



観測にもとづく海底熱水活動および 海洋環境変化の地球化学的研究

蒲 生 俊 敬*

1. はじめに

このたび石橋賞を頂いたことに、喜びとともに身の引き締まる思いを強くしております。卓絶した能力もなく、人間関係も下手な私が、それでもいくつかの業績をまとめることができたのは、数えきれぬ多くの方々が厳しくも暖かく教示し、惜しみなく協力してくださったからに他なりません。ここにあつくお礼申し上げます。受賞記念論文のご依頼をいただいたのを機に、皆様のご厚情をひとつ、ひとつ思い出しながら、過去数十年に携わってきた研究について回顧してみようと思います。

2. 装置を自作する

大学院生およびPDとして、東京大学海洋研究所海洋無機化学部門（堀部研究室）で過ごした7年間に多くのことを学んだ。ガスクロマトグラフィーによる海水中の溶存気体分析法、海水中の溶存無機炭素中の炭素-14分析法、さらに海水中の溶存ラドン-222分析法をそれぞれ確立し、これらの手法をフィリピン海・日本海・鹿児島湾などでの研究に応用した。これらの分析のための装置は、堀部純男教授の指導のもとで自作していった。具合が悪ければ直し、白鳳丸や淡青丸に積み込んで使用することを繰り返した。データが蓄積され、研究成果を少しずつ

まとめることができた。

堀部研究室には、ガラス細工のための酸素ガスバーナー、ボール盤、汎用性の高い作業テーブル、頑丈な万力その他、工作器具やパーツ類が豊富に常備されており、また研究所の中に本格的なガラス工作室と金工室もあって「モノ作り」には理想的な環境が整えられていた。倉庫には木板、金属板、アングル材など豊富にストックされ、思い立ったその日にすぐ作業に取りかかることができた。図面を書き、アングル材を切り、ステンレスパイプやガラス管をつなぎ合わせて必要な実験装置を製作した。アイデア如何で、得られる分析精度が大きく左右されることを何度も体験した。

当時、250リットル×4筒式大量採水器（堀部・坪田、1977）、ベローズ型無汚染採水器（坪田、1985）など、世界の最先端を行く独創的な海洋観測機器が、堀部研究室において次々と実用化されていった。それらの開発の現場に居合わせ、生々しい熱気を肌で感じたことも、私にとって強い刺激となった。

余談だが、かつて潜水船「しんかい6500」による調査航海に乗船した際、自作の試料収納箱（蓋付き）を持参して、「しんかい6500」に取り付けてもらったことがある。ベニヤ板製だったせい、強度が足りず、海底作業中に蓋があっ

*東京大学大気海洋研究所教授

さりもげて役に立たなかったが、当時は、研究を始める第一段階には、まず装置の自作がなければならない、という強迫観念(?)に突き動かされていたようだ。この第一段階をクリアすると、その後の研究がすらすら進んだのである。

3. 海底熱水活動に関する化学的研究

3.1 白鳳丸でマリアナトラフへ

1982年1月から3月にかけて、西太平洋海域で白鳳丸 KH-82-1次航海が実施された。堀部教授が主席研究員で、東京出港後ポナペ島(ポンペイ島)とグアム島に途中寄港した。グアムでは、米国スクリップス海洋研究所の Harmon Craig 教授門下の大学院生 Kyung-Ryul Kim (現在ソウル大学校教授)が、自作のガスクロマトグラフ一式を担いで乗船してきた。グアムから東京に向かう間に、マリアナトラフ背弧海盆の海底熱水活動調査が予定されていた。K-R. Kim は、熱水プルームのよい指標となるメタンガスを船上で分析する先駆的装置を開発しており、その腕を買われてやってきたのである。

ほんの数年前の1977年に、南米沖のガラパゴス断裂帯付近で世界初の海底熱水活動が発見され (Corliss et al., 1979), 1979年にはメキシコ沖の東太平洋海膨で温度350°Cに達するブラックスモーカー熱水が見つかった (Spiess et al., 1980)。潜水船「アルビン号」がこの高温熱水を採取し、化学分析したところ、通常の海水と大きく異なる化学組成であることが明らかになった (Von Damm et al., 1985)。海底熱水活動は海洋の物質循環に大きく関わっているのか(!?)と、多くの研究者が色めき立っていた。海底熱水活動探索の矛先は、中央海嶺だけでなく、西太平洋の多くの背弧海盆にも向けられ、上記の白鳳丸航海につながっていく。

白鳳丸が中部マリアナトラフ海域に到着すると、海底地形図(当時まだシービームなどはなく、PDR(精密音響測深機)が頼りだった)がまず描かれ、南北に延びる海底拡大軸(海底山脈)の形状が見えてきた。拡大軸に沿って観測点が設定され、熱水活動の兆候を掴むために海底直上まで深層海水のCTD観測とニスキン採水が次々と行われた。観測点と観測点の間は数時間たらずの距離で、海水試料が続々と上がってくる。K-R. Kim は三日三晩ほとんど休むことなくメタン分析に没頭した。海水中に溶存するメタンガスを巧みなヘッドスペース法によって迅速に抽出し、FIDガスクロマトグラフに導入する。海底直上にメタンガス濃度異常はなかなか見つからない。採水層を少しずつ海底から離していくと、海底面から約700mも離れたあたりに、顕著なメタンガス濃縮層(熱水プルーム)のひろがることが明らかにされた (Horibe et al., 1986)。

私はこの航海中ずっと、海底直上水の鉛直混合の速さを見積もるために、北西太平洋の外洋域で、海底堆積物由来の過剰ラドン-222(半減期3.8日)の分析を続けていたが、マリアナトラフにおいてもラドンを分析してみた。するとメタンガスほど顕著ではないものの、図1に示すように熱水プルームとおぼしきラドン-222の膨らみを検出することができた (Gamo and Horibe, 1984)。これが私が初めて嗅いだ熱水プルームの「におい」である。

マリアナトラフにはその後も時折調査に行く機会があり、「しんかい6500」で熱水を採取したり (Gamo et al., 1997)、ROV「かいこう」を用いて新しい熱水噴出口を発見することができた (Gamo et al., 2004)。

