

27. GISベースでの流域シミュレーションと 環境評価モデルの開発

BASIN SIMULATION AND ENVIRONMENT ASSESSMENT WITH GIS

小尻利治* 黒田良人** 東海明宏***
Toshiharu KOJIRI, Yoshihito KURODA, Akihiro TOKAI

Abstract; Water resources planning consists of two parts; namely i) basic framework for site, scale and management and ii) final decision through basin simulation by matching with other political plans. In this paper, we are focusing on the basin simulation to grasp the run-off characteristics of both of water quality and quantity in time and space. The multi-layer mesh typed run-off model is introduced by considering the land use situation and requested analysis scale. Water balance can be checked at arbitrary point in the basin or in the channel. The pollutant after rainfall comes out through the road and the drainage system, and then flows down along the channel depending on the run-off discharge and pollutant level.

KEYWORDS; basin simulation, Environment assessment, GIS

1. はじめに

近年、我が国では、急激な人口増加にともない山林、農地などにおいて都市化が進行している。また、市民生活も大きく変化し、水環境に与える影響は非常に深刻な問題とされている。一方、河川流域を解析するにあたり、地理情報システム (Geographic Information System ; GIS) が全国的に整備されてきた。そこで、本研究は、入手しうる河川・水文情報を利用したGISベースでの水量、水質のシミュレーション、さらには、水量、水質が生態系に与える影響を評価するものである。特に、蒸発散・積雪融雪・流出・水質過程を把握しうる流域モデルの作成を行う。しかし、流域全体におけるシミュレーションを行うためメッシュサイズの拡大化は免れない。都市内河川、下水道などの配置、解析を行うにあたり、流域におけるメッシュサイズでは都市内を十分に把握できなくなる。そこで、流域、都市においてメッシュサイズの切り替えを含む複合モデルを作成を図るものである。

2. 土地利用分類

使用する国土数値情報の標高データは250mメッシュである。これを、使用するメッシュサイズに変換し、流域に降る雨滴をメッシュ間4方向で最急勾配方向に追跡する。従来のメッシュ型多層流出モデルでは河道は斜面の一部としてとり扱われており、落水の追跡方向、河床勾配などは斜面に依存していた。ここでは、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る。

国土数値情報の土地利用面積ファイル (KS-200-1) は、12種類に区分された土地利用の1kmメッシュ内に含まれる面積率で構成されている。似通った流出特性、汚濁負荷発生特性を1つにするという観念のもと、12種類の土地利用分類を以下の5種類に再分類する。

分類1: 森林・荒地・不明	分類2: 田	分類3: 畑・果樹園・その他の果樹園
分類4: 建物用地・幹線交通網・その他の用地	分類5: 内水地・海浜	

下水道に関しては、流域モデルではメッシュの中央に1本、都市モデルでは、実際の下水道の配置を参考にした設置を行う。用水路に関しては、流域、都市モデルともに、メッシュの中央に1本設置する。

3. 流域のモデル化

3.1 蒸発散モデルの定式化

熱収支法を用いてメッシュごとに蒸発散量の算定を行うが、以下の適用条件・仮定を与える。

*; 京都大学防災研究所 D.P.R.I, Kyoto University,

**; 日本工営 Nihon koei Co., Ltd.,

***; 横浜国立大学 Yokohama National University

- i) メッシュ毎に日単位で蒸発散量を算定する。
- ii) 気温は観測地点と各メッシュの標高差と気温減率を用いて算定する。
- iii) 気圧・空気密度は、測高公式を用いて算定する。
- iv) 風速は、ティーセン法を用いて観測所のデータを割り当てる。

熱収支法の基礎式を以下に示す¹⁾。

$$\text{熱収支式；} \quad R \downarrow = \sigma T_s^4 + H + \epsilon E + G \quad (1) \quad \text{入力放射量；} \quad R \downarrow = (1 - \text{ref}) S \downarrow + L \downarrow \quad (2)$$

$$\text{バルク式；} \quad H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (3) \quad \text{潜熱；} \quad \epsilon E = \epsilon \rho C_E U (q_s - q) \quad (4)$$

