

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

井村秀文¹・大西暁生²・岡村実奈³・方偉華⁴

¹正会員 工博 名古屋大学教授 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)

²学生会員 環修 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非会員 学術博 松阪市立中部中学校 (〒515-0054 三重県松阪市立野町 1344)

⁴正会員 環境博 科学技術振興機構 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

黄河流域は、近年の急速な経済成長の結果、慢性的な水不足にある。こうした条件下に置かれた流域の水資源管理のためには、流域を構成する各地域・各セクター（農業、工業、生活）の水資源需要の変化を把握しつつ流域全体の需給バランスをいかに達成するか、地域間・セクター間の公平性を考慮しつつ各地域・各セクターにどのように水を配分するのが物理的・経済的に効率的かといった問題を分析する必要がある。このため、上流から下流へと配置された県市を基礎単位として、地域ごとの水資源需給バランスを空間的ダイアグラムとして表示することにより、流域全体の水資源需給を把握分析する手法を提示する。また、これを用いて、断流現象が観測された1997年とそれが観測されなかった2000年について、流域全体の水資源需給の空間構造を分析する。

Key Words: Yellow River basin, water resources, water demand, water supply, hydrology

1. はじめに

黄河流域のあらゆる生産活動と人間生活は、黄河という1つの川の水資源に大きく依存している。近年は、特に人口増加、灌漑農業の発達と工業化、都市化の進展によって水需要は増加する一方である。このような状況において1997年に発生した深刻な断流は、中国の首脳部を震撼させるものであった。この後、中国政府は水利部を中心に多方面にわたる総合的な水資源管理政策を打ち出した¹⁾。その結果、1999年以降、2005年現在まで顕著な断流は発生していない²⁾。この期間、流域全体、特に中流域の農業用水使用についてきめ細かな管理と制限を課したことで需要が抑制され、断流は防止できたというのが中国政府の説明である³⁾。しかし、経済成長による水需要の増加は今後も継続すると考えられるため、流域全体の水資源不足は全く解消されておらず、流域水資源管理のより一層の合理化が求められている。このためには、地域別、セクター別の需給バランスを把握し、水資源の合理的・効率的な利用のための対策を分析する必要がある。これは、黄河断流の原因解明にもつながる。

広大な黄河流域を対象とした水資源需給バランスに

関する研究としては、長期的将来にわたる水資源需給が地域の経済社会にどのようなインパクトをもたらすかを分析した世界銀行の報告書（2001年）がある⁴⁾。また、中国工程院は、「中国の持続可能な発展のための水資源戦略研究報告書」全9巻（2001年）を発表している⁵⁾。中国の水資源政策に関わる多くの専門家の知見を結集したこれらの報告書が既に存在するものの、その分析の基礎となったデータの多くは外部者には入手困難であり、また、用いた手法やモデルの細部も外部者には不明の部分が多い。このため、著者らは、上記2つの報告書を参考としつつ、中国で公開されている各種統計書や公報類のデータを基に水資源需給将来予測モデルの構築を行っている⁶⁾¹¹⁾。ここでは、公開されたデータを用いることによって、モデルの内部構造の透明性を可能な限り確保することとしている。しかし、著者らの従前の分析方法にはいくつかの欠陥があった。第1は、需要と供給をそれぞれ別に分析した上で両者のギャップを見る方法を探っていたことである。この方法では、農工業の生産拡大や都市化とともに需要だけが一方的に拡大する結果となってしまうので、需給調整のフィードバック機構をどう取り入れるかが課題である。第2は、水資源のカスケード的利用

を取り扱っていないことである。黄河流域の水資源は、上流から下流へ、またある用途から次の用途へと、カスケードを形成しており、特に工業用水と生活用水は、適正な排水処理システムを導入することによって再利用が可能となる。流域内における水資源の循環・再利用・カスケードの利用という観点から言えば、上流域の水資源は、下流域の水資源よりも高い利用ポテンシャルを持っており、水資源の効率的利用を考える場合にはこの点を考慮する必要がある。第3は、耗水量の取り扱いの不備、すなわち、取水した水のうちのどれだけが蒸発等によって減耗し、残りどれだけが再利用できるかを十分に考慮していなかったことである。

