

沖縄トラフ伊是名海穴海底熱水鉱床近傍における 海底地震計アレイ観測予備実験

岸本清行*¹ 中村光一*¹ 丸茂克美*¹

1990年6月上旬に、沖縄トラフ伊是名海穴のブラックスモーカー周辺で予定された「しんかい2000」による研究潜航に合わせて、海底熱水活動の変化などをモニターする目的で、デジタル海底地震計3台を、約500mの間隔で配置し、三日間の擬似連続(間欠の連続記録)測定を行った。この観測は、熱水系で様々な時間空間スケールで生起していると考えられる、エネルギーや物質の流れの現象を捉えるための予備実験として行ったものである。空間的にも時間的にも小規模な観測であったが、3日間の設置で延べ40時間分の地動記録がえられ、いくつかの異なったイベントに対応すると考えられる地動現象が観測された。これらの現象は、つぎの3つに分類することができた。すなわち、(1)自然地震、(2)単発性イベント、(3)群発性イベントの3つである。短期間の観測であったが、熱水活動域周辺の地動現象は、多様で活発であることを示唆する結果であった。今後、それぞれ時間空間スケールに適した、他の物理化学的方法を同時に利用した複合的な観測を計画するうえで参考になる。

Preliminary experiment of seismic observation using 3-OBS array at the black smoker venting site in the Izena caldron, Okinawa Trough

Kiyoyuki KISIMOTO*² Ko-ichi NAKAMURA*² Katsumi MARUMO*²

Small scale OBS (Ocean Bottom Seismometer) -array experiment was conducted to detect seismic tremors and/or sonic noise due to the hydrothermal activity at the black smoker venting site in the Izena caldron, Okinawa Trough. Three sets of OBS's were deployed in a triangular configuration of ca. 500m-offset between OBS's. About 40 hour-long seismic records were collected at each site out of 4 days of deployment period. Three types of events were discriminated from the background tremor or ambient noise, i. e., (1) natural earthquakes ; about 50 events were recorded, (2) sporadic seismic events ; smaller and shorter events compared to the natural earthquakes ; about 30 events were discernible, and (3) seismic swarm events of which duration times were from ten minutes to several tens of minutes. The result indicates that the hydrothermal site is seismically very active, however, the recurrence-time and/or duration-time of these seismic phenomena are not evident because of the short observation time.

* 1 工業技術院地質調査所

* 2 Geological Survey of Japan

はじめに

東太平洋中央海嶺系において海底熱水活動が発見されて以来、様々な発見的探査研究が海嶺系においてなされ、海底熱水活動現象とその環境に適応した生物活動などが普遍的な存在であることが認識されるようになった。また、引張応力場という意味で中央海嶺系と同じ地学場である背弧海盆においても、海底熱水活動現象の探査研究が行なわれ、1980年代の末には、マリアナ海盆、沖縄トラフ、そして北フィジー海盆、ラウ海盆などで次々と海底熱水活動が確認された。一方、米国では、中央海嶺系を固体地球システムにおける熱・物質フラックスの湧きだし口としてとらえ、様々な時間空間スケールで生起する現象の因果関係を観測や実験によって解明しようというプログラムが始まっている (RIDGE プログラムと呼ばれる: Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments の略)。このプログラムの立案推進のために、多くの研究者が集まりいくつもの専門委員会を開いて、その結果が何冊かの厚いシナリオや報告集としてRIDGEオフィスから出版されている (例えば、"RIDGE, 1989 Working-Group Reports")。このプログラムの推進者の一人であるワシントン大学のJ.R.ディレーニーらは、東太平洋のファンデカ海嶺やその他の実験サイトにおいて、精密な地形情報や測位装置を用いて、海底地震計、海底設置TVカメラ、温度計、流向流速計などによる同時観測を行ない、自然地震の発生と、熱水温度や湧出量の変化、チムニーの成長と倒壊等、時間空間的に連関した現象をとらえることに成功している (例えば、Delaney et al., 1989)。

