

(1-4) Earthquake Source Studies Related to Strong Ground Motion Estimates

James Mori (京都大学防災研究所)

mori@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の概要

We carried out two studies that relate the source characteristics of earthquakes as related to the levels of strong ground motions.

In the first study, we tried to make direct estimates of the slip-weakening distance from strong-motion data recorded very close to areas of large slip on a fault. The slip weakening distance is an important parameter in describing the dynamic rupture of earthquakes and represents the amount of fault slip over which the frictional level is dropping to the dynamic friction level. The results of our study indicate that the slip-weakening distance does not appear to have a strong dependence on the amount of fault slip and has values of about 0.8 to 1.4 m for area of large (3 to 8m) fault slip.

In the second study we investigated the source of the very destructive 1977 Tangshan, China earthquake. Using teleseismic waveform data, we determined the slip distribution for the earthquake. We found that two areas of large slip with about 5 m on the deeper portion of the fault near the hypocenter and a shallow area of large slip of about 5 m northeast of the hypocenter. The shallow region of large slip is located under Tangshan City and may be responsible for the severe damage there. The moment magnitude of Mw7.4 is relatively small for the great amount of damage produced by the earthquake.

(b) 業務の成果

1) Estimates of Slip Weakening Distance from Near-Field Records

In this study we used the method of Mikumo et al. (2003)¹⁾ to estimate the slip-weakening distance from slip velocity and fault displacement waveforms. Instead of using source time functions derived from subfault source inversions, we directly use the observed velocity and displacement records recorded close to large fault displacements. The assumption is that these strong sites move with the fault and are a good approximation of the actual fault movements. For the portion of the fault close to the station, these direct data may be more representative than the results from complex source inversion. This method uses the fault displacement and slip velocity time histories. The slip-weakening distance is shown as the amount of slip that has occurred on the fault at the time of the peak in slip velocity (Fig. 1). Using this simple method, we can estimate the slip-weakening distance from appropriate near-field records..

The important aspect of this study is to choose data that can really be regarded as representative of the near-field fault motions. For this to be the case, several conditions must be satisfied. I)Data must be located close to the fault so that the

near-field motion is dominant. II) There must be large slip, so the source effect is dominant III) The site and propagation effects must be relatively small, In this study, we used strong-motion data that was recorded within several (3 to 5) kilometers of a surface fault that had at least several meters of offset during an earthquake. We examined data from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, 1999 Izmit, Turkey., and 2002 Denali, Alaska earthquakes. We also looked at the Lucerne Valley record of the 1992 Landers, California earthquake, which was located close to the fault, but could not be used because it was located relatively far from the area of large slip.

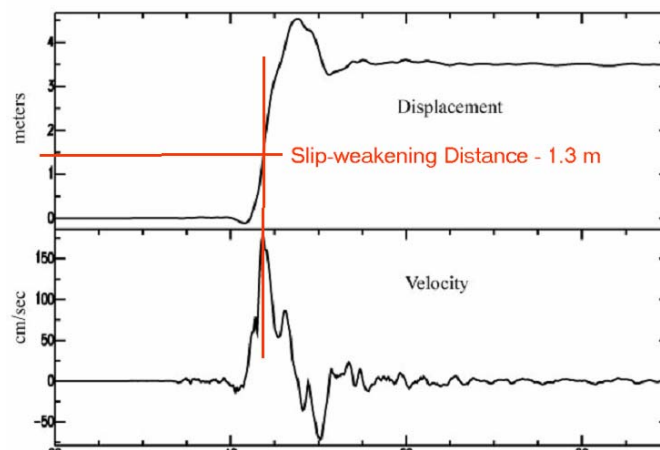


Figure 1 Example of the estimate of the slip-weakening distance from the fault displacement (top) and slip velocity (bottom) for station TCU068 from the Chi-Chi, Taiwan earthquake.

The results of the estimates for the slip weakening distance are shown in Fig. 2. There are four good estimates from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, TCU075, TCU067, TCU052, and TCU068 which correspond to fault displacements of 3 to 8 meters. For these four estimates there is not a strong dependence of the slip-weakening distance on the amount of fault slip, and the values are all between about 0.8 and 1.3 m. We also included individual estimates from station SKR from the 1999 Izmit, Turkey earthquake and the PS10 record of the 2002 Denali earthquake (Ellsworth et al., 2004²⁾). Looking at all the estimates, there does not seem to be a strong dependence of the slip-weakening distance on the amount of fault slip and the slip-weakening distance for the range of slips from about 3 to 8 meters is about 0.8 to 1.5 meters.

