

# GAME 強化観測期間 (IOP) を迎えて

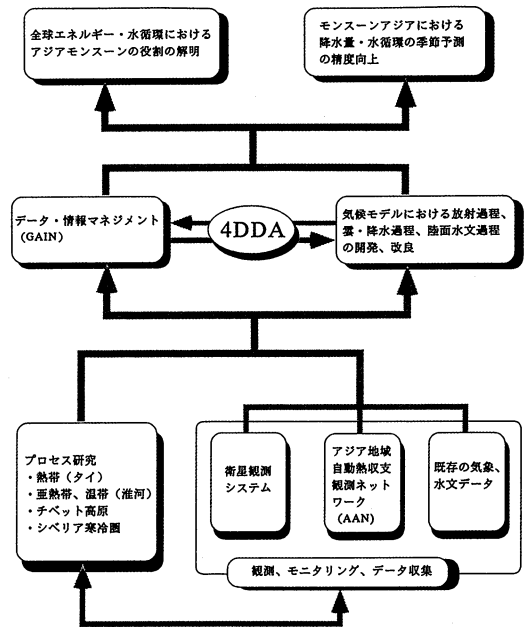
—季節変化する太陽入射エネルギーはアジアモンスーンをどのように駆動しているか—

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。もちろん、時として変調をきたしたモンスーンは、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)<sup>†</sup>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 (Yasunari, 1990, 1991; Yasunari and Seki, 1992; Webster and Yang, 1992 など) 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。

このような問題意識で開始されたのが 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。GAME 計画全体の構造は、第 1 図のようにまとめられる。簡単にいえば、1) データの収集、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 4 つの部分に分けられる。GAME そのものについて、あるいは GEWEX の一環としての GAME については、すでに



第 1 図 GAME 計画全体の構造。

「天気」でも紹介しているので、詳しくはそれを参照されたい (安成, 1994; 安成ほか, 1996)。放射収支、熱・水収支の長期モニタリングをアジア各地で展開する AAN (Asian AWS Network) については、別に詳しく紹介する予定である。この解説では、4 つの地域におけるプロセス研究と、これに関連して、1998 年夏を中心に予定されている GAME の IOP (Intensive Observing Period; 強化観測計画) の科学的意義とその計画の概要について紹介したい。データ・情報ネットワークについても最後に簡単に紹介する。

\* 筑波大学地球科学系。

—1998年 3月23日受領—

—1998年 5月26日受理—

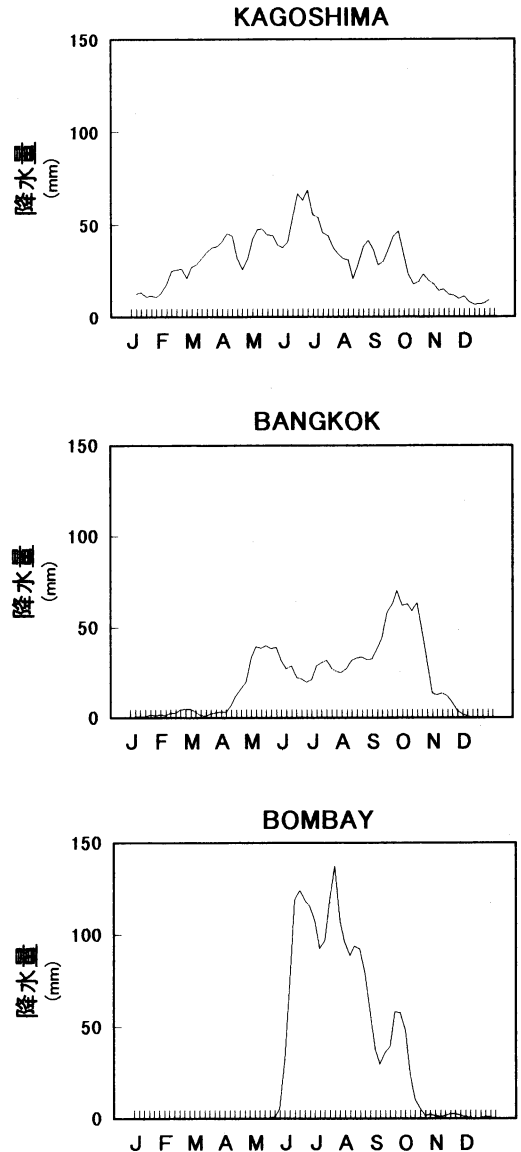
<sup>†</sup> 以下、主な略語は末尾の一覧を参照のこと。

## 2. 季節変化の機構の理解なしに年々変動は論じられない

モンスーンは、季節的に卓越する風系(大気循環系)と雨季に特徴づけられる。その風系と雨季の開始、およびその後の季節的な推移の気候学的特徴は、しかし、地域により大きく異なっている(Matsumoto, 1992)。第2図は、ボンベイ(インド)、バンコク(タイ)、および鹿児島における雨季の状況を、降水の季節的な推移で示している。東南アジアでは、雨季はすでに4月頃開始し、10月まで継続するが、そのあいだに大きな中休みが6月~7月頃に存在する。インドモンスーンの開始は、しばしばモンスーンバーストと呼ばれるように、突然開始され、9月にだらだらと終わる。日本の梅雨は、インドモンスーンとほぼ同時に開始するが、7月後半には終わってしまい、8月は太平洋高気圧に覆われた暑い夏となる。このようなモンスーンの季節推移とその地域性は、年々同じように繰り返される非常に顕著な季節変化のシグナルであるため、当たり前のように思われているが、なぜ季節推移が、地域的にこれほど大きくちがうのか、ということは、実はまだよく理解されていない。最近の大気大循環モデル(GCM)によるモンスーンのシミュレーションでも、このような雨季の季節的・地域的な特徴を精度良く再現しているものはない。梅雨前線そのものも、うまく再現できているGCM実験は非常に少ない。モンスーンにおける年々変動は、これらの季節変化のゆらぎと変動によって産み出されているともいえよう。したがって、年々変動の機構を理解するためには、季節変化そのもののしくみをまず正しく理解する必要がある。

## 3. 季節変化の鍵は陸面・大気・海洋相互作用

以上にのべたような複雑な季節変化過程の機構はなにか、その鍵を握るのが、太陽エネルギーの季節変化という強制のもとで、地域的・時間的に変化する陸面・大気・海洋間の相互作用であろう。陸面と海洋はその熱容量や地表面の物理特性の違いによって、太陽エネルギーによる加熱(冷却)のされ方が、大きく、あるいは微妙に異なっている。陸上の場合、地表面高度、地形(粗度)のような季節変化しないパラメータの他、植生状態、積雪・凍土の有無など、さらに雲量など季節変化の関数でもある状態量により、大気・陸面間のエネルギーと水の流れ(フラックス)は、規定される。大気・海洋間のエネルギー・水交換過程に非常に重要とされる海面水温(SST)も、同じ太陽エ



第2図 鹿児島、バンコクおよびボンベイにおける平均的な半月降水量の季節変化。15年間(1979-1993)の半月平均値にさらに3項移動平均を施してある。

ネルギーの強制下でも、風の強さや雲量で、大きく異なっており、ひいては大気への熱的影響も変わってくる。季節推移の中で時々刻々変わる太陽エネルギーの強制下で、大気と陸面、大気と海洋間のエネルギー交換過程、水循環過程はそれぞれの場所で異なるかたちで現れる。したがって陸面・海洋間の大気温度差と、それにとまう風系と水蒸気の流れや収束も、

