

# 死者低減を目的とした行政レベルの震災対策意思決定のための 多種想定地震の戦略的選択法

－名古屋市域における事例研究－

## STRATEGIC CHOICE APPROACH FOR SCENARIO EARTHQUAKES TO MINIMIZE THE DEATH TOLLS

－ In case of Nagoya region, Japan －

中嶋唯貴\*, 岡田成幸\*\*

*Tadayoshi NAKASHIMA and Shigeyuki OKADA*

For the purpose of optimizing the plan for seismic protection scenario in municipal unit, this paper proposes the strategic method for effectively and efficiently selecting the seismic hazard maps having significant impact on Nagoya city, Japan, as an example area in this study. In the first part, we make geographical database about 41 sheets of seismic intensity maps on Nagoya city and its population. In the second part, we select the extensive distribution of seismic intensity by use of the cluster analysis, and estimate the effectiveness and the efficiency of selected extensive distribution of seismic intensity. The result shows that nearly 99% of estimated victims in Nagoya city are able to be covered by only 2 maps selected in the strategic choice approach.

**Keywords :** *Seismic disaster assessment, Human casualty, Cluster analysis, Regional disaster prevention planning, Seismic strengthening strategy for building, Nagoya*

地震被害評価, 人的被害, クラスタ分析, 地域防災計画, 建物耐震化対策, 名古屋市

### 1. 研究の目的

行政レベルにおける地震防災対策の勘所は、地域全体の被災水準を下げることはもちろんであるが、見落としがちなのは、当該地域内の災害脆弱地域を見極め対策優先地域とすることで災害地域内格差を是正することにある。そのためには被害の事前評価（被害想定）が手法として重要となるが、地域全体での予測被害数もさりながら地域内予測被害分布に注目する視点が大切である。そのための基礎情報として、中央防災会議<sup>1)</sup>や地震調査研究推進本部<sup>2)</sup>及び各自治体が提供を始めた各種の地震動予測地図を有効利用すべきである。しかしながら、これらの地震動予測結果は、設定した断層パラメータ等に大きく左右され一意に決まらず、防災計画立案時にはそれらパラメータの選定法・地震動選択法が大変重要になることが知られている。パラメータの選定方法に関しては、たとえば、建物の性能設計に用いるための各種パラメータの検討<sup>3)</sup>や、被害分布に着目しパラメータによる不確実性を含めた地震防災計画策定指針に関する研究<sup>4)</sup>など、単一または複数の地震動予測結果の扱い方に関する研究は徐々に行われてきている。内閣府が推進する建物耐震化対策に準拠するならば、耐震化により地震による死者発生をどれだけ抑さえ込むことができるかが対策の成否の判断基準である。当該地域の死者数の軽減及びその発生分布の地域内格差是正を目的とした震源や伝播媒質に関わるパラメータの設定法や想定されている地震動の

選択法を防災戦略的方法と呼び、本論では特に後者の地震動選択法について展開する。

ここで、地震動を選択する意味について少し考察を加えておく。現在、地域に影響する地震動予測地図は多くの機関から発表されており、防災対策の理想論からするならば、それら全てに対して対策がとられるべきに思われる。たとえば、全予測地図を重ね合わせ最大値に対応するなどである。しかし極論するならば、その方向での対策は地域全てを同時に極大被害が襲うことを前提としたことと同意となり予防学的には意味を持つものの、被災後の時間経過に依存する死者発生・避難問題や間接被害並びに広域化被害への対応には想定される個々の地震被害分布に対する対策（シナリオ型防災対策）が必要となり（たとえば、被災度の大小により支援または被支援地域指定が異なるごとく）、個別地震動を重ねた極大値マップはシナリオ型対策には適していない。加えて地域の地震防災立案時に重要なことは、対策目標値を設定することのみではなく、対策を目標達成のための年次計画に落とし込むことである。すなわち個々の対策には時間差が発生することが普通であり実施優先順位を決める作業が必然的に発生する。その地域にとり、平均像ではなく対策の主眼をおくべき特定の地震動（①多数の死者発生を伴う地震動・②死者発生分布に大きな地域内格差を発生させる地震動）を戦略的に選択し効果的な防災政策を施行する必要があるのはこのことに依っている。

\* 名古屋工業大学大学院工学研究科 大学院生・修士(学術)

\*\* 名古屋工業大学大学院工学研究科 教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Eng., Nagoya Institute of Tech., M. Ph.

Prof., Grad. School of Eng., Nagoya Institute of Tech., Dr. Eng.

## 2. 地震動抽出の考え方

筆者らは前章において“地震選択”あるいは“震源選択”ではなく、“地震動選択”という言い方に固執してきた。以下にこのような言い方をとる理由を含め、筆者らの立場を説明する。以降、特に断らない限り“地震”は観測点における“地震動”ではなく、“震源”という意味で用いている。

選択優先度の指標として地震の発生確率を利用する考え方がある。一つの方法ではあるが、大きな問題点が内在している。確率論的地震動予測図として代表的なものに地震調査研究推進本部による全国を概観した地震動予測地図<sup>2)</sup>がある。ある期間内の発生確率という観点から複数の地震動予測結果を扱ったものであり、地震対策の費用対効果の検討等に利用されている。しかしながら、近年の発生地震で、震度6弱を観測した地域において、震度6弱以上の30年間における発生確率を見てみると2007年新潟県中越沖地震によって多大なる被害をうけた新潟県柏崎市は発生確率が2.5%、刈羽村が3.6%、同年能登半島地震によって被害を被った穴水町は1%、輪島市は0.3%といずれも発生確率の低い地域が皮肉にも襲われている。この地域を襲ったのは伏在断層であったため確率評価の際に評価されておらず、発生確率が低い地域にもかかわらず地震が発生し被災してしまった例である。このように、確率論的地震動予測図にのみ頼った防災計画では、伏在断層には対応できない。

