

モンスーン力学の国際シンポジウム報告*

金光正郎**

1. シンポジウムの目的

1977年12月5日から9日まで、インドのニューデリーで開かれたモンスーン力学のシンポジウムに出席の機会を得たのでその概要を報告したいと思う。このシンポジウムは、IUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) と IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) の共催、および、インド学会、インド大学連盟、インド工科大学、インド気象局、アメリカ気象学会の後援で行なわれたもので、16ヶ国から約50名、インド各地から200名近い人々が集まった。参加者の中には米国 MIT の Charney 教授をはじめとして、幾人かの著名な学者が見掛けられた。日本からは、筆者の他に IUTAM の関係から谷一郎さんが出席されていた。

このシンポジウムが計画された背景には、1979年1月から行なわれる予定の MONEX があることは言うまでもない。しかし、インドの学会がもっと長期的な計画の基にインドにおける気象学の近代化を目指していることには注目させられた。これは、このシンポジウムが、1977年の1月と4月にそれぞれ行なわれた印仏共同の数値予報に関するワークショップや印米共同のモンスーンに関するシンポジウム(天気、第24巻7号の新田尚氏による報告を参照)などの一連の企画の一部であることから推察される。非常にうらやましいことに、インド政府の気象学に対する関心は非常に高いもので、このシンポジウムへの援助は言うに及ばず、会期中にはデサイ首相自身が出席者との懇談を希望された程であった(研究発表の3日目に、わずか20分程であったが首相官邸で実現した)。

シンポジウムの委員長には、ケンブリッジ大学応用数学・理論物理学教授の Sir James Lighthill が選ばれており、開会の講演でこのシンポジウムを通じて気象学、海洋学、流体力学、応用数学、水文学などのいろいろな分野の知識を出し合い、モンスーンに関する意見の交換と啓蒙を主目的としようとする立場が打ち出された。

プログラムは、

- 1) 大循環に関連したモンスーン力学
- 2) モンスーンの気候学
- 3) モンスーンじょう乱
- 4) 数値モデリングに関する諸問題
- 5) 海洋循環
- 6) 水文学・洪水予報・高潮予報

となっていたが、参加者の都合などでプログラムに沿わない部分もあった。この報告では上のプログラムに従わず、全講演を聞いた結果をまとめ直して、筆者なりの分類で特に興味深く思われた研究のいくつかを紹介しようと思う。

2. 研究発表の概略

2-1 数値シミュレーション

研究の発表は、米国大気科学研究所 (NCAR) の Washington と英国気象局の Gilchrist による大気大循環の数値シミュレーションのレビューと現状の報告から始まった。現在、この分野では季節変化や経年変化のシミュレーションが主流で、殆どの大循環モデルグループではモデルを1年またはそれ以上積分するようになってきている。この二つのグループによる最近の実験結果も映画などを用いて紹介され、各季節の循環は大循環のスケールではほぼ実測に合っていることが示された。しかし、筆者の見るところでは、チベット高気圧の位置の季節変化などのもう少し小さなスケールでかなりの差があり、モデルにまだ改良すべき点があるように思われた。これは、推定ではあるが、大循環モデルにおいて移動性のじょう乱(特に熱帯性の)がまだあまりよく再現されてい

* Report on joint IUTAM/IUGG international symposium on Monsoon Dynamics.

** M. Kanamitsu, 気象大学校.

ないことが原因の一部であるような気がする。インドの南西モンスーンに関連した地域的な問題では、アフリカ東岸の対流圏下層にみられるソマリジェットと海面水温の変化によるインド亜大陸の降水量の変化の実験が主なものであった。ソマリジェットに関しては、大循環モデルの格子間隔が大きすぎることから実測されるような狭い強風帯はもともと期待できないが、そのようなモデルでもアフリカ東岸沿いに赤道を横切る比較的強い風の帯ができること、また、その成因には山岳が重要な役割を果たしていることが指摘された。

