

# 気候変動と海洋に関する研究の最近の動向\*

## —POMS 計画会議 (マイアミ, 1979) の報告\*\*—

浅井 富雄\*\*\*

### 1. はしがき

1979年10月1日～5日, マイアミ大学と NOAA の共同研究所である 海洋・大気共同研究所 Cooperative Institute for Marine and Atmospheric Studies (所長 E. Kraus 教授) で GARP 合同組織委員会 (JOC) と海洋研究科学委員会 (SCOR) 共催の “Pilot Ocean Monitoring Study” 計画会議が開かれた。ひき続いて, 8日～10日, 同じ場所で SCOR と IOC (政府間海洋委員会) 合同組織である「気候変動と海洋に関する委員会 (CCCC)」の第1回委員会も開催された。これらはともに世界気候研究計画 (WCRP) に重要な関係をもつので, その背景も含めて POMS 計画会議の概要を報告する。なお, WCRP については片山昭「世界気候会議と世界気候計画」(天気第26巻12号), 世界気候小委員会「わが国の気候変動研究計画について (I)」(天気第27巻4号), CCCC については浅井富雄「CCCC第1回会合の報告」(日本海洋学会誌第36巻2号)を参照して欲しい。

### 2. POMS 計画会議の目的

1978年11月, Kiel で JOC と SCOR 共催の「全地球的熱収支における海洋の役割に関する研究会議」が開かれ, そこで, (1) WCRP の優先的時間スケール (数週間～数10年) での気候変動において, 海洋上層循環は不可欠の要素となる。(2) 気候理論と長期予報を発展させるため, 1980年代に, hydrographic sections を長期にわたり繰り返し実施する国際的計画を急ぐべきであることなどが合意された。海洋の全球的なルーチン観測計画は時期尚早であるが, その準備的研究計画を早急に進める

ための科学的・技術的討議の必要性を認め, 上記合意事項に対応した試験的な海洋モニタリングの提案がなされた。すなわち, 先導的的海洋観測方式の研究 (Pilot Ocean Monitoring Study, 略称 POMS) と呼ばれる国際共同研究計画の立案がその第一歩である。

気候変動の研究や長期予報のための海洋のモニタリングの理論的・技術的な基礎を確立することを目指して, 1980年代に,

- (1) 理論的研究と数値モデルの開発
- (2) 新しい観測技術システムの開発
- (3) 現存技術を用いて特定のいくつかの測線での実験的モニタリング

を推進することが POMS の目的である。

上記提案は1978年11月の第14回 SCOR 総会および1979年3月第15回 JOC で承認され, また, この研究計画を推進するために, JOC と SCOR 共催の計画会議を早期に開くべきことが決定された。さらにこの計画会議は IOC でも支持され開催のはこびとなった。

参加者は, Stewart (カ, 議長), J.P. Woods (西独, 幹事), E.D. Kraus (米, ホスト), K. Bryan (米), R. Davis (米), C. Rooth (米), C. Wunsch (米), K. Wyrski (米), R.T. Pollard (英), Sh. A. Musaelian (ソ), Terziev (ソ), G.R. Kontarev (ソ), I. Galindo (メキシコ), J.L. Hyacinthe (仏), J. Merle (仏) など約30名, 日本からは浅井富雄が出席した。その他, B.R. Döös (JPS/GARP), R. Revelle (CCCC 委員長), K.F. Voigt (Unesco) など関連国際組織や NASA, U.S. National Climate Program Office の関係者なども参加した。

### 3. 海洋変動特性とその時間スケール

海洋から大気への顕熱・潜熱の輸送は大気運動の重要なエネルギー源であり, 一方, 大気から海洋への運動量輸送は海洋循環の重要な駆動力となる。したがって, 大

\* Recent progress in studies of climate changes and the ocean.

\*\* A Report of JOC/SCOR Planning Meeting for the Pilot Ocean Monitoring Study, Miami, 1-5 October, 1979.

\*\*\* Tomio Asai, 東京大学海洋研究所.

