

# 黄河全流域における水資源需給構造の分類

地下水と地表水のバランスに注目して

|       |                                |
|-------|--------------------------------|
| 誌名    | 環境科学会誌 = Environmental science |
| ISSN  | 09150048                       |
| 著者名   | 一ノ瀬,俊明<br>大西,暁生<br>石,峰         |
| 発行元   | 環境科学会                          |
| 巻/号   | 26巻2号                          |
| 巻号補足  |                                |
| 掲載ページ | p. 167-179                     |
| 発行年月  | 2013年3月                        |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## シンポジウム論文

黄河全流域における水資源需給構造の分類  
—地下水と地表水のバランスに注目して—一ノ瀬俊明<sup>\*,†</sup>・大西 暁生<sup>\*\*</sup>・石 峰<sup>\*\*\*</sup>

## 摘 要

中国の黄河流域において、大西ら(2006)の推計した水資源需給構造と、Ichinose *et al.* (2009)の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった当該流域における地表水の利用構造を描き出すことを試みた。黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造の形態的類似性(共通する特徴)に着目してそれらを12の小流域に分類した。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低いため、地下水利用の季節変動性は小さい。一方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。さらに地下水利用構造の類似性にもかかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源の需給構造に多様性が見られる地域がある。とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。

キーワード：黄河，地下水，水資源，都市，中国

## 1. はじめに

今日、黄河流域における水資源の開発利用をめぐる問題は次のように認識されている<sup>1)</sup>。最近数十年における大規模な水利事業の推進にもかかわらず、水資源が不足している。1980年代以降、渇水期の持続による流量の減少が著しい。利用できる地表水が少ないため、平原地区における大規模な地下水の汲み上げが行われている。このため、広域にわたり地下水位の大幅な低下が発生している。また、水資源の不足している乾燥・半乾燥地域における水資源需給の矛盾(水資源が必要であるのに使える水資源が存在しない)は深刻化している。国土の52%において、汲み上げ過剰の状態にあり、涵養が進みにくく滞留時間が1万年前後に及ぶ化石水のような深層地下水が利用されている。さらに、急速に発展する都市と工業が、生態環境用水と農業用水を圧迫し

ている。工業用水と農業用水におけるこうした緊張状態にもかかわらず、水資源の浪費問題も深刻である。加えて、水質も劣化している。

黄河流域の1人あたり年間水資源量は約580 tであり、これは世界平均の6%、中国平均の24%である<sup>2,3)</sup>。一方、流域の総水需要は人口増加、灌漑農地の発達、工業化、都市化の進展に伴い増加し続けており、1980年の271億tに対し、近年では年間平均で300億tを超えている<sup>4-6)</sup>。

以上の背景より、流域全体にわたる地域ごとの水需給構造を把握し、水資源の合理的かつ効率的な利用方法を模索することが重要である<sup>7)</sup>。広大な黄河流域では、気候・水文条件が地域によって大きく異なるため、継続的なモニタリングと水循環の解明が進められている<sup>8-11)</sup>。また、主産業である農業には灌漑が必須であり、農業における生産活動や水利状況の変化が流域全体の水資源需給バランスに

2011年10月11日受付，2012年4月25日受理

\* (独) 国立環境研究所社会環境システム研究センター，〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

\*\* 富山県立大学工学部，〒939-0398 富山県射水市黒河5180

\*\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科，〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

† Corresponding author: toshiaki@nies.go.jp

大きな影響を与える<sup>7)</sup>。そのため、特定の地域における生産活動や水利用の調査もさかんに行われている<sup>12~14)</sup>。一方、流域全体を網羅する水資源需給バランスの把握や総合的な水資源管理を目的とした研究<sup>15, 16)</sup>は少なく、その分析に用いられたデータや資料の多くが一般に入手困難であり、用いられた手法や作成されたモデルの内部も不明な部分が多い<sup>2)</sup>。

これらの状況を踏まえ大西ら<sup>7)</sup>は、黄河流域全体の水資源需給の時空間構造を県級行政単位別・月別に表現し、上流から下流への取水・耗水・還元といった一連の水循環を分析するための枠組みを提示した。彼らのモデルにおいては黄河流域に属する県級行政単位をボックスで表現し、そのそれぞれにおいて降水量・蒸発散量からもたらされる水資源量と、生産・経済活動に伴う取水量および耗水量を推計している。そこでは人口やGDPから推計された産業構造・工業生産額、既存統計などによる作物別水需要パターン・灌漑面積などが用いられている。次に、黄河流域全体にわたって上流から下流へとすべてのボックスを配置し、河道に沿ってそれらをリンクさせることで上流から下流までのカスケード関係を構成している<sup>17~19)</sup>。また黄河における計算流量について、観測流量を用いて検証し、ある程度の整合性を確認している。しかしここでは、地表水と地下水の水資源量が手法上の制約から混同されており、これらの現象を個別に再現するには至らなかった。

一方、黄河流域における地下水資源の問題は、資源利用の空間的分布のアンバランスと、その不合理な開発利用方式である。Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>は、黄河流域における地下水位の挙動を数値シミュレーションで再現することを目的として、具体的データが公開されていない地下水需要の空間分布を高解像度のグリッドベースで把握することを試みた。この出力を用いて行われた3次元地下水循環モデルによる数値シミュレーション<sup>21)</sup>を通じ、この推計結果が現実に近い地下水利用実態を表現しているものであることが示された。この推計には、本来地表面における人間活動としての水資源利用とはなんら物理的関係を持たない地表面夜間光衛星画像<sup>22~24)</sup>や、統計資料として公開されている県級行政単位別耕地面積などを参考に、「黄河水資源公報」などで省級行政単位別に公開されている農業・工業・生活用の地下水取水量を各県級行政単位やグリッド(約1120 m 四方)に配分する手法を採っている。しかし、農業用取水量の季節依存性は非常に大きいため、地下水の挙動を理解するためにも、単純な灌漑モデルを立てての季節変化の推計<sup>20)</sup>ではなく、正確な農

事暦を反映した取水シナリオの把握が課題として残っていた。また、それにより、地域ごとの地下水需要内訳を把握し、地表水との併用を念頭にした季節別水資源融通方策を考えることも可能となる。

## 2. 研究目的と解析手法

以上により本研究では、大西ら<sup>7)</sup>の推計した水資源需給構造と、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった地表水の利用構造を描き出すことを試みる。大西ら<sup>7)</sup>の対象年次は1997年、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>の対象年次は1996年である。Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>においては、グリッドで表現された工業用と生活用の地下水利用量を県級行政単位別に集計したマップも提示しており、今回比較に用いられるのはそのデータである。まず、黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位(表1; 図1)を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造(図2~図13)の形態的類似性に着目してそれらを12の小流域に分類した。なお、その過程で共通する特徴が記述できるよう、数度にわたる試行錯誤がなされているが、とりわけ地下水資源の使途に注目し、地下水利用の季節変動性を重視している。

Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>では県級行政単位でこれらのデータが推計されている。しかし推計手法上の制約から、省内の農業用地下水利用構造(季節間や作物間の分担比率)が同じものとなっており、県級行政単位での地域比較から得られる情報は利用量合計の絶対量の差のみである。よって本研究では、このデータを地級行政単位へ集計した上で解析を行っている。次章以降では、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>による地下水利用構造と大西ら<sup>7)</sup>の推計した水資源需給構造とを小流域(表1)別に比較した結果を上流から下流へと順に、地表水を含んだ水資源需要と地下水利用とをセクター(工業、生活、農業)別に交互にならべたグラフ(図2~図13)の形で示す。大西ら<sup>7)</sup>のデータも県級行政単位別に推計が行われており、同様に地級行政単位へと集計を行っている。

水資源需要と地下水利用との差が地表水利用に相当するが、上述の2つの先行研究における推計精度の相違から、水資源需要が地下水利用をわずかながら下回るケースも見られる。その場合も、水資源需要はほとんど地下水利用によってまかなわれているものと解釈した。また、小流域別・季節別に主たる作物の情報を記述しているが、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>で推計された農業用地下水利用量分布図によって。さらに、地級行政単位の面積(表1)は、今回の解析対象(黄河流域に大部分が含まれる)と

表 1 黄河流域に大部分が含まれる 35 の地級行政単位と小流域への分類

| 小流域              | 地級行政単位                                                                                                                  |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 黄河最上流域（青海）       | 西寧（3400 km <sup>2</sup> ）、海東（18006 km <sup>2</sup> ）                                                                    |
| 黄河上流域（甘肅）        | 蘭州（12600 km <sup>2</sup> ）、白銀（20400 km <sup>2</sup> ）、臨夏（8209 km <sup>2</sup> ）                                         |
| 黄河上流域（寧夏）        | 銀川（3100 km <sup>2</sup> ）、石嘴山（5310 km <sup>2</sup> ）、吳忠（27068 km <sup>2</sup> ）                                         |
| 黄河中流域（内蒙古）       | フフホト（17200 km <sup>2</sup> ）、包頭（27700 km <sup>2</sup> ）、オルドス（87428 km <sup>2</sup> ）、<br>バヤンノール（41021 km <sup>2</sup> ） |
| 黄河中流域（陝西）        | 延安（37089 km <sup>2</sup> ）、榆林（43493 km <sup>2</sup> ）、渭南（12283 km <sup>2</sup> ）                                        |
| 黄河中流域（山西）        | 太原（7000 km <sup>2</sup> ）、呂梁（21144 km <sup>2</sup> ）、晋中（8534 km <sup>2</sup> ）                                          |
| 汾河流域（山西）         | 運城（13968 km <sup>2</sup> ）、臨汾（20279 km <sup>2</sup> ）、晋城（7749 km <sup>2</sup> ）                                         |
| 黄河渭水分水嶺地域（甘肅・寧夏） | 定西（19604 km <sup>2</sup> ）、固原（16783 km <sup>2</sup> ）                                                                   |
| 渭水上流域（甘肅・陝西）     | 天水（13800 km <sup>2</sup> ）、平涼（11225 km <sup>2</sup> ）、慶陽（24209 km <sup>2</sup> ）、宝鷄（15013 km <sup>2</sup> ）             |
| 渭水下流域（陝西）        | 西安（9107 km <sup>2</sup> ）、咸陽（10200 km <sup>2</sup> ）、銅川（3900 km <sup>2</sup> ）                                          |
| 黄河下流域（河南）        | 洛陽（13799 km <sup>2</sup> ）、三門峡（10141 km <sup>2</sup> ）                                                                  |
| 黄河最下流域（山東）       | 済南（5215 km <sup>2</sup> ）、泰安（7692 km <sup>2</sup> ）、東營（6757 km <sup>2</sup> ）                                           |

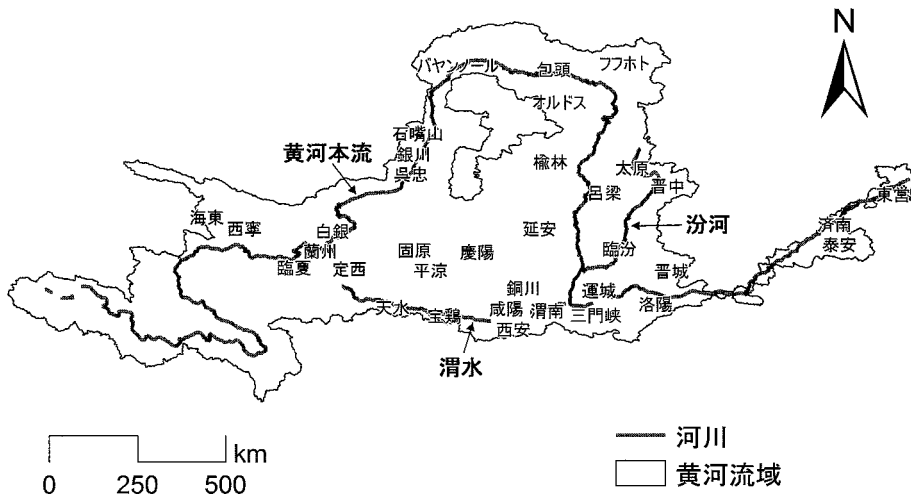


図 1 黄河流域に大部分が含まれる 35 の地級行政単位の位置

地図の出典：Y. Masutomi, Y. Inui, K. Takahashi and Y. Matsuoka (2007) *Hydrological Processes*  
図の中央付近に海に流出しない内流域が存在する。

なった県級行政単位のみ合計値であり、実際の地級行政単位の面積とは一致していない。加えて大西ら<sup>7)</sup>によれば、工業および生活での水資源需要における季節変化は無視できるとされ、4半期ごと（季節別）に示した農業での水資源需要と比較できるよう、図中には年間値を4分の1にした値（4半期分に相当）を示した。

地下水利用の季節変動性については、各小流域を代表する地級行政単位（本文中で主たる考察対象と

しているもの）における農業（季節変化は明瞭である）でのピークの値と、農業以外（工業および生活の合計）での4半期分の値を比較し、前者が大きいほうから小さいほうへ順に季節変動性を5段階（極めて大きい、大きい、中程度、小さい、極めて小さい）にカテゴライズした。数値的な目安として、農業でのピークの値が農業以外での4半期分の値に対し、10%程度かそれ以下を「極めて小さい」、同程度から2倍までを「中程度」、4倍以上となる場合

