

地殻内地震の応力パラメータに関する基礎的研究

—2003年宮城県北部地震および2005年福岡県西方沖地震—

Stress Parameter of Crustal Earthquakes Occurring in Japan
- The 2003 Miyagi-ken Hokubu Earthquake and the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki Earthquake -

鶴来雅人*, 香川敬生**, 入倉孝次郎***
Masato Tsurugi, Takao Kagawa, and Kojiro Irikura

*博(工) 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)

**博(理) 鳥取大学大学院 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

***理博 愛知工業大学 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4)

Characteristics of stress parameter of crustal earthquakes occurring in Japan are examined in this paper. The target earthquakes are the mainshocks and aftershocks of the 2003 Miyagi-ken Hokubu earthquake and the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki earthquake. The stress parameters are evaluated by the Brune's equation from seismic moment and corner frequency that are estimated by comparing observed spectra at hard rock sites with theoretical spectra. The theoretical spectra are calculated based on the omega-squared source characteristics convolved with propagation-path effects. In result, we find that the stress parameter is not clearly dependent on focal depth, but dependent on seismic moment. The stress parameter obtained here is approximately average stress drop for a circular crack model but some intermediate value for an asperity model. Most of the earthquakes analyzed here are assumed to approximately the crack model except the mainshocks judging from their source sizes estimated from the corner frequencies.

Key Words: Stress parameter, Crustal earthquake, Focal depth dependency, Seismic moment dependency

キーワード: 応力パラメータ, 地殻内地震, 震源深さ依存性, 地震規模依存性

1. はじめに

地震動が震源特性・伝播経路特性・サイト特性で構成されていることは良く知られている。昨今では、観測記録に基づく各特性の評価手法の精度向上に伴って、各特性を個別に評価した上で強震動予測を行なう事例が増えつつある^{例えば1)~3)}。また、入倉・三宅⁴⁾、入倉・ほか⁵⁾、地震調査研究推進本部地震調査委員会⁶⁾は想定する地震の震源のモデル化、震源と対象地域を包含する地下構造・地盤構造のモデル化、および地震動のシミュレーション手法、を示したいわゆる「強震動予測レシピ」をまとめ、その有効性を示している。しかし、一部には観測記録を詳細には説明できない場合があることも指摘されている⁷⁾。「強震動予測レシピ」においては、応力降下量の震源深さ依存性は考慮されていない。また、地震規模依存性については、地震モーメントが 7.5×10^{18} N·m (7.5×10^{25} dyne·cm, M_w : 6.5 に相当) 未満では断層面

全体の平均応力降下量は一定、それ以上では地震モーメントの増加とともにこれが大きくなるように与えられている。これは、平均応力降下量が円形クラックモデルを仮定して推定されるために見かけ上生じるもので、観測事実としての検証が必要とされる。

そこで本検討では、宮城県北部地域および福岡県西方沖地域で発生した地殻内地震について、Brune の式を用いて応力パラメータを求め、その震源深さ依存性や地震規模依存性等に関する検討を行う。ここで得られる応力パラメータは、震源が円形クラックで仮定される場合には応力降下量にほぼ近似されるが、アスペリティモデルの場合には断層面全体の平均応力降下量とアスペリティの応力降下量の中間的な値となる。

応力パラメータの地震タイプ別の震源深さ依存性や地震規模依存性などに関する検討は佐藤・巽⁸⁾、佐藤⁹⁾、川瀬・松尾¹⁰⁾、鶴来・ほか¹¹⁾などにより精力的に行われている。これらの検討では応力パラメータの地域性も指

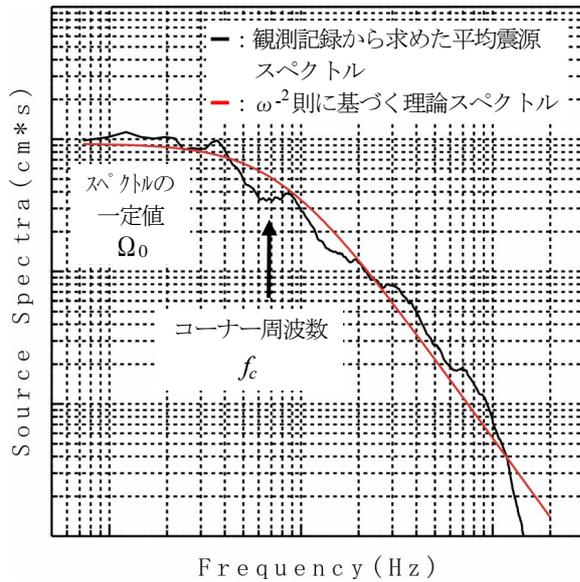


図-1 応力パラメータ算出の概念図

摘されている。本検討では、強震動予測レシピに基づく応力降下量の評価とここで得られた応力パラメータとの比較を行う。

2 解析概要

2.1 応力パラメータの算出方法

観測スペクトル $Obs(f)$ は震源スペクトル $Source(f)$ 、伝播経路特性 $Path(f)$ 、サイト増幅スペクトル $Ground(f)$ の積で表現される [式(1)]。サイト特性に起因する増幅がないとみなせる岩盤観測点における記録 $Obs(f)$ を伝播経路特性 $Path(f)$ で除することにより、震源スペクトルすなわち震源から単位距離におけるスペクトル $Source(f)$ を求める [式(2)]。得られた震源変位スペクトルの低周波数領域での一定値 Ω_0 とコーナー周波数 f_c を Andrews¹²⁾の方法により推定し、震源変位スペクトルの低周波数領域での一定値 Ω_0 から式(3)により地震モーメント M_0 を得る (図-1 参照)。最後に推定された地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c より Brune¹³⁾ [式(4)] を用いて応力パラメータ $\Delta\sigma$ を求める。なお、伝播経路特性 $Path(f)$ は式(5)のように表される。また、Andrews¹²⁾の方法とは式(6)～式(9)により Ω_0 および f_c を得るものであり、この適用にあたっては、十分な SN 比がないと考えられる低周波数領域を除いた領域を対象とした。

$$Obs(f) = Source(f) \times Path(f) \times Ground(f) \quad (1)$$

$$Source(f) = \frac{Obs(f)}{Path(f)} \quad (2)$$

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_S^3}{R_{\theta\phi}} \times \Omega_0 \quad (3)$$

ここで、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターンの係数(0.63)¹⁴⁾、 ρ および V_S は地震基盤における密度(g/cm^3)およびせん断波速度(cm/sec)である。

