

\*\*\*\*\*

国際共同研究紹介

\*\*\*\*\*

## アジアモンスーン地域における気候・水循環変動の研究

—GAMEの推進状況と成果について—

安 成 哲 三

### 1. はじめに

東アジアの梅雨をふくむ夏のアジアモンスーンは、私たちにとってなじみの深い気候現象である。アジアモンスーンは、ユーラシア大陸東・南部の広大な地域に、毎年規則正しい雨季をもたらす。恵みの水はこの地域の人々の生活の基盤になっている。しかしこのモンスーンは、時として変調をきたし、豪雨による水災害や干ばつも、この地域にもたらす。モンスーンの季節予報、季節内予報の精度を上げ、地域ごとの水循環、水資源予測に資することは、したがって、世界の人口の半分以上を占めるこの地域の人々と国々にとって、重要な課題である。また、近年、アジアモンスーンの変動は、熱帯太平洋域のENSO（エル・ニーニョ／南方振動）と密接な相互作用をしていることも明らかになりつつあるが、まだ多くの点が未解明である。特に、ENSOの発現は、北半球の春から夏のモンスーンに至る時期に起こっており、夏のモンスーンの開始過程と密接に関係があると推測される。さらに、現在、温室効果ガスの増加による「地球温暖化」が問題になっているが、私たちにとって非常に重要なことは、アジア地域での気温変化以上に、モンスーン

に伴う雨や水循環がどのように今後変化するかを、地域、流域スケールで予測する必要性に迫られていることである。しかし、現在のGCM（大気大循環モデル）や地域気候モデルにおける雲・降水過程、大気境界層・陸面水文過程などの水循環に関わる物理過程の単純化や不正確さにより、これらの予測は、まだ非常に大きな不確実性を残している（IPCC, 1996）。このような問題を解決する方向で開始されたのがGAME（GEWEX Asian Monsoon Experiment：アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画）である。

学問分野としては、気象学と水文学の協力・連携で実行されることになったが、この2分野は、一見近そうであるが、GAMEが計画されるまでは、国内での連携・協力は非常に少なかった。気象学は理学の一部であり、水文学は、主として工学（土木工学）と農学の分野の研究者により、担われてきた。理学（地理学）系の水文研究者もいたが、それぞれの関心や目的が異なることから、水文学そのものが、いくつかの学会に分かれており、気象学、水文学の共同研究は、非常に難しい状況にあった。しかし、このような時に大きな役割を果たしたのが、双方の若手の研究者であった。上記にあげたような問題の解決には、既存の気象学・水文学の枠組みにとら



われずに取り組む必要のあることをいち早く感じ、研究観測計画を作り上げていったことが、GAMEの大きな特色であり、強みであったといえる。

## 2. GAME 推進のための国内・国際的な枠組みと体制

GAMEはWCRP(World Climate Research Programme;世界気候研究計画)の副計画であるGEWEX(Global Energy and Water cycle EXperiment;全地球エネルギー・水循環研究計画)傘下の国際プロジェクトとして日本の気象・水文研究者の協力の下に提唱され、1994年にGEWEXの一翼を担う国際プロジェクトとして公式に認知された。国内では1995年7月、文部省測地学審議会により正式に建議され、文部省、科学技術庁(現在、文部科学省)、気象庁、宇宙開発事業団などの支援、協力のもとにスタートした。

GEWEX傘下の国際プロジェクトであるGAMEは、1996年3月に国際科学パネル(GISP)を設立し、GAMEの国際的な推進計画を毎年検討することになっている。このパネルには、関係するアジア8か国(日本、中国、韓国、ロシア、タイ、マレーシア、シンガポール、インド)の気象・水文関係者とGEWEXからのリエゾンを含めて、米国からもパネルメンバーとして参加してもらっている。この国際パネル事務局を含むGAME国際事務局(GAME-IPO)は名古屋大学大気水圏科学研究所(2001年4月より地球水循環研究センターに改組)に設置されている。GAMEの国内での実行体制