本論文では、以上のような欠陥をできるだけ改善し、流域全体の水資源需給の空間的構造の実態を可能な限り再現することをめざす。このため、黄河流域全体について、県市を基礎単位として、各県市でどれだけ取水され、どれだけが河川に還元されたのかわかるように、上流から下流への水資源カスケードを明示的に扱う分析フレームを提示する。また、流域全体での需給バランスが実現するように調整する。これによって、ある地点の水需給ギャップが下流の各県市の水需給バランスに及ぼす影響が把握され、上流から下流までの各地域・各セクターでの水資源消費と河口近くでの水不足の関係を考察することを可能とする。具体的には、深刻な断流現象が観測された1997年とそれが観測されなかった2000年の水資源需給の空間構造を再現し、両者を比較検討する。

2. 水資源需給空間構造の把握

(1) 概要

水資源需給は自然システムと社会システムが一体となった1つのシステムとして、需要・供給、利用・循環が相互に関係するフィードバック構造を形成している。このシステムを分析し、現実を再現するにはさまざまな課題があるが、本論文では次の要件を満たすことに重点を置く。

- ①流域全体を対象とする。
- ②工業、農業、生活の3セクターの需給構造を考慮する。
- ③社会経済データと自然データの時間的・空間的な整合性を確保する。
- ④流域の上流における需給バランスの変化が下流に波及する影響を分析可能にする。
- ⑤データの制約に対して対処できるようにする。

水需要は、個々の地域の経済成長、都市化、土地利用、人口増大等の社会経済因子によって支配されるが、こうした社会経済因子に関するデータは行政単位で整備されている。したがって、水需要の地域的特性を分

析するには、できるだけ小さな行政単位を基礎単位とすることが望ましいが、中国の各種統計で共通的に扱われる最小行政単位は県ないしは市である。そこで、本論文では県市を基本単位とする。

各県市を1つのボックスとし、その領域内部での空間的分布は無視する。県市ごとに、水資源量と、生産・経済活動にともなう取水量および耗水量を推定する。次に、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、河道に沿って各県市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考慮できるようにする。次に、各地域、各セクターの水需要と需給バランスを1つのチャートに表示する。これによって、流域全体の地域別、セクター別の水需給構造とともに流域全体の需給バランスを全体的に把握、分析することを可能にする。

本論文では、分析の第一歩として、年間での水需給バランス分析の結果を述べる。この分析範囲では、年間の需給バランスだけに着目するので、時間変化をともなう降雨流出などのプロセスを明示的に取り扱わなくてすむ。しかし、実際の水不足や断流現象は、特定の季節、特定の地域で発生するので、それを再現するには、季節別、月別での流域全体の水資源収支を分析する必要がある。そのためには、季節別、月別の降雨量、蒸発散量、灌漑用水需要量などとともに、地表水・地下水の流出解析が必要となるが、これは次の課題として取り組んでいる。

(2) 水資源量、耗水量

水資源量および耗水量の概念は、中国で一般的に使用されている定義に従う。すなわち、ある地域の水資源量とは、当該地域内での降水による地表・地下への流出総量（地域外からの流入量を含まない）を意味する¹²⁾。それは、降雨量から自然蒸発散量を差し引いたものである。人為的な水利用（取水）がなく、かつ地下水量を一定とすれば、ある期における水資源量は当該地域から河川への流入量に一致する。しかし、実際には、降雨から河川への流入までには時間遅れがある。また、地表水資源量と地下水資源量には重複があるので、水資源量の算定にはその分を差し引く必要がある。

他方、耗水量とは、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である。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、取水量の一部は蒸発等によって消失し、残りは河川水あるいは地下水に還元される。