$R \downarrow$: 入力放射、 σ : ステファーン-ボルツマン定数、 T_s : 地表面温度、 H : 顕熱フラックス、 ϵE : 潜熱フラックス、 ref : アルベド、 $S \downarrow$: 水平面日射量、 $L \downarrow$: 長波放射、 c_p : 空気の高圧比熱、 ρ : 空気の密度、 U : 風速、 T : 温度、 q_s : 飽和比湿、 q : 比湿、 ϵ : 気化潜熱、 C_H : 顕熱のバルク係数、 C_E : 潜熱のバルク係数、 G : 貯熱量

3.2 積雪・融雪モデルの定式化

熱収支法を用いて、降雪-積雪-融雪-浸透-保水-融雪水の地表面到達の一連の過程を考慮したモデルを作成する。算定にあつたての適用条件、仮定を以下に示す。

- i) 気温は観測地点とメッシュの標高差と気温減率を用いて算定する。
- ii) 気圧・空気密度は、測高公式を用いて算定する。
- iii) 風速、降雨は、ティーセン法を用いて観測所のデータを割り当てる。
- iv) 融雪量の算定にあたり、昇温・融雪・再凍結・冷却過程を考慮する。
- v) 積雪層は単層とする。

なお、雪の判別には、次式を用いる。

$$T_c = 11.01 - 1.5e \quad T > T_c : \text{雨}, \quad T < T_c : \text{雪} \quad T: \text{気温}, \quad e: \text{水蒸気圧} \quad (5)$$

続いて、融雪熱量の基礎式を以下に示す。

$$\text{熱収支式；} \quad Q_M = R \downarrow - \epsilon \sigma T_s^4 + H + \epsilon E + Q_G + Q_R \quad (5) \quad \text{入力放射量；} \quad R \downarrow = (1 - \text{ref}) S \downarrow + L \downarrow \quad (7)$$

$$\text{バルク式；} \quad H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (8) \quad \text{潜熱；} \quad \epsilon E = \epsilon \rho C_E U (q_s - q) \quad (9)$$

$$\text{雨熱量式；} \quad Q_R = CTR \quad (10) \quad \text{貯熱量式；} \quad Q_G = 0.696 I_f \quad (11)$$

Q_M : 融雪熱量、 $R \downarrow$: 入力放射、 σ : ステファーン-ボルツマン定数、 T_s : 雪面温度、 H : 顕熱フラックス、 Q_G : 貯熱量、 Q_R : 雨熱量、 ϵE : 潜熱フラックス、 ref : アルベド、 $S \downarrow$: 水平面日射量、 $L \downarrow$: 長波放射、 c_p : 空気の高圧比熱、 ρ : 空気の密度、 U : 風速、 T : 温度、 q_s : 飽和比湿、 q : 比湿、 ϵ : 潜熱、 C_H : 顕熱のバルク係数、 C_E : 潜熱のバルク係数、 C : 比熱、 R : 降雨強度、 ϵ_f : 氷の融解潜熱

融雪量の算定にあたり、融雪熱量 Q_M 、雪温 T_s により以下の4過程を考慮する。

- i) 昇温過程 $Q_M \geq 0, T_s < 0$ ii) 融雪過程 $Q_M \geq 0, T_s = 0$
- iii) 再凍結過程 $Q_M < 0, T_s = 0$ iv) 冷却過程 $Q_M < 0, T_s < 0$

3.3 流出モデルの構築

流出モデルを以下のように設定する。

- i) 流域特性を3次元的に表現するメッシュ型多層流出モデルを導入する²⁾。
- ii) 鉛直方向には4段の層を配置する。
- 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層の水量がゼロのときはB層より差し引く。
- vii) 時間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(151日～270日)を設定する。この期間には用水路を設置し、表面流を流入させる。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。
- iv) 都市域の斜面勾配は側溝などの勾配に近似し、Kinematic Wave Modelで解析する。下水道を流域モデルにおいてはメッシュの中央に一本ずつ、都市モデルにおいては実際の配管図に則して設置し、それぞれ都市表面流を流入させる。なお、下水道にはKinematic Wave Modelを適用する(図-1参照)。

