

— 報告 —

環境シミュレーター OOVEE の製作

田村 肇^{1*}, 荒木 英一郎¹, 木下 正高¹, 浜野 洋三¹, 柏瀬 憲彦¹, 川田 佳史¹

海底および海底掘削孔内に設置するセンサーの長期安定性評価を行なうことを目的として、長期にわたり安定した温度・圧力を維持できる環境シミュレーター OOVEE (Oil Operated Virtual Environment Equipment) を製作した。OOVEEは、2台の温度安定性 ± 10 mKの恒温槽、安定稼働時の圧力安定性 ± 3 kPaの圧力天秤、容積6.6 Lの圧力容器からなっている。設定できる温度の範囲は $-2 \sim 175$ °C、圧力範囲は $1 \sim 100$ MPaである。評価試験を行い、22時間にわたり、圧力容器内の圧力を 60 ± 0.05 MPa、温度を 2 ± 0.008 °Cに保つことに成功した。圧力の変動は圧力天秤のピストン回転加速によるものであり、2時間程度であればより安定した圧力を連続して供給できる。恒温槽の温度均一性は、深さ10 cm以上の部分で ± 15 mKである。

キーワード：センサー，孔内計測，長期安定性評価

2010年9月16日受領；2010年12月27日受理

1 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

*代表執筆者：

田村 肇

独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

046-867-9318

jim-tamura@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Report —

Development of Oil Operated Virtual Environment Equipment (OOVEE)

Hajimu Tamura^{1*}, Eiichiro Araki¹, Masataka Kinoshita¹, Yozo Hamano¹, Kazuhiko Kashiwase¹, and Yoshifumi Kawada¹

A test system for seafloor / borehole sensor, OOVEE (Oil Operated Virtual Environment Equipment), was equipped for long term sensor stability evaluation. OOVEE consists of two ± 10 mK stability isothermo baths, a ± 3 kPa stability (short term typical value) deadweight tester, and 6.6 L pressure chamber. The range of temperature is -2 to 175 degree Celcius, and of pressure 1 to 100 MPa. Pressure and temperature in the chamber were kept at 60 ± 0.05 MPa and 2 ± 0.008 degree Celcius for 22 hours evaluation. Variation of pressure came from acceleration of piston rotation, and more stable pressure can be supplied within 2 hours. Temperature homogeneity of the isothermo bath was ± 15 mK beneath 10 cm depth.

Keywords: Sensor, borehole observatory, long-term stability evaluation

Received 16 September 2010 ; Accepted 27 December 2010

¹ Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

*Corresponding author:

Hajimu Tamura

Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Tel. +81-46-867-9318

jim-tamura@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. 序

JAMSTECでは、海底に各種のセンサーを設置し、観測を行なっているほか、海底掘削孔内にセンサーを設置し、10年程度の期間にわたり継続的に観測を行なう長期孔内計測の実施を計画している。

センサーが時間経過に従ってドリフトを起こすことは、よく知られている。例えば水圧計について、Watts and Kontoyiannis (1989) が個体ごとに異なるがシステムティックなドリフトを示すことを報告している。またKobata (2005) は、ブルドン型高圧トランスデューサーの長期ドリフトが圧力やその変動の履歴に応じて変わること指摘すると同時に、個々のトランスデューサーのドリフト傾向を把握したうえでそれを一次式で補正することを提案している。

長期にわたる観測に際して、観測点の事情に即した環境で事前にセンサーの特性を把握することは重要である。特性の把握に際しては、観測点においてセンサーにかかると予想される温度・圧力を再現し、特性を把握しうる精度で安定させなければならない。観測装置は通常耐圧容器に收容されたセンサーアセンブリとなるため、相応の大きさとなるそれを收容できる必要もある。

このような評価を行なうため、最大直径130 mm、長さ500 mmのセンサーを收容して海底および海底掘削孔内の温度・圧力を安定して再現することを目的とする試験装置「OOVEE (Oil Operated Virtual Environment Equipment)」を製作した。

本報告では、OOVEEの構成と、動作試験の結果について報告する。

2. 装置の概要

試験装置 (OOVEE: Oil Operated Virtual Environment Equipment) は、大容量を加圧する加圧系 (OOVEE-RP)、圧力を一定に保つための油圧制御系 (OOVEE-PC) と、圧力容器 (Pressure Chamber)、これらを結ぶ圧力配管系、そして温度を一定に保つための恒温槽から構成される (Fig. 1)。OOVEE-RPは油圧ブースターポンプ (Oil Booster Pump: Haskel ASFD-202) と手動バリエブルボリューム (Variable Volume: HIP MPG1-30000) から構成され、圧力容器の初期加圧を行う。OOVEE-PCは圧力制御の核となる部分であり、圧力天秤 (Deadweight Tester: DHI PG7302) と圧力制御ポンプ (Pressure Control Pump: DHI PPCH) から構成される。圧力容器は、容積約6.6 L、耐圧241 MPa、使用温度上限300°CのSUS630製容器である (Fig. 2)。これらを繋ぐ圧

