

## 黄河流域の人間活動と水資源需給構造の把握に関する研究

大西暁生（総合地球環境学研究所）井村秀文（名古屋大学環境学研究科）

福寫義宏（総合地球環境学研究所）

### 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 580m<sup>3</sup> であり、これは世界平均の 6%、中国平均の 24% である<sup>1)</sup>。一方、流域の総水需要量は人口増加、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、近年では年間 300 億 m<sup>3</sup> を超えている<sup>2)</sup>。このような急速な社会経済成長を続ける黄河流域では、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。

本研究では、水資源量や各セクター（農業、工業、生活）の用水量を月単位によって推計する。さらに、水資源カスケード<sup>3)</sup>を利用することによって、上流から下流へ、またある用途から次の用途へと、流域内における水資源の取水・利用・排水・還元といった一連の水循環を構成する。これによって、黄河流域の季節ごとの水資源需給バランスを流域全体で把握することができ、また、ある地点の水資源需給ギャップが下流の各州市の水資源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が可能となる。本研究では、1997 年から 2000 年までの水資源需給の構造を再現し、断流現象が発生する時間的・空間的な特徴を考察する。

### 2. 水資源需給分析フレームの構築

#### 2.1 水資源需給モデルの概要

図-1 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、各州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、各州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。

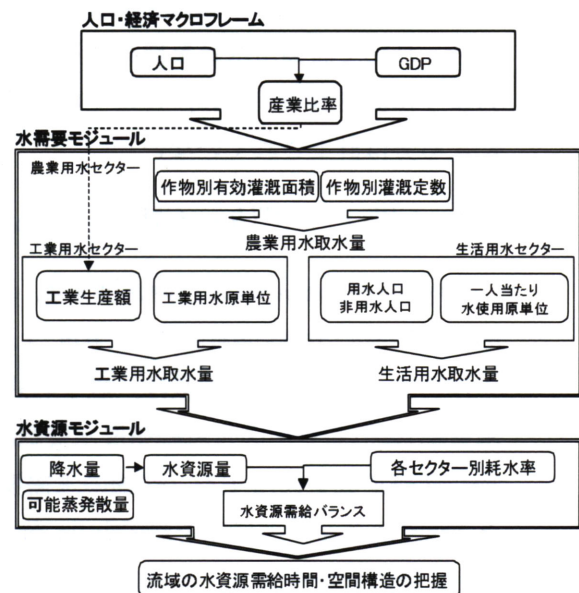


図-1 水資源需給モデルの構成

## 2.2 人口・経済マクロフレーム

### 2.2.1 人口, GDP

人口と GDP は、「中国県(市)社会経済統計年鑑」<sup>4)</sup>、「中国城市統計年鑑」<sup>5)</sup>、「各省統計年鑑」<sup>6)</sup>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、月ごとにおける人口と GDP は、年次間での変化率を用いて推計する。

### 2.2.2. 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。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。この推計式を用い、前項の人口と GDP から、各県市  $i$  の GDP (総生産値) に占める各産業の比率を推計する。

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

$y$ : 一人当たり所得 (GDP),  $\gamma_1$ : 1 次産業比率,  $\gamma_2$ : 2 次産業比率,  $\gamma_3$ : 3 次産業比率

## 2.3 水需要モジュール

### 2.3.1 農業用水量

本研究では、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。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。

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

$CIW$ (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

作物別、月別の灌漑定数は、以下の式を用いて推計する。作物別の灌漑定数は、「黄河水資源管理」や「中国可持続発展水資源戦略研究報告集第 4 巻」<sup>7)</sup>に記載されている省の作物別灌漑定数を代用する。作物の水需要パターンは、「引黄灌区節水決策技術応用研究」<sup>8)</sup>と Yang, D. et al.<sup>9)</sup>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。

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

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

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)

### 2.3.2 工業用水量

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] を乗じて求める。各県市  $i$  の工業生産額  $Y_i$  の推計には、「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。

$$\textcircled{1} \text{市区} : Y_i = 3.0986 \times GDP_i \times \gamma_{2,i} \quad (5)$$

$$\textcircled{2} \text{県(地区一市区)} : Y_i = 3.6751 \times GDP_i \times \gamma_{2,i} \quad (6)$$

