潜航型海洋調査船の必要性と予想される利用法と成果*

永田 豊†

武隈克義‡

Necessity of Underwater Research Vessel and its Possible Products for Oceanic Researches

Yutaka Nagata** and Katsuyoshi Takekuma ††

1. はじめに

海洋研究の目的が、単なる海洋現象の解明から、地球規模の気候にたいする海洋の役割の解明、気候変動・地球温暖化の予測へと進展するにともない、全世界の海についての均質かつ高度の資料が要求されるようになった。しかし、冬期の高緯度海洋のように、通常の観測船での観測が実施不可能ないしは非常に困難な海域があり、そこでの観測資料の欠如が、研究発展の大きな障害となっている。ここでは、1つの解決手段として、潜航型海洋調査船を取り上げ、その必要性と、実現した場合の有効な研究対象・利用法、さらには期待される成果について、概観することにする。

なお、ここで取り上げる潜航型海洋調査船は、JAMSTEC が現在保有するような深海潜水艇(サブマージブル)とは全く異なるもので、潜航深度としては海洋観測・調査のニーズから高々300m 程度を想定するが、かなり広い海域を観測し得る航続性の高い調査船である。このような潜航調査船は、世界でもほとんど存在せず、軍事的な観測を別にすれば、退役間近の米海軍原子力潜水艦パルゴによる北極海の観測(Keigwin and Johnson, 1992; Langseth *et al.*, 1994) が上げられるのみである。現在有

志の集まりである潜航型調査船懇談会(代表永田豊、幹事武隈克義)で技術的な検討も開始しており、その結果は調査観測ニーズを充足するシステムとして別途発表する予定である。ここでは、観測ニーズと対応する調査手段としての必要性を検討する上で、基本的な潜航型調査船の概要を示すにとどめる。

1) 基地から観測海域まで自航する形とし、片道 1,800 哩の距離を速力 8 ノット程度で無補給で往復することを目的とし、動力としてディーゼルエンジンを使用する。ただし、研究者などは、前進基地など航路上で乗下船できるようにする。

2) 潜航しての観測期間は 10 日程度を目標とし、海面状況に独立に観測可能とするため無給気潜航とする。無給気動力源としては、将来燃料電池の使用もあり得るが、さしあたってスターリングエンジンを用いるものとする(燃料はケロシンで液体酸素を酸化剤とする)。

3) 水中航走速度としては、観測期間中最大 2.5 ノットの連続航走が可能であるようにする。(ディーゼルエンジンによるシュノーケル航走を補助的に行うことも状況によっては可能となる。)

4) 最高潜航水深は 300m とする。上下方向の分布計測などのために、有索繰り出し型計測器、自動有索・無索航行機器などを装備する。

5) 乗員数は、船員、研究者、観測技術者などあわせて 20 名程度を予定する。

6) 観測機器、分析機器システムおよびデータ記録解析システム等は、モジュール化し、船内または船外に設置運用する。

* 1995 年 12 月 22 日受領; 1996 年 4 月 4 日受理

† 三重大学生物資源学部: 〒 514 津市上浜町 1515

‡ (財) 日本造船技術センター: 〒 171 東京都豊島区目白 1-3-8

** The Faculty of Bioresources, Mie University, 1515 Kamihamacho, Tsu-shi, Mie, 514 Japan

†† The Shipbuilding Research Centre of Japan, 1-3-8 Mejiro, Toshimaku, Tokyo, 171 Japan

7) 観測データとしても必要な潜航型調査船の測位は、水中音響システムおよび慣性航法システムなどにより実施する。

以上のような条件での概念設計では、船の全長が約38m、幅約5.5m、高さ6m、排水量約420トンの規模となっている。以下の議論は、この程度の潜航型調査船を念頭に置いて進めることにする。また、この程度の船では万能型の調査船を考えることには問題があるので、議論を海洋物理学的な応用に絞り、他分野の調査に付いては派生的に可能なものにのみ言及することにする。実現にあたっては、多目的型でなければ費用の面で難しいという問題が起こることが予想されるが、ここでは研究成果を最大限に上げると言う見地から議論を限定する。残念なことに、潜航型調査船に言及すると、いわゆる深海潜水艇と混同して船首に覗き穴があるような船で、着底可能な船を思い浮かべる人が少なくない。海洋中での水平視程は数メートル程度で、外洋ではそのようなものは全く役に立たず、無用なものである。ここで考えているのは広い水平方向の行動性もった悪天候・悪条件下で観測が可能な水中プラットフォームである。将来的には無人潜航艇を考えるべきであるが、連合王国の海洋研究所で設計計画があるにせよ、短距離型の無人ビークル(例えば, Curtin *et al.*, 1993)を除いて、実現にはかなりの時間がかかろう。さらに、潜航型調査船を必要とするような海域ないしは時期の観測データが余りにも不足しているため、現場でのフレキシブルな運用を想定する必要がある、ここでは有人調査船を議論の対象としている。

