

## 震度の計測化について\*

鉢 嶺 猛\*\*

### § 1. はじめに

気象庁は、地震時に地震の揺れの大きさや強さの程度（以下、地震動の強さ、と略する）を震度として観測している。この震度は、観測員が気象庁震度階級に基づき体感や周囲の被害状況を判断して決定したものである。

近年、地震対策の進展や社会の情報化に伴い、震度に関する関心が高まり、より客観的かつ迅速な震度観測が必要となってきた。このため、気象庁では学識経験者で構成される震度観測検討委員会（以下、「震度委」と略する）を設置した。当委員会では、気象庁が行う震度観測のありかたについて検討が行われ、その検討結果は1988年2月にとりまとめられた（以下、「報告」と称する）。

上記委員会は、震度と地震動に関する各種計測量との関係について検討を行い、次のとおり、震度を計測化する場合の提案式を示している。ここで、計測量に基づく震度を計測震度（仮称）と称する。

$$I = 2 \cdot \log(a) + 0.7 + \log(k \cdot t)$$

I (0～6) : 計測震度（仮称）（4捨5入して整数値とする）

但し、右辺が0.5未満のときに  $I=0$ 、5.5以上のときは  $I=6$  とする）

a : 加速度 ( $\text{gal} = \text{cm}/\text{sec}^2$ )

b : 周期 (sec) (暫定的に0.1～1秒の範囲)

k : 係数 (暫定的に  $k=3$ )

筆者は「震度委」の事務局として計測量の処理に携わったことから、ここでは、「震度委」での検討に用いられた主な解析結果を紹介するとともに、新たにデータを加えて再解析を行った結果を報告する。また、震度計測化の実用化に関する基礎的検討も行ったので、その結果についても報告する。

### § 2. 震度と計測量に関する検討

#### 2.1 地震動の強さの客観的観測について

震度観測は、1884年（明治17年）、当時の内務省地理局が全国から地震状況の収集を行った事に始まる（気象庁、1975）。震度階級の変遷については三浦（1964）によりまとめられているが、人間の体感や周囲の被害の状況から決定する観測方法（これは世界共通の方法でもある）は、現在でも変わっていない。

この震度の観測データは、地震計が十分に展開されていなかった明治時代においては、地震動の状況や地震の震央、規模等を推定するための重要な資料であった。現在では、地震学をはじめ地震工学、歴史地震学、防災などの各分野にも広く活用されている。（震度観測検討委員会、前掲1988）。

しかしながら、この震度は前述のとおり体感等に基づき決定された量であるため客観的な取扱いが困難であるが、震度と地震動計測量（以下、計測量と略する）との関係については過去に多くの研究があり、最近では、岡田（1987）、翠川・福岡（1988）により総合的な報告が行われている。

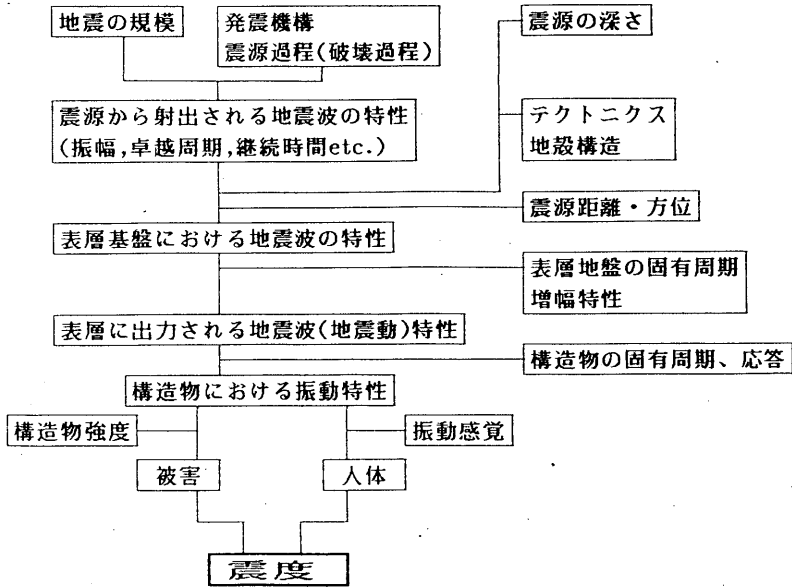
このような調査は主に地震工学の分野で行われており、そのほとんどは、震度と計測量の関係を求め、逆に震度から客観的に地震動を推定しようとするものである。

有感地震時には必ずといって良いほど地震情報に震度が盛りこまれて発表されているため、社会にも慣れ親しまれたものとなっている。また、震度は防災関係機関や住民を対象とした防災情報として用いられることから、即時的な観測・発表を行うことが求められている。これらのことは、気象庁が観測する震度を客観化する場合に考慮すべき重要なファクターと考えられる。

以上より、「震度委」では、

\* T. Hachimine: On the new instrumental observation of the seismic intensity (Received Jan. 30, 1989)

\*\* 気象庁地震津波監視課



第1図 震度観測関連要素概念図

- 1) 処理が単純であること
- 2) 物理的に理解しやすいこと
- 3) データとして利用しやすいこと

を基本として、震度の客観化に関する検討が行われた。

## 2.2. 使用データ

第1図に示すとおり、各観測点の震度(あるいは地震動)は、震源の規模、震源過程、地震波の伝播経路、観測点までの距離、表層地盤等を反映したものである。特に、表層地盤や地形の不規則性は地震動の強さに大きな影響を与える(日本建築学会, 1983)。すなわち、近接した地点でも地震動に大きな差を生ずることがある。

従って、「震度委」においては、震度と計測量と

の比較を行うためのデータとして、出来る限り両者とも同一場所、同一条件で観測された加速度又は速度のデジタル波形を使用している(第1表)。

その後、1988年(昭和63年)、気象庁は津波予報精度向上等を目的として、従来の機械式1倍強震計から電磁式強震計への更新を行った(73ヶ所)。この電磁式強震計は、変換器として加速度計を使用し、波形データはデジタル化されてフロッピーディスクに保存されるようになっている(気象庁, 1988)。再解析では、第1表のデータに併せてこのデータも使用した(震度別にデータ数を第2表に示す)。

第2表 再解析に使用した電磁式強震計のデータ数  
データ種別: 加速度, デジタル, 50Hz

0	I	II	III	IV	V	計
388	160	77	31	6	0	662

第1表 震度観測検討委員会の検討及び再解析に使用したデータ一覧表

	0	I	II	III	IV	V	計	観測機関	データ種別
水戸	25	22	25	4	3	0	79	気象庁	加速度, デジタル, 200Hz
東京*(R1)	12	9	2	1	1	0	25	気象庁	加速度, デジタル, 200Hz
東京*(7F)	10	8	9	8	1	0	36	気象庁	加速度, アナログ(A/D変換, 50Hz)
東京*(2F)	22	13	8	2	2	0	47	気象庁	加速度, デジタル, 200Hz
横浜	0	0	10	14	3	0	27	東京工業大学	速度, デジタル, 50Hz
釧路	0	0	0	8	3	1	12	建築研究所	加速度, アナログ(A/D変換, 100Hz)
仙台	1	7	4	2	0	0	14	気象庁	速度, デジタル, 60Hz
勝浦	0	0	0	0	0	1	1	気象庁	加速度, デジタル, 100Hz
計	70	59	58	39	13	2	241		

\* 気象庁本庁舎, RC造8F建

第3表 再解析に使用した高位震度データ一覧

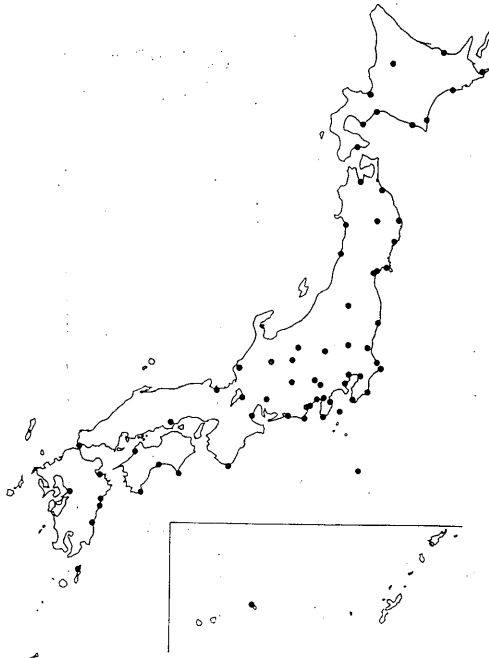
年月日時分	震央名(地震名)	観測地点	被害等の状況	近傍官署 震度	推定 震度	観測機関	
1966-04-05 17:51	(松代群発)	保科-A	震度5 <sup>1)</sup>	松代	4	5	東大地震研
"	"	若穂	震度5 <sup>1)</sup>	"	4	5	"
1966-05-20 09:30	"	保科-A	震度3 <sup>1)</sup>	"	4	3	"
"	"	松代-C	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
1966-05-28 14:21	"	松代-C	震度5 <sup>1)</sup>	"	5	5	"
1966-06-12 09:43	"	保科-B	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
"	"	若穂	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
"	"	松代-C	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
1966-06-26 16:34	"	若穂	震度5 <sup>1)</sup>	"	3	5	"
1966-07-10 15:44	"	保科-B	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
"	"	若穂	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
"	"	松代-C	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
1966-08-03 03:48	"	松代-C	震度5 <sup>1)</sup>	"	4	5	"
1966-08-08 09:37	"	若穂	震度4 <sup>1)</sup>	"	3	4	"
"	"	松代-C	震度3 <sup>1)</sup>	"	3	3	"
1966-08-28 13:09	"	松代-C	震度4 <sup>1)</sup>	"	4	4	"
1978-06-12 17:14	(宮城県沖)	東北大(工)IF		仙台	5	5	建築研究所
1987-12-17 11:08	千葉県東方沖	千葉港		千葉	5	5	東京ガス(株)
"	"	袖ヶ浦		千葉	5	5	"
1968-04-01 09:42	(日向灘)	細島港	(被害程度 <sup>2)</sup> ) I~III	延岡	5	5	港湾技研
"	"	高知港		高知	4	4	"
1968-05-16 09:49	(十勝沖)	室蘭港	I~II 震度4~5 <sup>3)</sup>	室蘭	4	5	"
"	"	青森港	I~III	青森	5	5	"
"	"	釧路港	- 震度4 <sup>3)</sup>	釧路	4	4	"
"	"	八戸港	I~IV	八戸	5	5	"
"	"	宮古港	I~III	宮古	4	5	"
1973-06-17 12:55	(根室半島沖)	室蘭港	-	室蘭	3	3	"
"	"	苫小牧港	-	苫小牧	3	3	"
"	"	釧路港	I~II	釧路	5	5	"
1978-01-14 12:24	(伊豆大島近海)	山下変電所	- 震度3.5~3.9 <sup>4)</sup>	横浜	5	4	"
"	"	清水工場	- " 4)	静岡	4	4	"
"	"	清水三保港	- " 4)	静岡	4	4	"
"	"	興津(清水)港	- " 4)	静岡	4	4	"
1978-06-12 17:14	(宮城県沖)	京浜-JI	-	横浜	4	4	"
"	"	山下変電所	-	横浜	4	4	"
"	"	小名浜港	-	小名浜	4	4	"
"	"	青森港	-	青森	3	3	"
"	"	千葉港	-	東京	4	4	"
"	"	秋田港	-	秋田	4	4	"
"	"	塩釜港	I~II	仙台	5	5	"
"	"	八戸港	-	八戸	4	4	"
"	"	宮古港	-	宮古	4	4	"
"	"	鹿島港	-	水戸	4	4	"
"	"	田子ノ浦港	-	静岡	3	3	"
"	"	大船渡墓	I	大船渡	5	5	"
1981-03-21 11:32	(浦河沖)	苫小牧港	- 震度4~4.1/2 <sup>5)</sup>	苫小牧	4	4	"
"	"	室蘭港	I 震度3.3/4~4 <sup>5)</sup>	室蘭	3	4	"
"	"	十勝港	- 震度4~4.1/2 <sup>5)</sup>	帯広	4	4	"
"	"	函館港	- 震度3.1/4 <sup>5)</sup>	函館	3	3	"
1983-05-26 12:00	(日本海中部)	秋田港	I~IV 震度5.0 <sup>6)</sup>	秋田	5	5	"
"	"	酒田港	- 震度4.0 <sup>7)</sup>	酒田	4	4	"
"	"	室蘭港	I 震度3.1 <sup>7)</sup>	室蘭	3	4	"
"	"	八戸港	- 震度3.5 <sup>7)</sup>	八戸	4	4	"
"	"	青森港	I~II 震度4.8 <sup>7)</sup>	青森	4	5	"
1984-08-07 04:06	日向灘	細島港	-	延岡	4	4	"
"	"	高知港	-	高知	3	3	"
"	"	大分港	-	大分	4	4	"

2) 片山,中野,蓮見,山口(1969)  
 福田,柴田,金子,白石,大堀(1983)  
 上部(1986)  
 土田,稲富,上田(1983)  
 土田,野田,稲富,上部,井合,大根田,外山(1985)

1) 大沢,田中,坂上,吉沢(1976)  
 3) 宇津(1969)  
 4) 村井,角田,辻村(1978)  
 5) 後藤,鏡味,太田(1982)  
 6) 野越(1984)  
 7) 太田,鏡味,後藤,岡田,堀田,大橋(1984)

被害程度(港湾技研による)

- IV:全体として形をとどめないもの
- III:形をとどめているが、構造物本体に破壊が起ったと認められるもの
- II:本体にかなりの変形の起ったもの
- I:本体には異常はないが、付属構造物に破壊や変状の認められるもの



