

WCP の窓

海洋大循環実験 (WOCE) 科学作業グループ 第1回会合 (ウズホール, 1983年8月) の報告*

木村 竜 治**

1. はじめに

海洋大循環実験 (WOCE: World Ocean Circulation Experiment) とは、気候変動に対して海洋大循環がいかなる役割をはたしているのか調べるために、1980年代末から5カ年計画で、地球規模の特別な海洋観測を行おうという国際協力事業である。WCRP (World Climate Research Programme) における WOCE の位置付けについては、「WCP の窓 (「天気」, 29巻8号)」、WOCE の原案については、同じく「WCP の窓 (「天気」, 29巻10号)」に述べられている。

今年の8月3日から5日まで、米国マサチューセッツ州ウズホールにある米国科学アカデミー・ウズホール研究センター (第1図) で、WOCE に関する科学作業グループの第1回会合が開かれた。その直後、同じ場所で、8日から12日まで米国 WOCE 国内計画ワークショップが開かれた。この会議には米国内の海洋物理学者 (及び少数の気象学者) が50名程参加し、5日間の討論を経て、米国としての WOCE 計画原案を作成した。

米国のワークショップに出席したカナダの Stewart 氏 (CCCO (Committee on Climate Changes and the Ocean) 議長) は、「GARP (Global Atmospheric Research Programme) において、気象学者は海洋学 (oceanography) の必要性を感じたが、海洋学者 (oceanographer) の必要性を感じなかった。ところが、WCRP においては、海洋学のみならず海洋学者の参加が不可欠である」と述べた。この言葉は、10日程度の天気変化を問題にする GARP と数十年にわたる変動までを問題に



第1図 米国科学アカデミー・ウズホール研究センター。

する WCRP の性格の違いをよく表現している。気候変動の問題を正面から取り組もうとすれば、気象学者が海中をのぞき、海洋物理学者が空を見上げることがぜひ必要になる。両者の有機的結合が、今後の気候変動研究の大きな流れを指向しているように思われた。

この報告では、まず WOCE の背景について述べ、次に国際作業グループの会合で議論された内容をまとめ、最後に米国内の原案を紹介する。

2. WOCE の背景

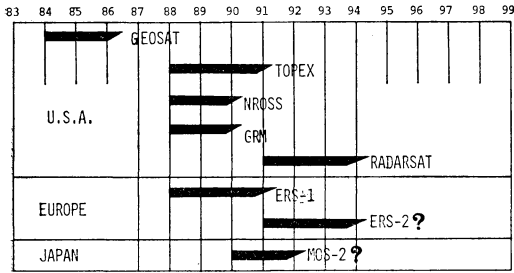
海洋は次の3つの過程を通して大気に影響を与える。すなわち、

- 1) 海面を通して行われる鉛直方向の熱と水蒸気の交換、
- 2) 海水の大循環による南北方向の熱輸送、
- 3) 大気・海洋間の二酸化炭素の交換。

大気が平均状態から変化した場合、海洋はその変化にどのように応答し、海洋の変化は3つの過程を通してどのような形で大気にフィードバックされるのであろうか。現在の海洋学の知識だけでは、これらの間に答えることができない。地球規模の海水循環に対する知識が非常に不足しているからである。

* Report on the first meeting of Scientific Steering Group on WOCE.

** Ryuji Kimura, 東京大学海洋研究所。



TOPEX=TOPOGRAPHIC EXPERIMENT MISSION
 NROSS=NAVY REMOTE OBSERVATION SATELLITE SYSTEM
 GRM=GEOPOTENTIAL RESEARCH MISSION
 ERS=EUROPEAN REMOTE SENSING
 MOS=MARINE OBSERVATION SATELLITE

第1表 海洋観測のための高度計または散乱計を搭載した人工衛星計画。?のついたものは計画が確定していない。

一方、人工衛星 SEASAT に搭載されたマイクロ波高度計およびマイクロ波散乱計は、わずか3カ月の観測データしか残さなかったが、海面を吹く風の分布と海面高度の分布をグローバルに観測できる可能性を示唆した(竹田, 1982参照)。海面の傾斜は海面付近の圧力勾配に比例するから、高度分布がわかれば、それにバランスする地衡流速の分布がわかる。

