HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	角皆, 潤; 土岐, 知弘; 中山, 典子; 蒲生, 俊敬; 加藤, 博之; 金子, 将
Citation	地球化学, 37(3), 101-109
Issue Date	2003-08-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/44892
Type	article
File Information	chikyukagakuv37p101.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

地 球 化 学 37, 101-109 (2003)
Chikyukagaku (Geochemistry) 37, 101-109 (2003)

報 文

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

角 皆 潤*・土 岐 知 弘*・中 山 典 子*
蒲 生 俊 敬*・加 藤 博 之**・金 子 将***

(2003年2月19日受付, 2003年5月7日受理)

WHATS: a new multi-bottle gas-tight sampler for sea-floor vent fluids

Urumu TSUNOGAI*, Tomohiro TOKI*, Noriko NAKAYAMA*, Toshitaka GAMO*, Hiroyuki KATO** and Sho KANEKO***

* Earth & Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
N10W8 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan
** Mechanical Science, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
N13W8 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan
*** R&D Department 4, Nichiyu Giken Kogyo Co., Ltd.
21-2 Matobashin-machi, Kawagoe, Saitama 350-1107, Japan

We report a newly developed water sampler WHATS (Water and Hydrothermal-fluid Atsuryoku Tight Sampler), for collecting seafloor venting gas-rich fluid (or gas itself) at *in situ* pressure (*Atsuryoku* means pressure in Japanese). It consists of four 150 cm^3 stainless steel sample cylinders, eight ball valves, a motor-driven arm, a rail, a peristaltic pump, and a flexible Teflon tube connected to a titanium inlet tube. The motor-driven arm on the rail can open one of the four cylinders. Then, by pumping out pure water that has filled the cylinder, we can introduce sample fluid into the cylinder. After completely replacing the pure water with sample fluid, the valves at both ends of the cylinder are tightly closed by moving the motor-driven arm again. At this stage, the next cylinder becomes to be ready for next sampling. We can take maximum 4 different gas-tight samples in series. Whole operation can be arranged inside the submersible cabin. Use of only one motor to operate valves makes the sampler small, light (28 kg in water), and easy to handle. With the sampler, we can collect almost uncontaminated sample because we pump fluid slowly (120 cm^3/min.) into the cylinder using the peristaltic pump. To date, the sampler has been used for ca. 40 dives of *Shinkai 2000* and *Shinkai 6500* with the success rate of more than 90%. We also evaluate the safety factors in handling highly pressured samples. We conclude that the sampler can be used to the depth of 3,000 m.

Key words: WHATS, fluid sampler, gas sampler, gas-tight, multi-bottle, hydrothermal and cold seep fluid, handling pressured sample

* 北大院理・地球惑星
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目
** 北大院工・機械科学
〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目
*** 日油技研工業株式会社
〒350-1107 埼玉県川越市的場新町21-2

1. 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。これは高分圧下（約2気圧）で溶解していた二酸化炭素が栓を抜くと大気圧下での溶解度を

超えて溶けきれなくなるためである。

高圧下の海底熱水や海底冷湧水あるいは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。このような流体を例えばニスキン採水器やアルビン採水器（Von Damm *et al.*, 1985など），ピストンシリンダー採水器（Tsunogai *et al.*, 1994など）のような圧力保持型でない一般的な採水器を用いて採取して地上に持ち帰ると，その途中で揮発性成分が大気圧下での溶解度を超えて発泡してしまい，生じた気体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揮発性成分の正確な濃度や同位体比を求めることはできない。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等に関する研究，③海底下に生息する始原的微生物の代謝に関する研究，④沈み込み帯における物質循環に関する研究，⑤二酸化炭素に富んだ火口湖に関する研究（日下部，2001），といった多方面の重要な研究の進展に不可欠である。本研究では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。

2．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を最小限に抑えるための装置である。「しんかい2000」や「しんかい6500」などの潜水調査船のペイロードに取り付けて使用することを念頭に置いて設計した。Fig. 1およびFig. 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Fig. 3には，「しんかい6500」に取り付けた時のWHATSの様子を示す。またこれらの図には各部の名称を付記した。WHATSの詳しい仕様はTable 1に示した。さらにFig. 4には採水器の全体システムの模式図を示した。