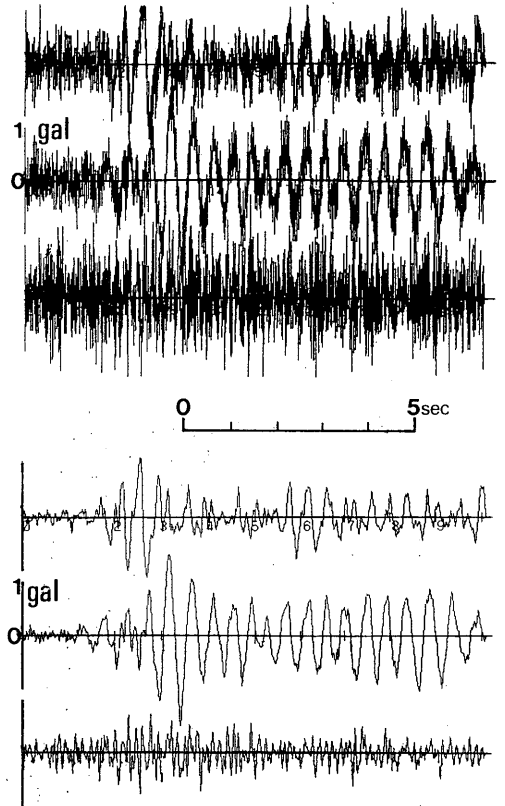
第2図 地震記録(加速度又は速度)観測地点:  
●印

また、以上のデータは主として震度4までのものであるが、震度5以上についても検討するために、第3表のようなデータを加えて再解析を行った。

以上の観測地点を第2図に示す。第1表、第2表のデータが、すべて直接震度と比較できるデータであるのに対し、第3表のデータは気象官署で観測されたものではないことから、観測地点での震度を推定する必要がある。この場合、近傍の気象官署の震度をそのまま採用することは好ましくなく、第3表に示すとおり、できるだけ観測点における震度観測、被害状況、アンケートによる詳細震度分布等を参考に観測点の震度を推定した。しかし、そのような資料がない場合には止むを得ず近傍の気象官署の震度を採用した。

なお、データの処理の都合上、波形データのサンプリング周波数は50Hzとし、用いた波形データの長さは最大41秒間までとした。

サンプリングが60Hz、100Hz又は200Hzのデータについては、高周波ノイズを除去するために10Hzのローパスフィルターを通した(第3図)うえ、50Hzのデジタルデータとした。なお、電磁式強震計データについては、すでに10Hzのローパスフィルターが施され、50Hzのサンプリングデータであるので原



第3図 ローパスフィルターによる高周波ノイズ除去の例

上図は原波形。空調ダクトの近傍に地震計を設置したため、高周波ノイズが重畳している。下図は、10Hzのローパスフィルターを通した後の波形。

データのまま使用した。速度についての検討を行う場合には、積分フィルターにより加速度データから速度への変換を行った。

原データが速度データの場合には、微分フィルターにより加速度データとした上、10Hzのローパスフィルターを通した。

積分フィルターについては井合、倉田、土田(1978)によるパラメータ付フィルター( $h=0.2$ )を、その他のフィルターについては気象研究所(1983)が高性能強震計の開発を行った際に用いたものを使用した。

このような震度と計測量との比較を行う場合には、震度データが各観測点の条件や地震活動度に依存しないように、多くの地点における観測データ、下位の震度から高位の震度までの計測量データが全て得られていることが望ましい。第2表のデータは、こ

の条件をほぼ満足していると考えられるが、第1表についてはやや不十分である。特に、第3表の高位震度のデータは、加速度波形が記録されているデータを選択したものであるため、すべてのデータが網羅されていないことに注意する必要がある。また、第1表、第2表の震度0の地震動データは、トリガー方式の地震計で得られたものであり、トリガーレベルを超える地震動であったが震度は0と判定されたもの、すなわち震度0のうちのごく一部のデータを取扱っていることに注意する必要がある。

2.3 震度と計測量の比較

前述のとおり、震度と計測量の関係については数多くの調査があるが、両者とも同一場所、同一条件における観測データを使用した例が少ないことから、改めて震度と以下のような各種計測量との比較を行った。

- a) 加速度 b) 速度 c) 加速度、速度スペクトル
- d) 加速度移動平均 e) 加速度RMS f) 加速度継続時間
- g) スペクトル強度

以下、「震度委」において検討されたものは<震度委>（使用したデータは第1表）、今回新たにデータを追加するなどにより検討したものについては<再解析>（使用したデータは第1、2、3表）として区別している。

a) 加速度

大森（1898）は高位の震度において最大加速度は地震動の強さを示すとした。たとえ加速度が直接的な破壊力にならない場合があるとしても、人間の感覚や被害には加速度が主たる役割を有している（河角、1943）ことから、多くの研究者が最大加速度と震度との比較を行っている。石本（1932）は、実際に観測された最大加速度と震度とを比較し、両者の関係を求めたが、河角（前掲1943）はその資料を統計的に再調査し、次式を提案した。この式は現在でも河角式として一般に用いられている。

$$I = 2 \log(a) + 0.7$$

I : 震度 a : 最大加速度

その後、最大加速度と震度とが一致しない例がかなりあり（勝又・徳永、1971）、河角式に比べ大きな最大加速度を与えるとの報告（大崎・渡部・沢田、1971、翠川、1980）もされている。

ただし、石本（前掲1932）は、石本の調査が東京大学地震研究所（東京都文京区本郷）における最大

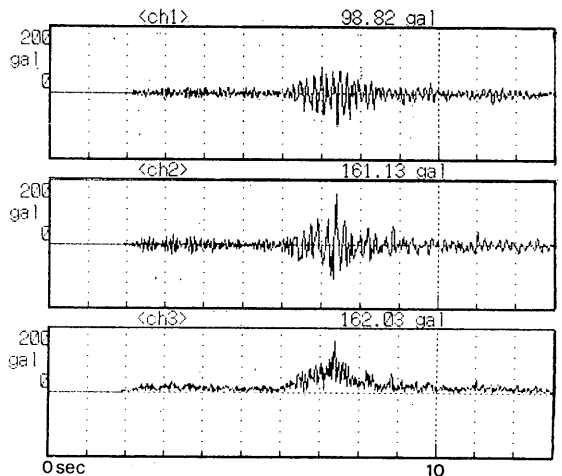
震度階級	河角式による 対応加速度(gal)
0	～ 0.8
I	0.8 ～ 2.5
II	2.5 ～ 8
III	8 ～ 25
IV	25 ～ 80
V	80 ～ 250
VI	250 ～ 400
VII	400* ～

\* 400gal以上は気象庁が設定した値

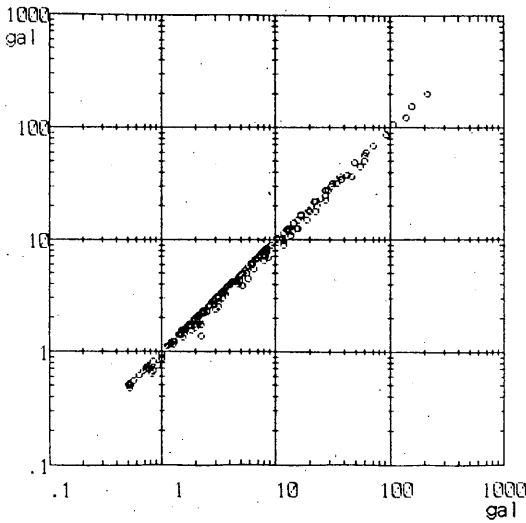
第4表 河角式による震度と最大加速度との対応

加速度値と、中央気象台（現気象庁、千代田区皇居内旧本丸）における震度とを比較したものであること、及び、本郷の地盤の卓越周期が0.3秒であることに注意する必要がある、との指摘をしている。なお、河角式は震度4までのデータに基づき求められたものであり、震度5と6の境界は外挿により求められたものである。

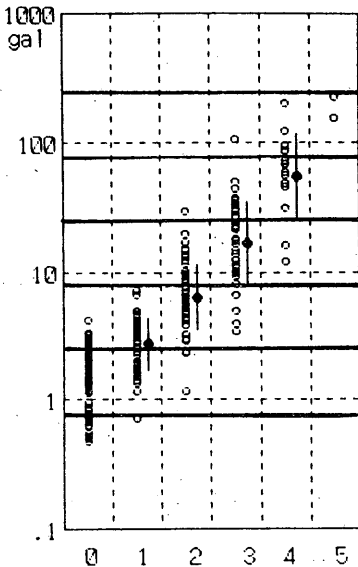
1952年版の気象庁の地震観測指針には、第4表のとおり震度の解説表に参考値として、河角の式による加速度値が添えられている（1967年版指針からは掲載されていない）が、震度6と7の境界値として400 galが与えられている。広野（1988、私信）によれば、この値は河角式によるものではなく、



第4図 加速度波形の水平2成分合成例  
<ch3>は、<ch1>及び<ch2>の合成波形。



第5図 水平動2成分と水平動合成との対応<震度委>  
 水平動2成分各成分の最大値のうちより大きい値(水平2成分値)と、2成分合成値(水平合成値)との対応を示す。  
 縦軸：水平2成分値；横軸：水平合成値

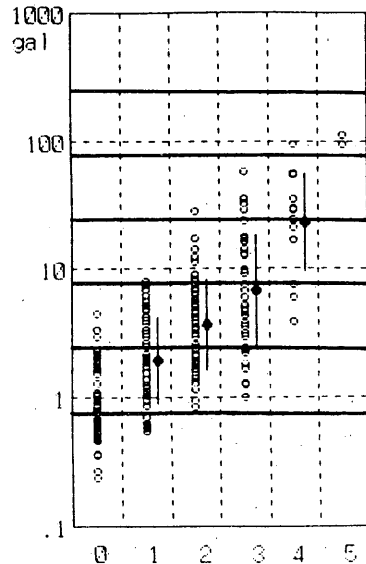


第6図 最大加速度(水平2成分値)と震度との対応<震度委>  
 縦軸：最大加速度(水平2成分値)  
 横軸：震度  
 図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル

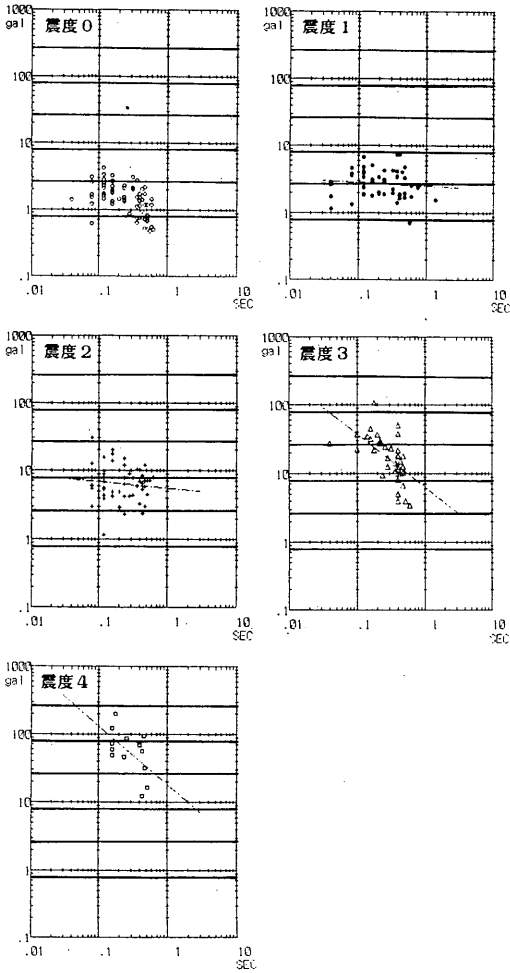
地震時の木造家屋の倒壊率と加速度との関係式(物部, 1925)を参考にして設定されたものである。

<震度委>では、最大加速度と震度との比較を水平成分と上下成分について行った。水平成分については、まず、2成分のうちの大となる値とするか、第4図のような2成分の合成値の最大値するかということを検討した。2成分のうち最大値と合成最大値との関係を第5図に示す。震度と計測量の比較を行う場合には一般に計測量が常用対数上で扱われることを考慮すると、水平成分のデータとして合成値を用いなくてよく、2成分のどちらかの最大値(以後、水平2成分値と称する)を使用してもさしつかえない。以後、各図、表に示す最大加速度等の計測量は、特に断らない限り水平2成分値を使用した。

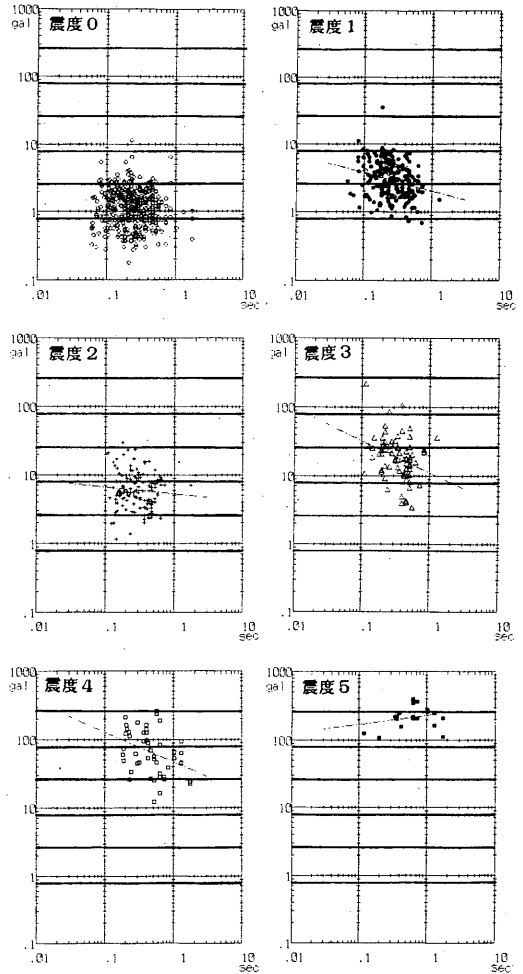
第6図に、縦軸を最大加速度として、震度別に水平2成分値、その平均値、標準偏差を示した。従来の調査(大崎・渡部・沢田, 前掲1971, 翠川, 1980)と同様、河角式に比べ各震度とも最大加速度のレベルが高く(特に震度0, 1の小さいところで顕著である)、また、かなりのばらつきを示している。上下成分データについてみると(第7図)、そのばらつきは水平2成分値に比べてかなり大きいこ



