

WCP の窓

気候変動と海洋に関する研究の最近の動向 (3)*

—WCRP 大規模海洋実験研究会議

(東京, 1982年5月) の報告**—

浅井 富雄***

1. はしがき

ICSU-WMO 合同科学委員会 (JSC) によってまとめられた「世界気候研究プログラムの準備的計画」(Preliminary Plan for the World Climate Research Programme, Geneva, 1981) において、気候にとって重要な成分の一つとして海洋過程がとりあげられている。海洋は熱の輸送・貯留を通して地球熱平衡に重要な役割を演じているので、これらの海洋過程を理解し、そのモデルをつくり、変動を予測することが重要であるとされ、JSC 第1回委員会 (1980年3月) は JSC と CCCO 共催の「海洋の世界気候に及ぼすインパクトに関する研究会議」を1982年5月東京で開催することを提案した。

日本側関係者が種々検討の結果、気象庁がホストとして会議開催を引き受けることになり、国内準備委員会を発足させた。

JSC 第2回委員会 (1981年3月) および CCCO 第2回委員会 (1981年5月) は会議の大綱を決定し、JSC と CCCO 合同の組織委員会 (A. Robinson 議長, D. Anderson, 浅井富雄, G. Kurbatkin, C. Leith, M. Petrossiants, G. Tucker, J. Woods) が設置された。国際組織委員会は1981年8月17~18日パリの ICSU 本部で初会合を開き、プログラムと招待者の大要を決定した。その後、若干の調整がなされ、最終的には次のような内容の会議となった。すなわち、第1週には、気候に及ぼ

す海洋の影響、気候研究にとって重要な海洋の研究についてのレビュー、研究計画の提案など9セッション36の講演が行われる。(1) 気候に及ぼす海洋の影響、(2) 大規模な海洋過程とモデル、(3) 総観規模、中規模および小規模の過程とモデル、(4) 外部系との相互作用と表面でのフラックス、(5) 人工衛星による観測システム、(6) 直接観測システム、(7) 観測資料解析法に関する諸問題、(8) 大規模実験、(9) 地域規模実験である。第2週には、「気候に及ぼす海洋の影響」、「モデリングと数値実験、解析」、「全球的・地域的実験」の3つのグループに分かれて、第1週の研究報告に基づき、今後の研究の進め方について討論し、研究実験計画の立案、勧告のとりまとめが行われる。

JSC-III (1982年3月)、CCCO-III (1982年3月) で上記計画が確認された。一方、国内準備委員会は実行委員会 (安井 正委員長, 駒林 誠, 新田 尚, 内田英治, 秋山 勉, 二谷 頌男, 岸保勘三郎, 浅井富雄) に切り換わり、local arrangement を担当することとなった。

会議には国外から米, 英, ソ, 加, 仏, 西独, 豪, ニューカレドニア, ベルギー, 国際組織 WMO, IOC, JSC, CCCO などから64名, 国内から18名, 計82名が参加した。

2. 海洋の気候に及ぼす影響

2.1. 海の熱的慣性

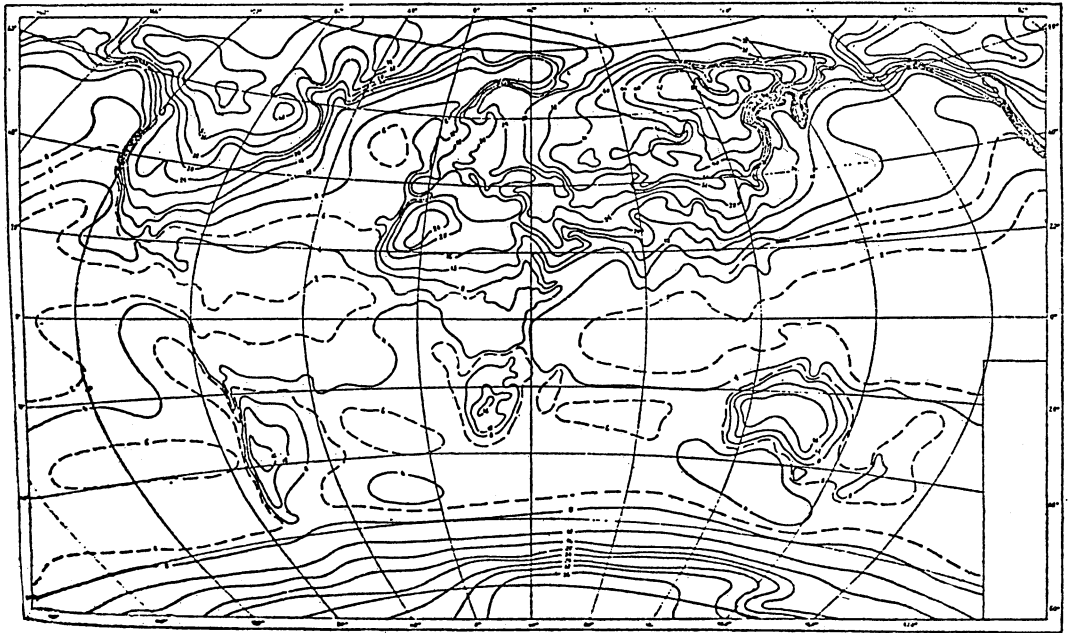
海洋の気候における重要性は主に (1) 海洋は大気に対する水蒸気補給源であり、(2) 海洋はその巨大な熱含量のため大気に比し大きな熱慣性をもっていることから発する。

熱的慣性の影響は表面気温の季節変化を見れば明瞭である (第1図)。これは海洋は陸地に比べ表面気温の季

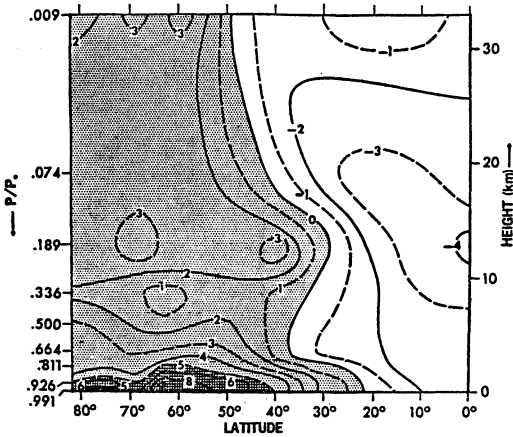
* Recent progress in studies of climatic changes and the Ocean (3).

