



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2004年12月26日 Sumatra-Andaman 地震の理論歪地震波形の計算と観測波形の比較
Author(s)	池上, 裕; IKEGAMI, Yutaka; 岡本, 大志 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 69, 221-231
Issue Date	2006-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.69.221
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21511
Type	departmental bulletin paper
File Information	16.pdf



2004年12月26日 Sumatra-Andaman 地震の 理論歪地震波形の計算と観測波形の比較

池上 裕・岡本 大志・中西 一郎

京都大学大学院理学研究科地球物理学教室

小久保一哉

気象庁精密地震観測室

(2006年1月23日受理)

Calculation of Theoretical Strain Seismogram by Normal Mode Theory and Comparison with Observed Data from the Sumatra-Andaman Earthquake of December 26, 2004

Yutaka IKEGAMI, Taishi OKAMOTO, Ichiro NAKANISHI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Kyoto University

and

Kazuya KOKUBO

Matsushiro Seismological Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received January 23, 2006)

The great Sumatra-Andaman earthquake of December 26, 2004 is studied by using extensometer (strain-meter) as very-broad-band seismograph. We analyze the strain seismograms obtained by 100 m extensometers installed at Matsushiro Seismological Observatory, Japan Meteorological Agency. We compare the observed strain seismograms with those calculated by normal mode theory and obtain fairly good agreement between the observed and calculated seismograms for a five-sources model with a moment magnitude of 9.3 and a source duration of about 600 sec. We find a peculiar strain change right after the passage of Rayleigh wave in the NS component of the strain seismograms. This strain change cannot be explained by the summation of normal modes and double-couple type sources.

I. はじめに

2004年12月26日に発生した Sumatra-Andaman 地震は広帯域地震計観測網が発達して以来最大の地震であった。Harvard は当初 $M_w = 8.9$ を発信したが、その後周期 300 秒以上の地震波を

用いることで $M_w=9.0$ に変更した。しかし最低次のノーマルモードから $M_w=9.3$ であったという研究もなされている (Stein and Okal, 2005)。また経過時間、すべりの大きさなどはいまだに議論されている (例えば Ammon et al., 2005 ; Ishii et al., 2005 ; Ni et al., 2005 ; Park et al., 2005)。

こうした巨大地震では長周期の波が励起されるが、現在広く用いられている広帯域地震計 STS-1 の速度特性が平坦な周期は 0.1 秒から 360 秒までである。そこでこうした巨大地震を観測するためには長周期側の falloff が無い歪計の利用が考えられる。

本研究では松代の気象庁精密地震観測室に設置された 100 m 石英伸縮計によって観測された 2004 年 12 月 26 日 Sumatra-Andaman 地震の歪地震波形と、ノーマルモードの重ね合わせにより理論的に合成された歪地震波形を時間領域で比較することでこの地震について調べる。

II. 観測点と地震

気象庁精密地震観測室に設置された 100 m 石英伸縮計 (北緯 36 度 32 分 35 秒, 東経 138 度 12 分 25 秒), 南北・東西 2 成分を用いた。南北方向の伸縮計は N 02°W, 東西方向の伸縮計は E 02°N を向いている。

本研究では 2004 年 12 月 26 日に発生した Sumatra-Andaman 地震, 同年 12 月 23 日に Macquarie 島付近で発生した地震による歪地震波形を用いている。これらの地震の表現として Harvard Centroid Moment Tensor(CMT) 解を用いる。それぞれの地震の各パラメータを Table 1 に示す。

Table 1. Harvard CMT Solutions of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and 2004 Macquarie earthquake.

Harvard CMT	Sumatra	Macquarie
Date [y/m/d] GMT	2004/12/26	2004/12/23
Hour	1	14
Minute	1	59
Second	8.96	30.92
Lat. N [deg]	3.09	-49.91
Lon. E [deg]	94.36	161.25
Depth [km]	28.6	27.5
M_w	9.0	8.1
Half duration [sec]	95.0	26.7
Moment tensor [10^{29} dyn-cm]		
M_{rr}	1.040	0.0108
M_{tt}	-0.427	0.0874
M_{pp}	-0.610	-0.0982
M_{rt}	2.980	0.0488
M_{rp}	-2.400	-0.0317
M_{tp}	0.426	-0.120