第7図 最大加速度(上下成分値)と震度との対応<震度委>  
 縦軸：最大加速度(上下成分値)  
 横軸：震度  
 図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル



第8図 震度別の最大加速度 対 周期<震度委>  
 縦軸：最大加速度  
 横軸：周期  
 図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル  
 また、参考のため、縦軸で示す計測量の横軸で示す計測量に対する一次回帰直線を一点鎖線で示す。(第9, 12, 13, 37の各図中に示す一点鎖線も同様の意である)



第9図 震度別の最大加速度 対 周期<再解析>  
 縦軸：最大加速度  
 横軸：周期  
 図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル

とが分る。従って、本報告に述べる各種計測量は水平成分値を取扱ったものとなっている。

岡田(前掲1987)は、震度決定に対する地震動の周期の寄与について指摘している。また、振動レベルと人間の感覚レベルとの比較については、振動公害関係の分野における調査が行われており、例えば三輪、米川(1971a, 1971b)は、加速度に対する人間の感覚量は、周波数(周期)に依存しているとしている。

そこで、加速度の最大値と卓越周期を求め、震度別に縦軸を最大加速度、横軸を卓越周期としてプロットした(第8図)。ここでいう卓越周期は、第2.3d)項に述べるスムーズ化スペクトルが最大となる周期である。

各震度に対応する最大加速度は約20dBの範囲で分布しているが、卓越周期についてもほとんどのデータが0.1~1秒の範囲、すなわち20dBの範囲に分布している。震度は、地震の強さを階級づけたものであり、ある範囲の地震動の強さを同一震度として判定したものであること、及び、市川(1983)の報告によれば震度判定の標準偏差は0.8程度であることか

ら、震度と計測量の両者の相関が明瞭になりにくいのは止むを得ないところもある。(このことは、最大速度データについても同様のことが言える)。しかし、同一震度をみた場合、卓越周期が短くなるほ

ど最大加速度が大きな値をとる傾向のあることが分る(鉢嶺・窪田・勝又, 1987)。

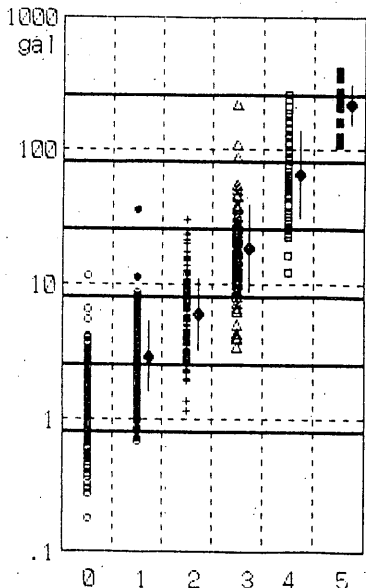
<再解析>の結果は第9図, 第10図に示すとおり, 上記と同様の結果となっている。(ただし, 周期を求める場合のスペクトルのスムーズ化は行っていない)

b) 最大速度

村松(1967)の調査によれば震度は速度と対応しており, また, 構造物被害については加速度より速度で説明される場合が多いとされている(翠川, 1985)。

<震度委>では, 加速度と同様に最大速度との比較を行った。第11図に縦軸を最大速度として, 震度別に水平成分データ, その平均値, 標準偏差を, また, 第12図に, 縦軸を最大速度, 横軸を卓越周期としてプロットした結果を示す。

震度間の分離の程度は, 加速度に比べて優れてい

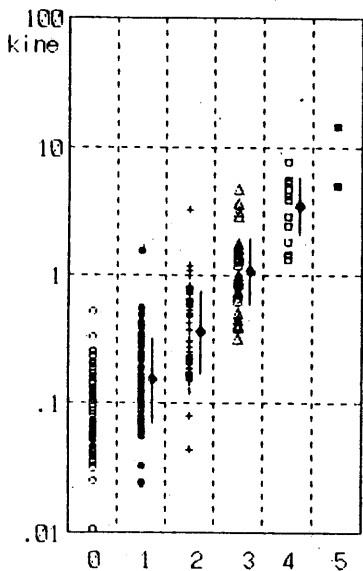


第10図 最大加速度 対 震度<再解析>

縦軸: 最大加速度

横軸: 震度

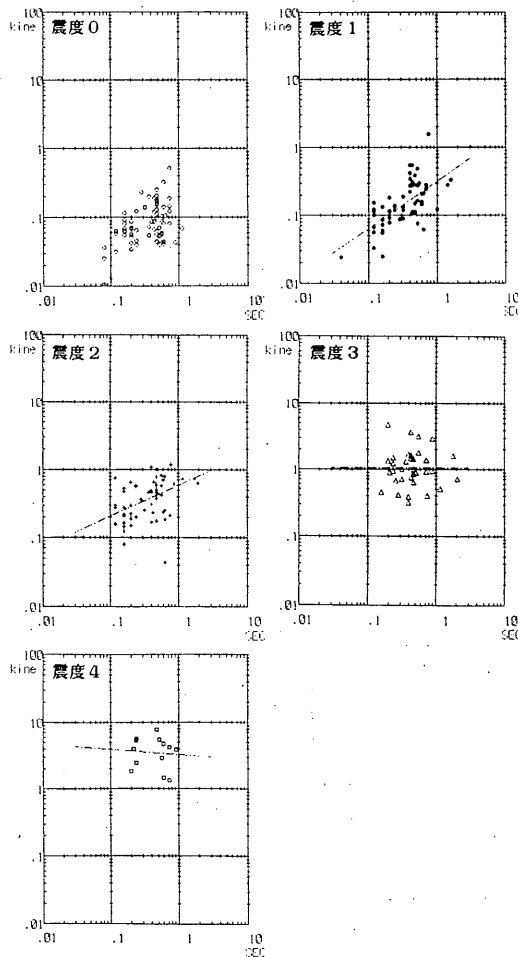
図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル



第11図 最大速度 対 震度<震度委>

縦軸: 最大速度

横軸: 震度

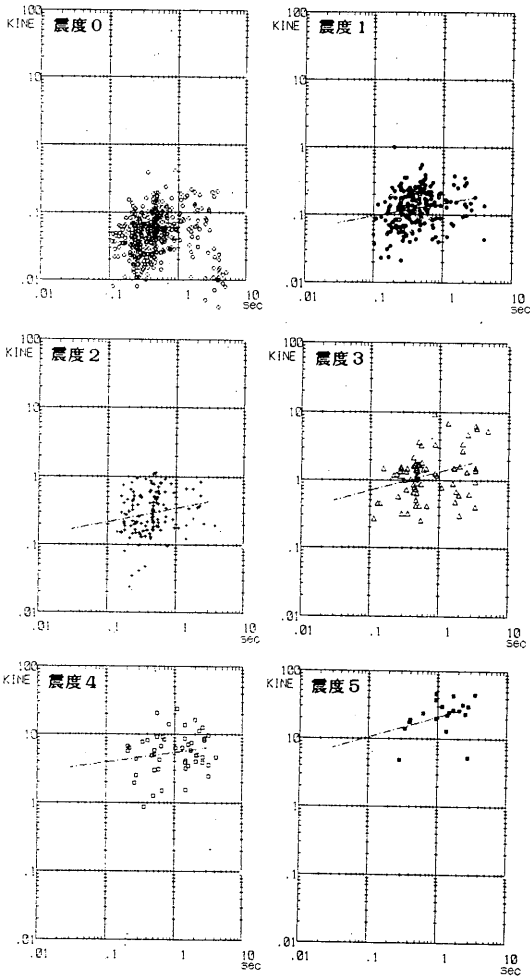


第12図 震度別の最大速度 対 周期<震度委>

縦軸: 最大速度

横軸: 周期





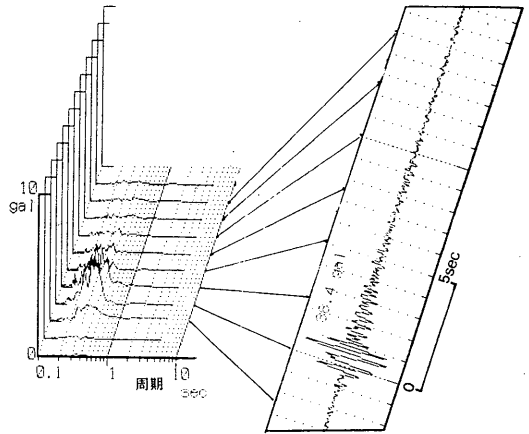
第13図 震度別の最大速度 対 周期<再解析>  
縦軸：最大速度  
横軸：周期

るとはいえない。また、周期に対する依存は、加速度の場合とは逆のセンス、すなわち、同一震度をみた場合、卓越周期が短くなるほど最大速度が小さな値となっている。

<再解析>の結果を第13図に示すが、上記と同様の傾向となっている。

c) 加速度、速度スペクトル

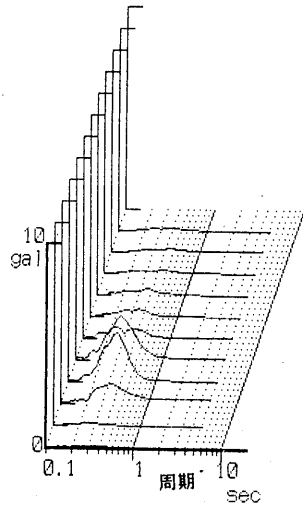
<震度委>では、加速度及び速度波形に含まれる主要成分を評価するため、震度とスペクトル最大値の比較を行った。波形の主要動の部分のスペクトルを対象とすることとし、約5秒間の波形のスペクトルを計算し2.5秒ずつずらしながら、そのうちの最大値を求めた(いわゆるランニングスペクトル、



第14図 ランニングスペクトル例

図中、右図が加速度波形、左図がランニングスペクトル。

左図縦軸：スペクトル  
左図横軸：周期

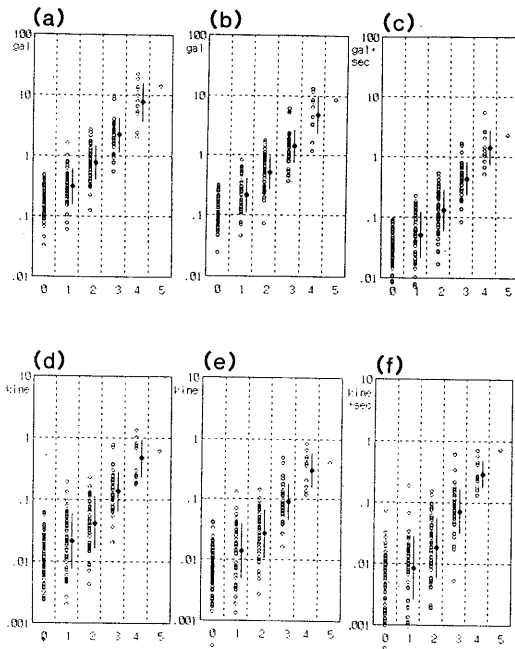


第15図 スムーズ化したランニングスペクトル例

縦軸：スペクトル  
横軸：周期

第14図)。しかし、第14図に見られるとおり、スペクトルの値は周波数ごとの変動が大きいため、スペクトルをスムーズ化した上で最大値を求めたことを行った(第15図)。なお、第2.3a)項の卓越周期は、このスムーズ化スペクトルにおいて最大値が出現した周期である。さらに、周期0.1~2.0秒間のスペクトル面積の最大値も求めた。これらの計測量と震度との比較した結果を第16図に示した。

いずれの計測量とも、最大加速度に比べて優れた結果は得られなかった。



第16図 スペクトル 対 震度<震度委>

(a)加速度スペクトル (b)加速度スムーズ化スペクトル (c)加速度スペクトル面積 (d)速度スペクトル (e)速度スムーズ化スペクトル (f) 速度スペクトル面積

縦軸：各種スペクトル値等計測量最大値  
横軸：震度

d) 加速度移動平均

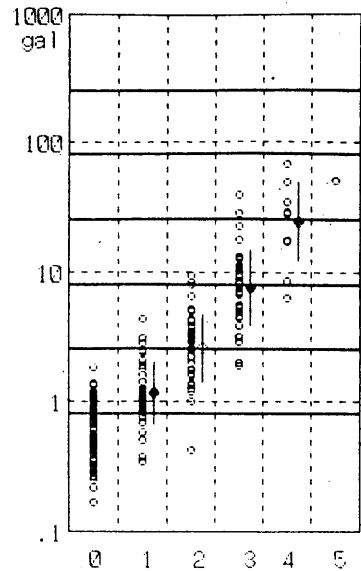
第2.3 a)項では、震度と加速度の最大値を比較したが、加速度波形中にスパイク状の波形があった場合には、明らかに加速度値が過大になると思われる。また、人間がある振動に反応したり、あるいは構造物に被害が生ずるためには、ある程度の作用時間が必要と考えられることから、加速度波形データについて1秒間の移動平均を行い、その最大値と震度との比較を行ったが、最大加速度に比べて全体のレベルが下がったものの、震度間の分離度について特に良い結果は得られていない(第17図)。

e) 加速度RMS (Root Mean Square)

