

(14) 西安市の都市河川における汚濁物質流出過程の解明と節水システム導入効果の検討

Pollutant fluxes and the efficiency of water conservation measures in the Zaohe basin, Xi'an

邊見充*, 楠田哲也**, 王晓昌***, 東修****, 馬場啓輔*****

Mitsuru HEMMI*, Tetsuya KUSUDA**, Xiaochang WANG***

Osamu HIGASHI****, Keisuke BABA*****

ABSTRACT; The Zaohe(The Zao River), located in west of the central Xi'an, works as a drainage. About 80% of untreated domestic and industrial wastewater flows into the river directly, so that BOD₅ is always around 200 mg/l and the river has off-flavor. These problems have harmful effects on ecosystems, and are regarded as a disincentive to economic growth. In this study, firstly, a tank model, applicable to analyze hydrological circulation in semiarid climate, is developed. Secondly, a water quantity and quality integrated model, composed of the conventional tank model and kinematic wave model and the 1-D advection-dispersion equation is established. Thirdly, water quality on BOD, SS, DO and NH₄⁺-N in the Zaohe is simulated with this model. In calculation, not only natural water budget such as precipitation and evapotranspiration but sectorial water use are included. Finally, the efficiency of water conservation measures is investigated by using this model. In conclusion, the simulation results have a high correlation with the observed data on water quality. BOD₅ concentration and groundwater level-down in the Zaohe basin are improved drastically with introduction of bio toilet and water reuse and recycle system, and increase in wastewater treatment.

KEYWORDS; Xi'an City; Water Quantity and Quality Integrated Model; Water Management

1 はじめに

水資源量が絶対的に乏しい中国西北地区では、特に都市域を中心として人口増加および生活レベルの向上が著しく、水資源が逼迫している。さらに、環境インフラの未整備による水系への汚水の直接流入が深刻化し、自然環境に与える都市の環境負荷は極めて大きい。水に関わる問題は食糧自給や生態系保全と密接に関連し、経済発展の律速因子として認識されつつある今、中国政府には、偏見のない政策に基づく効果的な投資配分、利害の対立・劣等感を克服した地域間の連携など速やかで実行力のある政策が求められている。主要都市で深刻化している地下水位の急激な低下および河川水質汚染は、今後、第10次5カ年計画により城鎮化が見込まれる中国各地の郷村にとっても座視できる問題ではない。持続可能な発展を目標に、将来の中国のあるべき姿を描いたとき、健全な都市活動の構築、良好な生態環境の保全、循環する資源システムを創造するために、顕在化している種々の水問題を定量的に詳細に解明することは必要不可欠である。

* 九州大学工学府都市環境システム専攻(Department of Urban Environment Engineering, Graduate School, Kyushu University)** 九州大学大学院工学研究院環境都市部門(Department of Urban Environment Engineering, Graduate School, Kyushu University)*** 西安建築科技大学環境与市政工程学院(School of Environmental & Municipal Engineering Xi'an University of Architecture & Technology)**** 科学技術振興機構(Japan Science and Technology Agency)***** 日本上下水道設計株式会社(Nippon Jogesuido Sekkei Co., Ltd.)

そこで本研究では、中国関中平野で著しい産業集積が見られる西安市(図1参照)において、都市活動がその周辺河川へ与える汚濁物質流出過程を定量的に解明することを目的とする。中心市区部を流れる皂河(Zaohe)を対象河川とし、タンクモデル、Kinematic Wave Model および一次元移流分散方程式から成る水文水質統合モデルを構築し、河川水質を再現するとともに、持続可能な節水型都市の構築へ向けた具体的な節水方策をモデルに組み込み、地下水位や水質改善効果について検討する。

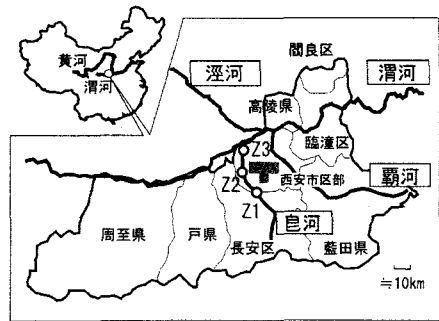


図1 西安市位置図

2 現地水質観測

図1に皂河の現地観測地点Z1-Z3を、図2にその水質観測結果を示す。図2より、BODおよび窒素分は総じて高く、劣悪な水質環境であることがうかがえる。また、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は30 mg/l前後と高い値を示しているため、これらは生活および工業由来の未処理排水が直接流入していることが原因と考えられる。他方、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ は低いことから、生活排水などの硝化は殆ど進んでおらず、また、地下水の湧出も少ないと考えられる。2005年4月20日にZ-1にて測定した地下水の $\text{NO}_3^+\text{-N}$ は11.4 mg/lであり、窒素分が地下へ浸透していることが示唆される。

