

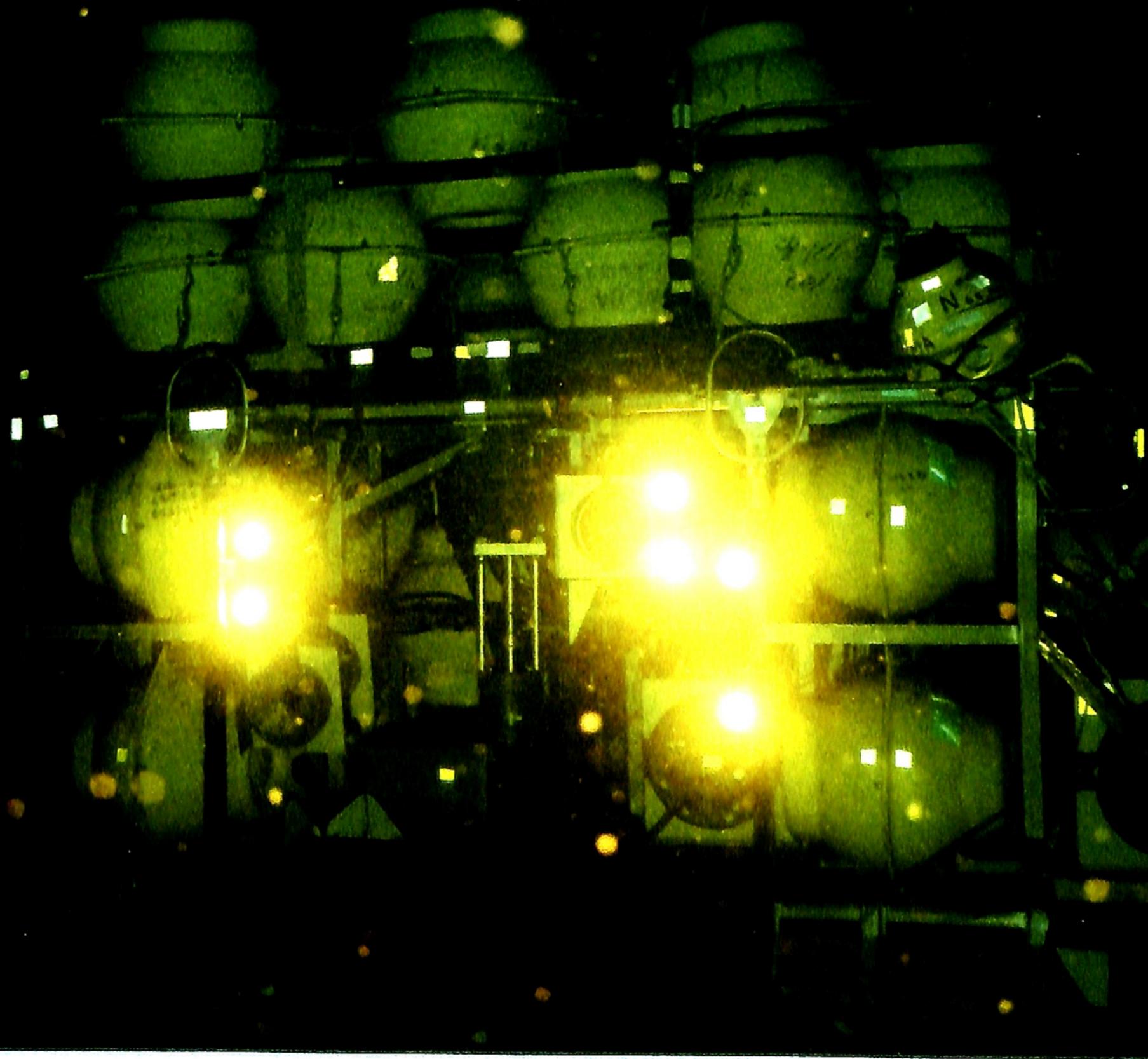
海の未来を考える

科学技術の情報誌

ジャムステック

# JAMSTEC

1994年 第6巻 第4号 (通巻第24号)



海洋科学技術センター

## 目 次

## 寄 稿 (依頼)

- プラクトン学 100 年 谷口 旭…………… 1  
 ● 海に魅せられて半世紀 (X X I V) 奈須 紀幸……………10

## 研究紹介

- 雑海藻除去システムの研究開発 深海開発技術部 野口 利仁……………14  
 ● 無人潜水機「げんたつ 500」の運用に関する研究について 深海開発技術部 月岡 哲……………22  
 ● 凍る海 (6) 海水—その 3— 海洋研究部 滝沢 隆俊……………29

## 海外事情

- America's Dairyland, Wisconsin 滞在記 海域開発研究部 他谷 康……………34  
 ● 国際深海掘削計画—技術工学開発委員会に出席して 深海開発技術部 平井 一司……………40

## 海からのたより

- 海のアソロジー (10) 広島大学 (前: 深海環境プログラム) 長沼 毅……………43  
 ● 海と浮力とアルキメデス 情報室 (兼) 海洋研究部 黒山 順二……………45  
 ● 「ドルフィン-3 K」からのメッセージ (4) 運航部 内田 徹夫……………50  
 一つれづれなるままに—  
 ● 深海への旅 (8)  
 ③⑧ 美味礼賛 深海研究部 藤倉 克則……………55  
 ③⑨ 深海への旅 東京大学地震研究所 笠原 順三……………57  
 ④⑩ 深海への旅 米国ライトガーズ大学 リチャード・ルッツ……………58  
 ④⑪ 深海への旅 米国インディアナ大学 A-L. レーゼンバッハ……………59  
 ④⑫ 深海にガラスの雪を降らせると…… 東京大学海洋研究所 白山 義久……………60

## 解 説

## 用語解説

- 亜熱帯モード水 海洋研究部 三寺 史夫……………63

## トピックス

- 水深 4,000 m の鯨骨が動くシナリオ 運航部 内田 徹夫……………65  
 —最新の GPS 航法システムの事情から—

※ 本雑誌名「JAMSTEC」は、海洋科学技術センターの英名: Japan Marine Science and Technology Center の略称にちなんだもので、「ジャムステック」と発音します。

※ 本誌は季刊誌であり、年 4 回 (1 月・4 月・7 月・10 月) の発行です。

# プランクトン学100年

東北大学  
農学部 谷口 旭  
Akira Taniguchi



## 略 歴

1942年 北海道旭川市に生まれる  
1965年 北海道大学水産学部卒業  
1970年 北海道大学大学院水産学研究科博士課程修了  
1970年 北海道大学水産学部助手  
1974年 東北大学農学部助教授  
1988年 東北大学農学部教授 現在に至る  
1993年 日本プランクトン学会長

## 1. はじめに

「地球の三分の二を占むと云ふ海洋は更なり、月影を宿すも足らぬ涓滴にも生物は棲んで居て生滅の理法を示して居る。此の生滅は水中にある物質の転変に因縁する。斯る煩雑なる関係は殊にうたかたの波のまにまに行方定めぬ生物で高調せられる。浮游生物学とは畢竟かゝる因象を窮めるのを目的として居るが故に、汎く水界を論じて其の真相を瞭かにするに最も重要な使命を享けて居るものである。(中略)要するに水界の栄養的価値は浮游生物学の按驗で之が質量を決定して初めて判明する訳である。之を閑却して水産の隆替を論ずるものがあれば衆盲象を評すの嘲は免れない。(後略)」

少々引用が長くなったが、これは藤田経信が小久保清治著(1923)“浮游生物学”に寄せた序文の一部である。浮游(ふゆう)生物学とは、つまりプランクトンの生物学であるとか水産学の1つの基礎学科であるとかいうのは、まちがってはいないにしても正鵠(せいこく)を得ていないということを、この序文は示している。プランクトンによって支配されている水圏の物質代謝の実態を究明することが浮游生物学の目的であり、その成果によってのみ水圏の生産力の評価が可能になり、水産の将来を論ずることができるということであろう。

ここで思い起こされるのは、“海洋生物学と生物海洋学とはどちらがうのか?”という問いである。かつて、浮游生物学は海洋生物学の中心的な分野であるといわれていた。私が学生のころ(1960年代)は、そうであった。たしかに当時は、さまざまな種類のプランクトンの分類

学、生物地理学、生理学、個生態学が研究の主流をなし、植物プランクトン群集の生産力と環境の関係、植物プランクトンと動物プランクトンの相互関係などが注目されて間もないころであった。だから、浮游生物学が海洋生物としてのプランクトンに関する生物学だという認識は、ごく自然なものであった。

1970年代に入ったころから、日本でもバクテリオプランクトンによる窒素固定とか、従属栄養鞭毛虫や繊毛虫の栄養塩再成(無機化)作用、また深海生態系への物質輸送に果す動物プランクトンの役割とか、非生物であるデトリタスの生態系内での役割やプランクトンとの相互関係などの研究がさかんになった。プランクトンが海洋の物質代謝の駆動者であるという認識が強まってきたのであった。このころより、浮游生物学は海洋生物学の中心的な分野であるという性格に加えて、浮游生物学は海洋学の1分野としての生物海洋学であるという考えが、鮮明になってきたのである。これこそが、最初に掲げた藤田経信の序文の意味するところであったらう。生物海洋学という語は、今ではすっかり定着したといっ

てよい。70年も前に明言されていたことが、今になってようやく定着したというのはなぜなのだろうか。そのような疑問を抱きながら、プランクトン学の歴史を、ざっと見直してみようと思う。

## 2. プランクトンという語

プランクトン学の歴史をみる前に、まずプランクトンという語そのものについて理解しておきたいことがあ

る。プランクトンとは、ほとんどが顕微鏡なしには見る  
ことのできない微小な生物で、運動力がないか、あつても微弱で、水の動きに流れ漂って生活している水中生物の総称である。この語はギリシア語の *πλαγκτος* を語源としており、その意味は“さまよい”、“放浪”であると説明されることが多い。ギリシア語辞典によれば“船の漂流”とか“道を迷い誤ること”とか、“意思をもって、あるいは道を誤って、あるいは悩みや苦しみのために放心状態となつて、さまようこと”などと説明されている。そのもとになる語には、さまようという受動的な意味とともに、“他者をだましたり惑わしてさまよわせる者”という能動的な意味があることも示されている。

Hardy (1956) は、海のプランクトンの語源としては“さまよい歩くように運命づけられているもの”、すなわち自分の意志では律することのできない漂流、といった受動的な意味がふさわしいと記している。古典ギリシアの運命論的な思想の土壌に想いをいたせば、この論には強い説得力を感ずる。プランクトンは、水中で浮游生活をするように運命づけられているのである。

プランクトンは浮游生物と訳される。漢和辞典によれば、浮游の語は前漢中葉の書「淮南子」にみられ、“あちこちと歩きまわる、ところ定めず旅をする”とか“カゲロウ（昆虫）”という意味であった。約200年時代がさがった西暦80年ころの「漢書」では、“職業がなく流浪する”という意味でも使われるようになった。

今日では游という漢字の使用が制限されるので、浮遊という語をあてることが多くなつてきた。しかしこの語は、はるかに古い書「莊子」に“ぶらぶら遊び歩く”という意味で使用されていたのである。浮遊の語はのちに“浮びただよう”という意味をも持つようにはなつた。けれども、それよりはるか昔にすでに“水に浮ぶ、舟遊びをする”とか“浮びただよう”という意味の語が別にあつた。浮泛（ふはん）あるいは泛濫（はんれん）という語がそれで、それぞれ「晋書」や「文選」で使われていた。だから、浮遊の本義はあくまでも遊び歩くことである。プランクトンの訳語は、やはり浮游生物の字でなければならないと思われるのである。

プランクトンを浮游生物と訳したのは、藻類学の大先達である岡村金太郎であつたようだ。彼自身の言によれば、1900年のことであつた。Plankton という語が最初に造られたのは1887年であつたから、それから13年後に邦訳ができたわけである。Plankton という名称の産みの親はドイツの Victor Hensen (図-1) であるが、この語ができる以前は、プランクトンやその仲間がドイツ



図-1 Victor Hensen 教授。Plankton という語の創造者にして近代的なプランクトン学の開祖 (Fraser, 1962 より)

語で Auftriebe (上層へ浮び漂うもの、浮力、揚力などの意味) と総称されていた。プランクトンを浮游生物と訳したとき、Auftriebe は浮泛生物 (フハンセイブツ) と訳された。後者の Auftriebe と浮泛生物の2語には水に浮ぶというニュアンスが濃厚なのに対して、プランクトンおよび浮游生物は特に水を意識した語ではなく、さまよい歩くという意味の方に力点がおかれている語なのである。

のちに岡村金太郎 (1904) は浮游生物を一字で表記することを提案した。漢字に適切な文字がないので、新しく「蜉」の字を創字した。これは漢字ではなく、日本で作られた日本字であつたが、残念ながら定着することはなかつた。

以上のような言葉の背景をみてくると、同じく“さまよい歩く”という意味を持っているにしても、英語の wandering にも漢語の浮遊にも、ギリシア語起源のプランクトンという語に含蓄されている運命論的なニュアンスが欠けていることがわかる。これは古典ギリシアと古典中国および英語圏における宗教観や人生観の差異を示しており、これだけを吟味しても大変興味深い論議ができるはずのことからである。いずれにしても、浮游生物という漢字では、プランクトンという語を完全に訳しきれていないのである。そのうえ、使用上の制限があつて游の字を使いにくいというのであれば、今後はむりに漢字を使わずに、片仮名でプランクトンと書くのがよいと思う。

### 3. プランクトンの運命の根源

プランクトンは“さまよい歩くように運命づけられているもの”(Hardy, 1956)なのだが、それはなぜなのだろうか。そのことについて考えることは、海の生物の生きざまを理解するための、最も基本的な観点の1つを形成することにつながるであろう。

まず海中の環境を簡単に要約してみよう。最も基本的なことは、海は深くて水に満されているということである。水の吸光度、粘度、密度は空気に比べておよそ3桁ほど大きい。それで、一次生産過程である緑色植物の光合成が可能なのは、海洋のほんの表層に限られる。しかしその表層は、海水の混合しにくい性格により、貧栄養である。だから海洋の緑色植物は、明るい表層に浮びつづけること、および貧栄養環境で高い光合成活性を維持すること、この2つの要求を同時に満足できるものでなければならない。これを可能にする唯一の方途は、体の小型化である。

小型であればあるほど体表面積(S)と体積(V)の比(S/V)が大きくなる。このうちVは体重すなわち沈降力と代謝総量すなわち栄養塩要求総量を決定する。Vの大きな植物は、沈降力が大きく栄養塩も多量に必要とする。一方Sは、海水との摩擦すなわち沈みにくさと、体表面からの栄養塩摂取量を決定する。大きなSは沈みにくさと高い栄養塩摂取能を保償する。従って小型のものほどS/V比が大きくなるので、沈みにくくて、かつ、貧栄養環境に順応しやすいということになる。この小型化ということが、海洋の一次生産者となりうるための、唯一の適応であり、これを果たしたのが植物プランクトンなのである。その大きさは1 $\mu\text{m}$ 以下から100 $\mu\text{m}$ のオーダーである。

この微細な植物プランクトンを直接摂食するために、海洋の植食者は繊細な濾過摂食器官を発達させなければならない。それを実現するために、海洋植食者はやはり小型化しなければならなかった。それが動物プランクトンである。かれらの小さな体は、植物プランクトンがいる表層で浮游摂食するために、再び有利である。このような動物プランクトンが存在するおかげで、魚類などは餌にありつくことができるのである。

ふつう、プランクトンは小さい生物だとか、海中にただよう小さな生物をプランクトンという、というように表現される。しかし自然の姿をもっと的確に表現するならば、海洋の低次生産を支えるものは、体を小型化して

浮游しつづけることに成功したプランクトンでなければならない、というべきである。プランクトンは、海洋生態系の進化の過程で、文字どおり浮游しつづけるように運命づけられて誕生してきたものなのである。

### 4. プランクトン以前の時代

小型な生物であるプランクトンの重要性が認識されたのは、そう昔のことであるはずはない。クラゲのように大きなものとか赤潮のような現象を例外とすれば、プランクトンは人の目につくことはなかった。

前史時代の人と海との関係は、われわれ日本人が空想するほどには、密接なものではなかった。主な古代文明は海から遠くはなれた内陸の、大河川の周辺で誕生している。メソポタミア、エジプト、インド、中国ともにそうである。ギルガメッシュの物語、ピラミッド・テキスト、リグ・ヴェーダ、中国古代神話などをみても、海は大して重要な役割を担ってはいない。流れる河水の行く末とか、遠い異国への路をへだてる障害くらいにしか考えられていなかったことがわかる。魚介類を採るとか塩を作るといようなことはあったにしても、海の存在は日本人が考えるほど主要なものではなかったのだ。

それが古典ギリシアあるいはその直前の時代に至って、人と海の間が急速に深まっていく。その多くは航海と関連していた。「海の民」が地中海東部で活躍したのは、紀元前1500-1200年ころとされる。イアソンが率いるアルゴノートが黒海に入ってコルキスに遠征したこと、またトロイ戦争のためにギリシアの連合艦隊が小アジアに侵攻したのは、それらが史実だとすれば、このころのことであつたらう。史実ではないにしても、似たような遠征航海がいくつもあつたことは、まちがいない。黒海が現在のような無酸素状態になったのは、今から5,000年くらい前ともいわれている。イアソンたちが見た黒海がどんなようすであつたのかを想像してみるのも、楽しいであろう。当時は、少なくとも黒い海とは呼ばれていなかったのである。

それ以後の、航海術との関連で海と気象に関する知識が増大していく過程は(図-2)、例えばFreuchen(1957)、Ross(1970)、宇田(1978)など多くの本に記載されているので、ここでは省略する。

一方、食料としての魚類の需要も増大してきた。特に18世紀後半から一般化したヨーロッパのグルメブームは、北東大西洋の魚類資源の乱獲を招来しそうな勢いになってきた。ナポレオンが台頭するころからヨーロッパ

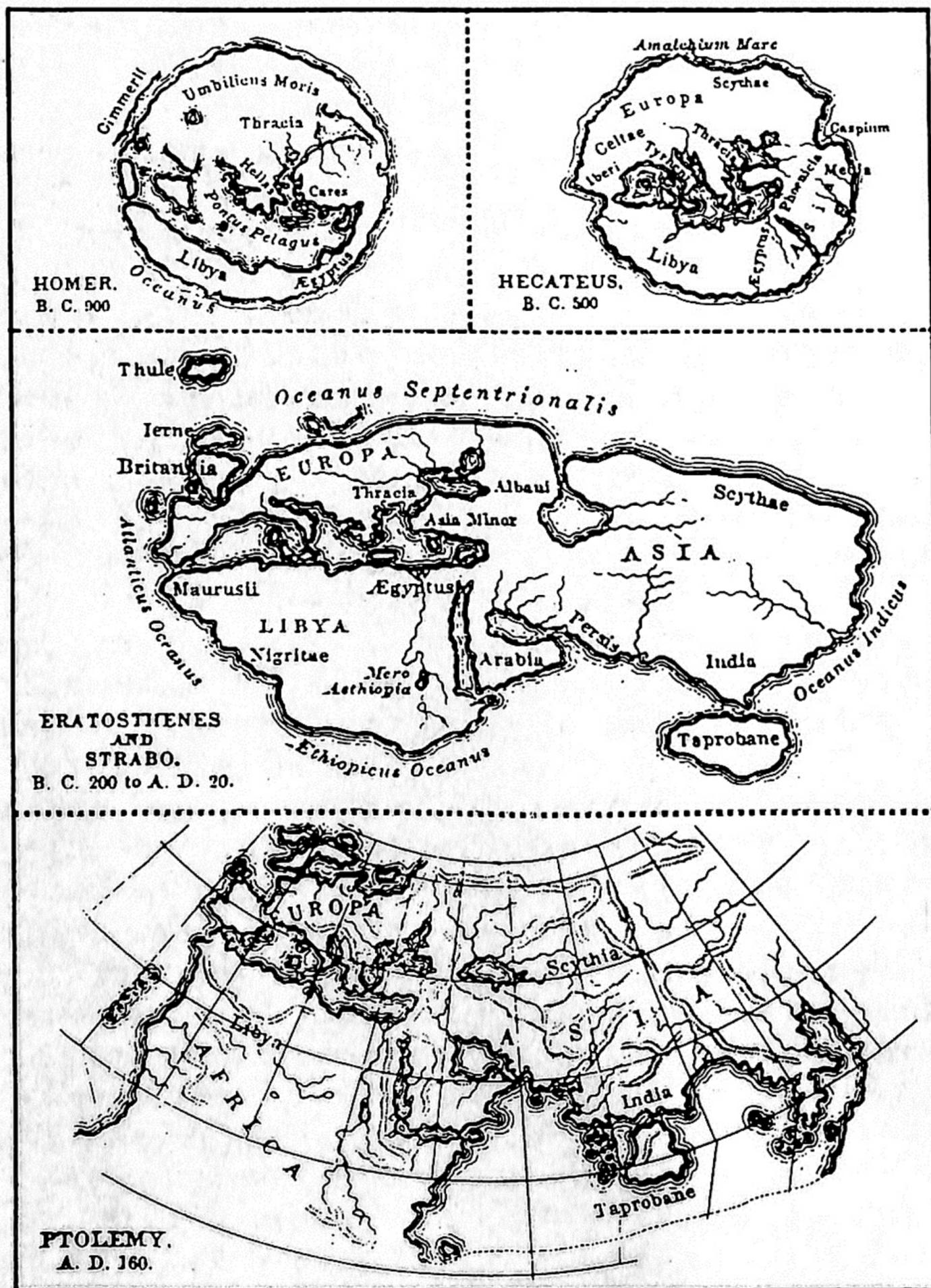


図-2 古典ギリシア時代以降、急速に進歩する地理学的知識。初期には地中海が海であり、世界の中心にあると考えられていた。陸地をとりまくオケアヌスは大河と考えられていたが、時代を経て大洋と認められるようになった。このような知識の進歩は、“海の民”とその影響を受けたフェニキア人やギリシア人の活発な航海のたまものであった (Freuchen, 1957 より)。

各国は膨脹策をとり、国際関係は複雑かつ先鋭になり、海洋魚類資源保護に関する国際協調はおろか、漁獲競争は激しくなる一方であったらう。ナポレオン戦争の後にはトロール漁法が普及し、汽船や汽車が発達するにつれて漁場も漁獲量も消費地も拡大しつづけた。特に汽船の発達でノルウェーなどの天然氷の輸入を可能にしたので、漁場と消費地をさらに拡大したのである。

19世紀後葉になるとトロール漁船も汽船化され、機動

力は飛躍的に大きくなった。最も決定的なことが1894年に起った。オッタートロールの発明である。軽量でコンパクトに収納できるトロールネットで、広い面積を曳網する効率の良い漁網である。漁獲効率は以前とは比較にならぬほど増大した (Graham, 1956)。

こうした漁具漁法の発達にともなって、北東大西洋の漁業は、明らかに乱獲の状態になった。国際協調による資源の保護管理が必要なことは、だれの目にも明らかで

あった。時は第一次大戦前夜で国際協調はあいかわらず困難ではあった。だが、危機感が強かったこととスウェーデン王オスカー二世の呼びかけが功を奏して、1899年に国際会議が開催され、1901年にはInternational Council for the Exploration of the Sea (ICES) が創設された。ヨーロッパ各国がそれぞれ分担海域を決めて重要魚種の調査を行い、毎年その成果を研究集会に持ち寄って討論するというものである。戦時中に一時中断したが、ICESの活動は今日も続いている。

このような漁業資源の劣化過程で、漁業資源それ自体の研究とともに、その生産の基盤をなす海洋環境とプランクトンに関する研究も発達した。重要魚種の産卵や索餌の回遊、漁場の形成などが海流や水塊配置と密接に関係していることが明らかになるにつれて、それまで航海術の興味から調査研究されていた海洋の物理学や地学は、漁業の研究と結合することになった。

### 5. プランクトン学の始まり

漁業資源の状態の明らかな悪化は、海洋環境の生産力について正しい知識を得ることの重要性を強調するきっかけになった。ドイツでは1870年から海洋研究を本格化させることになり、当時は医学生理学の教授だったV. Hensenは新しいタイプの海洋生物学に着手することに

なった。物理学化学環境パラメータと結合した重要魚種の資源量、分布、食性、繁殖、回遊の研究である。特にニシンの卵稚仔の研究を通じて、Hensenは卵稚仔やプランクトンはプランクトンネットを使うことによって定量的に採集調査しうることを確信した。彼は定量性を高めるために、水平曳網のかわりに鉛直曳網法を採用したのである(図-3)。このことが、近代的なプランクトン学の出発点になったといわれている。

微小なプランクトンの存在が人々によく知られるようになったのは、第一に17世紀後半の顕微鏡の発明(図-4)、次いで19世紀初頭の曳網の発明によるところが大きい。アイルランドの軍医J.V. Thompsonは最初に曳網を発明した人だといわれているが、彼がカニのゾエア幼生を発見して記載したのは1828年だという(Hardy, 1956)。C. Darwinのビーグル号航海記にも赤潮現象に関する記述(1832年3月18日)や、曳網を作って小さな甲殻類を採集観察したこと(1833年12月6日)がみられる。1940年代には、ドイツのJ. Müllerによって、曳網は海洋生物学の1手法として定着した。若きHensenは、このMüllerに影響を受けたにちがいないといわれている。

こうした先人達が発明した曳網とHensenのネットの基本的な差は、すぐれた定量性にある。それまで木綿布や船舶旗布などが使われていたのに対して、Hensenは

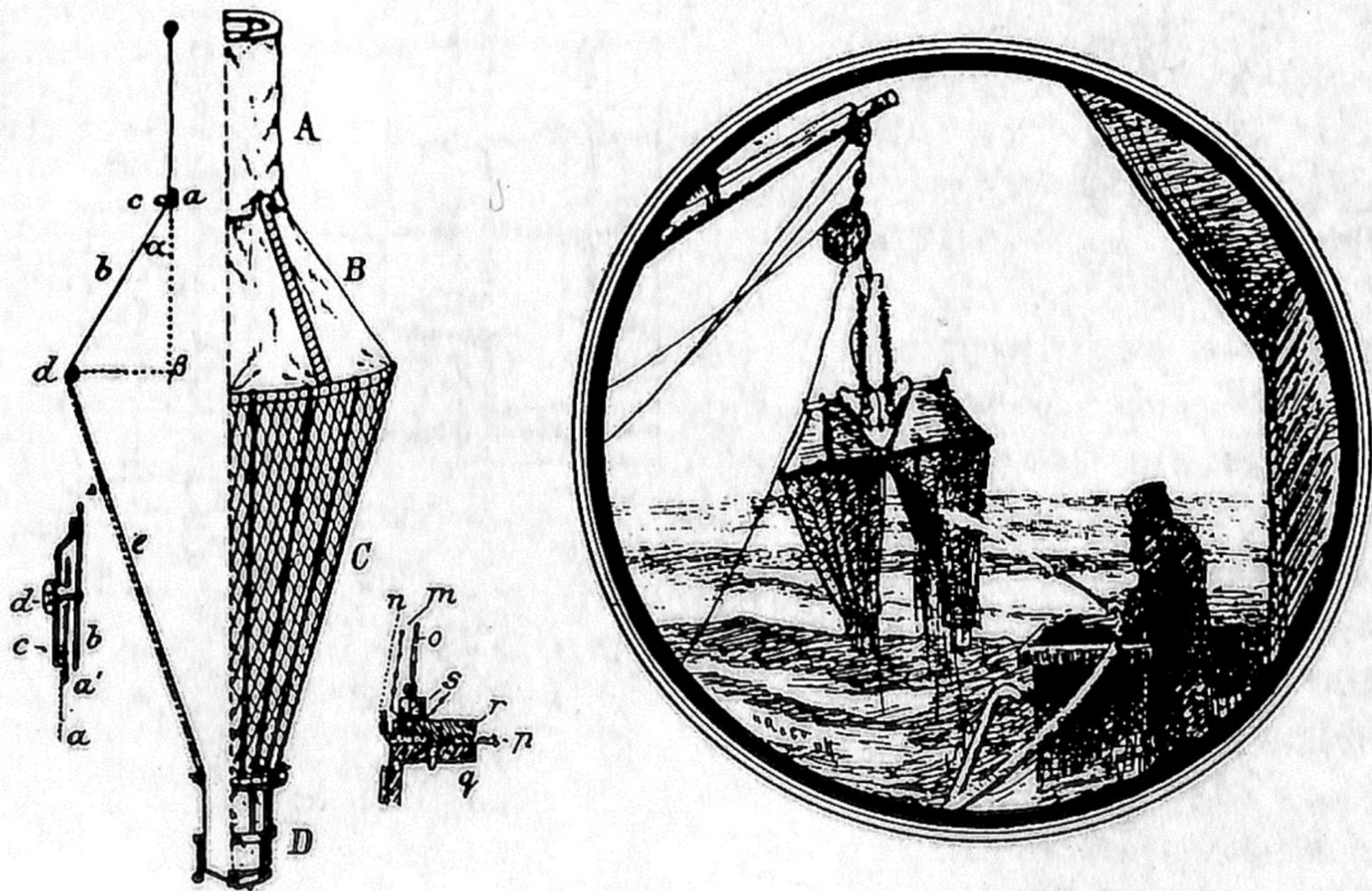


図-3 V. Hensenの定量プランクトンネットの構造(左)と船上での採集のようす(右)。濾水効率を高めるために、ネットの口輪面積は狭くしてある。この採集は双子型のネットで行われている。(左: Hensen, 1895, 右: Krümmel, 1892より)

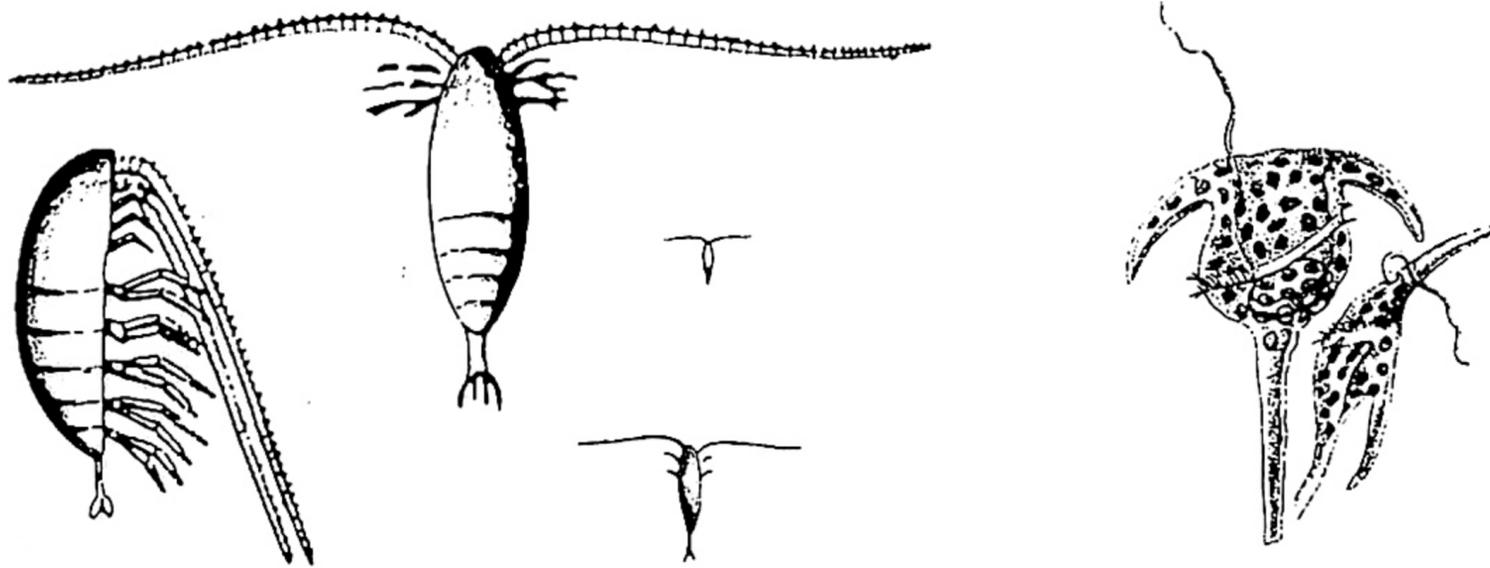


図-4 おそらく初めて科学的に記載報告された、動物プランクトンである Copepoda の *Calanus (Monoculus) finmarchicus* (左) と、植物プランクトンである Dinophyceae の *Ceratium (Peridinium) tripos* (右)。 *Calanus* は 1770 年に J.E. Gunnerus によって、また *Ceratium* は 1777 年に O.F. Müller によって、それぞれ報告された。海水をくんで顕微鏡で観察したものであろう (左: Marshall and Orr, 1955, 右: Dodge, 1984 より)。

目合いが正確で狂いのない製粉業用の篩絹（ふるいぎぬ）を網地として使用し、これを Müller ガーゼと名付けた（図-5）。また、フローメータがない時代だったので、室内実験により曳網の濾水量検定データを整備した。採集物の沈殿量（排水量）や個体数の測定法も厳密に規定した。重量や化学成分を測定することの重要性には気がついていたが、その方法は彼の弟子によって確立された。これらの定量採集および測定分析の基本原則は、今日まで継承されているのである。Hensen が近代的なプランクトン学の祖といわれる理由の 1 つは、ここにもあるのだ。

なぜ Hensen はかくもプランクトンの定量研究にこだわったのだろうか。彼の姿勢は、それまでの博物学的なプランクトン研究とは、明らかに異なったものである。かの有名な英国のチャレンジャー号の探検航海も、性格は博物学的なものであった。

Hensen の立場は鮮明である。世界初のプランクトン定量研究航海である Plankton Expedition を敢行した彼には、漁業資源の生産量は、究極的にはプランクトンの生産力によって決定されているという信念があったであろう（図-6）。魚類が産卵や索餌のために異なる水域間を回遊するのも、水域ごとに異なるプランクトン生産力の特性に原因すること、また、北海が生産性の高い漁場であるのに対して低緯度海域の漁業生産が低いのは、両海域で異なるプランクトン生産力に比例していることなどについて、彼は疑いを持たなかったのだろう。海洋の生物群集を有機的に考え、海洋環境とプランクトンと魚類とを、一体的に把握考究する立場を取ったといえる。この立場は、今日でいう生物海洋学の萌芽（ほうが）

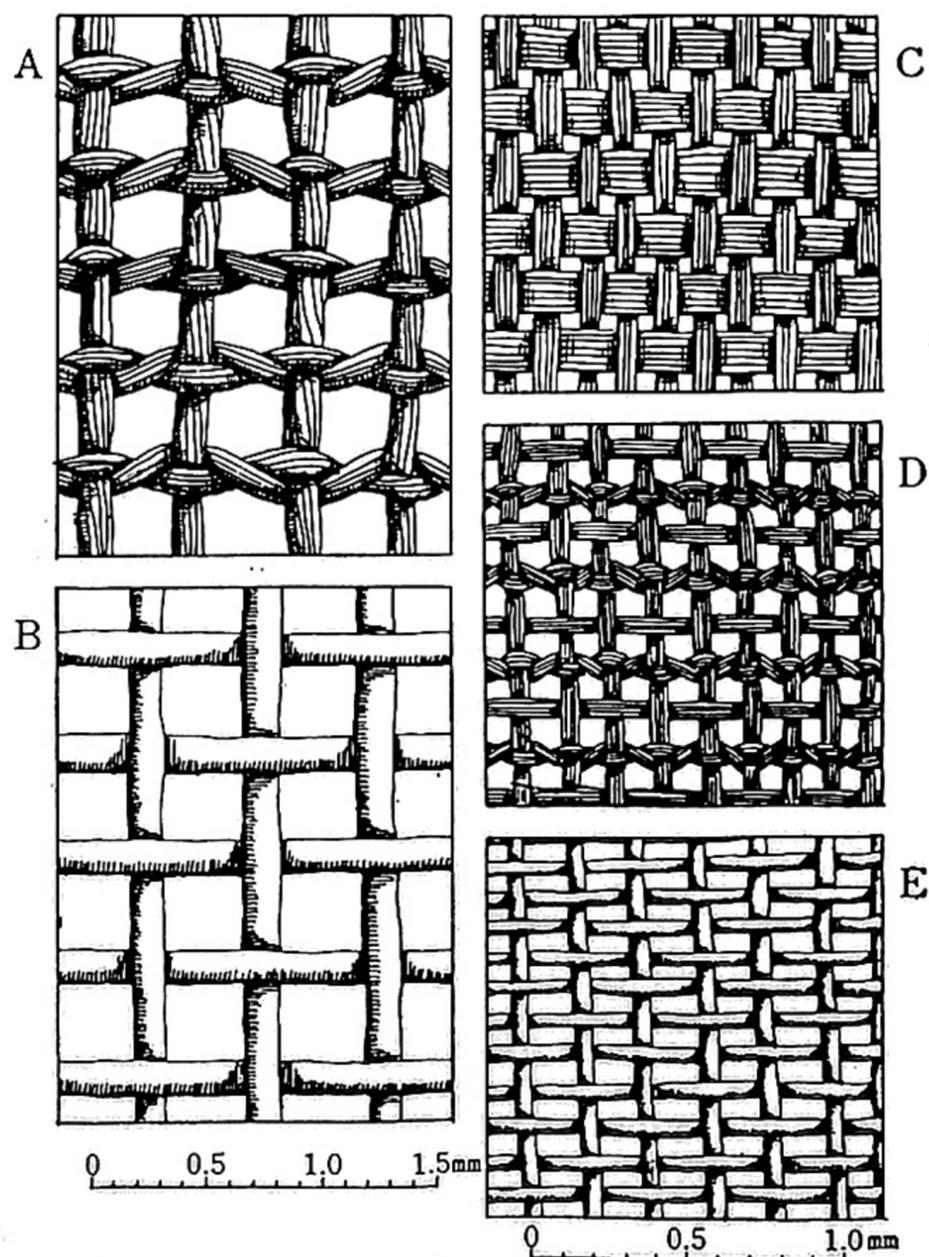


図-5 プランクトンネットに使用される布地。C は絵絹で、これを除く他のものは製粉業に使われる篩布。後者のうち A と D がプランクトン学ではミュラーガーゼとよばれる篩絹で、網目がずれないように特殊な織り方で作られていることがわかる（元田, 1974 より）。

である。Hensen が近代プランクトン学の祖といわれる真の理由が、ここにある。

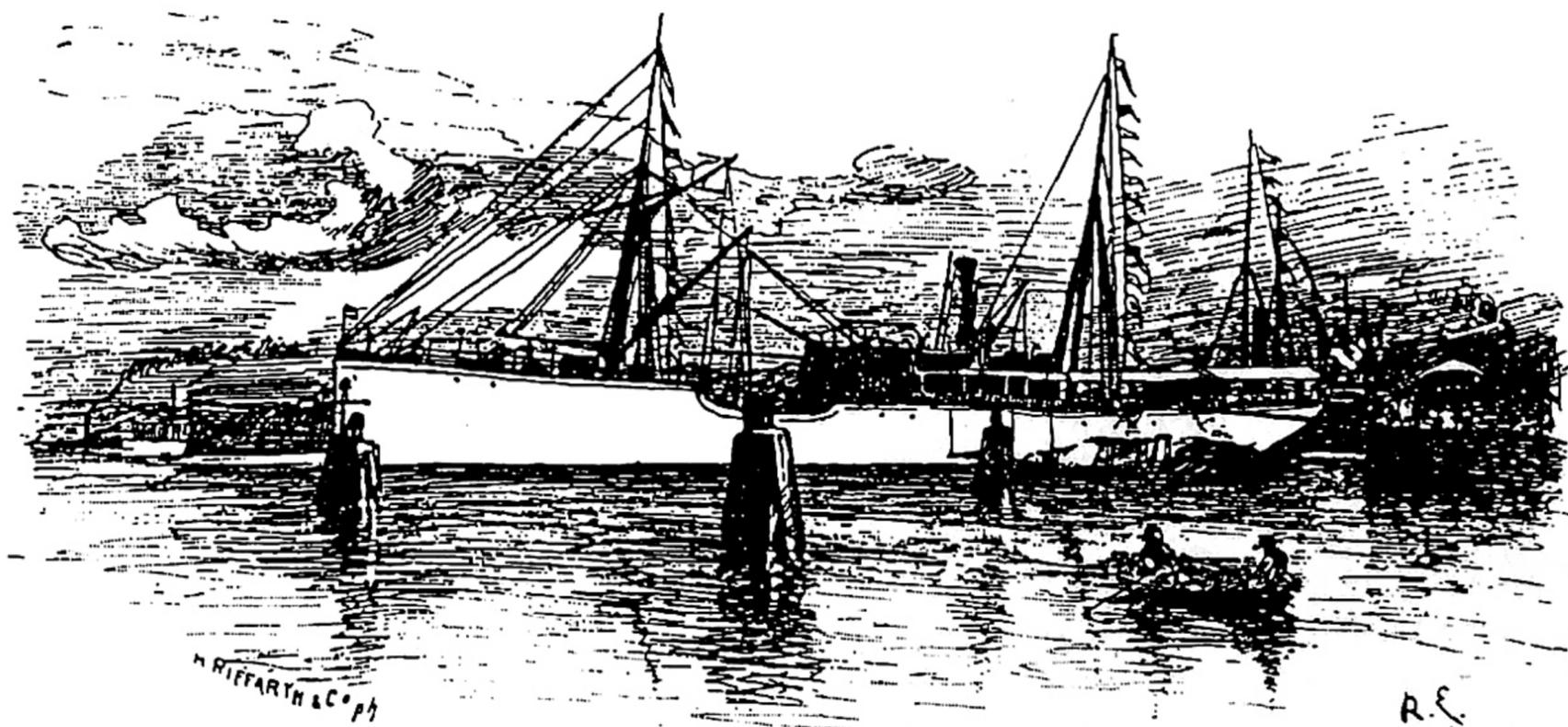


図-6 近代的なプランクトン定量研究航海の嚆矢（こうし）ともいべき Plankton Expedition を遂行した、ドイツの National 号。これまでの海洋研究航海は軍艦で行われていたが、この船は民間船であった (Krümmel, 1892 より)。

## 6. 生物海洋学への進化

上述の Hensen の考え方に疑いを持つ人は、今日ではほとんどいないであろう。しかし当時は、高温の低緯度海域よりも低温の高緯度海域のほうがプランクトン生産が高いというような主張は、すぐには承認されなかったのである。ある人はプランクトンネットの採集効率を疑い、ある人はプランクトンの分布が不均一であることを主張して、Hensen の定量研究法に異議をとなえた。漁業生産の大きさに比べてプランクトンの量が少なすぎるので、プランクトンが魚類の生産を支えているという Hensen の考えは不十分だと反論する人もいた。Hensen にとって、これらの反論は予期できたものであった。すなわち、ネットでは採集できない微細なプランクトンがたくさんいること、プランクトンが集中分布すること、現存量と生産量とは別次元のものであること等々である。しかし、実際の研究成果を集積してこれらの反論に答えるには、時間が必要であった。その役割は弟子が引き受けることになった。

それ以降今日に至るまでのプランクトン学の課題の多くは、このころの論議から発展してきたといっても過言ではない。研究の手法や規模は格段に進展したが、基本的には、海洋の物理化学的環境とプランクトンの生理学生態学との関係、あるいは海洋の物質代謝系内で果すプランクトンの役割に関して、さまざまな研究が行われてきている。初めのころに集中的に研究されたのは、バク

テリアを含む微細なプランクトンの現存量と生産に関する研究と、海洋生態系内の窒素循環の研究である。特に後者の研究過程では、窒素固定の重要性が明らかになっただけではなく、もっと決定的な認識が得られた。それは、Hensen が予測したように、海洋の生産系ではプランクトン生物量が何度となく更新されるということである。今でいう再生生産 (regenerated production) の概念である。

