

GIS を利用した分布型流出モデルによる 水量、水質の推定

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF WATER QUANTITY AND QUALITY WITH GIS-BASED RUNOFF MODEL

小尻 利治¹・小林 稔²

Toshiharu Kojiri, Minoru Kobayashi

1 正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

2 正会員 工修 国土交通省庄内川工事事務所 (〒462-0052 名古屋市北区福德町 5-52)

Recently, water quantity and quality have become very important factors to be evaluated for the river basin situation. In this paper, the multi-layer mesh-typed run-off model is introduced to perform the environment assessment with GIS technology representing the temporal and spatial distributions. As the whole river basin must be considered, the basic mesh consists of squares and, only one and straight channel exists in a mesh according to the digital elevation map. The mountain, paddy field, urbanized zones are decided with their occupation ratios under the classified infiltration rate. The concentration values of water quality in the river channel such as BOD, T-N, and T-P are formulated and analyzed through differential equations. As the water temperature is one of the most important factors for creatures in rivers, it is analyzed by considering air temperature, soil temperature and heat conductivity between atmosphere, groundwater and soil in the ground.

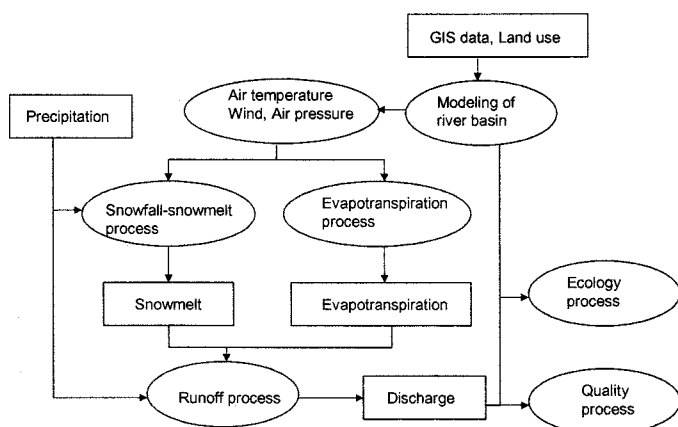
Key Words : GIS, distributed model, long and short-term runoff, water quantity and quality,
water temperature

1. はじめに

わが国では、高度経済成長とともに人口の急増、都市化の進行や水利用の高度化に伴って、水需要が増大した。そのため、水供給に主眼を置いた水資源開発が全国的に計画されたことにより、水系全般に渡る河川流況ならびに水需給の状況を的確に把握する必要性が出てきた。また、「健全な水循環」も近年の流域状況に対するキーワードとなってきた。このような状況を背景に、河川流域内水収支を分析するための様々な流出シミュレーションモデルの開発が行われてきた。しかし、用水需給状況の変化や流域内の土地利用・経済活動の変化、下水道や浄水処理施設の建設によって、流域内の水移動が様々な媒体を通して行われるようになった。人々の環境問題への関心が強まってきたことで、水量だけでなく、水質をはじめとする流域環境を土地特性を含めて検討した水資源計画の重要性が増してきた。つまり、河川を中心とした水循環の場において、利水と治水と同時に、自然環境・生態系の保全など、水循環にお

ける種々のバランスと持続可能性の保持を適切に把握、評価する手法の開発が望まれるようになってきた。

一方、地理情報システム (Geographic Information System) の発達により、アナログ的地図が唯一の空間的データベースであった頃と比べ、水文情報の充実はもちろんのこと、計算機の性能が向上したことで、きめの細かい流出モデルが提案されるようになった。そこで、本研究は庄内川を対象として、デジタル情報として入手可能なものを利用し、流域全体、かつ、水量と水質、および短期と長期を同時に解析する分布型多層流出モデルを開発したものである。平成8年から10年の3ヵ年の共同研究「分布モデルを中心とした洪水流出解析手法の高度利用化に関する研究」を基に、その後の研究成果を加えてまとめたものである。特に、洪水、低水流量分布と共に、水質の変動過程を解析し、流域内での脆弱地域の把握による健全な水循環に向けての基本情報を得ようとするものである。