In order to check the effects of the wave propagation on the estimate of the slip-weakening distance, we carried out some forward calculations. Using the example of TCU068 for the Chi-Chi, Taiwan earthquake with a local velocity and Q structure, we calculated point source Green sources for a grid of points near the

station (Fig. 3). The grid is ± 5 km along strike and extends down dip from the station from depths of 1 to 5 km. The Green functions are also shown in Fig. 3 and show that the largest amplitude dominate for sources within about 2 km of the station. We next added a source time function to simulate the effect of constant slip-weakening distance and constant rupture speed of 2.5 km/sec. Using the same method that was used to analyze the data, we estimated the ‘slip-weakening distance’ from the synthetic seismogram obtained by summing all the grid point seismograms. The results of this test using various values for the slip weakening distance, indicated that for this geometry we cannot resolve slip-weakening distances less than about 1.5 m.

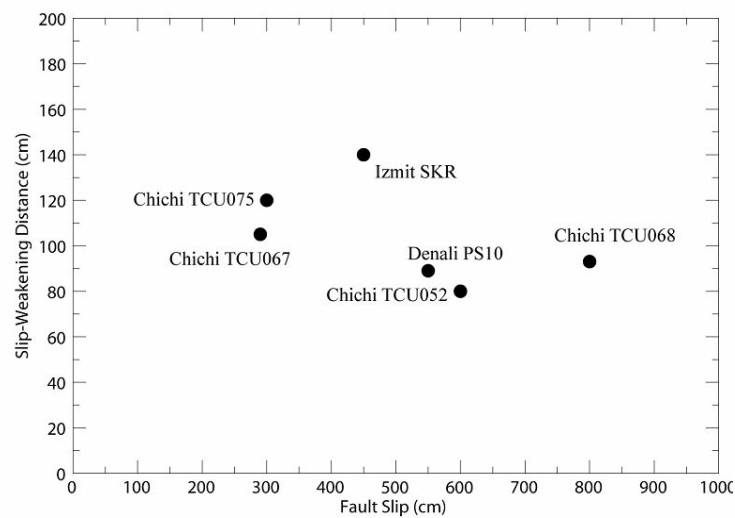


Figure 2 Summary of all estimates of the slip-weakening distance from near-field records. Chi-Chi,= 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, Izmit= 1999 Izmit, Turkey earthquake, Denali= 2002 Denali, Alaska earthquake

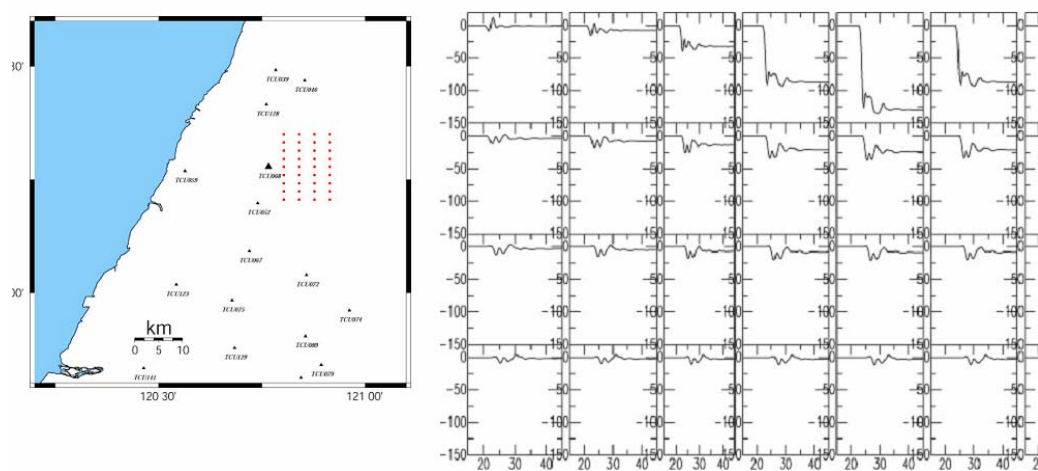


Figure 3 Grid (left) and Green functions (right) used for simulation calculations.