を「極めて大きい」としている。

また本文中、季節については1～3月を冬季、4～6月を春季、7～9月を夏季、10～12月を秋季としている。

### 3. 水資源需給構造の単純な小流域

はじめに水資源需給構造が単純であり、小流域内での類似性が高く、地域差の少なかった6つの小流域の結果を示す。

#### 黄河最上流域(青海)

西寧(3400 km<sup>2</sup>)、海東(18006 km<sup>2</sup>)の2地級行政単位がここに分類される。牧畜(農業に含まれる)の多い地域であり、農業以外における地下水利用が農業における地下水利用の数倍に及ぶため、地下水利用の季節変動性は極めて小さい(図2)。西

寧では、農業における地下水利用のピークが0.05(万 t/km<sup>2</sup>)弱であるのに対し、農業以外が0.45(万 t/km<sup>2</sup>)強となっている。一方、春季から夏季にそれぞれ2(万 t/km<sup>2</sup>)以上の農業用水需要が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。農業以外でも、地下水の3倍程度の地表水が使われている。黄河上流域(甘肅)

蘭州(12600 km<sup>2</sup>)、白銀(20400 km<sup>2</sup>)、臨夏(8209 km<sup>2</sup>)の3地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピーク(春季)と同程度であり、地下水利用の季節変動性は小さい(図3)。蘭州では、農業における地下水利用のピークが0.1(万 t/km<sup>2</sup>)弱であるのに対し、農業以外が0.2(万 t/km<sup>2</sup>)弱となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウ

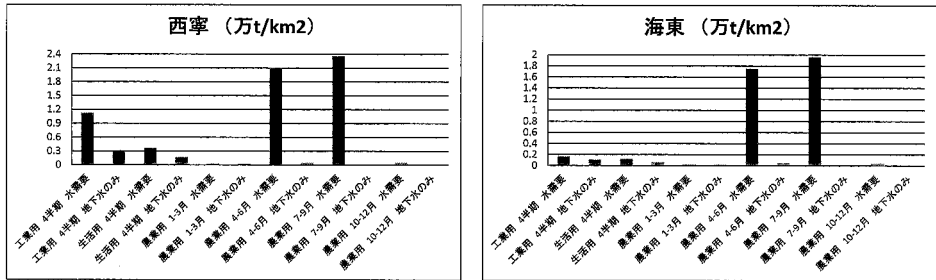


図2 黄河最上流域(青海)における水資源需給構造

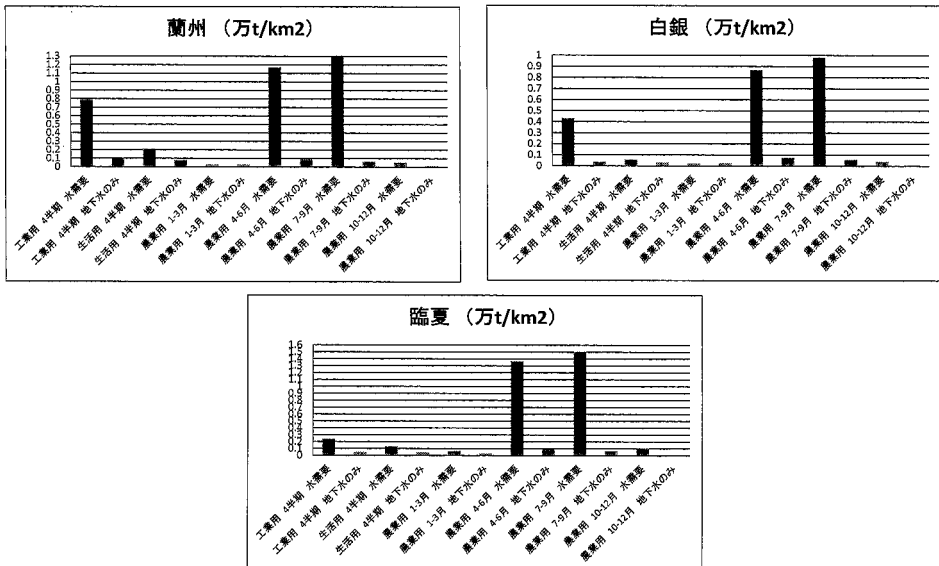


図3 黄河上流域(甘肅)における水資源需給構造

モロコシ)にそれぞれ1(万 t/km<sup>2</sup>)以上の農業用水需要が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。農業以外でも、地下水の5倍程度の地表水が使われている。

#### 黄河上流域(寧夏)

銀川(3100 km<sup>2</sup>), 石嘴山(5310 km<sup>2</sup>), 呉忠(27068 km<sup>2</sup>)の3地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの2~3倍に及ぶため、地下水利用の季節変動性は小さい(図4)。銀川では、農業における地下水利用のピークが0.15(万 t/km<sup>2</sup>)弱であるのに対し、農業以外が0.7(万 t/km<sup>2</sup>)強となっている。一方、春季から夏季にそれぞれ15(万 t/km<sup>2</sup>)前後の大きな農業用水需要が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。Ichinose *et al.*<sup>(20)</sup>では、春季に小麦、夏季にトウモロコシというモデリングがなされていたが、大西ら<sup>(7)</sup>などでも扱われているとおり、青銅峡灌区は有名な米の産地であるため、この地表水利用は米の生産に伴うものである。農業以外でも、地下水の3倍程度の地表水が使われている。

#### 黄河中流域(内蒙古)

フフホト(17200 km<sup>2</sup>), 包頭(27700 km<sup>2</sup>), オルドス(87428 km<sup>2</sup>), バヤンノール(41021 km<sup>2</sup>)の4地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークに比べ極めて小さいため、地下水利用の季

節変動性は極めて大きい(図5)。バヤンノールでは、農業における地下水利用のピークが0.7(万 t/km<sup>2</sup>)強であるのに対し、農業以外が0.1(万 t/km<sup>2</sup>)弱となっている。一方、春季から秋季にかけて農業用水需要(夏季の3.5(万 t/km<sup>2</sup>)強がピーク)が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。地級行政単位の面積が極めて大きいため、面積あたりの水需要量は、同様に乾燥が強く蒸発量の多い寧夏の事例に比べ小さめの値となっている。農業以外でも、地下水の5倍程度の地表水が使われている。

