

熱帯海洋と全球大気 (TOGA) に関する 国際研究集会に参加して*

安 成 哲 三**・蒲 地 政 文***・鬼 頭 昭 雄***
 饒 田 邦 夫****・住 明 正****・高 藪 出***
 高 藪 縁*・竹 内 謙 介**・時 岡 達 志***
 富 田 智 彦**・中 澤 哲 夫***・邊 田 有 理 江***
 見 延 庄 士 郎**・山 形 俊 男****

はじめに

安成哲三 (筑波大・地球科学系)

WCRP の一環としての TOGA 計画 (1985~1995) の、現時点における成果と今後の展望、問題点を明らかにすることを目的とした、最初の大きな国際会議が、ハワイはホノルルのイリカイホテルで、1990年7月16日~20日の日程で行われた。ENSO (エル・ニーニョ/南方振動) の解明を中心課題とする TOGA に関する大きな会議ということで、この会議に対する関心は非常に高く、約30カ国から約300人の参加者を数え、日本からも在米研究者を除いて19人の参加者があった。

折しも夏の観光シーズンを迎えたハワイは、毎日数千人以上といわれる日本人観光客がジャンボ機からホノルル空港に吐き出されており、ワイキキの浜辺にあるこのホテル周辺も日本人だらけで、会場の外は、およそ「まじめな国際会議」とは程遠い雰囲気の中にあっただ。

し、そんなことは関係なく、海に面した会場ロビーでの研究者同士の交流や議論は、心地よい貿易風のせい、終始なごやかに、且つ活発に行われていた。

会議は、五つのシンポジウムに別れ、それぞれのシンポジウムは、下記のようなセッションで構成されていた。

シンポジウム1・観測システムの進歩と今後の展望

セッション1 海洋データの収集について

セッション2 海洋データの同化について

セッション3 大気データの収集について

シンポジウム2・観測データ解析からの新しい知見

セッション1 全球規模の近年の動向

セッション2 太平洋上での近年の観測成果

セッション3 インド洋、中緯度大気、海洋生成物について

セッション4 (大気) 熱帯域の加熱が低・中緯度大気に及ぼす効果

セッション5 (海洋) 熱帯海洋の大規模な流れ・水位について

セッション6 (大気) ENSO と モンスーン の関係について

セッション7 (海洋) 熱帯海洋の大規模波動について

セッション8 (大気) 熱帯・中緯度大気の様々な運動

セッション9 (海洋) 熱帯海洋の様々な運動と構造

セッション10 ENSO について

シンポジウム3・大気-海洋結合モデルの成果と今後の課題

* Report of International TOGA Scientific Conference, July 16-20, 1990, Honolulu, Hawaii.

** Tetsuzo Yasunari, Tomohiko Tomita, 筑波大学.

*** Masafumi Kamachi, Akio Kitoh, Tetsuo Nakazawa, Izuru Takayabu, Tatsusi Tokioka, 気象研究所.

**** Kunio Kutsuwada, Akimasa Sumi, 東京大学.
+ Yukari Takayabu, 国立環境研究所.

** Kensuke Takeuchi, Shoshiro Minobe, 北海道大学.

+++ Yurie Heta, 京都大学.

++++ Toshio Yamagata, 九州大学.

- セッション 1 海洋-大気結合モデルの成果
- セッション 2 結合モデルおよび大気大循環モデルの成果
- セッション 3 単純化したモデルの成果
- セッション 4 データ解析研究の側からの報告, 新しいデータの効果
- シンポジウム 4・フラックス解析の進歩と将来のニーズ
 - セッション 1 海洋表面の各種フラックスのデータ解析
 - セッション 2 大気境界層の力学, 大気の放射過程の解析的研究
 - セッション 3 数値モデルによる研究
- シンポジウム 5・新しい理論と予報
 - セッション 1 ENSO について
 - セッション 2 中緯度・モンスーン域の応答について

しかし、どの話題もお互いに密接に関連したことが多く、聴く側にとっても、上記の区分は必ずしも意味を持たない。したがってここでは、各シンポジウム(セッション)毎の報告はせず、参加した14人の会員の、硬軟とりまぜての自由な感想・コメントを以下に収録して、報告とした。また、会議の前後には、関連するいくつかの小集会や委員会がハワイ大学やハワイ島などに場所を移して開かれた。その中のひとつ、TOGA-MONEG(モンスーン数値実験グループ)の会議の報告を、時岡達志氏にいただいた。なお、各報告の見出しのうち、かなりの部分は、まとめ役(安成)が内容から判断して適当につけたものであることを、おことわりしておきたい。

会議に参加して

1. アメリカ強し

住 明正(東大・理)

TOGA 前半の中間総括としてもたれた、TOGA-Conference の印象は、「アメリカ手強し」というものでした。とりわけそう思ったのは、一年前には、アメリカのモデラーを中心に、どのような戦略で研究するか、ものすごい論争があったのだが、今回出席してみたら、simple model-intermediate model-sophisticated model という階層構造でモデルを統合し、それぞれの段階のモデルの利点・欠点を見きわめ、全体として、TOGA の

モデリングに取り組んでいこう、という“取り決め”が出来ていました。もちろん、この背景には、最近の地球環境ブームで、資金面で豊かになったこともあります。それぞれのグループが主張することを主張し、それをまとめてゆく、というアメリカの力強さを感じました。個々のアイデアや仕事では、充分太刀打ちできると思うのですが、アメリカのもっている大きな数の力というものは、やはり、凄いです。

観測に関しては、この5年間で本当に進展したと思います。とりわけ、PMEL/NOAA を中心とする TOGA-TAO の係留ブリスシステムや、浮遊ブリスシステムなど、今まで、データの空白域であった熱帯海域が、一挙に、データが豊富な地域に変化してしまった感があります。このような観測の展開の中に、日本の JAPACS を中心とする仕事が重要な寄与をしていたのは、当事者としては、うれしいものでした。唯、正直にみて、まだ日本は、重要な脇役という感じでした。5年後に開かれるであろう TOGA 10 年の総括集会には、TOGA-COARE の成果をひっさげて、主役の一人になりたいと思った次第です。

