展望・解説

海中のリモートセンシングとこれからの海洋モニタリング*

四 竈 信 行**

Underwater Remote Sensing and Ocean Monitoring in Near Future

Nobuyuki SHIKAMA

1. はじめに

海の水はどのように大洋を循環しているのか。どれくらいの熱や物質を運んでいるのか。その循環の変化がどのように大気循環に影響を及ぼし、ひいては気候変動に関わっているのか。これらさまざまな疑問に答えるためには、まず海洋の循環や構造の実態を観測する必要がある。

本稿では、近年進歩が目覚ましい海洋の観測手法のうちでも特にこれからの海洋モニタリングにおいて重要と思われるものを取り上げて紹介したい。ただし海面下で物理的に測定しうる量に限定する。海面およびその付近のさまざまな情報（例えば海面水温、海面の凹凸、クロロフィル、風、海水などの分布）については、現在、人工衛星により広域の観測が行われているのでその方面の文献をあたられたい。

ところで、海中では大気中と違って電磁波は海水に吸収されてしまいほとんど伝わらない。海面では燦々と太陽が輝いていても、海面から 50 m も潜ればその照度は 100 分の 1 に落ちてしまう。一方、音波は海中を遠方まで伝わる。海洋には、海面下 1000m 付近に Underwater sound channel と呼ばれる、いわば音波に対して Waveguide として働く層があるが、比較的低周波の音波はこの層を 16000km の彼方まで伝わるができる。

したがって海中では、海水の光学的な性質（光の透過率、分光特性など）の分布を測定するとき以外は、もっぱら音波を用いている。

音波を利用して海中の物理量のリモートセンシングを行うとき、大別して

- 1) 音波の伝播時間、
- 2) 音波の周波数の変化、

の測定の二つに分かれる。1)を利用したものが多く、例えば測深機、魚群探知機、長距離にわたって流速や水温の構造を測定する海洋音響トモグラフィなどがある。2)としてドップラー効果を利用した ADCP (超音波式ドップラー多層流速計) がある。以下に、ADCP、海洋音響トモグラフィ、さらに中層フロートを紹介しよう。中層フロートは音波を利用したリモートセンシングの範疇には入らないが、将来の海洋モニタリングにおける柱の一つになるものである。

2. ADCP

ADCP とは Acoustic Doppler Current Profiler の略で、超音波のドップラー効果を利用して多数の層の流速を遠隔的に測定するものである。船を航走させながらも海面下 7~800 m までの流速分布がリアルタイム・モニタリングできるという画期的なものである。1970年代後半に米国で開発・実用化された¹⁾。その後日本でも古野電気株式会社をはじめ数社で同じ原理に基づく機器が作られるようになった。現在、日本では、多く

*原稿受付 1994年11月1日

**気象庁気象研究所

の観測船、調査船、巡視船、実習船などが船底に ADCP を備え、航走しながら海面下の流速分布をモニタリングしている。また ADCP を係留、曳航、海底設置するなどして黒潮、海峡部など従来測定困難であった強い流れを長期にわたって測定できるようになった。

2.1 原理・仕様

ADCP による流速測定の原理・仕様等を筆者が使用している米国 RD Instruments 社の機種（周波数 150kHz、記録内蔵型）を基に述べる。4 個の円盤形トランスデューサより超音波ビームを上方または下方に発射し、海中に存在する微小浮遊物からの散乱波を受信し、そのドップラースhift を測ることでその浮遊物のビーム方向の速さを求める。さらに浮遊物が海水とともに移動することを仮定して水平流速に直すものである。一定時間幅の超音波パルスを毎秒発射し、数分間の平均流速を計算して記録する。このとき ADCP 本体に組み込まれている方位計の出力をもとにして東西、南北方向の流速に分解し、傾斜計の出力により鉛直からの傾きを補正して記録する。この ADCP 本体の鉛直からの傾きは 20° までであれば補正が可能である。鉛直方向には 250m の範囲まで測定可能でこの範囲を最大 128 層（最少の層の厚さ 2m）まで分解して流速の鉛直プロファイルを求めることができる。水平流速の測定精度は平均する時間によって変わるが大体 $2\sim 3\text{cm/s}$ である。水平・鉛直流速、各層の散乱強度、良質データの割合、ADCP 本体の方位や鉛直からの傾きなどが 20メガバイトの EPROM または 60メガバイトのカートリッジテープに記録される。電源としてはリチウム・バッテリーが用いられる。

