

潜水調査船用多連式ガスタイト海底湧水採取装置の開発と応用

角皆 潤*¹ 上妻 史宜*¹ 中山 典子*¹ 蒲生 俊敬*¹ 金子 将*²

新しい潜水調査船用の採水器(略称:WHATS)を開発したので報告する。この採水器は海底における揮発性成分に富んだ熱水や冷湧水あるいは気泡試料の高純度でのサンプリングと、これらを母船上に回収するまでの間における含有揮発性成分の散逸防止を主な目的としており、DCポンプ1台、150mlステンレス製ガスタイト容器4本(内面は複合電解研磨処理済み)、各ガスタイト容器に2個ずつ計8個のボールバルブ、電動開閉アーム、採水チューブなどからなっている。本採水器は、試料の吸引に低速ポンプを利用し、試料液体(あるいは試料気体)の循環によって容器内置換を行うため、高純度試料のサンプリングが可能である。また開閉アームを一方向に動かすだけで合計8個のバルブの開閉を制御するため、開閉に油圧系を一切使用せず、電動モーターも一台しか使用しない。したがって一潜航で最大4種ものガスタイト試料が採取出来るにもかかわらず、軽量化(水中重量28kg)・小型化(船内視界外のペイロードに装着可能)・簡便な操作性などが実現している。2001年の夏から使用を開始し、これまで40回以上の「しんかい2000」あるいは「しんかい6500」の潜航調査で使用されたが、その間の採水成功率は90%以上と、この種の海洋観測機器としては画期的な高打率を記録している。なお高圧下にある深海の試料を現場圧力のまま船上に回収することに関しては安全に対する懸念が指摘されることが多いので、この点についても考察を加え、問題が無いことを確認した。

キーワード:ガスタイト, 採水器, 気体組成, 熱水, 冷湧水

Development of multi-bottle gas-tight sampler WHATS for sampling sea-floor venting fluids

Urumu Tsunogai*³ Fumitaka Kouzuma*³ Noriko Nakayama*³ Toshitaka Gamo*³ Sho Kaneko*⁴

We report newly developed water sampler WHATS (Water and Hydrothermal-fluid *Atsuryoku* Tight Sampler), to sample seafloor venting fluid or gas, so as to hold collected gas-rich fluids tight after sampling, including the ascent of submersible. It consist of a peristaltic pump, 4 stainless steel cylinders with electrically polished inner wall (150ml each), 8 ball valves, and an Teflon inlet tube. By using motor-driven hand, we can set only one of the four cylinders at open state. By pumping out MiliQ water which had occupied a space of the opened cylinder, we can introduce sample fluids into the cylinder. Then, using motor-driven hand again, both end of the cylinder is closed and the next cylinder becomes to be ready for sampling. It takes about 5 minutes to sample one cylinder. Whole operation can be arranged from the inside of submersible cabin. The superior point of this sampler is that we use only one motor to handle 8 valves, so that we don't have to prepare so much motor and/or any hydraulic cylinder for sampling different kinds of fluid samples. From the middle of 2001 to present, the sampler has been employed as a water sampler at ca. 40 dive surveys of *Shinkai 2000* and *Shinkai 6500*. During the dives, more than 90% of the water sampling trials had been successful. We also discuss the safety of this sampler.

Keywords : gas-tight, water sampler, gas chemistry, hydrothermal fluid, cold seep

*1 北海道大学大学院理学研究科

*2 日油技研工業株式会社

*3 Grad. Sch. of Sci., Hokkaido University

*4 NICHYU GIKEN KOGYO CO., LTD.

