



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

川瀬 博¹⁾、松尾秀典²⁾

- 1) 正会員 九州大学大学院人間環境学研究院、教授 工博
e-mail:kawase@arch.kyushu-u.ac.jp
2) 日立システム アンド サービス、工修
e-mail:hi-matsuo@hitachi-system.co.jp

要 約

強震動予測には地震動特性の適切な評価が不可欠である。そこで本論文では K-NET、KiK-net、JMA 震度計観測網の強震観測データに基づき、スペクトル分離手法によって震源・パス・サイトの各特性を分離抽出した。多数の観測データの同時分離によって、通過する経路数の少ない北海道北西部地域の Q 値を除き、安定した各特性が得られた。震源特性ではプレート間地震・プレート内地震・内陸地震にわけてそのコーナー周波数から Brune の応力降下量を求めたところ、内陸地震は有意に小さいこと、応力降下量には深さ依存性が認められるが、単純な線形関係にはないことがわかった。伝播経路特性では火山フロントの背弧側で前弧側の約半分の Q 値が得られ、幾何減衰に震源距離依存性を考慮したことで内陸地震の Q 値はプレート間地震などの Q 値とほぼ同程度となった。

キーワード: スペクトル解析、距離減衰、幾何減衰、応力降下量、サイト特性

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、全国規模で張り巡らされた強震観測ネットワークが公的機関によって一つならず整備され、データが公開されるようになったことは、強震動の特性を研究しそれを地震防災に役立てようとするものにとって大変貴重なことであり、そのデータを活用することは社会的要請の観点からも国費の説明責任上も重要である。この種のネットワークの第一号である K-NET¹⁾ が防災科学技術研究所によって整備され 1996 年 5 月に運用を開始してすでに 8 年近くが経過している。それに続いて 1996 年 10 月には気象庁の震度計観測網が稼動を開始し、さらに微小地震観測網である Hi-Net に併設された地中観測点を有する KiK-net が 1997 年 6 月に観測を開始した。その後、これら最新の強震観測網で観測された中小地震はかなりの数に上っている。残念ながら大地震といえる地震は最近の 2003 年 9 月 26 日に発生した M8.0 の十勝沖地震まで観測されていなかったが、中小地震の記録の方がむしろ地盤の非線形化の程度が小さいために震源・パス・サイト各特性の分析には適しているといえる。

最近の強震動予測には、理論的方法で求めた長周期域の波形と統計的グリーン関数から求めた短周期域の波形をマッチング周波数でフィルターし重ね合わせる、いわゆるハイブリッド合成法を用いることが多い²⁾³⁾。このハイブリッド合成法では理論的方法においては地盤の S 波速度構造が広域にわたって必要となり、一方では精度の高い統計的グリーン関数を生成するために、サイト増幅特性の適切な評価が不可欠となる。そこで我々は日本全国で観測されている K-NET、KiK-net、JMA 震度計ネットワークの強震観測データに基づき、まずスペクトル分離手法によりその震源、伝播経路、およびサイト

特性を抽出し、その各特性の地域性などに注目して分析を加えることとした。今回解析に用いたデータ総量はこれまでにない規模であり、また用いた基準観測点もこれまでにない硬い地盤で地震基盤相当であることから、以下に示すような興味深い結果が得られた。

2. 地中地表記録を用いた基準観測点の地盤構造の推定

スペクトルの分離解析では 3 特性が和の形をとっていることから、何らかの拘束条件が 1 つ必要となる⁴⁾⁵⁾。最も簡単な拘束条件はある基準観測点でサイト特性を特定の値(通常は 1.0)とすることである。しかしその場合には得られる震源スペクトルはその観測点上のものとなり、得られる他地点のサイト特性はその基準観測点に対する相対増幅率となる。もしも基準観測点にサイト特性があるとそれは全観測点のサイト特性と震源特性に反映されてしまう⁶⁾ので、できるだけ硬質でサイト特性の含まれない地震基盤相当の地点を基準観測点に選択したい。過去の検討事例では我々は九州地方の K - NET 観測点の中で基準観測点にふさわしい地点を探索し、最も良好な観測点として MYZ005(日向)を選択したが⁷⁾⁸⁾、その後全国規模の分離解析により MYZ005 も 1Hz 程度で既にかなりサイト増幅が存在すると指摘されている⁹⁾。そこで本研究では KiK-net のボアホール観測データを利用して浅い地盤の影響を剥ぎ取り、地中に存在する硬質岩盤が露頭していた場合に相当するようにあらかじめ変換することとした。

まず事前解析により、サイト特性の小さい観測点の中から、観測地震波数が多く、地中基盤層の S 波速度が大きな観測点として YMGH01(防府)を基準観測点に選択した。この観測点は表層の S 波速度が 1,000m/s、すぐ下に 2,100m/s の層、さらにその下には 3,100m/s の層があることがボーリング調査(PS 検層)によって分かっており、露頭岩盤サイトである。ただし PS 検層値と実際の値は必ずしも一致しないことが多いので、地中地表記録のスペクトル比より正確な地盤構造を同定することとした。層厚、単位体積重量は固定し、各層の S 波速度と減衰定数(のパラメタ)を推定した。最適化を行うターゲットはスペクトル比を対数で表示したものと位相差を用いた。推定手法として遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を用い個体数 50、世代数 500、交差率 70%、突然変異率 1%とした。振幅がほぼ同レベルで地盤の線形性を仮定できる 8 地震の小加速度記録 16 波から、S 波の初動以降を 5 秒、前後に 2 秒のコサインテーパを付けて波形を切り出し、そのフーリエスペクトルから地表・地中のスペクトル比 $H_o(f)$ を求めた。全 16 波(水平 2 成分)の平均値をターゲットとした。位相差はクロススペクトル G_{xy} の位相 $\theta_o(f)$ を用いた。従来、位相は乱されやすいとして目的関数として振幅の残差だけを用いることがよく行われてきたが、本研究では拘束を強くするため両方を最適化するようにした。具体的には目的関数として以下の 2 式を仮定し GA の 250 世代までは $misfit_1$ つまり振幅の残差が最小になるように、250 世代から 500 世代までは $misfit_2$ 、すなわち振幅と位相の両方の残差が最小になるように地盤構造を推定した。

$$misfit_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\log H_o(f) - \log H_t(f))^2} \quad (1)$$

$$misfit_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\log H_o(f) - \log H_t(f))^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\theta_o(f) - \theta_t(f))^2} \quad (2)$$

ここで H と θ の下添字 t は理論値を意味している。 f_1 、 f_2 はそれぞれ 0.1Hz、15 Hz とした。 N は f_1 から f_2 までのデータ数である。減衰定数のパラメタは全層一律とし、文献¹⁰⁾ にならって以下のように仮定し周波数依存を考慮した。

$$h = 1/2\alpha f^\beta + \gamma \quad (3)$$

ここで α は最大 200、 β は最大 2 として γ は最大 0.04 までを探索範囲とした。S 波速度については基盤以外は PS 検層の S 波速度の 5 割を探索範囲とし基盤は 2 割を探索範囲とした。入射角は 0°、すなわち鉛直入射と仮定した。また密度は以下の換算式¹¹⁾で固定した。

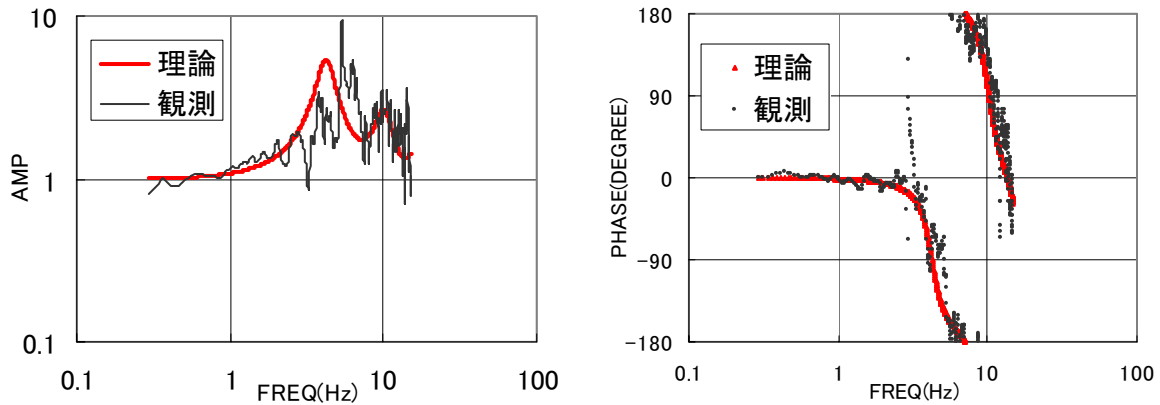


図1 理論と観測によるスペクトル比および位相差の最適化

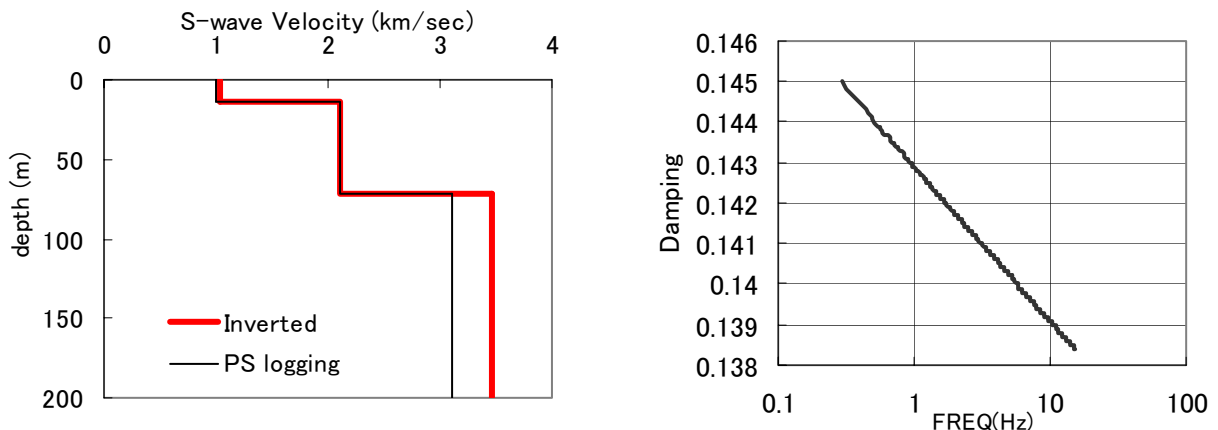


図2 同定されたS波速度構造と減衰定数

$$\rho = 0.31V_p^{0.25} \quad (4)$$

ここで ρ は密度 (g/cm^3)、 V_p はP波速度 (m/s) である。P波速度はボーリング調査結果を尊重した。

振幅と位相の両方の残差の和が最小となるようにS波速度と減衰定数を同定した結果、図1に示すように両者をよく一致させられる構造が求められた。その構造は図2に示すように最下層でS波速度が約3,400 m/s となった。得られた減衰定数は、値はかなり大きいものの、その振動数依存性は弱い。この減衰値は地中と地表のスペクトル比を説明するのに必要な値であり、ここでモデル化している1次元成層構造以外の構造によって生じる散乱波によるインコヒーレントな波動の影響が大きく寄与しているものと考えられる。以下の解析に先立ち、この同定構造で基準観測点の地表観測波からサイト特性を剥ぎ取り3,400 m/s の露頭岩盤相当(入射波の2倍)のスペクトルに変換した。

3. 分離解析で得られたスペクトル特性

3.1 解析手法とデータ

1996年8月から2002年6月までの間のMjma 4.5、震源深さ 60 km 、震源距離 200 km 、最大加速度 200 gal 、同一地震トリガー地点数 3 の条件にあうK-NET観測点(913点)、KiK-net観測点(468点)、JMA95型震度計観測点(319点)、計1,700点のいずれかの観測点で観測された加速度波形をデータベース化し、そのフーリエスペクトルに対して統計的な地震動特性を抽出した。用いた地震観測点ペアは全部で約15,800ペアとなった(地震波はその2倍)。同様の分離を、最大加速度、最大速度、計測震度を求めるためのフィルター波ベクトル合成加速度についても実施しているが別途報告する。

