

# モンスーンに関する国際シンポジウムに出席して\*

新 田 尚\*\*

## 1. シンポジウムの背景

1977年3月7日から12日まで、インドの首都ニューデリーで開催された「モンスーンに関する国際シンポジウム」に出席の機会を得た。モンスーンに関しては門外漢の筆者であるが、前の週に開かれたGARPのMONEX第3回計画会議にひきつづいて開かれたこのシンポジウムで、最近のモンスーン研究について少しでも理解を深め得ることを期待して会場にのぞんだ。

今回のシンポジウムは、インドとアメリカの両気象学会、インド熱帯研究所、インド気象局の主催で開かれたが、いよいよ本格的な観測網の展開に着手されたMONEXの幕明けを飾る意味があった。MONEXで展開される観測網によって作成されるMONEXデータ・セットをどう利用すれば、モンスーン研究に役立つかを学問的に検討しようという背景があった。そのためにモンスーン研究の現状を正しく把握せねばならない。幸いこのシンポジウムには17ヶ国から63人の参加者があり、現時点で考えてかなりよい代表性があったと思う。したがって、発表論文もモンスーン研究の現状の一端をかなり反映していたと思う。しかし、日本、中国、ソ連などからの発表がなかったため、モンスーンのすべての面をカバーしていたとは言えない。

## 2. 研究報告から

シンポジウムは月曜から土曜まで会期があり、開会式の後には、

診断的研究——シノプティックとダイナミック

理論および実験的研究

モンスーンの予報

モンスーンの一般的研究

MONEXの計画法

パネル・ディスカッション

の各セッションが開かれた。以下順を追って見ていこ

う。

### 2-1. 診断的研究——シノプティック

このセッションでは、昔流の天気図解析結果の羅列から波数分析結果まで、種々の論文が発表された。また、天気図をもとにして作成した映画も上映された。筆者には、これが最も興味深かったので、その話から入りたい。

この映画は、1965年から74年までの10年間の月平均850mbおよび200mb合成風ベクトルをもとにして作成されたもので（それぞれ別々に上映）、長期間のモンスーン流の変動が手に取るようによくわかった。T.N. Krishnamurtiを中心とするフロリダ州立大学のグループがNCARのコンピュータを使用して作成したものである。個々の天気図ではよくつかめない大気の全地球的な流れが生々と写し出され、モンスーンが活発な年と不活発な年の違いが明瞭に示された。この違いの分析から多くの興味ある問題点がとり出されると思う。また、7月のアラビア海の南西流が南半球に端を発して、インド亜大陸、中国東岸、東シナ海を経て日本に到り、別の南半球からの流れはフィリピンから北太平洋へ流れ込んでいて（冬はほぼこの逆をたどる）、文字通りグローバルな流れをなしている。さらに、従来ややもすると両半球間の相互作用はそれほど活発でないという漠然とした印象がもたれがちであったが、それは等圧線にもとづいた誤解で、風の場合にもとづいた流線はむしろ激しい両半球間の交流を示していることがよくわかった。今後、ひとつの研究の方向として、夏冬ともこうした全地球的な観点からモンスーンが見直されると思う。

モンスーンによる降雨の最大値とITCZの位置関係についての調査、タイ国での冬のモンスーンと赤道を越える流れの調査、ISMEX-73のデータを用いたアラビア海を通る南西流とインド・モンスーンの関係の調査、同じデータによるアラビア海上の境界層の解析、アラビア海の海水表面温度と夏季モンスーンの関係についての調査等々がシノプティック解析の話題であった。フロリダ州立大学（気象研より派遣）の村上勝人は、スペクト

\* Report on the International Symposium on Monsoons.

\*\* T. Nitta, 気象庁予報部電子計算室.

ル分析の手法を用いてモンスーン低気圧を解析し、その代表値として波長 30° (経度)、西進速度 5~6° (経度)/日、頻度 5 日周期を得た。そのほか鉛直構造なども求めているが、従来インドの研究者はあまりこうした手法を用いていなかったで、ひとつの良い刺激となった。最初にも述べたように、ともすれば同時現象の記述に止まりがちなのシノプティックな診断に、最近少しずつ物理的意味を考える傾向が出てきたのは喜ばしいことと思う。

## 2-2. 診断的研究——ダイナミック

力学的な診断では外国研究者の論文がたくさん発表された。大別すると、物理量の収支計算、モンスーン循環に関わる外力や物理過程の調査、モンスーンじょう乱の解析に分類される。