はじめに

瓶容器に密封されたビールやコーラの栓を抜くと瓶内の液相から気体(二酸化炭素)が発泡してくる様子が観察されるが、栓を抜く前の瓶内ではこのような現象は観察されない。栓を抜く以前に発泡が観察されないのは瓶内の気相部分(主成分は二酸化炭素)が約2気圧に加圧されているおかげであり、また栓を抜くと発泡が観察されるのは、気相全圧が大気圧(1気圧)へと下がると高分圧下で溶解していた二酸化炭素が溶けきれなくなるためである。この理屈は高校の化学の教科書では「ヘンリーの法則」という名前で紹介されている、気体が液体へ溶解する際に適用される重要な法則である。

海底熱水や海底冷湧水に代表されるような高水圧の海底や湖底に湧出する流体は、先に例に挙げたビールやコーラと同様に二酸化炭素をはじめとした揮発性成分に富んでいることが多い。このような流体を一般的な採水器(圧力保持型で無いもの:例えばニスキン採水器やTsunogai et al. (1994)で紹介しているような非耐圧ピストンシリンダーを用いたものなど)を用いて採取して一気圧の地上に持ち帰ると、その途中で揮発性成分がその溶解度を超過して発泡してしまつて揮発性成分が容器外に散逸してしまうことが多い。これでは湧出した流体中における正確な揮発性成分の濃度や同位体比を求めることは出来ない。海底湧水中の二酸化炭素やメタン、水素、一酸化炭素、ヘリウムといった揮発性成分の濃度や同位体比を正確にかつ高精度に分析することは、①海底火山の熱源マグマの生成環境に関する研究、②海底メタンハイドレートの成因や崩壊に関する研究、③海底下に生息する始原的微生物に関する研究、④沈み込み帯における物質循環に関する研究、といった多方面の重要な研究の進展に不可欠である。そこで本研究では溶存成分を含んだ高圧状態のまま試料を母船上に持ち帰る多連式ガスタイト海底湧水採取装置(略称WHATS: Water and Hydrothermal-fluid *Atsuryoku* Tight Sampler・特願2002-20041)を開発したので報告する。

1. 採水装置概要

本装置は海底熱水のような揮発性成分を多量に含んだ流体試料、あるいは海底湧出ガスのような揮発性成分そのものを、①海水の混入をなるべく押さえて採取し、②船上で回収するまで溶存揮発性物質の損失のおきないガスタイト試料容器内に保存するための装置であり、「しんかい2000」や「しんかい6500」のペイロードに取り付けて使用することを念頭に置いたものである。写真1および写真2には、海洋科学技術センターの潜水調査船「しんかい2000」に取り付けた時のWHATSの様子を、また写真3には、「しんかい6500」に取り付けた時のWHATSの様子を示す。また写真1および写真2には各部の名称を付記した。詳しい仕様は表1に示した。

図1の採水器の模式図に示したように、採水器はステンレス製ガスタイト容器(内容積150mL・内面は複合電解研磨により不活性処理済み・34MPa耐圧)4本、各ガスタイト容器に2個ずつ計8個のボールバルブ(90度づつの回転で開→閉→開→閉が切替・40MPa耐圧)、バルブ開閉アーム、同制御用

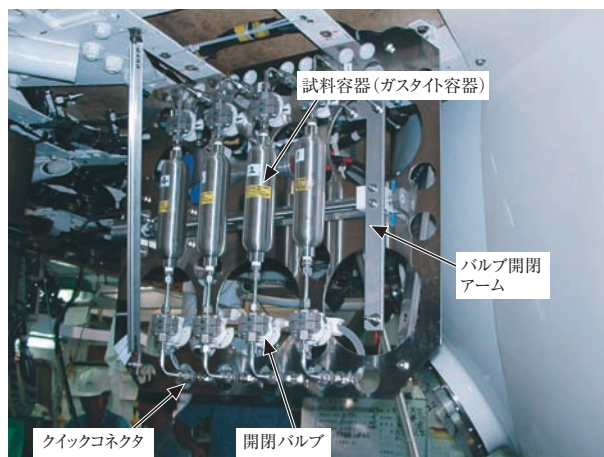


写真1 WHATS正面概観(「しんかい2000」のペイロードに装備したところ。採水器の背後が耐圧殻になる。)

Photo 1 Front view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 2000*.

