

水文学から水資源研究へ

池淵周一

要 旨

河川表流水を資源として利用・開発・配分する場合、河川流域内の場所的・時間的な流出形態を量的に把握また予測することが重要であり、それが水資源の計画・管理問題への基本情報を提供する。本報では、筆者がこれまで研究対象としてきた、降水・流出系のモデル解析、熱的水文現象の観測とモデル化、河川流況をベースにした水循環システム研究について概説するとともに、今後の総合的な水資源管理に向けた展望を述べる。

キーワード： 河川流況，熱的水文現象，水循環システム，水資源管理

1. はじめに

ここでは 3 月 5 日の防災研究所研究発表会退官記念講演内容を再録する形で記述する。京都大学工学部ならびに防災研究所に在籍する間、水循環とりわけ河川水をベースにした水資源システムの計画・管理を研究対象にしてきたといえる。河川表流水を資源として利用・開発・配分する場合、河川流域内の場所的・時間的な流出形態を量的に把握また予測することの重要性和、それが水資源の利用・開発・配分の計画・管理問題への基本情報を提供すると考えたからである。

2. 河川流況の把握・予測と流出モデルの開発

水防災や水利用・水環境といった水循環と人間活動との関わりが、流域を一つの空間ユニットとして営まれていることを踏まえ、ここでは主として流域水循環を対象とする河川水文学に焦点をあてている。そこには森林、農地・水田、都市、河川・湖沼といった土地利用があり、降水、蒸発散、河川水、地下水などの水循環プロセスがあり、それらは時・空間的に変動して

おり、その途上で種々の施設によって農業用水・都市用水などの取水源をうるとともに、利水・排水がなされている。

Fig. 1 は降水から河川流況に至る循環プロセスと経路を描いたものである。なかでも河川表流水の利用・開発・配分へのインプットとして考えるとき、図中の 1 個以上の降水サイクルからいろんな循環・経路をへて流出してくる長期流出に関心を向けた。すなわち日単位での河川流況を中・下流域にある基準点・取水点で把握・予測するものであり、降水・流出変換系を構成する長期間流出モデルの開発である。

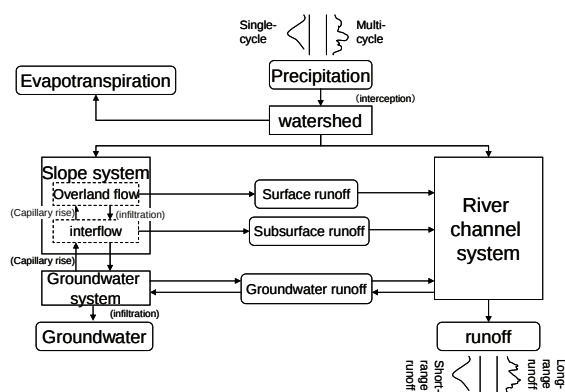


Fig.1 Rainfall-runoff Process

2.1 長期間流出モデル—統計的単位図法

集中型流出モデルとしてタンクモデル法が汎用されていたが、概念的モデルであること、多くのパラメータ同定に試行錯誤を要することといった問題があった。そこでモデル化にあつては、1) 1つ以上の流出サイクルを対象、2) 流出系の主要な物理的特徴が十分に組み込まれた上で確率・統計的手法を導入、3) 中間流出分と地下水流出分を合わせた流出解析を組み立て、それに表面流出分を加えていく立場で解析、4) 日降水量時系列と日平均流量時系列の相互関係を考察、5) 対象とする期間の全波形の予測に重点をおいた評価基準、これらを基本にしつつ Wiener の 3 波・予測理論をベースに流量モデルの展開をはかった (Ikebuchi et al., 1971)。その際、流出変換系の最適応答関数の算出方法が統計的であり、しかもその概念が単位図と似ていることから、これを統計的単位図と呼んだ。ベースとなる導入プロセスは以下の式で与えられる。

$$\Phi_{RQ}(t) = \sum_{k=0}^m h(k) \cdot \Phi_{RR}(t-k) \rightarrow h^*(k)$$

$$\text{ここに } \Phi_{RR}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(i) \cdot R(i+t)$$

$$\Phi_{RQ}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(i) \cdot Q(i+t)$$

$R(i)$, $Q(i)$ は i 日の流域平均降水量および日平均流量である。詳しくは省略するが、展開にあたってはこの他に系の定常化、線形化に力点を置いた。すなわち、1) 定常化として降雨期と積雪・融雪期に分ける、2) 線形化のために非線形特性の強い表面流出成分を降雨、流量系列からいかに除くか→降雨期にあつては A 層内の土湿量変化を考慮、融雪期では降水量を融雪量に変換、3) さらに中間流出と地下水流出を分離し、土湿量変化に蒸発散効果を導入した改良された統計的単位図を提案。統計的単位図法は土木学会水理公式集にも掲載された。

Fig. 2 は改良された統計的単位図による推定流出量と実測流出量の比較を示したもので（適用地点は由良川流域荒川地点：流域面積 150 km²）、再現性もまずまずである。

長期間流出モデルの開発についてはこの他に、流出系内部の確率的構造解明に Shannon の定義した意味で

のエントロピー最大仮説が置きうるとの考えで、状態遷移確率法を提案 (Ikebuchi et al., 1980)。また Shannon の情報量概念は降水観測がもたらす観測・推定情報量の算出に用いることができると考え、その最大化をもたらす観測網配置計画問題として定式化している (高棹ら, 1975)。