次式に示すような、Root Mean Square値も前項で述べたような過大な加速度値を避けることができると考えられる。

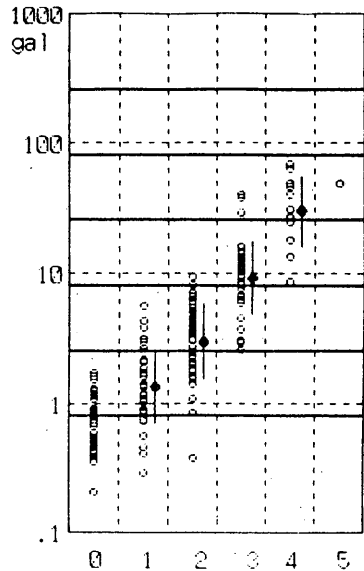
$$(1/T) \cdot \sqrt{\int a(t)^2 dt}$$

T : RMSを求めるための時間間隔  
a(t): 時刻tにおける加速度振幅値



第17図 加速度移動平均(1sec)最大値 対 震度<震度委>

縦軸：移動平均(1sec)最大値  
横軸：震度



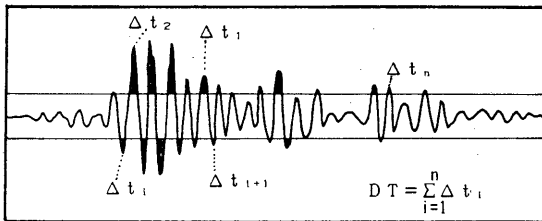
第18図 加速度RMS(2 sec)最大値 対 震度<震度委>

縦軸：RMS(2 sec)最大値  
横軸：震度

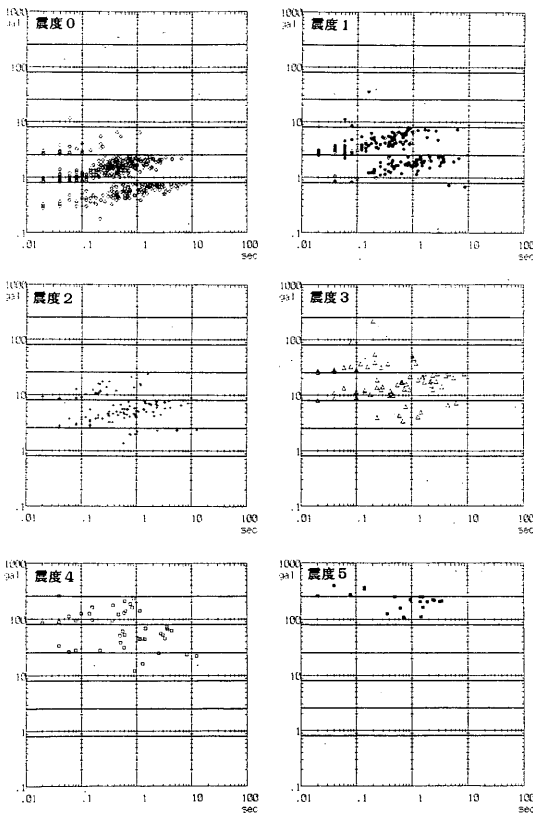
ここでは、 $T = 2$  秒として加速度RMSを求め、震度との比較を行ったが、加速度移動平均と同様、最大加速度に比べて全体のレベルが下がったものの、震度間の分離度について特に良い結果は得られていない(第18図)。

f) 加速度継続時間

市川(1984, 1985)は、継続時間(第19図)を用



第19図 市川の継続時間の模式図



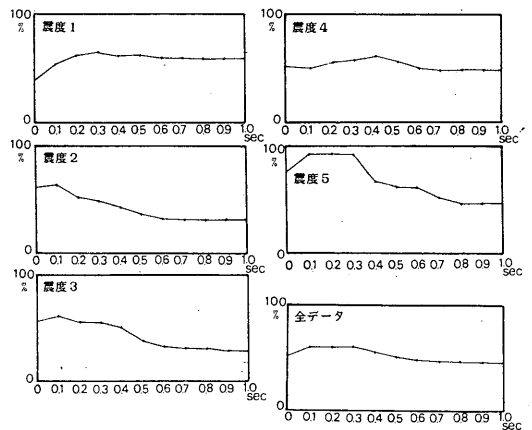
第20図 震度別の最大加速度 対 市川の継続時間<再解析>

縦軸：最大加速度  
 横軸：市川の継続時間  
 図中の横実線は河角式による震度に対する加速度レベル

いた震度の補正を行っているが、その補正方法は次のような手順で行われている。

- ① 加速度最大値を求め、その値を河角の式に代入し4捨5入した結果を仮の震度とする。
- ② その震度に相当する河角式から求めた加速度の下限を基準レベルとする。例えば、震度3の基準レベル8 galとなる。
- ③ 加速度波形の振幅が、基準レベルを超えている時間の総和を求め、継続時間とする。
- ④ 継続時間が0.5秒を超える場合にはその震度を採用し、0.5秒以下の場合には(仮の震度-1)を新たな仮の震度として、②以降の作業を繰り返す。

低位から高位までの震度について多くのデータが得られたので、<再解析>の段階で市川による継続時間補正を行ってみた。第20図は、震度別に、縦軸を最大加速度、横軸を仮の震度のレベルを超える継続時間(上記①~③)としてプロットしたものである。市川は、震度の補正を行う継続時間をいろいろと変化させて、上述④のとおり最終的に継続時間の基準を0.5秒とすることが最も良い結果を与えるとしている。しかし、今回扱うデータは最大41秒で打ち切っていることから、あらためて補正の基準となる継続時間を0.1秒から1秒まで0.1秒刻みで変化させて補正を行ってみた。その結果、第21図のとおり、今回使用したデータの範囲では大きな効果は見られなかった。



第21図 観測震度と市川の継続時間による補正震度との合致率(%)<再解析>

縦軸：合致率(%)  
 横軸：補正を行う継続時間

＜震度委＞では、市川の継続時間の考え方を次のように準用して継続時間を求めた。

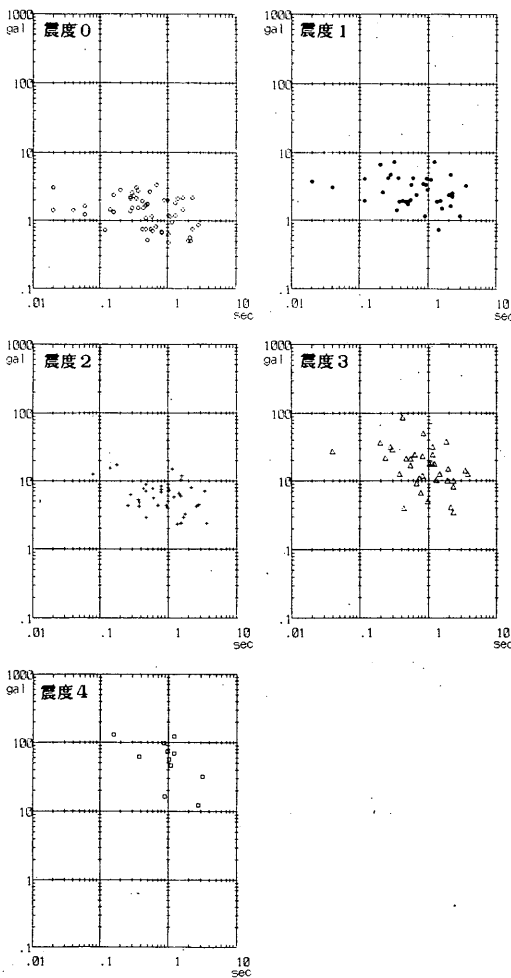
- ア) 加速度最大値を求め、その値を河角の式に代入し仮の震度とする。この震度は小数位で求められる。例えば、加速度最大値が10galの場合、仮の震度は2.7となる。
- イ) 仮の震度から0.5減じた震度に対応する加速度を基準レベルとする。ア)の例では、震度2.2に相当する加速度を河角式で求めると5.6galとなる。この値を基準レベルとする。
- ウ) 加速度波形の振幅が、基準レベルを超えている時間の総和を求め、継続時間とする。この継

続時間を基準レベル継続時間と呼ぶことにする。

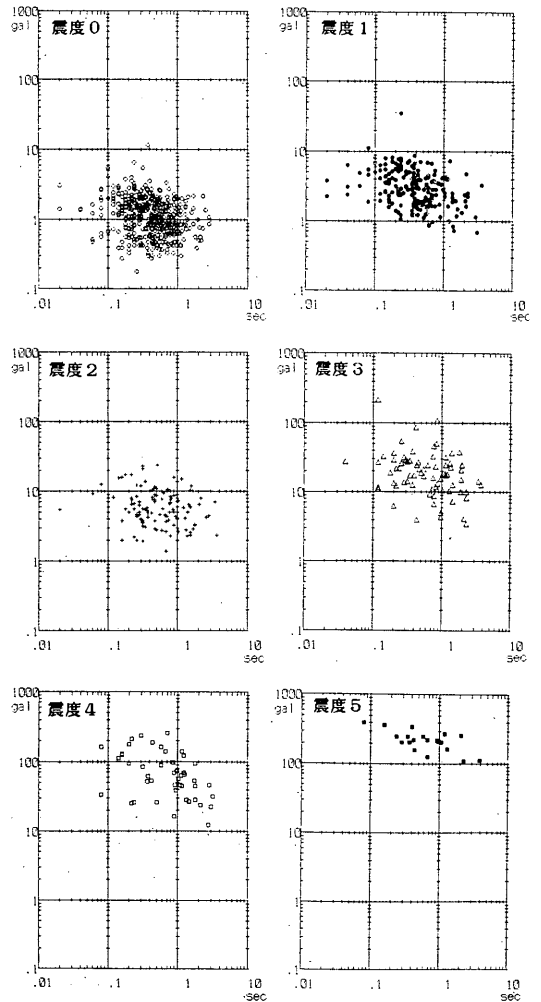
第22図は、このように継続時間を求め、縦軸を最大加速度、横軸を継続時間として震度別にプロットしたものである。同一震度であれば、最大加速度が大きい場合には継続時間が短く、逆に最大加速度が小さい場合には継続時間が長くなる傾向となることが期待されるが、第22図によれば震度4以外の震度についてはあまり明瞭な傾向は見られなかった。

同様の検討を＜再解析＞で行った結果（第23図）では期待される傾向が見られる。

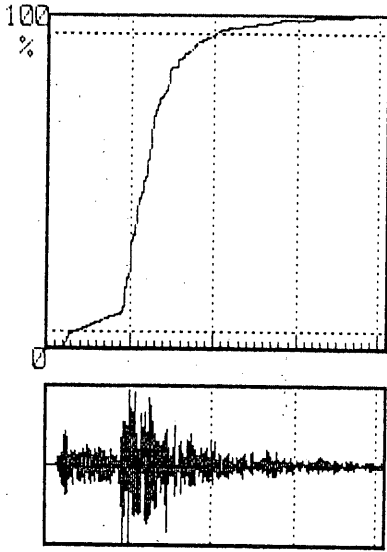
＜再解析＞段階で、全パワーによる継続時間についても検討を行った。



第22図 震度別の最大加速度 対 基準レベル継続時間＜震度委＞  
縦軸：最大加速度  
横軸：基準レベル継続時間



第23図 震度別の最大加速度 対 基準レベル継続時間＜再解析＞  
縦軸：最大加速度  
横軸：基準レベル継続時間



<ch1> MAX= 5.4 gal  
5 - 95 %>> 16.7 sec

第24図 全パワー継続時間の例  
図中の破線は、全パワーの5%及び95%を示す。

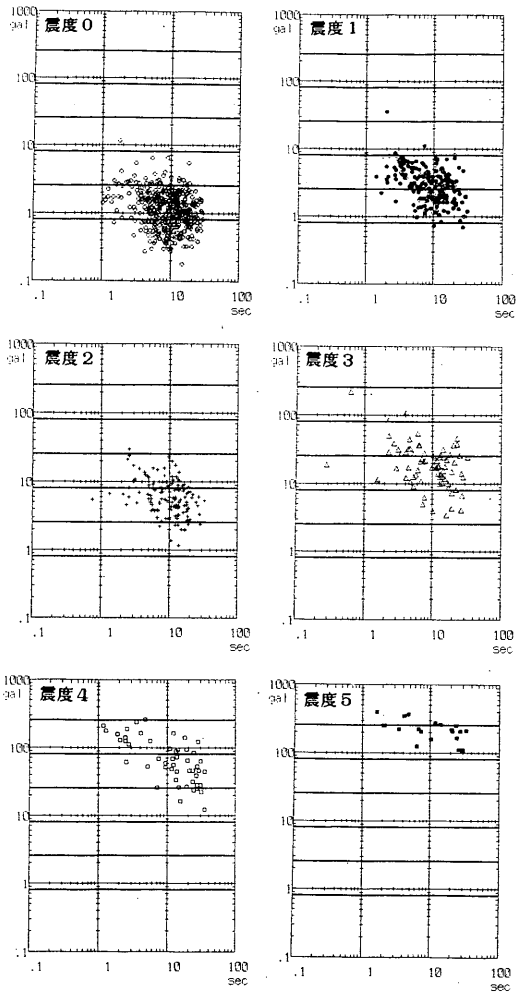
全パワーは、加速度の振幅を2乗した値を積算するもので、その5%から95%までに達する時間が継続時間と定義される(Trifunac and Brady, 1975)。この定義によると、第24図のとおり、地震波の主要動(一般にはS相)の前に5%に達する場合がある。この解析では、人間の体感と比較する場合には主要動の継続時間を評価したいこともあり、10%から90%に達する時間を全パワーの継続時間と定義し直した。

ただし、第2.2項でも述べたように、処理の都合上、波形の長さは最大で約41秒間に制限されている。

第25図は、縦軸を最大加速度、横軸を全パワー継続時間としてデータをプロットしたものである。基準レベル継続時間と同様の結果が得られた。翠川・福岡(前掲1988)は、高位の震度では継続時間の影響が見られることを指摘しているが、本解析では、高位の震度のみならず低位の震度についても継続時間の影響があるという結果が得られた。