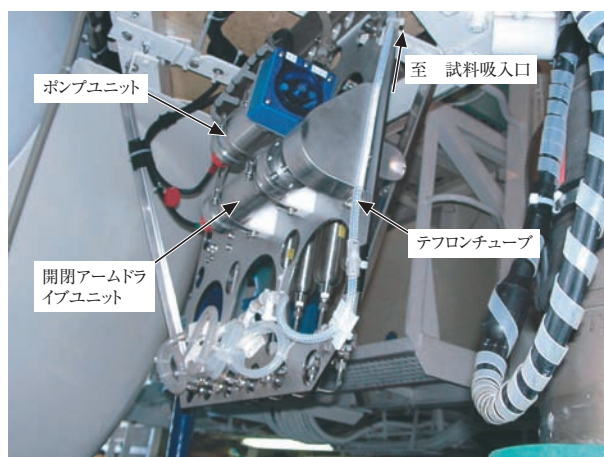


写真2 WHATS背面概観(「しんかい2000」のペイロードに装備したところ。左側が耐圧殻)。

Photo 2 Rear side view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 2000*.



写真3 WHATSを「しんかい6500」のペイロードに装備したところ。写真右端のサンプルバスケット前部に収納されているのが温度計付きの採水器吸入口。

Photo 1 Front view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 6500*.

表1 WHATSの仕様一覧

Table 1 Specifications of gas-tight water sampler WHATS.

最大動作水深	3,000 m
最大持込水深	3,000 m
試料容器耐圧	34 MPa
採水容量	150 mL × 4本
採水速度	120 mL/min.
電源	DC19-32V/1.0A (船内より供給)
水中重量	28.0 kg
空中重量	35.2 kg

のドライブユニット1台、ペリスタティック型のポンプユニット1台、フレキシブルテフロン製の採水チューブなどの各部からなっており、潜水船内からの指令により潜水船の28V直流電源を使用してドライブユニットとポンプユニットを随時動作させている。本採水器の特徴は、ドライブユニットによってバルブ開閉アームを随時停止させながらレール上を一方方向に動かすだけで8個のバルブの計12回にもおよぶ開閉動作を制御する点である。バルブ開閉アームの移動によるバルブ開閉の原理は図2に示した通りで、バルブ開閉アームを右から左に移動させることでバルブが動作する。まずバルブの片方(図1および図2の上側のバルブ)を閉じ、もう片方(下側)を開いた状態で潜航し、試料採取直前にバルブ開閉アームの最初の移動で4本のうちの一番右の1本について両端を開放状態にして一端開閉アームを停止する。そして試料吸入口が目的の試料湧出域にかざされた状態でペリスタティックポンプ作動させ、毎分120mLのゆっくりとしたスピードで純度の高い試料をガスタイト容器内に引き込む。十分試料を流して容器内が完全に試料に置き換わった後に(所要時間約5分)、バルブ開閉アームの再移動を行って両端のバルブを閉める。この動作を最大4本の容器すべてについて随時行うことで最大4種の試料が採取出来る。採取した試料は両端のバルブが閉じられたままとり、船上へ潜水艇が回収されるまで容器内に密封される(図2参照)。採取された熱水試料はステンレス製の保圧容器内に海底とほぼ等しい圧力条件のまま保持されるため、母船に回収されるまで揮発性成分の散逸は起きないようにしている。こうして船上に回収された試料はバルブのさらに外側にあるクイックコネクタ部を潜水船から取り外して船上実験室に持ち込み、真空ラインを用いたガス抽出作業に供する。

