

都市直下地震を想定した入力地震動の考え方と地域防災計画への指針

～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～

REGIONAL DISASTER PREVENTION PLANNING GUIDE BASED ON SEISMIC RISK ASSESSMENT
FOR EARTHQUAKES OCCURRING NEAR URBAN DISTRICTS

—Effects of indefinite fault parameters on the evaluation of seismic ground siverity and damages—

岡田成幸*・戸松 誠**

Shigeyuki OKADA and Makoto TOMATSU

Near field earthquakes bring catastrophic disasters in large urbanized cities. Local governments must prepare the regional mitigation plans on the basis of seismic hazard and risk estimation in order to protect the building environment and the population. In case of Sapporo City, that is our research target, it is difficult to specify the source parameters of near field earthquakes affected the populated area. It is necessary to investigate the influence of indefinite parameters upon the risk assessment. In this paper, we enforce an importance of the plural estimation of seismic damages by probable earthquakes occurring near the urban area. Paying attention to the difficulties of taking measures against all of the cases on estimated damages, we give an example of the rule of making decision about the priority of mitigation plans from the point of view of earthquake engineering and political science.

Keywords : Risk assessment, Regional disaster prevention planning, Near field earthquake, Fault parameter, Seismic intensity distribution, Sapporo

被害評価, 地域防災計画, 直下地震, 震源パラメータ, 震度分布, 札幌市

1. 研究の目的

1995 年の阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ、各都道府県市町村自治体は、当該地域の地震防災計画の見直しに向けて検討を進めている¹⁾。防災計画見直しのためには、その前提となる当該地域の地震被害評価が必須である。評価結果とは元来、ある偏差幅の中でばらついている一つの評価値のはずであるが、自治体においてはそれを唯一確定的なものとの前提の基に防災計画の大きな拠り所としている場合が多い。評価結果に偏差を生む原因の一つは算定時に仮定する各種パラメータ（たとえば震源パラメータ、モデル化された地盤定数・被災対象の特性パラメータ）の不確定性によるものである。本論は、直下地震を当該地域被害評価の想定地震とした場合問題となる、震源パラメータの不確定性に着目し、評価結果としての地震動入力や被害が持つ不確定性（結果のばらつき）を防災計画上どのように解釈し対策に生かすべきなのかを考察するものである。評価の不確定性が、防災行政的観点から無視し得るものなのか、無視し得ないとしたならばどのような検討が必要なのかを札幌市を事例とし具体的に議論するが、一般性に配慮し検討項目は他市町村でも議論となるものを扱う。従って本研究の意義は、評価結果に不確定性を有する被害分布を基に地域地震防災計画を立案しなければなら

ない場合の指針を一般的に提示するところにある。

2. 直下地震想定防災計画上の問題点

2.1 地域防災計画に必要な情報

地震動予測にはその目的別に大きく二つのタイプがあるであろう。一つは構造物建設に代表されるように、その立地点における地震動強さが必要な場合であり、要求される入力情報は耐震設計に必要な地震動波形あるいはスペクトルである。一方、自治体における地震防災計画とはたとえば、防災対策優先地域の抽出・防災資源（避難所等の施設計画・非常食等の備蓄計画・防災職員の有効配備計画等）の地域内準備・延焼防止に関する地区内不燃領域率設定等であり、これらに必要な情報は、行政管轄内の地震動強度の面的差違、すなわち地震動あるいは被害に関する地域内分布である。この場合、管轄内全域における地震動波形が要求されることはあまりない。むしろ、地震動をたとえば、最大加速度・速度、震度等々のように一指標化し、その地域差（分布）が対策のための情報として重要となる。よって本論では地域防災行政の立場より、地震動・被害分布に与える震源パラメータの不確定性を主として論じる。

* 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助教授・工博

Associate Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr.Eng.

** 北海道立寒地住宅都市研究所環境科学部都市防災科 修士(工学)

Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute, M.Eng.

2.2 中・遠距離地震のパラメータの扱いと直下地震との違い

従来、わが国においては防災計画のための想定地震はプレート境界で発生する巨大地震の場合が多く、この場合一般に震源距離は遠いため、震源位置と地震規模を与えてしまえばその他の震源パラメータ設定の曖昧さは地域の地震動入力にさほど大きく影響せず、従って、被害評価・防災計画立案の際にそれに伴う被害評価誤差については多く議論されることはなかった。むしろ、地域の地震動及び被害分布パターンの大勢を決定づけるのは震源パラメータではなく地域内の地盤増幅特性であり、たとえば揺れやすい場所は地震によらず常に他よりも大きく揺れるという具合に、地域内地震動入力分布は地域特性の一種としての扱いが可能であった。しかし、昨今問題となっている直下地震の場合についてもそのような取り扱いが可能なのかは検討する余地が大きい。今や被害評価は研究レベルを離れコンサルタント会社による実務レベルでルーチン的に作業が展開されることが多くなってきた。また自治体独自で当該地域の被害の概略を評価できるような、簡便な被害評価システムも提案されてきている^{2~4)}。これらは想定地震のパラメータを決定論的に与え、距離減衰式に地域内の表層地盤の影響を補正して入力地震動分布を求め被害評価するものがほとんどである。プレート境界で発生する地震に対しては可能であるこの種の方法が直下地震に対しても有効なのだろうか。地震被害評価法が簡便化されてきた今こそ、想定地震の震源パラメータの設定不確実性が、地域の地震動入力評価に与える影響の大きさを事前に知っておくことは被害評価及び防災計画の観点から非常に重要であると思われるが、この点を意識し直下地震による評価を具体的にを行っている事例は殆ど見ない。最近の研究に

唯一、震源パラメータの設定不確実性について論じたものがある⁵⁾。しかしこれは不確実性が応答スペクトルに与える誤差を調べたものであり、地域内分布評価への影響等の防災計画的観点にまで踏み込んではいない。震源パラメータをなるべく決定論的に決めるための方法が提案されつつある⁶⁾ものの、一意に決定するには至っていない。本論は、パラメータの不確実性を受け入れなければならない場合、防災行政上とすべき視点を提示するもので

ある。

2.3 指針検討の手順

図1に示す検討手順を提案する。検討の要諦は、当該地域について想定震源パラメータに不確実性が避けられない場合、そのパラメータの揺らぎ幅内で評価された被害分布のパターンが単一なのか、それとも多様に変化するのかという点であろう。評価被害分布を基に防災計画を立案する際、複数の被害分布が評価されたなら、被害シナリオそして対策シナリオも複数準備する必要があるからである。さらに、シナリオを多数用意しなければならなくなったとき、実務上対策優先度順位を振る(パラメータ絞り込みのルールを検討する)必要性がでてくる。地域行政体が抱える防災資源(人的・物的・経済的)は有限であり、防災計画にもある優先度を考慮することにより実行性のあるものとなるからである。仮に、全被害パターンについて対策シナリオが準備できるとしても、自治体における計画実施は年度単位であり、優先順位づけは避けられない問題である。すなわち、複数の想定被害から一定のルールで優先的に対策を講じるケースを選択していくことが実務上必要である。

