

(18) 西安市の水利用及び汚濁物質負荷過程の解明

Research on Water Utilization and Pollutant Load Fluxes in Xi'an City

東 修*, 楠田 哲也**, 王 曉昌***, 井上 和久****, 尾崎 心平****, 馬場 啓輔****
Osamu Higashi*, Tetsuya Kusuda**, Xiaochang C Wang***, Kazuhisa Inoue****, Shinpei Ozaki****, Keisuke Baba****

ABSTRACT: Xi'an, one of the biggest cities in the middle part of china, is along the Weihe River which is a branch of the Yellow River. In recent years, its water demand has been increasing drastically due to rapid industrial development and population growth. Infrastructure, such as water supply and wastewater treatment plants, however has not established enough yet, so serious water problems in quality and quantity have appeared. For example, ground subsidence has occurred by too much ground water abstraction, and water pollution has been more seriously by increasing domestic, industrial and agricultural wastewater disposal. So constructing an efficient water utilization system is an urgent need in this region. In this study, the authors investigate water balance and pollutant load fluxes in Xi'an City based on field surveys, and by analyzing GIS data and using SD. In conclusion, in Xi'an City, ground water accounts for 70% of the total water use and its amount decreased 0.9 billion tons from 1993 to 2001. The total BOD amount into the rivers is about 0.2 million tons in 2001 and its 90% is from domestic and industrial waste waters.

KEYWORDS: Xi'an City; Water Balance; Water Pollution; GIS; SD.

1 はじめに

中国では70年代後半の改革・開放政策の開始以来, 急激な産業発展, 人口増加及びそれに伴う農業生産の増加等により, 水の需要が急増している. これに対し, 水供給及び水処理施設等のインフラ整備は開発途上にあり, 地下水の過剰摂取, 河川の水質悪化等の問題も生じている. 特に, 従来から降水量の少ない黄河流域では, 「黄河断流」に象徴される水不足が深刻化している. こうした中, 黄河流域の都市部において, 節水型化を含む水循環に係る効果的なシステムを構築することは, 今後中国が持続的な発展を図る上での重要なポイントのひとつであると考えられる.

黄河の支流である渭河流域に位置する中国西部の主要都市・西安市(図1-1参照)においても, 近年, 産業及び人口の集中により水需要量が急増しており, これに伴い上述のような水循環に係る問題が深刻化している. 西安市は, 黄河流域内の都市が抱える水問題が凝縮されているといえる.

そこで本研究では, 西安市を対象に, 同市の水利用状況及び汚濁物質負荷過程を解明することを目的とし,

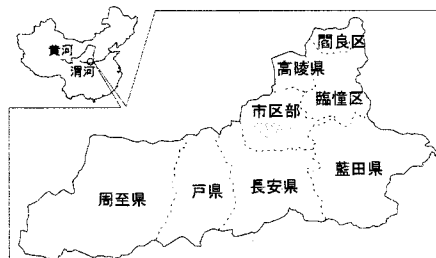


図1-1 西安市位置図

* 科学技術振興事業団 (Japan Science and Technology Corporation)** 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)**** 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)

今後、黄河流域全体の都市の節水型化を図る上で必要となるシステムの評価手法について検討する。具体的には、西安市の自然条件、社会条件及び各種統計資料¹²⁾等から水の利用、排水及び河川への汚濁負荷に係る原単位^{13),14)}を算定し、衛星画像⁹⁾、GISによる解析及び現地水質観測を通じ、西安市全体及び地域別の水利用、排水及び汚濁負荷の状況を明らかにする。またSD（システムダイナミクス）⁹⁾を活用し、地下水位の低下及び河川への汚濁負荷の抑制等について検討を加える。

2 西安市諸条件の整理

2.1 自然条件

西安市は、上述のように黄河の支流である渭河流域に位置し、面積は約10,000km²である。図2-1は、西安市の地形及び河川流況である。西安市南部には標高1,000-3,000mの山地が広がっており、中部及び北部は比較的起伏の少ない平地となっている。なお、図は旧ソ連製の地形図⁹⁾を基に作成した。

河川は各区、県に存在しいずれも渭河に注ぐ(図1-1参照：中国の市、県はそれぞれ日本の県、市に該当。区は日本と同様)。また地下水資源量¹²⁾は、1993年に25.8億m³であったものが2001年には17.3億m³となり、9年間で8.5億m³減少している。

年間平均降水量及び気温¹²⁾は、それぞれ526.4mm、13.8℃である。降雨は、6-8月及び10月に集中する傾向にあり、50-100mm/月程度である。

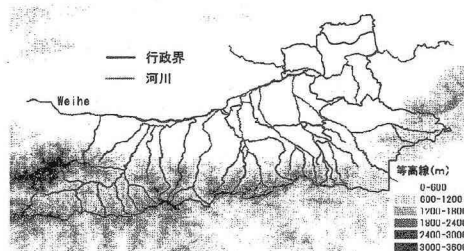


図2-1 西安市の地形及び河川流況

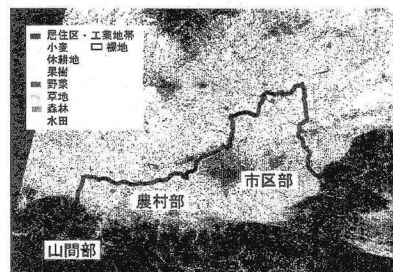


図2-2 西安市の土地利用状況(5月)

2.2 社会条件

(1) 土地利用状況

西安市の土地利用状況をLANDSAT-7:ETM+センサによる衛星画像を解析し把握した。図2-2は、2001年5月の衛星画像解析結果である。図より、市区部に居住区及び工場地帯が集積している。農地は畑地が全体の97%で大半を占める。冬から初夏にかけては小麦が、夏から秋にかけてトウモロコシが生産され、耕地の40%において二毛作が実施されている。なお、10月は5月に比し休耕地が多い。西安市周辺では、北部は殆どが畑地であり、南部は山地である。

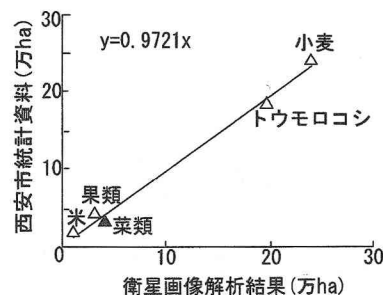


図2-3 衛星画像解析精度評価

衛星画像解析結果の精度確認のため、小麦及びトウモロコシの収穫期である5、10月の衛星画像の各種作物の作付面積を既存の統計データと比較した。その結果を図2-3に示す。図より、統計データと衛星画像解析による作付面積は、ほぼ1対1の比率で示され、解析結果は妥当であると考えられる。

