

防災工学

第4回

千葉大学 工学部 都市環境システムコース

丸山 喜久

<http://ares.tu.chiba-u.jp/marulab/index.html>

ymaryam@tu.chiba-u.ac.jp

1

気象庁マグニチュード M_J

2003年9月24日まで:

変位マグニチュードと速度マグニチュードを組み合わせる方法で計算.
変位計, $h \leq 60\text{km}$ の場合

(坪井, 1954)

Aは周期5秒以下の最大振幅(水平2方向合成), Δ は震央距離(km)

変位計, $h \geq 60\text{km}$ の場合

$K(\Delta, h)$ は勝又の表による.

速度計の場合

AZ: 最大振幅, α : 地震計特性補正項

2003年9月24日以降:

① 変位MIは、津波地震早期検知網以前と以降のMの系統的な差を統計的に吸収できるように計算式を改良. 深さによる式を統合.

② 速度MIは、Hi-net観測網データの蓄積を待って、変位Mとさらに良く一致し、かつ90kmよりも深い地震に対しても適用可能な経験式を導入.

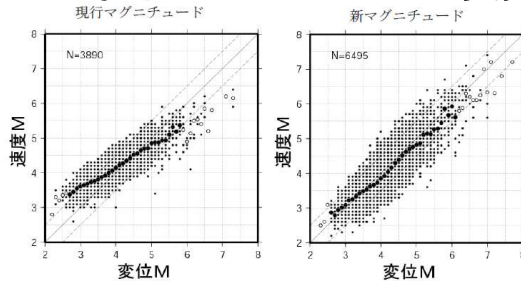
2001年: 1994-2001年の地震のMを一部修正

1995年兵庫県南部地震: 7.2から7.3へ, モーメントMIについても計算開始.

http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/monthly200308/200308jma_mag_cange.html

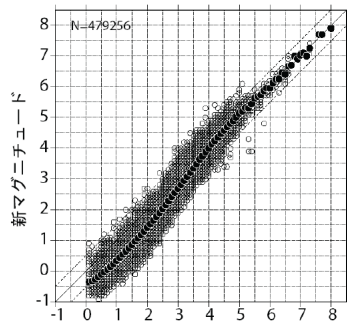
2

気象庁マグニチュードの変更(2003)



地動変位によるマグニチュード(変位M)と地動速度によるマグニチュード(速度M)との関係

変位Mと速度Mの両方が得られた地震についてプロット. 同じ変位Mについて、速度Mを平均したものを大きい丸で示した. 黒丸はサンプル数が10個より多いもの、白丸はそれ以外のもの. 現行の場合、小規模の地震では変位MIに比べて速度Mが大きめに計算されていることがわかる. 新しい速度Mの経験式を使うと、黒丸は傾き1の直線に近づきかなり改善されている.



現行マグニチュードと新マグニチュードの関係

図2 1997年10月から2003年3月の地震について、現行のマグニチュードと新マグニチュードの関係を示した図. 白丸はそれぞれの地震を示す. 黒丸は、現行マグニチュード(0.1単位)毎に、新マグニチュードを平均したもの. 黒丸の分布が現行マグニチュードと新マグニチュードの大まかな対応関係を示す. 現行マグニチュードが4以上の地震については、改訂による変化は少ない. 一方で、それよりも小さい地震では新マグニチュードの方が系統的に数値が小さくなっていることがわかる.

http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/monthly200308/200308jma_mag_cange.html

3

地震の発生回数とM(1)

マグニチュードMの地震発生回数 $n(M)$

(Gutenberg-Richterの関係式)

直線の傾きを表すbは、b値と呼ばれ、の値を示す.

