

気象庁地震観測点の揺れ易さについて

奥田 暁 野畑 有 秀
若松 邦夫 安井 讓

Amplification Characteristics Observed at JMA Seismological Stations

Satoshi Okuda Arihide Nobata
Kunio Wakamatsu Yuzuru Yasui

Abstract

Amplification characteristics of earthquake ground motions observed at JMA (Japan Meteorological Agency) seismological stations are estimated by systematic deviations of earthquake magnitude.

Deviation of earthquake magnitude is defined as the difference between the station magnitude and the JMA magnitude. Predominant periods for the stations are also estimated by frequencies of maximum amplitude periods, so some stations are amplified by shorter periods and others are amplified by longer period. The results include a quantitative analysis of site conditions and data useful for preventing earthquake disasters in major cities with Japan.

概 要

各地の「揺れ易さ」の指標として、全国116の気象庁観測点におけるマグニチュード偏差を求めた。マグニチュード偏差は、観測点マグニチュードと気象庁マグニチュードの間にみられる系統的な差により、定義される。その結果として、酒田や苫小牧などの観測点に正のマグニチュード偏差（揺れ易い）が、松代や姫路などの観測点に負のマグニチュード偏差（揺れ難い）が認められた。また卓越周期別には、釧路のように短周期に揺れ易いところ、帯広のように長周期に揺れ易いところ、根室のように周期によらず揺れ難いところなどのあることがわかった。これらの結果は、地盤種別分類などに比べてさらに細かい地盤の情報を定量的に与えている。これらの情報は、地震防災の観点から重要である。

1. はじめに

「あの街は地盤が悪いらしく、地震の時にはよく揺れる」といった情報が、人々により語られることがある。日本の各地を対象にそれら「揺れ易さ」に関する経験則を定量化できれば、全国画一的な設計計画を地域係数などよりもさらにきめ細かく、その地域の特性に則したものに展開していくなど、地震防災の観点から有益である。

一方、日本の主要都市の地震特性を考える場合、気象庁による定常的な地震観測記録は、全国規模のデータベースとして、量・質ともに利用価値が高い。

そこで今回、気象庁地震観測点毎の「マグニチュード偏差」に着目し、各地の「揺れ易さ」の定量化を試みたので、報告する。

2. 解析

2.1 「マグニチュード偏差」とは

マグニチュードの決定は、通常次のような過程を経る。まず、各観測点における振幅と震央距離から、観測点マグニチュードが計算される。次に、複数の観測点マグニチュードの単純平均により、その地震のマグニチュード

が決定される。その際に、常に大きめな値を見積もる観測点や小さめな値を見積もる観測点のあることが、経験的に知られている。

前者の例として図-1に新潟地方気象台、後者の例として図-2に大船渡測候所（岩手県）における、気象庁マグニチュード（各地の平均から気象庁が最終決定したマグニチュード）と観測点マグニチュードの対応を示す。地震の規模によらず認められるこの系統的な偏りが、「マグニチュード偏差」である。以下、観測点マグニチュードの値から気象庁マグニチュードの値を引いたものを「マグニチュード偏差」の値、と定義する。

ただし、個々の地震に対するマグニチュード偏差には、震源からの放射角特性や周期特性、伝播経路、入射角のほか、震央距離を評価する際の点震源と面震源の問題など、その地震に固有の影響も含まれている。そこで、それら影響が相殺されるように、各観測点において種々の地震に対するマグニチュード偏差の総平均を求め、これを「観測点のマグニチュード偏差」とする。マグニチュード偏差の値が正の観測点は、そこにいると通常、あたかも実際より大きな規模の地震が起こったかのように揺れることが多い、ということになる。

