

1 はじめに 最大地動(最大加速度、最大速度、最大変位)に関する統計的研究は世界の多くの研究者によってなされてきた¹⁾。これらの研究の中で、統計解析の限界、その克服法など多くの指摘がなされてきたが、最大の難点は母集団に対するサンプルの少なさであろう。強震記録蓄積のベースを考えれば、この難点は今後も早急に解決されそうもない。したがって、これを克服するためには、統計的手法に理論的知見を導入した一種の混合法も必要と考えられる。本研究は、この目的に沿い、理論的震源モデルと統計的手法をミックスした最大地動に関する簡易な半経験的解析モデルを論じたものである。一方、最大地動は震源、伝播経路、ローカルサイトなど種々の要因の影響を受けるので、これらをバランスよく考慮したモデルが望まれる。このうち、ローカルサイトの影響は、ラフな地盤種別に基づき分析されてきたが、地震被害が「軟弱地盤」に分類される地域でもかなり大幅に変動することを考慮すれば、観測点固有の影響評価が必要であろう。本研究では、観測点個別のサイト効果を導入した解析モデルを検討する。なお、最大加速度、最大速度、最大変位は相互相関があることから、ここではこれらの最大地動パラメータを統一的に扱う。

2 半経験的モデルの誘導

地震動は大別すれば、震源、伝播経路、ローカルサイトの影響を受ける。したがって、最大地動解析モデルにもなんらかの形で、これらの要因の影響を導入する必要があるが、ここでは実務的利便を優先させ、震源の影響を地震マグニチュード M 、伝播経路の影響を震源距離 r で代表させる。ところが、この二つのパラメータは現在の強震動データでは強い正の相関を有するのが普通であり、通常の実験分析でそれらの影響を解析しても、必ずしも妥当な値を与えない。特に、震源距離 r の回帰係数に M と r の相関度合いが強く混入する²⁾。以上から、本研究では震源距離の減衰係数として理想的な分布特性を有するデータセットに基づき、注意深く求められた既往の研究による係数を用いる。気象庁は比較的無相関な M - r 分布を示す最大速度データに基づき、距離減衰係数として1.64を誘導した³⁾。ここでは、最大加速度、最大速度、最大変位の距離減衰として一律にこの値を適用する。

ここの震源距離は実務の利便を優先させて導入されたもので、震源一観測点間の距離としてはベストでないことは明らかである。そこで、震源断層モデルと結合させて、この欠点を解決することを試みる。最近の震源理論によれば、地震はbarrier、asperityなどと呼ばれるモデルに関係した小断層破壊のマルチプルショックの形で生じることが知られている。このようなマルチプルショックは震源断層面上ではincoherentlyに起きることが期待されることから、断層面上では強震動特性は位置によらないと考えられる。このように断層面上での最大地動は一定となることが期待されるが、Papageorgiou and Aki⁴⁾はSpecific barrier modelに基づき、断層面上の最大地動を理論的に検討した。それによれば、断層面上の最大加速度 a_{max} 、最大速度 V_{max} は次のように表される。

$$a_{\max} \approx \frac{\sigma_c}{\mu} V_r^2 \frac{1}{D} \quad (1)$$

$$v_{\max} \approx \frac{\sigma_c}{\mu} V_r \quad (2)$$

ここに、 σ_c 、 D はそれぞれ断層粘着ゾーンの平均粘着力、平均すべり量、 V_f は断層の破壊伝播速度、 μ はせん断弾性係数。

さらに、Chin and Ak⁵⁾はCaliforniaの地震にSpecific barrier modelを適用して σ_c 、Dの地震マグニチュード依存性を求めた。それによれば、 σ_c 、Dの対数値はほぼ同様な傾向で地震マグニチュードに比例する。 V_r 、 μ は地震マグニチュードMに無関係であることが知られているから、このことは式(1)、(2)に照らして考えれば、断層面上において最大加速度は地震マグニチュードMによらず一定、最大速度はMに比例す