県市ごとの工業用水原単位については、筆者ら<sup>3)</sup>や国際開発銀行<sup>1)</sup>が採用した方法によって、全国や省、流域、都市レベルで存在する実績値を県市ごとに用いて推計する。

各県市の工業用水量は、以下の式のようなのである。

$$WI_i = \sum_k (Y_{i,k} \times w_{i,k} \times f_{i,k}), \quad Y_{i,k} = Y_i \times r_{i,k} \quad (7)$$

$WI_i$  : 県市  $i$  の工業用水量,  $Y_{i,k}$  : 県市  $i$  における産業  $k$  の工業生産額,  $w_{i,k}$  : 県市  $i$  における産業  $k$  の工業用水原単位,  $f_{i,k}$  : 県市  $i$  における産業  $k$  の回収率,  $r_{i,k}$  : 県市  $i$  における産業  $k$  の生産比率

### 2.3.3 生活用水量

全生活用水量 ( $DW$ ) は、各県市  $i$  において、以下の様に表される。

$$DW_i = Piped\_DW_i + NonPiped\_DW_i \quad (8)$$

上水道有りの生活用水量 ( $Piped\_DW$ ) :

$$Piped\_DW_i = Piped\_dw_i \times Piped\_Pop_i, \quad Piped\_Pop_i = Pop_i \times S_i \quad (9)$$

上水道無し生活用水量 ( $NonPiped\_DW$ ) :

$$NonPiped\_DW_i = NonPiped\_dw_i \times NonPiped\_Pop_i, \quad NonPiped\_Pop_i = Pop_i' \times S_i' \quad (10)$$

$Piped\_dw_i$  : 上水道有りの 1 日 1 人当たり水使用量,  $Piped\_Pop_i$  : 上水道有りの人口,  $Pop_i$  : 都市非農業,  $S_i$  : 都市非農業人口に対する用水普及率,  $NonPiped\_dw_i$  : 上水道無しの 1 日 1 人当たり水使用量,  $NonPiped\_Pop_i$  : 上水道無しの人口,  $Pop_i'$  : 都市農業人口,  $S_i'$  : 都市農業人口に対する用水普及率

ここで、都市非農業・都市農業人口の値は年間の値であるため、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。

## 2.4 水資源モジュール

縣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。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。しかし、こうした詳細なデータの入手は難しく、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 補間法により点データから面データに変換し縣市ごとの降水量を推計する。ここで、縣市ごとの水資源量を推計するため、縣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」<sup>10)</sup>に記載されている省別の水資源量と回帰する。ここで得られた回帰式を用い、各縣市、各月別の水資源量を推計する。

## 2.5 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。本研究では、1998 年と 1999 年は「黄河水資源管理」<sup>2)</sup>を、2000 年は「黄河水資源公報」<sup>11)</sup>を、1997 年は「黄河水資源管理」の 1998 年の値を用いる。ここで、耗水率は取水量に対する耗水量の比で定義できるため、以下の様に表される。

$$\text{耗水率} = \frac{\text{耗水量}}{\text{取水量}} \quad (11)$$

以上を整理すれば、本研究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量が河川に還元され、下流で利用可能な水資源となる。

## 2.6 水資源カスケード

中国国家基礎地理情報センターの 100 万の 1 データ<sup>12)</sup>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縣市行政界を合わせ、各縣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、それぞれの集水域の上流から下流への順序(河道)に合わせ縣市の順番を決定する。

本研究では、流域全体の大局的分析を目的として、8 大支流を本流とは別に考える(図 2 参照)。なお、支流から本流への流入については、それぞれ黄河本流に合流する縣市で交わるものとする。

上記までの方法をまとめると、各縣市  $i$  からの流出量は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{流出量}_i &= \text{流出量}_{i-1} + \text{水資源量}_i - \text{農業耗水量}_i - \text{工業耗水量}_i - \text{生活耗水量}_i \\ &\quad \leftarrow \begin{array}{c} \text{天然流量} \\ \hline \end{array} \rightarrow \\ &\quad \leftarrow \begin{array}{c} \text{実際流量} \\ \hline \end{array} \rightarrow \end{aligned} \quad (12)$$