現在の所、高度計および散乱計を積んだ人工衛星は一つも存在しないが、1988年までに打ち上げられる物はいくつかが存在する。その計画を第1表にまとめた。そこで、1988年から5カ年計画で、海面を吹く風の分布と海面高度分布を測定し、同時に海洋の現場観測を強化して、グローバルな海水循環の理解を深めようというのが、WOCE の発想である。

WOCE が5年後に実現可能であると判断されたのは、単に衛星技術の進歩ばかりでなく、次のような海洋物理学の背景があるからと考えられる。1) さまざまな局地的海洋特別観測(MODE-1, CUEA, ISOS など)*の知識が集積し、これらを土台にした新しい海洋大循環像の構築が求められている。2) 大循環観測に適当な新しい海洋観測手段(後述する音波トモグラフィ、漂流

ブイなど)が開発され、5年以内には実用化される。
 3) 計算機のハードウェアの進歩により、5年先には中規模渦の効果を表現できる海洋大循環の数値シミュレーションが可能になる見通しがある。

WCRP の目的を考えると、5年間の観測期間はみじか過ぎる。数十年の変動に対しては、5年間はいわば一瞬のスナップショットというべきであろう。それを補うものとして、化学トレーサーの重要性がクローズアップされている。特に、過渡的の化学トレーサー (transient chemical tracer: 後述) を用いて、海水の長期的な運動を追跡する研究が現在米国で進行中であり**、WOCE でも重要な役割を占めるものと予想される。

WOCE の原案は、1979年に米国の Bretherton を議長とする WOCE 計画作成グループ (WOCE Design Options Study Group: 日本から東大・永田 豊氏が参加) により作成され、1981年5月東京で開かれた WCRP 大規模海洋実験研究会議で報告された。

1983年1月フランス・パリで開かれた CCCO の委員会で、次いで3月にイタリア・ベニスで開かれた JSC (Joint Scientific Committee for WCRP: WCRP 合同科学委員会。合同とは WMO (World Meteorological Organization) と ICSU (International Council of Scientific Unions) の合同という意味) の委員会で WOCE を WCRP の正式研究計画として取り上げることが決定され、1983年に WOCE 科学作業グループ (WOCE Scientific Steering Group) が発足した。その最初の会合が、8月の始めに行われたのである。

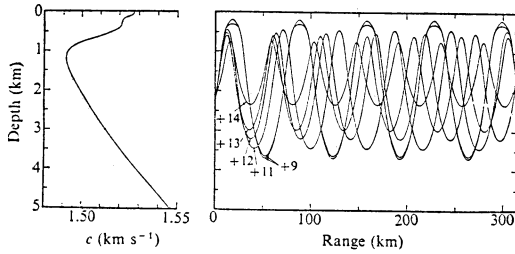
3. 国際科学作業グループの第1回会合の報告

発言が多い順に委員の構成を記すと次のようになる。

- F. Bretherton (米国: UCAR: 海洋の渦)
- (議長) C. Wunsch (米国: MIT: 海洋物理学)
- J. Woods (西ドイツ: キール大: 海洋混合層)
- W.S. Broecker (米国: コロンビア大: 海洋化学)
- J. Crease (英国: IOS: 海洋物理学)
- M.P. Lefebvre (フランス: CNES: 衛星測地学)
- 木村竜治 (日本: 東大海洋研: 地球流体力学)
- (欠席) K.F. Hasselmann (西ドイツ: マックス・プランク気象研究所: 海洋波動)
- (欠席) A. Sarkysian (ソ連: 科学アカデミー: 海洋

* MODE=Mid-Ocean Dynamics Experiment
 CUEA=Coastal Upwelling Ecosystems Analysis
 ISOS=International Southern Ocean Studies

** 1980年から TTO (Transient Tracers in the Ocean) というプロジェクト研究が行われている。これは、1969~1978年に行われた GEOSECS (Geochemical Ocean Section Study) の続きである。



第2図 左：海中における音速の深さによる変化。右：深さ 2.1 km より上向きに発射された音波のレイ (ray) の経路 (+は上向き, 数字は屈折の回数). The Ocean Tomography Group (1982) より.

物理学)

この他に, JSC から P. Morel, CCCO から B. Thompson が参加した.

