

# WCPの窓

## 海洋大循環実験 (WOCE) 科学作業グループ 第2回 (ワームリー, 1984年1月), 第3回 (ベニス, 1984年11月) の会合報告\*

木村 竜 治\*\*

### 1. はじめに

2日先の天気予報を行うのであれば大気だけに着目すればよい。しかし、3カ月先の気候を予測するためには、大気=海洋結合系に着目する必要がある。ところが、大気内部の力学に比較して海洋内部の力学にはわからないことが多い。そこで、WCRPの一環として、海洋大循環実験 (WOCE: World Ocean Circulation Experiment) が計画された。1990年から1995年まで、集中的に海洋大循環の観測とそのモデリングを行おうという計画で、FGGEの海洋版ともいえる大規模な国際協力事業である (第1図)。

科学作業グループは、WOCE 計画案作成のために組織された。第1回会合 (1983年8月3日~5日ウズホール (Woods Hole) にある米国科学アカデミー・ウズホール研究センター) では、6つの研究課題が選ばれ、それぞれ専門家からなるワーキンググループが組織された (天気, 1983年10月号参照)。

第2回会合 (1984年1月23日~28日: ワームリー (Wormley) にあるイギリス国立海洋研究所 (IOS: Insitute of Oceanographic Studies) では、各ワーキンググループの報告が行われ、それにもとづいて WOCE の目的をはっきりさせるための討論が行われた。

第3回会合 (1984年11月5日~8日: ベニスにあるイタリア国立科学院 (CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche) では、第2回会合の議論をふまえて、国際 WOCE 計画の原案の作成が行われた。

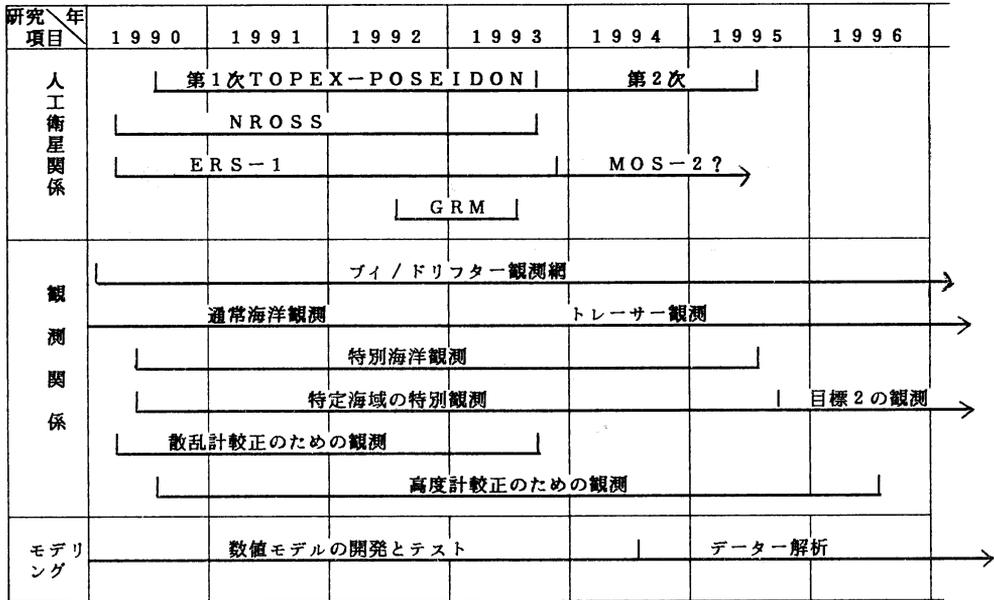
国際 WOCE 計画と平行して、米国とフランスでは、国内 WOCE 計画が企画され、具体的な計画案が提案されている (米国については、1983年に原案の作成が行われた。これについては、天気, 1983年10月号を参照していただきたい。フランスの原案要旨は付録に示す)。英国では、現在、IOS 内部で討論されている段階で、1984年末か1985年はじめに WOCE の国内計画案を練るための会合が開かれる予定である。

