

わが国の全地震活動モデルを用いた 震度曝露人口による地震リスク評価

能島 暢呂¹・加古 涼介²

¹正会員 岐阜大学教授 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:nojima@gifu-u.ac.jp

²学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:v3121011@edu.gifu-u.ac.jp

地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図の基礎データとして、わが国周辺の全地震活動モデルが用いられており、地震ハザードステーション(J-SHIS)で公開されている。本研究では、全地震活動モデルに基づいて、震度曝露人口 PEX を推計し、地震発生確率 P との関係を P -PEX 関係として表し、これに基づいて地震リスクカーブを求めて地震リスク評価を行った。また震度レベルごとに、30 年期待震度曝露延べ人数を求め、その内訳の考察を行った。さらに、地震リスク評価の応用として、供給系ライフライン（電気・水道・都市ガス）の地震時機能被害・復旧予測モデルを用いて、4 種類（地震直後、3 日間、1 週間、1 ヶ月間）の途絶リスクカーブを推計した。

Key Words: 全国地震動予測地図, 地震活動モデル, 震度曝露人口, 30 年地震発生確率, 地震リスクカーブ, 供給系ライフライン, 途絶リスクカーブ

1. はじめに

地震調査研究推進本部は、わが国の地震ハザードに関する総合的な調査研究の成果として、2005 年より全国地震動予測地図を公開している¹⁾。このうち確率論的地震動予測地図は、想定されるすべての地震を対象としたものであり、震度分布予測と地震発生確率の長期評価の双方における種々の不確定性を考慮して地震動ハザード評価を行い、その結果をまとめて作成される地図である。近年の公表経緯としては、2012 年版および 2013 年版確率論的地震動予測地図は、2011 年東北地方太平洋沖地震($M_w=9$)の教訓を踏まえて、主として地震活動モデルの面で様々な改良が加えられたうえで試作版として公表された¹⁾。その後、2014 年版 (2014 年 12 月)²⁾、2016 年版 (2016 年 4 月)³⁾、2017 年版 (2017 年 4 月)⁴⁾と継続的に公表されている¹⁾。

(国研)防災科学技術研究所では「地震ハザードステーション(J-SHIS)」⁵⁾を通じて、各種の地震動予測地図および作成に用いられた基礎データなどの関連情報を公開している。前報⁶⁾では、2008 年版確率論的地震動予測地図の作成にかかる基礎データの中から、震源断層が特定された内陸活断層地震（主要活断層帯およびその他の活断層）に焦点を絞って、震度分布と人口分布を重ね合わせ

て震度曝露人口(PEX: Population Exposure to shaking intensity)を求め、30 年地震発生確率(P)と合わせた P -PEX 関係と、それに基づく地震リスクカーブによりリスク評価を行った。また、内陸活断層地震のリスクを多面的に捉えることを目的として、切迫度、影響度、中立リスク、一般化リスク指標を用いた活断層のランキングを行った⁶⁾。

本研究では、より総合的な地震リスク評価を目指して、日本周辺の全地震活動モデルに対象地震を拡張し、震度曝露人口を用いた地震リスク評価を行うものである。具体的には、2016 年版確率論的地震動予測地図の作成に用いられた全地震活動モデル（平均ケース）を対象として、陸域および海域における震源断層を特定した地震および震源不特定地震に関わる震度曝露人口をすべて算出し、 P -PEX 関係と地震リスクカーブによりリスク評価を行う。加えて、震度レベルごとに 30 年期待震度曝露延べ人数を求め、その内訳の傾向を考察する。さらに、地震リスク評価の応用として、供給系ライフライン（電気・水道・都市ガス）の地震時機能被害・復旧予測モデル^{7,8)}を用いて、4 種類（地震直後、3 日間、1 週間、1 ヶ月間）の途絶リスクカーブを推計し、短期・中期・長期的なライフライン途絶リスクを評価する。

2. 使用したデータと処理方法

(1) 震源データ

2016 年版確率論的地震動予測地図の作成に用いられた全地震活動モデルの分類を表-1 に示して、以下にその概要を記す。陸域の地震は約 27.8 万モデル、海域の地震は約 67.7 万モデル、両者あわせて約 95.5 万モデルを対象とした。

a) 陸域の地震（地殻内地震で震央が海域にあるものを含む）

主要活断層帯による地震 208 モデル、主要活断層帯に発生する地震の連動地震 26 モデルおよび痕跡を認めにくい地震 1018 モデル、その他の活断層による地震 150 モデル、震源断層を予め特定しにくい地震約 27.7 万モデル（計約 27.8 万モデル）である。このうち、主要活断層帯に発生する連動地震と痕跡を認めにくい地震に関しては、「活断層の長期評価手法⁹⁾」および「九州地域の活断層の長期評価¹⁰⁾」を受けて、2013 年版より新たに導入されたものである^{付録1)}。

震源断層を予め特定しにくい地震については、地震地体構造区分に基づき 25 に分割された領域ごとに属性が定められている。地震規模については、最大マグニチュードと m_U （陸域で $m_U=7.3$ 、海域で $m_U=7.5$ ）が領域ごとに定められ、最小マグニチュードは共通で $m_L=5.0$ とされている。マグニチュードは刻み幅 $\Delta m=0.1$ で離散化され、震源位置は経度 0.1 度×緯度 0.1 度の空間分割により 11209 地点に離散化されており、マグニチュードとの組み合わせで約 27.7 万モデルとなる。震源断層は地下 3km の点震源で表現されている。

b) 海域の地震（海溝型地震で震央が陸域にあるものを含む）

震源断層を特定した地震については 14 地震 37 モデル、震源断層を予め特定しにくい地震については約 67.6 万モデル（計約 67.7 万モデル）である。震源断層を特定した 14 地震のうち、南海トラフの地震の震源域については、全体が一つの領域として評価されており、その領域は東西方向に日向灘、南海、東南海、東海に分割され、南北（深さ）方向には、固着が強い領域を中心に浅い領域と深い領域が設定されている。これらの複数の領域が連動して 1 つの地震として発生する場合の 11 パターンと、2 つの地震が短期間に続発する場合の 4 パターンの計 15 パターン（ $M_w8.2\sim9.1$ ）が設定されている²¹⁾。相模トラフ沿いの地震の震源域については、フィリピン海プレートの上面深さ方向に浅部・中部・深部に分割され、東西方向に浅部・中部に分割されて 5 つの領域が設定されている。これらの複数の領域が単独または隣接する領域の組み合わせにより、大正関東地震や元禄関東地震から最大クラスの地震まで計 10 パターン（ $M_w7.9\sim8.6$ ）が

表-1 確率論的地震動予測地図の作成に用いられる
基礎データの分類(2016 年版)

