HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スラブ内地震の震源特性
Author(s)	笹谷, 努; 森川, 信之; 前田, 宜浩
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 69, 123-134
Issue Date	2006-03-15
DOI	10.14943/gbhu.69.123
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21505
Type	bulletin (article)
File Information	10.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 69, March 2006, pp. 123－134

スラブ内地震の震源特性

笹谷　努
北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
森川　信之
独立行政法人 防災科学技術研究所
前田　宜浩
北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

(2005 年 12 月 27 日受理)

Source Characteristics of Intraslab Earthquakes

Tsutomu SASATANI
Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
Nobuyuki MORIKAWA
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
and
Takahiro MAEDA
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received December 27, 2005)

We examine source characteristics of intraslab earthquakes based on the eleven source models estimated by the empirical Green's function method. This method provides strong motion generation areas that reproduce near-source ground motions in a broadband period range (0.1～10sec). The strong motion generation areas roughly coincide with the asperity areas where stresses are largely released. Fault parameters of the asperity source model are outer fault parameters (entire source area and total seismic moment) and inner fault parameters (area of asperities, stress drop on each asperity and short-period level of the S-wave acceleration source spectrum). We find self-similar scaling of total seismic moment to the asperity areas. The number of asperities is one for Mw6 events, two to three for Mw7 events and five for Mw8 events. We also find self-similar scaling of total seismic moment to the short-period level of the S-wave acceleration source spectrum that is directly related to the asperity parameters (area of asperities and stress drop on each asperity). Further we find that the aftershock area overestimates the entire source area. This means that estimation of the entire source area is somewhat difficult for intraslab earthquakes. Based on our

results we propose a procedure for characterizing the source model for future intraslab earthquakes. Step 1: setting the total seismic moment (*Mo*), Step 2: setting the asperity areas (*Sa*) from the empirical relationship of *Sa*-*Mo*, Step 3: setting the short-period level (*A*) from the empirical relationship of *A*-*Mo*, Step 4: setting the number of asperities, Step 5: setting the stress drop ($\Delta\sigma$) on each asperity from the theoretical relation of *A*, *Sa* and $\Delta\sigma$, Step 6: setting the entire source area (*S*) from the theoretical relation of *Mo*, *Sa*, $\Delta\sigma$ and *S*. The theoretical relations are derived from the multiple-asperity model.

I．は　じ　め　に

1993年釧路沖地震（Jan. 15; Mw 7.6）と1994年北海道東方沖地震（Oct. 04; Mw 8.2）は，沈み込んだプレートの中で発生したスラブ内大地震である．そして，これらの地震により震央近傍でかなりの被害が生じたことから，サブダクションゾーンにおける被害地震として，このタイプの地震を新たに考慮すべきことが認識されるようになった．特に，沈み込んだプレートと都市との位置関係によっては，スラブ内地震は，いわゆる都市直下地震にもなりうる．その後，芸予地震（2001/03/24），宮城県沖地震（2003/05/26）もスラブ内地震として被害を起こした．

1993年釧路沖地震と1994年北海道東方沖地震による最大加速度（PGA）は，当時の既存の距離減衰式から予測される値よりもはるかに大きな値を示した（例えば，Morikawa and Sasatani, 2003）．この特徴は，スラブ内地震の震源特性の特異性を表している．これらの地震の発生後，スラブ内地震を考慮した新たな最大加速度の距離減衰関係が求められている（司・翠川，1999）．

1980年の後半から，震源近傍で得られた強震動記録の波形インバージョンにより，詳細な断層運動及び断層パラメータが推定されるようになった．そして，これらの断層パラメータの経験的な相似則（Somerville et al., 1999）が，内陸地殻内地震に対する強震動予測における断層パラメータ設定の基礎となっている（入倉，2004）．詳細な断層運動及び断層パラメータは，主に次の二つの手法で推定されている．一つは，長周期地震動（周期1秒以上）を対象とした波形インバージョン法（Hartzell and Heaton, 1983）で，もう一つは，広帯域地震動（周期0.1～10秒）を対象とした経験的グリーン関数法（Irikura, 1986；以下では，EGF法と略記する）である．スラブ内地震は，上述のように，他のカテゴリーの地震に比べて短周期地震波を強く励起するという震源特性を有している．EGF法による震源のモデル化は，それが広帯域地震動を説明することから，スラブ内地震のこの特徴を定量的に評価するのに最適な手法と考える．ここでは，経験的グリーン関数法（EGF法）によって推定された11個のスラブ内地震の震源モデル（断層パラメータ）を基にして，スラブ内地震の震源特性について検討する．そして，強震動予測におけるスラブ内地震の断層パラメータの設定法を提案する．

