戸市外からの転入者数は区の違いが大きい。神戸市外からの移動元としては、大阪府、京都市、奈良県、比較的多くを占めている。これらに次ぐ「近隣市」は、姫路市、尼崎市、西宮市、明石市、芦屋市の合計である。

(b)に示す転出者数においては、転入者数ほど明確ではないが、同様に大都市からの距離が離れるにつれて減少する傾向が見てとれる。また、神戸市内の移動者数はいずれの区も同程度となっており、市外の移動者数は、大局的には転入同様に大都市に近い区において多い。

大都市に近接する区において転入者数、転出者数ともに多いことは次のように理解される。人口増加および回復は、人々が当該地域を集中して選好することで転入者数の一方が増大するのではなく、空間相互作用によって転入転出がいずれも大きくなる中で、その差分が人口の増減に影響を及ぼすと考えられる。転入(a)と転出(b)の差分(転入超過)が実質的な人口増に寄与するため、転入超過数を(c)に示す。大都市に近いほど大きな正の値を取り、兵庫区から長田区にかけて負値に反転することが確認できる。

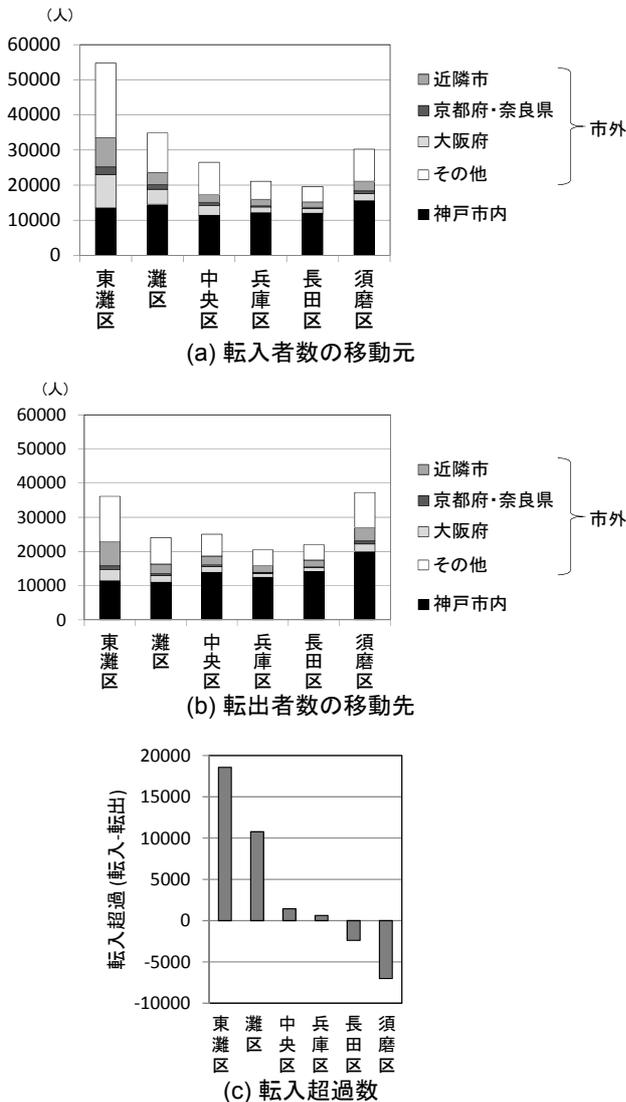


図9 転入・転出の地域内訳と転入超過数

(3) 重力モデル

ここで、空間相互作用の検討のため、国勢調査 1995-2000年のデータを用いて、前章の都道府県を対象とした求解方法と同様に、重力モデルによる検討を行った。1995年については、震災後の調査であることに留意する。

各市区*j*から神戸市*i*区への人口転入のモデルは、

$$t_{ji} = G_{iIN} \frac{m_i m_j}{d_{ji}^{\beta_{iIN}}} \quad (3)$$

とした。ここで、 G_{iIN} は比例定数、 m_j は転入元の市町村*j*の人口、 m_i は神戸市*i*区の人口、 d_{ji} は庁舎間の距離、 β_{iIN} は距離のべき乗パラメータである。

同じく転出のモデルは

$$t_{ij} = G_{iOUT} \frac{m_i m_j}{d_{ij}^{\beta_{iOUT}}} \quad (4)$$

とした。 G_{iOUT} は比例定数、 m_i は神戸市*i*区の人口、 m_j は転出先の市町村*j*の人口、 d_{ij} は庁舎間の距離、 β_{iOUT} は距離のべき乗パラメータである。べき乗パラメータは同様に小数第2位まで求めた。

モデルの推定値の対応の確認のため、実績値と推定値を比較して、転入者数、転出者数をそれぞれ図10及び図11に示す。一定の誤差があるが、いずれの区も大局的に対応していることが確認できる。