この採水器はステンレス製ガスタイト容器（Fig. 1のcylinder；内容積150 cm^3・内面は複合電解研磨に

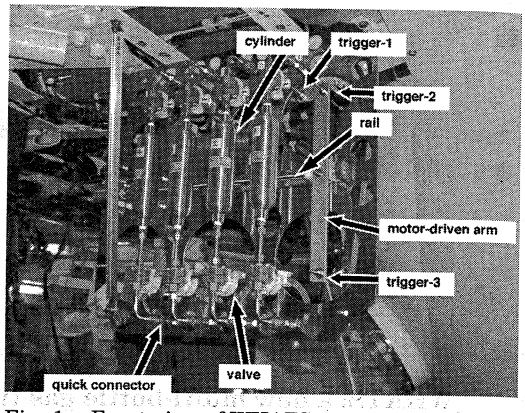

Fig. 1 Front view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 2000*.

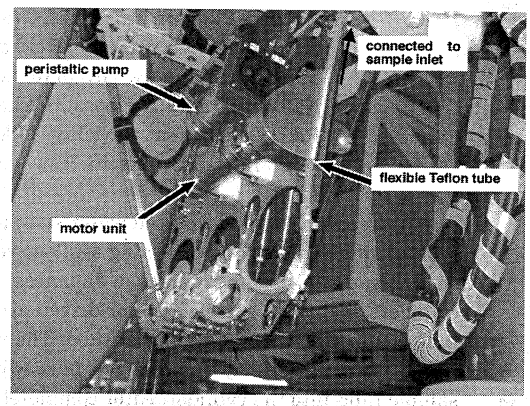

Fig. 2 Rear view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 2000*.

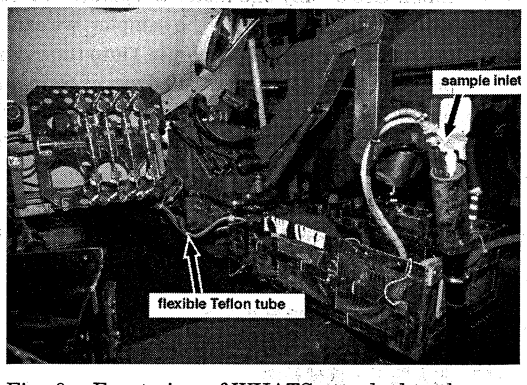

Fig. 3 Front view of WHATS attached to the payload of *Shinkai 6500*.

Table 1　The specifications of WHATS.

Maximum operational depth	3,000 m*1
Maximum sample pressure in bottle	40 MPa*2
Sample volume	150 cm^3×4 bottle
Pumping rate	120 cm^3/min.
Power required	DC 19-32 V/1.0 A
Dimension	D 605 mm × W 660 mm ×H 287 mm
Weight (in water)	28.0 kg
Weight (in atmosphere)	35.2 kg

*1 maximum pressure that the peristaltic pump can be used

*2 maximum pressure that the valves attached to bottles can be used

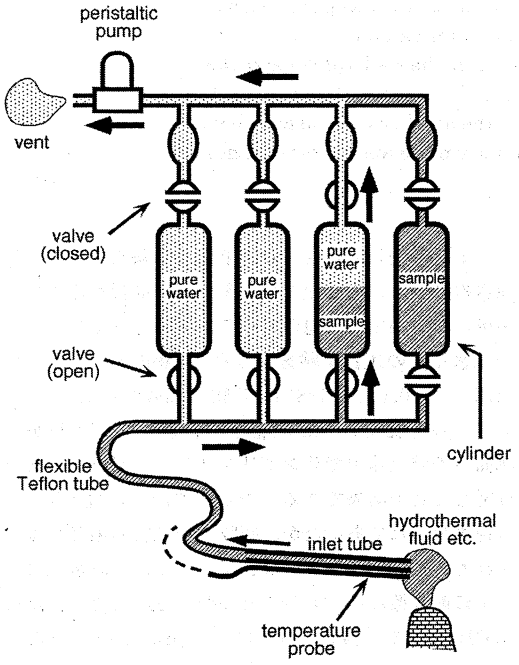

Fig. 4　Schematic diagram showing the sampling system of WHATS sampler.