地震の種類		震源位置 の個数	地域区分やマ グニチュード を考慮した震 源の個数
内陸 活断層 地震	主要活断層帯による地震	208	208
	連動地震	26	26
	痕跡を認めにくい地震	199	1018
	その他の活断層による地震	150	150
	震源断層を予め特定しにくい地震	11209	276768
	小計	11792	278170
海溝型 地震	震源断層を特定した地震	37	37
	震源断層を予め特定しにくい地震	27780	676486
	小計	27817	676523
合計		39609	954693

設定されている²¹⁴⁾。

震源断層を予め特定しにくい地震の設定方法に関しては、 m_L は全領域で 5.0、 m_U は下限値 6.8 として地域区分ごとに設定され、 $\Delta m=0.1$ として約 67.6 万の地震モデルが考慮されている。震源断層の形状に関しては、点震源モデル、矩形成断層モデル、円形断層モデルなどが使い分けられている。

(2) 地震発生確率データ

震源断層を特定した地震の 30 年発生確率としては、基本的に J-SHIS⁹⁾による公開データを用いた。平均活動間隔と最新活動時期が判明している場合は更新過程（時間軸原点：2016 年 1 月 1 日）、最新活動時期が不明な地震は平均活動間隔のみを考慮したポアソン過程が用いられている⁹⁾。

主要活断層帯に発生する連動地震の地震発生確率は文献¹⁰⁻¹²⁾に基づいて公開されている⁹⁾。痕跡を認めにくい地震の平均活動間隔は、 $M6.8$ 以上の地震に対して、当該主要活断層帯の単位区間の平均活動間隔の 2 倍とされている²⁾。これに b 値 0.9 のグーテンベルク・リヒター式を適用し、 $\Delta m=0.1$ 刻みの年発生率を算出して 30 年発生確率を求めた。海溝型の連動ケースを含む地震（南海トラフ沿い、相模トラフ沿い、十勝沖～根室沖）に関しては、単独発生・連動を区別しない延べ確率が公開⁹⁾されており、文献²⁾の確率配分方法に基づいて全パターンの 30 年発生確率を算出した。

震源断層を予め特定しにくい地震の地震発生率は、陸域・海域ともに、2010 年末までの気象庁震源データに基づいて算出されている²⁾。陸域における発生頻度に関しては、1885 年以降の観測データに基づいて 25 の領域ごとに評価されてきたが、2014 年版以降、局所的な影響を緩和するため、より大領域で平均化した発生頻度も考慮して、25 の地域区分を統合した 4 つの大領域（糸魚川～静岡構造線の東部、同 西部、伊豆諸島以南、南西諸島）が設定された²⁾。地震発生頻度としては、25 の地域区分と 4 つの大領域における地震発生頻度を 2 : 1

で重み付けした評価値が採用されている。これらについては公開データ⁵⁾を使用した。

(3) 震度分布データ

確率論的地震動予測地図の作成にあたっては、すべての地震について、簡便法（距離減衰式を用いた地震動予測手法）¹⁵⁾によって震度分布が推定されている。J-SHIS⁵⁾に震度分布データが公開されているもの（震源断層を予め特定しにくい地震以外）と、公開されていないもの（震源断層を予め特定しにくい地震）がある。本研究では、それらのいずれについても、確率論的地震動予測地図の作成に用いられている震度分布推定手法（東北日本および南西日本の異常震域補正等を含む）¹⁵⁾に従って地表面震度の中央値を算出した。

(4) 人口データと震度曝露人口の評価方法

人口分布データについては、平成 22 年度国勢調査に基づく 2 分の 1 地域メッシュ（約 500m）の夜間人口データを震度分布（約 250m メッシュ）データとのメッシュサイズを整合させるため 4 分割して 4 分の 1 地域メッシュデータ（約 250m）を使用した。上記の全地震活動モデルを用いて求められた 5 段階（震度 5 弱以上、5 強以上、6 弱以上、6 強以上、7）のレベルの震度分布と人口分布とをメッシュ単位で重ね合わせ、震度曝露人口^{16),17)}を算出した。

距離減衰式に基づく強震動予測のばらつきには、マグニチュード依存性、距離依存性、振幅依存性などの特性が指摘されている¹⁸⁾。確率論的地震動予測地図の作成においては、海溝型地震に関しては距離依存性、内陸活断層地震に関しては振幅依存性のばらつきがモデル化されている¹⁵⁾。震度曝露人口の評価にあたって、こうした距離減衰式周りのばらつきは、平均 0、標準偏差 σ の正規分布で表される窓関数により計測震度単位の震度曝露

人口の移動平均をとって平滑化することで考慮でき、前報⁹⁾では $\sigma=0.45$ の窓関数を採用した。しかしその後の検討¹⁹⁾において、内陸活断層地震に関しては $\sigma=0.41$ 、海溝型地震に関しては $\sigma=0.34$ が妥当との結果^{付録2)}が得られたため、本研究ではこれを踏襲することとした。

3. P-PEX 関係による地震リスク評価

各地震をイベント E_i で表すと、横軸をイベント E_i の震度曝露人口 $PEX(E_i)$ 、縦軸をイベント E_i の 30 年発生確率 $P(E_i)$ としたものが、両対数軸上にプロットした P-PEX 関係である⁹⁾。震度曝露人口 PEX は「影響度」、30 年地震発生確率 P は「切迫度」に相当すると解釈できる。期待値としての等リスク線（ $P \times PEX = \text{const.}$ の線）は右下がりの 45° 線で表され、期待値としての地震リスク $PEX(E_i)P(E_i)$ が高い図右上側が高リスク領域、逆に図左下側が低リスク領域となる。また図右下側はいわゆる「低頻度巨大災害」のリスク領域である。

以下では代表例として震度 6 弱以上の P-PEX 関係を示す。図示は省略するが、震度レベルが高くなるに従って震度曝露人口は単調減少し、一方の確率レベルには変化がないため、各プロットは左方に平行移動する。

(1) 陸域の地震

陸域の地震による震度 6 弱以上の P-PEX 関係を図-1(a)に示す。最も高いリスク水準にあるのは、断層長さ L が 20km 以上（マグニチュード 7 以上）に相当する主要活断層帯による地震（緑色の○）に多い。それらは例えば、立川断層帯（震度曝露人口約 1,300 万人、30 年発生確率 1.35%）、上町断層帯（同 約 1,100 万人、2.89%）および中央構造線断層帯和泉山脈南縁（同 約 800 万人、2.56%）などによる地震である。痕跡を認めにくい地震（青色