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \times V_S \times \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma$: 応力パラメータ(bar)、 M_0 : 地震モーメント($\text{dyne}\cdot\text{cm}$)、 f_c : コーナー周波数(Hz)である。

$$Path(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q(f) \times V_S} \right) \quad (5)$$

ここで、 X は震源距離(cm)、 $Q(f)$ は伝播経路における粘性減衰や散乱減衰を示す見掛けの減衰であり、解析に用いた特性は後述する。

$$S_{D2} = 2 \int_0^\infty D^2(f) df \quad (6)$$

$$S_{V2} = 2 \int_0^\infty V^2(f) df \quad (7)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{V2}}{S_{D2}}} \quad (8)$$

$$\Omega_0 = 4 \times S_{D2}^{3/2} \times S_{V2}^{-1/2} \quad (9)$$

ここで、 $D^2(f)$ は変位パワースペクトル、 $V^2(f)$ は速度パワースペクトルである。

なお、大地震については震源インバージョン解析やフォワードモデリングによって応力降下量を推定することが可能であるが、比較的規模の小さな地震については本研究で用いる方法つまり式(4)を用いる方法しかないのが現状である。

震源スペクトルは後述するように複数の岩盤観測点における観測記録より算出し、その平均を取った(これを「平均震源スペクトル」と称す)。複数地点の記録を用いることにより、断層破壊伝播の指向性(Directivity)やラディエーションパターンの影響を小さくすることができるものと考えられる。スペクトルの算出には主要動部 20 秒間を用い、水平 2 方向のベクトル和とした。ここで、主要動部の抽出にあたってマルチテーパ^{15)~17)}を用いることにより、スペクトル算出の精度向上を図った。マルチテーパとは、複数の形状を用いてテーパ処理を行ない、各テーパに対応するスペクトルを求め、その重みつき平均を最終的なスペクトルとするものであり、同時に周波数帯毎に異なる、かつ適切なバンド幅が自動的に選択され、スペクトルの平滑化が行われている。地中観測点の記録については地表からの反射波と入射波の干渉の影響が危惧されるが、これに起因するスペクトル

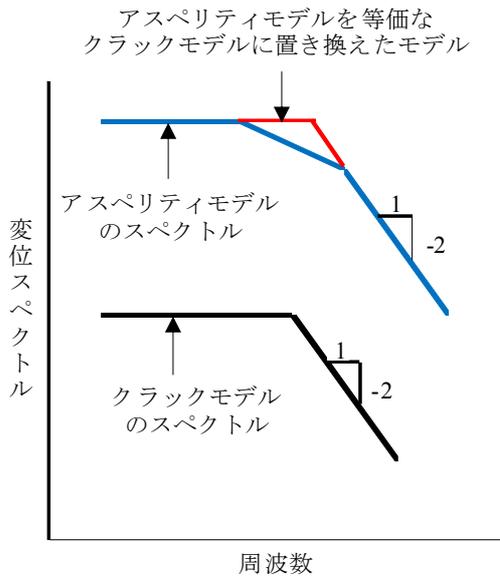


図-2 震源変位スペクトルの模式図¹⁹⁾
(クラックモデルとアスペリティモデルの比較)

の落ち込みが明確に確認できなかったため、観測記録をそのまま用いた。スペクトルの落ち込みが明確ではない理由として、地表付近が高減衰であることによって反射波の振幅が小さくなるためと考えられる。さらに計器特性の補正を行った。

中小地震のスペクトルは一般にクラックモデルの特徴を持つことが知られている。これに対し、比較的規模の大きな地震では観測事実としてクラックモデルが必ずしも成り立たず、アスペリティモデルの考慮が必要とされる。クラックモデルおよびアスペリティモデルに基づく震源変位スペクトルの模式的形状は、Boatwright¹⁹⁾によれば、図-2のように示される。つまり、クラックモデルではコーナー周波数に対応するスペクトルの屈曲点が1つ(図-2中、黒線)であるのに対し、アスペリティモデルでは2つの屈曲点がある(図-2中、青線)。このうち低周波数の屈曲点は断層面全体のサイズに対応し、高周波数の屈曲点はアスペリティ領域のサイズに対応している。本検討では式(4)を用いて応力パラメータを求めているが、この式は ω^{-2} 則¹⁸⁾に基づくクラックモデルを前提としたものである。今回、比較的規模の大きな地震についても式(4)を用いて応力パラメータを評価していることは、アスペリティモデルを等価なクラックモデルに置き換えて、具体的に言えば、2つの屈曲点をもつスペクトルを1つの屈曲点をもつモデル(図-2中、青線が途中で赤線に推移するモデル)に置き換えて、応力パラメータを求めていることになる。

表-1 検討に用いた地震

	2003年 宮城県北部地震 本震, 余震等	2005年 福岡県西方沖地震 本震, 余震等
地震数	31地震	24地震
記録数	223記録	168記録
M_J	3.5~6.4	3.6~7.0
震源深さ	7~15km	9~15km

2.2 検討対象地震およびサイト

検討の対象地震は2003年宮城県北部地震および2005年福岡県西方沖地震の本震および余震である(一部余震以外の中小地震を含む)。

これらの地震の岩盤観測点(独立行政法人防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の地中観測点)における観測記録を用いる。この時、2003年宮城県北部地震および2005年福岡県西方沖地震の震源域から概ね100km以内、かつ地中地震計設置深度におけるせん断波速度が2,000 m/sec以上の地点とした。ここで、1地点しか得られていない地震は検討から除外する。また、震源スペクトルのばらつきを大きくしている地点があれば、その地点は検討から除外した。なお、せん断波速度が2,000m/sec以上の堅固な地点の記録を用いることにより、サイト特性の影響を極力小さくすることができると考えられる。

検討対象地震の地震数、記録数、マグニチュード、震源深さを表-1に示す。また、解析に用いた地震の震央および検討対象地点の位置を図-3および図-4に示す。図中、括弧内の数字は検討対象地点の地震計設置深度におけるせん断波速度(m/sec)である。さらに、検討に用いた地震の諸元を表-2および表-3に示す。表-2中No.7の地震が2003年宮城県北部地震の本震、表-3中No.3の地震が2005年福岡県西方沖地震の本震である。