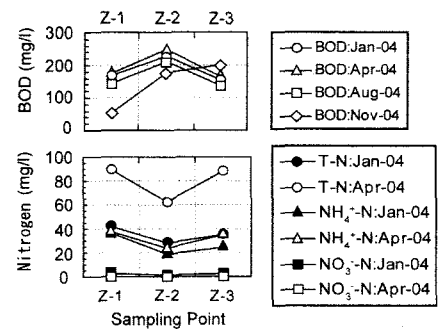


図2 現地調査結果

図3に2005年4月20日のZ-1における流出負荷量の時間変化を示す。流出負荷量は同日に測定したSSおよび $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と河川流量を用いて算定された。観測結果には、生活、工業および家畜由来の点源負荷量と耕地、市街地などからの面源負荷量が含まれている。しかし、観測日を含めて前日2日間快晴であったことを考慮すると、図より観察される時間変動には、面源負荷として流出するSSや窒素肥料による影響よりもむしろ点源負荷による影響が卓越していると考えられる。したがって、図より、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ がa.m.9時頃からピークを迎え高負荷が持続するのは、家畜からの糞尿の流入、工場の操業開始による排水流入、さらに、ヒトが起床して排泄する尿尿分が時間遅れを伴いながら河川へ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ として流出する過程を示しているものと考えられる。ここで、ヒトが排泄するのは概ね起床後、昼飯前後、夕食前後、就寝前およびそれらを補完する1~2回程度の合計5~6回と考えられる。図3では、その影響の一端が示されている。SSに関しては、その排出源が非常に複雑であるため、流出負荷量の増減に対してどの要因が最も影響しているかを議論するのは極めて困難であろう。しかし、これらは当該流域のライフスタイルを把握する上で非常に重要なデータとなりうる。今後、引き続き現地観測を実施し、データの拡充に努める。

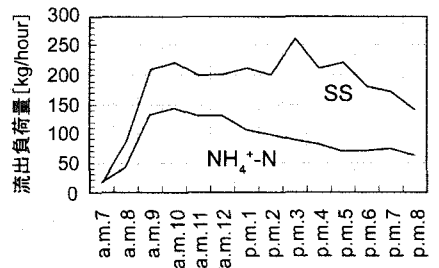


図3 Z-1における流出負荷量の時間変化
(2005年4月20日)

3 皂河流域諸条件の整理

本研究における解析対象流域(皂河流域、流域面積: 135 km²)を図4に示す。流域の境界は、西安市の河川流域境界図および地形図¹²⁾をGISを用いて解析した結果に基づき設定された。本流域は、年平均気温14.4℃、年降水量が400 mm程度の半乾燥地域に属する。解析対象河川区間は現地水質観測地点であるZ1-Z3までの22.3 kmであり、点源負荷として5つの污水集水区からの処理水及び未処理水の流入が見られる。また同流

域は大峪水库灌区、小型及井灌区、沔惠渠灌区の3つの灌漑区からなり、皂河流域の境界内に含まれるそれぞれの灌漑地域のみから排水および面源負荷が生じる。居住区および工業区への配水は渭河西北郊水源、渭河北郊水源、沔河水源、皂河水源、および黒河導水からなされるが、韦曲組団および各灌区では地下水を当該区域の直下の灌漑区から取水しているものとする。なお、流域内の雨水集水区域は、5つの污水集水区のうち皂河流域に含まれる区域とする。すなわち、六村堡組団東部、邓家村および北石橋集水区西部、韦曲組団全域である³⁾。

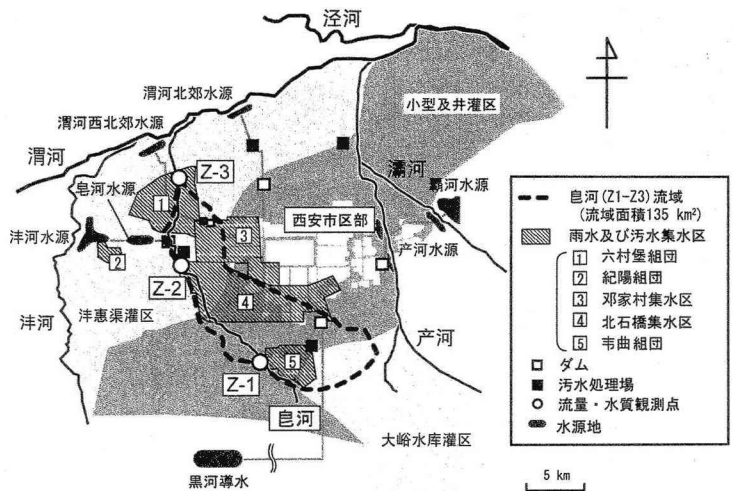


図4 皂河流域境界図

4 水量水質統合モデル

本研究では、降水量、蒸発散量などの自然系データおよび生活、工業、農業の各セクター別取水および排水量などの人工系データを統合的に組み込み、皂河の流量および水質を再現し、皂河に流入する汚濁物質負荷過程を定量的に把握できるモデルを構築する。

