

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

大西暁生¹・井村秀文²・白川博章³・韓驥⁴

¹正会員 工博 総合地球環境学研究所 (〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457番地4)

²正会員 工博 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

黄河流域は、近年の急速な社会経済の発展に伴い水需要量が増加した結果、1970年代初頭から90年代後半にかけて断流が頻発した。このような水不足に悩む流域では、各地域・各セクター（農業、工業、生活）の水需要を把握しつつ、これらを削減していくための対策を考える必要がある。また、黄河は非常に広大な流域を誇り、地域の産業形態や自然状況も大きく異なる。このような社会的・自然的特徴が、季節における水利用や水資源の変化をもたらす。このため、本研究では、黄河流域の水資源管理の議論に貢献するため、地域的・季節的な変化を考慮し、流域全体の水資源需給の時間・空間構造を県市別、月別で表わす。具体的には、1997年から2000年までの水資源需給の構造を再現し、断流現象などの需給アンバランスが発生する時間的・空間的な特徴を分析する。さらに、このアンバランスを不足量として表わし対策に必要な削減の目安として評価する。

Key Words: Yellow River basin, water resource management, water resource and demand balance, water shortage

1. はじめに

黄河流域は、深刻な水不足に悩む地域である。この流域の一人当たり年間水資源量は約580m³であり、これは世界平均の6%、中国平均の24%である^{1), 2)}。一方、流域の総水需要は人口増加、灌漑農業の発達、工業化、都市化の進展に伴い増加し続けており、1949年の74億m³から、1980年には271億m³に増大し、近年では年間平均で300億m³を超えている³⁾⁻⁵⁾。このような急速な成長を遂げる黄河流域では、慢性的な水不足が発生し、1970年代から90年代後半にかけて断流が頻発した。そのため、この流域での持続可能な発展が、中国北部における「生命線」とも言われている⁶⁾。

1997年に発生した深刻な断流以降、2005年現在まで大規模な断流は発生していない（ただし、1998年と1999年には小規模の断流が発生している）⁷⁾。この理由として、流域全体、特に下流域の農業用水の使用について管理と制限が強化されたことによって需要が抑制されたと言われている⁸⁾。しかし、急速な社会経済発展を遂げるこの地域において、工業化・都市化などに起因する新たな水需要の増加が懸念されており、この流域の水不足は完全には解消されていない。このた

め、流域全体にわたる地域ごとの水需給構造を把握し、断流現象などの水資源需給アンバランスが発生するメカニズムを明らかにすることが重要である。こうしたメカニズムの解明によって、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、黄河の水不足を解消するため、国内外において多くの研究が行われ、その主眼は研究分野ごとに多岐にわたる。特に、広大な流域を誇る黄河では、気候・気象条件が地域によって大きく異なり、水文状況は複雑になっているため、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⁹⁾⁻¹²⁾。また、主産業である農業は灌漑によって施されており、この地域における生産活動や水利用状況の変化が流域全体の水資源需給バランスに大きく影響を与える。そのため、これら地域における生産活動や水利用の調査が行われている¹³⁾⁻¹⁶⁾。しかし、上記のように、特定の地域や個別の問題に焦点を当てた研究は多く存在するが、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は多くは行われていない。その中でも、将来にわたる水資源需給の逼迫が地域の社会経済に与える影響を分析した研究として、世界銀行の報告書¹⁷⁾や、中国工程院による「中国の持続可能な発展のため

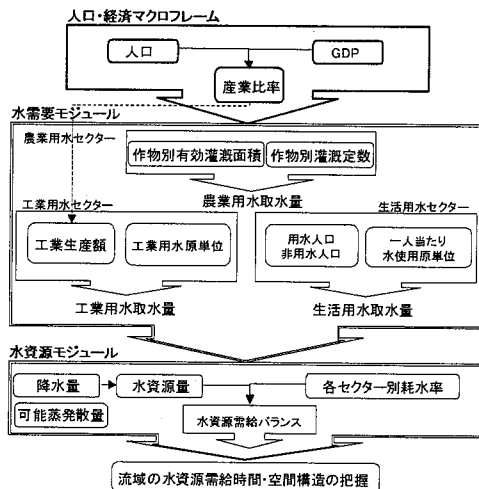


図-2 水資源需給モデルの構成

計において、蒸発散量は用いず、降水量との関係からのみ推計を行っている点である。3 点目は、ダムなどの人為的な操作については考慮していない点である。このように、簡略もしくは省略している箇所が存在するものの、これらボックス単位で計算された収支をカスケードに沿い1つのチャートに表示することによって、流域全体の地域別、セクター別の水資源需給構造が全体的に分析できる²⁰⁾。本研究では、これらボックス内部の活動を月別によって表すことによって、特定の季節や地域において発生する水資源需給アンバランスの発生のメカニズムを把握できると考える。

(1) 水資源需給モデルの概要

図-2に、本研究で構築する水資源需給モデルのフローを示す。このフローに従い、各県市ごとの水資源需給バランスを推計する。水資源需給モデルは、人口・経済マクロフレーム、水需要モジュール、水資源モジュールから構成されている。人口・経済マクロフレームでは、人口とGDPから産業構造を推計し、工業生産額を求める。水需要モジュールでは、農業・工業・生活といった各セクターにおける水需要量を推計する。水資源モジュールでは、各県市の水資源量を推定した上で、各セクターの用水量にそれぞれの耗水率を乗じて耗水量を求め、水資源カスケードによって上流から下流へと流域全体の水資源需給の構造を示す。

(2) 人口・経済マクロフレーム

a) 人口、GDP

人口とGDPは、「中国県(市)社会経済統計年鑑」²⁴⁾、「中国城市統計年鑑」²⁵⁾、「各省統計年鑑」²⁶⁾の値を用いる。しかし、こうした統計書から得られるデータは、年次の値であり、月単位で推計を行なうには、その月

ごとの変化を設定する必要がある。そのため、統計書の値を年末(12月)に集計された値と仮定し³⁰⁾、月ごとにおける人口とGDPの変化は、年次間での変化率を用いることによって推計する。

b) 産業構造

工業用水量を推計するためには、工業生産額の値が必要となる。しかし、県市ごとの工業生産額は2000年については実績値が存在するものの、1997年から1999年については都市のデータしか得られない²⁰⁾。そのため、1952年から2000年における各省の時系列データを基に以下の方法によって推計式を求める^{20), 23)}。この推計式を用い、前項の人口とGDPから、各県市のGDP(総生産値)に占める各産業の比率を推計する。