耕作地の生産量を高めるために施肥をすること、施肥量が収穫量を決定するという当時の農学の常識からみれば、海洋の一次生産量が栄養塩の濃度よりも回転率によって決定されるという考え方は、大きな発想の転換であったであろう。それまでは陸上生産系のアナロジーとして海洋生産系をみていたのが、両者の生産の特性が根本的に異なるという見方に変ったのである。この見方は、動物プランクトンは植物プランクトンの摂食者であるという一面的な考え方を、動物プランクトンは植物プランクトン摂食者であると同時に植物プランクトンへの栄養塩供給者でもあるという、両側面的な考え方に変化させることにもなった。栄養塩を媒介にして、植物プランクトンと動物プランクトンを組み合わせて1つの動的な系とみなす考え方は、今では当然の考え方ではあるが、それが成立するにはそれなりの背景があったのである。冒頭に引用した藤田経信の序文には、この当時の海洋生物学、水産学、プランクトン学の雰囲気を感じるのである。

ここに生物海洋学が始まったのである。

## 7. 拡張する興味

上記のような雰囲気の中で、植物プランクトンから動物プランクトンへの食物連鎖関係や、さらに動物プランクトンによる栄養塩再生供給過程を総合化する研究が始まった。この初期の研究は、英国 Plymouth 海洋生物学研究所や米国の科学者に負うところが大きかった。Plymouth の研究所長 E.J. Allen は、1 個の生命体ともいえる海洋生産系の機構は、究極的には物理学と化学とで解き得るであろうと考えて研究を推進したという。米国では、Scripps 海洋学研究所の R.H. Fleming が、多種多様な構成の植物プランクトン群集と動物プランクトン群集を、それぞれあたかも 1 種類の生物であるかのように抽象化した数式モデルを提示した。

Fleming のモデルはあまりに単純なうえにあまりに演繹的なので、評判は良くなかったという。最初これをあまり好きになれなかった G.A. Riley は、しかし数式モデルの将来性を見抜いて、さらに発展させて数理生態学のセンスをプランクトン学へ導入した。このセンスは種々の知見やデータを総合化するものであるが、その完成度を高めるためには、研究の分析的な深化を必要とする。例えば、動物プランクトン群集を食性によって分けるとか、摂食速度を種別とかステージ別に測定するとか、測定精度を高めるとかということが、それ以前にもまして要求されるようになった。

そういった各個の課題は、実はそれだけで十分に興味深く、かつそれぞれに奥深く独立した研究の課題なのである。だから、総合を最終的にめざしながらいったんは分析的な方向をとることにした生物海洋学の幹から、数多くの課題への分枝が派生し、それらはやがて種(たね)を落して独得の新しい研究分野へと独立していった。しかも、それぞれの分野間にはほとんど脈絡がないかのような様相までみられるようになった。生物学、物理学、化学等の分離はもとより、生物学的範囲に限ってさえ、植物プランクトンの生産生理の研究グループと動物プランクトンの代謝生理の研究グループは、たがいに独立していたというような状態がふつうになったのである。これは、良くいえば生物海洋学の興味の拡大であるが、悪くいえば分裂放散である。私が学生のころの日本のプランクトン研究は、ちょうどこのような状態にあったといえると思う。個々の研究はさらに深化し、発達して今日にいたっている。

学位論文のように個々の研究ごとに独創性と高い水準

の成果が要求される場合には、こうした研究の進め方が有利であり必要なことであるから、日本の大学の大学院が整備拡充されるにともなって、こうした傾向はさらに顕著になっていくことであろう。それはそれでよいが、そのときに藤田経信の警告“衆盲象を評す”ことにならないように、幅広い視野あるいは生物海洋学的の視野を失わないようにする努力が必要であろう。それは若い研究者よりは、その指導にあたる年輩の研究者が心にとどめておかねばならないことであろう。

## 8. 近年の傾向

近ごろは、いわゆる地球環境問題が深刻になってきた。局地的な環境汚染や環境破壊とは異って、地球規模の環境変化はゆるやかに起こり、人体を直撃することが少ない。ふつうは、まず人間をとりまく広域環境や生態系にわずかずつ圧力がかかり、その集積の結果がやがて人間にふりかかってくる。従って、原因を排除するという直接的な対応のまえに、ゆっくりと、しかも広域の環境や生態系に起こる変化を正確に把握し、近未来を予測することの必要性が痛感される。この必要性が、放散した海洋物理学、海洋化学、プランクトン学を再び集約する方向へ導いているようにみえる。ここ数十年間見失われていたかのような生物海洋学のルネッサンスのように、私には思われる。

その例としては JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) とか GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics) とか PICES (North Pacific Marine Science Organization) などの研究計画があげられよう。最後にあげた PICES は、正確にいうと研究計画ではなく、研究計画を立案勧告する研究機構である。そのモデルになったのが前出の ICES であった。PICES は、Pacific ICES という愛称であり、正式の名称は上記のとおり北太平洋海洋科学機構という意味である。

JGOFS は炭素を中心とした物質のフラックスの研究計画であるが、プランクトンを中心とする生物の活動がフラックスの担い手であるとする観点が据えられている。GLOBEC と PICES はもっと直接的にプランクトンへ力点を置いている。予想される地球環境の変化に対して、海洋生態系とりわけ動物プランクトンや魚類群集がどのような応答をするのかを課題としている。こうした近年の傾向は、1887 年にプランクトンという新造語とともに Hensen が提示した研究の進むべき方向に端を発して、今世紀初めの 1/3 くらいが過ぎるころまでに形成さ

れた生物海洋学的センスへの回帰のように、私には思われるのである。

## 9. プランクトンの科学

もちろんすべてのプランクトン研究が生物海洋学的センスで行われたのではない。局地的な環境問題としての赤潮や貝毒プランクトンの生物学や生化学は、日本で最も発達した分野である。人工養殖魚の初期餌料としてのプランクトン大量培養技術の実用化も、日本でいち早く完成された。プランクトンの各種の地理的分布の研究は水塊指標種概念を誕生させたが、水塊指標種の実用的な価値は本邦三陸沖のように複雑な水塊配置・混合が起っている海域でこそ、より有効に発揮されている。

動物プランクトンの日周鉛直移動や個体発生にともなう季節的鉛直移動の行動は、深い海という環境への動物の適応のあり方を示した。多種多様な動物プランクトンの代謝活性の測定結果は、分類学的な差異などを超越してあらゆる変温動物を貫く一大原理、すなわち環境温度と体重とによって代謝活性が決定されているという原理の存在を明らかにした。

測定機器や手法の発達にともなって、超微細なビールズのおびただしい存在が証明されようとしている。ビールズは植物プランクトンに感染してこれを殺すらしいとなれば、それは今まで考えられもしなかった植物プランクトンの死亡過程の発見である。同じく近年、超微細な植物プランクトンである原始緑藻が発見された。それがクロロフィルcとフィコビルン色素を持たずクロロフィルbを持つという事実が明らかになって、それまで行きづまっていた、単細胞藻類から高等植物へいたる進化学はにわかに活気を得た。

以上のようなプランクトンに関する生物学的研究の成果は、枚挙にいとまがないほど豊かである。それらの研究者が生物海洋学的な目的意識を持っていなかったからといって、これらの成果には生物海洋学的センスが欠けているとは、必ずしもいえない。ダーウィンの時代を境にして、生物学は革新的な変化を遂げた。まず、進化論の論議に欠くことのできない観点として、生態学の必要性がドイツの E. Haeckel によって主張された。ほかの生物学の分野と同様に、というよりはそれ以上に、プランクトン研究者は生物と生物の相互関係、生物と環境との関係、種の変異性や適応能力について、常に強く意識するようになっていたのだと思う。

わずかな深さの差でも環境条件の傾斜が大きいことと

か、小さなプランクトンネットの採集標本に、陸上の森林生態系を丸ごと投入したかのごとく多種多様な生物群集を見出すようなことを日常的に経験すれば、視点はおのずから複眼的になり、思考過程は動的にならざるを得なかったであろう。プランクトンの科学には、そうした性向が内在しているのである。だから、とりたてて生物海洋学を標榜（ひょうぼう）することはないのかもしれない。

しかし近い将来に、食料問題とか環境修復の問題、あるいは新素材探索などに関係したプランクトン学の新しい展開が起こるであろう。バイオテクノロジーがプランクトン学に導入される可能性も小さくはない。そうした研究の発展は、ややもすれば技術偏重の風潮を強めて、プランクトン学に内在する複合的な思考過程の重要性を忘れさせる恐れをはらんでいるといえよう。未来にそなえて、現代のプランクトン学徒は、今また心がまえを新たにすることが大切だと思われるのだ。

### 参考文献

- 1) Dodge, J.D.: Dinoflagellate taxonomy, 17-42. In *Dinoflagellates* (ed. by Spector, D.L.), Academic Press, Orland (1984)
- 2) Fraser, J.H.: *Nature Afloat. The Story of Marine Plankton*. G.T. Foulis, London, 178 pp. (1962)
- 3) Freuchen, P.: *Book of the Seven Seas*. Julian Messner, New York, 512 pp. (1957)
- 4) Graham, M.: *Sea Fisheries: Their Investigations in the United Kingdom*. Edward Arnold, London, 487 pp. (1956)
- 5) Hardy, A.: *The Open Sea, I. The World of Plankton*. Collins, London, 335 pp. (1956)
- 6) Hensen, V.: *Methodik der Untersuchungen. Ergeb. Plankton-Exped., Bd. 1.B.*, 200 pp. (1895)
- 7) 小久保清治: *浮游生物学*. 裳華房, 東京, 321 pp. (1923)
- 8) Krümmel, O.: *Reisebeschreibung der Plankton-Expedition. Ergeb. Plankton-Exped., Bd. 1. A.*, 370 pp. (1892)
- 9) Marshall, S.M. and A.P. Orr: *The Biology of a Marine Copepod Calanus finmarchicus (Gunnerus)*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 188 pp. (1955)
- 10) 元田 茂: プランクトンの採集, 191-225. In *海洋プランクトン* (丸茂隆三編), 東京大学出版会, 東京 (1974)
- 11) 岡村金太郎: 新作日本字「プランクトン」ノ披露. *植物学雑誌*, 18 (203), 15-16. (1904)
- 12) Ross, D. A.: *Introduction to Oceanography*. Appleton-Century-Crofts, New York, 384 pp. (1970)
- 13) 宇田道隆: *海洋研究発達史*. 東海大学出版会, 東京, 331 pp. (1978)

# 海に魅せられて 半世紀(XXIV)



## 略歴

1924年 福岡市に生まれる  
1946年 東京帝国大学第二工学部物理工学科卒  
1950年 東京大学理学部地質学科卒  
1962年 東京大学海洋研究所教授  
1968年 同所長  
1984年 放送大学教授  
東京大学名誉教授  
1994年 放送大学客員教授 現在に至る  
海洋科学技術センター評議員  
海洋開発審議会会長

奈須 紀幸 Noriyuki Nasu

## 13. 昭和40年代前半(7)

### ④ 白鳳丸の初外国航海(続き・その2)

1968(昭和43)年1月2日、ラバウルを後にした白鳳丸がハワイを目指す途中で地溝を発見したこと、これが約1億年前に太平洋で大規模な噴出を行ったスーパーブリュームの噴き出し口の名残りではないか、という疑いを最近持つようになったことについては前号で触れた。

本号では、ハワイ経由東京帰着までのエピソードの数々について述べる。

白鳳丸の食事はおいしい。朝は和食。パンを主食としてもよい。昼は洋食。夕食は和食。ただし早いので、夜8時ころ、簡単な夜食、例えばラーメンやうどんが出る。朝食は別として、1航海の間、同じメニューが出たことはない。この航海の時もそうであった。司厨長の苦心の程がうかがえた。

観測、採泥、食事、睡眠を重ねながらハワイに近付いていった。

旧日本海軍のデータでは、軍艦が外洋に出っ放なしで30日を超えると、急激に人身事故が増えたということであった。疲れるのである。私は、昭和28年、ベアード号でアリューシャン列島のエーダック島から函館までの航海に際して、20日を過ぎると疲れの溜まりかたが加速してゆくのを身をもって体験していた。淡青丸の場合、ほとんど1週間以内にはどこかの港に入るので問題はない。

白鳳丸は30日以上の無寄港航海も可能である。しかし、上述のデータを尊重して、私が首席を務める航海に関しては、すべて30日以内にどこかの港に入るようにした。このことは私が東大を停年になるまで破らなかった。海洋研の他の先生方にもそうなさるようにお薦めした。

ラバウル出航以来26日を経た1月28日、夜明けにオアフ島のダイヤモンド・ヘッドを見た。オアフ島はその南岸沿いに、東からダイヤモンド・ヘッド、ワイキキの砂浜、ホノルル港、国際空港、軍港が並ぶ。田中銀造船長はホノルル入港前に観光の機会を作るべく、船をいったんオアフ島の東端までもって行って、それから西行しつつワイキキの砂浜を間近に見ながらホノルルの港に入るように工夫してくださったのである。皆大喜びでワイキキの白い砂浜を飽かず眺めていた。ハワイは始めてという人が多かった。私はすでに7回ほどハワイを訪れていたが、ワイキキを海から眺めるのは始めてであった。

入港予定の時刻に合わせて船はたっぷり時間をかけながらホノルル港に入港した。白鳳丸にとっては初めての外国の港である。乗組員にも研究者にも、のんびりとしたハワイの休暇を存分に楽しんでもらいたいと思ったので、中6日の停泊をすることとした。勿論、最初からそのようにスケジュールを組んだのである。

ホノルルの港ではアロハタワーが建つピア(棧橋)が表玄関である。観光船はここに着く。当日、ここが混み合っていたのであろう。このピアよりやや西のピアに着岸した。

途端に船の中の緊張が解けた。ここからワイキキまでは相当な距離がある。早速、バスで行く人々がいた。歩いて往復したという乗組の一群があったのには驚いた。アロハタワーのすぐ北はホノルルのダウンタウンである。中華、日本食、洋食、土地のハワイ食の店、みやげ品店となんでもそろっている。研究者、乗組員とも皆三々五々、こうしたところへ散って休暇を楽しみ始めた。

船長と私は、いわゆる表敬訪問ということで、いろいろな役所などを訪れ、主だった方々に挨拶をして回った。

翌日、白鳳丸はアロハタワーのある棧橋へ移動した。これはハワイ州政府の大変な好意である。

それからの数日、白鳳丸の停泊中、各種行事をはじめいろいろのことがあって、中6日の滞在は瞬時のうちに過ぎてしまった。

研究者の中には、ハワイ大学をはじめ各研究機関の知り合いを訪ねる人も多く、また米国側の研究者で船を訪ねて見える方も多かった。

日本の総領事がお見えになった。これは私どもの表敬訪問に対する答礼訪問とも称すべきものである。当時、白鳳丸は恐らく世界の中でトップの設備を備えた研究船であったし、船内は冷暖房完備、居住性がよい、いわばゆとりを持たせた船であった。

ホノルルの総領事館では、船の全員を迎えての歓迎パーティーを開いてくださった。その後、総領事は再び船に来てくださった。余程お気に召したのであろう。もとより、航海訓練所の船をはじめとして多くの官庁船、民間船がホノルルを訪れている。総領事はそうした多くの船をご覧になっているはずである。が、白鳳丸のような船は始めてであったに違いない。くつろいでおられた。

白鳳丸でも、大層な気配りをして、先方の各所ともよく打ち合わせをして、各個人あてに招待状を送り、船上カクテルパーティーを催した。ロビーとその前の広い踊り場を使った。よくまあこれだけの人が入るものだと驚くほどの人が集まってくださった。100人を優に超える人数であった。司厨長の真壁さんが陣頭に立って、各種のお酒とおいしいカナッペを用意してくださった。パーティーは大成功であった。海洋研にとって初めての外国における当方主催のパーティーということになる。

たまたまハワイを通過された東大の大河内総長が訪ねて見えた。船首と船尾の白鳳丸という字は総長の揮毫になるものである。進水の時の支綱切断も総長が行われ

た。したがって我が子のような気持を持たれていたのであろう。私が船内をくまなくご案内した。大層喜んでくださった。帰国されて数か月後、いわゆる大学紛争が始まり総長を辞任された。大河内先生にとっては、このハワイ訪問時がもっとも幸せなころだったのであろう、後にそのような手記を書いておられる。

この航海の時の船医は、正規のシップ・ドクターが日本を離れられない事情があって、東京医科歯科大学の山科正平氏であった。ご専門は精神医学であるが、全般に通じておられて、皆が頼りにしていた。

当時、東京医科歯科大学の学部長の務めを終えられ、後に学長になられた勝木保次先生がハワイのイーストウェストセンターに研究のため滞在中であった。

私が1951年から55年までスクリップス海洋研究所に滞在中、1年とまではゆかないが、相当長期にわたって昼食をお世話した先生が2人おられた。お1人が東京水産大学の野野弘教授、専攻は私と同じ海洋地質学。もうお1人が勝木保次教授であった。お2人の滞在期間はずれていた。しかしお2人ともラホヤの町中にアパートを借りておられたし、奥様は日本に残しての単身渡米であった。

昼になると、どちらから誘うともなく一緒になってオフィスから5分ほどの距離にある私のねぐらに行く。25分ほどで私が手早く御飯を炊き、食事を作る。15分ほどで2人で食事を済ます。どういうわけか、私が立とうとしても、自分がやるとおっしゃって、先生が5分ほどで皿を洗ってくださる。その後5分ほどゆっくりして立ち上がりオフィスに戻るとちょうど午後1時になる。こういう日課が毎日続いた。

このお2人の先生との交流は私にとっては得る所大なるものがあった。楽しかった。でも、お2人の先生にとっては、私に対して一宿一飯の義理を負われたことになる。それだけに年の差を越えて親しくしていただいた。今はお2人とも故人である。

勝木先生は、妙手といわれるくらい、手先が器用な方であった。魚を生かしたまま解剖し、神経繊維を1本だけ取り出してその両端に電極を挿し、音響を与えた場合に神経の中の電位・電流の変化がどのような値を示すか、という研究をしておられた。

スクリップス海洋研究所が先生をお招きしたのは、この解剖技術を学ぶためであった。しかし、先生の滞在中にはとうとうこの技術をマスターする人はいなかった。後に、先生のお弟子さんが、再びスクリップス研究所に滞在されて、ようやくこの技術の伝授に成功されたとの

ことであった。

したがって、勝木先生の専攻は神経生理学の分野ということになるのであろう。

日本をたつ前にご連絡申し上げてあったので、すぐ連絡がついた。家に来い、とのことである。山科ドクターは勝木先生を大層尊敬しておられた。2人して先生のアパートに伺った。高層のマンションで素晴らしい眺望を楽しめる家であった。奥様の手料理で御馳走を頂いた。

その時、初めて知ったが、山科ドクターはかつての学生委員長とのこと。当時、勝木先生は学部長。“こいつには随分いじめられたよ”とおっしゃって、山科さんが頭をかいて大笑いになった。楽しい午後のひとときであった。

その時、勝木先生が、私を紹介したい人がいるからぜひまた会いたい、とおっしゃる。その翌日であったか、先生のオフィスへ伺った。そこから2人で、同じイーストウェストセンターのすぐ近くのオフィスへ赴いた。そこはベーケーシ先生 (Georg von Békésy) の部屋であった。未だ見ぬ日本への強い憧憬 (どうけい) を持っておられて、部屋一面に棟方志功の版画などが飾ってある。まことに柔和な先生であった。1961年、「内耳蝸中における刺激の物理学的機構の発見」でノーベル医学生理学賞を受賞された方である。神経生理ということで、勝木先生とは同学の士である。

ベーケーシ先生はハンガリーのブタペスト生れ。1946年までブタペスト大学の教授であったが、第二次大戦でソ連に占領されたのでスウェーデンに逃れ、渡米してハーバード大学を経てハワイ大学に落ち着かれたという経歴の持ち主である。1899年のお生まれだから、私がお目にかかった当時すでに70歳に近いお年であった。4年後にハワイでその生涯を閉じられた。

勝木先生に紹介されて3人で歓談した。今回の航海のことについても逐一お話し申し上げた。談たまま日本海溝や伊豆・小笠原海溝に話が及んだ時、私は7,000~8,000 mの海溝の底にも、なまこや深海魚などの生物が相当数生息していて、それらがドレッジや底びき網に結構かかって船上に上がってくることが多いと申し上げた。

先生の表情が厳しくなった。大変な関心を示され、今までそんなことは想像もしていなかった、もっとよく聞かせてくれ、とおっしゃる。私はさらに詳細に話を進めさせていただいた。

その後、すぐベーケーシ先生は “It is dangerous” という言葉を吐いては溜め息をつかれる。放心したように

してその言葉を何度もつぶやかれる。

私はいささか驚いた。深海の生物の話にこうした反応を示されたのは先生が始めてであった。私はすぐに気付いた。先生は原子爆弾に対比させて考えておられるのであろうと。陸上や浅海とは全く別の生理体系を持つ生物が深海底に生息している可能性がある。その生理を解明すれば、人類にとって益をもたらすものが得られるかも知れぬ。が、逆に原子爆弾のような恐ろしいものが生まれるかも知れぬ。先生のお顔には明らかにそのような思考推移の跡が見られた。

しばらくして、漸く気分が落ち着かれたらしく先生の表情に笑顔が戻ってきた。しばし歓談が続いた。やがて勝木先生と私はベーケーシ先生のもとを辞去した。でも、深海底生物の存在を知って幼な児のように驚かれた先生の反応の意外さは、その後長く鮮烈な印象として私の脳裏に焼き付いた。

それから9年を経た1977年、米国ウッズホール海洋研究所の潜水調査船アルビン号が、東太平洋海膨の支脈であるガラパゴス海膨中軸部で深海底の熱水噴出とそれを巡る生物のコロニーを発見した。その2年後の1979年には、同じくアルビン号が、東太平洋海膨中軸部でブラックスモーカーとその周辺生物のコロニーを発見した。これらの生物は、バクテリア、貝、イソギンチャクなどで、硫化水素を食餌としていることが判明した。果たして、ベーケーシ先生の予想どおり、陸上や浅海とは全く別種の生理・生態を持つ動物群が深海底に存在していたのである。こうしたコロニーは、その後、日本近海を含めて、「しんかい2000」、「しんかい6500」、並びにアルビン号をはじめとする外国の潜水調査船によっても続々と発見されつつあることは、周知の事実である。

従来、未知であったこれらの生理・生態系の研究、いわゆる深海バイオの研究から、人類やその他の生物にとって有用なものが生まれることを望むや切なるものがある。原子爆弾的なものでなく。

ホノルル滞在中、白鳳丸の人々は、私同様、各人各様の収穫を得て、1968年2月4日、ホノルル港を後にした。

写真-1は、出航時、知り合いになった日系の人からレイをかけていただいた筆者である。船は南下しつつあるので後方にダイヤモンドヘッドが見える。

東京までは14日の行程である。通常はホームスピードといってやや船速が早くなるので、東京港入港前に内房の館山港に沖がかりして一夜を過ごし、翌朝、東京湾に向かうことが多い。

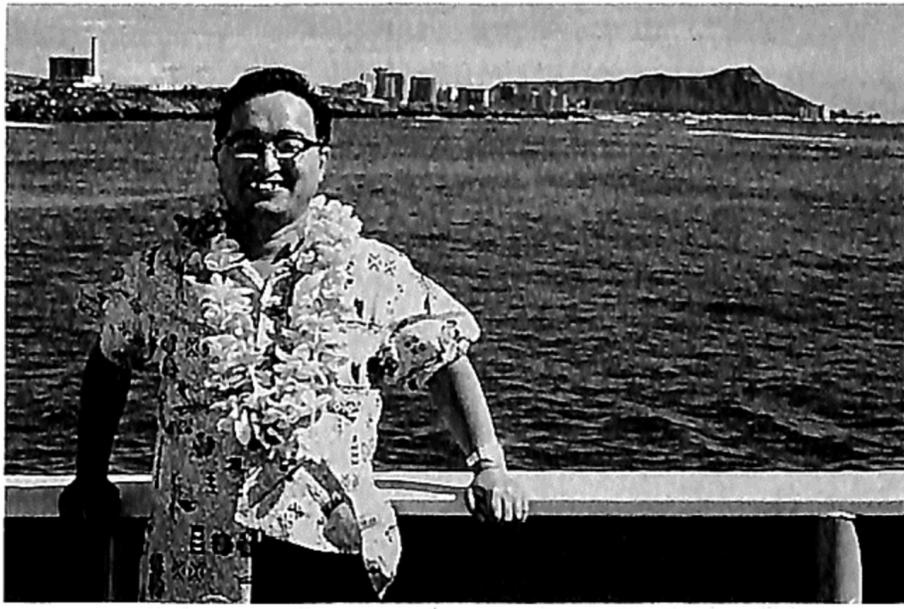


写真-1 ホノルル出航時の筆者

観測点は設けず、走航しながら測定できる海上重力や地磁気、気象観測、その他の観測を行ないつつ関東地方のはるか南方の海上に近付いた。

黒潮域を西行すると対地速度が落ちるので、東から東京湾に近付く際にはこのようなコースをとる。

白鳳丸が、そうした常識的なコースをとって日本に近付いた時、台湾低気圧に巻き込まれた。これは当時、台湾坊主と呼んでいたが、差別用語であるということで、その後訂正され、台湾低気圧、あるいは東シナ海低気圧というようになった。

夏の台風ならば、普通、一晩しのげばやり過ごすことができる。が、台湾低気圧の場合には数日数夜にわたることがある。この時もそうであった。

ものすごい風雨で、長年に及ぶ私の海上生活の中で、空前絶後の経験であった。

横波を受けるようになると、船が転覆する恐れがあるので、絶えず3~4ノット程度で前進しながら舵を利かして波に対して船を立てるようにする。スピードを上げるとピッチングがひどくなって堪え難い。したがって、

あまり前進することもなく、嵐が過ぎ去るまで耐え忍ぶのである。

ブリッジに上がると、波が高く、時にブリッジより高く見える。波高はこういうときでも8m±α程度のはずだが、ピッチングで船首が前傾しているときには、当然、波頭は目線より高いところに見える。海面そのものも、何か水が方々で湧き上がってくるような感じである。

田中船長は、この嵐の間、ブリッジに立ち尽くしておられた。

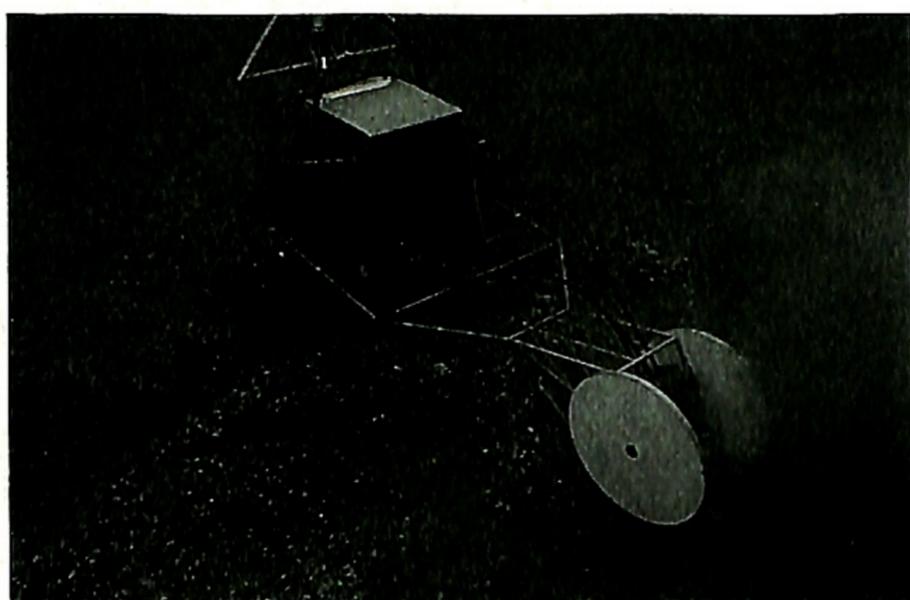
この嵐の真っ最中、西の方で日本の船が、SOSまではゆかぬが、その前段階の救援を求める信号を発しており、付近の船舶は救援に赴かれたし、との通報が入った。船長は、その船の方へ進もうとされたが、少しスピードを上げたら大変なピッチングが始まった。あまりにひどいので、いったんスピードを落とした。そうしたころ、下田から巡視船が救援のため出航して南下を始めたという情報がはいった。そちらにお任せすることになった。結果として、その船は自力でこの嵐をしのぎ、巡視船もそばまで達した由であった。

巡視船は、転覆しても元に戻るような設計になっている。安定この上ない設計になっている。が、ちょっと傾くとすぐ復元するので動揺の加速度が大きく、乗り心地は最高に悪い。私はかつて紀伊水道で乗せていただいたことがあるが、動揺周期の短いことに驚いたことがある。職務とはいえ、巡視船の乗り組みの方々へは常日ごろ、そのご苦勞に対して心からのお礼を申し上げているものである。

こうした、冬の嵐に遭遇という一幕もあったが、1968(昭和43)年2月18日、白鳳丸は初の外航を終えて無事、晴海の棧橋に着岸した。

乗組員、研究者ともども1つのハードルを越えた感じがあった。

# 雑海藻除去 システムの 研究開発



深海開発技術部 野口 利仁 Toshihito Noguchi

## 1. 概 要

我が国沿岸の浅い海域では、海藻群落が消滅したり、コンブ等の有用海藻類が繁茂しなくなり、石灰藻やホンダワラ類の雑海藻にとってかわられる磯焼け現象が各地で見られる。磯焼けの対策としては古くからコンブの胞子が付着しやすい新基質をつくるための投石、転石等に加えて、現在では岩礁爆破、ダイバーによる雑海藻駆除等の方法がとられている。しかし、それらを効率、安全性といった面から見た場合、対策として十分とは言えない。青森県と海洋科学技術センターは地域共同研究として、青森県の持つコンブ生産の技術と当センターの持つ無人潜水機の技術を融合させることにより、新しい雑海藻除去システムを開発することとなった。

本システムは、コンブの胞子が岩の表面に付着する直前の時期に岩についた雑海藻除去を目的としている。水中ビークルと呼ぶ無人潜水機の下部に装備したノズルから高水圧のウォータージェットを吹きつけ雑海藻を除去し、コンブの生育に適した新基質面を提供しようとするものである。本稿では「磯焼け」と平成3年度から5年度にかけ開発を行ったこの雑海藻除去システムの開発について紹介する。

## 2. 磯焼けと雑海藻

磯焼けとは海藻の生育するための太陽の光が届く約20mより浅い海域において大型海藻群落が消滅したり、コンブ等の大型有用海藻類が繁茂しなくなり、代わりに

無節、有節の石灰藻だけが生き残り目立つようになる、いわゆる“海の砂漠化”現象のことである（写真-1）。磯焼けはある種海藻の生育の停止を意味すると同時に、生態学的にはその海藻を中心とした生物生産活動の停滞をも意味している。岩礁地帯における海藻の林である藻場の重要性としては、海藻類の漁場としての役割は勿論のこと、そのほかに

- ① 魚類等の産卵場、あるいは稚魚の生育場所
  - ② サザエ、ウニ、アワビ等食植性動物の餌料場
  - ③ 海藻類が生育の過程で窒素、リンを取り込むことによる浅海域の水質の浄化、保全効果
- といったことなどがあげられる。

磯焼けは北は北海道、青森県から南は高知県、長崎県と日本各地の浅海域でその発生が多数報告されている。



写真-1 石灰藻に覆われ磯焼け状態の海底（青森県、佐井村沖海底）

口絵写真 雑海藻除去中の水中ビークル

磯焼けの原因として、海藻類の生育期である冬季の海水温度の上昇、栄養塩類の減少、塩分濃度の低下等により石灰藻や、ホンダワラ類の雑海藻に適した環境が醸成された結果ではないか、またあるいは種々の要因により生態系の平衡が崩れ、ウニ等の植食性動物が多くなりこれらによる大型海藻に対する摂餌圧が強まった結果、これらが消失するのではないかと等さまざまなことが考えられている。しかし磯焼けの現れ方も、地域によってさまざまであり、まだ定説といえるものはない。

磯焼けにおける有用大型海藻類の代わりに、顕著に現れる海藻類として石灰藻とホンダワラ類(写真-2)等が上げられる。

石灰藻：通常は紅色または桃色をしており、死ぬと白色の石灰質(炭酸カルシウム)が残る。石灰藻には有節石灰藻と無節石灰藻がある。

有節石灰藻は糸状の体枝を有し主枝の分岐または分枝の側出を繰り返し周囲へ広がりながら繁茂する。

無節石灰藻は主に岩の表面上に着生する石灰質の殻で覆われた苔状体の藻である。表面は種類により平滑であったり瘤(こぶ)状であったりと異なっている。中でも表面が平滑で岩全面を覆う甲羅のように厚く、硬くなっているものは非常に除去がしにくい。

ホンダワラ類：藻体は、付着器、茎状部、葉状部の3部に分化し、気泡をもっているものが多い。

### 3. 雑海藻除去の現状

コンブ漁場の保全、再活性化のために古くから行われてきた投石やマッケ曳き、比較的近年導入された爆薬や、ウォータージェットを利用した除去方式の概略は下



写真-2 石灰藻(桃色の部分)とホンダワラ類(右上の褐色部分)(青森県、大間町地先海底)

記に示すようなものである。

#### (1) 投石(図-1)

新しい岩(新基質)を海底へ投入することによりコンブのための藻場を造成するもので、投入直後は新基質が敷き詰められコンブの着床率が高い。なお、投入する石を青森県では県内の採石場のものを用いておりコストは比較的安い。投石を行う場所は主に砂礫地帯であり、有用生物に与える影響はほとんどない。しかし場所によっては投入した岩が数年で埋没してしまい再度新しい岩の投入が必要となる。

#### (2) マッケ曳き(転石)(図-2)

マッケとはコンブを刈り取る時のクマデ状の道具である。マッケ曳きはコンブの刈り取りを行うと同時に海底の岩石をひっくり返すことにより、新基質面を露出させる一石二鳥の方式である。しかし雑海藻の繁茂によりコンブの生育の悪い年にはマッケ曳きは行われなくなるため、さらに雑海藻が繁茂するという悪循環に陥ることになる。

#### (3) 岩礁爆破(図-3)

水中で爆薬を破裂させ、その圧力と衝撃波により雑海藻を除去しようとするものである。この方法は短時間に広い範囲の面積の雑海藻除去を行え、コストが比較的

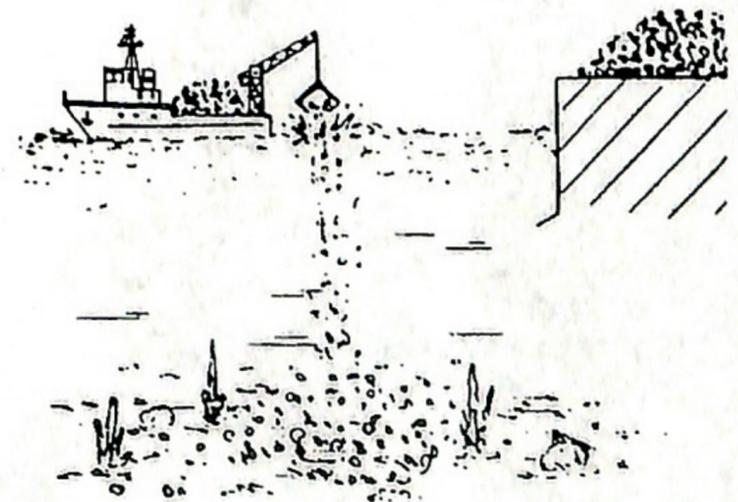


図-1 投石

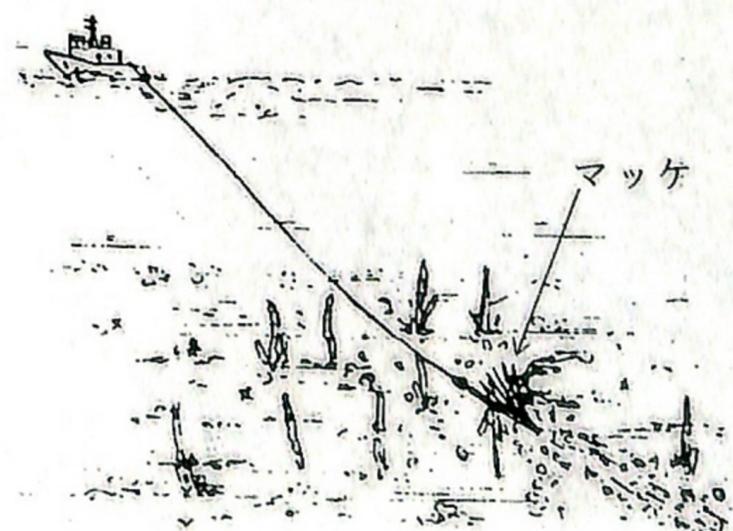


図-2 マッケ曳き

い。反面除去の対象を細かく限定することができず、雑海藻ばかりでなく有用な海藻や生物にも悪影響を与えることになる。さらに火薬を取り扱う性格上、船上での誤爆による人身事故の危険が常に付きまとい、運用にあたっては特別な知識、技術の習得が必要となる。除去の効果持続はコンブのライフサイクルにして2~3サイクル(4~6年)でありその後、再度雑海藻除去が必要となる。

(4) ウォータージェット (図-4, 図-5)

高水圧を利用したウォータージェット噴流を雑海藻に吹きつけることにより雑海藻を除去しようとするものである。現状ではダイバーが噴き出しノズルを手で移動させながら雑海藻を除去している。また洗耕機と呼ばれる半自動式のものが試作されている。除去の効果は高く雑海藻除去後の状態は岩礁爆破のそれにほぼ匹敵する。双方とも作業能率は300m<sup>2</sup>/日程度である。ただしコストが高いことと作業能率が悪いということから現在はあま

り行われなくなってきた。

4. 青森県のコンブと磯焼け

青森県内のコンブの総生産量の約7割を占める青森県下北半島北部、佐井村、大間町、風間浦村からなる北通り地区(図-6)は、古くからコンブ漁の歴史をもち、その全漁獲高に占めるコンブの割合は4割近くにもなる。この地域においても近年“海の砂漠化”である磯焼け現象が顕著に現れてきている。青森県の場合その原因にホンダワラ類、石灰藻を中心とした雑海藻が岩の表面に繁茂したために、コンブ等の有用海藻が繁茂できなくなったことが原因の1つに挙げられている。コンブは2年生の海藻であり本来1年ごとに豊凶を繰り返す性質を持っている。青森県全体では水揚げ量が、乾燥重量で1,500~1,700トンの豊漁年と800~1,200トンの不漁年を交互に繰り返してきた。しかし平成2年に約500トン、平成3

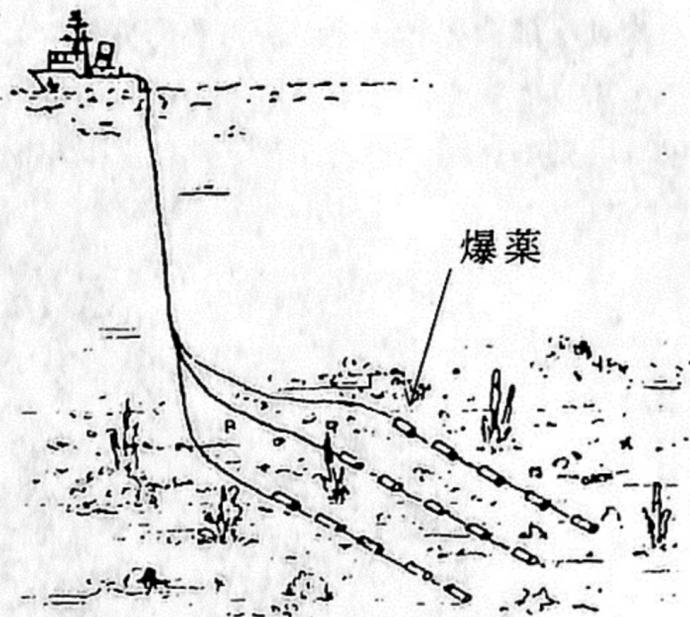


図-3 岩礁爆破

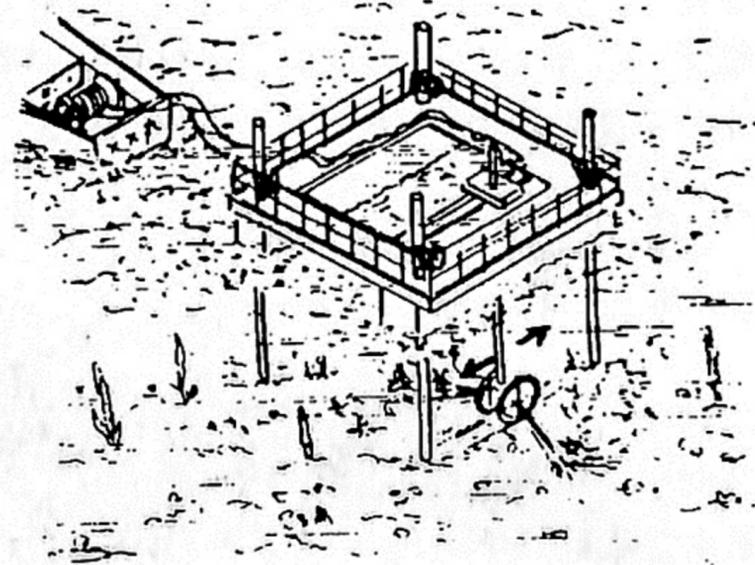


図-5 ウォータージェット (洗耕機)

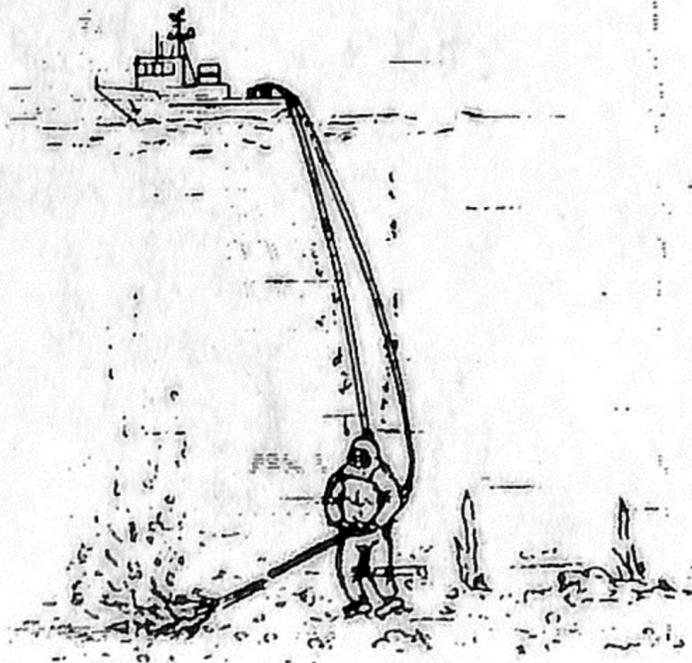


図-4 ウォータージェット (手持ち)

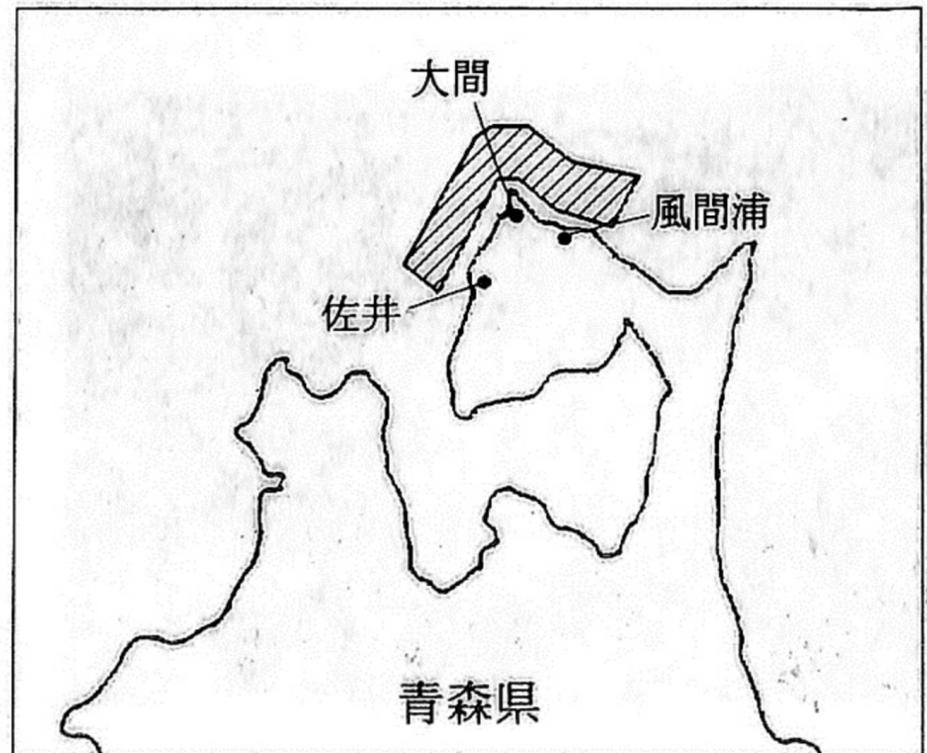


図-6 対象海域

年に約 200 トンと 2 年続けての磯焼けによると考えられるコンブの不漁が起こり、収穫の激減が漁業関係者に大きな打撃を与えた。

## 5. 雑海藻除去の時期

1 年生の雑海藻は、7 月終わりころから胞子を放出した後枯れ、流出し付着器または根だけとなる。一方、8 月の終わりころからコンブが遊走子を放出し始め、11 月ころから直立体が発生しはじめる。