図5に水量水質統合モデルの全体構造を示す。まず、タンクモデルを用いて河川への流出流量および流出負荷量を算定し、次に Kinematic Wave Model を用いて河川流量を解析する。最後に一次元移流分散方程式を用いて河川水質の挙動を明らかにする。

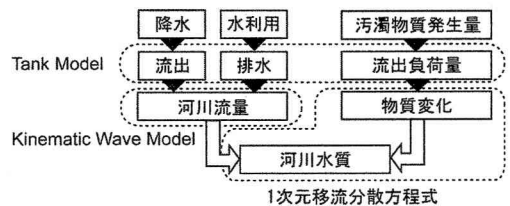


図5 水量水質統合モデル全体構造

4.1 入力データ設定

降水量、可能蒸発散量、セクター別水利用量、排水量、汚濁負荷量などを全て日平均値として入力する。以下に各入力データについて概説する。

(1) 自然系入力データ設定

降水量として、西安市降水観測点における実測値を使用した。西安市の年平均降水量は400 mm程度であり、夏期に降雨が集中し、冬から春にかけて少ない分布特性を持つ。

可能蒸発散量の算定には、Penman-Monteith法を用いた。

(2) 人工系入力データ設定

図6に皂河流域内におけるセクター別および水源別水利用量⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を示す。2002年の流域内水利用量は100万m³/dayである。本流域は西安市の中心市区部に位置し、人口、産業が集中していることか

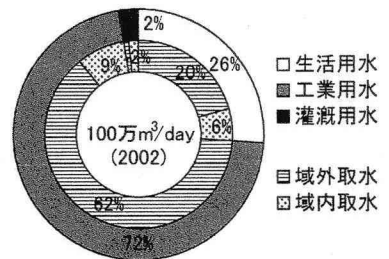


図6 皂河流域内の水利用量
(万m³/day、2002年)

ら、工業用水量が最も多く全体の7割以上を占め、生活用水量、灌漑用水量がそれに続いている。また、域外からの取水が全体の8割以上と高く、域内取水は全て地下水を水源としている。

排水量に関する設定は以下の通りである。すなわち、生活排水量は生活用水量と同様であると仮定した。また、工業排水量は統計資料⁷⁾より得られた。灌漑排水量は、

灌漑水路等に関するデータの不足により、耕地流入後、降水流出等の自然系水循環と同様の挙動を示すと仮定した。

表1に地域別のセクター別水利用量と排水量(2002年)を示す。人工系のデータは、各種統計資料⁴⁾⁵⁾より全て年間値として得られたが、生活、工業セクターの水利用に関しては、後述する点源負荷および面源負荷と同様に季節変動を与えた。

4.2 水文過程～タンクモデル、Kinematic Wave Model

(1) タンクモデル

本モデルでは、臼河流域内の大峪水库灌区、小型及井灌区および沔惠渠灌区のそれぞれについて図7に示す3段タンクモデルを構築し、各灌漑区から河川への流出流量を解析した。表2にタンクモデルの記号一覧を示す。モデルに降雨や蒸発散を加え、さらに上水道非供給地域での地下水取水や生活、工業、灌漑排水を組み込み、排水管の漏水によるタンクモデルへの流入も考慮した。ところで、温暖湿潤な気候を有する日本で開発されたタンクモデルを半乾燥地域である臼河流域に適用させるため以下の改良を加えた。

乾燥気候の下では、土壌水分が蒸発および蒸散により減少することによって降雨が生じても浸透も流出も行われず、土壌内に水分が蓄えられる現象がしばしば発生する。これは、流出過程に重要な役割を演じると考えられるため、 h_{13} 、 h_{22} を用いて土壌水分量を表現することによりモデル化された。

また、蒸発散量の算定の際に当該流域の植物の根の長さを考慮することにより、蒸発散量に植物の生育状況に関連づけた。具体的には、一段目タンクの水が枯渇したときに二段目タンクから差し引く蒸発散量を、近似的に蒸散量と等しいと見なし、全て植物の根からの吸い上げによると仮定する。実蒸発散量はPenman-Monteith法により求めた可能蒸発散量に蒸発散比を掛けることで得られるため、根からの吸い上げによる蒸散量は、植物の根が最長になったとき蒸発散比を0.8とし、根の長さに比例す

表1 臼河流域内セクター別水利用および排水状況(2002、単位:万 m^3/day)