は、各省庁・大学の関係研究者で組織されたGAME実行計画委員会を中心に進められ、国内事務局は名大大気水圏研に置かれていたが、2001年4月より筑波大陸域環境研究センターに引き継がれている。GAMEの活動は、ホームページ(<http://www.ihas.nagoya-u.ac.jp/game/>)で逐次更新されて報告されている。さらに、GAMEのそれぞれの活動(各地域プロジェクトや自動熱収支・放射収支観測ネットワーク、モデリングなど)に対応したメイリングリストも作られ、活発に利用されている。詳しくは上記ホームページまたは、[game-jp-request@ihas.nagoya-u.ac.jp](mailto:game-jp-request@ihas.nagoya-u.ac.jp)へ、問い合わせさせていただきたい。

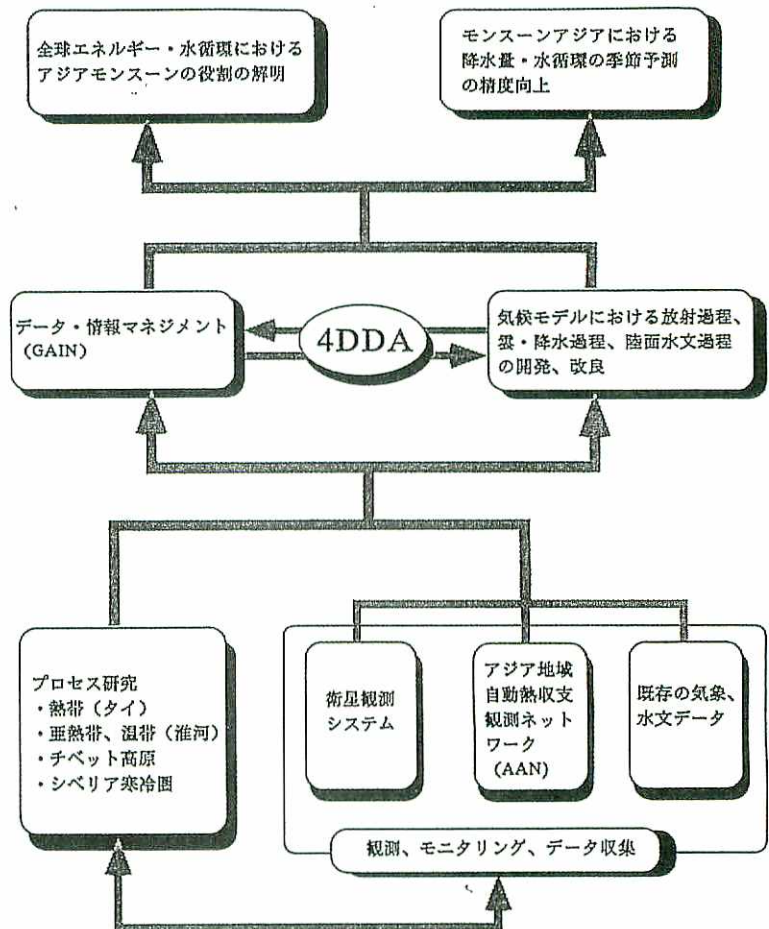


図1 GAME計画の全体の構造



### 3. アジアモンスーンの広域強化観測 (IOP '98) の実施

GAME 計画全体の構造は、図1のように、1) データの収集とモニタリング、2) プロセス研究、3) モデリング (4次元データ同化を含む)、と4) データ・情報ネットワーク (GAIN)、の四つの部分に分けられる。GAME の計画の詳細については、学会誌での報告 (安成, 1994) を参照されたい。ここでは特に、四つの地域におけるプロセス研究と、これに関連して、1998年夏に実施された IOP (Intensive Observing Period; 集中強化観測計画) の結果について、簡単に紹介したい。

GAME の四つの地域 (タイ・チャオプラヤ川流域、中国淮河流域、同チベット高原、シベリア・レナ河流域) におけるプロセス研究での具体的な共通のターゲットは、各地域・流域における大気・地表面系におけるエネルギー過程と大気・陸面系での水循環の季節変化をより正確に評価することにある。具体的には、土壌水分-地表面熱・水収支-大気境界層と対流活動のリンクを正確に理解し、気候・水循環の予測モデルの向上につなげることである。