データはまず、日本付近の平均的なせん断波の走時表(1997年10月以前は83A走時表、それ以降はJMA2001走時表)を用いて、S波初動以降をマグニチュードに応じた時間区間(Mjma 6で5秒、6 < Mjma

7で10秒、7<Mjmaで15秒)で切り出し、前後に2秒のコサインテーパをつけた。全波形を目視によりチェックして、S波初動以降がうまく切り出されていないと判断された場合は、データセットから取り除いた。拘束条件に用いる基準観測点 YMGH01(防府)については、推定した地盤構造の一次元増幅特性で表層を剥ぎ取り露頭基盤波を求めた。他地点のサイト特性はこの基準観測点に対する比として求まるが、同定された基盤のS波速度は3,400m/sに達しており地震基盤と考えられるので、得られたサイト特性は絶対値と考えてよい。

フーリエスペクトルは次のようにモデル化した。

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j \quad (5)$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk} \quad (6)$$

i : 地震

j : 観測点

k : 地域

$l(i)$: 地震のタイプ

ここで S_i は震源特性、 G_j はサイト特性である。また n は幾何減衰を表しており、スペクトルの場合理論的には実体波で1、表面波では0.5となる。 b は内部減衰+散乱減衰を表す項である。本論文では震源距離100km以内では実体波が卓越すると仮定して $n=1$ とし、100km以遠でのみ n を同定した。減衰項 b には地域性を考慮して第四紀の火山の分布や糸魚川-静岡構造線などで6地域に分割し(図3)、地震のタイプとしては海溝性(プレート間)、海溝性(プレート内)、内陸の3タイプに分類した。そのときの分類の基準として内陸地震では震源深さが25km以下で震源が内陸部にあるもの、プレート内地震

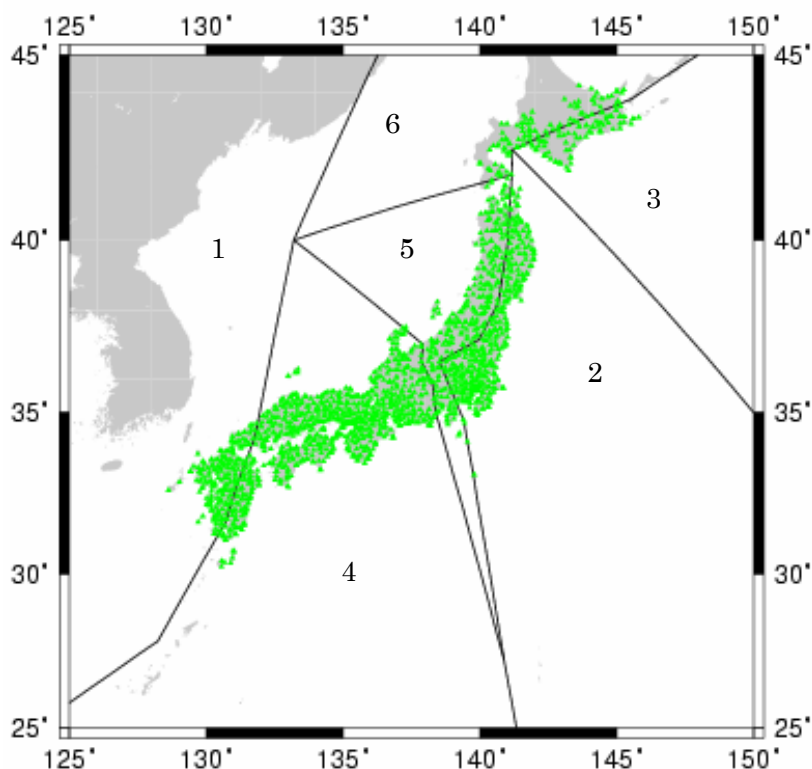


図3 観測点位置と地域区分

は震源深さが 25km 以深で沈み込むプレートの内部に位置するもの、さらにプレート間地震は沈み込むプレート上面に位置し、かつ CMT の発震機構解(1997 年以前は Harvard¹²⁾、それ以後は Freesia¹³⁾) が低角逆断層であるものとして判断した。それぞれのタイプ毎に震央と発震機構解を図 4~図 6 に示した。結果として解析した地震は内陸 48 地震、プレート間 99 地震、プレート内 81 地震の計 228 地震である。

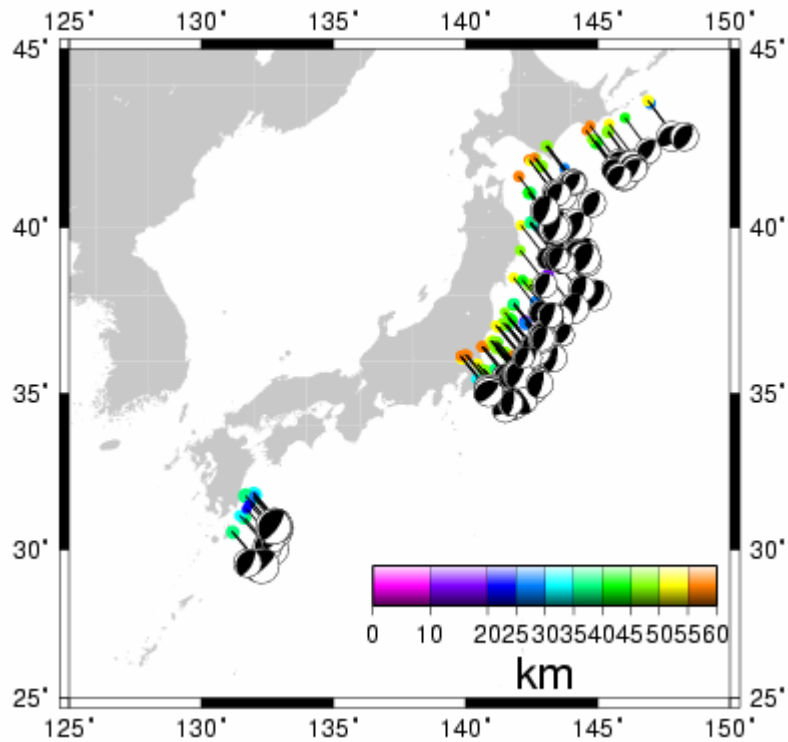


図 4 プレート間地震の震央とメカニズム、震源深さ

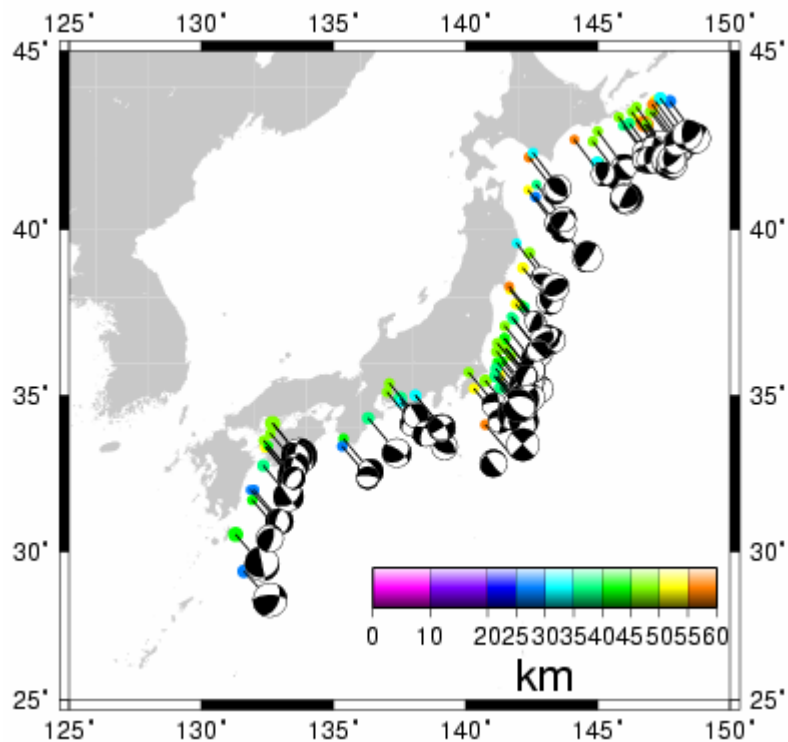


図 5 プレート内地震の震央とメカニズム、震源深さ

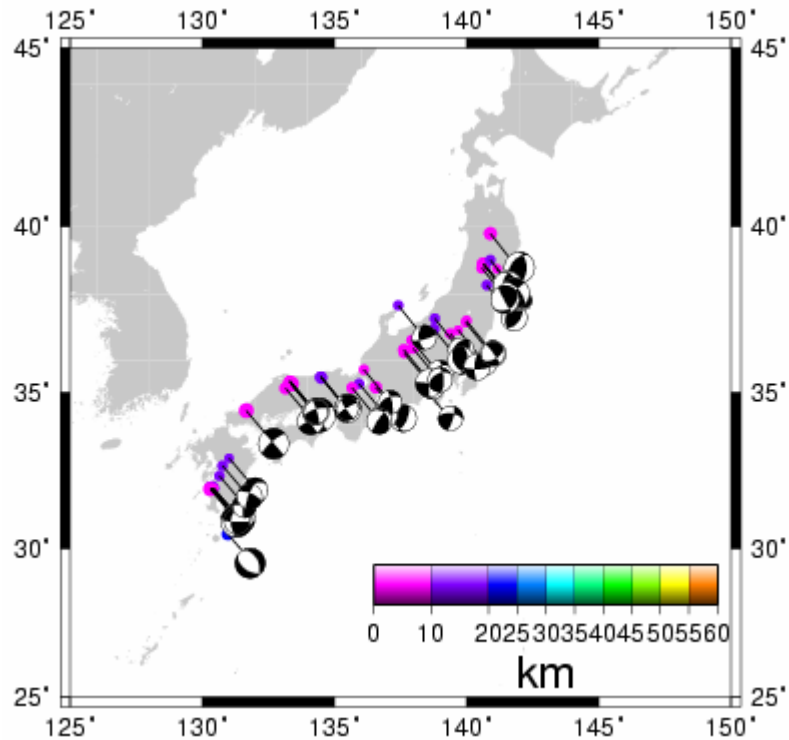


図6 内陸地震の震央とメカニズム、震源深さ

フーリエスペクトルの統計的特性の抽出には、事前にトリガー前の記録部分を用いて S/N 比をチェックして有効周波数帯域を調べ、さらに時間ウィンドウの幅も考慮して 0.3 から 20Hz の範囲で行った。また水平動は地震波動の放射特性の影響を小さくするため NS・EW 成分の rms 値を用いた。なおフーリエスペクトルは 0.1Hz の Parzen window により平滑化している。表 1 に用いた全 228 地震の諸元を示す。

3.2 分離で得られた震源スペクトル特性

フーリエスペクトルから得られた震源特性、伝播経路特性、サイト特性について若干の分析を試みる。まず分離された震源特性を下式により震源密度関数に変換した。

$$M(f) = \frac{4\pi\rho Vs^3 S(f)}{\omega^2 R_{\theta\phi} F_s P_R} \quad (7)$$

ここで

- M(f): 震源密度関数 (10^{-7} N・m)
- ρ: 密度 (g/cm^3)
- Vs: せん断波速度 (km/s)
- R : ラディエーションパターンの係数
- Fs: 自由地表面の影響による増幅
- P_R: エネルギー分配の係数

である。本検討では海溝性地震については $3.0\text{g}/\text{cm}^3$ 、Vs は $4.0\text{km}/\text{s}$ 、内陸地震については $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、Vs は $3.6\text{km}/\text{s}$ とし R は 0.63、Fs は 2、P_R は rms 値を用いているので $1/\sqrt{2}$ とした。次に ω^{-2} モデルより計算される震源密度関数と比較することでコーナー周波数 f_c と遮断周波数 f_{\max} を同定する。

$$M(f) = \frac{M_0}{(1+(f/f_c)^2)(1+(f/f_{\max})^2)} \quad (8)$$

表 1 用いた地震の諸元(その 1)