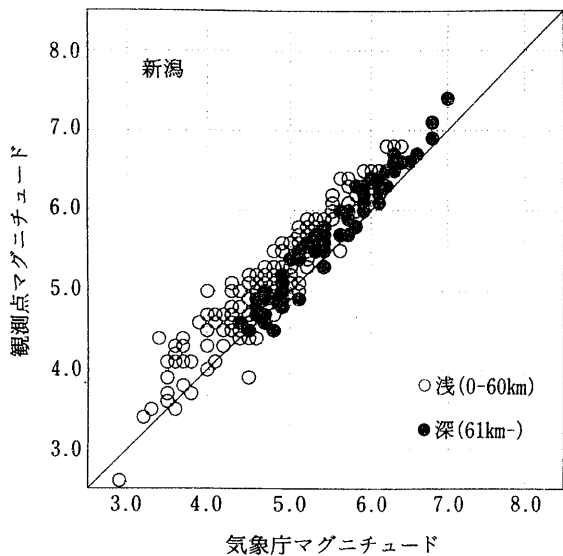


図-1 気象庁マグニチュードと観測点マグニチュードの対応 (新潟地方気象台)

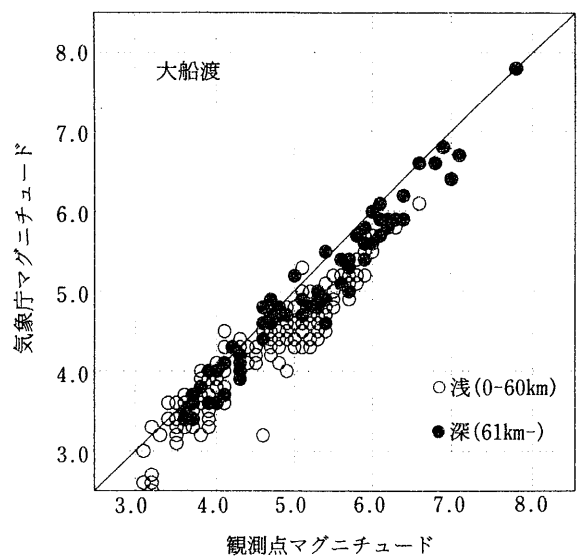


図-2 気象庁マグニチュードと観測点マグニチュードの対応 (大船渡測候所)

2.2 「揺れ易さ」をどう表すか

感覚的な「揺れ易さ」は震度により表されてきた。しかし、元来物理量でない震度は、その定量的な比較が困難である。つまり、ある地震に際して震央距離が違わないふたつの地点で異なる震度が判定されたとしても、それが揺れとして何倍異なるのかを言い表すことは難しい。体感震度を決める要因として、加速度のほか卓越周期や振動継続時間などが複雑に関係する、と考えられるからである。

そこで、今回ここでの検討は単純のため、「揺れ易さ」の言葉を地震計で観測可能な地動の振幅に限定して扱う。具体的には、地震の規模と震央距離から予測されるよりも大きな振幅値を観測した場合を揺れ易い、と評価することとする。

2.3 「マグニチュード偏差」と「揺れ易さ」の関係

気象庁が採用しているマグニチュードの計算式は、変位振幅に対して次の通りである。

- a 震源の深さが 60 km 以浅の場合：坪井の式¹⁾

$$M = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83$$

- b 震源の深さが 61 km 以深の場合：勝又の式²⁾

$$M = \log A + K$$

ただし、M：マグニチュード、A：水平動変位最大振幅の 2 成分合成値 ($10^{-6}m$)、 Δ ：震央距離 (km)、K：震央距離と震源の深さで与えられる変数、である。

基本的にマグニチュードは振幅の対数から計算され、これに震央距離および震源の深さによる減衰の効果を補正する項が加わる。したがって、「マグニチュード偏差」が「+0.3」ということは、その観測点では系統的に、標準的な距離減衰から推定されるよりも平均して「2 倍」大きな振幅が観測されていることを表しており、すなわち「2 倍揺れ易い」ということになる。

なお、気象庁マグニチュードは、上式において振幅の水平動成分から計算される。したがって、ここでいう「揺れ易さ」の度合いは、入力地震動に対する地盤の応答増幅の程度を反映する、と考えることができる。

2.4 データと解析

データとして、気象庁地震月報 (1990年 1月から 1993年 4月まで)³⁾から、各地の変位振幅が報告されている地震について、その震源要素と観測点マグニチュードを用いた。それら地震の規模はマグニチュード 3 クラスから 7 クラスまでさまざまであり、採用した地震の数は観測点により異なるが、小名浜測候所 (福島県) における 736 が最多である。

