

## アジアモンスーン エネルギー・水循環研究観測計画 (GEWEX Asian Monsoon Experiment ; GAME)\*

安成 哲三\*\*

### 1. はじめに

私たちが住む日本をふくめ、東アジア、東南アジア、南アジアの地域は、モンスーンアジアとよばれている。この地域には、世界の人口の約60%が集中し、人々の生活は、稲作を中心として、モンスーンの雨がもたらす水資源に大きく依存している。年々のモンスーンの変動に伴う水循環の変動は、したがって、各国、各地域における水資源・水管理に大きな影響を与えている。

いっぽう、アジアモンスーンは、全球的にみても巨大なその大気・水循環を通して、グローバルな水・エネルギー循環に大きな役割を果たしていると同時に、その年々変動においても、ENSO (エル・ニーニョ/南方振動) に代表される熱帯の大気・海洋系の振動と、積雪・融雪過程や土壌水分を媒介としたユーラシア大陸での大気・陸面相互作用をリンクさせるシステムとして、重要な役割を果たしていることが、明らかにされつつある (Yasunari and Seki, 1992 ; Webster and Yang, 1992 ; 安成, 1992 ; 安成・小池, 1993など)。

現在、炭酸ガスなどの温室効果ガスの増加による「地球温暖化」が、大きな問題となっているが、私たちにとって最も重要なことは、この「地球温暖化」が、アジアモンスーンとその水循環を、地域的な分布をふくめて、どう変化させてしまうのか、という問題である。しかしながら、現在の最も進んだとされる GCM (大気大循環モデル) によるシミュレーションでも、気温の上昇の様相については、かなり似た結果を示しているが、低緯度での降水量、とくにアジアモンスーン地域の降水量の変化については、第1図に示すように、どのモデルにおいても、その空間分布や量に非常に大きなバラつきを示し、モデル間の違いも非常に大きい (IPCC, 1990など)。これは、降水量変動を支配する物

理過程、特に土壌水分などの陸面過程、地表面での水・エネルギーの交換過程、雲形成のパラメタリゼーションなどの、モデルごとの違いや空間分解能の違いなどに、降水量のような物理 (気象) 量が、非常に敏感であることを示している。降水量予測におけるこのような不確定性を小さくするためには、地表面・大気系における水・エネルギー循環過程の実態のより精確な把握とモデル化が必要である。

特に陸面は、海面とはちがい非常に複雑多様であり、大気・陸面間のエネルギー・水交換過程も地表面状態により大きく異なる。したがって、アジアモンスーンの変動とこの地域の水資源変動の予測には、ローカルスケールでの水循環とエネルギー過程が、どのように積分されてグローバルスケールの気候と大気大循環に影響を与えていくかというアップスケーリングと、グローバルスケールの気候 (変動) が、どのようにローカルスケール、リージョナルスケールの水循環 (変動) に影響するかという、ダウンスケーリングをふくめた、エネルギー・水循環のスケール間の相互作用の過程を理解することが非常に重要であることが、近年ようやく認識されてきた。