** Report of the Joint JSC/CCCO Study Conference on Large-Scale Oceanographic Experiments in the WCRP, Tokyo, 10-21, May 1982.

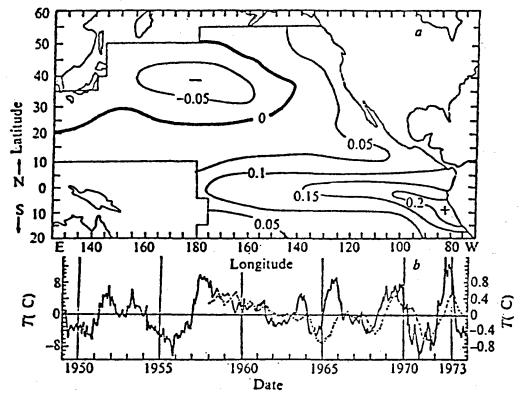
*** Tomio Asai, 東京大学海洋研究所.



第1図 表面気温年変化の振幅の分布 (Monin, 1975).



第2図 海流による熱輸送を考慮に入れた大循環モデルにおける帯状平均気温の海流を考慮しないものからの差の鉛直子午断面 (Manabe, 1969, 1982).



第3図 太平洋海面水温の EOF 第1項を示し、それは非季節的变化の23%を説明する。下図の実線はその時間係数、破線は熱帯対流圏平均気温で右側にスケールが示されている (Weare et al., 1976).

節変化を減ずること、その影響は沿岸陸上にまで広がっている。冬期中緯度偏西風帯では、大陸上から海洋上へ吹き出す寒気は海洋西岸付近で海洋から大気へ大量の熱を輸送させる。それに対応する熱源は対流圏で見出さ

れ、その熱源の強さは年々異なることが示される。海洋の東岸域では、暖気が海から陸へ吹き、北欧などの地域に温かな冬をもたらす。もう少し低緯度帯では、大陸-海洋間の温度差の符号の季節的反転は大規模モンスーン

循環を生ずる。大気の準定常循環パターンの性質を決定するのに海-気温度差が大きな役割を果たしていることは Blinova (1947), Smagorinsky (1953), Döös (1964) らによって示された。これらは気候の地理的分布を決めるのに海洋の重要性を示している。

2.2. 海流による熱・物質の輸送と再配分

海流は熱を再配分することによって、とりわけ低緯度帯から高緯度帯への輸送によって、気候に大きな役割を果たしている。Oort と Vonder Haar (1976), Bryden と Hall (1981) らは海洋は大気によるとほぼ同量の熱を輸送することを示している。Manabe と Bryan (1969) の数値実験は海流を考慮した場合としない場合を比較することによって海流の役割を示している(第2図)。海に起因する表面気温の上昇は特に高緯度帯で顕著であり、そしてそこでの温暖化は大気の安定成層のため下層に限られている。高緯度帯の昇温はアルペードの大きな雪氷面の境界の極向き後退によってさらに強められる。これらのことは気候形成における海流による熱輸送の重要性を示しているが、現在その評価は極めて不確実である。これが Heat Flux Experiment (大西洋“CAGE”太平洋“PATHS”など)を計画する理由である。

海洋はまた、大気 CO₂ 濃度の増加などのような外因に対する気候の応答にも大きな影響を与える。海はその大きな熱慣性の故に CO₂ 増加に伴う温暖化を大いに遅らせ得る。さらに、海は大気中に放出された CO₂ のかなりの部分を吸収するであろう。10~100年の時間スケールで温度アノマリあるいは CO₂ や他の微量物質の海洋中での分布やその変動を高い信頼度で評価するためには海洋大循環モデルが観測によって検定され、改良されることが必要である。World Ocean Circulation Experiment (WOCE) の主な目的の一つはここにある。

2.3. 気候アノマリ

大気も海洋も数カ月~数10年の時間規模で大きな非季節変動を示す。実際、熱帯では年々の変動は季節変動より大きい。WCRP の大きな目的はこれら気候アノマリとその原因を理解することである。因果関係には不明な点が多いが、海洋はその変化に深くかかわっているであろう。アノマリの記述は種々の方法でなされ得るが、EOF (empirical orthogonal function) を用いて簡単なパターンにより変動の大きな部分を表わすのが効果的である。非季節の変動は地球上で一様に分布しているのではなく、変動が比較的大きく、あるパターンをとる特定の場所が見出される。例えば、大気のパターンの解析に

については Wallace と Gutzler (1981), Horel (1981), など、海水温アノマリについては Navato 他 (1981), White と Hasunuma (1980) などがある。第3図はその一例で、太平洋における EOF 第1項とそれの時間変化を示している。