ところで、2.3 節で述べたように、気象庁の規則では地震の震源の深さにより適用するマグニチュード計算式が異なる。気象庁マグニチュードとして公表される値においてこのことは区別されていないが、マグニチュード偏差を評価する場合、計算式の違いによる影響も考えられる。そこでこれ以降、坪井の式が適用される深さ 60 km 以浅の地震を「浅い地震」、勝又の式が適用される 61 km 以深の地震を「深い地震」として、区別する。

なお、これら記録は主に周期特性 5 秒の変位計で観測された。ただし気象庁の規則により、水平動変位最大振幅を与える周期が 5 秒より長い場合は観測点マグニチュードが計算されない。したがって 5 秒より長い周期のマグニチュード偏差も、定義されないことになる。

また、気象庁では主に小地震・微小地震を対象に、上下動速度最大振幅からもマグニチュードを計算している。しかし、この観測は固有周期 1 秒の高感度速度計に限定され、大きな地震や遠い地震は報告されない。したがって速度振幅から決定されたマグニチュードは、今回のマグニチュード偏差の解析の対象としなかった。

表-1 地盤種別分類とマグニチュード偏差

		マグニチュード偏差									
地盤	観測点	浅い地震	深い地震								
1種	根室	-0.18	-0.29	2	宇都宮	-0.03	-0.10	3	和歌山	-0.03	-0.15
2or1	網走	-0.13	-0.12	2	前橋	-0.04	-0.17	2	潮岬	-0.08	-0.12
3	釧路	+0.04	+0.13	2	熊谷	+0.15	-0.01	3	鳥取	+0.11	-0.05
2	帯広	+0.23	+0.12	2	秩父	-0.11	-0.09	3	米子	+0.00	+0.10
2	広尾	+0.05	-0.13	3	甲府	+0.16	+0.14	1	松江	-0.08	-0.07
1	浦河	+0.28	+0.02	1	河口湖	+0.23	+0.24	1	西郷	-0.15	-0.21
1	室蘭	-0.32	-0.54	2	銚子	-0.14	-0.22	1	浜田	-0.37	-0.31
3	苫小牧	+0.47	+0.23	3	館山	+0.26	+0.10	2	岡山	-0.25	-0.31
2	稚内	-0.02	-0.07	2	横浜	+0.29	+0.11	1	広島	+0.07	-0.18
2	旭川	-0.04	-0.12	3	東京	+0.20	+0.07	1	下関	+0.13	-0.17
2	留萌	-0.03	-0.16		大島	-0.04	+0.04	2or3	高松	+0.10	-0.10
2	札幌	+0.08	-0.12		八丈島	+0.16	+0.03	3	徳島	+0.07	+0.07
1	寿都	-0.21	-0.45		父島	-0.20	-0.06	3	高知	+0.11	-0.11
3	函館	-0.02	-0.26		房総1	+0.14	-0.02	1	室戸岬	-0.14	-0.18
4	青森	+0.43	+0.23	3	静岡	-0.10	-0.06	1	足摺	-0.27	-0.32
2	八戸	-0.13	-0.06	1	石廊崎	-0.06	-0.01	2	松山	-0.05	-0.20
3	秋田	+0.33	+0.12	2	網代	-0.14	+0.06	1	宇和島	-0.12	-0.23
2	盛岡	+0.15	+0.03	2	三島	+0.07	+0.04	2	福岡	+0.28	-0.14
1	宮古	-0.22	-0.07	2	御前崎	+0.12	+0.08	4	佐賀	+0.37	+0.29
1	大船渡	-0.33	-0.22	2	浜松	+0.09	+0.07	1	長崎	-0.33	-0.42
2	山形	-0.10	-0.09	2	岐阜	-0.12	-0.05	1	雲仙岳	+0.00	-0.06
4	酒田	+0.72	+0.60	2	高山	-0.20	-0.20	2	福江	-0.16	-0.25
2	仙台	+0.11	+0.06	2	名古屋	+0.13	+0.17	2	巖原	-0.10	-0.36
2	石巻	-0.20	-0.18	3	津	+0.12	+0.14	2	熊本	+0.17	+0.05
2	福島	+0.20	+0.09	2	尾鷲	-0.29	-0.24	3	阿蘇山	+0.02	-0.04
1	白河	+0.12	+0.16	2	富山	+0.01	+0.04	3	大分	+0.28	+0.19
3	小名浜	+0.25	+0.27	2	金沢	+0.12	+0.05	3	宮崎	+0.09	-0.06
	若松	-0.07	+0.10	3	輪島	+0.20	+0.05	1	延岡	-0.28	-0.33
3	新潟	+0.37	+0.19	4	福井	+0.08	+0.01	2	鹿児島	+0.43	+0.19
1	相川	-0.09	-0.28	3	敦賀	+0.26	+0.07	1	種子島	-0.34	-0.44
3	高田	-0.11	-0.19	3	彦根	+0.20	+0.16	1	名瀬	+0.38	-0.10
2	長野	+0.20	+0.05	3	京都	-0.10	-0.09	1	那覇	+0.14	-0.04
	松代	-0.57	-0.68		舞鶴	-0.03	-0.05		名護	-0.19	-0.16
2	松本	+0.07	-0.00	3	大阪	+0.27	+0.24		久米島	+0.16	-0.04
2	飯田	+0.05	-0.00	2	高安山	-0.24	+0.00	1	宮古島	+0.41	+0.05
3	軽井沢	+0.19	+0.17	3	奈良	+0.27	+0.29	1	石垣島	+0.12	-0.08
2	水戸	+0.10	+0.03	2	神戸	-0.07	-0.01	1	与那国	-0.05	-0.10
2	柿岡	+0.19	+0.12	1	洲本	-0.12	-0.04	1	南大東	-0.10	+0.21
				1	姫路	-0.51	-0.20				
				4	豊岡	+0.43	+0.30				