ることになる。

ここで、断層長は最大加速度、最大速度などの最大地動のモデルによらずに同一の値が適用される必要がある。さらに、既往の研究を参照して断層長は地震マグニチュード M の増加関数であることを仮定する。以上の考察から設定される最大加速度、最大速度の解析モデルを模式的に示したのが図1である。なお、ここで最大変位は最大速度モデルに準ずるとしている。

図1の c_a 、 c_v 、 c_d および r_t は観測データに基づき、経験的に決定されることになるが、このうち r_t はすべての最大地動モデルに同一の値が設定される必要がある。図1より明らかに、 r_t は最大加速度モデルでより容易に決定される。したがって、最初に最大加速度モデルに対して統計解析を実施して、これにより決定される r_t を最大速度、最大変位モデルに適用する。

図1の最大加速度モデルで決定されるべき係数は c_a （一定）、 r_t （地震マグニチュード M に依存）であるが、これらは神山、松川⁶⁾に従いダミー変数の概念を導入することにより求めることができる。図2はその概念図を示したものである。いま、図2に示すように、任意の値 r_c を設定し、ダミー変数を用いると最大加速度モデルは次のように定式化される。

$$\log_{10} a_{\max} = -1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_a \quad (3)$$

$$R_0 = \begin{cases} 0 & (r \leq r_c) \\ \log_{10} r - \log_{10} r_c & (r > r_c) \end{cases} \quad (4)$$

$$R_1 = \begin{cases} 0 & (r \leq r_c) \\ 1 & (r > r_c) \end{cases} \quad (5)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0 & (r \leq r_c) \\ M & (r > r_c) \end{cases} \quad (6)$$

b_1 、 b_2 、 c_a は回帰係数である。

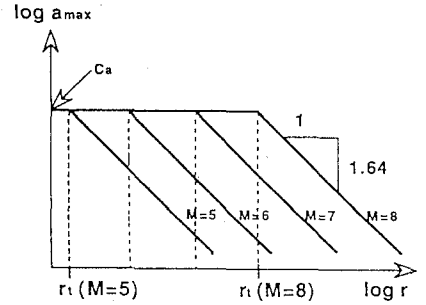
さらに、パラメータ r_t は回帰係数 b_1 、 b_2 を用いて地震マグニチュードの関数として次のように与えられる。

$$r_t = r_c \times 10^{\frac{b_1 + b_2 M}{1.64}} \quad (7)$$

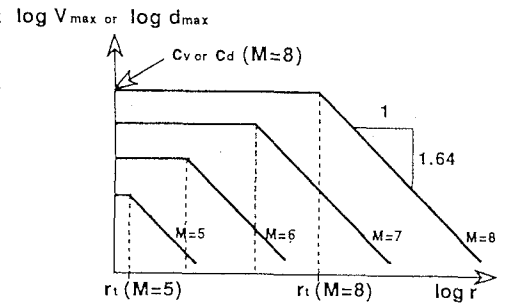
式(3)、(7)に示されるように、 r_t 、 c_a は任意に設定される r_c に依存する。ここでは、試行錯誤的に種々の r_c を与えて回帰分析を行い、その分析結果と実測データとの適合度および r_t の地震マグニチュード M 依存性における既往の知見との整合性を基に最終の r_t 、 c_a を決める。一方、図1の最大速度（最大変位）モデルの定式化は式(3)の最大加速度モデルに M 依存性を加えて、次のように与えられる。

$$\log_{10} v_{\max} = \alpha M - 1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_v \quad (8)$$

$$\log_{10} d_{\max} = \delta M - 1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_d \quad (9)$$