会議は, 海洋観測衛星の見通しをレビューした後に, WOCE 計画委員会のレポート (Bretherton report) の検討を行い, WOCE の目的を次のように定めた. すなわち,

i) 海洋大循環数値モデルの検証に最適な海洋観測のデータセットを作ること,

ii) 特定の5年間の観測結果が海洋大循環の長期的変動から見てどの程度の代表性があるのか調べ, さらに, 海洋の長期的変動を検出する方法を決定すること.

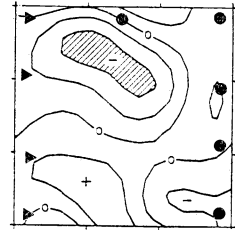
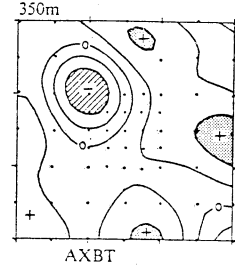
この目的に沿った研究計画として次の6つのテーマを選び, それぞれ専門家委員会を設けて, 具体的計画の立案を行うことにした.

1) 海水に対する海面強制力 (surface forcing) の問題

主要な海水運動は次の3つの作用によって生じる. すなわち, ①水面における風の応力, ②大気・海洋間の熱交換による加熱冷却, ③水面からの蒸発に伴う高塩分水の生成と降水や河川水の流入による低塩分水の生成. そこで, これらの海面強制力の分布を知ることは海水大循環にとって, 非常に重要である. WOCE に関しては, $2^\circ \times 2^\circ$ の柵目で月平均値が知りたい.

①の測定にはマイクロ波散乱計が有力な測器となるが, 現在の技術では $\pm 2 \text{ ms}^{-1}$ 程度の不確定性がある. これに対し, 風の応力の $\pm 10\%$ の変動を知るためには, 低緯度で (月平均ベクトル風応力にして) $\pm 30 \text{ cm s}^{-1}$ 程度の精度がほしい. この点が解決すべき大きな問題である (と Bretherton が主張した).

②, ③に関しては, 水蒸気フラックスをグローバルに



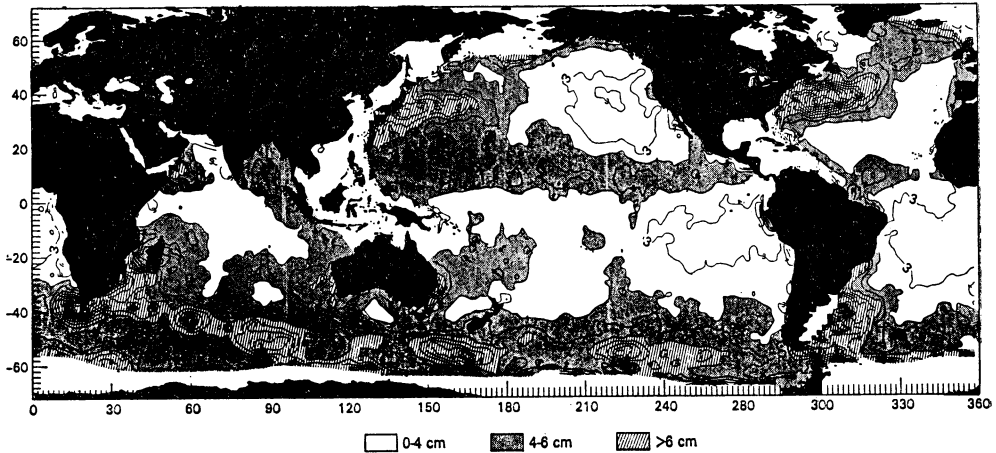
第3図 1981年4月13日における南北300 km, 東西300 km, 深さ350mの水平断面内の音速のアノマリー ($\pm 2 \text{ ms}^{-1}$ 以上のアノマリーに影をつけた). 音速のアノマリーは水温に比例する. 上図: AXBT による温度場の観測から描いたもの. 下図: 音波トモグラフィによる結果. ▲は音波発信器, ●は音波受信器 (出典は第2図に同じ).

求めることが大きな問題であり, 可能な測定技術を探る必要がある. 熱フラックスにして, $\pm 10 \text{ Wm}^{-2}$ の精度がほしい.