	生活用排水	工業用排水		灌漑用水
		新規利用水	工業排水	
1.六村堡組団	1.3	15.1	19	—
2.紀陽組団	0.1	1.7	2.1	—
3.邓家村集水区	10.9	13.1	16.6	—
4.北石橋集水区	8.5	33.1	42	—
5.韦曲組団	1.4	7.3	9.3	—
6.上記集水区以外	4.3	1.2	1.1	2.4
・沔惠渠灌区	0.8	0.2	0.2	0.5
・小型及井灌区	2.9	0.8	0.8	1.6
・大峪水库灌区	0.6	0.2	0.1	0.3

※ 表中の網掛け部は、すべて域内取水であり、水源は地下水と仮定した。

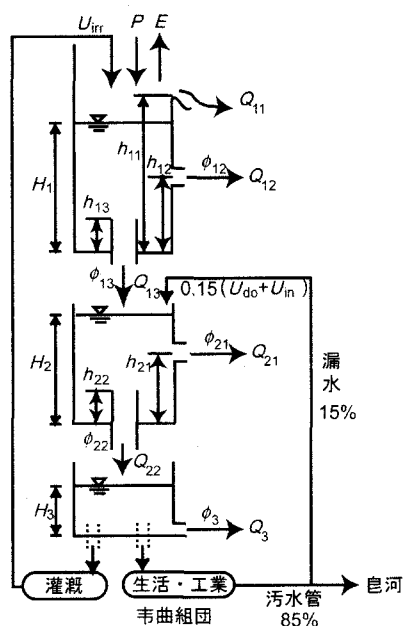


図7 3段タンクモデル(例:小型及井灌区)

表2 タンクモデル記号一覧

記号	タンクモデル中の表現	単位
P	降水量	[mm/day]
E	実蒸発散量	[mm/day]
Q	流出流量	[mm/day]
ϕ	流出係数	[day ⁻¹]
H	タンク水位	[mm]
h_{11}	限界流出高さ	[mm]
h_{12}, h_{21}	孔の高さ	[mm]
h_{13}, h_{22}	浸透孔の突き出し高さ	[mm]
U_{irr}	灌漑用水量	[m^3/day]
U_{do}	生活排水量	[m^3/day]
U_{in}	工業排水量	[m^3/day]

るよう関連づけた。すなわち、

$$E_r = 0.8 \times r / r_{max} \quad (1)$$

ここで、 E_r ：蒸発散比、 r ：根の長さ(m)、 r_{max} ：根の最大長さ(m)、である。なお、本流域では春に小麦、秋にトウモロコシの二毛作が行われている。根の長さには馬場ら⁸⁾による解析結果を利用した。

さらに、本モデルでは、隣接する灌漑区に対して次式に示す Darcy 則を導入し、地下水の移動を考慮した。

$$Q_{3n} = k \frac{\Delta H_{3n}}{\Delta x} \quad (2)$$

ここで、 Q_{3n} ：地下水間の水移動量(mm/day)、 k ：透水係数(mm/day)、 $\Delta H_{3n}/\Delta x$ ：灌漑区間の動水勾配である。なお、透水係数は文献⁹⁾を用いて設定し、隣接する灌漑区間の導水勾配を求める際には、各灌漑区の平面的な面積重心を GIS にて求め、それらの距離を Δx とした。

(2) Kinematic Wave Model

河川への流出流量が求められた後、Kinematic Wave Model により河川流量が算定された。解析対象河川区間において現地観測が実施できる地点数およびその間隔が非常に限られていることから、区間全長 22.3 km を 223 等分し、計算単位である河道区間長を 100 m とした。また、河川幅および水深の初期値として現地観測による断面形状の測定結果を用いた。なお、図 8 に各污水集水区からの排水流入先および各灌漑区からの降雨および灌漑排水の流入先の設定状況を示す。具体的には、GIS により流入先河道区間が設定され、各集水区、各灌漑区からそれぞれの流入河道区間に等分し、一様に横流入させた。ところで、後述するように、SS の挙動に関しては巻き上げおよび沈降を考慮しているが、SS の河床への堆積による Kinematic Wave Model への影響は無視できると仮定された。すなわち、SS の堆積の有無に依らず、各メッシュ内では常に運動方程式が等流条件下で成立すると仮定された。

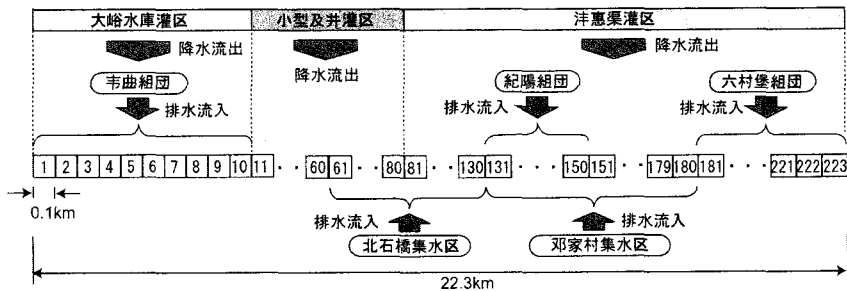


図8 河川解析区間への排水など流入先の設定

4.3 水質過程～点源負荷、面源負荷、一次元移流分散方程式

本モデルでは、河川へ流入する汚濁負荷量として点源負荷および面源負荷をそれぞれ算定した。解析対象水質項目は、SS、BOD、DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ であり、一次元移流分散方程式により水質挙動を再現した。