船底に ADCP を取り付ける場合には、船上から電力を供給できるので、より大きなトランスデューサを用い、周波数も 75kHz と下げて、海面下 7~800m までの流速分布を測定できる。この船底方式の場合、測定される流速は海水の船に対する相対流速なので対地流速に直すためには船の対地速度を求めてその分の補正を行う必要がある。水深が測定レンジの 1.5 倍位までなら海底について測られた速度が船の対地速度を表わすことになるのでこの分を差し引けば良い (Bottom

tracking)。これよりも水深が深い場合には、船の対地速度を GPS などで決定し補正する。

2.2 使用法

ADCP の最も多い使用法は、船底に取り付け、航走しながら海面下の流速分布をモニタリングする方式である。また固定翼あるいは可動翼を持った水中曳航体に ADCP を取り付け、観測船で曳航しながら海面下の流速分布を船底方式よりも精度良く測定する方式もある²⁾。ここでは筆者が用いている海底設置方式と中層係留方式を紹介しよう。

筆者が津軽海峡を通過する流れの流量を測定するために製作したシステムを図 1 に示す³⁾。アルミニウム合金のパイプで作られたフレームの、中心からやや外側に ADCP を鉛直に立てて固定し、中心には超音波式切離装置を固定する。フレームにはさらにガラスフロートを 8 個(全浮力 200kg)取り付けてある。このフレームは鉄製のアンカーの上に乗せられ、両者は超音波式切離装置を通してつながっている。海底の流れによって押し流されないようにアンカーは充分に重くしてあり、空中で約 600kg、水中で約 520kg もある。設置の際は海面より自由落下させる。ただし、着地のショックを少しでも和らげるために、設置点としては海図で判断して底質が砂あるいは貝殻とみられ、かつ海底が平坦と思われる所を選ぶ。回収するときは超音波式切離装置を作動させ、アンカーを切り離してガラスフロートの浮力で浮上させ

図1 海底設置型 ADCP の概略

る。海底設置方式を用いれば、ADCP が揺れ動くことがないので最も精度の良いデータが得られる。

また筆者が黒潮の流量を長期測定するために屋久島と奄美大島の間のトカラ海峡に設置している中層係留方式では、ADCP はシンタクティック・フォーム製のスフェアブイ（直径122cm）の中心軸に沿って挿入、固定される。シンタクティック・フォームは径100~150 μ mの中空のガラスビーズをエポキシ系樹脂で固めたものである。スフェアブイは空中重量約600kgあるが、海中では約450kgの浮力を生ずる。スフェアブイの下にはナイロンロープ、ガラスフロート、ロータ式の流速計、超音波式切離装置、アンカーが連なっている。スフェアブイが海面下約300mにくるように係留系を設置する。回収するときには船を投入点のほぼ真上までもっていき、超音波式切離装置に指令を送りアンカーを切り離して浮上させる。流れが強いときには、係留系が受ける抵抗も大きくなり、係留系全体が少し斜めになってスフェアブイの深度が増す。このスフェアブイの深度変化は圧力計で記録する。ADCP が開発されたおかげで、流れがそれほど強くない中層に ADCP を置き、上層の最も流れの強い部分を遠隔的にかつ長期にわたり安全に測定できるようになった。

