

(18) 断層モデルによる入力地震動特性の評価について

— 巨視的モデルと不均一モデルの比較 —

神奈川大学 正会員 荻本孝久
 構造計画研究所 正会員 栗山利男
 東京都立大学 正会員 国井隆弘

1. はじめに

近年、断層震源モデルを用いて、地震動特性を工学的に評価しようとする研究がいくつか成されている。(例えば、文献1)~4) 断層モデルは大きく分けて、従来より用いられている断層面全体の平均的な運動に着目した巨視的モデルと、最近注目されている断層面上の不均一性に着目した微視的モデルとに分けることができる。本研究では、前者のモデルとしてHaskell モデル⁵⁾⁶⁾を、後者としては、安芸ら⁷⁾によって提唱されたSpecific Barrierモデル(以下、Barrier モデル)を用いて、両者の比較検討を行い、1983年日本海中部地震、1978年宮城県沖地震に適用し断層モデルによる入力地震動特性の評価について若干の検討を実施した。

2. 断層震源モデル

[2-1] Haskell モデル: 図1にHaskell モデルの概念図を示す。S波の加速度スペクトルは、J. G. Savageによれば、次式で求まる。

$$\ddot{U}(\omega) = \mu LWD \cdot R(\theta, \phi, r) \cdot \{G(\omega) \cdot \omega^2\} \times (F(\omega, \xi) \cdot \omega) \dots \dots \dots (1)$$

R(θ, φ, r): 震源と観測点の位置関係で決まる関数
 G(ω): 震源のずれの時間関数のフーリエ変換
 F(ω, ξ): 破壊速度・破壊形式と観測点の位置によって決まる関数

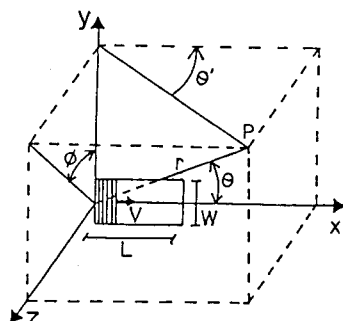


図1 Haskell モデル

また、震源パラメータは表1に示すような主にマグニチュード(M)を基準とした経験式により求められる。計算結果の一例として、M=7, R=50kmとしたときの震源時間関数の相違

(図-2)に
 によるスペクトル特性を図-3に示し、θ' (図-1)の変化に対応するスペクトル

表1 断層パラメータ

断層の長さ	L=10**(0.5*M-1.8)	(km)
断層の幅	W=L/2	(km)
S波 速度	β=3.0	(km/sec)
破壊 速度	V=0.72*β=2.16	(km/sec)
立ち上がり時間	τ=10**(0.5M-2.4)/(2*π)	(sec)
継続時間	Td=L/2.16	(sec)
最終スレ量	D=10**(0.5M-1.28)*0.75	(cm)
Q値	Q=100*(β-0.49)	
地震モーメント	M0=μ*L*W*D	(dyn*cm)

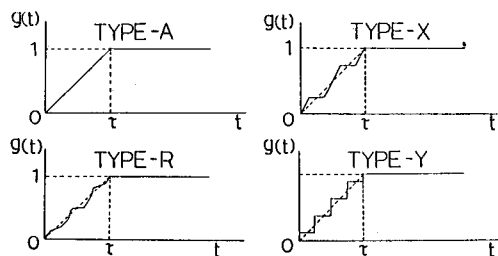


図2 震源時間関数のタイプ

振幅の最大値の変化を図-4に示した。図より、震源時間関数の相違により計算されたスペクトル特性は大きく変異なり時間関数のゆらぎに起因してTYPE-Xの場合が最もスペクトル振幅が大きくなる傾

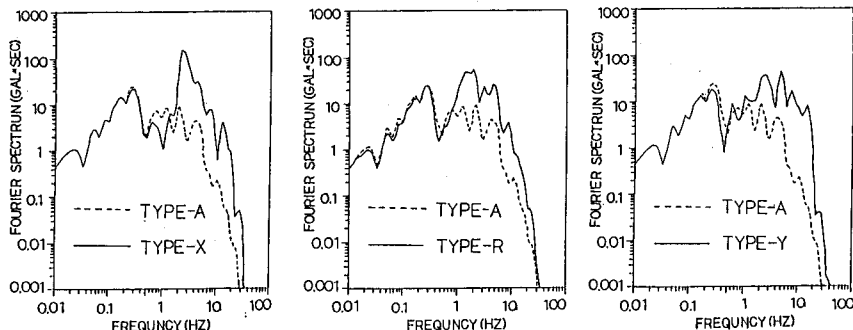


図3 計算例 (M=7, R=50 km, θ'=0°; β=3km/s)