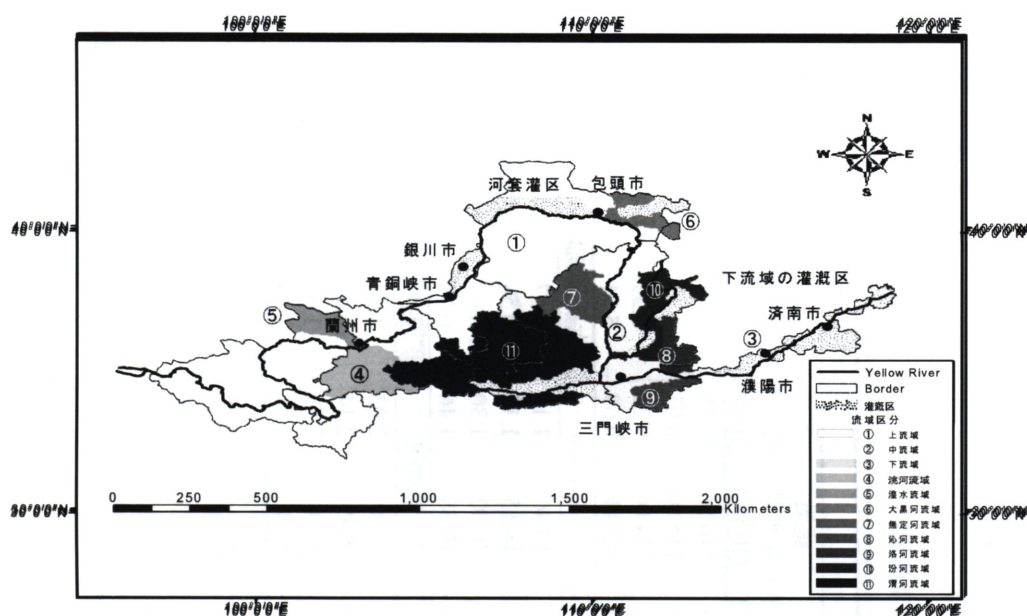


図-2 黄河流域の行政流域界と流域区分

### 3. 水資源需給の時間・空間構造の把握

#### 3.1. 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。結果を表-1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、④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、⑤支流域においても、水資源量と耗水量が逼迫している、⑥近年、工業や生活に由来する水需要が増加傾向にある、ことがわかる。

#### 3.2. 1997年の県市別、月別の水資源需給構造

結果を図-3に示す。ここには、黄河本流について、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。支流域については、頁数の制限より割愛する。

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下流域の大型灌区地域において、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、ことがわかる。こうした各県市の需給バランスによって、黄河本流の下流域において実際流量が全くなくなる月が発生した(図中、破線枠)。実際流量が枯渇した月は、1月から6月である。また、頁数の制限より支流域の結果は掲載できないが、支流域の多くは、渇水

