

黄河流域における詳細水需給空間構造の把握に関する研究

大西 暁生¹・佐藤 嘉展²・井村 秀文³・石 峰⁴・
森杉 雅史⁵・東 修⁶・白川 博章⁷

¹正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: onishi@corot.nuac.nagoya-u.ac.jp

²非会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³非会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: imura@genv.nagoya-u.ac.jp

⁴学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: hseki@urban.env.nagoya-u.ac.jp

⁵正会員 名城大学都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)
E-mail: morisugi@urban.meijo-u.ac.jp

⁶正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: higashi@urban.env.nagoya-u.ac.jp

⁷正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail: sirakawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp

21世紀は水の世紀と言われている。特に、乾燥・半乾燥地域では、水資源の枯渇が経済成長の大きな足枷となることが懸念されている。こうした世界各地で頻発する水不足の一例として、1972年から発生した「中国黄河の断流」があげられる。黄河流域では、急速な社会経済の成長に伴い水需要が増加した結果、水需給のアンバランスが発生し、断流が深刻化していったと言われている。しかし、このような断流の原因につながる社会経済と水需要増加の関係や流域全体の詳細な水需給構造については、未だ十分には検討されていない。そのため本研究では、黄河流域の社会経済成長と水需要の関係を明らかにしつつ、流域全体の水需給構造を詳細な空間単位によって把握することを目的とした。具体的には、1995年から2000年を対象に、人口・経済といった統計データとGISのような空間情報を駆使しながら、地域の水需要量をセクター別（農業、工業、生活）に推計した。次に、黄河流域で観測された気象データを用い、地域の水資源量を推計した。最後に、上記で得られた水需要と水供給の関係を「水需給ギャップ」として評価した。

Key Words : Yellow River basin, socio-economy, spatial water demand and supply structure

1. はじめに

中国の大転換期である1978年の改革開放政策以来、この国の経済は飛躍的に成長し、今後さらに加速すると予測されている。特に、WTO加盟による市場の自由化や国内での経済構造改革が進むことによって、生産拡大・産業高度化・生活水準向上などがより一層促進されると見込まれている。このような中国の経済成長の大きな足枷として懸念されているのが「水不足問題」である。特に、黄河流域では1972年に観測された断流が日増しに深刻化し、1997年には年間226日、断流区間距離として華北平原の扇頂部から利津流量観測点までのおおよそ700kmに達するほど悪化した。そのため今後、持続可能

な経済発展を進めていくには、いかに有効に水を利用していくのかが、重要な課題として押し掛かっている。

黄河流域の一人当たり水資源量は527 m^3 であり、これは世界平均の6%、中国平均の24%となっている¹⁾。一方、人口増加、灌漑農業の発達、工業化、都市化の進展に伴い水需要は増加し続けており²⁾、黄河の水不足は、このような水需要と水供給のアンバランスによって引き起こされていると言われている³⁾。そのため、まずは社会経済成長と水需要増加の関係を明らかにしつつ、各地域の水需給構造を詳細に把握することが重要となる。特に、さらなる経済成長が見込まれる黄河流域では、工業用水や都市生活用水などの新規の水需要が水需給バランスに大きな影響を与えることが懸念されており、このよ

うな人間活動の影響を十分に加味して分析が行われるべきである。このような分析の積み重ねによって、今後の水資源の合理的且つ効率的な利用方法を模索することができる。

現在、黄河の水不足を解決するため、多分野において数多くの研究が進められている。特に、気候・気象条件が地域によって大きく異なる黄河流域では、水循環の解明が鍵となり、例えばLin et al.⁷⁾、東ら⁸⁾、Sato et al.^{9) 10)}、Yang et al.^{11) 12)}、Xu et al.¹³⁾などによって研究が進められている。また、水資源の大半は、灌漑農業によって使用されており、こうした灌漑地域における水利用実態の調査^{14) 15)}も進められている。さらに、近年では水資源管理のための具体的な手法の提案や法制度に関わる研究が進められており、筆者らの農業用水の効率性の分析^{16) 20)}や石らの水権転換の研究²¹⁾などが挙げられる。

このように、黄河流域の水循環の解明や個別の問題に焦点を当てた研究は数多く存在するものの、その大半は自然物理過程における水文状況のみを扱う場合が多く、社会経済成長と水需要との関係を十分に考慮しているとは言えない。

そのため本研究では、以下の2点に重点を置き、黄河流域の詳細な水需給空間構造の把握を試みる。まず1点目として、筆者らの従前の研究^{3) 22) 23)}を応用し、セクター別（農業、工業、生活）の水需要を社会経済成長との関係から出来る限り明らかにする。2点目として、筆者らの従前の研究^{3) 22) 23)}で課題として残されていた空間解像度の改善を試みる。これには、近年利用可能となった中国科学院の空間情報^{24) 25)}を用いる。ただし、地下水利用に関しては、使用したデータは異なるものの、Ichinose et al.²⁶⁾がすでに黄河流域などを対象にその空間分布の把握を試みていることを付記する。本研究では、上記の点を考慮しながら、データの入手が可能であった1995年から2000年までの黄河流域の水需給構造を把握する。さらに、得られた水需要と水供給の関係を「水需給ギャップ」として評価することによって、どの地域がどの程度、黄河の水資源に依存しているかを明らかにする。