II．アスペリティ震源モデル

1980年の後半から，震源近傍で得られた強震動記録の波形インバージョンにより，詳細な断層運動及び断層パラメータが推定されるようになった（例えば，Hartzell and Heaton, 1983）．そ

の結果，断層面上のすべり分布は不均質であることがわかり，それはアスペリティモデルで表されている．Fig. 1はそのモデルを模式的に示したものである．地震発生前に，有限の断層面の限られた領域（アスペリティ）が応力を負担しており，それが破壊することにより地震が発生する．そして，その結果として，アスペリティでの応力降下（Fig. 1左図）と断層面上でのすべりの分布（Fig. 1右図）が生じる．すべり分布はアスペリティ領域で大きく，さらにその領域を越えて分布する．

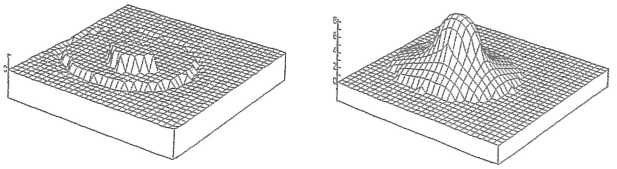

Fig. 1. Asperity source model. Distribution of stress change (left) and final slip (right) for a single asperity source model (after Boatwright, 1988).

Somerville et al. (1999) は，波形インバージョンから得られたすべり分布から，平均すべり量よりも1.5倍大きな領域をアスペリティと定義し，震源を特性化した．一方，EGF法では，小地震の記録をグリーン関数として用い，大地震の記録を説明する強震動生成領域（SMGA）を推定している．Miyake et al. (2003) は，内陸地殻内地震に対してアスペリティとSMGAを比較し，両者のサイズと位置はほぼ一致していることを明らかにした．よって，以下においては，EGF法によって推定されたSMGAをアスペリティと呼ぶことにする．

アスペリティモデルを記述する断層パラメータの主なものは以下の通りである（入倉，2004）．

巨視的（Outer）断層パラメータ

総断層面積：S（km^2）

地震モーメント：Mo（Nm）

微視的（Inner）断層パラメータ

アスペリティの面積：Sa（km^2）

アスペリティでの応力降下量：$\Delta\sigma$（MPa）

加速度震源スペクトルの短周期レベル：A（Nm/s^2）

なお，加速度震源スペクトルの短周期レベルについては，III．2で詳しく説明する．

III．スラブ内地震の震源特性

これまでに，日本及びその周辺で発生した11個のスラブ内地震(Mw 5－8)に対してEGF法による震源のモデル化が行われている．Fig. 2はそれらの震央分布とメカニズム解を示したものである．また，推定された断層パラメータがTable 1にまとめてある．ある地震に対して異なった研究者による複数のモデルがある場合には，その平均値を以下の解析で採用した．

1．アスペリティの特性

推定されたアスペリティの個数は，Mwの小さな地震では1個であるが，Mwが大きくなるとその数が増え，Mw 7で2－3個，Mw 8で5個となっている．アスペリティを何個配置するかは，

Table 1. Fault parameters for eleven intraslab earthquakes.

Event Date	Depth H (km)	Moment Mo (Nm)	Asperity area and stress drop on it Sa (km^2) / $\Delta\sigma$ (MPa)		Short-period level A (Nm/s/s)
1) 1993 Jan. 15 Kushiro-oki	101	3.3×10^{20} (T) 2.7×10^{20} (H)	52/109 72/381 35/163 (MS)	92/82 144/190 69/109 (MS)	4.2×10^{20} (MS) 2.0×10^{20} (I1)
2) 1994 Oct. 04 Hokkaido Toho-oki	56 (KK)	2.6×10^{21} (KK) 3.0×10^{21} (H)	400/82 256/82 144/382 144/300 256/137 (MS)		1.7×10^{21} (MS)
3) 1997 March 16 E. of Aichi Pre.	39	3.0×10^{17} (F) 3.3×10^{17} (H)	2.7/32 (A1)		1.2×10^{19} (I2)
4) 1999 May 13 S. of Kushiro	106	2.4×10^{18} (H)	3.2/73 4.9/73 (TS)		2.3×10^{19} (I1) 2.8×10^{19} (TS)
5) 1999 Aug. 21 N. of Wakayama	66	2.8×10^{17} (F) 3.1×10^{17} (H)	1.4/314 (A1)		2.9×10^{18} (I2)
6) 2000 Jan. 28 Hokkaido Toho-oki	59	2.0×10^{19} (H)	24.6/261 (A1)	56.3/62.4 (TS)	5.2×10^{19} (TS)
7) 2001 March 24 Geiyo	46	2.1×10^{19} (KH) 2.0×10^{19} (H)	33.1/47 24.8/41 (A1)	31.7/47.5 42.3/42.8 (M)	6.2×10^{19} (M) 6.0×10^{20} (I2)
8) 2001 Apr. 03 Central Shizuoka	30	8.2×10^{16} (F) 1.2×10^{17} (H)	4.0/23 (A1)	3.2/34 (M)	3.0×10^{18} (I2) 3.3×10^{18} (M)
9) 2001 Apr. 25 Hyuga-nada	39	4.0×10^{17} (F) 4.0×10^{17} (H)	7.5/19 (A1)		6.8×10^{18} (I2)
10) 2001 Dec. 02 S. of Iwate Pre.	122	5.3×10^{18} (F) 5.6×10^{18} (H)	5.8/87 8.6/116 5.8/116 (MF)		3.9×10^{19} (MF)
11) 2003 May 26 Miyagi-ken-oki	72	3.5×10^{19} (F) 3.9×10^{19} (H)	9.0/105 16.0/105 36.0/105 (A2)		1.1×10^{20} (S) 1.4×10^{20} (TS)