III. ノーマルモード理論による理論歪地震波形の計算

球座標における Gilbert and Dziewonski (1975) の式を, θ , ϕ により解析的に空間微分して水平歪を計算した。ここでは 45 秒以上の周期を持つノーマルモードを重ね合わせて波形を合成した (西前, 1999 ; 中西, 2005)。Harvard CMT 解は海モデルの PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) を用いて決定されているが, Sumatra-Andaman 地震と松代観測点間の経路 (Fig. 1) を考慮し, 地球モデルとして陸モデルの 1066 A (Gilbert and Dziewonski, 1975) を用いた。

IV. 2004年12月26日 Sumatra-Andaman 地震による歪地震波形

Harvard CMT 解を用いて理論歪地震波形を計算した。観測点（松代）と Harvard CMT 解で与えられた centroid の位置を Fig. 1 に示す。理論波形を合成する際に移動震源モデル (Aki and Richards, 2002) を元にした duration time を導入した。duration time を変化させたところ、150 sec のとき観測記録に対して振幅、位相がよく合った。Figs. 2, 3 には観測歪波形と duration time=150 sec として計算した理論歪波形との比較を NS, EW 各成分に対して示す。理論歪地震波形は 1 秒間隔で計算されている。バンドパスフィルターは Harvard CMT 解の決定に用いられた 300 sec から s_2 の固有周期 3233 sec を含む 300-4000 sec という周期帯を使用した。EW 成分において観測歪波形と理論歪波形はよく合っているが、NS 成分では G1+R1, X3+G2, X4+G3 の振幅・位相が合っていない。

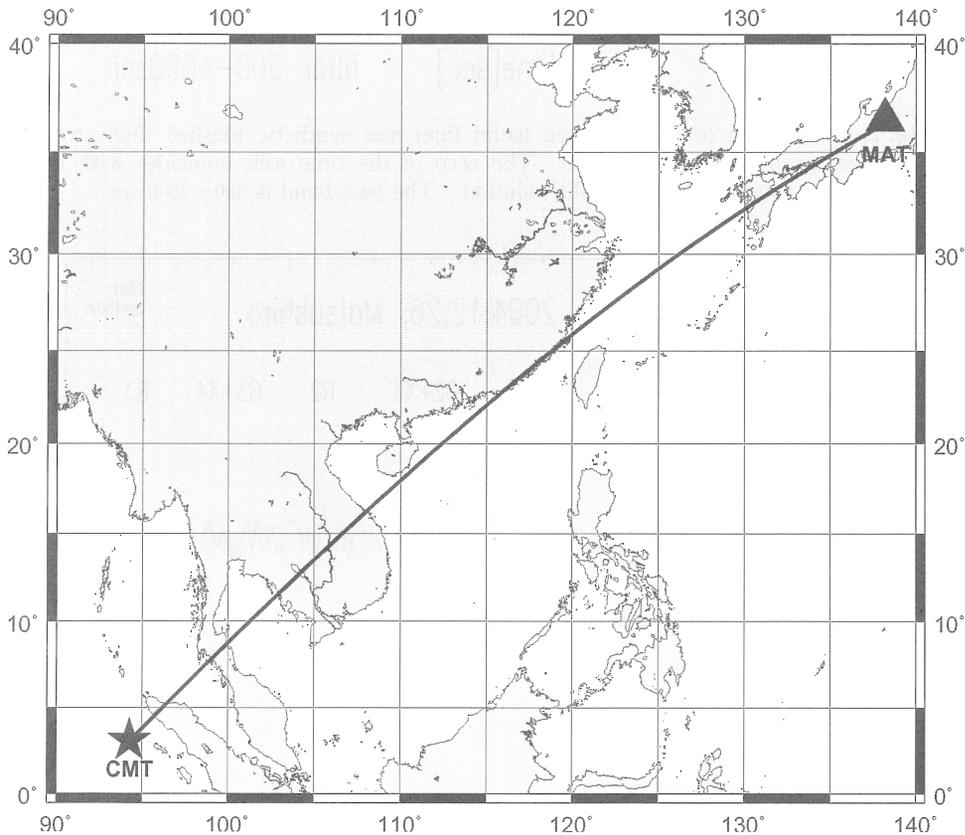


Fig. 1. Location map. The solid triangle is Matsushiro Seismological Observatory (MAT). The solid star is the centroid of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from Harvard CMT solution. The solid line is great circle.