2) (ポテンシャル) 温度・塩分の分布

高度計によって海面におけるジオポテンシャルの分布 (すなわちジオイド面からの高度変位) が決定された場合, 海洋内部のジオポテンシャルの分布は温度および塩分の分布から求められる. また, 温度・塩分分布は大循環モデルを検証するよい物理量である.

観測船によるデータを集めて分布を求める場合, データの均質化 (data assimilation) が問題になろう. 海洋の数値モデルの初期値や積分の途中で観測データを使用する場合には, 数値予報における4次元解析と同様の配慮が必要になる. 物理的制約条件を考慮してデータを均質化する方法の開発が重要な問題になるだろう. 音波トモグラフィ (acoustic tomography) は海中の水平面内の温度分布を測定する方法として注目されている. 第2図の左側の図は, 海中の音速の鉛直分布を示している. 右側の図は, 深度約2 km から放射した音波のレイ (ray) を示している (数字は屈折の回数). レイの入射角度によって, いろいろな道筋を通ることがわかるであ

SEASAT ALTIMETER
MESOSCALE VARIABILITY

第4図 SEASAT の高度計によって観測された海面高度のアノマリー。
1978年9月15日から10月10日までの結果 (Cheney *et al.*, 1983).

ろう。それぞれの道筋によって受信器に達するまでの時間が異なるので、逆に、受信された音波の波形を解析することにより、海水中の温度分布に関する情報を得ることができる。Munk のグループは、一辺300 km の正方形の海域の西の辺に4個の音源を配置、東の辺に4個、北の辺に1個の音波受信器を配置して、 $4 \times 5 = 20$ 個のレイの通過時間の分析から、各深度の温度構造を決定する実験を行った。第3図はその結果を AXBT (airborne expendable bathythermograph: 飛行機から海水中に温度計を投入して、海水中の鉛直温度分布を測定する測器) の観測結果と比較したものである。この方法が実用化されれば、限られた数の測器で非常に広い範囲の温度構造が測定できるので期待されているわけだ。

3) 流速分布および海洋大循環の数値モデル

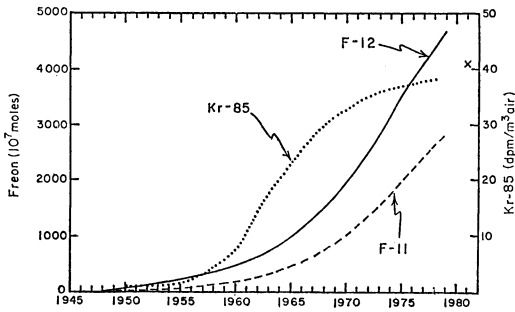
大気の場合、地上気圧の分布がわかっているので、静力学方程式を利用して温度分布から大気中の等圧面高度を一意的に決定できる。海洋の場合は、海面付近の基準ジオイド面における海水の圧力分布が不明のために、海水中の温度・塩分観測から海水内部の等圧面の分布(これから地衡流速の分布が求まる)を決定することができない。通常は一定の深度(たとえば2000m)に無流面(従って等圧面)を仮定して、大気と同様の方法で海水内部の圧力分布を求めることが行われる。しかし、強流帯とか水深が浅い場所では無流面の仮定は疑問で、この場合には流速に大きな誤差が生じることが予想される。

人工衛星によって地球の中心から水面までの距離が測

定できれば、(地球の中心から海面付近の基準ジオイド面までの距離を引くことによって)海面付近の圧力分布が求まる。これは地上天気図と同様に、海水内部の圧力分布を求める基準面となり得るのである。それ故、WOCE において高度計の役割は非常に大きい。高度計の実績は、GEOS 3 と SEASAT のみである。第4図は海面高度の変動の大きさを SEASAT のデータから求めたものであるが、日本東岸の黒潮、北米東岸の湾流、アフリカ東岸のアグラス海流、南米東岸のフォークランド海流などの西岸境界流および南極周極流の付近に変動の振幅が大きい場所が集中していることがわかる。この結果は、過去の海洋観測の知識から見ていかにももっともらしく、高度計が信頼できることを物語っている。

なお、人工衛星を利用した流速の有接測定としては、漂流ブイ(水面を漂流させる surface drifter と深度数100mを漂流し、1カ月に一度ほど水面に浮上して位置を知らせる pop-up drifter がある)やソーファーブイ(SOFAR drifter: 音速が極小になる深度(第2図参照)に漂流し、音波で位置を知らせるブイ)などが活用されるであろう。