ここで、黄河流域の地下水データは一部の地域について散見されるだけであり、流域全体について河川水と地下水を分離した定量的な分析を行うことはまだ困難な

情況にある。このため本分析では、河川水と地下水を区分せず、水資源量から耗水量を差し引いた分が河川水の増分になるとする。すなわち、地下水位は一定と仮定しており、流域全体の分析枠組みの全貌を把握するための出発点として、このような簡略化を行う。

(3) 対象地域の定義と水資源カスケードの設定

水需給分析における1つの技術的問題は、河川流域に関する集水域をもととした気象、土地利用等の自然地理データと、行政単位で整備されている社会経済活動に関する統計データとのオーバーレイ解析である。集水域の地理的範囲を示した図と県市の行政区界の図とを重ね合わせて黄河流域の対象範囲を定めるが、両者は完全には一致しない。また、1つの県市が黄河以外の別の河川流域にまたがる場合がある。ここでは、ある県市の一部が黄河の本流、支流で形成される流域のどこかを含めば、その県市は黄河流域に属するものとして扱う。その結果、全体で305県市(7つの省都を含む55の市および250の県)が含まれる。なお、花園口(図-1)より下流の黄河は天井川になっており、ここに流入する河川はない。このため、下流の流域は細い带状で定義される。しかし、こうして定義された流域の外に、灌漑用水を黄河に依存する広大な地域(引黄灌漑区)がある。

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)の流域から構成されている。県市同士の水資源カスケード関係を分析するには、河道に沿った相互の位置関係(2つの県市のいずれが上流側、下流側にあるか)を決定する必要がある。そのためには、ある県市から流出した水が、河川のどの位置に流入するかを定める必要がある。これは、正確には、地形(標高データ)、地下水脈等の情報によって決まるが、本分析では、当該県市の中心点から一番近い本流または支流の地点を流入点とみなす。また、流域全体の大局的分析を目的として、支流としては汾河と渭河の2つのみを取り上げる。

本論文におけるカスケード設定の方法を図-1に示す。各県市の中心位置(X_0, Y_0)から、その県市が属する流域の河川(本分析においては黄河本流、汾河、渭河のいずれか)に最も近い点を(X^*, Y^*)とする。当該河川の上流始点から(X^*, Y^*)までの河道距離を L とし、黄河本流、汾河、渭河それぞれについて L が短い順に並べ、上流から下流への位置関係とする。ただし、 L の値が等しい県市が何組か存在する場合は(X_0, Y_0)と(X^*, Y^*)の距離 d の大きい方を上流であるとする。

この扱いは、対象とする河に近接する県市については問題ないが、河川から遠く離れた県市については不正確となる。正確な解析のためには、出来るだけ多く

の流域に区分した上で、地形等の情報も考慮して修正する必要がある。しかし、多くの支流に分割した場合には流域全体の特徴がかえって把握しにくくなるという問題もある。本論文では、分析枠組みの概要を提示することに重点を置くこととして、このような簡略化した方法を採用する。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している(図-1)。