(a) 最大加速度



(b) 最大速度および最大変位

図1 最大地動の半経験的解析モデル

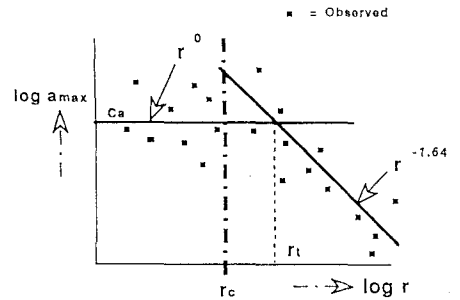


図2 c_a および r_t 決定の模式図

表1 最大加速度モデルの回帰分析結果

	r_c (km)															
	50	40	30	20	10	8.0	6.0	5.8	5.6	5.4	5.3	5.2	5.1	4.8	4.6	4.4
b_1	-1.766	-1.760	-1.555	-1.266	-0.767	-0.608	-0.403	-0.379	-0.354	-0.819	-1.164	-1.150	-1.137	-1.093	-1.063	-1.031
b_2	0.324	0.333	0.333	0.333	0.332	0.332	0.332	0.332	0.332	0.345	0.358	0.358	0.358	0.358	0.358	0.358
c_a	2.126	2.228	2.228	2.228	2.228	2.228	2.283	2.228	2.228	2.637	2.910	2.910	2.910	2.910	2.910	2.910
R	0.845	0.854	0.862	0.876	0.896	0.900	0.905	0.906	0.906	0.894	0.890	0.890	0.890	0.891	0.891	0.891
S	0.228	0.227	0.227	0.227	0.228	0.228	0.228	0.228	0.228	0.243	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247
r_t (km)	M=5	41.3	35.1	35.1	35.1	35.1	35.1	35.1	35.1	19.3	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
	M=6	65.1	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	31.3	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2
	M=7	102.6	89.4	89.4	89.4	89.3	89.3	89.3	89.3	50.8	35.0	34.9	34.9	35.0	35.0	35.0
	M=8	161.7	142.8	142.8	142.8	142.5	142.5	142.5	142.5	82.5	57.9	57.8	57.8	57.9	57.9	57.9

b_1, b_2 and c_a =regression coefficients, M= earthquake magnitude
R= multiple correlation coefficient
S= standard deviation

式 (3)、(8)、(9) はいわば震源、伝播経路のみを考慮したモデルである。前述のように、観測点の局所的地盤特性が最大地動に大きな影響を及ぼすことから、その影響を上式に加える必要がある。ここでは Kamiyama and Yanagisawa⁷⁾ のスペクトル解析と同様に観測点別にダミー変数を導入して、観測点固有の増幅率が算定されるモデルとして次のように定式化した。

$$\log_{10} a_{\max} = -1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_a + A_1 S_1 + A_2 S_2 + \dots + A_{N-1} S_{N-1} \quad (10)$$

$$\log_{10} v_{\max} = \alpha M - 1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_v + B_1 S_1 + B_2 S_2 + \dots + B_{N-1} S_{N-1} \quad (11)$$

$$\log_{10} d_{\max} = \delta M - 1.64 R_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c_d + D_1 S_1 + D_2 S_2 + \dots + D_{N-1} S_{N-1} \quad (12)$$

3 用いた最大地動データと解析結果

本研究では我が国でこれまで得られている強震記録357水平成分を観測データとして用いた。それらの詳細は文献2)に与えられている。図3はこれらのデータにおける観測点と地震の震央を示したものである。図3に示すように、ここでのデータは33観測点、88個の地震により得られたものである。これらは全てSMACタイプの強震計で得られたものであるが、計器補正とfilteringを施し、修正加速度、速度、変位記録をそれらの最大値とともに求めた²⁾。さらに、式(10)、(11)、(12)の解析モデルでは全観測点のうち一点を増幅率算定のための基準観測点に選定する必要がある。本研究では最初に最大地動の種類に拘わらず同一のサイトを基準観測点として解析して、その解析結果から増幅率を相対補正して、増幅率算定の基準となる観測点を最大地動の種類別に設定しなおした。最初の基準観測点は露出岩盤を有するOFUNATO(No.12)とした。

