海溝の底層流の直接測定—海洋物理学の最近の話題

平 啓 介*

Direct measurements of bottom current in Izu Ogasawara
Trench—A recent topic of physical oceanography

Keisuke TAIRA

I. はじめに

地球の表面積の70%を占める海の広さはよく知られている。海の深さについてはどうであろうか。平均の深さは3800mであり、陸の平均高度は840mなので地球全体をならすと固体地球は海面下2440mに没してしまう。

この広くて深い海を満たしている海水の運動を取り扱う学問分野が海洋物理学である。海面に目を向けると周期1秒以下の小波から10秒以上のうねりがあり、これらは海面下でも活発な海水の運動を伴っている。日本の南を黒潮が流れているが、九州沖に投入した漂流ブイに人工衛星による位置決定装置を組み込んで追跡することによって、北太平洋を東に流れ北米沖を南下し亜熱海域を西向きに帰って来る大きな時計回りの循環が観測されている。約3年で3万kmを流れるので平均流速は毎秒30cmであるが、黒潮の強流帯では毎秒2mを越えることも珍しくない。黒潮は数100mの深さに及び流量は毎秒5000万トンに達すると評価されている。

風波や海流は風によって引き起こされるが、一方、風の運動エネルギーは海面からの熱輸送によって供給されている。熱は下層大気を暖める顕熱と水蒸気を供給する潜熱があり、いずれも海面の温度に敏感である。大気と海洋の相互作用は気候変動への関心のたかまりによって多くの人に認識されていることと思われる。気候変動は大気物理学だけの問題だけではなく海洋物理学も密接に関連しており、熱帯における大気と海洋の相互作用を研究する「熱帯海洋と全地球大気プロジェクト (TOGA)」が進行中であり、気候に及ぼす海洋循環の役割を研究する「世界海洋循環研究計画 (WOCE)」が企画されるなど、日本の研究者も中心的な役割を果たしている国際共同研究が行なわれている。

風によって直接に駆動される海水の運動は上層で大きく下層には及び難い。平均水深3800mの海洋の大部分の下層には運動も循環もないのであろうか。船から流速計を下ろしても船の動揺のために正確な測定は不可能である。温度と塩分を測定することによって海水の密度が得られ、密度の鉛直分布から圧力が決められる。海流は定常な運動とみなすことができ、運動方程式より圧力傾度力とコリオリの転向力とが釣りあっていることが分かる。流速と緯度の関数であるコリオリ係数の積が転向力であり、圧力傾度力が分かれば流速を評価することができる。天気図から高気圧を右にみて風が吹き、風速は等圧線の間隔から判断することと同様である。多くの観測点で密度観測を行うことで海の天気図が描けることが期待される。海面を等圧面とし、海面気圧を与えて各深度の圧力場を求めると下層ほど圧力傾度が大きいという結果になる。直接測定される表層の海流を記述するには、下層の例えば1500m層で等圧面が水平であり無流であると仮定すればよいことが知られている。この方法は力学計算とよばれ20世紀初頭に確立され、海洋上層の循環を明かにすることができた。仮定する無流面の深度を変えると下層の流れとして異なった値が

* 東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo

得られるだけで、この方法は深層の流れを解明するためには無力である。

海洋観測の資料が集積され、深層の温度と塩分の値を広い範囲について調べると、一定の変化の傾向があることが知られるようになった。西太平洋では南の方ほど低温で高塩分になっていて、その起源を南極海までたどることができる。低温で高塩分の海水は密度が大きいので、南極海で冷却されて海水が沈降しているとの深層海水循環が提出されたのは1962年である。溶存酸素も沈降域で多く、北上にしたがって減少している。1970年代に行われた炭素同位体比の観測から海水の年齢を調べると、西太平洋の5000m 層の海水は赤道域から北緯30度まで北上するのに約300年を要している。平均流速は毎秒0.03cm に過ぎない。

深層の流動が意外に大きいことの確認は無流面の追求によってもたらされた。海水と密度を等しくしたフロートを船上から音響測位で追跡する方法で数千m 層に毎秒数10cm の流れが観測されたのは1960年代である。時間的にも変動することがわかり、1970年代になって目記式の流速計を長期係留する技術が確立すると周期100日、空間スケール100km 程度の中規模渦とよばれる活発な変動流があることがわかってきた。観測系全体を水中に置く深海係留の手法は1975年頃から日本に導入され、海洋研究所を中心に1977年2月から大島西水道の黒潮の測流が、そして同年12月から鳥島東方の6000m 水深海域の測流が開始された。前者は現在でも継続され、黒潮の流速変動に30日と100日の周期変動が卓越することを見いだした。後者は2000日の連続データを収録して1984年に終了した。南北流に周期130日、東西流に周期200日の振幅毎秒10cm の変動流が卓越することと、海山のまわりに時計まわりの定常的な循環があり、測点によっては毎秒10cm にも達することを発見した。北太平洋の6000m 水深点でも最大流速は毎秒30cm もの大きさがある。これらの強勢な流動のエネルギー源が何であるのか、そしてその発生の機構はどうなっているのかは世界の海洋学者が取り組んでいる問題の1つである。