These results suggest that the slip-weakening distance does not strongly depend on the amount of fault slip. It appears that instead there may be a threshold level over which large slip occurs during damaging large earthquakes. The behavior of the slip-weakening distance with slip on a fault is an important constraint on understanding how large slip, and thus how strong ground motions, are produced during a large earthquake.

2) Slip Distribution of the 1977 Tangshan Earthquake

The Tangshan earthquake (Ms 7.8) which occurred on July 27, 1976 at 19:42:54 in the North China Basin region (39.56°N 117.87°E) was one of the most devastating historical earthquakes in the world with reported deaths of 655,000 and great destruction to the city of Tangshan. There have been previous studies of the source which described the basic characteristics (e.g. Butler et al., 1989³), Kikuchi and Kanamori, 1986⁴), Nabelek et al., 1987⁵), Xie and Yao, 1991⁶), however, there is not a clear figure of the slip distribution. In this study we re-examine the teleseismic data to determine a slip distribution for the earthquake.

For the teleseismic body wave inversion, we used 14 stations that were well distributed in azimuth at distances of 45 to 86 degrees. We used P waves that were hand digitized from the long-period (15 sec seismometers and 100 sec galvanometers) vertical components of the World Wide Standard Seismograph Network (WWSSN).

The modeling was carried out using a fault area that was divided into 30 (10 horizontal x 3 vertical) subfaults, with dimensions of 10 km horizontally and 7 km vertically. Focal mechanisms for the mainshock show nearly pure strike-slip motion (e.g. Butler et al., 1979³), although from the aftershock pattern the fault for the earthquake appears to have a change in strike near the hypocenter. This is also consistent with the interpretation of Butler et al. (1987)³, that the earthquake initiated on a fault with a strike of 20 degrees and then the large moment release occurred with a change of focal mechanism that had a strike of 40 degrees. For our fault model we used a geometry with two strike orientations. The southwestern portion has a strike of 25 degrees and the northeast portion has a strike of 45 degrees. This is similar to the geometry used by Xie and Yao (1991)⁶. The dip of the fault was assumed to be 90 degrees, which is consistent the focal mechanisms for the earthquake.

The results of the waveform inversion produced the slip distribution shown in Fig. 4. The arrows show the amount and direction of the slip. There is a large amount of slip near the hypocenter and to the southwest on the deeper portion of the fault, and another area of shallow slip to the northeast of the hypocenter. Fig. 5 shows the observed and model waveforms for the slip distribution. In general there is a fairly good correspondence between the data and the synthetic waveforms. Although there

are some problems in matching the amplitudes at stations NAI and TAU.

The slip amplitude of about 5 m for the shallow patch northeast of the hypocenter is consistent with the geodetic observations (Xie and Yao, 1991)⁶⁾ which showed displacements of about a few meters in the area. This shallow area of large slip is located near the city of Tangshan and may be responsible for the severe damage that occurred there.