2. 潜航型調査船のメリット

2.1. 亜寒帯・極域の観測

荒天時の観測が容易なこと、従って従来殆ど海洋観測資料の得られていない冬季の亜寒帯域における海洋観測を可能とする。特に冬季の西部亜寒帯太平洋のように船体着氷の問題がある海域では唯一の観測手段を与える。また、波浪による揺れが少ないことから高精度の測定器・解析器の使用が可能となる。この特性は、台風等による暴風下での海洋表面混合層の変化のような、従来全く知見の得られていない問題解明にも有効である。

通常の観測船を用いた観測が不可能な氷域・氷縁域の海洋観測が可能となる。氷域の観測においては砕氷船に

よる観測も考えられるが、砕氷船自身の作った限られた開氷面からの計測器を下ろすことには種々の困難と制約がある。また、砕氷船は一般に動揺が激しく、荒天下の観測に大きな制約がある。もちろん、砕氷船は大きな航続距離を持ち、多人数の乗船が可能であり、大量の機器・資材の運搬が可能である。砕氷船と潜航型調査船との優劣を論じるのは無意味で、双方の利点を活かしての相補的な利用を検討すべきである。

亜寒帯・極域の、特に冬季の観測資料は、そこが深層水・中層水の沈み込む場所であり、また二酸化炭素などの大気中の温室効果ガスを効率的に吸収している場所であるから、地球温暖化・気候変動の研究に非常に重要である。この海域の冬季の観測が可能になるならば、たとえ観測項目が水温・塩分だけに限られようと、それだけでも潜航型調査船を建造する必然性が存在すると考える。

また海氷域の海洋観測は、海水の生成が高塩分・高密度のブラインを排出することから中・深層水の生成に大きな役割を果たしていることから重要である。一旦海面が海氷に覆われると、その断熱作用によって海水の生成率は著しく抑えられる。そのため、氷野の中の開水面・ポリニアでの精密な海洋観測が要求されている。また、水圧の効果により海水の生成がサブサーフェスでも行われるという指摘があり、このような現象の解明に潜航型調査船は大きな役割を果たすであろう。さらに、氷原の広がりや人工衛星を用いて、かなりの精度で観測可能であるが、氷厚の資料は殆ど得られていないのが現状である。このため海水の貯熱量や貯水量についての定量的な、精度のよい議論は全く欠けており、これが気候問題で海水の役割を定量的にモデル化することを不可能にしている。潜航型調査船による上向き音波観測がこの問題の解決に大きく役立つことは言を待たない。

2.2. 水平面(等密度面)に沿った連続計測

潜航型調査船の最大のメリットの1つは、水平面(ないしは等密度面)に沿って物理量を連続的に測定出来ることである。第二次大戦後の海洋物理学の急速な進歩は、MBT・STD・GEKの導入からXBT・CTD・ADCPの導入へと、海洋観測に要する時間を短縮するとともに、高精度化することによって、たとえ低速の観測船を用いた観測であっても、測点密度の増大を含め、取得情報量を格段に増大させたことによる。一般的な海況把握には現在

でも、いわゆる標準層の資料が用いられているが、XBT・CTDを用いた観測が高い鉛直分解能(1デシバーないしは1mの分解能)を持つことから、海洋中の拡散や混合の物理過程が直接の研究対象となってきたことは、われわれの海洋の構造に対する考え方に大きな変革を与え、さらには自由落下装置を用いた微細構造の研究へと発展したのである。

XBTやCTDによる観測の高速化は、測点密度の高い観測を可能とし、水平方向の分解能を向上させたが、海洋中に存在する微細現象を十分に捉えているとは云えない。各種の曳航式の計測機器やADCPによって、ある程度の水平的連続観測が行い得るようにはなっているものの、限られた海域に適用されているに過ぎない。一般に海洋構造の縦横比(アスペクト比)は 10^3 から 10^4 であるから、鉛直スケール1mの現象の解明のための測点間隔は1-10kmでよい。通常1時間程度の観測時間内に船はこの程度の漂流を起こすが、絶対的な位置精度は無理でも、相対的な位置決定精度ではこの程度の観測は可能である。しかし、揺れの少ない、また極表面層に比べれば諸種のノイズの少ない100-300mを航行する潜航型調査船を用いた水平的連続観測は、フロントや氷縁域の海洋構造のように水平のコントラストの強い場所で大きな威力を発揮するであろう。特に、曳航式の測器の適用の難しい氷縁・氷海での観測や台風下の荒天域での観測は潜水船でなければ不可能である。また、物理量ではないが、プランクトンのブルーミングのような現象はパッチ状・帯状に起こることが十分予想される所である。

このような3次元微細構造の観測では、微速運行やホバーリング(水中停止)のような、航行に対する特殊な要求が出ることが考えられる。ただし、ホバーリングについても、絶対的な停止が要求されるよりも、海水に対する相対速度を0として周りの水塊と一緒に流される方が意味において好都合である。現象に応じて柔軟な対応が望まれる。また、潜航型調査船から繰り出した有索の小型無人観測艇の併用も有効となろう。