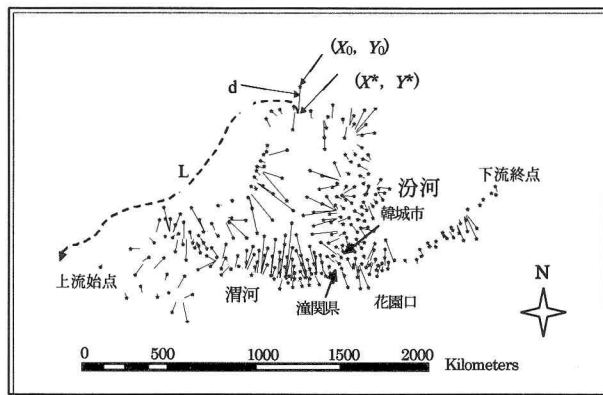


図-1 県市と河道の位置関係の設定

(4) 水資源量の推計

各県市における水資源のフローを概念図としてまとめたのが図-2である。

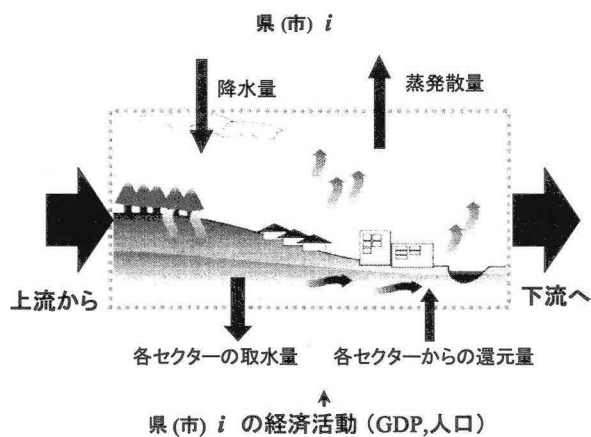


図-2 県市の水資源フロー

水資源量(降水量から蒸発散量を差し引いた値)については、中国水資源公報や黄河水資源公報において中国全体の省別あるいは主要河川流域別の値が公表されている^{12, 13)}。しかし、省内の県市別の水資源量は不明である。また、省別のデータには黄河流域以外の値も含まれている。このように県市単位の水資源量を統

計画から得ることはできないので、水資源公報による流域全体の水資源量を各県市の降雨量の比で按分して推計するという便法を用いる。降雨量については、流域内 190 の観測所の降雨量データを Kriging 補間法¹⁴⁾により点データから面データに変換し、県市ごとの値を推計する。ちなみにこの方法では、1997 年、2000 年の流域全体の水資源量はそれぞれ 478.5 億 m³、2000 年においては 565.3 億 m³となる¹³⁾。

水資源量推計の正統的な方法は、降雨量および蒸発散量の推計によって求めるものであり、著者ら¹⁵⁾も既に、Penmann-Montaitth 法などを用いて、衛星情報による土地利用データと観測点気象データから流域の可能蒸発散量の面的分布を計算した。しかし、可能蒸発散量から実蒸発散量を推計する方法はまだ確立していない。そこで、可能蒸発散量に何らかの係数を乗じて実蒸発散量とする便宜の方法が考えられる。すなわち、

$$\text{水資源量} = \text{降雨量} - \text{可能蒸発散量} \times \text{係数}$$

とする方法であるが、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、地域ごとの気象条件等の差異を反映した係数の設定は困難である。このため、本分析では、上記のような簡略化した方法を採用した。この点については、分布型水文モデルの開発研究の成果を待って改善することとしたい¹⁶⁻¹⁹⁾。

(5) 水資源需要量の推計

水資源需要は、各セクターのアクティビティを表す示量変数（たとえば、灌漑面積、工業生産額、都市人口など）と単位アクティビティに必要な水資源需要量、すなわち「原単位」（たとえば、灌漑面積当たりの灌漑用水量（灌漑定数）、単位工業生産額当たりの工業用水量、都市市民 1 人当たり生活用水量など）の積和によって決定される。示量変数については、各種統計書の実績値を用いるが、県市レベルでは公開されていないものがあり、これについては省レベルのデータ等から推計する。この分析フレームを図-3に示す。推定で値を求めた項目は図-3において実線の囲いで示す。

各県市における水資源需要量を、生活・農業・工業のセクターごとに推計する。1997 年と 2000 年について県市レベルのデータベースを作成した方法を以下に示す。なお、全県市のデータを示すことは紙数の制限から困難なので、流域全体についての主要なデータ（実績値あるいは推定値）を 1997 年と 2000 年についてまとめ、表-1 に示す^{12), 13), 20), 21)}。

a) 社会経済マクロフレーム

人口と GDP は、各種統計書から 1997 年と 2000 年

の実績値を使用する^{20), 21)}。データ項目によっては、対象とする地域、年によって統計書から実績値を得ることができないので、推計が必要である。たとえば、工業生産額等の推定には、県市の GDP（総生産値）に占める 1 次、2 次、3 次各産業の比率が必要となる。2000 年の産業比率については、「中国県（市）社会経済統計年鑑」と「中国城市統計年鑑」より県市毎のデータ利用できるものの、前書の発行が 2000 年からであるので、