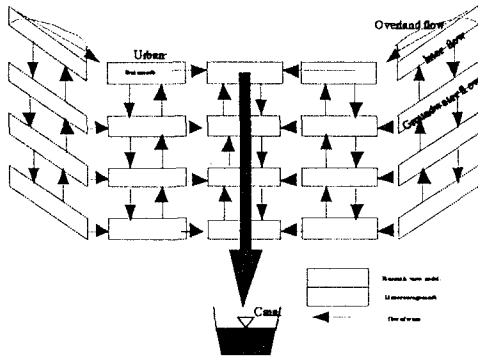


図-1 流出モデルの概念図

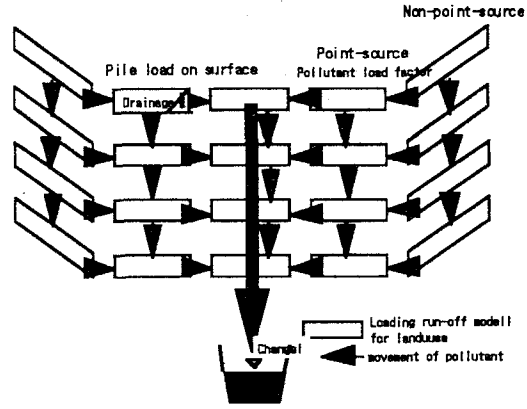


図-2 水質モデルの概念図

4. 水質モデルの構築

4.1 水質モデルの適用条件・仮定

水質解析には流出モデルと同様に直列4層を配置し、土地利用毎に適用モデルを対応させる。モデルにおける適用条件・仮定は以下のとおりである。

- i) 評価対象指標はCOD、BOD、T-N、T-Pの4種類とする。
- ii) 対象流域の各メッシュ毎に直列4層の土壌構造を仮定する。各メッシュ毎に土地利用別タンクモデルを適用し、汚濁負荷を時間単位で解析する。
- iii) 工場の煙突や、自動車からの排ガスなどは、大気中に拡散されるが、降雨によって一気にフラッシュアウトされ地上に降下し、降雨負荷となる。
- iv) 都市からの汚濁負荷を考慮する際に、晴天時においては、家庭、工場・事業場、第3次産業等の特定汚染源からの汚濁負荷を原単位法を用いて時間単位で算出する。降雨時においては、先の汚濁負荷と晴天時に堆積した汚濁負荷のどちらも考慮に入れ、そのすべてを下水道に流入させる。このとき都市表面はすべて、路面と仮定して解析を行う。下水道は分流水下水道の観念を採用し、汚濁負荷流出を追跡する。
- v) 農耕地からの汚濁負荷流出は、COD、T-N、T-Pを原単位より算出し、BODは考慮しない。水田においては湿田、乾田等の季節変化を与える。畑地においては、年間を通して一定の割合で汚濁負荷量を与える。
- vi) 水質解析に必要な水量に関しては、流出解析にて算定した値を用いる。汚濁負荷が河道を流下する際には河道の自浄作用を考慮する（図-2参照）。

4.2 土地利用別土壌内汚濁負荷流出モデル

対象流域の土壌における汚濁負荷の流出において、土地利用別負荷流出タンクモデルの概念をもとに、直列4層型のメッシュに適用する。

$$(\text{運動式}) \cdot \text{面源流出負荷量} : L_a = C_a Q_a A + k_w SC_a Q_a^2 A \quad (12)$$

$$L_i = C_i Q_i A \quad (13)$$

$$\cdot \text{浸透負荷量} : L_{ij} = C_i Q_{ij} A \quad (14)$$

L_i : i 層の排出負荷量、 A : 流域面積、 C_i : i 層の貯留水濃度、 k_w : 堆積物の掃流係数、 Q_i : i 層の流出高、 Q_{ij} : i 層から j 層への浸透高、 SC_i : i 層における汚染源からの堆積物

$$(\text{連続式}) \cdot \text{堆積掃流過程A層} : A \frac{d(C_a H_a)}{dt} = C_r R A - C_a Q_a A - k_{a1} C_a H_a A + k_{a2} SC_a Q_a^2 A \quad (15)$$

