

# 水文観測と地球環境

Hydrological Observations for Understanding of the Global Environment

砂田 憲吾

Kengo SUNADA

## 1. はじめに

これまで工学系や農学系の分野で進められてきた水文学の研究は、河川の流域あるいはそれ以下のスケールでの水循環過程が主な対象とされ、河川の計画や洪水予測の問題、流域への水供給その他の問題に対して多くの有用な成果をもたらしてきた。しかしながら、最近の地球環境変化への危機や関心の高まりは本来地球上の水循環を研究対象とする水文学が取り組むべき重要な問題をあらためて提起している。いうまでもなく、水は広く地球上を循環しながらエネルギーを受容・運搬し、地球の基本的な環境を形成する。多様な地表面と大気との相互作用を考慮した水循環過程、熱エネルギーの再配分に関わる水の役割を明らかにすることは極めて重要である。地球環境に関わる大気、生物、化学などさまざまな分野との関係においても水文学は中心的かつ重要な課題を担うべき立場にあるといえる。地域規模とも整合する地球規模での周到な水文モデルの構築が必要になってきている。Eagleson<sup>1)</sup>は、この研究の方向を「地球規模水文学」と名付け、他の地球科学者と協調しながらこれからの水文学の果たすべき使命を強調している。

水文学の研究を支える水文観測のあり方も最近ではその内容、位置づけと共に変化し、拡大してきている。従来は、流出系へのより正確な入力としての降水量や流出量、水収支の基本データとしての蒸発散量は水文量の重要な観測対象であった。しかしながら、最近の「観測」は、従来の観測という概念を超えて、「現象の把握のための情報収集システムとその有効利用法」とも言うべき時代に至っている。言い替えば、水循環の定量的・客観的把握に繋がる計測と評価はそのまま広い水文観測と位置づけることができよう。従来の観測目標や技術に加えて、以下のシステムの進歩に期待されるところが大きい。

まず、リモートセンシングデータの利用が挙げられる。衛星リモートセンシング、航空機観測、地上高機能レーダー降水観測技術が充実しつつある。続いて、地被・土地利用情報の収集と有効利用システムを含む技術としてのGIS（地理情報システム）が整備されつつある。こうした観測情報の利用を前提としていくつかの試みもなされている。すなわち、分布情報を有効に利用するために、水文モデルの開発と整備が行われ、その、より進んだ研究の方向として現象の把握・評価のための時間的、空間的スケールも問題となる。

本稿ではまず、地球環境の理解の方法論、研究の方向について整理する。続いて、リモートセンシングの中心的課題、水文量抽出のための新たなモデルの構成やスケールに関する研究を調べ、GISの利用に関する最近の研究について眺める。最後に、陸域-大気系の水循環過程解明のための総合的な地上・衛星同時観測計画として、最近開始された琵琶湖プロジェクトについて紹介する。

## 2. 地球環境、その理解の方法

### 2.1 GEWEX (全地球エネルギー・水循環観測計画)<sup>2), 3), 4)</sup>

地球環境、とりわけ気候の変化が注目されている。例えば、地球温暖化が議論され、その影響が注目されてさまざまな分野への影響や対策のための研究<sup>5)</sup>も開始されている。しかしながらその前提となる地球環境・気候システムについての着実な理解がまず重要である。このために、気候変動国際共同研究計画(WCRP)が準備され、その大型の副計画として、全地球エネルギー・水循環観測計画(GEWEX: Global Energy and

Water Cycle Experiment) が予定されている。

GEWEXの目標は、地球上のエネルギーと水の循環の実態を明らかにすること、地球上の水循環の変化が大気、海洋に及ぼすインパクトをモデル化すること、地球温暖化など環境変化にともなう水循環、水資源の変化を予測することである。さらに、人工衛星などの地球観測システムについて、次世代のプロトタイプを開発、発展させることもめざされている。GEWEXはエネルギーと水の循環という気候を決める重要な因子を対象としており、その実施はかなり長期にわたることが予測されるが、当面、1)大気・地表におけるエネルギーと放射収支、2)雲システムと降水、3)大気・土壌・植生における水循環、の3つの柱を中心に、研究計画が検討されている。現状では、3番目の計画の検討が先行している。

大気中の二酸化炭素量の倍増による数十年後の気候の温暖化を定量的に予測するには、現在全球の大気大循環モデル (GCMs: General Circulation Models) によるシミュレーションが用いられる。このモデルでは、コンピューターの制約から、気候を形成するエネルギーや水の循環を表す物理過程を重視し、空間分解能は積分時間が長いこともあり抑えられている (計算格子間隔4~500km程度)。しかしながら、水循環の特徴は、雲・降水など空間スケールの小さい現象・過程が重要な働きをしていることである。このスケールでは、雷雨はもちろん台風の再現も困難であり、更に、植生・地質・地形などの空間的に非常に不均質な地表の現象・過程が深く関与する現象を直接考慮することができない。このために、図-1に示されるように、GEWEX研究計画では空間スケールの小さい現象・過程を空間スケールの大きい現象・過程の中にいかにaggregate (集合化、平均化) していくかが課題となる。一方、GEWEXの目標の一つに地球環境の変化に伴う水循環・水資源の予測が挙げられている。このためには、GCMのような気候モデルの結果をどのようにして局域での変化としてdisaggregate (細分化) し解釈していくかが問題となる。すなわち、scale-up, scale-downの方法論の開発が必要となる。このために、特に大陸スケール国際共同プロジェクト (GCIP: GEWEX Continental-scale International Project) が構想され、観測施設の状況、データの質などを考慮してミシシッピー河流域で具体的計画が練られている。GEWEX関連の最初の国際共同研究計画として1995年頃のスタートが目指されている。

ミシシッピー河流域GCIPへの協力と共に、各国はそれぞれのGCIPについての研究計画が検討されている。日本での GEWEX の計画は、GEWEX小委員会 (委員長: 名古屋大学武田喬男教授) および作業委員会 (委員長: 筑波大

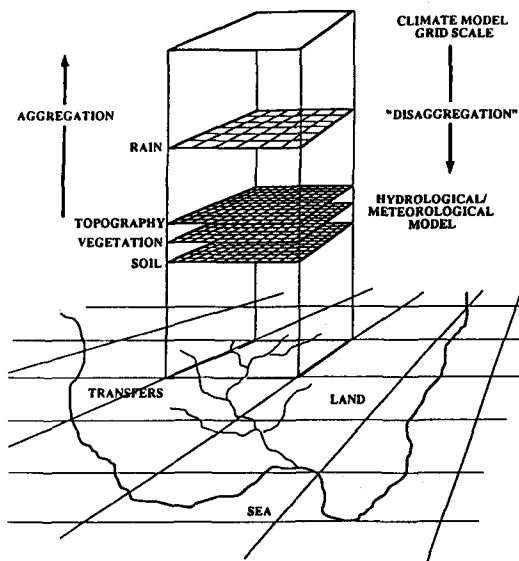


図-1 GCIPにおけるscale aggregation -disaggregation 2)

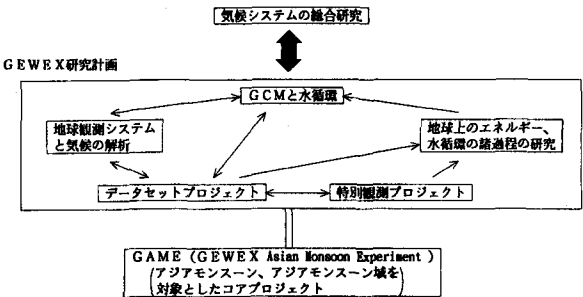


図-2 日本のGEWEX計画の概要 2)

学安成哲三教授)で検討されている。その目標は大きく次のように分けられている。(図-2)

#### I. 大気大循環モデルと水循環

#### II. 地球観測システムと気候の解析

#### III. 地球上のエネルギー・水循環の諸過程の研究

水文学分野にはすべての目標が関係するが、当面Ⅲに属する課題を中心に重点がおかれることになる。共通したコアプロジェクトとしては、アジアモンスーン域を対象とするGAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment)の研究計画が進められている。アジアモンスーンは地球の気候システムの重要な要素であり、地球上の水とエネルギーの循環の理解が深められること、域内の多様な陸面、さまざまなスケールの相互作用の解明に期待が寄せられる。

GEWEX, GCIPを含む地球環境問題に関する研究への対処について、西岡は市川による「分散化された巨大システム科学」という概念<sup>9)</sup>で考えている。すなわち、地球自体が巨大なシステムであるだけでなく、問題の解決に向けてあらゆる分野の人々が協力し、ある方向性を持って動く必要のある点で、地球環境研究は「巨大システム科学」である。しかし、目標・成果やそれを実行する機関が一元的に定められたところでない点も地球観測研究の特徴でもある。地球環境研究においては、おぼろげな目標は共通であるが、研究者は各国・各分野に分散し、それぞれに自分の位置を同定しながら自律的に研究を進めて行くことになる。この意味で地球環境研究は「分散化された巨大システム科学」である。研究者を統合するしかけは、強い統合の組織ではなく、ゆるやかな共通の場の存在である。(西岡<sup>1)</sup>)

ところで、水文諸量の観測が地球環境の解明に貢献するためには、

①現象に応じたスケールのもとで、水循環過程モデルを用いて、観測値による初期境界条件を与えて支配方程式を積分し、それらを統合して解を得る、

②直接地球規模でのスケールの現象をモデルと観測値により議論する、

の二つの方法があろう。本稿ではより厳密な前者のアプローチに沿う研究を中心に眺めていくが、その前に、後者の方法②についての最近の研究を次節で若干レビューしておく。

### 2.2 地球規模水循環の直接検証

広範囲の良く吟味された水文気象データは有用である。Wallis, Lettenmaier and Wood<sup>1)</sup>はGCMsによる計算結果をそのままのスケールで直接検証するためのアメリカ本土規模の水文気象資料の整備・調製を行っている。1009カ所のUSGS(地質調査所)の流量データ、1036カ所のNOAAの気象データステーションのデータから、特に、流域変更など利水状況を考慮して、日単位の雨量・流量のデータセットを構築している。図-3は流域変更等を考慮した合衆国本土における水文域を示している。

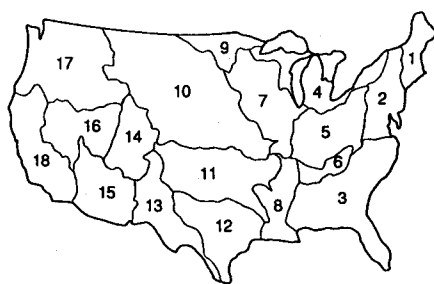
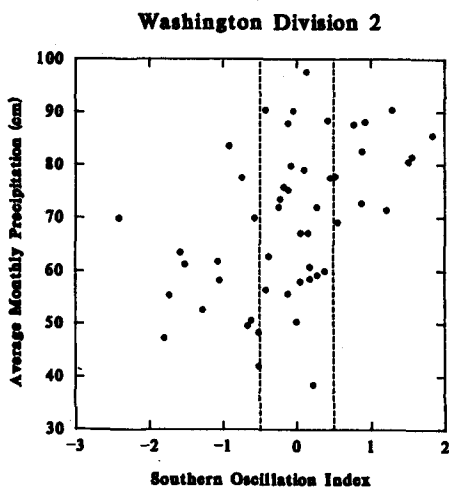
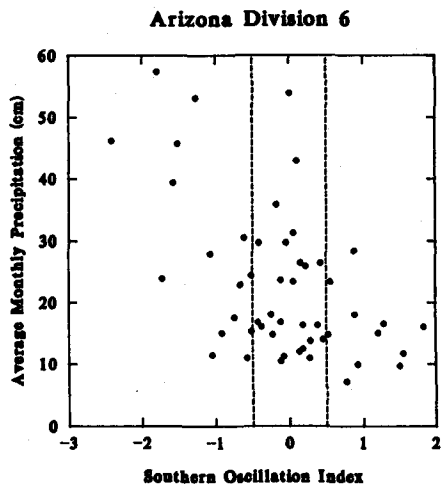