今回の実験は、将来に行なわれるべき同種の複合的な実験研究に向けての予備実験として、我が国周辺では最も身近な、活動的な熱水湧出現象が見られる沖縄トラフ伊是名海穴を選んで行なわれた。背弧海盆としては、初めてブラックスモーカーが発見された場所である (中村ほか, 1990, Halbach et al., Nature 1989)。当初、「しんかい2000」による潜航も予定されており、設置された地震計と周辺状況などの観察や熱流量の測定なども計画されていたが、直前になって潜航地点周辺 (ブラックスモーカー周辺) に、潜水船に障害となる海中繫留物が設置されていることが分か

OKINAWA TROUGH IZENA HOLE

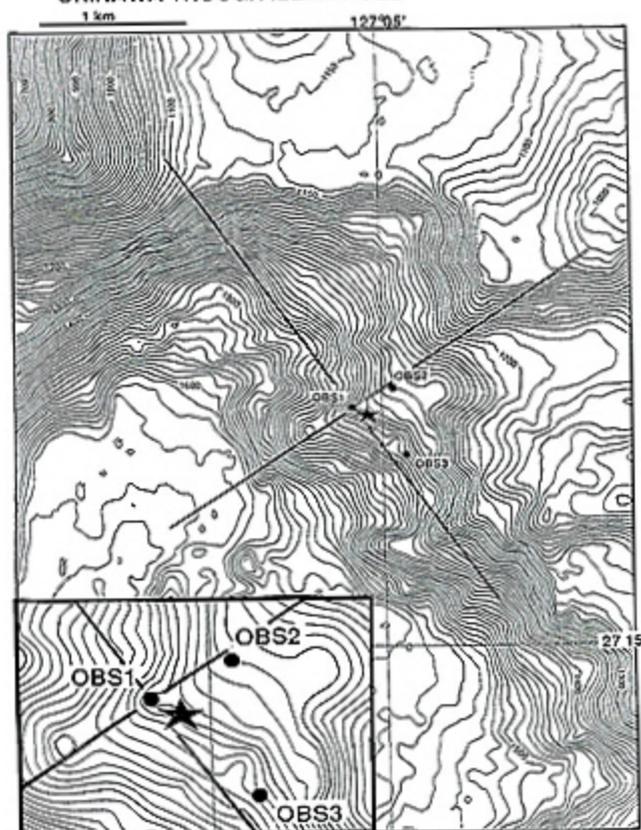


図1 海底地震計設置点OBS1,OBS2,OBS3と周辺の海底地形図。星印はブラックスモーカーの位置。実線はエアガンによる実験測線。

Figure 1. Location map of OBS's and topography. Black star shows the black smoker vent found in 1989. Solid lines are track lines of air-gun experiment.

り、海底地震計 (OBS) だけによる実験に縮小変更された。

実験の概要

OBSの設置、回収は、「しんかい2000」による潜航行動 (1990年6月1日から7日) に合わせて、母船「なつしま」を使って行なわれた。

用いた3台の地震計は、256キロバイトのバッファ用ICメモリーと115メガバイトの容量をもつ追記式光ディスクを記録媒体としたデジタル記録方式を採用している。センサーは、固有周波数2 Hzの3成分のジオフォンと1つのハイドロホンを備えている。観測条件や収録時間帯などの表を不揮発メモリーに設定して作動させる。メイン

アンプとデジタイズを行う回路で浮動小数点型のものを使っており、1サンプルデータは12ビットの符号付き整数と4ビットのバイナリーゲインを加えた16ビット（2バイト）長で記録される。

3台のOBSを、約500メートルの辺長をもつ三角形配置にする計画を立て、一点は、ブラックスモーカーが発見されている（図中の星印）近傍を選んだ。実測後の地震計の設置場所を、図1に示した。図中の2本の実線は、観測項目のひとつである、船上からのエアガン人工震源による実験測線である。「なつしま」には、高圧のコンプレッサーが搭載されていないので、150気圧の窒素ポンプ5本を持ち込み、各測線約30回の発振を行った。使用したエアガンは、容量約2リットルのもの1台であった。実験海域周辺では、「白嶺丸」を使った地質調査所による調査航海（GH89-3）が1989年に行われており、ブラックスモーカー周辺を中心にして北東-南西方向にのびる範囲で、熱水活動が活発であることが推定されている。活動域を示す指標として、同航海の報告書（有田正史編、1990）から、地殻熱流量値の分布図を図2に転載した。地震計を設置できる期間（6月1日-4日）、光ディスクの容量などを考慮して、図3に示したような時間表に従って、擬似的連続記録方式（一時記録のバッファメモリ内のデータを光ディスクへ転送中は欠測となる、間欠的連続記録方式；欠測時間は1分弱である）

