

### 3. 領域内の研究の進展状況とこれまでの主な研究成果)

#### A) 総括的な研究成果

熱帯東南アジアからシベリア寒冷圏に至る各地域で長期観測された放射・熱・水収支観測から、地表面でのエネルギー・水循環の日変化から季節変化における興味ある過程が明らかになった。特に、熱帯林や亜寒帯林(タイガ)やモンゴル草原などでは、土壌水分や凍土過程とリンクした植生(光合成)活動が、蒸発散の季節変化を大きく支配していること、すなわち水・エネルギー循環における生物圏の役割の重要性が明らかになった。

熱帯東南アジア、中国梅雨前線帯(淮河流域)とチベット高原などでの、ドップラーレーダや衛星による雲降水システムの集中観測により、メソ降水システムの3次元構造とその時間変動の実態が明らかになった。特に東南アジアやチベットでのシステムは、高原あるいはインドシナ半島スケールでの局地大気循環の日変化が基本モードとなっていること、梅雨前線帯では、複数の大規模気流系の相対的な強弱により、降水システムの構造が大きく変化すること等が明らかになった。また、梅雨前線での降水擾乱の一部は、チベット高原上での日変化擾乱がその起源であることも解明された。

98年のアジア全域における強化観測(IOP)にもとづくGAME再解析データの解析や領域モデルによる研究から、アジアモンスーンの大気加熱には、チベット高原における顕熱と対流による潜熱が共に重要であること、土地利用や地表面状態(植生の有無、土壌水分等)が降水システムの強化や季節進行にも影響していること等が強く示唆された。

#### B) 「放射・熱収支モニタリング」班

「放射・熱収支モニタリング」班では、国際共同研究プロジェクトGAMEの1997年設置された14地点の地表面フラックスの測定が可能なAWS(Automatic Weather Station)を引き続き運用してきた。これらの観測点では、モンスーンアジア地域の南北・東西方向のトランゼクトに沿った地域において、異なる気候・地表面状態での地表面フラックスの季節変化を明らかにすることが目標である。一方、アジア・モンスーン域の放射収支の基礎資料を得るために、中国とタイに観測サイトが設けられた。これらは、衛星データからの放射収支算定の検証用のWMOの地表面放射観測ネットワーク(BSRN)の一部であり、雲とエアロゾルの放射強制力(radiative forcing)の研究、全太陽放射の6~8%程度と考えられる雲・エアロゾルの放射収支の不

確定性を明らかにすることである。

GAME-AANにおける大きな成果の第一は、80年代に概ね方法が確立された地表面フラックスの直接測定法を辺境地に応用し、長期モニタリング技術の確立したことにある。当初は、時間の制約に伴う関係者の技術的な習熟性の問題、AWSのハードウェアの問題などからいくつかの問題が発生したが、測定技術の向上、カウンターパートとの意志の疎通などの向上により、中・後期には比較的スムーズな運用が可能となった。このようにして確立された観測技術は、今後のむけての大きな資産であり、入門書を執筆して広く啓蒙に努めている。

地表面熱収支は、理論的には正味放射、地中熱流量、顕熱交換、潜熱交換の4成分で閉じるはずであるが、近年の観測精度の向上の結果、現在の観測方法では閉じない場合があることがわかった。この問題は未だに解決したとは言えないが、各サイトでの解析や個々の成分での測定上の問題などが整理された結果、熱収支各項目の観測精度の向上に結びついた。

GAME-AANのサイトの地表面代表性の確認とGAME再解析の検証を目的として、各サイトの緯度経度に対応するGAME再解析データおよびECMWF再解析データの地表面フラックスと実測値を比較した。また、既存の蒸発量推定モデルによる2度グリッドの平均年間蒸発量と、対応するAANサイトで観測された年間蒸発量を比較した。これらの比較の結果、AANサイトの地点代表性について概ねよい結果が得られている。また、長期間の熱収支データの蓄積により、アジアモンスーンと各地域の地表面過程の相互関係を明らかにすることができる。ロシア国シベリアのカラマツ、モンゴル国草原、中国の水田、中国チベット高原の永久凍土地形、中国チベット高原の草原、タイ王国の灌木林等の混合植生、タイ王国の熱帯常緑林の1998年の比較によると、植生指標のピークはシベリア、モンゴル、チベットでは夏季に年1回であるのに対し、中国の水田では年2回であること、従来観測例の全くなかった地域間での表層土壌水分の年変化の差違、そして正味放射量とその顕熱や潜熱への分配の違いが明らかになった。