(2) 人口分布状況

2001年の西安市の総人口は695万人で、市区部で400万人、各県で295万人となっている²⁾。図2-4は、西安市の2001年の人口分布状況を1km×1kmメッシュで示したものである。これは西安市の郷、鎮、街道人口⁶⁾を(1)の衛星画像解析結果の居住区に振り分けたものである。図より市区部に人口が集中し

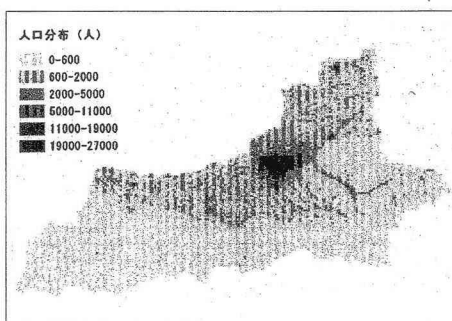


図2-4 西安市人口分布メッシュ(人/km²)

ており、人口密度は10,000-20,000人/km²であり、農村部の1,000人/km²程度と比べ格差は非常に大きくなっている。

3 西安市水循環システムの解明

3.1 解析手順

①西安市の水循環をSD⁹⁾を活用し、表現する。入力データは1993-2001年のものとする。

②2.1にならい、本モデルでは生活、工業、農業各分野の地下水汲み上げにより、地下水資源量が年平均で1億m³程度減少するとした。ただし、生活用水等の地下水汲み上げの影響を明確に示すため、これらが存在しない場合、つまり自然状態では地下水位が一定となるように設定する。

③西安市全体の水循環フロー図を作成する。また地域別の水利用状況についてもGISを活用し、解明する。さらに、取水による地下水位の低下について評価する。

3.2 解析手法

(1) 水循環基礎モデルの構築

図3-1にSDを用いた西安市の水循環に係る基礎モデルを示す。図中の□が貯水(stock)を意味し、○が水の流れ(flow)を示す。モデルでは西安市を山間部と平野部に区分し、平野部ではさらに農村部と市区部(居住区・工業区)に区分して各エリアの水利用の特徴を把握する。なお、本研究では限られた既存データから効果的に水利用状況を把握するため、SDに3段タンクモデルを組み込み、数値計算を試みた。

(2) 陸域入力データ整理

1) 日降水量及び蒸発散量

タンクモデルを用いるに当たり、日降水量が必要となるが、現在活用可能なものは月平均降水量⁹⁾のみである。このため既存文献の記述⁹⁾と年間降雨日数⁹⁾から日降水量を次のように設定した。

- ・降雨日数を各月に均等に割り振る。(例；年間降雨日数が120の場合は、常に3日に1日は雨が降る。)
- ・既存文献⁹⁾に「過去数十年において、毎年平均で50mm/日の降雨を1回、25mm/日の降雨を5回程度記録」とある。よって、降雨が50-100mm/月の場合、その月に降水量25mmの日が1度、100mm/月以上の場合、その月に降水量50mmの日が1度であると仮定した。

日蒸発散量は、Thornth-wait法¹⁰⁾から求めた月蒸発散量を各月の日数で除し、得られた。図3-2は日降水量

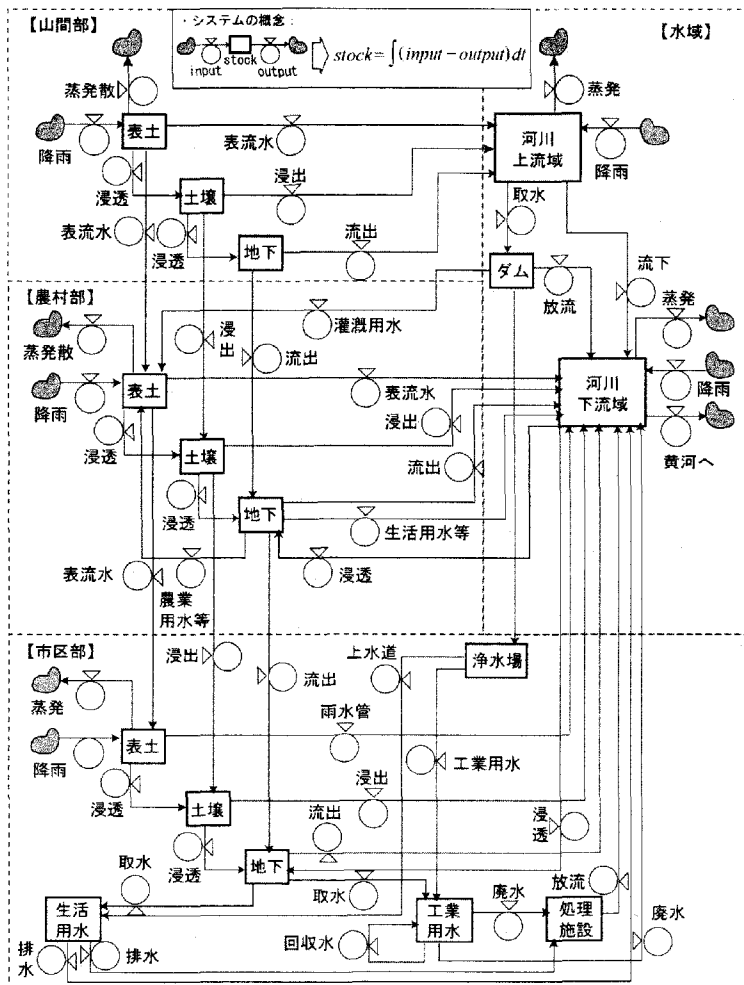


図3-1 西安市の水循環基礎モデル

及び蒸発散量の算定結果(2001)である。

2) 山間部の降水量及び気温

山間部の降水量と気温(蒸発散量算定に必要)は平野部と異なるため、西安市の海拔高度による降水量及び気温変化に関する実測値⁹⁾を曲線回帰し、算定した(図3-3参照)。なお、ここでは一律に標高1,500mの値を入力データとして活用した。

3) 西安市の水利用状況

図3-4は2001年の水利用量及び水源別水利用量である。水利用量は全体で16.1億 m^3 であり、このうち農業灌漑用水が7.4億 m^3 と全体の46%を占め最も多く、続いて工業用水4.4億 m^3 (27%)、生活用水3.4億 m^3 (21%)となっている。水源別では、地下水が11.2億 m^3 と全体の70%を占め、地下水依存が極めて大きいことがわかる。以下に、農業、工業、生活の各分野での1993年から2001年までの水利用状況の推移及び原単位について整理する。

a) 農業用水

図3-5に農業用水量の推移を示す。最近の耕地面積の減少に伴い農業用水量は減少傾向にある。1993年は農業用水全体(8.3億 m^3)の84%が地下水からの取水であったが、最近ではそれが70%程度まで減少し、ダムからの取水が増加している。なお灌漑用水原単位は、3,911 m^3 /ha/年である。

b) 工業用水

工業用水において、表流水及び回収水を活用しているのは全て市区部であり、農村部では全て新規利用としての地下水を活用していると仮定した。図3-6に新規工業用水量の推移を示す。新規利用水は1999年に5.6億 m^3 と最も多くなり、その後減少傾向にある。また、市区部での表流水の活用は減少傾向にある。なお、市区部工業用水回収率は1993年から2001年にかけて67%で推移しており、日本の水準(78.6%; 2000年現在)¹⁰⁾に比し10%程度低い。

