

論文

内陸地震による家屋の被害率と被害域

小泉 朗*・金折 裕司**

Percentages and regions of structural damage by inland earthquakes

Akira KOIZUMI* and Yuji KANAORI**

Abstract

After the 1995 M_j 7.3 Hyogo-ken-nanbu earthquake, seismic activity increased on the Japanese Islands, and five earthquake disasters--four inland type and one intra-slab type--occurred. The inland-type events include the 1995 Northern Niigata Prefecture earthquake of the reverse-fault type and three strike-slip fault-type earthquakes; the 1997 Northwestern Kagoshima Prefecture earthquake; the 1997 Northern Yamaguchi Prefecture earthquake; and the 2000 Western Tottori Prefecture earthquake. The intra-slab-type earthquake is named the 2001 Geiyo earthquake. The relationship between the structural damage caused by the above five earthquakes and two kinds of earthquake magnitude--the Japan Meteorological Agency scale magnitude (M_j) and the moment magnitude (M_w)-- are investigated. From the present study, no direct relationship between M_j and structural damage can be found, while the number of damaged structures increases with increasing M_w . The percentage of structural damage is calculated by multiplying by 100 the number of damaged structures that are divided by the total number of structures in each municipality. Also, the "damage circle" is defined as the circular area that covers almost every municipality that has one or more earthquake-damaged structures. The maximum structural damage percentage by the inland earthquakes tends to be significantly larger than that by the intra-slab Geiyo earthquake. It is pointed out that the radius of the damage circle due to the strike-slip type inland earthquake is nearly proportional to M_w and is smaller than the radius of the intra-slab earthquake with a similar magnitude.

キーワード：内陸地震，スラブ内地震，家屋被害，自然災害

Key words : inland earthquake, intra-slab earthquake, structural damage, natural disaster

* 山口大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Yamaguchi
University

(現(株)ヒューマンネットワーク)

** 山口大学理学部
Faculty of Science, Yamaguchi University

本論文に対する討論は平成15年8月末日まで受け付ける。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震の発生以降2001年までの間に、国内各地で5つの被害地震が発生している。これらの地震のうち、特に被害が大きかった兵庫県南部地震に関しては、数多くの被害報告がなされている。例えば、中山ほか(1995)は淡路島内における市町村別被害を詳しく調べ、倒壊した家屋の種類から構造物特性との関係を調べている。また、兵庫県南部地震では家屋の全壊率が30%を超える地域が帯状に現れ、“震災の帯”と名付けられた(嶋本, 1995)。この震災の帯と活断層および地盤との関係については、入倉(1996)によって詳しく議論されている。

金折ほか(1999)は、1997年山口県北部地震(M_j 6.6)による家屋被害を字(あざ)ごとに詳しく調べ、被害域が半径10kmの円内に収まることを指摘している。さらに、Kanaori et al. (1999)は、この地震の余震分布から推定された震源断層を9(3×3)のブロックに分けて地震波の伝播をシミュレーションすることにより、工学的基盤での震度や加速度の分布が同心円状になることを示し、被害域が円形になることを裏付けている。

これまで、タイプや規模の違う地震では、家屋被害がどのように異なるかについては詳しく調べられていない。地震による家屋被害を軽減するためには、地震のタイプ、規模および家屋被害状況を詳しく調べ、その結果を被害想定や地域防災に反映させていく必要がある。

ここでは、兵庫県南部地震以降に日本列島内で発生した、タイプや発生深度の異なる5つの地震を対象として、家屋の被害と地震規模との関係を詳しく調べるとともに、それらの結果を比較して、家屋の被害率や被害域と地震のタイプおよび発生深度との関係を議論した。

2. 被害地震の概要

最近の地震活動をみると、1995年兵庫県南部地震以降、日本列島全体で地震活動が活発になっていることがわかる。図1に兵庫県南部地震とそれ以降に発生した被害地震の震央と発震機構を示

す。1995年に逆断層タイプの新潟県北部地震が発生した。1997年には右横ずれタイプである鹿児島県北西部地震、1997年に右横ずれタイプの山口県北部地震、2000年に左横ずれタイプの鳥取県西部地震、2001年に正断層タイプの芸予地震が相次いで発生している。地震の発生深度と発生地域から、芸予地震はスラブ内地震に、他の4地震は内陸地震に分類される。

表1は兵庫県南部地震以降に発生した5つの被害地震の概要である。これら5被害地震による震度分布を図2に示す。

図3には中国地方西部において1997年～2001年に起きた $M_j > 2$ の地震の分布を示した。断面図をみると、この地域の地震は、①深さ20km以浅と②それより深い帯状のゾーン内で起きていることがわかる。①の地震は脆性破壊を起こす地殻の存在を示している。これに対して、②の地震はフィリピン海プレートの上面ないしスラブ内で起きている。2001年芸予地震は、②のスラブ内で起きた地震であるとみなされる。一方、山口県北部地震と鳥取県西部地震は①のタイプである。

平面的な分布をみると、山口県中部から北東方向に伸びる地震の帯が認められる(石川, 1995)。この地震の帯は活断層系として定義された弥叡山西-大原湖断層系に沿っている(金折, 1998)。1997年山口県北部の地震と2000年鳥取県西部地震はそれぞれ、この北東-南西方向の地震帯の両端付近に位置している。さらに、この断層系の南西端と南西延長部でそれぞれ、1987年山口県中部の地震(M_j 5.2)と1991年周防灘の地震(Mj 6.0)が起きている(金折ほか, 2001)。

図4abに新潟県北部地震と鹿児島県北西部地震の本震と余震の分布を示した。新潟県北部地震については本震発生後1週間以内に起きた余震分布を示し、鹿児島県北西部地震については本震発生後3日間の余震分布を示した。いずれの地震も余震は20km以浅で発生しており、内陸地震であることを示している。

3. 地震の特徴と被害

解析の対象とした5地震による家屋被害と人的

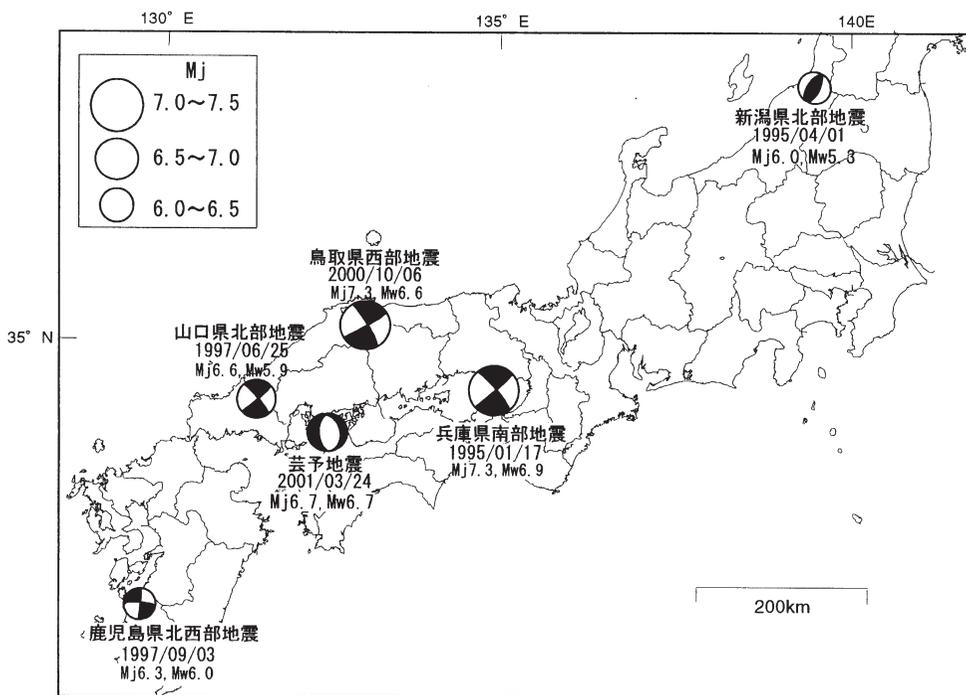


図 1 1995 年以降日本列島で発生した被害地震の震央と発震機構 (気象庁のデータに基づく)

