

(15) 観測点地盤の影響を考慮した震度階の重回帰分析

東北工業大学 工学部 ○神山 真  
 東北工業大学 工学部 松川 忠司

1. はじめに

震度階は、その決定法にラフな側面があるが、地震時における諸物体の挙動を総合的に反映したものであり、しかも被害の程度が盛り込まれていることから、震害予測の研究を進める上で有用なパラメータと考えられる。他の地震動パラメータと同様に、震度階の大きさも、地震規模、震源距離、観測点の局所的地盤条件など様々な要因の影響を受けると考えられる。このうち、震度階に及ぼす地震規模、震源距離の影響については河角<sup>1)</sup>、宇津<sup>2)</sup>、嶋<sup>3)</sup>などをはじめ多くの研究がある。一方、震度階に及ぼす観測点地盤の影響はほとんど研究が成されておらず、定量的評価も困難な状況にある。本研究は、震度階データの統計解析により、震度階に及ぼす観測点の影響を明らかにする手法を示すとともに、震度階に対するサイト効果(site effect)について若干の考察を加えたものである。

2. 統計解析で用いた震度階データ

本解析で用いた震度階データは、1926~1986年の約60年間にわたり、仙台管区気象台の23観測点(地方気象台、測候所)で感じた地震によるものである。このうち、いずれかの測候所で震度階4以上を記録した143個の地震による2076の震度階データ<sup>4)</sup>を解析対象とした。図1に観測点と地震分布を示す。なお、図1では観測期間中に移設された観測点を一点で代表させて表示してあるため、17観測点になっている。また、震度階

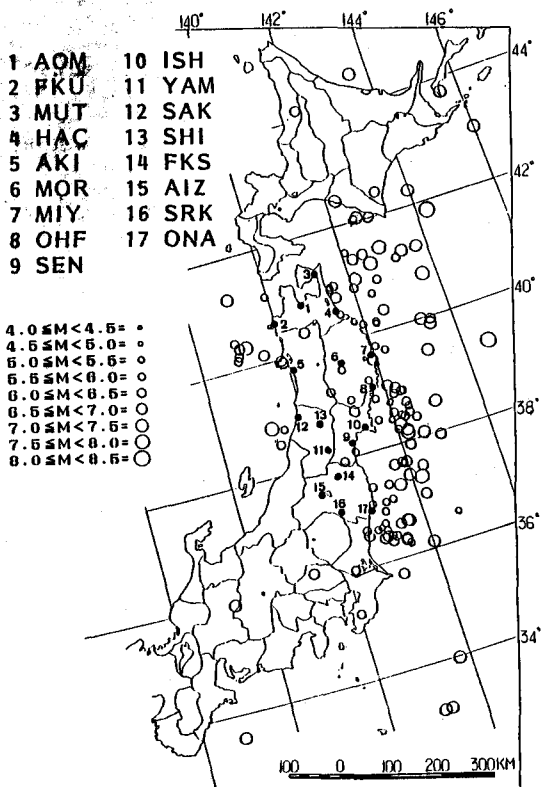


図1. 観測点と地震分布

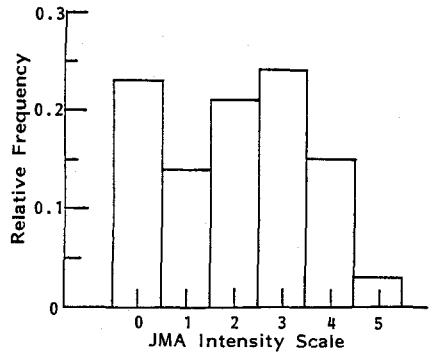


図2. 震度階ヒストグラム

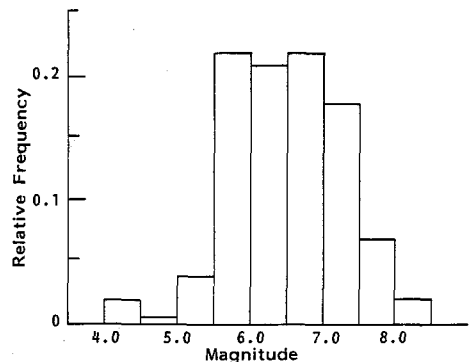


図3. マグニチュードヒストグラム

(I)、地震マグニチュード(M)、震央距離(Δ)のヒストグラムを各々図2～図4に示す。図2～図4から知れるように、ここでのデータは近距離、大規模地震の震度階データが相対的に少ない。