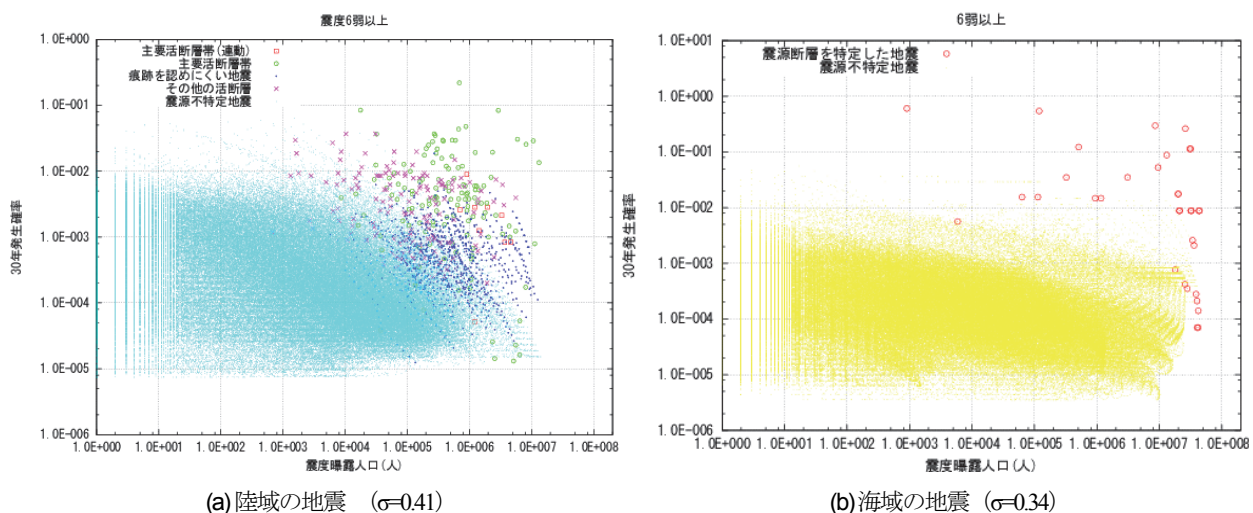


図-1 30 年地震発生確率と震度曝露人口との P-PEX 関係（平均ケース）

の・)については、一断層について複数のマグニチュードの地震が設定されるため、グループごとに規則的に並ぶ傾向が見て取れる。プロット数は1018ケースとかなり多数であり、上限近いマグニチュード設定においては、発生確率は低いものの震度曝露人口は多数に及ぶ。主要活断層の連動(赤色の□)については26ケースと少ないため、あまり際立ったプロットとなっていない。

断層長さ10km以上(マグニチュード6.5以上)に相当するその他の活断層帯による地震(紫色の×)については、全体的にややリスク水準が低いものの、30年発生確率、震度曝露人口、ともに主要活断層帯による地震に匹敵する地震も存在しており、注意が必要である。

震源不特定地震(水色の・)は、空間的(緯度0.1度×経度0.1度)かつ規模的($\Delta m=0.1$)にケースが細分化されている。このため発生確率は総じて低くなり、突出して高いリスク領域にあるものはない。しかしながら対象地震は27.7万にのぼり、リスク累積効果は大きい。全国地震動予測地図では、主要活断層帯の30年発生確率が 10^{-5} (=10%)未満の場合、「ほぼ0%」として確率論的地震動予測地図作成の計算上においては確率ゼロとされている。しかし震源不特定地震については、考慮の対象とする確率の下限値を設けておらず、本研究でも全地震を対象としている。

震度曝露人口の30年期待値が1未満となる領域は、図のほぼ左下三角(1×1 と $10^6 \times 10^6$ を結ぶ等リスク線より下)に相当する。こうした震源不特定地震も考慮しないと、地震リスクを明らかに過小評価することになる。また、最大マグニチュードは陸域で7.3、海域で7.5に設定されていることから、大都市近傍でマグニチュードの大きい地震になると、震度曝露人口に関して主要活断層帯やその他の活断層を上回る水準にあるものも多い。

(2) 海域の地震

海域の地震による震度6弱以上のP-PEX関係を図-1(b)に示す。震源断層を特定した地震(赤色の○)のリスクが圧倒的に高いことがわかる。右上に並ぶ地震の多くは南海トラフ沿いの単独または連動地震である。期待値的な意味でのリスク水準(30年発生確率 $P \times$ 震度曝露人口PEX)が最も高いのは、東南海-東海連動地震(震度曝露人口約2,600万人、30年発生確率26.3%)である。次いで南海-東南海-東海浅部連動地震(同約3,100万人、11.4%)、南海-東南海-東海連動地震(同約3,100万人、11.4%)となっている。一方、色丹島沖の地震は30年発生確率が最も高く60.6%にも及んでいるが、震度曝露人口は903人と相対的に少ない。逆に、南海トラフ沿いの4連動地震は震度曝露人口が4,000万人以上であり、影響度は最も高いが、30年発生確率は0.88%となっている。この他の南海トラフ沿いの連動地震もかなりリスク水準

が高い。これらに次いで、相模トラフ沿いのM8クラスの地震が、30年発生確率が小さく相対的にリスク水準が低くなっているが、震度曝露人口は約1,800万~4,200万人規模の地震であり、発生した際の被害は甚大なため注意する必要がある。

震源断層を予め特定しにくい地震(黄色の・)に関しては、すべてまとめてプロットしたため、陸域で発生する震源断層を予め特定しにくい地震(約27.7万モデル)よりも考慮するモデル数(約67.6万モデル)が多い。30年発生確率の高低および震度曝露人口の規模ともに、非常に幅が広くばらついているが、地震数が極めて多数であるため、地震リスクの過小評価をしないよう注意が必要である。

4. リスクカーブによる地震リスク評価

(1) 陸域の地震

陸域の地震について、図-1(a)に示した震度6弱以上のP-PEX関係に基づく地震リスクカーブを図-2(a)に示す。黒線は陸域の地震すべてを合算したもの、その他の色はその内訳を示す。また「主要活断層(total)」は、主要活断層帯による地震、それらの連動地震、痕跡を認めにくい地震に限って合算したものである。

主要活断層帯による地震については、震度曝露人口が少ない一部領域を除いて累積確率が最も高く、全体を支配している。連動地震はケース数が少ないことから全体への寄与は小さい。これに対して、痕跡を認めにくい地震はケース数が多いことから、その他の活断層による地震をもほぼ全域で上回っている。その他の活断層帯による地震は、主要活断層帯と比べて全体的に左よりであることから地震リスクが相対的に低いと言える。

震源断層を予め特定しにくい地震については、震度曝露人口が少ない一部領域において、主要活断層による地震を上回っている。震源断層を予め特定しにくい地震は、規模が小さい地震が多く、震度曝露人口が相対的に少ないケースが多い。一方、空間的に地震発生位置が細分化されているため30年発生確率が小さい一方で、その数は約27.7万ケースと膨大になる。小規模災害のリスクはかなり高いため、その地震リスクを過小評価しないようにする必要がある。

