

水・汚濁物質収支シミュレーションを用いた 水量・水質管理施策の相対的確率評価

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た水と汚濁物質収支のシミュレーションモデルを利根川水系上流域に適用して、利水ダムの建設や節水に関する施策、ダム群の運用方法の変更といった水資源問題に関する施策についてのシミュレーションを行い、得られた結果から(i)各施策による渇水被害額の削減効果の比較、(ii)渇水日数と渇水被害(不足%日)、渇水被害額の関係、(iii)渇水被害の年間変動、(iv)河川水質への影響、の4項目についての考察を行った。その結果、生活系水利用の10%の削減は利水ダムの建設とほぼ同程度の渇水被害額の削減効果があること、取水制限開始貯水量や最大取水制限率の変更などのダム群の運用方法に関するシナリオでは対象流域内とその下流域とで全く逆の効果が得られること、などいくつか知見が得られた。

Key Words : *drought indices, river water quality, impact analysis, water resources management, hydrological uncertainty, the Tone River Basin*

1. はじめに

河川流域におけるさまざまな水量・水質管理施策が流域全体の水循環や水質変動に与えている影響については、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ため、この不確定性を考慮したシミュレーションを行うことによって確率的に評価していく必要がある。

筆者らは、利根川上流域という大規模な流域を対象として、上記の不確定性を考慮した水資源施策の評価を行うために、1,000年分の流量系列を作成して流域内の水収支のシミュレーションモデルを構築してきた^{1),2)}。また、水質管理の施策や水道事業者レベルの施策の評価を行うために、汚濁物質収支を考慮し、上下水道などの人工的な水循環の現象も組み込んだモデルを構築してきた³⁾。さらに、流量の相互相関性や自己相関性を考慮した流量系列の作成方法の導入などのモデルの改良を行ってきた⁴⁾。

本研究では、このモデルを用いて、利根川水系上流域における利水ダムの建設や節水、上水道における有効給水率の改善、ダム群の取水制限に関する運用方法の変更、などの水資源問題に関する諸施策の及ぼす影響についてのシミュレーションを行い、渇水

の生起確率や不足%日といった利水安全度の概念を用いた指標や渇水被害額、あるいは河川水質に関しての指標を算出した。さらに、得られた結果を用いて、(i)各施策による渇水被害額の削減効果の比較、(ii)渇水日数と渇水被害(不足%日)、渇水被害額の関係、(iii)渇水被害の年間変動、(iv)河川水質への影響、の4項目についての考察を行った。

2. 対象流域の概要

対象としたのは、図-1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(奈良俣ダム、渡良瀬貯水池)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。また、中流部の利根大堰からは、利根導水路により東京・埼玉方面への年間20億m³弱(対象流域における流出量の約22%)の水が導水されている。

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上

での構成要素となるが、対象流域内には1989年の時点で88の水道事業体と31の下水処理場がある。

3. シミュレーションモデルの概要

このシミュレーションモデルでは、水文事象の不確定性を考慮して水や汚濁物質の収支を確率的に評価するために、対象流域内の各小流域から発生する流量について1,000年分の流量系列を作成してシミュレーションの入力値としている。この流量系列は、統計データ^{5), 6), 7)}から推定した各季節ごとの発生流量の確率分布を基に1から999までの乱数を用いて作成されており、発生流量の相互相関性や自己相関性をその相関の程度に応じて考慮に入れることにより実際の流量に対する再現性を高くしてある⁹⁾。なお、発生流量には河川流量の実測値を用いている。従って、降雨から蒸発散量を減じたり、積雪による一時的貯留、融雪による水量の増大等の諸要素を全て総括的に含んだ総合的な発生流量として扱うものとなっている。

こうして作成した1,000年分の流量系列を用いることにより、各地点における流量や水質を確率分布として表現できるようになっている。以下に、シミュレーションで行った小流域内における水および汚濁物質収支式の概要について説明し、さらにシミュレーションに必要なパラメーターや算出される評価指標について説明する。

(1) 水収支式の概要

小流域内の水収支の様子は図-2に示す。水収支シミュレーションの構成要素としては、図に四角で示しているように河川、地下水、発生流量の他に、3種類の水利用者、上水道事業体、下水処理場がある。また、シミュレーション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⁸⁾であることから半旬単位で行われる。

河川流量 (R_{i-1}) や発生流量 (SF_i) が豊富にある場合、図-2のような小流域 i における j 水道事業体の給水量 (W_j)、 i 流域の生活用水量 (UD_i)、製造業用水量 (UI_i)、農業用水量 (UA_i)、 k 下水処理場の処理水量 (SP_k) は以下の式(1)~(5)により算出される。

$$W_j = WR_{i-1,j} + WS_{ij} + WG_{ij} + WW_j \quad (1)$$

$$UD_i = UDW_{ji} + UDS_{ii} + UDG_{ii} + UDSP_{ki} \quad (2)$$

$$UI_i = UIW_{ji} + UIR_{i-1,i} + UIS_{ii} + UIG_{ii} \quad (3)$$

$$UA_i = UAR_{i-1,i} + UAS_{ii} + UAG_{ii} \quad (4)$$

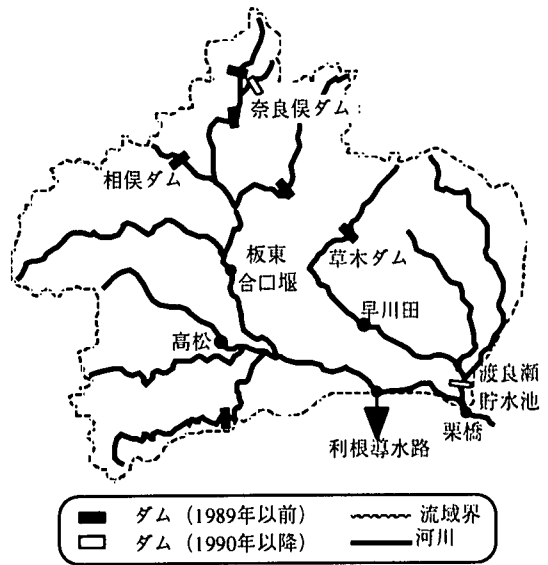


図-1 対象流域地図

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

ここで、 $WR_{i-1,j}$ 、 WS_{ij} 、 WG_{ij} は河川 $i-1$ 地点、 i 流域の発生流量、地下水それぞれからの j 水道事業体の取水量、 WW_j は i 水道事業体からの j 水道事業体の受水量、 UDW_{ji} 、 UDS_{ii} 、 UDG_{ii} は j 水道事業体、 i 流域の発生流量、地下水からの i 流域の生活用への取水量、 $UDSP_{ki}$ は k 下水処理場からの i 流域の生活用への再利用水量、 UIW_{ji} 、 $UIR_{i-1,i}$ 、 UIS_{ii} 、 UIG_{ii} は j 水道事業体、河川 $i-1$ 地点、 i 流域の発生流量、地下水からの i 流域の製造業用への取水量、 $UAR_{i-1,i}$ 、 UAS_{ii} 、 UAG_{ii} は河川 $i-1$ 地点、 i 流域の発生流量、地下水からの i 流域の農業用への取水量、 β_k は k 処理場における地下水没入を考慮した下水割増率、 $SPUD_{ik}$ 、 $SPUI_{ik}$ は i 流域の生活用、製造業用から k 処理場への排水量である。

