HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	中西, 一郎
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 261-269
Issue Date	2005-03-15
DOI	10.14943/gbhu.68.261
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/14376
Type	bulletin (article)
File Information	68_p261-269.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 68, March 2005, pp. 261－269

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

中西　一郎
京都大学大学院理学研究科地球物理学教室

(2005年1月24日受理)

Calculation of Theoretical Strain Seismograms by Normal Mode Theory and Comparison with Observed Data from a Large Deep Earthquake

Ichiro NAKANISHI
Department of Geophysics, Faculty of Science, Kyoto University

(Received January 24, 2005)

A large deep earthquake of $m_b = 6.4$ occurred beneath the Sakhalin Island, Eastern Russia on May 12, 1990. The earthquake was observed not only at large distances by global networks but also at near distances by local networks. The VBB records of seismic waves from the earthquake obtained by a local network of velocity type seismometers and strainmeters (extensometers), which has been operated in Hokkaido region, Japan, by Hokkaido University, are analyzed by using a linear moment tensor inversion of long-period seismic waves. The moment tensor solution of the earthquake is obtained by linear moment tensor inversion from long-period component of the VBB records. The solution is in good accordance with those obtained from global networks by other research groups. The reliability of the solution is examined by comparing the observed strain seismograms with the calculated ones for strainmeters with lengths of 10 to 30 m installed at 8 stations of the network. The moment tensor solution well explains the observed strain amplitudes of about 2×10^{-9} and the observed strain waveforms at periods greater than 45 sec, and may suggest the use of the strainmeter records for the long-period moment tensor inversion.

I. はじめに

長周期地震波形を用いたモーメントテンソルインバージョンはGilbert and Dziewonski (1975) により初めて行われた．この研究ではアナログ地震波形(WWSSN)のディジタル化という大きな作業を必要とした．しかし，その後の世界規模のディジタル長周期地震計網，さらに広帯域地震計網の展開により長周期地震波形からのセントロイドモーメントテンソル(CMT) (Dziewonski and Woodhouse, 1983)の決定は自動化され，地震発生後短時間のうちにCMT解の決定が行われている．例えば，2004年12月26日9時58分51秒(日本時)に発生したアンダマン・

ニコバル・スマトラ沖地震では，14時25分にCMT解とM_w=8.9がハーバードから世界中に発信された．地震の規模が非常に大きかったため，その後データ長を2.5時間から9時間に延ばし周期300秒以上の地震波のみを用いてCMTインバージョンが再度行われ，マグニチュードはM_w=9.0に変更された．

広帯域地震計の代表例であるSTS-1/VBB (Wielandt and Streckeisen, 1982；Wielandt and Steim, 1986)では周期0.1秒から360秒まで速度特性が一定である．従って，M_w=9.0の地震のCMTインバージョンに於いてはカーネルを構成するモードの多くは固有周期が360秒以上になり，速度特性が一定である帯域から外れる．破壊速度が非常に遅くても海底下での破壊断層が大規模であれば，発生する津波も巨大なものになる．

地球深部構造の研究に於いても周期360秒以上の帯域が重要になる．低次の基本モードの固有周期は，44分（${}_0T_2$），28分（${}_0T_3$），20分（${}_0S_0$），54分（${}_0S_2$），36分（${}_0S_3$）になる(Dziewonski and Anderson, 1981)．また660 km不連続，コアに関する情報をもたらす高次モードの例である${}_1S_4$，${}_3S_2$の固有周期はそれぞれ，14分，15分になる（Tromp, 2001；Tsuboi and Saito, 2002)．

以上のようにM_w=9.0クラスの巨大地震の研究，ノーマルモードを用いた地球深部構造の研究を進展させるには，現在の広帯域地震計にみられる長周期側でのfalloffのない超広帯域地震計が理想的である．このような地震計として歪地震計の利用が考えられる．伸縮計(Benioff, 1959)，レーザー伸縮計（Levine and Hall, 1972)，ボアホール歪計(大久保・他，2004)，ボアホール体積歪計(Sacks and Evertson, 1968）が実用化されている．