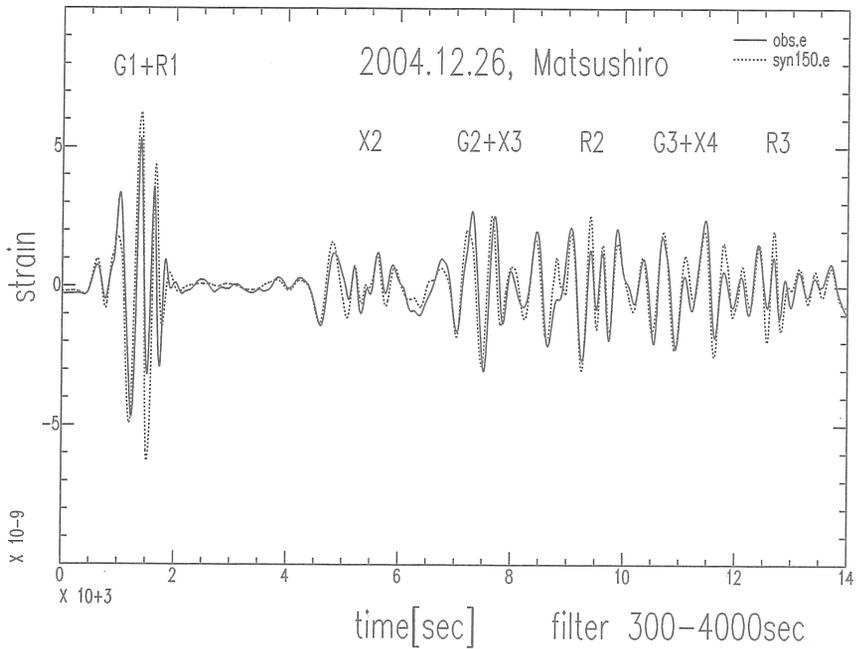


Fig. 2. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (EW component). The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

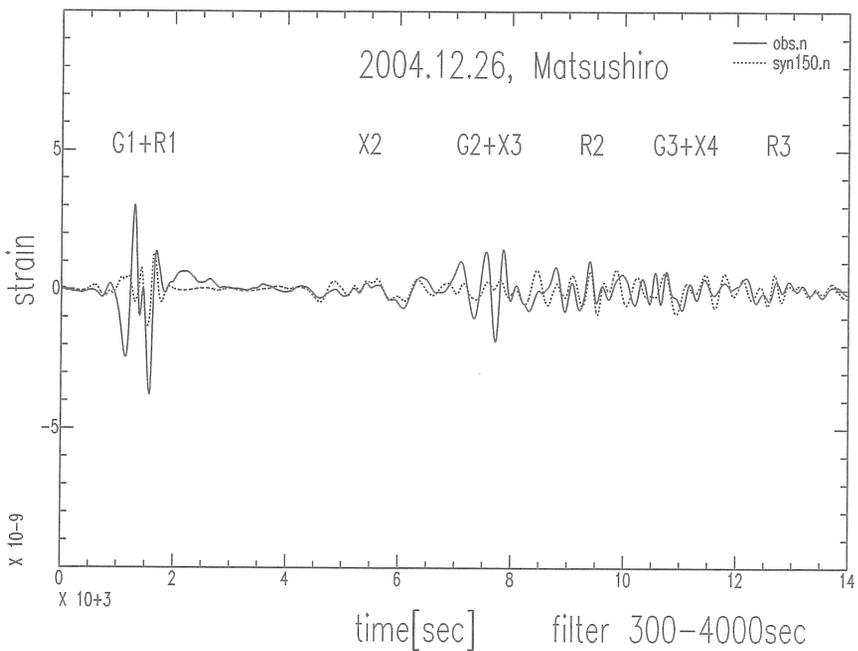


Fig. 3. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (NS component). The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

V. 多重震源に対する理論歪地震波形

Sumatra-Andaman 地震では 1200~1300 km という範囲で断層運動があったと言われており (Ammon et al., 2005 ; Krüger and Ohrnberger, 2005), 先ほどの NS 成分の問題点の原因が Sumatra-Andaman 地震においてすべたとされる断層が点震源 (centroid) では表せていないのではないかと考え, 震源を複数個と仮定し理論歪地震波形を計算した。

その際に震源のパラメータとして Tsai et al. (2005) によって与えられた震源を用い, 5 点の震源 (Table 2, Fig. 4) を与えた。Tsai et al. (2005) ではこれらの震源から $M_w=9.31$ という値を出している。

