

### 11 - 3 深部ボアホール歪観測による地震研究の情報について

#### Information about seismological research obtained from strain observation in deep borehole

地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所  
名古屋大学 環境学研究科

Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES) Association for Development of Earthquake Science (ADEP) and Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

東濃地震科学研究所では深部ボアホールにおいて地殻活動総合観測を実施しており、現在、8ヶ所の深部ボアホール観測のデータを得ている。最も深いボアホール総合観測装置は深度1030mで浅いのは165mである。深部ボアホールにおいて観測すると人工的なノイズが小さくなりS/Nのよい良好な記録が得られる。最近いくつかの地震が発生し、深部ボアホール歪計で観測された地震のデータが蓄積されてきた。これらの地震は2003/9/26 十勝沖地震 M8.0、2004/9/5-6 紀伊半島沖地震 M7.4&M6.9、2004/10/23 新潟県中越地震 M6.8、2004/12/26 スマトラ地震 M9.0、2005/3/20 福岡県西方沖地震 M7.0などである。これらのデータにより歪地震観測の重要性や地震計で得られない情報を得られることが明らかになってきた。

歪計(歪地震計)の特徴としては地震計では応答できない直流成分まで記録することである。また、計器の設置点が傾斜しても感度が変化せず安定した記録が取れる。歪計はこの様に地震計では出来ない有利な特徴を備えている。

上記地震の全てにおいて良好な歪地震波形を記録することが出来た。サンプリングは多いもので20Hz、少ないもので1Hzである。簡単なデータ解析により以下のような地震研究の情報を得ることが出来る。

1. 歪地震計はSTS地震計と同様な波形を記録するが特に重要な震源情報を含んでいる実体波の部分でSTSが記録できない長周期変化を記録している。
2. 震源時間関数の変化が歪記録で直接容易に見られる
3. 震源の永久変位が歪記録で直接容易に見られる
4. 地球の自由振動が容易に観測できる。特にトロイダルモードの変動にも正確に応答する
5. 1ヶ所の歪計でマグニチュードが決められる
6. 1ヶ所の歪計で地震発生方向が決められる
7. 地震計と異なり歪計においては傾斜変動による感度の変動は発生しない
8. 地震などの破壊発生前の基本的現象であるゆっくりした変動を観測することが出来る
9. ボアホール歪計に用いられているメカニカルな拡大装置を適用すると1km以上の長さに相当する伸縮計が製作可能で高いS/N比の歪観測が可能になる。

以上の結果は地震の発生機構を研究する上で歪地震観測が重要な観測情報を含んでいることを示している。例えば津波の発生に関しても震源時間関数が容易にわかれば予測することができる。得られた結果を紹介する。