より不活性処理済み・57 MPa 耐圧）4本，各ガスタイト容器の両端に2個ずつ計8個のボールバルブ（Fig. 1 の valve・40 MPa 耐圧），バルブ開閉アーム（Fig. 1 の motor-driven arm），同制御用のドライブユニット1台（Fig. 2 の motor unit），ペリスタ型のポンプユニット1台（Fig. 2 の peristaltic pump），テフロン製のフレキシブルチューブ（Fig. 2 の flexible Teflon tube）などの各部からなっている。潜水船の28 V 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船内からの指令により随時作動させることができる。

3．作動原理

本採水器は，ドライブユニットによって三つのトリガー（Fig. 1 の trigger 1/2/3）のついたバルブ開閉アームを移動と停止を繰り返しつつレール（Fig. 1 の rail）上を一方向（Fig. 1 で右から左）に動かすだけで8個のボールバルブの計12回にもおよぶ開閉動作を制御する。ボールバルブは90度ずつの回転で開→閉→開→閉が切替出来るものを選んだ。バルブ開閉アームの移動によるバルブ開閉の原理を Fig. 5 に示す。まず4本の容器内をすべて純水で満たした上でバルブの片側（Fig. 4 および Fig. 5 で上側に描かれた方のバルブ）をすべて閉じ，もう片方（下側）をすべて開いた状態で潜航し（Fig. 5 の一番右の図の状態），試料採取直前にバルブ開閉アームの最初の移動で4本の容器のうちの一番右の1本について上側のバルブを90度回転させて開状態に変えることで両端を開放状態にして，一端バルブ開閉アームを停止する（Fig. 5 の真中の図の状態）。試料吸入口が目的の場所（試料湧出孔など）にかざされた状態でポンプを作動させると，試料を毎分120 cm^3のゆっくりとしたスピードで開放状態のガスタイト容器内に引き込むことができる。他の容器は上端が閉まっているため試料は流入しない。十分試料を流して容器内に予め満たしてあった純水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それぞれ90度回転させることで閉め，容器を完全閉鎖系とする（Fig. 5 の左の図の状態）。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種の試料が採取できる。採取した試料は両端のバルブが閉じられたままとなり，船上へ潜水艇が回収されるまで容器内に密封される。採取された熱水試料は容器内に「海底とほぼ等しい圧力」（第5章参照）のまま密閉保持され，たとえ試料が揮発性の溶存物質に富んでいたとしても，母船に回収されるまで含有成分の散逸は起きない。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採水器本

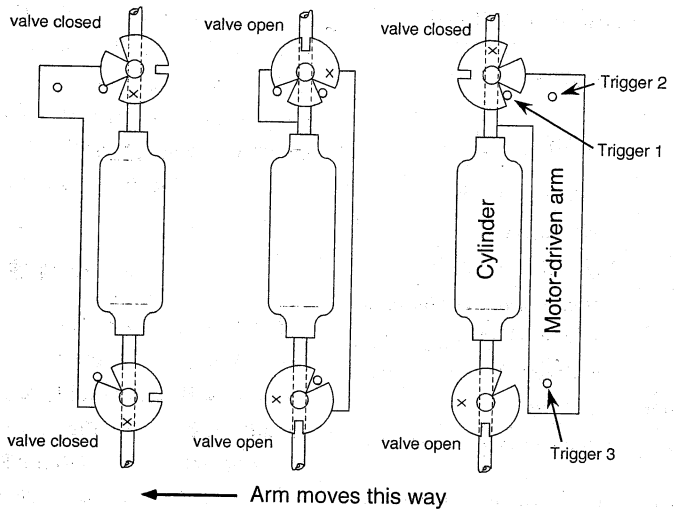

Fig. 5 Schematic diagram showing the way to open/close the valves using three triggers on motor-driven arm. Each figure corresponds to the stage of before sampling (right), during sampling (middle), and after sampling (left), showing the relative position between the ball valves and the motor-driven arm. The valve is closed when the cross mark on the rotating disk comes on the axial position of each bottle, whereas the valve is open when the mark sits the other positions.

体から取り外して船上実験室に持ち込み，接続部を良く洗浄・乾燥させた上で専用の真空ラインに接続し，溶存揮発性成分の抽出・回収作業に供する。

なお実際の使用に際しては，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する（Fig. 4 の temperature probe）。また潜水船が持参する他のペイロード機器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」の場合はペイロードの左端（Fig. 1，2），「しんかい6500」の場合は耐圧殻の下（Fig. 3）に本体を装着した。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に組み込まれたプログラムによって，潜水調査船内の乗船者が採水ボタンを押せば自動的に一連の試料採取作業が制御されるようにした。

