
講 演

**グローバルなエネルギー・水循環
におけるアジアモンスーンの役割**
—GAMEに向けて—*

安成哲三**

551.465 : 551.585

1. はじめに

本日の副題にありますGAMEというのは、GEWEX-ASIAN・MONSOON EXPERIMENTというのを略したものです。日本語では「アジアモンスーン エネルギー・水循環観測研究計画」と呼んでおります。

GEWEXは、Global Energy and Water Cycle Experimentの略です。これは、WCRP (World Climate Research Program, 世界気候研究計画) 計画の一環として1995年あるいは96年から正式に走ります。このGEWEXの中で特にアジアモンスーンは、非常に重要で、特に我々アジアの人間が何らかの形で中心的な寄与を期待されています。というわけで、GAMEを立案して軌道に乗せてやらなければいけないのですが、GEWEXあるいはGAMEは、現業官庁、日本の場合は特に気象庁ですが、この協力なしにはとうてい成功させることはできません。更に私たちは現業的な観点からも、多くの成果が期待できるのではないかと考えております。

2. WCRPについて

WCRPはWMO (世界気象機関) とICSU (国際学術連合) の共同のプロジェクトとして走っているものです。このWCRPの方針を決めるのがJSC (Joint Scientific Committee) です。現在このJSCが開かれておりまして、日本からは東京大学の松野太郎氏、山形俊男氏が参加しています。このWCRPのサブプログラムとして現在走っておりますのが、TOGA (Tropical Ocean and Global Atmosphere) で、世界の気候における熱帯の役割、中でも大気と海洋の役割、もっと具体的に言えばENSO (El Niño and Southern Oscillation) に関するメカニズムの解明を目標に研究しています。これは日本からは東京大学の住明正氏がSSG (Science Steering Group) のメンバーとして参加しています。このTOGAの中心となるTOGA・COARE (Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment) という西部熱帯太平洋における観測計画はちょうどこの間終わったばかりです。それから海洋を中心としたサブプログラムにWOCE (World Ocean Circulation Experi-

* Role of Asian Monsoon on Global Energy and Water Cycle - A Proposal of GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) - (この記事は1993年3月16日に気象庁で開かれた安成哲三博士による気象講演会から起こしたものに、安成哲三氏が加筆されたものである。図書資料管理室)

** Tetsuzou Yasunari, (筑波大学教授)

ment) というのがあります。これも今ちょうど走り出したところです。これは主に気候システムにおける海洋の役割、特に海洋循環に焦点を当ててやろうというもので、日本からは東京大学の杉野原氏が参加しています。

GEWEXは、これらに引き続くWCRPの計画です。これには私がSSGの日本代表として参加しております。時期的にはTOGAが1995年に終わります。それからWOCEが1990年から10年間ぐらい続きます。このGEWEXは1995年あるいは96年から始まって、正式には10年間続きます。

3. GEWEXについて

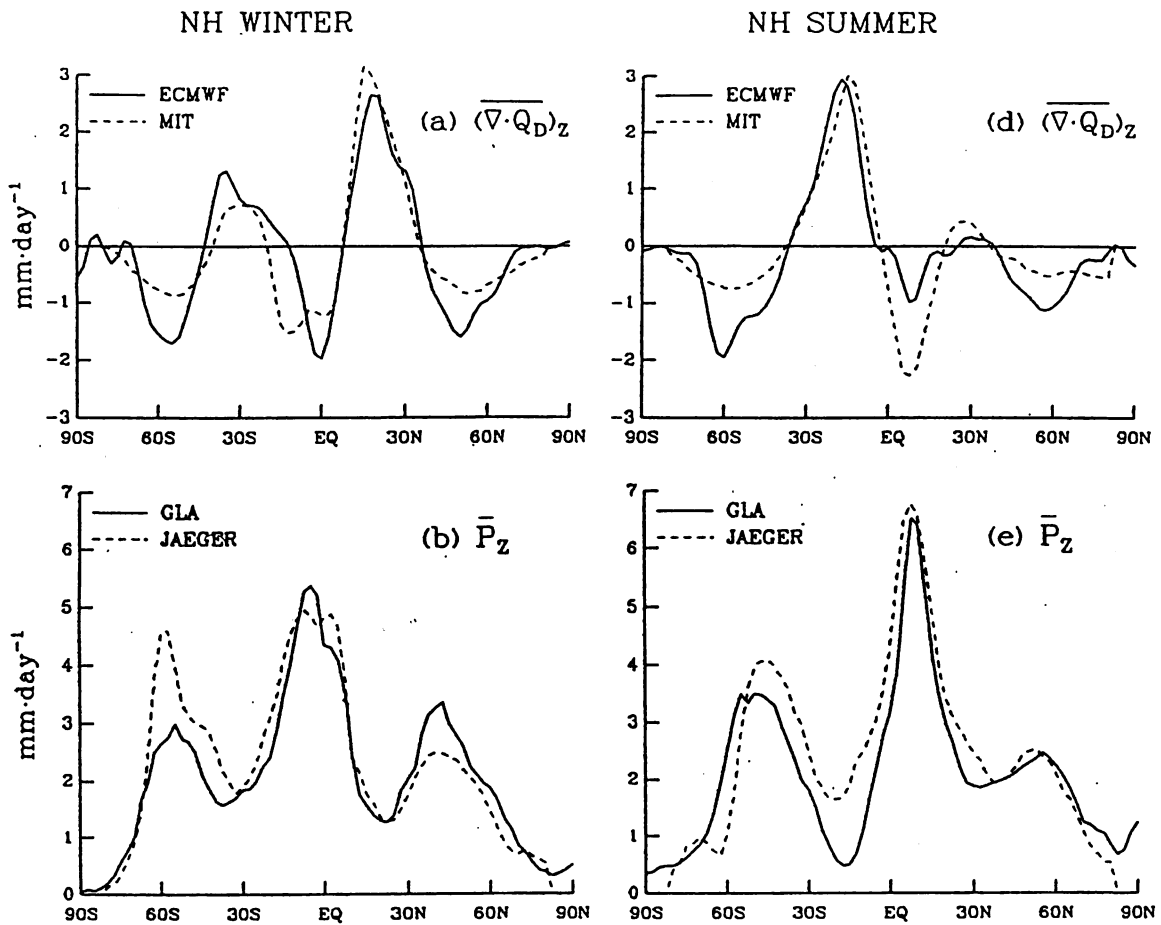
日本語では、「全地球エネルギー・水循環実験観測計画」と訳されています。簡単に言いますと、地球大気と地表面のエネルギー収支と水収支をきっちりと押さえようというものです。気候変動を理解する前提となる、いわばほぼ平衡状態としての熱と水の循環はどうなっているか、これらがバランスした状態というのはどのようなものであるか、そしてそれぞれの大きさはどうなっているか、こういった事柄をまずきっちりと押さえようというものです。その後で例えば太陽放射や炭酸ガスが変動した時に気候システムはどのように反応するかを評価できるのです。特に焦点となっているのは、水惑星ともいわれる地球上の水循環と相変化の役割です。すなわち、水蒸気の蒸発凝結、雲や雪氷の形成なども含め、エネルギーと水のサイクルを全地球的な規模で量的に把握しようというのがGEWEXです。

第1図(下)は最近の Journal of Climate に載ったアイオワ大学の T.C.Chen 氏の論文から引用した東西方向で平均した緯度方向の降水量の分布です。北半球の夏はモンスーンあるいはITCZが北に寄っており、北半球側に降水のピークが見えます。それから中緯度の総観規模のじょ

う(擾)乱に伴う降水のピークがあります。第1図(上)は水蒸気フラックスの大規模発散量の分布ですが、どこに水蒸気の源と吸い込み口があるかということの目安になります。北半球夏には、南半球の亜熱帯の海に発散の中心があり、この辺で蒸発がかなり起こっていることになります。蒸発した水蒸気は中緯度で収束して雨となっています。南半球の夏にはこの関係が逆転して、北半球側に発散の中心が来ます。ところがこの図でも実線と破線がありますようにECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) とMIT (Massachusetts Institute of Technology) ではモデルの違いが出てきています。同じ観測データを用いても、大気大循環モデルや予報モデルを用いたデータの4次元同化(後述)によってこれらの収支が計算されますので、このようにモデルによって結果が違ってしまいます。炭酸ガスを倍増させて地球の気温がどうなるかという議論が盛んに行われておりますが、現状の把握についてさえこのように大きな不確実性がある状態です。GEWEXはこの現状把握をまずきっちりやろうというものです。

第2図は降水量をいろんな大循環モデルから計算したものです。熱帯域で一番多く、中緯度にピークがあるという点ではどのモデルでも一致しているものの、量的にはこのように大きなばらつきがあります。破線は実測ですが、これ自体にも実は大きな問題があるのです。特に海洋上の降水量などは、まだ良くわかっていないわけです。実測値ですらかなり大きなエラーバーが付いているということです。この辺を量的にきちんと押さえたいかないと、気候変動の研究をやると言いましてもその評価は難しいのではないかと、ということがそもそもGEWEXの発端です。

第1,2図は、東西に平均したものでしたが、実際は東西の非一様性あるいは非対称性があります。

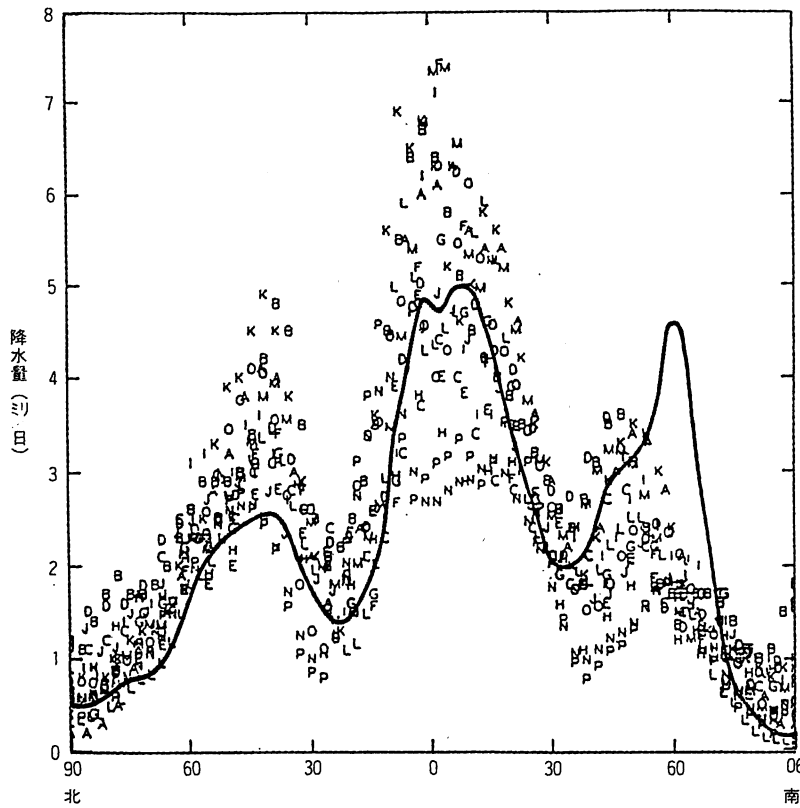


第1図 帯状平均した水蒸気フラックス発散と降水量
 実線と破線はそれぞれ計算したデータソースの違いを示す。(Chen and Pfaendtner,1993)

