

## 1. はじめに

### 1-1 業務の目的

平成 12 年鳥取県西部地震（以下、鳥取県西部地震とする）は、その地震の規模が  $MJ7.3$ （ $M_J$ ：気象庁マグニチュード）と大きく、また、最大震度階 6 強（気象庁計測震度による）、最大加速度 927gal（KiK-net の日野記録 NS 成分）が観測されている。これらのデータだけから判断すると、各種の構造物に甚大な被害を生じた平成 7 年兵庫県南部地震に匹敵するほどの地震であったといえる。実際には、平成 7 年兵庫県南部地震とは対照的に、鳥取県西部地震は一部の建築物に比較的大きな被害が生じたものの、本業務で対象とする橋梁構造物には大きな被害が生じなかった。

本業務では、鳥取県西部地震において科学技術庁防災科学技術研究所（地震発生当時科学技術庁、現在文部科学省）の強震観測網 K-NET<sup>1)</sup>と KiK-net<sup>2)</sup>で観測された強震記録を対象に、その地震動特性を求め、何故、橋梁構造物に与える被害が少なかったかを検討する。検討は、平成 7 年兵庫県南部地震や 1994 年ノースリッジ地震等のように構造物に何らかの被害を生じた過去の地震で観測された地震動の特性と比較する形で行う。また、鳥取県が管理する道路橋の RC 橋脚を対象に、鳥取県西部地震で観測された地震がこれらの RC 橋脚に与える影響を検討する。

## 1-2 地震の概要

ここでは、鳥取県西部地震に関して各機関から公表された震源情報（断層運動に関する情報）に基づいて、鳥取県西部地震の震源特性の概要について述べる。

気象庁から発表された速報震源の諸元は、以下のとおりである。

発生時刻：2000.10.06 13:30頃

震央位置 北緯 35.3°，東経 133.4°

震源深さ 10km

気象庁マグニチュード  $M_J$  7.3

鳥取県境港市および鳥取県日野町では、兵庫県南部地震以後導入された計測震度の観測値としては現在最も大きい、震度6強という値が記録されている（図 1-1 参照）。

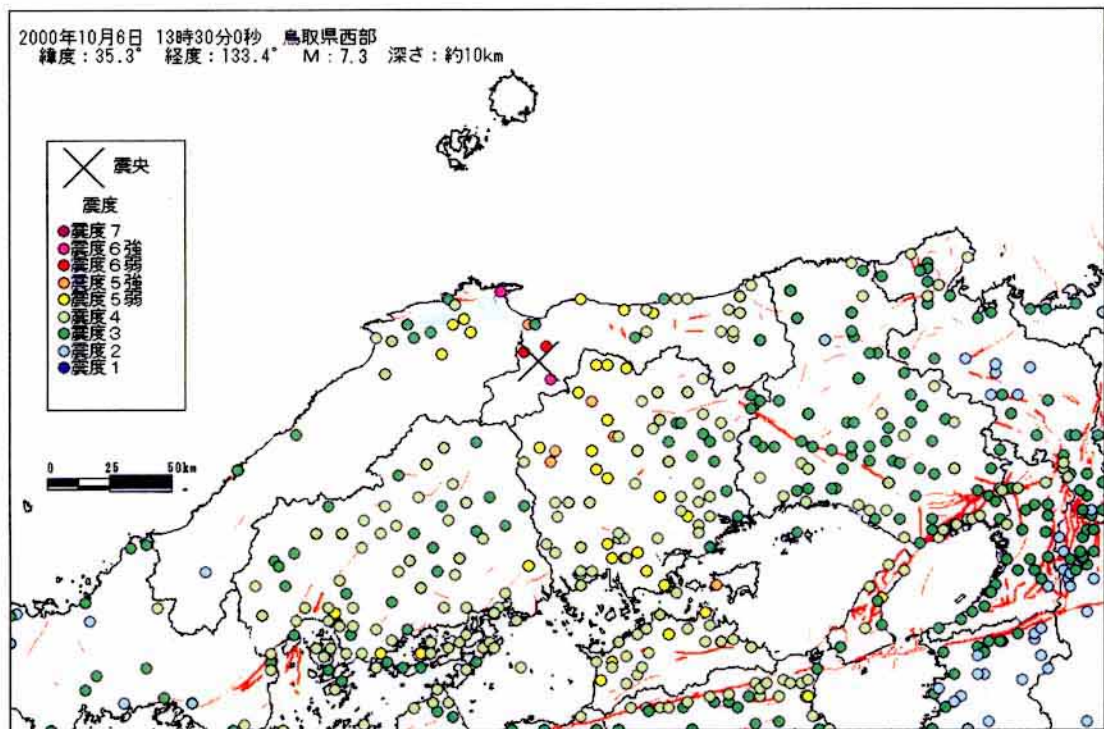


図 1-1 計測震度による気象庁震度階級の分布図<sup>3)</sup>

鳥取県西部地震の震源情報は、国土地理院や東京大学地震研究所地震予知情報センターや京都大学防災研究所によって公表されている。震源特性（震源で起こったこと）を推定する方法は、図 1-2<sup>4)</sup>に示すように、地質学的データに基づいた方法、測地学的データに基づいた方法、地震学的データに基づいた方法の3つに大別できる。

### 1) 地質学的データに基づいた方法

地質学的データに基づいた方法は、地震によって地表に現れた断層（地表地震断層）に基づいて、震源での断層（震源断層）の大きさを推定するものである。地表地震断層は、地下の震源断層の運動が地表に到達して生じたものであり、地表で観察された