表-1 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

|      | ① 黄河本流上流域                                      |  |  |   |   | ② 黄河本流中流域                                      |  |  |   |   | ③ 黄河本流下流域                                      |  |  |   |   |
|------|--|--|--|---|---|--|--|--|---|---|--|--|--|---|---|
|      | 農業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 工業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 生活<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 全耗<br>水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 水資<br>源量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 農業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 工業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 生活<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 全耗<br>水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 水資<br>源量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 農業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 工業<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 生活<br>耗水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 全耗<br>水量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 水資<br>源量<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) |
| 1997 | 63.39  | 9.22   | 2.91   | 75.52   | 207.89  | 18.83  | 4.50   | 2.95   | 26.29   | 56.91   | 116.56   | 7.55   | 5.19   | 129.29  | 24.42   |
| 1998 | 62.87  | 10.01  | 3.04   | 75.91   | 276.45  | 18.82  | 4.70   | 3.01   | 26.52   | 82.33   | 115.90   | 8.03   | 5.32   | 129.25  | 35.32   |
| 1999 | 71.47  | 11.81  | 3.54   | 86.82   | 259.59  | 20.42  | 5.37   | 3.16   | 28.96   | 78.12   | 114.06   | 9.12   | 5.53   | 128.72  | 31.59   |
| 2000 | 67.27  | 12.08  | 4.01   | 83.36   | 230.36  | 19.79  | 5.42   | 3.23   | 28.44   | 77.18   | 92.14  | 9.69   | 5.74   | 107.57  | 35.79   |
|      | ④ 洮河流域   |  |  |   |   | ⑤ 湟水流域   |  |  |   |   | ⑥ 大黒河流域  |  |  |   |   |
| 1997 | 2.56   | 0.77   | 0.56   | 3.89  | 16.15   | 5.07   | 0.96   | 0.67   | 6.70  | 40.26   | 18.46  | 1.12   | 0.57   | 20.15   | 7.43  |
| 1998 | 2.54   | 0.83   | 0.56   | 3.93  | 25.25   | 5.02   | 1.06   | 0.59   | 6.67  | 47.86   | 18.15  | 1.19   | 0.58   | 19.92   | 9.11  |
| 1999 | 2.71   | 0.96   | 0.67   | 4.34  | 25.84   | 5.47   | 1.13   | 0.67   | 7.27  | 51.51   | 20.30  | 1.30   | 0.60   | 22.20   | 8.25  |
| 2000 | 3.31   | 0.90   | 0.71   | 4.92  | 25.49   | 6.22   | 1.19   | 1.35   | 8.76  | 35.30   | 18.58  | 1.46   | 0.79   | 20.84   | 8.12  |
|      | ⑦ 無定河流域  |  |  |   |   | ⑧ 沁河流域   |  |  |   |   | ⑨ 洛河流域   |  |  |   |   |
| 1997 | 0.98   | 0.33   | 0.45   | 1.76  | 10.64   | 2.90   | 3.33   | 0.68   | 6.90  | 6.86  | 5.66   | 2.03   | 1.44   | 9.13  | 7.65  |
| 1998 | 0.98   | 0.36   | 0.46   | 1.80  | 16.08   | 2.83   | 3.18   | 0.63   | 6.64  | 10.01   | 5.49   | 2.14   | 1.47   | 9.10  | 12.01   |
| 1999 | 1.01   | 0.40   | 0.51   | 1.92  | 13.71   | 3.33   | 3.30   | 0.62   | 7.26  | 9.88  | 6.70   | 2.52   | 1.59   | 10.81   | 10.38   |
| 2000 | 1.10   | 0.39   | 0.59   | 2.07  | 18.15   | 3.08   | 2.94   | 0.58   | 6.60  | 9.60  | 6.08   | 2.64   | 1.54   | 10.25   | 11.90   |
|      | ⑩ 汾河流域   |  |  |   |   | ⑪ 渭河流域   |  |  |   |   | 黄河全流域  |  |  |   |   |
| 1997 | 11.24  | 4.75   | 2.14   | 18.13   | 18.24   | 28.35  | 12.68  | 6.16   | 47.20   | 72.59   | 274.01   | 47.25  | 23.70  | 344.96  | 469.04  |
| 1998 | 11.09  | 4.80   | 2.21   | 18.10   | 27.07   | 28.07  | 13.61  | 6.38   | 48.05   | 109.37  | 271.76   | 49.91  | 24.25  | 345.91  | 650.88  |
| 1999 | 10.45  | 5.27   | 2.31   | 18.02   | 23.70   | 29.10  | 15.47  | 7.40   | 51.97   | 108.24  | 285.03   | 56.65  | 26.60  | 368.28  | 620.81  |
| 2000 | 10.81  | 4.91   | 2.25   | 17.97   | 22.82   | 31.53  | 15.07  | 8.37   | 54.96   | 104.86  | 259.91   | 56.70  | 29.14  | 345.76  | 579.57  |