海洋大循環の数値シミュレーションは現在でもいくつか行われているが、中規模渦を表現しないモデルと表現するモデルに分離している。前者はグローバルな海域を扱い、長時間積分できるが、中規模渦の影響が無視されている。後者は高分解能のモデルだが、扱える海域が狭く、外的なパラメータが固定されている。今後、5年間



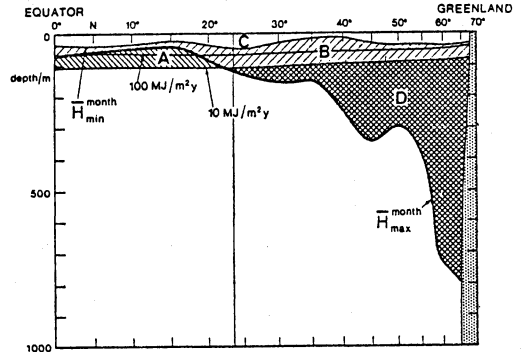
第5図 大気中のフロン11, フロン12, ^{85}Kr の増加曲線。フロンは工業生産量から推定。 ^{85}Kr は大気中の濃度を測定した (dpm = disintegration per minute)。Broecker が用意した資料より。

に両者がどの程度にドッキングされるのか, WOCE にとって大きな課題となろう。

4) 化学トレーサー

二酸化炭素の大気・海洋間の交換速度は WCRP の主要な問題である。また, 深海における二酸化炭素の移動と拡散も気候の長期変動に関連して重要である。これらの研究には二酸化炭素自身を追跡するよりも, 観測の容易な化学トレーサーを用いるのが便利である。特に, 人為的な作用によって大気中に放出された物質がトレーサーとして注目され, 過渡的トレーサー (transient tracer) と呼ばれている。海水循環のトレーサーとして利用されているものは, 核爆発の際に生じる, ^3H , ^3He , ^{14}C , ^{80}Sr , ^{137}Cs , 原子炉から生じる ^{85}Kr , 冷媒して用いられるフロン11, フロン12などである。第5図は, 1945年以降, 大気中におけるフロンと ^{85}Kr の濃度がいかに増加したか示しているが, この一部は海洋に吸収される。それを追跡することにより, 海水内部における物質の輸送と拡散に関する知見が得られるのである。

^3H (トリチウム) と ^3He の測定を組み合わせると深海の水がいつ海面から沈降したのかわかる。 ^3He は ^3H の壊変によって生じるのだが, 海水が表層の混合層内にある間は, 大気との気体交換によって, ^3He の濃度は増加しない。しかし, 水塊が海中に沈むと ^3He が蓄積さ



第6図 30°Wにおける最大混合層深度の緯度変化。

A: 日射の到達する深さではあるが, 1年中混合層は発達しない。B: 冬季のみ発達する。C: 1年中発達する。D: 日射は到達しないが冬季に混合層が発達する。10MJ/m²yの線は, この線より下まで透過する日射エネルギーが 10 MJ/m²yであることを意味する。100 MJ/m²yの線の意味も同様 (Woods *et al.*, 1983)。

れていくので, その量から, 水塊の年令決定が可能になるのである。

5) 混合層より深層における等密度面を横切る方向の混合 (diapycnic mixing)

染料を海中に流す実験から, 海水表層の混合層より下では, 海水はほとんど層流であることが知られている。それにもかかわらず, 化学トレーサーは分子拡散より大きな拡散係数で拡散していく。水は等密度面 (isopycnic surface) に沿って動き易い (中規模渦は等密度面に沿う方向の拡散に重要な役割をはたしていると考えられている)。それでは, 等密度面を横切る方向の拡散はどのようなメカニズムによるのだろうか。考えられる過程としては, 内部波の碎波, KH 不安定, 二重拡散対流*, キャベリング** (cabbling), 深海の境界流の慣入などである。

6) 冬季の対流混合層

水塊の変質 (温度, 塩分, 含有物質などの変化) は海面における大気との交換過程によって行われるが, もっとも大規模な水塊変質は冬季の対流混合層の発達によって生じる。第6図は, 季節を通じてもっとも厚くなる混合層の深さが緯度によってどのように変化しているか示したものである。高緯度の冬季の海域で 700m まで対流混合層が発達している。低緯度では, 混合層が表層付近に限られ, それより深部の水塊を変質させる作用がな

