

(3) 震源過程を考慮した地震動挙動の解析方法に関する研究
 - 墓石調査結果との比較検討 -

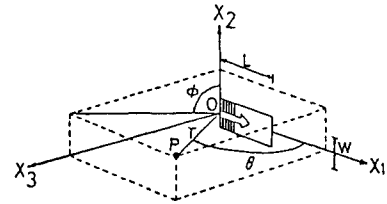
神奈川県 荻本孝久
 都立大学 国井隆弘

1. はじめに

強震地動の研究は、強震観測の面、および理論的な解析の面からも進展している。特に近年、後者に関する研究は断層震源モデルとして工学的にも応用されつつある。従来、断層震源モデルとしては決定論的モデルと確率論的モデル、および両者を組合せたハイブリッドモデルが提唱されている。前者は、断層面上での破壊過程の複雑な性質が考慮されていないため短周期成分が説明できないが、理論的な取扱が簡潔で理解しやすく、時間領域と周波数領域での整合性がつきやすい。一方、後二者は、複雑な断層運動を断層面上での破壊過程の不均一性として現象論的にとらえ、確率論的に地震動強度を与えて短周期成分をシミュレートする上で効果的であるが、断層面上での破壊強度の不均一性に対する確率統計的な取扱い方が難しい。本研究では、前者の決定論的モデルにおける震源時間関数に種々の関数を与える方法によって算定される地震動特性について、若干の検討を実施したものである。一方、筆者らはこれまでに1974年伊豆半島沖地震以降、1984年長野県西部地震に至るまでのいくつかの地震において、墓石調査による最大加速度値の分布に関する調査を実施してきた。本研究では、上記の解析方法にもとづいて各地震の震源過程を考慮した地震動強度の解析を実施し、墓石調査結果との比較を実施した。

2. 断層震源モデル

断層震源モデルは、Haskell & Savageのモデルを用い、算定式を(1)式に示す。また、震源時間関数は図-1に示す6タイプを



Fourier Amplitude spectrum

$$\ddot{U}(\omega) = R(\theta, \phi, r) \cdot \mu L W D \cdot G(\omega) \cdot \omega^2 \cdot [F(\omega, \xi, \eta) \cdot \exp\left[-\frac{\omega r}{20s}\right]] \quad (1)$$

< Strike Slip >

$$P\text{-wave} : R(\theta, \phi, r) = (e_r \cdot \sin 2\theta \cdot \sin \phi) / (4\pi \beta^3 p r)$$

$$S\text{-wave} : R(\theta, \phi, r) = (e_\theta \cdot \cos 2\theta \cdot \sin \phi + e_\phi \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi) / (4\pi \beta^3 p r)$$

< Dip Slip >

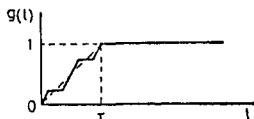
$$P\text{-wave} : R(\theta, \phi, r) = (e_r \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin 2\phi) / (4\pi \beta^3 p r)$$

$$S\text{-wave} : R(\theta, \phi, r) = (e_\theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \sin 2\phi + e_\phi \cdot \sin \theta \cdot \cos 2\phi) / (4\pi \beta^3 p r)$$

$$G(\omega) = \left[R_n^2 + \left| \frac{1}{n} \right|^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$R_n = \left[\frac{(1+4na)}{4n\omega} \left\{ \sin\left(\frac{\omega r}{4n}\right) - 3\sin\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) + \dots + (-4n-1)\sin\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) + 4n\sin(\omega r) \right\} \right. \\ \left. + \frac{(1+4na)}{\omega r} \left\{ -1 + \cos\left(\frac{\omega r}{4n}\right) - \cos\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) + \dots - \cos\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) + \cos(\omega r) \right\} \right. \\ \left. + \frac{(1-4na)}{4n\omega} \left\{ -\sin\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + 3\sin\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + (-4n-1)\sin\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{(1-4na)}{\omega r} \left\{ -\cos\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + \cos\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + \cos\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{2a}{\omega} \left\{ -\sin\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + 3\sin\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + (-4n-1)\sin\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) - 2n\sin(\omega r) \right\} \right. \\ \left. - \frac{1}{\omega} \sin(\omega r) \right]$$