3. 札幌市の想定直下地震

本研究では、問題を具体的に扱っていくために、対象地域として札幌市を取り上げる。札幌市に大きな直接被害を及ぼすと思われる地震は、①ユーラシアプレートと北米プレートの境界に位置する日本海で発生する巨大地震(たとえば、1940年積丹半島沖地震(M7.0)、1993年北海道南西沖地震(M7.9))、②同じく日本海側のプレート内で発生する大地震(たとえば、1792年後志積丹沖地震(M6.9)、1947年留萌西方沖地震(M7.0))、③北海道石狩低地帯に発生する内陸直下地震(たとえば、1834年石狩湾地震(M6.8))である。石狩湾地震は、この地震により津波が生じたといわれていたため、最近まで震源は石狩湾にあったとされていた⁷⁾が、その後の詳細調査により津波は1883年庄内地震による誤りであったとの指摘がある⁸⁾。また、液状化の痕跡が内陸に延びていることと、マグニチュードと液状化限界距離との関係からこの断層は陸域に想定されるべきであるとの結論に至っている⁸⁾。本論ではこの内陸直下の地震が発生した場合に予想される札幌市の被害を評価する。

4. 被害評価

4.1 評価の手順

本研究の目的は被害の詳細を求めるのではなく、震源のパラメータ設定の不確実性が被害分布に与える影響の大きさを把握し、問題点を指摘することにあるので、被害評価方法もそれに応じた簡便なものとする。また評価項目も被害評価の基本に位置づけられる木造住家の震動による被害棟数及びそれにより派生する人的被害を求めるに留める。まず、想定される地震による地域震度分布を求め、住家の被害関数(Vulnerability関数)より被害率に換算し、被害棟数を求める。住家の被害関数は、北海道における過去の地震被害統計より震度-被害率の関係を新たに求め⁹⁾、用いた。人的被害は死者・重傷者・軽傷者をそれぞれ建物被害棟数より換算する。換算式は太田・他¹⁰⁾によった。その手順において、想定される直下地震の震源パラメータの不確定量(揺らぎの大きさ)を定め、その範囲内で震源パラメータを複数与え、感度解析を行う。

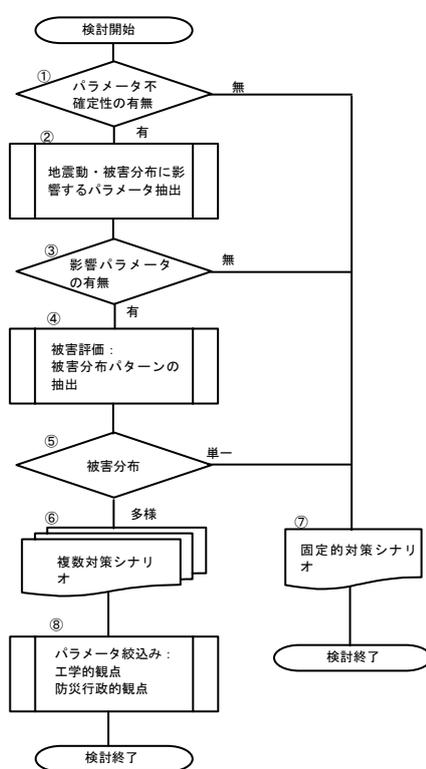


図1 震源パラメータ不確実性を防災計画に生かすための検討手順

4.2 震源パラメータの不確定性

図2は1905年以降の札幌市付近の有感地震の震央分布である⁸⁾。同図より札幌市直下に地震の集中域が見られ、小樽沖から日本海の地震活動帯へ地震帯を形成していると考えられる。その方向から、起震ポテンシャルを持つ断層の走行は北西-南東方向であると推測される。笠原は同図及び北海道大学附属地震予知観測地域センターによる最近の地震活動をもとに、長さ20km、幅10km、滑り量1m程度の断層(想定される気象庁マグニチュード6.5)が、同図中長方形で示す領域内に発生する可能性を示唆している⁸⁾。しかしながら、札幌市街地は厚い堆積層で覆われているために活断層調査からその位置を特定することができない。現状のデータからでは、この領域内で地震が発生する確率はほぼ等しく、震源位置及びパラメータをこれ以上絞ることはできない(図1:手順①)。

4.3 地域内震度分布の予測

直下地震の場合、震源近傍の地震動特性は断層の破壊プロセスの影響による方位依存性(directivity)が大きく関与するため、震源を点震源として扱うことは適切ではない。線震源あるいは面震源での評価が望ましい。地震工学分野でこのような地震動の方位依存性を考慮して地域地震動入力評価をする方法にKobayashi and Midorikawa¹¹⁾の方法がある。この手法は、種々の震源パラメータを任意に与えることができ、パラメータの不確実性感度解析に都合がよい。また、地域の地震動入力の分布を求める手法として自治体等で広く用いられている。本研究ではこの手法を基本において地域の地震動入力を評価する。

札幌市の表層を500m区画で分割し、この区画ごとの震度を計算することを試みる。今、区画番号を*i*で表す。Kobayashi and Midorikawaの方法は地域の地震基盤面(S波速度が3km/秒の層)における最大入射加速度あるいは速度を求める方法であり、この方法による基盤面(区画*i*直下における)の最大速度を本論では V_i^B で表す。札幌市域においては過去の地震より、表層地質の影響を震度増分 δ_{ij} (但し、*j*は表層地質区分)として考慮した以下の型の震度分布算定式が得られている¹²⁾。

$$I_i = I_i^S + \delta_{i,j} \quad (1)$$

ここに、 I_i は区画*i*における地表面震度、 I_i^S は地表面の影響を取り去った標準地盤震度(札幌市域の平均震度)である。 I_i^S はKobayashi and Midorikawaの方法によって求めた基盤面最大速度 V_i^B に、標準地盤/基盤最大速度比(地盤増幅率) α を乗じて、Muramatu¹³⁾による最大速度-震度換算式を流用した以下の式により求めることとする。

$$I_i^S = 2 \times (\log(\alpha \times V_i^B) + 1.4) - 0.5 \quad (2)$$

最大速度比 α は1993年北海道南西沖地震の際の札幌市の詳細震度分布¹⁴⁾より求める。すなわち、北海道南西沖地震の際の区画*i*におけるアンケート震度を I_i とし、Muramatuにより最大速度に換算すると、以下となる。

$$\log V_i^S = \frac{I_i - \delta_{i,j} + 0.5}{2} - 1.4 \quad (3)$$

ここに、 V_i^S は標準地盤最大速度である。北海道南西沖地震の震源パ

ラメータを阿部・他¹⁵⁾および日本建築学会¹⁶⁾より採用し、Kobayashi and Midorikawaにより V_i^B を計算する。各区画ごとに V_i^S と V_i^B を求め、その比の平均値を求めると最大速度比 α が求まる。その際に札幌市内で観測した同地震の加速度記録も参考にした。求めた α は2.8であった。この値を(1)式より軟弱な地表面(扇状堆積物層~シルト層)における最大速度と基盤面最大速度比に変換すると3.7~6.8となる。翠川¹⁷⁾は基盤における最大速度振幅に対する地盤増幅度を求めている。彼によれば地盤種別が完新統(沖積層)で7.5であり、更新統(洪積層)で5.3である。上値とほぼ調和し、 α 値の妥当性を示唆している。