ここから計算された理論歪地震波形と観測波形の比較を Figs. 5, 6 に示した。ここでもやはり EW 成分においては振幅・位相ともによく合った。NS 成分については EW 成分ほど合ったとは言えないが点震源 (Fig. 3) に比べて改善された。より適切な多重震源を考えることでさらによりよい結果を得る可能性がある。

また 1 点の震源の場合, 5 点の震源の場合それぞれにおいて, 観測歪波形と理論歪波形の差の自乗和をデータ数で割ったもの (Table 3) を波形一致の目安とした。この値が小さいほど 2 つの

Table 2. Parameters of the five-sources model taken from Tsai et al. (2005). A composite solution (Comp) obtained by summing the moment-tensor components of the individual sources is also listed.

Source	Strike [deg]	Dip [deg]	Rake [deg]	Moment	M_w
1	318	6.4	94	0.318	8.94
2	345	6.3	109	0.387	9.00
3	343	5.8	95	0.275	8.90
4	15	8.4	132	0.105	8.62
5	35	8.1	155	0.081	8.54
Comp	343	6.1	107	1.15	9.31

The depth of all sources is constrained at 25 km.

Moment is in units of 10^{30} dyn-cm.

Table 3. Comparison of average residuals between CMT source and Multi source (five-sources model) (Tsai et al., 2005).

Component	Time [sec]	Average Residual [10^{-10}]	
		CMT source	Multi source
NS	0-3000	5.602	4.824
	0-14000	3.307	3.018
EW	0-3000	6.376	4.501
	0-14000	4.302	3.580