References : KK=Kikuchi & Kanamori (1995), T=Takeo et al. (1993), H=Harvard CMT, F=F-net, KH=Kakehi (2004), MS=Morikawa & Sasatani (2004), A1=Asano et al. (2003), TS=This Study, A2=Asano et al. (2004), I1=Ikeda et al. (2002), I2=Ikeda et al. (2004), M=Morikawa et al. (2002), MF=Morikawa and Fujiwara (2002), S=Satoh (2004).

実際の解析において悩ましい問題である．Morikawa and Sastani (2004)は，EGF 法による 1993 年釧路沖地震 (Mw 7.6) のモデル化において，強震記録の長周期 S 波パルスを基に 3 個のアスペリティを推定している．Fig. 3 に IRIS (Incorporated Research Institute for Seismology) による釧路沖地震の遠地 P 波速度波形が示されている．この図から，P 波初動から約 10 秒間に 3 つのパルスの存在していることがわかる．また，同図に示した 2000/01/28 地震と 2003/05/26 地震よる IRIS の遠地 P 波速度波形は，大局的に 1 個及び 2 個のパルスの存在を示している．EGF 法によるこれらの地震のアスペリティ個数は，それぞれ 1 個及び 3 個である (Table 1 参照；2003/

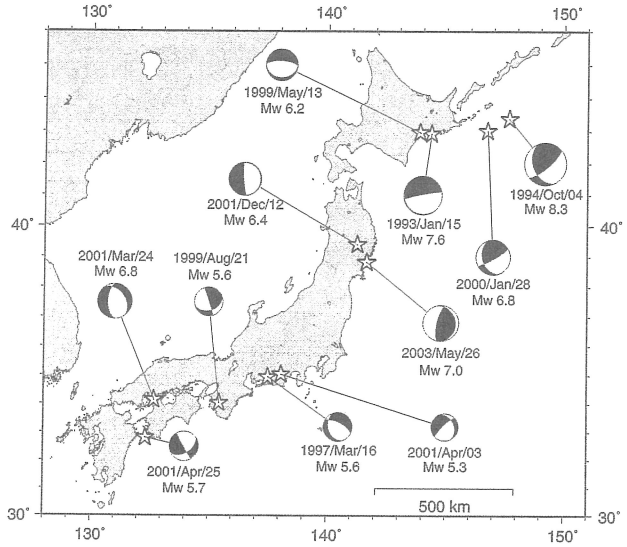

Fig. 2. Eleven intraslab earthquakes whose source models were estimated by the empirical Green's function method. Their focal mechanisms are also shown. The event list is given in Table 1.

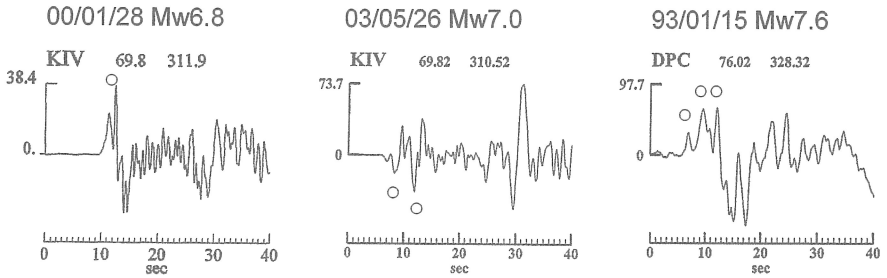

Fig. 3. Far-field P-wave velocity waveforms from three intraslab events. These are taken from Incorporated Research Institute for Seismology (IRIS). Circles show P-wave pulses that may be generated from the asperities. P-wave pulses appearing after about 25 sec are depth phases.

