

海洋の観測

我々は、ほとんどのリアルタイムに天気図から高・低気圧分布などの大気の様子を知ることができる。大気に比べ、海洋中の流れや海水の性質を計ることははるかに難しく、またコストもかかる。そのため、海洋の様相を天気図のように知ることは、よほど多くの観測船を動員しない限り難しかった。しかし、近年は人工衛星などを利用した新しい観測技術の進展により、海の天気図を描くことはもはや夢ではなくなりつつある。本解説では、海洋観測の中心となる水温・塩分及び流れの観測をその歴史も含めて解説する。

1. 海洋観測の歴史

はじめて地球規模で海洋の流れや海水の性質を観測したのが、1872 - 1876 年のイギリスのチャレンジャー号による世界一周探検航海であり、この観測により今日の海洋学の基礎が築かれた。今につながる精度の高い水温測定や採水観測が行われるようになったのは、1893 - 1896 年のノルウェーのナンセン(Fridtjof Nansen, 1861-1930 年)によるフラム号の北極海漂流航海からである。北極点一番乗りをめざした探検としても有名なこの航海では、ナンセン自らが採水器(ナンセン採水器)を考案し、北極海の深層まで及ぶ海洋観測を行っている。ナンセン採水器には、転倒式の水銀温度計が取り付けられ、温度計は転倒することで水銀を切りその深さで測った温度を固定するしくみになっている。温度計に被圧型と防圧型の 2 種類を使うことで、その差からその水圧(水深)が知れる。このようなナンセン採水器による観測は、1980 年代までの 100 年近くにわたって海洋観測の主流を勤めてきた。

2. 水温・塩分の観測

海水の密度は、ほぼ水温、塩分の関数として決まる。密度は海洋の力学を支配する重要な要素であるため(第 24 章参照)、水温と塩分の観測は、昔から海洋観測の中心であった。前述した転倒温度計付ナンセン採水器にとって代わり、現在もっとも一般的に精度よく水温・塩分を測る機器として用いられているのが CTD である。伝導度 (conductivity)、水温 (temperature)、水深 (depth) の、それ



図 1：ロゼット採水システム（左）と船上での採水作業（右）

ぞれ頭文字をとった測器であり、それぞれの値を連続的に計測できる。CTDの一般的な用いられ方としては、アーマードケーブルと呼ばれる電気信号を伝えられるワイヤーを用いて水中につり下げ、水温・塩分の値を船上でモニターする方法である。通常、海洋観測船では、CTDはロゼット採水システム（図1）とともに用いられる場合が多く、取得したい深度での採水を船上より指令できる。CTDによる観測は高精度なデータが得られるが、船を使用する必要があるため、コストがかかりすぎるという問題がある。そんな中で、プロファイリングフロート(profiling float) という測器が開発され、海洋学に革命をもたらしつつある。このフロートには、CTDが搭載され、所定の深度（密度）に漂流し、設定された時間ごとに海面まで浮上するように設計されている（図2）。浮上の際に、CTDにより水温・塩分のプロファイルを測定し、フロートの位置とともに衛星経由でデータを送信する（図2）。2000年よりアメリカが中心になって、このフロートを世界中の海に常時3000個以上漂流させようという、アルゴ(Argo)計画が立ち上がった。そして2007年11月、目標の3000個が達成され現在に至っている。3000個を維持するには年間800個のフロートを投入しつづけなければならない。日本はアメリカに次いでフロートの投入に貢献している。このアルゴ計画により、従来より1オーダー大きい数の水温・塩分データがほぼ全世界をカバーしてリアルタイムに得られるようになった。また、アルゴ計画によるデータは基本的に公開されている。