力配管系には、系の圧力を読み取るための基準圧力モニター (Reference Pressure Monitor: DHI RPM4) が含まれる。圧力は1 ~ 100 MPaを供給できる。恒温槽は、冷凍機を使用する低温用 (OOVEE-LT: 離合社400-PBC) と使用しない高温用 (OOVEE-HT: 離合社400-PBH) が各1台である。温度範囲は、OOVEE-LTが-2~60°C、OOVEE-HTが60~180°Cである。ただし圧力媒体であるdi-2-ethylhexyl-sebacateの耐用温度が175°Cであるため、温度上限はこの温度となる。

圧力容器と圧力制御系は一そろいしかないので、基本的には恒温槽のいずれかと圧力容器、圧力制御系を組み合わせ

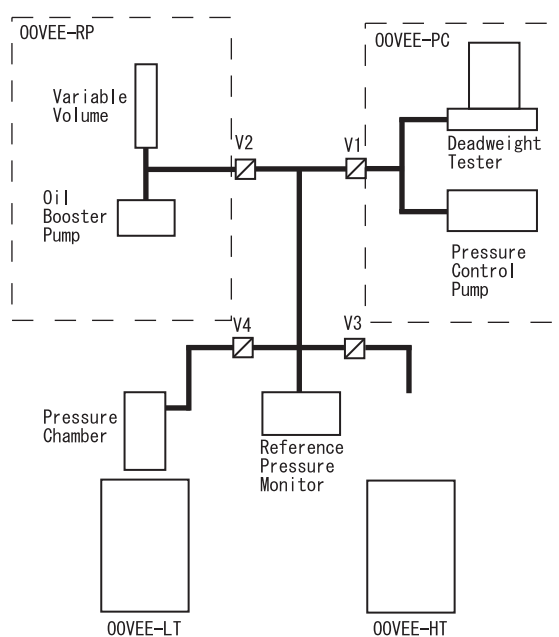


Fig. 1. Schematic of OOVEE. OOVEE consists of six parts: OOVEE-PC, OOVEE-RP, the pressure chamber, pressure tubings, and two isothermo baths (OOVEE-LT and OOVEE-HT). V1, V2, V3, and V4 are valves. OOVEE-PC is the pressure control including a deadweight tester and a pressure control pump. The pressure chamber is pressurized first by rough pressurizing apparatus, OOVEE-RP, which includes a booster pump, and then controlled by OOVEE-PC after pressure adjustment by a variable volume included in OOVEE-RP. The pressure chamber's temperature is controlled by one of two isothermo baths, OOVEE-LT and OOVEE-HT.

図1. OOVEEの構成図。OOVEEは、OOVEE-PC、OOVEE-RP、圧力容器、圧力配管、そしてOOVEE-LTおよびOOVEE-HTの2つの恒温槽の、6つの部分に分けることができる。図中、V1、V2、V3、V4は配管を仕切るバルブである。OOVEE-PCは圧力天秤 (Deadweight Tester) と圧力制御ポンプ (Pressure Control Pump) を用いて圧力制御を行なう。圧力容器内の圧力は、まずOOVEE-RPの油圧ブースターポンプ (Oil Booster Pump) を用いて加圧し、手動バリエブルボリューム (Variable Volume) を用いて圧力を微調整したうえで、OOVEE-PCで制御する。圧力容器の温度は、2つある恒温槽 (OOVEE-LTおよびOOVEE-HT) のいずれかで制御する。

せることになる。OOVEE-LT と OOVEE-PC の組合せの場合 OOVEE-LT+PC, OOVEE-HT との組合せの場合 OOVEE-HT+PC と表記する。

2.1. 圧力容器

Fig. 2 に圧力容器の構造を示す。Fig. 2a が容器本体を含む全容で、直径 130 mm、深さ 500 mm の円筒空間がある。蓋の凹凸や底部の丸みを無視すると、容積は約 6.6 L となる。圧力媒体を導入するポートは容器側面と蓋の二箇所を用意されており、側面のポートから圧力媒体を導入し、蓋のポートから空気抜きを行なう。容器本体の上部には段差が設けられ、その上の内壁にねじが切っており、段差部分で蓋を支え、その上から押さえねじで蓋を押して固定する。

蓋は上下に段差のある独楽状の形状をしており (Fig.

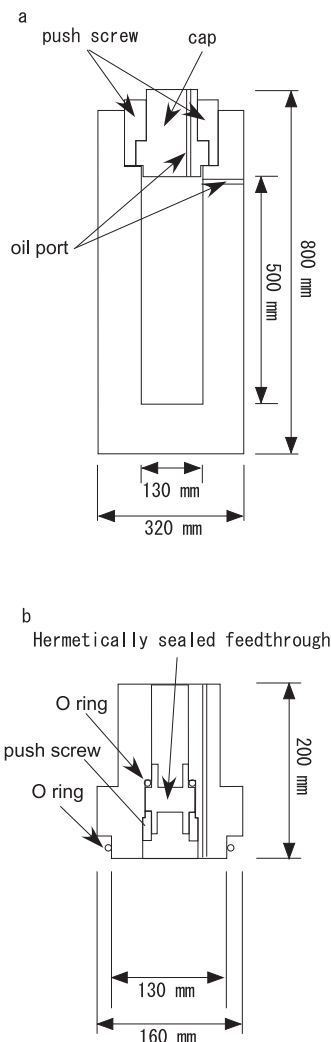


Fig. 2. The pressure chamber. a: total image of the pressure chamber. b: cap of the pressure chamber.