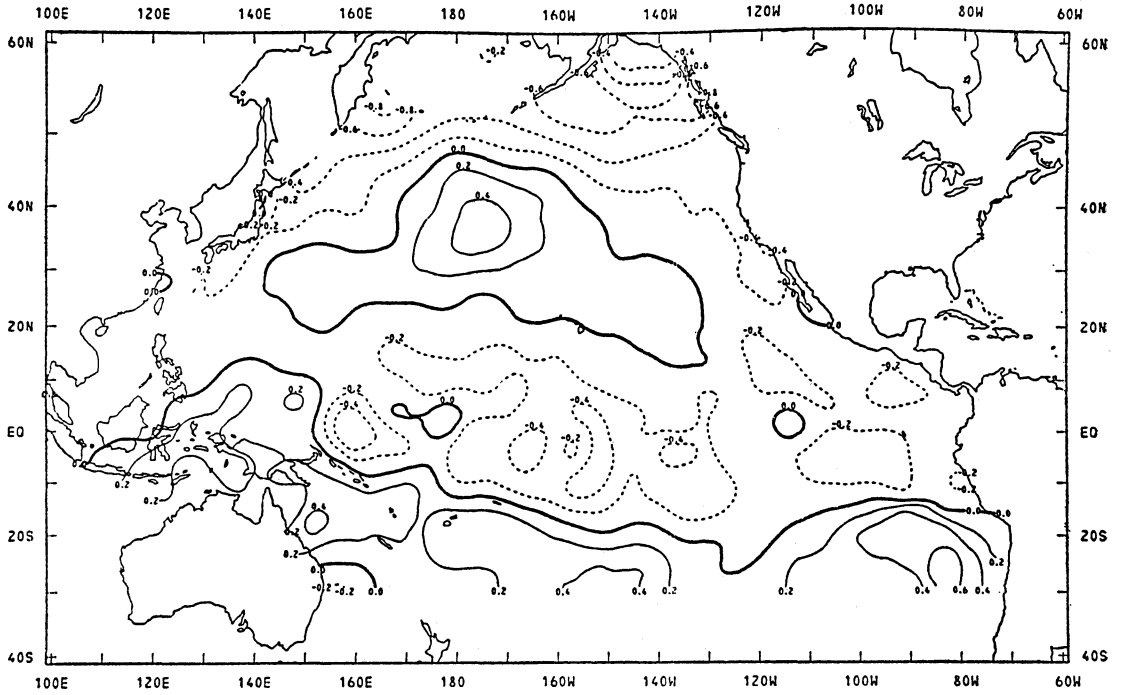
年々変動の最も明瞭な信号はいわゆる“Southern Oscillation”であり、それは地球規模の大気-海洋系における大きな変動である。SO index の単純なものはダーウィンとイースター島の気圧差である。SO index と大気や海洋の変量との相関パターンは地球規模のものであることを示し、その index はまた、太平洋の水温変化と関連する時系列とも密接に関係している(第3図)。

最近の研究によって、SO と結びついたパターンは定常ではなく、季節サイクルと結びついて移動することが明瞭となった。Rasmusson と Reynolds (1982) は6回の El Niño のデータを重ね合わせて熱帯太平洋における海面水温と風のアノマリの変動を記述し、北太平洋へその研究を拡張した(第4図)。El Niño の海面水温分布と前年のそれを比較すると、パターンはあまり変わらないで、符号が逆転している。さらに、El Niño 年につづく1月、4月のパターンは明らかに移動している。SO index と関係のある海面水温アノマリはインド洋(Wright, 1977)や大西洋(Covey and Hastenrath, 1978)でも現れる。

このような顕著な表面水温アノマリに対応して降水、風、気温などのアノマリパターンが見出され、それらは海洋の作用に対する応答とも、海面水温アノマリの原因の一部とも考えられる。

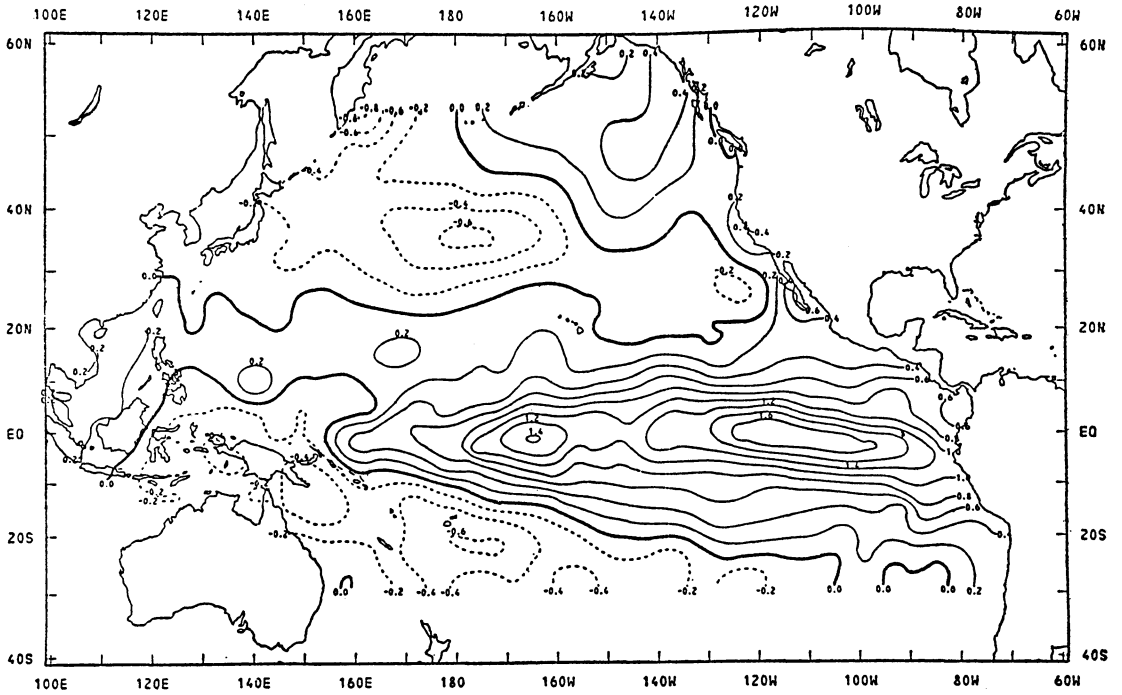
大気大循環モデルを用いた数値実験は海面水温アノマリの大気に及ぼす影響について理解を深めることに貢献した(Rowntree, 1972, 1976, 1982; Julian and Chervin, 1978; Keshavamurty, 1982; Wallace and Shukla, 1982)。大気の応答はアノマリの現れる場所にとりわけ強く依存する。熱帯での正のアノマリの効果は中緯度帯のそれより大きく、西・中部熱帯太平洋でのアノマリの影響は東部でのそれより強い。