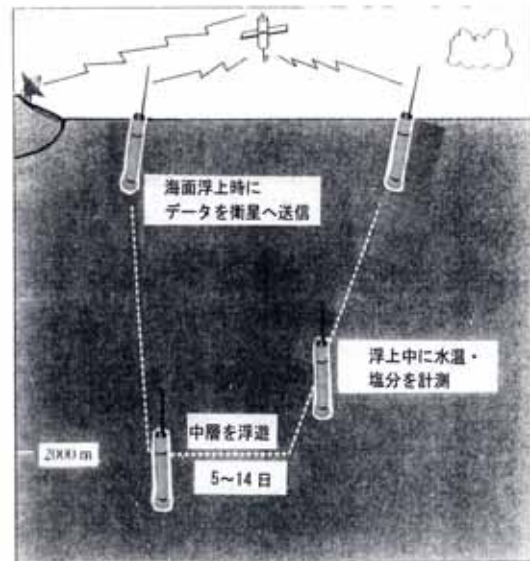


図2：プロファイリングフロート：中層に浮遊し一定時間ごとに浮上して、その際の温度・塩分の鉛直プロファイルを位置とともに衛星を介して送る

3. 流速の観測

海流の観測には、大きく分けて、直接測流と地衡流の関係を利用するものがある。直接測流にはラグランジェ的手法（流れに乗って計る方法）と、オイラー的手法（固定点で計る方法）がある。プロファイリングフロートによる中層の軌跡追跡はラグランジェ的な測流の代表といえる。人工衛星の追尾による表層ブイも表層の流れをラグランジェ的に測るものとして、大いに利用されている。図3aに示すように表層ブイは海面に浮いている送信部と水深15m以近に中心を持つドロッグ（抵抗体）からなっており、ブイが風の影響を直接受ける海面を避け、抵抗体付近の海水の動きに従うようになっている。観測例として、1999年オホーツク海で計20個投下された表層ブイの軌跡を示す（図3b）。この観測によって、サハリン島東岸沖に幅約100kmの強い南下流（東樺太海流）があることが、はじめて実測によって確かめられた。

オイラー的な測流の代表は係留系システムによる流速計・ADCPの長期連続観測である。係留系システムとは、海底の重りからロープやワイヤーを立て上げ一番上に浮きを付けて張ることによって固定点を作るシステムで、流速計などをロープやワイヤーに固定する（図4a）。重りのすぐ上には切り離し装置が付いており、船上より超音波で指令を出すことによって切り離しをかけ系を回収する。流

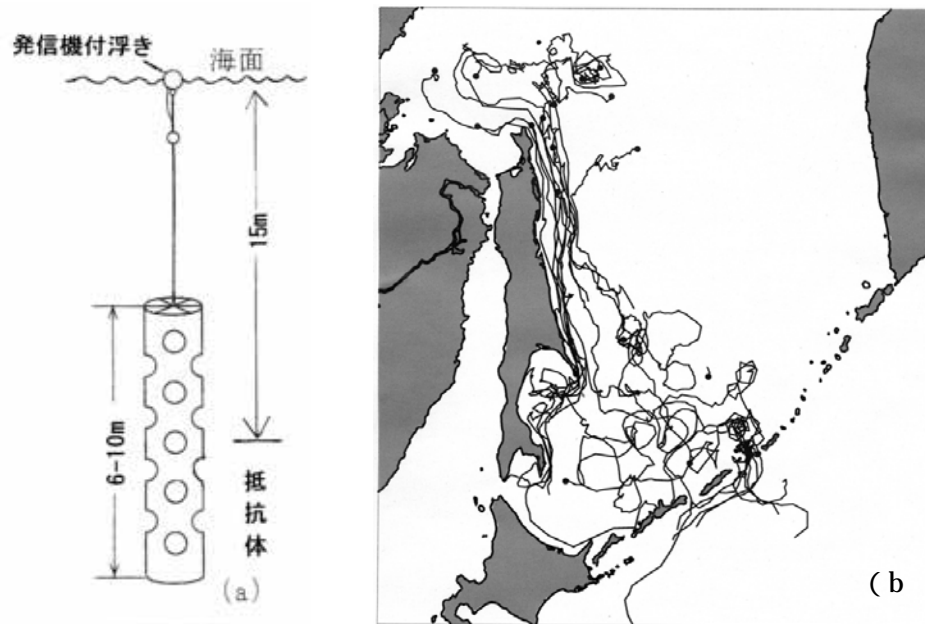


図3：(a) 表層漂流ブイの形状と、(b) オホーツク海に投下した20個のブイの軌跡(1999年8月～2000年2月)。Ohshima et al.(2003)より加筆。

速計は、プロペラやローター式のもの長きにわたって使用されてきたが、最近これがADCPにとって代わるようになった。ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)は、超音波を発射し、その反射のドップラーシフトから流速を測定する。3ないし4個の音源兼受信器から、超音波を発し、反射してきた超音波のドップラーシフトから、反射させたものの速度を測定する。測定するのは超音波の方向の成分である。3または4方向の成分を合成して水平成分を測定する。返ってくる時間により、測器からの距離がわかり、そのため、1ヶ所でなく、鉛直分布がわかるのが特長である。超音波を反射させているのはプランクトンなどの浮遊物質や温度場の乱れなどといわれている。ADCPは船底に穴をあけて船に設置することもでき(図4b)、航路に沿って上層の流速プロファイルの取得が可能となる。最近の観測船はADCPが標準装備となりつつある。

