

流域水管理シミュレーションに用いる流量の 作成手法に関する研究

荒巻俊也¹・松尾友矩²

¹正会員 工博 東京大学助手 大学院工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

水文事象の不確定性を考慮しながら流域管理施策の評価を行うために、水収支シミュレーションの入力値となる発生流量について過去のデータを基にして大量に作成する手法を提案した。この手法は、大規模な流域を対象とできるように、対象流域内をいくつかに分割して発生流量を独立に作成するとともに、分割した流域間の発生流量の相互相関性、あるいは自己相関性を考慮に入れられるようになっている。さらに、利根川上流域を対象として作成した発生流量系列を実測データと比較するとともに、この発生流量系列を用いて水収支のシミュレーションを行い、実際の流域の状況と比較した。その結果、相互相関性や自己相関性を考慮に入れることにより発生流量系列の再現性が増していることが確認された。

Key Words : flow data generation, cross-correlativity, water balance simulation, hydrological uncertainty, river basin management

1. はじめに

安定で安全な水源の確保、あるいは良好な河川環境の保全のために、ダムや下水道の建設、都市における雑用水の利用、合併浄化槽の普及などのさまざまな施策が検討されている。これらの施策は、自然環境あるいは人間活動に大きな影響を与えるので、流域内における水や汚濁物質の動きがその施策によってどのように変化していくか、そしてその変化が自然環境あるいは人間活動どのような影響を与えるかについて、シミュレーションにより定量的に評価しておくことが必要である。

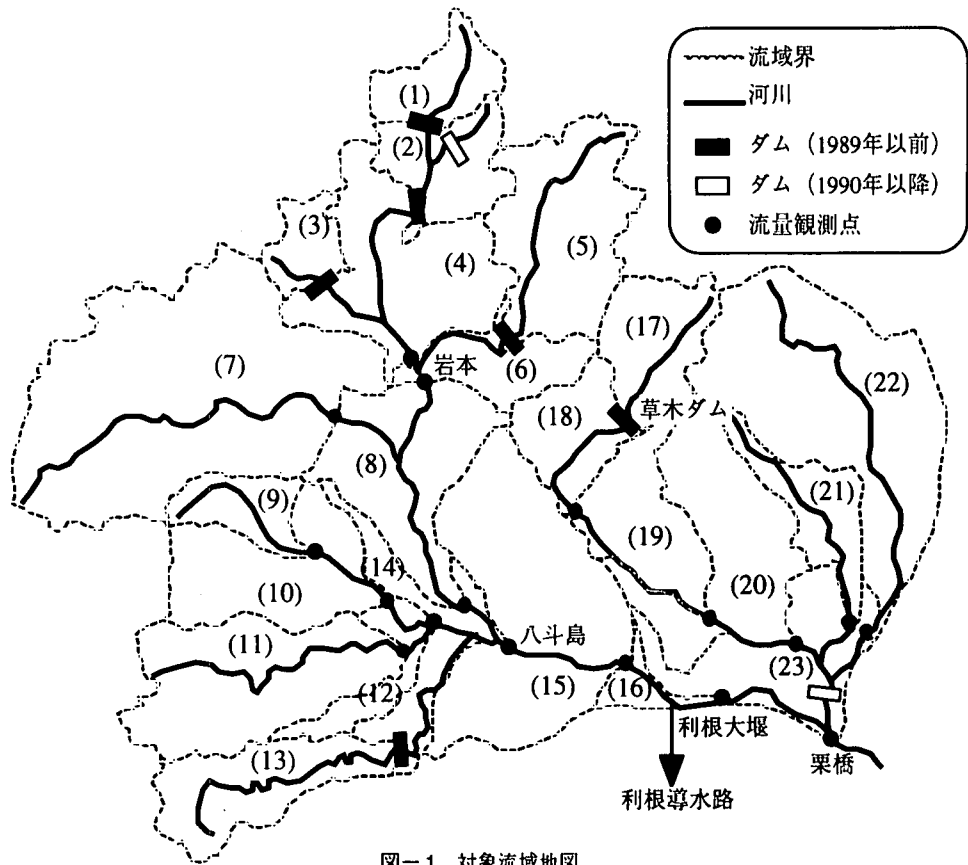
一方、河川流量などの水文事象は年ごとに、あるいは季節ごとにランダムに変動するといった不確定性を有している。そして、この不確定性を考慮した評価を行うという観点から、渇水の生起確率や不足%日、あるいはreliability, resiliency, vulnerability¹⁾などの利水安全度の概念が考えられているが、この概念に基づく評価指標を算出するにあたっては、シミュレーション中の河川流量や水質などについて確率論的な取り扱いが必要である。

しかし、実際の水資源施設計画や水質管理計画においては、10年第1位渇水年などの確率水水量や低水流量などの値が計画評価の基準量として用いられて

おり、このような特定の値を基準とした決定論的な収支バランスでは前述のような利水安全度を評価することはできない。また、水文統計データが測定されている期間も限られており、利水安全度を評価するには不十分な量であると言わざるを得ない。

そこで、実水水量の持つ確率統計的特性を用いてコンピューター上で新たな水水量を作成するという手法が考えられる。池淵ら²⁾は河川流量や水質の確率分布をベクトルやマトリクスを用いて表してシミュレーションを行う方法を提案し、淀川水系への適用を試みている。しかし、この手法では、流域内の各地点で流量の差が大きい流域を対象とした場合や利水の状況が複雑な流域を対象とした場合、マトリクスの数や次元が大きくなって取り扱うデータが膨大になってしまうという問題点がある。

一方、高棹ら³⁾は福岡市域において1万年分の降水量系列を作成してシミュレーションを行い、ダム導入の効果について検討している。この手法ではシミュレーション中でのデータの取り扱いが容易であるが、対象流域内の各地域の降水量が比例関係にあるとして取り扱っているために、流域内で降水量や流量の変動に違いがあるような広い地域を対象とした場合に、実際の状況を十分に再現できないという問題点を残している。



