

海洋の観測

Oceanographic Observations

竹内 謙 介*

Kensuke Takeuchi

1. はじめに

我々は毎日の様に天気図を見て高気圧や低気圧の分布を、ほとんどリアルタイムに知ることができる。しかし海洋の地球規模的な様相を天気図の様に見ることは、つい最近まで夢でしかなかった。海洋観測をほとんど観測船に頼っていた時代、広い範囲を短い時間でカバーすることは、よほど多くの観測船を動員しない限り不可能だった。その事は、例えば一台の車で日本全国を回りながら気象観測をして一枚の天気図を書くことを想像してみればわかる。ようやく最近、その事情は大きく変わりつつある。人工衛星や係留ブイによる観測で、かなりリアルタイムに近い形で、海の「天気図」を見ることが可能になりつつある(図-1)。その意味で現在は海洋観測の革命期といっても過言ではない。

2. 何を何のために測るか

古来より航海のために、海流に関する情報が必要だった。これは学問的興味からも、海洋循環を知るためには必要である。また、気候システムにおいて海洋が運んでいる熱は重要な役割を果たしているが、これにも海流の測定が必要である。この様に、海流は常に海洋観測の重要な要素であった。

海岸における潮位の観測は海洋観測でも歴史の古いものの一つであるが、海面の高さの分布は海洋力学にとって大きな情報である。地球の回転によるコリオリ力のお陰で、また、海流の情報をももたらしてくれる。

漁業や気候変動の研究などには海水温も重要な要素である。水温は最も容易に観測できることもあって、最も多く観測されている要素でもある。水温は海水の密度を決める最も重要な要素であり、海水の力学的研

究にも不可欠である。中でも、海面水温は大気と海洋の熱のやりとりに強い影響力を持ち、気候変動の理解に欠かせない要素として特に近年注目を集めている。エルニーニョはそのよい例である。勿論、海面における熱、水蒸気、運動量、化学物質のフラックスそのものの観測も重要性が増している。

海水の大きな特徴は塩分があることである。海水の塩分は塩化ナトリウムを中心とする塩であるが、地球上のどこでもその組成は非常に均一であるため、塩分と言う一つの値で代表することができる。塩分も水温とともに海水の密度を決める二大要素の一つであり、海洋力学に重要なことは言うまでもない。

海洋中の化学物質は海洋生物の生態に影響が強いのは勿論、いろいろな元素の地球規模での循環を知る上でも重要である。最近では二酸化炭素が話題になっている。海洋は人間活動に伴って排出される二酸化炭素の2, 3割を吸収していると言われているが、それがどの様に海洋中を循環しているかを知ることは、今後大気中の二酸化炭素の振る舞いを予想する上で欠かせない。海洋汚染など、環境問題にも重要なことは言うまでもない。また、化学物質はトレーサーとして海洋循環を知る上でも大きな役割をしている。

そのほか、海洋ではいろいろな要素が観測されている。海洋中の生物は勿論、それ自体、海洋研究の重要な対象である。海洋底の堆積物は、過去の地球の歴史に関する貴重な情報源である。海の波は、海を仕事場とするものには重要な要素である。海洋中の乱流も海洋循環研究には必須の要素である。しかし、ここで取り上げるにはスペースや私の能力を越えている。

