

震災リスクを考慮した国土利用構造の 経済性評価に関する研究

紀伊 雅敦¹・土井 健司²

¹正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)
E-mail:kii@eng.kagawa-u.ac.jp

²正会員 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)
E-mail:doi@eng.kagawa-u.ac.jp

大都市への人口集中は震災リスクを高める一方、経済効率の向上に寄与する。つまり都市機能の地理的集積に関し、震災リスクの低減と経済効率向上の間にはトレードオフが存在すると考えられ、望ましい国土利用構造の検討には、両者の整合的な評価が必要である。その際、地震被害は特定の一期間に発生するため、評価においては被害の単純な期待値ではなく、時点間の負担の公平性の考慮が必要と考えられる。

本稿では、全国の地震動の発生確率の下で、国土利用構造と担保すべき公平性の違いがもたらす社会厚生への影響評価を試みた。その結果、功利主義的な価値規範の下では分散型構造は正当化されないが、時点間の公平性を考慮した価値規範の下では正当化されることが示唆された。

Key Words : *quake disaster risk, national land use structure, economic evaluation, equity*

1. はじめに

従来、主要な地震対策として、建造物の耐震性強化と被災時の応急計画の策定等が進められているが、こうした対策の想定を上回る地震が大都市で発生する場合、被害は当該地域のみならず全国に波及する。我が国は諸外国と比較して大都市部への人口集中が著しく、本州太平洋岸に集中していることから、大きな震災リスクが懸念されている。一方、集積効果が都市への人口集中の大きな要因であり、経済機会を提供する大都市の人口集中は我が国の経済効率の向上に寄与している。つまり都市機能の地理的集積に関して、震災リスクの低減と経済効率向上の間にはトレードオフが存在すると考えられるが、望ましい国土利用構造を検討するには、両者の整合的な評価手法が必要である。

通常、生起確率の希少な災害の期待被害額は、実際に生じた場合の被害額と比較して極僅かである。しかし、地震被害は特定の一期間に発生するため、震災発生時に人々は多大な被害を受ける一方、その他の期間に被害を受けることはない。震災復興債等による平準化はある程度可能と考えられるが、それにより被害を十分補償することは難しいため、評価においては単純な期待値ではなく、時点間の負担の公平性の考慮が必要であろう。

本稿では、全国の地震動の発生確率の下で、国土利用

構造と担保すべき公平性の違いがもたらす社会厚生への影響評価を試みる。その際、国土利用構造の違いによる震災被害の地域間波及と集積の外部効果を反映するため、都道府県間の交易を考慮した簡易経済モデルを作成し、地震発生パターンの生起確率の下での社会厚生期待値を算定する。ただし、担保すべき公平性の程度についての明確な指針はないため、社会厚生指標としてAtkinson指標を用い、公平性の程度による望ましい国土利用構造の違いについても考察する。以上により、防災を考慮した国土計画の議論に資することが本研究の目的である。

2. 既往研究

大都市圏を被災地を含む巨大地震については、詳細な条件を考慮した被害想定と対策が実務的に検討されている¹⁴⁾。そこでは震源を具体的に想定した上で、特定の地震動が生じた場合の倒壊建物数、火災による焼失家屋数等をメッシュレベルで推計し、それに伴う人的被害、経済被害等を算定している。近年の報告では被災地内の経済活動のみならず、産業連関分析、あるいは生産関数を用い、被災地外への波及効果も推計されている。山野ら¹⁵⁾は同様のアプローチにより、経済メッシュデータと地域間産業連関表を用い、阪神・淡路大震災の被害推計を行い、被災地外への波及経済損失も算定している。

一方、防災投資の経済効果を厳密に定義するために、多地域一般均衡フレームを用いた不確実性下での便益評価⁶⁾、産業特化と交易を考慮した防災投資効果の地域波及分析⁷⁾、災害保険によるリスク配分設計とそのもとの防災投資の便益計測⁸⁾等の研究がなされている。これらは企業や家計の行動原理から経済便益を導出しており理論的に厳密な評価となっている。しかし、その具体的な計算には、詳細な地域データが必要とされるため、いずれの研究でも仮想的な条件下での数値実験にとどまっている。また、便益あるいは厚生水準は災害発生確率のもとの期待値として定義されており、時点間の公平性といった観点は考慮されていない。