図一 対象流域地図

筆者らは、面積約8,600km²の利根川上流域という大規模な流域を対象として、対象流域を流量観測点によって分割した小流域ごとに1,000年分の流域内からの発生流量を作成して水および汚濁物質収支のシミュレーションに用いることにより、水資源計画および水質管理施策の評価を行ってきた³⁾。さらに、発生流量の流域間である程度の相互相関性や自己相関性があることを考慮した発生流量系列の作成方法の導入を行ってきた。

本研究では、発生流量の自己相関性や相互相関性をその相関の程度に応じて考慮しながら大規模な流域における発生流量系列を作成する手法について提案するとともに、利根川上流域を対象として発生流量の実測値に対する再現性について検討する。また、ここで作成された発生流量系列を用いて水収支のシミュレーションを行い、現状の水収支の再現性について検討する。

2. 対象流域の概要

対象としたのは、図一に示した河口から約130kmの栗橋地点より上流の流域である。流域面積は

8,588km²で利根川流域の1/2を占めている。対象流域内には、1989年の時点で6つの主な利水ダムがあり、1990年以降に2つの新規のダムが供用開始されている。これらのダムは実際に、栗橋地点の基準流量を満たすように統合管理されている。

中流部の利根大堰からは、利根導水路により東京・埼玉方面への導水が行われている。各年の栗橋地点流量と利根導水量（利根大堰から対象流域外への取水量）の和について1978～87年の平均値をとると約84億m³で、そのうち22%が利根大堰から対象流域外へ導水されている。なお、東京都の水道配水量が約17億m³であり、その大部分を利根川水系に依存している。また、10年間で最小が65億m³、最大が111億m³となっており、年によりかなりのばらつきがあることがわかる。

ここでは、17の流量観測地点と1989年時点の6つのダムによって、対象流域全体を図一のように23の小流域に分割する。このように分割された小流域とともに、上水道と下水処理場も水収支のシミュレーションを行ううえでの構成要素となるが、対象流域内には1989年の時点で88の水道事業者（給水人口351万人）、31の下水処理場がある。

3. 発生流量系列の作成手法とその再現性の検討

(1) 相関性を考慮しない発生流量系列の作成手法

高棹ら⁴⁾は降水量系列を作成してシミュレーションに用いていたが、ここで行われる水収支シミュレーションでは流出過程を考慮せずに済むように、流域からの発生流量を作成することにする。このシミュレーションでは利水を目的とした低水管理を対象としていること、対象流域において最上流部から栗橋地点までの流下時間が1～2日⁷⁾であることからシミュレーションは半月単位で行えるので、作成される発生流量も半月単位で作成することとする。

発生流量の作成は、まず1978～87年の10年間の発生流量を河川流量の実測値から推定することから行う。 i 小流域(i 地点とその直上流の地点間での集水域)における1978～87年の発生流量の推定値(ESF_i)は式(1)により算出される。

$$ESF_i = OR_i - \sum_j OR_j + EG_i + \sum_j SW_{ij} - \sum_j SW_{ji} \quad (1)$$

ここで、 OR_i は i 地点での流量の実測値、 EG_i は地下水収支(取水と涵養)の推定値、 SW_{ij} は i 流域から j 流域(i 以外の他流域を j 流域とする)への送水量である。右辺の第二項は i 地点の上流側の流量の和であり、また送水量には導水路を経由したものでなく、上水道や下水道を経由して他流域に送水されたものも含んでいる。

図-2に矢木沢流域(図-1の(1)の流域)の半月発生流量を対数正規確率紙にプロットしたものを示す。ここで示した2例とも直線を当てはめることが可能なことから、これらの発生流量の分布として対数正規分布を仮定することが可能であると言える。対象流域中の多くの小流域では、このように発生流量の分布が対数正規分布に類似した分布となっているため、各小流域からの発生流量が対数正規分布に従うと仮定して、過去の発生流量の実測値から各小流域の月ごとの対数平均(Avg)と対数化された値の標準偏差(Std)を求める。