一方、地域防災計画上たびたび利用されているのは、中央防災会議や各自治体が作成した断層モデルを用いたシナリオ地震動予測結果である。このような確定論的な扱いの場合、自治体は震源の発生確率を基に1~2の地震動予測結果のみを選択し地域防災計画の拠り所にする場合が多い。この場合、問題点は2点ある。1点目は震源の発生確率の問題であり、たとえば、1995年の兵庫県南部地震は発生直前の30年発生確率は0.02~8%となっており<sup>3)</sup>、この発生確率の幅の中のどの確率を直前の発生確率と考えるかにより、リスク評価に大きな差が生じる。仮に最大発生確率の8%を直前の発生確率とした場合でも、想定東海地震の30年最大発生確率87%に比べると、かなり低い確率で発生したことになる。当該地震において発生確率が低いにもかかわらず発生したのは、再来周期活動間隔が長い平均活動間隔に大きな揺らぎを持つことが一因となっている<sup>4)</sup>。このようなことから、海溝型地震のように活動間隔が比較的短い(100年程度)場合は、数回の地震の発生間隔が記録として得られており、平均活動間隔の情報データがそろっているため、発生確率の上限(地震が発生する確率)は経過時間と共に100%に近づいた時点で文字どおり発生する確率が高いが、発生間隔の長い内陸型の場合、平均発生間隔を評価するためのデータが少なく、また地震毎の発生間隔のばらつきも海溝型に比べ大きいため、兵庫県南部地震と同様に、発生確率が10%未満でも発生する可能性は十分にある。平均発生期間が長ければ、地震が発生する発生確率も低くなると考えられており、発生確率は、平均発生期間が著しく異なる場合、同尺度で比較検討を行うことはできない。発生記録1回のみの地震においては発生間隔が求められない場合も多い。この場合、信頼度はdランク表記となり、発生確率共に極めて小さなグループに位置づけられ重要度は低くなる(たとえば、愛知県加木屋断層帯)。しかしこれは発生確率が低いというのではなく、情報が少なく発生間隔・確率が現時点では推定できないというに過ぎず(地震調査研究推進

本部地震調査委員会のWeb解説による)、対策緊急性が低いわけではない。このように、地震発生確率によって優先度を選択すれば、必然的に海溝型の地震を選択することになる。発生間隔の短い海溝型の地震(経験的確率評価が可能な地震群)と発生間隔が長く情報が極めて少ない内陸型の地震(経験的確率評価は不可能であり、公理的確率評価も不可能である場合、一般には主観的確率を用いるが、信頼度dの場合は長期間の平均値を単純に確率と置き換えている)について発生確率の数値を同尺度で論じ被害リスクを評価することは、内陸型の地震の危険性を過小評価しかねない。

シナリオ地震動予測結果に基づく現状の防災対策の2点目の問題は、震源パラメータの不確定性の扱い方である。パラメータの値が少し変わるだけでも結果地震動分布が大きく変動することをシミュレーションし、その扱い方に注意喚起した論文<sup>4)</sup>もあるが、一般に自治体では震源パラメータを一意に固定し、地震動分布パターンを検討することなく対策の拠り所としている。ここに内在する問題は、地震動分布を1つに絞った場合、自治体が決定した想定地震動とは地震動分布の特徴の異なる地震が発生した時に、防災計画が有効に働かない(たとえば罹災者数分布が計画とは大幅に異なるため避難所配置計画・動員計画・備蓄計画が崩れる)ことである。このことは、地震の発生確率のみを用いて優先地震動を決定した場合にも同様のことが指摘できる。すなわち、震源の発生確率を優先させると発生間隔の短い海溝型の地震が抽出されることとなり、兵庫県南部地震のような発生間隔の長い内陸型地震に対する地震動分布に対する対策は置き去りになりかねない。このような問題点に対する対処法として筆者らの立場を整理しておく。筆者らは震源に着目するのではなく、そのような震源によってもたらされる当該地域の地震動分布に着目する立場をとる。地域防災の要諦は、前述のとおり、地域間の被害分布(地震動分布)に対策を講じるべきものである。仮に想定外の地震が発生したとしても、その地震でもたらされる被害分布(地震動分布)に同一パターンの分布が事前に想定され対策が打たれていれば、対応は十分可能である。このように地震動分布パターンを複数想定しておくことが、防災対策に保証を与えることになる。震源の発生に確率を持ち込んだ意思決定は、その確率がはずれた場合の対策として脆弱である。震源ではなく、地震動の選択法を提案する意義はそこにある。この場合、優先度として重要なのは、地域を襲う地震動の確率(襲来確率)ではなく、地震動分布パターンの多様性を第一義とすべきである。この考え方は、シナリオ地震動予測のパラメータ不確定性への対処にも通じる。

以上の立場より、地震による地震動や被害の地域分布の特徴を見逃さないように考慮しつつ地震を絞り込み、当該地域にとり重要な地震動分布パターンを抽出する方法を、地域地震防災対策の1つのアプローチとして提案する。伏在断層による地震動分布に関しては今後の地震学の発展に待つ必要があるが、特定できている断層に対しては、海溝型の地震に比べ発生確率が低くても、地震による被害分布の特徴(死者の地域分布)が異なるならば、重要地震動パターンとして抽出し対策を実施しておく。このように考えることで、現時点では発生間隔が特定できない地震に対しても、また伏在断層に対しても、数値化された確率値に過度の信頼度をおいた優先地震への対策に比べ、対策未実施という最悪状況を避けられる可能性は大きいと考えられる(これに関する検討は4.3(4)章で行っている)。

このような認識より、本論では名古屋市域を検討エリアとし、各種機関が作成した確定論的地震動予測結果を用い、地震間による地震動や死者発生分布の非類似性に着目することで、地震動分布（被害分布）をパターン化し当該地域にとり優先的にターゲットとすべき重要な地震動を戦略的に選択する手法について考察する。また、その抽出した地震動群において伏在断層をどこまで考慮可能かの検討を行う。図 1(a)に対象エリアを図示する。基本メッシュ単位を 1km とする。塗りつぶした範囲が名古屋市域であり、16 区からなっている。同図(b)には区境界線と JR 線を含む主要交通網及びランドマークを書き込んである。地盤条件としては堀川を境に西側に軟弱地盤が発達している。

### 3. 名古屋市域における想定地震動

名古屋市域を被災エリアとする想定地震は多く、それらについても複数の想定地震動が公表されている。また、確率論で名古屋市全域を見た地震動も存在しており、図 2 は今後 50 年の発生確率が 2% の震度分布図<sup>6)</sup>である。名古屋市域のほぼ全域が震度 6 強であり、軟弱地盤層に一致する港区（名古屋市南西部）の一部が震度 7 になっている。この図からは名古屋市全域に耐震化対策の必要性を認めること以上の対策は出てこない。また、この確率地震動分布は一度の地震がもたらすものではないので火災延焼や避難シミュレーションによるシナリオ型の防災戦略に利用することはできない（1 章で述べた極大値マップがシナリオ型防災対策には有効に働かないという指摘と同意）。

名古屋市域に影響する想定地震動として中央防災会議<sup>1)</sup>は 34 の地震動を発表している（表 1）。愛知県<sup>7)</sup>では想定東海地震、想定東南海地震、想定東海・東南海連動地震、内陸養老断層の 4 地震を当該地域の対象地震に設定し、地震動分布の作成を行うと共に、それに基づき対策を立案している。また、岐阜大学<sup>8)</sup>は海溝型の 3 地震動について地震動評価を行っている。これら 3 機関において対象とす