時々刻々、複雑に変化していく。その結果、対流活動、降水活動も時間・空間的に複雑に変化し、第2図に示したようなモンスーンの現われ方の違いが生じる。これらの変化には、対流活動、降水活動が、また大規模な大気場の変化にフィードバックされるという過程も、もちろん含まれる。モンスーンの季節変化の中に見られる対流活動や風系の突然の変化 (Murakami and Matsumoto, 1994; Ueda *et al.*, 1995; Ueda and Yasunari, 1996; Matsumoto, 1997など) や、梅雨前線のようにある時期のみに現れる現象も、これらの過程の一環である。アジアモンスーンの複雑な動態は、このように、季節変化する太陽エネルギーの強制下で、非線形の陸面・大気・海洋相互作用系が示す非平衡、非定常な振る舞い、あるいは「散逸構造」(ニコリス, 1993など) として理解する必要がある。

#### 4. 大気・地表面間のエネルギー・水循環変化過程の強化観測

GAMEの4つの地域(タイ・チャオプラヤ川流域、中国淮河流域、同チベット高原域、シベリア・レナ河流域)におけるプロセス研究では、この相互作用系の中でも、特に鍵となり、しかし未解明な部分の多い大気・陸面相互作用に焦点を当て、様々な大気・陸面系における地表面・大気間のエネルギー・水循環過程を季節変化のなかで理解し、さらにモデリングにむすびつけることを目標としている。流域にこだわるのは、大気・陸面過程のエネルギー・水循環のモデリングを行った時、その陸面過程モデルの検証が、大気側の水収支と閉じた流域での流出量から可能になるためである。チベット高原においても、高原中部で、怒江(サルウィン河)の源流域で、100 km×100 kmスケールの閉じた流域を、集中的なプロセス研究領域としている。

これらの地域でのプロセス研究での具体的な共通のターゲットは、ひと言でいえば、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。これに関連して、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、モデリングに資することも重要な課題である。大陸スケールの水循環の評価には、4次元データ同化による大気客観解析データを用いた大気水収支法をよく用いるが、既存のデータは、ここで考えているような流域・地域スケールの水循環変動の評価にはまだ十分な精度を持ち合わせていない (Oki *et al.*, 1995)。

ちょうど数年前に中部熱帯太平洋上の大気・海洋系で行われた TOGA-COARE は、海面水温-地表面熱・水収支-大気境界層・対流活動のプロセス研究を行ったが、大陸上の大気・陸面系では、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並行して比較観測が必要な理由はそこにある。1998年の強化観測期間 (IOP) では、それぞれの地域で何を目的として、どのような観測を行う計画であるかを、簡単に述べたい。

##### 4.1 タイ・チャオプラヤ川流域 (GAME-Tropics) あるいは GAME-T)

第2図に示すように、東南アジア大陸部の中心であるこの地域のモンスーンの開始は、アジアモンスーン地域の中で、最も早く、4月末から5月頃である。降雨には、2つのピークがあり、最初は5~6月、2回目の最大のピークは8~9月で、7月頃には、降雨の弱まった時期が存在する。他の地域と比べて非常に早いモンスーンの開始は、3~4月頃のインドシナ半島の非常に乾いた陸面での大気加熱がインド洋からの湿った赤道西風を最初に誘い込むからと推測される (Tian and Yasunari, 1997)。8~9月の雨季のピークは、活発化した西部熱帯太平洋での対流活動と密接な関係があると考えられるが、そのメカニズムは不明な点が多い。水田などを多く含む湿った地表面と大気間の水の再循環もこの時期の対流・降水活動には重要な役割を果たしている可能性もある。この地域は、湿潤熱帯における陸面・境界層・対流活動の相互作用を、例えば海洋の影響のより少ない南米のアマゾン河流域と対比しつつ理解すべき格好の舞台である。特に両地域は、現在熱帯林の破壊によるローカルな気候変化が問題にされている。アマゾン地域の場合、熱帯林の破壊により、植被面の保水能力が低下し、蒸発散減少と流出増大、水の再循環の弱化などで、結果的に乾燥化する可能性が指摘されている (Nobre *et al.*, 1991など)。まわりを海で囲まれた東南アジアの場合、植生変化の気候・水循環への影響は、アルベード、地表面粗度などの変化に加え、広範な水田の存在などが、海陸間のモンスーン循環、局地循環の変化にどう現れる(現れている)かで、大きく異なると推測される。例えば、森林被覆の破壊が、蒸発散量を極端に抑え、顕熱が増大すれば、海陸間の大気・水循環はむしろ強化され、海からの水蒸気収束量が強化され、内陸部での蒸発量

減少を補償する方向に働くということも考えられ、複雑である (Pielke *et al.*, 1996; Lean and Rowntree, 1997). その意味から、GAME-T は、後述する SCSMEX やアマゾンの LBA と連携した研究が今後重要となろう。GAME-T の強化観測では、現在卓越するいくつかの植生、表面状態での熱・水収支の違いと、半島スケールでのエネルギー・水循環が、季節変化する地表面状態 (土壌水分など) にどう影響されるかを解明することを目指している。

#### 4.2 中国淮河流域 (GAME-HUBEX)

東アジアの夏のモンスーンは、中国の Meiyu (梅雨)、日本の梅雨、韓国の Changma に代表される停滞前線による雨である。梅雨前線は、大循環的には、南西モンスーン気流とチベットの北側を回ってきた偏西風ジェット気流 (とそれに伴う寒帯気団) の境界に形成される温度、湿度の不連続線である。しかし、その構造と前線に伴う擾乱の性質は、中国大陸上と海洋を中心とする日本付近では、大きく異なることが知られている (Ding, 1992; Kato, 1985, 1987, 1989; Ninomiya and Muraki, 1986; Ninomiya and Akiyama, 1992 など)。大陸上の梅雨 (Meiyu) 前線は、南北の温度傾度よりもむしろ、湿度 (水蒸気量) 傾度が、その降水擾乱形成、維持の機構に重要であることも指摘されている。前線上にはメソスケールからシノプティックスケール (総観規模) まで、さまざまなスケールの雲クラスターが、同時に、あるいは相互作用しながら組織化されている。日本付近では前線付近での弱い傾圧性を前提とした中間規模じょう乱 (Yoshizumi, 1977 など) が形成され、しばしば各地に集中豪雨をもたらすが、大陸上の前線は傾圧性は弱く、組織化の機構もかなり異なると考えられる。陸地表面での加熱分布と蒸発・降水の水循環自身が、降水擾乱の組織化に重要な役割を果たしている可能性もある。この前線帯の一部である淮河流域は、高層観測、地上気象・水文観測データ網が中国でも最も密な地域であり、Meiyu に伴う陸面・大気間のエネルギー・水循環と降水擾乱の形成・維持機構の研究に最もふさわしい地域であり、HUaihe-river Basin EXperiment (HUBEX) として、3次元ドップラーレーダのトライアングル配置による雲・降水擾乱の構造や地上熱・水収支を中心とする強化観測が行われることになった。