ライダー観測から得られた雲底高度の統計によれば、熱帯のSri Samrongの雨季では、雲底が1.5km程度であることが多く、7,8月の雨季には90%以上の時間で雲が観測された。雲は2重構造を示すことも多かった。また、乾季には雲の出現高度は6km以上になることが多かった。

地表面太陽放射がGMSの可視・赤外放射データから見積もられ、GAME高精度サイトやSKYNETのデータと比較された。地表面放射フラックスの月平均値は観測値と非常に良くあっているが、個々の比較はエアロゾルの濃度

や拡散光強度によると考えられるわずかな違いが認められた。このことはエアロゾルの正しい見積もりが衛星データからの地表面放射の見積もりには必要であることを示している。

モデルのシミュレーションから異なるエアロゾルは地球の放射収支に異なる効果を持つことが知られている。エアロゾルの光学的性質、特に単散乱アルビードの広域分布を知ることが人工的エアロゾルによる直接的な放射強制力の正確な見積もりに重要である。タイの2月の乾季にはバイオマスの燃焼の影響が大きい。スカイラジオメータの粒径分布からは雨季に比べて大きな光学的厚さと小粒子の分布による小さな単一散乱アルビードを示す。これは化学分析から元素状炭素の割合がバイオマスの燃焼によって増大していることを示している。単散乱アルビードは乾季には0.75まで下がるが、エアロゾルの光学的厚さが薄い他の時期には0.9に達することがわかった。

### C) 「熱帯エネルギー・水循環過程」班

「熱帯エネルギー・水循環過程」研究は、主としてタイ各機関をカウンターパートに、チャオプラヤ川流域を対象として研究が進められた。

タイの代表的な三種類の土地利用(天水田、森林、灌木林地)における地表面からの水・熱フラックスの詳細な長期観測データは、中高緯度に集中する気候モデル(GCM)の陸面過程検証用のデータの中で、熱帯においてはアマゾン熱帯林に次ぐものと位置づけられる。本観測データから、アジア湿潤域に特徴的な水田の水・熱収支が通常の耕作地と大きく異なることが示され、GCMの陸面過程モデルを水田用に改良することによって、シミュレーション再現精度が向上した。一方で、森林地においては乾季の終盤に最も蒸発散が盛んになることが観測から示され、乾季に蒸発散が抑制されるという通常の予測と逆であることが発見された。

集中ゾンデ観測データの分析によって熱帯陸上における数々の大気波動・日変化の存在が確認された。また、これらゾンデ観測を取り入れたGAME再解析から、タイ上空へもたらされる水の輸送経路と起源を算定し、雨季開始前の水輸送経路、雨季開始によるその突然の変化、さらに雨季の終焉を物質循環的に示した。このことは、水の安定同位体観測によっても検証されつつある。加えて、この物質循環的視点によって、タイを中心としたインドシナモンスーン域は、南北両半球の物質交換の要となる地域であることが判明した。また、乾季の終盤、上空3km程度に非常に強い逆転層があることがゾンデ観測によって発見され、アジアモンスーン雨季の急激な開始がタイを中心

としたインドシナ域で最初に始まることと関連があるとの仮説が提唱され、その解明へ向けた新たな研究計画へと繋がりつつある。

熱帯域で最も特徴的な降水の日変化は、これまで鉛直一次的に解釈されがちであったが、タイ全土の詳細な降水データから、地域毎に日変化のピークが大きく異なることが発見され、また現地における降水レーダ観測結果と数値モデルによるシミュレーションの結果、タイ西端の山岳域で発生した降水システムが東方へ移動し、その2次元的・3次元的システムの時間サイクルの結果として日変化が生じていることが示された。また、観測降水量の分析とその数値モデル実験との対応により、20世紀後半のタイでの広範囲な森林伐採が降水量に変化を与えている可能性、特に雨季の中でも季節風が弱まる9月のみにその効果が現れている可能性が発見・示唆された。