→ マグニチュード(M-1)の地震はマグニチュードMの地震の

地震エネルギーの消費は、大部分は大地震によるものである

微小地震 : $1 \leq M < 3$

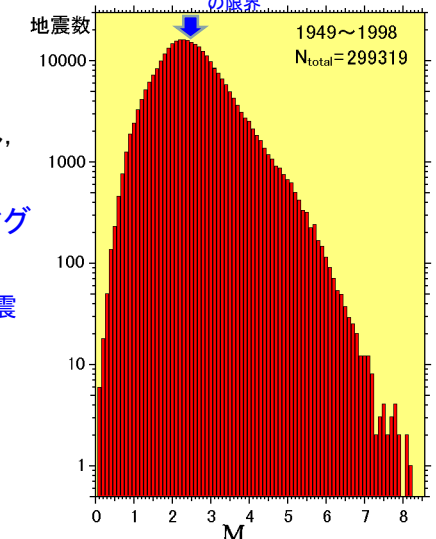
小地震 : $3 \leq M < 5$

中地震 : $5 \leq M < 7$

大地震 : $7 \leq M$

巨大地震 : $8 \leq M$

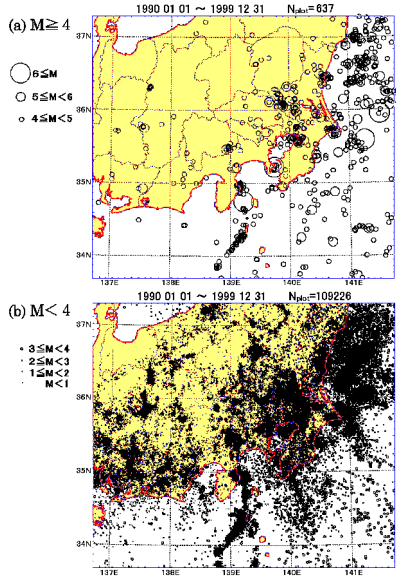
1949~1998年の50年間に日本周辺で検知された地震のM別頻度分布(気象庁データ) 地震観測網の検知能力の限界



http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec1.2.htm

4

1990-1999年の10年間に関東・東海地域で発生した深さ100km未満の地震の震源分布 (防災科研データによる)



地震の発生回数とM(2)

マグニチュードと日本付近における発生頻度

名称	M	地震の概略(浅い地震の場合)	発生頻度
大地震	9	数100~1000kmの範囲に大きな地殻変動を生じ、広域に大災害・大津波。	日本付近に起こった記録がない。
	8	内陸に起これば広域にわたり大災害、海底に起これば大津波が発生する。	10年に1回程度
	7	内陸の地震では大災害となる。海底の地震は津波を伴う。	1年に1~2回程度
中地震	7	震央付近で小被害が出る。Mが7に近いと、条件によって大被害となる。	1年あたり10~15回程度
	6	被害が出ることは少ない。条件によっては震央付近で被害が出る。	1月に10回程度
	5	震央付近で有感となる。震源がごく浅いと震央付近で軽い被害が出る。	1日に数回程度
小地震	4	震央付近で有感となる。	1日に数回程度
	3	震源がごく浅い場合に、震央付近でまれに有感となることがある。	1時間に10回程度
	2	人間に感じることはない。	1分に1~2回程度
微小地震	1	人間に感じることはない。	無数に発生している。
	0	人間に感じることはない。	
	-1	人間に感じることはない。	

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec1.2.htm 5

マグニチュードと地震断層

内陸地震のマグニチュードMと活断層長さL(km), すべり量D(m)の関係 (松田, 1975)

$$\log L = 0.6M - 2.9$$

$$\log D = 0.6M - 4.0$$

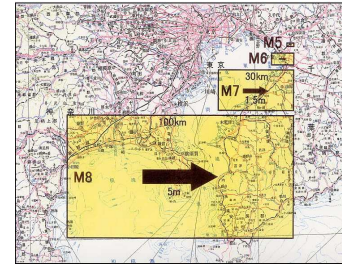
この他にもいろいろな経験式がある。海溝型含む(佐藤, 1979)。

断層長さL(km), すべり量d(cm)

$$\log L =$$

$$\log d =$$

比はMによらずほぼ定値

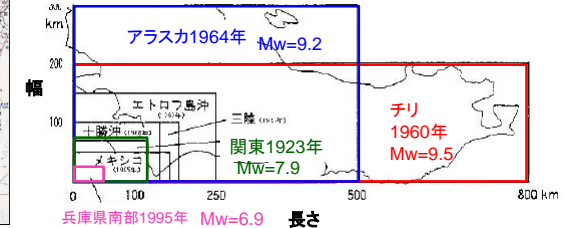


M8の地震はひとつの県と同じ位の断層

M	L(km)	すべり量 D(m)
6.0	5.0	0.4
6.5	10.0	0.8
7.0	20.0	1.6
7.5	39.8	3.2
8.0	79.4	6.3

M	L(km)	すべり量 d(cm)
5.0	4.2	13
6.0	13.2	40
7.0	41.7	126
8.0	131.8	398
9.0	416.9	1259

大地震の震源断層面積の比較。[阿部勝征(1990)]



http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec2.2.html

地震の群れ

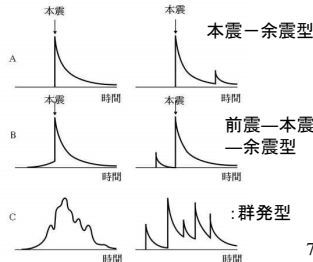
foreshock : 本震の前に起きた小さな地震。(観測されるのは1割程度)

mainshock : 最初に起きた大きな地震

aftershock : 本震の後に起こる地震。浅い大地震では必ず起こる。余震は、本震を生じた断層面のごく近傍で発生。このため、本震直後の期間に発生した余震の空間分布に基づいて、

