

(74) 水文・水質統合モデルを用いた渭河流域内都市域水質汚濁状況の解明

Development and Evaluation of a Mathematical model for the Urban Area's
water pollution in the Weihe Basin

東 修*, 楠田 哲也**, 王 曉昌***, 楊 大文****

井上 和久*****, 尾崎 心平*****, 柴田 勝史*****

Osamu Higashi*, Tetsuya Kusuda**, Xiaochang Wang***, Dawen Yang****

Kazuhisa Inoue*****, Shinpei Ozaki*****, Katsuhumi Shibata*****

ABSTRACT; The Weihe river basin which is the greatest tributary in the Yellow river, is one of the base areas for the Western Region Development in China. In recent years, its water demand has been increasing drastically due to rapid industrial development and population growth. Wastewater treatment plants, however, have not established enough yet, so that the wastewater treatment ratio in this area is only 20% and BOD of water in the river is always over 100mg/l near urban areas in dry season. In this study, the authors investigate water utilization, such as irrigation and reservoir control, drainage system and pollutant load fluxes in the Weihe basin, by analyzing GIS data and satellite images, then, develop a water quantity and quality integrated model, and evaluate water balance, river water quality, based on field surveys and GBHM2 (geomorphology-based hydrological model 2 (Yang *et al.*, 2002))¹⁾. In conclusion, the wastewater treatment ratio should increase at least 80% to meet the China surface water standards.

KEYWORDS; Weihe Basin; Pollutant Load; Water Quantity and Quality Integrated Model;

1 はじめに

中国では、第9次5ヵ年計画²⁾において、自然村落に多数分布し、汚濁物質発生源となっている小規模郷鎮企業の都市部工業集積区への移動を促進するとし、第10次5ヵ年計画³⁾では、2005年までに一部郷村を小城镇化する等により、農村余剰労働力4,000万人を都市部へ移動させるとしている。これにより、今後、ますます都市部への人口及び産業集積が活発化することが予想される。

黄河の支流である渭河流域は、陝西、甘肅、寧夏の2省、1自治区に跨り、西安を中心に、咸陽、渭南、宝鸡、銅川、天水等の主要都市が分布している(図1-1参照)。本流域では、西部大開発の進展に伴い近年の発展が著しく、特に西安市では、藍田、六村堡工業園区等の中心市区周辺での工業集積区の開発が進み、1996年から2001年にかけて、工業区に該当する約20の郷村が小城镇化した。しかし、一方で水循環に係るインフラ整備は未だ不十分であり、年間500mm程度と降水量の少ない流域

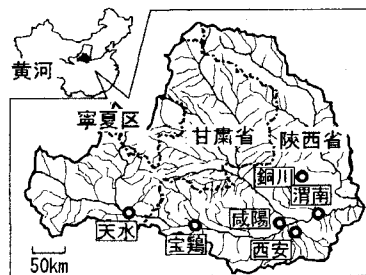


図1-1 渭河流域位置図

* 科学技術振興機構 (Japan Science and Technology Agency)** 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (Department of Urban Environmental Engineering, 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)**** 精華大学水利水電工程系 (Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University)***** 日本上下水道設計株式会社 (Nippon Jokesuido Sekkei Co., Ltd.)***** 九州大学工学府都市環境システム工学専攻 (Department of Urban Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Graduate School, Kyushu University)

内各都市では、生活用水、工業用水の水源の大部分を地下水に依存し、排水を殆ど処理せず放流するため、地盤沈下、河川水質悪化等の問題が深刻化している。これより、本研究では、渭河流域を対象に、水利形態及び排水処理状況を把握し、都市域を中心に水質汚濁状況を解明することを目的とする。具体的には、まず、楊ら(2002)⁹⁾による分布型水文モデル(GBHM2)に渭河流域内の人工系の水利用形態を組み込み、これに一次元移流分散方程式に基づく水質モデルを統合し同流域の水文・水質統合モデルを構築する。次に、本モデルを用い、流域内の点源負荷の分布状況とこれに伴う水質分布を明らかにし、現地水質観測結果との比較検討により、その妥当性を確認する。さらに排水処理率の向上による水質改善効果について検討する。