でデータの収録を行い、延べ約40時間の記録を得た。図中の黒く塗りつぶしたところは、計測停止期間、白と灰色部分が連続収録の時間帯である。灰色部分の時間帯でエアガンによる実験を予定していたので、サンプリングレートを200Hzに設定し、その他では100Hzに設定した。図中に示した3個1組の数値は、後で述べる3種類の地動現象の連続観測期間内での発生頻度である。地震計の回収は、潜航調査終了後の時間を利用して、2日間で行い、3台とも設定通りの作動を確認した。

観測記録と考察

データは、ICバッファメモリと同じ大きさのファイルにして、順次番号をファイル名にして光ディスクに保存される。各チャンネル1サンプル当たり2バイトのデータ、4チャンネル分が順次マルチプレクスされて、32768サンプル/チャンネルで1ファイル（約327秒または163秒の記録長）を構成している。今回の観測では、約400ファイルが各点で収録された。各点の記録を再生した結果、センサーの動作不良が各点で見られた。観測点OBS1（位置は図参照）ではハイドロホン、OBS2では上下動と水平動1成分、OBS3では水平動1成分がそれぞれ、十分な大きさの信号を記録していない不良チャンネルであった。しかし、各OBSの近傍で発振したエアガンの信号を記録し

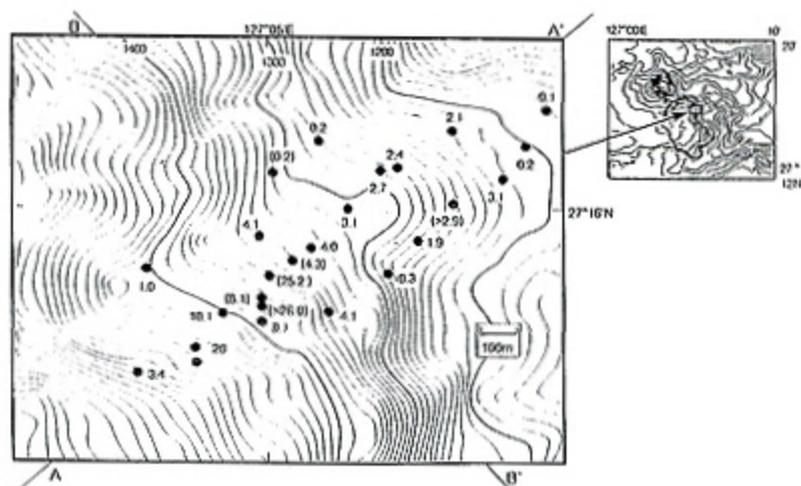


図2 伊是名鉱床地帯の熱流量測定結果
Figure 2. Heat flow map at the Izena hydrothermal deposit area

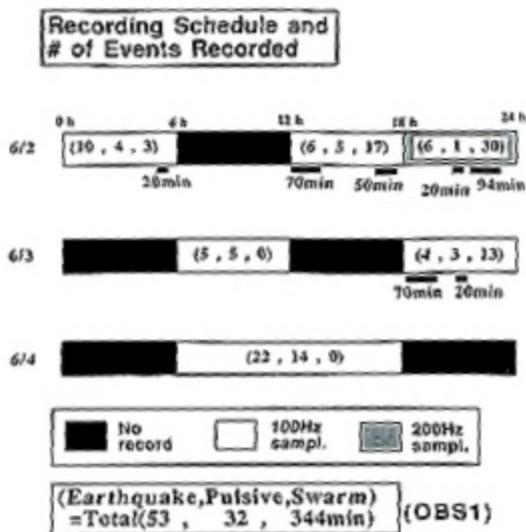


図3 海底地震計作動時間表。
Figure 3. OBS's operation time table.