$$A \frac{dSC_a}{dt} = L_a - k_d SC_a A + k_{a1} C_a H_a A - k_{a2} SC_a A - k_w Q_a^2 A \quad (16)$$

$$\cdot \text{浸透・土壌内蓄積・溶脱過程B層～D層} : A \frac{d(CH_i)}{dt} = L_{mi} - L_i - L_{ij} - k_i \left\{ CH_i - r \frac{SC_i + SC_{io}}{SC_{io}} SC_i H_{imax} \right\} A \quad (17)$$

$$A \frac{(SC_i H_{imax})}{dt} = k_i \left\{ CH_i - r \frac{SC_i + SC_{io}}{SC_{io}} SC_i H_{imax} \right\} A - k_{di} SC_i H_{imax} A \quad (18)$$

H_i : i 層の貯水位、 H_{imax} : i 層の最大貯水位、 C_r : 降雨濃度、 R : 降雨強度、 SC_{io} : i 層の吸着飽和係数、 r : 吸着平衡定数、 k_{a1} : a 層の吸着速度係数、 k_{a2} : a 層の脱着・可溶化速度係数、 k_{di} : i 層の減衰係数、 k_i : i 層の吸脱着速度係数

不特定汚染源の雨天時における流出において、路面堆積負荷流出モデルを適用する。

$$\text{・晴天時における推積負荷量：} \quad P(t) = P_0 e^{-kt} + \frac{\alpha(1 - \exp^{-kt})}{1 - \exp^{-kI}} \quad (19)$$

P : n 日後の推積負荷量、 P_0 : 残存路面負荷量、 k : 路面推積負荷減水係数

4.3 下水道における汚濁負荷流出モデル

分流式下水道を導入して解析を行う。モデルは堆積負荷量が流出に非線形で影響することを考慮して、下水道流出負荷量を路面堆積負荷量と降雨強度の関数として表したもので、基礎式は以下に表される。

$$\text{運動式；} \quad Q_p = K C_R P^{mR} R \quad (20) \quad \text{連続式；} \quad P = A P(n) - \int Q_p dt \quad (21)$$

Q_p : 路面流出負荷量、 C_R : 流出係数、 P : 路面推積負荷量、 R : 降雨強度、 $P P(n)$: n 日後の初期路面堆積負荷量、 mR : 運動式の係数、 K : 汚濁負荷流出係数

流域から水路や河川に排出された物質は、その流下過程で物理的・化学的及び生態的作用を受けて、量的かつ質的に変化する。河川の自浄作用として物質変換モデルを適用しており、その基礎式を以下に示す。

$$C = C_0 \cdot 10^{-\frac{(d_1 + d_2)t}{2}} \quad (22)$$

5. 生態系評価モデルの構成

5.1 モデルの適用条件

本研究は、水質が生態系の与える影響について魚を対象に評価を行う。また、評価指標はBODと水温（標高の関数として表す）の2種類を用いる。サンプルとして以下の5種を用いる。

・イワナ、アマゴ、アユ、シラハエ、フナ

魚は、BODや水温の違いなどにより、それぞれの生息エリアをもっている。この生息エリアの境界は明確でなく、それぞれ曖昧な広がりをもっている。そこで、この曖昧な空間をファジィ集合の概念を用いて、表現する。メンバーシップ関数は、中島らがまとめた河川評価指標との評価と相関¹¹⁾を参考にして、BOD、標高のそれぞれについて作成する（図-3参照）⁴⁾。図中の縦軸は、魚の住み易さを表すものとする。