2 渭河流域の現地水質観測

図2-1に渭河流域の水質観測地点を示す。50km
渭河河口付近から中流域までの約400kmの
区間にある13地点において、2002年10月
から2004年4月にかけて、計7回水質観測
を実施した。図2-2にBOD₅の地点別、時期
別の観測結果を示す。図中のsampling point No.において、2, 7, 8, 11は、それぞれ主要都市である宝鸡、咸陽、西安、渭南付近に存在する。図より、咸陽、西安付近で特にBOD₅が高く、都市の未処理排水の流入による影響の大きさが伺える。また時期的に見ると、夏季等の気温の高い多雨期に低く、冬季等の気温の低い少雨期に高い。

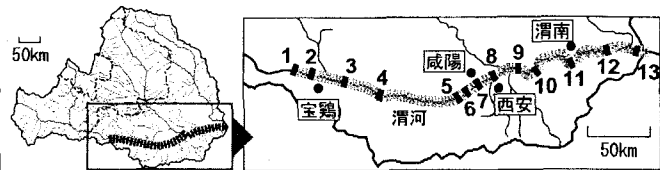


図2-1 現地水質観測地点

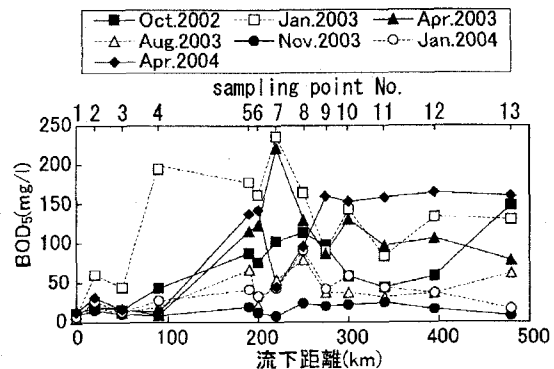


図2-2 現地水質観測結果 (BOD₅)

3 渭河流域の水文・水質統合モデルの構築

図3-1に水文・水質統合モデルの概念を表す。本モデルは、渭河流域を2.5kmのgridで区分し、各gridの降水量、水利用量等を入力データとし、土壌水分移動等の計算を経て、河川流量、地下水位、河川水質等を出力する仕組みとなっている。データ入力は1時間毎である。以下に自然系、人工系の各データ設定及び解析手法について述べる。

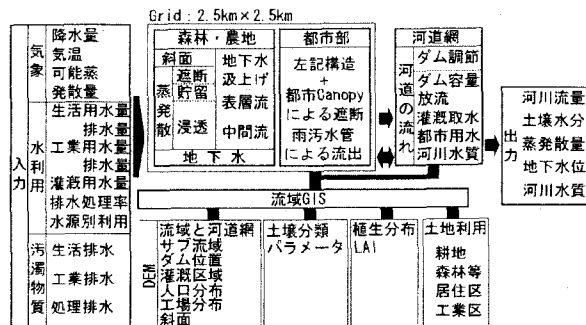


図3-1 水文水質統合モデル概念図

3.1 入力データ設定

(1) 自然系入力データ設定

1) 降水量

図3-2は流域内の降水量観測点を示したものと西安市の観測点における1991年の日降水量推移である。本モデルでは、日降水量と降雨継続時間から1時間当たりの降水量(mm/h)を算定し、それらを各gridに与えた。なお、観測点以外のgridの降水量は、最寄観測点の値を与えた。

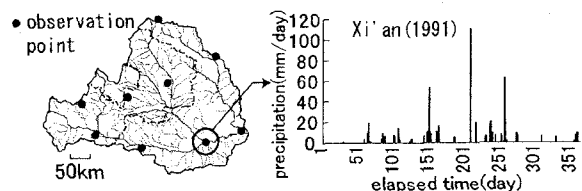


図3-2 渭河流域降水量観測点分布と西安市の日降水量推移

2) 気温

気温の入力データは、降水量と同じ観測点にお

けるものである。日最高気温、日最低気温をそれぞれ午後1時、午前1時に設定し、 $\cos$ 関数で時間変化($^{\circ}\text{C} = f(h)$)を表現した。

3) 可能蒸発散量

Penman-Monteith法⁹⁾により各gridの日可能蒸発散量を算定した。ここでは蒸発散が生じる期間を午前7時から午後7時までと仮定し、日可能蒸発散量を平均化した(mm/h)。