第四の成果は、物理法則に基づく水文流出モデルの構築と、水文流出現象の把握である。水文流出モデルは、正統的な詳細3次元モデル、地形情報を活用した簡略型モデル、気候モデルの陸面モデルを利用したモデル等が開発され、それぞれが良好な河川流量の算定に成功した。これらの成果は、タイにおける水資源アセスメント、洪水被害シミュレーションなどに応用されるなど、現地灌漑局において実用へと繋がる多くの貢献を成し得た。さらに、チャオプラヤ川の流量が長期的に大幅な減少傾向にあることが判明し、その解明と緩和のための国内プロジェクトが計画されるなど、タイの水資源研究に大きなインパクトを与えた。

第五の成果は、東南アジア水文気象データベースの構築と国際協力の進展である。本研究によって、タイを中心とした東南アジア各国の現業水文・気象データが収集された、日本人研究者によるデータと併せて、GAME-Tデータベースとして日本及びタイのサーバによってインターネット公開され、またCD-ROM版として配布された。また、タイにおいてほぼ毎年開催するワークショップにおける集中的な議論や、日々の研究交流を契機として、タイ国内における水文・気象研究の研究組織が整備されつつあり、独自の研究予算獲得なども行われるようになってきた。同様の動きを周辺諸国へと少しずつでも拡大しようと試みられている。

#### **D) 「亜熱帯・温帯エネルギー・水循環過程」班**

1998年及び1999年の梅雨期に淮河流域において陸面過程と雲降水過程の特別観測を実施し、降雨前後の陸面過程の連続データ及び降雨時の雲降水過程の3次元データを取得した。3台のドップラーレーダーを用いた降水シス

テム内の3次元気流観測は中国大陸内では初めてのものであり、レーダー観測網を取り囲むラジオゾンデ強化観測網による収支解析が可能な観測網で連続観測を行った。これらの観測データは中国と日本のデータセンターに集約され、データを公開した。観測データを用いた解析により、淮河流域の水・熱収支を明らかにした。また、淮河流域における梅雨前線帯の降水システムの3次元構造を明らかにした。梅雨前線の、北上時と南下時の降水システムにおける特性の違いを明らかにし、下層の非常に湿った南西風の流入が降水システムの形成維持に果たす役割の重要性を明らかにした。さらに、梅雨前線の南の領域における積雲の発達に対する陸面の特性と大気境界層の役割について高解像度の数値実験によって明らかにした。

淮河流域における梅雨前線帯の降水システムの発達過程については種々の数値モデルを用いた研究を行った。たとえば、3種類の雲解像数値モデルを用いて、1998年7月に淮河流域で発生した大雨の再現実験を行った結果、どのモデルでも、ほぼ観測した大雨および大雨をもたらした気象擾乱が再現できた。感度実験の結果、土壌水分そのものはこの気象擾乱の発生や大雨にほとんど影響していないことや、南からの水蒸気フラックスが多すぎると、メソスケール擾乱が発達しすぎて移動速度が速くなり、結果的に局地的な大雨にはならないことなどがわかった。

中国大陸における雲・降水システムの研究を含めたエネルギー・水循環過程研究の意義を明らかにしたことにより、淮河流域の南側のより湿潤な領域と淮河流域の北側のより乾燥した領域における「エネルギー・水循環過程」に関する新たな日中共同研究の具体化に大きく貢献したと考えられる。

### E) 「チベット高原陸面エネルギー・水循環過程」班

チベット高原での大気・陸面相互作用の様々な特徴をプレモンスーン期、モンスーン期の比較をして定量的に理解できた。具体的には、モンスーンの開始とともにボアエン比が $1/4 \sim 1/3$ に急激に低下し、降水系の高さが4 km程度高くなり、日周変化のピークが2~3時間程度遅くなることが分かった。また、山谷地形による明瞭な局所循環の存在が明らかとなり、昼間に山側に水蒸気が集まり、雲・降水系を形成することが示された。

チベット高原での大気・陸面相互作用を表すモデル(凍土プロセスを表す一次元スキーム、表面・中間流出を含む二次元スキーム、分布型流出モデル、陸面・大気結合モデル)が開発された。これらのモデルを使って、凍土帯での地形による土壌水分の分布の形成やその結果生じる陸面フラックスの不均

一性が定量的に示された。また、一次元の陸面スキームと水平方向の水の流れを表現できる陸面スキームとの比較により、陸面での水の移動が領域のフラックスの算定に与える影響をシミュレートすることができた。