・地盤種別分類は気象庁資料による (第1種:岩盤 第2種:硬質地盤 第3種:沖積層地盤 第4種:軟弱地盤)

3. 結果

3.1 地盤種別分類との対応

全国116観測点について求めた、観測点マグニチュード偏差の値を表-1に示す。あわせて、気象庁により実施された、表層地質とボーリング調査に基づく地震観測点の地盤種別分類(4種)⁴⁾を示す。また、これら結果を地盤種別分類とマグニチュード偏差の対応としてまとめたものを浅い地震について図-3に、深い地震について図-4に示す。

おおむね、第4種(軟弱地盤)においてはマグニチュード偏差が大きく正に偏り、これが第3種(沖積層)、第2種(硬質地盤)、第1種(岩盤)の順に、負に偏っていく傾向が読み取れる。表-1を参照して、酒田、苫小牧、豊岡、青森、鹿児島、佐賀、新潟、秋田などに大きな正

の偏差(揺れ易い)がみられ、振幅比に換算すると2倍前後に相当する。また、松代、姫路、浜田、長崎、大船渡、室蘭、尾鷲などに大きな負の偏差(揺れ難い)がみられた。

しかし、個々の観測点で見ると、同じ地盤種別に分類されながらマグニチュード偏差の値には違いがある。このことから、マグニチュード偏差は、表層の地盤種別分類よりもさらに深い地盤構造ないし地形条件を反映しているものと思われる。

なお、一部の地震観測点は、ここで参照した地盤種別分類調査の実施後、現在までに、当時の独立した気象官署から地方合同庁舎等へ移転している。しかし、同じ都市の中であり、地盤条件が著しく変わることはないと考えて、地盤種別分類はそのまま参照することとした。