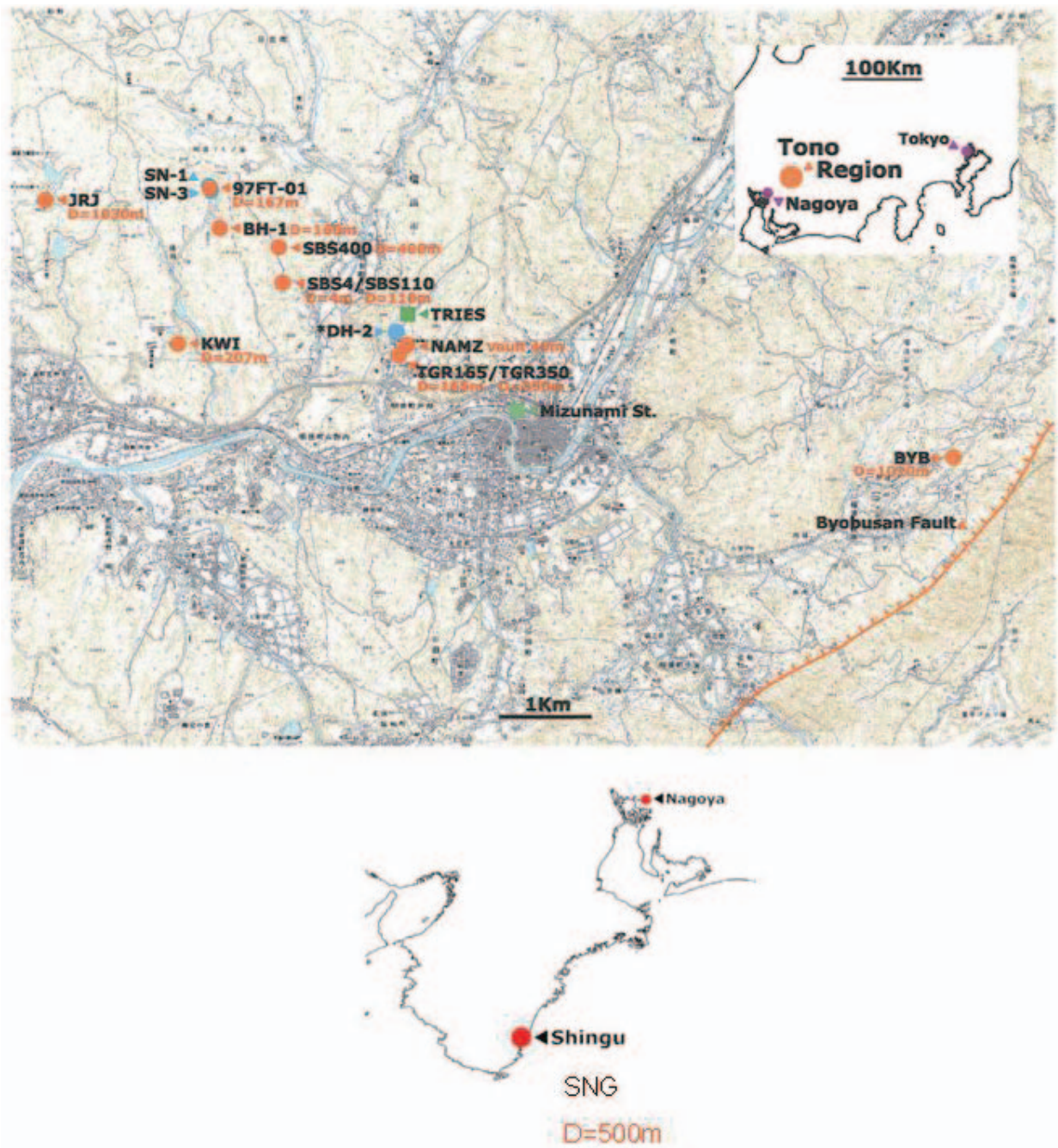
参考文献

岡田義光,1980、理論歪地震記象とその応用、東京大学地震研究所彙報,55,101-168.

大久保慎人、石井 紘、山内常生、ボアホール歪計アレイが観測した2003年十勝沖地震波形、2004、地震、57、2号、105-113.

Okubo, M., Y. Asai, H. Aoki and H. Ishii, The seismological and geodetical roles of strain seismogram suggested from the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, 2004, Earth Planets Space, 57, 303-308.

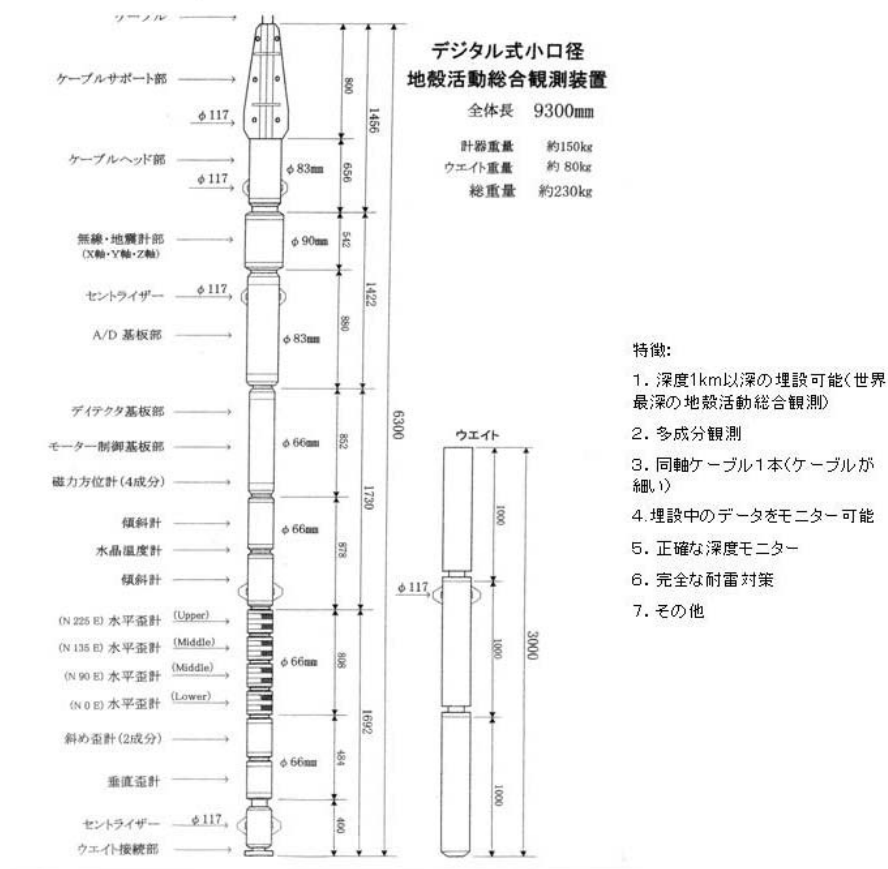
Asai, Y., M. Okubo, H. Ishii, H. Aoki, T. Yamauchi, Y. Kitagawa, N. Koizumi, Co-seismic strain-steps associated with the 2004 off Kii peninsula earthquakes-Observed with Ishii-type borehole strainmeters and quartz-tube extensometers, 2005, Earth Planets Space, 57, 309-314.