衛星による土壌水分、積雪、降水、熱・水フラックス算定のアルゴリズムが開発され、それぞれプロダクトが作られ、地上データを用いて検証された。それによって、チベット高原上の積雪分布が年々東西振動していることが発見され、チベット高原上の表層土壌水分の季節変化特性が明らかにされた。また、衛星データと陸面スキームを組み合わせた土壌水分の4次元データ同化手法が新たに開発され、メソスケール領域での表層の土壌水分のみならず、土壌水分の鉛直プロファイルや陸面フラックス分布についても、物理的に整合性のある陸面プロダクトが作られた。

観測データや GAME 再解析データを用いて、チベット高原スケールでの風の日周変化や収束帯の形成、またその日周変化の崩れとともに発生する中規模擾乱の発達・東進と、東アジアにおける豪雨の発生との間に関連性があることが発見された。

#### F) 「チベット高原大気エネルギー・水循環過程」班

チベット高原における大気陸面間の潜熱顕熱フラックスに関しては、従来は大気収支法による評価、既存のルーチン観測データを用いた評価が主体であり、精密な接地層計測に基づくフラックス評価は殆ど文献に無かった。IOP 期間中のチベット高原東部の3地点で実施された渦相関法によるフラックス観測から、陸面から大気への顕熱潜熱フラックスの季節変化が得られ、モンスーン開始前の地表面が乾燥した状態では顕熱フラックスが卓越すること、モンスーン開始後降水により土壌水分量が増加するに伴い潜熱フラックスが増加し顕熱フラックスが減少する様子が定量的に示された。特に、モンスーン前の高原地表面は、乾燥と強い日射により地表面温度の日格差が 50 にも及び、これが日中の大きな顕熱フラックスに寄与していることがわかった。

乱流フラックス観測と平行して実施された、放射収支量観測、地中熱流量観測のデータを統合して、地表面エネルギーバランスの評価を行った結果、顕熱潜熱フラックスと地中熱流量の和が放射収支量よりも小さく、いわゆる energy imbalance が生じていることがわかった。さらに詳細な研究により、地中熱流量の不均一性、移流の影響、僅かな平均鉛直流の存在、熱流板による地中熱流測定の問題などの要因が明らかになった。さらに、アムドに於ける乱流フラックス計測とプロファイル観測との比較より、バルク輸送係数を

リチャードソン数の関数として求め、IOP 期間後についても、タワー観測とバルク係数から、顕熱潜熱フラックスを算出した。また、NOAA AVHRR のデータを用いて、point（あるいは patch）スケールのフラックス観測結果を広域にアップスケールする方法がを試みられた。また、GMS-5 のデータを用いて、チベット高原の地表面温度の季節変動、年々変動を算出した。

またこれまで気象データが乏しかった西チベットの改則(Gaize)と獅泉河においても、自動気象観測装置によるプロファイル観測を用いたボーエン比法による顕熱・潜熱フラックス算定が行われた。さらに、Xu and Haginoya(2001) は、既存の観測データを用いてチベット高原上の多くの既存観測地点気象観測所における地表面熱収支を長期間にわたり算出した。

平地ならびに山岳における地上気圧の日変化から、静力学関係式を応用して、1998 年 IOP 期間中における日中の気柱昇温量（6～18 時）を算出し、これにより広い範囲での顕熱フラックスの算出が行われた。この結果、気柱昇温量はモンスーン入り前後を境に急激に減少すること、また渦相関法による地表面からの顕熱観測値よりもかなり大きく、日中におけるチベット高原上の大気が、地表面からの顕熱ばかりでなく、放射の吸収などによって加熱されていることを示唆している。またチベット高原東部における集中的なゾンデ境界層観測と数値計算により、高原上の可降水量分布の日変化を解析した結果、ゾンデ観測に見られる午後の比湿低下が局地循環による水蒸気輸送に起因するものとした。

西チベットについては、AWS データと既存データを比較しながら、既存データのみを用いた大気陸面相互作用算出にむけたモデル化を行ってきた。また、東チベットに関しては、気象研（高藪）と協力して、アムドデータを用いたモデルの検証を行っている。