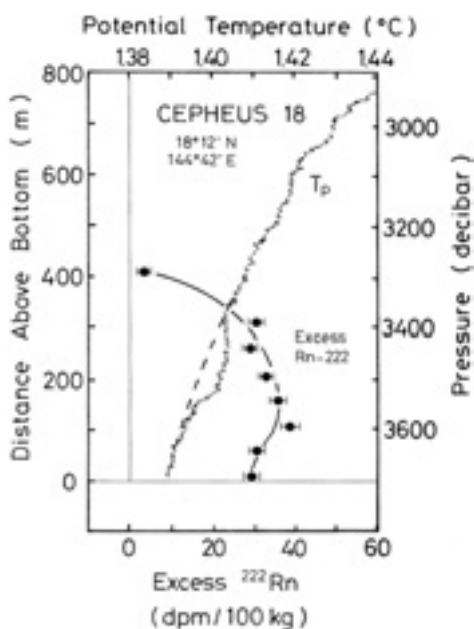


図1 中部マリアナトラフ、測点CE18における海底直上の過剰ラドン-222分布 (Gamo and Horibe, 1984). 海底上200m付近に、近傍の熱水活動域由来の熱水プルームと見られるラドン-222ピークとポテンシャル水温上昇が認められる。

3.2 メタンガス分析装置の製作と熱水プルーム調査

さて上述のように、簡便な方法によって海水中のメタンガスが船上で迅速に分析され、そのデータに基づいて次の観測点が決められていくという、絵に描いたように効率の良い観測作業に少なからず衝撃を受けた。こんな観測を自分でも実践したいと痛切に感じた（これは後述するように、ほぼ10年後にインド洋の熱水調査で実現できた）。

メタンガスは活動的の深海底の新しい化学トレーサーとして、1980年代から急速に脚光を浴びはじめた。海底拡大軸の熱水のみならず、プレート沈み込み帯の冷湧水からも検出されるようになった。海水中のメタンガス分析システムがまず必要だった。白鳳丸船上で K-R. Kim は真

空ヘッドスペース法でメタンガスを抽出していたが、私は大学院時代に製作した船上ガスクロマトグラフやラドン抽出装置と同じように、キャリアガスのバブリングによるメタン抽出を行ってみようと考えた。必要なガラス器具や金属管・バルブなど材料を集め、パイプを切り、装置を組み立てていった。

停年退官された堀部教授の後任として、岡山大学温泉研究所（当時）から酒井均教授が赴任された。1985年8～10月にかけて、酒井教授を主席研究員として実施された白鳳丸 KH-85-4次航海では、その航程の一部がハワイ島南西沖にあるロイヒ海山における集中的な熱水調査にあてられた。ロイヒ海山はハワイ諸島のホットスポット火山としては最も新しく成長途中の火山で、その山頂は海面下約1,000mにあった。そこでは活発な海底火山活動に伴う熱水噴出が予想されていたものの、その化学的性質はほとんど知られていなかった。ハワイ大学から P. Fryer をはじめ3名の地質学者・化学者が合流し、ロイヒ海山直上の深海カメラ撮影、ドレッジによる岩石採取、および海水採取とその化学分析などが精力的に実施された (Sakai et al., 1987)。

完成させたばかりの溶存メタンガス分析装置 (図2) を、この航海で初めて使用した。当初はいろいろトラブルが続いたが、当時大学院生の石橋純一郎氏（現在九州大学准教授）の粘り強い努力によって、ロイヒ海山の山頂付近を二重に覆う熱水プルームの分布 (図3) を初めて描き出すことができた (Gamo et al., 1987)。

海水中のメタンガスとは、その後も長いつきあいが続いている。特に1990年代後半からは、角皆潤博士（北海道大学准教授）の精力的研究により、メタンガスの濃度だけでなく、炭素の安定同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比) の高精度分析が可

能となった (Tsunogai et al., 2000). 早速、2002年の白鳳丸 KH-02-1次航海を利用して、沖縄トラフ第四与那国海丘付近の熱水プルームに含まれるメタンとその炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) を調べた。プルーム内では、微生物によるメタン消費に伴う炭素同位体分別のために、残存メタンの炭素同位体比は次第に増加する。沖縄トラフでは熱水中のメタン濃度が高いため、この現象を顕著に見ることが出来た。熱水エンドメンバーでは -26‰ 程度であったメタンの $\delta^{13}\text{C}$ 値が、噴出口から遠ざかるにつれてみるみる重



図2 初代白鳳丸の第3研究室に搭載したメタン分析装置。

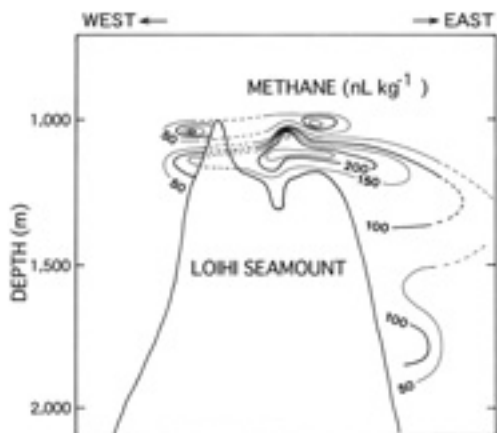


図3 ハワイ・ロイヒ海山上にひろがるメタンプルーム (Gamo et al., 1987)

くなっていき、最終的には $+40\text{‰}$ を超えてなお上昇しているのに驚いた (Gamo et al., 2010).