第1図 東濃地震科学研究所のボアホール観測点分布。赤色の数字はボアホールの深度

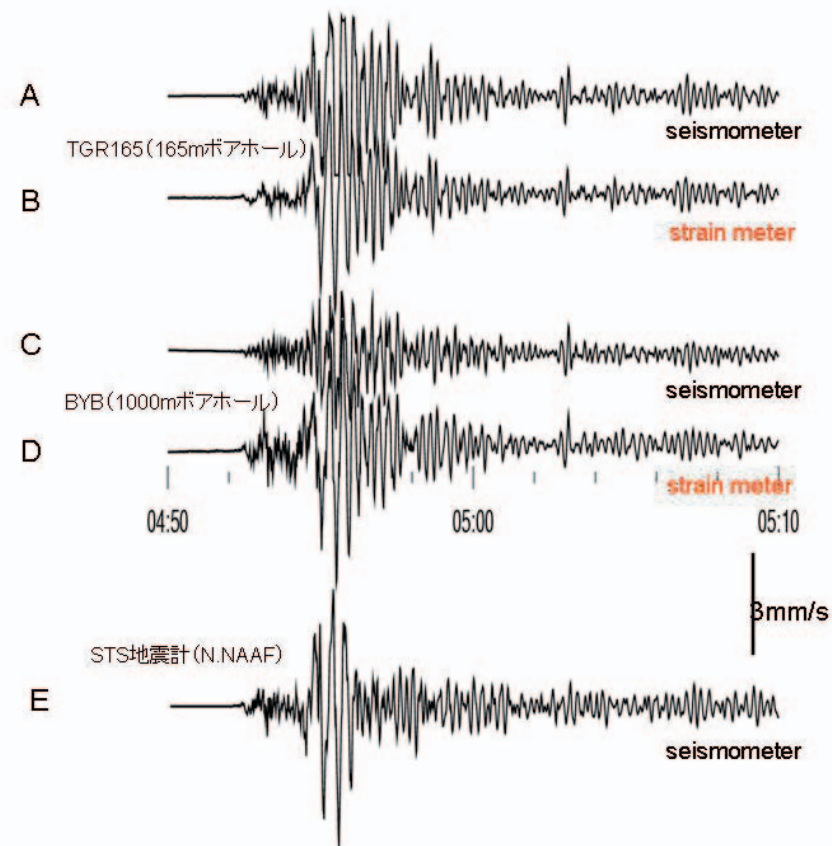
Fig.1 Distribution of borehole station operated by Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES). Red numbers indicate depth of boreholes.

## 屏風山(BYB)1000mボアホールに埋設設置した地殻活動総合観測装置と主な特徴



第2図 屏風山(BYB)1000mボアホールに埋設設置した地殻活動総合観測装置と主な特徴

Fig.2 Multi-component borehole instrument installed in the 1000m depth borehole of BYB station and its characteristics.