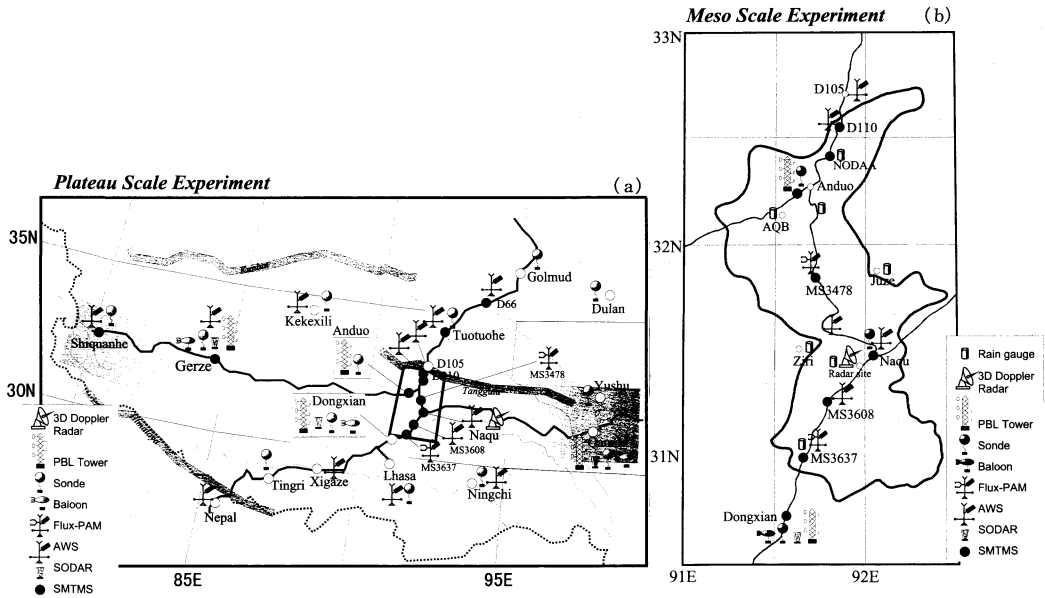
#### 4.3 チベット高原 (GAME-Tibet)

夏季アジアモンスーンに果たすチベット高原の役割、特に大気加熱に果たす役割については、1979年の

MONEX や QXPMEEX のデータを用いて、すでにいくつかの研究がなされている (叶・高, 1979; Nitta, 1983; Luo and Yanai, 1984; Yanai *et al.*, 1992 など)。これらの研究は、モンスーンの季節進行に伴い、プレモンスーンからモンスーン開始期には西部を中心とする顕熱加熱が、モンスーン最盛期には、東部を中心とする対流活動を通じた潜熱加熱が大気加熱に重要であることを示した。一方で、最近の名古屋大学、長岡技術科学大学、筑波大学などによる高原中部での観測的研究と、高原での積雪、永久凍土、土壌水分などの陸面状態の季節変化と地表面熱収支、大気境界層の季節変化が密接に関連していることが明らかになってきた (Koike *et al.*, 1994, 1997; Endo *et al.*, 1994)。陸面状態の年々の変動と、高原上での大気加熱の年々変動とは、当然、密接に関連していると考えられる。さらに、高原上でのプレモンスーン季の活発な雲活動や日中の極めて高い地表面表皮温度 (surface skin temperature)、夜間の接地境界層における湿潤層の形成など、最近の観測で明らかにされた高原上特有の現象が、対流圏全体の加熱と地表面・境界層過程を結合する上で、重要な役割を果たしている可能性が指摘されている (Smith and Shi, 1992, 1995; Li and Yanai, 1996)。また、平均高度で、5千メートルを越え、南縁に高いヒマラヤ山脈が存在する高原で、モンスーン最盛期の大気加熱を担う対流活動は、どのように維持されているのか、そのための水蒸気輸送、水循環はどうなっているのかは、まだ明らかではない。GAME-Tibet では、中国で同時に行われる高原気象観測計画 TIPEX と連携して、第3図に示すように、高原全体での高層ゾンデと自動気象観測システムによる強化観測、西部、中部でのタワーやエアロゾンデ、係留気球などによる境界層観測と、中部でのドップラーレーダによる雲・降水系の観測をプレモンスーン季からモンスーン季にかけて行うことにより、これらの未解明な問題に取り組む。1997年夏季に高原中部の那曲で行われた NASDA (宇宙開発事業団) のドップラーレーダによる予備観測では、高度17 km に達する積乱雲や数十キロスケールで組織化された雲クラスターをはっきり捉えることができた。

#### 4.4 シベリア・レナ河流域 (GAME-Siberia)

ユーラシア大陸の北半分をほぼ占めるシベリアはタイガ (Taiga) と呼ばれる針葉樹林帯とツンドラ (Tundra) とよばれる極域の貧植生ステップで代表される。これらの地域は、いずれも永久凍土層の卓越する地域



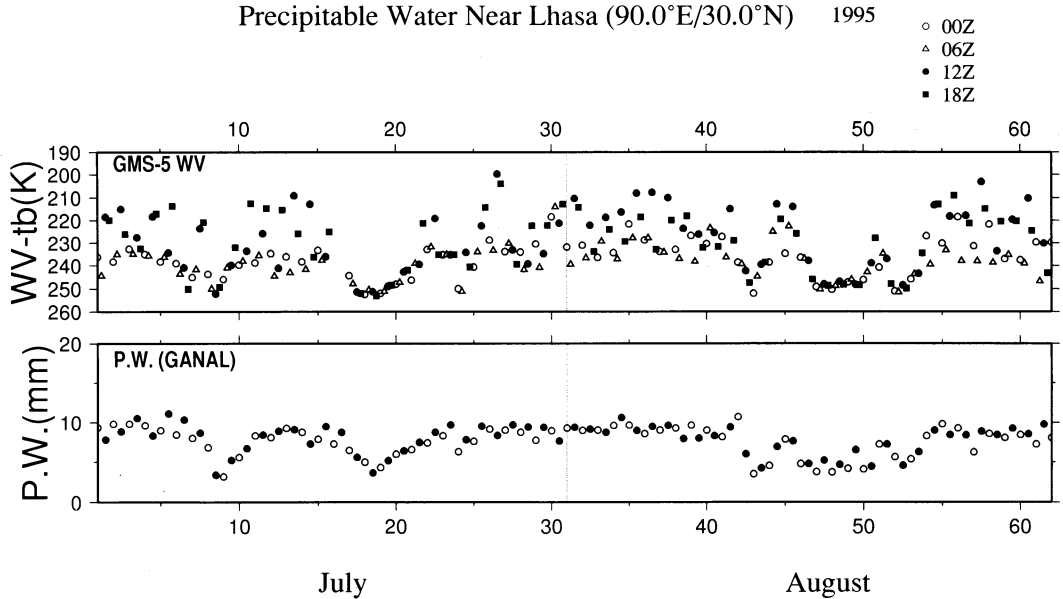
第3図 GAME チベット+TIPEX における高原スケール (a) とメソスケール (b) の観測システムの分布。(a)において、ラサ (Lhasa) 北方のナチュ (Naqu)、アムド (Amduo) を中心とする黒枠で囲まれた高原中部の領域が(b)に対応する。観測システムの和文名称は以下の通り。3D Doppler Radar: 3次元ドップラーレーダ、PBL Tower: 境界層観測タワー、Sonde: 高層ゾンデ、Baloon: 係留気球、Flux-PAM: フラックス測定装置付 PAM (Portable Atmospheric Meso-net) 自動気象観測システム、AWS: 自動気象観測システム、SODAR: 気象用音波レーダ(ソダ)、SMTMS: 土壌水分・地温自動測定システム。