4．採取試料の信頼性に関する考察

2001年の夏から使用を開始したが，これまで100本を超える試料の採取に成功し，この種の海洋機器としては画期的な採水成功率（90%以上）を記録している。また採取した試料への汚染（予め満たしておいて純水の試料への汚染や試料と接する採水器本体からの汚染）についても問題がないことを確認するため，他の採水器との比較実験を行った。Table 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）において，海底から海面への浮上途中でサンプリングした一般海水試料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 CH_4濃度を，1986年11月に同一海域で船上からニスキン採水器を用いて試料採取・分析した時の結果（Tsunogai *et al.*, 1998）と比較したものが Table 2 に示してある。このような一般海水試料は湧水試料と違って大気圧下で発泡するほどガス成分は溶けておらず，従ってニスキン採水器で採取した試料でも十分信頼できると考えられる。WHATS で採取した試料の CH_4濃度の鉛直分布は過去の同一海域におけるニスキン採水器で採取した試料のそれとほぼ一致しており，

Table 2 Observed salinity and CH_4 content of sea water sampled using WHATS at Suruga Trough. Literature CH_4 content of seawater from the same station in 1986 (Tsunogai *et al.*, 1998) is shown for comparison.

	Depth (m)	Salinity (‰)	CH_4 [this study] (n mol/kg)	CH_4 [Tsunogai *et al.*, 1998] (n mol/kg)
D 619-W 1	1,800	35	2.2	2.5
D 619-W 2	1,000	35	0.5	0.5
D 619-W 3	700	35	2.1	1.9
D 619-W 4	400	35	3.2	2.7

WHATS で採取した試料は少なくとも CH_4の汚染や脱ガスに関しては問題ないことが確認された。また本採水器のガス保存を行う容器本体およびバルブ部分は Evans *et al.* (1993) によって高圧水試料について溶存 CO_2の保存性の検証がなされたものと全く同じであり，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ないものと思われる。

5．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3,000 m の深さの試料を持ち帰る場合，この水は容器内で30 MPa（約300気圧）前後の圧力を示すことが予想され，取り扱いには注意が必要である。容器内に密閉採取した高圧試料について，安全上問題が発生しないか検討してみた。

5.1 液体試料採取時の容器内の圧力変化と試料の温度上昇の影響

WHATS を用いてある深度で液体試料を採取してから1気圧（0.1 MPa）の水面に戻った時に容器内外の圧力差がいくつになるか考えてみたい。この内外の圧力差が容器の使用限度圧力を超えると，容器が破損し場合によっては周囲の人間に危害が及ぶ可能性が出てくるためである。WHATS の場合，容器本体より両端に用いているバルブの方が使用限度圧力が低いので試料容器の内外の圧力差がその使用限度圧力である40 MPa を超えてはいけない。試料を採取した海底においては容器の内外ともに海底における水圧で容器内外に圧力差はない。しかし潜水船が浮上し水深が浅くなるにつれて周囲の水圧は低下する一方で密封された容器内は圧力が高い状態で保持される。もし浮上途中で試料の温度と容器の内容積に一切変化がなければ，試料を採取した深度における水圧がそのまま水面における容器内外の圧力差となる。したがって採取時の水圧を使用限度圧力以下に押さえておけばよい。

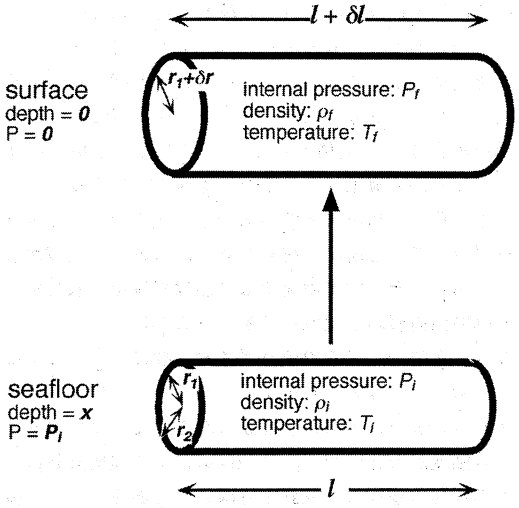

Fig. 6 Schematic diagram showing the expansion of gas-tight sample bottle due to depressurization.