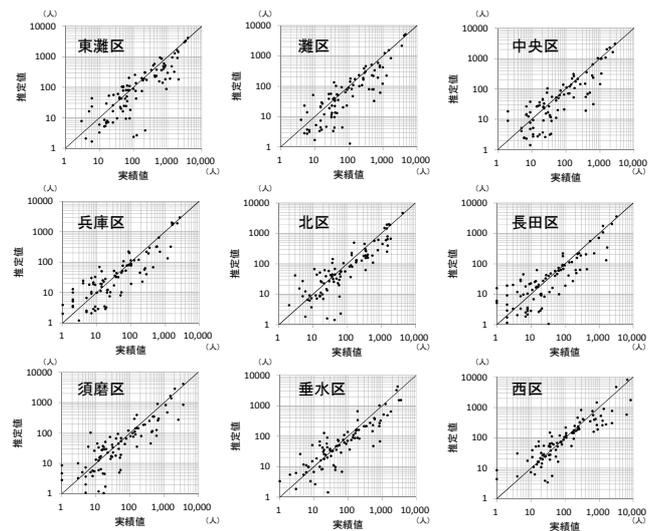


図10 各区-市町村間の転入者数の推定値・実績値の比較

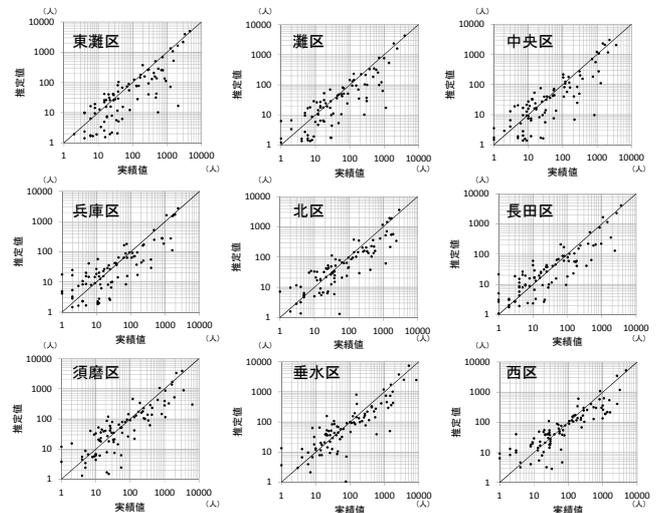


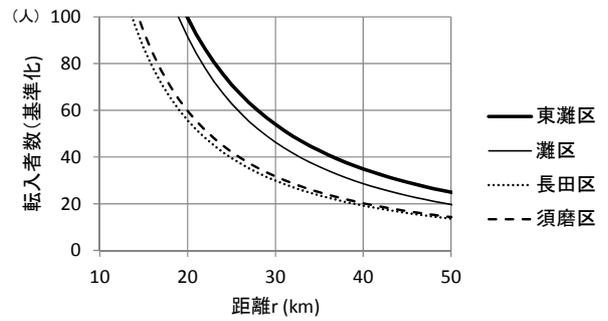
図11 各区-市町村間の転出者数の推定値・実績値の比較

(4) パラメータ推定及び地震被害との関係

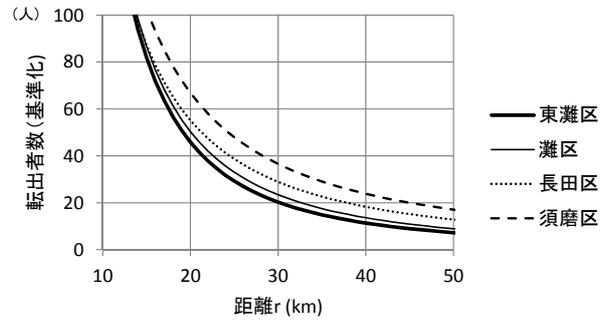
得られた重力定数 G 及びべき乗 β を図 12 に示す。図 (a) に示す β の値は 1.5 から 2.0 程度の値となっている。また、回復が順調であった区において必ずしも転入の重力定数 G_{IN} が大きくないが、これは重力モデルの大小が β とともに決定されるためである。(b) に示すように、重力定数とべき乗には一定の相関がある。

地震被害および人口変動が大きい主な区について、得られた重力モデルの推定値(転入・転出)を、距離との関係をプロットして図 13 (a)(b) に示す。ここでは、人口規模等の条件をそろえるため移動元、移動先の人口をいずれも 10 万人に規準化している。回復が順調であった東灘区、灘区では、回復が停滞した長田区、須磨区に比べて、転入者数は多く転出者数は少なくなっており、実績値を反映した有意な推定結果と考えられる。転入者数について大阪圏との距離である概ね 30km 程度の位置において比較すると、東灘区、灘区は、長田区、須磨区に比べて転入者数すなわち人口の吸引力としておよそ 2 倍となっている。

また、これらの重力モデルは、大小の違いはあるが距離の変化に対して交わることはほとんどなく、概ね相似になっている。重力定数又はべき乗の一方のみが変化してはこのような関係にはならず、前述のように重力定数とべき乗が相関をもっているためと考えられる。

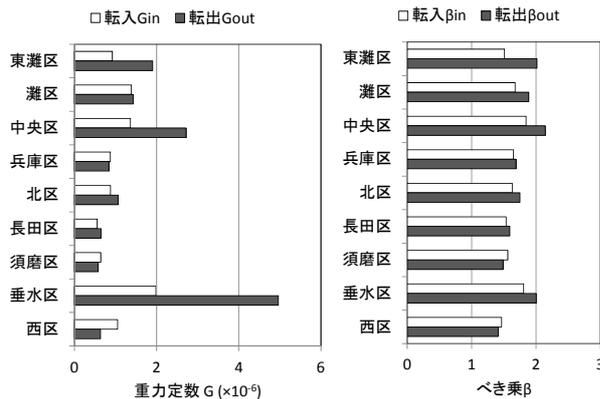


(a) 転入

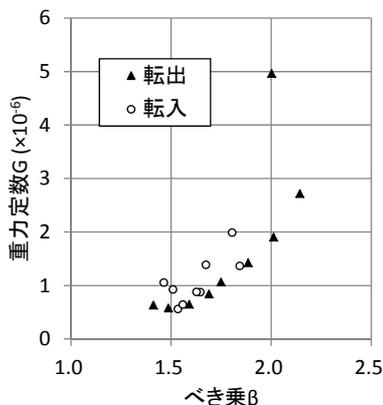


(b) 転出

図 13 神戸市各区の重力モデルにおける距離通減 (転入・転出)