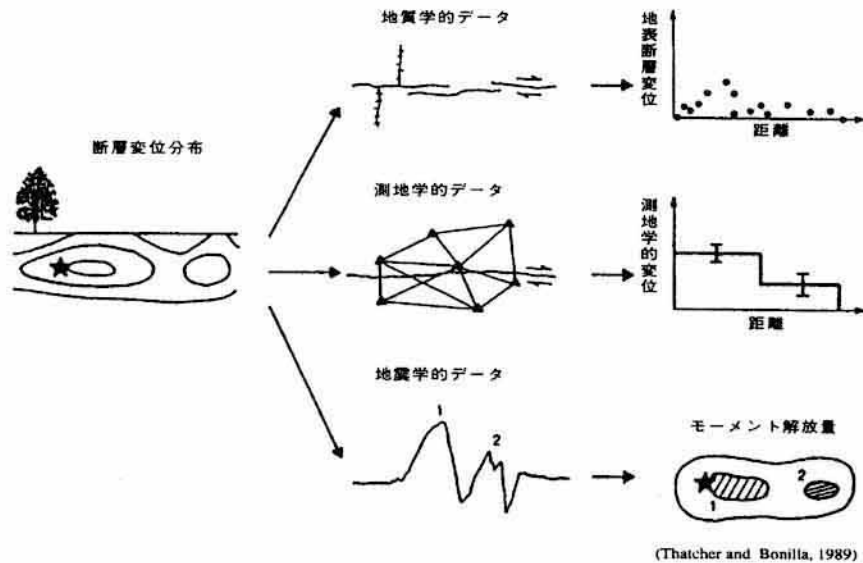


図 1-2 震源断層を推定する為の情報 (概念図) <sup>4)</sup>

変位量やその分布が地中の震源での食い違いをそのまま表しているわけではない。しかし、地表に現れる変動の大きさは、地中の震源断層の動きと何らかの相関を持ち、地下における震源断層の食い違いを知る手がかりになる<sup>5)</sup>。鳥取県西部地震では、兵庫県南部地震の野島断層のような明確な地表地震断層は観察されていない。このため、地質学的データに基づいた震源断層に関する報告はない。

## 2) 測地学的データに基づいた方法

我が国で定期的実施される三角測量や三辺測量（光の到達する時間を図って距離を求める光波測距の手法）からは、全国で 5000 点ほどある三角点の相対的な位置を、水準点の水準測量からは、上下の地核変動を知ることができる。また、GPS (Global Positioning System) を用いた人工衛星による連続的な測量も国土地理院や気象庁および大学等によって実施されている。このような測量結果を地震の前後によって比較することにより、地震によって生じた地核変動を知ることができる。このような測地学的なデータは、鳥取県西部地震のように地震断層が地表面に現れなかった地下でどのようなことが起こったかを知る最も直接的な情報といえる<sup>5)</sup>。

## 3) 地震学的データに基づいた方法

大きな地震が発生すると、本震後に必ず余震活動をともなう。余震が発生する範囲（余震域）は、空間的広がりを持っている。特に、本震直後の余震域は、本震で断層が食い違った領域にほぼ等しいことが報告されている。また、大きな地震が発生すると、世界中の地震計で地震動が観測される。地震計がおかれた観測地点は、震源に近いものから、震源から遠く離れたところにあるものまで様々である。震源に近いところで観測される地震動（近地の波）には、短周期成分が多く含まれている。震源近くで観測される地震動は、その地震動強度（最大加速度や最大速度）が大きいことが多い。地震動強度が大きい地震動の観測記録は、強震記録と呼ばれることもある。震源

近傍で観測された強震記録には、震源での破壊過程に関する情報（主に短周期成分にその情報が反映されている）が多く含まれているため、震源断層の細かな動きを知る上で役に立つ<sup>5)</sup>。我が国では、兵庫県南部地震以後、強震観測網が精力的に整備されてきており、鳥取県西部地震でも、数多くの強震記録が得られている。遠くで観測される地震動（遠地の波）は、長周期成分が多く含まれた地震動である。上述したように、地震動の短周期成分は波長が短く、震源で起きた断層の細かな動きを反映しているが伝播する途中でその性質は変化し易い。しかし、地震動の長周期成分は波長が長く、途中の伝播経路や観測地点付近の地盤や地形の影響を受けにくいいため、震源からエネルギーがどのように放出されたかを大まかにすることができる<sup>5)</sup>。

ここでは、鳥取県西部地震の震源メカニズムを、地震学的データより推定した東京大学地震研究所地震予知情報センターと京都大学防災研究所の解と、測地学的データより推定した国土地理院の解について紹介する。

東京大学地震研究所地震予知情報センターの Yagi&Kikuchi は、遠地実体波（アメリカの IRIS-DMC:Incorporated Research Institutions for Seismology の 12 点の遠地 P 波広帯域記録と K-NET および KiK-net で観測された地震記録）によって鳥取県西部地震の震源メカニズムを解析し、以下のような震源特性を報告している<sup>6)</sup>。図 1-3 に示した球面は、観測された縦波（P 波）の押し引き（押しは震源から離れる方向、引きは震源に近づく方向）を震源に引き戻して震源を囲む球面（震源球面）上に投影したものである。図のように押し引きの境界を示す線が円の中心付近で交差する場合は、震源断層が横ずれ断層であったことを表している。図 1-3 の右上に示した横軸にタイムスケールを持つ図は、震源における運動の時間的経過を表した震源時間関数である。震源時間関数は、後述する地震モーメント  $M_0$  の時間的な変化を表した（地震モーメントの微分）ものであり、地震開始後 4 秒～7 秒付近で大きなすべりが生じていることがわかる。図の下段はすべり分布を示したものである。図 1-4 はその進行過程を示したものである。発震点よりも南東でおおきなすべりが生じていることがわかる。

震源時：13:30:17

（走向，傾斜，すべり角）（150，87，1）

地震モーメント  $M_0$ ： $1.1 \times 10^{19} Nm$

モーメントマグニチュード  $M_w$ ：6.6

破壊継続時間 T：約 9sec

深さ H：11km

最大すべり量：約 3.4m

長さ：20km

幅：10km

断層運動：北西南東走行の左横ずれ断層

## 2000 Tottori Earthquake

Moment =  $0.109 \times 10^{20}$  Nm,  $M_w = 6.6$

(Strike, Dip, Slip) = (150.0, 87.0, 0.9)