2. はじめての国際会議

高 藪 緑(国立環境研)

7月15日18時30分、会場のイリカイホテルのプールサイドでオープニングセレモニーが始まった。数時間前に渡された発表件数 247 件という分厚い予稿集は翌日からの会議への期待感とともにもかなりの不安感をもたらしてくれたが、それも時差ボケの眠さがやや緩和してくれているようだった。「ハワイは“熱帯”であるから日本より暑い」という“常識”のもとに薄手のブラウスばかり持ってきた私の腕は日の暮れかけたヨットハーバーサイドの涼風に鳥肌を立てていた。参加者は、南北アメリカ、アフリカ、ヨーロッパ、オセアニア、アジアの30カ国にも及ぶ国々から集まっており、ほとんどが一堂に会した初日の昼食会は壮観だった。近くにいる人達と声をかけあった範囲では海洋の研究者の方が若干多いという印象であった。

会議はまず、最近 TOGA によって展開されつつある新たな観測についてのシンポジウムから始まった。特に太平洋上の海洋面における観測網が着々と整備されつつある様子が伝わってきた。ただし、インド洋、大西洋については、総合討論でも指摘があったが、今後の展開が

待たれる領域であるようだった。衛星データに関しては、スカットロメタによる海面風速(将来的には風向も)について、Atlas, Lorenc, Hollingworth らにより期待が述べられたことが印象に残った。私は、データ解析からの新知見のセッション2-8において、「1986年6月1~20日に太平洋上で観測されたスーパークラスターのコンポジット構造」と題して発表を行った。何にしろ外国における初発表であったので、非常に緊張したが、大規模・年々変動スケールの現象がメインであるこのような会議の参加者の多くが総観スケールの話にも非常に興味を持っていることが分かり、大きな励みになった。このセッションでは、熱帯擾乱スケールの話が2つ、海面水温と熱低との関係について1つ、さらに、中緯度と熱帯との相互作用について2つの講演があった。今回は、4日目の自分の発表の練習に手一杯で十分に予習ができなかった点に関して反省は残るが、共通の興味を持ち、ツーと言えばカーと答えてくれる人達に囲まれた幸せな1週間であった。身をもって得た教訓は、ポスターセッションでは一番聞きたいものにまっ先に駆け付けたいと、説明者を捕まえ損ねるということであった。

最後になりましたが、この会議への参加に当たっては、旅費の一部を気象学会から国際学術交流事業を通じて援助して頂きました。深く感謝致します。

3. 熱帯のイメージ

邊田有理江 (京大・防災研)

準備不足のまま不安な気持ちでハワイへ出発したのですが、その割にはとても有意義な一週間を過ごすことができました。ハワイまでは7時間半ととても近くて、朝やけの雲の美しさにみとれているうちに着いてしまいました。そのせいか時差ぼけがひどく英語力のなさも加わって、会議の発表の方はあまり理解できたとはいえません。Mr. V. Magana と Prof. M. Yanai が熱帯と亜熱帯の相互関係を解析しておられたことや Ms. C. Deser と J.M. Wahllace が地表の風の場をみる必要を示唆されていたことなどが強く印象に残りました。合間に比較的ゆっくりとられた昼食や coffee break でのポスターセッションではいろいろな国の多くの方々と交流することができました。まず気象か海洋かたずねられたこともこの会議の特徴を示しているような気が致します。

熱帯の島に実際に立って雲や雨や空をながめ、光の強さや湿度を肌で感じる機会を得て、日頃机上で勝手に作

りあげていた熱帯のイメージがいくらか現実にそった豊かなものになった気がいたします。

4. ハワイ会議の感激

富田智彦 (筑波大・地球科学研究科)

青い空と青い海の見渡せるゴージャスなハワイのリゾートホテルで開催された本国際会議は、海外に来たことの初めてな私にとってそれはそれは困った程“絶好!”な環境の中行われた学会でした。会場のすぐ隣のプールは、やけにまぶしく、ハワイという土地柄のせい参加者の多くもラフな格好で、「日本の気象学会とは随分違うな」という印象です。開催期間5日、350名近い一線級の ENSO 研究者が参加しており、有名な論文の著者らをも間近に見ることができ、私にとっては感激ひとしお、今まではるか遠くにあると思えていた世界が実はこんなにも近くにあったのかと目から鱗がポロッと落ちる思いでした。私の英語の力では、とても話を完全に理解することはできず、メモは人物評でいっぱいですが、これだけでもおつりのくる価値ある参加でした。

5. TOGA と海洋観測の業務化

竹内謙介 (北大・理)

TOGA 以前には、太平洋のような大洋をモニターしようなどとは海洋学者には考えられなかった。需要もなかったし、技術的にも無理であった。TOGA はちょうど技術的に可能性が出てきたところで海洋モニターを要求した。気象学者から見れば当然とも見えようが、TOGA が始まって以来の観測技術の向上は目を見張るものがある。

しかし、その観測の主体は依然として研究者個人の努力によるものである。大部分が業務として行われている気象観測と大きく違う。そのためデータの公開が遅いなどと言う問題も生じている。また、個人的努力で維持するには観測が大がかりになりすぎて来ている。業務に転換する時期に来ていると言える。しかし、移行は必ずしもスムーズには行きそうにない。研究者としては折角、自分の開発し育てたものを他人に渡す事への抵抗感があるようだし、現業官庁への不信感もあるようだ。

その点、日本では元来多くの海洋観測は現業官庁に依るものだし、現業と言ってもかなり研究的な観測にも携わっている。この有利さは最大限に利用したいものだ。

SCIENTIFIC CONFERENCE は多くの人が報告するであろうから、その直前に行われた CCCO PACIFIC CLIMATE STUDY PANEL の中心話題を紹介した。

6. 海洋でのデータ同化の必要性

浦地政文 (気象研・海洋)

