

相模湾初島沖における海底湧水の化学フラックス 測定のための採水装置の試作

蒲生俊敬*¹ 酒井 均*¹

初島沖海底のシロウリガイ群集は、その生存のための化学合成エネルギーを、相模トラフのプレート境界付近の海底から供給される冷湧水中の化学成分から得ている、と想像される。このような冷湧水の化学フラックスを明らかにするために、群集内の海底面にロート状の容器をかぶせて放置し、その中の海水を、新たに開発した「しんかい2000」搭載用の多筒式採水システムを用いて吸入採取した。ロート状容器の設置後、0.2～1.4および21.9～23時間後に採取した海水の化学成分を比較すると、後者の方がpHが低下し、一方 ΣCO_2 、Si、 SO_4 、および CH_4 はわずかに増加していた。これは海底面からの湧水の影響と、ロート容器内での生物過程を反映したものとみられる。今回の潜航実験により、海底面での長期現場観測のための「化学ステーション」開発の基礎的技術が確立された。

Development of a Semi-automatic Multi Water Sampling System for Determining Chemical Flux of Bottom Fluid Venting off Hatsushima Island, Sagami Bay

Toshitaka GAMO*² and Hitoshi SAKAI*²

The Hatsushima site, western Sagami Bay, is one of the plate boundaries where bottom biological communities dominated by giant clams and tube worms may be associated with active fluid venting. We deployed a funnel (volume: approximately 4 liters) on a flat seabed in one of the Calyptogena communities (34° 59.9' N, 139° 13.6' E) during the dive No.379 of the submersible "SHINKAI 2000", in order to collect vent fluids in the funnel. By using a specially designed multi-water sampling system installed on "SHINKAI 2000", seawater samples inside the funnel were sucked out into the 100ml sampling bottles 0.2 – 1.4 and 21.9 – 23 hours after the deployment. It was shown that ΣCO_2 , Si, SO_4 and CH_4 concentrations slightly increased while pH decreased between the both sampling periods, suggesting an existence of chemical flux inside the funnel possibly due to fluid venting and biological activities. This study offered prospects for developing a timer-controlled "Bottom Chemical Station" aiming at automatic water samplings and in situ chemical measurements for a longer period deployment.

*¹ 東京大学 海洋研究所

*² Ocean Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

メタンや硫化水素から化学合成によってエネルギーを得ている深海生物群集が、世界各地のプレート境界において相次いで発見されている。そして、その特殊な生息環境をめぐって、生物学、地質学及び地球化学の分野にまたがる総合的研究が活発に行なわれている (e. g. Jones, 1985; 太田ほか, 1987; Childress, 1988)。

相模湾では、最近の数年間の間に湾西部の初島沖と東部の沖ノ山堆において、シロウリガイやハオリムシなどの大規模な生物群集があいついで発見された (Okutani and Egawa, 1985; Hori-koshi and Ishii, 1985; 橋本ほか, 1987; 1988)。相模湾は、その中央部を北西から南東方向に相模トラフが縦断し、(図1参照)、南側のフィリピン海

プレートと日本列島のプレートとのプレート境界と考えられている (中村と島崎, 1981)。トラフ沿いには活断層も多く、これらの大型生物は海底の割れ目から供給される冷湧水をもとに、体内に共生させた化学合成細菌から必要なエネルギーを得ているとみられる。

Sakai et al. (1987) は、シロウリガイ群集直上の海水中に、通常の深層水の1000倍に達する高濃度のメタンが含まれていること、またシロウリガイのえらには、湿重量比にして3.5%もの硫黄が含まれていることを明らかにした。Gamo et al. (1988) は、このメタン異常が確かにシロウリガイ群集付近に供給源を持つことを確認するとともに、群集付近の地殻熱流量が異常に高いことを明らかにした。才野と太田 (1988) は、シロウ