(a) 各区の推定結果



(b) 重力定数とべき乗の関係
図 12 各区の重力定数とべき乗

(5) 大都市との空間相互作用および地震被害の影響

大都市との空間相互作用および距離との関係を分析するため、代表として大阪市から各区への転入者数と大阪市への転出者数を、距離との関係を取り、図 14 に示す。ここで、個々の区の人口規模の違いを考慮し、転入・転出者数の実績値を、各区の人口を 10 万人に規準化している。大阪市からの転入者数には明確、急峻な距離通減が現れている。一方、大阪市への転出者数の距離通減は、大局的にはみとめられるが緩やかであり、結果として、転入の影響が大きく現れたと考えられる。

地震被害が重力モデルに及ぼす影響の評価は、分析上、予測上有用である。そこで、(5)式によって、被害の影響を回帰分析した。大阪市との人口移動者数および人口に実績値を用いて、重力定数および死亡率²³⁾から算出の係数を回帰分析した。ここで、べき乗は簡単のため、既に求めた値の概ね平均として共通の値(1.5)を用いた。

回帰分析の結果を表 1 に示す。重力定数、死亡率いずれの変数も有意となっており、死亡率の係数は正数であるため、死亡率が大きいほど、回復が大きくなることを表している。

$$u_{ij} = G \frac{m_i m_j}{d_{ij}^\beta} + H x_j \quad (5)$$

u_{ij} : 大阪市から j 区への転入超過数(転入-転出)

G : 重力定数

m_i : 大阪市の人口

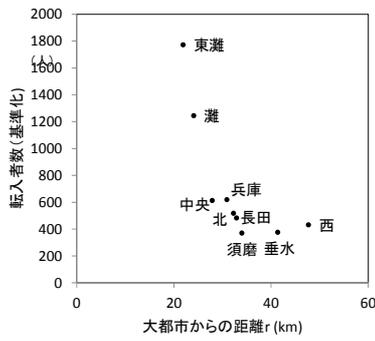
m_j : j 区の人口

d_{ij} : 大阪市と j 区の距離 (km)

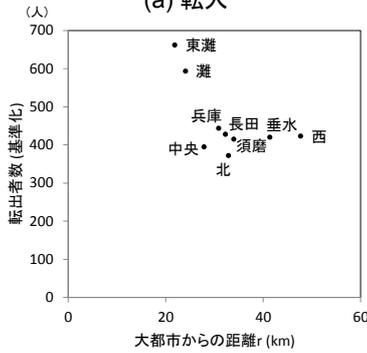
β : べき乗(共通)、1.5 を設定

H : 死亡率の比例定数

x_j : j 区の地震による死亡率(%)



(a) 転入



(b) 転出

図 14 神戸市各区-大阪市間の転入転出者数

表 1 地震被害の影響の回帰分析結果

重決定 R ²	0.896
補正 R ²	0.861
標準誤差	260.4
n	9

	係数	標準誤差	t	P-値	有意水準
定数	-1132.1	239.5	-4.73	0.0032	-
重力定数G	4.53 × 10 ⁻⁷	8.43 × 10 ⁻⁸	5.38	0.0017	**
死亡率の比例定数H	1035.1	286.0	3.62	0.0111	*

**: 1%, *: 5%

4. 重力モデルを用いた数値実験

これまでの検討において、神戸市と都道府県、また神戸市内の区個別においても、重力モデルが成立することを示した。また、特に転入者数の分布において、大都市との人口移動の距離減衰の影響が現れることを考察した。ここでは、重力モデルを用いて復興計画上の利活用を数値実験上でを行い、その知見を示す。

(1) 数値実験モデル

今、図 16 に示すように、大都市である都市 0 と、その近隣の都市 1, 2, 3, 4 を考える。都市 0 は大阪を中心とする大都市圏を集中人口として表現したものであり、都市 1~4 は神戸市の各区をイメージしている。都市 0 の人口は 600 万人、都市 1~4 の人口は一律 10 万人とする。都市 1~4 は、都市 0 からそれぞれ一直線上に 20km, 25km, 30km, および 35km 離れているものとする。都市 1~4 は時刻 1 年目に震災によって被害を受け、都市 0 の被害はない(無視できるほど小さい)ものとする。これを Model1 とする。

重力定数とべき乗パラメータの設定を表 2 に示す。各都市の重力定数 G は、実績値に基づく時系列の推定結果もふまえ、震災後のフェーズに合わせて変化させた。ま

ず震災前の経年数 0 年の重力定数は、いずれも 1.0×10^{-6} とした。次に、震災直後の経年数 1 年目には、被害のなかった都市 0 の人口の引力が高まるものとして相対的に都市 0 の重力定数を大きく 3.0×10^{-6} とし、都市 1~4 は 1.0×10^{-6} から不変とした。復興期の 2 年目以降は、都市 1~4 の復興により人口の引力が高まるものとして、都市 0 は 1.0×10^{-6} 、都市 1~4 は 1.1×10^{-6} とした。比較上の簡単のため、べき乗パラメータ β は、時間変化はせず 2.0 一定を仮定した。これらのパラメータおよび移動元、移動先の都市の毎年の人口 m_i, m_j および都市相互の距離 d_{ij} から

$$t_{ij} = G_{ij} \frac{m_i m_j}{d_{ij}^\beta} \quad (6)$$

により毎年の移動者数 t_{ij} を評価し、10 年間の人口の推移を解析した。



図 16 大都市(600 万人)と近隣都市を模擬した数値実験モデル(Model1)

表 2 重力定数とべき乗パラメータ

	重力定数 $G (\times 10^{-6})$		べき乗	
	都市0	都市1~4	都市0	都市1~4
震災前(経年数0)	1.0	1.0	2.0	2.0
震災直後(経年数1)	3.0	1.0	2.0	2.0
震災次年以降(経年数2~)	1.0	1.0	2.0	2.0