2. 分析フレーム

黄河流域における水需給バランスを考えた場合、その主眼は社会経済成長によって変化する水需要におかれる。特に、近年の社会経済成長に伴い増加し続ける工業用水や都市生活用水が、流域全体の水需給バランスに大きく影響することが考えられる。そこで本研究では、国際協力銀行¹⁾や筆者らの従前の研究^{3) 22) 23)}を参考に、水需要を決定する人口・経済といったマクロな因子をまとめた、

(1) 経済成長：GDP（GRDP）、一人当たりGDP

(2) 人口：地域別の人口、都市人口と農村人口、非農業人口と農業人口

本研究では、このようなマクロ因子を出来る限り詳細な空間単位によって整備する。この場合、中国で刊行されている省及び県市のデータを用いることによって推定式を作成することで、上記の要因を中心に詳細な空間データを作成する。また、黄河流域の土地利用分布を把握するため、各種のGISデータを用いる。さらに、黄河流域の水資源量及び農業生産に関わる灌漑定数などを推計するには、気象データが必要となる。そのため、流域およそ120の観測点で得られたデータをKriging補間法²⁷⁾により点データから面データに補間する。最後に、水需要と水資源量を推計するため、これらに関わる各種の統計データや資料を整理する。本研究で用いたデータや分析方法については次節でさらに詳しく説明する。

本研究では、このような統計データや空間情報をもとに、黄河の水需要と水資源量を0.1度格子ごとに推計する。この0.1度格子という空間単位は、黄河を対象とした多くの水文モデルで採用されており、今後、得られた結果の妥当性や汎用性などを評価する場合、最も適当な大きさであると考えられる。本研究の分析フレームを図-1に、また黄河流域図を図-2に示す。

3. 推計方法

(1) 人口・経済マクロ因子

a) 人口、GDP、一人当たりGDP

まず、中国科学院の空間情報²⁴⁾を利用し、水需要を決定するマクロ因子のもととなる人口、GDP、またこれから得られる一人当たりGDPのデータを整備した。中国科学院の空間情報から得られるデータは、1995年及び2000年の人口とGDPのデータのみである。そのため本研究では、1995年から2000年の間の年次については、これら両時点での変化率を用いて推計した。

b) 産業構造

次に、前項の一人当たりGDPを用いて産業構造を推計する。この推計には、国際協力銀行¹⁾や筆者らの従前の研究^{3) 22) 23)}を参考とする。使用したデータは、国家统计局總公司²⁸⁾に記載されている1952年から2000年までのものである。この推計方法は、一人当たりGDPから第1次及び3次産業比率（全GDPに占める各々の産業比率）を求め、第2次産業比率については第1次と3次産業比率の総和から差し引くことによって求める。これは、第1次と3次産業比率が一人当たりGDPと経験的に相関が高いことことから成り立っている。これらの推計式を以下に

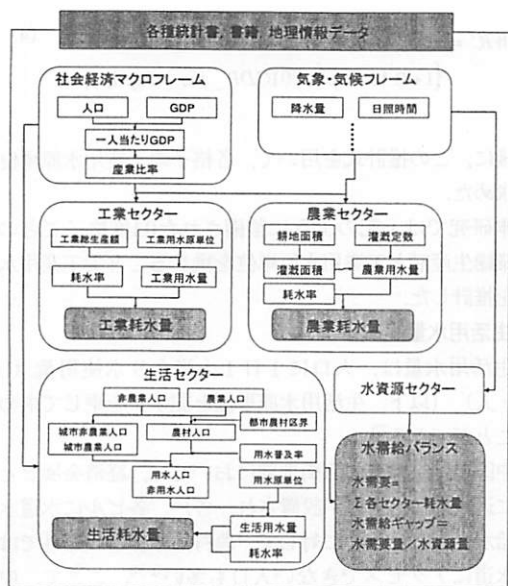


図-1 分析フレーム

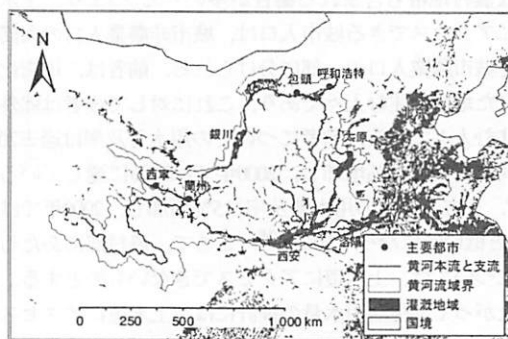


図-2 黄河流域図

示す。

$$\left. \begin{aligned} \ln \left(\frac{1}{1-\gamma_1} - 1 \right) &= a_1 \ln y + b_1 \cdots \cdots 1 \text{次産業} \\ \ln \left(\frac{1}{1-\gamma_3} - 1 \right) &= a_2 \ln y + b_2 \cdots \cdots 3 \text{次産業} \\ \gamma_2 &= 1 - \gamma_1 - \gamma_3 \cdots \cdots 2 \text{次産業} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