TOGA には久しぶりの参加でした。いつもながら国際会議で発表するのは大変です。発表、ロビー外交、個人的なナイトセッションなど、一週間朝から晩まで続くと頭が混乱します。発表ではアイデアを出さないと（あってもそれとわかる形で発表に取り入れないと）相手にされませんし、次からのお呼びもかからない。発表だけして論文にまとめないと他の参加者に先を越されてしまいます。しかし、それだけに、手ごたえのあったときは喜びも一入です。

今回の私の発表は、非線型の場合の変分法による4次元データ同化作用の問題点についてでした。発表の前後に関連する研究者達と議論しましたが、非常に反響がありました。一般的に今回の会議でも、現象の理解と予報が焦点だったと思います。私の発表したシンポジウム1は、大気・海洋系での予報を行うために必要なトータルシステムとしての観測の進歩、データセットとモデルとの相互の同化を焦点にし、それらに寄せられる期待についてでした。現在データ同化作用の研究では、3次元から4次元へ、客観解析から変分法による調節へと移ってきています。それに伴って、原理的な問題の解決と現実的な大循環モデルへの組み込みという二つの方向へ向かっているようです。海洋でのデータ同化の必要性も急速に高まっています。ここ数年欧米では研究が始まっており、日本でも発展させる必要性を痛感しています。気象学での長い経験と手法の発達の結果を取り入れるだけでなく、海洋での現象と観測システムの特性にあわせたデータ同化作用の開発が急がねばならない状況にあります。またその事により、海洋学での発展が気象学へのフィードバックを引き起こすかもしれません。

今回の TOGA だけでなく他の研究集会でも毎度の事ですが、アジア人の語学の上での、および欧米人の層の厚さの上での二重のハンディキャップを痛感しました。アジア地域での交流をより活発にする必要があります。また、最初に述べたように、この労多くしかし喜びもまた大きい国際計画に、より多くの若い研究者が（現在の研究テーマだけでなく次の TOGA/WCRP をもめざし

て）参加されることを望みます。

7. 観測の新しい段階

中澤哲夫 (気象研・台風)

あの紺碧の海と抜けるような空の青さを見てみると、地球上にこんなところがあったんだとつくづく感じてしまう。今回ハワイに行って、改めてその魅力に気づかされた。

今回の TOGA 会議でもっとも印象に残っていることは、何と言っても海洋観測関係の研究者の話聞くことができたことと、SSM/I はじめ衛星によるリモートセンシングの台頭を目の当たりにしたことである。残念だったことは、あまり気象関係の解析の話がなかったことか。

発表で興味深かったものを列挙すると、

NASA/GSFC の Busalacchi SSM/I の風速のデータを ECMWF 解析やハワイ大学の Sadler 解析などの結果と比較。この3つはよく一致していた。

NOAA/AOML の Hansen TOGA で350個の漂流ブイを流した。こんなに流しているのには驚いた。まだまだ増えるようだ。

NOAA/PMEL の Hayes, McPhaden ATLAS のデータ紹介、SST と T(z) の微細構造示す。

ECMWF の Hollingsworth 衛星による風計算の誤差を静止気象衛星ごとに示す。「ひまわり」ももっとも悪く、50 m/s 以上の風で 15 m/s の誤差。昼食の時に直接話を聞く。ECMWF は強調画像の利用、GOES は高度設定調整で改善したとのこと。

UCLA の Magana 季節内変動に MPT からのエネルギー補給があることを79年のデータで示す。

ECMWF の Palmer インドとサハルの月降水量の予報実験。風が弱いときの CD を大きくすることで発散場大幅に強化。

メリーランド大学の Wang 下層の東西風の変動を調べて、二年サイクル成分が一年サイクルと位相固定していること、インド洋と太平洋にそれぞれ極大のあることを示す。Singular Spectrum Analysis という、ひとつの時系列から、卓越する周波数変動を順番に拾いだしてくれるという便利な手法を用いていた。

8. (Q)BO の重要性

樽田邦夫(東大海洋研・大槌臨海センター)

気象・海洋の多数の研究者が一同に会する国際会議に参加したのは私自身久しぶりの体験であったが、ごく一部の時間帯を除いて全ての講演発表が聴けるプログラム構成になっていたことは、日頃こうした機会が皆無な研究環境にいる私にとって大変貴重であった。米国では、少なくとも TOGA の研究者に関しては、気象学と海洋学の間で活発な交流があることを実感すると同時に、日本においても同様な気運が定着する期待をもった。

講演発表を通して焦点となっている問題の一つに、熱帯域の下層大気および海洋表層における (Q)BO の特性があげられ、これは安成氏なども指摘しているように、特に ENSO の発生過程の理解において、避けて通れない命題になったといえる。しかしながら、(Q)BO と ENSO の関係が明確にされつつあるというのではなく、むしろその逆で、明確な証拠は見出されていないというのが現状とみられる。(Q)BO の特性に関しては、最終日の総合討論でも、当面の課題として位置づけられた。

(Q)BO に対応する時間スケールや ENSO 発生に重要な時間スケールの変動を記述する幾つかの発表において、従来の EOF (Barnett 等) の他に、POP (Max Plank Institute), SSA (Rasmusson) といった解析手法が用いられていたが、これらの手法の有効性は必ずしも明確にされていない現状という印象を受けた。有効性ととも、各手法の欠点も我々の知りたい重要な情報である。むしろ、台風の研究における権威ともいえる W.M. Gray が下層大気東西風と熱帯太平洋の海面水温の 40 数年間の時系列の比較という素朴な視点から、幾つかの ENSO イベントを除けばという条件付きで QBO は重要であり、ENSO の発生には QBO の強さではなく、Timing が重要なのではという指摘を行っていたことが注目された。

9. モンスーンと QBO

安成哲三(筑波大・地球科学系)

やや我田引水かもしれないが、今度の会議で感じたのは、ENSO におけるモンスーンの役割に対する関心が、特にモデラーと海洋の観測屋を中心に、これまでになく高まってきたということである。例えば、TOGA 会議

