

東太平洋中央海膨における熱水ブルーム挙動把握のためのSF₆トレーサ実験

津旨 大輔*¹ 下島 公紀*¹ 岡村 慶*² 石橋純一郎*³
浦辺 徹郎*⁴ 中村 光一*⁴ 藤本 博巳*² 満澤 巨彦*⁵

熱水ブルーム挙動の把握のため、東太平洋中央海膨のRM28サイトにおいて、特定の熱水活動域にSF₆トレーサを投入し、その挙動を「しんかい6500」によって観測した。SF₆トレーサ実験の結果から、今回観測対象とした熱水ブルームは、その浮力の効果により1日以下の時間スケールで、約60m上方まで上昇し、ただよっていたことが分かった。そして、その10日後では、さらに約100m、放出口からは約160m地点まで上昇していたことが分かった。10日後に観測されたトレーサの上昇は、潮汐流と海底地形の相互効果によって生み出された鉛直流による移流によるものと考えられる。

キーワード：熱水ブルーム挙動、六フッ化硫黄、トレーサ実験、直接測流、安定上昇高さ

SF₆ tracer experiment to observe the behavior of hydrothermal plume at South East Pacific Rise.

D.TSUMUNE*⁶ K.SHITASHIMA*⁶ K.OKAMURA*⁷
J.ISHIBASHI*⁸ T.URABE*⁹ K.NAKAMURA*⁹
H. FUJIMOTO*⁷ K.MITSUZAWA*¹⁰

In order to understand the behavior of hydrothermal plume, SF₆ tracer that injected into one hydrothermal vent was observed by using "SHINKAI 6500" at RM28 site of South East Pacific Rise. As the results of SF₆ tracer experiment, hydrothermal plume rose up about 60m height above the vent one day later by buoyancy effect and rose up about 160m height 10 days later. We think that the rise of hydrothermal plume from 1 day to 10 day later is caused by the vertical advection that occurred by the interaction between horizontal tidal current and the bottom topography.

Keywords : Behavior of hydrothermal plume, Sulfur Hexafluoride, Tracer experiment, Direct measurement of current, Stability height of rise

* 1 電力中央研究所

* 2 東京大学海洋研究所

* 3 東京大学理学部

* 4 地質調査所

* 5 海洋科学技術センター深海研究部

* 6 Central Research Institute of Electric Power Industry

* 7 Ocean Research Institute, University of Tokyo

* 8 Faculty of Science, University of Tokyo

* 9 Geological Survey of Japan

* 10 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

熱水活動は、海底から海洋への熱・物質の供給源としての役割を担っている。その供給フラックスの見積もりは様々な観点から行われており、海洋全体の物質収支において、決して小さくはないと言われている（浦辺,1996）。しかし、これらは様々な仮定の上になった見積もりであり、熱水ブルーム挙動の把握は、いくつかの問題点から詳細には行われていないことが現状であると考える。その問題点の一つとして、熱水ブルームの供給源としての熱水放出口の現象と、熱水ブルームの積分値である熱水ブルーム像を関連付けて把握できていないことがあげられる。

熱水ブルームと一口に言っても、様々な定義付けが可能である。そのため、ここでは以下のように、主に物理的な観点にたち、段階別に区別するものとする。熱水ブルームは、ある海域にいくつかの放出口が集まっており、それが連行しあい、一つの浮上性熱水ブルームとしてふるまう。さらにそれらのブルームが浮力を失った水深で混ざり合い、温度異常や物質濃度異常によって検出される熱水ブルームとなる。このように、ブルーム挙動を、物理的に3つの段階に分けて考える。以下に、これら3つの段階についての物理的な研究例についてまとめる。

1.1 近傍域

熱水放出口における熱水の採取という観点から、熱水の直接採取による化学分析、温度の測定は行われている。しかし、物理的な側面からの観測はほとんど行われておらず放出口での流速や温度低減率などの情報は少ない。また、直径10cm程度の熱水放出口が複数個集まって、みかけ上一つのブルームを形成している場合が多いが、現象が複雑すぎて、観測データがほとんどないため、この現象をモデル化した例はまだ存在しない。

1.2 浮上性ブルーム

一つの熱水活動域におけるいくつかの熱水放出口が互いに連行しあい、一つのブルームとしてふるまい、その浮力効果で上昇し、浮力を失いある高さでたなびく。この現象を浮上性ブルームと呼ぶこととする。また、このたなびく高さは熱水活動のフラックスの指標となる。これは安定上昇高さと呼ばれ、重要視されている（Speer and Rona, 1989, Lupton, 1995）。Little, et al., (1987)は、潜水艇から立ち上げた観測機器によって、ブルームの断面の水温、塩分、濁度、鉛直流速の同時観測を行っている。その結果より求められた浮上性ブルームの物理モデルを

構築し、熱および物質フラックスに関する計算を行っている。しかし、その結果に対する検証は、観測データの不足から十分には行われていない。

1.3 ブルーム

安定上昇高さに達した後、濁度、温度異常などの形で検出されるものをブルームと呼ぶこととする。観測船から検出器を吊り下げたTow-Yo観測が行われて、空間スケール~数100Kmのオーダーで検出されている（Urabe, et al. 1995, Ishibashi, et al.,1997）。観測密度の問題から、時間スケールは定常と考えられている場合が多い。多様に存在する熱水放出口の積分値として検出されたものである。当該海域のすべての熱水活動域を把握することは困難なので、熱水放出口と熱水ブルーム挙動の関係を把握する際には、不明確な点が残る。現状では、広範囲にわたる熱水ブルームを再現したモデルは存在しない。