05/26 地震の 3 つのアスペリティの内で，2 つは空間的に接近しており，実質的には 2 個とみなせる）．これは，IRIS の遠地 P 波速度波形からアスペリティの個数を推定することの可能性を示している．

アスペリティの全面積Saと地震モーメントMoとの関係を Fig. 4 に示す．同図には内陸地殻内地震に対するその関係（Somerville et al., 1999）も示してある．アスペリティの全面積は地殻内地震と同じ傾向でMoとともに増大するスケーリング則を示しているが，その値は地殻内地震のそれの約 1/4 であることがわかる．これは，スラブ内地震のアスペリティでの応力降下量が内陸地殻内地震よりもはるかに大きいことに関係している．

内陸地殻内地震のアスペリティ全面積と地震モーメントとの関係は (1) 式で表される（Somerville et al., 1999）ので，スラブ内地震のその関係は (2) 式となる．

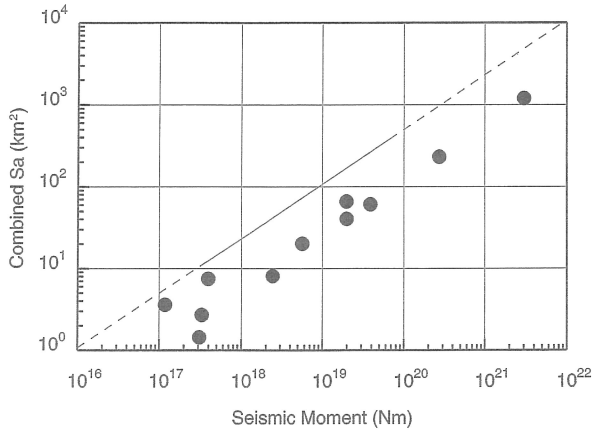

Fig. 4. Empirical relationship between combined asperity area (*Sa*) and seismic moment (*Mo*) for eleven intraslb earthquakes. A solid line indicates the relationship for inland crustal earthquakes (after Somerville et al., 1999).

$$Sa(\mathrm{km}^2)=5.00\times10^{-16}\times Mo^{2/3}(\text{dyne-cm}) \qquad (1)$$

$$Sa(\mathrm{km}^2)\approx1.25\times10^{-16}\times Mo^{2/3}(\text{dyne-cm}) \qquad (2)$$

(2)の関係は，スラブ内地震の地震モーメントからアスペリティの面積を設定する時に利用できる．

2．S 波加速度震源スペクトルの短周期レベル

S 波の加速度震源スペクトル$M(f)$は，(3) 式に従って，観測スペクトルからサイト特性及び伝播経路特性を取り除いて推定される．

$$M(f)=\frac{4\pi\rho_s\beta_s^3}{R_{\theta\varphi}}\frac{R^\gamma O(f)}{G(f)}\exp\left[\frac{\pi f T_s}{Q_s(f)}\right]\sqrt{\frac{\rho_g\beta_g}{\rho_s\beta_s}} \qquad (3)$$

ここで，$O(f)$は観測された加速度スペクトル，$G(f)$はサイト特性，Rは震源距離，T_sは S 波走時，$Q_s(f)$は S 波のQ値である．ρは密度，βは S 波速度で，下付き添字のs，gはそれぞれ震源と観測点近傍での値であることを表している．右辺の最後の項は震源と観測点での音響インピーダンスの違いを補正するためである．また，$R_{\theta\varphi}$は S 波の放射特性で，平均値 0.63 (Boore and Boatwright, 1984) を用いる．γは幾何学的な減衰を表す項で，ここでは 1 を用いる．解析例を Fig. 5 に示す．加速度震源スペクトルの短周期レベルはほぼフラットになっており，ω^{-2}震源モデルの妥当性を示している．短周期レベルAは，そのフラットなレベルの評価から推定される．

最初に，11 個のスラブ内地震の短周期レベルAと地震モーメントMoとの関係について検討する．図 6 は，スラブ内地震のA-Mo関係を示したものである．図中の実線は壇・他 (2001) による内陸地殻内地震に対するその関係である．これから，スラブ内地震のAは，同じモーメントの地殻内地震のそれよりも数倍大きいことがわかる．しかし，スラブ内地震のAとMoの関係を示す直線

の傾きは，内陸地殻内地震のそれとは異なっているように見える．Table 1に示すAの値は異なった研究者によって異なった手法で推定されている．それで，この図からスラブ内地震と地殻内地震とでA-Mo関係が異なっていると結論することは早計である．特に，Moの大きな2つの地震(1993年釧路沖地震，1994北海道東方沖地震)のAは，(3)式における震源と観測点での音響インピーダンスの違いを補正することなく推定されている（Morikawa and Sasatani, 2004)．よって，これらの値は過大評価であり，その補正により図に示された値の約0.6倍とすべきである．

