

流域水循環モデルを利用した比較水文学の提案

朴珍赫*・小尻利治・友杉邦雄

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

水量、水質の移動変遷過程を時空間的に把握し、流域の健全性を評価できる水循環モデルの開発が要求されている。近年、GIS 技術と計算機能力の発展により、流域スケールの拡大や空間的な分布特性をより忠実に反映させる分布型モデルの構築が可能となってきた。本研究では GIS をベースに流域水循環モデルを構築する一方、流域場の特性と降雨－流出における相互流域間の類似性を通して、水循環系全体を含めた比較水文学を提案するものである。

キーワード：比較水文学、流域シミュレーション、GIS、流域流出場

1. 本研究の背景と目的

近年における地球規模での人間活動の活発化と複雑化に従って、自然界の水循環過程は量、質ともに大きく変化している。水循環が水資源開発や治水・利水に限定されていた時代には、マクロな水収支解析や従来のモデルによる降雨－流出解析の有用性は高かった。しかし、より複雑な環境問題に対処していくためには、水量、水質の移動変遷過程を時空間的に把握し、流域の健全性を評価するモデルの開発が必要である（榎根，1987）。健全な水循環とは、治水、利水、環境への機能が損なわれない持続的な循環系が成立した状態と考えられている。そのため、利水及び治水のための水量の確保と水質の維持、そして河川における生態系の保全が求められている。

近年、地理情報システム (Geographical Information System ; GIS) 技術と計算機能力の発展によって従来は紙面上でしか扱うことのできなかった地図情報を計算機で管理・計算処理・表示することができるようになり、各種水文情報、すなわち量・質的に異なる多様な

データを位置座標と結びつけたままで統一的に扱うことが可能となってきた。これによって、水環境を捉える上で、流域スケールの拡大や空間的な分布特性をより忠実に反映させる分布型モデルの構築が可能となってきた。分布型モデルはそのモデルの構造によって大きく2つに分けることができる。一つは流域をいくつかの単位に分割して、その分割領域ごとにある流出モデルを設定し、最終的にそれらのサブモデルからの流出を総合する方法である。米国工兵隊 (U.S. Army Corps of Engineers) の HEC-1 や HEC-HMS、米国環境保護局 (U.S.A.EPA ; USA Environmental Protection Agency) の SWMM もこのモデル構造を有している。他は、流域をサブ流域に分割しないで、流域の数値地形情報を利用して、雨水の流れをそれに従って直接追跡する方法である。この方法には、数値地形情報をもとに最も標高の低い方向に雨水が流れると考える落水線図を作成し、その落水線図に従って雨水の流れを一次的に追跡する手法がよく用いられる (立川, 1999)。また、SHE モデル (Bathurst, 1986) のように、流域を差分格子で覆い、雨水の流れを二次元または三次元的に直接解く方

法もある。どの方法を選択すべきかは、その目的と利用できるデータなどの条件によると考えられるが、その明確な判断基準が存在するわけではない。流域の水循環の視点から、地表水と地下水のバランスに配慮した総合的な水管理を行うためには、支援ツールとなる分布型モデルである流域水循環評価モデル（以後、水循環モデルと呼ぶ）が必要である。

物理的分布型モデルのメリットは流域の任意の地点で流量、汚濁負荷量を推定できる点にあり、しかもそのプロセスを物理的に追跡しているために、流域内の人間活動や自然条件の変化や空間的な分布特性を計算に反映させることができることである。GISの活用は、水文現象に影響を及ぼす気象学的要因、土壌、土地利用、標高等の水文情報を獲得するための手段及びデータの管理の側面はもとより、解析結果の表現という新たな側面でより効果的である。さらに、GIS技法を利用した流域の地表面傾斜、流路長、土地利用及び土壌特性などの決定過程で、誤差を最小化した流出の空間的構成因子を算定することにより、より正確な降雨－流出関係を解明することができるであろう。

そこで、本研究では降雨と流域特性を空間的に把握できる分布型水循環モデルを用いた流域の水量、水質、生態を含む相互流域間を総合的に比較及び類似性を検討する比較水文学を提案するものである。すなわち、最近注目されているGIS技術を水文解析に応用して流域水循環モデルを構築する一方、流域流出場の特性と降雨－流出における水循環全過程での比較研究を行うものである。

2. 比較水文学と比較手法の提案

比較水文学とは、“流域間の気象、水文、地形などの自然条件と人口、産業、土地利用などの社会経済的な条件を比較しながら流域水循環を基礎としている治水、利水、環境などに及ぼす影響を考察する水文学の一分野”と定義する。

世界の流域は、その流域面積、勾配などの地形特性ばかりでなく気候、地質などの自然条件によって極めて多様である。さらに、対応する流出特性も地域の個性によって差が生じる。ゆえに、水文・水資源に対する特定の手法を適用する際には、その地域の個性を的確に捉まえておく必要がある。

Fig. 1は本研究で提案している比較水文学の比較項目とその手法を簡単に示したものである。比較項目としては大きく入力、媒体、結果の3種類に分けて、入力段階では小項目として気象条件、媒体では小項目として基本因子、地形特性、パラメータ、土地利用や人口などのその他の項目を、結果としては小項目に蒸発散、水量、水質を、そして、得られるピーク流量などの項目である。最後に、各項目の特性値を集約して総合的な類似性を求める。言い換えると、比較水文学研究の最終目的は流域場の特性と降雨－流出における水循環過程での比較を通して流域構造と水循環モデルとの関係を流域間の比較研究によって明らかにすることにある。

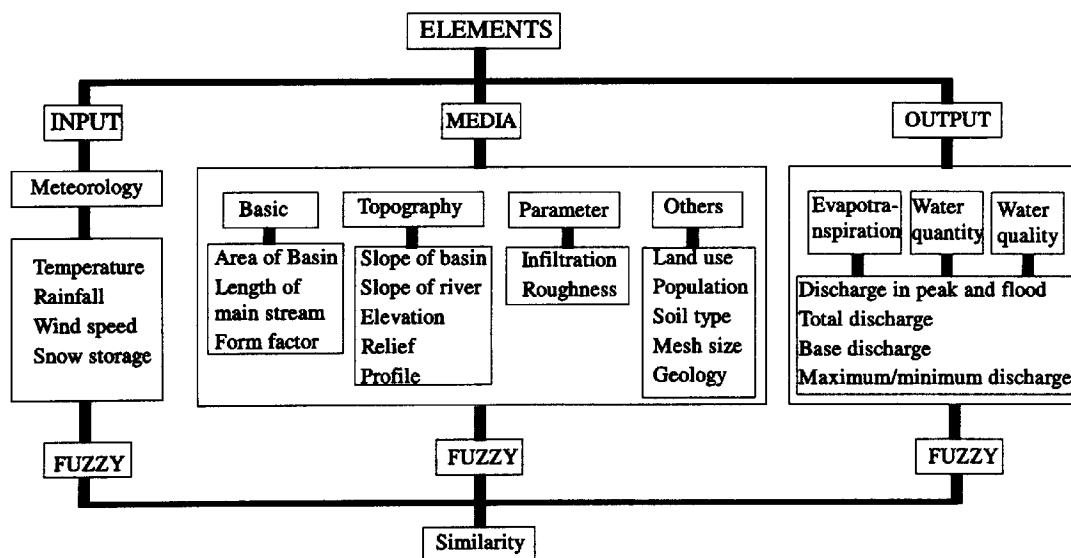


Fig. 1 Proposed elements of Comparative Hydrology

3. GIS による流域のモデル化

GIS は多様な情報源から大量の空間データを取り込み、地図情報を主体としたデータベースを作成し、それを効率的に蓄積・検索・変換・解析することができる。また、デジタル化された地理情報をベースに、様々な情報を付加して加工、分析、ビジュアル化して意思決定支援などに適用できるシステムである(中村、1998)。

