

(13) 渭河流域における水量水質統合モデルの開発と供給可能水量の将来予測

Development of an Integrated Model on Water Quantity and Quality,
and Prediction of Available Water in the Weihe Basin

東 修*, 楠田 哲也**, 王 曉昌***, 楊 大文****,
尾崎 心平*****, 馬場 啓輔*****, 柴田 勝史*****

Osamu HIGASHI*, Tetsuya KUSUDA**, Xiaochang WANG***, Dawen YANG****,
Shinpei OZAKI*****, Keisuke BABA*****, Katsufumi SHIBATA*****

ABSTRACT: Many types of meteorological, hydrological and water quality models have been used to simulate water resources distributions, water supply/demand, pollutant fluxes, and water quality in river basins. These models are known to be useful to estimate water budgets and water quality, however, there is no study that tried to integrate these models to propose a comprehensive water resources management system and predict water budgets in future. Therefore, in this study, first, an integrated model on water quantity and quality which involves sectorial water use, is developed. Water balance, pollutant fluxes and water quality in the Weihe basin, are estimated by this model. Secondly, a stochastic meteorological model which can evaluate future rainfall and evapotranspiration, is developed. Future available water in the Weihe basin is predicted by these models. In conclusion, observation data, such as river discharge, water quality and groundwater level, is simulated well using an integrated model on water quantity and quality. Furthermore, the available water in a drought season in 2050, is estimated about 39 billion tons. This value is less than the water demand in the Weihe basin, so it is urgent need to introduce saving-water systems in this region, unless the agricultural sector is shrunken.

KEYWORDS: the Weihe Basin; Integrated Model; Precipitation Model; Available Water

1 はじめに

現在、分布型水文モデルや流出モデルの発達により、過去数十年分の河川流量の再現が、全球規模から小規模流域にわたり、可能になっている。しかし、これらのモデルの多くは、自然系水循環のみを対象としており、人工系水循環や汚濁物質負荷過程を考慮したものは少ない。また、流域水管理に係る政策決定の際、流域水収支の将来予測が非常に重要な要素となるが、これまでのところ、過去の再現が主流となっており、明確な予測手法は確立されていない。

図 1-1 に示す黄河の支流である渭河流域では、西部大開発の進展

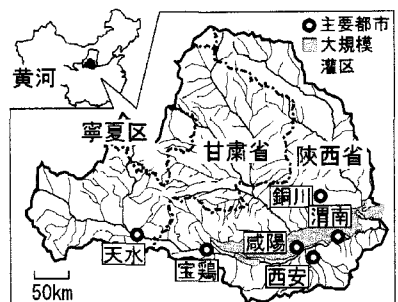


図 1-1 渭河流域位置図

* 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 (Dept. 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)**** 清华大学水利水电工程系 (Dept. of Hydraulic Engineering, Tsinghua University)***** 福岡市役所 (Fukuoka City)***** 日本上下水道設計株式会社 (Nippon Jagesuido Sekkei Co., Ltd.)***** 九州大学工学府都市環境システム工学専攻 (Dept. of Urban Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Graduate School, Kyushu University)

に伴い、近年都市部を中心に発展が著しい。しかし、供給水量不足を補う地下水利用に伴う地盤沈下、水処理施設等の不足による水質汚染の深刻化が、今後の経済発展の足枷となる可能性は非常に高い。こうした問題を解決することが、渭河流域を含む黄河流域全体、さらには中国全体の持続可能な発展を確保するために非常に重要である。これより、本研究では、渭河流域を対象に水量水質統合モデルを構築し、セクター別水利用形態及び汚濁物質負荷過程を把握した上で、流域の水質汚濁状況を解明する。次に、確率的降雨予測モデル、及び蒸発散量予測モデルを構築し、これらを水量水質統合モデルに組み込むことで、渇水期、平水期、豊水期における流域内供給可能水量の将来予測を可能とする。

2 渭河流域における水量水質統合モデルの構築

東ら(2004)¹⁾は、楊ら(2002)²⁾の自然系水循環のみを考慮した分布型水文モデル(GBHM2; Geomorphology-Based Hydrological Model 2)に渭河流域の人工系水循環、並びに点源からの汚濁物質負荷過程を組み込んだモデルを構築した。本研究では、これと馬場ら(2004)³⁾によるEPICモデル(Erosion-Productivity Impact Calculator)をSWIM(Soil and Water Integrated Model)⁴⁾の構造に基づき統合し、新たに面源からの汚濁物質負荷過程も考慮した水量水質統合モデルを開発した。