#### 黄河下流域(河南)

洛陽(13799 km<sup>2</sup>), 三門峡(10141 km<sup>2</sup>)の2地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークに比べ小さいため、地下水利用の季節変動性は大きい(図6)。洛陽では、農業における地下水利用のピークが1.8(万 t/km<sup>2</sup>)強であるのに対し、農業以外が0.5(万 t/km<sup>2</sup>)強となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて農業用水需要(春季の2.2(万 t/km<sup>2</sup>)強がピーク)が存在し、そのほとんどが地下水でまかなわれている。図6から、Ichinose *et al.*<sup>(20)</sup>におけるモデリングは実際の農事暦に近いものと考えられる。農業以外でも、地下水の3倍程度の地表水が使われている。

#### 黄河最下流域(山東)

済南(5215 km<sup>2</sup>), 泰安(7692 km<sup>2</sup>), 東営(6757 km<sup>2</sup>)の3地級行政単位がここに分類される。農業

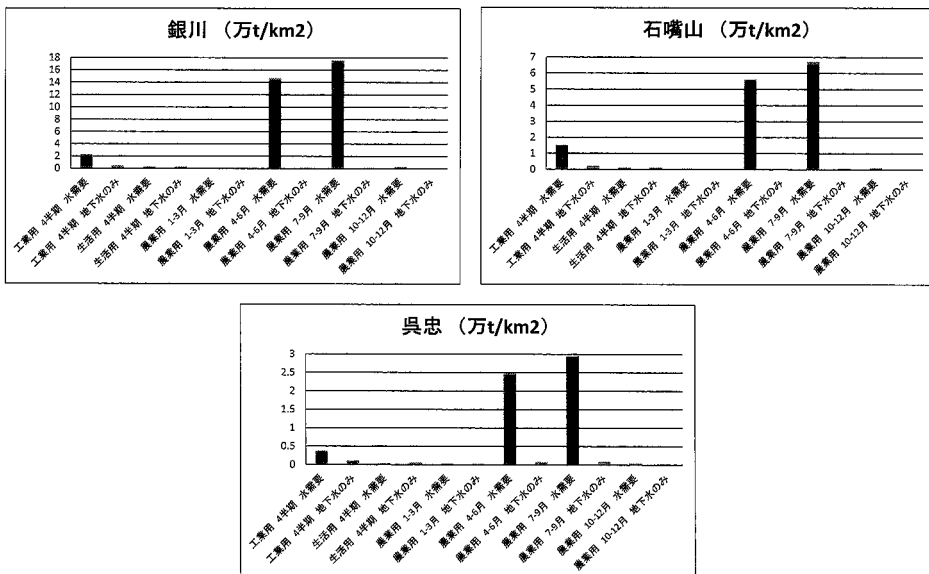


図4 黄河上流域(寧夏)における水資源需給構造

以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの数分の1であり、地下水利用の季節変動性は中程度である(図7)。済南では、農業における地下水利用のピークが $1.2$ (万 $t/km^2$ )弱であるのに対し、農業以外が $0.6$ (万 $t/km^2$ )強となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて大きな農業用水需要(春季の $13$ (万 $t/km^2$ )程度がピーク)が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。農業以外でも、地下水の4倍程度の地表水が使われている。

#### 4. 水資源需給構造の複雑な小流域

次に、小流域内部で水資源需給構造に多様性の見られた6つの小流域における結果を示す。

#### 黄河渭水分水嶺地域(甘粛・寧夏)

定西( $19604 km^2$ )、固原( $16783 km^2$ )の2地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの数分の1であり、地下水利用の季節変動性は中程度である(図8)。固原では、農業における地下水利用のピークが $0.2$ (万 $t/km^2$ )強であるのに対し、農業以外が $0.15$ (万 $t/km^2$ )弱となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて、それぞれ $1.7$ (万 $t/km^2$ )前後の農業用水需要が存在し、そのほとんどが地表水でまかなわれている。農業以外はほとんど地下水に依存していると考えられる。

定西では、地下水への依存率が若干高くなっている。農業以外でも、地下水の5倍程度の地表水が使

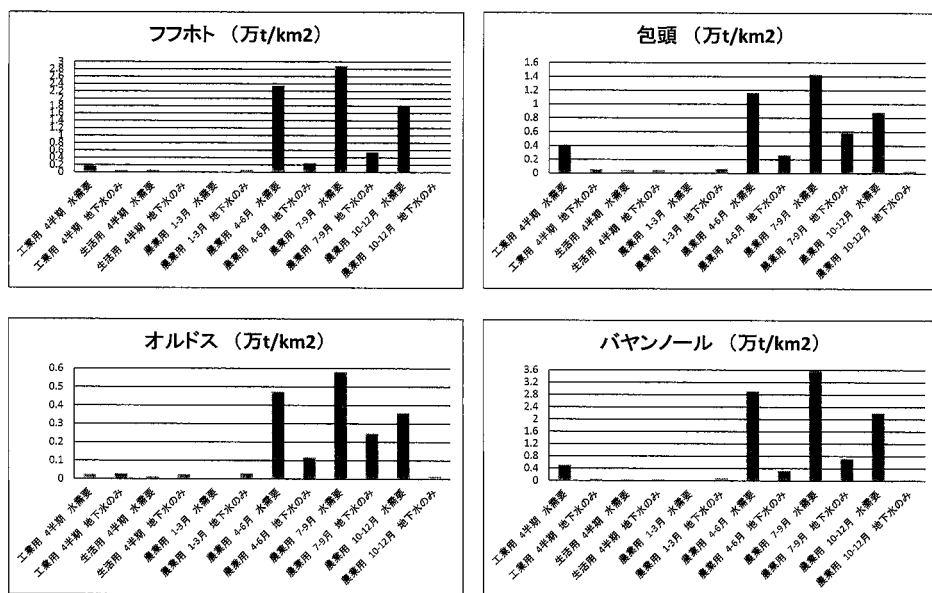


図5 黄河中流域(内蒙古)における水資源需給構造

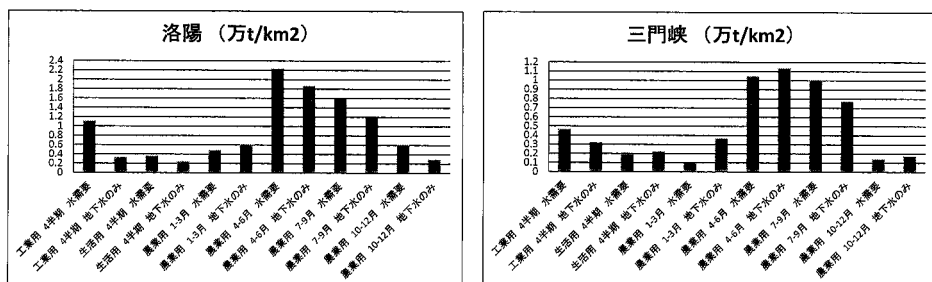


図6 黄河下流域(河南)における水資源需給構造

われている。

### 渭水上流域(甘肅・陝西)

天水(13800 km<sup>2</sup>), 平涼(11225 km<sup>2</sup>), 慶陽(24209 km<sup>2</sup>), 宝鶏(15013 km<sup>2</sup>)の4地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの数分の1であり, 地下水利用の季節変動性は中程度である(図9)。平涼では, 農業における地下水利用のピークが0.2(万 t/km<sup>2</sup>)程度であるのに対し, 農業以外が0.1(万 t/km<sup>2</sup>)弱となっている。一方, 春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて, それぞれ0.6(万 t/km<sup>2</sup>)前後の農業用水需要が存在し, およそ3:1で地表水のほうが多く使われている。農業以外でも, 地下水の6倍程度の地表水が使われている。