図2. 圧力容器の断面図。a は圧力容器全体の断面であり、b は蓋の断面図である。

2b), 下部は容器本体の段差から 3 cm ほど中に入り込む。この部分に JIS B 2401 4種 D フッ素ゴム Oリングをはめており、これで油圧をシールする。下部にはハーメチックシールのフィードスルー電極 (16 極) がはめ込まれている。この部分は円筒ねじで下から押すようになっており、銀メッキ SUS304 Oリング (日本バルカー工業) を上下に押し潰す形で油圧をシールする。このほか蓋には、前述の通り油圧ポートが開いており、圧力媒体充填時の空気抜きに使うほか、HIP HF4 に互換の配管を用いて圧力計などを繋ぐことも可能である。また蓋底面には M3 のねじが 3 箇所切られており、これでバスケット固定用の金具をとめるほか、機材を吊るすことも可能である。

2.2. OOVEE-RP

OOVEE-PC に含まれる制御用ポンプ DHI PPCH は、制御の精度は高いが吐出量が小さく、圧力容器のような大容積を昇圧するには不向きである。このため、補助の加圧系を用意した。Haskel ASFD-202 油圧ブースターポンプは空気圧で動作し、毎分 2.4 L の吐出量である。

油圧ブースターポンプは圧力の微妙な調整には向かないが、加圧後、圧力制御を OOVEE-PC に引き渡すためには、OOVEE-RP と OOVEE-PC の圧力を 0.01 MPa のレベルで釣り合わせる必要がある。このため、手動バリアブルボリューム HIP MPG1-30000 を用いて圧力を微調整する。

OOVEE-PC に圧力制御を引き渡した後は、OOVEE-RP はバルブ V2 で切り離す。

2.3. OOVEE-PC

圧力制御の核となる OOVEE-PC は、DHI の PG7302 と PPCH の組合せである。PG7302 は di-2-ethylhexyl-sebacate を圧力媒体に用いる圧力天秤で、自動重錘加除装置 AMH を備え、圧力制御ポンプ PPCH を制御することで、理想的な条件では設定圧力を ± 30 ppm で維持することが可能である (DH Instruments, 2004; Bair and Delajoud, 2005)。

PG7302 と PPCH を組み合わせた場合に圧力を制御可能な容量は、300 mL とされる。しかしながら、OOVEE の製作に際して、この容量は圧力制御系の温度を安定させることで大きくできると考えた。この容量は圧力媒体容器の容量の問題であると同時に、圧力ないしは圧力媒体の体積が変動した場合にポンプが迅速に対応できる吐出量の点からも制約される。熱膨張係数は、一般的に大きいとされるシリコンオイルで $0.001/^\circ\text{C}$ 程度であり (信越化学工業, 2008), 300 mL のシリコンオイルの温度が例えば 2°C 変化した場合 0.6 mL の体積変化を起こす。一般的な空調のもとでは数分間で 2°C 程度の温度変化が起こることはままあり、PG7302 と PPCH の組合せもこのような状況には対

応していると考えられる。制御する容量を6.6 Lとした場合、体積変化を0.6 mLに抑えるには温度変動を0.09°C以内にすればよい。これがOOVEE-LTおよびOOVEE-HTの温度制御精度に対する制約条件となる。

圧力天秤は機構的にピストン部からの圧力媒体漏れが発生し、その分の圧力媒体補充が恒常的に必要となる。これは小さな量であるから、実験期間に応じた漏れ量の予想値に対して十分余裕を持った外部タンクをPPCHに取り付けられればよい。PG7302のピストンの降下率はカタログ値で毎分0.4 mmであり、これは錘50 kgの場合の値である。錘100 kgの場合に降下率も倍になると考えると、毎分1 mm

程度を想定することになる。ピストン断面積は4.9 mm²であるから、一ヶ月の実験期間を想定すると200 mL程度が漏出することになる。他に漏れがある場合を考えても、500 mL程度を外部タンクに入れておけば十分対応できると考えられる。

2.4. OOVEE-LT

OOVEE-LTは容積約320 Lの恒温槽で、ヒーターと冷凍機を備える (Fig. 3)。冷凍機本体から冷却コイルまでの配管が2 mという制約があり、高温動作時の冷却コイルの取り外しが難しい。冷却コイルを取り付けたまま動作させる