式(1)~(5)から、 i 流域の地下水収支 (G_i) および河川 i 地点における流量 (R_i) は以下の式(6)、(7)にて算出される。

$$G_i = WG_{ij} + UDG_{ii} + UIG_{ii} + UAG_{ii} - LUD_i \cdot UD_i - LUI_i \cdot UI_i - LUA_i \cdot UA_i + \left\{ \frac{SP_k \cdot (\beta_k - 1)}{\beta_k} \right\} - W_j \cdot (1 - \alpha_j) \quad (6)$$

$$R_i = R_{i-1} - (WR_{i-1,i} + UAR_{i-1,i} + UIR_{i-1,i}) + (SF_i - WS_{ij} - UDS_{ii} - UIS_{ii} - UAS_{ii}) + (UD_i - LUD_i \cdot UD_i - SPUD_{ik}) + (UI_i - LUI_i \cdot UI_i - SPUI_{ik}) + (1 - LUA_i)UA_i + (SP_k - UDSP_{ki}) \quad (7)$$

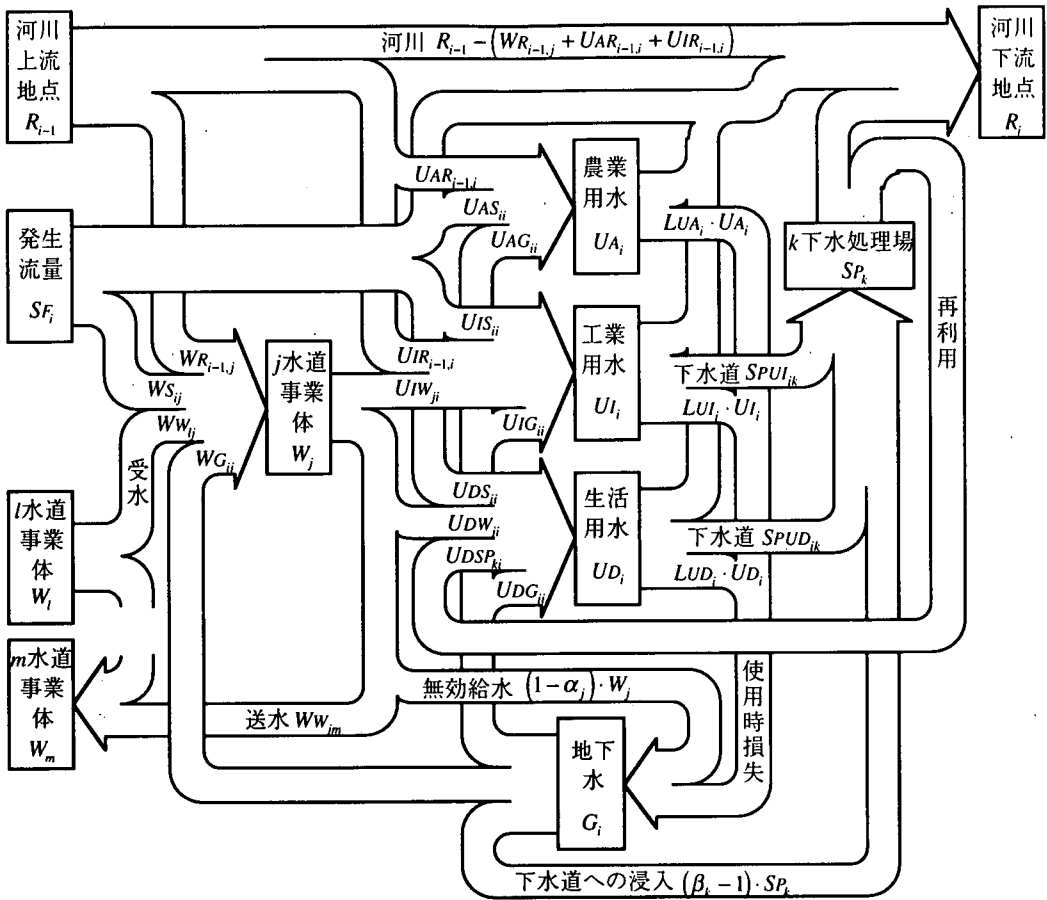


図-2 小流域内での水収支の様子

ここで、 LUD_i 、 LUI_i 、 LUA_i は*i*流域における生活用、製造業用、農業用利用時の地下への損失率、 α_j は*j*水道事業体の有効給水率である。

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 の運用方法を決定し、その後上流から下流へと構成要素ごとに式(1)~(7)を用いて計算が行われる。渇水時にはダム群の総貯水量に応じた取水制限により、各設定取水量は減少するようになっている。

また、図-2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発生流量などは変化しないものと仮定していることになる。

(2) 汚濁物質収支式の概要

小流域からの汚濁負荷量は、生活系由来のうち下水道を経由して排出されるものと経路しないで排出されるもの、製造業由来、畜産業由来、非特定汚染源(農地、市街地、山林)に分けて算出される。なお、これ以外の負荷については、ここでは取り扱っていない。

例えば、*i*流域における下水道以外の生活由来(UDP_i)、製造業由来(UIP_i)、畜産業由来(LSP_i)、非特定汚染源(NPP_i)の発生汚濁負荷量は、以下の式(8)~(11)により算出される。

$$UDP_i = \sum_{j=1}^3 WPPOP_{ij} \cdot WPPU_j \quad (8)$$

$$UIP_i = \left(UI_i - LUI_i \cdot UI_i - \sum_{j=1}^l SPUI_{ij} \right) \cdot UIQ_i \quad (9)$$

$$LSP_i = \sum_{j=1}^2 LS_{ij} \cdot LSPU_j \quad (10)$$

$$NPP_i = \sum_{j=1}^4 LA_{ij} \cdot LAPU_j \quad (11)$$

ここで、 $WPOPOP_{ij}$ は*i*流域における合併浄化槽 ($j=1$)、単独浄化槽 ($j=2$)、汲み取り ($j=3$)の利用人口、 $WPPU_j$ は合併浄化槽、単独浄化槽、汲み取りにおける1人当たり発生汚濁負荷量、 UIQ_i は*i*流域の製造業からの排水水質、 LS_{ij} は*i*流域における種別の家畜飼育頭数、 $LSPU_j$ は種別の1頭当たりの発生汚濁負荷量、 LA_{ij} は*i*流域における用途ごと(水田、畑地、市街地、山林)の土地利用面積、 $LAPU_j$ は用途ごとの面積当たり発生汚濁負荷量である。

河川*i*地点における汚濁負荷量(RP_i)は、小流域からの汚濁負荷量、下水道からの汚濁負荷量、上流からの汚濁負荷量を合わせて式(12)を用いて算出される。

$$RP_i = \sum_{j=1}^n NR_{ij} \left(RP_j \cdot \frac{\sum_{k=1}^m WR_{kj} + \sum_{k=1}^n UIR_{kj} + \sum_{k=1}^n UAR_{kj}}{R_j} \right) + \sum_{j=1}^i NSPR_{ij} \left(SP_j - \sum_{k=1}^n UDSP_{kj} \right) \cdot SPQ_j + PRR_i \cdot (UDP_i + UIP_i + LSP_i + NPP_i) \quad (12)$$