y : 一人当たり所得 (GDP), γ_1 : 1次産業比率, γ_2 : 2次産業比率, γ_3 : 3次産業比率

最後に、上記のようにして得られた各省の推計式を用い、それぞれの省に属する格子に適用することで産業構造を推計する。

(2) 水需要量

a) 農業用水量

黄河流域の全用水量のおよそ7割は農業用水量によって占められている⁴⁾。この農業用水量は、灌漑面積と単位面積当たりの水使用量（以下、灌漑定数と記す）によって決定される¹⁾。したがってここでは、灌漑面積と灌漑定数の双方のデータを整備する必要がある。

まず、0.1度格子の灌漑面積のデータを得るため、中国科学院の格子形式の空間情報²⁾で整備されている耕地面積と、中国科学院地理科学・資源研究所³⁾のポリゴン形式の灌漑地域データを用いた。ただし、黄河の下流域には、自然集水域界の外側にも黄河から取水している灌漑地域が広がるため、中国灌漑排水発展中心³⁾と黄河水利委員会³⁾のデータを参考にその範囲を特定し流域に含むこととした。灌漑面積の推計には、耕地面積の格子データをもとに、ポリゴンで表された灌漑地域がこの耕地面積格子に含まれていればその全面積を灌漑面積とし、一部灌漑地域のみが格子内に含まれる場合は、その含まれる面積の割合を算出し、耕地面積から灌漑面積を推計した。

次に、灌漑定数の推計を行うため、農業用水量のデータを整備した。黄河流域の農業用水量のデータは、孫ら⁴⁾と黄河水利委員会⁴⁾に、1996年と1997年を除く1988年から2005年までの各省の農業用水量（黄河流域内に属する地域を省ごとに集計したもの）が記載されている。そのため、これらの農業用水量と上記で得られた灌漑面積から各省の灌漑定数を得た。しかし、各省内の詳細な地域の灌漑定数は当然異なる。そのため、この設定には、上記で得られた省ごとの灌漑定数を用いることによって推計する。一般的に、灌漑定数は、人為的な要因と自然的な要因によって決定される³⁾。そのため本研究では、灌漑定数を被説明変数に、一人当たりGDP（元/人：GDP_per_Capita）、降水量（mm：Prep）、日照時間（hr：Sun）、平均気温（℃：AveTemp）、最高気温（℃：MaxTemp）、風速データ（m/s：Windspeed）、相対湿度（%：RH）を説明変数とすることで推定式を同定する。ここで得られた推定式を用いて各格子の灌漑定数を推計する。この際、上記の説明変数に加え主要作物品種の指標として小麦作付割合ダミーとトウモロコシ作付割合ダミーを、また環境条件としてアルカリ土壌ダミーを設定する。これらのダミー変数は、その条件がある場合を1とし、そうでない場合は0とする。本研究で用いた灌漑定数（IWC）の推計式を以下に示す。括弧内の値はα値を表す。

$$\bar{R}^2 = 0.975$$

$$\begin{aligned} \ln IWC = & 2.461 \ln Sun - 2.399 \ln MaxTemp - 0.673 Prep \\ & (22.309) \quad (-7.385) \quad (-3.846) \\ & + 0.649 \ln Windspeed - 0.578 Maizedummy \\ & (2.352) \quad (-4.322) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、前述したすべての説明変数を用いると、各説明変数間で多重共線性が発生するため、(2)式ではそのうち最も良好な結果が得られた変数の組み合わせを採用している。さらに、ここでは推定式の形状として、線形、両対数形、切片の有無などを試した結果、一番推計精度の高かった切片なしの両対数形を採用することとした。

本研究では上記のように整備された0.1度格子ごとの灌漑面積と灌漑定数を乗じることで農業用水量を推計した。

b) 工業用水量

工業用水量は、工業総生産額に単位工業総生産当たりの水使用量（以下、工業用水原単位と記す）を乗じることによって求められる。

まず、各格子の工業総生産額の推計には、国家统计局總公司²⁹⁾に記載されている1952年から1998年までの（1998年以降はある一定規模以上の企業の生産額しか計上されていないため時系列的な継続性がないため使用できない）各省の第2次産業生産額（2nd_GDP）の値と工業総生産額（IO）の値を用い、各省ごとに以下の式を求めた。