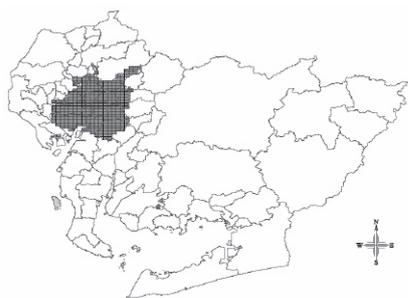


図 1(a) 調査対象名古屋市の位置

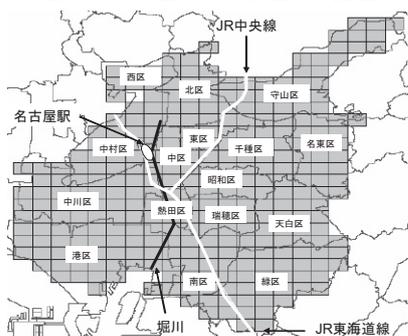


図 1(b) 名古屋市の算定単位 1km メッシュ

る地震は同じものであっても、断層パラメータや地震動評価方法が異なるので、地震動分布も異なる（2 章で述べたシナリオ地震動予測結果に基づく現状の防災対策の問題点と同意）。図 3 に東海・東南海連動型地震についての 2 機関による地震動分布を比較する。これは断層パラメータの不確実性がもたらすものであり、どちらが正しいとは言い切れない。むしろ、当該地域の防災の観点からは、被害評価が異なるのであるから異なる地震動パターンとして扱うべきものである<sup>3) 4)</sup>。以上より、当該地域においてありそうな地震動パターンを公表されているもの 41 種類を集め、これらから当該地域が防災対策上優先的に考えるべき地震動を選択決定する<sup>注 2)</sup>。

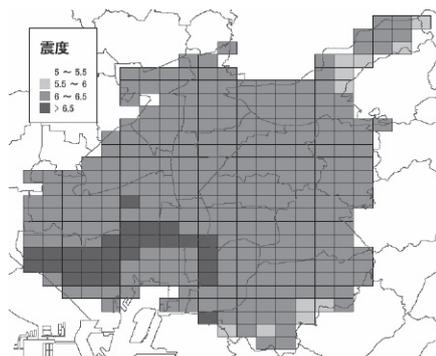


図 2 50 年 2% の発生確率の震度分布

表 1 名古屋市を想定域に含む地震動

作成機関	地震動番号	地震動名
中央防災会議 <sup>1)</sup>	1	猿投－高浜断層
	2	加木屋断層
	3	布引山地東縁断層帯東部
	4	名古屋直下 M6
	5	四日市－桑名－養老断層
	6	花折断層帯
	7	中央断層帯
	8	伊那谷断層帯
	9	清内路峠断層
	10	木曾山脈西縁断層帯主部震度
	11	佐見断層帯
	12	白川断層帯
	13	赤河断層帯
	14	恵那山猿投山北断層
	15	武儀川断層
	16	伊勢湾断層帯主部
	17	白子－野間断層
	18	養老山地西縁断層帯
	19	鈴鹿東縁断層帯震度
	20	布引山地東縁断層帯
	21	柳ヶ瀬－関が原断層帯
	22	鈴鹿西縁断層帯
	23	頓宮断層
	24	名張断層帯
	25	大鳥居断層帯
	26	湖北山地断層帯北西部
	27	琵琶湖西岸断層帯
	28	京阪奈丘陵曲断層
	29	上林断層震度
	30	三峠断層震度
	31	山田断層帯主部
	32	御所谷断層
	33	大阪湾断層帯震度
	34	中央構造線断層帯
愛知県 <sup>7)</sup>	35	愛知県作成東海地震
	36	愛知県作成東南海地震
	37	愛知県作成東海・東南海連動地震
岐阜大 <sup>8)</sup>	38	養老断層地震
	39	岐阜大作成東海地震
	40	岐阜大作成東南海地震
	41	岐阜大作成東海・東南海地震

#### 4. 名古屋市域における高影響地震動の戦略的選択

##### 4.1 手法の概略

地震の被害とは、地域を襲う地震動の強さと都市の脆弱性で決まる。そのために我々が入手できる地図データは想定地震動入力地図（代表的なものとして図4）・人口分布（図5）それに住宅関連統計データである。これらを利用して木造住家の倒壊に伴う死者予測分布図を作成する。死者予測分布図は想定地震動の数41について算定され、その分布パターンの類似度を名古屋市域の基本区画（1kmメッシュ）内の発生死者数をユークリッド距離にとりクラスター分析を行うことで計る。これにより死者分布の類似パターン化を行い、類似グループの代表地震動を選択する。住家の耐震化戦略において、次に発生する地震予測が難しい状況下で死者軽減に効率的な効果を持たせるためには、ターゲットとする地震はなるべく少なく、かつ現在考え得る想定地震動による死者発生を多く含む地震動を代表的地震動として選択抽出することが望ましい。この考え方の基に代表地震動としての選択適性を死者数と分布の包含率で検討する。これが大凡の流れ（図6）である。

なお図5は愛知県の平成12年国勢調査<sup>9)</sup>における1km×1kmメッシュで作成された人口分布である。図から10,000人/km<sup>2</sup>を超える超過密地域は市域中央部に散在しており、この図のみからは中央部を優先地域とみなせ、先の確率論的地震動分布図（図2）とは異なる見解を与えている。対策優先地域を絞り込むという問題に帰着させたとしても一意の答えは得られない難しさが理解されよう。

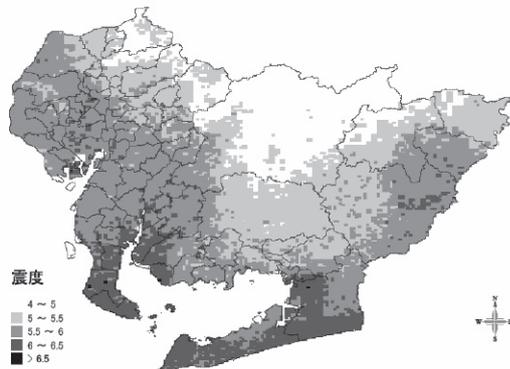


図3(a) 愛知県作成 東海・東南海連動地震震度分布図

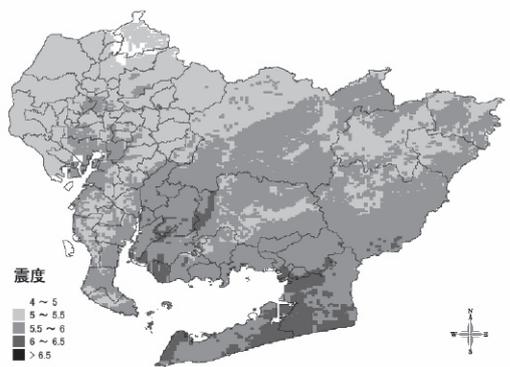


図3(b) 岐阜大作成 東海・東南海連動地震震度分布図

##### 4.2 戦略的選択手法の詳細

###### (1) 地震動想定結果の調整とデータベース化

3機関によって作成された41種類の地震動予測結果（震度分布図）は、中央防災会議<sup>1)</sup>によるものは1km×1kmメッシュで作成されており、愛知県<sup>7)</sup>と岐阜大<sup>8)</sup>によるそれは500m×500mメッシュで作成されている。そこで、愛知県と岐阜大の地震動予測結果を1km×1kmに揃え、メッシュ内の最大震度を採用することで統一化した。