このような問題意識が、GAME 立案の背景となっている。

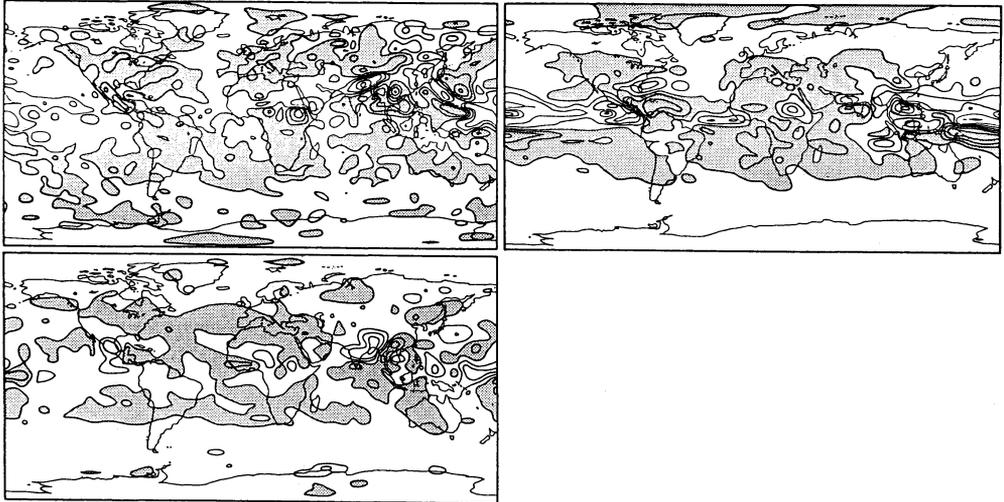
### 2. GAME 立案の経緯

ICSU (国際学術連合) と WMO (世界気象機関) との協同研究計画として、現在 WCRP (世界気候研究計画) が実行されているが、この重要な副計画として GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment : 全球エネルギー・水循環研究計画) が立案され、現在準備段階にある。GEWEX の目的は、地球の気候システムでの重要な物理過程である放射、雲、そして水循環と、それらにともなうエネルギー過程の実態を定量的に正確に理解し、比較的長時間スケールの短い気候変動の機構解明の基礎にしようとするものである。

\* GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME).

\*\* Tetsuzo Yasunari, 筑波大学地球科学系.

© 1994 日本気象学会



第1図 大気中の  $\text{CO}_2$  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. 三つの大気大循環モデルによる,  $\text{CO}_2$  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  $1 \text{ mm/日}$ , 影の領域は負の値を示す.

GEWEX については, すでに武田 (1990) の解説があるので, 参照されたい.

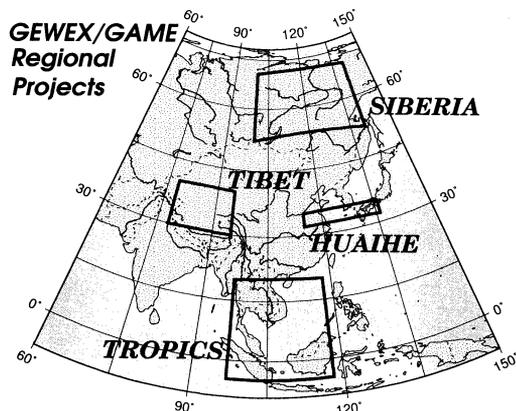
GEWEX のひとつの柱は, その複雑・多様性のために研究が遅れている大陸スケールの水循環と, 大気・陸面相互作用の実態解明とモデリングである. この目的のために GCIP (GEWEX Continental-scale International Project) が GEWEX の副計画のひとつとして立ち上げられ, 具体的な地域として, 気象・水文観測ネットワークが完備している北米大陸のミシシッピ河流域が選ばれている. しかし, 大陸スケールの水循環と大気・陸面相互作用を, 全球的な視点で研究する場合, ミシシッピ河流域だけでは, その地理的, 気候・植生的条件から考えて, 不十分である. 特に地球の気候システムにおいて大きな役割を果たしていると考えられる熱帯地域や, 高緯度の大きな面積を占める永久凍土域などの過程が, この地域ではほとんど考慮されないことになる. アマゾン河流域を対象とした LAMBADA, カナダのマッケンジー河流域を対象とした MAGS, バルト海水域を対象とした BALTEX などが, このような視点から, GCIP ミシシッピ河計画と平行して, 1990年頃より立案され, 準備されている. しかしながら, 最大の大陸であり, 私たちにとって重要なアジアモンスーンの変動にも密接に関係したユーラシア大陸については, まったく白紙の状態であ

った.

GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) は, この GEWEX および GCIP への日本およびアジア各国の重要な貢献として, 日本の気象学・水文学研究者により協同で提案されたものである. GAME の立案は, 日本学術会議 WCRP 専門委員会 (委員長松野太郎東大教授) の下に作られた GEWEX 小委員会 (委員長武田喬男名大教授 (当時), 現在安成) で, 1990年よりワーキンググループを作って検討が重ねられ, 1993年1月, 米国サンディエゴでの第5回の GEWEX SSG (Science Steering Group) 会議で提案された. そして本年 (1994年) 1月, イタリアのフラスカティでの第6回 SSG 会議で, 他の4つの大陸スケールの水・エネルギー収支研究観測計画とともに, 正式に GEWEX のプロジェクトのひとつとして認められた. 国内では, 1993年11月に GEWEX 小委員会とは別に, GAME 小委員会 (委員長安成) が新たに作られ, 国際協同プロジェクトとしての GAME の実行計画の立案と推進および国内での研究体制の整備, 確立をすすめることになった.

### 3. GAME の研究目的

はじめにのべた科学的背景をもとに, GAME の研究目的は, 以下の4つにまとめられている.



第2図 GAMEにおいてエネルギー・水循環の集中観測を行う4つの特定地域

- A. 全球的なエネルギー・水循環過程におけるアジアモンスーンの役割の解明
- B. モンスーンアジアの多様な地表面におけるエネルギー・水循環過程の解明
- C. 気候モデルによるアジアモンスーンのシミュレーションと季節予報の改良
- D. アジアモンスーンの変動が地域・流域スケールの水循環・水利用に与える影響の評価

Aは、衛星データや4次元同化データにもとづく全球的な解析や大気大循環モデルなどの気候モデルによる研究が中心となる。GAMEの最終的な生産物となるべき大陸スケールの気象・水文データのアーカイブや編集も、この研究目的の一環として位置づけられる。

Bは、モンスーンアジアを代表するいくつかの地域でのフィールド観測と衛星データ解析にもとづき、大気・地表面での広域熱・水収支の時空間構造を解明するとともに、それらの結果にもとづくマクロ水文学モデルの構築を具体的な目標としている。

Cは、A、Bでの成果を踏まえた気候(予報)モデルによる、より現実的なアジアモンスーンとその変動のシミュレーションおよび予測可能性の向上が、ひとつの大きな目標である。Dでは、上記のGAMEに関連した活動を通して得られたデータセットと、気候・水文学モデルを用いた、モンスーンアジア各地域、各流域での水循環、水利用の変動予測と評価への応用を目的としている。

#### 4. GAMEの概要

GAMEは、以下のような研究計画の構成を現在考え

ている。

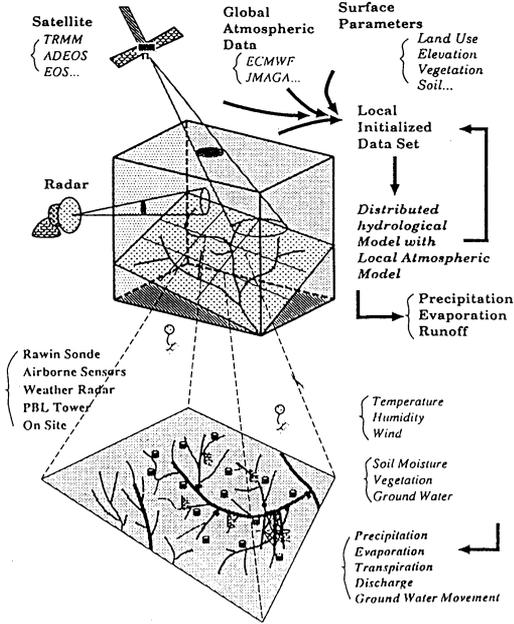
- ① 地上および人工衛星によるモンスーンアジア地域での広域エネルギー・水収支の観測とモニタリング

これは、既存の定常気象・水文観測データの高密度のデータ収集に加え、放射収支、熱・水収支成分の連続測定が可能な自動気象観測システム(AWS)を、特に定常観測網が希薄なアジア各地域に展開するアジア地域自動気象観測ネットワーク(Asian AWS Network; 略称AAN)の構築と維持も含まれる。これらのAWSのデータは、静止気象衛星GMSによる準リアルタイムのデータ回収も予定しており、気象庁から協力の内諾も得ている。最近のユーラシア大陸における「温暖化」、すなわち地上気温の急激な上昇の原因を解明するためには、規格化された自動測器システムによる地表面放射・熱収支の長期的なモニター観測が不可欠である。このネットワークの中で、特に放射観測の部分は、WCRPの一環として国際的に進められている放射観測プロジェクトであるBSRN(Baseline Surface Radiation Network)のモンスーンアジア地域における貢献や、衛星観測によるSRB(Surface Radiation Budget)の地上検証としても位置づけられる。