Y. Yagi and M. Kikuchi (2000)

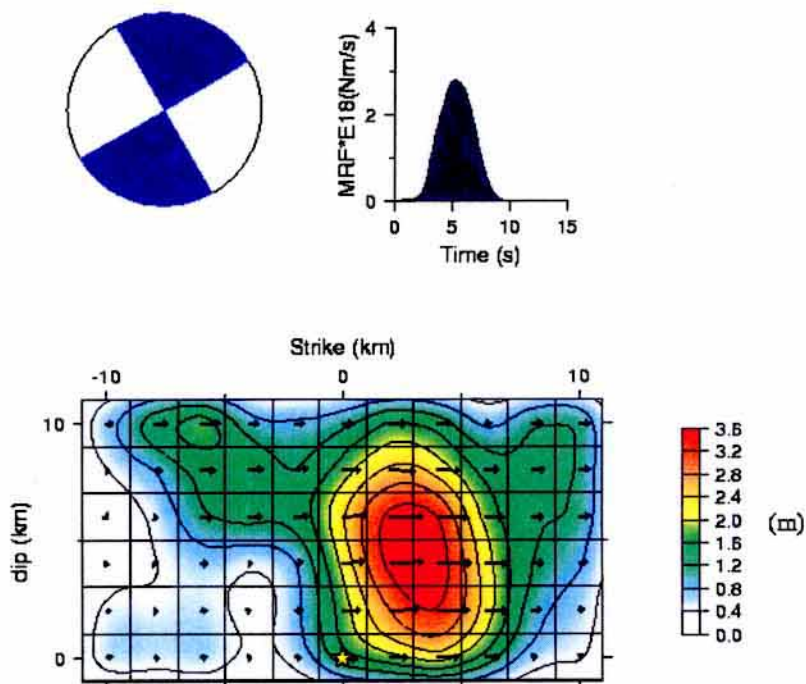


図 1-3 推定された鳥取県西部地震の震源モデル（震源時間関数とすべり分布）<sup>6)</sup>

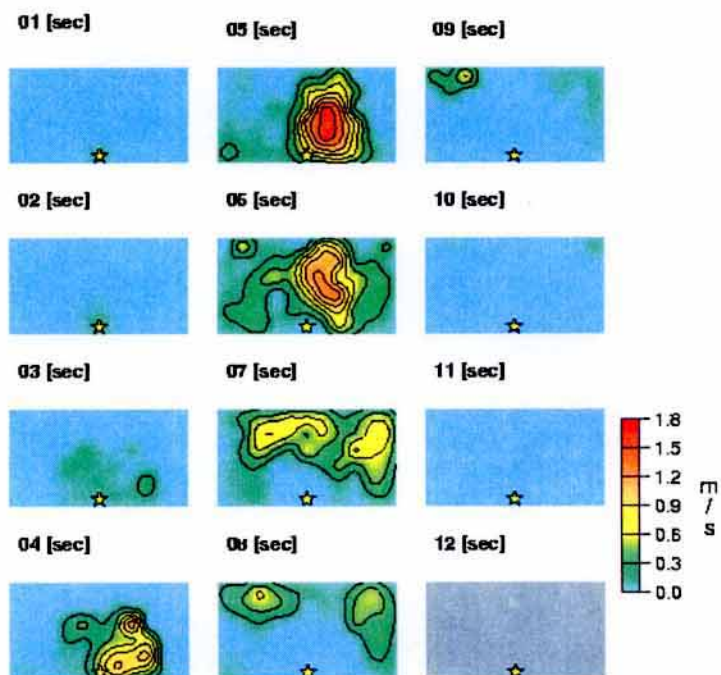


図 1-4 推定された断層の破壊過程<sup>6)</sup>

京都大学防災研究所の関口・岩田は、K-NETとKiK-netで観測された地震記録を用いて断層の破壊過程の推定を行い、図1-5と図1-6に示すような断層面のすべり分布とその破壊の進展を報告している<sup>7)</sup>。図は、断層面を南西側からみたもので、発震点より浅いところでおもにすべりがみられ、大きなすべりは発震点よりやや南東側にあることがわかる<sup>7)</sup>。図1-6は、発震後、約4~7秒に浅い部分でのすべりが卓越していることを表している<sup>7)</sup>。関口・岩田は、以下のような震源特性を報告している<sup>7)</sup>。

地震モーメント  $M_0$  :  $1.93 \times 10^{19} \text{ Nm}$

モーメントマグニチュード  $M_w$  : 6.8

断層運動：左横ずれが卓越し、最大すべり量は約3m。

..ASIU01101501107010122

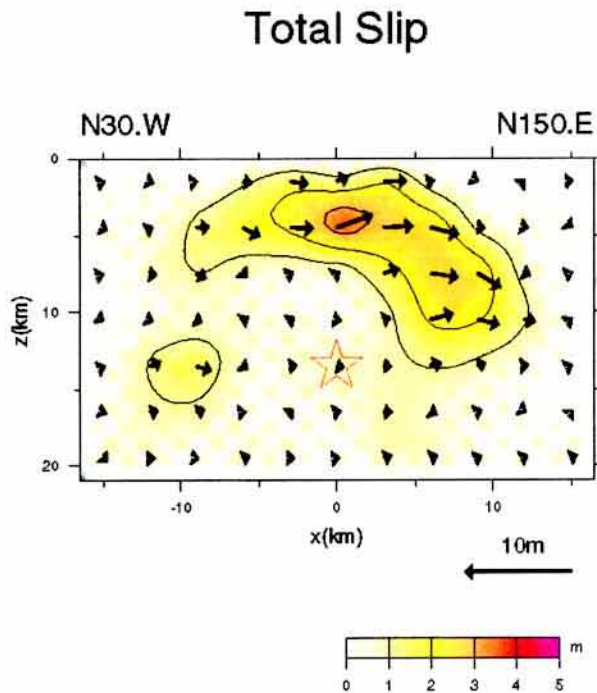


図1-5 推定された断層面のすべり分布<sup>7)</sup>

/moo17/haru/inw/tot/solution/sol107010122

### Time Progression of Rupture (Slip)

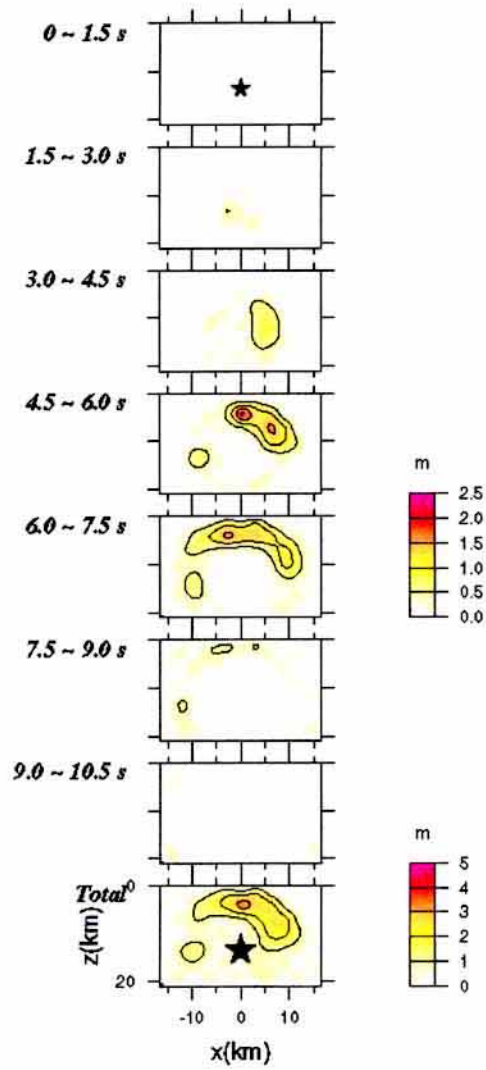


図 1-6 推定された断層の破壊過程<sup>7)</sup>

国土地理院は図 1-7 に示すように震源周辺の電子基準点で観測された地核変動データを解析し、鳥取県西部地震を発生させた断層の位置やすべりの大きさを求め、以下のような震源特性を報告している<sup>7)</sup>。