- 本震の発震機構解の2つの節面のうち、断層面を判別
- 断層面の長さや幅などを推定したりする。震源域~

地震の群れは3タイプに分けることができる。

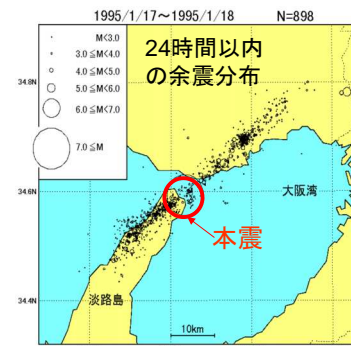


1978年伊豆大島近海地震(M=7.0)

: 本震と言うべき飛びぬけて大きな地震を含まない地震の群れ。火山性の地震など。

7

1995年兵庫県南部地震の余震分布と余震回数

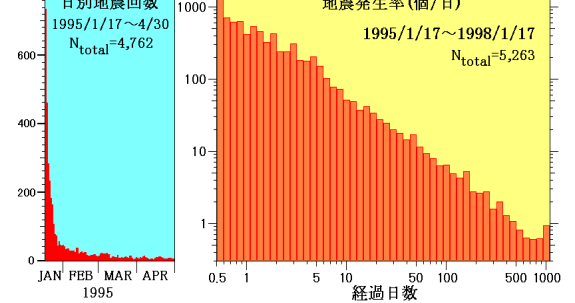


余震の震源は、淡路島から神戸市にかけての約40kmにわたって南西-北東方向に直線状に分布

1995年兵庫県南部地震の余震活動

地震後3ヶ月半

地震発生から3年間



地震後3年間にわたる余震発生率の減衰を対数目盛で表現。余震発生率はほぼ直線状に減っていく様子が見られ、余震数がベキ乗則で減衰するという改良大森公式がよく成り立っていることを示す。

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec7.1.htm

8

余震の時間的減少

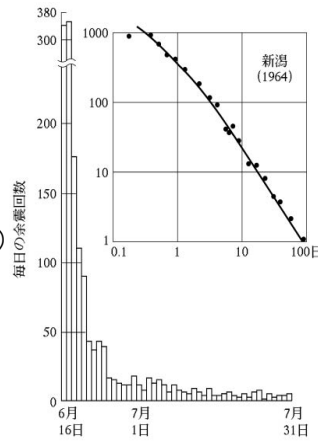
余震の発生数 $n(t)$ は、時間とともに減少する。

大森公式 (1894)

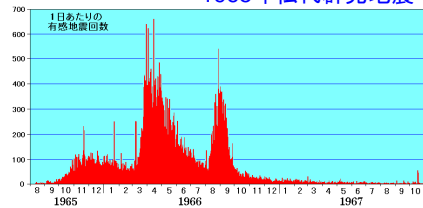
改良大森公式
(宇津ら, 1957)

K, C, Pは地震ごとに異なる定数
Pは通常1よりやや大きい(大森公式はP=1のとき)

1964年新潟地震(M=7.5)の
1日当たり余震数の変化



1965年松代群発地震

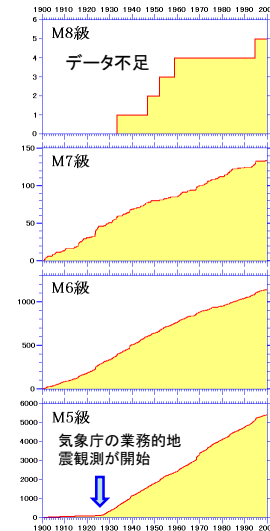


<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/1/1-2.3.2.html>

地震の周期性と活動期・静穏期 (1)

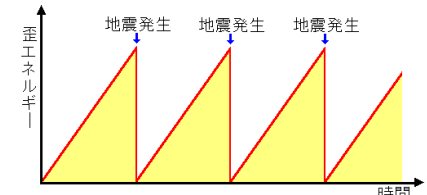
日本列島周辺における最近100年間のM別
地震回数(宇津および気象庁カタログによる)

どのマグニチュードレベルにおいても
地震累積数の推移は直線的であり、
一定の割合で地震が発生している。



広域かつ長期的に見ると、地震の発生には周期性や、
活動期・静穏期の区別を見出すことはできない。

特定地域に着目すると、M8級の海溝型巨大地震では
100~200年、内陸活断層で発生するM7級の大地震では
数千年~数万年の繰返し周期で、似たような地震の
発生が繰り返されている→

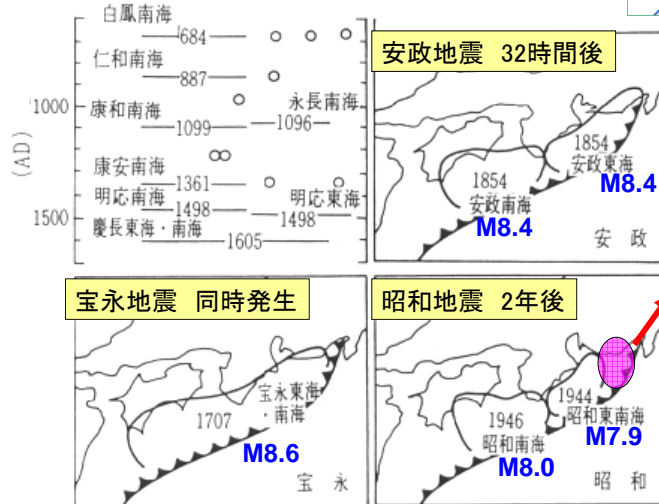
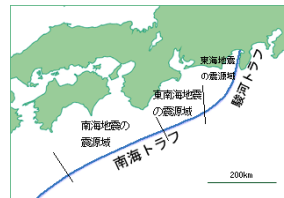