気と海洋それぞれの運動系は他方の知識なしに正しく理解することはできない。また両者の間の熱容量や質量の大きな差異のために、大気と海洋の熱的・力学的時間スケールは、その大きさのオーダーが異なるので、大気・海洋結合系の動態は考える時間スケールに強く依存することになる。例えば、短期天気予報の問題においては、大気への熱輸送を支配する海面温度は、与えられた一定の境界条件と見なされ、予報の問題は完全に大気のみにある。しかしながら、気候変動のような長い時間スケールに対しては、大気と海洋の役割は基本的に逆転する。ここでは、海洋の詳細な予報モデルが必要となり、大気循環の性状はいくつかの平均量によって表わされ得るであろう。

若干の海域での海洋変動の観測によって、海洋の運動の統計的性状、時間スケール、力学構造などの知識は増大しつつある (Monin, Kamenkovich, Kort, 1974, 他)。変動特性は現象の時間スケールの大きいものから順に、準地衡流、慣性重力波、小規模乱流の三つに分類される。一方、近似的に海洋は2層に大別される (Hasselmann, 1977, 他)。すなわち、季節変化する厚さ 数 10 m ~ 数 100 m の上層とその下の深層とである。上層は混合層と季節的温度躍層とから成り、熱的緩和時間は数週間~数年である。深層の熱的応答時間は、その評価は困難であるが、間接的な評価によると  $10^2 \sim 10^3$  年といわれている (Munk, 1964)。要するに、海洋の力学的変動は1秒~ $10^3$ 年の広範な時間スケールに亘る特性をもっている。海洋と海水の相互作用を含めれば時間スケールはさらに少なくとも1オーダー長くなる。気候変動にもっとも関係の深い  $1 \sim 10^3$ 年の時間スケールに亘る海洋変動の力学の理解は未だ非常に貧弱である。今日得られている海洋大循環モデルはそれらが平均海洋循環を支配する力学過程を定量的に正しく記述しているかどうかは未だ明らかでない。その主な理由の一つは、モデルを検証し得る観測資料の入手が困難なこと、他の一つは準地衡流擾乱と海洋大循環の相互作用に関する知識の不足である。総観規模の準地衡風大気擾乱をぬきにして大気大循環を正しく把握できないのと同様、海洋における準地衡流擾乱の大循環に果たす役割は重要となるであろう。海洋は大気に比して速度の大きさが2桁小さいこと、成層が殆んど海水柱全体にわたって非常に弱いことのために、海洋の準地衡流擾乱の空間スケールが大気のそれに比してかなり小さい方へ拡がり得る。すなわち、赤道付近を除き、100 km 以下の空間スケールまで地衡流近似

が許され、また、傾圧不安定効果が 300~500 km の波長帯に集中する。このスケールの擾乱は、大西洋、そしておそらく太平洋でも運動エネルギーの大半を占めている。数値モデルでその擾乱を表現するためには、大気大循環モデルで通常用いられているものの10倍の分解能一格子間隔が  $1/10$  が必要となるであろう。したがって、この種の運動が大規模運動に与える影響のパラメータ化の方法を見出す試みが、大気の場合以上に重要となるであろう。

#### 4. 熱の南北輸送

低緯度帯では太陽からの正味の入射エネルギーは地球・大気系から赤外放射として系外へ射出される量を上回っているが、高緯度帯ではその事情は逆転する。すなわち緯度40度付近を境にして地球・大気系の放射エネルギー収支は低緯度帯では黒字、高緯度帯では赤字となっている。この不均衡を解消するに要するエネルギーの低緯度から高緯度への北向き輸送に大気と海洋はそれぞれどの程度貢献しているのであろうか。