日本では、まだ、WOCE に関して討論が行われていない。国際 WOCE 計画案は、各国の国内計画の足なみをそろえさせるためのペースメーカーのような機能をはたすだけである。走るのは、あくまで、国内計画であるから、日本でも具体的な国内 WOCE 計画を作らなければ、WOCE に協力したことになる。現在、日本では WCRP に関連して、① OMLET (Ocean mixed layer experimnt), ② OHTEX (Ocean heat transport experiment) が計画されている。また、フィリピン海盆の深層循環に関する研究計画が進行しつつある。気象研究所では、将来大気の大循環モデルと結合することを考えた海洋大循環モデルの作成が行われている。人工衛星を利用した海洋研究の機運も高まっている。また、海洋化学の研究者によって海洋内部の物質循環の研究が進んでいる。水産に関して、北部太平洋水域 (亜寒帯循環) の調査も行われている。

このような研究は、いずれも WOCE の目的に沿っているので、関連する研究に参加されている研究者は、研究成果を (自分の研究分野に寄与することに加えて) WOCE のためにも役立たせることをぜひ考えていただくようお願いしたい。この大規模な国際協力事業が成功

\* Report on the 2nd and 3rd meeting of Scientific Steering Group of WOCE.

\*\* Ryuji Kimura, 東京大学海洋研究所.



第1図 海洋大循環実験 (WOCE) のスケジュール

すれば、人類の海洋循環に対する理解は、現在よりはるかに深まり、気象の長期変動の予測に一步近づくことが期待されるからである。

この報告では、第2回、第3回の会合を通じて作成された国際 WOCE 計画原案を報告する。

2. WOCE の目標

第2回および第3回会合では、主に WOCE の目的をはっきりさせるための討論が行われた。その結果、次の2つの目標が設定された。

- 1) 主に1990~1995年の間の5カ年間で WOCE 特別観測期間と定め、地球規模でできるだけ詳しい海洋観測のデータセットを作る。それを基に、5カ年間の平均的な海洋大循環の構造と、5年より短い周期の海水循環の変動特性を明らかにする。
- 2) WOCE 特別観測期間中の海洋大循環がもっと長い時間スケールの変動特性の中でどのように位置付けられるのか見積るための長期的な海洋のモニタリングを行う。

以上は主に海洋観測の目標であるが、海洋観測と同時に海洋大循環のモデリングを行うことも WOCE の主要な研究課題である。モデリングは、逆モデル (inverse model) と数値シミュレーションに分類される。逆モデ

ルとは、物理法則を制限条件として使用し、断片的な観測結果を総合的に扱って海洋大循環像を求めるモデルである。数値シミュレーションは将来大気の大循環モデルと結合することを前提として開発されるものとする。WOCE の観測結果は数値シミュレーションの検証に使われることを意図している。

3. 目標1) の重要研究課題

以上のような基本方針のもとに、次の4つの重点研究課題を選んだ。すなわち、

- 1) 海面を通してのエネルギー交換過程。海洋にとっては、海水循環の強制力 (forcing) となる。具体的には、①風の応力の分布と変動、②熱の出入り、③淡水の出入り (蒸発および降水、河川水の流入) を調べる。①に関しては、人工衛星に搭載したマイクロ波散乱計に大きな期待がかけられている (わが国の海洋観測衛星 MOS-2 の WOCE に対する貢献が期待されている)。

2) 海洋内部におけるポテンシャル渦度の生成と輸送。海洋内部の大規模な循環は表層に形成されるエクマン境界層下端に生じる鉛直流の作用で、海洋内部に相対渦度が生まれることであるが、相対渦度の生成は (絶対) ポテンシャル渦度保存則に従うので、ポテンシャル渦度の分布を調べることは強制力とその応答の関係を知