なお、この問題に関して既にかかなりの数の人々が山岳が重要であるという結論を出しており、これはほぼ定説化したと言って良いようである。海面水温の降水に対する影響は、Shukla (1975) がプリンストン大学の地球流体力学研究所のモデルを用いて初めて実験を行なったものである。その結果によると、海面水温の低下は、海面気圧の上昇と海水の蒸発の減少をもたらし、南西季節風を弱め、水蒸気輸送を減少させ、したがって、降水を減少させることが明らかになった。しかし、この実験以来このときに現われた降水量の変化が統計的に有意であるかどうかの問題とされてきた。これは、モデルと実際の天気とが異なるという問題の他に、モデルがたとえ完全でも大気には外部パラメータ（海面水温、地表面のアルベド、太陽常数など）の変化に関係しない自然変動 (natural variability) があり、海面水温を変えたときの変動がこの変動より大きいかどうかを判定する必要があるという問題であった。この自然変動とは、たとえば、数値モデルで全てのパラメータを一定にしたときでも運動が定常にならない（運動の非線型性）ことに対応し、その大きさを求めるのは非常に難しい。Washington の発表も定性的には Shukla と同じ結果であり、有意性についてもいろいろ考察していたが、依然として問題の解決までに至っておらず、数値モデルを用いたこの種の研究の難しさを指摘したに留まった。大循環モデルの結果としてもうひとつ興味を覚えたのは、Gilchrist が示したシミュレーションから得られた非断熱効果の水平分布であった。これによると、北半球夏季には当然予想されるように陸上に熱源、海上に冷源が分布しているが、その内訳として、陸上では暖められた地面と大気との熱の交換が最大で、凝結の効果はあまり大きくないという結論であった。また、NCAR のモデルでも同じような結果がでているとのコメントがあった。しかしながら、この結論はプリンストン大学のモデルによるヒマラヤ山

系のモンスーンへの影響を調べた研究 (Hahn・Manabe, 1975) の結果と反していると考えられることからかなりの議論を呼び、観測を含めたこの方面の研究の必要性が強調された。筆者自身の経験でも積雲による凝結熱の効果がずっと大きくでているので興味深い結果と思った。なお、この問題に関連して、MONEX では熱収支に注目した気象衛星による放射の観測を重視していることを付け加えておこう。

Das・Bedi (インド気象局) は、限られた領域でのプリミティブモデルを用いてモンスーントラフ（南西モンスーン期に北緯30度付近のヒマラヤ南麓に帯状にできる低圧帯）のシミュレーションを試みた。モデルがまだ安定には走っていないようなので結果は最終的ではないようにも思われたが、地表面境界条件、特に、地面のアルベドやしめりなどのパラメータを適当に選ぶことによってトラフがシミュレートされることを示していた。結論としては、単に基本場と山岳を与えるといったような単純なモデルではトラフのシミュレーションは不可能で、放射や地面と大気との熱や水蒸気の交換など、種々の物理過程の複雑な相互作用の結果としてトラフが形成されるとのことであった。現在のところ、モデルに水蒸気の凝結過程を入れていないので、それ等を組み込んだより改良されたモデルでの研究に期待がかけられる。

Charney・Rivas・Schneider・Shukla (いずれも米国MIT) は、これまでによく用いられてきた大気の帯状平均モデルに海洋の帯状平均モデルを結合させ、熱帯の降雨帯 (ITCZ) が形成される緯度についての考察を行なった。彼等は、太陽が赤道にあり両半球が海洋でおおわれている南北半球が赤道に対して対称な条件の下でも ITCZ は赤道上にできず、その位置がどちらかの半球にずれることを示した（これは、ITCZ が赤道にある状態は不安定であると言い換えることができる）。この位置がずれる機構は、以下のように説明できる。まず始めに赤道上に ITCZ があるととして、これがどちらかの半球にずれると角運動量の保存から赤道の海面上では偏東風が期待される。この偏東風は赤道で海洋の湧昇をもたらす（風によって海水は北半球では風下に向かって右、南半球では左に運ばれるから）、海表面は下層からの冷たい海水によって冷却する。この冷たい海面で冷やされた大気には下降気流が生じ、ITCZ は赤道から離れたより暖かい海面上に移動することになる。この発表は、対称な条件下で非対称が生ずる可能性を示した物理的に非常におもしろい研究だと思った。Charney 自身

これまでに ITCZ が赤道上にできない理由を説明しようといろいろな考え方を述べてきたが、今回の海洋と大気との相互作用を取り入れるという考え方でこの問題は一応解決したように思われた。彼等はこのほかに北半球に陸地を想定した実験を行ない、ITCZ が北緯30度付近の陸上にできることを示してインドモンスーンに伴う ITCZ の北上 (モンスーントラフ) を見事に説明していた。