$$IO = \alpha \times \gamma_2 \times \frac{GDP}{2nd_GDP} \quad (3)$$

そして、ここで得られた各省の推計式と、前節b)「産業構造」の推計によって得られた第2次産業生産額の値を用い、それぞれの省に属する各格子の工業総生産額を推計した。

次に、工業用水原単位（ m^3 /万元：WIC）の推計には、まず黄河流域に属する各省の工業用水量の実績値³⁰⁾と国家统计局總公司²⁹⁾に記載されている工業生産額から省ごとの原単位を整備した。次に、国家统计局總公司²⁹⁾に記載されている各省の人口とGDPから一人当たりGDP（元/人：GDP_per_Capita）を作成し、これと原単位の関係から以下のような推定式を導出した。ここでロジスティック関数を用いた理由は、格子の一人当たりGDPの値の乖離が大きく、上限値を設定しないと工業用水原単位の値が大きくなるためである。これについては、今後さらに検討する必要がある。

$$WIC = \frac{343.011}{\{1 + 0.136 \exp(0.001 GDP_per_Capita)\}} \quad (4)$$

最後に、この推計式を用いて、各格子の工業用水原単位を求めた。

本研究では上記のように整備された0.1度格子ごとの工業総生産額と工業用水原単位を乗じることで工業用水量を推計した。

c) 生活用水量

生活用水量は、人口に1日1人当たり水使用量（ l /日・人）（以下、生活用水原単位と記す）を乗じて求めることができる²⁹⁾。

中国では、都市の市街地帯においては、経済発展とともに近代的な上水道が設置され、各戸、各ビルに水道水が給水されているのに対して、農村部や都市の郊外では上水道にアクセスできない人口も多い³¹⁾³⁹⁾。ここで、中国の都市の定義には、中心市街地帯だけでなく周囲の広大な農村地帯も含まれる場合が多い³⁹⁾。つまり、上水道にアクセスできる城市人口は、城市非農業人口の大部分と城市農業人口の一部に分けられる。前者は、市街化された地域に住む人々であり、これに対して後者は郊外に住む人々である。前者についての用水普及率は過去20年間に於いて16%増加し、2000年では97%に達している³⁹⁾。一方、後者の用水普及率は5%増加し、2000年では8%と低い値になっている³⁹⁾。ここで、農村部に於ける県については、上水道にアクセスできないものとする。したがって、生活用水量の推計には、上水道にアクセスできる「用水人口」とアクセスできない「非用水人口」の値、またそれぞれの生活用水原単位を知る必要がある³⁹⁾。具体的には、①城市非農業人口と城市農業人口の値、②城市非農業人口と城市農業人口に対する用水普及率、③都市生活用水原単位（上水道あり）と農村生活用水原単位（上水道なし）、が必要である³⁹⁾。

まず、城市非農業人口と城市農業人口の推計には、上水道の整備されている城市（市轄区及び市）における非農業人口と農業人口の比率が必要である。ここで、非農業人口と農業人口の推計には、国家统计局總公司²⁹⁾に記載されている各省の一人当たりGDP（元/人：GDP_per_Capita）と総人口に占める非農業人口（NonAgricultural_Pop）の比率をもとに、以下の式によって求めた。

$$NonAgricultural_Pop = \beta_1 \times \ln(GDP_per_Capita) + \beta_2 \quad (5)$$

ここで得られた各省の推定式を用い、それぞれの省に属する格子に適用し非農業人口を推計する。また、農業人口に関しては、総人口から得られた非農業人口を差し引くことで求めた。さらに、城市に含まれる格子を特定することで、城市非農業人口と城市農業人口が得られる。

次に、城市非農業人口と城市農業人口の用水普及率については、筆者らの従前の方法³⁹⁾を用いて推計した。

さらに、都市生活用水原単位（上水道あり）と農村生活用水原単位（上水道なし）については、中国水資源公報²⁾と中国科学院地理科学与资源研究所³⁹⁾による水使用原単位の実績値を用いた。ただし1995年の原単位については一部の省において入手が困難であったため、1996年のものを代用した。

以上を整理すると、生活用水量は上水道の普及の有無を考慮して、以下の式で表される。

全生活用水量 (DW) :

$$DW_i = Piped_DW_i + NonPiped_DW_i \quad (6)$$

上水道有りの生活用水量 (Piped_DW) :

$$Piped_DW_i = Piped_dw_i \times Piped_Pop_i \quad (7)$$

$$Piped_Pop_i = Pop_i \times S_i \quad (8)$$

上水道無し生活用水量 (NonPiped_DW) :

$$NonPiped_DW_i = NonPiped_dw_i \times NonPiped_Pop_i \quad (9)$$

$$NonPiped_Pop_i = Pop_i \times S'_i + R_Pop_i \quad (10)$$

ここで、 i : 格子、城市非農業人口 : Pop_i 、城市非農業人口の用水普及率 : S_i 、都市生活用水原単位 : $Piped_dw_i$ (l/日・人)、城市農業人口と農村人口 : Pop'_i 、城市農業人口と農村人口の用水普及率 : S'_i 、農村生活用水原単位 : $NonPiped_dw_i$ (l/日・人) である。

(3) 水供給量 (水資源量)