$$I_n = \left[\frac{(1+4na)}{4n\omega} \left\{ \cos\left(\frac{\omega r}{4n}\right) - 3\cos\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) + \dots - (-4n-1)\cos\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) + 4n\cos(\omega r) \right\} \right. \\ \left. - \frac{(1+4na)}{\omega r} \left\{ \sin\left(\frac{\omega r}{4n}\right) - \sin\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) + \dots - \sin\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) + \sin(\omega r) \right\} \right. \\ \left. + \frac{(1-4na)}{4n\omega} \left\{ -\cos\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + 3\cos\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + (-4n-1)\cos\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) \right\} \right. \\ \left. - \frac{(1-4na)}{\omega r} \left\{ -\sin\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + \sin\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + \sin\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{2a}{\omega} \left\{ -\cos\left(\frac{\omega r}{4n}\right) + 3\cos\left(\frac{3\omega r}{4n}\right) - \dots + (-4n-1)\cos\left(\frac{(4n-1)\omega r}{4n}\right) - 2n\cos(\omega r) \right\} \right. \\ \left. - \frac{1}{\omega} \cos(\omega r) \right]$$



TYPE-X

$$g(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{t}{r} + \frac{4na}{r}t & 0 \leq t < \frac{r}{4n} \\ \frac{t}{r} - \frac{4na}{r}t + 2a & \frac{r}{4n} \leq t < \frac{3r}{4n} \\ \frac{t}{r} + \frac{4na}{r}t - 4a & \frac{3r}{4n} \leq t < \frac{5r}{4n} \\ \frac{t}{r} - \frac{4na}{r}t + 6a & \frac{5r}{4n} \leq t < \frac{7r}{4n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{t}{r} + \frac{4na}{r}t - 4na & \frac{(4n-1)r}{4n} \leq t < \tau \\ 1 & t \leq \tau \end{cases}$$

仮定した。TYPE-Xの場合の震源時間関数のFourier変換形を(2)式に示す。なお、マグニチュード(M)は7と仮定し、 (θ, ϕ, r) をパラメータとした。

3. 地震動のスペクトル特性 算定された地震動のスペクトル特性の1例をTYPE-A~TYPE-Zに対して、図-2に示す。図より震源時間関数が複雑になる程(TYPE-X, Z)、周波数特性には短周期成分が増加する傾向が認められる。また、図-3はTYPE-AとTYPE-Yの震源時間関数の場合に算定されたスペクトル特性を模式図的に示した結果であり、上述の傾向が明瞭である。

一方、TYPE-Xにおいて震源時間関数のゆらぎの数 n を変化(1~10程度まで)させた場合のスペクトルの最大値の (θ, ϕ, r) に対する変化を図-4に示した。図よりスペクトルの最大値は n の増加によって大きくなり、 θ, ϕ によっても変化することが認められる。

4. 地震動特性 震源断層モデルにより算定されたスペクトル特性を用いて、Fourier逆変換により計算された地震動のシミュレーション波形を、仮定した震源時間関数のタイプ毎に図-5に示す。なお、本研究では、位相スペクトルは決定論的モデルから理論的に与えられるものではなく、乱数で与えた。図より計算された地震波形は、震源時間関数が複雑な程短周期成分が卓越し、最大加速度

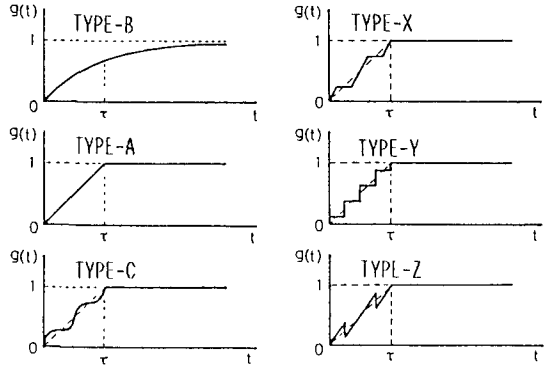


図-1 震源時間関数

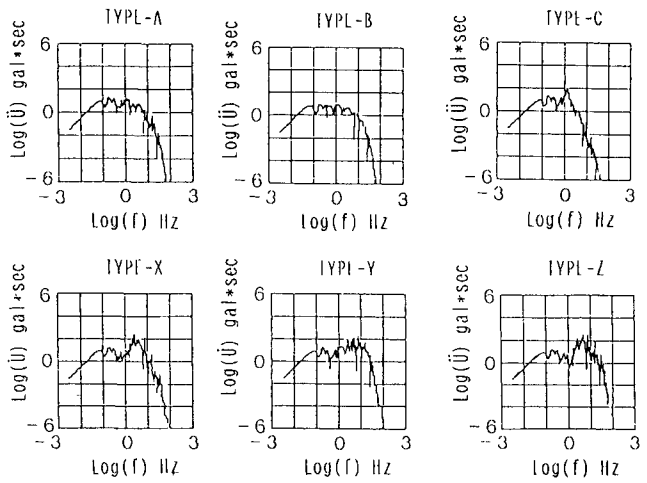


図-2 スペクトル特性 (R=50km, $\phi=10^\circ$, $\theta=20^\circ$)