まず収支計算では、角運動量と運動エネルギー収支に関する GFDL の A.H.Oort と R.H. Chang の仕事ですっきりとまとまっていた。彼等の結論は、全地球的収支に及ぼすモンスーンの役割は大であるというもので、局所ハドリー循環を通じてその影響があらわれることを示した。また、角運動量の生成域が主としてモンスーン地域で、そこから域外へ流出していることも示している。インドの S.T. Awade 等は波数空間でみて、角運動量の子午面輸送がモンスーンの活発な年 (1967) と不活発な年 (1972) とでどう違うか比較した。ベルリン自由大学の月平均天気図を用いた計算によれば、活発な年の方が全体に波動による貢献度が大 (とくに波数 1 と 3 の超長波) という結果であった。

熱収支に関しては、米国 NESS の J.S. Winston と A. F. Krueger の仕事に興味深かった。NOAA の極軌道衛星に搭載した放射計観測から、季節別および月別の全地球的な長波放射、アルベド、太陽放射および正味の放射量のパターンを求めたものである。これに用いて 1974 年から 76 年について、東半球上の分布と夏のモンスーン循環の変動の関係を調べ、モンスーンの年による差を論じるのに局所的な効果ばかりでなく、全地球的な放射や循環の差違も見なければならぬことを強調している。北半球夏季モンスーンについていえば、長波放射、アルベド、正味の放射量の分布に東西のコントラストが目立つ (冬の南半球がほとんど南北の勾配のみで東西にほぼ一様なのに比して)。この東西の違いは、たとえば正味の放射量についていうと、20~40°N の間ではサハラ砂漠、アラビア砂漠、東太平洋で冷却が生じ、残りの海洋上で暖化が起こっている。いっぽう、40°N 以北ではユーラ

シア大陸が暖化し、北太平洋など海洋上で冷却している。この東西のコントラストが緯度で逆位相になっているのは面白い。そのほかモンスーンの活発度と放射収支の分布にもはっきりした関係が示されていた。

モンスーンの活動に対する外力的な効果として、アラビア海の加熱効果とヒマラヤ山塊の影響が、これまでよく取上げられた。今回も、スタンフォード研究所の C.M. Bhumralkar が、アラビア海における潜熱補給(蒸発)とインド西岸の降雨量の変動との間の相関関係を調べて有意だという結論を出していた (さらに、南半球からの潜熱輸送も同量ぐらいあるという参加者のコメントがあった)。MIT の B.M. Misra は、アラビア海とベルガル湾からの蒸発によって、インドの夏季モンスーン雲系の約半月周期の振動が、有限 CISK 系の 1 不安定モードにあたることを示した。インドの R.R. Rao 等は、北インド洋からの熱補給とインド夏季モンスーンの動静の関係を調べ、ケース・スタディ的にモンスーンの活発・不活発に応じて補給量に差が生じることを示したが、こうした同時現象的な関係から因果関係を導くには、かなり慎重な配慮が必要である。

いっぽう、山の影響に関しては、インドの Sulochana Gadgil と D.R. Sikka が論じた。彼等は、準地衡風モデルにいわゆる小田原ちょうちん式の山岳地形効果\*を導入し、インド亜大陸の地形による強制波を調べている。こうした扱いの結果として、強制波を誇大に表現してしまっているが、夏の平均流線図の特徴が示されたとのことであった。

ハワイ大学の村上多喜雄と M.S. Unninayar は、700 mb と 200mb の風の資料を用いて、北半球の夏季および冬季モンスーンの間の変動と大規模循環の関係を調べた。夏季モンスーンについては、1970年 6, 7, 8 月に関して 200mb 面でチベット高原上のモンスーン高気圧の変動と太平洋および大西洋の海洋上のトラフの変動との間に負の相関がみられること、700 mb 面で中国中部からインドと赤道インド洋を経て西部オーストラリアにかけてのトラフ周辺では、平均移動性うず運動エネルギーが大きいこと (したがって多分モンスーンじょう乱と両半球偏西風波との側面結合が重要であることを) を示した。いっぽう、冬季モンスーンについては、1970年12月

\* 山のある部分で、山の勾配に比例した上昇流が強制されるが、空気自体は山が存在しないかのごとく通過する。したがって、山塊の周囲をまわる流れの成分は考慮されていない。