表 1 5つの地震の概要

発生年月日	地震名	震央		M		発生震度 (km)	断層のタイプ
		緯度	経度	Mj	Mw		
1995 年 4 月 1 日	新潟県北部	37.9° E	139.3° E	6.0	5.3	17	逆断層
1997 年 3 月 26 日	鹿児島県北西部	31.9° E	130.4° E	6.3	6.0	12	左横ずれ断層
1997 年 6 月 25 日	山口県北部	34.45° E	131.67° E	6.6	5.9	12	右横ずれ断層
2000 年 10 月 6 日	鳥取県西部	35.3° E	133.4° E	7.3	6.6	10	左横ずれ断層
2001 年 3 月 24 日	芸予	34.1° E	132.7° E	6.7	6.7	51	正断層

気象庁のデータに基づく

Mj: 気象庁マグニチュード

Mw: モーメントマグニチュード

な被害を表 2 に示す。以下に、これら 5つの地震と震源断層の特徴および被害について詳しく述べる。

3.1 山口県北部地震

1997 年 6 月 25 日に山口県北部を震源とする M_j 6.6 の地震が発生した。震央の位置は $34.45^\circ N$, $131.67^\circ E$ で、震源の深さは 12 km と発表された

(気象庁発表)。

山口県北部地震の余震は、平面的には北東-南西方向の長さ約 10 km ほどのゾーンに集中している (図 3 参照)。このゾーンは傾斜がほぼ垂直であり、地下 15 km 付近から地表下 5 km にかけて認められる。余震の集中するゾーンは、迫田 - 生雲断層の北東部を覆っている。この地震の発震機構は東西圧縮による右横ずれ型と報告されている

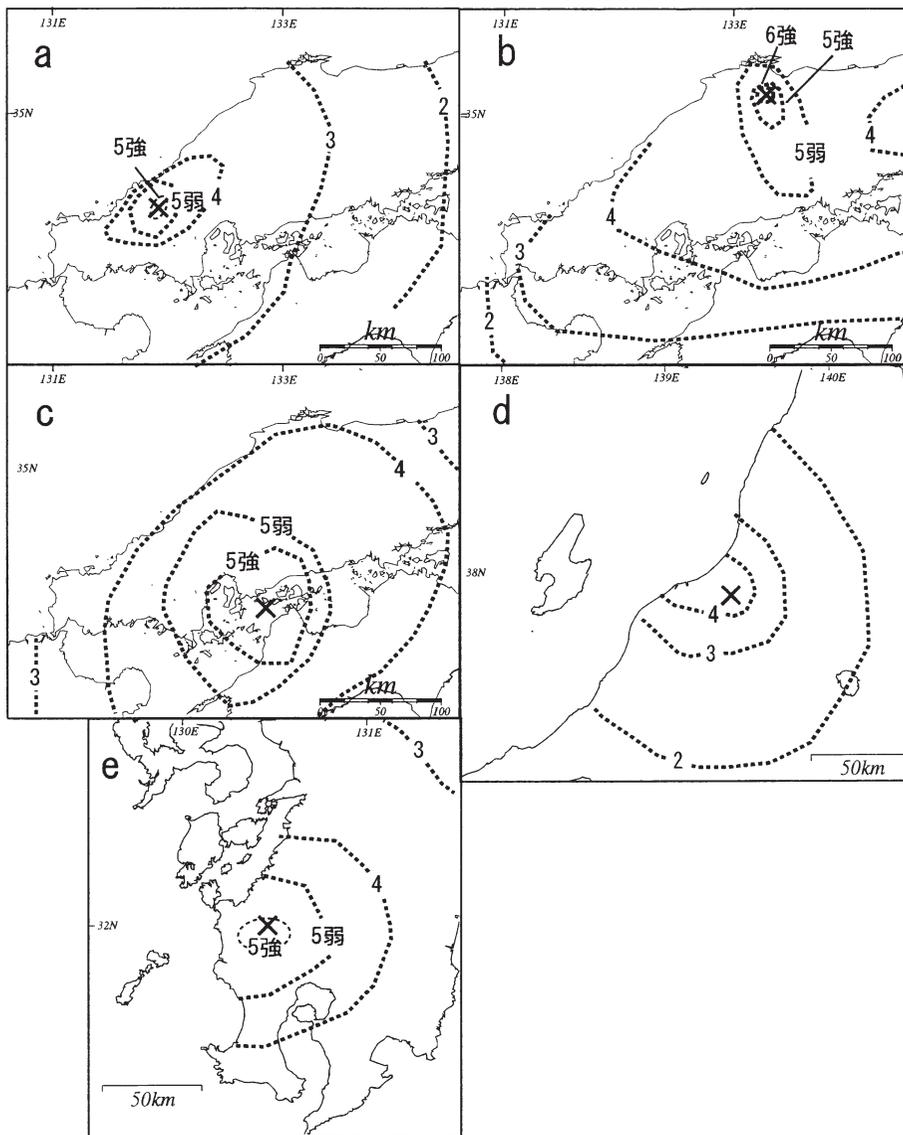


図2 5つの被害地震による震度分布（気象庁のデータに基づく）(a) 山口県北部地震 (b) 鳥取県西部地震 (c) 芸予地震 (d) 新潟県北部地震 (e) 鹿兒島県北西部地震
×印が震央の位置を示す

（気象庁発表）。一方、迫田－生雲断層に伴う断層露頭中に発達する断層ガウジの方向性から、この断層の運動方向は右横ずれであり、山口県北部地震の発震機構と一致する（金折ほか，1999）。

この地震による人的被害としては、2名の軽傷者が報告されている（山口県消防防災課）。家屋の

被害は、全壊が1件、半壊が7件、一部損壊が216件に及んだ（山口県防災会議震災対策専門部会，1997）。地震の震央に近い山口県阿武郡阿東町生雲西分では3棟の家屋が全半壊し、コンクリートの舗装道路に40mにわたって亀裂が生じるなどの被害が生じた（山本，1997）。一部損壊とし