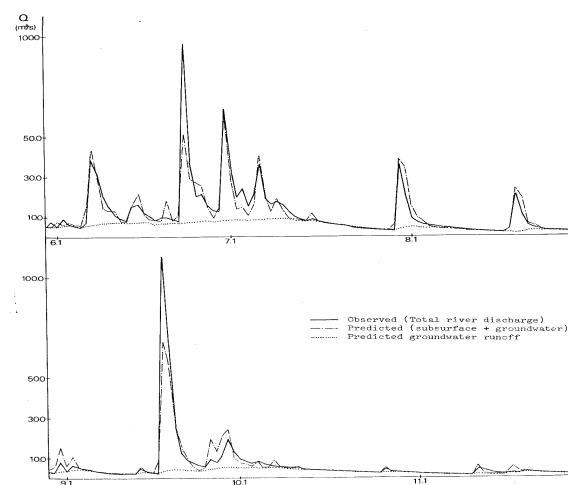


Fig.2 Comparison of observed and estimated discharge. Estimation by improved statistical unit hydrograph method

2.2 降水量の空間的・時間的確率構造とその流況シミュレーション

降水時系列から流出モデルを介して流量データを補完したり、長期間の流量データを作成、さらに多数の長期間流況が水資源システムへのインプット情報として要請されることを考え、降水にあつても多地点での時・空間確率構造を分析し (Ikebuchi et al., 1972)、それらの構造パラメータを内蔵した多地点同時シミュレーションモデルの構築をはかった (池淵ら, 1980)。そのモデル構築のフレームは以下のようである。

- 1) 降水観測所を観測期間、欠測の有無などにより基幹、準基幹、周辺観測所にクラス化
- 2) 基幹と準基幹・周辺観測所間の地域相関分析—等相関係数線図
- 3) 降水系と無降水系とに分離して、それぞれの確率構造を把握した基幹・準基幹観測所の空間的シミュレーション法
- 4) 日降水量と降水間隔日数の 2 変数独立過程として把握した基幹観測所の時間的シミュレーション法

以上のシミュレート結果を Thiessen 法によって流域平均降水量に変換し、長期間流出モデルである統計的単位図法、状態遷移確率法と結合して、流況シミュレーションを実施するものである。

2.3 集中型流出モデルから分布型流出モデルへのシフト

(1) 分布型線形応答モデル

基準点・取水点での河川流況の把握・予測から流域的視点での流況把握、そこには都市化、土地利用変化の影響、各種施設計画・設計とその配置・ネットワーク、降水観測と降水の空間分布のとりこみが重要になってくるとの考えのもと、長期流況にあっても集中型モデルから分布型モデルへの展開を試行した。はじめは流域を格子に分割し、長期流出系を線形貯水池 (Nash, Dooge の流出関数モデルを参照) の結合体として分布型流出モデルを表現し、流出関数に含まれるパラメータを観測流量との間で同定。同定結果を用いて各流域格子への流量配分をおこない、分布型線形応答モデルによる長期流況予測とした (高棹ら, 1976)。このモデルは流域形状、河道ネットワーク、降雨観測点の配置などが流量に与える影響を概括的に分析する場面にも採用している。

(2) 多層メッシュ型流出モデル

河川流域にあつては、上流は森林域、中流は農地・水田域、下流は都市域としての土地利用が大きい。なかでもわが国にあつては、森林面積率は国土の7割近くを占めている。その上流森林域にあつては、森林水文学の分野でフィールド観測等を通して降水・流出関係の知見が多く見いだされているが、

- 1) 森林の埋水機能 (洪水緩和、水源涵養) の評価,
 - 2) 森林域での人為的改変による流出変化,
 - 3) フィールド観測データと知見の ha 規模から km^2 規模への拡張,
 - 4) 降水・流量観測に比べて蒸発散観測の少なさと流出モデル機構にあつての蒸発散プロセスの重要性,
- これらを認識し、考察することができるよう、森林流域の流出特性を3次的に表現できる多層メッシュモデルを構成した (池淵ら, 1990)。

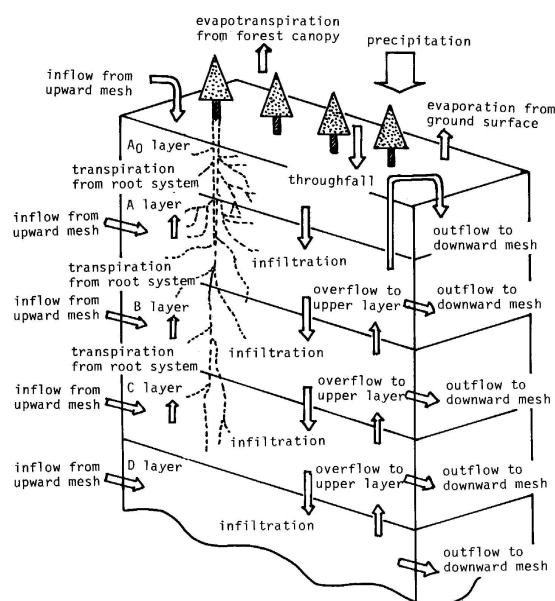


Fig.3 Conceptual block diagram of Multi Layers Mesh Model

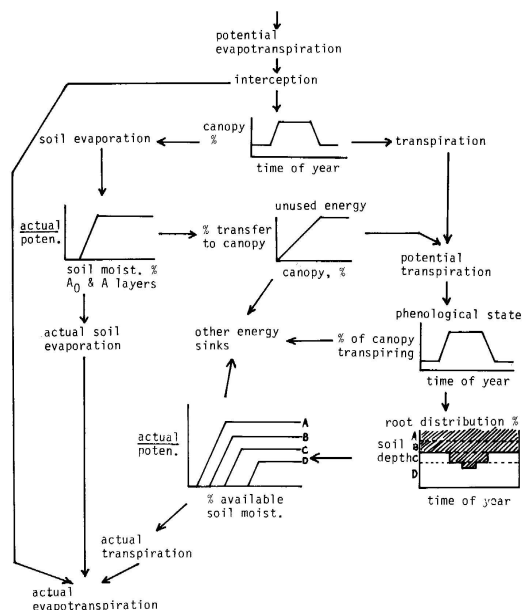


Fig.4 Flowchart for estimation of actual evapotranspiration

多層メッシュモデルは平面分布型としてメッシュ型を、鉛直分布型として多層モデルをとる、いわば複数タンクモデルの合成体である。Fig. 3 にこのモデルの概念図を示すが、別途、降雨遮断モデル、地表面浸透モデル、蒸発散モデル、地中流モデル、河道流モデルが構成されている。モデルの計算時間間隔は短期流出解析時には1時間、長期流出解析時には12時間間隔としており、昼は蒸発散現象が、夜は凝結現象が卓越す