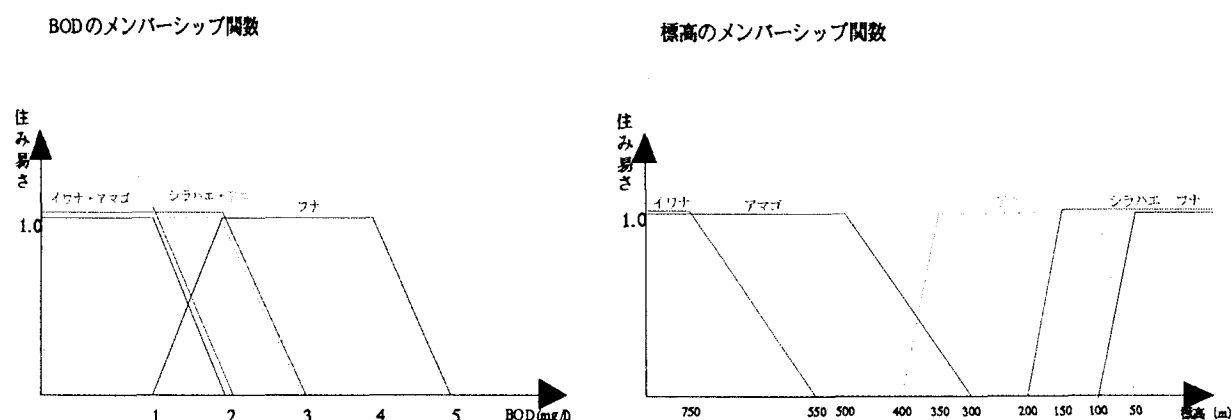


図-3 生態系評価のメンバーシップ関数

5.2 生息エリアの推定

上述のメンバーシップ関数より求められた、BOD、標高それぞれにおける住み易さを用いて、各サンプルの生息エリアを推定する。すなわち、

$$In_i = \min \{ B_i(x), H_i(x) \} \quad (23)$$

In_i : サンプル i における住み易さ、 $B_i(x)$: サンプル i におけるBODに関する住み易さ、 $H_i(x)$: サンプル i における標高に関する住み易さを用いる。

6. 実流域における適用と考察

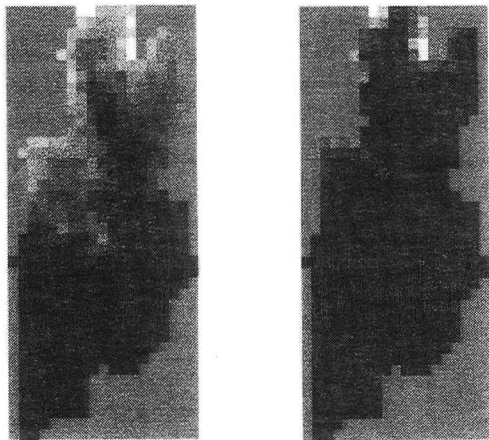
6.1 長良川流域での適用

木曽川水系長良川中・上流において、1994年の降水量、風速、気温、水蒸気圧等を用いてシミュレーションを行った。複合メッシュにおける流域モデルを長良川中・上流で、都市モデルを岐阜市長良川南部で適用した。それぞれのメッシュサイズは、流域モデルにおいては2km、都市モデルにおいては500mである。

熱収支法を用いて、メッシュごとに降雪ー積雪ー圧密ー融雪ー保水ー浸透の一連の過程を考慮したモデルを作成したことにより、観測値と非常に高い相関を得ることができた。また、GISの利用により、流域全体

における積雪分布を把握するだけでなく、積雪の日変化を的確に捉えることができた。図-4は2月1日と3月19日の積雪分布を示したものである。

平常時、降雨時など、1年を通したシミュレーション結果より、観測値とまずまずの相関を得ることができた（図-5参照）。その相関係数は0.61を示している。流域・都市における複合メッシュモデルの作成によ



2月1日 3月19日
図-4 積雪分布

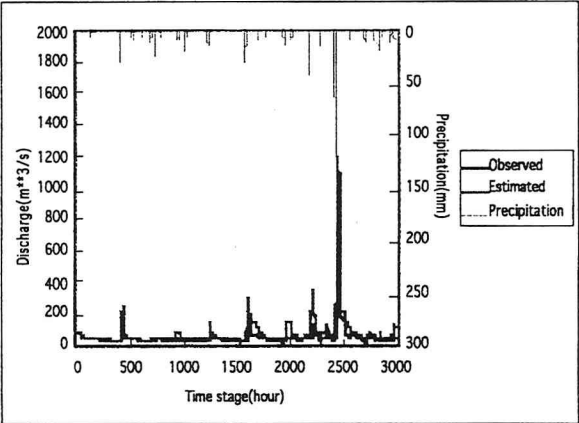


図-5 観測と計算によるハイドログラフの比較

り、流域全体の流況把握だけでなく、都市などのにおいても詳細な流況把握を行うことができた。GISの利用により、河川や下水、流域における水分移動を視覚的に捉えることができ有用性を示した。流域モデル、都市モデルにおける流出分布を図-6に示す。