の前の週に、ハワイ大学で CCCO (気候変動と海洋に関する委員会) のインド洋・太平洋に関する合同パネル・ミーティングが開かれたが、私は NCAR の G. Meehl とともにこの会議に呼ばれ、熱帯の大気・海洋系におけるモンスーンの役割についての話題提供を要請された。海洋の観測屋を多く含むこのグループは、私の論文にあるインドモンスーンと西太平洋の混合層水温(凌風丸データ)の高いラグ相関、およびそれに関連した風(応力)の変動に並々ならぬ関心を示していることがよくわかった。一方、TOGA SSG の議長でもある Peter Webster は、これらの解析結果に加えて、日本の山形グループや英国の Anderson のグループに刺激されたのか、アジアモンスーンを外力として加えた数値実験の未発表の結果を示し、熱帯大気・海洋系の振動に果たすモンスーンの役割を、このミーティングでも本会議でも強調していたのが印象的であった。住明正氏の解説によれば、最近のこの傾向は、太平洋域でのみの大気・海洋結合モデルを用いて、海の役割を主、大気を従と主張して、この数年ある意味で ENSO コミュニティをリードしてきた海洋側のモデル屋に対する大気側のモデル屋の巻き返しという、TOGA 内部の政治的背景もあるという。何はともあれ、このような雰囲気の変化は、以前からモンスーン的重要性を説いてきた私たち日本のグループにとっては、非常に喜ばしいことである。

モンスーンの役割に関連してこの会議で強調されたもう一つのことは、ENSO における二年振動 (BO ないしは QBO) の側面である。これは、様々な統計的手法を用いて、主として大気の解析屋によって主張されていた。私自身の発表も含め、確認しただけで、八つの発表が、熱帯の大気・海洋系におけるこの時間スケールの変動の重要性を指摘していたようである。もちろん、同じようなデータを用いながら、それぞれの力点は、微妙に、あるいは大きく異なっている。例えば、この (Q)BO を大気・海洋系における基本モードと見るか、それとも、もう少し長い ENSO モードとは独立のモードとし、これら二つの異なる時間スケールの相互作用としていわゆるエル・ニーニョの発現を考えるか、等等。また、升本・山形の結合モデルの結果では、モンスーン加熱のある範囲の強さにした時のみ、大気・海洋系に 2-3 年周期が現れている。この問題は、季節サイクルの役割と併せて、ENSO 問題における今後の重要課題の一つとして残されている。

成層圏の本家 QBO と、この対流圏の (Q)BO の関

連も若干の議論があった。例えば熱帯サイクロンの男、William M. Gray 教授は成層圏 QBO の ENSO に果たす役割をかなり声高に主張していた。これに対し、POP 解析という、新しい手法を引っ提げてきた Hasselman のグループの Xu 女史の解析結果は、否定的であった。実は、この問題に再び火をつけたのは、最近の気象集誌に載せた私の小さい論文のようだが、正直なところ、私自身は今もって確信ある結論が出せず、いろいろと悩み、迷っている状態である。しかし、アメリカ人の自信というのは大したもの、大男の Gray 氏は、私を見つめるや駆けつけてきて、「おい、この問題が分かっているのは、俺とおまえだけだ。頑張って言い続けようぜ！」と言って私の肩を叩いて励ましてくれる。理屈抜きに元気が湧いて来るのであった。

10. 海洋赤道波にたいするとりくみ

見延庄士郎 (北大・理)

会議の中で発表された、海洋赤道波に対する研究を紹介しよう。

White ら、および Miller & Cheney は GEOSAT の高度計での海面水位変動の観測から、赤道上で位相伝播を取り上げていた。ともに太平洋での、年周期 Kelvin による東西位相伝播は、はっきりとは見えない。非エルニーニョ時の Kelvin 波を、位相伝播から捕捉するのは無理ではないかという印象を受けた。一方、Clark は太平洋東岸での1960年代からの水位変動データから、年周期・半年周期の Kelvin 波を分離していた。気候値の絵しか出していなかったもので、Seasonal な Kelvin 波がどの程度経年変動するのかを聞いてみたのだが、英語力の不足から話がかみ合わなかったのは残念である。

またモデルでは Murphree らが、GCM で赤道上の東西流速の年周期程度の成分が、Rossby 波による、きれいな西への伝播を見せることを示していた。

理論的な面では Vianna & Holvorcem が現実的な地形を考慮しての、大西洋西岸での Rossby 波の scattering を発表していた。

11. 観測とモデルのはざま

鬼頭昭雄 (気象研・気候)

30カ国から約 300 人が参加した盛大な集会であった。WCRP の一環として1985年から10年間の計画が始まっ

た TOGA もその中間点を迎え、最も活発にその計画が遂行されている段階と言えよう。西部太平洋では、気象庁による137°E の定線観測としてこれまでの1,7月の凌風丸に、啓風丸が加わった。しかし熱帯太平洋で提案されている10°S 10°N に70ヶの繫留ブイを配置する計画図を見ていると、現状との gap は大きい。また Semtner and Chervin (1988) の 1/2° の eddy-resolving OGCM によるファンシーな絵を見せられる一方で、西太平洋からインド洋へ抜ける海流や特定海域のドリフター観測結果の記述を聞いていると、水平スケールの小さい海洋観測の困難さを感じられた。大気の方にも問題点はある。気象衛星による雲追跡風データ (SATOB) の誤差についての議論は古くからあり、1986年に東京で開かれた「WMO/IUGG 短・中期数値予報国際シンポジウム」の際にも GMS の誤差が最大と言われていた。「何を真の値とするか」の問題はあるが、Hollingsworth (ECM-WF) は METEOSAT の誤差が減少したのに対し某 GMS は依然最大と強調していた。