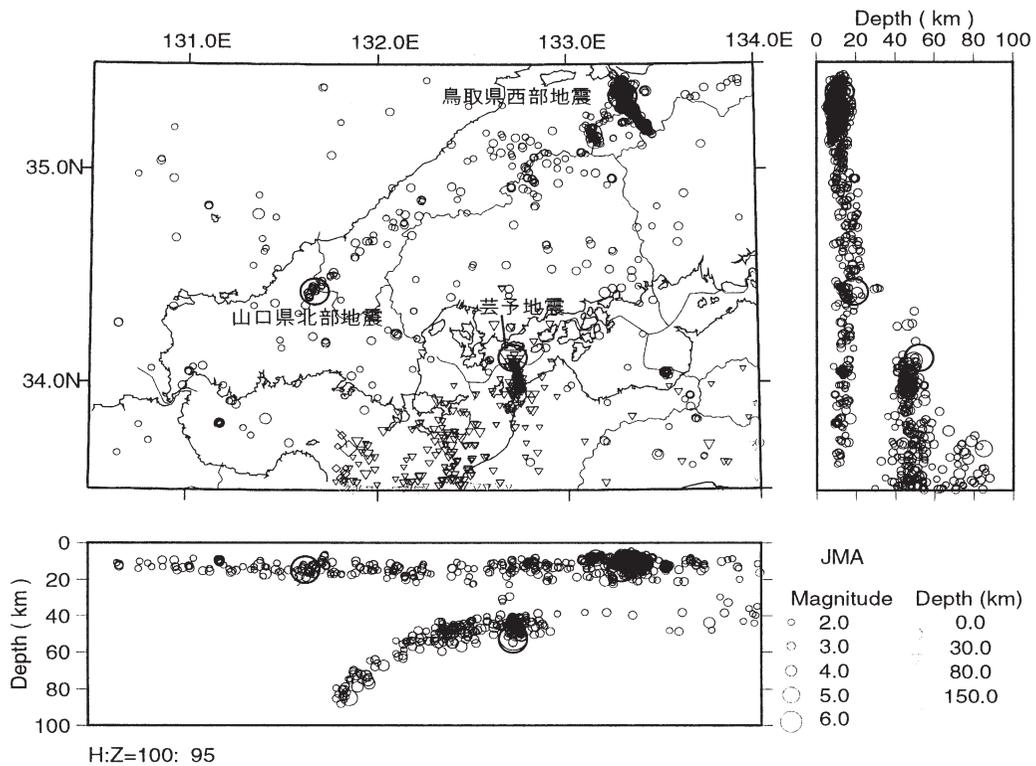


図3 中国地方西部の地震活動(1997年4月1日~2001年7月31日)。気象庁地震カタログに基づき、地震活動解析システム(鶴岡, 1997)による解析結果である

ては、『屋根瓦の一部破損やずれ』、『ガラス窓のガラス破損』、『壁面のクラック』などが主なものである(金折ほか, 1999)。

3.2 鳥取県西部地震

2000年10月6日に鳥取県西部に震源を持つ M_j 7.3の地震が発生した。震央の位置は 35.3°N , 133.4°E で震源の深さは10 kmである(気象庁発表)。平面的には余震が $\text{N}35^\circ\text{W}$ の走向で直線状に約20 kmにわたり分布していることがわかる

(図3参照)。これに直交する断面では深さ5~15 kmにかけて、余震がほぼ鉛直方向に分布している。したがって、この地震は長さ約20 kmで幅約10 kmの断層が動いて発生したと推定される。発震機構は東西方向の圧縮軸を持つ横ずれ型を示しており、上記の余震分布から推定された $\text{N}35^\circ\text{W}$

の走向の断層が左横ずれに運動したことによって、この地震が発生したと考えられる(気象庁)。

余震分布から推定された震源断層は、これまで指摘されていた活断層と方向や位置が異なっている。すなわち、『新編日本の活断層』(活断層研究会, 1991)による確実度Ⅲの鎌倉山南方断層の方向は東北東-西南西方向で余震分布とはほぼ直交する。また、『200万分の1日本列島活断層図』(200万分の1活断層編纂グループ, 2000)に引かれた長さ約10 kmの推定活断層は推定された震源断層と方向は一致するものの、このゾーンから5 km以上も南西に位置している。

以上のことから、この地震の震源断層は、これまで指摘されていた活断層に関係がないと判断された。

この地震による被害は鳥取県と島根県、岡山県にまたがる地域に集中した。人的被害は負傷者

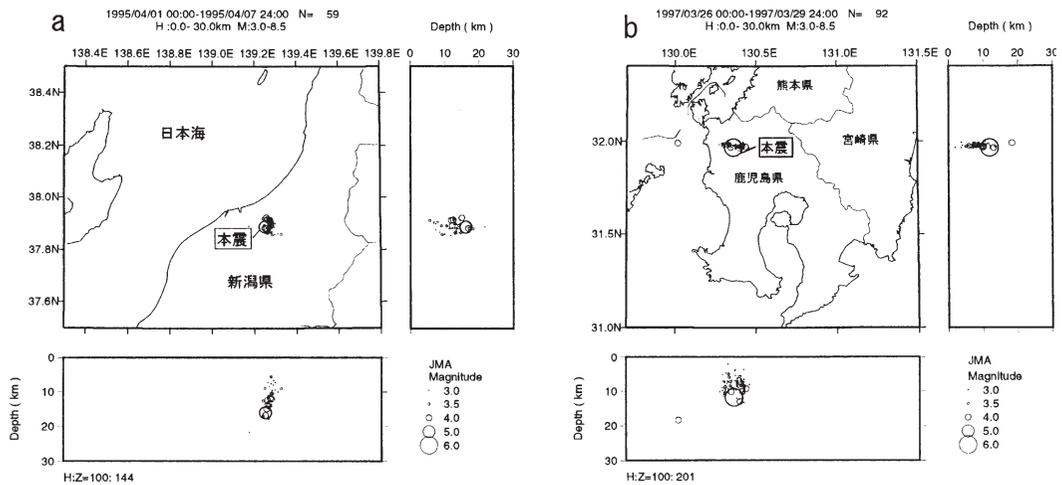


図 4 (a) 鹿児島県北西部地震の本震発生後 3 日間の震央分布
 (b) 新潟県北部地震の本震発生後 1 週間の震央分布
 いずれも、気象庁地震カタログに基づき、地震活動解析システム(鶴岡, 1997)による解析結果である

表 2 5つの地震に伴う被害

発生年月日	地震名	M		人的被害		家屋被害数	
		Mj	Mw	死者	負傷者	全・半壊	一部損壊
1995年4月1日	新潟県北部	6.0	5.3	0	60	236	1,376
1997年3月26日	鹿児島県北西部	6.6	6.0	0	31	38	2,675
1997年6月25日	山口県北部	6.6	5.9	0	2	8	216
2000年10月6日	鳥取県西部	7.3	6.6	0	137	911	6,884
2001年3月24日	芸予	6.7	6.7	2	289	627	41,302

各県および消防庁のデータに基づく

Mj：気象庁マグニチュード

Mw：モーメントマグニチュード

137名である(消防庁発表)。地震による物的被害は家屋の損壊に加えて、地盤の液状化や斜面崩壊などが広い範囲で発生した(山口大学調査団, 2001)。

3.3 芸予地震

2001年3月24日に安芸灘を震源とする M_j 6.7の地震が発生した。震央の位置は 34.1°N , 132.7°E で深さは 51 km である(気象庁発表)。余震はほぼ南北方向に約 20 km, 深度 40~50 km に集中していることから、本震は長さ約 20 km, 幅約 10 km の断層が動いて発生したものと推定

される。微小地震から求められたフィリピン海プレートの上面の等深線(三浦ほか, 1991)分布から、芸予地震の震源付近ではプレートの上面は深さ 40~45 km に位置している。このことと正断層型の発震機構から、芸予地震は中国~四国地方の下へ沈み込んでいるフィリピン海プレートの内部で発生したものと考えられる。