断層の形状：長方形と仮定

断層の向き：ほぼ北北西-南南東方向

断層の大きさ：水平方向約 20km, 上下方向約 10km

傾斜角： $86^\circ$ （北東から南西の方向に傾き下がるほぼ垂直な断層）

断層上端深さ：約 1km (断層の北端は、米子市の南西約 10km に位置する。)

断層運動：ほぼ純粋な左横ずれ（すべり角  $7^\circ$ ）で、すべり量は約 1.4m。

モーメントマグニチュード  $M_w$ ：約 6.6

この推定結果に基づいて描かれた断層モデルの概念図がやはり国土地理院より公表されている。それを、図 1-8 に示す<sup>8)</sup>。

#### 平成12年10月6日鳥取県西部地震に伴う地殻変動と断層モデル

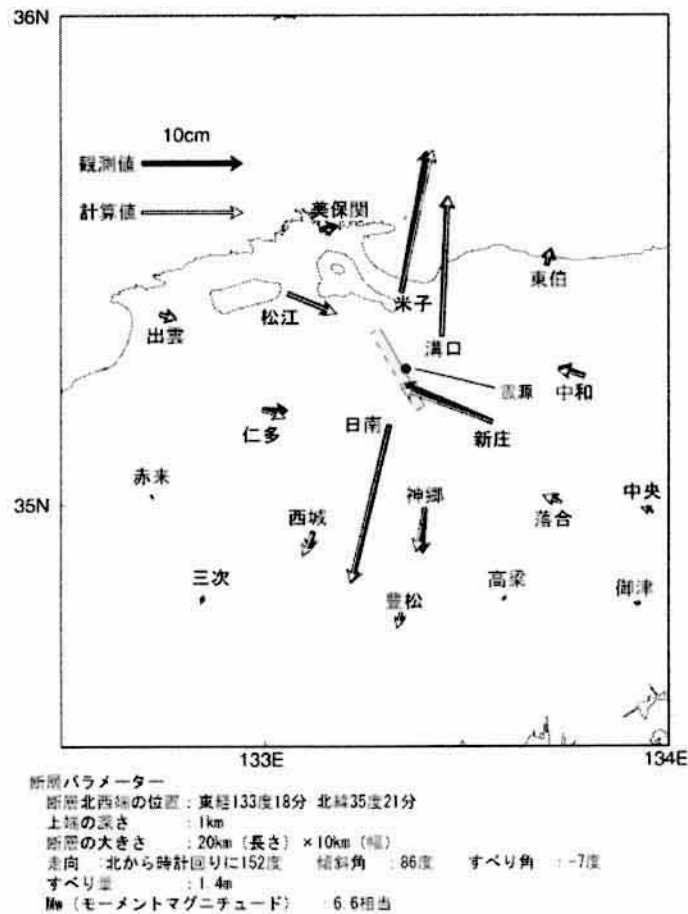
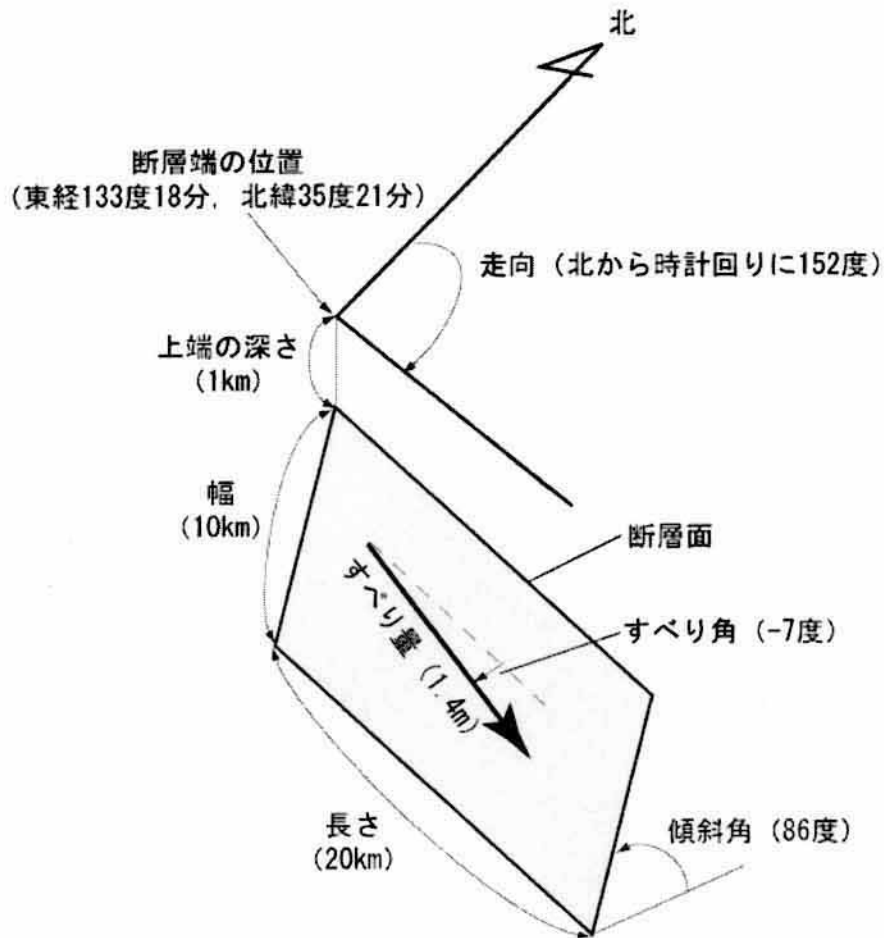


