

シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発

小尻利治・東海明宏*・木内 陽一**

* 北海道大学大学院工学研究科
** 京都大学大学院工学研究科

要旨

近年、日本において、急激な人口増加やそれに伴う都市化の進行などによる水環境の悪化が深刻な問題となっている。一方、地理情報システム (GIS) 等の開発により、水環境過程を系統的に捉えることが可能となってきた。そこで本研究は、庄内川流域を対象に流域内の流量、水質変遷過程のシミュレーションを行うとともに、水質、水量が生態系に与える影響を評価するものである。

キーワード：水循環、シミュレーション、GIS

1. はじめに

近年、人口の急増、都市化の進行に伴い、水不足や家庭および工場等から排出される汚濁物質による水質汚濁など、水循環に様々な影響が発生している。国土庁では「健全な水循環」をテーマに掲げ検討を進めている。これは、個々の水問題に個別に対応するのではなく、水循環を通して、水利用、土地利用、経済活動などのあらゆる分野の相互関係を総合的に検討するものである。河川流域を中心とした水循環の場において、利水と治水に対する要望が充足され、同時に自然環境・生態系の保全に果たす水の機能が失われないなど、水循環における多方面のバランスと持続可能性の評価ということになる。

一方、地理情報システム (Geographic Information System; GIS) の発達により、アナログの地図が空間的データベースであった頃と比べ、全国規模での地形、地質、土地利用情報がデジタル入力として利用しやすくなり、よりきめの細かい流出モデルが提案されるようになってきた。

小尻ら(1997)は国土数値情報を基にしたメッシュ型多層流出モデルを構成し、流量から水質までの解析を行っている。また、東海ら(1997)は、こうした流出モ

デルの化学物質の移流モデルを結合させ、流域内生物の環境運命予測を解析した。大気から河川や水田の底泥に至る物質移流を扱っており、流域開発、社会活動が環境に及ぼす影響を把握する上で重要な指標を与えるものと期待されている。

こうした背景のもと、本研究は、流域内流量および水質のシミュレーションモデルを構築し、流量、水質が生態系に与える影響を評価しようとするものである。すなわち、メッシュ型多層流出モデルと多媒体化学物質移流モデルを結合させようとするものである。

2. 流域水循環モデルの構成

2.1 流域の設定

まず、流域モデルの作成であるが、メッシュサイズの決定には以下の問題が生ずる。すなわち、対象流域に対してメッシュサイズが小さすぎる場合は、莫大な計算時間や、記憶容量の不足が考えられる。逆に、メッシュサイズが大きすぎる場合は、流出、水質計算において、誤差の増大や、細部での出力を把握できない場合がある。従って、対象流域の規模と解析目的にあった適切なメッシュサイズが要求される。例えば本研究では、メッシュ数が504で、1kmメッシュを用い

ている。

国土数値地図（標高）は50mメッシュで供給されているので、各メッシュを形成する4格子点の平均を当該メッシュの標高値とする。

続いて、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。1kmメッシュの解析結果に影響を及ぼしうる河道を選び出すため、1/25,000の地形図上で流域内にある河川の位数を求め、位数が3以上の河川をモデル上の河道とする。言い換えると、メッシュ内に一本の河川だけが現れるようにすると、1kmのメッシュでは、河道勾配同一という条件より位数3以上が残ることになる。作成した擬河道網において地形則を適用し、各位数ごとに算出された平均勾配を河床勾配とする。

整備し終わった標高データを用いて、流域に降る降雨を隣接するメッシュ間4方向で最急勾配方向に追跡する。ここで描いた落水線は、標高データだけに依存しているため、逆勾配や窪地や不連続な落水線が発生する可能性がある。このとき、勾配がほぼ0となるように標高データを修正する。

2.2 土地利用分類及び人口分布の設定

国土数値情報にファイル化されている1/10細密区画土地利用データ（KS-202-1）には、12種類に区分された土地利用が100mメッシュで納められている（日本気象協会、1997）。ここで、同一流出特性、負荷発生特性のものを一つにすると、12種類の土地利用分類は以下の5種類に再分類される。

- 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

上記の分類が各メッシュごとにそれぞれ占める割合（%）を求め、本流域の土地利用データとする。一方、流域の人口分布は、各市町村の人口データを用いて、各市町村ごとに分類4(都市)の割合でメッシュに振り分け、水質モデルの点源負荷量の指標とする。

最後に、流出および水質のシミュレーションを行う際に、下水道、用水路の設定は不可欠となる。下水道には、単一の管渠で汚水と雨水を排除する合流式下水道と汚水と雨水を別々に排除する分流式下水道の2種類があるが、本研究では、後者の分流式下水道を想定し、下水道網、用水路網は落水線に沿うものとする。すなわち、

i)土地利用データより、分類4(都市)、分類2(水田)の

面積を算出する。

ii)一辺がメッシュ幅となる矩形に置き換える。

iii)それぞれの面積部分の中央に下水道、用水路を1本設置する。つまり、分類4(都市)から流出する水は全て下水道に入り、分類2(水田)は用水路に流出するものとする。ただし、用水路は湛蔽期（6月1日～9月30日）のみ設定する。

2.3 流域シミュレーションの計算手順

本環境評価システムは、基本的には、大気と流域からの空間上の構造と水量、水質、生態の目的上の構造からなっている。それらがメッシュ型の流域モデルで計算されることになる。細かく言えば、蒸発散、積雪、河道への流出、水田からの流出、都市、下水流出、地下水流出、用水路、河道流量による水量算定サブモジュール、河道流出・流下水量を河道上の離散地点で表現する換算モジュール、及び大気の移流を始め、汚染源・流域からの化学物質流出および河道内の化学物質移動を解析する化学物質モジュールに分かれる。

計算時間単位からみると、大気モデルでは、流域上の風の移動とスケールを考えると10分単位の解析が要求され、その平均値が1時間単位の解析をする流出モデルへの入力となる。生態モデルでは、化学物質の影響がすぐに評価できる場合と体内に蓄積され長期間の観測が必要な場合があり、1日単位から1年単位までの解析時間が想定される。従って、異なる時間単位で解析を進め、平均や累加を通じて次のモデルへの出力を引き渡すオブジェクト的なプログラム構成となろう。そうしたサブプログラム（モジュール）を一括して表したのが、Fig.1であり、本研究では、全てのモジュールを適用対象とはせず、図中の太線枠で表示した部分を実施するものとする。すなわち、大気、蒸発散から下水道をのぞいた水量流出、および簡略化した形での化学物質流出までである。

3. 水量流出過程

3.1 蒸発散過程

熱収支法⁴⁾の適用条件・仮定を以下に示す。

- i)各メッシュごとに日単位で蒸発散量を求める。
- ii)日平均気温を用いて解析する。
- iii)各メッシュの気温は、ティーセン法で決定された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⁵⁾。
- iv)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。