Sarachik (米国ハーバード大学) は、1 次元海洋大気結合モデルを用いて熱帯大気鉛直温度分布・水蒸気分布をシミュレートした。彼は、大気を plume layer (混合層にあたる)、低い積雲の層、高い積雲の層の三層に分け、各々の層に現在最もよく用いられているパラメタリゼーション (たとえば、高い積雲の層には Arakawa parameterization) を使い、放射、積雲対流、海表面での熱や水蒸気の収支を考慮し、平衡条件から定まる大気の状態を求めた。与えるパラメータは成層圏の温度と短波のフラックスだけであるが、求められる海面水温、海面気温、水蒸気量などはかなり現実に近いということであった。ただし、放射過程が少し雑なために各層の厚さにはまだ問題があるらしく、パラメータを変化させたときの大気の状態を調べるような実験はまだ信頼できるところまではいっていないようであった。

Webster (オーストラリア、CSIRO) は、非常に簡単なモデルで (帯状平均モデルに極めて近いものであるが、東西方向にも大きなスケールでの海陸分布を入れるように工夫している) モンスーンの季節変化をシミュレートした結果について述べた。これは、4 月のシンポジウムの発表とほぼ同じ内容であったらしいが (前出、新田尚氏による解説を参照)、ITCZ の位置やその季節変動がかなり現実的に再現されていた。結果を用いたいくつかの計算の中から、北半球夏季の陸から海への東西方向の熱輸送の大きさが中緯度の高低気圧による南北の熱輸送と同じオーダーであること、海流による熱輸送が重要な役割を果たしていることなど、海陸分布や海洋と大気の相互作用の重要性を簡単なモデルで非常にきれいに説明していた。

Charney は、モンスーンの子報可能性と題して、主として数値シミュレーションの結果を基に熱帯大気が下層境界条件にどのくらい影響され易いかにについて論じた。彼は、中緯度における実測降水量とシミュレーションによる降水量の比はかなり 1 に近いが (後者の方が小さい) 低緯度ではモデルの方がずっと小さくなること、温

度の高い熱帯では温度変化による飽和水蒸気圧の変化が中緯度より大きいこと、したがって、対流活動が温度に強く依存するであろうと考えられること、低緯度では水平温度傾度の変化に対する温度風の変化が大きいことなどを例としてあげ、また、偏東風帯である熱帯には中緯度の影響は伝わりにくいという理論も考えあわせて熱帯大気は下層境界条件のわずかな違いに影響され易く、しかも、その違いが熱帯大気を持つ流体力学的・熱力学的な不安定によって増幅され易い状態にあると結論した。この結論はもちろん、この前に述べた熱帯大気の数値モデルのいろいろな結果、すなわち、大気が海面水温や地表面のアルベド、しめりなどに大きく左右されるという事実とも良く合っている。また、この結論を言い換えると熱帯では人為的な変化に対する大気の変化が中緯度より大きいということになるが、これも、最近よく話題にされている砂漠の拡大は家畜が砂漠周辺の植物を食べ尽くすことによって地面のアルベドを変化させ、それがより乾燥を強めることによるという彼の砂漠の力学の理論と関連している。この Charney の推論を応用すれば、境界条件をより詳しく知る必要があるという点で、熱帯の子報は中緯度の予報よりも一段と難しいことになる。彼は、これらの少々悲観的な推論から熱帯の長期予報には従来のような予報法ではなく、たとえば、長年の平均からの偏差を予報するといった方法の開発が必要となるであろうと話を結んだ。この講演は予報が困難であるという結論上かなりの反響を呼んでいたが、筆者にとってはこの結論は少し早計で、視点を変えれば逆にある場合には外的ファクターの変化を見付ければ予報が可能であると言い換えることもできるのではないかと思われた。もちろん、この外的ファクター自身 (海面水温など) も大気の運動によって変わるのであろうから問題は複雑になろうが、長期予報に関連した予報可能性の問題としてこれから脚光を浴びる課題になるであろうと思われた。