水循環モデルにおける GIS の応用は、複雑かつ膨大な水文情報を的確かつ正確に処理するために、情報のビジュアル化は不可欠であり、かつ、地形、河川といった図形データと人口、気温、降水量などの属性データをデジタル化し、蓄積、解析、検索、処理、表示などの処理を行うことに用いる。

3.1 GIS による流域形状の設定

(1) DEM から流域界の決定手法

土地利用情報や標高データなどは、分布型流出モデルと整合性が良く、河川流出をモデルする上で非常に有用なものになりつつある。デジタル標高データ(DEM)から対象流域を含む領域の標高データを切り出し、DEMのグリッドポイント周囲の矩形の領域を一つの部分流域(メッシュ)とみなす、流域全体がメッシュの多数の集合体であるとして GIS 上で適切なメッシュに変換したデジタルマップを作成する。地形情報データベースとして国土数値情報や DEM を用い、GIS 上で以下の手順で流域界を決定する。

Fig. 2 は流域界抽出のアルゴリズムをフローチャートで表したものである。

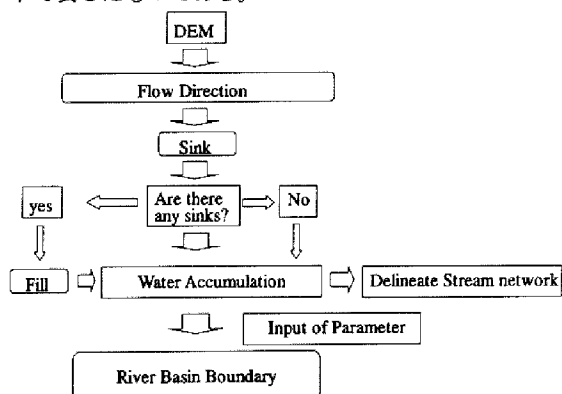


Fig. 2 Extraction algorithm of river basin boundary using GIS

i) GIS 上で地形と河川の正確な位置を与える場合、互いの座標系が一致しない時がある。例えば、国土数値情報の 50m メッシュ(標高)は経緯度座標で表されて

おり、数値地図 25000(画像)は画像データのため座標系をもっていない。それで、数値地図 25000(画像)を変換させるプログラムを作成して UTM 座標で与えている数値地図 25000 と経緯度座標で与えている国土数値情報の 50m メッシュ(標高)を UTM に投影する必要がある。

- ii) 窪地(Sink)の除去: 水文解析の前処理として、DEM に存在する窪(凹)地の除去処理を行う。
- iii) 水流方向(Flow Direction)の解析: 窪地除去後のテーマから各セルの最急傾斜方向を解析する。
- iv) 水流の集積(Flow Accumulation)の計算: 個々のメッシュについて、上流のすべてのセルから流れ込む流量の合計を求める。この値が大きいメッシュは河川の支流となる。
- v) 流域界の計算: 水流の集積と水流方向を仮定して流域界を抽出する。Fig. 3 は韓国の琴湖川を対象に流域界を決定した結果である。

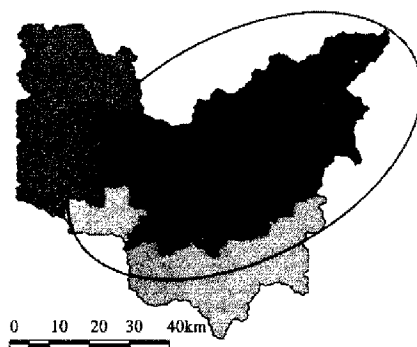


Fig. 3 Extraction of the Geumho River Basin boundary

(2) 流域メッシュの最適化手法

- i) 流域を四角形で囲む。
- ii) メッシュを i(行)、j(列)で表現する。
- iii) メッシュ化された流域と比べてメッシュがへこんでいる部分はネガティブ、はみ出ている部分はポジティブとしてネガティブとポジティブの平方の和が最小となることを流域のメッシュ位置として決定する。すなわち、方程式は以下に示す。

$$\sum [\text{NEGATIVE}(i)^2 + \text{POSITIVE}(i)^2] \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

ここに、NEGATIVE(i): メッシュがへこんでいる部分、POSITIVE(i): メッシュがはみ出ている部分

Fig. 4 は韓国の琴湖川を対象に流域メッシュ位置を最適化した結果である。



Fig. 4 Optimization of mesh layouts in the Geumho River Basin

3.2 GISによる入力データの作成

(1) 土地利用分類の設定

国土数値情報の土地利用面積ファイルは、12種類に区分された土地利用の1 km メッシュ内に含まれる面積率で構成されている。同じ流出特性、負荷発生を一つにするという観点のもとで以下のように5種類に再分類する。

分類1 (山地): 森林、荒地

分類2 (水田): 田

分類3 (畑地): 畑・果樹園・その他の樹木畑

分類4 (都市): 建物用地・幹線交通用地・その他の用地

分類5 (水域): 内水地・海浜・海水域

各メッシュの等価粗度をそのメッシュの土地利用クラスから決定してモデル化を行う。土地利用ごとの等価粗度の値は本モデルを用いて流出解析を行った過去の研究から得られた値を用いている。メッシュごとの土地利用の割合を計算する手順は以下のようになる。

i) 例えば、Arc/view を利用する場合、「面積のクロス集計」と「テーブルの演算」機能を使うことで求めることができる。

ii) [土地利用]の(グリッド)テーマと[流域]のテーマの間で「面積のクロス集計」を行う。

iii) 「解析」メニューの「面積のクロス集計」を選ぶ。「行のテーマ」には[流域]のテーマを「行のフィールド」には[流域]のテーマの中のフィールドを指定するが、流域毎にIDがあり、ID毎に集計するのであればその[ID]フィールドを指定する。「列のテーマ」には[土地利用]のテーマを、「列のフィールド」には[利用区分]のフィールドを指定する。実行すると、テーブルが1つ作られ、各ID(=レコード)毎に各土地利用項目の面積が求められている。

iv) このテーブルにフィールドを1つ追加し、演算機能で面積の合計をセットし(演算式は [Value-1] + [Value-2] ... になる)、同様に、フィールドを追加し