さらに、西暦2000年頃までに打ち上げが予定されているTRMM(熱帯降雨観測衛星)、ADEOS-1、ADEOS-2やEOSシリーズといった衛星による地表面気象・水文情報の継続観測データのリアルタイム・ベースのデータ収集も、GAMEの重要な一部分である。特にTRMM(およびTRMM-2)の降雨レーダーによる観測や、ADEOS-2などに搭載予定の中分解能可視赤外放射計やマイクロ波放射計による地表面状態(植生、アルベド、土壌水分など)の観測は、大きく季節変化するユーラシア大陸での水循環と地表面・大気の相互作用の実態解明に、大きな威力を発揮するものとして、期待されている。

- ② エネルギー・水循環特定地域研究プロジェクト

このプロジェクトでは、モンスーンアジアでの代表的な植生・気候区を4地域(第2図参照)選び、流域スケールでの大気・水圏系における、いくつかの代表的時間・空間スケールにおけるエネルギー・水循環過程の実態解明を、包括的な観測研究(experiment)によって行うとともに、これらの結果を総合して、さまざまな陸面状態に対し、より普遍的に適用可能なメソ気象・マクロ水文結合モデルの構築を目指すものであ



第3図 流域スケールのエネルギー・水循環集中観測研究の模式図

る。これらの特別観測データは、同時に、③の研究項目の一部である数値予報モデルによる気象・水文データの4次元同化のための入力データとモデリングという側面もふくまれる。具体的には、

1. 湿潤熱帯モンスーン地域 (チャオプラヤ流域, サラワク熱帯雨林)
2. 亜熱帯/温帯モンスーン地域 (淮河流域)
3. チベット高原と内陸アジア乾燥地域
4. 寒帯林・永久凍土帯 (シベリア/レナ河流域)

の4地域を設定し、それぞれの地域での2次元ないし3次元の降水過程、地表面での水・熱収支過程、流出過程を詳細に観測・解析(第3図参照)し、それぞれの地域での水文気象プロセスの解明を行う。これらの地域特別観測プロジェクトについては、別の機会に、より詳しい紹介を行う予定である。

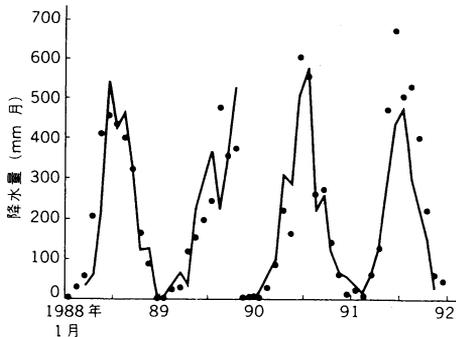
### ③ 大気・水文過程のモデリングと4次元同化

この研究項目では、気候モデルによるモンスーン降水量と水循環のシミュレーションと予測、および水文気象過程解析のための高精度4次元同化データの作成をめざす。広域アジアモンスーン循環の変動予測には、観測にもとづく、より現実的な陸面過程を組み込んだ大気・海洋結合モデルの開発が、100 km から 1000 km スケールの地域・流域における降水量と水循環の季節