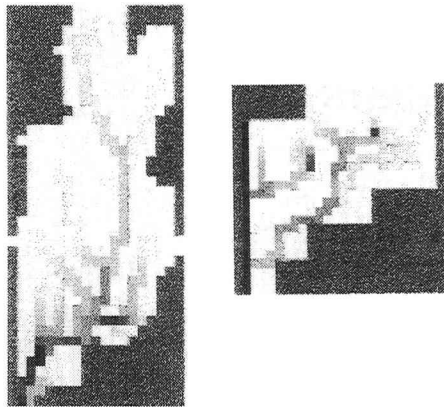


図-6 流域モデルと都市モデルの流量分布

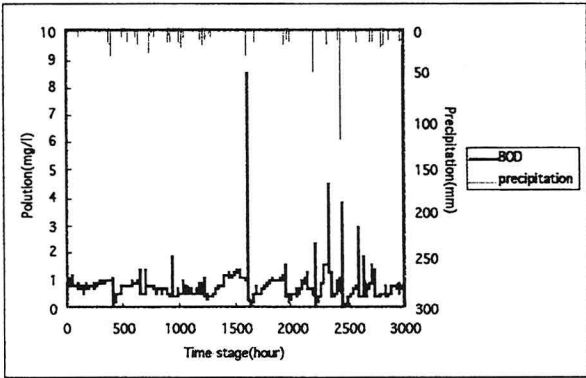
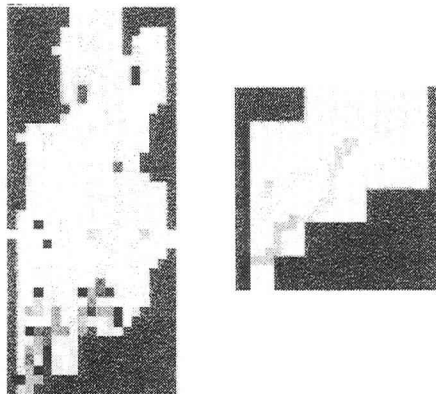
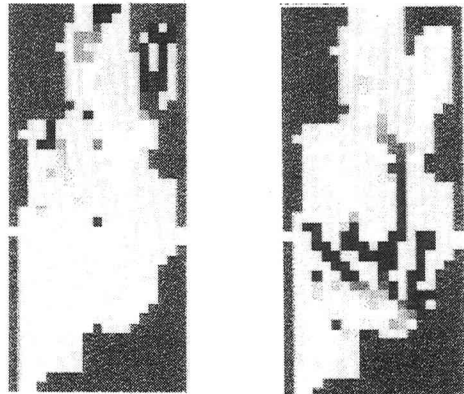


図-7 シミュレーションされた水質系列

BOD、COD、TN、TP の4種類においてシミュレーションを行った。平常時、降雨時において、流域モデル、都市モデル、共に妥当な結果を得られた。しかし、観測データの不備や、汚濁負荷流出原単位などの入力データ不足のため、解析精度を検討することはできなかった。図-8に流域、都市での空間的水質分布を示す。また、魚の生息エリアの大略をつかむことができ、そのイワナ、アユの生息分布を図-9に示す。