図－１ 水循環系の概念図

2. 流域のモデル化

(1) シミュレーションモデルの構成

流域の水環境を時空間的に評価するには、分布型流出モデルによる詳細なシミュレーションが必要になる。小尻ら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開発し、流量から水質までの解析を行った¹⁾。図－１は、流域内流量および水質の循環系を示したものである。解析対象条件としては、計算期間は１年以上、１年間を通して平常時、降雨時、洪水時のどの状況においても、流域内の水環境状況を把握できることを前提とする。

本流域水循環モデルは、水量流出過程と水質移流過程から構成されている。前者では、蒸発散過程、水田流出過程、表面流出・土壌内浸透過程、河川流出過程、取水・放水過程に分け、後者は、水温移流過程、汚濁物質移流過程に分けられる。まず、標高データ、土地利用データを用いて、流域の水分、汚濁負荷物質の空間的分布を推定するために流域を矩形メッシュに区切る。流域のモデル化において、土地利用、河道、標高、下水道、用水路、人口分布の設定を行う。土地利用については、同じような流出特性、負荷発生特性の要素を一つにするという方針で、土地利用データの１２種類の分類を山地、水田、畑地、都市、水域の５種類に再分類する。下水道、用水路については、それぞれ土地利用のうち都市、水田に設置する。

(2) 水量流出過程：

流出過程における適用条件、仮定は以下のとおりである。

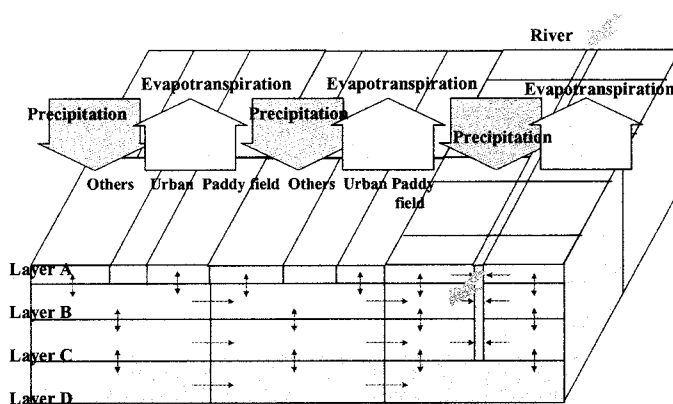
- ・ 平面分布としてメッシュ型モデル、鉛直分布として多層モデルを用いて、流域特性を３次元的に表現したメッシュ型多層流出モデルを適用す

る。

- ・ 鉛直方向には４段の層（Ａ～Ｄ）を配置する。
- ・ 河川、地表面においてはKinematic Wave Modelを適用する。
- ・ Ａ層～Ｄ層には、線形貯留モデルを適用する。
- ・ 解析は１０分単位で流出量を算定する。
- ・ 都市、水田においては、メッシュの中央に一本ずつ、それぞれ下水道、用水路を設置し、表面流を流入させ、Kinematic Wave Modelを適用する。
- ・ 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する（図－２参照）。

a) メッシュサイズの決定

対象流域に対してメッシュサイズが小さすぎると、莫大な計算時間の必要性や記憶容量の不足が考えられる。また、メッシュサイズが大きすぎる場合は、水量、水質流出計算において、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合った適切なメッシュサイズが要求される。



図－２ 多層構造の概念図

b) 入力データの整備

国土数値地図 50m メッシュ（標高）から各メッシュの格子点の標高値を得て、各メッシュを形づくる４格子点の平均値を各メッシュの標高値とする。

c) 疑河道網の設定

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。例えば、メッシュ内に一本の河川が現れるようにすると、1/25,000の地形図では位数３以上が残ることになる。作成した疑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。