た部分を再生すると、これらの不良チャンネルでも、その信号の到来を確認することができる。地震計の設置場所が、伊是名海穴の北東壁の斜面であったこと、また、潜水船による観察の結果、地形に大小の起伏が多く見られることなどを考慮すれば、海底での地震計の着底姿勢が悪かったことが不良チャンネルの主な原因と考えられる。

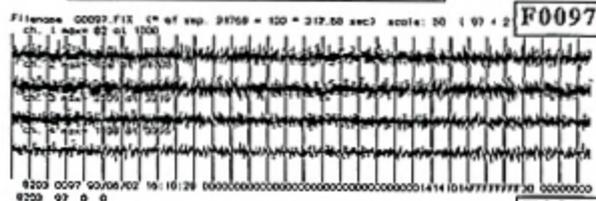
三日間の全データを概観して、記録波群から次ぎの3つのタイプに分類した。(1)自然地震、(2)単発性イベント；自然地震より小規模で孤立的な波群として観測されているが観測点毎の波形の相関は小さい、(3)群発性イベント；その周期性、継続性は不明であるが、比較的単調で静穏な期間（バックグラウンドノイズ）と、数分から数10分間継続する微小振動現象を示す期間とが区別される、の3つである。全期間で、自然地震は約50個、単発性イベント（10秒から数10秒程度の継続時間をもつ振動現象）が30個程度、認められた。自然地震とも思われるが、S/N比が小さく判別しがたいものは、(2)に分類した。これらの、それぞれの例を図4から図6に示す。各図とも、上から上下動成分、水平動2成分、ハイドロホンを示し、各チャンネル毎に最大値で規格化してある。表示範囲は1ファイル分、約327秒間で、10秒毎の刻時線がついている。図4aの、上の2つの例は、OBS2サイトのそれぞれ、バックグラウンドノイズと地震記録であり、上下動成分と水平動1成分が不良であ

る。図4aの、下の2つの例は、OBS1サイトの地震記録であり、不良チャンネル4（ハイドロホン）でもエアガン信号（記録の後半に見える短いパルス）の初動は明瞭に読み取れる。図4bは、OBS3サイトの地震記録例であり、図4aと同様のことが見られる。図5は、単発性イベントに分類した記録の例である。相互に共通する特徴の少ない地動現象である。図6は、群発性イベントに分類した記録の例である。始まりと終わりのはっきりしない振動が続き、地震計全体が共振しているようにも見える。図7aに、これら3つの現象の頻度分布を示す。図7bは、累積度数である。図中で、パルス/地震と示したのは単発性イベントのことで、自然地震を含んでいる可能性を意味する。群発性イベントは継続時間や頻度の定義は明確にできないので、1ファイル中に半分以上継続しているもので単一の地震として判別できないイベントを、群発的現象と考え、ファイルの個数を頻度、その累積数を継続時間に読み変えている。これらの図から、観測停止（欠測）期間内にも、上記のイベントのいずれかが発生していた可能性はあると推察される。

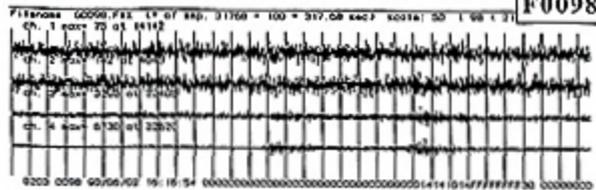
いくつかのイベントについて、観測点毎の位相の差を調べて、波の伝播性を調べた。地震イベントの初動部分についてはほとんど位相差が見られず、やや長周期の後続波部分で500m/sから1km/sの値を示すものがあり、表面波であろうと考えられる（図8参照）。従って、遠地性の地震であろう。つぎに、単発性イベントに分類した波についても位相速度の計算を試みたが、観測点毎の波形の相関が小さいことや、不良チャンネルの影響で同一成分の比較や位相の同定が困難で、現在までのところ信頼性のある値はまだ得られていない。同様の理由で、群発性のイベントについても、ここでは波群の進行性についてはまだ議論できない。