全耗水量=農業耗水量+工業耗水量+生活耗水量

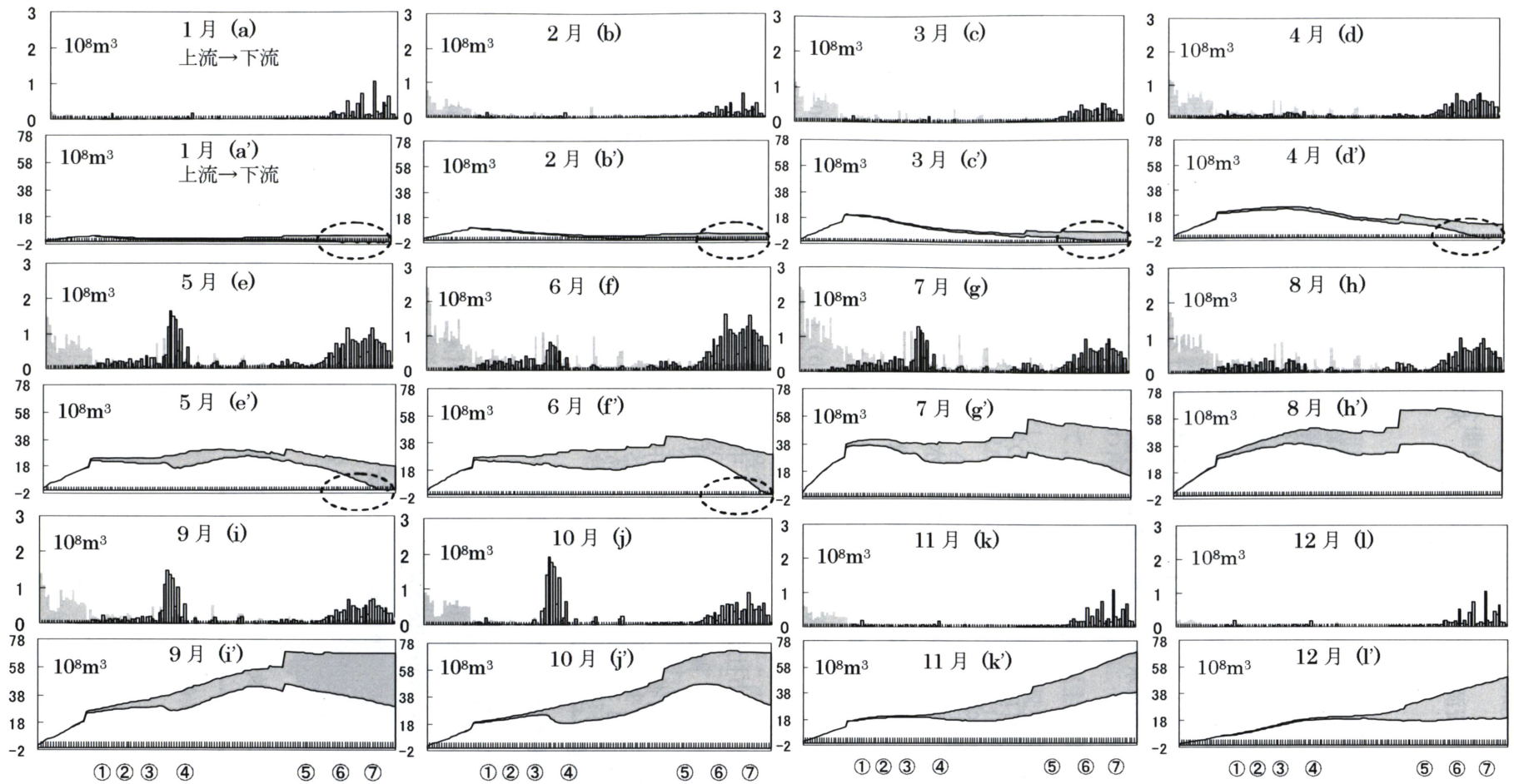


図-3 1997年の黄河流域の月別、縣市別水資源需給構造  
 (a)..(l) は各縣市の水資源量と耗水量を示す, (a')..(l')は各縣市からの天然流量と実際流量を示す,  
 ①蘭州, ②青銅峽, ③銀川, ④包頭, ⑤三門峽, ⑥濮陽, ⑦濟南, ⑧河套灌区, ⑨下流域の灌漑区

水資源量
  天然流量  
 耗水量
  実際流量

期を中心に、水資源需給バランスが逼迫し、水不足は本流域より更に厳しい状況にある。

#### 4. 結論

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・縣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。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目的であった。

#### 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) 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.
- 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) 国家統計局農村社会經濟調査総隊：中国県（市）社会經濟統計年鑑 2001，中国統計出版社，2001.
- 5) 国家統計局城市社会經濟調査総隊：中国城市統計年鑑 2001，中国統計出版社，2001.
- 6) 各省統計局編：青海省，四川省，甘肅省，寧夏回族自治区，内蒙古自治区，山西省，陝西省，河南省，山東省統計年鑑，中国統計出版社.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Yang, D., C. Li, H. Hu, Z. Lei, S. Yang, T. Kusuda, T. Koike, 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.*, 40, W06502, 2004.
- 10) 朱曉原，張学成：黄河水資源变化研究，黄河水利出版社，1999.
- 11) 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.
- 12) 1：100万中国数值地図データ：中国国家基礎地理情報センター.