て 各面積値 / 面積合計 の比率を求めることができる。

(2) 他を入力データについて

その他にモデルの入力データ抽出するため、GIS を利用してメッシュごとの標高値、斜面勾配、人口分布、流入メッシュの方向、河川データなど誤差を最小化した流出場での空間的構成因子として算定することができる。

4. 流域シミュレーション

本研究では、流域内水量算定モデルに平面分布型としてメッシュ型モデルを、鉛直分布型として多層モデルを用いて、流域特性を3次元的に表現したメッシュ型多層流出モデルを適用する。鉛直構造はA~Dの4層を配置しており、A~C層の水平流出量は河川に流入し、D層は河川流量には影響を及ぼさない地下水層とする。また、都市からの排水は、分流式下水道を想定し、汚水を下水道普及率に応じて下水処理場に、下水処理場で処理されない汚水はそれぞれ浄化槽を経て、雨水と共に落水線に沿った下水道に流出させる。水田では河川からの灌漑用水の取水が、必要な維持湛水深を満たすように行われるという農業従事者の操作方策を組み込み、地下浸透、用水路流出、畦畔越流として流出する。さらに、大気-土壌間の水移動として蒸発散を考える。河川では、下水処理場からの放水や、工業用水、上水道用水のための取水が行われる。

このモデルの特徴としては、短期間の流出(洪水の時)ばかりでなく長期間の流出現象を時間的、空間的に把握でき、水量、水質に及ぼす特性を把握することにより統合的な流域の管理ができるように開発されている。さらに、入力段階からGISをベースに、流域の幾何学的な特性を抽出して信頼性のある流出の空間的構成因子を算定及び流出解析結果の視覚化により時空間的な分布を把握できる。

各解析過程において必要なデータを以下に示す。

i) 蒸発散過程: メッシュごとの標高、土地利用、緯度、風速、気温、気圧、水蒸気圧、日照時間

ii) 水量流出過程: メッシュごとの土地利用、勾配、降水データのティーンセン分割、流入メッシュ情報、河川位数、流域メッシュの河川の有無情報、蒸発散量、下水処理場放流地点及び量、取水地点及び量、家庭排水量、水田灌漑用水の取水地点、時間降雨

iii) 水質移流過程: 処理場からの放流水質、処理場への流入水質、市町村毎の浄化槽形態、人口、水量

水量流出過程では、(a)熱収支法による蒸発散過程、(b)水田流出過程、(c)取水・放水過程、(d)4層多層メッシュ型流出過程(表面流・土壌内浸透・河川流下過程)、とする。水質移流過程では、(e)面源、点源汚濁物質発生源の抽出、(f)地表面、河川、下水道、水田での堆積掃流過程の導入を試みる。

4.1 蒸発散過程

入力する観測量として、土地利用、標高、緯度、風速、気温、大気圧、水蒸気圧、日照時間を与え、各メッシュごとの気圧・空気密度は、測高公式を用いて算定する。算定方法として、熱収支法を用いる。熱収支法とは、地表面温度を仮定し、熱収支式の各ブラックスを求め、この収支式に代入し成り立つような地表面温度を推定していく。

熱収支法の基礎式を以下に示す。

$$\text{Heat balance ; } IR = \sigma T^4 + HS + IE \quad (2)$$

$$\text{Input radiation ; } IR = (1 - \text{ref})SR + LR \quad (3)$$

$$\text{Bulk formula ; } HS = C_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (4)$$

$$\text{Laterant heat ; } IE = l \rho C_E U (q_s - q_h) \quad (5)$$

ここに、 IR : 正味放射量 (Wm^{-2})、 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 TS : 地表面温度 (K)、 HS : 顕熱輸送量 (Wm^{-2})、 IE : 潜熱輸送量 (Wm^{-2})、 ref : アルベド、 SR : 全天日射量 (Wm^{-2})、 LR : 長波放射量 (Wm^{-2})、 C_p : 空気定圧比熱、 ρ : 空気密度、 U : 風速 (m/s)、 T : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 q_s : 飽和比湿、 q_h : 比湿、 l : 気化潜熱 (J/kg)、 C_H : 顕熱のバルク係数、 C_E : 潜熱のバルク係数

4.2 流出過程

流出モデルの特徴を以下のように設定する。

- i) 流出特性を3次元的に表現しうるメッシュ型多層流出モデルを導入する。
- ii) 鉛直方向には4段の層(A,B,C,D層)を配置する。
- iii) 地表面においてはKinematic Wave Modelを適用する。
- iv) A層には復帰流を考慮したKinematic Wave Modelを適用する。
- v) B-D層には、線形貯留モデルを適用する。
- vi) 蒸発散量は、A層の水量から差し引く。また、A層の水量がゼロの時はB層より差し引く。
- vii) 10分単位で流出量を算定する。
- viii) 水田は季節変化に伴い土壌の表面が変化するため灌漑期を設定する。この期間には用水路を設置し、地面流を流入させる。用水路はメッシュの中央に1本配置し、Kinematic Wave Modelで追跡する。

流出モデルの基礎式を以下に示す。

・Kinematic wave モデル

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x, t) \quad (6)$$

$$q = \alpha h^m \quad (7)$$

ここに、 x : 上流端からの距離、 h : 水深、 q : 単位幅当たりの流量、 r : 単位幅当たりの横流入量、 t : 時間、 α, m : 流れの抵抗則に関する定数

・線形貯留モデル

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (8)$$

$$O = kS \quad (9)$$

ここに、 S : 貯留量高、 I : 流入強度、 k : 浸透係数
流出過程でのモデルの概略図を(Fig. 5)に示す。

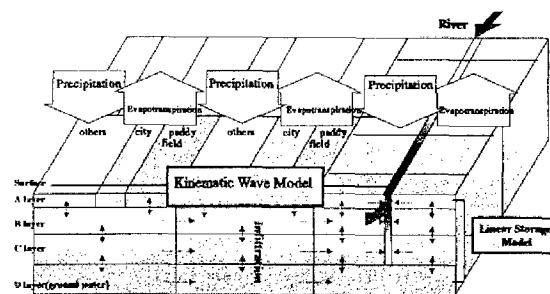


Fig. 5 Structure of run-off model

4.3 水質過程

汚濁負荷物質は、各土地利用によって流出挙動が異なる。そこで面源の場合は、各メッシュ毎に各土地利用毎の原単位に面積を乗じて、そのメッシュでの発生負荷量とする。また、生活系から発生する汚濁負荷は、そのメッシュでの人口に、排出源単位を乗じて排出量を求める(東海、2000)。Fig. 6は汚濁負荷流出モデルを示す。汚濁負荷流出モデルとは、水量流出過程で得られた時系列的な水の分布、移動情報を用いて、汚濁負荷物質の挙動をその溶存態と堆積態を考慮した上で追跡するものである(国松、1990)。

