

## ハイブリッド型最適化による流域総合管理に関する基礎的研究

小尻 利治・寺村 和久\*

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

本研究では、「水循環の健全性」を確立に向けて、流域に発生する諸問題の時間的、空間的広がりを考慮し、流量、水質だけでなく、生態系や親水性、景観といった新しい要素を踏まえた総合的な流域管理概念を提案しようとするものである。物質循環に関する分布型流域シミュレーション技術と最適化手法を結合したハイブリッド型流域管理計画手順を、遺伝的アルゴリズムを用いて定式化するとともに、実流域に適用することにより、手法の有効性、発展性を検証しようというものである

キーワード：水循環の健全性, ファジィ推論, GA, ハイブリッド

### 1. 序論

現在、世界各国で地球環境に対する関心は非常に高くなっており、日本においても人々の環境問題に対する意識の高まりから、適切な水環境の整備、および水循環の見直しがなされている。国土庁（現国土交通省）では、個々の水問題に個別に対応するのではなく、水循環を通じて、水利用、土地利用、経済活動などあらゆる分野に相互関係を意識し、「水循環の健全性」をテーマに検討が進められている。この健全性とは、平常時の水質、水量が良好に維持される事を目標としている。さらに、わが国の経済社会の成熟度の高まりにつれて国民の価値観が多様化してきており、様々なニーズの発生の結果、ただ単に生活の利便性を追求するだけでなく、自然とのふれ合い、といった項目についても大きな関心が寄せられるようになってきている。

従来、流域の管理とは、治水では高水時の河川流量を、利水では低水時の流量を対象として進められていた。もっとも、近年では水質、生態系、環境を考慮するようになってきている。しかし、流域で生じる様々な問題に対して、個々に対応を取っているだけ

で流域全体をどのように扱うのか、という基本概念が明確にされていない。

以上のような問題を改善するためには、流域管理という新しい概念を新しく設定し、時間的・空間的広がりを持った世界で現状を評価し、どの問題が最重要改善点であるかを決定し、それに対する改善案を示す事が重要となってくる。一方、水循環に関する流域シミュレーション技術の分野では、メッシュで構成された分布型モデルが開発されるようになり、詳細な水量、水質の時空間的な動態をとらえることができるようになってきた。

こうした背景のもと、本研究では、時・空間的な解析能力を持った流域モデルを利用し、水量、水質という意味で総合的な流域管理システムを提案しようというものである。

### 2. 流域管理概念の提案

#### 2.1 “流域管理”の定義

流域の管理を考えて行く上で、まず「管理」という言葉の持つ意味を定義する必要がある。従来の河川流域管理の実態を見ると、「管理」という言葉は、

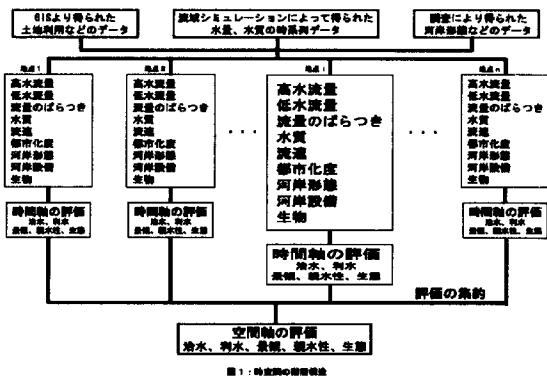


Fig. 1 時空間の把握構造

問題が起こった時の対処、つまり個々の問題が生じたときにどのような対策をとるかを目的にしていると言っても過言ではない。しかし、他にも重要な要素は存在する。例えば、汚水処理場、ゴミ処理場の適切な配置や、生態系、親水性、景観といった流域の環境である。そこで本研究では、前者を「狭義の流域管理」とし、後者を「広義の流域管理」とする。ウォータープラン21では、健全な水循環系の構築に向けて、持続的水利用システムの構築、水環境の保全と整備、水文化の回復と方式をうたっており、まさに河川流域の望ましい発展を目指そうとしている。流域管理を再定義すると、「流域を全体としてとらえ、水量、水質、生態（環境を含む）を同時に評価し、他の流域計画、地域計画と調和のとれた状態を達成すること」となる。そのためには、時空間的、多目的な評価関数の設定とその評価関数を最適化しうる方法論の提案が必要である。そこで、以下に流域管理としてとらえるポイントを挙げる。

- (i) 河川を中心とした面的広がりを持つ地域の水量、水質、生態（環境）等の総合的評価
- (ii) 評価が悪い項目に関しては、最良の方法で改善できるシステム、すなわち効率的なリスクマネジメントの実施システム
- (iii) より多くの目的、あるいは基準を組み込み、社会生活に豊かさを感じる状況を表現しうること（親水性・景観等）

## 2.2 流域管理における評価視点

上述で定義した流域管理を行なうには、時間的・空間的側面からの評価が必要であり、以下のようにまとめることができる。また、概念図を Fig1 に示す。(i)：時間軸

- 洪水氾濫が長期間にわたって引かない場合
- 汚染物質の残留など長期にわたって影響を与え

続ける場合

(ii)：空間軸

- 工場から排出される汚染物質などが空間的に広がっていく場合
- 渇水時の水不足・断水が流域全体に及ぶ場合

(iii)：強度軸

- 洪水流量水位の大小で破堤の危険度が異なる場合
- 水量、水質のようにわずかな変化では直接的には社会生活に影響を及ぼさないが、大きな変化では生命に危険を感じる場合

このように、流域で生じる問題には様々な要素が存在し、現実にかかる諸問題はその要素が複雑に絡み合って構成されているので、それぞれの評価軸においての単純な比較では問題の持つ本来の重要性を把握することは不可能である。