大陸上の大気・陸面系では、大気・海洋系の海面水温と同等の役割を果たすのは、土壌水分といえる。もちろん、陸面の場合、これに植生や積雪・凍土といった表面状態が多くの場合、複雑に絡んでくる。異なる気候帯や植生の地域で平行して比較観測が必要な理由はそこにある。

IOP の科学目的は、冬から夏の季節進行の中で、アジアモンスーンがどのように開始され、変動するのかを、日変化から季節内変動、季節変化までの時間スケールでの大気・陸面・海洋間のエネルギー・水循環過程とし

て詳細に観測し、その変動の機構を明らかにしようというものである (安成, 1998)。この IOP 期間中、四つの地域を含むアジアモンスーン地域で、集中的な強化観測を同時に行った。モンスーンの季節変化過程 (とその変動) における大気・陸面相互作用とエネルギー・水循環を理解する上で、日変化を含む実態の解明は非常に重要である。モンスーンに伴う対流活動も顕著な日変化があることは、いくつかの静止気象衛星や1997年11月に打ち上げられた TRMM (熱帯降雨観測衛星) による対流・降水活動の解析から衛星データの解析などから、すでによく理解されていた。1998年夏を IOP の時期として選んだ理由のひとつは、TRMM 衛星データのフル利用であった。しかし、例えばチベット高原では、非常に顕著な日変化が地表面、境界層にあり、湿潤な大気層や雲形成が夜間にあるかないかで、対流活動や大気加熱の定量的評価への影響は大きく異なると考えられる。対流活動の日変化は、当然、水蒸気 (輸送) 量の日変化と密接に関係している。水蒸気量とその水平収束量の日変化は、対流活動のダイナミクスを考える際に非常に重要であるが、1日1-2回の高層ゾンデ観測による大気水蒸気量をもとにした水蒸気収支では、大きく日変化する水蒸気 (収束) 量が、正しく評価されない。モンスーンアジア地域でのより定量的に議論可能な放射収支、熱・水収支を調べるためには、地表から対流圏全体での日変化を含む大気の状態を、より正確に観測する必要があった。

1998年3月末、韓国齊州島で開催された第2回国際科学パネル会議で、GAME-IOP における高層ゾンデ強化観測計画の検討と、取得されたデータの交換、公開に関する合意がなされた。この会議には、パネル参加10か国の他、バングラデシュ、スリランカ、ネパールの南アジア3か国もオブザーバーとし



て参加した。この会議では、述べたような強化観測の科学的必要性が議論された後、モンスーンアジアのほぼ全域で、対流活動に関係した大気の気温、湿度の季節変化と日（周）変化を詳しく解像し、4次元データ同化に提供できるデータを取得するために、1日4回の高層強化観測を、図2に示す観測地点で、モンスーン開始前後の5月後半から6月前半の1か月と、モンスーンが最盛期になる7月一月間、実行することが合意された。このような共同観測の合意が予算も少ないアジア諸国の気象機関、研究機関の間でなされたのは、画期的であった。もちろん、日本による

かなりの資金や測器の援助も前提としていたが、多くの発展途上国も、それぞれ可能な限り独自でも努力して観測を実施しようという意欲に燃えていた。アジアモンスーンの理解と予測が、いかにこの地域にとって重要か、切実な問題かを非常に強く感じた会議であった。

