

(17) 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

PROBABILISTIC EVALUATION SYSTEM ON WATER RESOURCES AND WATER QUALITY MANAGEMENT THROUGH THE SIMULATION OF WATER AND POLLUTANTS BALANCES AND THE EFFECTS OF WATER SAVINGS AND A NEW RESERVOIR IN THE TONE RIVER BASIN

荒巻俊也^{*}、松尾友矩^{*}

Toshiya ARAMAKI^{*}, Tomonori MATSUO^{*}

ABSTRACT ; In recent years, many policies on water and water quality management are proposed for various problems, such as water pollution and water shortage. To choose a most suitable policy or policy combination, we need to quantitatively evaluate these policies' effects on a river basin scale.

In the present study, the evaluation system on water management with the simulation of water and pollutant balances is constructed. In this system, the random variation of water quantity is considered and probabilistic evaluation indices are calculated. Furthermore, this system is applied to the Tone River Basin and the effects of water saving and a new reservoir are evaluated. The following results are obtained from the present evaluation ;

- The effects of the new reservoir, Naramata, are less than the effects of 20% reduction of intake volume at the Tone-Ohzeki and both effects are larger in the lower basin.
- There is no relation between water saving in the upper basin and the stability of water use in the lower basin in the Tone River.
- The effects of water saving in agricultural use are larger than water saving in industrial and domestic use.

KEYWORDS ; Water and water quality management, Probabilistic evaluation system, Water and pollutants balances, the Tone River Basin, Water saving, New reservoir

1. はじめに

渇水、水質悪化などの水環境問題に対して、水量・水質の両面からさまざまな対策が行われている。現在まで水量に関しては主に貯水池の建設、水質に関しては主に下水道整備を中心として対策が進められてきた。しかし、自然環境の破壊、建設費の高騰や水循環の改変による環境への悪影響といった問題点が指摘されており、水利用の合理化や処理水の再利用、戸別合併浄化槽の普及などが脚光を浴びてきている。このような中から最適な対策を選択するために、これらの諸対策が与える影響や効果を定量的に評価していく必要がある。

このような定量的な評価を行うには、水循環や汚濁物質の動きについて広範囲な地域におけるシミュレーションを行う必要がある。しかし、水循環や汚濁物質の動きに関しては未解明な部分が多く、また対象地域を広げると取り扱う情報が多すぎることもあり、降雨からの流出現象などの個別の事象に注目した研究は多くあるのに比べ、全体を取り扱った研究は少ない。

^{*} 東京大学工学部都市工学科 (Department of Urban Engineering, The University of Tokyo)

そこで筆者らは、流域全体についての水・汚濁物質収支シミュレーションを行い、さまざまな水管理施策の効果や流域状況の変化による影響を定量化するシステムの構築を試みている。そして、このシステムでは降水などの水文事象のランダムな変動を確率分布を用いてシミュレーションに取り入れることにより、その変動性を考慮に入れた確率的な評価を行えるようにしている。

本報では、この水管理施策の確率評価システムの概要と、このシステムを用いて利根川水系上中流域においていくつかの節水対策ならびにダムの新設等の果たす水量確保、水質保全にかかわる効果について検討した結果を報告する。

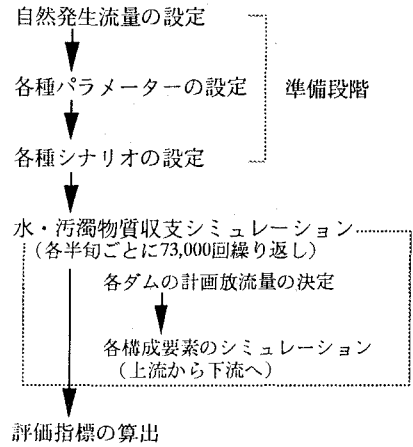


Fig.1 Flow diagram of the evaluation system

2. 評価システム

2. 1 概要

評価システムの全体の流れは図1に示すように、まず水・汚濁物質収支シミュレーションの準備段階として各小流域の自然発生流量、対象流域に関するパラメーター、取水シナリオ等のさまざまなシナリオの設定を行う。そしてこれらの設定された値を用いてシミュレーションを行い、得られた河川流量、貯水量、水使用量などを用いて評価指標を作成する。

システムの中心となる水・汚濁物質シミュレーションは、確率分布を用いて算出された1年分の自然発生流量の1000系列を用い、半旬を時間単位として行われる。自然発生流量について詳しくは後述するが、1000系列の自然発生流量をつなぎ合わせて1000年分の自然発生流量として、各半旬ごとに各ダムからの計画放流量の決定と各構成要素のシミュレーションを73000回(1000系列×73半旬)繰り返す。各構成要素のシミュレーションは、基本的に上流から下流へと行われるが、その順番はシミュレーション順序シナリオとしてあらかじめ設定する。