モデル関係では大気海洋結合モデルが中核を占め、intermediate model または hybrid coupled model と称するものがその周囲にある。全体としてどこかで見たり聞いたりした話が多かったが、結合モデルで no correction でいこうというグループが増えてきたように思う。ただしモデルの気候ドリフトは依然大きく、日本人の目から見ると「あれでよく発表するなあ」というような勇気のある講演もある。Storch (MPI) と Xu (同) は POP (Principal Oscillation Pattern) による30-60日振動およびエルニーニョの予報をそれぞれ行っていたが、この一種の外挿法は使えるという印象を受けた。

200弱の研究発表に対し参加者は約300人である。自分では発表しなくてもこの集会に参加することで得ることが多いと判断した人が多いということだろう。米中日仏豪がベスト5だが、中国からの参加が21名に達し日本よりも多い。米国からの参加者や発展途上国向けには十分な旅費の配慮がなされたようであるが、アジア・太平洋域に対する彼らの意気込みを示すものと思われた。TOGA 計画についてはわが国の研究者の寄与が期待されており、今後さらに旅費などを充実してこれらの集会に多くの研究者が出席できるようになることが望まれる。なお筆者は平成2年度科学技術庁国際研究集会派遣研究員として出席できました。関係者に深く感謝いたします。

12. 結合モデルの新しい展開

山形俊男 (九大・応力研)

本稿では結合モデルの進展状況 (シンポジウム 3 と 4) について簡単に報告する。今回の会議は1984年のリージュ会議 (大気海洋結合不安定の発見), 1986年のIAPSO/IAMAP 会議 (さまざまな不安定モードの発見), 1988年ビヤルクネス記念シンポジウム (遅延作用の発見と太平洋一派, モンスーン一派の分離) などの一連の流れを汲むものと言える。コロンビア大学の Cane 教授を中心とするグループは, ENSO を一つの状態のまわりの自動振動と捉えてきたが, 私は二つの状態 (エル・ニーニョとラ・ニーニャ) の間の遷移と考えて来た。この遷移を生むものとして, 安成 (1990) らの解析に基づき, 赤道域の大気海洋結合系にとっては外力と考えられる, モンスーンの変動を想定して来た。モデルに多少の違いこそあれ, 基本的には似通った比較的簡単なモデルを用いて, どうしてこのように違った見方が生じてしまったのであろうか。これを解く鍵は最近, Wakata and Sarachik (1990) によって用意された。すなわち, 大気と海洋の結合度がある臨界値を越えると, 結合不安定波は赤道太平洋の東岸あるいは西岸で最大値をとる停滞波 (エル・ニーニョあるいはラ・ニーニャ) になってしまうのである。この臨界値は極めて現実的な範囲にあるので, モデル ENSO の多様性は勿論のこと, 実際の ENSO のそれぞれに違った「素顔」も説明できそうである。

大気と海洋の結合の程度とは, より具体的には大気海洋間の熱および運動量フラックスということである。このプロセスをきちんと見積るには, 大気海洋現象の階層構造というものが重要になって来る。ENSO モードは決して滑らかに発達するのではなく, 30~50日振動などを伴って, 極めて「ぎくしゃく」とした発達をする。この辺の解析とモデリングが次のこの種の会議の主要なテーマとなるであろう。

■ 今回のハワイ会議の後, 程なくして北京の気候会議で再び Cane 教授と再会することとなった。彼は ENSO リサイクルの理解が新しい段階に入って来たこと, 彼の解釈も一つのモデルに基づいた「お話し」に過ぎないことを認め, 協力関係を深めていくことで意見が一致した。

13. 大気海洋間フラックス算定の重要性

高藪 出 (気象研・応用気象)

本研究集会は, 五つのシンポジウムと二つのポスターセッションから構成されていたが, そのいずれにおいても TOGA プロジェクトの前半5年間での成果について活発な議論がなされた。その中心は熱帯海洋域でのデータ収集とそれを用いた研究であり, 数値モデル, 理論についての研究はそれに比べると少数であった。

筆者の参加目的の一つは, 熱帯域の大気海洋間の熱のやり取りの実態について耳学問をしてくることにあった。そこで, このことに関連したいくつかの発表について報告しておきたい。

シンポジウム 1 (データ収集) では, NOAA の Hayes と McPhaden による ATLAS 係留ブイの紹介があった。このブイは, 大気側の要素としては気温, 湿度および風を, また, 海洋側の要素としては水温または流速を測定するもので, 現在は赤道上に20度から30度ごとに5台のブイが設置されている。得られたデータは ARGOS 衛星と GTS 回線を介して米本土に配信されるようになっている。彼らは, 水温変化に対する風の強制力の重要性を指摘していた。風向で $\pm 3 \sim \pm 7$ 度の違いが, 海面水温で ± 1.5 度の差になって現れてくるとのことであった。このブイは, 将来的には 130 E から 95 W の熱帯太平洋上に東西には10度毎, 南北には2から3度毎に配置され, 強力な観測手段となることが期待されている。

太平洋上ではこの他100から150台の drifting buoy, それに多くの観測航海も行われており, この海域でのデータの集積は著しいものがある。一方で, 大西洋とインド洋域では目だったプロジェクトもなくデータ不足が問題として挙げられており, これらの地域での資金不足が沿岸諸国から訴えられていた。

さて, 海洋上でのデータ採集をどれだけ密に行うことが必要かというのは非常に重要な問題だが, これに関しては CSIRO の Meyers と Phillips による XBT 観測網についての報告があった。彼らは, 密なデータの得られたところで統計的に decorrelation scale を計算し, 時間で2カ月, 緯度方向に3度, 経度方向には15度という結果を得ていた。

ところで, データの均質度という点では, 衛星に優るものはない。海面水温に関して, この衛星データを船舶, ブイのものと比較した発表が, 米国の Climate

Analysis Center の Reynolds と Leetmaa によりなされていた。衛星では海洋のごく表面を測ってしまうため海上で測定した結果との差が非常に大きくなる可能性があること、また、昼側のデータと夜側のデータでバイアスがあることが示されていた。