(1) 点源負荷

点源負荷量の算定には原単位法を用いた。表3に各水質項目の原単位を示す。表の数値は各種統計資料⁷⁹⁾¹¹⁾および中国国内における経験的な値から得られたものである。なお、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は主に面源から発生するものとし、ここでは考

表3 点源負荷原単位(2004年)

発生源	BOD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	SS	単位
生活排水	50	14	14	[g/人/day]
工業排水	0.2	0.03	0.09	[kg/m ³]
処理水	0.01	0.005	0.01	[kg/m ³]

慮しなかった。ここで、汚水処理率は生活、工業排水ともに 20%とした³⁾。また、原単位の季節変動を考慮するために、統計資料¹²⁾¹³⁾に従い、年間負荷量はそのままに、生活排水由来の点源負荷量は夏期に平常時の 1.5 倍とし、工業排水由来の点源負荷量は月別の工業総産値に比例させた。この際、生活由来の点源負荷量は、生活排水量の季節変動に単純比例すると仮定された。

(2) 面源負荷

面源負荷量の算定には $L-Q$ 式($L=aQ^n$ 、 L :汚濁負荷量(kg/day)、 Q :タンクモデルから河川への総流出量(m³/day)、 a,n :パラメータ)を利用した。本研究では、2004 年 1 月、4 月、8 月、11 月の現地観測データを用いて、各水質項目に対してパラメータを同定した。同定されたパラメータと河川への総流出量 Q との相関から近似曲線を導出し、面源負荷のパラメータを総流出量の関数として目的に変動させた。

(3) 一次元移流分散方程式

以上のように算定された河川流量および汚濁負荷量を用いて、次式の一次元移流分散方程式により各水質挙動が再現された。

$$\frac{\partial (AC_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial (q_{flow} C_i)}{\partial x} + Af_i + Q_{m_i} \quad (3)$$

ここで、 q_{flow} : 流量(m³/day)、 A : 河川断面積(m²)、 C_i : 物質 i の濃度(kg/m³)、 t : 時間(day)、 x : 流下距離(m)、 D_L : 分散係数(m²/day)、 f_i : 物質 i の変換速度(kg/m³/day)、 Q_{m_i} : 流入負荷量(kg/m/day)である。ここで、各水質項目の変換速度として表 4 に示す各素過程を考慮した。例として、DO の変換速度 f_{DO} を以下に示す。

$$f_{DO} = -K_{1L}C_{BOD} + K_2(C_{DO}^* - C_{DO}) - D_B \quad (4)$$

ここで、速度係数 K_{1L} (day⁻¹)、再曝気係数 K_2 (day⁻¹)、生物反応以外の DO 消費 D_B (kg/m³/day)であり、 C_{DO}^* : 飽和溶存酸素濃度(kg/m³)は水温による変化を考慮した。なお、変換速度の算定に係るパラメータの設定に際しては、文献¹¹⁾¹⁴⁾における標準値を採用した。

表 4 素過程一覧

	考慮対象素過程	モデル中での表現項目
SS	巻き上げおよび沈降	巻き上げ(沈降)限界せん断応力、せん断応力
BOD	微生物などによる分解、沈降および SS への吸着	脱酸素係数、沈降および吸着速度係数(SS濃度により変化)
DO	BOD 分解に要する消費、再曝気、その他の酸素消費や生成	脱酸素係数、再曝気係数(村上の式)、飽和溶存酸素濃度(水温考慮)、その他の酸素消費や生成
NH ₄ ⁺ -N	硝化菌による硝化、菌体の死滅	収率、飽和定数、菌体濃度、死滅係数、最大比増殖速度、最大比増殖速度を低下させる影響を示す関数

5 解析結果および考察

5.1 水質挙動

本モデルによる解析結果の一例を図 9 と図 10 に実測値と併せて示す。図 9 は 2004 年 11 月 28 日における皂河の流下距離に伴う水量および水質変化であり、図 10 は 2004 年の Z-3 における時間変化に伴う水量および水質変化である。両図より、解析値と実測値の相関は良好であり、モデルの妥当性が確認される。図 9 において、各集水区からの点源負荷が顕著であるのは、上流端から約 1 km 以内と約 7 km より下流の範囲である。故に、以上の範囲では排水流入による流量の増加が著しく、BOD は増加傾向を、DO は減少傾向を示している。一方、約 1 km から約 7 km 以内において、SS および NH₄⁺-N が増加しているのは、面源負荷の影響のためと考えられる。次に、図 10 において一年を通じて観察される流量のピークは降雨時における出水を表しており、出水に伴う SS および BOD、NH₄⁺-N 濃度の増大は、河川底質中に堆積していた汚濁物質の巻き上げ・掃流が発生しているためと考えられる。また、出水に伴う DO 濃度の減少は、河川への流入水中に含ま