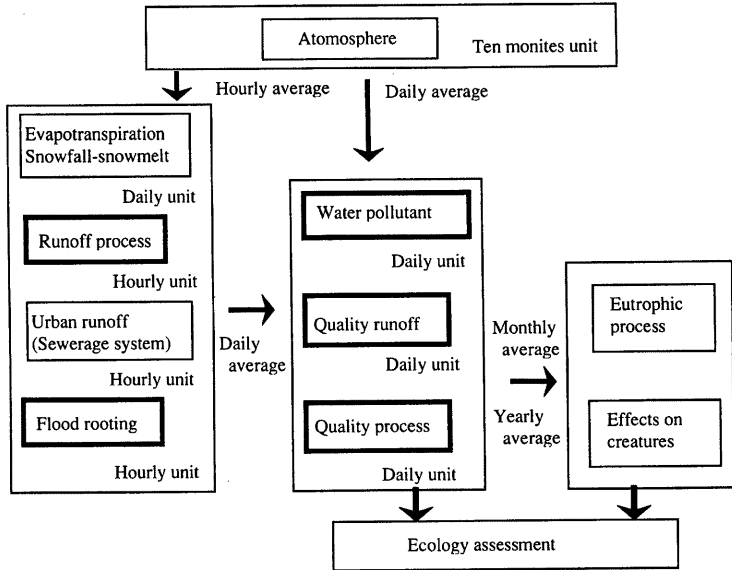


Fig. 1 Considered research subjects in water circulation

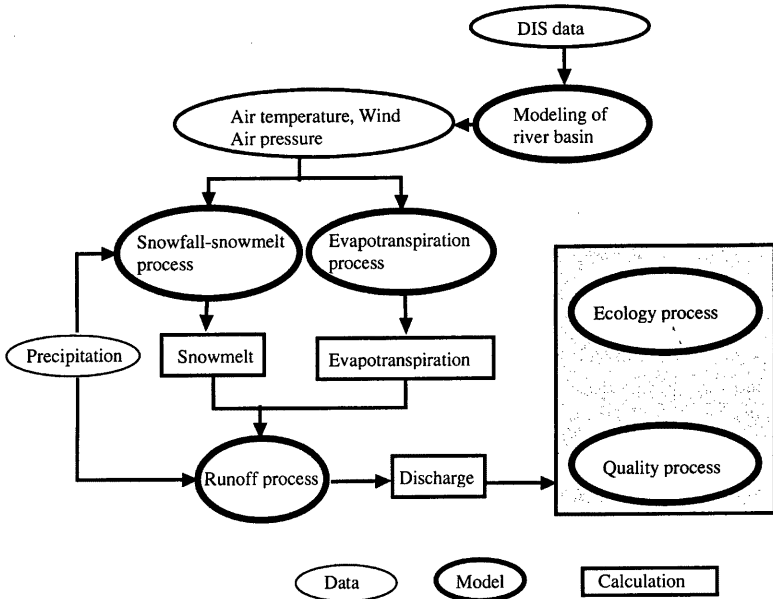


Fig. 2 Concepts of water circulation model

v) バルク係数・蒸発散効率・アルベード・ロビンソン係数は、各被覆条件における値とその面積率により算定する。

vi) 各メッシュの風速は、ティーセン法を用いて観測所のデータを割り当てる。

ここで、地表面における熱収支は、次式で与えられる。

$$R \downarrow = \sigma T_s^4 + H + lE + G \quad (1)$$

ただし、 $R \downarrow$: 入力放射量、 σ : ステファン-ボルツマン定数、 T_s : 地表面温度、 H : 顕熱フラックス、 lE : 潜熱フラックス、 G : 貯熱量、である。いま、 T_s を仮定すると、各項は以下のように求められる。

(a) 入力放射量

入力放射量は、全日日射量と斥は放射量により次式で定義される。

$$R \downarrow = (1 - \text{ref}) S \downarrow + L \downarrow \quad (2)$$

なお、 ref : アルベード、 $S \downarrow$: 全日日射量、 $L \downarrow$: 長波放射量、である。顕熱、潜熱のフラックスは以下のようにバルク式で表される。測高公式より、仮温度 T_v が一定減率 Γ で高度 z とともに低くなると仮定すると、 T_v を T_a と置くと

$$T_v = T_{v0} - \Gamma z' \quad (3)$$

となる。 z' は基準点から対象メッシュまでの高度差(大気内まで)である。基準地点では地表面の気圧 p_{s0} が観測されているので、大気圧 p_a は、 T_{v0} を基準地点の気温とすると、

$$p_a = p_{s0} \left(\frac{T_{v0} - \Gamma z'}{T_{v0}} \right)^{\frac{g}{R_d \Gamma}} \quad (4)$$

$$\text{where } k = \frac{g}{R_d \Gamma}$$

となる。ただし、 R_d : 乾燥空気気体定数、 g : 重力加速度(9.8066ms⁻²)、である。大気中の飽和水蒸気圧 $e_{a \text{ sat}}$ は

$$e_{a \text{ sat}} = 6.1078 \times 10^8 \exp^{(b+T_a)/a} \quad (5)$$

$$a = 7.5, \quad b = 237.3$$

で求められる。一方、大気の飽和比湿 $q_{a \text{ sat}}$ は

$$q_{a \text{ sat}} = \frac{0.622(e_{a \text{ sat}}/p_a)}{1 - 0.378(e_{a \text{ sat}}/p_a)} \quad (6)$$

となる。すると、地表での飽和比湿 $q_{s \text{ sat}}$ は

$$q_{s \text{ sat}} = q_{a \text{ sat}} + \frac{dq_{a \text{ sat}}}{dt} (T_s - T_a) - q_a \quad (7)$$

で表されるが、式(6)を代入することにより

$$q_{s \text{ sat}} = q_{a \text{ sat}} + \frac{0.622 p_a}{(p_a - 0.378 e_{a \text{ sat}})} \cdot e_{a \text{ sat}} \times \frac{ab}{(b+T_a)} \ln 10 \cdot (T_s - T_a) - q_a \quad (8)$$

と展開できる。基準地点の密度分布は、基準地点で観測された水蒸気圧 e_{s0} を用いて

$$p_{s0} = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_{s0}} \times \frac{p_{v0}}{1013.25} \left(1 - 0.378 \frac{e_{s0}}{p_{s0}} \right) \quad (9)$$

となり、対象メッシュでの大気密度分布は

$$p_a = p_{s0} \left(\frac{T_{v0} - \Gamma z'}{T_{v0}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (10)$$

より推定される。この密度より、大気の水蒸気圧 e_a を次式より逆算する。すなわち、

$$p_a = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_a} \times \frac{p_a}{1013.25} \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{p_a} \right) \quad (11)$$

e_a が得られたので、比湿

$$q_a = \frac{0.622(e_a/p_a)}{1 - 0.378(e_a/p_a)} \quad (12)$$

も同様にして求められる。こうして、以下の懸熱、潜熱が求められる。

$$H = c_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) \quad (13)$$

$$lE = \rho_a C_E U (q_a \text{ sat} - q_a) = \rho_a \beta C_H U (q_a \text{ sat} - q_a) \quad (14)$$

が得られる。ここに、 c_p : 空気定圧比熱、 ρ_a : 空気の密度、 U : 風速、 T_a : 気温、 $q_{a \text{ sat}}$: 飽和比湿、 q_a : 比湿、 l : 気化潜熱、 C_H : 顕熱のバルク係数、 C_E : 潜熱のバルク係数、 $e_{a \text{ sat}}$: 飽和水蒸気圧、 β : 蒸発効率、である。