シンポジウム 4 (フラックス解析) の研究報告においては、TOGA プロジェクトにともなって新しく得られたデータの解析が着実に進められていた。しかし、現段階でのデータの誤差は本プロジェクト目標値 ($<10 \text{ W/m}^2$: これは 50 m の厚さの海洋混合層を 2 カ月間で 1°C 上昇させる熱フラックスに対応する) の 5 倍の大きさ (50 W/m^2) であり、境界層の各パラメーターの評価方法にも改善の余地が大きいことが指摘されていた。この方面でも、リモートセンシング技術の進歩は著しいものがあった。

CISRO の Radley と Godfrey はフラックス評価の際に生ずる誤差の総合的な報告を行っていた。短波放射 (Q_s)、長波放射 (Q_l)、潜熱 (E) および顕熱フラックス (H) はそれぞれ、次のように表される。

$$Q_s = Q_0 T_r (1 - \alpha) (1 - C_n C + 0.0019 \phi) \quad (\text{Reed, 1977})$$

$$Q_l = \epsilon \sigma T_s^4 (0.254 - 0.00495 e_a) (1 - c C d) + 4 \epsilon \sigma T_s^3 (T_s - T_a) \quad (\text{Budyko, 1974})$$

$$E = \rho L c_E U (q_s - q_a)$$

$$H = \rho C_p c_H U (T_s - T_a)$$

ここに出てくる数多くの変数は次の三つに分類される。

- ① 観測量: 雲量 (C)、風速 (U)、気温 (T_a)、海面水温 (T_s)、大気の比湿 (q_a) および海面水温に対する飽和比湿 (q_s)。
- ② 正確に評価できるパラメーター: 大気外の日射量 (Q_0)、アルベド (α)、太陽の南中高度 (ϕ)、射出率 (ϵ)、ステファン・ボルツマンの定数 (σ)、空気の密度 (ρ)、単位質量の潜熱 (L)、空気の比熱 (C_p)、水蒸気量 (e_a ; 単位は mb)。
- ③ 正確に評価することがむずかしいパラメーター: 大気の透過率 (T_r)、雲量にかかる係数 (C_n , c , d)、バルク係数 (c_E , c_H)。

彼らは、これらの観測量、パラメーターに含まれる誤差がフラックス換算でどれだけの誤差に相当するのかわ、北大西洋のデータについて調べた結果を示していた。③の各パラメーターの誤差は T_r 5%, C_n 1%, d 50%, c_E 12%, c_H 24%, また、温度測定の誤差は 0.2°C と評価された。これらから Q_s , Q_l , E , H に含まれ

る誤差はそれぞれ $5 \sim 15 \text{ W/m}^2$ 程度と見積られ、正味の熱フラックスに対して、誤差の合計は約 50 W/m^2 となっていた。

熱帯・亜熱帯域ではバルク法に不確実な点があるため、気象データが完備であっても誤差が残るという指摘がなされていた。他に、random error と systematic error、観測回数による誤差の変化、衛星データとの比較なども議論されていた。また、1988年5月20日のビスマルク海での船舶による測定結果から測器間の偏差、バルク係数の種々の評価式の比較も行っていた。結論としては次の五つが述べられていた。

(1) フラックスの評価にはまだ大きな不確かさが残っている。

(2) フラックスは日々の変化が大きい。

(3) 正味の太陽放射フラックスに関して、衛星データは地上での観測とよくあっていた (6%の誤差)。

(4) 風速 0 でも顕熱フラックスは 0 にはならず、バルク係数の予報式として LKB 法 (Liu, Katsaros and Businger, 1979) がよくあっていた。

(5) 風速 0 でも 25 W/m^2 の潜熱フラックスが観測された。

このように気象条件などによってフラックスの変化が大きいとすると、境界層のパラメタリゼーションにはその効果を取り込む必要が生じてくる。New South Wales 大の Banner は、風洞実験の結果などを用いて、海上での風のストレスを評価するのに風波の砕波の効果を取り入れる試みを報告していた。NCAR の Moncrieff は対流性の雲が大気境界層に及ぼす効果を雲のタイプによりパラメタライズする方法を提案していた。Naval Postgraduate School の Garwood と Chu は海洋混合層が大気側の強制でどう変化するかを、赤道域の海洋混合層の特徴とともに調べていた。赤道域の混合層の特徴は、温度、流速が一定の狭義の混合層 ($Ri < Ri_c$ で厚さは約 20 m) の下に、温度・流速の変化の大きい、 $Ri = Ri_c$ の厚い層 (厚さ約 80 m) が存在することであると指摘していた。混合層の構造は、大気境界層の小さなスケールの強制だけではなく、大きなスケールの圧力勾配も関係していることが示されていた。

海洋混合層については塩分躍層についての Hawaii 大の Lukas の発表も興味深かったので、最後に報告しておく (シンポジウム 2)。Hawaii 大学の観測によると、熱帯西部太平洋では温度躍層の上に塩分躍層が形成されている。これは、この地域で特に降水が多いため、fresh

water の供給が多いためである。このような条件下では、混合層の深さは塩分で決まっている。そうすると、西風バーストなどで混合層が成長を始めても混合層の下端が温度躍層に到達するまで、水温の低下は生じない。塩分躍層は海洋混合層の性質を規定する上で重要な要素になっているというのが彼の主張であった。ただ、モデル研究などで塩分躍層を考慮しているものは見あたらなかった。Lukas によると、その理由は“traditional”なものに過ぎないということだった。Sydney 大の Springtall と Tomczack はこの二つの躍層の深度を全世界の海について季節毎に調べた結果を詳細な報告にまとめた (ポスターセッション; また、次の報告書 (1990) がある Springtall, J. and M. Tomczak, 1990: Salinity considerations in the oceanic surface mixed layer, Report No. 36, Ocean Sciences Institute, Univ. of Sydney, 170 pp.)