2.3 解析に用いる Q 値など

伝播経路特性 $Path(f)$ の算出には伝播経路における Q 値が必要である。宮城県北部地域の Q 値は、同地域を震源とする中小規模の地殻内地震の観測記録を用いてスペクトルインバージョン解析を行い、求めた。得られた特性を式(10)に示す。福岡県西方沖地域については川瀬・松尾¹⁰⁾による Q 値[式(11)]を用いた。この特性は九州北西部で発生した中小規模の地殻内地震の観測記録を用いたスペクトルインバージョン解析によって得られた特性で

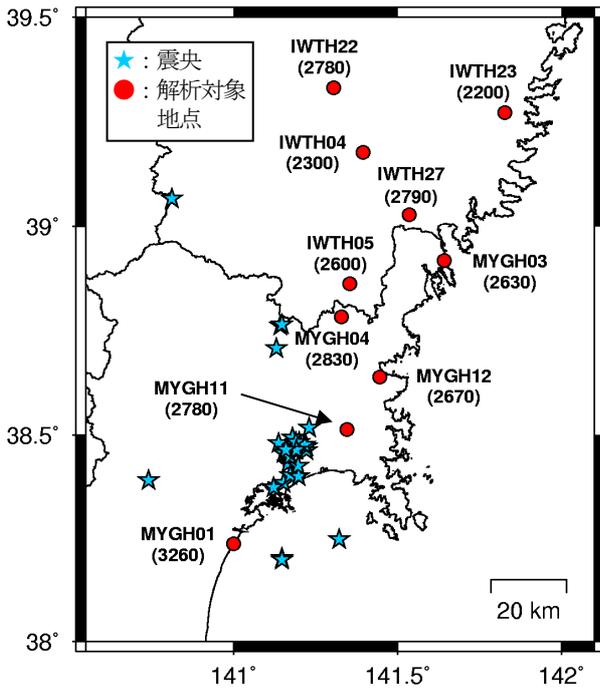


図-3 検討対象地震の震央および地点の位置
(2003年宮城県北部地震 本震および余震等)

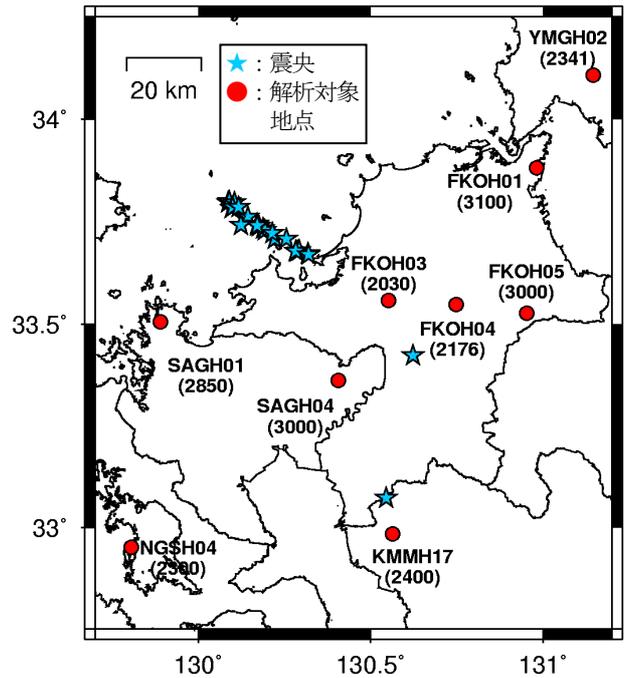


図-4 検討対象地震の震央および地点の位置
(2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等)

ある。

$$\text{宮城県北部地域: } Q(f) = 63.8 \times f^{1.00} \quad (10)$$

$$\text{福岡県西方沖地域: } Q(f) = 79.4 \times f^{0.74} \quad (11)$$

地震基盤におけるせん断波速度は、宮城県北部地域については Iwasaki *et al.*²⁰⁾による宮城県付近の地下構造を参考に、福岡地域については Uehira *et al.*²¹⁾による福岡地域の地下構造を参考に、いずれも 3.6km/sec とし、密度はこのせん断波速度に対応する値として経験的に 2.7 g/cm³ とした。

3 解析結果

3.1 2003年宮城県北部地震 本震および余震等の

応力パラメータ

推定された震源パラメータを表-2に併記する。同表には地震モーメントの F-net の値に対する推定値の比 (M_0 比) および検討に用いたサイト数も示した。推定された地震モーメントは F-net の値に対して 0.53 倍~1.46 倍であり、本検討で推定された地震モーメントは概ね妥当であると考えられる。F-net による地震モーメントは比較的遠距離の観測点における記録の表面波部分を用いて決定されている。したがって、表面波が大きく励起される比較的規模の大きな地震では精度があるが、表面波が十分励起されない中小規模の地震では精度が十分ではない可能性がある。一方、本研究で用いた手法は、伝播経路特性

やサイト特性および震源におけるラディエーションパターンが十分に補正されている場合は高精度であるが、観測点数が十分ではない場合などは、これらの補正が不十分で精度が落ちることが懸念される。つまり、両手法の優位性を明確に判断することは困難である。そこで、ここでは両手法による地震モーメントの値を比較することにより、推定した値の妥当性を示すに留める。

観測記録から求めた平均震源スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ の比較例を図-5に示す。理論スペクトル $A(f)$ とは、式(12)に示すように ω^{-2} 則¹⁸⁾に基づく震源特性 $Source(f)$ と伝播経路特性 $Path(f)$ [式(5)] を考慮したスペクトルである。

$$A(f) = Source(f) \times Path(f) \quad (12)$$

ここで、 $Source(f)$ は式(13)のように表せる。

$$Source(f) = C \times M_0 \times \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (13)$$

ここで、 C はラディエーションパターンなどその他の係数である。図-5より、スペクトルに $1/f$ の傾向が見られ SN 比が悪いと思われる周波数帯 (図中、黄色い網掛け部、本震: 0.07Hz 以下, No.1 の地震: 0.5Hz 以下) を除けば、観測記録から求めた平均震源スペクトルと理論スペクトルは良く適合していることが判り、得られたパラメータの妥当性が確認できる。ここでは、2 地震について

表-2 検討に用いた地震の諸元および推定した震源パラメータ
(2003年宮城県北部地震 本震および余震等)