ともほぼ一致する。一見アジアモンスーンとは関係なさそうな地域だが、実は、季節を通したこの地域の大陸スケールでの大気・陸面相互作用を通して、アジアの夏・冬のモンスーンの成立に密接に関連したユーラシア大陸での気団形成に非常に重要な役割を果たしている地域である。

春先から夏にかけて、この地域の気・陸面系は、非常にドラマティックな変化をする。5月から6月の短期間のあいだに、融雪と永久凍土の表面融解が同時に起こり、河川の流出が突然この時期に増える。冬眠状態だった植生も、有効に利用できる土壌水分の増加により、急に光合成活動が活発になることが、衛星からの植生インデックスでもはっきりと確認できる。しかしながら、このような地表面状態・植生活動の変化が、夏へ向かって顕著になる大気加熱や、それに伴う気団の形成にどのように影響し、あるいは相互作用しているかは、観測データの欠如により、まだ明らかではない。北米カナダの BOREAS の報告によると、夏の初めのタイガはまだ光合成が抑えられており、そのため、蒸散より顕熱輸送が卓越し、タイガの存在が、したがって大気加熱の季節変化を促進するという

(Sellers *et al.*, 1995; Betts *et al.*, 1996)。このような植生の効果を入れたモデルによると、タイガの存在のために、季節的なジェット気流の北への後退がより促進されているという (Pielke and Vidale, 1997)。しかし一方、シベリアでは蒸発散が非常に活発であるという報告 (Pavlov, 1984) もある。GAME-Siberia の一環として、1997年夏季にヤクーツク近郊のタイガで、30 m の境界層タワーによる観測が開始された。ここでの森林カノピー上での予備的な熱収支観測の結果では、夏のはじめ、融雪・凍土融解と同時に蒸発散が非常に大きくなり、夏の後半になって顕熱の割合が大きくなることが報告された (Hiyama *et al.*, 1998; Ohta *et al.*, 1998)。

最近、Kodera and Koide (1997) は、シベリアの春の積雪量変化が、夏から秋の大気循環を通して、次の冬の高緯度大気循環に影響し、さらに次の春の循環(と積雪)変化にフィードバックされる過程を示唆している。いずれにせよ、寒冷圏における積雪・凍土・土壌水分は、熱帯における海面水温と同様の気候メモリーとしての役割が大きいことが指摘されている (Delworth and Manabe, 1988)。実際には、これに植



第4図 チベット高原ラサ (Lhasa) 付近の、モンスーン季 (1995年7月-8月) における GMS-5 水蒸気チャンネルによる400 hPa 面での水蒸気量 (上) と気象庁客観解析値 (GANAL) による対流圏全体の水蒸気量 (下) の日変化と日々変動 (谷田貝・安成, 1997). 図中の○, △, ●, ■はそれぞれ00Z, 06Z, 12Z, 18Z (各々現地時間6時, 12時, 18時, 0時) の値を示す.

生活動が加わって、気候システムのフィードバック系を構成していると考えられる。GAME-Siberia では、タイガとツンドラの大気・地表面間のエネルギー・水循環過程を季節を通して観測することにより、これらの問題の解明をめざしている。

#### 5. エネルギー・水循環過程の理解には日変化成分の観測が重要である

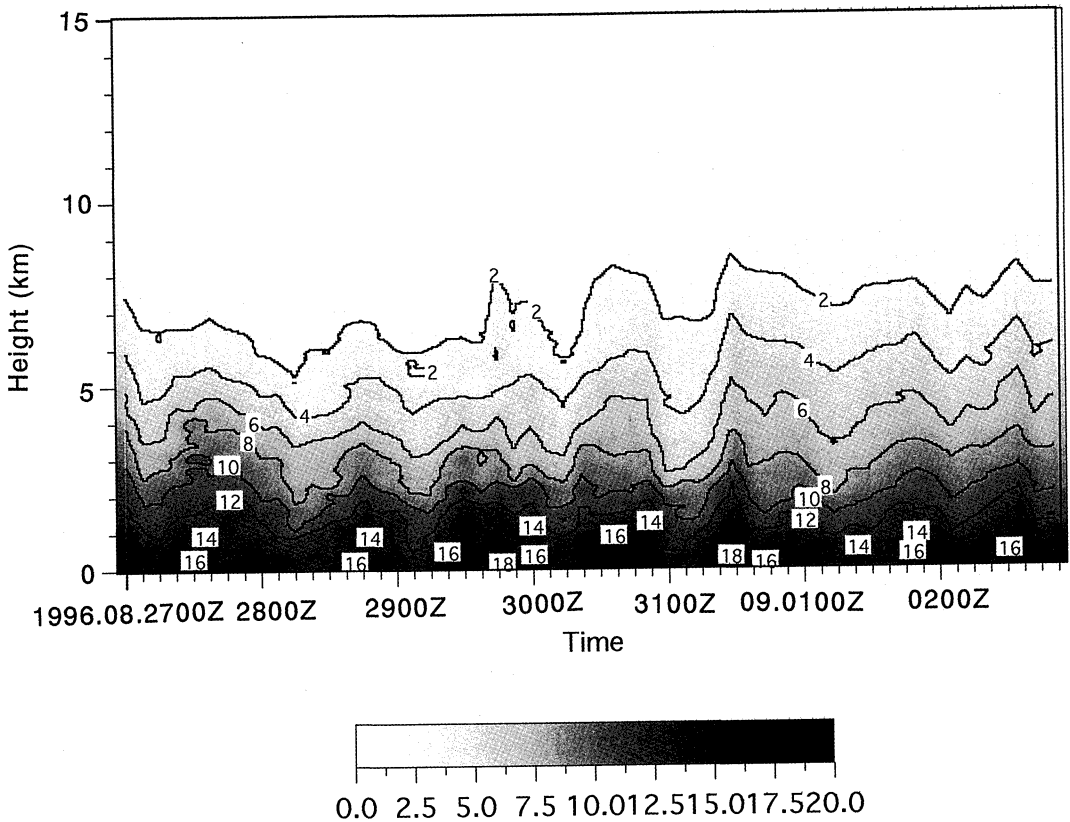
上記に述べたような、季節変化過程 (とその変動) における大気・陸面相互作用とエネルギー・水循環を理解する上で、日変化を含む実態の解明は非常に重要である。例えば、サハラ砂漠では、太陽が真上に来る夏でも、砂漠上では放射収支は負となり、大気はむしろ冷却されている。これは、水蒸気が極端に少ないために、夜間の放射冷却によって、昼間の加熱分は帳消しとなり、さらに冷えてしまうためである。もし、水蒸気がある程度入れれば、放射収支は簡単にプラスになることは容易に推測できる。チベット高原でも、4.3で述べたように、非常に顕著な日変化が地表面、境界層にあり、湿潤な大気層や雲形成が夜間にあるかないかで、対流活動や大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。

たとえば第4図は、ラサ付近における気象庁客観解

析値 (GANAL) による対流圏全体の水蒸気量 (下図) と静止気象衛星 GMS-5 水蒸気チャンネルによる400 hPa 面での輝度温度 (上図) を、日変化成分も含めて較べた図である。この輝度温度 (K) はこの高度における水蒸気量の指標であり温度が低い (高い) ほど、この高度における水蒸気量が多い (少ない) ことを示す。したがって、必ずしも対流圏全体の水蒸気量に対応するものではないが、実質的に対流圏中・上層のみのチベット高原上では、この高度の水蒸気量が、対流圏気層全体の水蒸気量によく比例することが、ラサの高層データとの比較で確認されている (谷田貝・安成, 1997)。GANAL は1日2回、GMS は1日4回のデータにもとづいた1995年7月～8月の時系列が示されている。