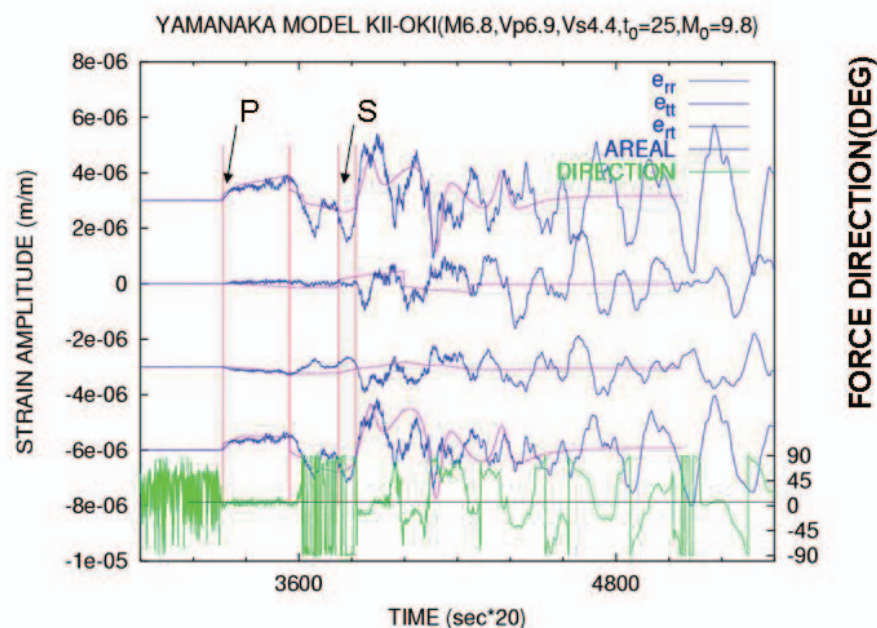


第3図 BYB, TGR165とN.NAAF観測点において観測された十勝沖地震の鉛直歪地震波形と地震計による波形。Dの歪地震記録とEのSTS記録の実体波部分を比較すると歪地震記録のほうが長周期成分をより多く記録しているのが明らかである。

Fig.3 Strain seismograms of vertical component at both BYB and TGR165 stations, and seismogram of STS seismometer at N.NAAF station of NIED for Tokachi-oki earthquake (2003/9/26 M8.0). Comparing strain seismograms of D and E, it is found that strain seismogram can record longer period components than STS seismometer at body wave part.

震源時間関数が直接容易に見られる(津波の予測などに有効)

紀伊半島沖地震MJMA6.8の歪地震波形(青色)、主歪の方向(緑色)とOKADA(1980)による理論波形(桃色)



理論波形と観測波形はよく一致する。PRINCIPAL STRAIN DIRECTION (FORCE DIRECTION)により初期破壊の領域が容易にわかる。歪波形でインバージョン(震源プロセスの解明)ができる

第4図 紀伊半島沖地震MJMA6.8の歪地震波形(青色)、主歪の方向(緑色)とOKADA(1980)による理論波形(桃色)

Fig.4 Strain seismograms of offshore southeast of the Kii peninsula earthquake (blue color), direction of principal strain (green color) and theoretical strain seismogram computed by the method of OKADA(1980).

1ヶ所の歪計でマグニチュードが決められる

初期破壊歪の継続時間とマグニチュード ( $M_w$ ) の関係

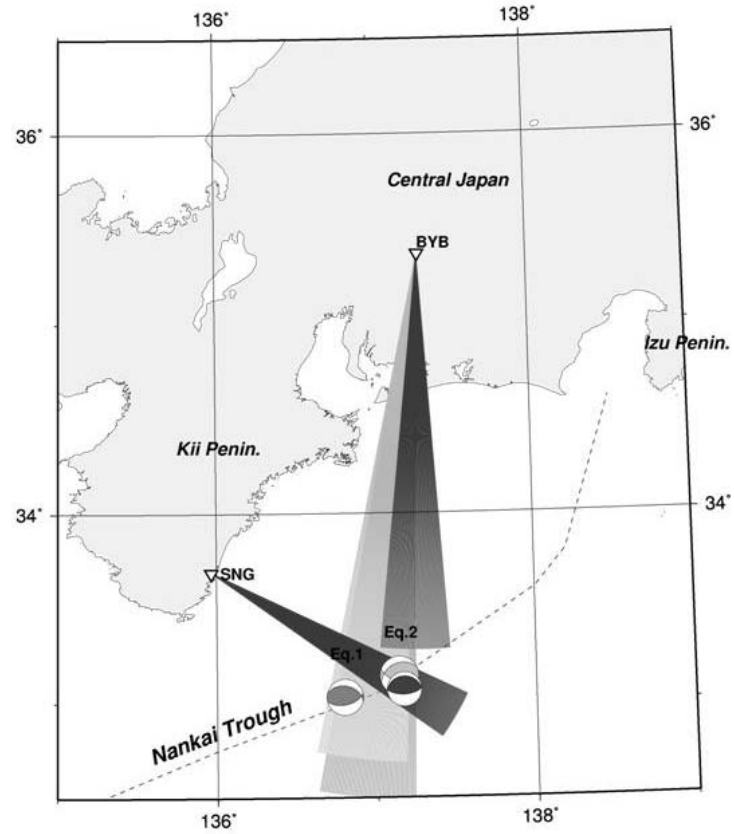
	BYB		JMA	USGS	YAMANAKA	YAGI
	$\tau$	$M_n$	$M_n$	$M_n$	$M_n$	$M_n$
$M_{JMA} 6.8$ 09/05 19:07	16sec	~7.2	7.1	7.1	7.3	7.2
$M_{JMA} 7.4$ 09/05 23:57	29sec	~7.5	7.5	7.4	7.4	7.5
$M_{JMA} 6.4$ 09/07 08:58	7sec	~6.7	6.6	6.7	6.6	
$M_{JMA} 6.5$ 09/08 23:58	10sec	~6.9	6.9		6.2 (6.8)*	

歪継続時間  $\tau$  とマグニチュードの関係は  
 $M_w = 1.4 \times \text{Log}(\tau) + 5.5$   
 もしくは、  
 $M_0 = 2 \times \tau^2 \times 10^{17}$

第5図 初期破壊歪の継続時間とマグニチュードの関係  
 Fig.5 Relationship between magnitude and duration time of initial break down.