以上、数値実験関係では簡単なモデルから大循環モデルまで、熱帯循環のシミュレーションは流れの場や降水帯の位置、大気鉛直構造などだいたいのところは再現できるようになってきている。しかしながら、これらのモデルを気候変動や長期予報へ応用する段になると外的パラメータを変化させたときとさせないときの差がモデルと現実の大気との差の中に入ってしまったたり、前に説明した自然変動の中に入ってしまったりする為に、結果の信頼性が非常に低くなってしまおうというのが現状のようである。したがって、これからは実験の有意性を理論的

に求める努力と、モデルをより実際の気気に近づけていく努力が期待される。なお、前者の問題についてはソ連からの参加者である Marchuk が観測および解析誤差の伝播・増幅という観点から理論的な考察を行っていた。このような研究によって、熱帯気気が下層境界条件に敏感であるかどうかという事実も裏付けられる必要があると思う。また、後者の問題であるモデルの改良には、大気下層の境界条件に大きく左右される積雲対流や境界層、放射過程などをより精密に扱うことが必要になってくると思われるが、これらは何れも異なったスケール間の相互作用を含むパラメタリゼーションの問題なので、かなりの困難が予想されよう。

2-2 観測による研究 (大循環規模)

ハワイ大学の村上は、アメリカ気象局の熱帯解析を用いて、冬季と夏季の大循環規模の渦度場、発散場の解析とエネルギー解析の結果を述べた。エネルギー解析では波数空間で移動性の波と停滞性の波の間のエネルギー交換を論じ、停滞性の超長波が重要なことを示した。しかし、エネルギー変換の大きさや方向は年毎にかなり変化するので、はっきりとした結論を出すにはより正確で長期間にわたる解析が必要であるとのことであった。

筆者は、熱帯での実験数値予報の結果と、それから得られた対流圏超長波の立体構造、エネルギー収支について発表した。

Krishnamurti (米国フロリダ州立大学) は、1972年の大規模なかんばつに焦点を合わせて、かんばつの年とそうでない年との間の大循環規模の場の違いを詳しく論じた*。そして、かんばつの年には熱帯対流圏上層の流れの場、発散の場などが南東に緯度にして約10度ずれていること、それに伴って熱帯偏東風が弱いことや、これらが台風活動の激しさに関係がありそうなことなどを指摘した。この研究ではかんばつの原因を述べるまでには至っていないが、これは注目すべき要素が非常に多く、しかも、それ等の因果関係がはっきりしていないことが理由であり、また、それを指摘するのもこの研究の目的のひとつであった。

Freer (西独、ボン大学) は、熱帯・亜熱帯各地の降水量の相互関係を周期の比較的長い変動に注目して調べ、両地域間の関係を見付けることによって気候変動や長期予報への糸口をつかもうとしていた。M. S. Rao (インド気象局) も同様の目的でモンスーンの強さがその年の1月から4月までのインド上空の流れの場やモンスーン

期のオーストラリア上空の場と良い相関があることを示した。この他にも、相関や統計などを用いた同様の研究がいくつかあった。

以上、大循環規模の観測による研究はデータの点であまり先へは進めない状態に来ており、FGGE の開始が一番待たれている分野である。また、データを用いた気候変動や長期予報の研究はきちんとした理論も殆どない現状では統計的な研究を積み重ねていくのが重要なかもしれない。ただ、もう少し物理的なアイデアに基づいた統計または相関解析が望まれるような気がした。

大循環規模ではないがもう少し小さいスケールでソマリジェットに関する発表がいくつかあった。G. V. Rao (米国、セントルイス大学) は、昨年夏に行なわれた MONEX の予備実験 (Monsoon 77 と呼ばれている) の結果について航空機を用いて観測したジェットの微細構造や時間変化に関して述べ、日変化が非常に大きいことを示した。Findlater (ケニア気象局) は気候学的なジェットの解析とその変動とインドの降水との関係について述べ、Cadet・Togbe (フランス気象学研究所) は低層定圧ゾンデによるインド洋の下層の流れの場の解析について論じた。これらの研究は未完成のものが多く、MONEX の本実験への準備的な感が強かった。

2-3 観測による研究 (移動性じょう乱規模)