宝鶏および慶陽では, 地下水への依存率が若干高くなっている。

### 渭水下流域(陝西)

西安(9107 km<sup>2</sup>), 咸陽(10200 km<sup>2</sup>), 銅川(3900 km<sup>2</sup>)の3地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの数分の1であり, 地下水利用の季節変動性は大きい(図10)。咸陽では, 農業における地下水利用のピークが1.2(万 t/km<sup>2</sup>)強であるのに対し, 農業以外が0.4(万 t/km<sup>2</sup>)強となっている。一方, 春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて, それぞれ3(万 t/km<sup>2</sup>)弱の農業用水需要が存在し, およそ3:1で地表水のほうが多く使われている。農業以外でも, 地下水の3倍程度の地表水が使われている。

渭水から離れている銅川では, 農業用水はほぼ地下水でまかなわれている。これは, 一ノ瀬<sup>25)</sup>における現地調査の結果と整合的である。図10から,

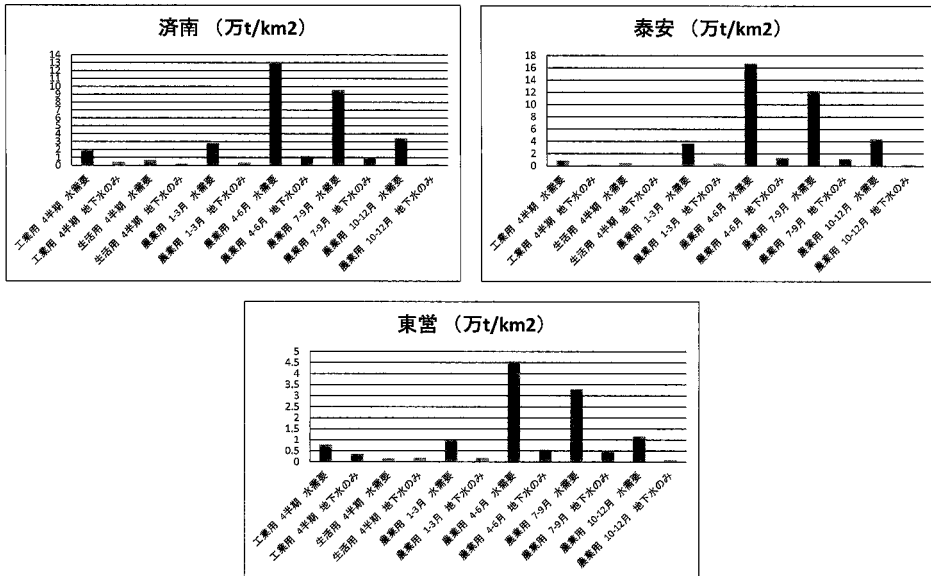


図7 黄河最下流域(山東)における水資源需給構造

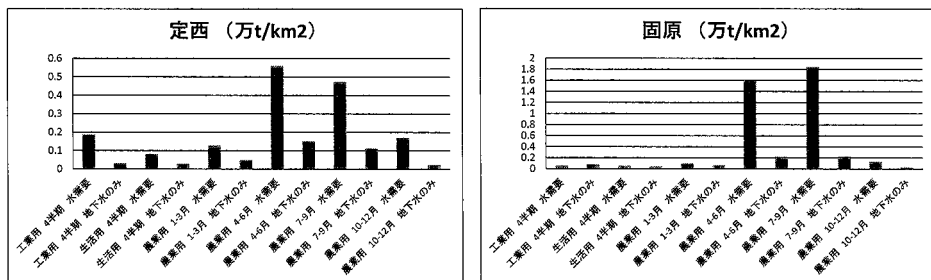


図8 黄河渭水分水嶺地域(甘肅・寧夏)における水資源需給構造

Ichinose *et al.*<sup>20)</sup> におけるモデリングは実際の農事暦に近いものと考えられる。また、地表水はほとんど工業に利用されていると考えられる。

#### 黄河中流域 (陝西)

延安 (37089 km<sup>2</sup>), 榆林 (43493 km<sup>2</sup>), 渭南 (12283 km<sup>2</sup>) の3地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利

用のピークの数分の1であり、地下水利用の季節変動性は大きい (図11)。榆林では、農業における地下水利用のピークが0.45 (万 t/km<sup>2</sup>) 強であるのに対し、農業以外が0.2 (万 t/km<sup>2</sup>) 弱となっている。一方、春季 (おもに小麦) から夏季 (トウモロコシ) にかけて、それぞれ0.3 (万 t/km<sup>2</sup>) 弱の農業用水需要が存在する。推計手法の相違により、地下水利