震度は即時に判定されるとはいえ、震度決定までには、揺れがさらに大きくなるか、今の揺れの程度は確かであるか等の確認作業が無意識に行われていると考えられる。これが、低位の震度においても継続時間が影響している理由であると思われる。

なお、第26図に示すとおり、基準レベル継続時間



第25図 震度別の最大加速度 対 全パワー継続時間<再解析>

縦軸：最大加速度

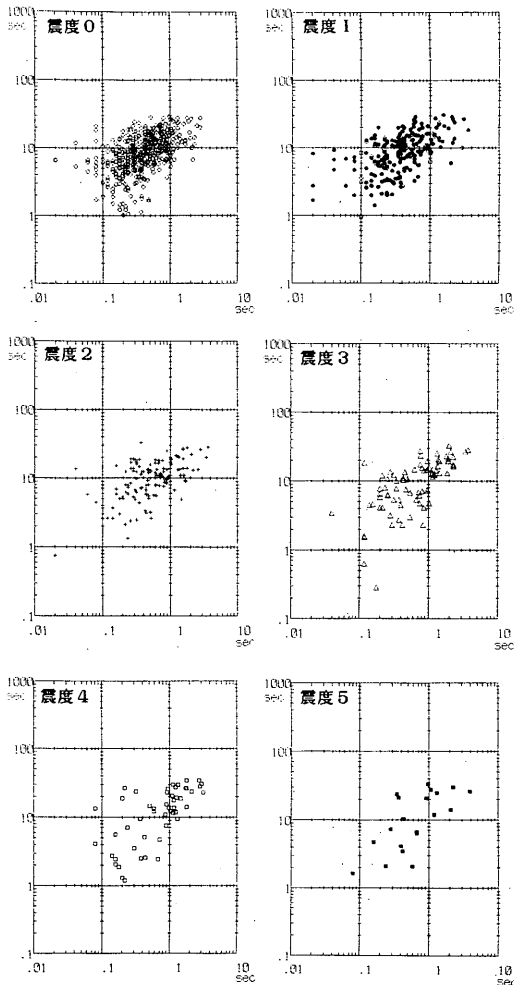
横軸：全パワー継続時間

図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル

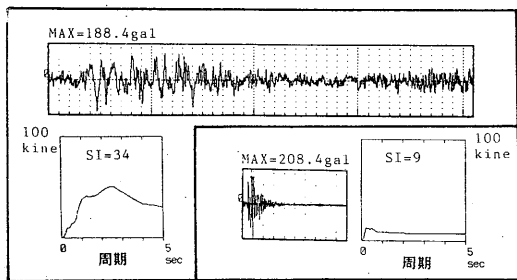
と全パワー継続時間の両者には相関がみられるが、第23図と第25図とを比較すると、震度に対する継続時間の影響は全パワー継続時間の方にやや明瞭に現れている。

g) スペクトル強度

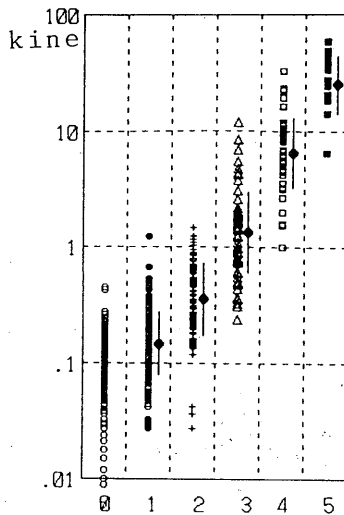
地震工学の分野では、地震動による構造物被害と対応する計測量としてスペクトル強度 (Spectrum Intensity:SI値と称する)が提案されている(Housner,1975)。このスペクトル強度とは、次式に示したように、1自由度振動系における速度応答スペクトルの0.1~2.5の間の面積を求め、その値



第26図 震度別の全パワー継続時間 対 基準レベル継続時間<再解析>  
縦軸：全パワー継続時間  
横軸：基準レベル継続時間



第27図 スペクトル強度(SI)の計算例  
左上図は継続時間が長い波形例、右下図は継続時間が短い波形例であり、最大加速度では大きな差はないが、SI値は大きく異なっている。



第28図 SI 対 震度  
縦軸：SI値  
横軸：最大速度及び最大加速度

を 2.4 で除して平均値としたものである。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T,h) \cdot dT$$

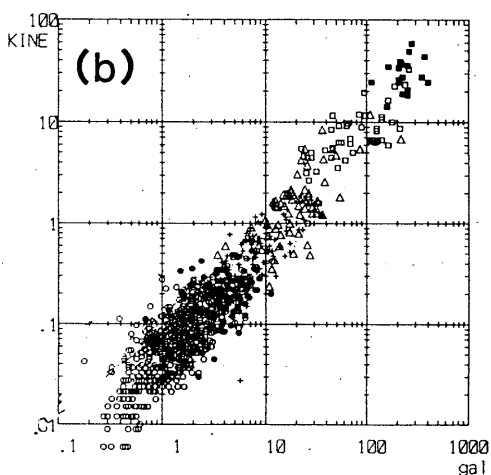
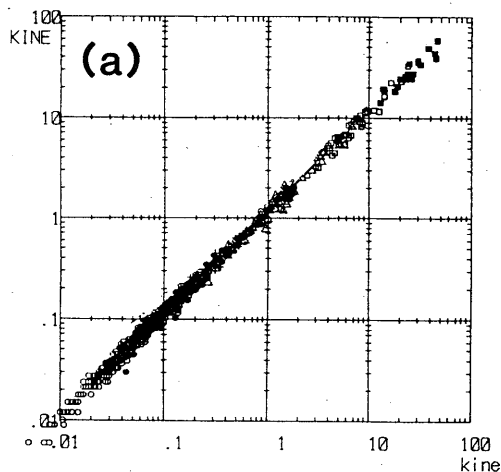
ここで、Sv:速度応答スペクトル、T:固有周期、h:減衰定数である。

片山・佐藤・大久保・川崎(1985, 1986)は、このSI値を地震被害発生の有無を判断する基準としている。

そこで、<再解析>において、このSI値(h=0.2)と震度との対応を調べてみた。第27図は、ほぼ同一の最大加速度であるが継続時間の異なる波形についてのSI値を計算した例である。

縦軸をSI値として震度別にデータをプロットした結果を第28図に示す。この図を見ると、震度に関する限りSI値による分離度が良いとはいえない。

被害が生ずるような地震動(震度で言えば高位の震度)を対象とした調査(小林・長橋, 1973)によると、SI値と最大速度との相関は良く、最大加速度との相関は良くないとの報告がされている。今回収集したデータについて、震度別にSI値と最大加速度、最大速度との比較を行ってみた。その結果は第29図に示すとおり、従来の調査と同様、SI値と最大速度との相関が高いという結果が得られた。



第29図 SI 対 最大加速度及び最大速度<再解析>

- (a) 最大速度  
(b) 最大加速度

縦軸：SI

横軸：(a)最大速度及び(b)最大加速度

### § 3. 震度の計測化について

<震度委>では、§ 1に示したように震度の計測化式を提案しているが、ここでは、§ 2で報告した震度と各種計測量とを比較した結果を再度まとめるとともに、計測震度(仮称)の実用化を念頭において若干の検討を行う

#### 3.1 震度の計測化式

§ 2で述べたとおり、継続時間を除くその他の計測量については、震度間の分離について最大加速度

や最大速度より優れたものはなかった。

なお、継続時間については第 3.4 項に後述する。

震度と最大加速度及び最大速度を比較した結果(第 9 図, 第 13 図)から、おおむね次のようなことが言えるであろう。

- 1) 同一震度を見た場合、最大加速度については卓越周期が短い(周波数が高い)ほど大きな値となる傾向がある。
- 2) 一方、最大速度については卓越周期が短いほど小さな値となる傾向がある。

1)の結果は、加速度(水平動)に対し、人間の感覚量は周波数(3 Hz以上)が高いほど低下するという三輪(前掲1971a, 1971b)の調査とも調和的である。

もう少し注意深く見ると次のようなことが言える

- 3) 最大加速度については、低位より高位の震度のほうが周期に対する依存性が明瞭である。
  - 4) 逆に、最大速度については、高位より低位の震度のほうが周期に対する依存性が明瞭である。
- このことを言換えれば、低位の震度は最大加速度との対応が良く、高位の震度は最大速度との対応が良いとすることができる。高位震度は長周期成分との相関が高く、低位震度では短周期成分との相関が高いという岡田(前掲1987)の指摘と調和的である。

<震度委>では、人間の感覚量に対応する計測量としては、力に対応する加速度のほうが理解しやすい(構造物被害は速度との対応が良いとしても)ことから、中位の震度を標準として、震度の低位、高位にかかわらず次式(再掲)に示されるように、加速度に対する周期補正を行う式が提案された。

$$I = 2 \cdot \log(a) + 0.7 + \log(k \cdot t)$$

$I$  (0~6) : 計測震度(仮称) (4捨5入して整数値とする)

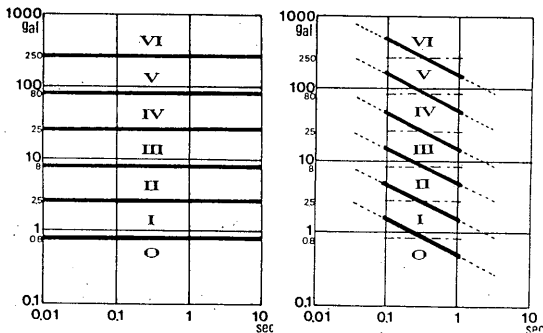
但し、右辺が0.5未満のときは $I=0$ 、5.5以上のときは $I=6$ とする)

$a$ : 加速度 (gal = cm/sec<sup>2</sup>)

$t$ : 周期 (sec) (暫定的に0.1~1秒の範囲)

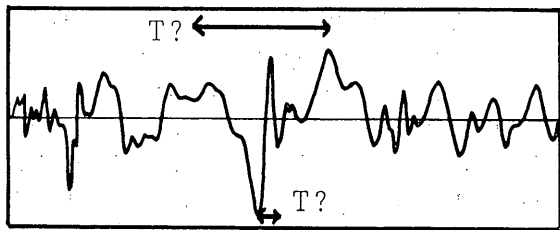
$k$ : 係数 (暫定的に $k=3$ )

この提案式は河角式を修正したものとなっており、ある一定の加速度振幅に対し、例えば地震動の周期が0.1秒(短周期側)の計測震度(仮称)は、周期が1秒(長周期側)の計測震度(仮称)より1減じた値となることを示している。別の見方をすると、ある一定の震度に対して、地震動の周期が10倍(20



第30図 周期補正模式図（震度観測検討委員会報告書，1988）

左図は河角式による震度間の境界  
 右図は周期補正による震度間の境界  
 縦軸：最大加速度  
 横軸：周期



第31図 最大加速度と周期判定模式図  
 図中にあるとおり卓越周期の判定が困難な場合がある。

dB) 増加すると加速度振幅が10dB減少することを示したものとなっている(第30図)。一方、ある一定の速度振幅を設定した場合、周期が10倍(20dB)増加すると加速度振幅は20dB減少することから、この提案式は加速度と速度との中間的な量を与えるものとなっている。しかし、加速度と速度の中間的な量といっても物理的には理解しにくいことから、基本的な計測量としての最大加速度を周期で補正したものと理解するのが妥当であろう。

なお、具体的な周期補正による結果は第3.2項に述べる。

3.2 計測震度(仮称)の実用化

計測震度(仮称)を実用化するためには、周期補正の具体的な方法やkの値など、いくつかの項目について検討する必要がある、以下、それらについて若干の検討を行った。

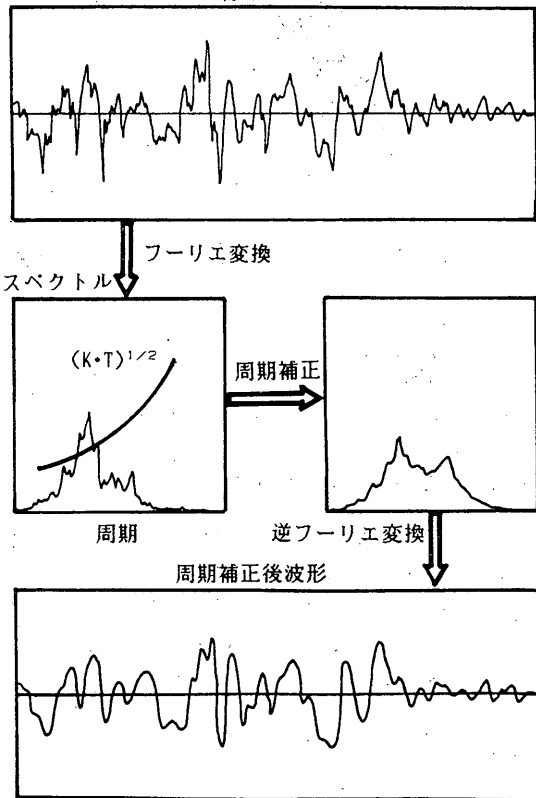
1) 周期補正の方法

<震度委>の提案式は、地震動の加速度から求められる計測震度(仮称)を卓越周期により補正する形となっているが、実際には第31図に模式的に示すように、卓越周期を決定することが困難な場合もあり、最大加速度を単純に周期で補正してよいのかという疑問が生ずる。