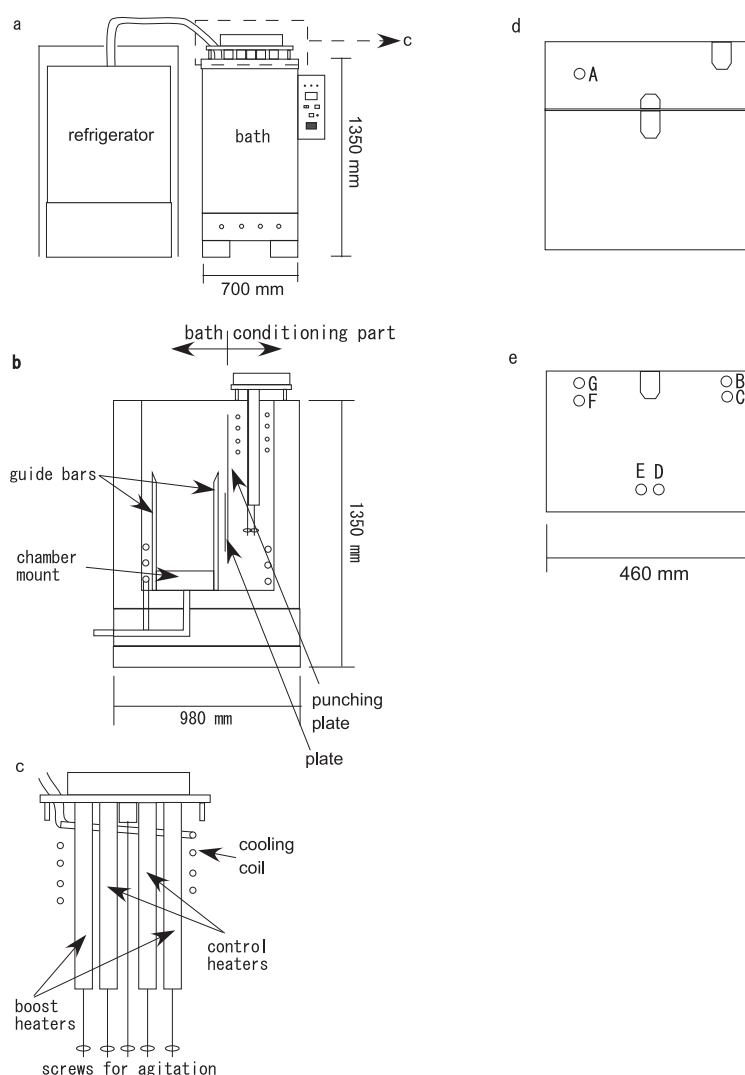


Fig. 3. OOVEE-LT. a: front view, b: cross section from right side, c: agitating unit, d: regular covers, e: cover for temperature measurement. A - G on d and e are thermometer sensor holes. OOVEE-LT consists of two parts of the conditioning part (right of Fig. 3b) and the bath (left of Fig. 3b). The agitating unit (Fig. 3c) is stored into the conditioning part as the pressure chamber (Fig. 2) into the bath.

図3. OOVEE-LTの構造など。aは前面図、bは右側からの断面図である。cは攪拌機である。dは通常用の、eは温度測定用の蓋である。OOVEE-LTは後半の温度調節部 (Fig. 3b右側) と前半の容器収容部 (Fig. 3b左側) に分けられる。温度調節部には攪拌機 (Fig. 3c) が収容され、容器収容部には圧力容器 (Fig. 2) が収容される。

場合 80℃が冷媒の耐用限界となるため、低温用のOOVEE-LTと高温用のOOVEE-HTの2台の構成となった。恒温槽の寸法は、圧力容器を収容できるように定めた。

2.3に示した通り、温度制御の精度は0.09℃以内でなければならない。OOVEEの製作においては、これを±0.01℃とした。圧力容器全体を均一な温度とするため、恒温槽内の熱媒体を十分に攪拌する必要がある。これは、温度不安定の原因となる、周囲と異なる温度をもった熱媒体の塊を作らないためにも、重要である。このため、5機のファンを約1500 rpmで回し、かつ熱媒体は指定の温度範囲で粘度が10 cSt以下になるシリコンオイルを用いることとした。シリコンオイルの粘度と揮発性、引火性は、粘度が低くなるほど揮発性、引火性が高くなる。このため熱媒体も、OOVEE-LTとOOVEE-HTでは異なるものを用いることとし、OOVEE-LTについては信越化学工業KF-96L-5csを用いた。

OOVEE-LTは大きく、温度調節部と容器収容部に分けることができる(Fig. 3b)。間にはパンチングメタルを配置し、その一部を板でふさぐことで熱媒体の流れを整える。熱媒体は上部で容器収容部から温度調節部に吸い込まれ、温度調節部で加熱冷却され、下部で温度調節部から容器収容部に供給される。温度調節部は、冷凍機の冷却コイルが4機の2 kWヒーターを含む攪拌部を囲む構造となっている(Fig. 3c)。ヒーターのうち2機は粗調整用、2機が温度維持用であり、温度維持用のヒーターはPID制御される。設定温度より0.2℃以下の温度になると、粗調整用ヒーターが働く。冷凍機は冷却能力2150 Wの冷凍機2機を連結している。冷凍機の廃熱が恒温槽周囲の気温に影響することを避けるため、恒温槽を設置する部屋に外部から張り出したスペースを作り、そこに冷凍機を納めている。

OOVEE-LTは基本的に開放型であるが、使用時はベークライト製の蓋をする(Fig. 3d)。蓋は二つに分かれており、手前側の蓋は通常のもので(Fig. 3d)、温度計を挿すための穴が開いたもので交換が可能である(Fig. 3e)。

2.5. OOVEE-HT

OOVEE-HTは容積約320 Lの恒温槽で、ヒーターを備える(Fig. 4)。恒温槽の寸法は、圧力容器を収容できるように定めた。

OOVEE-LTと同様、温度制御の精度を±0.01℃とした。熱媒体を十分に攪拌する必要も同様である。攪拌部の構成はOOVEE-LTと同じであり、熱媒体としては信越化学工業KF-96-20csを用いた。

構造もOOVEE-LTと共通しているが、整流塔が設置される一方、温度調節部と容器収容部の間を仕切るのがパンチングメタルのみである点が異なる(Fig. 4b)。またこれ

