
報 告

第59回気候問題懇談会報告

気候・海洋気象部*

はじめに

第59回気候問題懇談会は、1997年12月15日(月)に気象庁において開催された。当日は、同懇談会の委員である筑波大学地球科学系の安成哲三教授に「アジアモンスーンエネルギー水循環観測研究計画(GAME)」, 予報部数値予報課の隈健一予報官より「陸面過程のモデリングについて」の話題を提供していただいた。また、そのほかとして、気候・海洋気象部気候情報課の時岡達志課長より「気象審議会第20号答申「今後の気候情報のあり方について」」概要説明が行われた。以下に、これらの概要を報告する。

1. アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画(GAME) — アジアモンスーン変動と水循環の予測へ向けて —**

1.1 はじめに

東アジアの梅雨を含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、恵みの水として、この地域の人々の生活基盤になっている。しかしこのモンスーンは、時として、豪雨による水災害や干ばつをもたらすこともある。このため、モンスーンの季節予報の精度を上げ、地域ごとの水循環、水資源予測に資することは、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、熱帯太平洋域のエルニーニョ・南方振動(ENSO)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。しかし、多くの点が未解明で、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発生しており、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、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、私たちにとつ

て重要なことは、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今後どのように変化するかを、地域、流域スケールで予測する必要に迫られていることである。

ところが、現在の大気大循環モデル(GCM)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、まだ大きな不確実性を示している(IPCC, 1996)。このような問題を解決する方向で開始されたのがアジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画(GAME)である。

1.2 GAMEの実行体制

GAMEは世界気候研究計画(WCRP)の副計画である全球エネルギー・水循環研究計画(GEWEX)傘下の国際プロジェクトとして日本の気象・水文研究者を中心に提唱され、1994年にGEWEX Hydrometeorological Panel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、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。また、地球環境研究の国際的な支援組織であるアジア太平洋地域変動研究ネットワーク

* 全体のとりまとめは海務課計画係竹田康生が行った。

** 安成哲三(筑波大学地球科学系教授)

APN (事務局は環境庁地球環境部) も、下記に述べる GAME のモニタリングネットワークを中心に支援を開始した。さらに、1997年度から開始された地球フロンティア研究システムも、GAME のモデリングとデータ・情報ネットワークに関連した研究活動を担っている。

GEWEX傘下の国際プロジェクトであるGAMEは、1996年3月に国際科学推進パネル (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大陸スケールエネルギー水循環実験計画 (ミシシッピ川流域) (GCIP) からのリエーンを兼ねて、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。現在のパネルの議長は安成 (日本)、副議長は Ding Yihui (中国) である。1998年1月には、第3回パネル会議が気象庁で開催される。この国際パネルの事務局を兼ねたGAME国際事務局 (GAME-IPO) は名古屋大学大気圏科学研究所に設置されている (事務局長は中村健治教授)。GAMEの国内での実行体制は、各省庁の関係研究者で組織されたGAME実行計画委員会 (委員長: 安成哲三、副委員長: 小池俊雄長岡技術科学大学助教授) を中心に進められている。国内事務局 (事務局長: 福嶋義宏教授) も名大大気圏研に置かれている。

1.3 GAME 計画の概要

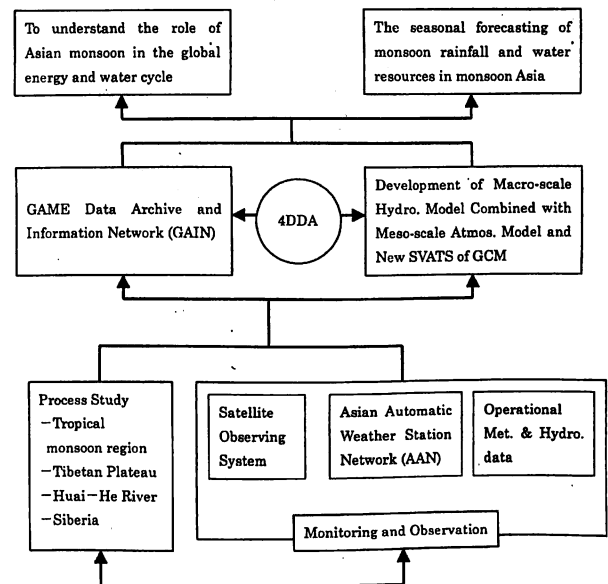
GAME計画全体の構造は、第1.1図のようにまとめられる。簡単にいえば、データの収集とモニタリング、プロセス研究、4次元データ同化を含むモデリング、データ・情報ネットワーク (GAIN) の4つの部分に分けられる。

GAMEの計画概要については、すでに3年前の気候問題懇談会や学会誌でも紹介しているので、詳しくはその報告 (安成, 1994) を参照されたい。今回は、4つの地域におけるプロセス研究と、これに関連して、1998年夏に予定されているGAMEの集中観測計画 (IOP) の科学的意義とその計画の概要について以下に簡単に紹介したい。放射・熱収支長期モニタリング (AAN) とデータ・情報ネットワーク (GAIN) についても簡単に紹介する。

1.4 4地域における大気・地表面間のエネルギー・水循環変化過程の集中観測

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、特に重要でありながら未解明な部分の多い大気・陸面相互作用に焦点を当てている。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、100km×100km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。

これらの地域のプロセス研究での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。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の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



第1.1図 GAME 計画の構造

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・海洋系で行われた熱帯海洋全球大気変動研究計画の海洋・大気結合応答実験 (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、陸面では多くの場合、これに植生や積雪・凍土といった表面状態が複雑に絡んでくる。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。1998年の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述べるとともに、すでに行われている予備観測の結果も簡単に紹介したい。