本研究では歪計の長周期地震計としての可能性を調査する目的で，日本で最も広範囲に設置されている伸縮計用の理論歪地震波形を計算し，北海道大学理学部地震予知観測地域センター（現在の北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター）の歪地震計（伸縮計）アレイによって記録された観測歪地震波形と比較した．

II. 観測網と地震

Fig. 1は観測点の位置，伸縮計の方向，データが収録される札幌の位置，用いた地震の震央を示している．観測点の中，KKJ（上ノ国)，AIB（愛別）には広帯域地震計（STS-1/VBB）が設置されている(Nakanishi et al., 1991)．図中にない観測点NMR（根室）にも広帯域地震計が設置されているが，地震の発生する直前に落雷があり，この地震のデータを得ることができなかった．伸縮計の長さはERMが30 m，他は10 mである．データはすべて5.77 HzでA/D変換され，札幌の地震予知観測地域センターへ送られ連続記録された．

本研究の目的が，歪計の長周期地震計としての可能性を調査することであることを考慮して，1990年5月12日にサハリン下約600 kmで発生したm_b=6.4の地震を用いた．深発地震は波形が比較的単純であり，浅発地震に比べて今回の目的に適している．

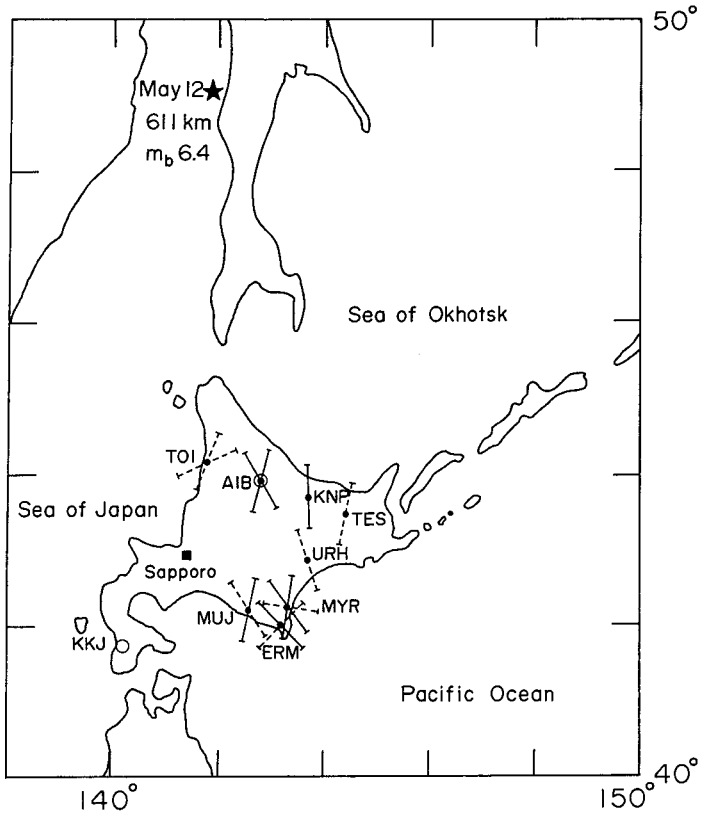


Fig. 1. Locations of strainmeters (extensometers) (solid circles), STS-1 seismometers (open circles), recording site (solid square), and epicenter of the deep earthquake (solid star) used in this study. The records obtained by the strainmeters indicated by the dashed bars are shown in Fig.8, but those with the solid bars are shown in Figs. 8 and 9. The solid and dashed bars indicate the directions of the strainmeters.