流域 都市
図-8 水質分布



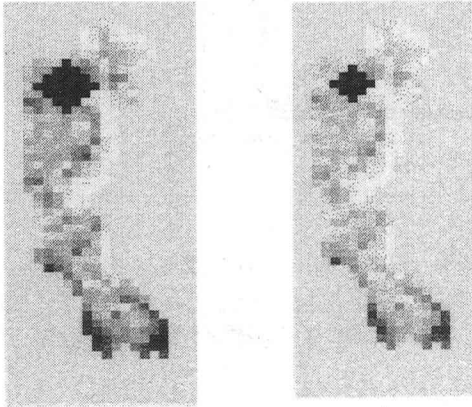
イワナ アユ
図-9 魚の生息分布

6.2 桜川流域における適用と考察

利根川水系桜川において、流出、水質に関してシミュレーションを流域モデルで行うとともに、仮想都市を想定した流出、水質変化のシミュレーションを行った。ただし、メッシュサイズを1kmとした。

1年を通してのシミュレーションにおける相関係数は、0.82と長良川流域に比べ非常によい結果となった。理由として、長良川流域は2kmメッシュサイズであるのに対し、桜川流域は1kmメッシュサイズであることが考えられる。メッシュサイズの縮小は、メッシュ型の流出モデルで解析を行うにあたり、精度向上につながるといえよう。

仮想都市を2パターン（図-10参照）設定し、それぞれにおける流出、水質変化のシミュレーションを行った（図-11参照）。その洪水時における流量の増加率を表-1に示す。仮想都市が流量に与える影響は、下流に行くに従い減少することがわかる。また、水質の平常時における増加率を表-2に示す。流量と同様に、仮想都市の影響は、下流に行くほど減少することがわかる。



仮想パターン1 仮想パターン2
図-10 仮想した都市化パターン

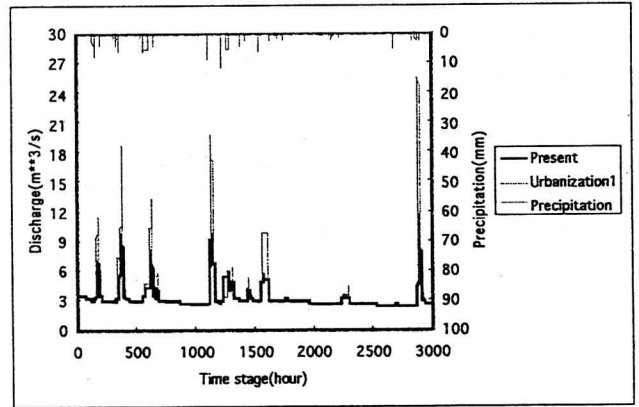


図-11 パターン1における流量変化

表-1 洪水時における流量の増加率

	パターン1	パターン2
上流	3.1	2.3
中流1	2.2	1.7
中流2	1.9	1.6
下流	1.6	1.4

表-2 平常時における水質濃度の増加率

	パターン1	パターン2
上流	11.8	9.5
中流1	3.1	2.6
中流2	1.9	1.7
下流	1.3	1.2

7. おわりに

本研究では、GISをベースに蒸発散、積雪・融雪、流出、水質、生態系、それぞれについてシミュレーションを行うとともに、流域・都市におけるメッシュサイズの切り替えを含む複合メッシュモデルの作成と流域の水循環、水環境の把握に関する評価・検討を行った。ここで、得られた成果は以下のとおりである。

- 流出モデルに関しては、かなり良い精度でシミュレーションを行うことが出来た。
- GISを用いたことにより、流域全体の流量分布や水の移動を視覚的にとらえることができた。
- 水質モデルに関しては、観測データの不備により精度の比較・検討することはできなかったが、妥当な結果が得られた。
- 生態系評価モデルに関しては、これからの調査、研究にゆだねる部分が多々あるが、評価方法を提示することができた。
- 都市化によるシミュレーションに関しては、流量、水質の変化を捉え、表示することができた。

参考文献

- 1) 近藤純正：水環境の気象学、朝倉書店、1994、pp1-333
- 2) 高野直樹：メッシュ型広域流域モデルの作成と温暖化による影響、岐阜大学修士論文、1992、pp1~16
- 3) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析、技法道出版、1990、pp.11-137
- 4) 中島重旗、加納正道、小島義博、金子好雄：水環境工学の基礎、森北出版株式会社、1989、Pp91~183