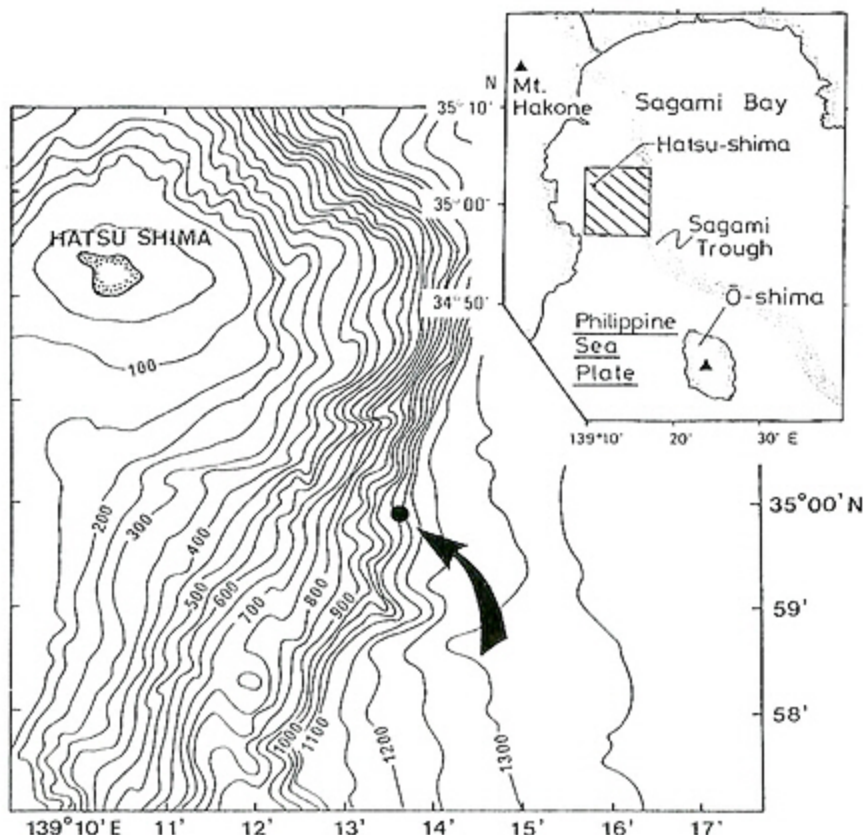


図1 相模湾初島沖周辺の海底地形と潜航点の位置 (黒丸印)。海底地形は水路部発行の十万分の一の地形図による。等深線の単位はメートル。

Fig. 1. Map showing the location of the diving point (filled circle) together with the bottom topography off Hatsu-shima Island in Sagami Bay, which was reproduced from the bathymetric chart (1:100,000) published by the Japan Maritime Safety Agency. Contours are in meters.

リガイ軟体部の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ が通常より低い値であることを示し、増澤ほか (1988) は、シロウリガイ体内に Ag, Zn, Cr などの重金属元素が異常に濃集していることを見いだした。また、シロウリガイコロニー内で採取された深さ 16cm のコア試料から硫化水素が検出された (増澤ほか, 1988)。これらの地球化学的成果は、当海域においてなんらかの海底湧水系が存在し、それが生物生態系と深い関連を持つことを強く示唆している。

湧水に伴う化学成分のフラックスとその時間変動は、生物群集の盛衰を支配する重要な要因と考えられ、その正確な測定は当面の重要な研究課題である。フラックスを測定するには、海底面に係留できる湧水の採取装置、及び化学成分の現場分析装置を開発する必要がある。海外では、オレゴン沖の沈み込み帯に伴う冷湧水系において、現場に採水機器を長期間設置することにより、海底からのメタンのフラックスが測定されている (Suess et al., 1988)。また、化学センサーやフローインジェクション方式の分析機器を組合せた、現場観測のための係留システムも実用化が進んでいる (Johnson et al., 1986)。

我々は、海洋科学技術センターの深海潜水船「しんかい2000」を利用して、化学分析のための海底係留機器 (化学ステーション) を開発するための潜航実験を、相模湾初島沖において開始した。今回の実験はその第1段階として、シロウリガイコロニーの海底面に、湧水を集めるためのファンネル容器を設置し、その中の海水を「しんかい2000」に搭載した採水装置で採取する技術の確立を目的としている。