地震および単発的、群発的現象以外の比較的静穏な期間をバックグラウンドノイズと考えて、その平均的な最大振幅と各イベントとの比を調べると、イベントの種類によらず、2倍から10倍程度の振幅比の現象が今回の観測では得られている。データの十分な解析はまだ進んでいないが、約4日間の観測で得られた振動現象の推移を概観して

OBS2 Noise and Earthquake

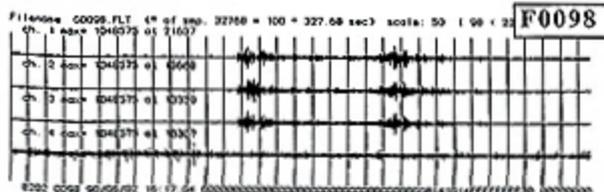


F0097

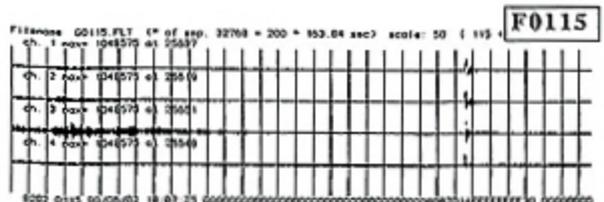


F0098

OBS1 Earthquake and Airgun signals



F0098



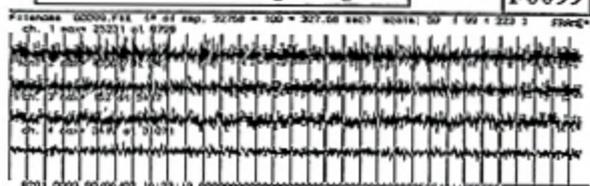
F0115

図 4 a 自然地震とバックグラウンドノイズの記録例。最下図の記録では、OBS1の不良チャンネルの4でも、エアガンの初動信号は記録されている。

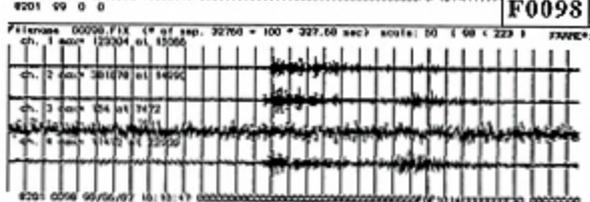
Figure 4 a. Example record of natural earthquakes and ambient noise. Bottom figure shows that the first arrival of airgun signal is recorded even in a bad channel 4 of OBS1.

みて、熱水活動域の地動（音波も含めて）はかなり活発で多様であることが予想される。今後には計画されるべき、複合的観測、実験に向けて議論を深めていきたいと思う。また、この実験で観測された振動現象のメカニズムを特定するためには、時間空間のスケールを変えた観測をすると同時に、潜水船による観察や、その他の物理的観測を同時に行う必要がある。

OBS3 Noise, Earthquake and Airgun signals

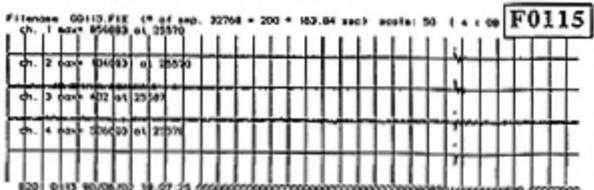


F0099



F0098

1 min.



F0115

1 min.

図 4 b 自然地震とバックグラウンドノイズの記録例。最下図の記録では、OBS3の不良チャンネルの3でも、エアガンの初動信号は記録されている。

Figure 4 b. Example record of natural earthquakes and ambient noise. Bottom figure shows that the first arrival of airgun signal is recorded even in a bad channel 3 of OBS3.