人間の感覚や構造物は、地震動の影響を総合的に受けており、地震動の周期に関して考えれば、各周期成分の強さを全体として評価する方法が適当と考えられる。

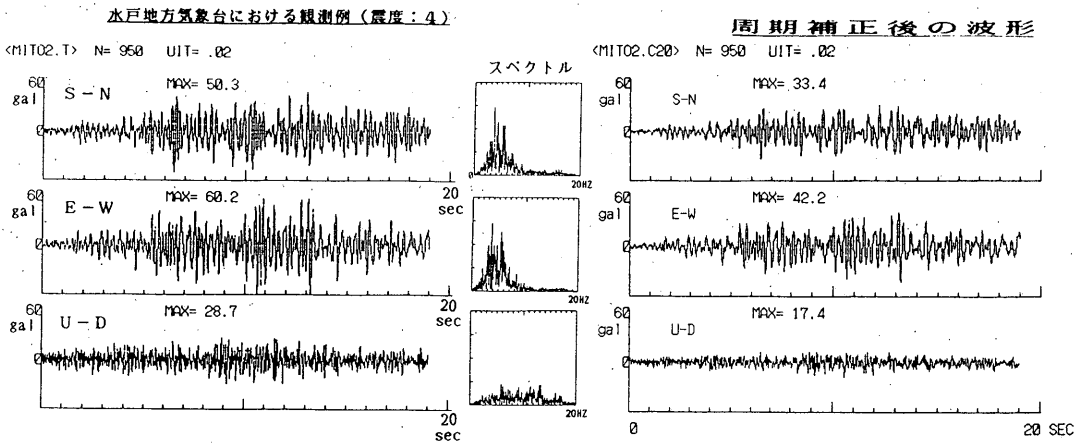
すでに公害振動の分野では振動レベル計が実用的に使用されているが、これは第2.3a)項で述べた三輪(前掲1971a, 1971b)らの研究に基づき、加速度波形に感覚補正(一種のフィルターによる周波数補正)を行い、その実効値をデシベル値で表示するものである(機械電子検査検定協会, 1985)。

計測震度(仮称)は、第3.1項で述べたとおり、加速度と速度との中間的な量に比例するものとなることから、アナログ的に解決するためにはさらに検討が必要であり、ここでは次のように計算機による処理を行う方法を示した(第32図)が、この方法は



第32図 周期補正模式図





第33図 周期補正例

各周期成分の強さを全体として評価することに相当する。

- ① 水平成分の各々について、地震波形をフーリエ変換しスペクトルを求める。
- ② 計測震度（仮称）の周期の項に相当するフィルターをかける（各周期成分に重みをつける）。
- ③ 逆フーリエ変換を行う。これにより、周期補正後の波形が得られる。
- ④ その波形の最大値(a)を求め、

$$\text{河角式 } I = 2 \times \log(a) + 0.7$$

に代入することにより、計測震度（仮称）を得る。

- ⑤ 水平2成分の計測震度（仮称）のうち、大となる値を最終的な計測震度（仮称）とする。

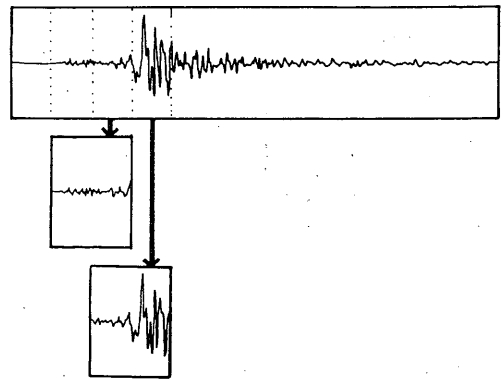
第33図は、この方法により地震波形の周期補正を行った例である。

この補正は波形全体について上のような処理を行ったものであるが、計測震度（仮称）の実用化を行う場合には即時的処理が求められることから、第34図に模式的に示したとおり、ある時間間隔で次々と計測震度（仮称）を求めていく必要があると考えられる。

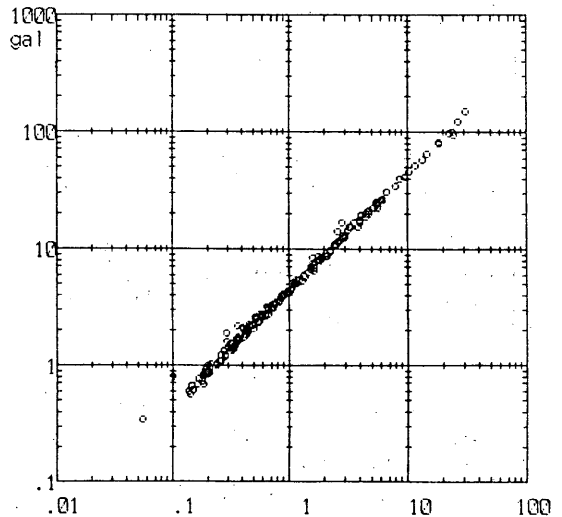
なお、参考のために、加速度波形と速度波形について同一時刻の振幅の積をもとめ、その最大値と上記の周波数補正による地震波形の最大値とをプロットすると、第35図のとおり相関が非常に良いという結果が得られた。このことは、上記のようなデジタル処理をアナログ的に容易に実現できる可能性のあることを示している。

2) 補正式の係数kについて

第2.3 a) 項で述べたとおり、震度と最大加速度



第34図 短い時間間隔での波形処理模式図



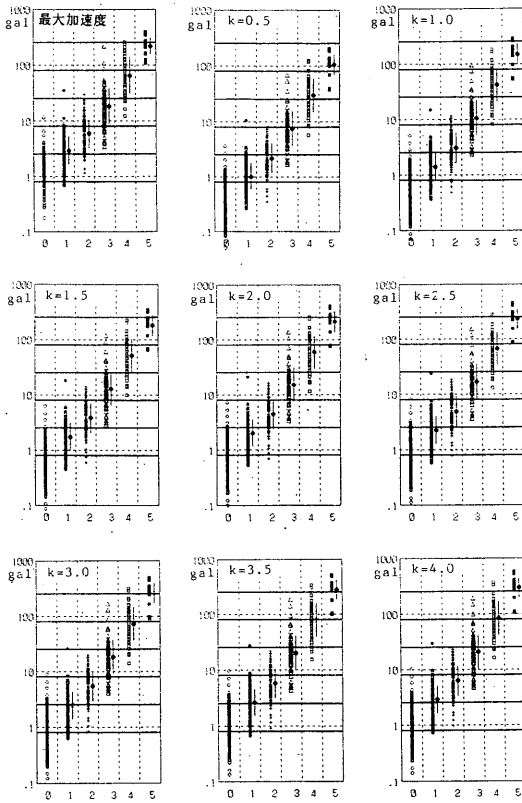
第35図 最大加速度×最大速度 対 周期補正加速度最大値  
 縦軸：最大加速度×最大速度  
 横軸：周期補正加速度最大値

とを比較すると、河角式によるレベルよりかなり高くなること分る。〈震度委〉では、最大加速度と卓越周期との関係が着目され、周期による補正を行う式が提案された。この提案式中の係数 $k$ の逆数(例えば $k=3$ の時は0.33秒)の周期では提案式と河角式と一致するようになっている。

〈震度委〉の検討においては、得られたデータの卓越周期の範囲が0.1~1秒と狭いことやデータ数が少ないことから、振動に対する人間の感覚は周期0.3秒で最も敏感であるという調査(石本・大塚, 1933)や一般に居住している建物の固有周期が0.3秒前後であることも参考とし、暫定的な $k$ として0.1秒と1.0秒の幾何平均0.32の逆数3となっている。

〈再解析〉では、第3.2 1)項の方法を用いて $k$ を0.5から4.0まで0.5刻みで変化させ周期補正を行った。その結果を第36図に示すが、第9図に比べて標準偏差がやや小さくなっている。しかし、 $k=3$ の場合、まだ全体のレベルが高いことから、 $k=2$ (または $k=1.5$ )を選択した方が良いと思われる。すなわち、基準の周期を0.33秒よりやや長い0.5秒程度にすることで、一般によく知られている河角式のレベルをあえて変更しないようにすることができる。

第37図は $k=2$ で補正した加速度と周期の関係を、第10図と同様にプロットした結果である。



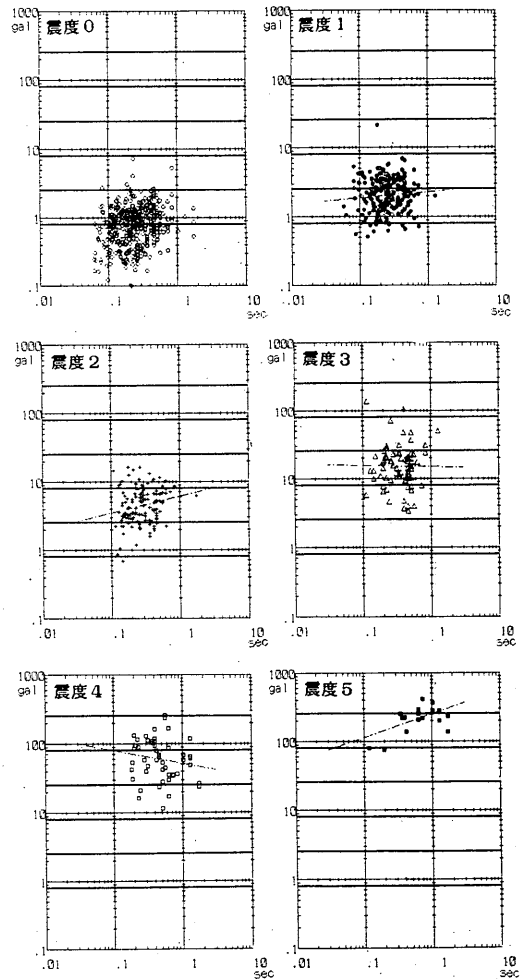
第36図 周期補正加速度最大値 対 震度 (周期補正を行う場合の $k$ を0.5から4.0まで0.5刻みで変化させた場合) 〈再解析〉

縦軸：周期補正加速度最大値

横軸：震度

ただし、最左上図は最大加速度(未補正)対 震度との対応を示す。

図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル



第37図 震度別の周期補正加速度最大値 対 周期 ( $k=2$ ) 〈再解析〉

縦軸：周期補正 ( $k=2$ ) 加速度最大値

横軸：周期

図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル

(a)	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	!	
So : 0 :		137	281	38	1	0	0	0	457	
So : 1 :		2	83	122	4	1	0	0	212	
So : 2 :		0	10	80	39	1	0	0	130	
So : 3 :		0	0	8	43	22	3	0	76	
So : 4 :		0	0	0	5	25	19	1	50	
So : 5 :		0	0	0	0	0	15	5	20	
So : 6 :		0	0	0	0	0	0	0	0	
		139	374	248	92	49	37	6	945	
	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	! ㄥイキ ㄥン?	
So : 0 :		30	61.5	8.3	.2	0	0	0	!	
So : 1 :		.9	39.2	57.5	1.9	.5	0	0	1.63 .51	
So : 2 :		0	7.7	61.5	30	.8	0	0	2.25 .53	
So : 3 :		0	0	10.5	56.6	28.9	3.9	0	3.23 .63	
So : 4 :		0	0	0	10	50	38	2	4.32 .64	
So : 5 :		0	0	0	0	0	75	25	5.37 .3	
So : 6 :		!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!	
		0	0	0	5.1	50.4	42.4	1.8	.2	
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

(b)	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	!	
So : 0 :		270	183	4	0	0	0	0	457	
So : 1 :		18	137	56	1	0	0	0	212	
So : 2 :		2	31	83	14	0	0	0	130	
So : 3 :		0	0	15	51	8	2	0	76	
So : 4 :		0	0	0	8	26	16	0	50	
So : 5 :		0	0	0	0	0	2	16	20	
So : 6 :		0	0	0	0	0	0	0	0	
		290	351	158	74	36	34	2	945	
	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	! ㄥイキ ㄥン?	
So : 0 :		59.1	40	.9	0	0	0	0	!	
So : 1 :		8.5	64.6	26.4	.5	0	0	0	1.19 .48	
So : 2 :		1.5	23.8	63.8	10.8	0	0	0	1.86 .53	
So : 3 :		0	0	19.7	67.1	10.5	2.6	0	2.94 .61	
So : 4 :		0	0	0	16	52	32	0	4.13 .6	
So : 5 :		0	0	0	0	10	80	10	5.23 .36	
So : 6 :		!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!	
		0	0	0	4	15.2	64.1	19.7	.6	
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

(c)	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	!	
So : 0 :		230	218	9	0	0	0	0	457	
So : 1 :		11	124	76	1	0	0	0	212	
So : 2 :		1	21	86	22	0	0	0	130	
So : 3 :		0	0	14	51	9	2	0	76	
So : 4 :		0	0	0	6	24	19	1	50	
So : 5 :		0	0	0	0	1	12	7	20	
So : 6 :		0	0	0	0	0	0	0	0	
		242	363	185	80	34	33	8	945	
	<Sc>	0	1	2	3	4	5	6	! ㄥイキ ㄥン?	
So : 0 :		50.3	47.7	.2	0	0	0	0	!	
So : 1 :		5.2	58.5	35.8	.5	0	0	0	1.31 .48	
So : 2 :		.8	16.2	66.2	16.9	0	0	0	1.99 .53	
So : 3 :		0	0	18.4	67.1	11.8	2.6	0	3.06 .61	
So : 4 :		0	0	0	12	48	38	2	4.25 .6	
So : 5 :		0	0	0	0	5	60	35	5.35 .36	
So : 6 :		!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!!!	!	
		0	0	.2	10.9	60.9	27.3	.8	0	
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

第5表 観測震度に対する計測震度（仮称）の合致率

So:観測震度

Sc:計測震度（仮称）

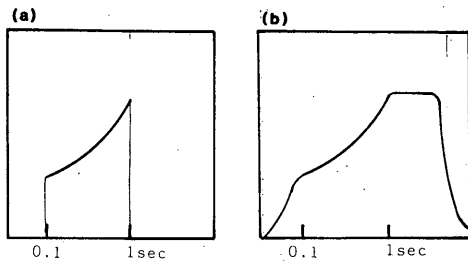
- (a) 最大加速度を河角式に代入し計測震度（仮称）を求めた場合.
- (b) <震度委>の提案式においてk=1.5として計測度<仮称>を求めた場合.
- (c) <震度委>の提案式においてk=2.0として計測震度（仮称）を求めた場合.