なお実際の使用においては、試料吸入口部に温度計を併設し採取試料の温度をモニタリングしながら使用した(写真3参照)。また潜水船が持参する他のペイロードの作業や潜水調査船内からの視界を妨げないようにとの配慮から、「しんかい2000」の場合はおでこの左端(写真1・2)、「しんかい6500」の場合は耐圧殻の下(写真3)に本装置を装着した。さらに船内からの採水操作にあたっては船内に設置する制御装置内

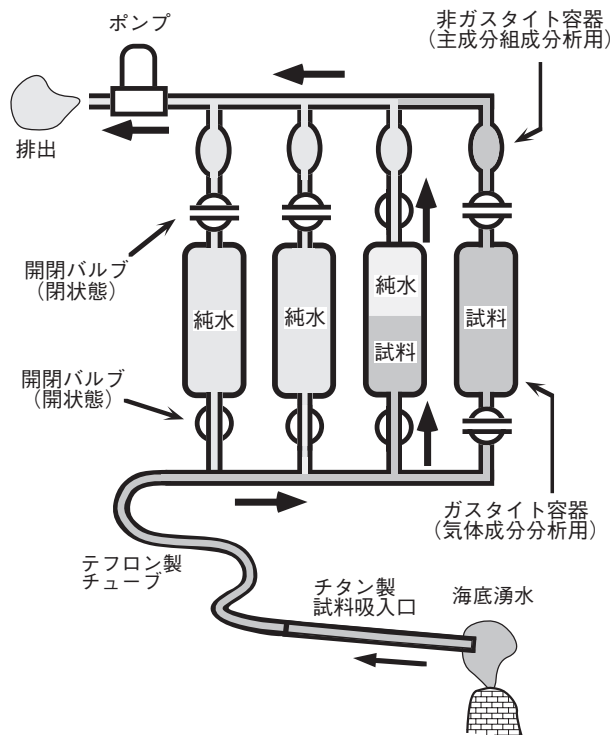


図1 WHATSによる採水の模式図。4本の容器のうち、右から2番目の容器に採水している所を模式的に示した。また一番右の容器は採取済みの容器を、また3番目と4番目は未採取の容器を表している。

Figure 1 Schematic diagram showing the WHATS sampler.

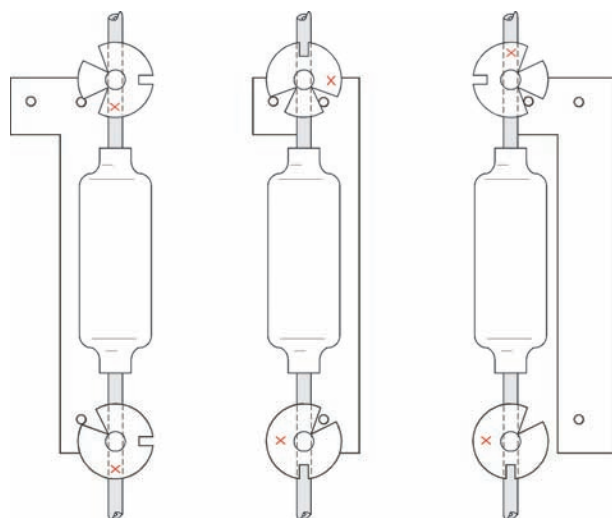


図2 バルブ開閉アームによるバルブ開閉動作の原理図。右から採取前・採取中・採取後のバルブと開閉アームの関係を示す。バルブの回転ディスク上の「×」印が容器の縦の中心軸上に来ている時はそのバルブは閉まっていることを示しており、また回転ディスク上のコの字型の切れ込みが中心軸上にある時はそのバルブは開いていることを示している。

Figure 1 Schematic diagram showing the way of valve rotation using motor-driven hand.