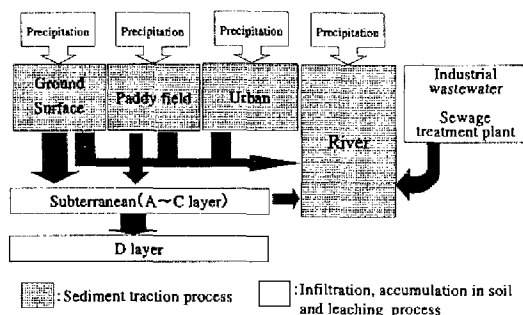


Fig. 6 Advection process of water quality

本研究では、汚濁物質として T-N（総窒素；total nitrogen）、T-P（総リン；total phosphorus）、COD（化学的酸素要求量；chemical oxygen demand）、BOD（生物化学的酸素要求量；biochemical oxygen demand）の 4 種類を対象とする。

次に、各流出要素での汚濁物質の挙動を表す連続式を示す。

(1) 堆積・揚流過程（地表面・都市・水田・下水道・用水路・河川）

溶存態：

$$A \frac{dC_i S_i}{dt} = C_{np} R_{ain} A - k_1 C_i S_i A + k_2 P_{np} A + L_{i(in)} - L_{i(out)} \quad (10)$$

面源由来堆積態：

$$A \frac{dP_{np}}{dt} = L_{np} - k_{dnp} P_{np} A + k_1 C_i S_i A - k_2 P_{np} A - k_{wnp} P_{np} Q_n A \quad (11)$$

(2) 浸透・土壌内蓄積・溶脱過程（A～D 層）

溶存態：

$$A \frac{d(C_i S_i)}{dt} = L_{i(m)} - L_{i(out)} - k_i (C_i S_i - r \frac{P_i + P_{i0}}{P_{i0}} P_i S_{iMAX}) A \quad (12)$$

堆積態：

$$A \frac{d(P_i S_{iMAX})}{dt} = k_i (C_i S_i - r \frac{P_i + P_{i0}}{P_{i0}} P_i S_{iMAX}) A - k_{di} P_i S_{iMAX} A \quad (13)$$

ここに、 S_i ：i 層の貯水位（m）、 C_{np} ：雨滴中の汚濁負荷物質濃度（mg/m³）、 R_{ain} ：降水量（m）、 k_1 ：吸着速度係数（1/h）、 k_2 ：脱着・可溶化平衡係数（1/h）、 k_{dp} ：点源由来の汚濁負荷物質の減衰係数（1/h）、 k_{dnp} ：面源由来の汚濁負荷物質の減衰係数（1/h）、 k_i ：i 層における吸脱着速度係数（1/h）、 P_i ：汚濁負荷物質堆積負荷量（mg/m²）、 S_{iMAX} ：i 層の最大貯留量（m）、 k_{di} ：減衰係数（1/h）、 $r \frac{P_i + P_{i0}}{P_{i0}}$ ：i 層の吸着平衡定数（1/m）

5. 適用と考察

比較対象地域として流域のスケールの差があり、水文情報が比較的充実している日本の庄内川と韓国の琴湖川を選び、流域場の特性比較及び流域シミュレーションを行った。

5.1 対象流域の概要

(1) 庄内川の概要

庄内川（Fig. 7）は、その源を岐阜県恵那郡の夕立山（標高 727m）に発し、岐阜県東農地方の盆地を貫流し、濃尾平野を南下して伊勢湾に注ぐ一級河川であり、中部地方を代表する都市河川である。流域は愛知県、岐阜県の 2 県にまたがり中部圏の中核都市名古屋をは

じめ、近年都市化が著しい春日井市、尾張旭市や、陶都の瀬戸市、多治見市、土岐市などの諸都市を擁し、中部圏の経済、文化の基盤をなしている。本研究では庄内川の志段味より上流域を対象流域とする。

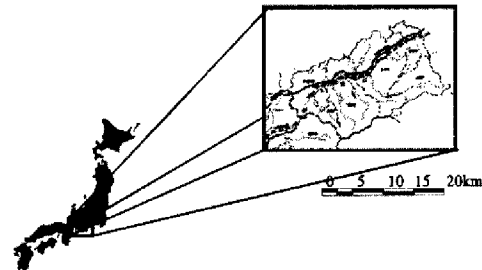


Fig. 7 Map of the Shonai River Basin

(2) 琴湖川の概要

琴湖川（Fig. 8）は、韓国第 2 の川である落東川流域（流域面積 23,817 km²）の 11 支流の一つで慶尚北道捕港市竹長面佳土里（709m）から発して大邱広域市を過ぎて落東川下流から 167.4km 上流地点である大邱広域市達城郡多欺面竹谷里で落東川の本流に流れる河川である。流域面積は 2,088km² で落東川流域の 8.8% を占めてあり流路延長は 118.4km に至る。産業形態は中上流部の慶山市と永川市は農業中心地域であり中流沿岸には中小企業が、下流部の大邱広域市は人口が 250 万人で韓国の第 3 番目の大都市である。琴湖川は大邱広域市の中心と外郭を回って流れている主要河川で生活用水と工業用水、及び農業用水原として市民に休息空間の機能を果たしてきた。しかし、都市の人口集中及び都市化による各種生活下水と工場廃水の放流などから水質悪化だけではなく各種用水原としての機能を喪失している現状である。大邱広域市は自然河川本来の機能に取り戻すと共に貯水路整備、体育施設及び河川公園の造成などのため琴湖川総合開発事業を 87 年から 14 年計画で推進している（韓国建設交通部、1998）。

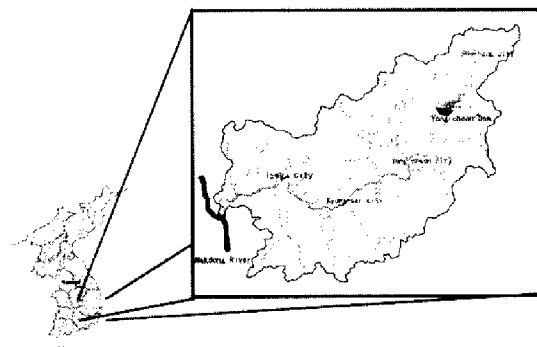


Fig. 8 Map of the Geumho River Basin

5.2 各流域の流域特性

地形に影響を与える気候をみても、日本は北海道を除き温暖多雨地域であるが、韓国は日本より降水量が少なく、月別降水量をみると夏季に集中している。また、冬季は南部海岸地方を除き著しく低温である（大矢、1993）。こうした条件下での過去 10-30 年間にわたる両流域での基本的な流域特性を Table 1 に示す。各流域の流域の特性を大きく流域形状特性、地形特性、気象特性に分ける。

Table 1 Comparison of river basin characteristics

Factors	Shonai River	Geumho River
Area (km ²)	532	2,106
Topography	Forest (75.2%)	Forest (63.3%)
Mean annual precipitation (mm)	1,900	1,021
Length of main stream (km)	118	79
Elevation (m)	20~807	21~1,192
Population	248,266	2,650,000