Budyko (1956, 1963) や Sverdrup (1957) らは放射収支と海面での熱収支とを用い、平衡条件を満たすとして大気と海洋による南北輸送量をそれぞれ算出した。大気の質量は海洋のそれに比して極めて小さいが、熱の輸送に対する大気への貢献度は非常に大きいことが示されている。特に中・高緯度帯では大気による熱の極向き輸送が圧倒的に大きい。最近、Oort と Vonder Haar (1973, 1976) は気象衛星の放射資料に基づく地球・大気系の放射熱収支、ラジオゾンデ観測資料に基づく大気の極向き熱輸送量、BT による海洋観測資料に基づく海洋貯熱量などを算定し、残差として海洋による極向き輸送量を推算した。この結果は Budyko らのそれとの間に大きな差異が認められた。特に亜熱帯では海洋による熱輸送量は大気のそれに匹敵し、これまでの海洋による極向き熱輸送が過少評価されている可能性が指摘されるに至った。海洋における熱の輸送は平均水平大循環 (gyre)、鉛直子午面循環 (深層熱塩循環)、中規模渦、乱渦による拡散などによってなされる。これら種々の機構の熱輸送に果している役割については今日なお不明な点が多い。気候とその変動にとって熱の極向き輸送は決定的に重要な意義をもつので、それらの評価をより確実なものにすることが重要な研究課題となる。

### 5. 気候学的な大気・海洋間の応答

気象の長期変動に対する海洋の要因としてもっとも重要なものは海面温度のアノマリーであろう。これは海洋表層の熱容量のアノマリーの表われであり、種々様々の原因で現われ得る。Hasselmann (1976) はそのようなアノマリーは気候の大気変動を含まないランダムな大気擾乱によって局所的につくられるかもしれないことを理論的に示唆した。この理論は海洋循環によるアノマリー再分布を考慮に入れることにより、非局所的なアノマリーの発生に拡張され得る。Marchuk (1978) は海洋における熱容量のアノマリーは大気的气候変動に伴う特定域での異常な加熱あるいは冷却に依存するというモデルに基づいてそれらの応答特性を調べた。それによれば注入された熱のアノマリーは海洋循環により輸送された後、他の場所にかなりの海面温度アノマリーを生じ得る。

海洋での運動は熱のアノマリーを鉛直および水平方向に再分布するが、熱のアノマリーの海洋への注入とそれにひきつづく大気へのフィードバックの間に時間的ずれが生ずる。このずれは規則的な加熱冷却の日変化や季節変化についてはよく知られているが、もっと長い時間スケールでのそれについてはあまり知られていない。このずれの大きさは海洋内部の性質に依存し、海域によって異なる時間スケールをもつ。主な海洋の厚さはほぼ 1 km の上層（暖水圏）は数週間から数10年にスペクトルバンドをもつ特徴的な時間スケールを持つ。

ペルー沖の東部太平洋赤道海域では1958年1月から2月にかけて表層水温が3~4°Cも上昇する異常高温を示した。これが El Niño (エル・ニーニョ) と呼ばれる現象で、数年毎に現われ、大気・海洋間応答現象の典型例の一つと考えられている。通常、南米赤道帯の西海岸沖はペルー海流と沿岸湧昇で特徴づけられ、海洋生物が豊富で、とりわけアンチョビーの豊漁場である。ところが、中部太平洋熱帯で貿易風の最強期から約1年後に暖水塊がこの南米沖の海域に出現する傾向があり、それに伴って漁獲が極端に減少する。Bjerknes (1966, 1969) はエル・ニーニョを Walker の提唱した Southern Oscillation に起因する海洋の応答現象と見なした。すなわち、貿易風が弱まるとペルー海流や沿岸湧昇は衰弱し、赤道海域から暖水が南東へ拡がり南米大陸西岸沖の海洋表層をおおうという説である。Wyrtki (1973) は熱帯海域に散在する島の水位観測資料を用いて、中部太平洋における赤道反流の流量変化に約3カ月遅れて中米沖の熱帯太平洋の水温変化が起こり、また、赤道反流の流量変化は

貿易風の変化から3カ月おくれることを示した。これら海面温度の異常に伴って気象の変化も生ずる。すなわち、通常寡雨のペルー砂漠地帯で多量の降水が観測される。

要するに、エル・ニーニョは太平洋規模の大気・海洋間の応答が局所的に強調された結果の一例と考えられる。より一般的に、熱のアノマリーの存在あるいは注入および海洋内でのその輸送をモニターすることと、その後の大気へのアノマリーのフィードバック過程を明らかにすることが極めて重要となる。