地震発生源における歪エネルギーの蓄積と解放のサイクル

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.html

東南海・南海地震の歴史

- ほぼ100-150年間隔で巨大地震が発生
- 同時発生か、東南海、南海が連発
- 2030年以降に必ず起きる地震。昭和の地震のMが小さかったので、次は発生が早い恐れ。



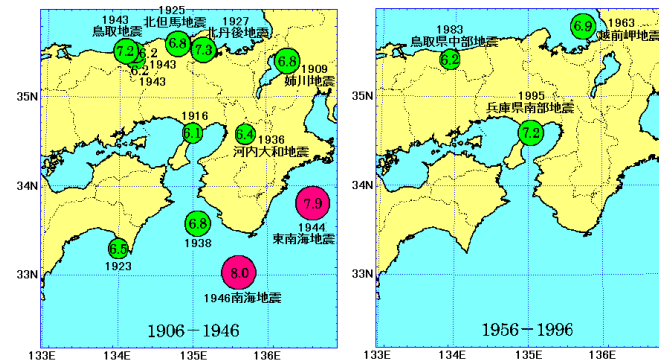
壊れ残った場所が想定「東海地震」の震源となる可能性?

恐らくもう東海地震の単発はない。

地震の周期性と活動期・静穏期 (2)

歪エネルギーを蓄積する期間のうち前半は歪エネルギーを放出しているため、一般に大きな地震は起きにくくなり(), 後半になると地下の緊張状態が高まり、大きめの地震が起きやすくなる()という傾向がある。

南海地震に先立つ40年間は内陸の地震活動が高かった。

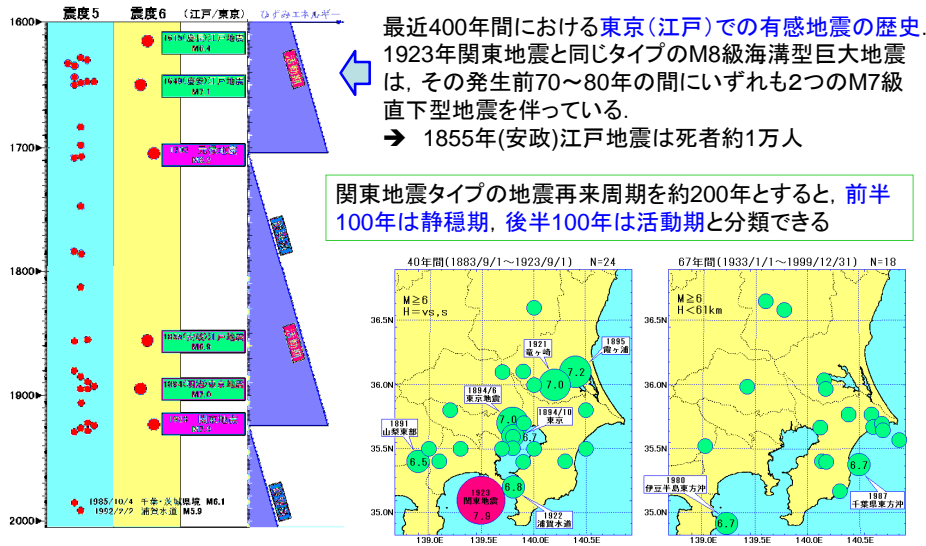


1946年南海地震(M8.0)の発生前40年間(左)と最近40年間(右)における、近畿地方周辺の地震活動(M>6)の比較

最近の40年間は大変に静かだったが、1995年兵庫県南部地震に続いて、2000年鳥取県西部地震や2001年芸予地震などが起きており、西日本地域は次の南海地震に向けた内陸地震の活動期に入ったのではないかと議論もされている。

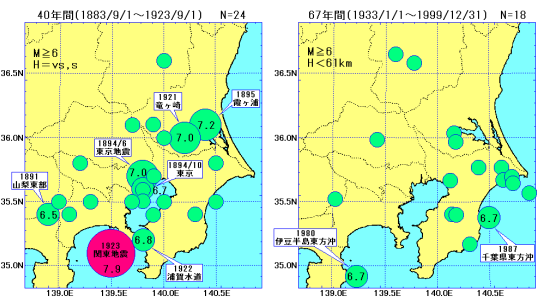
http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.html

地震の周期性と活動期・静穏期 (3)