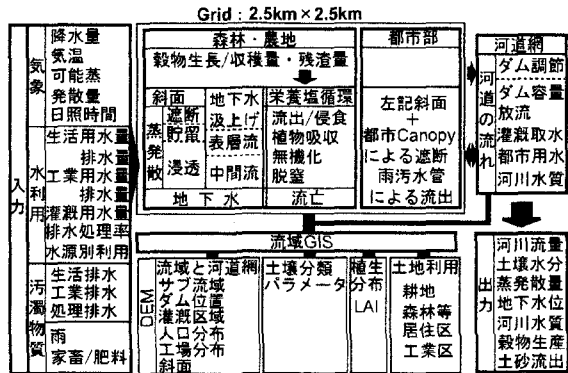


図 2-1 水量水質統合モデルの概念

2.1 水量水質統合モデルの全体概要

図 2-1 に水量水質統合モデルの概念を示す。本モデルは、渭河流域を 2.5km の grid で区分し、各 grid の降水量、セクター別水利用量、点源及び面源からの汚濁物質負荷量等を入力値とし、土壤水分移動、汚濁物質流出等の解析を経て、河川流量、地下水位、河川水質等を出力する仕組みをもつ。データ入力は 1 時間毎である。

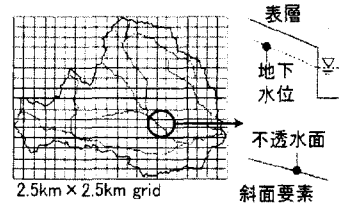


図 2-2 流域 grid 区分と斜面要素

図 2-2 に流域の grid 区分状況と斜面要素の概要を示す。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。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)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。

自然系、人工系の各種データ設定、点源からの汚濁物質負荷過程、河川流量、及び地下水位変動に係る解析手法は全て東ら(2004)に基づくため、ここでは面源からの汚濁物質負荷過程、及び水質解析手法を中心に示す。なお、河川-grid 間の地下水移動は、図 2-2 に示す斜面要素、並びに図 2-3 に示す水収支モデルから、Darcy 則に基づき算定され、grid 別の地下水流出、及び地下水位変動が出力される仕組みとなっている。

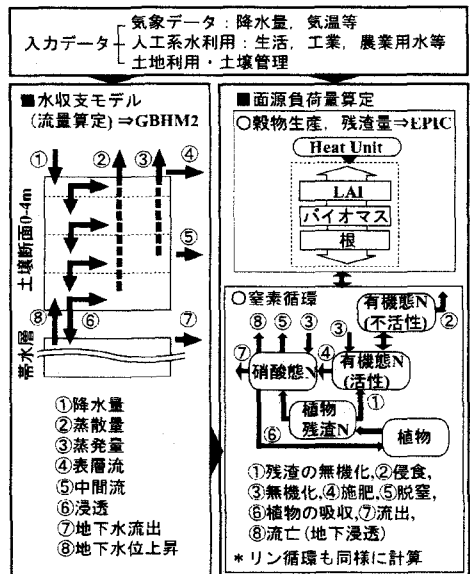


図 2-3 面源負荷量解析フロー

2.2 面源からの汚濁物質負荷過程に係る解析手法

面源負荷量を SWIM の概念に基づき算定する。図 2-3 に面源負荷量解析フローを示す。SWIM は、流域の水循環、穀物の収穫量、及び収穫後の残渣量計算、土壌浸食量計算、栄養塩循環の 4 部により構成され、河川流出水量、及び流出水中の汚濁物質の濃度計算を可能とする。但し、SWIM の水循環モデルでは、適用可能流域面積が 100-10,000km² に限られるため、本研究では GBHM2 を用いることで、これを克服した。以下、各要素における解析手法の概要を示す。