## G) 「シベリア生物圏エネルギー・水循環過程」班

2000 年までのシベリア東部レナ川中流域のカラマツ林における熱収支の連続観測により、潜熱フラックスはカラマツの開葉（5 月中旬から 6 月初旬）により急激に増加し、その結果顕熱フラックスは有効放射量が 6 月下旬まで増加するにもかかわらず、急激に減少すること、ボーエン比の季節変化は明確な「U」字型を示すことが明らかになった。また、この観測した 3 年間の暖候期降水量（5 - 8 月）は 80mm～230mm と大きく変化し、この結果土壤水分量にも大きな相違があった。しかし、平均蒸発散量（平均潜熱フラックス）には降雨量の多寡による顕著な相違は認められなかった。これらの事実

は、3つの異なるモデルによっても検証されている。また、植物（カラマツ）の吸水深度に関して安定同位体（ $^{18}\text{O}$ ）を用いた解析、土壤水分プロファイルを用いた解析の二つの独立した解析から、ともに植物体は多雨年には降水を、寡雨年には永久凍土の融解水を生理活動に利用していることが明らかとなった。永久凍土の存在が降雨の多寡に対するバッファーとなり、蒸発散量を安定化させていることを示唆している。これに対し、濡れた葉面（樹冠）からの遮断蒸発量は降雨量の多寡を明確に反映する結果となった。

2000年暖候期の上記カラマツ林南西約2kmに位置するアカマツ林で同様の観測を行った結果、アカマツ林では融雪直後から大きな潜熱フラックスの値を示し、融雪直後からの活発な蒸散活動が明らかになった。これは、アカマツ林土壌では凍土の融解が早く進むこと、常緑であるため展葉に要する時間が必要ないことなどが関係している。また、アカマツ林においては、風向による熱収支のbalanceが大きく変動することが示された。この点は、現在foot print、植生分布、地形の影響などを検討中である。

係留気球観測による観測の結果、ボーエン比はカラマツ林上での値に近く、同時に観測を行った草地で得られた値とは大きく異なった。この結果、ヤクーツク周辺左岸地域では、森林帯の影響が大きいことが示唆された。

#### H) 「シベリア雪氷圏エネルギー・水循環過程」班

ツンドラ帯のティクシ観測点において、1997年夏期以降、2002年春期までの水文気象データ(AWS, フラックス観測、流域水文)が集積した。また、ヤクーツク付近の森林・草地の観測点については2000年以降の2年間の水文気象データが集積した。このような長期間にわたったツンドラ域で水循環を議論できる水文気象データセットの作成はアラスカ北部を除き世界で始めてである。

これらの観測結果の解析から、ツンドラ地域の水循環において最も重要な蒸発量が4年間について6-8月3ヶ月間で110-165mmと見積もることができた。夏期蒸発量の季節変化・年々変化は、それぞれの時間スケールでの日射量に相関が強い。これは、凍土融解深が薄く、全体に土壌表層が湿潤であることに起因する。ただし、毎年の日射量と降水量（これが夏期期間中の土壌水分を湿潤にする要因）が反比例するため、蒸発量の変化幅は押さえられる。北米大陸で得られている結果と比較的近い値をとることが分かった。また、ティクシのような沿岸ツンドラの水熱交換の顕熱・潜熱項は、北および南から来る気団の性質が異なるため、風向依存性がある。さらに、ツンド



ラ流域での流域規模の水・熱循環モデルの構築が進み、ほぼ完成に達した。

また、ツンドラとの比較の必要からヤクーツク北西の平地タイガにおいて観測を行い、カラマツ森林では、森林の年齢によらず（立木密度、樹林項、生理特性が異なる）水熱交換の絶対値は近い値であることが明らかになった。また、この地域に存在する草地は、人為起源・自然起源で形成されるが、草地形成後の年代によって水熱交換の特性が異なる。形成されてから期間の短い草地は、森林に比べ蒸発量が多く、顕熱量は少ない。期間の長く、一般的に規模の大きい草地は、アルベドが高く蒸発量も顕熱量も少ない。アラスの形成史に描かれている概念図と矛盾しない結果を得た。さらに、草地、森林に適応できる一次元水熱交換モデルの検証と改良が夏期データを基になされ、この地域の領域フラックス推算の基礎ができた。