向が認められる。

[2-2] Barrier モデル： Barrier モデルは、図5に示すように矩形面に円形クラックの分布を考えたもので、観測される地震動は、個々のクラックより放出された地震動の集積の結果と考える。Barrier モデルについては、加速度フーリエスペクトルを求める式は誘導されておらず、パワースペクトルの期待値のみを求めるにとどまっている。本研究では、以下に示すような方法により加速度フーリエスペクトルを求めた。図6に示すような一つの円形クラックを考えれば、佐藤・平沢⁸⁾により、要素波の加速度波形は、下式で求まる。加速度スペクトルは、下式をフーリエ変換することにより求まる。そこで、個々のクラックから生成されるスペクトルを計算し、それらを時間領域で重ね合せ、さらにフーリエ変換することにより、加速度スペクトルを求めた。また、複雑さを避けるため、破壊は一定の時間間隔で順次起こるものとし、個々のクラックの破壊速度、ズレ量は、同一と仮定した。計算結果の一例として、Haskell モデルの場合と同様に $M=7$ 、 $R=50$ km と仮定したときの、要素数 ($N=8, 18$) および破壊伝播速度 ($v=2.88, 3.2, 3.6$ km/s; $\theta=0^\circ$)

$$\frac{d^2 \Omega}{dt^2} = 2Kv\rho_0^2 \cdot \frac{\pi}{(1-k^2)^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{v}{\rho_0}\right)^2 \quad 0 < x < 1-k$$

$$\frac{d^2 \Omega}{dt^2} = 2Kv\rho_0^2 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \frac{-2}{k(1+k)^2} \cdot \left(\frac{v}{\rho_0}\right)^2 \quad 1-k < x < 1+k$$

$$k = \left(\frac{24}{7\pi}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{\mu}\right) \quad k = \left(\frac{v}{c}\right) \sin\theta \quad x = \frac{v}{\rho_0} \left(t - \frac{r_0}{c}\right)$$

180°) の相違によるスペクトルの計算結果を図-7と図-8に示した。図より、要素数の変化はスペクトルの形状を変化させ、要素数が増加すると相対的に短周期成分が増加する。一方、破壊伝播速度 (v) の変化も同様な効果を示し、 v が増加すれば短周期成分が著しく増加する傾向を示している。また、断面との相対的な位置関係 (θ') によってもスペクトル特性は大きく変化

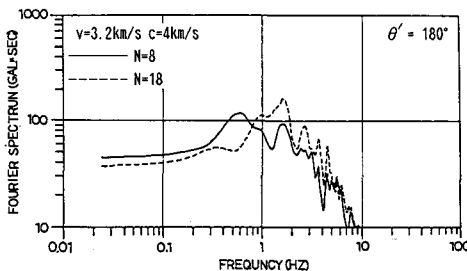


図7 要素数の相違による計算例 ($M=7, R=50$ km)

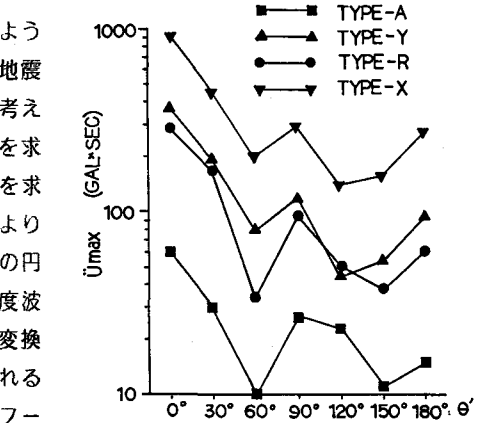


図4 スペクトル振幅の最大値の変化

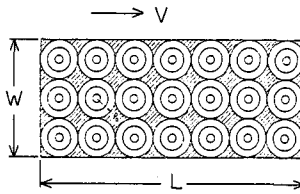


図5 Barrier モデル

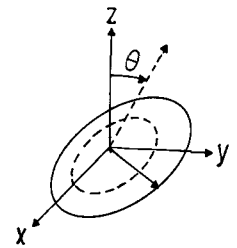


図6 円形クラックの座標系

- Ω : 要素波の変位波形
- θ : Z軸と観測点のなす角
- r_0 : 観測点までの距離
- v : 破壊伝播速度
- ρ_0 : 円形クラックの半径
- c : 媒質のS波速度
- $\Delta\sigma$: 局所応力降下量
- μ : 媒質の剛性率