この地震による人的被害は、死者 2 名、負傷者 289 名である(気象庁発表)。地震による被害は広島県と愛媛県に集中するとともに、隣接する山口県と島根県、高知県、香川県、岡山県、そして福岡県と大分県の広い範囲に及んでいる(地盤工学

会・芸予地震災害緊急調査団, 2001)。

3.4 新潟県北部地震

1995年4月1日に新潟県北部を震源とする M_j 6.0の地震が発生した。震央の位置は $37.9^\circ\text{N}, 139.3^\circ\text{E}$ で震源の深さは17 kmである(気象庁発表)。本震発生後1週間の余震の震央分布を図4aに示す。余震はほぼ南北方向に約10 km, 深度5~20 kmに集中している。また、震源のメカニズムは東西圧縮による逆断層タイプと推定されている(気象庁)。震央の東約60 kmにはほぼ南北方向を示す逆断層の月岡断層があるが、余震の分布はこの断層の位置と一致しない。

この地震による人的被害は、負傷者が60名と報告されている(新潟県消防防災課)。また、地震による物的被害は新潟県笹神村高田および上高田に集中した。一部の地域で液状化による被害が報告されている。この地震による被害で最も目立ったのは家屋・神社の被害である。例えば、豊浦町では新潟県文化財に指定されている市島邸の湖月閣の倒壊が発生した。一般の住宅の被害はその大部分が一部損壊であった。しかしながら、盛土や切土、平坦化地などの人工改変地については、今回の地震による被害はほとんど発生しなかったことが報告されている(粟田ほか, 1996)。

3.5 鹿児島県北西部地震

1997年3月26日、鹿児島県北部を震源とする M_j 6.3の地震が発生した。震央の位置は $31.9^\circ\text{N}, 130.4^\circ\text{E}$ で、震源の深さは12 kmである。この地震の余震は平面的には本震を中心として、西北西-東南東方向に配列し、そのゾーンの長さは約18 kmである(図4b)。また、断面図では深さ2~15 kmに発生している。また、発震機構は、ほぼ東西方向の左横ずれ型である(気象庁)。さらに、同年5月13日にこの地震の震央の西南西約4 kmの地点で、2回目のイベント(M_j 6.2)が発生している。

鹿児島県消防防災課のまとめによると、人的被害は4市5町におよび、負傷者は計31人と報告されている。建物被害は鶴田町と宮之城町に集中

している。紫尾山周辺の花崗岩地域では斜面災害が多く発生したのに対し、阿久根市や川内市の埋立地では液状化現象による被害が誘発された(秋吉ほか, 1998)。

4. 家屋被害とマグニチュード

4.1 気象庁およびモーメントマグニチュード

我が国では地震の規模を表す尺度として、これまで長い間気象庁マグニチュード(M_j)が一般的に使われてきた。しかし、2001年以降、 M_i に加えてモーメントマグニチュード(M_w)が気象庁から発表されるようになった。

気象庁マグニチュード(M_j)は、次の式を用いて計算される(国立天文台編, 2001)。ただし、 $M_j > 5.5$ の地震では(2)式は用いられない(h は震源の深さ)。

1) $h \leq 60$ km の場合

$$M_j = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83 \dots \dots \dots (1)$$

$$M_j = \log A_z + 1.64 \log \Delta + \alpha \dots \dots \dots (2)$$

2) $h > 60$ km の場合

$$M_j = \log A + K(\Delta, h) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 A は中周期変位型地震計による地動最大片振幅(水平動2成分合成, 周期5秒以下, 単位は μm)、 A_z は短周期速度型地震計による最大地動速度振幅(上下動, 単位は $10^{-3}\text{cm}/\text{S}$)、 Δ は震央距離(km)を表している。 α は地震計の特性補正項である。

気象庁マグニチュードの欠点としては、大きな地震ではスケールが飽和して、地震の大きさが適切に表現できないことが挙げられる。この欠点を持たないのが次に述べるモーメントマグニチュードである。

モーメントマグニチュード(M_w)は、地震モーメントという物理的に明確な量で定義される(Kanamori, 1978)。地震モーメント M_0 は、断層面の面積 S とずれの量 U 、断層付近の岩石の剛性率 μ から、次の式で表される。

$$M_0 = \mu S U \dots \dots \dots (4)$$

さらに、モーメントマグニチュード M_w と M_0 に

は、次の関係が知られている (Kanamori,1978)。

$$\log M_o = 1.5 M_w + 16.1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

4.2 マグニチュードと家屋被害

図5にはマグニチュードと家屋被害数との関係を示した。図5 abはそれぞれ全・半壊家屋数と2種類のマグニチュード (M_w と M_j) との関係を示し、同様に、図5 cdは一部損壊家屋数とマグニチュードの関係を示している。解析した5つの地震は発生深度や発震機構が異なっているため、直接比較することはできない。ここで、横ずれタイプの内陸地震である山口県北部地震と鹿児島県北西部地震、鳥取県西部地震に注目すると、これら3地震では全・半壊もしくは一部損壊など被害の程度に関わらず、 M_j では特に明瞭な関係がみられない

のに対して、 M_w においては非常によく相関関係が認められた。すなわち、 M_w が大きくなるとそれに比例して家屋被害も増加している。全・半壊数 (N_t) および一部損壊数 (N_p) と M_w の関係は以下の式で近似できる。

$$\log N_t = 4.0 M_w - 22.8 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\log N_p = 2.76 M_w - 13.8 \quad \dots\dots\dots (7)$$

図5には兵庫県南部地震 ($M_j 7.3, M_w 6.9$) による家屋被害の値も示されており、これについても上記の関係にはほぼ整合していることがわかる。

ただし、上記の式(6)と(7)は M_w 5.5前後から7以下の地震から求められたものであり、 M_w 7を超える地震では非現実的な被害家屋数が得

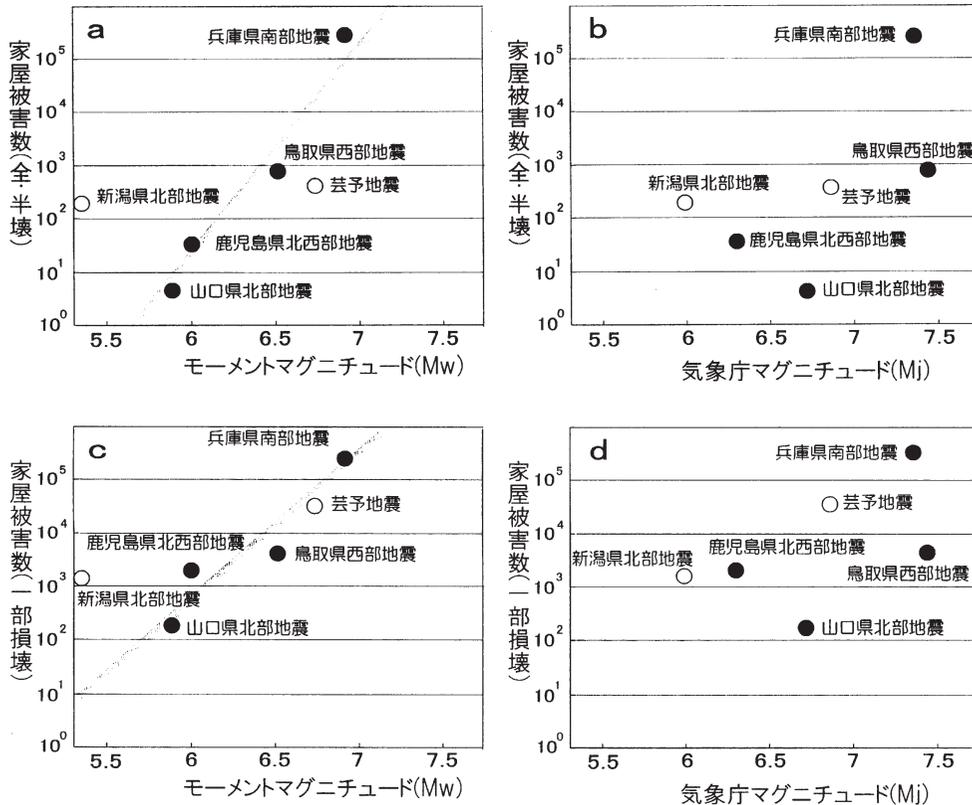


図5 家屋被害数とモーメントマグニチュードおよび気象庁マグニチュードの関係
 ●：横ずれタイプの内陸地震
 ○：それ以外の地震
 この図の回帰直線は、山口県北部地震と鹿児島県北西部地震、鳥取県西部地震から最小二乗法を用いて計算した。