### 1) 「気候水循環モデリング」班

1次元モデルに関しては、凍土の扱える一次元陸面過程モデルを開発するとともに、土壌水分量が不均一な場合の陸面過程のパラメタリゼーション、およびリモートセンシングを利用した陸面過程モデルを開発した。

また個々の積雲対流を容易に再現することのできる広域2次元気象モデルによるシミュレーションを実施し、現地観測データと比較検証をすることにより、主として地形と積雲対流の関係について、以下に述べる成果を得ることができた。タイにおける降水の日変化の位相とその地域分布は、地形性降水とその降水に伴う冷氣外流に支配されていること、チベット高原で観測される主要な山脈沿いの雲活動およびゾンデにより観測される水蒸気の日変化は局地循環により説明できること、一般に、山脈に隣接する平野部の降水の日変化は局地循環と中層の水蒸気移流により説明できること。

さらに領域気候モデルによる月単位のシミュレーションと降水量観測データを検討した結果次のような重要な成果が得られた。タイにおける最近50年間の森林の減少が、特定のシーズンに限られるものの、降水の長期減少トレンドの原因となりモンスーン循環の弱まる9月に森林伐採による乾燥化が顕著になること、特に、梅雨前線は基本的にはアジア大陸と太平洋の熱的コントラストが偏西風と相互作用することによって生じ、その中でチベット高原の熱的・力学的効果は極めて大きいこと、アジア大陸の土壌水分量により梅雨前線の位置と降水量が影響を受けること、が示された。

### J) 「エネルギー・水循環情報データアーカイブ」班

国際共同研究 GAME では、ユーラシア大陸上の、寒帯から熱帯にわたる様々な地域における、大気、水圏、地表面、植生の観測が実施された。この観測によって得られたデータの中には史上これまで得られなかった貴重なデータが多く、このデータを利用して行われる研究の可能性は計り知れ無いものがある。「エネルギー・水循環情報データアーカイブ」班の目的は、これらの貴重なデータを集約化・アーカイブし、広く世界に公開・配布することにある。

「エネルギー・水循環情報データアーカイブ」班は国際的には GAIN(GAME Archive & Information Network)として活動し、その役割は2つ、すなわち GAME・データ管理方針の設立、および GAME データを公開・配布するシステムの構築に分けられる。

その第1の作業は本研究のデータ管理指針の作成である。本研究は国際的な研究計画であり、そのデータ管理指針は研究者間の国際協力の基礎となるものである。このデータ管理指針は、本研究で得られたデータに関するガイドラインであり、データの定義、データ提供の基本方針などが含まれる。このデータ管理指針のうちで、最も重要なものは内外の研究者に対するデータ公開のスケジュールであり、これは以下の通りとなっている

#### GAMEデータ管理指針（抜粋）

集中観測において得られたデータは次のスケジュールに従って公開される。

- 1)参加研究機関および研究者に対しては、1999年6月(集中観測後6ヶ月)末日までに公開。
- 2)それ以外の研究機関・研究者に対しては、2000年6月(1年後)末日までに公開。

集中観測以外の期間に得られたデータは、次のスケジュールに従って公開される。

- 3)参加研究機関および科学者に対しては、データ取得後1年以内に公開。
- 4)それ以外の研究機関・研究者に対しては、データ取得後2年以内に公開。

本研究では、観測によって得られたデータに加えて、主として東南アジア各国の研究機関、現業機関に対して、再解析の検証用として新たなデータ（地上観測データ）を提供してもらえよう依頼をし、いくつかの国には

応じてもらっている。

データ管理指針によれば、データ提供の主たる手段は、インターネットによるオンラインアクセスである。GAIN の第 2 の機能は、このようなアクセス手段の提供にある。各班は、それぞれが取得したデータ提供を、それぞれで行うことになっており、GAIN では、GAIN-Hub としてこれらの各班のデータのカatalogを提供することと、いくつかのデータ（再解析データ）の提供を行うことの 2 つの役割を果たしている。GAME の前データへは、この GAIN-HUB (<http://gain-hub.mri-jma.go.jp>)からアクセスすることができる。

インターネットの発達していない国のように、オンラインアクセスの無い国においては、CD-ROM によるデータの提供が有効である。このため、GAIN-HUB ではオンラインによるデータの提供に加えて、CD-ROM の製作も行っている。これまでに本報告書のリストに示すような CD-ROM を製作し、全世界に配布している。