雑海藻の除去作業は、図-7 に示すようなこれら海藻類の持つライフサイクルの違いを利用することがポイントである。したがって雑海藻が流出してから、コンブの直立体が発生し始めるまでの、8 月から 10 月ころが除去作業の適期となる。

## 6. システムの検討

### 6.1 新しい雑海藻除去システム

従来の雑海藻除去方法から新しい雑海藻除去システムに求められる要件は次の 3 点に集約される。

- ① 実用的な雑海藻除去効率を実現する。
- ② 有用生物へ悪影響を与えない。
- ③ トータルコストを安くする。

以上の要件に当てはまる方式として、本研究ではウォータージェット方式が現状の技術では最適であるとの結論に達した。ウォータージェットの噴射物は水であるから、直接噴射を受けないかぎり有用生物等は影響を受けることはなく、また海水をそのまま使用すれば海上での供給ができ費用もかからない点において非常に有利となるからである。

そしてウォータージェットのノズルの移動方法については、従来の方式であるダイバーが水中に入り移動させる方法については、ウォータージェットによる反力、振

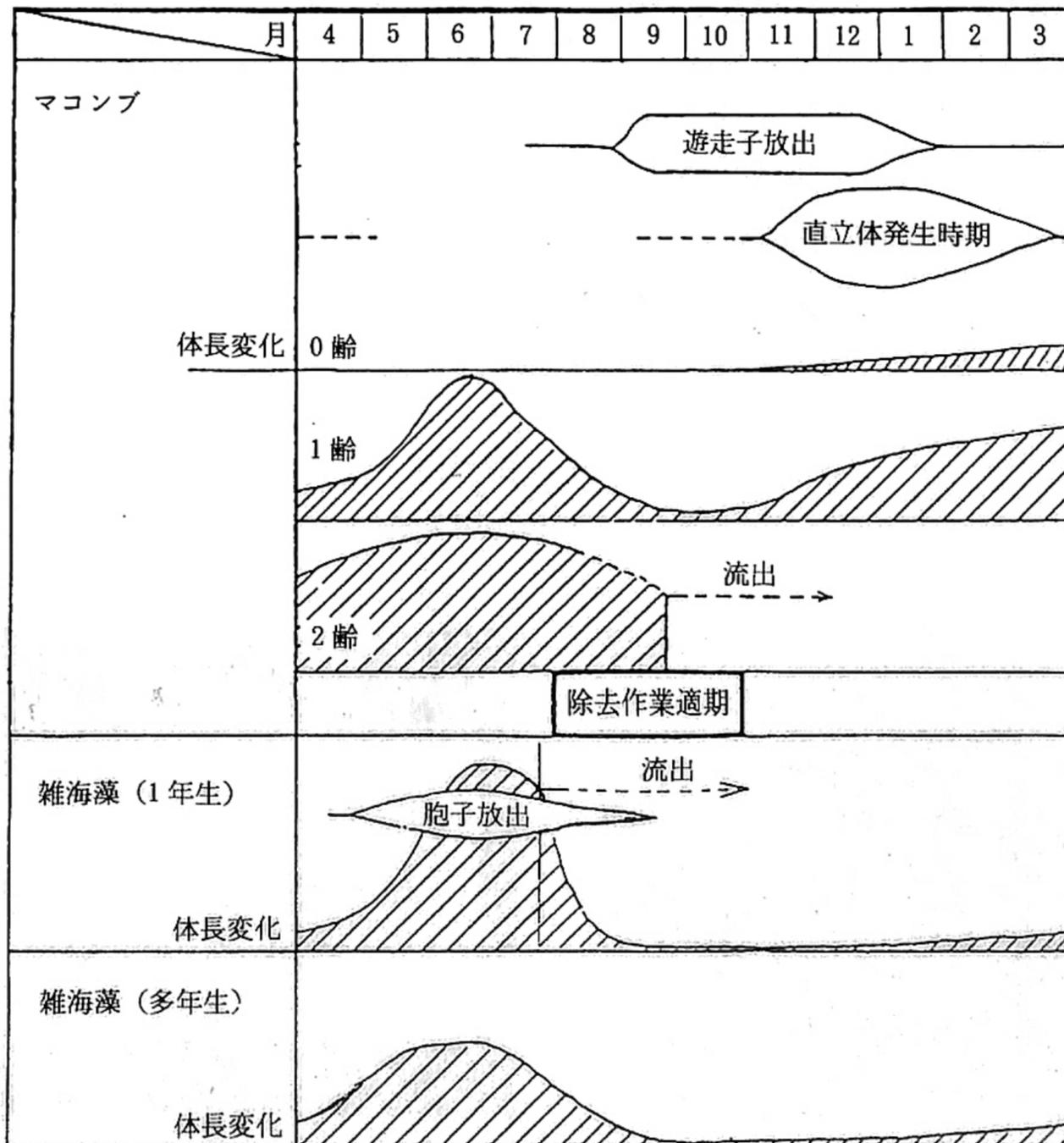


図-7 海藻のライフサイクル

動、騒音等による作業環境の劣悪性、また潮流1~3kt中での作業といった特殊性のため人件費が高価なものとなっている。この点からダイバーの代わりに無人潜水機にさせることにした。現在の無人潜水機は水中ビデオカメラの搭載も可能であり、除去作業のリアルタイムの監視も可能となる。したがって、新しい雑海藻除去システムとして無人潜水機とウォータージェットを組み合わせたものを雑海藻除去システムの中核とし、提案すると共に要素技術の開発、設計に着手した。

## 6.2 ウォータージェット噴射試験

雑海藻除去システムにウォータージェットを採用した場合のシステムの有効性の確認を行うとともに、ウォータージェットの噴射条件（吐出圧力、流量、噴射距離、送り速度、ノズルの運動効果）、噴射時の反力等について、基礎データを取得する目的でウォータージェット噴射試験を行った（図-8）。

試験には、ウォータージェットで雑海藻を除去できることを確認するために、試験片に石灰藻の付着した自然

石を用いた（写真-3）。また噴射条件の違いによる除去効果の定量的観察のために、軟質コンクリートブロックにペンキを塗ったものを用いた（写真-4）。

## 6.3 水中ビークルの検討

### (1) 航行・潜行装置

無人潜水機の航行・潜行方式には、スラスタ方式及び曳航方式が考えられる。スラスタ方式は推進力の加減がしやすく運動制御を行ううえでも有効に働き、多くの無人潜水機に採用されている。

支援母船からの曳航方式は曳航索により安定した前進が行える利点がある。いま作業予定海域は、1~3ktの潮流がありスラスタ方式の無人潜水機にはかなりの運動的負担となる。またテザーケーブルの採用を想定した場合、無人潜水機はなお一層の拘束を受けることとなり負担がさらに増大し、これは大出力のスラスタが必要になることになる。したがって雑海藻除去システムの運用状況を考慮し、潮流に対する前進運動は主として曳航方式に頼り、運動制御用にはスラスタを必要に応じて使

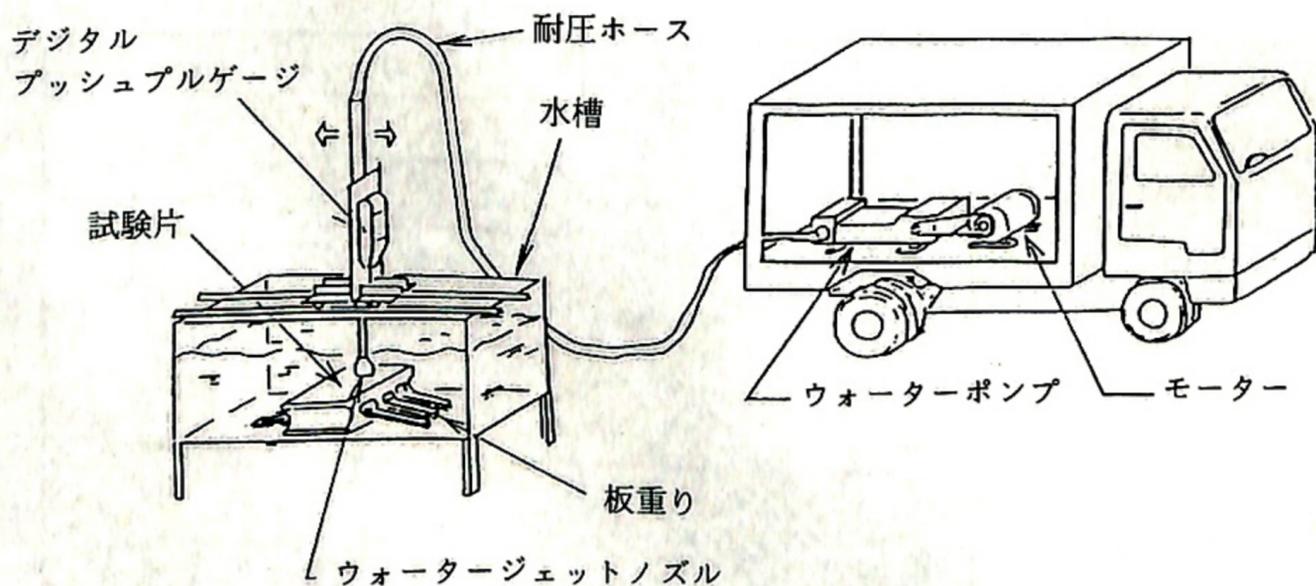


図-8 試験装置全体概要



写真-3 ウォータージェット噴射試験片（自然石、中央部の岩石地肌分は除去跡、両側は石灰藻）



写真-4 ウォータージェット噴射試験片（コンクリートブロック、黄色ペンキの剝離部分は除去跡）

用するといった2つの方式を組み合わせるものとした。

## (2) 雑海藻除去装置

ウォータージェットを使用する場合ウォータージェットのノズルと海底面との距離を一定に保持することが重要になる。いまその方法として接触式アーム方式が考えられる。これは水中ビークル本体から回転式ジョイントで取り付けられたスイングアームを下方に延ばし、その先端部にウォータージェットのノズル部を装備する形となるものである。この方式では水中ビークルは大まかな高度制御だけを受け持ち、小さな起伏及びウォータージェット噴射時の反力による上下動はスイングアームに受け持たせようとするものである。

## 7. システムの概要 (図-9, 図-10)

雑海藻除去システムは次の3つの部分からなる。

(1) 水中ビークル……雑海藻除去装置として下部にウォータージェットノズル部を装備し、そのノズル部は雑海藻の除去幅を大きくするために回転式2連となっている。ノズル先端から海底面への噴射距離が予備試験の結果から得られた最適距離を保つように車輪を並行に2輪設け、その間、接地面から高さ約10cmのところ

ズル部を取り付けている。この車輪の重量でウォータージェット噴射時の反力によるノズル部の浮き上がりを抑える働きを持つ。また水中ビークル本体の高度が変動した場合にも噴射の最適距離を保てるように、車輪は高度変動吸収用のスイングアームに取り付けられている。潮流の影響が大きい場合、それに伴って水中ビークルに発

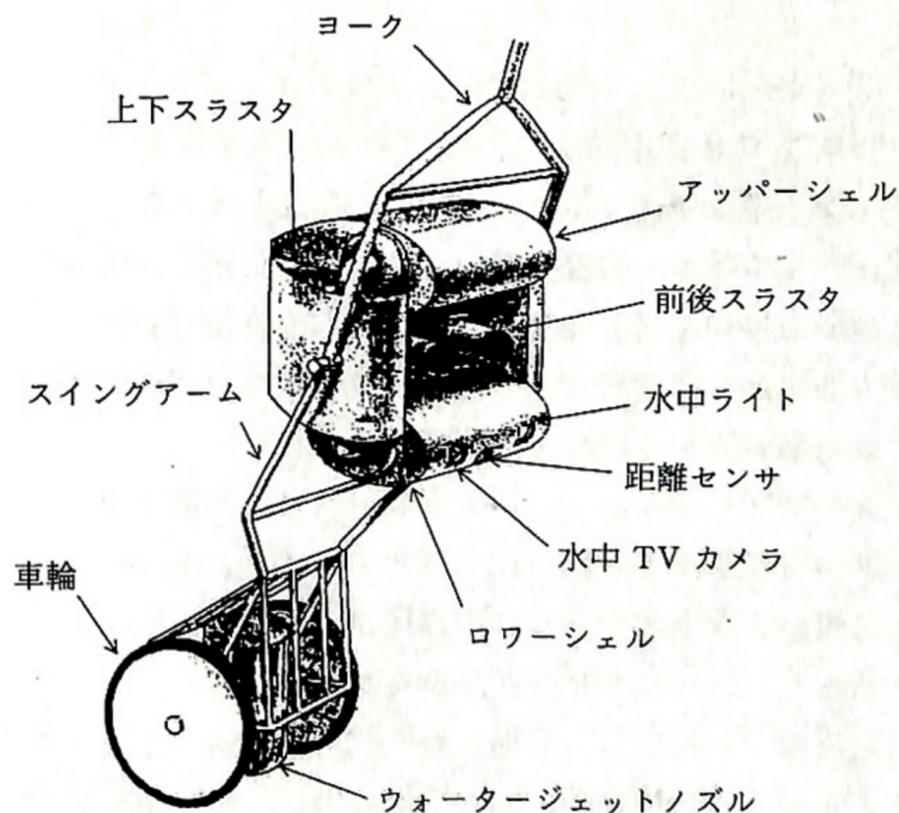


図-10 水中ビークル

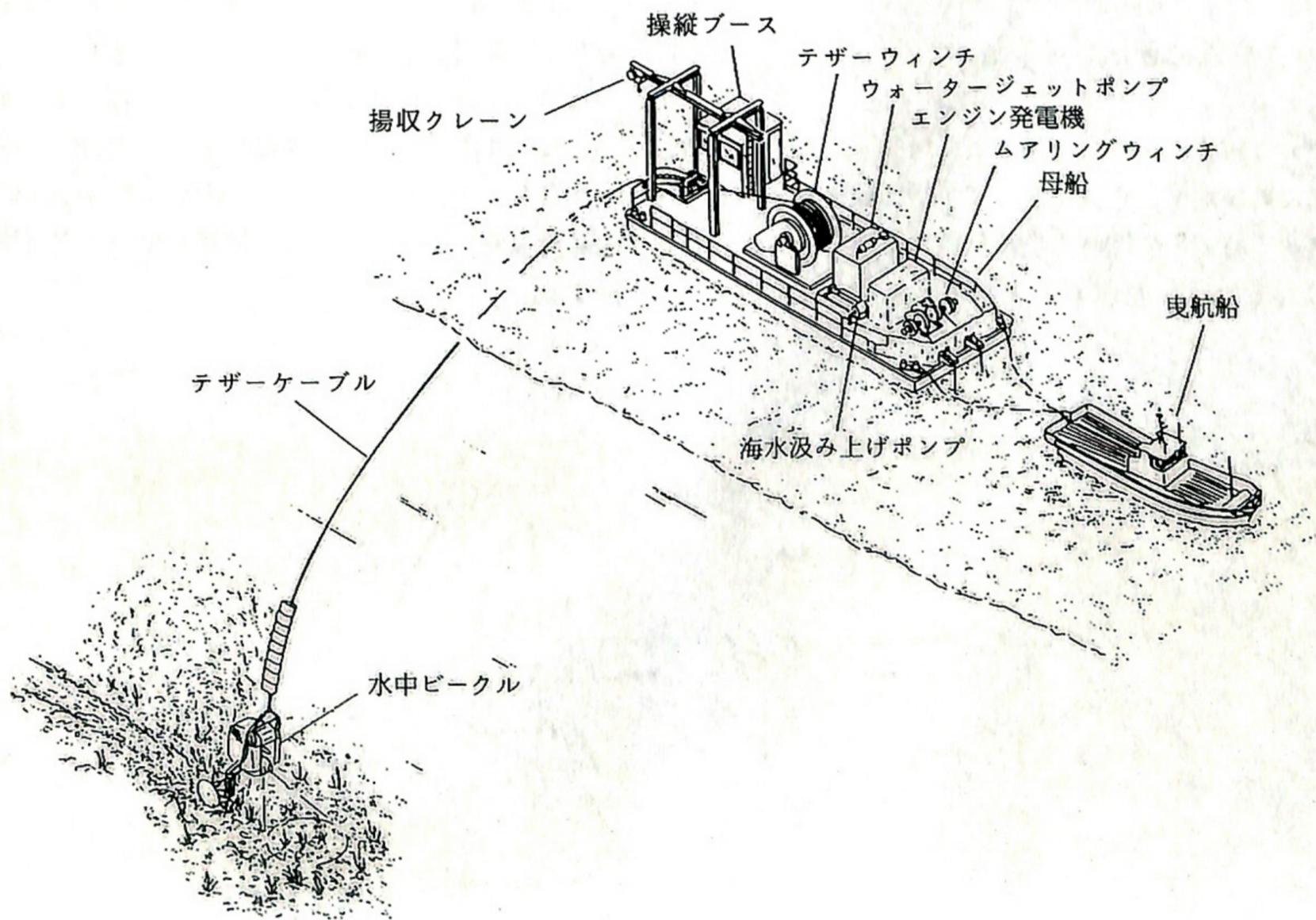


図-9 雑海藻除去システム概要

生する上向きの流体力に抗して高度保持が可能のように上下スラストを両側に装備している。雑海藻除去状況監視装置としては、水中ビークルの前後に各1台ずつTVカメラを装備しており、支援母船上から常時確認することができる。また、障害物情報収集用には前後及び下向きに計4台の距離センサーが取り付けられており、TVカメラと共に水中ビークルの高度と前方障害物の監視に用いられる。

(2) 支援母船……高圧水を造りだすウォータージェットポンプや制御用装置、操縦ブース、テザーケーブルウィンチ等システムの水上機器を搭載する。また水中ビークルの着水・揚収及び、システムを母港と作業海域との間で移動させる役割をもつ。なお、支援母船は自航能力を持たず作業海域への往復及び作業地点での大きな移動は漁船等を曳航船として使用する。

(3) テザーケーブル……水中ビークルを前進させる牽引索の役割を持ち、繰り出し状態の最大長約200m。支援母船から水中ビークルへの高圧水、電力の供給ラインであると共に、水中ビークルから支援母船へのTV映像信号、センサー信号を変換した光信号の伝送ラインとなる。ケーブルは作業中に海底に引っ掛かったり擦ったりしないように海中でわずかな正浮量をもつように浮力材を内包している。

## 8. システムのオペレーション

システムは以下のように運用される(図-11)。

①最初に対象海域の潮流に対して平行に除去ラインを設定する。そしてその潮流の上手位置に支援母船を潮流に平行になるように左右のアンカーを用いて固定させ

る。

②水中ビークルを支援母船より下ろし潮流にまかせながらあるいは水中ビークル自身のスラストで後進をかけながら、母船上のテザーケーブルの繰り出しを行い(最大約200m)、水中ビークルを作業開始位置まで移動させる。

③ウォータージェットノズルが岩礁に対して一定の距離に保たれるように、水中ビークルを上下スラストで下降させ(最大深度約25m)車輪を着底させる。

④支援母船上のウォータージェットポンプを駆動し、420 kgf/cm<sup>2</sup>の高圧水をテザーケーブルを通して水中ビークル下部に装備したノズルから岩の表面についた雑海藻に噴射してこれらを除去する。このとき、テザーケーブルはウィンチにて約10 cm/secのスピードで巻き取ることにより、水中ビークルはケーブルをたぐりよせてくるように前進する。(ビークルの制御は支援母船のブース内に設置したコントローラを用いてオペレーターが行い、雑海藻除去状況及び障害物情報は水中ビークルの前後に各1台ずつ設置したTVカメラを用いて、操縦ブース内のモニタにて常時確認することができる。水中ビークルの前後及び下向きに計4台の距離センサーが取り付けられており、TVとともに水中ビークルの高度と前方障害物の監視に用いる。)

⑤支援母船には左右2組の係留用アンカーが装備されており、支援母船を定位置に保持するとともに1本のラインに沿って除去作業が終了すると、左右のアンカーロープの長さを調節して母船を横移動させ次の除去作業ラインへ移動する。(支援母船は自航能力を持たないため雑海藻除去海域と母港との間は漁船を用いて支援母船を曳航する。)

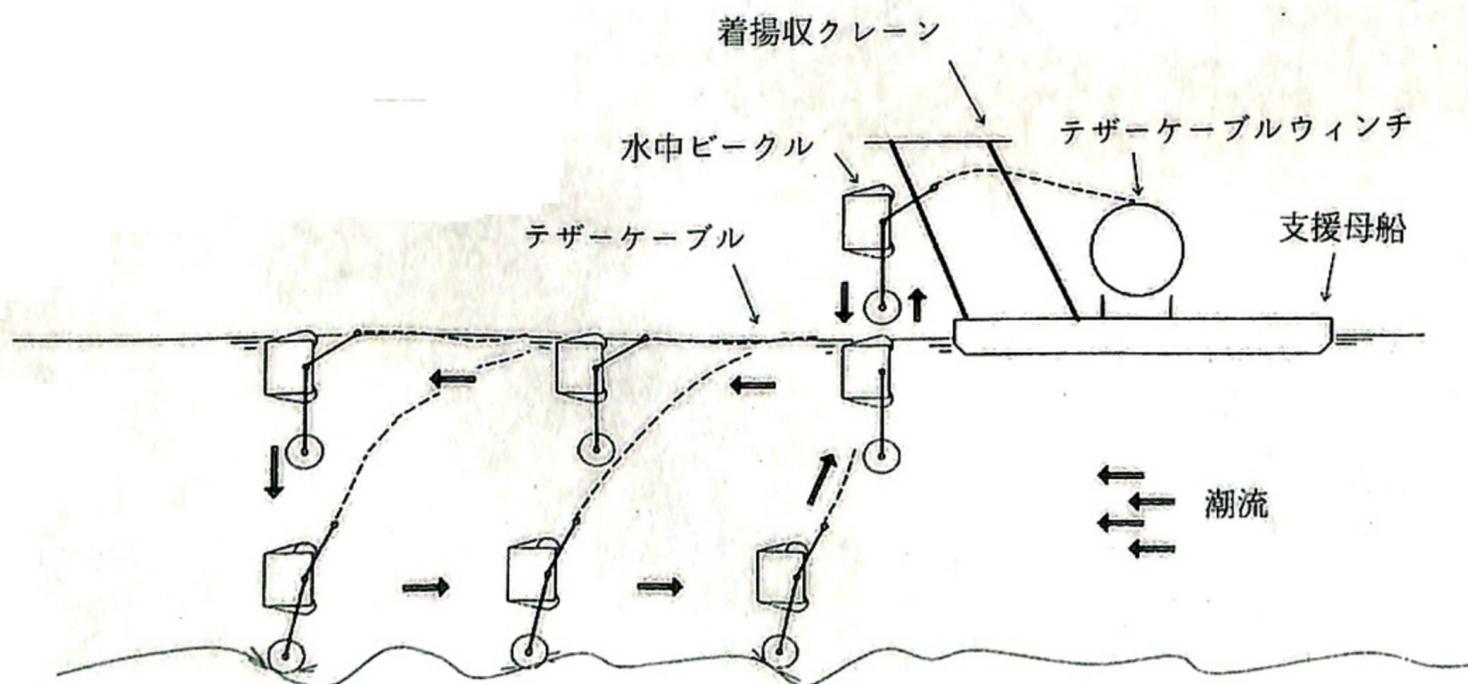


図-11 水中ビークルのオペレーション

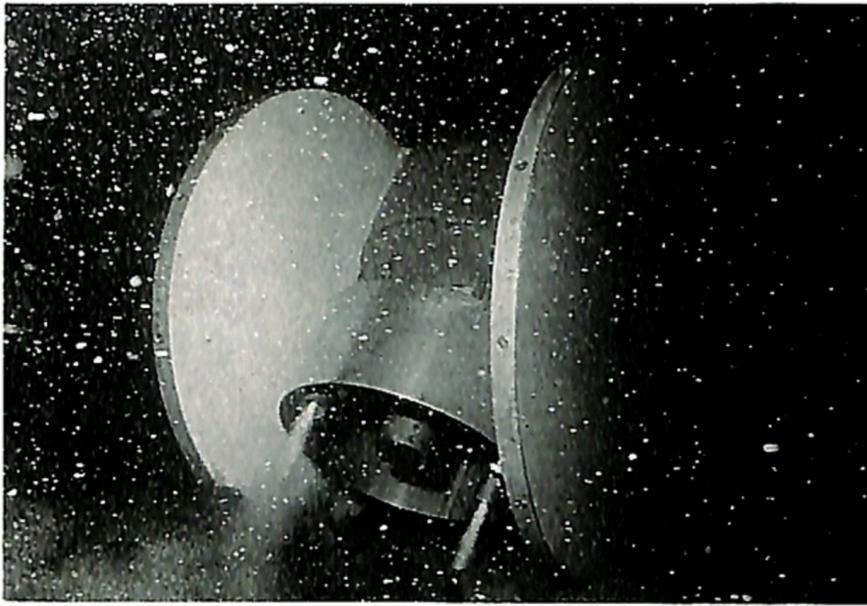


写真-5 ウォータージェット噴射状態



写真-6 ウォータージェットにより石灰藻が剝離した岩石

## 9. 海域試験

対象海域である青森県下北半島北部沿岸海域においてシステムの作動確認試験及び雑海藻除去試験を行った。試験海域として水深が5~11 mでホンダワラ類等の大型雑海藻が支配的な区域と石灰藻が支配的な区域の2か所を選定し、試験を実施した。その主な確認内容は以下のとおり。

- ① 水中ビークル及びテザーケーブルの海中における挙動
- ② 海中におけるウォータージェット噴射状況
- ③ 雑海藻除去状況

水中ビークルを海面に浮かせた状態で水中ビークルを後進させ、潮の流れも同時に利用しながらテザーケーブルを最大長約200 mを繰り出したが、潮の流れに合わせるによりケーブルをからませることなく、水中ビークルの開始地点へのスムーズな移動を確認できた。水中ビークルを着地させた状態で、ウォータージェットを噴射させながら（テザーケーブルの巻き取り）速さ約10 cm/secで海底を走行させた。海底の起伏は大きい所で約1 m程度あったが、水中ビークルが岩間の落ち込みや岩塊にひっかかることもなく比較的安定して走行することを確認した。海底でのウォータージェット噴射状況を写真-5に示す。ウォータージェット噴射圧力は約360

kgf/cm<sup>2</sup>。観察の結果ノズル部の海底面への追従性を高め、除去効率を高める余地のあることが確認された。石灰藻が支配的な地域については除去試験後、除去箇所の岩石採取を行った結果、厚さ2~3 mm程度の石灰藻の剝離が観察された（写真-6）。これによりウォータージェットが石灰藻除去にも一定の効果を持つことが確かめられた。

海域試験では当初計画したシステムの作動の良好なことを確認し、システムの実用化へ向けた技術開発のめどを得ることができた。無人潜水機を海底に接地させながらケーブルで引っ張り、前進させるという他に類を見ない方式の基礎データを収集することができた。

## 10. おわりに

本研究において雑海藻除去システムを用いた雑海藻の除去の確認ができた。しかし研究の最終目的であるコンブをはじめとする有用大型海藻類の復活がみられ、かつてのような海藻の群落が形成されるまでの効果を確認するためには、今後長期にわたって雑海藻を除去しながら定量的な観察を継続していく必要がある。またシステムについては、本研究で製作した開発機を実用に供するためには、実海域の環境下における最適な雑海藻除去スピードやウォータージェット水圧等の条件を調べるための試験が必要となる。

# 無人潜水機「げんたつ500」の運用に関する研究について

深海開発技術部 月岡 哲 Satoshi Tsukioka

## 1. はじめに

平成元年から平成3年度までの3年間にわたり福井県と海洋科学技術センター（以下、海洋センターとする）で行われた地域共同研究では、海底に棲息する生物資源の調査を目的に無人潜水機の開発が行われた。この無人潜水機はすでに海洋センターで試作の終了していた細径ケーブル無人潜水機「UROV2000」をベースにした実用機で、水深500mまで潜水できる能力を持ち、若狭湾にある漁場「げんたつ瀬」にちなんで「げんたつ500」（以下「げんたつ」とする）と命名され福井県水産試験場でズワイガニ、ホッコクアカエビなど生物資源の調査に利用されている。「げんたつ」は一般に利用されている有索式無人潜水機と同様、オペレータが支援母船に搭載された制御装置を操縦して無人潜水機の運動や観測装置を操作するが、バッテリーを内蔵するので支援母船とは制御指令値やデータの通信を行う光ファイバーケーブルのみで結ばれているので、ケーブルが海水から受ける抵抗が小さく運動特性に優れる。

その後、福井県水産試験場（以下福井水試とする）と海洋センターは「げんたつ」に関する共同研究を進め、運用性の改善、または開発した装置の耐久性や運動性能を追跡調査してきた。これにより今後の無人潜水機の開発に役立つ情報を得ることや、細径ケーブル無人潜水機システムの完成度を高めることができる。今までにバラスト投下装置の改良や、調査潜航時の無人機の制御指令値や測位データなど無人機の運動特性を評価するのに役立つデータの収集を行ってきたが、ここでは「げんたつ」に搭載された装置の改良や潜航中に記録した制御指令値について報告する。

## 2. 「げんたつ」の概要

写真-1に「げんたつ」の外観を示す。支援母船と無人潜水機を光ファイバーを介して結ばれ、支援母船上にはビークルの船上制御装置と水中での無人機の位置を測位するSSBL方式の音響測位装置などが装備される。直径が1mmの細径ケーブルを使用しているため運用に必要な長尺の光ファイバーケーブルは無回転繰り出し装置（スプーラ）に収納できる。スプーラは糸巻きに似た構造で小型軽量を利点とする。電力供給などの理由からアーマードケーブルを使用するシステムでは支援母船上にケーブルウインチや油圧装置などの大型機器を必要とするが、細径ケーブル無人潜水機システムでは着揚収のためのクレーンが必要なほか特殊な装置を必要としない。支援母船は福井水試の所有する排水量147トンの漁業資源調査船「福井丸」だが、後部甲板上に「げんたつ」を搭載し船上制御装置が積まれた船用コンテナを艀装すると甲板は手狭となり、無人潜水機システムをコンパクト

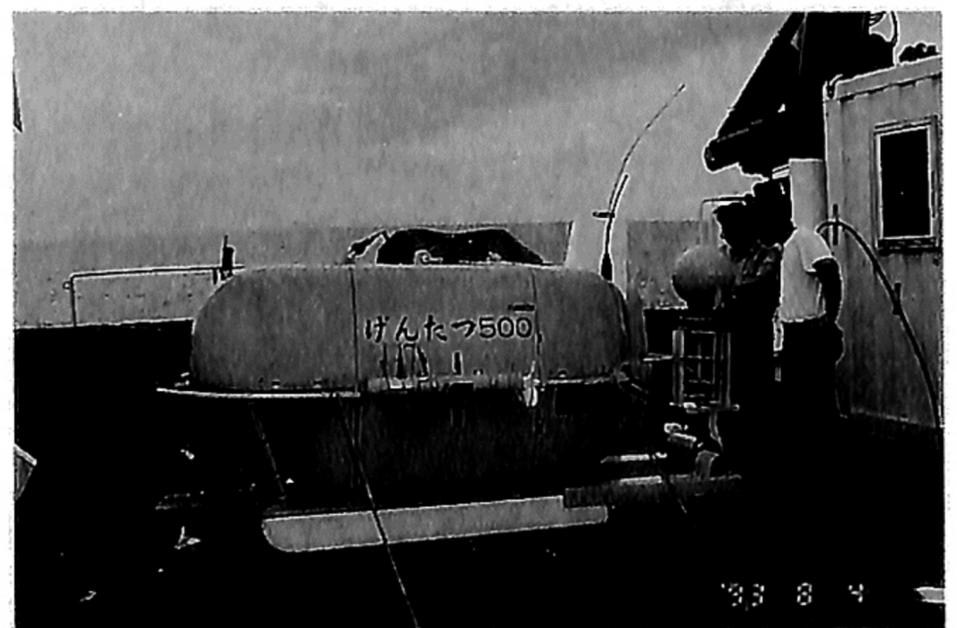


写真-1 「げんたつ」の外観

に設計することの重要性がうかがえる。

ビークルの構造は図-1に示すように主としてアルミニウムパイプで組み立てられたフレームに観測機器と制御装置などを取り付けている。観測装置は自黒テレビカメラ、チルト機能を持つカラーテレビカメラ、撮影用のスチルカメラと温度、圧力センサーなどである。推進装置は直流モータとプロペラからなるスラストで水平、垂直方向の推力を発生するためにそれぞれ2基、合計4基を備える。これら各機器の制御は機体上部の耐圧殻に収納された電子装置により行われ、その下部に電力を供給するためのバッテリーが置かれる。また、このほかに水中で中性浮力を得るための浮力材として、ガラスマイクロバルーンを用いたシntaxティックフォームや浮上用のバラスト投下機などの装置で構成される。また、運用を支援するための装置として音響測位用トランスポンダ、海面に浮上したとき無人潜水機の位置を確認するためのラジオビーコン、フラッシャーを備える。バッテリーはUROV2000ではニッケル亜鉛電池を用いたが、「げんたつ」は実用機であり不特定多数の人が操作するので、エネルギー密度はやや劣るが安全性と保守性に優れた油漬ニッカド電池を採用した。

### 3. 「げんたつ」の改良について

運用面から「げんたつ」にはいくつかの改良が加えられた。いずれも運用時の安全性や浮上できないときでも回収できることを目的に行った。以下この改良について

述べる。

#### 3.1 浮上用バラスト投下装置の改良

図-1からわかるように浮上用のバラストは約22kg重の直方体に加工した鉄の塊にフックを取付け、バッテリーの間の投下装置に装着する方法であった。バラストの装着はビークルの前後に高さ約40cmの台を当て機体を浮かした状態で、機体下部のバラスト投下口にバラストを装着した。この作業は2名で行われていたが、動揺する船上で機体の下でバラストを装着する作業は危険であることや、ビークルを着水させるためクレーンでつり上げたときにバラストが不意に落下することが考えられた。また、運用の面から、バラストの形状から加工費が高価であること、投下されたバラストが底引き作業中の漁網を傷めうることも指摘された。以上のことからバラストを「しんかい2000」で使用しているショットバラストに改めることにした。ショットバラストは工業製品の表面研磨に使用する鉄の粒をバラストとして使用する。規格の中から粒径が2mmのものを利用したので、1回の潜航に必要なバラストにかかる費用は従来品より安くなった。バラストを保持するホッパーを機体内に取付ける作業が必要となったが、機体の改造が必要最低限で済むように、それまでのバラストが収納されている空間にホッパーと切離し装置が収まるように設計を行い、平成4年7月に福井水試にて改造工事を実施した。また、バラストの装てんは機体上部のカバーまでホッパーからパイプを通じ、このパイプを介してバラストをホッパーに充填する。その際、バラストは海中で無人潜水機

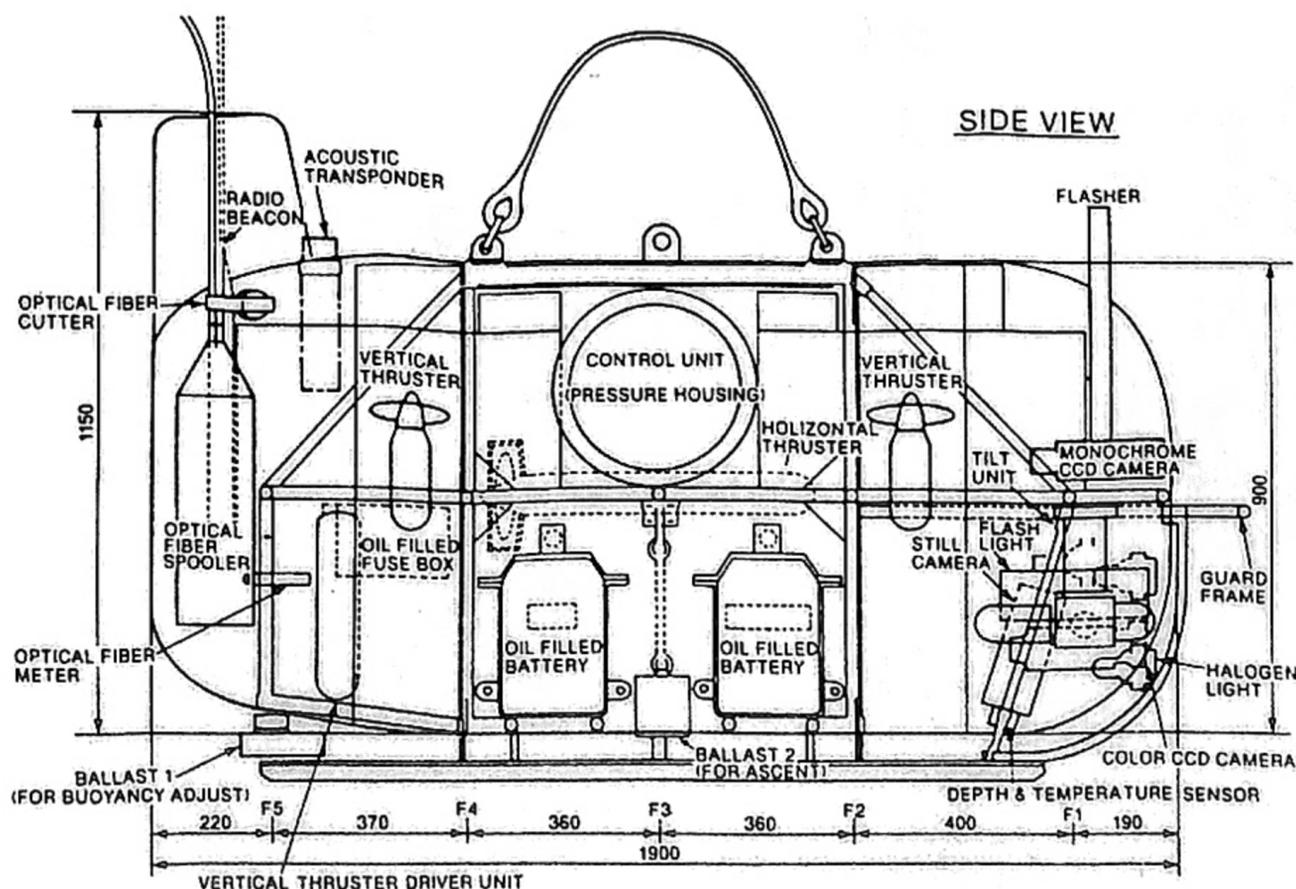


図-1 「げんたつ」の構造図

が中性浮力となるよう所定の重量をあらかじめ計測しておき、機体上部の2つのバラスト投人口から写真-2のように漏斗を用いて投入できる構造とした。これによりバラスト装着時に、架台に乗せたビークルの下で行う作業がなくなりクレーンで吊ったときもバラストが小粒であるがゆえに落下事故が与える危険性が小さくなった。

### 3.2 救離システムの新設

「げんたつ」は調査を終了し、浮上するときは光ファイバーケーブルを切断する。切断する理由は光ファイバーケーブルはわずかな力でスプーラから繰り出されるので、浮上途中の光ファイバーケーブルの消費を抑えるのが目的である。ビークルは光ファイバーが断線しデータ通信が行われなくなると、機体に積まれた浮上用バラストを自動的に投下するように設計されている。このためファイバーが断線すると浮力が正となり浮上を開始する。このバラストは市販の乾電池で電力を供給する電磁石で保持しているの、乾電池が消耗すれば電磁石の生じる磁力ではバラストを保持できなくなる。よって、たとえ制御装置にトラブルを生じ投下装置が作動しなくても自然にバラストを投下し浮上することができる。しかし、「げんたつ」の運用目的は海底に棲息する生物資源の調査であり、ビークルが海底に着底した状態で移動することも考えられる。このような場合、海底に堆積している泥が水抜きなどの目的で作られた機体の隙間から機体内に侵入したり、その下の粘土が機体に付着し浮上用バラストを投下しても十分な浮力が得られなくなる恐れがある。光ファイバーを切断すると通信が途絶えるので無

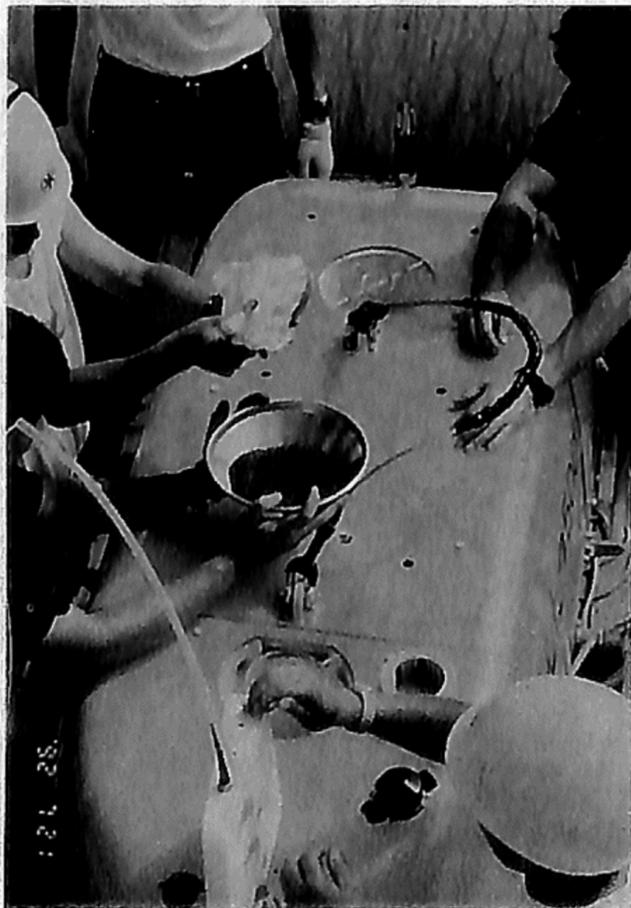


写真-2 浮上用バラストの装填

人機の状態はわからないが、機体に取り付けられたトランスポンダで海底にいる「げんたつ」は船上で音響測位できる。そこで万一浮上不能になったときでも図-2のからみ索を利用し海底に頓挫（とんざ）するビークルを回収できる救難ブイシステムを開発した。からみ索には写真-3のような数個の「ハツ目錨」が取り付けられている。からみ索の運用は図-3のように行う。

(1)海底に頓挫している「げんたつ 500」の位置を船上の音響測位装置で測位する。(2)船上から数個のハツ目錨をつけたロープで作られるからみ索を投入し、「げんたつ」の方向に向け船を進める。(3)母船の曳航しているからみ索が「げんたつ」に絡まれるように目標地点を中心に円を描く。ここでからみ索がビークルにかかり、ビー