潜航型調査船による直接的な水平連続観測においては、船体による乱れを避けるために、船首部分にブームを出してそこに測器を取り付けるような方策を取る必要もあろう。ただし、このような計測は、基本的には一定水深または等密度面にそっての直線上に限られるため、特殊な海域を除くと、サーミスター・チェインのような曳航式測

器による観測に比べて、必ずしも有効とは云えない。むしろ、前節で述べてきたような悪条件下の海域では、基礎的な観測知識の積み上げが非常に少なく、予定測点間の航行中に現象を監視し、その結果から測点の変更・測点密度の変更等を適宜行う方策として考慮すべきである。これが、次節に述べる有人観測船を想定している最大の理由である。

2.3. 有人観測のメリット

悪天候下や、氷海のような場所では、潜航型調査船といえども、安全性の観点からの運用には慎重な検討が必要とされる。将来的には、悪条件下の観測には、自動運行する無人潜航艇の適用を考慮すべきであろう。しかし、既に述べてきたように、潜航型調査船による観測を緊急に必要とする海域、あるいは対象について、殆ど既存の観測資料が無いことを忘れてはならない。このことは、最適の時間的・空間的測定間隔のような、観測計画を立てる上で必須の知識さえ無に等しいのであり、潜航型調査船を用いた観測は探検的なものとならざるを得ず、現場での判断が常に要求されるであろう。これが有人の潜航型調査船を考慮している最大の理由である。

3. 対象とする現象の空間・時間スケールと潜航型調査船の利用法

3.1. シノプティック・スケール

Fig. 1a, Fig. 1bに、亜寒帯北太平洋における1957年の夏と、1958年冬における海洋観測点の分布図を示す(Dodimead *et al.*, 1961)。この図から分かるように、冬の観測資料は、東部のアラスカ湾を除くと、極端に少ない。この資料はやや古いが、1966年2-3月の観測船アーゴによる観測(大谷, 1989)のような特殊な例を除くと、現在もほとんど事情は変わっていない。しかし、このようなシノプティック・スケールの現象解明に、低速であり航続距離の限られた潜航型調査船が果して有効であるかどうか、検討しておこう。

最近、米国のスクリップス海洋研究所が中心となって行なった、北太平洋西部における観測の測点図を、例としてFig. 2に示す(Talley, 1991)。1985年8月の観測船トンプソンによる観測では、領海問題からクリル列島に近

Fig. 1. 1957 年夏に行われた海洋観測点の分布 (a: 上図) と, 1958 年冬に行われた海洋観測点の分布 (b: 下図).
(Dodimead *et al.*, 1961)

づけず, 釧路を出航後南東に進路をとり, 40°N 付近から斜めに列島に沿った北東に向かう測線を取っている. そうして, 47°N, 160°E の測点 38 から, 東西に走る北太平洋横断観測線に入っている. この図で, クルゼンステルナ海峡から南東に延びる測線は, この観測を補足するためにロシアの観測船アカデミク・コレロフを利用して, 1987 年 6 月に改めて行なわれた観測線である. 今仮りに, 冬期においても測点 38 以東の東西の測線は通常の観測船によって観測が可能であるとし, 長さ約 550 哩のクリル列島に沿った部分を潜航型調査船が担当するとし

てみよう. 潜航速度を 2.5 ノットとすると 1 日 60 哩, 10 日間で 600 哩を走破できる. 測点間隔を約 40 哩とすると測点は 12 点となる. CTD のような比較的単純な計測作業に限ると, 1 測点 1 時間の観測時間で十分であるから, 一応この列島沿いの測線をカバーし得る. 40 哩の測点間隔は, 精密な海況解析には粗すぎるかもしれないが, 釧路あたりを基地として 2 回の航海を想定すれば, 測点間隔をもっと狭め, 列島沿いの測線に加えて, 図の北海道・クリル列島から南東に延びた 2 つの測線での観測も十分実施し得る. 図の例に見られるように, 夏期につ

Fig. 2. 1985 年 8 月の観測船 T. Thompson, および 1987 年 6 月の 観測船 Akademik Korolev の観測点分布図.
(Talley, 1991)

いても、補足的測線の観測を 2 年後に行って総合的に解析しているが、観測資料が不足している現状では、これでも大きな成果とされているのである。さらに資料の少ない冬期については、1 つの海域を数年がかりでカバーしても、その価値が非常に大きいことは論を待たぬところである。

現在の広域観測は明確な研究・観測目的のもとで組織された国際協力プロジェクトの形で行われるのが通例である。従って、通常型の観測船や砕氷船のような特殊船、係留観測、衛星観測等を潜航型調査船と組合せ、それぞれの特性を活かした総合観測を企画するべきであろう。従って、天候のよい夏季を中心に、在来型の通常観測船による広域資料を得ておき、時期的空間的にブランクとなるような部分について潜航型調査船や砕氷船を適用していくことが望まれる。気候問題の解明のためのシノプティック・スケールの海洋観測においては、たとえ測定項目が CTD 観測のような基礎的なものに限られようと、その成果は大きいことを忘れてはならない。装備を CTD のみに限ったとしても、現状では潜航型調査船の需要は 1 隻の船の寿命をはるかに超える量となることを強調しておきたい。