ると考え、1日を6時から18時、18時から6時の2つに分けている。また、メッシュ幅は水平面では流域の特性と森林伐採などによる流出形態の変化を十分に表現できる範囲で最大のものを、一方、鉛直方向については森林域にあつては森林土壌の特性をふまえA,B,C,D各層に分けている。とくに、本モデルにあつて蒸発散推定モデルは力点をおいたところでもあり、そのフローチャートをFig.4に示しておく。

本モデルは最初、淀川水系木津川流域の比奈知ダム建設サイトでの森林伐採フィールドで伐採前後の比較を気象・水文・土壌など詳細な観測・調査を実施し、モデルに含まれる各種パラメータの同定とハイドログラフの良好な再現をみるとともに、同定パラメータの空間変動とその感度分析をおこない、分布型モデルにおけるメッシュサイズとモデルパラメータの代表性や計算時間間隔との関係性についても議論している。

本モデルは日本林業技術協会の水源地森林機能研究会でもとりあげられ、いくつかの流域に適用されるとともに、土砂生産、土砂流出との結合もはかられた。また、水源税問題での関係省庁間の論争、その後の緑のダム・コンクリートダムの洪水緩和・調節機能、日本学術会議での森林の公益的機能評価にも一部資料として提供された。多層メッシュ型流出モデルは、その後、洪水流の追跡を線形合流ではなく、kinematic waveモデルで展開され、長短期流出モデルとして、また融雪や地下水、水質モデルも追加され広域に拡張されたHydro-BEAMとして発展を続けている(例えばKojiri et al., 1998, 朴ら, 2003)。

3. 熱に関わる水文現象の観測とモデル化研究

水循環のプロセスにあつて、また流出モデルを構成するにあつて、とくに水資源にかかわる長期間流況の把握・予測にあつて蒸発散現象はきわめて大きなプロセス研究である。蒸発散現象は直接測定がむずかしく、観測事例が相対的に少ない上に、基礎的研究も少ない。とはいえ、先にも述べたように

1) 表層土壌を乾燥させ土壌層の浸透能を回復、降雨流出の形態を変化させる、

2) 蒸発散は表流水を減少させるため、水資源上、損失に値する、

3) 森林機能評価にあつてもそのウエイトは大きい、

4) 地表面から蒸発した水蒸気は大気中で凝結して再び降水となって地上に到達する、

5) 蒸発散は降水とならんで地球上の水循環と熱循環において重要な役割を果たしている、

ことから蒸発散に関する観測・調査およびそのモデル化研究を鋭意進めることにした。

3.1 林地蒸発散量の観測と推定

東京都八王子市の東京農工大学農学部波丘地利用実習施設の自然林内に、林地蒸発散量観測施設を設置し、主として林地の熱収支をベースにした蒸発散量の推定に必要な各種微気象要素の観測を実施した。実習期間は1981年4月から1984年7月までである。植生はクスギ、コナラを中心として落葉広葉樹林であるが、なかでもコナラは約72%を占めている。コナラの平均胸高直径は16.8cm、平均樹高は16.5mであり、このコナラ群落中に25mの高さの観測塔を設置し、純放射量、地中熱流量、乾・湿球温度(3高度)とその鉛直方向温度差、および風速を観測した。試験地ではこの他にも降雨、土壤水分、地下水位、表面流、地中流なども測り、水・熱収支も検討した。

蒸発散量の推定にあつてはボーエン比熱収支法の適用を試みるとともに、この推定値をもとに熱収支を考慮して空気力学的な方法で必要となる各種パラメータを同定し、これを内挿することで長期間にわたる推定を空気力学的方法によって可能ならしめた(池淵ら, 1985b)。ボーエン比熱収支法の適用結果では、日合計値でみると快晴日では夏季(8月)は最大6.0mm/day、平均4.6mm/day、秋季(9~10月)は最大3.4mm/day、平均3.0mm/day、春季(4月~5月)は最大3.5mm/day、平均3.0mm/dayであった。もちろん曇天・雨天月はこれらを大きく下回っていた。いずれにも平均月1回のペースで現地におもむき、風でゆれるタワーにのぼり、とりわけ湿球温度計の水補給をおこなうとともに、林学、理学の先生方との観測、モデル化談義はいい経験であった。

3.2 裸地蒸発量の観測とモデル化

宇治グラウンドでの地・空相互作用実験場に大型ラインメータ（直径 120cm, 深さ 60cm の鋼製円筒にその地の土壌・土を入れ、精巧な天秤で重量変化を測る）を設置し、微気象観測とともに裸地からの蒸発量を観測・評価した。あわせて裸地蒸発量をペンマン式をベースにモデル化し、そのシミュレーション結果と上記データとの比較で実証的研究を行った（池淵ら, 1989）。