(b) 貯熱量

貯熱量 G は、陸地面においては日中と夜間でプラス・マイナスになり、日平均状態を対象とするときは微少項となるので、無視($G \approx 0$)する。

(c) 全日日射量

大気上端における水平面日射量の日平均値を $S_{0d} \downarrow$ としたとき、地上における全日日射量の日平均値 $S \downarrow$ は次式によって算定できる。

$$S \downarrow = (C_d + 0.7 \times 10^{-m_d f_d}) (1 - i_d) (1 + j_d) S_{0d} \downarrow \quad (15)$$

$$C_d = 0.21 - 0.2 \beta_{DUST} \quad \beta_{DUST} \leq 0.3 \\ = 0.15 \quad \beta_{DUST} \geq 0.3 \quad (16)$$

$$m_d = k_d m_{\text{noon}} \quad (17)$$

$$m_{\text{noon}} = (p_a / p_0) \sec(\phi - \delta) \quad (18)$$

$$k_d = 1.402 - 0.06 \log_{10}(\beta_{DUST} + 0.02) - 0.1(m_{\text{noon}} - 0.91)^{1/2}$$

$$F_d = 0.056 + 0.16(\beta_{DUST})^{1/2} \quad (19)$$

$$i_d = 0.014(m_d + 7 + 2 \log_{10} w) \log_{10} w \quad (21)$$

$$\log_{10} w = 0.0312 T_{DEW} - 0.0963 \quad (22)$$

$$T_{DEW} = \frac{237.3 \times \log_{10}(e_a/6.11)}{7.5 - \log_{10}(e_a/6.11)} \quad (23)$$

$$j_d = \{0.066 + 0.34(\beta_{DUST})^{1/2}\}(\text{ref} - 1.15) \quad (24)$$

$$S_{od} = \frac{I_{00}}{\pi} DIS (H_{od} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H_{od}) \quad (25)$$

$$H_{od} = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (26)$$

$$DIS = 1.00011 + 0.034221 \cos \eta_{od} + 0.00128 \sin \eta_{od} + 0.000719 \cos 2\eta_{od} + 0.000077 \sin 2\eta_{od} \quad (27)$$

$$\delta = \sin^{-1}(0.398 \times \sin(4.871 + \eta_{od} + 0.033 \sin \eta_{od})) \quad (28)$$

$$\eta_{od} = \left(\frac{2\pi}{365} \right) t_{od} \quad (29)$$

ただし、 I_{00} : 太陽定数、 p_0 : 標準気圧、 ϕ : 緯度、 δ : 太陽の赤緯、 β_{DUST} : ロビンソン係数、である。

(d) 長波放射量

長波放射量の日平均値は次式で算定される。

$$Ll = (0.74 + 0.19 \text{rad} + 0.07 \text{rad}^2) \sigma T^4 \quad (30)$$

$$\text{rad}l = 0.0315 T_{DEW} - 0.1836 \quad (31)$$

ここで、式(1)に式(3)、(13)、(14)を代入すると次式が得られる。

$$E_{\text{evapo}} = (1 - \text{ref}) S_{\downarrow} + Ll - \sigma T_s^4 - c_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) - \varphi_a \beta C_H U (q_s - q_a) \quad (32)$$

T_s を修正して、 $E_{\text{evapo}} = 0$ となるように逐次近似法をすすめると、真の T_s を得ることができ。次に、 T_s に対して、メッシュ内での地表と大気との高度差を Z' とすると、メッシュ上の大気圧、空気密度は

$$p_a = p_s \left(\frac{T_s - \Gamma Z'}{T_s} \right)^{\gamma} \quad (33)$$

$$\rho_a = \rho_s \left(\frac{T_s - \Gamma Z'}{T_s} \right)^{\gamma-1} \quad (34)$$

となる。 p_s 、 ρ_s は式(33)、(34)より高度を基準地点と対象メッシュの差として求める。これらの値を用いて次式より e_a を算定する。

$$\rho_a = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_a} \times \frac{p_a}{1013.25} \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{p_a} \right) \quad (35)$$

さらに、 e_a を式(12)に代入することにより比湿 q_a が求められ、同様に、 $e_{\text{asat}} = e_a$ と置くこと q_a が得られる。最後に、式(14)より、蒸発散量を算定することになる。

3.2 積雪・融雪過程

3.2.1 積雪・融雪量

熱収支法の適用条件・仮定を以下に示す。

- i) 積雪量・融雪量は日単位で求める。
- ii) 昇温・融雪・再凍結・冷却過程を考慮する。
- iii) 積雪層は単層とする。
- iv) 日平均気温を用いて解析する。
- v) メッシュ上の気温は、観測地点、対象メッシュの標高差と気温減率を用いて算定する。
- vi) メッシュの気圧・空気密度は、測高公式を用いて算定する。
- vii) メッシュの風速、降水は、ティーセン法により求める。

まず、降水が雪か雨であるかは、次式で判別する。

$$T_a > T_C \quad : \text{雨} \quad (36)$$

$$T_a < T_C \quad : \text{雪} \quad (37)$$

$$T_C = 11.01 - 1.5 e_a \quad (38)$$

雪の物理特性には含水量と水を含まない相当水量が考えられる。新雪の含水量、相当水量は以下の式で算定される。

$$W_{\text{CN}} = RS \times 0.05 \quad T_a \geq 0^\circ \text{C} \quad (39)$$

$$W_{\text{CN}} = 0 \quad T_a < 0^\circ \text{C} \quad (40)$$

$$W_{\text{EQN}} = RS - W_{\text{CN}} \quad (41)$$

ただし、 W_{CN} : 新雪の含水量、 W_{EQN} : 新雪の相当水量、 RS : 降水量、である。また、新雪の雪温 T_{SN} は以下で表される。

$$T_a \geq 0^\circ \text{C} \quad T_{\text{SN}} = 0^\circ \text{C} \quad (42)$$

$$T_a < 0^\circ \text{C} \quad T_{\text{SN}} = T_a \text{C} \quad (43)$$

このとき、積雪層全体の含水量、相当水量、雪温は次式で表される。

$$W(i) = W(i-1) + W_{\text{CN}} \quad (44)$$

$$W_{\text{EQ}}(i) = W_{\text{EQ}}(i-1) + W_{\text{EQN}} \quad (45)$$

$$T_s(i) = \frac{(W_{\text{EQ}}(i-1) \cdot T_s(i-1) + W_{\text{EQN}} \cdot T_{\text{SN}})}{W_{\text{EQ}}(i)} \quad (46)$$

ここに、 $W_{\text{CN}}(i)$: 積雪層の含水量、 $W_{\text{EQ}}(i)$: 積雪層の相当水量、 $T_s(i)$: 積雪層の雪温、とする。

3.2.2 融雪量の算定

積雪の圧密過程は、圧縮粘性係数 η を用いて次式で表される。

$$\rho_{\text{SN}}(i+1) = \rho_{\text{SN}}(i) \left(1 + \frac{W_{\text{EQ}}(i)}{\eta_{\text{SN}}} \right) \quad (47)$$

ただし、 $\rho_{\text{SN}}(i)$: 積雪の密度、 η_{SN} : 圧縮粘性係数で

あり、密度や積雪温度で表現できる。

$$\eta_{SN} = AS \cdot 3.44 \times 10^6 \exp(0.0253\rho_s(i) - 0.0958T_s(i)) \quad (48)$$

$$AS = \frac{\exp(-\beta_s \omega_s) - \exp(-100\beta_s)}{1 - \exp(-100\beta_s)} \quad (49)$$