### 6. POMS 計画会議の提案

観測に基づく海洋循環を導出するための解析法、既存の観測データベースの欠陥、海洋上層部のモデリングの現状とその改良、海洋モニタリングのための新しい技術（リモートセンシングと現場観測の両者について）の開発、各国あるいは各機関の POMS に関連した研究計画などについて参加者から報告され、それらについての検討がなされた。それらについては GARP Report の一分冊として近く刊行されるので、ここでは、検討の結果とりまとめられた内容と CCCO や JSC への提案を以下に要約する。

#### (1) 数値モデリングを含む理論的研究

ここでは、表層暖水圏と中規模渦の研究、これらを解像し得るあるいはパラメタライズした海洋大循環モデルの開発が重要課題となる。また、理論グループはパネルを設置し、海洋大循環モデルの改良と併行して、それらのモデルをテストし得る観測計画、データセット、将来の海洋モニタリングシステムの立案などに協力する。

#### (2) 新しい観測技術・モニタリングシステムの研究

人工衛星と acoustic tomography を核とした全球規模の海洋観測システムの開発が有望である。日本、米国、ソ連、ESA などは海洋観測衛星を計画しており、将来、少なくとも次の四つすなわち、i) 海面のトポグラフィ、ii) 海面での風のストレス、iii) ドップラーによる海面近くの流れ、iv) 表面温度、などの測定が可能となろう。また、地震波から地球内部構造を推定するように acoustic tomography を用いて、海洋中の密度の三次元分布を推定することができる。

現在、FGGE/GARP の一部として数100個の漂流ブイが南半球の海洋上で気象観測をしている。今後、海水温、塩分、海洋上層部の流れなども測定し得るようブイシステムを発展させる。商船などを利用した XBT 観測は太平洋で広範囲のデータの取得に有効となっている

が、航路外の空白域はブイで埋められるべきである。

- (3) 既存の技術に基づく全地球的海洋観測の充実と長期継続態勢への発展。

これには、特定のいくつかの hydrographic sections の維持や新設、商船などを利用した XBT 観測の強化充実をはかることがある。

- (4) 海洋データの管理

現在のシステムは気候の短期(数週間~数カ月)変動の予測のためには、データの流しは遅すぎて不相当である。資料センターと自動資料伝送システムの整備が必要である。

- (5) 上記事項をふまえて、次の二つの海洋実験を提案する。

- a. 北大西洋での極向き熱輸送量を直接測定する実験計画(CAGE experiment)の立案

4. でも述べたように、海洋による低緯度から高緯度への熱の輸送量の評価はもっとも重要な未解決の問題の一つである。これまで放射収支から、海洋・大気の両者によって輸送されるべき量は知られているが、大気と海洋による熱輸送量がそれぞれどのような割合であるかの算定は不正確である。また、中規模渦の熱輸送における役割については殆んど知られていない。これらを調べるため、赤道から 25°N まで、あるいは 25°N から 45°N までの緯度帯の北大西洋を対象域とし、これを囲む境界で海洋と大気の観測により熱の出入りを評価する。

- b. Global Ocean Circulation Experiment

海洋上層の流れ(地衡流)の分布図を描く試みで、それは人工衛星の利用によって可能となる。同時に標準海洋観測が一定間隔で実施される hydrographic sections を設置することである。ソ連が既に実施しているいくつかの section、日本が実施してきた 137°E 線に沿うもの、カナダの沿岸から定点“PAPA”までの測線などを含む“pilot ocean monitoring sections”を設定する。

- (6) 各国の POMS 関係研究プログラムを援助し、必要に応じて、国際的研究計画に発展させる。

GARP の経験からも、POMS で論議された新しい技術の開発は恐らく10年を要するであろう。またはほぼ同じぐらいの期間が海洋循環の理解を大きく進展させるには必要となろう。したがって、1980年代の10年間を目処に POMS 計画を展開するのが適当であり、現在認められていない新技術はこの期間に開発されず、この期間に開発された新技術は1990年代に実用化されるであろう。