1.5 モンスーンアジア地域における高層ゾンデの強化観測

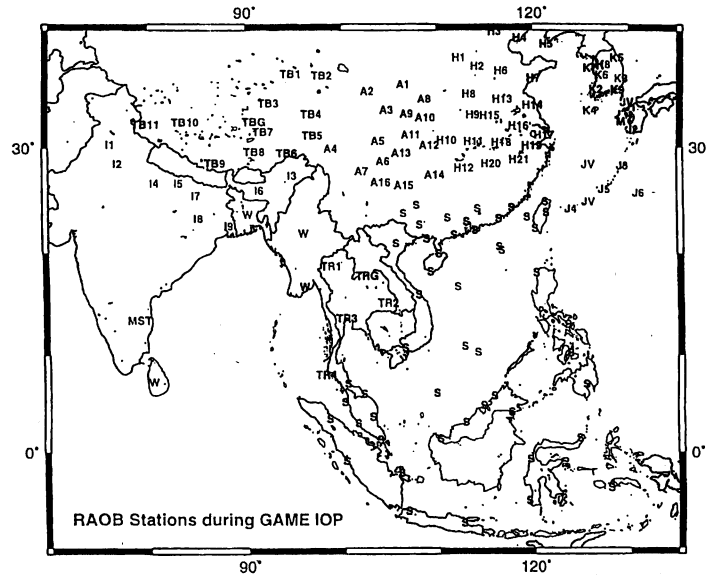
モンスーンの季節変化過程とその変動における大気・陸面相互作用とエネルギー・水循環を理解する上で、日変化を含む実態の解明は非常に重要である。例えばチベット高原では、顕著な日変化が地表面、境界層にある。湿潤な大気層や雲形成が夜間にあるかないかで、対流活動や大気加熱の定量的評価への影響は大きく異なると考えられる。モンスーンに伴う対流活動も顕著な日変化があることは、静止気象衛星「ひまわり」(GMS) のデータの解析などから、すでによく理解されている。IOPでは、GMSや1997年6月に東経110度上に打ち上げられた中国の静止気象衛星FY-IIと、1997年11月に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星(TRMM)が、対流・降水活動の広域モニタリングに大きな役割を果たすはずである。98年夏をIOPの時期として選んだ理由のひとつは、TRMMのデータを十分に利用するためである。

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。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重要である。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。このため、高層ゾンデ強化観測が必要

なのである。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、より精確に観測する必要がある。

1997年3月末、韓国齊州島で開催された第2回国際パネル会議での主な議題は、1998年におけるIOP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、パネル参加国のほか、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、すでに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調査し、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か月間と、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、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、南シナ海モンスーン実験計画(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、フィリピン、インドネシアの一部)の32地点が含まれる。さらに、ベンガル湾上では、インド国立海洋研究所の観測船による高層観測が、インド気象局の協力の下で行われることも、その後決定した。また、中国は、予算などの事情が許す限り、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、5-7月の3か月間、連続で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2期間で強化観測が行われる地点は第1.2図のようになる。さらに、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。



第1.2図 GAME/SCSMEX 合同強化観測が行われる地点分布

記号は強化観測に参加するプロジェクトまたは国を示す。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, MST: NMRFによるウインドプロファイラー観測。

1.6 放射・熱収支の長期モニタリング

1998年夏を中心に行われる集中観測のほかに、GAMEでは、モンスーンアジアの異なる気候・植生状態での放射・熱収支の長期モニタリングをめざすAAN (Asian AWS Network) が同時に進められている。現在、シベリアのツンドラとタイガ、モンゴルの草原、中国淮河流域の水田地域とチベット高原、ネパールヒマラヤ、タイ・マレーシアの熱帯林の10か所で、1年以上にわたる放射・熱収支の長期観測を計画し、一部がすでに開始されている。このモニタリングの目的は、短期間のプロセス研究を補完するだけでなく、地表面での放射、熱・水収支の季節変化の詳細な観測を通して、大気大循環モデル (GCM) などにおける大気・陸面過程モデルの改良と検証、広域の衛星観測データの地上検証などに資することである。このモニタリングは、地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP) の一環である fluxnet との連携も今後視野に入れ、二酸化炭素フラックスの観測も併せて行うことも議論されている。1997年度には、シベリアの2地点とモンゴル、タイでの1地点が実質的に開始されている。一部のデータについては、気象庁の協力を得て、GMS衛星を利用したリアルタイムのデータ転送も行われる予定である。

1.7 データの公開と客観解析(4次元データ同化)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、保管することが合意された。ただし、この時点では、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は、法的規制のため公開できないとされたが、その後、GAME-Tibetとの間でデータ交換についての合意ができ、国際的な公開が可能となった。国際事務局には、近々、外国人研究者も事務局メンバーとして招聘される予定である。GAMEの活動は、ホームページ (<http://www.ihis.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、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、技術者、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。詳しくは上記ホームページを参照願いたい。

2. 陸面過程のモデリング***

2.1 陸面過程が気候系において果たす役割

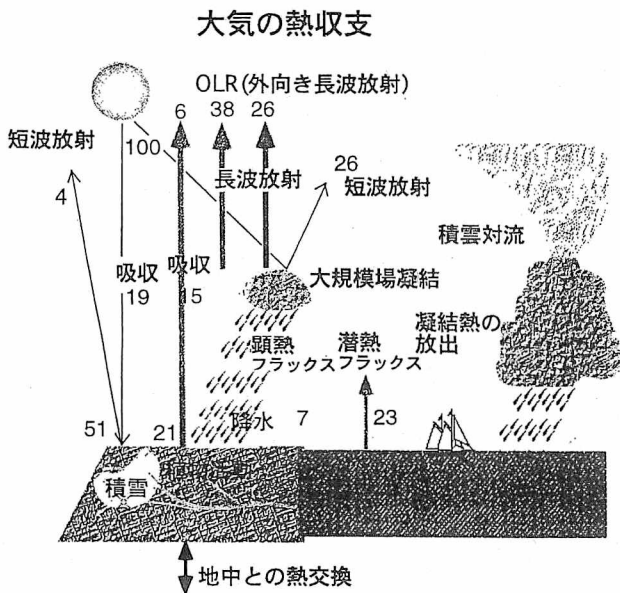
地球大気は、大気乱流や高低気圧から季節変化や ENSO 等さまざまな時間空間スケールで激しく変動している。この生き物のように振る舞う地球大気のエネルギー源は太陽からの放射エネルギーである。第 2.1 図はこの太陽からの放射エネルギーが大気や地表面にいかに分配されるかを示したものである。これによると、太陽の放射エネルギーのうち、直接大気を暖める割合は 2 割程度に過ぎず、5 割強が地表面に入射することがわかる。この 5 割強の放射エネルギーを