リッジフラックス計画では、海嶺からの熱、物質フラックスのモデル化を目的の一つとしている。モデル化の第一段階として、これまでに唯一モデル化研究が行われている浮上性ブルームを対象とすることとする。これまでのモデル化研究では定性的な挙動に関する検討が中心であり、観測データの不足のため観測データとの定量的な比較検討は行われていないのが現状である（Speer and Rona, 1989, Little, et al.,1987, Middleton and Thomson, 1986）。唯一、Baker, et al. (1987)は、メガブルームを対象にブルームの詳細な観測データと数値モデルを用いて、メガブルームのソースの見積もりを行っている。これは、メガブルームはある特定の熱水活動域をソースとするものであるという前提条件の下で、メガブルーム内の物理データを詳細に観測できたために可能となった。通常の熱水ブルームに同様の手法を適用することは困難である。

そこで、モデル化に先立ち、物理的な現象把握を目的とした観測が必要となる。

浮上性ブルームは、ブルームの成分が中立浮力となった後、たなびく。この現象を観測する際、ブルームのたなびきの成分は、どの熱水放出口を起源とするものなのかの判断ができないため、ブルームと放出口の関連付けが不可能である。これが、浮上性ブルームを対象とした観測例とモデル化例が存在するにも関わらず、十分な検証が行われていない大きな問題の一つである。この問題を解決するため、観測対象とする熱水放出口に六フッ化硫黄（以下、SF₆）をトレーサとして放出し、それによって対象熱水活動域にいわゆる色付けを行うトレーサ実

験を行った。このトレーサ実験により、これまで不可能であった、浮上性ブルームがたなびくまでの挙動を観測することが可能となる (図1参照)。

また、トレーサの挙動に対する流動の影響を把握するために、トレーサ実験期間中に係留系による直接測流を行った。

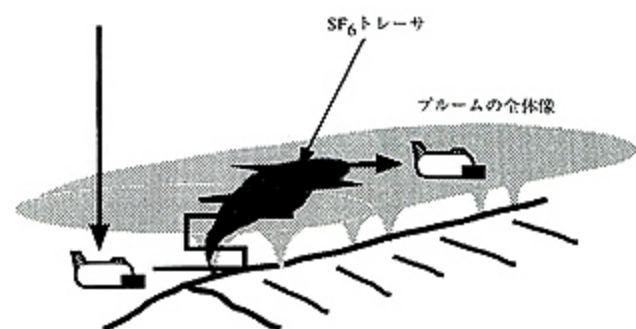


図1 「しんかい6500」を用いたSF₆トレーサ実験の概念図
Fig. 1 Schematic view of SF₆ tracer experiment by using "SHINKAI 6500"

2. トレーサ実験手法

2.1 SF₆トレーサ

トレーサとして、SF₆を用いた。SF₆は人工生成物であり、変電所の開閉装置や接続部分を絶縁するための密閉型開閉器内の絶縁ガスとして用いられている。無色、無臭の気体であり、通常500℃の熱に対しても安全である。電子捕獲検出器付ガスクロマトグラフによって、高精度の検出が可能であるため、大気挙動把握のためにトレーサとして、用いられてきた。海洋においては、大気からの浸透したSF₆が存在しているが、海水への溶解度の低さのため、その量は非常に小さい。海洋トレーサとしては、1985年のサンクモニカ海盆において、約1.3molesのSF₆を放出し、約半年後のサンプリングによって、半年スケールの海洋拡散現象が実測された (Ledwell and Watson, 1991)。現在においても大西洋を中心に海洋拡散現象把握のためのトレーサ実験が行われている。

2.2 トレーサ実験海域

トレーサ実験を行ったのは、東太平洋中央海膨におけるRM28サイトである。トレーサ実験海域を図2に示す。海嶺軸の中央部が谷状 (幅約300m、深さ約30m) になっており、谷の東側斜面に熱水活動域が存在していた。

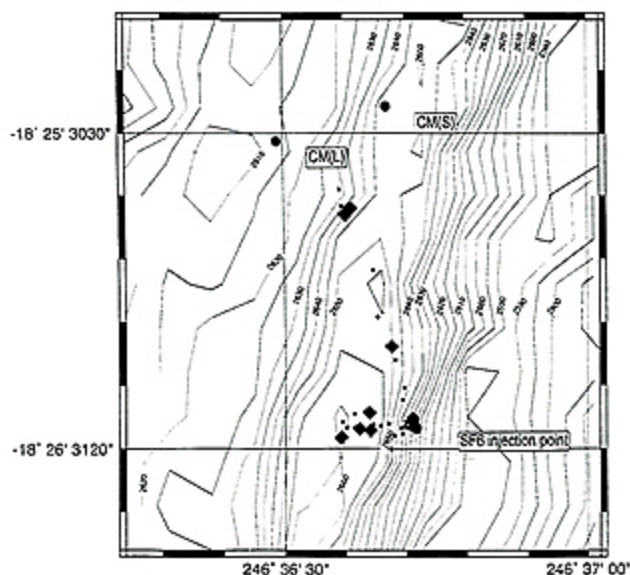


図2 東太平洋中央海膨RM28サイトの海底地形図、CM(S)、CM(L)は流速計の係留系設置点、SF₆放出地点を●で、サンプリング地点を◆で示す。大きな◆では、SF₆トレーサが検出され、小さな◆では検出されなかった。各サンプリング地点の深度データは、表1を参照。

Fig. 2 Bathymetric map at the RM28 site of South East Pacific Rise. The points of moorings of current meters are shown by CM(S) and CM(L). SF₆ injection point is shown by ●. SF₆ sampling points are shown by ◆. SF₆ tracer was detected at the point of large ◆. SF₆ tracer was not detected at the point of small ◆. Refer to Table 1 about the depth of sampling points.