以上、大規模地震の経済被害に関する様々な研究が行われているが、それを国土計画と明示的に結びつけた定量的分析は見られない。本稿では集積効果、地震被害、および時点間の公平性を考慮した社会厚生期待値を算出するモデルを作成し、これを用いて国土構造と担保すべき公平性の違いがもたらす影響評価を試みる。

その際、国土構造の変化の影響を分析するために、各地域の状況を具体的に反映する必要がある。このため、経済影響評価には、必要データを比較的入手しやすい小池⁹⁾と同様の方法を用いる。ただし、全国で生じうる様々な地震発生パターンのもとの経済影響を評価するため、人口、交通条件から直接生産額を推計するモデルとし、影響波及は地域間の交通条件から推計する簡便なモデルとする。また、時点間の公平性を考慮するため、得られる生産額を要素とする社会厚生関数を導入する。なお、国土構造として、人口配置と地域間の交通条件のみを考慮する。

3. 分析の枠組み

本稿では、国土利用構造が震災リスクと経済効率に与える影響を統合的に評価する指標として期待社会厚生を定義する。まず、震災リスクは地点固有であると想定し、各地点の地震動に対する生起確率を外生的に与える。ただし、被害は居住人口が多いほど大きくなると想定する。一方、生産には集積の効果が働き、従業員人口が多いほど生産性が高いと想定する。さらに、当該地域のみならず、交易を通じて近接性の高い地域の従業員人口も効率性に影響すると考える。この場合、ある地域の集積効果は周辺地域にも及ぶが、地震発生時には反射的に経済的な被害が他の地域にも波及する。このため、特定の地域への人口集中は生産性を高める一方、当該地域の地震発生時の被害額と波及被害額も大きくなる。

なお、一定期間内の地震動の生起確率は防災科学技術研究所によって確率論的に示されているが、その発生時期の予測は困難である。地震被害は特定の一時点で発生

するため、震災発生時に人々は多大な被害を受ける一方、地震が発生しない期間に被害を受けることはない。防災投資は将来の被害を軽減し、また震災後の復興債等は費用を将来に回すため、時点間の費用の平準化はある程度可能である。しかし、民間施設の被害や生産減少等の経済的波及影響は通常は補償の対象とはならず、被害の大部分は地震発生時の国民がその費用を負担しなければならない。

集中型の国土利用構造は生産性を高めるが、震災リスクも高める。両者のバランスを評価するには、国土利用構造がそれらに与える影響を定量化する必要がある。一方、震災リスクが顕在化するの是一時点であり、その費用の大部分は発生時の国民が負担する。従来、被害額の期待値としてリスクは評価されてきたが、時点により負担に差が生ずるならば、被害評価において公平性を考慮することも必要と考えられる。

そこで、本研究では、人口分布と交通条件で表される国土利用構造が生産額に及ぼす影響をモデル化し、これを用い所与の地震動の発生パターンのもとの被害額を算定する。一定期間内の被害額をAtkinson指標を用いて平均化したものを被害評価値とし、全ての発生パターンの生起確率から求めたその期待値を期待被害評価値とする。また、期待社会厚生はゼロリスクの総生産と期待被害評価値の差で定義する。その際、公平性の程度を変化させた場合の評価値を分析する。以上の分析フレームの概要を図1に示す。

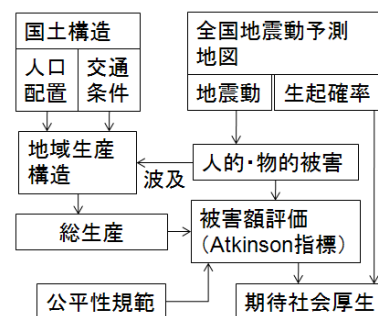


図1 分析フレーム

3. 期待社会厚生の推計方法

防災科学技術研究所の地震動メッシュデータ¹⁰⁾を用い被害額と生起確率を推計する。このデータでは2009年から50年の間に超過確率が39%、10%、5%、2%となる地震動強さを1/4地域メッシュごとに与えている。ここでは簡単のため、与えられたデータの線形補間によりハザードカーブを求め、生起確率が61%、29%、5%、3%、2%となる地震動の期待値をメッシュごとに求めた。