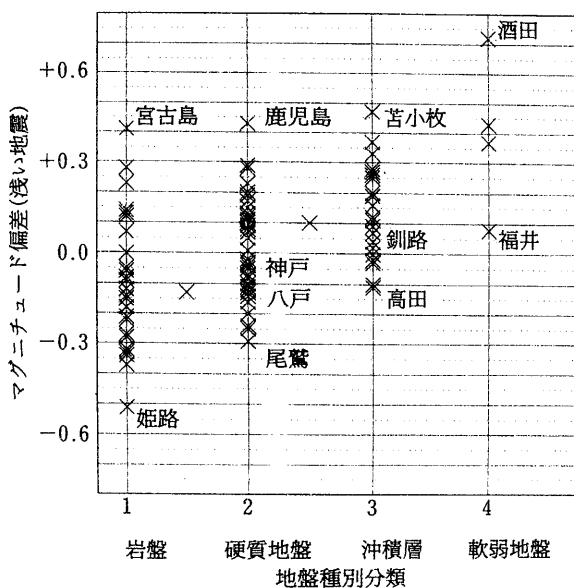


図-3 地盤種別分類とマグニチュード偏差の対応 (浅い地震)

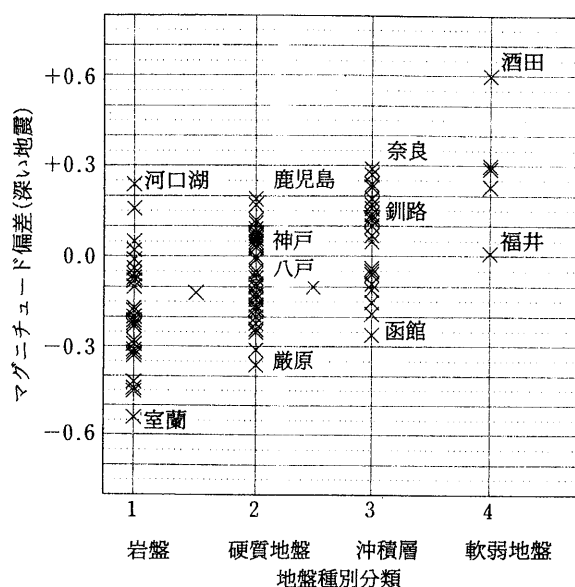


図-4 地盤種別分類とマグニチュード偏差の対応 (深い地震)

3.2 既往の研究との比較

岡田、鏡味⁵⁾は、やや長周期の地盤特性として、マグニチュード5.4以上で震源の深さ60km以下の浅い地震を対象にした気象庁地震観測点の揺れ易さを求めている。方法は、1倍強震計の地震観測記録を資料に地震毎の距離減衰曲線を求め直し、観測振幅と標準的な振幅との比をもって、観測点の揺れ易さ係数と定義している。

この岡田、鏡味の揺れ易さ係数と、今回求めたマグニチュード偏差の対応を図-5に示す。先の2.3節で述べたマグニチュード偏差と振幅比すなわち揺れ易さ係数の対数との間の比例関係を図中、直線に示す。両者の対応はおおむね、この直線の周りに分布するが、必ずしも一致しない。例えば長崎と延岡は、岡田、鏡味の結果では「どちらか」といって、揺れ易い」に、今回の結果では「やや揺れ難い」に分類されるが、地盤種別分類ではどちらも第1種地盤である。このように、地盤種別分類に照らして今回の結果の方が「揺れ易さ」を良く表しているのではないかと、と思われる観測点もある。

4. 考察

4.1 釧路地方気象台の特徴

釧路地方気象台は、平成5年釧路沖地震ならびに平成6年北海道東方沖地震において震度VIを記録した。同所における震央距離別のマグニチュード偏差を図-6に、マグニチュード決定の根拠となる水平動変位最大振幅を与えた周期の頻度分布を図-7に示す。また比較のため同じく帯広測候所について図-8と図-9、根室測候所について図-10と図-11に示す。