さらに、1から999までの乱数を発生させてこれを $Rand$ とし、式(2a)、(2b)を用いて発生流量 SF (m^3 /半月)を1,000年分作成する。

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{Rand}{1000} \quad (2a)$$

$$SF = e^{Avg + x \times Std} \quad (2b)$$

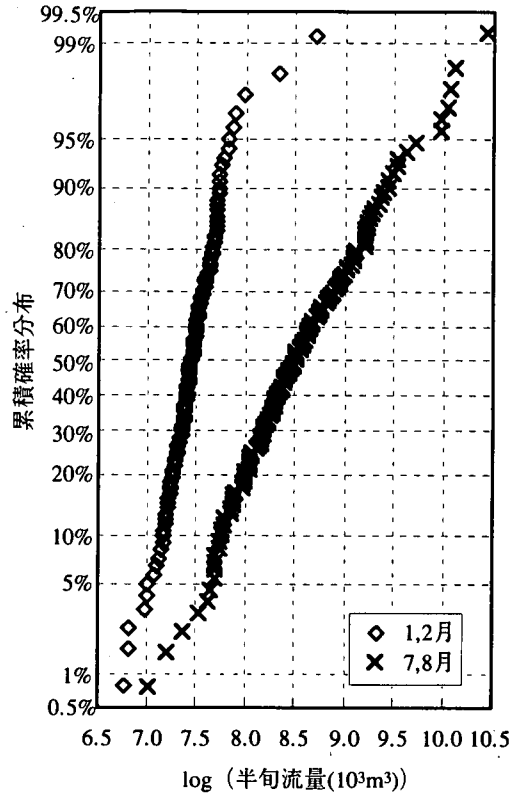


図-2 矢木沢流域における半月発生流量の実測値(1978～87年)の正規確率紙へのプロット

(2) 相互相関性、自己相関性の考慮方法

対象流域内の23小流域間の相互相関係数を計算してみると、253個のうち3個が0.9以上、22個が0.8以上と高い相関性を有しているが、その一方で114個は0.5以下となっている。また、月ごとの23小流域の半月遅れの自己相関係数を計算してみると、276個のうち20個が0.9以上となっている一方で0.5以下のものも30個ある。このように、発生流量は、小流域間において流量の変化が同じような傾向を示すという性質(相互相関性)と、ある半月と次の半月との間で流量は同じような傾向が続くという性質(自己相関性)をある程度持つものと考えられるので、発生流量系列を作成するうえでこれらの相関性をその相関性に応じて考慮する必要があるものと考えられる。

ここでは、 $Rand$ として1から999までの乱数を単純に用いるのではなく、以下のような手順で設定することにより、相関性を考慮している。

- 1) 代表小流域の選出: 他流域との相互相関係数の高い小流域1流域を代表小流域として選出する。なお、ここでは草木ダムの集水域を選んでいる。
- 2) 相互相関係数の設定: ここでは、各小流域と代表小

表-1 各系列の年間発生流量の算術平均と標準偏差

	算術平均 (10^6m^3)	標準偏差 (10^6m^3)	相互相関係数の平均	自己相関係数の平均
実測値	8,492	1,734	0.528	0.665
相関性を考慮せず	8,945	339	0.321	0.313
相互相関性のみ考慮	8,944	867	0.564	0.362
相互相関性・自己相関性ともに考慮	9,059	1,625	0.563	0.497

流域との間の相互相関係数について注目する。上記で選んだ代表小流域との相関係数が高い小流域から順々に相互相関係数を決定していく。ただし、以下の例のような場合は別である。A、B2つの小流域について、A小流域と代表小流域の相関係数が0.9、B小流域と代表小流域の相関係数が0.7、A小流域とB小流域の相関係数が0.8の時、 $0.7 < 0.72 = 0.8 \times 0.9$ となる。このような場合、B小流域の相互相関係数を0.8とし、その対象は代表小流域ではなくA小流域とする。なお、A小流域の相関係数は代表小流域との間で既に決められているため、例のような場合があったとしても、全ての小流域の相互相関係数は、直接あるいは間接的に代表小流域との間で決定される。ただし、他の小流域と負の相関があるよう小流域がある場合は以上の手法は適用できない。

- 3) 代表小流域のRandの決定: 最初の半旬の代表小流域のRandは、プログラムにより発生させた1から999までの乱数をそのまま用いる。
- 4) 他の小流域のRandの決定: 他の小流域については、新たに1から999までの乱数を発生させ、その乱数が相互相関係数の1000倍より小さい値であれば代表小流域のRand(上の例のような場合はA小流域の乱数)をその小流域についても用い、そうでない場合は再び1から999までの乱数を発生させて、その値を用いるようにする。この過程により、代表小流域との相互相関係数が高いような場合は、代表小流域と同じRandの値を用いられる確率が高くなり、相互相関性が考慮されるようになる。これを全ての小流域について行う。
- 5) 次の半旬の代表小流域のRandの決定: 新たに1から999までの乱数を発生させて、その乱数がその月の代表小流域の自己相関係数の1,000倍より小さい値であれば前の半旬で用いられたRandをそのまま用い、そうでない場合は再び1から999までの乱数を発生させて、その値を用いるようにする。この過程により、自己相関係数が高い場合は前の半旬

と同じRandの値が用いられる確率が高くなり、自己相関性が考慮されるようになる。

- 6) 4), 5)の手続きを繰り返して発生流量系列を作成するためのRandを設定していく。

(3) 相互相関性、自己相関性の考慮による再現性への影響

相関性を考慮しなかった場合、相互相関性のみ考慮した場合(代表小流域の自己相関係数を0とする)、相互相関性・自己相関性ともに考慮した場合のそれぞれについて、1,000年分の発生流量系列を作成し、1978～87年の発生流量との比較を行う。

表-1にこれら3種類の系列と1978～87年の年間発生流量の算術平均値と標準偏差および流量を対数化した値について各小流域間の相互相関の平均と、自己相関の平均を示す。作成された各系列では、相関性の考慮の有無にかかわらず平均値はほとんど変わらないが、実測値の平均と作成された各系列の平均には明らかな差がある。これは、図-2において流量が大きい方で実測値が直線からやや外れる傾向があり、その部分も含めて対数正規分布を作成していることが原因であると考えられる。標準偏差や相関係数の平均では、相互相関性・自己相関性ともに考慮したものが他と比べて実測値に近い値を示している。

図-3には各系列の累積度数分布を示す。実測値は、1978～87年のものを小さい方から順に並べたものとなっている。これらから、相互相関性・自己相関性をともに考慮することにより、年間流量という点でおおむね実際の事象を再現できているものと考えられる。

年間の全半旬を対象とした半旬発生流量の度数分布を図-4に示す。半旬流量の最大値は、実測値、考慮しない場合、相互相関性・自己相関性ともに考慮した場合、それぞれ、約12億 m^3 、約6億 m^3 、約16億 m^3 となっており、相関性を考慮しない場合は実測値と比較して最大値が小さくなっている。実測値が過去10年間の値であり、ここで作成した発生流量系列