2.3 トレーサの放出

SF₆放出装置を写真1に示す。またその概念図を図3に示す。両端開放のポンベに対し、一方にはタイマー制御で開放されるバルブ、他方には圧力差によって開放されるラブチャーディスクを取り付けた。ポンベ内に充填されたSF₆は、水深2,000mに達した後、ラブチャーディスクが開放され、海水と混ざる。その後、タイマーバルブとポンベを同時に駆動させることによって、SF₆が放出される。

今回の実験では、耐圧ポンベ内に合計約 5.0×10^{-2} molesのSF₆を海水溶液と気体の両方の形態で封入した。この放出装置をしんかい6500チームのトランスポンダーを用いて係留系として仕立て、ダイブの直前に海底に投入した。「しんかい6500」によって、放出装置をトレーサ放出地点の近傍まで運んだ。放出装置からホースでつながれたトレーサ放出口を熱水放出口内に設置し、タイマー制御によってバルブとポンベを駆動させ、SF₆を熱水放出口のブルーム中に約10分間で放出した。

対象とした熱水放出口の全体図を写真2に示す。約

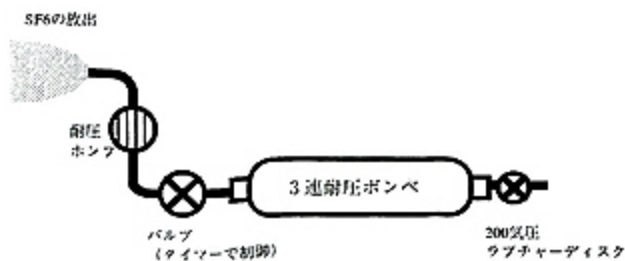


図3

図3 SF₆トレーサ放出装置の模式図
Fig.3 Schematic drawing of SF₆ injection unit.

3m四方の熱水活動域に5~20cm程度の直径を持つ熱水放出口が数個存在していた。直接放出した熱水放出口の温度は約150℃であったが、これは熱水放出口が小さかったため正確な測定が実施できなかった。ごく近傍の比較的大きな熱水放出口の温度は367℃であり、それらから供給される熱水もまわりで連行されており、見掛け上一つのブルームとしてふるまっていた。対象としたブルームを「しんかい6500」のアームの内側に設置したCTD(FSI)+transmissiometer(Sea Tech) (写真3参照)で、ブルーム内をつっきるように観測した結果を図4に示す。この図でもこの熱水活動域から供給された熱水が一つのブルームとしてふるまっていることが確認できる。なお観測時のデータは、しんかい6500内に設置したDeck Unitでデータ変換し、Laptop computer(NEC)でリアルタイムにモニタリングしながら記録した。

2.4 トレーサの検出

2.4.1 サンプルング方法

サンプルングは、「しんかい6500」のサンプルバスケットに設置したRosette Multi Sampler (RMS) (写真3参照)によって行った。RMSはCTDを通じて、「しんかい6500」内のLaptop computerから操作した。放出直後、1日後及び10日後の計3回、「しんかい6500」で12本ずつのニスキンボトルによる採水を行った。サンプルは500mLのデュラン瓶に、穴空き蓋(テフロンキャップ付き)をつけて、密封した。

2.4.2 分析方法

サンプル中のSF₆は、濃縮し、非線源型電子捕獲検出器(ECD, Valco)付きガスクロマトグラフ(HP)によって測定した。濃縮装置の構成は、試料を導入する試料管、ガス乾燥部、ガス吸着させるトラップ管、ガスクロマトグラフ、ECDからなる。試料管は試料500 ml容量を導入