3.3 湖面蒸発量の観測と比較

琵琶湖総合水管理委員会（昭和 55 年～平成元年）の調査研究で湖面蒸発量の観測とその推定をおこなった。琵琶湖北湖・南湖湖面上に取水塔などをプラットフォームとして詳細な微気象観測系を設置し、定常観測を実施するとともに、湖面蒸発量の面的評価をおこなうために船をつかった移動観測も実施した。集中観測期間には渦相関法を実施して真値を得るとともに、長期間にあっては基本的にバルク法を適用し、数年間にわたって湖面蒸発量を推定した。その結果、深い湖を代表する琵琶湖の湖面蒸発量の季別・時系列変化が明らかになるとともに、琵琶湖の秋・冬渇水と水位管理にあって、降雨とともに湖面蒸発量の推移の重要性が浮かびあがった。Fig. 5 は湖面蒸発量の経時変化の一例である（池淵ら, 1988）。

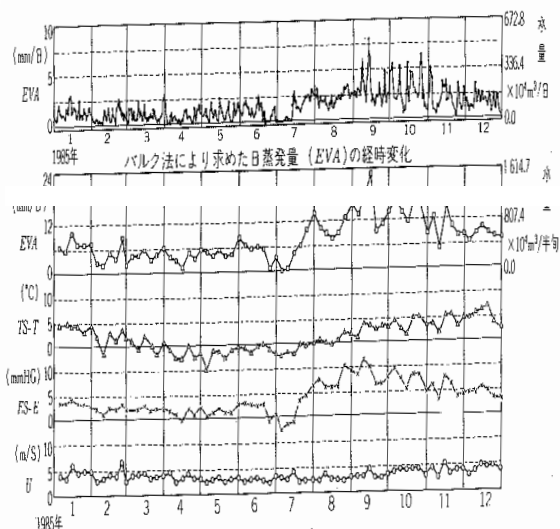


Fig.5 Time series of pentad averaged evaporation (EVA), difference of surface and air temperature (TS-T), difference of saturated vapor pressure at TS and vapor pressure (ES-E), and wind speed

3.4 積雪・融雪・流出の観測調査とモデル化

熱にかかわる水文現象として積雪・融雪・流出に関する調査研究も進めた。わが国の豪雪地帯は国土面積にして 52% を占めており、そこに 2000 万人以上の人々が住んでいる。降雪は直ちに流出するのではなく、流域にいったん積雪として貯留され、積雪面には日射や放射、顕熱、潜熱、降雨による熱エネルギーが、また積雪下面には地温エネルギーが加えられて融雪し、やがて融雪水が河川に流出する。

琵琶湖北部大浦川・高時川流域で積雪・融雪・流出に関して詳細な気象・水文観測調査を数年間実施するとともに、降雨・降雪→変換系Ⅰ→積雪→変換系Ⅱ→融雪→変換系Ⅲ→流出、の一連のモデル構成によって積雪・融雪・流出モデルを開発した（池淵ら, 1985c）。モデルの特徴として、

- 1) 積雪・融雪期を通して連続的に計算ができる、
- 2) 積雪の冷却・凍結過程がモデルに組み込める、
- 3) 積雪内貯留過程がモデルに組み込める、
- 4) 計算過程のなかで、積雪水量、積雪深、積雪密度、雪温、含水量などの積雪の状況を表す諸要素が算出される、

といった点をあげることができる。最終的に本モデルを琵琶湖全流域に拡張し、積雪・融雪期の琵琶湖水位の再現・評価にもち込んでおり、琵琶湖水管理にあっての流出予測情報になっている。

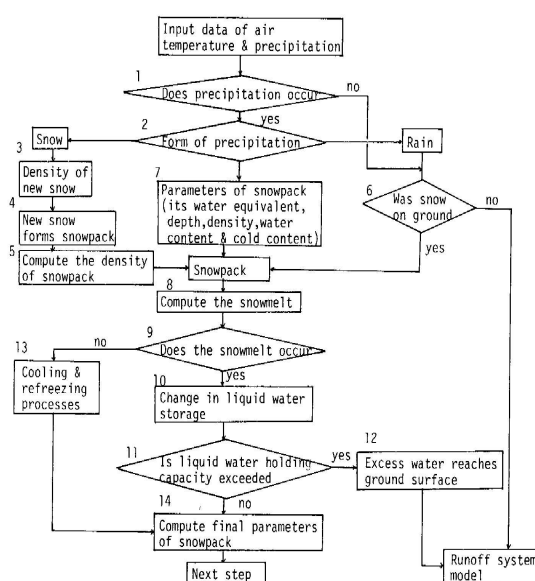


Fig.6 Block diagram of the snowmelt model

本モデルはさらに水質負荷、いわゆる酸性雨・酸性雪の流出問題にも適用している。すなわち、河川水、融雪水、土壌水の各種イオン濃度観測とともに、土壌内化学過程を表現する ILWAS(Integrated Lake Watershed Acidification Study)モデルをベースに積雪・土壌内イオン変換モデルを構成して、酸性雪・融雪・流出プロセスをへて河川水へのアシッドショックの程度を計量化している。また、早い段階から琵琶湖流域にあっては熱にかかわる水文現象を明らかにしてきているので、これらモデルを通して地球温暖化シナリオにとまなう湖面蒸発量、積雪・融雪・流出への影響と琵琶湖水位への影響・評価を試みている(Ikebuchi, 1992)。なお、琵琶湖および琵琶湖流域での湖面蒸発量、積雪・融雪・流出は流域蒸発散、流域流出モデル、地下水流出モデルなどの開発とあわせ、その結果は琵琶湖水収支としてアクアビワ館の展示パネルに紹介されている。

3.5 広域水・熱フラックスと陸面過程モデル

(1) 面積率パラメタリゼーション

林地・裸地・湖面・雪面各蒸発面からなる広域の蒸発散量をどのように領域平均化するか、この問題については、琵琶湖という広領域からの湖面蒸発量を移動観測等を通じて領域平均化する方法を展開しているが、さらに土地利用スケールと領域平均熱フラックスとの関係を数値実験も併用して検討した結果、ある広がりをもった領域平均にあっては、各蒸発面からの蒸発散量を各土地利用面積の加重平均で評価してもよいことを見出している(田中ら, 1995)。