(2) 人口の推移の再現

数値実験モデルの都市 1~4 の 10 年間の人口推移を比較して図 17 に示す。都市 0 に最も近い都市 1、都市 2 は、人口が減少した後、比較的大きな増加率で増加していく。一方、都市 0 から離れた都市 3、都市 4 では相対的に回復が遅くなっている。重力モデルに基づき転入者が距離に対して減衰する影響が確認できる。

ここで、市外との相互作用、すなわち各都市に対して都市 0 との相互作用が及ぼす影響を確認するため、都市 1 と都市 4 について、人口と転入転出者数の推移を図 18 および図 19 に示す。なおこの図では、市外(都市 0)の人口移動に着目するため、転入者数、転出者数の各内数として、都市 0 との人口移動を破線で示している。都市 1、都市 4 とともに震災直後は転出者数が急増しており、その後は転入者数が転出者数を上回り人口増加に転じる点は共通しているが、転入と転出の差分が都市 1 の方が大きく、人口回復に寄与していることが確認できる。破線で示す都市 0 との移動者数に着目すると、都市 1 では転入者数・転出者数ともに都市 4 に比べて大きく、都市 0 との空間相互作用が強いことが表れている。そこで、結果に対する実績値の比較対象として、大都市から近い東灘区および遠い長田区の人口推移、転入転出者数の実績値を、図 20、図 21 に示す。また、その内数として神戸市外との転入転出者数も破線で示す。モデルと実績値の共通点として、都市 1(図 19)と東灘区(図 21)は、いずれも共通して順調に人口が回復しており転入者数が転出者数を上回っているが、この転入者は都市 0(市外)が多くを占めている。東灘区は基礎データの分析においても考察したように、市外との相互作用が強く、市外からの転入者

数と転出者数の差が人口回復に寄与した。一方、都市4(図 20)と長田区(図 21)はこれと概ね対称の傾向にあり、市外の相互作用は相対的に弱く、転入者数と転出者数の各総数は概ね拮抗している。人口の増減とともに、市内・市外の各移動の比率の傾向も整合していることから、妥当なモデルと考えられる。

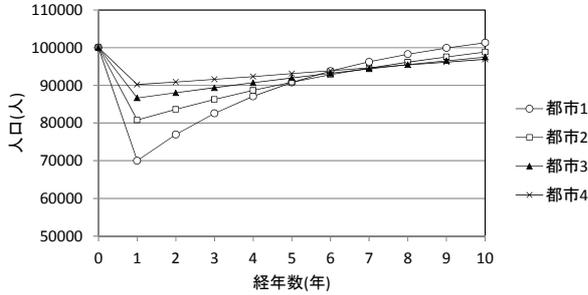


図 17 都市 1~4 の人口推移(Model1)

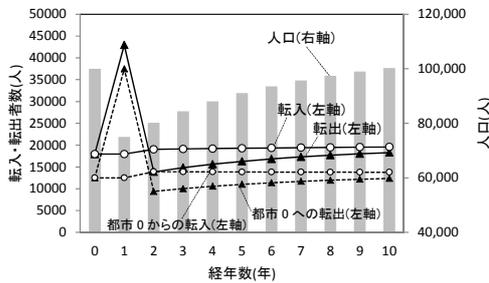


図 18 都市 1 の人口増減 (Model1)

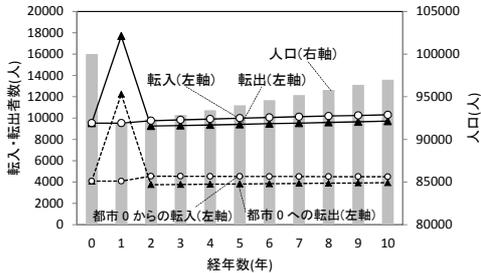


図 19 都市 4 の人口増減 (Model1)

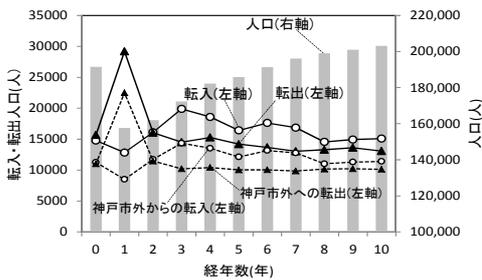


図 20 東灘区の人口増減の実績値

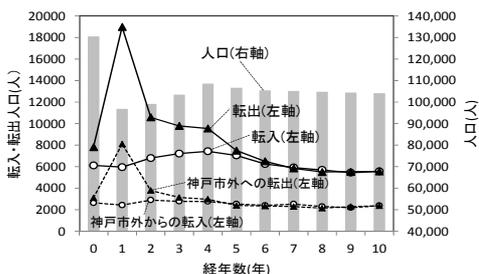


図 21 長田区の人口増減の実績値

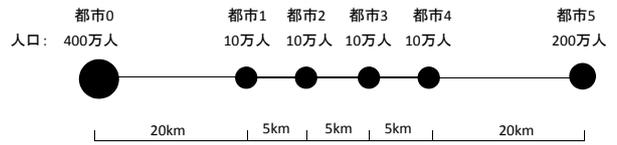


図 22 大都市(400万人)および準大都市 200万人と近隣都市の数値実験モデル(Model2)



図 23 大都市(300万人)2都市および近隣都市の数値実験モデル(Model3)

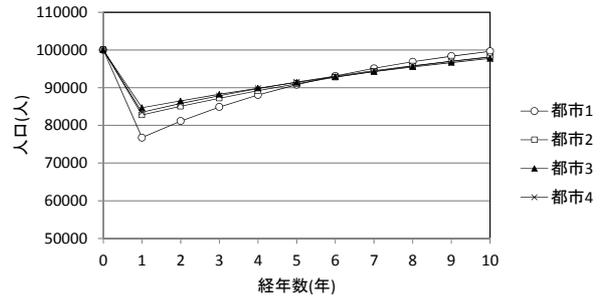


図 24 都市 1~4 の人口推移 (Model2)

