

## 研究展望

# 水理学・水文学における地球環境研究

TRENDS OF GLOBAL ENVIRONMENTAL RESEARCH IN FIELDS OF HYDRAULICS AND HYDROLOGY

砂田憲吾<sup>1</sup>・中辻啓二<sup>2</sup>

Kengo SUNADA and Keiji NAKATSUJI

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科  
(〒400 甲府市武田4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科  
(〒565 吹田市山田丘2-1)

**Key Words** : global environment, hydrological cycles, urban environment, river disaster, urban coastal waters, tropical mangrove estuary

## 1. はじめに

地球規模の環境問題では、環境変化の発生条件はさまざまな要因をもち、その変化が及ぼす影響はさらに多方面に及ぶ。その中にあって、水や大気は現象の発生とその伝播に関する重要な物質/媒体であり、環境そのものの場でもあることから、地球規模・地域規模での気候や水循環の変化、都市域を始めとする局地気象現象、沿岸部・海洋における環境の把握と監視などに関する多くの課題が生じている。種々の条件下での流体のふるまいを調べることは水工学の中心的なテーマであり、こうした現象の解明や課題克服のために流体力学、水理学および水文学に期待されることは大きい。これまでも、環境問題に関係する現象解明のために水工学は大きな貢献をしてきたが、その多くの場合は地域規模や限定的な水域が対象とされてきた。最近では、これまでの水工学分野の研究の成果に基づいて、地球規模や多数の要因が複合する現象について明らかにすべきことが求められている。このことは一方で、水理学・水文学の新たな質的発展が要請されているともいえる。

本稿は地球環境に関わる研究のうち、土木学会水理委員会地球環境水理学小委員会の活動対象となっている水理学・水文学など水工学分野に関する研究の動向を概観して、今後のこの分野で配慮されるべき研究の視点について整理したものである。参照すべき研究事例を網羅的に挙げるといふ立場をとらず、地球環境に関わる代表的研究についてできるだけ系統的に眺めていくことにする。

## 2. 地球環境と水環境

### (1) 背景

地球表面で、大気や海流の水平方向の運動を無視した1次元的な放射収支だけでエネルギーバランスをとると、放射平衡による北緯または南緯の36度程度を境とする灼熱・酷寒の厳しい地球環境が生じていることになる。これに対して現実には、大気圏・地表における南北方向の海流、大気の循環および潜熱輸送が生じてエネルギーの交換がなされ、生命の活動を支える地球環境の基本的な条件が提供されていることはよく知られている事実である。多岐にわたる地球環境の問題ではあるが、現在重要視されている課題は、地球気候システム、温暖化、オゾン層破壊、酸性降下物、砂漠化などのキーワードで表わされよう。それらの項目のほとんどが、海洋—大気—陸域におけるエネルギーと水の循環に深い関わりがある。

内嶋<sup>1)</sup>によれば、「地球環境システムは太陽エネルギーの大小の流れ、および物質循環の回路によって縦横に連絡し合ったシームレスな網目構造になっている。それゆえ、局地的または地域的なインパクトでも、それが持続的に作用すると、いつとはなしにシステム全体に影響が波及してくる。これが現在生じている地球規模の環境変化の本質である」という。当面の考察対象は地域であっても、その現象にかかわる条件の設定はより広い領域を考慮して与えられるべきであるし、地域の現象として抽出された特性はさらに広域にその影響を及ぼすのである。したがって、気候や気象や水循環についての課題では、地域規模の問題と地球規模の問題とを厳密に区別するのは適切ではないが、本稿では対象とする規模を念頭に便宜的に分けて3章以降のように考察する。

## (2) 地球環境水理学小委員会の目標とこれまでの活動

現在、土木学会水理委員会では地球環境水理学小委員会を組織している。この小委員会の最終的な目標は、有効な流体力学・水理学・水文学的手法を駆使して地球環境・地域規模の環境問題の解決のために貢献することにある。その機能としては水理委員会に設けられている3部会すなわち、水文部会、基礎水理部会、環境水理部会と横断的に連携することであり、水理委員会の方針のもとに土木学会内の他の委員会、地球環境委員会などとの連絡調整を行う役目も担っている。小委員会の水理委員会への設置は平成4年(1992)であるが、その活動は平成元年(1989)に発会した「地球規模環境水理学懇談会(アゲール, AGEHR: Association for Global Environmental Hydraulic Research(中川博次代表, 続村岡浩爾座長))」から引き継がれたものである。

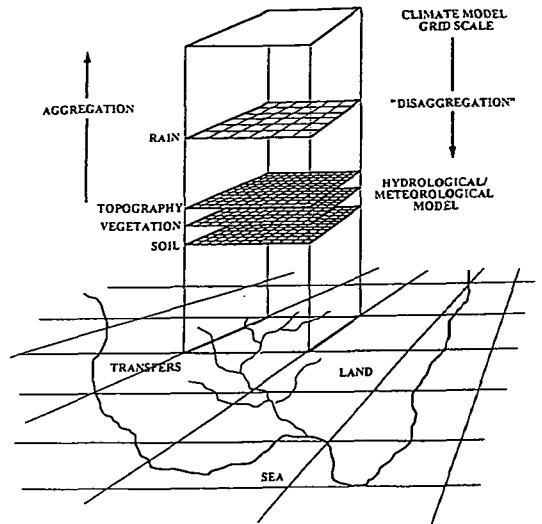
地球環境水理学小委員会では、独自の活動としてこれまで年1回のアゲールレポートを発行し、アゲールシンポジウムを開催してきている。特に、アゲールシンポジウムは例年水理講演会の前日に開かれ、毎回パネラーに富んだ3題ほどの話題提供のもとで十分な時間をもって議論が交わされて、地球環境問題解明のために必要な幅広い知識と考え方が参加者に多くの示唆を与えるものとなっている。

## 3. 気候変動の予測と影響に関わる課題

自然起源または社会起源の地球環境へのインパクトのうち、CO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガスによる地球温暖化による気候変動は最も重要な課題の一つである。その影響はさまざまな分野に及ぶこととなり、対策のための多くの研究が開始されているが、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。本節では気候変動の予測精度向上のための水文学分野が貢献しつつある現状を概観<sup>2)</sup>したのち、気候変動のシナリオのもとで試みられている水循環への影響に関する研究例を紹介する。

### (1) GEWEX計画<sup>3),4)</sup>とGAME計画<sup>5)</sup>

気候変動国際共同研究計画(WCRP: World Climate Research Programme)は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)を推進している。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、地球上の水の循環の変化が海洋に及ぼす影響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。大気中の二酸化炭素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