ここに、 ω_s : 重量含水率、である。すると、積雪深 H_{SD} は

$$H_{SD} = \frac{W_{EQ}(i)}{\rho_{SN}(i)} \quad (50)$$

で表される。融雪熱量は、積雪表面に関する熱エネルギー収支より次式で求める。

$$Q_M = R - \sigma T_s^4 + H + iE + Q_R + Q_G \quad (51)$$

ここに、 Q_M : 融雪熱量、 Q_R : 雨熱量、 Q_G : 貯熱量であり、各々、以下のように求められる。

(a) 雨熱量

$$Q_R = C \cdot T_a \cdot RS \quad (52)$$

ただし、 Q_R : 雨熱量、 C : 比熱、である。

(b) 貯熱量

$$Q_G = 1.16 \times 10^{-5} \cdot i_f \quad (53)$$

ただし、 Q_G : 貯熱量、 i_f : 氷の融解潜熱、である。さて、入力放射量、顕熱、潜熱に式(2)～(4)を用いると、 Q_M や雪温 T_{SN} 、含水量 W_C の値によって、以下の4つの過程が生じる。

[$Q_M \geq 0$ $T_{SN} < 0$ のとき (昇温過程)]

雪温は次式で与えられる。

$$T_s(i+1) = T_s(i) + \frac{Q_M}{C \cdot W_{EQ}(i)} \quad (54)$$

$$Q_M = |T_s(i)| \cdot C \cdot W_{EQ} \quad (55)$$

一方、 $Q_M > Q_H$ のとき、熱量 $Q_M - Q_H$ は次の融雪過程に移行する。

[$Q_M \geq 0$ $T_{SN} = 0$ のとき (融雪過程)]

ここでは、融雪熱量すべてが、融雪に用いられる。その融雪量 H_T は次式で与えられる。

$$H_T = \frac{Q_M}{i_f} \quad (56)$$

融雪量により、含水量、相当水量は以下のように変化する。

$$W_C(i+1) = W_C(i) + H_T \quad (57)$$

$$W_{EQ}(i+1) = W_{EQ}(i) - H_T \quad (58)$$

[$Q_M < 0$ $W_C > 0$ $T_{SN} = 0$ のとき (再凍結過程)]

凍結量は式(56)で表され、このときの含水量、相当水量はそれぞれ次式で与えられる。

$$W_C(i+1) = W_C(i) - H_T \quad (59)$$

$$W_{EQ}(i+1) = W_{EQ}(i) + H_T \quad (60)$$

[$Q_M < 0$ $W_C = 0$ $T_{SN} < 0$ のとき (冷却過程)]

融雪熱量のすべてが積雪層の冷却に用いられるとき、雪温は次式で与えられる。

$$T_s(i+1) = T_s(i) + \frac{Q_M}{C \cdot W_{EQ}(i)} \quad (61)$$

融雪過程において、可能保水量を越えた融雪水は地中へと浸透する。すなわち、

$$P_R = W_C - W_{CM} \quad (W_C \geq W_{CM}) \quad (62)$$

$$W_{CM} = W_{HC} \cdot W_{EQ} \quad (63)$$

$$W_{HC} = 0.111 \cdot \rho(i) \cdot 0.131 \quad (\rho > 0.4) \quad (64)$$

$$W_{HC} = 0.025 \cdot \rho(i) \cdot 0.04 \quad (\rho \leq 0.4) \quad (65)$$

ただし、 P_R : 浸透量、 W_{CM} : 可能保水量、 W_{HC} : 可能保水率、である。

3.3 水量流出過程

流出過程における適用条件・仮定を以下に挙げる (Fig. 2 参照)。

- i) 平面的にはメッシュ型、鉛直的には多層型を用いて流域特性を3次元的に表現するメッシュ型多層流出モデルを適用する。
- ii) 鉛直方向には4段の層(A～D)を配置する。
- iii) 河川、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) 分類2 (水田) には季節変化に伴い土壌表面の状態が変化するため、灌漑期 (6月1日～9月30日)を設定する。この期間には用水路を設置し、そこに表面流を流入させる。用水路は、水田部分の中央に一本設置し、Kinematic Wave Modelで追跡する (Fig.3 参照)。
- ix) 分類4 (都市) においては、メッシュの中央に一本ずつ、下水道を設置し、それぞれ都市表面流を流入させる。このとき、下水道にはKinematic Wave Modelを適用する。
- x) 中間流からの復帰流、すなわち、表層中の中間流の水深が表層の厚さに達すると、地表流が生ずるものと考えられる。

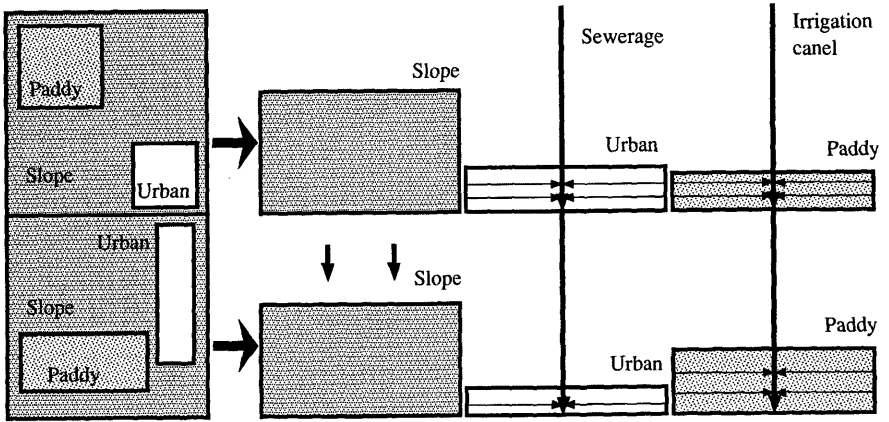


Fig. 3 Modeling of sewerage and irrigation canal

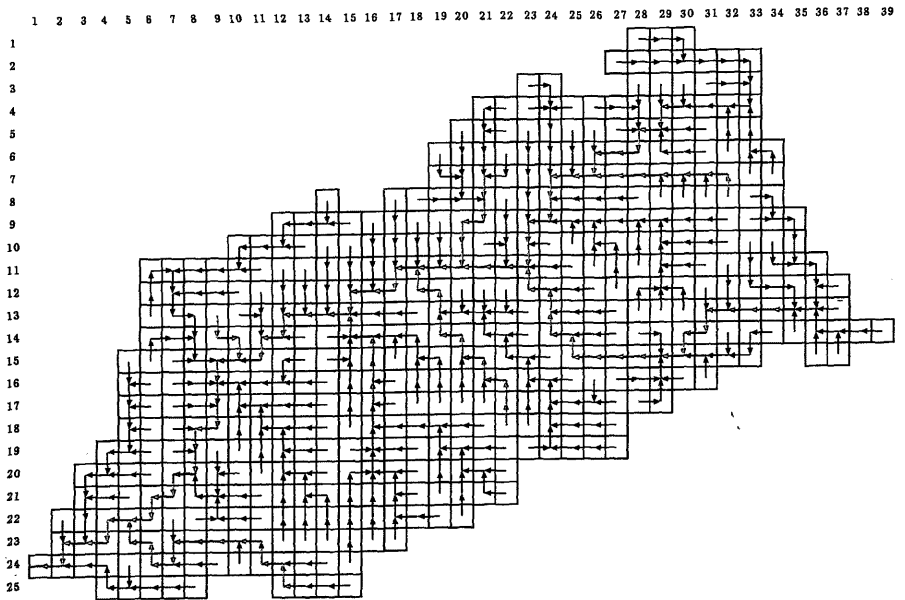


Fig. 4 Flow routing map in the considered river basin

3.3.2 Kinematic Wave Model

Kinematic Wave Model の連続式、運動方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x, t) \quad (66)$$

$$q = \alpha h^m \quad (67)$$

ここに、 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、 x ：斜面における流下方向距離、 α 、 m ：それぞれ流れの抵抗に関する定数で、以下のように示される。