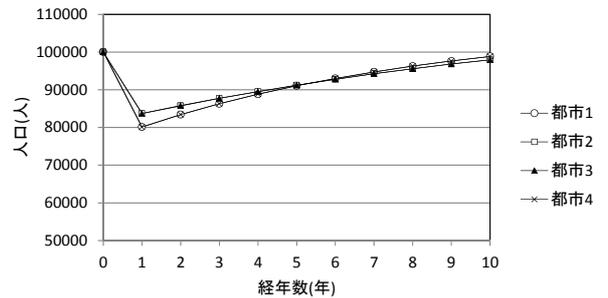


図 25 都市 1~4 の人口推移 (Model3)

(3) 大都市の一極集中とその緩和

近年では、少子高齢化や若年層の都市集中等を要因とした全国的な地方の衰退の問題とその回避²⁴⁾²⁵⁾という観点から大都市の一極集中の緩和が政策的に検討されている。そこでは、平常時における地方の活性化を中心に議論が行われている。他方、大都市一極集中の緩和は、災害後の復興においてどのような影響を及ぼすであろうか。数値実験上において検討を行った。

大都市 400 万人(都市 0)と準大都市 200 万人(都市 5)およびこれまで同様の都市 1~4 からなるモデルを作成し、図 22 に示す。比較の簡単のため、総人口は Model1 と等しくしている。これを Model2 とする。また、大都市 2 都市各 300 万人と、都市 1~4 からなるモデルを図 23 に示す。これを Model3 とする。Model3 では、人口配置は完全に左右対称となっている。

Model2 における都市 1~4 の人口推移を図 24 に示す。Model1 の結果に比べて、地震直後の大都市近隣の都市 1 の人口減少の落ち込みが緩和しているとともに、最終的な都市 1~4 の回復の人口差も縮小している。また、

Model3 における都市 1~4 の人口推移を図 25 に示す。Model3 では人口配置が完全対称となるため、当然に都市 1~4 の人口推移はほぼ同一となる。

全てのモデルの比較評価のため、復興に要する期間として、各都市が震災後従前の人口(10 万人)を上回るまでの期間と定義する。前述の人口推移は震災後 10 年間までを示したものであるが、全ての都市が復興に至るまでを評価し、Model1~3 の各都市の復興に要する期間を比較して図 26 に示す。各都市の期間の違いに着目すると、Model1 では、都市 1(11 年)と都市 4(15 年)の間に最大 4 年間の期間の差があるのに対して、Model2 では 2 年間、Model3 では 1 年間となり、復興の格差は短縮している。

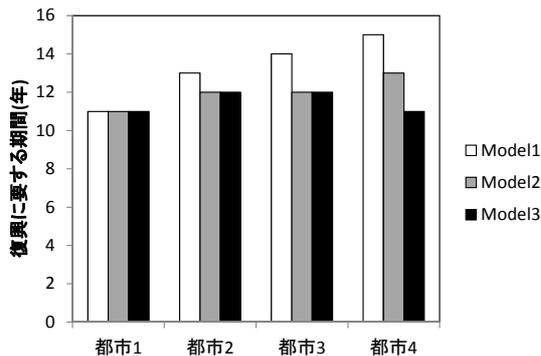


図 26 各都市の復興に要する期間の比較

(4) 都市のコンパクト化と重力の均衡

空間相互作用が復興に及ぼす影響は、近年の都市計画上の重要なデザインコンセプトであるコンパクト化⁽²⁶⁾とも密接に関係している。

今後の人口減少下では、無秩序、非効率な衰退を回避するため、都市構造の問題点を把握し、適切な地域の拠点を選定し、周辺地域を地域の拠点へ集約、誘導することが必要と考えられている。都市構造の評価方法に関しては、提案が行われており、当該地域に関して、利便性や安全・安心、地域経済など様々な視点から評価を行っていく手法^(例えば 27)が例示されている。また、近年では拠点の選定に関してより厳選、集約すべきとの指摘⁽²⁸⁾も出ている。東日本大震災の復興を契機として、コンパクト化を推進する試み⁽²⁹⁾も始まっている。

これまでのコンパクト化の議論においては、拠点をいかに評価、選定するかにか重点が置かれており、重要な論点ではあるが、他方では、コンパクト化の結果として生じるであろう拠点同士の規模の関係について、よりマクロに、将来的に俯瞰した立場から、言及されることは少ない。本研究において、既に述べた一極集中型のモデルをふまえると、大都市と中核都市、あるいはローカルな拠点同士が規模のバランスを保てるほど、その他の地域の復興格差が小さくなることを示唆している。すなわち選択と集中を行う中においても、図 27 に模式的に示すように、中核都市の規模および重力の均衡を考えていくことが重要と考える。地域の機能維持のため必要なコンパクト化、選択集中を推進していく中においても、コアとなる中核都市、地域が互いに規模—すなわち重力—の均衡を一定程度保つべく誘導することが、その他の地域の復興格差を縮小し、災害を契機とした不用意な衰退を緩和し、全体としての弾力性即ちレジリエンスを高めると考える。

よりミクロな地域、地区計画としては、適切な規模の

中核的都市を相互に均衡させながら成長させて配置することが、将来計画として考えられる。そして、平時から地域の魅力度を向上させ、重力すなわち人の吸引力⁽³⁰⁾を高めることが必要である。その場合には、当該地域の耐災害性能をも重点的に強化することはもちろん、従前の大都市一周辺部、産業地区—ベッドタウンのような分業・従属的な役割ではなく一つの核として自立的な機能をもった地域となることが期待される。詳細な地域計画は地域特性に応じた検討が必要であるが、たとえば多摩部・林⁽³¹⁾のように、神戸市の被災後の年代人口(コホート)の分析から、職住近接や用途複合が当該地域の復興を促したとの報告もある。復興の中核となる地域の将来像として有用である。その際にも、誘導の方針としては前述のような重力の均衡を念頭におくことが本研究の提案である。