図一 GCIPにおける現象・過程の平均化と細分化<sup>2)</sup>  
 図中の各格子の大きさは平均化が可能あるいは平均化を仮定するスケールを概念的に示す。

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わ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100 km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が重要な働きをしていることである。現状の格子スケールでは雷雨はもちろん台風の再現も困難であり、さらに、地形・地質・植生などの空間的に非常に不均質な地表の条件・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。このために図一に示されるように、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)していくかも課題となる。一方、環境変化に伴う水循環・水資源の予測というGEWEXのもう一つの目標のためには、GCMのような気候モデルの結果をどのようにして局所域の変化として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、特に大陸スケール国際共同プロジェクト(たとえば、GCIP: GEWEX Continental-scale International Project)が構想され、多くの観測施設、大量のデータを動員して、ミシシッピー河流域で実施されている。

GCIPと同様な目的を持ちながら、日本の気象や水文の研究者がリーダーシップをとって、アジアモンスーン域を対象とするGAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment, 研究代表者: 筑波大学・安成哲三教授)

の研究計画が進められている。GAMEの目標として、  
 1) 地球全体の気候システムのエネルギー・水循環におけるアジアモンスーンの役割解明 2) アジアモンスーン変動の予測の物理的基礎の確立と、モンスーン変動が地域・流域の水資源や水災害に与える影響の評価が掲げられ、域内の多様な陸面の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ている。目標2)のために、地域エネルギー・水循環過程の観測に基づくプロセス研究が重視され、域内の地域的特徴を代表する熱帯モンスーンアジア（タイ・チャオプラヤ河流域、マレーシアなど）、湿潤亜熱帯モンスーンアジア（中国淮河流域）、チベット高原、シベリア（ロシア・レナ河流域）の4地域で平行して1998年夏の集中本観測のための準備や予備観測が行われている。一方、この国際的な共同研究を側面的に支える形で、国内においては琵琶湖プロジェクト（後述）が先行して実施されている。

## (2) 地球規模の水循環

水文諸量の観測と解析が地球環境の解明に貢献するためには、①直接地球規模でのスケールを対象として、モデルと観測値により議論する、②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、の二つの方法がある。本節ではまず、①の方法について最近の研究を若干レビューし、次節で②のアプローチに沿ういくつかの研究をながめていく。

広範囲のよく吟味された水文気象データは有用である。Wallis, Lettenmaier and Wood<sup>6)</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に、アメリカ本土規模の水文気象資料の整備を行って、日単位の雨量・流量のデータセットを構築している。

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、気候の変化に伴う地域の降水量・流量の予測も立てやすい。Redmond and Koch<sup>7)</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との海面気圧の平均値からのずれから、ダーウインのそれを差し引いて得られる）との関係を調べ、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関係が強いことなど興味ある傾向を見出ししている。

沖ら<sup>8)</sup>は地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。大河川で地下水流去も河川流量として観測されるとすれば、

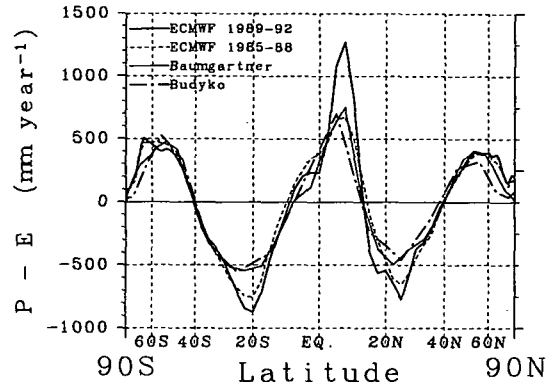


図-2 大気水収支法による全球の流出量の緯度分布算定結果<sup>8)</sup>

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。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-2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。

## (3) 衛星による水収支の観測

衛星をはじめとするリモートセンシングは広域性・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を持ち、他の情報処理技術の進歩と相俟って、さらに有効な地球環境の観測や監視のために利用される時代になっている。これまでに行われてきた衛星リモートセンシングによる広域での水収支の把握の代表的な例を眺めてみる。

### a) 積雪・融雪

高橋ら<sup>9)</sup>はLandsat MSS（Multi Spectral Scanner）データによる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だしている。小池ら<sup>10)</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、風間ら<sup>11)</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ることから、同データにより残雪期の融雪出水の予測について議論している。

### b) 土壌水分

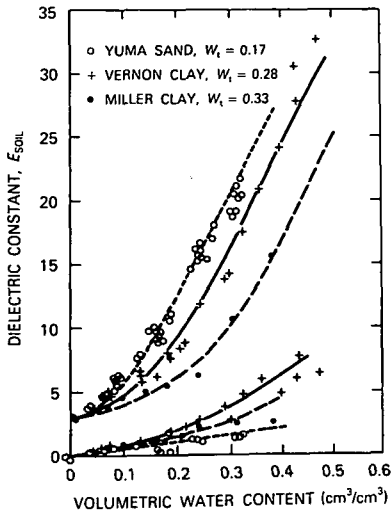
表層土壌水分量は、後述する蒸発散をはじめとする地表・大気間の水循環の解析に不可欠な水収支量である。図-3は土中の体積含水率の違いによりマイクロ波帯の誘電率が大きく異なることを示しており<sup>12)</sup>、この特性を用いてマイクロ波による土壌水分量の測定が期待されてい

表一 利水安全度の比較<sup>18)</sup>

(温暖化なし (0, 0) の場合とそれに対する比 (2030年または2×CO<sub>2</sub> (二酸化炭素倍増時)))

表中例えば, (3, +10)は温暖化シナリオにおける気温上昇3°C, 年降雨水量10%増を示し, 略英字記号はシナリオの根拠の計算値を示した研究所を表わす. 発生頻度とは渇水の発生頻度を指す.