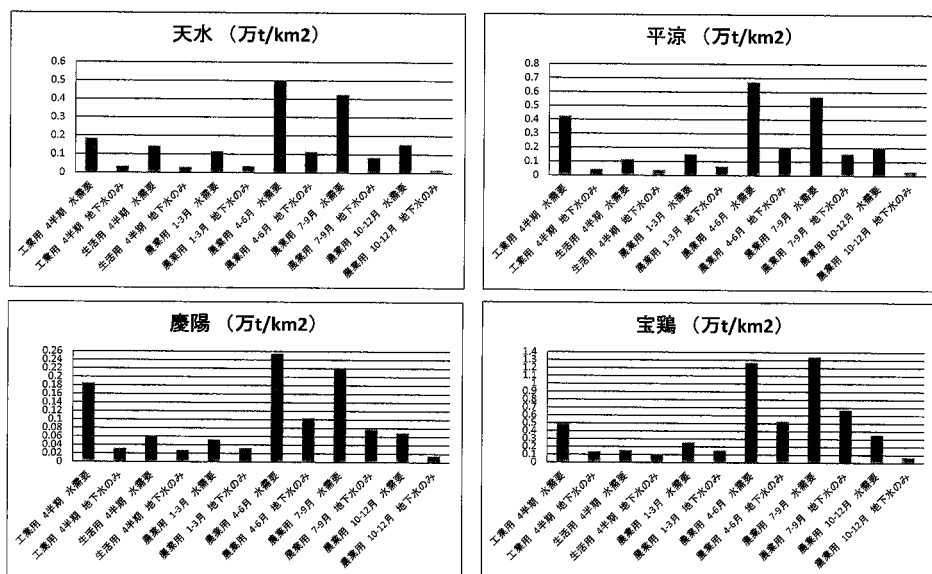


図9 渭水上流域 (甘粛・陝西) における水資源需給構造

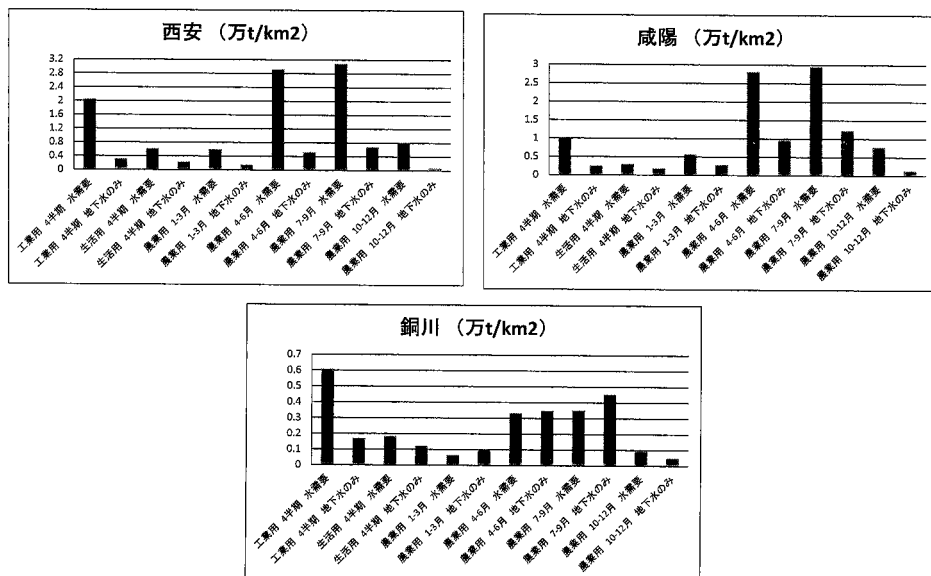


図10 渭水下流域 (陝西) における水資源需給構造

用量が水資源需要量を上回っているが、農業用水はほぼ地下水でまかなわれているものと考えられる。これは、一ノ瀬<sup>25)</sup>における現地調査の結果と整合的である。図 11 から、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup> におけるモデリングは実際の農事暦に近いものと考えられる。農業以外も地下水でまかなわれていると考えられる。渭南は渭水に近いため、地表水への依存度が高く

なっている。

#### 黄河中流域 (山西)

太原 (7000 km<sup>2</sup>)、吕梁 (21144 km<sup>2</sup>)、晋中 (8534 km<sup>2</sup>) の 3 地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークの数分の 1 であり、地下水利用の季節変動性は大きい (図 12)。晋中では、農業における地

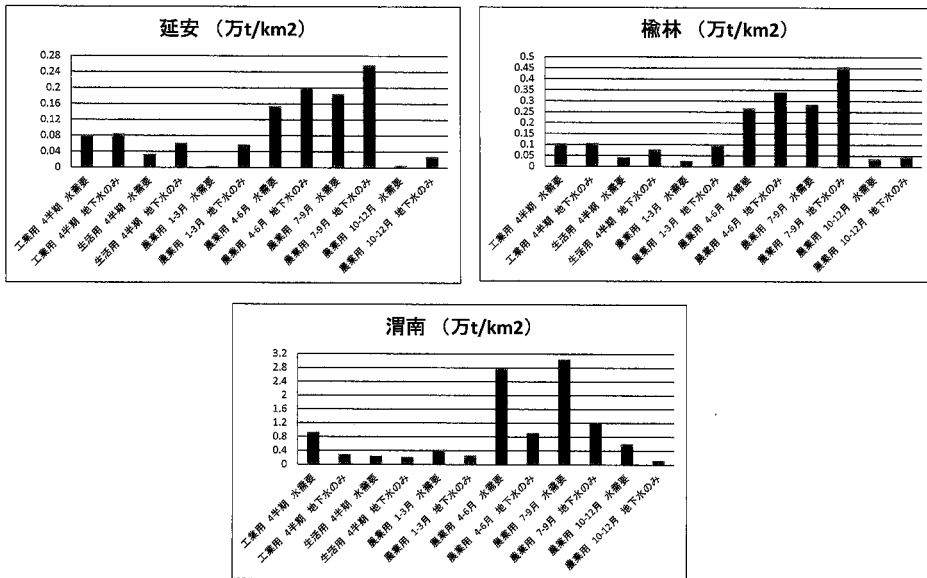


図 11 黄河中流域 (陝西) における水資源需給構造

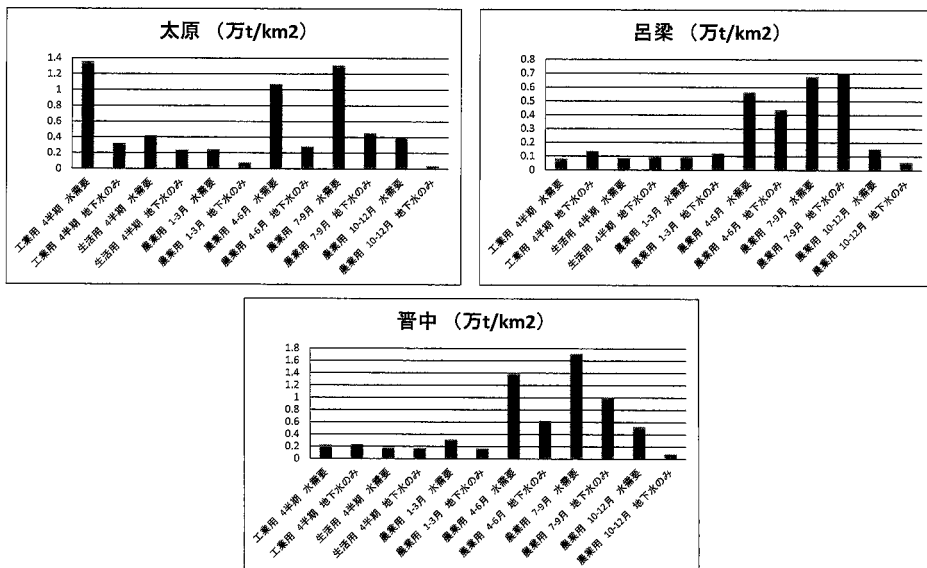


図 12 黄河中流域 (山西) における水資源需給構造

下水利用のピークが1 (万 t/km<sup>2</sup>) 程度であるのに対し、農業以外が0.4 (万 t/km<sup>2</sup>) 程度となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて、それぞれ1.5 (万 t/km<sup>2</sup>) 前後の農業用水需要が存在し、およそ2:1で地表水のほうが多く使われている。図12から、Ichinose *et al.*<sup>(20)</sup>におけるモデリングは実際の農事暦に近いものと考えられる。農業以外は地下水でまかなわれていると考えられる。