ここで、 SPQ_j は*j*下水処理場における処理水質、 PRR_i は*i*流域における河川への流達率である。

なお、ここでは、BOD、COD、TN、TPの4種の汚濁物質を対象としている。

(3) パラメーターの設定

人口や土地利用、製造業出荷額などの流域情報については1989年、もしくは1990年の統計データを参考に設定しており、また上水道の有効給水率や下水処理水質などの、上水道や下水処理場、ダムに関するパラメーターについても近年の実測値を参考に設定している。

水需要量や排出汚濁負荷量などは原単位法を用いて算出されるが、これらの原単位は既存の統計データ⁹⁾や流総指針¹⁰⁾などを参考にして設定している。畜産系の排出汚濁負荷など、原単位によっては発生地域ごとに一律の値にならず、また過去の調査によっては1桁以上異なる結果が示されているものもあるが、本研究では広い流域を対象としていること、および相対評価を行う上でそれほど影響を与えないものについては、過去の調査例における平均的な値を用いることにしている。なお、農業系の水需要に関する原単位については5~6月の水田における湛水期に多くなるように、また非特定汚染源からの排出汚濁負荷原単位については降雨量に応じて季節ごとに値を

変化させている。

各利用者の設定取水量や利根導水路の導水量などはシミュレーションを行ううえであらかじめ設定しておかなければならないが、これは統計データから得られた実績値を基に設定している。また、前述のように渇水などでダム群の貯水量が少ないときには、これらの設定取水量が減少するようになっている。

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旬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、取水制限が行われ、各利用者の設定取水量が削減されるようになっている。なお実際の状況では、取水制限は水利権に応じて課せられているが、このシミュレーションでは細かい水利権に基づく解析を行っていないため、各利用者一律に課すことを仮定している。また、取水制限直前での駆け込み余剰取水については、適切なデータが得られなかったため検討していない。

合併浄化槽、単独浄化槽、汲み取りの各利用人口は、日本全国(1988年度)で下水道が約40%、汲み取りが31%、単独浄化槽が28%、残りが合併浄化槽等になっており、これを参考に値を定めている。流達率については、利根川の低水時の河川水質を再現することを目的としているので、流総指針¹⁰⁾より各小流域のBOD流達率を15%とし、COD、TN、TPについてはBODの2倍の30%としている。

(4) 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を算出している。評価指標としては、平均値などの他に、中安ら¹¹⁾が提案した渇水の頻度や期間、程度、深刻さ、経済的被害などの利水安全度の概念を参考にした8種の確率的な指標を算出している。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量の場合は計画水需要量が用いられる。

半旬渇水確率：渇水の頻度を表す指標。1,000年分のシミュレーション結果のうち渇水の状態が生起する確率で、半旬ごとに算出される。

半旬渇水不足率：渇水の程度を表す指標。渇水の状態が起こったときの基準水量に対する不足率(%)の平均値で、半旬ごとに算出される。

渇水年確率：渇水の頻度を表す指標。ある半旬において渇水の状態が起こっているような年が1,000年分

表-1 河川各地点の水質75%値 (mg/L)

	BOD	COD	TN	TP
板東合口堰	0.6 (0.8 - 1.3)	1.0	0.5	0.04
高松地点	3.7 (2.2 - 4.7)	5.5	2.0	0.28
早川田地点	3.7 (2.9 - 4.2)	5.6	3.5	0.29
栗橋地点	3.1 (1.1 - 1.9)	4.6	2.3	0.23

※ BODの()内は1980～89年の実測値

のシミュレーション結果のうち何年あったかを確率として算出したものである。

年平均渇水日数：渇水の期間を表す指標。1,000年分のシミュレーション結果のうち、渇水の状態が起きている年における渇水日数の平均値である。

年平均渇水被害(不足%日)：渇水の深刻さを表す指標。ある年において渇水の状態が起こった場合、その基準水量からの不足率(%)とその不足率の期間(日)を掛け合わせた値(不足%×日)について、1,000年分のシミュレーション結果の平均値を算出したものである。対象流域全体の年平均渇水被害として、対象流域内の各小流域や上水道事業体についてその水需要量に応じた重みづけ平均値も算出している。

年平均渇水被害額：渇水の経済的被害を表す指標。ある年において渇水の状態が起こった場合、その基準水量からの不足水量とその不足率に対応する渇水被害額原単位を用いて算出した値について、1,000年分のシミュレーション結果の平均値をとったものである。渇水被害額原単位は、式(13)～(17)に示した中澤ら¹²⁾が算出した原単位の式を用いて用途ごとに算出される。

生活系(上水道)： $P=150 \quad (0 < S \leq 39.1) \quad (13)$

$P=2.05S^2-147S+2,763 \quad (S > 39.1) \quad (14)$

生活系(上水道以外)：

$P=2.05S^2-147S+2,613 \quad (S > 39.1) \quad (15)$

製造業系： $P=0.33S^2-1.28S \quad (S > 3.8) \quad (16)$

農業系： $P=0.066S^2-0.33S \quad (S > 5.0) \quad (17)$

ここで、 P が渇水被害額原単位(円/m³)、 S が不足率(%)である。

利根導水路導水と栗橋地点の被害額原単位は、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(13)～(17)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している。また、水質についても平均値などの他に1,000年分

のシミュレーション結果を生かした指標を算出している。以下にその概要を示す。

水質75%値：ある1年において75%の水質値が超過しないような値であり、ここでは、さらに1,000年分のシミュレーションの平均値をとっている。

水質超過確率：河川のBOD値が各半月において環境基準値を超過する確率である。

(5) シミュレーションモデルによる河川流量・水質の再現性

シミュレーションの結果算出された年平均流量や半月平均流量、利用水量、あるいは渇水年確率といった確率的な指標については、実際の状況を比較的よく再現していることが確認され、別の報告¹¹⁾において示しているとおりである。

よって、ここでは河川水質の再現性について検討する。水質4項目の75%値、および1980～1989年のBOD75%値の実測値の範囲を表-1に示す。BODの75%値についてシミュレーション結果と実測を比較すると、板東合口堰ではシミュレーション結果は実測値より低く、逆に最下流の栗橋地点では高くなっており、利根川本川上では実測値とのずれがある。一方、支流にある高松地点や早川田地点ではシミュレーション結果は実測の範囲内で、実際の状況がある程度再現されていると考えられる。栗橋地点における適合性が悪い点は、貯水池内や河川流下時の水質変化が考慮されていないこと、実測値が晴天日の流量に対する水質であることに対して、シミュレーションは晴天日流量のみを対象としているわけではないこと、などがその理由として考えられるが、場合によって、周辺流域からの汚濁負荷量の推定が大きくなった可能性は否定できない。但し、本研究においてはシステム全体の有効性を検証することを優先し、負荷量推定の精度については検討を保留している。

このように、水量面に関してはほぼ実際の状況が再現できており、水質面に関しては汚濁負荷の発生時などでは季節変動しか取り扱っていないので、地点によっては再現性に問題が残されている。しかし、ここでは各施策の相対的な評価を目的としており、この水および汚濁物質収支のシミュレーションモデルの利用により、その目的は十分に達成されるものと考えられる。