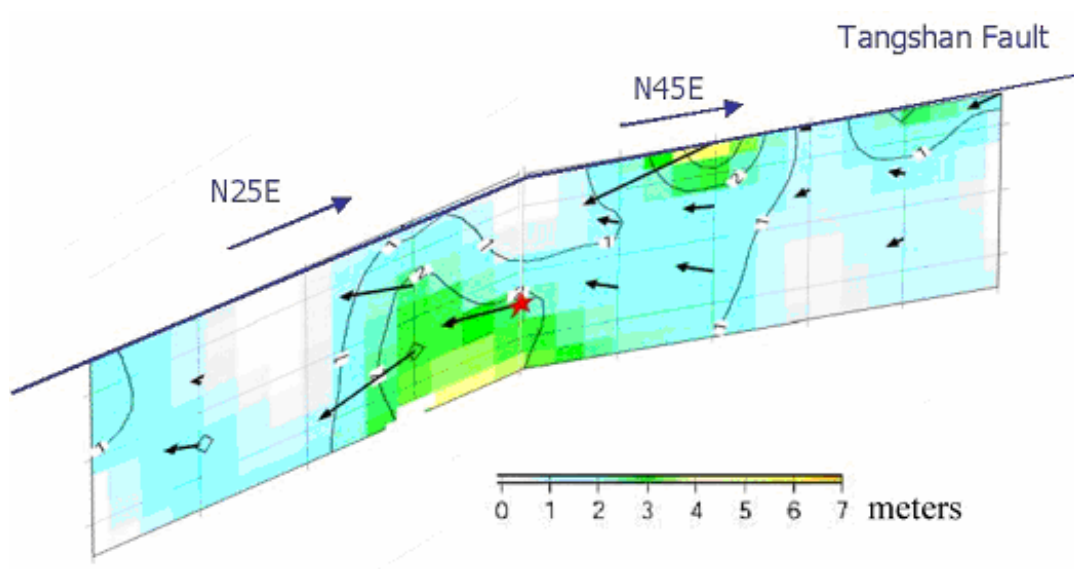


Figure 4 Slip distribution of the 1977 Tangshan earthquake

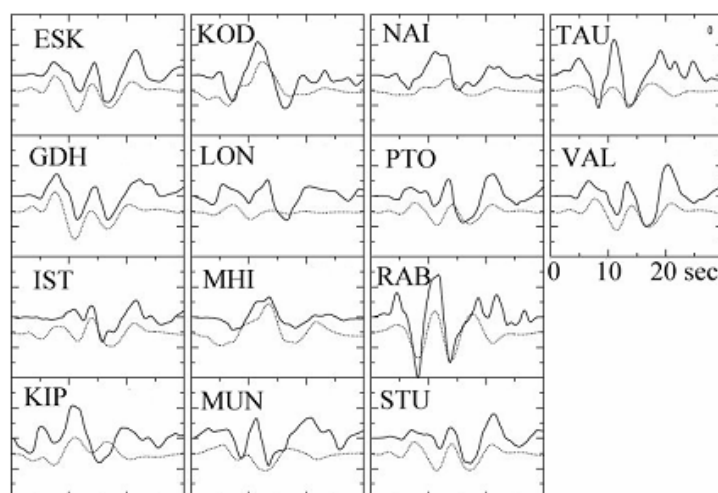


Figure 5 Data (solid lines) and model synthetics (dotted lines) for the modeling of the 1977 Tangshan earthquake.

(c) 引用文献

- 1) Mikumo, T., Olsen, K.B., Fukuyama, E., and Yagi, Y.: Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 264-282, 2003.
- 2) Ellsworth, W.L., Celebi, M., Evans, J.R., Jensen, E.G., Kayen, R., Metz, M.C., Nyman, D.J., Roddick, J.W., Spudich, P., Stephens, C.D., Near-field ground motion of the 2002 Denali Fault, Alaska, Earthquake Recorded at Pump Station 10, Earthquake Spectra, 20, 597-615, 2004.
- 3) Butler, R., Stewart, G.S., and Kanamori, H.: The July 27, 1976 Tangshan, China earthquake: A complex sequence of intraplate events, Bull. Seismol. Soc. Am., 69, 207-220, 1979.
- 4) Kikuchi, M. and Kanamori, H.: Inversion of complex body waves II, Phys. Earth Planet. Int., 43, 205-222, 1986.
- 5) Nabelek, J., Chen, W.-P., and Ye, H.: The Tangshan earthquake sequence and its implications for the evolution of the North China Basin, J. Geophys. Res., 92, 12,615-12,828, 1987.
- 6) Xie, W.-B. and Yao, Z.-X.: The faulting process of Tangshan earthquake inverted simultaneously from the teleseismic waveforms and geodesic deformation data, Phys. Earth Planet. Int., 86, 265-277, 1991.

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Miyazawa, M., Mori, J., Iio, Y., others	Triggering Sequence of Large Aftershocks of the Mid Niigata prefecture, Japan Earthquake in 2004 by Static Stress Changes	Earth Planets Space, 57, 1109-1113, 2005	2005 年 11 月
Park, S., Mori J.	Source Parameters of the May 29, 2004 South Korea earthquake (M _L 5.2)	Earth Planets Space, 57, 471-475, 2005	2005 年 6 月
Park, S., Mori J.	2004 Sequence of Triggered Earthquakes Off the Kii Peninsula, Japan	Earth Planets Space, 57, 315-320, 2005	2005 年 4 月
Mori, J.	Temperature Measurements and Earthquake Heat	Assoc. of Pacific Rim Universities Research Symposium - Earthquake Hazards around the Pacific Rim -	2005 年 8 月 31 日 - 9 月 2 日