表1は式(10)による最大加速度モデルの回帰分析結果のうち、回帰係数 b_1 、 b_2 、 c_a および r_t についてまとめたものである。表1のように r_c の設定に応じて結果が変化するが、 $r_c < 10$ kmに対して重相関係数が大きい。また、表1では代表的な地震マグニチュードMに対して求められる r_t の値も示されているが、これらは $r_c < 5.3$ kmではほぼ一定している。前述のように、 r_t は震源断層長に等価であるから、 r_t の値は断層長の地震マグニチュードM依存性に関する知見と調和していなければならない。ここでは、円形断層を仮定して得ら

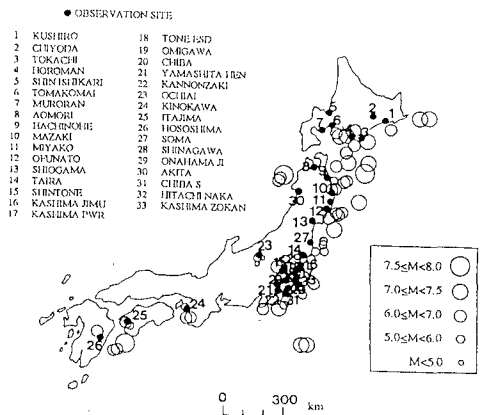


図3 観測点および地震震央の分布図

れる佐藤⁸⁾による断層寸法の経験則に $r_c \leq 5.3\text{km}$ の結果が最も調和的であることを考慮して $r_c = 5.3\text{km}$ による回帰係数 b_1 、 b_2 、 c_a を妥当な値として採用した。このように求められた b_1 、 b_2 をさらに式(11)、(12)に適用して最大速度、最大変位の回帰分析を行った²⁾。これらの一連の回帰分析では観測点のサイト効果を表す係数 A_1 、 B_1 、 D_1 がそれぞれの観測点について求められる。これらの係数による10のべき乗が各最大地動に対する観測点毎の増幅率を与えることになるが、これらは地盤の地震応答に関する考えに整合すべく相対補正された²⁾。表2は最大加速度(ACC)、最大速度(VEL)、最大変位(DIS)のそれぞれに対して求められた増幅率を観測点別に示したものである。これから、増幅率は観測点毎に大幅に変動すること、変動の様相が最大地動の種別によって異なることがわかる。表2の増幅率を最大加速度、最大速度、最大変位に対して各々 $AMP_1(a)$ 、 $AMP_1(v)$ 、 $AMP_1(d)$ と記して回帰分析の最終結果は次式のようにまとめられる。

$$a_{\max}(i, M, r) = 518.9 \times AMP_1(a) \quad (13)$$

$$\text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M})$$

$$a_{\max}(i, M, r) = 547.6 \times 10^{0.358M-1.64\log_{10}r} \times AMP_1(a) \quad (14)$$

$$\text{for } (r > 10^{0.014+0.218M})$$

$$v_{\max}(i, M, r) = 2.879 \times 10^{0.153M} \times AMP_1(v) \quad (15)$$

$$\text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M})$$

$$v_{\max}(i, M, r) = 3.036 \times 10^{0.511M-1.64\log_{10}r} \times AMP_1(v) \quad (16)$$

$$\text{for } (r > 10^{0.014+0.218M})$$

$$d_{\max}(i, M, r) = 0.189 \times 10^{0.236M} \times AMP_1(d) \quad (17)$$

$$\text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M})$$

$$d_{\max}(i, M, r) = 0.200 \times 10^{0.594M-1.64\log_{10}r} \times AMP_1(d) \quad (18)$$