d) 河道幅の設定

河道の縦横断データ（200m 毎）を用いてメッシュ

毎に河川幅を設定する。疑河道網のうち、縦横断データのない部分は、同じ位数を持った河道の幅を平均した値を用いる。

e) 落水線図の作成

整備し終わった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ので、標高データをメッシュサイズに変換する際の誤差などで、逆勾配、窪地や不連続な落水線が発生する場合がある。このとき、用いた標高データの基本単位(「国土数値地図 50m メッシュ (標高)」の場合は 10cm) 分だけの落差となるように標高データを修正する。

f) メッシュ傾斜角の計算

落水線方向に隣接するメッシュ間の標高差 ∂h 、メッシュ幅 L を用いて、傾斜角 Inc を

$$Inc = \tan^{-1}(\partial h / L) \quad (1)$$

とする。また、用水路、下水道は以下のように設定される。すなわち、

i) 各地表メッシュについて土地利用データより、分類 4 (都市) の面積を算出する。

ii) それを 1 辺がメッシュ幅となるような長方形に置き換える。

iii) その長方形の長辺の中央に短辺方向に下水道 (雨水管) を 1 本設置する。都市への降雨は全てこの下水道 (雨水管) に流入するものとする。

iv) 家庭排水、工業排水のうち、下水道普及率分は下水処理場を経て河川に流入するとし、残りは浄化槽を経て下水道 (雨水管) に入るものとする。表流水や河川などの流出、流下計算を行う際に用いる。なお、Kinematic Wave Model は以下のように定式化される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x, t) \quad (2)$$

$$q = \alpha h^m \quad (3)$$

ここに、 h は水深、 q は単位幅あたりの流出量、 $r(x, t)$ は単位幅あたりの横流入量、 x は斜面における流下方向距離、 α 、 m はそれぞれ流れの抵抗に関する定数、である。次に、地下水は、線形貯留モデルモデルとして以下のように取り扱う。

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (4)$$

$$O = kS \quad (5)$$

ただし、 S は貯留量、 I は流入強度、 O は流出強度、 k は透水係数、である。

3. 水質移流過程

(1) 水温移流過程

地中温度を一年間通して見てみると、平均温度は年平均気温にほぼ一致している。また、ある深さに達すると、1 年中ほとんど変化しなくなる。この層を恒温層という。日本での恒温層深度は、12m~14m であることが知られており、本モデルでは、D 層の基底の深さを約 15m としていることから、D 層内地下水温を一定と置くことができる。いま、地中水温は地中温度と等しいものとする、深さ y (m) なる点での地中温度 θ_g は、

$$\theta_g(y, t) = \theta_0 + D' e^{-y\sqrt{\pi/\chi T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - y\sqrt{\frac{\pi}{\chi T}}\right) \quad (6)$$

となる。ただし、 θ_0 は年平均気温 (°C)、 T は周期

(365 日)、 χ は地中での熱の拡散率 (0.04m²/d)、

である²⁾。 D' は地表面温度 T_s の時系列変化を SIN カーブに近似したときの振幅で、グリッドごとに数値として与えられる。各層から流出する地下水温は、得られる地中温度に等しいとする。都市から流出し下水道 (雨水管) に流入する水は非常に流出速度が速く、あまり外界からの影響を受けないため、降雨温度と等しいとする。一方、下水道 (污水管) のうち、下水処理場ではなく浄化槽を経て直接河川へ流入するもの、つまり、家庭排水のうち (1-下水道普及率) 分の水温は、各市町村の下水処理場への流入水の温度と等しいものとする。また、降雨温度は湿球温度に等しいとみなす。

水田における熱収支の要素として、降雨、大気、河川からの灌漑用水がある。水面での大気との熱収支は、蒸発散過程での水面熱収支式を応用する。河川からの灌漑用水温度は、取水地点の河川温度とする。さらに、灌漑用水が取水地点から水田に至る間の熱収支は無視できると見なす。

河川水温度を推定する基礎式は、以下のようになる。

$$C\rho DY\left(\frac{\partial \theta_{riv}}{\partial \theta}\right) = H_0 + \frac{C\rho}{AW} \sum_v q_{Iv}(\theta_{Iv} - \theta_{riv}) \quad (7)$$