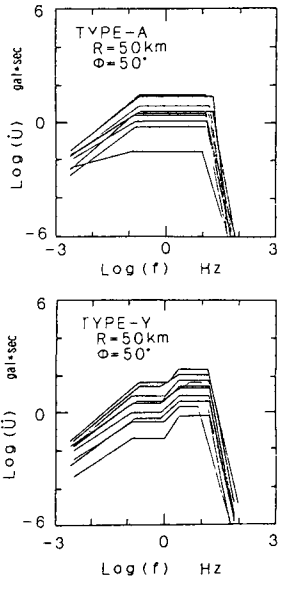


図-3 スペクトルの模式図

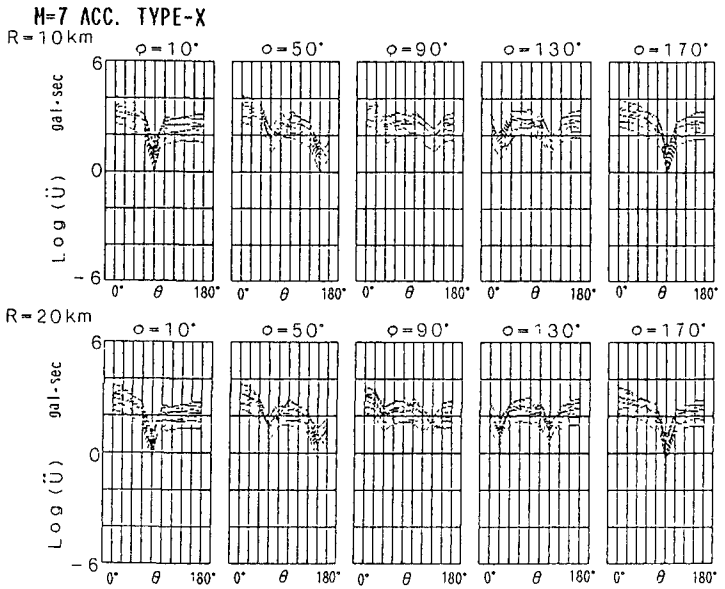


図-4 最大スペクトル値の分布

値が増加する傾向が認められる。以上の方法で算定されたスペクトル特性にもとづいて、関東地方の平均的な地下構造を仮定した場合の第1種地質程度の地盤における最大加速度値を断層の走向に対する角度 θ' と、断層の傾き δ とに対してプロットし、図-6に示す。図によれば、 θ' の変化により最大加速度値は著しく変化し、 $\theta' = 0^\circ$ のとき最も大きい値を示している。最大スペクトル値と最大加速度値の関係を図-7に示す。図より両者は、震源時間関数のタイプにより多少異なるが、ほぼ直線的に比例する。

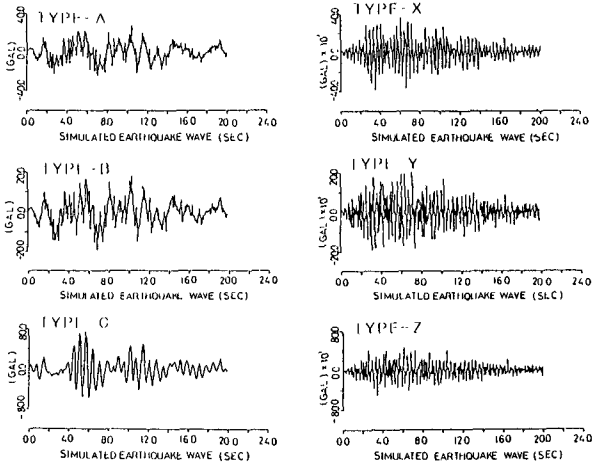


図-5 地震動のシミュレーション波形 (R=10km, $\phi=30^\circ$, $\theta=90^\circ$)

5. 墓石調査による最大加速度分布

筆者ら

は、比較的近年に発生した中～大規模な地震を対象として、以下の6地震において墓石調査による推定最大加速度の分布に関する調査を実施した。その結果はすでに公表されており、各地震における各地の震度分布に関して有益な知見を得ることができた。