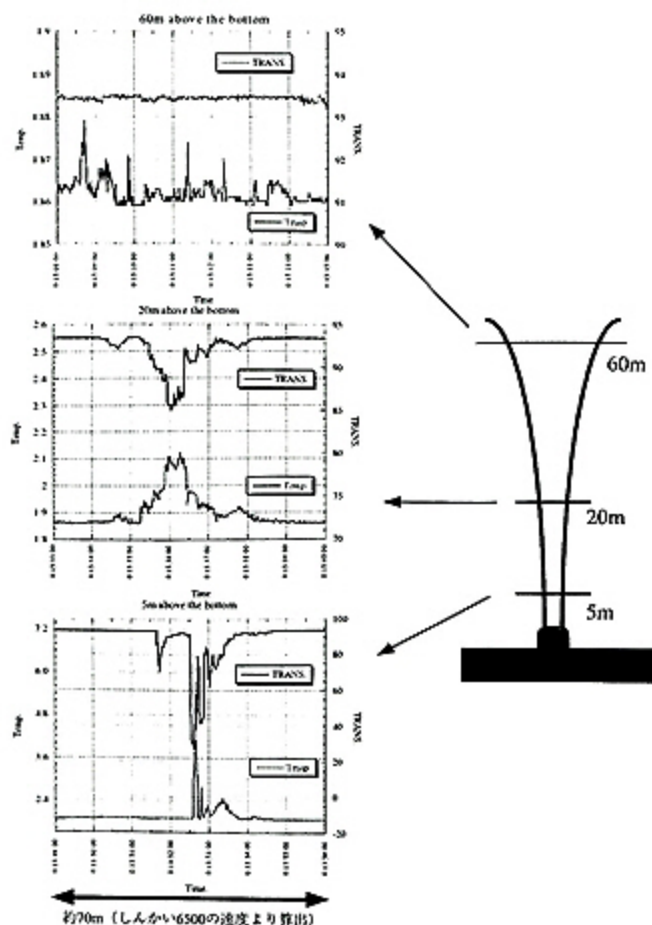


図4 「しんかい6500」に搭載したCTD+Tで観測した熱水ブルーム内の温度と光透過度

Fig.4 Temperature and Transmission in hydrothermal plume that observed by CTD+T on "SHINKAI 6500".

でき、下部のガラスボールフィルターから高純度窒素をバージし、溶存するガスを気相部に追い出す。水分はNafion Tubeにより除去し、トラップ部には1/8ステンレスパイプにPorapak Q (80-100 μm)を充填したものをプロパノール/ドライアイスで-70℃に冷却し、捕集する。捕集後、ヒーターを用いて80℃に加熱脱着する。SF₆と隣接するピークを持つO₂は、ガスクロマトグラフに導入する直前にあらかじめ1/8ステンレスパイプにMolecular Sieve 5A (80-100 μm)を充填したプレカラムに分離し、ガスクロマトグラフに導入し、ECDで検出した。分析には、内径0.53mm、長さ30mのHP製Molecular Sieve 5A (80-100 μm)を使用した。

3. SF₆の分析結果

サンプルの分析結果を表1に示す。36個のサンプル(有効サンプル32個)中10個のサンプルからSF₆を検出

Dive	Observer	No.	Time	Position		Depth (m)	Altitude (m)	SF ₆ (fM)
#381 26Jul	Tsumune	N01	14:20:30	18° 25.982 S	113° 23.328 W	2653	4	<0.20
		N02	14:21:44	18° 25.968 S	113° 23.297 W	2655	2	<0.20
		N03	14:21:44	18° 25.968 S	113° 23.297 W	2655	2	<0.20
		N04	15:08:16	18° 25.965 S	113° 23.288 W	2598	45	0.49
		N05	15:09:26	18° 25.957 S	113° 23.291 W	2595	47	0.45
		N06	15:10:14	18° 25.952 S	113° 23.291 W	2595	46	0.81
		N07	15:29:05	18° 25.965 S	113° 23.305 W	2631	15	N.D.
		N08	15:29:50	18° 25.965 S	113° 23.302 W	2628	13	<0.20
		N09	13:53:20	18° 25.957 S	113° 23.302 W	2647	6	<0.20
		N10	13:51:42	18° 25.979 S	113° 23.322 W	2650	3	<0.20
		N11	13:28:14	18° 25.957 S	113° 23.302 W	2635	13	<0.20
		N12	15:30:53	18° 25.968 S	113° 23.291 W	2619	24	<0.20
#382 27Jul	Nakamura	N02	11:44:09	18° 25.967 S	113° 23.400 W	2440	228	<0.20
		N03	11:49:02	18° 25.967 S	113° 23.386 W	2463	206	<0.20
		N04	11:52:09	18° 25.973 S	113° 23.379 W	2481	188	N.D.
		N05	12:10:08	18° 25.964 S	113° 23.344 W	2481	181	<0.20
		N06	12:16:03	18° 25.962 S	113° 23.356 W	2501	163	<0.20
		N07	12:22:04	18° 25.958 S	113° 23.407 W	2501	168	<0.20
		N08	12:32:52	18° 25.945 S	113° 23.388 W	2540	126	N.D.
		N09	12:51:07	18° 25.943 S	113° 23.363 W	2590	77	0.36
		N10	13:11:08	18° 25.983 S	113° 23.409 W	2581	91	3.04
		N11	13:26:20	18° 25.969 S	113° 23.379 W	2622	47	3.46
		N12	13:31:58	18° 25.972 S	113° 23.361 W	2668	2	0.46
		N13	13:57:36	18° 25.967 S	113° 23.31 W	2654	5	<0.20
		#388 5Aug	Fujimoto	N02	11:10:37	18° 25.960 S	113° 23.331 W	2450
N03	11:18:52			18° 25.922 S	113° 23.308 W	2479	173	<0.20
N04	11:20:30			18° 25.903 S	113° 23.305 W	2499	163	N.D.
N05	11:22:26			18° 25.976 S	113° 23.308 W	2525	145	<0.20
N06	11:23:58			18° 25.860 S	113° 23.319 W	2545	126	<0.20
N07	11:25:30			18° 25.838 S	113° 23.325 W	2565	106	0.36
N08	11:27:40			18° 25.792 S	113° 23.348 W	2592	80	<0.20
N09	11:30:53			18° 25.719 S	113° 23.354 W	2652	17	<0.20
N10	11:42:25			18° 25.622 S	113° 23.390 W	2485	148	0.69
N11	11:44:33			18° 25.632 S	113° 23.399 W	2515	121	0.41
N12	11:46:41			18° 25.618 S	113° 23.405 W	2545	94	<0.20
N13	11:48:49			18° 25.591 S	113° 23.408 W	2575	57	<0.20