(1) 穀物生産量

穀物生産量の算定は、EPIC モデルに基づく。EPIC モデルでは、穀物の生育状況は日々蓄積される Heat Unit を用いて表され、これとバイオマス、LAI、及び、根から吸収される栄養塩、水等の成長抑制要因との関係から、収穫時の生産量が導かれる(図 2-3 参照)。馬場ら(2004)の解析により、小麦及びトウモロコシを対象とした穀物生産モデルの良好な再現性は確認されている。ここで得られた穀物残渣量を栄養塩循環の解析に用いる。

(2) 栄養塩循環

窒素の循環フローは、図 2-3 のとおりである。ここでは、SWIM の手法に基づき、窒素の無機化、脱窒、植物吸収、流出・流亡、土壌浸食による損失等を解析した。なお、リン循環の解析手法も同様である。

(3) 浸食

窒素、リンの土壌浸食による損失を算定する際、MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)⁹⁾の手法を用い、流域内の土砂発生量を評価した。

(4) 解析結果事例

図 2-4 に上記手法により算出した土砂発生量の面源負荷量分布を示す。ここで算定された各物質の流入量を後述する水質モデルへ入力し、河川水質を推計する。なお、本解析結果による流域内の年間土砂発生量は 4.8 億 t であり、これは既存資料⁹⁾の値(3.7-5.6 億 t/年)とほぼ一致し、発生分布の相似性も確認された。他の事項では、これまでのところ、解析結果に対する明確な比較検討材料が見当たらないため、その精度の検証を今後の課題とする。

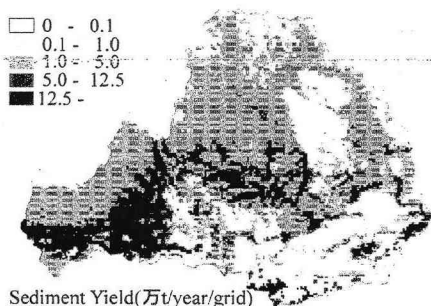


図 2-4 土砂流出分布

2.3 水質モデルの構築

本研究では、河川水質に係る各項目(SS, BOD, DO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^+\text{-N}$)を全て、一次元移流分散方程式に基づき解析する。流量の導出には、Kinematic wave 法を用いる。各項目の物質変換速度を導出する際、SS で

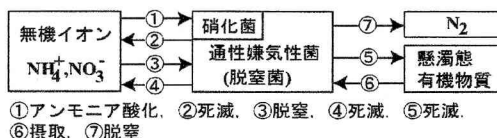


図 2-5 窒素変換過程の概要

は底泥の巻上げ及び沈降を、BOD では分解、及び SS の挙動に伴う変化(吸着及び沈降)を、DO では再曝気等をそれぞれ考慮する。また、窒素変換過程は図 2-5 に基づき解析される。通常、通性嫌気性菌又は硝化菌と無機イオンの間には、摂取と排出の関係が存在する。現地調査結果から、渭河では、栄養塩濃度が高く(例えば、全窒素は全ての観測地点で年間を通じ 10mg/l を超える¹⁾)、pH も年間を通じて 7-8 であり、硝化反応にとっての最適値に保たれるため、ここでは硝化菌の無機イオン摂取速度を一定と仮定した。この際、これに対応する排出速度も一定と仮定し、解析の簡単化を図るため、摂取速度 = 排出速度とした。また、通性嫌気性菌と懸濁態有機物質の間に⑤死滅と⑥摂取の関係が成り立つが、現時点では本関係性を明確化することが困難なため、やむを得ず死滅 = 摂取と仮定し、モデルの複雑化を避けた。なお、これらの仮定の妥当性の検証は、今後の課題であり、前者では水温、及び阻

害物質濃度等の影響，後者では底質及びSSに付着する通性嫌気性菌及び懸濁態有機物質の挙動等を明らかにする必要がある。

2.4 解析結果

東ら(2004)により，自然状態のみを考慮したGBHM2にダム，地下水取水等の人工系水循環を加味することで，河川流量実測値の増減傾向，及びピーク値の出現時期を精度よく再現できることは既に確認された¹⁾。ここでは，河川水質，並びに地下水位低下に係る解析結果を中心に示す。