No.	発震時刻	震央緯度 (°)	震央経度 (°)	D (km)	M_J	決定した震源パラメータ				サイ ト数
						M_0	f_c	$\Delta\sigma$	M_0 比	
1	2002.02.13 18:54:48	38.762	141.143	9	4.5	5.43×10^{14}	2.00	0.86	0.78	8
2	2002.08.24 08:22:02	38.248	141.322	15	4.3	2.84×10^{14}	2.50	0.88	1.18	5
3	2002.09.19 04:58:35	38.765	141.147	9	4.1	5.97×10^{14}	1.69	0.57	0.63	10
4	2002.11.16 12:19:54	38.708	141.130	7	4.2	4.53×10^{14}	1.72	0.46	0.85	9
5	2003.07.26 00:13:08	38.430	141.167	12	5.6	2.09×10^{17}	0.45	3.78	1.22	9
6	2003.07.26 05:22:05	38.383	141.153	11	3.6	1.25×10^{14}	3.30	0.89	0.69	2
7	2003.07.26 07:13:32	38.402	141.173	12	6.4	2.23×10^{18}	0.26	7.77	1.46	8
8	2003.07.26 07:52:02	38.457	141.167	13	4.6	2.33×10^{15}	1.84	2.88	0.53	9
9	2003.07.26 10:22:25	38.453	141.167	13	5.1	1.04×10^{16}	1.14	3.06	0.70	10
10	2003.07.26 11:05:37	38.462	141.222	11	3.8	2.70×10^{14}	3.00	1.45	0.62	8
11	2003.07.26 11:08:04	38.465	141.192	12	3.7	2.14×10^{14}	2.02	0.35	0.57	3
12	2003.07.26 12:16:25	38.472	141.223	11	3.6	1.28×10^{14}	2.93	0.64	0.60	5
13	2003.07.26 14:29:01	38.400	141.198	12	3.7	2.63×10^{14}	2.36	0.64	0.73	4
14	2003.07.26 15:03:39	38.463	141.190	11	3.9	2.33×10^{14}	3.50	1.98	0.88	7
15	2003.07.26 15:41:53	38.482	141.200	12	3.9	5.34×10^{14}	2.04	0.90	0.77	7
16	2003.07.27 13:20:29	38.475	141.218	11	4.2	1.03×10^{15}	1.80	1.19	0.67	9
17	2003.07.28 04:08:05	38.455	141.152	14	5.1	1.89×10^{16}	1.09	4.85	0.80	9
18	2003.07.30 19:11:54	38.425	141.197	12	3.7	2.67×10^{14}	2.60	0.93	1.23	7
19	2003.08.08 09:51:32	38.517	141.230	11	4.6	3.13×10^{15}	1.30	1.36	1.01	10
20	2003.08.09 02:54:51	38.457	141.170	13	3.8	3.83×10^{14}	1.59	0.31	0.96	2
21	2003.08.12 09:27:59	38.493	141.180	12	4.3	1.39×10^{15}	1.68	1.31	0.79	10
22	2003.08.23 01:05:55	38.448	141.172	13	3.5	9.57×10^{13}	3.80	1.04	0.73	3
23	2003.08.27 02:12:26	38.480	141.137	14	4.0	4.42×10^{14}	2.60	1.54	1.12	10
24	2003.09.05 19:54:55	38.482	141.190	12	3.8	2.21×10^{14}	2.64	0.81	0.83	7
25	2003.10.23 14:00:38	38.463	141.192	12	4.4	9.85×10^{14}	2.26	2.25	1.00	10
26	2003.12.12 13:44:10	38.463	141.160	13	3.6	1.55×10^{14}	2.60	0.54	0.54	6
27	2004.05.23 05:06:04	38.373	141.123	13	3.7	1.43×10^{14}	2.74	0.99	0.57	3
28	2005.11.01 11:01:09	39.067	140.813	9	4.6	4.38×10^{15}	1.20	1.50	0.81	10
29	2006.07.06 06:11:45	38.390	140.742	11	4.3	1.10×10^{15}	1.70	1.07	0.67	3
30	2007.04.05 20:39:41	38.202	141.148	12	4.5	3.00×10^{15}	1.56	2.26	1.28	10
31	2007.04.12 22:50:26	38.198	141.147	12	4.5	2.35×10^{15}	1.70	2.29	1.18	10

D : 震源深さ, M_J : 気象庁マグニチュード, M_0 : 地震モーメント(N・m), f_c : コーナー周波数(Hz),
 $\Delta\sigma$: 応力パラメータ(MPa), M_0 比 : F-netの地震モーメントに対する比

て比較結果を示したが, その他の地震についても両スペクトルはこれらと同程度適合している. なお, SN 比が悪い周波数帯を除けば, 本震の平均震源スペクトルと余震のそれとのレベルの違いは明らかである.

得られた応力パラメータは 0.3MPa~7.8MPa(3bar~

78bar), その対数平均は 1.2MPa(12bar)程度となり, 既往検討結果^{8),10)}と調和的である. 一方, 対数標準偏差は 2.1とばらつきが大きい, これも既往検討結果^{8),10)}と調和的である.

表-3 検討に用いた地震の諸元および推定した震源パラメータ
(2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等)