海洋や陸面過程が分配しているのである。ここでは陸面過程が果たす役割について述べることにする。

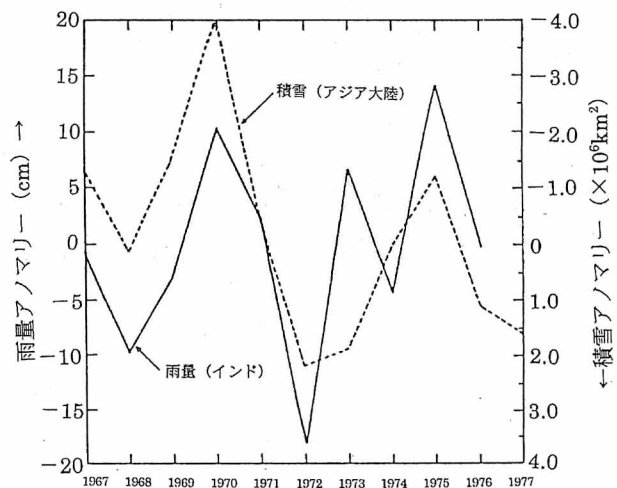
まず、積雪・植生・土壌などの地表面状態により、入射した放射エネルギーの反射率が決定される。地表面に吸収された放射エネルギーは、長波放射として大気中に放出されるもの、地中を暖めるもの、そして乱流により大気に顕熱として与えるもの、陸面に含まれる水分である土壌水分が蒸発するときに潜熱として与えるものに分配される。顕熱と潜熱の比はボーエン比と呼ばれて、きわめて重要な量である。

地球大気を大きく特徴づけているものは、水の存在である。例えば、台風、梅雨などは水蒸気の凝結熱が主要な役割を果たしている現象である。さらに熱帯域ではモンスーン、ENSO など大気大循環そのものが凝結熱により支配されている。また、凝結した水から構成される雲は、太陽からの放射エネルギーを反射したり、逆に地表面や下層大気からの長波放射が宇宙空間に出ていくのをさえぎる温室効果においても重要である。従って、陸面から大気に放出されるエネルギーが、顕熱の形をとるか水蒸気という潜熱の形をとるかは、大気の変動において極めて重要である。

ボーエン比を支配する因子としては、土壤に含ま



第 2.1 図 大気の熱収支



第 2.2 図 アジア大陸 (52° N 以南) 上の積雪 (点線) とインド全域でのモンスーン降雨 (実線) の 10 年間 (1967 - 77) における変動 Hahn and Shukla (1976) より。

*** 隈 健一 (予報部数値予報課予報官)

れる水分,すなわち土壌水分がきわめて重要である。雨がしばらく降らなくても,青々と茂っている植物の多くは地中深く根を張ってそこから水分を供給していることからわかるように,地中深いところの土壌水分は毎日の天気変化よりもゆっくりと変動している。このため,数週間から数カ月,あるいは年々変動のような時間スケールの大気変動にも影響があることが指摘されている。

太陽放射の反射率や融解後に土壌水分に影響する積雪量についても長い時間スケールの変動との関係が指摘されており,例えば,インドモンスーンの年々変動とチベットの積雪量との関係(第2.2図, Hahn, D.G. and J. Shukla(1976))がその一例である。

このように土壌水分や積雪などの陸面状態が気候変動と大きな関係を持つことから,大気や海洋,陸面全体を総合的なシステムとみなして気候系と呼んでいる。

以上は全球エネルギー・水循環実験計画(GEWEX)の観点における気候系と陸面過程の関係であるが,地球圏-生物圏国際共同研究計画(IGBP)の観点からは,温室効果ガスである二酸化炭素の交換が大きな課題である。実は水蒸気も二酸化炭素も植物の気孔を通じて,陸面と大気の間で交換される。二酸化炭素排出の今後の削減目標においては,人為的な排出量から大気中の二酸化炭素の森林への吸収量を差し引いて基準が設けられることが京都での温暖化防止会議で決定されている。どの国の森林でどの程度二酸化炭素が吸収されるのかという研究基礎データは,政策決定上もきわめて重要な意味を持つことになる。

陸面過程が目されるのは,気候系への影響ばかりではなく,陸面過程そのものがそこに生活する人類の生活と深く関わっているからである。陸面の温度と土壌水分量が農業や水資源におよぼす影響が大きいことは,容易に理解できよう。全球気候観測システム(GCOS),全球海洋観測システム(GOOS)と並んで,全球陸面観測システム(GTOS)が計画されているが,GTOSでは植物種の変化,水資源の変動なども観測対象になっており,事務局は世界食糧農業機関(FAO)に置かれている。人間生活により密接に関連した分野であり重要性は高い一方,農業,水資源管理,環境,気象と複数の行政機関が関わっているため,予算化の手続き,観測計画の調整,観測データの

交換等多くの課題がある。

2.2 数値モデルで用いられる陸面過程

数値モデルで用いられる陸面過程においては,陸面での熱や水の収支の取り扱いが基本である。また,蒸発散を通じて水の収支計算と熱の収支計算は強い関係を持っている。

第0世代の陸面過程のモデルは水収支の計算は行わず,熱収支の立場により陸面過程の影響を計算する。ただし,砂漠で蒸発が少なく,熱帯雨林で蒸発が多いという気候学的特性を考慮して,土壌の湿潤度を気候学的に計算しておく。地面に接する大気の比湿が地面温度における飽和比湿であると仮定したときの蒸発量とこの湿潤度との積を,陸面からの蒸発量とする。土壌の湿潤度を気候値で押さえているので,砂漠が湿ってきて雨が続きたり,アマゾンが砂漠気候になったりすることがない安全さがこのモデルの特徴であろう。

気象庁において,この方式は領域数値予報モデルには現在も使われており,全球モデルにおいても1989年までは使われていた。しかし,水収支を取り扱わないため,雨が降らなくても水は無尽蔵に供給されて蒸発に用いられる。このため,雨の多い年は蒸発が多くなり,雨の少ない年は逆に少なくなる,といった年々変動を表現することはできない。

長期間の時間積分により年々変動などを研究する大気大循環モデルにおいては,早くから第一世代の陸面過程のモデルが開発・利用されてきた。このモデルでは簡便な方式であるが,陸面の水収支も考慮されている。このモデルは,降水,蒸発散,流出から土壌水分の変化を次のように計算する。土壌の水分許容量(例えば15cm)を設定して,土壌水分がそれを超えると河川に流出すると仮定する。蒸発散については,第0世代のモデルで用いられる湿潤度を,土壌水分量が大きいほど大きくなるように決める。そこで,深さ15cmのバケツを置いて,降水によって水かさが増し,蒸発により水かさが減る。また,水かさが15cmを超えるとあふれ出して,流出するという概念モデルに基づいている。これはバケツモデルとも呼ばれている。この手法は単純であることが特徴であり,現実との対応においては様々な矛盾があるものの,結果の解釈が容易であることが利点である。