図-2(b)は、陸域のすべての地震を考慮して統合したリスクカーブを震度階ごとに示したものである。震度レベルにより大きく異なった様相を示し、震度5弱以上においては、数千万人の曝露人口規模でも累積確率はかなり高い値を示している。

(2) 海域の地震

海域の地震について、図-1(b)に示した震度 6 弱以上の P-PEX 関係に基づく地震リスクカーブを図-3(a)に示す。黒線は海域の地震すべてを合算したもの、その他の色はその内訳を示す。

震源断層を特定した地震のリスクカーブについては、対象とした 37 ケースの地震（単独で発生する地震 23 ケース、連動して発生する地震 14 ケース）に関しては、全体的に 30 年発生確率が高いため、1 ケースごとに累積確率の急激な変化が見られる。今後 30 年間に 2,000 万人以上が震度 6 弱に曝露される可能性は、約 45%にものぼる。

震源断層を予め特定しにくい地震については、マグニチュードが相対的に小さく、非常に細分化されているために個々の地震の発生確率レベルも低い。しかしながら、極めて多数のケースからなるため、震度曝露人口 2000 万人以下の領域において、累積確率が 20%から 100%に至るまでほぼ直線的に増加しているのが特徴的である。震度曝露人口 1000 万人以下では、震源断層を特定した

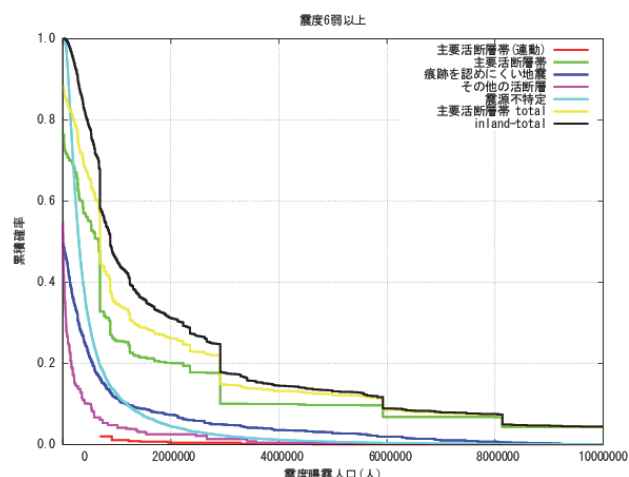
地震を上回っており、全体を支配している。

図-3(b)は、海域に発生するすべての地震に関するリスクカーブを震度階ごとに示したものである。震度曝露人口は陸域の地震より数倍の規模となっている。特に震度 5 弱以上においては、数千万人の曝露人口規模でも累積確率はかなり高い値を示しており、震度曝露人口 2,000 万人規模での累積確率はほぼ 100%で 6,000 万人規模でも 50%を超えている。

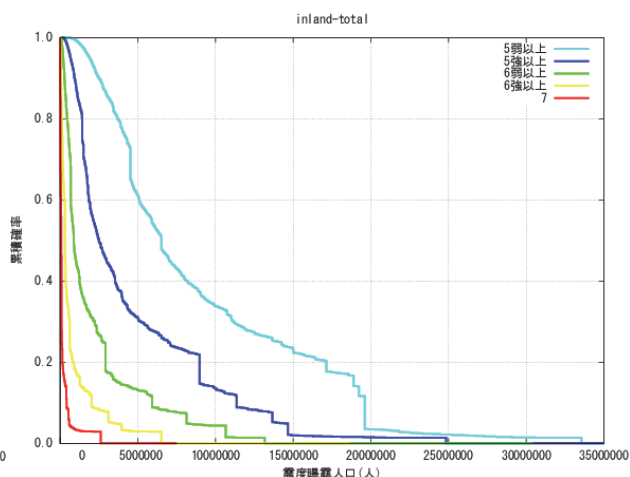
(3) 全ての地震

図-4(a)は、図-1(a)および図-2(a)に示した陸域および海域の地震による震度 6 弱以上の P-PEX 関係に基づいて、全てあわせた地震リスクカーブである。黒線はすべての地震を合算したもの、その他の色は陸域・海域の内訳を示す。トータルのリスクカーブ（太線）は海域の地震にほぼ支配されている。