(1) 流域形状特性

流域の輪郭が流出量にかなり影響することは、すでに Sherman, L. K. (1932) が指摘している。Horton(1932) は、流域形状係数(basin shape factor) S_f を提案し、流域特性を定量化した。すなわち、流域面積を A 、流域最辺長(basin length)を L_0 とすると、 A/L_0 は流域平均幅 B であり、 S_f は

$$S_f = \frac{L_0}{B} = \frac{L_0^2}{A} \quad (14)$$

であらわされる。また、 S_f の逆数を形状比(form ratio)と呼び、以下の式で表した。

$$F = \frac{B}{L_0} = \frac{A}{L_0^2} \quad (15)$$

この式を基つくと両流域の形状係数は庄内川流域が 11.73、琴湖川流域が 6.67 になる。また、形状比は庄内川流域が 0.085、琴湖川流域が 0.149 になる。

(2) 地形特性

庄内川流域の平面的な形状は、東西方向に細長く伸びている。これにより、上流部と下流部との降雨特性の違いが明瞭に表れることになる。木曽川との境をなす北側に比較して、矢作川との境をなす南側の分水界の標高が高く、この傾向は上流部岐阜県側で顕著であり、南側左支川の流路延長が大きいことと合わせて、庄内川の流域地形の特徴として位置づけられる。

琴湖川流域は落東川流域の中東部に位置し、その形

態が東西にかけた長方形の流域で、支流の流路傾斜は比較的緩慢となり平野地帯を形成している。

Fig. 9 は各流域における標高—距離間の関係を表す縦断面図である。流域面積の差を考えると両流域の標高—距離間の曲線は似ている傾向を見せている。

両流域の河川縦断面形は急勾配である他に、滑らかな曲線ではなく短区間の屈曲を示す例が多い。

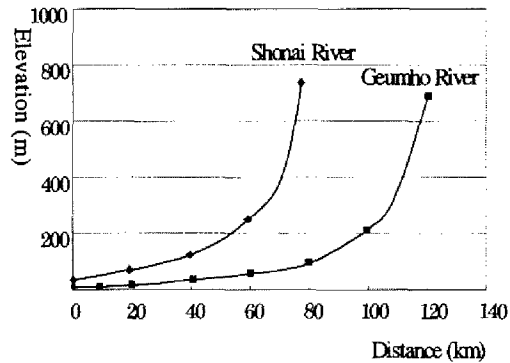


Fig. 9 Comparison of profiles

本研究では GIS 上で全流域にメッシュをかけ直し、そのメッシュに相当する平均高度と平均傾斜を読み取り、両流域に対して地形の分析を行った。Fig. 10 に絶対値が異なる両流域の面積と標高間の関係を比曲線として分析した。縦軸に流域全体の高度差 H に対する任意の高度 h の比 h/H をとり、横軸に全面積に対する任意の高度 h 以上の面積の比をとって、両者の関係をあらわしたものである。

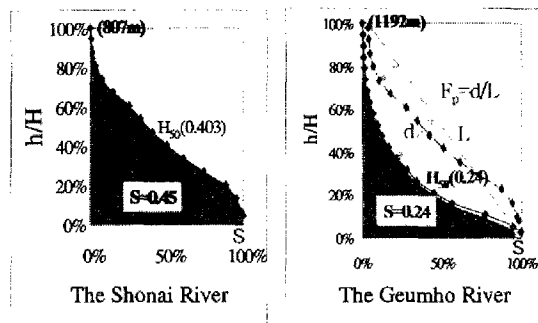


Fig. 10 Comparison of topographic elements

流域全体の高度分布を代表値であらわす場合には、流域中位高度や流域平均高度を用いる（高山、1974）。流域中位高度 H_{50} は、面積—高度曲線上で面積比が 50% に相当する海拔高度である。流域平均高度 H_m は、山体の体積 V を流域面積 A で除した値である。すなわち、

$$H_m = \frac{V}{A} = \frac{1}{A} \sum_{n=0}^H a \cdot \Delta h = \frac{1}{A} \int_0^H a dh \quad (16)$$

ここに、 V : 体積、 Δh : 等高線間隔、 A : 全面積、 a : 高度 h 以上の面積

その結果、面積比 50 パーセントによる標高比は、庄内川が、0.403、それに相当する高度は 325m、琴湖川が 0.24、それに相当する高度は 286m で、この数値から見ると琴湖川の場合には最大標高と最低標高との差が激しいのがわかる。流域平均高度は、庄内川が 363m、琴湖川が 286m になる。

また、体積 V を流域全体の体積 $A \cdot H$ で基準化すると、面積比 S が計算される。すなわち、

$$S = \frac{V}{A \cdot H} = \sum_0^1 \left(\frac{a}{A} \right) \Delta \left(\frac{h}{H} \right) \quad (17)$$

上式は、面積－高度比曲線を座標軸に囲まれた部分の面積の座標軸に囲まれた正方形の面積に対する比をあらわすものに等しい。

流域の平均傾斜は庄内川が 3.92、琴湖川が 3.33、河川の平均傾斜は庄内川が 9.38、庄内川が 5.83 で流域の平均傾斜と河川の平均傾斜とも琴湖川流域より庄内川流域の方が大きかった。以上に地形の特性を全体的にまとめると、庄内川は流域全体にわたって傾斜が均一で、琴湖川の方が庄内川に比べて面積分布による標高標高の差が激しいのがわかる。

(3) 気象特性

庄内川流域の年平均降水量は約 1,900mm であり、琴湖川(1,021mm)に比べて約倍になる。両流域とも年間降水量の半分以上が梅雨期である 6 月～9 月に集中する。

Fig. 11 は両流域における月平均降水量を示している。

年平均気温は庄内川流域が 14.5℃、琴湖川流域が 13.2℃でほぼ差がない。図は庄内川では 1995 年、琴湖川では 1999 年のデータを示したものであるが、後者は年降水量が過去 30 年の平均値とほぼ同じであった。

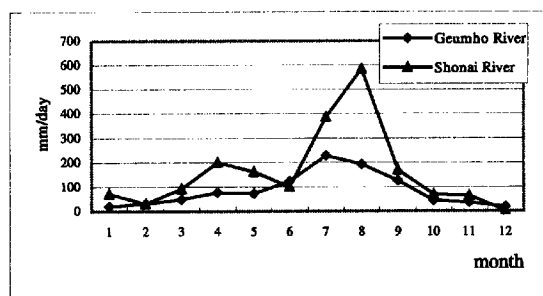


Fig. 11 Comparison of monthly rainfall

5.3 流域シミュレーションの結果

メッシュサイズは、対象流域の規模と解析目的に合った決定が要求される。入力データの量及びコンピュ

ータの計算時間とメモリの容量を考慮して適当なサイズを決めた。この結果、庄内川の場合には 1km×1km、琴湖川の場合には 1.8km×1.8km とした。流域をメッシュ化し、メッシュ内に一本の河川が現れるようにすると、庄内川の場合は 1/25,000 の地形図で位数 3 以上が、琴湖川の場合は位数 4 以上が残ることになる。すなわち、庄内川の場合は流域面積 532km² に対して位数が 3 以上を、琴湖川の場合は流域面積 2,088km² に対して位数が 4 以上の疑河道網を設定し、標高データを各メッシュに対応させた。また、斜面と河道を分離したモデルを作成することにより、河道特性をより良く表現することを試みた。庄内川の場合は 532 メッシュのうち 110 メッシュ、琴湖川の場合は 603 メッシュのうち 168 メッシュとなった。