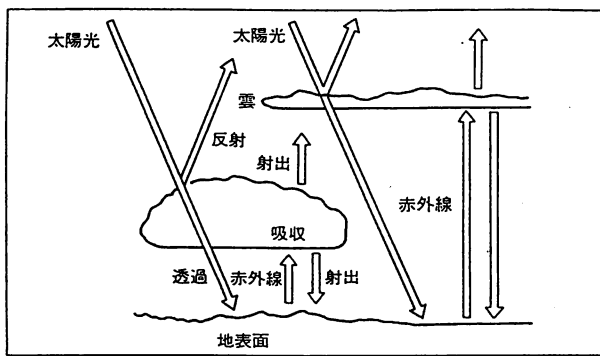
その最も大きなものは陸と海による分布です。例えば全地球的な水循環を、現在の信頼できるデータでほぼ定常状態だとして調べますと、蒸発と発散が海洋上にあり、陸上で雨が降る。陸で降った雨は川となって海に行きます。大気の方でも海と陸の間で水蒸気のやり取りがある。GEWEXでは、陸と海が水やエネルギーの循環で果たしている役割がかなり大きな問題となると思います。

エネルギー収支の視点で言いますと、第3図にありますように、地球の気候を決めているのは太陽からの短波放射と、地球大気系からの長波放射の収支です。そして、雲があると短波は反射されるとか、あるいは地表面に雪や氷があれば反射されるというフィードバック機構があります。一方

長波の方では雲があれば吸収が起きます。水蒸気そのものは非常に大きな長波放射の吸収源であります。温室効果が問題になっていますが、一番大きな温室効果ガスというのは水蒸気です。更に雲はその形態や高度により、放射収支にプラスにもマイナスにも働きます。これらはいずれにしても水が形を変えてエネルギー収支に作用しているものです。更に、エネルギーつまり潜熱を運ぶ実体としても水は重要です。GEWEXのもう一つの側面は、気候システムの中での水が持っているフィードバック機構の解明です。GEWEXは気候の年々変動を表向きには扱いませんが、その素過程をきちんと押さえようということ、そしてそれらの気候変動における感度(センシティブティ)を観測と



第2図 14の気象大循環モデルによる降水量の緯度分布と観測値（実線）の比較



第3図 大気・雲・地表の放射収支・放射過程の模式図

モデルの両方に基づいて議論しようというプロジェクトとも言えます。

GEWEXの主要研究課題は次の3項目に整理されると思います。

- 1.雲, 放射におけるフィードバックの過程
- 2.大気と海洋表層での相互作用

すなわち蒸発・降水の効果

3.大陸における蒸発・降水, 雪や氷の効果, 土壌がはがれるとか乾くという効果の気候システムの中での役割

この中で3番目は研究が特に遅れています。と言いますのは, 大陸は非一様であり, 多様性に富んでいます。しかも大陸は地球の表面積の1/3を占めており, これを定量的, 定性的に押さえることが重要です。

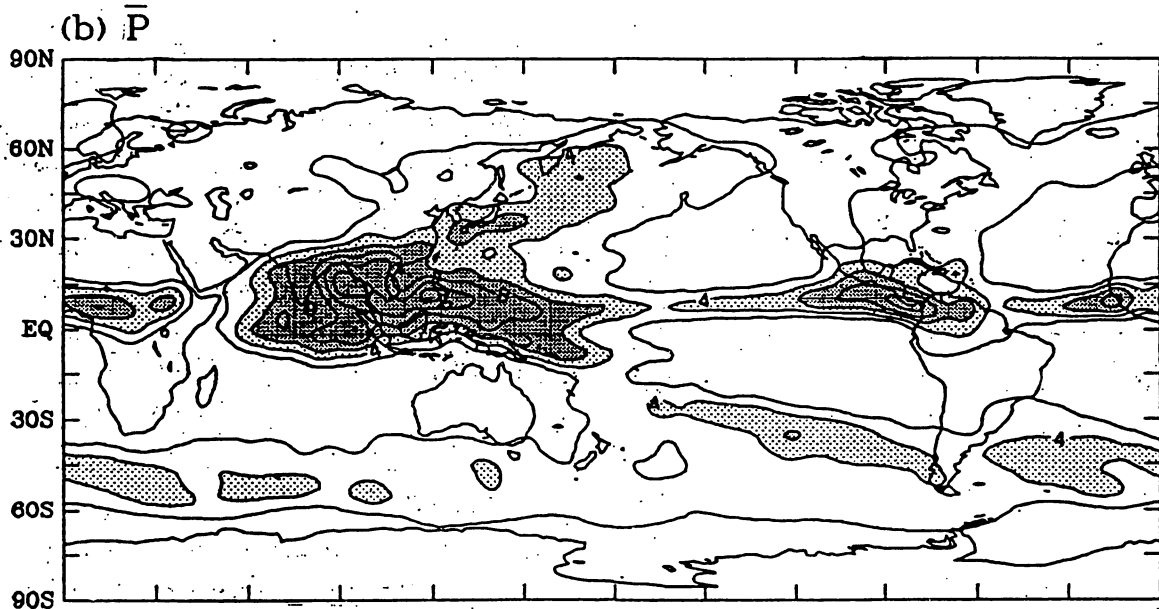
4. 海陸分布 (東西方向の非一様性) の重要性

第1,2図は緯度方向だけの関数で降水量と水蒸気の発散量を示したものですが, 実際の分布を見ますと降水は決して東西に一樣ではありません。例えば第4図は北半球夏の降水量分布です。特に

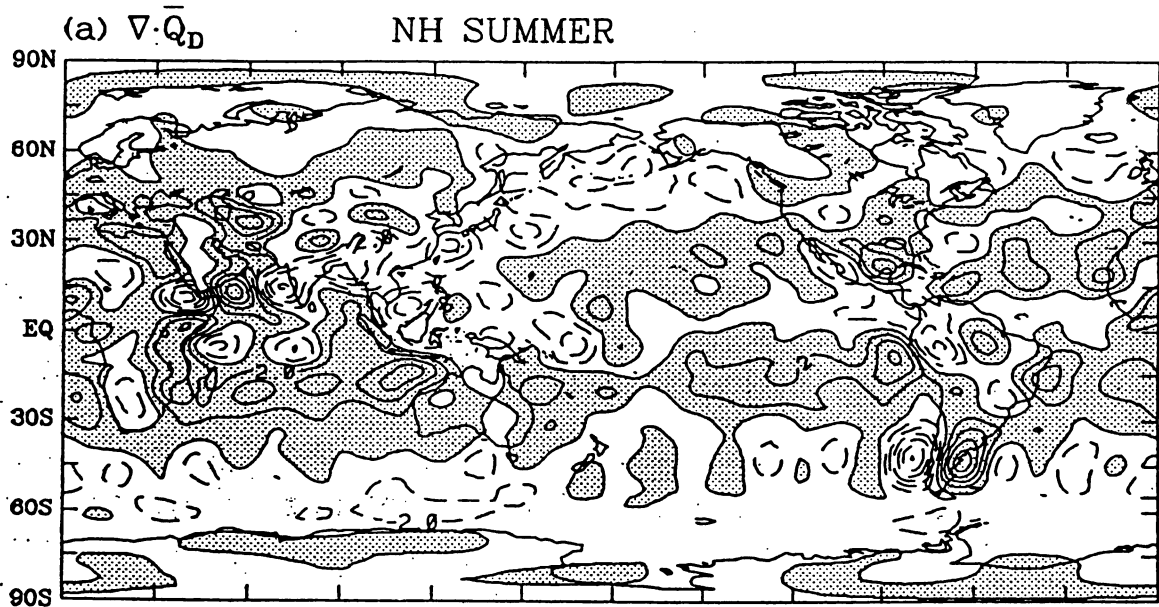
最も大きな非一様性はアジアモンスーンにより作られています。すなわち、熱帯のインドから東南アジア、西太平洋にかけての降水の集中です。他の降水量のピークはメキシコ付近ですが、モンスーンアジアに比べればはるかに小さいものです。これを見ても、アジアモンスーンのプロセスをき

ちりと押さえないと、地球全体のエネルギー・水循環の過程は理解できないということは良くわかりになるかと思えます。

第5図は水蒸気の発散です。白い所が収束、ハッチ域が発散です。非常にnoisyなパターンをしています。モンスーン域で全般に収束、まわりの



第4図 北半球夏における降水量分布
 4(8)mmday⁻¹は薄い(濃い)陰影部で示す。(Chen and Pfaendtner, 1993)

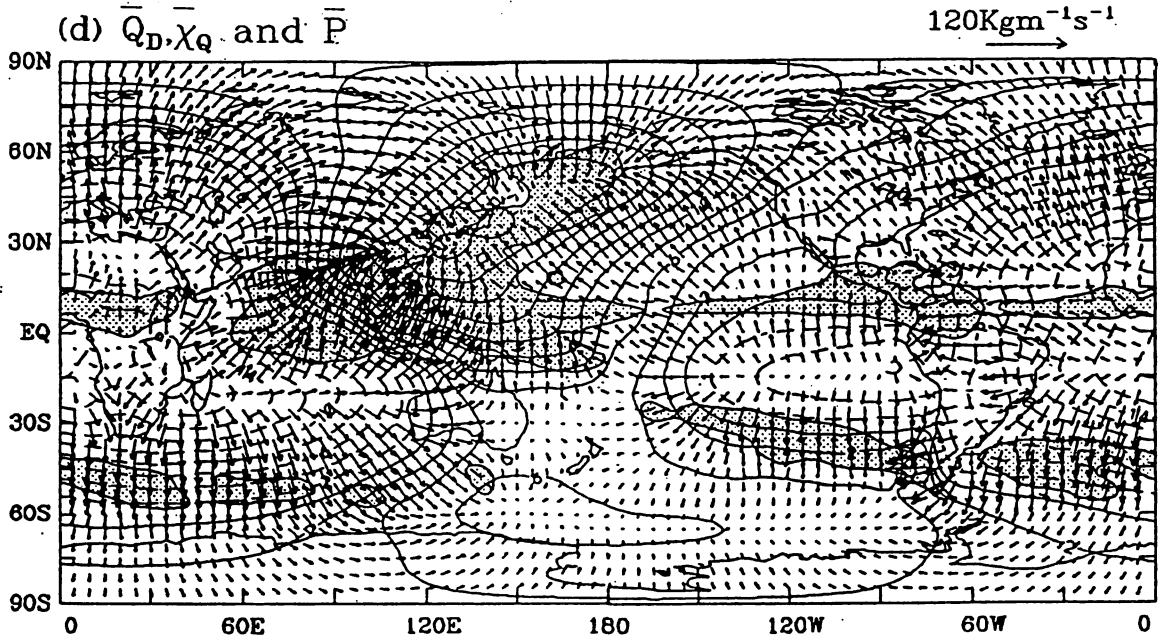


第5図 北半球夏における水蒸気フラックス発散の分布
 単位は2mmday⁻¹, 発散域は陰影部で示す。(Chen and Pfaendtner, 1993)