3.3 潜水船による熱水の採取

1980年代に話を戻す。その頃、観測船による調査に加えて、有人潜水船を用いる調査、すなわち海底面を直接肉眼で観察したり試料採取したりすることが、我が国でも可能になってきた。1984年に、海洋科学技術センター (現在、海洋研究開発機構: JAMSTEC) が、深さ2,000mまで潜れる「しんかい2000」の運航を開始した。我が国の深海調査研究は、これを契機に大きく躍進する。

フィリピン海プレートの沈み込む琉球海溝の後ろ側に、沖縄トラフ背弧海盆がある。水深は1,300~1,600mと「しんかい2000」の射程範囲にあり、日本近海では海底熱水活動研究の格好のターゲットとなった。しかし、稼働したばかりの「しんかい2000」は、まだ研究のための装備が十分整っていなかった。例えば熱水を採取する装備がなかった。海底から熱水の噴出を発見したとしても、それを採取して化学的特徴を解明できなくては話にならない。一般に熱水は、海底に林立する細い煙突状の構造物 (熱水チムニーと呼ぶ) から海中に噴出するが、その途端に周囲の海水によって大きく希釈されてしまう。そこで、純粋な熱水を採取するためには、熱水チムニーの内部に管を差し込んで強制的に熱水を吸い出す工夫がいる。

ちょうどその頃 (1988年)、私はマサチューセッツ工科大学の J. Edmond 教授の招聘を受け、東太平洋ゴルダ海嶺の潜航調査に参加する機会を得た (Campbell et al., 1994). 「アルビン号」で深さ3,200mの海底に潜航し、熱水採取の様子を体験した。「アルビン号」が用いていたのは、強力なバネによって駆動するチタン

製の注射器型採水器 (Von Damm et al., 1985) で、マニピュレータ (ロボット腕) を2本装備する「アルビン号」は、その1本を採水器専用に使っていた。この採水器が「しんかい2000」でも使用できれば話は早い。しかし「しんかい2000」は腕が一本しかないので、アルビン式採水をそのまま導入すると、海底で他の作業がしにくくなる。マニピュレーターの形状や機能も、「アルビン」と「しんかい2000」では大きく異なっている。

そこで発想を転換し、深海ポンプを用いて熱水を吸入採取する方式をあれこれ検討した。深海ポンプと自動回転バルブを組み合わせることによって、6~8本のチタンまたはアクリル製円筒容器に熱水を吸入採取できるシステムが製作できた (酒井ほか, 1990)。1987年以降、この採水器を装備した「しんかい2000」による沖縄トラフの熱水調査研究が毎年のように実施され、沖縄トラフの特異な埋積海嶺型熱水の化学組成が次第に解明されていった (Sakai et al., 1990; Gamo et al., 1991)。この採水方式を踏襲し、その後「しんかい6500」用バージョンも製作した。この多筒採水方式は、熱水中の揮発性成分を逃がさず回収できるガスタイト採水器 WHATS へと進化し、現在様々な潜航調査に活用されている (角皆ほか, 2003)。

3.4 インド洋初の熱水系に挑む

1990年代に入ると、白鳳丸 KH-90-3次航海 (主席研究員: 酒井教授) が、パプアニューギニアのビスマルク海マヌス背弧海盆をターゲットとして実施され、地球化学的手法による熱水プルーム探査が大成功をおさめた (Gamo et al., 1993)。この実績をバネに、大洋中央海嶺の本格的調査に踏み出そうという気運が高まった。まさにそのようなとき、インド洋中央海嶺

の熱水活動調査が、当時の海洋研究所の玉木賢策助教授と藤本博己助教授を中心とする地球物理学分野から企画立案された。これが白鳳丸 KH-93-3次航海 (上記の2名が共同主席研究員) である。欧米の海洋先進国から地理的に遠いために、ほとんど研究例のないインド洋中央海嶺に挑む、画期的な大プロジェクトであった。

先のマヌス海盆調査での熱水系の発見に際して、海水の化学分析が決定的役割を果たしたことが高く評価され、化学分野からは破格の10名 (白鳳丸の研究員定員は31名) もの研究員が乗船できることになった。高感度化学発光検出法によるマンガン・鉄分析計を開発されたばかりの中山英一郎博士 (当時京都大学、その後滋賀県立大学教授、第11回石橋賞を受賞) の協力を仰ぎ、船上でマンガン、鉄、およびメタンを分析する、当時としては世界最強の観測チームを結成した。酒井均教授 (東京大学を定年退官後、山形大学に異動) を代表とする文部省科研費・重点領域研究「オーシャンフラックス」が動き始めた直後で、海底熱水活動の化学的研究も計画研究の1つに組み込まれていた。この科研費のおかげで、クリーンな海水を採取するためのレバーアクション型ニスキン採水器、熱水活動に由来するわずかな海水の濁りを検出する透過度計など、最先端の観測機器を導入することができた。

白鳳丸 (2代目) は1989年に竣工したばかりで、船上装備、操船性どれをとっても世界最高水準にあった。白鳳丸乗組員の高度な操船能力が、これまで我が国で行ったことのない観測手法を可能にした。それは tow-yo (トローヨー) 法とよぶ観測法 (図4) で、ワイヤーで吊り下げた現場計測装置 (CTD センサーや透過度計) をトローヨーのように上げ下げしながら、白鳳丸を一定の方向に1ノット程度の微速で移動させ

る。すると計測装置は図4に示したようなジグザグなパターンを描く。熱水ブルームの中をうまく通過することによって、その規模や広がりを迅速にマッピングすることができる。水中での装置の位置を正確に知るために音響トランス

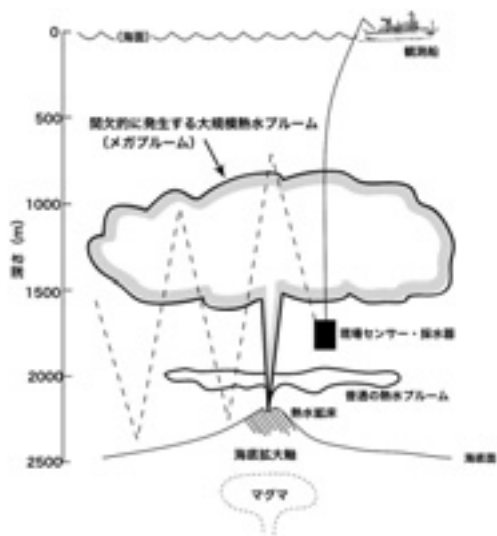


図4 Tow-yo 観測法の原理

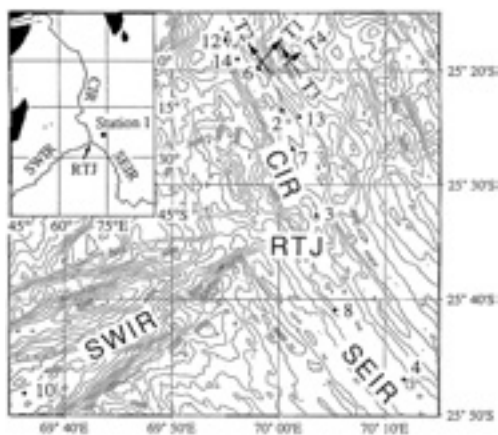


図5 インド洋中央海嶺ロドリゲス三重点 (RTJ) と観測点の位置 (Gamo et al., 1996). 略称 CIR, SEIR, および SWIR は、それぞれ中央インド洋海嶺、南東インド洋海嶺、および南西インド洋海嶺を示す。測点6とその東側の海域で熱水ブルームが発見された。