(2) 衛星リモートセンシングとのかかわり

広域といってもさらにスケールアップした地球環境の観測と地球システムを構成する現象の理解が進展しつつある中で、そのツールとして衛星リモートセンシング技術とその活用が水文分野の研究者・技術者にも働きかけがあった。当時、宇宙開発事業団に設けられた地球観測専門委員会の一つに水文ミッションが設置され、何もわからないまま、その主査を担当、センサーの特質と大気・陸面過程の電磁気学・光学特性をふまえ、水文分野における衛星センサーの開発スベック

等を議論、その必要性を要請した苦労を経験した。衛星リモートセンシングが衛星、センサーの開発ともあいまって、いろんな分野に有用な情報を提供することを、その当時は想像だにできなかったが、衛星リモートセンシングはその後、琵琶湖プロジェクトや GAME プロジェクトといった広域の気象・水文観測でも機能を発揮するとともに、水文過程にあって多様な物理量の抽出アルゴリズムの開発とプロダクトとしての情報提供をもたらしている。

(3) 陸面過程モデル(SiBUC)

複数土地利用からなる広域の水・熱フラックスの領域平均化とあわせ、地表面での水・熱フラックスの推定は大気大循環モデルやメソ気象モデルの最下層を受けもつモデルとしての陸面過程モデルとしての重要性が高まってきた。代表的な陸面過程モデルとして SiB(Simple Biosphere model)があり、このモデルでは植生を2層で表現し、樹木に覆われた樹木層と草地あるいは裸地で構成される地表層を考え、地表面下の土壌層は3層からなるものとしている。我々は、地表面は植生でおおわれているだけではなく、水・熱フラックスの特性にあっては、都市域や水体のそれは植生と大きく異なり、その影響は無視できず、またアジアモンスーン域を考えると水田という土地利用の広がりは大きいため、これらを取り込んだ陸面過程モデル SiBUC(Simple Biosphere including Urban Canopy)を開発・展開した(田中ら, 1994)。

SiBUC モデルでは地表面の状態を性質が比較的似ているものをまとめて大きく3つに分けモデル化している。すなわち、緑地のモデル(green area model; SiBを基本とするが植性を一層にするなど少し簡略化)、都市域のモデル(Urban Canopy model; 都市域の粗度要素としての建物群を同じ幅だけ高さは違う直方体の集合体として表現、放射過程では天空率などを導入している)、水体のモデル(water body model; 水温だけの強制復元モデル)を考え、また、グリッドあるいはメッシュ内でこれら構成要素が混在化することを許すモザイクモデルになっており、その領域平均化が大気の最下層の水・熱フラックスとして、大気モデルと結合されている。SiBUC の基本フレームを Fig. 7 に、水・

熱フラックスのフローを Fig. 8, 9 に示す。

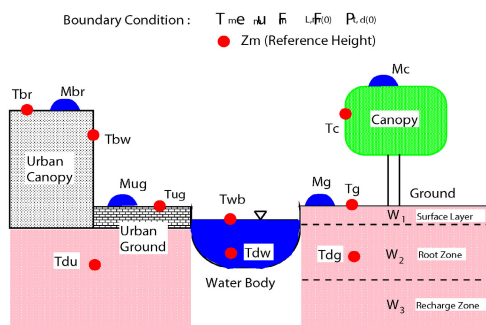


Fig.7 Schematic image of surface elements in SiBUC

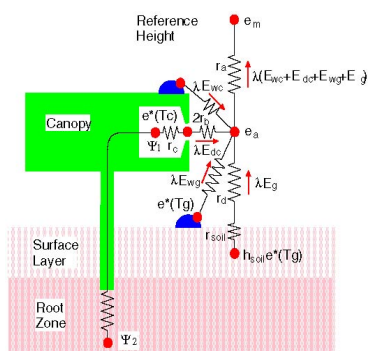


Fig.8 Transfer pathways for latent heat flux

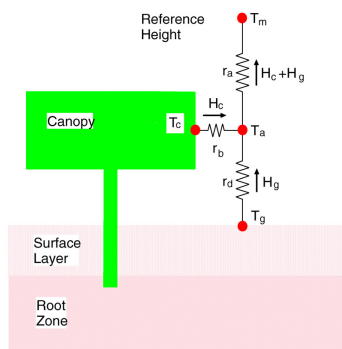


Fig.9 Transfer pathways for sensible heat flux

SiBUC と大気モデルの結合、これもいくつかのメソ数値予報モデルとの結合があるが、都市域にあってのヒートアイランドと都市集中豪雨の関連にあっては、練馬豪雨を事例として、CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)とSiBUCの結合によるCReSiBUCで数値実験をおこない、ヒートアイランドに伴う熱的影響が降水域の形成位置や降水量に影響を及ぼすことを見い出している(伊藤ら, 2006)。また、JSM(Japan Spectral Model)とSiBUCの結合により、中国・韓国・日本を含む東アジア域にあって梅雨前線による降水の再現と、森林から草地への土地利用変化にともなう降水域および降水強度の変化についてもシミュレートしている。

さらに、琵琶湖プロジェクトや淮河プロジェクトを立ち上げ、それぞれの領域において森林、水田・農地、市街地、水面上での水・熱フラックス観測を行うとともに、SiBUC モデル中のパラメータ同定をはかり、琵琶湖流域(6700 km²)および淮河流域(111,000 km²)の衛星データ等による土地利用データマップとあわせ、両流域の水・熱フラックス分布を算定している(田中ら, 2003, Kozan et al., 2003)。これらモデルは出力として地下水流出量や灌漑取・排水量も算出するので、2年間ではあるが琵琶湖流域の水収支をこれら要素を含めて系別に詳細に描くことを可能にしており、また、淮河流域にあっては水・熱フラックスの算定とともに、分布型流出モデルとの結合により、大流域での流量再現・予測に活用されている(立川ら, 2002)。