2. 係留機器と潜航実験

2.1 機器の概要

写真1は、今回使用したファンネル容器 (ピラミッド型ロート、内容積約4リットル) が、海底面に設置されている様子を示す。材質はステンレスで、外から内部が覗けるようにアクリル板の窓が周囲の4面にある。上側に突出した柱の部分には、内部に太さ約15mmの穴が上下方向に貫通しており、この穴を通じて容器の中の海水を吸入採取できる。海水を採取するには、太さ約10mmのステンレス製の管をこの穴から容器内に差し込む (写

真1参照)。この管は、内径2mmのテフロンチューブを介して、以下に述べる採水装置につながっている。

写真2は、「しんかい2000」搭載用に今回新たに制作された、海水採取のための多筒式採水装置 (関日油技研工業製作) を示す。海水を採取するための内容積約100mlの採水筒 (アクリル製) が10本束ねられ、採水筒の両端にはテフロン製のキャップがついている。海水試料を採水筒のなかに吸い込むために、ギヤ付きモーターによって作動するピストン式の吸入装置 (最大吸入量約1リットル) が採水筒に直結されている (写真2の最下部)。また、採水筒に囲まれた内側にあるのは、海水試料をいずれかひとつの採水筒に導入するための回転式の自動12方バルブである。

使用前にすべての採水筒のなかに蒸留水が満たされる。吸入装置が作動すると採水筒内が減圧になるので、採水筒内に充たされていた蒸留水が吸入装置に吸い込まれる。すると、採水筒の中にはめこまれたテフロン製の円板 (採水筒の内壁と円板とのあいだの水密性は円板の周囲のOリングによって保たれる) が、採水筒の中を端から端まで、蒸留水を押出すかたちでゆっくりと移動していき、それと同時に円板の反対側には、海水試料が吸入採取される仕組みである。海水の吸入によって生じると思われるファンネル容器内の海水の擾乱をなるべくおさえるために、モーターのギヤ比は出来るだけ大きくして、海水の吸入速度を遅くしてある (100mlの採取に15~20分かかる)。1試料の採取が終了すると、海水の流路が回転式自動バルブによって切り替えられ、次の採水筒がスタンバイする。吸入装置と回転式バルブはいずれも内蔵電池によって作動するが、そのスイッチングは潜水船船内より水中ケーブルを通して行なう。

2.2 「しんかい2000」による実験

1988年11月3日に行なわれた「しんかい2000」第379回潜航の際に、上記のファンネル容器を海底に設置した。設置場所は、図1に示した相模湾西部初島沖 (34°59.9'N, 139°13.6'E) のシロウリガイコロニー内 (深度1,160m) である。この地点は、1987年の「しんかい2000」第313~316潜

航で調査された点でもあり、そのとき太田（東大海洋研究所）によって、深海フラッシャーとトランスポンダーが設置されている。今回の潜航ではこの深海フラッシャーを点滅させて目標点とした。採水装置一式は、ファンネル容器に差し込むための吸入管延長部を除き、「しんかい2000」のサンプルバスケット用スペース（観測窓からの目視が可能であった）に予め固定した（写真2）。

目標点に到達後、コロニー内をしばらく観察し、海底からの湧水の可能性が高いと思われるシロウリガイの密集（10匹以上）した平坦な場所を選定した。そしてシロウリガイをマニピュレーターで排除してからファンネル容器を垂直に設置した。ただし、すべてのシロウリガイを除くことはできず、容器内に1～2匹のシロウリガイ生体が残った。

ファンネル容器設置にともなう海底堆積物の舞い上がりのおさまるのを待ってから、吸入管をマニピュレーターでファンネル内に差し込み、船内より吸入装置と回転バルブを交互に作動させて海水を採取した（写真1参照）。採水装置の操作は「しんかい2000」船内より、装置の作動状態を確認しながら行なった。装置は正常に作動し、設置後0.2～1.4時間経過する間に（時刻は採水の開始時を示す）4試料を採取した。吸入管をマニピュレーターで引き抜き、ファンネル容器のみ現場に残してその日は浮上した。