### 3. 観測点の影響を含まない震度階の重回帰分析

既往の研究と比較する目的で、最初に観測点の影響を考慮しない重回帰分析を実施した。重回帰分析のモデルとしては種々の形が考えられよう。特に、震度階の物理的意味を問いつながら検討すれば、それ自体大きなテーマになると考えられる。しかし、本研究は主に震度階に及ぼす観測点の局所的影響を明らかにすることを目的としているので、それらの大きさを相対的に比較する上で、地震マグニチュード、震央距離などの影響を従来の回帰モデルと大幅に変えて検討することは好ましくない。そこで本研究では、河角<sup>1)</sup>などで用いられている単純な線形式によって震度階の重回帰モデルを構成した。設定したモデルは次式である。

$$I = a \cdot M + b \cdot \log_{10} \Delta + c \cdot \Delta + d \cdot D + e \dots (1)$$

ここに、I：JMA震度階，M：JMAマグニチュード，  
 Δ：震央距離(km)，D：震源深さ(km)，  
 a，b，c，d，e：回帰係数。

式(1)のモデルを、先に述べた震度階データに適用して、最小自乗法により次式が得られた。

$$I = 1.29 M - 3.26 \log_{10} \Delta - 0.103 \Delta + 0.002 D + 1.68 \dots (2)$$

(重相関係数=0.771)

式(2)における震度階のマグニチュード(M)、震央距離(Δ)依存性を既往の研究のそれと比較したのが図5、6である。図5は、M=7.0のときの震度階(I)の震央距離(Δ)による変化を示したものであり、図6は、Δ=100kmのときの震度階IのマグニチュードMによる変化をプロットしたものである。宇津、嶋の研究では回帰モデル式が本研究と異なるので、特に近距離の震度階の値に違いが顕著であるものの、本研究のデータ分布が多い震央距離Δ=100~200km、M=6~7の範囲では各研究ともほぼ同じ震度階を与えることがわかる。本研究は東北地方に限定したデータを用いており、他研究のデータと性質が大幅に異なるにも拘らず、同じような震度階を与えることは興味深い。

### 4. 観測点の影響を考慮した震度階の重回帰分析

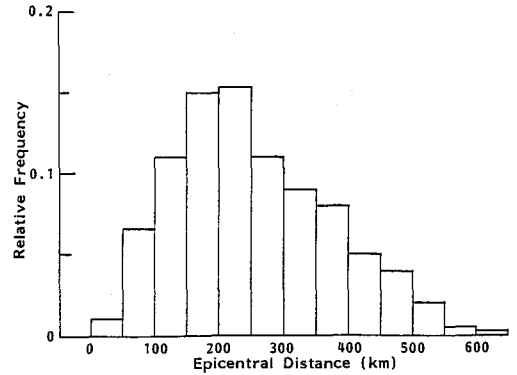


図4. 震央距離ヒストグラム

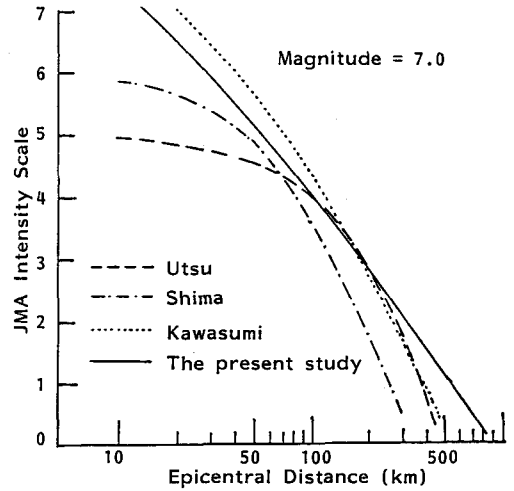


図5. 震度階の震央距離依存性

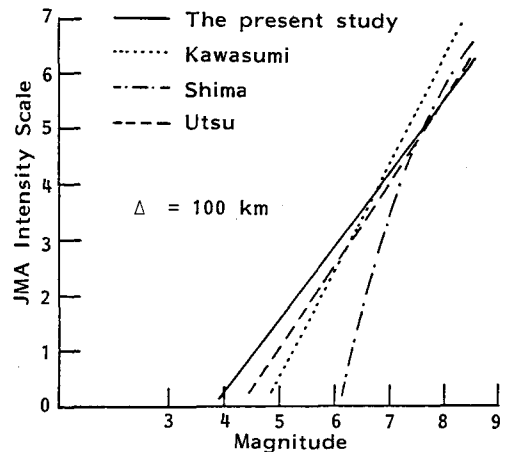


図6. 震度階のマグニチュード依存性

式(1)は震度階が、地震規模、震央距離、震源深さのみにより決まると仮定したモデルに相当する。しかしながら、他の地震動パラメータと同様に、観測点の局所的地盤構造は震度階に対しても大きな影響を及ぼすと考えられる。図7はその一例として、本研究の震度階データにおける代表的2観測点（山形、福島B）の震度階を比較したものである。図7から知れるように、福島Bは山形より「揺れやすい」傾向があり、明らかに震度階には観測点の違いによる有意な差がみられる。