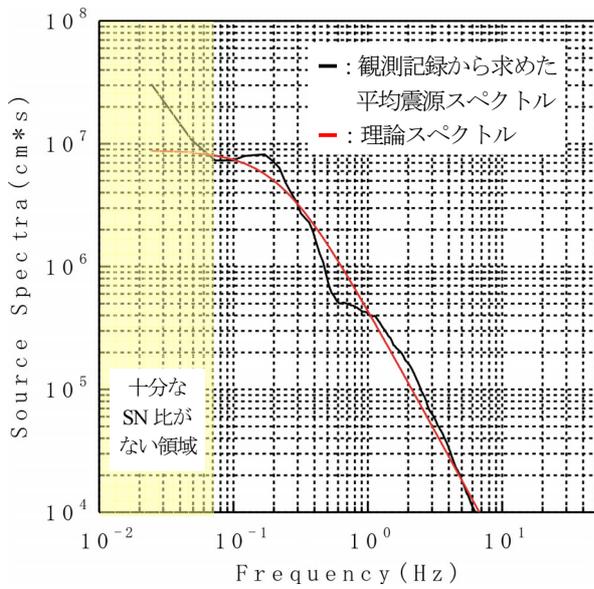
No.	発震時刻	震央緯度 (°)	震央経度 (°)	D (km)	M_J	決定した震源パラメータ				サイ ト数
						M_0	f_c	$\Delta\sigma$	M_0 比	
1	2004.09.06 10:03:37	33.423	130.623	12	3.7	2.86×10^{14}	2.43	0.81	1.11	8
2	2004.11.04 03:13:21	33.073	130.545	14	4.2	1.28×10^{15}	1.66	1.16	0.81	6
3	2005.03.20 10:53:40	33.738	130.175	9	7.0	1.15×10^{19}	0.16	9.34	1.47	9
4	2005.03.20 14:32:23	33.797	130.087	12	4.5	3.98×10^{15}	0.78	0.37	1.34	3
5	2005.03.20 15:41:25	33.708	130.222	10	3.6	3.79×10^{14}	1.58	0.30	1.55	2
6	2005.03.20 16:08:49	33.762	130.143	12	4.1	9.83×10^{14}	1.48	0.63	2.08	4
7	2005.03.20 17:43:58	33.733	130.188	15	3.9	4.54×10^{14}	2.04	0.76	1.77	5
8	2005.03.20 19:52:03	33.800	130.090	13	4.7	7.12×10^{15}	0.78	0.67	1.29	9
9	2005.03.20 20:08:22	33.797	130.105	13	4.4	2.13×10^{15}	1.86	2.72	1.63	9
10	2005.03.20 20:38:16	33.745	130.170	11	4.5	4.22×10^{15}	1.13	1.21	1.94	9
11	2005.03.21 06:17:01	33.728	130.193	12	3.9	1.03×10^{15}	2.02	1.68	1.42	7
12	2005.03.21 15:37:26	33.783	130.097	11	4.2	1.30×10^{15}	1.62	1.10	1.73	6
13	2005.03.21 23:59:22	33.785	130.100	12	4.8	9.42×10^{15}	0.97	1.70	1.68	8
14	2005.03.24 23:38:43	33.740	130.170	11	4.3	8.07×10^{14}	1.95	1.19	1.50	6
15	2005.03.25 03:43:19	33.722	130.215	11	4.0	1.00×10^{15}	1.54	0.72	1.46	4
16	2005.03.25 21:03:20	33.785	130.117	12	4.1	1.76×10^{15}	1.79	2.00	1.54	8
17	2005.04.01 21:52:14	33.672	130.318	12	4.3	2.65×10^{15}	1.41	1.47	1.65	9
18	2005.04.06 07:59:54	33.708	130.255	14	4.1	4.86×10^{14}	2.85	2.23	1.45	5
19	2005.04.20 06:11:27	33.677	130.287	14	5.8	1.43×10^{17}	0.67	8.53	1.09	9
20	2005.04.20 06:22:50	33.678	130.288	13	4.7	7.03×10^{15}	1.00	1.39	1.32	8
21	2005.04.20 06:44:52	33.680	130.293	12	4.5	3.83×10^{15}	1.20	1.31	1.04	8
22	2005.04.20 09:09:43	33.678	130.283	13	5.1	2.12×10^{16}	1.01	4.33	1.41	9
23	2005.05.02 01:23:58	33.670	130.320	11	5.0	1.51×10^{16}	0.83	1.71	1.39	9
24	2005.07.05 05:10:02	33.742	130.123	15	4.2	1.37×10^{15}	2.10	2.52	1.47	8

D : 震源深さ, M_J : 気象庁マグニチュード, M_0 : 地震モーメント (N・m), f_c : コーナー周波数 (Hz),
 $\Delta\sigma$: 応力パラメータ (MPa), M_0 比 : F-netの地震モーメントに対する比

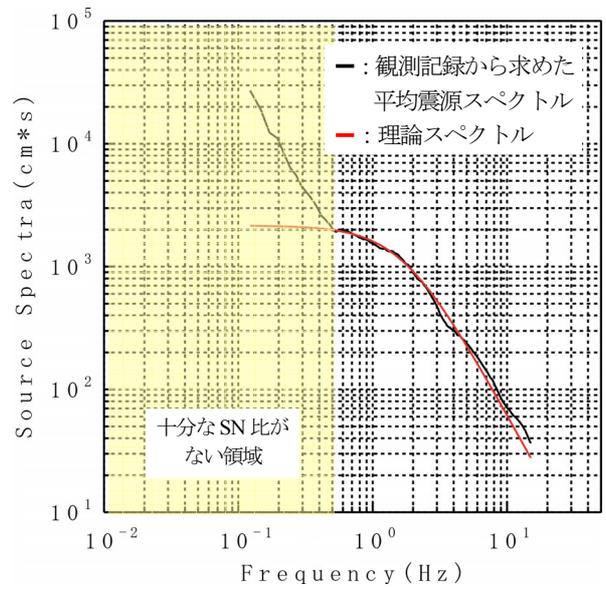
3.2 2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等の 応力パラメータ

推定された震源パラメータを表-3に併記する。同表には地震モーメントのF-netの値に対する推定値の比(M_0 比)および検討に用いたサイト数も示した。推定された地震モーメントはF-netの値に対して0.81倍~2.08倍である。複数の研究者により2005年福岡県西方沖地震の震源インバージョン解析が行われているが^{22)~24)}、これらの解析で得られている地震モーメントはF-netの値の1.1倍~1.8倍である。また、他の地殻内地震を対象とした震源インバージョン解析ではF-netの2.4倍程度の地震モーメントとなった事例もある。地震モーメントの推定方法が異

なることを勘案すれば、本検討で推定された地震モーメントは概ね妥当であると考えられる。観測記録から求めた平均震源スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ の比較例を図-6に示す。同図より、スペクトルに $1/f$ の傾向が見られSN比が悪いと思われる周波数帯(図中、黄色い網掛け部、本震:0.07Hz, No.12の地震:0.5Hz以下)を除けば、平均震源スペクトルと理論スペクトルは良く適合していることが判り、得られたパラメータの妥当性が確認できる。ここでは、2地震について比較結果を示したが、その他の地震についても両スペクトルはこれらと同程度適合している。なお、SN比が悪い周波数帯を除けば、本震の平均震源スペクトルと余震のそれとのレベルの違いは明らかである。