3.2. メソ・スケール

低速で航続距離が限られるという点からいえば、潜航型調査船の特性はメソ・スケールの現象の観測により活かされると言える。メソ・スケールの現象の研究は、種々の物理過程を解明し、現象をより定量的に扱うために必須のものである。しかし、その背景となるシノプティック・スケールの知識無しにはその成果は限られたものとなる。従って、気候学的な意味での海域の知識がすでに集積されているか、より高速の通常観測船による背景観測を平行して実施するか、衛星資料を有効に利用するか、何等かの総合的プロジェクトの形で行われることが望ましい。

1) 混合過程の観測

メソ・スケールの現象の一例として Fig. 2 の観測の際に得られた水温・塩分の鉛直分布の例 (Fig. 3) を示しておこう。クリル列島沿いの観測線上の測点、29, 30, 31 で得られたものであるが、深度 800m 付近に測点 30 においてのみ、水温・塩分の鉛直分布に異常な膨らみが見られる。密度の鉛直分布は 3 点ともにスムーズなプロファイルを示しており、このような現象の水平スケールが小さいことが分かる。この膨らみの部分の水は、オホーツク海に起源をもつ低温・低塩・高酸素の海水であることが

Fig. 3. Fig. 2 の測点 29, 30, 31 で得られた水温塩分の鉛直分布. (Talley, 1991)

示されている (Talley, 1991). このようなパッチ状の異水塊は、多くの場所で観測されており、混合現象の 1 つの過程を示すものであろう。また、一般に親潮の水は東カムチャッカ海流から直接もたらされた水と、一旦オホーツク海に入りそこで変質を受けた水とが、ほぼ等量づつ混合して作られていると考えられている (大谷, 1989, 永田他, 1992). 従来の粗い観測では、2 つの水塊の間に種々の混合比を持った両水塊の混合水が存在し、水系が連続的に 1 つの水塊からもう 1 つの水塊に移って行くように見える。しかし、最近の測点密度の高い観測の結果では、種々の混合比をもった混合水が見られると云うよりも、2 つの起源水塊がほとんど変質を受けずに互いにモザイク状に入り組んでいるような構造が得られる方が普通である。混合の過程そのものを観測から明らかにして行くために、今後どのような観測を行うべきかについて明確な方策が立っている訳ではないが、より詳しい海洋構造の記述を、時間変化の情報を加味しながら解析すべきであろう。物理過程のモデル化と観測結果の結合をはかることが急務であり、低速であっても安定した観測プラットフォームである潜航型観測船にたいする期待が大きい。

さらに、混合現象の研究において、海面の冷却による対流が卓越する冬期の観測が重要な意味をもつ。厳冬期での精密な混合過程の観測研究の例はほとんどなく、ここにも潜航型調査船が必要とされる理由がある。

2) 氷海とポリニア

メソ・スケールの現象の研究において、最も潜航型調査船が威力を発揮するのは、氷海とポリニアの観測である。流氷の密接度や氷厚が流氷野の運動や氷海の海洋特性に大きな影響を与えているが、流氷の特性とその下の海況を同時に精密に観測することが出来る潜航型調査船の役割は非常に大きい。もちろん、航行の安全性を確保するために、観測域の設定にかなりの制約を生じるから、慎重な計画立案が必要である。しかし、たとえ観測域が当初、氷縁域付近に限定されようとも、大きな成果が期待できる。また、実際の観測潜航は、氷海域の安全潜航について多くの基礎資料を提供してくれるであろう。

有力な研究対象の 1 つとして、氷海に存在する開水面、ポリニアの観測研究が上げられる。海面が流氷に覆われると、流氷が断熱層を形成するから、海面を通しての熱損失は著しく減少し、海氷の生成率も格段に小さくなる。オホーツク海の北西の陸棚部では、冬期の強い季節風によって海氷が沖合いに運ばれ、恒常的な沿岸ポリニアが形成される。大気はこの開水面から盛んに熱を奪い海水を生成するが、生成された氷が沖に流されて生成域に留まらないため、海氷の生成は冬期を通して活発に行われる。海水はその真水成分だけが凍るため、周りに高塩分の海水 (ブライン) を放出する。この沿岸ポリニア域では、その表層に多量の、結氷点に近い低温の高塩分水が

つくられるが、その量は年率にして、0.5 Svにも達するとされる (Alfultis and Martin, 1987). この水は周りの水と混合・変質するが、その量は十分に北太平洋中層水を維持するものとされる。ただし、この評価は衛星観測によるポリニアの開水面の観測結果から推定されたものであって、直接的な観測資料を基にしたものではない。陸棚で作られたこの低温・低塩の水はオホーツク海中央部まで流出してくるまでに、高塩の性質を失い、北太平洋中層水の典型的密度面において、北太平洋で最も低塩の水を与えることになる (永田他, 1992; Talley and Nagata, 1995). この変質過程についてもほとんど解明されておらず、潜航型調査船を適用すべき研究課題はオホーツク海だけでも非常に多い。