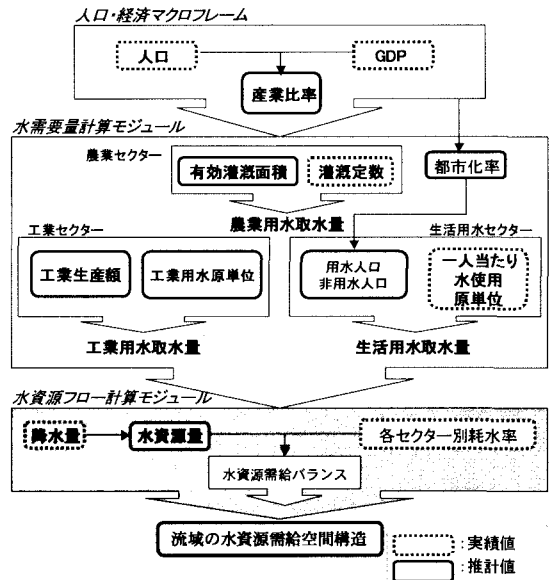


図-3 水資源需給バランス分析ツールのフレームワーク

表-1 水需要量推計に用いたデータ

		1997年	2000年
人口		万人	11,034
GDP		億元	5,715
産業比率	1次	%	13.6
	2次		49.6
	3次		36.8
有効灌漑面積*		万ha	495
灌漑定数	山 西	m ³ /ha	3,225
	内 蒙 古		7,305
	山 東		3,780
	河 南		4,620
	四 川		5,790
	陝 西		4,275
	甘 肅		9,795
	青 海		9,255
	寧 夏		24,720
生活用水 使用原単位	都市 (上水道あり)	ℓ/人/日	130
	農村 (上水道なし)		54
用水人口		万人	2,161
非用水人口			8,873
工業総生産額		億元	9,189
工業用水原単位		m ³ /万元	93

1997 年については推定が必要である。このため、以下の推定式を用いた¹⁰⁾。

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

ただし、
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

である。

b) 生活用水

生活用水量は、1 人あたり水使用量 (ℓ/日・人) に人口を乗じて求める。中国では、都市の市街地においては、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、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く、両者の原単位を区別する必要がある。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。水使用原単位については、文献 5, 12 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直接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^{9), 10)}。

c) 農業用水需要量

農業用水量は、

$$\text{農業用水量} = \text{灌漑定数} \times \text{有効灌漑面積}$$

で計算される。ただし、灌漑定数は単位面積当たりの灌漑用水量である。なお、ここでの農業用水は灌漑用水のみで、自然降雨 (天水) による分は計上されていない。

有効灌漑面積 (灌漑区の全面積ではなく、その中で実際に灌漑が行われている区域の面積) に関しては 1949 年以後、各省別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、1979-1991 年についてはデータが公表されていたにも関わらず、1992 年以降はデータが公表されていない²¹⁾。このため、1991 年の実績をもとに、各県市が所属する省の有効灌漑面積の

増加率によって 1997 年、2000 年の値を推計する。

一方、灌漑定数については、「水資源公報」(水利部) に省別データが発表されているが、黄河流域に属する地域だけを対象としたデータではない¹²⁾。同じ省内の県市でも降水量などによって灌漑定数に違いがあると考えられるが、データが存在しないため、その県市が属する省の水資源公報の値を当該県市の灌漑定数として採用する。また、黄河流域の水資源用途のデータを参照するときは、引黄灌漑区を含むかどうかに注意が必要であるが、本論文では、引黄地区の農業用水を含めることとする。ただしデータの制約から、灌漑面積は 1990 年の引黄区有効灌漑面積実績値で一定とし、その灌漑区が属している省の当該年の灌漑定数で推定した²³⁾。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取水するものとする。

d) 工業用水

工業用水量は、単位工業生産 (1 万元) 当たり水使用量 [m^3 /万元] (以下、工業用水原単位) に工業生産額 [万元] を乗じ求める。県市ごとの工業生産額は 2000 年については実績値の報告書が存在するが、1997 年については城市のデータしか得られなかったため、以下の回帰式で推計した^{6), 20), 21)}。