2. 2 水・汚濁物質収支に関する考え方

このシミュレーションにおける構成要素は、対象流域を100～1000 km²ぐらいの大きさに分割した小流域、上水道事業体、下水処理場、対象河川の取水・基準地点、ダム、対象流域外の導水路である。表1に水・汚濁物質の各構成要素に対する水量・汚濁物質の入出力先を示す。

Table 1 Inputs and outputs of each element in the simulation

入力先	構成要素	出力先
河川各地点* 自然発生流量* 地下水* 他の上水道事業体* 下水処理場*	上水道事業体*	他の上水道事業体* 下水処理場* 人為系排水
自然発生流量* 地下水*	生活系水利用* (上水道以外)	下水処理場* 人為系排水
河川各地点* 自然発生流量* 地下水* 上水道事業体*	製造業系水利用*	人為系排水 下水処理場*
河川各地点* 自然発生流量* 地下水*	農業系水利用*	人為系排水
上水道事業体 生活系水利用 (上水道以外) 製造業系水利用 農業系水利用* 面源汚濁負荷# 畜産系汚濁負荷#	人為系排水	河川各地点
上水道事業体* 生活系水利用* (上水道以外) 製造業系水利用*	下水処理場*	河川各地点 上水道事業体*
河川上流地点 自然発生流量* 人為系排水 下水処理場	河川各地点	河川下流地点 上水道事業体* 製造業系水利用* 農業系水利用* 流域外導水

水利用は、上水道事業者ごとの生活系水利用、各小流域ごとの製造業系水利用、農業系水利用、上水道以外の生活系水利用の4つの形態に分けられる。上水道と農業系水利用に関する取水は、対象河川の各地点、各小流域の自然発生流量、各小流域の地下水の3種類の水源から行われる。製造業系の水利用に関しては、さらに上水道事業者からも取水が行われるようになっており、一方上水道以外の生活系水利用では各小流域の自然発生流量と地下水からの取水のみになっている。また、上水道事業者では他の事業者との送受水、下水処理水の再利用も行われる。

各形態による水利用後の排水で下水処理場にて処理が行われるもの以外を人為系排水と定義する。生活系利用後の排水は下水道、合併処理浄化槽（コミュニティプラント等も含む）、し尿処理浄化槽（雑排水は放流）、くみ取り（雑排水は放流）の4種類の排水処理に分けられる。そして、下水道の場合は指定された下水処理場へ送られ、その他の3種の排水処理については発生した汚濁物質とともに各小流域における人為系排水となる。製造業系の場合は下水道とそれ以外で、下水道の場合は生活系の時と同じように指定された下水処理場へ、それ以外の場合は発生した汚濁物質とともに各小流域における人為系排水となる。農業系の場合はそのまま人為系排水に加算する。

各小流域の人為系排水は、生活系の排水と汚濁物質、製造業系の排水と汚濁物質、農業系の排水に、畜産系の汚濁物質、農地、山林、市街地等の面源からの汚濁物質を加算したものからなる。これは、汚濁物質の流達率を掛けた後に河川の各地点に排出するようになっている。

下水処理場では、生活系および製造業系水利用から集められた排水に地下水による水量の割増を行い、汚濁物質とともに河川各地点に直接排出される。

対象河川の各地点では、上流地点から流下してきた水と汚濁物質、各小流域からの自然発生流量、人為系排水とその汚濁物質、下水処理水とその汚濁物質からなる。ここでは、まず集められた水から河道ならびに流域内での水量損失分が差し引かれる。その後、各水利用形態ごとの取水と流域外への導水が行われ、残流量が下流地点の流量に加算される。汚濁物質はこの時に、各取水量と導水量、残流量に比例してふり分けられる。

この表には示されていないが、ダムは対象河川の各地点に対応しており、その地点への入力をダムへの流入水量ならびに流入負荷量とし、各ダムごとに設定された計画放流量にそって決定された放流量をその地点の河川流量に置き換えるようになっている。

2. 3 自然発生流量の設定

各小流域からの自然発生流量は年ごとにランダムな変動をする水文事象である。この変動性を考慮して流域の利水安全度を評価する研究は現在までにいくつか行われている。Hashimoto ら¹⁾ は利水安全度を表す3種類の確率を用いた指標を提案しており、池淵・小尻ら^{2) 3)} は流量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、これを淀川水系に用いて Hashimoto らが提案した指標より利水安全度を算出している。一方、高棹ら⁴⁾ は福岡市域において1万年分の降水量系列を用いてシミュレーションを行い、ダムの導入による安全性の向上について検討している。本研究における評価システムでは、データの取り扱い易さから高棹らが行ったように確率分布により作成した1年分の自然発生流量の1000系列をシミュレーションの入力値として用いることにする。

具体的には、各小流域からの自然発生流量は対数正規分布に基づいたばらつきがあると仮定している。よって、河川各地点の流量の実測値を用いて算出した各小流域自然発生流量を対数化して各月ごとの平均値と標準偏差を算出し、これを用いて自然発生流量の確率分布を決定し、この確率分布から乱数を用いて自然発生流量を1000系列作成している。