地表面流 (Manning型)

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n} \quad (68)$$

$$m = \frac{5}{3}$$

中間流 (Darcy型)

$$\alpha = \frac{k_s \sin \theta}{\lambda} = k \sin \theta \quad (69)$$

$$m = 1$$

河道流 (Manning型)

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{2n} \quad (70)$$

$$m = \frac{4}{3}$$

なお、 θ ：斜面または河道勾配、 n ：粗度係数、 k_s ：透水係数、 k ：見かけの透水係数(= k_s/λ)、 λ ：有効間隙率、である。

次に、粗度係数を土地被覆状態に基づいて修正する。すなわち、各土地利用ごとに設定した各係数に面積率を乗じることにより算定する。

$$n_i = \frac{\sum n_k A_k}{A} \quad (71)$$

なお、 n_i ：メッシュ i の粗度係数、 n_k ：土地利用 k の粗度係数、 A_k ：土地利用 k の面積率、 A ：メッシュの面積、である。

3.3.3 線形貯留モデル

B～D層での流出量は次の貯留モデルより算定される。

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (72)$$

$$O = k \cdot S \quad (73)$$

ここに、 S ：貯留量、 I ：流入強度、 O ：流出強度、 k ：

透水係数、である。ただし、透水係数は、次式で求められる。

$$I = P_{in} + QI \quad (74)$$

$$O = P_{out} + QO \quad (75)$$

$$k = k_1 + k_2 \quad (76)$$

ただし、 P_{in} ：上層からの浸透強度、 P_{out} ：下層への浸透強度、 QI ：上流メッシュからの流入強度、 QO ：下流メッシュへの流出強度、とする。なお、 k_1 、 k_2 は次式より算定する。

$$k_1 = \frac{k_H \cdot \cos \theta}{B \cdot \varepsilon} \quad (77)$$

$$k_2 = \frac{k_V}{\varepsilon} \quad (78)$$

なお、 k_H ：水平透水係数、 k_V ：鉛直透水係数、 B ：メッシュ幅、 ε ：有効間隙率、である。本研究では、鉛直透水係数を下方のみの流出として与える。いま、初期貯留量を S_0 とし Δt の間は一定の流入が行われていると仮定すると、 Δt 後の貯留量 S_1 は次式で求められる。すなわち、

$$S_1 = (I - \xi)S_0 + \frac{I}{k} \cdot \xi \cdot \Delta t \quad (79)$$

$$\xi = 1 - \exp(-\Delta t \cdot k) \quad (80)$$

また、 Δt の間の流出量 Q_{out} は、

$$Q_{out} = S_0 - S_1 + I \Delta t \quad (81)$$

で表せ、

$$Q_{out} = (\Delta t - \frac{1}{k} \cdot \xi) \cdot I + \xi \cdot S_0 \quad (82)$$

を得ることができる。解析時に、貯水量が最大貯水量を越えてしまうことが考えられる。最大貯水量を S_{max} 、時刻 t における貯水量を $S(t)$ とすると、溢水量 ΔQ は、

貯水量が最大貯水量を越える場合： $S(t) > S_{max}$

$$\Delta Q = S(t) - S_{max} \quad (83)$$

$$S(t) = S_{max} \quad (84)$$

貯水量が最大を越えない場合： $S(t) \leq S_{max}$

$$\Delta Q = 0 \quad (85)$$

$$S(t) = S(t) \quad (86)$$

と表すことができる。このとき、 ΔQ は、上層に復帰するとする。

4. 水質移流過程

4.1 汚濁負荷流出モデル

汚濁負荷発生源は、点源と面源に大別される。点源は工場などの特定汚染源を示し、面源とは処理施設に処理されることの無い面的汚濁負荷物質分布 w 示している。一般には、点源での汚濁負荷発生量に関しては、原単位法を用いる。

汚濁負荷流出モデル（国松ら、1990）では、各土地利用によって流出量、流出挙動が異なる。面源の場合は、土地利用による原単位をそのメッシュでの土壤投入原単位としてとして計算に用いる。すなわち、

$$L_{np} = \frac{\sum_{j=1}^m L_{npj} A_j}{A} \quad (87)$$

である。ここに、 L_{np} ：面源由来の汚濁負荷物質投入原単位(mg/m²day)、 L_{npj} ：土地利用 J での面源由来の汚濁負荷物質投入原単位、 A ：メッシュ面積、 A_j ：土地利用 J の面積、を表す。また、点源である人間による汚濁負荷は次式で算定される。

$$L_p = P_p \cdot \text{People} \quad (88)$$

ただし、 L_p ：点源由来の汚濁負荷流出量(mg)、 P_p ：人間由来の汚濁負荷物質排出原単位(mg/day人)、 People ：メッシュ内人口（人）、である。点源からの流出負荷量は

$$L_{p0} = f_p L_p \quad (89)$$

となる。ただし、 f_p ：放出率、である。A層からの流出負荷量は

$$L_A = (C_A + k_{wp} P_{Ap}) R_{AH} A + k_{wnp} P_{Anp} R_{AH}^2 A \quad (90)$$

で求められる。ここに、 L_A ：A層からの水平汚濁負荷流出量、 C_A ：A層からの汚濁負荷物質濃度、 R_{AH} ：A層からの水平流出高、 k_{wp} ：点源由来の掃流係数、 k_{wnp} ：面源由来の掃流係数、 P_{Ap} ：点源由来の堆積汚濁負荷物質質量、 P_{Anp} ：面源由来の堆積汚濁負荷物質質量で表される。さらに、B,C,D層からの負荷流出量は次式で示される。