III. 広帯域地震波形による CMT インバージョン

KKJ と AIB に設置された広帯域地震計による記録を用いて，サハリン深発地震の CMT インバージョンを行った．Fig. 2 に原記録，Fig. 3 に周期 50 s－1000 s のバンドパスフィルターを通した記録を示す．インバージョンの方法は Nakanishi et al. (1991)，Nakanishi (1993) と同じである．Fig. 4 に CMT 解を示す．Fig. 5 に観測波形と CMT 解(Fig. 4) で計算した理論波形の比較を示す．

IV. 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 (r, θ, ϕ) での Gilbert and Dziewonski (1975) の式を r, θ, ϕ により空間微分し歪を計算した．r に関しては固有関数の計算に於いてすでに数値計算されている．θ, ϕ に関しては解

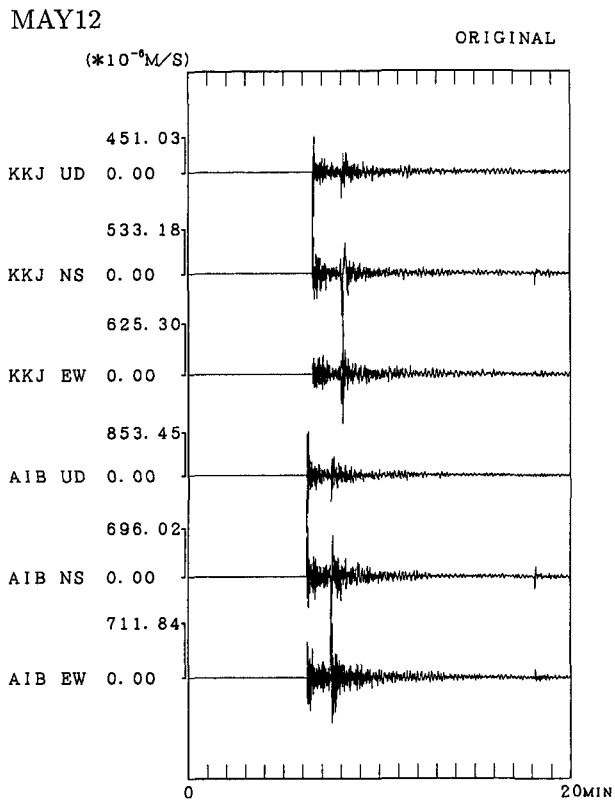


Fig. 2. Three-component velocity-seismograms at two stations KKJ and AIB observed from the deep earthquake of May 12, 1990. Each seismogram is normalized to its maximum amplitude, which is indicated in 10^{-6} m/s.

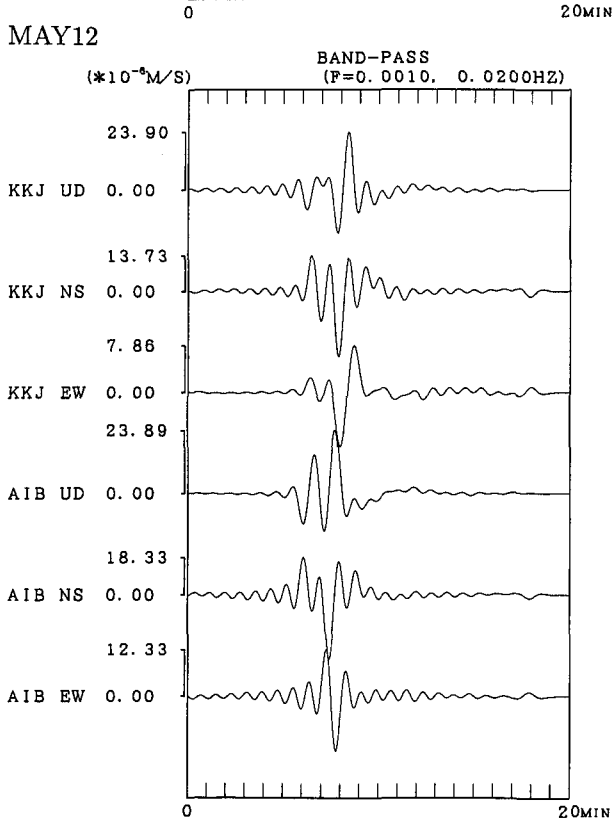
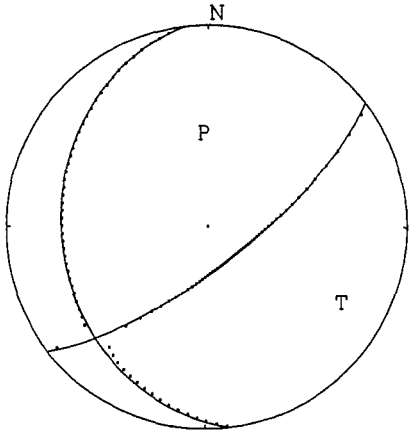


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for the band-pass filtered seismograms. The pass-band is 0.001−0.02 Hz.