ここでは工業用水量の算定に、一定規模以上の工業の場合

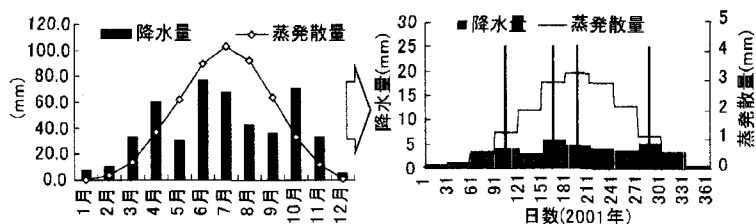


図3-2 月別降水量及び蒸発散量の日データへの変換

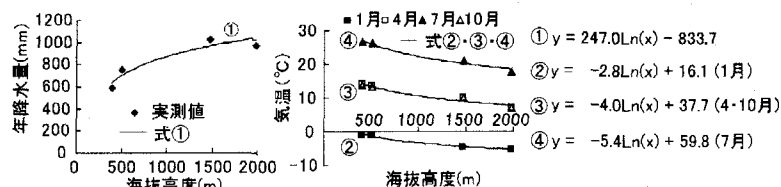


図3-3 西安市の海拔高度による降水量変化(左)、気温変化(中)及び回帰式(右)

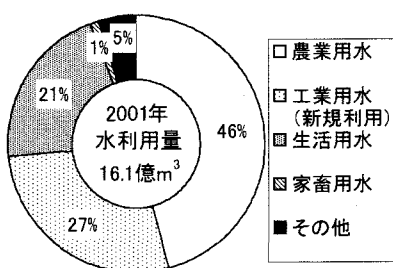


図3-4 ① 西安市の水利用量

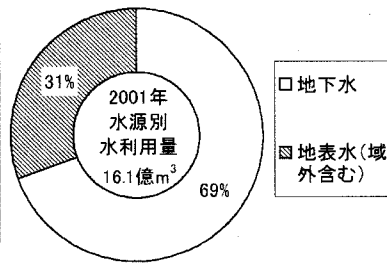


図3-4 ② 西安市の水源別水利用量(2001)

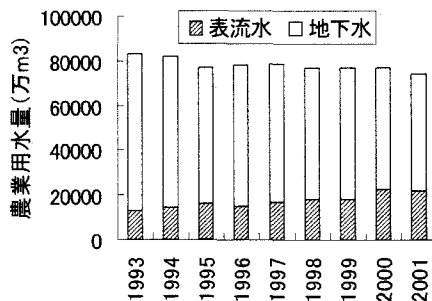


図3-5 西安市の農業用水量の推移

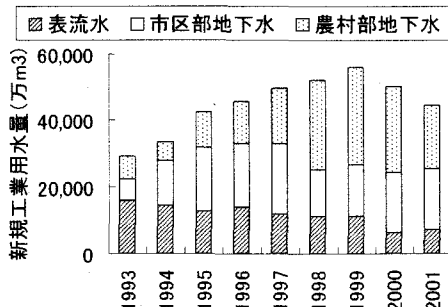


図3-6 西安市の新規工業用水量の推移

は、業種別生産額当たりの工業用水原単位を用い、一定規模以下の場合は、一定規模以上の工業排水量原単位の平均値を用いた。表3-1に2001年の重工業（資源開発、石油化学、金属加工、機械及び通信設備製造、電力供給等を含む）と軽工業（食品加工、紡績、印刷、製紙、ゴム及びプラスチック製品製造等を含む）の工業用水原単位を示す。原単位算定においては、金子らの論文¹²⁾を参考にした。

表3-1 西安市の生活及び工業用水原単位 (2001)

		単位	市区部	都市郊外・鎮	農村部
生活用水		ℓ/人/日	214.4	105.5	44.0
		単位	一定規模以上*		一定規模以下*
工業用水	重工業	m ³ /年/元	0.0147		0.0044
	軽工業		0.0045		0.0038

*統計資料²⁾では、工業用水量がある一定の企業規模で区分され示されているが、規模に関する定義がない。なお、西安市総企業数46,000社のうち、一定規模以上の企業は800社程度と少ない。また一定規模以下の企業の殆どが農村部に位置する。

c) 生活用水

図3-7に生活用水量の推移を示す。図中、上水道普及地区の生活用水量が1996年に急速に増加しているが、これは黒河導水の完成によるものである²⁾。また、供水なし市区部・鎮と農村生活用水量は、地下水の取水によるものと仮定した。2001年の生活用水量全体に占める上水道使用量の割合は60%と農業、工業に比し高くなっている。表3-1に2001年の市区部及び農村部の生活用水原単位を示す。表より、市区部の生活用水原単位は、農村部の5倍程度となっている。市区部では市街化の発達による事業用水の増加、水洗トイレ及び電気洗濯機の普及等が進んでいるのに対し、農村部では土に穴を掘っただけの簡易トイレ、河での洗濯が見受けられる。そのため両者の生活用水量に大きな差が生じると考えられる。

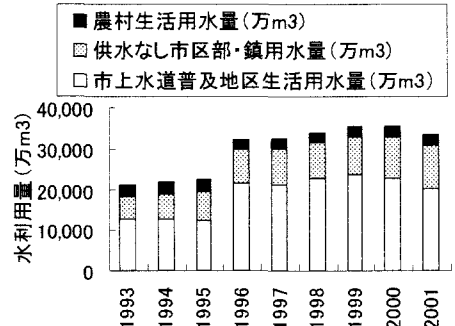


図3-7 西安市の生活用水量の推移

(3) タンクモデルの浸透係数等の決定

上記1)、2)のデータを用い、3.1②で示した手順でタンクモデルに必要な係数を決定した。表3-2に各係数等の一覧を示す。なお、表は図3-1とリンクしている。

(4) 水域の入力データ整理

河川を上流域と下流域に区分し、図2-1の標高600m以上を流れる領域を上流域、それ以外を下流域と設定した。表3-3に河川及びダムに関する係数の一覧を示す。なお、表は図3-1とリンクしている。