各(a),(b),(c)表中,

上段：観測震度に対する計測震度（仮称）の震度別度数

下段：観測震度に対する計測震度（仮称）の震度別合致率(%)

なお、下段中最下行は全データに対する合致率を観測震度と計測震度（仮称）との差ごとに示したものである。例えば、(a)表では観測と計測の震度が一致する割合は50.4%、観測より計測の震度が1大きくなる割合は4.24%。



第38図 周期補正用フィルターモード図

- (a) 対象周期範囲外を全く考慮しない場合  
 (b) 対象周期範囲外について考慮した場合

第5表に最大加速度（河角式），周期補正（ $k=1.5$ ），周期補正（ $k=2.0$ ）のそれぞれの場合について観測震度と計測震度（仮称）との合致度数及び合致率を示す。明らかに周期補正を行った方が合致率の良いことが分る。また， $k=1.5$ の方が $k=2.0$ より合致率がやや上回っているが，観測震度が1にもかかわらず計測震度（仮称）が0となる率が高くなり，必ずしも $k=1.5$ の方が良いとはいえない。なお，ある計測震度（仮称）についてみると，大部分の観測震度は $\pm 1$ の範囲となっている。

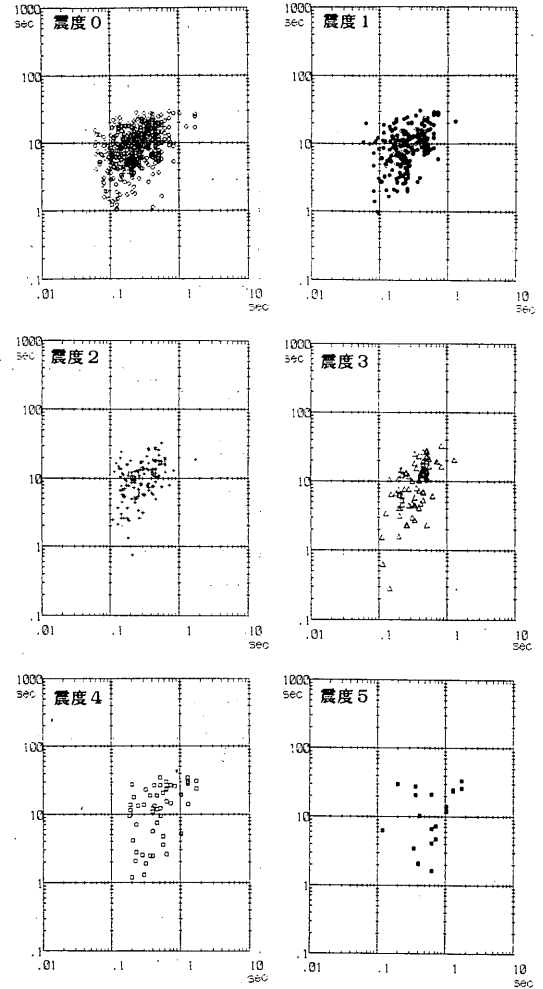
### 3) 周期の範囲について

<再解析>時までには収集したデータの卓越周期は，ほぼ0.1～1秒の間にあることから，提案式における周期の対象範囲を特に変更する理由はないが，実際に計測震度（仮称）を求める方法として第3.21)項の方法を用いるとすると，補正用のフィルターは模式的に第38図(b)に示す形となり，1秒以上の周期についても実質的には補正を行うことになる。一般のフィルターでいう通過帯域及び阻止帯域のエッジ周波数等については，今後，検討を行う予定である。

### 4) 継続時間について

一方，第2.3 f) 項で述べたとおり，最大加速度と継続時間との相関が良いことから，震度の計測化に継続時間を用いることも考えられる。しかし，次のような理由により，この方法は気象庁が行う即時的震度観測や無人観測にはやや不向きであると考えられる。

- 1) 全パワーや基準レベル継続時間の観測を行う場合，継続時間の計算をいつ終了するか(地



第39図 震度別の全パワー継続時間 対 周期 <再解析>

縦軸：全パワー継続時間  
 横軸：周期

震動終了の判定) という問題があり，最終的震度判定が遅れる可能性がある。

- 2) 地震動終了の判定が難しいとすれば，群発地震時のように短い時間間隔で地震が発生した場合には，計測震度（仮称）の算出を即時的にあるいは無人の観測点で行うことは困難となる。

ところで，一般に地震のマグニチュードが大きく震源距離が遠い場合には，地震動の継続時間は長く卓越周期も長くなり，これに対し，マグニチュードが小さく震源距離が近い場合には，継続時間は短く周期も短くなると考えられる（もちろん，このことは，地震計が設定されている地盤や構造物の影響も

あることから、必ず成立するとは限らない)。そこで、加速度波形の全パワー継続時間と卓越周期の関係を第39図に示す。

かなりのばらつきがあるが、継続時間が長い地震動は卓越周期も長いという傾向が見られる。このことから、周期補正にはある程度継続時間的要素が含まれていると考えられる。

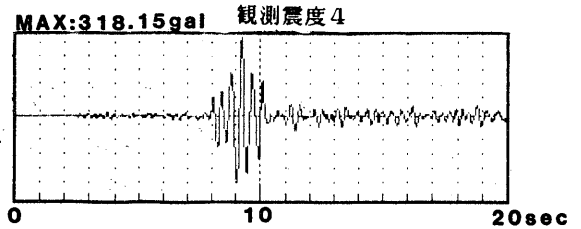
5) 高位の震度について

第2.3 a) 項で述べたとおり、物部の式に基づき震度6と7の境界が400galとされているが、これは関東大地震時の木造家屋の倒壊率などから求められたものであり、現在も適用できるかどうかは不明である。また、震度7に達する被害が生じたかどうかを、計測震度(仮称)だけで判断することは難しく、むしろ調査によるべき領域であると考えられることから、<震度委>の提案式は計測震度(仮称)5と6の境界の値までを定義したものとなっている。

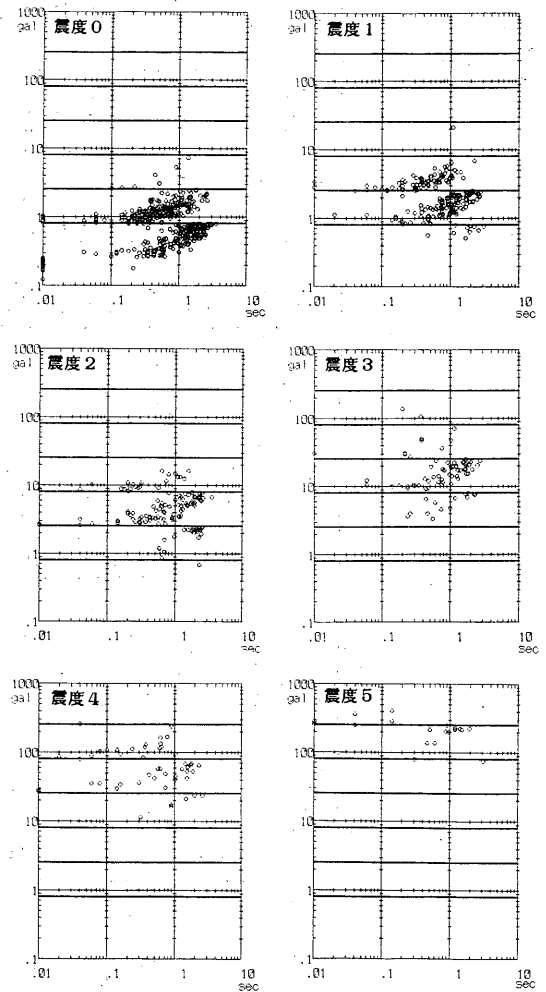
第3.2 2) 項により、仮に $k=2$ としたとしても、第37図によれば、観測震度(ただし大部分のデータは推定値)が4や5であるのに対して、計測震度(仮称)が6となる場合が生ずる。この6が実際の現象に比較して妥当かどうかについては、詳細な調査が必要であり、また議論の分れるところであろう。

例えば、第40図に地震動の周期がそれほど短くないために、周期による補正効果を得ることが出来ない波形例を示す。このときの計測震度(仮称)は、 $k=2$ とした場合に6となるが、観測震度は4と報告されている。観測震度が4あるいは5であるがほとんど被害を生じないような地震動に対しては、防災上の観点から計測震度(仮称)6を与えないような処理も考えておく必要がある。

そこで、周期補正を第34図のように行うことを利用して、ごく短い時間内(ここでは5秒間)における市川の継続時間を求め(第19図)、計測震度(仮称)が出現した区間についての計測震度(仮称)と継続時間の対応を求めてみたところ(第41図、図の見方は第20図と同様である)、高位の震度では継続時間の短いデータが分離できるように見える。このようなデータのみについて、計測震度(仮称)の切下げを行うことは可能であり、現実的であろう。市川は、震度の切下げを震度階級の1単位で行っているが、計測震度(仮称)が小数位で求められることから、一案として次式のように連続的な補正を行う方法が考えられる。



第40図 大加速度の出現継続時間が短い波形例



第41図 震度別の周期補正( $k=2$ )加速度最大値対市川継続時間(5秒間における)<再解析>

縦軸: 周期補正( $k=2$ )加速度最大値

横軸: 市川継続時間(5秒間における)

図中の横実線は河角式による震度に対応する加速度レベル

(a) <Sc>		0	1	2	3	4	5	6		
So	0	270	183	4	0	0	0	0	457	
So	1	18	137	56	1	0	0	0	212	
So	2	2	31	83	14	0	0	0	130	
So	3	0	0	15	51	10	0	0	76	
So	4	0	0	0	8	37	5	0	50	
So	5	0	0	0	0	4	16	0	20	
So	6	0	0	0	0	0	0	0	0	
		290	351	158	74	51	21	0	945	
<Sc>		0	1	2	3	4	5	6	ハイキ	ヘンサ
So	0	59.1	40	.9	0	0	0	0		
So	1	8.5	64.6	26.4	.5	0	0	0	1.19	.48
So	2	1.5	23.8	63.8	10.8	0	0	0	1.86	.53
So	3	0	0	19.7	67.1	13.2	0	0	2.92	.57
So	4	0	0	0	16	74	10	0	3.95	.52
So	5	0	0	0	0	20	80	0	5.04	.39
So	6	///	///	///	///	///	///	///		
		0	0	.4	15.6	66.4	17.4	.2	0	0
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

(b) <Sc>		0	1	2	3	4	5	6		
So	0	230	218	9	0	0	0	0	457	
So	1	11	124	76	1	0	0	0	212	
So	2	1	21	86	22	0	0	0	130	
So	3	0	0	14	53	9	0	0	76	
So	4	0	0	0	7	37	6	0	50	
So	5	0	0	0	0	3	17	0	20	
So	6	0	0	0	0	0	0	0	0	
		242	363	185	83	49	23	0	945	
<Sc>		0	1	2	3	4	5	6	ハイキ	ヘンサ
So	0	50.3	47.7	2	0	0	0	0		
So	1	5.2	58.5	35.8	.5	0	0	0	1.31	.48
So	2	.8	16.2	66.2	16.9	0	0	0	1.99	.53
So	3	0	0	18.4	69.7	11.8	0	0	3.03	.55
So	4	0	0	0	14	74	12	0	3.97	.48
So	5	0	0	0	0	15	85	0	4.9	.44
So	6	///	///	///	///	///	///	///		
		0	0	.2	11.5	65	23.2	.2	0	0
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

第6表 第5表(c)において、高位震度（計測震度（仮称） $\geq 4.0$ ）について継続時間補正を行った場合の、観測震度に対する計測震度（仮称）との合致率。

(a)  $k=1.5$  の場合。

(b)  $k=2.0$  の場合。

表の見方は第5表と同様。

$I_c < 4.0$  のとき  $I_c = I_c$

$$I_c \geq 4.0 \text{ のとき } I_c = I_c - \left( \frac{DM \cdot DT}{DTS} \right)$$

$I_c$  : 周期補正による計測震度 (仮称)

DT : 継続時間

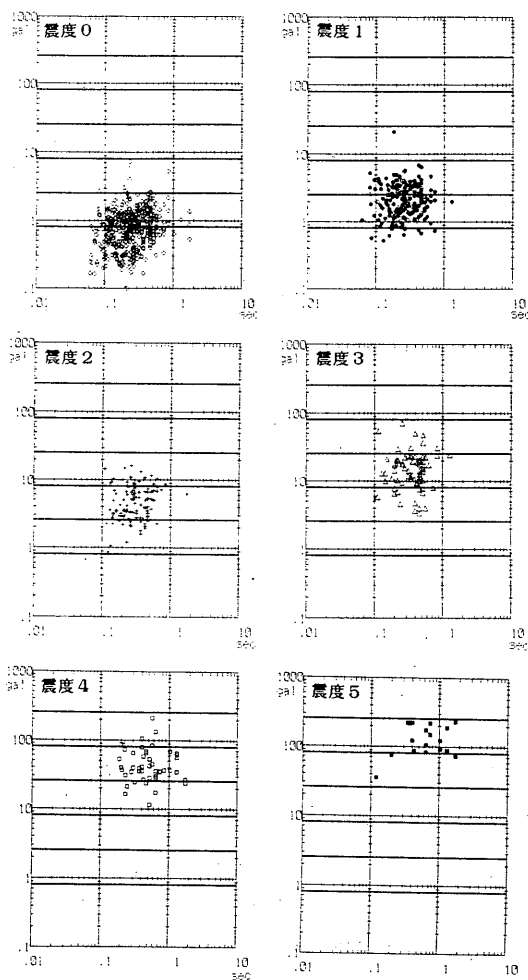
DTS : 標準継続時間

DM : 補正定数

但し,  $DT > DTS$  のとき  $DT = DTS$

その結果を第42図 (但し, 上式における  $DM = 1$ ,  $DTS = 1$  とする) に示す。

これにより, 周期補正したデータに, さらに高位



第42図 震度別の周期補正 ( $k=2$ ) 及び継続時間 ( $I \geq 4.0$ ) 補正加速度最大値 対 周期 ( $k=2$ ) <再解析>  
 縦軸: 周期補正 ( $k=2$ ) 及び継続時間 ( $I \geq 4.0$ ) 補正加速度最大値  
 横軸: 周期