MOMENT TENSOR X10**26 DYNE*CM
MRR=-4.260 MTT=-0.803 MFF=5.064
MRT=-6.073 MRF=-3.528 MTF=2.959

SEISMIC MOMENT
6.96 X 10**26 DYNE*CM

CLVD (%)
0.6

MOMENT MAGNITUDE (MW)
7.2

STRIKE (DEG)	DIP (DEG)	SLIP (DEG)
51.9	74.2	-65.7
173.0	28.7	-145.5

Fig. 4. Full moment tensor (dotted line) and best double couple (solid line). Lower hemisphere equal area projection is adopted.

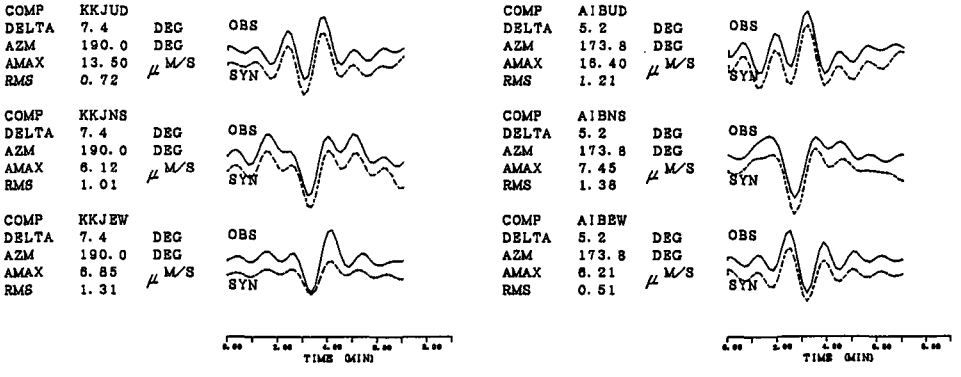


Fig. 5. Comparison of the observed (solid trace) and synthetic (dashed trace) seismograms. The zero of the time axis coincides with the earthquake origin time.

析的に計算できる．伸縮計で記録される歪波形の計算には r 微分は用いない．また震源の表現としてはモーメントテンソルを用いた．地球モデルとしては 1066 A (Gilbert and Dziewonski, 1975) を用いた．

Fig. 4 の CMT 解を用いて計算した歪地震波形の例を Fig. 6 (MYR) と Fig. 7 (TOI, ERM) に示す．図からわかるように，ノーマルモードの重ね合わせによりストレインステップ (strain step) も計算できる．＋が伸縮計の伸びに対応している．

V．理論波形と観測波形の比較

Fig. 8 は Fig. 1 に示した伸縮計に対する理論波形と観測波形の比較を示す．理論波形は 10 秒間隔で計算した値をプロットしている．両者とも周期 50 s－1000 s のバンドパスフィルターを通し