4.4 震源パラメータの不確実性が震度分布に与える影響

札幌市の地表面における震度を上記の方法により計算する。震源パラメータの不確実性が札幌市の震度分布に与える影響の大きさについて遠距離地震と直下地震を比較し、分布に大きく影響するパラメータを抽出する(図1:手順②③)。この方法による断層パラメータは、幾何学的パラメータとして断層位置・深さ・断層長さ・断層幅・傾斜角度等があり、運動学的パラメータとして立ち上がり時間・断層破壊開始点・破壊伝播速度等がある。本論では、札幌市の直下地震においては確定できない震源深さ・破壊開始点・立ち上がり時間・破壊伝播速度・傾斜角・断層位置について検討する。このうち、震源深さ・立ち上がり時間・破壊伝播速度は地震動の大きさには影響するものの地域分布への影響は小さい。よってここでは上記パラメータについては、地域内最大震度を代表値とし、それについて議論する。ここで対象とした遠距離地震は、1993年北海道南西沖地震相当とし、各パラメータ設定の揺らぎの幅を直下地震の場合と同程度にして計算し、その影響の大きさを比較することとした。検討のための標準の設定パラメータと設定の揺らぎ幅を表1に、また直下地震の断層位置は想定される図2の範囲内とし、地表面からの最浅位置を図3に示す6カ所とした。

(1) 震源深さの影響

直下地震・遠距離地震共に浅発地震を想定する。札幌市域における地震基盤面までの平均的な深さは1kmである¹⁸⁾ので、断層最浅部の深さを1~26kmまで5kmずつ深くしていき、札幌市域の最大震度の変化をみる。震源決定の深さ方向の誤差は10km程度であるので、遠距離地震の場合の不確定誤差範囲としてもほぼ妥当であ

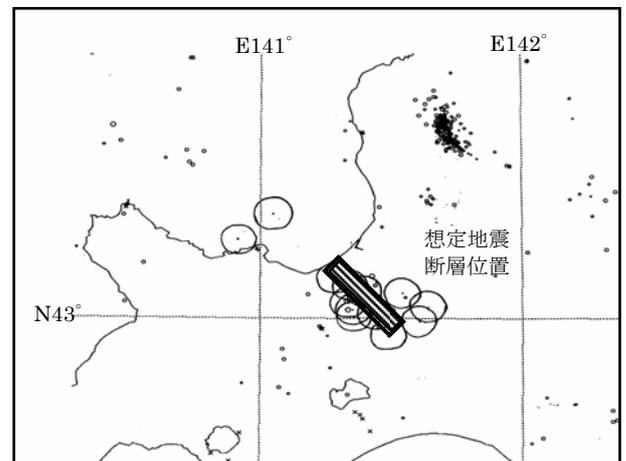


図2 札幌市付近の有感地震の震央分布(1905~1996)

(○:有感地震の震央位置。文献⁸⁾を基に作成)

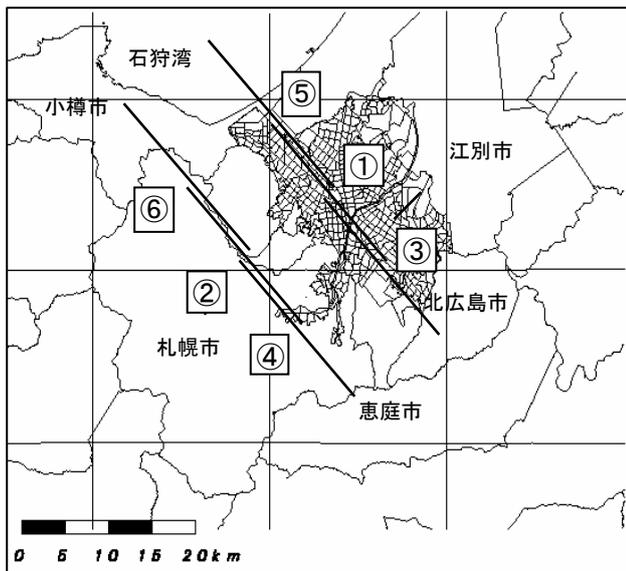


図3 想定断層位置 (数字は地表面の断層線位置を示す)

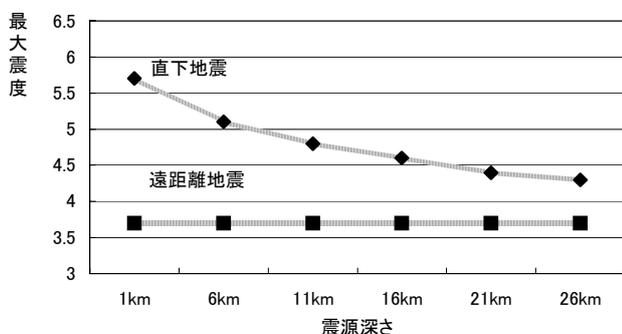


図4 震源深さの不確定性が最大震度に与える影響

ろう。図4は横軸に断層最浅部までの深さ、縦軸に計算された地域内の最大震度を取り、遠距離地震と直下地震を比較してみたものである。震央距離で約200km離れている遠距離地震は、深さが25km変化しても最大震度に与える影響は0.1程度と小さい。それに対し直下地震は、深くなるほど最大震度は小さくなり、1.4の違いが生じた。札幌市の直下地震の場合、深さの設定不確定性が震度分布に与える影響は無視できないことが分かる。

(2) 立ち上がり時間の影響

立ち上がり時間とは断層内の破壊領域が破壊を開始してから破壊終了に要するまでの時間のことであり、一般的には地震動スペクトルの短周期側のコーナー周期に影響する。しかし、Kobayashi and Midorikawaの方法では、その影響は波の継続時間に吸収されてしまっており、その影響は定かではない。前出の文献⁵⁾より立ち上がり時間の設定誤差範囲を最大75%とした。直下地震の場合、立ち上がり時間の短い方が最大震度で0.2程度大きくなったが、遠距離地震では最大震度の変化は認められなかった。立ち上がり時間の工学的取り扱いにおける影響の少なさは、他の論文でも指摘されているところである。短周期及び長周期波を半経験的及び理論的地震動評価によるハイブリッド手法で合成した検討でも、応答スペクトルに与える揺らぎも±10%程度であり⁵⁾、立ち上がり時間の地震動への影響は小さいと考えられる。