□ 耕地 ■ 水域
□ 草地 ■ 森林
■ 裸地 ■ 居住区

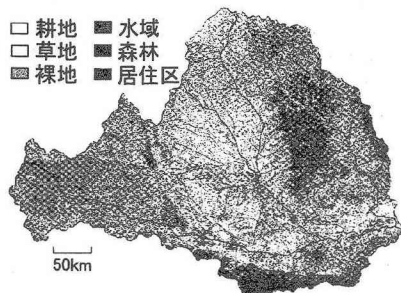


図3-3 渭河流域の土地利用状況(2002)

(2) 人工系入力データ設定

1) 土地利用状況及び人口、工場分布

人工系の入力データを設定するに当り、まず、渭河流域の土地利用状況を踏まえ、水利用先、及び汚濁物質の発生源の把握に必要となる人口、工場及び灌漑地の分布を明らかにする。図3-3にLANDSAT-7:ETM+センサによる衛星画像を解析して得られた渭河流域の土地利用状況を示す。耕地の大部分は流域南東部の関中平原に位置し、広く小麦、トウモロコシの二毛作が実施されている。また、流域南部に居住区及び工業区の集積が見られる。図3-4に渭河流域の人口分布を示す。これは各種統計資料⁹⁾⁷⁾⁸⁾から得られた地域別の人口データを図3-3の居住区に振り分け、作成したものである。主要都市での人口密度が特に高い。工場の各gridへの配分は、人口密度に比例させた。灌漑区は既存資料⁹⁾を用い配置した。

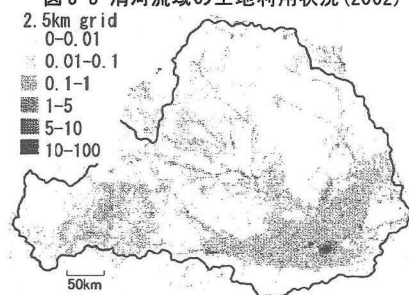


図3-4 渭河流域の人口分布
(2000, 単位: 万人)

2) 水源に係る設定

ダムに関するデータ⁹⁾⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾は、流域内の中大規模ダムの位置及び容量のみであり、用途、供給先、供給水量等に係るものが存在しないため、各ダムの供水先は最寄の都市、又は灌漑地とし、供給水量は統計資料⁹⁾⁷⁾から得られる水需要量に一致させた。また各gridの地下水取水先は、各grid直下の帯水層と仮定した。

3) 水需要に係る設定1(生活用水)

表3-1に各省、自治区の城鎮、鄉村別の生活用水原単位⁹⁾⁷⁾⁸⁾を示す。表より、城鎮と鄉村の生活用水原単位に大きな格差が見られる。これは、2001年現在で、洗濯機の普及率が都市部で90%程度であるのに対し、農村部では40%程度である等、生活習慣の違いが主な原因と考えられる。

表3-1 渭河流域の生活用水原単位と流域内人口(2000)

		陝西省	甘肅省	寧夏区
生活(L/人/日)	城鎮	184	73	110
	鄉村	46	49	30
流域内人口(万人)	城鎮	1,689	328	12
	鄉村	435	792	79

4) 水需要に係る設定2(工業用水)

表3-2に工業の規模別、業種別の工業用水原単位¹¹⁾を示す。既存資料⁹⁾⁷⁾⁸⁾の地域別(市区県別)工場数に係る表記が、軽工業と重工業の一定規模以上及び以下の区分に限られるため、工業セクターの地域別水利用量の算定にあたり、流域内17業種の水利用及び排水原単位を軽工業、重工業で区分し、これを平均化した。表中の重工業は、資源開発、石油化学、金属加工、機械及び電力供給等であり、軽工業は、食品加工、紡績、印刷、製紙、ゴム及びプラスチック製造業等を含む。また、一定規模以上の場合、新規利用水量、回収水量、排水量の原単位($\text{m}^3/\text{元}/\text{年}$)が存在するが、一定規模以下の場合、水利用に係る

表3-2 渭河流域の工業用水原単位と省区別工業総産値(2000)

規模	業種	工業用水原単位 ($\text{m}^3/\text{元}/\text{年}$)	工業総産値(億元/年)		
			陝西省	甘肅省	寧夏区
規模以上	軽工業	0.005	309	21	3
	重工業	0.015	575	81	2
規模以下	軽工業	0.004	421	9	1
	重工業	0.004	551	36	1