波形は一致している。ここから定量的にも1点よりも5点で震源を与えたときの方がよいという結果となった。

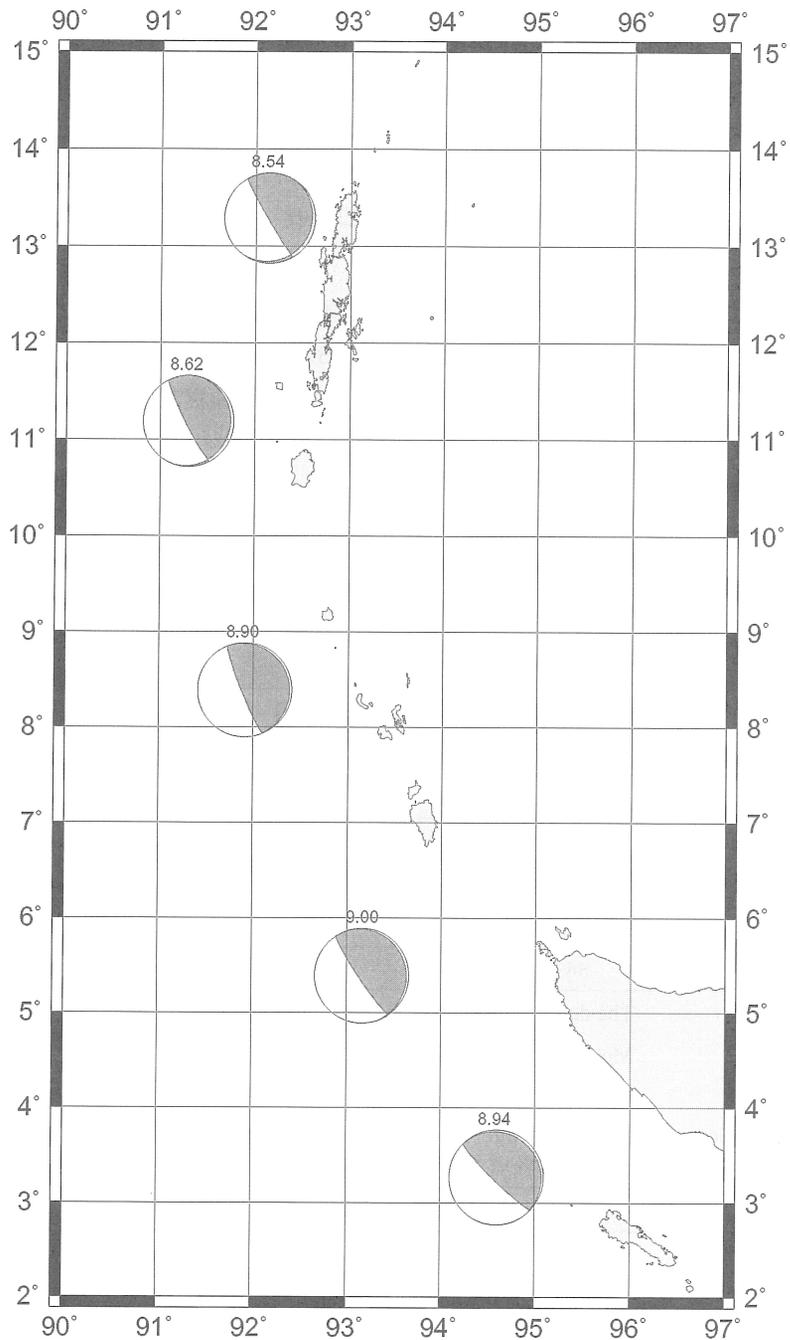


Fig. 4. Locations and focal mechanisms of the five CMTs from Tsai et al. (2005). Also shown in the figure are the moment magnitudes of the five sources. The sizes of the beach balls are proportional to their moment magnitudes.

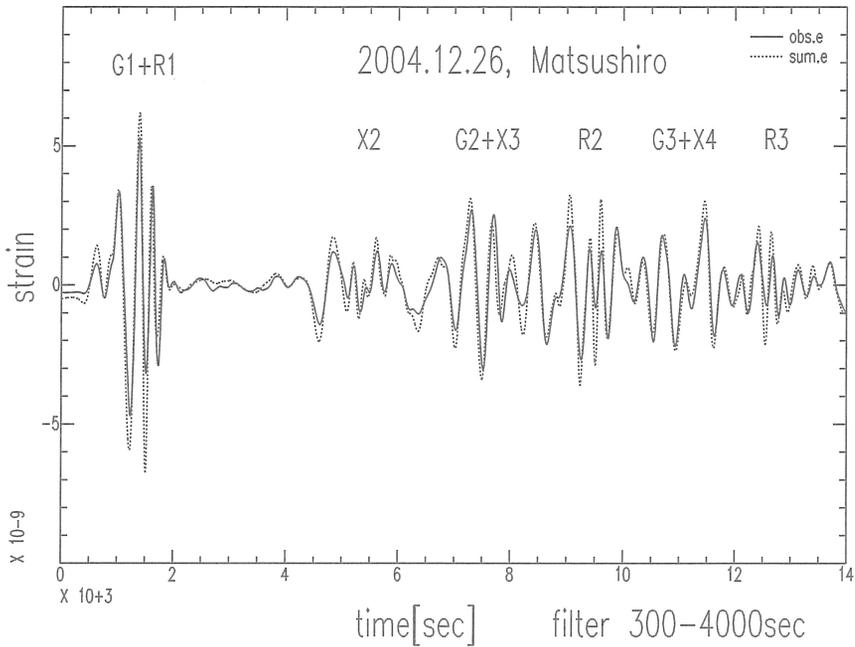


Fig. 5. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (EW component) using the 5 sources in Fig.5. The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

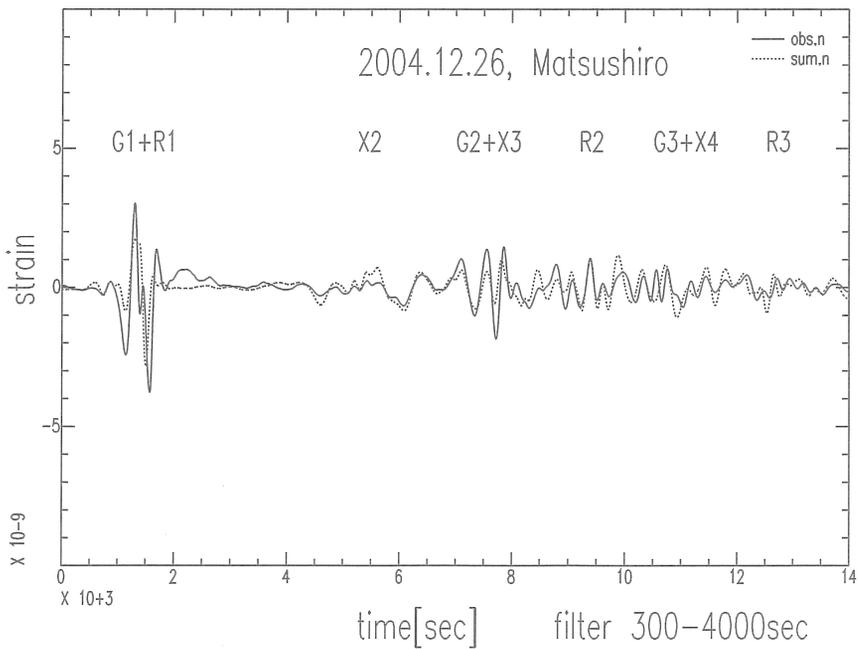


Fig. 6. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (NS component) using the 5 sources. The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