いずれの時系列も10～20日周期程度の変動はほぼ同じような傾向で見られる。しかし、日変化成分は、GMS では特に輝度温度が全般に低い時期すなわち対流活動が活発な時期に、温度差30 K-40 K に達する非常に大きな日変化が現れている (特にローカル時刻で午前6時-12時に当たる白抜き○, △と、午後6時-0時に当たる黒●, ■の差に注目) のに対し、GANAL ではほとんど現れていない。このことは、現在の客観解析値が、対流活動に伴う水蒸気量の日変化を正しく評価で

## Time-Height Distribution of Mixing Ratio (g/kg)



第5図 GAME-Tの1日8回の高層ゾンデ予備観測(1996年8月末から9月初め)によるタイ中部上空での水蒸気量(混合比)鉛直分布の変動。横軸は時間軸、目盛は3時間毎、また、2800Zは8月28日00Z(現地時間で午前7時頃)を表す。明瞭な日変化が見られる(Watanabe *et al.*, 1997)。

きていないことを示している。

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、GMS衛星データの解析などから、すでによく理解されている(Murakami, 1983; Nitta and Sekine, 1994など)。GAME-IOPでは、静止衛星としては、GMS-5の他に、インドの静止衛星INSATと1997年6月に東経110度上に打ち上げられた中国の静止気象衛星FY-IIが重要な役割を果たすはずであったが、FY-IIは非常に残念なことに、今年4月中旬に突然機能が停止した。さらに重要な衛星は、1997年11月に打ち上げられたTRMM(熱帯降雨観測衛星)である。降水レーダを搭載したこの衛星は、鉛直構造も含めた熱帯全域での対流・降水活動の貴重な情報をすでにもたらしつつある。1998年夏をIOPとして選んだ理由のひとつは、このTRMM衛星データのフル利用である。

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はずである。第5図は、GAME-Tの1日8回の高層ゾンデ予備観測で明らかになったタイ上空での水蒸気量の明瞭な日変化(Watanabe *et al.*, 1997)である。極大はローカル時間の21時頃に、極小は午前中に現れる傾向が強く現れている。これはおそらく、インドシナ半島における大規模海陸風系によって、海洋から内陸に流入するモンスーン気流系の強弱に日変化があることと密接に関係していると推測される。興味深いのは、1日周期の上に、半日(あるいはそれ以下の)周期の変動も認められることである(例えば8月29~31日の期間)。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大気水収支法による水蒸気収支では、大きく日変化する水蒸気(収束)量が、正しく評価されないことになる

う。高層ゾンデ強化観測の必要な所以である。

シベリアのような高緯度地域でも、広大なタイガ(針葉樹)による光合成活動に伴う蒸発散, およびそれに関連した顕熱には, 明瞭な日変化があり, 1日1, 2回の高層ゾンデ観測では, 広域での正確な水蒸気収支が得られないことも考えられる。ちなみに, 気象庁の最近の調査によると, 旧ソ連の広大な地域では, 1日2回の高層観測を実行している地点が, 過去1年間で, 半分弱になってしまっており, 日本付近の短期数値予報にも, すでに影響が出ているとのことである(野村, 1997)。

以上のように, 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, より精確に観測する必要のあることが理解されよう。

## 6. 南シナ海モンスーン観測計画(SCSMEX)との連携

GAME-IOPは, 南シナ海から中国南部のモンスーンをターゲットにした南シナ海モンスーン観測計画(South China Sea Monsoon EXperiment; SCSMEX)と連携して行うことが, 7節で述べるGAME国際科学パネルの第1回会合で合意された。SCSMEXは, 世界気象機関大気科学委員会(WMO/CAS)の東アジアモンスーン(M1)研究グループ, WCRP/CLIVARモンスーンプログラム及び太平洋科学会議協会(PSA)三者の合同の国際共同プロジェクトである。実際には, 中国気象局がイニシアティブを取り, 米国NASA, 台湾, オーストラリア気象局(BMRC)などの研究者が協力して進めている。PSAという団体が入っているのは, 国連の下部機関であるWMOや関連プログラムであるWCRPには, 台湾の研究者が参加できないという政治的な事情によるものである。SCSMEXの中国の代表は国家気候センター長のDing Yihui教授, 米国の代表はNASAのK. M. Lau博士である。

南シナ海のモンスーン開始は, 平年的には5月中旬から後半頃に突如始まる。そして, 東アジアの梅雨季へと続くため, 中国の雨季の予報にとっては, この海域でのモンスーン開始が毎年いつ, どのような状態でスタートするかは, 非常に大事である(Lau and Yang, 1997)。この時期は, ちょうど東南アジアのモンスーンが, 最初にピークになる時期でもあり, GAME-TとSCSMEXの連携はゾンデ観測ネットワークからみて

も, 必然的なものである。また, この南シナ海でのモンスーン開始は, チベット高原上での大気加熱が急速に進む時期とほぼ期を一にしている。高原上での急激な昇温によってチベット高気圧の急速な北上・発達と, この地域の風系の変化が引き起こされている可能性も指摘されている(Ueda and Yasunari, 1997)。このような科学的背景により, SCSMEX-IOPは, GAME-Tのみならず, GAMEチベットやGAME-HUBEXを含めたGAME全体のIOPと連携して実行することが, 双方の推進グループで合意された。

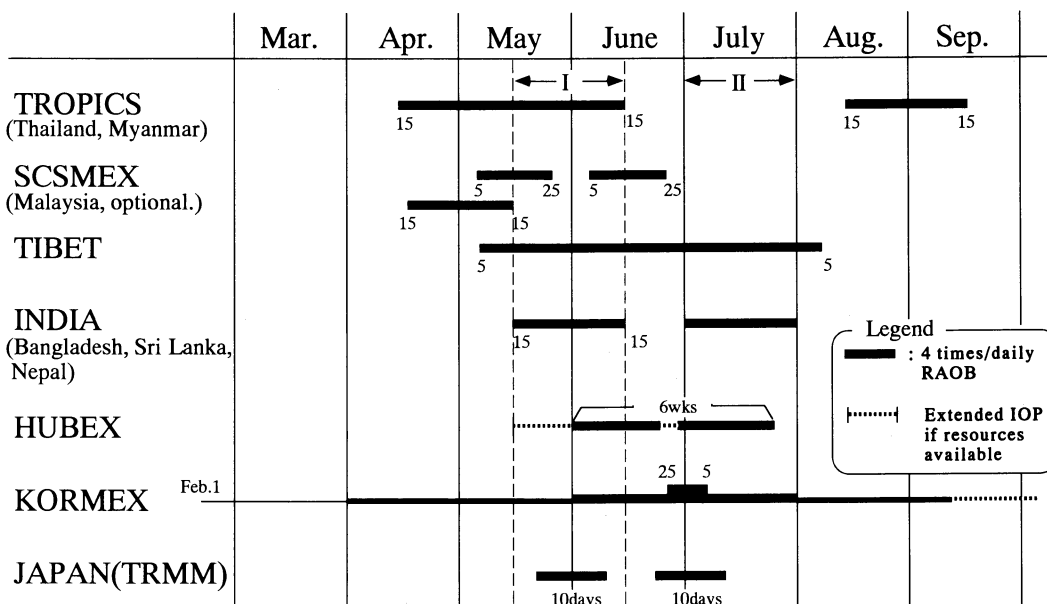
## 7. モンスーンアジア地域における高層ゾンデの強化観測

GEWEX傘下の国際プロジェクトであるGAMEは, 一昨年3月に国際科学パネル(ISP)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9か国(日本, 中国, 韓国, ロシア, タイ, マレーシア, シンガポール, 香港, インド)の気象・水文関係者とミシシッピ河流域での大規模プロジェクトであるGCIPからの代表も兼ねて, 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。第2回科学パネル会議が, 今年3月末, 韓国済州島で開催された。この会議での主な議題は, 1998年におけるGAME-IOP期間中における高層ゾンデ強化観測計画の検討とGAMEで取得されたデータの交換, 公開に関する合意であった。この会議には, 上記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。さらに本年1月初め, 気象庁で第3回科学パネル会議が開かれ, GAME-IOPの計画とデータ交換に関する原則が最終的に合意された。