に組み込まれたプログラムによって、乗船者が採水ボタンを押せば自動的に試料採取作業が制御されるようにした。

本採水器はバルブ開閉に油圧系を一切使用せず、また電動モーターもバルブ開閉アームドライブユニットの一台しか使用しないため、一潜航で最大4種ものガスタイト試料が採取出来るにもかかわらず、軽量化(水中重量28kg)・小型化(視界を遮断しないペイロード部分への装着)・簡便な操作性などが実現している。まとめると、①多連式であり一回の投入で150mlの試料が最大4本採取可能、②4本の容器の両端に付いた合計8個のバルブの開閉は1個のDCモーターのON/OFFだけで制御していて油圧系は一切使わない、③耐圧容器やバルブは市販品を使用していて交換が簡単、④採水だけでなく海底から放出される気体の「採ガス」にも応用可能、⑤採水器は真空引き方式(例えばSedwick et al., 1994)では無く低速ポンプを利用した容器内の水の置換方式なので高純度試料の採取が可能、といった一連の特徴を持っている。

2. 結果と試料採取装置としての信頼性に関する考察

2001年の夏から投入を開始したが、これまで100本を超える試料の採取に成功し、採水成功率も90%以上とこの種の海洋機器としては画期的な高打率を記録している。また採取した試料についても問題が無いことを確認した。表2は駿河湾湾口部(34° 40.0'N, 138° 35.7'E)における「しんかい6500」の潜航調査(第619潜航, 観測者:角皆 潤)において、作業終了後に海底から海面への浮上途中で海水試料をサンプリングし、これを分析した時の結果である。予め容器内には塩濃度0‰の純水を入れてあったが、回収した試料の塩濃度はいずれも35‰を示していることから、これが海水試料に完全に置き換わっていることがわかる。またこの試料のCH₄濃度を、1986年11月に同一海域で船上からの鉛直採水によって試料採取・分析した時の結果(Tsunogai et al., 1998)と比較したのも表2に示してある。CH₄濃度分布は時期や場所のわずかな違いで大きく変動する成分であるが、それにもかかわらず過去の同一海域における鉛直プロファイルと値はほぼ一致しており、本採水器が汚染等に関しては問題は無いことが確認された。また本試料採水器のガス保存を行う容器本体およびバルブの部分はEvans et al. (1993)によってガスの保存性の検証がなされたもの全く同じであり、この点からも本採水器の試料採取装置としての信頼性には問題が無いものと思われる。

表2 WHATSにより採取した海水試料の採取深度と化学組成

Table 2 Observed salinity and CH₄ content in sea water sampled by WHATS, together with CH₄ content in the past literature of the same station (Tsunogai et al., 1998).

	採取深度 (m)	塩濃度 (%)	CH ₄ 濃度 (nmol/kg)	CH ₄ 濃度 (文献値) (nmol/kg)
D619-W1	1,800	35	2.2	2.5
D619-W2	1,000	35	0.5	0.5
D619-W3	700	35	2.1	1.9
D619-W4	400	35	3.2	2.7

3. 安全性に関する考察

採水した試料は採取した現場深度の圧力をほぼそのまま保持して母船上に上がってくる。本採水器の動作限界である3,000mの深さの試料を持ち帰る場合、この水は容器内で30MPa(約300気圧)の圧力を示すことが予想される。この圧力は厚さ2mmの平らな鋼鉄の板を破壊するに十分な力を持っており、取り扱いには注意が必要である。取り扱い如何によっては安全性に疑問が出てくる場合もあり得る。保圧容器内に密閉して回収してきた高圧液体試料について、いくつかのケースについて問題が発生しないか検討してみた。

3.1 溶存成分の影響

揮発性成分に富んだ熱水を密閉容器に入れて持ち帰ると、海水の場合のような水圧による圧力以外に、溶存成分が内圧をより高めて保圧容器を破損しそうなイメージを持つ方がいるかもしれないが、これは間違いである。海底で採取した流体試料は、温度さえ変わらなければ、例えどんなに溶存揮発性成分に富んでいようが圧力は海底で採取した時の圧力そのままであり、溶存成分が少ない試料との差は無い。ガス態で採取した場合も同じである。