シナリオ	発生頻度 [回/年]	不足発生日数 [日]	総不足量 [m <sup>3</sup> ]	不足%・日 [%・日]	最大不足率 [%]	渇水被害回数 [(%) <sup>2</sup> ・日]
(0, 0)	7.7	112	77.98×10 <sup>4</sup>	1434	11.9	145.7×10 <sup>4</sup>
(3, -10)	1.58	2.39	7.59	7.59	3.96	19.00
(3, 0)	1.72	1.96	3.76	3.76	2.50	6.44
(3, +10)	1.06	0.96	0.95	0.95	0.98	0.68
CCC (3, -20)	1.34	3.33	14.36	14.36	5.25	84.85
GISS	1.65	2.19	5.63	5.63	3.28	11.51
GFDL/UKMO	1.49	1.50	2.05	2.05	1.68	2.39
NCAR	1.31	1.29	1.50	1.50	1.34	1.51



図一三 土壌の体積含水率と誘電率との関係<sup>12)</sup>

る. 合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) は光学センサーに較べ, 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. 受信するマイクロ波の特性は, 目標の土壌水分量以外に, 土壌の感応深さ, 水分量分布形, 土壌面粗度, 周波数, 入射角, 偏波によっても影響を受ける. 土壌面からの放射・散乱特性を正しく評価し, 水分情報と結び付けるには整備されたモデルと現地での系統的な検証が必要となる.

### c) 降雨の全球モニタリング

地球規模の降雨のモニタリングは地球環境の解明に不可欠な情報である. 間もなく降水レーダーを搭載した衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission) が打ち上げられることになるが, 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手法の検討も行われている. 竹内ら<sup>13)</sup>は GMS-IR (-Infrared) データの基本ヒストグラムおよびタイ国チャオプラヤ川流域の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の降雨量推定式を検討し, 洋上で得られた Arkin らによる推定式との違いを議論している.

このほかの衛星リモートセンシングの利用として, 広域蒸発散量の推定<sup>14), 15)</sup>, 水資源の管理, 水質のモニタリングへの応用などの研究が行われている<sup>16)</sup>.

### (4) 地球温暖化が流域の水循環におよぼす影響

地球の温暖化の影響にははざまざまなものがあるが, どのような環境の項目を対象とするかにより, 影響評価のアプローチは異なる. 現在の世界の各研究機関による GCMs を用いた気候変動の予測値は, 気温の上昇については地域的な分布も変動幅も比較的類似しているが, 降水量の変動については増減値や地域分布に大きな差異がある<sup>17)</sup>. 平均的な温度上昇に伴う海面上昇を対象とする場合などに較べ, 水循環を対象とする場合は地域による降水量の増減が不確定な点が大きな課題である. 農産国アメリカにとっても温暖化は水資源システムの変更を余儀なくされるものとの認識から, 早くから Waggoner らにより気候変動の水資源への影響評価の総合的な検討がなされている<sup>17)</sup>. 温暖化の流出応答への影響については多くの研究があるが, ここでは, 宝・小尻<sup>18), 19)</sup>による検討結果を例示する. 宝らは, 将来時点での想定する温暖化シナリオを二通り考え, 昇温と降水量変化率を年間一定とする場合, それらの季節変動を考慮した場合についてシミュレーションを行った. 琵琶湖南部の野州川流域 (387 km<sup>2</sup>) を対象流域として, 18年間の過去の降雨データの系列を一年毎に区切り, 繰り返しを許してランダムに並び変えて将来の降雨を引き伸ばし, タンクモデルを用いて日単位流量をシミュレーションした. その結果, たとえば, 表一に示されるように, 渇水の生起頻

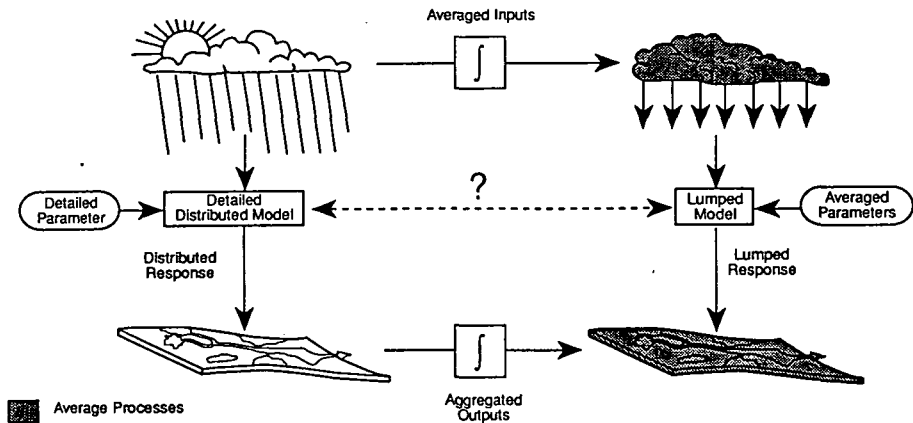


図-4 水文過程のモデル化における平均化スケールの問題<sup>24)</sup>  
分布モデルと等価な集中モデルをどのように構成するか？

度・規模に関する項目のうち洪水被害関数は温暖化の影響が顕著に現われること、月単位流況では季節性を取り入れた温暖化シナリオに基づく検討がより重要であること、などを指摘している。

#### 4. 広域水文循環のモデル化をめざして

前章までの地表面水文過程を大気・気象現象に連携させるためには、その気象モデルが表現できるまでの広さを持つ統括された水文モデルが必要になる。気象で目指される当面の目標がメソスケールのモデルとすれば、100 km から 500 km 以上のスケールをもつ領域を包含し得る地表面水文循環モデルの開発が望まれる。水文学研究者はこのモデルを概念的に“マクロ水文モデル”と呼んでいるが、現在のところその統一した意味やイメージが確立していない。メソ気象モデルとマクロ水文モデルとの結合をめざして、以下のような研究やプロジェクトが精力的に進められている。

##### (1) GISとその応用

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(物理情報システム: Geographical Information System)の有効な利用と解析方法が研究されている。

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が陸ら<sup>20)</sup>により試みられている。地形標高数値地図と実河道データから擬河道網を作成し、流出解析を行い、標高メッシュサイズの違いによって流出の応答特性には差のあることを指摘している。

一方、高棹ら<sup>21)</sup>は分布型流出モデルのスケールアップについて、グリッドデータ間隔の拡大に伴う流出過程の

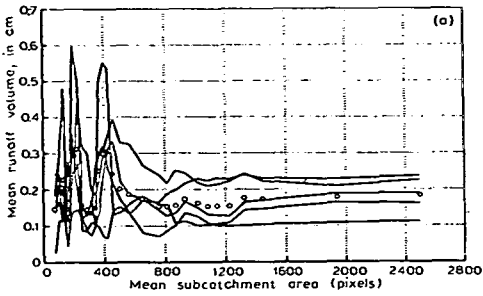
合理的な表現のために、グリッド間の雨水の授受を受け持つ河道と雨水がグリッド内の河道に流入する機構とを分けてモデル化する新しい視点からの検討を行っている。