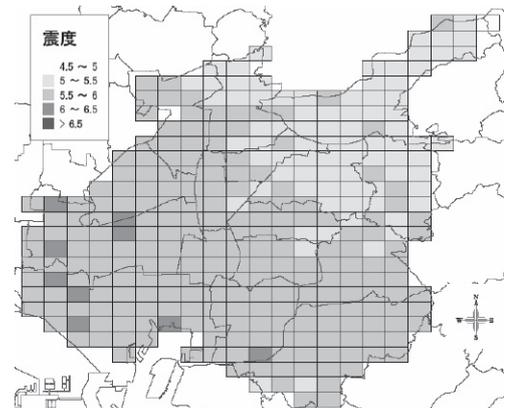


図4 愛知県作成 東海・東南海連動地震の名古屋市震度分布図

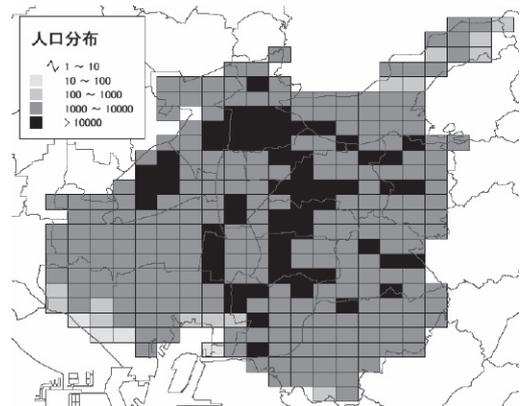


図5 名古屋市の人口分布

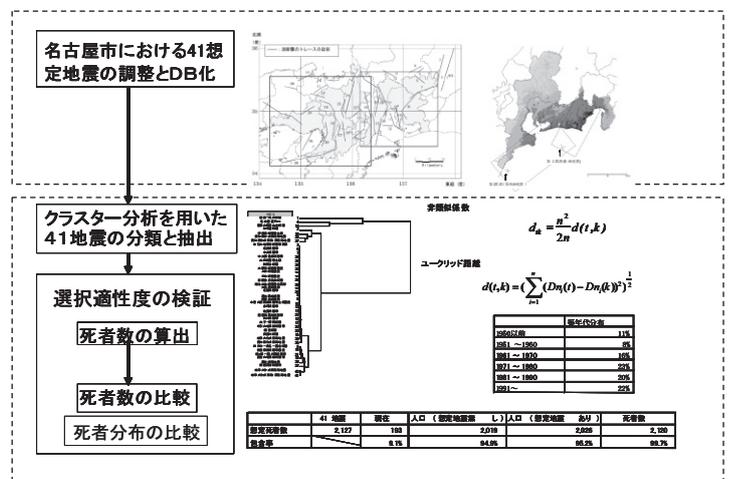


図6 分析の流れ

また関連のデータベースを以下のように整理した。なお、年度別の人口と建物に関するデータは公表されているうちで最新のものをを用いている。

- ①名古屋市の1km×1km各メッシュの人口は平成12年国勢調査を用いる。
- ②上記メッシュには41の想定地震により計算された震度を対応させる。
- ③建物と居住者に関するデータは平成15年住宅土地統計による。

(2) 死者数の算出手法

筆者らは、地震による建物倒壊に伴う死者の高精度評価のために建物損傷度関数と棟死亡率関数を用いた評価方法を提案している<sup>10)</sup>。ここではその方法に倣い死者評価を行う。この方法は建物1棟当たりの死者数を以下の式で算出し、各メッシュ毎に総計する。

$$Dn = \sum_{t=0}^1 \sum_{x=0.6}^1 Dnk(x,y) \times Mf(I, \Delta x) \times kf + Dnt(x,y) \times Mf(I, \Delta x) \times tf \quad (1)$$

ここに  $Dn$  は死者数、 $x$  は木造住居の損傷度、 $y$  は周辺全壊率、 $Dnk(x,y)$  は戸建の死者発生率、 $Dnt(x,y)$  は長屋・共同の死者発生率、 $Mf(I, \Delta x)$  は木造住居損傷度曝露人口、 $kf$  は木造戸建人口率、 $tf$  は長屋共同戸建人口率を示す。死者数算定の流れを図7に示す。概略は以下の手順となる(詳細な死者算出手法は文献<sup>10)</sup>参照)。対象地域はある大きさ(本論では1km)にメッシュ区画し、関連データとして総務省統計局提供の地域メッシュ統計を用いることとする。

- ①各メッシュの人口とハザード情報(震度)から震度曝露人口を生成する。
- ②地震発生時における木造住宅の居住人口(936,408人)を、地域別の木造人口率(戸建て人口率:84%、長屋共同人口率:16%)と地震時在宅率(92%)から求め、住宅損傷度を勘案しつつ比例配分することにより木造住宅の損傷度別の人口(木造住宅損傷度曝露人口)を求める。比例配分には、地域データとして住宅の建築年代分布(表2)が入手できるので年代別の耐震評点分布(年代別耐力分布)と木造住宅損傷度関数を用いて地域の損傷度別住宅頻度を求め、住宅形式別の居住人口より比例配分を行う。なお、括弧内のデータは平成15年住宅土地統計による。
- ③住宅形式別(戸建て率・長屋共同率)の棟死亡率関数(人的損傷度関数)を使って、曝露人口を死者数に変換する。

(3) クラスタ分析を用いた41想定地震動の分類

上記に求めた死者数分布は表1の41地震動分布について求められる。次に、似たものどうしをグルーピングするクラスタ分析を用いて、名古屋市全域に影響するグループを抽出し、さらにグループの中から代表的地震動を選択する手続きを踏むことにより、影響度の大きく異なる地震動を選び出すことを試みる。クラスタ分析とは、対象間のユークリッド距離を定義し、距離の長さによって対象を分類する方法である。ここでは距離として、名古屋市内におけるそれぞれの地震動の影響度、すなわちここではメッシュ内で発生する死者数をとる。クラスタ分析の解析手順を簡易的に記述すると以下となる。

- ①個々の対象(地震動)間の近似の程度をはかるためのユークリッド距離を定義し、さらにクラスタとして併合する際の距離の大きさを決める。
- ②個々の対象間の距離をすべて計算し、距離が最小となる対象を統

合してクラスタとする。

- ③新しく形成されたクラスタと対象間の距離をすべて計算し、対象間の距離のうち最小値をとる対象どうしを統合する。これらすべてのクラスタが統合されるまで繰り返す。
- ④クラスタの統合過程を示すデンドログラム(樹形図)を描き適当な距離で切断することによりいくつかのグループに分ける。グループに含まれる対象を調べ、グループの特徴を把握する。