表3-2 タンクモデルの各種係数一覧

タンクモデル		項目	内容
	山間部	山間部降水量	R_f (mm/day) 3-2②にて算定
		山間部蒸発散量	E_f (mm/day) 同上。但し $H_{f1} < 5\text{mm}$ にて $E_f = 0$ 、 $H_{f1} > 5\text{mm}$ にて $1.2 * E_f$ とした。
		水収支式	$dH_{f1}/dt = (R_f - E_f) - (Q_{f1} + Q_{f2})$ (dt: timestep (day) 以下同様)
		表流水	河川流出 $h_{f1} = 10$ (mm)、 $\phi_{f1} = 0.05$ (day ⁻¹) (H_{f1} 初期値: 10mm) $Q_{f1} = \phi_{f1}(H_{f1} - h_{f1})$ ($H_{f1} < h_{f1}$ にて $Q_{f1} = 0$) (mm/day)
		表流水	農地流出 山間部から河川へ流れ出る流量の0.1%と仮定。河川流況図に1km ² づき図をかぶせ、山間部と農地及び河川が接する数を比較し推計。
		浸透	$\phi_{f2} = 0.05$ (day ⁻¹)、 $Q_{f2} = \phi_{f2} * H_{f1}$ (mm/day)
		水収支式	$dH_{f2}/dt = Q_{f2} - Q_{f3} - Q_{f4}$
		表流水	河川流出 $h_{f2} = 10$ (mm)、 $\phi_{f3} = 0.05$ (day ⁻¹) (H_{f2} 初期値: 10mm) $Q_{f3} = \phi_{f3}(H_{f2} - h_{f2})$ ($H_{f2} < h_{f2}$ にて $Q_{f3} = 0$) (mm/day)
		表流水	農地流出 表流水（農地流出）と同様。
		浸透	$\phi_{f4} = 0.05$ (day ⁻¹)、 $Q_{f4} = \phi_{f4} * H_{f2}$ (mm/day)
地下水	土壌	水収支式	$dH_{f3}/dt = Q_{f4} - Q_{f5}$
		河川流出	$\phi_{f5} = 0.05$ (day ⁻¹) (H_{f3} 初期値: 10mm—山間部は土壌が花崗岩等の岩盤からなるため、地下水位の初期値を小さくした) $Q_{f5} = \phi_{f5} * H_{f3}$ (mm/day)
		農地流出	表流水（農地流出）と同様。

タンクモデル		項 目	内 容
$\bullet$ U_{ir}: 灌漑用水 $\bullet$ D_w: 農業、生活排水等の浸入(地下水源から) $\bullet$ U_{agw1}: 汲み上げ1 $\bullet$ U_{agw2}: 汲み上げ2		平野部降水量	R_p (mm/day) 3-2.2にて算定
		平野部蒸発散量	E_p (mm/day) 同上。但し $H_{a1} < 5$ mmにて $E_a = 0$, $H_{a1} > 5$ mmにて $1.2 * E_a$ とした。
		灌漑用水	U_{ir} (mm/day) 3-2.2にて算定
		農業、生活排水等の土壌浸入	$D_w = 0.9 (U_{gw1} + U_{gw2})$ (mm/day) (農村部における全排水量の90%が土壌に浸入し、残り10%が河川に直接流入するものとした。)
		水収支式	$dH_{a1}/dt = (R_p - E_p + U_{ir} + D_w) - (Q_{a1} + Q_{a2})$
		表土	河川流出 $h_{a1} = 20$ (mm), $\phi_{a1} = 0.01$ (day ⁻¹) (H_{a1} 初期値: 10mm) (蒸発散量が山間部より多いため、表流水量を少なくした), $Q_{a1} = \phi_{a1} (H_{a1} - h_{a1})$ ($H_{a1} < h_{a1}$ で $Q_{a1} = 0$) (mm/day)
		表流水	市区流出 農地から河川へ流れる量の0.3%と仮定(山間部の場合と同様の手法)
		浸透	$\phi_{a2} = 0.05$ (day ⁻¹), $Q_{a2} = \phi_{a2} * H_{a1}$ (mm/day)
		土壌	水収支式 $dH_{a2}/dt = Q_{a2} - Q_{a3} - Q_{a4}$
		浸出水	河川流出 $h_{a2} = 10$ (mm), $\phi_{a3} = 0.01$ (day ⁻¹) (H_{a2} 初期値: 10mm)
		市区流出	$Q_{a3} = \phi_{a3} (H_{a2} - h_{a2})$ ($H_{a2} < h_{a2}$ で $Q_{a3} = 0$) (mm/day)
		浸透	表流水(市区流出)と同様。 $\phi_{a4} = 0.2$ (day ⁻¹) → 地下水量を確保するため係数を大きめに設定した。 $Q_{a4} = \phi_{a4} * H_{a2}$ (mm/day)
		水収支式	$dH_{a3}/dt = Q_{a4} - (Q_{a5} + U_{agw1} + U_{agw2})$
		河川流出	$\phi_{a5} = 0.00003$ (day ⁻¹) (H_{a3} 初期値: 10,000mm), $Q_{a5} = \phi_{a5} * H_{a3}$ (mm/day)
		市区流出	表流水(市区)と同様。但し市区部の地下水位との格差が大きくなった場合、農村部から市区部への流入を大きくする措置をとった。
		汲み上げ1	U_{agw1} (mm/day) 生活用水、工業用水等取水 3-2.2にて算定
		汲み上げ2	U_{agw2} (mm/day) 灌漑用水取水 3-2.2にて算定
		地下水	
		平野部降水量	R_p (mm/day) 3-2.2にて算定
		蒸発量	E_v (mm/day) 表土水位の10%を蒸発量と仮定
		水収支式	$dH_{u1}/dt = (R_p - E_v) - (Q_{u1} + Q_{u2})$
		表土	表流水(河川流出) $h_{u1} = 20$ (mm), $\phi_{u1} = 0.3$ (day ⁻¹) (H_{u1} 初期値: 10mm) (雨水管が設置されているため、 ϕ_{u1} を大きくした), $Q_{u1} = \phi_{u1} (H_{u1} - h_{u1})$ ($H_{u1} < h_{u1}$ で $Q_{u1} = 0$) (mm/day)
		浸透	山間部と同様(生活排水、工業排水は河川へ直接排出すると仮定)
		土壌	水収支式 $dH_{u2}/dt = Q_{u2} - Q_{u3} - Q_{u4}$
		浸出水	河川流出 $h_{u2} = 10$ (mm), $\phi_{u3} = 0.05$ (day ⁻¹) (H_{u2} 初期値: 10mm)
		浸透	$Q_{u3} = \phi_{u3} (H_{u2} - h_{u2})$ ($H_{u2} < h_{u2}$ で $Q_{u3} = 0$) (mm/day)
		地下水	農村部と同様
		水収支式	$dH_{u3}/dt = Q_{u4} - (Q_{u5} + U_{agw1} + U_{agw2})$
		河川流出	$\phi_{u5} = 0.00005$ (day ⁻¹) (H_{u3} 初期値: 10,000mm), $Q_{u5} = \phi_{u5} * H_{u3}$ (mm/day)
		汲み上げ1	U_{agw1} (mm/day) 生活用水取水 3-2.2にて算定
		汲み上げ2	U_{agw2} (mm/day) 工業用水取水 3-2.2にて算定