* 熱と塩分の拡散係数が異なることが原因で生じる熱対流。

** 等密度ではあるが温度と塩分の組み合わせが異なる2つの水塊が混合すると密度が増加する現象。海水の密度が温度や塩分の一次関数でないことによって生じる。

い。このため、海洋大循環に影響を与えるような水塊変質に関しては、冬季の混合層に着目することが重要であり、最大深度を予測できるようなモデル作りをする必要がある。

WOCE 計画の次のステップは、上記6つのテーマについて、具体的な計画案を作成することである。日本からは、1) に関して竹田 厚氏 (防災センター)、2) に関して蓮沼啓一氏 (東大海洋研)、3) に関して遠藤昌宏氏 (気象研)、5) に関して永田 豊氏 (東大理)、6) に関して鳥羽良明氏 (東北大理) が専門委員として参加する予定である。

4. 米国内 WOCE ワークショップ

50名近い研究者が5日間遠隔地 (といっても高級避暑地ではあるが) に集って、朝食・昼食を共にして、朝8時半から夕方5時近くまで、一つのテーマについて激しく議論し、プロジェクト研究の原案をまとめるまでに至るとは、米国の研究者にとっては通常の手続きなのであるが、経験のない筆者は正直いってびっくりした。議論は個人と個人の意見の対立のために空転することが多く、非常に多くの枝道に入りながら進行するために能率が悪い。しかも、体力と精神力の消耗が大きい。その代わりに、出席者全体の認識のレベルが高くなり、問題点の所在が明確に浮かびあがってくる。このような研究者集団の brain-storming を通じて計画案を練る作業は、対立を好まない日本の方法と対照的で非常に興味深いものであった。

米国内のワークショップは NSF と NASA の資金援助のもとに C. Wunsch (MIT), D.J. Baker (ワシントン大), F. Bretherton (NCAR), W. Broecker (コロンビア大), J.C. McWilliams (NCAR), W.D. Nowlin (テキサス農工大) が企画したものである。まず、何人かの人々が WOCE 全体の考え方に対して自分の意見を述べ、次に3日間程かけて、WOCE に関係する20編程の background papers が紹介された。木曜日には、i) 水塊形成と交換率、ii) 大気・海洋相互作用、iii) 速度場の3つのワーキンググループに分かれて、それぞれの計画案作り。そして、最終日には、次のような計画原案が成立した。

全体の目的：大気の長期変動に対する海洋の応答と大

気へのフィードバックを予測できる程十分に海洋大循環を理解すること。

作業内容：地球規模の海洋観測、海水大循環のモデリングおよびその検証。

特に研究すべき問題：

1. グローバルな海洋の物理的状態の記述。
2. 海面における境界条件の記述。
3. 海水による南北熱輸送量の決定。
4. 海盆間の水の交換。
5. 大気の年々変動に対する海洋の応答。
6. 海面強制の季節変化及び年々変化に対する海盆スケールの海水循環の応答。
7. 中規模渦と平均流との関係、西岸境界流とジャイヤ (gyre) の内部の循環との関係。

研究班：

- *1. 海洋表層 (混合層を含む) と大気・海洋相互作用研究班
- *2. 流速研究班 (平均場、大規模・中規模の変動、渦の統計)
- *3. グローバルな温度・塩分の分布に関する研究班
- *4. 化学トレーサー研究班 (海水内部における混合を含む)
5. 熱量フラックス研究班
6. 海盆間交換研究班
7. モデリングとデータの総合化研究班
8. 技術開発班

(* のついた項目は国際協力事業として行う)

文 献

- Cheney, R.E., J.G. March and B.D. Beckey, 1983: Global mesoscale variability from collinear tracks of SEASAT altimeter data, *J. Geophys. Res.*, **88**, 4343-4354.
- Ocean Tomography Group, 1982: A demonstration of ocean acoustic tomography, *Nature*, **299**, 121-125.
- 竹田 厚, 1982: 海洋学における衛星資料の利用, *気象研究ノート*, **145**, 195-246.
- Woods, J.D., W. Barkman and A. Horch, 1983: Solar heating of the world Ocean, *Q.J. Roy. Met Soc.*, (投稿中).