#### 4. 研究成果のハイライト

IOP '98の翌99年の春から夏にかけては、シベリアでの集中観測も行われ、現在、各地域での膨大な観測データの解析が、国内外の

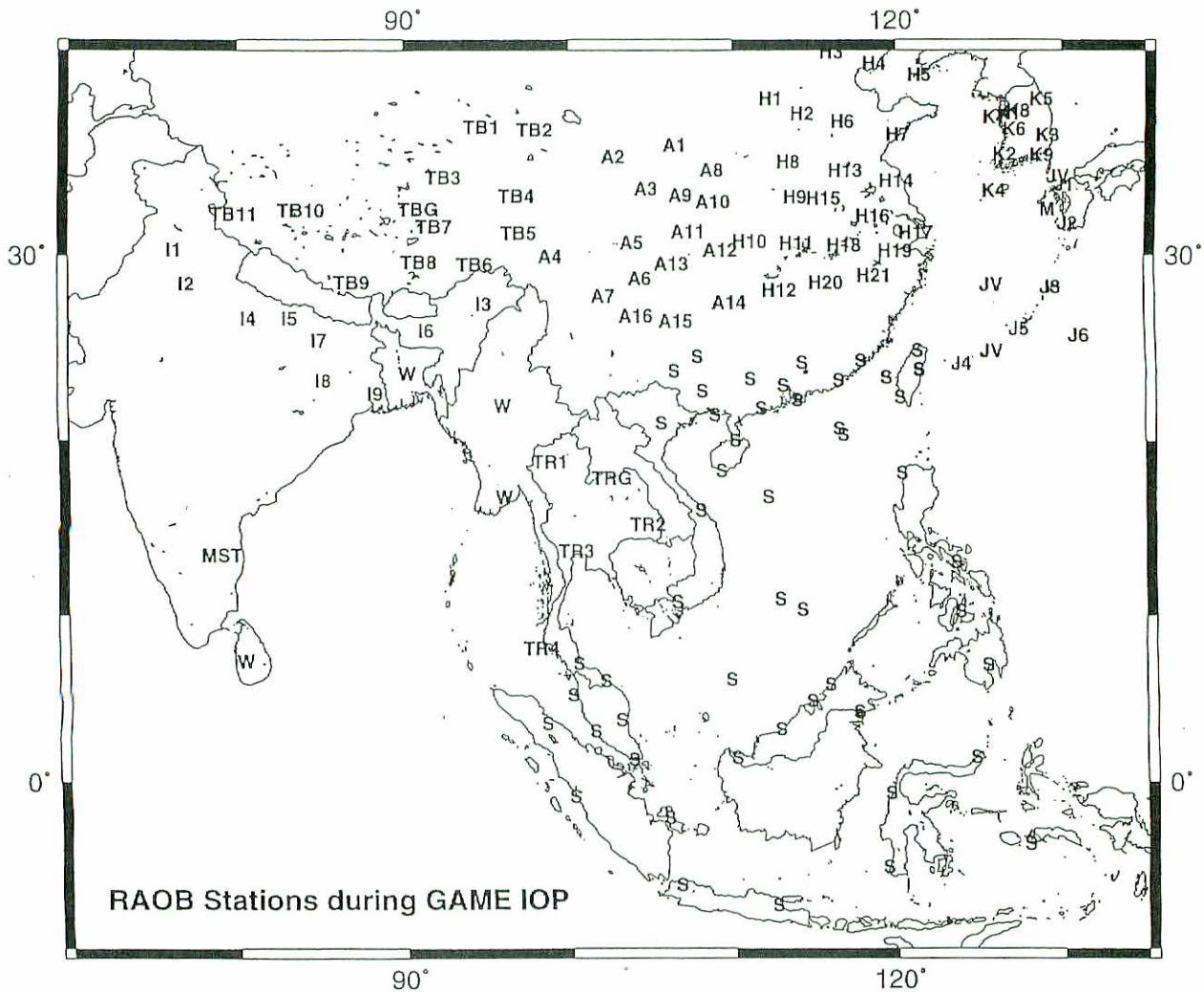


図2 GAMEとSCSMEXによる合同強化高層観測が行われた地点の分布図  
数字を含むそれぞれの記号は、強化観測に参加したそれぞれのサブプロジェクトまたは国を表す。



多くのグループによって行われている。本格的な成果の発表は、今後次々に行われると期待しているが、すでに得られたいくつかの興味深い結果を、簡単に紹介したい。

#### 4-1. 熱帯林の有無は水循環を大きく変える？

タイでは、熱帯林、水田、灌木帯など、いくつかの地表面状態のところで、すでに3年以上の熱収支・水収支の観測が続けられている。その結果、水田などでは、降水量の集中する雨季（6-9月）に、蒸発散量も年間の極大に達する（Toda et al., 2001）が、北部