##### (2) 土壌・植生・大気過程結合モデル

GCMではグリッド内の地表面の湿潤、蒸発、流出過程を考慮するために容量をもつ1次元のバケツモデルが用いられてきた。さらに詳細な地表面過程を考慮するために、鉛直1次元でのエネルギーと水の輸送をモデル化しBATS(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme: 植生域-大気輸送モデル)やSiB(Simple Biosphere Model: 単純植生域モデル)が順次実行され、種々の土地利用下でのパラメータ基準値などの検討も行われている<sup>22), 23)</sup>。同様な考えでさらに狭い領域を対象として、より細かな条件を考慮するSVAT(Soil-Vegetation-Atmosphere Model: 土壌-植生-大気モデル)が開発され、最近3次元SVATに改良されてその有効性が検討されている<sup>24)</sup>。

##### (3) 水文学とスケール問題

さきの(1)節でなごめたように、数値地形などの高密度な流域水文情報の入手は、より精緻な分布型水文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が問題となる。すなわち、水文応答の視点からは図-4<sup>21)</sup>のように、分布した降雨および流域パラメータによる流出と平均降雨および平均の流域パラメータによる流出とが等しくなるような領域の大きさやパラメータはあるのかという問題である。さらに、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



図一5 代表基本流域 (REA) の抽出<sup>25)</sup>  
 図中の実線は5回の降雨事象に対する結果、  
 ○印はそれらの平均値を示す。

問題が明らかにされておらず、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>25)</sup>は流域浸透量や直接流出率に関して、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。対象流域を多数から少数の流域に段階的に分割する。それぞれの小流域ごとに流出計算を行い、どの程度の流域面積に分割した場合に安定的な答えが出るかを調べた。図一5はその計算例で、1000 pixels (約1 km<sup>2</sup>) を境に性質が異なることから、Woodらは流域面積にして約1 km<sup>2</sup>を代表基本流域とみなし得ると結論している。

流域の空間的スケールを議論するためには、現象の時間的スケールとの関連ですべきであろう。砂田・木村<sup>26)</sup>は、流域斜面の段階的な粗視化 (集約化: Aggregation) によるモデルについて、各種時間スケールを持つ降雨イベントに対する流域水文パラメタの最大直接流出量への感度を調べることで、流域スケールの効果を考察している。

#### (4) 琵琶湖プロジェクト<sup>27)</sup>

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。そのためには狭い領域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、より広域な水文量の分布情報を活用することが考えられる。

以上の点を背景として、流域規模・地球規模での地表面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「陸域一大気系の水循環過程解明研究班」(研究代表者: 山梨大学・砂田憲吾教授)を組織した。地球環境観測委員会 (宇宙開発事業団 (NASDA)), 水

文・水資源学会、住友財団、文部省科研費ほかの支援を得て、滋賀県湖北地方の水田地帯を中心に具体的かつ基本的な共同現地観測・解析を進めてきており、第1ステージ (1989年~1994年) が終了し、1995年から第2ステージ (研究代表者: 京都大学・中北英一助教授) に入っている。その目的は、

- ① 衛星リモートセンシングデータの地上検証
- 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 (1 km~100 km 程度の領域を対象)

のように要約されている。このプロジェクトと同様な目的を持つ共同観測計画は欧米を中心に諸外国で行われているが、必ずしも十分総括された成果は得られていない。むしろ、こうした研究をいろいろな地域で推進して、それぞれの結果を積み上げて互いに参照して行くことが重要と考えられる。詳しい内容やこれまでの結果については文献<sup>28), 29)</sup>を参照されたい。

## 5. 地域規模での環境問題

水文学には海洋-大気-陸域における熱と水の地球規模の大循環、メソスケールの気候変動、等の地球研究の課題がある。一方、海岸工学においては温暖化によって生じる海面上昇に対する工学的対応という明確な課題の解明に的を絞った戦略的な研究<sup>30)</sup>が可能である。そのような経緯から両分野で組織的に研究が進められて、相当の成果をあげてきたことは、水文学を例にとれば、前章までの内容から容易に理解できる。これに対して、水理学・河川工学の分野にあってはアゲール以来のプロパガンダがありながら、今なお的を絞ってない状況にあることは否定できない。

地球の温暖化は、大気の大気・日射・放射の変化、降雨特性や植生の変化、河川水温の変化、海面上昇、潮位変化などを引き起こす。これらはさらに降雨流出形態や流出量、土砂の生産・流出と河川レジーム、水生動植物・生態系等に大きな影響を及ぼす。こうした河川域や沿岸域の環境の変化は治水や防災機能を左右するような重大な問題をはらんでおり、その予知・予測技術の確立は急務となっている。

### (1) 都市域の大気・熱環境と水環境

都市化の進行した地域において、河川は自然環境の残存する貴重な空間である。都市河川網は都市域を縦横に結ぶグリーン・ベルトを構成し、多種多様な生物群集を今なお育んでいる。河川に沿って吹く風は都会人に心地

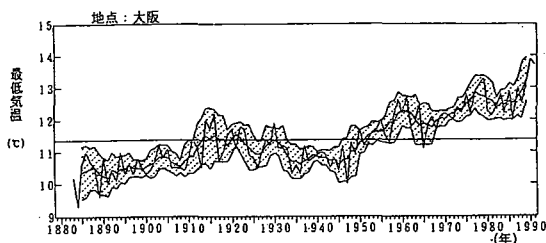


図-6 大阪で観測された日最低気温の100年間の経年変化<sup>31)</sup>

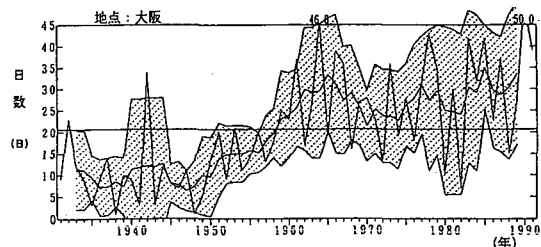


図-7 大阪で観測された熱帯夜の発生日数の100年間の経年変化<sup>31)</sup>

よさとともに故郷の田園風景を連想させ、景観、水流と河原、植生と昆虫、動物や魚類、等々、アメニティー豊かな憩いの場を提供している。近年、自然環境の保全、ひいては河川の景観の重要性が治水や利水に加えて認識されるようになってきた。その一つはヒート・アイランド化する都市域の大気・熱環境における河川の役割の評価である。大都市圏において人工発熱量が都市気象を変えるほどの勢いで増加している。温暖化と乾燥化の進む都市域にあって河川空間の役割を大気や熱環境の面から積極的に評価する研究が増加している。今ひとつは建設省の提唱している多自然型川づくりにおける河道内の植生と流れ、瀬と淵の存在する躍動感のある流れを惹起させる川づくりである。治水一辺倒で人工的に歪められた河川を人間を含む生態系と共存できる空間として取り戻す川づくりであるといえる。