4. 施策シナリオの概要

ここでは、実際の状況の再現性が確認された設定を「現状」のシミュレーション結果とし、これに対し

て表-2に示した9つの項目についての設定を個別に変更するシナリオを27通り作成し、シミュレーションを行って前章で示した評価指標を算出して施策の評価を行う。以下に各シナリオについて項目毎に詳しく述べる。

(1) 利水ダムの建設

現状からさらに利水用のダムを建設した場合について検討する。現状のシミュレーションでは図-1に示した1989年以前から存在する6ダム（総利水容量3.5億m³）をシミュレーションの構成要素として取り入れていたが、ここではこれらの6ダムに加えて、奈良俣ダム（7,200万m³）、あるいは渡良瀬貯水池（2,640万m³）がそれぞれ建設された場合についてのシミュレーションを行う。

また、1989年以前に建設されていたダムについて、事故などで使えなくなった場合、あるいは利水用として用いなくなった場合についても検討する。具体的には、相俣ダム（2,000万m³）、草木ダム（5,050万m³）について、それぞれを無くしてダムが5つになった場合についてのシミュレーションを行う。このケースは、これら2つのダムが存在する効果を測定するシナリオでもある。

(2) 水道事業体における有効給水率

各水道事業体において配管網の更新などにより有効給水率を改善した場合について検討する。現状のシミュレーションでは、各事業体の有効給水率として統計データ⁹⁾を用いており、88事業体のうち61事業体が有効給水率85%未満、75事業体が90%未満となっている。ここでは、85%未満の61事業体の有効給水率を85%に、あるいは90%未満の75事業体の有効給水率を90%に設定してシミュレーションを行う。

(3) 農業系水利用量

農業系の水利用の増減による影響について検討する。具体的には、対象流域内における農業系の水需要量原単位を増減させるとともに、利根導水路導水量における農業系水需要量と栗橋地点基準流量における農業系水需要量を増減させて下流部での農業系水利用量の変化も考慮に入れたシミュレーションを行う。変化させる量の目安としては、5%、あるいは10%増減させることにする。

(4) 生活系水利用量

生活系の水利用の増減による影響について検討する。具体的には、対象流域内の生活系の水需要量原単位を増減させるとともに、利根導水路導水量にお

表-2 取り扱ったシナリオのリスト

利水ダムの建設	(1)奈良俣ダムの建設 (2)渡良瀬貯水池の建設 (3)相俣ダムが無い場合 (4)草木ダムが無い場合
有効給水率の改善	(5)全事業体で85%以上 (6)全事業体で90%以上
農業系水利用量	(7)10%減少 (8)5%減少 (9)5%増加 (10)10%増加
生活系水利用量	(11)10%減少 (12)5%減少 (13)5%増加 (14)10%増加
取水制限開始貯水量の変更	(15)0.5億m ³ に変更 (16)1.0億m ³ に変更 (17)2.0億m ³ に変更 (18)2.5億m ³ に変更
最大取水制限率の変更	(19)30%に変更 (20)50%に変更 (21)60%に変更
栗橋地点維持流量の変更	(22)10%減少 (23)5%減少 (24)5%増加 (25)10%増加
(26)下水道の普及	
(27)合併浄化槽の普及	

る生活系水需要量と栗橋地点基準流量における生活系水需要量を増減させて下流部での生活系水利用量の変化も考慮に入れたシミュレーションを行う。変化させる量の目安としては、5%、あるいは10%増減させることにする。

(5) 取水制限の開始貯水量

ダム群の総貯水量が減少してきた時に、河川から取水している事業者にと取水制限を課してダム群の貯水量を温存するというダム群管理が現実には行われている。利根川水系における過去3回（昭和53年、62年、平成2年）の取水制限が行われたときに取水制限開始時の総貯水量はほぼ1.5億m³であったこと、また不足率が40%を越えると生活系の渇水被害額が急激に大きくなることから、現状のシミュレーションにおいては取水制限の開始貯水量を1.5億m³、最大取水制限率を40%に設定している。具体的には、図-3の現状に示したように、6ダムの総貯水量が1.5億m³未満の時に10%、1.125億m³未満の時に20%、0.75億m³

未満の時に30%、0.375億 m^3 未満の時に40%の取水制限を課すように設定している。

ここでは、取水制限の開始貯水量を変更した場合の影響について検討する。具体的には、最大取水制限率を変えずに取水制限開始貯水量を0.5、1.0、2.0、2.5億 m^3 に変更してシミュレーションを行う。変更した時の総貯水量と取水制限率の関係は図-3に示した通りである。

(6) 最大取水制限率

ここでは、最大取水制限率を変更した場合の影響について検討する。具体的には、取水制限開始貯水量は1.5億 m^3 のままとして、最大取水制限率を30%、50%、60%に変更してシミュレーションを行う。変更した時の総貯水量と取水制限率の関係は図-4に示した通りである。

(7) 栗橋地点維持流量

実際の利根川上流ダム群からの放流量は栗橋地点の基準流量を満たすように決定されており、現状のシミュレーションにおいても基準流量を満たすように各ダムから放流するようになっている。この基準流量としては、栗橋地点より下流部における取水権量と維持流量の和を用いており、ここでは、栗橋地点における維持流量を変更した場合の影響について検討する。具体的には、維持流量を5%、あるいは10%増減させてシミュレーションを行う。

(8) 下水道、合併浄化槽の普及

ここでは、7つの水量に関する施策のシナリオを取り上げているが、これらの施策が水質に与える影響を検討するための比較対象として、下水道の普及、あるいは合併浄化槽の普及といったシナリオについてもシミュレーションを行う。

下水道の普及は、対象流域内において下水道の利用者を1990年時点における計画人口にまで拡大した場合についてのシミュレーションを行う。このシナリオにより、下水道人口が72万人（普及率23%）から121万人（普及率39%）に増加する。

合併浄化槽の普及は、対象流域内において単独浄化槽や汲み取りによるし尿処理を行っていた人に対して雑排水の処理対策として合併浄化槽の普及を行うもので、現状のシミュレーションでは合併浄化槽の利用者は下水道を利用している人以外の中で2%を占めるとしていたが、このシナリオでは10%まで普及した場合について検討する。このシナリオにより、合併浄化槽利用人口は5万人から24万人へと増加する。