## 2.3 ハイブリッド型流域管理計画の達成

流域の現状、あるいは、望ましい状況が評価されるとそれを改善する、あるいは達成する手順が必要となる。従来の河川管理計画や水資源計画では、流域をの動態を線形関数で表現し、費用最小化、あるいは便益最大化の線形最適化問題として定式化されていた。しかし、本流域管理概念では流域の状況を時空間的に把握する必要があり、非線形モデルの導入が必要不可欠である。一方、目的の達成のために最適化を行なうこととなる。故に、分布型の流域シミュレーションと望ましい状況に向かう最適化手法（ここではGAを用いる）との結合を行なうという意味で本手順をハイブリッド型流域管理計画と呼ぶことにする。

## 3. ファジイ理論を用いた流域環境評価手法

### 3.1 流域環境評価手順

#### (1) 評価項目の設定

現地での流域環境観測や分布型の流域シミュレーションでは、水量、水質、親水性、景観等の多項目で時・空間的に評価を行なうことができる。また、時間軸・空間軸それぞれで評価値を算出する際、単純には比較できない複数の項目を評価するため、また、2値論理的に「良い」か「悪い」という評価をせず、柔軟な流域管理を行なうため、ファジイ理論を導入し、メンバーシップ関数を用いて、ファジイグレードとして評価値を算出することとする。ファジイグ

レードとして扱うので、

$$EP(i) = \begin{cases} EP(i) & (0 \leq EP(i) \leq 1) \\ 1 & (1 < EP(i)) \end{cases} \quad \dots (1)$$

ただし  $EP(i)$  は、 $i$  地点での評価値として、評価値は 0 から 1 の間の値をとるようにする。それらを項目別に整理すると、以下ようになる。

**高水流量** ; 都市内水路や河川は、流域に設計されている計画確率年の洪水を安全に流すように改修され、またはされつつある。従って、堤防等の整備が未完成のところも多く、また、部分流域での開発の結果、一部の河道への流入量が増加し、部分的に氾濫することも想定される。こうした状況の下では、高水流量に関する危険度評価式としては、

$$FL(i) = Qt_{max}(i)/Qt_{flst}(i) \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。

ただし、 $Qt_{max}(i)$  は、 $i$  地点でのピーク流量、 $Qt_{flst}(i)$  は、 $i$  地点での洪水流量に関する基準流量（計画高水流量）である。

**低水流量** : 水利用の観点から、流域には利用できる最低水量が設定されており、それを確保すべく、流量の調整や新たな水源確保対策がとられている。しかし、流域の開発による土地利用状況の変化、生活習慣の変化などにより、流域の水需要には変化が生じるものと思われる。このような状況下では、低水流量に関する式は以下のようになる。

$$DR(i) = Qt_{drst}(i)/Qt_{min}(i) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $DR(i)$  は、 $i$  地点での濁水に関する評価値、 $Qt_{min}(i)$  は、 $i$  地点での最小流量、 $Qt_{drst}(i)$  は、 $i$  地点での低水流量に関する基準流量である。

**流量のばらつき** : 日本の国土は急峻な地形をしており、河川流量は、洪水時の流量と通常時の流量には、大きな開きがある。しかし、水利用、治水面の両面で考えると、あまりにも大きなばらつきは、浸食や河床変動、生態系の変化などの問題を生じることとなる。そこで、評価項目の一つとし、以下のように定式化する。

$$ST(i) = (Qt_{max}(i) - Qt_{min}(i)) / (Qt_{flst}(i) - Qt_{drst}(i)) \quad \dots (4)$$

**水質** : 流域での水利用のため、また環境保全のために、生活・産業排水を処理場で浄化したり、危険物質の排出を規制したりするなどが行なわれている。しかし、今後の流域の発展の中で土地利

用の変化により新たな汚染源が発生すると、生活環境として好ましくない部分も発生することとなる。そこで、水質に関する式は以下のようになる。

$$PO(i, m) = Ql_{max}(i, m)/Ql_{st}(i, m) \quad \dots (5)$$

ただし、 $PO(i, m)$  は、 $i$  地点での汚染物質  $m$ (BOD など) による水質汚染に関する評価値、 $Ql_{max}(i, m)$  は、 $i$  地点での汚染物質  $m$  のピーク濃度、 $Ql_{st}(i, m)$  は、 $i$  地点での汚染物質  $m$  に関する環境基準値である。

**景観** : 数値として得られる流量や水質などの評価項目と違い、景観に関する評価項目は、明確な評価基準が定まっていなくて、評価を算出することが困難である。よって、評価を導出する基準を設定し、その中で以下の仮定をおくこととする。

- 景観評価地点において、河川周囲が都市化が進んでいけば、人工的に手を加えられた河川でも周囲の風景と調和し、河川景観の評価としては高くなる。
- 逆に、景観評価地点の周囲が都市化が進んでいない自然的な風景であれば、人工的に手を加えられた河川は周囲と調和せず、景観評価は低くなる。河川も自然的であれば、周囲と調和し、景観評価は高くなる。

そのうえで、景観の評価導出式は以下のようになる。

$$VW(i) = f_v(UBNGR(i), RS(i)) \quad \dots (6)$$

ここに、 $UBNGR(i)$  は、 $i$  地点の都市化度、 $RS(i)$  は、 $i$  地点の河岸携帯を表す関数、 $f_v$  は、各種評価値より景観を表す関数である。

**生態系** : 流域の生態系は流域環境保全と言う観点から、重要な要素となってくる。しかし、流域の発展にともなう汚染物質の増加や都市化の進展による環境の変化などにより、生態系は変化が予想され、評価項目を以下のように定義することができる。

$$EC(i) = f_e(SP_1(i), SP_2(i), \dots, SP_n(i)), (ql_{a_1}(i), ql_{a_2}(i), \dots, ql_{a_n}(i)) \quad \dots (7)$$