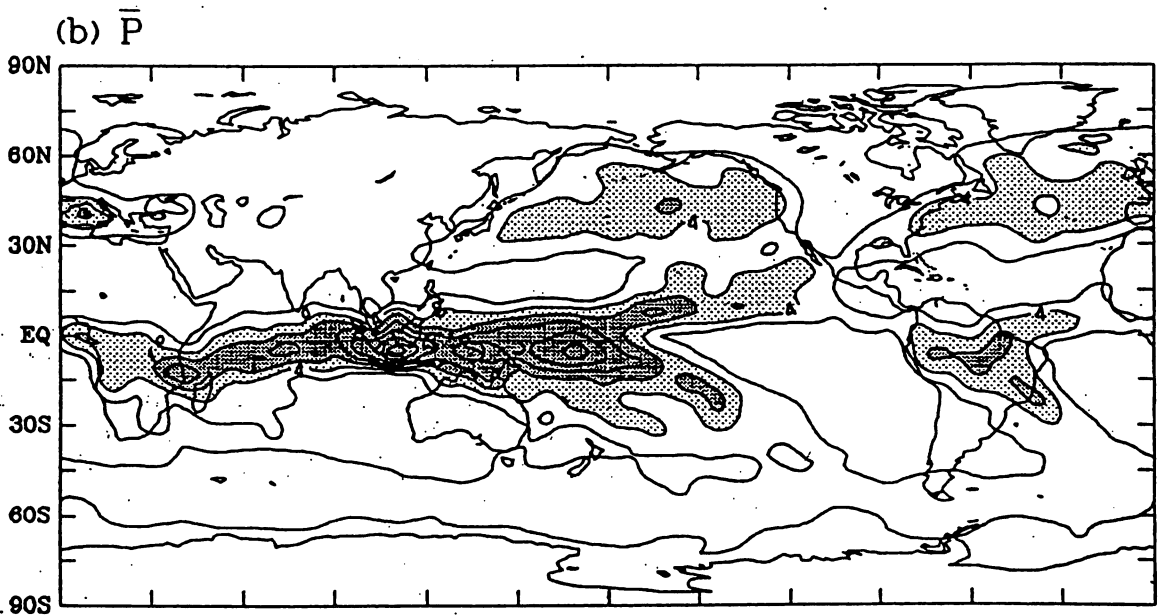
海洋上で全般に発散となっています。これをもう少し見やすくするために、noisyな収束発散分布をならした速度ポテンシャルで見ます。第6図は北半球の夏の場合ですが、日本から東南アジア付近に収束の中心があり、一方発散の中心がアラビア海と東太平洋に分布しています。

第7図は北半球冬の降水量分布です。降水量の中心はインドネシアからニューギニアの方へ移ります。同時にオーストラリアの夏のモンスーンの時期となります。緯度は変わりますが、この場合も分布は東西方向に非常に偏っています。

エネルギーの方から見てみます。第8図は一番



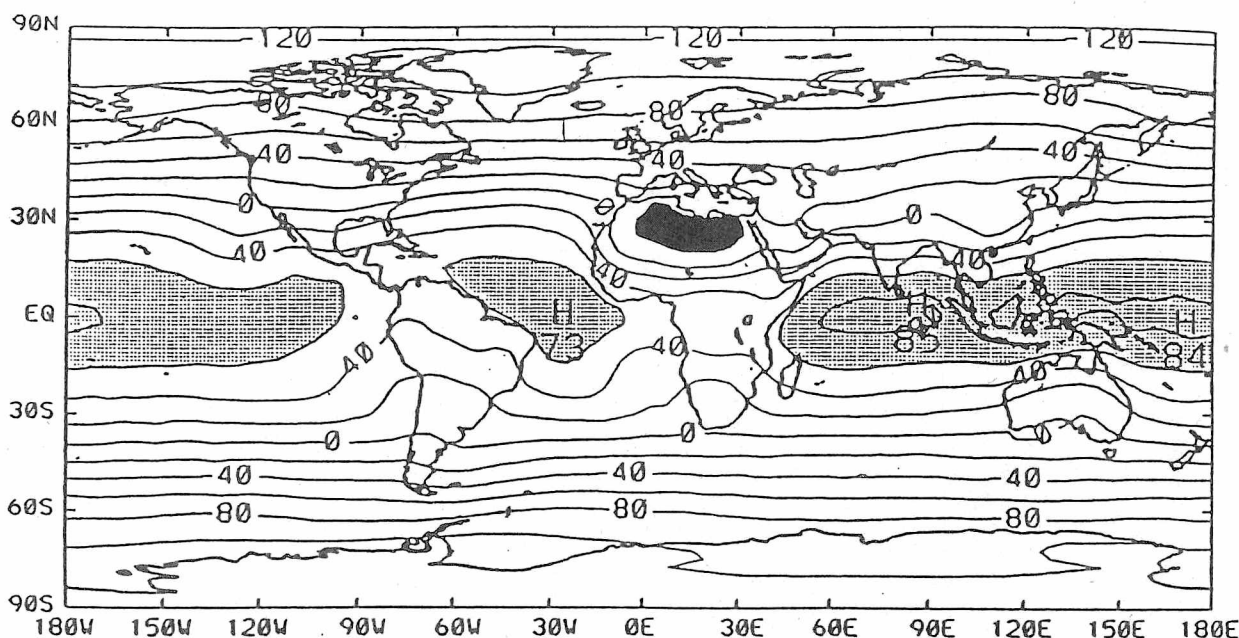
第6図 北半球夏における水蒸気発散とそのポテンシャル分布(Chen and Pfaendtner,1993)



第7図 北半球冬の降水量分布

4(8)mmday⁻¹は薄い(濃い)陰影部で示す。(Chen and Pfaendtner, 1993)

Six Year (1979-84) Mean Net Radiation



第8図 大気上端における年平均放射収支量

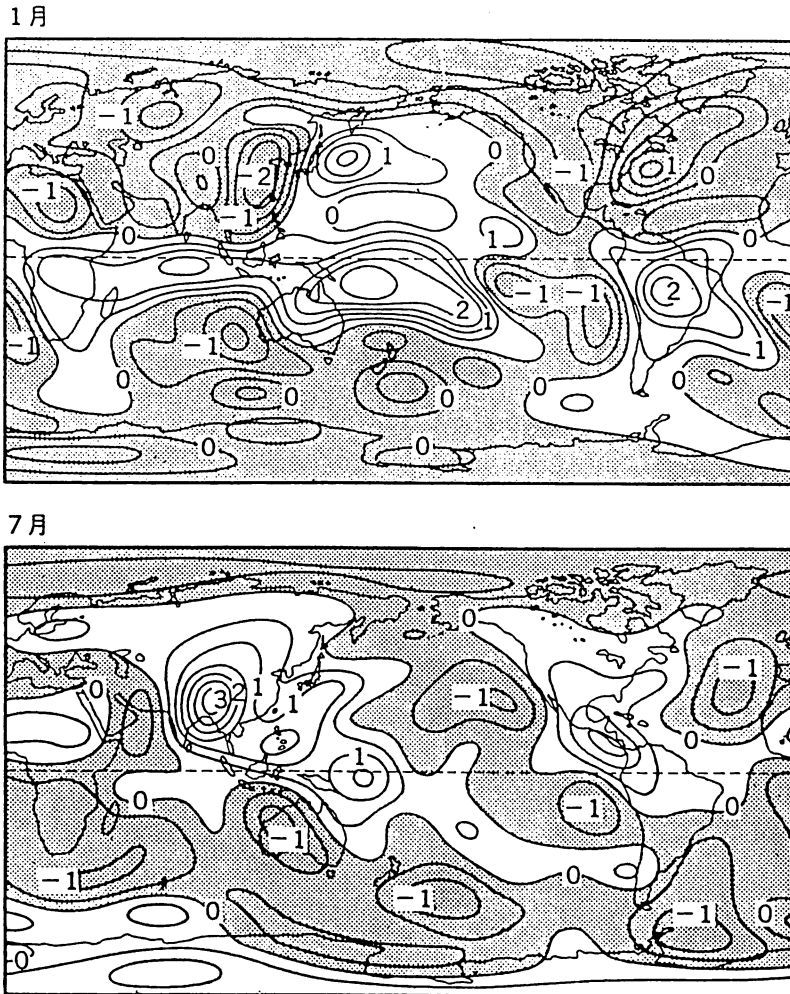
等値線は 20Wm^{-1} , 60Wm^{-1} 以上はハッチ域で示す, 黒色部は負の領域. (Sohn and Smith, 1992)

新しい人工衛星のERBE (Earth Radiation Budget Experiment) による放射収支です。年間平均した場合地球のどの部分に太陽のエネルギーが一番入っているかというのですが、これを見る限りでは東西方向にはほぼ一様に赤道付近に集まっています。しかしこれが実際の大気の冷却あるいは加熱に再分配されたらどうなるでしょうか。第9図は大気柱全体の非断熱加熱率を、1月と7月の場合について計算したものです。例えば北半球の夏(7月)のモンスーン期ですが、白の領域の部分がプラスで、大気の加熱が起こっている地域、影の領域は冷却が起こっている地域です。第8図の放射の分布に比べて、東西方向の大きな非一様性が見られます。特にアジアモンスーンの地域で大きな加熱が見られ、その中でもインドのアッサムの地域に加熱のピークがあります。一方、東太平洋は正味の放射収支はプラスですが、大気非断熱加熱はむしろマイナスです。すなわちネットとして放射エネルギーは入ってきていても、ここ

では大気は加熱されていないどころかむしろ冷却となっているのです。このような放射収支と非断熱加熱の違いは水蒸気を媒介にした熱の再配分が行われているからです。南半球の夏(1月)には降水量のピークに対応してインドネシアの海洋大陸に加熱の中心があります。今度は大陸の方が冷え、まわりの海は大体加熱されています。しかし、加熱の中心は夏も冬も基本的にはアジアからオーストラリアにあるということがわかります。南半球の夏の場合アマゾンも結構大きいのですが、アジアモンスーン域の加熱に比べるとかなり小さいのです。

確かに東西方向に平均すれば、赤道付近で正のピーク、中緯度で負のピークが出ます。しかしこのようにしてみますと海陸分布やモンスーンに関連した、東西方向の非常に大きな非一様性が分かります。

GEWEXのサブプログラムとして、先ほど海陸間の水の循環、あるいはエネルギー調節という



第9図 1月と7月の大気加熱率 (K/日) (Johnson *et al.*, 1987)
 大気柱全体で平均した非断熱加熱率,影の領域は負の値を示す。

お話をしましたが、今進行中のもので、アメリカのミシシッピー川流域についての観測研究計画があります。これはGCIP (GEWEX Continental Scale International Project) と呼ばれています。ミシシッピー川流域については気象・水文データが非常に多く、レーダー網が完備しており、ウィンドプロファイラーのネットワークもあります。そこで大陸上の水・エネルギーのプロセスをきちりと押さえようというのは非常に意味のあることだと思います。しかし全地球規模の水循環とエネルギー過程の研究をしようと思ったら、アジアの地域を無視することは出来ないわけです。GEWEX

でも、ある程度の分業体制がとられていまして、アメリカのグループはミシシッピー川流域を中心にやる、アジアモンスーンは日本が中心としてやってくれないかという非常に強い要請があります。

5. 気候の年々変動とアジアモンスーン

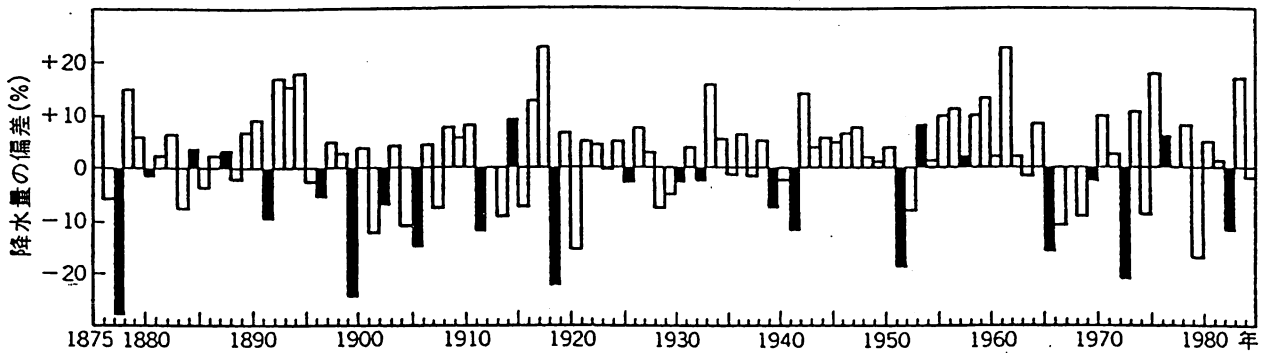
今までは平均場の話でしたが、次に年々変動の話をしたと思います。

第10図はインドのモンスーンの年々変動です。ほぼ100年間の降水量の平均値からの偏差の図です。2~3年から数年の変動をしていることがわかります。黒く塗った年はエルニーニョが起こった