加えて、全球1度陸域グリッドでインプットデータセット(GWSP2 提供)を気象強制力として陸面過程モデルSiBUCにより、潜熱、顕熱はもとより、土壌水分量分布を算出するとともに、灌漑能力(水源・設備)は考慮していないものの、作物を最適に生育させるために必要な最大灌漑水量として灌漑要求水量分布を求めている(Yorozu et al., 2005)。全球での水利用の約80%を占める農業用水、農作物生産の40%以上が灌漑農地であることを考えると、水資源・作物の安定供給にこうした灌漑要求水量の把握が必要であり、農業システムの気象変動に対する耐性・脆弱性の評価にも持ち込むことができると考えられる。Fig. 10 に一例として全球灌漑要求水量分布を示す。

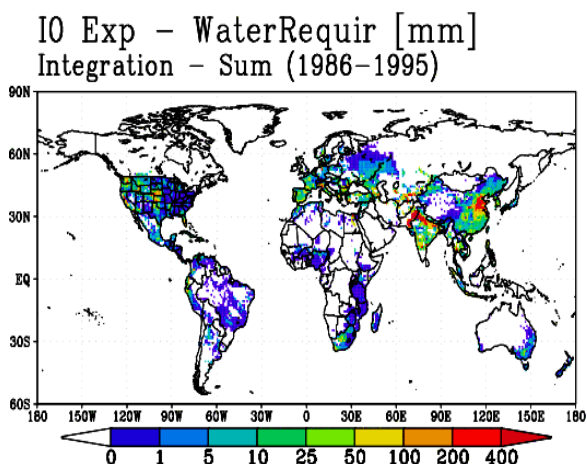


Fig.10 Global distribution of annual total irrigation water requirement

4. 河川流況をベースにした水循環システム研究

水資源システムを水文現象の空間的・時間的な変動性から人間の資源価値に変換する操作系と認識すると、資源価値としての水需要、それは時代性や地域によって形成され、価値に変換する操作系にあっても変動を平滑化し、開発するハード・ソフト技術、また操作系にあってはその利用・実施にあつての枠組みとして施策や法制度がかかわってくる。これらにも時代性と地域性がある。このように水資源問題は水需給いずれにあっても動的な側面をもっているといえる。

研究の当初にあつては、水資源といえば主として利水、水利用であり、水需要構造とその予測、それに対応する水資源の開発・配分計画問題に焦点をあてた。そこで、水資源システムの計画策定プロセスを水需要予測、河川流況と利水安全度の設定、流域全体での需給バランスをはかる水資源開発計画（水資源開発施設の規模・配置計画、段階的建設計画、ダム貯水池群の運用計画）、それをうけての地区別・用途別の需給バランスをはかる水資源配分計画を描き、水資源開発計画、水資源配分計画にあつての代替案選択問題には Fig. 11 のような 3 段階モデル構成をはかった (Kojiri et al., 1982)。

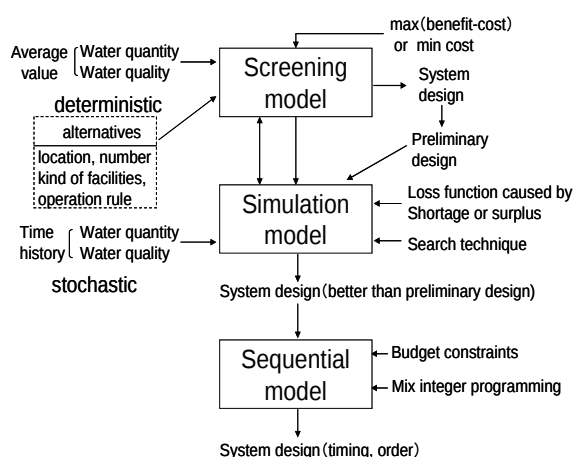


Fig.11 Screening, simulation and sequential stages in model making of water resources systems

昭和 40 年代後半から 50 年代後半にかけて水資源の開発要請は国内外とも大きく、数理計画モデルの構成と最適化手法の適用が数多く展開された。

ちなみに筆者も

- ・複数のダム・取水施設の規模・配置計画 (0-1 整数変数を含めた混合整数計画)
- ・ダム貯水池群の水量制御 (DP)
- ・時間選考を考慮した水資源開発施設の建設時期・順序計画 (0-1 全整数計画, 混合整数計画, および DP)
- ・ダム貯水池による水量・水質制御 (多目的最適化手法)
- ・河川水・地下水連結運用モデル (多層最適化手法)
- ・その他 確率的最適化手法の適用

などのモデル構成と最適化手法の適用をはかった (高埴ら, 1975b, 池淵ら, 1985a, Kojiri et al., 1984)。

4.1 システムダイナミックスモデル (SD) による水需給シミュレーション

水需給が多くの内因・外因に支配されているとともに、とられる施策によっても影響を受けるので、それら水需給の変化過程を SD モデルで構成し、施策シナリオを含めてシミュレーション予測する。この SD モデルは淀川 SD として展開された (高埴ら, 1977)。その他、治水に関しても水系一貫した治水計画の策定に関して、治水システムとその洪水・氾濫に関する時・空間確率算定法を構成、氾濫確率を計画完全度指標とした治水システムの策定法を建設手順計画とあわせ展開する研究もおこなった (堀ら, 1987)。

4.2 渇水と利水安全度

渇水は水需給の一時的アンバランスであり、利水安全度はその一時的アンバランスをどの程度の水準で受容するか概念表示である。この利水安全度の規定要因として、不確定な水量、水質の変動、要求・確保の対象となる目標値の水準、両者を対応させる変換システム、いわゆる水資源の開発・配分・操作システムを考え、信頼度、回復度、深刻度という安全度指標を設定し、確率マトリックス演算による利水システムの安全度評価を展開した (池淵ら, 1987)。渇水問題については気象レベル、水文学レベル、水管理レベルといった階層構造的認識の必要性を述べるとともに渇水の時・空間生起特性とその要因構造分析、FTA による渇水の構造特性分析なども行なった (Ikebuchi, 1990)。