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

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

(3) 水需要モジュール

a) 農業用水量

黄河流域の水需要の約7割は農業用水である¹⁾。また、季節的な水需要パターンは、作物種とその栽培期間、人為的な灌漑オペレーションなどによって大きく変化し、広大な面積を誇る黄河流域においては、気候や気象、農地の土壌特性などによって地域ごとで異なる。しかし、これら作物の季節ごとの水需要パターンに関する情報は少なく、リモートセンシング技術などを用いても、流域全体を網羅する情報の取得は困難である。また、仮に物理的な作物の水の要求量を算定できたとしても、実際に使用される水量との間に乖離が生じるため、観測されたデータを基に補正をする必要がある。そのため、既存研究の多くでは、ある特定の地域のパターンを流域全体に適用したり、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指標) などの植生の活性具合などを基に、一元的な情報によって作物全体のパターンを決定したりする場合が多い。

本研究では、これら既存研究を参考としつつ、現存する統計書類や書籍から、作物の水需要パターンや作物の灌漑面積を求め、月別で農業用水量を推計する。

各県市ごとの月別、作物別の用水量(CIW)は、以下のように表される。

$$CIW_{i,t} = CIWU_{i,t} \times CIA_{i,y} \quad (2)$$

CIW (Crop Irrigation Water) : 作物別用水量,

$CIWU$ (Crop Irrigation Water Unit) : 作物別灌漑定数,

CIA (Crop Irrigation Area) : 作物別灌漑面積,

i : 県市, t : 月, y : 年

なお, ここでの農業用水量は灌漑用水量のみを扱い, 天水(自然降水)による分は計上されていない²⁰⁾.

作物別の灌漑定数の設定は, 次の①, ②の方法を用いて推計する.

① 年間の作物別灌漑定数

中国で刊行されている灌漑定数のうち, 灌漑地における単位面積当たりの水使用量を表わしたものに「中国水資源公報」²⁾, 「中国可持続発展水資源戦略研究報告集第2巻」²⁷⁾の省別のデータ(1997年から2000年)がある. 一方, 作物別の灌漑定数については, 「中国可持続発展水資源戦略研究報告集第4巻」²⁸⁾に省別の値が記載されている. そのため本研究では, これら2つのデータを用い, 各省ごとの年単位の作物別灌漑定数を設定する²³⁾.

② 作物別水需要パターン

次に, ①で求められた年単位の灌漑定数を作物の水需要パターン(年需要に占める各月の需要割合)に合わせて, 月ごとの灌漑定数を求める. 作物別の水需要パターンは, 作物の栽培期間とその期間内における水消費パターンによって地域で異なる. しかし, 前述したように衛星画像などを用いた作物種の特定やその消費パターンの把握は未だ困難とされており, 本研究では, 「引黄灌区節水決策技術応用研究」²⁹⁾と Yang, D. et al.^{11), 12)}の研究を参考とし, 黄河流域の作物別, 月別の水需要パターンを設定する. 作物の水需要パターンは, 流域全体において, 小麦は2パターン, トウモロコシは3パターン, その他の作物(米, その他糧食, 油料作物, 綿花, 野菜, その他経済作物)はそれぞれ1パターンとする.

上記①と②の方法を用い, 以下の式によって作物別, 月別の灌漑定数を推計する.

$$CIWU_{i,t} = CIWU_{j,y} \times CWDP_i \quad (3)$$

$CWDP$ (Crop Water Demand Pattern) : 作物別水需要パターン,
 j : 7省・2自治区

しかし, ここで推計する灌漑定数は, 省ごとの値であり, 実際には同じ省内においても自然条件や灌漑設備などによって灌漑定数は異なる. しかし, 現時点ではこのようなデータの入手は困難であり, 各県市における灌漑定数は, その属する省の値と同様とする.

作物別の灌漑面積の推計には, 以下の方法を用いる.

③ 作物別灌漑面積

有効灌漑面積(土地が均平で灌漑のための施設・設備および一定の水源を有し, 通常の年に正常な灌漑を行なうことのできる耕地³⁰⁾)に関しては, 1949年以後, 各省の時系列データが存在するものの, 黄河流域内の有効灌漑面積を求めるには, 県市別のデータが必要である. しかし, 1979年から1991年についてはデータの公表があったにも関わらず, 1992年以降では公表を取り止めている³¹⁾. このため, 1991年の実績値をもとに, 各県市が所属する省の有効灌漑面積の変化率によって1997年から2000年の値を推計する²⁰⁾. さらに, 県市ごとの作物別の灌漑面積については公表されていない. ただし, 省ごとにおいては, 作物別の作付面積のみが発表されている. そのため, 各県市の作物別灌漑面積は以下のように推計する.

$$CIA_{i,y} = IA_{i,y} \times CSA_{j,y} \quad (4)$$

IA (Irrigation Area) : (有効) 灌漑面積,

CSA (Crop Sown Area) : 作物別作付面積割合(全作物の作付面積に占めるある作物の作付面積割合)

ここで, 農業用水量は, 黄河流域外の引黄灌漑区へも引水されていることに注意する必要がある. この引水量は, 年間およそ15億 m^3 であり, 11月から翌年の2月にかけてほぼ同量を三門峡以下の下流域において取水している⁴⁾. そのため, 本研究では, 引黄灌漑区に供給される農業用水はそれぞれの引水口がある県市から上記期間内において取水するものとする²⁰⁾.

b) 工業用水量

工業用水量は, 単位工業生産(1万円)当たり水使用量 [m^3 /万円] (以下, 工業用水原単位) に工業生産額 [万円] を乗じて求める²⁰⁾. 各県市の工業生産額の推計には, 同章2節b)の「産業構造」の推計によって得られた2次産業比率の値を用い, 以下の式で求める.