る上で重要である。

3) 海洋大循環の変動特性：海水循環は時間・空間的に広いスペクトル範囲で不規則に変動している。その性質は大気への応答として気候変化に影響を与える。特に、次の4つの点に着目して変動特性の研究を行うことがのぞましい。

- ① 5年間の平均状態を求める際に変動特性が影響を与えるので、その大きさを見積る必要がある。
- ② 変動特性の性質は大循環モデルの検証に有効である。
- ③ 時間変化は運動方程式の力のつりあいがなりたないことを示している。準定常を仮定した理論の適用性を検証する。
- ④ 散乱計、高度計など新しい測器は変動特性の力学に新発見をもたらす可能性がある（例えば、南極周極流の変動特性）。

#### 4. 重点研究

上に述べた研究課題は非常に広い範囲の問題を含むが、特に次の3つの観測を重点研究として行う。

- 1) できるだけ均質な地球規模の海洋観測のデータセット：既存および特別観測による海洋内部のデータと共に海面における気象データも含む。
- 2) 海洋間の海水交換：南極周極流とそれに続く南半球の海洋構造について詳しい観測を行う。
- 3) 亜熱帯循環の力学：特定の海洋循環の構造をできるだけ詳しく調べる。目的は数値モデルを定量的に検証すること。もっとも性質がよくわかっている海域がのぞましい。したがって、北大西洋の亜熱帯循環系を観測領域に選ぶ。

#### 5. 目標2)の重要研究課題

目標2)に関連して、次の3つの重要研究課題が選ばれた。

- 1) 5年間の特別観測の代表性について調べる。その方法としては次のようなことが考えられる。
- ① 数値モデルを利用する。たとえば、5年間の状態をよく再現する数値シミュレーションによって化学トレーサーの長期的追跡を行い、実際の観測結果と比較する。
- ② 特定の観測項目については5年間の実験終了後も引きつづき観測を行う。特に、人工衛星による海上風（散乱計）と地衡流（高度計）の観測、商船による海洋表層および海上気象の観測、潮位観測が期待される。

2) 気候変動に深く関係する海水循環の指標(index)を探す。指標の候補としては以下のようなものが考えられる。

- イ) XBT 観測による熱含有量。
- ロ) 島の潮位計による水位変動。
- ハ) 音波または電磁効果を利用した観測による西岸境界流の流量。
- ニ) 人工衛星の雲ベクトルから求めた熱帯の風。
- ホ) 南極周極流の流量。

3) 長期的な海水循環のモニタリングに適した新しい観測技術を開発する。気候変化を表す海洋の指標を長期的にモニターするためには、それに適した観測技術の開発が必要である。WOCE 終了後の観測をめざして、できるだけ早期に開発を始めることがのぞましい。

なお、以上は原案である。この案は科学作業グループの親委員会(CCCO, JSC)でさらに検討され、改良される予定である。

#### 付 録

フランスの国内 WOCE 計画案要旨。

1984年春に WOCE に関心をもつフランス国内の研究者が集まってフランス国内 WOCE 計画について討論した。以下はその結果をまとめたものである。

フランスの国内 WOCE 計画は、特に、中高緯度の観測に重点をおく。赤道海域の問題は TOGA で考えるべきであろう。しかし、もちろん、WOCE の観測システムは赤道海域も考慮すべきであって、さらに、地球規模の気候モデルと関連させなければいけない。

#### 1. 観測

海洋大循環の描像を得るための観測、および亜熱帯循環系の力学に関連するほど広いが予算的に可能な程度の中規模の海洋変動特性の観測に重点を置く。観測地点は国内研究者の希望と国際 WOCE 計画案を考慮して定める。亜熱帯循環系の一部を含み、以下の研究ができる場所を選ぶべきであろう。すなわち、