られることに注意しておく必要がある。

5. 家屋被害の解析

5.1 家屋被害率と被害円

地震による被害分布を検討するために、次の家屋被害率を定義し、市町村ごとの被害率を求めた。家屋被害率は次の式で表される(金折ほか, 1999)。

$$\text{家屋被害率 (\%)} = (\text{損壊した家屋数} / \text{総家屋数}) \times 100 \cdots \cdots (8)$$

ここで、損壊した家屋数とは全・半壊数と一部損壊数を加えた値である。また、各市町村の総家屋数が不明であったため、この計算には住民基本台帳に掲載されている世帯数を用いた。家屋被害数には非住宅も含まれており、1戸に2世帯以上が居住している場合などを考慮すると、被害率は実際の値より少し小さめの値となることが予想される。

次に、家屋被害が報告された市町村を包含する円を“被害円”と定義した。以下の手順にしたがって、それぞれの被害地震の被害円を求めた。ここでは、家屋被害がなかった市町村を無被害市町村と呼び、家屋被害が出た市町村を有被害市町村と呼ぶことにする。

(1) まず、2つの有被害市町村が接している行政境界を抽出する。

(2) 次に、抽出された行政境界を含む円を求めた。この場合、できるだけ多くの行政境界が含まれるように、円の半径を変え、中心を移動させた。

このような手順で被害円を求めたため、有被害市町村のうち、他の1つの有被害市町村としか接していない有被害市町村や、2つ以上の有被害市町村と接していても、一部で被害円から外れていることがある。

5.2 家屋被害率の分布と被害円

5.2.1 山口県北部地震

図6には山口県北部地震による家屋被害率の分布が示されている。この地震による家屋被害は、他の地震に比べ狭い範囲に集中している。家屋被害

のた市町村は山口県阿東町と、山口県むつみ村、島根県津和野町で、被害率は阿東町で5%、むつみ村と島根県津和野町で1%未満であった。被害円の半径は10kmと見積もられる。被害円の中心は震央の約5km南に位置する。

5.2.2 鳥取県西部地震

鳥取県西部地震による家屋被害率の分布は図6に示されている。この図より、震源断層沿いおよびその周辺の市町村で被害率が高くなっていることがわかる。被害率の高かった地域では、西伯町が80%、会見町が75%、溝口町と江府町が70%、日野町が65%、岸本町が55%である。また、1%未満の低被害率地域は鳥取県中部と島根県東部、広島県北東部、岡山県北西部に分布している。

被害円の半径は45kmとなる。被害円の中心は震央の南南東約10kmに位置する。

5.2.3 芸予地震

図7に芸予地震による家屋被害率の分布を示す。ここでは、30%以上の被害率を示す市町村はなかった。被害率の相対的に高かった地域として、震央に近い呉市(10%)と少し離れた三原市(25%)が挙げられる。この家屋被害率の分布は、1%未満の低被害率地域が広範囲に及んでいることで特徴づけられる。すなわち、1%未満の地域が西は山口県中部から東は岡山県西部、北は鳥取県中部から南は愛媛県に広がり、広範囲に分布することがわかる。

被害円の半径は75kmとなる。被害円の中心は震央の南東約18kmにある。

5.2.4 新潟県北部と鹿児島県北西部地震

図8には新潟県北部地震および鹿児島県北西部地震による家屋被害率の分布を示した。これら2地震はいずれも内陸地震であり、震源断層沿いの市町村で被害率が極端に高くなっていることがわかる。

新潟県北部地震では、震央に位置する豊浦町で最も高い被害率45%が得られた。また、鹿児島県北西部地震でも同様に鶴田町で75%という値

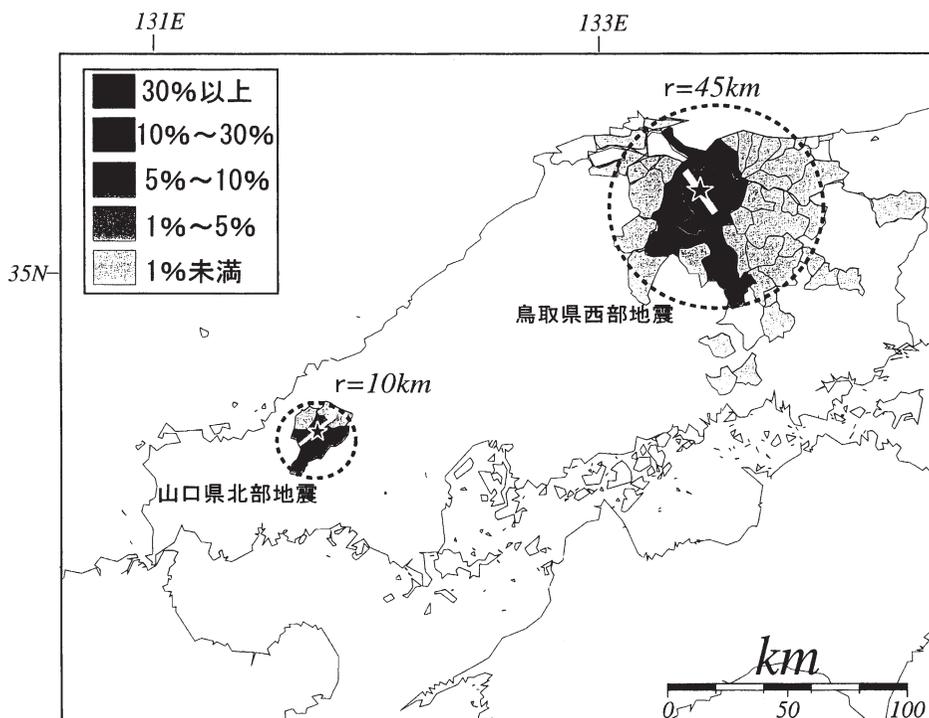


図6 山口県北部地震 (a) および鳥取県西部地震 (b) による家屋の被害率と被害円
星印は震央で太線が震源断層を示す。

が得られた。

被害円の半径は新潟県北部地震で 20 km, 鹿児島県北西部地震で 30 km と見積もられた。いずれの地震も被害円の中心は、震央とほぼ一致する。

5.2.5 被害円の半径とマグニチュード

図9には被害円の半径とマグニチュードの関係を示した。 M_w と被害円の半径(R_{hd})との関係を見ると、横ずれタイプの内陸地震である山口県北部地震と鳥取県西部地震、鹿児島県北西部地震の3地震には、よい相関関係がみられた(図9a)。この関係は次の式で近似される。

$$R_{hd} = 50 M_w - 275 \quad \dots\dots\dots (9)$$

タイプの異なる新潟県北部地震と芸予地震は、この関係から少しはずれる。一方、 M_j については被害円との明瞭な関係は認められなかった(図9b)。

このことから、横ずれタイプの内陸地震では家屋被害数と同様に被害円でも M_j に比べて M_w の方が地震による家屋被害を反映していることが指摘される。このことについては、6.3で詳しく議論する。