から71年2月に関して120°Eに沿って顕著な局所ハドリー循環が存在し、赤道上で上昇して中国北部と西部オーストラリアで下降していること、700 mb 面で風の変動の大きさがこの局所ハドリー・セル近辺で極大となること、東南アジアの上層のトラフはしばしば赤道を越えて南半球まで南下すること、夏季モンスーンより変動幅が大きいことなどを示した。

インドの A.T. Das 等は、中緯度偏西風波動とモンスーン循環の相互作用を調べるため、運動量と熱の輸送を計算し、500 mb と 200 mb 面で見ると、これらの輸送量はモンスーンが活発な時期と不活発な時期で大きく異なることを示した。

モンスーンじょう乱の一生、構造、発生・発達機構を解析する仕事は5編発表されたが、全般にすっきりした仕事は目につかなかった。インドの S.M. Daggupati と D.R. Sikka, R.V. Godbole は、それぞれモンスーン低気圧に伴ううず度の収支と鉛直速度分布を計算し、低気圧の構造を解析していた。じょう乱が発生する前の流れの場の特徴から、不安定性を推察したのがインドの R.N. Keshavamurty 等で barotropic-baroclinic 不安定性の結合効果を示唆している。それに対して参加者から、積雲対流の集団効果を考慮しないのは片手落ちでないか、そうしないと十分な成長率が求まらないという発言がなされた。インドの S.K. Mishra も同様に、主として barotropic 不安定性に重点をおいて論じていた。

ISMEX-73の資料を用いて、インドの K.V. Rao 等は、アラビア海上のモンスーン低気圧の一生を通じてエネルギー解析を行っていたが、かなり小さいスケールのじょう乱に準地衡風近似を適用して鉛直速度を求める方法に疑問がある。この点は Monsoon-77や MONEXのデータを使って今後がっちりやられねばならないと思う。

### 2-3. 理論および実験的研究

最近モンスーンを直接対象とする数値実験も増えてきており、ようやくモンスーンについてのすっきりした理論的説明へのアプローチがなされようとしている。

今回のシンポジウムでは、モンスーン・システムそのものを論じた論文とモンスーンじょう乱を論じた論文に大別される。

モンスーン・システムについては、ワシントン大学の P. Webster (近く CSIRO へ移る予定) が2つの研究を発表した。ひとつは発散 barotropic モデルを用いて、北半球の春と秋に南半球中緯度のじょう乱が赤道を

越えてモンスーン領域に伝播し、その基本構造に影響する可能性を調べたもので、赤道付近の基本流(緯度・経度の関数)が低緯度の大規模定常渦の影響で“臨界緯度”を生成し、上記エネルギー伝播をもたらす可能性を示した。もうひとつは K.M.W. Lau との共著で、簡単な大気-海洋結合モデルを用いて、その annual march から全地球的なモンスーンのなりゆきを追ったもので、モンスーン・システムの機構の本質をさぐるようとしている。このモデルは領域の北西部に大陸が、残りはすべて海洋といったきわめて単純な地球表面上に組立てられたものだが、物理過程はひと通り入っている。大気大循環の基本的な性質を知る上で大変おもしろい仕事だと思ったが、その結論を下に列記する。(1)大陸と海洋のいろいろな時間スケールの相互作用が大切で、たとえば陸地の heat up やしめりが海洋と関係しあって大気に影響しており、単に太陽熱の変動が直接影響するだけではない。(2)対流活動は現象の推移を複雑にする。(3)モンスーンのモードは単なる大規模な“海陸風”型ではない。(結論(1)のために、8月にみかけの降雨の中休みがあらわれる。また、モンスーンは徐々に形成されるものでなく、switch over という感じて既存の上昇流領域にある時から降雨がはじまるといった経過をたどった。もちろん、これらの結果は、モンスーンについての結論的なものではないが、と Webster は謙遜していた)。アメリカ海軍大学校の C.P. Chang と R.J. Pentimonti は、北半球夏季モンスーンの時間平均場が、定常および非定常の熱源に対してどういった反応を示すかを3層モデルを用いて調べた。彼等のぬらいのポイントは、先に Holton と Colton (1972) が見つけた、北半球夏季モンスーンのプラネタリー・スケールの渦度収支において 200mb の水平発散と釣合うために強力な渦度の sink が必要であるという事実に対して、ひとつの仮説を数値実験的に実証するところにある。その仮説というのは、これまで村上多喜雄や T.N. Krishnamurti などが観測した発散の形をとった外力の変動(たとえば15~16日周期の)を、この sink とするものである。Chang 等は Krishnamurti の水平発散分布によって指定される熱的外力を用いて、2つの実験を行なった。1つは熱源を定常に、他の1つは10日周期で振動させるものである。しかし、両方の実験で求めた準定常解の時間平均をみると、非定常熱源の場合チベット高原上の高気圧があまりきれいにあらわされておらず、他の大循環数値実験グループや村上の結果とくい違っている。いっぽう、熱带上層の谷は実