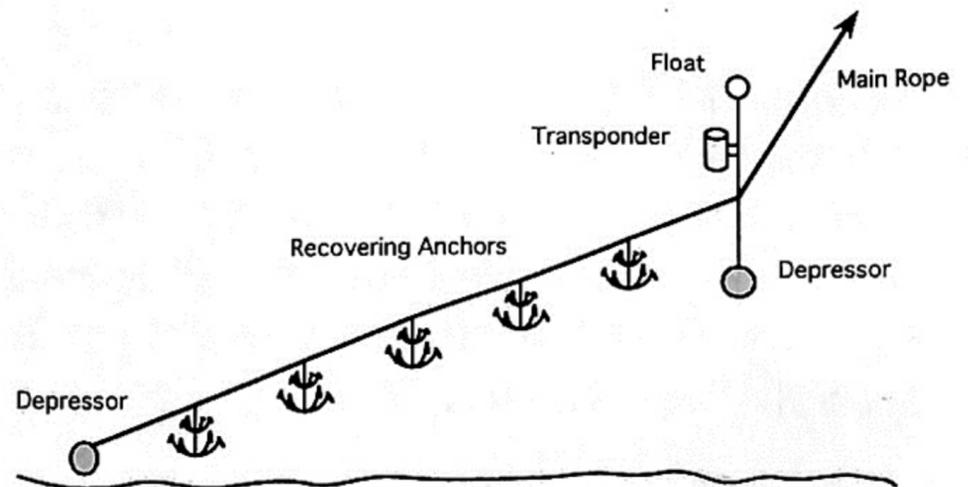


図-2 からみ索の構成



写真-3 ハツ目錨の外観

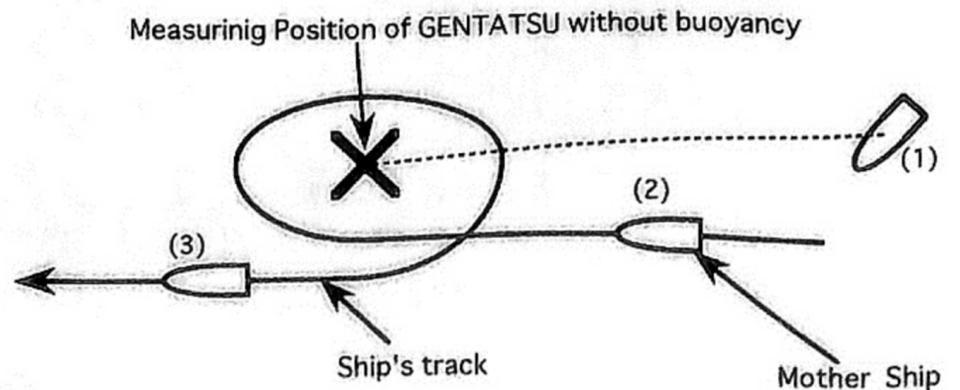


図-3 からみ索の運用

クルがもとの位置から離れていることを音響測位装置で観察しながら、からみ索を引き上げ機体の回収を行う。しかし、「げんたつ」の機体は高さが約1mであり、からみ索が直接機体にかからむことは期待できない。そこでからみ索が確実に引っかかるように機体からロープを立ち上げることにした。この救難ブイシステムは写真-4のように機体後部に置かれ浮上用バラスト投下装置と同様、電磁石が発生する磁力を利用し機体に保持されている。ロープは直径約30cmのドラムに巻かれ、ドラムには直接ブイが取り付けられている。ブイが浮上するときは、その浮力によってロープの巻かれたドラムを引き上げる。これによりブイは真下のドラムからロープを繰り出しながら上昇する。ドラムもブイと一緒に上昇するのでブイに必要な浮力が大きくなったが、八つ目錨は球形のブイには滑りやすいのであえてブイとドラムとを一体構造とし、錨がかかりやすいようにした。また、ロープは柔軟でかつ海水中で特性の変化があってはならないことから破断強度が約1tのケブラー素材のロープを使用している。ロープは引っ張り試験を行い、端末処理などの資料とした。ビークルが内部に進入した泥などで浮力を失った場合、からみ索が機体を揺さぶることで内部の泥が排出されビークルは浮力を回復する。よってロープに加わる荷重は小さいと考えられるが、からみ索がかかったときの衝撃荷重などを考え機体の空中重量の約2倍の荷重に耐えるようにした。切り放しは制御装置と電氣的に独立しているタイマーによって行われる。これは「げんたつ」の運用可能時間を大きく超えたときに確実に救

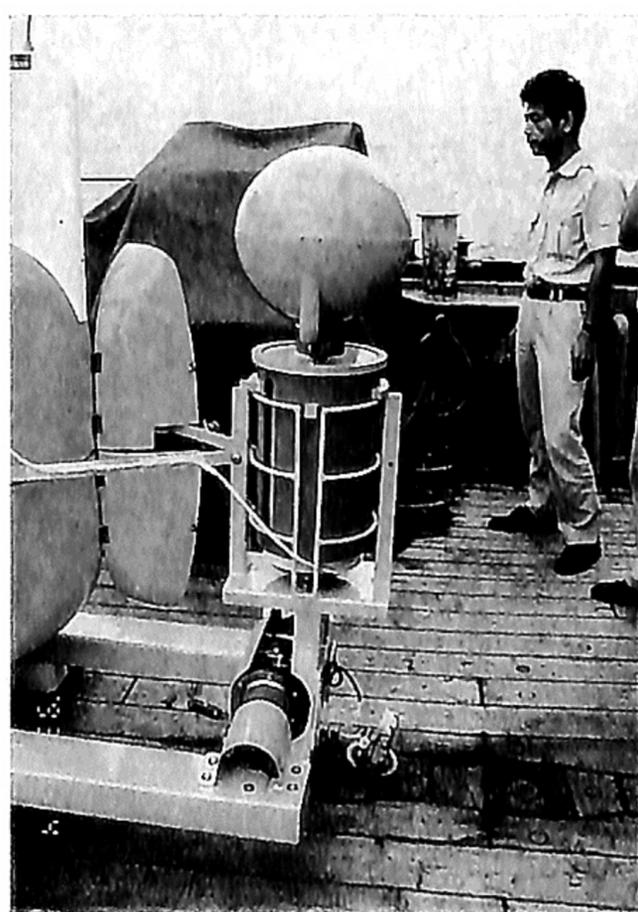


写真-4 救難ブイシステムの外観

難ブイが機体から離脱するように安全性を求めたからである。

### 3.3 ダミーを用いた回収試験

実際にかからみ索を用いた回収試験を平成5年の7月から8月にかけて若狭湾で行った。「げんたつ500」が救難ブイを打ち上げた状態と同じ状況を作るため、図-4のようなダミーを製作した。ブイからシンカーまでの長さは約30mで、ブイの直下にロープを収納するドラムと同じサイズの塩化ビニールパイプを取り付け八つ目錨のかかり具合が実際と等しくなるように工夫した。また、音響測位装置でダミーの位置が測位できるように、シンカーの近くにトランスポンダを取り付けた。現在までに、350mまでの水深でからみ索による回収試験は成功している。

## 4. 調査潜航の運用データ記録

今までに行った運用データの記録では測位データとスラスト制御指令値の2つのデータを記録した。この目的は前者では、支援母船に搭載されたSSBL方式の音響測位装置ではビークルの相対位置は測位できるが実際の航跡が記録されず、テレビカメラなどの調査結果と海域との対応付けができないので調査に不便であったことがあげられる。また、後者では水中でのビークルの運動を評価し、「げんたつ」の航行にある程度自律機能を持たせる調査援用システムや現在開発を進めている航行型無人潜水機の資料とする。新しく記録装置を試作し以下のデー

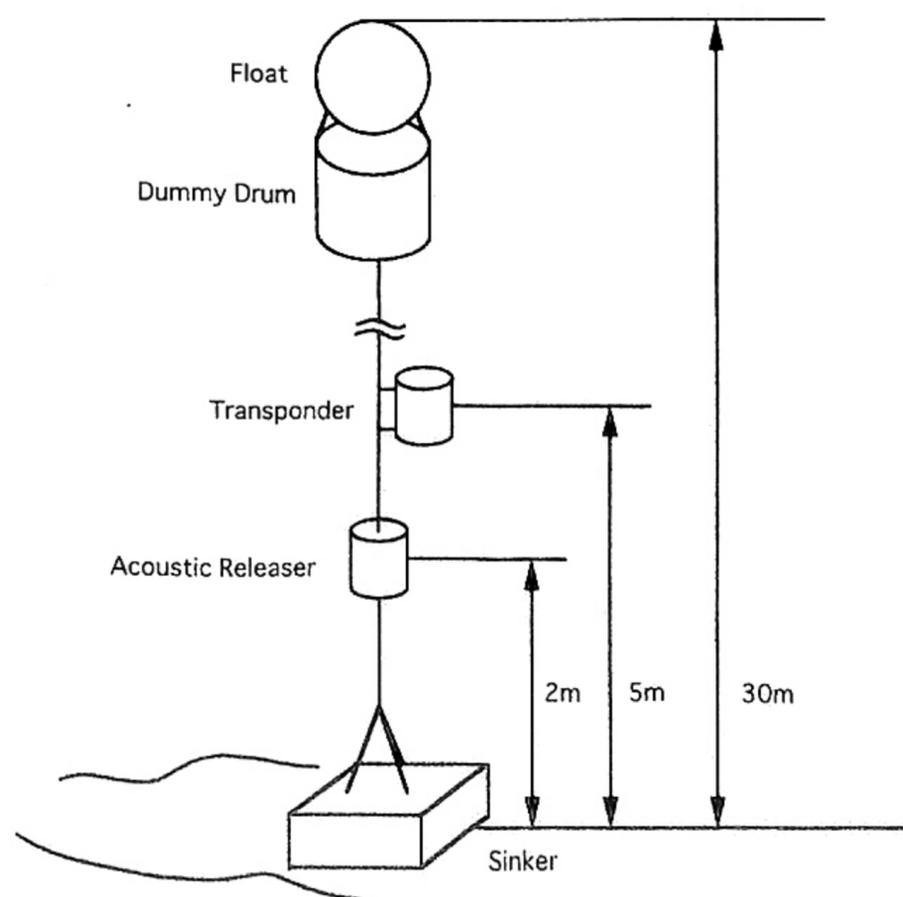


図-4 回収試験用ダミーの構造

タが記録できることを確認した。

#### 4.1 航跡記録について

「なつしま」や「よこすか」は深海調査船の支援母船として建造されたので、調査船の測位や航跡の記録を行う高性能機器が組み込まれている。しかし「げんたつ」の支援母船である「福井丸」は、上記のような支援母船として建造されておらず航跡の記録は行えなかった。調査を行った海域は、支援母船に備えられたGPSなどの測位装置で測位した支援母船の位置を観測点としていた。しかし、「げんたつ」は支援母船から比較的離れた場所への水平移動が可能で、支援母船の位置のみではなく実際の海底近くでの航跡も調査海域を特定するために強く要望されている。調査潜航の航跡を記録するためには母船の測位データと無人機の支援母船に対する相対測位データが必要なので、図-5のような記録装置を試作した。このシステムはパーソナルコンピュータを中心に構成され「げんたつ」の以下の測位データが記録できる。

- 1) 音響測位データ
- 2) ビークル方位データ
- 3) ビークル深度データ
- 4) 母船方位データ

記録装置が測位装置や船上制御装置のデータを取得するには、船上制御装置などの各装置を接続するインターフェイスの試作やデータ通信を行うためのソフトウェアを開発した。1)の音響測位データは音響測位装置からRS232C準拠のシリアル信号で得られたが、2)と3)の光ファイバーを通じて船上制御装置に送られる無人機の圧力センサーとコンパスで得られたデータは、船上制御装置にインターフェイスが必要であった。3)のビークル方位データはビークルに搭載されたコンパスから出力されるデータで、海底付近を航行しているビークルの方位

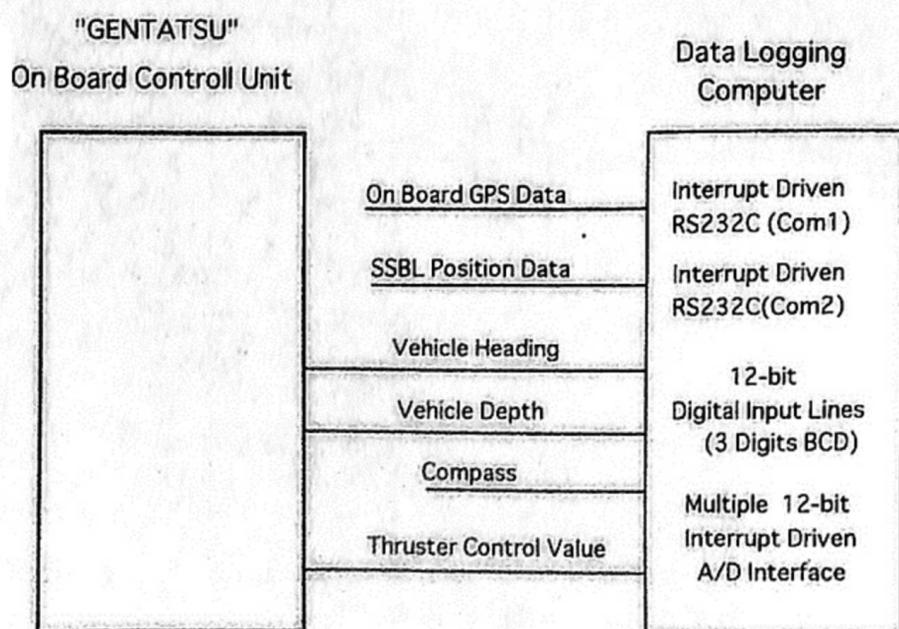


図-5 調査潜航の運用データ記録装置

がわかる。4)の母船方位は音響測位装置に入力し、支援母船から見たビークルの測位が絶対方位で行えるようにした。ソフトウェアは各データの時間の整合をはかるために、記録装置が音響測位データを受信した時点で船上装置のデータを読みとりハードディスクに記録する。また、音響測位装置が精度良く深度を測位できる範囲はハイドロホンの指向角で制限されているため、「げんたつ」のように水平方向に大きく移動する場合には、ビークルがこの指向角の外となり深度が正確に得られないこともある。そこで記録装置で取り込むビークルの深度センサーのデータを利用し、音響測位装置データフォーマットに変換し音響測位装置に与えた。これによりビークルがハイドロホンの指向角の外にいるときでも、正確な測位が期待できる。一例として図-6は「げんたつ」が水深256mの海域で約1時間50分の調査を行った時の記録から描いた航跡図で、xy軸はそれぞれ東西方向と南北方向を示し、原点は支援母船である。この図から「げんたつ」は東西に500m、南北に300mと水深のおよそ2倍の広い範囲を移動していることがわかる。

#### 4.2 スラスト制御指令値記録について

海底に棲息する生物の密度を知るには、「げんたつ」で調査を行った海域の広さを知る必要がある。ビークルは個別の生物の観察を行うために定点にとどまらず、一定の速度で航走することが望まれる。観測者はビークルで見ることができた生物の個体数を数えれば、ビークルの移動した距離から棲息密度を算出できる。オペレータがこのようなビークルの操縦を無理なく行えばよいのだが、観測カメラの情報をもとに操縦できる生態観察とは状況が異なり、測位データのみからビークルを操作するのは大変である。そこで「げんたつ」の航行がある程度自動的にできるようにオペレータに代わりジョイス

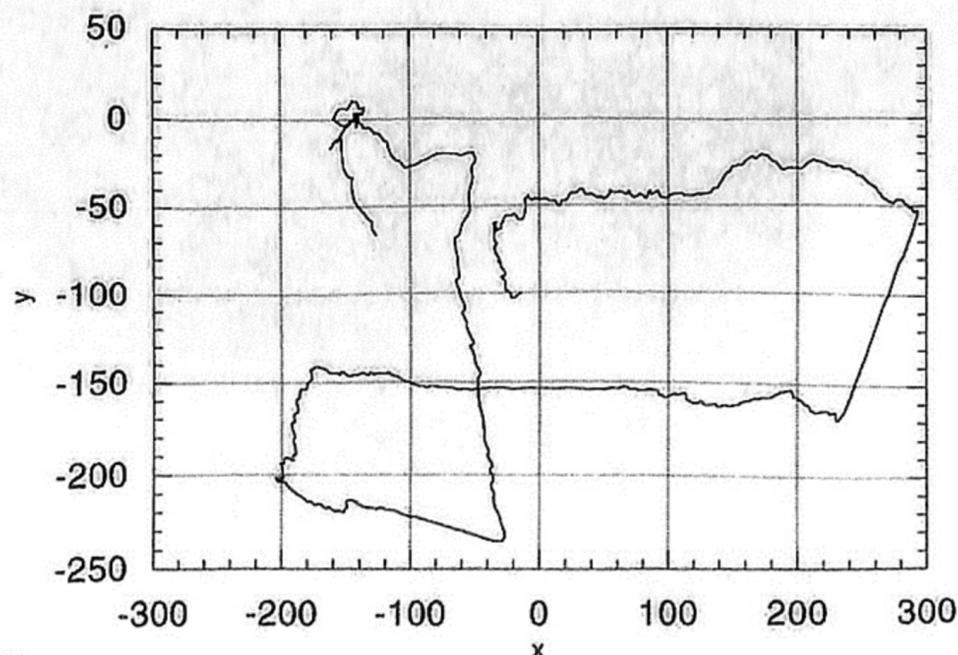


図-6 記録した「げんたつ」の航跡の一例

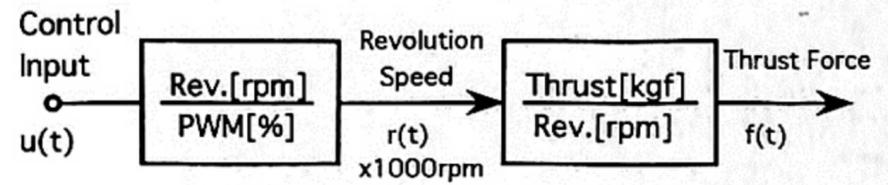
ティックを操作する装置を開発中である。起伏が多い海底面でビークルの高度を一定に保つ機能を持たせるのは難しいが、普段調査を行っている海域の海底面はほぼ平らなので、「げんたつ」が持つ深度保持機能に水平面の運動を制御できるシステムを付加すればよい。「げんたつ」は前後進用の水平スラストとして各舷に1本ずつ、上下スラストとして機体の中央に2本装備し、水中での3次元運動を制御している。水平方向の移動はジョイスティックで行われ、上下方向の制御は別のダイヤルで行っている。オペレータが操作するジョイスティックは水平スラストを独立に制御するのではなく、自動車のハンドルやアクセルペダルの感覚で操作できるように船上制御装置内でジョイスティックの出力する電圧を各スラストの指令値へ変換している。

オペレータに代わりこれらの操作を自動的に行う装置を開発するには、無人機の運動特性を評価することが必要となる。無人機のスラストの特性を知り運動方程式を求めてシミュレーションを行うことも時には必要だが、すでに実機が動いているので実際にオペレータが操作しているジョイスティックデータと航跡をもとに「げんたつ」の運動特性を推測することにした。図-7は図-6の航跡をたどった時の左舷側のスラストのモータに与えられた指令値とそのときの推力の一例である。オペレータが操作しているジョイスティックの出力電圧を記録し、データ取得終了後に船上制御装置内に組み込まれている演算手順と同じ手法で再生した。ここでのサンプリング周波数は4.54Hzで、指令値にはモータのPWM (Pulse Width Modulation) コントローラでの変調率を示した。推力は図-8のブロック図に基づき、まず変調率をモータの回転数に変換し、次に回転数からプロペラの推力に変換した。ここで用いた伝達関数は測定値から求め

ている。「げんたつ」に搭載された水平スラストが発生する最大推力は1台あたり約15kgfだが実際の潜航調査では最大でもこの50%程度しか使われていないことがわかった。

## 5. まとめ

いままでに行われた実験で、細径ケーブル無人潜水機が海洋調査のための実用機として十分に活躍できる無人潜水機であることが確認でき、より実用性と安全性に優れたシステムとする改良の指針を示すことができた。ま



$$r(t) = -10.34u(t)^5 + 10.32u(t)^4 + 382.6u(t)^3 + 114.8u(t)^2 + 552.9u(t) + 3.432$$

$$f(t) = 3.241r(t)^5 + 0.0389r(t)^4 - 5.710r(t)^3 - 0.0144r(t)^2 + 5.775r(t) - 0.0353$$

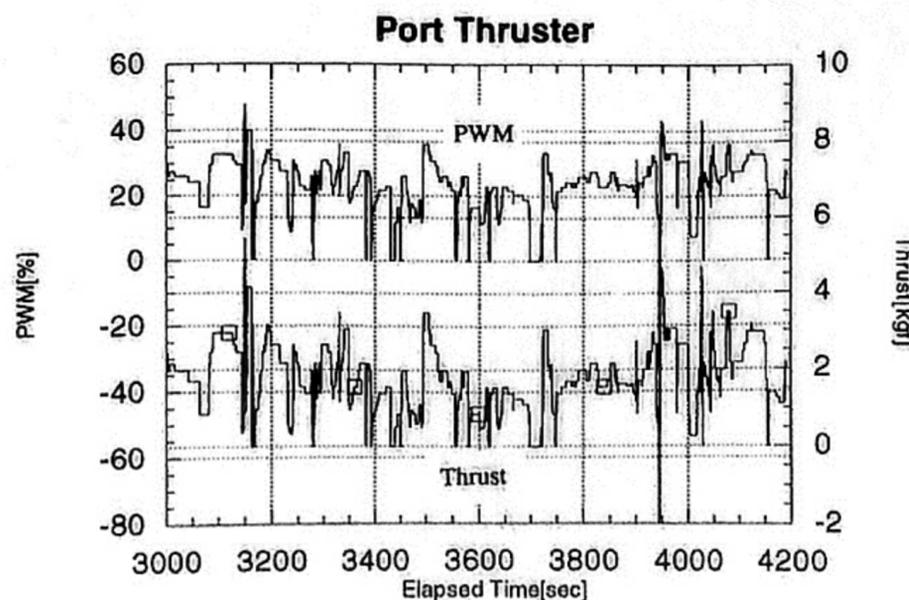
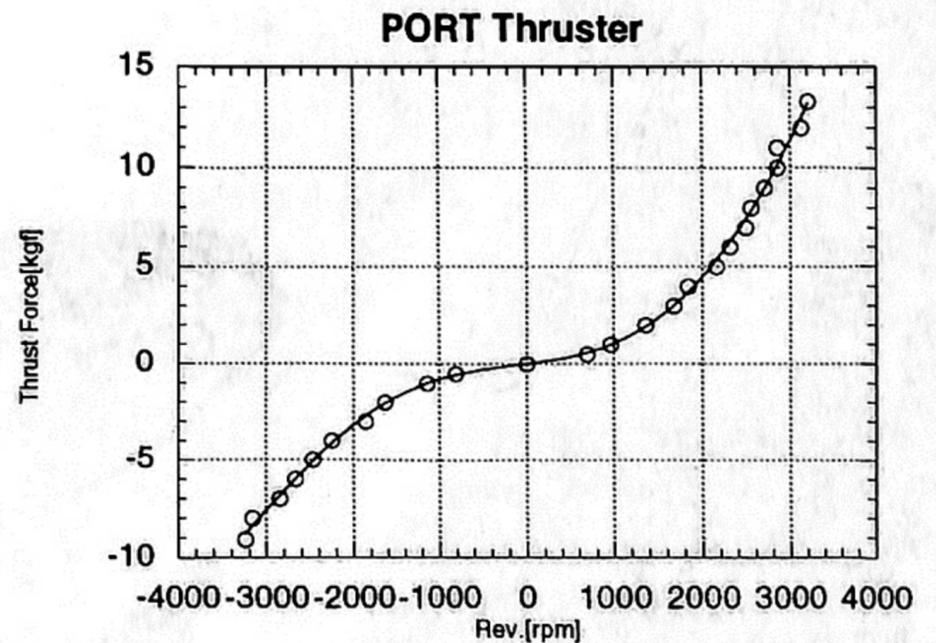


図-7 潜航時のスラストに与えた指令値と推力の一例

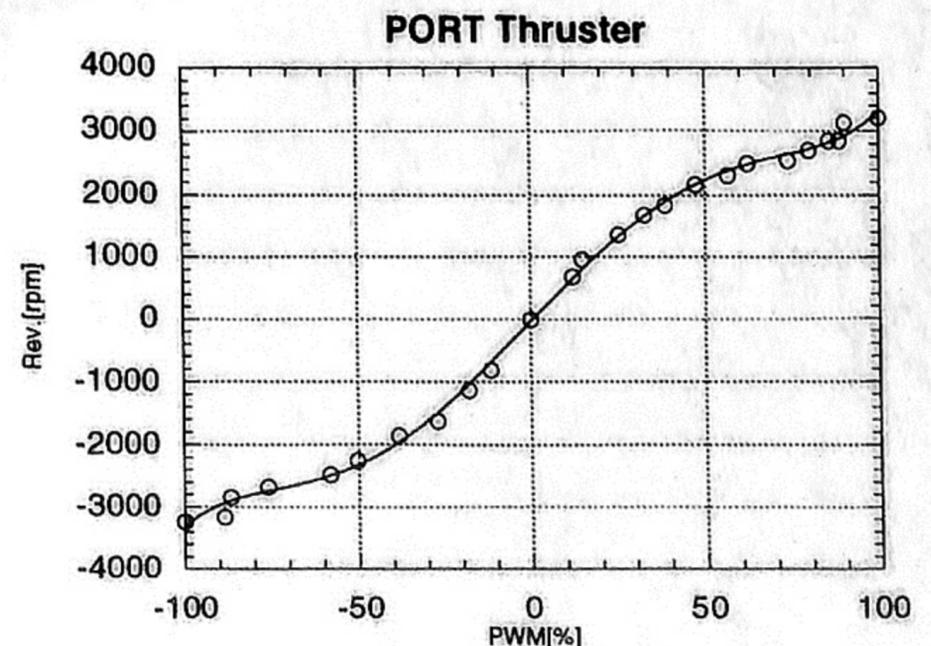


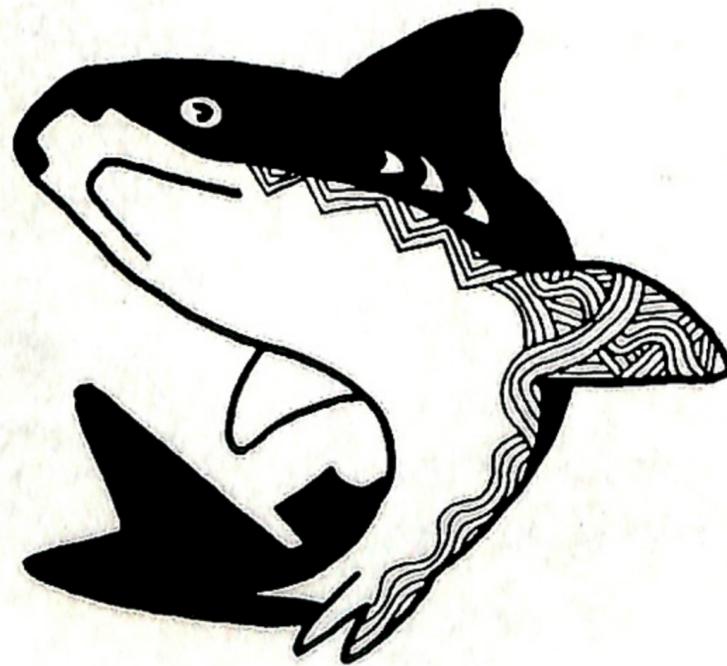
図-8 左舷スラストのブロック図と静特性

た、小型の無人潜水機を用いた海洋調査でも、調査海域における無人潜水機の航跡の記録は重要であり、そのデータを得るために無人潜水機の船上制御装置、音響測位装置など支援母船に搭載された各機器からのデータを記録できる記録装置の試作を行うことができた。その結果、試作した調査潜航時のデータ記録装置は、潜航調査の航跡記録や運動特性を評価するデータは今後も必要であると判断できるので、継続して使用できるよう船上制御装置に組み込めるように小型化を行っている。最後に「げんたつ」を運用されている「福井丸」の柴野氏をはじめ乗組員の方々にはひとかたならぬお世話になりました。

た。また、「げんたつ」の建造を行った住友電気工業(株)の中江氏には「げんたつ」の貴重な技術資料をいただきました。ここに深く感謝の意を表す次第です。

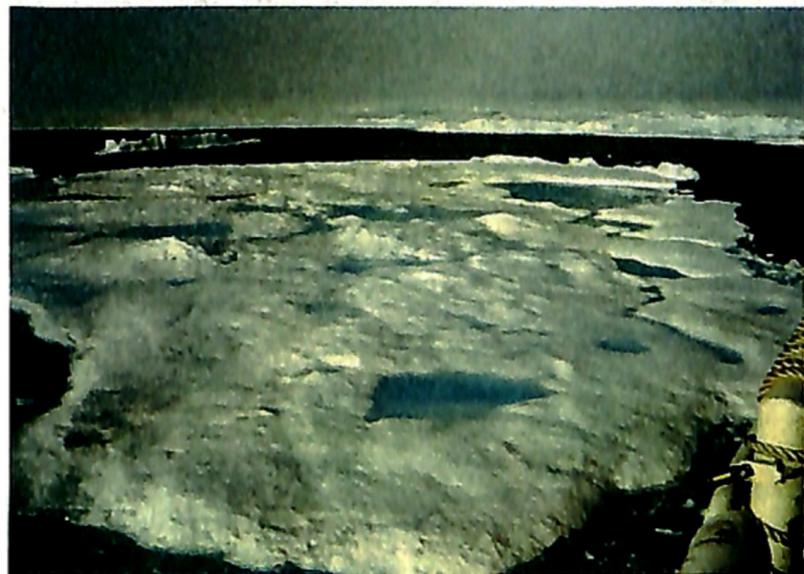
#### 参考文献

- 1) 月岡・青木・粕谷・家接：細径ケーブル無人潜水機「げんたつ 500」の実証試験。海洋科学技術センター試験研究報告, 29, 15-24.
- 2) Aoki, Tsukioka, Kasutani, Ietsugu, Nakae, Terakubo: "Development of Expendable Optical Fiber Cable ROV System". ISOPE '93.



# 凍る海

## (6) 海氷 —その3—



海洋研究部 滝沢 隆俊 Takatoshi Takizawa

### 2. 海水の融解とパドル

#### (1) 氷盤の融解過程

海水の融解は、日射の吸収、大気からの熱吸収、氷に接する海水からの熱吸収の結果により生じる。これらの融解のエネルギーは氷の表面（上・下面及び側面）から吸収されるので、個々の氷盤の表面積と体積の割合によって融解の速度が異なる。物体の表面積と体積の比は、物体が小さいほど大きいので、厚さが同じなら小さな氷盤が先に融けることになる。したがって、氷盤の寸法が融解にとって重要であり、氷野の分裂が大きな意味を持つ。海水の特徴として、前回述べたように（(6)海水の塩分）海水中に含まれるブラインは温度変化に対してその濃度平衡を保つために、氷を析出させたり周囲の氷を融かしたりして、その体積を変える。冬が終わって春に向かい、気温の上昇や日射量の増大によって氷の温度が上がり始めると、海水内部のブライン体積が増大していく。これは、目には見えないが事実上氷内部で融解が始まっていることになる。また、ブライン体積の増加は水中に液体部分が増えることであり、氷の強度の低下をもたらす。そのため、風やうねりによる氷野の力学的破壊が起りやすくなり、この結果氷盤の細分化が進み、融解を促進する環境がもたらされる。

Zubov (1945) に従って海水の融解の進展をまとめると

#### 1) 海水の弱体化

- ・水温の上昇に伴ったブライン体積の増加とブライン脱落による空隙の増加。

- ・日射による海水上面（積雪があるときはその上面）での内部融解層の発達（これについては後述）。
- ・日射による海水の凸出部、氷丘の角ばった部分などでの融解。

これらは気温がかなり低くても（例えば、 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下）生じることが知られている。

#### 2) パドル（氷上融水）の形成

融解が徐々に進むと、やがて積雪の表面に黒ずんだ斑点が現れる。これは主に、付近の雪が融けてできた水が凹みに集まり、その雪が水を吸収したために黒ずんで見えるもので、氷上の小さな浅い融水の集まりである。さらに融解が進むと、輪郭のはっきりした水溜まり（パドル）となる（写真-1）。

パドルは一度作られると絶えず大きくなって行く。たまたま寒気がきてパドルの表面に薄い氷が張ったとしても、この薄氷がちょうど温室のガラスと同じ役割をして内部の水はほとんど凍結しない。その水温はプラスの数 $^{\circ}\text{C}$ にも達することがある。

ここで述べたパドルの形成は、積雪のある場合であり、裸氷の場合にも後に述べるように氷が日射で融けてパドルが形成される。

#### 3) パドルの発達

気温の上昇と日射の吸収によりパドルの水温はだんだん高まり、パドル下面の氷の融解が始まる。氷の融解水と周囲から集まってくる融雪水により、パドルは次第に深くなると同時に水平方向にも大きくなる。大きなパド

口絵写真 パドルができていく氷盤。IAOE 91 (1991年国際北極海共同観測) にて (撮影: 中村 旦)

ルは氷上池 (Melt Pond) と呼ばれる。

パドルが発達していくと、個々のパドルは互いにつながって大きくなる一方で、一部のパドルは底が下の海水に通じている「底なしパドル」になる。パドルの水は、融雪水や海水の上層の融氷水が溜まっている間はほとんど淡水と同じで飲用水としても使える程度である。パドルの水温上昇と同じく、海水表層の水温も上昇するので、氷盤の側面からの融解が進む。特に氷の喫水付近の融解が大きい。

#### 4) 氷盤の分裂

パドルが無数にできた氷盤は (写真-2)、この時期の水温が結氷温度に近くなっていることに対応した氷中のブライン体積の増大の効果も加わって、その強度は著しく小さくなっている。そのため、うねりや氷盤どうしの衝突によって簡単に割れ、氷盤の細分化が進む。先に述べたように氷盤が小さいほど融解しやすいので、この時期の氷盤の融解・消滅は加速度的に進む。やがて、氷盤

はバラバラになり小さな氷塊へと分裂する。

氷塊の形状は、波の浸食作用と暖められた表層水による融解のため喫水線付近が大きく凹むので、水上部分が突き出たひさし状になっている「きのこ」状が1つの特徴である。また、水上部分の融解が進むと、氷塊の水中部が大きく張り出した形状になり氷衝角と呼ばれる。融解期の氷の表面は、写真-3に見られるように、ブラインチャンネルやブライン細胞など弱い部分が先に融けるため、蜂の巣のように無数の穴が出来ることである。このような氷は「はちの巣氷」と呼ばれる。

#### (2) 内部融解とパドルの形成

雪や氷の融解温度は $0^{\circ}\text{C}$ なので気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以上に上昇し、雪氷の表面温度が $0^{\circ}\text{C}$ になったときに融解が始まるかということ必ずしもそうではない。日射があるときは、気温が低くても日射の加熱によって雪や氷の内部で融解が起こることがある。雪や氷が日射を吸収する量は表面近傍が最も大きい。しかし表面では上向きに長波長放射を放出し、さらに風が強く空気が乾燥していると激しい蒸発が生じる。このような条件では表面の加熱は生じに



写真-1 パドル (撮影: 中村 旦)



写真-3 はちの巣氷 (撮影: 中村 旦)



写真-2 パドルが発達した氷野 (撮影: 中村 旦)

く。一方、雪氷内部では、日射の内部吸収が起こり温度が上昇する。

日射吸収熱を伝導で運びきれないとき、雪や氷は内部で昇温し、 $0^{\circ}\text{C}$ になると融解を始める。この最も大規模な現象は海水上にみられる内部融解層(パドル)である。気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下で表面融解が生じないときであっても、日射が強くなっていくと積雪の少ない海水や裸氷の内部に融解層が発生する。海水のアルベド、光の減衰係数、水温、日射量がパドル形成の大きな要因になっている。全層が $0^{\circ}\text{C}$ になる融解最盛期には熱伝導はなくなり、日射の内部吸収熱量はすべて内部融解に使われる。パドルの発生は、裸氷や雪が少ないところで日射が海水内部まで透過する条件下では表面に薄氷を残して氷層内部から起こる。一方で、積雪がある程度以上あると、先に述べたように融雪水が溜まることから始まる。この際に、積雪の内部融解が起こっていることもある。

パドルの発達と消滅過程を南極昭和基地の裸氷で詳しく観測した遠藤(1970)によると、内部融解は氷層上部の透明な氷と不透明な氷の境界の下10~30 cmの層から始まる。透明な氷とは、前の夏のパドルなどの融解水が再凍結したもので、ほぼ淡水氷である。その下に不透明な氷として海水が存在している。透明な氷がない所、すなわち全層が海水である場合は表面から10~30 cm

の層で内部融解が始まる。透明な氷は日射をよく透過するので、その下の不透明な層に入ったところで日射の吸収が起こるためである。図-1は、パドル発達過程の前期(12月~1月)のパドルの断面と水温分布である。2つのパドルの上の表面氷は、Aは透明であったが、Bの最上層1~2 cmは不透明氷であった。時間の経過とともにパドル表面の氷は少しずつ薄くなっていくが、パドルの底では氷はほとんど融けないことがわかる。したがってパドルが深くなるのは、パドル表面の氷の融解による。パドルの下の氷は、その下面、すなわち海水との境から融解が進むことがわかる。このパドルの表面の氷が融けてパドルの水面が現れたのはAで1月6日、Bは1月15日であった。パドルAの水温は、 $10^{\circ}\text{C}$ 近くまで上昇し表面の氷が融けるまで続いた。表面の氷がなくなると、水温は急に $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ まで下がり、その後はほとんど上がらなかった。このことは、パドルの表面の氷が水温保持に大きな役割を果たしていたことを示している。一方、表面の氷の最上層2 cmほどが白くなっていたパドルBの水温は、Aほど上昇せず $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度であった。表面の氷が透明か不透明かによる日射の透過量の違いが水温に大きく影響していることがわかる。

図-2は、パドル期間の後半の観測結果である。この図に示されているように、秋がくるとパドルの表面に新

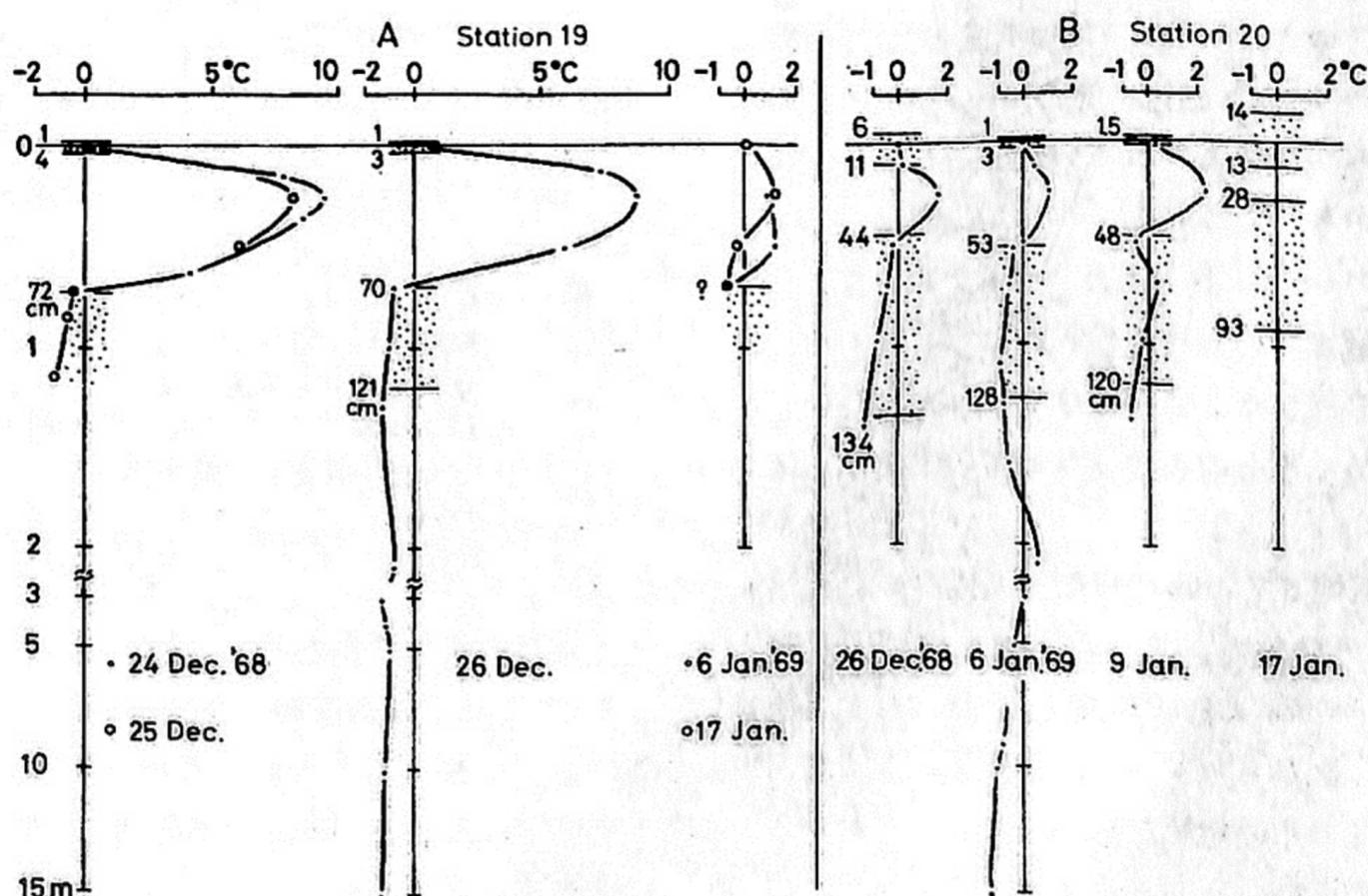


図-1 前半期のパドルの断面と水温分布。縦軸は、パドルの水面から測った深さ、横軸は温度を示す。点を打った部分が氷。表面の氷と水中の氷にはさまれた部分がパドル。水中の氷の下は海水である。Aは観測点19、Bは観測点20にできたパドルである。観測点19(A)の表面の氷は全層透明であったが、観測点20(B)の表面の氷は、その上部1~2 cmが白く不透明であった。観測点20においてはパドルの表面の氷は、1月15日ころなくなった。B図の右端の図(1月17日)は、観測点20のすぐ近く、まだ表面の氷が融けきっていない所の断面図である(遠藤, 1970)。

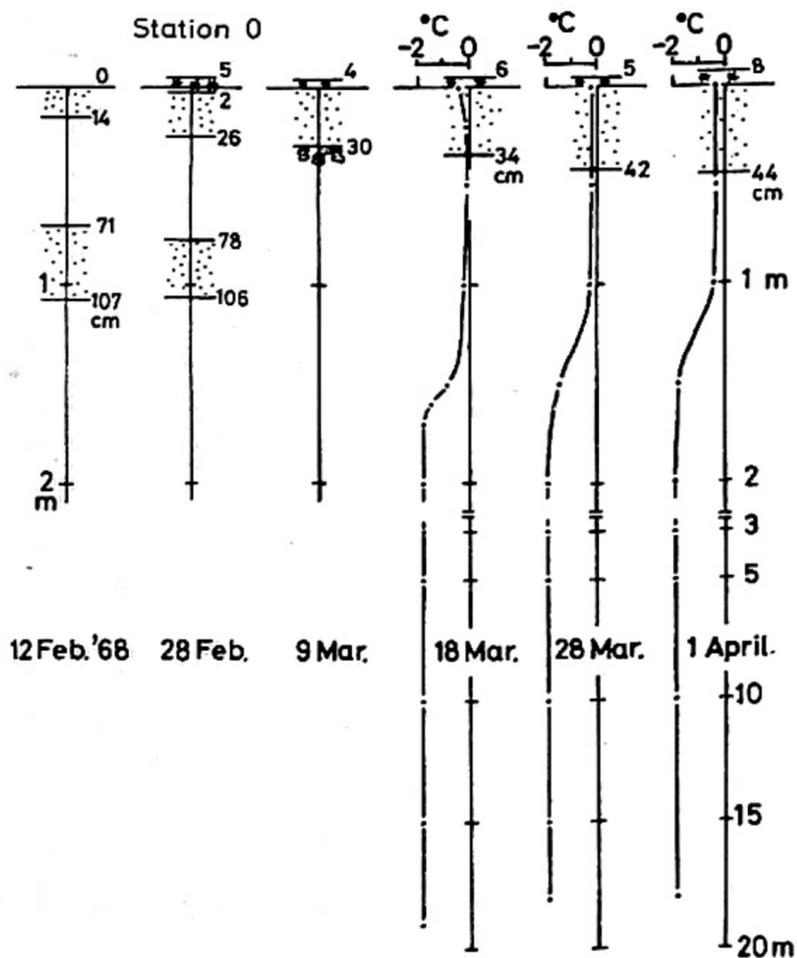


図-2 観測点0で観測した後半期のパドルの断面と水温分布。縦軸が水深、横軸が温度を示し、点を打った部分が氷、星印が積雪を表す(遠藤, 1970)。

しい氷が張る。パドルの水は、ほとんど真水に近いので、新しい氷は透明で気泡の少ない氷であった。この新生氷は、次第にその厚さを増していったが、パドルの下の氷は逆に薄くなってゆき、3月9日には消滅した。同時に、パドル表面の新生氷の下面に大きさ3~7cmほどのこわれたはちの巣氷が浮き上がっていた。これはパドルの下の氷の残骸である。こうして、パドルの底は抜けパドルは消滅した。図-3は、図-1と2をもとにして、パドルの形成から消滅までの過程を模式的に示したものである。しかし、どのパドルも底が抜けるわけではない。それで図にも底が抜けるものと抜けないものを示してある。