表1 SF₆分析結果

Table 1 Results of analysis of SF₆ samples

することができた。今回の分析においては、検出限界は0.2fM (1fM = 1.0×10^{-15} mol/L)であった。

また図5に、ブルームの検出の有無の横方向の断面の結果を示す。トレーサ放出直後の観測では、放出口から約60m上方でSF₆トレーサを検出した。1日後の観測では、直後の観測とほぼ同じ水深(約50m~約90m)でSF₆トレーサを検出した。その後、10日後の観測では、放出口から約160m上方の水深でSF₆トレーサを検出した。サンプル数が限られているが、SF₆トレーサ実験の結果から、今回観測対象とした浮上性ブルームは、その浮力の効果により1日以下の時間スケールで、約60m上方まで上昇し、ただよっていた。そして、その10日後では、さらに約100m、放出口からは約160m地点まで上昇したと考えられる。

図2には、ブルームの検出の有無の水平断面の結果を示している。

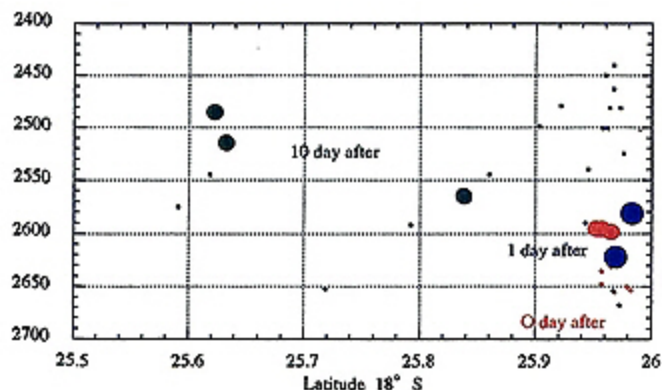


図5 SF₆トレーサの検出結果の南北断面図、トレーサ放出直後を赤、1日後を青、10日後を緑で示している。大きな●ではSF₆が検出され、小さな●ではSF₆が検出されなかった。

Fig. 5 South-north cross section of the results of SF₆ tracer detection. Red symbol shows the sampling point 0 day after injection. Blue symbol shows the sampling point 1 day after injection. Green symbol shows the sampling point 10 days after injection. SF₆ tracer was detected at the point of large ●. SF₆ tracer was not detected at the point of small ●.

4. 流動観測方法

4.1 測定地点及び方法

図2に測定地点周辺の海底地形図と係留系の設置地点を示す。凹み内と外の流速を把握するために、海底谷内に係留系CM-S、谷の外に係留系CM-Lを設置した。係留系の断面の模式図を図6に示す。CM-SにはFSI製の3次元超音波流速計(ACM)を3台(海底上20m, 40m, 70m)、CM-Lにはユニオンエンジニアリング社製のアンダー型のプロベラ式流速計(RCM)を3台(海底上

85m, 135m, 235m)設置した。このうち、海底上40mのACMと海底上235mのRCMはデータが未回収である。観測期間と時間間隔は、ACMは1分毎に、RCMは10分毎に1997/7/25から8/27までの33日間とした。しかし、ACMの観測においては、メモリー不足によるデータの欠損が生じている。

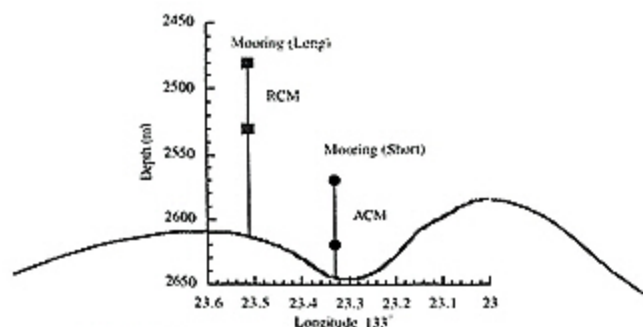


図6 係留系設置地点の東西断面図

Fig. 6 East-west cross section of the points of moorings of current meters.

5. 流動観測結果

測定結果を図7に示す。約12時間周期の流速変動が卓越しており、その振幅は数cm/sであった。海底から離れるにつれ、流速の変動成分が小さくなっている。一番上方の135m点では、流速の変動成分が非常に小さい。ACMの分解能は0.1cm/sであるため、その観測結果では、低流速域まで連続してスムーズな変動がみられる。RCMでは観測限界値が1.5cm/sであるため、1.5cm/s以下の低流速は観測できなかった。また、三次元ACMの測流結果では、比較的大きな鉛直流速が観測された。これも約12時間周期で変動しているが、東西流速の変動と非常に相関を持つ。このことから、鉛直流速は、東西成分流速が海嶺状の地形の影響を受けたことによって生じたものと考えられる。しかし、鉛直流速成分が水平流速成分に匹敵するほど大きいという観測結果に関しては、今後の検討が必要であると考えられる。本海域における3次元流速の観測ははじめてであった。さらなる3次元観測の必要性があると考えられる。