測とよく一致していた。非定常熱源の場合、より多くの渦度をつくり、非定常波を生み出したがこの場合局所的な barotropic 不安定性をもたらすようである。

つぎに、少し違った視点にたったものにヴィスコニン大学の J.A. Young の仕事がある。これは赤道を越える一般流が赤道波に及ぼす影響を論じたもので、その結果、風と気圧の関係が変わり、Yanai-Maruyama 波は北向きの、Kelvin 波は南向きの運動量フラックスをもたらすように、それぞれの波が歪められることを示した。

インドの Shankar Rao は、熱源に Kuo 型のパラメタリゼーションを用いて平均子午面循環を夏と冬について計算し、よくまとまった結果を発表していたが、どこに新しい主張があるのかよくわからなかった。

つぎにモンスーンじょう乱に関連した仕事に移る。

フロリダ州立大で学位を取りニューヨーク州立大に就職した F.H. Carr は、学位論文のテーマであった中部対流圏じょう乱の数値実験結果を発表した。このじょう乱は、モンスーンじょう乱の中でも特異な存在で、地表面や上層ではほとんど目立たず、対流圏中層付近で最大振幅をもつもので、夏季モンスーンに伴もってベンガル湾、インド亜大陸、アラビア海で発生し、モンスーン降雨に重要な関係をもつ。Carr の目的は、このじょう乱の発生・発達機構を探る所にあり、3次元半ラグランジュ型プリミティブ方程式モデルを用いた数値予報を行ない、予報と実況をくらべることによって最大うず度が対流圏中層に集まる過程を追跡していた。話の筋道はやや入りくんでいるため、ひと口でまとめることは困難だが、非常にすっきりした仕事だと思った。

M.I.T. の J. Shukla は、モンスーン低気圧の力学について論じた。彼が狙っているのは、いわゆる湿潤大気力学的な不安定性で、barotropic-baroclinic-CISK 結合不安定性を論じていた。CISK として Arakawa のパラメタリゼーションを用いて、彼が理論的に求めたじょう乱の構造はもっともらしいものだったが、CISK をなくした barotropic-baroclinic 不安定性だけだと成長率が不十分であった。彼の研究結果では、じょう乱の生成に barotropic 不安定性が必要だが、振幅増大には CISK 的な構造が不可欠のことであった。そして、baroclinicity はこの場合、こまかい構造を決める上で大切だが、山岳系の影響は大きくないという結果であった。筆者が Shukla に台風とモンスーン低気圧の差異について質問したところ、モンスーン低気圧は台風ほど強くない、十分組織されていない、地上の最低気圧は低くない

が、降雨量が多いとのことであった。また、生成の機構について両者とも本質的には同じだという彼の意見である。

セントルイス大学の G.V. Rao は、5月から8月の夏季モンスーン期における  $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ,  $40^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$  の領域での流れの性質を見るために、簡単なモデルをつくり、空気塊のトラジェクトリーを追跡した。この場所では、とくに南赤道トラフ (SET) が重要で、それに伴う下層の収束場と積雲対流の活動帯がほぼ緯度線に沿って見られるが、上記トラジェクトリー計算もそれを示し、この収束場の性質が海水表面温度のアノマリーや周辺気象系によって影響されていることを示した。

米海軍大学気象学部のグループ (J.B. Tupaz, R. T. Williams, C.P. Chang) は、夏季モンスーン期間中の上部対流圏偏東風ジェット付近の barotropic 不安定じょう乱の構造を数値実験的に調べた。用いたモデルは、赤道  $\beta$  面上の線型 barotropic 渦度方程式で、結果は実況と比べてよくシミュレートされていたが、部分的な結論という印象であった。

以上の他にも、メリーランド大学の A.D. Vernekar と H.D. Chang の準地衡風モデルによるモンスーン循環とじょう乱の関係の調査、カナダ大気環境庁の M. Lal による1次元モデルを用いたアラビア海上のプラネタリー境界層の数値実験、インド気象台の R.P. Sarker 等の地形性降雨の力学的研究があったが、いずれも部分的な説明にはなり得ても全体像の形成にどれほどの寄与があるのかよくつかめなかった。