の熱帯季節風林では、最も乾いた乾季（3-4月）に、極大となることが明らかになった。天気が良く、日射量も多い乾季や乾燥地域は、蒸発のポテンシャル（水があった場合の最大可能な蒸発量）が高いことは、以前から知られているが、実際の蒸発量は土壌水分の不足のため非常に小さいのが普通である。しかし、GAME-T（熱帯）グループの観測は、雨季に大量の水分を供給された森林では、森林とその土壌が水分を十分に保持し、半年以上も後の乾季に最大の蒸発散量を示す結果となった（Suzuki et al., 2001）。この事実は、熱帯では、森林があるかないかにより、その

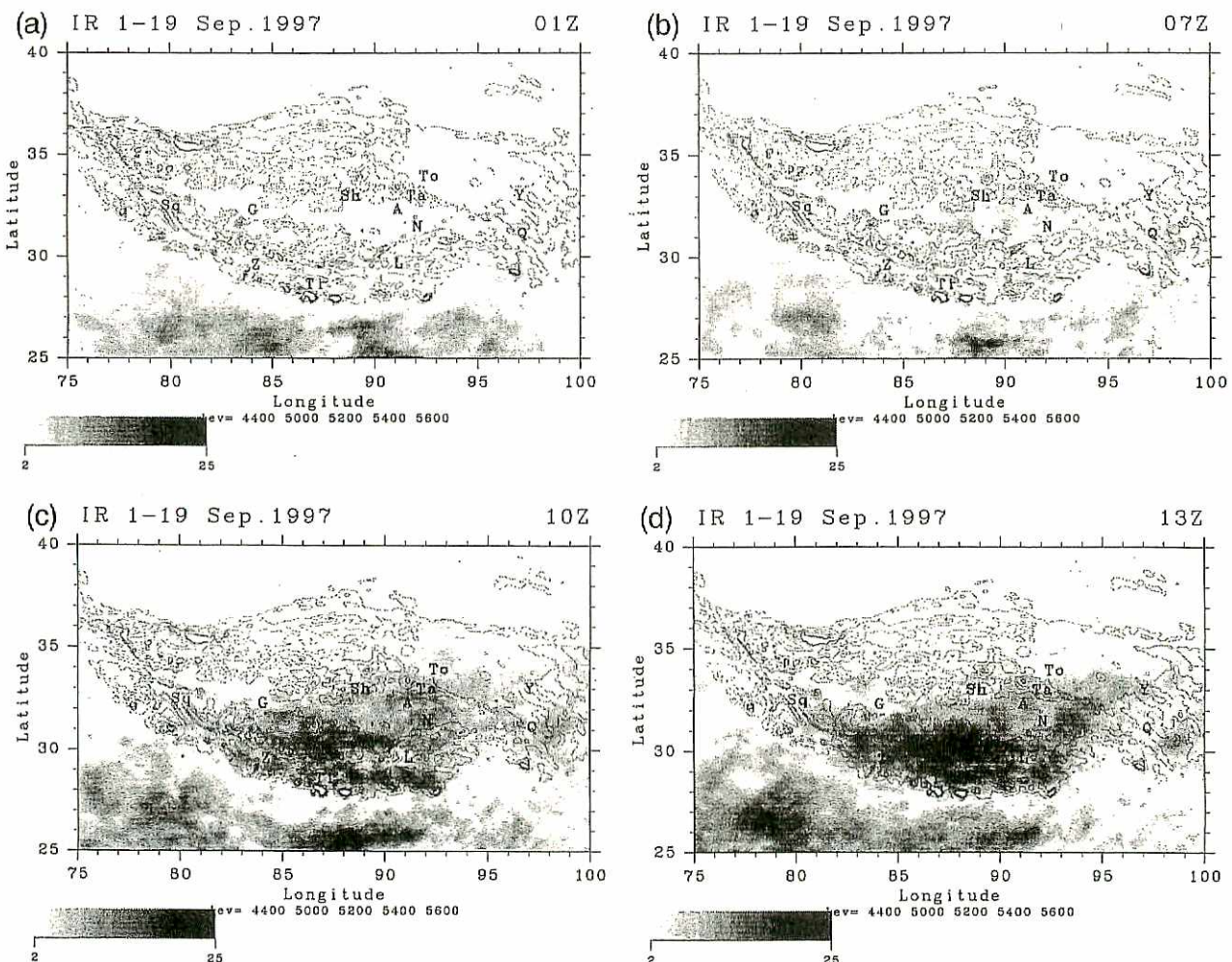


図3 静止気象衛星 GMS-5 の赤外チャネル輝度で観測された高原付近の対流活動の日変化 (a)現地時刻の7時頃 (b)同13時頃 (c)同16時頃 (d)19時頃  
黒っぽい部分ほど、対流活動が活発なことを示す (Ku wagata et al., 2001)。



地域の水循環が大きく変わること示唆している。タイは過去数十年、大部分の地域の森林が破壊され、水田などに変えられたが、この地表面状態の違いを入れた地域気候モデルによるシミュレーション (Kanae et al., 2001) も、季節風の弱くなる9月に、森林がない状態では、降水量が大きく減少することを示した。

#### 4-2. 大きく日変化するチベット高原上の大気

熱帯・亜熱帯では、対流活動や降水に日変化が顕著であることは、よく知られている事実である。日本でも、太平洋高気圧に覆われて、一時的に「亜熱帯」の気団の下にある真夏には、しばしば午後から夕方にかけて対流雲（積乱雲）が発達し、雷雨に見舞われる。しかし、そのような大気の大きな場を決めている太平洋高気圧（あるいは亜熱帯海洋性気団）そのものが大きく日変化することはない。しかし、アジアの100か所近い地点で、1日4回（6時間ごと）の高層観測を行ったGAME-IOP期間のデータと高原での観測を行ったGAME-Tibet研究グループの結果からは、チベット高原を中心として、対流活動のみならず、十数キロの厚さをもつ対流圏全体の気温や水蒸気量に大きな日変化成分があることが明らかになった。