①市区：

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

②県 (地区-市区)：

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

県市毎の工業用水原単位については、著者ら⁶⁾ が以前に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定した。

(6) 水資源需給バランス

以上で推計した水資源量と水需要量にもとづいて各県市の水資源需給バランスを計算する (図-2)。そのために、様々な取水目的に利用された後に蒸発散によって消失する耗水量の推定と必要生態水量の設定を行う。

a) 耗水率

上記の方法によって農業・工業・生活の各セクターの需要量が計算される。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かの推定が必要である。このためには、使用量のうちの減耗量の割合 (水資源として回収されない分の割合)、すなわち「耗水率」のデータが必要である。生活水の耗水率については、例えば下水道普及率などの情報をもとに県市ごとにある程度は推計できる。しかし、すべての県市についての

情報を集めることができなかったため、黄河流域を上流から下流まで8つの分区に分けた「黄河水資源公報2000」のデータから耗水率を設定した¹³⁾。それぞれの県市の各セクター（農業、工業、生活）の耗水率は、属する分区の値とした。使用した値を表-2に示す。

以上を整理すれば、本分析における各セクターの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。水資源量から耗水量を差し引いた残りが水資源として河川に還元され、下流で利用可能となる。ただし、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。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はゼロとして処理している。現実には、不足量が発生した場合、それは地下水汲み上げによって処理されている場合が多く、それは地下水位の低下になっているはずである。地下水の取り扱いに関するこのような問題点については、地域の実情をもっと詳しく調査し、分析に取り入れる必要がある。

表-2 黄河流域の分區別・用途別耗水率

耗水率	農業	工業	都市生活	農村生活
蘭州以上	0.77	0.61	0.58	1.00
～頭道拐	0.68	0.27	0.36	1.00
～龍門	0.96	0.69	0.63	1.00
～三門峽	0.88	0.53	0.58	1.00
～花園口	0.87	0.44	0.47	1.00
～利津	0.95	0.68	0.88	0.96
利津以下	1.00	1.00	1.00	1.00
黄河内流区	0.84	0.76	0.67	1.00

出典：黄河水資源公報2000から計算

b) 生態水量

水資源の用途としては、農業・工業・生活の各セクターに加えて生態系への配分があり、中国ではこれを生態水と称している。生態水の内容は多様で、都市樹木のための用水、清掃用水なども含まれるが、黄河の場合にはダムでの土砂堆積を防ぐために河川流量を確保する必要があり、これが生態水の大部分を占める。本論文では、水資源量から耗水量を差し引いた量が河川に還元されて河川流量を構成するものとみなし、その量と必要生態水量の関係によって水資源需給バランスの逼迫度を分析する。ここで、黄河の必要生態水の総量は年間210～260億 m^3 といわれている²⁴⁾。生態水の必要量が空間的にどう分布するかは厳密な議論は、ダムの位置とダム水の放流スケジュールに左右される。本分析では、河口近くでの河川水量と生態水のバランスに関心の中心をおくこととして、河口での年間の生態水必要量を210億 m^3 と仮定し、上流からの累積量が

これに一致するように上流から均等に各県市に割り振る⁹⁾。ここで生態水の必要量については、中国国内でも議論が多いところであり、その空間的配分方法は今後さらに検討する必要がある。