* 規模以上工業企業: 産品の年間売り上げ額が500万元以上である企業

データが殆ど存在しない。このため、一定規模以下の工場の新規利用水量に係る原単位として、一定規模以上の工業用排水原単位の中で最も小さい値を示す排水量の原単位を代用した。なお、一定規模以下の工場では、工業排水の再生技術はなく、新規利用水は使用後全て排水に回ると仮定した。

5) 水需要に係る設定3 (灌漑用水)

a) 灌漑開始条件

各灌漑区の平均土壌水分量が閾値を下回った場合、取水を実施する。なお、流域内各省、自治区の灌漑用水原単位⁶⁷⁾は、陝西省：4,275m³/ha/年、甘肅省：9,285m³/ha/年、寧夏自治区：8,985m³/ha/年、である。陝西省では大規模節水灌漑事業が実施されており、他の地域に比し原単位は小さい。

b) 取水方式

まず、各 grid の層別の要求水分量 D_w (m³) を算定し、これを灌漑区毎に集計する。

$$D_w = (S_s - S_w) \times dz \times A \quad (1)$$

ここで、 S_s ：飽和土壌水分量(%)、 S_w ：土壌水分量(%)、 dz ：層厚、 A ：各 grid 面積、である。次に、取水可能量 A_w (m³) を、取水先の状況に応じ設定する。河川から取水する場合、河川水量の7%まで取水可能としダムから取水する場合、最大取水可能量を10m³/s(=36,000m³/h)として計算する。上記で導出した要求水分量 D_w と取水可能量 A_w を比較し、以下の条件で灌漑区へ水を分配する。

i) $D_w \leq A_w$ の場合：要求水分量のみ取水し、灌漑区に時間単位で分配する(m³/h)。

ii) $D_w > A_w$ の場合：取水可能量のみ取水し、灌漑区に時間単位で分配する(m³/h)。

この際、各灌漑区の平均土壌水分量が50%に達するか、または取水継続期間が2週間を超えた場合、取水を停止する。なお、上記において、モデル入力値としての年間灌漑取水量が統計資料⁶⁷⁾上の値と一致するように、取水可能量及び取水継続期間に係る数値を設定した。

6) 水需要のまとめ

図3-5は、渭河流域のセクター別、水源別水利用量(計71.9億m³)である。図より、セクター別では灌漑用水が全体の70%程度を占め、生活用水17%、工業用水13%と続く。水源別では、地下水の割合が全体の40%程度を占める。図3-6

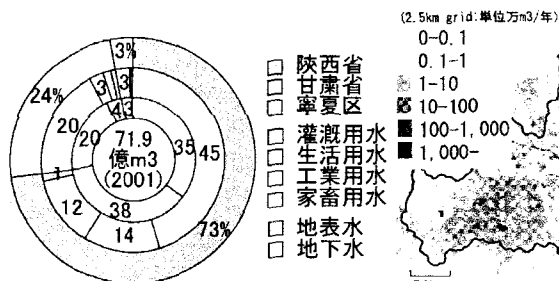


図3-5 渭河流域の年間水利用量(2001)

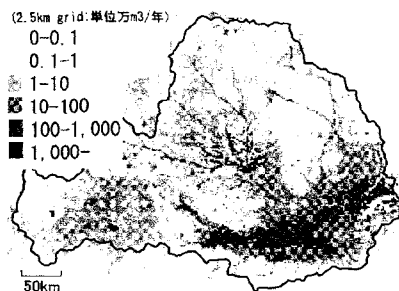


図3-6 渭河流域の水利用分布(2001)

に、渭河流域内の年間水利用分布状況を示す。図は、図3-4の人口分布と地域別の生活用水原単位を、人口分布と同様の手法で作成した工場分布と工業用水原単位を、灌漑地と灌漑用水原単位を、それぞれ掛け合わせたものを用いて作成した。図より、灌漑区及び主要都市が分布する地域の水利用量が非常に多いことがわかる。各 grid の生活用水、工業用水は、年間需要量を時間平均し人工系入力データとした。