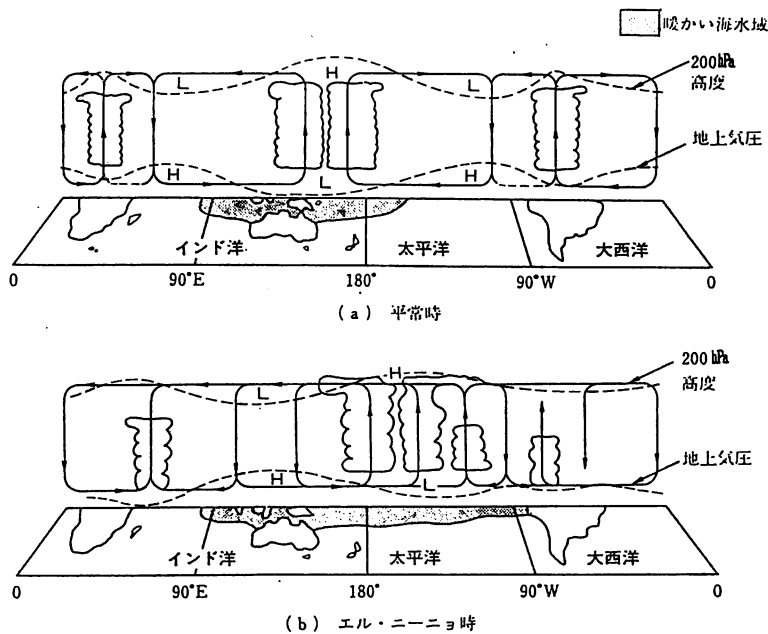
年です。これを見ますとモンスーンの弱い年に大部分のエルニーニョが発生しています。もちろんモンスーンが弱くてもエルニーニョが発生しない年もあります。しかし少なくともエルニーニョはモンスーンの弱い年に発生しています。

年々変動において、水蒸気や水の流れと熱の分布に関連して大気の流れがどうなっているかということを模式的に書くと第11図(上)のようになります。すなわちアジアモンスーンの所で対流活動が起こっています。これに伴って、いわゆるハドレー循環(南北循環)もありますが、同時に東太

平洋で発散して西太平洋・インドネシア付近で収束という一つの大気の流れがあります。これによってモンスーン地域に水蒸気が運ばれ、それがまたこの循環のエネルギーになっています。この図は通常の状態なのですが、何年かに一度エルニーニョ現象が起き、赤道太平洋の海面水温分布が大きく変わります。この海面水温の分布が大気の循環に影響しますが、同時にまた大気の流れが海面水温の分布に影響し、いわゆるポジティブフィードバックの機構が働きます。この結果、太平洋域の大気・海洋大循環の様相は第11図(下)のように一変しま



第10図 インドモンスーン降雨量の経年変動 (Mooley and Shukla, 1987)
平年からの偏差で示す。黒で示したのがエルニーニョ年。

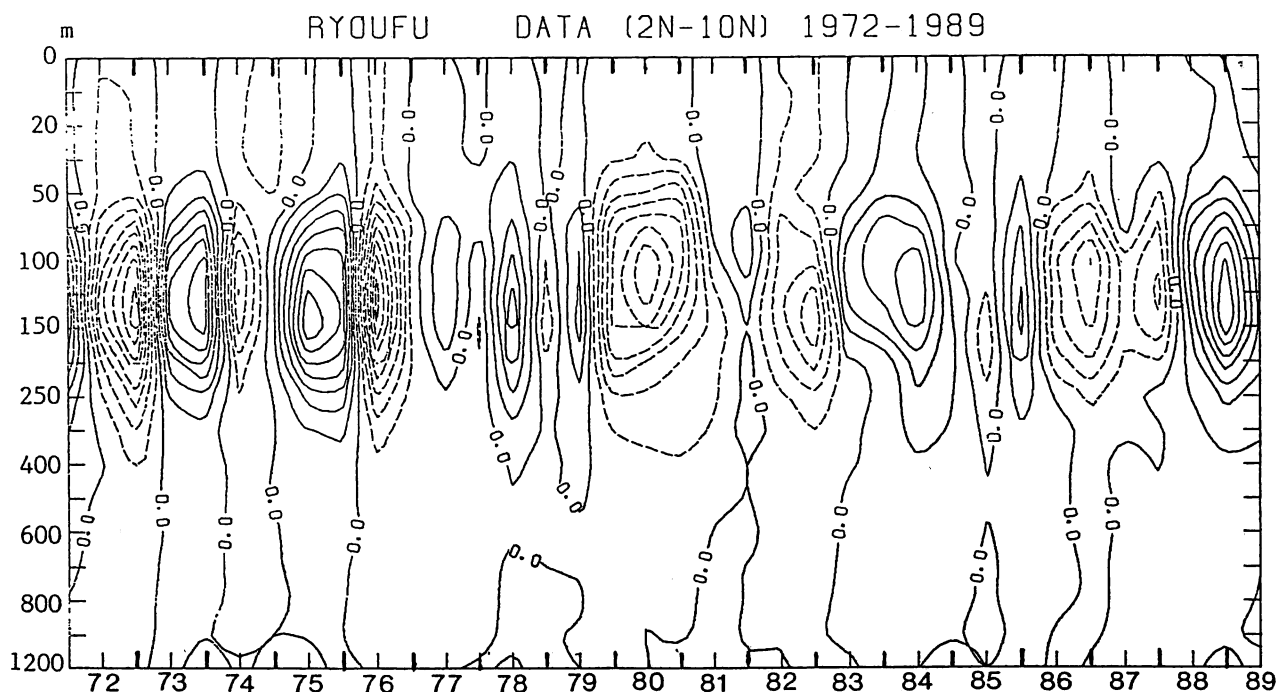


第11図 熱帯の対流活動、東西循環と海水温の分布の東西断面 (安成, 1990)

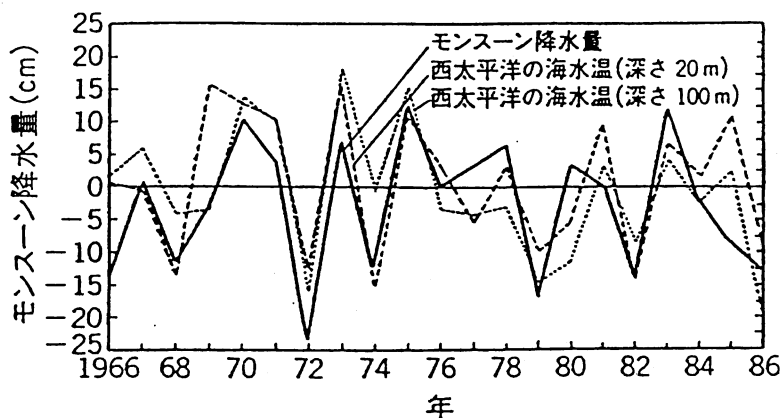
す。このように気候の年々変動を引き起こすメカニズムの中で一番大切なものの一つがエルニーニョです。エルニーニョのメカニズムは、TOGA・COAREなどの成果により、次第にわかっていくことと思いますが、この大規模な大気・海洋系の変動にも、明らかに蒸発、凝結、対流活動といった水を通したエネルギー過程が大きな役割を果た

しています。

第12図は凌風丸が観測した137°E線の混合層水温の変動です。1972~88年のデータですが非常にきれいな2~3年の変動を示しています。この西太平洋の暖水域の2~3年の周期の変動は、第13図に示すように、第10図のインドモンスーンの変動と密接に関連しています。



第12図 137°E, 2~10°Nで平均した熱帯西太平洋の海水温変動
等値線は0.1°C間隔で、実線は正、破線は負の偏差を示す。(Yasunari, 1991)



第13図 インドモンスーン降雨量と翌年1月の西太平洋 (137°E, 2~10°N) の海水温偏差
(Yasunari, 1990; 安成, 1991)
海水温偏差は正規化してある。

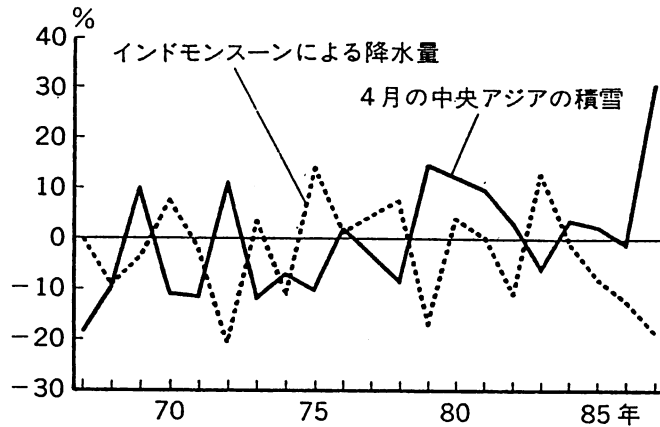
この図の実線はインドモンスーンの強さ、破線は半年後（1月）の凌風丸の海水温データです。両者には非常に高い正の相関のあることがわかります。これは恐らく先ほど説明した大気の流れと海水温、対流のフィードバックメカニズムに関連しているものと思われます。熱帯太平洋の大気・海洋系は一つの自励振動系を作っているのかもしれない。

一方モンスーンの変動には、大陸の熱的過程も非常に重要であると思います。第14図（巻頭カラー頁）はNIMBUS-7のマイクロ波の観測から出した4月の積雪深の分布です。このような積雪の広がり大陸の夏の加熱と密接に関連するということが予想されます。

第15図は4月のユーラシア大陸の積雪面積と夏のモンスーンの降水量の時系列ですが、これら間には負の相関があるということがわかります。この相関にどのような物理過程が効いているかというのは今後の課題ですが、GEWEXの一環として調べるべき問題の一つだと思います。考えられる一つの過程はアルベドによる反射効果です。ただアルベド効果は雪が無くなれば消えてしまいます。もう一つの効果は、雪が多いか少ないかが、融雪後の土壌水分の多寡に寄与し、そしてこれが