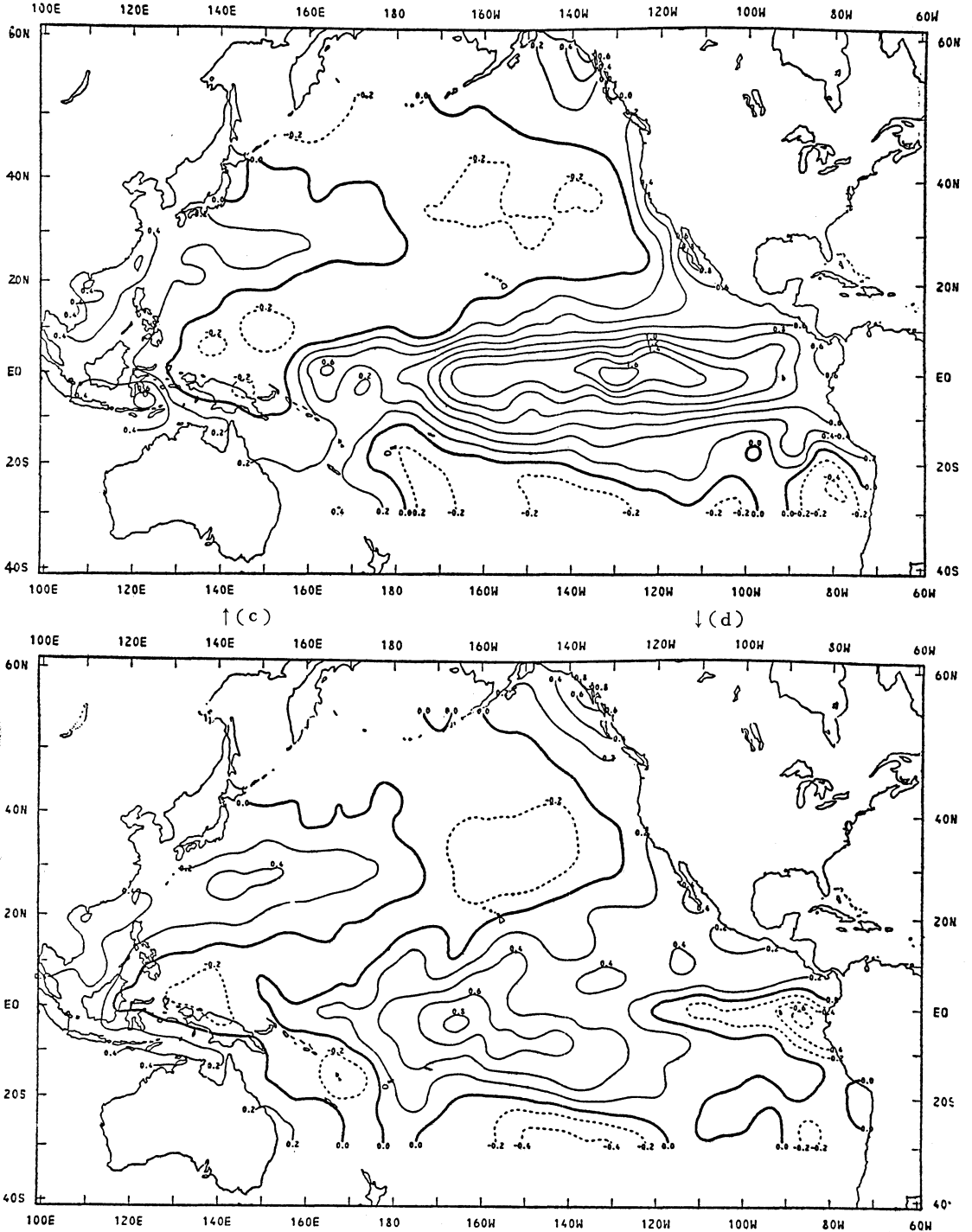
数値実験モデルやデータ解析によると、大気の応答は熱帯だけではなく中緯度帯にも、とりわけ冬の北半球で見出される(Horel and Wallace, 1982; Hoskins and Karoly, 1981)。さらに Simmons (1982) は大気中の定常波パターンのために、中緯度帯大気の(1)応答は forcing の経度に依存し、(2)大気は応答の卓越モードをもっていることを示した。そして Wallace と Sim-



↑(a)

↓(b)





第4図 6回の El Niño ケース (1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1972) を重ね合わせた海面水温アノマリの分布図。(a) El Niño の前年10月(9, 10, 11月3ヵ月平均), (b) El Niño 年の10月, (c) その後の1月, (d) 4月 (Rasmusson and Reynolds, 1982).

mons (1983) は (1) 気圧パターンの卓越応答はアリュージアン低気圧とアイスランド低気圧付近に中心をもち、(2) 西太平洋の forcing は東太平洋でのそれより強い中緯度帯の応答をもたらすことを示した。

Rasmusson と Carpenter (1982) はインドの夏のモンスーンに伴う降雨との関係を調べ、特に El Nino の 20% はその後、降水が平年値より 2σ 以上少ない強い早魘 (σ は標準偏差)、44% は σ 以上少ない早魘と結びつく。その他、SO は地球規模の現象であるから、種々の関係があるに違いない。

SO は大気・海洋変動パターンの一つであり、他にも海洋の影響についてたくさんの例がある。例えば北東ブラジルの早魘と表面水温 (Moura and Shukla, 1981)、サハラ早魘とギニア湾の暖水 (Merle, 1982) 等々である。