クラスタ分析にはいくつかの手法が提案されており、用いるクラスタ間距離によって手法定義されているが、ここでは鎖効果がおきにくいWard法を用いることとする。Ward法を前節(2)で作成したデータベースに適用すると、地震動 $t$ と地震動 $k$ 間の距離 $d_{tk}$ は、全メッシュ数を $n$ とし、非類似係数を $d(t,k)$ とすると、式(2)のように与えられる。

$$d_{tk} = \frac{n}{2} d(t,k) \quad (2)$$

死者低減を目標とする場合、発生する死者数の大半を含むような想定地震動が望ましい。ここでは死者に与える影響の高い特徴の異なる地震動を抽出するため、距離に死者数を用いる。距離 $d(t,k)$ は式(3)のように表される。

$$d(t,k) = \left( \sum_{i=1}^n (Dn_i(t) - Dn_i(k))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、 $Dn_i(t)$ 、 $Dn_i(k)$ は地震動 $t$ 、 $k$ におけるメッシュ番号 $i$ の死者数である。この $d(t,k)$ を用い、 $d_{tk}$ を41地震動すべてで算出し、二つの地震動の距離が最小のものから統合し、その統合過程を樹形図で記述することで41地震動を再度分類する。

表2 木造住居の築年代分布

築年代	~1950	1951~ 1960	1961 ~1970	1971~ 1980	1981~ 1990	1991~
存在割合	11%	8%	16%	23%	20%	22%

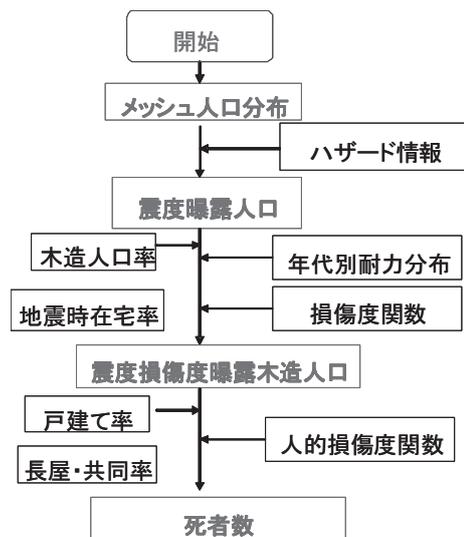


図7 死者算定の流れ

### 4.3 結果

#### (1)現状の地震動想定との比較

まず愛知県が想定している4地震動(地震動番号35、36、37、38)が、名古屋市全体で想定される死者をどの程度カバーできているのかをみている。41全地震動による各メッシュの最大死者数の分布を図8に示す。市域東部の市境界沿いに多くの死者発生をみている。これに対し、41地震動の死者分布から愛知県が想定している4地震動の死者数との差分分布が図9になる。愛知県想定地震動は市域南西部に死者を偏在させるものであり、その絶対数も少ないため、41地震動の死者数の9.1%しか考慮していないことになり、想定外の地震動が発生した場合、現状の防災計画で十分に対応できない可能性がある。特に市域東部における死者の見逃しは大きな問題点として指摘できる

#### (2)抽出結果

式(1)~(3)を用い分類した結果(樹形図)を図10に示す。同図を仮に距離80で切断し分類すると大きく3つのクラスターに分かれていることが分かる。切断箇所の妥当性と本方法による地震動抽出法の適否について以下検討する。第1クラスターは猿投-高浜断層であり、2つめは名古屋直下M6及び恵那山猿投山北断層のグループであり、第3クラスターは加木屋断層以下のグループである。グループ内では死者数の多い方が上位にくるので、第2クラスターは名古屋直下M6で代表し、第3クラスターは加木屋断層で代表させる。抽出された3地震動の死者分布をそれぞれ図11~13に示す。第1クラスターの猿投-高浜断層は41の想定地震動中で予想死者数が最も多く、分布は名古屋市中心で2分し東部に大きな被災地を発生させているので、「地震動パターンA(全域-東部)」と呼称することにす。名古屋直下M6で代表される第2クラスターの地震動は、全域に死者発生分布を見るが、特に市域中央から北に大きな被災地を発生させているので、「地震動パターンB(全域-北部)」の呼称を与える。加木屋断層に代表される第3クラスターに分類される地震動は、南部の沿岸に死者を発生させる大きな地震動である。これを「地震動パターンC(南部)」とする。分布が3地震動で大きく異なり、パターン分類が成功していることが分かる。41地震動からそれぞれの分布図の差分をみたのが図14~16である。地震動パターンAとの差分(図14)は名古屋市の東部一面の死者が考慮されたことを意味しており、全死者数の94.8%の包含率である。図14からさらに地震動パターンBを考慮した差分を図15に示す。地震動パターンAに加え地震動パターンBを想定したことにより、北西側の死者が考慮されたことが見て取れる。死者の包含率も99.3%にのぼり41地震の死者数の大半はこの2パターンを考慮し対策を立てることで見落とすことなくかつ効率的な対策を立てることが可能である<sup>注3)</sup>。次に、地震動パターンCを考慮した死者分布差分を図16に示す。前2者の考慮による図15に比べ南部で死者が減少しているのが分かるが、包含率は0.1%の上昇に留まっており、先の2パターンでほぼ41地震の死者数を考慮可能という判断もあり得よう。いずれにしても、愛知県による現状の想定地震(図9)との死者カバー率の違いは歴然としている。図10から愛知県による現状の想定地震がどこにグルーピングされているかをみると、4地震動全てが、地震動パターンCに分類されており、4地震動共に同類の死者分布を与えているのが分かる。死者分布で見ると4地震動

を対策に据えても対策のバリエーションが広がるわけではなく、むしろより被害の大きな加木屋断層のみの想定で4地震動はカバーされてしまう。

このように本方法によるクラスター分析を行い、またパターン分類による死者差分を検討することで地震動抽出が適正に行われることが確認された。

#### (3)発生確率の導入

ここまで、震源の発生確率については考慮の外におき、重要地震動のパターン化を行ってきた。クラスター分析により同一グループに分類されたものは死者分布が近似している地震群である。前節の抽出法はその中で死者最大数を与えるものをそのグループの代表地震とするものであったが、このように地震動のパターン分類をした後に発生確率の高い地震を代表とする考え方もあり得よう。