地震No	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	Mj	タイプ	Mo (dyn.cm)	fc (Hz)	fmax (Hz)	Ds (bar)
1	199608110312	38.905	140.637	9	5.9	内陸	9.50E+24	0.12	13.0	3
2	199608110354	38.895	140.654	9	5.4	内陸	1.80E+24	0.23	12.6	4
3	199608110810	38.863	140.676	10	5.7	内陸	3.80E+24	0.20	12.6	6
4	199608112048	38.89	140.673	4	4.8	内陸	2.50E+23	0.41	26.1	3
5	199608131113	38.795	140.588	6	5.1	内陸	1.10E+24	0.24	15.4	3
6	199608172100	35.562	141.236	45	4.5	プレート内	6.60E+23	0.81	5.5	47
7	199609091334	30.486	130.962	22	5.7	内陸	4.50E+24	0.14	19.8	2
8	199609111137	35.636	141.22	52	6.4	プレート内	2.00E+25	0.50	7.7	332
9	199609221129	34.092	140.758	58	4.9	プレート内	7.00E+23	1.31	6.4	209
10	199610181950	30.572	131.199	38	6.2	プレート間	1.00E+26	0.13	8.8	29
11	199610191731	31.875	131.966	33	4.8	プレート間	2.00E+24	0.42	10.3	20
12	199610192301	31.834	131.986	37	5.1	プレート間	4.20E+24	0.45	7.7	51
13	199610192344	31.795	132.011	34	6.9	プレート間	1.40E+26	0.21	6.9	172
14	199610200617	31.709	131.961	37	5	プレート間	2.40E+24	0.50	10.2	40
15	199610281824	43.517	146.977	29	5.3	プレート間	1.50E+24	0.72	7.4	74
16	199611111250	30.608	131.147	37	4.5	プレート間	1.40E+24	0.52	9.7	26
17	199611201127	34.359	141.314	57	6	プレート内	1.80E+25	0.31	13.2	71
18	199612030718	31.766	131.683	38	6.7	プレート間	1.20E+26	0.16	7.3	65
19	199612121620	31.695	131.938	40	4.8	プレート内	8.50E+23	0.51	11.2	15
20	199612211029	36.093	139.864	53	5.4	プレート間	2.10E+24	0.95	9.0	239
21	199701111450	31.56	131.897	37	4.8	プレート間	1.36E+24	0.69	7.2	59
22	199702201655	41.757	142.878	49	5.7	プレート間	1.07E+25	0.39	8.6	84
23	199703161451	34.925	137.528	39	5.8	プレート内	2.97E+24	0.83	9.3	226
24	199703261731	31.969	130.361	12	6.5	内陸	1.40E+25	0.19	20.9	17
25	199703261739	31.971	130.344	10	4.7	内陸	1.80E+23	0.72	26.0	12
26	199704010051	33.379	132.445	52	4.6	プレート内	1.48E+23	1.94	13.3	144
27	199704030433	31.967	130.324	15	5.6	内陸	1.33E+24	0.38	21.8	13
28	199704030647	33.377	132.434	52	4.9	プレート内	3.89E+23	1.40	15.6	142
29	199704040233	31.957	130.395	14	4.6	内陸	1.14E+23	0.92	32.1	16
30	199704051324	31.967	130.406	12	4.8	内陸	3.11E+23	0.64	31.2	15
31	199704092320	31.97	130.413	11	4.8	内陸	2.04E+23	0.77	24.1	17
32	199704092323	31.971	130.426	9	4.5	内陸	1.01E+23	0.81	50.0	10
33	199705120759	37.057	141.25	54	5.5	プレート間	2.28E+24	0.98	10.8	285
34	199705131438	31.945	130.305	9	6.3	内陸	1.22E+25	0.19	19.9	15
35	199705140832	31.933	130.346	9	4.7	内陸	2.21E+23	0.55	17.8	7
36	199705180625	32.376	130.643	13	4.6	内陸	8.47E+22	1.27	21.5	32
37	199706251850	34.438	131.669	8	6.6	内陸	5.66E+24	0.33	17.6	37
38	199709040516	35.259	133.379	9	5.1	内陸	6.83E+23	0.47	18.0	13
39	199710031346	42.516	144.823	46	4.9	プレート内	3.99E+23	1.41	5.6	149
40	199710090620	41.918	145.021	37	5.6	プレート内	1.19E+25	0.15	6.5	5
41	199710091229	41.923	144.962	32	5.1	プレート内	5.33E+23	0.53	8.4	11
42	199710091300	41.912	144.961	31	5	プレート内	9.45E+23	0.34	18.6	5
43	199710111444	34.424	138.272	34	4.9	プレート内	3.38E+23	1.21	11.5	80
44	199710111845	38.879	142.171	50	5.1	プレート内	8.05E+23	1.20	11.9	185
45	199710170400	43.479	146.465	49	4.8	プレート内	7.07E+22	2.94	11.7	239
46	199711051844	36.587	141.236	44	4.5	プレート間	1.00E+23	3.13	7.1	407
47	199711201056	40.951	142.655	25	5	プレート内	2.75E+23	1.66	9.8	167
48	199712061540	35.73	140.109	48	4.6	プレート内	1.31E+23	2.07	6.7	154
49	199712220603	43.138	146.448	51	5	プレート内	5.46E+23	1.34	10.4	174
50	199712230132	40.175	142.466	37	5.1	プレート間	1.19E+24	0.92	9.2	123

(地震モーメント M_0 , コーナー周波数 f_c , 高域遮断周波数 f_{max} , およびストレスドロップ $D_s(\Delta\sigma)$ については 3.2 参照)

表 1 用いた地震の諸元(その 2)

地震No	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	Mj	タイプ	Mo (dyn.cm)	fc (Hz)	fmax (Hz)	Ds ^o (bar)
51	199801030320	42.951	145.441	50	4.8	プレート間	3.69E+23	4.06	5.8	3280
52	199801161058	35.216	140.322	53	4.6	プレート内	5.36E+22	5.66	5.7	1291
53	199801210021	43.601	146.902	53	5.2	プレート間	3.67E+24	0.58	19.7	95
54	199802051948	43.191	145.807	48	4.9	プレート内	4.08E+23	1.45	14.6	165
55	199802111125	41.953	142.394	55	4.8	プレート間	3.56E+23	1.62	9.9	201
56	199802210955	37.267	138.799	19	5	内陸	3.15E+23	0.65	11.7	16
57	199802260232	35.578	141.117	36	4.6	プレート内	2.75E+23	1.18	5.9	60
58	199803080902	38.522	141.813	52	4.6	プレート間	3.74E+22	4.02	8.1	323
59	199803120427	37.707	142.226	35	5	プレート内	2.70E+23	2.87	5.1	848
60	199803170803	37.037	141.258	50	4.5	プレート間	8.25E+22	2.61	11.5	195
61	199803231837	36.366	141.185	49	5.3	プレート内	1.28E+24	0.98	12.3	160
62	199803261144	43.358	147.094	51	4.6	プレート内	5.50E+23	1.19	18.0	123
63	199804091429	42.798	144.994	48	4.8	プレート内	2.80E+23	1.80	13.2	217
64	199804222032	35.173	136.566	8	5.4	内陸	6.74E+23	0.53	15.1	18
65	199805141954	40.274	143.431	12	5.2	プレート間	1.07E+24	0.67	6.3	43
66	199805150356	40.261	143.454	18	5.8	プレート内	7.19E+24	0.32	6.2	31
67	199805310318	39.026	143.852	11	6.3	プレート間	8.89E+24	0.41	5.1	81
68	199806011021	39.165	143.267	25	5.2	プレート間	4.91E+23	1.13	5.1	94
69	199806142217	35.461	140.752	46	5.6	プレート内	3.58E+24	0.36	5.1	22
70	199807010222	36.619	137.918	9	4.7	内陸	3.79E+23	0.47	10.1	7
71	199808032009	37.207	139.999	8	4.9	内陸	4.99E+23	0.38	15.4	5
72	199808121513	36.233	137.631	3	4.7	内陸	2.25E+23	0.39	27.9	2
73	199808160331	36.325	137.628	3	5.4	内陸	1.17E+24	0.22	19.2	2
74	199808162305	37.248	141.762	42	5.2	プレート間	8.38E+23	1.14	9.2	165
75	199809031658	39.803	140.905	8	6.1	内陸	7.53E+24	0.16	11.1	6
76	199809040802	32.016	131.863	28	4.5	プレート内	1.42E+23	1.30	11.4	41
77	199809151624	38.279	140.764	13	5	内陸	3.19E+23	0.61	13.6	13
78	199810040201	36.768	141.459	40	4.5	プレート内	4.93E+22	5.46	5.5	1066
79	199810140541	40.091	143.454	19	5.4	プレート間	1.76E+24	0.52	5.1	33
80	199811160808	37.671	137.419	12	4.7	内陸	1.45E+23	0.92	15.8	21
81	199811250236	37.068	141.601	39	4.7	プレート間	1.08E+23	3.73	6.5	744
82	199812100056	42.333	143.104	48	4.5	プレート間	2.18E+23	1.72	10.6	147
83	199812172149	36.054	141.386	40	4.9	プレート内	4.37E+23	0.91	7.3	44
84	199901020120	36.23	141.713	46	5	プレート内	6.69E+23	0.65	7.6	24
85	199901220702	38.603	143.12	10	5.5	プレート間	4.77E+24	0.42	5.2	47
86	199901240937	30.565	131.292	40	6.6	プレート内	6.58E+25	0.17	21.2	43
87	199901281025	36.369	137.986	9	4.7	内陸	1.17E+23	1.05	8.4	25
88	199902010152	37.125	141.529	45	5.1	プレート間	8.58E+23	1.11	10.9	156
89	199902010201	37.141	141.484	45	4.7	プレート内	1.38E+22	9.22	9.3	1436
90	199902010429	43.343	147.004	45	5.3	プレート内	4.06E+24	0.59	19.3	111
91	199903071003	42.958	145.968	39	5	プレート内	2.54E+23	1.58	9.3	133
92	199903091253	32.934	131.021	10	4.5	内陸	2.79E+23	0.53	50.0	8
93	199903112006	39.602	141.927	30	4.5	プレート内	4.41E+22	6.19	6.3	1389
94	199903161643	35.274	135.934	12	5	内陸	1.83E+23	0.98	11.9	31
95	199903182127	41.144	142.359	51	4.5	プレート内	3.56E+22	5.00	8.8	591
96	199903190255	41.018	143.227	29	5.7	プレート間	7.14E+24	0.43	5.6	75
97	199903260831	36.447	140.619	59	4.9	プレート間	4.55E+23	1.88	9.6	402
98	199904252127	36.453	140.625	59	5.1	プレート間	6.24E+23	1.41	9.4	232
99	199905072148	35.21	138.342	20	4.7	内陸	1.56E+23	0.81	9.3	15
100	199905170620	41.903	142.45	54	4.5	プレート間	4.33E+22	6.86	6.9	1856

(地震モーメント Mo, コーナー周波数 fc, 高域遮断周波数 fmax, およびストレスドロップ Ds(Δσ)については 3.2 参照)

表 1 用いた地震の諸元(その 3)