3. 海洋大循環実験 (WOCE)

World Ocean Circulation Experiment (WOCE) の目的は海洋大循環の理解を増進するために、まず、エネルギーや物質の循環の診断的研究に適した世界海洋の均質なデータセットをつくること、次に、大気の変動に対する海洋の応答を予測するためのモデルをテストすることである。CCCO-II と JSC-II では、人工衛星に高度計と散乱計を搭載して全地球的観測ができれば WOCE は可能であるという考えのもとに、詳細な観測の設計に進む前に WOCE の優先目標を明確にすることが必要であるとし、design option を検討する研究グループ(議長 F. Bretherton) を発足させた。

Study Group により展開された戦術は次の二成分から成っている。(1) gyre や大規模な準停滞性のものと中規模渦などより小規模な移動性擾乱の両方を含む海洋の時間的・空間的変動特性を記録すること。この記録は全実験時間 (~5年) における平均、季節変化、年々変化を表わすであろう。(2) water mass conversion の率を人工衛星による海面高度測定、海洋断面観測、トレーサー測定などによる間接法と海洋境界層の直接観測の両方により求めることである。

これらの観測には、海面における風のストレス、海面水位、海面水温、海面熱収支成分の放射、大気頂での正味放射など衛星観測により測定することを含んでいる。

したがって、高性能の高度計と散乱計のシステムを持つ衛星が必要であり、Study Group は互いに軌道を調整した少なくとも三つの高度計と二つの散乱計が必要であ

るとしている。

研究会議では個々の観測項目とその意義について議論が行われ、WOCE Design Option Study Group の報告書の大綱を支持し、WOCE を指導するため WOCE Steering Group を設けることを JSC と CCCO に勧告した。

4. 海洋熱輸送実験 (Oceanic Heat Flux Experiments)

4.1. 目的

海洋における熱(および塩分)の南北輸送量を評価し、その輸送についての理解を増進することが海洋熱輸送実験の目的である。1980年、JSC-I と CCCO-I の決定に従って、北大西洋での実験—最初 CAGE Experiment と呼ばれたが、その後、太平洋でも同様のことが検討されるに至ったので、北大西洋 CAGE、北太平洋 CAGE と区別される—の feasibility がその研究グループ(議長 F. Dobson)によって検討されてきた。実験の主眼は、三つの異なる評価法:(1) 大気の熱収支 (Oort and Vonder Haar 法)、(2) 海洋の熱収支 (Bryden, Hall, Szoeké 法)、(3) バルク法による海面熱収支 (Bud-yko 法) の結果を比較して、海洋熱輸送量と共に海洋から大気への熱フラックスの評価法を確立することである。Feasibility Study Group の検討結果*によると、数年間にわたって実施される北大西洋 CAGE 実験は三つの方法に伴う誤差を明らかにし、海面を通しての熱フラックスを評価する最善の方法を見出す望みがあるとしている。

4.2. 提案された実験計画

4.2.1. 北大西洋 CAGE

24°N で熱・塩分の南北輸送の直接測定を Bryden and Hall (1980) の方法により $\pm 20\%$ の精度で実施すること。4.1. 節に記述済みである。

北大西洋北部海域での GIN CAGE は (1) 高緯度帯で深い対流による水塊変換過程をグリーンランド—アイスランド—ノルウェー海域で熱・塩分の流出流入をモニターすることによって調べる。(2) 高緯度の海面での熱フラックス評価法を (1) と比較して検定。(3) 深い対流過程の海面での熱フラックスなどに対する応答に際しての淡水の役割を解明することなどを目指している。

* The "CAGE" Experiment: A feasibility study, Final Report, January 1982, commissioned by the JSC/CCCO Liaison Panel.

4.2.2 PATHS (Pacific Transports of Heat and Salt)

(a) 中緯度北太平洋の上層1,000 mにおける平均熱・塩分輸送, 貯留を測定すること. (b) 海洋による輸送と海気間フラックスの変化に伴い時間変化する海洋の熱・塩分の分布を調べることが目的である. いわば北大西洋 CAGE に対する北太平洋は対応体をなすものである.

(1) 太平洋規模実験

本州南方海域で繫留系による流速測定と太平洋横断観測から成る Ocean Heat Transport (OHTEX), 東シナ海と琉球南東海域における黒潮による熱輸送を測定する Heat Advection Investigation in the Kuroshio (HAIKU) とが含まれている.

(2) 中間規模実験

海洋と大気中のフラックスの発散の比較実験を季節, 1年~数年の時間スケールで実施する. 密な ships of opportunity 観測網が WWW と IGOSS の一部として 30°~45°N に存在するので, PATHS の時間変動部はこの地域に焦点を合わせる. 副計画として, (a) 三海域で海気間フラックスを種々の方式で評価し比較する. (b) 近々, 水温 0.1°C, 塩分 0.01% の精度で XCTD がルーチン観測に使用できるようになることを考慮して, 熱・塩分の収支の算定に必要な最適観測網のデザインの研究. (c) 東部北太平洋での熱・塩分輸送の評価の準備的研究などがある.

(3) Nested, process-oriented studies

大規模海洋循環の研究で用いられるパラメタリゼーションを検証し, サンプリング誤差を評価するため時間的・空間的に小規模な現象についての process oriented な実験が必要である. そしてこれらの実験は大・中規模実験の anchor point としても有効である.

(a) 本州南方海域での海洋混合層実験 Ocean Mixed Layer Experiment (OMLET) が提案された他, 併せて (b) エクマン輸送, (c) 表層混合層下面での鉛直混合などの研究の重要性が指摘された.

4.3. 勧告

1. JSC/CCCO Scientific Steering Committee を設置して, 全体的な実験設計に必要な CAGE PATHS 研究を組織し, 指導すること

2. 次の研究が CAGE PATHS 実験の先鋒として実施されるべきである.