その他、平成6年全国的渇水を文科省突発災害調査として申請し、その気象・水文特性と被害対策の地域比較調査なども実施した(池淵, 1995)。

4.3 水資源システムの運用管理

水資源システムのなかでもダム貯水池による流量調整は、水資源の開発と有効利用のための種々の方策の中で効果が大きい、ダム群制御システムを入力軸、システム軸、目的軸の3次元的表现で描くとともに、計画操作にあつてはDP、確率DP、確率制御DP、モンテカルロDP、多目的計画法などの最適化手法を導入して、多ダム、多評価地点系の最適操作(高棹ら, 1978)、濁質水を考慮した多目的ダム制御(高棹ら, 1979)、治水・利水を包含した貯水池操作(高棹ら, 1980)などを解く。これらは操作のルールへのデザイン、操作ルールを含んだダム緒言のデザインに活かされる。

一方、実時間操作にあつては、入力値すなわち降雨・流出量の時々刻々の観測値ならびに不確定な将来予測値をもとに放流量を決定することになるが、意思決定あるいは判断プロセスと曖昧さはつきものであり、この曖昧さを定量化して柔軟にかつ積極的にダム貯水池操作システムに導入する試みをおこなった。それが貯水池操作システムへのファジィ制御理論の適用に関する研究であつた(Kojiri et al., 1988)。また、中、長期気象予報、開発したニューラルネットワークや類似法をベースにした長期の降水予測値を利用したダム貯水池の長期実時間操作手法も展開した(Galvao et al., 1992)。これらは、どちらかというと低水管理に重きをおいた実時間操作であるが、洪水時の実時間操作にあつてはこの他に定性推論の導入(Oishi et al., 1994)や、そもそも降雨の短時間予測が必要になることから、力学や物理を考慮しつつ、降水メカニズムを概念的に単純化した降水モデルを導入し、そのモデルパラメータや状態量を同定するためにレーダー反射因子値を用いる(Nakakita et al., 1996)、といった短時間降雨予測手法を展開している。降雨の短時間予測はダムの事前放流やただし書操作の回避などダムの高度運用にあつて、益々重要性を高めてきている。

4.4 ダムと河川環境

洪水期、夏期制限水位まで空容量となっているダムの洪水調節容量の一部を、安全性を十分に確保した上で活用し、渇水補給、清流回復(維持流量の増大)、河川清潔の保持(ブラッシング)等をはかるダムの弾力的管理運用を検討した。そこには降雨の短時間予測の精度向上とともに、流水の物理的環境と生態的環境の定量的な関係把握が重要であり、いくつかのダムで調査研究を開始した(波多野ら, 2005, 竹門ら, 2006)。

5. おわりに一水資源管理に向けて

流域をベースとした治水・利水・環境保全いずれをも包含した水資源管理となると、水資源のもつ多様な機能や社会的側面の担保関係を理解し、対立する利害を調節し、より実際上の問題解決を強く意識した形で統合型の水資源管理あるいは総合的な水資源マネジメントに向かう必要がある。そのためにはホリスティックな理念・目標設定、ハード・ソフトの対応策、それを実行するための政策提言が望まれる。

参考文献

- 池淵周一, 谷本光司(1980): 面積雨量のシミュレーション法とその流出モデル評価への適用, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp. 157-173.
- 池淵周一, 小尻利治, 堀智晴(1985a): 治水システムの段階的建設手順に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第28号B-2, pp. 237-252.
- 池淵周一, 澤井康(1985b): 林地蒸発散量の長期間にわたる時系列推定, 京都大学防災研究所年報, 第28号B-2, pp. 157-177.
- 池淵周一, 竹林征三, 友村光秀(1985c): 積雪・融雪・流出モデルとその59年豪雪への適用, 京都大学防災研究所年報, 第28号B-2, pp. 195-211.
- 池淵周一, 小尻利治, 武村彰文(1987): 確率マトリックス演算による利水システムの安全度評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, pp. 359-375.