- 海面から海底までの海洋大循環
- 西海岸付近および循環系の中央部の渦の変動特性
- 上記2項目の相互関係

観測結果をもっとも有効に利用するためには、すべてのフランスの観測結果は逆モデル(inverse model)の中で積分できるようにあるべきである。

北大西洋の海洋循環に関する予備的な議論が行われ

た。この海域は次の理由で興味深い。すなわち、1) 熱輸送の重要性。特に、極から赤道に向けて熱が輸送されていること。2) 北大西洋とのカップリングによって支配されている深層循環、3) あらゆる種類の観測不足。以下に具体的な観測計画を要約する。

### 1.1. 外的強制力

ERS-1 および NROSS に搭載した散乱計によって、地球規模の風の応力を測定する。応力の値は現場観測によって較正する。2つの問題が検討された。すなわち、

- 人工衛星の分解能 (50 km × 50 km) を評価するための風速および風速変動の現場観測。

- 散乱計を較正するための風応力の直接観測。

前者は進行中の TOSCANE 計画である。2番目は次の3つの理由で重要と考える。

- 風の応力は海洋循環の原動力であること、

- 散乱計の応力は、風速よりも応力に対してより敏感であること、

- 散乱計から風速を求め、風速から応力を求めても、モデルを改善するのによりよいとはいえない。

### 1.2. 海洋循環の特徴的な現象

エネルギーの主要な変換は、湾流の再循環帯や南極周極流域で、大循環と渦の間で行われている。高波数から低波数への、高振動数から低振動数への運動を正しく記述しなければならない。WOCE に現実性を与えているのは、次のような技術革新が存在するからである。第1：人工衛星に搭載した高度計によって地球規模で海面における圧力分布が測定できる可能性のあること。第2：海洋内部をただようブイを音波航法で追跡し、人工衛星経由で位置を決定する技術が開発されたこと。第3：保存性の高い化学トレーサーを用いて長期間にわたる海水運動の積分が可能になったこと。第4：海洋内部の音速場を利用したリモートセンシングによって海水内部の温度場を測定できるようになったこと (トモグラフィ)。

フランス国内 WOCE 計画で特に重点のおかれる観測は次の通りである。

A. 高度計—NASA と CNES の協力のもとに行われる TOPEX/POSEIDON 計画は1989~1990年に高度計を積んだ人工衛星を 63°—1,300 km の軌道に打ち上げる予定である。同じ軌道上の観測をくり返すことによって、観測される海洋変動特性の振動数を小さくすることができるが、精度を正確に見積ることはむずかしい。なぜなら、誤差の原因がいろいろあるからで、たとえ

ば、①観測器の誤差、②人工衛星の軌道と位置の誤差、③信号伝達の誤差：大気中の水蒸気と自由電子、④海洋潮汐、⑤大気圧、⑥海の波、などがあげられる。

これらの補正を行ったデータが地球規模で求められれば、①水位変動の統計、②統計力学的なモデルにおけるデータの検証、③基準楕円面に関係して海洋の平均水位を決定すること、が可能になるだろう。平均的な海水循環を求めるためには、この方法と独立な方法で精度よくジオイドを求める必要がある。

B. 船による海洋観測と化学トレーサー—船による観測は、現場で行う実験の中心となるものである。密度場は海洋変動のうち低周波のみを取り出すフィルターのようなものだから、船による観測は大規模な海水循環の決定に最適だろう。観測領域は高度計の観測を考慮して決めるべきである。空間的・時間的分解能をどの程度にするかも検討すべきである。CTD の観測時間を 1/3 から 1/4 にできる新しい測器の開発が (米国で) 進んでいる。

化学トレーサーによる観測は船による海洋観測として行われるが、通常海洋観測と全く異った海洋の描像が得られる。トレーサーの分布は、発生源から観測時までのあらゆる海水循環のスペクトルを積分した結果を表している。トレーサーによる海水循環像と通常海洋観測および高度計による海水循環像との関係を調べる必要がある。トレーサーの分布は大循環を求める際の制限条件として利用できる。観測海域に冬季の高緯度における沈降流の存在海域を含めるべきである。