3. 流速の測定

海水の流速を測定する方法は直接的な測定と地衡流の関係を用いて観測する方法に、直接的な方法はさらにオイラー的な方法とラグランジェ的な方法に分けることができる。

*北海道大学低温科学研究所教授

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目

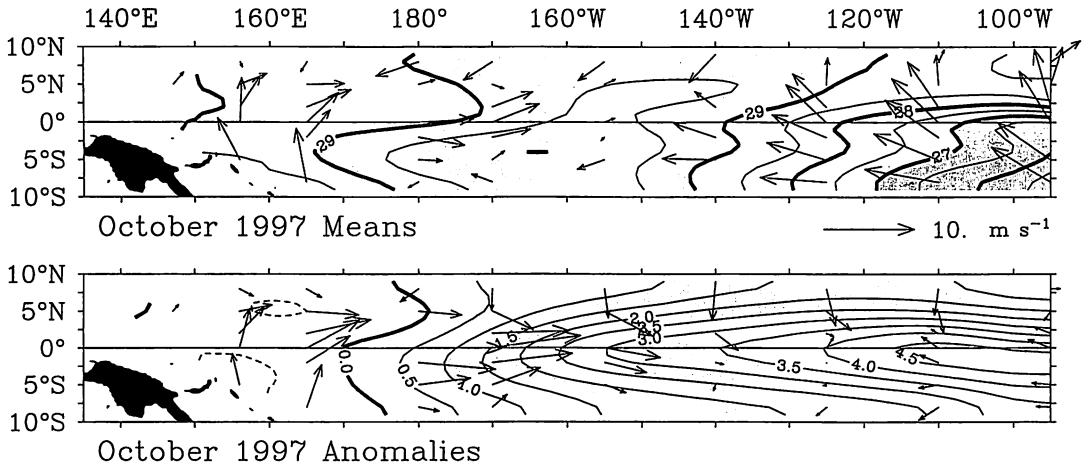
TAO Monthly Mean SST ($^{\circ}\text{C}$) and Winds (m s^{-1})

図-1 TAO (Tropical Atmosphere Ocean Array) によって観測された海面水温 (等高線) と海上風 (矢印) (上段) と平年からの偏差 (下段). エルニーニョが起きていることが分かる. (Climate diagnostic bulletinより)

注意すべきは、現在流速を測ると言う場合、殆どその水平成分を測ることを意味しているということである。大規模な海洋循環では、流速の鉛直成分は一般に二桁以上小さいため、わずかな角度の誤差により、水平流速が鉛直流速に混入してしまう。そのため、鉛直成分の観測は間接的なものととまっている。

3.1 地衡流の関係を利用する方法

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。そのため、海流を知る方法は地衡流の関係を利用した方法に頼らざるを得なかった。この方法は流れによるコリオリの力が水平圧力傾度と釣り合うことを利用するものである。つまり、水平圧力傾度がわかれば、その場所でのコリオリの係数から流れの水平成分を計算することができる。

地衡流計算は直接測流が広く使われるようになった現在でも重要性を失っていない。その一つの理由はこの方法で得られた流速場が時間的にも空間的にも比較的大きな規模の現象をより良く反映していると考えられるからである。この方法は、圧力場をどう求めるかにより、いくつかの方法がある。

(1) 水温、塩分による方法

もっとも一般的に行われる方法で、水温や塩分の分布の観測の、いわば副産物として行えるところが長所である。この方法は、海水の密度場をまず求め、それ

から静水圧の関係 (大規模な現象ではかなり良く成り立っている) を利用して圧力場を計算し、地衡流の関係から流速を計算する。問題は等重力ポテンシャル面が分からないことにある。

一般に用いられる方法は、深海では流れが無く、圧力傾度が無い、つまり等圧力面がそのまま等重力ポテンシャル面になっている、と仮定することである。この面を無流面、あるいは基準面 (reference level) と呼ぶ。一般に深海では表層に比べれば流速が小さいことは確かであるが、必ずしもゼロでは無い。この計算では、他の深度での圧力傾度は無流面での圧力傾度の分だけ誤差を含むことになる。

ちょっと考えると、圧力が観測できるならば、直接圧力傾度がわかる筈では無いかと思うかも知れない。しかし、我々の知りたいのは圧力の水平傾度であることに気をつける必要がある。海洋中では、圧力の水平傾度は鉛直傾度に比べてはるかに小さい為、深さのほんのわずかな誤差が、大きな水平圧力傾度の誤差につながる。その様な訳で、一見回り道の様な方法を採用するのである。

(2) 人工衛星による方法

人工衛星からマイクロ波を放射し、海面で反射して帰ってくる時間から衛星と海面の距離を測定するものである。衛星の位置が正確に解れば、海面の高さが計算できる。

ここで問題になるのはジオイド（平均海面水位と一致する等重力ポテンシャル面）と潮汐である。潮汐は地衡流バランスをしていないので取り除く必要があるが、外洋に関してはかなり信頼のおける潮汐モデルの予測を差し引いている。