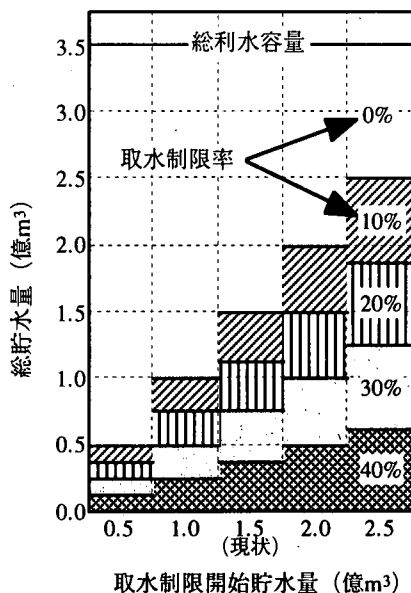


図-3 各取水制限開始貯水量における総貯水量と取水制限率の関係

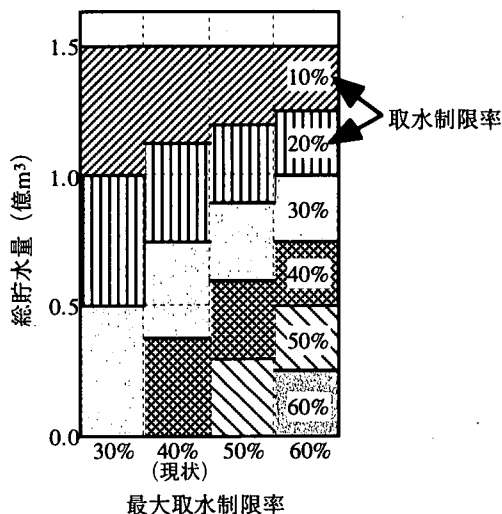


図-4 各最大取水制限率における総貯水量と取水制限率の関係

5. 評価指標に現れる効果の比較

(1) 年平均渇水被害額の変化

図-5～7に各シナリオにおける対象流域内、栗橋地点、利根導水路の導水に関する年平均渇水被害額を示す。これらの図で、縦軸は前章で示した各施策のシナリオを表しており、横軸が年平均渇水被害額となっている。また、現状のシミュレーションでは、対象流域内、栗橋地点、利根導水路の導水に関する渇水被害額はそれぞれ147、2,559、2,474億円であり、こ

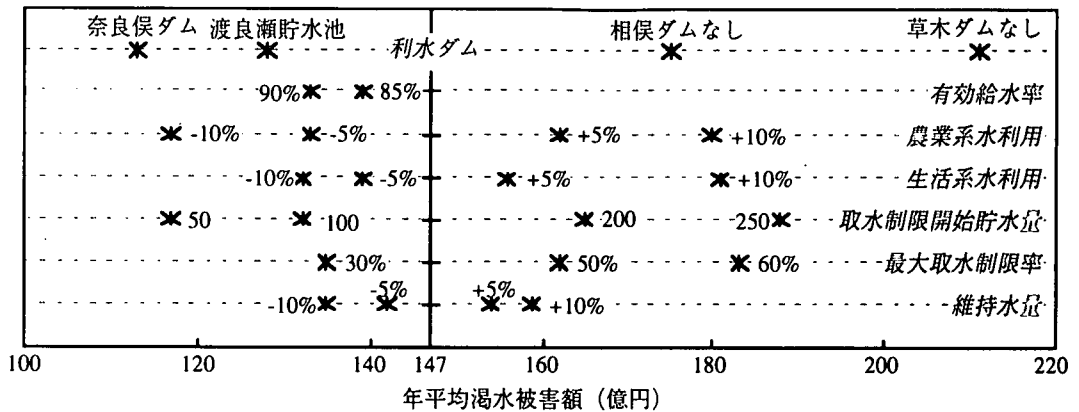


図-5 各シナリオにおける対象流域内の年平均洪水被害額

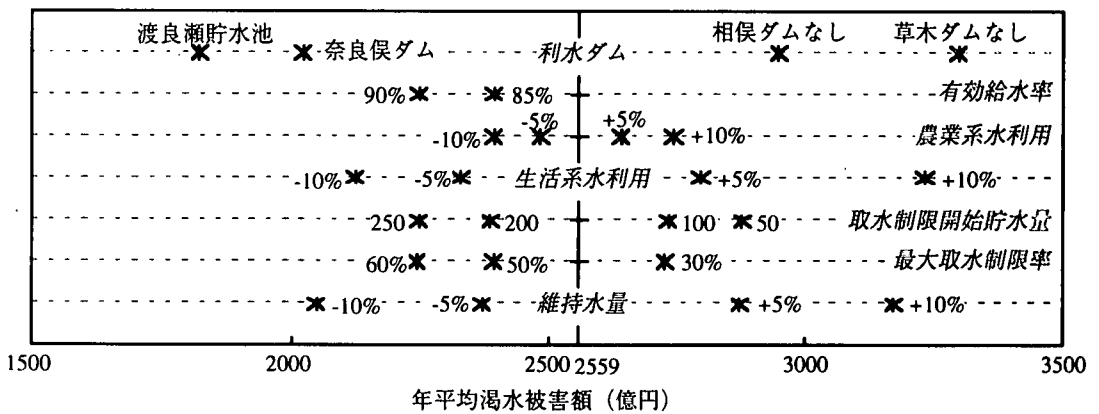


図-6 各シナリオにおける栗橋地点での年平均洪水被害額

これらの値を横軸の原点としたことにより、現状からの変化量がわかるようにしてある。例えば、奈良俣ダム建設のシナリオにおける対象流域内の洪水被害額は115億円弱であり、現状から30億円以上減少している。一方、相俣ダムがないというシナリオでは、対象流域内の洪水被害額は175億円程度となっており、現状から30億円程度増加している。

現状と比較して洪水被害額の削減量が多くなるシナリオを挙げると、対象流域内においては奈良俣ダム建設、農業系の水利用-10%、取水制限開始貯水量0.5億 m^3 で、栗橋地点での洪水被害額においては渡良瀬貯水池、奈良俣ダム建設、栗橋地点維持流量-10%、生活系水利用-10%、利根導水路の導水に関しては上水道有効給水率90%、生活系水利用-10%、奈良俣ダム、渡良瀬貯水池建設となっている。一方、洪水被害額の増加量が多いシナリオを挙げると、対象流域内においては草木ダムがない場合、栗橋地点においては草木ダムがない場合の他に生活系水利用+10%、栗橋地点維持流量+10%、利根導水路導水においては草木ダムがない場合、生活系水利用+10%、最大取水制

限率60%となっている。

利水ダム建設の効果はいずれの洪水被害額の削減に対しても効果が大きくなっているが、生活系水利用の10%削減でも被害額は利水ダム建設と同程度削減されている。また、農業系水利用の削減や上水道の有効給水率の改善、栗橋地点維持流量の変更やダム群の運用方法の変更でも、対象流域内、栗橋地点、利根導水路導水のどれかの洪水被害額を同程度削減することができる。

また、例えば取水制限開始貯水量については、開始貯水量を1.0、あるいは0.5億 m^3 に減らすと対象流域内では洪水被害額は削減されるが、栗橋地点や利根導水路導水では洪水被害額は増加している。このような状況は最大取水制限率についても見られており、ダム群の最適な運用方法について検討するときには流域全体にあたる影響を考慮に入れて検討していく必要があることを示唆している。