太原では工業に少なからぬ地表水が使われている。また、吕梁では地下水への依存度が高く、ほとんどの水需要が地下水でまかなわれていると考えられる。

#### 汾河流域(山西)

运城(13968 km<sup>2</sup>)、临汾(20279 km<sup>2</sup>)、晋城(7749 km<sup>2</sup>)の3地級行政単位がここに分類される。農業以外における地下水利用は農業における地下水利用のピークにくらべ極めて小さく、地下水利用の季節変動性は極めて大きい(図13)。运城では、農業における地下水利用のピークが1.4 (万 t/km<sup>2</sup>) 強であるのに対し、農業以外が0.3 (万 t/km<sup>2</sup>) 程度となっている。一方、春季(おもに小麦)から夏季(トウモロコシ)にかけて、それぞれ2.3 (万 t/km<sup>2</sup>) 前後の農業用水需要が存在し、およそ2:1で地表水(黄河)のほうが多く使われている。図13から、Ichinose *et al.*<sup>(20)</sup>におけるモデリングは実際の農事暦に近いものと考えられる。少ないながらも農業以外

は地下水でまかなわれていると考えられる。

汾河の流量が少ない临汾では、ほとんどの水需要が地下水でまかなわれていると考えられる。また、晋城では工業での地表水利用(黄河)が突出している以外、少ないながらもほとんどの水需要が地下水でまかなわれていると考えられる。

#### 5. 考察

以上の結果は表2のように整理される。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低い。ため、地下水利用の季節変動性は小さい。一方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。

さらに、地下水利用構造(農業と農業以外の量的な比率および季節変動性)の類似性にもかかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源の需給構造(おもに地表水と地下水の比率)に多様性が見られる地域がある。とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。なお今回はおもに、絶対量の多い農業における水資源利用量に着目して考察を行っているが、農業以外についても同様の考察が可能と思われる。しかし、絶対量が小さい上に共通する特徴の抽出が困難であったため、主たる分析対象とはしていない。

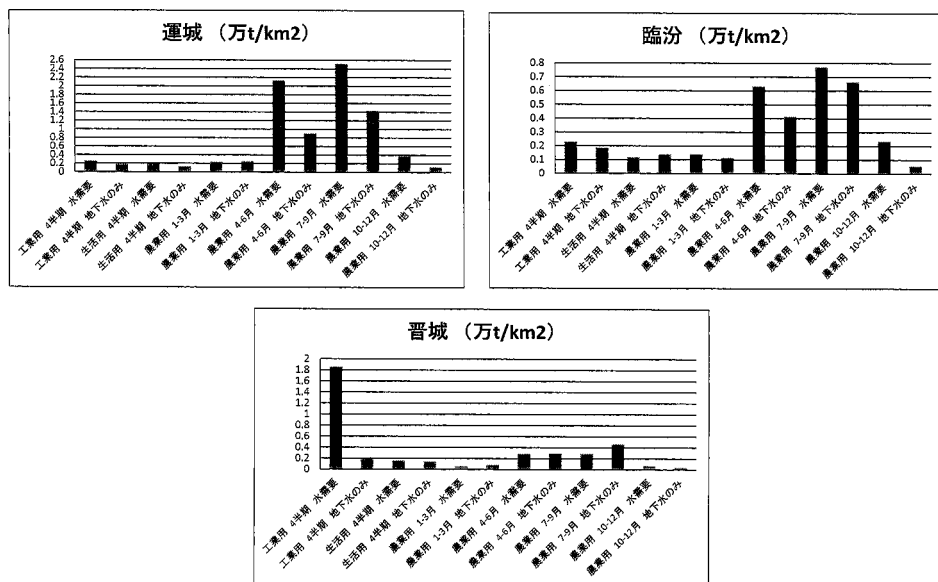


図13 汾河流域(山西)における水資源需給構造

表 2 小流域別水資源需給構造のまとめ

| 小流域                  | 地級行政単位                    | 地下水利用の<br>季節変動性 | 農業用水       | 特徴          |
|----------------------|---------------------------|-----------------|------------|-------------|
| 黄河最上流域（青海）           | 西寧, 海東                    | 極めて小さい          | 地表水が主      |             |
| 黄河上流域（甘肅）            | 蘭州, 白銀, 臨夏                | 小さい             | 地表水が主      |             |
| 黄河上流域（寧夏）            | 銀川, 石嘴山, 呉忠               | 小さい             | 地表水が主      | 稲作          |
| 黄河中流域（内蒙古）           | フフホト, 包頭, オルドス,<br>バヤンノール | 極めて大きい          | 地表水が主      |             |
| 黄河中流域（陝西）            | 延安, 榆林, 渭南                | 大きい             | 地下水が主      | 渭南では地表水にも依存 |
| 黄河中流域（山西）            | 太原, 呂梁, 晋中                | 大きい             | 2:1で地表水が多い | 呂梁では地下水が主   |
| 汾河流域（山西）             | 運城, 臨汾, 晋城                | 極めて大きい          | 2:1で地表水が多い | 臨汾では地下水が主   |
| 黄河渭水分水嶺地域<br>（甘肅・寧夏） | 定西, 固原                    | 中程度             | 地表水が主      | 農業以外は地下水が主  |
| 渭水上流域（甘肅・陝西）         | 天水, 平涼, 慶陽, 宝鷄            | 中程度             | 3:1で地表水が多い |             |
| 渭水下流域（陝西）            | 西安, 咸陽, 銅川                | 大きい             | 3:1で地表水が多い | 銅川では地下水が主   |
| 黄河下流域（河南）            | 洛陽, 三門峽                   | 大きい             | 地下水が主      |             |
| 黄河最下流域（山東）           | 済南, 泰安, 東営                | 中程度             | 地表水が主      |             |

また、立地の近接性のほか、とりわけ地下水資源の使途に注目し、地下水利用の季節変動性を重視した結果、このような12小流域への区分となったものの、小流域の中では例外的とされた地級行政単位についても、地表水を含めた水資源需給構造が、隣接する小流域に属する地級行政単位に近い事例も見受けられる。具体的には、定西が天水や平涼と、咸陽が慶陽や宝鷄と、銅川や呂梁が延安や榆林と、渭南が運城と、晋中が臨汾との間に、棒グラフ（図2～図13）の形状の類似性が認められる。