7) 汚濁負荷量に係る設定

表3-3に生活排水、工業排水、及び処理水のBOD物質に係る汚濁負荷発生原単位¹⁾を示す。表の生活排水に係る原単位は、中国の経験的な値であり、工業排水のそれは既存資料より得られた。また、処理水に係る原単位は、西安市北石橋污水处理場の放流水のBOD₅に基づき設定した。ここでは、都市排水の河川への影響をより明確化するた

表3-3 汚濁物質(BOD)発生原単位

	単位	BOD負荷
生活排水(都市-農村)	g/人/日	50-30
工業排水	mg/l	200
処理水	mg/l	5

* 流域内人口：都市部2,029万人、農村部1,306万人

め点源からの汚濁負荷のみを考慮する。図3-7は汚濁物質の点源分布である。図より、西安、咸陽、宝鶏、渭南の負荷量が非常に大きい。

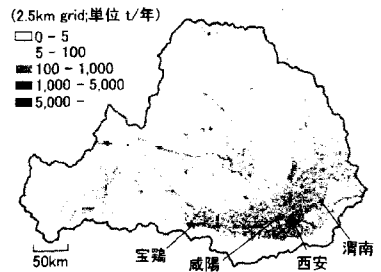


図3-7 渭河流域の汚濁物質点源分布 (BOD 物質)

3.2 流出形態に係る解析手法

(1) 斜面モデル概要

図3-8に渭河流域のgrid区分状況と斜面要素の概要を表す。モデルの斜面要素は、表層と帯水層の2層からなり、斜面の傾きはgrid内の標高差を平均化したものである。なお、各gridの表層厚及び帯水層厚を設定する際、関連データが得られなかったため、楊ら(2002)⁹⁾が黄河流域でgrid別(10km grid)に設定したものをそのまま活用した。表層厚は0-4m、帯水層厚は表層厚の5倍程度である。

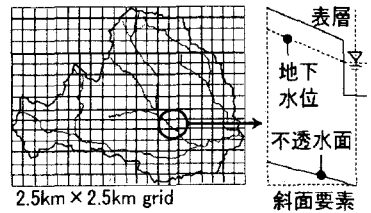


図3-8 渭河流域のgrid区分と斜面要素

(2) 流出形態

図3-9に水文水質統合モデルの自然系及び人工系流出形態の概要を示す。自然系の流出形態の表現には、基本的に楊ら(2002)⁹⁾のGBHM2の手法を踏襲した。本モデルでは、これに人工系の水収支及び汚濁物質の負荷を考慮し、水質モデルとの統合を図った。

1) 樹冠遮断と蒸発散(図3-9①②③): canopyの保水能を次式で表す。

$$S_{co} = 0.15LAI \text{ (mm)} \quad (2)$$

ここで、LAIは1981-2000のNOAAの衛星画像によるNDVIから得られたものである。また、実蒸発散量は、可能蒸発散量の0.8倍程度とした。

2) 表層流(図3-9④): 降雨強度が土壤浸透能を上回る、または飽和地表面に降雨があたる場合に、表流水を発生させた。表面流れを定常流と仮定し、流速をManning式から算定した。

3) 土壤水分移動(図3-9⑤⑥): 不飽和水分移動は、以下の鉛直次元Richards式から算定した。

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right], \quad C_h = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (3)$$

ここで、 h :マトリックスポテンシャル、 k_z :不飽和透水係数、 θ :体積含水率、である。不飽和透水係数はvan Genuchten式より得た。

4) 地下水流出(図3-9⑦⑧):、ダルシー則に基づき、地下水流出及び地下水位上昇について算定した。

5) 都市排水(図3-9⑪⑫):生活排水量を生活用水量と等しいと仮定し、各種統計資料⁵⁰⁾⁷⁾に基づき処理率20%と設定した。一時間当りの排出量に表3-3に示した汚濁物質負荷原単位を乗じ、河川への負荷量を算定した。また、工業排水量を、統計資料¹⁰⁾に基づき新規利用水と回収水との関係から導いた。さらに、生活排水の場合と同様の手法を用い、工業排水による河川への汚濁負荷量を算定した。工業用水の回収率は1992-2001の10年間で50-60%程度、処理率は20%程度といずれも低い値を示した。