2. 4 パラメーター、シナリオの設定

パラメーターのうち、小流域、上水道事業者、下水処理場、河川各地点、ダム、対象流域外への導水に関

Table 2 List of parameters in the simulation

小流域に関するもの	人口、土地利用（水田、畑地、市街地、山林）、製造業出荷額、家畜飼育頭数（牛、豚）、排水処理別人口（上水道以外）、汚濁負荷流達率、水利用形態別水源と各水源取水可能量
上水道事業体に関するもの	排水処理別人口、有効給水率、水使用量原単位割増率、水源と各水源取水可能量、他の事業体との送受水可能量
下水処理場に関するもの	排水先、地下水／汚水比率、処理水質、場外再利用先と再利用量
河川各地点に関するもの	各半旬基準流量、水質基準
ダムに関するもの	利水容量、初期水量、初期水質、基準貯水量、水質基準
流域外導水に関するもの	取水先、各半旬導水量、水質基準
原単位	生活系一人当たり水使用量、上水道使用者損失率、製造業出荷額当たり水使用量、製造業水損失率、製造業場内リサイクル率、農地種類別面積あたり水需要量、農地種類別水損失率、排水処理別一人当たり排出汚濁負荷量（合併浄化槽、単独浄化槽、くみ取り）、製造業排水水質、家畜別一頭当たり排出汚濁負荷量、土地利用別面積当たり排出汚濁負荷量

するものについては個別の地域、地点ごとに、原単位については対象流域で統一した値を設定するようになっている。表 2 にパラメーターの一覧を示すが、以下にいくつかのパラメーターについて説明を補足する。

小流域、上水道事業体に関して、水源と取水可能量を設定している。2. 2 で示したように水利用の形態ごとに取水できる水源について制限があるが、河川に関しては複数地点を指定できるようになっている。

排水処理別人口は上水道による生活系水利用と上水道以外の生活系水利用で設定している。これは利用後の水の排水処理方法ごとの人口で、下水処理場、合併浄化槽、単独浄化槽、くみ取りの 4 種類に分けている。

上水道事業体における水使用原単位割増率は、本来一人当たりの上水道使用量は地域によってばらつきがあるものだが、原単位は対象流域で統一してしまっているのでそのばらつきを持たせるためのパラメーターである。具体的には、対象流域の一人当たり水使用原単位に水使用原単位割増率を掛けたものがその上水道事業体における一人当たり水使用量になっている。

下水処理場において処理水質を設定するようになっているが、このシミュレーションにおける汚濁物質量は基本的に原単位より算出していくのであるが、下水処理場からの汚濁物質量についてはこの処理水質を用いて算出するようになっている。また処理水の再利用については再利用水を上水道事業体に供給する、つまり上水道の替わりとして生活系の水利用に使用されることになっている。

このように設定されたパラメーターから、水利用形態別の水需要量が算出される。この水需要量に対して、各水源からの取水可能量を参考に計画取水量を取水シナリオとしてあらかじめ設定している。また、製造業で使用した水のうち下水処理場へ放流される排水量についても排水シナリオとして設定している。

2. 5 水・汚濁物質収支シミュレーション

水・汚濁物質収支シミュレーションについては 2. 1、2. 2 で簡単に述べられているが、以下にいくつかの部分について説明を補足する。

まず各ダムの計画放流量の設定に関しては、シミュレーションの各半旬ごとに全ダムからの目標放流量を設定し、それに見合うように各ダムからの計画放流量を決定している。目標放流量は、対象流域の最下流の河川地点の基準流量に流域外への導水量を加えたものである。

Table 3 List of evaluation indices and their meaning

	評価指標	単位	指標の内容	対象データ
半 旬 単 位 の 指 標	平均半旬水量	千・m ³	全系列の平均水量	河川流量 ダム貯水量 流域外導水量 水利用形態別取水量
	最小半旬水量	千・m ³	全系列中の最小水量	
	不足確率	%	喝水が起こる確率	
	不足度	%	喝水が起こった時の不足の度合い	
	平均水質	ppb	全系列の平均水質	河川流量 ダム貯水量 流域外導水量
	最大水質	ppb	全系列中の最大水質	
	超過確率	%	水質基準を上まわる確率	
	平均半旬水量	千・m ³	全系列の平均水量	下水処理水量 地下水取水量
	最大半旬水量	千・m ³	全系列中の最大水量	
	最小半旬水量	千・m ³	全系列中の最小水量	
1 年 単 位 の 指 標	平均年間水量	千・m ³	全系列の平均水量	河川流量 ダム貯水量 流域外導水量 水利用形態別取水量
	喝水年確率	%	喝水が起こる系列／全系列	
	喝水年平均喝水日数	日	喝水が起こる系列における平均喝水日数	
	平均喝水被害	%・日	全系列の平均喝水被害	
	平均水質	ppb	全系列の平均水質	河川流量 ダム貯水量 流域外導水量
	超過確率	%	水質基準を上まわる確率	
	全流域年間取水量	千・m ³	全系列の平均取水量	水利用形態別取水量
	全流域下水処理水量	千・m ³	全系列の平均処理水量	下水処理水量
	全流域地下水取水量	千・m ³	全系列の平均取水量	地下水取水量
	全流域平均喝水被害	%・日	全系列の平均喝水被害	水利用形態別取水量