3. 水資源需給バランスの評価

(1) 1997年と2000年の需給バランス

上記の分析枠組みによって、1997年と2000年における水需給構造を再現したのが図-4である。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、需要量（農業、工業、生活の各セクター別）の空間分布が表示されている。これによって、流域のどこから水資源が由来し、どの地域のどのセクターで消費されたかが同時に把握できる。各県市をやや強引に河道に沿って一次的に配置したのは、全体をこのように一望できるようにするためである。

この図から、①水資源量の多くが蘭州より上流で供給されていること、②水需要の7割は農業用水であり、銀川や河套平原、引黄灌漑等の大型灌漑地区の県市における需要量は水資源量を大きく上回っていること、③西安、太原などの大都市の水需要が突出して大きいこと、④1997年は2000年に比べ、流域全体にわたって水資源量が少なく、黄河本流の中流域での農業用水量が大きかったことなどがわかる。

1997年と2000年の流域全体のセクター別水需要の内訳を図-5に示す。

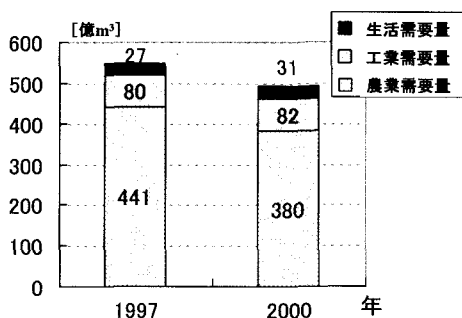


図-5 1997年と2000年における水需要内訳

(2) 必要生態水量から見た需給バランスの評価

水資源量から耗水量を差し引いた分が河川に流入するとして、その分を上流から累積させることによって河道に沿った各地点の年間流量を評価することができる。この値が0になったときに断流となる。ただし、本論文では年間の値で議論しているため、河口でも正の流量となっている。しかし、1997年の場合、下流で

は流量が必要生態水量を下回っている。これは、土砂を排除するために必要なダムからの放流が困難になった事態を示している。ここで、必要生態水量がどの程度確保されているかを示す指標として、河道に沿って、県市ごとに、必要生態水保持率 ε を次式で定義する。

$$\varepsilon = \text{河川流量} / \text{必要生態水量}$$

ただし、河川流量が必要生態水量を上回れば $\varepsilon = 1.0$ とする。1997 年と 2000 年について、 ε の空間分布を見たのが図-6 である。1997 年は、水資源量自体が中・下流で少なく、農業用水量が大きかったため、汾河、渭河の支流と本流の下流域で ε が 1.0 を下回った。黄河本流については、 ε の値が 0.75 以下の地域において断流が観測されている。これに対して、2000 年においては、河口以外どこでも ε は 1.0 であった。ただし、同じ ε が 1.0 以下であっても、それより上流にある渭河および汾河とでは中流と下流の間に大きなダム（三门峡ダム、小浪底ダムなど）を擁して土砂堆積のために放流しないといけないう黄河本流と事情が異なる。

4. まとめ

本論文では県市を基礎単位として、上流からの取水・耗水・還元の水資源カスケードを明示的に扱いながら水資源需給の空間的構造を分析するための枠組みを提示した。また、1997 年および 2000 年の水資源需給構造の再現を試み、その空間的構造を図示した。ここで示された結果の多くは既知の事実であるが、水需給の空間的構造を河道に沿ったダイヤグラムで表示することによって、流域全体の需給構造が視覚的にわかりやすく表示できるようになった。流域全体の需給バランス構造をこのように表示することによって、水管理政策の議論に貢献することが本研究のねらいである。

最後に、本研究の改善課題をまとめる。第 1 は、年間バランスではなく、さらに細かい時間単位、つまり季節別、月別単位での時間変化を取り入れたシミュレーションの実施である。このため、月別の降水量、農作物の生長パターンにあわせた蒸発散量などを考慮した解析を行っているところである。第 2 は、県市別水資源量の推計方法の改善である。特に、土地利用・被覆データと気象データから可能蒸発散量および実蒸発散量を推計する方法について改善が必要であるが、これについては、分布型水文モデルの開発等の関連研究の進展に期待したい。第 3 は、