ポンダー観測は、同乗メンバーの渡辺正晴技術官 (海洋研) が完璧にカバーしてくれた。

インド洋中央海嶺のロドリゲス三重点付近 (図5) を集中的に探査した。新規導入した透過度計が異常値 (海水のわずかな濁り) を捉えた。この層から採取した海水試料から高濃度のマンガン、鉄、メタンが検出され、熱水ブルーム発見の決め手となった。引き続き tow-yo 観測モードに移り、このブルームの源をひたすら追いかけた。ブルーム中の海水のメタン/マンガン比の分布からみて、熱水ブルームは西向きにたなびいており、海嶺軸の東側にある小規模な海丘付近に熱水噴出口があるらしいと結論できた (図6) (Gamo et al., 1996)。

ここまでくれば、次のステップは、潜水船による熱水噴出現場の発見と熱水試料採取である。JAMSTEC は、「しんかい2000」の他に、「しんかい6500」や「かいこう」(1万メートル級無人探査機) を次々と深海調査のために実用化し、華々しい成果を上げつつあった。インド洋

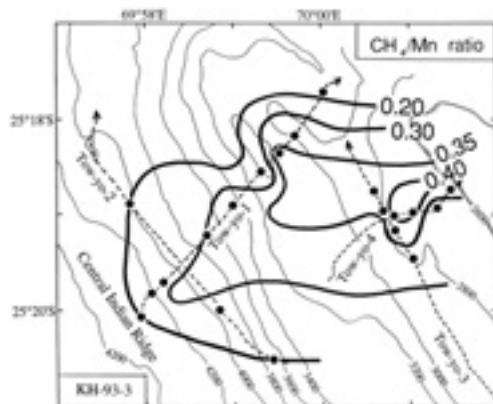


図6 Tow-yo 観測の測線と熱水ブルーム中のメタン/マンガン比の分布 (Gamo et al., 1996). 新鮮な熱水ブルームほどメタン/マンガン比の高いことを利用し、熱水活動の源が図の右端にある地形的高まり (後日「白鳳海丘」と命名される) 付近であると推察した。

ロドリゲス三重点海域においては、1998年に「しんかい6500」(Sohrin et al., 1999)、次いで2000年に「かいこう」を用いた潜航調査が実施された (Hashimoto et al., 2001)。「かいこう」が水深2,450mの深海底で、温度360°Cに達する激しい黒煙の噴出 (ブラックスモーカー) をついに発見したのは、奇しくも7年前に白鳳丸がこの海域での調査を終了した日と同じ8月25日だった。この熱水域は、「かいこう」の母船「かいいい」の名をとって Kairei Field と名付けられた。採取した試料からインド洋で初めての熱水の化学組成が明らかとなった (Gamo et al., 2001)。特筆すべきことは、Kairei Field 熱水から大量の水素とそれに依存する生態系 (ハイパースライム) が発見されたことで (Takai et al., 2004)、Kairei Field は熱水生物圏や生命起源に関わる最先端研究の場として世界の注目を集めている。

4. 日本海における化学トレーサー研究

海底熱水活動に関する研究とは別に、大学院の頃より、海水中の溶存気体や放射性核種をトレーサーとする海洋の循環・混合に関する研究を並行して進めてきた。とりわけ日本海を対象とする調査研究は、1977年以来30年以上にわたる長期に及んでいる。

日本海の地形的な閉鎖性・独立性、および冬季の高密度表面水形成、これら二つの組み合わせはたいへん興味深いものがある。後者は海洋大循環の緒をなす北部北大西洋で生じている表面水の沈み込み機構と共通するもので、周囲の海域から独立している日本海深層・底層では、あたかも全海洋の縮小 (ミニチュア) 版として海水が循環している。そこには様々な謎があり、魅力的なミニ海洋とよぶことができる。

4.1 炭素-14による日本海の深層循環の研究

1970年代後半、堀部研究室で250リットル大量採水器を開発した主目的は、海水中の炭素-14を測定するためだった。加速器質量分析法 (AMS) はまだ萌芽したばかりの段階にあり、精度の高い分析値を得るには、炭素-14のβ線をガスカウンターで計測する方法が一般的であった。炭素に換算して数グラムもの試料が必要で、海水中の全炭酸濃度が約 2 mmol kg^{-1} であることを考えると、海水約200リットルから全炭酸を抽出する必要があった。大量採水器は、白鳳丸 KH-76-1次航海、KH-76-4次航海での試運転を経て、KH-77-3次航海から本格的に使用されるようになった。この航海の観測ターゲットが日本海だった。

日本海は、最大水深が3,700mを超える深海でありながら、太平洋に比べると深層・底層水中の酸素濃度がずば抜けて高い。その理由は日本海の上下混合の時間スケールが短いため、と説明されていた。しかし短いといっても、それが数十年なのか数百年なのか、判断できるデータは何もなかった。海洋の現象に時間軸を付けるには、海水中の放射性核種が有効である。特に炭素-14 (半減期5,730年) は、当時米国が主導した GEOSECS (地球化学的大洋縦断研究) 計画でも必須の測定項目にあげられ、世界の主要な海域でデータが蓄積されつつあった。世界の深層循環が約2,000年の時間スケールで一巡しているとする Broecker のコンペアーベルトモデル (Broecker, 1990) は、この炭素-14データに基づいて構築された。

白鳳丸 KH-77-3次航海、さらにこれに続く KH-79-3次航海において、東大海洋研方式の大量採水器 (堀部・坪田, 1977) は威力を発揮し、日本海の表層から底層にわたり、250リットルの大量試料を初めて採取することができた。試