翌日の第380回潜航（観察者：半田暢彦）では、同一地点で海底のコア採取が行なわれた。これと並行して、前日と同様にファンネル容器内の海水採取も行なわれ、容器の設置後21.9～23.0時間の範囲で海水4試料が吸入採取された。

得られた海水試料は、「しんかい2000」浮上後、ただちに各種化学分析のための容器に分取し、以下に述べるように船上分析、もしくは持ち帰るための然るべき保存処置をとった。いずれの潜航の際にも、回収した採水筒の中には数mLに達する気相が認められた。採取した海水から発生したものは考えられないので、「しんかい2000」の浮上後に採水筒のなかに空気の漏れがあったとみられる。

なお、第379回潜航では、海水採取と並行してシロウリガイの生体が27個採取され、船上での飼

育実験や生理学的研究に用いられた。

3. 試料の化学分析

今回行なった海水の化学分析項目は、pH、Si、 SO_4 、 CH_4 、 δCO_2 と水の δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ である。

pH測定用試料は、気泡を入れないように10ml スチロール瓶に密封し、採取後1日以内に測定を行なった。 CH_4 および δCO_2 試料は HgCl_2 溶液を加えて殺菌したのち、20mlバイアル瓶に密封して約5℃で冷蔵保存し、それぞれFIDおよびTCDガスクロマトグラフィーにより定量した（Gamo et al., 1987; Gamo and Horibe, 1980）。Siおよび SO_4 測定用試料は30mlポリ瓶に入れて冷蔵保存し、それぞれ比色分析法（モリブデンブルー法）及びイオンクロマトグラフィーによって定量した。水の同位体比測定用試料は、別のポリ瓶内に密栓して保存し、常法にしたがって同位体比質量分析計によって測定した。なお溶存酸素も測定する予定であったが、機器のトラブルのため分析値は得られなかった。いずれの海水試料も硫化水素臭は認められなかった。

4. 結果と考察

表1に、ファンネル容器設置後の経過時間と化学成分分析結果の一覧を示す。

CH_4 を除くと、いずれの化学成分についても、同じ潜航で採取した試料間では有意な値の変動は見られない。この程度の時間スケールでは、検出できるほどの濃度変化が引き起こされることはなく、値のバラツキが測定の実験誤差を表しているものと考えてよいであろう（ CH_4 についてはあとで考察する）。

しかし、潜航379から潜航380まで約20時間放置したことによって、いくつかの成分に値の変化が見られた。pHは、ファンネル容器設置直後の7.54から7.28まで0.26減少した。これに対応して、 δCO_2 が0.05 (mmol/l)増加した。また、Siと SO_4 についても、わずかに増加の傾向が認められる。一方、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ では有意の変動はなかった。このように一部の化学成分にみられる濃度変化は、海底面からの湧水フラックスと、ファンネル容器内での生物活動を反映しているものと考えられる。ただし、約1日の係留は確定的なこ

表1 海水試料の化学分析結果

Table 1. Results of chemical analyses for seawater samples

Dive No.	Elapsed time* (hours)	pH (25°C)	Si ($\mu\text{mol/l}$)	SO ₄ ($\mu\text{mol/l}$)	CO ₂ ($\mu\text{mol/l}$)	CH ₄ ($\mu\text{l/kg}$)	10 (o/oo)	δ ¹⁸ O (o/oo)
379	0.2	7.55	3.87	28.9	-	6010	-2.7	-0.4
379	0.7	7.55	-	29.1	2.36	5160	-2.2	-0.6
379	1.0	7.51	3.96	28.8	2.35	4480	-2.9	-0.2
379	1.4	7.53	3.96	29.0	2.37	4690	-2.0	-0.3
	(average)	7.54	3.93	29.0	2.36		-2.5	-0.4
380	19.2	7.26	4.13	29.3	2.42	14790	-2.6	-0.4
380	20.2	7.31	3.98	29.4	2.38	4130	-2.7	-0.5
380	20.6	7.27	4.10	29.3	2.39	6690	-1.2	-0.7
380	21.7	7.26	4.35	29.6	2.43	8450	-2.5	-0.8
	(average)	7.28	4.14	29.4	2.41		-2.3	-0.6

*Time elapsed after the deployment of the funnel.