このようなポリニア域を中心とした中・深層水の起源となる高密度水の生成はオホーツク海に限らない。わが国の近くでは、日本海北部での日本海固有水の生成機構もこれから解明されるべき課題である。さらに、南極大陸周辺・北極海における深層水の生成問題は、気候変動の予測の問題と関連した重要課題である。南極周辺のポリニアの精密観測は、わが国の国際的な貢献として今後南極観測事業に組み入れられるべき緊急の課題である。

3) 暴風時の表層混合層

海水の流動・拡散が主として等密度面に沿っておこなわれることから、通常の海水の動きが海洋の成層構造の変化や、海水の変質に果たす役割は大きくない。これに対して、海面近くでの高密度水の生成による対流や、海洋中の鉛直混合は直接的に海洋の成層構造に影響するため、その量は少なくとも、海洋現象への影響が大きい。

鉛直混合を引き起こすものの1つとして、洋上を吹く風や波による力学的な攪拌作用がある。表面混合層の力学・熱力学は、シノプティック・スケールの現象としては、世界の海での緩やかな深層水の湧昇との関連において、主躍層の形成に関わっている。また、表層混合層の中に現われる季節躍層を含む種々の構造とその変化の観測は、海面そのものの役割や、熱や水、種々の化学物質の海面を通してのフラックスを決定する正確なモデルの構築のために重要である。

この力学的混合過程は、台風のような悪天候下で最も激しく行われるが、その実体の実測は無に等しい。台風との相対位置、あるいは洋上の気象条件をどのようにして同時測定するか (あるいは通報を受けるか) といった

問題を解決する必要があるが、台風直下でも精密な海洋観測が可能である潜航型調査船の利用価値は高い。相対位置を時々刻々知ることが難しい場合には、いくつかの係留系観測と併用し、ある程度の空間分布を係留系で監視しながら、潜航型調査船観測を実施するような方策も考え得る。

3.3. ファイン・スケール

微速で航行出来、場合によっては水中静止ないしは水塊と共に移動し得る潜航型調査船は、海洋フロントの構造のようなファイン・スケールの現象の観測に威力を発揮するであろう。ただし、運行コストのかかる潜航型調査船をこのような目的に使う必然性は、氷縁域あるいは氷海域のように他の船が近づけない場合を除き、少ないかもしれない。しかし、他の目的観測に付随した特殊観測に限定されようとも、そのような利用価値のあることは常に記憶されるべきであろう。

エンジンを止めて完全に水塊と共に動く実験室として利用する際は、エネルギー消費を最小にとどめ得るから、相当長期の連続観測が可能となる。有人観測のメリットを活かしたそのような運用を考慮すべきである。

3.4. マイクロ・スケール

海中実験室という観点に立てば、潜航型調査船の有効性はより微細なマイクロ・スケールの観測にある。海洋の特性の1つは、著しい成層性にある。自由落下装置の利用を中心とする海洋の微細計測は、厚さが mm スケールの構造が大洋中のいたるところに存在することを明らかにした (e.g., 永田, 1974, 吉田・長島, 1990). このような研究のきっかけは MBT や CTD 等の鉛直連続観測機器からの情報による所が大きい。しかし、最初に自由落下装置を導入した C.S. Cox が、開発に際してのヒントはカナダのある研究者の潜水艦を利用した研究から得たと語っていた。これは、潜水艦のへさきにブームを取り付けて、それに張りつけたサーマル・フィルムで水温変動場の計測を行なったもので、潜水艦利用の計測がマイクロ・スケールの研究の契機を与えたことは記憶されてよい事柄であろう。

海水の密度が水温と塩分の2つの要素から決まること、水温と塩分の拡散係数に大きな差があることから生じる2種の二重拡散現象 (ソルトフィンガー型と安定過剰型)

を初めとして、キャベリング現象、成層を伝わる内部波とその砕波、水の水平貫入等の物理的に興味ある現象が海洋中に存在することが、自由落下装置により次々と見出され、これらの現象と海洋の微細構造の関係が論じられてきた。これらの現象は海洋中の混合・拡散・移流を支配する素過程であり、水塊変質に対しても大きな働きをしている。これらの現象のファイン・スケール、メソ・スケール現象との関連の研究、さらにはシノプティック・スケールの現象を論ずる際の拡散係数・混合係数の正しい評価・パラメタリゼーションの研究を深化させることが急務である。しかし、典型的な状況の下での現象の記述は進んでいるものの、一般的な状況下での大規模現象への影響の定量的な推定は、多くの研究者の努力にもかかわらず、余り進展していない。Turner (1978) が指摘した異種水塊が水平に接する場合に見られるインターリーピング現象のように、現象を3次元的に考察しなければならない。二重拡散現象が流れのシアの存在下で、どのように変形され抑制されるのか、またグロスな成層構造と微細構造との相互関係の解明も今後の課題である。微細構造は、海洋中に恒常的に存在しているが、その固有時間スケールは多くの場合、数分ないしはそれ以下である。この時間スケールの二重性をいかに取り扱うためにも、詳細な観測が望まれる。