2.3 測定例

図2は筆者が海底設置方式を用いて測定した津軽海峡中央部における流速の鉛直分布を表わして

図2 津軽海峡中央部における流速の平均的な鉛直分布。左は断面に直角、右は並行な成分。
実線：1990年8月21日～9月1日の平均、
破線：1991年1月24日～2月4日の平均。
海面下41m層以下のデータが信頼できる

いる³⁾。海底から4mごとに50層、10分間隔で測定したものの10日間にわたる平均である。ただし海面から下方40m位までは超音波ビームのサイドロープの影響が入るため信頼できるデータにはならない。夏季と冬季で流速の鉛直分布がはっきりと変化することが分かる。また海底直上まで平均して30cm/sの強い流れが存在している。

3. 海洋音響トモグラフィー

海洋音響トモグラフィーは1970年代の末に、米国のムンクとウンシュによって提唱された画期的な手法で、海洋中に音波の送信機と受信機を数100km以上離して設置し、音波の伝播時間を精度良く測定して途中の水温や流速の分布を求めようというものである⁴⁾。各国で、現在もなお精力的に開発が進められている。日本では1987年に気象庁が実海域で音波の送受信実験を行ったのを皮切りに、海洋科学技術センターでは高性能の音源の開発に成功、さらにリアルタイム・トモグラフィー・システムの実現へと地道な努力が続けられている。

トモグラフィーのトモはギリシャ語のスライス（薄切り）という意味から来ており、トモグラフィーで断面の構造を画くということになる。海洋音響トモグラフィーは、音波を利用して人体の内部を観察する医療用のCTスキャナーや、地震波の伝播時間を各地で測定して地球の内部構造を探る地震波トモグラフィーなどと同じ発想に基づくものである。ただ海洋では、人体や地球内部を探るのとは異なり、対象とする海域の内部に立ち入ってセンサー（送受波機）を置くことができる。

送受波機は音波の伝播効率の高いSound channelに置かれる。音波を双方向に送受信することにより途中の水温と流速の分布が求められる。それには、まず対象とする海域について、水温、塩分の観測データを集め、音速の平均的な分布を求めておく。この平均的な音速分布に対して、送波機から海面や海底で反射することなく受波機に到達する音線とそれに沿った伝播時間を可能な限り多く計算しておく。現実の海洋では中規模渦や内部波などが存在し、平均的な音速分布はわずかな擾乱を受ける。しかし、この音速分布の擾乱は

音速の絶対値に比べて非常に小さいため、音線はほとんど影響を受けないが伝播時間はわずかに変わってくる。音速の擾乱と流速を未知数として、積分方程式を解けば音線に沿った音速分布と流速分布が得られる。実際の海洋では音速の変動はほとんど水温の変動によっているので、音線に沿った水温分布が得られることになる。

海洋科学技術センターで開発を進めているリアルタイム・トモグラフィー・システムは係留された受波機が受信したデータを海面に出したブイを通じて、海事通信衛星(インマルサット)に送り、陸上にいて海中の広域にわたる水温や流速の分布の変動をモニタリングしようというものでまさにこれからの海洋モニタリングの柱の一つとなる⁵⁾。

4. 中層フロート

中層フロートとは、海洋中をほぼ一定の深さに沿って周囲の水とともに流れ、しかも定期的にその位置を確かめることのできるシステムを備えたフロートである⁶⁾。このフロートを追跡すれば中層、さらには深層の流れを広域にわたって直接的に測ることができる。1955年、英国のスワローによって開発されたスワロー (Swallow) フロートを皮切りに、1970年代に米国のウェップとロスビーによって開発され今でも北大西洋を中心に大いに使われているソーファ (SOFAR) フロート、1980年代にロスビーによって開発されたレイフォス (RAFOS) フロートなどがある。