図-4は昭和基地で2年間にわたって観測された海水の厚さと積雪深の変化である。この地点は積雪が数十cmあったので、パドルの形成が遅く、1月になって急速に発達している。図からパドルの底が次第に深くなっており、パドルの底の氷の融解が起こったことがわかる。前節でもパドルの進展でパドルが深くなると述べた。一方、図-1, 2の遠藤の観察では、パドルの底での氷の融解はほとんどなく、氷の底面、海水との境界面で融解が起こるとされている。このように、パドルの底面で氷が融解するかについては相反する結果が出ている。今のところパドルの底面での氷の融解について、両者がどのよ

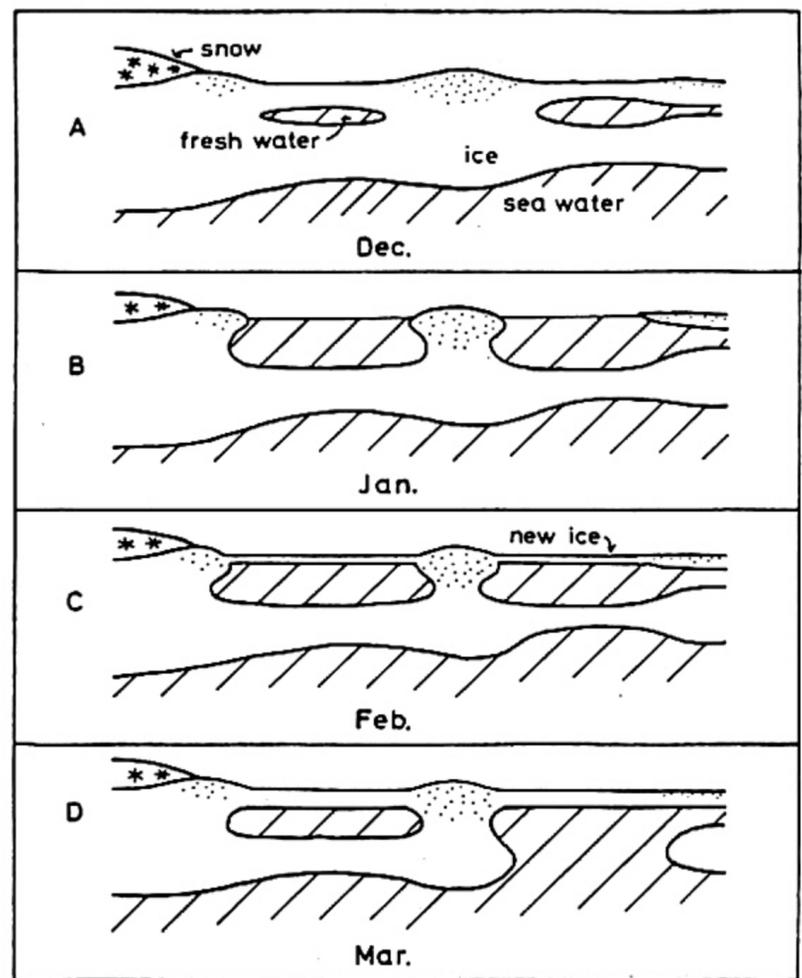


図-3 パドルの形成から消滅まで。底抜けパドルと底が抜けないパドルの2つを模式的に示してある(遠藤, 1970)。

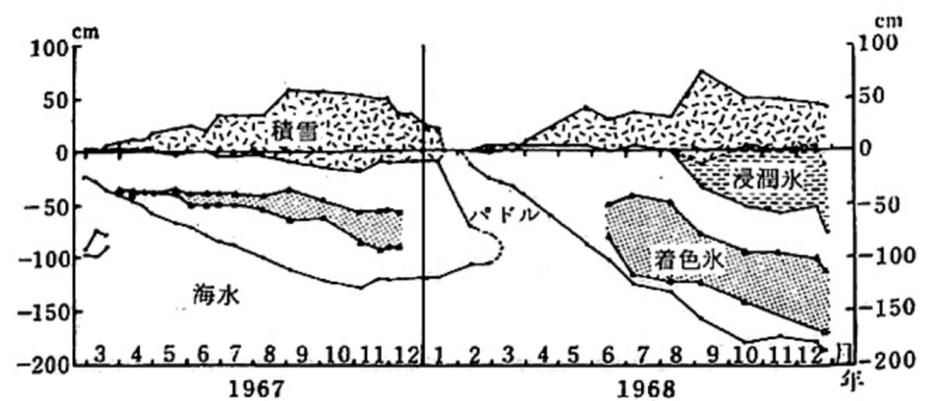


図-4 昭和基地における1967年、1968年の海水の成長と融解過程。着色水とは、プランクトンを大量に含む茶褐色をした海水、浸潤水とは積雪による重みで全体が沈み、クラック等の割れ目から海水が積雪中にしみ込み凍結した海水部分をいう(Naruse et al., 1971)。

うな条件で起こるか等についてはわかっていない。

### (3) パドルの役割

夏の北極海は、その面積の20~30%がパドルで覆われる(Campbell et al., 1978, 1984; Carsey, 1982)。パドルは表面に氷が張っていない場合は水面であるので、そのアルベドが非常に小さい。Grenfell and Maykut (1977)やGrenfell and Perovich (1984)によると、曇天でのアルベドは、パドルで約0.23、雪で覆われた氷で約0.83、夏の裸氷で約0.58、海面で約0.1である。したがって、氷野にパドルが出来るとアルベドが急に小さく

なるので、その存在は熱収支に大きな影響を与える。パドルが発達した氷野のアルベドは0.5~0.6と見積もられる (Carsey, 1985)。

近年の氷野の観測は、人工衛星のパッシブ・マイクロ波放射計が用いられ非常に成果が上げられている。この放射計にとって、パドルの存在は非常にやっかいなものとなっている。パドルの表面は水であるので、放射計は無数にパドルが存在している氷は、たとえその厚さが何mであろうとも海水面として識別する。すなわち、氷がない海水面とパドルが出来ている厚い氷の区別が非常に問題となる。さらに、秋になってパドルの表面に薄い氷が張ると、放射計としては、それは薄い新生氷として識別する。このように氷の上に出来たパドルは、パドルの下にある海水の情報を隠してしまうので、パッシブ・マイクロ波放射計のデータ処理アルゴリズムを複雑にするとともに、観測結果に不確実性を与えることになる。

(つづく)

#### 参考文献

- 1) Campbell, W.J., J. Wayenberg, J.B. Ramseyer, R.O. Ramseier, M.R. Vant, R. Weaver, A. Redmond, L. Arsenault, P. Gloersen, H.J. Zwally, T.T. Wilheit, T.C.

Chang, D. Hall, L. Gray, D.C. Meeks, M.L. Bryan, F.T. Barath, C. Elachi, F. Leberl and T. Farr : Microwave remote sensing of sea ice in the AIDJEX main experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 13, 309-337. (1987)

- 2) Carsey, F.D. : Arctic sea ice distribution at end of summer 1973-1976 from satellite microwave data. *J. Geophys. Res.*, 87 (C8), 5809-5835. (1982)
- 3) Carsey, F.D. : Summer Arctic sea ice character from satellite microwave data. *J. Geophys. Res.*, 90 (C3), 5015-5034. (1985)
- 4) 遠藤八十一 : パドルの形成から消滅まで. *低温科学*, 28, 203-212. (1970)
- 5) Grenfell, T.C. and G.A. Maykut : The optical properties of ice and snow in the Arctic Basin. *J. Glaciol.*, 80, 445-463. (1977)
- 6) Grenfell, T.C. and D.K. Perovich : Spectral albedos of sea ice and incident solar irradiance in the Southern Beaufort Sea. *J. Geophys. Res.*, 89, 3573-3580. (1984)
- 7) Naruse, R., Y. Endo, T. Ishida and Y. Ageta : Observations of snow accumulation and sea ice at Syowa Station, Antarctica. *Antarctic Record*, 40, 57-64. (1971)
- 8) Zubov, N.N. : *L'dy Arktiki (Arctic Ice)*. 360 pp. Izdatel'stvo Galvsevmorputi, Moscow. (1945)



深海探査船と成層圏気球の切手 (スイス, 1994年発行)

## America's Dairyland, Wisconsin 滞在記

海域開発研究部 他谷 康 Yasushi Taya

## 1. 生活編

本来なら、先ず長期在外研究の目的を述べ、その成果を報告させていただくのが、この紙面の順序とも考えた。しかし、長期在外研究は、先ず生活の基盤を築くことから始めなければならず、あえて生活編から始めさせていただくことをお許し願いたい。

## (1) マディソンの春

平成5年3月30日、長期在外研究員としての米国への旅立ちの日は、春の日差しですがすがしいものであった。しかし、家族4人の思いは様々であり、家内は友人とのしばらくのお別れにと、連日の長電話と送別会、そして子供のパスポートや小学校への挨拶、住民票の転出届け、引っ越し準備等々で少々バテ気味。長男(10歳)と長女(8歳)も、しばらくは友達に会えない寂しさがあるのだろうか。多少の不安があるのは仕方なしと相変わらず冷静さを装うものの、やはり筆者にも家族が1年間の米国生活を無事に楽しく過ごしてくれるのか、多少の戸惑いを感じた出発の日であった。

時差ボケの中、マディソンに到着したのは昼過ぎであった。空港では、筆者が研究指導を受けるレーナー先生が満面に笑みを浮かべ、今回は家族も一緒のこともあり熱烈に歓迎して下さった。マディソンはレーナー先生が一番好きな季節である春を迎え、街中の木々の若葉は、陽の光に輝いていた。空気も澄み切っていた。マディソンの冬の厳しさをレーナー先生だけでなく友人からも聞いていただけに、この時期に来てやはりよかったと安心したものである。

ホテルに2泊し、新居となるアパートには4月1日に引っ越し手はずになっていた。しかし、その日のマディソンの街は、31日夜半から降り続いた雪が、我々を歓迎するかのように銀世界を作り出し、新生活は雪国の春から始まった。

## (2) マディソン(米国)の生活は車・SOCIAL SECURITY CARDそしてIDカード

アパートは、筆者の研究室があるバイオトロンから車で15分、子供たちが通う小学校から10分の距離にあった。また、スーパーや銀行、郵便局、ショッピングモールも徒歩10分の距離にあり、立地条件として問題はなかった。しかし、車での買い物が当たり前になっている家内には、歩くには少ししんどい距離である。道幅が広く、信号が少なく、交通渋滞もなく、1ガロン(約3.8リットル)のガソリン代が1ドル10~20セントの米国では、車無しの生活は考えられないようである。隣にある定年退職者のためのアパートに住む70歳位のお婆ちゃんも、3,000CCクラスの国産車(アメ車)で買い物に出かけるのである。確かにアパートの周辺で買い物袋を持って、歩道を歩いている人を見かけることはなかったような気がする。すべてが車での移動であり、必需品である。

我が家も、レーナー先生のレンタカーよりは中古車を購入した方がよい、との勧めもあり、大金(?)を出して中古の小型車を購入することとなった。中古車といえども、1年を通じて故障もなく(わずか1回の厳寒でのバッテリー故障だけで)、走り続けてくれた。

特に、10月から始まった子供たちのアイスホッケーの練習と遠征試合の送り迎えには、フル回転の活躍を見せてくれた。忘れられない平成6年1月15日の零下40°Cの大寒波の時にも、ミネソタ州との州境まで200マイルの道のりを息子のアイスホッケーの試合のために走り続けてくれたのである。この時の車内は暖房を最強にしていたにもかかわらず、筆者の吐く息がドアのガラスに氷結し、バックミラーを見るときは、プラスチックのヘラで氷をかき落としながら運転したことが懐かしい思い出となっている。米国車もすてたもんじゃない。

SOCIAL SECURITY CARDは、銀行の口座を開設し

たり、写真付きの身分証明書 (PHOTO ID) を作る際にも必要である。また、大学所属の研究者であることを証明するスタッフ ID や、放射線、実験動物の取り扱いの許可申請を行う際の申請書類には、必ずと言ってよいほどこのカード番号を記入する欄がある。米国民だけでなく、米国に長期滞在する人は、この薄ぺらな紙製のカードが必須 (ひっす) アイテムとなる。

PHOTO ID は、文字どおり写真入りの個人を証明するカードであり、このカードを \$6 で作っておけば、パスポートを持ち歩く必要はない。筆者は、アパート前に建つ 12 階建ての馬鹿でかいステートオフィスビルの事務所に SOCIAL SECURITY CARD を持参し、PHOTO ID を取得した。発行までの所要時間は、15 分ほどであり、免許証と同じ体裁のカードを作ることができる。もちろん、米国で自動車免許証を取得すれば PHOTO ID として使用できる。小切手やカードを使用する際に、PHOTO ID の提示を求められれば、この小さなカードが大いに役立つのである。1 年間の米国生活であったが、パスポートを提示したのは、入国時と出国の時だけであった気がする。

### (3) 子供たちの学校

マディソンには日本人学校はなく、子供たちは幸か不幸か地元の子供たちと同じ学校に通うことになった。しかし、この学校は学区内に筆者のような研究や、ウイスクンシン大学に留学を目的としている世界中からの学生や研究者のためのアパートがたくさん建っており、その子供たちも通っているインターナショナルな学校である。その国の数は、80 か国余りにもなり、年に 1 度、学校のイベントとしてインターナショナル・デイが開催されるマディソンでは有名な小学校であった。

入学手続きは心配の種であったが、30 歳半ばの校長先生が優しく迎えてくださり、クラス分けも、筆者等の目の前で即座に決めていただいた。この時にも、娘の学年には既に日本人の子供がいることから、そのクラスを選んでいただいた。しかし、息子の学年には日本人がいないこともあり、ベテラン先生のクラスとなった。

校長先生はとても気さくな方であり、子供たちの担任の先生の紹介だけでなく、校内も丁寧に案内していただいた。日本では子供たちの学校に、運動会と年に 1 度の父親参加日しか出たことのない筆者にとっては、校長先生とお話しをすることは皆無であっただけに、彼には親近感を覚えたものである。子供たちの教材を買いそろえるときに偶然スーパーで出会った時にも、彼は親切にアドバイスしてくれた。何かが日本とは違っている気がし

たものである。子供たちは 1 年間を通じて、良い環境で、素晴らしい先生や友達に巡り会えることになった。

学校に入るに当たって 1 つ気がかりだったのは、学校の始業時期が日本と異なっていることであった。3 月に日本の学校で終業式を終えた子供たち (息子は 4 年生、娘は 2 年生を終了) は、日本では 4 月から 5 年生と 3 年生になる。しかし、米国では 9 月が新年度となり、進級して転入できるかどうかであった。こんな筆者の心配をよそに、パスポートによる年齢の確認だけで、5 年生と 3 年生で各々入学することとなった。4 月に入学し、わずか 2 か月の在学で、6 月には学年末を迎え、9 月からさらに 1 学年進級して新学年を迎えることになるとの話であった。実際、息子は 2 か月の在学で卒業証書 (小学 5 年生が最終学年となっている) を手にしたのである。

6 月初旬の学年末の時期、校長先生と担任の先生とを交えた親の面接があり、その時に、子供たちを進級させるかどうか問題となった。筆者と家内は、もう一度、同じ学年を、同じ先生でお願いできないかと申し出た。返事はすぐに帰ってきた。そのように手続きしましょう。先生たちも同じ意見を持っていたのである。それにしても奇妙な話である。息子は卒業証書を受け取りながら、留年したのである。

この学校の名はシャールウッド小学校と呼ばれ、文字どおり学校の回りは木々が生い茂り、緑に囲まれた森の中の学校である (写真-1)。当然というべきか、住宅も回りに沢山建っているが、リスや野鳥はどこにも見られ、自然がいっぱいの環境である。学校の運動場も芝生の絨毯 (じゅうたん) である。堅い土のグラウンドが当たり前の日本と違って、ここでは芝生が当たり前なのである。土が無いグラウンドはいささか奇妙な感じさえ覚えたもの



写真-1 子供たちが通ったシャールウッド・ヒル小学校 (初秋)

であるが、転んでも擦り傷を心配することもなく、遊び盛りの子供にとって最適なグラウンドと言える。まったく羨ましい環境であり、素晴らしい学校であった。

## 2. 仕事編

### (1) 何故ウイソコンシンへ

ウイソコンシン大学マディソン本校のレーナー先生(ウイソコンシン大学医学部予防医学研究部主任研究員)と、共同研究者である同大学病院放射線科のウイルソン教授は、骨壊死の早期診断方法や発症機序並びに予防方法について、羊をダイバーのモデルとして精力的に研究されている。筆者がこの大学を選んだ最大の理由は、米国で唯一、大型の動物チェンバーを所有しており、羊を使った動物実験を実施できる環境が整っていたからである(写真-2)。11月初旬から2月中旬までは、厳しい寒さにさらされ、特に1月の大寒波を味わった今も、やはりここに決めてよかったと、心の底から実感している。

### (2) 骨壊死研究の目的

在外研究の目的は、我が国では主にヘルメットを使用した潜水漁業ダイバーに多く認められる骨壊死の発症過程を羊モデルを使用して研究することであった。この研究の社会的背景として、わが国の潜水漁業ダイバーの骨壊死の発症率が50%以上と欧米(3~15%)に比較して非常に高いことが挙げられる。米国でも、ハワイ州の珊瑚採取のダイバーや、メイン州のホタテガイ採取、カリフォルニア州のアワビ採りに従事しているダイバーに骨壊死の発症が報告されている。

今回、筆者がお世話になったウイソコンシン大学のレーナー先生らは、米国だけでなく日本の漁業ダイバーや港湾での橋脚設置や地下街建設に従事する高気圧作業

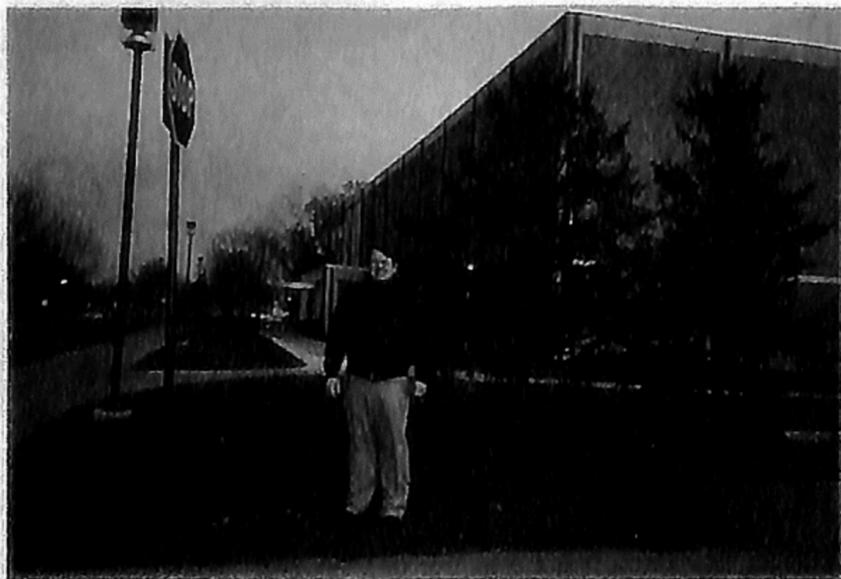


写真-2 大型の動物用高気圧チェンバーのあるバイオトロ  
ン全景とレーナー先生(初冬)

従事者(ケーソン作業員ら)だけでなく、近年のレジャーダイバーのダイビング・コンピューターの使用による、1日に2~3回の繰り返し潜水も骨壊死罹患の危険性があると考えており、精力的な研究を実施している。

骨壊死は、高圧環境からの不適切な減圧方法によって生じる減圧症の一種であり、原因として他の減圧症と同じく、不活性ガス等の過飽和状態(気泡化)が主たる原因と考えられている。しかし、四肢の関節に痛みが伴うベンズ、呼吸器系の減圧症であるチョークス、中枢神経系の減圧症等が減圧終了後、数十分から数時間で発症するのに比較して、骨壊死は早い人で半年、遅い人では十数年と時間的に大きな違いがある。この骨壊死の発症機序並びに予防方法は未だ十分に解明されておらず、適正な動物を使用した研究が必要と考えられている。慢性減圧症の代名詞となっている骨壊死の研究は、我が国の潜水漁業ダイバーだけでなく、世界中の潜函作業等の高気圧環境従事者やレジャーダイバーにとっても重要な研究課題である。

### (3) 5月から始まった実験

生活のリズムも安定?した4月中旬から、筆者の在外研究もようやく実験準備が整い、5月の予備実験を目指して日本と変わらない生活が始まった。動物実験で大切なことは言うまでもなく、適正な実験動物を確保することである。

筆者が使用した実験動物は、大学付属の牧場で繁殖・飼育されている管理の行き届いた羊であり、病気の心配は全くなかった。この羊の価格は、大学の研究員が購入する場合は、1頭100米ドル、学外の者が購入する場合は、約3倍の価格となっている。ちなみに日本で購入すれば3千ドルくらいの値段である。

今回の研究では、全部で14頭の羊を使用した。当初は10頭を予定し、18m相当深度圧力からの高圧暴露実験を計画していた。しかし、レーナー先生は予備実験をまず3頭の羊を使用して実施することを力説された。この予備実験は、17m相当深度での3時間の圧縮空気による暴露と、その後の無減圧での潜水方法において、減圧症発症の有無を調査し、本実験での高圧暴露深度を決定することが目的であった。筆者は、18mからの実験を希望したが、羊での高圧実験に精通しておられるレーナー先生は、今回の筆者が持ち込んだ日本の潜水漁業ダイバーの潜水プロファイルは安全面で問題があることを既に認識されていたのである。

### (4) 研究活動

予備実験の結果、17m相当深度圧、3時間暴露、無減

圧方法で、3例中2例に減圧症（ベンズ：四肢の痛み）が認められた。しかし、レーナー先生が心配されていた呼吸性の減圧症で死亡することはなく、本実験は6月初旬から、筆者の希望した18mで開始することになった。以下、本研究の概略を紹介させていただく。

＜日本の潜水漁業従事者の骨壊死発症に関する研究＞

#### イ) 高圧暴露実験

実験は、前述したとおり、ウイスコンシン大学の付属施設であるバイオトロンに設置されている大型の動物用高圧チェンバーを使用した（写真-3参照）。実験に使用した動物は、健康な3~4歳の羊であり、予備実験を含め14頭（対照群：3頭、暴露群：11頭）を用いた。

高圧暴露方法は、圧縮空気により18~22m相当深度まで加圧、3時間の保圧（圧力を高圧で維持）後、直接大気圧まで減圧する方法とした。このときの加圧速度は、チェンバーの性能から1分間に6~10m相当の圧力増加とし、減圧速度は1分間で10m相当の圧力低下とした。この高圧暴露条件（深度・時間）は、実際に筆者らがダイビングレコーダによって記録した、有明海での潜水漁業従事者の潜水方法をシミュレートしたものである。

#### ロ) 減圧症の確認

減圧症は、減圧後4時間にわたる観察と、翌日の24時間後の観察から、前述したベンズやチョークス等の有無を判定するものであり、クラシックサインと呼ばれる典型的な減圧症の症状を時間経過とともにノートに記録した。この観察では、四肢の状態と呼吸変化に主眼を置き、四肢の挙上が認められる場合にはベンズ（四肢関節に痛みが伴う減圧症）と判定した。また、呼吸が浅く、かつ早くなった状態を呼吸器系の減圧症（チョークス）、歩行状態や神経症状調査から異状が認められた場合には中枢



写真-3 動物チェンバー内の羊

神経系の減圧症（CNS-DCS）と判定した。

#### ハ) 骨壊死の確認

羊の骨変化については、高圧暴露の1週間前にコントロールデータとして、放射性同位体（テクニシウム： $Tc^{99m}$ -MDP）を頸静脈に注射し、2時間後にγカメラにより、四肢の側面と前面から骨シンチグラムを撮った。また、高圧暴露の翌日と2週間後及び7週間後にもそれぞれ骨シンチを行い、経時的な骨変化をカルシウムの代謝活動から判定した。

さらに、暴露8週間後に解剖を行い、四肢骨の摘出並びに骨髄壊死の有無を検査した。その後、10%中性ホルマリン及び70%アルコールで半切した骨をそれぞれ固定し、病理組織学的検査の資料とした。

#### ニ) 結果

##### （減圧症観察）

ベンズと確認できる減圧症は、予備実験の17m暴露群（予備実験）では3例中2例、本実験の18m、20m及び22m暴露群では、全例に認められた。その痛みの程度は、軽度なものから激しい痛みまで様々であり、出現時間も早いものでは減圧終了後、10分から認められた。この症状は、3例ではあるが24時間後の観察でも確認でき、最終的には、この内の2例に骨髄壊死が認められた。また、22m暴露実験では、1例に減圧後5分に呼吸器系並びに中枢神経系の減圧症が認められ、レーナー先生と筆者が交替で酸素吸入を施したが37分後に死亡した。死因は呼吸性の減圧症であり、翌日の剖検ではすべての血管内に気泡を確認した。

##### （骨シンチ）

放射性同位体（ $Tc^{99m}$ -MDP）の取り込み状態から、骨皮質におけるカルシウム代謝をγカメラでとらえ、骨壊死の診断資料とした。暴露前の画像を対照群とし、暴露後2週間及び7週間での画像を比較検討した結果、暴露群の8例中3例に変化が認められた。特に最もベンズが顕著に認められた1例は、2週間後の画像からホット・スポットと呼ばれるカルシウムの集積が認められた（写真-4）。この変化の部位は、解剖所見で骨髄壊死が確認された部位であった。このことから、骨シンチでとらえた変化は、骨損傷の修復のための血流量の増加による、骨代謝の変化と考えられ、骨壊死発症過程での早期診断の指標として有効であることが明らかとなった。

##### （解剖所見）

対照群を含む14頭の羊は、高圧暴露後8週間目に剖検を実施した。本実験では、暴露後に全例にベンズが認められ、この中の2例に明らかな骨髄壊死を認めた（写



写真-4 羊#0033の骨シンチグラム。Control（高圧暴露1日前）、1 Day（暴露後1日目）、2 Weeks（2週間後）、7 Weeks（7週間後）



写真-5 羊#0033の左脛骨（下）と右脛骨（上）の縦断面。左脛骨に骨髄壊死が認められる。

真-5)。骨壊死の確認については、最終的に病理検査を実施しなければならないが、その結果が待たれるところである。

#### (5) 研究成果のまとめ

これまでのウイスコンシン大学の羊実験では、圧力環境は11~42 m相当深度、暴露時間も24時間暴露から30分の短時暴露まで様々な条件で実施しており、24時間暴露では骨壊死の発症を確認している。しかし、3時間のしかも1回の暴露実験で骨壊死発症が示唆されたことはなく、初めてのケースとして貴重な資料を得ることとなった。

我が国の潜水漁業ダイバーの潜水方法が、減圧症発症だけでなく骨壊死の発症の危険性を含んだ潜水方法であることを示唆する結果であったが、筆者らの現地調査では、減圧症を訴えるダイバーがいなかったことも事実で

ある。

羊が人に比較して、減圧症に罹患しやすいことが、本実験では考えられた。その理由の1つに体脂肪量の差が大きな要因として考えられる。脂肪組織には、水よりも約5倍不活性ガス（空気の場合には窒素ガス）が多く溶け込むことは知られている。従って体脂肪が多いほど不活性ガスが多く溶け込むことになる。今回の実験に使用した羊の体脂肪の割合は、体重の約30%であり、人の割合（18~20%）よりも多かったことが、今後の研究課題でもある。

この成果の一部は、第12回日米天然資源会議/潜水生理・技術パネル（1993年7月13・14日、米国メリーランド）で発表しており、興味のある方は、同会議から発行される論文集を参照していただければ幸いである。

### 3. 終わりにあたって

マディソンでの1年間の長期在外研究の好機を得たことは、私並びに家族にとって、大変有意義なものであった。1年間は長いようでもあり、過ぎ去ってしまえば短かった気がする。滞米中の1年間、家内は子供たちの通う小学校の給食のボランティア活動に参加し、帰国前にはマディソンの教育委員会から、感謝状をいただく栄誉を得た。子供たちは、毎日休むことなく、厳しい冬の時期も、家内の運転する車で不満も言わず学校に通い、友



写真-6 筆者の家族（シカゴでの休日）



写真-7 お世話になったレーナー先生(右)と林先生(左), 中央は筆者(高圧環境医学会出席の後に訪れたロッキー山脈にて)

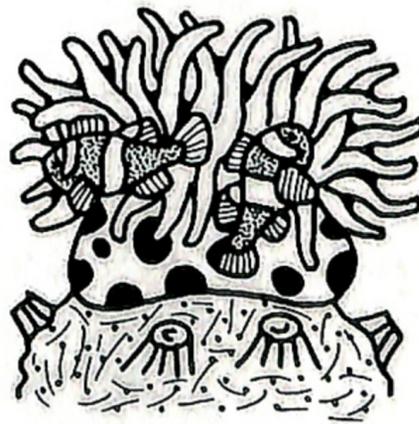
達もたくさんできたようである。心配していたマディソンの冬も、9月下旬から始まったアイスホッケーのクラ

ブチームに参加し、地元の子供たちと一緒に乗り越えてくれた。特に、息子のチームは、10月から始まったマディソンでの試合に勝ち進み、ウイスコンシン州のアイスホッケー・トーナメントで準優勝に輝いた。娘もアイスホッケーを通じてたくましくなった気がする。

このような思い出に残る生活を送ることができたのは、家族が健康で頑張ってくれたことが一番であったと感謝している(写真-6)。そして、公私にわたりお世話いただいた、レーナー先生と超多忙な弁護士である奥様、筆者の研究に自分の研究の時間を割いて協力してくれた、台湾からの留学生であり、軍医である林先生の協力があったからである(写真-7)。本誌面をかりて深く感謝申し上げます。

また、海域開発研究部の皆様はじめ、当センターの多くの方々から、電話で、手紙で、葉書で、ファックスで、電子メールで、そして小包で公私にわたり励ましていただきました。改めて感謝申し上げます。有り難うございました。

「故郷は遠くにありて思うもの」と言いますが、まさに今回がこの機会であった気がします。多くの方々に、このような機会が巡ってくることを祈っています。



# 国際深海掘削計画—技術工学開発委員会 に出席して

深海開発技術部 平井 一司 Kazushi Hirai

### 1. はじめに

去る3月7日-8日に米国、テキサス A & M 大学構内の ODP 事務局で開催された第15回国際深海掘削計画—技術工学開発委員会 (ODP-TEDCOM) に出席する機会を得ましたので、その概要についてご紹介いたします。

国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program : ODP) は、米国国立科学財団 (National Science Foundation : NSF) が、中心となって先進各国に呼びかけ、地球に残された最後の科学的未開地である、海底下の地質構造と地球の歴史を究明するために、それぞれの国の代表機関との間に交換覚書を交わして実施している国際共同研究事業である。

また、本計画に必要な経費は、主として NSF より、また他の加盟国からも分担金として拠出されており、JOI (Joint Oceanographic Institutions Inc.) を経由して、実務担当機関である、テキサス A & M 大学 (Texas A&M University : TAMU)、及びラモントードハーティ地質研究所 (Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia Univ. : L-DGO) に配分されている。

現在の ODP には、米、日、英、独、仏、ロシア、加・豪海洋掘削共同体及び12か国で構成される欧州海洋掘削総合科学財団が加盟しており、1993年10月より新しいフェーズ (第2期) に入り、原則として今後10年、具体的には当初5年 (1998年9月まで) の継続が合意され、米国国立科学財団と加盟各国との覚書の交換が行われた。

### 2. 深海掘削研究の歴史について

地球の本態を知るために海洋底を掘削し海洋の地殻を採取しようとする試みは、地殻とマントルの境界と考えられているモホロビッチ不連続面 (通称「モホ面」) までの掘削を目指すモホール (Mohole) 計画が1950年代に米国で立案され、1961年にカリフォルニア半島沖で CUSS I 号を用いて掘削が実施された。

また、1968年に米国で JOIDES (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling) 計画が立案され、Caldrill I 世号を用いてフロリダ沖で掘削が実施された。さらに掘削船 Glomar Challenger 号を用いて深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Project : DSDP) として調査が開始された。同計画は1975年に米国に加えて、日、仏、英、西独、ソ連が参加し、国際協力のもとで国際深海掘削計画 (International Phase of Ocean Drilling : IPOD) として再編され、DSDP・IPOD を通じて世界各海域の624地点で総計約170kmのサンプルを採取した。

1985年からは米国国立科学財団 (US National Science Foundation : NSF) の支援の下で新たな参加国を加え国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program : ODP) として活動しており、世界各海域の約450地点で約80kmのサンプルを採取した (1991年3月現在)。本計画で使用されている掘削船 JOIDES RESOLUTION 号は1994年までの運航計画が決定されており、さらに1998年まで運航が延長される見込みである。

### 3. ODP-TEDCOM について

国際深海掘削計画に関する重要事項の審議と決定は

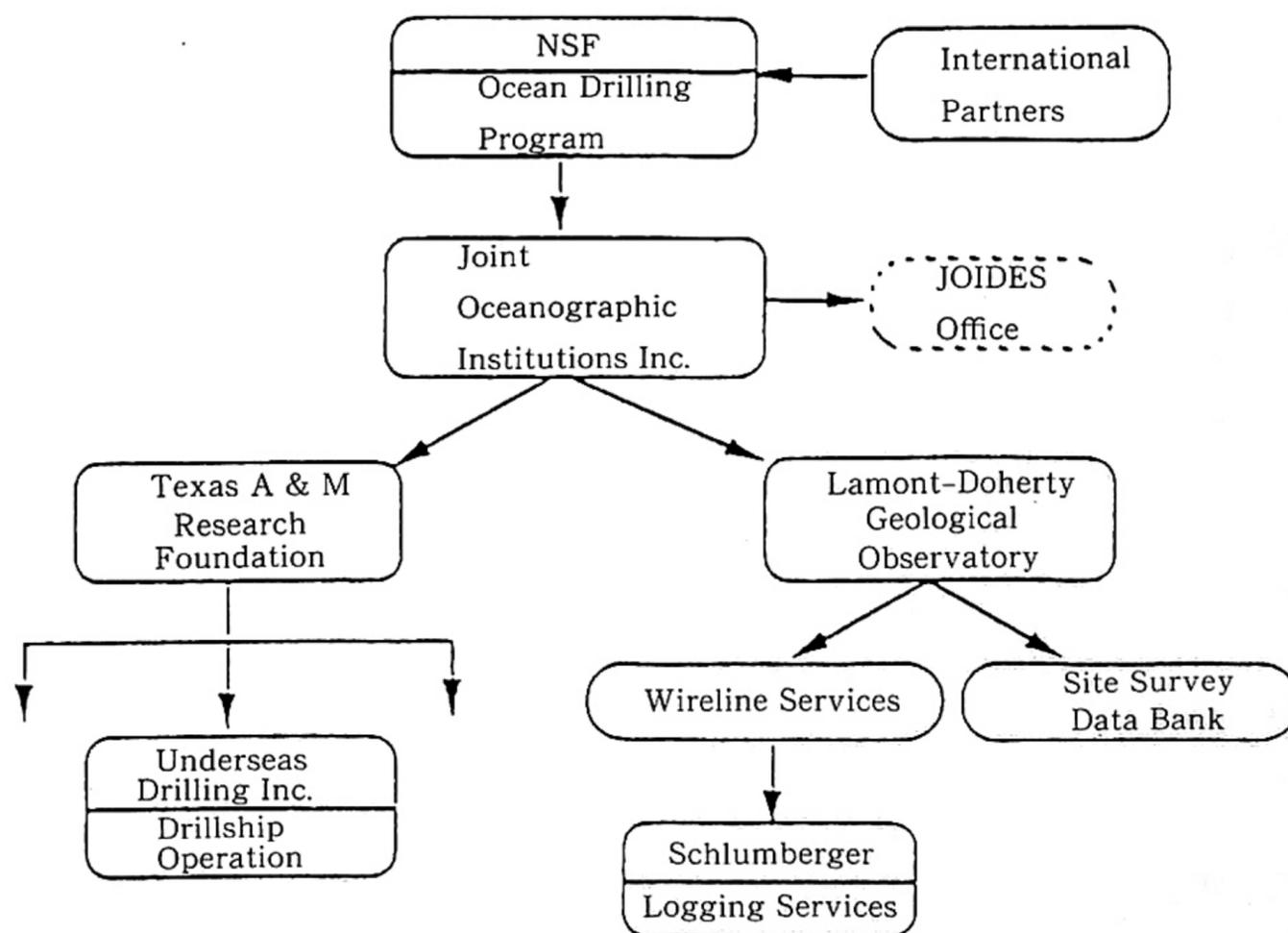
ODP 加盟各国の代表機関と JOIDES によって行われている。理事会 (Executive Committee : EXCOM), 計画委員会 (Planning Committee : PCOM) の下にリソースパネル等のテーマ別パネル及び汚染防止・安全パネル等の業務別パネルが検討部会として常設されており, 計画の大綱から航海計画, 孔の位置, 掘削内容, 計測の種類, 首席研究員の人選まで, あらゆる課題を検討, 立案している。また, 技術工学開発委員会 (Technology and Engineering Development Committee: TEDCOM)

では, 科学者の要望である

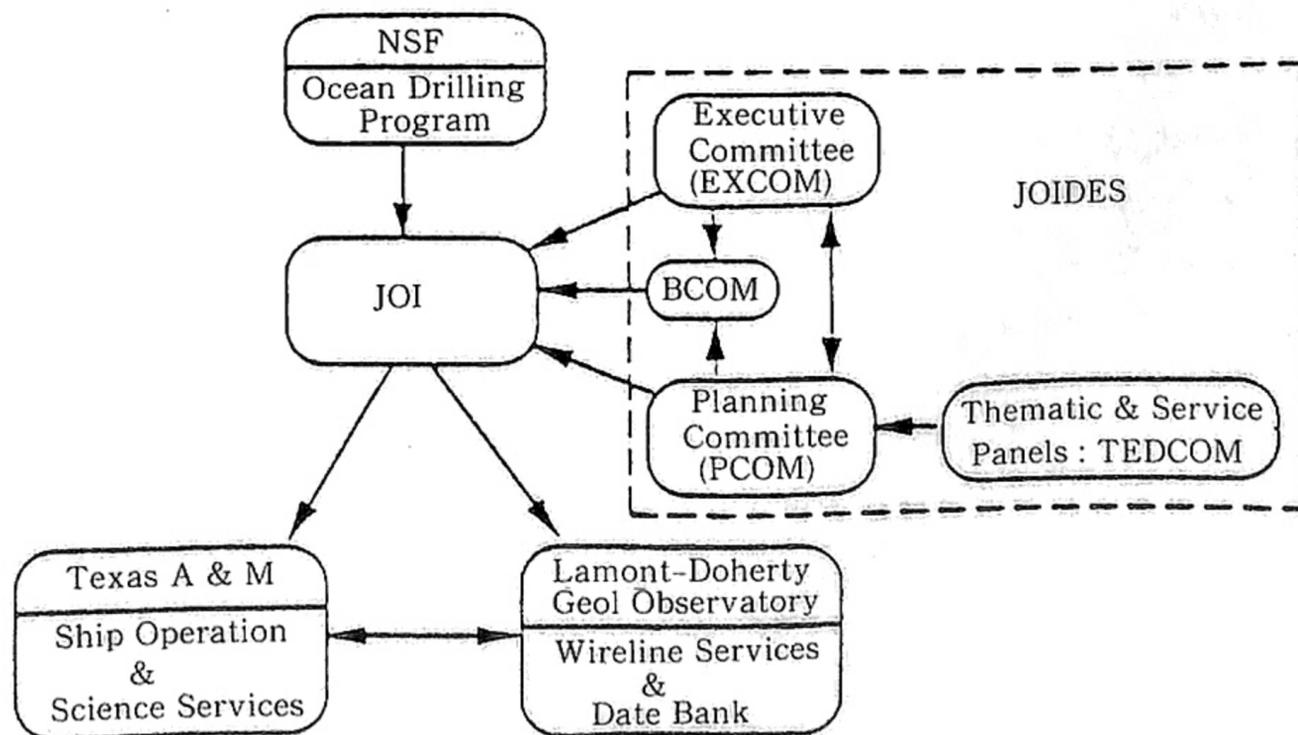
- ・より深い掘削深度の確保
- ・炭化水素含有層の掘削
- ・コア回収率の向上

等を目指して安全かつ効率の良い掘削機器と掘削技術に関する先端ノウハウを検討し, PCOM に対し推奨を行い, また, 開発状況を監督している。

現在の TEDCOM のメンバーは, IFP (仏) のスパークス氏を議長とし, 各国の技術者, 研究者が参集しており,



A. Program Management



B. Science Advisory Structure

図-1 ODP 運営組織図

当センター深海開発技術部第一研究グループの高川主幹が日本の委員を努めている（図-1を参照）。

今回の TEDCOM では、DCS 関連、スリムラインライザー関連、JOIDES RESOLUTION 号改造案等についての提案、討議が行われた。

#### (1) DCS

ダイヤモンドコアリングシステム（Diamond Coring System : DCS）は、固い岩層を掘削するために、小口径のダイヤモンドビットを用いて高速回転で掘削する方法であり、陸上の鉱山では既に使用されているが、動揺する掘削船からドリルパイプを介してビット（先端の刃先）に一定の押しつけ力を作用させることが非常に困難な技術となっている。

DCS の開発については、昨年6月までに終了する予定であったが、装置の開発が遅れており、1996年1月～2月に実施される LEG 165 で海上試験が実施される予定となり、これまでの開発計画の一部を改正して、最大許容ビット荷重の評価方法を確立し、さらに能動制御型の動揺吸収装置のロジック及び基本仕様を決めるための数値シミュレータを開発することとなった。

しかし、今年実施される予定の陸上試験についても予算が付いておらず、どのように開発を実施していくのか TEDCOM-PCOM で調整することとなった。

#### (2) スリムラインライザー

海洋石油掘削では、炭化水素（石油、ガス等）を採掘することを目的として掘削が行われるが、ODP の学術掘削では、危険防止のため炭化水素が含有されていると思われる地層については、十分な調査のうえで掘削対象から除外され、また掘削中に炭化水素の存在を表す兆候が出た場合には、即時に掘削を中止することを原則としている。

しかしながら、科学者からは前述のような要望が出されており、その要望を達成するための1つの方法として、海洋石油掘削で用いられているライザー掘削システム（掘削船と海底とをライザーと呼ばれる太いパイプでつなぎ、特殊な薬剤を混入した泥水を循環させることにより、炭化水素含有層をはじめとして、より深く、より回収率良く掘削ができる等の多くの利点を持つ掘削方法）を採用することが挙げられる。

スリムラインライザーによる掘削法は、スパークス氏から提案されたが、本年2月に京都で実施された Joint EXCOM-STA/JAMSTEC Workshop 「21世紀の深海掘削計画（Ocean Drilling in the 21st century : OD