まず、震央距離別のマグニチュード偏差の値について、次のような特徴が認められる。

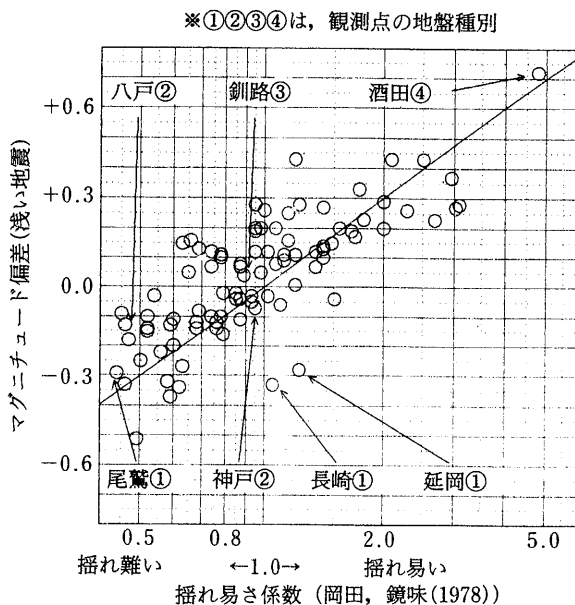


図-5 揺れ易さ係数とマグニチュード偏差の対応

- a 釧路：深い地震の場合、震央距離によらず
浅い地震の場合、震央距離が遠くなると負
 - b 帯広：おおむね正だが、震央距離が近くなると負
 - c 根室：震央距離によらず負
- 一般に震央距離に近いほど、また浅い地震に比べて深い地震は、入力地震動は相対的に短周期成分が卓越すると思われる。したがって震央距離ないし深さによる傾向は、入力の卓越周期の違いに置き換えても考えられる。また、水平動変位最大振幅を与えた周期について、次のような特徴が認められる。

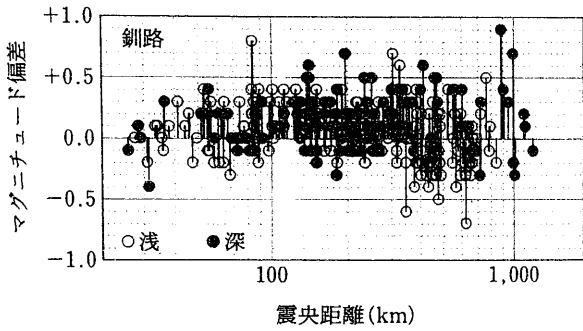


図-6 震央距離別マグニチュード偏差 (鉦路地方気象台)

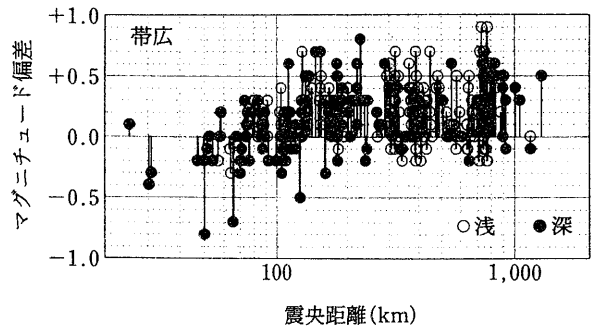


図-8 震央距離別マグニチュード偏差 (帯広測候所)

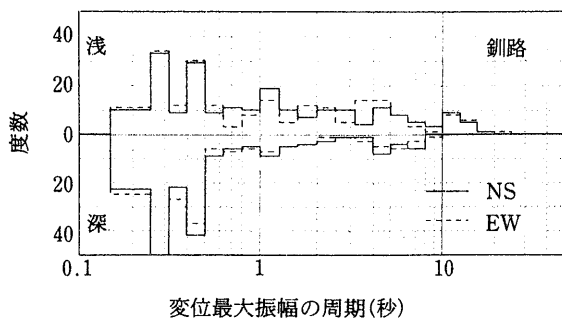


図-7 水平動変位最大振幅を与える周期の頻度分布 (鉦路地方気象台)

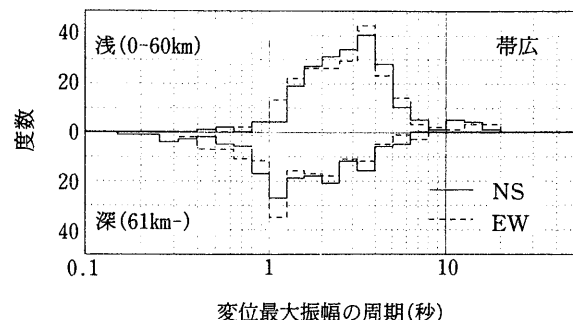


図-9 水平動変位最大振幅を与える周期の頻度分布 (帯広測候所)