3.2 気体試料への温度の影響

本採水器で気体試料を採取して持ち帰ってくる途中で、この試料の温度が上昇すると、これにともなって内部の圧力も上昇すると予想される。これが大幅な圧力上昇であった場合は容器の耐圧基準を超えて容器の破損につながる事が懸念される。そこでいま体積不変で温度が上昇した場合に内部の圧力がそれほど変化するか試算してみる。内部の気体を理想気体と仮定し、初期の内圧と温度を P_0 と T_0 、温度上昇後の内圧と温度を P_1 と T_1 とすると、

$$P_1 = P_0 \frac{T_1}{T_0} \quad (3.1)$$

となる。今15MPaで採取された4°Cの海水が、体積不変で26°Cに温度が上昇した場合を例にして計算すると、内部の圧力は1MPa(約8%)ほど上昇するだけであって、全圧は約16MPaとなる程度であることがわかる。気体試料の場合には温度の影響は問題とされないと考えられる。これは気液が混合した試料でも同様であると考えられる。

3.3 液体試料への温度の影響

次に容器内が完全に液体試料となっている場合について温度上昇の影響を考える。温度が上昇すると、水も体積がわずかながら増えるのでこの場合も圧力が上昇する。いま先の例と同じく15MPaで採取された4°Cの海水が、体積不変で26°Cに温度が上昇した場合を考えると、内圧は約28 MPaとなり13MPaも上昇する(気象庁編, 1990)。容器の耐圧試験圧力は57MPa, またバルブの使用限度圧力は40MPaであるから、2,000mを超える深海底で採取した液体試料の温度管理には細心の注意を払う必要がある。可能であれば水深2,500m以深の採水は避けるべきであり、また採水した場合には揚収後すみやかに冷水に浸けるのが望ましい。特に船上で潜水船揚収後に何らかの形で加熱される事態は絶対に避ける必要がある。ただし実際上は容器内外の圧力差の増大に伴うわずかな容器の変形(膨張)で内圧はある程度は緩衝されるため、実際の使用において過度に恐怖心を抱く必要は無い。

なおいくら冷却するのが望ましいからといって、間違っても冷凍しないように気を付ける必要がある。一定体積中の海水が冷凍されて氷になってしまうと、その途端急激な内圧上昇が起こるため容器が破損しても不思議ではない。

謝辞

本採水器の開発にあたっては日油技研工業株式会社の皆様や産業総合技術研究所の中村光一様に大変お世話になりました。また潜水調査船における実際の設置・使用にあたっては「しんかい2000」/「なつしま」, 「しんかい6500」/

「よこすか」の乗船研究者ならびに潜航チームの皆様にご多大のお世話になりました。宮崎大学農学部の三浦知之先生には写真を提供していただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。なお本採水器の開発には、科学技術振興調整費「アーケアンパーク計画」を用いております。

参考文献

- 1) Evans, W.C., G.W. Kling, M.L. Tuttle, G. Tanyileke, and L.D. White, Gas buildup in Lake Nyos, Cameroon: The recharge process and its consequences, *Applied Geochemistry*, 8, 207-221, 1993.
- 2) 気象庁編“海洋観測指針”, 日本海洋学会, 1990.
- 3) Sedwick, P.N., G.M. McMurtry, D.R. Hilton, and F. Goff, Carbon dioxide and helium in hydrothermal fluids from Loihi Seamount, Hawaii, USA: Temporal variability and implications for the release of mantle volatiles, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1219-1227, 1994.
- 4) Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, and T. Gamo, Methane-rich plumes in Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization, *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 97-105, 1998.
- 5) Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, T. Gamo, K. Watanabe, T. Kajimura, S. Kanayama, and H. Sakai, Peculiar features of Suiyo Seamount hydrothermal fluids, Izu-Bonin Arc: Differences from subaerial volcanism, *Earth and Planetary Science Letters*, 126, 289-301, 1994.

(原稿受理:平成14年9月11日)