#### 2-4. モンスーンの子報

モンスーンの子報に関する論文は、全部で10編発表されたが、経験則を用いるもの、統計予報、数値予報などバラエティに豊んでいた。

数値予報に関しては、米 NMC の N.A. Phillips, M. B. Mathur, K.A. Campana のグループが、北半球モデルにネストしたファイン・メッシュ・モデルを用いたインド上のモンスーンの休止の子報結果を発表した。彼等のモデルには放射と地表境界層 (explicit に表現した) 以外すべての効果を含んでいる。dry model では気圧系の移動がよく予報されたし、moist model では雨の分布が実況とくらべて一応よく予報されていたが、モデル自体はまだ開発中で、ネスティングの効果 (粗い格子網と細かい格子網が相互に結合した場合) がテレスコピングの効果 (粗い格子網の情報が一方的に細かい格子網にインプットされるだけでフィード・バックがない場合)

に比べてどう違うかなどはよくわからなかった。

英気象局の D.B. Shaw は、元来 GATE のために開発された客観解析—数値予報のスキームを利用して、モンスーン領域に適用するモデルをつくって実験予報を行なった。予報モデルは11層  $\sigma$ -系を用いたプリミティブ方程式モデルで、 $2^\circ$  の緯度—経度格子網で表現され、主要物理効果はすべて含まれている。予報結果は概して良好だったが、ヒマラヤの南側でノイズが目立っていたのでまだまだ改良を要すると思った。

これらの他にインドの S.S. Singh と K. Saha の barotropic 予報 (準ラグランジュ移流スキーム)、P.K. Das と H.S. Bedi の山の効果のチェックが発表されたが、数値予報の練習問題を解いたという感じがした。

経験則や統計法を用いる予報方法は実にばらばらで、いずれも何とかして前駆現象を見つけ、それに着目して予想しようという行き方をしている。しかし、そうした方法にどれくらいの信頼度があるのか、適用可能な範囲と予報結果のバラツキはいかほどか、なぜその前駆現象を取上げたかの理由づけなどについて十分説得力のあるものが見当たらなかった。その中で、インドの P.V. Joseph のモンスーン降雨が多い年と少ない年のパターンの特徴の違いを調べて、そうした違いを事前につかむ努力、C.R.V. Raman 等のやはり同様の仕事、英気象局 (ナイロビ駐在) の J. Findlater が着目したケニヤ上空の風の強度とインド亜大陸西岸の雨量との lag 相関の検証が、比較的すっきりしているように思えた。

シンポジウムのセッションには、続いてモンスーンの一般的研究があったが、要するにどのセッションにも入らない論文のよせ集めであったが、フランスの低層定高度面バルーン (low-level Constant Level Balloon) を用

いた観測結果が興味深かった。残りのセッションのうち、MONEX の計画案については、ハワイ大学の村上多喜雄が MONEX 第3回計画会議の結果をまじえて現状を紹介した (「天気」1977年5月号“GARPの窓”の拙稿参照)。また、最終日のパネル・ディスカッションは、主催者側の都合 (当日はインドの祭りにあたった) で1時間しか与えられず、実のある討論ができなかったのは心残りであった。なお、本シンポジウムの議事録は後日出版されるとのことであった。

### 3. モンスーン研究の今後

筆者はモンスーン研究の門外漢であるが、大気大循環への興味の一環としてモンスーンにも関心を抱いていた。今回、こうしたシンポジウムに参加する機会を得、いろいろ勉強ができて喜んでいる。

アジア・モンスーンと一口にいても、気象学的にはたくさん問題点とアプローチがあること、歴史的には古くから取上げられているのに肝心の所ではっきりした知識が欠けていること、部分的な理解を深める一方で統一的な全体像の把握がこれからはされねばならないことなどを知って大きい収穫だったと思う。言い換えれば、それほどモンスーンというものは、こみいった複雑な現象なのであろう。

インドにおいて若い気象研究者 (何人かの女性も目立った) が輩出しており、在米インド人気象学者がそれを援助しているのは印象的であった。さらに、インド以外の南アジア、東南アジア、東アフリカでも活発な研究意欲が芽ばえているのを知って、西アフリカ諸国での西アフリカ・モンスーンに対する関心の高まりとともに、良い意味での気象学における“南北問題”に発展してくれることを願っている。