- (7) 次の二つの国際会議を開催する。

- a. Workshop on oceanic time series

これまで既に多くの time series 海洋観測資料が存在する。例えば70年間にわたるバレンツ海の定線観測は顕著な年々変動を示す多くの情報を与えている。その他、日本や欧米各国もそれぞれ長期間にわたる観測を実施している。会議の目的は、これら time series から得られた経験、アイデア、未解決の問題などについて情報を交換し、検討することである。JSC 第1回会議(1980年3月)において、IOC, JSC, SCOR 共催として1981年4月、東京で開催されることに決定した。

- b. Impact of the oceans on global climate

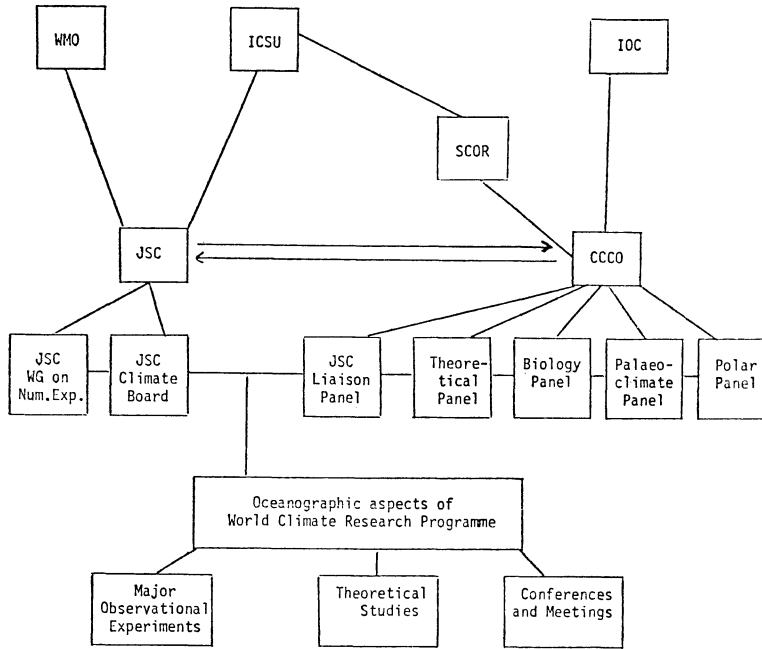
JOC/GARP と SCOR 共催の Keel meeting “The role of the ocean in the global heat budget” (1978) でも報告されたものである。1982年5月、東京で“Impact of oceanic processes on global climate and extended-range forecasting”のシンポジウムとして開催予定。

## 7. 国際研究組織と CCCO の発足

1978年 SCOR 第14回総会は WCRP に関する海洋プログラムについて助言するため、強力なグループの必要性を認め、CCCO (Committee on Climate Changes and the Ocean) を設置した。CCCO は当面、数週間から数10年の時間スケールの気候変動に重点をおく WCRP への海洋学的寄与を第一義的に取り扱うが、海洋の気候、気候変動の海洋生物・海洋循環の変動に及ぼす影響、地質的時間スケールでの海洋変動なども考慮の対象にすべきことが付記されている。さらに WCRP における海洋学の果たす重要性和 IOC との協力の必要性に鑑み、CCCO は SCOR と IOC の合同組織とすべきことが認められ、IOC 第11回執行委員会(1979年)もそれに同意し、ここに CCCO は SCOR と IOC の合同委員会として、WCRP の推進のため発足した JSC と協力しながら活動することとなった(組織図参照)。

CCCO は次の11名の委員からなっている。R. Revelle (米, 委員長), K. Bryan (米), J.D. Woods (西独), L.M. Brekhovskih (ソ), G.P. Kurbatkin (ソ), E.P. Borisenkov (ソ), A.E. Gill (英), 浅井富雄 (日), J. Thiede (ノ), A.R. Longhurst (カ), R.W. Stewart (カ)。その他、気候問題に関係のある SCOR や IOC の小委員会や作業委員会などの委員長約15名が連絡委員として加わる。例えば、A. Robinson (海洋力学), D.W. Stewart (El Niño の予測), A. Foldvik (北極海熱収支), R. Chesselet (海洋・大気間物質交換), E.D. Goldlerg (海