集会最終日にはパネルディスカッションが行われ、各シンポジウム担当の座長による総括があった。その時のメモなどを参考にシンポジウム 2, 3 および 5 の概要についてもまとめておくと次のようになる。

シンポジウム 2 (データ解析) 海洋については、TOGA 前半の 5 年間に西部太平洋で行われた 45 航海のデータ、および衛星のデータなどに基づいて多くの研究成果が発表された。大気については、1) ENSO と他の地域の気候の関係、2) 数日のスケールまでの単周期の現象、それに 3) 2 年あるいはそれ以上の長周期の現象について多くの発表と議論が行われた。次の 5 年間に残された課題は、新しいデータセットを作ること、データ解析の研究とモデルによる研究の溝をなくして行うことである。

シンポジウム 3 (数値モデル) ここでは議論が発散気味であったように筆者には感ぜられた。GFDL の Philander が OHP で投影した次の警句が印象的であった。

“Theoretists almost always become too fond of their own ideas”. “Experimental facts are always wrong”.

この分野は今後 5 年間で進歩が最も求められているようだった。

シンポジウム 5 (予測可能性) 種々の階層のモデルが揃ってきており、また、中緯度の応答の基本的なメカニズムも理解されてきているが、予測可能性についてはまだ途上にあるという状態であった。

熱帯の気象・海洋という共通のテーマの下に全世界の研究者が集い議論を行う様子は、非常に知的興奮をもた

らしてくれました。しばらく気象学界から遠ざかっていた筆者に取ってはよいリハビリになりました。

なお、Lukas 博士の仕事については彼の教室で研究を続けている Hawaii 大の篠田敏昭さんにいろいろ教えていただきました。また、本文中に記した数値や式は OHP をメモしたものなので、もしもまちがいがあれば、すべて筆者の責任であることを断わっておきます。

14. モンスーン数値実験グループ (MONEG) 第 2 回会合報告

時岡達志 (気象研・気候)

去る 7 月 26 日、27 日にヒロ (ハワイ) において標記会合がもたれた。23 日から 25 日にかけて同じ場所で TOGA-SSG が開催された。MONEG は TOGA の下に新たに設置された作業委員会で、昨年 9 月に第 1 回会合が持たれている。「天気」で MONEG の紹介をするのは今回が初めてなので、今回の会合の様子他に、これまでの経緯についても簡単に触れておく。

この設置については TOGA-SSG の意向を受けて昨年 2 月米国のペンシルバニア大学で開催された WCRP/TOGA モンスーン気候研究に関する特別会合で検討されていたものである。MONEG の目的は名称が示すようにモンスーンのシミュレーションに関すること、その年々変動についての理解、予報などに関する情報の収集と研究の推進である。太平洋域での ENSO に関する大気海洋結合過程の理解が進展している中で、他の領域で同じような時間スケールの大気中の変動についての理解の進展が余り進んでいないという認識がその背景にあった。MONEG の活動は当然ながら WGNE の活動の一部にも位置づけられるものである。従って MONEG は TOGA と同時に WGNE と密接に連絡を取りながら活動して行くことになっている。MONEG の委員長は T. Palmer (ECMWF) で、委員は Anderson (Oxford), Arkin (NMC), Krishnamurti (FSU), Shukla (COLAI) と私である。前回に引き続き Dumenil (Hamburg) が、また今回 Fennesy (COLAI) がオブザーバーとして会合に加わった。

ハンブルクでの第 1 回会合では MONEG の活動として次の点が確認された。

(1) 観測に基づく海面水温を与えた場合の、大気循環モデルによるモンスーン循環の長期予報を検討、評価する。

(2) 大気大循環モデルを用いた実験により、モンスーン循環に対する陸面過程を検討、評価する。

(3) 大気大循環モデルによるモンスーンシミュレーションの系統的誤差を検討すると同時に、そのモデル依存性を検討する。

(4) 大気大循環モデルによるモンスーン循環の季節内変動のシミュレーションおよび予報可能性について検討、評価する。

(5) WGENE および TOGA-NEG と連携を保ち、協力していく。

特に具体的事項として以下の2点について調査への協力および参加の呼び掛けを行うことにした。

1) 各々の大気大循環モデルで再現されているモンスーン気候に関する調査を行う。調査項目に関する詳しいことは関係するところに連絡されるが、風ベクトル、降水分布、非断熱源の3次元構造、流線関数、速度ポテンシャル、海面気圧、地表および海面における応力・顕熱・潜熱・放射フラックス分布などである。

2) 1987年と1988年の夏について次のような比較実験を行うことを提案する。ただし初期値は各々のところで入手可能な全球解析値を用い、積分は5月または6月より始め、それぞれ最低4カ月または3カ月間行う。

◎実験1：実測の海面水温 (SST)・海水分布を与えたもの。

◎実験2：気候値の海面水温 (SST)・海水分布を与えたもの。

さらに余力のあるところはインド洋、太平洋、大西洋それぞれの SST の影響を評価する実験も行う。

以上2点については正式の依頼状が作られ、委員長である Palmer から関係する各機関やグループにすでに届けられている。

今回の会合での大きな決定事項は、上記「87年、88年の夏の実験」に関するワークショップを来年9月頃開催することのみである。イタリアのトリエステ辺りでの開催を考えている。あとは上記1)、2)についての進展状況の確認、MONEGに関連する研究の進展に関する話題を話しあった。

大気大循環モデルで再現されているモンスーン気候に関する調査については、英国気象局 (UKMO)、国立大気科学研究センター (NCAR)、気象研究所 (MRI)、欧州中期予報センター (ECMWF)、ハンブルク大学、フランス (CNRN) のモデル結果が集まった段階であり、まだ結果の比較、整理は行われていない。MRI のモデ

ル気候について言えば 850 mb のモンスーン西風のパターンは悪くないが、その強さが実測の7割程度しかない。地形をより現実的に表現し、熱の南北コントラストを良くするために水平解像度を上げる必要もあるが、鉛直解像度を上げ、鉛直プロファイルを良くする影響がもっと大きいのではないかという気がしている。北アフリカの風の鉛直スケールも小さいので、この地域での解像度の違うモデル間の比較も興味がある。最も重要な比較は降水量であるが、モデル間の違いを理解するには単なる相互比較だけでなく、各々のモデルの解析が必要となる。