#### a) 都市域の大気・熱環境

水理学で大気・熱環境を取り扱うことになったのは、ヒートアイランド現象に深く関係している。大阪で観測された日最低気温と熱帯夜数の経年変化<sup>31)</sup>を110年にわたって示したのが、図-6、7である。細い線は年平均値（熱帯夜の場合は、各年の発生日数）、太い線は5年間平均値、そして上下限はそれらの95%信頼限界を示している。100年間に日最低気温は約2.5°Cも上昇している。また、熱帯夜の発生日数は1985年に40回にもものほり、なお増加傾向にある。最近100年の関西圏の年平均気温の増加率（表-2）はIPCC報告<sup>32)</sup>（表-3）よりもはるかに大きい。都市域の温暖化は地球のそれを凌ぐ速度で進行していることが分かる。盆地という地形の影

表-2 関西圏の平均気温の上昇トレンド(°C/年)<sup>31)</sup>

地点名	1962-1992年
京 都	2.58
大 阪	3.37
神 戸	1.88
湖 岸	1.46
洲 本	-0.24

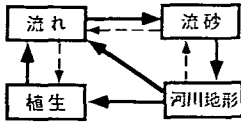
表-3 IPCCによる平均気温の上昇トレンド(°C/年)の予測値<sup>32)</sup>

範 囲	1950-1988年
全 球	0.60
北 半 球	0.54
南 半 球	0.75
北 ア ジ ア	1.34

響もあるが、大規模宅地造成が進行中である兵庫県三田市の1月の最低温度がわずか10年あまりで約4°Cも気温上昇している<sup>33)</sup>のは予想をはるかに超えている。動植物や昆虫等、生物にとっては計り知れない気温や地温の変動である。一方、東京湾の埋立・造成が大気・熱環境に及ぼす影響が大きいという環境庁の指摘<sup>34)</sup>は、海域の流れのみならず大気環境もアセスメントの対象となり得る点で興味深い。埋立が大気の流れや温度場に及ぼす影響評価は大阪湾においても検討されている<sup>35)</sup>。

日野・神田<sup>36)</sup>は4.(2)で述べた土壌・植生・大気間の水文気象過程のモデル化の一例として、植物の葉面からの物質交換、気孔開度、葉温、根による吸水作用、茎や樹幹部の動き、等を考慮した解析を行い、植生による都市気象の気候緩和効果を検討している。さらに、大気-土壌(水面)系に着目した3次元数値モデルを用いて都市気象の代表例であるヒート・アイランドや対流雲の発生機構の解析を行っている。植物の生理を流体力学的にとらえるという従来の水理学とは視点を変えた試みであり、興味深い。森林流域における水収支の定量的な評価を土壌水分構造を考慮した現地実測からモデル化する試みも端野ら<sup>37)</sup>によってなされている。

一方、浅枝ら<sup>38)</sup>は都市域の舗装の蓄熱効果の実測結果を、若宮ら<sup>39)</sup>は都市河川周辺の大気の流れと温度場に関するモデル実験の結果を示している。両論文は都市域の環境熱力学的研究の必要性を示唆したものであり、これらの発表を契機にして、ストリート・キャニオンや大都市周辺部の大気・熱構造、海陸風フロント等の研究が数多くの研究者によって活発に実施されている。そのなかで、特に都市内河川の有する夏期の大気冷却効果に着目した研究で、池田ら<sup>40)</sup>は河川の市街地に及ぼす影響範囲と河道内および市街地の気象との関連を数値計算と熱収



図一8 河相を支配する相互作用系<sup>41)</sup>

支観測から検討している。いずれも都市河川の付加価値としての熱環境に目を向けた研究であり、人間が、あるいは日本人が川に対して抱いている好ましい水環境の要因の一つとして熱環境も加えられるべきであろう。得られた数値シミュレーションの結果については、それらを検証する都市域規模の緻密な観測データが残念ながら乏しく、前述した琵琶湖プロジェクトのような共同観測研究が待たれる。

#### b) 河川の植生と流れ

河川敷での植生は治水面でも生態系や景観面でも重要である。治水面では複断面河道の高水敷に密生する植生、セイヨウカラシナやヤエムグラの低生のものからアシなどの高生のものまで、どのような流水抵抗を示すのかという問題がある。直立するアシ。群生するオギで共通するのは、それらが流れでたなびき揺動することと、頂部が倒伏・連接してキャノッピ流れになることである。先駆的な研究は日野・歌原<sup>41)</sup>や室田・福原<sup>42)</sup>による疑似植物を用いた模型水理実験である。最近では多自然型川づくりとも関連して数多くの研究が実施されている。それらの成果は(財)河川環境管理財団の資料「河川の植生と河道特性」<sup>43)</sup>に詳細に記されている。辻本<sup>44)</sup>はその資料の中で、流れによって土砂が運ばれ、地形が形成され、それがまた水流や流砂に影響するという河道の動態把握のなかの一つの重要なサブシステムとして河道植生を考える必要性を強調している。図一8に示すように、植生を伴う流れと、それによる土砂輸送・地形変化が水理学的な課題であり、地形変化や洪水履歴が植生の繁茂にどのように影響するかが植物生態学の課題であると述べている。彼はこのような動態を「河相」という言葉で表現しているが、植生の違いも含めて各河川固有の特性を科学的に把握すべきであるという提案であろう。全国一律主義の河川行政への警告である。

複断面水路における高水敷の流れと低水路の流れ間の相互干渉、断面内2次流、水平せん断2次流の詳細な計測<sup>45), 46)</sup>と数学モデルの開発<sup>47)</sup>が実施されているが、植生があることによってどのような影響を受けるのが流体力学的に興味ある課題である。河川工学から見れば、高水敷と低水路の流量配分が重要な課題である。