最近400年間における東京(江戸)での有感地震の歴史。1923年関東地震と同じタイプのM8級海溝型巨大地震は、その発生前70~80年の間にいずれも2つのM7級直下型地震を伴っている。
 → 1855年(安政)江戸地震は死者約1万人

関東地震タイプの地震再来周期を約200年とすると、前半100年は静穏期、後半100年は活動期と分類できる



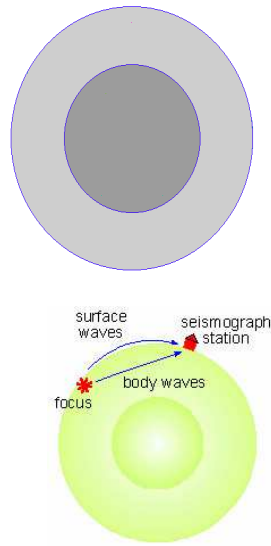
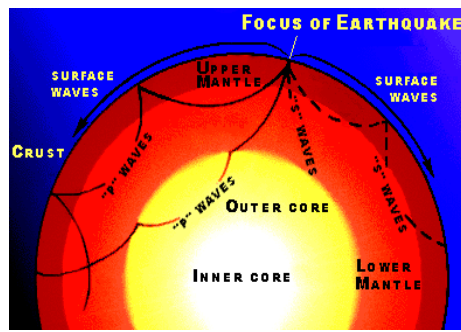
1923年関東地震(M7.9)の発生前40年間(左)と最近67年間(右)における、関東地方周辺の地震活動(M ≥ 6)の比較(岡田義光, 2001)