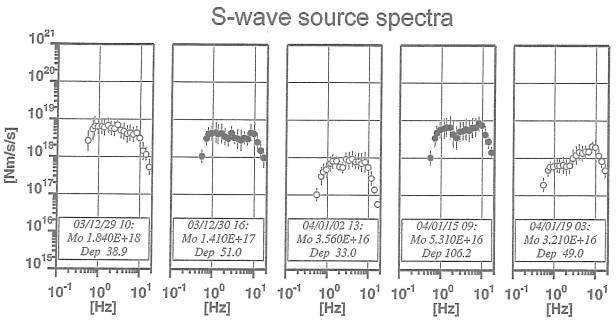

Fig. 5. An example of S-wave acceleration source spectra. Solid circles: intraslab earthquakes and open circles: plate-boundary earthquakes.

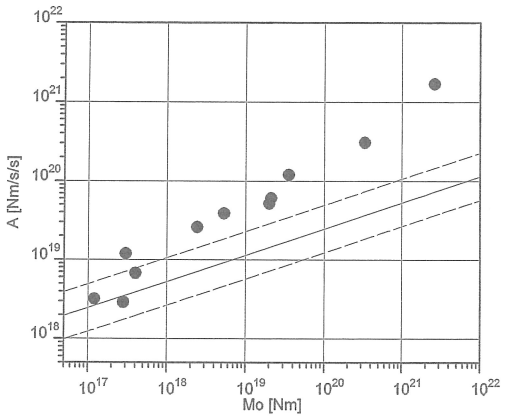

Fig. 6. Empirical relationship between short-period level of S-wave acceleration source spectrum (A) and seismic moment (Mo) for eleven intraslab earthquakes. A solid line indicates the relationship for inland crustal earthquakes; dashed lines show the standard deviation (Dan et al., 2001).

北海道東部地域における火山フロント前弧側マントルウエッジのQ構造と各地のサイト特性に関しては，前田・笹谷（2001）によって評価されている．このQ構造とサイト特性を基にして，(3) 式に従って，北海道東部太平洋側で発生した76個の地震（プレート間地震46，スラブ内地震30）に対してS波加速度震源スペクトルを推定した（Maeda and Sasatani, 2006)．そのスペクトルの2－8 Hzの平均値を短周期レベルAと定義し，その地震モーメント依存性について検討した．その結果をFig. 7に示す．この結果は同一の手法で推定されたものであり，その特性を検討するのに適している．プレート間地震のAは内陸地殻内地震とほぼ同じスケーリング則を示している．一方，スラブ内地震のAはそれらよりも約4倍大きなレベルで同様なスケーリング則を示している．これは，スラブ内地震が他のカテゴリーの地震に比べて短周期地震波を強く励起することに関係している．ただし，$Mo=2\times10^{17}$Nm以下では，この傾向からはずれている．この傾向は，Fig. 6においてもみられる．また，同様な結果は，池田・他（2002）によっても得られている．$Mo=2\times10^{17}$Nm以下におけるAのバラツキについてはその要因を解明する必要がある．

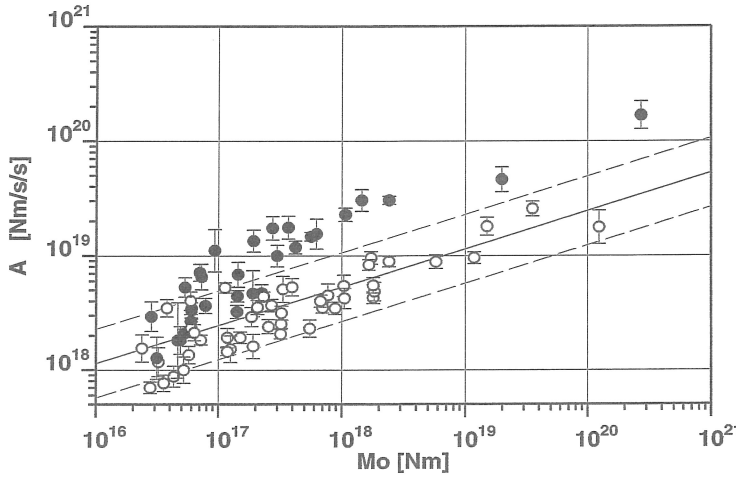

Fig. 7. Empirical relationship between short-period level of S-wave acceleration source spectrum (A) and seismic moment (Mo) for subduction zone earthquakes in the eastern part of Hokkaido (after Maeda and Sasatani, 2006). Solid circles: intraslab earthquakes and open circles: plate-boundary earthquakes. A solid line indicates the relationship for inland crustal earthquakes; dashed lines show the standard deviation (Dan et al., 2001).