中国で一般的に公表されている水資源量の定義は、河川・湖沼などの地表水または地下水の形で人間が実際に利用できる水の量を示している¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。流域において利用できる水資源量は降水量によってほぼ決定される。しかし、黄河流域のような乾燥もしくは半乾燥地帯では、土地の表面からの蒸発や植物の葉から呼吸によって発散される分 (蒸発散量) が多く、降水によってもたらされる水のすべてが利用可能なわけではない¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。降水として得られる水のうち、水資源として利用可能なのは、地表水 (河川、湖沼などの水) および地下水である¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。ただし、地表水と地下水の間には相互に移動がある

ので、それぞれの量を別に計上すると以下のような重複水量が発生する¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。

$$\text{水資源量} = \text{地表水量} + \text{地下水量} - \text{重複水量} \quad (11)$$

流域内の地域では、その域内の降水からもたらされる水資源量に加え、河川や地下水から流入する分が加わる。ただし、上式で定義された水資源量は、あくまでもある地域の降水量と自然条件だけによって決まる水資源量であり、ここには、地域外からの流入分は含まれていない¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。水資源量は、実際の河川の流量や地下水位から計算することができる¹⁾³⁾²³⁾³⁹⁾。しかし、公表されているデータは、全国あるいは流域あるいは省別の水資源量 (河川水量、地下水量、重複分) のみであり、詳細なデータは不明である³⁾。そのため本研究では、黄河流域内で観測された降水量データから、各県市の水資源量を求める簡便な手法を用いる。

まず、降水量については、1995年から2000年までの流域内 190 の観測所によって記録された降水量データを Kriging 補間法により点データから格子データに補間した。次に、この格子データを公表されている河段別 (流域を上流から下流にかけて 7 地域に区分したもの) の水資源量に合算し再編した。この1995年から2000年までの河段別の降水量 (億 m^3 : $Prep$) と水資源量³⁹⁾ (億 m^3 : WR) の関係から推定式を以下のように求めた。

$$R^2 = 0.847$$

$$WR = 0.159 Prep \quad (12)$$

(15.080)

最後に、ここで得られた推定式を用いて、各格子の降水量から水資源量を求めた。

(4) 耗水率

前節までの方法によって、各格子・各セクターの水需要量と水資源量が求められる。しかし、使用された水がどれだけ水資源として還元されるのかを知るためには³⁾²³⁾、使用量のうちの減耗量の割合 (水資源として回復されない分の割合)、すなわち「耗水率」のデータが必要である³⁾²³⁾³⁹⁾。この耗水率に関するデータは、孫ら⁹⁾と黄河水利委員会⁹⁾から各省ごとの値を得ることができる。本研究では、1995年から1999年は黄河水資源管理の値を、2000年は黄河水資源公報の値を、また1996年と1997年はデータが存在しないため1995年と1998年の平均値を用い、各省に属する格子に適用した。