もOOVEE-LTと共通しているが、実験終了時の冷却促進のため、温度調節部と容器収容部にまたがるように冷却配管を備えている。冷却時は、この配管に空気もしくは水を通す。ヒーターは、2.5 kWが4機である。うち2機が粗調整用、2機が温度維持用である点はOOVEE-LTと同様で、制御についても共通である。ただし、OOVEE-HTは設定

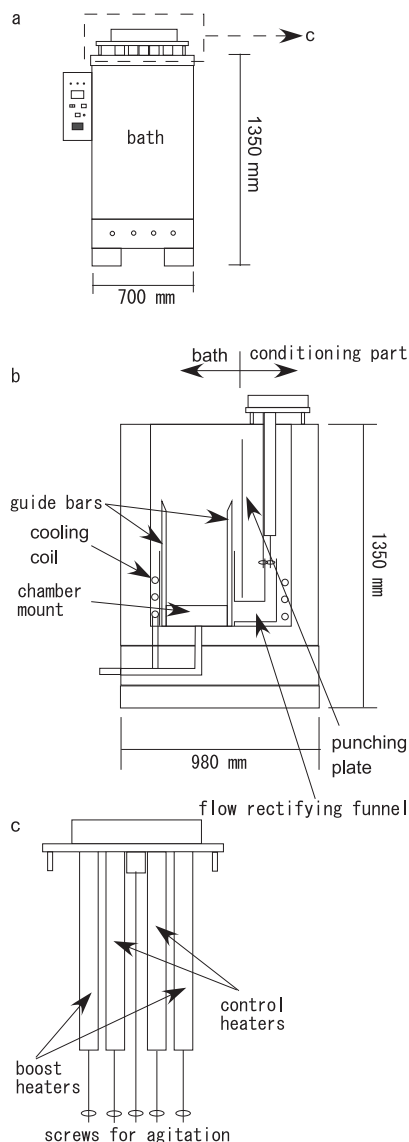


Fig. 4. OOVEE-HT. a: front view, b: cross section from right side, c: agitating unit. OOVEE-LT consists of two parts of the conditioning part (right of Fig. 4b) and the bath (left of Fig. 4b). The agitating unit (Fig. 4c) is stored into the conditioning part as the pressure chamber (Fig. 2) into the bath.

図4. OOVEE-HTの構造図など。aは前面図、bは右からの断面図、cは攪拌機である。OOVEE-HTは後半の温度調節部(Fig. 4b右側)と前半の容器収容部(Fig. 4b左側)に分けられる。温度調節部には攪拌機(Fig. 4c)が収容され、容器収容部には圧力容器(Fig. 2)が収容される。

温度を40℃以下にすることができない。

OOVEE-HTは基本的に開放型であるが、使用時はベークライト製の蓋をする点もOOVEE-LTと同様である。蓋は二つに分かれており、手前側の蓋は通常のものと、温度計を挿すための穴が開いたものとの交換が可能である。

3. 性能試験

OOVEEの性能を評価するため、圧力容器内の温度圧力を一昼夜維持する試験を行った。圧力制御実験はOOVEE-LT+PCを用いて行い、温度設定は2℃、圧力設定は60 MPaとした。

また恒温槽内の温度分布を確認する試験を行なった。OOVEEの恒温槽は開放型であるため、また温度調節部と容器設置部が完全に隔離されていないため、容器設置部の上部と下部、および温度調節部側から手前側に向かって、温度勾配が生じる可能性がある。

3.1. 圧力制御試験

3.1.1. 試験に用いた機材

前述の通り、試験装置としてはOOVEE-LT+PCを用いた。ただしOOVEE自体には圧力容器内の温度を監視する機能が存在せず、恒温槽の温度監視センサーの位置も圧力容器の位置とは異なる。また温度圧力を記録する機能を持たない。このため、圧力容器内、恒温槽内の圧力容器周辺および恒温槽に向かう油圧配管に白金測温抵抗体を設置し、Agilent 34970Aを用いて温度計測を行なうこととした。またドイツ式温度計 (Pfender and Villingner, 2002) 3本を、高さを変えて圧力容器内に設置した。記録のためには、OOVEEのRPM4から圧力測定値を読み出し記録するプログラムを製作し、Agilent 34970Aについては付属のBenchLink Logger IIを使用して、PCを用いて記録した。データのサンプリング間隔は5秒、圧力計測の積分時間は2秒、Agilent 34970Aによる温度計測の積分時間は0.17秒とした。ドイツ式温度計におけるサンプリング間隔は10秒とした。

3.1.2. 試験手順

各計測器およびPCについて時計あわせを行なったうえで、センサーを設置し、記録を行なった。

圧力容器の蓋にセンサーを設置したうえで、圧力容器を組み立て、圧力媒体の充填と漏れ試験を行った。圧力容器内に設置するセンサーは、圧力容器の蓋から銅線で吊り上げた。白金測温抵抗体のリード線は、蓋のフィードスルー端子に接続した。圧力容器の組み立ては、まず圧力媒体を側面の油圧ポートの1 cm 下まで充填したうえで、蓋を閉め、