とを言うには十分でないで、今後、数日もしくは数週間程度の長期間観測を行なう必要がある。

メタン濃度は、ほかの成分に比べ、きわめてバラツキの大きい結果が得られた。先に述べた採水筒内への空気の混入があったために、海水試料を保存容器に封入するまでの過程で、海水試料中のCH₄の一部が気相に移行してしまった可能性がある。これは大気と溶解平衡にある海水中には、CH₄はわずかに50nl/kgしか溶けないのに対し、初島沖海底の直上水はこの100~200倍に達するメタンを含み、大気中では非常な過飽和状態にあるためである。しかし表1の結果を大まかに見ると、380回潜航の際に採取された試料の方がCH₄値が高くなる傾向にある。船上での試料処理は両潜航を通じて同一であることから考えると、この傾向は海底面からのCH₄フラックスを反映しているのかもしれない。

5. おわりに

今回の最初の実験では、海水の吸入採取システムの基本性能が明らかになり、海底の化学実験に有効に利用できることがわかった。また問題点として、採水筒へ大気の影響の起こることがわかった。今回のように採水システムを潜水船の船内からコントロールする方式では、潜水船が海底面にいる間しか採水を行なうことが出来ないで、試料採取の時間間隔は限られ、また長期観測を継続するのが難しい。この点を改良するために、実験の第2段階として、今回の採水システムにマイコンを組み込み、タイマー制御方式に改良中である。この方式によれば、システムはタイマーの指令にしたがって自動的に採水動作を繰り返すので、潜水船はただシステムを現場に係留してあとで回収

するだけでよく、化学ステーションの構築にむけて大きな進展が期待できる。

6. 謝 辞

本研究を行なうにあたり、海洋科学技術センター深海研究部の堀田宏部長、鶴啓介司令ならびに段野洲典副司令には、研究の立案から実際の潜航実験に際し、数多くの便宜をはかっていただいた。「しんかい2000」の福井勉整備長をはじめとする整備・潜航チームの皆様、第379回潜航の際桜井利明船長と赤澤克文潜航士には、採水システムのセッティングや海底での使用にあたってお世話いただいた。支援母船「なつしま」の越智貞己船長をはじめとする乗組員の皆様は、骨身を惜しまず作業にご協力下さった。名古屋大学水圏科学研究所・半田暢彦教授は、第380回潜航の際に海水試料の採取を行なって下さった。東大海洋研究所の太田秀教授はフラッシュの使用を快く承諾して下さい、小池勲夫教授、遠藤圭子技官および門前一姫技官には、「なつしま」船上で装置の準備と海水試料の処理を助けていただいた。石橋純一郎氏および末田直子氏は、船上での試料処理とメタン分析、及び水の安定同位体比測定を、それぞれ分担して下さい。また柳沢文孝博士にはSO₄分析でお世話いただいた。以上の皆様にあつくお礼申し上げる。なお本研究の一部は、文部省科学研究費(No.60430010及びNo.63420012)の補助を受けて行なわれた。

参考文献

- Childress, J. J. 1988, Biology and chemistry of a deep-sea hydrothermal vent on the Galapagos Rift; the Rose Garden