料は容量約200リットルのドラム缶に入れて酸性とし、全炭酸をCO₂ガスとして抽出してNaOH溶液に吸収させ持ち帰った。東大の年代測定室において化学処理を加え、最終的にC₂H₂ガスとして¹⁴Cの放射能を計測した。水深2,000m以深の日本海底層水のΔ¹⁴C値として-74±6(‰)という値を初めて得た。日本海底層水にボックスモデルを適用して底層循環の時間スケールを求めるには、Δ¹⁴Cの初期値(沈み込む直前の日本海表面海水の持っていたΔ¹⁴C値)を仮定しなければならない(実測値は存在しない)。現在の表面水なら分析できるが、1960年代の大気核実験¹⁴Cで汚染されているため、ここでの目的には使用できない。やむなく、大西洋での文献値をもとに-50±10(‰)と推定し、日本海の底層循環の時間スケールとして300±100(年)という結果を発表した(Gamo and Horibe, 1983)。

その後、Chen et al. (1995)は大気核実験以前の日本海表層水のΔ¹⁴C値をもっと低い(-80±10‰)と推定した。この値を用いると、底層水の平均滞留時間は120年程度と計算される。

4.2 酸素濃度の正確な定量

冒頭近くで述べた自作の船上ガスクロマトグラフは、海水中の窒素、酸素、アルゴン、および全炭酸を分析することができた(Gamo and Horibe, 1980)。海水中の溶存酸素分析法としては、チオ硫酸ナトリウム溶液によるヨウ素滴定を応用したウィンクラー法が、簡便なルーチン分析法として確固たる信頼を得ていた。しかし、ガスクロマトグラフによって得られた酸素分析値が、ウィンクラー法による値よりわずかに(0.5~1%程度)高くなることに気がついた(図7)。文献を調べてみると、Carpenter

(1965)がウィンクラー法の正確さについて系統的な研究を行っており、滴定の際のヨウ素の揮発が誤差要因として無視できないことを指摘していた。彼はヨウ素の揮発を抑えるため、I⁻を予め大過剰に加えてI₂を揮発しにくいI³⁻にするとともに、試料採取容器をそのまま滴定にも使用できるようにし、試料溶液を移し替える際におこるI₂の逃散を防いでいた。

当時、海洋観測指針(1970)に記載された日本の標準的なウィンクラー法では、海水採取容器(酸素瓶)内でI₂を発生させ、その溶液をコニカルビーカーに移してから滴定が行われていた。I⁻も過剰に加えてはいなかった。そのため、溶存酸素濃度がやや小さくなっている可能性があった。

そこでCarpenter(1965)を参考に、三角フラスコ型の酸素瓶(図8)を製作した(Horibe and Gamo, 1981)。この酸素瓶の中で、酸素の固定を行うと共に、沈殿の溶解とヨウ素滴定も行うことができる。滴定液の添加により溶液の体積が増えても溢れないように、瓶の上側に余分のスペースがある。実際にはこれほど大きな

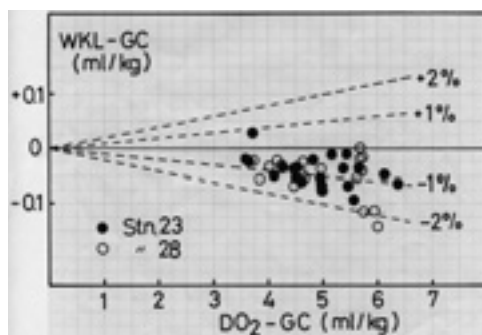


図7 ガスクロマトグラフ法(GC)とウィンクラー滴定法(WKL)(日本海洋学会, 1970)との分析値の比較。横軸はGCによる分析値、縦軸はWKLによる分析値からGCによる分析値を差し引いた値。分析データは、白鳳丸KH-76-1次航海(インド洋)の測点23, 28において取得した。

スペースは不要だが、酸素の固定の際に瓶を振りやすい（持ちやすい）形状になっている。この酸素瓶で定量した酸素濃度は、以前からの酸素瓶による値より0.5～1%大きく、ガスクロマトグラフによる値とはよく一致した。ヨウ素デンプン反応による滴定終点も見やすく、操作に習熟すれば、再現性0.1%以内のデータが出せた。

そこでこの Carpenter 方式の酸素瓶を KH-77-3次航海以後は常時用いるようにした。以下に述べるような日本海底層水中の溶存酸素濃度のわずかな変化にいち早く気づき、その有意性を自信を持って主張できたのは、この新しい滴定法の導入に負うところが大きい。

4.3 日本海底層で何が起きているのか

日本海における観測は、1977年以来、30年以上にわたって継続している。日本海北部（日本海盆）と日本海南部（大和海盆）に定点を設け、溶存酸素を計測してきた（Gamo et al., 1986;

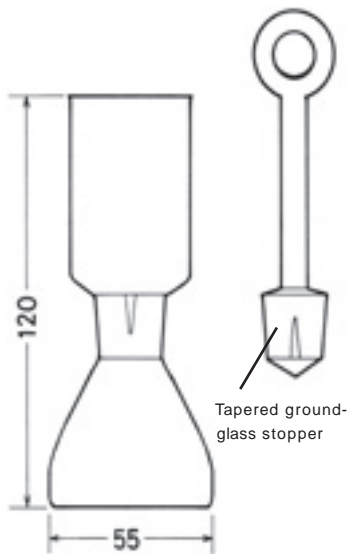


図8 Carpenter (1965) を参考に製作した新しい酸素瓶 (Horibe and Gamo, 1981)

Gamo, 1999). 図9は、東部日本海盆における過去30年間（1977～2007年）の溶存酸素鉛直分布を重ね合わせたものである（Gamo, 2011）。深度2,000mより深い底層水を見ると、年とともに酸素濃度が少しずつ減少し、底層水の厚みも減少傾向にあることが分かる。

海洋深層ではどこでも、表面から降下する光合成起源の有機物質が微生物を介して分解を受ける。その際に酸素が消費される。太陽光が届かず、光合成の存在しない深層では、そのままでは酸素は減少の一途をたどり、やがて無酸素状態となる（黒海がその例）。日本海の深・底層水が豊富に酸素を含むのは、活発な海水の上下混合（深層循環）によって、表面水中の光合成で作られた酸素が深・底層に送り込まれるからに他ならない。天然の換気現象（ventilation）である。ちなみに北太平洋深層水も日本海ほどではないが豊富に酸素を含んでいる。これは遙か南半球から北上する南極底層水によ