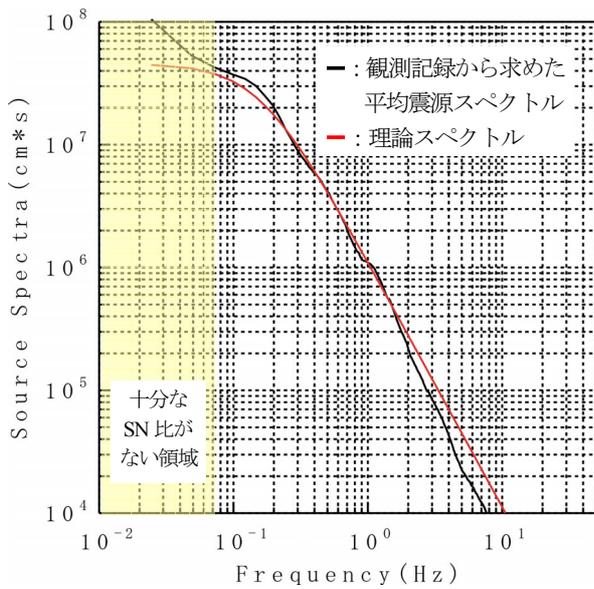


(1)本 震

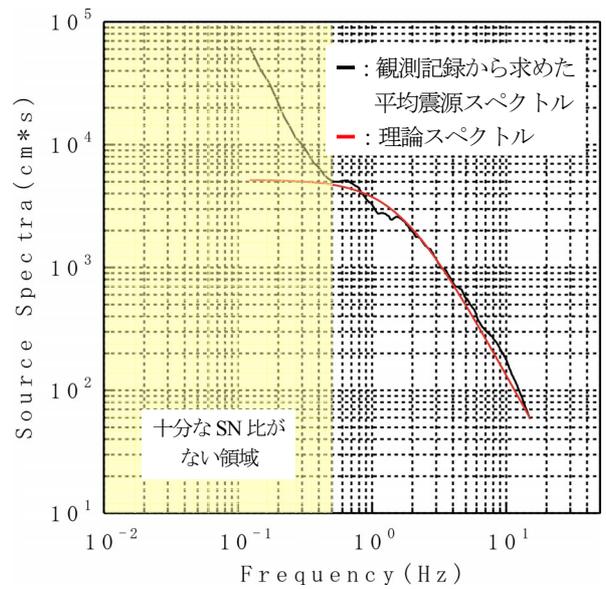


(2)No.1の地震

図-5 観測スペクトルから求めた平均震源スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ の比較例
(2003年宮城県北部地震 本震および余震等)



(1)本 震



(2)No.12の地震

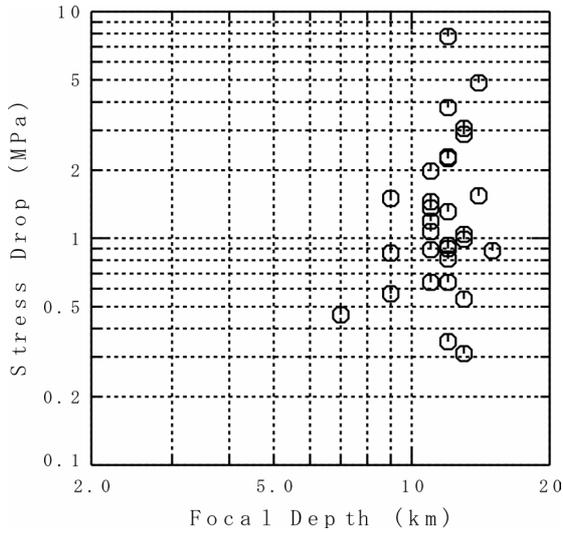
図-6 観測スペクトルから求めた平均震源スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ の比較例
(2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等)

得られた応力パラメータは 0.3MPa~9.3MPa(3bar~93bar), その対数平均は 1.4MPa(14bar)程度となり, 既往検討結果^{8), 10)}と大きな差はない. 一方, 対数標準偏差は 2.3 とばらつきが大きい, これも既往検討結果^{8), 10)}と調和的である.

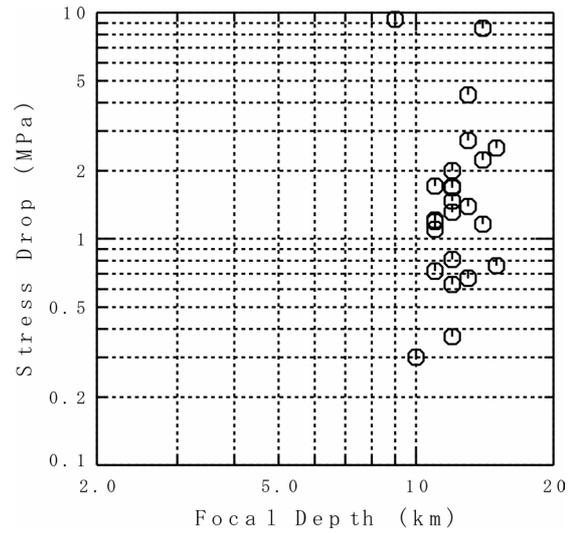
3. 3 応力パラメータの震源深さ・地震規模依存性 および強震動予測レシピとの関係

震源深さ D (km)と応力パラメータ $\Delta\sigma$ (MPa)の関係を図-7に示す. 両者の間には相関が認められるとは言いがたい. これは既往検討結果^{8), 10)}と調和的である.