壇・他（2001）による内陸地殻内地震のA-Mo関係は（4）式で与えられている．よって，Fig. 7から，$Mo=2\times10^{17}$Nm 以上のスラブ内地震に対するA-Mo関係は（5）式で与えられる．

$$A\,(\mathrm{dyne\text{-}cm/s^2})=2.46\times10^{17}\times Mo^{1/3}\,(\mathrm{dyne\text{-}cm}) \qquad (4)$$

$$A\,(\mathrm{dyne\text{-}cm/s^2})\approx9.84\times10^{17}\times Mo^{1/3}\,(\mathrm{dyne\text{-}cm}) \qquad (5)$$

アスペリティモデルにおける短周期レベルAは，以下に示すように微視的断層パラメータ（アスペリティの面積と応力降下量）のみによって表される（入倉・他，2003；壇・他，2002）．

$$A=4\pi\beta^2\sqrt{\sum(r_n\Delta\sigma_n)^2} \qquad (6)$$

ここで，r_nと$\Delta\sigma_n$は複数（n個）のアスペリティそれぞれの半径と応力降下量，βはS波速度を表す．上の式では，簡単なために，アスペリティを円形，背景領域での応力降下量をゼロと仮定している．EGF法によって震源モデルが得られている11個のスラブ内地震に対して，上記関係式が成り立つかどうかについて検討した．Fig. 8は，観測されたAとEGF法によって得られた微視的断層パラメータを上式に代入して予測された値との比較を示したものである．一つの地震を除いて両者はファクター2の範囲で同じ値を示していることが分かる．Aの観測値と予

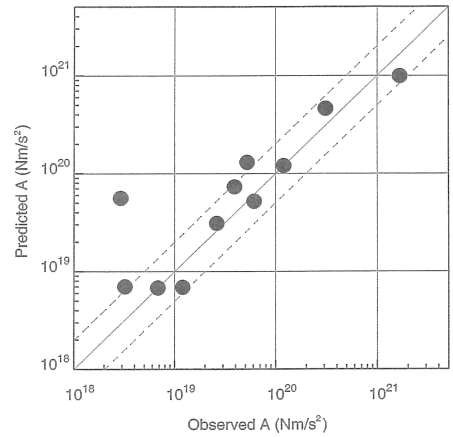

Fig. 8. Comparison between predicted short-period level (A) from equation (6) in the text and observed one for eleven intraslab earthquakes. Dashed lines show a factor of 2 and 1/2 for the solid line (1:1 relation).

測値は，それぞれ独立に評価されたものであり，両者が良い一致を示すことは，スラブ内地震がアスペリティモデルで表されること，そして，短周期レベルから，アスペリティの面積と応力降下量に関する情報が得られることを示している．なお，Fig. 8 において，予測値が観測値よりもはるかに大きい地震は，Table 1 の No. 5）地震で，それは極めて大きい応力降下量を有している．これに関しては，再検討する必要があるかもしれない．

3．総断層面積

アスペリティモデルにおける巨視的断層パラメータと微視的断層パラメータの関係は，次で与えられる（入倉・他，2003；壇・他，2002）．

$$Mo=\frac{16}{7}r_f\times\sum(r_n^2\Delta\sigma_n) \qquad (7)$$

ここで，r_f は断層全体を円形と仮定した場合の半径であり，$S=\pi r_f^2$ で与えられる．

一般に，波形インバージョンにおいては，余震分布を基にして総断層面積（S）が仮定されている．しかし，スラブ内地震の場合，この余震面積がアスペリティモデルの S に相当するかどうかは定かではない．そこで，遠地 P 波波形から S の推定について検討した．Fig. 9 は，3 つのスラ

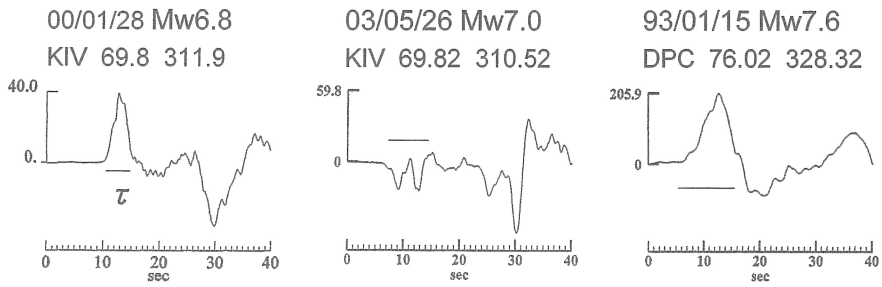

Fig. 9. Far-field P-wave displacement waveforms from three intraslab events. These are taken from Incorporated Research Institute for Seismology (IRIS). A horizontal bar shows P-wave pulse-width (τ) which represents the rupture process time. P-wave pulses appearing after about 25 sec are depth phases.