しかし実際には浮上によって次第に内外圧差が拡大すると，試料を封入している金属容器はわずかながら変形（膨張）を起こす（Fig. 6）。液体は体積が膨張すると圧力が低下するため，容器内の液体の圧力（以下これを「内圧」と呼ぶことにする）は採取深度の水圧よりいくらか減少することが予想される。つまり海底で採取した液体試料は金属容器に封入したからといって必ずしも海底での採取時の圧力を保持するわけではない。また一方で海底を満たしていた深層水に比べると表面水の方が高温なので，試料は母船に回収されるまでの間に温度が少なからず上昇する。一定体積に封入された液体の温度が上昇するとこの液体の圧力

は増大する。

つまり持ち帰った容器の内外の圧力差を定量化するためには，試料を密封した場所における水圧以外に，試料密封後の試料容器の微小膨張に起因する内圧の減少と試料温度の上昇に起因する内圧の増大の効果も定量的に勘案して議論する必要がある。以下試料が塩濃度35‰の海水であった場合について定量的に数値を用いて議論し，試料採取の可能な最大深度を見積もる。

試料を封入した容器はFig. 1やFig. 5に示したように中央部は円筒形をしており，両端部分は内径が次第に小さくなる紡錘形状となってバルブにつながっている。最大採取可能深度を見積もるためには，まずこの容器の内容積が内外圧差に応じてどの程度変化するかを見積もる必要がある。これは容器形状と容器材質およびバルブ部分の設計強度から有限要素法などの数値解析によって見積もることが出来る。しかしながら，海底から海上に至るまでの深層水の状態変化に応じた容器の変形を考えているから，汎用の構造強度解析プログラムを用いて解くためには煩雑な前処理が必要である。そこで本論文では容器は両端を平板で閉じた厚肉円筒容器と近似して考えることにした。つまり容器の膨張は円筒の内径と長さが一様に大きくなるように起きるとする（Fig. 6）。バルブを含む両端の紡錘形状の部分は適切に強度設計がされていれば平板よりも強度が大きいから，この近似による強度計算は実際の容器の強度の下限界を見積もるであろう。言い換えると容器の破損や内容物の圧力変化に対しては安全側の設計基準，すなわち試料採取深度について最浅の限界深度を与える。さらに以下に示すように構造強度計算が定式化されるので，数値計算に比較してたいへん見通しのよい解析が可能となる。

いま水深x（標準）(m) で金属容器（内半径r_1 mm，外半径$r_2$mm，長さl mm）に密封した深層海水試料をゆっくりと水深0（m）まで持ち帰ったとする。この時の内圧をP_fとすると，容器の外の圧力は内圧P_fに比べると0と近似できるのでこれが内外の圧力差に相当し，これを用いると力の釣り合い状態における金属容器の内径の変形Δrと長さ方向の変位Δl以下のように表すことが出来る（Gere and Timoshenko, 1984）。

$$\frac{\Delta r}{r_1}=\frac{1-2\upsilon+(1+\upsilon)\left({}^{r_2}/_{r_1}\right)^2}{\left({}^{r_2}/_{r_1}\right)^2-1}\frac{P_f}{E}$$

$$\frac{\Delta l}{l}=\frac{1}{\left({}^{r_2}/_{r_1}\right)^2-1}\frac{P_f}{E}$$

但しυはポアソン比，Eはヤング率である。本採水器に通常使用する金属容器は，内半径$r_1=19.3$(mm)，外半径$r_2=25.4$ (mm)，長さ$l=203$ (mm) であるので，$\upsilon=0.3$，$E=197$（GPa；一般的なステンレス鋼の値）を用いると，

$$\frac{\Delta r}{r_1}=1.84\times10^{-5}P_f \tag{5.1}$$

$$\frac{\Delta l}{l}=6.93\times10^{-6}P_f \tag{5.2}$$

一例として金属容器内外の圧力差P_fが限度圧力一杯の40（MPa）であった場合について内径の変形Δrと長さの変形Δlを計算してみると，

$$\Delta r=0.014\ (\mathrm{mm})$$
$$\Delta l=0.056\ (\mathrm{mm})$$

となる。すなわち限度圧力下では試料容器の内径は0.014（mm）ほど，また長さは0.056（mm）ほど膨張している。膨張率はそれぞれ0.07%と0.03%程度である。

また試料を採取した水深x（m）における試料の密度をρ_iとし，これを水深0（m）まで持ち帰った時の容器内の密度をρ_fとすると，

$$\frac{\rho_i}{\rho_f}=\frac{1/\pi r^2 l}{1/\pi(r+\Delta r)^2(l+\Delta l)}$$
$$=1+2\frac{\Delta r}{r_1}+\left(\frac{\Delta r}{r_1}\right)^2+\frac{\Delta l}{l}+2\frac{\Delta l}{l}\frac{\Delta r}{r_1}+\left(\frac{\Delta r}{r_1}\right)^2\frac{\Delta l}{l}$$