ただし、 C は比熱 (cal/g°C)、 ρ は密度 (1.0x10⁶ g/m³)、

DY : 平均水深 (m)、 θ_{riv} は河川水温 (°C)、 H_0 は単位

面積あたりの水面熱収支量 (cal/m²s)、 AW は水面の

面積 (m²)、 q_{Iv} は要素 v からの流入量 (m³/s)、 θ_{Iv} は

流入水温 (°C)、である。

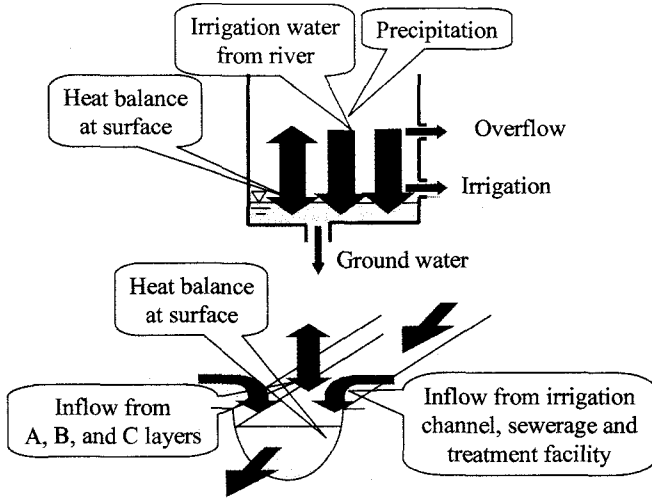


図-3 河川、水田での熱収支過程

(2) 汚濁物質移流過程

適用する汚濁負荷流出モデルは、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。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）などを解析対象とすることが出来る。

汚濁負荷発生源として、原単位で汚濁負荷を発生させる原単位法を用いる。汚濁負荷発生源は、点源（point source）と面源（non-point source）に分けられる。点源とは工場や家庭の特定発生源のことであり、廃棄物の処理、処分方法の改善や下水道整備などによって低減させることができるものをいう。一方、面源とは、大気中の浮遊物、煤塵、粉塵や、これらが降雨に溶解した汚濁物質、都市内を移動する交通等によって排出される排気ガスやごみ、ほこり、タイヤかす、アスファルトかすなど、発生場所が特定できないものをいう。工場、家庭からの排水で下水処理場を経ないものは、合併浄化槽、農業下水道、単独浄化槽のいずれかを通して河川に流されとする。合併浄化槽、農業下水道を経た汚水は、浄化槽の原単位と取水放水過程で求めた1人当たりの汚水排出量を用いて排出濃度を算定し、単独浄化槽に関しては、一般的に尿尿放出量 Q_{so} が45 l（40～50 l）であることを利用する。結局、各放出濃度は以下ようになる。

$$C_{com} = \frac{L_{pcom}}{Q_{sew}} \quad (8)$$

$$C_{ag} = \frac{L_{paq}}{Q_{sew}} \quad (9)$$

$$C_{so} = \frac{L_{pso} + C_{dis}Q_{sew} - C_{soin}Q_{so}}{Q_{sew}} \quad (9)$$

ここに、 C_{com} は合併浄化槽放出濃度（mg/m³）、 L_{pcom} は合併浄化槽原単位（mg/d. person）、 Q_{sew} は1人1日当たりの汚水放出量（m³/d. person）、 C_{ag} は農業下水道放出濃度（mg/m³）、 L_{pag} は農業下水道原単位（mg/d. person）、 C_{so} は単独浄化槽放出濃度（mg/m³）、 L_{pso} は単独浄化槽原単位（mg/d. person）、 C_{dis} は下水処理場流入濃度（mg/m³）、 C_{soin} は単独浄化槽流入濃度（mg/m³）、 Q_{so} は1人1日当たりの尿尿放出量（0.045m³）、である。

面源としては、土地利用毎に原単位を与え、各メッシュの原単位を土地利用の面積率で求める。すなわち、

$$L_{np} = \frac{\sum L_{npu} A_u}{A} \quad (10)$$

である。ただし、 L_{np} は面源由来の汚濁物質負荷投入原単位（mg/m²day）、 L_{npu} は土地利用 u での面源由来の汚濁物質負荷投入原単位（mg/m²day）、 A_u は土地利用 u の面積（m²）、 A はメッシュ面積（m²）、である。