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.html 13

地震波とその伝播

地震が発生すると、断層面から出たは周辺に広がっていく

seismic wave



地震波は大きく分けると2つに分類

- 地球内部を伝わる
- 地表面に沿ってのみ伝わる

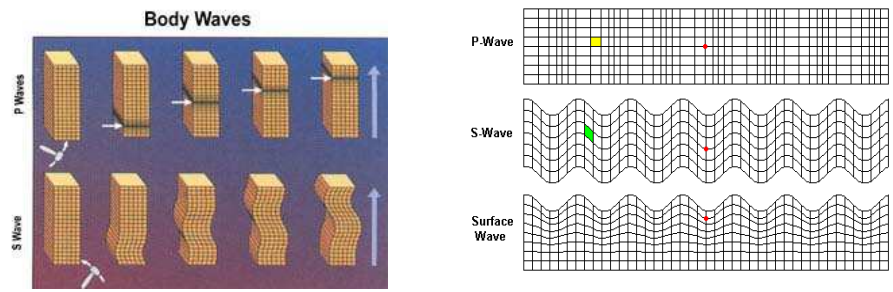
粒子の運動は地表面付近に限られる

http://earthquake.usgs.gov/image_glossary/

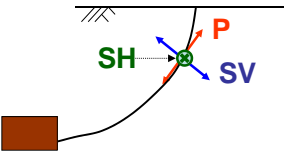
実体波

P波:
primary wave 媒質粒子の運動方向は、波の伝播方向と一致→

S波:
secondary wave 媒質粒子の運動方向は、波の伝播方向と直角



鉛直面内で振動する SV波と水平面内で振動する SH波に分解することができる

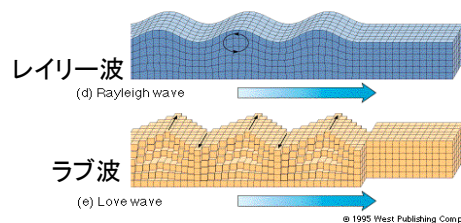


表面波

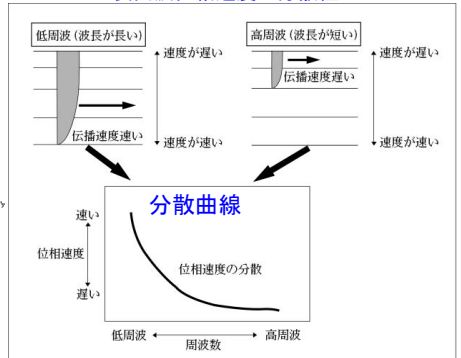
縦波や横波が干渉しあって生まれる。

ラブ波:
Love wave 媒質粒子の運動方向は、波の伝播方向と直角

レイリー波:
Rayleigh wave 媒質粒子の運動方向は、波の伝播方向に楕円運動



表面波位相速度の分散性



分散性: 周期ごとに表面波の伝播速度が異なること。表面波伝播速度の分散性は、その場所の地盤構造に強く依存する。

<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/2/II-7.2.1.html>

関東平野への3次元基盤構造と新潟県中越沖地震による震源から地震波の伝わり方

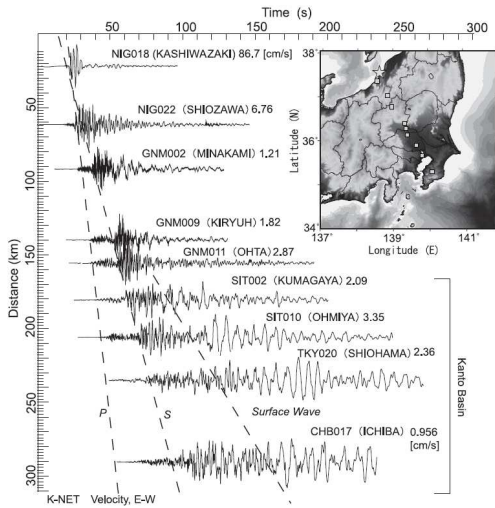


図2 新潟県中越沖地震による、震源から関東平野への地震波の伝わり方と、関東平野での表面波(長周期地震動)の発達の様子。9観測点の速度波形東西成分は最大振幅で正規化し、最大速度を右に表示している。右上の地図には観測点の位置を示す。

速度EW成分

古村ら:地学雑誌, 2007

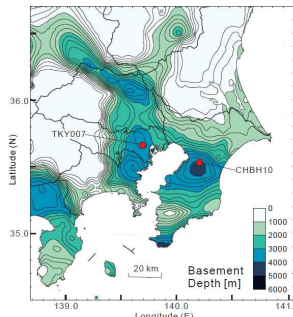


図3 関東平野の3次元基盤構造(田中ほか, 2006)

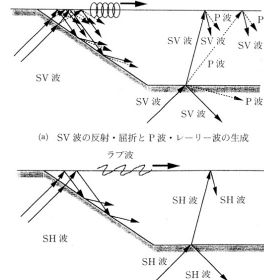


図2.5 地盤の層境界での波動の反射・屈折・変換¹⁾

愛知県, 1998

17

2003年十勝沖地震の地震波伝播の可視化



2003年9月26日M_{JMA} 8.0
652点で強震波形記録



- 北海道では根釧原野、苫小牧市などがある勇払平野、石狩平野などで長時間にわたって継続的なゆれが見られる。
- 本州では関東平野や新潟平野で同じ現象が続く。

として注目

<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/tokachi-oki/>

18

長周期地震動の例

東北地方太平洋沖地震 横浜ランドマークタワー70階



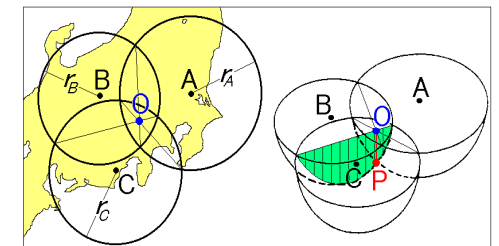
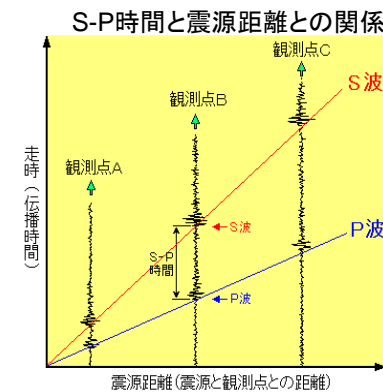
19

S-P時間を用いた震源決定(1)

P波速度 V_p と S波速度 V_s が、一定な媒質(均質媒質)を考える
震源から観測点までの距離を r とする
P波が到着してからS波が遅れてやってくるまでの時間(S-P時間)は

よって

$$\text{ここで } k = 1 / \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p} \right)$$



- ・共通弦の交点が震央位置O
- ・共通弦を直径とする断面円を描いてOの位置から垂線を立てる
- ・長さOPが震源の深さ

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec3.1.htm

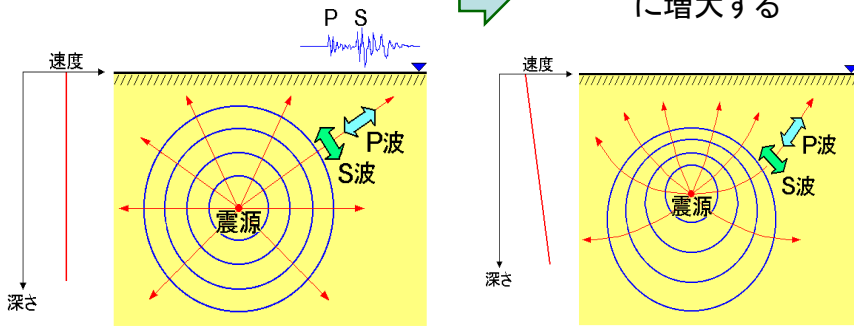
20

S-P時間を用いた震源決定 (2)

地球内部を均質であると仮定

実際は
→

地震波速度が深さ方向に増大する



実際の震源決定では、震源深さと震央距離の関数としてP波およびS波の走時を求めるプログラムを準備し、地震の発震時と震源位置を少しずつ変えながら、観測されたP波およびS波の着震時データと理論的走時がもっとも良く適合する組合せを探す