①市区 :

$$\text{工業生産総値} = 3.0986 \times \text{GDP} \times \text{第2次産業比率} \quad (5)$$

②県(地区-市区) :

$$\text{工業生産総値} = 3.6751 \times \text{GDP} \times \text{第2次産業比率} \quad (6)$$

県市ごとの工業用水原単位については, 筆者ら²³⁾や国際開発銀行¹⁾が採用した方法によって, 全国や省, 流域, 城市レベルで存在する実績値を用いて推計する. しかし, このように公表されている実績値は年単位の値であるため, この値を各月で等分し, これに工業生産額を乗じることによって, 月別の工業用水量を求める. また, 中国では, 高い水準で中水利用が行われて

おり¹⁾、この回収率（使用水量に対する重複水量の割合）を設定することによって、循環し使われる回収水を推計する。

c) 生活用水量

生活用水量は、1日1人当たり水使用量（ℓ/日・人）に人口を乗じて求める²⁰⁾。中国では、都市の市街地部においては、生活インフラの整備によって近代的な上水道が既に設置されている一方、農村や都市の郊外では上水道などの設置が遅れ、これを享受できない人口も多い。そのため、両者の原単位は異なる。そのため、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」のデータとともに、それぞれの原単位を整備する²⁰⁾。水使用原単位については、文献2、18による実績値を用いる。用水・非用水人口については、県市ごとのデータを得ることはできないため、城市非農業・城市農業人口のデータと城市非農業人口および城市農業人口に対する用水普及率から計算する¹⁾。²⁰⁾。ここで、城市非農業・城市農業人口の値は年間の値であるため、同章2節a)の「人口、GDP」と同様、これを年末の値と仮定し、その年次間の変化率をもって各月の値を求める。用水普及率も同様である。

(4) 水資源モジュール

流域全体の水資源量は降水量によって決まる¹⁾。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。降水から得られた水のうち、実際に水資源として利用できるのは、地表水と地下水である¹⁾。ただし、地表水と地下水の間には相互に移動があるため重複量が発生する¹⁾。²⁰⁾。そのため、この重複分を差し引く必要がある。すなわち、

$$\text{水資源量} = \text{地表水} + \text{地下水} - \text{重複水} \quad (7)$$

である。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。つまり、上流で多くの水需要が発生すれば、下流に至る水量は減少する。ただし、式(7)で定義された水資源量は、あくまでもその地域（たとえば、対象とした省や流域の内部）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（たとえば、他の省や流域）からの流入分は含まれていない¹⁾。「中国水資源公報」、「黄河水資源公報」、「黄河水資源変化研究」³²⁾の「水資源量」とはこのように定義された量である¹⁾。

水資源量は、河川流量や地下水位からの観測によっ

て求めることができる¹⁾。このため、1997年以降、上記の水資源公報や書籍が水利部によって毎年発表されている。ただし、こうした公表資料には、省内の県や市などの詳細な地域の水資源量は公表されていない。

県市などの水資源量を求めるためには、河川や地下水を含めた流域全体の水収支を把握する必要がある¹⁾。そのためには、本流、支流、地下水系およびダムを含めたネットワーク全体について、多数の観測点での流量、流速、地下水位等のデータが必要である¹⁾。しかし、こうした詳細なデータの公表はされておらず、本研究では降水量から水資源量を推計する以下の簡略化した方法を用いる。

降水量については、流域内190の観測所によって記録された10日単位の降水量データをKriging補間法³³⁾により点データから面データに変換し県市ごとの降水量を推計する。ここで、県市ごとの水資源量を推計するため、県市の降水量をその属する省で集計し、「黄河水資源変化研究」に記載されている省別の水資源量と回帰する。通常、水資源量に融雪量を含む上流域の青海省では、水資源量と降水量の関係から、その正確な値を推計することは難しい。そこで、以下のような推計方法を用いることとする。

まず、黄河流域に属する9省のうち、青海省を除く8省で回帰を行なう。ここで、回帰に使用した「黄河水資源変化研究」の水資源量と推計した降水量は年間の値である。この8省については、10日単位で推計した各県市の降水量を月ごとで集計し、得られた回帰式に代入し水資源量を求める。一方、青海省については、得られた回帰式によって降雨によってもたらされる水資源量を一旦求めた後、「黄河水資源変化研究」に記載されている青海省の水資源量の値から差分をとる。つまり、この差分が融雪によってもたらされた水資源量である。この得られた融雪量に関しては、気温が0度以上の月（通常3月から11月）において、青海省の各県市に均等に振り分けることとする。

前述したように、水資源量の正しい推計方法は、降水量および蒸発散量を用いるものである²⁰⁾。著者らと共同で研究を行っている方ら³⁴⁾も、流域の可能蒸発散量の空間分布を計算しているが、可能蒸発散量から実蒸発散量への推計には完全には至っていない。そこで、可能蒸発散量に適当な補正係数を乗じて実蒸発散量に変換する方法が考えられる²⁰⁾。

$$\text{水資源量} = \text{降水量} - \text{可能蒸発散量} \times \text{補正係数} \quad (8)$$

しかし、水資源量のデータが流域全体あるいは省別にしか公表されていないので、詳細な地域ごとの気象条件等の違いを加味した補正係数の設定は困難である。

このため、本研究では、上記のような簡略化した方法を代用した。

近年、黄河流域を対象とした分布型水文モデルの開発⁹⁾¹²⁾が進められており、詳細な地域の水資源量の推計が可能となってきた。そのため、今後は、これから研究の進捗を参考に、適切な方法を用いて再度推計をする必要がある。

(5) 耗水率

前節までの方法によって、各セクターの水需要量と水資源量が計算される。次に、使用された水がどれだけ再び水資源として還元されるのかを推定する必要がある。このためには、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²⁰⁾。この耗水率に関するデータは、「黄河水資源公報」と「黄河水資源管理」から得ることができる。本研究では、1998年と1999年は「黄河水資源管理」を、2000年は「黄河水資源公報」を、1997年は「黄河水資源管理」の1998年の値を用いる。