ただし、 $SP_l(i)$ ( $l=1, 2, \dots, n$ ) は、 $i$  地点での生物  $l$  の個体数、 $ql_{a_l}(i)$ ( $l=1, 2, \dots, n$ ) は、 $i$  地点での生物  $l$  に関する必要個体数、 $f_e$  は、化学物質濃度等による生物個体数を表す関数である。

**親水** : 近年では、環境の保全や、流域の安全性の確

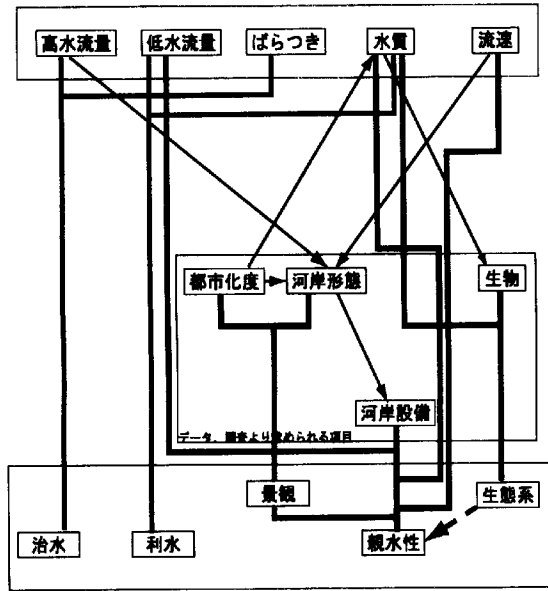


Fig. 2 評価項目の階層構造

保だけでなく、より親しみやすい水環境の整備を求める声が高まっており、今後、河岸の整備や河川敷の施設の充実などが進むと思われる。この項目に関して、評価項目として以下のように定義することができよう。

$$FM(i) = f_f(FC(i), BK(i), EC(i), AC(i)) \quad \dots \dots \quad (8)$$

ただし、 $FC(i)$  は、 $i$  地点での河川敷施設に関する評価値、 $BK(i)$  は、 $i$  地点での河岸形態に関する評価値、 $AC(i)$  は、 $i$  地点のアクセスに関する評価値、 $f_f$  は、各種評価値より親水性を表す関数、 $Qt(i)$  は、 $i$  地点での流量に関する評価値、 $Ql(i)$  は、 $i$  地点の水質に関する評価値である。

そして、以上の評価項目の関係を図にすると、Fig2 のように整理することができる。

## (2) 時間、空間、目的間の集約方法

流域の問題は、時間的・空間的な広がりを持っており、地点別には前節のように定義される。それらを流域として評価するには、集約が必要であり、最悪値、最悪値の出現回数、基準値を越える地域分布の3点から検討しよう。

**最悪値**：最悪値は各評価がピークを用いて定式化されているそのものである。言い替えると、各地点において、時系列で求められる評価値の時間軸からの集約である。ある項目の評価値が時間、地点別に  $EP(i, t)$  で表されると地点  $i$  最悪

値は、以下のように定式化できる。

$$EP_{max}(i) = \max(EP(i, t)) \quad \dots \dots \quad (9)$$

**最悪値の出現回数**：これは、ピーク値が1回の場合と複数回の場合の相違を意味している。頻度が少ない場合には、流量の回復能力ということもできる。適用に用いる流域シミュレーションの関係よりメッシュ別に計算されているので、メッシュでの頻度（空間的でない）と限定すると、出現回数は、

$$EP_{COUNT}(i) = COUNT(EP(i, t) | EP_{max}(i)) \quad (10)$$

となる。ここに、 $COUNT()$  は出現回数を数える関数である。

**基準値を越える分布**：これは、時間軸での処理が終った空間軸の問題であり、メッシュの集約といえることができる。従って、流域での最悪値は、

$$ESB = \max(EP_{max}(i)) \quad \dots \dots \quad (11)$$

で求められる。最悪値の出現回数より基準値を越える場合の数で評価するとみなし、ここでは空間分布を算出する。すなわち、基準値でメッシュの環境評価状況を (0 or 1) のように2値化し、その個数で決定することになる。

$$ES_{COUNT} = COUNT(EPb(i)) \quad \dots \quad (12)$$

ここに、 $ES_{COUNT}$  は発生カウント数であるので、流域としては、

$$ESC = ES_{COUNT} / N_{mesh} \quad \dots \dots \quad (13)$$

で評価される。ここに、 $N_{mesh}$  は、対象流域の全メッシュ数である。隣接状況は表現できないが、評価が悪い地域の広がりや点在の程度を把握できるであろう。

**目的間の集約**：前出の評価項目は単体でなく、いくつかの要素を組合わせて、利水、治水などの目的別での評価に集約する。例として、利水面の評価を行なう。評価項目としては、低水、水質の2項目を使用し、水質の評価対象汚染物質はBODとする。各評価項目は、メンバーシップ関数によって評価されており、後述の推論ルールに従って、 $j$  番目の推論ルールによる評価は、ファジイ積により次式で表される。

$$FG_j(i) = \min(h_{dr,j}(DR(i)), h_{po,j}(PO_{BOD}(i))) \quad \dots \dots \quad (14)$$