地震No	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	Mj	タイプ	Mo (dyn.cm)	fc (Hz)	fmax (Hz)	Ds (bar)
101	199905231719	43.341	146.276	48	4.5	プレート内	2.26E+22	8.50	8.5	1843
102	199906151647	43.025	146.198	38	5.1	プレート内	5.90E+23	1.22	12.1	142
103	199906181608	38.231	141.688	51	4.5	プレート内	1.15E+22	8.51	8.6	941
104	199906220152	43.123	146.027	44	4.8	プレート間	2.57E+23	1.66	8.1	156
105	199907150756	35.932	140.444	50	4.9	プレート間	5.33E+23	0.87	5.1	47
106	199907230653	36.039	141.192	42	4.5	プレート内	1.19E+23	1.65	7.6	71
107	199908030032	40.067	142.107	50	4.6	プレート間	2.70E+22	6.27	6.4	884
108	199908180915	40.063	142.723	28	4.6	プレート間	1.62E+23	1.31	8.5	48
109	199908231511	41.702	143.75	28	5	プレート間	7.37E+23	0.86	5.1	62
110	199908231908	41.987	142.665	49	4.6	プレート間	3.97E+23	1.09	12.2	68
111	199910030609	40.184	143.197	4	5.6	プレート間	2.71E+24	0.62	5.1	86
112	199910161714	36.459	141.538	39	5	プレート内	3.20E+23	1.36	10.6	107
113	199910192216	36.456	141.504	45	4.7	プレート内	9.22E+22	3.35	5.5	460
114	199911151035	38.317	142.431	46	5.5	プレート間	2.89E+24	0.86	14.7	244
115	199911170753	42.079	142.408	60	4.9	プレート内	1.74E+23	2.76	8.7	486
116	199911292134	35.11	137.029	45	4.7	プレート内	1.60E+23	1.76	16.5	116
117	199912222017	32.012	131.994	29	4.8	プレート内	2.16E+23	1.96	8.2	216
118	200001091302	37.287	141.667	43	5	プレート間	5.66E+23	1.46	10.3	234
119	200001151629	37.815	142.636	29	4.6	プレート間	4.71E+22	5.17	5.3	864
120	200001242150	37.14	141.542	45	4.6	プレート間	4.68E+22	5.60	5.7	1092
121	200001282028	36.607	141.146	47	4.5	プレート間	1.26E+23	2.37	7.4	223
122	200001282321	43.006	146.749	59	7	プレート内	1.21E+26	0.32	17.1	527
123	200002111608	39.02	140.907	11	4.7	内陸	1.52E+23	0.80	13.1	14
124	200002112229	37.298	141.657	43	4.5	プレート間	3.59E+22	6.23	6.3	1153
125	200002192233	42.33	143.027	49	4.7	プレート間	8.25E+23	0.90	14.0	80
126	200002202258	42.568	144.122	60	4.5	プレート内	6.99E+22	3.03	15.1	258
127	200004100630	36.187	140.063	55	4.6	プレート間	1.26E+23	4.28	5.1	1312
128	200004130651	40.119	142.433	37	4.8	プレート間	2.34E+23	1.52	8.8	109
129	200004150241	33.641	135.389	42	4.8	プレート内	2.45E+23	1.63	9.0	141
130	200005161940	36.426	140.716	55	4.6	プレート間	1.33E+23	2.81	10.1	392
131	200005241923	41.302	142.676	37	4.5	プレート内	1.71E+23	1.92	6.9	161
132	200006031754	35.687	140.75	48	6.1	プレート間	1.72E+25	0.34	5.1	90
133	200006050954	35.717	136.114	9	4.7	内陸	7.99E+22	0.95	27.4	12
134	200006062357	29.352	131.621	28	6.1	プレート内	5.35E+25	0.22	50.0	76
135	200006080932	32.689	130.764	10	4.8	内陸	2.66E+23	0.71	26.0	17
136	200006130154	42.906	144.722	59	4.6	プレート間	1.46E+23	4.41	5.1	1663
137	200006251534	31.039	131.633	36	5.9	プレート間	1.13E+25	0.31	6.7	45
138	200007010534	37.31	141.665	42	5.1	プレート間	1.06E+24	0.79	12.9	69
139	200007210339	36.526	141.122	49	6.4	プレート間	1.07E+25	0.74	5.7	576
140	200007211416	35.25	141.325	37	5.6	プレート内	2.18E+24	0.50	5.1	36
141	200008031430	31.117	131.466	34	5.1	プレート間	1.68E+24	0.39	8.7	13
142	200008160521	42.982	146.876	56	5.7	プレート内	8.05E+24	0.66	11.3	307
143	200008182247	36.257	141.556	47	4.6	プレート間	1.63E+23	1.73	5.5	112
144	200008192141	36.271	141.484	46	5.4	プレート間	1.06E+24	0.70	6.3	48
145	200008200226	43.635	147.176	54	5.6	プレート内	3.17E+24	1.08	10.7	530
146	200008270030	42.199	142.554	30	4.7	プレート内	3.40E+23	1.19	9.5	76
147	200008281720	37.781	142.076	40	4.8	プレート内	9.22E+22	5.23	5.4	1752
148	200009032001	42.984	146.846	49	5.2	プレート内	1.39E+24	0.89	14.6	130
149	200010031313	40.168	143.37	10	5.9	プレート間	1.32E+25	0.31	5.7	52
150	200010061330	35.271	133.352	9	7.3	内陸	8.62E+25	0.16	14.1	64

(地震モーメント M_0 , コーナー周波数 f_c , 高域遮断周波数 f_{max} , およびストレスドロップ $D_s(\Delta\sigma)$ については 3.2 参照)

表 1 用いた地震の諸元(その 4)

地震No	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	Mj	タイプ	Mo (dyn.cm)	fc (Hz)	fmax (Hz)	Ds (bar)
151	200010081317	35.136	133.153	7	5.5	内陸	4.65E+23	0.47	14.9	9
152	200010082051	35.366	133.313	8	5	内陸	3.11E+23	0.47	19.9	6
153	200010181258	36.929	139.685	9	4.5	内陸	6.48E+22	1.01	12.4	12
154	200010310143	34.295	136.324	39	5.5	プレート内	1.70E+24	1.09	9.6	292
155	200011031633	35.355	133.296	9	4.5	内陸	5.23E+22	0.96	18.0	8
156	200011140057	42.43	144.945	41	5.9	プレート間	7.79E+24	0.54	5.1	163
157	200011141253	42.466	144.932	44	5.2	プレート間	2.24E+24	0.91	5.4	224
158	200011152319	42.768	144.564	55	4.5	プレート間	7.60E+22	5.11	5.2	1347
159	200012050147	35.831	141.146	35	5.3	プレート内	3.11E+24	0.46	5.1	40
160	200101032347	43.636	147.741	25	5.6	プレート内	5.15E+24	0.65	40.9	188
161	200101041318	36.953	138.772	11	5.1	内陸	7.50E+23	0.43	12.0	11
162	200101061148	35.384	137.12	48	4.6	プレート内	1.69E+23	1.98	11.4	174
163	200101091337	33.585	132.36	46	4.6	プレート内	1.04E+23	2.47	11.5	208
164	200101120800	35.463	134.493	11	5.4	内陸	7.11E+23	0.53	13.5	19
165	200101200520	35.501	134.482	11	4.7	内陸	5.42E+22	1.00	13.4	10
166	200101200724	35.49	134.492	11	4.5	内陸	4.41E+22	1.11	11.8	11
167	200102230723	34.79	137.552	32	4.9	プレート内	2.43E+23	2.14	8.3	316
168	200102250654	37.187	142.259	16	5.8	プレート間	4.67E+24	0.70	5.7	213
169	200102261508	37.152	142.273	27	5.4	プレート間	1.13E+24	0.92	5.2	117
170	200103061432	36.635	140.997	52	4.6	プレート間	1.93E+23	1.88	14.9	170
171	200103202040	36.437	141.127	48	4.5	プレート間	9.04E+22	1.84	10.1	75
172	200103241528	34.129	132.696	46	6.7	プレート内	1.51E+26	0.28	16.1	440
173	200103260541	34.114	132.712	46	5	プレート内	4.76E+23	1.31	14.5	142
174	200103310609	36.818	139.378	5	4.9	内陸	3.28E+23	0.36	11.6	3
175	200104032357	35.021	138.097	30	5.1	プレート内	8.17E+23	1.00	9.1	109
176	200104121602	37.273	141.681	44	5	プレート間	5.31E+23	1.28	12.6	148
177	200104140816	42.729	145.385	48	5.4	プレート間	2.16E+24	0.78	6.8	136
178	200104170940	35.614	141.092	38	4.8	プレート内	2.60E+23	1.42	5.1	99
179	200104201905	42.738	145.397	47	4.6	プレート間	2.02E+23	1.46	7.4	83
180	200104252340	32.796	132.342	39	5.6	プレート内	4.00E+24	0.53	15.1	79
181	200105080627	42.332	143.097	49	4.6	プレート間	8.75E+22	4.14	5.1	825
182	200105251555	35.756	140.669	47	4.8	プレート間	4.84E+23	0.71	5.9	23
183	200105310859	36.172	139.811	56	4.5	プレート間	1.19E+23	2.38	10.2	213
184	200106010041	34.991	138.111	30	4.8	プレート内	1.40E+23	2.05	8.8	160
185	200106261846	43.543	147.062	55	5	プレート内	4.15E+23	1.73	10.9	285
186	200107060357	36.638	140.951	53	4.5	プレート間	1.08E+22	8.80	8.8	977
187	200107200602	36.159	139.816	55	4.8	プレート間	2.03E+23	2.85	7.9	624
188	200107240926	37.8	141.893	54	4.8	プレート内	3.79E+22	6.52	6.7	1395
189	200107311359	36.082	141.665	43	4.9	プレート間	2.14E+23	1.68	5.1	135
190	200108042043	37.339	141.81	38	4.9	プレート内	2.32E+23	1.54	16.8	113
191	200108140511	40.993	142.44	38	6.2	プレート間	3.88E+25	0.36	8.3	240
192	200108241848	41.015	142.385	41	5.2	プレート間	5.49E+23	1.81	5.6	432
193	200108252221	35.149	135.663	8	5.1	内陸	2.38E+23	0.82	11.7	24
194	200108300552	31.485	131.839	24	4.6	プレート間	2.03E+23	1.52	6.9	95
195	200109030003	36.385	141.152	49	4.6	プレート間	5.61E+23	0.61	19.1	17
196	200109042354	36.754	141.476	42	5.2	プレート内	3.86E+23	2.42	5.8	727
197	200109061040	37.501	141.478	48	4.5	プレート間	2.54E+22	6.45	6.7	905
198	200109171121	31.751	131.996	28	4.7	プレート間	2.54E+23	1.55	6.9	126
199	200110021720	37.726	141.818	41	5.4	プレート間	2.10E+24	0.86	10.1	177
200	200110022114	33.414	135.334	26	4.6	プレート内	3.49E+22	3.24	8.7	158

(地震モーメント M_0 , コーナー周波数 f_c , 高域遮断周波数 f_{max} , およびストレスドロップ $D_s(\Delta\sigma)$ については 3.2 参照)

表 1 用いた地震の諸元(その 5)

地震No	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	Mj	タイプ	Mo (dyn.cm)	fc (Hz)	fmax (Hz)	Ds (bar)
201	200111131645	39.334	142.073	48	4.7	プレート間	9.65E+22	5.08	5.2	1680
202	200111211925	42.008	142.594	60	4.5	プレート間	1.19E+23	4.65	5.1	1589
203	200111250522	37.175	141.415	46	4.8	プレート間	1.55E+22	7.75	7.8	958
204	200112080707	37.152	139.96	5	4.5	内陸	6.87E+22	0.60	8.9	3
205	200201191806	43.712	147.362	32	5.6	プレート内	3.44E+24	0.71	17.8	164
206	200201210855	42.533	144.781	47	4.7	プレート間	1.10E+23	2.19	6.7	153
207	200201241608	35.361	133.324	9	4.5	内陸	5.56E+22	1.01	19.3	10
208	200201271609	39.317	142.416	46	5.3	プレート内	8.70E+23	1.72	7.9	588
209	200201290842	37.757	141.837	39	4.6	プレート間	5.45E+22	2.11	13.7	68
210	200201290845	37.765	141.826	39	4.8	プレート間	1.35E+23	1.91	8.9	125
211	200202111010	35.783	141.092	35	5	プレート間	7.49E+23	0.76	5.1	44
212	200202122244	36.586	141.086	48	5.5	プレート間	1.94E+24	1.19	7.9	434
213	200202131854	38.763	141.145	9	4.5	内陸	6.94E+21	2.06	15.9	11
214	200203091257	37.104	141.128	51	4.5	プレート間	1.45E+22	4.13	11.4	136
215	200203252258	33.821	132.617	46	4.7	プレート内	1.26E+23	2.79	10.4	363
216	200204040842	41.471	142.012	59	5.3	プレート間	2.77E+24	0.71	11.9	132
217	200204060157	33.426	132.533	42	4.5	プレート内	3.84E+22	4.92	6.4	607
218	200204112104	40.046	142.694	31	4.7	プレート間	1.45E+23	2.00	5.1	154
219	200204151510	37.417	141.73	39	4.5	プレート内	2.28E+22	2.66	14.1	57
220	200204210910	38.333	141.645	60	4.5	プレート内	6.16E+21	8.79	8.8	556
221	200205042035	35.46	140.41	32	4.6	プレート間	2.28E+23	1.39	5.1	81
222	200205061712	38.463	142.155	40	5	プレート間	2.82E+23	1.86	10.7	241
223	200206141142	36.213	139.98	57	4.9	プレート間	2.27E+23	3.37	5.1	1154
224	200206160439	36.624	141.201	45	4.6	プレート内	3.29E+22	5.60	5.6	767
225	200206181658	31.333	131.71	22	4.5	プレート間	5.66E+22	2.69	5.1	146
226	200206191816	36.189	141.808	58	5	プレート間	8.42E+23	0.78	5.7	53
227	200206200834	35.74	140.705	47	4.5	プレート間	1.53E+23	1.16	6.4	32
228	200206212315	40.142	142.472	35	4.8	プレート間	5.08E+22	4.83	5.1	760