ここで耗水量とは、送水、使用の間に、蒸発散、土壌の吸収、製品に持ち込まれる分、住民や家畜の飲用などの形で消費され、地表水体または地下含水層に回復できない水量を指す²⁾。つまり、水の利用過程において消失し、河川あるいは地下水に還元しない水量を意味する。人為的な水利用がなければ、ある期間の水資源量は当該地域における河川水または地下水の増分となるが、実際には、人間活動のための取水があり、取水量の一部は消失し、残りは河川水あるいは地下水に還元される²⁰⁾。ここで、耗水率は取水量に対する耗水量の比で定義できるため、

$$\text{耗水率} = \frac{\text{耗水量}}{\text{取水量}} \quad (9)$$

で表わされる。

以上を整理すれば、本研究における各セクターの水需要量とは取水量を意味しており、これに耗水率を乗じた分が耗水量となる²⁰⁾。水資源量から耗水量を差し引いた残量が河川に還元され、下流で利用可能な水資源となる。ただし、地表の河川水と地下水を区別していないので、地下水ストックは一定と仮定している²⁰⁾。耗水量が水資源量を上回る県市については、不足量として計上し下流域への流出時にはこれをゼロとして処理している²⁰⁾。ただし、実際には、発生した不足量は地下水の汲み上げによって補われることが考えられ、この過剰取水が地下水位の低下をまねいている恐れがある。このような地下水の利用状況については、今後、実地調査を行うことによって実態の把握を進めたい。

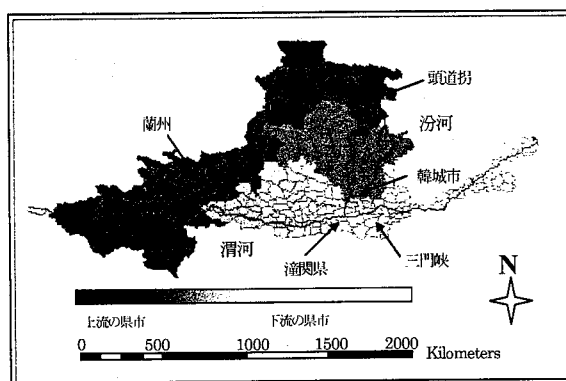


図-3 水資源カスケード：上流から下流への県市の並び

(6) 水資源カスケード

黄河流域は、本流と76本の一級支川（それぞれの流域面積は1000km²以上）、それらに流入する2・3級支川の流域から構成されている²⁰⁾。県市の上流から下流への水資源カスケード関係を分析するには、河道に沿った各県市の位置関係（いずれの県市が上流側、下流側に位置するか）を決定する必要がある。そのため本研究では、標高データから作成した各支流を含む集水域の上流から下流への流れを基に、各県市のカスケード関係を設定する。

まず、中国国家基礎地理情報センターの100万の1データ³⁵⁾を用いてDEM（Digital Elevation Model：数値標高モデル）から本流・支流で構成される集水域を設定する。この作成した集水域界に県市行政界を合わせ、各県市の面積が占める割合が大きい方をそれぞれの集水域に属するものとする。そして、集水域の上流から下流への順序に合わせ県市の順番を決定する。ただしここで、1つの集水域に2つ以上の県市が属する場合、それぞれの集水域内における河川の上流から下流への流れに合わせて県市の順序を設定する。この結果を図-3に示す。

本研究では、流域全体の大局的分析を目的として、2大支流である汾河と渭河を本流とは別に考える²⁰⁾。なお、支流から本流への流入については、汾河は韓城市、渭河は潼関県で、それぞれ黄河本流に合流するものとする²⁰⁾。

3. 水資源需給の時間・空間構造の把握

(1) 1997年から2000年までの水資源需給構造

ここでは、1997年から2000年までの水資源需給構造の結果を流域別にまとめる。結果を図-4及び表-2に示す。得られた結果から、①水資源量の大半は上流域から供給されている、②1997年は、その他の年と比べて、どの流域においても水資源量が少ない、③また、

水資源量は季節による変化が大きい、④一方、耗水量は下流域と上流域において多く、特に農業での耗水量が多い、⑤季節における水利用に大きな変化がある、⑥特に、下流域では域内の水資源量を上回る耗水量が発生している、⑦支流流域においても、汾河流域は水資源量と耗水量が逼迫している、ことがわかる。このような状況によって、1997年には大規模な断流現象に代表される水資源需給アンバランスが発生した(ただし、1998年と1999年には小規模の断流が発生している)。特に、断流現象が発生した年と全く発生しなかった2000年を比較すると、断流現象の発生の一端は、水資源量の不足と下流域での過剰な水利用が重なったことで、1997年の大規模化につながったと考えられる。また、2000年には灌漑面積の増減が鈍化した一方で、下流域の山東省や河南省などで灌漑定数の低下が見られ、取水量が削減されたことによって、耗水量が低下したと考えられる。

次節では、1997年の水資源需給バランスと流量の結果を県市別で示す。これによって、水資源需給アンバランスの発生のメカニズムをより詳細に考察できる。

(2) 1997年の県市別、月別の水資源需給構造

結果を図-5～図-7に示す。ここには、黄河本流と渭河、汾河のそれぞれについて、上流から下流へと、各県市の水資源量、耗水量の時間・空間分布が表示されている。また、流量の結果として、天然流量と実際流

量の結果を示している。ここで、天然流量とは、人為的な取水活動やダムなどの操作がない場合の河川の流量を意味する。一方、実際流量とは、こうした人為的な活動で失われた水量を差し引いた流量である。

まず、各県市の水資源需給バランスの結果を示す。この結果から、①水資源量の多くが蘭州より上流で供給されており、特に、夏季にその供給量が多い、②下流域の位山灌区などで、耗水量が慢性的に水資源量を超過している、③また下流域では、冬季にも多くの水を引黄灌漑区に引水しているため、水資源需給のアンバランスが年間を通じてみられる、④上流域は恵まれた水資源量によって、下流ほど水資源需給アンバランスは酷くないが、耗水量が増加する4月から8月においては、河套灌区で耗水量が水資源量を上回っている、⑤渭河流域の西安市、汾河流域の太原市で耗水量が突出して多く、年間を通じて水資源量を超過している、ことがわかる。こうした各県市の需給バランスによって、黄河本流の下流域、汾河の太原市、渭河の西安市において実際流量が全くなくなる月が発生した(図-5～図-7の破線丸棒)。その実際流量が枯渇した月は、本流の下流域で1月から6月、汾河の太原市で1月、2月、3月、5月、11月、12月、渭河の西安市で1月、2月である。断流の発生している本流の下流域では引黄灌漑区をはじめ大半を河川流量に依存しているのに対して、渭河や汾河では、西安市における水利用の7割が地下水であるように、地下水への依存が大きい^{3),36)}。