3.3 解析結果

(1) 西安市の水循環と地域別水利用状況

図3-8に2001年の西安市全体の水循環を示す。これは図3-1と関連しているが、ここでは図3-1の○(flow)を文字のみで示し、また表土と土壌を一つのstockに統一した。図より、農村

表3-3 水域入力データ及び各種係数一覧

項目	内容
河川上流域 F_u (mm)	初期水位 $F_u = 200$ (mm) 現地調査結果(河川断面形状測定)に基づき設定
	蒸発量 E_v (mm/day) 既存資料 ²⁾ (月別データ)を日データ化
	降水量 R_p (mm/day) 山間部降雨と同様(表3-2参照)
	流下量 D_r (mm/day) $= F_u / 4 / \text{timestep}$ 河川上流域から下流域への流下にかかる時間遅れを4で除すことで表現
ダム R_{es} (mm)	初期水位 $R_{es} = 10,000$ (mm) 既存資料 ^{2), 3)} に基づき設定
	取水率 T_w (mm/day) $= 0.2 * F_u / \text{timestep}$ (ダムからの水利用量を十分賄える量に設定)
	放流量 D_{1sw} (mm/day) ($F_u > 10,000$ mmで、 $D_{1sw} = 0.015 * R_{es} / \text{timestep}$ (それ以外は $D_{1sw} = 0$))
河川下流域 F_d (mm)	初期水位 $F_d = 2,000$ (mm) 現地調査結果(河川断面形状測定)に基づき設定
	蒸発量 河川上流域と同様
	降水量 R_p (mm/day) 平野部降水量と同様(表3-2参照)
	黄河流出 D_{1sy} (mm/day) $= F_d / 20 / \text{timestep}$ 河川下流域から黄河への流下にかかる時間遅れを20で除すことで表現

部及び市区部において、地下水からの流出量が流入量を2億m³程度上回っており、農業、工業、生活各分野での地下水汲み上げの影響が見て取れる。また、黄河への流出量は年間24.5億m³で、既存資料¹⁾の西安市全体の河川年間平均流量(24.8億m³)とほぼ等しくなっている。なお、農村部、市区部の生活污水等の河川への未処理排水量は6.2億m³で、黄河への流出量の25%を占め、汚染状況の深刻さを窺わせる。

図3-9はGIS及び各種水利用原単位を活用して求めた年間の水利用量の地域分布(1km × 1kmメッシュ)で

ある。図より1km²あたりの水利用量は市区部及び鎮等、居住区・工業区が含まれる地域で高く最大で300万m³/km²/年となっている。これは農村部の5-10倍程度であり、表3-1に示した市区部と農村部の原単位格差をよく反映している。

(2) 地下水位の変動状況

図3-10は、市区部及び農村部の地下水位の変動状況である。図より、地下水位の低下が市区部では年間平均0.1m程度であるのに対し、農村部では0.01m程度と小さい。この理由として、市区部では単位面積あたりの年間水利用量が農村部の10倍程度と極めて大きいこと(図3-9参照)、そこでの排水は、ある程度配備された排水管を通じ河川へ直接放出され、土壌への浸透量が少ないこと、等が挙げられる。また、本計算において、農村部及び市区部の地下水域面積は農村部及び市区部の面積(各5,733km², 486km²)に等しいとした。

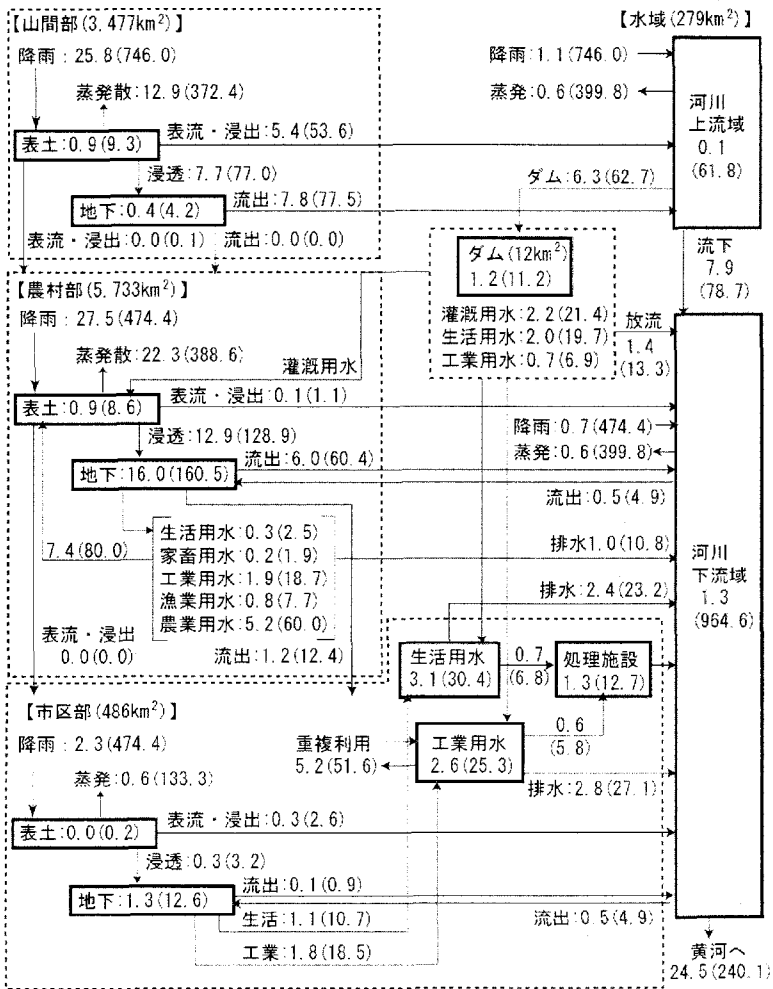


図3-8 西安市水循環フロー(2001)(単位→stock: 億m³(mm), flow: 億m³/年(mm/年))

(3) 工業用水回収率向上による地下水汲み上げ抑制

西安市区部の工業区では、前述のように、工業用水の回収率が67%で推移している。1993年から2001年にかけて回収水量は48.1億m³であったが、この回収率が日本並みの8割程度¹¹⁾に徐々に向上したと仮定すると、9年間で53.3億m³となり、

全体で5.2億m³、年平均0.6億m³の地下水汲み上げを抑制できる。これより工業用水回収率の向上は、市区部の地下水位低下を抑制するに当たり、非常に効果的であると考えられる。