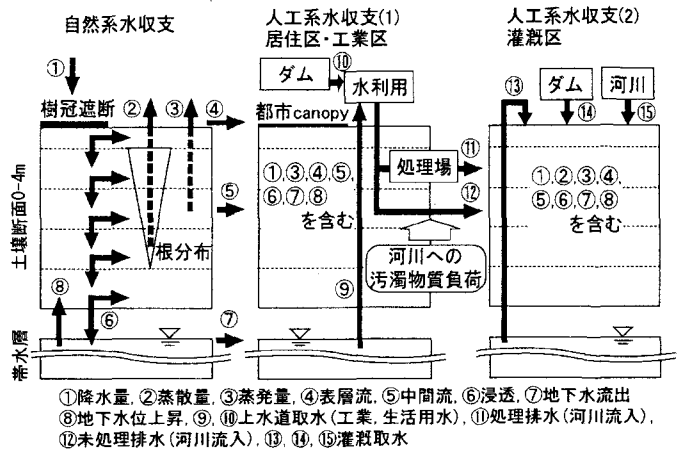


図3-9 自然系及び人工系の流出形態概要図

6) 灌漑排水：灌漑排水の排出経路に係るデータがないため、灌漑用水は、排水時、表流水または浸透水として自然系と同様の挙動を示すと仮定した。

3.3 水質モデルの構築

本モデルでは河川流量の導出に、kinematic wave法を用いた。この流量解析値を以下の一次元移流拡散方程式に代入し、水質モデル構築を試みた。

$$\frac{\partial(A X_i)}{\partial t} = \frac{\partial(A D_L \partial X_i / \partial x)}{\partial x} - \frac{\partial(A u X_i)}{\partial x} + q_i + A f_i \quad (4)$$

ここで、 X_i ：iの物質濃度(ここではBOD物質)、 A ：河川断面面積、 t ：時間、 D_L ：流下方向の拡散係数、 u ：流速、 x ：流下距離、 q_i ：負荷量、 f_i ：iの物質変換速度、である。 f_i は、速度定数 K_{1i} 、 K_{3i} を用い、 $f_i = -(K_{1i} + K_{3i})X_i$ とした。上式において、河川の流れを定常状態と仮定した。なお、河川の断面形状を長方形とし、各gridの河川幅及び深さを、現地調査による河川断面形状測定、及びGISを用いた流域地図¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾の解析結果に基づき設定した。式(4)の X_i の導出に必要な各パラメータ設定値を表3-4に示す。沈降速度定数は、分解速度定数に比し非常に小さいと仮定し、ここでは無視した。また、渭河はSS濃度が非常に高く、底泥への吸着を考慮する必要があるが、現在SS挙動に係るモデルを構築中であり、今後、当該モデルへの導入を図っていく。

表3-4 水質モデルパラメータ

A	河川断面面積(m ²)	現地調査、及び既存資料 ¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾ より設定
x	流下距離(m)	5,000
K_{1i}	分解速度定数(h ⁻¹)	0.001~0.05
K_{3i}	沈降速度定数(h ⁻¹)	0
D_L	拡散係数(m ² /s)	0.1
∂t	タイムステップ(s)	3,600

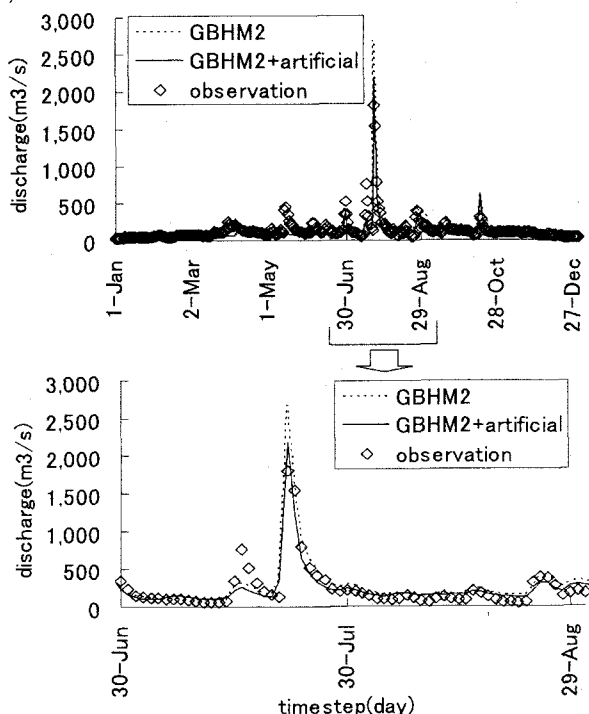


図4-1 河川流量の実測値と解析値の比較(咸陽:1993)