		Prediction and Disaster Prevention, P. 32.	
Mori, J., Ito, H., Fujio, R., Kano, Y., Ma., K.-F.	Temperature Measurements in the Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project	Asia Oceania Geosciences Society, SE15/2A-02-2	2005 年 6 月 20-24 日
Mori, J., Tanaka, H.	Energy Budget of the Chi-Chi, Taiwan Earthquake	AGU Chapman Conference on Radiated Energy and the Physics of Earthquake Faulting, Portland, Maine, P. 47.	2005 年 6 月 13-17 日
Mori, J.	Estimates of Slip-Weakening Distance from Near-field Seismograms	日本地震学 2005 年度 秋季大会, C041	2005 年 10 月 20 日

(e) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(1-5) 西日本の堆積盆地構造と強震動評価

川瀬博（九州大学大学院人間環境学研究院）

kawase@arch.kyushu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

「西日本の堆積盆地構造と強震動評価」研究課題では、今年度はこれまで実施してきたスペクトル分離手法を周期 10 秒まで拡張して適用し、やや長周期域も含めてノイズの影響のない M5.5 以上の地震のスペクトル特性を震源・伝播経路・サイト特性に分離した。平行してその経時特性を Boore の包絡形でモデル化し、そのピーク到達時間と継続時間をマグニチュードと震源距離で回帰してモデル化した。これらスペクトル特性と経時特性を用いて中小地震の地震動を再構成し、観測波形と比較して良好な再現性を有していることを確認した。このモデルを用いることにより 10 秒までの周期成分を含む波形合成法用の要素地震を作成することができるようになった。

(b) 業務の実施方法

広帯域の地震被害予測を行う目的で、日本全国の内陸地域と海岸地域に起きた 110 個の地震に対して K-NET・KiK-net・JMA 震度計ネットワークの強震動記録を用いて、その震源特性・伝播経路特性・サイト特性の分離を行い、統計的グリーン関数を作成する。作成に当たっては今まで 2~3 秒までを対象としてきたがこれを 10 秒まで拡張する。この統計的グリーン関数を用いて、内陸地震・海溝型地震の震源モデルを設定すれば、その地域における強震動を予測することが可能となり、設計用入力地震動の作成や地震被害想定、防災計画の策定などに用いることができる。統計的経時特性に関しては観測波形を Boore の包絡線関数でモデル化し、同定したパラメータ T_r と T_d をマグニチュード M と震源距離 X で回帰して、震源係数・距離係数・サイト係数を求めた。得られた特性をもとに地震動を再構成し観測記録と比較して適切なモデル化ができていることを確認する。

(c) 業務の成果

まず 1996 年 8 月から 2005 年 3 月にかけて、全日本の地域や海岸周辺に起きたマグニチュード $M \geq 5.5$ 、震源深さ $\leq 60\text{km}$ 、最大加速度 $\leq 200\text{gal}$ 、最大震源距離 $\leq 400\text{km}$ 、K-NET、Kik-net、JMA 強震動観測点に対して最小でも 3 点で観測できた地震を選んだ。また、長周期波形の特性を考慮することと全体のバラツキを考慮して、同じ場所で沢山の地震が起きた場合(本震—余震シーケンスの場合)はそこからマグニチュードが大きな地震をいくつか選ぶようにした。また震源距離が遠くなるほどノイズが増える可能性を考慮して、400km 以内であっても利用する震源距離はマグニチュードに比例するように限界を決め観測波形を選択した。結局このような条件を満たす地震は 110 個になり、その内訳は内陸地震 25 個、プレート内地震 34 個、プレート間地震 51 個であった。対象観測点としては K-NET、Kik-net、JMA の観測点を含む 1,684 個地点であり、強震動波形データは合計 15,935 波になった。地域特性に関しては、川瀬・松尾(2004)¹⁾と同様に日本の火山や中央構造線など考慮して全日本を 6 地域に分割した。