表一 各系列の年間発生流量の算術平均と標準偏差

	算術平均	標準偏差
実測値	8,492	1,734
A系列	9,059	1,625
B系列	8,972	1,554
C系列	8,897	1,533

が1,000年分であることから、最大値が実測値よりはるかに小さい値となっている相関性を考慮しない場合は、流量をうまく再現できていないことがわかる。

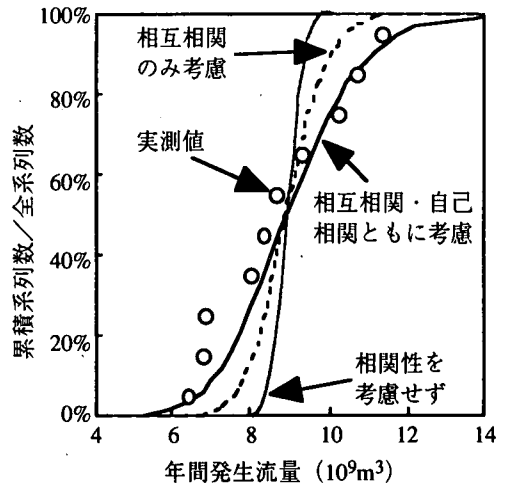
一方、相互相関性・自己相関性とも考慮した場合は、相関性を考慮しなかった場合と比較して実測値の分布、特に極端な事象についてよく再現できていると考えられるが、実測値と比較して流量が少なくなっている半旬が多くなっているため、今回の手法を用いて作成した流量を用いて水収支シミュレーションを行った場合、渇水に関する影響を実測値で考えたよりも大きく、つまり過度に危険側に見積もることになっている可能性があることは注意しておかなければならない。

以上から、ここで提案した手法により相互相関性、自己相関性をともに考慮して作成した発生流量系列は、相関性を考慮しなかった場合と比較して実際の状況をよく再現していると考えられる。

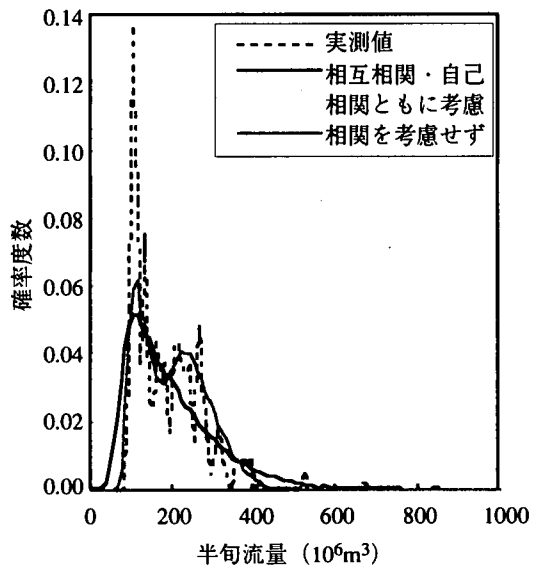
(4) 同じ条件で作成した発生流量系列間の差異

一般的に、疑似乱数を用いて1,000年分の半旬流量系列を作成したような場合は、試行回数が多いためほぼ同じような系列が作成されるものと考えられる。しかし、ここで用いた手法では自己相関性や相互相関性を考慮する時に乱数を操作しているため、全く同じ条件で作成した系列でもその分布などが違ってくる可能性も考えられる。そこで、相互相関性・自己相関性ともに考慮した場合について、1,000年分の発生流量系列を同じ条件で3系列(A系列, B系列, C系列)作成して相互に比較を行い、それらの系列間に差異があるかどうかについて検討する。

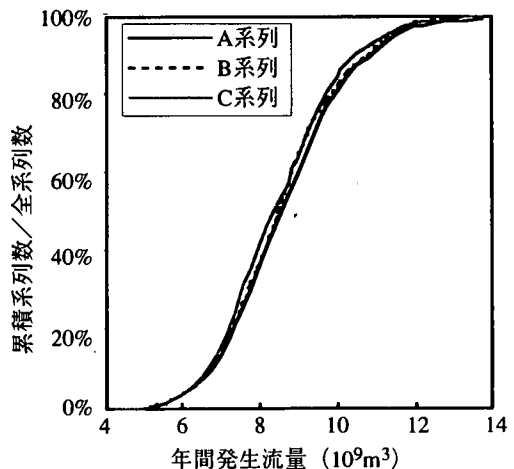
表一に各3系列の年間発生流量の算術平均と標準偏差を示す。また、各系列の年間発生流量の累積度数分布を図一5に示す。平均、標準偏差や累積度数分布を比較してもほとんど差は見られないことから、作成条件を一定とした場合、ここで用いた作成手法の影響を受けずにほぼ同じような系列が作成されていることがわかる。



図一 3 発生流量系列の年間流量の累積度数分布



図一 4 発生流量系列の半旬流量の度数分布



図一 5 発生流量系列の年間流量の累積度数分布

4. 水収支シミュレーションの概要

前章では、相関性を考慮した発生流量の作成手法を提案するとともに、作成した発生流量系列を実測値と比較することにより作成手法の適否を判断してきた。このような発生流量系列の作成は水収支シミュレーションに用いるために行われたものである。実際のシミュレーションを通して得られた利水安全度指標などが作成手法の違いによりどのような値を示すかについても確認しておく必要がある。

本章では、ここで作成した発生流量系列を用いて対象流域について水収支のシミュレーションを行い、実際の事象の再現性について検討する。ここではまず、水収支シミュレーションの概要を説明する。

(1) 水収支のシミュレーション

小流域内の水収支の様子を図-6に示す。水収支シミュレーションの構成要素としては、河川、地下水、発生流量の他に、3種類の水利用者、上水道事業者、下水処理場がある。河川流量や発生流量が豊富にある場合、各構成要素における水収支は以下のように算出される。

まず、上水道事業者 j の給水量 W_j は式(3)により算出される。

$$W_j = \alpha_j \left(\sum_i WR_{ij} + \sum_i WS_{ij} + \sum_i WG_{ij} - \sum_i WW_{ij} + \sum_i WW'_{ij} \right) \quad (3)$$