さて、面源由来の堆積物の掃流量 L_{swp} （mg/h）は、 Q_h の2乗に比例するものとする、

$$L_{swp} = k_{wnp} P_{np} Q_h^2 A \quad (11)$$

となる。ここに、 Q_h は水平流出高（m/h）、 k_{wnp} は面源由来の掃流係数（h/m²）、 P_{np} ：面源由来の堆積汚濁負荷物質質量（mg/m²）、と表すことができる³⁾。堆積物が掃流すると、隣接する媒体に供給されるものとする。また、流出要素 v からの流出負荷量と流出要素 w から v への流入負荷量は、

$$L_{vout} = \sum C_v Q_{out} A \quad (13)$$

$$L_{vin} = \sum (C_w Q_{in} A + L_{swpw}) \quad (14)$$

となる。なお、 C_v は要素 v の汚濁物質濃度（mg/m³）、 Q_{out} は要素 v からの流出高（m/h）、 Q_{in} は要素 w からの流出高（m/h）、である。堆積、掃流、浸透、蓄積、溶脱などの汚濁物質の挙動は、従来より各過程で定式化されているので、ここでは省略する。

水域に流入した有機物質（例えば、COD、BOD）は、生物学的分解、沈殿、吸着などの作用により減少することになり、これを河川の自浄作用と呼ぶ。汚濁物質の減少を次の1次減少反応式で近似した場合、その減少速度係数を自浄係数といい、河川内水質濃度（mg/m³）は

$$CR(t) = CR(0)e^{-kG} \quad (15)$$

となる。ただし、 t は時間 (day)、 G は速度係数 (自浄係数) (1/day)、である。自浄係数は河川の状況、汚濁源の状況によって大きく変化し、0.05～10 (1/day) の範囲のものが実測されている。河川水中での有機物質の減少は生物学的な分解など有機物質の減少に応じて水中のD0 (溶存酸素) を消費するものと、沈殿などD0を消費しないものに分けられるが、室内実験や実河川での測定によるパラメータ同定が不可欠である。

4. 実流域での適用と考察

(1) シミュレーション結果

メッシュ化された流域と河道庄内川網を図-4に示す。国土数値情報やその他の水利用地点を記してある。

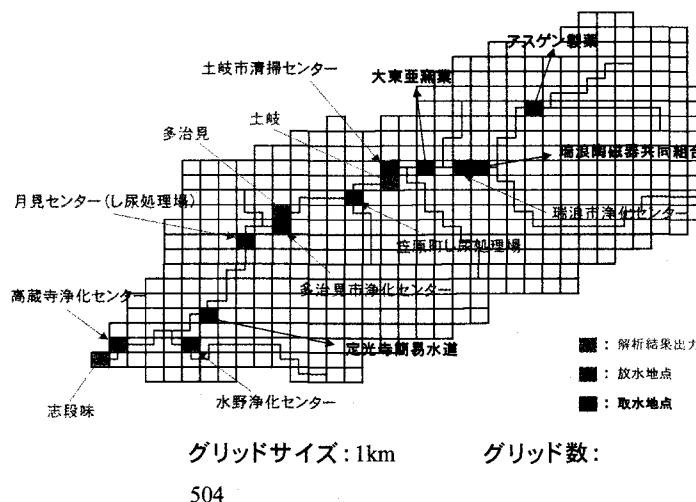


図-4 庄内川流域における適用流域メッシュ

図-5は、ある洪水での河川流量の出力例で、流域最下流地点での観測値との比較結果である。10分単位で通年での解析のあと、洪水流量を比較するために特定の個所を取り出したものである。高水、低水を連続して計算し常に土壌水分を求めており、個別の洪水時の初期水分量を考慮する必要は無く、水文学的な流域状態の連続性を確保できる。図-6は、同洪水における流域内と河川での水分を表したものである。全ての時間での空間分布を表示するのは記憶量が膨大で非効率であるが、低水時の乾燥地域、高水時の氾濫(危険)地域などの把握が容易になる。図-7は最下流地点での河川のBOD濃度である。高水によるフラッシュ効果や低減部での水質変動が理解できる。これも空間分布として捕らえることがで