図3はGMS静止気象衛星赤外画像から高原上での対流活動の大きな日変化を示したものである (Kuwa-gata et al., 2001)。上空約20キロの高さには、チベット高原を中心とする東西数千キロのスケールの「チベット高気圧」が、アジアモンスーンの大気循環を特徴づけるひとつのシステムとして存在しているが、この高気圧そのものも、水蒸気量や対流活動の日変化に伴い、大きな日変化の脈動をしているのである。このような日変化が、モンスーン循環の維持・変動にどのような役割を果たしているか

など、今後の課題であろう。

#### 4-3. 変幻自在に構造が変わる梅雨前線の雲システム

私たちの住んでいる中緯度の雨は、いわゆる低気圧の雲システムによりもたらされる。天気図で見られるように、低気圧の前面（東側）には温暖前線、後面（西側）には寒冷前線が存在し、低気圧の進行に伴い、温暖前線による雨や寒冷前線による雨が降る。中国揚子江流域のやや北側にある淮河流域で、ドップラーデータによる梅雨（中国ではMeiyuという）前線の雨の集中観測を行ったGAME-HUBEXグループの観測によって、気象衛星などでは一見同じように見える雲システムも、南からの湿った熱帯モンスーン気流の影響が強い場合と、北からの乾いて冷たい大陸内部からの気流の影響が強い場合とで、そのシステムを構成する雲の鉛直構造や水平的な構造が全く異なることが明らかになった (Fujiyoshi et al., 2000)。すなわち、南からの気流の影響が強く、前線が北上しながら発達する時は、温暖前線的な構造に、前線が南下しながら発達する時は、寒冷前線的な構造に変化して、雨をもたらし、その強度や持続性も大きく異なる。このような「変幻自在」の雲システムの特徴は、中国における初めての雲の3次元構造の観測を行って、明らかになったといえる。

#### 4-4. 永久凍土とタイガ（北方林）がシベリアの気候と水循環を決めている？

ユーラシア大陸北半部の非常に寒冷な気候によって、永久凍土が形成され、この気候に適応したタイガとよばれる亜寒帯林が卓越している、というのがこれまでの教科書的説明であった。しかし、GAME-Siberia研究グループの2年以上にわたるレナ河流域での観