1ヶ所の歪計で地震発生方向が決められる

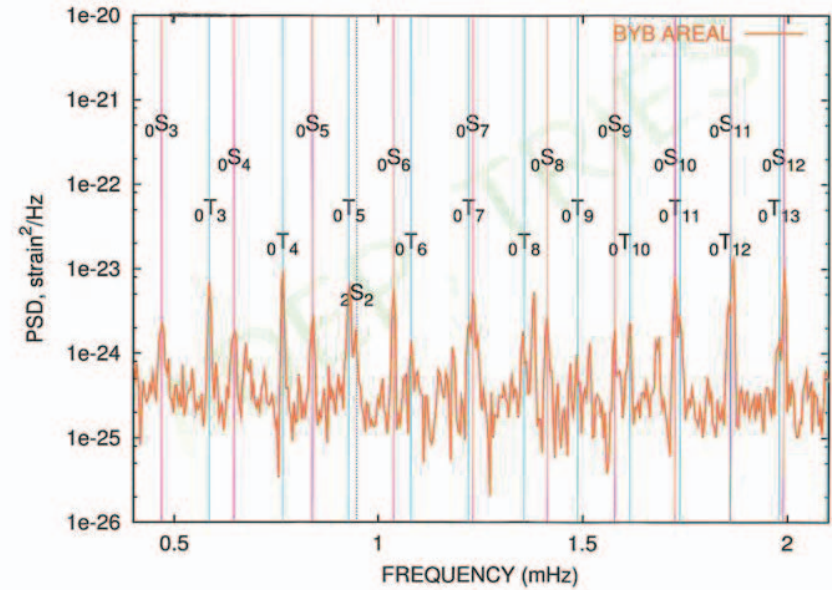
紀伊半島沖地震の余震分布と東濃地震科学研究所観測点位置



1つの観測点で歪解析によって求まるFORCE DIRECTION (歪地震動の主歪の方向) から観測点からみた震源の方向が推定できる!

第6図 1ヶ所の観測点で歪地震動の主歪の方向から推定した地震震源方向  
 Fig.6 Direction of epicenter estimated by direction of principal strain obtained from strain seismograms of one station.