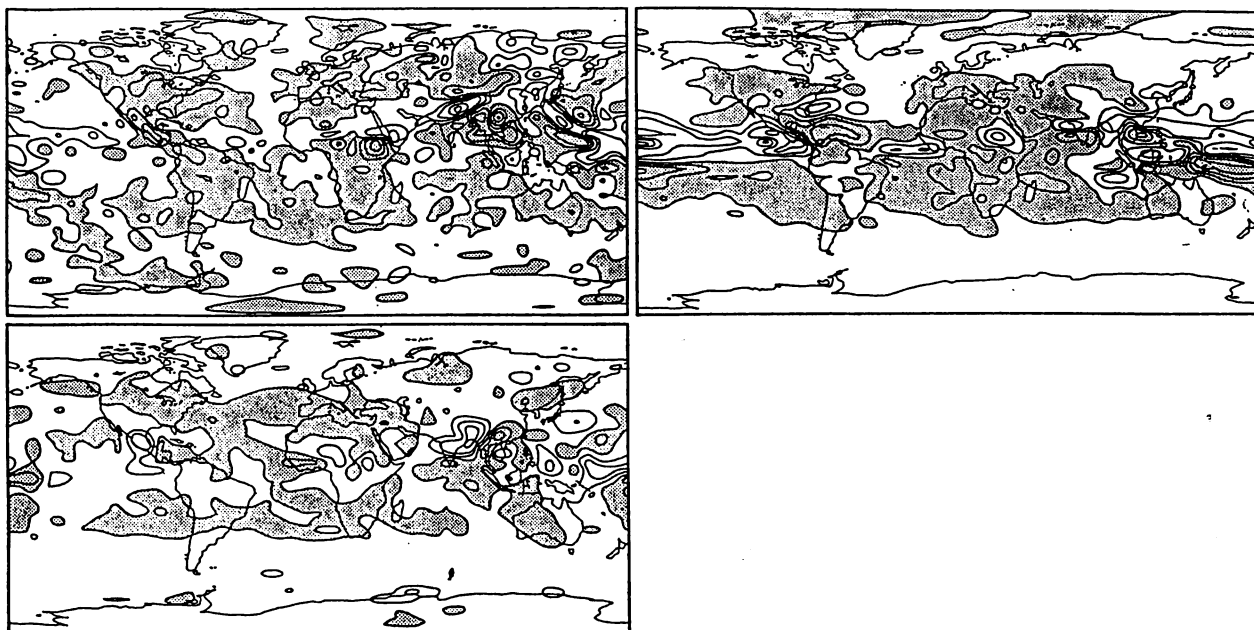
夏の大气加熱の進行に効いてという水文学的效果です。そしてこの効果がモンスーンの立ち上がりにも効いてくる可能性があると言われていました。

モンスーンの変動に関するもう一つの問題は、地球温暖化に関連して、CO₂が増加すると降水量はどうかということです。GCM（大気大循環モデル）を用いたCO₂を倍増した時のシミュレーションでは、気温の変化に関してはどのモデルも同じような変化をしています。すなわち、基本的には高緯度、北極域の気温が非常に上がる、モデルによっては10℃も上がります。何故どのモデルでも結果が似ているかということ、基本的には、海水のフィードバックが皆同じだということによるようです。温度が上がると海水が溶ける、そうするとアルベド効果が弱くなってますます温度が上がるといふものです。ところが降水量の変化を見ると、モデル間の一致は良くないわけです。第16図は、左上がカナダの気候センター、左下がアメリカのGFDL（Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）、右上がイギリス気象局の結果ですが、かなり結果が違ふと思います。特にアジアモンスーンの雨の多い所を見ると、モデルごとに変化量の分布の違いが大きく、地域的な変動などはとても結論できない状況であることが分かります。



第15図 ユーラシア大陸（中央アジア）の4月の積雪面積と夏のインドモンスーン降水量の年々変動（安成, 小池, 1993）

平均値からの偏差（%）で示す、積雪面積は人工衛星からの観測データ。



第16図 大気中のCO₂濃度を現在の2倍にしたときの夏(7~9月)の降水量変化の予測(安成,小池,1993)
 三つの大気大循環モデルによる,CO₂濃度2倍の計算値から現在の濃度での計算値を引いた値.等値線の間隔は1mm/日,影の領域は負の値を示す.

す。

モデルはかなり良くなったようですが、水に絡んだプロセス、特に雲のフィードバック、陸面での土壌水分や蒸発のフィードバックにはまだ非常に大きな不確定性があります。はっきり言って観測が少なすぎるのです。そこでどなたかが出したパラメタリゼーションがあるとみんなそれでやってしまうのです。こういう現状から、温暖化の問題をきっちりやろうと思ったら、まず現実の気候の状態がいかに成り立っているか、あるいは陸面での蒸発のプロセスはどのようになっているかといった問題をきちんとやらないといけません。

6. GAMEについて

GAMEとしてどのようなプランを考えているかをしばらくお話したいと思います。

日本学術会議内のWCRP専門委員会においてまとめられたGAMEの骨子は、1992年2月にGEWEXのinternationalなSSGで提案され、基本

的には承認され現在具体案が検討されているところです。そこで本日は気象庁の方々を前にして、私からもお願いしたいことがいろいろあります。

第17図(巻頭カラー頁)は東海大学で処理された人工衛星画像です。これにはGAMEで扱う要素(海、雲、雪氷)が全部入っています。これを見ますと、様々な地表面状態があることがわかると思います。ユーラシア大陸は、アメリカのミシシッピ河流域とは違いまして、チベット高原があり、シベリアのツンドラとかタイガがあり、熱帯雨林があります。このような地域は非常に不均一性が高いので、取り扱いが面倒くさいという考えもあるでしょうが、面倒だといっているといつまでも不確定性は無くなりません。確かにこれを全部、地上の観測でやろうとすると大変ですが、幸い今は衛星という武器があります。この衛星のデータをいかに使うかということは非常に大きなポイントになっています。

GAMEそのものの研究目的を大きく四つにま

とめてみました。

- ① 全球的なエネルギー・水循環における（オーストラリアを含めた）アジアモンスーンの役割を解明すること。
- ② 気候（予報）モデルにおけるアジアモンスーンの季節的な予報の改善に貢献すること。
- ③ 多様な気候、地表面状態を有するアジアモンスーン領域における、多スケール間の相互作用を明らかにすること。
- ④ アジアモンスーンの変動が地域的な水循環、水利用に与える影響を調べること。

アメリカのグループは③を避けて、非常に一様なミシシッピ流域の研究を進めています。従ってそこで得られた知見というのが、アジアモンスーン領域にそのまま使えるかということは大きな問題です。水は気候システムにおいて物理的に大きな役割を持っていると同時に、人間の生活にとっても非常に大きな問題であります。それが④の目的に結びつきます。

実際のGAMEの中身ですが、簡単に言いますと、観測とモデリングとデータセットの作成と管理ということになります。

陸の上ではそれぞれの国がそれなりに観測をやっていて、これをきっちりと集めるだけでもかなりの仕事で、現在のGTS (Global Telecommunication System) などに乗っていないデータがたくさんあります。

GCM, モデリングにおける不確定性はいろいろあります。簡単に言えば水文学過程あるいは陸面の過程と雲の問題はかなり強力にやる必要があります。地表面過程では、例えば多くのGCMではバケツモデルという簡単なものを使っていますが、一方で気象庁でも佐藤信夫氏がやっているSiBという非常にソフィスティケートされたモデルもあります。しかしどのモデルもまだまだいろいろな問題点を抱えています。その解決のために

は、実際の地表面過程の観測によるデータとモデルとを連携して進める必要があります。また雲はまさに観測をしないとわからない面がまだまだたくさんあります。雲の放射過程は東京大学気候研究センターの中島映至氏のグループ、雲のモデリングは東京大学の山岬氏のグループが担当し、マクロ水文モデルは東京大学生産技術研究所の虫明功臣氏とか長岡技術科学大学の小池俊雄氏など、日本の水文学の研究者が総力をあげる形で協力しようと動いて下さっています。これはたいへん心強いことです。

7. 4次元同化システムの役割

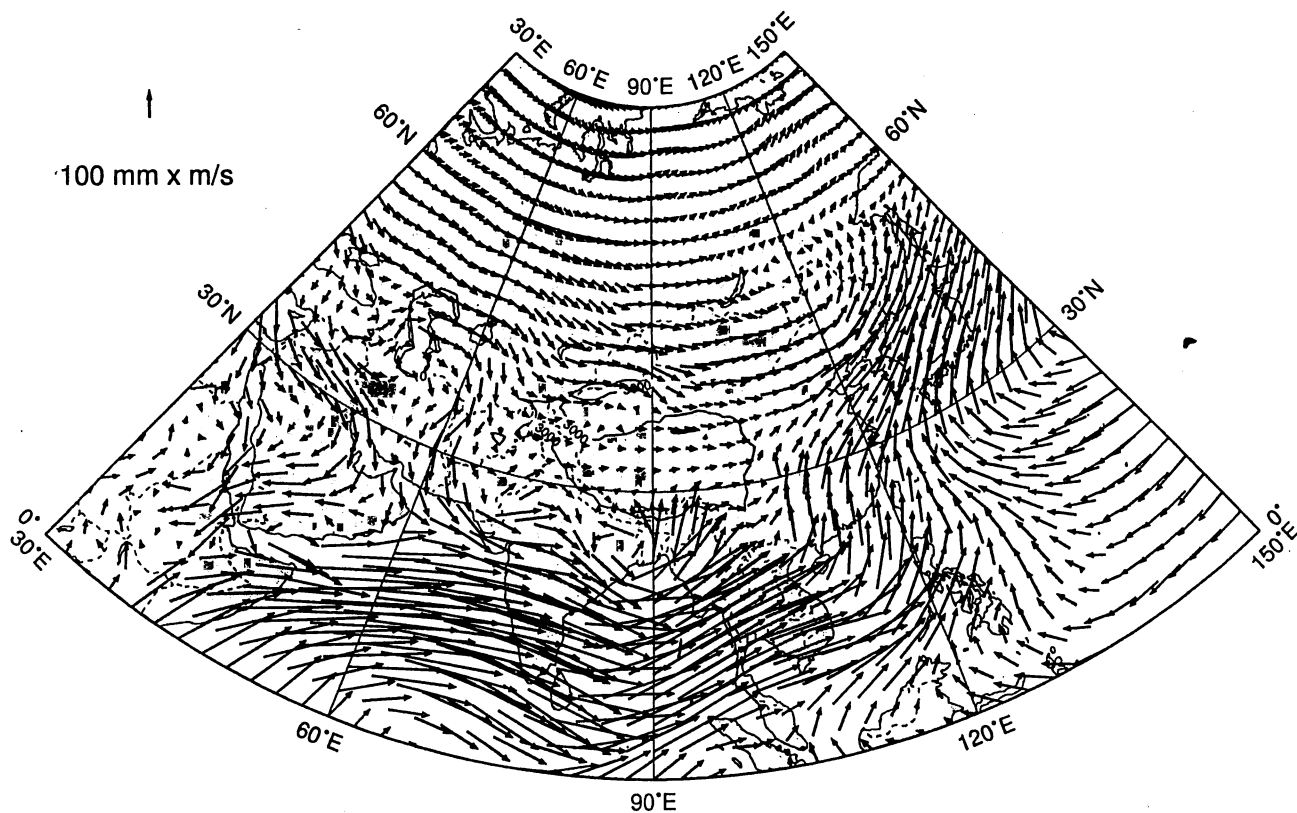
それから水とエネルギー過程の研究のためには、均質なデータが必要であり、現在4次元同化システムによるデータが非常に大切になっています。すなわち、いわゆるルーチンのデータだけではなくて、衛星データ、特別観測のデータ等も含めて、4次元同化によるデータの精度を更に良くすることが必要です。アジア大陸に関する最終的な要請としては、かなり大きな流域、例えば揚子江とかタイのチャオプラヤなどの、かなり地域的な流域での水収支を、大気の方からの4次元データ同化から押さえるということが一つの目標になると思います。具体的には2000年くらいに50km×50kmのグリッドメッシュで、エネルギー・水収支がかなり正確に押さえられるということが一つの目標です。予報のモデルは大体50~60kmのグリッド間隔になっていますが、大陸のように非常に多様性のある所で、意味のある値を得るには、それなりのインテンシブなデータをインプットしなくてはなりません。これがGAMEの一つの大きな仕事ではないかと思えます。4次元同化に使う気候モデルそのものも、水文過程、雲の過程の改良されたものを使うということが大事です。水収支・エネルギー収支の評価のための非常に質の良い4次元