- a 鉦路：0.3秒，ついで0.5秒が卓越
- b 帯広：4秒（浅い）ないし1秒（深い）が卓越
- c 根室：特に卓越する周期は認められない

3観測点は，ほぼ同じ地震を観測対象としているので，それぞれに異なる震央距離ではあるが，取り上げた地震の震源特性に観測点毎の違いはない。

したがって，以上をまとめると

① 第1種地盤である根室は，観測記録においてもほぼ震源特性をそのまま反映した周期特性を示し，入力周期によらず，揺れ難い。

② 第2種地盤ではあるが盆地状構造の平野に位置する帯広は，1～4秒周期を選択的に増幅し，揺れ易い。

③ 第3種地盤の鉦路は，特異な例として0.3秒や0.5秒の短周期を増幅し，短周期入力に対して揺れ易いと思われる。

すべての観測点について，水平動変位最大振幅を与えた周期の頻度分布から「揺れ易い周期」について判定した結果を表-2に示す。この表に地名がない観測点は，上記の根室と同様に明らかに特定の周期をもたないものと，母数が少なく最頻度数が読み取れないものがある。

4.2 八戸測候所の特徴

平成6年三陸はるか沖地震において震度VIを記録した八戸測候所（青森県）について，変位最大振幅の周期別にみたマグニチュード偏差を図-12に，比較のため同じく青森地方気象台について図-13に示す。青森の揺れ易

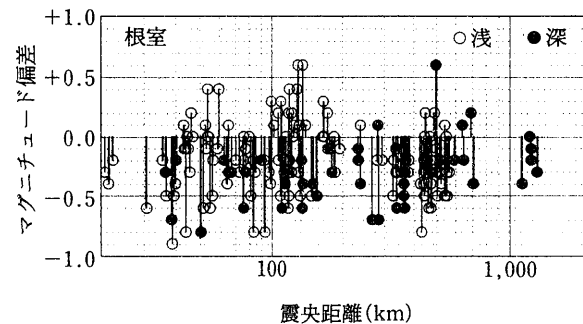


図-10 震央距離別マグニチュード偏差 (根室測候所)

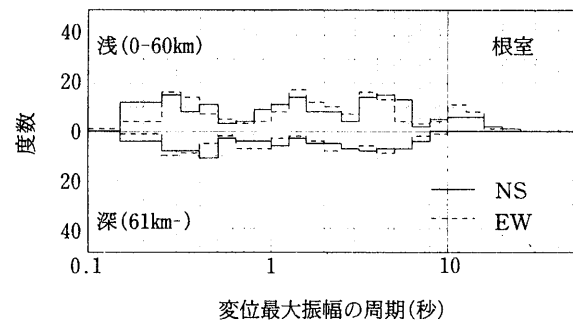


図-11 水平動変位最大振幅を与える周期の頻度分布 (根室測候所)

表-2 気象庁観測点の揺れ易い周期 (秒)

観測点	周期	山形	2	柿岡	0.8	輪島	0.8
網走	3	酒田	2	前橋	3	福井	1.2
釧路	0.3	仙台	1	熊谷	4	彦根	1.0
帯広	2	福島	0.8	甲府	1.5	大阪	3
稚内	4	白河	2	河口湖	1.5	豊岡	1.0
旭川	2	小名浜	1.0	東京	4	佐賀	3
留萌	4	新潟	4	房総1	2	大分	4
札幌	2	高田	3	浜松	3	宮崎	0.8
寿都	3	長野	3	名古屋	3	延岡	4
青森	1.5	松代	4	津	3	鹿児島	2
秋田	2	飯田	1.2	富山	4	名瀬	0.6
盛岡	0.4	軽井沢	2	金沢	4	宮古島	4