FFTによるスペクトル解析の結果を図8に示す。南北流速、東西流速、鉛直流速ともに12.4時間周期及び約24時間周期が卓越していた。この結果から、本海域における流動現象が、潮汐流を主成分とするものであることが示唆される。

データ解析結果を表2に示す。平均流成分は、すべての観測水深で北向きであり、特に海底谷の中では谷の軸

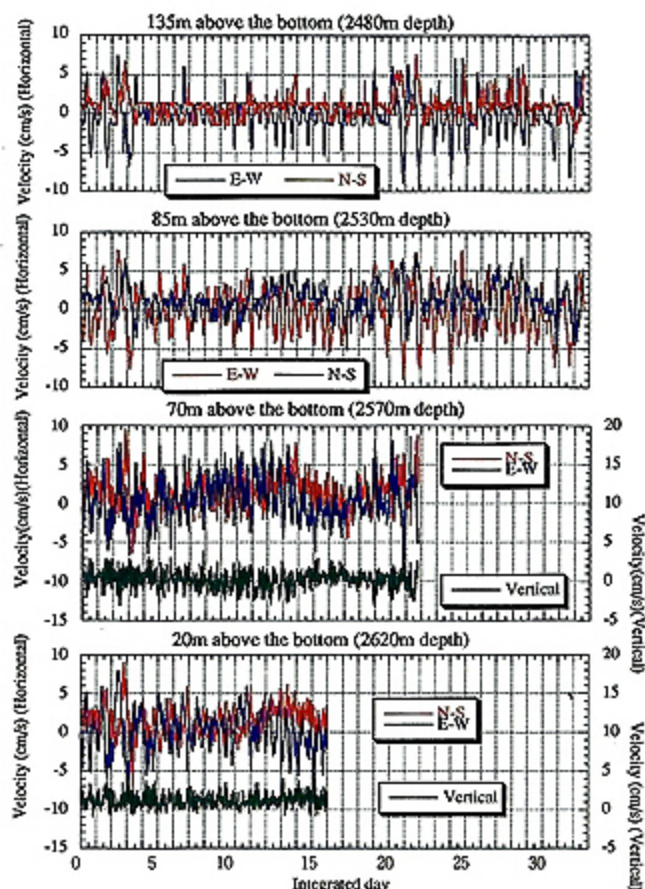


図7 流速の時間変動, 上から順に, 2,480m水深に設置したRCMのデータ, 2,530m水深に設置したRCMのデータ, 2,570m水深に設置したACMのデータ, 2,620m水深に設置したACMのデータ。

Fig. 7 Time series of current velocity. From the top to the bottom, figures show current data by RCM at 2,480m depth, current data by RCM at 2,530m depth, current data by ACM at 2,570m depth and current data by ACM at 2,620m depth.

に沿った北北東方向の流速が卓越している。また乱れ成分及び潮汐による振動流は東西方向に卓越している。鉛直成分は, 上向き方向に卓越している。

6. まとめ

SF₆トレーサ実験を行うことにより, 対象とする熱水活動域から放出された浮上性ブルームが浮力を失い, ある深度でただようまでの挙動を観測することができた。

SF₆トレーサ実験の結果から, 今回観測対象とした浮上性ブルームは, その浮力の効果により1日以下の時間スケールで, 約60m上方まで上昇し, ただよっていた。そして, その10日後では, さらに約100m, 放出口からは約160m地点まで上昇していたことが分かった。

また, 直接測流の結果からは, 本海域は潮汐流に支配されており, 平均流成分はリッジに沿って北向きであるが, 潮汐変動成分は, 東西方向に卓越している。この東西流成分と海嶺状の地形に起因する考えられる比較的大きな鉛直流速が存在する。

今回の観測では, 濁度異常で検出される熱水ブルームは海底上約100m~200mを漂っていたが, これは, 「みかけ上の熱水ブルームの浮上高さ (約160m~200m)」 = 「熱水ブルームの浮力効果 (約60m~100m)」 + 「潮汐によって生み出された鉛直移流の効果 (約100m)」と考えられる。

熱水ブルームの安定上昇高さから熱フラックスを見積もる式も提案されているが(Lupton, 1995), 特に鉛直移流の効果을適切に考慮しないと, 過大評価となる可能性がある。

今後, より詳細な熱水ブルーム挙動把握のため, 鉛直

Mooring	Location	Current Meter (serial number)	Depth (m)	Altitude (m)	Direction	Average (cm/s)	RMS (cm/s)	Viscosity (cm ² /s)
CM(S)	18° 25.458S 113° 23.330W	ACM (1415)	2620	20	North-South	0.96	1.86	3.02E+04
					East-West	0.46	2.58	3.85E+04
					Vertical	1.09	0.74	2.15E+03
	ACM (1441)	2570	70	North-South	1.23	1.82	3.15E+04	
				East-West	0.60	2.38	6.04E+04	
				Vertical	0.24	0.92	3.15E+03	
CM(L)	18° 25.513S 113° 23.511W	RCM (5048)	2530	85	North-South	1.29	1.87	3.75E+04
					East-West	0.01	2.83	7.30E+04
	RCM (5049)	2480	135	North-South	1.00	1.42	2.04E+04	
				East-West	-0.16	2.31	4.51E+04	

表2 流速の解析結果

Table 2 Statistics of Current observations.