$$EU_j(i) = h_{EVA}(FG_j(i)) \quad (15)$$

ただし、 $FG_j(i)$  は、推論ルール  $j$  で算出されるファジイグレード、 $EU_j(i)$  は、算出される評価値、 $h_{dr,j}$

は、低水のメンバーシップ関数、 $h_{po,j}$  は、水質のメンバーシップ関数、 $h_{EVA}$  は、評価値のメンバーシップ関数である。

その結果、流域評価としては、評価項目のファジイ積によって与えられる。

#### 4. GAによる流域管理計画の策定

##### 4.1 流域管理計画の策定

###### (1) 最適化問題としての定義

流域の現状についての評価が行われると、基準値を満たさない、もしくは低い評価が算出された問題点に対して、または、将来目標にしたい評価値に対して対策を立てていく必要がある。この計画をたてる際に、基準値を満たすように、改善するためには、水利用（取水、排水）施設の最適配置を決める必要がある。更に流域開発に際しても、都市化や施設建設による影響を適切に評価し、最適計画を立案することが必要である。また、現実の施設建設・管理においては使用できる予算に限度があるので、費用、改善しなければならぬ物質質量という制約条件のもとでの最適化問題として以下のように定式化されよう。

$$\text{maximize } E(x_1, x_2, \dots, x_m) \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{subject to } BUD \geq C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (17)$$

$$C_1 = K_{11}x_1 + K_{12}x_2 + \dots + K_{1n}x_n$$

$$C_2 = K_{21}x_1 + K_{22}x_2 + \dots + K_{2n}x_n$$

$$\vdots \dots\dots\dots (18)$$

$$C_m = K_{m1}x_1 + K_{m2}x_2 + \dots + K_{mn}x_n$$

ただし、 $E(x_1, x_2, \dots, x_m)$  は、流域の環境適応度、 $x_1, x_2, \dots, x_n$  は、配置する施設の位置、規模、能力を表す度数、 $BUD$  は、使用可能な予算、 $C_1, C_2, \dots, C_m$  は、土地費・設備費など用途別費用、 $K_{11}, K_{12}, \dots, K_{mn}$  は、費用係数である。

###### (2) 最適化手法の選択

上式の最適化手法では、施設は、“存在する”か“存在しない”のどちらかであり、その中間の値は存在しないので、整数計画法として扱われる。整数計画法には、分枝限定法など数種類の解法があるが、組合せをすべて検証するような解法が一般的で、施設の配置・規模・能力といった要素も含めると、膨大な組合せを考慮することが必要となってくる。そこで、広い探索範囲を持ち、できるだけ多くの場合を想定できること、なおかつ局所解に陥ることが少なく最適解にたどり着くことのできるという視点より、遺

伝的アルゴリズムの導入をはかる。遺伝的アルゴリズムの内容は、次節で述べることとし、その適用手順をまとめると以下ようになる。

- (i) 流域シミュレーションによる評価結果より、施設配置対象とする地点を設定する。
- (ii) 計画予算を設定する。
- (iii) 施設の規模・能力によって費用を設定する。
- (iv) GAにより最適化を行ない、配置する施設の規模・能力を決定する。

#### 5. 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) の概要

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GA) は、生物進化（選択淘汰、突然変異）の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる。構造・操作は比較的単純であり、またシミュレーションに要する時間も短い。しかも最急降下法などの従来の手法に比べ、より広い探索範囲をもつ事ができ、局所解に陥ることが少ないという利点を持つ。

##### (3) GAの手順

GAは、計算機上に仮想環境を作り、その中で、遺伝子情報を持つ個体として存在する染色体 (chromosome) が、その形質によって算定される環境に対する適応度に応じて世代交代していくというものである。以下にその手順を示す。

- (i) 初期集団の発生
- (ii) 初期集団の適応度算定
- (iii) 遺伝的操作 (genetic operation) による世代交代
- (iv) 新たな世代の適応度算定

(iii) の遺伝的操作と (iv) の新たな世代の適応度算定の部分が終了条件が満たされるまでのループとなる。

##### (4) 初期集団と適応度

初期集団は、乱数を用いてランダムに決定される。ここで決定した個体 (individual) 数 (population size) は、通常固定値をとり、世代交代の際にある個体が失われると、何らかの手段で補充される。また、各個体は、その染色体を見てみると、その形質を決定する配列で表現されたコードである遺伝子 (gene) が存在し、それらの組み合わせパターンとして遺伝子型 (genotype) と分割できる。遺伝子は、そのデータ配列により、環境に対する適応度という数値を持っており、遺伝子の組み合わせにより存在する染色体 (chromosome) は、全体としての適応度を持つこと

になる。そして、世代交代の際、適応度に応じて次世代に生き残る確率が算出される。

### (5) 世代交代操作 (genetic operation)

GAにおける特徴的な操作であり、淘汰・増殖、交叉、突然変異の3種類がある。

**淘汰・増殖 (selection):** 個体の持つ適応度により次世代に生き残る確率を算定し、その生存確率によって世代交代時にある個体が消えてしまうことを淘汰と呼ぶ。淘汰により失われた個体を、生き残った個体のうち、適応度の高いもので補充することを増殖という。適応度から生存確率を求める際、適応度をそのまま生存確率にする場合と、ある関数によって適応度を生存確率に変換する場合があります、後者の操作をスケールリング (scaling) という。

**交叉 (crossover):** 次世代を作り出す時に、ある一定の確率 (交叉率:crossover ratio) で、旧世代から任意に2個体を選んで親個体とし、親個体の遺伝子を組替えることにより次世代に2個体作り出すことを交叉という。交叉を行うことにより、親の持つ優れた (適応度の高い) 資質を受け継ぐことができ、探索する上において飛躍的な前進を遂げることができる。

**突然変異 (mutation):** 遺伝子の情報のある一定の確率 (突然変異率:mutation ratio) で対立遺伝子に書き換える操作を突然変異という。これは、世代交代の途中で、全く新しい探索場所から探索を始めることができ、それにより局所解に陥ることを防ぐことができる。