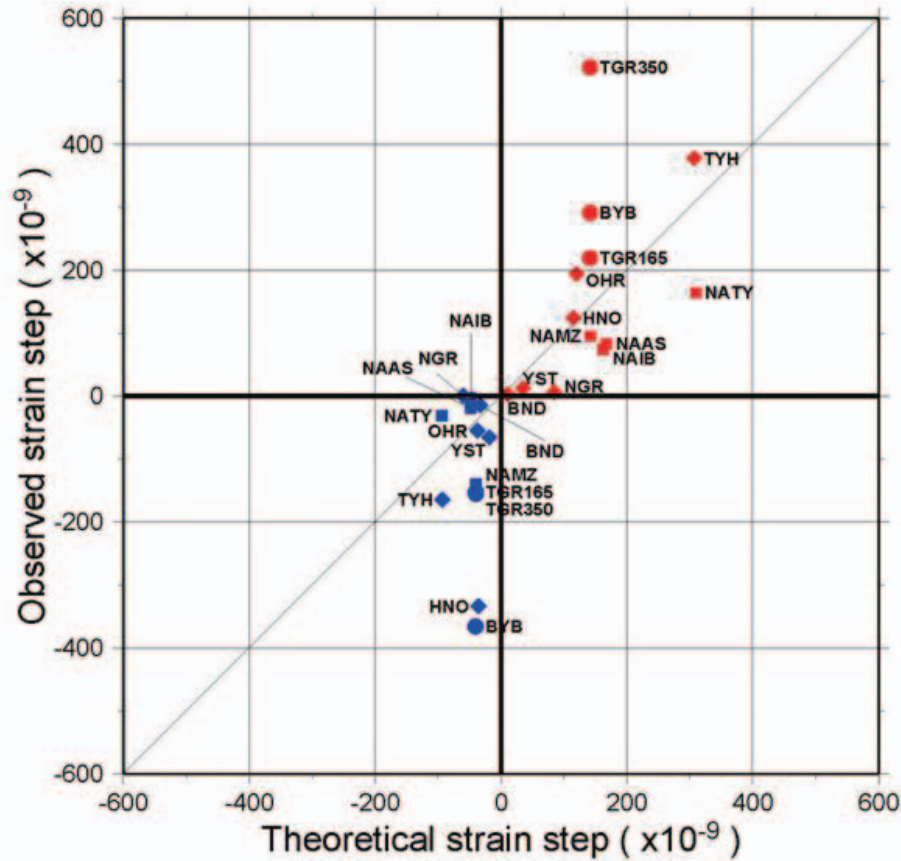
地球の自由振動が容易に観測できる。特にトロイダルモードの変動にも正確に応答する



第7図 BYB観測点(深度1000mボアホール)で観測されたスマトラ地震の歪観測から求めた地球の自由振動。縦線が理論周期で赤の線が解析値  
 Fig.7 Free oscillation of the earth analyzed by strain seismograms observed at BYB station (1000m depth borehole). Straight line indicates theoretical period and red curve analyzed one.

### 震源の永久変位がわかる-1

### Principal strain of M7.4

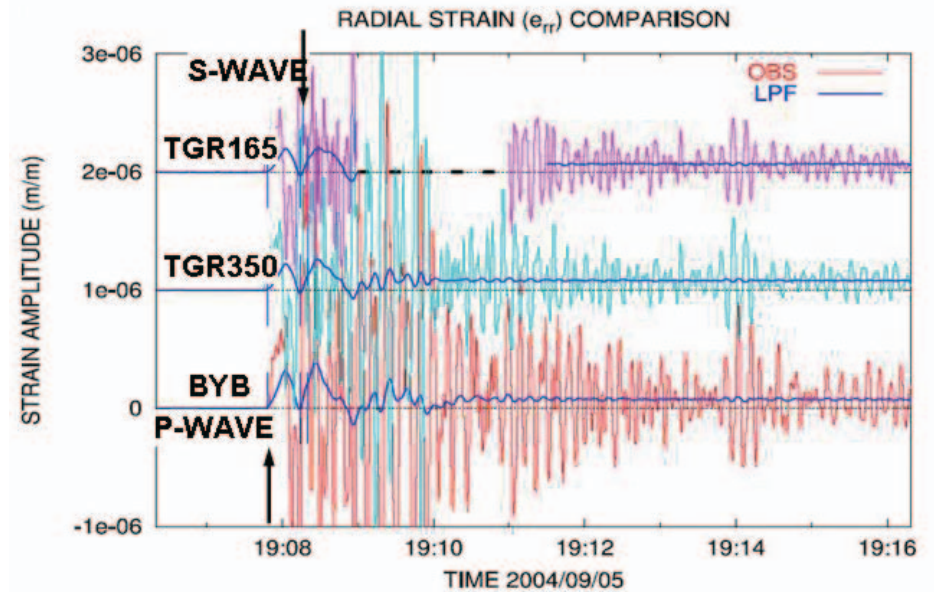


第8図 紀伊半島沖地震（2004/9/5 M7.4）の観測されたストレインステップとモデル計算との比較。昔の伸縮計時代に比較してよく一致しておりボアホール歪計の有効性がわかる。計算値とずれている点は地下水やブロック運動と関連があると考えている。

Fig.8 Comparison between strain steps observed at various stations and theoretical value for Kii peninsula earthquake (2004/9/5 M7.4).

### Strain stepの生成過程

#### STRAIN STEPの生成過程

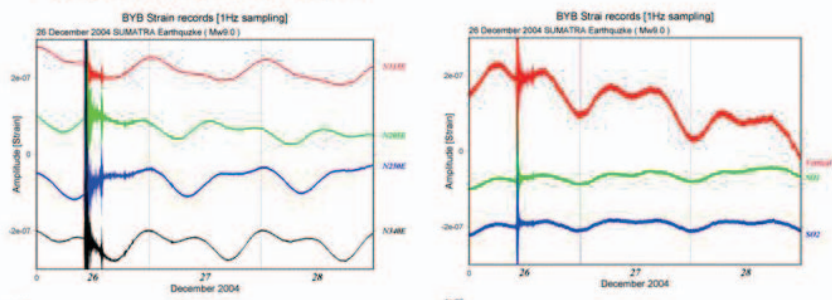


**STRAIN STEPはP波初動到達と同時に生成が始まり、S波、レイリー波と振幅が大きい波の到来によって変化している振幅の大きな波が通過することによってその大きさは固定される。**

第9図 STRAIN STEPはP波初動到達と同時に生成が始まり、S波、レイリー波と振幅が大きい波の到来によって変化している振幅の大きな波が通過することによってその大きさは固定される。