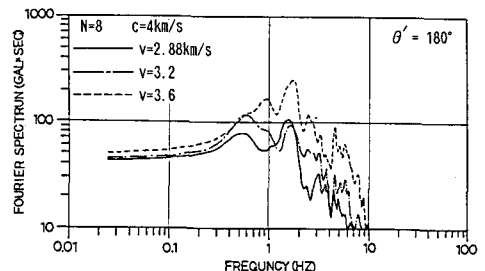
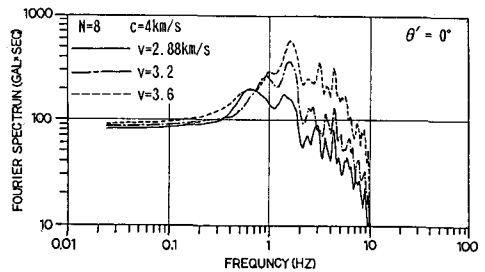


図8 破壊伝播速度と θ' の相違による計算例

する。

3. スペクトル特性の比較

ここでは、以上の算定方法にもとづいてHaskellモデルとBarrierモデルの両者を用いて、ほぼ同一の断層パラメータを設定した場合の両者のスペクトル特性の差異について検討を行う。Haskellモデルは、震源時間関数をTYPE-Yとし、単純なStrike Slip型を仮定した。一方、Barrierモデルは、円形クラックの要素数を18個とし、比較を簡単にするために局所応力降下量はすべての要素に対して $\Delta\sigma = 100 \text{ bar}$ として統一し、グローバルな破壊の伝播はHaskellモデルの場合と同様にStrike Slip型に近い様式を設定した。

両者のモデルでは基本的に計算過程およびパラメータの設定方法に違いがあるため、必ずしも厳密な意味での比較は不可能であるが、計算されたスペクトル特性の形状は明瞭に異なり（例えば、図-3、図-7の計算例）、特に0.2Hz程度以下の低周波数領域での差異が大きいことが認められる。また、スペクトルの最大振幅に着目して、 θ' の変化に対応してスペクトル振幅の最大値をプロットした結果を図-9に示した。図より、最大値にのみ着目した場合には、両者は比較的よく対応し、Haskellモデルによる計算結果に変動が大きく見られ、Barrierモデルによる結果は θ' による変動が少なく前者の平均値的な値を示す傾向が認められる。

4. 日本海中部地震・宮城県沖地震

についての検討

本節では、実際に過去に発生した比較的大規模の大きな2つの地震に両モデルを適用して両モデルの理論計算によるスペクトル特性と実地震記録（秋田<1983>、塩釜・開北橋<1978>）のスペクトル特性の比較を試みた。

図10、表2に1983年日本海中部地震（ $M = 7.7$ ）、1978年宮城県沖地震（ $M = 7.4$ ）の地震概要、設定した断層および震央位置を示す。計算に用いた地下構造は、既往の地下構造探査によって推定された構造に基づいて、表3に示すような地下構造のモデルを用いた。また、Haskellモデルにおいて、震源時間関数はゆらぎを与えた関数（TYPE-Y）を用いた。なお、設定した震源パラメータは公表されている既往の値に基づいて試行錯誤的に決定し表4に示した。計算結果を図11に示す。図より、Barrierモデルによる理論スペクトルの方が、観測記録のスペクトルと

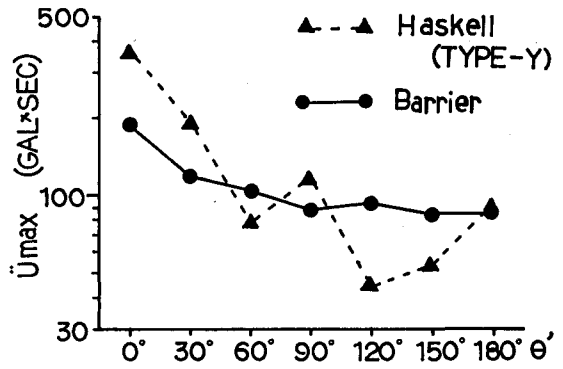


図9 スペクトル振幅の最大値の比較

表2 地震概要と断層モデル

	日本海中部地震	宮城県沖地震
発震時	1983.5.26 12:00	1978.6.12 17:14
震源	東経 139° 05'	東経 142° 10'
	北緯 40° 21'	北緯 38° 09'
深さ	14km	40km
マグニチュード	7.7	7.4
断層の長さ・幅	40×120km	80×30km
断層の傾き	30° 東	27° 西
平均ずれ量	350cm	170cm

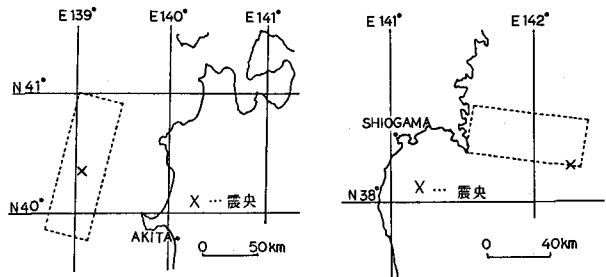


図10 断層および震央の位置図

表3 設定した地下構造

日本海中部地震		宮城県沖地震（開北橋）	
H (m)	Vs (m/sec)	H (m)	Vs (m/sec)
500.0	700.0	1000.0	1400.0
1500.0	1400.0	7000.0	3400.0
5000.0	3800.0	20000.0	3800.0
		50000.0	4300.0