(1) 河川水質

図2-6に流下に伴う各水質要素の挙動を示す。図より，解析値と観測値は，ほぼ同様の傾向を示す。このうち，BOD₅とNH₄⁺-Nは，特に都市部周辺(図2-7参照)で濃度が高く，生活，工業排水の未処理流入の影響が大きいことが分る。また，観測地点1-7では，大規模灌漑区(図1-1参照)からの排水流入が既存資料⁶⁾より確認されており，NO₃⁻-N濃度が他の観測地点に比し高い。図より，解析値も灌漑排水の影響を再現していることが分る。

(2) 地下水位

前述のとおり，流域内各gridの地下水位変動は，東ら(2004)に倣い，Darcy則に基づくgrid間及び河川-grid間の地下水移動を考慮し算定された。図2-8に解析結果を示す。図より，都市部における地下水位低下量が年間1m程度と非常に大きいことが分る。これは，生活，工業用水の過度の汲み上げが主な原因と考えられる。また，流域内の大規模灌漑区では，年間3-10cm程度の地下水位低下が見られ，特に灌漑用水の地下水位依存度の大きい咸陽，渭南において，低下量が多い。なお，西安市都市部における解析結果は，既存資料⁷⁾による地下水位低下量とほぼ一致している。

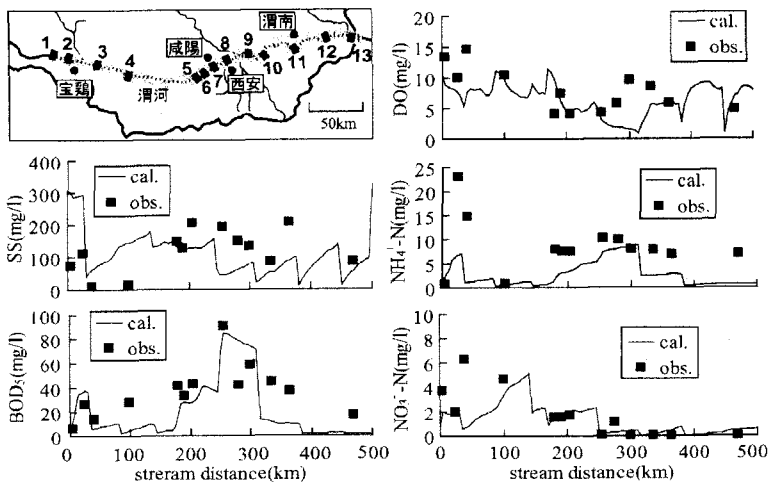


図2-6 現地水質観測地点(左上)と流下距離に伴う各種水質解析結果(Jan.2004)

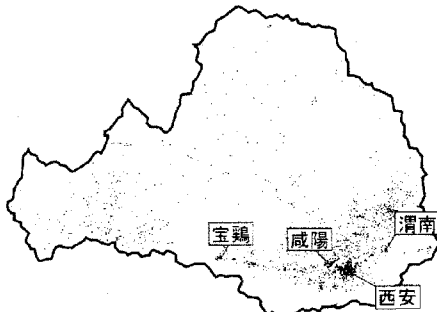


図2-7 流域内居住区分布状況(2002)
(LANDSAT-7:ETM+センサ)

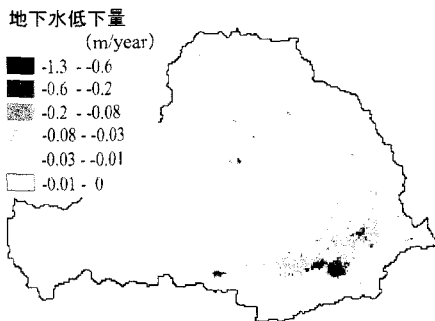


図2-8 地下水位低下状況(1998)

3 渭河流域の供給可能水量の将来予測

図3-1に流域内供給可能水量の将来予測のための解析フローを示す。まず，確率的手法に基づき，降雨量を予測する。次に，同じく確率的手法に基づき，日照時間及び風速を予測し，時系列解析から得られる気温と組み合わせることで，Penman-Monteith法により可能蒸発散量を算定する。さらに将来における流域内地下水位の低下限界を設定し，得られた結果を水量水質統合モデルに入力することで，将来の供給可能水量を推計する。本研究では，図3-2に示す各気象観測点のデータに基づき降雨等を予測した。気温の予測においてのみ，気候変動の影響を考慮した。なお，本章で示す解析結果は，全て西