精密な震源決定を行なうためには、地下の詳細な地震波速度構造があらかじめわかっている必要がある。

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec3.1.htm

21

震度とは？

震度：ある地点における

seismic intensity 日本では気象庁震度階級を震度と呼ぶ。

：人体感覚、身の周りの物体の動き、構造物の揺れ・被害程度、地変などから総合的に推定される

■日本では1884年に創設、その後改良を重ねる

■気象庁職員が「震度階級解説表」を用いて体感・物の挙動・周囲の状況などから判断→

■建物被害状況等が含まれる→

■1906年より震度0から6まで7段階の震度階級が明文化

■1948年福井地震を契機に震度7が加えられ8段階に(1949年)震度7では現地調査必要(家屋の30%以上が倒れる)

■1990年から移行を進め1996年より震度5と震度6を強弱に階級を分けた

22



福井地震直後の大和百貨店

毎日新聞社「サン写真新聞(1948年6月30日版)」



1948年福井地震

発生日：1948年(昭和23年)6月28日

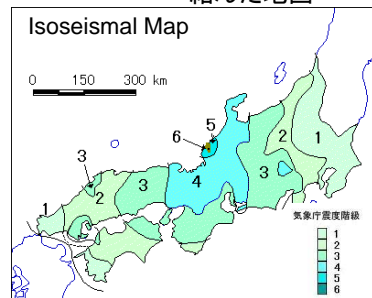
発生時刻：16時13分29秒(JST)

震央：福井県丸岡町(現・坂井市丸岡町)

震源深さ：30km

マグニチュード(M_j)：7.1 直下型地震

：震度の等しいところを
結んだ地図



<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/f6-20.htm>

死者・行方不明者：3,769名、負傷者：2万2203名

全壊：3万6184戸；半壊：1万1816戸；焼失3,851戸

<http://toshichan.be.fukui-nct.ac.jp/yoshida/works/earthquake/fukuida/date/japanese/siryou/syasinn.html>

23

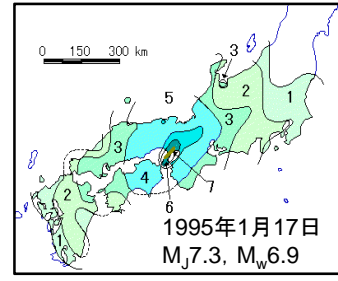
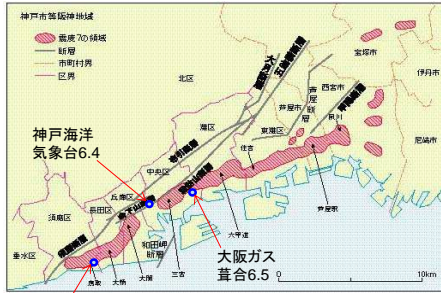
気象庁震度階級の解説表(1949年)

階級	説明	参考事項 (1978)
0	無感。人体に感じないで地震計に記録される程度。(加速度0.8Gal以下)	吊り下げ物のわずかにゆれるのが目視されたり、カタカタと音が聞こえても、体にゆれを感じなければ無感である。
I	微震。静止している人や特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震。(0.8~2.5Gal)	静かにしている場合にゆれをわずかに感じ、その時間も長くない。立っては感じない場合が多い。
II	軽震。大ぜいの人に感ずる程度のもので、戸障子がわずかに動くのがわかる程度の地震。(2.5~8.0Gal)	吊り下げ物の動くのがわかり、立っいてもゆれをわずかに感じるが、動いている場合にはほとんど感じない。眠っいても目をさますことがある。
III	弱震。家屋がゆれ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のような吊り下げ物は相当ゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震。(8.0~25Gal)	ちょっと驚くほどに感じ、眠っている人も目をさます。戸外に飛び出すまでもないし、恐怖感はない。戸外にいる人もかなりの人に感じるが、歩いている場合感じない人もいる。
IV	中震。家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花びんなどは倒れ、器内の水はあふれ出る。また、歩いている人にも感じられ、多くの人は戸外に飛び出す程度の地震。	眠っている人は飛び起き、恐怖感を覚える。電柱・立木などのゆれるのがわかる。一般の家屋の瓦がずれるのがあっても、まだ被害らしいものはない。軽い目まを覚える。
V	強震。壁に割れ目が入り、墓石・石どうろが倒れたり、煙突・石垣などが破損する程度の地震。(80~250Gal)	立っていることはかなりむずかしい。一般家屋に軽微な被害が出はじめる。軟弱な地盤では割れたりくずれたりする。すわりの悪い家具は倒れる。
VI	烈震。家屋の倒壊は30%以下で、山くずれが起き、地割れを生じ、多くの人が立っていることができな程度の地震。(250~400Gal)	歩行はむずかしく、はわないと動けない。
VII	激震。家屋の倒壊が30%以上に及び、山くずれ、地割れ、断層などを生じる。(400Gal以上)福井地震以降	