21）」でも報告され、製作費用が比較的安い費用で製作できるが、通常の海洋石油掘削とは多少異なったコンセプトとなっており、安全性、掘削作業をも含めて今後さらに検討が必要であり、同席した技術者から疑問点につき質問が出た。

現在、日本は、これまでの海洋石油掘削技術の延長線上でのライザー掘削が可能な新しい深海掘削船の建造を提案しており、本件についてもスパークス氏から報告がなされた。

#### (3) JOIDES RESOLUTION 号の改造提案

ODP で使用されている JOIDES RESOLUTION 号は、1978年に建造された海洋石油掘削船を研究船に改造したものであり、かなり老朽化しており、また、ライザー掘削の設備がないこともあり、前述の科学者の要望に十分こたえているとは言えない。そのため、同号の延命と研究範囲を広げるための改造が提案された。

改造案としては、主として船長を長く伸ばし、また各部を補強改造することにより、その目的を達成しようとするもので、スリムラインライザーも搭載でき、さらに研究設備も拡充できると報告された。

## 4. おわりに

モホール計画の立案以来、国際深海掘削計画として発展した現在の ODP まで、これらの計画が地球科学分野に及ぼした影響は計り知れなく、この分野における本格的なビッグプロジェクトの先鞭（せんべん）をつけた意義は高く評価される。

しかしながら、海洋底地殻構造の実体は奥深く、更なる調査・研究が必要であることは言うまでもない。

ODP-TEDCOM では、学術掘削に関する種々の技術検討を行っており、21世紀の深海掘削計画を支える深海掘削船システムの開発を目指して技術研究を行っている当センターとしては、ODP-TEDCOM と連携を保ちつつ学術掘削における最新の技術情報を取得するとともに、自ら提案及び開発に積極的に参画することが必要であると感じられた。また、今回の委員会に出席して、技術開発の困難さは当然であるが、運営資金の不足が痛切に感じられ、日本として新しい深海掘削船の建造提案を出してはいるものの、技術立国、経済大国である日本の果たすべき役割をもう一度考え直す必要があると思われた。

## 海のアソロジー (10)

広島大学 (前: 深海環境プログラム) 長沼 毅 Takeshi Naganuma

山の調は桜人, 海の調は波の音……

海におかしき歌枕

磯辺の松原 琴を弾き 調めつつ

沖の波は磯に来て 鼓打てば

みさご浜千鳥 舞い傾れて遊ぶなり

情緒あるこれらの歌は『梁塵秘抄』(岩波文庫)からです。『梁塵秘抄』は平安末期の12世紀後半に、後白河法皇が集成した“今様歌”歌集です。“今様歌”とは流行歌のことで、今の30・40歳代が若かりしころ、『明星』の付録に歌謡曲歌集(ウタ本と呼んでいた)がありましたが、これが『梁塵秘抄』に相当します(と言っても身も蓋もないが)。それにしても、猥雑(わいざつ)と思われがちな民衆歌謡を時の法皇が勅撰とは、日本文学史上きわめて異例と言えましょう。古代から中世へ、時代を画する変革の大波の中で、民衆が何を願い何を歌っているか。民衆の口調をそのまま伝える『梁塵秘抄』には、他の歌集にはない、率直さとダイナミクスがあります。ちなみに、上の歌の「桜人」とは催馬楽(さいばら、古代歌謡)の曲、「みさご」とは海辺に住むトビの類で、仲のよい夫婦や貞淑な婦人に例えられるそうです。

こゆりさんの渚には、金の真砂ぞゆられくる……

波が寄せて返すたびに、波の下の砂がきらきらと舞い遊ぶ。そんな情景がパッと浮かんでくるような歌です。「こゆりさん」の意味はわかりませんが、相模地方の海岸を指す「こゆるぎの磯」の転訛・転意かも知れません。

いかにも民衆歌謡という素朴な歌もご紹介しましょう。

伊勢の海に朝夕に海女の居て  
採り上ぐる 鯨(アワビ)の貝の片思なる

波高や荒磯の 鯨の貝の片思なる

老の波 磯額にぞ寄りにける あはれ恋しき若の浦かな

夕暮れに浜行く鷹を海人かとして  
魚乞ふ主か 釣りもせぬ身を

『梁塵秘抄』にはまた、仏教の影響も色濃く見られます。

生死の大海ほとり無し 仏性真如岸遠し……

……何ぞの海 常楽我浄の風吹けば  
七宝蓮華の波ぞ立つ

文殊の海に入りには、娑竭羅王 波をやめ……

「娑竭羅王」(沙伽羅王)とは八大龍王の第三位、海に住み水を司る龍神ですが、8歳で即身成仏(現世成仏)した娘(竜女)の方が有名かも知れません。乗船研究者の中には、娑竭羅王と相性が良くて、この人が乗ると海が穏やかになる、という文殊菩薩のような人もいれば、逆の人もいます(例えば「JAMSTEC」第5巻第4号69頁)。

ところで、八大龍王と言え、源実朝のこの歌が思い出されます。

時により 過ぐれば民の嘆きなり

八大龍王 雨やめたまえ  
（『金塊和歌集』719）

大雨洪水に苦しむ民衆を案じる姿は、さすが將軍歌人だと思えます。「海のアソロジー（1）」でも触れましたが、この希有の人物には強く魅かれるものがあります。

わたつ海の中に向かいていづる湯の  
いづのお山とむべもいひけり  
（『金塊和歌集』641）

この歌は、実朝が走湯山（湯河原と熱海の間、伊豆山）参詣のときに詠んだものです。手元の昭和32年の資料では、走湯は毎分5,000リットル以上も湧出する伊豆屈指の温泉だそうです。湯の出づる所、つまり伊豆、とは実にもっとも（むべ）なのです。火山学者の仲二郎博士（深海研究部）や小坂丈予教授（玉川大学）と何回か、伊東沖の海底火山（手石海丘）の調査を行ったことがありますが、そのときは上の歌を思い出したものです。今年3月の調査では、火山活動の沈静化を示唆するデータが得られました。そこで狂歌を一句。「わたつ海の火山活動停止しつっ 手石のお山とむべもいひけり」。



帆船（ブルガリア，1969年発行）

# 海と浮力とアルキメデス

情報室（兼）海洋研究部 黒山 順二 Junji Kuroyama

## 1. 1枚の写真

先日、自称ナンセン三世のH氏から1枚の写真を見せられました（写真-1）。彼は北極海へ氷海用自動観測ステーション（自動観測ブイ）の設置に行ってきたばかりで、写真はその際に作業の1シーンを撮ったものでした。北極海の流水の中央部に自動観測ブイを埋め込むために、熱水ジェットによって厚さ約3mの氷を切り抜き、直径約1メートルの穴を開けたというのです。写真はまさに海水を円形に切り終わったところですが、問題はその円内の氷柱が周囲に比べて5~10cm程度下がっているように見えるということです。彼にこれは何故かと聞かれましたが、私もこれまで氷について深く考えたことがなく分かりませんでした。その時はただただ、彼と2人で首をひねるばかりでした。

しかしながら、その後もこの「氷の問題」のことが私の頭から離れませんでした。その写真において本当に自

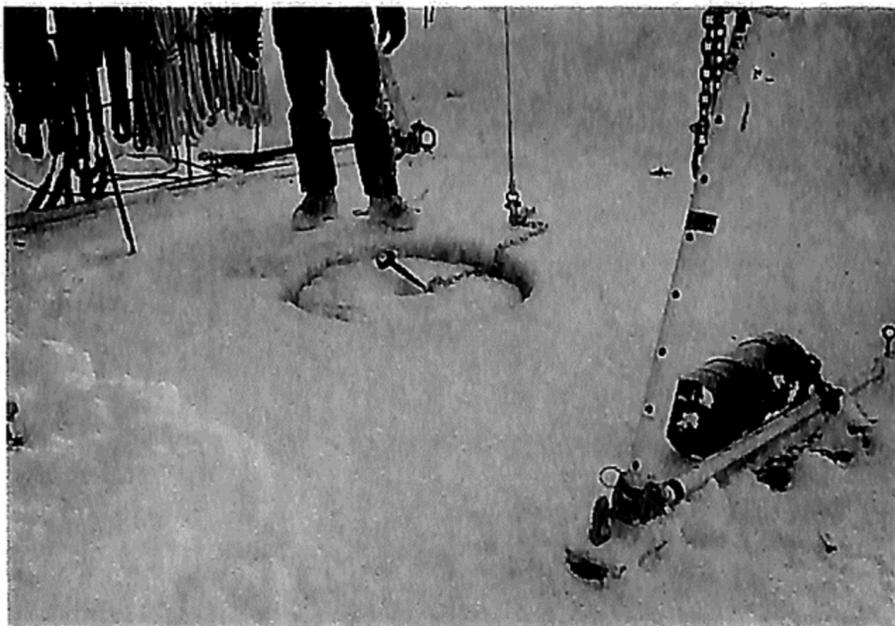


写真-1 氷海上の作業風景

然に円内の氷柱が周囲に比べて下がっているのか、やや疑問も残りますが、この機会に一度「海水は何故そして如何に海に浮かんでいるのか？」という素朴な問題を考えてみるのもいいではないかと思いました。そう言えば、日ごろよく「氷山の一角」という言葉を口にしながら、氷山の内どのくらいの部分が海面に出てどのくらいが海中にあるのか疑問に思ったことがなかったのです。研究者の端くれとして恥ずかしいことです。何故今まで疑問に思わなかったのでしょうか？ 幼児や小学生がよく「どうして？どうして？」と親に尋ねますが、この素朴な疑問が研究の原点かも知れません！ そこで、私は無い知恵を絞って、海水について考えてみることにしました。まず思いついたことは、氷が海に浮かんでいるのは浮力つまりアルキメデスの原理によるものだろうということです。

## 2. アルキメデス

アルキメデス (Archimedes, B.C. 287–B.C. 212) は、古代ギリシアの科学者で数学や物理学の分野において数多くの発見・発明をしました。たとえば数学では、初めて円周率を3.14まで計算した人として知られています。数学上の業績は目覚ましく、微積分や二項定理などの発見者として知られるニュートン (Isaac Newton, 1642–1727)、及び最小自乗法の発明や複素数及びベクトル等に関する研究で知られるガウス (Carl Friedrich Gauss, 1777–1855) と並び3大数学者と称されるほどです。また、ニュートンが万有引力や動力学、ガウスが電磁気学などの物理学にも貢献したと同様に、アルキメデスは物理学ではテコの原理の発見者として知られ、「私に大きなテコと支点をくだされば、地球でも動かしてみせます。」



写真-2 アルキメデス

と言ったことは有名です。そしてもう1つ、彼の偉大な発見がアルキメデスの原理として知られる浮力の原理です。

昔々、王様が黄金の冠を金物細工屋に作らせました。しかし、王様は金のほかに銀が混ざっている不正の疑いを持ち、アルキメデスに問題の解決を命じました。そこで、アルキメデスはおそらく来る日も来る日も寝食を忘れて考えていたのですが、ある日のこと、風呂に入ったとき自分の体が軽くなったのを感じた瞬間に、ひらめきました。問題が解けたのです。アルキメデスはうれしさのあまり素っ裸のまま表へ飛び出し、「エureka! エureka! (ギリシア語で、見つけた! 見つけた!)」と叫びながら町じゅうを走り回ったという話です。なお、これがストーリーキングの元祖(?) だとも言われています。その入浴中に発見したものが、まさに浮力についてのアルキメデスの原理と呼ばれるものだったのです。

### 3. 浮力とアルキメデスの原理

物質の三態(固体、液体、気体)のうち液体と気体は、自由に変形でき、小さな外力に対して流動しやすいという類似の性質を持っています。そこで、液体と気体を総称して流体と呼びます。静止している流体に関して、以下の主な性質があります。

- ① 静止流体中では、圧力は常に面に垂直に作用する。
- ② 流体中の任意の1点における圧力は、あらゆる方

向に等しい。

- ③ 流体内部にある水平面上の圧力は、どこでも等しい。
- ④ 流体内部の鉛直線上にある2点の圧力を比べると、 $h$ だけ深い所の方が $\rho_w gh$ だけ圧力が大きい( $\rho_w$ は流体の密度、 $g$ は重力加速度)。
- ⑤ 流体の一部に圧力を加えると、流体内部のすべての点で同じ値だけ圧力が増加する(パスカルの原理)。

さて、図-1のように静止した流体の中に物体がある場合を考えますと、物体は流体の圧力を全表面に受けます。上記③の性質によって側面に働く力は相殺され( $F_1 = F_2$ )、上記④の性質によって下面に働く力の方が上面に働く力の方より大きい( $F_3 < F_4$ )。結局、すべての圧力の合力は鉛直上向きとなり、これを浮力といいます。すなわち、物体に作用する浮力が物体の重力よりも大きい場合には物体は浮かび、浮力が重力よりも小さい場合には物体は沈み、浮力が重力と釣り合う場合には物体は中立状態となるわけです。また、浮力の大きさは物体が排除する流体の重力に等しく、これをアルキメデスの原理といいます。これは、以下のとおり導出できます。まず図-2(a)のように、流体(たとえば水)の中に吊られた物体A(たとえば石)に作用する圧力を考えますと、図のように浮力と重力が働きます。(ただし、ここでは重

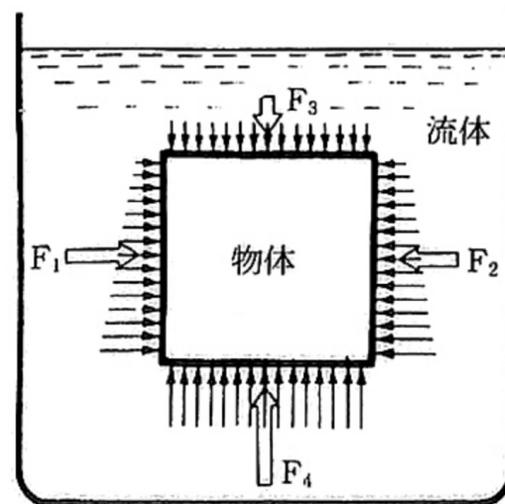


図-1 物体に働く圧力

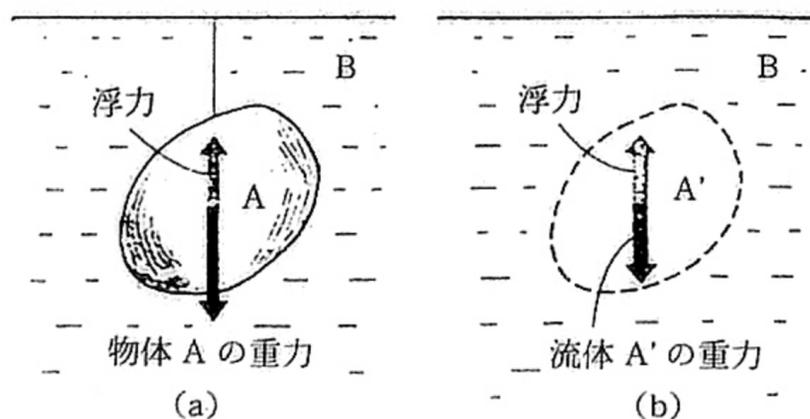


図-2 アルキメデスの原理の説明

力の方が浮力よりも大きいと仮定しますが、物体は糸で吊られているため沈みません。次に図-2 (b) のように、物体 A の代わりに同位置に同形同大の流体 A' があつたとして、A' 部分以外の周囲の流体を B とします。すると、流体 A' が釣り合いの状態にあるためには、流体 B が流体 A' に及ぼす圧力の合力すなわち浮力は流体 A' の重力と釣り合わなければなりません。ところが、この浮力は、図-2 (a) の場合において流体 B が物体 A に及ぼす圧力の合力すなわち浮力と同じはずですが、したがって、流体内の物体に働く浮力の大きさ  $F_B$  は、物体の流体内の部分と同体積  $V$  を占める流体の重力  $\rho_w gV$  に等しく、上向きに作用することになります (ただし、 $\rho_w$  は流体の密度、 $g$  は重力加速度)。一方、物体に働く重力の大きさ  $W$  は、 $\rho gV$  で下向きに作用します (ただし、 $\rho$  は物体の密度)。したがって、物体に働く真の上向き力は、 $\Delta F \equiv F_B - W = (\rho_w - \rho) gV$  となります。そうして、 $\Delta F$  の値が正か負かゼロかに応じて、前述のように、物体は浮かぶか沈むか中立状態になるわけです。なお、このアルキメデスの原理は、上記④に示す流体静力学の基礎式からもっと数学的に導出することもできます。

ではいったい、アルキメデスはどのようにして、黄金の冠に銀が混ざっているのを見破ったのでしょうか？まず図-3 (a) のように、天秤を使って空中で物体の重さを測定し、それを  $W$  とします。次に図-3 (b) のように、物体を水中に入れると水が物体に及ぼす圧力によって物体に浮力が働き、その分だけ物体が軽くなります。そこで図-3 (c) のように、そのときの物体の重さを測定し、それを  $W'$  とします。すると、アルキメデスの原理より、 $W - W' = \rho_w gV$  ( $\rho_w$  は流体の密度) という関係式が成り立ちます。よって、 $W = \rho gV$  ( $\rho$  は物体の密度) であることを考慮して、物体の比重 (水に対する密度比) は次式によって求めることができます。

$$\text{物体の比重} = \rho / \rho_w = \rho gV / \rho_w gV = W / (W - W') \quad \dots\dots\dots(1)$$

さあこれで、アルキメデスがどうやって黄金の冠の謎を解いたか分かりました。つまり、上記の物体を王冠にして実際に実験してみれば、(1) 式から王冠の比重が求まり、それを純金の比重と比較すればいいわけです。

#### 4. 海氷の問題

さて、話を海氷の問題に戻しましょう。直径 1~2 km 程度で厚みが約 3 m の平べったい海氷の中央部を、小さく切り抜いた (直径約 1 m) 場合、その内部の氷柱は周

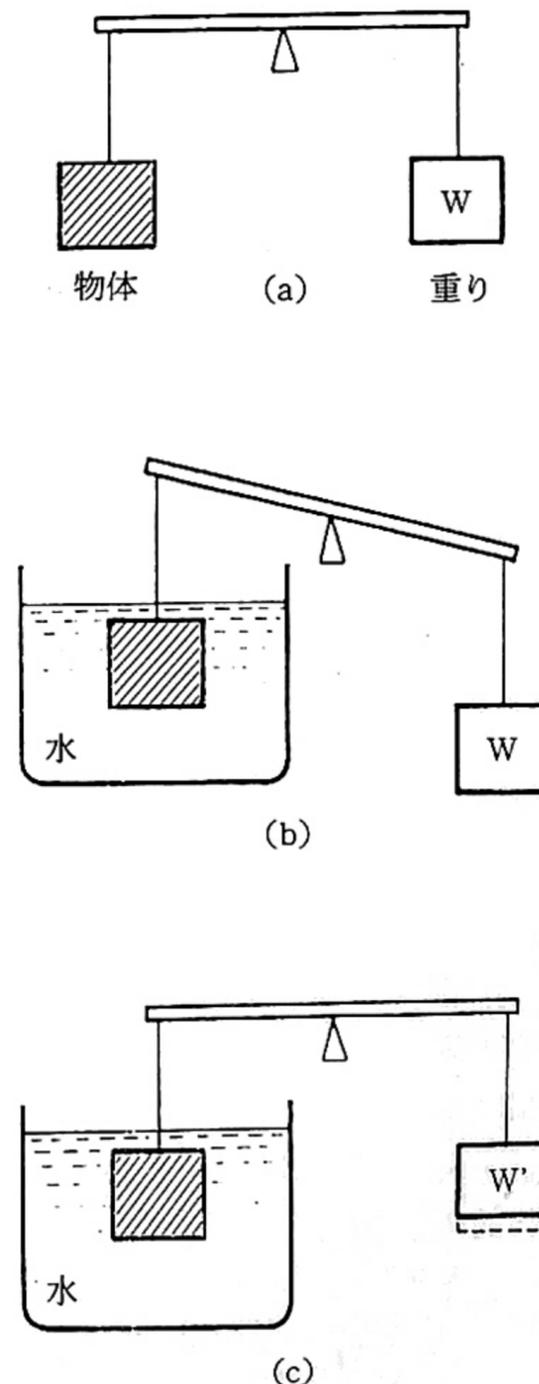


図-3 浮力を利用した比重の測定方法

囲の水に比べて上昇するか下降するかということが問題です (写真-1 と、本誌「JAMSTEC」通巻第 23 号の表紙写真を参照)。

まず、図-4 に示すように、水平断面積が  $\Delta S$  の鉛直方向に細長い氷柱が海に浮かんでいる場合を考え、その氷の部分の密度を  $\rho_i$ 、海水の密度を  $\rho_w$  とします。また、氷柱の全厚みを  $h$ 、その内の海面下の厚みを  $h_1$ 、海面上の厚みを  $h_2$  とします。すると、氷柱に働く重力は  $\rho_i g h \Delta S$ 、氷柱に働く浮力はアルキメデスの原理より  $\rho_w g h_1 \Delta S$  となり、氷柱がこの状態を維持するための条件として、鉛直方向の力の釣り合いを考えれば、

$$\rho_i g h \Delta S = \rho_w g h_1 \Delta S$$

$$\therefore h_1 = (\rho_i / \rho_w) h \quad \dots\dots\dots(2)$$

となります。さらに、 $h_2 = h - h_1$  より

$$h_2 = (1 - \rho_i / \rho_w) h \quad \dots\dots\dots(3)$$

となります。また、(2) 式と (3) 式より

$$h_2 / h_1 = (\rho_w / \rho_i) - 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

となります。(4) 式によれば、 $\rho_w$  及び  $\rho_i$  が一定と仮定すれば  $h_2 / h_1$  が一定、つまり氷柱の全厚みにかかわらず氷

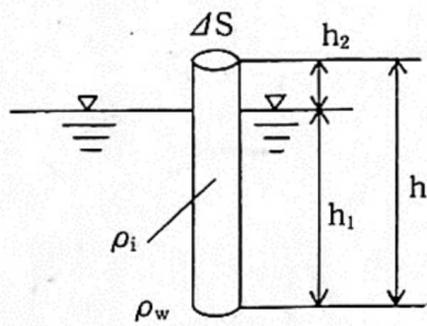


図-4 氷柱

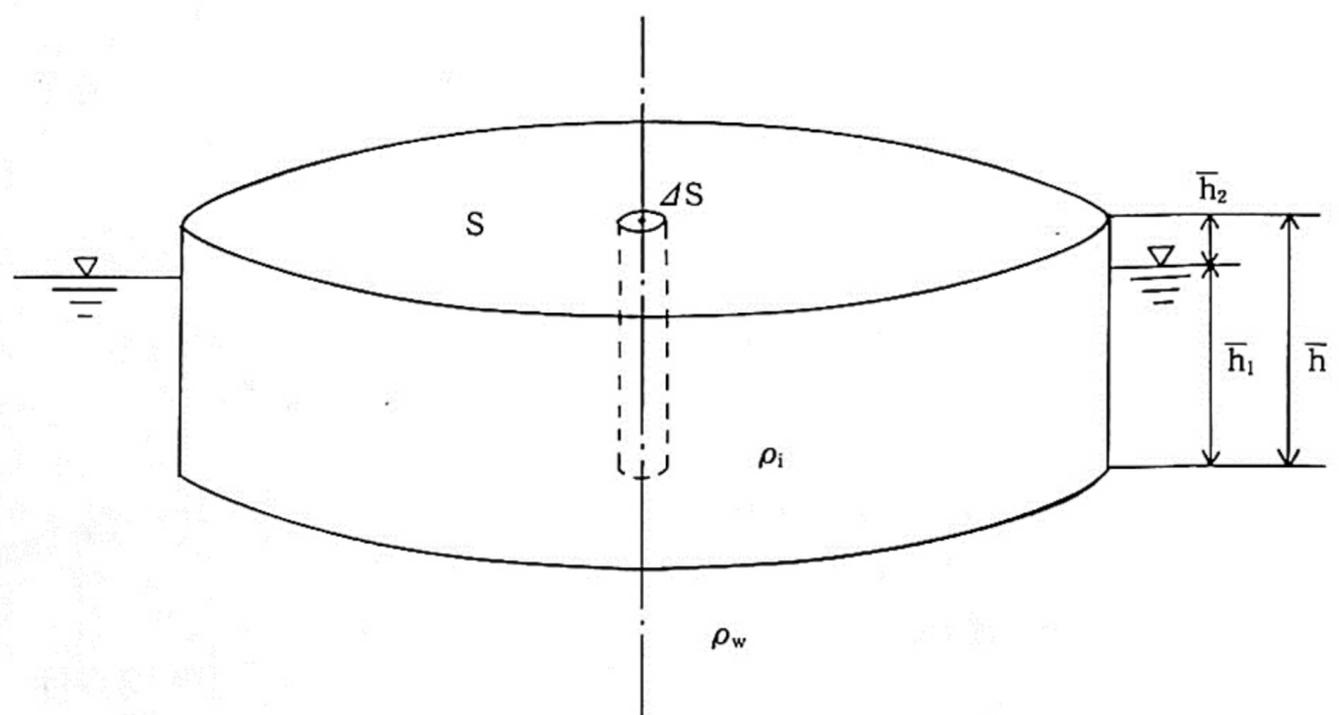


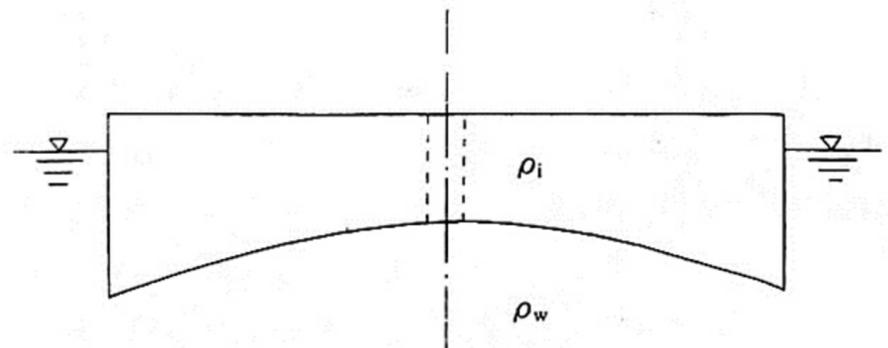
図-5 大海氷 (S) と氷柱 (ΔS)

柱の海面上の厚みと海面下の厚みの比が一定となることは興味深いことです。ここで、理科年表（平成6年版）によって、 $\rho_w$  及び  $\rho_i$  の値を 1.02 及び 0.92 (g/cm<sup>3</sup>) と置けば、 $h_2/h_1$  は 0.109 と見積もられ、 $h_1/h_2$  は 9.2 で、つまり海面上の氷の厚みの 9.2 倍の厚みの氷が海面下に存在することになります。なお、(2)(3)(4)式は、海水及び海氷の密度が一様とみなせる範囲で、断面積  $\Delta S$  に無関係に成り立ちます。ちなみに、このような細長い氷柱が数多く集まって氷山のような大きな海氷が形成されていると考えれば、「氷山の一角」とは柱状の場合には全体の 10%程度と予想することができます（ただし、球状に近い形状の場合にはもっと少ないはずです）。

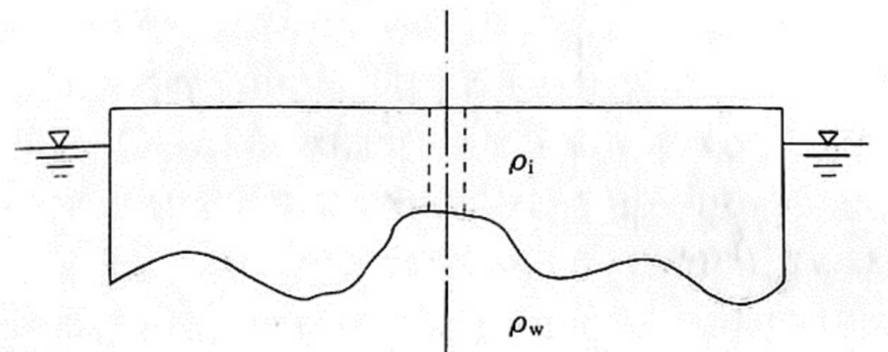
次に、図-5 に示すように、水平断面積が  $S$  の平べったい大海氷が海に浮かんでいる場合を考えます。今この大海氷の中央部を断面積  $\Delta S$  の柱状に切り抜いたとします。その時に氷柱が周辺部の氷に比べて下降する可能性があるのは、水平方向に何らかの不均一性がある場合に限定され、具体的には主として下記の 3 つの場合が想像されます。

- ① 大海氷の氷の密度が不均一で、密度の水平方向の違いに着目したとき、 $S$  全体にわたる氷の平均密度に比べて中央部の氷の密度が大きい場合。
- ② 大海氷の下面直下に存在する海水の密度が不均一で、密度の水平方向の違いに着目したとき、 $S$  全体にわたる海水の平均密度に比べて中央部直下の海水の密度が小さい場合。
- ③ 大海氷の氷の厚みが不均一で、 $S$  全体にわたる平均厚みに比べて中央部の厚みが薄い場合。

しかしながら、①と②のように、場所が 1 km 程度違うだけで、氷の密度や海水の密度が大きく違うとは予想しがたいと思われま。結局、最も可能性の高いのは③



(a) 海氷の厚みが規則的に変化している場合の例



(b) 海氷の厚みが不規則に変化している場合の例

図-6 大海氷の鉛直断面図

の場合、すなわち大海氷の鉛直断面形状が場所によって変化している場合です。たとえば、図-6 (a) のように、海氷の厚みが中央部ほど薄くなっている場合が予想されます。また、そのように何らかの事情で海氷の厚みが規則的に変化している場合のほかに、海氷の厚みが不規則に変化した場合も予想されます。たとえば、図-6 (b) のように、大海氷の底面が凸凹している場合です。すなわち、この場合には、柱状に切り抜いた場所の氷がたまたま平均厚みより薄ければ氷柱が下降するわけです。逆に、氷柱の厚みが平均厚みより厚ければ上昇するわけです。もし  $\rho_w$  及び  $\rho_i$  が一定とするならば、切り抜いた氷柱の下降分は(3)式より次式で計算されます。

$$\Delta h \equiv \bar{h}_2 - h_2 = (1 - \rho_i / \rho_w) (\bar{h} - h) \dots \dots \dots (5)$$

$\rho_w$  及び  $\rho_i$  の値を 1.02 及び 0.92 (g/cm<sup>3</sup>) と置けば、たと

えば  $(\bar{h}-h)$  の値が約 70 cm のとき  $\Delta h$  は 6.9 cm となります。つまり、切り抜いた氷柱が約 7 cm ほど下降することになります。ただし、海水の厚みに関して規則性が有るか無いかについては、海水の構造や生成等に関する詳しい観測データがなければ判断できません。これは今後の課題です。

なお、現実にもっと近づけるために、海水の上に積雪の有る場合も考えてみました。この場合には上述の因子のほかに、雪の密度及び厚みも関係してきます。ただし、これに関する詳細は、紙面の関係で割愛したいと思います。

## 5. おわりに

「海水の問題」については、まだまだ「エウレカ!エウレカ!」とは言えず、今なお無い知恵を絞っている最中です。平成 6 年 5 月 18 日に H 氏から見せられた「1 枚の

写真」から考え始め、同 6 月 2 日に (2)(3)(4) 式を含む「最初の答案」を H 氏に示しました。その後、T 氏に相談したり、もう 1 人の T 氏と議論したりして、同 9 月 8 日になってやっとここまで解くことができました。本稿が「第 2 の答案」というべきものです。つつい深入りしてしまった感もありますが、この問題を考えたお陰で研究の喜びを実感した気がします。また、研究者同士の情報交換及び議論の重要性も痛感しました。なお、この問題については、今後も引き続き考えるつもりです。「エウレカ!エウレカ!」と言える、その日まで……。

最後に、「1 枚の写真」を提示し問題を提起してくれた海洋研究部の畠山清氏、北極海に関する情報を提供してくれた同研究部の滝沢隆俊氏、並びにこの問題に興味を持っていただき有益な助言を与えてくれた情報室長の辻義人氏に感謝の意を表します。

(The END)

## 読者の広場

海洋川柳

T.S.

- ・「よこすか」に届けてほしい「JAMSTEC」
- ・鯨骨は深海族のレストラン
- ・UFO も宇宙人の「かいこう」か

海と心

J.K.

海・深し  
されど 我が心は浅く  
未だささいな事に一喜一憂す

海 広し  
されど 我が心は狭く  
未だ他を受け入れる度量なし



「読者の広場」の記事をお待ちしております!

記事の種類や投稿方法等の詳細については、本誌の前号(通巻第 23 号)の巻末をご参照ください。

# 「ドルフィン-3K」からのメッセージ(4) —つれづれなるままに—

運航部 内田 徹夫 Tetsuo Uchida

## 1. スピリット

無人探査機の運用では、海底作業に関するかぎり潜水調査船より肉薄した作業はその使命であり、運用上の甘えは許されない。たとえそのために機体のフレームを曲げあるいはマニピュレーターからオイルの血を流そうとも、そのリスクから逃げていたのでは存在そのものの意義を失う……。

## 2. やり残した仕事

1994年3月13日、英国出張から帰国したその足で、「ドルフィン-3K」の相模湾、初島沖での調査潜航に参加するため伊東港から「なつしま」に乗船した。最初の仕事は、前年11月の海底長期観測ステーション作業で、やり残した海底ステーションケーブルブイの切断である。ケーブルブイは、まだ十数個残っている（本誌1994年第6巻第1号「ドルフィン-3K」からのメッセージ(1)参照）。前回の作業を教訓にして、ケーブルをガイドするリング状の治具を製作し、マニピュレーターに押し切りと引切り2種類の Cutter を取り付けての再挑戦である。まず、海底観測ステーションに接近し、ケーブルを確認すると、比較的平坦な場所でケーブルをまたいで着底する。さらに、ケーブルを左手のグラバに持たせたリングに通し、ケーブルが通過するポイントをマニピュレーターの操作し易い位置に固定した。この位置ならビークルがなにかの拍子にケーブルの下をくぐってしまうことはない。セッティングが整ったあと、リングの内にケーブルを滑らせながらブイのある斜面に移動する。急傾斜地に近づくと、ケーブルはブイの浮力で、所々うねりながら浮いた状態となりビークルをホバリングさせ

ての作業となった。最初は思惑どおり運んだのだが、作業が進むにしたがって問題が出てきた。ブイを切断したとたん、浮力を失ったケーブルは自身の重みでリングの内を滑り落ちて、次のブイがリングに突き当たって止まるのである。そうすると皮肉にもグラバで持ったリングが邪魔になり、さらに、ブイの位置が近すぎて、マニピュレーター操作がしにくい。ケーブルをしっかりと確保して、ブイを操作性の良い位置に固定する必要がある。しかたなく3個ほど切断した時点で、せっかく用意したリングを放棄した。グラバでケーブルを押さえてブイを切断することにする。さらに2個ほど切断した時に、今度はグラバの手先がポロッと外れて落ちてしまった。手先を固定しているシアーピンが折れて、過大な力からグラバを守るための最終的な安全策が働いたのである。結局、物を掴めない左手になってしまい、Cutterの刃もすでにボロボロになっていたので作業を中止して浮上した。まだ数個のブイが残っている。それにしても、ケーブルとブイの間は、Cutterの刃を入れる隙間がないほどロープでしっかりと固定されている。もう少し間隔があれば容易に切断できるのだが。治具が思ったように使えなかったのが、製作者の私としては非常に残念だったが、門馬主幹との相談で今度はケーブルを通し滑らせるだけで、ブイを固定しているロープが切断できるような治具を製作することで、次回の作業に期待することとした。ふたりともこの作業に関しては、なかば意地になっている。

## 3. 震源地「ドルフィン-3K」

このあと、3月15日から、深海研究部橋本副主幹をはじめとする生物チームが乗船してきた。これには MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Insti-

tute) の Bruce Robison 博士をはじめ研究者や技術者たち 5 人も同行している。本誌 1992 年第 4 巻第 4 号 (通算第 16 号) 『ROV「VENTANA」調査航海記』で紹介したように、彼らには 2 年前のクルーズでお世話になっており、いわば一宿一飯の恩義がある。Monterey Bay はアメリカ西海岸、サンフランシスコの南に位置する大きな湾であるが、相模湾と同じように、地殻のプレートが大陸にぶつかって下に潜り込む、沈み込み帯に位置する。太平洋を隔てた対岸の 2 つの湾で、シロウリガイなど相模湾と同種の特有な生物群集が発見されているため、相互の研究が行われている。

当初は、1992 年 11 月に来日して、「ドルフィン-3K」の相模湾の調査に参加する予定であったが、3K のテザーケーブルトラブルで中止となり、2 年越しの参加となった。

荒天下に、作業艇で乗船した彼らは大きな荷物ごとズブ濡れである。体格のよい彼らにとっては、用意された防水着はチョッキを羽織っているようで役に立たない。防水着のズボンに片足しか入らないため、片足ずつ 2 着分のズボンをはくというこっけいな格好で登場するやからもいた。プライドは別にして、無事乗船した彼らに「ドルフィン-3K」システムの概要を説明している最中、生物チームはこのクルーズのために用意した、ドラム缶をふたまわりも大きくしたイバラガニ採集用のカゴに網を張る作業をしていた。この採集カゴはトランスポンダとブイを備えており、投げ込みで投入後カニを捕獲したらトランスポンダで重りを切り離して浮上するという優れ物である。しかし、この作業を遠目で見守っていた「なつしま」の乗組員には、北洋でカニを専門に漁獲したいいわゆるプロがいる。カニの入網する穴の造作を見て、彼らいわく「あんなものでは、カニは絶対取れない」といい、小生はじめ数多くの人の賛同を得ていた。結局、このカニカゴによるイバラガニの捕獲作戦は、回収用のトランスポンダの作動不良で海に沈める前に挫折した。しかし、このトラブルはまだ翌日の序曲にすぎなかったのである。

翌日の潜航は、いつもの着底場所の北、水深 853 m 付近から新たな生物群集の発見を目的とした、海底を探索しながらの航走である。着底点から、いったん北に上がり、その後、東に変針する。この付近は、南東への急傾斜でモニターには斜めになった海底が写り、ソーナーには所々に急崖になった露岩の反応がある (写真-1)。カゴによる採集を目的としたイバラガニも多く、投棄された古タイヤにイバラガニの一群がいた (写真-2)。採集

カゴより古タイヤのほうが効率がいいかもしれない。転針から、2 分ほどした比較的平坦な場所で、東大地震研究所が伊東沖に設置した海底地震計用の海底ケーブルの端末部分を発見した (写真-3)。地震計ケーブルは、泥の海底に半分くらい埋没し、展張方位は  $20^{\circ}$  -  $200^{\circ}$  で直



写真-1 点在する露岩



写真-2 古タイヤに群がるイバラガニの群れ



写真-3 確認した地震計ケーブル

線に伸びている。状況から見るかぎり、少なくともこのあたりでは全く危険ではない。その後、南に変針し、所々で出現する露岩の根元を探るように観察していく。さらに、西に変針し、ちょうど四角形を描くような航跡を閉じようとした時、地震計ケーブルと交差する可能性があるということで、南にコースをとった。この時点で地震計ケーブルを発見した地点から約 150 m 離れた場所である。ところが、しばらくして、操縦桿に今年の南奄西海域で感じた、あのいや～なあたりがあった。テザーケーブルに異様な抵抗感がある（本誌 1994 年第 6 巻第 2 号「ドルフィン-3K」からのメッセージ(2)参照)。さきほど確認した地震計ケーブルの展張方位とは、平行に走っているはずであった。しかし、南に航走する際、急崖にビークルの後部をぶつけながら駆け降りた。そのため、もしかしたら「テザーケーブルの立ち上がりが遅れて露岩に引っかけたかな？」と思い、前進を停止してしばらく様子を見ることにした。しかし、状況はかわらない。そこで止むなくテザーケーブルの巻き込みを開始した。ラムテンショナーが押し込まれ、テザーケーブルに荷重がかかっているのがわかる。そのうちビークルがテザーケーブルに引っ張られる。荷重がかかったまま、ビークルが上昇しはじめたということは、露岩に引っかけたのではない。ここにいたって、最も地震計ケーブルが怪しいとは思いつつも、捨網や捨漁具なども考えられないわけでもなく、いったいなにがテザーケーブルに引っ掛かったのか判断しかねていた。そのうちに、後方監視用の TV カメラに地震計ケーブルが写ったので、引っ掛けた相手が見事に判明した。地震計ケーブルは、テザーケーブルの巻き込みとビークルの動きにより、引き止め金具の部分までずれ込んできていた。そこで今度は、テザーケーブルの巻き込みを中断して逆に繰り出してみたが、重い地震計ケーブルはテザーケーブルを繰り出した分、ビークルにまとわり付き一緒に落ちていくだけである。ビークルを前後左右に動かせという指示で、そうしているうちに心配したとおりの光ファイバーが折れてビークルはブラックアウトした。ビークルへの給電を停止し、そのままテザーケーブルを巻き取り引き揚げる。制御コンテナでは、もう何もすることがないので甲板の様子を見に出た。テザーケーブルはピンと張り詰め、ラムテンショナーが押し込まれて荷重がかかったままなのがよくわかる。あと 300 m というところまでテザーケーブルを巻き込んだ時、突然、ラムテンショナーが伸びあがり荷重がとれた。いわばばらしである。荷重がとれた原因は 2 つしかない。テザーケーブル

が切れてビークルを紛失したか、地震計ケーブルがなにかの拍子で外れたかどちらかである。さすがに、今度ばかりは「駄目かなあ？」と思い、MBARI の連中の視線を意識して、クリスチャンでもないのに祈るように胸で十字を切った。テザーケーブルの張りを注意深く見守るけれど、ビークルが残っているかどうか判断できない。テザーケーブルの巻き込み速度がやけに遅く感じる。やがて巻き込みが終了した。母船船尾側から順番に、テザーケーブルのブイが水面に顔を出す。多くの関係者がテザーケーブルの先端をかたずを飲んで注目している。するとおもむろに、ビークルがポッカーリ水面から頭をだして「コンニチハ」をした。とたんに、交信機にドッと安堵の言葉が飛び交い、だれかの首をさす音が聞こえてきた。幸運にも、地震計ケーブルがはずれたのである。しかし、エレファントノーズが壊れテザーケーブルも損傷していた（だからブラックアウトした）。

結果的に、地震計ケーブルの位置は、最初に確認した展張方位を延長して推測した位置より、かなり手前に位置していたか、方位が変わっていたのだだろう。あらかじめ得ていた地震計ケーブルの位置と、「ドルフィン-3K」の測位位置にも相対的な誤差が生じていた。最近の海底ケーブルは海底の深みに対して十分な落としこみをしていない。急傾斜地では必ずブリッジになる。その下を知らずにビークルがくぐったのである。とにかくオペレーション関係者は、ビークルを回収できたことでひと安心していた。しかし、青ざめた生物グループには、もう 1 つ早急にやらなければならないことがあった。

『伊豆半島、伊東沖の海底地震の震源地は「ドルフィン-3K」であります。』という東大地震研究所への通報である。確かに、同時刻に、「ドルフィン-3K」が起こした地震を海底地震計で観察したという。マグネチュードはどれくらいであったのだろうか？

MBARI の連中は、このトラブルの一部始終を見届け、そして後に、この航海のことを「EARTHQUAKE CRUISE (地震航海)」と呼んだ。

#### 4. 次世代 ROV への夢

やむをえない事態だったとはいえ、2 年待って来日した MBARI のメンバーにとって、調査の第 1 日目でトラブルを起こし、10 日間取ったスケジュールを台無しにしてしまったのは、なんとも心苦しい気持ちであった。当初、彼らは、このぐらいのトラブルではせいぜい 2~3 日で復旧すると思っていたようである。たしかに彼らの