図-4(b)は、全地震に関するリスクカーブを震度階ごとに示したものである。いずれの震度階に関しても、海域の地震の結果を示した図-3(b)とほぼ同様となっている。

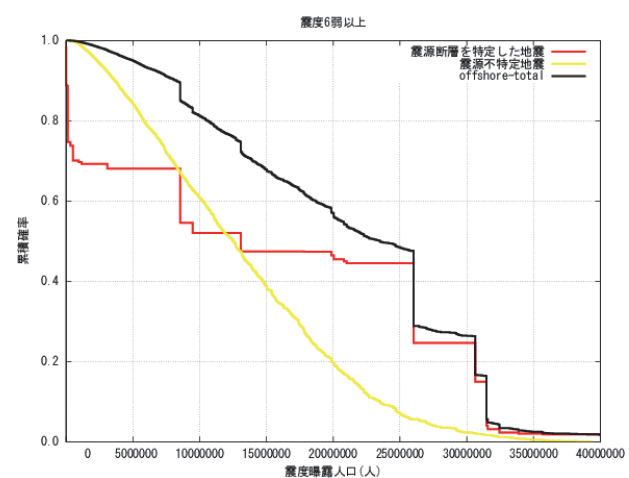


(a) 震度 6 弱以上の内訳

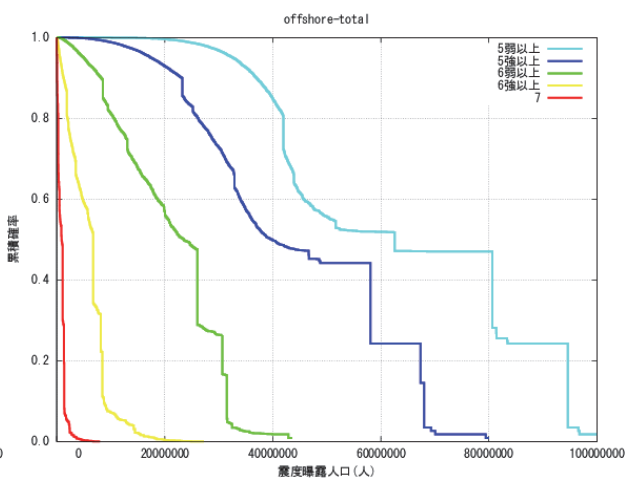


(b) 震度レベル間の比較（陸域全地震）

図-2 陸域の地震による地震リスクカーブの比較（平均ケース、 $\sigma=0.41$ ）



(a) 震度 6 弱以上の内訳



(b) 震度レベル間の比較（海域全地震）

図-3 海域の地震による地震リスクカーブの比較（平均ケース、 $\sigma=0.34$ ）

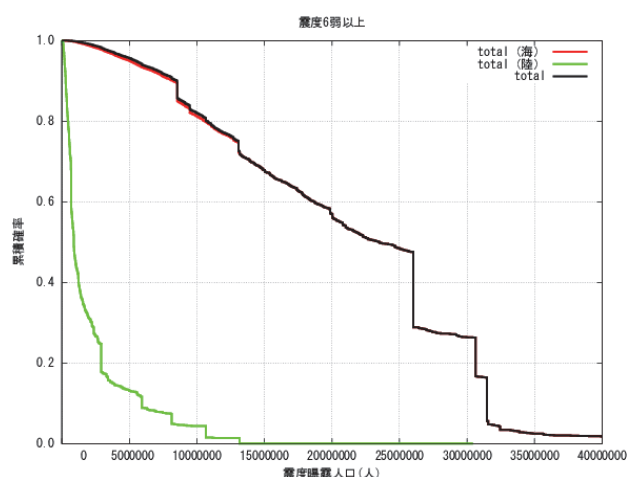
海域の地震のリスクが陸域の地震リスクより相対的に高いのは、海域の地震の切迫度としての 30 年発生確率と、その影響度としての震度曝露人口がいずれも高いことによるものである。

一方、累積確率のかなり低いレベルについて、対応する横軸の震度曝露人口を参照すると、陸域で発生する地震に関しても、かなり大きな値を示す。陸域の内陸活断層による大規模地震の発生確率は概して小さいため、リスク比較の上では、低頻度巨大災害という面では、内陸活断層地震の地震リスクを軽視するべきではないと言える。

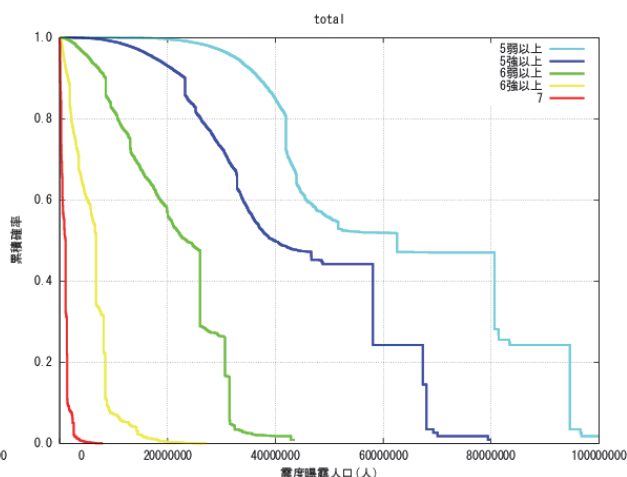
最後に、表-3 に 30 年超過確率に対応する震度曝露人口をまとめておく。

表-3 30 年超過確率に対応する震度曝露人口 (万人)

30 年超過 確率	5 弱 以上	5 強 以上	6 弱 以上	6 強 以上	震度 7
3%	9,658	6,930	3,387	1,445	261
6%	9,464	6,799	3,147	1,118	239
26%	8,142	5,808	3,063	815	131
50%	6,257	3,980	2,351	671	109

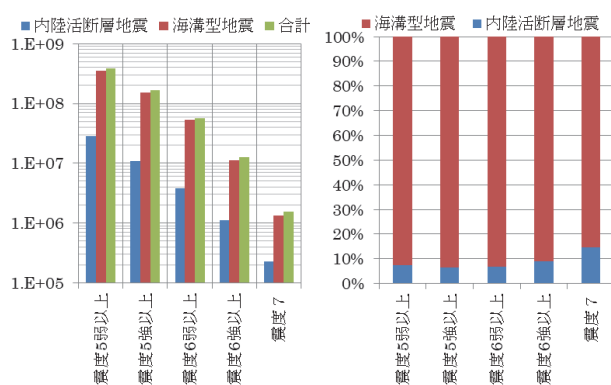


(a) 震度6弱以上の内訳

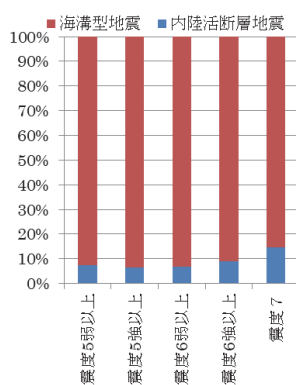


(b) 震度レベル間の比較 (total)

図-4 全地震活動モデルによる地震リスクカーブ (平均ケース)



(a) 絶対数での比較



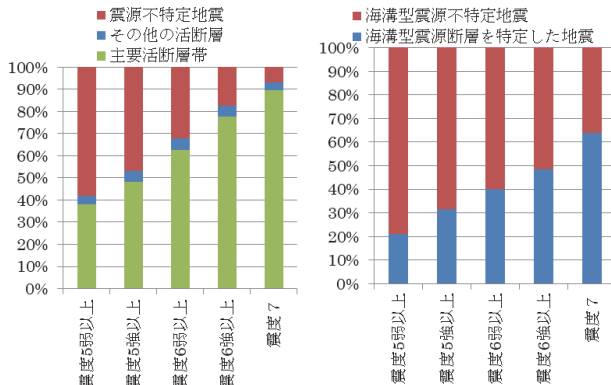
(b) 相対比較

図-5 震度レベルごとの 30 年期待震度曝露延べ人数

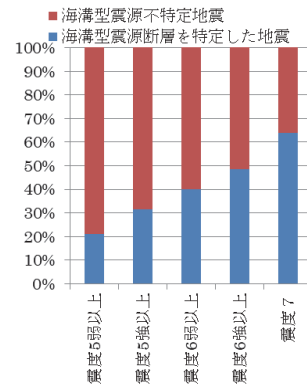
5. 期待震度曝露人口による地震リスク評価

震度レベルごとに、30 年期待震度曝露延べ人数 (複数回の震度曝露を考慮した延べ人数) を $\Sigma P \times PEX$ により求めて図-5 に比較した。内陸活断層地震と海溝型地震の合計は、震度 5 弱以上 3.83 億人、5 強以上 1.65 億人、6 弱以上 5,647 万人、6 強以上 1,247 万人、震度 7 で 157 万人となった。図-5(a)の絶対数での比較をみると、どの震度レベルにおいても内陸活断層地震と海溝型地震の人数の差は 1 桁程度あり、海溝型地震の方が、リスクが高く、被害が甚大であることがわかる。また、図-5(b)の絶対比較をみると、海溝型地震が圧倒的に高いリスクを保有していることがわかる。しかし、内陸活断層地震のシェアは震度 6 弱以上までは 7%程度であるが、震度 6 強以上で 10%弱、震度 7 で 15%まで増加し、震度レベルの大きい領域においては高いリスクを示している。