OBS1 Pulsive Events

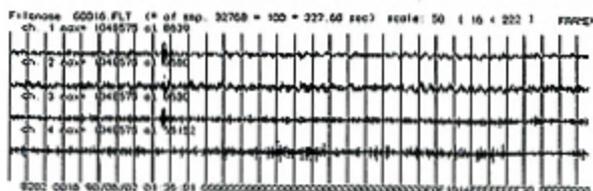
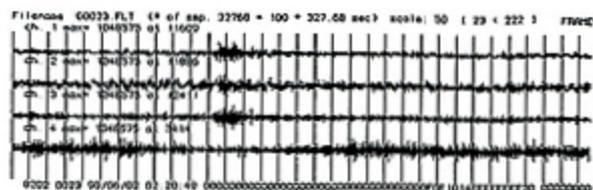


図 5 単発性イベントの記録例

Figure 5. Example record of sporadic seismic event

OBS1 Earthquake Swarm(?)

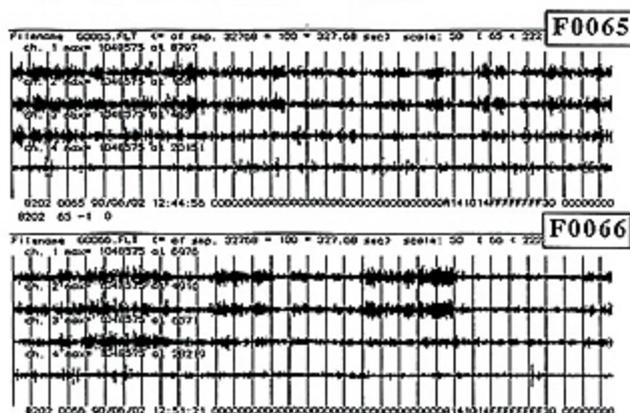


図6 群発性イベントの記録例。波群の始まりや終わり、P波、S波の区別が困難である。

Figure 6. Example record of swarm-like event. No clear onset nor end of the wavelet is visible.

OBS1 (NAT90)

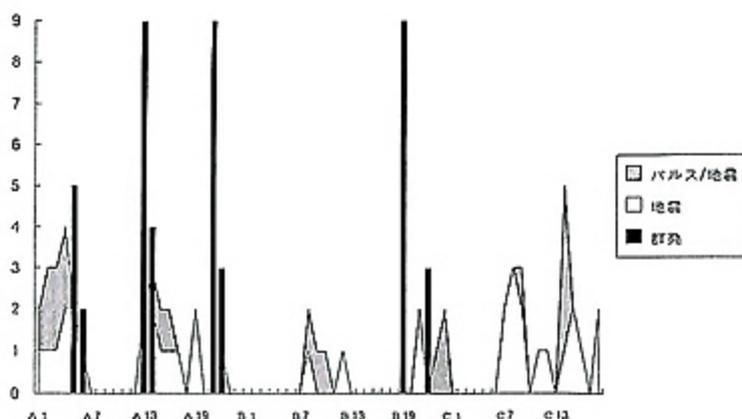


図7 a 3種類の地動現象の頻度分布

Figure 7a. Histogram of three types of seismic events classified in this study.