潜航型調査船は、かなりの大きさを持つから、マイクロ・スケールの観測には船体の影響を避ける工夫が必要である。船首部にブームを取り付け、微速前進しながら測定を行ったり、振動が少ないことを利用してホバリング中の船から、センサー類を上下に繰り出してやることも有効であろう。

具体的な例として、Ohshima *et al.* (1994) が南極海の氷山の側で見出したステップ構造について考察しておこう。氷山の溶解にともなってその側壁に沿って 0℃、塩分 0 の水が海中に供給されることによって生じたものと考えられ、流れの弱い氷山の陰の部分にのみ観測されている。しかし、氷山に近づき難いことなどの観測上の制約から、その空間的広がりには明確でなく、周辺の流れの場も実測されていないため、氷山との関係も類推にとどまっている。この現象は、実験室あるいは数値モデルの中で再現されているが、観測結果とはステップ構造の層厚のような特性において一致していない。明確な結論を得るためには、海洋中の実験室とみなせる潜航型調査

船を適用すべき現象の典型的な一例であろう。

しかし、潜航型調査船の適用には種々検討を要する問題がある。先ず、安全性の観点のみならず研究成果を上げるためにも、このような観測では調査船の氷山に相対的な位置を正確に把握する必要がある。さらに氷山に近づくためには、氷山の存在のみならずその形状の把握、氷山までの正確な距離を測定するリモートセンシング技術が不可欠である。氷山全体の形状(特に海面下の形状)や、氷山の融解の進み具合、周辺の海況といった状況把握も不可欠の要素であって、これらの測定が1隻の潜航型調査船が単独で行ない得るのかどうか、また出来るとしてもそれが効率的であるのかも検討されなければならない。マイクロ・ストラクチャーの研究観測でも、真の成果を得るには総合的なプロジェクト観測に発展すべき要素を含んでいることは常に留意すべきである。

センサーとしては、この場合でも、水温・塩分の鉛直微細構造を測点を密に(あるいは連続して)求め得れば、それだけでかなりの成果が期待される。これに流速の鉛直プロファイルの観測が出来れば理想的であり、センサー・測器としては特殊なものが要求されるわけではない。

3.5. 深度レンジ

一般に海洋の深・底層の現象の時間スケールは長く、季節変動は認められない。従って、条件のよい時、例えば夏期に、観測すれば十分であり、潜航型調査船を必要とする理由は乏しい。塩分極小層で代表される海洋中層についても、顕著な季節変化は認められていない。しかし、一般に亜寒帯海域では冬期の対流はかなりの深度に及び、場所によっては海底近くまで及ぶ可能性が高く、そのような場所では深層までの観測を要求されよう。少なくとも、中層水の密度面の深さまでは季節変化ないしは年々変化が存在するかどうかについて、詳細な観測が必要である。(太平洋の西部亜寒帯循環域では 100m-200m 水深に存在する安定した塩分躍層により、海面の冷却にともなう冬期の対流はこの躍層上面までに限られる。このような塩分躍層の詳細な冬季の観測は潜航型調査船の必要性の1つである。)

従って、特殊な現象を除けば、潜航型調査船による主たる観測対象深度は、海洋の表層・上層となるであろう。これが、潜航型調査船の潜航最高深度を 300m と想定した理由の1つである。もちろん、亜寒帯域の冬期の観測は

少なくとも海洋中層まで行う必要があり、CTD等の測器を調査船から上に向けて繰り出すとともに、深層まで下ろし得るウインチを備えるべきでもある。

3.6. 時間変動

以上の議論において、主として空間スケールを中心に考えてきたが、もちろん海洋現象を分類する際、時間スケールによる方が便宜である場合が多い。また、観測結果の整理に当り、時系列解析の手法は一般に非常に有効な手段となる。しかし、潜航型調査船のような可動性のプラットフォームを用いて時系列データを取ることは、微細ステップ構造に生じる短周期の内部波の観測のような限られた現象を除いて、実用的であるとは考えられない。もちろん、航走しながら諸量の空間連続観測を行って、その測定結果の波数スペクトルを求めることは考えられる。時系列的データについては、係留系観測を主体に考えるべきである。

もちろん、季節変動やそれより長い変動を対象とした場合、他の通常観測船では困難な冬期あるいは荒天時の観測を担当し、時系列を完成させるための補完観測は潜航型調査船の主要な任務となることは言うまでもない。

4. 観測手法からの考察

4.1. リモート・センシング、位置決定

海洋中での光ないしは電波の伝搬距離は非常に短いから、マイクロ・スケールの構造を調べる場合を除いて、光学的測定は考えにくい。従って、覗き穴のような使用目的の限られたものは潜航型調査船では考慮すべきではない。リモート・センシングの観測の主体は音波的手法に限られてこようが、水深測量・漁探の原理による各種測定は最大限に活かすべきである。