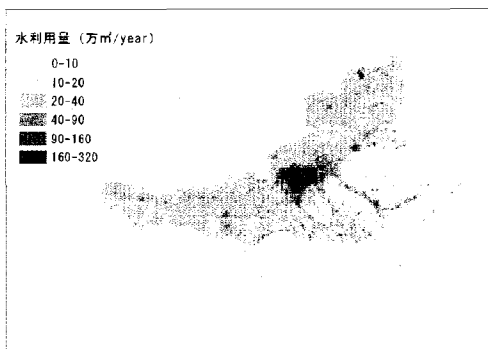


図3-9 西安市地域別水利用状況(2001)

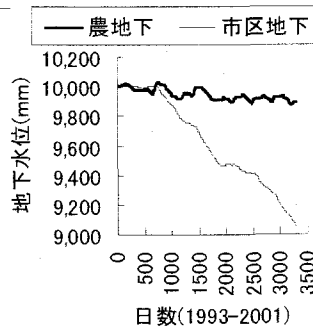


図3-10 西安市地下水位変動(1993-2001)

4 現地水質観測

図4-1は水質調査地点(Weihe:13地点W1-13, Zaohe:3地点Z1-3, Bahe:3地点B1-3, Jinghe:1地点J1)である。各地点において、2002年10月、2003年1、4月に水質観測を実施した。

図4-2はWeihe各地点のBOD₅である。W1ではダムから灌漑用水のみが取水されており、河川水が存在しない。このため、図中W1のBOD₅は灌漑用水路のものである。ただし、W2からは河川に十分な水量が確認されたため、これ以降は河川水に占める排水の割合がかなり高くなることが予想される。図では1月の値が他の時期に比し最も高い。この理由として、1月は気温がかなり低く微生物の活性が低いこと、降水量が少なく河川流量に占める排水の割合が他の時期に比し高くなること、等が考えられる。また、地点別では、西安市区部の排水の直接流入が考えられるW7-8において高い。

Zaoheでは、全ての時期及び地点においてBOD₅が150mg/lを超えており、これは大量の生活排水及び工業排水の直接流入が原因と考えられる。これに対し、BaheのBOD₅は比較的小さく、上流部(B1-2)、下流部(B3)でそれぞれ3mg/l、10mg/l程度となっており、生活排水等の直接流入は少ないとみなせる。なお、西安市の北方の農村地域からWeiheに注ぐJingheのBOD₅も最下流で20mg/l程度であり、汚染状況はBaheとほぼ同程度である。

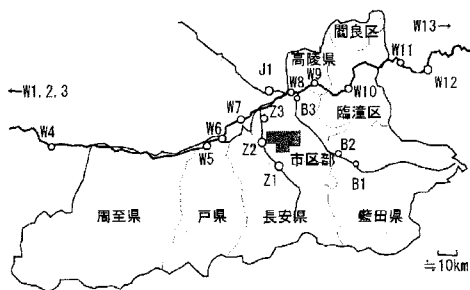


図4-1 現地水質測定地点

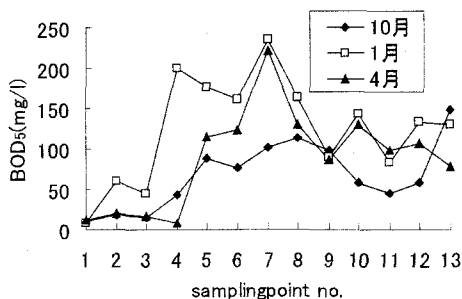


図4-2 BOD測定結果(Weihe)

5 西安市汚濁物質負荷過程の解明

5.1 解析手順

①汚濁負荷発生原単位を設定する。

②水循環と同様に、SDを用い汚濁負荷物質(BOD)に関するモデルを表現する。入力データは1993-2001年のものとする。

③解析により、発生源から河川への流入負荷量を算定する。ここで、現地調査結果(BOD₅)と解析結果を比較検討する。

④河川への流入原単位とGISを用い、河川流入負荷分布図を作成する。

表5-1 汚濁負荷発生原単位一覧

地域	発生源	単位	BOD	窒素	リン	備考
山間部	雨水	mg/l	1.6	0.30	0.02	・市区部の雨水水質(実測値)を適用
	地下水	mg/l	0.9	0.20	0.01	・B-1の地下水水質(実測値)を適用
ダム	灌漑用水	mg/l	10.0	2.00	0.10	・W-1の灌漑水質(実測値)を適用
	雨水	mg/l	1.6	0.30	0.02	・山間部と同様
農村部	地下水	mg/l	0.9	0.20	0.01	・山間部と同様
	生活排水	g/人/日	30.0	2.80	0.40	・中国の経験値、既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
	工業排水	kg/m ³	0.2	0.03	0.01	・既存資料 ⁽³⁾ を活用
	家畜糞尿	牛 g/頭/日	706.0	120.00	15.00	・既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
		豚 g/頭/日	169.0	20.00	4.00	
		鶏 g/羽/日	9.0	0.30	0.10	
	漁業排水	養殖場 mg/l	1,100.0	102.70	15.40	・既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
市区部	化学肥料	t/ha/年	5.0	0.50	0.20	・既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
	雨水	mg/l	1.6	0.30	0.02	・山間部と同様
	地下水	mg/l	0.9	0.20	0.01	・山間部と同様
	生活排水(都心)	g/人/日	50.0	4.60	0.70	・中国の経験値、既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
	生活排水(郊外)	g/人/日	40.0	3.70	0.60	・中国の経験値、既存資料 ⁽⁴⁾ を活用
	工業排水	kg/m ³	0.2	0.03	0.01	・既存資料 ⁽³⁾ を活用
	処理水	mg/l	4.5	0.80	0.06	・現地処理施設の放流水質

5.2 解析手法

(1) 汚濁負荷発生原単位の設定

表5-1に汚濁負荷発生原単位を示す。ここでは、山間部、農村部、市区部の汚濁負荷を既存資料¹⁾¹³⁾、実測値等に基づき、項目別に整理した。

(2) 汚濁負荷に係る基礎モデルの構築

SDを用いた西安市の汚濁負荷に係る基礎モデルは図3-1に示したものと基本的に同様の仕組みを持つ。農村部のモデルを用いて、水循環モデルとの異なる点を示す(図5-1参照)。図中、flowとして表されているものは全て汚濁物質負荷であり、BODの負荷を示すBの文字を添えている。水循環の場合と異なる点は、農地表土及び土壤中において汚濁物質が分解されること、また施肥により土壤中の汚濁物質が増加すること等により、これらを新たなflowとして加えた。なお、蒸発散による汚濁物質負荷の増減はないものと仮定した。図中の各汚濁物質負荷量は3章で推計した水循環フロー(図3-8参照)と表5-1の原単位を用いて算定した。