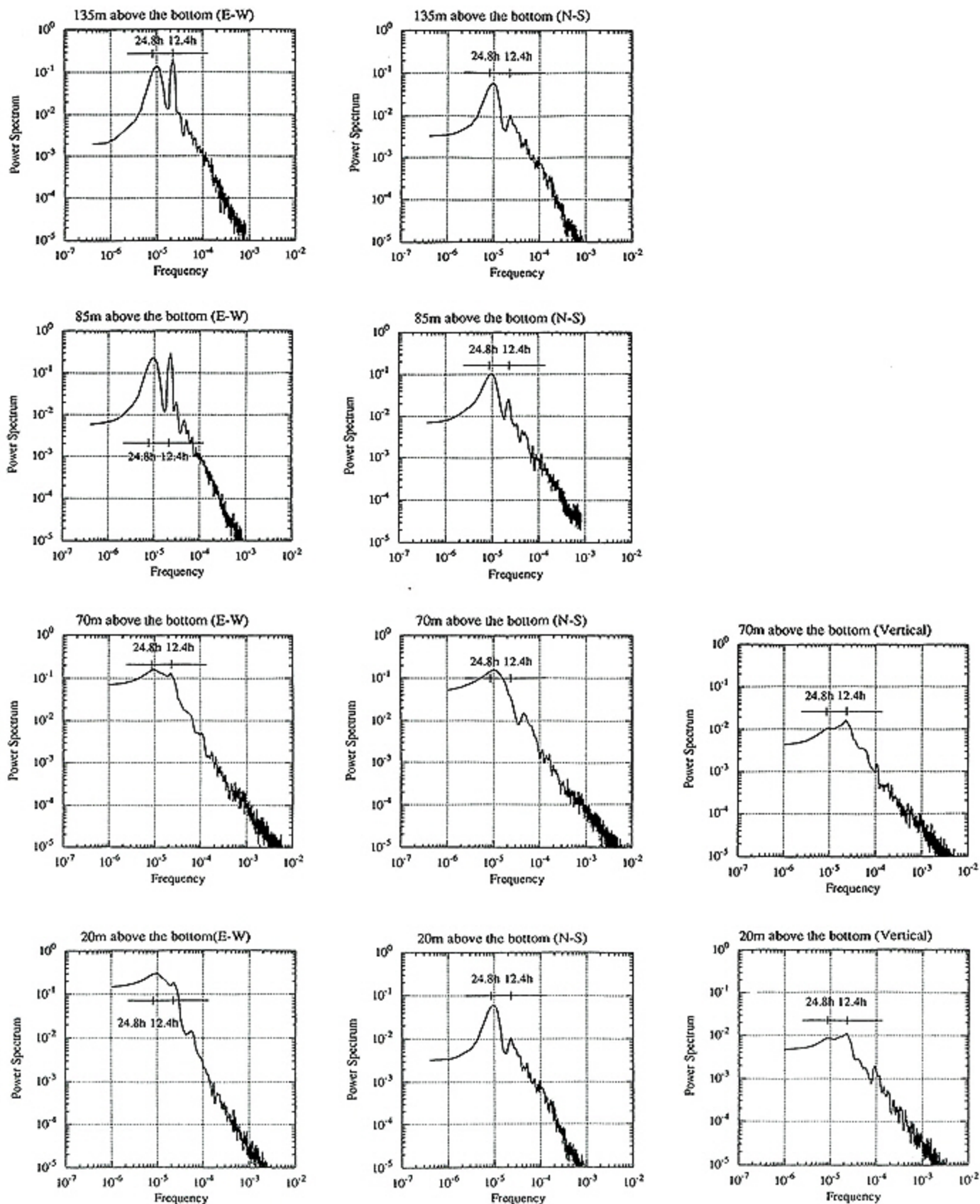


図8 FFT解析結果、東西成分、南北成分、鉛直成分に分け、各水深毎(2,480m, 2,530m, 2,570m, 2,620m) に示した。

Fig. 8 The results of FFT of current data. Figures show east-west component, north-south component and vertical component at the 2,480m, 2,530m, 2,570m and 2,620m depth, respectively.

流速の詳細な観測、染料を用いたデータが密なトレーサ実験を行い、モデル化を進めていきたいと考える。

なおこの研究は、科学技術振興調整費本研究課題「海嶺におけるエネルギー・物質フラックスの解明に関する国際共同研究」(リッジフラックス計画)一環として行われた。

謝 辞

一連のトレーサ実験は、井田司令、今井副司令をはじめとする「しんかい6500」潜航チームの皆様のご創意工夫及び巧みな技術なしでは達成できなかったと思います。また、石田船長をはじめとする「よこすか」乗組員の皆様及び乗船研究者の皆様には、大変お世話になりました。海洋科学技術センター深海研究部の藤岡換太郎博士には、深海研究に対する御指導を頂きました。陸上においては、環境リサーチの前田義明氏、新日本気象海洋の五十嵐弘昭氏、佐藤修之氏、SEAの中川拓郎氏の協力を得ました。合わせて深く感謝致します。