モンスーン季のインドでは、モンスーントラフに沿って東から西に移動するモンスーン低気圧による降水を予測することが重要な課題である。この低気圧の力学を理解する為に観測値を用いた研究がなされてきているが、特に、その成因に関する発表が目についた。Goswami・Satyan・Keshavamurti (インド物理研究所) は、モンスーン低気圧が大気の力学的不安定性によって生ずることを示すためにじょう乱の発生する場が傾圧不安定または順圧不安定の条件を満たすかどうかを調べた。その結果、基本場は傾圧的には安定であるが、順圧的には不安定の条件を満たし、発達する波の構造や成長率はモンスーン低気圧に似ているとのことであった。Pearce (英国、リーディング大学) は、南北の温度差 (傾圧性) に注目し、 β 効果を入れると傾圧波が発達し得ることを示し、これがモンスーン低気圧の発達に関係あるとした。Mak (米国、イリノイ大学) は、移動性ではないがインド西岸にしばしば観測される Midtropospheric cyclone (中層低気圧) の発達をやはり傾圧不安定で説明しようとした。これは、彼が以前に Journal of Atmospheric Sciences に載せた論文 (Mak, 1975) で基本場の選び

*) 筆者との共同研究

方が現実とはかなり異なるという批判を浴びたことに対抗して、より現実に近い基本場を選び計算し直したものである。これ等の解析結果をみると、どうも安定・不安定の条件が用いるモデルと基本場の選び方に非常に敏感であるように思われる。しかも、どの研究もモンスーンじょう乱に伴う積雲対流の効果を入れていない(たとえば、CISK についての解析)のは片手落ちの感が強かった。積雲の効果も考慮した研究に関しては Shukla が MIT の博士論文で行なったと聞いているが、積雲のパラメタリゼーションの方法によってじょう乱の発達の条件や構造などが異なるためにはっきりとしたことを言えないというのが結論だったと思う。したがって、この様な大気の力学的・熱力学的な安定性に注目した研究はじょう乱発生メカニズムをつかむといった大気現象の理解の意味では非常に重要であるが、予報への応用には十分気を付けなければならないと思われる。以上のほかにも山岳の効果でじょう乱の発生を説明しようとした研究があったが、物理的にあまり明確ではなく一つの可能性を示すに留まった。

モンスーン低気圧以外では、Ramanathan (インド気象局)による Monsoon 77 の期間のインド洋における熱・水蒸気の収支計算 (Yanai *et al.*, 1973 と同じ方法)があった。結果は、西部太平洋におけるものと非常に似ているが、各量が 1 オーダー近く大きいということであった。

2-4 数値モデリングに関する諸問題

このセッションでは、特にモデルに使われる差分法が主な話題となった。M.S. Rao・Batwar (インド理科学研究所およびインド気象局)は山岳波の数値実験における差分の問題、Sundqvist (スウェーデン、ストックホルム大学)は大規模現象における山岳を考慮するときの差分法、座標系の選び方、イニシャルゼーション等についてのレビューを行なった。Reddy は、有限要素法(任意の形の格子を用いて偏微分方程式を解く方法で、工学関係で開発された)を大規模運動の予報方程式系に応用する為のいろいろな問題、特に、種々の保存性(渦度、渦度の二乗、運動エネルギー等)について論じた。Reddy は、米国オクラホマ大学の応用数学の教授で、同大学気象学科教授の佐々木さんの助言によって気象の問題を始めたそうである。佐々木さんの話によれば、有限要素法はオメガ方程式などのような境界値問題を解くには適しているが、時間積分のような問題に応用するにはまだ欠点が多いとのことである。有限要素法について