(5) 今後の課題

今回の検討結果および知見は兵庫県南部地震に基づくものであり、なおかつ空間相互作用という一つの立場からの観点であるため、留意が必要である。神戸市と同様な都市型の震災に対しては一定程度有効であると考えられるのに対して、都市から離れた地域、例えば中山間地域等への適用は、空間相互作用の構造を十分に吟味する必要があると考えられる。多様な土地、災害に対しても、さらに知見を得ていく必要がある。

また、神戸市の特性をもとに、解析的検討から、人口回復の空間的変化に関する分析を加えてきたが、これは距離という 1 次元的な空間変化に着目したものであった。今後さらに研究を一般化し、適用性を高めるためには 2 次元的に視野を広げる必要もあると考えている。大都市から 1 次元的に空間変化が成り立つのであれば、図 28 に示すように、人口分布の中心からその郊外へ向かう放射状の地域についても同様の関係が成り立つと類推できる。東京をはじめとする大都市圏の構造を想定している。従前の人口分布と震災後の人口移動の関係がさらに明らかになり、人口移動が偏極することの分析や復興人口の均衡化のための対応策を解析的に検討できると考える。また、より一般化された状態において、災害による離散と集積によって都市がどのように組織化されるかこれまでの都市の集積に関する研究^{(たとえば 32)(33)}に対して新たな知見を与える可能性がある。

研究手法に関しては、空間相互作用モデルの兌換性から、効用の空間変化に着目したロジットモデル⁽³⁾などへの展開も可能であろう。これにより、復興過程及び市民の移動を効用の空間的変化の結果としてとらえることができ、それに応じた個々人の行動の相互作用を評価できるのではないかと考える。本研究において重力モデルのパラメータの変動として表現した点も、これらの挙動に還元できると推測している。

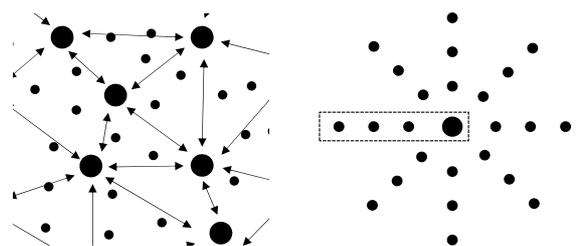


図 27 中核都市の重力の均衡 図 28 同心円都市への拡張

5. まとめ

本論文では、地域間移動の空間的な関連強さ、すなわち空間相互作用が復興に及ぼす影響に着目し、地震災害後の復興過程の分析のため、兵庫県南部地震後の人口移動を対象として、重力モデルを用いた検討を行い、以下の結果と知見を得た。

- 1) 神戸市と 46 都道府県の空間相互作用の 10 年間の時系列的分析を行い、モデル推定値と実績値が対応することを示し、震災直後に転出の重力定数が顕著に増大することを指摘した。震災後には距離のべき乗数 β も増大することから、災害後の転居における距離に対する抵抗感、近隣への移動志向が増加すると解釈できる。また、べき乗数 β は、個々の市町村の地震被害(死亡率)と正の相関がある。したがって被害が甚大であると一層移動への抵抗感は増大する。
- 2) 神戸市 9 区とおよそ 100 市町村の震災前後の空間相互作用の分析を行い、モデル推定値と実績値が対応することを示した。各区の人口増減の要因を分析すると、特に大阪府を代表とする近隣の市・府県からの転入者数の距離通減に強く影響されていることを示した。一方、神戸市内(各区の間)の移動には、回復が順調であった区と滞った区の間には有意な差はみとめられなかった。したがって、大都市への移住者が復興後に各区へ再帰する際の転入の偏差が回復に影響していると考えられる。
- 3) 都市構造を模擬した重力モデルの数値実験を用いて、人口の一極集中が人口回復に及ぼす影響の基礎的検討を行った。作成したモデルの人口推移が、実績値と同様の傾向を再現することを確認した上、大都市への人口の偏在が緩和されることで、人口が復興に要する期間、格差が減少することを示した。

本研究は、震災復興を空間相互作用という観点から論じたもので一般化には留意が必要であるが、今後の人口減少社会では、コンパクト化や集約を推進していく中においても、コアとなる中核都市が互いに規模一すなわち重力の均衡を一定程度保つことが、その他の地域の復興格差を縮小し、不用意な衰退を緩和し、全体としての弾力性即ちレジリエンスを高めることを示唆する。

謝辞

本研究の着眼点の一部は、既往の地域安全学会秋季発表会³⁴⁾での貴重な議論を進展させたものです。また、匿名の査読者に重要なご指摘、ご意見をいただきました。記して謝意を示します。

補注

本論文と既往研究²⁾はモデルの形式が異なるため、両者の対応関係を確認することが必要と考える。重力モデルの理論と人口の復元力特性を直接結びつけることが一つの目標となる。しかし、質点系モデルの挙動がさまざまな変化のフェーズを有し比較的複雑であるため、数学的に完全な手続きを経て両者の対応関係を証明することは、容易ではないと考えられる。そこで、一部簡略化を行い、両者が対応することを確認する。質点系モデルを展開した上で、重力モデルを仮定した場合に、その結果として角振動数 ω が距離 r に対して通減することを示す。ここでは、以下の事項(i)~(iii)を仮定する。

- (i) 質点モデルにおいては、人口回復期の挙動を分析対象とする。ここで、回復期とは震災直後の急激な減少を過ぎた後

の人口増加に転じたフェーズである。詳細は後述する。

- (ii) 重力モデルにおいては、十分に大きな人口を持つ大都市との相互作用があるものとし、市内の相互作用は相対的に十分小さい。
- (iii) 角振動数 ω と距離 r の関係に着目する際には、それ以外の変数は定数とみなす。たとえば減衰定数 h と距離 r も相関を持っているが、その影響は小さいものとする。