表1 震度分布への影響を検討するための震源パラメーター一覧

パラメータ	単位	想定直下地震		遠距離地震	
		標準設定	揺らぎ幅	標準設定	揺らぎ幅
断層長さ	km	20		120	
断層幅	km	10		25	
変位量	m	1		4	
断層面分割数		12×12		15×5	
破壊開始点		断層南端	北端-南端	断層南端	北端-南端
立上り時間	秒	1.1	±75%	4.5	±75%
傾斜角	°	45	45, 90, 135	55	
深さ	km	1	1~26	4.3	1~26
S波速度	km/秒	3.5		3.4	
破壊速度	km/秒	2.3	±30%	2.9	±30%
断層位置		図3①	図3①② ③④⑤⑥	N42.53° E139.45°	

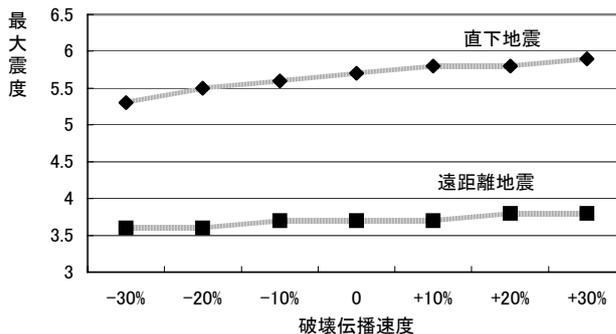


図5 破壊伝播速度の不確定性が震度分布に与える影響

(3) 破壊伝播速度の影響

前出の文献⁵⁾より不確定性±30%で変化させ、市域内の最大震度を比較する。結果を図5に示す。両地震とも破壊伝播速度の増加に伴い震度は大きくなり、この場合、遠距離地震で0.2、直下地震で0.6の違いが認められる。直下地震は破壊伝播速度の影響をより大きく受けることが分かり、設定に際し注意を要する。

(4) 破壊開始点の影響

断層面を南端から北端まで長さ方向に12分割し、南端より一領域ずつ破壊開始点をずらして計算する。断層の幅方向の破壊は同時に起こることとした。図6に破壊開始点が北端・中央・南端の場合の札幌市全域の震度分布図を示す。左側が直下地震の場合(断層位置①を直線で示す)、右側が遠距離地震の場合である。破壊形式は南端および北端の場合が一方破壊(unilateral)であり、中央の場合が両方向破壊(bilateral)である。直下地震の場合は、破壊が進行していく方向に震度が大きくなる地域が出現する。一方、遠距離地震の場合は、震度が大きくなるのは常に市域の北東部で、表層に泥炭層が分布している軟弱地盤地帯である。遠距離地震は常に地盤条件の悪い地域で震度が最大となる傾向を示すのに対し、直下地震は断層の破壊開始点を何処に設定するかによって震度が最大となる地域が変わり、かつ震度分布パターンも極めて大きく変化している。

(5) 傾斜角の影響

直下地震の場合、断層の傾斜角の不確定性は震度分布に大きく影響する。図7は断層位置が⑥、断層の北端を破壊開始点とし、傾斜角を断層面東側の地表面からの伏角でそれぞれ45°、90°、135°とした場合の震度分布を示している(他のパラメータについては表1の標準設定)。表層地質の影響で北東部に震度の大きな領域がやや偏って現れているものの、震度5以上の領域が傾斜角に応じて動

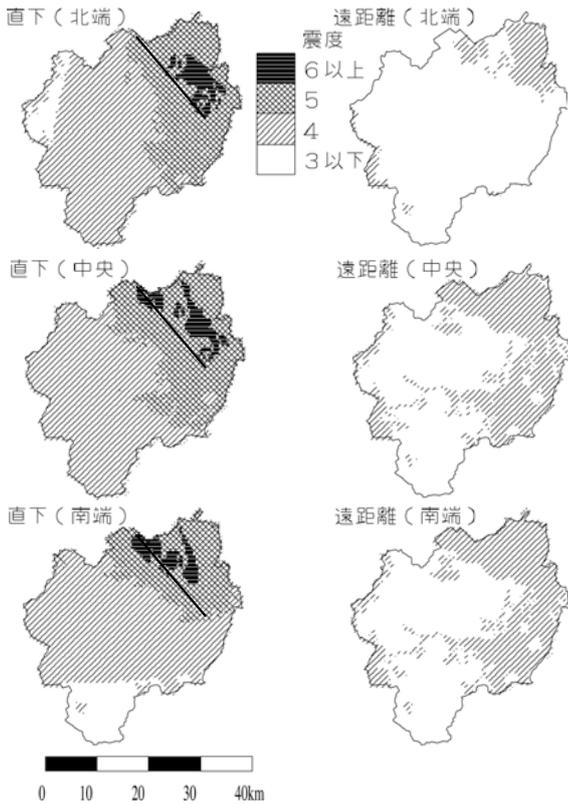


図6 破壊開始点の不確実性が震度分布に与える影響

いているのが分かる。

(6)断層位置の影響

断層位置の震度分布への影響は明らかである。図8は断層位置を③、⑤、⑥と変えた場合の震度分布を示している(傾斜角は135°、断層破壊開始点は南端)。

4.5 被害評価に与える影響

(1) 防災計画上配慮すべき震源パラメータ

前章より、震源パラメータの設定不確実性は直下地震に、より大きく影響することが理解できる。遠距離地震の場合、地震動に与え

るその影響は小さいためそれほど不確実性に注意を払うことのなかった震源深さ・破壊伝播速度についても、札幌市においては直下地震の場合無視し得ないことが判明した。想定される揺らぎの範囲内で、震源深さはより浅い方がまた破壊伝播速度はより早いほうが当該地域の最大震度は大きくなり、これへの対策を行使することは、防災計画上 max-min の判断原理(最悪状況下での損失最小化)に立つことを意味し、防災への前提状況は設定しやすい。また、地震規模(マグニチュード)に関する断層長さ・幅・滑り量は、その地域で過去に出現したものにある程度の安全率を見込んで想定するなどの防災上の配慮は可能である。しかし断層破壊開始点(震源位置)・断層位置・傾斜角の違いは、直下地震の場合震度の分布を大きく変えてしまい、安易な設定は誤った防災計画を誘導してしまう。これらについては想定される揺らぎ幅の中でシミュレーションし、被害分布を求め、防災対策の観点より重要なものを抽出し、計画に生かしていく必要がある。この検討のために、地震動分布・被害分布に不確実性がより影響する震源パラメータ(位置・傾斜角及び破壊開始点)の評価被害量への影響を次に考察する(図1:手順④)。

断層の地表面からの最浅位置を図3に示す6カ所とし、断層の傾斜角を45°、90°、135°の3パターン、破壊形式はエネルギー集中の大きな一方破壊を採用し、破壊開始点を断層南端及び北端の2パターンとする。いずれも前記した不確定範囲内で想定したものである。その他のパラメータは表1の標準設定とする。以上の36パターンについて被害を算定した。結果は、当該市街地の主要街路網を境界とする(平均約0.25km²)ゾーン単位で出力する。図9にゾーン及び行政区を示す。それぞれの想定地震の震源パラメータ及び木造住家の評価被害を行政区単位で集計した対照表を表2に示す。