予報のためには、GCM に組み込めるマクロ水文モデルの構築が重要である。

現在のGCMでは、蒸発、流出および土壌水分変化といった水文学的過程が、1次元過程として、非常に単純化されて導入されている。その最も簡単なものが、いわゆるバケツモデルである。最近では、植生での蒸発散過程も組み込んだ、より複雑なモデル(例えばSiB, BATSなど)も現れているが、現実の2次元(3次元)の複雑な地表面を代表させるには、まだ多くの問題を含んでいる。一方これまでの水文学でのモデルは、個々の流域の地形、植生、土壌などに合わせたかたちの経験的な流出モデル(例えばタンクモデルなど)が主流であり、流域上空の大気との相互作用を考慮した、しかもどのような地表面状態にも適用可能なモデルは、存在しなかった。マクロ水文学モデルとは、気象学、水文学におけるこれら2つの従来型の陸面水文過程モデルの欠点を克服すべく、現在いくつかの原理と手法にもとづいた開発が行われているが、まだ完成の域に達しているものはない。(詳しくは、小池(1994)の解説を参照されたい。)このようなモデルの開発と検証にとって特に必要なことは、地球上での多様な地表面条件下での適用性と、パラメータ推定などに関するモデルの普遍化である。モンスーンアジア地域は、年中湿潤な熱帯雨林帯、雨季乾季の明瞭な熱帯モンスーン帯、亜熱帯前線帯、乾燥帯、季節的積雪域、永久凍土帯など、きわめて多様な地表面から構成されており、大気・陸面相互作用におけるいくつかの極値的現象が同時に生起しており、GCM適用可能なマクロ水文学モデルの開発と検証にとって、重要な場を提供している。別の言い方をすれば、地球上で最も大きな面積を占め、水循環でも非常に重要な役割を果たしているこの地域にうまく適用できない水文学モデルでは、GCMにとって意味のないモデルということになる。

GAMEをふくむGEWEXの重要な任務の一側面は、地球気候システムのエネルギーと水循環を、高精度で定量的に評価できるデータセットをつくることである。これには、前述の観測・モニターのプロジェクトに加え、これらで得られた観測データを、最も進んだ予報モデルに入力して4次元同化することにより得られる客観解析データが、大きな武器となる(佐藤, 1993)。この解析データにより、例えば第4図に示すように、地域的な水収支要素を、季節変化、年々変動をふくめ、量的により精確に評価できるようになる。2で述べた5つの大陸スケールのエネルギー・水収支研



第4図 中国揚子江南部 (90°E~100°E, 20°N~30°N) での全球モデルの1日子報降水量を1か月積算し (太い実線), 観測された月積算降水量の平均 (●) と比較した結果。季節変動がよく表わされている。(佐藤, 1993)

究観測計画では、衛星データをふくめ観測されたデータを、最終的には4次元同化データとして国際的に提供できる現業の数値予報センターの協力が、その公式承認の条件として付記されている。

GAMEにおいては、幸い、気象庁がこの部分を含めて積極的に参画・協力することを決めており、国際的にも大きな期待が寄せられている。数値予報課では、1996年から約50 kmの格子点精度でのグローバル予報・解析を開始する予定になっているが、この精度に対応した観測ネットワークの展開とモデルの開発は、GAMEのひとつの重要な側面でもある。さらに、上述の地域特別観測プロジェクトに関連した地域では、マクロ水文学モデルの開発と絡めて、さらに高精度 (例えば約20 kmスケールの格子間隔) のデータ同化が、大気・水文過程の解明に大きな役割を果たすものと期待される。

#### ④ データセット・情報ネットワーク (GAME data Archive and Information Network; 略称 GAIN) の構築

GEWEXの目的はもちろん、グローバルおよび地域的な気候システムにおけるエネルギー・水循環を解明することであるが、同時にそのための精度のいいデータセットを最終的に構築し、世界の地球環境研究のコミュニティに提供することも重要な貢献として位置づけられている。GAMEにおいては、アジア地域で観測され編集された、さまざまな種類のデータをアーカイブするデータセンターと、そのデータ利用を促進するための情報ネットワークの機能を有するシステム (GAIN) の構築が、特に重要である。

アジア地域においては、各国のさまざまな政治・経済的事情により、現在でもデータ利用について、多くの困難が存在している。特に水文データは、これまで (そして現在も)、各国関係機関の中でのみ管理されていた傾向が強く、これが水文学自身をも、地域・流域単位でのみ現象を扱う学問として性格づけてしまった面もある。気象・水文データの積極的な提供・交換により、結局は各国の気象予報や水資源予測が向上するという合意と、そして実績をつくっていくことが、何より大事なことであろう。GAMEを通じた各国の協力と理解により、この問題に対する飛躍的な前進を期待したい。そのためには、4次元同化データ、衛星データの提供などもふくめ、日本が果たすべき役割は、非常に大きい。