である。$\frac{\Delta r}{r_1}\ll1$，$\frac{\Delta l}{l}\ll1$より，2次以上の項を無視すると

$$\frac{\rho_i}{\rho_f}=1+2\frac{\Delta r}{r_1}+\frac{\Delta l}{l}$$

という関係が成り立つ。式（5.1）と式（5.2）を代入すると，

$$\frac{\rho_i}{\rho_f}=1+4.37\times10^{-5}P_f \tag{5.3}$$

これは海水面上まで浮上させた容器内の液体一般が満たす関係であるが，中に封じた液体は海水であるのでその状態方程式も条件に加える必要がある。海水の密度ρは一般にその温度Tと圧力Pの関数として以下

のように記述することができる（気象庁，1990）。

$$\rho(T,P)=\frac{\rho(T,0)}{1-P/K(T,P)} \qquad (5.4)$$

但し$K(T,P)$はその温度と圧力条件における体積弾性率であり，$\rho(T,0)$は1気圧下のその温度における35‰海水の密度である。

試料の採取水深x（m）さえ決まれば採取時の試料温度T_iと内圧（採取時の水圧）P_iが決まるので，式（5.4）を用いることでρ_iが決まる。つまりρ_iは採取水深xのみの関数として記述される。また同じく式（5.4）を用いると表面まで浮上した時の最終内圧P_fと最終温度T_fを変数としてρ_fも記述できることになる。そこで式（5.4）によって採取水深xのみの関数として記述したρ_iと式（5.4）を用いてP_fとT_fの関数として記述したρ_fを式（5.3）へ代入すると，式（5.3）は採取水深xと最終内圧P_fと最終温度T_fの関係式となり，最終温度T_fを何らかの方法で決めてやることで，各採取水深xに対する最終内圧P_fを求めることができる。そこで最終温度T_fを，①浮上による温度変化はなく採取時の温度（深層水の温度である2°Cとした）のままであった場合，②採取時より10 K温度上昇した場合，③採取時より20 K温度上昇した場合，の三つの場合を想定し，それぞれの場合について各試料採取深度xに対する最終内圧P_f（すなわち表面における容器内外の圧力差）計算した。結果をFig. 7に示す。

水深2,000 m（水圧20 MPa）で採取した海水を例に取ると，Fig. 7より，もし温度変化がなければ内圧は約18 MPaで，容器の膨張で10%ほど内圧が減少することがわかる。本採水器WHATSは厳密な意味では試料を採取した現場環境をそのまま保持した「保圧」採水器ではないが，その圧力損失量はせいぜい10%程度であるのでほぼ保圧採水器と考えて差し支えないことがわかる。またもし温度が10 Kほど上昇すると内圧は約22 MPa，20 Kほど上昇した場合には内圧は約28 MPaへと上昇することもわかる。

容器の使用限度圧力である40 MPaを超えない採取深度を求めてみると，温度変化がなければ水深4,400 m，＋10 Kの温度変化を勘案すると水深3,900 m，＋20 Kの温度変化を勘案すると水深3,250 mが使用限界であることがFig. 7から求まる。これらはいずれも本採水器の使用限界深度である水深3,000 m（Table 1）より十分深い。著者が実試料採取時に金属容器に触れて検証した限りでは，温度上昇はせいぜい5 Kから10 K程度であると考えられるので，採水器の使用限界深度を守る限り温度上昇の影響は安全性に問題ない。また容器の使用限度圧力である40 MPaはブローアウト防止機能を備えた両端のバルブの使用限度圧力であって，容器本体の耐圧である57 MPaにはまだ大きく余裕がある。従って何らかの理由で40 MPaを超えても容器本体が破裂して人体に直接危害を与える危険性が出てくるわけではない。

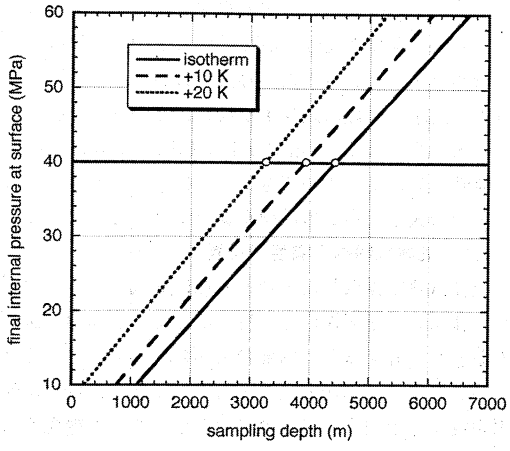

Fig. 7 Relationship between sampling depth and final internal pressure of the sample bottle at the surface.