(1) 黒潮と湾流の輸送量測定

(2) 海洋中の熱・塩分量測定のため深くまでとどく

XBT, XCTD の開発

(3) ROTUS, OMLET などの小規模で注意深く制御されたフラックス収支の研究および資料解析

(4) 中規模渦による海洋の熱・塩分輸送の推定

(5) 要求される精度 ($\pm 10 \text{Wm}^{-2}$) を満たすに必要な気象観測網についての observing system simulation experiment

その他にもいくつかの要請がつけ加えられた (省略).

5. 熱帯海洋と大気大循環 (TOGA)

5.1. 目的

第2章に述べたように, 熱帯海洋は大気大循環の年々変動に影響を及ぼすことを示唆する資料は増しつつあり, また, 熱帯の海面温度アノマリは統計的にもモデル研究でも大気のアノマリと関連づけられる. Tropical Ocean and Global Atmosphere (TOGA) の目的はこれらの観測事実相互の関連に対する物理的基礎を与えることである. したがって (1) 熱帯海洋の変化と関連している地球規模大気循環の変動を明確に記述し, その関係の物理過程を把握する. (2) 大気循環の変動に影響を及ぼしている熱帯海洋の変動を記述し, その原因を解明することである.

1982年3月 CCCO-III は "The Interannual Variation of the Tropical Oceans, its Atmospheric Causes and Effects (IVTOACE)" を研究計画の一つとしてとりまとめた. 一方, 米国は "El Niño and the Southern Oscillation (ENSO)" を計画し, また, "Monsoon Climate Programme" が検討されつつある. これらは内容的に重複することも多いので, JSC と CCCO の TOGA に関する Joint Study Group (議長 A. Gill) を設け, そこでの検討結果が JSC に報告されることになっている.

5.2 観測

上記の目的を達成するために必要な観測は次の三つの部分, (1) 全地球大気, (2) 熱帯における気-海交換, (3) 熱帯海洋から成っている.

(1) 全地球大気

(a) 衛星による赤外放射連続観測から激しい降水域, したがって潜熱解放による大気の駆動域を検出. (b) 静止衛星による雲の移動から上層と下層の風の推定. (c) 衛星による降水率の定量的評価など衛星観測が重要な部分となる.

(2) 気-海交換

(a) 風のストレス: 船による風の観測と静止衛星に

よる下層雲風を組み合わせて海上風を推定, 散乱計による風波スペクトルの測定を用いて風のストレスを推定することなど, その海上広域分布を決めるための研究.

(b) 潜熱フラックス: 潜熱フラックスを 20 Wm^{-2} の精度で得るためには海面水温は 0.5°C , 風は 1 ms^{-1} , 比湿は 0.0005 , の精度が要求される. したがって湿度測定精度の向上が要求される. (c) 正味太陽放射フラックス: 1° 格子で 5 Wm^{-2} の精度. (d) 長波放射: 熱帯での年変化は比較的小さく, 測定上の困難はない.

(3) 熱帯海洋

(a) 海面温度: 月平均値に対する要求精度は $1/4^\circ\text{C}$, (b) 海面塩分濃度: 降水の指標としても使える. (c) 海面水位: 島, 沿岸, 海山などでの水位観測, 衛星高度計による海面凸凹の広域分布についての研究. (d) 上層の熱的構造: 表層での熱の移動, 相対地衡流を得る. (e) 流れ: 多くの検討を要する.

5.3. 時間・空間規模

TOGA の第一義的目的は年々変動の研究であるが, それは年変化と組み合わせられているので, 季節サイクルについての知識も必要である. したがって1カ月の時間解像度が適当であろう.

南北スケールは非常に小さい. 例えば赤道ケルビン波は約 4.5° , 赤道反流は 6° , 赤道潜流の半値幅は 1° である. 東西スケールはもっと大きく, 10° の解像度でよいであろう.

5.4. 熱帯域における観測計画の現状

各国, 各地域で以下に列挙されるように, 種々の観測あるいは観測計画があるので, CCCO Tropical Panel がそれらを検討し, TOGA のための国際的調整に努める必要がある.

(1) 太平洋

(a) 日本と米国の衛星計画

(b) EPOCS 計画(米): 南米沿岸からガラパゴス諸島に至る海域で, 大気的作用に対する東部熱帯太平洋の応答を研究することが目的である. 1983-1987年, 150°W まで拡大して実験を行う.

(c) TROPIC HEAT 計画(米): 季節~数年の時間規模での海洋上層の熱と物質の収支の変動を研究することが目的である. 冷水塊の貫入する中部太平洋 110°W - 150°W , 5°N - 10°S の海域で, 1983年から5年計画の実験.

(d) ERFEN 計画: 東太平洋で海洋断面観測を可能なところでは季節毎に反復する. ペルー, エクアドル,

コロンビア, チリーなどが参加.

(e) PEQUOD 計画(米): 中部赤道太平洋

(f) 海面水位観測: 1972年以来, ハワイ大学は西太平洋熱帯域で水位観測を維持してきたが, これによって El Niño の進行過程が明らかになりつつある. これらの観測を継続し, 水位の上昇を初期段階における El Niño の開始として記録する. 熱帯太平洋全域での研究を強化し国際的に計画を調整すること.

(g) ORSTON ニューカレドニア・タヒチ研究所は種々の航路沿いの XBT, 表面塩分観測の time series を保持している. 西太平洋熱含量と表層物質分布を研究し, これを大気の変動と関連づけることが目的である. オーストラリア CSIRO はある期間, 西太平洋の断面を補充する可能性あり.

(h) 137°E 南北断面観測(日本)

(i) Sections 計画(ソ連): 西太平洋における断面観測を赤道まで拡張する.

(2) 大西洋

(a) SEQUAL (Seasonal, Equatorial, Atlantic Experiment, 米): 季節変動する風系に対する海洋上層の応答の研究. 観測と同時にモデリング研究に重点を置く.