Table 2 に各流域における流域シミュレーションのための基本情報を示す。

Table 2 Comparison of river basin modeling factors

Factors	Shonai River	Geumho River
Resolution of DEM (m)	50	30
Mesh size(km×km)	1×1	1.8×1.8
Number of mesh :Basin (River)	532 (110)	603 (168)
Observation station	8	5

(1) GIS によるモデル化結果

i) 落水線の作成

水域のあるメッシュの標高データを用いて、流域に降る雨滴を隣接するメッシュ間 4 方向最急勾配方向に追跡して落水線を作成する。対象とする河川に流入する方向の落水線だけを選び出してそれ以外の落水線を有するメッシュは流域外として除外する。こうして流域が決定される。**Fig. 12** は庄内川流域に対する落水線図を表している。結果的に庄内川流域の位数 3 次以上の河川メッシュ数は 120 となる。

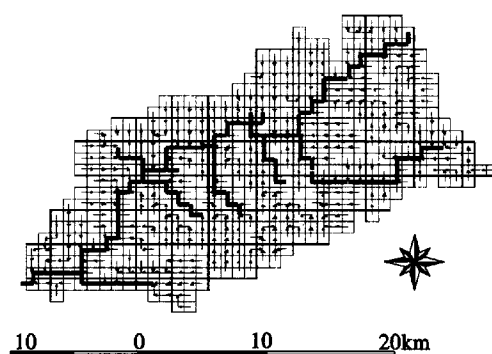


Fig. 12 Flow routing map in the Shonai River Basin

ii) 土地利用分布の設定

土地利用データの入手に関しては日本と韓国の国家数値情報の差があった。庄内川流域の場合は 1/10 細密区画土地利用データ (KS-202-1) があり、100m 四方のメッシュにその最大土地利用状況を与えてメッシュ毎にデータベース化した。5 分類された土地利用の流域分布を Fig. 13 に示す。山地は庄内川から離れるほど多くなっており、また、上流域にも多く分布している。水田と畑地は共に上流域に集中しており、似たような分布をしている。都市は、春日井市のある下流域と、多治見市などの中流域で分布しており、庄内川に沿って都市化が進んでいることが分かる。

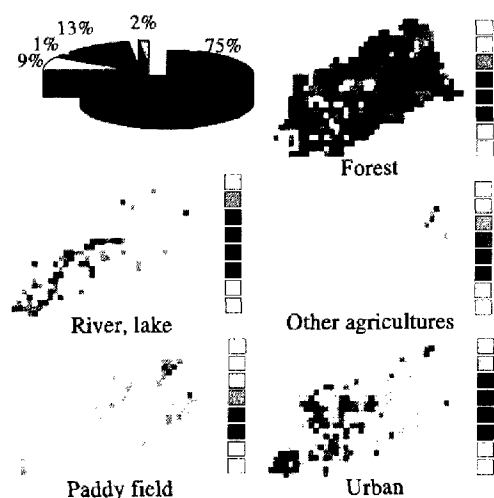


Fig. 13 Land use distributions of the Shonai River

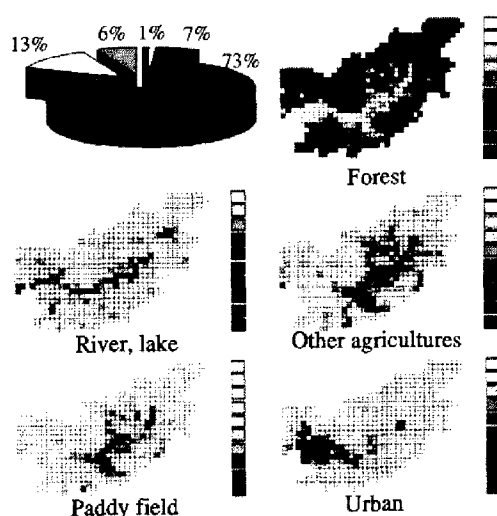


Fig. 14 Land use distributions of the Geumho River

Fig. 14 は琴湖川流域の土地利用分布を表している。山地は琴湖川の上流域に多くなっており、その割合は全体土地利用の割合の中で 73% を占める。都市は、大邱市のある中下流域で川に沿った形で分布しており、水域については庄内川流域と同じように全体面積の 1% を占めている。

Fig. 15 は琴湖川流域を対象に RS(Remote Sensing) データを用いてメッシュごとに 5 分類した土地利用を表している。

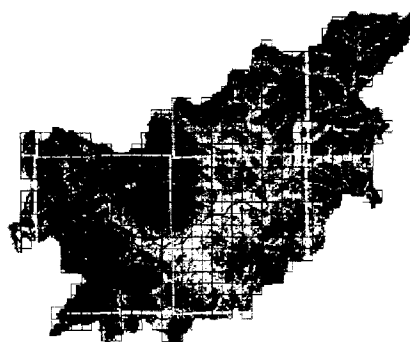


Fig. 15 Distribution of land use using RS data in the Geumho River Basin

iii) 観測地データのデータベース化

気象観測所、雨量観測所、水位観測所の位置データとその属性を GIS 上でデータベース化し、各種入力データを統合することによりデータの修正、解析などを容易にしてモデルの一貫性を求めた。Table 3 は琴湖川流域の水位観測所に当たるメッシュ情報を表している。Fig. 16 は琴湖川流域の気象観測所、雨量観測所、水位観測所の位置データに属性を加えて表している。

Table 3 Information on stage stations in the Geumho River Basin

Number of Station	Name of Station	Number of Mesh	Elevation (m)	Slope (degree)	Land Use (%)				
					F	P	U	O	R
Station 1	Danpogyo	68	124	0.116	46	34	3	16	1
Station 2	Geumho	126	99	0.526	21	27	29	14	9
Station 3	Dongchon	446	40	0.933	57	4	36	2	1
Station 4	Sungseo	603	27	0.016	52	13	10	7	18

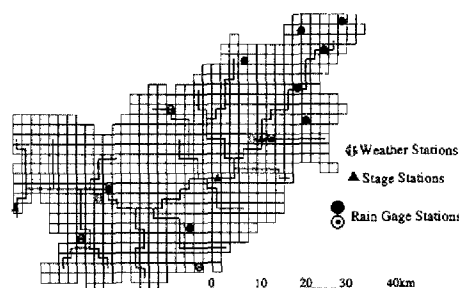


Fig. 16 Location of hydrological stations in the Geumho River Basin

iv) その他の入力データ

流域シミュレーションに用いるすべての入力データを GIS 上でデータベース化して抽出した。デジタル標高データからメッシュごとの標高値、緯度、斜面勾配などを、メッシュごとの人口、雨量観測所及び気象観測所などを GIS 上でティーセン分割した。