(3) 汚濁物質(BOD)の河川への間接流入に係る検討

Baheの上流域(B1, 2)を対象に、土壌浸透を経た河川への汚濁物の流入率を算定した。本エリアは、工場排水、生活排水等の河川への直接流入が非常に少なく、化学肥料、家畜糞尿等の表面流出による影響を検討するのに適している。主な計算条件は次のとおりとする。a)洗濯が河川で行われていることから、生活排水

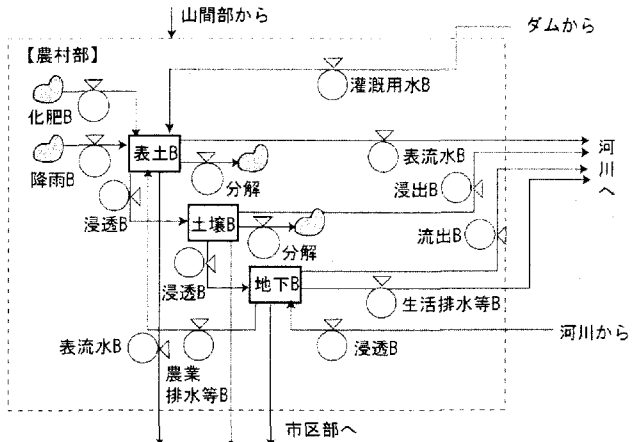


図5-1 汚濁物質負荷過程に係る基礎モデル(農村部)

表5-2 汚濁物質負荷過程のモデルに用いる計算条件(農村部)

水循環タンクモデル	項目	内容
	降水量B	$R_b \text{ (kg/day)} = 0.01 \cdot R_0 \cdot A \cdot R_b$ R_0 : 降水量(mm), A: 農村部面積(ha), R_b : 雨水汚濁負荷原単位(mg/l)
	化肥B	$C_{rb} \text{ (kg/day)}$ 既存の施肥量データと表5-1の原単位を用いて算定
	灌漑用水B	$I_{rb} \text{ (kg/day)}$ 灌漑用水量と表5-1の原単位を用いて算定
	各種排水B	$D_{wb} \text{ (kg/day)}$ 生活、工業、農業等各種排水量と表5-1の原単位を用いて算定
	物質収支式	$dH_{a1b}/dt = R_b - C_{rb} + I_{rb} + D_{wb} - (Q_{a1b} + Q_{a2b} + D_{eb})$ H_{a1b} : 表土水分中汚濁物質質量(kg), Q_{a1b} : 表流水中汚濁物質質量(kg/day), Q_{a2b} : 浸透水中汚濁物質質量(kg/day: 表土→土壌), D_{eb} : 土壌中の汚濁物質分解量 $h_{a1} = 20 \text{ (mm)}$, $H_{a1} > 20$ で $Q_{a1b} = \phi_{a1b} \cdot H_{a1b} \text{ (kg/day)}$, $H_{a1} < 20$ で $Q_{a1b} = 0$ 一汚濁物質表面流出率 $\phi_{a1b} = 0.002 \text{ (day}^{-1}\text{)}$, H_{a1b} 初期値: 1.934kg(表5-1の農村部地下水汚濁負荷原単位、農村部面積A, h_{a1} を用い算定)
	表土B	河川流出 市区流出 浸透 分解
	土壌B	物質収支式 $dH_{a2b}/dt = Q_{a2b} - (Q_{a3b} + Q_{a4b} + D_{eb})$ H_{a2b} : 土壌水分中汚濁物質質量(kg), Q_{a3b} : 浸透水中汚濁物質質量(kg/day), Q_{a4b} : 浸透水中汚濁物質質量(kg/day: 土壌→地下水) $h_{a2} = 20 \text{ (mm)}$, $H_{a2} > 20$ で $Q_{a3b} = \phi_{a3b} \cdot H_{a2b} \text{ (kg/day)}$, $H_{a2} < 20$ で $Q_{a3b} = 0$ 一汚濁物質浸透率 $\phi_{a3b} = 0.002 \text{ (day}^{-1}\text{)}$, H_{a2b} 初期値: H_{a1b} と同様の手法にて算定
	地下B	物質収支式 $dH_{a3b}/dt = Q_{a4b} - (Q_{a5b} + U_{gw1b})$ H_{a3b} : 地下水中汚濁物質質量(kg), Q_{a5b} : 流出水中汚濁物質質量(kg/day: 地下水→河川), U_{gw1b} : 地下水汲み上げに含まれる汚濁物質質量(kg/day) $Q_{a5b} = \phi_{a5b} \cdot H_{a3b} \text{ (kg/day)}$ 一汚濁物質流出率 $\phi_{a5b} = 0.0006 \text{ (day}^{-1}\text{)}$, H_{a3b} 初期値: H_{a1b} と同様の手法にて算定
		河川流出 市区流出 汲み上げ
		$U_{gw2b} \text{ (kg/day)}$: 表5-1の原単位と3-2-2の取水量を用い算定

全体負荷のうち、10%が河川に直接流入する。b)施肥時期は、トウモロコシ及び小麦の播種期、収穫までの中間期とする（トウモロコシ：5、7月・小麦：10、1月）。c)Baheの月別流量データと3章解析結果による河川水位の日変動を用い、日流量を推計し、河川へのBOD負荷量と日流量から、BOD濃度の推移を算定する。d)堆肥等の発生源から河川への流入率を0.2%とする。表5-2に詳細な計算条件を示す。汚濁物質負荷過程のモデルは、表流水Bが水循環の表流水がなければ存在しない等、3章で示した水循環とリンクしているため、表中に水循環で示したタンクモデルを併記した。

図5-2にBaheのBOD₅の実測値(B1, 2)と計算値を示す。現地調査は2002年10月から2003年4月まで実施されているが、計算値は便宜上1年前の同時期のものとなっている。図より、実測値と計算値との相関はよく、実測値では10月のBOD₅が最も高くなっているが、これは冬小麦の播種期であるため、多くの施肥がなされ、同時に多雨期であることから、化学肥料の河川への流出による負荷が大きくなっていると思われる。計算値もこの状況をよく表しており、計算結果は妥当といえる。

(4) 汚濁物質(BOD)の河川への直接流入に係る検討

W8を対象に、汚濁物質の排水管等を通じた直接流入について検討した。W8は西安市農村部及び市区部の排水が集中する地点である。市区部では生活排水及び工業排水の80%が河川に未処理排水され、20%が処理施設を通じ排水される。²⁹⁾また、雨水は、側溝、雨水管を通じ30%が河川に直接流入するとした。一方、農村部では、Zaohe上流部のように生活排水等が直接河川に流入し、市区部の水域に大きな負荷を与えている地域もある。このため農村部全体では、生活排水及び工業排水の50%及び家畜排水の10%が河川に直接流入するとした。