(b) FOCAL (Programme Français Océan et Climat Atlantic Equatorial, 仏): 熱帯大西洋における熱・物質のフラックスの長期変動の研究.

(c) Sections 計画(ソ連): 0° ~ 12°N , 40° ~ 50°W における多角形, 30°W , 20°W 南北断面での年4回観測.

(3) インド洋

西インド洋は季節風に伴って海洋循環が最も劇的に変化する海域である.

FGGE-INDEX: ソマリー沿岸と赤道沿いの海洋の南西季節風に対する応答についての研究に貢献した.

SINODE 計画 (Surface Indian Ocean Dynamics Experiment, 仏): Guardafini 岬と La Reunion 間に年4回の断面観測を維持. 衛星追尾浮遊ブイで, 上層熱含量, 帯状流, 海面条件などの年々変動を研究.

これらの年々変動研究を, 船舶, 衛星観測を含め強化することが CCCO インド洋 Panel (議長 J. Swallow) の目的の一つである.

TOGA 研究の少なくともその最初の段階は, CCCO Tropical Panel と JSC/CCCO Study Group によって Modelling Panel の援助を得ながら組織されること, その他10数項目の勧告がまとめられた.

6. 先導的海洋観測方式の研究 (POMS)

Pilot Ocean Monitoring Study (POMS) は科学的根拠に基づく気候予報のための海洋モニタリングの確立を窮極の目標とするが、現在、海洋循環に関するわれわれの知識が乏しいので、何を何処で如何にモニターするかを指定することは困難である。そのための戦術として POMS は次の三つの成分から成っている。(1) 既存の海洋時系列資料を収集、解析、解釈し、それより得られた経験を検討する。(2) 各国での長期海洋観測を維持、促進し、そのような活動を公開して、参加を望む他国グループとの調整をはかる。(3) 将来のモニタリング要求を満たし、採算のとれる能率的な新しい海洋観測手法を開発することである。

1979年マイアミ研究会議で提案されて以来、上記の線に沿って次のような活動が開始された。

(1) 1981年5月、東京で“Time Series of Ocean Measurements”研究会議が開かれ、その成果はいくつかの刊行物として発表されている。

(2) 世界各海域での海洋モニタリングは増加しつつあり、また、既存資料から得られた成果も発表されつつある。NEADS 計画で北大西洋における長期繫留測流計群の解析によって準地衡流のエネルギーが大きな季節変化をしていることを見出した。ソ連の Sections 計画(後述)、フロリダ海峡での流速測定などが始まった。ICES (The International Council for Exploration of the Sea) は北大西洋における活動成果を定期的に出版し、さらに POMS の支援活動を申し出ている。(3) 海洋モニタリングのための多くの新しい技術も開発されてきた。最初の海洋衛星“Seasat”の高度計と散乱計による測定結果の出版、acoustic tomography の第1回目の野外実験が1981年熱帯大西洋で成功裏に実施された。第1回目の船上ドップラー acoustic 法による流速分布の測定結果が出版された。欧米の多数のグループがその経験を得つつある。“Batfish”のような towed undulating system は長い断面観測に適しており、1981年北大西洋でのルーチン観測に用いられた。ARGOS 衛星によるブイの追跡解析は北大西洋における平均循環や渦の統計的性質、ブイの運動と等力学高度線パターンとの相関などを示した。

(4) CCCO と JSC は、IOC と WMO の要請に応じて、海洋モニタリングのための行動計画 (Action Plan for an Ocean Observing System) を策定した。

(5) Sections 計画

ソ連は以前から提案していた Sections programme に

基づいて、1981年から5年計画として、Energetically Active Zones of the Ocean (EAZO) である5つの海域—ノルウェー沖、ニューファウンドランド海域、熱帯大西洋、黒潮域—で気象・海洋観測を開始した。全部で15隻の観測船が参加し、年2回、特に黒潮とニューファウンドランドの2つの海域では年4回、それぞれ約3週間の観測である。

日本、その他の国のモニタリング活動も報告された。現在のモニタリング計画は大いに支持されるべきであるが、今後の新しい計画の立案に際しては cost-benefit の検討を充分に行って慎重に対処すべきであるという意見が強かった。

7. 海洋モデリング

7.1. モデルの分類

モデリングと WCRP 海洋実験との相互関係を示す第1表は実験計画におけるモデルの役割についての考え方を総括している。

縦軸には三つのカテゴリに大別された種々のモデルを示している。上段には横軸に示された各海洋実験計画へ寄与し得る既存のモデル、中段には実験計画の各成分を理解するために重要と考えられる物理過程のモデルや、より複雑なモデルを理解するためのモデル、下段には海洋循環における物理過程の洞察に寄与し得る新しいモデルの開発、を示している。そして、二重丸印(◎)は直ちに必要、丸印(○)は今後5年間に以内に必要となるモデルである。

(1) 大循環モデル

第1表上段の二種類のモデルは、(a) 中小規模渦を解像しない海洋大循環モデルと (b) 中規模渦を解像する大循環モデルである。最初のもは循環の大規模構造と三次元密度構造を研究するために考案されている。現在その欠点は種々の物理過程—中規模渦、高緯度帯での対流、鉛直混合—などをパラメタライズしなければならぬことである。第二のモデルは中規模渦を陽に含み、渦の変動度や混合の地理学的分布を説明するのにかなり成功している。しかしながら、この種のモデルは大抵海洋中の熱力学過程や大気との熱力学的相互作用を含んでいない。したがって、活発な水塊形成過程や大規模な躍層構造の形成などは表現できない。これら(a)、(b)二種類のモデルの結合は今後5年間の重要な課題の一つとなる。そのような大循環モデルの完成は主要な WCRP 実験計画の全ての研究に寄与し、広範な計画の統合に役