## (2) 地球温暖化が河川(洪水)災害に及ぼす影響<sup>48)</sup>

河川(洪水)災害を引き起こす地球環境の要因として、

①豪雨・豪雪等の降水特性の変化、②降水ならびに融雪特性と植生の変化による洪水形態や土砂生産形態の変化、③海面上昇による洪水災害の助長、流路の不安定化等が考えられる。水文現象に関しては4章で詳しく述べた。降雨特性や植生の変化、流出形態の変化などが洪水問題に及ぼす影響として、土砂生産の変化ならびに地形変化を見落とすことができない。すなわち、降雨強度の増大や頻度の増加、斜面抵抗力の減少等によって、山地や農耕地からの生産土砂量が増加するとともに、それらの流出・堆積による河道や河川構造物の不安定化の生じることが懸念される。

さらに、洪水災害に及ぼす影響として、海面上昇に伴う河口水位の上昇と河口付近の地形変化の生じることが考えられる。海面上昇は、土砂輸送能力の減少につながり、堆積位置が遡上したり、堆積速度が増加したりすることが懸念される。そのような河床上昇に伴って水位の上昇が助長され、氾濫が生じやすくなる。また、流路が不安定となり、その位置が変動しやすくなることが懸念される。河川水位の上昇は単に溢流による氾濫を生じ易くするだけでなく、河川堤防からの漏水や堤体の強度低下など、破堤の要因を増長させる危険がある。また、地下水水位の変化も重要な問題である。

海面上昇によるもうひとつの問題として、河口密度流の混合形態の変化や、塩水くさびの遡上等、淡水と塩水の接触に伴う問題が挙げられる。河口密度流は地下水の水質や生態系に対して、大きな影響を及ぼすものであるが、洪水問題に対しても感潮域の増大や塩水くさびの侵入の変化、さらに、浮遊物質の拡散状態の変化、ひいては、土砂堆積や地形変化に影響を及ぼすことになる。懸濁物質の輸送と堆積が河床変動に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

一方、わが国において、人口・資産の集中する大都市の多くは河口に位置しており、洪水災害と高潮災害とを同時に受ける状況にある。したがって、防潮水門、排水機場、遊水池、最近では地下貯留施設等、多種多様な防災施設により、流量調整は人為的な操作に委ねられ、自然流下の都市河川は無いと言っても過言ではない。海面上昇あるいは温暖化による気象変化で洪水現象と高潮現象の同時生起確率が高まるとなると、これら都市河川の治水機能施設のあり方を見直し、再検討するとともに、総合的な操作システムの開発を早急に計る必要がある。治水施設の適切な配置計画や建設にあたっては、住民のコンセンサスを作り上げることが重要である。それゆえ、河川工学や水理学の範疇だけでなく、経済学や社会学、等も含んだ学際的な広い視点から、治水と環境の対策を研究することが必要となろう。



### (3) 沿岸海域の開発と水環境

IPCCの報告<sup>37)</sup>によれば、2020年までに1.8°C(1.3~2.5°C)の気温上昇、20cm(10~32cm)の海面上昇、また2070年までにそれぞれ3.5°C(2.4~5.1°C)、45cm(33~75cm)の上昇を予測している。20~45cm程度の海面上昇では潮汐、波浪、高潮、塩水侵入、地下水に及ぼす影響は静的であり、動的な変化をもたらすことはないと考えられる。もちろん、数cmの海面上昇であっても広大な面積を水面下に失う地域があることは事実であるが、わが国のような開発された海岸線を有する国においては構造物による防衛の強化により十分対応できると期待される。すなわち、技術的な対応と財政投資で高度に開発された日本の沿岸域は防御できると考えられる。むしろ、着目すべき点は首都圏や関西圏を代表とする沿岸開発との関係であろう。大阪湾を例にとれば、過去40年間に5,200haの埋立が行われてきたし、また今後10年間に約3,000haの埋立計画が予定されている。わが国においては地球温暖化の影響が沿岸空間の開発にともなう諸問題と同時進行することを認識すべきである。埋立地形の配置、沿岸構造物のあり方、河口域の洪水処理、残存水域の海水交換等、海面上昇と重複する問題が多い。加えて、沿岸域の水環境は陸域からの負荷と強く関連しており、陸域での地球温暖化(降水量、気温、蒸発量、他)と沿岸空間の開発の二つの影響を受けることになる。海面上昇よりはむしろ沿岸域の水質・生態系への地球温暖化の影響が危惧される。

局所的な規模での海洋生態系の変化は既に沿岸域で顕在化しつつある。赤潮現象の地球規模化、多発化、大規模化はその一例であり、北海・アメリカにも出現している。それには人為的な富栄養化が原因している。青潮は今のところ東京湾が有名であるが、閉鎖性内湾の海底での貧酸素化は大阪湾や瀬戸内海でも見られる。嫌気性環境における硫化物イオンの形成と風による湧昇が青潮の発生機構であることはよく知られており、水理学的な説明が待たれる。富栄養化した水域であるということに加えて、密度成層が発達し易いことが、貧酸素化の進行の必要条件である。地球温暖化による気温上昇は水温の上昇を高め、埋立等による地形の改変は水の停滞性を増し、成層化する期間を長くする。夏季に底層水塊が貧酸素化し易いことは大阪湾や燧灘の観測で明らかになっている。2°Cぐらいの水温上昇で多くの魚種の生産力は増加する。それを越えると生産力の減少、多様性が低下することになる。淡水湖のエリー湖の例であるが、EPAの影響評価<sup>49)</sup>によれば、地球温暖化の影響で成層化する期間が現況より2月ないし4月長くなり、温度上昇による生物の活発な活動によって溶存酸素量が減少するし、結果として、水生生物の減少、藻類の大量発生による水質の悪化が生じると報告している。わが国においても、

このような地域的な影響評価を行う必要がある。そのためにも現在進行中のエスチュアリーや閉鎖性海域の密度流を含む三次元構造の実測に基づいた基礎的な研究を遂行することが重要である。

### (4) 亜熱帯性マングローブ水域の開発と水環境問題

三村<sup>50)</sup>は1994年に開催された「地球規模環境問題に関するミニワークショップ」で、①わが国の海面上昇に対する対応策は構造物による防衛の強化であること、②アジアの一員としてアジア・太平洋の諸国に目を向ける必要のあること、を指摘した。アジア・オセアニアの各国は大河川の三角州やマングローブ林、珊瑚礁の海面上昇に対して脆弱な海岸線に囲まれており、日本とは異なる自然条件にある。第二著者は毎年タイやマレーシアを訪問しているが、マングローブ林が驚くべき速度で消失していくのを目のあたりにしている。アジア人の一人としてマングローブ水域<sup>51)</sup>を敬愛して取りあげたい。