水平方向

$$L_j = C_j R_{jH} A \quad (91)$$

鉛直方向

$$L_{ij} = C_j R_{ij} A \quad (92)$$

ここに、 L_j ： J 層の水平排出負荷量、 L_{ij} ： i 層の鉛直排出負荷量、 C_j ： j 層の貯留水濃度、 R_{jH} ： J 層の流出高、 R_{ij} ： i 層から J 層への浸透高、とする。加えて、隣接するメッシュからの汚濁負荷物質移動量は、次式で示される。

$$InL_A = \sum_{i=1}^3 \{L_A + (1 - f_g) f_p L_A\} \quad (93)$$

$$InL_B = \sum_{i=1}^3 C_B R_{Bij} A \quad (94)$$

$$InL_C = \sum_{i=1}^3 C_C R_{Cij} A \quad (95)$$

なお、 InL_J ： J 層の隣接するメッシュからの汚濁負荷物質移動量、 f_g, f_y ：下水道、用水路への放出率、である。各メッシュにおける下水道、用水路への汚濁負荷物質移動量は、次式で示される。

$$InL_G = f_y \sum_{i=1}^3 (f_p L_p + L_{npj} A_i) \quad (96)$$

$$InL_Y = f_y \sum_{i=1}^3 L_{np2} A_2 \quad (97)$$

ただし、 InL_G, InL_Y ：下水道、用水路への汚濁負荷物質移動量、である。結局、メッシュ内部での汚濁負荷の収支式は以下のとおりである。すなわち、

$$A \frac{d(C_A S_A)}{dt} = C_{np} R_{ain} A - C_A R_{Ain} A - k_{A1} C_A S_A A + k_{A2} P_{Anp} A - L_{AB} + InL_A \quad (98)$$

$$A \frac{dP_{Ap}}{dt} = (1 - f_p) L_p - k_{dp} P_{Ap} A - k_{wnp} P_{Ap} R_{AH} A \quad (99)$$

$$A \frac{d(P_S S_{jmax})}{dt} = k_j \left\{ C_j S_j - r \frac{P_j - P_{j0}}{P_{j0}} P_j S_{jmax} \right\} A - k_{uj} P_j S_{jmax} A \quad (100)$$

ただし、灌漑期和非灌漑期では水田からの汚濁流出が異なり、次のように定式化される。

(灌漑期)

$$A \frac{dP_{Anp}}{dt} = f_A (L_{np} A - f_y L_{np2} A_2 - f_g L_{np4} A_4) - k_{dnp} P_{Anp} A + k_{A1} C_A S_A A - k_{A2} P_{Anp} A - k_{wnp} P_{Anp} R_{AH}^2 A \quad (101)$$

$$A \frac{d(C_j S_j)}{dt} = f_j (L_{np} A - f_y L_{np2} A_2 - f_g L_{np4} A_4) L_{j1} + InL_j - L_{j1} - L_{j1} - k_j \left\{ C_j S_j - r \frac{P_j - P_{j0}}{P_{j0}} P_j S_{jmax} \right\} A \quad (102)$$

(非灌漑期)

$$A \frac{dP_{Anp}}{dt} = f_A (L_{np} A - f_g L_{np4} A_4) - k_{dnp} P_{Anp} A + k_{A1} C_A S_A A - k_{A2} P_{Anp} A - k_{wnp} P_{Anp} R_{AH}^2 A \quad (103)$$

$$A \frac{d(C_j S_j)}{dt} = f_j (L_{np} A - f_g L_{np4} A_4) L_{j1} + InL_j - L_{j1} - k_j \left\{ C_j S_j - r \frac{P_j - P_{j0}}{P_{j0}} P_j S_{jmax} \right\} A \quad (104)$$

ここに、 P_j : J層における汚染源からの堆積物、 k_{dp} : 点源由来の汚濁物質の減衰定数、 k_{dnp} : 点源由来の汚濁物質の減衰定数、 S_j : J層の貯水位、 S_{jmax} : J層の最大貯水位、 C_{np} : 降雨濃度、 R_{ain} : 降雨強度、 P_{j0} : J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_j : J層の吸脱着速度係数、 k_d : J層の汚濁負荷物質の減衰定数、 lnL_j : J層の隣接するメッシュからの汚濁負荷物質移動量、 f_j : J層における面源負荷物質の放出率、 f_g, f_y : 下水道、用水路への放出率、 lnL_G, lnL_Y : 下水道、用水路への汚濁負荷物質移動量、である。

4.5 化学物質多媒体間動態モデル

化学物質の導体として、各メッシュに大気、土壌、地下水、河川水、河川低泥、水田、水田低泥の7個の部分空間(コンパートメント)を考える。化学物質の移動の推進力は、移流による流入出系、大気中化学物質の雨滴への溶解と降雨流出系、及び媒体間の濃度差による拡散移動系から成っている。各媒体間の化学物質移動は、分配係数や移動速度によって決定されるものとする。化学物質収支の基礎式は以下に示すとおりである。すなわち、

$$\frac{dV_i C_i}{dt} = (Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_i) - K_i V_i C_i + \sum_{j=1}^N U_{ij} A_{ij} (C_j - \frac{C_i}{H_{ij}}) + \sum_{j=1}^N \Omega_{ij} X_j \quad (105)$$

となる。ただし、 i : メッシュ(コンパートメント)番号、 j : 隣接するメッシュ番号、 V_i : コンパートメントの体積、 Q_{in} : 移流量、 Q_{out} : 移流流入量、 C_i : コンパートメントからの移流流出量、 K_i : 分解係数、 U_{ij} : i から j への移動係数、 H_{ij} : j : i 間の分配係数、 Ω_{ij} : 物理的移動量、 X_i : 放出速度、である。特に、第1項は移流、第2項は分解、第3項は2層境界膜による物質移動、第4項は地下水、降雨などの物理的移動、第5項は化学物質の環境への放出速度、などを表している。

5. 適用と考察

5.1 流域の設定

本研究では庄内川の志段味(しだみ)より上流域を対象流域とする。庄内川は、その源を岐阜県恵那郡の夕立山(標高727m)に発し、岐阜県東濃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7)。

メッシュサイズに関しては、前述のように、メッシュ数が504となる1kmメッシュが適切であると判断した。庄内川流域の1kmメッシュ図(落水線図)をFig.4に示す。図中の上部、左部に描かれている数字はメッシュの行列番号を表しており、以下Mesh(i,j)で表現する。iは行番号、jは列番号とする。

5.2 土地利用分類、及び人口分布の設定

100mメッシュの土地利用データを1kmメッシュとして換算した結果、分類1(山地)は本川から離れるほど多くなっており、また、上流域に多く分布している。分類2(水田)、分類3(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。分類4(都市)は、名古屋市、春日井市などの下流域と、多治見市などの中流域に庄内川に沿った形で分布しており、流域の都市化が進んでいることが分かる。分類5(水域)は、河道部分と志段味周辺のため池部分が表れている。流量、汚濁負荷については、土地利用形態は、分類1(山地): 17%、分類2(水田): 20%、分類3(畑地): 15%、分類4(都市): 41%、分類5(水域): 7%、となっている。人口分布は平成8年度の統計資料を用いており、下流域、中流域の庄内川本川に沿って人口が多く分布している。

5.3 水量流出量

降水量は平成8年のデータを用いた。降水の空間分布については8つの観測地点から得られたデータをテーゼン法で処理した。メッシュ型多層流出モデルでの各層の厚さはそれぞれ、A層0.3m、B層1.0m、C層2.0m、D層10.0mと設定し、Table 1、Table 2に示すパラメータ(透水性係数、粗度係数)を用いて1時間単位で1年間を通して解析を行った。流域モデルにおける計算流量、観測流量(志段味観測所)のハイドログラフの比較をFig.5に示す。計算値は観測値と比べ降水時においてハイドログラフの立ち上がりが早く、変化が緩やかになっている。前者の理由としては、下水道の設置方法が考えられる。各メッシュにおいて分類4(都市)を一边がメッシュ幅になるように置き換えており、この置き換えにより下水道に流入するまでの都市斜面長が短くなったため下水道への到達時間の短縮、地下浸透量の減少を生じたのであろう。後者の理