これは農村部の全排水量の10%であり、3章の仮定（農村部の全排水量のうち90%が土壤に浸透する：表3-2参照）と合致している。以上の条件のもと数値計算を行い、図5-3のような結果を得た。図はW8のBOD₅実測値と計算値の関係である。図より、実測値と計算値の相関はよく、上記の仮定は妥当である。

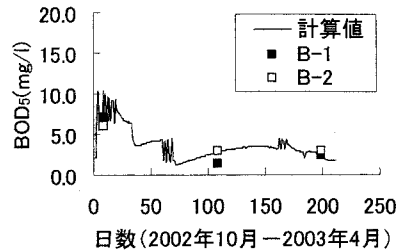


図5-2 水質実測値(Bahe)と計算値の関係

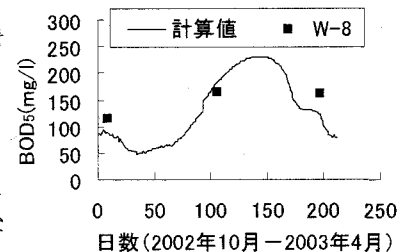


図5-3 水質実測値(W8)と計算値の関係

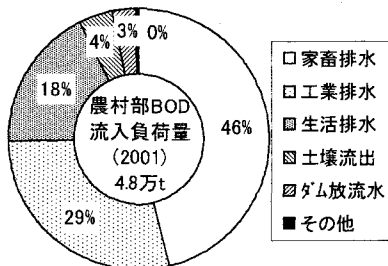


図5-4① 農村部年間BOD流入負荷

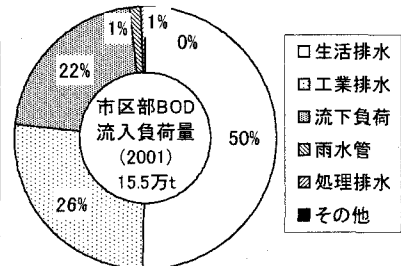


図5-4② 市区部年間BOD流入負荷

5.3 解析結果

図5-4は農村部及び市区部の河川への年間BOD流入負荷量である。農村部では、全体で4.8万tの負荷量であり、このうち、生活排水等の直接流入によるものが4.5万t(93%)と殆どを占める。化学肥料等、土壤浸出による影響は0.2万tと小さい。窒素、リンの負荷量は、表5-1で示した原単位を用いると各0.6万t、0.1万tとなる。一方、市区部では全体で15.5万

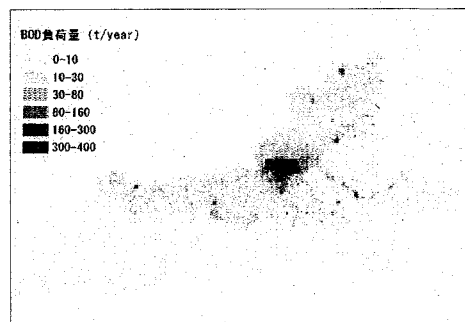


図5-5 西安市年間汚濁負荷分布

tと農村部の3倍程度となり、生活排水等の直接流入によるものが11.8万tで全体の76%を占め、これに農村部から流下する負荷をあわせると98%となる。農村部からの負荷も殆どが生活排水等の直接流入水であることから、西安市の汚濁原因の殆どが生活及び工業排水等の直接流入によるものといえ、水処理施設の早期拡充が望まれる。図5-5は、西安市の年間汚濁負荷量分布である。図よりBODの市区部での負荷が非常に大きく、300t/km²程度で農村部の5-10倍あり、市区部での汚染状況がより深刻である。

6 まとめ

本研究では、各種原単位、GIS、SDを活用し、西安市の水循環及び汚濁物質負荷過程をうまく説明できた。SDを活用し水循環と汚濁物質負荷過程をリンクさせることで、限られたデータの中で効果的に全体の状況を把握し、GISを活用することにより、これを地域情報におとす、という一連の手法は、今後、特にデータ入手が困難な小都市を含む黄河全体の水問題を考えていく上で有効な手段であると考えられる。以下に本研究の結果をとりまとめる。①年間水利用量は16.1億m³(2001)で、そのうちの7割が地下水利用である。②市区部において地下水位低下が深刻であり、低下速度は0.1m/年で、汲み上げ量では年間1億m³程度過剰摂取されている。工業用水の回収率を日本の水準まで高めることにより、年間0.6億m³の地下水汲み上げが削減できることから、今後の地下水位低下の抑制方策として、こうした取組は重要である。③河川へ流入する汚濁負荷量はBODで20万t/年程度であり、うち90%以上が生活・工業分野からの未処理排水の流入による。よって水処理施設の早期拡充が望まれる。

なお、本研究は科学技術振興事業団の戦略的創造研究推進事業(CREST)によるものである。また研究の遂行に当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) 西安市地方志編纂委員会：西安市志、第一巻、西安出版社、1996
- 2) 西安市統計局：西安統計年鑑、中国統計出版社、1994-2002
- 3) 中国環境年鑑編纂委員会：中国環境年鑑、中国環境年鑑社、1991-2002
- 4) 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
- 5) 西安市城市企画管理局、西安市勘察測繪院：西安城市工程地質図集、西安地図出版社、1998
- 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) 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
- 8) 長谷川均：リモートセンシングデータ解析の基礎 THE ABCs OF RS、古今書院、1997
- 9) 島田俊郎編：システムダイナミックス入門、日科技連、1994
- 10) Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R.: The water balance. Laboratory of Climatology, Publication No.8, Centerton, NJ, 1955
- 11) 国土交通省、土地・水資源局水資源部編：日本の水資源、2002
- 12) 金子慎治、近江健治、三枝祐司、井村秀文：黄河流域における水資源賦存量と水需要量の地域バランス、第28回環境システム研究論文発表会講演集、pp281-286、2000
- 13) 中華人民共和国水利部・中国水資源公報編纂委員会：中国水資源公報2000、第4章用水原単位、2001(国際協力事業団水利人材養成プロジェクト翻訳を引用)
- 14) 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>

【全般を通じての参考文献】

- * 巖斗鎔、楠田哲也：渇水の規模と発生確率を考慮した水資源確保対策の検討とその評価—博多湾流域を対象として—、環境工学研究論文集Vol.36、pp333-340、1999
- * 馬場啓輔、井上和久、楠田哲也、東修：西安市周辺河川の汚濁負荷メカニズムに関する基礎的研究、平成14年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、ppB610-611、2003
- * 尾崎心平、井上和久、楠田哲也、東修：西安市の効果的水循環システム確立のための基礎的研究、平成14年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、ppB612-613、2003
- * 宗宮功：自然の浄化機構、技報堂出版、1999
- * 清華大学・環境科学と工程系：中国環境ビジネス—現状と将来予測—(最新市場調査レポート)、神鋼リサーチ株式会社、2002