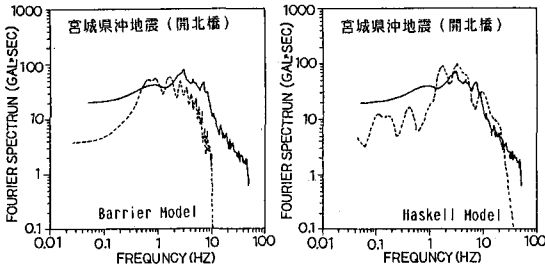


表4 設定した断層ハノメータ

	日本海中部地震	宮城県沖地震
破壊速度	2.74km/sec	3.10km/sec
立ち上がり時間	5.50sec	3.03sec
クラックの数	12	24
クラックの半径	10.0km	5.0km
破壊速度	3.4km/sec	3.24km/sec

(上段: Haskell-Model 下段: Barrier-Model)

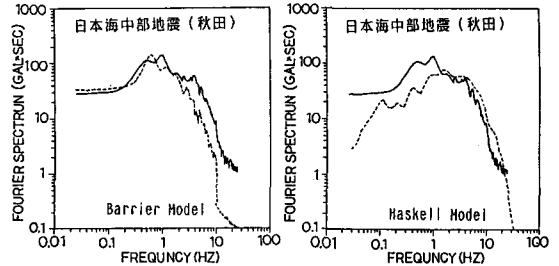
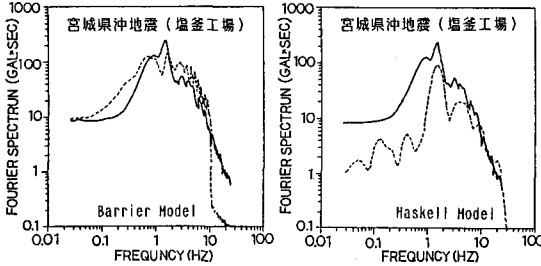


図1.1 計算結果の比較 (Barrier モデルとHaskell モデルの比較) ----- 観測値 ----- 計算値

良く一致している。しかし、Haskell モデルによる理論スペクトルにおいてもBarrier モデルに比べて、その計算過程の単純さを考えれば第1次近似的な精度においては、比較的良く観測結果を説明しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、巨視的モデルとしてのHaskell モデルと不均一モデルとしてのBarrier モデルについて、両モデルに基づいて算定される理論スペクトルのスペクトル特性の差異について若干の検討を実施した。その結果、両モデルでは計算過程および断層パラメータの設定方法に基本的な相違が存在するために厳密な意味では比較は困難であるが、両者のスペクトル特性には明瞭な差異が認められた。また、両モデルを1983年日本海中部地震(M=7.7)、1978年宮城県沖地震(M=7.4)に適用し、観測された強震記録によるスペクトルとの比較を行った。その結果、全体的にはBarrier モデルの方が観測値をより良く評価することができたが、Barrier モデルについては、断層面上の不均一性に対する取り扱いに極めて複雑な問題を残しており、工学的な入力地震動特性の予測ということを想定した場合には、前述したように第1次近似的な精度においては、適切なパラメータに基づくHaskell モデルによっても、比較的良好な評価ができるものと考えられる。今後とも、より多くの強震記録についての検討を実施し、研究成果の蓄積を計る必要があると考えている。

<参考文献>

- 1)赤尾:断層近傍の短周期地震動推定のためのEGF法;土木学会大会,1986
- 2)永江・沢田・多田:断層パラメータのランダム性が要素波の強度特性に与える影響;土木学会大会,1986
- 3)神山:震源断層における断層パッチ寸法の相似則;土木学会大会,1986
- 4)池浦・武村:短周期領域まで適用可能な判経験的地震動評価法;土木学会大会,1986
- 5)N.A.Haskell: Total Energy and Energy Spectral Density of Elastic Fault; B.S.S.A Vol.54,1964
- 6)J.G.Savage: Relation of Corner Frequency to Fault Dimensions; J. Geophys. Res. Vol.77,1972
- 7)S.Papageorgiou & K.Aki: A Specific Barrier Model for the Quantitative Description of Inhomogeneous Faulting and the Prediction of Strong Ground Motion (Part I); B.S.S.A Vol.73,1983
- 8)T.Sato & T.Hirasawa: Body Wave Spectra from Propagating Shear Cracks; J. Phys. Earth,21,1973