地震動の経時特性は、包絡形と継続時間で特徴づけられる。本研究では、経時特性を Boore(1983) ²⁾ の包絡線関数 $W(t)$ でモデル化し、パラメータの同定を行う。Boore のモデルは、継続時間 T_d 、振幅が最大となるまでの時間 T_r 、 T_r の T_d に対する比 ε 、時刻 T_d における振幅の最大振幅に対する比 η で規定される。 $W(t)$ の式を以下に示す。

$$W(t) = a \cdot t^b \cdot \exp(-ct) \cdot H(t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$a = \left(\frac{2.7182}{\varepsilon \cdot T_d} \right)^b \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$b = \frac{-\varepsilon \cdot \ln \eta}{[1 + \varepsilon \cdot (\ln \varepsilon - 1)]} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon \cdot T_d} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(1)の $H(t)$ は単位ステップ関数を表し、式(2)の a は関数 $W(t)$ の最大値が 1 になるように規定されている。まず、観測波形を 120sec 切り出し、前後に 2 秒のコサインテーパをつけた。その観測波形の最大値を 1 に基準化し、その絶対値振幅の 1 秒ごとの区間最大値を取り、それに $\eta = 1/20$ で固定した $W(t)$ をフィッティングさせ、各観測波形の T_d と $T_r (= \varepsilon \times T_d)$ を最小自乗法により同定する。フィッティング対象は観測波形の全域で、 ε は 0.05～0.95 の範囲を 0.02 刻みで変化させて最適値を後から検索した。次に、得られた T_d と T_r をマグニチュード M と震源距離 X で重回帰する。ここで、マグニチュード M と震源距離 X が相互にトレードオフになる可能性を除くため、二段階重回帰分析手法を用いた。

図 1 には一つの例として、同定した海溝型地震の T_r 、 T_d とマグニチュード M 及び震源距離 X の関係、および統計包絡線と観測波形の比較結果を示す。マグニチュード M や震源距離 X が大きいほど T_r や T_d も大きくなる傾向がある。マグニチュード M が大きいほど断層破壊に時間がかかること、震源距離 X が大きいほど散乱の影響により見かけ速度の遅い波の到達時刻が遅れることによるものと考えられる。また、図から統計的に得られたパラメータによる包絡線が観測波形の形状をほぼ再現していることが分かる。内陸地震の観測データから得られた統計的経時特性は海溝型地震特性とほぼ同じであるが、内陸地震の T_r 、 T_d ではマグニチュード M や震源距離 X が大きいほど大きくなる傾向が海溝型地震の方より明確ではなく、同じマグニチュードと震源距離に対して T_r 、 T_d が平均的に海溝型地震より小さいことがわかった。地震基盤とみなせる基準観測点(YMGHO1)の内陸地震に対する統計的経時特性 T_r 、 T_d を式(8)、式(9)に、海溝型地震に対する統計的経時特性 T_r 、 T_d を式(10)、式(11)に示す。

$$\log T_r = 0.1390 \cdot M + 0.4048 \cdot \log X - 0.9205 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\log T_d = 0.1164 \cdot M + 0.2791 \cdot \log X - 0.0689 \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\log T_r = 0.0943 \cdot M + 0.5109 \cdot \log X - 1.0396 \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$\log T_d = 0.0884 \cdot M + 0.6868 \cdot \log X - 0.7946 \quad \dots \dots \dots (8)$$