次に各水利用形態ごとの取水では、河川から取水する時に河川流量が基準流量より下回る場合は取水量を加減して基準流量を確保している。また、河川流量や自然発生流量が不足してシナリオ通りの取水量が確保できない場合は、他の取水先から取水可能量の範囲内で追加取水を行っている。

2. 6 評価指標の算出

シミュレーションの結果得られた河川各地点の流量と水質、対象流域外への導水量と水質、ダムの貯水量と水質、4種類の水利用形態ごとの取水量、地下水取水量、下水処理水量について評価指標が算出される。評価指標は半旬ごとに算出される指標と1年を単位として算出されるものに分けられる。表3に評価指標の一覧とその内容、対象となるデータを示す。

この表において、喝水は基準水量を下まわる状態である。基準水量は河川流量の場合はパラメーターの基準流量、ダムの貯水量の場合は基準貯水量、流域外への導水の場合は設定導水量、水利用形態別取水量の場合はパラメーターから算出された水需要量が当てはめられる。

また、平均喝水被害はある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である。全流域平均喝水被害は、各小流域（上水道事業体）の平均喝水被害を用いて、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算出している。

3. 利根川水系の節水ならびにダム新設効果の検討

3. 1 対象流域の概要

以上の評価システムを利根川水系上中流域に適用し、節水やダム建設等が流域の水量や水質、水使用量に与える影響について検討する。

対象とする利根川は、全国で一人当たり水資源賦存量が最も少ない関東地方の代表的な河川で、首都圏の水源として重要な河川である。首都圏の人口集中に伴う都市用水の需要量の増加を受けて上流部でダム建設が進められてきたが、この20年間（1975～94年）にも7年の取水制限が行われた年があり、水需給は逼迫している。また、首都圏の都市用水が下流部で取水されているため、その取水水質が問題にもなっている。

今回対象としたのは、図2に示した河口から約130kmの栗橋地点より上流の流域で、5県110市町村にまたがる流域面積8588km²の利根川流域の半分を占める地域である。対象流域内には88の上水道事業体、31の下水処理場、6つの代表的な利水ダム（1988年以前）があり、ダム群の総利水容量は約3.5億m³（夏期約2.6億m³）となっている。また、利根大堰から東京圏等へ取水権量にして最大約140m³/sの導水が行われている。

この流域を17の流量観測点と6つのダムで、23の小流域に分割してシミュレーションを行う。

3. 2 入力情報

自然発生流量系列は、1978～87年の流量データ^{5) 6) 7)}をもとに作成された確率分布により作成されている。流量データから各小流域の自然発生流量データを算出する際に、自然発生流量が負になって（上流地