図-3 合衆国本土における“水文域”<sup>1)</sup>

地域気象と河川流況の変動についてもっと大きなスケールでの気象変動との関係が明らかになれば、気候の変化にともなう地域の降水量・流量の予測も立て易い。エルニーニョ現象は、1~2万km<sup>2</sup>、1年~1年半位持続する(EL Nino-Southern Oscillation, ENSO周期で3~5年程度)のスケールで生じ、日本を含む太平洋周辺の天候の変動に強い影響を及ぼす。特に、エルニーニョ現象のときに現れる北半球中・高緯度大気循環場の変動として太平洋・北米パターンがよく知られている。これに関して、例えば、Redmond and Koch<sup>2)</sup>はアメリカ西部・西海岸地域の51年間の降水・気温・河川流量とエルニーニョに伴う南方振動の指標(SOI: Southern Oscillation Index, タヒチ島における各月ご



(a)



(b)

図-4 10月～3月平均降水量と7月～11月のSOI（南方振動指数）との関係<sup>9)</sup>

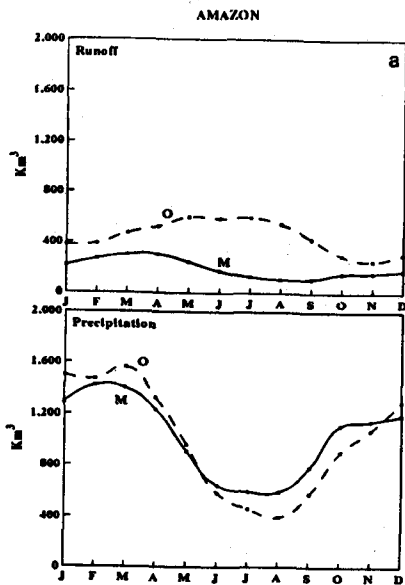
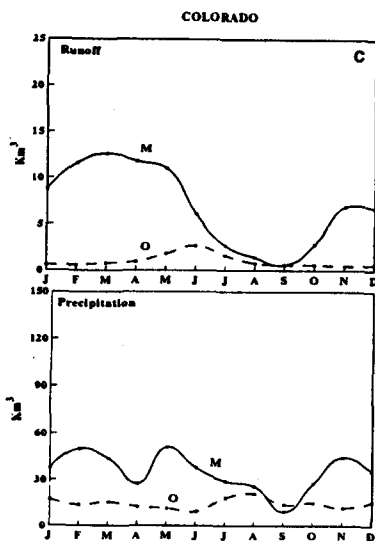


図-5 GCM (NASA/GISS) による季節河川流出量の算定<sup>10)</sup>

との海面気圧の平均値からのずれから、ダーウィンのそれを差し引いて得られる) との関係調べ、この地域の10月～3月の降水が、7月～11月のエルニーニョとの関係が強いことなどを見いだしている。図-4は、(a)北部ワシントン州と、(b)南部アリゾナ州での期間月平均降水量とSOIとの関係を示し、低いSOI（エルニーニョの発生）に伴う降水量の多少は地域によってその傾向が逆転している。

GCMsによれば、よく知られる気候の将来予測（気温）だけでなく、河川流量も算定される。Kuhl and Miller<sup>10)</sup> は現況気候条件下で  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  の緯度経度水平空間格子、鉛直10mbまで9層のGCM（NASA/GISS開発）を

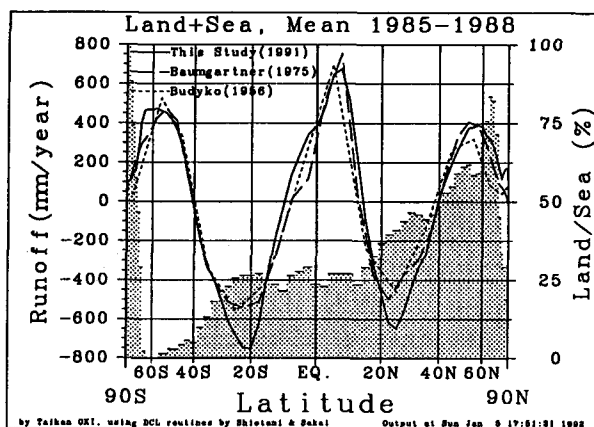


図-6 全球の流出量の緯度分布算定結果<sup>11)</sup>

用いて、蒸発散量を考慮、地表面条件に応じて設定された許容保水量のもとで河川流出量を算定している。流出はすぐに河口に到達するという仮定のもとで、世界中の大河川の月毎の流出量を算定して観測値と比較した。乾燥地域より湿潤地域の方がモデルの再現性が良いことなどが得られた。図-5は結果の一例で、降水量はモデル(M)とUNESCOの観測値(O)と良く一致しているが、流出では位相もずれ、モデルは観測値の半分程度になること、土壌条件などそれぞれモデルの不十分な点もみられる。

同様な観点から、世界中の観測データを直接用いて河川流量も算定し得る。沖・虫明・増田<sup>11)</sup>は全球規模の水循環と水収支の現況把握のために、大気水収支法を用いて地球規模の水収支を計算している。まず、大気水収支式、流域水収支式において、年間の大気中の貯留量変化、流域貯留量の変化を無視し、2.5°メッシュでの液相・固相の移流も無視する。大河川での適切な流量観測地点では集水域のすべての地下水流出も河川流量として観測されるとすれば、年単位の水収支では、水蒸気収束量と(降水量-蒸発量)と流出量とは互いに等しいことになる。水蒸気収束量の算定に用いたデータは大気側がECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)で作成された4次元同化による客観解析データ、地上河川流量はGRDC(Global Runoff Data Center)に集められた河川流量のうち、流域面積が30万km<sup>2</sup>以上の35河川流域のデータである。図-6は大気水収支の算定によって得られた全球の流出量の緯度分布であり、従来の研究結果ともよく一致している。こうした解析は水文観測を総合して、直接地球規模の水文環境を評価するのに役立つだけでなく、局所モデルの統合により得られることになるだろうより厳密な水循環の今後の解析にとっても見通しを与えてくれることにも意味がある。

### 3. リモートセンシングと水文量抽出モデル

レーダーや人工衛星をはじめとするリモートセンシング技術は、最近著しい進歩をとげている。リモートセンシングの持つ広域性・瞬時性、場合によっては日常モニタリングの可能な優れた特性は、これからの水文観測にとって欠くことのできない情報を提供することになる。高機能(3次元、ドップラー、偏波など)のレーダーによる降雨観測が行われ、衛星リモートセンシングも地球環境監視のための運用の時代に移行しつつある。現在運用中から計画のものまで、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)、ERS-1(後述)、TRMM(後述)、ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)さらには、国際的協調による複数の極軌道衛星同時打ち上げ構想のもとでの総合的な地球観測がめざされている。センサーの開発と改良が進む中で、特に、マイクロ波リモートセンシングは、水蒸気、地表付近の土壌水分、積雪量などの諸水文状

態量の定量観測技術として期待されている。

アメリカの地球科学委員会(CES: Committee on Earth Science)は1989年に地球変動研究計画(GCRP: Global Change Research Program)を掲げ、衛星観測計画を担当する NASA は計画の一つに地球観測システム(EOS: Earth Observing System)を中心に据えたプロジェクトを開始している。これは極軌道衛星(POP: Polar Orbiting Platform)を中心とした、日本、ヨーロッパ、を含む国際協力による計画で、目標は「水圏」、「大気圏」、「生物圏」、「固体地球」に関する総合的本格的な地球環境時代の幕を開けようとしている。日本では、関連した計画策定のために、宇宙開発事業団(NASDA: National Space Development Agency of Japan)は JPOP (Japan-POP)計画を機に1990年にミッション解析調査委員会を発足させている。表-1は、その時点で検討され提案されたJPOP-1(ADEOS-II)搭載センサーの候補である。その後はかの衛星計画とも統合させ「地球環境観測委員会」を構成し、分科会・ワーキンググループごとに議論することになった。水文過程分科会は京

都大学池淵周一教授を委員長に、水循環過程観測の立場から観測項目、必要センサーの提案を検討している。この間の経緯については小池により詳しく報告されている<sup>13)</sup>。ミッション開発者側が科学者に必要な要望を聴くことになったことは当然とはいえ意義深く、また責任も生ずる。得られたデータから何とか解釈していく姿勢から、今後は何をどのように知るために、どんなセンサーが必要かを提案していく時代になっている。

表-1 JPOP-1(ADEOS-II)搭載センサーの候補<sup>12)</sup>

|                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|
| ○第1優先度                                                                         |
| 改良型マイクロ波放射計                                                                    |
| AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer)                                  |
| 広域観測走査放射計                                                                      |
| GLI (Global Imager)                                                            |
| 実験研究用大気サウンダ及び高度計                                                               |
| E-LIDAR (Experimental LIDAR)                                                   |
| 降水レーダ                                                                          |
| PR (Precipitation Radar)                                                       |
| ○第2優先度                                                                         |
| AMSR, GLI, E-LIDAR+                                                            |
| チューナブルエタロン地球遠隔測定装置                                                             |
| TERSE (Tunable Etalon Remote Sounder of Earth)                                 |
| 3次元オゾン分布紫外撮像分光計                                                                |
| TOMIUS (Three-dimensional Ozone Mapping with Ultraviolet Imaging Spectrometer) |
| 成層圏周縁大気赤外放射分光計                                                                 |
| SLIES (Stratospheric Limb Infrared Emission Spectrometer)                      |
| ○第3優先度                                                                         |
| AMSR, GLI, E-LIDAR+                                                            |
| 改良型レーダ高度計                                                                      |
| ADALT (Advanced Radar Altimeter)                                               |

### 3.1 リモートセンシングによる水文学の観測

#### <積雪量・融雪量>

武田・高橋<sup>13)</sup>はLandsat MSS (Multi Spectral Scanner)データを用い、積算暖度法とも併せて流域最大積雪水量の算定について先駆的な解析を行っている。積雪域・無雪域の分離にはOdegaardの方法が用いられた。すなわち、CCT(Computer Compatible Tape)データを用いて、積雪領域・無雪領域のそれぞれのトレーニングエリアにおいてCCT計数値の度数分布を求め、それらの平均値を境界値とする方法である。高橋ら<sup>14)</sup>は同様の積雪面積情報を用いて、各高度で流域面積率が一定の場合、積雪水量が積雪面積率の2乗に比例する関係を見いだしている。さらに、小池ら<sup>15)</sup>はさらに、マイクロ波誘電特性に基づいて積雪構造を明らかにする手法の開発を試みている。一方、風間・沢本・Jirayoot<sup>16)</sup>は、NOAAデータはLandsatデータに比較して、空間分解能は低下するが時間的に頻度の高いデータが得られ、融雪出水の予測には有効であろうとして、NOAA-AVHRR(Advances Very High Resolution Radiometer)データを用いた残雪域の把握を行い融雪出水量について議論している。力丸<sup>17)</sup>は空間分解能の高い好天時のLandsat-MSS-TM(Thematic Mapper)データによる融雪履歴情報の支援により、NOAA-AVHRR画像内積雪境界位置の推定方法を提案している。