固定ねじを締めた。その後側面の油圧ポートから、手押しポンプを用いて圧力媒体を充填し、蓋の油圧ポートから空気抜きを行なった。空気抜き後、蓋の油圧ポートを封止し、手押しポンプで内部を60 MPaに加圧して一時間放置し、漏れがないことを確認した。

圧力容器収納後、温度測定用の蓋のDの穴に白金測温抵抗体を設置した (Fig. 3e)。油面からの深さは30 cmであった。また恒温槽に向かう油圧配管に白金測温抵抗体を固定した。

温度および圧力の設定は、温度、圧力の順で行なった。これは、試験中の油圧系は閉鎖系となるため、温度を変動させると圧力媒体の膨張が圧力変動として現れ、制御できなくなると考えられるためである。OOVEE-LTの温度を2℃に設定し、圧力容器内の温度が安定するのを待つため二昼夜放置した。その際、温度の低下に伴って圧力媒体が収縮し、内部が負圧になることを防ぐため、加圧用ポンプで圧力容器内の圧力を20 MPaとしたうえで圧力制御系をバルブで切り離した。温度が安定した後、加圧用ポンプで圧力を60 MPaとし、バリアブルボリュームで圧力制御系の圧力と釣り合いを取った上で圧力制御を開始、一昼夜放置した。その後、油圧系をベントし、温度を20℃に設定し冷凍機を停止した。圧力容器内の温度が20℃を超えたことを確認してから圧力容器を取り出し、分解してセンサーを取り出し、ドイツ式温度計からのデータの取り出しを行なった。

3.2. 温度分布確認試験

3.2.1. 試験に用いた機材

OOVEE-LTとOOVEE-HTの双方について、白金測温抵抗体2個を温度調節部側下部と手前側上部に設置して温度分布を評価した。計測にはAgilent 34970Aを用いた。

加えて、OOVEE-LTについて、SAHF (Kinoshita et al., 2005) を用いて垂直温度分布を測定した。SAHFの校正を兼ねたため、校正済みの白金温度計での温度測定も行なった。SAHFの測定は10秒間隔とした。OOVEE-HTについてSAHFを用いた試験を行っていないのは、OOVEE-HTの温度レンジがSAHFの耐用温度を超えるためである。

3.2.2. 垂直温度分布試験手順

SAHFは設定後、OOVEE上のクレーンで吊下し、プローブ部分を恒温槽内に差し込んだ。白金温度計は温度測定用の蓋のDに設置した (Fig. 3e)。深さは30 cmであった。

温度は0℃から2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30℃と段階的に変化させ、30℃から再度段階的に0℃まで下げた後、20℃に設定して冷凍機を停止した。

4. 結果

4.1. 圧力制御試験

試験の結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。Fig. 5a および Fig. 6a は試験中の圧力変化と温度変化の全体である。Fig. 5b, c と Fig. 6b は圧力制御を行なった部分を拡大したものである。試験開始直後の部分に温度変化による圧力媒体の収縮と見られる圧力低下が見られるほか、60 MPa に加圧した直後の圧力が不安定になっていることが分かる (Fig. 5b)。これは、Fig. 6a 中央部のピーク状の温度上昇に対応しており、加圧により断熱圧縮を起こした熱媒体の温度の上昇とその後の冷却の過程が見えたものである。鋸歯状に上下を繰り返しているのは、圧力天秤で制御しようとしたものの冷却による圧力媒体収縮が制御ポンプの容量を上回ってしまい、圧力が下がってしまったためである。下がると一度圧力天秤を止めて (Fig. 1 の V1 を閉める) 加圧ポンプを繋ぎ (Fig. 1 の V2 を開ける)、加圧したうえで、圧力制御系に制御を引き渡す (Fig. 1 の V2 を閉めて V1 を

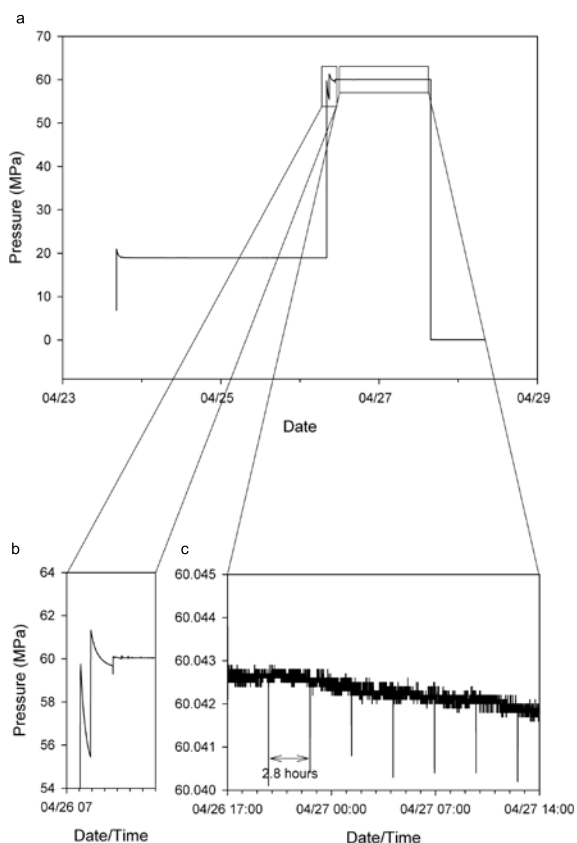


Fig. 5. Pressure variation during pressure holding test. a: overall variation, b: magnified box in a.