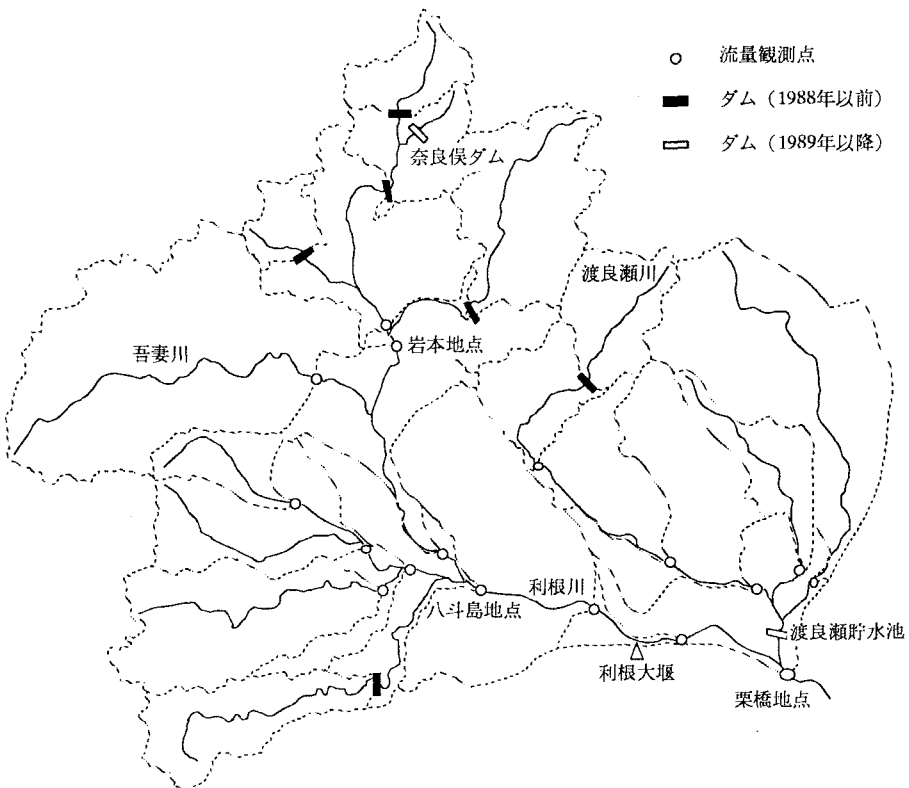


Fig.2 Area of this simulation

点流量が下流地点流量より多い) 対数化ができなくなる場合には、月ごとに定数を設定してもとの流量データに加算して対数化を行うようにしている。この定数は水・汚濁物質収支シミュレーション中で損失水量として取り扱うことにする。

パラメーターには、基本的に1989～90年のデータを用いている。人口、土地利用などの基本的な情報は、各県の統計年鑑の行政区分別データから小流域ごとの値を推計している。上水道事業体、下水処理場、ダム の各種パラメーターは統計データ等^{6) 8) 9)} を、水質基準は環境基準を用いている。河川の基準流量については、栗橋地点についてのみ下流部の取水権量を考慮して10～3月が約90 m³/s、4～9月が約150 m³/sと設定している。利根大堰からの流域外導水量は、統計データ⁷⁾ から求められた各半月ごとの平均的な値を用いている。小流域の流達率や原単位については、過去の研究・調査^{10) 11)} による値を用いている。

取水シナリオ、製造業から下水処理場への排水量については、統計データ^{8) 9) 12)} をもとに取水可能量を考慮しながら算定もしくは推定を行っている。

3. 3 実測値とシミュレーションの比較

水・汚濁物質収支のシミュレーションの行ううえで、実測のデータとの適合性の確認をしておく必要がある。ここでは、流量データに欠測がない1980年、81年のデータを用いて自然発生流量を算出し、これを用いてシミュレーションを行い、流量の実測値と比較する。

表4に実測値とシミュレーションによって算出された値を、岩本地点、八斗島地点、栗橋地点における年間流量と利根大堰から流域外への年間導水量について示す。また、シミュレーション値の実測値との誤差を実測値で割ることにより誤差率を求めている。八斗島地点で多少誤差が大きくなっているものの、年間流量で考えるとシミュレーションの結果は実際の状況を再現できているようである。

図3に1980年の半月ごとの栗橋地点の流量について、実測値とシミュレーションの値を示す。4～6月においてやや差が見られるが、その他の期間はおおむね合っている。4～6月は農業用利水が多い時期で、実際にはきめ細かいダム群運用が行われているものと思われるが、シミュレーションの方では単純な運用方式になっているため対応ができなかったのであろう。

栗橋地点の水質では、統計データ¹³⁾ によるとBODの年平均は1980年、81年とも1.6ppmで、シミュレーションでは1980年1.9ppm、81年1.8ppmとなっており、ややシミュレーションは値が大きくなっている。これは、統計データが低水流量の時に測定されたものであるために、流域からの全負荷量を対象としていないからであろう。

Table 4 Comparison between observed and calculated annual water volume

	1980年			1981年		
	実測流量 (百万m ³)	シミュレーション (百万m ³)	誤差率 (%)	実測流量 (百万m ³)	シミュレーション (百万m ³)	誤差率 (%)
岩本地点	2592	2563	-1.1	3159	3106	-1.7
八斗島地点	4476	4271	-4.6	6181	5944	-3.8
栗橋地点	6558	6433	-1.9	8042	7991	-0.6
利根大堰	1835	1915	4.4	1954	1921	-1.7

Table 5 Evaluation indices of standard setting

全流域年間取水量 (百万m ³)	2260
生活系 (上水道)	617
生活系 (上水道以外)	31
製造業系	562
農業系	1050
全流域下水処理水量 (百万m ³)	124
全流域地下水取水量 (百万m ³)	825
全流域平均渇水被害 (%・日)	
生活系	354
製造業系	21
農業系	1033
栗橋地点年間指標	
平均流量 (百万m ³)	7263
渇水年確率 (%)	34.0
渇水平均日数 (日)	9.8
平均渇水被害 (%・日)	120
平均BOD (ppm)	1.8
BOD超過確率 (%)	38.2
流域外導水年間指標	
平均流量 (百万m ³)	1912
渇水年確率 (%)	54.3
渇水平均日数 (日)	7.3
平均渇水被害 (%・日)	122
平均BOD (ppm)	1.5
BOD超過確率 (%)	24.2