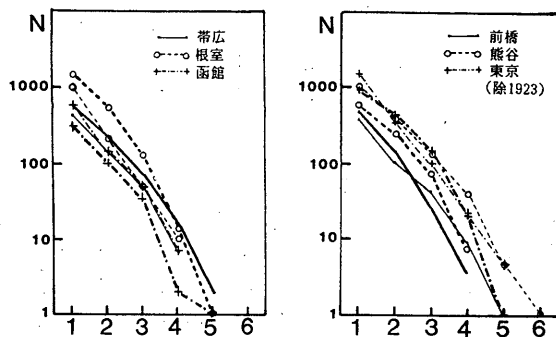
震度 ( $I \geq 4.0$ ) のみ継続時間補正を行った場合の観測震度と計測震度 (仮称) との合致率を第6表に掲げる。これらのパラメータについては, さらに検討の上, 最終的に決定する予定である。

6) 低位の震度について

第36図をみると, 地震動の強さを体感等による震度から計測震度 (仮称) に切替えた場合, 震度1~2の回数がかなり増加する可能性がある。

震度1の定義は, 「静止している人や特に地震に注意深い人だけ感ずる程度の地震 (参考事項: 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。立っでは感じない場合が多い)」, 震度2の定義は, 「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 (参考事項: 吊り下げ物の動くのがわかり, 立っでもゆれを感じるが, 動いている場合にはほとんど感じない。眠っでも目をさますことがある)」となっている。このことから, 特に震度1については, かなり良い条件下においてのみ観測されたものと考えられる。

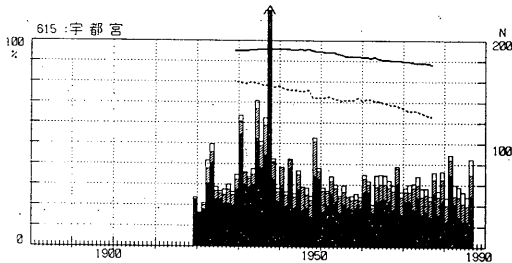
いくつかの気象官署について1911年~1940年及び1958年~1987年の各30年間の震度の累積回数を求めると, 第43図のとおりとなり, 1911年~1940年の間については直線に近かったものが, 近年は凸状になっている。すなわち震度1, 2の回数が減少しているように見える。このことから, 震度観測の条件も時代とともに変わっていることが想像される。なお, 1900年前後までは, 地震計の記録のみで体には感じ



第43図 1911~1940及び1958~1987年30年間における有感地震の震度別累計回数例<再解析>  
 太線: 1958~1987年  
 細線: 1911~1940年 (ただし, 東京については1923年を除く1910~1940年の30年間)  
 縦軸: 震度回数累計値  
 横軸: 震度

浦	河	熊	谷	岡	山
札	幌	水	戸	松	山
帯	広	岐	阜	宇	和
根	室	名	屋	高	知
函	館	甲	府	徳	島
青	森	銚	子	福	岡
秋	田	津		大	分
盛	岡	三	島	長	崎
宮	古	東	京	雲	仙
仙	台	網	代	熊	本
福	島	京	都	宮	崎
小	名	大	阪	鹿	児
長	野	神	戸	名	瀨
宇	都	和	歌		
前	橋	潮	岬		

第7表 有感回数調査対象気象官署

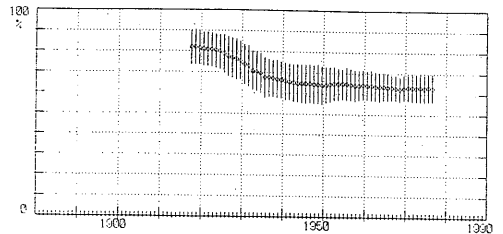
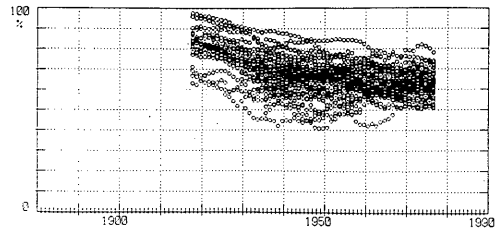


第44図 震度回数ヒストグラム例<再解析>

破線：有感回数に占める震度1の回数の割合  
(20年間の移動平均)

実線：有感回数に占める震度1及び2の回数の割合  
(20年間の移動平均)

ない地震(現在の無感)についても微震として報告された時期があり(三浦, 再掲1964), 有感, 無感の区別が十分ではない恐れもあることから, 対象データは1911年以降とした。そこで, 第7表に掲げた各気象官署について, 有感回数に占める震度1の割合を求めた。第44図に, 宇都宮の例を示す。ただし, 年間の有感回数が少ない場合には誤差が大きくなるので, 20年間の総回数を対象として移動平均を行った。さらに, 第43図のような震度別回数  $N(1):1$  (震度) を直線  $\log N(1) = a - b \cdot 1$  で近似した場合の定数  $a, b$  は, 観測点ごとに異なるという報告(宇佐美・勝又, 1973)があることから, 地域的な差や



第45図 <再解析>

上図：第44図における有感回数に占める震度1の回数割合を第7表の官署について, すべてプロットしたもの

下図：上図のデータにおける平均値及び標準偏差

地震活動度による影響をあえてマスクするために, すべての官署の結果を重ね合わせ, その平均値を求めた(第45図)。これによると, 1940年代を境として震度1の割合が減少している。この理由については別途調査を行う必要があるが, 近年は震度観測を行う場合の条件が不利になってきていると考えられる。

従って, 計測震度(仮称)により1や2の回数が増えたとすれば, むしろ地震動の強さを客観的に観測したことを反映したものであり, 現在の震度回数に合せて計測震度(仮称)1の回数を減らすための処理をする必要はないと考えられる。

ただし, 今後, 計測震度(仮称)観測が実用化され計測震度(仮称)による回数と過去の有感地震回数との比較等を行う場合には十分注意をする必要が生じるであろう。

以上は, 震度観測検討委員会による震度の計測化についての提案式に基づき, 主として気象庁が行う実用的な震度の計測化方法等について検討したものである。

地震計が設置されていない地点における地震動の推定を行うことは, 地震学, 地震工学, 地震防災等の各分野において有用であり, 今後も震度と地震動計測量との関係について新しい手法による検討が必要であろう。



## 謝 辞

本報告は、震度観測検討委員会委員の任にあたられた東京大学地震研究所宇津徳治教授(委員会会長)、東海大学開発技術研究所浅田敏教授、法政大学工学部小口雄康教授、運輸省港湾技術研究所土田肇所長、東京都立大学工学部渡部丹教授に震度の客観化に関する検討をいただいた賜物であり、また、数々の御数示をいただいた。

東京工業大学総合理工学科翠川三郎氏には震度と計測量に関する貴重な御意見をいただき、また、気象庁地震火山部山川宜男部長、同地震予知情報課窪田将課長、気象研究所地震火山研究部勝又護部長をはじめとして、気象庁及び気象研究所の関係官には震度の計測化について御助言、御意見をいただいた。

また、港湾技術研究所、建築研究所強震観測委員会、東京大学震研究所、東京工業大学総合理工学科地震工学講座、東京ガス株式会社から貴重なデータを提供いただいた。

これらのデータや参考文献等の資料について、港湾技術研究所倉田栄一氏、建築研究所北川良和氏、同山口修由氏、東京工業大学総合理工学科翠川三郎氏、東京大学地震研究所工藤一嘉氏、東京ガス株式会社岩田隆氏、東京大学生産技術研究所佐藤暢彦氏、東京都立大学工学部花里利一氏にお世話になった。

各位、各機関に対し深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 震度観測検討委員会(1988):震度観測検討委員会報告書, 21pp
- 気象庁(1975):気象百年史, 91-94
- 三浦武重(1964):気象庁震度の変遷, 測候時報, 31, 6, 134-138
- 岡田成幸(1987):震度と物理量に関する関係式の考察, 地震災害事象の通信・面接・現地調査法にもとづく組織的研究, 自然災害特別研究計画, 研究成果, 41-55
- 翠川三郎, 福岡和久(1988):気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係, 地震2, 41, 223-233
- 日本建築学会(1983):不規則な構造の地盤振動, 地震動と地盤, 164-178
- 気象庁(1988):電磁式強震計について(速報), 地震火山技術通信, 64, 1-11
- 井合進, 倉田栄一, 土田肇(1978):強震記録の数字化と補正, 港湾技研資料, 286, 56pp
- 気象研究所(1983):83型強震計の開発, 気象研究所技術報告, 71-93
- 大崎順彦(1976):地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 260pp
- 大森房吉(1898):地震動の強度と被害との関係, 震災予防調査会報告, 21, 45-50
- 河角広(1943a):震度と震度階, 地震, 15, 6-12
- 河角広(1943b):震度と震度階(続), 地震, 15, 187-192
- 石本巳四雄(1932):震度階と地震最大加速度, 地震研究所彙報, 10, 614-626
- 勝又護, 徳永規一(1971):震度Ⅳの範囲と地震の規模及び震度と加速度の対応, 験震時報, 36, 89-96
- 大崎順彦, 渡部丹, 沢田健吉(1971):地震時の最大加速度に対する人体応答および構造物の非線形応答について, 天然資源の開発に関する日米会議耐風・耐震構造専門部会第3回合同部会会議録, 56-77
- 翠川三郎(1980):気象庁震度階と地震動最大加速度・最大速度との相関について, 地震学会講演予稿集, 昭和55年度秋期, 193
- 中央気象台(1952):地震観測法, 図表6-1
- 気象庁(1967):地震観測指針(観測編), 110-111
- 物部長穂(1925):関東大地震調査報文, 震災予防調査会報告, 100(丁), 11-14
- 三輪俊輔, 米川善晴(1971a):正弦振動の評価法(振動の評価法1), 日本音響学会誌, 27, 1, 11-20
- 三輪俊輔, 米川善晴(1971b):複合正弦振動とランダム振動の評価法(振動の評価法2), 日本音響学会誌, 27, 1, 21-32
- 市川政治(1984):Digital Seismogramによる震度の推定, 研究時報, 35, 6, 221-251
- 鉢嶺猛, 窪田将, 勝又護(1987):震度と計測量の比較について, 地震学会講演予稿集, 昭和62年度秋期, 80
- 村松郁栄(1967):地震工学, 地震2, 20, 281-290
- 翠川三郎(1985):気象庁震度階と最大速度振幅との関係について, 地震学会講演予稿集, 昭和60年度秋期, 193
- Trifunac, M.D. and A.G. Brady (1975): A study on the duration of strong earthquake ground

- motion, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 139-162
- Housner, G.W. (1975): Measures of severity of earthquake ground shaking, Proc. the U.S. Conf. on Earthquake Engineering, 25-33
- 片山恒雄, 佐藤暢彦, 大保直人, 川崎勝幸 (1985): 制御用地震センサーに関する基礎的検討, 土木学会第40回年次学術講演会
- 川崎勝幸, 佐藤暢彦, 大保直人, 片山恒雄 (1986): SI値による地震動強さの評価, 土木学会第41回年次学術講演会
- 小林啓美, 長橋純男 (1973): 重層建築物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅, 日本建築学会論文報告集, 210, 11-22
- 機械電子検査検定協会 (1985): 公害計量器の検定について, 59-71
- 石本巳四雄, 大塚実 (1933): 震動の知覚的限界, 地震研究所彙報, 11, 113-121
- 宇佐美龍夫, 勝又護 (1973): 震度別有感地震回数, 験震時報, 38, 1, 15-21
- 大沢胖, 田中貞二, 坂上実, 吉沢静江 (1976): 松代群発地震地域における強震記録のデジタル・データ, 東京大学地震研究所強震計観測センター強震観測資料, 1, 157 pp
- 宇津徳治 (1969): 震度階について -1968年十勝沖地震の場合-, 北海道大学地球物理学研究報告, 21, 53-62
- 村井勇, 角田信子, 辻村芳子 (1978): 1978年伊豆大島近海地震の被害・震度と地震断層, 地震研究所彙報, 53, 1025-1068
- 後藤典俊, 鏡味洋史, 太田裕 (1982): 1982年3月21日の浦河沖地震の高密度震度調査-北海道全域の震度分布-, 1982年3月21日浦河沖地震調査報告, 135-144
- 太田裕, 鏡味洋史, 後藤典俊, 岡田成幸, 堀田淳, 大橋ひとみ (1984): 1983年日本海中部地震に伴う東北・北海道地域市町村別震度調査, 1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究, 176-179
- 野越三雄 (1984): 1983年日本海中部地震のアンケート方式による秋田県・秋田市の高密度調査, 1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究, 180-188
- 片山猛雄, 中野拓治, 蓮見隆, 山口孝一 (1969): 1968年十勝沖地震などの被災例による現行設計法の検討, 港湾技研資料, 93, 1-6
- 福田功, 柴田鋼三, 金子英久, 白石修章, 大堀晃一 (1983): 1978年宮城県沖地震の被災例などによる現行設計法の検討, 港湾技研資料, 449, 4-16
- 上部達生 (1986): 重力式係船岸の地震被災量に関する研究, 港湾技研資料, 548, 136-145
- 土田肇, 稲富隆昌, 上田寛 (1983): 1982年浦河沖地震港湾被害報告, 港湾技研資料, 472, 3-47
- 土田肇, 野田節, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 大根田秀明, 外山進一 (1985): 1983年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技研資料, 511, 68-90