ソーファフロートの場合は、流れていくフロートが音波信号を発信し、それを海中数か所に設置された受信局が受信し、受信時刻を記録する。1～2年後に船を出して受信局を回収し、記録を解析してフロートの軌跡を知る。レイフォスフロートではソーファフロートの機能を逆転し(そのためSOFARを逆に読んでRAFOSと名付けられた)、海中に音源を設置し、フロートは音波信号を受信してその時刻を記録する。1～2年流れた後、重りを捨てて海面に浮上し、人工衛星を通じてデータを陸上に送信する。レイフォスはソーファに比べてとき、フロートを小型にできる点、データの回収のために船を出さなくてもよい点が

勝っている。しかし、いずれも1～2年後にデータが取得されるのでモニタリングには適さない。

以下に紹介するアラスとスローカムはまさにモニタリングを視野に置いたフロートである。

4.1 アラス

1980年代の末にカリフォルニア大学スクリプス海洋研究所のデイヴィスは、従来の中層フロートの殻を破る画期的なフロートを開発し、これをALACE (アラス) と名付けた⁷⁾。ALACE とは Autonomous Lagrangian Circulation Explorer の頭文字をとったものである。アラスは浮力を定期的に調整することで、海面と、あらかじめ深度を設定された中層との間を50回以上往復することができる(図3)。中層にいる時間を例えば20日に設定すると、20日間中層を流れた後、浮力を増して海面まで浮上し、1日浮いている間にアルゴシステムでフロートの位置を求め、また海中にいた間の水温、水圧、電池電圧などのデータを送信する。1日経つと、浮力を減らして元の深度まで戻り、中層の水とともに再び流れ続ける。20日後に再び浮上する。このようなサイクルを50回以上繰り返すのである。中層の流れは、海面において、沈んだ時の位置と、つぎに浮上した時の位置を結ぶことにより推定される。このようにして4～5年にわたり、中層の流れをよりリアルタイムに近い形で知ることができる。また中層から海面まで浮上するときに水温の鉛直分布を測って送信することもできる。

図3 アラス (ALACE) の概略

構造・機能

アラスの外形は、長さ107cm、直径17cm、肉厚9.5mmのアルミニウム管である（図4）。管の耐圧は約2400m。上端から長さ70cmのアルゴスアンテナが突き出ている。アンテナの少し下方にダンピングディスクが取り付けられる。これはフロートが海面に浮いている時、波によって沈められるのを抑え、アンテナの送信状態を良くするためのものである。フロートの空中重量は約23kg。内部構造は三つの系に分けられる。一つは浮力調整系、一つは種々の機能を管理するマイクロプロセッサ、一つはデータを送信するアルゴス送信機とアンテナである。浮力調整系は、オイル溜とフロート外部に取り付けられたブラッド（ゴムの袋）、これら両者間でオイルを移動させるためのポンプとモータ、バルブから成る。この系は閉じていてオイルが外に漏れることはない。オイル溜から外部のブラッドにオイルを移してふくらませれば、フロートの自重は変わらないが体積がふえるので浮力が増し浮上する。逆にブラッドからオイル溜にオイルを戻せば、フロートはもとの体積に戻り浮力が減少し、沈降して元の深度でバランスすることになる。なおフロートの内部は0.7気圧に保たれているので、オイル溜とブラッドの間にあるバルブを開くことにより、電池を消耗せずにブラッド内のオイルを溜に戻すことができる。

電源には、アルカリまたはリチウム電池が用い

られる。エネルギー収支の一例として、1か月間1000m層を流れ、浮上して海面で24時間にわたり1分ごとに32ビットのデータを送信とした場合、電池の全エネルギーのうち、およそ57%が浮上する際高い外圧に抗してブラッドをふくらませるために使われ、37%はデータの送信に、6%が制御回路、データの取入れ、クロックなどに使われ

図4 アラス (ALACE) の構造

る。将来、測定すべき項目がふえてデータ量が飛躍的に増せば、ブラッドをふくらませるために使われるエネルギーの割合は、はるかに小さいものとなる。

またフロートの沈降、浮上に要する時間は、例えば650m層を設定深度とした場合、沈降に約3.5時間、浮上に約0.5時間である。

アラスによる観測

デヴィスは1990年1月に南極周極流を測定するために南米南端と南極大陸との間のドレーク海峡に8個のアラスを投入したのを皮切りに、1994年3月までに東太平洋、南太平洋に計175個のアラスを投入してデータを取得している。ほとんどの設定深度は750~900mである。これらのうち15台のアラスは、中層から浮上するときに水温のプロファイルも測定し、アルゴス経由でそのデータを順調に送信している。