ROV なら、当たり前なのだが、「ドルフィン-3K」の場合、テザーケーブルのリターミネーションは船上ではできない、ケーブルウィンチごと陸揚げしてメーカーでの作業となる。これも、専用母船を持たない弱みである。結局、調査行動そのものが中止という羽目になってしまった。しかたなく、彼らは当センターに戻ってからこれまでに記録されたビデオテープや写真を丹念に検証し情報を得ていた。運用技術や調査技術のエンジニアには、私も休日を返上して対応にあたった。しかし、逆にこの機会を通じて MBARI からいろいろな情報を得ることができた。『ROV「VENTANA」調査航海記』で紹介したように、彼らは ROV「VENTANA」で週4日、海に出て調査をし、精力的な活動を行っている。また、ROV による潜航調査の深度を 4,000 m まで拡大するため、Bruce Robison 博士がオピニオンリーダーとなって新しい ROV を独自に開発している。MBARI の新しい ROV「TIBURON」は、ミニ「かいよう」版の双胴母船「WESTERN FLYER」と共に来年から海上試験が始まり、彼らの画期的なコンセプトを持った ROV が試される。独特の発想のペイロードパッケージ「TOOLSLED」を持つ ROV「TIBURON」の構成は、スペースシャトルのオービターとペイロードデッキの関係とどこか似ている。アメリカ人的発想なのであろうか。フランスの IFREMER は、この「TOOLSLED」の構想に同意し、まだ計画段階の 6,000 m クラス ROV でこの「TOOLSLED」のインターフェイス規格を統一するという。これにより、将来、計画が順調に進めば、MBARI と IFREMER の研究者は、自分の「TOOLSLED」を相互のビークルに接続するだけで、独自の調査手法を確保できるようになり、アメリカ大陸や大西洋を越えてシステムを移動する必要がなくなる。

後日、今度は IFREMER のエンジニアに会う機会があり、6,000 級 ROV の計画の概要を聞いたが、これは、MBARI の「TIBURON」と非常に似ている。明らかに「後発の利」をねっているのであろう。とにかく、彼らの前を MBARI が走っているのだから、開発にあたって無意味な時間やコストを費やすことは避けやすい。調査能力に主眼をおいた実用的な ROV を求め、確実に計画を進めるには賢い選択である。このような、新しい考え方を持った ROV に、次世代ポスト「かいこう」の ROV を夢みるのは私だけなのであろうか。

## 5. 改造の歴史

私は、潜水機の実績を潜航回数という数値で判断されるのは不満である。「ドルフィン-3K」では潜航回数を十分確保できない分、1回、1回の潜航調査が充実するように努めてきた。そもそも充実した調査潜航とは、システムの能力とそれを動かす人間の能力、それに研究者の努力の組み合わせによって産みだされるもので、まさしくアナログ的な産物である。数字というデジタル的な表現の中に、運用現場で仕事をする人々の努力を埋もれさせたくはない。研究者の苦勞は、やがて成果として報告書に描かれ、報われる時もあるだろう。しかし、システムを育ててきた人々の仕事はなかなか表に出ないものである。そこでその一端をのぞく意味で、「ドルフィン-3K」はどのように成長してきたのか、外観の変化を見てみよう。これは、数多くの不具合や故障の経験からなされた改造の歴史でもある。

写真-4 は、1987 年、運用開始当時の「ドルフィン-3K」の様子である。着水揚収方法はテザーケーブルでの直吊りで、母船は「かいよう」である。

写真-5 は、1988 年のもので母船は「なつしま」に代わり、着揚収システムは嵌合（かんごう）金物による別策方式に変更され、引き止め金具付近のテザーケーブルを保護するためベルマウスという保護具を装着している。ビークルは、着底脚がかさあげされ、前部にガードと浮力材を追加している。

写真-6 は、1994 年現在のビークルの様子である。テザーケーブルの保護は、エレファントノーズに変更され、トルクセンサーが設けられている。前方の2台の TV カメラも、CCD-TV カメラとスーパーハープ TV カメラに変更されている。また、前方のガードフレームも

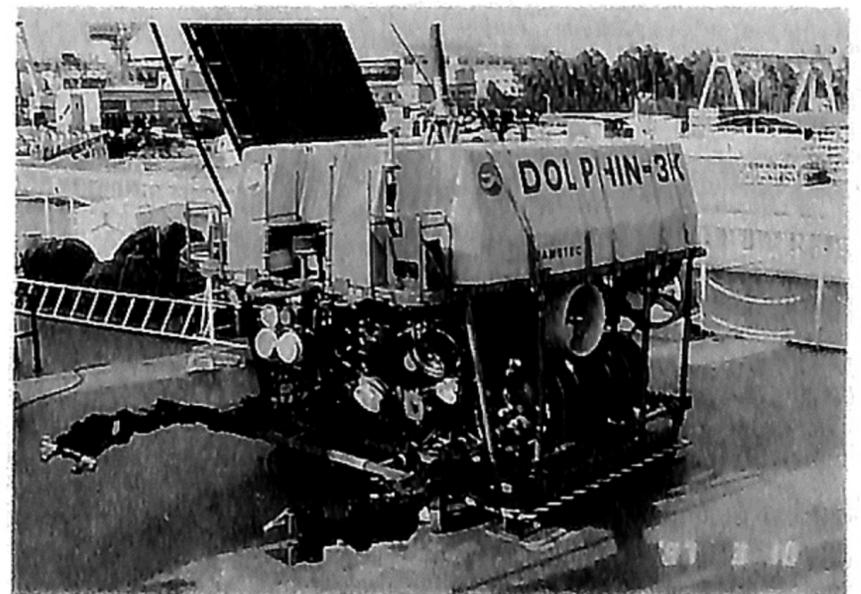


写真-4 1987年まだ海上公試中の「ドルフィン-3K」



写真-5 1988年「なつしま」に搭載された「ドルフィン-3K」

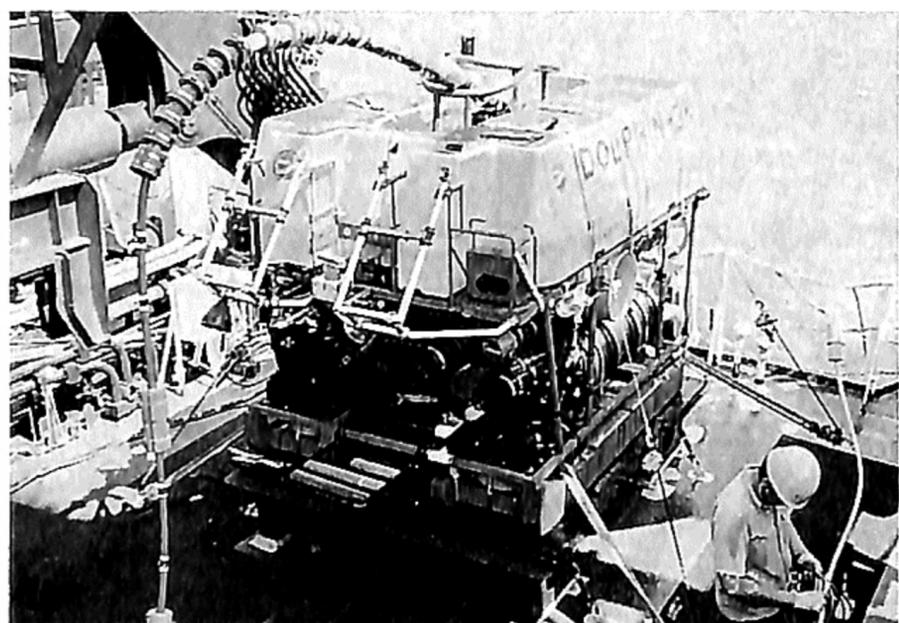


写真-6 1994年現在の「ドルフィン-3K」

形状が変わり、前方探査ソナーも小型高速処理のカラーイメージタイプに、照明灯も高輝度放電灯に改造した。

もちろん、外観上わからない改造も多い。このような改造によって、わずかずつではあるがシステムの信頼性を高め、作業効率を改善し、調査能力も向上させてきた。これからも研究者のニーズを理解して、システムに常に磨きをかけていかなければならない。その流れを止めることは陳腐化をうながすことでもある。研究者にとって、利用し易いシステムでありつづけようとするための

作業は、常に怠ることのできない課題なのである。

## 6. エピローグ

最後に、1年間に及ぶこのメッセージを夢の話でしめくくることにする。

私が、潜水調査船ののぞき窓や無人探査機のTVカメラを通して、海底を見つめる仕事を始めてから15年という時間が過ぎてしまった。「しんかい2000」が潜航調査を開始した当時、オキナエビスガイ、チューブワーム、ブラックスモーカー、熱水鉱床の話など、「なつしま」の船室で仲間と熱っぽく語りあった、魅惑的な夢物語があった。しかし、その後の潜水調査船の活躍によって、これらは現実の話となり、輝かしい成果の歴史と変わった。だが、夢の成就是、夢の終わりである。ひとつひとつ消えていくことにほかならない。そして、ふとこの先、深海の世界にどんな宝物を夢見たらいいのだろうと思ひ、漠然とではあるがそれを探し求めていた。しかし、私は、最近ほんのちょっとしたきっかけでそれを見つけたのである。仕事として、深海の世界を膨大な時間見つめたそのなかで、まさにほんの一瞬かいま見たその光景は、自然の真理が作りだした神秘であり大きな感動を覚えた。そしてまだ、深海の世界には、こんなすばらしい宝物が残っていたんだとあらためて悟ったのである。それは芸術であり、限られた人しか見ることができず、また限られた人しか理解できない宝物でもあった。

### 追伸

1994年4月から「ドルフィン-3K」の運用は日本海洋事業に委託され、私と、「ドルフィン-3K」との間には、残念ながら一線が引かれてしまった。私としては、我が子を手放す思いで「ドルフィン-3K」の行く末を見守らずにはいられない。これまで綴ってきた、おじさんからのメッセージを、後を託す者たちがしっかり受け止めてくれることを期待して……。

1994. 夏

# 深海への旅（8）

## その38 美味礼賛

深海研究部 藤倉 克則 Katsunori Fujikura

「しんかい2000」の厚いアクリル製観察窓を通して深海底を観察していると、意外と多くの動物を見ることができる。魚類、エビ・カニなどの甲殻類、ナマコ・ウニなどの棘皮動物、イソギンチャクやサンゴの仲間といった刺胞動物など…数えきれないほどである。それらは、私たち旅人に様々な行動を示してくれ、例えば海底表面をゆったりと泳いでいたり、盛んに泳ぎ回って「しんかい2000」に突進してくる魚もいる。なかには、せつかく苦労して私たちが訪問したにもかかわらず、私たちには何の興味も示さず愛嬌なく海底上にじっとしたままのものもあり、実はほとんどの動物がそれである。これらの動物も、その生命の維持や種族保存のために色々な工夫をしているはずだが、ほとんどがベールに包まれている。また、当然餌を食べなければならず、食性もそれぞれの動物種に特徴がある。動物の食性は、食べているものによりいくつかのカテゴリーに区分されており、岩波生物学辞典によれば表-1のようになる。このカテゴリーの中で、明らかに深海性の動物に見られないのが草食性である。深海域は浅い所のように太陽光が届かないことから海草や植物プランクトンは生息しておらず必然的なことである。植食性のものもないように思えるが、実際、深海底には陸上や浅海起源の木材や海草の死体(?)があり、それらを食べている動物もいることから植食性のものも生息していることになる(水生生物ではないが「しんかい2000」内の深海性動物である私たちも、昼食に弁当のサラダを食べているときは植食性と思っていたが、マヨネーズがついているので雑食性であろう)。しかし、これに出会うことはまれで、深海性の動物の多くは動物食性・肉食性・捕食性・腐食性に属している。

表-1 動物の食性(岩波生物学辞典を一部改変)

植食性	植物体あるいはそれに由来したものを食う
草食性	生きている植物を食う
動物食性	動物体あるいはそれに由来したものを食う
肉食性	生きている動物を食う
捕食性	生きている動物を殺して食う
寄生性	生きている生物を殺さずに餌として利用する
雑食性	植物と動物の双方をともに食う
腐食性	生物の死骸や排泄物などを食う

実際に、私たちが「しんかい 2000」で深海性の動物を捕獲するときは、この食性を利用する。例えば、「ユノハナガニ（仮称）」という眼のないカニを採集するときは、「ベイトトラップ」という鼠（ねずみ）取りのようなものを使うことがよくある。これはジュースやウーロン茶のペットボトルを細工した容器に餌を入れたもので、それをカニの近くに置く。その前に餌を何にするか悩み、最初はウニやエビを混ぜた釣り餌、さらに強烈な臭いを発するサナギ油を混ぜたり、サンマ、アジ、サバ、ニシンを使ったりと、いずれも深海では滅多にお目にかかれないゴージャスな餌を入れ、ユノハナガニの前で満漢全席を披露する。ただし、眼がないカニなので盛り付けには気を使わない。結論からいえば、どの餌でもユノハナガニは寄ってくる。ところが、私もそうであるが、目の前に見たことのない食べ物が出てくると、他人の食べ方をみてから食べ始めたり、どのように食べようかと考えてから手を付ける。ユノハナガニも同じことを考えているようで、いきなり餌に突進してくるのではなく、少し時間をおいてからトラップの中の餌を食べようと集まってくる。なかには、どういうわけか全く入らないトラップもあり、あきらめて他に移動して調査を行った後、再びトラップを見るといつのまにか満員電車のようにユノハナガニが入っていることもあった。

このようにして採集したものも含め、実験室でユノハナガニを飼育しているが、最初はやはり餌に悩んだ。ベイトトラップの餌に用いたような魚の切り身や釣り餌を与えると、小さな水槽では水質が悪化するので使えず、アサリ・ムラサキガイ・シラス・市販の配合餌料そしてオキアミなど…試行錯誤を繰り返した。どの餌も最初は、盛んに食べてくれるのだが、味に飽きてしまうのか連続して同じ餌を与えると数日後からは食べる量が少なくなり、やがて見向きもしなくなる。そうすると餌の種類を変えてやったり、餌をピンセットで挟み、目の前に持って行ってやったりとなかなか手間がかかる（実際には、ユノハナガニは眼がないので目の前でなく口の前になる）。しかし、手を変え品を変えユノハナガニが餌を食べてくれると嬉しいもので、先日も、餌を与えていたNさんは「今日、シラスをやったらカニがジャンプして喜んでくれた」などと非常に擬人的な表現をしており、カニより本人の方が喜んでるように見えた。とにかく、深海の動物もなかなかグルメだということである。

ところが、主に深海域の熱水噴出域や冷水・温水湧出域には化学合成生物群集といった太陽光依存の生態系とは異なった生物群集がある。その群集の構成動物のなかには普通の動物のように口から餌を食べることを止めてしまった動物がいる。シロウリガイの仲間や、ハオリムシ（チューブワーム）の仲間がそれで、体内に化学合成バクテリアを共生させ、バクテリアが作った栄養をもらっているという横着な動物である。つまり、温泉につかりながら、自然と満腹になり大きく成長できるわけで、一見するとうらやましいように思える。しかし、考えようによっては、色々な食べ物の味覚が楽しめないということになり、それはそれで悲しいものがあるのかも知れない。

東京大学地震研究所 笠原 順三 Junzo Kasahara

1. 今まで「ドルフィン 3K」, 「マーカス 3000」や「浅海 300 mROV」などの航海に同乗して海底の地形などを体験したことがある。また潜水艇でとったビデオなどを見たことがある。これらを通じて海底に関するある程度の知識と, 海底に置いたものの搜索の困難さもある程度理解していた積もりであった。

まず海底に降りて着底寸前に自分の目の前に広がった枕状溶岩の地形, 凹地の地形は今まで見たどの景色よりも感動的であった。潜水艇が進むにつれて凹凸の激しいのにびっくりした。今まで数百台の海底地震計を設置してきたが, その一部がこんな地形であるとは大変な驚きであった。今までは船上から, 良くてシービームの海底地形を見ながら海底地震計の投入であったが, それでもできるだけ平坦な地形を選んできた積もりであった。今回もシービームで見ると実に平坦な頂上であった。それが実際には 10 m の凹凸を持った実に複雑な地形であったとは!

2. 海底の搜索がまた大変であるのは知識以上であった。海底地震計のすぐそばを通ったはずだし, 海底地震計もチムニーも見ることができなかった。また, #184 潜航でも海底地震計付近のチムニーに行ったはずであるがこれも見逃している。なんと搜索とは困難なことであろうか。

3. 自分が潜航してみると, また次第に他の潜航者のビデオを見てくると, 海底とはなんてすばらしいものであるのかと今更ながら思うようになってきた。そして, 日本海溝や奥尻海台, 北フィジー海盆のビデオをみると, それらがどんな地形であるか周囲も想像できるようになってきた。

以上潜航, 船上を通じて潜水船の大事さと海底を理解できるようになってきた, たいへん貴重な航海であった。

機会があれば, 今後ともぜひ潜航したい。我々に興味のあるような場所では, 海底地震計による観測の際には潜水艇が必要欠くべからざるものであるといっても過言ではないだろう。

米国ライトガーズ大学 リチャード・ルッツ Richard Lutz

「しんかい 6500」の第 186 潜航は、私にとって非常に忘れ難いものでした。まだ訪れたことのなかった海山を訪ね、私がかつて全世界の海洋を通して他の場所で見えてきたものと異なる光景を見ました。Mermont Blanc (仏語で白い海山の意味) の頂部を覆っている白い沈殿物あるいはバクテリアマットは非常に異例のもので、寒い冬の夜のたそがれに出現したかのごとく、風に吹かれ雪に覆れた山頂の有様でした。その海山の東側頂部斜面に大型動物が見られなかったことは、異常なことでした。その海山の西側頂部の場所に、2, 3 種のエビ、多数のコシオリエビ及び相当な量の糸状バクテリアが存在したことは、きらきら光る水が全く観察されなかったということが事実だとすれば、当惑することでした。すなわち、これらは熱水現場で見られるものと著しく類似した動物群 (ただし、エビの種類は違って見えた) であるのに、今なおその地域での熱水活動を示すよい直接的証拠はなかったからです。パイロットは極めて有能だったし、潜航の全過程を通して非常に協力してくれ、そして「しんかい 6500」の中での潜航体験全体を本当にすばらしいものにしてくれました。

(原文)

### Trip to the Deep

Richard Lutz  
Rutgers University

Dive 186 was a very memorable one for me. We visited a seamount never before visited and saw sights unlike any I have seen elsewhere throughout the world's oceans. The white precipitate or bacterial mats covering the summit of Mermont Blanc were most unusual and gave the appearance of a wind-blown, snow-covered mountain peak as it would appear at dusk on a cold winter's night. The lack of megafaunal organisms on the slopes of the eastern summit of the seamount was most unusual. The presence of 2 or 3 species of shrimp, numerous galatheid crabs and considerable amounts of filamentous bacteria at a number of localities on the western summit of the seamount was perplexing given the fact that no shimmering water was observed—this was a fauna remarkably similar to that found at hydrothermal sites (although the species of shrimp appeared different) and yet there was no good direct evidence for

hydrothermal activity in the region. The pilots were extremely competent and very helpful throughout the course of the dive and made the whole diving experience in the "Shinkai 6500" a truly wonderful one.

## その 41 深海への旅

米国インディアナ大学 A-L. レーゼンバッハ A-L. Reysenbach

「しんかい 6500」第 187 潜航は、私が決して忘れることのできない体験の 1 つでした。それは、すばらしい科学とわくわくするような探検とすてきな仲間の組み合わせでした。小倉さんは「しんかい」による私の最初の潜航時のパイロットでもあったので、前もって私に日本語の一塊を教え込んでくれていました。それゆえ、その潜航はサン、ニー、イチという秒読みで始まり、そのあとすばらしい青い海中へとつながって行きました。我々は皆で語り合いました。しばしば植物プランクトンのマリンスター（海星）が見られる最初のわずか 100 m をいかに多く楽しむかということについて。それから、世代の違いや文化の障害を超えて、ビートルズのほかに何がよい音楽かについて。それで、「しんかい」の中で、我々はスウィングジャズを演奏していました！ 海底に近づくやいなや、その環境は心地よく感じられました。そうです。我々がいるのは海面下 1,500 m で、非常に驚くべき景色が見えました。すなわち、200℃の水。すごい素早さで飛び跳ねて、好物の化学合成無機力源生物や超好熱菌や有機栄養生物を捕らえているエビ。自分自身の仕事を嫌がり気体を多く含む熱水の中でころげまわって、ただのらくらと遊びほうけている巻き貝。それから、友人が遠く離れ数少ないことを残念に思って皆を眺めている、偶然出くわした大きな孤立した二枚貝。すばらしい潜航でした。その潜航の目的はすべて成し遂げられ、もっと多くの成果がありました。

(原文)

### Trip to the Deep

A-L. Reysenbach

Indiana University

Dive 187 was one of those experiences that I shall never forget. It was a combination of good science, exciting exploration and excellent company. Ogura'san was my pilot on my first dive on the "Shinkai" too, so he had already primed me with a bunch of Japanese words. So the dive

started with the count down...san ni ichi...and then into the wonderful blue depths. We all related how much we enjoy the first few 100 m...often alive with "stars" of phytoplankton, and then what better music but the Beattles...crossing generation gaps and cultural barriers. So there we were..jiving in the "Shinkai"! Once the ocean floor approached, the familiarity of the environment was good to feel. Yes, this is where we are, 1,500 m below the ocean surface, viewing one of the most amazing scenes...200°C water, shrimp (ebi) darting around in a frantic scurry to grab some of those delicious chemolithotrophs, hyperthermophiles, and heterotrophs. Snails (makikai) just doodling around, wallowing in the warm gas-rich water minding their own business and then the very occasional large solitary mussel (nimaikai) viewing all this with some regret that it's mussel friends are so far and few between. It was a good dive, all the objectives of the dive, and many more, were achieved.

## その 42 深海にガラスの雪を降らせると……

東京大学海洋研究所 白山 義久 Yoshihisa Shirayama

筆者が「しんかい 2000」の潜航を初めて体験したのは、1984年7月27日、ダイブ 132 においてである。当時はまだ学術枠の潜航への申込み件数も今ほど多くなく、同じ部門の太田教授と2人で3潜航（ダイブ 131～133）を釜石沖で実施させていただいた。

この一連の潜航における筆者の最大の研究課題は、深海生物の活性をいろいろな側面から測定することであった。当時までにスクリップス海洋研究所のスミスを中心とするグループは、大型生物特にソコダラ類の呼吸活性を、アルビン号を用いて現場にて測定し、深海に生息する種は浅海のものに比べて3桁程度生理活性が低いことを報告していた。筆者は深海に生息する小型の底生生物の生態を中心に研究を進めていたが、線虫などの小型の生物でも同じような現象が観察できるのか興味を持っていた。しかし、1 mm にも満たない小型の生物の生理活性を現場でマニピュレーターで測定することはとうていできそうもない。

当時筆者は、生物攪拌（かくはん）についても研究を進めていた。生物攪拌の速度は、鉛の放射性同位元素の堆積物内での鉛直分布から計算することが行われていたが、この方法では非常に速度の早い生物攪拌は測定できない。また空間的な変異を検出することも難しい。そこで深海底に人工の堆積物粒子を散布し、一定時間後に再度同じ場所において堆積物試料を採取し、人工粒子の分布から攪拌速度を実測しようという計画を立てた。このような実験は潜水調査船を用いなければ実行不可能であり、その特徴を生かしたなかなかのアイデアであると、本人はひそかに自負していた。

さて実際に散布する人工堆積物粒子としては、散布したときに白色で視認可能なこと、現場の粒子に近い粒径のものが得られることなどを理由として、ガラスビーズを選んだ。筆者の潜航の前日、太田教授の潜航の際の散布はかなりうまくいった。散布後の海底の様子をビデオで見て、これならば実験はうまくいきそうだと、心躍らせてベッドに入った。ちなみにこのとき「なつしま」に乗船していた研究者は3名のみで、それぞれが個室を与えていただき、賄いの船員の方が、じつに凝ったベッドメイキングを毎晩してくださった。まだ助手になりたてだった筆者には、分不相応のその計らいに少々肩の凝る思いをしたことをいつまでも思い出す。

さて潜航当日、真夏にもかかわらず防寒服の出で立ちの筆者は、汗で下着がびしょぬれになるのもかまわず、ほとんど無我夢中で「しんかい2000」の観察窓から船外を潜航時間中見続けていた。まず何よりも印象的だったのは、潜航していく道中で、様々な生物を見、とくに発光性の生物の美しさに心を奪われたことである。さらに、巨大なくらげの死骸のような脆弱（ぜいじゃく）な物体が水中に浮遊しているのが、多数観察されたことも思い出される。深海への物質輸送では、とかく動物プランクトンの糞粒が重要視されるが、マリンスノーのおやだまのような有機物の塊と、その上で輝く発光細菌(?)のネットワーク（まるで透明のプラネタリウムを外から眺めているかのような印象である）は、まだまだ海洋生態学にはやるべきことが多いという印象を筆者に与えてくれた。

さて海底も近づき、ツリムも取れていよいよ前日散布したガラス粒子を探す段となった。前日目印においてきた浮を必死にさがす。海底を攪乱してしまえば実験はおしまいであるから、慎重にならざるを得ない。しかし、あっけないほど簡単に現場に戻ることができた。その時は、「しんかい2000」運航チームのナビゲーションのレベルの高さに脱帽した。

海底に着座して、試料を採取する前に、上から海底を観察した。海底は雪原のようにガラスビーズが一面に真っ白くひろがっている...はずだった。しかし実際には、滅多に降らない雪を使って、子供たちが喜々として雪だるまを作った後の、東京の小学校のグラウンドをみているようであった。前日に一様に散布したガラスビーズの白い面の上には、種々の生物のはい跡が生痕化石として縦横無尽に走っていたのである（写真-1）。



写真-1 海底に散布したガラス粉末の上に残された各種の生痕化石

深海とは何と活発な生物の多いところだろう。これが筆者の印象である。そしてそのことは、この潜航で採取した堆積物中に生息していた、線虫類の呼吸量を測定した結果から裏付けられた。ソコダラ類とことなり、線虫類などは浅海種と変らぬ速度で酸素を消費していたのである。

現在でこそ、深海でも季節があり、春の植物プランクトンの大発生の後では、深海底にヘドロのようにその遺骸（いがい）が降り積もることまで知られているが、わずか24時間で海底に多数のはい跡を残していった深海の多数の底生生物たちは、筆者にそのダイナミックな生態系の有様を初めて体験させてくれた。



タイセイヨウバンドウイルカと潜水艇  
(カンボジア, 1993年発行)

# 亜熱帯モード水

海洋研究部 三寺 史夫 Humio Mitsudera

問い：冬季，世界で最も海洋から大気への熱の放出が盛んな海域はどこでしょうか？

答え：中緯度域，特に亜熱帯モード水の存在する海域です。

亜熱帯モード水とは，16℃から19℃と水温がほぼ一樣な水のことで，太平洋や大西洋の中緯度・西岸域に発達しています。図-1はその水温層の厚さを示していますが，200 mもの厚さを持つ層が日付け変更線まで広がります。

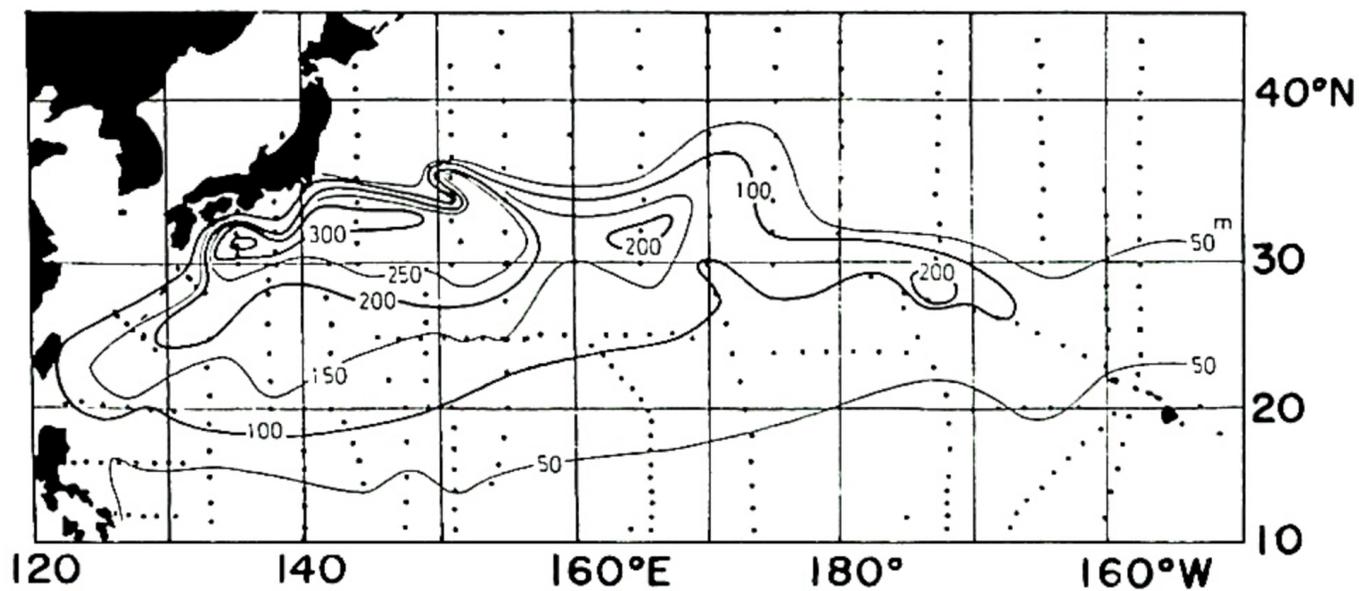


図-1 夏季の亜熱帯モード水（16°~19℃の水温を持つ層）の厚さ。単位は m

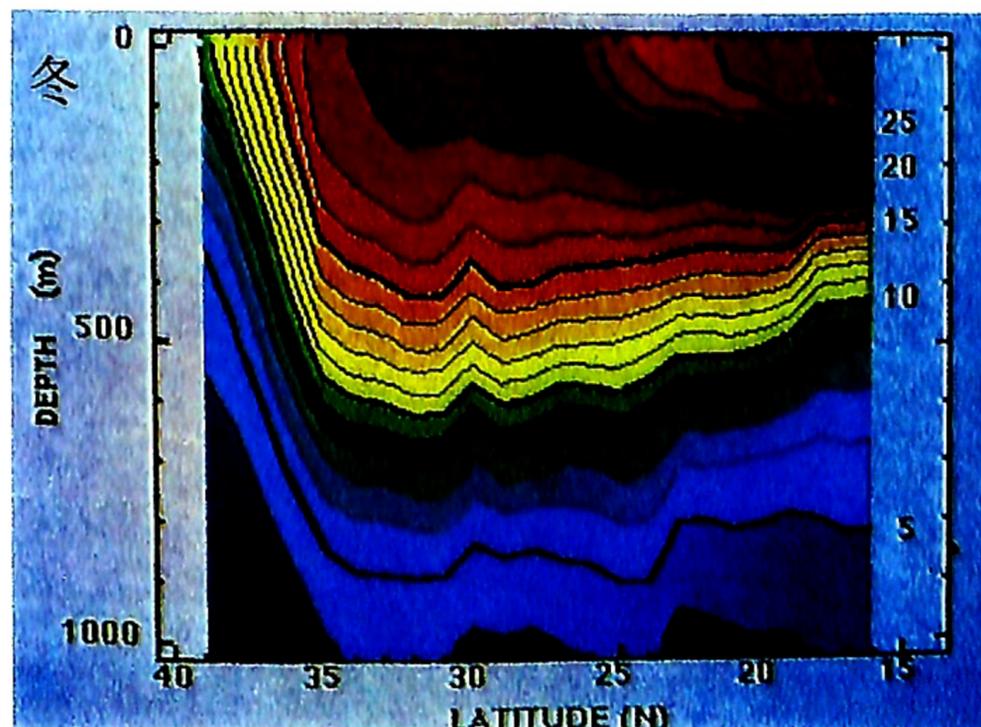
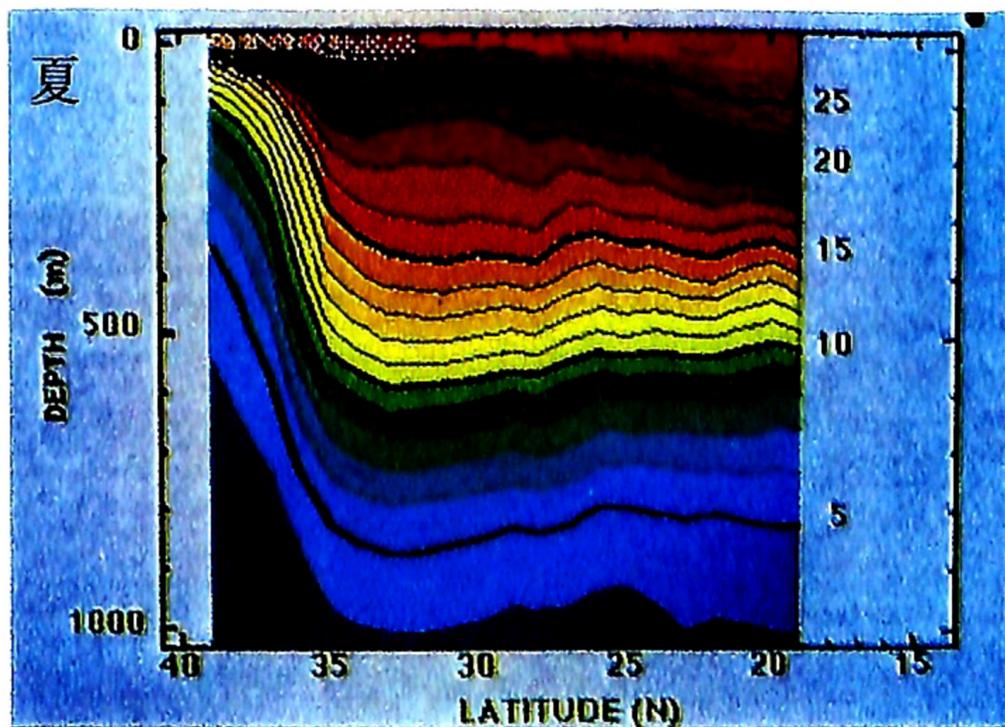
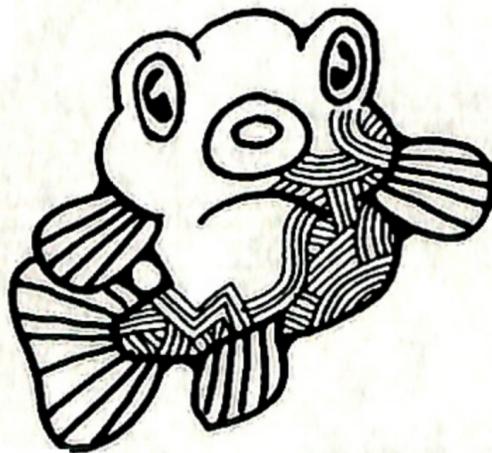


図-2 本州東方の東経 142 度から 147 度までの経度帯で平均した温位の南北断面図

がっていることがわかります。最も層が厚いのは日本南岸で 300 m 以上、時には 400 m にも達します。図-2 は東経 145° 付近に沿って観測した水温断面の一例ですが、冬季には 16°~19°C の水が表面に現れ、北からの冷たい吹き出しに接するため、大気へ熱を活発に放出することがわかります。したがって、海洋上層で深い対流が起こり、厚い等温層ができるのです。夏季になると表層は暖かい水で覆われるのですが、その一方、100 m から 400 m 深に存在する亜熱帯モード水では等温線の間隔も広く、冬季の対流活動の痕跡を残しています。この意味で、亜熱帯モード水は、中緯度・冬季における大気海洋相互作用の「記憶の貯蔵庫」といえるでしょう。

最初の質問でも取り上げたとおり、黒潮及び亜熱帯

モード水域は冬季に海面からの熱放出量が世界の中でも最も大きい海域の 1 つで、気候の長周期変動に対して非常に大きな役割を担っているものと考えられています。特に、記憶された前冬の気候海洋相互作用の情報は、次の冬の亜熱帯モード水に直接その影響を及ぼすため、水温は強い経年変動を示すことがわかってきました。そのばく大な熱の放出量を考慮すると、その変動をモニターしメカニズムを解明することは、地球規模の気候変動を解明するうえで重要な課題の 1 つといえます。私たちは、東北大学との共同研究として、おがさわら海運の協力を得、東京と小笠原（父島）を結ぶ定期航路のおがさわら丸から XBT を投下し、亜熱帯モード水の変動をとらえようとしています。



# 水深4,000mの鯨骨が動くシナリオ —最近のGPS航法システムの事情から—

運航部 内田 徹夫 Tetsuo Uchida

## 1. リエントリー

潜水調査船や無人探査機（潜水機）による、海底の特異点への再潜航調査（リエントリー）の機会が増えてきている。このような潜航作業では、目標とする特異点の位置は潜航の成否を左右する最も重要な情報である。そもそも、緯度・経度で示される特異点の位置情報は、もし仮にその場所を再調査する必要がなければ、その位置が200 mや300 mずれていようと研究者の報告書に書かれる最後の数字が、実際と少し違うだけでなんの支障もない。このような海底のピンポイントへの再潜航調査の機会であればこそ、極めて重大な意味を持つのである。ここで常に問題になるのが測位誤差の問題である。そこで、本誌の1994年第6巻第1号に掲載された深海への旅(5)その25「鯨骨（写真-1）の搜索」で紹介された測位誤差を例としてなぜこのような誤差がでるのが、その理由を探ってみた。

「鯨骨の搜索」の著者である橋本航法管制長によれば、鯨骨の再発見を目的とした最初の長沼氏による「しんかい6500」の潜航調査では3,000 mあまりの航跡を描きながらも結局、鯨骨に到達できなかった。翌日の和田氏の潜航で再発見した鯨骨の位置は、予定点より西に130 mずれていたとし、それがGPS航法システム（以下GPSとする）と音響航法システムLBL（以下LBL）の総合誤差であるとしている。130 mという誤差距離は、せいぜい10 m前後しか視程を確保できない潜水機にとっては致命的な距離である。このような誤差は、どうして起こるのであろうか。GPSとLBLの両航法システムの故障は報告されていない。そこで発生した130 mの誤差から、LBLの許容測位誤差30 mを単純に引くと残りは

100 mである。LBLで必要とする3本の海底設置トランスポンダのキャリブレーションは、母船「よこすか」の航法システムであるGPSに基づいている。そこであらためてGPSの測位誤差を探究してみた。

## 2. 最近のGPS航法システムの事情と測位精度

GPSは（Global Positioning System）の略語であるが、正確にはNAVSTAR（Navigation Satellite with Time And Ranging）GPSという。というのも同様な衛星航法システムがほかにもあるからで、旧ソ連にはGLONASS、ESA（ヨーロッパ宇宙機構）ではNAVSAT（Navigation Satellite System）、その他にもSTARFIX、GEOSTAR LINK ONEという衛星航法システムが存在する。しかし、すべてが稼働しているわけではなく、計画中や開発中であつたり、稼働をやめたものもあるようである。ただ、旧ソ連のGLONASSは



写真-1 鳥島海山水深4,146 mの鯨骨生物群集。「しんかい6500」148潜航、静岡大学和田秀樹氏撮影

NAVSTAR GPS と同等の精度を確保できることから GLONASS の衛星と NAVSTAR GPS の衛星を総合させた航法システム、さらには NAVSTAR GPS 衛星と静止測位衛星の統合などをも検討されている。しかし現在、最も普及し我々が容易に利用できるシステムは何といても NAVSTAR GPS であり、そこで簡単に GPS と呼んでいる。

GPS は NNSS (Navy Navigation Satellite System) の後継衛星航法システムとして、アメリカ空軍、陸軍、海兵隊、NATO 諸国などにより 1973 年ころから開発が進められてきた。

1993 年 12 月、アメリカ国防長官から運輸長官への書簡により、GPS の IOC (Initial Operational Capability 初期運用能力) の宣言が報告された。これにより、20 年に及ぶ開発段階が終了したことになる。当初の計画では 1988 年に IOC、1989 年に FOC (Full Operational Capability 完全運用能力) を宣言する予定であったことを考えると、スペースシャトルの爆発事故など、衛星打ち上げの遅れで当初より約 6 年開発スケジュールが遅れた格好となった。GPS の宇宙部分を構成する NAVSTAR 衛星は図-1 のような軌道で 6 軌道に 4 個ずつ 24 個の配置が完了し、この内には 3 個の予備衛星が入っている。衛星は高度 26,427~26,693 km を 12 時間で周回する中軌道周回衛星で、これにより地球上の任意の地点から常に 4 つ以上の衛星が見渡せ、衛星からの送信信号を受

信して、利用者に測地座標系 (WGS-84) 上に緯度・経度とさらに高度を提供する (図-2)。現在、衛星は初期開発衛星 (ブロック I 3 機) と運用型衛星 (ブロック II・ブロック II A 21 機) からなり、この衛星がすべてブロック II 以降の衛星に入れ替わったとき、軍用利用者への業務が確立されたとして、FOC が宣言されることになり、これは 1994 年の後半だといわれている。

IOC や FOC の宣言は、航法用に利用可能な業務が規定のレベルに達したことを保証するものである。GPS は 2 種類の測位業務を提供している。1 つは標準測位業