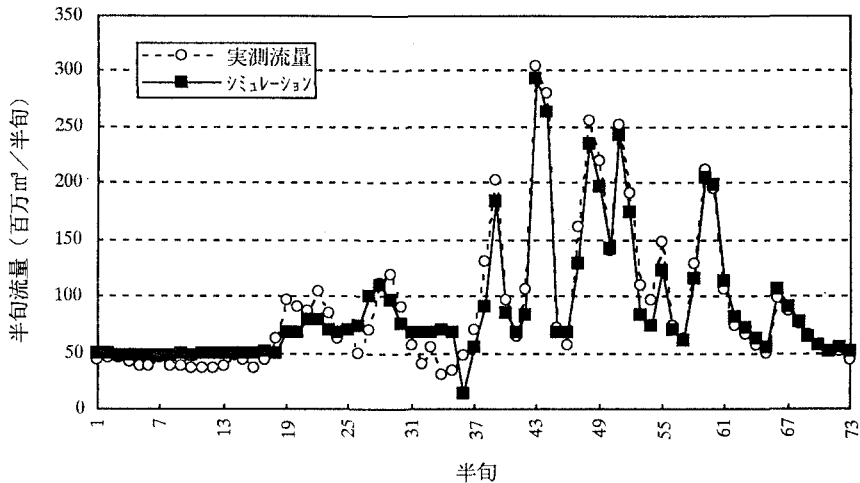


Fig.3 Comparison between observed and calculated 5 days' water volume at Kurihashi in 1980

以上の結果から、ここで用いられたシミュレーションはこれ以降節水やダム新設の効果を検討していくうえで、十分に実用に供するものと考ええる。

3. 4 結果と考察

前節で設定されたパラメーター、取水シナリオ等を用いてシミュレーションを行い、算出された年単位の指標のうちいくつかを表5に示す。対象流域内の生活系、製造業系、農業系の取水量をまとめると年間22.6億 m^3 になる。これに対して、栗橋地点流量は年間約72.6億 m^3 、利根大堰からの流域外への導水量は年間約19.1億 m^3 になっている。水質は利根大堰からの導水がBODで平均1.5ppm、水質基準の超過確率が38%、栗橋地点は平均1.8ppm、超過確率が24%となっている。BODの75%値、つまり超過確率25%以下が環境基準の目標となるが、この結果から栗橋地点ではそれが守られていないことが分かる。

これ以降、このパラメーター、取水シナリオの設定を標準として、節水ならびにダム新設による効果の検討を行う。具体的には節水の効果は水使用に関する原単位を変更することと流域外への導水量を減らすことにより、ダム新設の効果は1989年以降に完成した奈良俣ダム、渡良瀬貯水池をシミュレーションに加えることにより検討する。シミュレーションを行った11のシナリオを表6に示す。Run 1からRun 7が水利利用形態ごとの節水効果、Run 8、Run 9は対象流域より下流地域における節水効果、Run10、Run11はダム新設効果に関してのシミュレーションとなっている。

Table 6 Scenarios for simulation

Run 1	一人当たり水使用量 200→180 (1/日)
Run 2	一人当たり水使用量 200→160 (1/日)
Run 3	公共・流域下水道の再利用率を一律5%に
Run 4	製造業再利用率 65→70 (%)
Run 5	製造業再利用率 65→75 (%)
Run 6	夏期水田水需要量 7→6 (mm/日)
Run 7	夏期水田水需要量 7→5 (mm/日)
Run 8	流域外への導水量を10%削減
Run 9	流域外への導水量を20%削減
Run10	奈良俣ダム(利水容量8500万トン)の新設
Run11	渡良瀬貯水池(利水容量2140万トン)の新設

(1) 生活系水利利用における節水効果 (Run 1、2、3)

Run 1とRun 2では水使用量原単位をそれぞれ10%、20%減少させることにより、取水量を減少させている。またRun 3では下水処理水を都市用水として再利用させることによる節水効果を考えている。表7に主要な指標として、生活系、製造業系、農業系の全流域平均渇水被害、栗橋地点と流域外導水の年間平均渇水被害、年間平均地下水取水量について標準設定からそれぞれのシナリオにした時の変化率(=(シナリオの値-標準設

定の値)／標準設定の値×100)を示す。(－は減少を表す。)

Run 1、Run 2 について、生活系の渇水被害はそれぞれ 1 %、5 %、地下水取水量がそれぞれ 4 %、7 % 減少している。しかしその他の渇水被害は変化なしに被害が拡大しており、農業系の渇水被害はそれぞれ 9 %、16 % 被害が増加している。これは、生活系の水利用では水量の損失率が低いために使用した水はほとんど河川に循環されること、対象流域内の生活系取水の地下水依存度が高いので生活系取水減少の内訳の大部分が地下水取水の減少になること、という 2 つの理由から他の利用にはそれほど影響を与えないのである。逆に、上流部における地下水取水の減少により下流の流量が不安定になってしまうために他の渇水被害の拡大といった現象が起こるのである。

Run 3 では生活系の渇水被害が 2 % 減少しただけで他のものに関してはほとんど影響を与えていない。

(2) 製造業系水利用における節水効果 (Run 4、5)