図5に示すのは筆者が1992年1月24日に気象庁・凌風丸の協力を得て、24°N、137°Eに投入したアラスの軌跡である。設定深度は約600m、浮上周期は26日である。

投入後、1994年2月28日に石垣島付近の浅瀬で最後の交信を行うまでに計29回の浮上を行っている。ベクトルの間が途切れているのは、浮上している1日の間に表面の流れによって流されるためである。中層でのフロートの動きは複雑である。25日間でほとんど動かないこともあれば、1992年11月9日から12月5日のように24cm/sで動いたこともあった。大体3~4cm/sから10cm/s前後のことが多い。124~137°E、19~29.5°Nの範囲を動き回っていて、東方はるかに流れ去る様子を示さない。浮上するたびに、海面に1日浮いており、この間にアルゴスシステムにより位置が5~8回、平均6.8回決定されている。位置決定の精度は、150m、350m、1000mの3段階に分かれている。

4.2 スローカム

現在米国のウェブにより開発中でまだ実用化されていないが、近い将来、海洋モニタリングの中心的測器となるであろうスローカム——それはもはやフロートと呼ぶのは適切ではないかもしれないが——について最後に紹介したい。その名

図5 筆者が投入したアラス (ALACE) の軌跡

前は、今からおよそ 100 年前に、史上初めて単独でヨットを駆り、世界一周を成し遂げた人物 Joshua Slocum にちなんで付けられた。スローカムは海中の温度差を特殊なワックスの伸縮に変えることで、動力を取り出す。1 日に 6 回、海面と中層の間を往復し、海面に出るたびに、測定してきた水温や塩分さらには化学成分の鉛直分布のデータを人工衛星に送信し、かつ衛星から次にする仕

事やどこへ行くかの指示を受ける。海中をグライダーのように斜めに上昇・下降し、翼の向きを変えることで、自分の方向を自由にコントロールすることができる。このことから海面と中層の間の流量を求めることもできるし、全海洋を一周させることもできる。筆者が 1994 年 3 月にウェブを訪ねたとき、スローカムの室内テストを繰り返していた。ワックスを主体とした Thermal engine は順調に行っており、1～2 年のうちにフィールドテストに入るという。

5. おわりに

近年、海洋観測の技術は目覚ましい進歩を遂げつつある。気候変動が人類にとって非常に重要な問題となっている今日、海洋の広域、長期にわたるモニタリングはまことに夢の多いフィールドと言えよう。

参考文献

- 1) Joyce, T. M., Bitterman, D. S. Jr. and Prada, K. E.: Shipboard acoustic profiling of upper ocean currents, *Deep-Sea Research*, 29-7A (1982) 903-913.
- 2) 金子 新他: 曳航式 ADCP による黒潮流動場の可視化, 九州大学応用力学研究所報, 68 (1989) 101-118.
- 3) 四電信行: 海底設置型 ADCP により実測された津軽海峡内の流量変動, 月刊海洋 (印刷中).
- 4) Munk, W. and Wunsch, C.: Ocean acoustic tomography; a scheme for large scale monitoring, *Deep-Sea Research*, 26A (1979) 123-161.
- 5) 中埜岩男: 海洋音響トモグラフィ技術の研究開発, *JAMSTEC*, 5-3 (1993).
- 6) 四電信行: 中層フロートからスローカムまで, 月刊海洋, 号外 No. 4 (1993) 98-109.
- 7) Davis, R. E., Webb, D. C., Regier, L. A. and Dufour, J.: The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE), *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 9 (1992) 264-285.