地震動パターンAについては、この分類に当てはまるのは猿投-高浜断層のみであるのでそのままとする。地震動パターンBに分類される地震は名古屋直下M6地震と恵那山-猿投山北断層である。これらの地震により評価された死者数はそれぞれ1,110人と575人であるが、発生確率に関しては名古屋直下M6地震が伏在断層のため確率が設定されていないのに対し、恵那山-猿投山北断層の30年発生確率は、ほぼ0%~2%と公表されている。よって、発生確率を導入するなら恵那山-猿投山北断層が地震動パターンBの代表地震となる。地震動パターンCには死者の多いものとしては、4つの地震動が抽出されており、海溝型及び内陸活断層型共に2地震動ずつである。2章に記載したごとく、海溝型と内陸地震型とでは地震発生間隔・発生確率を評価する情報量に極めて大きな差があるため、確率評価の前提が異なり数値をそのまま比較することに、筆者らは反対の立場である。しかし、地震動のパターン分類をした後に同一グループから代表地震を選択する方法に発生確率を導入することに関しては許容範囲内とし、以下考察を進める。この状況下で地震動パターンCの代表地震を選択するなら、30年発生確率60~70%のグループ内最大を与える愛知県作成東南海地震ということになる。以上、これら3地震動パターンから地震発生確率を優先指標として選択した3地震動による死者包含率を計算すると95%となる。3地震動による死者差分分布は図17に示されている。前節の死者数最大値を優先指標とした選択法による99.3%からは若干数値が劣るものの、図17と図16の比較から分かる通り、被害分布的にはほぼ全域をカバーしており、愛知県想定地震の9.1%(図9)に比較し、その選択適正さが理解できる。

このように、地震動分布をパターン化することで異なる被害分布の特徴を見落とすことがなくなり、また地震発生確率の導入も可能であることを示すことができた。

#### (4)震源を特定できていない断層系に対する対処シミュレーション

近年発生が著しい伏在断層は、2章で述べたとおり、確率論的地震動予測図作成時に考慮することはできない。しかし地震防災対策に伏在断層の存在は無視できず、設定する震源パラメータの信頼性は低いものの、伏在断層を想定したシナリオ地震動予測図が発表されている(たとえば、名古屋直下M6地震)。当然、発生確率は設定できず、確率値優先選択法では下位に位置づけられてしまう。このような状況下にあっても地震動をパターン分類する本提案方法は有効性を保持している。以下に確認しておく。

伏在断層は地震規模・位置が特定できず、よって被害分布の特徴も判然としないので、最悪状況下として当該地域全体が最大震度 7 に襲われた場合を想定し、選択された地震動との被害差分を検討することで、震源を特定することができない断層系に対する備えの可否をシミュレーションする。

名古屋市全域が震度 7 (計測震度 6.5) で揺れた場合の死者数は 8,639 人と評価された。なお、震度 6 強 (計測震度 6.25) の場合は 2,789 人である。現在の名古屋市域における愛知県の想定地震の包含率は、震度 7 に対し 2.2%、震度 6 強に対し 6.9% である(震度 6 強の場合の差分分布図を図 18 に示す)。これに対し、地震動分布パターン A・B・C にグルーピングし発生確率で優先度を与え抽出した 3 地震動の場合の包含率は、震度 7 で 24.6%、震度 6 強で 58.3% となる(震度 6 強の場合の差分分布図を図 19、震度 7 の場合の差分分布図を図 20 に示す)。これで分かるとおり、本手法で優先地震を決定すると、発生箇所の分からない伏在断層で起こった地震であったとしても未対策域の軽減に効果的である。もちろん、震度 7 を有する地震を発生させる伏在断層が名古屋市域にあった場合は、本手法を用いたとしても、75.4%の死者は想定外の死者となる。そのため本手法を用いた場合でも対策未実施となる可能性を有しているが、対策対象としての地震動の選択に分布としての多様性を加味することで、未対応の状況をできるだけ減らすことは可能であるし、そうであるなら防災行政としては、そのような対策準備を進めるべきであろう。

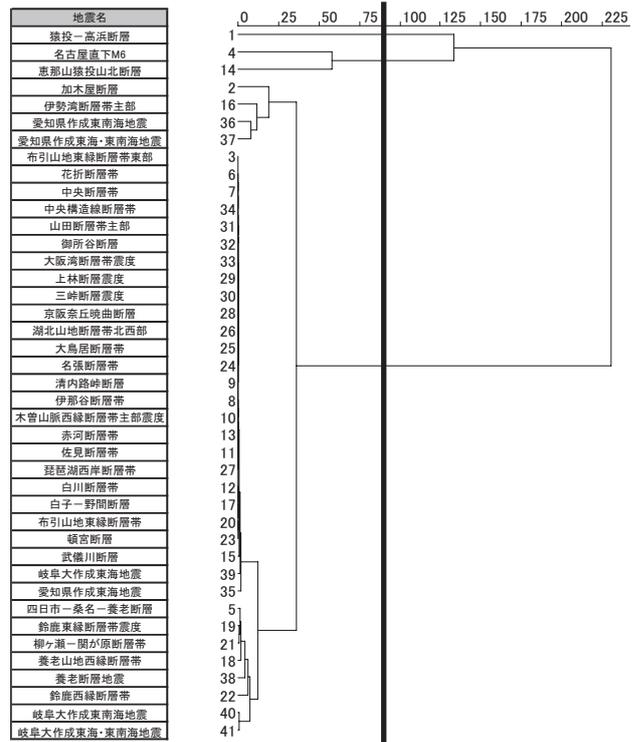


図 10 死者数を距離としたクラスター分析

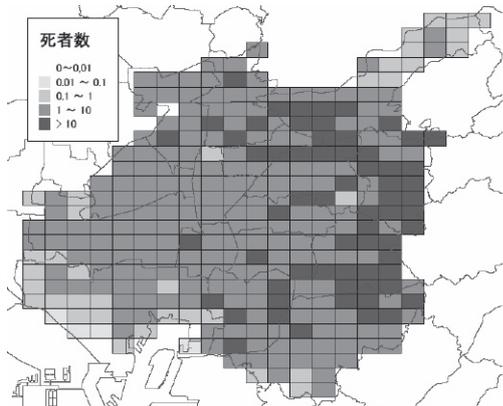


図 8 41 地震動による死者分布

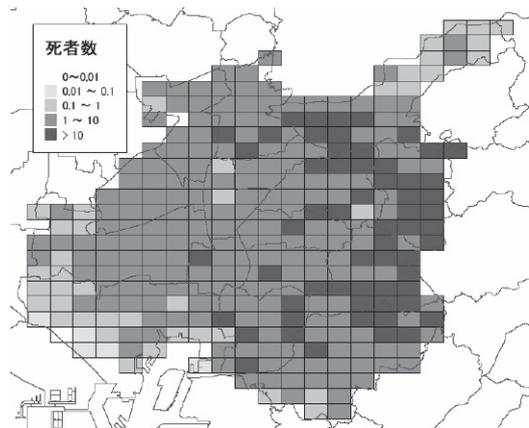


図 11 猿投-高浜断層による死者分布  
(地震動パターン A (全域-東部))