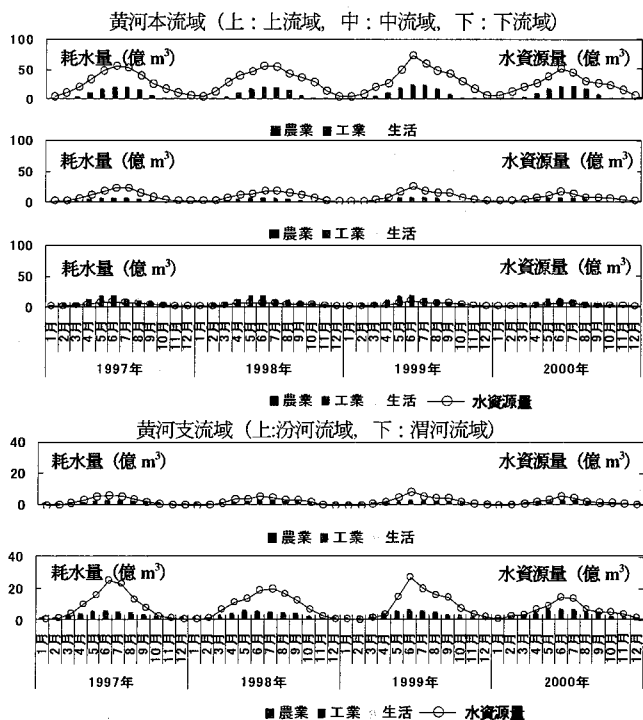


図-4 1997年から2000年までの流域別、月別の水資源需給構造

表-2 1997年から2000年までの流域別、セクター別の耗水量と水資源量

上流域					
	農業	工業	生活	合計	水資源量
1997年	85	11	4	101	273
1998年	84	12	4	101	360
1999年	95	14	5	114	345
2000年	91	14	6	110	298
中流域					
	農業	工業	生活	合計	水資源量
1997年	30	11	6	46	72
1998年	29	11	6	46	105
1999年	33	13	6	52	97
2000年	31	13	6	51	104
下流域					
	農業	工業	生活	合計	水資源量
1997年	102	8	5	114	24
1998年	101	8	5	115	35
1999年	99	9	6	114	32
2000年	77	10	6	93	36
汾河流域					
	農業	工業	生活	合計	水資源量
1997年	12	5	2	19	25
1998年	12	5	2	19	37
1999年	11	5	3	19	33
2000年	12	5	3	19	32
渭河流域					
	農業	工業	生活	合計	水資源量
1997年	28	13	6	47	74
1998年	28	13	6	48	114
1999年	29	15	7	51	115
2000年	32	15	8	54	111