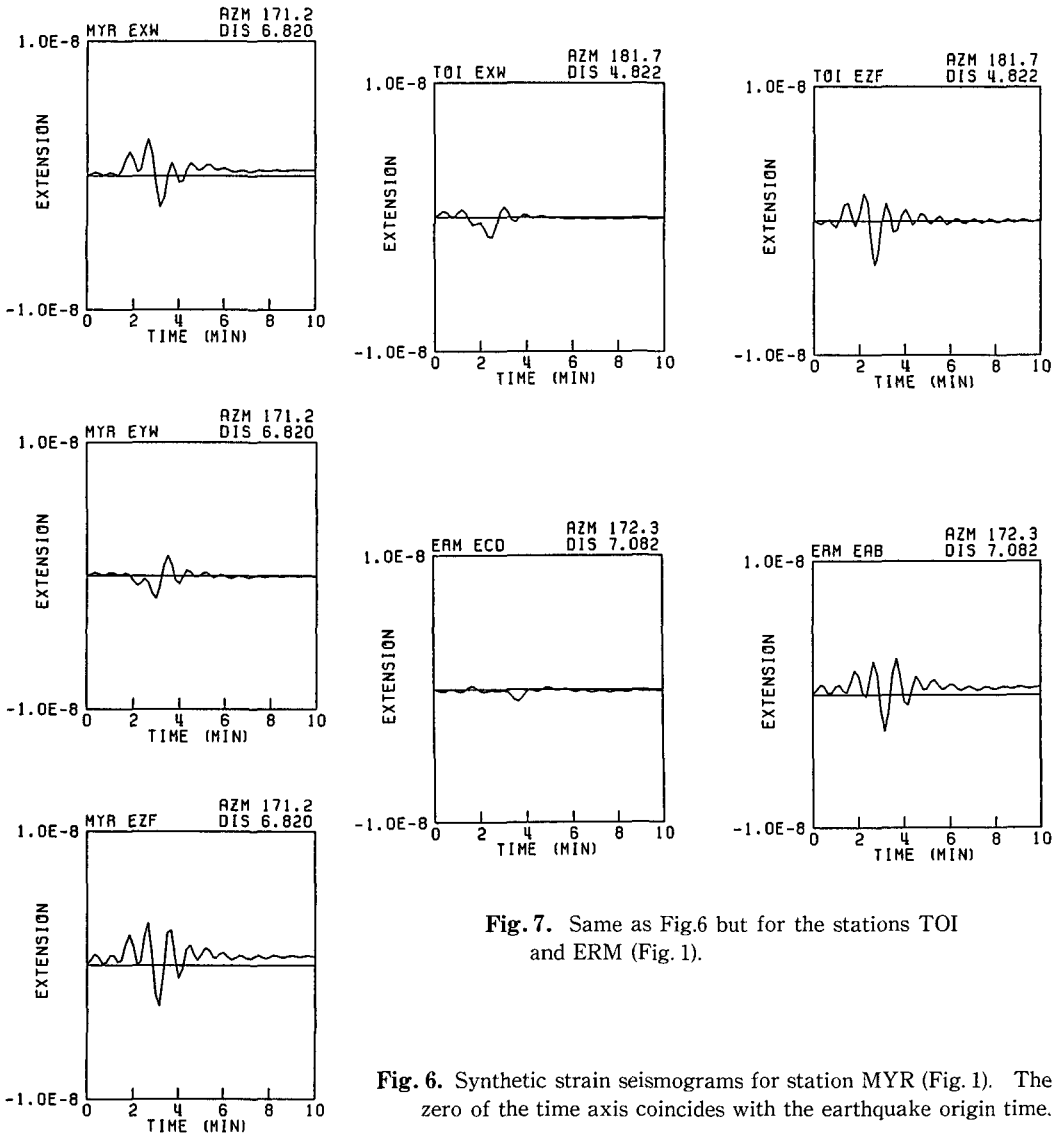


Fig. 7. Same as Fig.6 but for the stations TOI and ERM (Fig. 1).

Fig. 6. Synthetic strain seismograms for station MYR (Fig. 1). The zero of the time axis coincides with the earthquake origin time.

ている．Fig. 8 が示すように，この帯域では，理論波形と観測波形の振幅はほぼ一致している．8 観測点下の地質はかなり異なる．例えば，MUJ は第 4 紀沖積層，TES は現世堆積物・鮮新世安山岩，TOI は新第 3 紀砂岩・泥岩・第 3 紀礫岩で特徴付けられ，短周期成分は他の観測点と比較して 5 倍から 10 倍近く振幅が大きくなるが，図のようにこの帯域ではそのようなことはない．

しかし，MUJ を除いて，TES，TOI 以外の観測点の方が振幅・位相とも，理論波形と観測波形の一致がよい．TES，TOI，URH の 3 観測点を除き，振幅・位相とも良く一致する波形を Fig. 9 に示した．URH 下の地質は白亜紀の砂岩であり，Fig. 8 でも振幅・位相の一致は悪くはないが，原記録において伝送系に起因すると思われる S/N 比の低下が見られるので Fig. 9 からは除いた．Fig. 8，Fig. 9 の理論歪波形は Fig. 4 の CMT 解で計算したものであり，観測歪波形との一致