図5. 圧力維持試験中の圧力の変化。aが実験期間全体を通しての変化、bがaの枠の部分を拡大したものである。

開ける) 作業を繰り返し行なった。温度低下率は1時間当たり 10 mK 以下である必要がある。圧力が安定した4月26日17時以降、22時間にわたって、温度を $2 \pm 0.008^\circ\text{C}$ に保つことに成功した。

圧力制御時の圧力変動は、標準偏差で 66 ppm、最大値と最小値の差で 0.08 MPa であった。Fig. 5c をみると、定期的に圧力がピーク状に低下していることが分かる。これは圧力天秤のピストン回転の加速の際の圧力変動である。この変動が明瞭に見えているので、それ以外の部分での安定性はより良好であると考えられる。変動を示すデータを除去した場合の圧力変動は、8 ppm であった。圧力が低下傾向を見せているのは、後述の温度低下の影響が見えていると考えられる。

Fig. 6 において、恒温槽の温度変動に見られる短周期の変動成分が、圧力容器内の温度変動には見られないことが分かる。これは、圧力容器の熱容量が大きいために短周期の成分がフィルターされた結果と考える。測定結果を見る限り圧力容器に上下の温度勾配があるように見えるが、下

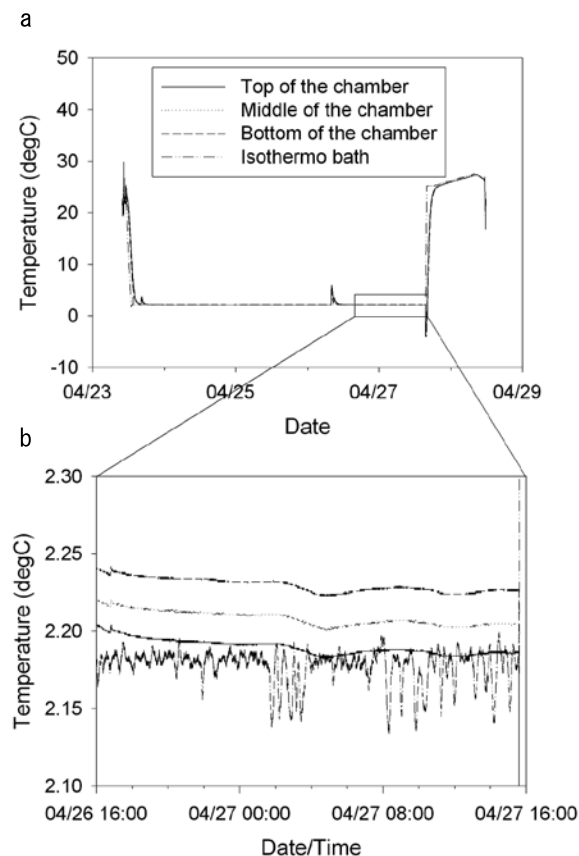


Fig. 6. Temperature variation during pressure holding test. a: overall variation, b: magnified box in a. Time range of the box is the same as Fig. 5.

図6. 圧力維持試験中の温度変化。aが実験期間全体を通しての変化、bがaの枠の部分を拡大したものである。拡大部分の時間はFig. 5と同じにしてある。

部の温度が高い勾配であり、次の垂直温度分布の試験結果とあわせて考えて、そのような温度勾配があるとは考えにくい。温度計の校正を行なうか、あるいは温度計の順序を入れ替えての評価を行なう必要があるだろう。

また圧力制御を開始した時点は加圧による温度上昇から7時間が経過しているが、その後一昼夜の記録であるにもかかわらず温度が低下していく傾向が見える。圧力制御には問題のない程度の変動ではあるが、圧力容器内を加圧する際の運用手順について、より長期間のデータの基づいた検討が必要である。なお圧力容器内に設置した白金測温抵抗体は、加圧したところ圧力依存の抵抗値増大が発生した(Kuyumchev et al., 1994)。このため評価に使用していないが、温度変動の傾向はドイツ式温度計と同様である。

4.2. 温度分布試験

白金測温抵抗体を用いた2点での評価では、OOVEE-LT、OOVEE-HTともに、温度差は0.03℃以内であった。

SAHFによる測定結果をFig. 7に示す。これは校正前の抵抗値であり、ばらつきにはサーミスタの特性と恒温槽の特性の双方が考えられる。データポイントの並び方には位置による規則性が見られないことから、ここで見られるばらつきは基本的にサーミスタの特性によるものと考えられる。

Fig. 7aの最初の山について、SAHF9-5のみ他と異なる傾向を示している。この部分を拡大したのがFig. 7bであるが、SAHF9の一番上のセンサーのデータのみが左肩の下がった変化をしていることが分かる。これと対応するSAHF8のデータ(SAHF8-5)は他のサーミスタと同様の変化をしていることから、この違いは設置条件の微妙な違いか(例えば吊り下げの際の高さの差など)、サーミスタの特性によるものと考えられる。

5. まとめ

海底および海底掘削孔内に設置するセンサーの長期安定性評価を行なうことを目的として、長期にわたり安定した温度・圧力を維持できる環境シミュレーター OOVEE を製作した。OOVEEの主眼は安定した静水圧の供給にあるが、制御する負荷容量が大きいため、温度を十分に安定させる必要がある。