4 数値解析結果の検証

4.1 河川流量及び流域水収支

図4-1は、咸陽の水文観測地点における流量実測値と解析値との比較である(計算期間:1993年)。図より、自然状態のみを考慮したGBHM2¹³⁾に、ダム、地下水取水等の人工系を加味することで、実測値の増減傾向及びピーク流量の出現時期を精度よく再現できる。図4-2に渭河流域の年間の水収支を示す。図より、黄河への流出量に占める未処理排水流入量の割合は10%程度と高くなっている。

4.2 河川水質

図4-3は、咸陽の水文観測地点における現地水質観測結果(BOD₅)と解析値とを比較したものである。図より、

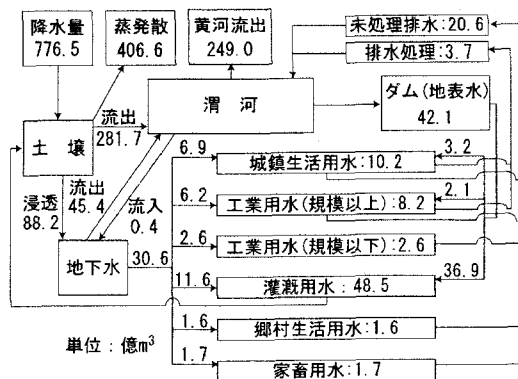


図4-2 渭河流域の水収支(1993)

都市近郊の河川は、未処理排水の直接流入により、BOD値が非常に高くなっている。図4-4は、図3-7で示した点源負荷のみを考慮した場合の流域内水質分布の解析結果である。降水量の少ない冬季の水質を出力しているため、比較的水質は悪い。図より、都市部周辺の河川では、常に中国地表水環境質量基準¹⁶⁾の超V類 ($BOD_5 > 10\text{mg/l}$)を示し、今後の水質改善に係る対策が急務となっている。但し、本モデルは主要都市の点源負荷しか考慮されていないため、都市周辺の河川水質の再現は可能であるが、耕地周辺の河川水質を再現できていない(図4-5参照)。このため、耕地等の面源負荷を考慮しモデルの精度を高めなければならない。

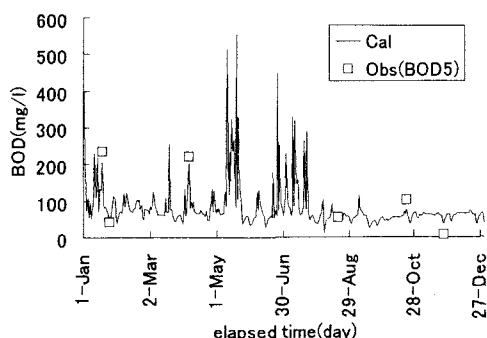


図4-3 河川水質の実測値と解析値の比較(咸陽)

5 排水処理率向上による河川水質改善の評価

現在、都市部の排水処理率は前述のとおり20%程度と非常に低い。今後、都市への人口及び産業集積はさらに進展していくため、水処理施設の拡

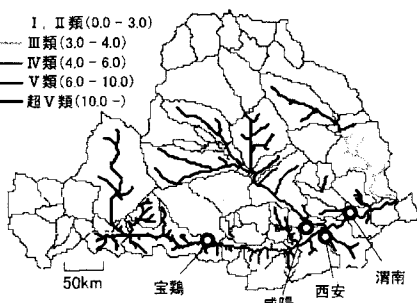


図4-4 中国地表水環境質量基準に基づく水質分布()内の数値はBOD:mg/l)

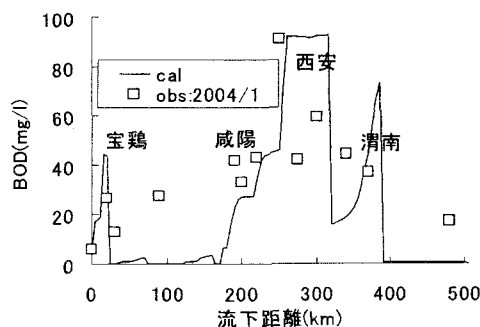


図4-5 渭河の流下距離に伴う水質変化(2004.1)