安市気象観測所のデータに基づく。

3.1 降雨量予測

将来の降雨量を推計するに当たり、降雨量の実測値から得られる流域内の降雨特性に基づき、擬似的に降雨を発生させるモデルを構築した。以下に、渭河流域の降雨特性、並びに降雨発生モデルの概要を示す。

(1) 流域内降雨特性

流域内雨量データの解析により、以下の降雨特性が明らかとなった。

1) 年降雨量

年降雨量の分布は、対数正規分布に従う(図3-3参照)。なお、図中の横軸に示す Y は、以下のSlade型対数変換式から導出される。

$$Y = a \log_{10} \frac{x-b}{x_0-b} \quad \dots (Eq.3-1)$$

ここに、 x : 水文学量、 a , x_0 , b : 係数。また、縦軸の確率指標は、ある水文学量 x_i に対応するヘーズンプロットによるプロットティングポジション $P(x_i)$ を標準正規累積分布の逆関数で表したものであり、劉ら(1999)⁸⁾に倣った。なお、 $P(x_i)$ は次式で示される。

$$P(x_i) = \frac{2i-1}{2N} \quad \dots (Eq.3-2)$$

ここに、 i : 降水の観測値の順位、 N : 降水の観測年数。

2) 月降雨量

各月の月降雨量の分布は、対数正規分布に従う(図3-4参照、縦軸及び横軸は図3-3と同様)。

3) 月降雨日数

各月の月降雨日数の分布は、ポアソン分布に従う(図3-5参照)。

(2) 降雨発生モデルの構築

上記の降雨特性に基づき、降雨発生モデルを構築した。計算フローの概念を図3-1に示す。計算のTime Stepは、水量水質統合モデルとの連動性を考慮し、1hourとした。モデルを構築する上での主な仮定は、次のとおりである。i) 月降雨イベント数は、月降雨日数に比例する、ii) 降雨イベントが発生する時刻はランダムである、iii) 降雨波形は、sin関数等でなく不規則変動とみなす。なお、正規乱数を発生させる際、Box-Muller法を用いた。

3.2 日照時間予測

将来の日照時間を推計するに当たり、実測値から得られる流域内の日照特性に基づき、降雨特性との関連を把握した上で擬似的に日照を発生させるモデルを構築した。

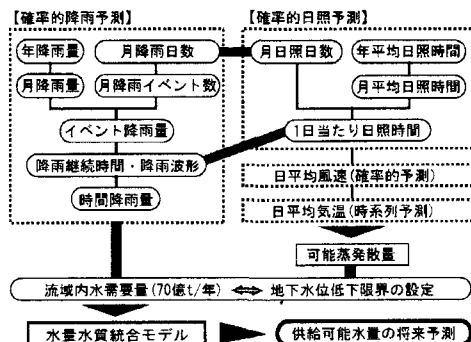


図3-1 流域内供給可能水量の将来予測フロー



図3-2 流域内気象観測点

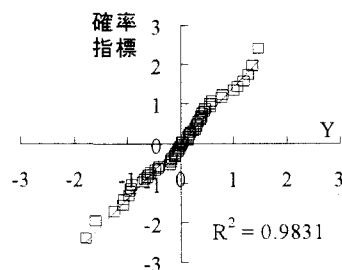


図3-3 年降雨量の確率分布

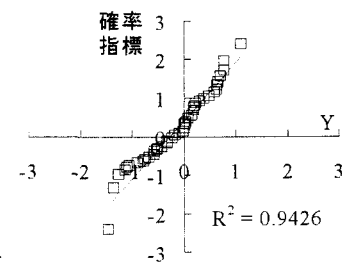


図3-4 月降雨量の確率分布(Jan)

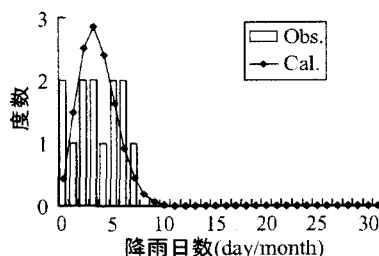


図3-5 月降雨日数の度数分布(Jan)