#### 5. GAMEの実行にむけて

以上のべてきたように、GAMEはかなり大型の国際協同研究観測計画である。しかし、地球のエネルギー・水循環と気候システムにおけるアジアモンスーン地域の重要性を考えると、この計画はGEWEX全体からみても重要な位置を占める計画であり、世界各国の気象・水文学関係者のみならず、生物学などを含めた地球環境研究のコミュニティからも大きく期待されている。また、地球科学 (大気・水圏科学) 分野において日本がはじめて提唱し、立ち上げる国際協同研究のプロジェクトでもあり、WCRPなどの研究コミュニティからの期待も大きい。GAMEは、現在のところ1995年頃から少なくとも10年 (以上) にわたる計画として立案されている。この計画に賛同し、これからの地球とアジアの水と気候について大いなる関心をもつ、多くの元気な若手研究者の参加を期待したい。"Think globally, Act in Monsoon Asia."

#### 参考文献

- 小池俊雄, 1994: マクロ水文モデルについて, 水文・水資源学会誌, (投稿中).
- 佐藤信夫, 1993: 4次元データ同化とは, 科学, 61, 683-685.
- 武田喬男, 1990: GEWEX (全地球エネルギー・水循環実験観測計画), 天気, 37, 490.
- 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.
- 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.
- 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.

Webster, P. and Yang, 1992 : Monsoon and ENSO :  
Selectively Interactive Systems, Quart. J. Roy.  
Meteor. Soc., 118, 877-926.

### 日本気象学会および関連学会行事予定

行事名	開催年月日	主催団体等	場所	備考
地球大気化学 国際シンポジウム	1994年9月5日 ～9日	CACGP (大気化学・地球規模 汚染委員会)	ハイランドリゾート ホテル (富士吉田市)	事務局 岩上 直幹 小川 利紘 Tel. 03-3812-2111
月例会「長期予報と 大気大循環」	1994年9月22日	気象庁	気象庁第一会議室 (千代田区)	気象庁長期予報課内 L. F. グループ事務局
日本気象学会 1994年度秋季大会	1994年10月18日 ～20日	日本気象学会	九州大学 (福岡市)	
第6回 IGBP/GAIM 研究会	1994年10月20日		九州大学 (福岡市)	筑波大学 及川 武久 Tel. 0298-53-6661
アジアモンスーンとその 変動に関する国際シンポ ジウム	1994年11月2日 ～6日		中国広州市	東大気候システム研究 センター 新田 勲
第13回風工学 シンポジウム	1994年11月30日 ～12月2日	日本風工学会, 電気学会 日本気象学会, 土木学会 ほか	日本学術会議講堂 (港区)	東京大学生産技術 研究所村上研究室 Tel. 03-3401-7439
第41回風に関する シンポジウム	1994年12月19日	日本航空宇宙学会 日本気象学会 ほか	東京大学山上会館 大会議室 (文京区)	東京大学航空宇宙学科 久保田 弘 Tel. 03-3812-2111
月例会「レーダー気象」	1994年12月20日	気象庁	気象庁 (千代田区)	気象研究所台風研究部 榑原 均 Tel. 0298-53-8671
気象・海洋のデータ同化 に関する国際会議	1995年3月13日 ～17日	WMO (世界気象機関)	気象庁講堂 ほか (千代田区)	気象庁数値予報課 平 隆介 Tel. 03-3212-8341
日本気象学会 1995年度春季大会	1995年5月15日 ～17日	日本気象学会	気象庁, KKR 竹橋 (千代田区)	
第19回国際理論・ 応用力学会議	1996年8月25日 ～31日	International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM)	国立京都国際会館 (京都市)	事務局 渡邊英一 Tel. 075-753-5079