き、人口密集地域や污水处理場近くでの高濃度が把握できているとともに、水質悪化地点や汚濁物質発生地点の特定が可能となる。

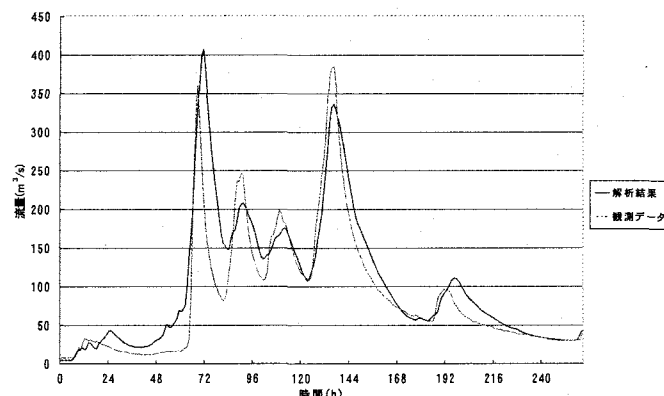


図-5 洪水時における河道最下流端での流量

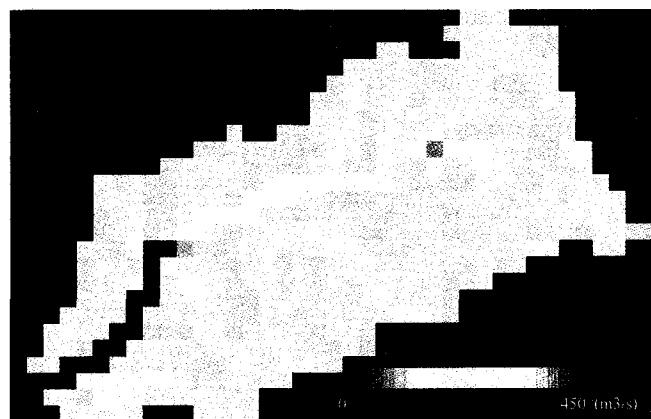


図-6 流域及び河川流量の空間分布

図-8も同じく河川水温の時空間表示である。2月と8月の平均値を示したが、季節的な水温変動による水生生態系への影響を想像できる。今後、リアルタイムでの水質情報による汚染源の特定化や河川水深・幅がもたらす水生生物の生存特性、および、酸性雨などの大気との連携のモデル化を図り、詳細な流域環境評価を行う必要がある。こうした解析出力の時空間的連続性は、流域内での危険地域の把握が容易になり、総合流域管理における施設の配置・規模決定への重要な指標となろう。

(2) 温暖化シナリオでの適用

地球温暖化の影響評価を検討するため、気温2度上昇の場合の水温変化を求めた。日照時間、降水量、土地利用などは変化せず、蒸発散や流出、水利用過程での熱収支だけの変動である。表-1は河川系での代表的地点での結果である。積雪・融雪は変動し

ているはずであるが、対象流域では、あまり現れていなかった。地表面では、8月など、光波長の影響が大きい期間で摂氏2度程度の変化が見られた。体感温度や植生への影響を考えると大きな値である。降水の温度は地表気温と同じとしているので全期間に渡って若干増加しているが、水田、河川での水温は影響が小さいく、潜熱の作用で却って低下しているようである。

表-1 温暖化シナリオの下での影響評価

	Present average (℃)	Climate change (℃)	Changed volume (℃)
Surface	17.92	19.30	+1.32
Precipitation	11.66	12.52	+0.85
Paddy field	22.02	19.95	-2.07
River discharge			
at Toki	16.67	17.54	+0.87
at Tajimi	16.48	17.27	+0.79
at Shidami	16.21	16.83	+0.62