上向きに発射された音波が戻ってくる時間からの氷厚の連続測定は、最も潜航型調査船の早急な活用が望まれる測定項目である。さらに、調査船の冰山に対する相対位置の決定に用いられるような音波探査技術は、船の安全運行上からも不可欠である。また、精度のよい連続的な水深の計測は、あらかじめ観測海域の水深分布を求めておけば、観測位置の正確な決定に役立てることが出来る。さらに、音波的な観測は、海水の生成初期のアイス・クリスタルを定量的に把握するのに大きな役割を果たす

と考えられる。これには、最適の音波周波数の決定のような開発要素も存在するであろう。また、生物学的・水産学的な情報は魚探類似の技術によって容易に得ることが出来る。

音響測器としては ADCP を上方・下方双方に適用して流速場の連続的測定を行なうことは容易であろうから、これによる流速場の測定は基本的な測定項目となろう。また、インバーテッド・エコーサウンダーを用いての水温・密度躍層の位置の連続測定は表層混合層の変動を記録するのに有効な手段を与えよう。

潜航型調査船の位置決定は慣性航法が主体となろうが、上述の水深分布測定やトランスポンダーを設置しての相対的位置決定、あるいは次に述べる有索型のブイを水面まで繰り出しての衛星航法も考慮すべきであろう。

4.2. 有索繰り出し型計測器

海水の密度が水温と塩分及び水圧（水深）で決まることから、水温と塩分場の正確な測定が海洋観測の最も基本的なものとなる。従って、海洋物理学的見地に立てば、潜航する調査船から CTD のような測器を上方と下方に繰り出してやる事が出来れば、それだけで多くの成果を得ることが出来る。もちろん潜水時間の制約があるから、航行を続けながら観測の出来る XBT・XCTD のような投げ捨て型の測器も非常に有効な計測手段となろうから、重りの代わりに浮子を付けた浮上型の XBT 等の開発が望まれる。従来ほとんどデータの得られていない冬期の亜寒帯海洋の計測は、このような基礎的測定機器を備えているだけでも、海洋研究上の意義は計り知れないものとなる。

現在 CTD に O_2 センサーを付けての計測が広く行なわれているが、測定項目の増加はそれだけ海洋の特性を詳しく知り得ることになる。特に O_2 のように、水塊の寿命に関連する時間スケールを表現する量の測定は重要である。もちろん、どのような量であれその分布の測定は、より精密な水塊分析を可能とし、混合過程等の物理過程を類推して行く上で大きな力を発揮するものである。潜航型調査船をより有効に活用するために、CTD に併設出来るような各種のセンサーの開発が望まれる。

原理的にはこのような測器は、潜航中に船内に取り込む必要はなく、船外に格納し自動的に繰り出せばよい筈である。ただし、水温・塩分にしても最高の精度を得

るためには、随時、測器・センサーのキャリブレーションを行なう必要が生じるし、他のセンサーでは同時採水による比較的頻繁な検定を必要とするであろう。測器を潜航中の船内に取り込めるようにするか、または採水器の併用を行なうかについて、十分の検討がなされるべきである。

有索の自動計器としては水面にブイを送りだして、それにより海面上の気象要素を観測するようなものは、荒天時の混合過程の研究には不可欠なものとなろう。また水面ブイは、衛星利用の位置決定、陸上または他の通常観測船等との通信連絡手段としても考慮すべきである。また、氷海においては調査船の真上の氷の状態の把握は安全航行の関連からも重要であり、どのような計測が可能か、有索型の計器も検討すべき課題である。

4.3. 測器・サンプルの船内への収容

海洋各層の海水の採水が可能となれば、上述のように各種のキャリブレーションが可能となり、より精度の高い計測が可能になる。そのためには、通常の観測船で用いられているようにCTDの本体に多数のロゼット・サンプラーを付け、CTDもろとも船内に取り込むような方策が有効となろう。また、採水により化学的分析が可能となるため、測定項目が非常に増える、プランクトン等の生物学的な計測も可能となる。もちろん、船内収容が行えれば、プランクトン・ネットによる生物学的な計測も同様に行い得ることになる。ただし、船内の倉庫の利用スペースは非常に制限されるから、調査船の潜航位置での大量採水は、容易であるにしても余り期待すべきではない。ろ過程度の処置はとれても、実験室の広さの制約や換気上の問題から、化学試料の前処理作業については、慎重な検討が必要とされる。

4.4. 調査船外部設置型観測

特にマイクロ・ストラクチャーの計測では、船首ブーム、潜望鏡、あるいはブリッジ等へ、潜航前に機器設置して計測にあたることが考えられる。このような特殊観測に備える場合に、どのようなものを予め考えておくべきかも、検討項目の1つとなろう。