(2) 防災計画上重要な地震シナリオ

シミュレーションした36のケースより、防災計画上重要なものを指摘する(図1:手順⑤⑥)。図1のチャートに示したように複数の被害対策シナリオが必要なケースとして、まず当該地域においてこれまで経験してきた震度分布あるいは被害分布と大きく異なるもの

がある場合、防災計画に必要な被害シナリオは従来のものと別仕立てとなるので見逃さない。既述のとおり札幌市は北東部が泥炭層・砂泥じりシルト層等の軟弱地盤で覆われており図6右側(北海道南西沖地震相当)にみるように、表層地質が震度分布を決定づける場合が多く、地域住民の理解もそれに沿ったものである。しかし、図7・8で示したように、表層地質以上に震源位置等が分布に強く影響する場合もある。防災対策上、別シナリオの準備と地域住民への危険度周知が要諦となる。配慮すべきもう一つの点は、同一地域で評価被害量にばらつきがあるかどうかということであろう。被害量が安定している地域は被災人口の見積もりが容易で、固定的被害シナリオで防災対応が可能であるが、被害量が大きくばらつく地区がある場合、地区の被災時の役割が支援側・被支援側の両建てを留意する必要があるなど地区ごとに複数のシナリオの必要性がある。札幌市についてまず地域全体の被害分布を眺めてみる。図10は木造住家被害棟数の最大を与える地震

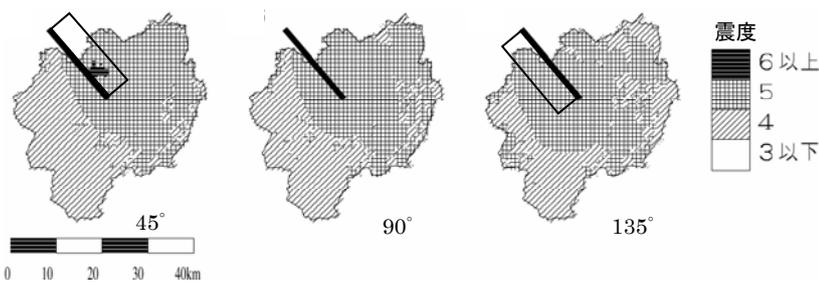


図7 断層傾斜角の不確実性が震度分布に与える影響

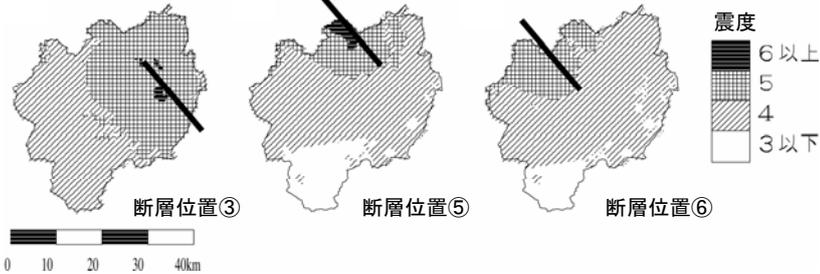


図8 断層位置の不確実性が震度分布に与える影響

と最小被害のそれとの被害分布比較である。同図は図9に示した市街地のゾーン区分図上に全壊・半壊・一部破損を含めた全被害棟数を濃淡で示してある。被害棟数の最も多いものを最大被害地震（断層位置③、傾斜角45°、破壊開始点南端：EQ13）とし、最小被害地震（断層位置⑥、傾斜角135°、破壊開始点南端：EQ33）と被害棟数を比較すると、全壊（2,569：1）・半壊（27,791：3,582）・一部破損（77,799：9,550）を含めた全被害棟数（108,159：13,133）で8.2倍の違いがあり、被害量は全く異なる。被害分布にも大きな違いが見てとれ、最大被害地震は市街地全体に全壊被害が発生しており、被害棟数が500棟を超える潰滅ゾーンは50を超えている。また死者も全市的に発生する。一方、最小被害地震では全壊は手稲区に1棟、半壊・一部破損も市北西部のみに偏在しかつ死者も発生しないなど、被害分布・様相に相当の違いが認められる。

札幌市は9の行政区に分かれており^{脚注)}、区を単位として被害分布のパターンを検討する。図11は36の地震について各区の全壊棟数を示したものである。一本の線が一つの地震に対応している。また、各地区の被害量のばらつきを矢印で示している。同図によると、パラメータの変動に伴い被害量も大きく変動する不安定な地区（北区、東区、白石区）と安定した地区（南区、厚別区、手稲区）とあるのが分かる。不安定な地区は軟弱地盤上に位置した地区であり、震源パラメータの不確実性による被害量のばらつきが、地盤特性による増幅効果により助長されたことが考えられる。軟弱地盤地区は、地震時の被害は一般に大きく、防災重点地区に指定される場合が多い。しかし、パラメータの不確実性による影響にも敏感であり、発災対応型の事前対策が立て難い地区でもあるのが分かる。図11では、地震（パラメータ）によっては硬質地盤地区よりも被害の小さい場合もあり得ることを示唆しており、この場合、軟弱地盤地区は被災地区の後方支援としての役割も担うことになる。