(1) 流域内日照特性

流域内日照データの解析により次の日照特性が明らかとなった。

1) 年平均日照時間

年平均日照時間の分布は、対数正規分布に従う(図3-6 参照)。なお、図中の縦軸、横軸はともに降雨量と同様の手法で算定した。

2) 月平均日照時間

月平均日照時間の分布は、対数正規分布に従う(図3-7 参照)。

3) 月日照日数

月日照日数は、月降雨日数との関係性から、次式で示される。

$$DL_{mth} = M_{day} - (CD_{mth} + RD_{mth}) + DL_{in_RD} \quad \dots (Eq.3-3)$$

ここに、 DL_{mth} : 月日照日数、 M_{day} : 月の日数、 CD_{mth} : 月曇天日数(1日のうち降雨・降雪、日照にいずれも該当しない日数と仮定)、 RD_{mth} : 月降雨日数、 DL_{in_RD} : 降雨イベント発生日に日照が確認された日数。

データ解析から、各月の CD_{mth} 、 DL_{in_RD} の発生頻度が、非常に少ないことが確認され、 RD_{mth} 同様、ポアソン分布に従うことが分った(図3-8、9 参照)。以上より確率的手法による月日照日数の予測は妥当と考えられる。

4) 1日当たり日照時間

1日当たりの日照時間を推計する際、降雨時と晴天時に区別した。降雨確認時の日照時間は、解析の結果、二項分布に従うことが分った。但し、晴天時の日照時間の度数分布は、流域内各観測点、及び各月において

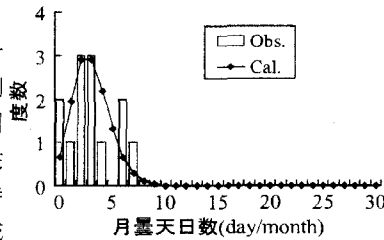


図3-8 月曇天日数の度数分布(Jun)

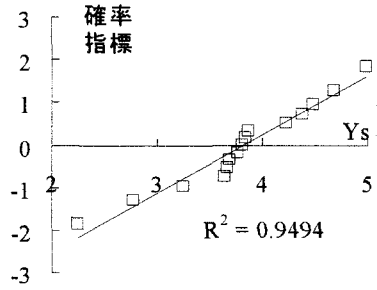


図3-6 年平均日照時間の確率分布

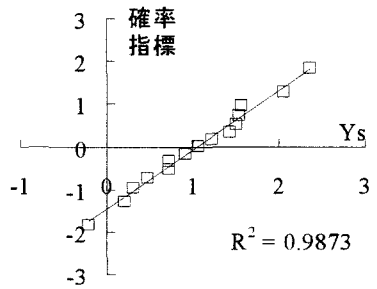


図3-7 月平均日照時間の確率分布(Jan)

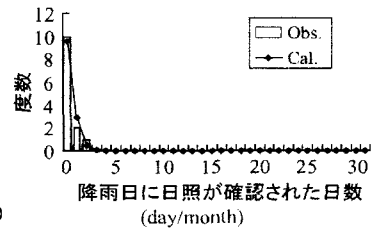


図3-9 降雨確認日の日照日数の度数分布(Jan)

図3-10に示すようなピークが2つ現れる傾向が見られたため、短時間日照と長時間日照に区分し解析した。図に解析フローを併せて示す。短時間日照と長時間日照は次式に基づき区別される。

$$SDL \leq \frac{DL_{max}}{2} < LDL \quad \dots (Eq.3-4)$$

ここに、 SDL : 短時間日照、 DL_{max} : 月最大日照時間、 LDL : 長時間日照。

まず、各月の晴天時日照日数に占める短時間、長時間日照日数を解析した結果、これらは二項分布に従った(図中段)。次に、短時間、及び長時間日照をそれぞれの出現日数に基づき、解析する(図下段)。この結果、短時間、長時間日照は、高い相関で二項分布に従うことが分った。