#### <土壌水分>

表層土壌水分量は、後述する蒸発散をはじめとする地表・大気間の水循環の解析に不可欠な水文量である。マイクロ波帯の誘電率が水(実部80)と乾燥土(2~4)とで大きく異なる特性を用いて、マイクロ波による土壌水分量の測定が期待されている。アクティブマイクロ波によるリモートセンシングは気象レーダーなどで早くから使われていた<sup>18)</sup>。最近では、航空機・衛星に搭載される合成開口レーダー(SAR: Synthetic

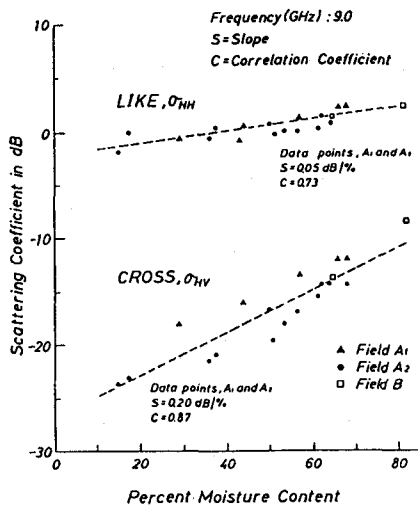


図-7 後方散乱係数の偏波による感度<sup>21)</sup>

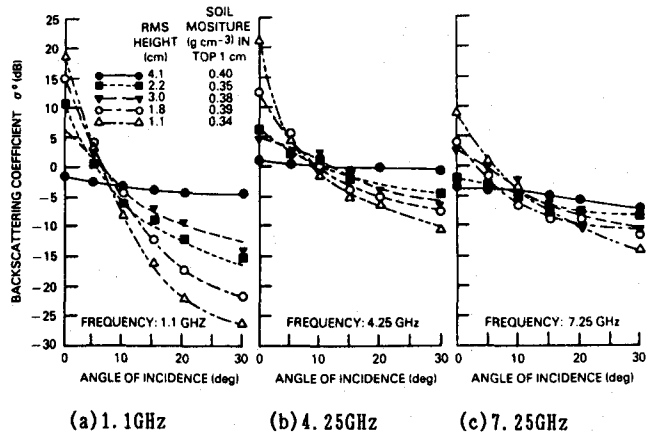


図-8 後方散乱係数に与える入射角と表面粗度の影響<sup>22)</sup>

Aperture Radar)が注目されている。衛星では1978年に最初にアメリカのSEASATに搭載され、現在ではヨーロッパ、日本のE/J-ERS-1(EERS-1: European Remote Sensing Satellite-1, JERS-1: (Japan) Earth Resource Satellite-1)の主要センサーとして観測とその検証が行われている。SARは光学センサーに比べ、太陽高度に無関係であり、波長が4桁以上長いので大気中の水滴・エアロゾル等による減衰が少なく、かつ光学センサーに匹敵する高分解能が得られることから多方面から関心が持たれている。表層土壌水分量の中でも絶好の観測対象ではあるが、深見<sup>19)</sup>は、マイクロ波リモートセンシングにより直接に得られるデータは純粋に対象の誘電率分布・散乱特性に関する電磁気学理論により理解されるべきものであることをあらためて指摘している。受信するマイクロ波の特性は、目標としている量以外の表皮深さ(感応深さ)、水分量分布形、土壌面粗度、周波数、入射角、偏波により異なる。このことはマイクロ波に限らないが、土壌面からの放射・散乱特性を正しく評価し、水分情報を結び付けるにはよく整備されたモデルが必要となる。図-7、8はこうした目的のために行われた現地・実験室での研究の例である。能動方式のマイクロ波リモートセンシングで得られる後方散乱係数について、図-7は水平(H)、垂直(V)の偏波送受信の組み合わせによる感度を示し、図-8は試料面への入射角および表面粗度への依存性を表している<sup>20)</sup>。

衛星SARについても、当然、土壌水分検証についての地上実験観測が必要である。現在、E/J-ERS-1については、土壌水分検証グループ(代表・東京大学虫明功臣教授)が92~93年度に千葉・琵琶湖・山梨において、土壌サンプリング、地上散乱計と併せて検証実験を展開している。

#### <広域蒸発散量の推定>

多様な地表面過程が関係する蒸発散量は広域での土地利用状況・水文条件を考慮し得るリモートセンシングデータの利用が特に有効である。しかしながら、関係する水文諸条件は多く、単一のセンサーによるデータのみでは不十分なことから、フラックスの形式で推定する必要があることなどから、蒸発散モデルを介して算定する必要がある、リモートセンシングデータの利用方法はさまざまである。リモートセンシングデータを一部の条件・観測数値のように扱う研究例は多く、ここではその代表例を取り上げる。観測というよりモデルに組み込んで、ほかの水文過程と同時に議論するような研究例は次節で紹介することにする。

例えば、地表面温度の空間分布は地中熱フラックス、熱収支の算定に重要である。Price<sup>21)</sup>はHCMM(Heat Capacity Mapping Mission)による昼夜一組の熱赤外データから地表面熱収支を推定し、地上微気象データと

組み合わせて日蒸発量推定の可能性を調べた。Sugita and Brutsaert<sup>24)</sup> は国際衛星利用地表気候研究計画に関する第1回現地実験(FIFE: First International Satellite Land Surface Climatology Project Field Experiment)のなかで、Landsat による熱赤外データと地上風速から顕熱フラックスを計算し、熱収支式から蒸発散量を求めている。

これらとは別タイプの衛星データ利用方法もある。古藤田ら<sup>25)</sup> はLandsat データを用いて土地利用分類を行い、7つの分類のもとで、それらのアルベド、地中熱流量係数、(平均)地表面温度を用意し、Priestly and Taylor の平衡蒸発量を応用した式により関東地域の日蒸発散量を求めている。佐渡<sup>26)</sup> も同様な方法で蒸発散量を推定している。

#### <降雨の全球モニタリング>

やがては降水レーダーを搭載した衛星が打ち上げられることになるが(後述のTRMM)、GMS (Geostationary Meteorological Satellite)、NOAAなどの現有の衛星データを用いて全球的な降水の観測モニタリングのための検討も始められている。竹内・海老沢・池本<sup>27, 28)</sup> は、GMS-IR (-Infrared)データの1984年5月～7月93日間の基本ヒストグラムおよびタイ国チャオプラヤ川流域約11万km<sup>2</sup>部分の144地点の日降雨量記録を用いて、衛星による種々の時空間平均スケールの降雨量推定式を同定した。説明変数として235K以下の冷たい雲の割合Fcを用い、10日平均2.5°メッシュの降雨推定式として表-2のようなPIが得られた。推定式中のtは対象とする降雨時間数を表す。洋上で得られた他の推定式、Arkinらにより提案され現在CAC/NOAAで全球の低緯度帯降雨量推定に用いられているGPI、またMaruyama, Eguchiによるものいずれと比較しても、同一のFcに対し低い推定降雨量を与える。低緯度帯の雲頂温度と地上降雨量の関係は陸上・洋上で異なっており、地形の影響が無視できないため、IRを用いた地球規模の降雨監視には、地域別推定式を整備する必要があるとしている。竹内らは同様の地域を含む世界各地の日降雨量、月降雨量について、NOAAによる OLR (Outgoing Longwave Radiation)と地上降雨量との関係も調べている<sup>29)</sup>。

表-2 GMS-IRを用いる降雨推定式の比較<sup>27, 28)</sup>

|                  | データ期間           | 推定式                    | メッシュ | 時間単位 | 相関係数 |
|------------------|-----------------|------------------------|------|------|------|
| Arkin, et al.    | : 1974.6-9      | $GPI=3F_{ct}$          | 2.5° | 日    | 0.85 |
| Maruyama, et al. | : 1978.2-83.12  | $PI=1.57F_{ct}+0.013t$ | 1.0° | 月    | 0.78 |
| Eguchi           | : 1978.12-79.12 | $PI=1.25F_{ct}+0.05t$  | 1.0° | 10日  | 0.66 |
| Takeuchi, et al. | : 1984.5-7      | $PI=0.51F_{ct}+0.14t$  | 2.5° | 10日  | 0.50 |

註) Arkin et al., Takeuchi et al.は235K、Maruyama et al., Eguchiは400mb面相当温度を閾値として用いている。

#### <熱帯域の降雨>

地球環境の中で特に熱帯域の降雨の観測を目的としてTRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)が1997年の打ち上げ予定で計画されている<sup>30)</sup>。熱帯降雨は大気や熱の大循環の駆動源として重要である。すなわち、地・海表面における非放射のエネルギーは気温の上昇と水蒸気潜熱として使われる。水蒸気のエネルギーは降水現象を通じて大気を暖め、大気を駆動し、生じた風により海流を駆動する。海洋は水蒸気を通じて大気に影響を与えている。降水現象は低緯度・熱帯地域の大気海洋の相互作用に重要な役割を果たしており、中高緯度域や大気の長期変動の大きな要因ともなっており、これらを明らかにすることは重要な課題である。しかし、熱帯域では水文気象に関する観測点や資料が少なく、その観測には衛星観測が有効である。計画は1985年以来、日米共同により計画準備が進められ、衛星は軌道傾斜角35° 高度350kmの円軌道に打ち上げられ、3年間の観測を行うことになっている。可視・赤外放射計、マイクロ波放射計とともに、昼夜・陸上海上の区別なく降雨の鉛直構造の観測が可能な降雨レーダー(PR: Precipitation Radar)に期待が寄せられている。



### 3.2 レーダー雨量計システム<sup>11)</sup>

レーダー雨量計等の地上降雨情報システムは、洪水時の対策・防災上から重要なだけでなく、日常の降雨域監視・降雨特性の解析にとって重要である。情報は5分単位で、半径120kmの範囲が把握できることから非常に有効である。しかし、現有のレーダーシステムには以下のような問題点がある。

- ① プライットバンドの発生 上空  $0^{\circ}$  C付近での氷粒表面の液化・大氷粒化により誘電率の増大、見かけの強降雨域のようなエコーの発生。
- ② 雨粒と氷粒・雪片の判別困難
- ③ 降雨換算定数  $B, \beta$  の推定が困難 反射電力 ( $Z$ ) から降雨強度 ( $R$ ) に換算するときに降水粒径分布を用いるが、その分布を表すのに2つの未知パラメーターが必要で、レーダーエコー情報だけでは  $Z = BR^{\beta}$  とするときの定数  $B, \beta$  が推定しにくい。

近年、以上の問題点を克服するために、従来からの受信電力値のみならず、周波数変化の特性（ドップラ効果）や偏波特性を利用して観測情報量を増すことにより観測精度を高めようとする努力がなされている。これには、二波長レーダー（波長の異なる電波を用いて反射特性の差を利用）、円偏波レーダー（円偏波を受けた物体からの反射信号の円偏波抑圧度比を観測）、二重偏波レーダー（水平、垂直偏波の反射因子の差を計測）、垂直指向ドップラレーダー（水物質の落下速度の分布を観測）などがある。これらは総称して特殊レーダー (Multiparameter Radar) と呼ばれている。

二偏波レーダーのうち直交二偏波レーダーによる降雨強度推定精度向上の例を見てみる。イギリスのラザフォードアップルトン研究所では  $Z_{0.5}$ （水平および垂直偏波によって得られるレーダ反射因子  $Z_H, Z_V$  を用いて、 $Z_{0.5} = 10 \log(Z_H/Z_V)$  で定義される）を用いた降水強度の観測精度を、ディストロメータ（雨滴計）の観測データのみを用いた場合と、レーダー観測値と評価とディストロメータおよび地上雨量計の観測値との対比による場合とで評価している。図-9 (a), (b) はその結果である。(a) はディストロメータの観測値を用いて  $Z_H$  を計算し、 $Z = 284R^{1.47}$  を用いて降水強度を推定したものと、ディストロメータの観測値から直接降水強度を求めたものとの散布図である。ばらつきが大きく標準偏差は33%である。これに対して、(b) は  $Z_{0.5}$  を用いて降水強度を推定した結果である。標準偏差は14%となり、単純な  $Z \sim R$  関係を用いるより精度が向上している。

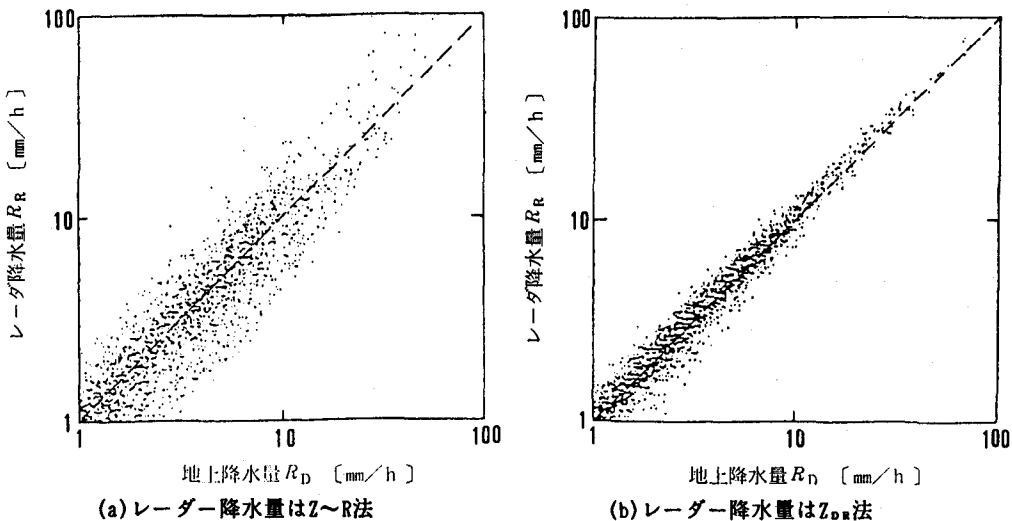


図-9 レーダー降水量と地上降水量の散布図<sup>11)</sup> ( $Z_{0.5}$ と $Z_H$ はディストロメータの観測値から算出)

3.3 水文学抽出モデル

水文学の中には直接観測することが困難なものや、フラックスのかたちで求められるべきものが少なくない。この場合、いわゆるプロセススタディーの成果も取り入れた検出が必要になる。モデルを介しての水文学観測を進めて水文学量そのものを評価すると共に、逆に、他の水文学観測値と総合して、モデルの検証・改善を進めることが必要になる。

＜リモートセンシングデータを用いる水文学モデル＞

Camillo, Gurney and Schugge<sup>22, 23, 24)</sup> は地表面と大気との相互作用に注目して、土壌層中の水・熱フラックスと地表面での熱収支とを同時にモデル化して解き、地表面温度とモデルで算定されるそれとを比較検討した。図-10はその結果であり、推定値(b)は観測値(a)と良く合っている。同時に地中温度の分布も推定されている。検討の過程で、土の熱伝導係数と地表面粗度は結果に敏感に影響することも指摘している。こうした研究が進めば、地表面温度を知ることにより、地中の温度・水分プロファイル、結果として蒸発散量まで求められることになる。

前述したように、より効果的なリモートセンシング観測の方法を水文学観測の観点から提案しようとする

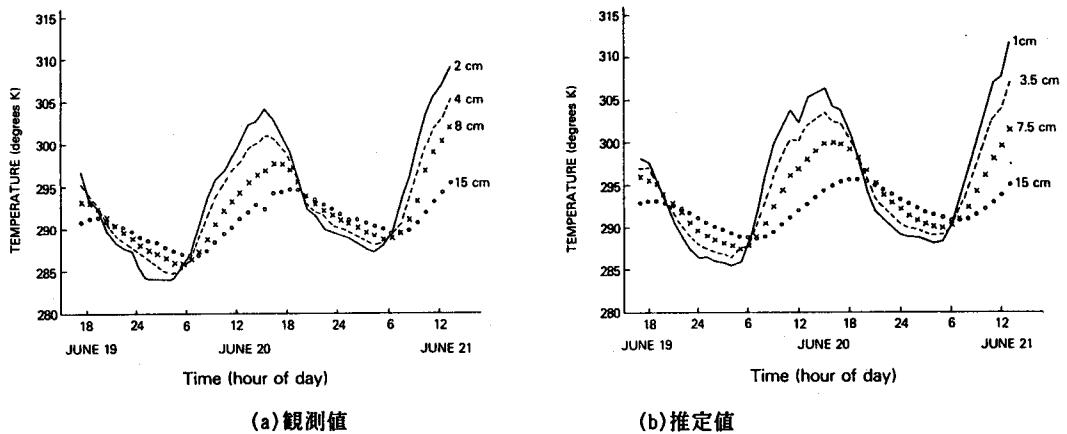


図-10 地表面・地中の温度の分布<sup>22)</sup>

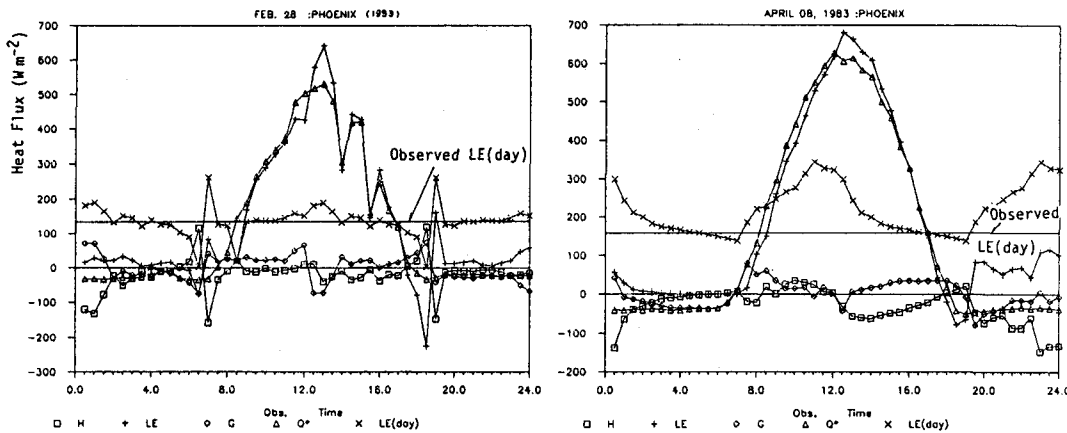


図-11 推定されたエネルギー収支と日蒸発散量<sup>22)</sup>

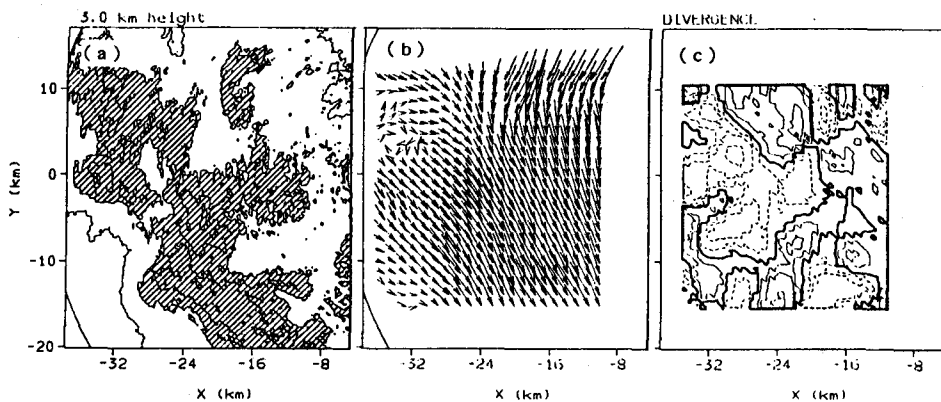


図-1 2 3km高度のエコー強度分布(a)とデュアルドップラー観測から推定された水平風速分布(観測値)(b)およびその収発散量分布(c)<sup>\*)</sup>

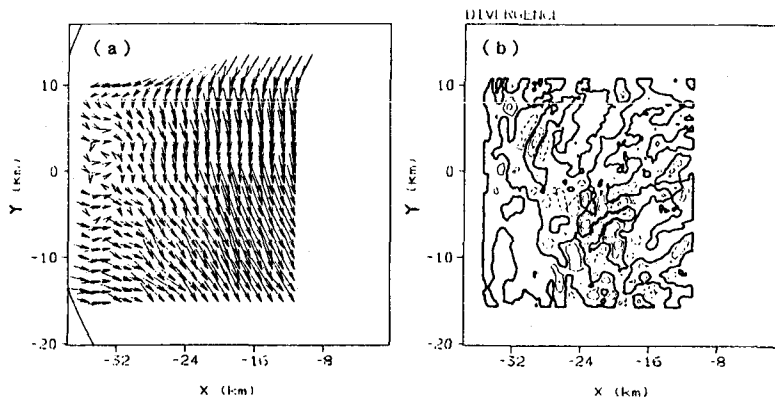


図-1 3 エコー強度分布から算定した3km高度の水平風速分布(a)と平滑化した収発散量分布(b)<sup>\*)</sup>

立場に立つ研究も必要である。Sunada, Sorooshian and Gay<sup>\*)</sup>は広域日蒸発散量推定のために、リモートセンシングデータを用いる新しいアルゴリズムを提案している。通常の地上微気象データと共に土壤水分量が知れたとして、地表面温度をリモートセンシングで観測することを考える。中立大気を仮定すれば、一日2回の観測により日平均蒸発散量の推定が可能であることを示したうえで、どのような時間帯のペア(2回)のリモートセンシングを行うのが精度が高いかを検討している。図-1 1は結果の例で、推定値(×印)が日平均蒸発散量の観測値(LE直線)により近い時間帯、すなわち日没・日の出前の時間帯での12時間おきペア観測が有効であることが判る。

大気中の風速プロファイルを同時に広域的に知ることは水・熱フラックスを把握するために重要であるが、その観測は、2台のドップラーレーダーによるなどのほかは単純なシステムでは困難である。将来の衛星観測による風速プロファイラとしてのLAWS(Laser Atmospheric Wind Sounder)はまだ搭載のめどが立っていない。中北<sup>\*)</sup>は3次元レーダーや衛星降雨レーダーによるエコー強度から水蒸気相変化量とメソβスケールでの風速を同時に推定する手法を提案している。降水の存在する大気の飽和状態の領域を対象として、偽湿潤断熱過程を考慮にいて、等方水平収束を仮定する。そのような場で、水分と飽和水蒸気量の保存式を用いて総観場の水平風速を初期値として次元風速を求めるものである。図-1 2 (b), (c)は推定された水平風速分布

と平滑化した収発散分布を示している。図-13 (b), (c)に与えられるデュアルドップラーレーダーによる観測に較べてもよく一致していることが判る。降水現象の解明、将来のTRMMデータの有効な解析に向けて今後の研究の進展が期待される。

水循環に関わる、多様な過程や相互作用を考慮したより新しいタイプの研究も進められている。例えば、土壌-植物-大気 連続系のモデル化などがそうである。従来個別の場合での所与の条件のもとでの応答の形で検討されてきた解析対象についても、それらの過程間の相互作用を重視し、連続した形で解釈する立場に立つものである。神田・日野<sup>37)</sup>は土壌系と大気系との間にあって、従来、機能が複雑なため現象記述のための方程式系が確立されていなかった植物系についてのモデル化を試みている。モデルでは根による吸水、茎による水分輸送、葉からの蒸散という植物内の水分の動きとともに、葉における熱収支、光合成過程、葉による運動量損失の考慮もなされている。諸因子に対するモデル植生総体の挙動として、ある植物物性条件の場合 (case(a)) が例えば図-14のように得られている。完全な検証は容易ではないが、少なくとも種々の力学量、熱量が植物生理作用・水循環過程に及ぼす影響についての“感度”を確かめることはできよう。複雑な水文循環系およびその相互作用が統合的に記述できれば、水文観測の方法、効果的な項目設定に大変有益な知見となる。神田ら<sup>38)</sup>はこのモデルを発展的に適用して、地域の微気候・環境に与える植生の効果についても議論している。

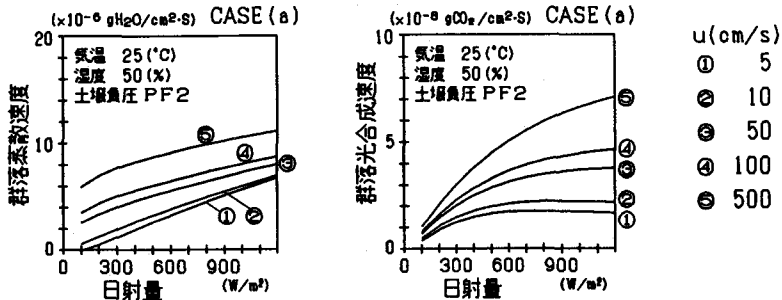


図-14 異なる風速に対応した光合成・蒸散-日射の関係<sup>37)</sup>

#### 4. GISとその応用

大気-陸域地表面との相互作用の結果、大気・水文条件は直接地表面地被条件に影響を及ぼす。従って、衛星リモートセンシングなどにより地被状況の変化をモニタリングする事により、地球規模での気候の変化、水文条件の変化を反映した環境の変化が直接検出できる。ここでは、それとは別に、水文現象の物理過程の生起場としての多様な地表面条件の計測手法・評価手法としてのGIS (地理情報システム: Geographical Information System) の利用を調べておこう。なお、GIS全般については宝<sup>39)</sup>により分かりやすく解説されている。

レーダー雨量計、国土数値情報など分布型水文情報の整備に対応する流出モデルの開発は、陸・小池・早川<sup>40)</sup>により早くから試みられている。地形標高デジタルマップと実河道データから擬河道網を作成し、直接流出に対してはKinematic wave モデル、基底流出成分については貯留関数法を用いて、レーダーアメダス合成値に対して流出解析を行う。図-15はメッシュサイズの違いによる擬河道網の表示の違いを表している。これらのメッシュサイズの違いによって、流路の水平長さや集水面積分布には大きな差は表れないが、流出の応答特性には100m、250mと500mメッシュとでは差のあることも結論されている。

水文循環や流出に与える影響の大きい地形の表現についてはさらに詳細に検討する必要がある。高棹・椎葉・立川<sup>41,42)</sup>は三角形要素のモデルの合理性を支持して、その処理システム、流域場の表現システムを開

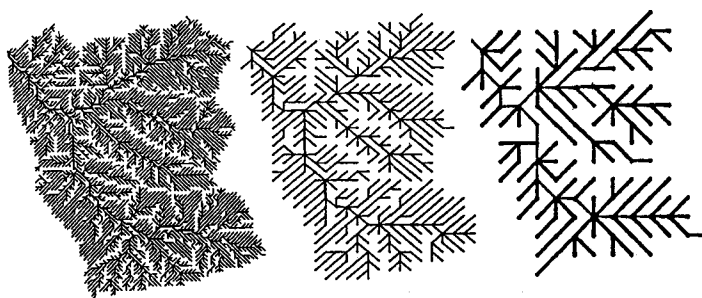


図-15 魚野川流域にけるメッシュサイズの違いによる  
擬河道網の違い (L=100m, 250m, 500m)<sup>(40)</sup>

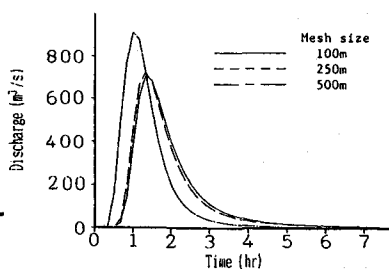
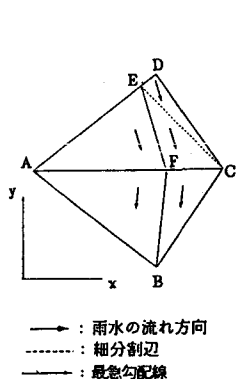
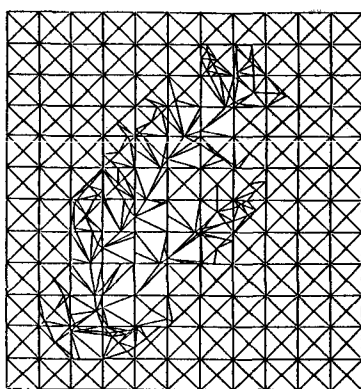


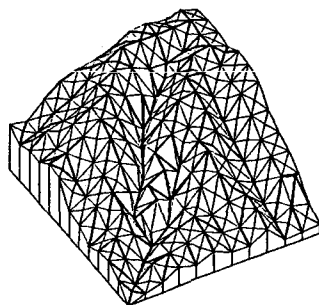
図-16 メッシュサイズによる流出  
応答の違い<sup>(40)</sup>  
(降雨強度  $i=1.0\text{mm/min}$ )



(細分割の模式図)



(梅ヶ谷流域の細分割表示)



(梅ヶ谷流域の立体表現)

図-17 三角形要素による地形の表現<sup>(41)</sup>

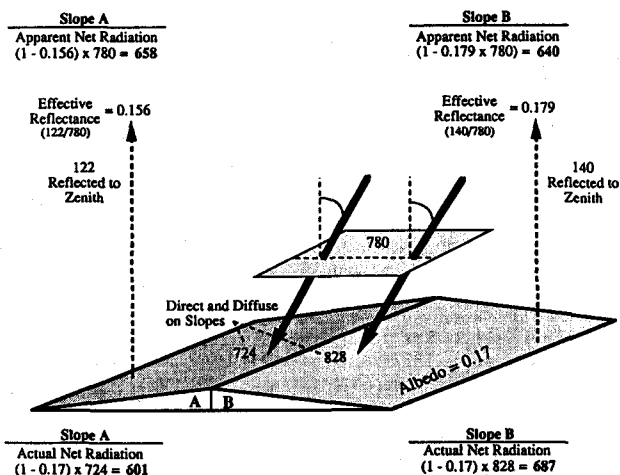


図-18 見かけの純放射量と地形計測結果を考慮した真の純放射量<sup>(42)</sup>

発している。グリッドモデルをもとに、中心点を追加するか、河道が三角形の辺になるようにまず三角要素を作成する。続いて、要素上で雨水の流下方向を算定し、各辺が流出辺か流入辺かを判定し、流出辺がただ一つになるよう要素を細分割する。図-17はその一例である。より正確で合理的な地形表現はグローバルな、マクロな水文学への拡張性を支えるものであり、同時に高精度な放射量収支・算定にも重要である。Dubayah<sup>43)</sup>はLandsat-TMデータで得られる0.3~3 $\mu$ mの可視・近赤外放射量に対して、数値地形データを使って純放射量の推定を行った。図-18はその結果で、地形効果を考慮すると、特に、斜面Aでは10%近くも純放射量が異なることが判る。

流域内の各種の情報がかなり詳細に得られるようになってきた。沢本・藤本<sup>44)</sup>はこれらを背景として、例えば衛星データと国土数値情報等を用いた流域データのベース化をめざし、

A) 定常データとして、衛星データ①(高分解能: Landsat-TM, Mos-1-MESSRなど)、国土数値情報(標高、土地分類など)、

B) 時系列データとして、気象データ、流量データ、衛星データ②(NOAA, GMSなど)、  
について、データの統合の問題点と処理方法を検討している。大陸規模、地球規模への拡張のためにはデータの均質性が問題となってくるだろう。

## 5. スケール効果

衛星による水文観測、レーダー雨量計、さらには数値地形などの高密度な流域水文情報の入手は、より精緻な分布型流出モデルの構成を基に精度の高い水文量の予測・推定を可能にしている。しかしながら、現状ではどれほどの時間的・空間的スケールを流域要素の基準として設定すべきか、降雨のスケールと流域のスケールとの関係をどのように考えるかなどの基本的な問題が明らかにされていない。現在のところ、その評価・判断基準そのものにも統一された考えはない。

明らかに降雨の範囲より大きな面積を持つような流域の場合には、降雨範囲の大きさが流出応答に影響をもたらす。Milly and Eagleson<sup>45)</sup>はこの点について調べ、浸透余剰の形で表面流出が生ずるような場合には、降雨域のサイズは流出応答に大きな影響をもたらすが、飽和していたり、不浸透域からの流出が主な場合には表面流出の応答に降雨域のサイズは余り関係しないとしている。また、Woolhiser and Goodrich<sup>46, 47)</sup>は降雨強度パターンの違いが流出に及ぼす影響を調べ、降雨情報の時間細分化と流出特性との関係を実証的に論じ始めている。

一方、基準要素流域の空間スケールが降雨-流出系の応答特性に及ぼす影響は、従来から重要な課題とされてきた。この点について、Wood and Sivapalan<sup>48, 49)</sup>は流域浸透(総)量や直接流出(総量)率に関して、流域水文量(降雨強度、(飽和)透水係数など)の非一様性を考慮し、代表基本流域(REA: Representative Elementary Area)のスケールを検討している。初めに約17km<sup>2</sup>の面積を持つ流域を87個、39個、19個、3個の小流域に分割する。それぞれの小流域ごとに流出計算を行い、その後合成する。それぞれの小流域内の計算では30m×30mの区画(これを1 pixelと呼んでいる)ごとに流出計算を行っている。このようにして、どの程度の流域面積に分割して流出計算をすると安定な答が出るかを示したのが図-19である。この図より、約1000 pixels(約1km<sup>2</sup>)以下と以上とで性質が異なっているように見える。このことから彼らは、流域面積にして、1000 pixels(約1km<sup>2</sup>)を代表基本流域とみなし得ると結論づけている。

流域の空間的スケールを議論するためには、現象の時間スケールとの関連ですべきであろう。有限・特定(の範囲)の物質移動速度、伝播時間を考えればこのことは当然である。砂田・木村<sup>50)</sup>は、流域斜面の段階的な粗視化(集約化、Aggregation)によるモデルにおいて、各種時間スケールを持つ降雨イベントに対する流域諸水文パラメタの最大直接流出流量への感度を調べることにより、流域スケールの効果を考察している。

流出モデルには中間流・地表流共用モデルを用い、実際の地形形状に即した流域スケールの影響を調べる

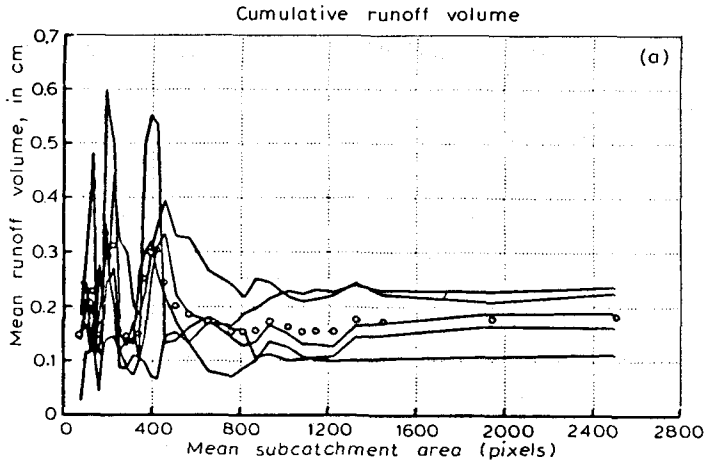


図-19 代表基本流域の検出<sup>(\*)</sup>

ために、長方形に近似しうる斜面流域を千曲川流域から17ヵ所選定した(面積: 2.16~233.2Km<sup>2</sup>)。各近似流域で、斜面長、斜面勾配、河道長および河道勾配を計測し、空間率、等価粗度係数は一定とする。不確定な表層厚、透水係数についてはこれまでの検討による最適値<sup>(1)</sup>を標準に組合せ、20ケースを各斜面で設定する。降雨の時間スケールを導入するために100年確率継続時間強度式を用い、それぞれのケースについて、降雨継続時間(tr)を30分から8時間まで与えて最大流量のシミュレーションを行った。

得られた最大流量(比流量)は図-20のようになる。各流域において、斜面条件設定の組合せにより算定される最大流量はばらつき、それらの平均値(○印)に対する標準偏差および変動係数も求まる。これらの結果より、流域水文パラメタの違いが最大比流量に及ぼす影響の度合いが、流域面積、継続時間により異なり、継続時間の短い強い降雨の場合は斜面飽和領域の伸長と直接深い関係があり、それを規定する表層厚、透水係数の見積りが重要となることが理解される。逆に、長い弱い降雨では、小流域では定常に近い流出状態が生じ流域特性パラメタの影響は少なく、河道集水過程に変化を与える大流域でのパラメタの見積りが重要となる。継続時間ごとに標準偏差が最大を示す流域面積を判読して整理すれば図-21のようになる。同図は、対象とする降雨・洪水の時間スケールに応じて、流域特性の見積りの sensitivityを与えるものであり、より高精度な特性量の推定が要求される流域スケールの大きさの程度を示している。

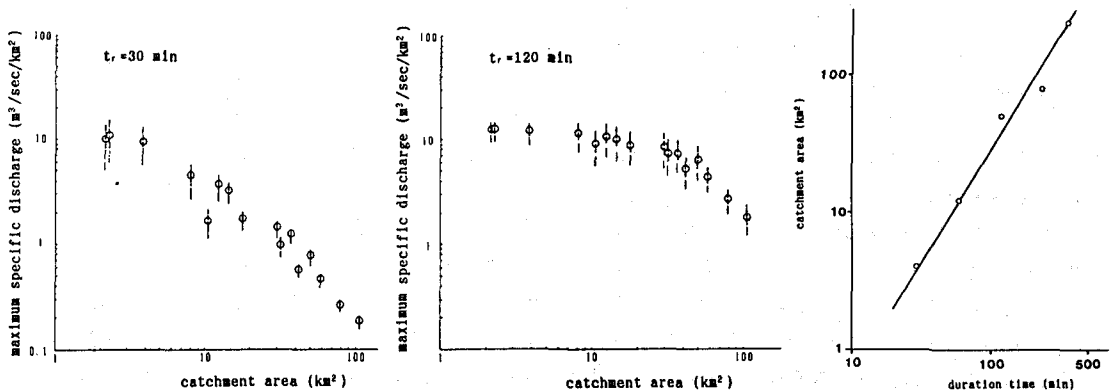


図-21 流域面積と  
降雨継続時間<sup>(\*)</sup>

図-20 各流域におけるシミュレーションによる最大流量(比流量)<sup>(\*)</sup>

## 6. 琵琶湖プロジェクト（陸域-大気系の水循環過程に関する共同観測・解析計画）<sup>52, 53)</sup>

### 6.1 プロジェクトの目標

前章までに述べられたさまざまな背景を考慮して、流域規模、地球規模での水循環過程解明のための取り組みとして、土木学会水理委員会では1989年に「陸域-大気系の水循環過程解明研究班」を組織した。研究班では以下のような課題に対して、具体的かつ基礎的な研究準備・観測・解析を進めている。

まず、先にみてきたように、メソスケール（数km～200km程度）での気象現象、地表面条件および水文過程を大循環モデルのグリッドのスケール（数100km）にまでより厳密に平均化（aggregation）する方法を得ること、一方、大循環モデルによる評価値を逆に細分化（disaggregation）して翻訳する方法を知ることが必要になっている。種々のスケールの現象は階層的に生じており、水循環の把握にはその階層構造を考慮に入れた理解が必要となる<sup>54)</sup>。研究班としては、より大スケール（数100km～数1000km）との関係を考えながら、まずは地表水文学の対象とされてきた、1kmから100km程度までのスケールに焦点を絞って検討していく。

もう一つは、この水文現象の階層構造の解明のためには、種々の水文・大気現象をより厳密に観測推定し、それらの特性や相互作用を明らかにする必要がある。そのためには地点規模からより広い空間規模に至る水文情報が不可欠である。これには、共通基準の地域を対象として、衛星リモートセンシングに同期させた地上における各種水文学の観測・調査・解析を実施し、開発検証される水文過程モデルや水文学抽出アルゴリズムを用いて衛星リモートセンシングデータに基づいて得られるより広域水文学の分布情報を活用ことが考えられる。

ところで、一般に衛星リモートセンシングでは観測対象の特性や状態量の真値と比較対照することが要求される。特に、水文学についてはフラックスのかたちで求められるべきものも多く、いわゆる process study の成果も取り入れた総合的な地上観測による結果を参照することが必要である。合成開口レーダー（SAR）を搭載した E, J/ERS-1 が91年、92年に相次いで打ち上げられた。こうした衛星のマイクロ波センサーなどについての検証も行う必要がある。

上記の課題に対し、達成の順序を考慮して目的を要約すれば次のようになる。

- ① 衛星リモートセンシング（RS）データの地上検証
- ② 衛星データを用いた水文学抽出アルゴリズム／モデルの開発
- ③ 地表面-大気系の水循環過程とその相互作用の解明
- ④ 水循環過程の評価における時空間スケール効果の検討  
（1km～100km程度のスケール領域を対象）

このプロジェクトの目的と同様な、あるいは関連した共同研究は欧米を中心に諸外国で行われ始めており（例えば、PIFE（前出）、HEIFE（Heihe River Field Experiment（黒河流域(中国)現地実験））、KUREX（Kursk Experiment（クルスク(ロシア)現地実験））、など）、結果も出始めているが、必ずしも十分総括された成果が得られてはいない。むしろ、こうした研究をいろいろな地域で多角度からさらに推進して、それぞれの成果を積み上げて互いに参照していくことが重要と考えられる。

また、地球環境観測委員会（宇宙開発事業団(NASDA)）では、水文過程解明のための次期ミッション・センサーの提案が求められている。研究班としては、観測・解析結果の提示と共に、近い将来の衛星観測計画に対して、水循環過程解明の立場からの観測要求・センサー仕様についても積極的に提案して行きたい。

全体の計画としては上述のような比較的包括的な目標を掲げており、参加研究者の自主的な興味や関心に委ねられている部分も少なくない。それは、現状では未整備な方法論の構築も含めて、計画を実施していく中で進められる十分な議論に期待したいと考えているからである。そこでは、従来から行われてきた水文学に関する個別の研究の水循環全体の中での位置づけが再認識されうることにもなる。



## 6.2 計画と観測・解析の内容

1989年の研究班の発足とともに、共同観測の目標・項目の抽出、データ収集および観測対象候補地の検討が行われてきた。1992年には対象地域の選定と何回かの現地踏査を経て観測・解析計画案を取りまとめ、その10月には試験観測が、93年2月には冬期観測が実施された。93年10月には本観測を予定しており、以降補足的な観測、連携解析を行い、94年度までには観測・解析結果の比較検討および今後の課題抽出をおこなうことになっている。以下に観測・解析の内容を示す。

### ○観測・解析対象

- ・基準フィールド：1km×1km（草地または裸地／積雪・融雪地）  
1km×1km（森林地）
- ・上記フィールドに近接する山地流域（数10km<sup>2</sup>）
- ・上記を地域を含む 約100km×100km 程度の地域  
（過程モデル、リモートセンシングデータによる画素ベースの広域推定）

### ○利用衛星・航空機・レーダーデータ

- ・NOAA-AVHRR, E, J/ERS-1 (SAR, OPS), LANDSAT(TM), MOS-1, 《TRMM, ADEOS》：将来
- ・航空機 MSS+SAR
- ・3Dレーダー雨量情報

### ○主な観測・解析項目

- ・観測： 山地における高度別降水分布、積・融雪量、接地境界層内風速・気温・水蒸気量分布、  
地表面・雪面熱収支、蒸発散量、土壌水分量、森林小流域の水収支 他
- ・リモートセンシング、レーダー、GISを用いた解析：  
降水の3D分布、広域積雪量、雪面・大気相互作用広域評価、表層土壌水分量分布、  
水蒸気収支、広域蒸発散量 他、地形・地被分布、分布型モデル流出解析

### ○直接的観測・検証

- ・ERS-1合成開口レーダーデータ土壌水分検証
- ・地上マイクロ波散乱計実験
- ・広域蒸発散量推定アルゴリズム

### ○水循環システムの構成・比較検証

- ・全体からの要請：1. 時間スケール…日（平均）量で提示、比較  
2. 空間スケール…1km<sup>2</sup>オーダー平均水文量で提示、比較

- ・近接する素過程で互いに必要・妥当な時空間スケールで比較検証

たとえば、降水量 ↔ 水蒸気補給量  
水蒸気補給量 ↔ 水蒸気移流量  
水蒸気移流量 ↔ 蒸発散量  
蒸発散量 ↔ 土壌水分量変化  
土壌水分量変化 ↔ 蒸発散量  
降水量 ↔ 土壌水分量変化  
融雪量 ↔ 土壌水分量変化

### ○応用的・発展的解析

- ・積雪・融雪モデルの開発と検証
- ・GIS利用による流域規模・流出解析

### 細密分布型流出モデルの構成

### 基準森林小流域との比較検証

- ・ 時間・空間スケールの変化に伴う水文・大気平均量・特性量の変化  
(特性量の時間・空間的スケールアップの検討)

## 6.3 対象地域の概要

研究班の設置以来、共同観測地域の選定を進めてきた。必要データについての参加研究者からの提案をもとに、地域特性や観測のためのアクセス性、高層気象資料、資料蓄積、さらに、平地での降雪があり、近い将来のTRMM(降雨レーダー搭載：軌道傾斜角35度)の観測範囲を考慮して琵琶湖地域が選定されている。

### ○集中観測基準フィールド(高月)

JR北陸本線沿いの滋賀県伊香郡高月町井口地区の水田地帯(観測基準点： $35^{\circ} 29' 11''$  N,  $136^{\circ} 13' 36''$  E)にある。南北約2km、東西約1kmにわたり、ほぼ様な土地利用状況にある。付近には木之本、片山、虎姫、吉槻などのアメダス観測地点があり、加えて、地域内では滋賀県農業試験場湖北分場により気象観測も行われている。

### ○基準森林小流域(菅山寺)

高月フィールドの北約5km、滋賀県伊香郡木之本町、高時川右小支川に京都大学農学部林学科砂防研究室によって水文観測が継続されてきた菅山寺流域( $35^{\circ} 31' 53''$  N,  $136^{\circ} 13' 05''$  E：流域面積39.4ha)がある。森林特性、森林小流域での水収支・流出解析、さらに次項の高時川流出解析における参照流域として重要な試験地である。

### ○代表山地流域(高時川)

高月フィールドの北約10km、滋賀県伊香郡余呉町にある高時川流域では、建設省直轄のダム(丹生ダム：流域面積93.1km<sup>2</sup>)が計画されており、本川流量を含めた水文資料が整っている。典型的な山地河川流域は地形解析にともなう分布型流出モデルの構成、積・融雪解析に最適である。高月フィールド、菅山寺流域での結果を参照しながら、水文量の時間的・空間的スケールアップの効果も検討し得る。

## 6.4 試験観測(92年10月)の実施状況

対象観測地点での土地利用・地被条件の一様性を期待し、かつ衛星の通過を考慮して、米の収穫直後の1992年10月11日～17日に93年とほぼ同じ内容を持つ短期間の試験観測が実施された。特に、衛星E-ERS-1(AMI-IMAGEデータ取得)の通過する13日は集中観測日として、予定する全データの取得が計画された。これには、各研究機関から15チーム50数名が参加した。観測は集中観測対象田を中心に、隣接する参照田、大豆畑(いずれも各30m×100m)とこれらを含む600m×600mの地域およびその地域の北端にある伊香高校農場、さらに予備的に菅山寺山地流域で行われた。観測の項目と内容は表-3に示されるとおりである。観測対象は、大気物理量の分布、放射量、境界層熱・水フラックス、土壌層(地点、広範囲)、マイクロ波利用、立木蒸散、森林試験地水循環などに大別される。本計画では、観測項目については個々の研究者の関心に委ねられている。しかし、類似の機器や観測項目については、効率的なデータ取得のためにデータの交換も含めて事前の調整が行われてきた。図-22は集中フィールド(水田)での機器の設置状況である。同型機種では測定高度を変化させたり、隣接する畑(大豆50cm高)にも配置したりするなどの工夫がなされた。マニュアル観測を含め「毎正時には各データが取得されていること」を原則にした。各チームの観測期間の長さは同じではないが、衛星通過の13日(24時間観測の場合は12日18:00～13日18:00)には目標としたほぼ全観測項目のデータが獲得できた。

表-3 琵琶湖プロジェクト試験観測内容

1992年10月11日～17日

## ◇ 大気プロファイル／

| 測 器      | 観 測 項 目                            | 期 間 ・ イ ン タ ー バ ル | 備 考  |
|----------|------------------------------------|-------------------|------|
| レーウィンゾンデ | 気温・湿度・風向・<br>風速（地表～2000m、<br>50m毎） | 10/12～10/13、3時間   |      |
| バルーン     | 地表面からの長波放射・<br>気温・湿度（～100m）        | 10/12～10/13、3時間   | 水田上空 |

## ◇ 放射／

|          |            |                 |                     |
|----------|------------|-----------------|---------------------|
| 日射計      | 全天短波放射量    | 10/12～10/14、5分  | 水田                  |
| 散乱日射計    | 下向き散乱短波放射量 | 10/12～10/13、1分  | 水田                  |
| 長波放射計    | 下向き長波放射量   | 10/12～10/14、5分  | 水田、毎時上向も測定          |
| 放射収支計    | 純放射量       | 10/12～10/14、5分他 | 水田（京大、長技大）<br>畑（名大） |
| アルベドメーター | 地表面アルベド    | 10/12～10/14、5分  | 水田                  |
| 放射温度計    | 地表面温度      | 10/12～10/14、1時間 | 水田、マニュアル            |

## ◇ 境界層熱・水フラックス／

|          |            |                                                                |                           |
|----------|------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 超音波風速温度計 | 顕熱フラックス    | 10/12～10/13（東大、長技大）<br>10/12～10/14（京大、気象協<br>会）10/12～10/15（名大） | 水田（3D×3高度、1D）<br>畑（3D、1D） |
| 水蒸気変動計   | 潜熱フラックス    | 10/12～10/14（京大、気象協会）                                           | 水田、畑                      |
| 通風乾湿計    | 気温・相対湿度    | 10/12～10/14、10分（京大）<br>10/12～10/15、1分（名大）                      | 水田、畑（4高度）                 |
| 三杯式風速計   | 平均風速プロファイル | 10/12～10/14、10分（京大）<br>10/12～10/15、1分（名大）                      | 水田、畑（4高度）                 |
| 気圧計      | 地表面気圧      | 10/12～10/14                                                    | 畑                         |

## ◇ 土壌層／

|                   |                                  |                 |      |
|-------------------|----------------------------------|-----------------|------|
| 熱流板               | 地中熱流量                            | 10/12～10/15、1分  | 畑    |
| サミスター             | 地中プロファイル<br>（2, 5, 10, 20, 40cm） | 10/12～10/14、30分 | 水田   |
| ヒートプローブ式土壌<br>水分計 | 土壌水分プロファイル                       | 10/12～10/14、15分 | 水田   |
| テンシオメーター          | サクシジョンプロファイル                     | 10/12～10/14、1時間 | 水田、畑 |
| TDR水分計            | 土壌水分                             | 10/12～10/13     | 随所   |
| 採土円筒              | 土壌水分、乾燥密度                        | 10/12～10/14     | 随所   |

## ◇ マイクロ波利用／

|                      |           |                               |              |
|----------------------|-----------|-------------------------------|--------------|
| 携帯式誘電率計              | 誘電率（Cバンド） | 10/12～10/13、随時                | 随所           |
| 散乱計（多波長多偏波<br>・Cバンド） | 後方散乱係数    | 10/12～10/13、随時<br>10/10～10/16 | 随所<br>伊香高校農場 |

## ◇ 立木蒸散／

|                  |          |                                    |      |
|------------------|----------|------------------------------------|------|
| 幹熱収支計            | 樹液流速     | 10/12～10/15                        | 数本あり |
| ヒートバルス式蒸散<br>流速計 | ヒートバルス速度 | 10/12～10/13（東大）<br>10/12～10/14（徳大） | 数本あり |

## ◇ 森林流域／

|            |          |       |          |
|------------|----------|-------|----------|
| 電気伝導度計（自記） | 溪流水電気伝導度 | 9/20～ | 菅山寺流域量水堰 |
| 水温計        | 溪流水温     | 9/20～ | 菅山寺流域量水堰 |

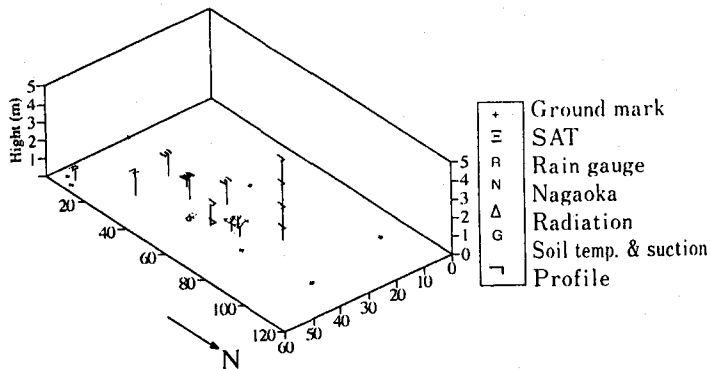


図-22 集中観測基準フィールド（水田）での観測機器の配置

まず、JWA（気象協会関西本部）によるレーウィンゾンデを用いた観測ではゾンデ位置自動追跡システムがよく機能し、即時処理された前日の観測結果が翌朝にはグラフと共に速報された。埼玉大のバルーンの浮揚も応援を得て進行し、3時間ごと一昼夜の観測に成功した。京大、東大、名大、長技大、JWAによる放射関連の測定、超音波風速温度計をはじめとする境界層熱・水フラックス観測のための測定も順調であった。直接的な衛星データ検証としては土壌水分量が対象となった。参照水田では密な土壌サンプリングが、これを含む広域（600m×600m）での計画的サンプリング山梨大により行われ、東大生研散乱計車が追隨走破して大量のデータを得た。これらと交錯するように広島大のTDR水分計による土壌水分データの収集も行われた。伊香高校農場では建設省土研による波長、偏波を組み合わせでのマイクロ波散乱計実験が試みられた。集中フィールドより約300m離れた観測本部付近の小さな社では、何本かの立木を使い、東大、徳島大、名大によるヒートパルス法、幹熱収支法による樹液流速、立木の蒸散量観測が行われた。

現在、データの解析・比較も行われつつある。それらの結果を参照しながら、試験観測の経験を生かして本観測および冬期観測の計画準備が進められることになっている。

## 7. おわりに

地球環境の解明に向けて水文学が貢献し得るいくつかの課題と研究の現状・将来の方向について眺めてみた。水文観測の役割はいよいよ大きく、初めに述べたように広義の水文観測としての、発展しつつあるリモートセンシング技術、モデルを中心としてフラックスの評価、水循環の場の計測法としてのGIS、それらを考慮する有効な時間空間スケールの検討の例と研究の方向を紹介した。

やや対象が広範囲になりすぎたきらいがあるが、それだけに多様な問題が関わっている証左でもある。その一方で、水文観測が「水循環に関わる諸量の観測」と考えれば、本稿で取り上げた内容は逆に偏ったものになっている。地球環境に関係する水文条件としては、森林域とその分布とモニタリング、極域氷床などの変動はかの重要な問題が触れられていないからである。水文学は今新たな発展段階に入ったと考えてよく、現在大変活発な研究が展開されている。地球環境問題の解明への貢献も含め、越えられるべき課題は多く今後の着実な研究の進展が期待される。

## 参考文献

- 1) Eagleson, P.S.: The emergence of global-scale hydrology, Water Resources Research, Vol.22, No.9, pp.6S-14S, 1986.
- 2) 日本学術会議国際対応委員会/WCRP専門委員会・GEWEX小委員会: Global Energy and Water Cycle

- Experiment (GEWEX: 全地球エネルギー・水循環観測計画) 研究計画、1993.
- 3) 武田喬男: GEWEX (全地球エネルギー・水循環観測計画) について、水文・水資源学会誌、Vol. 5, No. 2, pp. 37-40, 1992.
  - 4) Japan National Committee for WCRP: GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME) - A proposal for the sub-programme of the Global Energy and Water Cycle Experiment (First Draft), 1993.
  - 5) 地球環境研究センター: 地球温暖化研究のあり方とIPCCへの取り組み -有識者意見集-、環境庁・国立環境研究所、1992.
  - 6) 市川惇信: 分散型巨大科学としての地球環境科学、地球環境センター開所記念講演会、1990.
  - 7) 西岡秀三: 地球温暖化に対処する研究の方向、水文・水資源学会誌、Vol. 4, No. 1, pp. 3-10, 1991.
  - 8) Wallis, J. R., D. P. Lettenmaier, and E. F. Wood: A daily hydroclimatology data set for the continental United States, Water Resources Research, Vol. 27, No. 7, pp. 1657-1663, 1991.
  - 9) Redmond, K. T., and R. W. Koch: Surface climate and streamflow variability in the Western United States and their relationship to large-scale circulation indices, Water Resources Research, Vol. 27, No. 9, pp. 2381-2399, 1991.
  - 10) Kuhl, S. C., and J. R. Miller: Seasonal river runoff calculated from a global atmospheric model, Water Resources Research, Vol. 28, No. 8, 1992.
  - 11) 沖 大幹・虫明功臣・増田耕一: 大気水収支法による地球規模での年河川流出量の算定、水工学論文集、Vol. 36, pp. 573-578, 1992.
  - 12) 小池俊雄: 衛星による地球環境観測計画と水文・水資源学、水文・水資源学会誌、Vol. 4, No. 2, pp. 1-8, 1991.
  - 13) 武田 要・高橋 裕: LANDSAT雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量に関する研究、土木学会論文報告集、第311号、pp. 81-92, 1981.
  - 14) 高橋 裕・武田 要・森園繁光・小池俊雄: LANDSAT積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究、第26回水理講演会論文集、pp. 171-176, 1982.
  - 15) 小池俊雄・長谷川泉・深見和彦: 積雪パラメータとマイクロ波誘電特性、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 12-15, 1992.
  - 16) 風間 聡・沢本正樹・Kittipong Jirayoot: NOAA-AVHRRデータを用いた残雪域の把握と融雪出水、Vol. 4, No. 1, pp. 33-37, 1991.
  - 17) 力丸 厚: MSS融雪履歴情報の支援による気象衛星データの画素内積雪領域の細密推定、土木学会論文集、No. 438/II-17, pp. 13-22, 1991.
  - 18) 加藤 進・福山 薫・若杉耕一郎・佐藤 亨・深尾昌一郎・青木忠生・小平信彦・福島 圓: 気象の遠隔測定 (I)、気象研究ノート、No. 144, pp. 1-116, 1982.
  - 19) 深見和彦: 土壌水分のリモートセンシング、水文・水資源研究のためのリモートセンシング講座、水文・水資源学会、pp. 53-72, 1990.
  - 20) Engman, E. T., and R. J. Gurney: Remote Sensing in Hydrology, Chapman and Hall, pp. 127-154, 1991.
  - 21) Hirose, H., S. Komiyama, and Y. Matsuzawa: Cross-polarized radar backscatter from moist soil, Remote Sens. Environ., Vol. 7, pp. 211-217, 1978.
  - 22) Ulaby, F. T., R. K. Moor, and A. K. Fung: Microwave Remote Sensing - Active and passive, Vol. 3, Artech House, 1986.
  - 23) Price, J. C.: The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation, Water Resources Research, Vol. 16, No. 4, pp. 787-795, 1980.
  - 24) Sugita, M., and W. Brutsaert: Landsat surface temperatures and radio soundings to obtain Regional surface fluxes, Water Resources Research, Vol. 28, No. 6, pp. 1675-1679, 1992.
  - 25) 古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治・吉野正敏・星 仰・武田 要・関 利孝: ランドサットデータによる土地利用区分と広域蒸発散量算定手法の開発に関する研究、筑波大学水理実験センター報告、No. 8, pp. 57-66, 1984.
  - 26) 佐渡公明: ランドサットTMデータを用いた広域蒸発散量の推定、京大防災研究所水資源研究センター研究報告、No. 13, pp. 51-61, 1993.
  - 27) Takeuchi, K., and S. Ebisawa: GMS Precipitation Index Developed in Chao Phraya River Basin, Thailand -- For global precipitation monitoring by satellite observations --, Proc. Workshop on the effects of global climate change on hydrology and water resources at a catchment scale, Tsukuba, pp. 147-158, 1992.
  - 28) 竹内邦良・海老澤聡・池本一志: タイ国チャオプラヤ川流域での衛星による降雨量推定式の同定、水文・水資源学会誌、Vol. 5, No. 3, pp. 33-41, 1992.
  - 29) 竹内邦良・志村昌也: 世界各地のOLRと地上降雨量の関係、水文水資源学会誌、Vol. 6, No. 3, (印刷中) 1993.
  - 30) 岡本謙一: TRMMプロジェクトの概要、水文・水資源研究のためのリモートセンシング講座、水文・水資源学会、pp. 147-159, 1990.
  - 31) 建設省土木研究所水文研究室: 直交二偏波レーダによる降水観測に関する調査報告書、土木研究所資料、No. 2487, pp. 1-132, 1987.
  - 32) Camillo, P. J., R. J. Gurney, and T. J. Schmugge: A soil and atmospheric boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies, Water Resources Research, Vol. 19, No. 2, pp. 371-380, 1983.

- 33) Gurney, R. J., and P. J. Camillo: Modelling daily evapotranspiration using remotely sensed data, *Journal of Hydrology*, No. 69, pp. 305-324, 1984.
- 34) Camillo, P. J., and R. J. Gurney: A sensitivity analysis of a numerical model for estimating evapotranspiration, *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 105-112, 1984.
- 35) Sunada, K., S. Sorooshian, and L. W. Gay: A basic study on estimation of regional evaporation using remotely sensed data, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 27-38, 1990.
- 36) 中北英一・田中実・椎葉充晴・池淵周一・高埴琢馬: 3次元レーダーによるエコー強度情報を用いた水蒸気相変化量と大気3次元風速の同時推定手法、*水工学論文集*, Vol. 36, pp. 483-488, 1992.
- 37) 神田学・日野幹雄: 大気-植生-土壌系モデル (NEO SPAM) による数値シミュレーション (1) 植生効果のモデリング、*水文・水資源学会誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 37-46, 1990.
- 38) 神田学・日野幹雄: 大気-植生-土壌系モデル (NEO SPAM) によるシミュレーション (2) 植生の気候緩和効果の数値実験、*水文・水資源学会誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 47-55, 1990.
- 39) 宝馨: GIS (地理情報システム) とその水文・水資源への応用、*水文・水資源学会誌*, Vol. 5, No. 4, pp. 53-61, 1992.
- 40) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発、*土木学会論文集*, No. 411/II-12, pp. 135-142, 1989.
- 41) 高埴琢馬・椎葉充晴・立川康人: TIN-DEMデータ形式による流域地形の表現について、*水工学論文集*, Vol. 35, pp. 75-80, 1991.
- 42) 高埴琢馬・椎葉充晴・立川康人・大江郁夫: TIN-DEMデータ形式を用いた流域場情報システムの開発、*水工学論文集*, Vol. 36, pp. 677-684, 1991.
- 43) Dubayah, R.: Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 2469-2484, 1992.
- 44) 沢本正樹・藤本美樹子: 衛星データと国土数値情報を用いた流域データベースの設計、*水工学論文集*, Vol. 34, pp. 619-624, 1990.
- 45) Milly, P. C. D., and P. S. Eagleson: Effect of storm scale on surface runoff volume, *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 620-624, 1988.
- 46) Woolhiser, D. A., and D. C. Goodrich: Effects of storm rainfall patterns on surface runoff, *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1-4, pp. 335-354, 1988.
- 47) Goodrich, D. C.: Basin scale and runoff model complexity, Technical Report No. HWR91-010, Dept. of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, 1990.
- 48) Sivapalan, M., and E. F. Wood: A multidimensional model of nonstationary space-time rainfall at the catchment scale, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 7, pp. 1289-1299, 1987.
- 49) Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven, and L. Band: Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling, *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1-4, pp. 29-47, 1988.
- 50) 砂田憲吾・木村真章: 水文量評価のための最適空間スケールに関する基礎的研究、*水工学論文集*, Vol. 35, pp. 675-678, 1991.
- 51) Sunada, K., and T. F. Hong: Effects of slope conditions on direct runoff characteristics by the interflow and overland flow model, *Journal of Hydrology*, No. 102(1-4), pp. 323-334, 1988.
- 52) 砂田憲吾: 陸域-大気系の水循環過程に関する共同観測・解析計画「琵琶湖プロジェクト」について、*水文・水資源学会誌*, Vol. 5, No. 3, pp. 56-61, 1992.
- 53) 砂田憲吾: 陸域-大気系の水循環過程に関する共同観測・解析計画「琵琶湖プロジェクト」試験観測の報告、*水文・水資源学会誌*, Vol. 6, No. 1, pp. 55-60, 1993.
- 54) 武田喬男: 大気中の水のリモートセンシング、*水文・水資源学会誌*, Vol. 5, No. 1, pp. 61-65, 1992.
- 55) Theon, J. S., T. Matsuno, T. Sakata, and N. Fugono (Ed): The Global Role of Tropical Rainfall, Proc. of the international symposium on aqua and planet, A. DEEPAK Publishing, 1992.
- 56) 気象庁編: 異常気象レポート'89, 1989.
- 57) 二宮洸三: メソスケール現象の定義と研究主題、*気象研究ノート*, No. 172, pp. 1-9, 1991.
- 58) 高埴琢馬 (代表者): 流出現象の物理機構に関する研究、昭和60・61年度科学研究費補助金 (総合研究 (A)) 研究成果報告書、1987.
- 59) Eagleson, P. S.: *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, pp. 13-49, 1970.
- 60) Sellers, W. D.: *Physical Climatology*, The University Chicago Press, pp. 11-39, 1965.
- 61) Waggoner (Ed): *Climate Change and U. S. Water Resources*, John Wiley & Sons, pp. 41-73, 1990.
- 62) Schmugge, T. J., and J. C. Andre (Ed): *Land Surface Evaporation - Measurement and Parameterization*, Springer-Verlag, 1991.
- 63) Shuttleworth, W.: Macrohydrology - the new challenge for process hydrology, *Journal of Hydrology*, No. 100, 31-56, 1989.