同化データセットを作るというのはGEWEXそのものの目標になっています。例えば第18図はECMWFによる1981年夏の水蒸気の水蒸気輸送の平均のフラックスです。それが82年だとかなり違います。これくらいのデータでも年々変動はかなり激しくて、差をとると東アジアから南西モンスーンアジアにかなり大きな変化があります。この図の解像度は250kmですがこれを最終的には50kmメッシュで、しかもかなり精度の高いデータにする、というのが目標であります。

8. 衛星観測の役割

GAMEは人工衛星による計画と密接にタイアップしております。GAMEのスターティングポイントをいつにするかについて、決め手になる衛星がいくつかあります。その内の一つがTRMMという衛星で、正式には熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission) と言って1997年に日本とアメリカの合同で打ち上げられます。それで1997年をGAMEの実質的な出発の年にしようという案があります。それから地表面や海面の過程を見るのがADEOSやADEOS IIで、NASDAが計画している打ち上げ時期はADEOSが1996年、

Water Vapour Transport Summer (June - Aug.) Mean of 1985-1990



第18図 北半球夏季のモンスーンに伴う水蒸気輸送

ADEOS IIが1999年です。ADEOSには、NSCATという散乱計が搭載されていて、海洋上で風の強さが非常に良くわかります。前回のGEWEXのSSGの会議では、ヨーロッパのECMWFの人が、このNSCATのデータを南半球で入れると実際に予報が非常に良くなるという結果を示しておりました。このNSCATについては、飛ばす限りは気象の予報現業にリアルタイムで利用できるようなにして欲しいというWCRPからの強い要請があります。

モンスーンは年々変動が大きいので1年だけやっても仕方がなくて、少なくとも5年、ENSOサイクル+ α ぐらいの期間がよいと思われまます。TRMMというのは熱帯の雲をレーダーを使って観測して降雨量を測ろうというものですから、非常に画期的な武器になるわけですが、寿命がたった3年(1997~2000年)しかありません。これではしょうがないということで、TRMM2号を間髪を入れずにやるべきであるという非常に強い要請が、日本、ヨーロッパ、アメリカの研究者から出ています。また、TRMMは35°Nまでしか見られませんので、次のTRMM2号はもう少し高緯度までという要請があります。例えばイギリス気象局のBrowningのグループは、少なくとも55°N、中緯度まで完全にカバーして欲しいと提案しています。ヨーロッパの人達が非常に強く主張している理由は、北大西洋の海の上にどれだけ雨が降ったかを知りたいからです。これをもう少し長い目で見ると、北大西洋の深層水循環に関連しています。真鍋氏の数値実験にもありましたように、海洋上層の淡水のフラックスの量によっては、深層水循環が止まるという話があるからです。更に、我々のユーラシア大陸を考えると60°Nぐらいまで上げて欲しい。というのは、シベリアの大きなタイガ、そこに流れる川の水収支は、後で述べますように、北極海への淡水供給の視点からも非常に重要だからです。また、TRMM2号では、雲があるかどうか

ただけではなく、雲の高度や対流雲か積雲かという雲の種類も判別できるcloud radar (雲レーダー)を積んで欲しいという要請があります。これは放射収支の観点からしてもたいへん重要です。

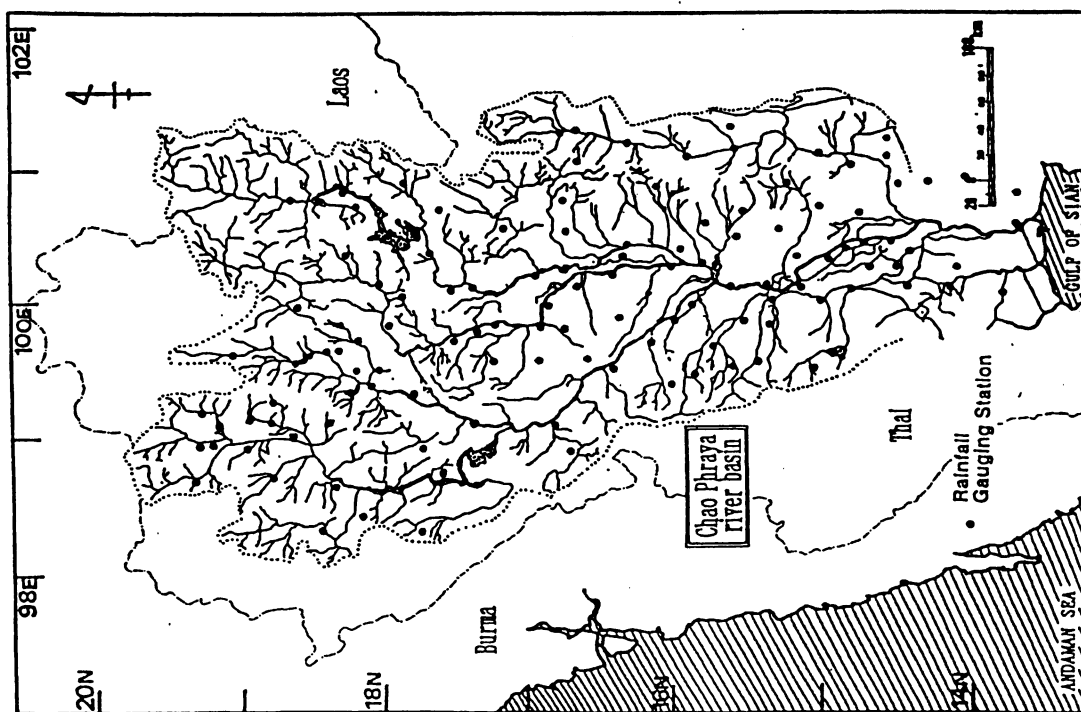
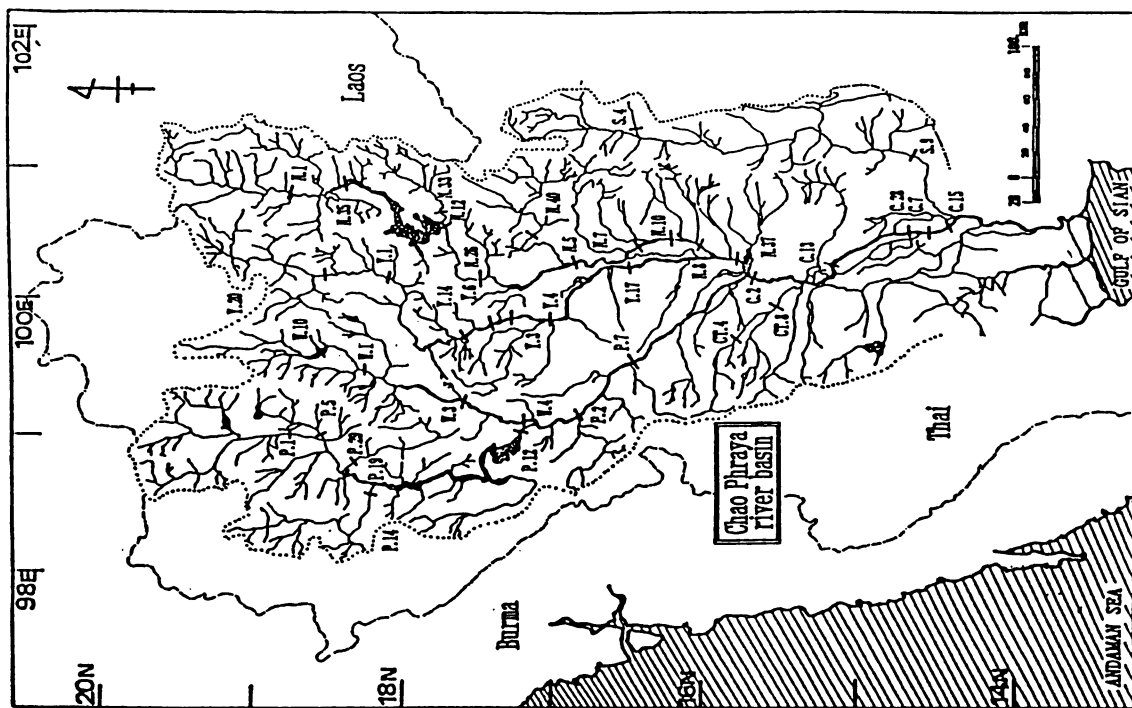
9. ユーラシア大陸における地上観測プロジェクト

さきほど、ユーラシア大陸というのは非常に多様であると言いましたが、ユーラシア大陸をほぼ均等な幾つかの領域に区分をして、領域ごとの熱と水の過程を研究しようという地域特別観測プロジェクトが考えられています。

現在計画されているこうした観測プロジェクトを幾つか紹介します。

まず、東南アジアの熱帯降雨林で、エネルギーと水収支をやろうというプロジェクトです。ボルネオ島のサラワク地区には熱帯降雨林が50mぐらいの高さで茂っています。そこに高さ35mぐらいの所に木から木へとずーっと観察できるような釣り橋を作り調査を続けている日本の生態学のグループがあります。このグループと協力して、熱帯林の中と上とでは、熱、水、CO₂などのフラックスがどう違うかということを知る計画があります。これは点でしかできませんが、GAMEではこの計画を熱帯林での素過程研究として視野に入れていきたいと思っています。

もう少し面的な展開としては、東京大学の生産研究所虫明氏のグループを中心としたタイのチャオプラヤ流域プロジェクトがあります。この地域は降水量や水位の観測点、かなりたくさんあります(第19図参照)。シャム湾の島にTRMM衛星の地上検証用レーダーができる予定ですが、そういうものも利用できます。この流域は雨季乾季の季節変化が大きく、このような地域での大気・水文過程がどうなっているかを、第20図のように、レーダー、衛星、飛行機なども用い、立体的な



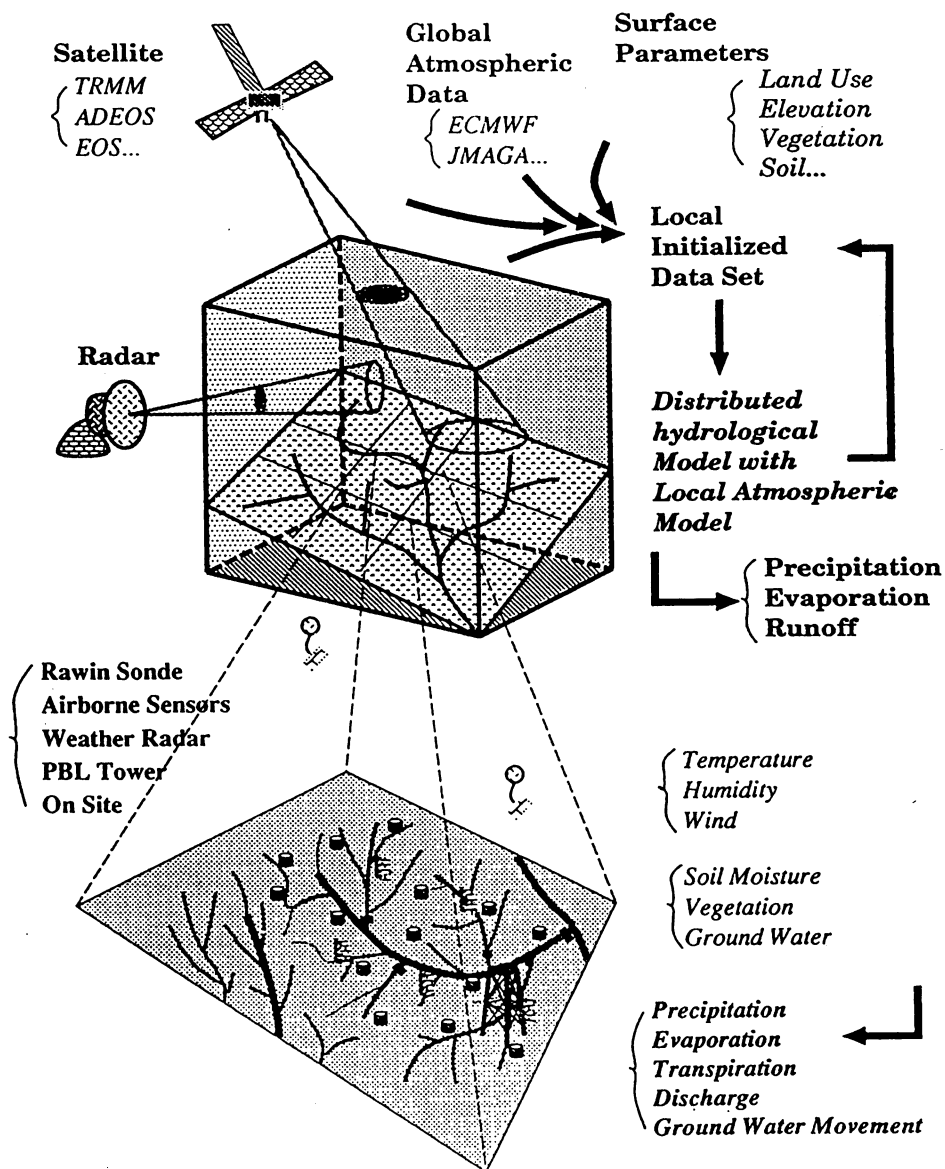
第19図 タイのチャオプラヤ河流域における降水観測点(左)と水位観測点(右)の分布