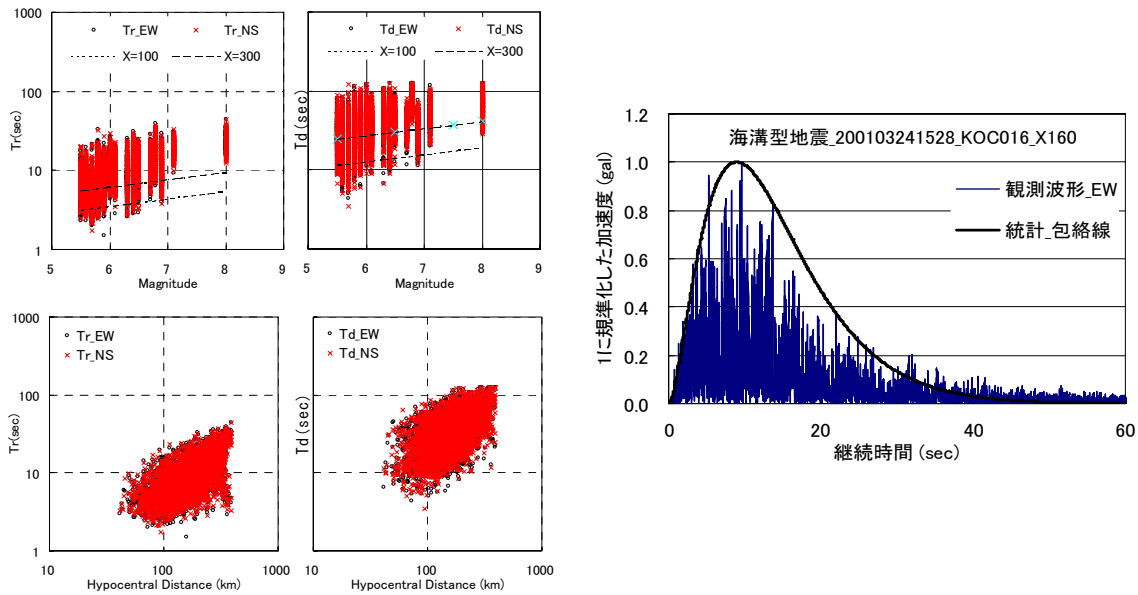


図 1 統計的径時特性の例 ($T_r \cdot T_d$ とマグニチュード・震源距離の関係の関係) および統計的包絡線と観測波形の比較

同じく内陸地震と海溝型地震（プレート間地震とプレート内地震）の統計的スペクトル特性が得られた。図 2 では例としてプレート内地震の震源特性、内部減衰 b 、幾何減衰 n 、サイト特性をそれぞれ示している。内部減衰 b は日本海側の地域で大きく変化しているが、太平洋側の地域ではその変化が小さくなっていることが分かる。分離された n は海溝性地震の場合は距離にかかわらずほぼ 1 であるが、距離が遠くなるほど観測データが少なくなり、変動が大きくなる傾向がある。全体としては、距離減衰 ($1/Q$) は内陸地震より海溝性地震のほうが大きい傾向があり、地域的に九州の西部は火山フロントの影響で最も大きく、東北の背弧側でも大きい傾向が見られる。

最後に、得られた統計的グリーン関数の妥当性を検証するため、統計的グリーン関数法で想定南海地震の強震動波形を作成し、既往の研究（釜江、2002）³⁾ および経験的距離減衰特性と比較した。その結果、図 3 に示したように、最大加速度は距離減衰式とほぼ一致するように推定されているが最大速度は全体的に少し小さくなっていることが分かる。