## 6. 実流域への適用結果と考察

### 6.1 対象流域の概要

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 722m) 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。本研究で流域評価に用いたモデルでは、1km四方のメッシュを用いて、流域を504に分割した。モデルの全体図を、Fig3に示す。メッシュは表面層とA,B,C,D層の4層に分割された地下層から構成されており、流出モデルとしては、小尻・木内らの開

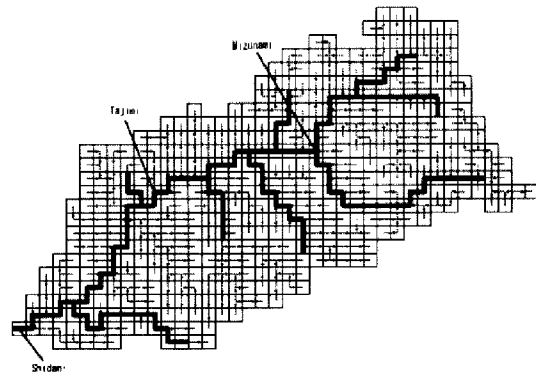


Fig. 3 モデルの全体図

発している Hydro-BEAM モデルを利用しているので、ここでは詳しい説明は行なわない。

### 6.2 流域環境評価の定式化

#### (1) 評価項目とその形式

3で定義した評価項目の内、今回は、高水流量、低水流量、流量のばらつき、水質、都市化度、河岸形態を使用した。河川メッシュに関しては、4つの項目を利用して利水面、治水面、景観での評価を、流域全体としては、水質による流域環境面の評価、という形式で、目的別に評価を出すこととした。また、用いたデータは、1994年、1995年の降雨によるシミュレーション結果 (水量、BOD) である。適用にあたり、基準値の定義を以下のようにした。

**高水流量 :** 計画高水流量は、再現確率年 200 年で設定されているが、全ての治水施設が完成されていないので、他の要素と値を近くするために、再現確率年を 100 年にして、基準流量を求めた。

**低水流量 :** 基底流量をデータから読みとり、低水時流量の基準とした。

**水質 :** BOD を水質の評価対象とした。基準値に関しては、生活環境の保全に関する水質環境基準より、水道として利用できる最低基準である類型Bの基準濃度を使用した。また、ピーク時濃度だけでなく年平均濃度も用いて、両者で評価がどう変わるかを検討した。

**流域環境評価 :** これについても、BOD を水質の評価対象とした。基準値は、河川メッシュに関しては、水質と同じく類型Bを、その他のメッシュに関しては、環境保全に関する最低基準である類型Eの基準濃度を採用した。

#### (2) 推論ルールの設定

利 水 面 ( $DR(i)$ ,  $PO(i, BOD)$ ) 治水面 ( $FL(i), ST(i)$ ) の評価に伴

う対策（計画）を提案するためファジィ推論ルールを設定する。 $DR(i), FL(i)$  に関しては、危険性が高い、中間、低い3通りに、 $PO(i, BOD), ST(i)$  に関しては、危険性が高い、低い2通りに分け、利水、治水ともそれらの組合せで、ルール数は  $3 \times 2 = 6$  とした。なお、それぞれの場合分けの範囲についてだが、「高い」や「低い」などの言葉の持つ幅を考慮し、それぞれの評価項目が「低い」場合、「中間」場合、「高い」場合についてそれぞれ以下のような数値を設定した。対策のメンバーシップ関数の範囲についてだが、それぞれ行う対策について考察した結果、利水面では均等に対策がとられるようにするため、治水面では、堤防を建設するという対策がとられやすいようにするため、それぞれ以下のような数値を設定した。以下にそれぞれの推論ルールを示す。