表の単位は億 m³

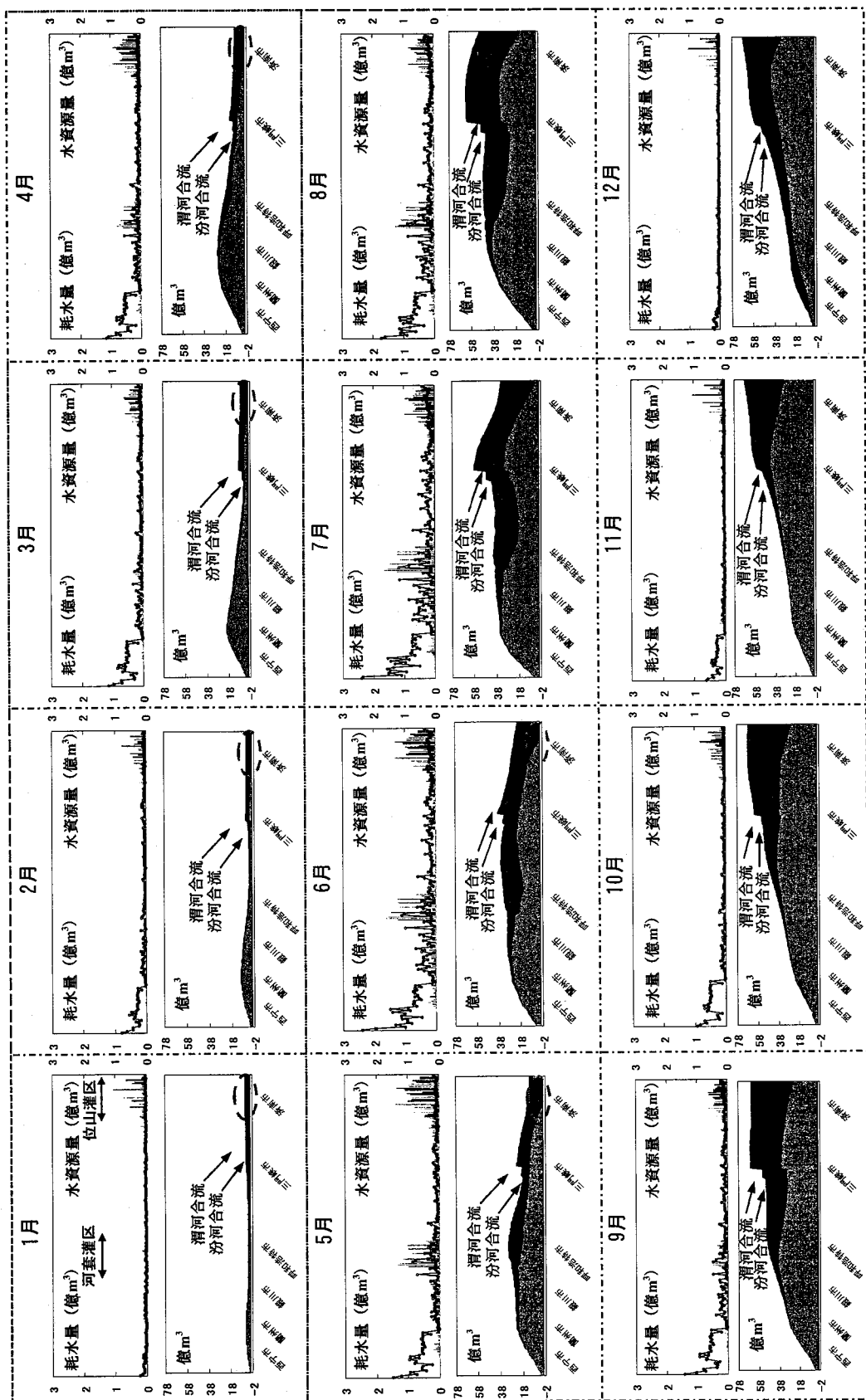


圖-5 1997年における黄河本流の県市別、月別の水資源需給構造

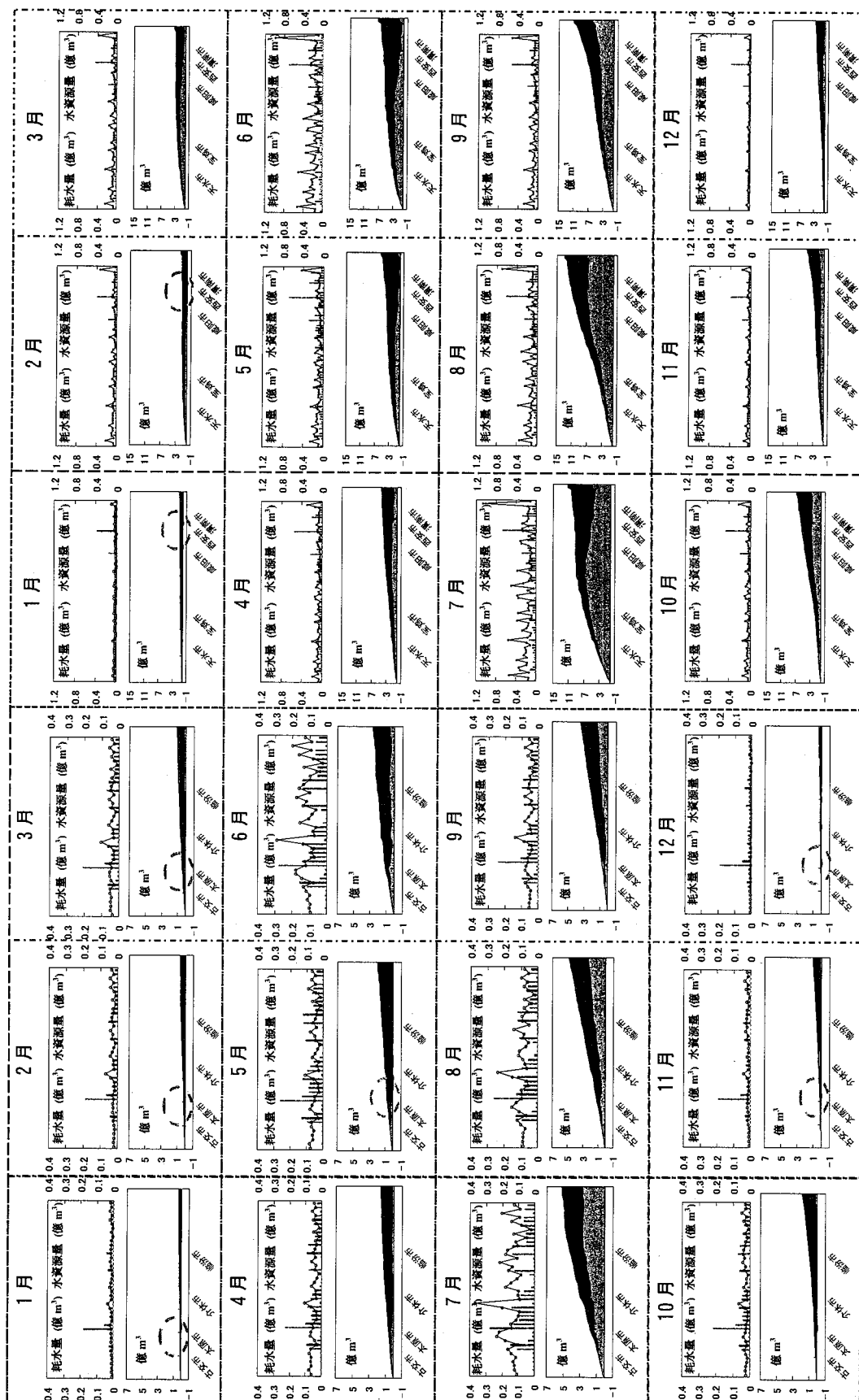


図-6 1997年における汾河の県市別、月別の水資源需給構造

図-7 1997年における渭河の県市別、月別の水資源需給構造

■ 耗水量
■ 天然流量
○— 实际流量

そのため、渭河や汾河での需給逼迫は断流ではなく、地下水位の低下として問題が生じていると考えられる。しかし、本モデルでは、地表と地下の水資源量を混同して扱っているため、これらの現象を個別に再現することはできない。こうした解決には、地表水、地下水の双方の情報が必要である。

(3) 精度検証

本研究では、数箇所の観測所で測られた1997年の流量のデータが入手可能であったため、本モデルの計算流量と比較し、精度の検証をする。

図-8に、本モデルの計算結果による天然流量と実際流量を、またそれぞれ観測された流量を示す。また、観測所の位置関係を図-3に記す。

天然流量については、蘭州、頭道拐において、ある程度の整合性が確認できる。しかし、三門峡に至るまでに、流速に誤差が生じることから、流量に違いが表れる。一方、実際流量については、蘭州においてはほぼ類似した結果がみられるが、頭道拐においては計算流量が若干過大であることがわかる。これは、本モデルによる河套灌区などの大型灌漑地区での農業耗水量の評価が過小であることが影響していると考えられる。

現在、Xu et al.⁹⁾、敖ら¹⁰⁾、Yang et al.^{11), 12)}をはじめとする多くの流出解析の研究では、高度な水文モデルを作成し流出解析を行なっているが、頭道拐から三門峡に至る区間で、支流から多くの流入が本流に合流すること、地形の急激な勾配の低下やダムなどの人為的な操作が流速に影響することなどから流量の正確な再現は難しい。また、渡邊¹³⁾や星川ら¹⁴⁾⁻¹⁶⁾による灌漑区での水利用の実態調査が進められており、詳細なデータの蓄積が進められている。今後は、これら研究の進捗を参考とし、より高い精度の再現を目指す。