3次元観測をやろうと考えております。

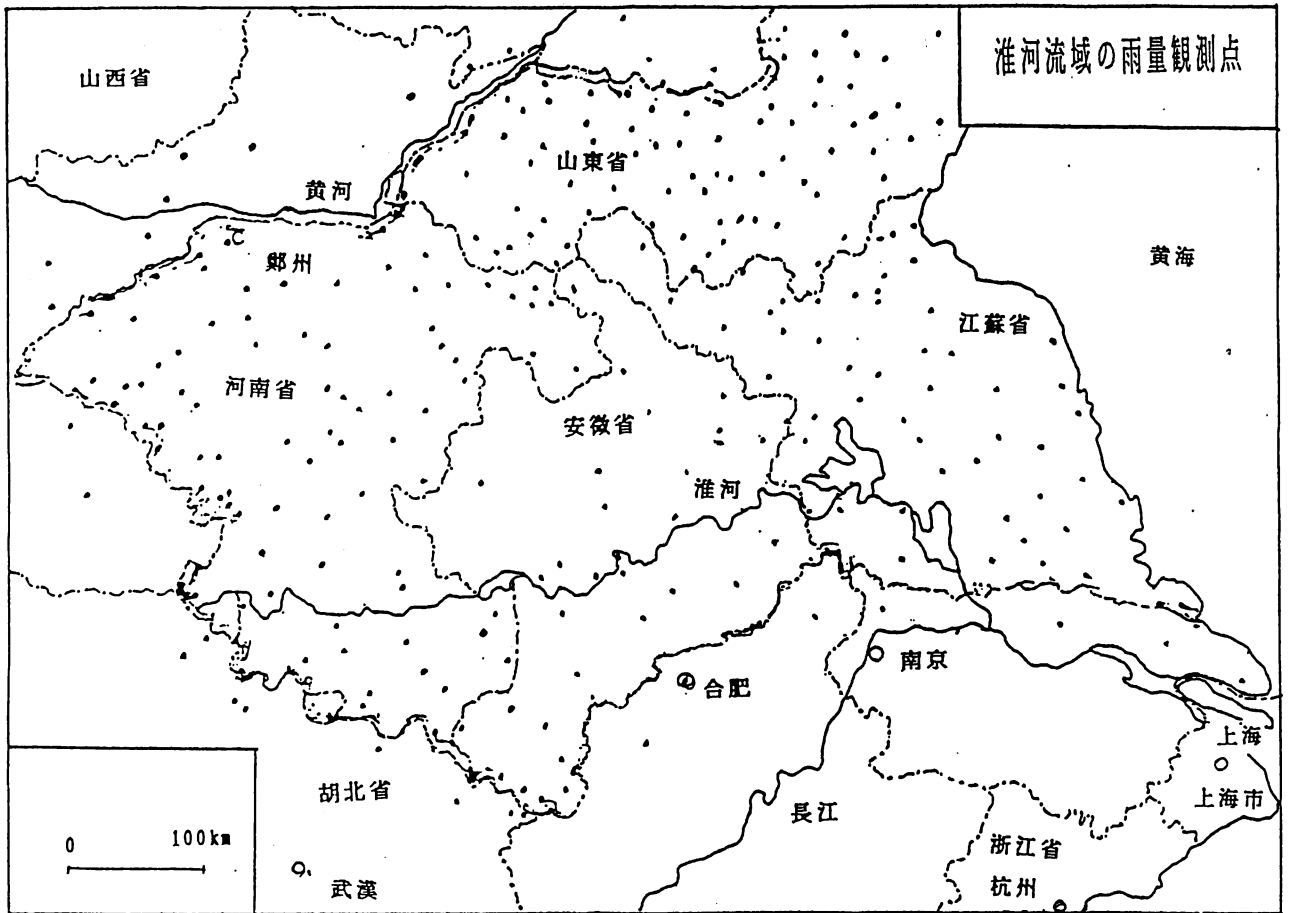
中国のグループが非常に熱心にやろうとしている淮河流域は黄河と揚子江の間にある流域で、水位、降水量の観測点が多く、例えば第21図は雨量観測計の分布です。ここに日本からドップラーレーダーを持って行って、梅雨前線に伴う雲の観測をやろうとしております。これは名古屋大学の武田氏のグループが中心に企画しているところです。

それからモンスーンの理解に古くから問題になっているのがチベット高原です。1979年のFGGE

(First GARP Global Experiment) の時に中国は夏の間だけかなり集中的な観測をしました。ただ、チベット高原の凍土や積雪などの地表面状態の季節変化がモンスーンの成立と強さにどのような影響を与えているか、年々変動はどうなっているかといった観測はまだほとんどなされていないのが実情です。中国の国家気象局、科学院や日本のグループ(名古屋大学、筑波大学、気象研究所、防災研究所など)が現在このための計画を立案中です。



第20図 大気の局地循環モデルとマクロ水文モデル結合のための集中観測システム



第21図 中国淮河流域の降水観測点網

それからシベリアはアジアモンスーンの領域か、ということが話題になりますが、一つはユーラシアの積雪がモンスーンの年々変動に密接に関係しているという視点から重要です。同時にこの領域を考えようというもう一つの動機は、ユーラシアの東半分は、日本が何らかのイニシアチブを取って欲しいという要請もあるからです。

気候の問題として更に重要なことは、シベリアの三大河川、オビ河、エニセイ河、レナ河（エニセイ河が一番大きいのですが）が、北極海に供給する淡水の60%強を占めていて、海水の形成とその変動に関与しているのではないかとされています。この問題を含めた北極海域が地球気候に果

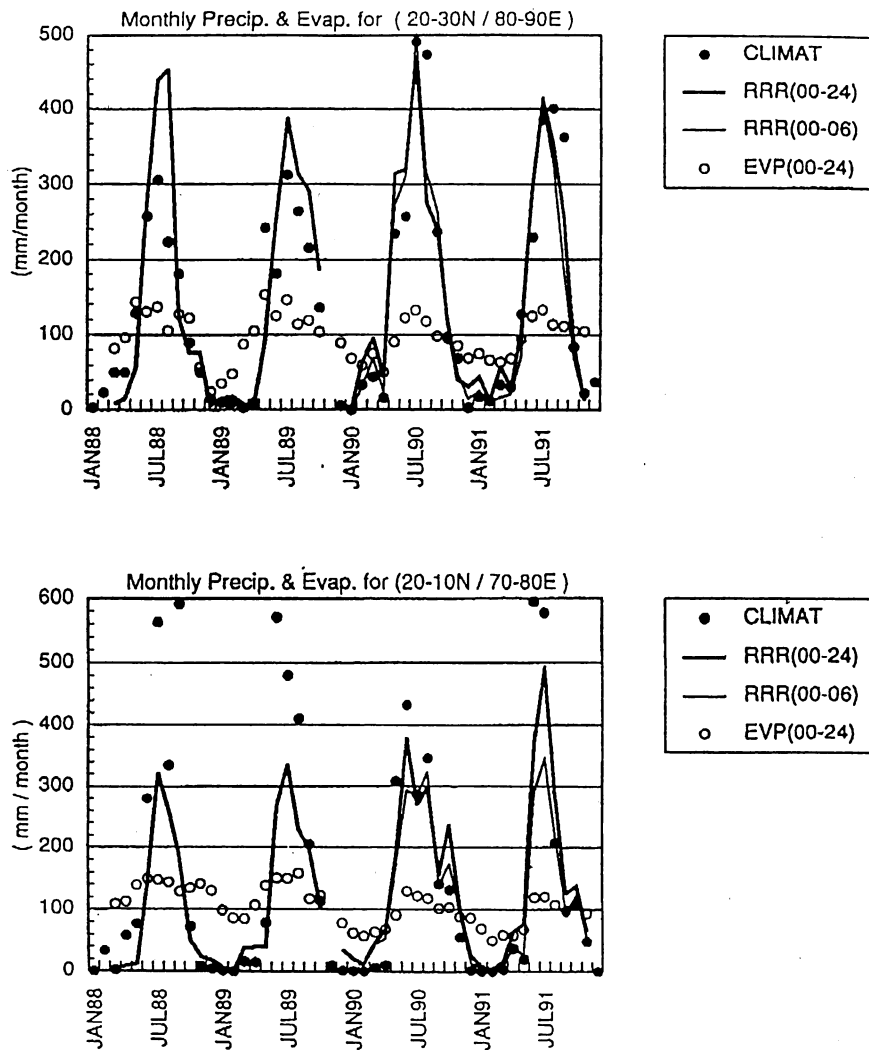
たす役割を調べることを目的として、やはりWCRPのプログラムの一つとしてACSYS (Arctic Climate System Study) というプロジェクトが立ち上がりつつあります。このACSYSへの貢献としてもシベリアの大流域の水収支とその変動にかかわる要因をきっちりと押さえるのは非常に大事です。面積も非常に広いですから、地上のデータだけでなく衛星や飛行機を使うことが必要です。大きく分けて森林（タイガ）とツンドラが主な領域ですが、そのほとんどが永久凍土帯です。今この凍土が溶け始めていて、メタンガスや炭酸ガスを放出しているのではないかと問題になっております。環境庁のグループとロシアの研究者が、メ

タンと炭酸ガスの収支を測定するということが、永久凍土帯にアプローチを始めておりますが、実は熱と水の収支の上でもシベリアの永久凍土は非常に重要であると言えます。IPCCレポートにも報告されていますように、地球大気全体の最近の昇温の顕著な地域の一つはシベリアなのです。この原因としては、積雪や永久凍土のフィードバックが関与しているかもしれないと言われています。

10. GAMEのデータセットの整備

最後に肝心なことはデータセットの構築です。

まず衛星や現地観測のデータを含めて4次元同化でどこまで可能となるかということです。現在、気象庁数値予報課の佐藤信夫氏が中心となって進めておりますが、4次元同化で、水循環の年々変動や季節変動がどれだけ再現できるかということが特に重要です。第22図(上)は4次元同化による降水量と観測された降水量を、ガンジス川の下流について比較したものです。黒丸が観測値(CLIMAT DATA)で、実線が計算値です。観測データが多いと現状でもよく合っており、アメリカのNMC (National Meteorological Center) や