● 利水面の推論ルール

シナリオ 1 :  $DR(i)$  が高く  $PO(i, BOD)$  も高いなら、水環境が悪いとみなし、その地点からの取水を禁止する。

シナリオ 2 :  $DR(i)$  が中位で  $PO(i, BOD)$  が高いなら、水質が悪いと判断し、処理場の設置を検討する。

シナリオ 3 :  $DR(i)$  が低く  $PO(i, BOD)$  が高いなら、水質が悪いと判断し、処理上の設置を検討する。

シナリオ 4 :  $DR(i)$  が高く  $PO(i, BOD)$  が低いなら、水不足が厳しいとし、その地点からの取水を禁止する。

シナリオ 5 :  $DR(i)$  が中位で  $PO(i, BOD)$  が低いなら、現状のままで良い。

シナリオ 6 :  $DR(i)$  が低く  $PO(i, BOD)$  も低いなら、現状のままで良い。

● 治水面の推論ルール

シナリオ 1 :  $FL(i)$  が高く  $ST(i)$  も高いなら、破堤、氾濫の危険性が高いとし、堤防を建設する。

シナリオ 2 :  $FL(i)$  が中間値ぐらいで  $ST(i)$  が高いなら、浸食、破堤の危険性が高いと判断し、堤防を建設する。

シナリオ 3 :  $FL(i)$  が低く  $ST(i)$  が高いなら、現状のままで良い。

シナリオ 4 :  $FL(i)$  が高く  $ST(i)$  が低いなら、氾濫の危険性が高いとみなし、堤防を建設する。

シナリオ 5 :  $FL(i)$  が中間値ぐらいで  $ST(i)$  が低いなら、現状のままで良い。

シナリオ 6 :  $FL(i)$  が低く  $ST(i)$  も低いなら、

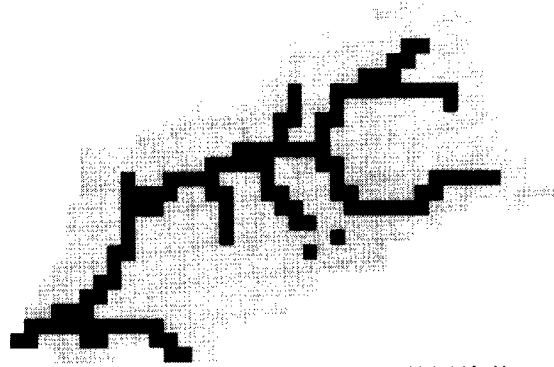


Fig. 4 BOD 濃度平均による河川利水評価値

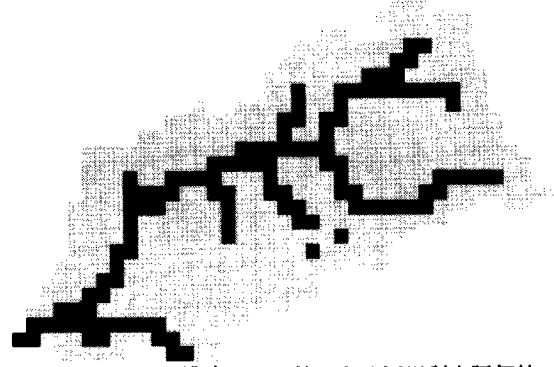


Fig. 5 BOD 濃度ピーク値による河川利水評価値

現状のままで良い。

- 景観の評価ルール 前述の仮定に従い評価する。都市化度については、評価を行うメッシュにおいて、都市域が占める割合を都市化度とし、河岸形態については、現地調査を行い、(1) 自然形態、(2) 一般コンクリート護岸形態、(3) 景観コンクリート護岸形態、(4) 複断面構造形態、と4種類に分類した。そして、それらの組み合わせによって景観の評価を行った。
- 流域環境評価の評価ルール 河川メッシュ、その他のメッシュともに、環境指数を設定し、1日の濃度について指数を計算し、それを1年間加算し、平均をとったもので評価する。以上のファジィメンバーシップ関数に流域の評価値を入れ、ファジィ推論により対策を求めた。

(3) 現状の評価結果

利水面からの評価 : 河川メッシュ全体では、最高濃度を用いると評価値は0.373で、水利用に関しては、問題が全くないわけではないが、処理場の建設が必要であるとまではいかない、という結果であった。また、平均濃度を用いた評価だと、0.138となり、水利用面ではまず問題は起こらず、現状のままで良いという結果が出た。メッシュそれぞれの空間的評価値の分布を、Fig4, Fig4 に示す。図を見ると、全体の評価ではかなり良い評

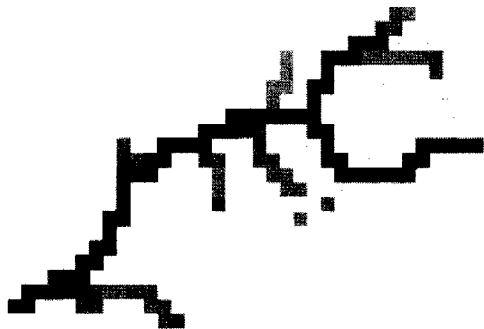


Fig. 6 時間的に集約した河川治水評価値,1994年

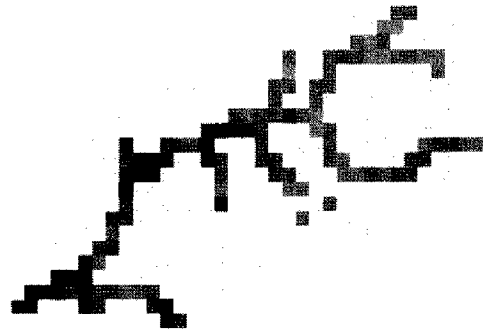


Fig. 8 流域の都市化度

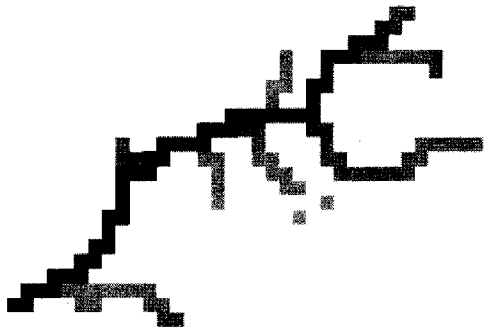


Fig. 7 時間的に集約した河川治水評価値,1995年

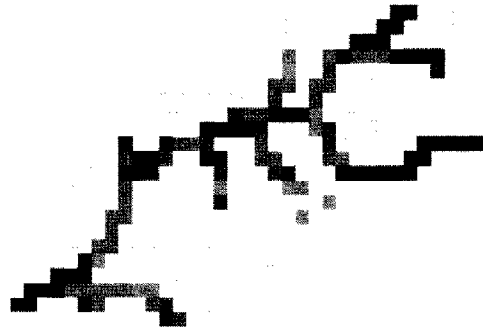


Fig. 9 景観評価の分布

評価結果が出たが、悪い評価の部分が集まって存在しているのが分かる。これらの部分は、実際の地形では、対象流域中流域の上岐市付近と、対象流域下流端の志段味付近である。両地域とも、周辺は都市化が進んでおり、その地域での水利用評価が悪いということは、評価が正しく行なわれたものと思われる。また、最高濃度、平均濃度どちらの評価の分布もほぼ同じ分布を示しており、時間的には同じ傾向であると言える。

**治水面からの評価**：河川メッシュ全体の評価値は、'94年データだと0.588になり、評価は少々悪く堤防建設を検討すべきである、という結果が出た。'95年データだと0.460となり'94年よりも良い結果が出た。利水面と同様に、'94年、'95年の空間的評価値の分布を Fig6, Fig7 に示す。図を見ると、両年とも支流部分の評価は良く、本川部分の評価値は悪くなった。これは、今回低水時の基準に使用した基底流量の決め方に原因があったと思われる。また、'94年の分布の方が'95年の分布よりも評価が悪く、全体の評価値の差と一致している。