$$\text{for } (r > 10^{0.014+0.218M})$$

表2 最大地動の増幅率

NO	SITE NAME	RENOVATED FACTORS			AMPLIFICATION
		ACC	VEL	DIS	
1	KUSHIRO	2.46	3.21	3.51	
2	CHIYODA	2.03	2.36	3.13	
3	TOKACHI	2.02	1.60	2.25	
4	HOROMAN	0.99	0.61	0.79	
5	SHIN ISHIKARI	3.90	6.66	7.41	
6	TOMAKOMAI	2.11	2.14	2.76	
7	MURORAN	2.91	2.44	2.59	
8	AOMORI	1.92	3.67	4.95	
9	HACHINOHE	1.25	1.61	2.38	
10	MAZAKI	1.27	1.30	4.06	
11	MIYAKO	2.44	1.29	1.46	
12	OFUNATO	1.56	1.19	1.59	
13	SHUOGAMA	2.44	3.46	2.30	
14	TAJRA	1.74	2.43	3.03	
15	SHINTONE	1.27	2.37	2.54	
16	KASHIMA JIMU	1.56	2.75	2.75	
17	KASHIMA PWR	1.39	2.35	1.95	
18	TONE ESD	1.14	2.70	5.87	
19	OMIGAWA	1.24	2.70	6.13	
20	CHIBA	1.64	2.45	4.29	
21	YAMASHITA HEN	1.19	1.73	1.78	
22	KANNONZAKI	2.11	1.80	1.86	
23	OCHIAI C	0.27	0.35	0.37	
24	KINOKAWA	0.27	0.33	0.35	
25	ITAJIMA	3.49	2.70	2.56	
26	HOSOSHIMA	1.16	1.33	1.21	
27	SOMA	2.71	1.54	1.30	
28	SHINAGAWA	1.69	2.71	2.17	
29	ONAHAMA JI	1.86	1.56	2.00	
30	AKITA	1.44	2.00	2.81	
31	CHIBA S	1.46	2.62	2.38	
32	HITACHI NAKA	2.13	1.35	0.51	
33	KASHIMA ZOKAN	1.61	1.62	1.78	
Average		1.778	2.149	2.630	
Standard deviation		0.778	1.149	1.630	

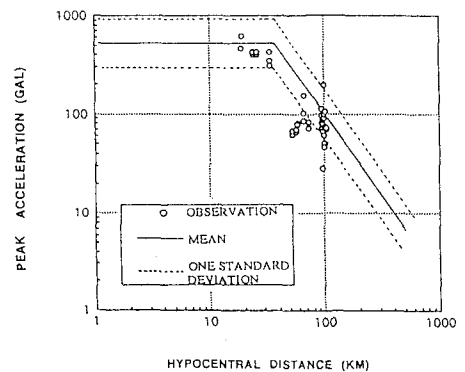


図4 予測と実測の比較例
(最大加速度、1989Loma Prieta地震)

上式の AMP_1 を除いた値がローカルサイト効果のない、いわば基盤での最大地動を与えることになる。これによれば、例えば、震源断層の上での基盤の最大加速度は地震の規模に無関係に500gal程度ということになる。このような基盤において期待される最大地動の予測結果の妥当性を判定するため、外国における代表的な地震による実測最大地動と本研究による予測値を比較した²⁾。図4はその一例としてLoma Prieta地震の最大加速度について示したものである。本モデルの予測は比較的よく実測を説明していることがわかる。

参考文献 1)Campbell, Eartq. Spectra Vol.1 2)Kamiyama, O'Rourke and Flores-Berones, NCEER Report 92-0023 3)神林他、震験時報, Vol.41 4)Papageorgiou and Aki, BSSA, Vol.78 5)Chin and Aki, BSSA Vol.81 6)Kamiyama and Matsukawa, Structural Eng. and Earthq. Eng., Vol.7, No.2 7)Kamiyama and Yanagisawa, Soils and Found., Vol.26, No.2 8)Sato, Journal Phys. Earth, Vol.27