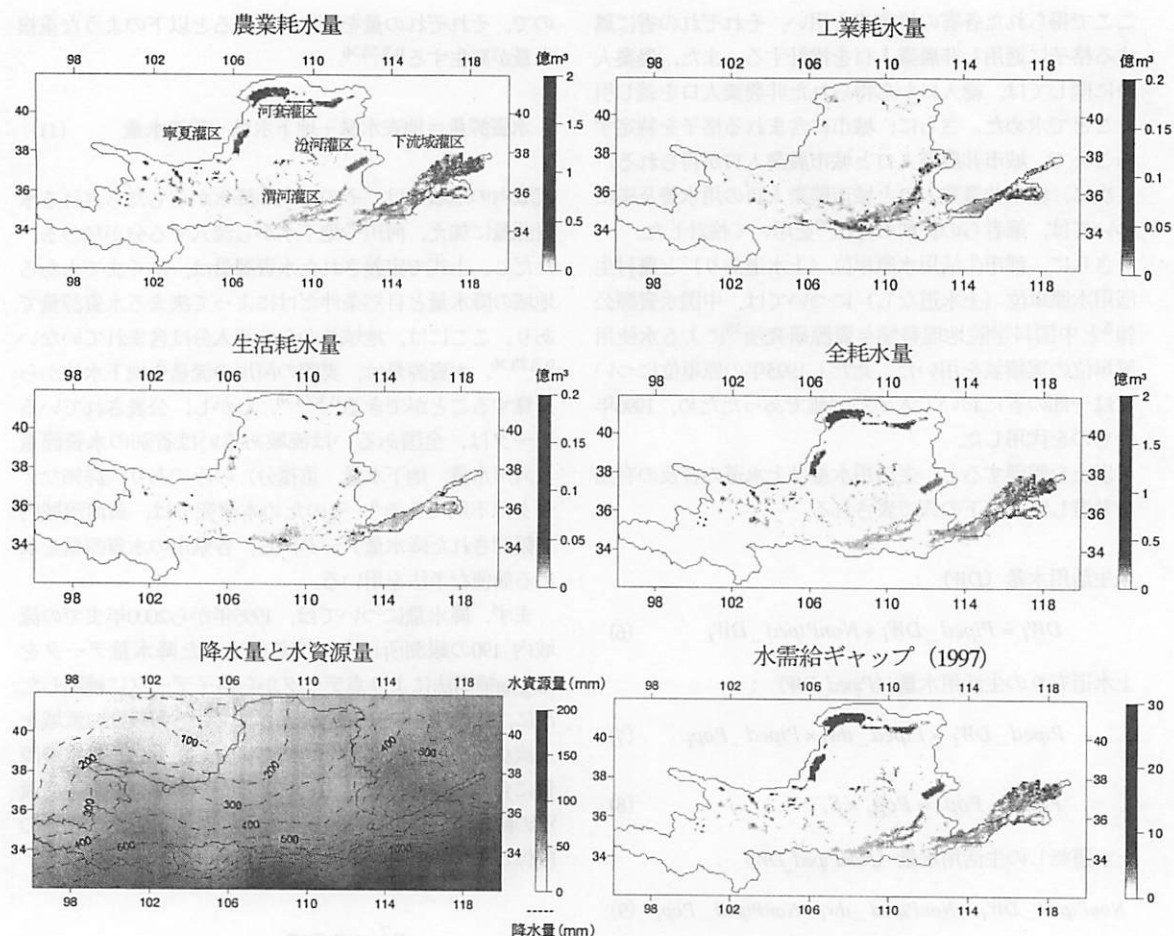


図-3 黄河流域における各セクターの耗水量と水資源量、及び水需給ギャップの分布

4. 推計結果

(1) 水需給分布

図-3に黄河流域における各セクターの耗水量と水資源量、及び水需給ギャップの分布の結果を示す。ここでは、1995年から2000年までの各セクターの耗水量及び全耗水量と水資源量の平均値を表している。また、1997年の水需給ギャップ（耗水量/水資源量）を表している。

まず、農業耗水量は河套灌区や寧夏灌区、下流域（流域内及び流域外の引黄灌区）に広がる多数の灌区において多いことが分かる。また、黄河の支流である渭河や汾河沿いの灌区においても耗水量が多いことが分かる。他方、工業耗水量は経済発展の進む沿岸部に近い下流域やエネルギー資源が多く産業発展が進む渭河や汾河沿いで多いことが分かる。さらに、生活耗水量は、各省の省都や首府などで多く、蘭州、包頭、呼和浩特、太原、西安、済南などで耗水量が多くなっている。

上記の耗水量の総和である全耗水量を見ると、黄河流域の水需要の大半を占める農業耗水量の多い地域で、全

耗水量も多いことが分かる。

次に、降水量と水資源量分布の結果から、南東から北西にかけて降水量及び水資源量が低下することが分かる。特に、水資源量は、下流域や渭河流域などで多く、大型灌区に広がる内蒙古自治区や寧夏自治区で少なくなっていることが分かる。

最後に、水需給ギャップの結果から、農業耗水量が多く水資源量が少ない地域、特に河套灌区や寧夏灌区では水需給ギャップが大きいことが分かる。つまり、これらの地域では、その地域内の水供給に必要な水をまかなえない場合、他地域（より上流側の地域）から供給される河川水などを取水し農業などの人間活動が営まれていることが分かる。そのため、これらの地域での水使用が、その下流域での断流などの水の枯渇に大きく影響を与えていると推察される。

(2) 精度検証

ここでは、本研究で得られた結果の妥当性（精度）を検証するため、黄河流域の耗水量データを掲載してい

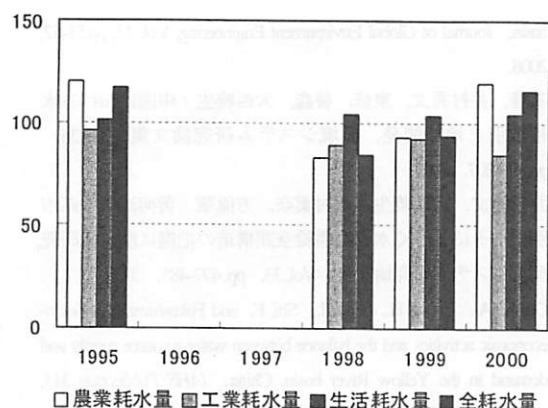


図-4 黄河流域全域の耗水量の精度検証

表-1 黄河流域全域の全耗水量の文献値

	1995	1998	1999	2000
農業耗水量	306.680	312.710	338.000	302.620
工業耗水量	31.400	29.020	29.880	29.910
生活耗水量	22.560	23.080	24.860	26.210
全耗水量	360.640	364.810	392.740	358.740