**景観評価**：前述の仮定に従い、流域の都市化度の分布および、景観の評価を行った結果を、Fig8, Fig9 に示す。

上流部の、都市化が進行していない地域の評価

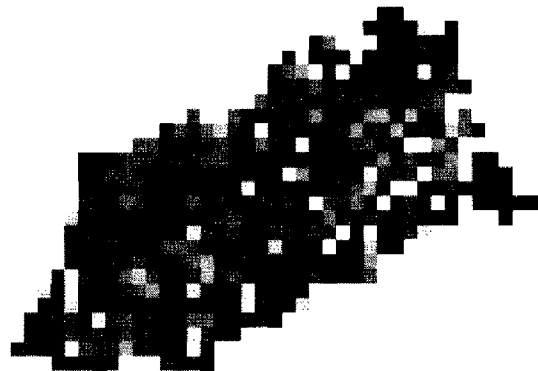


Fig. 10 環境指数の分布

が高いという結果が導出された。これは、上流部において、河岸形態が自然な部分が多く、それが周囲の景観と調和したことが原因であろう。また、最下流部の評価が高い地点では、複断面構造の設備が整った河岸形態と、周辺の都市域とが調和して評価があがったものと思われる。

**流域環境評価**：定義した環境指数により、評価を行ったところ、指数の流域平均は6.253となった。環境指数の空間的分布を Fig10 に示す。この分布からは地域による指数の偏りは見られなかった。河川メッシュの治水評価に対し、流域評価では偏りが無かったのは、河川メッシュの治水評価は低水流量も評価項目に入っているため、悪い評価が出たところがあるのであろう。



更に、流域に分布している BOD が落水線に沿って河川に流れ込んだ結果、高い濃度を示したのであると思われる。

### 6.3 GAによる最適計画の結果

#### (1) 遺伝的操作過程

**施設配置場所の決定**：現状評価の結果、処理場配置場所には、流域環境評価の分布からは、悪い評価地点が集まっているとは判定できなかった。ゆえに、河川メッシュの空間的利水評価分布で悪い評価が出た2地域を処理場配置場所とし、堤防配置場所には、空間的治水評価分布で悪い評価が出た3地域を堤防配置場所とした。また、全体の戦略としては、エリート保存型戦略を拡張して適用した。この方法を採用することにより、適応度の上位3個体を保存していくこととした。

**個体数の決定、初期集団の発生**：1世代の個体数は50個とし、初期集団は乱数を用いてランダムに発生させた。

**制約条件の算定**：計画全体の予算、処理場、堤防建設にかかる費用を資料よりモデル化して設定した。ただし、対象流域での現実の値は入手することが出来なかったため、解の反応を確認するために、適切と思われる値を使用した。ここで、使用できる予算を3通り考えた。

**適応度の算定**：処理場部分、堤防部分の遺伝子双方とも、規模、能力（施設）についてそれぞれの規模、能力を有した場合の社会的価値を相対的に任意で数値化し、それを適応度とした。また、それぞれの遺伝子部分の適応度を合計したものを遺伝子全体の適応度としている。また、スケールリングは今回は行なわないこととした。

**選択淘汰**：操作前に50個の個体を適応度順に並び、低い方から10個を淘汰するようにした。

**交叉**：淘汰されなかった40個の個体から10個を選んで5組の親個体を作り、堤防部分の遺伝子と処理場部分の遺伝子の境界での単純交叉とした。つまり、交叉は、毎回発生し、これにより誕生した子個体が淘汰で失われた個体数を補うようにした。

**突然変異**：淘汰、交叉が終了し、個体数が回復してから、突然変異率10%で発生することとした。発生すると、ランダムに突然変異を起こす個体を選択され、その個体のなかの遺伝子のどれかがランダム選択され、適応度が上昇する様に変化する。また、予算120（仮想値とみなし、特に

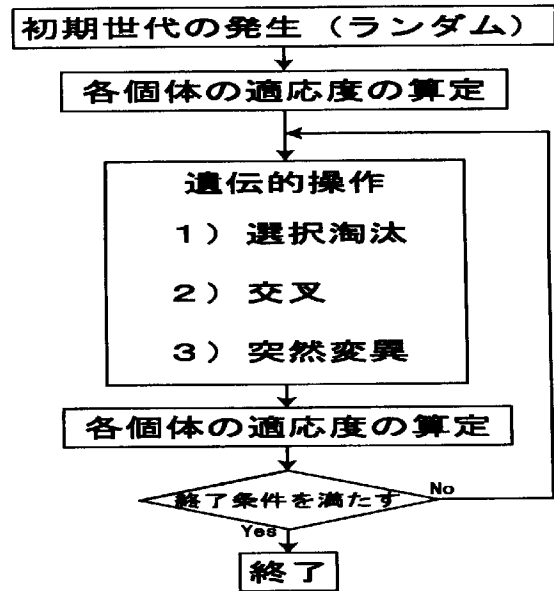


Fig. 11 GA の操作手順

単位をつけない) の場合においては、全ての個体に突然変異が起こる可能性がある時(条件1とする)と、適応度の上位3個体に関しては、突然変異が起らないエリート保存の時(条件2とする)の2つについて行うこととした。