(地震モーメント M_0 , コーナー周波数 f_c , 高域遮断周波数 f_{max} , およびストレスドロップ $D_s(\Delta\sigma)$ については 3.2 参照)

ここで

M_0 : 地震モーメント (10^{-7} N・m)

f_c : コーナー周波数 (Hz)

f_{max} : 高域遮断周波数 (Hz)

である。この f_c の同定の際、地震モーメントは Harvard あるいは Freesia の CMT 解が公表されている地震についてはその値を用い、それが公表されていない 2 地震 (No.4 と No.25) については気象庁マグニチュード M_j に佐藤の関係式¹⁴⁾を適用して地震モーメントを仮定した。地震のタイプごとに得られたコーナー周波数 f_c と地震モーメントの関係および、 f_{max} と地震モーメントの関係を図 7 ~ 図 9 に示す。ここで f_{max} は 20Hz 以上に同定されたものについては 20Hz 以上ということはいえても値そのものには精度がないので便宜的に 30Hz の位置に表示している。図中の R^2 値は寄与率、すなわち回帰直線の相関係数の二乗である。図からわかるように、ここで求めた f_c は地震モーメントの 3 乗に比例する、いわゆる応力降下量一定のスケーリング則に乗っていないことがわかる。特に海溝性の地震では傾きは 2 乗に近く、その違いが顕著である。そこで応力降下量の地震規模依存性を調べるために、物理的意味は必ずしも明確ではないが最も簡便でよく用いられている Brune の応力降下量 (以下ストレスパラメタと呼び $\Delta\sigma$ で表す) を求め、図 10 ~ 図 12 左に地震モーメントの関数として示した。さらにこのストレスパラメタの震源深さ依存性を調べるために、同図右にそれを震源深さの関数として示した。その際、プレート間地震およびプレート内地震については震源特性の地域性を見るため日向灘の地震だけをシンボルによって示し、さらにプレート内地震については西南日本のフィリピン海プレート内の地震をシンボルによって区別した。これらの図から以下のことがわかる。

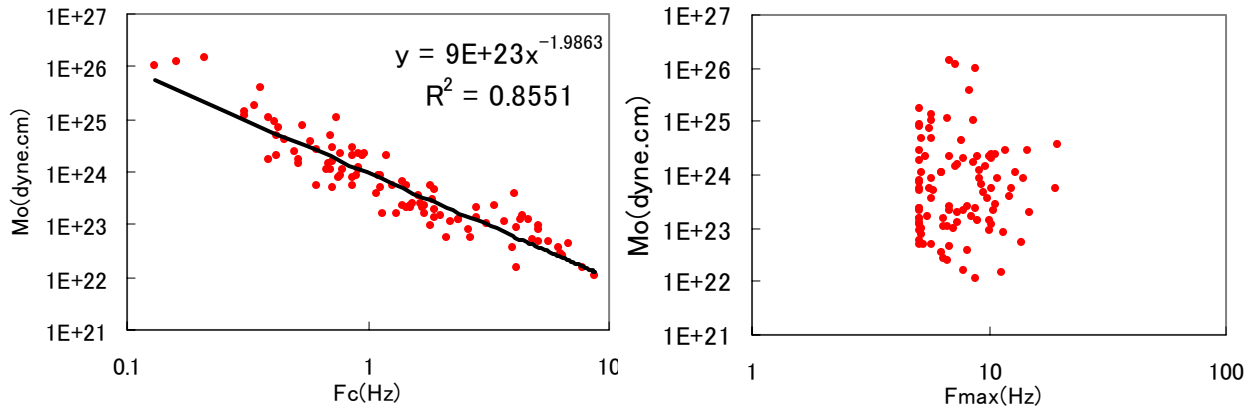


図7 プレート間地震の f_c - M_0 関係および f_{max} - M_0 関係

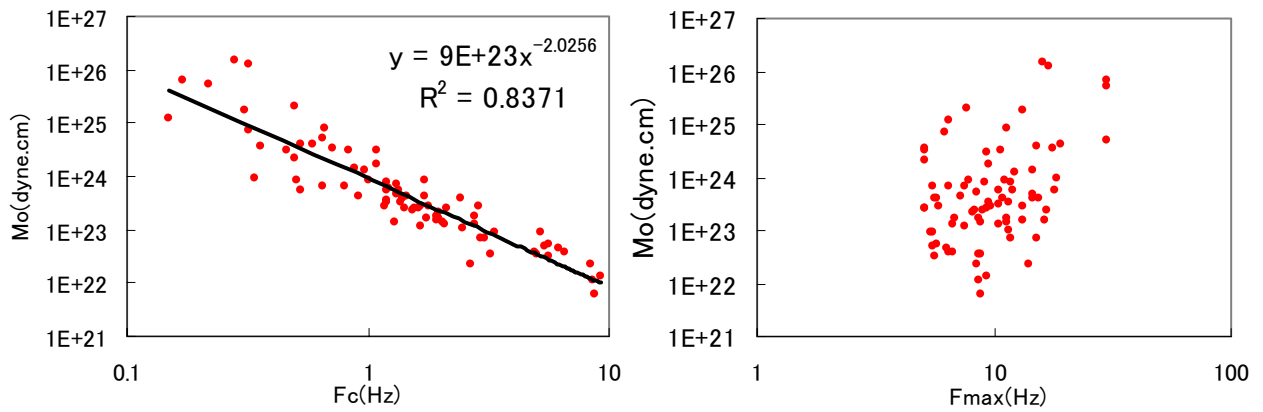


図8 プレート内地震の f_c - M_0 関係および f_{max} - M_0 関係

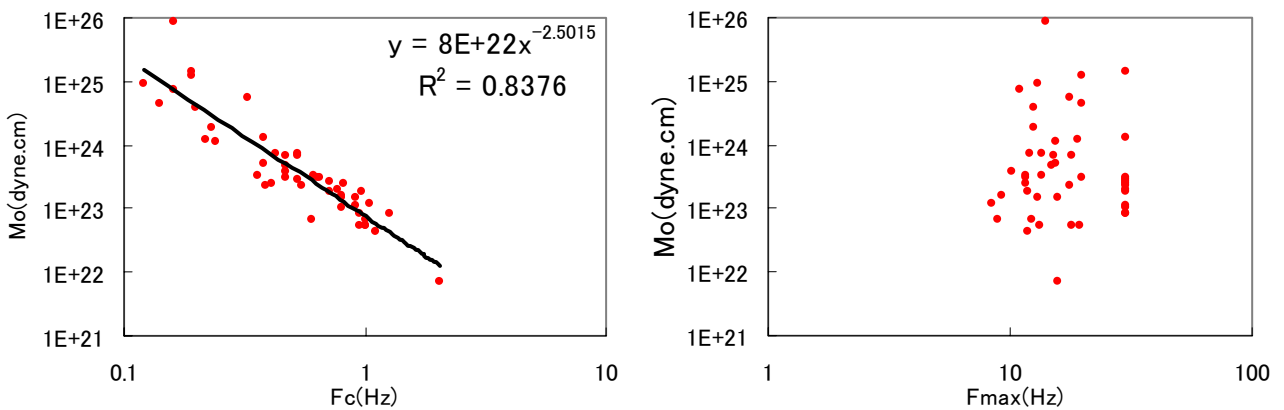


図9 内陸地震の f_c - M_0 関係および f_{max} - M_0 関係

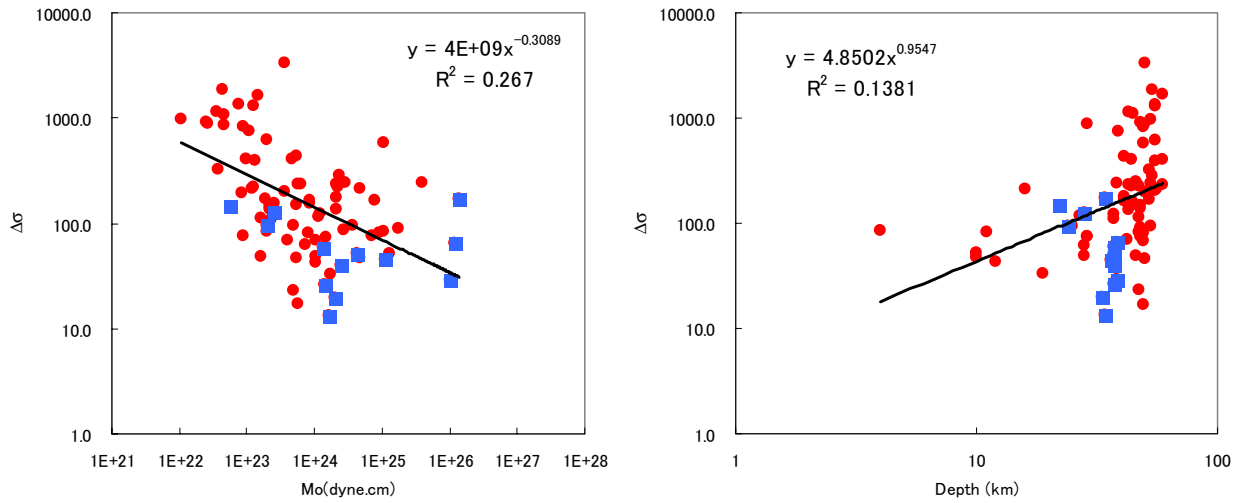


図 10 プレート間地震の $\Delta\sigma$ - M_0 関係および $\Delta\sigma$ -震源深さ関係($\Delta\sigma$ は 0.1MPa を単位)

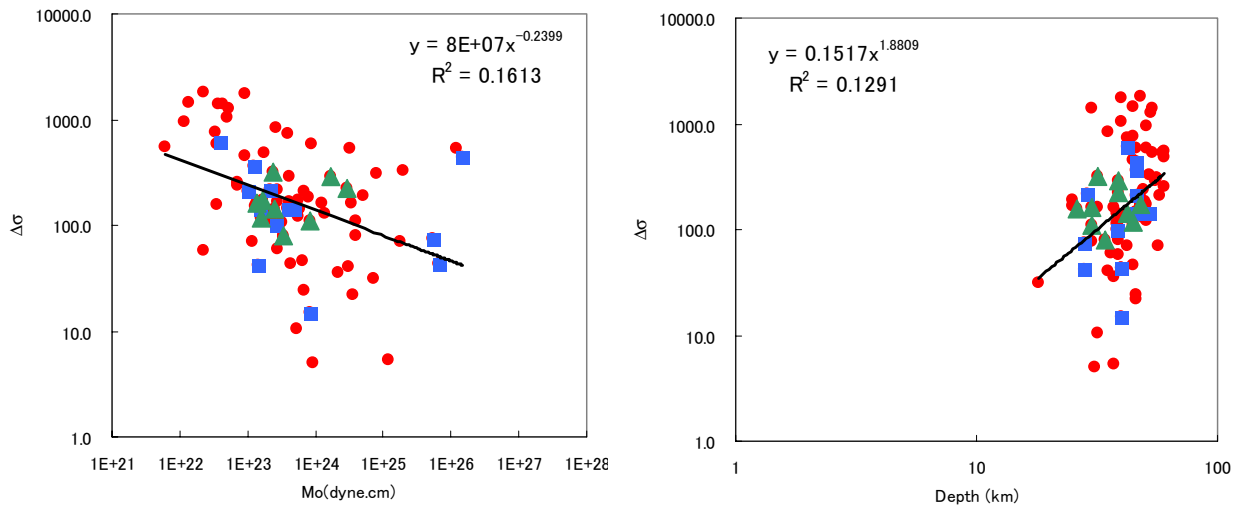


図 11 プレート内地震の $\Delta\sigma$ - M_0 関係および $\Delta\sigma$ -震源深さ関係($\Delta\sigma$ は 0.1MPa を単位)