- 1) 1974年 5月 9日 伊豆半島沖地震(M=6.9)
- 2) 1978年 1月14日 伊豆大島近海地震(M=7.0)
- 3) 1978年 6月12日 宮城県沖地震(M=7.4)
- 4) 1980年 6月29日 伊豆東方沖地震(M=6.7)
- 5) 1983年 5月26日 日本海中部地震(M=7.7)
- 6) 1984年 9月14日 長野県西部地震(M=6.9)

墓石調査に基づく最大加速度値の評価に関しては、これまで多くの問題点が指摘されてきたが、筆者らは、墓石調査に関しては上記の地震において共通した方針に基づいて調査を実施し、これまでの結果から、周波数数Hz程度までの地震動の水平成分の有効な最大加速度値を十分評価できるものと考えている。

6. 断層パラメータ

上記、各地震の断層パラメータ

は、余震分布、ならびに長周期地震動等によりいくつか推定されている。本研究では、その結果に基づいて断層パラメータを設定した。また、震源、および墓石調査地点近傍の地下構造は、弾性波探査等の結果から推定されているものを採用した。また、特に調査地点の表層地盤の性質は重要な要因ではあるが、個々の地点では調査資料が得られてないため想定することが不可能であり、宮城県沖地震と日本海中部地震の2地震を除く4地震においては本研究では考慮せず、先の2地震においては地質図中の第4紀の平野部において2倍の増幅率を設定した。設定した断層パラメータ、および地下構造モデルを表-1に示す。

7. 最大加速度値の算定結果

以上の震源過程を考慮した地震動強度の算定方法に基づいて、各地震の断層パラメータ、地下

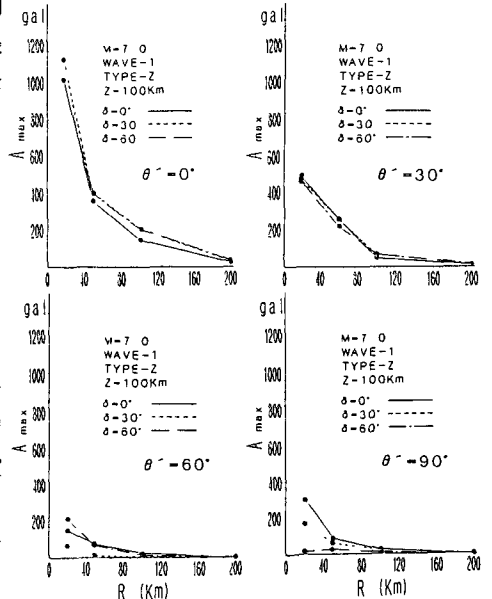


図-6 (r, θ') に対する最大加速度値の分布

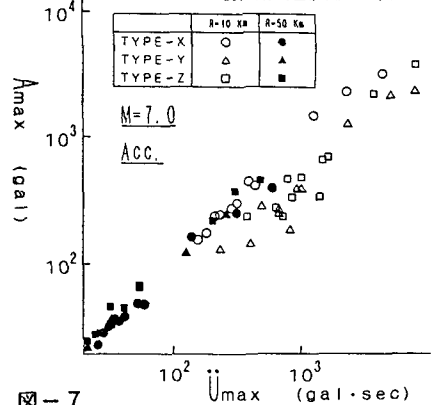


図-7 最大スペクトル値と最大加速度値の関係

構造モデルを用いて算定した最大加速度値と、墓石調査結果から推定された最大加速度値との関係を図-8に示す。図で縦軸の計算結果による最大加速度値は、横軸の墓石調査から評価される最大加速度値の区間の幅毎に平均値で表示した。結果より宮城県沖地震を除く他の5地震においては、ほぼ良好な相関関係が得られた。今後、さらに表層地盤の影響あるいは、計算される地震動の周波数特性に対する検討も合わせて検討しておく必要

表-1 設定した断層パラメータと地下構造モデル

1974年 伊豆半島沖地震					1980年 伊豆東方沖地震						
	H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		
L=20.0 km	1	1.0	1.45	2.2	100	L=20.0 km	1	1.0	1.45	2.2	100
W=10.0 km	2	1.0	2.30	2.5	100	W=10.0 km	2	1.0	2.30	2.5	100
V=2.00 m	3	2.0	2.50	2.5	150	V=2.66 m	3	2.0	2.50	2.5	150
$\tau=1.90$ m	4	-	3.70	2.8	250	$\tau=1.13$ m	4	-	3.70	2.8	250
D=110.0 cm	Strike-slip Type					D=88.0 cm	Strike-slip Type				
$\delta=90.0^\circ$	Uni-lattaral					$\delta=90.0^\circ$	Uni-lattaral				