上に列記したそれぞれの現象の記述も興味深いものであるが、ここでは私達が世界に先駆けて行った水深9200m の海溝の底層流の観測について以下に紹介したい。

II. 超深海の測流のための測器の開発

海洋の深層にも強勢な流動があることは常識化してきたが、海溝の底層はどうであろうか。海山のまわりに時計まわりの循環があれば海溝には反時計まわりの循環があることが力学的に予想される。水深3600m の駿河・南海トラフの反時計まわりの循環は毎秒3cm であることが筆者らによって観測されている (TAIRA and TERAMOTO 1986)。そこでは潮汐流が卓越し周期数10日以上の変動は小さかったが最大流速は毎秒24cm であった。

第1図 チタン製の円筒容器を使用した耐圧12000m 水深の流速計

水深6000m を越える海域の流速の長期測定はこれまで行われたことがなかった。その最大の理由は計測器がないことである。世界の海の面積の98%は6000m 以下であり、人間活動の及んでいる海域はもっと浅い。商品としての測器の耐圧は6000m 以下に限定されていて、たまにもっと大きいことを表示していても実績が無いのが実状であった。耐圧容器の材質がアルミやステンレスでは強度が得られなかったり、重くなり過ぎることもその原因である。

日本の東方には日本海溝、伊豆小笠原海溝と9000m を越える海溝につながり、南の南西諸島トレンチも7000m を越える。このように超深海は日

本にとっては身近の海と言えるので、その流動を知ることは重要である。また、超深海の計測手法を確立することは海洋物理学だけでなく海洋地球物理学など他の分野の計測に波及させることができる。そこで文部省の試験研究を申請し、昭和61・62年度の2年間で「超深海の海洋計測用耐圧容器の開発」を行うことになった。研究組織は平 啓介・深澤理郎（東大海洋研）、宮崎秀久（日油技研工業株式会社）の3人である。

耐圧容器の材質はチタンを採用することにした。チタン材の加工は技術的に困難であるが、幸い宇宙開発のための優れた技術の蓄積があり、工場（川越市）には 1200kg/cm^2 の能力の加圧試験器があり、初年度に流速計と音響切離装置の耐圧容器を製作することができた。

開発した流速計は第1図に示す形状である。測流センサーはアーンデラ社の縦型ローターで毎秒 1.5cm 以上の流速があれば回転する。回転軸にマグネットが組み込まれていて容器の中のリードリレーで回転を検出する。円筒容器は長さ 40cm 、外形 10.5cm 、内径 8.6cm であり、肉厚 0.95cm で 1236kg/cm^2 の圧力に耐えることができる。容器の底部には磁気コンパスが置かれるが、そのために容器の材質は非磁性が要求され、その点でもチタンは好都合である。ローターの回転数とコンパスの指示値はデジタル信号として半導体メモリー素子に設定した時間間隔で記録される。使用する電池は低温特性の優れたリチウム電池である。これらの電子回路は北川庄司技官（東大海洋研）によって製作された。流向板によって容器の部分が上流を向くように回転する。

係留系の構成を第2図に示す。上部に集中している浮力材であるガラス球の耐圧が 6000m なので全長を 4040m にしてある。流速計は底上 20m 、 820m 、 1620m の3層に取り付ける。おもりは古レールを組合せて 450kg にした。おもりの直上に取り付けた機器は音響切離装置であり、船上からの音響信号を受信するとおもりの接続部を切離するもので係留系の回収に使用する。このように全系を水面下に置くことによって、船舶の航行や漁船の操業による切断事故を無くし、また係留観測中の悪天候時の風や波による流出を防いで長期観測を行うことが可能になる。

音響切離装置も十分な耐圧が必要で、本研究によってチタン製の容器を開発し、日油技研製の音響切離装置を組み込んだ。しかし、従来の製品は 6000m 仕様であり音響信号の交信距離が短かったので、水中部と船上局の出力を増強することと、音響トランスデューサを改造して音響ビームを狭くすることによって鉛直方向の指向特性を向上させ十分な交信距離をもたせることができた。