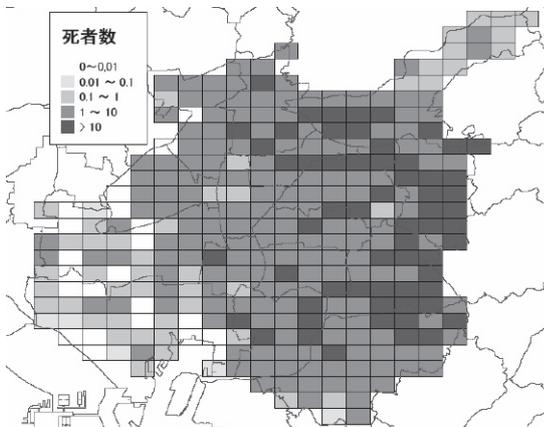


図 9 41 地震動と愛知県想定地震動における死者差分の分布  
(包含率 9.1%)

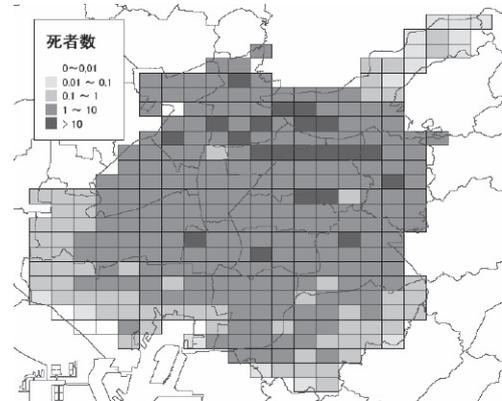


図 12 名古屋直下 M6 地震による死者分布  
(地震動パターン B (全域-北部))

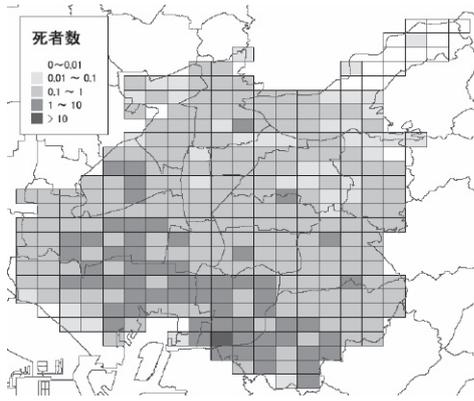


図13 加木屋断層による死者分布  
(地震動パターン C (南部))

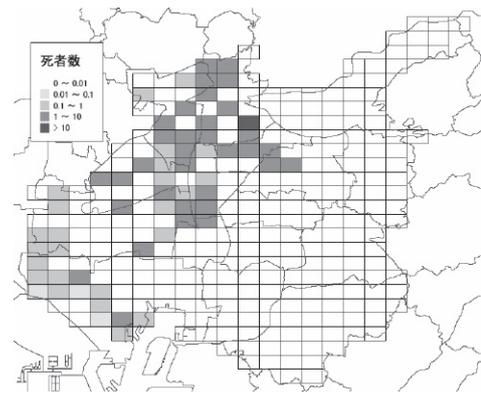


図17 41地震動の死者分布と発生確率を導入して抽出した3地震による死者差分分布 (包含率95%)

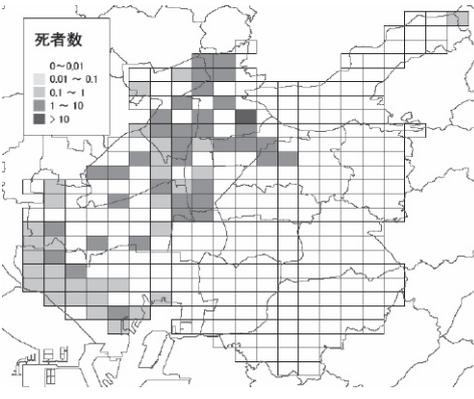


図14 41地震動の死者分布と地震動パターンAとの死者差分の分布 (包含率94.8%)

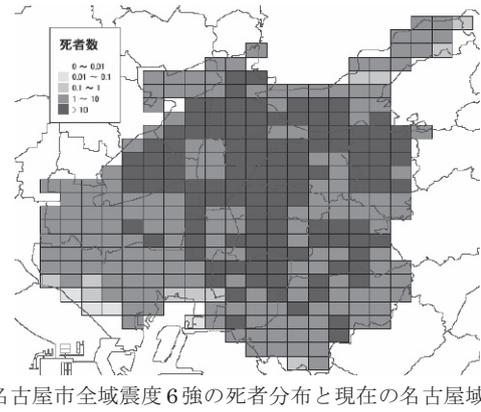


図18 名古屋市全域震度6強の死者分布と現在の名古屋域における想定地震の死者差分分布(包含率6.9%)

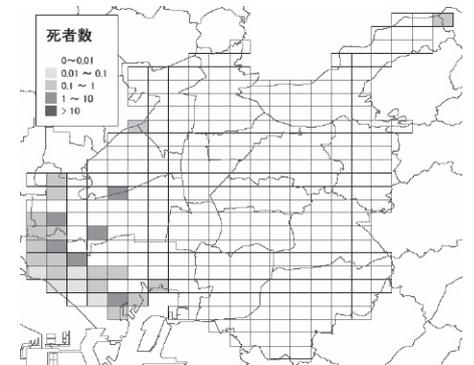


図15 41地震動の死者分布と地震動パターンA及びBによる死者分布との差分分布 (包含率99.3%)

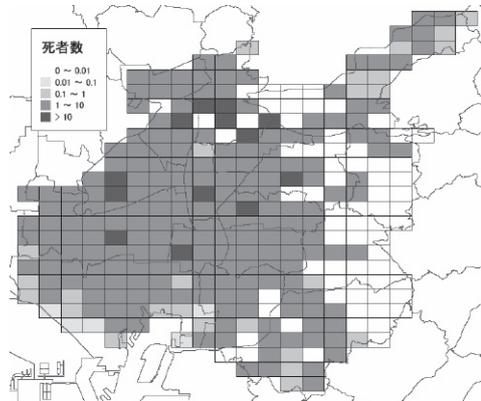


図19 名古屋市全域震度6強の死者分布と発生確率を導入して抽出した3地震動による死者差分分布(包含率58.3%)

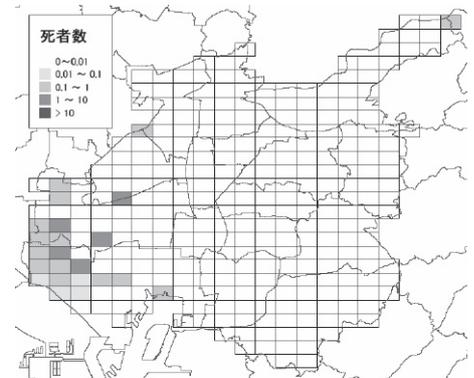


図16 41地震動の死者分布と地震動パターンA・B及びCによる死者分布との差分分布 (包含率99.4%)