以上から日照時間の予測に当たり、短時間日照と長時間日照に区別して解析する手法は有効であると考えられる。

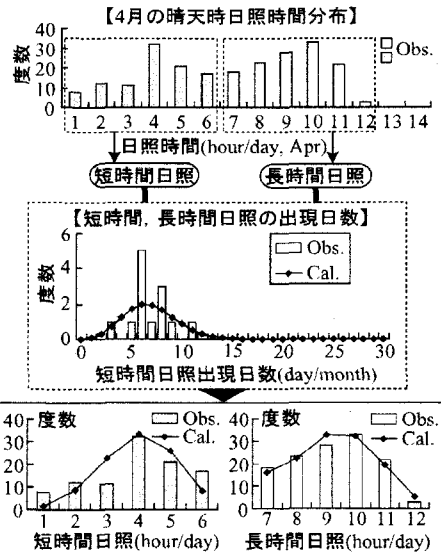


図3-10 晴天時日照時間分布(Apr)と解析フロー

3.3 風速予測

日平均風速の出現率は、ワイブル分布に従うことが知られている。次式による解析の結果、渭河流域においても同様のことがいえた(図3-11参照)。

$$f(V_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_w}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{V_w}{c} \right)^k \right) \quad \dots (Eq.3-5)$$

ここに、 V_w :日平均風速、 c 、 k :係数(西安市の場合、 $c=1.59$ 、 $k=2.87$)。なお、風速の時間変化に関するデータが得られなかったため、風速は1日中一定と仮定し、解析のtime stepが1時間である降雨量等との整合性を図った。

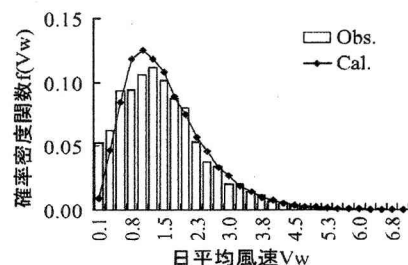


図3-11 日平均風速分布

3.4 気温予測

図3-12に1990-2004までの西安市の日平均気温の推移を示す。年平均気温は、過去15年間で1.5℃程度上昇している。この温暖化の影響を加味し、日平均気温予測式を以下のように導いた。

$$T_w = 0.16 \cdot N_y - 297.4 + 15 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{365} \cdot N_d - 64.7 \right) \quad \dots (Eq.3-6)$$

ここに、 N_y :西暦、 N_d :日数(1990年1月1日を1とする)。なお、気温の時間変化は日最高気温及び日最低気温を用い、sin関数で表した。

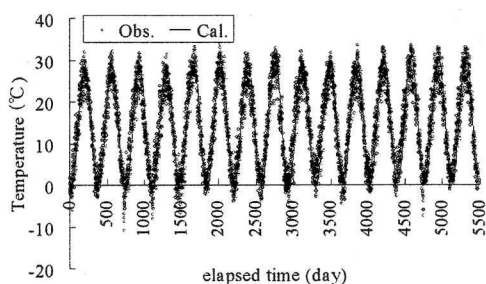


図3-12 日平均気温の推移(1990-2004)

3.5 可能蒸発散量

前述のとおり、以上の解析結果を用いPenman-Monteith法から可能蒸発散量を導く。

3.6 各種データの空間分布設定

降雨量の空間分布を導く際、各観測点における標高、緯度、経度、勾配を説明変数とする重回帰分析を行った。図3-13に解析結果を示す。これは、既存資料⁶⁾による降雨分布とほぼ同様の傾向を示している。また、日照時間、風速、及び気温の観測点以外の予測値は、降雨の場合と異なり、楊ら(2002)の設定状況に倣い、最寄観測点の値に等しいと仮定した。

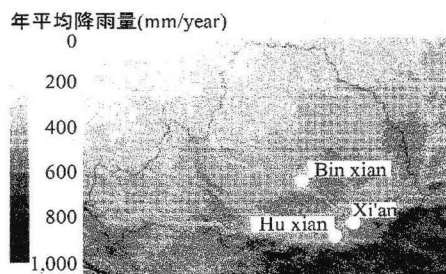


図3-13 流域内年間降雨の空間分布(解析値)

3.7 供給可能水量の将来予測

水量水質統合モデル、及び降雨等の気象関連予測モデルを用い、将来的な渇水年、平水年、豊水年における流域内供給可能水量を算定した。従来、供給可能水量の推計に当たっては、降水量から蒸発散量を差し引いた水資源賦存量を導出することが一般的である。しかし、渭河流域では都市部を中心に地下水位低下が深刻な状況であるため、本研究では、流域内各gridに年間の地下水位低下限界を設定し(表3-1参照)、水量水質統合モデルから得られる河川流量、及びダム容量等から設定される表流水利用可能量と地下水取水限界の合計値とした。