ただ安全に万全を期す意味で2,500 mを超える深海底で採取した液体試料の温度管理には注意を払ったほうがよいであろう。可能であれば回収後すみやかに冷水に浸けるのが望ましい。また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。なおいくら冷却するのが望ましいからといっても，間違っても冷凍しないように気をつける必要がある。一定体積中の海水が冷凍されて氷になってしまうと，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。

また揮発性成分に富んだ液体試料を採取した場合について触れておく。まず温度と容器の内容積が変わらない場合は，どんなに溶存揮発性成分に富んでいても容器内の内圧は海底で採取した時の水圧そのままであり，揮発性成分が少ない試料との差はない。次に浮上による温度上昇等によって内圧が変化した場合についてであるが，この場合も内圧が海底で採取した時の水圧より増える限りにおいてはその内圧は容器内を満た

している流体の性質（状態方程式）によって決まるものであって揮発性成分の溶存量の大小はこれにほとんど影響を与えない（ただし容器の膨張等によって採取時より内圧が大幅に減少する場合にその減少を緩和することはありうる）。結論として採取した液体試料が揮発性成分に富んでいても，それによって容器の内外圧差が増大して容器の破損を促進することはない。

5.2 気体試料への温度の影響

液体試料を採取した場合と同様に海底で噴出していた気体試料を密閉採取して持ち帰ってくる途中で試料の温度が上昇すると，内部の気体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使用限度圧力を超えて破損等につながることが懸念される。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ど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_i と T_i，温度上昇後の内圧と温度を P_f と T_f とすると，

$$P_f = P_i \frac{T_f}{T_i} \tag{5.5}$$

となる。今水深1,500 m（15 MPa）で採取された2°Cの気体が，体積不変で22°Cになった場合を例にとって計算すると，内部の圧力上昇は1 MPa（約8%）であって，全圧は約16 MPa程度であることがわかる。気体試料の場合には液体試料よりもさらに温度の影響は問題とならない。これは気液が混合した試料でも同様である。

6．WHATSの特徴と他の採水器との比較

これまで深海底の熱水採取用に開発され，現在もなお通常使われている採水器としては，アルビン採水器（またはチタンシリンジ採水器，Von Damm *et al.*, 1985など），ガスタイト採水器（Edmond *et al.*, 1992など），真空引き採水器（Sedwick *et al.*, 1994など），ピストンシリンダー採水器（またはポンプ式採水器，Tsunogai *et al.*, 1994など），等圧採水器（Seewald *et al.*, 2001）などが挙げられる（名称はいずれも日本国内での一般的な呼称で正式名称ではない）。

WHATSの長所を上に挙げた他の湧水採水器と比較しながら列挙してみる。①ガスタイト試料が採取できる（アルビン採水器やピストンシリンダー採水器では脱ガスする），②多連式であり一台で複数種の試料が採取可能（アルビン採水器やガスタイト採水器や真空引き採水器や等圧採水器はいずれも採水各部が試料容器と一体になっているため複数種の試料を採取するためには複数台を用意する必要がある），③油圧系は一切不要（アルビン採水器やガスタイト採水器や真空引き採水器は潜水船の油圧系が利用できないと動作しない），④低速ポンプを利用してゆっくり試料を引き込むため高純度試料の採取が可能（真空引き採水器は一気に試料を真空容器内に引き込んでしまうため純度の高い試料が採れない），⑤各試料容器には二ヵ所の出入口があり試料をフローしながら容器内を試料で置き換えていくためデッドボリュームが存在せず原理的に100%の純度の試料が採取可能（WHATS以外は全て入口が一ヵ所でここから行き止まりの容器内に一方通行で試料採取するため容器の入口部分などに存在する容器内容積の数%程度のデッドボリュームを満たしていた流体が試料に混入している），⑥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（WHATS以外では採ガスは難しい），⑦本体の大部分を潜水船の視界外に装着可能で潜水船の視界を妨げない（WHATSとピストンシリンダー採水器以外は使用に際して採水器全体を潜水船の視界内に設置する必要がある），⑧耐圧容器やバルブには市販品を多用していて交換や部品の補充が簡単（この点に関してWHATSは真空引き採水器と並んで他より優位であると考えられる），⑨構造がシンプルなため動作が確実でメンテナンスも楽である（この点に関してWHATSは真空引き採水器と並んで他より優位であると考えられる）。