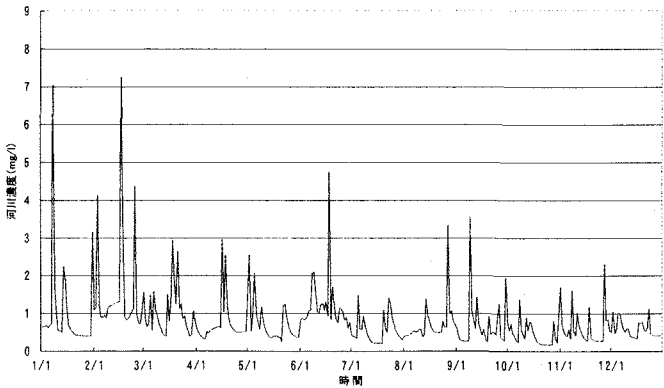
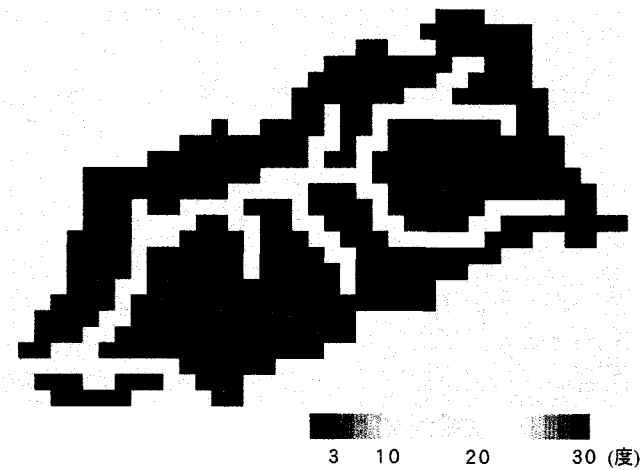
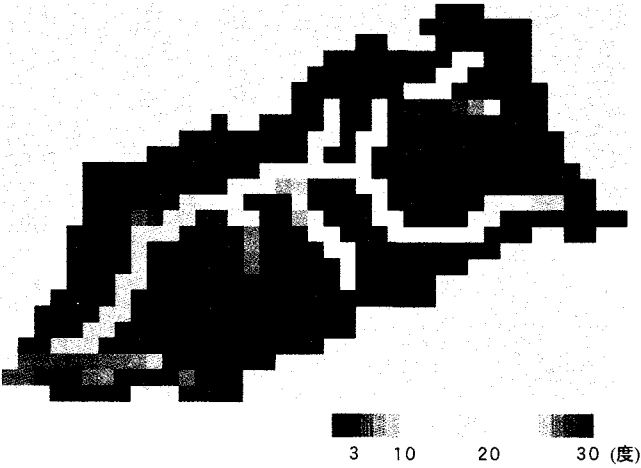


図-7 河川内最下流地点での BOD 濃度



(a) 2月の水温



(b) 8月の水温

図-8 河川水温の空間分布

5. 結語

本章では、健全な水循環や持続可能な流域水管理の必要性が望まれている水資源問題に対して、河川からみた水資源分布と流域としての環境情報把握手法をまとめたものである。総合的流域管理手順になるまでには、評価項目の追加や集約化など、多くの課題を残している。今後、

- 1) 大気-水域-地下を含んだ3次元シミュレーションモデルの開発
- 2) 水循環と水利用の相互関係や地球規模での気候変動を考慮しうる水循環管理モデルの開発
- 3) 森林、都市、農地などでの詳細な水利用形態の再現、あるいは、対象項目にあったメッシュサイズの変更可能性
- 4) 河川内と河川近傍での水量、水質をベースにした水域生態系モデルの導入
- 5) 親水性、河川景観を含む総合的な流域環境評価手順の提案

を行いたい。

参考文献

1) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発、京都大学防災研究所年報、第41号B-2、1998、119-134
2) 新井正・西沢利栄：水文学講座 10 水温論、共立出版
3) 国松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析、技報堂出版、1990、166-171

(2002. 4. 15 受付)