以上の検討より、札幌市においては防災対策上、複数の被害シナ

表2 震源パラメータと行政区別木造全壊被害棟数一覧

地震コード	傾斜角	破壊位置	開始点	中央区	北区	東区	白石区	豊平区	南区	西区	厚別区	手稲区	全市
EQ 1	4.5	南端	①	30	703	727	189	26	0	113	1	91	1,882
EQ 2	9.0	〃	〃	43	388	293	47	19	0	140	0	120	1,050
EQ 3	13.5	〃	〃	134	317	174	20	48	11	272	0	219	1,195
EQ 4	4.5	北端	〃	64	393	792	662	356	17	56	75	2	2,419
EQ 5	9.0	〃	〃	92	201	333	315	316	34	67	30	4	1,393
EQ 6	13.5	〃	〃	214	152	203	209	379	117	156	18	17	1,456
EQ 7	4.5	南端	②	16	64	38	4	7	7	88	0	99	316
EQ 8	9.0	〃	〃	0	2	0	0	0	1	5	0	32	40
EQ 9	13.5	〃	〃	0	0	0	0	0	5	0	0	15	20
EQ10	4.5	北端	〃	53	26	54	55	97	147	36	5	7	479
EQ11	9.0	〃	〃	0	0	4	3	15	78	0	0	0	100
EQ12	13.5	〃	〃	0	0	0	0	2	80	0	0	0	82
EQ13	4.5	南端	③	113	377	981	628	319	12	73	54	12	2,569
EQ14	9.0	〃	〃	143	264	502	293	263	25	89	14	15	1,610
EQ15	13.5	〃	〃	266	230	357	195	334	96	142	5	21	1,646
EQ16	4.5	北端	〃	1	0	87	278	204	4	0	58	0	632
EQ17	9.0	〃	〃	0	0	16	87	151	9	0	17	0	279
EQ18	13.5	〃	〃	9	0	4	38	202	48	0	6	0	308
EQ19	4.5	南端	④	91	103	132	44	63	122	84	0	18	656
EQ20	9.0	〃	〃	3	17	25	5	3	56	12	0	6	126
EQ21	13.5	〃	〃	1	1	2	0	0	62	2	0	1	69
EQ22	4.5	北端	〃	0	0	0	1	32	63	0	0	0	96
EQ23	9.0	〃	〃	0	0	0	0	1	25	0	0	0	26
EQ24	13.5	〃	〃	0	0	0	0	0	32	0	0	0	32
EQ25	4.5	南端	⑤	1	195	65	0	0	13	0	52	326	
EQ26	9.0	〃	〃	0	58	6	0	0	12	0	75	151	
EQ27	13.5	〃	〃	1	26	0	0	0	40	0	159	227	
EQ28	4.5	北端	〃	71	793	909	183	44	3	167	8	59	2,236
EQ29	9.0	〃	〃	92	443	454	112	40	7	199	3	82	1,431
EQ30	13.5	〃	〃	166	348	301	81	48	18	331	0	167	1,461
EQ31	4.5	南端	⑥	0	3	0	0	0	0	2	0	56	61
EQ32	9.0	〃	〃	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
EQ33	13.5	〃	〃	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
EQ34	4.5	北端	〃	73	108	137	44	24	16	132	0	70	604
EQ35	9.0	〃	〃	3	13	30	7	2	7	18	0	15	95
EQ36	13.5	〃	〃	1	0	4	1	0	9	4	0	2	21

脚注) 1998年に豊平区は豊平区と清田区に分区された。

リオを用意する必要性のあることが分かった。

(3) 防災計画的観点からの地震動入力決定指針

札幌市において直下地震を想定する場合、震度分布や被害分布に与える震源パラメータの影響が地盤増幅特性以上に大きく関わってくる場合もあり、この場合、不確実性は無視できないことが、前章の解析より明らかとなった。地域防災計画の基本資料となるべき想定震度分布・被害分布を一意に決めたい可能性がありながら、何らかの判断基準に則って一つに絞って被害評価を行い、それをターゲットに防災対策を立案しているのが、しかしながら現実である。

震源パラメータを一意に決めたいという不確実性の問題は、本論で取り上げた札幌市の例に見られるような、当該地域に影響する

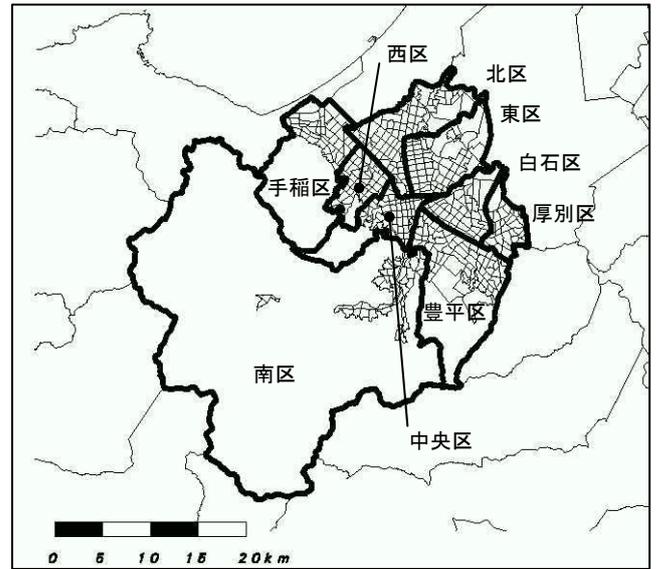


図9 札幌市のゾーン区分と行政区

最大被害地震の場合(EQ13) 最小被害地震の場合(EQ33)

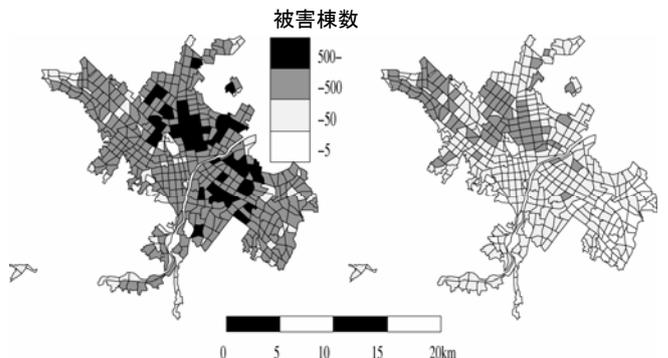


図10 最大被害地震と最小被害地震の被害分布比較（住居被害）

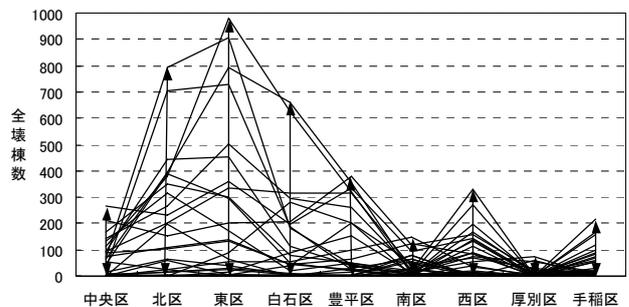


図11 各行政区の木造住家全壊棟数の評価のばらつき

直下地震断層が不明である場合以外にもよく見られる。たとえば、東京都のように、地域に大きな被害をもたらすと思われる断層が複数存在する場合である。この問題に対して都は4種の被害を想定し比較検討している¹⁹⁾。また、多くの場合がそうであるように、断層位置が確定されていたとしても破壊開始点・破壊方向・破壊形式など想定した断層の動き方を容易に特定できないことは多い。さらに、パラメータには本質的に仮定しないと、値を設定できないものもある⁵⁾。何れの場合も、評価結果に大きな偏差が生じるはずである。

複数の被害パターンへの検討が地域防災計画立案の正鵠であることを述べてきたが、実務的な立場からは当面の標的をどう設定すべきか、すなわちパラメータの絞り込みのルールを検討する問題が浮上してくる(図1:手順⑧)。本来は、当該地域の評価・防災業務に関わる三者(地震学、地震工学、防災行政)による協議で当該地域の優先施策基準を決定すべきである。その判断基準の考え方を以下に提案し、札幌市の場合を例示する。

地震学的観点からの基準は、種々の震源パラメータが想定される場合、その発生確率を判断根拠とすべきであろうが、一般に難しい。札幌市の場合も、表1に示したパラメータの想定揺らぎ幅の中での発生確率は同程度との判断であり、地震学的観点のみからでは決定できない。地震工学(都市計画学)的そして防災行政的観点からの規準を考える必要がある。その規準に照らし該当する被害のパターンを当該地域の重要地震とし、防災計画シナリオに反映させる手順が考えられる。地震工学的観点からの基準の一つは被害量最大を与える地震を優先させるといふものであろう。検討のための規準を3軸提案する(表3)。物的被害が最大となるケース(工学A)、