(2) 蒸発散過程の適用結果

蒸発散過程では、タイムステップを1日とし、モデルの構造上、水田とその他の部分に分けて算定した。

Fig. 17 と Fig. 18 は、両流域を対象に算定したメッシュごとの蒸発散量の時系列変化を示す。蒸発散量は気温、風速などの気象観測データから潜熱フラックスを求める熱収支法を用いて算定される。その結果、年蒸発散量は最下流地点で庄内川流域が 626.5mm、琴湖川流域が 740.5mm を示した。蒸発散量は両流域共に4月～8月間に多く、12月～1月には少ない方であった。

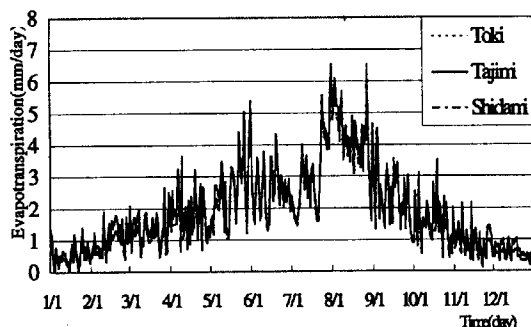


Fig. 17 Evapotranspiration sequences in the Shonai River Basin (1995)

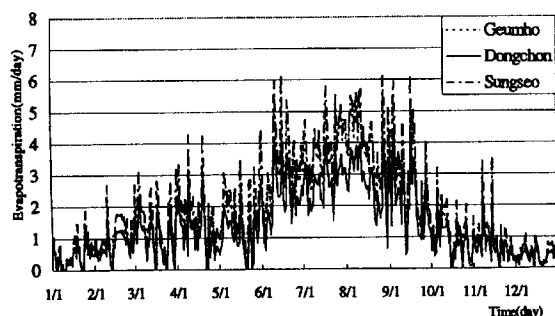


Fig. 18 Evapotranspiration sequences in the Geumho River Basin (1999)

(3) 流出過程の適用結果

Fig. 19 と Fig. 20 は両流域に対して流出シミュレーションから得られた河川流出量のハイドログラフを最

下流地点で表したものである。河川総流出量は庄内川流域が $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ 、琴湖川流域が $14.71 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ を示して、総流出量は琴湖川の方が流域面積に比例して、庄内川の約3倍大きさがある。

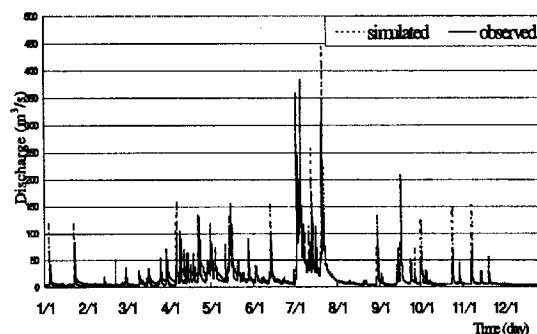


Fig. 19 Discharge sequences at Shidami, the Shonai River (1995)

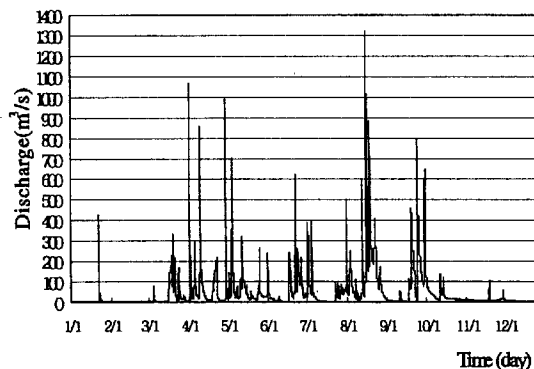


Fig. 20 Discharge sequence at Sungseo, the Geumho River (1999)

Fig. 21 と Fig. 22 は流出モデルの結果の中で、地表面下のA層の流出量を計算した結果を両流域を対象にハイドログラフとして表したものである。

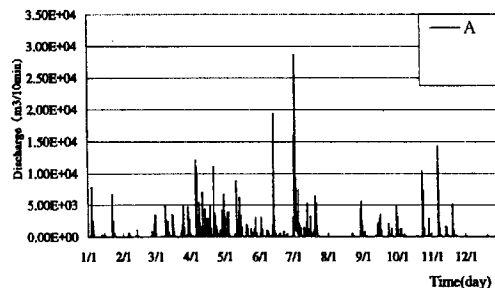


Fig. 21 Discharge sequences of A layer at Shidami, the Shonai River (1995)

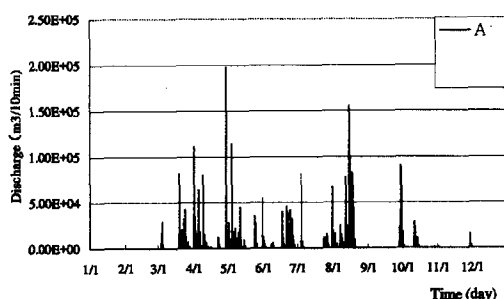


Fig. 22 Discharge sequence of A layer at Sungseo, the Geumho River (1999)

庄内川流域における解析結果と観測データのハイドログラフを比較した結果、全体的な形状は非常に良く合致しており、基底流量もほとんど差違なく、満足できる結果となった。解析結果と観測データとの相関をグラフとして示す(Fig. 23)と相関係数は 0.848 で極めて高い。

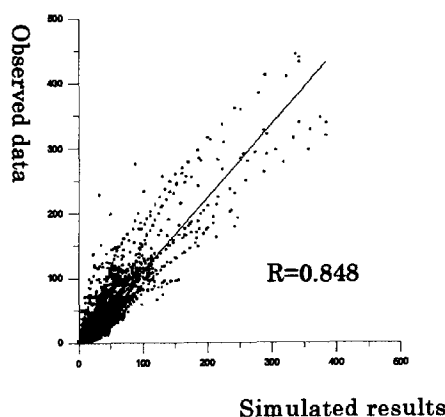


Fig. 23 Correlation between simulated results and observed data at Shidami, the Shonai River (1995)

(4) 水質過程の適用結果

本研究で用いた点源負荷については、各市町村の下水道普及率と浄化槽の種類と人口データに基づいて算定した。汚濁物質移流過程で算定した 4 物質 (T-N, T-P, COD, BOD) の中で両流域における BOD の河川水濃度の変化を Fig. 24 と Fig. 25 に示す。変化の様子は敏感に変化し、鋭いピークを形成する。

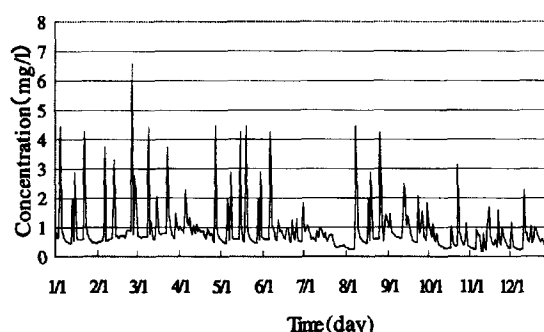


Fig. 24 BOD concentration sequence at Shidami, the Shonai River (1995)