(4) 不足量

黄河流域では、1987年に国務院弁公庁より批准された「黄河供給可能水量配分法案」が発行され、黄河水利委員会の指導のもと、各省・各自治区の用水のマクロ・コントロールを目指した統一的な水管理の枠組みを整えた。しかし、この方案は累年の平均的な状況の総体配分指標であったため、雨季や乾季などの異なる水資源状況や、将来の水需要量の動向を踏まえたものではなかった。そのため、この計画実施後も、断流現象は悪化していった。

黄河の水調整には、季節的に不均一な水資源分布において、水量のコントロールをある程度人為的に行なう必要がある。これには、ダムや貯水池を管理し、どの時期にどの程度水を貯め、放水するかを決定することが重要である。また、節水技術の導入とその普及を

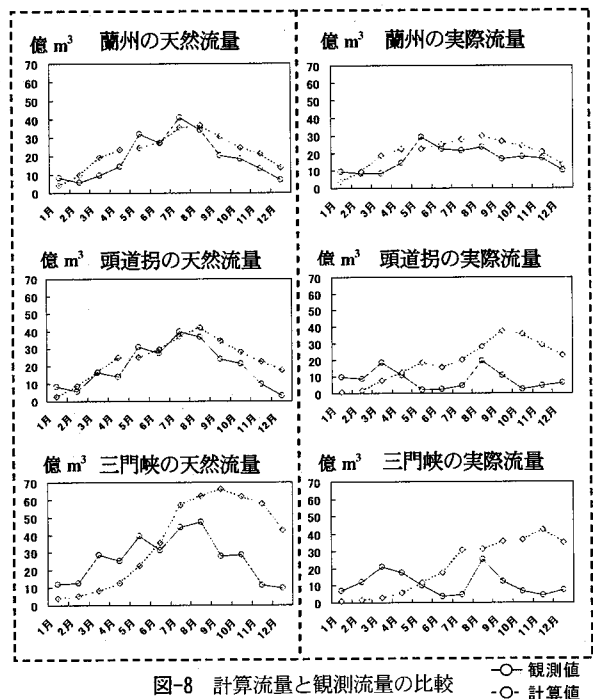


図-8 計算流量と観測流量の比較

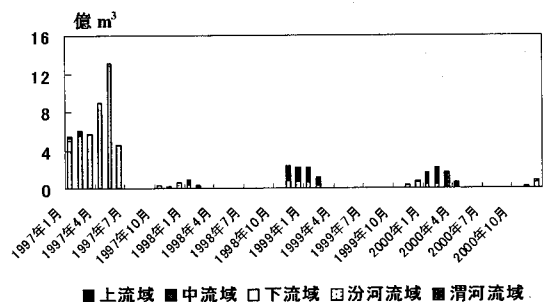


図-9 流域別、月別の不足量

啓蒙し、配分目標を達成するための具体的な方法を示す必要がある。さらに、配分手法には、水供給と水需要の双方に主眼をおき、季節の変化を考慮することが望まれる。そのため、本研究では、このような具体的な対策を実行するために必要な削減の目安として、不足量を月単位において算出する。ここで不足量とは、各都市の耗水量に対する水資源量（ここでは、水資源量を各都市内の水資源量と上流からの流入分の和として記す）の不足分、つまり実際流量がゼロ未満になる量で表される（図-5～図-7の枠線丸棒）。結果を図-9に示す。この結果、1997年には黄河流域では、42.43億 m^3 の水が不足し、特に1月から6月にかけて下流域で悪化する。しかし、1997年以降においては全く不足量が発生していないことがわかる。また、支流域においては慢性的な水不足の傾向にあり、10月から翌年の3月にかけて不足量が発生する。しかし、ここで得られた値は、流域全体で年間およそ200億 m^3 とも言

われる⁹⁾必要生態水量が含まれていないため、実際にはさらに厳しい削減が求められる。

4. まとめ

本研究では、黄河流域における水資源需給の時間的・空間的な特徴を、月別・県市別で表わすことによって、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。また、この枠組みを用いることによって、1997年から2000年までの水資源需給の構造を再現し、断流現象などの水資源需給アンバランスが発生するメカニズムを考察した。さらに、このアンバランスの量を不足量として表わすことによって、対策に必要な削減の目安として評価した。このような流域全体における水資源需給の特徴と削減目標を示すことによって、黄河水資源管理の議論に貢献することが本研究の目的であった。

最後に、改善すべき課題をまとめる。第1に、簡略化した水資源量の推計の改善と地表水と地下水の水循環フローの解明である。また、これに関連して、ダムオペレーションなどの人為的な操作を把握する必要がある。特に、1999年10月から水門閉鎖貯水を開始した黄河下流の小浪底ダムは、土砂流出・堆積を防止し適正な水の流出を管理する目的で建設され、これが断流の緩和に関係したとも考えられる。しかし、現時点において、このような情報はほとんど公表されていない。そのため、日中共同の黄河研究プロジェクトなどで進められている分布型水文モデルの開発⁹⁾⁻¹²⁾の結果を参考とし、本モデルの調整を行なっていきたい。第2に、地域ごとの作物種の特定とその生長に合わせた水需要パターンの把握である。これについては、方^{34), 37)}の研究のように、リモートセンシング技術を用いて、作物種の特定やその蒸発散量の推計が進められている。しかし、地域ごとの詳細な作物種などの把握には、統計書類や公報類などの併用が必要であり、これら公表データの空間精度に頼らざるを得ない。また、ここで得られる結果はあくまでも作物の要求水量であり、実際の観測された水の消費量とは異なる。そのため、こうした補正には、灌漑区での調査の結果¹³⁾⁻¹⁶⁾を反映する必要がある。第3に、本研究で推計した不足量をどのような手段で調整していくかを考える必要がある。これら不足量の調整には、水価格、計画的配分、水利権の売買といった手段が考えられるが、今後は、これら需給バランスを調節できるモデルの開発を目指す²⁰⁾。

謝辞：本研究は、独立行政法人：科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業のプロジェクトである「黄河