組織図



洋の炭素収支)などの SCOR 作業委員会, R.Y. Treglos (IGOSS), T. Winterfeld (IODE), WESTPAC 委などが IOC の関係である。

CCCO の初会合が1979年10月8日~10日、マイアミで POMS 会議にひきつづいて開かれた。主な議事内容を以下に要約する。

(1) パネルの設置

a. JSC との liaison

気象プログラムを支持・強化する海洋プログラムを発展させるため、JSC と緊密に連絡し、協力を維持することで、Stewart らがこれにあたる。

b. 極域海洋

高低緯度間の熱輸送の僅かの変化が海氷の拡がりの変化をもたらす。また、海氷の拡大はアルビードを増大して大気・海洋は冷され、海氷はさらに拡大するという正のフィードバックが期待される。このように、海氷の変動は海洋と大気気候変動のもっとも強力な信号の一つである。さらに、海氷生成域では、表面近くの海水の塩分は増大して密度が大きくなり、その結果底層水形成が加速、増幅されるであろう。これらの問題を取り扱う。

c. 気候と海洋生態学

本会合では生物学者のメンバーが欠席したため、議論はなされなかったが、魚群の規模や位置は海洋の気候変動の影響を受けるが、ここでは特定の種のみではなく、気候変動によって影響を受ける海洋の全生態系を扱う。

d. 高解像の古気候学

近時、ある特定の環境で蓄積された堆積物を研究することによって過去の条件の年々変動を見出すことが可能となった。サンゴもその有力な資料の一つであり、その成長速度や O や C の同位体比にも海水温の年々変動が反映するであろう。もし、この手法がうまくいけば、過去数10年~数100年の熱帯・亜熱帯表層水の温度、塩分などの時間シリーズの資料を著しく増大し得る。

e. 理論とモデリング

海洋と大気モデル、および海洋・大気結合モデルなどを扱う。また、海洋のモニタリングやサンプリング、モデルの検証のための観測計画などについて助言する。

その他、上述の POMS 計画会議が提案した、二つの海洋実験計画、すなわち CAGE と GOCE の立案、二つの国際研究集会開催などが採択された。これらは JSC, SCOR, IOC などに報告され、問題に応じて適当

な組織や機関で検討され、採択されたものについては具体化への努力がなされる。

### 文 献

- 片山 昭, 1979: 世界気候会議と世界気候計画, 天気, 26, 733-743.  
 浅井富雄, 1980: CCCO 第1回会合の報告, 日本海洋学会誌, 36.  
 世界気候小委員会: わが国の気候変動研究計画について(I), 天気, 27, 298-302.  
 JOC Study Conference on the Physical Basis of Climate and Climate Modeling, GARP Publications Series, No. 16, 1974.  
 Report of the First Meeting on the JOC Board for the Climatic Dynamics Subprogramme, 1977.  
 Report of the Second Meeting on the JOC Board for the Climatic Dynamics Subprogramme, 1978.

- Report of the Third Meeting on the JOC Board for the Climatic Dynamics Subprogramme, 1979.  
 Report of the JOC/SCOR Joint Study Conference on General Circulation Models of the Ocean and their Relation Climate, Vol. I, and Vol. II, 1977.  
 Report of the JOC/SCOR Specialists Meeting on the Role of the Ocean in the Global Heat Budget, Kiel, FRG, 6-8 November 1978.  
 Report of the JOC/SCOR Planning Meeting on the Pilot Ocean Monitoring Study, Miami, 1-5 October 1979.  
 Report of the Panel on Monitoring Ocean Climate Fluctuation, GARP/SCOR Working Group 48, Geneva, November 1977.  
 Report of the Pilot Ocean Monitoring Study planning Meeting, Miami, 1-5 October 1979.