はほかにもインド工科大学の人達が気象や海洋の問題に応用していたが、格子点の粗いところでの精度の問題がまだ残っているようであった。

2-5 海洋循環

MONEX には、いくつかの海洋観測計画も含まれている。このシンポジウムでも、この点を考慮し、海洋関係の論文発表の為にひとつのセッションがあてられた。Swallow (英国、海洋科学研究所)はアフリカのインド洋岸を流れるソマリ海流についてのいろいろな観測事実について述べた。この海流の特徴は次のようにまとめることができる。ソマリ海流は夏と冬とでその流れる方向がほぼ逆転する(季節風とほぼ同じ方向に流れる)。夏季の赤道を横切る海流は赤道域で南風の始まりから 2 日～3 日後に始まり次第に北へと強まっていく。海流の速さは表面で 3～4 m/sec に達するところもある。また、海流が海岸から離れていく緯度では岸に近いところで強い湧昇流が観測される。この海流に伴って強い渦動が存在することも知られている。しかし、この海流の鉛直構造や赤道地帯の海流との相互作用などについて知られていないことがまだ多いようである。Woods Hole 海洋研究所の Luyten は赤道地帯におけるソマリ海流の鉛直構造の最近の観測結果を述べ、赤道に近づくほど海流の鉛直方向のスケールが小さくなっていることを示した。このように、海流自体の詳しい観測が始まったばかりなのでこれから MONEX を通じて解決されるべき課題がたくさんあるように思われた。

ソマリ海流の数値実験では、Cox (米国、プリンストン大学)と Lin・Hurlbert (米国、海軍海洋研究所)が各々かなり単純化したモデルで理想化したソマリ海流のシミュレーションに成功していた。詳しいことはよく分からなかったが、アフリカ東岸の傾斜や海岸線の走行などが重要なファクターになるとのことであった。

このセッションで異色であったのは、R. Krishnamurti (米国フロリダ州立大学海洋学)による海洋循環の室内実験であった。彼女は、回転水槽の内部を三つの領域に仕切って一層または二層の流体で満たし、その上に中心ほどへこんだ蓋をして水槽と蓋を独立に回転させることによって、風によって作られる海流の実験を行なった。蓋がへこんでいるのは、流体の深さを変化させることによってコリオリパラメータの緯度による変化(β 効果)の効果を与える為である(β 効果は海流の問題では非常に重要であると考えられている)。一層モデルの場合と二層モデルの場合では流れの場は少し異なってくるが、

何れの場合もいわゆる吹送流の西岸強化が見事に再現されていた。二層モデルの場合には全体のパターンはそれほど変化しないが、西岸流が岸から離れていく付近から傾圧波が発達していく様子がきれいに現われていた。量的にも、蓋の傾斜の変化に対する不安定波の発達度合やロスビー数と西岸流による質量輸送との関係など、理論と良く一致することを示していた。室内実験でもこれだけのことができるということで、新鮮な興味をわかせた発表であった。

3. まとめ

以上にあげた発表の外にも、統計や時系列を用いた予報、数値モデルによる高潮予報などの話があったが、別に目新しいものはなかったのでここでは省略する。今回のシンポジウムを振り返ってみると、モンスーンに関するいろいろな分野の研究を出し合うという点では成功していたが、その反面まともに欠けた部分も多かった。もっとも他の分野の人々にモンスーンの種々な問題を理解してもらおうという立場からは仕方がないことであろう。筆者にとっても、ソマリ海流等の海洋の話題に触れることができたのはかえって幸いであった。

MONEX に関連して昨年中にインドで開かれた一連の学会やシンポジウムは、筆者の見た限りでは、世界中の気象学者に限らないいろいろな分野の人々にモンスーンの重要性とその問題の複雑さ、難しさを教え、沢山の人々の関心を引きつけたという点で大いに成功したと思われる。運営や計画の面で難しい問題もあるかもしれないが、日本でもこの様な企画を是非実現させたいもので

ある。

最後に、このシンポジウムの研究発表を聞いて特に強く感じたのは、現在気象学をリードしている米国の気象学者達が、いずれも気候学や長期予報の研究に非常な努力を注いでいることである。その研究は数値モデルから相関解析までのさまざまな分野にわたっており、GARPの第2目標に既に多数の人々が全力を注いでいるのには驚かされる。この分野は特に今までの気象学の流れとは全く異なった理論が出てくる可能性もあることから、夢のある多くの人々の関心をひいているのかもしれない。日本でもこれから気候関係の研究に関心を示す人が少しずつでも増えてこないのかと願われる。

文 献

- Hahn, D.G. and S. Manabe, 1975: The role of mountains in the south Asian circulation, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1515~1539.
- Mak, Man-Kin, 1975: The monsoonal midtropospheric cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2246~2253.
- Shukla, J., 1975: Effect of sea-surface temperature anomaly on Indian summer monsoon: A numerical experiment with the GFDL model, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 503~511.
- Yanai, M., S. Esbensen and J.H. Chu, 1973: Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from largescale heat and moisture budget, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 611~627.