ここで、 WR_{ij} は河川 i 地点からの設定取水量、 WS_{ij} は i 流域の自然発生流量からの設定取水量、 WG_{ij} は i 流域の地下水からの設定取水量、 WW_{ij} は j 事業者から i 事業者へへの設定送水量、 α_j は有効給水率である。

また、 i 流域の生活用水使用量 UD_i 、工業用水使用量 UI_i 、農業用水使用量 UA_i は式(4)により算出される。

$$UD_i = \sum_j UDW_{ij} + UDS_i + UDG_i + \sum_k UDSP_{ik} \quad (4a)$$

$$UI_i = \sum_j UIW_{ij} + \sum_k UIR_{ik} + UIS_i + UIG_i \quad (4b)$$

$$UA_i = \sum_j UAR_{ij} + UAS_i + UAG_i \quad (4c)$$

ここで、 UDW_{ij} 、 UIW_{ij} は i 水道事業者からの設定取水量、 UIR_{ik} 、 UAR_{ij} は河川 i 地点からの設定取水量、 UDS_i 、

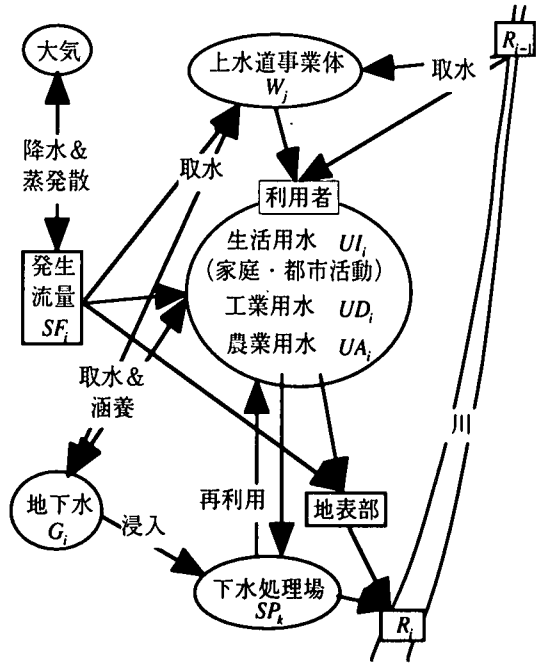


図-6 シミュレーションにおける小流域内の水収支

UIS_i 、 UAS_i は流域の自然発生流量からの設定取水量、 UDG_i 、 UIG_i 、 UAG_i は i 流域の地下水からの設定取水量、 $UDSP_{ik}$ は i 下水処理場からの設定再利用量である。なお、各利用者が他流域の発生流量や地下水から取水するようなケースは、量としても非常に少ないと考えられるので、式(4)中の UDS_i 、 UIS_i 、 UAS_i 、 UDG_i 、 UIG_i 、 UAG_i について他流域からの取水は考慮していない。

k 下水処理場における下水処理水量 SP_k は式(5)で算出される。

$$SP_k = \beta_k \left(\sum_i SPUD_{ik} + \sum_i SPUI_{ik} \right) \quad (5)$$

ここで、 $SPUD_{ik}$ 、 $SPUI_{ik}$ は i 流域の生活用、工業用からの下水道へ設定排水量、 β_k は下水道への地下水没入を考慮した下水量の割増率である。

これら構成要素のシミュレーション結果から i 流域の地下水収支 G_i は式(6)により算出される。

$$G_i = \sum_j WG_{ij} + UDG_i + UIG_i + UAG_i - LUD_i \cdot UD_i - LUI_i \cdot UI_i - LUA_i \cdot UA_i + \sum_k NSG_{ik} \left\{ \frac{SP_k \cdot (\beta_k - 1)}{\beta_k} \right\} - \sum_j NGW_{ij} \left\{ \frac{W_j \cdot (1 - \alpha_j)}{\alpha_j} \right\} \quad (6)$$

ここで、 LUD_i , LUI_i , LUA_i は i 流域における利用時の損失率、 NSG_{ii} は i 流域の地下水が t 処理場への排水に浸入するかどうかを表す係数（浸入する場合は1, 浸入しない場合は0）、 NGW_{ii} は t 水道事業体の無効給水が i 流域の地下水へ涵養されるかどうかを表す係数（涵養される場合は1, 涵養されない場合は0）である。

また、 i 流域の排水が河川に排出される河川 i 地点の流量 R_i は式(7)により算出される。

$$R_i = \sum_j NR_{ij} \left(R_j - \sum_u WR_{ju} - \sum_u UIR_{ju} - \sum_u UAR_{ju} \right) \quad (7)$$

$$+ \left(SF_i - \sum_j WS_{ij} - UDS_i - UIS_i - UAS_i \right)$$

$$+ (1 - LUD_i)UD_i + (1 - LUI_i)UI_i + (1 - LUA_i)UA_i$$

$$- \sum_j (SPUD_{ij} + SPUI_{ij}) + \sum_j NSPR_{ij} \left(SP_j - \sum_u UDSP_{ju} \right)$$

ここで、 NR_{ij} は河川 t 地点が i 流域の上流側の境界と接しているかどうかを表す係数（接している場合は1, 接していない場合は0）であり、右辺第1項は t 地点での取水後の流下流量となっている。また、 $NSPR_{ij}$ は t 下水処理場の排水が i 地点に放流されるかどうかを表す係数（放流される場合は1, 放流されない場合は0）である。

このシミュレーションでは、人口、土地利用、生産量などから原単位法により算出した各利用者の水需要量に基づいて設定取水量等をあらかじめ決定しておく。そして、まず流域の状況からダム運用方法を決定し、その後上流から下流へと構成要素ごとに式(3)~(7)を用いて計算が行われる。渇水時にはダムの貯水量に応じて取水制限率が設定され、各設定取水量が取水制限率に応じて減少するようになっている。