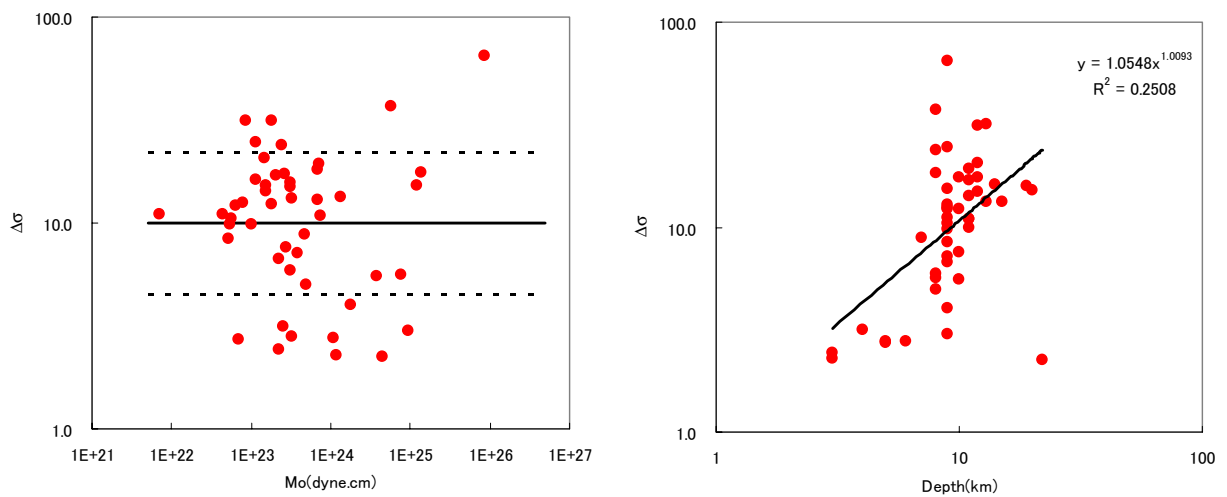


図 12 内陸地震の $\Delta\sigma$ - M_0 関係および $\Delta\sigma$ -震源深さ関係($\Delta\sigma$ は 0.1MPa を単位)

プレート間地震およびプレート内地震のストレスパラメタはかなり強い地震規模依存性を示し、規模が大きいほどストレスパラメタ $\Delta\sigma$ は小さくなる。

これに対して内陸地震は規模依存性がほとんどない。むしろ規模が大きいほどストレスパラメタは大きくなる傾向が弱いながら見受けられ、鳥取県西部地震は6.4MPa(64bar)で突出して大きい。

深さのレンジが狭いので傾向が定かではないが、いずれのタイプの地震もストレスパラメタはなんらかの深さ依存性を示している。中でもプレート内地震には深さ依存性があるように見える。一方、プレート間地震と内陸地震の場合、ある深さまではストレスパラメタが大きな地震が発生しないという傾向が見られる。内陸地震の深さ方向分布は既往の研究報告⁹⁾の傾向とよく対応する。

プレート間地震の場合、日向灘の地震は明らかにストレスパラメタのレベルが太平洋沖の地震に比べ小さい。これは既往の研究報告⁹⁾¹⁵⁾で指摘されている通りである。ただし佐藤・巽⁹⁾では日向灘の地震のストレスパラメタの対数平均値を1.8MPa(18bar)としており、本研究の結果(後に示すようにM5以上で4.0MPa=40bar)とは有意な差がある。ちなみに太平洋沖の地震については佐藤・巽⁹⁾は平均11.9MPa(119bar、ただしプレート間とプレート内の区分なし)と報告しており、今回の結果(M5以上でプレート間11.2MPa・プレート内9.4MPa)とほぼ同じである。

これに対してプレート内地震の場合、地域性は明瞭でなく、日向灘の地震も芸予地震を含む近畿地方のフィリピン海プレート内の地震も太平洋プレート内の地震と系統的な差は認められない。この点は佐藤¹⁵⁾の結果(フィリピン海プレート内の地震のストレスパラメタは太平洋プレート内のその約3倍)とは異なっている。ただし我々の結果には南西諸島の地震は含まれていない。

f_{max} には明瞭な規模依存性が見られない。プレート内地震の場合には規模が大きいほど f_{max} が大きい傾向がうかがえるが、これは通常の仮説とは逆の結果である。なお本論文では f_{max} の最小値を5Hz(かつ f_c 以上)にセットしている。

ここでこの傾向は、佐藤¹⁵⁾において短周期レベルの傾きによって間接的に示されている規模依存性がほとんどない結果とは異なっている(ω^{-2} モデルに従えば短周期レベルはストレスパラメタが規定するので、短周期レベルとストレスパラメタは1対1に対応する)。しかし図10・図11をよく見ると、ストレスパラメタの規模依存性は規模の小さな地震が高ストレスであることから生じていることがわかる。規模の小さい地震ではCMTによる地震モーメントの評価誤差が大きい可能性があり、それがいくつかの小地震のストレス評価に反映されている可能性が考えられる。そこで佐藤ら⁹⁾¹⁵⁾と同じ土俵で比較するためにM5に相当する $M_0 = 5.0 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上の地震に限って傾向を求めると、図13・図14に示したように、規模依存性はほとんどなくなり、平均値(実線)の周りにばらついているだけであることがわかる。これをもって図10・図11に示したM5以下の地震の応力降下量が直ちに疑わしいとはいえないが、その評価には注意が必要であり、今後より詳細に検討していくこととしたい。これらの図から得られたストレスパラメタの平均とばらつきをタイプ別(一部地域別)に整理して表2に示す。

なお今回の解析で f_c の同定が適切に行われていることを検証するため、全地震について得られた震源特性を M_0 と $\Delta\sigma$ でパラメタ化された ω^{-2} モデルと比較したが、ほとんどの場合両者はよく一致することを確認している。図15には内陸地震とプレート間地震それぞれ3つを例として比較結果を示す。

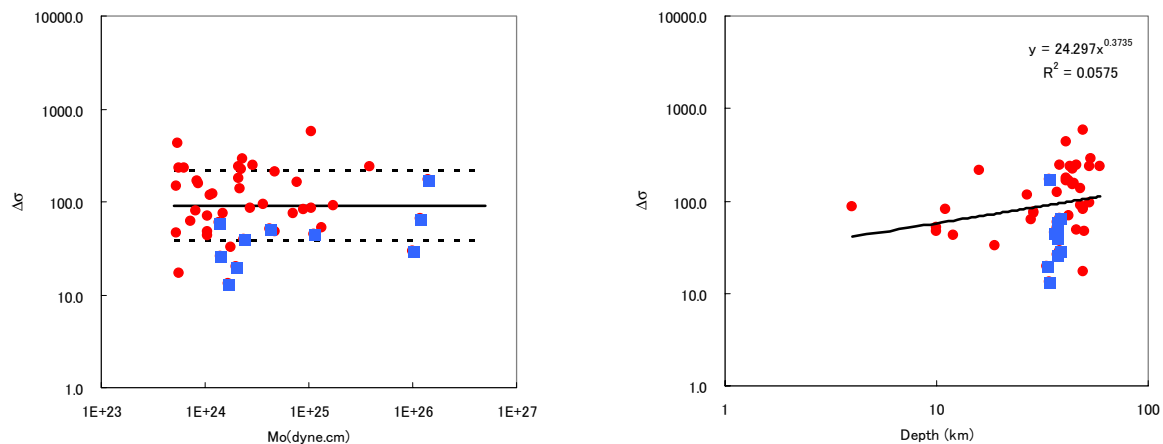


図13 プレート間地震の $\Delta\sigma$ - M_0 関係および $\Delta\sigma$ -震源深さ関係(M5相当以上のみ)

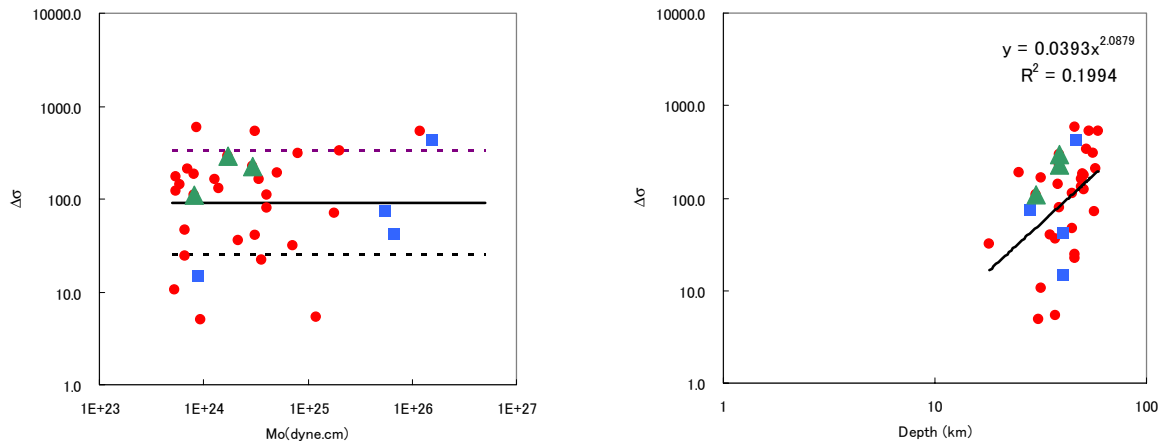


図 14 プレート内地震の $\Delta\sigma$ - M_0 関係および $\Delta\sigma$ -震源深さ関係 (M_5 相当以上のみ)

表 2 ストレスパラメタ(Brune の応力降下量)の地震タイプ別平均値(0.1MPa)

地震タイプ	プレート間		プレート内		内陸
	太平洋	日向灘	太平洋	日向灘	
平均	112	40	94	68	10
平均-1s.d.	51	20	26	17	4.5
平均+1s.d.	246	83	341	280	22

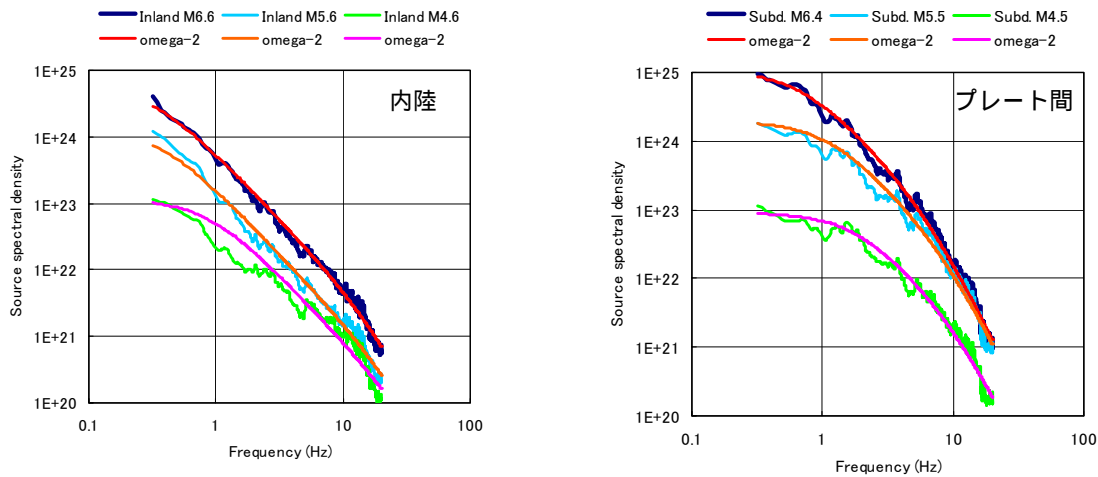


図 15 分離された震源スペクトルとそれにフィッティングさせた ω^{-2} モデルの比較例

3.3 分離で得られた伝播経路特性

次に、分離された伝播経路特性について報告する。内部減衰・散乱減衰を表している b 値を下式により $1/Q$ 値に変換し、図 16～図 18 にそれを幾何減衰項 n の結果と合わせて地震タイプ別に示す。

$$1/Q(f) = \frac{-b(f) \cdot V_s \cdot \ln 10}{\pi \cdot f} \quad (9)$$

これらの図から $1/Q$ は海溝性(プレート間・プレート内)地震の方が、内陸地震と比べて若干大きいことがわかる。また地域的に見ると火山フロント背弧側に位置する九州北西部(図 3 の領域 1)は地震のタイプによらず最も大きい地域に属する。東北日本の日本海側(領域 5)でもプレート間地震の場合にはこれとほぼ同程度のレベルとなっている。しかしプレート内地震の場合は太平洋側の地域と大きく違わ