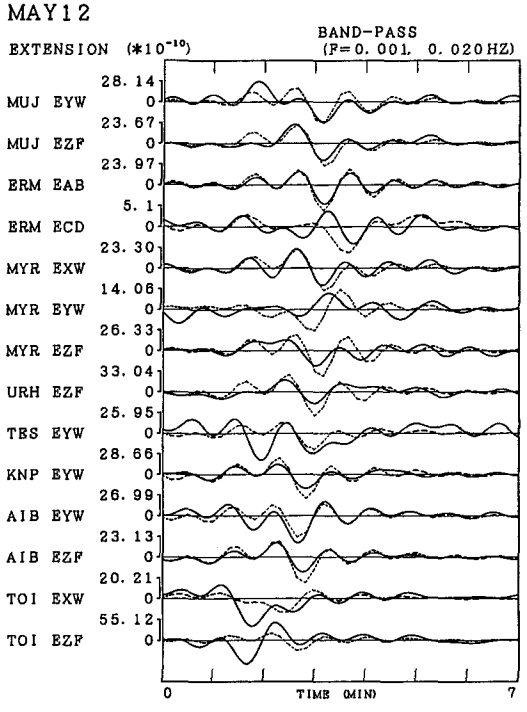


Fig. 8. Comparison of the observed (solid trace) and synthetic (dashed trace) strain seismograms for all the strainmeters indicated by bars in Fig. 1. The zero of the time axis coincides with the earthquake origin time. The digital interval of the synthetic traces is 10 s.

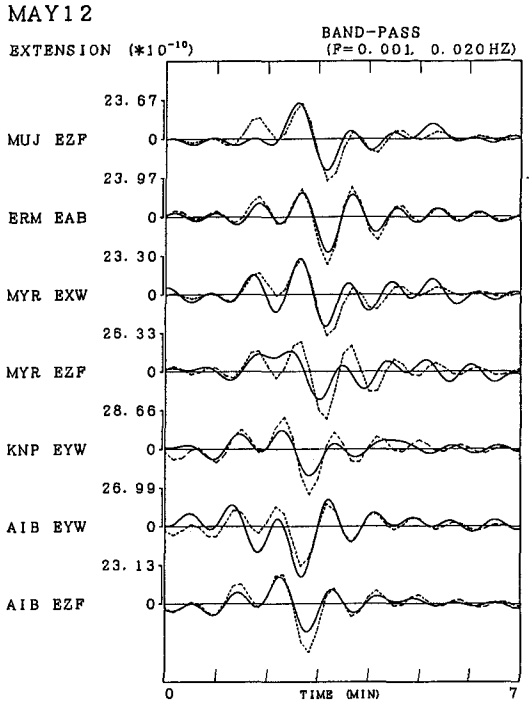


Fig. 9. Same as Fig. 8 but for the strainmeters indicated by solid bars in Fig. 1.

を良くするためのCMT解の調整等は一切行っていない．Fig. 4のCMT解を修正することにより理論歪波形と観測歪波形の一致は，Fig. 8・Fig. 9の場合よりも良くなると思われる．

VI. 議　　論

1990年5月12日のサハリン深発地震(m_b=6.4)の伸縮計記録を用いて，理論歪地震波形と観測歪地震波形の比較を行った．Fig. 8およびFig. 9が示すように，周期50秒以上ではノーマルモード理論に基づく理論歪波形は観測歪波形をかなり良く説明出来た．

西前（1999）は，気象庁精密地震観測室（長野県松代町）に設置された100 m伸縮計(山岸・他, 1976)によって記録された，日本列島周辺で1990年から1995年に発生した比較的規模の大きい15地震（M_J=6.5～8.1)に対し，同じ計算プログラムを用いて理論歪波形と観測歪波形の比較を行った．15地震のうち，9地震に対して理論と観測との良い一致が見られた．他の6地震のうち，3地震に対しては，位相は合うが振幅を説明出来なかった．残りの3地震に対しては位相・振幅ともに説明することが出来なかった．この3地震に共通する事は震央距離が近いことである．M_J