図-6 に震源区分に関する構成比率を示す。図-6(a)をみると、内陸活断層地震は震度レベルが上がるにつれて、主要活断層帯による地震が支配的となる。震度 6 弱以上では 60%を超え、震度 7 では 90%が、主要活断層帯による地震であり、高いリスクを持っているといえる。逆に



(a) 陸域の地震



(b) 海域の地震

図-6 30 年期待震度曝露延べ人数の構成比率

低震度レベルでは震源不特定地震の影響が大きく、震度 5 弱以上で 60%、5 強以上で約 50%を示すため、地震防災を考える上で、リスクを考慮する必要がある。その他の地震はどの震度レベルにおいても一定の割合を示している。図 6(b)をみると、海溝型地震も同様に震度レベルが上がるにつれて、震源断層を特定した地震の影響が大きくなっていく。しかし、震度 6 強以上までは震源不特定地震の方が高い割合を示す。震度 5 弱以上では 80%の割合を示しており、非常に高いリスクだといえる。

6. 供給系ライフラインの途絶リスク評価

本章では、全地震活動モデルを用いた地震リスク評価の応用として、供給系ライフライン（電気・水道・都市ガス）の供給停止リスクに関する評価を行う。評価のための時間断面に関しては、地震直後、3 日後、1 週間後、1 ヶ月後の 4 時点を代表として取り上げ、それぞれ直後の途絶リスク、3 日間途絶リスク、1 週間途絶リスク、1 ヶ月途絶リスクの評価を行う。

(1) ライフライン供給人口分布を用いた震度曝露人口

震度曝露人口を求めるために用いるライフライン供給人口分布について説明する。電気・水道に関しては普及率を 100%として全人口を使用する。

都市ガスの普及率は全国平均 55%程度のため、実際に都市ガス供給を受けている人口分布が必要となる。既往研究⁸⁾では、平成 22 年度国勢調査による地域メッシュ統計の 2 分の 1 地域メッシュ（約 500m 四方）の夜間人口データを 4 分の 1 地域メッシュ（約 250m 四方）に変換したものに、都市ガス供給対象市区町村における人口集中地区内外別の都道府県別普及率を掛け合わせて都市ガス供給人口分布を推定した。

以上による供給人口分布に全地震活動モデルによる震度分布を重ね合わせて震度 5 弱以上、5 強以上、6 弱以上、6 強以上、7 の震度曝露人口をそれぞれ算出し、その差分により各震度階（5 弱、5 強、6 弱、6 強、7）の震度曝露人口を算出する。

(2) 供給系ライフラインの地震時機能的被害・復旧予測モデル

本研究では、供給系ライフラインの地震時機能被害・復旧予測モデル⁷⁸⁾を適用する。このモデルは、1995 年兵庫県南部地震の被災事例に基づいて、計測震度を説明変数として供給系ライフラインの地震時機能を二段階で評価する簡便なモデルである。第一段階では機能停止確率の予測、第二段階では供給停止期間の予測を行う。両者を組み合わせたモデルを用いると、計測震度入力に対

して、任意の地震後経過時間における電気・水道・都市ガスの停止確率が求められる。このモデルは推定精度の向上を図るために改良が重ねられてきた⁸⁾。改良モデルを東日本大震災の被災事例に適用して、供給支障人口の初期被害とその解消過程を事後評価して実測値との比較を行ったところ、モデルの妥当性が検証された⁷⁾。

ここでは、計測震度を説明変数とする基本モデルを適用するが、簡便のため計測震度ではなく震度階を入力情報として、対応する 5 つの計測震度の機能停止確率の平均値を震度階ごとの機能停止確率とする。水道を例にとると、震度 6 弱による地震直後の停止確率としては、6

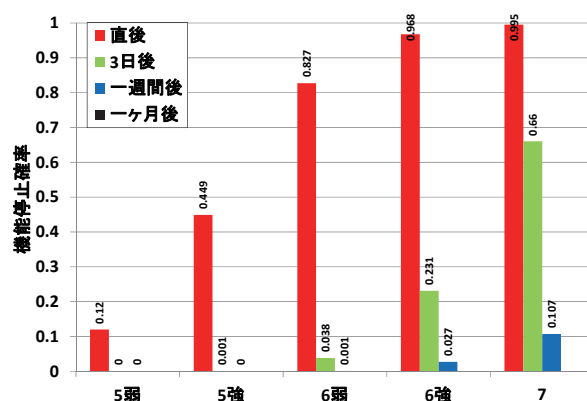


図7 電気の途絶確率

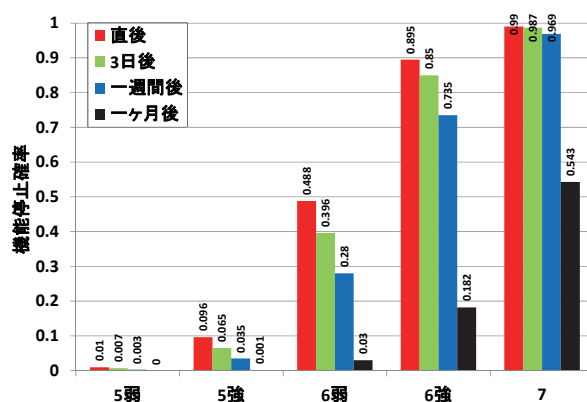


図8 水道の途絶確率

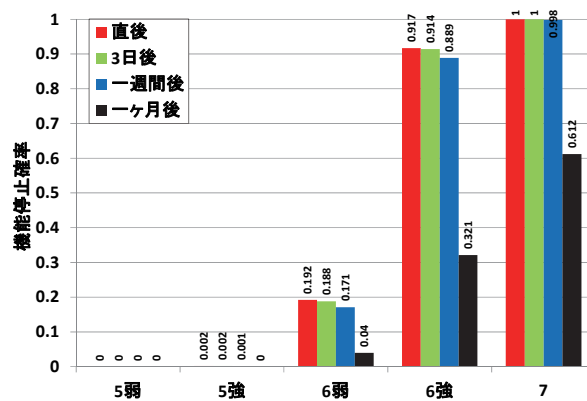


図9 都市ガスの途絶確率

弱 (5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9) に対応する 5 つの機能停止確率 (0.270, 0.372, 0.487, 0.604, 0.710) の平均値として 0.488 とした。同様に地震発生後の 4 時点における機能停止確率を求めた結果を図-7～図-9 に示す。これらをそれぞれ、地震直後の途絶確率、および 3 日間、1 週間、1 ヶ月間の途絶継続確率とする。

供給系ライフラインの地震リスク評価として、各震度階の震度曝露人口に途絶確率を乗じて、すべての震度階について総和をとることによって、ライフライン供給支障人口を求めることができる。