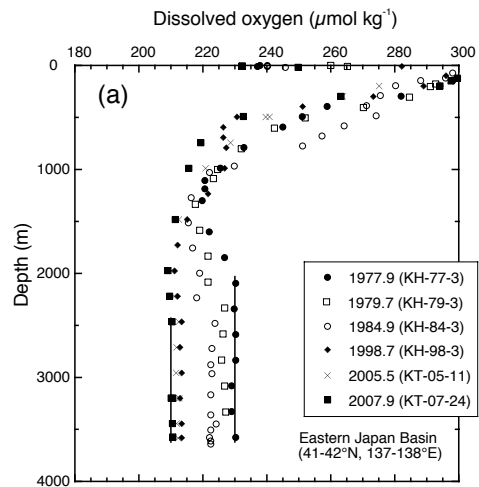


図9 日本海北部の東部日本海盆における過去30年間の溶存酸素濃度分布の時系列変化 (Gamo, 2011)。1977年から2007年までの間に底層水の酸素濃度が $230 \mu\text{mol kg}^{-1}$ から $210 \mu\text{mol kg}^{-1}$ まで減少し、底層水の厚みも約500m短縮していることが分かる。

て酸素が補給されているからである。図9に示した酸素の減少傾向は、底層水中における有機物分解による酸素の消費と、表面水の沈み込みによる酸素の補給とのバランスが崩れ、前者が後者を上回った状態の続いていることを示している。

Gamo et al. (2001) は、1984年と1998年の2回、日本海における大気核実験由来のトリチウム濃度分布を計測した(図10)。トリチウムも、酸素と同じく海洋表面にのみ供給源があるので、深層循環のよいトレーサーとなる。得られた結果から、1984~1998年の14年間に関する限り、日本海底層水へのトリチウム供給はほとんどないことが確認された。その一方で、日本海の深層(深さ700~2,000m くらいの間)については、トリチウムの明らかな増加が認められた。表面水の沈み込みによってトリチウムが供給されたと考えなければならない。

図11は上記のトリチウムの測定結果から示唆される日本海の深層循環を単純化したものである(Gamo et al., 2001)。日本海の深層循環パ

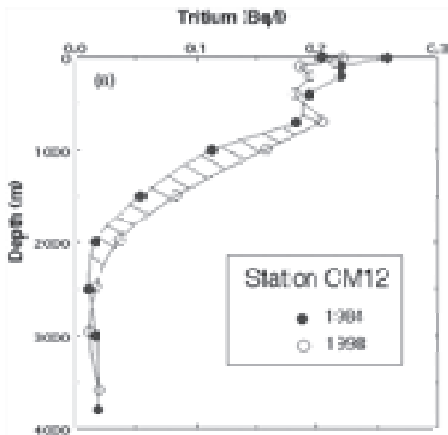


図10 東部日本海盆におけるトリチウム濃度分布を1984年と1998年とで比較したもの(Gamo et al., 2001)。14年間のトリチウムの放射壊変分を補正するため、1998年のデータは1984年時点の値に戻している。

ターンを、モードAとモードBの2通りに分けると、現在は、モードBが卓越しており、深層循環系は比較的浅い部分に限定されているものと考えられる。約2,000mよりも深い底層水はこの循環系から切り離されてしまったために、新鮮な酸素の補給を受けることができない状態にある。このように深層循環系が浅くなっているのは、表面から沈み込む海水の密度が十分大きくなれないためと考えられる。その原因は、地球温暖化のようなグローバルな気候変化にあるものと推察される。今後どのように変化していくかたいへん興味深く、さらに観測を続ける必要がある。

5. 現場で化学分析を行う

海洋の化学的観測の基本は、試料を採取して化学分析することにあるが、これまでに随所で

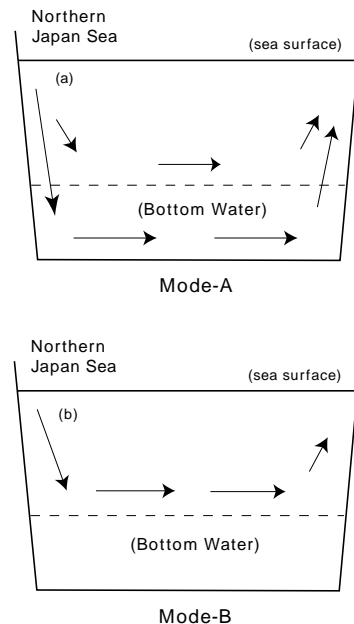


図11 日本海の深層循環系の二つのパターン(Gamo et al., 2001)。現在はパターンBが卓越し、日本海の底層水は循環系から切り離された状態にある。

述べた「試料採取とそのあとに続く化学分析」という観測手法によってカバーできる空間的・時間的分解能には限界があり、そこからはみ出してしまう変動現象をどのようにして捉えるかが問題である。例えば、深海底の熱水活動のように、きわめてローカルな場での大きな時間変動を伴う現象については、従来のCTD採水のみによって全貌を解明するのは不可能であろう。

また、海洋での試料採取は「汚染（コンタミネーション）」の問題を避けて通れない。採水器の汚れ、採取容器の汚れ、採取時に異物の混入、保存中の微生物過程……その他、もとの試料を変質させる要因はいくらでもある。

これらの問題に対応できる手法が、現場化学分析法である。化学分析機器を海水中に直接降下させ、現場で化学分析を実施する。フロー方式と呼ばれる、海水を常時ポンプで吸入しながら連続的に化学分析を行う方法によれば、空間的にも時間的にも、きわめて分解能の高いデータを取得することができる。標準試料やブランクの分析を適宜挟み込むことによって、現場での分析感度の変化を補正することもできる。現場でキャリブレーションできることは現場化学分析計の大きなメリットで、単なる化学センサーとはここで分けられるのである。

紀本電子工業(株)との共同で開発した我が国最初の現場分析計は「深海化学ステーション」の名称で1990年頃完成した。海水中のSiとH₂Sを比色法によって分析する機能を持ち、淡青丸KT-91-3次航海で相模湾（深さ約1,200m）に降下させ、海中での正常な作動を確認できた（蒲生ほか，1991；Gamo et al., 1994）。その後、本装置を「しんかい6500」に搭載し、大西洋中央海嶺TAG熱水噴出域（深さ約3,640m）での潜航観測を行い、海水中のSi濃度が熱水の影響を受けて高いことを検出した（Gamo et al.,