測は、むしろ凍土とタイガの存在そのものがシベリアの現在の気候と水循環を決めているという側面を明らかにした。カラマツなどが卓越するタイガ地帯での熱・水収支を通年観測した結果、蒸発散量の割合が、木々の葉の展葉とともに劇的に増加すること、この展葉は、凍土の融解が木々の根の深さまで達した時期に起こっていることが明らかになった (Ohta et al., 2001)。また、夏季の蒸発散量の大部分はこれら森林からの蒸散が占めていること、広域の水収支の計算によって、夏季の降水量の大部分は地表面からの蒸発散に依存していることが明らかになった (Yasunari and Yatagai, 2001)。すなわち、タイガ地域での水循環は、夏になると植生 (森林) と大気のあいだで蒸散→降水→蒸散という再循環が卓越し、夏の終わりになると、循環していた水の大部分は、土壤水分として凍結したまま、夏→冬→次の夏へと保持されていることが示唆された。タイガと凍土は、水循環を通していわば一体となって、維持されているとも考えられる。さらに詳しいプロセスの解明とモデリングは現在も進行中である。

## 5. データの公開と客観解析 (4次元データ同化) について

GAME は、WMO/WCRP 傘下の国際プロジェクトであるため、取得されたデータは、非商業ベースの利用に限り、無償、無制限の利用、提供が原則である。

ここに紹介した地域ごとの特別観測データや、AAN (自動熱収支・放射収支観測ネットワーク) のデータも、観測後1年をめぐりにクイックルック的なデータを、2年目 (以降) に、整理・品質管理がされたものから、順次公開され、解析、モデリング等に利用されつつある。

GAMEでの膨大なデータは、図4に示すように、GAIN (GAME Archive Information Network) とよばれる情報、データのネットワークで管理とユーザ利用を行う予定で進めている。GAINは、ひとつのハブステーションと複数の DAAC (分散型データセンター) をネットワークで結合したひとつのシステムであり、ハブステーションは、気象研究所が担当している。それぞれのデータセットについては、関連する DAAC へインターネットでアクセスすることにより、データが利用できるようなシステムの構築を始めている。

IOPで取得されたアジア地域全体での高層観測データを用いて、気象庁/気象研究所は、4次元データ同化という手法で全球およびアジア地域での高精度 (約 50 km) の格子点客観解析気象データを作成しつつあり、その第1版はすでに CD-ROM で世界に配布されている。この客観解析は、今後、さらに TRMM (熱帯降雨観測衛星) からのデータも取り込み、3次元変分法というより新しい手法による解析データも今年度中には出される予定である。このデータにより、アジアモンスーンに伴う大気循環と水循環変動のより詳しい解析が可能となるはずである。