ここまでのモデルにおいては、植生の役割については直接取り扱っていない。しかし、実際には陸面での熱や水の配分において、植生の果たす役割は大きい。第二世代のモデルではこの植生の効果をモデル化するに至った、ここで植生が大気・陸面システムにおよぼす影響についてまとめておきたい。

植物は光合成を基本エネルギーとして生きており、太陽放射の中でも光合成に有効な可視域の波長帯(0.4~0.72 μm)で強く吸収し、近赤外(0.72~4.0 μm)では反射が大きくなる。この強い吸収により、植生の存在は太陽放射の反射率を小さくする効果がある。気象庁モデルの放射過程では散乱部分(0.7 μm 以下)と吸収部分(0.7 μm 以上)に分けて取り扱っており、それぞれの波長帯での反射の違いを取り扱えるようになっている。なお、(0.4~0.72 μm)の波長帯の放射量を光合成有効放射(PAR)と呼び、植物の生理にとって重要な物理量となっている。

植生の最も重要な効果は、陸面過程の鍵となっている蒸発散を植物の生理が制御していることである。植物は進化の過程で光合成の最適化制御を学んでいる。光合成を行うためには、大気中の二酸化炭素を取り込むために葉の表面にある気孔を開く必要がある。気孔が開くと大気と葉の中の湿った部分が直接接触しあうことになり、必然的に体内の水分が失われて大気中に蒸散する。この蒸散のしやすさ、つまり、気孔の開き方はPAR、大気の乾き具合、温度、そして葉が根から水を吸い上げる力に依存する。PARがない夜は光合成を行えないため、気孔は閉じているが、PARが増え始めると急速に気孔は開き始める。しかしPARが200W/m²を超えるとその開き方は変わらなくなる。大気が乾いていると植物にとって大切な水分がより多く失われるので、それを守るため気孔の開きが小さくなる。温度については植物によって最適温度が異なるが、ある温度範囲で気孔が開くようになる。水を吸い上げる力は、土壌水分が少ないときや蒸散が活発なときに大きくなる。このような時は、水を失うのを防ぐために気孔の開きが小さくなり、ある限度を超えると完全に閉じてしまう。

これらのことから、夜間は気孔が閉じているので蒸散が小さいこと、昼間は蒸散が増えるが葉の温度が上がりすぎると、温度依存性や乾き具合の関係で気孔を閉じて蒸散が小さくなることなどの重要な役

割が理解できると思う。

植生の形状が関係する効果もいくつかあり、降水を枝葉でいったん受けとめ、それが再び蒸発して大気中に戻ることを遮断損失と呼ぶ。アマゾンに降る降水の1/3から1/2がこの過程を通じて蒸発するといわれている。また、樹木が風に対する抵抗になったり、土壌を放射や乾燥から守ったりする役割も重要である。

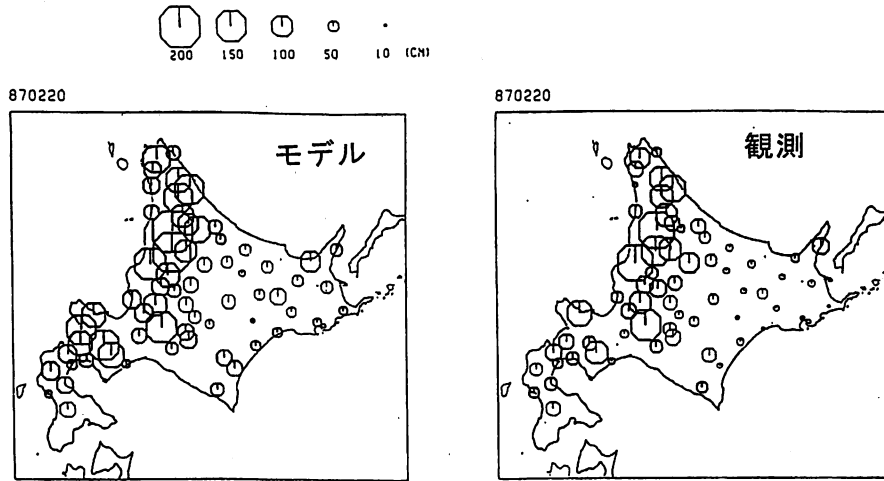
このような過程を組み込んだモデルが第二世代のモデルである。気象庁では1989年11月から、第一世代を飛び越して、一気に世界に先駆けて第二世代のモデルを運用するに至った。このモデルの導入により、特に日中のポーエン比が大きく改良されている。

植物は二酸化炭素の吸収のために気孔を開くと述べたが、第三世代のモデルでは、この気孔開閉のメカニズムを光合成による二酸化炭素の同化量を用いて表現する。気孔開閉は、この同化量と葉の表面での二酸化炭素濃度と相対湿度により支配される。このモデルにおいては、熱と水蒸気と二酸化炭素の出入りをデータ同化システムにより統一的に計算できること、その計算において重要なパラメータが衛星観測で求められること、二酸化炭素の変動・その植生への影響を直接取り扱えること等が特徴である。気象研究所において、この方式を数値予報課のモデルに組み込み、大気中の二酸化炭素濃度を予報変数に取り入れた実験が行われており、その成果が期待されている。

23 全球土壌水分プロジェクト(GSWP)

土壌水分は陸面から大気への水の供給をコントロールするという意味で、海洋における海面水温と同程度に重要なデータである。海面水温については、数十年にわたる全球解析結果が得られており、その大気大循環モデルの海面水温応答実験が大気モデル比較プロジェクト(AMIP)を始めとして数多くなされている。この結果、エルニーニョなどの海面水温の変動が気候におよぼす影響についてもかなり研究が進み、気象審議会第20号答申でも、季節予報に大気海洋結合モデルを用いることが大きな柱として盛り込まれている。