(2) 洪水被害と被害額、洪水日数の関係

ここでは、各シナリオにおける栗橋地点の年平均

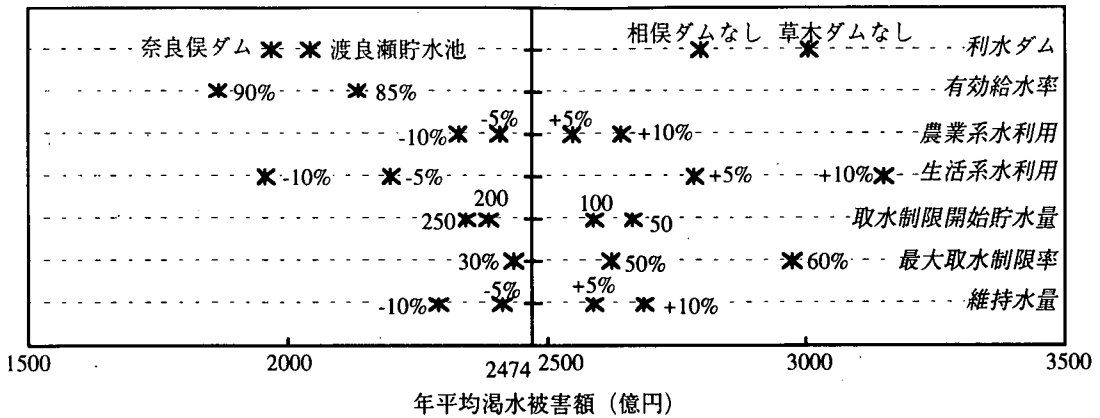


図-7 各シナリオにおける利根導水路の導水に関する年平均渇水被害額

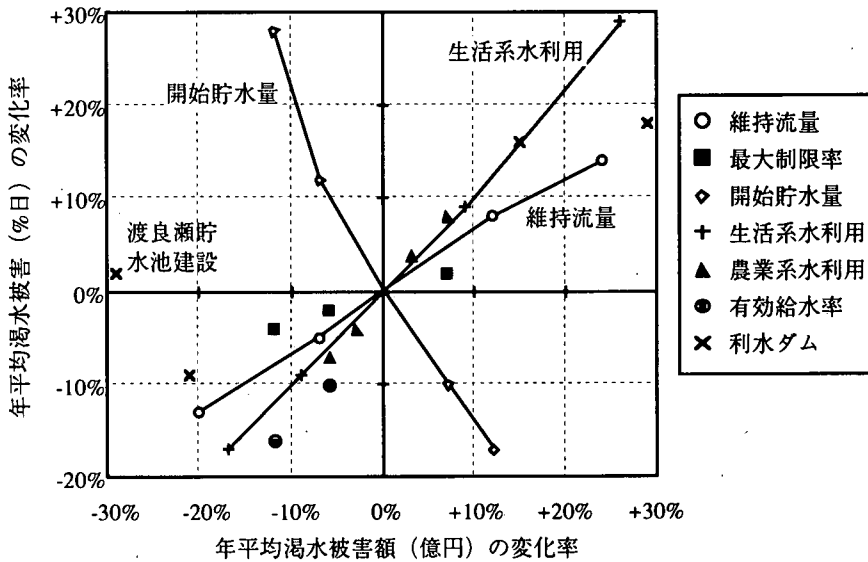


図-8 各シナリオにおける年平均渇水被害額（億円）と年平均渇水被害（%日）の変化率

渇水被害額、年平均渇水被害、年平均渇水日数について各指標の関係について検討する。

図-8に各シナリオにおける栗橋地点の年平均渇水被害額と年平均渇水被害の現状からの変化率を示す。正の変化率は渇水被害額や平均渇水被害が増加していることを意味しており、負の変化率は減少していることを意味している。ほとんどのシナリオで渇水被害額と平均渇水被害は同じように変動しており、渇水被害額が増加しているときは平均渇水被害も増加しており、渇水被害額が減少しているときは平均渇水被害も減少している。しかし、取水制限開始貯水量を変更するシナリオと渡良瀬貯水池建設に関しては、渇水被害額は減少しているが平均渇水被害は増加している、といった様子が見られている。この理由は、渇水被害額は平均渇水被害と比べると厳しい渇水の状況を表す指標になっており、これらのシ

ナリオは厳しい渇水を減らす効果があるものの渇水の頻度自体は増加させているためである。

また、生活系水利用の場合は渇水被害額と平均渇水被害の変化率はだいたい同じような値となっている（図-8で傾きが1）が、栗橋地点維持流量の場合では渇水被害額の変化率の方が平均渇水被害の変化率より大きくなっており、生活系水利用の変化と比較して栗橋地点維持流量の変化は渇水の頻度よりは渇水が起こったときの深刻さに大きな影響を与えているものと考えられる。

図-9に各シナリオにおける栗橋地点の年平均渇水被害と年平均渇水日数の現状からの変化率を示す。利水ダム建設や開始貯水量の変化といったシナリオ以外は、平均渇水被害の変化率に対する平均渇水日数の変化率が同じような値になっている。また、奈良俣ダムについては、平均渇水被害は減少するもの

渇水日数は増加している。この理由は、上流部で水を貯めておくことにより利根導水路からの他流域への導水量が増加したため、栗橋地点においては厳しい渇水を減らすことができたものの、渇水の頻度自体は増加させているからである。

(3) 渇水被害の年間変動に与える影響

図-10に現状のシミュレーション、奈良俣ダム建設、生活系水利用の10%削減、取水制限開始貯水量の1億m³に減少、といった各シナリオにおける栗橋地点の半旬渇水確率の年間変動を示す。現状では、1～3月(第1～18半旬)、6月後半(第34～36半旬)などで渇水確率が高くなっており、冬期に降水量の減少、および6月の水田における水利用のピーク時に流量が確保できない状況が多くなっていることを表している。奈良俣ダムの建設では5～6月にかけて現状より渇水確率を増大させており、一方生活系水利用の10%削減と取水制限開始貯水量の1億m³への減少は年間通して渇水確率を減少させており、特に冬期において現状より大きく減少させている。奈良俣ダムの建設に伴い、栗橋地点においては渇水の頻度が増加してしまうことは前述した年平均渇水日数で示されたが、これが5～6月の利根導水路導水における農業用水需要が多い時期に起こっていることが渇水確率の年間変動から示されている。

図-11に図-10で示したシナリオについて、利根導水路導水の半旬渇水確率の年間変動を示す。現状では、3月と7～10月前半にかけて渇水確率が大きくなっている。3つのシナリオについては、いずれも年間を通じて渇水確率が現状より減少しており、特に奈良俣ダム建設と取水制限開始貯水量の1億m³への減少は削減効果が大きくなっている。

図-12には図-10で示したシナリオについて、栗橋地点の半旬渇水不足度の年間変動を示す。現状では、8～9月にかけて渇水不足度は高くなっており、あとは多少の変動はあるもののほぼ一定である。取水制限開始貯水量の1億m³への減少は年間を通じて不足度を増大させており、一方で生活系水利用の10%削減と奈良俣ダム建設は年間を通じて減少させている。奈良俣ダム建設により5～6月にかけての渇水確率は増大するが、渇水不足度は減少していることから、渇水の深刻さは軽減していることがわかる。一方で、取水制限開始貯水量の1億m³への減少により渇水の頻度が減少することから栗橋地点、利根導水路導水の渇水確率はともに減少するが、渇水不足度は増大しており、渇水が起こったときの深刻さは増大していることがわかる。