評価試験を行った結果、OOVEEは、23時間にわたり、圧力容器内の圧力を 60 ± 0.05 MPa、温度を 2 ± 0.008 ℃に保つことに成功した。圧力の変動は圧力天秤のピストン回転加速によるものであり、2時間程度であればより安定した圧力を連続して供給できる。恒温槽内の温度分布は、30 mK

以内である。油面から10 cm以上の深さでは、温度の相違は認められなかった。

運用に際しては、温度が安定するまでに十分な時間を必要とする点に注意すべきである。評価試験の際に断熱圧縮によって発生した4℃の温度上昇から32時間以上経ても、温度の低下傾向が認められた。温度変化率が1時間当たり10 mK以下になるまで7時間を要したが、この間圧力天秤による制御ができなかった。

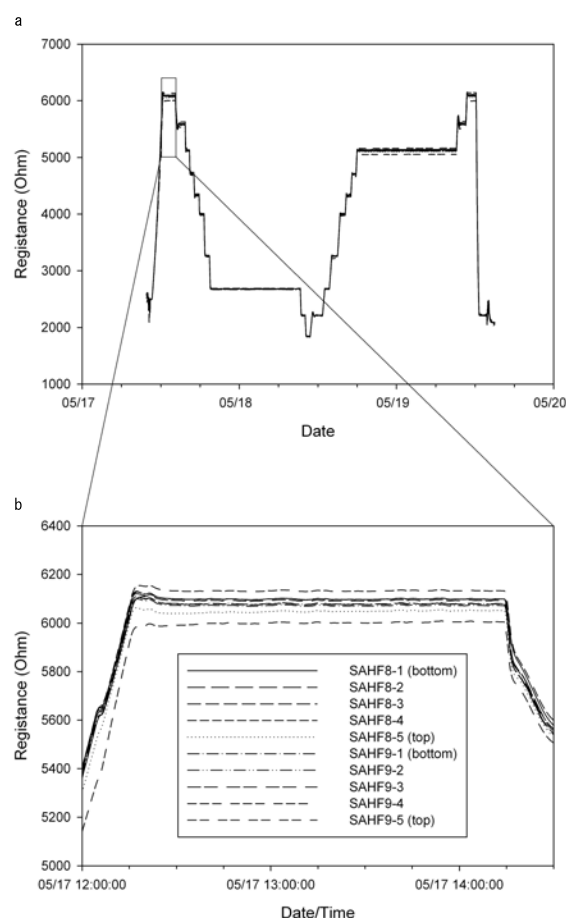


Fig. 7. Variation of SAHF reading (resistance) during temperature vertical variation evaluation. a: overall variation, b: magnified box in a. Legend is common in a and b. Temperature was increased with steps of 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, and 30 degree Celcius, then decreased with the same steps to 0 degree Celcius, and finally the control target temperature was set to 20 degree Celcius and the refrigerator was stopped.

図7. 垂直温度分布確認試験中のSAHF読み取り値の変化。aが実験期間全体の変化であり、bがaの枠の部分拡大したものである。凡例はaとbで共通である。温度は0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30℃と段階的に増加させ、その後同じ段階で0℃まで下げ、最終的に温度制御の設定温度を20℃とした上で冷凍機を停止した。

謝辞

海洋研究開発機構の伊藤久男博士、許正憲博士には、装置の製作に際して有益な助言をいただいた。東邦マーカントイル大井琢磨氏、石塚哲也氏、大手技研の大手孝悦氏、離合社の久信田啓一氏には、装置の製作に際してご尽力いただいた。高知大学の深瀬裕彬氏には、SAHF を用いた温度測定で助力いただいた。ここに謝意を表する。

引用文献

- Bair, M., and P. Delajoud (2005), Uncertainty analysis for pressure defined by a PG7601, PG7102, PG7202 or PG7302 piston gauge, Technical Note 7920TN01D, DH Instruments, 30pp.
- DH Instruments (2004), PG7000™ Piston Gauges PG7102™, PG7202™, PG7302™, PG7601™ (Ver. 2.05c and Higher) Operation and Maintenance Manual, DH Instruments, 208pp.
- Kinoshita, M., Y. Kawada, A. Tanaka and T. Urabe (2005), Recharge/discharge interface of a secondary hydrothermal circulation in the Suiyo Seamount of the Izu-Bonin arc, identified by submersible-operated heat flow measurements, *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 498-508.
- Kobata, T. (2005), Characterization of quartz Bourdon-type high-pressure transducers, *Metrologia*, 42, S235-S238, doi:10.1088/0026-1394/42/6/S20.
- Kuyumehev, A. A., V. M. Shul'ga, and Yu. A. Atanov (1994), Electrical resistance of platinum at a pressure of up to 1 GPa, *Measurement Techniques*, 37, 180-183.
- Pfender, M., and H. Villinger (2002), Miniaturized data loggers for deep sea sediment temperature gradient measurements, *Marine Geology*, 186, 557-570.
- 信越化学工業 (2008), シリコンオイルKF-96 性能試験結果, 信越化学工業, 36pp.
- Watts, D.R., and H. Kontoyiannis (1989), Deep-ocean bottom pressure measurement: drift removal and performance, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7, 296-306.