1995）。

現場化学分析計は、大学院博士課程に在籍した岡村慶氏（現在高知大学准教授）が研究テーマに選び、格段の改良が加えられた（Okamura et al., 2001）。熱水ブルーム中の鉄・マンガンなど重金属元素を高感度化学発光分析法によって現場分析できる画期的なフロー装置が完成し、GAMOS（Geochemical Anomaly Monitoring System）と呼ばれている。本装置は岡村博士らの努力によって次々とバージョンアップが図られ、小型で高性能の機種が次々と開発され、様々な海洋観測に活用されている。

今後は、海洋の化学的観測において、現場化学分析計による長期の連続測定の実績が果たす役割が増加していくであろう。地震計と同じような手軽さで、深海底に現場化学分析計を多数展開する時代がやがて来ることを期待する。我々はその可能性を探るために、GAMOSを海底ケーブルに接続する実験を開始している。相模湾初島沖のJAMSTEC海底観測ステーションを介して、GAMOSを約3ヶ月にわたって海底面に係留した。初島沖冷水湧水活動に伴う海底直上水中のMn濃度の連続観測に成功し、海底地震に同期してMn濃度が上昇する現象を見い



図12 相模湾初島沖の深海底（深さ約1,300m）に設置し、海底ケーブルに接続した現場化学分析計GAMOS（写真右下）。ROVハイパードルフィンの中カメラによって撮影した（Gamo et al., 2007）。

だすことができた (Gamo et al., 2007).

6. おわりに

私の恩師である堀部純男先生（東京大学名誉教授）は、私が大学院修士課程に入って間もない頃、よく以下の意味のことを仰いました。「研究に必要な装置は自分で作れ。必要な技術は先生や先輩から盗み取れ。自分の手で組み立てた装置であれば、如何ようにも改造でき、市販の装置では決して得られない優れた機能を引き出すことができる」

当初はハンダ付けさえ満足にできず、ガラス細工をすれば火傷の水ぶくれに泣く私でしたが、それほどに不器用でも、時間をかければ何とかなるということ、大学院の修士・博士課程とそれに続く2年間のポストクの期間、堀部研究室に居座ることで会得できました。そのおかげで、これまで約1,600日にわたる観測航海に参加し、魅力溢れるサイエンスの世界をあちこち歩き回ることが出来ましたこと、望外の喜びです。

堀部研究室で助教授を務められた坪田博行先生（広島大学名誉教授）の、観測と向き合う真摯な迫力に息をのみながらご指導いただき、船上や研究所で緊張の日々を送ったことも、遙か昔となりましたが、貴重な体験として決して忘れることはできません。

改めて堀部先生、坪田先生に衷心より御礼申し上げます。ちなみに両先生とも、嘗てこの石橋賞を受賞されていることに不思議な因縁を感じます。

ここで唐突ですが、伊藤整の「汜濫」の一節を最後に引用します。私が時折読み返す小説です。エゴイズムに満ちた人間社会の描写で名作と言われるこの小説の中で、私が興味引かれる

のは、主人公真田佐平（有機化学者）が、研究者・技術者としての心情を、ひとり吐露する以下の場面です。

「……打開の道は全く見つからなかった。しかし、仕事とはそういうものだったのだ。多くの人々の実験と理論のあとをのろのろとたどって行く馬鹿のような丹念さと、その間に、疲労とともにやってくる連想や空想の中に、思いがけないアイディアの浮ぶことを待つという、手さぐりの中での忍耐の持続が、長い間彼の仕事の実態だったのだ。」

このような孤独で自虐的なエゴイズムこそ、私の原点に相応しいと思ひながら、いまましの努力を続けたいと念じております。今後どうぞご指導のほどお願いいたします。

引用文献

- Broecker, W. (1990): The great ocean conveyor. *Oceanogr.*, 4, 79-89.
- Campbell, A.C., German, C.R., Palmer, M.R., Gamo, T. and Edmond, J. (1994): Chemistry of hydrothermal fluids from Escanaba Trough, Gorda Ridge. *U.S.G.S. Bull. 2022* (Geologic, Hydrothermal, and Biologic Studies at Escanaba Trough, Gorda Ridge, Offshore Northern California), pp. 201-221.
- Carpenter, J.H. (1965): The accuracy of the Winkler method for dissolved oxygen analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 10, 135-140.
- Corliss, J.B. et al. (1979): Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, 201, 1073-1083.
- 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. and Horibe, Y. (1983): Abyssal circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan.*, 39, 209–219.
- Gamo, T. and Horibe, Y. (1984): Excess bottom Rn-222 profiles and their implications in the northwestern Pacific Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 71, 215–228.
- Gamo, T., Nozaki, Y., Sakai, H., Nakai, T. and Tsubota, H. (1986): Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. *J. Mar. Res.*, 44, 781–793.
- 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., Sakai, H., Kim, E.-S., Shitashima, K. and Ishibashi, J. (1991): High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107, 328–338.
- 蒲生俊敬, 酒井均, 紀本英志, 中山英一郎, 石田憲治 (1991): 海底化学ステーションの開発, *月刊海洋*, 23, 446–461.
- Gamo, T., Sakai, H., Ishibashi, J., Nakayama, E., Isshiki, K., Matsuura, H., Shitashima, K., Takeuchi, K. and Ohta, S. (1993): Hydrothermal plumes in the eastern Manus Basin, Bismarck Sea: CH₄, Mn, Al and pH anomalies. *Deep-Sea Res.*, 40 (11/12), 2335–2349.
- Gamo, T., Sakai, H., Nakayama, E., Ishida, K. and Kimoto, H. (1994): A submersible flow through analyzer for *in situ* colorimetric measurement down to 2000m depth in the ocean. *Anal. Sci.*, 10, 843–848.
- Gamo, T., Masuda, H., Chiba, H. and Fujioka, K. (1995): *In situ* flow-through analysis of dissolved silica over the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge. *JAMSTEC J. Deep-Sea Res.*, 11, 103–110.
- Gamo, T., Nakayama, E., Shitashima, K., Isshiki, K., Obata, H., Okamura, K., Kanayama, S., Oomori, T., Koizumi, T., Matsumoto, S. and Hasumoto, H. (1996): Hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142, 261–270.
- Gamo, T., Tsunogai, U., Ishibashi, J., Masuda, H. and Chiba, H. (1997): Chemical characteristics of hydrothermal fluids from the Mariana Trough. Chemical characteristics of hydrothermal fluids from the Mariana Trough. *JAMSTEC J. Deep-Sea Res. Spec. Volume: Deep Sea Research in subduction zones, spreading centers and backarc basins*, JAMSTEC, 69–74.
- Gamo, T. (1999): Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3141–3144 (1999).
- Gamo, T., Momoshima, N. and Tolmachev, S. (2001): Recent upward shift of the