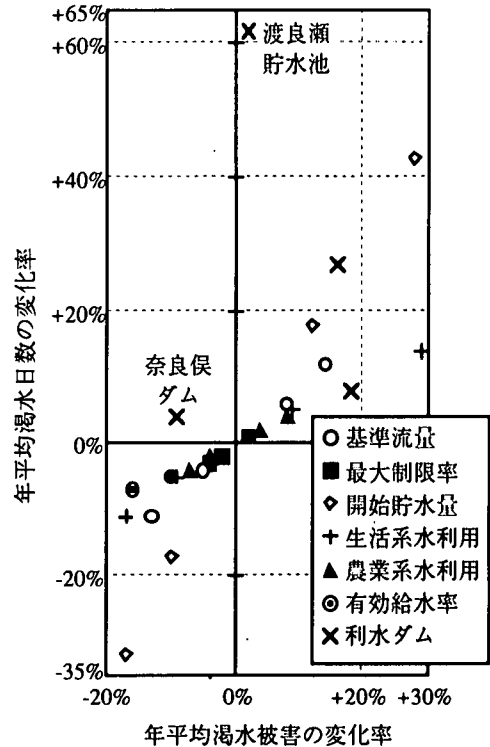


図-9 各シナリオにおける年平均渇水被害と年平均渇水日数の変化率

(4) 河川水質に与える影響

表-3に、各シナリオにおける栗橋地点の各水質項目の75%値と、BODの環境基準値2mg/Lに対しての超過確率を示す。上から栗橋地点維持流量まで7つのシナリオは水量の安定化に関する施策のシナリオであり、その下にある下水道普及、合併浄化槽の普及という2つのシナリオは水質保全に関する施策のシナリオである。

下水道普及のシナリオでは、対象流域内において下水道普及率を16%引き上げたことになっているが、BOD75%値は現状の3.11mg/Lから2.91mg/Lと6%程度削減されたにとどまっている。この理由は、対象流域内では畜産業や水田や畑地などの面源からの汚濁負荷量が多いためである。

水量安定化に関する施策のシナリオは、河川の水質にはそれほど影響を及ぼさないものと考えられる。しかし、ここで取り上げたいくつかのシナリオでは栗橋地点のBOD75%値や超過確率に影響を与えている。BOD75%値の改善効果という点では、取水制限開始貯水量の0.5億m³への変更や栗橋地点維持流量の10%増加、上水道の有効給水率の90%への改善といったシナリオが大きくなっており、またBOD超過確率の改善効果では渡良瀬貯水池建設が大きくなっ