角振動数と距離の関係の検討のため、質点系モデルの解を展開する。既往文献²⁾に示すように、震災時に衝撃力を受けた質点系の変位(人口変動) y の解は

$$y = e^{-h\omega t} (Ae^{\sqrt{h^2-1}\omega t} + Be^{-\sqrt{h^2-1}\omega t}) \quad (7)$$

$$A = \frac{v_0}{2\omega\sqrt{h^2-1}} \quad (8)$$

$$B = -\frac{v_0}{2\omega\sqrt{h^2-1}} \quad (9)$$

と表せる。 ω は角振動数、 h は減衰定数、 v_0 は初速度である。表示を簡潔にするため、定数 A 、 B は代入せずにおいている。速度は、これを微分することにより

$$\dot{y} = A(-h + \sqrt{h^2-1})\omega e^{(-h + \sqrt{h^2-1})\omega t} + B(-h - \sqrt{h^2-1})\omega e^{(-h - \sqrt{h^2-1})\omega t} \quad (10)$$

となる。ここで、東灘区のパラメータを用いた場合を例に、人口の変化率(速度)の時刻歴を下段に、上段の変位と比較して図 29 に示す。この図の速度のグラフには式(9)の第 1 項と第 2 項の値の変化も内数として示した。第 1 項は時刻 0 で正の値をとり、時間とともに緩やかに減退する。第 2 項は時刻 0 で負の値をとり、時間とともに急速に 0 に近づいていく。両者の違いは、主にべき乗数の係数 $-h + \sqrt{h^2-1}$ と $-h - \sqrt{h^2-1}$ の違いである。速度は正数の第 1 項と負数の第 2 項の大小関係から決まっているが、一定時間経た人口回復フェーズでは人口の変化は第 2 項によって支配されるとみなせる。

ここで仮定(i)から、時刻 t が人口回復フェーズであって第 2 項がほぼ 0 とみなせるだけ経過した時刻 τ においては、式は第 1 項のみとみなせて

$$\dot{y} \cong A(-h + \sqrt{h^2-1})\omega e^{(-h + \sqrt{h^2-1})\omega \tau} \quad (11)$$

となる。定数 A の値を代入すると

$$\dot{y} = \frac{v_0(-h + \sqrt{h^2-1})}{2\sqrt{h^2-1}} e^{(-h + \sqrt{h^2-1})\omega \tau} \quad (12)$$

ここで、重力モデルに関して、仮定(ii)から十分大きな都市との相互作用についてのみ考える。大都市の人口を m_0 、復興に着目する都市の人口を m_1 、両者の距離を r 、べき乗数を β とする。転入の重力定数を G_{in} 、 G_{out} 、両者の差を G とすれば、人口増加すなわち転入人口と転出人口の差は

$$\dot{y} = G_{in}m_0m_1r^{-\beta} - G_{out}m_0m_1r^{-\beta} + \varepsilon = Gm_0m_1r^{-\beta} \quad (13)$$

となる。式(11)と式(12)を等置した上で、表記の簡単のため

$$C_1 = \frac{v_0(-h + \sqrt{h^2-1})}{2\sqrt{h^2-1}} \quad (14)$$

$$C_2 = (-h + \sqrt{h^2-1})\tau \quad (15)$$

とおけば

$$C_1 e^{C_2\omega} = Gm_0m_1r^{-\beta} \quad (16)$$

人口が回復中であるため両辺は正数であるので両辺対数をとれば

$$\log C_1 + C_2\omega = \log Gm_0m_1 - \beta \log r \quad (17)$$

ω と r の関係に着目するため整理すれば

$$\omega = -\frac{\beta}{C_2} \log r + C_3 \quad (18)$$

$$C_3 = \log Gm_1m_2 / C_2 \quad (19)$$

となる。仮定(iii)から減衰 h 等の他の変数の距離依存性を小さいとみなせば、式(17)から角振動数 ω は距離 r の対数に比例して

単調に通減することがわかる。

ここで、既往文献²⁾において角振動数 ω と距離 r の関係の分析では第一次接近として線形回帰を行ったが、上記定式化の上では対数の関係となっており、緩やかな非線形関係と理解できる。以上のように、簡単のための幾つかの工学的な仮定を介してはいるが、角振動数 ω が大都市からの距離 r と負の線形関係があるとした既往文献の結果が、重力モデルを用いて説明できることを示した。