Run 4、Run 5 と再利用率を 5 % ずつ上げることにより、全流域の製造業系年間取水量は標準設定の 5.6 億 m³ から Run 4 で 4.8 億 m³ (14 % 減)、Run 5 で 4.0 億 m³ (29 % 減) となっている。表 8 に表 7 と同様に主要な指標の変化率を示す。製造業系の渇水被害はそれぞれ 70 %、95 % の大幅な減少をしており、また地下水取水量もそれぞれ 5 %、14 % 減らしている。一方栗橋地点の渇水被害は Run 5 で 13 % の増加を見せ、同様に流域外導水も Run 5 で 5 % 被害が拡大している。製造業についても生活系と同じような理由でこのような現象が起こっている。

(3) 農業系水利用における節水効果 (Run 6、7)

夏期における水田の水需要原単位を 7 (mm/日) から 6、5 とそれぞれ 14 %、29 % 減らしているわけであるが、全流域の農業系年間取水量で見ると標準設定の 10.5 億 m³ から Run 6 で 9.6 億 m³ (9 % 減)、Run 7 で 8.6 億 m³ (18 % 減) となっている。表 9 に主要な指標の変化率を示す。農業系の渇水被害はそれぞれ 30 %、58 % と大幅に減少している。また他の渇水被害や地下水取水量についても全般的に Run 6 で 1 ~ 10 %、Run 7 で 3 ~ 20 % 減少している。取水量が多く、また表流水への依存度が大きい農業の節水は他の部分についても好影響を与えている。

(4) 対象より下流地域における節水効果 (Run 8、9)

対象流域を水源としている東京圏における節水効果を検討するために、利根大堰からの導水量を Run 8、Run 9 でそれぞれ 10 %、20 % 減少させている。表 10 に主要な指標の変化率を示す。渇水被害の減少は、生活系水利用でそれぞれ 4 %、9 %、農業系水利用でそれぞれ 9 %、17 % の減少、栗橋地点流量ではそれぞれ 55 %、81 % となっており、かなりの効果が見られる。

Table 7 Change rate of evaluation indices [%]
(Run1, Run2, Run3)

評価指標	Run 1	Run 2	Run 3
平均渇水被害			
全流域生活系	-1	-5	-2
全流域製造業系	0	-0	-0
全流域農業系	9	16	-0
栗橋地点	1	3	0
流域外導水	0	1	0
地下水取水量	-4	-7	-0

Table 8 Change rate of evaluation indices [%] (Run4, Run5)

評価指標	Run 4	Run 5
平均渇水被害		
全流域生活系	-0	-0
全流域製造業系	-70	-95
全流域農業系	0	0
栗橋地点	3	13
流域外導水	1	5
地下水取水量	-5	-14

Table 9 Change rate of evaluation indices [%] (Run6, Run7)

評価指標	Run 6	Run 7
平均渇水被害		
全流域生活系	-1	-3
全流域製造業系	-10	-20
全流域農業系	-30	-58
栗橋地点	-3	-7
流域外導水	-2	-5
地下水取水量	-0	-1

Table 10 Change rate of evaluation indices [%] (Run8, Run9)

評価指標	Run 8	Run 9
平均渇水被害		
全流域生活系	-4	-9
全流域製造業系	-2	-4
全流域農業系	-9	-17
栗橋地点	-55	-81
流域外導水	-20	-35
地下水取水量	-0	-0

(5) ダム新設の効果 (Run10、11)

6 ダム合計で通常期 3.5 億 m³、夏期 2.6 億 m³あった貯水容量が、奈良俣ダムを新設すると通常期 4.4 億 m³ (24%増)、夏期 3.3 億 m³ (28%増) に、また渡良瀬貯水池を新設すると通常期 3.7 億 m³ (6 %増)、夏期 2.7 億 m³ (3 %増) になる。表 11 に主要な指標の変化率を示す。渇水被害の減少は利水容量の大きい奈良俣ダム新設の方が顕著で、生活系や農業系の渇水被害で 12%の減少、栗橋地点の被害では 67%の減少が見られる。

(6) さまざまな節水効果とダム新設効果の比較

Run 2、Run 5、Run 7、Run 9、Run10 の 6 つの指標について、標準を 1 とした時の値を求め、図 4 に示す。Run10 の奈良俣ダムの新設は、Run 9 の流域外導水を 20%削減したときと比較して、全般的に効果はやや小さいもののその現れ方が似ている。対象流域内における節水と対象流域より下流部の東京圏における節水ではその効果が現れ方が違うので一概に決められないが、上流部の節水（特に生活系や製造業系）は下流の利水に対して効果があまり見られない。また、対象流域内の生活系、製造業系、農業系の節水効果では、表流水への依存度が高いこと、取水量自体が多いこと、使用時の損失量が多いこと、などの理由により農業系の節水効果が他と比較して非常に大きくなっている。

Table 11 Change rate of evaluation indices [%] (Run10, Run11)

評価指標	Run10	Run11
平均渇水被害		
全流域生活系	-12	-4
全流域製造業系	-3	-1
全流域農業系	-12	-3
栗橋地点	-67	7
流域外導水	-4	-4
地下水取水量	-0	-0