次に、各確率カテゴリの地震動の下での構造別の建物倒壊数を村尾・山崎¹¹⁾の方法で以下のように算定する。

$$\text{全壊建物数} : N_{jks}^{TC} = \sum_{m \in \Omega_j} n_{ms} f_s^{TC} (V_{mk}) \quad (1)$$

$$\text{半壊建物数} : N_{jks}^{HC} = \sum_{m \in \Omega_j} n_{ms} f_s^{HC} (V_{mk}) \quad (2)$$

ただし、 j : 地域、 k : 地震動カテゴリ、 s : 建物構造、 m : メッシュ、 Ω_j : メッシュ集合、 n_{ms} : 建物数、 f_s^{TC} 、 f_s^{HC} : 建物全壊率・半壊率関数、 V_{mk} : 地震動強さである。

国土利用構造変化により都道府県人口が変わる場合は、メッシュ人口変化に応じて建物数を変更する。被害額は構造別倒壊建物数に建物単価を乗じ求める。人的被害は、内閣府の方法¹²⁾を用いて死亡者、重傷者、負傷者毎に次式を用いて求める。

$$\text{死者数} : N_{jk}^D = \sum_s \alpha_s^D \cdot N_{jks}^{TC} \cdot R_{js} \quad (3)$$

$$\text{重傷者数} : N_{jk}^S = \alpha^S N_j \sum_s N_{jks}^{TC} / \sum_s N_{js} \quad (4)$$

負傷者数 :

$$N_{jk}^I = N_j \sum_s R_{js} g \left((N_{jks}^{TC} + \frac{N_{jks}^{HC}}{2}) / N_{js} \right) \quad (5)$$

ただし、 R_{js} : 建物内滞留率、 N_j : 地域 j の人口、 N_{js} : 建物数、 g : 負傷者率関数、 α_s^D 、 α^S : パラメータである。

ここで、被害額は交通事故損失に係わる支払意思額¹³⁾を参考に設定する。なお、単純化のため、1)各都道府県の地震発生回数の期待値は1回、2)地震は都道府県毎に独立して生起する、3)ある確率カテゴリの地震動は都道府県内の全グリッドで同時発生する、と仮定する。

経済的影響については、震災による建物被害率に応じて労働力換算の投入が減少し、それに伴いGDPが減少すると想定する。まず、地域 i の生産関数を交易を考慮して以下のように設定する。

$$y_i = \theta_0 N_j^W \sum_{j \in \Omega} N_j^{W\theta_N} c_{ij}^{\theta_c} \quad (6)$$

すると、GDPは次式となる。

$$Y = \sum_{i \in \Omega} y_i \quad (7)$$

また、従業者換算の生産要素は次式で定義する。

$$N_{jk}^{W'} = N_j^W \left(1 - \frac{\sum_{s \in S^{NW}} (N_{jks}^{TC} + N_{jks}^{HC} / 2)}{\sum_{s \in S^{NW}} N_{js}} \right) \quad (8)$$

以上より、全国の経済被害額を次式で算定する。

$$D_{jk}^E = \theta_0 (N_j^{W\theta_N} - N_{jk}^{W'\theta_N}) \sum_{i \in \Omega} c_{ij}^{\theta_c} \quad (9)$$

ただし、 i : 地域、 N_j^W : 地域 j の就業人口、 c_{ij} : 一般化交通費用、 Ω : 全地域の集合、 θ_0 、 θ_N 、 θ_c : パラメータ、 S^{NW} : 非木造構造、である。

以上の直接被害を貨幣換算したものと生産減少額の和を総被害額と定義し、地域 j でカテゴリ k の地震動が生

生する場合の総被害額を次式で定義する。

$$D_{jk} = \sum_s c_s^B \cdot (N_{jks}^{TC} + N_{jks}^{HC} / 2) + \sum_{h \in \{D, S, I\}} c_h^H \cdot N_{jk}^h + D_{jk}^E \quad (10)$$