著者らは、このような地震動パラメータに対する観測点の影響を統計的に定量化する重回帰モデルを提案し、それを応答スペクトル特性に適用した<sup>5)</sup>。本研究においても、この方法を応用し、震度階に及ぼす観測点の影響を統計的に明らかにすることを試みた。設定した重回帰モデルは、式(1)に観測点の違いを定量化するダミー変数を加えた次式である。

$$I = a \cdot M + b \cdot \log_{10} \Delta + c \cdot \Delta + d \cdot D + e + \sum_{j=1}^{N-1} A_j \cdot S_j \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $S_j$ : ダミー変数、 $N$ : 観測点総数、 $A_j$ :  $S_j$ に対する回帰係数。

式(3)においてダミー変数 $S_j$ は観測点ごとに付与される説明変数であり、その係数 $A_j$ が基準観測点(全観測点から任意に設定される)に対する $j$ 観測点の震度階における相対差を与える。式(3)のような重回帰モデル、特にダミー変数の取扱いと回帰係数 $A_j$ の物理的意味は著者らの文献5)を参照されたい。

式(3)の重回帰モデルを、先に述べた震度階データに適用し、最小自乗法により得た回帰係数を表1に示す。表1は基準点として、深浦(図1の2)を採用した場合の結果である。ここでは、幾つかの観測点を基準点として解析を試みたが、式(3)のモデルは元々、目的変数となる地震動パラメータの「基準観測点」に対する増幅率をモデル化するために誘導されたものである。従って、基準観測点は物理的な地震応答の観点から、他観測点の基準とするに足る堅固な岩盤が露出している観測点が望ましい。この観点から、表1では深浦を最適な基準点として採用している。このようなことから、表1の回帰係数 $A_j$ は各々の観測点の深浦に対する相対的な震度階の差を意味する。図8は、各観測点の $A_j$ の大きさを図示したものである。なお、図8では表1の各観測点のうち、観測期間中に移設された観測点は、現在観測継続中の観測点を対象にプロットしてある。

表1の係数と式(2)を比較してもわかるように、観測点の違い

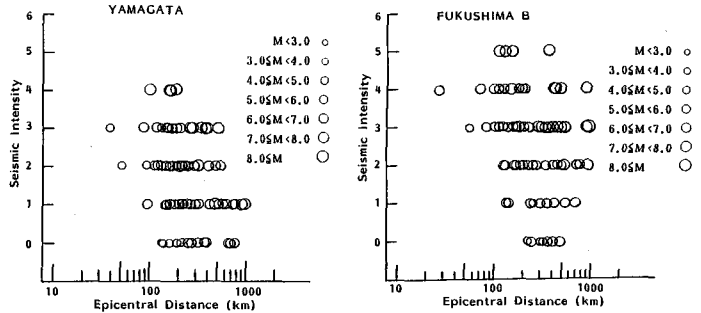


図7. 観測点の違いによる震度階の例

表1. 式(3)における回帰係数

a	1.29	b	-2.97	c	-0.0014
d	0.002	e	0.391		
$A_j$					
AOM A	1.35	SEN	0.88		
AOM B	0.56	ISH	0.50		
AOM C	0.59	YAM	0.01		
AOM D	0.87	SAK A	0.27		
FKU	0	SAK B	0.69		
MUT	0.58	SHI	-0.04		
HAC	0.99	FKS A	1.67		
AKI	0.37	FKS B	1.20		
MOR	1.27	AIZ	0.23		
MIY A	0.70	SRK	1.00		
MIY B	0.93	ONA	0.97		
OHF	0.93				
Multiple correlation coefficient					
0.821					
Standard deviation					
0.844					

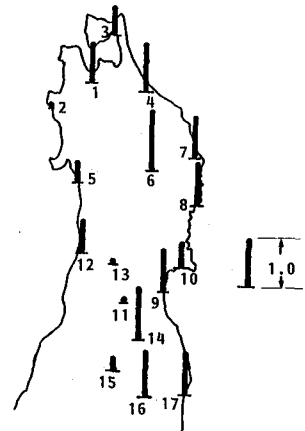


図8. 震度階に対する観測点の $A_j$  (サイト効果)

を導入したことにより、重相関係数が大きくなっており、モデルとデータとの適合度が向上している。このことから、観測点の違いを重回帰モデルに導入することの意義が理解できよう。