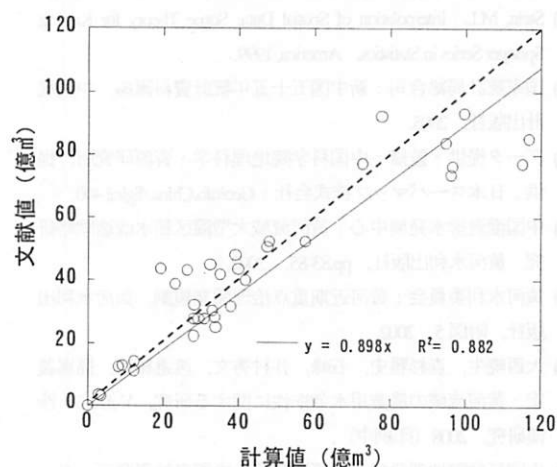


図-5 黄河流域各省の全耗水量の精度検証

る孫ら⁴⁾や黄河水利委員会⁹⁾の文献値と本研究で得られた計算値の比較を行った。

図-4に、黄河流域全域の文献による耗水量と計算値を比較した結果を示す。この図は、それぞれの項目ごとの文献値を100とした場合の計算値との乖離を示している。つまり、計算値が100に近ければ近いほど再現性は高く、100より大きい場合は計算値が文献値を上回り、100より小さい場合はその逆であることを意味している。また、表-1に黄河流域全域の文献による耗水量の値を示す。ただし、1996年と1997年は文献値が掲載されていないため、比較対象から除外した。図-4の結果から、その乖離は最小82.733、最大120.775、平均100.179となっており、概ね良好な結果が得られていると考えられる。

次に、省ごとの推定結果を検証するため、孫ら⁴⁾や黄河水利委員会⁹⁾の全耗水量の値と本研究で得られた計算値の比較を行った結果を図-5に示す。検証に用いたサンプルは、1996年と1997年を除く1995年から2000年までの各省の全耗水量の値である。図-5の結果から、重決定係数が0.882と高く比較的良好な結果が得られていることが分かった。

本来、詳細な空間単位で計算を行った場合、その精度検証には、用いた空間単位と同等もしくはそれに匹敵する空間単位のデータを用いて比較することが望まれる。しかし、現時点では、省より細かい空間単位において実測値（文献値）を得ることは出来なかったため検証を行っていない。そのため今後、このようなデータが得られる場合には、再度検証を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、急速な社会経済成長と水資源枯渇が進む黄河流域を対象に、1995年から2000年までの水需給構造を、統計データとGISのような空間情報を駆使しながら、出来るだけ詳細に把握することを試みた。この結果、社会経済成長と水需要の関係を明らかにしつつ、水需給構造の空間分布を示すことができた。このような流域全体にわたる水需給構造の特徴を示すことによって、今後の水資源管理に向けた適正な水利用のあり方について議論が可能となると考える。

謝辞：本研究は、大学共同利用機関法人：人間文化研究機構・総合地球環境学研究所のプロジェクトである「近年の黄河の急激な水循環変化とその意味するもの」（研究代表者：福嶋義宏）と「急激に変化する中国・長江流域の人間活動と自然の相互作用」（研究代表者：田中広樹）の一環として行われたものである。記して深謝する。

参考文献

- 1) 国際協力銀行：中国北部水資源問題の実情と課題－黄河流域における水需給の分析－, JBIC Research Paper, No. 28, 2004.
- 2) 中華人民共和国水利部：中国水資源公報 1997-2000, 中国水利部, 1997-2000.
- 3) 大西暁生, 井村秀文, 白川博章, 韓驥：黄河流域水資源需給の時間・空間構造の把握に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.34, pp.611-622, 2006.
- 4) 孫広生, 喬西現, 孫寿松主編：黄河水資源管理, 黄河水利出版社, 2001.
- 5) 席家治：黄河水資源, 黄河水利出版社, 1996.