れる DO をモデルで表現できていないため、希釈効果が生じたことによる。これは実現象を正確に表した結果ではないと考えられるため、今後モデルの精度を高めなければならない。

5.2 地下水位変動

図 11 に 1993 年から 2004 年までの臼河流域内の各灌漑区における地下水位変動を示す。図はタンクモデルの第 3 段タンクの水位を時系列で表したものであり、当該灌漑区の地下水位と等価と見なすことが出来る。タンクモデルに生活、工業、灌漑取水を組み込んでいるため、図 11 ではその多大な影響が現れている。すなわち、井戸灌漑が広く用いられ、韦曲組団による取水が著しい小型及井灌区では年平均 0.5 m の速度で地下水位が低下している。やや古い観測値ではあるが、文献⁹⁾によると、臼河流域では、1984 年から 1993 年のうちに平均して年 1 m 程度地下水位が低下している。一方、主に地下水以外の水源から取水する沔惠渠灌区では殆ど水位の低下が見られない。なお、2002 年における臼河流域内の地下水取水量は約 15.8 万 m³/day である。地下水位の低下を抑制するためには、半乾燥地域に属する本流域では降雨による地下水涵養効果が殆ど期待できないため、出来るだけ地下水取水量を減少させることが必要である。以下では、具体的な節水方策をモデルに組み込み、地下水位低下抑制効果や水循環の変化による河川水質改善効果について検討する。

6 節水型都市構築のための方策と導入効果

6.1 具体的方策

節水型都市を構築するためには生活、工業、農業の各セクターからそれぞれ効果的に水利用を抑制する必要がある。臼河流域においては、全水使用量に対する農業用水量の割合が低い(図 6 参照)、生活、工業セクターに関して節水方策を検討する。本研究では、以下の 5 方策に関して考察した。

- 1) 乾式トイレ(バイオトイレ)の導入
- 2) 中水道の導入
- 3) 工業セクターの再利用率向上
- 4) 汚水処理率向上

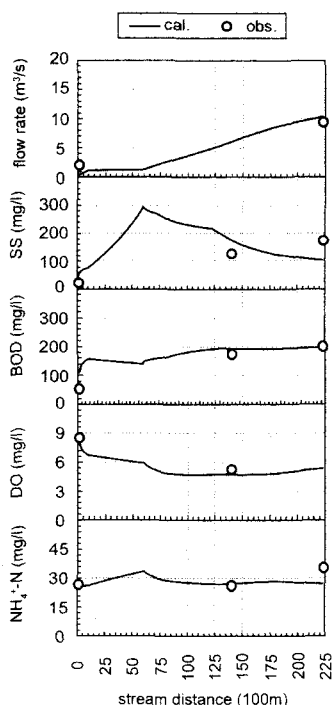


図 9 流下距離に伴う水量および水質変化(2004 年 11 月 28 日:2 日前に 2 mm/day の降雨有り)

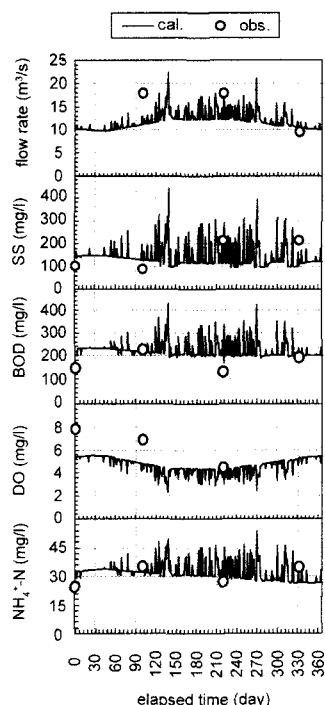


図 10 Z-3における時間変化に伴う水量および水質変化(2004 年)

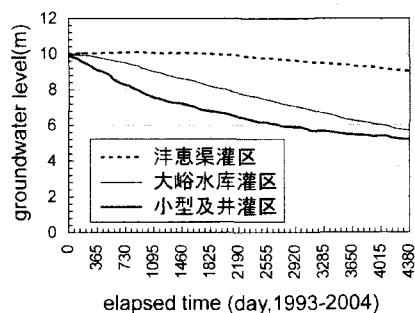


図 11 地下水位変動

5) 管渠（導水管、雨污水管）からの漏水率減少
 節水方策 1) の効果としては、生活排水の尿尿分を各家庭内で分解処理できるため、尿尿排水量がゼロとなる。2) は生活雑排水を処理し、工業用水として再利用することにより、水使用量の抑制、河川への汚濁負荷減少効果が期待できる。また、3) に関しても同様の効果が期待できる。さらに、4) は生活・工業排水による河川への汚濁負荷流出量を削減でき、5) は漏水による無効水量を削減できるほか、本研究では考慮対象外であるが汚水の漏水による土壌および地下水の汚染を低減させることができる。本流域では、経済発展に比して環境