これら2回の会議では, 4節, 5節で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気温, 湿度の季節変化と日変化を詳しく解像し, 4次元同化に提供できるデータを取得するために, 各国各地域(プロジェクト)で, 1日4回の高層強化観測を, 南アジア, 東アジア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, ほぼ全域でモンスーンが最盛期になる7月の1か月間, 狭義のIOPとして, 実行することが合意された。このIOPには, 第6図と第1表に示すように, GAMEの4つの地域プロジェクト, インドと南アジア3か国, ビルマ, SCSMEX領域(南シナ海, 中国南部, ベトナム, マレーシア, シンガポール, フィ



GAME-IOP (year 1998)



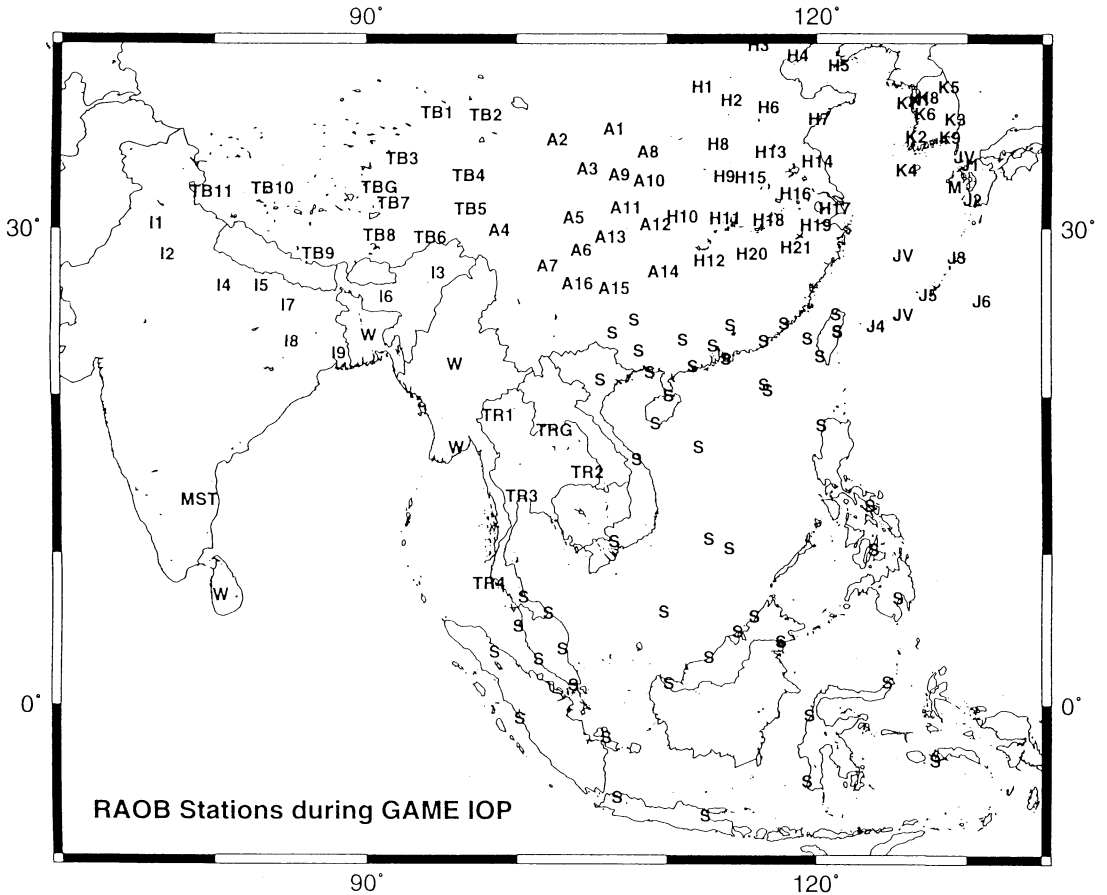
第6図 GAMEの各地域とSCSMEXによる強化観測 (IOP) が行われる期間. 矢印で示される2期間が、(I)モンスーン開始期(onset phase)と、(II)モンスーン最盛期(mature phase)に対応したIOP期間である.

第1表 GAMEの4つの地域プロジェクト、SCSMEX、中国 TIPEX、インド、南アジア3カ国、ビルマ、韓国 (KORMEX) および日本でのIOP参加の高層観測地点数.

Project/country	number	country (agency) involved
GAME-HUBEX	21	China (CMA)/Japan
TIPEX/JEXAM/GAME-TIBET	11+1	China (CMA)/Japan
Region-A between H-T	16	China (CMA)/Japan
GAME-Tropics	4+1	Thailand (TMD)/Japan
SCSMEX	46	China/Taiwan/Philippines/ Malaysia/Indonesia/Singapore/ Thailand/USA
KORMEX	9	Korea (KMA)
Japan	6+4	Japan (JMA/MRI)
India	9+1	INDIA (IMD, NIO)
Bangladesh	1	Bangladesh (BMD)/?
Nepal	1	Nepal (DHM)/?
Myanmar	1	Myanmar (MMD)/?
Total	123+7 (ad-hoc)	= 130

リピン、インドネシアの一部)の32地点が含まれる。さらにインドでは、ベンガル湾上でのインド国立海洋研究所(NIO)の観測船による高層観測と、南インドバンガロール近郊の国立MSTレーダ研究所(NMRF)によるウィンドプロファイラーによる連続

観測などが、このIOPに参加する予定となっている。また、中国気象局は、HUBEXとGAME-Tibet/TIPEXによる観測領域の狭間に広がる地域16地点での観測も行うことに合意した。韓国はKORMEX(KOREan Monsoon EXperiment)の一環で、4~8



第7図 GAME/SCSMEX 合同強化(高層)観測が行われる地点分布. 数字を含むそれぞれの記号は, 下記に示すように, 強化観測に参加するそれぞれのプロジェクトまたは国を表す. K: KORMEX, J: 日本(気象庁), JV: 日本(TRMM 検証実験+梅雨観測プロジェクト), H: GAME-HUBEX, S: SCSMEX, A: JEXAM による観測支援地域, TB: GAME-Tibet/TIPEX/JEXAM 共同観測, TR: GAME-Tropics, W: WMO-VCP 支援による観測, I: インド気象局(IMD), MST: NMRF によるウインドプロファイラー観測.