また逆に短所としては以下が挙げられる。①試料採取口と試料容器の間にテフロンチューブを使用しているため成分によってはここを通過する間の組成変化の懸念がある（アルビン採水器やガスタイト採水器や等圧採水器は試料採取口と試料容器が直結しているためこの懸念はほとんどない），②電力を必要とするため電力が利用できない潜水船では使用できない（アルビン採水器やガスタイト採水器や真空引き採水器は油圧系だけで動く），③試料容器の接ガス部にはわずかながらテフロンが用いられている（ガスタイト採水器の接ガス部はすべて金属である），④厳密な意味では試料は保圧ではない（等圧採水器は完全に保圧），⑤一台で採取可能な試料量は600 ml（ピストンシリンダー採水器では最大6 L程度の採水が可能），⑥最大使用水深は3,000 m（他は4,000 m以上）。

どの採水器を利用するか判断するためには，使用する潜水調査船の能力や採取する試料の性質，さらにその試料中の測定対象成分が何かという点をよく吟味す

る必要があるだろう。しかし上に挙げたWHATSの長所と短所を総合すると，試料量と使用水深の点さえ問題にならないのであれば，どのような用途に対してもWHATSは最も一般的で汎用性のある採水器と考えてよいと思われる。また使用水深の点はポンプユニットとドライブユニットの耐圧能力の改良で，また試料量の点はオプション部を増設することでそれぞれ対応が可能であり，需要があれば今後より汎用性が高い改良品を作ることにも容易である。

謝　辞

本採水器の開発に際して日油技研工業株式会社の皆様に大変お世話になりました。また産業総合技術研究所の中村光一博士と九州大学の石橋純一郎博士に数多くのご助言をいただきました。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，運航関係者，海洋科学技術センターの関係者の皆様に大変お世話になりました。宮崎大学農学部の三浦知之博士には写真を提供していただきました。査読者の岡山大学の日下部実博士と九州大学の石橋純一郎博士には本稿の改訂にあたり有益な助言を賜りました。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。本計画の関係者の皆様にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

Edmond, J. M., Massoth, G. and Lilley, M. (1992) Submersible-deployed samplers for Axial vent waters. *Ridge Events* **3**, 23–24.

Evans, W. C., Kling, G. W., Tuttle, M. L., Tanyileke, G. and White, L. D. (1993) Gas buildup in Lake Nyos, Cameroon: The recharge process and its consequences. *Appl. Geochem.* **8**, 207–221.

Gere, J. M. and Timoshenko, S. P. (1984) Mechanics of Materials (2nd ed.), Brooks/Cole Engineering, Monterey, California.

気象庁（1990）海洋観測指針．日本海洋学会．

日下部実（2001）カメルーン・ニオス湖ガス災害と地球化学．地球化学，**36**，137–147.

Sedwick, P. N., McMurtry, G. M., Hilton, D. R. and Goff, F. (1994) Carbon dioxide and helium in hydrothermal fluids from Loihi Seamount, Hawaii, USA: Temporal variability and implications for the release of mantle volatiles. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 1219–1227.

Seewald, J. S., Doherty, K. W., Hammar, T. R. and Liberatore, S. P. (2001) A new gas-tight isobaric sampler for hydrothermal fluids. *Deep-Sea Res. Part I* **49**, 189–196.

Tsunogai, U., Ishibashi, J., Wakita, H. and Gamo, T. (1998) Methane-rich plumes in Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization. *Earth Planet. Sci. Lett.* **160**, 97–105.

Tsunogai, U., Ishibashi, J., Wakita, H. and Gamo, T., Watanabe, K., Kajimura, T., Kanayama, S. and Sakai, H. (1994) Peculiar features of Suiyo Seamount hydrothermal fluids, Izu-Bonin Arc: Differences from subaerial volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.* **126**, 289–301.

Von Damm, K. L., Edmond, J. M., Grant, B. and Measures, C. I. (1985) Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**, 2197–2220.