(3) 評価結果

図-10～図-13 に、それぞれ地震直後、3 日間、1 週間、1 ヶ月間の途絶リスクカーブを示す。

電気に関しては、地震直後の途絶リスクが 3 システム中で圧倒的に高いレベルにある。停電人口規模で最大約 6000 万人となっており、3000 万人程度の途絶確率も 50%を超える。相対的に低い震度でも停電確率が高いためである。しかし復旧のペースは早く 3 日間の途絶リスクは供給系の電気・水道・都市ガス 3 システムの中で最も少なくなっている。1 週間後にはほとんど復旧が進み、

1 ヶ月後における停電リスクは 0 となっている。ただしこれは応急給電という手段を含めた機能的復旧であり、大規模災害においては対応力不足によって停電が長期化する可能性があることに注意が必要である。

水道に関しては、電気と比較すると地震直後の停止リスクは、断水人口規模で約半数である。時間経過とともに断水人口は減少するものの復旧のペースは遅い。3 日間途絶リスクは供給系の中で最も高い結果となっている、1 ヶ月間の長期断水のリスクも低いとはいえず、飲料水の十分な備蓄や、給水支援体制の強化の必要がある。また抜本的な対策として、大容量送水管の整備や、耐震管率の向上も、途絶リスクを全般的に低減するうえで重要である。

都市ガスに関しては、現行の供給停止判断基準の設定により、低い震度レベルにおける不要な供給遮断を回避できることと、普及率が相対的に低いことから、地震直後の途絶リスクは、停止人口規模では供給系で最も低い結果となっている。しかし復旧のペースは供給系の中で最も遅い。これは、安全重視の作業工程が組まれることと、震度 6 強以上を中心とした高震度レベルでの供給停止が中心となるためである。結果として、地震直後と 1

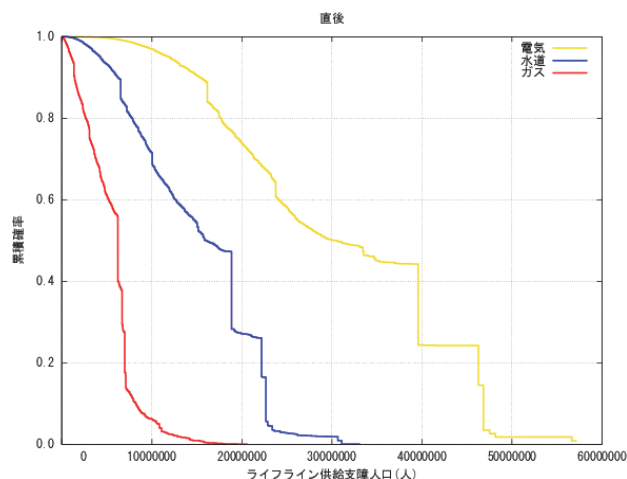


図-10 直後の途絶リスクカーブ

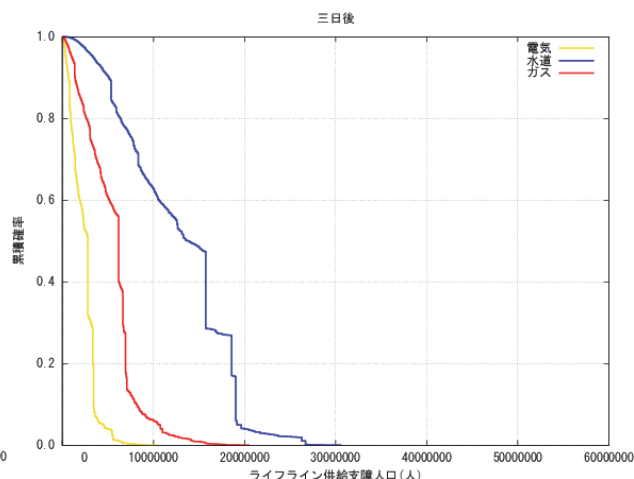


図-11 3日間途絶のリスクカーブ

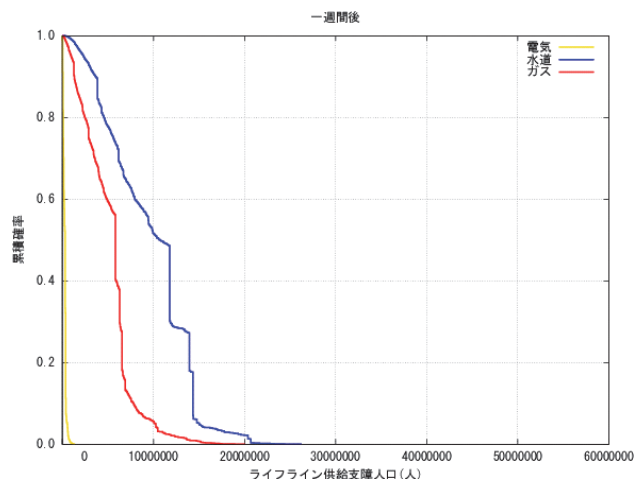


図-12 1週間途絶のリスクカーブ

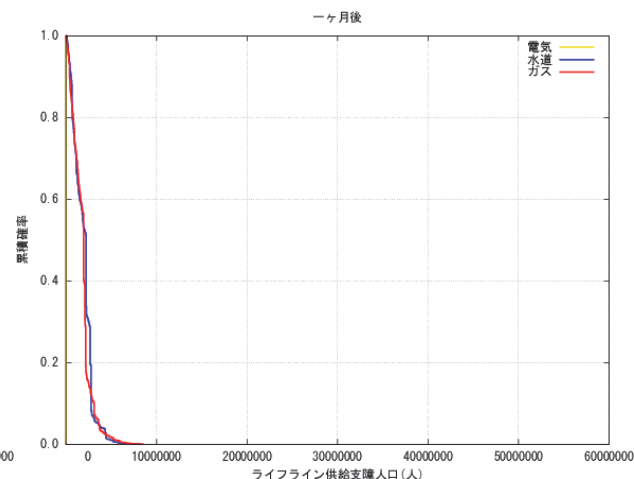


図-13 1ヶ月途絶のリスクカーブ

週間の途絶リスクの差異は大きくないことがわかる。1ヶ月間の途絶リスクはやや低減されており、水道とほぼ同等となっている。2016年熊本地震では導管被害は少なかったため復旧ペースは速かった。これは近年の耐震管率の向上の成果と考えられ、今後も耐震管の普及を推進することにより、長期間の途絶リスクを低減することが期待される。