由としては、透水係数の固定が完全でないことが挙げられる。今回用いた透水係数は試行錯誤的に求めた値であり、このようにパラメーターの最適化は、流出モデルにおいて大きな課題の一つであるといえる。他に、河道のモデル化による河道長の減少、落水距離の減少についても、さらに検討する必要がある。また、7月3日10時～7月4日22時の洪水を対象にした空間表示による河川流量、流出量の時間分布をFig. 6に示す。流域の水の動きが目視的に把握できよう。また、Mesh(24, 1)における貯留高をFig. 7に示す。層中の水量は一定の変化を繰り返している。特に、A、B層での増減は降水量に対応している。

5.4 汚濁負荷流出モデル

汚濁負荷の指標としてT-N(全窒素)を用いた。汚濁負荷流出モデルによって水質解析を行うに当たり必要な流出量は、流出解析において算定された値を使用する。本モデルにおいて用いた汚濁負荷の土地利用別原単位、その他パラメーターをTable 3, Table 4に示す。土地利用によって排出される面源負荷量は、A層に60%、B層に30%、C層に10%分配し、点源負荷量については人のみの排出とした。Fig. 8, Fig. 9は、Mesh(24, 1)の河川水濃度変化とA層中濃度変化を示している。河川水濃度は150日ぐらいから急に増加しているが、これは、灌漑期から非灌漑期へ変わる時に計算上で起こったことであろう。C層中濃度が、低水時時系列形状が右上がりになっており、計算時の差分方法の再検討が必要であろう。また、流出、流下流量の少なさのため、濃度が高くなったと考えられ、パラメータや入力値の考察も行う必要があろう。

6. おわりに

本研究は、GIS上で作成された流域モデルを利用し、流域内の流量、水質変遷過程のシミュレーションを行うことであった。そこで、流域のモデル化をはかり、水分流出モデルとして用いたKinematic Wave Model, 線形貯留モデルでの出力値を水質モデルとして用いた汚濁負荷流出モデルの入力値として、汚濁負荷物質の環境中濃度を求めることで、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、得られた成果をまとめると、以下ようになる。

i) 水量流出過程：

平常時、降水時など様々な降水条件のもと、1年間を通してシミュレーションを行い、流出状況を時間的・空間的に捉えることが出来た。すなわち、水系全体として得た形状ピーク等の把握が可能となった。ハ

イドログラフの特徴としては実測値と比較して立ち上がりが早く、緩やかに変化する傾向が見られた。これは、下水道の設定方法、各パラメーターの最適化手法が原因として考えられる。

2) 水質移流過程：

T-N(全窒素)を評価指標として汚濁負荷流出モデルを適用し、シミュレーションを行った。河川中濃度については観測値とは異なる結果が得られたが、一般的には濃度変化や物質質量変化の様子を捉えることが出来た。今後、河川の自浄作用、晴天の続いた日数による路面上の堆積負荷量の考慮などが挙げられる。

一方、今後の課題として

3) 水循環過程での精度向上：

蒸発散や積雪・融雪過程の理論展開、プログラム化は終わっているの、それらを結合させた総合的水循環モデルの完成を計る。

4) 生態系モデルの適用：

水量、水質に加えて、それらの変化が生態に与える影響を適用する必要がある。具体的には、生物(魚)体内での毒物蓄積過程による化学物質濃度アプローチの適用である。

5) 水利用・浄化過程のモデル化：

水質変化過程を詳細に追跡するために、農地での水利用、浄水場による水質変化、都市部における下水道網などの詳細な組み込みが不可欠である。

謝辞

本研究の理論展開やプログラム化において適切な助言を頂いた日本工営株式会社黒田良人氏、および、貴重な資料を提供いただいた建設省中部地方建設局庄内川工事事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 小尻利治・黒田良人・東海明宏(1997)：GISベースでの水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発、第5階地球環境シンポジウム講演集、pp.209-214.
- 近藤純正(1994)：水環境の気象学、朝倉出版、pp.1-333.
- 東海明宏・小尻利治・堀博(1997)：流域シミュレーションを利用した流域化学物質の環境運命予測、第5回水資源に関するシンポジウム講演集、pp.239-224.

Table 1 Coefficient of permeability

Layer number	Coefficient of horizontal Permeability	Coefficient of vertical permeability
A	1.2	0.9
B	0.025	0.033
C	0.0011	0.0003
D	0.00004	0

Table 2 Roughness in river basin

Land use	Roughness
Mountain	0.6
Paddy field	0.25
(Farm field)	0.4
Urban	0.2
Canel	0.2
Sewerage	0.05
River	0.01

Table 3 Parameters of water pollutant

Parameter	Value
C_{np}	1,500 mg/m ³
f_p	0.6
k_{A1}	8.03-E0.3 1/h
k_{A2}	6.3E-0.3 1/h
k_{dp}	0
k_{dnp}	0
k_{wp}	10 l/m
k_{wnp}	8.4E+2 h/m
k_f	0
r	0.025
P_{J0}	3
L_{np1}	1.1 mg/m ^{**2} /day
L_{np2}	6.16 mg/m ^{**2} /day
L_{np3}	30.1/mg/m ^{**2} /day
L_{np4}	1.4 mg/m ^{**2} /day
L_{np5}	0
<i>Air</i>	2.467 mg/m ^{**2} /day

Table 4 Parameters of unit requirement

Classification	Unit requirement
Mountain	1.1 mg/m ^{**2} /day
Paddy field	6.16 mg/m ^{**2} /day
Farm field	30.1 mg/m ^{**2} /day
Urban	1.4 mg/m ^{**2} /day
Water zone	0 mg/m ^{**2} /day
Human being	3530 mg/person/day