図 1-7 平成 12 年鳥取県西部地震に伴う地核変動と断層モデルの推定結果<sup>8)</sup>



## 断層モデルの概念図



断層のすべりを表す矢印は、断層の下盤側（北東側）に対する上盤側（南西側）の運動方向と大きさを表します。

図 1-8 建設省国土地理院によって推定された平成 12 年鳥取県西部地震の断層モデル概念図<sup>8)</sup>

図 1-3～図 1-6 と図 1-8 より、鳥取県西部地震は、震源から南東の方向に向かって破壊が進んでいったと推定されていることがわかる。

平成 7 年兵庫県南部地震でも、地質学的データ、測地学的データ、地震学的データに基づいた震源特性が報告されている。ここでは、鳥取県西部地震と比較するために、図 1-9<sup>9)</sup>に兵庫県南部地震の震源特性を示す。図より、平成 7 年兵庫県南部地震の本震は、3つのサブイベントからなる多重震源であったことがわかる。

(走向, 傾斜, すべり角) (233, 85, 165)

地震モーメント  $M_0$  :  $2.5 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$

モーメントマグニチュード  $M_w$  : 6.9

破壊継続時間  $T$  : 11 秒

深さ  $H$  : 8km  
 相対変位量 : 2.1m  
 長さ : 40km  
 幅 : 10km  
 断層運動 : N233° E/N53° E を走向とする右横ずれ断層

### Hyogo 1995/01/17

$M_0 = 2.5 \times 10^{26}$  dyne-cm  $M_w = 6.9$  Depth = 8 km var. = 0.3450

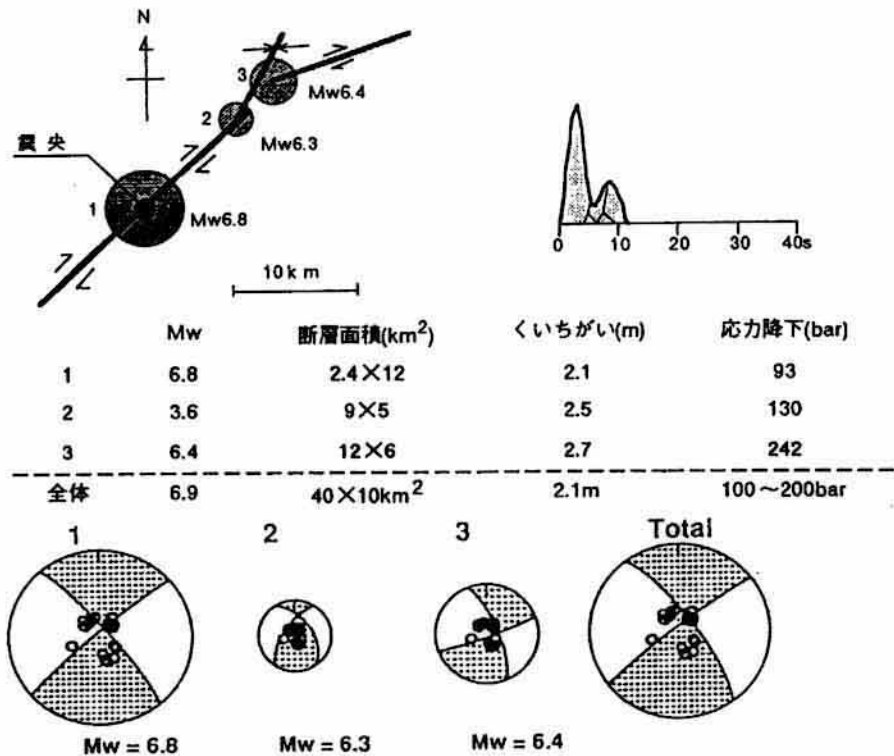


図 1-9 平成 7 年兵庫県南部地震における震源メカニズム<sup>9)</sup>

上述したように気象庁マグニチュード  $M_J$  は、鳥取県西部地震の方が、兵庫県南部地震よりも大きいにもかかわらずその被害が小さいことが指摘されている。地震の大きさを気象庁マグニチュード  $M_J$  ではなく、断層を境にして岩盤をずり動かすために働いた力（地震モーメント  $M_0$ ）の大きさをもとにして計算するモーメントマグニチュード  $M_w$  で両地震の大きさを比較する。震源断層の面積を  $S$ 、平均変位量を  $D$ 、地震の起こった場所の剛性率を  $\mu$  とすると地震モーメント  $M_0$  は、次式で表される<sup>10)</sup>。

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot S \quad (2-1)$$

鳥取県西部地震のモーメントマグニチュード  $M_w$  は約 6.6、兵庫県南部地震のモーメントマグニチュード  $M_w$  は約 6.9<sup>11)</sup> とそれぞれ推定されている。今、モーメントマグニチ