地震モーメント M_0 (N・m)と応力パラメータ $\Delta\sigma$ (MPa)の関係を図-8に示す. 両者の間にはばらつきは大

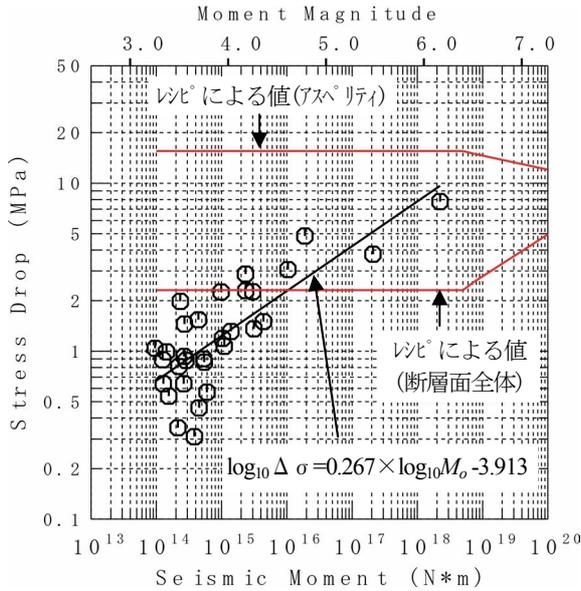


(1) 2003年宮城県北部地震 本震および余震等

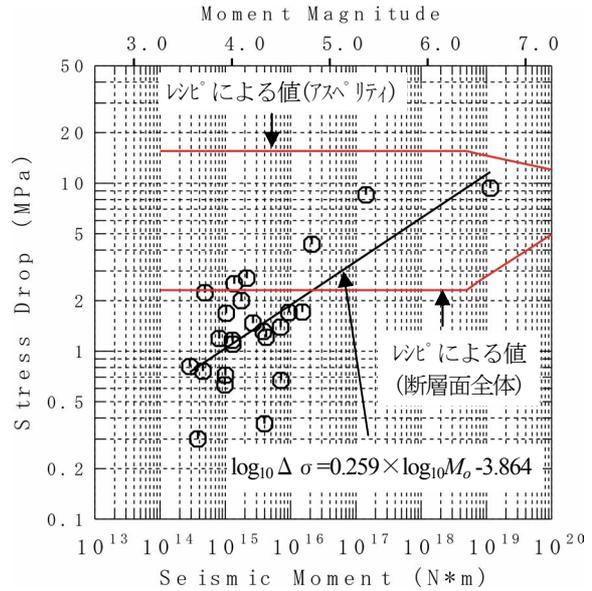


(2) 2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等

図-7 震源深さと応力パラメータの関係



(1) 2003年宮城県北部地震 本震および余震等



(2) 2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等

図-8 地震モーメントと応力パラメータの関係

きいものの、正の相関が認められる。川瀬・松尾¹⁰⁾は「内陸地震の応力パラメータは地震規模が大きくなると大きくなる傾向が弱いながら見られるが、全般的には地震規模依存性はほとんどみられない」としているが、これとはやや異なる結果となった。本研究で対象とした地震のうち比較的規模の小さな地震は、一部を除いて2003年宮城県北部地震および2005年福岡県西方沖地震の余震である。本震の断面上での未破壊領域が破壊したものが余震と考えられ、このため余震の応力パラメータは余震以外の中小地震のそれよりは小さい可能性がある。したが

って、ここで得られた応力パラメータの地震規模依存性が一般的な特徴と言えるかどうかについては、更なる検討が必要であろう。また、これ以外に、川瀬・松尾¹⁰⁾が日本全国を対象としているのに対し、本検討では福岡県地域や宮城県北部地域に特化していること、地震モーメントの評価法が違うこと、などが川瀬・松尾¹⁰⁾による結果とやや異なる原因として考えられる。なお、最小2乗法による両者の関係は以下に示す通りである。

●2003年宮城県北部地震 本震および余震等

$$\log_{10} \Delta \sigma = 0.267 \times \log_{10} M_0 - 3.913 \quad (14)$$

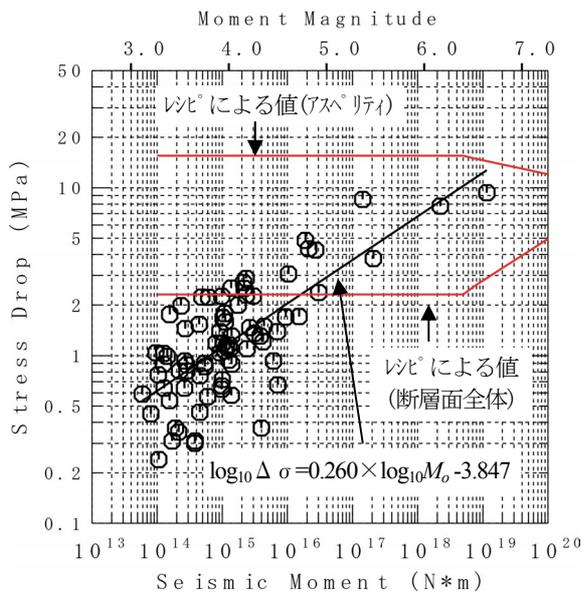


図-9 地震モーメントと応力パラメータの関係
(3地域の全78地震)

●2005年福岡県西方沖地震 本震および余震等

$$\log_{10} \Delta \sigma = 0.259 \times \log_{10} M_0 - 3.864 \quad (15)$$

既往研究¹¹⁾で得られている近畿地方で発生する地震の両者の関係は

$$\log_{10} \Delta \sigma = 0.277 \times \log_{10} M_0 - 4.122 \quad (16)$$

と表され、これらの3式における係数はほぼ同じ、すなわち本研究の範囲内では地域性は認められないことがわかる。参考までに、この3地域の全78地震を対象として得られる両者の関係を図-9および式(17)に示す。

$$\log_{10} \Delta \sigma = 0.260 \times \log_{10} M_0 - 3.847 \quad (17)$$

図-8および図-9には強震動予測レシピ⁶⁾で与えられる断層面全体の平均応力降下量およびアスペリティにおける応力降下量の値を赤線で併記した。これらの図より、本検討で得られた応力パラメータは地震モーメントが $1.0 \times 10^{16} \text{ N}\cdot\text{m}$ ($1.0 \times 10^{23} \text{ dyne}\cdot\text{cm}$)程度未満では、強震動予測レシピで設定される断層面全体の平均応力降下量の値を概ね下回っているが、それ以上の地震モーメントに対してはこれを越えるケースが見られる。比較的規模の大きな地震ではクラックモデルは必ずしも成り立たず、アスペリティモデルの考慮が必要とされる。アスペリティモデルを想定した場合、アスペリティにおける応力降下量 $\Delta \sigma_a$ と断層面全体の平均応力降下量 $\Delta \sigma_c$ との関係はMadariaga²⁵⁾により、式(18)で表される。

$$\Delta \sigma_a = \frac{S}{S_a} \times \Delta \sigma_c \quad (18)$$

ここで、 S は断層総面積、 S_a はアスペリティ領域の面積である。Somerville *et al.*²⁶⁾によれば、アスペリティ領域の面積が全断層面積に占める割合(S_a/S)は10%~40%で、平均値は22%である。アスペリティ面積比として平均値

の22%を採用した場合、式(18)より $\Delta \sigma_a$ は $\Delta \sigma_c$ の約4.5倍となる。本検討ではアスペリティモデルを等価なクラックモデルに置き換えて応力パラメータを求めているため、比較的規模の大きな地震では、断層面全体の平均応力パラメータ $\Delta \sigma_c$ とアスペリティにおける応力パラメータ $\Delta \sigma_a$ との中間的な値を求めていることになる。これが、比較的規模の大きな地震では、強震動予測レシピで設定される断層面全体の平均応力降下量の値を上回る理由と考えられる。