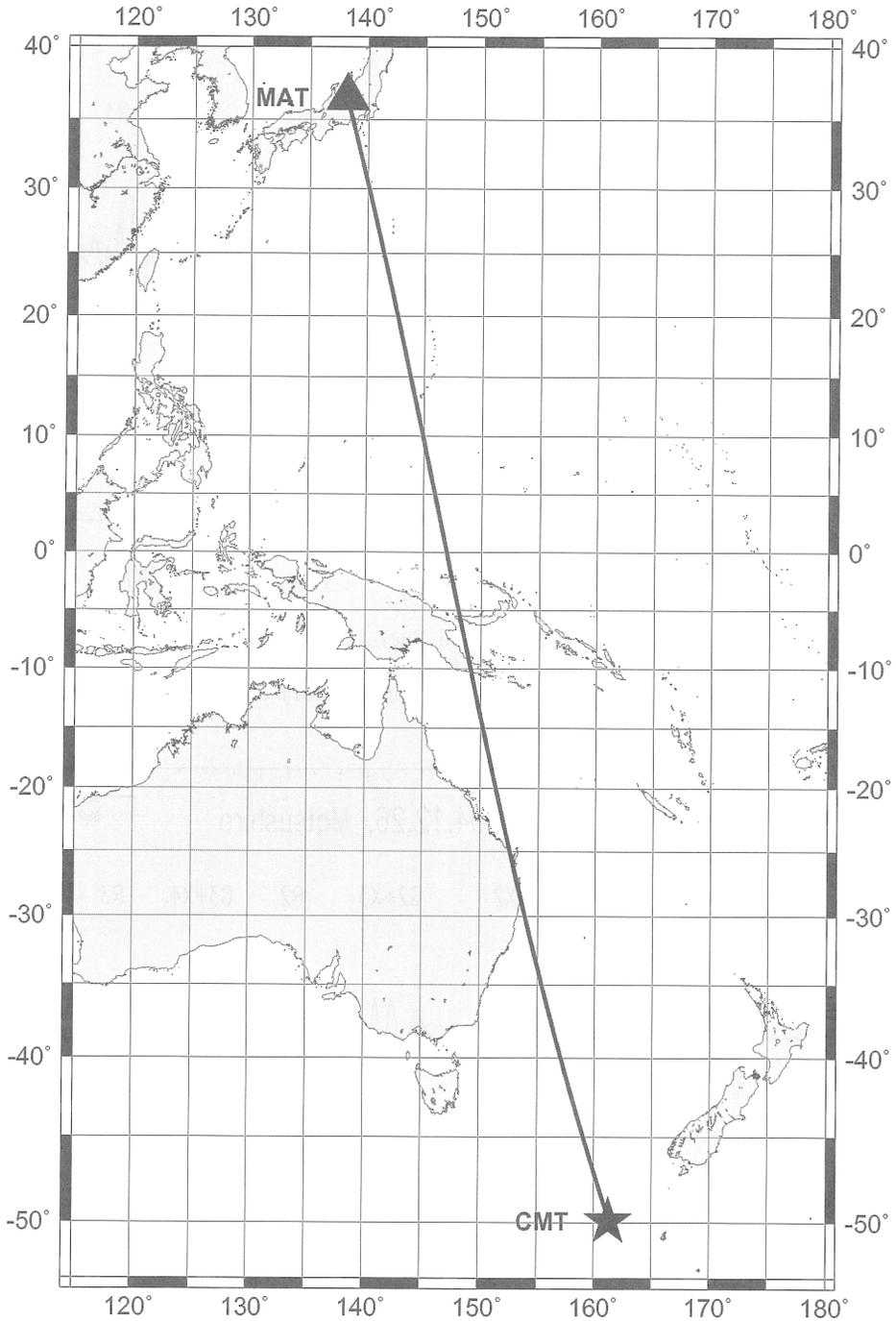


Fig. 7. Location map. The solid triangle is Matsushiro Seismological Observatory (MAT). The solid star is the centroid of the 2004 Macquarie earthquake from Harvard CMT solution. The solid line is great circle.