引用文献

- 浦辺徹郎 (1996) : 東太平洋海嶺の巨大熱水ブルーム群, 科学, 66(7), 470-477
- Speer, K.G. and P.A. Rona (1989) : A Model of an Atlantic and Pacific Hydrothermal Plume, *Journal of Geophysical Research*, 94, 6213-6220.
- Lupton, J.E. (1995) : Hydrothermal Plumes : Near and Far Field, *Seafloor Hydrothermal Systems : Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions Geophysical Monograph*, 91, AGU.
- Little, S.A., K.D. Stolzenbach and R.P. Von Herzen (1987) : Measurements of Plume Flow from a Hydrothermal Vent Field, *Journal of Geophysical Research*, 92, 2587-2596.
- Urabe, T., E.T. Baker, J. Ishibashi, R.A. Feely, K. Marumo, G.J. Massoth, A. Maruyama, K. Shitashima, K. Okamura, J.E. Lupton, A. Sonoda, T. Yamazaki, M. Aoki, J. Gendron, R. Greene, Y. Kaiho, K. Kisimoto, G. Lebon, T. Matsumoto, K. Nakamura, A. Nishizawa, O. Okano, G. Paradis, K. Roe, T. Shibata, D. Tennant, T. Vance, S. L. Waker, T. Yabuki and N. Ytow (1995) : The Effect of Magmatic Activity on Hydrothermal Venting Along the Superfast-Spreading East Pacific Rise, *Science*, 269, 1092-1095.
- Ishibashi, J., H. Wakita, K. Okamura, E. Nakayama, R.A. Feely, G.T. Lebon, E. T. Baker, K. Marumo (1997) : Hydrothermal methane and manganese variation in the plume over the superfast-spreading southern East Pacific Rise, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(3), 485-500.
- Middleton, J.M. and R.E. Thomson (1986) : Modeling the Rise of Hydrothermal Plumes, *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci*, 69, 18pp.
- Baker E.T., G.J. Massoth and R.A. Feely (1987) : Cataclysmic hydrothermal venting on the Juan de Fuca Ridge, *Nature*, 329, 149-151.
- Ledwell, J. R. and A. J. Watson (1991) : The Santa Monica Basin Tracer Experiment. A Study of Diapycnal and Isopycnal Mixing, *Journal of Geophysical Research*, 96, 8695-8718.

(原稿受理：1998年7月10日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載



写真1 SF₆放出装置
Photo 1 SF₆ injection unit

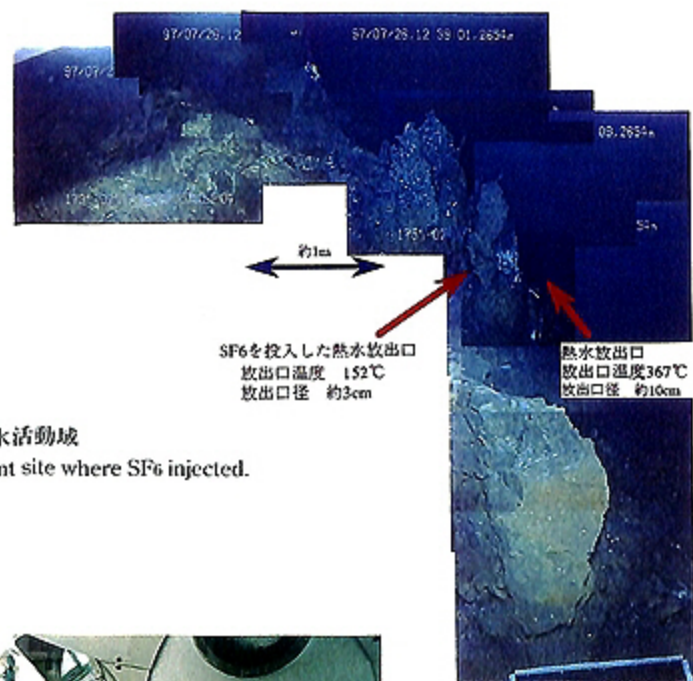


写真2 SF₆を放出した熱水活動域
Photo 2 Hydrothermal vent site where SF₆ injected.

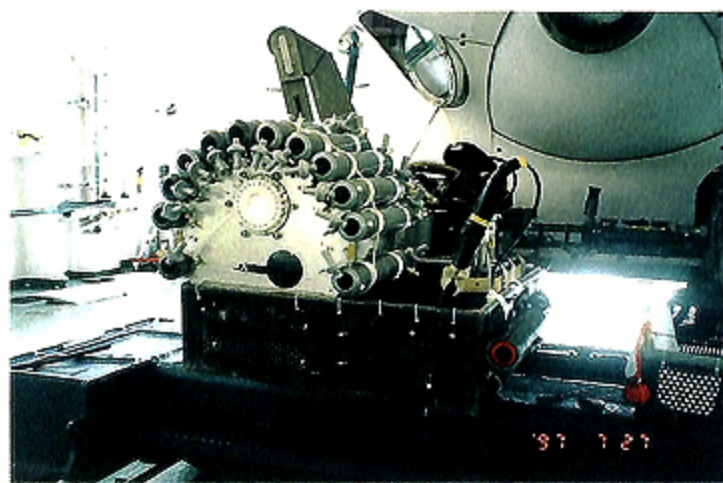


写真3 「しんかい6500」のマニピュレーターの中に設置したCTDと濁度計、及びバスケットに設置したロゼット採水器
Photo 3 CTD and transmissiometer between manipulators of "SHINKAI 6500" and Rosette multi sampler on sample basket.