- 6) 黄河水利委员会：黄河水资源公报 1997-2000，中国黄河水利委员会，1997-2000。
- 7) Liu, C. and Zheng, H. : Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th century, *Hydrological processes*, DOI: 10.1002/hyp.5534, 2004.
- 8) 東 修，楠田哲也，王晓昌，楊大文，尾崎心平，馬場啓輔，柴田勝史：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，*環境工学研究論文集*，vol.42，pp.111-118，2005。
- 9) Sato, Y., Ma, X., Matsuoka, M. and Fukushima, Y. : Impacts of human activity on long-term water balance in the middle-reaches of the Yellow River basin, *IAHS Publication* 315, pp.85-91, 2007.
- 10) Sato, Y., Ma, X., Xu, J., Matsuoka, M., Zheng, H., Liu, C. and Fukushima, Y. : Analysis of long-term water balance in the source area of the Yellow River basin, *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.6730, 2007.
- 11) Yang, D., Herath, S. and Mushiaka, K. : A Hillslope-based Hydrological Model Using Catchment Area and Width Functions, *Hydrological Sciences Journal*, 47(1), pp. 49-65, 2002.
- 12) Yang, D., Li, C., Hu, H., Lei, Z., Yang, S., Kusuda, T., Koike, T., and Mushiaka, K. : Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data, *Water Resour. Res.*, 40, W06S02, 2004.
- 13) Xu, Z., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Zhang, X. : Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach, *Water Resource. Mgmt.*, 16, 239-261, 2002.
- 14) Watanabe, T., Hoshikawa, K. : Water Use and Water Balance of Large Irrigation Schemes in the Yellow River Basin, *2nd International Workshop on Yellow River Studies, Kyoto, Proceedings*, pp. 6, 2004.
- 15) 星川圭介，渡邊紹裕：水管理・作付体系に着目した灌漑区水収支モデルの開発，*水文・水資源学会研究発表会*，2004。
- 16) Hoshikawa, K., Nagano, T., Donma, S., Watanabe, T. and Fukushima, Y. : Application of Irrigation Management Performance Assessment Model (IMPAM) to the Lower Seyhan Irrigation Project, *ICCAPP-Cappadocia Workshop 2004*, pp. 93-96, 2004.
- 17) Hoshikawa, K., Watanabe, T. and Fukushima, Y. : Water Balance Modeling of Large Irrigation Districts in the Yellow River Basin, *2nd International Workshop on Yellow River Studies*, pp. 42-45, 2004.
- 18) 渡邊紹裕，星川圭介：黄河流域の大型灌漑区の農業用水利用，*沙漠研究*，Vol. 16, No. 2, pp.97-101.
- 19) 大西暁生，森杉雅史，石峰，韓驥，白川博章，井村秀文：包絡分析法を用いた黄河流域の地域別農業用水効率性の評価に関する研究，*環境情報科学論文集* 21，pp.543-548，2007。
- 20) Onishi, A., Morisugi, M., Imura, H., Shi, F., Watanabe, T. and Fukushima, Y. : Study on the efficiency of agricultural water use in the Yellow River basin, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol. 13, pp.51-67, 2008.
- 21) 石峰，井村秀文，東修，曹鑫，大西暁生：中国における水権取引と地域開発，*環境システム研究論文集*，Vol.35，pp.199-207，2007。
- 22) 井村秀文，大西暁生，岡村実奈，方偉華：黄河流域の県市別データに基づく水資源供給空間構造の把握に関する研究，*環境システム研究論文集*，Vol. 33，pp.477-485，2005。
- 23) Onishi, A., Imura, H., Han, J., Shi, F. and Fukushima Y. : Socio-economic activities and the balance between water resource supply and demand in the Yellow River basin, China, *IAHS Publication* 315, pp.320-327, 2007.
- 24) 中国科学院資源環境科学データセンター：社会経済 1995 年・2000 年データ
- 25) 中国科学院資源環境科学データセンター：土地利用変化データ 1995 年・2000 年データ
- 26) Ichinose, T., Hamada, I., Ee, M., Otsubo, K. : Estimation of groundwater resource demand in the Yellow River Basin, China, *Hydrological change and management: from headwater to the ocean*, Taylor & Francis, 2008.
- 27) Stein, M.L. : Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging, *Springer Series in Statistics*, America, 1999.
- 28) 国家统计局總公司：新中国五十五年統計資料匯編，中国統計出版社，2005。
- 29) データ提供・監修：中国科学院地理科学・資源研究所，提供：日本スーパマップ株式会社：Geoinfo.China digital 400.
- 30) 中国灌漑排水発展中心：黄河流域大型灌区節水改造戰略研究，黄河水利出版社，pp.83-85，2002。
- 31) 黄河水利委员会：黄河近期重点治理開發規劃，黄河水利出版社，附図 5，2002。
- 32) 大西暁生，森杉雅史，石峰，井村秀文，渡邊紹裕，福島義宏：黄河流域の農業用水効率性に関する研究，Vol.18-2，*沙漠研究*，2008（印刷中）。
- 33) 中国科学院地理科学与資源研究所 中国自然資源データベース。
- 34) 大西暁生：黄河流域の社会経済・生産活動と水資源供給空間構造の把握に関する研究，名古屋大学大学院環境学研究科博士論文，2006。
- 35) 張学成，潘啓民等著：黄河流域水資源調查評估，黄河水利出版社，pp.328-329，2000。

STUDY ON UNDERSTANDING OF FINE SPATIAL WATER DEMAND AND SUPPLY STRUCTURES IN THE YELLOW RIVER BASIN

**Akio ONISHI, Yoshinobu SATO, Hidefumi IMURA, Feng SHI,
Masafumi MORISUGI, Osamu HIGASHI and Hiroaki SHIRAKAWA**

This 21 century is said as water century. Especially, regions where are located at arid and semi-arid climate conditions concern that water will become more severe constraint of economical growth. 'Dry-up in the Yellow River' is one of most representative phenomena of water issues in the world. It is said that increases in water demand associated with rapid socio-economic development and decreases in water resource lead the sever water shortage in the Yellow River basin. However, the causes of the water shortage, especially relationship between socio-economy and water demand and spatial distributions of water demand supply structures, have not been fully understood. Thus, this study aims to clarify relationship between socio-economy and water demand and to understand of fine spatial water demand and supply structures in the Yellow River basin. Firstly, the fine regional water demand is understood by using the socio-economic macro statistic data and GIS data. Secondary, the fine water resource distribution is estimated by using the observed climate data. Finally, the ratios between water demands and supplies are shown as those balances as spatial distributions of the regions.