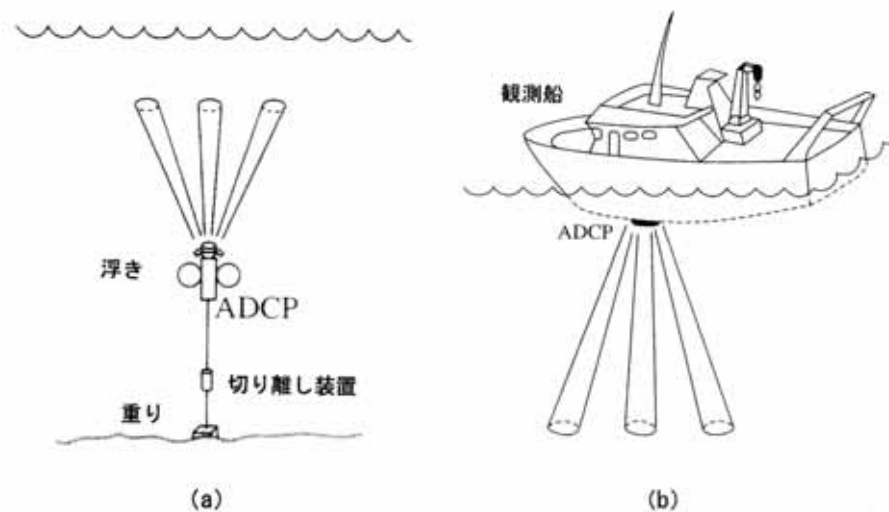


図4：ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)による、流速の鉛直分布の観測。(a)係留系による長期連続観測。(b)船底設置型。柳(2002)より加筆。

HFレーダー(High Frequency Radar)は表層の流れを面的に連続計測できるもので、海流のモニターに実用化されている。陸上の局からHF電磁波を発射し、海面の波浪成分とのブラッグ散乱共鳴を利用して海面付近の流れを計測するものである。一局のレーダーからはアンテナの視線方向の流速成分しか得られないので、適度に離れた2-3局のレーダーからの同時観測を行う必要がある。観測例として、北海道北部の宗谷海峡付近に設置された3台のHFレーダーから算出された流速ベクトルの分布図を示す(図5)。このような流速場が1時間ごとに観測され、リアルタイムで公表されている。

以上の直接測流は1970年代になるまでは技術的に難しく、限られた範囲でしか用いられなかった。それまでは、海流を知る方法としてはもっぱら地衡流の関係(流れによるコリオリの力が水平圧力傾度力と釣り合うという関係:第24章参考)を用いていた。この方法では、深い所までの水温・塩分分布さえわかればよく、深い所で流れがない(圧力傾度がない)という仮定があれば流れが求まる。海水の密度は水温・塩分で決まるので、流れがないとする深い面(無流面・基準面と呼ばれる)に対して、その上に乗っている海水の重さがわかり、圧力が計算できることになる。圧力分布がわかれば、原理的に地衡流の関係から流速が計算できる。

表層の流れは、海面の凹凸(高度)がわかれば地衡流の関係からわかることになる。北(南)半球では海面の高い方を右(左)に見て流れることになる。人工衛星搭載の海面高度計による観測が、現在表層流のモニターに非常に有効な手段になっている。人工衛星からマイクロ波を放射し、海面で反射して返ってくる時間から衛星と海面の距離を測定するという手法である。衛星の位置が正確にわかれば、海面の高さが計算できる。海面の傾きから圧力傾度がわかり、表層の地衡流が計算できる。ただし、我々は平均海面水位(ジオイド)自体を精度よく知ることはできない。従って、海面高度計の観測では絶対流速を知ることができないが、変動分だけは計算することができる。衛星が高度計を使って全地球をカバーするのに2週間程度かかるので、全球の表層流を2週間ごとに知れることになる。



図5: 海洋HFレーダによる表層流の観測例: 空間分解能約3kmで表層流速が得られる。2003年8月17日20時の例。Ebuchi et al.(2006)より加筆。毎時のリアルタイムデータは、<http://www.woc.lowtem.hokudai.ac.jp/hf-radar/index.html>にて公開されている。

このような観測は1993年以降継続して行われている。

海面高度計による表層流モニタリングと前述したアルゴ計画(プロファイリングフロート)による水温・塩分及び中層の流れのリアルタイムモニタリングを合わせることで、海の天気図も一挙に現実的なものとなった。但し、これらのデータは全球で定時に得られるわけではなく、十分な分解能があるわけでもない。現在では、これらのデータを数値モデルに取り入れて、モデルとデータの両方を最適に反映させてデータセットを作ること(データ同化)が試みられており、海の天気図作りや海の天気予報がより現実的、実用的なものになりつつある。