我々が知りたいのは海面高度のジオイドからのずれである。そのためにはジオイドの位置を知らなければならない。ジオイドの位置は、大きな空間スケールに関しては良く分かっているが、海溝等の激しく地形が変化するところでは局所的に数十メートルの変化があり、この様な場所での誤差は、海面の凹凸（1m程度）に比べてまだ大きい。

幸いなことに、この様な地形は、我々が考えている様な時間スケールでは、殆ど変化しないと考えて良いことを利用し、変動分だけは計算することが出来る。特に、黒潮等強い海流の変動や、渦の動きなどを追うのには威力を発揮する。この方法の特長は、なんとと言っても、広い範囲の流れの平面分布が一度に解ることである。この様な衛星は極軌道のもので、少しずつ軌道をズラしながら地球を覆っていく為、一枚の平面図を書くには2週間程度がかかる。それでも観測船によるのに比べれば、はるかに効率が良い。但し、原理的に海面の流速しか知ることにはできない。

3.2 オイラー的な直接測流

オイラー的測流とは、ある一点における流速を連続的に観測することである。この方式の利点は時系列がとれるため、解析が容易であることである。この方法の困難は、先ず、海洋中に固定点を作ることである。現在、もっとも広く行われている測流方法は、係留システムによるものである。これは、海底の重りからロープやワイヤーを立ち上げ、一番上に浮きを付けて張ることによって固定点を作る物で、流速計はロープやワイヤーに固定する（図-2）。

直接、海流を測る流速計のセンサーとしては、いろいろなタイプがある。最も一般的なのがプロペラやローターによるもので、いわば風車である。また、海水が電離していることを利用して、磁場中の海水の運動による電場を測るもの、発信器、受信機間の超音波の伝播速度が海水の運動で変化することを利用するものなどがある。

最近、急速に普及しつつあるのが超音波プロファイラーと呼ばれるもので、レーダーの様に超音波を発信し、プランクトンや水温の乱れなどから反射され戻ってきた超音波のドップラーシフトから流速を測定する。

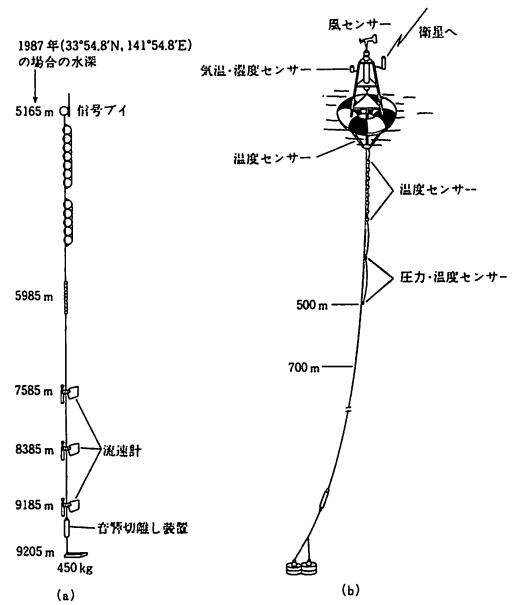


図-2 海面下係留 (a, 東京大学海洋研究所カタログより) の例とTAOで使われている海面係留 (b, Heyes他, 1991)。

この方法の特徴は一個の機械で流速の鉛直分布が計れることである。この型は、船舶の船底に取り付けられ、航行しながらの観測にも用いられ、最近では観測船のスタンダードとなりつつある。これは船舶に相対的な流れを測るので、絶対的な流速を知るためには船舶の位置情報が必要で、このシステム普及の影にはGPSによる位置の測定精度向上があると言える。

海水も電離している為、流れが地球磁場を切ることによって電場が生じる。この原理を使い、電話回線などの為の海底ケーブルを利用する事により、比較的安価に海峡を通る流量をモニターすることが行われている。

3.3 ラグランジュ的測流

海水とともに動くものの動きを観測することによって流速を測定する方法である。古くは漂流ビンもこの一種と言えるが、最初と最後しかわからないのに対し、現在では、途中も刻々と位置が分かるようなものが開発されている。海面に浮くタイプと海洋中層のある密度の層に浮くタイプがある。

ラグランジュ的な測流の特色は、何といたって海水の動きそのものを追えると言う点である。物質循環や水塊の形成などの見地からも、実際海水がどう動いているかを知りたいという要求は少なくない。変動成分が多く、平均流は小さい場合、オイラー的な観測で平