マングローブは熱帯・亜熱帯の海岸・入江・河口・河岸などに生育する塩性植物である。生育環境の条件には満潮線と干潮線の間にあること、潮流や波浪があまり強くなく静穏であること、土壌が泥質または砂泥質であること、年間気温が20°C以上であることが挙げられる。マングローブ植生は熱帯・亜熱帯沿岸線の約60%を占めている。ところが、マレー半島では人間・産業活動から1945年から1982年の間に約20%消滅した。タイでは木炭の生産、養殖、製塩への転換、錫の採掘によって、オーストラリアでは観光資源、海老の養殖のために、マングローブ林が開拓され、また汚濁水による水質悪化が顕在化している。わずかな海面上昇でも生態系への影響は免れない。さらに、海岸線からマングローブが消失すれば、高潮の危険性が増大する。インドネシアやバングラデッシュの洪水はまさにその例である。

マングローブ水域は主水路のクリークと湿地帯・沼地であるスオンプから構成される複断面水路となっている。スオンプにはマングローブが繁茂し、大潮等では潮汐振動の半周期の期間は浸水する。乾期には、塩分濃度が鉛直方向に一様な強混合であり、河口からの距離にしたがって塩分濃度は増大する。スオンプは蒸発池のように働き、栄養塩の溶出が認められる。雨期には陸域からの栄養塩が浮遊粒子の土砂とともに運ばれ、スオンプに堆積する。この栄養塩の肥沃化がマングローブの生育を促進している。潮汐振動にともなうクリークとスオンプ間の物質の交換やスオンプでの滞留効果によって、汚濁物質の滞留時間が長くなる。このような水域に海面上昇が生じたときにどのようなようになるのか、またそれを予期してどのような対応策を講じるべきなのかについては、今のところ解答はない。それ以前に実態が把握できていない。これに対応するにはわが国とは異なった自然条件に

合った技術の開発が必要となるが、水理学・河川工学の分野で研究実績を上げてきた複断面河川水路の水理学や潮汐影響下の分散・密度流の研究成果を進展させることによって現象の解明に貢献できると期待される。

## 6. 今後の課題

地球環境に関わる多岐にわたる研究分野について具体的な課題を整理するのは適当ではない。ここでは水文や水循環、河川・貯水池や海岸・海洋の環境に関わる分野に共通する主に研究手法について課題を述べておこう。

1) 水文過程の時間空間スケールの評価：4.2節では流出解析の立場からの代表スケールが提示されたに過ぎないが、さまざまな目的に応じて、代表的なスケールとその評価基準が必要になってくる。例えば、物理モデルと称するモデルのパラメータを現地の観測値を用いて推定することはできるか、現象の階層構造そのものを何によって評価したらよいか、などこれまでの研究成果の上に新たな概念の形成と議論が必要である。

2) 水文モデルへの植物過程の導入と評価：地表面での熱・水輸送における植物過程の考慮は今や不可欠であるが、季節変動や年ごとの変化や遷移などフィードバックの強い複雑な機構の導入は容易ではない。単なる現象のアナロジーとしてパラメータで“合わせる”の立場に立つのではなく、植物の基本的な生理作用を適切に抽象化してゆく努力が求められる。

3) 検証の重要性：現象理解のためにさまざまなモデルを用いて解析やシミュレーションが行われる。それらの結果が妥当かどうかは当然直接的な現地のデータで検証する必要がある。従来の水理学・水文学ではほぼ確立した検証方法があるが、地球規模、地域規模の多様な現象については何をどのように観測して検証したとすることが問題となる。さらに、大河川の流量など、前述のGRDCによれば観測箇所数が減少しているという。先端技術は進むが、こうした基本的でありながらも労力の必要な努力が軽視される傾向がある。何をするために何が測られなければならないか、あらためて考え直したい。

4) 研究手段の提案：先端技術の利用により問題の把握は確かに向上するが、これまでは技術や手法が独自に先行して発展していることが多く、問題解決者はそうした技術をどちらかといえば受け身的に利用してきた。今後は、研究者が必要な技術や情報取得を研究の過程の中から要求すべき時にきている。例えば、衛星リモートセンシングでは、宇宙開発事業団がそれまでの方針を転換し、地球環境観測のために科学研究者に対しどのようなセンサーを必要とするかを問い掛けるようになってきてい

る。目的に応じた適切な研究手法や手段を積極的に各方面に提案していく必要がある。

5) 学際的研究の勧め：地球を取り巻く環境は様々な物理過程が複雑に絡み合った形で構成されている。その物理過程に乗った形で、生物が生まれ、生態系が成り立っている。それぞれの分野が独立に研究され、学問体系が個々に成熟してきた。地球の環境問題はまさに境界領域にあるわけであり、相互に遠慮なく乗り入れ、共通の言葉と認識の上に初めて成り立つものである。恐れず、慢心せず、一つ一つのささやかな新たな発見を共有することから、学際的研究が始まる。

6) 地球規模の研究環境：アジアの発展途上国においてわずかな測量器具や簡単な計測器を持ってジャングルの中を歩いて何を測るのか？日本では、コンピュータが出力する膨大なデータを前にして何を見出すのか？データを体系化して整理し、科学的な機構を解明するには、洞察力を駆使した思考パターンと、データに対する執念、加えて、我が国の先達もたらした研究成果の活用が必要である。地球環境研究を遂行するには地球規模の研究環境を整える必要がある。

## 7. おわりに

地球規模の環境問題が新たな認識と課題を提起しているが、それらは流行のテーマということでは済まされない。国情によっては地球環境への関心の低い国もあるし、地球環境解明のための予算が削られることもあるだろう。目的のために何が重要で、何をなすべきか、をあらためて問い直したい。問題の多様性からさまざまな分野の研究手法や成果の投入が必要である。個々の研究の位置付けを明確にしながら、たとえばさやかであっても学術上技術上着実な貢献が期待できる研究こそが要請されている。すでに有用な研究成果を挙げておられる多くの研究者に敬意を表すと共に、そうした研究を引き継ぐ方々の奮闘を大いに期待したい。