1978年 伊豆大島近海地震					1983年 日本海中部地震						
	H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		
L=17.0 km	1	1.0	1.45	2.2	100	L=120.0 km	1	0.5	0.70	2.0	50
W=10.0 km	2	1.0	2.30	2.5	100	W=40.0 km	2	1.5	1.40	2.2	100
V=2.80 m	3	2.0	2.50	2.5	150	V=2.00 m	3	-	3.80	2.5	250
$\tau=2.00$ m	4	-	3.70	2.8	250	$\tau=5.50$ m					
D=83.0 cm	Strike-slip Type					D=350.0 cm	DIP-slip Type				
$\delta=90.0^\circ$	Uni-lattaral					$\delta=65.0^\circ$	Uni-lattaral				

1978年 宮城県沖地震					1984年 長野県中部地震						
	H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		H(km)	Vs(km/s)	ρ (t/m)	Q		
L=30.0 km	1	1.0	1.40	2.2	100	L=13.0 km	1	-	3.00	2.5	250
W=80.0 km	2	7.0	3.40	2.5	250	W=5.0 km					
V=3.10 m	3	20.0	3.80	2.5	250	V=2.16 m					
$\tau=3.03$ m	4	-	4.30	2.8	300	$\tau=1.20$ m					
D=170.0 cm	Dip-slip Type					D=110.0 cm	Strike-slip Type				
$\delta=27.0^\circ$	Bi-lattaral					$\delta=80.0^\circ$	Bi-lattaral				

があるが、震源過程を考慮した計算方法に対する概略的な傾向を理解することができるものと考えられる。

8. あとがき

本研究では解析的な取扱、および計算過程が比較的簡単な断層震源モデルを用いて地震動特性に関して若干の検討を実施した。その結果従来より指摘されている短周期成分に関して多少の改良が認められ、計算過程のパラメータの設定を考慮すれば、より良い結果が期待できるものと思われる。一方、墓石調査が実施された中～大規模地震に対してその最大加速度値の分布と、上記計算方法を用いて算定した最大加速度値との比較を実施した結果、両者は比較的良好的対応関係が得られた。本研究で用いた計算方法は実際の現象を単純化して用いた比較的簡便な方法であり複雑な断層運動を考えれば、その平均的な現象を扱っていることになり、今後、他の断層震源モデルの計算方法や、実際の強震観測記録との対応についての検討を必要とする。

<参考文献>

佐藤良輔：『断層運動における短周期挙動と入力地震波の推定』；自然災害特別研究研究成果

(昭和59年10月)

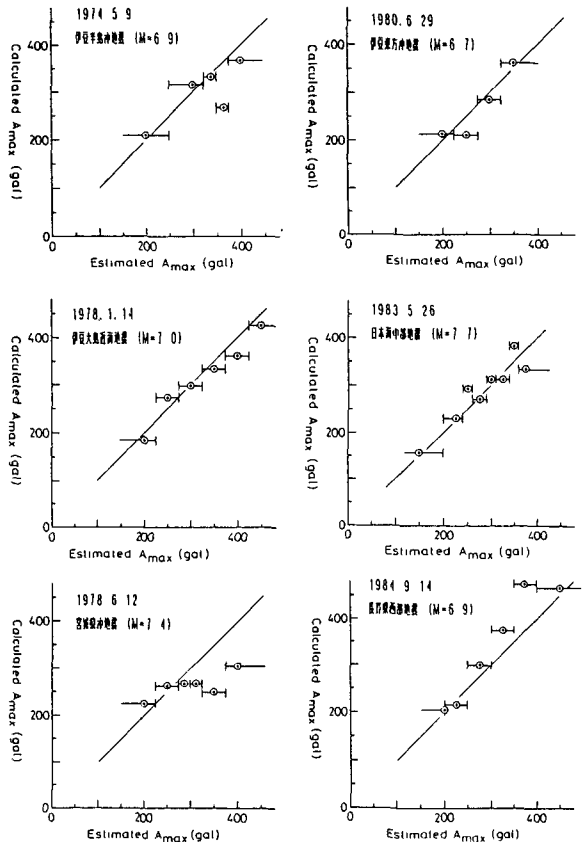


図-8 計算結果と墓石調査結果による最大加速度値の比較