表3 対策決定のための地震被害パターン分類

地震工学・都市計画学的観点からの規準		
工学A	物的最大被害を与えるケース	地震コード
	1 被害量(被害額)最大	
	2 住民被害(住居被害)最大	EQ13
	3 住民生活(ライフライン)被害最大	
	4 地域被害(基幹産業被害)最大	
工学B	間接被害最大を与えるケース	
	1 人的被害が最大	EQ28
	2 火災延焼が最大	EQ28
	3 後続被害が最大	
工学C	開発計画区の被害が最大となるケース	
	1 人口増加地域の被害が最大	EQ3、EQ30
	2 都市計画重点地域の被害が最大	EQ4
防災行政的観点からの規準		
防災A	対応パターンが大きく異なるケース	
	1 全市的に被害が広がる	EQ13、EQ15
	2 被害量が際立つ地区が複数ある	EQ9、EQ11
	3 被害が市の一部に集中	EQ16,22,25
防災B	中枢施設集中地区が被災するケース	
	1 防災中枢施設集中地区の被災	EQ15
	2 政経情報中心地区の被災	EQ15
	3 地域基幹産業施設集中地区の被災	
	4 商業中心地区の被災	EQ15
	5 住宅集中地区の被災	
防災C	危険地区が被災するケース	
	1 産業危険施設が被災	
	2 指定危険地域(急傾斜地等)が被災	EQ15
	3 歓楽密集地域が被災	EQ15
	4 旧市街地が被災	EQ15、EQ28
防災D	迅速対応が難しい地区が被災	
	1 遠隔地が被災	EQ11
	2 被災により交通アクセスが途絶	EQ4
	3 災害弱者が多い地区が被災	EQ3, EQ4

間接被害が最大となるケース(工学B)、そして将来の人口増加に対応した都市開発計画重点地区の被害が大きくなるケース(工学C)である。それぞれの規準は地域の事情により細分されるであろう。例を表3に示し、札幌市について該当する地震コードを併記する。札幌市の場合、被災人口が最も大規模(工学A-2規準)になるのは図10に示した最大被害地震(EQ13)である。間接被害に関しては、人的被害、火災延焼、地域活動低下のような後続被害が検討対象となる。人的被害・火災延焼は古い木造密集地域で多発する。札幌市は近年において新築住居の簡易耐火あるいは耐火構造の採用率が上昇しており(8.6%(1980)、14.6%(1991))²⁰⁾、不燃化が進んでいるものの、依然旧木造住宅は多い。図12は1992年現在の札幌市における旧木造住家(1970年以前のもの)の棟数分布²⁰⁾である。特に北区に密集しており、この地区に大きな被害を及ぼす地震(工学B-1,2規準)は地震コードEQ28であるのが分かる。

図13は札幌市における木造新築住家(1970年以降)の棟数分布を示しており²⁰⁾、新築住家の多い地区は人口増加の新興住宅地区(手稲区・厚別区)に一致する。同地区への被害が大きい地震はEQ3、EQ4、EQ30であり、開発地区を襲う地震として都市計画的に重要視すべき地震(工学C-1,2規準)となる。

防災行政的観点からは4つの軸を提案する。対応が大きく異なる地震パターン(防災A規準)、たとえば、被害分布が全市的に拡大する場合(地震コードEQ13:図10、EQ15:図14)と被害が一部あるいは離れた複数の地域に集中する場合(地震コードEQ9、EQ11、EQ16、EQ22、EQ25)とでは、支援対応の様相が異なる。被害分布の偏りにより被災地域と支援地域に分かれるからである。札幌市の場合、被災地点が複数となるケース(防災A-2規準)そして一部

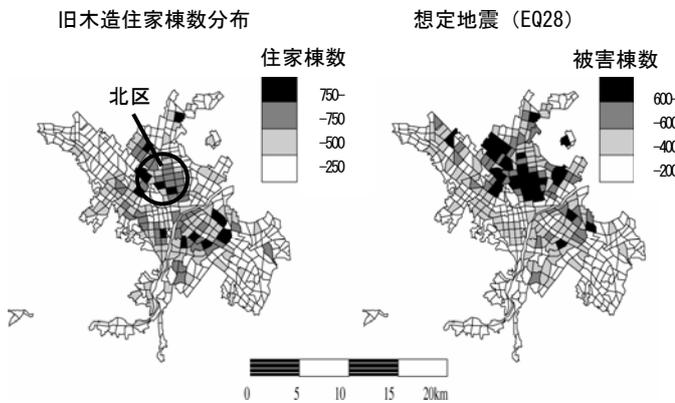


図12 旧木造住家棟数分布とそれに影響する想定地震

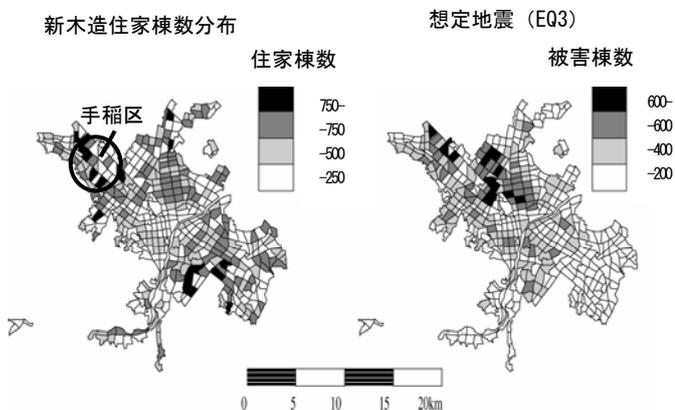


図13 新木造住家棟数分布とそれに影響する想定地震

に集中するケース（防災A-3 規準）では被害量が小さく（表2）、対策重点からはずすことは可能である。

諸対応の難しい地震被害の対応優先度を上位化するという規準がある。市の中核施設が被災し対策が主導できなくなる場合（防災B規準）がある。札幌市の場合、中央区に基幹施設が集中しており、地震コードEQ15がこれら多くに影響する（防災B-1,2,4規準）。また危険地域が被災し被害が拡大することへの対策（防災C規準）を講じる必要がある。図14は札幌市の人口密度分布である²⁰⁾。同図より12,000人/km²以上の人口集中の激しい旧市街地（防災C-4規準）は、豊平区から中央区西側であり、地震コードEQ15はこの地区への影響も大きく、札幌市にとり重要度の極めて高い地震といえそうである。被災時の迅速対応が難しい地区を優先する規準（防災D規準）もある。札幌市における南区定山溪は札幌市街地から20kmと離れており、また主要アクセス道も1本であり、災害時の孤立化が懸念されている（防災D-1規準）。影響ある地震はEQ11であるが、被害量はそれほど大きくはない（表2）。中心地と結ぶ主要アクセス道に橋梁が架かっていたり、道路幅員の狭い地区は被災時に孤立化する恐れがある（防災D-2規準）。また、高齢者が多かったり転出入者が多く地区コミュニティの劣る地区は復旧期においても脆弱であり、優先度を上げる必要がある（防災D-3規準）。