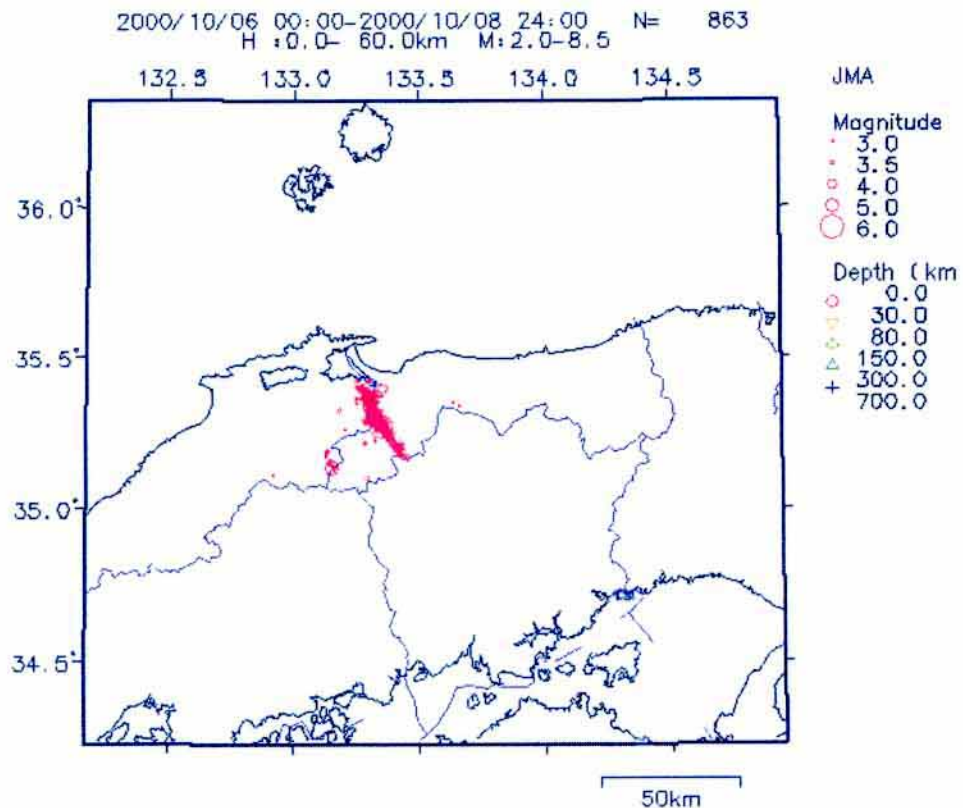
ュード  $M_w$  と地震モーメント  $M_0$  の関係を、式(2-2)に示す金森の式<sup>10)</sup>によって表されるとすると、鳥取県西部地震の地震モーメント  $M_0$  は  $M_0 = 1.1 \times 10^{19} Nm$ 、兵庫県南部地震の地震モーメント  $M_0$  は  $M_0 = 2.49 \times 10^{19} Nm$  となる。鳥取県西部地震の地震モーメントは、兵庫県南部地震の約 40% と小さいことがわかる。

$$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 \quad (2-2)$$

地震モーメントは概ねエネルギーに比例することから、鳥取県西部地震の震源でのエネルギーは、兵庫県南部地震の半分以下であったと言える<sup>9)</sup>。このように、気象庁マグニチュードの大きさからは、鳥取県西部地震と兵庫県南部地震で生じた被害の違いを説明できないが、断層の大きさに着目すると、両地震による被害の違いを説明できることがわかる。

地震による構造物の被害は、地震の大きさだけでなく、構造物に与える影響が大きい地震動の周期成分の大きさ、構造物の耐力、構造物周辺地盤の状況等が複雑に影響しながら生じるため、地震モーメントが兵庫県南部地震よりも小さいことだけを、構造物の被害が小さかった理由にはできないが、理由の1つであると考えられる。

上述した震源特性が、観測された事象にどのような形で現れているかをみる。図 1-10 は、気象庁一元化震源データに基づく 10 月 8 日までの余震分布<sup>12)</sup>である。余震は断層に沿って発生していることがわかる。



[TSEIS]

図 1-10 気象庁一元化データに基づく余震分布 (2000.10.06~10.08)<sup>12)</sup>

## 地表における最大加速度分布

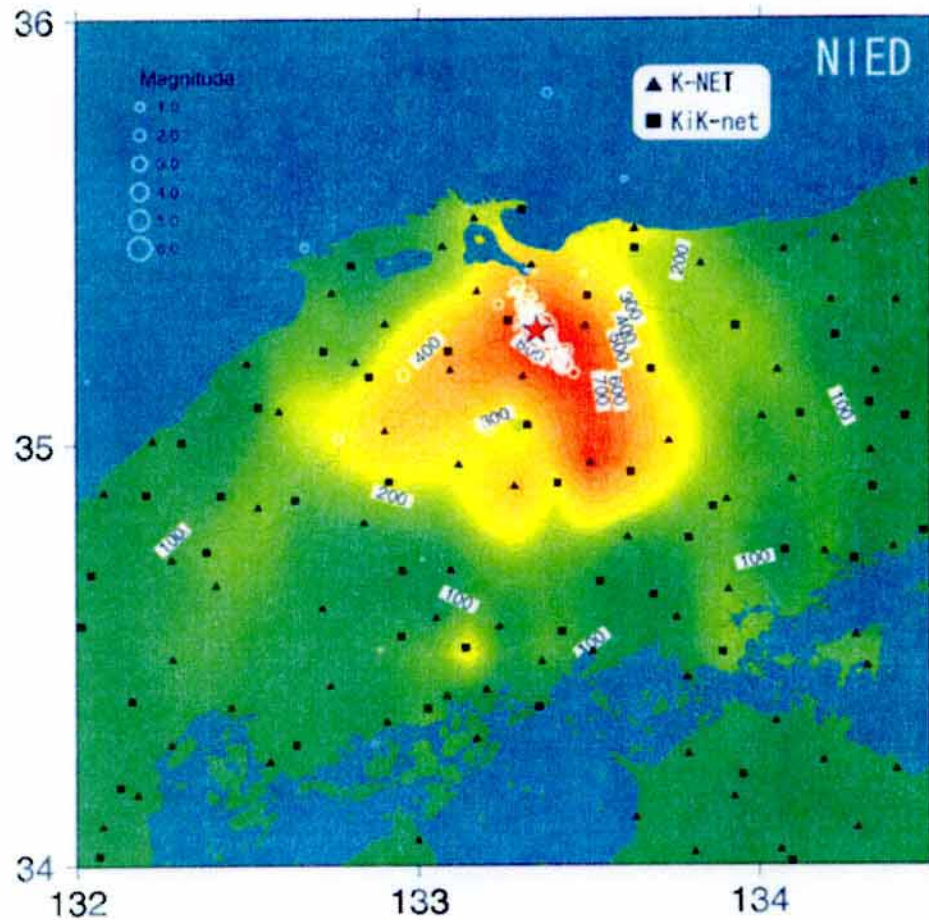


図 2. 防災科学技術研究所 (K-NET, KiK-net) により観測された地表における最大加速度コンター (gal) および震源分布 (10/6 13:30-23:59)。

図 1-11 K-NET と KiK-net による地表面上の最大加速度分布 (コンター図) <sup>13)</sup>

図 1-11 は K-NET と KiK-net で観測された地表面の最大加速度の分布を、図 1-12 は KiK-net で観測された地中 (工学的基盤面) の最大加速度の分布をそれぞれ示したものである <sup>13)</sup>。地表面上における最大加速度の分布は、表層地盤の影響を受けて複雑な形状をしているが、地中における最大加速度の分布は、南南東-北北西に細長い楕円の形状をしており、加速度の大きい領域が南側に広がっていることがわかる <sup>13)</sup>。これは、上述した東京大学地震研究所地震予知情報センター Yagi & Kikuchi, 京都大学防災研究所の関口・岩田の大きなすべりは発震点よりやや南東側にあることと整合している。