また、図-6に示したように現在のモデルの中では、地下と地表の間での浸透・湧出など地下水に関する自然の水循環が省略されている。よって、ここでは取水、人工的涵養による水収支だけを考慮しており、地下水を無限大のバッファのようなものと考えて、涵養量や取水量が変化しても取水などに影響を及ぼさないものと仮定していることになる。

(2) パラメーター値の設定

水や汚濁物質収支のシミュレーションにおいて、水需要や排出汚濁負荷量を算出するために、人口や土地利用、製造業出荷額などの流域情報と、それに対する水需要原単位や排出負荷量原単位をあらかじめ

設定しておく必要がある。これらのパラメーター値は、既存の統計データ、研究例などを参考にして設定した。なお、ここでは1990年頃の流域状況を再現することとし、流域情報などは1990年のデータを用いている。また、農業に関する原単位については季節ごとに異なる値を設定している。

ただし、上水道事業体の水需要については、給水人口当たりの水需要量にかなりのばらつきがあるので、実績給水量を参考にして設定している。この他の上水道や下水処理場、ダムに関するパラメーターや各利用者設定取水量や利根導水路の導水量などについても実測値を参考に設定している。なお、これらの実績給水量や導水量は渇水の影響を受けていない年のデータを参考にしている。

ダムからの放流量については、全てのダムの貯水量や栗橋地点の基準流量（下流部の利水権量と維持流量を合わせたもの）などから、シミュレーション中で各半月ごとに設定されるようにしている。また、ダム群の総貯水量が減少している場合は、取水制限も行われるようになっている。

(3) 評価指標の算出

シミュレーションの結果得られた1,000年分の河川流量、利根導水路導水量、ダム貯水量、用途別の使用水量、地下水収支、下水処理水量などについて評価指標が算出される。評価指標は半月単位で算出される指標と年単位で算出されるものに分けられ、平均値などの他に、1,000年分のデータがあることを生かして、利水安全度の概念を参考にした評価指標が算出される。以下にその概要を示すが、渇水の状態とは、ある基準水量を下まわる状態である。この基準水量としては、河川流量の場合は維持流量か基準流量、利根導水路導水量や各利用者使用水量の場合は既に設定されたパラメーターから算出された水需要量が用いられる。

a) 半月単位の評価指標

不足確率：半月ごとの渇水が起こっている確率。

不足度：半月ごとの渇水が起こったときの不足率（%）の平均値。

b) 年単位の評価指標

渇水年確率：渇水が起こっている年の割合を確率として算出したもの。

平均渇水日数：渇水が起こっている年における渇水日数の平均値。

平均渇水被害：ある1年にどの程度の被害が見込まれるかを（不足%×日）という単位で表したものの、各小流域（上水道事業体）の水需要量に応じた重みづけの平均をとって、対象流域全体の平均渇水被

表一3 河川流量と利根導水路導水量に関するシミュレーション結果の年間指標

	相関性を 考慮せず	相互相関のみ 考慮	相互相関・自己相関 ともに考慮	実測値
岩本地点				
平均流量 (10 ⁶ m ³ /yr)	2,843	2,839	2,738	2,624
渇水年確率 (%)	39.3	34.7	38.3	-----
渇水日数 (day/yr)	6.4	6.1	7.7	-----
八斗島地点				
平均流量 (10 ⁶ m ³ /yr)	5,281	5,162	5,222	5,089
渇水年確率 (%)	9.4	29.3	47.9	-----
渇水日数 (day/yr)	5.1	6.3	10.3	-----
栗橋地点				
平均流量 (10 ⁶ m ³ /yr)	7,046	6,941	7,125	6,538
渇水年確率 (%)	20.7	93.8	91.5	100
渇水日数 (day/yr)	5.5	44.6	58.4	34
利根導水路				
平均流量 (10 ⁶ m ³ /yr)	1,851	1,732	1,693	1,823
渇水年確率 (%)	71.8	99.0	97.2	100
渇水日数 (day/yr)	8.2	129.1	129.7	184

害も算出している。

平均渇水被害額：後で述べる渇水被害額原単位を用いて算出した年間渇水被害額の平均値。

c) 渇水被害額の算出方法

渇水被害額は、基準水量からの不足水量と渇水被害額原単位の積で算出される。渇水被害額原単位は、式(8a)~(8e)に示した中澤ら⁹⁾が算出した原単位の式を用いて算出される。

生活系（上水道）：

$$P=2.05S^2-147S+2,613+150 \quad (S>39.1) \quad (8a)$$

$$P=150 \quad (0<S\leq 39.1) \quad (8b)$$

生活系（上水道以外）：

$$P=2.05S^2-147S+2,613 \quad (S>39.1) \quad (8c)$$

製造業系：

$$P=0.33S^2-1.28S \quad (S>39.1) \quad (8d)$$

農業系：

$$P=0.066S^2-0.33S \quad (S>39.1) \quad (8e)$$

ここで、 P が渇水被害額原単位（円/m³）、 S が不足率（%）である。

利根導水路導水量と栗橋地点流量の被害額原単位は、それぞれにおいて設定された用途別導水量、用途別基準水量を用いて算出される。導水量（流量）が不足した場合、維持流量以外について用途別の比率を算出し、その不足率に対して式(8a)~(8e)より求められた原単位に対して重み付けを行って渇水被害額原単位を算出する。