しかし、植生分布や地形から連想されるように陸面過程は局地性が極めて強く、また衛星によるり



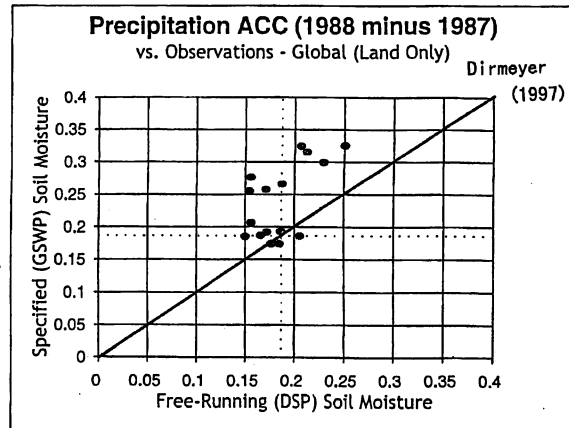
第2.3図 陸面モデルにより求めた積雪量と観測との比較

モートセンシングが容易でないことから、観測データのみから全球の分布データを得ることは困難である。このことは、土壌水分の気候に対する影響を、大気大循環モデルを用いて研究する際の大きな障害になっている。

GSWPは、陸面モデルを開発している数値モデルセンターが全球土壌水分・積雪解析値を土壌水分や積雪に関する観測値を用いずに求め、それを相互比較するというプロジェクトである。

この手法が有効と思われる理由は、前節での熱・水の収支の議論が示唆しているように、陸面過程が降水、放射、気温などの大気側の情報により決定される部分が多いからである。第2.3図(佐藤信夫・西村照幸, 1996)は北海道のアメダス地点について陸面モデルにより求めた積雪量と観測との比較である。積雪データを利用せずに積雪分布が見事に再現されていることがわかる。

全球を対象にした場合は地上観測点が不足しているため、衛星による観測も取り入れている。国際衛星陸面観測気候計画 (ISLSCP) は、衛星による放射観測、雨量計観測と、数値予報センターでの4次元データ同化結果などに基づいて、陸面過程を支配する気象情報である、全球大気強制力のデータを1987と1988年について作成している。このデータに基づき各陸面モデルにより作成された結果は、気象庁と東京大学の共同研究により比較解析されて公開されている。



第2.4図 GSWPで得られた土壌水分量を与えたモデルと、自由に土壌水分を予報させたモデルの降水予報精度の比較

こうして得られた結果がどの程度実際の土壌水分などに対応するか、土壌水分の現地観測データや河川の流出量データ等との比較による検証も行われている。

このプロジェクトは、対象を1987年と1988年に限定するパイロットプロジェクトであるが、次ような成果が得られた。第一に、全球土壌水分分布が、1987年と88年の2年間について得られた。第二に、季節予報実験を行うと、GSWPで得られた土壌水分量を与える場合、モデルで自由に土壌水分を予報させる場合と比較して、降水の予報精度が向上することが示された(第2.4図, Dirmeyer, P.A, 1997)。第三に、広域の陸面水収支について、河川の流出量による検

証方法が有効であった。

しかし、モデル間で土壌水分量のバイアスが大きく、土壌水分量をモデルに依存しない普遍的な物理量として取り扱うにはまだ課題が残されている。また、2年のデータでは年々変動を論ずるには短すぎるため、ISLSCPでは1986年から1995年の10年間の大気データを作成することになっており、このデータに基づきGSWPの第2段階が開始される予定である。

24 季節予報への応用

気象審議会第20号答申によると、力学的季節予報の実現に向けて、陸面に関する観測データの収集およびデータ同化技術の確立に努めることが求められている。エルニーニョ現象に伴う赤道海面水温の季節予報への影響は熱帯ではきわめて大きい、中高緯度では北米大陸の一部を除いて、支配的という程ではない。特にユーラシア大陸の下流側に位置する日本は、大陸の陸面状態の影響が少なくないと考えられている。現業としての季節予報の改善を図るためには、準リアルタイムで陸面過程の初期状態の解析が必要である。この初期状態の解析方法には二通りの戦略が考えられる。

第一の方法は、GSWPに準ずる手法で陸面過程の解析を実施し、その結果を陸面・大気結合モデルの陸面に関する初期状態に用いる。ただし、ISLSCPのデータに準ずるものを準リアルタイムで作成する必要がある。降水量データについては、4次元データ同化システムで診断される降水量を用いるか、雨量計観測結果の即時交換を普及させて、その結果も反映させることができればさらに精度が向上する。放射データに関しては、4次元データ同化システムでの診断データで代用するか、静止衛星データを交換して、雲量分布や放射データ等から地上に到達する放射量を求めるなどの方法が考えられる。現業に使えるものは何でも利用しようという観点からは、土壌水分や積雪深データを全球気象通信システム(GTS)で交換して、その結果も初期状態の解析に反映させる方法もあろう。

この方法の特長は、解析のためには陸面モデルだけを計算すればよいので、計算資源に対する要請が小さいことである。また、不自然なフィードバックがないことも特徴の1つである。一方、この手法で求め

られた土壌水分等の陸面解析と陸面・大気結合モデルとの整合性については必ずしも保証されておらず、予報開始後に初期値解析の場が急速にくずされる危険性も秘めている。

第二の方法は陸面と大気が相互作用するモデルを用いて、観測データを処理する4次元データ同化手法により、大気と陸面の解析値を同時に得る方法である。陸面・大気結合モデルとの整合性が保証されており、最終的にはこの手法を目指すことになろう。しかし、陸面に関する現地観測データの即時交換があまりなされておらず、観測データも局地性が強いという問題がある。さらに、土壌水分に対する衛星観測データの適用には限界があり、森林など植生の深いところでは無力で、裸地面においても表層数cmの範囲に限定されるのである。このため、初期値解析において、かなりの部分をモデル予報値に頼らざるを得ない。観測データによる歯止めがきかないので、例えばアマゾン流域が乾燥し始めると、蒸発散も減ってさらに降水の減少をもたらす乾燥がひどくなる、といった不自然なフィードバックが起こり、モデルが暴走してしまう恐れがある。

このような方法で得られた陸面の初期状態は季節予報の初期条件として有用なばかりでなく、土壌水分や積雪の実況監視データとして、水資源管理や農業などへの利用価値も期待される。また、過去にさかのぼって解析を行うことにより、ENSOや10年スケールの気候変動と陸面変動との関係などの研究が推進されることになる。こうした実況監視データを定常的に作成・配布することは、GCOS/GTOSにおける中核的な貢献といえるであろう。

ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の再解析プロジェクトにおいては、陸面・大気結合モデルによる4次元データ同化を、土壌水分に関する観測データを利用せずに行っている。地上の比湿の解析と予報値の差であるインクリメントを用いて、予報が乾きすぎている場合は土壌水分を増加させ、湿りすぎている場合は減少させる、ということをしている。前述の土壌水分の暴走を防ぐ役割を果たしていると思われるが、水収支は成り立たなくなる。

25 陸面データ同化とそれに基づく季節予報の成功の鍵

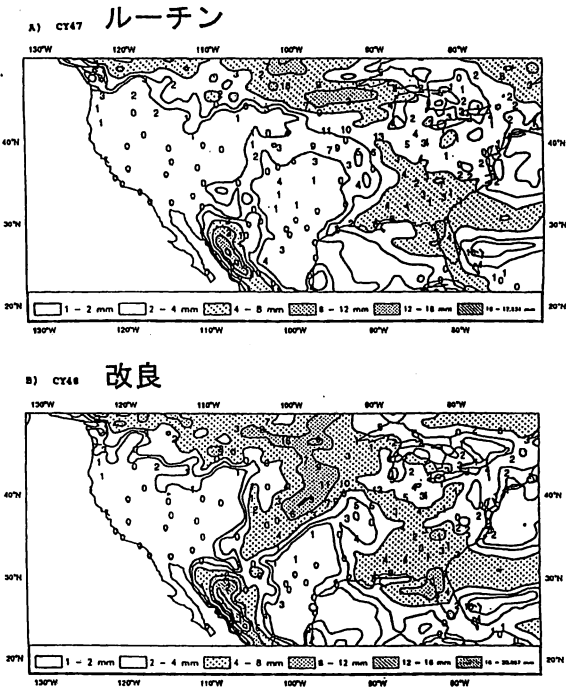
陸面の4次元データ同化においては、観測データが少ないうえに利用法が困難であることと、大気からの強制力が重要なことなどから、陸面および大気モデルの性能がきわめて重要である。大気モデルにおいては、降水過程や雲・放射過程の相互作用の取り扱いが特に重要である。数値予報モデルの性能を評価するのに、500hPa 高度場の2乗平均平方根誤差などを用いることが多いが、陸面過程への影響という点では、陸面に達する放射強度や降水量等が重要である。海洋・大気結合モデルについても、海面に達する放射強度は海洋混合層の温度場に影響するし、降水量は凝結に伴う加熱分布により海上風が決定され、それが海洋循環を駆動するという意味で重要である。従ってこれらの物理量は、大気モデルの性能として重視すべき物理量であり、共通の見地から大気モデルの性能評価を行うべきである。GEWEXのGEWEX雲システム研究計画(GCSS)は、観測結果を用いて数値モデルの降水、雲・放射過程を比較評価する研究を推進している。現在は海洋上の観測データである熱帯海洋全球大気変動研究計画の海洋・大気結合応答実験(TOGA-COARE)で得られたデータとの比較が進められているが、GAMEなどの大陸スケール観測計画の進展により、陸上の観測を用いた比較実験にも期待が寄せられている。

一方、陸面モデル自身を改良するためには、陸面過程の検証が重要である。このため、GSWPや観測データを用いた陸面過程スキームの比較実験(PILPS)などの検証実験が用意されている。しかし、陸面と大気の相互作用は複雑であり、最終的には陸面・大気結合モデルの性能評価が必要である。この性能評価の一例として、ECMWFで行われた陸面過程の改良のインパクト実験(Beljaars et al., 1996)を紹介したい。

この実験はアメリカ中西部で異常多雨を観測した1993年7月を対象に、現業のデータ同化システムに対して、改良された陸面過程を用いたデータ同化システムを並行運用して、予報結果等を比較して改良モデルの評価を行ったものである。16回の予報の平均で降水量を比較すると、最初の24時間では両者にはあまり差がないが、48時間から72時間の間の降水量で比較すると、中西部の多雨が現業モデルではあ

まり表現されていないが、改良モデルでは表現されている(第2.5図)。しかし、そこでの蒸発散量を比較すると、両者の差は小さく、その場所での蒸発散量の差で降水量の差は説明することはできない。2つのモデルを比較すると、降水が少なかった現業モデルでは下層に安定層があり、湿潤対流を抑制していた。この地点の対流圏下層の大気について72時間さかのぼって追跡すると、境界層内の空気はメキシコ湾からやってきているが、それより上の空気は大陸西部の空気が移流してくることがわかった。また、この地域では、改良モデルは現業モデルよりも土壌水分が多いため蒸発散量も大きく、顕熱加熱は小さいことが分かった。この加熱の差により大気境界層の構造が変わり、中西部での下層の安定層を弱めて湿潤対流を活発化させていると思われる。

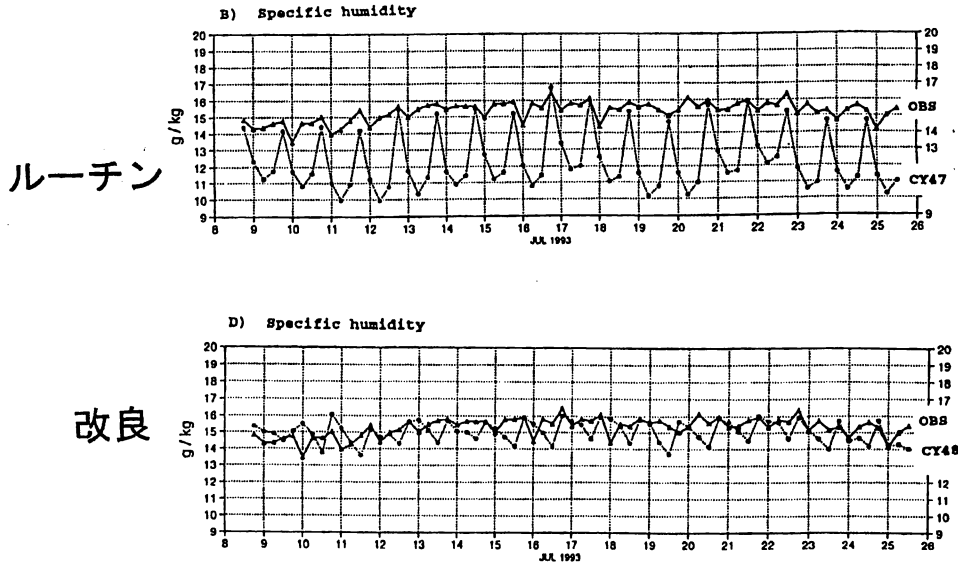
蒸発散量や顕熱加熱について、直接検証を行うことは特別観測データがない限り困難であるが、間接的な検証として地上観測データを用いることは可能