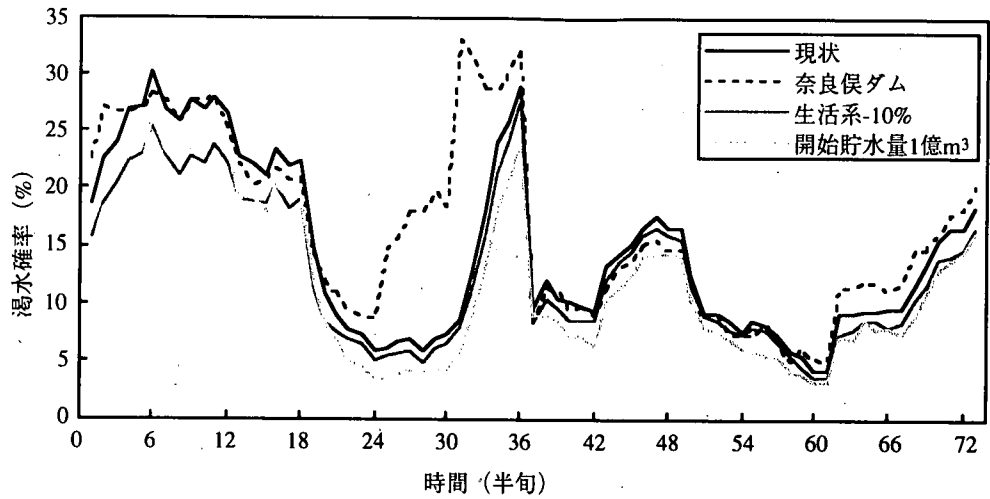


図-10 各シナリオにおける栗橋地点の半旬缺水率の年間変動

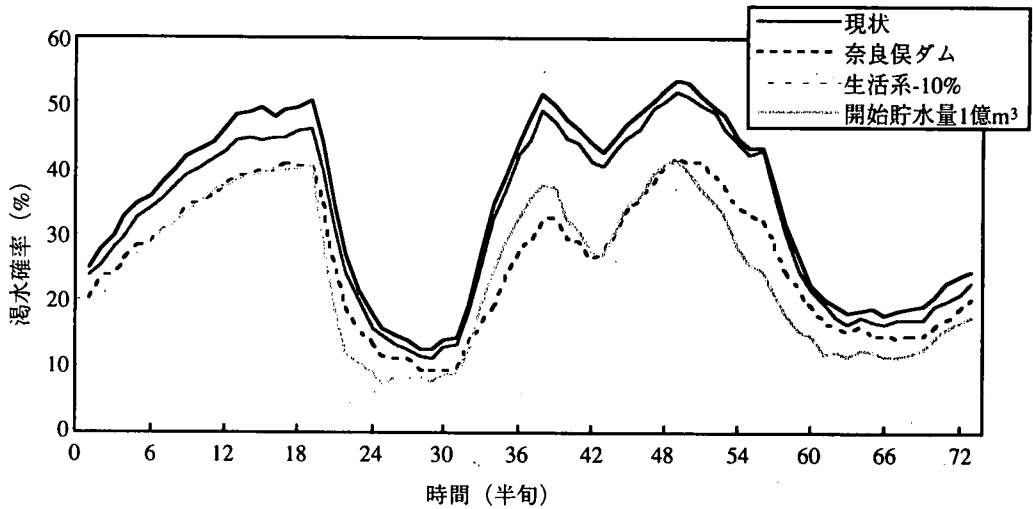


図-11 各シナリオにおける利根導水路の導水に関する半旬缺水率の年間変動

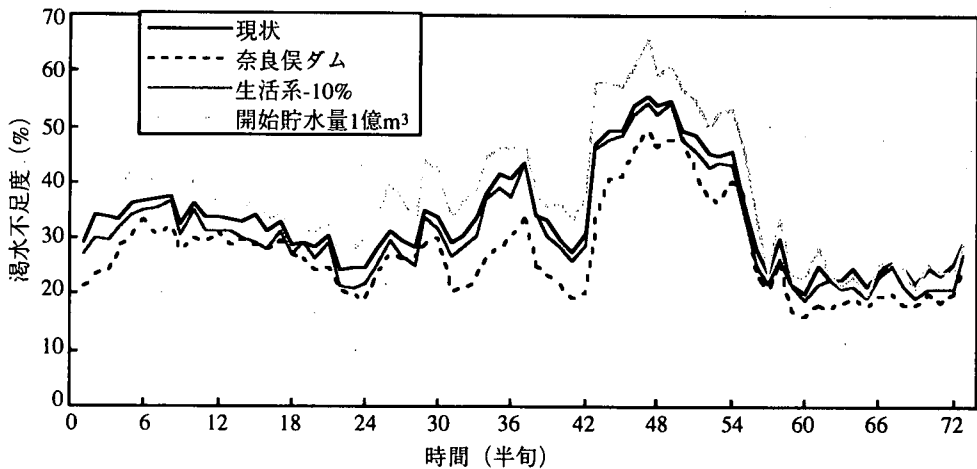


図-12 各シナリオにおける栗橋地点流量の半旬缺水不足度の年間変動

表-3 各シナリオにおける栗橋地点の各水質項目の75%値とBOD超過確率

		BOD		COD	TN	TP
		75%値 (mg/L)	超過確率 (%)	75%値 (mg/L)	75%値 (mg/L)	75%値 (mg/L)
現状		3.11	48.8	4.60	2.03	0.245
利水ダム	奈良俣ダム	3.11	49.0	4.59	2.04	0.244
	渡良瀬貯水池	3.08	46.8	4.54	2.01	0.243
	草木ダムなし	3.10	48.9	4.59	2.03	0.246
有効給水率	90%	3.07	48.5	4.54	2.00	0.242
農業系水利用	-10%	3.13	48.8	4.63	2.05	0.246
	+10%	3.09	48.8	4.57	2.02	0.244
生活系水利用	-10%	3.10	48.5	4.58	2.00	0.243
	+10%	3.12	49.2	4.60	2.06	0.249
開始貯水量	0.5億m ³	3.01	48.3	4.45	1.95	0.237
	2.5億m ³	3.28	49.7	4.82	2.14	0.256
最大制限率	30%	3.11	48.8	4.59	2.03	0.244
	50%	3.12	48.9	4.60	2.04	0.246
維持流量	-10%	3.17	48.8	4.68	2.06	0.248
	+10%	3.06	48.9	4.52	2.00	0.242
下水道普及		2.91	45.4	4.44	2.27	0.268
合併浄化槽普及		3.03	47.5	4.52	2.02	0.244

ている。この中でも、取水制限開始貯水量の0.5億m³への変更によるBOD75%値の改善効果や渡良瀬貯水池建設によるBOD超過確率の改善効果は、合併浄化槽の普及による改善効果よりも大きくなっている。

BOD以外の水質指標として、栗橋地点のTN75%値を見てみると、現状のシミュレーション結果では2.03mg/Lであるのに対して、取水制限開始貯水量の0.5億m³への変更により1.95mg/L、栗橋地点維持流量の10%増加により2.00mg/L、合併浄化槽の普及では2.02mg/Lとなっている。また、TP75%値についても同様に取水制限開始貯水量や栗橋地点維持流量の変更の方が合併浄化槽の普及より改善効果が大きくなっている。

取水制限開始貯水量や栗橋地点維持流量の変更、渡良瀬貯水池建設といった施策は水量安定化に関する施策であるものの水質に与える影響も大きいので、施策の効果や影響を検討する上では水量についてばかりでなく水質についても十分に検討しておく必要がある。

6. まとめ

本研究では、利根川水系上流域における水と汚濁物質収支のシミュレーションモデルを用いて、利水

ダムの建設、生活系や農業系水利用量の変動、上水道における有効給水率の改善、ダム群運用における取水制限の開始貯水量と最大取水制限率の変更、栗橋地点の維持流量の変更、といった水資源問題に関する施策についてのシミュレーションを行い、渇水の生起確率や不足%日、渇水被害額といった利水安全度の概念を用いた指標や河川水質に関する指標を算出した。ここで用いたシミュレーションモデルは水文事象の不確定性を考慮していること、水量と水質を同時に考慮していること、さらに上下水道などの人為的な水循環と自然の水循環とをともに対象としていることなどの特徴を有している。

さらに、得られた結果を用いて、(i)各施策による渇水被害額の削減効果の比較、(ii)渇水日数と渇水被害(不足%日)、渇水被害額の関係、(iii)渇水被害の年間変動、(iv)河川水質への影響、の4項目についての考察を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) 利水ダム建設の効果は対象流域内、栗橋地点流量、利根導水路導水量のいずれの渇水被害額の削減に対しても効果が大きくなっているが、生活系水利用の10%削減でも被害額は利水ダム建設と同程度削減されている。また、対象流域内の渇水被害額については農業系水利用の10%削減や取水制限開始貯水量の変更が、栗橋地点流量の渇水被害額に

については栗橋地点維持流量の10%削減が、利根導水路導水量の渇水被害額については、上水道の有効給水率の90%以上への改善も利水ダム建設と同程度の被害額の削減効果を上げることができる。

今回は、個々のダムの細かい操作や時間的な取水制限率の変更などについてはシナリオとしては検討していない。今後はより現実的な、より複雑なシナリオを導入して最適なダム群運用方法の検討していくうえで流域全体に与える影響を十分に考慮に入れる必要がある。

- 2) 渇水被害額と平均渇水被害の各シナリオによる変動の様子の違いから、シナリオによって渇水を軽減、あるいは増大する状況は違っており、例えば生活系水利用の変更と比較して栗橋地点維持流量の変更は渇水の頻度よりは渇水が起こったときの深刻さに大きな影響を与えているものと考えられる。
- 3) 奈良俣ダムの建設は利根導水路導水量の増加により栗橋地点流量の渇水確率を特に5~6月において増大させている。しかし、河川流量を安定化させることにより栗橋地点の渇水不足度を減少させており、渇水の深刻さを軽減していると考えられる。一方、取水制限開始貯水量の1億 m^3 への減少は渇水の頻度を減少させるので、栗橋地点流量、利根導水路導水量の渇水確率を年間を通じてともに減少させているが、栗橋地点流量の渇水不足度を年間を通じて増大させており、渇水が起こったときの深刻さを増大させているものと考えられる。
- 4) 取水制限開始貯水量の0.5億 m^3 への変更や栗橋地点維持流量の変更、渡良瀬貯水池建設といった施策は水量安定化に関する施策であるものの、合併浄化槽の普及よりBODやTNの75%値、あるいは超過確率などの改善効果は大きくなっており、河

川水質に大きな影響を与えている。このシミュレーションモデルでは、汚濁負荷原単位の地域による差異、季節による変動などの詳細については取り扱っておらず、今後モデルを複雑化してより現実的なものとしていくことが必要である。

参考文献

- 1) 荒巻俊也、一ノ瀬俊明、松尾友矩、花木啓祐：関東地方における利水安全性の評価、第29回環境工学フォーラム講演集、pp.79-81、1992。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 荒巻俊也、松尾友矩：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、土木学会論文集、投稿中。
- 5) 建設省河川局・日本河川協会編：流量年表、1978~87。
- 6) 建設省河川局編：多目的ダム管理年報、1978~87。
- 7) 水資源開発公団編：水資源開発施設等管理年報、1978~87。
- 8) 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。
- 9) 日本水道協会：水道統計、1989~1990。
- 10) 日本下水道協会編：流域別下水道整備総合計画調査指針、1993。
- 11) 中安正晃、振井茂宏：利水安全度指標に関する研究、第28回水理講演会論文集、pp.13-19、1984。
- 12) 中澤式仁、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。

(1997.10.6 受付)

PROBABILISTIC IMPACT ANALYSIS OF WATER RESOURCES AND QUALITY MANAGERMENTS IN THE TONE RIVER BASIN

Toshiya ARAMAKI and Tomonori MATSUO

The scenarios of water resources managements in the Tone River Basin, such as reservoir's construction, water savings and the change of operation rules of reservoirs, were simulated using a water and pollutant balance model with hydrological uncertainty. Various indices on drought and water quality were calculated from the results of this simulation, and the following matters were investigated: (i) comparison of the impacts of each scenario on the damage of drought, (ii) relationships between indices of drought, such as the costs, vulnerability and the duration of drought, (iii) seasonal variation of the occurrence and the scale of drought, (iv) impacts on river water quality.