さは、入力によらず周期1秒から3秒あたりの地震動を強く増幅した結果であることが読み取れる。一方、八戸は、長周期側ではマグニチュード偏差がおおむね負に偏るのに対して、短周期側では正に偏る。さらにこの傾向は、深い地震において顕著である。したがって、八戸の地盤は前節4.1の釧路の結果と同様に、「入力に短周期が卓越する場合は揺れ易い」ことが推定される。

4.3 近畿地方の観測点の特徴

平成7年兵庫県南部地震において震度VIを記録した神戸海洋気象台ならびに洲本測候所は、どちらかという揺れ難い観測点であり、ただし周期特性などに特徴的な点は認められなかった。しかし、表-2から、同地震において震央に比較的近接ながら震度IVであった大阪管区気象台は3秒周期に対して揺れ易く、したがって短周期に対しては揺れ易いとはいえないこと、それより遠方でありながら震度Vを記録した彦根地方気象台および豊岡測候所は、1秒周期に対して揺れ易い特徴が認められる。

4.4 今後の展開

マグニチュード偏差は既往の資料から比較的容易に求めることができ、調査対象期間を広げれば、データも大量に、多様に扱うことができる。よってさらに多角的に解析することで、例えば特定の周期に対して揺れ易いと判断された地点については、構造物の設計においてもそれを考慮することが望ましい。

ただし、これらはいくまで各気象官署における観測結果であり、一般化してその都市における揺れ易さを考えるときには、地域内の地盤・地形条件の違い、特徴を考慮する必要がある。また、マグニチュード決定式の定義から、5秒より長い周期の揺れ易さは、マグニチュード偏差を求める方法では解析できない。

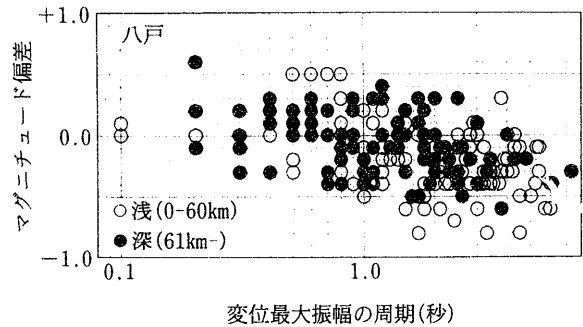


図-12 変位最大振幅の周期別マグニチュード偏差 (八戸測候所)

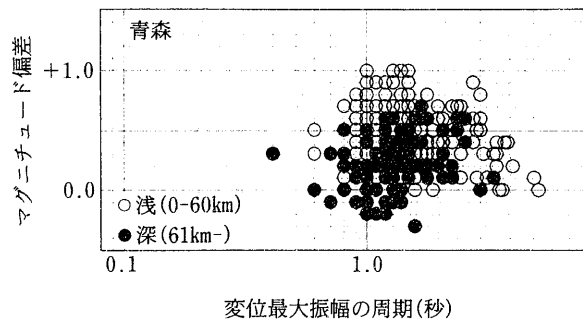


図-13 変位最大振幅の周期別マグニチュード偏差 (青森地方気象台)

5. まとめ

各都市の「揺れ易さの度合い」の指標として、マグニチュード偏差を求めた。その結果、マグニチュード偏差は、各地盤の条件を地盤種別分類よりも細かく、定量的に表すことができることがわかった。また、マグニチュード偏差を最大振幅の周期毎に評価する、などの方法で、その地盤の震動特性を「揺れ易さの傾向」として表すことができる。

参考文献

- 1) 坪井忠二：地震動の最大振幅から地震の規模Mをさだめることについて、地震II, Vol.7, p.185~193, (1954)
- 2) 勝又 護：深い地震のMagnitudeを決める一方法, 地震II, Vol.17, p.158~165, (1964)
- 3) 気象庁：地震月報, (平成2年1月~平成5年4月各号)
- 4) 気象庁地震課：気象庁地震観測官署の地盤調査, 験震時報, Vol.37, p.113~115, (1972)
- 5) 岡田成幸, 鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み, 日本建築学会論文報告集, Vol.267, p.29~38, (1978)