4.5. 自動有索・無索航行機器の利用

以上に述べてきた計測の多くは、静止ないしは微速航行中の潜航型調査船から観測するものであるが、調査船が低速のために3次元的な海洋構造の把握には自ずから限界を生じるであろう。もちろん、複数の潜航型調査船を同時に同じ海域に送れば問題は大幅に改善されようが、簡単に実現し得るとは考え難い。従って、1台または2台の自動有索航行のできるビークルに各種のセンサーをつけて送り出し、潜航型調査船からこれをコントロールすることが出来れば、観測の量・質が格段に改善される。

また、このようなビークルは、氷山の真近のように調査船が接近することが危険な場所の観測をも可能とする。さらに、索の長さを大きく取ることができれば、若干の危険のともなう氷海の下奥深くにあらかじめ送り込んで概略の海況を把握し、それをもとに潜航型調査船を運行させるという利用法も考えられる。また、ここで考えている最高潜航深度よりも深くに精密な観測を行なう必要のある場合にも、自動有索航行の出来るビークルはその有効性を発揮するであろう。

もちろん、有索型のビークルは、繰り出し得る水平距離の制約が大きいから、無索型のビークルに置き換え、潜航調査船をその母船として、潜航中に発進・回収をはかることが、より望ましい。前に述べたように、潜航型調査船を必要とする海域における将来の観測は、安全性の問題から考え、可能な限り無索の自航型のビークルに置き換える必要がある。自動有索航行機器の利用から、自動無索航行型の機器へと発展させていくことは、完全無人観測への発展へ向かう一段階としても大きな意味を持つであろう。

4.6. 測器の設置・回収のような作業

海底の特定された場所に、計測器を設置し回収するような作業艇として、ここで考えているような潜航型調査船を利用することは得策ではない。そのような潜水作業艇はこの調査船とは別個に設計されるか、可能な限り従来の観測船ないしは作業船を用いるべきである。効率的運用や費用の面から言って、潜航型調査船は、万能型ではなく、単能型であるべきであることを改めて強調しておきたい。

5. おわりに

潜航型調査船は、建造においても運用においても、通常の観測船・調査船に比べて多額の費用を要する。従って、その実現は容易ではないと考える。しかし、ここで述べてきたように海洋物理学の発展や、地球温暖化問題を初めとする気候変動の予測のための海洋研究において、有効な観測プラットフォームとして不可欠なものであることを理解してもらいたい。

もちろん、ここで前提とした潜航型調査船のスペックは非常に限定されたものである。理想的には、潜航したまま高速で太平洋を横断できるような船が要求されようが、エネルギー源の制約があり、それを実現するためには原子力エンジンを導入した巨大な潜航型調査船が必要となる。この小論の目的は、それほど大規模なものを考えなくても、十分に有効な潜航型調査船が成立し得ることを示すところにある。将来の問題として、検討の種として利用していただければ幸いである。

References

- Alfultis, M.A., and S. Martin (1987): Satellite passive microwave studies of the Sea of Okhotsk ice cover and its relation to oceanic processes, 1978-1982. *J. Geophys. Res.*, **92**, 13,013-13,028.
- Curtin, T.B., J.G. Bellingham, J. Catipovic, and D. Webb (1993): Autonomous oceanographic sampling networks. *Oceanography*, **6**, 86-94.
- Dodimead, A.J., F. Favorite and T. Hirano (1961): Salmon of the North Pacific Ocean-II, Review of oceanography of the Subarctic Pacific region. *Bull. Int. North Pacific. Comm.*, **13**, 1-195.
- Keigwin, L., and G.L. Johnson (1992): A plan of action for utilization of nuclear submarine for Arctic research. *EOS*, **73**, 209, 214-215.
- Langseth, M., T. Delca, G. Newton, B. Coakly, R. Colony, J. Gossel, C. May, P. McRoy, J. Morison, W. Smethie, D. Steele and W. Tacker (1994): SCIC EX-93, Arctic cruise of the U.S. Navy nuclear powered submarine USS Pargo. *Mar. Tech. Soc. J.*, **27**, 4-12.
- 永田豊・大谷清隆・柏井誠 (1992): 北太平洋亜寒帯循環. *海の研究*, **1**, 75-104
- 永田豊 (1974): 微細構造. In: 海洋学講座 1 (海洋物理学 I), 東京大学出版会, 207-239.
- Ohshima, K.I., T. Kawamura, T. Takizawa and S. Ushio (1994): Step-like structure in temperature and salinity profiles, observed near icebergs trapped by fast ice, Antarctica. *J. Oceanogr.*, **50**, 365-372.
- 大谷清隆 (1989): 親潮水形成に関わるオホーツク海の役割. *海と空*, **65**, 63-83.
- Talley, L.D. (1991): An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res.*, **38** (suppl. 1), S171-S190.
- Talley, L.D., and Y. Nagata (1995): The Okhotsk Sea and Oyashio region. *PICES Scientific Report No. 2*, 227pp.
- Turner, J.S. (1978): Double-diffusive intrusion into a density gradient. *J. Geophys. Res.*, **83**, 2887-2901.
- 吉田次郎・長島秀樹 (1990): 海洋の二重拡散対流. *ながれ*, **9**, 93-114.