第1表

海洋モデル	海洋実験			
	海洋大循環 WOCE	先導的海洋モニタ リング POMS	海洋熱輸送 Heat Flux (CAGE, PATHS)	熱帯海洋 TOGA
海洋大循環モデル				
(a) 低解像	◎	◎	○	○
(b) 高解像	◎	◎	○	○
赤道モデル				◎
物理過程あるいは地域モデル	◎	○	◎	
大気・海洋結合モデル	○	○		○
混合層モデル	◎	○	◎	◎
海氷モデル	◎	○		
概念的・解析的モデル	◎		◎	◎
等密度面 (outcrop) モデル	○	○		
地球化学海洋モデル	◎	◎		

立ち得るであろう。

(2) 赤道海洋過程

現在二つの型のモデルが用いられている。(a) 簡単な一層あるいは二層(重力を減じた)モデル: 風のストレス分布の季節的および年々変動に対する表層循環の変動を再現することを目指す。(b) より詳しい鉛直構造と非線型性を入れたモデル: 潜流の形成や維持, 移流過程, 海面水温を変える断熱過程など, (a) で考慮されない力学過程に注目する。

両者とも赤道海流の力学の解明に寄与し, したがって, TOGA 計画に貢献する。赤道域と亜熱帯環流との交流を妨げる人工的な壁がとり除かれ, 中緯度帯へ拡張されると, これらのモデルは WOCE や CAGE などにも役立つであろう。

(3) 地域的・物理過程モデル

海洋の特定域にあわせた, その海域に特有な物理過程を表わすためにつくられた高解像モデルである。地域的現象の実態を調べたり, そのパラメータ依存性や敏感度についての研究ができる。黒潮やその延長海域, 西部北大西洋中規模渦海域, 南大西洋東部境界流とその変動などが対象例である。これらは大循環モデルを補充し, 将来, それに埋め込まれ得る。また, 地域モデルは観測資料同化や実験設計のシミュレーションに特に適している。

(4) 大気・海洋結合モデル

海洋の気候に果たす役割を明確にするのに中心的役割を果たすものである。現在数グループが今日の地球の気

候系をシミュレートしたり, CO₂ の影響や過去の気候など, 特別な問題を調べるために気候系をモデル化すべく大気・海洋結合モデルをもっている。それらのモデルの海洋部分は, 大抵, 大循環低解像型(a)のものである。したがって, 結合モデルでは, 中規模渦, 等密度面混合などの効果を含める努力が必要である。しかし, そのようなモデルでは経費節約のため, より簡単な低解像度の大気モデルを用いることになる。この種のモデルは孤立した(海面境界条件が与えられた)海洋モデルに対する補完モデルとして役立つ。WOCE や TOGA はそのようなモデルが大規模な気-海相互作用についての理解を増進させ得るよう企てられた計画でもある。

(5) 海洋混合層モデル

海洋混合層は大気と海洋の接点であり, 混合層物理の正確な表現は気候研究にとって不可欠である。混合層は大気が海洋のより深層部と交流し得る程度を決定する。対流が年々異なる強さで起こる高緯度帯での混合層力学は水塊形成過程, したがってまた, 気候変動にとって重要となる。上層の乱流域の深さは海洋-大気間熱交換率を制御する。低緯度帯で, 海洋から大気への熱補給はテレコネクション機構を通して中緯度帯における大規模な大気の応答(アノマリ)をもたらすことが示された。一次元混合層モデルの現状は比較的進んでおり, 低解像海洋大循環モデルへの導入もなされつつある。混合層モデルは通常準ラグランジュ系で定式化されるが, 海洋大循環モデルはオイラー系で表示されているので両者の結合に際し, 若干の技術的問題が生ずる。この問題を解決す

れば、両者の結合によって海洋大循環モデルは気候変動のモデル化にその威力を増すであろう。

(6) 海氷モデル

海氷の拡がりや融けは海面アルベドに大きな影響を与え、両者のフィードバックは気候変動に重要な役割を果たす。多くの大気・海洋結合モデルは海氷の影響を簡単な熱力学で取り扱い、氷の移流を含めていない。氷の拡がりの他にその厚さをも考慮する必要がある。したがって、気候モデルの内部変数として海氷を扱い得る海氷系の物理を進展させることが必要である。

(7) 概念的モデルと理論

海洋力学の本質をつかんだ簡単なモデルによってこれまで研究が進んできたが、気候系が複雑であればある程、このアプローチは依然として重要である。

7.2. 観測資料の処理・解析

観測資料の乏しいことが海洋循環の記述を非常に困難にしているが、さらに観測資料の空間的・時間的分布の不規則さ、精度、熱フラックスなど直接測定値がないことなどがそれに拍車をかけている。そのため、(1) 客観内挿法、(2) 診断モデルの利用、(3) inverse 法、(4) 力学的資料同化、(5) 直接測定値から二次的物理量の推

定法、などの開発・改良が重要事項となる。さらに、海洋データセットの有用性は、その資料の信頼性と入手の容易さに依存している。信頼性は均質な品質管理に依るので、上記種々の解析法の相互比較、誤差の評価などが不可欠となる。

7.3. シミュレーションと実験設計

モデルの解析・検証・利用など、モデル開発と表裏一体をなす重要な側面である。ここでは7.2. 節と7.3. 節に関する報告を割愛する。

8. あとがき

本研究会議の成果は2分冊(第1週と第2週それぞれ)の報告書として出版される。ここでまとめられた研究・実験計画案の内容、その推進策などについて今後さらにCCCCO, JSC その他関連組織、研究グループで検討されることになる。実施にいたるまでにはまだ多くの難関がある。

会議の円滑な運営に努力された増沢気象庁長官、安井海洋気象部長、駒林企画課長はじめ気象庁関係各位にお礼申し上げますと共に事務局で全期間を通して献身的に奉仕された長坂昂一氏の労を特に記して感謝する。