均流を調べることは誤差が大きい。ラグランジュ測流は、基本的に流速の積分量である位置の変化を測定するため、長周期の変動を見やすいという特徴がある。一方、測定点そのものが動いてしまうので、解析が困難になる意味がある。

(1) 表層漂流ブイ

現在使われているのは殆ど人工衛星によって位置を追跡するものである。この位置の情報は衛星に蓄積され、地上の受信局の近くを通過するときに吐き出される。この電波には位置以外の海面水温、気圧等の情報を、送ることが出来る。風の影響を緩和する為、通常ブイはパラシュートや「穴明き靴下」と呼ばれる、穴の空いた円筒状の布など、海水の抵抗をより強くうけるものをつける(図-3)。この方法は比較的安価なため、多数用いることが出来る利点がある。

(2) 中層ブイ

中、深層では平均流が弱く、相対的に変動成分が大きい。ため、ラグランジュ的な観測がより有効である。中層ブイは、目的とする層の海水の密度と同じ比重になるように調整されたブイで、その密度の海水と一緒に移動する。

ブイの位置の測定には通常、超音波が使われる。海洋中のいくつかの固定局との距離が、超音波の到達時間から計算され、3角測量の原理で位置が決められる。ブイの出す超音波を固定局が受信して距離を測定するもの(SOFARブイ)と、逆に固定局が出す超音波をブイが受信するもの(RAFOSブイ)の2つのタイプがある。前者はデータが固定局に蓄積され、固定局が回収されてから取り出される。後者はブイにデータが蓄積され、ブイが海面に浮上したとき、衛星にデータが転送される。超音波を使うタイプでは、海洋中に固

定局を展開する必要があり、コストは小さくない。このため、時々海面に浮上し、自分の位置を衛星に伝えた後、また所定の深度に潜り、海水とともに移動する、といったことを繰り返すタイプもある。但し、途中の動きは知ることが出来ない。

3.4 トレーサーによる流速分布の推算

トレーサーに使われる化学物質や物理量は保存量であるか減衰率(半減期など)がはっきりしているもので、しかも、ソースの領域がある程度限られて、既知であることが望ましい。核実験による放射性同位元素やフロン等は供給源の時間分布の情報があるため便利である。温位(水温に圧力の効果を加味したもの)、塩分、渦位(海水の角運動量)等も保存量であるためトレーサーとして利用される。

しかし、トレーサーの分布から流速場を求めるためにはまだ良くわかっていない乱流拡散係数を必要とする等苦しいところがある。また、多くのトレーサーを用いなければ一意に流速場を決定することは出来ない。しかし、数値モデルとの組み合わせで使うことで有力な武器となり得る。

4. 水温と塩分の観測

水温の測定は従来水銀温度計が主力であったが、現在は電気的な計器にとって代わられた。主なセンサーとしては、サーミスタと白金抵抗等、温度による抵抗変化を利用するものである。サーミスタは安価で、熱容量を小さくすることができ、反応が早いという特徴があるが、ドリフトが出やすいなど、精度としては白金抵抗にゆずる。超音波の伝播速度の水温依存性も、水温測定に使われており、後に述べる音響トモグラフィーはこの原理を使ったものである。

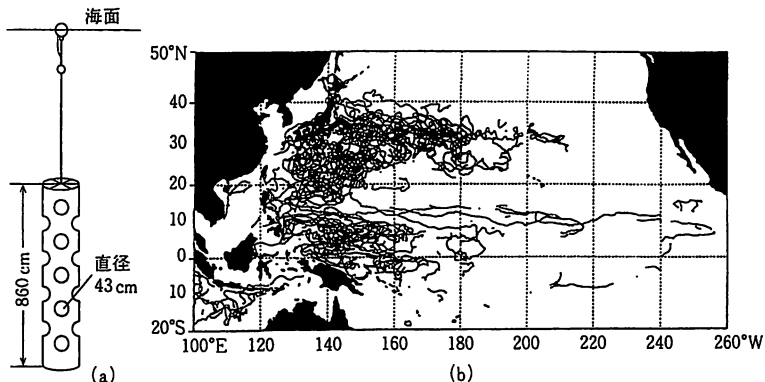
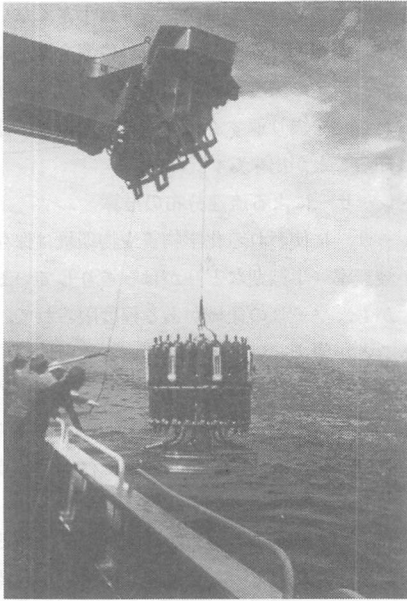