第2.5図 現業のデータ同化システムと改良された陸面過程を用いたデータ同化システムの平均予想降水量の比較

1993年7月9日から25日にデータ同化したときの48から72時間後の平均予想降水量。等値線は1, 2, 4, 8, 16mm/day-1。数字は観測所の観測値。

Beljaars et al. (1996)より。



第2.6図 現業のデータ同化システムと改良された陸面過程を用いたデータ同化システムの地上比湿の比較
 実線は観測値、破線は予想値。

である。

モデル間の蒸発散量の差が大きかった領域での地上観測データを平均して比湿の時系列を求め、48～72時間予報の地上比湿の時系列と比較すると(第2.6図)、改良モデルの方が観測に近いことがわかり、蒸発散量等がうまく表現されていることを示唆している。改良モデルでは、データ同化サイクルを通じて土壌水分の時間的変動がうまく表現できるような改良がなされており、それが成功していることをこの結果は示している。

陸面過程の検証には陸面データや蒸発散量などのデータが不足しているため、上記のように地上観測データが意外と威力を発揮する。ECMWFは地中の土壌水分凍結とキャノピーに積もった雪が落ちて森林での太陽放射反射率が小さくなる効果をモデルに組み込むことで、冬季のヨーロッパでの低温バイアスが改良されることを、やはり地上観測データとの比較で示している。また、地上観測データを陸面のデータ同化に利用する試みも積極的に進められている。

26 まとめ

陸面過程は日変化から季節・年々変動までさまざ

まな時間スケールを考慮することが重要であり、数値予報での短いタイムスケールの検証から、GSWPなどによる年々変動のタイムスケールの検証を通じて、モデル開発を行う必要がある。一方、空間スケールも数mスケールから全球スケールまで、それぞれ強い変動成分を持っており、無限に細かい観測が事実上不可能であることを考慮すると、ある空間スケールでの観測をほかの空間スケールの理解やデータに置き換えることは易しくはないがきわめて重要な仕事である。

モデリング技術は、衛星観測技術の支援のもとで、観測所などの点の観測や地域的に偏った観測を全球的かつ定量的な解析に結びつける基盤技術である。気候変動研究を社会に還元させるためには、この全球かつ定量的な解析あるいは予測のプロダクトを中心に据えていく必要があろう。

3. 気象審議会第20号答申「今後の気候情報のあり方について」***

3.1 はじめに

本答申は、近年の社会的、経済的發展を背景に、気候情報に対する高度化と多様化への要望が高まる中

*** 時岡達志(現職は総務部参事官)

で、今後の気候情報のあり方について指針を示すものである。この中で、主に、季節予報を含む気候予報に必要な予測技術の高度化、気候情報の改善等についてその推進方策を提言している。

3.2 気候情報の意義と社会の要望

気候情報には、現行の季節予報を含む気候予報のほか、長期的な数十年先以上の地球温暖化予測情報のほか、実況情報、統計資料等がある。

気候情報、特に、異常気象に関する情報は、社会活動、産業活動の根幹となるソフト的な社会公共基盤情報であり、その提供を任務とする気象庁の役割と責任は極めて大きなものがある。

気候情報の社会・経済的な有益性を高めることが求められており、特に、予報の精度向上、情報の種類・表現等の改善に関する要望が強い。

3.3 気候予測技術の現状と課題

現在の気候予報は、統計的手法により行われているが、その精度は利用者の多くが期待する水準に達していない。さらに精度を向上させるには、物理法則に基づく力学的手法に立脚した気候モデル(大気・海洋結合モデル)の導入が必要である。現在、国内外で、気候モデルの開発が精力的に進められている。

気象庁では、1か月予報に力学的手法を導入したほか、現在太平洋、特に赤道域の海水温情報の拡充に向けた気候モデルの開発に取り組んでいる。また、予測技術の高度化には、気候モデルの高度化とともに、観測データ収集の強化、データ解析技術等の高度化が課題である。

3.4 気候予報等の改善方策

気候予報等の改善には、予測技術の高度化による予報の精度向上、また利用者のニーズに適合し、かつ適切に利用されるよう情報の種類・表現等の改善が重要である。

3.4.1 予測技術の高度化に向けた改善方策

予測技術の高度化には、まず気候モデルの開発・実用化が重要であり、当面、中・長期的な目標を設定した取り組みが必要である。

当面、2～3年間には、3か月、暖候期・寒候期の

季節予報についても、気候モデルによる力学的手法を導入する必要がある。また、現在開発に取り組んでいる太平洋赤道域のデータ同化・解析モデルを高精度化するとともに、海水温予測モデルをできるだけ早期に実用化する必要がある。

5～10年後の中・長期的には、陸面・海水等の諸過程の精密なモデル化と海洋および大気モデルの高度化を推進し、これらの成果を取り入れた高精度の気候モデルを開発・実用化する必要がある。また、高精度気候モデルを用いて、精度評価を踏まえ、1年程度先の気候予報の実施についても検討する必要がある。

これらの気候モデルの開発・実用化に加えて、観測データ収集の強化、データ解析技術の高度化への継続的な取り組みが必要である。衛星による地球規模の大気・陸面・海洋表面の観測データ収集、観測船やブイ等による海洋内部の観測データ収集の強化が必要である。また、陸面データ同化および中・高緯度の海洋データ同化技術の開発と、大気データ同化技術の改良を行い、データ解析技術の高度化に努める必要がある。さらに、気候モデルの性能を評価するため、過去に遡って解析値を作成する再解析の実施が求められている。

気候モデル等の研究開発の推進にあたっては、国内外の気候に関する諸計画への参画、大学、研究機関等への気候データの提供等による連携強化が必要である。

3.4.2 情報の種類・表現等の改善方策

気候情報を以下のように改善し、利用者の要望に応えなければならない。

- ・社会的関心の高いエルニーニョ現象等の発現に関わる太平洋赤道域の海水温情報の充実・強化を進める。発表に際しては、日本の気候に与える影響が適切に理解されるよう配慮する。