一方、マグニチュード(M)、震央距離( $\Delta$ )、震源深さ(D)の回帰係数について、式(2)と表1を比較すると、表1の重回帰モデルに観測点の影響が導入されているにも拘らず、大きな差がないことがわかる。このことは、マグニチュード(M)などの震源に関するパラメータが震度階(I)にたいして観測点の局所性とは独立した影響を与えることを示すとともに、式(3)の重回帰モデルが、このような独立した影響を分離させるのに有効なモデルであることを示唆するものと考えられる。

表1のA<sub>j</sub>の値、図8をみると、震度階に及ぼすサイト効果がマグニチュード(M)、震央距離( $\Delta$ )の影響に比し、無視できない大きさを持つことがわかる。ここで求められた基準観測点に対する最大震度階差は1.5程度であり、このことは他の条件が同じであっても、震度階には観測点の違いにより1程度の差が生じ得ることを意味している。Tilfordら<sup>6)</sup>は、一つの地震の震度分布調査からMM震度階を対象に、震度階に及ぼすサイト効果を考察しているが、ここで統計的に求められたサイト効果は、彼らの結果と矛盾しない。

また、表1および図8をみると、震度階は観測点ごとに大幅に変動し、観測点固有のサイト効果があることがわかる。これには、観測点直下の地盤構造、観測点一帯の地形、地質構造など様々な要因が関与していることが推定される。図9は、代表的5観測点の地盤柱状図を示したものである。S波速度などの物性値は知られていないが、図9の柱状図にみられる土質と、表1、図8のサイト効果の大きさは、一対一に対応しないようである。一方、このような直下の地盤構造との関係とは別に、図9のサイト効果の大きいMOR(6)などの観測点は複雑な地形に立地し、地盤構造が急変する境界に位置する傾向がみられる。このことから、震度階は直下の地盤構造のみならず、付近一帯の地盤の広域的、立体的構成の影響を受けることが推定される。なお、本研究と同様に震度階に及ぼすサイト効果を検討したものとして、Hashidaら<sup>7)</sup>の研究がある。彼らの方法は、非常に複雑な統計処理に基づいており、サイト効果の尺度も本研究と異なるが、観測点による変動には、同一の傾向が認められる。これを示したのが図10である。〈謝辞〉 震度階データおよび地盤データの利用に際し、仙台管区気象台観測課の皆様にお世話になりました。記して感謝します。

<参考文献> 1)Kawasumi,Bull.Earthq.Res.Inst.21,1951, 2)宇津,震研彙報,59,1984, 3)嶋,計測と制御,16,1977, 4)仙台管区気象台,東北地方の有感地震,1988, 5)Kamiyama et al.,Soils and Foundations,Vol.25, 6)Tilford et al.,Bull.Seism.Soc.Am.,Vol.75,1985, 7)Hashida et al.,J.Phys.Earth,35,1987

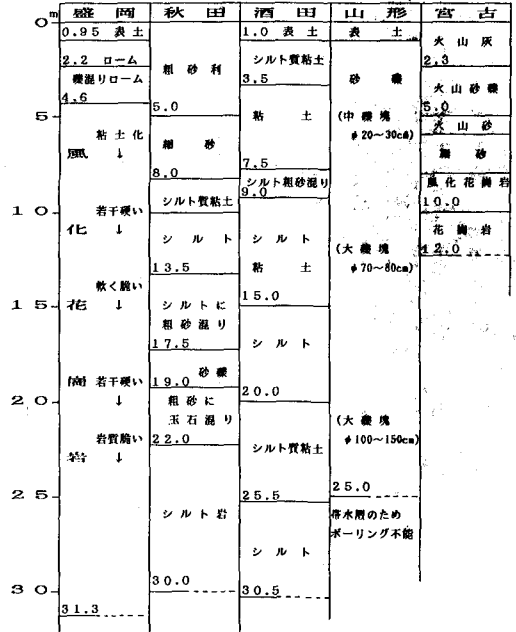


図9. 代表的観測点の地盤柱状図

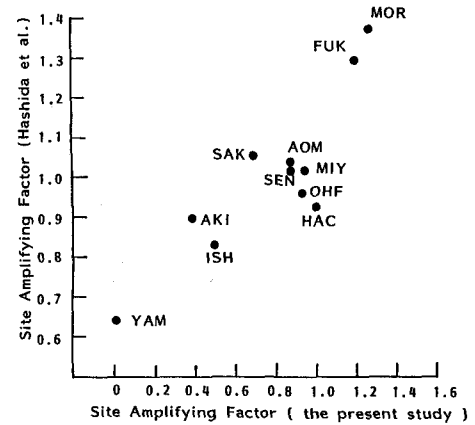


図10. サイト効果の比較