6. 議論

6.1 家屋被害とその要因

上記で述べてきた内陸地震はいずれも震源断層が地表に現れていない。このような場合でも、家屋の被害率分布と余震の分布から推定された震源断層の位置を比較すると、震源断層沿いの市町村で極端に被害率が高くなっていることがわかる(図6と図8参照)。例えば、横ずれタイプの内陸地震である3地震の最も高い被害率を示した市町村は、山口県北部地震(M_w 5.9)では阿東町(5%), 鳥取県西部地震(M_w 6.6)は西伯町(80%), 鹿児島県北西部地震(M_w 6.0)は鶴田町(65%)

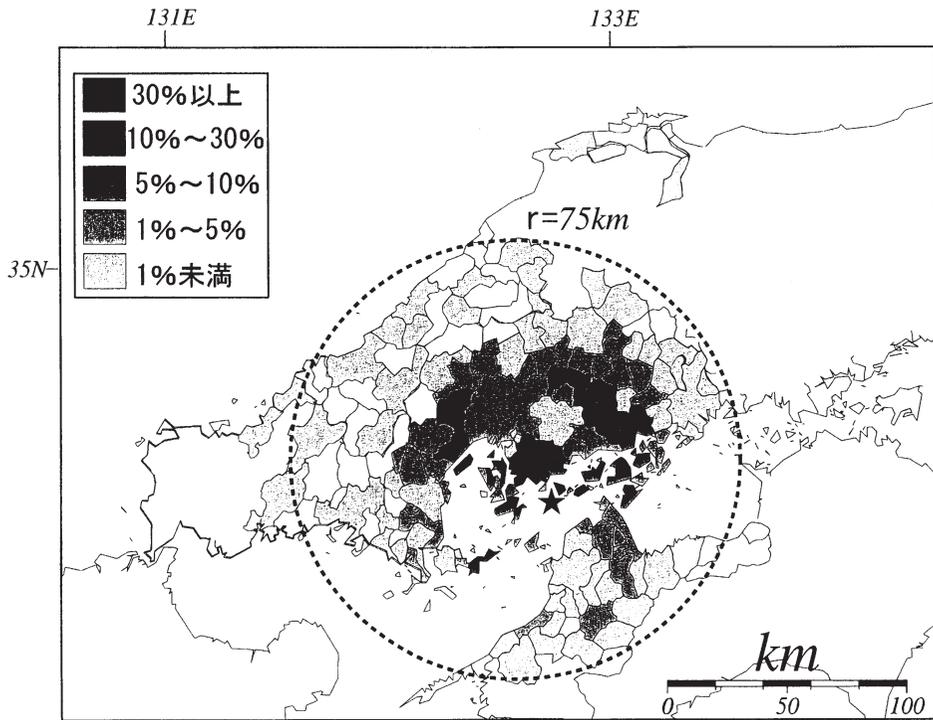


図7 芸予地震による被害率と被害円
星印は震央で太線が震源断層を示す。

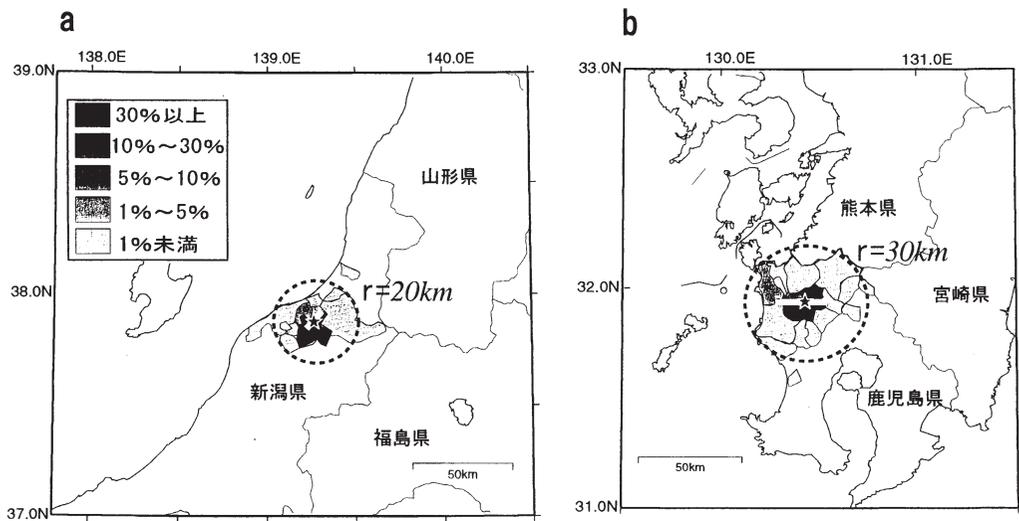


図8 鹿児島県西北部地震 (a) と新潟県北部地震 (b) による被害率と被害円
星印は震央で太線が震源断層を示す。

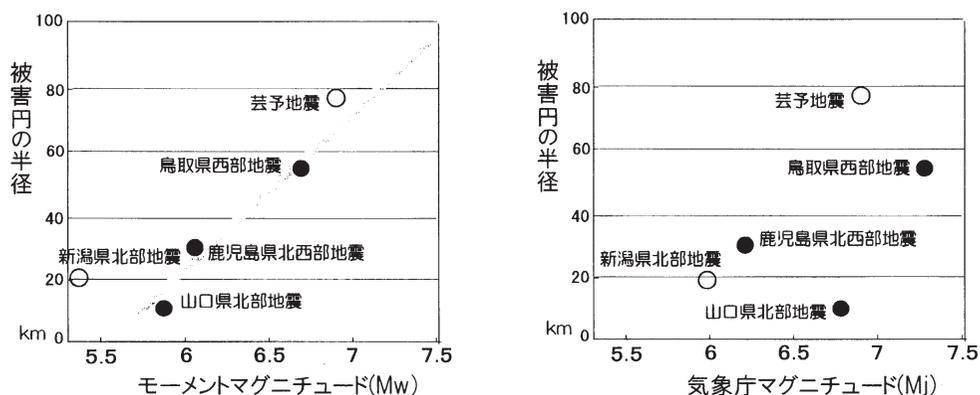


図9 被害円の半径とモーメントマグニチュード (a) および気象庁マグニチュード (b) との関係
 ●：横ずれタイプの内陸地震
 ○：それ以外の地震

である。この数字をみると M_w が大きい地震ほど最大被害率も高くなる傾向がある。

Kanaori et al. (1999) は、山口県北部地震の震源断層による地震波伝播のシミュレーションを行ない、工学的基盤 (S 波速度 500~600 m/秒) での地震力は同心円状を描いて減衰していくことを示している。本研究で家屋の被害率を求めた内陸地震はいずれも山間地域で起きているため、被害域には主として工学的基盤とみなされる岩盤が広く地表に分布している。これらのことから、家屋の被害域の大部分が震源断層を含む被害円によって包含されたことが説明できる。しかしながら、海岸や河川に沿った地域では局所的に工学的地盤を覆って完新統や更新統などの未固結堆積物が分布しているので、局所的な家屋被害を把握するためには、このような堆積物の分布を考慮する必要がある。