## 地中における最大加速度分布

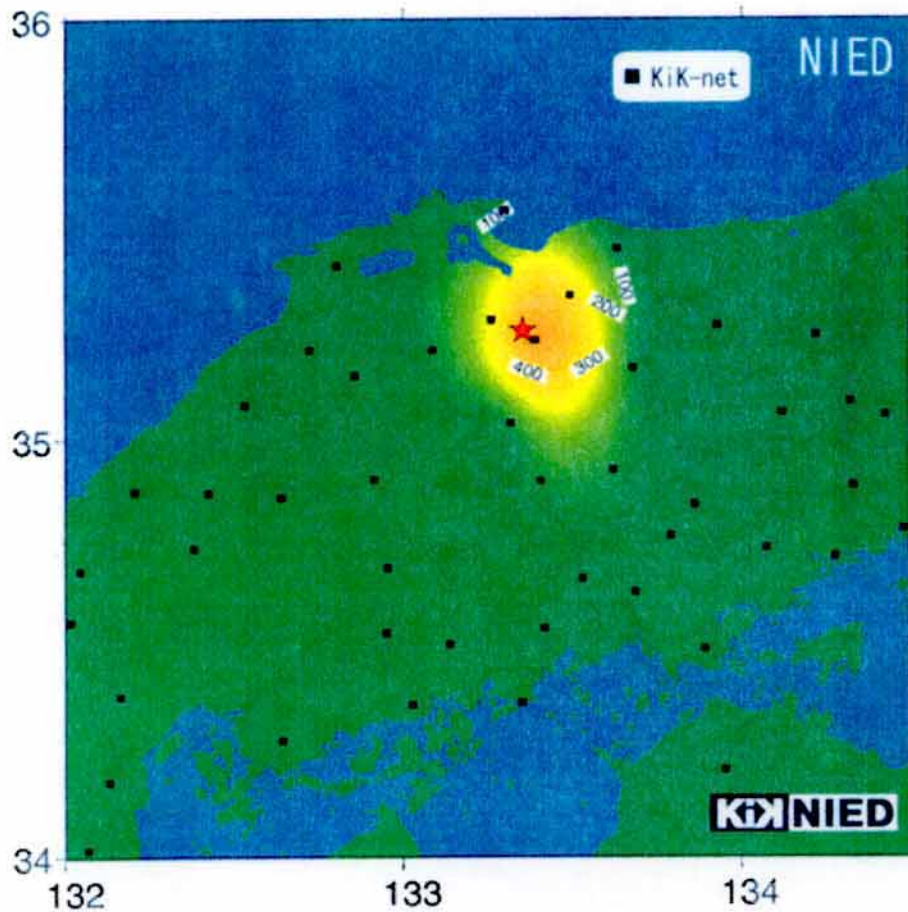
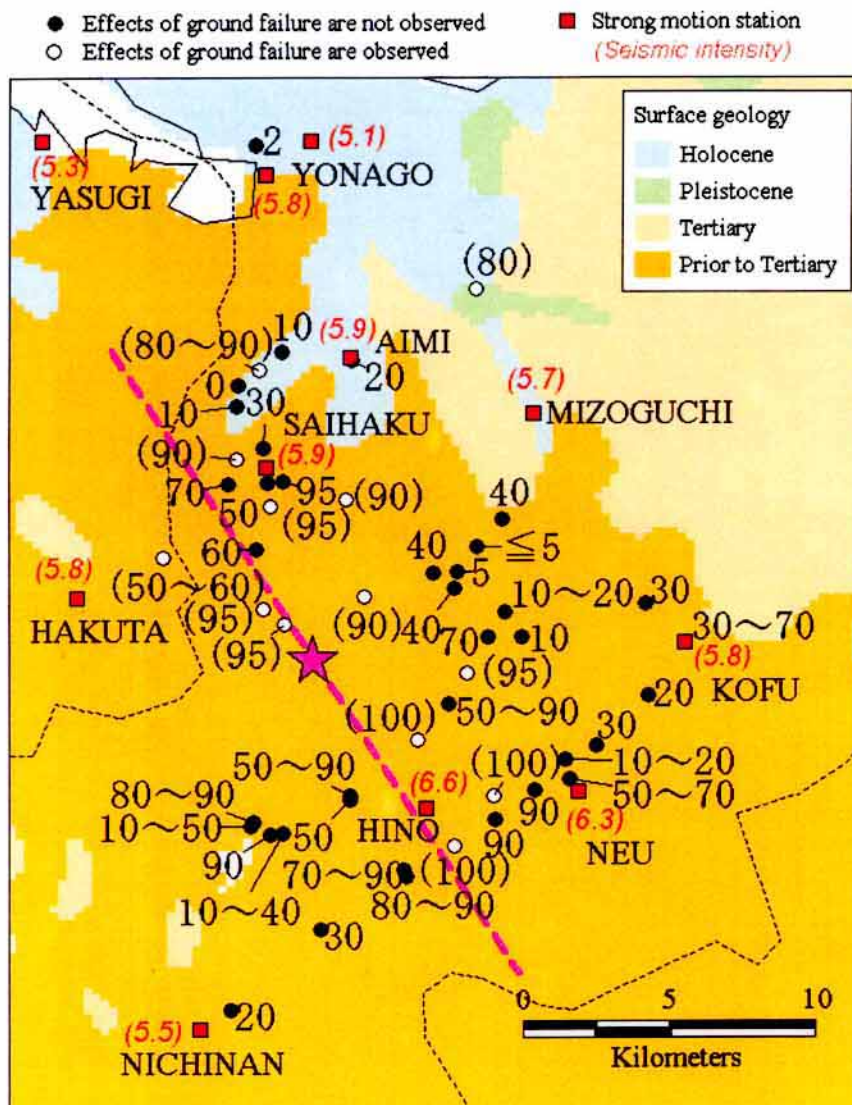


図 1. 防災科学技術研究所 (KiK-net) により観測された地中における最大加速度コンター (gal)