図-3 衛星追跡型漂流ブイ (a) とそれによる海流観測の例 (b). (道田, 1995より)



写1 CTDとロゼット採水器（周りの筒状の物）を海面に降ろそうとしているところ。

塩分の測定も電気抵抗によるものが主流となり、現在では塩分定義そのものが電気抵抗で表されるようになってきている。

(1) CTD

水温や塩分の観測に現在、標準的に使われているのが、CTDと呼ばれる、伝導度、水温、水深の、それぞれ英語の頭文字をとった測器である。船上からワイヤーによって釣り下げられ、水中を降下しながら連続的に測定し、データはワイヤーを通じて船上局に伝えられる（写真1）。そのため、情報を伝えられるワイヤーやウィンチ等、専用のものが必要になり、海洋観測船以外では、使用が困難である。通常のウィンチでも使用出来るように、データを内蔵のメモリーに記録するタイプのCTDもある。但し、船上でリアルタイムにモニターすることは出来ず、深度の確認もワイヤー長から判断するしかない。

CTDは、それまで主流であったナンセン採水器による観測にとって変わった。ナンセン採水器は、北極探検で有名なナンセン達によって開発された測器で、

採水とともに転倒温度計によって水温を固定して観測する。この方法では深さ方向に間欠的なデータしか得られず、CTDの出現により、1次元に過ぎなくとも、連続的な水温塩分の観測が可能になった意味は小さくない。

(2) XBT

高緯度海域をのぞけば海水密度は水温に対する依存度が最も大きい。そこで、水温だけをもっと手軽に測定するために使われるのがXBTと呼ばれる使い捨ての水温計である。爆弾の形をした本体が自由落下しながらサーミスタで測温し、信号は細いエナメル線で船上に送られる。航走中でも観測ができる特徴がある。深度は落下時間から計算される。

XBTは、精度より、数で勝負する測器である。変動の観測の重要性が高まる中、広い範囲を早くカバーすると言う意味で、単にCTDの代替という以上の意味が認識されてきている。特に、簡便さを生かした商船の奉仕による観測網は海洋の状態を準リアルタイムでモニターするのに威力を発揮している。最近では塩分も観測可能なタイプも開発されている。

(3) 係留系ネットワーク

どうしても船舶を使用する観測では点の観測になってしまう。3次元的（時間的な連続性を考えれば4次元）観測に対する要求は増大している。それに対する一つの回答が係留系のネットワークである。図-1はエルニーニョの観測の為にアメリカと日本等の国際協力で維持されている係留系ネットワークで観測されたものである。衛星によるデータ通信以外、これと言ってハイテクを使っているわけではないが、海洋の3次元的構造リアルタイムでモニターが可能（WWWでも見ることが出来る）な意味は小さくない。1997年に発生したエルニーニョは多くのモデルが予報に成功しているが、それにはこのシステムの貢献が無視できない。

(4) 音響トモグラフィー

医学で使われるCTスキャンや地震波による地下構造の研究など、波の伝搬から2次元、3次元的な構造を調べる方法を海洋に適用したのが音響トモグラフィーである（Munk and Wunsch, 1979）。海洋の場合特