1995年兵庫県南部地震では、家屋被害の集中したゾーン "震災の帯" と震源断層の位置が必ずしも一致しないことから、地盤の性質や堆積層の厚さ、断層の破壊メカニズムなどが地震に伴う家屋被害に影響を与えることが指摘されている (入倉, 1996)。ところが、調査の対象とした3つの地震の被害域では、一部で厚い堆積層が存在している他は、河川に沿った部分に限られている。したがって、厚い堆積層の存在する地域と基盤岩が

広く露出する地域では、家屋被害を支配する要因が異なると思われる。

一方、スラブ内の芸予地震の被害率分布は明らかに内陸地震と異なっており、 M_w 6.7 と規模の大きい割に 30% 以上の家屋被害率を示す地域が出現していない (図7参照)。この地震では 1% 未満の家屋被害率の低い地域が広範囲に広がり、このことがスラブ内で起きる深い地震の特徴であるとみなされる。

家屋が壊れるかどうかについては、家屋に作用する地震力と家屋の耐震抵抗力の大小関係で決まり、地震波の大きさとその性質で決定される家屋に作用する地震力は、(1) 震源の性質 (規模とメカニズム)、(2) 震源断層からの距離、(3) 表層地盤の特性、で決まることが知られている (中島, 1996)。また、兵庫県南部地震の場合には、震源断層から約 10 km 以内では、地震力は断層からの距離に関係なく、地盤条件によって大きく変わることが指摘されている (入倉, 1995)。この研究では、これらのことを考慮しないで、家屋の被害率を市町村ごとに計算した。芸予地震では大都市である広島市に被害が出ている。それ以外の山口県北部地震と鳥取県西部地震、新潟県北部地震、鹿児島県北西部地震の震央はいずれも山間部にあり、地理的にも類似しており、人口がそれほど密集していない地域で発生している。

すなわち、ここで検討した3つの地震について、その震央を含む行政単位の単位面積当たりの世帯数をみると、鹿児島県薩摩郡と山口県阿武郡、鳥取県日野郡はそれぞれ、32.5世帯/kmと10.4世帯/km、9.4世帯/kmであり(平成12年国勢調査に基づく)、オーダー的には一致している。この数字は厳密には家屋の密集率ではないが、5.1で述べたように、世帯数がほぼ家屋数に匹敵するため、おおまかには家屋の密集率を示していると考えることができる。したがって、この研究で得られた家屋被害とマグニチュードの関係は、 M_w 5.5前後から7以下のしかも山間部で起きる内陸地震に誘発される家屋被害の特徴を示していることになる。

横ずれ型を示した3つの地震から得られた家屋の被害数と M_w の関係は、すでに4.2で示したように兵庫県南部地震にも当てはまっている(図5参照)。図5の縦軸は指数目盛りで表示しているため、兵庫県南部地震の家屋被害数は、3つの地震のうち最も被害数の多かった鳥取県西部地震に比べて、2桁程度大きいことがわかる。また、 M_w が大きくなると震源断層も長くなり、被害範囲が広くなることが予測される。これらのことから、 M_w の規模が大きくなると、家屋の密集率が多少異なっても、4.2に示した式(6)と(7)の関係がオーダー的に成立するものと考えられる。

また、ここで計算した家屋の被害率は行政単位ごとに集計したため、地盤条件や家屋の密集率や建物の地震耐力などが考慮されていないが、市町村など行政単位ごとの密集率や建物の地震耐力および地盤条件などを包括した、いわば行政単位での平均的な家屋の耐地震力もしくは脆弱性を示していると考えられる。

しかしながら、建物の地震耐力や密集率については行政単位の中で地域差があることから、各行政単位で被害想定を行う場合には、建物の地震耐力と密集率を詳細に検討することが必要である。

6.2 被害域と被害円

ここで検討した地震では、家屋被害の出た市町村はほぼ円内に収まり、それによって被害円が定

義された。また、これらの地震では震源断層が地表に現れていない。山口県北部地震を対象とした工学基盤での加速度と震度のシミュレーション結果では、加速度や震度分布が同心円状になり、家屋被害の分布とよく一致することが示されている(Kanaori et al., 1999)。

これに対して、1891年濃尾地震(M_j 8.0)や1945年三河地震(M_j 6.9)、1948年福井地震(M_j 7.1)では、地表に現れた震源断層に沿って被害が集中している(Kanaori et al., 1994)。さらに、1995年兵庫県南部地震(M_j 7.3)では家屋の全壊率が30%を超えた地域が帯状に現れた(嶋本, 1995)。また、活動した断層が長くなれば、被害域は震源断層に沿って楕円形を呈するようになる(杉戸, 私信)。以上のことから、地表に震源断層が到達しない場合や震源断層の長さが短い場合には、被害域は円形を呈することが指摘される。

6.3 家屋被害とマグニチュード

一般に、 M_j と M_w の大小関係は、 M_w が5.5~7前後を対象とすると、5.5~6.5くらいまでは M_i が少し大きく、6.5~7では両者はほぼ等しく、7くらいでは M_j が少し小さくなる。この違いはみている周期帯の違いに起因し、気象庁マグニチュードはおおむね5秒より周期の短い地震動を反映するのに対し、モーメントマグニチュードはより長周期の断層運動を反映することになる(菊池, 2000)。したがって、震源断層の広がりや食い違い量や津波の大きさを比較するためには M_w が適当であるが、建物の倒壊といった家屋被害との相関は M_j の方がよいとされている(菊池, 2000)。

ところが、この研究で対象とした3つの内陸地震の場合、家屋の被害率や被害円の半径は M_w とよい相関が認められたのに対し、 M_j ではばらつき大きく、よい相関が得られなかった。この理由として、次のことが挙げられる。

(1) ここで検討した3つの内陸地震については、 M_j が M_w より0.3~0.7ほど大きく、上記の一般的な傾向と異なっている。 M_w に対して M_j の方がかなり大き目の値が得られた原因の1つは、 M_j 計測に用いられた地震計の設置場所に関係してい

ることが挙げられる。すなわち、計測用の地震計は基盤岩内もしくは基盤岩上に直接設置されたものが少なく、基盤岩を覆う被覆層上や建物内に設置されたものが多いことである。すなわち、基盤岩内よりも被覆層では振幅が実際よりも大きく記録されるため、 M_j の方が M_w よりも大きく見積もられた可能性がある。

(2) ここで検討した3地震は、いずれも20 km以浅で起きた横ずれタイプの地震である。また、家屋被害の出た地域は主として基盤岩が広く露出していたため、基盤内の断層の動きが直接家屋被害に反映されたと予想される。さらに、家屋被害の出た地域を包含する被害円も震源断層を含んでいた。これらのことから、家屋の被害率や被害円の半径が M_w とよい相関を持ったことが指摘される。

(3) 震源断層面の幅や地震時の食い違い量が等しければ、 M_w は断層の長さに比例して大きくなる(392ページの4と5式参照)。検討した3つの内陸地震はいずれも20 km以浅で起き、地表に地震断層が出現しなかったことから、断層面の幅や食い違い量にそれほど大きな違いがないと考えられれば、 M_w の違いは震源断層の長さに比例することになる。したがって、 M_w は震源断層の長さに比例して大きくなり、家屋の被害円の半径も M_w とともに大きくなることが説明できる。