ブ内地震の IRIS による遠地 P 波変位波形を示したものである．変位 P 波のパルス幅（τ）は断層面上での破壊継続時間に関係すると考えられるが，これからその面積を推定するためには断層破壊モードが必要である．Kikuchi and Ishida（1993）は，正方形断層を一方向に速度 Vr で伝播する破壊において S と τ との以下の関係を示した．

$$S=(Vr\times\tau/2)^2 \qquad (8)$$

規模の大きな 5 つのスラブ内地震に対して IRIS の P 波波形からパルス幅を推定し，この式によって評価された S（$Vr\sim0.8\beta$ と仮定）と微視的断層パラメータを（7）式に代入して予測された Mo を，実際に観測された値と比較した（Fig. 10）．同図には余震分布から推定された S と微視的断層パラメータを（7）式に代入して予測された Mo も示されているが，それらは実際に観測され

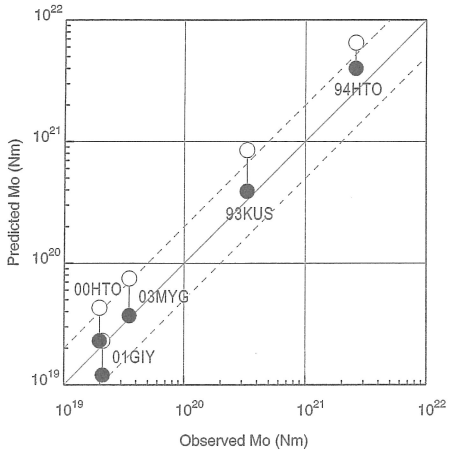

Fig. 10. Comparison between predicted seismic moment (*Mo*) from equation (7) in the text and observed one for large five intraslab earthquakes. 94HTO: 1994 Hokkaido Toho-oki, 93KUS: 1993 Kushiro-oki, 03MYG: 2003 off Miyagi-ken, 01GIY: 2001 Geiyo, and 00HTO: 2000 Hokaido Toho-oki. Solid circle: predicted based on P-wave pulse-width, and open circle: predicted based on aftershock area. Dashed lines show a factor of 2 and 1/2 for the solid line (1:1 relation).

た値よりも大きく，P 波パルス幅に基づく予測値のほうが実際に観測された値に近いことがわかる．これは，余震分布は本震時の総断層面積よりも大きいことを意味している．*Mo*の予測値が 2 倍大きいことは，(7) 式から考えて，r_fが 2 倍，よって，総断層面積が 4 倍ほどの過大評価となる．

IV. 議論とまとめ

ここでは，経験的グリーン関数法 (EGF 法) によるスラブ内地震の震源モデルを基にしてその震源特性について検討した．アスペリティの全面積*Sa*及び*S*波加速度震源スペクトルの短周期レベル*A*が地震モーメント*Mo*と自己相似な関係を有すること，そして，微視的断層パラメータ（アスペリティの面積と応力降下量）から予測された短周期レベルが実際に観測されたそれとほぼ同じ値を示すことを明らかにした．特に，それぞれ独立に評価されたこれらの短周期レベルが良い一致を示す Fig. 8 の結果は重要である．これらは，スラブ内地震の震源がアスペリティモデルで表されること，さらに，その短周期レベルのスケーリング則 (5) 式から (6) 式を用いて微視的断層パラメータの設定が可能であることを意味している．

特性化震源モデルから強震動を予測する場合（入倉，2004），特にアスペリティの存在が重要であるが，総断層面積も複数のアスペリティをどの範囲に配置させるかを決めるために必要なパラメータである．しかし，スラブ内地震の場合，総断層面積を精度良く評価することが困難であり，そのスケーリング則を得るまでには至っていない．また，余震分布を基にしたその評価は過大であることが示された．これに関しては，地震モーメントと微視的断層パラメータを基にして (7) 式からそれを設定することが妥当であると考える．

以上の研究成果から，スラブ内地震の断層パラメータの設定法として，次を提案する．

Step 1　スラブ内地震の*Mo*の設定

Step 2　*Sa*と*Mo*のスケーリング則（図 5 及び (2) 式）⇒ *Sa*の設定

Step 3　*A*と*Mo*のスケーリング則（図 7 及び (5) 式）⇒ *A*の設定

Step 4　アスペリティの個数nの推定：ただし，$Sa=\pi\sum(r_n)^2$

Step 5　Aとアスペリティパラメータの関係：（6）式 ⇒ r_nと$\Delta\sigma_n$の設定

Step 6　Moとアスペリティパラメータの関係：（7）式 ⇒ $S(=\pi r_f^2)$の設定

この設定法は，スラブ内地震の総断層面積が事前に推定困難であるために，内陸地殻内地震に対する断層パラメータの設定法（レシピ；入倉，2004）とは異なっている．

今後は，ここで得られたスケーリング則をより確かなものにするために，より多くのスラブ内地震に対して震源モデルを推定することが必要である．さらに，ここで提案された手法に則って強震動を予測し，実際に発生したスラブ内地震に対してその検証を行うことも必要である．最近，壇・他（2005），笹谷・他（2005）は，上に提案した断層パラメータの設定法に則ってスラブ内地震による強震動を予測し，良好な結果を得ている．