全体像を示したいがために、本稿で参照する研究事例が偏ってしまったことを危惧している。

## 参考文献

- 1) (社)環境情報科学センター編：図説環境科学，朝倉書店，pp.86-128，1994。
- 2) 砂田憲吾：水文観測と地球環境，水工学シリーズ，土木学会水理委員会，pp.A-4-1~A-4-22，1993。
- 3) 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。
- 4) 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.
- 5) Japan National Committee for WCRP : GAME-A Proposal for the Sub-programme of the Global Energy and Water Cycle Experiment, p.75, 1993.
  - 6) 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.
  - 7) 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, 1992.
  - 8) 沖 大幹, 虫明功臣, 松山 洋, 増田耕一: 大気水収支と地球規模の水循環, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 13-27, 1995.
  - 9) 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.
  - 10) 小池俊雄, 長谷川東, 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.
  - 11) 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, 水文・水資源学会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 33-37, 1991.
  - 12) Wang, J. R. and T. J. Schmugge : An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-18, pp.288-295, 1980.
  - 13) 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.
  - 14) Sugita, M. and W. Brutsaert: Land Surface Temperature and Radio Soundings to Obtain Regional Surface Fluxes, *Water Resources Research*, Vol.28, No.6, pp.1675-1679, 1992.
  - 15) 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.
  - 16) Engman, E. T. and R. J. Gurney : Remote Sensing in Hydrology, Chapman and Hall, pp.53-72, 1990.
  - 17) Waggoner, Paul E. (Ed.): *Climate Change and U. S. Water Resources*, Wiley Interscience, pp.41-137, 1990.
  - 18) 宝 馨, 小尻利治: 地球温暖化による流域水文応答の変化に関する数値実験, 土木学会論文集, No. 479/II-25, pp. 1-10, 1993.
  - 19) 小尻利治編: 地球温暖化のもとでの水資源システムの安全度評価と耐渇水方策に関する総合的研究, 平成 3-5 年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書, pp. 36-89, 1994.
  - 20) 陸 叟皎, 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.
  - 21) 高棟琢馬, 椎葉充晴, 市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, Vol. 38, pp. 809-812, 1994.
  - 22) Dickinson, R.E., J. Jager, W. M. Washington and R. Wolski : Boundary Subroutine for NCAR Global Climate Model, *NCAR Technical Note 173 TIA*, 1981.
  - 23) Sellers, P.J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Delcher : A Simple Biosphere model (SiB) for Use within General Circulation Models, *Journal of Atmospheric Science*, Vol.43, No.6, pp.505-531, 1986.
  - 24) Wood, E.F.: Heterogeneity and Scaling Land-Atmospheric Water and Energy Fluxes in Climate Systems, *Space and Time Scale Variability and Interdependencies in Hydrological Processes*, Cambridge University Press, pp.3-19, 1995.
  - 25) 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.
  - 26) 砂田憲吾, 木村真章: 水文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.
  - 27) 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.
  - 28) 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, 1992.
  - 29) 中北英一(編): 琵琶湖プロジェクト'95 報告-'95 飛行船観測中間報告と今後の展望-, 平成7年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書, p. 158, 1996.
  - 30) 土木学会海岸工学委員会編: 地球温暖化の沿岸影響, 262 p, 1994.
  - 31) 鈴木善光, 山路昭彦: 土木学会関西支部調査研究報告書「21世紀の沿岸都市域の水災害と水環境の展望と問題点」, pp. 163-168, 1994.
  - 32) IPCC レポート: Climate Change, Island Press, 274 p.
  - 33) 中辻啓二, 南博高, 佐藤歩, 村岡浩爾: 都市化が大気の熱環境に与える影響とその要因分析, 第 3 回地球環境シンポジウム講演集, pp. 269-274, 1995.
  - 34) 環境庁: 首都圏における土地利用の変化等に伴う気候変動に関する検討業務報告書. 1990.
  - 35) 重光泰宗, 佐藤歩, 中辻啓二, 村岡浩爾: 大都市とその沿岸の土地利用変化と人工排熱が大気環境へ与える影響の変化, 第 2 回地球環境シンポジウム講演集, pp. 69-75, 1994.
  - 36) 日野幹雄, 神田学: 植生による気候緩和効果と都市環境への応用, 地球環境流体力学, 朝倉書店, pp. 230-247, 1992.
  - 37) 端野道夫, 吉田弘, 市原秀樹: 降雨遮断および SPAC を考慮したタンクモデルによる長期流出解析, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 93-98, 1991.
  - 38) 浅枝隆, 水沼崇彦, 鈴木水弘, 塩崎修男: 都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 591-596, 1991.
  - 39) 若宮聡, 池田駿介, 山本泰浩: 都市河川周辺大気の流れ・温度場に関するモデル実験, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 663-666, 1991.
  - 40) 池田駿介, 財津知亨, 館健一郎: 感潮河川の熱特性に関

- する研究—荒川における測定—, 土木学会論文集, 503/II-29, pp.207-213, 1994.
- 41) 日野幹雄, 歌原英明: 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文集, 第 266 号, pp.87-94, 1977.
- 42) 室田明, 福原輝幸: 柔軟な水草を有する流れの乱れ特性について, 第 27 回水理講演会論文集, pp.585-590, 1983.
- 43) 河川環境管理財団河川環境総合研究所: 河川の植生と河道特性, 127 p. 1995.
- 44) 辻本哲郎: 1.3 水理学的見方, 河川の植生と河道特性, pp.3-7, 1994.
- 45) Nezu, I.: Compound Oen Channel Turbulence and Its Role in River Environment-Significance of Secondary Currents-, 9th Congress, APD, IAHR, pp.1-24, 1994.
- 46) Shiono, K. and Knight, D.M.: Turbulent Open Channel Flows with VVariable Depth Across the Channel, *J. Fluid Mech.*, Vol.222, pp.617-646, 1991.
- 47) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H.: Towards the Modelling of the Hydrodynamics Forces in Compound Open Channel with Vegetated Flood Plain, *Proc. Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.38, pp.437-442, 1994.
- 48) 中辻啓二, 澤井健二: 地球環境変化に伴う水災害, 文部省科学研究費重点領域「自然災害の予測と防災力」報告書, 1989.
- 49) 米国EPAレポート: 地球温暖化による社会影響(抄訳), 技報堂出版, 332 p, 1990.
- 50) 三村信男: 海面上昇の沿岸域への影響と対応策—IPCCでの検討の現状—, 土木学会地球規模環境関に関するミニワークショップ, 講演録, pp.6-10, 1990.
- 51) 中辻啓二: 河口域の流れと物質輸送過程の数値モデルの開発, 文部省科学研究費補助金, 平成4・5年度国際学術研究(課題番号 04044107) 研究報告書, 16p, 1996.
- 52) 日本流体力学会編: 地球環境と流体力学, 朝倉書店, p.275, 1992.

(1996. 8. 26 受付)