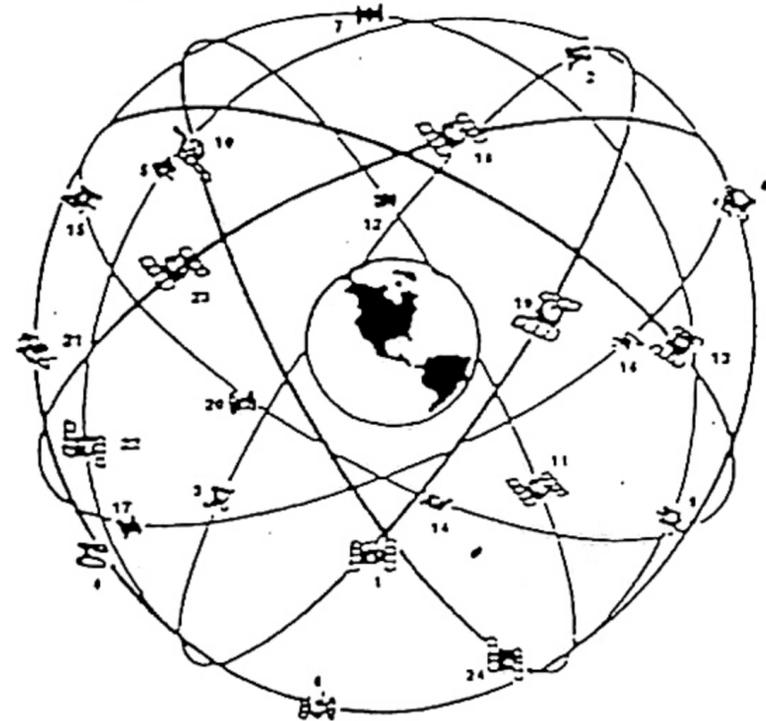


図-1 GPS 衛星の軌道構成

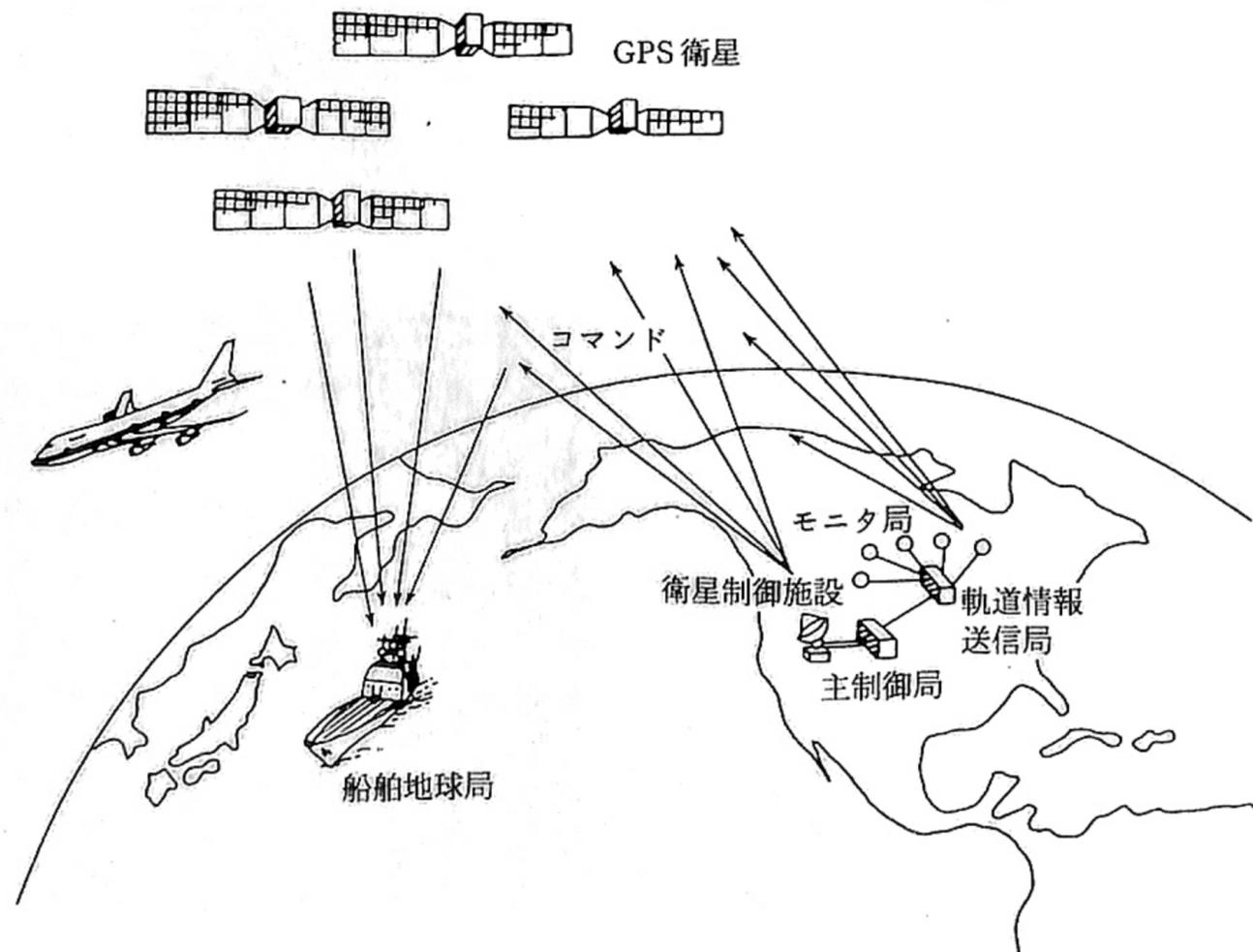


図-2 NAVSTAR・GPS システム

務 SPS (Standard Positioning service) で衛星からの測距信号の L1 周波数の C/A コード (C=Coarse:粗, A=Aquisition:捕捉) を利用するもので、すでに幅広く民間利用されている。ちなみに「よこすか」はじめ海洋科学技術センターの所有する船舶が搭載する受信機はすべてこのタイプである。もう1つは、高精度測位業務 PPS (Preceise Positioning Service) で衛星から送信される L1 及び L2 波の P コード (Precision:精密) を利用して測位するもので、そのコードは秘密になっている。IOC は SPS において水平精度 100 m 以内 (2 drms. 95% 確率), 99.99% の確率で 300 m 垂直精度は 140 m 以内 (95% 確率), 340 ns 以内 (95% 確率) のタイミング精度で、利用時間 24 時間、利用範囲としては全世界という性能を保証するものである。IOC はとりあえず SPS についてだけの保証だが、次に出される FOC は PPS について水平予測位置誤差 22 m, 垂直精度 27.7 m, 95% 確率の時間精度 90 ns を保証する。しかし、この測位精度の確定には1つの物語があるのである。

図-3 に、1990年に雑誌「船の科学」の連載講座「船舶電子航法ノート」に載った GPS の各モードにおける測位精度を示す。これによれば上段の C/A コード測位誤差は 100 m であるが、問題は横に表示される(劣化)という言葉である。測位精度については GPS の開発当初から、数多くの実験が行われ C/A コードの測位誤差

は 30 m 程度で、この結果は下段の C/A コード (SA なし) にあたる。つまり通常の C/A コードによる GPS 受信機でも本来は 30 m の測位精度を得られるのである。

### 3. SA (Selective Availability) 選択利用性

しかし残念ながら、民間に幅広く利用されている C/A コードの軌道信号には故意の劣化操作が行われている。当初から米国で運用している GPS が米国の国防上の理由から、その精度を人為的に落とすことは想像されていたが、よほど深刻な事態が発生しないかぎりこれを使うことはないだろうといわれていた。しかし、アメリカは 1990 年 3 月 25 日から、突然予告なしにこの精度の劣化を開始した。これを SA (Selective Availability) 選択利用性といい、ブロック II 衛星により (ブロック I では不可能) 衛星の原子時計で制御される C/A コードのチップのタイミングにゆっくりとしたランダムな揺れをかけることと、C/A コードで放送される航法メッセージの中の衛星の軌道データを故意に悪いものにするという。

SA の発動時には C/A コードの測位誤差がどのように変化するか図-4 にその測定例を示す。後日の話では、国防省はその精度を 500 m まで落とすことを提案したが、反対が多く、特に運輸省が「それでは既存の電波

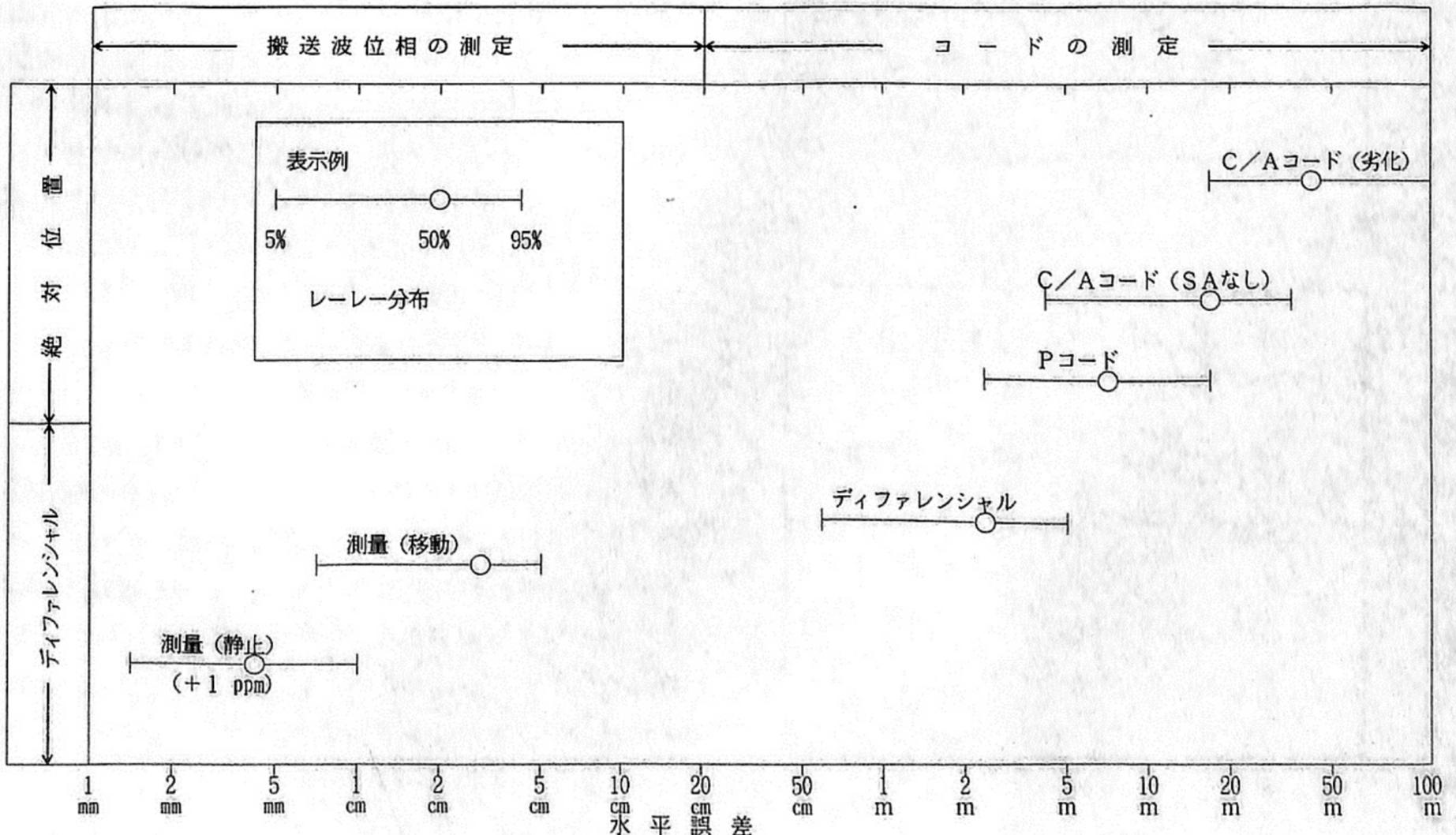


図-3 各種の GPS の測位誤差のまとめ

航法システムより精度が落ちる」という理由で100mに落ち着いたということである。このようにC/Aコードの100mの測位精度は、システムの性能ではなくGPSを管理運営するアメリカの政策によって決定されたのである。

ではなぜ、国防省はこのようなことをしたのか？これは推察だが、GPSがNNSSの後継システムであることを考えると、軍事用といわれているPコードを使用した測位の重要な任務にはクルージングミサイルなどの、戦術ミサイルの誘導が含まれて当然であろう。Pコードの測位精度はほぼ20m以内である。それに対して、敵対国に流失の恐れのあるC/Aコード受信機の精度が30mでは、逆に敵対国のミサイル誘導に利用されたら戦略的な優位差を失う。そこで、SAを発動することにしたのではないだろうか。

しかし、このSAは、GPSがその本来の性能を最も発揮するであろうといわれた湾岸戦争時には、アメリカは皮肉にもその発動を休止したといわれている。これは、

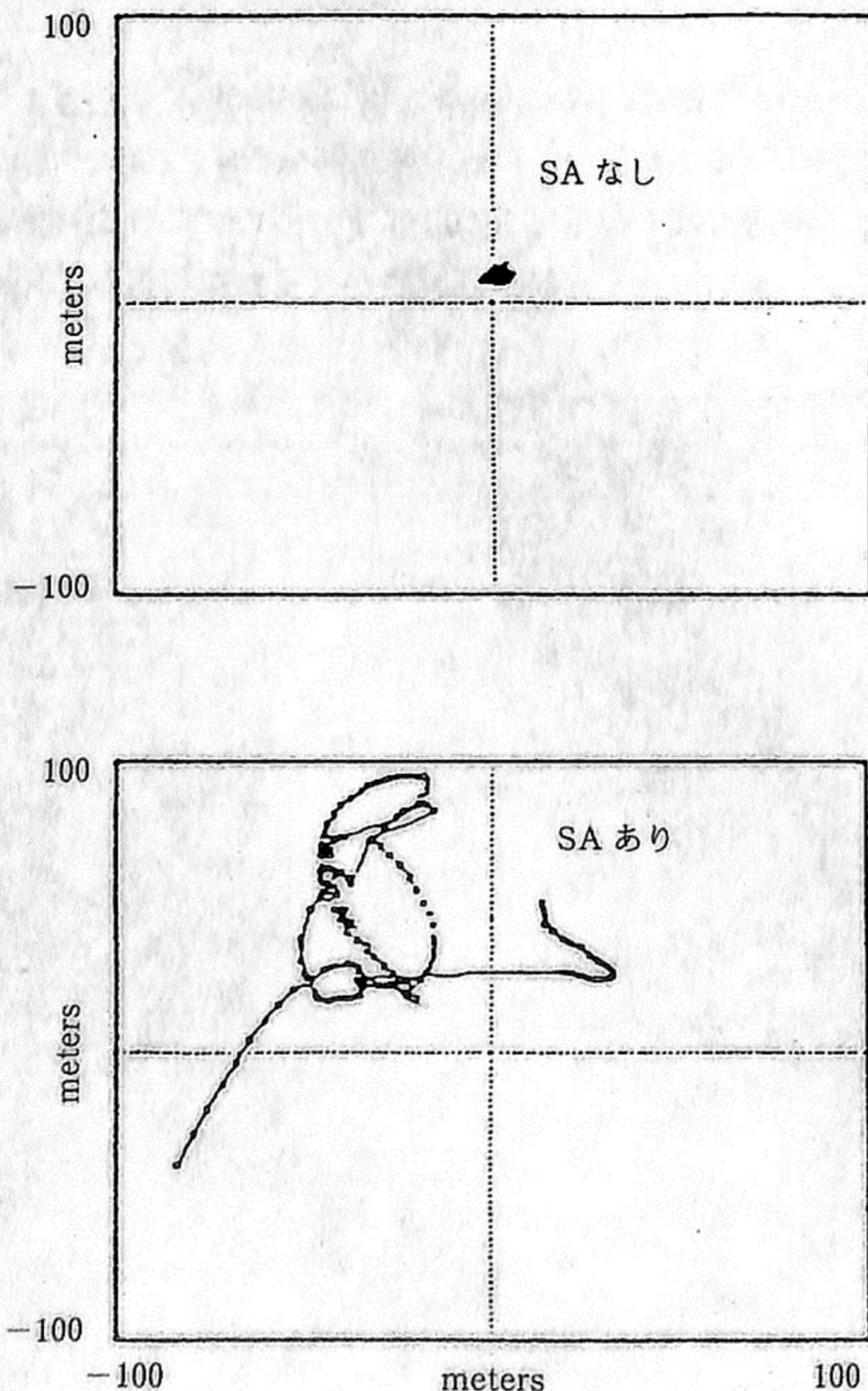


図-4 SAのあり(下)、なし(上)による測位誤差

多国籍軍へのPコード受信機の供給が追いつかず、民間のC/Aコード受信機を大量に投入し、また、イラク側での利用は極めて限定されたもので、戦略的な優位差に影響ないと判断されたためだという。

図-2に示されるようにGPS衛星を地上から管理する運用制御部分をOCS(Operational Control System)と呼び、主制御局、モニター局、地上アンテナとそれらを結ぶ通信回線で構成される。ここで、定められた基準に衛星の性能を維持するための管理が行われている。

モニター局は、ほぼ全世界をカバーする5局が設置され、ここから得られた測位情報を主制御局で分析し、衛星への指令を直径10mもあるほぼ世界的に分布した地上アンテナで送信する。主制御局は唯一の有人施設で、アメリカ内陸部コロラドスプリングスのファルコン空軍基地内にある宇宙集中管理センター内にあり、交代制で衛星や航法システムの技術者が勤務している。

#### 4. 鯨の骨が動くシナリオ

ここで描きだされるシナリオとは「鯨の骨に足が生えて、とか地殻の変動で……」という話ではなく、GPS測位誤差100mからの描写である。「最初に鯨骨を発見した時か、再潜航調査の時かどちらかの海底設置トランスポンダのキャリブレーション時に、このSAが発動されていた。このため音響測位装置との複合測位誤差が西へ130mという結果になった。つまり、鳥島海山の北東頂上付近、水深4,146mの海底にある鯨の骨は、はるか遠くアメリカ大陸の中央、ロッキー山脈の麓、デンバーの南にあるコロラドスプリングスの主制御局に勤務する当直スタッフのサジかげんにより、動かされたのである。」

こう考えれば130mという測位誤差はGPSのC/Aコード測位誤差100mとLBLの許容誤差30mを足した数字で当然の結果であり、むしろLBLの高精度を証明したといってもいい。しかし、逆にいえばトランスポンダネットワークの構築時に、母船のGPS航法システムがSAに遭遇した場合、LBLの高精度はその意味を失う。そしてそれはネットワークの再設置によりピンポイントへの再潜航が行われる場合に、もっとも顕著な結果となって現れるのである。SAの発動はマニュアル化されたものかどうかはわからない。もしかしたら、たまたま当直者がひいきにしているフットボールチームが負けたか、出勤前にワイフと喧嘩(けんか)して機嫌が悪かったのかもしれない。SAの発動、つまり測位精度を劣化させることも主制御局の任務であることにはかわり

ない。いずれにしろ、このままでは、これからも鯨の骨は散歩し、潜水調査船のオブザーバーは不本意な潜航に嘆き、航法管制長が頭を抱える、ということは起こりうるのである。

## 5. 諸外国では

このような、潜航調査の基本となる船舶の測位誤差に、諸外国の海洋調査機関はどのような対応をしているのであろうか？そこで知人を通じて海洋調査に使用する船舶がどのような航法システムを装備しているか情報を収集した。

まず、フランスの IFREMER の船舶は Differential GPS (以下 DGPS) を装備している。その精度は図-3 に示すとおり SA 発動時にもわずかに数 m である。アメリカのウッズホール海洋研究所 (WHOI) は、DGPS のカバーエリア外の調査が多いという理由で、P コード GPS を借用して使用したことがあるが、現在、P コード GPS を予算要求中であるという。同じくアメリカの MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute) では DGPS を利用し、2 年前にはすでに、簡易的な電子海図のようなものと組み合わせて、所有する音響測位 SSBL を使用する無人探査機の運用現場から、海底設置トランスポンダを追放した。これにより、潜航前の海底設置トランスポンダにかかるすべての作業を抹消してまった。このため、MBARI のスタッフが来日したおり、SSBL で測位する「なつしま」に海底設置トランスポンダが搭載されているのを不思議がっていた。

## 6. P コード GPS

P コード GPS について補足すると、一般に P コードは軍用とされているが、正確には軍事だけの使用に限定されたものではない。P コードを使用する PPS 業務は以下のように定義されている。

「PPS は主にアメリカの軍用として設計された。それは暗号の使用で非承認利用者を否定する。PPS は、国防省と特別の協定を通じてアメリカ合衆国と連合政府 (民間と軍) の利用者に利用可能とする。制限された、非連邦政府の、国外と外国の両方の PPS の民間利用者は要求を考えて、ケースバイケースで次により、承認される。

- 1) そうすることがアメリカの国として興味がある。
- 2) 規定された GPS の秘密の要求が、申請者に適合

できる。

3) PPS の使用に対する合理的な代案が利用できない。」

と標記されている。WHOI の P コードの予算要求に裏付けられるように、この内容からすると海洋科学技術センターのような組織なら正当な手続きで申請を行えば、簡単に拒否されるものではない気もする。

ただ、P コードは本来秘密コードであるが、Interface Control Document などの文書では公表されており、一部の民間の受信機に搭載され市販されている。このため有事の際は、秘密性を確保するため必要に応じて、AS (Anti-Spoofing : 対謀略性) という操作により、もっと秘密性の高い Y コードに変更されることになり、1994 年 1 月 31 日に発動された。

## 7. Differential GPS (DGPS) の現状

もう一方最も有効な測位システムとして、DGPS がある。DGPS は Differential オメガなどでその有効性が確認されたあと、GPS の開発当初、衛星が軌道にあがる以前から研究されている。Differential の定義は「分かっている場所において測位誤差を決定して、そのあと、同じ地域で運航している同じ電波航法システムの利用者に、決定したその誤差、または補正係数を送信することによって、電波航法システムの精度を改善するのに使用される技術」とされ、基準局の配置や補正值情報の放送媒体の到達距離により、その利用範囲が限定される。

図-5 に DGPS の概念を示す。この方法により SA を含めた衛星と空間伝達部分に起因する誤差要因を相殺し、基準局と利用者の受信機を統一してメートルレベルの測位精度を実現させている。DGPS のシステム構成からすると、NAVSTAR GPS をベースに利用はしているが、補正值情報を放送し、また利用者では受信するシステムが必要で、一応別のシステムであるともいえる。図-6 に DGPS の測位精度の測定例を示す。これは SA 発動時 (劣化操作時) のものであるが誤差は数 m 以内におさまっており、P コード使用時よりも精度がよい。このため DGPS は、SA の発動以降その対応策として急速に発展している。

アメリカ沿岸警備隊 (USCG) では早くから DGPS の研究に着手し、台風により位置がずれた海上浮標の再設置にも利用するなど、数々の利用実績がある。そこで、アラスカでのタンカーの座礁事故を、1 つの教訓として「アメリカの港湾と港湾への進入区域に全天候での海上

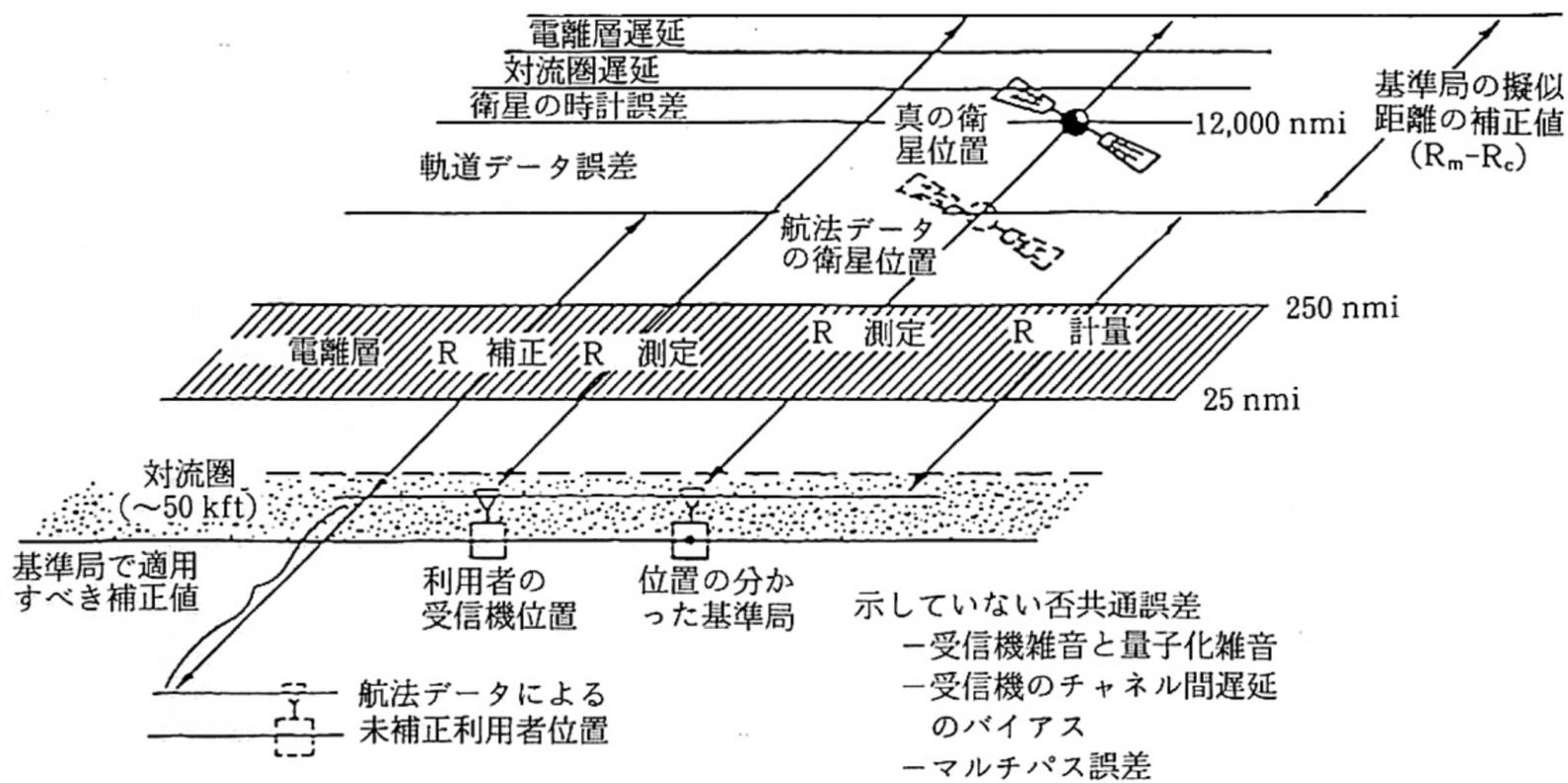


図-5 ディファレンシャルGPSによる誤差の軽減

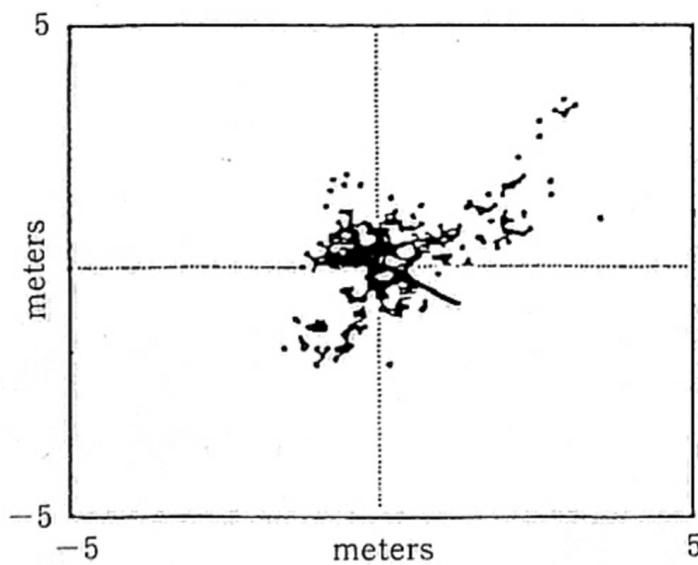


図-6 SAによる測位誤差のディファレンシャルGPSによる補正

交通業務を助け、危険な航路への進入を容易にするために、船舶に10mの測位精度を与える」という計画がある。これには中波の無線航路標識の電波のなかに、補正值情報を乗せて放送する計画で1996年からの運用が予定されている。さらに、ヨーロッパにも同様なシステムがフィンランドとスウェーデンの首都の間の航路でも運用されており、日本の海上保安庁でもその開発が開始されている。また、航空関係では国際民間航空機関(ICAO)のもとに、空港に基準局を設置し航空機の進入を助けたり、広域DGPSを利用して航空機の航法システムへの補助的利用がなされている。また、アメリカ各地の都市では、最近流行のカーナビゲーション用GPSに対して、FM放送に補正值情報を乗せる試みが行われており、日本でも全く同様な方式がNHK放送技術研究所から提案されている。DGPSは特定の組織や個人でも、基準局と利用者間に適当な通信回線があれば可能

で、自動車電話や船舶電話を利用した実験例があり、KDDによる無人探査機の海上実験では、このような簡易DGPSを利用している。

無線局からの放送により、補正值情報を伝達する比較的範囲の狭いシステムをLDGPS(Local DGPS)と呼び、これよりさらに広域にサービスをするものをWADGPS(Wide Area DGPS)といい、補正值情報の放送にはインマルサットの衛星回線を利用している。これは、利用料金を徴収する民間の会社によって運営されており、1993年現在で4社ほどがある。これらの測位精度は、電離層遅延のモデル化や多基線補正で、基準局から1,000~2,000kmのレンジでリアルタイムにメートルレベルとされている。

WADGPSサービスのうち2~3社が、すでにベトナム沖や南支那海での石油開発にからんでアジアにネットワークを展開し(図-7)、日本近海でも橋脚の設置や石油リグ、海底ケーブルの設置など利用実績がある。その内の1つSky Fixは札幌に基準局を、もう1つStar Fixは、沖縄に基準局を設け、国内にさらに4箇所ほど設置の予定である。これらのDGPSの利用には、GPS受信機と補正值受信機をレンタルするための初期起動費用と、1日あたり\$400から\$1,000(会社によって異なる)ほどの利用料が必要で、顧客が増えれば安くなるという、競争状態にあるようである。Sky Fixによる利用料は、補正值情報を解読するための暗号解読機を貸し出した日から返却した日まで、という具合で計算される。つまり、日本においても測位精度数mというDGPSの補正值情報が、インマルサット衛星から暗号によりす

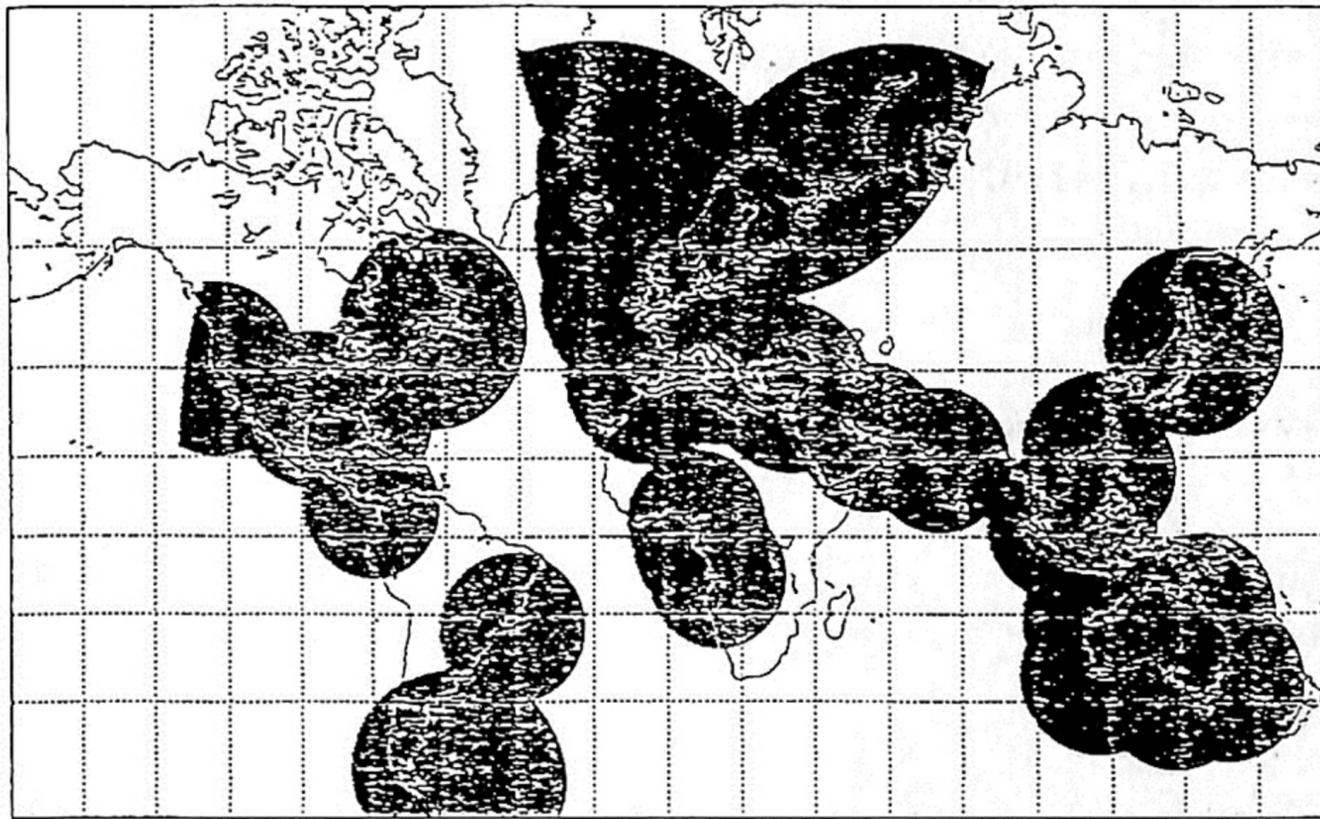


図-7 Racial Survey 社の DGPS のカバーレージ

に放送されているのである。

しかし、日本国内での DGPS の展開には、ネットワークを構成する電話回線の利用料が高いため海外での利用に比べて割高になりがちだという。また、補正值情報の放送に関する NHK 技研のような提案には、国内の電波法の壁がある。このような事情にあって、一説には、DGPS の普及の鍵は郵政行政が握っているとされ、ある意味での規制緩和がこの業界でも待ち望まれている。

一方、日本近海で、DGPS を普及させるきっかけとして期待されるのが、海上保安庁水路部の電子海図の発行である。電子海図が普及すれば、そこに自船の位置や航跡を入れたいのには当然の成り行きであるが、ノーマルな GPS では 100 m もずれてしまう。それでは作成された電子海図上で防波堤や陸に乗り上げる船がでてくることになる。アメリカ沿岸での、USCG による DGPS のサービスも、こういった将来展望を考慮しての政策なのかもしれない。

## 8. GPS の将来

1992 年の連邦電波航法プラン (FRP) では ICAO の勧告をうけて、「最小 10 年間は GPS の SPS 業務は直接の利用者料金をなしで継続運用をするとともに、10 年を越える見通せる将来にわたってもそれらを継続し、システムの運用中止には少なくとも 6 年前に公告するつもりである。」としている。これにより、すぐに GPS の受信料を徴収されることはなさそうだが、とにかく、将来の政治や経済の動向で、GPS の位置情報を無料で利用できる

時代が終わりにならないとも限らない。この業界では、アメリカの衛星航法システムを無料で利用して、受信機の販売や DGPS のサービスのよう民間会社が利益を得ている事情があり、ある意味での、うしろめたさみたいなものもあるのも事実で、このような胸の内をある人は、噂話としてこう表現してくれた。「つまり、豚は太らせてから喰うということが将来あるかも知れません……」

## 9. おわりに

いずれにしても、潜水機の運用現場で求められるような測位精度を得る方法は、ネットワークの陸、海、空における全世界的な拡大の勢いを考慮すれば、DGPS の利用が最も適当で、特に潜水機の音響測位を SSBL で使用する「なつしま」では有効である。ここで、理想の航法システムを思い描くならば、縮小図から拡大図まで自在に変化する、将来の電子海図上に DGPS と音響測位 SSBL を組み合わせて、母船の航跡や潜水機の位置を表示する。しかも、海底設置トランスポンダが必要ないため測位範囲に拘束されず、それよりも良い精度でほぼ完璧な位置再現性があるといったものであろう。

アメリカの USCG のような、DGPS の無料サービスが日本でも近い将来に可能になるだろうが、その利用範囲等はまだ不明でもあり、当面は既存の民間のネットワークを有料で利用することも 1 つの選択である。これには海洋科学技術センターなどの研究機関や大学の調査船など、まず最初に公共性の強い船舶が利用者としての

横の連帯を作ることが、なによりも効果的ではないだろうか。このように、極めて精度の良い位置を出す航法システムは、もう手の届くところまできている。それを潜水機の運用現場で活用するのはもはや技術の問題ではないのである。

追伸

本稿の執筆にあたり、「船舶電子航法ノート」著者、木

村小一氏の指導を受けました。誌面にて、謝辞申し上げます。

参考文献

- 1) 木村小一：船舶電子航法ノート。「船の科学」連載講座，VOL106-204.
- 2) 原田益水：衛星のすべて（1993），217-222.



レプブリカ号



ピオニール号



ブルノ号

遠洋船舶（チェコスロバキア，1989年発行）

# 海の豆知識

## おもな海洋

海洋名		面積	体積	最大深度	平均深度
		(10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	(10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	m	m
1) 大洋	太平洋	165.246	707.555	10920	4282
	大西洋	82.441	323.613	8605	3926
	インド洋	73.443	291.030	7125	3963
	計	321.130	1322.198	(10920)	4117
地中海(陸地間の海)	北極海	14.090	16.980	5440	1205
	濠亜地中海 <sup>2)</sup>	8.143	9.873	7440	1212
	アメリカ地中海 <sup>3)</sup>	4.319	9.573	7680	2216
	ヨーロッパ地中海 (黒海を含む)	2.966	4.238	5267	1429
	ハドソン湾	1.232	0.158	229	128
	紅海	0.438	0.215	2300	491
	バルト海	0.422	0.023	459	55
	ペルシャ湾	0.239	0.006	170	25
	計	31.849	41.066	(7680)	1289
沿海	ベーリング海	2.268	3.259	4097	1437
	オホーツク海	1.528	1.279	3372	838
	東シナ海	1.249	0.235	2719	188
	日本海	1.008	1.361	3796	1350
	アンダマン海	0.798	0.694	4198	870
	北海	0.575	0.054	700	94
	カリフォルニア湾	0.162	0.132	3700	813
	セントローレンス湾	0.238	0.030	640	127
	その他	0.253	0.015	—	—
	計	8.079	7.059	(4198)	874
全海洋	361.058	1370.323	10920	3795	

1) 沿海含まず。

2) スンダ列島, フィリピン, ニューギニア島, オーストラリアでかこまれる地中海。

3) カリブ海, メキシコ湾等の総称。

Robert. L. Fisher (1993) および日本海洋データセンター資料による。

## 海洋の深さの面積比

深さの範囲	太平洋	大西洋	インド洋	全海洋
m m	%	%	%	%
0—200	5.7	13.3	4.2	7.6
200—1000	3.1	7.1	3.1	4.3
1000—2000	3.9	5.3	3.4	4.2
2000—3000	5.2	8.8	7.4	6.8
3000—4000	18.5	18.5	24.0	19.6
4000—5000	35.2	25.8	38.1	33.0
5000—6000	26.5	20.6	19.4	23.3
6000—7000	1.6	0.6	0.4	1.1
7000以上	0.2	0.1未満	0.1未満	0.1

(理科年表 平成6年版より)

# |編|集|後|記|

記録的な猛暑も過ぎ、本格的な秋となりました。「JAMSTEC」通巻第24号をお届けします。

依頼原稿の最初は、東北大学農学部教授の谷口旭先生に「プランクトン学100年」と題してご執筆いただきました。プランクトン（浮遊生物）とはご承知のとおり、水中を漂う、ほとんどが、微小な生物のことです。これは海の生産者（魚などのえさ）として、あるいは環境を変化させる主役の1つとして海の重要な要素です。今回は特に、専門的知識のない読者にも理解できるように、大変分かりやすく、浮遊生物研究の歴史と現状を説明していただきました。一見同じように感じられる、海洋生物学と生物海洋学の違い、そして前者から後者に認識が変化してきたこと、独立して発展（放散）してきた浮遊生物関連の研究分野が、近年のグローバルな研究計画を契機に集約し、生物海洋学の本来の目標である総合化をめざしはじめたこと、など興味のある内容です。

研究紹介では、深海開発技術部の野口研究員に雑海藻除去システムの開発について紹介してもらいました。これは、コンブ等の有用海藻が消失し代わりに石灰藻やホンダワラ等の雑海藻が繁茂する「磯焼け」から、逆に雑海藻を除去して漁場を回復するためのシステムです。ウォータージェットと海中ロボット技術を組み合わせたユニークなものです。同じく深海開発技術部の月岡研究員には極く細い、光ファイバーケーブルだけで結ばれた、海中ロボット「げんたつ500」の若狭湾での運用について紹介してもらいました。

海外事情では、海域開発研究部の他谷研究副主幹から、ウイスコンシン州のマディソンでの研究及び家族4人の生活の様子を紹介してもらいました。また深海開発技術部の平井研究副主任にはテキサスで開催された深海掘削に関する国際会議の概要を報告してもらいました。

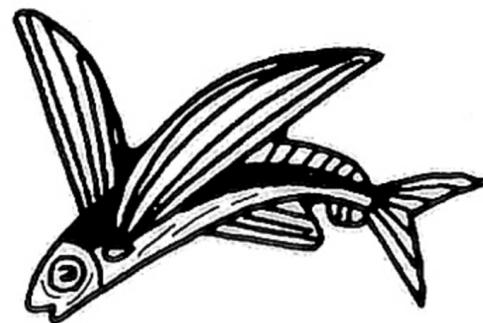
「海からのたより」では、前深海環境プログラムの長沼研究員（9月1日より広島大学の生物生産学部助教授）より10回目の「海のアロソロジー」をいただきま

した。外に出ても当センターのOBとして「JAMSTEC」への執筆を続けてほしいものです。また情報室（海洋研究部兼務）の黒山室員には、「海水に関する何故？」に独自の解釈をしてもらいました。結論の如何はともかく、素朴な人柄がしのばれる随筆です。地道な研究の紹介とともにこのような思索内容の紹介も「JAMSTEC」にとって大切な記事です。運航部無人探査機操縦班の内田班員に執筆いただいたリアルな体験記事、「ドルフィン-3K」からのメッセージは今回を持って終了します。ご苦労さまでした。

当センターのこと。MODE '94計画（MidOcean-ridge Diving Expedition）の前半、大西洋行動を終えた「しんかい6500」とその母船「よこすか」は、7月末、ウッズホール海洋研究所（WHOI）に寄港し、当センターの石塚理事長やガゴシアン WHOI 所長を交えて、調査成果の発表会や「しんかい6500」見学会が盛大に開催されました。後半の東太平洋行動は9月から11月にかけて実施されます。

最後になりましたが、本号の発刊にあたりご執筆・ご協力いただいた関係各位にお礼申し上げます。

（辻）



## 表紙写真の説明

### 相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」水中部

当センターでは、1993年9月にリアルタイム型の長期観測ステーションを相模湾初島沖の水深1,177mの深海底に設置し、連続観測を開始してから1年がたちました。

写真は、当センターの無人探査機「ドルフィン3K」で撮影した、観測ステーションの水中部です。水中部には、TVカメラ(2台)、水中ライト(6灯)、CTD(導電率または塩分濃度・水温・深度)センサー、地中温度計(2台)、流向流速計、地震計、ハイドロホンの各センサーが搭載されており、観測データは、光ファイバーケーブルを通じて、初島の陸上局に伝送されています。さらに、電話回線で横須賀にも送られてきます。

この場所にはシロウリガイのコロニーが1984年に発見されており、また、付近の海底では群発地震や海底火山の噴火がくり返し発生しています。

この観測ステーションは、シロウリガイの活動、コロニー下の地殻熱流量、群発地震、そして海底噴火等を長期にわたって観測し、これらの因果関係を明らかにすることを目的としています。このような深海底の長期連続観測は世界でも初めての試みです。

(深海研究部 岩瀬 良一)



### 刊行物編集委員会委員及び作業部会専門委員

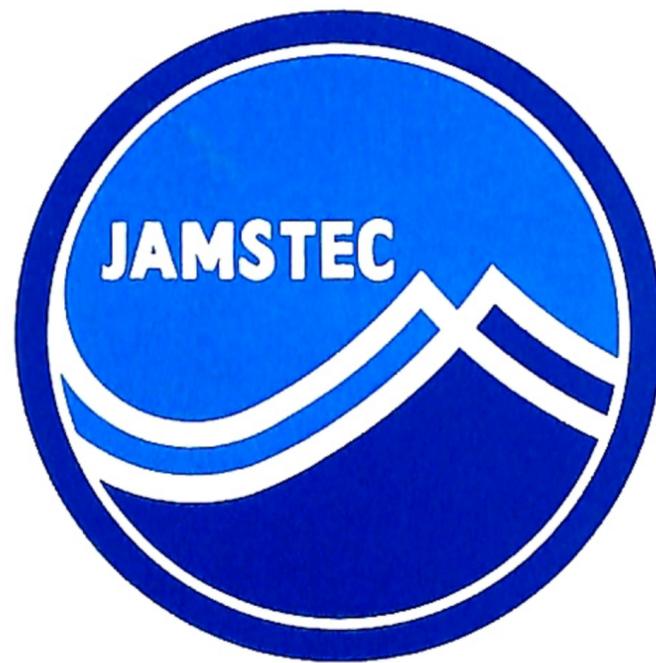
委員長	林 暉 (理事)	作業部会長	辻 義人
委員	小野 峰夫 (総務部長)	専門委員	長谷川康明 石井 春雄
	有本 建男 (企画部長)		喜多河康二 佐々木保徳
	堀田 宏 (深海研究部長)		堀田 平 伊藤 信夫
	田崎 正幸 (深海開発技術部長)		藤岡換太郎 豊田 孝義
	中西 俊之 (海洋研究部長)		門馬 大和 福井 勉
	宇野 史郎 (海域開発研究部長)		野本 昌夫 續 辰之介
	青木 昱 (運航部長)		高川 真一
	辻 義人 (情報室長)		

(平成6年8月31日 現在)

JAMSTEC 第6巻 第4号 (通巻第24号) (無断転載を禁ず)

1994年10月1日 発行

編集兼発行人	海洋科学技術センター 情報室
本部	〒237 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 TEL (0468) 66-3811 (代)
東京連絡所	〒105 東京都港区新橋2-6-1 さくら新橋ビル6階 TEL (03) 3591-5151 (代)
印刷・製本	創文印刷工業株式会社 〒116 東京都荒川区西尾久7-12-16 TEL (03) 3893-3692



**JAPAN MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTER**