

陸域-大気系の水循環過程に関する 共同観測と解析“琵琶湖プロジェクト”

On a collaborative field observation synchronized with the spaceborne and airborne
remote sensing for understanding the hydrological cycle "The Biwako Project"

水理委員会

砂田 憲吾*

Kengo Sunada

ABSTRACT; A collaborative field observation project, named the Biwako Project, was built up in 1989 and has been developed and proceeded by a Japanese group for investigating the hydrological cycle near the land surface, which is composed of tens of members from more than twenty universities and institutions. The original research fields of the members are ranging from engineering, agriculture to science. The aim of this project, as the title presents, understanding the hydrological cycle in and/or over the Lake Biwa basin together with establishing ways of scaling up and down the hydrological model within the scale of 100km. Specifically, what this project is heading to as goals are; (1)verification of satellite remote sensing; (2)development of algorithms/models describing hydrological processes; (3)understanding the land surface-atmospheric interactions; (4)evaluation of space/time scale effects in the hydrological cycle.

KEY WORDS; hydrological cycle, field observation, remote sensing, scale effect

1. はじめに

土木学会水理委員会では、陸域-大気系の水循環過程に関する共同観測・解析計画として“琵琶湖プロジェクト”を推進してきた。89年の検討開始以来これまで、第1回目の試験観測(92年10月)、第2回目の冬期観測(93年2~3月)に続いて、93年10月末~11月上旬に100名を超える研究者・協力者によって共同観測(本観測)が実施された。本観測ではそれまでの地上・衛星同時観測に加えて、航空機観測検証も行われた。各項目の観測データは概ね順調に取得され、現在、資料の突き合わせ、解析が行われている。ここではプロジェクトの背景や目的を紹介し、93年の本観測を中心にその概要を報告する。

2. プロジェクトの背景と目的¹⁾

2.1 背景

(A) GEWEX (全地球エネルギー・水循環観測計画)^{2,3,4)}: 地球環境の変化、特に、地球温暖化がもたらすさまざまな分野への影響や対策のための研究が開始されている。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確かな理解と予測がまず必要である。大気中の二酸化炭素量の倍増などに

*山梨大学工学部土木環境工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Yamanashi University

よる数十年後の気候の温暖化を定量的に予測するために、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行われる。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、積分時間が長くとられるため空間分解能は抑えられている (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。気候変動国際共同研究計画 (WCRP) では、その大型の副計画として、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つの柱を中心に据えた、全地球エネルギー・水循環観測計画 (GEWEX: Global Energy and Water Cycle Experiment) を予定している。GEWEX計画では、図-1 に示されるように、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) していくかが大きな課題となる。一方、GEWEXの別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。これには、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) し解釈していくかも問題となる。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、ミシシッピー河流域で具体的計画が進められている。アジア地域では、日本が中心になってアジアモンスーン域を対象とするGAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) の研究計画が練られている。

(B) 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近年著しい進歩を遂げている。リモートセンシングは広域性、瞬時性や日常モニタリングの可能性などに優れた特性を備えており、最近では、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、例えば、合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) を主要センサーとする、ヨーロッパ、日本のE/J-ERS-1 (EERS-1: European Remote Sensing Satellite-1, JERS-1: (Japan) Earth Resources Satellite-1), 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) を搭載する TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), 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。特に、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、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。

ところで、水文量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観測を進めて水文量そのものを評価すると共に、逆に、他の水文観測値と総合して、モデルの検証・改善を進めることが必要になる。

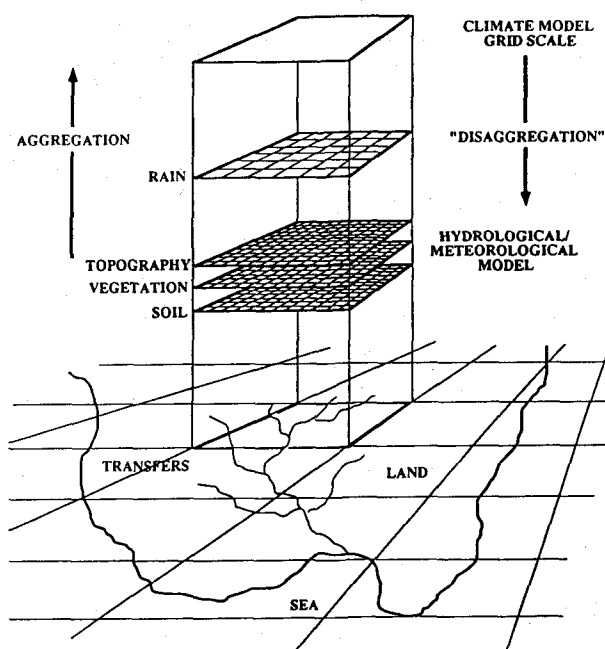


図-1 GCIPにおけるscale aggregation -disaggregation ²⁾

(C) GISとその応用：大気－陸域地表面との相互作用では、大気・水文条件は直接地表面地被条件に影響を及ぼし、逆に地表面条件は大気・水文条件を支配する。複雑で多様な地表面を合理的かつ効率的に表現する必要がある。最近では、水文現象の物理過程の生起場としてのさまざまな地表面条件、例えば地形標高、植生やその活性度、土地利用状況、その他の計測手法・評価手法としてのGIS（地理情報システム：Geographical Information System）が急速に発達してきている。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となってきた。

2. 2 プロジェクトの目的

前述したように、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が必要である。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求められている。本研究では、より大スケール（数100km～数1000km）との関係を考えつつ、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量の観測・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量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の水文量の分布情報を活用することが考えられる。その際、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も要求される。以上より、プロジェクトの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量抽出アルゴリズム／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）

3. 観測地域と観測期間（93年本観測）

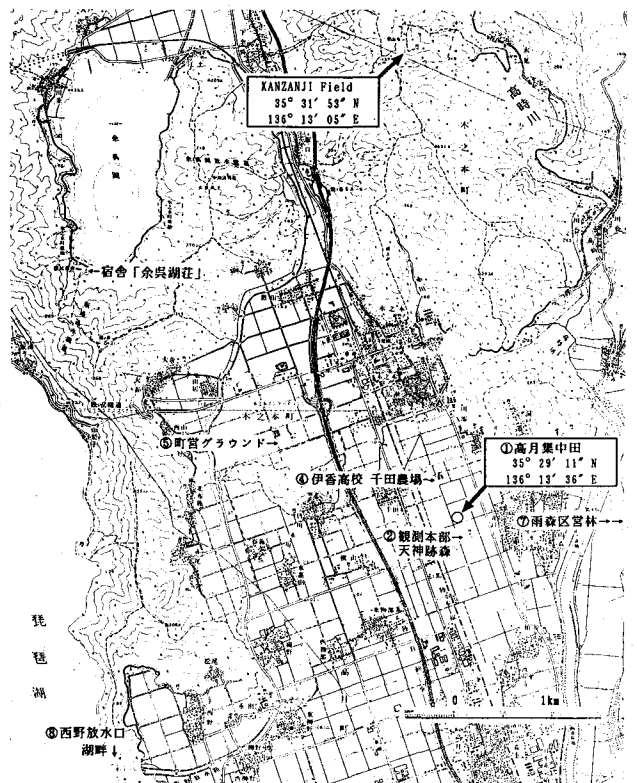
3. 1 観測地域

観測地域として、全国の適地を比較検討し、平地ながらよく降雪があることや近い将来のTRMMの観測範囲に入ることなどを考慮して琵琶湖地域を選定している。今回の観測は、図－2に示されるように、この内の集中観測基準フィールド（琵琶湖北東部滋賀県高月町井口地区の水田地帯（観測基準点：35°29′11″N, 136°13′36″E）、木之本町）を中心に、木之本町、長浜市内の以下の地域で実施された。

- ①高月集中田 ②本部・天神跡森 ③高月広域田
- ④伊香高校農場 ⑤木之本町営グラウンド
- ⑥高月・木之本地域全体 ⑦雨森区営林
- ⑧西野放水口湖畔 ⑨長浜市街 ⑩その他

3. 2 観測日程と参加者

対象観測地点での土地利用・地被条件の一様性を期待し、かつ衛星の通過日を考慮して、米の収穫後の1993年10月28日～11月5日に設定された。特に、11月2日（火）はE-ERS1/AMI-IMAGEデータの取得と



図－2 観測対象地域

LANDSAT-5 通過予定に合わせて集中観測日とし、この日を含む10月31日(日)～11月4日(木)を航空機観測候補・待機日とした。11月3日はMOS-1の通過日にもなっていた。観測は琵琶湖プロジェクトに参加の各チーム独自の観測と、93年特別の企画である航空機観測検証のための観測との二本立てである。観測には、各大学、国の機関、気象協会、電力会社等の研究調査部門から25チームが参加し、観測実施者、協力者、支援者を含めて最盛時には100名を超えた。このプロジェクトでは、観測ではなく主に解析・データの応用を予定している何人かの研究者も観測に積極的に参加し、支援を行っている。

4. 観測内容と経過

4. 1 地上および航空機観測内容

まず、各チームの地上観測の主要な内容は表-1に示される通りであり、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、立木蒸散に大別される。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」を原則にしたが、各チームの観測期間の長さは同じではない。詳細な観測内容は別に編集されたデータカタログに掲載されている。

以上のデータの一部は当初より航空機観測のグラウンドトゥースとしてデータ取得が計画・実施された。航空機観測の内容としては、① MSSによる観測およびハッセルブラッドカメラによる垂直写真撮影、② X-バンドSARによる観測、③ C-バンド散乱計による観測である。その観測諸元等の詳細についてもデータカタログを参照されたい。

4. 2 経過

11月28日には最初のチームが現地入りし、順次各チームが集結して観測準備が始まる。それぞれが観測を開始するなか、30日には観測本部が設けられた。31日には24mクレーン高所作業車による天神跡森の樹冠部観測などが開始された。写真-1は観測本部上空クレーンゴンドラから眺めた集中観測フィールドを示

表-1 琵琶湖プロジェクト'93 観測内容

観測対象(手法)	主要観測機器	観測項目・内容
大気プロファイル	レーウィンゾンデ	気温・湿度・風向・風速 (地表～2000m, 50m毎)
	バルーン	地表面からの長波放射・ 気温・湿度(～100m)
放 射 量	日射計	全天短波放射量
	散乱日射計	下向き散乱短波放射量
	長波放射計	下向き長波放射量
	放射収支計	純放射量
	分光放射計	分光反射率
	アルベドメータ	地表面アルベド
	放射温度計 サーモトレーサー	地表面温度 樹冠・葉面温度
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
	水蒸気変動計	潜熱フラックス
	通風乾湿計	気温・相対湿度
	三杯式風速計	平均風速プロファイル
	気圧計	地表面気圧
土 壌 層	熱流板	地中熱流量
	サーミスター	地中温度プロファイル (2, 5, 10, 20, 40cm)
	ヒートプローブ式 土壌水分計	土壌水分プロファイル
	テンシオメータ	サクションプロファイル
	TDR水分計	土壌水分
	土壌サンプラー	土壌水分、乾燥密度
(マイクロ波利用)	携帯式誘電率計	誘電率(Cバンド)
	散乱計(多波長多偏波・Cバンド)	後方散乱係数
立木蒸散	幹熱収支計	樹液流速
	ヒートバルス式蒸散流速計	ヒートバルス速度

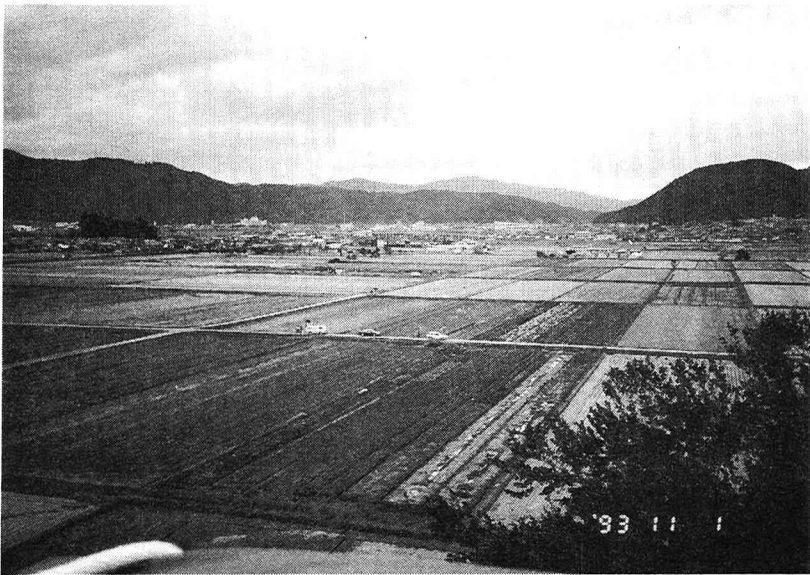


写真-1 本部上空より集中観測フィールドを見る

している。31日、1日と航空機観測検証のために待機したが、天候不十分でこれらの日は観測をキャンセル。1日夜には約100名の参加者のもとに、観測・解析の紹介を中心にフォーラムを行った。2日に集中観測の日を迎えたが、好天とはならなかった。晴ときどき曇の天気、午前中には C-バンド 散乱計、続いて X-バンド SAR 観測の航空機が現地上空に相次いで飛来、いずれもデータの取得が行われた。しかし午後になっても快晴状態には至らず、この日のMSS観測は断念した。3日観測可能ぎりぎりの13時になって最終判断をし、MSS機は14時ごろ現地上空に飛来して、14時35分ごろデータ収録を終えた。以後は、各チーム独自の予定の観測を進めて、無事終了している。

収集されたデータは多岐にわたるが、結果の一部を例示すれば以下のである。図-3は日本気象協会関西本部により渦相関法によって求められた顕熱、潜熱フラックスを示す。図-4は宇宙開発事業団により収録されたX-バンド SAR (解像度 5m×5m) の画像写真を示す。図-5は直接土壌サンプリングにより得られた高月広域田全体における表層土壌水分量(体積含水率(%))の分布(y軸がほぼ南北方向)を示している。

観測から1ヵ月後の12月3日には東京において、土木学会、水文・水資源学会および宇宙開発事業団の共催により「地表面水循環過程の地上観測とリモートセンシング」と題したシンポジウムが開催された。琵琶湖プロジェクト参加のチームからは、プロジェクト研究の意義および以下のような観測・解析結果の一部の紹介がなされた。グラウンドトールスにおける TEM波 TDR法を用いた地表面土壌水分測定(広島大:開発)、多様な地被形態上での顕熱輸送特性(京都大:中村)、時空間スケールの違いによる広域蒸発散量の評価(気象協会関西:石田)、1次元大気土壌結合数値モデル(東京大:仲江川)、および、地表面水蒸気フラックスが降雨分布に及ぼす影響などについて(京都大:中北)である。

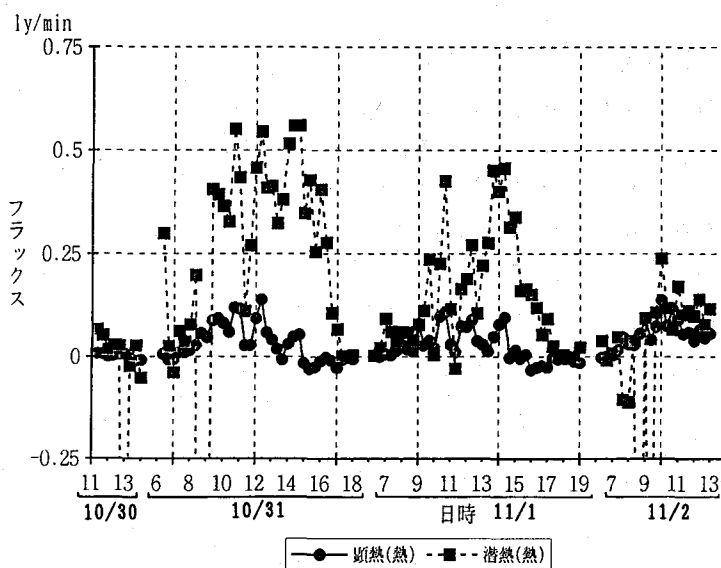


図-3 顕熱・潜熱フラックス(気象協会関西本部)

SCENE:BIWAKO PASS-2 93-11-02 11:09:53~11:11:14
RESOLUTION:5m×5m LOOK:2

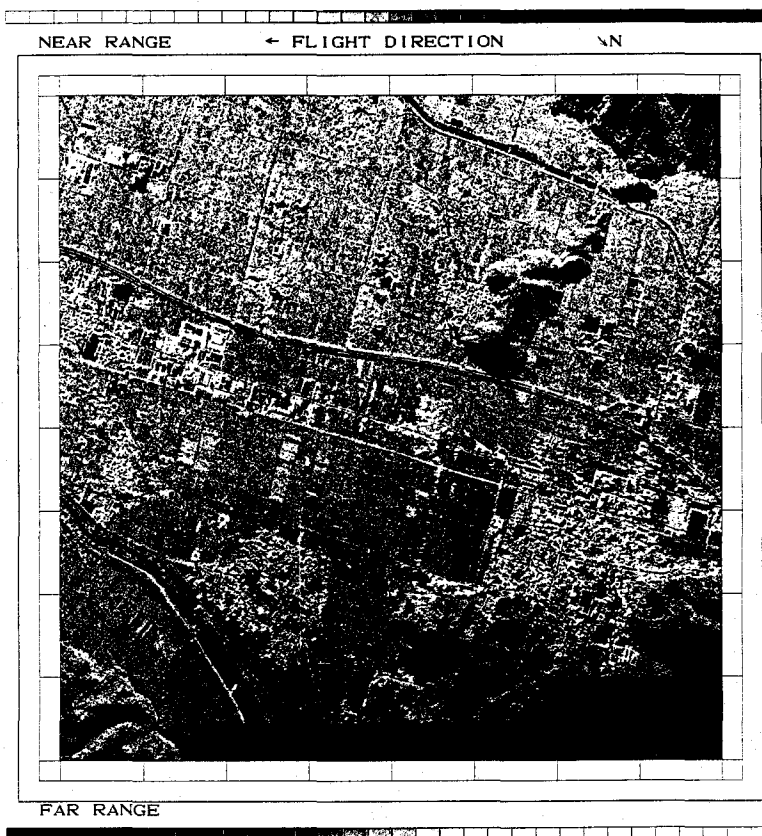


図-4 X-バンドSAR画像写真(宇宙開発事業団)

5. おわりに

琵琶湖プロジェクトで各チームが取得したデータは多様で、かつ膨大である。必要な研究者にはこの時点で、データの比較検討のために観測項目や内容の提示を行うことになっており、このための「データカタログ」が 92年・93年をまとめた形で編集されている。これまで2年間の観測方法や内容を吟味する94年6月の「琵琶湖プロジェクト観測・解析成果報告会」での協議をもとに、琵琶湖プロジェクトとしては94年（夏または秋）にも同様の共同観測の実施を予定している。

観測に参加した研究者の間では、プロジェクトの総括的な目標とは別に、関心の深いそれぞれの近隣のテーマ毎に共同研究や共著の論文発表も生まれつつある。得られた観測・解析結果の最大限の有効活用を議論しながら、さまざまな側面から陸域-大気系の水循環過程の解明がめざされることになっている。

〔謝辞〕本プロジェクトおよび今回の共同観測の実施に当たり、多くの方々・関係機関より多大なご支援を頂いた。特に、水文・水資源学会、建設省琵琶湖工事事務所・丹生ダム工事事務所、宇宙開発事業団、（財）リモートセンシング技術センターをはじめ、滋賀県高月町小森和正氏、同町井口生産組合（西川善嗣組合長）、滋賀県立伊香高校、高月町・木之本町役場、関西電力（株）の関係者各位に厚く御礼申し上げる。また、このプロジェクト研究の一部は住友財団「平成4年度環境研究助成」を受けて行われたもので、記して深甚なる謝意を表する。

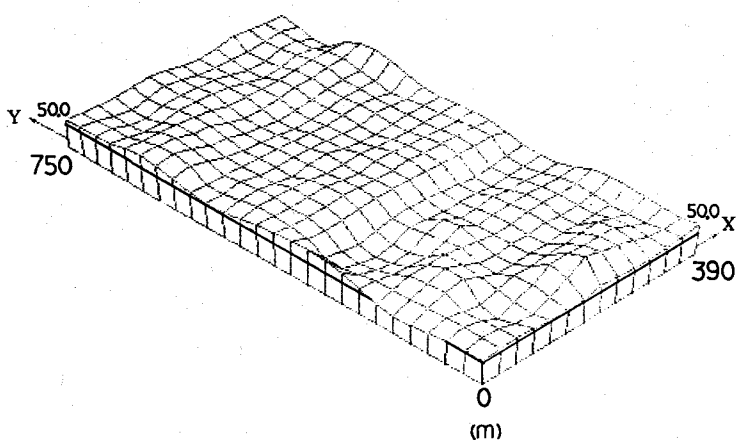


図-5 広域田での表層水分量（体積含水率(%)）の分布

参考文献

- 1) 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.
- 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) 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.
- 6) 砂田憲吾：水文観測と地球環境、水工学シリーズ93-A-4、土木学会水理委員会、pp. 1-22, 1993.
- 7) 砂田憲吾：琵琶湖プロジェクト'93 共同観測の報告、第6回アゲールシンポジウム講演集、1994.