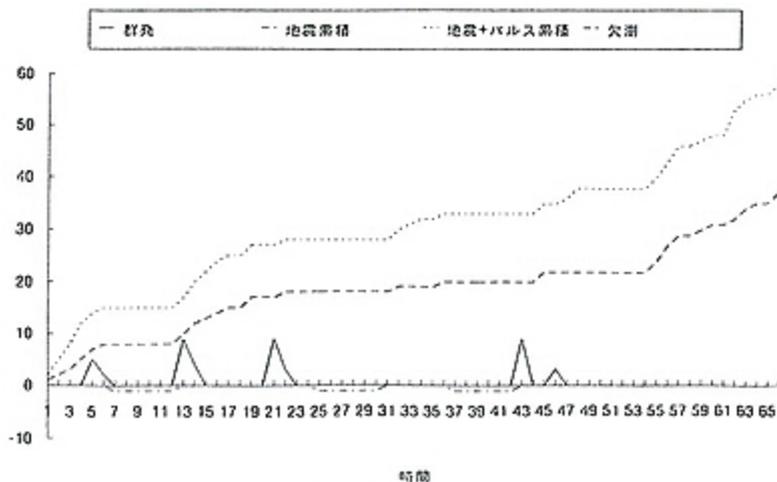
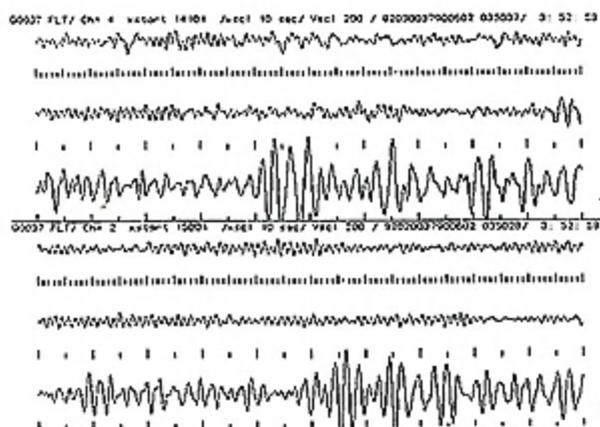


図7 b 3種類の地動現象の累積度数

Figure 7b. Accumulation curves of three types of seismic events classified in this study.



F0037 OBS1 -> OBS2
450-400m/s

図 8 a 地震記録の後続波部分の位相差 (OBS1とOBS2の比較)

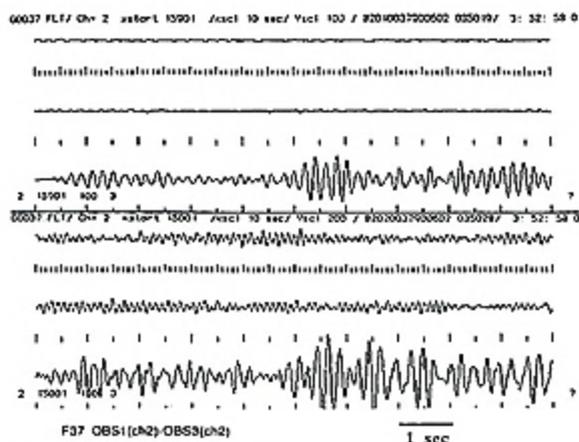
Figure 8a. Phase difference between later phases of an earthquake (comparison between OBS1 and OBS2)

謝 辞

今回の実験に際しては、1週間で4ダイブの潜航計画のなかに3台の地震計の設置回収とエアガン観測の作業を組み入れていただき、夜間に継続する作業も行うことによって予定通り観測を行うことができました。母船「なつしま」船長ほか甲板部の方々、「しんかい2000」司令ほか潜水船運航チームの方々のご協力、ご援助に感謝致します。

参考文献

- 有田正史編, 1990, 海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究, 平成元年度研究概要報告書, 地質調査所, pp83-253
- B LaFlamme, J R Delaney, R E McDuff, V Miller, V Robigou, A Schultz, M Smith, J Wells, J Fondrk and J McClain, 1989, Observations and Experimental Studies in the Endeavour Hydrothermal Field-Summer, 1988, EOS, Vol. 70, No. 43, pp. 1160
- P. Halbach, Ko-ichi Nakamura, M. Wahnser, J. Lange, H. Sakai, L. Kaselitz, R. -D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Czerwinski and N.



F0037 OBS1-OBS3

図 8 b 地震記録の後続波部分の位相差 (OBS1とOBS3の比較) Figure 8b.

Phase difference between later phases of an earthquake (comparison between OBS1 and OBS3)

Blum, 1989, Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin, Nature, Vol. 338, No. 6215, pp.496-499

中村光一, 丸茂克美, 青木正博 1990, 沖縄トラフ伊是名海穴海底熱水性鉱床地帯におけるブラックスモーカーと二酸化炭素に富む流体湧出変質帯 (ポットマーク) の発見, 第6回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 海洋科学技術センター, pp. 33-50

RIDGE Office, 1989, RIDGE 1989 Working-Group Reports, Univ. of Washington