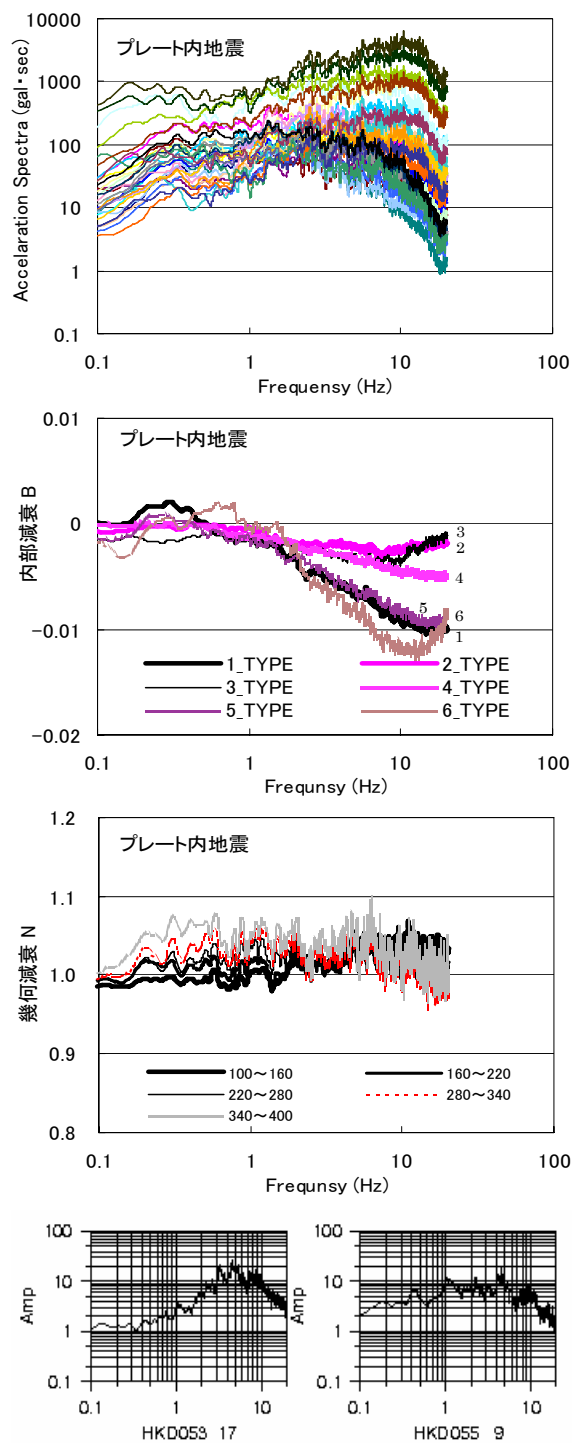


図2 統計的スペクトル特性
の1例（上から震源特性、内
部減衰 b 、幾何減衰 n 、サイ
ト特性）

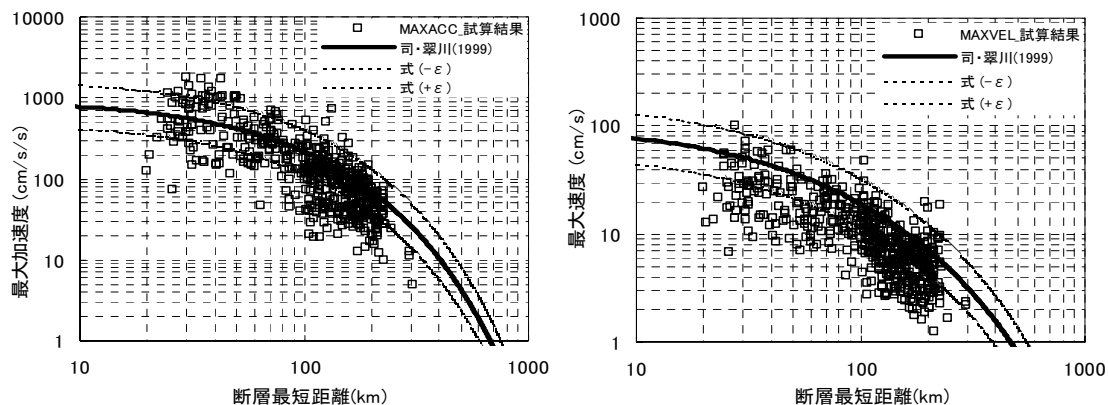


図3 南海地震に対するシミュレーション波の最大加速度・最大速度と
司・翠川(1999)による距離減衰式との比較

(d) 結論ならびに今後の課題

中小地震に対する統計的グリーン関数を作成するため、まず統計的経時特性に関しては観測波形をBooreの包絡線関数でモデル化し、同定したパラメータ T_r と T_d をマグニチュード M と震源距離 X で回帰して、震源係数・距離係数・サイト係数を求めた。得られた経時特性モデルは、観測記録と良く一致するものであった。同様に統計的スペクトル特性に関しては震源・伝播・サイトの各特性を分離し、その特性を推定した。この得られた特性は地震のタイプや地域ごとに違いが明白で、その地震タイプの特性や地域特性を抽出できていると考えられる。こうして得られた統計的グリーン関数を用いて想定南海地震による西日本における強震動を試算したところ、過去の研究成果や経験的距離減衰式とほぼ一致したが、最大速度が過小評価されることがわかった。これは速度波形の包絡関数が加速度波形のそれとは異なっているためと考えられ、速度波形に対する包絡線関数を作成して短周期成分とハイブリッド合成することを考える必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 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, 第4巻, 第1号, 33-52, 2004.
- 2) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, pp1865-1894, 1983.
- 3) 釜江克宏: 半経験的手法による強震動予測, 20XX年の南海地震を考えるシンポジウム, 9-23, 2002.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
----	----	-----	-------

Hiroshi Kawase	Site effects derived from spectral inversion method for K-NET, KiK-net, and JMA strong-motion network with special reference to soil nonlinearity in high PGA records	大都市大地震特別プロジェクト国際シンポジウム，東京大学地震研究所	平成 17 年 10 月 24 日
川瀬博	福岡県西方沖地震で観測された震度計データとその構造物破壊能	日本地震工学会大会 2 0 0 5 梗概集	平成 17 年 11 月 20 日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 18 年度業務計画案

これまでに得られた分岐断層に関する理論的動的破壊モデルを、平成 16 年度の探査で得られた近畿圏の活断層への適用を検討する。最近の震源モデル情報をもとに、地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震の震源モデル構築法についての研究をすすめる。