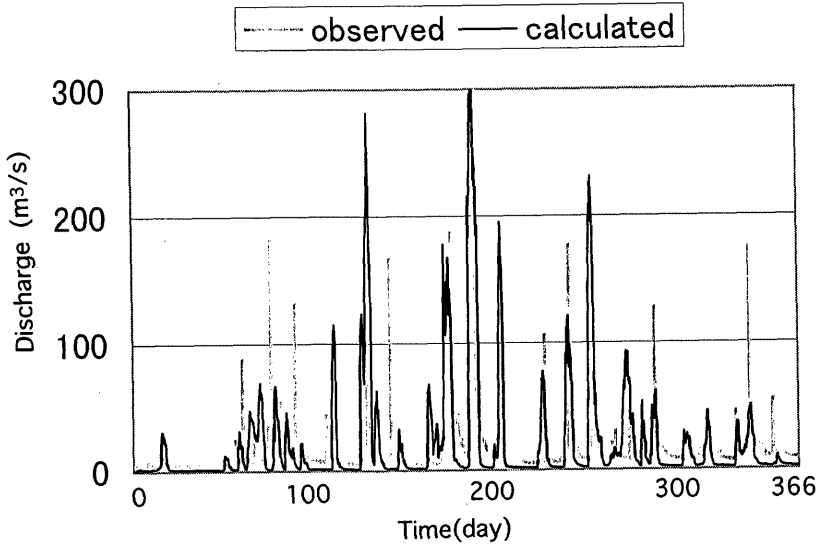


Fig. 5 Comparison of discharge between observed and calculated sequences

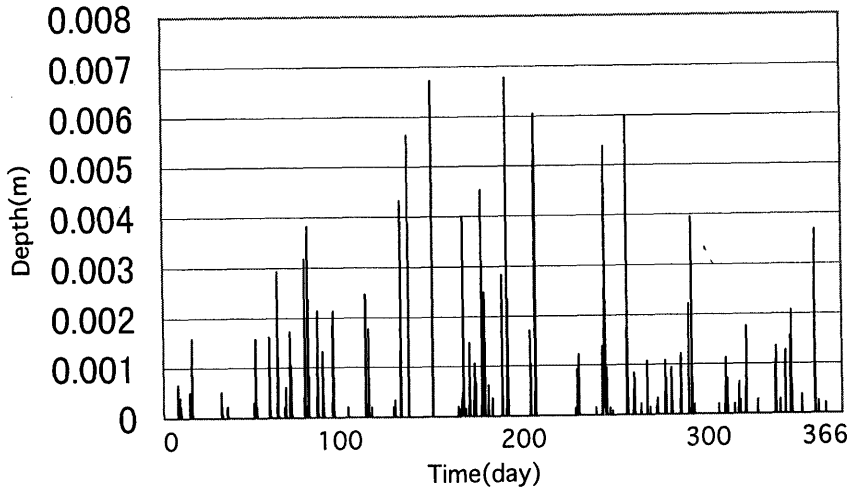
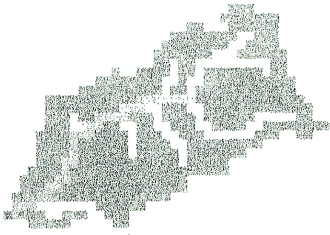
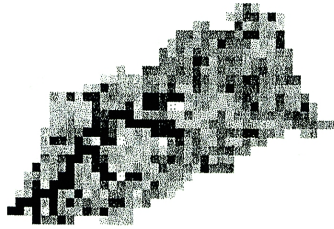


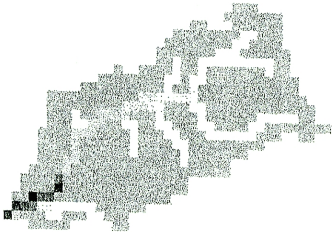
Fig. 6 Calculated sequence of storage height



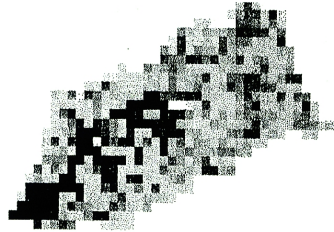
2:00, July 4



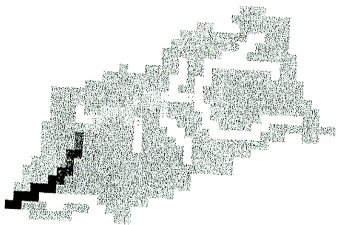
2:00, July 4



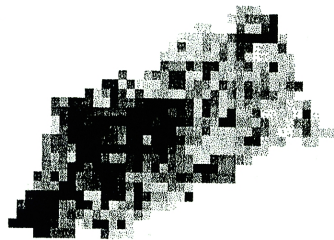
10:00, July 10



10:00, July 10



18:00, July 18



18:00, July 18

left: Flow discharge in the river

right: Run-off discharge from the considered mesh

Fig. 7 Visual description of spacial distribution of discharge

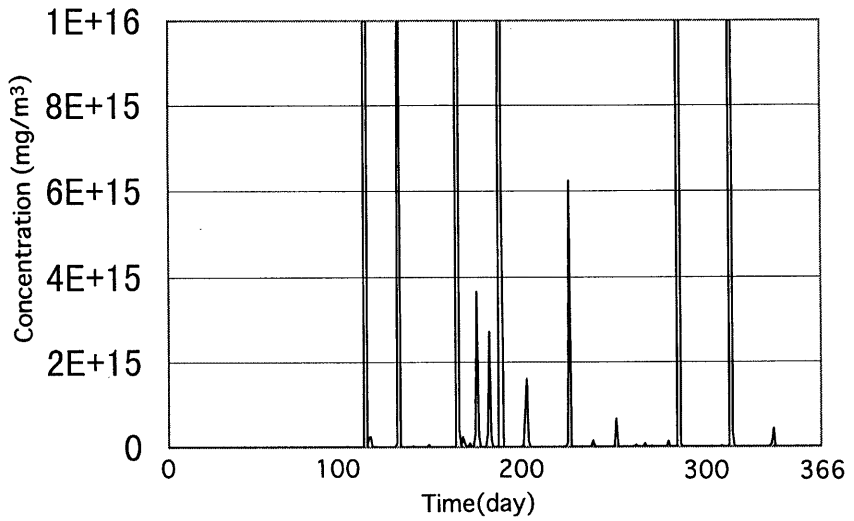


Fig. 8 Water quality of T-N (Total-Nitrogen) in the river at Mesh(24,1)

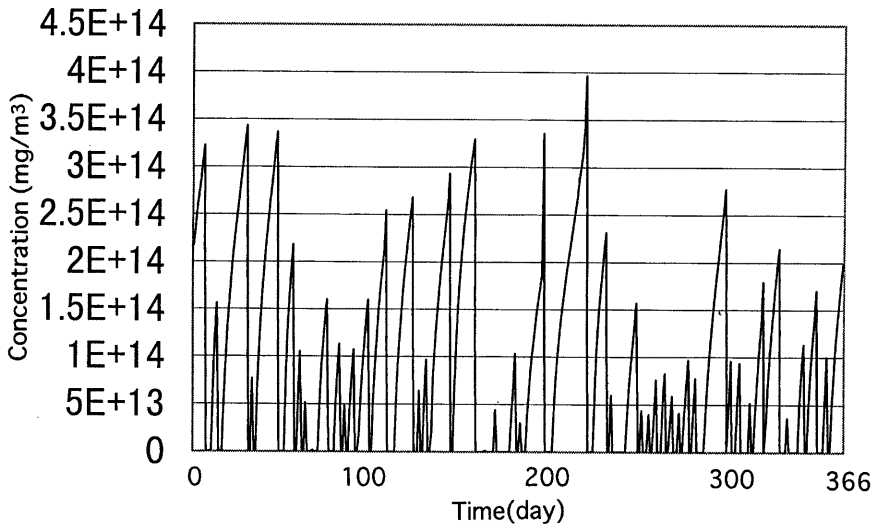


Fig. 9 Water quality of T-N (Total-Nitrogen) in the A-layer at Mesh(24,1)

日本気象協会 (1997) : 気象年鑑 1997年版
(財) 日本地図センター (1994) : 数値地図ユーザーズ
ガイド (改訂版) .

Assessment of River Basin Environment through Simulation with Water Quality and Quantity

Toshiharu KOJIRI, Akihiro TOKAI* and Yoichi KINAI**

* Graduate School of Engineering, Hokkaido University

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The river basin simulation model with multi-layer mesh-typed runoff model is proposed to assess the basin environment. Not only water quantity but also quality is analyzed to evaluate the sustainability of basin through piling and exfoliating processes. The river basin is divided into proper number of square meshes by considering calculation memory and time. GIS data is applied to classify the land-use into slope of mountain, paddy field and urban, and channel of drainage, canal and river.

Keywords: Water circulation; River basin simulation; Water quantity and Quality; GIS