月の5か月間, 最大で8地点の高層観測点で1日4回の観測を行うことを表明した. 日本では, 気象研究所のメソ気象研究プロジェクトと TRMM 衛星検証の一環で, 九州・南西諸島および東シナ海上で, ゾンデ強化観測を, 上記2期間の一部で行うことを決定した. 上記の2期間で一斉に強化観測が行われる地点は, 第7図のようになる. GAME-Tropics では, 東南アジア地域の早いモンスーンの開始と8~9月の降雨のピーク時にも, 強化観測を広げる予定をしている. これらの強化観測は, 各国(気象局)が独自の努力で行うのに加え, 日本側(文部省, 科技厅 JEXAM, NASDA, 地球フロンティア研究システム)および WMO からの資金・物品の援助により行われる.

## 8. データの公開と客観解析について

GAME も SCSMEX も, 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. IOP で取得された高層観測データについては, 一部は GTS 回線を用いたりリアルタイムでの利用が可能となる予定であるが, データ転送上の技術的な問題もあり, 1年後をめどにデータを提供, アーカイブすることが合意された. ただし, 中国国内のプロジェクトである TIPEX で行われるチベット高原での特別観測データの国際的な公開については, 国内での法的規制があるという理由で中国の代表者が反対し, 会議では合意が得られなかった. しかし, 幸い7月末,

GAME チベットと TIPEX の間でデータ交換についての合意が得られ、このデータも含めた国際的な公開が可能となった。

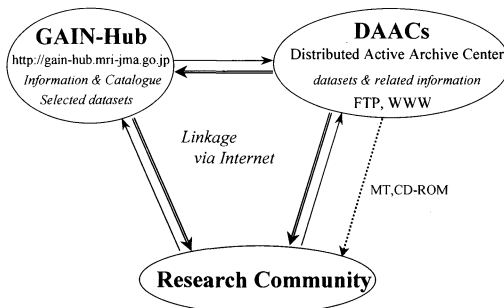
気象庁は、1999年以降に、この GAME/SCSMEX-IOP データを用いた 4 次元同化を再解析として行う予定であり、1979年の FGGE/MONEX 以降で、最も高精度の客観解析データがモンスーン研究に提供されることになる。この客観解析は、TRMM 衛星からのデータを取り込んだ解析と、取り込まない解析のふたつの version が出る予定である。

4 節で紹介した地域ごとの特別観測データや、ここでは紹介しなかった 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 年をめどに quick look 的なデータがまず公開される予定である。さらに 2 年目 (以降) には、整備と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できることになる。GAME での膨大なデータは、第 8 図に示すように、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 ヘ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。

## 9. GAME への招待

GAME は、WCRP の下で、日本がイニシアティブを取り、関連する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。国際事務局は名古屋大学大気圏科学研究所観測プロジェクトセンターに置かれ、中村健治教授(事務局長)、玉川一郎助手の両名を中心に維持されている。近々、外国人研究員も事務局メンバーとして招聘される予定である。国内事務局(事務局長: 福嶋義宏教授)も同研究所に置かれている。国内的には、測地学審議会の建議もとづき、現在、文部省、科学技術庁、気象庁、宇宙開発事業団、地球フロンティア研究システム(宇宙開発事業団と海洋科学技術センターの合同推進プログラム)などの支援を受けて進められている。また、GAME-AAN (自動熱収支・放射収支観測ネットワーク) は、APN (Asian-Pacific Network for Global Change

## GAME Archive & Information Network (GAIN)



第 8 図 GAIN の構造を示す模式図。

Research) の支援も一部受けて進められている。

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。また、GAME に関心のある方々のオープンなインターネットのメイリングリストとして、GAME-JP が公開されており、GAME 関係のさまざまなスケジュールや、情報、意見交換など、自由にできるようになっている。このような大きな国際プロジェクトは、その計画の遂行のために核となる研究者群が必要なのは当然である。しかし同時に、常にその周辺には、非常に広い意味で GAME に関連するさまざまな問題に関心を持った出入り自由の広範な研究者、学生が、山のすそ野のように存在して、さまざまな刺激を与えたり、時には批判も行っていくことが必要である。核と周辺の交流、交換も絶えず行いながら、研究グループの持続的な活性化が重要である。私としては、GAME-JP にそのような機能、役割も期待している。加入希望の方は、メールを受けたいアドレスから [game-jp-ctl@ihas.nagoya-u.ac.jp](mailto:game-jp-ctl@ihas.nagoya-u.ac.jp) へ電子メールを送ると、自動的に登録され、案内が返送される。さらに、GAME のそれぞれの活動(各地域プロジェクトや AAN, 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) へお問い合わせいただきたい。

## 謝 辞

この解説をまとめるに当たり、遠藤伸彦、菅田真由美、高橋清利、藤井秀幸、藤波初木、谷田貝亜紀代、渡辺明の各氏には、図表の作成などご協力いただきました。また、原稿の改訂にあたっては、「天気」編集委員の中村尚氏に大変有益なコメントをいただきました。

た。ここに記して感謝の意を表します。

**主要略語一覧** (和訳は正式名称がない場合は、直訳にしてある)

BOREAS : Boreal Ecosystem-Atmosphere Study  
(北方林生態系・大気相互作用研究計画)

CLIVAR : Climate Variability and Predictability  
(気候の変動性と予測性に関する研究計画)

ENSO : El Nino and Southern Oscillation (エル・ニーニョ/南方振動)

FGGE : First GARP Global Experiment (第1回 GARP 全球実験計画)

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)

GCIP : GEWEX Continental-scale International Project (GEWEX 大陸スケール国際プロジェクト)

GCM : General Circulation Model (大循環モデル)

GEWEX : Global Energy and Water cycle Experiment (全球エネルギー・水循環研究計画)

GMS : Geostationary Meteorological Satellite (静止気象衛星「ひまわり」)

GTS : Global Telecommunication Systems (全球通信システム)

IOP : Intensive Observing Period (強化観測期間)

JEXAM : Japan-China Joint Experiment for Asian Monsoon Mechanism (日中共同によるアジアモンスーン機構解明研究プロジェクト)

LBA : Large-scale Biospheric studies in Amazonia (アマゾン大規模生物圏研究計画)

MONEX : Monsoon Experiment (モンスーン実験計画)

MST Radar : Mesosphere, Stratosphere, Troposphere Radar (中間圏, 成層圏, 対流圏レーダー)

NASA : National Aeronautics and Space Administration (米国航空宇宙局)

QXPME : Qinghai-Xizang Plateau Monsoon Experiment (青藏高原モンスーン実験計画)

SCSMEX : South China Sea Monsoon Experiment (南シナ海モンスーン実験計画)

TIPEX : Tibetan Plateau Experiment (チベット高原気象実験計画)

TOGA : Tropical Ocean and Global Atmosphere (熱帯海洋・全球大気研究計画)

TOGA-COARE : TOGA-Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (TOGA 大気海洋応答実験)

WCRP : World Climate Research Programme (世界気候変動研究計画)

WMO : World Meteorological Organization (世界気象機関)

#### 参考文献

Betts A. K., J. H. Ball, A. C. M. Beljaars, M. J. Miller and P. A. Viterbo, 1996 : The land-surface-atmosphere interaction : a review based on observational and global modeling perspectives, *J. Geophys. Res.*, **101**, 7209-7225.

Delworth, T. and S. Manabe, 1989 : The influence of soil wetness on near-surface atmospheric variability, *J. Climate*, **2**, 1447-1462.