と震央距離を具体的に書くと，1993年東海道はるか沖地震(7.1, 4.4°)，1995年兵庫県南部地震(7.3, 3.2°)，1993年能登半島沖地震(6.6, 1.6°)になる．M_Jが8.1と大きくても，震央距離が10.1°と遠い1994年北海道東方沖地震に対しては，振幅・位相とも理論波形と観測波形の非常に良い一致が得られた．このことから3地震における理論波形と観測波形の不一致の原因として強震に対する伸縮計の応答に問題があることが考えられる．

VII. 結　　論

Fig. 8, Fig. 9に示した理論歪波形と観測歪波形の比較，松代精密地震観測室に設置されている100 m伸縮計での理論波形と観測波形の比較(西前, 1999)から，長周期波形のCMTインバージョン，特にスローイベント・津波地震の震源過程の研究，津波予測のためのCMT解の即時決定(福島・他, 1987)に適していると思われる．しかし，今回示した理論歪地震波形を計算するプログラムは15年以上前に書いた(中西・笠原, 1990)ものであり，その後のグローバル地震学の進歩を考慮した改良を行う必要がある．

謝辞　島村英紀教授が北海道内での広帯域地震観測にご理解とご支援を示されたことに感謝致します．伸縮計データの利用については笠原稔教授，岡山宗夫技官，本谷義信助教授，高波鐵夫助教授からご理解とご支援を頂きました．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．皆様方に感謝致します．

文　　献

Benioff, H., 1959. Fused-quartz extensometer for secular, tidal, and seismic strain, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **70**, 1019−1032.

Dziewonski, A. M. and J. H. Woodhouse, 1983. An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981, *J. Geophys. Res.*, **88**, 3247−3271.

Dziewonski, A. M. and D. L. Anderson, 1981. Preliminary Reference Earth Model (PREM), *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297−356.

福島毅・末次大輔・中西一郎, 1987. 津波予測のための日本近海地震のモーメントテンソル即時決定:数値実験，地震2，**40**, 365−375.

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.

中西一郎・笠原稔, 1990. 歪地震計アレイによる1990年5月12日サハリン深発地震の観測，1990年度地震学会秋季大会 講演予稿集，A 49.

Levine, J. and J. L. Hall, 1972. Design and operation of a methane absorption stabilized laser strainmeter, *J. Geophys. Res.*, **77**, 2595−2609.

Nakanishi, I., Y. Hanakago, T. Moriya, and M. Kasahara, 1991. Performance test on long-period moment tensor determination for near earthquakes by a sparse local network, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 223−226.

Nakanishi, I, 1993. Long-period moment tensor determination for regional earthquakes by a local broad-band

seismograph array in Hokkaido, Japan, *Proc. Int. Symp. Earthq. Disas. Prev.*, Mexico, Vol. 1, 70－80.

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.

大久保慎人・石井紘・山内常生, 2004. ボアホール歪計アレイが観測した2003年十勝沖地震波形　－広帯域地震計による観測との比較－, 地震2, **57**, 105－113.

Sacks, I. S. and D. W. Evertson, 1968. A sensitive borehole strain-rate meter, *Carnegie Institution Yearbook*, **68**, 448－455.

Tromp, J., 2001. Inner-core anisotropy and rotation, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **29**, 47－69.

Tsuboi, S. and M. Saito, 2002. Existence of finite rigidity layer at the base of the Earth's liquid outer core inferred from anomalous splitting of normal modes, *Earth Planets Space*, **54**, 167－171.

Wielandt, E. and J. M. Steim, 1986. A digital very-broad-band seismograph, *Ann. Geophys.*, **4, B, 3**, 227－232.

Wielandt, E. and G. Streckeisen, 1982. The leaf-spring seismometer: Design and performance, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 2349－2367.

山岸要吉・泉　末雄・相原奎二, 1976. 松代における地殻変動の連続観測結果について, 験震時報, **41**, 13－20.