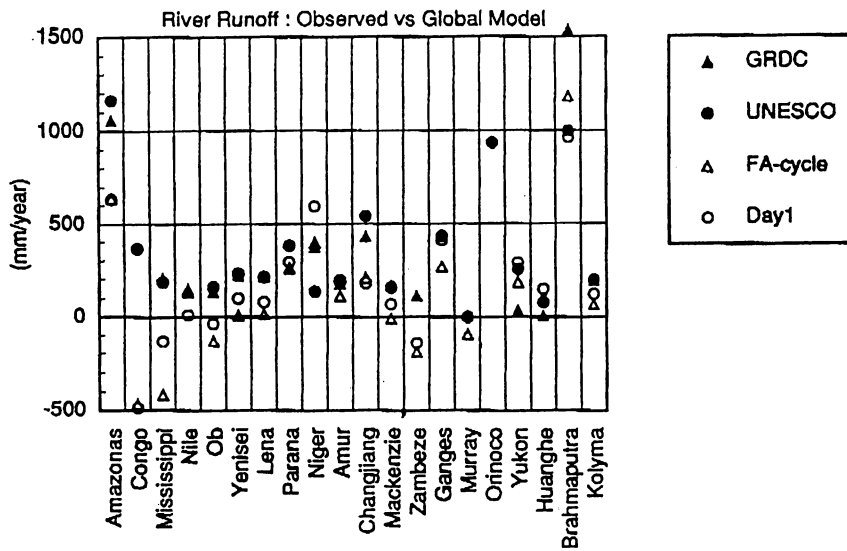


第22図 4次元同化データによって推定された月降水量(実線)と蒸発量(○印)と降水量観測値(●印)の比較

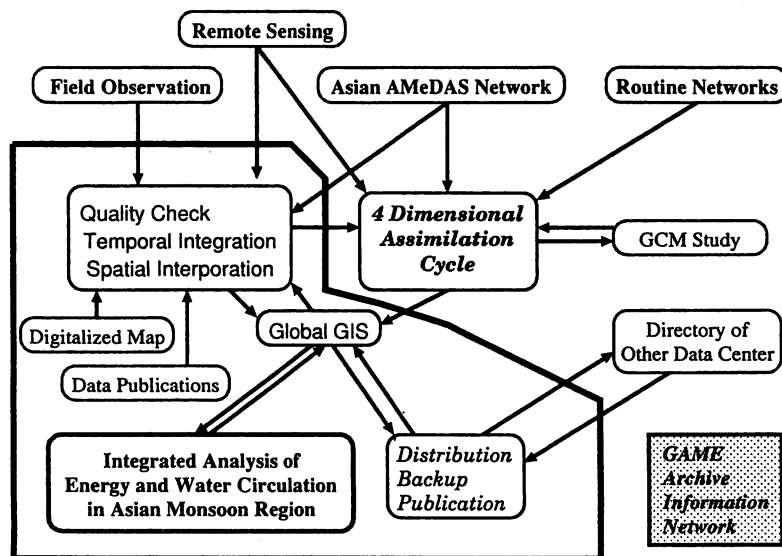
ヨーロッパのECMWFのグループから非常に評価されているデータです。データの少ないアラビア海（第22図下）になると、気候値と合いません。少なくともアジアのどの地域においても年々変動や季節変化が上の精度でとらえられるようになること、空間分解能も50km×50kmぐらいいは欲しいというのがGAMEの目標です。実際、佐藤氏が主な世界の流域で、大気の同化データを使って出し

たデータと、GRDC（Global Runoff Data Center）が出している流量のデータセットと比べてどのくらい合うかということを見てみます。第23図は年平均量ですが、現状では合う所も合わない所もあり、この精度を良くする必要があります。

GAMEの実際のデータの流れは結局第24図のようになるでしょう。観測データ、衛星データ、現業のルーチンのネットワークのデータ、これで



第23図 4次元同化データによって推定された年間の河川流量(△,○印)とGRDC(▲印)とUNESCO(●印)による観測流量の比較。(Sato, 1992)



第24図 GAIN (GAME Archive Information Network) の構成図(案)

4次元同化の入力データを作ります。もちろんGCMと同化システムのモデルというのは密接な交流が必要です。最終的にはいろんな形でグローバルGIS (Global Information System) を使って、GAMEに関連したデータとインフォメーションのいわばネットワーク (四角の枠で囲んだ部分) を作り、2000年ごろを目標にそれぞれのデータのキーステーションをコンピューターネットワークで結ぶという形で機能させることを考えています。これをGAME Archive Information Network, 略してGAINと仮に呼ぶことにします。もちろんそのプロダクトは研究者とか現業の方にいつでも利用可能な形にすべきです。大事なことは、国内だけではなくインターナショナルに、このようなデータセットの利用を公開し、促進していく体制を作っていくことです。

11. まとめ

GAMEはGEWEXの中ではContinental Scale Budget Study (CSBS) というカテゴリーに入る研究になります。これを、日本が中心となって国際的プロジェクトとしてやることになります。実際は中国などのアジアの国々にロシア、できればオーストラリアやアメリカのグループとも協力して実行することになります。ここでWCRPあるいはGEWEXのSSGから大陸スケールの研究(CSBS)のための最小限の要求事項 (minimum requirements) として以下の四つの条件が挙げられています。

1. 大気及び地表面のデータ同化を行い、観測値と対応する気象水文データを提供できる数値予報センターとの協力 (この部分は気象庁に期待されています)。

2. 気候モデルの検証サポートのための基本的な気象・水文データの収集・編集のための地域的な協力体制の確立。
3. 気候変動研究の計画的遂行のために大気・水文モデルの開発、データマネジメント、4次元同化データシステムのための予算の用意 (施設) と人員の配置。
4. WCRPの規定に沿った国際的なデータ・情報交換への参画。

すなわち、例えば、実質的には日本と中国とか日本とロシアとか2国間でいろいろな協力が行われたとしても、GAMEはWCRPの一環ですから、最終的には国際的な情報交換に乗せないといけません。現在のTOGA・COAREのデータセットも基本的にはそのような性質を持っています。

現在GAMEと並ぶような大きな大陸スケールのbudget study として、GEWEXのSSGで、先ほどの基準に合っている、あるいは合うだろうとして確認されているのが次の五つのプロジェクトです。

- ① GCIP (ミシシッピー河流域), ②GAME, ③LAMBADA* (アメリカNASAのDr.P.Sellersが中心, 対象はアマゾン河流域), ④BALTEX** (ヨーロッパのグループで責任者はDr.Rashke, バルト海が対象), ⑤MAGS*** (カナダが中心, 北極海へ向かうマッケンジー河が対象, 責任者Dr.Lawford)。

GAMEは、まだ実行計画策定の段階ですが、先ほど言いましたTRMM衛星が1997年に飛びますので、そのころから実質的な観測を始めようという予定で考えられています。更に1999年にADEOS II という衛星が上がりますが、陸面過程をきっちりと押さえるのに、この衛星が期待され

* LAMBADA(Large-scale Atmospheric Moisture Budget of Amazonia using Data Assimilation)

** BALTEX(Baltic Sea Experiment)

*** MAGS(Mackenzie River GEWEX Study)

ています。それからアメリカのEOS (Earth Observing System) 衛星計画があります。アメリカも今は財政がピンチで、この計画はかなり危うくなっていますが、それでもAM-1というローカルタイムの午前中に飛ぶというものだけは何とか実現したいと思っています。それからENVISAT-1などのヨーロッパの衛星等によるデータ取得が予定されています。こうして得られたデータと改良されたモデルによる4次元同化を駆使して、2000年ごろには、50km×50kmで水収支、熱収支の評価を可能にすることを目標にしています。そのためには、大学や国立の研究機関だけではどうにもなりません。国際的な要請からも、明日の天気予報だけではなく、4次元同化をきちっとやれる数値予報センターとして非常にいいデータセットを作っていくということで、是非今後とも気象庁に御協力をお願いしたいと思っております。

参 考 文 献

- Chen, T.-C. and J. Pfaendtner(1993):On the Atmospheric Branch of the Hydrological Cycle. *J. Climate*, **6**, 161-167.
- IPCC (1990):Climate Change. J. T. Houghton *et al.* eds., Cambridge Univ. Press, 365pp.
- Japan National Committee for WCRP(1993): GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME). First Draft, 75pp.
- Johnson, D.R., *et al.*(1987):Global and Regional Distributions of Atmospheric Heat Sources and Sinks During the GWE. In 'Monsoon Meteorology', C.-P. Chang and T.N. Krishnamurti eds., Oxford Univ. Press, 271-297.
- Manabe, S. and R.J.Stouffer (1988):Two Stable Equilibria of a Coupled Ocean-Atmosphere Model. *J. Climate*,**9**, 841-866.
- Mooley, D.R. and J. Shukla(1987):Variability and Forecasting of the Summer Monsoon Rainfall over India. In 'Monsoon Meteorology', C.-P. Chang & T.N.Krishnamurtieds., Oxford Univ. Press, 26-59.
- 森永由紀(1991):北半球の積雪面積変動と大気循環場の統計的解析. *グロースベクター*, **30**, 1-11.
- Morinaga, Y.(1992):Interactions between Eurasian Snow Cover and the Atmospheric Circulations in the Northern Hemisphere. 94pp.
- Sato, N.(1992):Climate Diagnosis by Use of JMA GDAS Products. Proc. ISLSCP America Workshop.
- 佐藤信夫(1993):4次元データ同化とは. *科学*, **63**, 683-685.
- Sohn, B.J. and E.A. Smith(1992):Global Energy Transports and the Influence of Clouds on Transport Requirements -A Satellite Analysis. *J. Climate*, **5**, 717-734.
- 安成哲三(1990):熱帯とモンスーン。「東南アジアの自然」第2章,「講座 東南アジア学」**2**,51-74.
- Yasunari, T. (1990):Impact of Indian Monsoon on the Coupled Atmosphere/Ocean System in the Tropical Pacific. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **44**, 29-41.
- Yasunari, T. *et al.* (1991):Local and Remote Responses to Excessive Snow Mass over Eurasia Appearing in the Northern Spring and Summer Climate -A Study with the MRI • GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 473-487.
- Yasunari, T.(1991):The Monsoon Year -A New Concept of the Climatic Year in the Tropics. *Bull. Ame. Meteor. Soc.*, **9**, 1331-1338.
- 安成哲三(1991):地球気候システムにおけるモンスーンの役割. *科学*, **61**, 697-704.
- Yasunari, T. and Y. Seki(1992):Role of the Asian Monsoon on the Interannual Variability of the Global Climate System. *J. Meteor.*

Soc. Japan, 70, 177-189.

安成哲三・小池俊雄(1993)：地球の気候とアジアモンスーンの水循環. 科学, 63, 626-634.

講演者プロフィール



安成 哲三 博士 (筑波大学教授)

略歴

昭和46年 京都大学理学部地球物理学科卒業
昭和52年 京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了
昭和52年 京都大学東南アジア研究センター助手
昭和57年 筑波大学地球科学系講師
平成2年 同上 助教授
平成4年より現職

この間

昭和55年 秩父宮記念学術賞 (日本学術振興会)
昭和56年 山本賞 (日本気象学会)
昭和56年 京都大学より理学博士
昭和61年 日本気象学会賞 (日本気象学会)

主 著

ヒマラヤの気候と氷河：東京堂出版(1983)
地球環境変動とミランコビッチサイクル：古今書院(1992)