Ding Y.-H., 1992 : Summer monsoon rainfalls in China, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 373-396.

Endo N., K. Ueno and T. Yasunari, 1994 : Seasonal change of the troposphere in the early summer of 1993 over central Tibet in the Tanggula mountains, *Bull. Glacier Res.*, **12**, 25-30.

Hiyama, T., T. Ohta and K. Suzuki, 1998 : Diurnal variations of the surface energy fluxes and its impact for the atmospheric boundary layer over the eastern Siberian taiga region, *Res. Rep. IHAS*, (4), (in press).

Kato, K., 1985 : On the abrupt change in the structure of the Baiu front over the China Continent in late May of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 20-36.

Kato, K., 1987 : Airmass transformation over the semi-arid region around North China and abrupt change in the structure of the Baiu front in early summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 737-750.

Kato, K., 1989 : Seasonal transition of the lower-level circulation systems around the Baiu front in China in 1979 and its relation to the northern summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 249-265.

Kodera K. and H. Koide, 1997 : Spatial and seasonal characteristics of recent decadal trends in the northern hemisphere troposphere and stratosphere, *J. Geophys. Res.* (in press)

Koike, T., K. Seko, X. Chen, T. Tadono, K. Tamagawa, H. Igarashi and H. Takizawa, 1994 : Monitor-

- ing ground surface condition on Tibetan plateau by using satellite remote sensing, *Bull. Glacier Res.*, **12**, 95-104.
- Lau, K. M. and S. Yang, 1997 : Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 14-162.
- Lean, J. and P. R. Rowntree, 1993 : A GCM simulation of the impact of Amazonian deforestation on climate using an improved canopy representation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 509-530.
- Li, C. and M. Yanai, 1996 : The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-surface thermal contrast, *J. Climate*, **9**, 358-375.
- Luo H.-B. and M. Yanai, 1984 : The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II : Heat and moisture budgets, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 966-989.
- Matsumoto J., 1992 : The seasonal changes in Asian and Australian monsoon regions, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 257-273.
- Matsumoto, J., 1997 : Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 231-245.
- Murakami, M., 1983 : Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and Southeast Asia. Part I : Diurnal variation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 60-77.
- Murakami T. and J. Matsumoto, 1994 : Summer Monsoon over the Asian Continent and Western North Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, 719-745.
- ニコリス・ブリゴジン, 1993 : 複雑性の探求, みすず書房, 338pp.
- Ninomiya, K. and H. Muraki, 1986 : Large-scale circulations over East Asia during Baiu period of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 409-429.
- Ninomiya, K. and T. Akiyama, 1992 : Multi scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 467-495.
- Nitta, T., 1983 : Observational study of heat sources over the eastern Tibetan Plateau during the summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 373-390.
- Nitta, T. and S. Sekine, 1994 : Diurnal variation of convective activity over the tropical western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 627-641.
- Nobre, C. A., P. J. Sellers and J. Shukla, 1991 : Amazonian deforestation and regional climate change, *J. Climate*, **4**, 957-988.
- 野村 厚, 1997 : 旧ソ連諸国のラジオゾンデ観測数の減少の実態とそれが数値予報に与える影響. 気象庁平成9年度数値予報研修テキスト, 55-58.
- Oki, T., K. Musiake, H. Matsuyama and K. Masuda, 1995 : Global atmospheric water balance and runoff from large river basins, *Hydrol. Processes*, **9**, 655-678.
- Ohta, T., Hiyama, T., Kubota, J. and Suzuki, K., 1998 : Seasonal variations of the hydro-meteorological variables from the preliminary observation at a larch forest near Yakutsk city, *Res. Rep. IHAS*, (4), (in press).
- Pavlov, E. V., 1984 : Energy budget on earth land surface, Nuka, Nobosibirsk (in Russian), 256pp.
- Pielke R. A. and P. L. Vidale, 1997 : The boreal forest and the polar front. *J. Geophys. Res.*, (in press).
- Sellers P. J., F. Hall, H. Margolis, B. Kelly, D. Baldocchi, G. den Hartog, J. Cihlar, M. G. Ryan, B. Goodison, P. Crill, K. Jon Ranson, D. Lettenmaier and D.E. Wickland, 1995 : The Boreas Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS) : An overview and early results from the 1994 field year, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**, 1549-1577.
- Smith E. A. and L. Shi, 1992 : Surface forcing of the infrared cooling profile over the Tibetan Plateau. Part I : Influence of relative longwave radiative heating at high altitude, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 805-822.
- Tian S. F. and T. Yasunari, 1997 : Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 585-596.
- Ueda, H., R. Kawamura and T. Yasunari, 1995 : Abrupt seasonal changes of large-scale convective activity over the Western Pacific in the Northern summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 795-809.
- Ueda H. and T. Yasunari, 1996 : Maturing process of the summer monsoon over the Western North Pacific---A coupled ocean/atmosphere system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 493-508.
- Ueda, H. and Yasunari, 1998 : Role of warming over the Tibetan Plateau in early onset of the summer monsoon over the Bay of Bengal and the South China Sea, *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 1-12.
- Watanabe, A., Y. Tachibana, M. D. Yamanaka, J. Matsumoto, K. Furukawa, K-h. Ikeda, K. Asano, J. Hamada, K-n. Ikeda, S. Kanae, Y. Naruse, S. Ogino, C. Migail, P. Sereerat, T.T. Pogrernde, T. Saewekul, D. Bisionyabut, P. Patvisatsiri, A. Sumi and K. Mushiake, 1997 : Analysis of the diurnal

- variation of the atmospheric circulation in Thailand, The Third International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, 68-69.
- Webster, P. J. and Y. S. Yang, 1992 : Monsoon and ENSO : Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**, 877-926.
- Yanai, M., Li, C. and Song, Z., 1992 : Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 319-351.
- 安成哲三, 1994 : アジアモンスーンエネルギー・水循環観測計画, *天気*, **41**, 15-20.
- 安成哲三, 岩崎俊樹, 小池俊雄, 鈴木雅一, 早坂忠裕, 福嶋義弘, 1996 : アジアにおける GEWEX と GAME (GEWEX アジアモンスーンエネルギー・水循環観測研究計画) に関する第 2 回国際研究集会報告, *天気*, **43**, 49-55.
- Yasunari, T., 1990 : Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean systems in the tropical Pacific., *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 29-41.
- Yasunari, T., 1991 : The monsoon year—A new concept of the climatic year in the tropics., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 1331-1138.
- 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.
- Yatagai, A. and T. Yasunari, 1997 : Variation of summer water vapor transport over and around the arid region in the interior of the Eurasian continent, (submitted to *J. Meteor. Soc. Japan*).
- 谷田貝亜紀代, 安成哲三, 1997 : GMS-5 水蒸気チャネルを用いたチベット高原上の水蒸気変動, 水蒸気輸送過程の研究 (序報), 1996年度 GAME 国内研究集会発表要旨集, 53-55.
- Yoshizumi, S., 1977 : On the structure of intermediate-scale disturbances on the Baiu front, *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 17-120.
- 叶 篤正, 高 由嬉, 1979 : 青藏高原気象学, 科学出版社 (北京), 278pp..

---

## Toward the Implementation of the GAME-IOP 1998 —How is Asian Monsoon Forced by Seasonal Change of Insolation?—

Tetsuzo Yasunari\*

\* *Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8571, Japan*

(Received 23 March 1998 ; Accepted 26 May 1998)

---