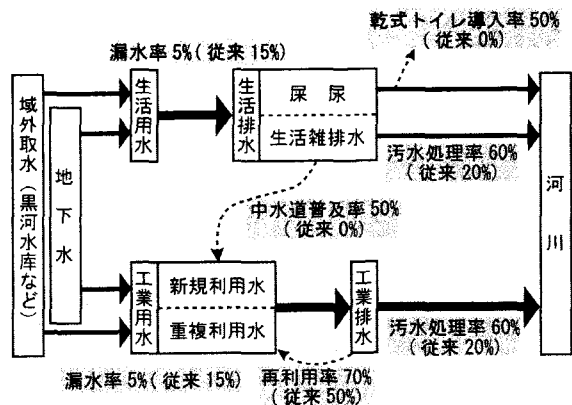


図 12 節水方策

の新設およびインフラの整備などが最重要課題である。これらの改善は、水系への流出負荷抑制および損失の少ない水循環システム構築に必須である。本研究では、文献³⁾を参考にし、図 12 のようにそれぞれ具体的に数値を設定し、構築したモデルを用いて効果を検討した。

6.2 節水方策導入効果

(1) 水質挙動

図 13 および図 14 に節水方策導入後の解析結果を示す。cal.2 が導入後の解析値である。両図より、明らかに水質が改善されていることがわかる。排水流入による影響が大きい流量や BOD に関しては、その効果がより大きい。特に、BOD に関しては 5 割程度の汚濁負荷削減効果が期待できる。 NH_4^+-N も総じて減少しているが、面源負荷の影響が大きい約 1 km から約 7 km 以内の減少量はそれ以外の区間と比較してやや小さい。また、これらの汚濁物質の濃度低下に伴い DO は回復している。ところで、図 14 において出水に伴い各汚濁物質の濃度がピークを示す理由は図 10 と全く同様であるが、そのピーク濃度に殆ど変化が見られない。これは、汚濁物質流入ー河道貯留ー巻き上げ・掃流という汚濁物質の流出過程のうち、河道貯留をモデルで反映できていないためである。

次に、各節水方策を個別に評価す

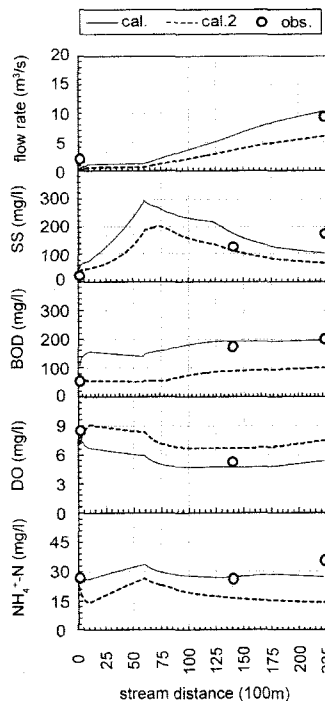


図 13 流下距離に伴う水量および水質変化(2004 年 11 月 28 日、節水方策導入)

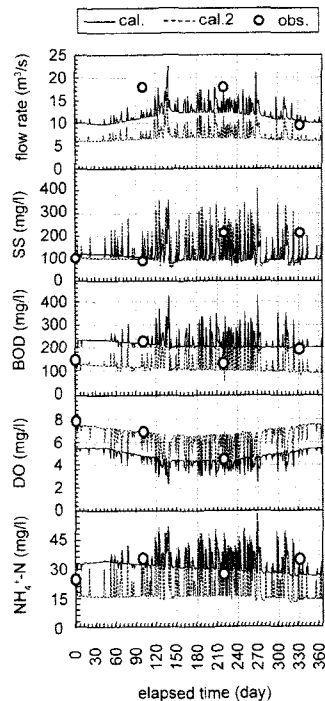


図 14 Z-3における時間変化に伴う水量および水質変化(2004 年、節水方策導入)

るために、全ての節水方策が同時に達成された場合と各節水方策が単独に導入された場合の比較を、流出負荷量および生活・工業用排水量について表5に示す。表には各節水方策の流出負荷量削減効果および節水効果が定量的に示されている。本流域は工業が盛んな産業地域であるため、生活セクターへの寄与が大きい乾式トイレ、中水道の効果は、皂河への流出負荷量の削減という点では小さい。一方、工業排水の再利用率や汚水処理率の向上は、他の方策に対して比較的その流出負荷量削減効果は高い。漏水率の減少に関しては、その方策単独では、汚水をより多く河川へ運ぶことになり、期待すべき結果が示されていない。しかし、汚水処理場の設置と組み合わせ、end-of-pipe 技術を充実させることができれば、意味ある節水方策となろう。