5. 水収支シミュレーションによる河川流量・取水量の再現性の検討

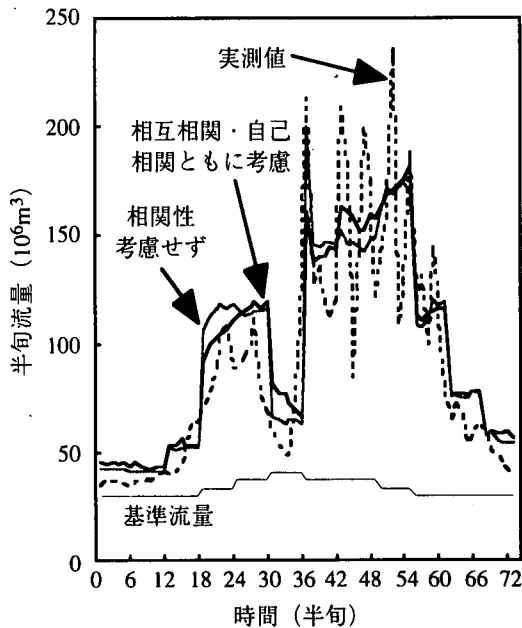
相関性を考慮しないで作成した発生流量系列、相互相関性のみ考慮して作成した発生流量系列、相互相関性と自己相関性をともに考慮して作成した発生流量系列の3系列を用いて水収支のシミュレーションを行い、河川流量や取水量等について実測値との比較を行う。

表一3には、岩本地点、八斗島地点、栗橋地点の河川流量と利根導水路導水量について平均年間流量と渇水年確率、渇水日数を示す。ここで、岩本地点と八斗島地点については維持流量に対する渇水年確率、渇水日数となっているが、栗橋地点については下流部の利水権量も合わせた基準流量に対する渇水年確率、渇水日数となっている。

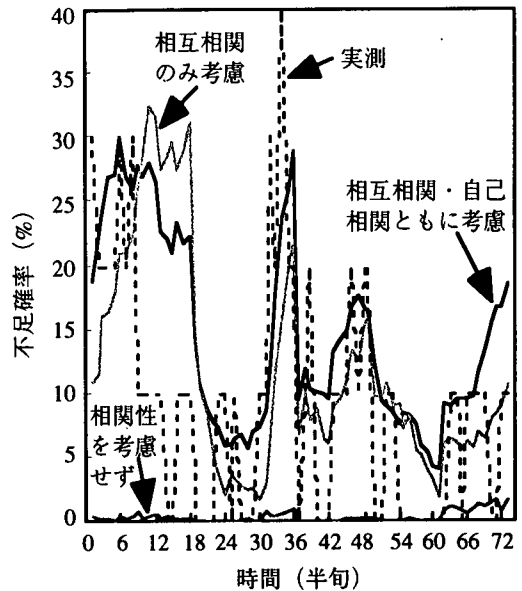
河川の平均年間流量は、3系列を用いたシミュレーション結果とも実測値より大きくなっている。これは、作成した発生流量系列の平均の方が実測より大きいためである。

渇水年確率や年平均渇水日数に注目すると、利根導水路導水量や栗橋流量について、実測値に対してシミュレーションで設定した導水量や基準流量を用いて渇水年確率、渇水日数を算出した場合の結果と比較すると、相関性を考慮した場合の方が実測に近い。

図一7に栗橋地点の半旬ごとの流量について、相互相関と自己相関とともに考慮にいたした発生流量系列



図一七 栗橋地点の半旬流量の比較



図一八 栗橋地点の不足確率の比較

表一四 対象流域全体における平均取水量, 下水処理水量 (10^6 m^3/yr)

	相関性を考慮せず	相互相関のみ考慮	相互相関・自己相関ともに考慮	実測値
上水道取水量	575	571	570	576
製造業系取水量	335	335	335	----
農業系取水量	2,093	2,048	2,032	----
下水処理水量	122	121	120	147

を用いた場合と相関性を考慮していない発生流量系列を用いた場合のシミュレーション結果と、1978～87年の実測流量の平均値、ならびに水収支シミュレーションで設定されている基準流量を示す。平均流量で見ると2つの系列によるシミュレーション結果にはそれほど差はなく、第18～30半旬を除いては実測データの傾向が再現できている。第18～30半旬にかけてはシミュレーション結果が実測値を上回っているが、この原因としてはこの時期において農業系の水利用量を過小評価していること、などの原因が考えられる。

図一八に栗橋地点の半旬ごとの不足確率について、相互相関と自己相関をともに考慮に入れた発生流量系列を用いた場合、相互相関のみを考慮に入れた発生流量系列を用いた場合、相関性を考慮していない発生流量系列を用いた場合のシミュレーション結果と1978～80年の実測値を基に算出した結果を示す。実測は各半旬に10個のデータから算出した値なので、その値自体の信頼性は乏しいが、相関性を考慮しな

かった系列による結果では不足確率がほとんどの期間において0に近くになっており、実測と比較しても実際の利根川の状況とはかけ離れているものと考えられる。

表一四に対象流域全体の用途ごとの平均年間取水量や下水処理水量、地下水収支を示す。このシミュレーションにおいて、河川流量や発生流量が少ないときには取水量はそれに応じて減少するようになっているので、用いた発生流量系列により表一四の値も変化する。なお、上水道取水量、下水処理水量については、統計データから得られた実測値を合わせて示している。

上水道取水量については、3系列によるシミュレーション結果と実測値ともにはほぼ同じくらいの値になっている。一方、下水処理水量では3系列によるシミュレーション結果は約1.2億m³でほとんど差はないが、実測値の1.4億m³よりは少なくなっている。この理由としては、下水処理場におけるし尿の投入などを考慮に入れていないことなどが考えられる。ま

表一 5 渇水被害額のシミュレーション結果 (億円)

	相関性を 考慮せず	相互相関 のみ考慮	相互相関・ 自己相関と ともに考慮
対象流域内	7	88	145
利根導水路	148	769	2,474
栗橋地点	0	607	2,559

た、下水処理水量は上水道取水量と比較して使用した発生流量系列による差が小さくなっており、この流域においては上水道と比較して渇水の影響を受けにくいことを表している。