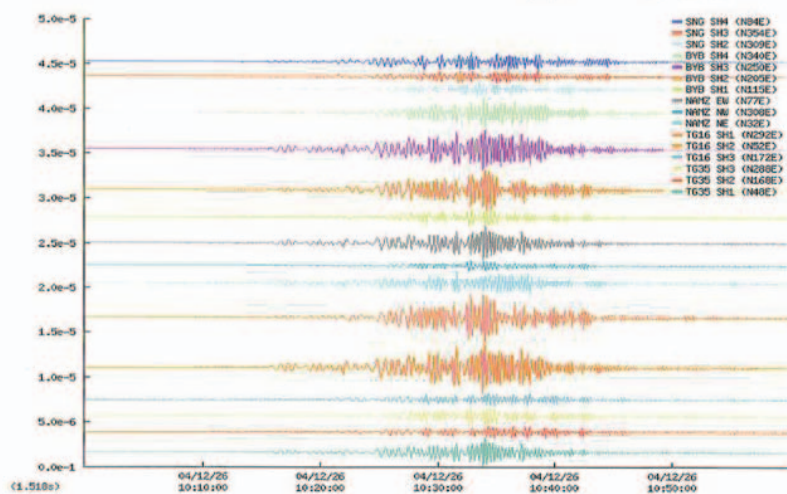
Fig.9 Process of strain step generation. Blue lines indicate low pass filtered strain seismograms.

屏風山深度1000mボアホールで観測されたスマトラ地震  
(2004/12/26)の歪記録 地震計による3成分の観測より多くの成分  
を観測しており情報量が多い



水平4成分

鉛直および斜め成分

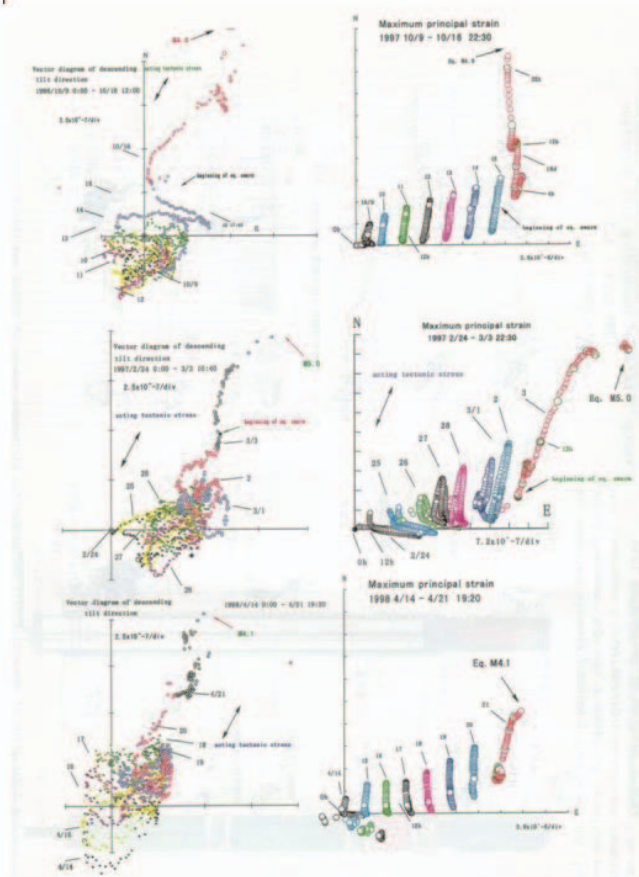


ボアホール観測点、新宮(SNG)、屏風山BYB、戸狩350(TGR350)、戸狩165(TGR165)および瑞浪名大伸縮計(NAMZ)で観測されたスマトラ地震の歪地震波形

13

第10図 ボアホール観測点、新宮(SNG)、屏風山BYB、戸狩350(TGR350)、戸狩165(TGR165)および瑞浪名大伸縮計(NAMZ)で観測されたスマトラ地震の歪地震波形  
Fig.10 Strain seismograms of Sumatra earthquake (2004/12/26) observed at borehole stations.

伊豆半島沖群発地震に関する3例の地震発生前に観測された前兆的傾斜・歪変化 このような緩慢な変化は地震計では観測できない



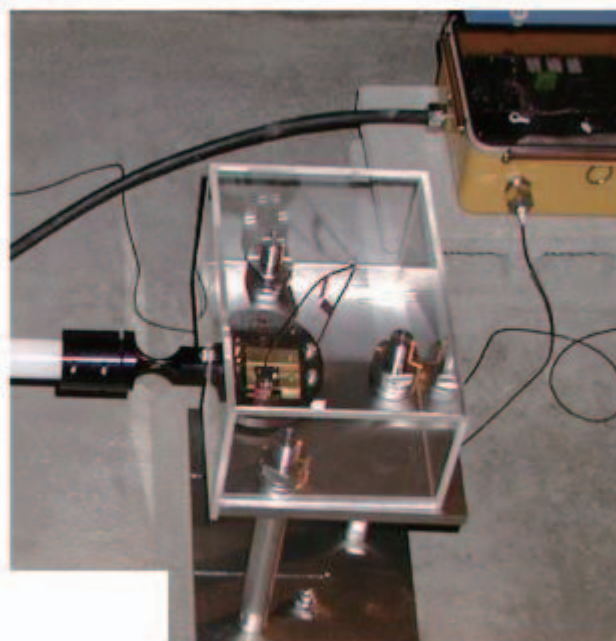
物質の破壊前の変形は基本的な現象でありSNのよい地下深部などでイベントに近い位置で観測すれば観測可能と考える