ないか、むしろ小さめとなっている。内陸地震の場合でも差は小さい。北海道の北西部では低振動数域で $1/Q$ が負となっており、安定した結果となっていない。これは減衰が大きいのでこの地域を伝播する地震 地点ペアのデータ数が少ないためである。しかし高周波数域の値を見るとプレート間もプレート内も九州北西部(領域 1)とほぼ一致しており、同程度と考えるのが妥当であろう。それ以外の太平洋側の地域および九州北西部を除く西南日本ではほぼ同等の値が得られている。最近、火山の影響は局所的ではないかという可能性が指摘されている¹⁶⁾ が、ここで得た $1/Q$ はあくまで各領域の平均値であることに注意されたい。また幾何減衰 n は海溝性地震の場合は震源距離にかかわらずほぼ 1 であり、実体波が卓越していることを示唆するが、内陸地震の場合は震源距離が 100km から長くなるにつ

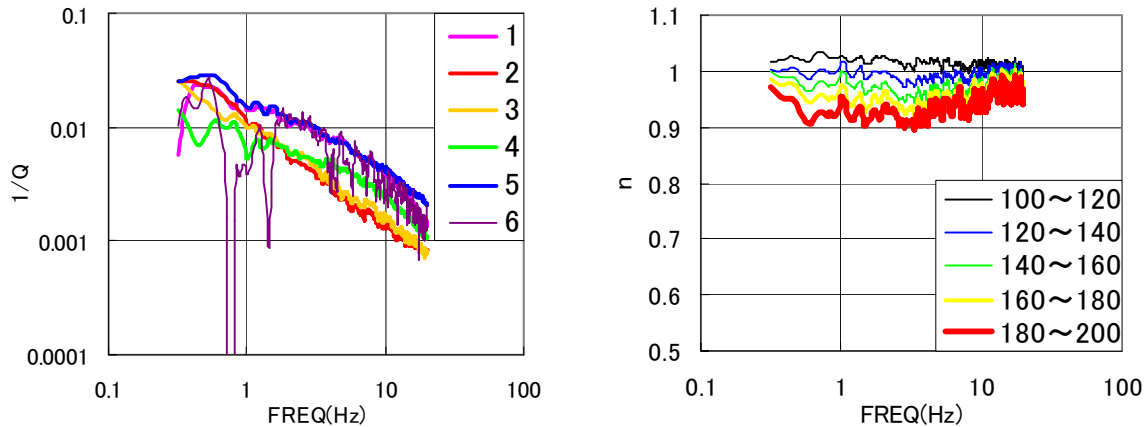


図 16 プレート間地震の地域別減衰値 $1/Q$ および震源距離別幾何減衰項 n

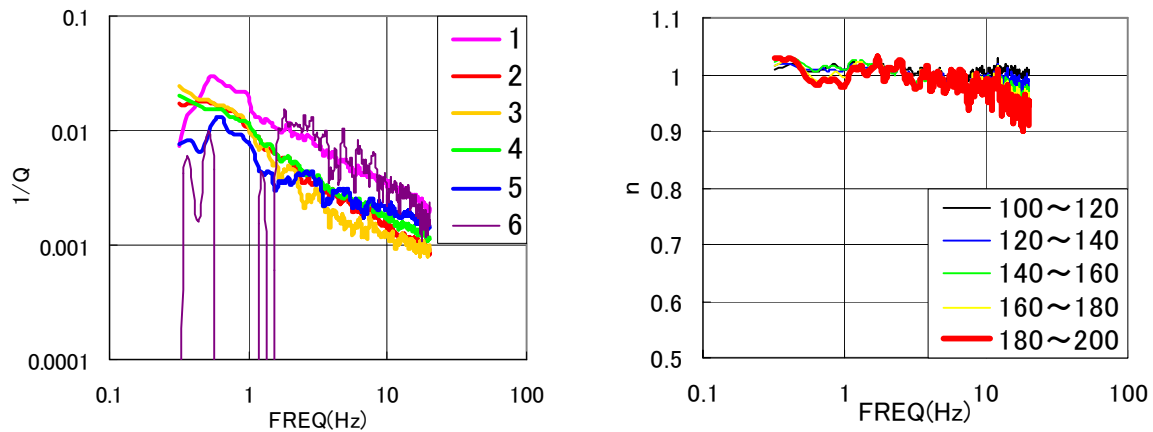


図 17 プレート内地震の地域別減衰値 $1/Q$ および震源距離別幾何減衰項 n

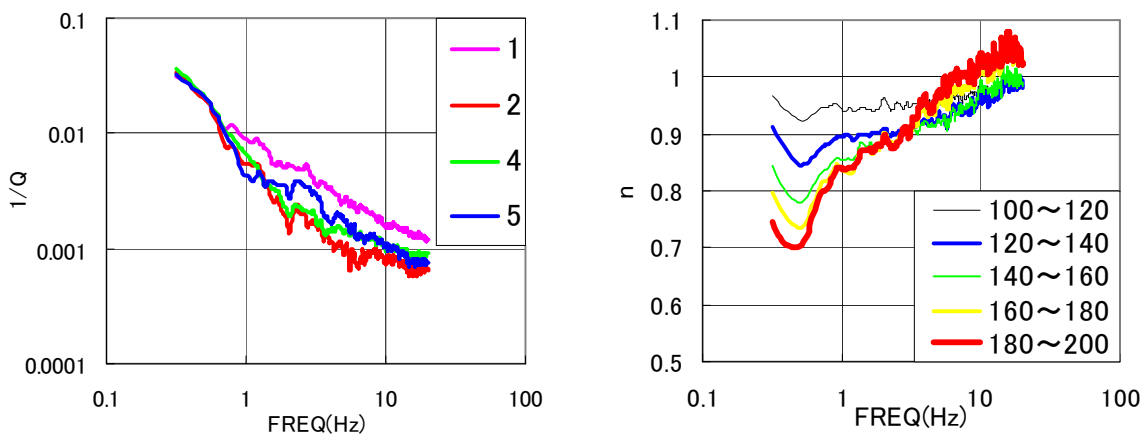


図 18 内陸地震の地域別減衰値 $1/Q$ (3 と 6 は決定できず)および震源距離別幾何減衰項 n

れて、徐々に 1 から減少していき、その傾向は低振動数側が大きい。これは遠くなるほど、低振動数となるほど表面波が重要な寄与をしはじめるためと思われる。なお内陸地震の場合、北海道(領域 3 と 6)では十分な観測データ数がなかったので事前にその地震 地点ペアを除外している。

以上の 1/Q の結果から、べき乗則を仮定して求めた領域毎の Q モデルを表 3 にまとめておく。火山プロントの背弧側の Q 値は外側に比べて約 1/2 であること、内陸が最も大きく、次いでプレート内で、プレート間の場合が最も小さいこと、周波数依存性は 0.7~0.9 が多いことがわかる。プレート内およびプレート間の火山フロント前弧側の Q モデルは既往の結果⁶⁾⁹⁾¹⁵⁾¹⁷⁾などとほぼ整合している。また火山フロント両側の比に関しては九州西部を対象にした加藤¹⁸⁾の結果とほぼ整合している。内陸地震の Q 値がプレート間地震のそれよりも大きいことは伝播経路を考えると物理的な Q としては考えにくい。モホ面やコンラッド面、地表面などでの反射波の寄与が見かけの減衰を小さくさせているものと推測される。分離で得られる Q 値はあくまで幾何減衰値とセットで考えるべきで、これは今回のように幾何減衰に震源距離依存性を導入すれば、プレート内の場合と同程度の大きな Q を仮定してもよいということを示している。なお内陸地震の方が大きい Q となる結果は、幾何減衰が震源距離 80km で 1.0 から 0.5 に変化すると仮定した佐藤・巽⁹⁾や佐藤¹⁵⁾でも報告されている。

表 3 減衰定数から換算した等価 Q 値のモデル

地震タイプ	プレート間	プレート内	内陸
領域 1	51 $f^{0.76}$	67 $f^{0.64}$	112 $f^{0.70}$
領域 2	93 $f^{0.89}$	115 $f^{0.77}$	243 $f^{0.69}$
領域 3	91 $f^{0.86}$	149 $f^{0.73}$	-
領域 4	99 $f^{0.66}$	114 $f^{0.69}$	204 $f^{0.65}$
領域 5	51 $f^{0.70}$	175 $f^{0.45}$	163 $f^{0.75}$
領域 6*	39 $f^{0.95}$	41 $f^{0.87}$	-

*Q 値が正で得られた周波数範囲のみ利用して決定

3.4 分離で得られたサイト特性の例

以下では分離で得られたサイト特性について、いくつかの例を用いて概要を紹介する。紙面の都合で、ここで得られたサイト特性の分析とそれを用いた地盤構造評価については稿を改めて報告したい。

まず今回得られたサイト特性が期待されるように地震基盤からのものであると考えられることを検証するため図 19 に KiK-net 観測点から堅固な岩盤層が浅い地点で得られる 2 地点を選択して、そのサイト特性を示した。図にはボーリング調査結果から得られる両地点での S 波の一次元地盤増幅率を重ね書いた。最表層の地表 S 波速度が 570m/sec で、2m で 1,600m/sec(頁岩)となり、16m で 2,700m/sec(砂岩)に達する O1TH09(宇目東)ではほとんどサイト特性が生じていない。これに対して MYGH04(東和)では表層に S 波速度 220m/sec の層が 4m あり(その下に 960m/sec の層が 6m)、その影響で 15Hz 付近に顕著なピークが生じているが 5Hz 以下の増幅率は少なく、理論的増幅率と概ね対応した結果となっている。これらの結果は今回の基準観測点が地震基盤と見なせるものであることを示している。

図 20 には例として選択した地点 6 点のサイト特性を示す。K-NET 観測点はデータ数の少ない北海道以外の観測点の中で最大の増幅率を示した O1T013(犬飼)と九州だけの分離解析⁷⁾⁸⁾で基準観測点とした MYZ005(日向)、および既往の研究⁹⁾¹⁵⁾で基準観測点としている IWT009(大東)を、KiK-net 観測点は鳥取県西部地震で最も大きな最大速度を記録した TTRH02(日野)を、JMA 観測点はサイト特性の顕著な 9D0(熊本県葦北郡芦北町芦北)と 899(青森県東津軽郡平内町小湊)を選択した。これらの図からサイト特性の大きな地点ではピーク周波数においてスペクトル増幅率は 100 倍近くにも達することがわかる。一方、MYZ005 では増幅率は最大でも 3 程度で、これが硬質地盤(最下層で 1,070m/sec)の観測点であることを反映している。IWT009 では表層の存在によって 15Hz 以上で約 20 倍と大きな増幅があるが、既往文献⁹⁾¹⁵⁾で対象としている 4Hz 以下の増幅率は最大でも 2 倍程度となっている。

K-NET 観測点と KiK-net 観測点では 10m~200m 程度の深さまでボーリング調査がされており、その結果も公表されているので、それを用いて図 19 と同様に一次元 S 波増幅率を求め図 20 に重ね書いた。ただし、図 19 の場合には最下層は地震基盤と見なし得るが、この 4 地点の場合には最下層の S 波速度はそれほど大きくないので、異なる基盤からの増幅率を比較していることに注意されたい。ボーリング調査結果の層構造の理論増幅率を分離された地震基盤からの観測サイト特性と比較すると、O1T013 や IWT009、TTRH02 ではピーク周波数が概ね一致する増幅特性が得られていることがわかる。しかし、