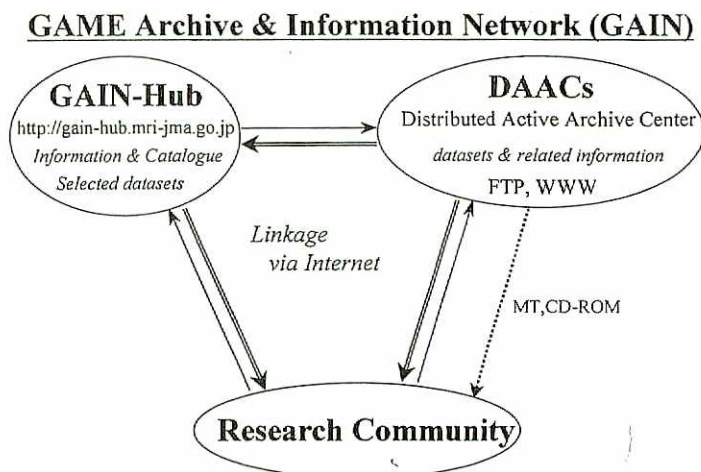


図4 GAIN (GAME アーカイブ&情報ネットワーク) の構造を示す模式図



## 6. おわりに

GAMEは、WCRPの下で、日本がイニシアティブを取り、アジア各国と協力して実行している初めての国際プロジェクトである。2000年6月に東京で行われた第5回GAME国際科学パネル(GISP)会議では、IOPを含む5年間の共同観測の成功を受けて、得られたデータによる共同研究の推進や研究協力の国際的体制の構築を期待する意見が多く、多くの国の代表から出された。そして、これらを推進するためのGAME第2期(GAME-Phase II, 2002-2004)計画の提言が、この会議の結論としてまとめられた。得られた膨大なデータにもとづく解析や、その新たな知見にもとづく気象・水文予測モデルの開発・改良は、まだ開始されたばかりである。同時に、GAMEへの参加を通して、アジア各国によろやく気候や水循環(水資源)の観測と予測研究のための組織やグループができつつあり、これら国々の気候・水資源研究の基盤形成(capacity building)のためにも、GAME第2期を通じた国際的な共同研究の維持・推進が強く望まれている。国際的な共同観測は、GAMEの国際的な活動がきっかけとなるかたちで、WCRPが主催する全球的なエネルギー・水循環の同時観測計画CEOP(Coordinated Enhanced Observing Period)へと発展することになったが、これについては、改めて紹介することにした。

謝辞：文部(科学)省からは、1996年から3年間は特別国際共同研究(事業費)と科研費(国際学術調査)により、1999年度から3年間は、科研費特定研究Bを中心として、GAME実行のための予算措置をいただいている。APN(Asian Pacific Network for Global Change Research)からは、GAME-AAN

のモニタリングネットワーク構築について、1996-98の3年間、一部支援を受けた。宇宙開発事業団からは、GISP会議やチベット高原でのレーダ観測などにつき、支援を受けた。ここに記して深く謝意を表したい。

### ■ 参考文献 ■

- 1) Fujiyoshi, Y., K. Kurihara, H. Uyeda, B. Geng, and T. Takeda, 2000: Meso-scale features of the Meiyu front observed by triple Doppler radars during GAME/HUBEX IOP '98. Proceedings of International GAME/HUBEX Workshop, 55-60. (12-14 September, Sapporo, Japan)
- 2) IPCC, 1996: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Ed. by Houghton, J.T. et al. pp. 572. Cambridge University Press.
- 3) Kanae, S., T. Oki and K. Musiaka, 2001: Impact of Deforestation on Regional Precipitation over the Indochina Peninsula. *J. Hydrometeor.*, 2, 51-70.
- 4) Kuwagata, T., A. Numaguti and N. Endo, 2001: Diurnal variation of water vapor over the central Tibetan Plateau during summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 401-418.
- 5) Ohta, T., T. Hiyama, H. Tanaka, T. Kuwada, T. Ohata, Y. Fukushima, and T.C. Maximov, 2001: Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a Larch forest in eastern Siberia. *Hydrological Processes* (in press).
- 6) Suzuki, M., H. Takizawa, T. Kume, N. Tangtham, and C. Tantasirin, 2001: One dimensional heat and water flux monitoring and modeling in a hill evergreen forest. Proceedings '99 workshop on GAME-Tropics in Thailand. GAME Publication No. 18/GAME-T publication No. 6, p. 66-68
- 7) Toda, M., N. Ohte, M. Tani, and K. Musiaka, 2001: Observation of energy flux and evapotranspiration over terrestrial complex land in the tropical monsoon region. *Journal of Meteorological Society Japan* (in revision).
- 8) 安成哲三, 1994: アジアモンスーンエネルギー・水循環観測研究計画(GAME). *天気*, 41, 15-20.
- 9) 安成哲三, 1998: GAME強化観測期間(IOP)を迎えて。一季節変化する太陽入射エネルギーはアジアモンスーンをどのように駆動しているか。 *天気*, 45, 501-514.
- 10) Yasunari, T. and A. Yatagai, 2001: A hydroclimatic memory effect of Taiga-Permafrost ecosystem in Eastern Siberia. *Nature*. (Submitted).

安成 哲三(やすなり・てつぞう)  
筑波大学地球科学系 教授。