- deep convection system in the Japan Sea, as inferred from the geochemical tracers tritium, oxygen, and nutrients. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4143–4146.
- Gamo, T., Masuda, H., Yamanaka, T., Okamura, K., Ishibashi, J., Nakayama, E., Obata, H., Shitashima, K., Nishio, Y., Hasumoto, H., Watanabe, M., Mitsuzawa, K., Seama, N., Tsunogai, U., Kouzuma, F. and Sano, Y. (2004): Discovery of a new hydrothermal venting site in the southernmost Mariana Arc: Al-rich hydrothermal plumes and white smoker activity associated with biogenic methane, *Geochem. J.*, 38, 527–534.
- Gamo, T., Okamura, K., Mitsuzawa, K., Asakawa, K. (2007): Tectonic pumping: earthquake-induced chemical flux detected *in situ* by a submarine cable experiment in Sagami Bay, Japan. *Proc. Japan Acad. Ser B.*, 83, 199–204.
- Gamo, T., Tsunogai, U., Ichibayashi, S., Chiba, H., Obata, H., Oomori, T., Noguchi, T., Baker, E.T., Doi, T., Maruo, M., and Sano, Y. (2010): Microbial carbon isotope fractionation to produce extraordinarily heavy methane in aging hydrothermal plumes over the southwestern Okinawa Trough. *Geochem. J.*, 44, 477–487.
- Gamo, T. (2011): Dissolved oxygen in the bottom water of the Sea of Japan as a sensitive alarm for the global climatic change. *Trends Anal. Chem.*, 30, 1308–1319.
- Hashimoto, J., Ohta, S., Gamo, T., Chiba, H., Yamaguchi, T., Tsuchida, S., Okudaira, T., Watabe, H., Yamanaka, H. and Kitazawa, M. (2001): First hydrothermal vent communities from the Indian Ocean discovered. *Zool. Sci.*, 18, 717–721.
- 堀部純男・坪田博行 (1977): 大量採水器, 「環境科学としての海洋学」(堀部純男編), 東京大学出版会, pp.199–202.
- Horibe, Y. and Gamo, T. (1981): Modified Carpenter's method, in *Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-77-3 (PEGASUS Expedition)*, ed by Horibe, Y., Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, pp. 53–55.
- Horibe, Y., Kim, K-R., and Craig, H. (1986): Hydrothermal methane plumes in the Mariana back-arc spreading centre. *Nature*, 324, 131–133.
- 日本海洋学会 (1970): 海洋観測指針 (気象庁編), 428 pp.
- Okamura, K., Kimoto, H., Saeki, K., Ishibashi, J., Obata, H., Maruo, M., Gamo, T., Nakayama, E. and Nozaki, Y. (2001): Development of a deep-sea *in situ* Mn analyzer and its application for hydrothermal plume observation. *Mar. Chem.*, 76, 17–26.
- Sakai, H., Tsubota, H., Nakai, T., Ishibashi, J., Akagi, T., Gamo, T., Tilbrook, B., Igarashi, G., Kodera, M., Shitashima, K., Nakamura, S., Fujioka, K., McMurtry, G., Malahoff, A. and Ozima, M. (1987): Hydrothermal plumes on the summit of Loihi Seamount, Hawaii.

- Geochem. J.*, 21, 11-21.
- Sakai, H., Gamo, T., Ishibashi, J., Shitashima, K., Kim, E.-S., Yanagisawa, F., Tsutsumi, M., Tanaka, T., Matsumoto, T., Naganuma, T. and Mitsuzawa, K. (1990): Unique chemistry of the backarc basin hydrothermal solution at the mid-Okinawa Trough, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2133-2136.
- 酒井均, 山野誠, 田中武男, 蒲生俊敬, 金銀洙, 石橋純一郎, 下島公紀, 松本剛, 大森保, 柳澤文孝, 堤眞 (1990): 「しんかい2000」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究—第413回及び第415回潜航報告, 及び第424回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について, *JAMSTECR Deepsea Res.*, 6, 69-85.
- Sohrin, Y., Gamo, T. and the shipboard science party of the INDOYO (1999): CTD observations to search for hydrothermal activity on the southwest Indian Ridge and the central Indian Ridge just north of the Rodriguez Triple Junction: the Yokosuka/Shinkai MODE'98 Leg 3 INDOYO cruise. *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 15 (II), 7-11.
- Spieß, F.N. & RISE Project Group (1980): East Pacific Rise: hot springs and geophysical experiments. *Science*, 207, 1421-1433.
- Takai, K., Gamo, T., Tsunogai, U., Nakayama, N., Hirayama, H., Neelson, K. and Horikoshi, K. (2004): Evidence for a hydrogen-based hyperthermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (HyperSLiME) beneath an active deep-sea hydrothermal field. *Extremophiles*, 8, 269-282.
- 坪田博行 (1985): 無汚染採水器の開発と無汚染汚染, 「海洋の動態 (梶浦欣二郎編)」, 恒星社厚生閣, pp. 225-236.
- Tsunogai, U., Yoshida, N., Ishibashi, J. and Gamo, T. (2000): Carbon isotopic distribution of methane in deep-sea hydrothermal plume, Myojin Knoll caldera, Izu-Bonin arc: Implications for microbial methane oxidation in ocean and applications to heat flux estimation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 2439-2452.
- 角皆潤, 土岐知弘, 中山典子, 蒲生俊敬, 加藤博之, 金子将 (2003): WHATS: 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, *地球化学*, 37, 101-109.
- Von Damm, K.L. et al. (1985): Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2197-2220.