GA の操作手順を、Fig11 に示す。

#### (2) 最適化の結果、及び考察

GA によるシミュレーションの結果、条件1では、44世代目で収束値0.706を、条件2では、135世代目で収束値0.706を得た。収束する過程を見ると、計算時個体集合での平均適応度は単純増加しているのではなく、小幅な増減を繰り返しながら、トータルで見ると増加している。これは、適応度上位の個体は保存されているが、淘汰によって失われた個体を補う際、交叉により適応度の低い個体が作られてしまったのが原因だと思われる。しかしながら、制約条件下での最適解としては、良い結果が得られたものと思われる。次に、2つの条件で、収束値、収束に要した世代が違った事について考察する。条件1の方が収束が早かったのは、突然変異が起こる可能性のある個体が条件2より多く、探索方向が狭くなったためであろう。しかしその結果、局所解に陥ったか、もしくは、適応度上位の遺伝子に突然変異が発生し、より上位の遺伝子に変化した結果、制約条件を超えてしまい死滅してしまったので、条件2の方がより高い収束値を得るという結果になった。そこで、条件2での収束後の個体内容を検証しよう。その中で最大適応度のものを見てみると、以下のようになっ

た。

(200世代目の個体)

[堤防1]	適応度: 0.030
[堤防2]	適応度: 0.200
[堤防3]	適応度: 0.200
[処理場1]	適応度: 0.150
[処理場2]	適応度: 0.150
[全体]	適応度: 0.730
[総費用]	85.05

また、予算制限を変化させた場合について結果を見ると、予算90の場合は90世代目で収束値0.623を、予算80の場合は、34世代目で収束値0.545を得た。この結果と、条件2を比較することで、収束値は予算が減るほど低くなり、また予算が少ないことにより、遺伝子型に変化が無くなり早く収束する、ということが分かる。

### (3) 最適解と流域評価のハイブリッド

最適化で得られた解を流域モデル上に表現して、もう一度流域評価を行なってみる。現状では、流域モデル上に新たな処理場を表現することはできなかったため、堤防による治水面の評価のみを行なうこととした。その結果、堤防を配置した場所の平均評価値は、0.818から0.734、0.903から0.718、0.842から0.720へとそれぞれ評価が良くなった。その空間的評価分布を Fig12, Fig13 に示す。ハイブリッド前の図5-16(b), 図5-17(b)と比較してみても、その特徴が確認できた。しかし、評価値は改善されたものの、大きな変化が見られなかった。それは、治水面での評価が高水流量と流量のばらつきを2つを評価項目としているので、流量調整施設を考慮していない今回の研究では、ハイブリッドによって高水流量に関する評価のみが良くなり、流量のばらつきに関する評価が改善されなかったのが原因であると思われる。

## 7. 結論

最後に本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (i) 水量、水質、生態等を対象にした、総合的な流域管理概念を提案できた。
- (ii) ファジ理論を利用して、流域評価の時間的、空間的な集約を行ない、また目的別での評価を示すことができた。
- (iii) 流域の施設配置最適化問題を GA を用いることで、短時間で有効な最適解を導出することができた。

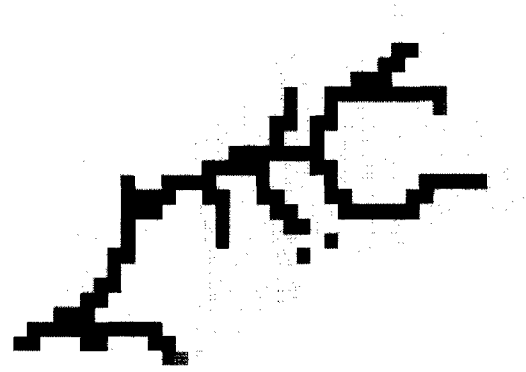


Fig. 12 ハイブリッド後の河川治水評価値,1994年

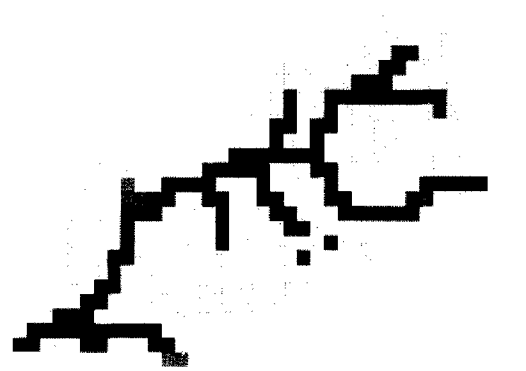


Fig. 13 ハイブリッド後の河川治水評価値,1995年

- (iv) 最適化に際してGAとシミュレーションを結合させることをハイブリッドと呼び、ハイブリッドを実施することで、線形計画と非線形計画を合わせた流域計画を具現化できた。  
一方、今後の課題として以下のことが挙げられる。
- (i) 生態系、親水性、景観の評価項目についての具体的な定式化を行なう。
- (ii) 流域モデル内にダム、貯水池、新たな処理場の配置を表現し、流域の諸問題をすべて考慮する。
- (iii) 最適化を行なう際の遺伝子情報をより一層増やして、より多くの流域の問題に関して最適化を行なう。
- (iv) 河川の評価値分布を利用し、悪い評価の原因を究明し、リスクマネジメントとしての機能を追加する。

今後、より総合的な流域管理の手法となるよう改良していきたい。

## 参考文献

- 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993  
国土庁：新しい全国総合水資源計画、1999  
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, 1998  
水文水資源学会 編集: 水文・水資源ハンドブッ  
ク, 1991  
菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988  
古田均, 小尻利治, 宮本文穂, 秋山孝正, 大野研, 背  
野康英: ファジィ理論の土木工学の応用, 森北出  
版, 1992

## **Integrated river basin management using distributed runoff model and GA**

Toshiharu KOJIRI, and Kazuhisa TERAMURA\*

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

Nowadays, management of water resources is getting more important matter in many country. Also in Japan, Ministry of land, infrastructure and transport proposed "Soundly water circulation" But, nobody takes concrete shape. In this research, we propose comprehensive concept of river basin management, and evaluate with fuzzy method and optimize with genetic algorithm river basin in order to take concrete shape this concept.

**Keywords :** soundness of water cycle, fuzzy method, GA, hybrid