C. ラグランジュアン・ブイ—この10年程の間に、音波航法によって、半日から2、3年にわたる流速計としての中立ブイの追跡が可能になった。この方法は、700 m~3,000 m の海水循環の変動特性の調査に適している。高度計が含むいろいろな誤差を考えると、ブイによる直接かつ独立の大循環変動の観測は不可欠のように思われる。もし変動特性が一様で定常であれば、少数のブイの軌跡からオイラー的な流速場の性質が得られるであろう。しかし、ほとんどの海域はこの条件に当てはまらないので同時に多数個のブイを使用する必要がある。

具体的には、 $(1,000/300)^2 \times 15 = 170$  個/年が必要になる。ブイの観測はトレーサー実験の解釈や EGCM (Eddy resolving General Circulation Model) の検証に役立つ渦のエネルギー、分散、拡散を知るのに有効であろう。

既に SOFAR (ブイから発信、海中の固定点で受信)、

および RAFOS (固定点から発信, プイで受信. プイは観測終了後浮上して ARGOS を通じて記録を送る) についてはテストを行った. 最近, 別種のプイ (DIOGENE と大循環プイ) が提案されている. これらのプイは時々 (2, 6 カ月間隔) 浮上して位置を知らせてくる.

プイと同時にオイラー的流速計の使用も計画されている. 特に, ①鉛直方向の変動特性, ②渦度や熱の観測, に有効と考えられる.

D. トモグラフィ—トモグラフィはいろいろな深さを通る多数の音波のパルスの発信から受信までの時間を測定して, その間の音速場の分布を求める観測である. 音速は水温に関係し, 水温と塩分の関係がわかっているれば密度が求められる. この測定方法は技術開発的な部分が多いので, すでに実験を行っているスクリッブス海洋研究所と協力してテストを行うことがのぞましい.

### 1.3. 散逸過程

モデルにおける海水の応答は拡散過程のパラメタリゼーションに大きく依存する. しかし, 回転効果のために大規模な乱れは2次元的になり, 乱れのエネルギーはより大きいスケールに移行する傾向があり, 散逸過程はあきらかでない. 底面まさつ, 側面まさつ, 海洋内部における鉛直混合などは乱れの高波数成分にエネルギーを移行するので, モデルでは分解できない. これらを観測や準地衡流的モデルと比較し, 散逸過程を見積ることを提案する.

### 2. モデリング

WOCE は観測と同時に次の2種類の海洋のモデリン

グを行うことが不可欠である.

- ①時間・空間的に不均一なデータから力学的な制限条件を導入して海水循環を求めるモデル.
- ②海面における応力や熱源分布を境界条件として与え, 流体力学の方程式を積分して海水循環をシミュレーションするモデル.

前者は, いわゆる逆モデルで観測結果の解析に用いる. 後者は大気大循環モデルと結合させ気候予測を行う方向に進むべきである.

### 3. 結論

フランス WOCE を成功させるためには特に以下の点に着目することが必要であると結論する.

- ①ERS-1, NROSS の散乱計を風の応力で直接校正する.
- ②高度計, 現場観測, トレーサー, 中立プイの観測をいかに組織的に行うか.
- ③プイによるラグランジュ的測定:  $1,000\text{km} \times 1,000\text{km}$  の範囲で 200 個/年必要.
- ④高度計のデータの補正のための潮汐モデルの開発.
- ⑤逆モデルの開発.
- ⑥エネルギー源に対する感度が見積れるような準地衡流モデルの開発.
- ⑦定常流を求めるために高度計と独立の方法でジオイドを決定すること.

もちろん, これだけに問題は限られることではないが, 以上の点は WOCE に対するフランスの寄与の基盤となるものと考えられる.