深海係留系の設置はブイの部分から投入し、最後におもりを落下させて行う。その間船は毎秒 1.5m 程度の速力で航走し係留索に十分な張力をかけながら作業することが重要である。第2図の係留系は昭和62年1月28日に白鳳丸（東大海洋研）で設置し、5月11日に

第2図 伊豆小笠原海溝に設置した係留観測系の模式図

第3図 北緯34度の海底地形と設置した係留流速計 (C4, C5, C6) の深度を示す。

第4図 1987年1月29日から5月10日までの102日間の流速記録。上段の3つは C6: 海底上1620m 層, C5: 海底上820m 層, C4: 海底上20m 層の東西成分であり下方の3つはそれぞれの南北成分である。測定時間間隔は20分毎に設定した。

淡青丸 (東大海洋研) で回収した。設置作業は約2時間を要した。回収時は切離指令から1時間で浮上し、ラヂオビーコンの発信信号を方向探知機で受信して発見することができた。

III. 伊豆小笠原海溝の測流の結果

係留系の設置点は北緯33度55分, 東経141度55分の伊豆小笠原海溝の中心部の水深9200mである。第3図に示すように9000m以深の部分の幅は約20kmである。海溝の軸は142度の子午線に沿い南北方向に延びている。

第4図に得られた102日間の20分毎の記録を示した。東西成分, 南北成分ともに半日,

1日程度の短周期変動が卓越し 毎秒 5 cm 程度の流れがあることがわかる。最大流速は底上 20m では毎秒 10cm, 820m と 1620m 層では毎秒 9 cm であった。

流速の短周期変動の性質を調べるために周期解析を行った。第 5 図 a に南北成分のスペクトルを示す。周波数 0.8cph (サイクル毎時) は 12.5 時間周期の半日潮である。周波数 0.048cph のピークは慣性振動流であり, 0.04cph のピークは 1 日潮である。第 5 図 b に示す東西流のスペクトルでは 1 日潮は小さくなっている。調和解析によって主要 4 分潮の潮流楕円を求めると 1 日潮の長軸は南北方向であり, 潮汐波は北から南に伝播している。半日潮は北東から南西に伝播していることが示され, 沿岸潮位から推定されていた等潮時線の向きと一致する。潮流は下層に向かって振幅が減少している。

慣性振動流は回転流の遠心力とコリオリの転向力がつりあった回転運動である。その周期は緯度によって決まり, 北緯 34 度では 21 時間 40 分である。慣性振動流は変動する風によって生ずる。第 5 図 a, b とともに慣性振動流は下層ほど振幅が増大している。下方に伝播し底層にとじこめられていることを示している。このような現象も最近の測流観測で明かになったことであるが, 海溝底に気象擾乱の影響が強く現れていることが興味深い。

最後に平均流を見ることにしよう。第 6 図は流速の進行ベクトル図である。測定開始時からの流速成分の積分値をそれぞれ座標値として時間の関数として示したもので, 短周期成分がフィルターされ平均流と長周期変動流を強調することができる。全期間でみると 3 層とも南南東の毎秒 1 cm の流れである。観測期間が短いが 20 日程度と 70 日程度の長周期変動流もあることをうかがわせている。

IV. むすび

無人潜水艇から行った海溝底の短時間の流速測定の報告はあるが, 本論で報告した長期測流は世界で初めてのことである。海溝には海溝特有の変動流が存在する可能性を示す理論的研究もあり, また定常的な反時計まわりの循環が存在することが予想されている。私達の係留系は 1 年以上の長期測流が可能であり, 昭和 62 年 11 月の白鳳丸航海から設置と回収を繰り返して 800 日以上連続観測を行うことを計画している。

第 5 図 a

第 5 図 b

第 5 図 a 流速の南北成分のエネルギースペクトル。横軸は周波数で単位はサイクル毎時 (cph)。スペクトルピークに付した番号は測流層 (4: 底上 20m, 5: 底上 820m, 6: 底上 1620m) を示している。

第6図 流速記録の進行ベクトル図。

一方、昭和62年度から文部省重点領域研究「深層海水循環過程の解明（研究代表者、寺本俊彦）」が発足し、3年計画で北太平洋の深層循環の研究を行うことになった。強い海流は西岸に沿って流れるので、係留流速計を展開して深層の西岸境界流を調べたり、中立ブイを音響的に追跡して循環を実測にすること、そして、密度分布の観測を行うことを目的としている。モデルを作って理論的に研究したり、室内モデル実験を行い、また化学物質の分布から深層循環を解明することも含まれていて、この研究によって北太平洋の深層循環の知識を飛躍的に増大することが期待されている。深層循環を効率的に計測する新しい手法を開発する工学的な研究も含まれていることも付言したい。