そのピークレベルは観測より大幅に小さく、また MYZ05 では理論サイト増幅自体が高振動数域にしか生じておらず観測とは対応していない。これはボーリング調査結果でわかっている表層地盤だけでは説明できない増幅がかなりあることを示している。ちなみに、OIT013 の最下層(S 波速度 640m/sec)と今回の基盤とのインピーダンス比は約 6 倍あり、さらにそれが高台となったグラウンドの端部に設置されていることから、30m 近いその崖地形の影響を考えれば 100 倍のピーク倍率は一応説明可能と考えられるが、定量的な評価を行なうためには現地調査等を含むより詳細な検討が必要であろう。なお気象庁の震度計サイトについてはサイト特性が相当大きく得られた地点も多く、現時点では地盤情報が何も提供されていないので、今後の調査が望まれる。

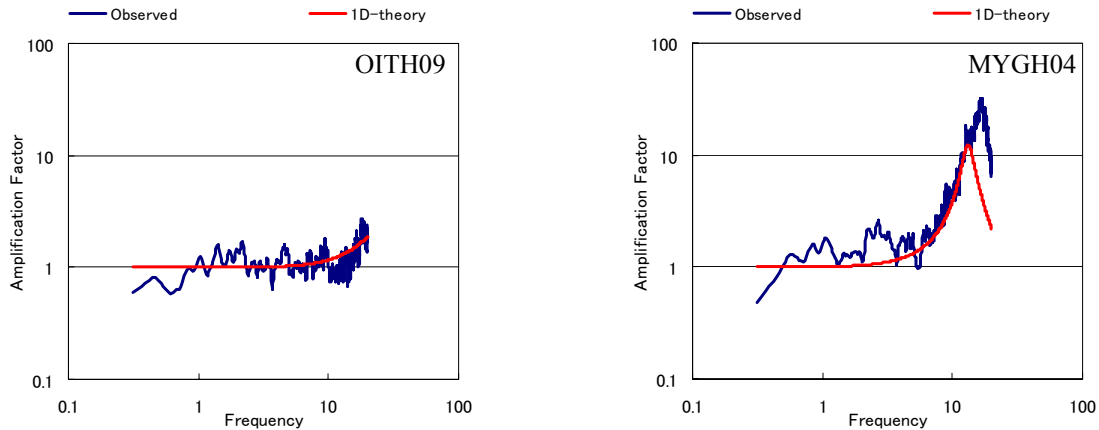


図 19 硬質岩盤が浅い部分に存在している KiK-net サイトでの分離で得られたサイト特性の例

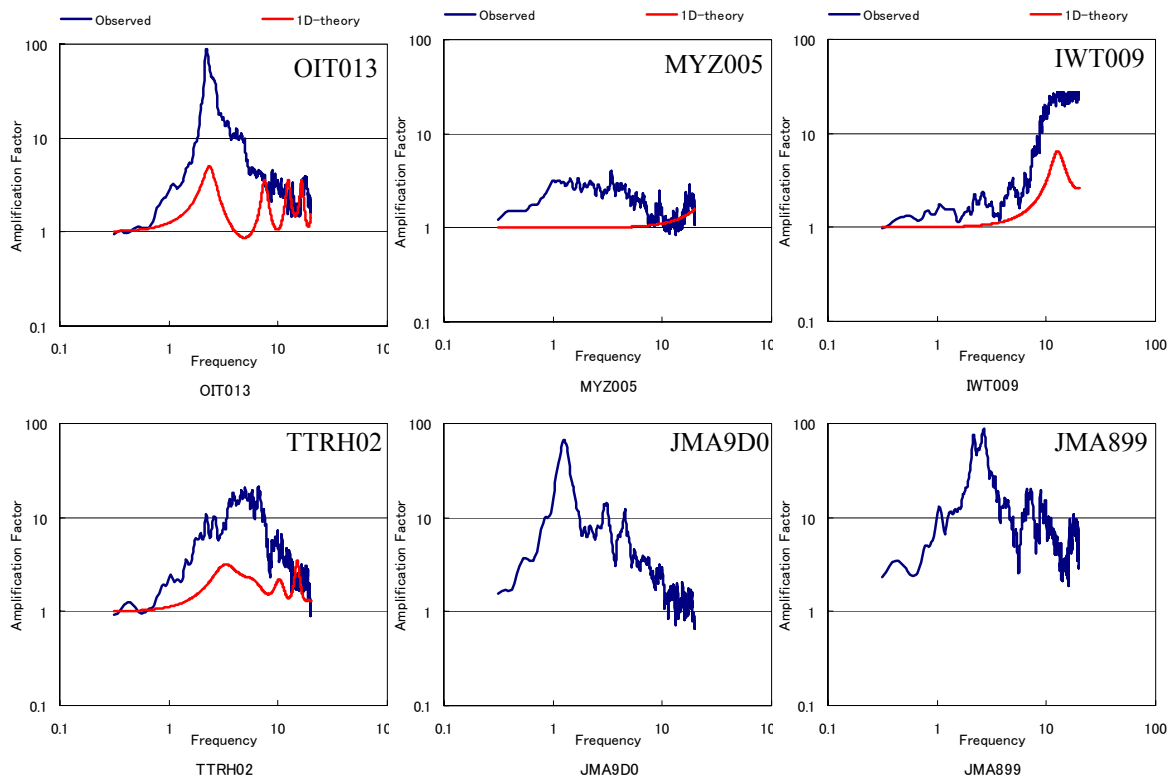


図 20 分離で得られたサイト特性の例
(青線が観測サイト特性、赤線がボーリングデータに基づく最下層からの理論 1 次元増幅率
ただし JMA 観測点は地盤構造情報がないので理論増幅率は計算されてない)

4. まとめ

本論文では日本全国で観測されている K-NET、KiK-net、JMA 震度計ネットワークの強震観測データに基づき、まずスペクトル分離手法によりその震源、伝播経路、およびサイト特性を抽出し、その特性について分析を加えた。用いた地震は 228 地震、観測点は 1700 点で、地震 地点ペアは約 15,800 である。分離に際しては全国を 6 地域に区分し火山フロントの背弧側で減衰が大きい影響を地震タイプ別に評価できるように工夫した。また内陸地震では遠地となるに従って Moho 面反射波を含む表面波の寄与が幾何減衰項の減少となって現われるが、それを抽出できるように 100km 以遠では幾何減衰項も同定パラメタとした。得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 海溝性地震のストレスパラメタ(Brune の応力降下量)は平均 10MPa(100bar)程度と得られた。しかし同じ海溝性の地震でも日向灘のプレート間地震は約 1/2.5 の柔らかい地震であることがわかった。規模依存性については M5 クラス以上の地震については明瞭ではなかった。
- 2) 内陸性地震のストレスパラメタは平均 1MPa(10bar)程度であったが、規模が大きくなると若干大きくなる傾向にあった。
- 3) ストレスパラメタには深さ依存性があるように見えるが、深さと線形関係にあるとは言えない。むしろ最大値レベルに深さ依存性がある(逆に最小値は依存性が弱い)可能性が指摘できる。ストレスパラメタのばらつきは 2 倍~3 倍ある。
- 4) 幾何減衰項に震源距離依存性を導入すると、内陸地震では震源距離が大きく、振動数が低くなるほど 1.0 から離れ 0.5 に近づくことがわかった。一方、海溝性の地震ではこの項は震源距離にも振動数にも依存せず、ほぼ 1.0 を保つことがわかった。
- 5) 内部減衰 + 散乱減衰を表す Q 値は火山フロントの背弧側では前弧側に比べ約半分となることがわかった。なおこれは全域の等価な減衰であることに注意されたい。プレート間地震とプレート内地震では差が少ないが、内陸地震の Q 値は海溝性地震の Q 値より幾分大きい値が同定された。
- 6) サイト特性は場所による違いが大きく、ピーク値の最大では 100 倍近くに達する地点もあることが示された。ピーク振動数については表層地盤の理論ピーク振動数と一致する傾向にあるが、増幅率は不足することがほとんどで、表層以外の増幅を考慮する必要性が指摘された。

以上のような震源・パス・サイトの分離パラメタによって、少なくとも S 波の主要動部分については高精度のスペクトルモデルが構成できたと考えている。今後、今回得られたサイト特性から地盤構造を同定する一方、PGA や A_0 といった地震動強度指標の分離解析結果をここでのスペクトルによる分離解析結果と対比させることにより、あるべき地震動評価の方向を模索したいと考えている。

謝辞

本論文で用いた観測記録は防災科学技術研究所および気象庁が観測・収集したものを配布いただいたものです。記して感謝の意を表します。なお本研究の一部は文部科学省振興調整費「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」(研究代表者：入倉孝次郎)および「大都市大震災軽減化特別プロジェクト 地震動(強い揺れ)の予測」の研究資金によって実施しています。

参考文献

- 1) 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔：K-NET 型強震計の記録特性、地震、第 2 輯、第 49 巻、1997、467-481 .
- 2) 入倉孝次郎・釜江克宏：1948 年福井地震の強震動 - ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現、地震、第 2 輯、第 52 巻、1999、129-150 .
- 3) 中道聡・川瀬博：福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による広周期帯域強震動予測、日本建築学会構造系論文集、第 560 号、2002、83-91 .
- 4) 岩田知孝・入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性・伝播経路特性・及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み、地震第 2 輯、第 39 巻、第 4 号、1986、579-593 .
- 5) 木下繁夫：地震観測に基づく観測点特性と経路減衰特性の評価、地震第 2 輯、第 46 巻、第 1 号、1993、161-170 .
- 6) 加藤研一・武村雅之・八代和彦：強震記録から評価した短周期スペクトルの地域性、地震第 2 輯、第 51 巻、第 1 号、1998、128-138 .
- 7) 伊藤茂郎・川瀬博：統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用、

- 日本建築学会構造系論文集、第 540 号、2001、57-65.
- 8) 伊藤茂郎・久原寛之・川瀬博：K-Net データから抽出した地震動の統計的性質とそれを用いた波形合成用グリーン関数の生成、日本建築学会構造系論文集、第 543 号、2001、34-41.
 - 9) 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、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、2002、15-24.
 - 10) 小林喜久二・久家英夫・植竹富一・真下貢・小林啓美：伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定、その 3 Q 値の基本式に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、1999、253-254.
 - 11) 物理探査学会：物理探査ハンドブック 手法編、1998.
 - 12) Dziewonski, A.M. et al., Harvard Seismology: Centroid-Moment Tensor Project, <http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/>, 1976-2003.
 - 13) 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉、オンライン広帯域地震 波形を用いた完全自動メカニズム決定、地震 第 2 輯, 第 51 巻, 第 1 号、1998、149-156 (<http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>).
 - 14) 佐藤良輔、日本の地震断層パラメータハンドブック、1989、鹿島出版会.
 - 15) 佐藤智美、中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深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、2003.12 (印刷中).
 - 16) 中村亮一・植竹富一：東北日本における強震記録データにより求めた詳細な三次元減衰構造と火山分布、地球惑星関連学会合同大会、2003、CD-ROM.
 - 17) 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性 仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析、日本建築学会構造系論文集、第 462 号、1994、79-89.
 - 18) 加藤研一：K NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価、日本建築学会構造系論文集、第 543 号、2001、61-70.

(受理：2003 年 11 月 18 日)

(掲載決定：2004 年 1 月 30 日)

Separation of Source, Path, and Site Effects based on the Observed Data by K-NET, KiK-net, and JMA Strong Motion Network

KAWASE Hiroshi ¹⁾ and MATSUO Hidenori ²⁾

1) Member, Professor, Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.

2) Engineer, Hitachi System and Service, M. Eng.

ABSTRACT

Adequate evaluation of the strong motion characteristics is indispensable for quantitative strong motion prediction. In this paper, separation of source, path, and site characteristics was carried out by the spectrum separation technique based on the observed data of K-NET, KiK-net, and the JMA Shindo-kei network in Japan. We analyzed 228 sources and 1,700 sites. As for the source characteristics, we found that among three different types of earthquakes, namely plate boundary, intraplate, and crustal ones, Brune's stress drops are significantly smaller for crustal earthquakes, and that they does not linearly correlate with depth. As for the propagation path effects, we found Q value in the back arc side of a volcanic front to be about one half of the front arc side, and Q for inland earthquakes seems to be equally high as those for plate boundary and intraplate earthquakes.

Key Words: *Spectrum Analysis, Attenuation, Geometrical Spreading, Stress drop, Site effects*