4 おわりに

本検討では2003年宮城県北部地震および2005年福岡県西方沖地震の本震および余震等について、その応力パラメータを求めた。まず、2003年宮城県北部地震については全31地震(223記録、 M_j : 3.5~6.4、震源深さ: 7~15km)を対象とした。得られた応力パラメータは0.3MPa~7.8MPa (3bar~78bar)となり、その対数平均は1.2MPa (12bar)程度であった。2005年福岡県西方沖地震については全24地震(168記録、 M_j : 3.6~7.0、震源深さ: 9~15km)を対象とした。得られた応力パラメータは0.3MPa~9.3MPa (3bar~93bar)となり、その対数平均は1.4MPa (14bar)程度であった。また、いずれの地域ともに応力パラメータの対数標準偏差は2.0程度となり、ばらつきは大きいことが明らかとなった。

最後に、応力パラメータの震源深さ依存性や地震規模依存性について検討を行ない、強震動予測レシピに基づく応力降下量との比較を行なった。まず、震源深さ依存性については、いずれの地域とも震源深さと応力パラメータの関係はばらつきが大きく、明確ではなかった。強震動予測レシピでは応力降下量の震源深さ依存性は考慮されていないが、本研究で得られた結果はこの妥当性を示すものと言える。一方、応力パラメータの地震規模依存性は概ね認められた。その地震規模依存性は宮城県北部地域、福岡県西方沖地域、近畿地方ともに同様の傾向を示し、その地域的な差異は認められない。ただし本研究では、以下に示す2つの要因により、比較的規模の大きな地震では応力パラメータがやや大きめに、比較的規模の大きな地震では応力パラメータがやや小さめに、評価されている可能性があり、ここで得られた地震規模依存性が一般的な特徴と言えるかどうかについては、更なる検討が必要であろう。

- 比較的規模の大きな地震では、アスペリティモデルを等価なクラックモデルに置き換えて応力パラメータを求めているため、断層面全体の平均応力パラメータとアスペリティにおける応力パラメータとの中間的な値を求めていることになる。
- 対象とした地震のうち比較的規模の小さな地震は、その多くがマグニチュード6級以上の大地震の余震であ

る。本震の断面上での未破壊領域が破壊したものが余震と考えられるため、余震の応力パラメータは余震以外の中小地震のそれよりは小さい可能性がある。

謝辞

本検討を行うにあたり、独立行政法人 防災科学技術研究所の KiK-net による観測記録、F-net による震源メカニズム解を利用しました。査読者の方々には有益なご意見を頂きました。また、一部の図の作成には GMT²⁷ を用いました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大阪府土木部：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書，1997.
- 2) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書，2007.
- 3) 文部科学省地震調査推進本部地震調査委員会強震動評価部会：糸魚川－静岡構造線断層帯(北部，中部)を起震断層と想定した強震動評価手法について，<http://www.jishin.go.jp/main/>，2001.
- 4) 入倉孝次郎，三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌，Vol.110，pp.849-875，2001.
- 5) 入倉孝次郎，三宅弘恵，岩田知孝，釜江克宏，川辺秀憲：強震動予測のための修正レシピとその検証，第 11 回地震工学シンポジウム，No.109，2002.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)，http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf，2008.
- 7) 入倉孝次郎，三宅弘恵，岩田知孝，釜江克宏，川辺秀憲：周波数帯域に応じた強震動予測手法の高精度化，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，平成 13 年度研究成果報告書，pp.205-216，2002.
- 8) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会造系論文集，No.556，pp.15-24，2002.
- 9) 佐藤智美：中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源さ依存性及び地域性に関する研究，土木学会地震工学論文集(CD-ROM)，No.48，2003.
- 10) 川瀬博，松尾秀典：K-NET，KiK-net，JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析，日本地震工学会論文集，Vol.4，No.1，pp.33-52，2004.
- 11) 鶴来雅人，岡崎敦，羽田浩二，入倉孝次郎：近畿地方で発生する地震の応力降下量の特徴，第 12 回地震工学シンポジウム論文集，pp.378-381，2006.

- 12) Andrews,D.J. : Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, *Geophysical monograph* 37, Maurice Ewing Vol.6, pp.259- 267, 1986.
- 13) Brune,J.N. : Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 14) Boore,D.M. and Boatwright,J. : Average body-wave radiation coefficient, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.74, pp.1615-1621, 1984.
- 15) Thomsom,D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, pp.1055-1096, 1982.
- 16) Lees,J.M. and Park,J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geo-sciences*, Vol.21, pp.199-236, 1995.
- 17) 加藤護，中西一郎，小林昭夫，高山博之：マルチプル・テーパー法を用いた遠地地震波形記録のスペクトル解析，気象庁精密地震観測室技術報告，Vol.15，pp.1-23，1998.
- 18) Aki,K. : Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 19) Boatwright,J. : The seismic radiation from composite models of faulting, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.78, pp.489-508, 1988.
- 20) Iwasaki,T., Yoshii,T., Moriya,T., Kobayashi,A., Nishiwaki,M., Tsutsui,T., Iidaka,T., Ikami,A., and Matsuda,T. : Precise P and S wave velocity structures in the Kitakami massif, Northern Honshu, Japan, from a seismic refraction experiment, *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, pp.22187-22204, 1994.
- 21) Uehira,K., Yamada,T., Shinohara,M., Nakahigashi, K., Miyamachi,H., Iio,Y., Okada,T., Takahashi,H., Matsuwo,N., Uchida,K., Kanazawa,T., and Shimizu, H. : Precise aftershock distribution of the 2005 West off Fukuoka Prefecture Earthquake(Mj=7.0) using a dense onshore and offshore seismic network, *Earth Planets and Space*, Vol. 58, No. 12, pp.1605-1610, 2006.
- 22) 防災科学技術研究所：近地地震動記録による福岡県西方沖で発生した地震の震源インバージョン，<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/fukuoka050320/>，2005.
- 23) 山中佳子：EIC 地震学ノート No.163 : 2005 年 3 月 20 日福岡県西方沖の地震(Mj7.0)，http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2005/EIC163.html，2005.

- 24) 浅野公之, 岩田知孝 : 震源域近傍強震動記録からみた 2005 年福岡県西方沖の地震の震源過程, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/050320inv.html>, 2005.
- 25) Madariaga,R. : On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, pp.2243-2250, 1979.
- 26) Somerville,P.G., Irikura,K., Graves,R., Sawada,S., Wald,D., Abrahamson,N., Iwasaki,Y., Kagawa,T., Smith,N., and Kowada,A. : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, Vol. 70, pp.59-80, 1999.
- 27) Wessel,P. and Smith,W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, American Geophysical Union, 1998.

(2008 年 9 月 18 日受付)