- in 1985. Introduction. Deep-Sea Res., 35, 1677-1680.
- Gamo, T. and Horibe, Y. 1980, Precise determination of dissolved gases in sea water by shipboard gas chromatography. Bull. Chem. Soc. Jpn., 53, 2839-2842.
- Gamo, T., Ishibashi, J., Sakai, H. and Tilbrook, B. 1987, Methane anomalies in seawater above the Loihi submarine summit area, Hawaii. Geochim. Cosmochim. Acta, 51, 2857-2864.
- Gamo, T., Ishibashi, J., Shitashima, K., Kinoshita, M., Watanabe, M., Nakayama, E., Sohrin, Y., Kim, E.-S., Masuzawa, T. and Fujioka, K. 1988, Anomalies of bottom CH_4 and trace metal concentrations associated with high heat flow at the Calyptogena community off Hatsu-shima Island, Sagami Bay, Japan: A preliminary report of Tansei Maru Kt-88-1 cruise Leg-1. Geochim. J., 22, 215-230.
- 橋本 惇・田中武男・松澤誠二・堀田宏 1987, 相模湾初島沖におけるシロウリガイ群集の調査, 海洋科学技術センター試験研究報告・第3回「しんかい2000」シンポジウム, 37-50.
- 橋本 惇・松澤誠二・堀田宏 1988, 相模湾沖の山堆における深海生物群集の探索, 海洋科学技術センター試験研究報告・第4回「しんかい2000」シンポジウム, 177-188.
- Horikoshi, M. and Ishii, T. 1985, Mode of occurrence of Calyptogena soyoae observed from the Japanese submersible "Shinkai 2000" in Sagami Bay. Deep Sea Newslett., 11, 14-16.
- Johnson, K. S., Beehler, C. L. and Sakamoto-Arnold, C. M. 1986, A submersible flow analysis system. Anal. Chim. Acta, 179, 245-257.
- Jones, M. L. (Ed.) 1985, Hydrothermal vents of the eastern Pacific: An overview. Bull. Biol. Soc. Washington, Number 6, INFAX Corp., Vienna, Virginia 22180, 545 pp.
- 増澤敏行・半田暢彦・小山睦夫 1988, 相模湾初島沖海底生物群集のシロウリガイの微量元素組成, 海洋科学技術センター試験研究報告・第4回「しんかい2000」シンポジウム, 225-231.
- 増澤敏行・半田暢彦・北川浩之 1989, 相模湾初島沖の海底生物群集近傍堆積物の間隙水および堆積物の組成(その2), 日本海洋学会春季大会講演予稿集 331, 272-273.
- 中村一明・島崎邦彦 1981, 相模・駿河トラフとプレート沈み込み, 科学, 51, 490-498.
- 太田秀・酒井均・平朝彦・大和田紘一・石井輝秋・前田昌調・藤岡換太郎・才野敏郎・木暮一啓・蒲生俊敬・白山義久・古田俊夫・石塚明男・遠藤圭子・角隆幸・堀田宏・橋本惇・半田暢彦・増澤敏行・堀越増興 1987, 相模湾初島沖における「シロウリガイ群集」総合調査報告(Ⅰ), 海洋科学技術センター試験研究報告・第3回「しんかい2000」シンポジウム, 51-60.
- Okutani, T. and Egawa, K. 1985, The first underwater observation on living habit and thanatocoenosis of Calyptogena soyoae in bathyal depth of Sagami Bay. Venus (Jpn. J. Malac.), 44, 285-288.
- 才野敏郎・太田秀 1988, 日本近海で得られたシロウリガイおよびチューブワームの ^{15}N , ^{13}C 同位体比, 日本地球化学会年会講演予稿集 2 A 09, 133-134.
- Sakai, H., Gamo, T., Endow, K., Ishibashi, J., Ishizuka, T., Yanagisawa, F., Kusakabe, M., Akagi, T., Igarashi, G. and Ohta, S. 1987, Geochemical study of the bathyal seep communities at the Hatsu-shima site, Sagami Bay, Central Japan. Geochim. J., 21, 227-236.
- Suess, E., Kulm, L. D., Carson, B. and Whitticar, M. J. 1988, Venting of fluids from subducted sediments of the Oregon continental margin. Abstracts of JOA MEXICO 88.