1987年、88年の夏の予報実験については ECMWF、メリーランド大学 (COLAI) と MRI で実験が進んでおり、その途中結果の報告があった。これら3機関の他に11の機関やグループが実験を行う意志表示を行っており、全部で14あるいはそれ以上の機関が予報実験に参加することとなりそうである。この実験にこれから参加しようというグループがあれば、まだ時間的に間に合うので奮って参加されたい。

87年、88年の夏はわが国にとっても興味のあるケースである。低緯度西部太平洋域の海面水温は87年は低く、88年は高かった。これまでの統計的關係で言えば、非常に高い確率でこの海域の海面水温の高低と日本の夏の気温の高低との間に正の相関があったが、88年は予想を裏切って雨量が多く気温も低い夏となった。その理由をはっきりさせることは重要である。バングラデシュでは両年とも降水量が多かったが、88年はより多くの降水があった。一方インドでは87年は降水量が少なく、88年は最近で最も降水量の多い年であった。米国では6月は干ばつにみまわれている。このようにここで取り上げているケースはそれぞれの国でそれぞれ異なった興味を持たれている。今回持ち寄った実験結果は、長期予報として見た場合必ずしも満足のいく結果が得られているとはいえないが、それぞれの検討、比較から多くのことが解明されるであろうと期待している。

MRI・GCM を用いた杉の実験では88年のインド洋の海面水温アノマリはフィリピンの東辺りで降水量を抑える働きをしている。しかしトータルとして降水量は減少しない。OLR データと大きく違うのは日付変更線付近から西にかけての赤道領域で、モデルでは大きな雨量の減少を示している。北アフリカの東西に伸びる降雨帯での降水量の増加も再現できていない。これらの点が、これからの検討課題である (日付変更線付近の降雨量に

については COLAI も失敗している。北アフリカの雨については ECMWF は見事に再現している)。

興味を引いたのは、ECMWF では蒸発の係数を操作し、風が弱いときでも一定量の蒸発が起こりうるようにしたら、低緯度の子報が改善されたという話である。大気海洋結合モデルについては、すでに Gordon 達 (Oxford) が指摘していたことでもあるが、海面水温を与え

た大気大循環モデルでも同様であるということである。MRI では鬼頭・山崎がサブグリッドスケールの島の影響を取り入れるという理由で乱流の輸送係数を大きくすると海洋大陸周辺の水収支が量的に変わってきて、大循環が改善されることを示している。蒸発量の高精度のパラメタ化は低緯度、モンスーンのシミュレーションにとって非常に重要な要素であることに間違いはない。



Dieter Henning 著
「Atlas of the Surface
Heat Balance of the
Continents」

Gebuder Borntraeger, Berlin・Stuttgart

1989年刊 402頁, 178ドイツマルク

近年巷間を賑わしている気候の温暖化について、世界の穀倉地帯が乾燥化するかどうかという局所的な影響が問題とされている。気候モデルによってこの課題に取り組もうとすると、大気大循環モデルの陸面水文過程にも相応の関心を払わざるを得ない。また評者の専門分野である数値予報の、重点課題の一つは力学的長期予報である。積分時間が長くなると、短期予報と違って、大気と地表面の相互作用が予報結果に大きく影響する。数値予報モデルや大気大循環モデルで、地表面の熱収支が正しく気候を表現しているかが気になるところである。

地表面の熱収支については、Budyko の「気候と生命」(1971) が著名であり、彼の世界の熱収支図は多くの研究者により引用されている。評者は、Budyko の図にいささか食傷気味であったところに、本書の評を依頼され喜んで引き受けた。衛星観測の成果も取り入れた最新の研究を期待したのである。

読後感としては落胆の一語に尽きる。研究手法が古い。これをもって書評としては、読者は不満であろうから、以下にその理由を述べる。

本書は、地上気象観測により得られた気候データを用いて、陸面の熱収支(正味放射, 潜熱, 顕熱フラックス)の月平均や年平均などの気候値を計算し、327葉の分布図に表わしている。計算法は F. Albrecht (1965没) の開発した熱収支法によっている。彼の死後、著者の D. Henning が国際水文10年 (IHD) 等の資金援助を得

て、計算と地図作成を行った。潜熱フラックスの大きさを決める蒸発散能 β を相対湿度の関数としている。単純に地面と大気の熱交換係数を決めて熱収支法を適用するとポーエン比が -1 になったりするため(潜熱フラックスが正で顕熱フラックスが負、絶対値が等しい)、熱交換係数の風速依存性を弱めたり上限を設定したりしている。またこのようにして蒸発量を求めるとその地点の年降水量より多くなる場合があるので、(筆者には納得し難い) 水収支法を適用して蒸発量を抑えている。

前出の Budyko は陸面の潜熱フラックスを、流出量を概念的にモデル化した水収支法から求め、顕熱フラックスを熱収支の残差から求めるという方法を採用している。Budyko と本書の潜熱フラックスを比較すると、アフリカの熱帯雨林や中国南部で前者が少ない。Budyko は彼の熱収支図の潜熱フラックスの誤差は月別値で20%程度と述べているが、ソ連邦はともかく、他の地域ではもっと悪いのではないか。

観測データが少ないため、その妥当性が疑わしい経験則を導入せざるを得ないところに、これらの半経験的手法の発展に限界を設けているように思われる。地上観測の気候データを用いる Budyko や本書のような地表面の熱収支の研究は1950—60年代に盛んに行われたものであって、本書の出版はやや時代遅れの感がある。著者も結語において、著者の手法に将来性がないことを認めている。

1970年代に入って、乱流相関法による地表面フラックスの観測が行われ、近年は森林上のフラックスも計測されている。また気象衛星による遠隔測定も発展している。グローバルな水収支・熱収支の気候値とその変動を求める研究は新しい発展段階を迎えているといっているのではないか。

(気象庁数値予報課・佐藤信夫)