- 池淵周一，陣内孝雄，岡久宏史（1988）：琵琶湖湖面蒸発量の観測・評価システムとそのシミュレーションモデルへの活用，水理講演会論文集，第 32 回，pp. 155-160.
- 池淵周一，土谷史郎，久保和幸，光田寧（1989）：裸地蒸発量のモデル解析とその実証的研究，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-2，pp. 319-336.
- 池淵周一，久保和幸（1990）：多層メッシュモデルによる流出再現と感度分析，京都大学防災研究所年報，第 33 号 B-2，pp. 147-166.
- 池淵周一（1995）：平成 6 年渇水の気象・水文特性と被害対策の地域比較調査，平成 6 年度河川災害に関するシンポジウム.
- 伊藤洋太郎，茂木耕作，相馬一義，他（2006）：詳細な陸面過程を組み込んだ雲解像モデルによる練馬豪雨発生に対する都市の影響評価，水工学論文集，第 50 巻，pp. 385-390.
- 高棹琢馬，池淵周一（1975a）：降水観測がもたらす情報量とその観測網配置計画への応用，土木学会論文報告集，pp. 83-95.
- 高棹琢馬，池淵周一，小尻利治（1975b）：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究，土木学会論文報告集，pp. 39-50.
- 高棹琢馬，池淵周一（1976）：分布型線形応答モデルによる長期流出予測，水理講演会論文集，第 20 回，pp. 9-14.
- 高棹琢馬，池淵周一（1977）：水の需給構造に関するシステム・ダイナミクス論的研究，土木学会論文報告集，pp. 55-70.
- 高棹琢馬，池淵周一，小尻利治（1978）：多ダム・多評価地点系の最適操作に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 21 号 B-2，pp. 193-206.
- 高棹琢馬，池淵周一，小尻利治（1979）：濁質水を考慮したダム制御に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第 22 号 B-2，pp. 167-178.
- 高棹琢馬，池淵周一，小尻利治（1980）：治水・利水を包含した貯水池操作に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第 23 号 B-2，pp. 279-291.
- 竹門康弘，山本佳奈，池淵周一（2006）：河川下流域における懸濁態有機物の流程変化と砂州環境の関係，京都大学防災研究所年報，第 49 号 B，pp. 677-690.
- 立川康人，宝馨，田中賢治，他（2002）：中国淮河流域における河川流量シミュレーション，水文・水資源学会誌，第 15 巻，第 2 号，pp. 139-151.
- 田中賢治，池淵周一（1994）：都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用，京都大学防災研究所年報，第 37 号 B-2，pp. 299-314.
- 田中賢治，田中敬也，池淵周一，葛葉泰久（1995）：土地利用スケールと領域平均熱フラックスの関係，水工学論文集，第 39 巻，pp. 159-164.
- 田中賢治，中北英一，池淵周一（2003）：陸面過程モデルから見た琵琶湖流域の水循環，平成 15 年度水資源セミナー講演概要集，pp. 61-68.
- 朴珍赫，小尻利治，友杉邦雄（2003）：流域環境評価のための GIS ベース分布型流出モデルの展開，水文・水資源学会誌，第 16 巻，第 5 号，pp. 541-555.
- 波多野圭亮，竹門康弘，池淵周一（2005）：貯水ダム下流の環境変化と底生動物群集の様式，京都大学防災研究所年報，第 48 号 B，pp. 919-934.
- 堀智晴，池淵周一，小尻利治（1987）：氾濫確率を計画安全度指標とした治水システムの策定法，水理講演会論文集，第 31 回，pp. 247-252.
- Galvao, C. and S. Ikebuchi (1992) : Rule-based reservoir operation considering long range forecast, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 42, pp. 72-94.
- Ikebuchi, S. and T. Ishihara (1971) : A Study of Long Range Runoff System Response Based on Information Theory, Proc. of 1st Bilateral U. S. -Japan Seminar in Hydrology, pp. 1-21.
- Ikebuchi, S. and T. Ishihara (1972) : Stochastic Structure in Space and Time of Daily Precipitation and Their Simulation, Proc. of 2nd Intl. Sympo. in Hydrology, pp. 615-626.
- Ikebuchi, S. and T. Takasao (1980) : Stochastic Aspects on the Runoff System and Model Making Based on the Concept of Entropy, Proc. of 3rd Intl.

- Sympo. on Stochastic Hydraulics, pp.177-188.
- Ikebuchi, S. (1990) : Study on Characteristics of Drought by FTA(Fault Tree Analysis), Proc. of Intl. Sympo. on Water Resources Systems Application, pp.187-196.
- Ikebuchi, S. (1992) : Possible Change of Evaporation and Snowmelt due to Global Warming and its Effect on Water Level of Lake Biwa, Proc. of the Workshop on the Effect of Global Climate Change on Hydrology and Water Resources at the Catchment Scale, pp.189-206.
- Kozan, O., K. Tanaka and S. Ikebuchi (2003) : The Estimation of Water and Heat Budget in the Huaihe River Basin China - Detail Representation of Various Cropland and Irrigation -, Proc. of the 1st Intl. Conf. on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region, Vol. 2, pp.763-768.
- Kojiri, T., S. Ikebuchi and T. Takasao (1982) : Optimal Planning of flood Control Systems Based on Screening, Simulation and Sequential Models, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 32(4), pp.209-227.
- Kojiri, T. and S. Ikebuchi (1984) : Optimal Operation for the Conjugative Use of Dam Reservoir and Groundwater Systems Based on Multi-Level Optimization Method, Proc. of 4th Congress-Asian and Pacific Division, IAHR, pp.905-919.
- Kojiri, T. and S. Ikebuchi (1988) : Real-Time Operation of Dam Reservoir by Using Fuzzy Inference Theory, Proc. of 6th Congress-Asian and Pacific Division, IAHR, pp.437-444.
- Kojiri, T. and S. Ikebuchi (1998) : GIS-Based Environment Assessment Model for Water Quantity and Quality with River Basin Simulation, Proc. of Intl. Sympo. on Hydrology Water Resources and Environment Development and Management in Southeast Asia and the Pacific, pp.11-23.
- Nakakita, E., S. Ikebuchi, et al. (1996) : Short-term Rainfall Prediction Method Using a Volume Scanning Radar and Grid Point Value Data from Numerical Weather Prediction, JGR, Vol.101, No.D21, pp.26.181-26.197.
- Oishi, S. and S. Ikebuchi (1994) : Knowledge Acquisition and Qualitative Reasoning for Flood Control, Effective Environmental Management for Sustainable Development, Kluwer Academic Publ., pp.321-334.
- Yorozu, K., K. Tanaka and S. Ikebuchi (2005) : Estimation of global distribution of required water for irrigation using SiBUC, Proc. of XII World Water Congress (CD-ROM).

Progressing in Water Resources Research

Shuichi IKEBUCHI

Synopsis

Quantitative understanding and prediction of the spatial-temporal pattern of runoff process is important for the utilization, development, and allocation of the river water resources. It provides the basic information to water resources planning and management. In this report, author's research activities, such as modeling and analysis of rainfall-runoff system, observation and modeling of energy balance, systems approach on water cycle based on river discharge, are briefly summarized. Future perspective toward the holistic water resources management is stated in the last part.

Keywords: hydrograph, energy balance, water cycle system, water resources management