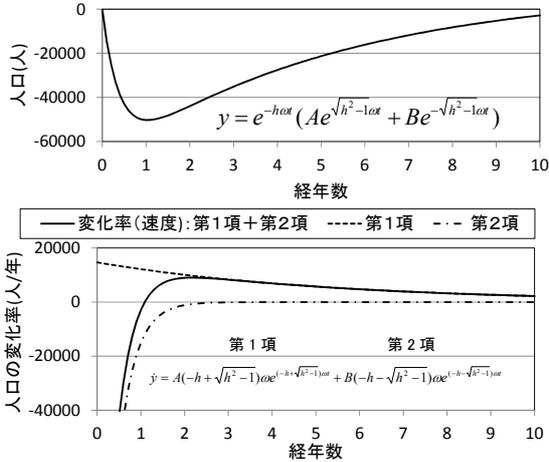


図 29 人口と変化率(速度)の特性

参考文献

- 1) 復興都市計画による市街地再編と居住実態の変容に関する研究, 日本災害復興学会論文集, No.2, 2012
- 2) 上田遼: 兵庫県南部地震後の神戸市の人口復元力特性の分析とレジリエンス評価-力学的アナロジーに基づく復興過程の研究, 日本建築学会計画系論文集, No.709, pp.641-649, 2015.3,
- 3) 青木義次: 建築計画・都市計画の数学-規模と安全の数理-工学のための数学 A-5, 数理工学社, 2006.1
- 4) 大山達雄: 最適化モデル分析, 日科技連, 1993
- 5) 石川義孝: わが国における人口移動の計量地理学的研究, 京都大学博士論文, 1994
- 6) 青木義次, 大佛俊泰: ロジックモデルと空間影響モデルを連動した居住地選択行動モデル-カテゴリー変量を説明変量とする空間影響モデル, 日本建築学会計画系論文報告集, No.444, pp. 97-103, 1993.2
- 7) 栗田治: 無制約型重力モデルのパラメタ推定に関する新しい方法-エントロピーモデルの解析学的側面に注目した重力モデルの理解-, 日本建築学会計画系論文集 Vo.76, No. 661, pp.653-662, 2011.3
- 8) 阿部隆: 東日本大震災による東北地方の人口変動続報, 日本女子大学人間社会研究科紀要 第21号, 2015.3
- 9) Jasmin Gröschl: Natural Disasters and International Migration -A Gravity Perspective, European Economic Association and Econometric Society, 2012.2
- 10) 水谷武司: 震災による東京からの人口流出の予測, 都市防災研究-12-特集, 1988.12
- 11) 阪田弘一: 震災時における避難者数推移および避難所選択行動の特性-地域防災計画における避難所の計画に関する研究-, 日本建築学会計画系論文集, No.537, pp.141-147, 2000.11
- 12) 阪田弘一, 柏原土郎, 吉村英祐, 横田隆司: 阪神・淡路大震災における避難所の圏域構造に関する研究-神戸市灘区の避難所を対象として-, No.501, pp.131-138, 1997.11
- 13) 木村玲欧, 林春男, 立木茂雄, 浦田康幸: 阪神・淡路大震災後の被災者の移動とすまいの決定に関する研究, 地域安全学会論文集, No.1, pp.93-102, 1999.11

- 14) 木村玲欧, 林春男, 立木茂雄, 田村圭子: 阪神・淡路大震災のすまい再建パターンの再現- 2001年京大防災研復興調査報告 -, 地域安全学会論文集 No.3, pp.23-32, 2001.11
- 15) 佐藤慶一, 牧紀男, 中林一樹, 翠川三郎: 想定首都地震後の住宅再取得に関する社会シミュレーション, 都市計画論文集 No.45-3, pp.571-576, 2010.10
- 16) 池田浩敬, 中林一樹, 地震災害が地域の人口変動-商工業活動へ及ぼす影響と被災地の地域特性との関係に関する基礎的研究, 地域安全学会論文集, No.1, pp.125-130, 1999
- 17) 立木茂雄, 林春男, 矢守克也, 野田隆, 田村圭子, 木村玲欧: 阪神・淡路大震災被災者の長期的な生活復興過程のモデル化とその検証: 2003年兵庫県復興調査データへの構造方程式モデリング, 地域安全学会論文集, No.6, pp.251-260, 2004
- 18) 梶谷義雄, 多々納裕一, 岡田憲夫, 松田曜子: 時空間統計モデルを用いた人口分布変動に基づく災害復興過程の分析, 土木学会論文集 No.722 / IV-65, pp.143-151, 2004.10 神戸市企画調整局: 神戸市統計書, §3-9, 2010
- 19) 総務省統計局: 住民基本台帳移動報告長期移動時系列表平成6年~平成17年, 2015.8 参照
- 20) 神戸市企画調整局: 神戸市統計書, §3-9, 2010
- 21) 総務省統計局: 国勢調査(平成12年), 2015.8 参照
- 22) 神戸市: 震災から10年間における復興の進捗と取り組み, 2005
- 23) 神戸市: 阪神・淡路大震災 データからみる神戸, 神戸市 HP, 災害と戦災資料館(平成12年最終集計被害), 2015.8 参照
- 24) 増田寛也: 地方消滅 - 東京一極集中が招く人口急減, 中公新書, 2014.8
- 25) 日本創生会議, 北海道総合研究調査会: 人口移動が収束しない場合の全国市区町村別 2040年推計人口, 人口減少問題検討分科会資料, 2014
- 26) 国土交通省, コンパクトシティの形成に向けて, 国土交通省資料, 2015.4
- 27) 国土交通省: 都市構造の評価に関するハンドブック, 国土交通省都市局資料, 2014.8
- 28) 肥後洋平, 森英高, 谷口守, 「拠点へ集約」から「拠点を集約」へ-安易なコンパクトシティ政策導入に対する批判的検討-, 日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol. 49, No.3, pp.921 - 926, 2014.10
- 29) 亀山紘: 東日本大震災からの復興- コンパクトシティの実現に向けて-, 第8回東北発コンパクトシティ推進研究会, 2014.10
- 30) 小森谷祥明, 杉浦芳夫, 矢野圭司, 空間的相互作用モデルによる東京大都市圏における市区間人口移動の分析, 総合都市研究, No.64, pp.109-133, 1997
- 31) 多名部重則, 林春男: 大震災の被災と復興を経験した地域での長期人口動態の分析-阪神・淡路大震災の被災地にコーホート要因法を用いて-, 地域安全学会論文集 No.25, 2015.3
- 32) H.A. Simon: On a Class of Skew Distribution Function, Biometrika, No. 42, 3-4, pp.425-440, 1955
- 33) S, Tomita and Y. Hayashi: A Controllable Model of Random Multiplicative, Process for Entire Distribution of Population, Physica A, Vol. 387, pp.1345-1351 2008.
- 34) 上田遼: 復興計画のための震災地域の人口回復予測モデル-兵庫県南部地震後の神戸市の分析と首都直下地震対策への応用, 地域安全学会論文集 No.15, pp.285-292, 2011.11

(原稿受付 2015.9.19)

(登載決定 2016.3.10)