(7) 水質保全に関する効果

標準設定と各シナリオにおける栗橋地点の年平均水質と超過確率を表 12 に示す。Run 5 の製造業系の節水により少しだけ水質が悪化しているが、節水やダムの新設は水質に対してほとんど影響していない。

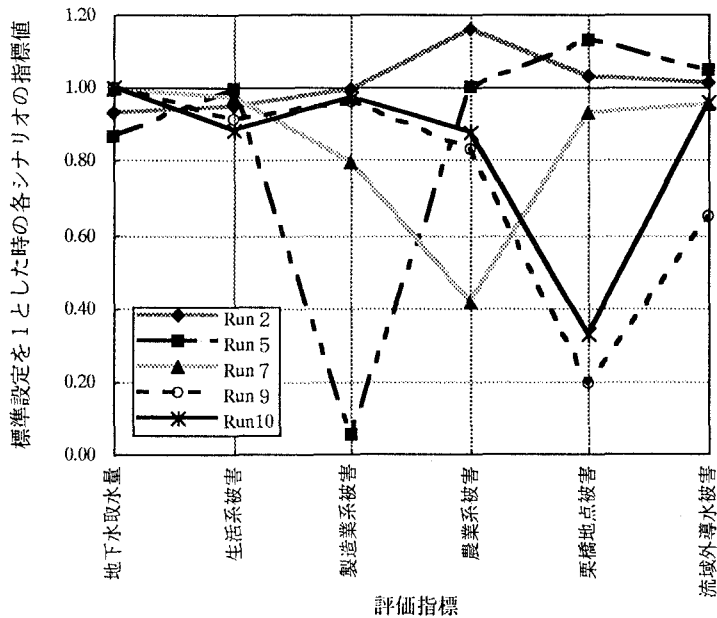


Fig.4 Ratio of evaluation indices between each scenario and standard setting

4. おわりに

本報では、流域全体について水文事象の変動性を考慮した水・汚濁物質収支シミュレーションを行い、水管理施策の効果や流域状況の変化による影響等を定量的に評価するシステムを提案している。またこのシステムを利根川水系に用いて、生活系や農業系などの水利用形態ごとの節水効果やダム新設の効果について個別に検討し、相対的な比較を行っている。以下に得られた知見を要約する。

- (1) 奈良俣ダムの新設の効果は利根大堰からの導水量を20%削減する効果よりやや小さいが、その効果の現れ方は似ており、ともに下流部の利水の安定性に対してその効果がでている。
- (2) 上流部における節水は下流部の利水の安定性に対してあまり効果がない。
- (3) 生活系、製造業系、農業系で節水効果を比較すると、表流水依存度が高いこと、取水量が多いこと、使用時の損失率が高いことから農業系の節水効果が大きい。

ここで提案した評価システムで用いたシミュレーションでは、地下水の涵養による自然発生流量の増加や地下水取水の増大による自然発生流量の減少など地下水に関する現象が十分に取扱いされていない。よって、農業系など地下水涵養が行われるものに対しては節水効果は過大に、製造業系など地下水取水量が多いものに対しては節水効果を過小に評価していることが考えられる。このように問題点はあるものの、この評価システムを用いることにより利根川水系という広い流域において、しかも水文事象の変動性を考慮しながら、節水やダム新設が水量確保や水質保全に与える効果と同じ枠組みの中で相対的に評価し、比較することが可能になった。水や汚濁物質の動きに関しては、地下水に関する現象以外にも複雑でかつ未解明な部分が多いので、今後このような部分が評価システムに与えている影響を検討し、問題のある部分をシステムに取り入れて評価の精度を上げていくことが今後の課題である。

参考文献、参考資料

- 1) Tsuyoshi Hashimoto, Jerry R. Stedinger and Daniel P. Louks : 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 第30号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 第32号B-2、pp.383-400、1989
- 4) 高埴琢馬・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年研究発表要旨集、pp.75-78、1989
- 5) 流量年表（昭和53年版～62年版）
- 6) 多目的ダム管理年報（昭和53年版～62年版）
- 7) 水資源開発公団施設等管理年報（昭和53年版～62年版）
- 8) 水道統計（平成元年度）
- 9) 下水道統計・行政編（平成元年度）
- 10) 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説、平成5年
- 11) 高橋裕編：首都圏の水、東京大学出版会、1993
- 12) 工業統計・用地用水編（平成元年度）
- 13) 河川水質年鑑（昭和55年、56年）

Table 12 Evaluation indices on water quality

	栗橋地点BOD		流域外導水BOD	
	平均値 (ppm)	超過確率 (%)	平均値 (ppm)	超過確率 (%)
標準設定	1.77	38.2	1.49	24.2
Run 2	1.77	38.2	1.49	24.2
Run 5	1.82	39.2	1.51	25.9
Run 7	1.76	37.9	1.49	24.2
Run 9	1.77	38.2	1.49	24.2
Run10	1.77	38.2	1.49	24.2