ただし、 c_s^B : 建物価格、 c_h^H : 一人当たり損失額である。

t 期における全地域の特定の地震発生パターン $\mathbf{k} = \{k_1^t, k_2^t, \dots, k_j^t\}$ のもとでの被害額とそのパターンの生起確率は式(11)、(12)で定義する。

$$D_{\mathbf{k}}^t = \sum_j D_{jk_j^t} \quad (11)$$

$$P_{\mathbf{k}^t} = \prod_j p(k_j^t) \quad (12)$$

T 期間の発生パターン $\mathbf{K} = \{\mathbf{k}^1, \mathbf{k}^2, \dots, \mathbf{k}^T\}$ の下での被害評価値は次式の Atkinson 指標を用いて表す。

$$D_{\mathbf{K}} = (\sum_{t=1}^T D_{\mathbf{k}}^{t+1/\epsilon} / T)^{1/(1+\epsilon)} \quad (13)$$

ここで ϵ は公平性の程度を表すパラメータであり、 $\epsilon=0$ の場合は算術平均を表し、 $\epsilon \rightarrow \infty$ の場合はロールズ指標となる。

また、パターン \mathbf{K} の生起確率を次式で定義する。

$$P_{\mathbf{K}} = \prod_{t=1}^T P_{\mathbf{k}^t} \quad (14)$$

すると、期待被害評価値は次式となる。

$$ED = \sum_{\mathbf{K} \in \Omega_{\mathbf{K}}} P_{\mathbf{K}} \cdot D_{\mathbf{K}} \quad (15)$$

また、期待社会厚生は次式となる。

$$EW = Y_0 - ED \quad (16)$$

ただし、 \mathbf{k}^t : t 期の地震発生パターン ($= \{k_1^t, k_2^t, \dots, k_j^t\}$)、 $p(k_j)$: 地震カテゴリ k の年間生起確率、 $\Omega_{\mathbf{K}}$: 全発生パターン、 Y_0 : リスク無し総生産である。

式(6)の生産関数パラメータは、平成19年度県民経済計算および総合交通分析システムNITASのデータを用い推計した。推計結果を表1に示す。ただし、従業人口の単位は100万人であり、交通費用は旅客交通の最小一般化費用を用い、単位は千円/回である。

表1 生産関数の推計結果

	θ_N	θ_c	θ_0
パラメータ	1.415 (3.520)	-0.224 (-4.838)	0.165 (1.907)
相関係数	0.74		

()内 : t値

なお、地震動カテゴリは発生しない場合を含め6つあり、これが47都道府県、50年間に独立に発生する場合、全発生パターンは $6^{47 \times 50} \approx 10^{1828}$ 通り存在し、実質的に計

算不可能である。そこで、 D_k' 、 P_k' の算定では、まず2地域の組み合わせを求め、 D_k' に基づく階層型クラスタリングにより被害額の近いパターンを集約する。これに地域を1つ加えるごとにクラスタリングし、パターン数を制限する。なお、クラスター数はベイズ情報量規準により決定する。全期間の発生パターンも同様に、まず2時点の組み合わせについて D_k をクラスタリングし、1時点を加えるごとにクラスタリングすることでパターン数を制限する。

4. 国土利用構造と公平性パラメータの影響

50年間の期待社会厚生に対し国土利用構造と公平性パラメータが与える影響の分析結果を図3に示す。ここで、現況型とは現在の人口分布と交通条件が将来にわたり維持されるケースであり、分散型とは期待総被害額の大きい都道府県から小さい都道府県に人口を移動させ、都道府県間の交通条件を改善するケースである。ただし総人口は50年間変わらないとする。ここでは、東京、大阪、名古屋等の大都市部から全国人口の5%を地方部に移動させ、全都道府県間の一般化交通費用を28%削減するよう設定した。