表3-1 流域内地下水位低下限界設定状況

	地下水位
	低下限界(m/年)
2010年	0.3
2030年	0.1
2050年	0.05

図2-8で示したとおり、流域内都市部の地下水位低下速度は、年間1mを超えている区域が多く、すでに地下水は過剰供給されている。こうした状況が今後続いた場合、地盤沈下はますます深刻化する。そこで、本研究では、地下水位低下抑制のための目標値として、表3-1に示す地下水位低下限界を段階的に設定し、これを超える地下水汲み上げを行わないとした場合、供給可能水量が今後どのように推移するかを予測した。なお、解析に当たり、表流水利用可能量の算定に必要なダム容量等は現状維持とした。

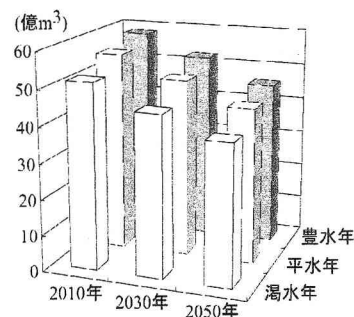


図3-14に表3-1で示した条件下での流域内供給可能水量を示す。

降雨等、気象関連予測モデルの適用に当たり、渇水年、及び豊水年の再現期間を50年とした。図より、2050年における供給可能水量は、平水期で43億 m^3 、渇水期で39億 m^3 程度であり、現状の流域内水利用量70億 m^3 をかなり下回る。これより、今後、渭河流域の持続可能な発展を実現するには、水資源供給制約下での効果的な水資源配分方策の検討が急務である。

4 結論

本研究では、渭河流域において、水量、水質、双方の予測を可能とするモデルを構築した。また、確率的手法を中心とする降雨及び蒸発散量予測モデルを開発し、水量水質統合モデルとの併用による流域水収支の将来予測手法を提案した。これにより、将来の流域内供給可能水量の算定が可能となった。確率的手法による降雨量等予測モデルでは、将来の降雨量及び蒸発散量等を精度よく予測できるわけではない。しかし本モデルを活用することにより、将来における渇水期、平水期、豊水期の降雨特性及びこれに対応する蒸発散特性を把握できるため、将来の水需給シナリオ等との連携から、各降雨特性に応じた流域水収支を解明できる。よって、本モデルは、将来の渇水期における経済成長の確保等に係る水需給施策の検討に非常に有効と考えられる。

今後、流域内における水資源供給制約下での持続可能な成長を確保するため、食糧安全保障、経済成長、生態系保全、社会の安定化等の経済社会活動に係るシナリオを設定し、経済-水量水質統合モデルの構築を目指す。また、本モデルを活用し、各種節水方策、及びGDP成長方策に係る費用便益分析を通じ、あるべき流域発展形態をデザインする。

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) 東修, 楠田哲也, 王晓昌, 楊大文, 井上和久, 尾崎心平, 柴田勝史: 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, 環境工学論文集, 第41巻, 2004
- 2) Yang, D., S. Herath and K. Mushiaki (2002) A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions. Hydrological Sciences Journal, 47(1): 49-65
- 3) 馬場啓輔, 楠田哲也, 王晓昌, 楊大文, 東修, 尾崎心平, 柴田勝史: EPICによる渭河流域の穀物生産評価と食糧安全保障の検討, 環境工学論文集, 第41巻, 2004
- 4) Varentina krysanoba, Jeff Arnold, Ragavan Srinivasan, Jimmy Williams: SWIM USER MANUAL. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000. http://www.pik-potsdam.de/publications/pik_reports/reports/reports/pr.69/pr69.pdf
- 5) Williams, J.R. & Berndt, H.D., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. ASAE 20(6): 1100-1104.
- 6) 黄河水利委員会, 黄河流域地区集, 中国地区出版社, 1989
- 7) 西安市城市計画管理局, 西安市勘察測絵院: 西安城市工程地質図集, 西安地図出版社, 1998
- 8) 劉剛, 石川重雄, 長坂貞郎, 丸山利輔: 年最大降雨量の確率密度関数に関する研究, 水文水資源学会誌, Vol.12, No.6 (1999)