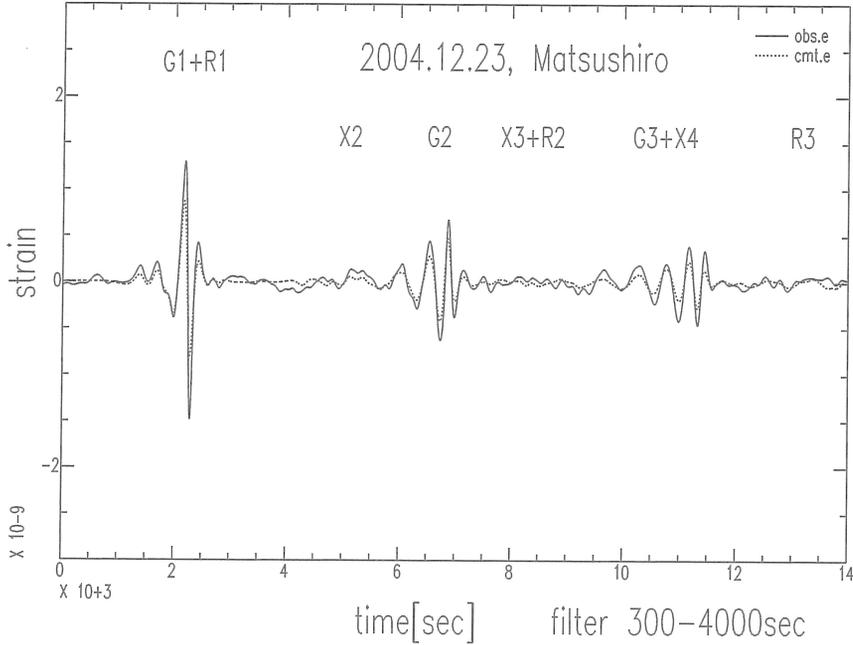


Fig. 8. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (EW component). The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

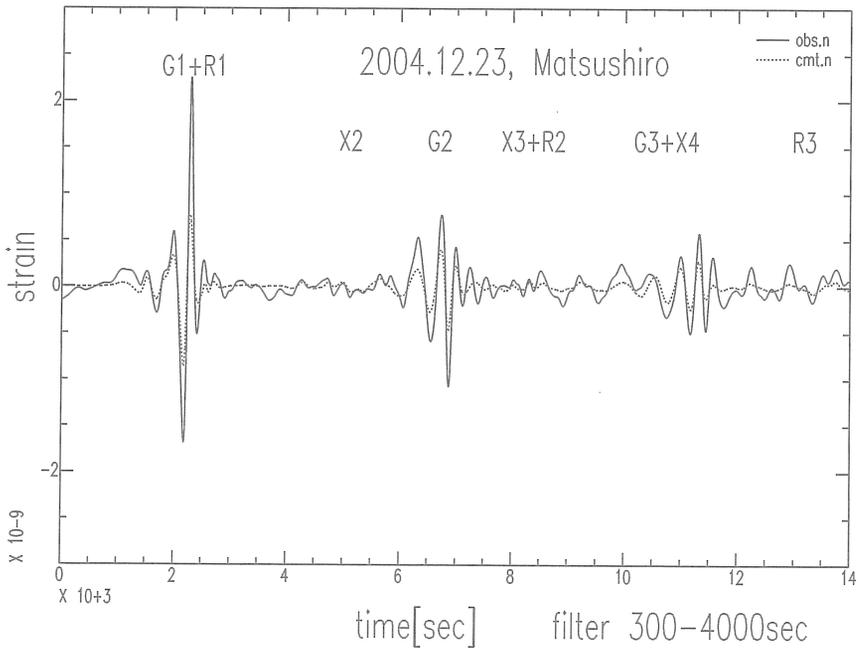


Fig. 9. Comparison of the observed (solid line) and synthetic (dashed line) strain seismograms (NS component). The zero of the time axis coincides with the centroid time of Harvard CMT solution. The pass-band is 300–4000 sec.