## 6. 結 論

中国の黄河流域において、大西ら<sup>7)</sup>の推計した水資源需給構造と、Ichinose *et al.*<sup>20)</sup>の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった当該流域における地表水の利用構造を描き出すことを試みた。黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造の形態的類似性（共通する特徴）に着目してそれらを12の小流域に分類した。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低いため、地下水利用の季節変動性は小さい。一方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。さらに地下水利用構造の類似性にもかかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源

の需給構造に多様性が見られる地域がある。とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。

## 謝 辞

本論文は、独立行政法人国立環境研究所特別研究「全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用」（代表・日引聡）および科学研究費補助金（基盤C）「黄河流域における省資源型・環境調和型社会を目指した適正な水資源配分のあり方」（代表・大西暁生）の研究成果の一部である。データ解析を手伝っていただきました早稲田大学学生の山本修司君および筑波大学大学院生の李重顔君に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 劉 昌明, 中国の水循環, 水資源と生態保護, 「現代中国環境論」, 愛知大学, 2007, 61-75 (中国語).
- 2) 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, 2004, No. 28.
- 3) 中華人民共和国水利部, 「中国水資源公報」, 1997～2000.
- 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) 中華人民共和国水利部黄河水利委員会, 「黄河水資源公報」, 1997～2000.
- 7) 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 2006, 34: 611-622.
- 8) Z. Xu, K. Takeuchi, H. Ishidaira and X. Zhang, Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach, *Water Resource Mgmt.* 2002, 16: 239-261.
  - 9) 敖天其・竹内邦良・石平博, 大河川の擬河道網作成における問題点およびその流出解析への影響, 水工学論文集 2001, 45: 139-144.
  - 10) D. Yang, S. Herath and K. Mushiake, A Hillslope-based Hydrological Model Using Catchment Area and Width Functions, *Hydrological Sciences Journal* 2002, 47 (1): 49-65.
  - 11) D. Yang, C. Li, H. Hu, Z. Lei, S. Yang, T. Kusuda, T. Koiike and K. Mushiake, Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data, *Water Resour. Res.* 2004, 40: W06502.
  - 12) T. Watanabe and K. Hoshikawa, Water Use and Water Balance of Large Irrigation Schemes in the Yellow River Basin, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Yellow River Studies, Kyoto, *Proceedings* 2004, 6-.
  - 13) K. Hoshikawa, T. Naganô, S. Donma, T. Watanabe and Y. Fukushima, Application of Irrigation Management Performance Assessment Model (IMPAM) to the Lower Seyhan Irrigation Project, *ICCAP-Cappadocia Workshop* 2004, 93-96.
  - 14) K. Hoshikawa, T. Watanabe and Y. Fukushima, Water Balance Modeling of Large Irrigation Districts in the Yellow River Basin, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Yellow River Studies, Kyoto, *Proceedings* 2004, 10-.
  - 15) The World Bank, Sinclair Knight Merz and Egis Consulting Australia, the General Institute of Water Resources & Hydropower Planning and Design, *China Agenda for Water Sector Strategy for North China* 2001, Vol. 1-4.
  - 16) 銭正英・張光斗他, 「中国可持續發展水資源戰略研究報告集 1~9」, 中国水利水電出版社, 2001.
  - 17) M. Okamura, A. Onishi and H. Imura, Water Resources Supply and Demand Forecast in Yellow River Basin, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Yellow River Studies, Kyoto, *Proceedings* 2004, 137-140.
  - 18) 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需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 2005, 33: 477-485.
  - 19) 大西暁生, 「黄河流域の社会経済・生産活動と水資源需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.
  - 20) T. Ichinose, I. Harada, M.S. Ee and K. Otsubo, Estimation of groundwater resource demand in the Yellow River Basin, China, *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management* 2009, Taylor & Francis, 477-482.
  - 21) 森康二・多田和宏・西岡哲・登坂博行, 地下水循環モデルの構築とシミュレーション, 人・自然・地球共生プロジェクト「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」平成 18 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局 2007, 199-207.
  - 22) T. Ichinose, K. Matsumura, T. Nakaya, Y. Nakano, C. Elvidge and M. Imhoff, Estimation on regional intensity of economic activity in Asia: An application of nocturnal light image by DMSP/OLS, 2<sup>nd</sup> Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries, Bonn, *Proceedings* 2002.
  - 23) 一ノ瀬俊明編, 「夜間光衛星画像データ DMSP によるアジアの地域別経済活動強度推定」, 平成 12 年度~平成 13 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 2002.
  - 24) L. Zhuo, T. Ichinose, J. Zheng, J. Chen, P. Shi and X. Li, Modeling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated nighttime light images, *International Journal of Remote Sensing* 2009, 30: 1003-1018.
  - 25) 一ノ瀬俊明, 「千里走単騎」中国単身現地考察活動, 203-216; 竹内邦良・福島義宏編, 「メコンと黄河~研究者の熱い思い~」, 学報社, 東京, 2007, pp. 267+.

# Classification of Structure of Water Resource Demand and Supply in the Yellow River Basin of China —Focusing on Balance between Ground Water and Surface Water—

Toshiaki ICHINOSE \*, Akio ONISHI \*\* and Feng SHI \*\*\*

(\* Center for Social and Environmental Systems Research,  
National Institute for Environmental Studies / Graduate School of Environmental Studies,  
Nagoya University, NIES 16-2, Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, Japan

\*\* Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University,  
5180, Kurokawa, Imizu-City, Toyama 939-0398, Japan

\*\*\* Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-City, Aichi 464-8601, Japan)

## Abstract

The authors attempted to describe structure of surface water use in the Yellow River Basin of China, whose situation was difficult to be understood with a lack of actual data, in directly comparing structure of water resource demand and supply estimated by Onishi *et al.* (2006) and structure of ground water use estimated by Ichinose *et al.* (2009) in the each region. 35 municipalities which were almost included in the Yellow River Basin were picked up and they were classified into 12 small catchments in focusing on the geographical location and the similarity of shape of structure of water resource demand and supply (expressed as bar graphs). In the upstream areas surface water is mainly used and share of agricultural use is small, therefore, seasonal variability of ground water use is small. On the other hand, in the middle stream and the downstream areas share of ground water is large and share of agricultural use is large, therefore, seasonal variability of ground water use is large. Especially these characters are obvious in the Loess Plateau. In addition, surface water is mainly used again in the most downstream areas.

**Key Words:** Yellow River, ground water, water resource, urban, China