以上のルールに照らし、重要度の高い地震を抽出し、対策に利用すればよい。被害分布は地震動に市街地形成が関わって決定する。札幌市の場合市街地形成のゾーン区分が明快で、防災対応に地域的偏りを生み出す被害パターン（防災A-2,3規準、防災D規準）は、評価被害量は比較的小さく、重要視すべき地震のパターンは限られそうである。以上の検討より抽出された札幌市の防災重点地区と関

連する想定地震を図15に概略で示す。軟弱地盤地区に一致する住居被害が最大の地震（EQ13）、旧住家が多く人的被害が最大の地震（EQ28）、中枢地区に影響する地震（EQ15）が、札幌市にとり重要視すべき地震（パラメータ）と結論できる。

4. 結語

直下地震とプレート境界に発生する遠距離地震ではその地震動入力の評価の際に注意すべき点異なり、それがその後の地震対策計画立案に極めて大きく影響することが分かった。直下地震は震源パラメータ設定の僅かな違いが地域内の地震動・被害量・被害分布を大きく変化させてしまう。直下地震の被害想定を1パターンのみについて行うのは、実際の地震動被害と全く異なった情報を与えかねない。地域の被害地震想定に当たり十分配慮すべき点として指摘しておきたい。本稿では当面の被害地震を想定するためのルールを地震被害をパターン化して検討することを提案した。

本研究遂行に当たり、北海道立寒地住宅都市研究所より札幌市の地盤関連資料を、また札幌市企画調整局計画部都市計画課には住居に関する資料をそれぞれ提供いただいた。翠川三郎氏（東京工業大学大学院総合理工学研究科）には地震動入力計算プログラムを提供していただいた。記してお礼申し上げる次第である。本研究は平成10～11年度文部省科学研究基盤研究(B)「都市直下地震を想定した入力地震動の考え方と地域防災計画のあり方」（課題番号：10450198、代表者：岡田成幸）の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 朝日新聞社：1995年8月24日付朝日新聞朝刊。
- 2) 伊藤豊治：地震被害予測システムの現状及び今後のあり方，地域安全学会論文報告集，7，62-5，1997。
- 3) 田村栄一・高見信二・石原晃彦・岡山和生：地震被害想定支援マニュアルの開発，地域安全学会論文報告集，7，72-77，1997。
- 4) 戸松 誠・南 慎一・道脇正則・大野雄一・竹内慎一：市町村の地震防災マップ作成手法に関する研究，地域安全学会論文報告集，8，450-455，1998。
- 5) 中尾吉宏・田村敬一・本田利器・千葉光：断層パラメータの設定が推定地震動に与える影響，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，667-672，1998。
- 6) 入倉孝次郎：活断層を想定した強震動予測，平成8-10年度東京大学地震研究所特定共同研究(B)報告書，1-6，1999。
- 7) 阿部勝征：札幌市とその周辺の地震活動，自然災害科学資料解析研究，8，1-9，1981。
- 8) 笠原稔：札幌の地震，地形と地質，さっぽろ文庫（北海道新聞社），77，253-266，1996。
- 9) 戸松 誠・岡田成幸：都市直下地震を対象とした被害評価のあり方～札幌市を例にして～，日本建築学会北海道支部研究報告集，70，221-224，1997。
- 10) 太田 裕・後藤典敏・大橋ひとみ：地震時の死者発生数予測に関する実験式の一構成，地震2，36，463-466，1983。
- 11) Kobayashi H. and S. Midorikawa：A semi-empirical method for estimating response spectra of near-field ground motions with regard to fault rupture，Proc. of the Seventh European Conference on Earthquake Engineering，2，161-168，1982。
- 12) 岡田成幸・宮川忠芳・太田 裕：高密度震度調査にもとづく地域内震度予測式の構成～札幌市を例として～，日本建築学会構造系論文報告集，348，11-18，1985。
- 13) Muramatu I.：Expectation of maximum of earthquake motion within 50 years throughout Japan，Sci. Rep. Gifu Univ.，3，470-481，1966。
- 14) 鏡味洋史・岡田成幸・村上公一・高井伸雄：1993年北海道南西沖地震の札幌都市圏の詳細震度調査，文部省科学研究費突発災害調査研究成果 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する研究調査，43-46，1994。
- 15) 阿部勝征・吉田康宏・井出哲：1993年北海道南西沖地震と津波の地震学的考察，文部省科学研究費突発災害調査研究成果 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する研究調査，51-58，1994。
- 16) 日本建築学会：1993年釧路沖地震災害調査報告 1993年北海道南西沖地震災害調査報告，1-497，1995。
- 17) 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測，構造工学論文集，33B，43-48，1997。
- 18) 日高英治：長周期微動から推定されるレイリー波位相速度とS波速度構造～石狩平野地域について～，北海道大学大学院理学研究科修士論文，1-129，1985。
- 19) 熊谷良雄：都市直下の地震を対象とした被害想定のある方，地域安全学会論文報告集，7，56-61，1997。
- 20) 札幌市：札幌市都市計画基礎調査，1992。

(1999年5月26日原稿受理，1999年12月6日採用決定)

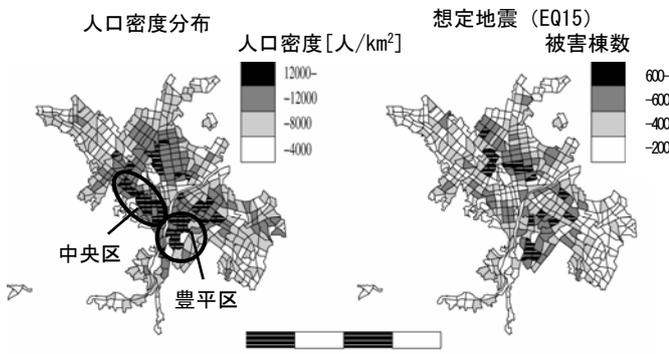


図14 人口密度分布とそれに影響する想定地震

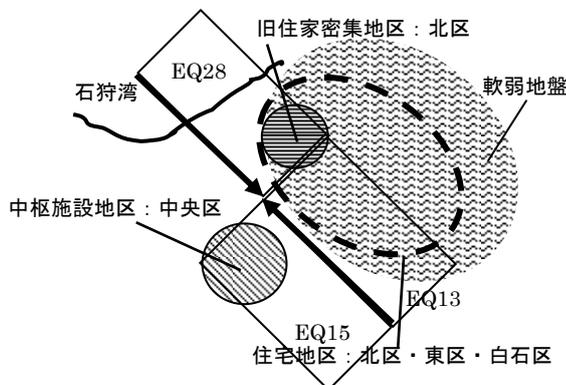


図15 札幌市の対策重点地区に影響する想定地震