7. まとめ

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- (1) 2016年版の確率論的地震動予測地図に用いられた日本周辺の全地震活動モデルを用いて、各地震による震度階別の曝露人口 PEX を算出した。影響度と切迫度によるリスク表現として、各地震の30年発生確率 P との P -PEX 関係を求め、地震リスクの全貌を明らかにするとともに、地震リスクカーブによる地震リスク評価を行った。
- (2) 陸域（主要活断層帯に発生する地震、それらの連動地震、痕跡を認めにくい地震、その他の活断層に発生する地震、震源不特定地震）および海域（震源断層を特定した地震、震源不特定地震）の分類に従って地震リスクカーブを個別に求めて比較した。着目する震度曝露レベルおよび確率レベルに応じた寄与度合いや、多数のモデルに分割された震源不特定地震のリスク累積効果を定量的に明らかにした。
- (3) 全地震活動モデルを用いて、震度5弱以上～震度7の5つの震度レベルに関する地震リスクカーブを求めた。海域の地震（特に南海トラフ巨大地震や相模トラフの地震）が全体を支配していることがわかった。ただし陸域の地震も、低頻度巨大災害という面で重視すべきである。
- (4) 震度レベルごとに、30年期待震度曝露延べ人数を求めるとともに、その内訳を示して比較した。震度レベルが高くなると、陸域の地震の占める割合が増加することや、震度レベルが低くなると、震源不特定地震の占める割合が増加することを明らかにした。
- (5) 上記の地震リスク評価の応用として、供給系ライフラインの途絶リスク評価を行った。電気・水道・都市ガスのシステム別に震度階ごとの曝露人口を求め、ライフライン機能停止・復旧予測モデルを適用して、地震直後、3日間、1週間、1ヶ月間の途絶リスクカーブを算出した。各システムの普及率、震度別の初期機能停止確率、復旧確率の違いによって、リスクカーブは特徴的な様相を示し、短期・中期・長期的にみたライフライン途絶リスクの概略を定量的に明らかにした。

わが国は、陸域と海域において、発生確率、地震規模、その影響度といった面で異なった特徴を持つ多数の地震群のリスクに曝されている。本研究では、すべての地震モデルを網羅的に考慮した総合的な地震リスク評価結果を示すものであり、地震リスク対応策を検討するための基礎情報として有意義なものと考えられる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP26350486 および JP17H02068 の補助を得て行ったものである。本研究の実施にあたっては、王棟氏（研究当時 岐阜大学大学院工学研究科）および野田智也氏（同 岐阜大学工学部）の協力を得た。記して謝意を表する次第である。

付録

- (1) 連動地震については、地域評価^{10,12)}の進捗に合わせて順次追加されており、2016年版では九州地域¹⁰⁾および関東地域¹¹⁾のみが評価対象とされている。警固断層帯を例にとると、警固断層帯北西部M7.0と警固断層帯南東部M7.2に加えて、より大規模な警固断層帯連動地震M7.7が想定されている。一方、痕跡を認めにくい地震については、M6.8以上の地震でも明瞭な地表地震断層が出現しない場合や、出現しても断層長さやずれの量が小さい場合があることを鑑みて、より小規模な地震も考慮するものである^{10,12)}。地震規模の上限は固有地震としての単位区間の規模（M7.4を超える場合はM7.4）、下限はM6.8である。警固断層帯北西部ではM6.8～7.0の3種、警固断層帯南東部ではM6.8～7.2の5種が考慮されている。痕跡を認めにくい地震の断層面については、地震規模によらず単位区間の断層面が用いられる。
- (2) 震源断層を特定した地震については、地震発生を条件として各震度レベルの超過確率を表した条件付確率地図が公表されている⁹⁾。文献¹⁹⁾ではまず、これらの条件付確率地図と人口分布データを重ね合わせ、条件付確率を重みとした人口の加重平均値によって震度曝露人口の条件付期待値が求められた。次に、震度曝露人口の分布を平滑化する窓関数の標準偏差 σ を系統的に変化させ、各震度レベルの曝露人口が上記の条件付期待値と等価になるように探索的に求められた結果が $\sigma=0.41$ および 0.34 である¹⁹⁾。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図，2017。
http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2014 年版～全国の地震動ハザードを概観して～，2014.12。

- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2016 年版，2016.6.
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2017 年版，2017.4.
- 5) (国研)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション(J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station)ホームページ，2017. <http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 6) 能島暢呂，藤原広行，森川信之，石川 裕，奥村俊彦，宮腰淳一：震度曝露人口による活断層の地震リスク評価，日本地震工学会論文集，第 10 巻，第 2 号，pp.22-40，2010.
- 7) Nojima, N. and Kato, H., "Modification and Validation of an Assessment Model of Post-Earthquake Lifeline Serviceability Based on the Great East Japan Earthquake Disaster," *Journal of Disaster Research*, Vol.9, No.2, pp.108-120, 2014.
- 8) 加藤宏紀，能島暢呂：供給系ライフラインの地震時機能的被害・復旧評価モデル —市区町村別簡易評価法のシステム構築—，日本地震工学会論文集（JAEE 特集号）第 15 巻，第 7 号，pp.7_354-7_367，2015.
- 9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：活断層の長期評価手法（暫定版），117p.，2010.11.
- 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：九州地域の活断層の長期評価（第 1 版），81p.，2013.2.
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：関東地域の活断層の長期評価（第 1 版），127p.，2015.4.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：中国地域の活断層の長期評価（第 1 版），70p.，2016.7.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第 2 版），94p.，2013.5
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第 2 版），81p.，2014.4
- 15) (国研)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.
- 16) 能島暢呂，久世益充，杉戸真太，鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み，自然災害科学，Vol.23, No.3, pp.363-380，2004.
- 17) 能島暢呂，久世益充，杉戸真太：2000～2005 年の主な地震による震度曝露人口と住家・人的被害との関連に関する考察，自然災害科学，Vol.25, No.2, pp.165-182，2006.
- 18) 翠川三郎，大竹 雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析，日本地震工学会論文集，第 3 巻，第 1 号，pp.59-70，2003.1.
- 19) 井奈波慶：地震ハザードステーション(J-SHIS)を用いた地震リスク評価，岐阜大学工学部社会基盤工学科，2011 年度卒業論文，66p.，2012.3.

(2017.?.? 受付)

RISK ASSESSMENT USING THE COMPREHENSIVE DATABASE OF EARTHQUAKE OCCURRENCE MODELS IN AND AROUND JAPAN IN TERMS OF POPULATION EXPOSURE TO SEISMIC INTENSITY

Nobuoto NOJIMA and Ryosuke KAKO

For probabilistic seismic hazard maps produced by the Headquarters for Earthquake Research Promotion, the comprehensive database of seismic occurrence models in and around Japan is compiled and provided via the website of the Japan Seismic Hazard Information Station (J-SHIS). Taking advantage of the database, this study evaluates the relationship between population exposure to five ranks of seismic intensity scale and the probability of occurrence of earthquakes within 30 years ("P-PEX relation") for all the potential events of earthquake. On this basis, seismic risk curves and expected population exposure are assessed for the period of 30 years. Finally, as an extended application, risk assessment of disruption of utility lifelines are performed for electric power, water and city gas supply focusing on four time phases: immediately, three days, one week and one month after the earthquake.