河川流量データとの整合性の検証である。特に月別、季節別の流量データはダムの管理と密接に関係するが、そうしたデータはほとんど公表されていない。しかし、最近いくつかの日中共同の黄河研究プロジェクトにおいて分布型水文モデルが開発されているので、それらの研究結果¹⁶⁻¹⁹⁾で得られた流量データとの整合性を検証していく予定である。またその関連で、地下水ストックの役割を調査する必要がある。断流の発生している本流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、渭河や汾河流域では、西安市における利用水量の 7 割が地下水であるように、地下水への依存が大きい。そのため、渭河や汾河流域での需給逼迫は、断流ではなく、地盤沈下の形で問題を引き起こしている。第 4 の課題は、今後予想される流域の社会経済フレームの変化を考慮した将来予測の実施である。潜在的に増大一方の需要と供給をどのようなメカニズムで均衡させるかが課題である。このため、価格による調整、計画的配分、水利権の売買といった手段による需給バランス調節を取り入れたモデルの構築をめざしている。

謝辞

本論文は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（CREST）「黄河流域の水利用・管理の高持続性化（研究代表者：楠田哲也）」の一環として行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中国水利年鑑編集委員会：中国水利年鑑 2001，中国水利水电出版社，pp.236，2001。
- 2) 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。
- 3) 王亜華：対黄河連続 5 年不断流及断流工作評価，人民黄河，Vol.27, No.4，2005。
- 4) 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。
- 5) 錢正英，張光斗他：中国可持續發展水資源戰略研究報告集，Vol.1～9，中国水利水电出版社，2001。
- 6) 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。
- 7) 三枝裕司，金子慎治，陳晋，井村秀文：黄河流

- 域の水資源需給に関する基礎的研究, 環境システム研究, Vol.26, pp.501-506, 1998.
- 8) 金子慎治, 三枝裕司, 松本亨, 井村秀文: 中国の長期的水需要予測, 第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.315-322, 1998.
 - 9) 三枝裕司, 金子慎治, 陳晋, 井村秀文: 中国黄河の流域水資源管理の課題, 環境システム研究, Vol.27, pp.127-133, 1999.
 - 10) 小澤亮輔, 小川茂, 方偉華, 井村秀文: 中国黄河流域の水資源需要将来予測に関する研究, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.31, pp.295-302, 2003.
 - 11) 金子慎治, 近江健治, 三枝裕司, 井村秀文: 黄河流域における水資源賦存量と水需要の地域バランス, 第 28 回環境システム研究論文発表会講演集, Vol.28, pp.281-286, 2000.
 - 12) 中華人民共和国水利部: 中国水資源公報, 1997-2000, 中国水利部.
 - 13) 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.
 - 14) Stein, M.L.: *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*, Springer Series in Statistics, 1999.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 張永昌, 楊文海他編: 黄河下游引黄灌溉供水与泥沙处理, 黄河水利出版社, 1998.
 - 24) 席家治: 黄河水資源, 黄河水利出版社, 1996.

Water Resource Balance in Yellow River Basin Based on the County Level Water Use Data

Hidefumi IMURA, Akio ONISHI, Mina OKAMURA and Weihua FANG

A multitude of economic activities in the Yellow River basin in China depend on the finite water resources supplied within that watershed. Meanwhile rapid economic growth, particularly in recent years, has led to chronic water shortages in the middle and lower reaches of the river. To properly manage the water resources in a river basin that faces such conditions, 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 (in both the physical and economic sense) to each sub-region and sector, while considering equity between them. This study proposes a water resource management analysis framework to help ascertain and analyze the water resource supply and demand in the overall basin, by presenting a spatial diagram of the supply and demand balance of the region's water resources, from upstream to downstream, using counties and cities as the basic units of the model. In addition, using the proposed framework, this study analyzes the supply and demand structure of water resources of the entire basin, using data on the flow stoppages that were observed in 1997, but not observed in 2000.