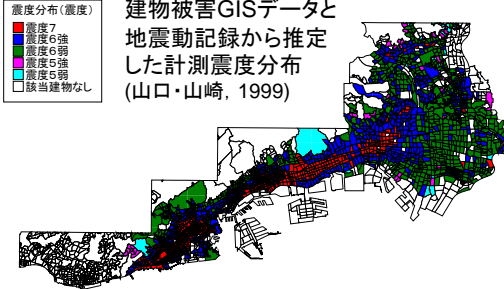
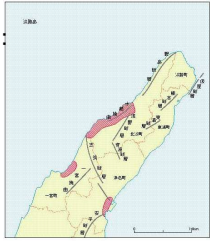
()内の対応する加速度は現在の震度階級表からは削除されている。

24

1995年兵庫県南部地震の震度分布



気象庁地震機動観測班による被害状況調査結果
震度7の地域:



<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>

<http://ares.tu.chiba-u.jp/~papers/index.htm#1999>

震度階級	人間	屋内の状況	屋外の状況	木造建物	鉄筋コンクリート造建物	ライフライン	地盤・斜面
0	人は揺れを感じない。						
1	屋内にいる人の一部が、わずかな揺れを感じる。						
2	屋内にいる人の多くが、揺れを感じる。眠っている人の一部、目を覚ます。	電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。					
3	屋内にいる人のほとんどが揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。	棚にある食器類が、音を立てて揺れる。	電線が少し揺れる。				
4	かなりの恐怖感があり、一部の人は、身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。	つり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。座りの悪い置物が倒れることがある。	電線が大きく揺れる。歩いている人も揺れを感じる。自転車を運転していて、揺れに気付く人がいる。				
5弱	多くの人が、身の安全を図ろうとする。一部の人は、行動に支障を感じる。	つり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。座りの悪い置物の多くが倒れ、家具が移動することがある。	窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのがある。補強されていないブロック塀が倒れることがある。多くの墓石が倒れる。自動車の運転が困難となり、停止する車が多い。	耐震性の低い住宅では、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁などに亀裂が生じるものがある。	安全装置が作動し、ガスが遮断される家庭がある。まれに水道管の被害が発生し、断水することがある。[停電する家庭もある。]	軟弱な地盤で、亀裂が生じることがある。山地で薄石、小さな崩壊が生じることがある。
5強	非常な恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	棚にある食器類、書棚の本の多くが落ちることがある。テレビが台から落ちることがある。タンスなど重い家具が倒れることがある。変形によりドアが開かなくなることがある。一部の戸がはずれ。	補強されていないブロック塀の多くが倒れる。掘付けが不十分な自動販売機が倒れることがある。多くの墓石が倒れる。自動車の運転が困難となり、停止する車が多い。	耐震性の低い住宅では、壁や柱がかなり破損したり、傾くものがある。	耐震性の低い建物では、壁、梁、柱などに大きな亀裂が生じるものがある。耐震性の高い建物でも、壁などに亀裂が生じるものがある。	家庭などにガスを提供するための導管、主要な水道管に被害が発生することがある。[一部の地域でガス、水道の供給が停止することがある。]	
6弱	立っていることが困難になる。	固定していない重い家具の多くが移動、転倒する。開かなくなるドアが多い。	かなりの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものがある。耐震性の高い住宅でも、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁や柱が破損するものがある。耐震性の高い建物でも、壁や柱が破損するものがある。	家庭などにガスを提供するための導管、主要な水道管に被害が発生することがある。[一部の地域でガス、水道の供給が停止することがある。]	地割れや山崩れなどが発生することがある。
6強	立っていることができず、はわないと動くことができない。	固定していない重い家具の多くが移動、転倒する。戸が外れて飛ぶことがある。	多くの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されていないブロック塀のほとんどが倒れる。	耐震性の低い住宅でも、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁、柱がかなり破損するものがある。	耐震性の低い建物でも、倒壊するものが多い。耐震性の高い建物でも、壁や柱が破損するものがある。	一部の地域でガス、水道の供給が停止することがある。	
7	揺れにほんろうされ、自分の意志で行動できない。	ほとんどの家具が大きく移動し、飛ぶものもある。	ほとんどの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されているブロック塀も破損するものがある。	耐震性の高い住宅でも、傾いたり、大きく破損するものがある。	耐震性の高い建物でも、傾いたり、大きく破損するものがある。	[広い地域で電気、ガス、水道の供給が停止する。]	大きな地割れ、地すべりや山崩れが発生し、地形が変わることもある。

<http://www.precr.u-tokyo.ac.jp/CSS/kaisetsu.html>

震度解説表の再改定 2009.3.31

震度に関する検討会

- 「震度階級関連解説表」を最近の現状に合うように見直し
- 設置条件等の不適切な震度観測点の点検とその扱い
- 市町村合併を踏まえて、地方公共団体設置の震度計の具体的な配置基準の検討