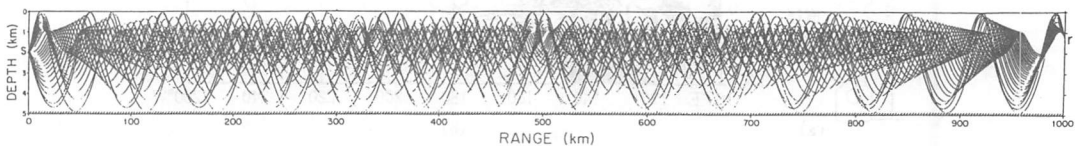


図-4 音響トモグラフィーにおける超音波の経路。（Munk他，1979より）

徴的なのは、一組の送受信装置で2次元的な構造がわかることである。海洋中にはソーファチャネルと呼ばれる音波速度が最低になる層がある。このため音源から出た音波は、いろいろな経路を通して受信器に到達する(図-4)。それぞれの場所の水温変化がそれぞれの経路に異なった影響をを与えることを利用して2次元的な構造がわかる。何組かの送受信機の組み合わせで3次元構造を連続的に関することが可能になる。しかし、技術的困難とともに、超音波が海洋生物に与える影響が懸念されている。

5. 化学物質の観測

現在化学物質の観測は、ほとんど海水を採水し、船上等の実験室で分析することで行われている。その主力となっているのがロゼット採水器と呼ばれるもので、前述のCTDと組み合わせ船上で水温、塩分、深度等をモニターしながら望みの場所で採水器の蓋を閉め採水することが出来る(写真1)。

溶存酸素や栄養塩など一部、電気的なセンサーも開発されているが、精度の問題で標準になり得ていない。しかし、採水ではどうしてもサンプルが時間的にも空間的にも離散的のものしか得られない。特に係留系等による時系列データの観測が今後の課題となろう。

6. 人工衛星による観測

人工衛星による観測も近年、海洋観測に変革をもたらしているものの一つである。現在人工衛星で観測されている主なものは、既に述べた海面高度、漂流ブイの追跡の他に、海面水温、海水、クロロフィルの分布等の観測にも威力を発揮している。さらに、海上風や波浪も実用化しつつある。海面塩分、海上での降雨等も視野に入りつつある(川村, 1996)。

人工衛星の長所は、とにかく地球規模の現象を時間に関して連続的にモニターが可能なことである。欠点としては、やはり海面以外の情報が得られない事である。

また、間接的ではあるが、船舶などの位置決めやデータ転送の中継基地としての衛星の海洋観測への貢献も見逃すことが出来ない。

7. 海洋観測の展望

従来、気象と違い、海洋の変動が与える影響は漁業や海運など限られた分野にとどまると思われてきた。そのため、海洋観測は純学問的な観測が主であった。しかし、長期予報や気候変動予測には海洋変動の情報が必要であると言う認識が広がるにつれ、海洋を準リアルタイムにモニターする要求が高まっている。それも海洋のどこを、と言うのでなく、世界の海洋の変動を丸ごと、3次元連続的に見る必要があるように思われる。それは現在の技術でも全く不可能と言うわけでは無い。例えばTAOを全世界的に展開することには決定的な技術的困難があるようには思えない。問題はその認識と、それを可能にする体制をどう整えるかである。

文献表

- Climate diagnostic bulletin, May 1996, Climate Prediction Center, NOAA, U. S. Department of Commerce, pp78
 道田 豊, 他; 漂流ブイ観測から見た北太平洋の表面海流, 月刊海洋, 号外9(1995), 75-82
 川村 宏; 大気・海洋の相互作用, 鳥羽良明編(1996), 東京大学出版会, 261-329
 Hayes, et al.; TOGA-TAO: A moored array for real-time measurements in the Tropical Pacific Ocean, Bulletin of the American Meteorological Society, 72(1996), 339-347

協賛行事ごあんない

「第17回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス」について

期 日: 平成10年6月17日(水), 18日(木)

会 場: 成蹊大学

(東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1)

主 催: 日本シミュレーション学会

協 賛: 応応用物理学会, 応化学工学会 他

問い合わせ先:

日本シミュレーション学会・事務局(澤田)

〒102-0083 東京都千代田区麹町1-6

相互麹町第3ビル6F

TEL 03-3239-4738/FAX 03-3239-4714

E-mail: simul@pp.iij4u.or.jp