製造業系、農業系の取水量については、1988年の関東地方全体の年間取水量が製造業系で約25億 m^3 、農業系で約90億 m^3 となっており、対象流域は関東地方全体に対して人口10%弱、面積で約25%となっている。この値から、対象流域内の製造業系の取水量を人口比で考えると約2.5億 m^3 、農業系の取水量を面積比で考えると約22億 m^3 となる。シミュレーションの結果は、この値と比較するとほぼ同程度の値となっている。

表一5に渇水被害額について、3つの系列によるシミュレーション結果を示す。渇水の規模が大きいほど被害額の原単位も大きくなるので、相互相関と自己相関をともに考慮している系列による結果が他と比較して著しく大きくなっている。相互相関と自己相関をともに考慮した系列は半旬単位で流量が極端に少なくなることがあることから、渇水被害額を過大に評価している可能性はある。しかし、さまざまな代替案について相対的な評価を行う場合には、このように危険側で評価を行っておいた方がよいものと考えられる。

以上より、相関性を考慮しない系列を用いた場合では、渇水などの極端な事象が再現できていない。その一方で、相互相関と自己相関をともに考慮している系列を用いた場合は、年間水量や渇水年確率などで比較的よい再現性を示していた。

6. まとめ

流域管理施策の効果を水文事象の不確定性を考慮して評価するうえで、水収支、あるいは汚濁物質収支のシミュレーションを行うときに水文事象に対して確率的な取り扱いが必要である。本研究では、水収支シミュレーションの結果に対して確率的な評価ができるように、シミュレーションの入力値である発生

流量について過去のデータを参考に大量に作成する手法を提案した。この手法は、大規模な流域を対象とできるように、対象流域内をいくつかに分割して発生流量を独立に作成するとともに、その分割した流域間の発生流量の相互相関性を考慮に入れられるようになっているものである。さらに、発生流量の自己相関性についても考慮に入れるようになっている。

この手法を用いて、利根川上流域を対象として相関性を考慮しない場合、相互相関性のみを考慮した場合、相互相関性・自己相関性をともに考慮した場合の3通りについて、1,000年分の発生流量を作成し、参考とした過去のデータと比較することにより実際の状況に対する再現性について検討した。その結果、相互相関性・自己相関性をともに考慮した場合は、相関性を考慮しない場合や相互相関のみを考慮した場合と比較して現状がよく再現されていた。

さらにここで作成した相関性を考慮しない場合、相互相関性のみを考慮した場合、相互相関性・自己相関性をともに考慮した場合の3つの発生流量系列を用いて、対象流域で上水道や下水道などの人工的な水循環も含めた水収支のシミュレーションを行った。相互相関性・自己相関性をともに考慮した発生流量系列を用いたシミュレーション結果は、平均流量や水利用量あるいは渇水年確率といった確率的な評価指標についても実際の状況を比較的よく再現していた。一方、相関性を考慮しない発生流量系列を用いたシミュレーションでは渇水などの極端な事象を再現できなかった。

ここで作成した発生流量系列を用いて水と汚濁物質収支のシミュレーションを行うことにより、大規模な流域においても水文事象の不確定性を考慮した流域管理施策の評価が可能となった。一方で、平均値を完全に再現できていなかったり、半旬流量が実測と比較して少ない半旬が多くなっていることなどの課題もあることから、今後全ての小流域に対して対数正規分布を仮定したことの見直しや、その他の相関性を考慮した流量の作成手法との比較・検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) Hashimoto, T., Stedinger, J.R. and Loucks D.P.: Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resources Research*, Vol.18, No.1, pp.14-20, 1982.
- 2) 池淵周一, 小尻利治, 武村彰文: 確率マトリックス演算による利水システムの安全度評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No.30 B-2, pp.359-375, 1987.
- 3) 池淵周一, 白村暁: 利水システムの安全度評価とその淀川水系への適用に関する研究, 京都大学防災研究所年

報, No.32 B-2, pp.383-400, 1989.

- 4) 高棹琢馬, 宝馨, 丸川幸治: 渇水対策ダムの導入が利水安全度に及ぼす効果に関する基礎的研究, 水文・水資源学会 1989 年研究発表会要旨集, pp.75-78, 1989.
- 5) 荒巻俊也, 松尾友矩: 水量シミュレーションによる利根川水系の水資源システムの安定性評価, 水文・水資源学会 1993 年研究発表会要旨集, pp.96-97, 1993.
- 6) 荒巻俊也, 松尾友矩: 水・汚濁物質収支シミュレーションによる水量及び水質管理施策の確率評価システムの構築と利根川水系の節水とダム新設の効果の検討, 環境工学研究論文集, Vol.32, pp.159-169, 1995.
- 7) 小葉竹重機, 田中長光, 赤穂俊作: 利根川上流ダム群の冬春期運用について, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.345-350, 1992.
- 8) 中澤弍仁, 今村瑞穂, 石崎勝義, 中村昭: 渇水時の水管理に関する計画学的研究: 土木研究所資料 1508 号, 1979.

(1997.8.28 受付)

FLOW DATA GENERATION FOR THE SIMULATION OF RIVER BASIN MANAGEMENTS WITH HYDROLOGICAL UNCERTAINTY

Toshiya ARAMAKI and Tomonori MATSUO

In order to evaluate various kinds of river basin management with hydrological uncertainty, a generation method of flow data based on the input of water balance simulation was proposed. This method could be applied to the simulation in a large basin area, because flow data of each separated basin in an object area were generated with considering their cross- and auto-correlativity. Furthermore, generated data were compared with the observed data in the upper basin of the Tone River, and water balance simulation was carried out using the generated data. As a result, considering cross- and auto-correlativity increased reproducibility for the observed data.