$\epsilon=0$ 、すなわち功利主義的厚生関数の場合には分散型よりも現況型の期待厚生が大きい。つまり、交通条件の改善効果を分散化に伴う集積効果の低下が上回ると評価される。一方、 ϵ が8以上では、分散型の期待厚生が現況型を上回る。これは分散型では、大都市の被害額が現況型よりも小さくなるためであり、対象期間の最悪の被害の期待値が改善することを反映している。また、無リスクの社会厚生は災害がない場合の生産額であり、交通改善があったとしても、集積の効果より分散型より現況型の方が大きい。一方、ロールズ指標は50年間で最小となる社会厚生水準を表し、分散型よりも現況型のほうが小さくなっている。

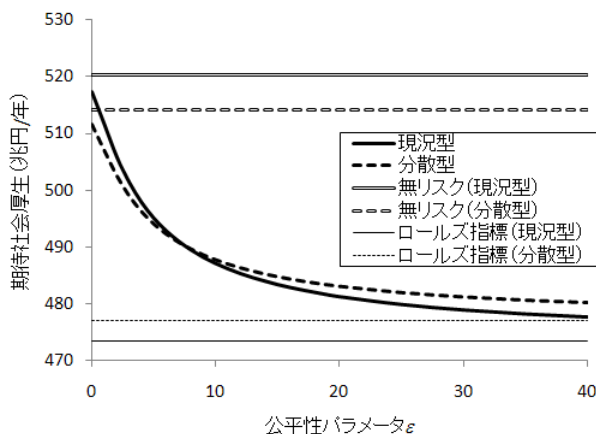


図3 期待社会厚生の推計結果

5. まとめと課題

本稿では、震災リスクを考慮した国土利用構造の経済性評価手法を構築し、2つの国土構造の比較を試みた。その結果、功利主義的な価値規範の下では分散型構造は正当化されないが、時点間の公平性を考慮した価値規範の下では正当化されうることを示唆した。

今後の課題として、生産関数の信頼性向上、リスク評価における震源の考慮、独立到着事象の組み合わせの集約方法の精緻化などが挙げられる。また、社会厚生評価において消費に対する限界効用逓減を考慮する場合の、社会厚生水準と公平性パラメータの感度も検証が必要である。

参考文献

- 1) 中央防災会議:首都直下地震対策専門調査会報告, 2005 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/houkoku.pdf>, アクセス日 2011.4.18).
- 2) 中央防災会議:東海地震に関する専門調査会報告, 2001 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/20011218/siryou2-2.pdf>, アクセス日 2011.4.18)
- 3) 中央防災会議:東南海、南海地震に関する報告(案), 2003 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou2.pdf>, アクセス日 2011.4.18)
- 4) 中央防災会議:中部圏・近畿圏の内陸地震に関する報告, 2008 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/36/shiryou/shiryou3.pdf>, アクセス日 2011.4.18)
- 5) 山野紀彦, 梶谷義雄, 朱牟田善治:自然災害による経済被害推計モデルの開発—経済メッシュデータと地域間産業連関モデルを用いた被害推計—, 電力経済研究, No.53, pp.11, 2005.
- 6) 上田孝行:防災投資の便益評価 —不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて—, 土木計画学研究・論文集, vol.14, pp.17-34, 1997.
- 7) 庄司靖章, 多々納裕一, 岡田憲夫:2地域一般均衡モデルを用いた防災投資の地域的波及構造に関する分析, 土木計画学研究・論文集, vol.18, pp.287-296, 2001.
- 8) 小林潔司, 横松宗太:カストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 土木学会論文集, No.639/IV-46, pp.39-52, 2000.
- 9) 小池淳司:道路ネットワーク整備が人口・社会構成へ及ぼす影響分析—中国地方におけるパネルデータ分析—, 国際交通安全学会誌, Vol.34, No.1, pp.6-14, 2009.
- 10) 防災科学技術研究所:「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第336号, 2009
- 11) 村尾修, 山崎文雄:自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, 189-196, 2000.
- 12) 内閣府(防災担当):首都直下地震に係る被害想定手法について, 2005 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/15/shiryou3.pdf>, アクセス日 2011.4.18)
- 13) 内閣府政策統括官:交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究報告書, 2007 (<http://www8.cao.go.jp/koutu/chouken/19html/houkoku.html>, アクセス日 2011.4.18).