流域の水利用・管理の高持続性化」と、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」の一環として行われたものである。記して謝意を表す。

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.
- 3) 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.
- 4) 席家治：黄河水資源, 黄河水利出版社, 1996.
- 5) 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, 中国黄河水利委員会.
- 6) 大坪国順, 王勤学, 劉昌明：黄河下流域における断流と塩類化の問題, LU/GEC プロジェクト報告書VI－中国における土地利用変化のメカニズムとその影響に関する研究－, pp. 242-248, 2000.
- 7) 汪恕誠：努力推進水資源可持續利用为全面建設小康社会作出貢獻, 全国水利庁局長会議上の演説, 2003.
- 8) 王亜華：对黄河連續5年不断流及断流工作評估, 人民黄河, Vol.27, No. 4, 2005.
- 9) Xu, Z., K. Takeuchi, H. Ishidaira, and X. Zhang : Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach, Water Resource. Mgmt., 16, 239-261, 2002.
- 10) 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, 第45巻, pp. 139-144, 2001.
- 11) Yang, D., S. Herath, and K. Mushiakhe : A Hillslope-based Hydrological Model Using Catchment Area and Width Functions, Hydrological Sciences Journal, 47(1), pp. 49-65, 2002.
- 12) Yang, D., C. Li, H. Hu, Z. Lei, S. Yang, T. Kusuda, T. Koike, and K. Mushiakhe : Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data, Water Resour. Res., 40, W06502, 2004.
- 13) Watanabe, T., K. Hoshikawa : 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.
- 14) 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 2004 年度総会・研究発表会, 2004.

- 15) Hoshikawa, K., T. Nagano, S. Donma, T. Watanabe, Y. Fukushima : Application of Irrigation Management Performance Assessment Model (IMPAM) to the Lower Seyhan Irrigation Project, ICCAP-Cappadocia Workshop 2004, pp. 93-96, 2004.
- 16) Hoshikawa, K., T. Watanabe, Y. Fukushima : Water Balance Modeling of Large Irrigation Districts in the Yellow River Basin, 2nd International Workshop on Yellow River Studies, pp. 10, 2004.
- 17) 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*, Vol. 1-4, 2001.
- 18) 銭正英, 張光斗他 : 中国可持續發展水資源戰略研究報告集, Vol. 1~9, 中国水利水電出版社, 2001.
- 19) OKAMURA, M., A. ONISHI, H. IMURA : Water Resources Supply and Demand Forecast in Yellow River Basin, 2nd International Workshop on Yellow River Studies, pp. 137-140, 2004.
- 20) 井村秀文, 大西暁生, 岡村夷奈, 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, Vol. 33, pp. 477-485, 2005.
- 21) 大西暁生, 方偉華, 白川博章, 井村秀文 : 黄河流域の月単位における県市別水資源需給モデルの構築に向けた基礎的研究, 環境科学会 2005 年会講演集, pp. 256-257, 2005.
- 22) 大西暁生, 園田益史, 白川博章, 井村秀文 : 黄河流域の水資源需給空間構造の把握に関する研究, 平成 17 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 603-604, 2006.
- 23) 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.
- 24) 国家統計局農村社会経済調査総隊 : 中国県(市)社会経済統計年鑑 2001, 中国統計出版社, 2001.
- 25) 国家統計局城市社会経済調査総隊 : 中国城市統計年鑑 2001, 中国統計出版社, 2001.
- 26) 各省統計局編 : 青海省, 四川省, 甘肅省, 寧夏回族自治区, 内モンゴル自治区, 山西省, 陝西省, 河南省, 山東省統計年鑑, 中国統計出版社.
- 27) 劉昌明, 陳志愷 : 中国水資源現状評価と供需發展趨勢分析-中国可持續發展水資源戰略研究報告集-第 2 卷, 中国水利水電, 2001.
- 28) 石玉林 主編 : 中国農業需水与節水高效農業建設-中国可持續發展水資源戰略研究報告集-第 4 卷, 中国水利水電, 2001.
- 29) 許迪, 蔡林根, 茆智等 : 引黄灌区節水決策技術応用研究, 中国農業出版社.
- 30) 小島麗逸 : 中国経済統計・経済法解説, アジア経済研究所, 1988.
- 31) 中華人民共和国国家統計局 : 中国統計年鑑(各年版), 中国統計出版社, 1946-2001.
- 32) 朱曉原, 張学成 : 黄河水資源变化研究, 黄河水利出版社, 1999.
- 33) Stein, M.L. : Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging, Springer Series in Statistics, 1999.
- 34) 方偉華, 井村秀文 : Comparison of Empirical PET Estimation Methods in the Yellow River Basin, 第 31 回環境システム研究論文集, Vol.31, pp.217-225, 2003.
- 35) 1 : 100 万中国数値地図データ : 中国国家基礎地理情報センター.
- 36) 西安市水利局 : 西安市水資源公報, 1999-2001, 西安市水利局.
- 37) Fang, W., H. IMURA, F. SHI : Wheat Irrigation Water Requirement Variability (2001~2030) in the Yellow River Basin Under HADCM3 GCM Scenarios, 環境科学会誌, Vol. 19, No.1, pp. 3-14, 2006.

GRASP OF SEASONAL AND REGIONAL CHARACTERISTICS OF WATER RESOURCE SUPPLY AND DEMAND STRUCTURES IN THE YELLOW RIVER BASIN

Akio ONISHI, Hidefumi IMURA, Hiroaki SHIRAKAWA and Ji HAN

Rapid socio-economic growth in the Yellow River basin has led to chronic water shortage in the lower reach of the river. In order to properly manage the water resources in a river basin, it is essential to consider various issues. For example, how can one best balance the basin's overall supply of and demand for water resources? How can one maintain a good grasp of changes in water supply and demand of each sub-region and sector (agriculture, industry, and domestic)? How can water be allocated efficiently to each sub-region and sector, while considering equity between them. This study analyze the water resource supply and demand in the overall basin, by presenting a spatial diagram of the monthly supply and demand structures of the region's water resources, from upstream to downstream. To be concrete, serious shortage of water in 1997 is reproduced by using the proposed framework. Also, standard of measures is shown by amount of water supply and demand imbalance.