VI. 2004 年 12 月 23 日 Macquarie 地震による歪地震波形

Sumatra-Andaman 地震における理論歪波形と観測歪波形の不一致の原因を探るために同観測室で記録された 2004 年 Macquarie 地震($M_w=8.1$)について理論歪波形を計算し、観測歪波形と比較した。入力パラメータは Table 1 に記載した Harvard CMT 解である。また centroid と観測点の位置を Fig. 7 に示す。

理論歪波形と観測歪波形の比較を Figs. 8, 9 に示す。これは振幅に多少の違いはあるが、NS, EW 共に位相はよく合致した。ただここでも EW 成分よりも NS 成分の方が多少合わないといえる。しかし Sumatra-Andaman 地震の NS 成分の不一致の原因が本研究で用いたプログラムの不具合や精密地震観測室の石英伸縮計の不具合によるものでないことがわかった。

VII. 議 論

NS 成分の波形が合わない原因が生データにおいて欠損があるためではないかと考え、生データに飛びなどが無いかとチェックしたところ、問題となっている NS 成分には異常はなく、EW 成分の最大振幅あたりがわずかではあるが振り切れていることが判明した。12 月 26 日 1 時 34 分 (GMT) 頃に 3 秒間にわたり同一の値が記録されていた。しかし理論歪波形における最大振幅付近の 3 点を同一の値に書き換え、300–4000 sec のフィルターをかけた波形は、元の理論歪波形に同フィルターをかけた波形とほぼ変わらない。よって本研究で行っている帯域においてはこの振り切れによる影響は無視出来ると判断した。

VIII. ま と め

Sumatra-Andaman 地震において理論歪地震波形を合成し、気象庁精密地震観測室の伸縮計により観測された歪地震波形と比較した。Harvard CMT 解を用いた計算結果において、EW 成分についてはよく説明できたが NS 成分を十分に説明することはできなかった。しかし多重震源を用いたことで NS 成分の不一致はある程度改善されたことから、震源を変えることでさらによく説明できそうである。また Macquarie 地震による観測歪波形と理論歪波形の比較はよく合致したことから Sumatra-Andaman 地震による波形の不一致の原因がこの地震の大きさ、震源過程、伝搬経路、観測点付近の歪場などに起因すると推察できる。

謝辞 森谷武男助教授が広帯域地震観測に関心と支援を示されたことに感謝致します。笹谷努助教授、小山順二教授から本記念号への投稿の機会を頂きました。笠原稔教授、高波鐵夫助教授、岡山宗夫技官からの歪計の超広帯域地震計としての利用についてのご理解は著者にとって励みになりました。データの解析において 2005 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)) 「歴史地震の詳細震度分布図の作成と断層パラメータの推定に関する研究」(研究代表者：都司嘉直)を用いました。皆様方に感謝致します。

文 献

- Aki, K., and P. G. Richards, 2002. *Quantitative Seismology*, second edition, University Science Books, 700pp.
- Ammon, C. J., C. Ji., H. Thio, D. Robinson, S. Ni, V. Hjorleifsdottir, H. Kanamori, T. Lay, S. Das, D. Helmberger, G. Ichinose, J. Polet and D. Wald, 2005. Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, **308**, 1133–1139.
- Dziewonski, A. M., and D. L. Anderson, 1981. Preliminary Reference Earth Model (PREM), *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297–356.
- Gilbert, F., and A. M. Dziewonski, 1975. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **278**, 187–269.
- Ishii, M., P. M. Shearer, H. Houston and J. E. Vidale, 2005. Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array, *Nature*, **435**, 933–936.
- Krüger, F., and M. Ohrnberger, 2005. Tracking the rupture of the $M_w=9.3$ Sumatra earthquake over 1,150 km at teleseismic distance, *Nature*, **435**, 937–939.
- 中西 一郎, 2005. ノーマルモード理論による理論歪地震波形の計算と観測波形との比較, 北海道大学地球物理学研究報告, **68**, 261–269.
- Ni, S., H. Kanamori and D. Helmberger, 2005. Energy radiation from the Sumatra earthquake, *Nature*, **434**, 582.
- 西前 裕司, 1999. 歪地震計で観測された長周期地震波の波形と理論波形の比較, 気象庁精密地震観測室技術報告, **16**, 11–23.
- Park, J., T. A. Song, J. Tromp, E. Okal, S. Stein, G. Roullet, E. Clevede, G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M. V. Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu and S. Rosat, 2005. Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, **308**, 1139–1144.
- Stein, S., and E. A. Okal, 2005. Speed and size of the Sumatra earthquake, *Nature*, **434**, 581–582.
- Tsai, V. C., M. Nettles, G. Ekström and A. M. Dziewonski, 2005. Multiple CMT source analysis of the 2004 Sumatra earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17304, doi:10.1029/2005GL023813.