(原稿受理 1989年4月19日)

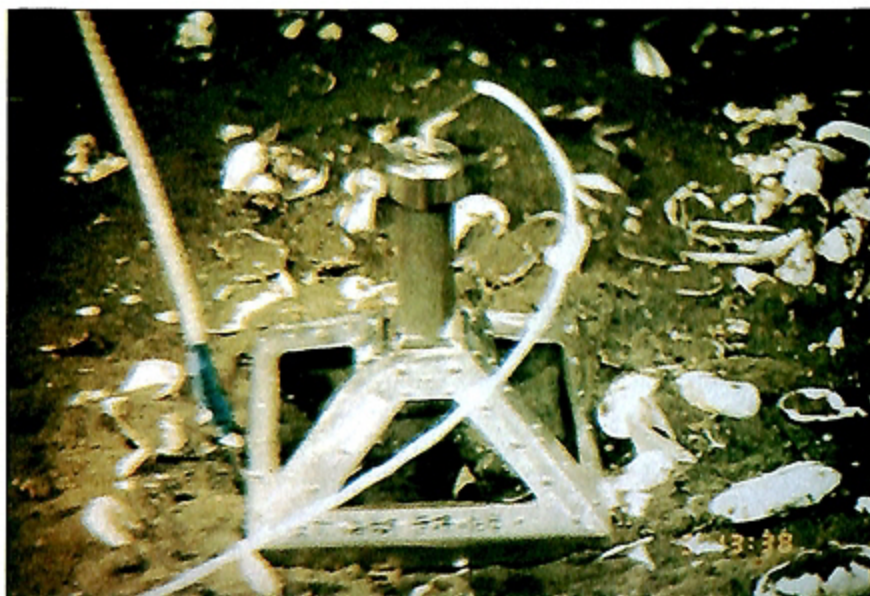


写真1 初島沖のシロウリガイ群集内の海底面に設置したファンネル型容器。

photo. 1 The funnel deployed on the seabed in the *Calyptogena* community off Hatsu—shima Island.

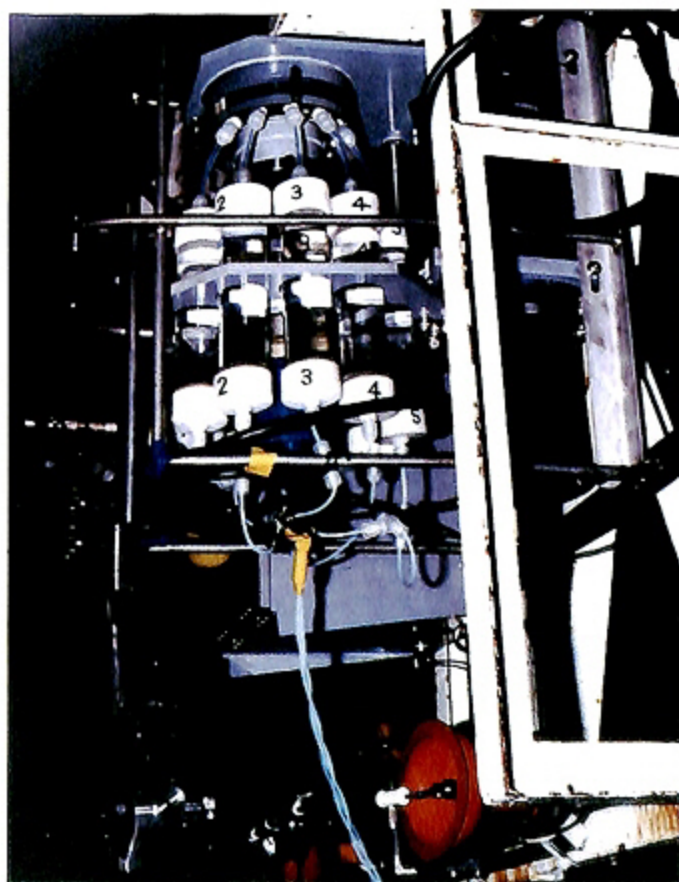


写真2 「しんかい2000」前面に固定された多筒式採水装置。

photo. 2 The multi—water sampling system fixed on the front of the submersible "SHINKAI 2000"