第11図 伊豆半島沖群発地震に関する3例の地震発生前に観測された前兆的傾斜・歪変化 このような緩慢な変化は地震計では観測できない。

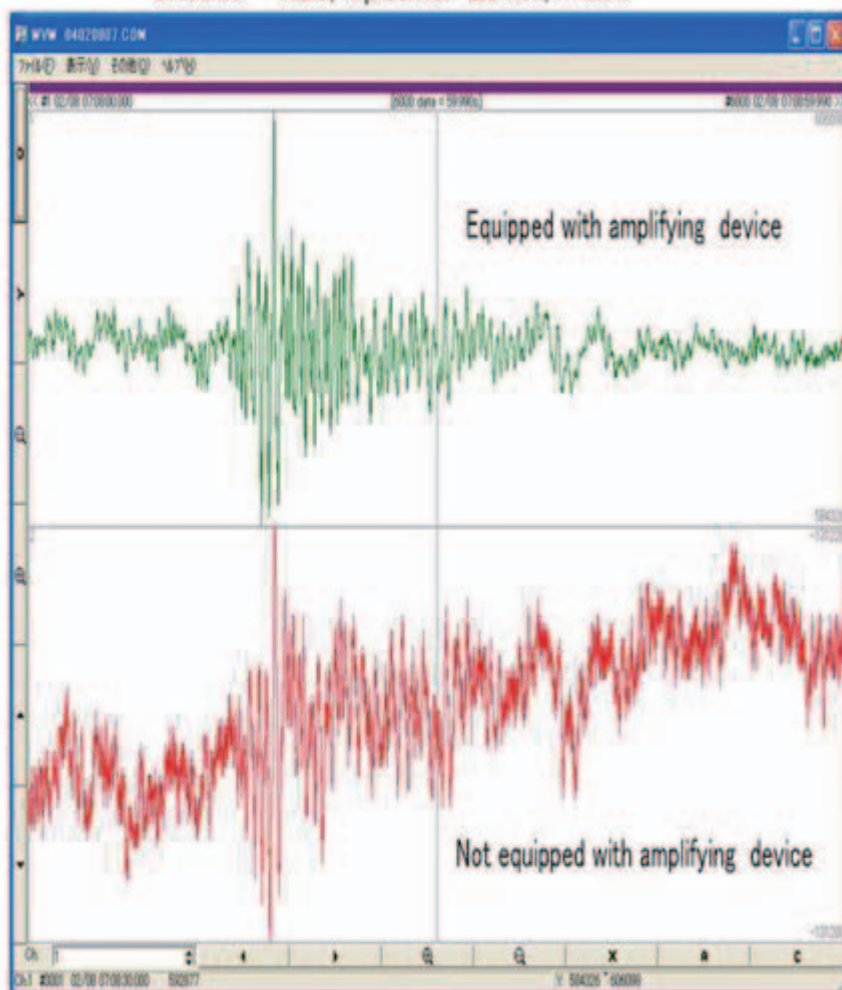
Fig.11 Precursory variations observed at a borehole station in the case of three earthquake swarms occurring in Izu peninsula.

既存の伸縮計の自由端にポアホール歪計で採用しているメカニカルな拡大機構を取り付けることによりS/Nが格段に向上する

右:伸縮計の自由端に取り付けられたメカニカルな拡大装置 伸縮計の変動が約50倍拡大される



Strain seismogram: 2004/2/8 07:08:00 - 07:09:00 M2.9, epicenter=237km, h=8km



記録された歪地震の例

上(緑色)の記録は拡大装置を取り付けたもの、下(赤色)は伸縮系からの記録

上と下の記録の比較をすると同じ指針を記録してもS/Nが非常に異なり、拡大装置付の方から寄り大胡の情報が見られる。

第 12 図 既存の伸縮計の自由端にポアホール歪計で採用しているメカニカルな拡大機構を取り付けることにより S/N が格段に向上する。

Fig.12 Comparison of extensometer record with that of extensometer equipped with mechanical amplifying system of about 50 times. Mechanical amplifying system much improves amplification and S/N ratio for signals.