スラブ内地震による強震動予測のための断層パラメータ設定法が提案されたが，強震動予測の精度を高めるためには，スラブ内地震に関する以下の研究を推進する必要がある：1）地震発生層の存在及び断層面の選択性に関する研究，2）破壊の開始点及びその伝播方向に関する研究，3）アスペリティの個数とその性質に関する研究．

謝辞　京都大学防災研究所の浅野公之氏から，貴重なデータの提供を受けた．記して感謝します．本研究は，文部科学省振興調整費による「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究（第II期 2004～2005，代表者：京都大学　入倉孝次郎）」の一環として行われたものである．

参考文献

Asano, K., T. Iwata and K. Irikura, 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth, Planets and Space*, **55**, e5－e8.

浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎，2004．2003年5月26日に宮城沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション，地震2，**57**，171－185.

Boatwright, J., 1988. The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 489－508.

Boore, D. M., and J. Boatwright, 1984. Average body-wave radiation coefficient, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1615－1621.

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透，2001．断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，**545**，51－62.

壇一男・石井透・渡辺基史・佐藤俊明，2002．巨視的震源情報と不均質震源特性との関係の分析，地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究，第1回シンポジウム論文集，29－36.

壇一男・武藤尊彦・宮腰淳一・渡辺基史，2005．断層パラメータのタイプ・地域別依存性のモデル化，地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究，第3回シンポジウム論文集，21－26.

Hartzell, S.H., and T.H. Heaton, 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1553－1583.

Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symp.*, 151－156.

入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・川辺秀憲・Luis Angel Dalguer，2003．強震動予測地図における強震動評価について－内陸地震と海溝型地震に対する強震動予測レシピとその問題点－，地震動予測地図ワークショップ－地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携－，予稿集，35－52．

入倉孝次郎，2004．強震動予測レシピ－大地震による強震動の予測手法－，京都大学防災研究所年報，第47号A，25－45．

池田孝・武村雅之・加藤研一，2002．強震動記録に基づく北海道周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性，日本建築学会構造系論文集，**560**，67－73．

池田孝・武村雅之・加藤研一，2004．強震記録に基づくフィリピン海プレート内で発生するスラブ内地震の高振動数成分の励起特性，日本建築学会構造系論文集，**586**，53－61．

Kakehi, Y., 2004. Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, *J. Geophys. Res.*, **109**, B08306, doi:10.1029/2004JB002980.

Kikuchi, M., and M. Ishida, 1993. Source retrieval for deep local earthquakes with broadband records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1855－1870.

Kikuchi, M., and H. Kanamori, 1995. The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1025－1028.

前田宜浩・笹谷努，2001．上部マントルの異常構造が強震動に与える影響，北海道大学地球物理学研究報告，**64**，91－113．

Maeda, T., and T. Sasatani, 2006. Seismic source and path effects on strong ground motion from subduction-zone earthquakes (in preparation).

Miyake, H., T. Iwata and K. Irikura, 2003. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 2531－2545.

森川信之・藤原広行，2002．スラブ内地震のスケーリング則（2），地球惑星科学関連学会2002年合同大会予稿集，S 042－P 013．

森川信之・笹谷努・藤原広行，2002．経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，133－138．

Morikawa, N., and T. Sasatani, 2003. Source spectral characteristics of two large intra-slab earthquakes along the southern Kurile-Hokkaido arc, *Phys. Earth Planet. Interiors.*, **137**, 67－80.

Morikawa, N., and T. Sasatani, 2004. Source models of two large intra-slab earthquakes from broadband strong ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 803－817.

笹谷努・森川信之・前田宜浩，2005．スラブ内地震による強震動の予測，日本地震工学会大会－2005梗概集，304－305．

佐藤智美，2004．宮城沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定，日本地震工学会論文集，**4**，1－4．

司宏俊・翠川三郎，1999．断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，**523**，63－70．

Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada, 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for prediction of strong motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, 59－80.

Takeo, M., S. Ide and Y. Yoshida, 1993. The 1993 Kushiro-oki, Japan, earthquake: A high stress-drop event in a subducting slab, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2607－2610.