充は不可欠である。表5-1に生活

排水及び工業排水の処理率別の河川流入負荷量を示す。表より、排水処理率が80%の場合、河川へのBOD物質流入量は、処理率20%の場合に比し、7割程度減少する。図5-1に排水処理率20%(図4-3の水質挙動と同様)と80%の場合の水質解析結果の比較を示す。図より、都市周辺のBOD値が、少雨期を除き中国地表水環境質量基準内 ($<10\text{mg/l}$)に近づけるには、少なくとも排水処理率80%の達成が必要であることがわかる。

表5-1 生活排水、工業排水の処理率別の河川流入負荷量一覧

	BOD発生原単位 (mg/l)	河川放流量(万 m^3) [BOD負荷量(t)]	
		処理率20%	処理率80%
生活排水	150	94,232 [141,348]	23,558 [35,337]
工業排水	200	81,174 [162,347]	20,293 [40,587]
処理水	5	43,851 [2,193]	175,405 [8,770]
計	-	219,257 [305,888]	219,257 [84,694]

*生活排水のBOD発生原単位は、表3-3の値(g/人/日)をmg/lで換算した値である。なお、排水量は2000年の値である。

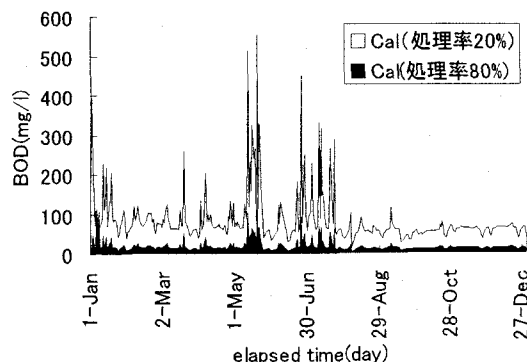


図5-1 異なる排水処理条件での渭河の水質挙動の比較

6 結論

- 1) 水文水質統合モデルは流域の河川流量、及び都市部付近の水質を再現するのに有効であった。
- 2) 都市域居住区、工業集積区等の汚濁物質の点源では、排水処理率を80%程度とした場合、都市周辺河川の水質が中国地表水環境質量基準値 ($BOD_5 < 10\text{mg/l}$)¹⁶⁾

をほぼ満たすことが判明した。今後降水量の空間分布、汚濁物質の面源負荷、SS挙動等を考慮し、モデルの精度を高める予定である。

なお、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)によるものである。また研究の遂行にあたり、西安建築科技大学の学生諸氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) Yang, D., S. Herath and K. Musiake (2002) A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(1), 49-65.
- 2) 石原潤：内陸中国の変貌－改革解放下の河南省鄭州市域－，ナカニシヤ出版，2003
- 3) 田中修：中国第十次五ヵ年計画－中国経済をどう読むか－，蒼蒼社，2001
- 4) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, 1998
- 5) 国家统计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
- 6) 陝西省統計局：陝西統計年鑑 1993-2003，中国統計出版社
- 7) 甘肅省統計局：甘肅統計年鑑 1993-2003，中国統計出版社
- 8) 寧夏回族自治区統計局：寧夏統計年鑑 1995, 1997, 1998, 2001, 2002, 中国統計出版社
- 9) 陝西省計画委員会，陝西省測繪局：陝西省資源地図集，西安地図出版社，1999
- 10) 張宗祐，戸耀如：中国可持續發展水資源戰略研究報告集 第9卷 中国西部地区水資源開發利用，中国水利水電出版社，2001
- 11) 中国環境年鑑編集委員会：中国環境年鑑，中国環境年鑑出版社，1991-2002
- 12) 東修，楠田哲也，王曉昌，井上和久，尾崎心平，馬場啓輔：西安市の水利用及び汚濁物質負荷過程の解明，環境工学論文集，第40巻，2003
- 13) 黄河水利委員会：黄河流域地図集，中国地図出版社，1989
- 14) 西安地図出版社：陝西省地図冊，西安地図出版社，2001
- 15) 西安市地図集編纂委員会：西安市地図集，西安地図出版社，1990
- 16) 清華大学・環境科学与工程系：中国環境ビジネス－現状と将来予測－（最新市場レポート），神鋼リサーチ株式会社，2002