図 1-12 KiK-net による地中 (工学的基盤面上) の最大加速度分布 (コンター図) <sup>13)</sup>

図 1-13 は、東京工業大学翠川研究室が行った墓石の転倒調査結果である <sup>14)</sup>。転倒調査は、10月9日～11日に行い、追加調査が10月19日に行われている。調査した墓地は51地点である <sup>14)</sup>。転倒率を計算する際には、竿石の上に傘状の石が乗った不安定な墓石や小さな墓石を除去し、既に墓石が修復された跡があり、転倒率が正確に算定できない場合には、ある幅で転倒率が示されている <sup>14)</sup>。また、まさ土で整地された墓地が多く、これらの墓地では地盤変状を起こし、そのために墓石の基礎部分が不等沈下している場合もみられた。このような場合、竿石が地震動によって転倒したのか基礎部分の不等沈下によって転倒したのか判断しにくいいため、地盤変状がみられた墓地での転倒率は必ずしも地震動の強さを反映しているとは考えにくいいため、地盤変状が



## Overturning rate of tombstones (%)

図 1-13 墓石の転倒率分布<sup>14)</sup>

みられた墓地での転倒率は括弧書きで示されている<sup>14)</sup>。転倒率の分布をみると、隣接する地点でも値に大きな差がみられる場合があるが、震源の北西の推定断層付近では60%前後で、震源の南東の推定断層付近では80%前後であり、震源の南東の方が転倒率が高いことがわかる<sup>14)</sup>。これも、東京大学地震研究所地震予知情報センター Yagi&Kikuchi, 京都大学防災研究所の関口・岩田の大きなすべりは発震点よりやや南東側にあることと整合している。

以上のように、各機関から公表されている震源特性はほぼ等しく、特に、モーメントマグニチュードは兵庫県南部地震の約 1/2.5, 断層は北西南東走向の左横ずれ断層、断層面における大きなすべりは発震点より南東に生じているという特性が得られている。

## 参考文献

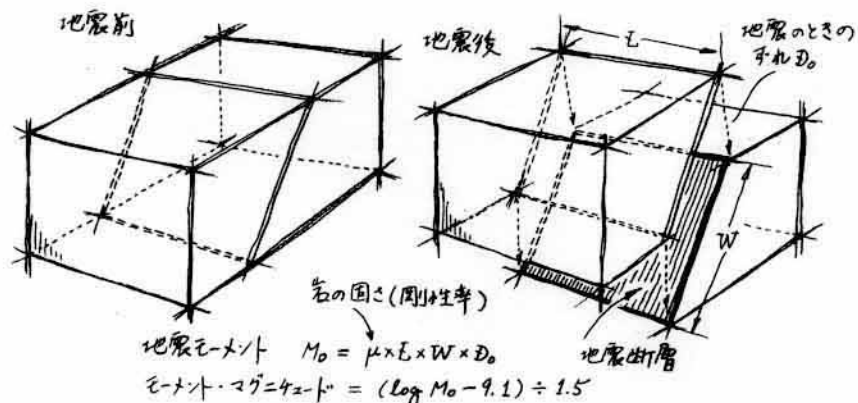
- 1) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET），<http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 2) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網（KiK-net），<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 3) 財団法人地震予知総合研究振興会，<http://www.adep.or.jp>
- 4) 中田高，蓬田清：地震断層からみた 1995 年兵庫県南部地震の震源過程，月刊地球／号外 No.13，pp.107-108，1995.
- 5) 鹿島都市防災研究会編著：大地震と都市災害-2.5 震源で起こったこと-，pp.56-64，鹿島出版会，1996.8.
- 6) <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottori/>
- 7) <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwata/ttr.source.html>
- 8) <http://www.gsi-mc.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2000/1007-2.htm>
- 9) 国立天文台編，理科年表，地学の地 154(794)，丸善，2001.
- 10) 宇佐美：新編日本被害地震総覧，489 頁，東京大学出版会，1996.
- 11) 日本建築学会：1995 年兵庫県南部地震災害調査速報，pp.8-9，1995.3.
- 12) <http://criepi.denken.or.jp/WhatsNew/Topics/report1013.html>
- 13) <http://www.bosai.go.jp/ad/Jpn/news/press/001012tottori.html>
- 14) <http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/tottori/2000tottori3.html>

### 【補足説明】 マグニチュードとモーメントマグニチュード

地震の大きさを表す量として震度やマグニチュードが良く用いられる。震度とマグニチュードは、照明器具の照度と光度に相当する。照度は、光があたる面での明るさを表す量である。これを震度に置き換えると、震度は、地震動が観測される点での地震動の強さを表す量であるといえる。光度は、光源である照明器具が有するエネルギー量の大小を表す量である。これをマグニチュードに置き換えると、マグニチュードは、震源が有するエネルギー量の大小を表す量であるといえる。すなわち、震源の大きさ（地震の規模）をマグニチュードで、震源から生じる地震の波（地震動）の強さを観測地点ごとに表したものを震度という。

ある地震が起きたときに、その震央からちょうど△キロメートル離れたところに地震計があったとする。その地震計で観測される地震動の最大震幅Aは、地震の規模が大きければ大きな値が、地震の規模が小さければ小さな値が観測されるであろうという考えにもとづいて定義されたのがマグニチュードである。しかし、地震計にはいろいろな特性を有する地震計があり、用いる地震計によって観測される地震動の最大震幅も異なるため、現在、世界中で数種類のマグニチュードが使用されている。日本で用いられているのは、気象庁マグニチュードである。

地震は断層が動くことによって起こるため、地震の大小は、地震をおこした断層の面積の大小によって決まるといえる。マグニチュードは、震央からの距離とそこで観測される地震動の最大震幅で定義されると述べたが、マグニチュードを決める地震動の震幅は、断層面の大きさがある程度大きくなると、たとえ断層面の大きさに大差があっても、それほど差異が現れない。このため、大きな地震では、地震動の震幅の大きさだけでは、地震を引き起こすもととなった断層の大きさを表すことができない。そこで、図補-1に示すように、地震波の震幅の大小よりもその断層を境にして岩盤をずり動かすために働いた力（地震モーメント）の大小で地震の大きさの大小を表すことが地震学の分野では行われている。これをモーメントマグニチュードという。図中に記された岩の固さ（剛性率） $\mu$ は、地核内で発生する地震の場合 $\mu = 3.3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ 程度（日本列島の地震-地震工学と地震地体構造-, pp.18, 鹿島出版会, 1991.1.）である。



図補-1 断層の大きさを表すマグニチュード(モーメント・マグニチュード)の概念  
(島村英紀著, 地震はどこに起こるのか, 講談社, 図II-2を抜粋)