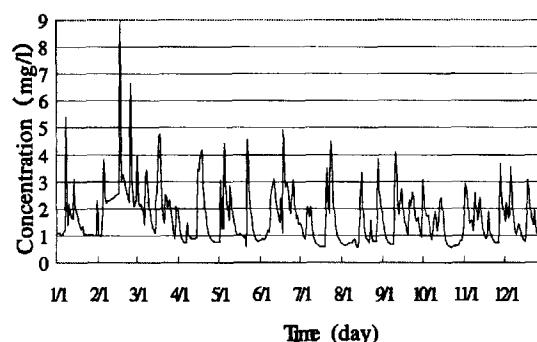


Fig. 25 BOD concentration sequence at Sungseo, the Geumho River (1999)

5.4 総合化から類似性の検討

隣接してはいるが日本と韓国の河川の自然条件には著しい相違がみられる。地形・地質的に庄内川は環太平洋造山帯に属するのに対し、琴湖川は安定陸塊に属している。流域の平面的な形状は、庄内川は東西方向に細長く伸びており上流部と下流部との降雨特性の違いが明瞭に表れることになる。一方、琴湖川は流路延長が非常に長く、最大洪水量/最低濁水量の比である河床係数が大きい。

標高一面積曲線による地形因子の比較結果、流域代表標高と測高面積比は琴湖川流域より庄内川流域の方が大きかった。縦断因子は琴湖川の方が一般的な川に比べて特異な傾向を見せていた。

Fig. 26 は観測地点のメッシュで両流域の河川総流出量を棒グラフとして示したものである。河川総流出量は琴湖川の方が流域面積に比例して、庄内川の約 3 倍大きさがあつた。このように両流域のスケールの差があるので年平均流量 (m^3/sec) を流域面積 (100km^2) で基準化した年平均比流量 ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{km}^2$) から比較してみると、庄内川は 1.088、琴湖川は 0.705 を示した。

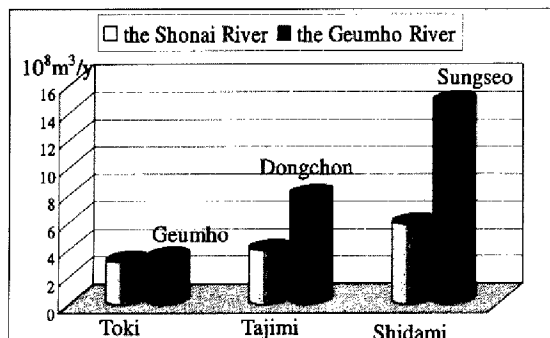


Fig. 26 Comparison of river discharges at stage stations

Fig. 27 は両流域において総流出量と総損失量の割合をパイグラフとして表したものである。その結果、両流域間の総流出量の割合はほぼ同じような結果が得られた。しかし、総流出量が同じであるため総流出量に影響を与える因子の特性が同じとは言えないだろう。各因子の特性と流出量との関係を知ることは今後の課題として残される。

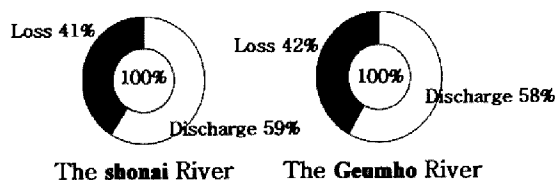


Fig. 27 Comparison of total discharges and total runoff loss

6. 結 論

本研究の結論は次の通りである。

- (1) 流域シミュレーションに GIS を利用することによって流域モデルの最適化及び各種水文データの精度を上げることが出来た。
- (2) GIS を利用した流域特性の抽出と分布型水循環モデルを利用した流域シミュレーションから基礎的な比較水文学への手法を提案出来た。
- (3) 日本と韓国の流域の特性が違う実際の流域を対象にシミュレーションし、同一の手法による流域比較が可能になった。
- (4) 今後、両流域以外の他の流域を対象にモデルの汎用性を検討する一方、多様な比較手法を開発する課題が残されている。

今後は、以上の知見をもとに、最後に各比較項目の特性値をファジィ理論などに適用、集約して総合的な類似性を求めるに取り組みたい。また、本研究では比較対象流域として庄内川と琴湖川流域のみを研究対象

としたが、今後複数の流域を対象に同一手法による流域比較を適用したい。

謝 辞

本研究において、琴湖川流域の各種水文データを韓国嶺南大学工学部の李舜鐸教授、韓国建設技術研究院の李參熙博士、数値標高データ (DEM) 及びリモートセンシング (RS) の土地利用データを韓国環境部環境資料室より提供して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 大矢雅彦 (1993): 河川地理学、古今書院、pp. 154-155.
- 韓国建設交通部 (1998): 琴湖川河川整備基本計画、pp. 31-32.
- 国松孝男・村岡浩爾 (1990): 河川汚濁のモデル解析、技報堂出版、pp. 166-171.
- 榎根 勇 (1987): 流域における流出特性の比較研究、比較河川学の研究、文部省科学研究費特定研究 (1) 研究成果報告書、pp. 25-30.
- 高山茂美 (1974): 河川地形、共立出版、pp. 4-21.
- 立川康人 (1999): 分布型流出モデルの実用化への課題、土木学会水理委員会・河川懇談会共同研究平成 10 年度研究成果報告書、pp. 27-33.
- 東海明宏・福島武彦・小尻利治 (2000): 地域水系における化学物質のリスク評価、京都大学防災研究所年報、第 43 号 B-2、pp. 109-116.
- 中村和郎 (1998): 地理情報システムを学ぶ、古今書院、pp. 71-86.
- Bathurst, J. Cl (1986): Physically-based distributed modeling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique European, J. of Hydrol., Vol. 87, pp. 79-102.
- Horton, R. E. (1932): Drainage basin characteristics. Trans. A. G. U., Vol. 13, pp. 350-361.
- Jin-Hyeog Park, Toshiharu Kojiri, Shuichi Ikebuchi, and Satoshi Oishi (2000): GIS based hydrological comparison and run-off simulation of river basin, Fresh Perspectives on Hydrology and Water Resources, pp. 143-156.
- Sherman, L. K. (1932): The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage basins. Trans. A. G. U., Vol. 13, pp. 332-339.

Proposal of Comparative Hydrology Using River Basin Simulation

JinHyeog PARK*, Toshiharu KOJIRI and kunio TOMOSUGI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper proposes a comparative hydrology including water circulation system with river basin simulation based on GIS. Comparative hydrology is an analyzing method of regional run-off phenomena with common criteria for the river basin characteristics, uniqueness and commonness. Building the accurate water circulation model in each river basin is very important to build the comparative procedure because the river basin characteristics have great influence on the runoff process. These approaches are applied to two river basins in Japan and Korea.

Keywords: comparative hydrology; river basin simulation; GIS; river basin characteristics