- ・予報の要素を拡充する。

- ・精度評価を行ったうえで、予報の対象期間の延長を目指す。

- ・大気の性質等による予測の不確実性から、予報を確率表現とすることを今後とも基本とし、その表現をわかりやすいものに改善する。

- ・予報が適切に利用されるよう、予報の評価結果や

予報に使用した基礎資料等を公表する。

・国際化した社会・経済活動の振興に資するため、地球規模の実況情報を充実する。

3.5 気候情報の普及

気候情報を以下のような方策により、その普及を図る必要がある。

・気候情報に関する調査を実施し、利用実態を把握する。行政および各種産業等の利用機関との連携・協力により気候情報の利用法の開発を図る。

・多様な個別的要望に応えるため、気候情報をこれまで以上に積極的にかつ効率的な方法で民間気象事業者等に提供していく。

・気候情報とその理解・利用の基礎となる科学的・技術的知識の啓蒙に努め、国民の理解を深める。

3.6 地球温暖化予測情報の高度化

気象庁は地球温暖化問題に貢献するため、国内外の大学や関係機関と連携し地球温暖化の科学的理解の進展や予測に含まれる不確実性の低減を図るべきである。このため、数十年スケールの気候変動の理解を進め、気候モデルの高度化や我が国周辺等の地域を対象とした地域気候モデルの開発を行うことが必要である。これらの結果に基づき、より信頼性の高い情報を国内外の関係機関へ提供するとともに、広く国民を対象として情報の啓蒙・普及を図る必要がある。

3.7 気候問題に関する国際的な取り組みと気象庁の貢献

気象庁はアジア・太平洋地域の中核的な気象機関として、大学・研究機関との連携・協力を進め、気候に関する観測や研究に係わる多くの国際計画に引き続き貢献すべきである。

特に、世界気象機関(WMO)が推進している「気候情報・予測サービス計画」に参画し、世界各国、とりわけアジア地域の気候関連業務を支援することが重要であり、支援の具体策を検討する必要がある。

参 考 文 献

- Beljaars, A.C.M., P. Vitterbo, M.J. Miller and A.K. Betts(1996): The anomalous rainfall over the United States during July 1993: sensitivity to land surface parameterization and soil moisture anomalies. *Mon. Wea. Rev.* 124, 362-383.
- Diameyer, P.A.(1997): Assessing GCM sensitivity to soil wetness using GSWP data. Report 47, Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 17pp.
- Hahn, D.G. and J. Shukla(1976): An apparent relationship between Eurasian snowcover and Indian monsoon rainfall. *J. Atmos. Sci.*, 33, 2461-2463.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)(1996): Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution to Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC. eds. Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, Cambridge University Press, UK, 572pp.
- 気候変動対策室(1992): 第48回気候問題懇談会報告(「エルニーニョ南方振動(ENSO)とモンスーン」). 測候時報, 59, 189-207.
- Oki, T., K. Musiaka, H. Matsuyama and K. Masuda(1995): Global atmospheric water balance and runoff from large river basins. *Hydrol. Processes*, 9, 655-678.
- P.J. Sellers, R.E. Dickinson, D.A. Randall, A.K. Betts, F.G. Hall, J.A. Berry, G.J. Collatz, A.S. Denning, H.A. Mooney, C.A. Nobre, N. Sato, C.B. Field and A. Henderson-Sellers (1997): Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275, 502-509.
- 佐藤信夫・西村照幸(1996): 土壌水分解析に関するノート. 数値予報課報告・別冊第42号, 57-61.
- 安成哲三(1994): アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画(GAME). *天気*, 41, 459-464.
- 安成哲三(1994): アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画(GAME). *水文水資源学会誌*, 7, 343-345.

略語一覧

AAN	: Asian AWS Network	: 放射・熱収支長期モニタリング
AMIP	: Atmospheric Model Intercomparison project	: 大気モデル相互比較実験
APN	: Asian Pacific Network for Global Change Research	: アジア太平洋地域変動研究ネットワーク
AWS	: Automatic Weather Stations	:
COARE	: Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment	: 海洋・大気結合応答実験
ECMWF	: European Centre for Medium-range Weather Forecasts	: ヨーロッパ中期予報センター
ENSO	: El Nino / Southern Oscillation	: エルニーニョ・南方振動
FAO	: Food and Agriculture Organization	: 世界食料農業機関
FY-II	:	: 中国の静止気象衛星
GAIN	: GAME Archive & Information Network	: データ・情報ネットワーク
GAME	: GEWEX Asian Monsoon Experiment	: アジアモンスーンエネルギー水循環実験 計画, GEWEX/WCRP
GAME-IPO	:	: GAME 国際事務局
GCIP	: GEWEX Continental Scale Information Project	: GEWEX 大陸スケールエネルギー水循環 実験計画 (ミシシッピ川流域)
GCM	: General Circulation Model	: 大気大循環モデル
GCOS	: Global Climate Observing System	: 全球気候観測システム
GCSS	: GEWEX Cloud System Study	: GEWEX 雲システム研究, GEWEX/WCRP
GEWEX	: Global Energy and Water Cycle Experiment	: 全球エネルギー・水循環実験計画, WCRP
GMS	: Geostationary Meteorological Satellite	: 静止気象衛星
GOOS	: Global Ocean Observing System	: 全球海洋観測システム
GSWP	: Global Soil Wetness Project	: 全球土壌水分プロジェクト
GTOS	: Global Terrestrial Observing System	: 全球陸面観測システム
GTS	: Global Telecommunication System	: 全球気象通信システム
HUBEX	: Huai-He River Basin Experiment	:
IGBP	: International Geosphere-Biosphere Programme	: 地球圏-生物圏国際共同研究計画, ICSU
IOP	: Intensive Observing Period	: 集中観測計画
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change	: 気候変動に関する政府間パネル
ISLSCP	: International Satellite Land Surface Climatology Project	: 国際衛星陸面過程気候プロジェクト, GEWEX/WCRP, BAHC/IGBP
ISP	: International Science Panel	: 国際科学推進パネル
KORMEX	: Korean Monsoon Experiment	:
PAR	: Photosynthetically active radiation	: 光合成有効放射
PILPS	: Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes	: 陸面過程スキームの比較実験
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・全球大気変動研究計画, WCRP
TRMM	: Tropical Rainfall Measuring Mission	: 熱帯降雨観測衛星
WCRP	: World Climate Research Programme	: 世界気候研究計画, WCP
WMO	: World Meteorological Organization	: 世界気象機関