表5 全節水方策が同時に達成された場合と各節水方策が単独に導入された場合の比較

	皂河への年間流出負荷量(ton/year)			生活用水および排水量(万m ³ /year)	工業排水量(万m ³ /year)
	SS	BOD	NH ₄ ⁺ -N		
①節水方策導入前	19000	48300	4940	70300	250000
②全節水方策導入後	8900	7750	1800	35150	150000
③削減量(①-②)	10100	40600	3140	35150	100000
④削減率(③/①)	53%	84%	64%	50%	40%
各方策単独の削減量(削減率)					
1)乾式トイレ	356 (2%)	969 (2%)	264 (5%)	10500 (15%)	0 (0%)
2)中水道	831 (4%)	2260 (5%)	617 (12%)	24600 (35%)	0 (0%)
3)再利用率向上	6180 (32%)	15200 (31%)	825 (17%)	0 (0%)	100000 (40%)
4)汚水処理率向上	9520 (50%)	24200 (50%)	2470 (50%)	0 (0%)	0 (0%)
5)漏水率減少*	(2235, 増加) (-)	(5682, 増加) (-)	(581, 増加) (-)	(6410) (-)	(22794) (-)

* : 皂河への年間流出負荷量は、漏水を通して土壌や地下水へしみ出す汚水が直接皂河へ流入するため増加している。また、用排水量に関しては、無効水量は減少するものの流域内水使用量が変化する訳ではないため、その変化量を括弧で表記した。

※ 生活排水量＝尿尿(3割)＋生活雑排水(7割)とした。

(2) 地下水位変動

節水方策導入後の地下水取水量は約10万m³/dayに削減された。導入前と比較して約6万m³/dayの取水抑制効果があることがわかる。都市域である皂河流域では、工業セクターの影響がより大きいいため、工業セクターへの対策を重点的に進めていく必要がある。

本研究では、以上のように水量および水質に関する議論に留まるが、図12に示す節水方策をより説得力のある方策として議論を展開するには、各方策に対してそれぞれ費用対効果を検討する必要がある。ライフサイクルコストに準じた議論だけでなく、例えば乾式トイレが及ぼす林業への影響など、経済波及効果に関しても考慮する必要がある。

7 結論

- 1) 構築された水量水質統合モデルは本流域において、精度良く河川流量および水質挙動を再現できる
- 2) 中水道の導入、汚水処理率の向上など具体的な節水方策を考慮した結果、BODが約5割減少するなど、その効果が検討できた
- 3) 節水方策により地下水取水量を約6万m³/day削減できる

今後、経済分析を導入し、節水方策に関する費用対効果および他産業へ及ぼす経済波及効果を検討する。

最後に、本研究は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(CREST)による成果の一部であり、研究の遂行にあたり、西安建築科技大学の学生諸氏による多大なる尽力を頂いたことをここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 西安市地图集編纂委員会：西安市地图集、西安地图出版社、1990
- (2) 岐阜県立図書館所蔵：中華人民共和国 10 万分の 1 地形図、旧ソ連製、測量年 1978-1986
- (3) 西安市市政工程管理局：西安市排水工程計画(1995-2010)、1998
- (4) 西安市地方志編纂委員会：西安市志、第一卷、西安出版社、1996
- (5) 西安市統計局：西安統計年鑑、中国統計出版社、1993-2004
- (6) 国家統計局人口和社会科技統計司編：中国郷・鎮・街道人口資料、中国統計出版社、2002
- (7) 中国環境年鑑編集委員会：中国環境年鑑、中国環境年鑑社、1991-2003
- (8) 馬場、楠田、王、楊、東、尾崎、柴田：EPIC による渭河流域の穀物生産評価と食料安全保障の検討、環境工学論文集、vol.41、2004
- (9) 西安市城市計画管理局 西安市勘察測繪院編制：西安城市工程地質図集、西安地图出版社、1998
- (10) 全国工商貿易網・中国園芸網：常用化肥の含量和性質・人糞尿排泄量及成分含量・家畜糞尿排泄量及成分含量、<http://www.100800.com/yy/index.htm>
- (11) 宗宮功著：自然の浄化機構、技報堂出版、1999
- (12) 宝鶏市地方志編纂委員会：宝鶏市志、上巻、三秦出版社、1996
- (13) 中国工業年鑑社：中国工業年鑑、2003
- (14) 海田、楠田、二渡、栗谷：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究、土木学会論文集、第 393 号、1988