(4) M_j の場合は、震源からの距離による補正が行われるため(391ページの式1参照)、震源断層近傍ないし被害域での地震記録だけから求められた値だけではなく、広範囲で得られた地震記録の平均的な値として得られる。このため、 M_j は震源断層を含む被害地域における直接の値を表現していないように思われる。このことにより、 M_j の値がばらつき、家屋の被害数や被害円の半径とよい相関がみられなかったと推定される。

7. まとめ

タイプや発生深度の異なる5地震を対象として、地震による被害の特徴を比較することにより、地震に伴われる家屋の被害と地震の規模、地震のタイプとの関係を詳しく調べた。その結果をまとめ

ると次のようになる。

- (1) 内陸地震で横ずれタイプの地震による家屋被害は、気象庁マグニチュード(M_j)よりもモーメントマグニチュード(M_w)に関係している。
- (2) 内陸地震による家屋被害率は震源断層沿いの地域で極端に高い値が得られる。これに対して、スラブ内地震である芸予地震では被害率の低い地域が広範囲に分布する。
- (3) 家屋被害率の分布から求められた被害円では、横ずれタイプの内陸地震において、被害円の半径とモーメントマグニチュード(M_w)に相関関係が得られた。

8. おわりに

以上に、1995年の兵庫県南部地震以降に発生した5つの被害地震を対象として、家屋被害の分布と地震のタイプ、マグニチュードの関係を述べてきた。このうち3つの地震では家屋被害と M_w により相関関係が認められた。これら3地震には、次のような共通する特徴が認められる。すなわち、1) 20 km以浅の内陸地震、2) 横ずれタイプの発震機構、3) 震源域が主に山間地域、4) M_w 6~7地震である。したがって、これら3地震から経験的に求められた家屋被害と M_w との関係は、上記の特徴を持った地震や基盤岩が広く分布する地域の活断層に誘発される地震被害を大局的に想定するのに有効であると考えられる。これに対して、局所的な被害予測を行うために、局所的な地盤特性や建物特性などを詳細に検討していくことが、今後の課題として挙げられる。さらに、同様なタイプの地震について、家屋被害とマグニチュードを検討し、本研究で得られた結果の検証が望まれる。

この研究では、家屋の種類や地盤の影響を考慮しないで、市町村ごとに家屋の被害率を求めた。大都市である広島市に被害が出た芸予地震以外は、いずれの内陸地震も震央は山間部にあり、人口がそれほど密集していない地域で発生している。したがって、この研究で得られた家屋被害とマグニチュードの関係は、類似の地域において M_w 5.5

前後から7以下の内陸地震で誘発される家屋被害を想定する場合に利用できるであろう。

今後、家屋被害を市町村ごとにさらに詳しく検討していくためには、家屋被害に影響を与える要因を考慮する必要がある。本研究で得られた結果が地震に誘発される家屋被害の軽減や広域的な被害想定を行うための1資料となれば幸いである。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、(独)産業技術総合研究所活断層研究センターの遠田晋次研究員と山口大学理学部田中和広教授には、有益な助言と多くの議論を頂いた。また、山口大学工学部山本哲朗教授と三浦房紀教授には、鳥取県西部地震と芸予地震の現地調査において大変お世話になるとともに、地震被害に関する多くの情報の提供を受けた。また、山口大学大学院理工学研究科福塚康三郎氏と真鍋一樹氏とは、一緒に現地調査に同行を願った。

ここに記して、これらの方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 秋吉 卓・澗田邦彦・松本英敏・池田篤志：鹿児島県北西部の地震による被害の特徴。自然災害科学研究所西部地区部会報告, vol.22, pp.45-50, 1998.
- 2) 粟田泰夫・井村隆介：1995年4月1日に発生した新潟県北部の地震の被害調査。地震予知連絡学会報, vol.54, pp.123-124, 1996.
- 3) 地盤工学会・芸予地震災害緊急調査団：平成13年芸予地震災害緊急調査速報。土と基礎, vol.49, pp.35-38, 2001.
- 4) 入倉孝次郎：“震災の帯”をもたらした強震動。深尾良夫・安藤雅孝・石橋克彦編『阪神・淡路大震災の予測』, 岩波書店, pp.32-38, 1996.
- 5) 石川有三：地震活動域の意義。月刊地球, vol.21, pp.22-29, 1995.
- 6) Kanamori, H. : Quantification of Earthquakes. Nature, vol.271, no.5644, pp.411-414, 1978.
- 7) 金折裕司：地震モーメントの平均解放速度に基づく内陸地震の危険度評価：中国地方西部の活断層系からの例。応用地質, vol.39, pp.287-297, 1998.
- 8) 金折裕司・小林健治・安野泰伸・割ヶ谷隆志・山

本哲朗：1997年山口県北部地震(M6.1)の震源断層と家屋被害。応用地質, vol.40, pp.287-297, 1999.

- 9) 金折裕司・遠田晋次・小泉 朗：山口県中西部で発生した3被害地震と周辺断層付近の応力変化。自然災害科学, vol.20, pp.213-224, 2001.
- 10) Kanaori, Y., S. Kawakami, K. Yairi and S. Niwa: A sequence of destructive earthquakes and the coupling of fault systems in central Japan. Eng. Geol., vol.37, pp.167-180, 1994.
- 11) Kanaori, Y., M. Sugito and T. Yama-moto: House damage by and simulation of ground motions of the 1997 magnitude 6.1 Northern Yamaguchi Prefecture earthquake. Jour. Natl. Disas. Sci., vol.21, pp.53-64, 1999.
- 12) 活断層研究会：新編日本の活断層—分布図と資料。東京大学出版会, 438 p, 1991.
- 13) 菊池正幸：10月6日鳥取県西部の地震(M7.3)。EIC地震学ノート。No.23, http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/001006.html, 2000.
- 14) 国立天文台編：理科年表平成13年。丸善, 1064 p, 2001.
- 15) 中島正愛：建物被害の分布, 特徴, そして今後の課題。科学, vol.66, pp.114-119, 1996.
- 16) 中山昭夫：淡路島の地震被害。兵庫県南部地震災害調査緊急報告会, 建築学会, pp.54-59, 1995.
- 17) 200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ：200万分の1日本列島活断層図。活断層研究, vol.19, pp.3-12, 2000.
- 18) 嶋本利彦：“震災の帯”の不思議。科学, vol.65, pp.195-198, 1995.
- 19) 鶴岡 弘：WWWを用いた地震活動解析システムの開発。地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, B22-P09, pp.77, 1997.
- 20) 山口大学調査団：平成12年鳥取県西部地震とその被害に関する緊急調査報告。地盤工学会誌, vol.41, pp.36-40, 2001.
- 21) 山口県防災会議震災対策専門部会：1997年6月25日「山口県北部地震」とその被害の概要。山口県総務部消防防災課, 8 p, 1997.
- 22) 山本哲朗：1997年山口県北部地震とその被害。地盤工学会誌, vol.45, pp.38, 1997.
- 23) 山口県防災会議震災対策専門部会：1997年6月25日「山口県北部地震」とその被害の概要。山口県総務部消防防災課, 8 p, 1997.

(投稿受理：平成14年3月18日
訂正稿受理：平成14年12月12日)