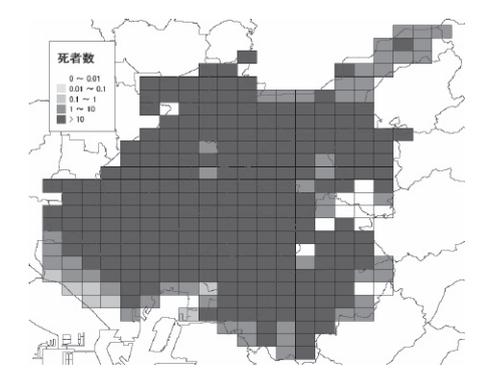


図20 名古屋市全域震度7の死者分布と発生確率を導入して抽出した3地震動による死者差分分布(包含率24.6%)

## 5. おわりに

本研究では、近年多数作成されている想定地震動の中から地域に大きな影響を与える特徴の異なる地震動を抜き出すことを目的に、多数ある想定地震動のデータベース化とクラスター分析の適用を試みた。適用事例として内陸型、海溝型の両方の危険性を有する名古屋地域を取り上げた。被害数に加え被害分布に焦点を当てる解析により判明した下記事項は、複数のハザードマップを机上に置き、この中から当該市域に影響が大きく、かつ問題を抱える地域を見落とさないための対策を効率的かつ効果的に進めていくための、一つの有力なアプローチとなるであろう。以下、本論の結論とする。

- 1) 死者で重み付けをしたクラスター分析で分類することにより、41の想定地震動は2乃至3種の代表的な地震動パターンに絞り込むことが出来ることを示した。41地震動パターンによる死者すべてに対し、2地震動でも死者数の99%を包含しており、この手法の選択有効性を示している。
- 2) グループ化した地震動について震源の発生確率を用い優先地震動を抽出することで、地震発生確率の導入も可能なことを示した。ただし、この場合、グループ内の最大死者を優先する方法に比べ包含率は若干落ちる。
- 3) 地震動分布（被害分布）をパターン分類し、その中から優先地震動を選択する手法は、震源が特定できない伏在断層に対する対策としても有効な手法であることをシミュレーションにより示した。
- 4) 本論では、内閣府が推進する建物耐震化対策に則り死者軽減の観点から想定死者数による重み付けで地震動分類を試みた。建物倒壊で死者が多く発生する地域は、一般に道路閉塞による交通支障やライフライン系による機能停止被害の影響も大きな地域と重なることが多く、死者は重要地域を見定める総合因子との位置づけであるからである。さらに重み付け要素を種々変化させることで、死者以外の直接・間接被害に高い影響を与える地震の抽出、加えてそれらによる総合被害指標による地震抽出も同様のアプローチで可能である。

本論で用いた死者数評価には複雑な関数を駆使しているため、全地震で死者を算出するのは詳細なデータとそのデータベース化に多大なる労力を有する。筆者らは実用性に配慮し計算量を大幅に低減する簡易手法についても研究を進めている。それらについては次報で報告の予定である。

なお、本研究は多種の想定地震が存在する場合に、対策の目的を絞り込むことにより対策を先鋭化させる戦略的選択法について学術的観点から方法論を展開・提案したものであり、一例として名古屋地域を扱ったものである。対策の目的を本論では死者の低減においてその重要度において明快であると同時に内閣府の建物耐震化対策に準拠させたためであるが、他の対策を考える場合は関わる被害について同様の考察をすべきである。さらに実際の防災対策については本論で対象とした誘因（地震動）と素因（被災対象の脆弱性）に加え、自治体の防災資源（予防力・防災力）など総合的に判断する必要がある、自治体の現状の防災対策について批評するものではないことを付け加えておく。

本研究遂行に当たり、各機関から地震動想定結果を提供していただいた。記して謝意を表す。

## 注

- 1) 少数の観測事例から地震発生確率を評価する際の問題点は、種々検討されている<sup>11,12)</sup>。たとえば松村<sup>12)</sup>は、母集団の発生確率 $\nu$ とし、 $T$ 年間における地震観測数を $n$ としたときの事後確率密度 $P(\nu | n)$ をベイズの定理を用い、 $\nu$ を等間隔発生地震パターンとポアソン分布に従うランダム発生とした場合のパターンで検討し、地震発生間隔の期待値を等間隔の場合には $T/3$ （期待値） $\pm T/18$ （分散）、ランダムの場合で観測事例が少ない時（ $n \approx 0$ ）は $(1/3 \pm 1/\sqrt{18})T \sim (1 \pm 1)T$ と求めている。これによれば、内陸地震の場合、観測年数 $T$ は1万年程度であるので、発生間隔は1,000年～20,000年という大きな変動幅を持つことになる。
- 2) 名古屋市は地域防災計画策定にあたり①想定東海地震と②想定東南海地震及び東海・東南海連動地震に加え、直下地震の備えとして③濃尾地震を選定し被害想定を行っている。本論では内陸地震として最近の活断層研究により地震調査研究推進本部により指定され、ハザード分布が公表されているものについて検討を行った。
- 3) このことは切断距離を80に設定したことの妥当性も同時に示している。距離130以上で2分類しても地震動パターンBは見逃すことになる。このように切断距離をいくつか設定し検討することが重要である。

## 参考文献

- 1) 中央防災会議「東南海、南海地震に関する専門調査委員会」：中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布について、2006.12.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書、2005.
- 3) 壇一男，神原浩，藤川智，菊地優：断層破壊のシナリオとその生起確率を考慮した地震ハザードの解析に関する研究—断層モデルによる予測地震動を建物の性能設計法に実装するために—，日本建築学会構造系論文集，No.602，PP.119—128，2006.4.
- 4) 岡田成幸，戸松誠：都市直下地震を想定した入力地震動の考え方と地震防災計画への指針～震源パラメータの不確定性がもたらす地震動入力及び被害評価への影響～日本建築学会論文集，No.530，PP.37—44，2000.4.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：六甲・淡路島断層帯の長期評価について，2005.1.
- 6) 地震ハザードステーション J-SHIS：http://www.j-shis.bosai.go.jp/（参照2008年7月3日現在）
- 7) 愛知県防災会議地震専門部会：愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書—想定地震に基づく被害想定—，2003.
- 8) 久世益充・能島暢昌・杉戸真太：南海トラフ巨大地震を想定した広域震度予測，自然災害科学，Vol. 22，No.1，PP.87—99，2003.
- 9) 総務省統計 HP：http://www.stat.go.jp/（参照2008年7月3日現在）
- 10) 中嶋唯貴・岡田成幸：時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定—東海・東南海連動型地震を対象とした東海4県への適用事例—，日本建築学会構造系論文集，No. 623，PP. 79—86，2008.1.
- 11) 井元政二郎：地震発生確率の妥当性—平均情報量利得による評価—，地震II，Vol.53，PP.79—81，2000.
- 12) 松村正三：少数の事例から地震発生率を評価する際の問題について，地震II，Vol.54，PP.45—46，2001.

(2008年7月8日原稿受理，2009年1月20日採用決定)