

黄河流域における水資源賦存量と水需要量の地域バランス Regional balance between water resources endowment and water demand in the Yellow River basin

金子慎治¹・近江健治²・三枝祐司³・井村秀文⁴

Shinji KANEKO, Kenji OHMI, Yuji MIEDA and Hidefumi IMURA

ABSTRACT: The shortage of fresh water is emerging as a serious threat to the sustainable development in the North China due to its adverse economic and environmental impacts. In the Yellow River basin, in particular, the water flow has been cut off almost every year in the low reaches since 1992, causing serious impacts not only on agriculture but industry and citizens' life in the region. This paper takes up the basin and analyzes the regional balance of water supply-and-demand from a macroscopic viewpoint. Firstly, the distribution of water resources endowment and water demand is estimated for 1980-1996. Then, the distance from the upper reach of the Yellow River to each mesh or county/city is calculated. Then the spatial distribution data are converted into the line data according to the distance of each mesh to the river. Consequently, evaluation of the regional balance between water resource endowment and water demand at each mesh point is made possible, and regional characteristics of the balance are discussed.

KEYWORDS: water resources, the Yellow River, water demand, water cutoff, supply-and-demand balance

1. はじめに

中国における水問題は深刻さを増している。2000年8月23日、全国人民代表大会の農業と農村委員会が行った「中国の水問題及び水法の修正に関する座談会」において、李鵬委員長は「中国の深刻な水問題について考えるため、戦略的視野に立つことが必要である。水利施設と関連の法制度を整え、法に基づいて水問題を解決し、水資源の合理的な開発と有効利用と統一的管理を推し進めなければならない」と述べ、さらに、水の管理に関する法律を修正するにあたっての課題の1つとして「経済・社会と資源、環境を同時に整備し、水資源のマクロ的管理が必要」と語った¹⁾。

このことから、現在の中国における水不足問題の深刻さとともに、具体的対策実行のための中央政府の強い意思が読み取れる。特に、90年代に入り断流が深刻さを増す黄河流域においては、こうした取組みが急務であり、地域間、セクター間の水需要を調整するためのマクロ的管理が求められている。断流の原因としては、いくつかの要因がある。水の需要側では、近年の急速な経済成長による工業化、都市化に伴う水需要の大幅な増加があげられる。また、水の供給側では、気候変動によって流域全体の降水量が減少する傾向にあるという報告もある²⁾。マクロ的管理に必要な情報として、まず地域別、セクター別の需給バランスを把握することが重要である。このことは黄河断流のメカニズムを解明することにもつながり、逆に断流メカニズムの解明がマクロ的管理にとって多くの示唆と教訓を与えるものと考えられる。

以上のような認識に基づき、著者らは既報の研究^{3), 4), 5), 6)}において、黄河流域の省レベル及び県レベルでの水需要推計を行った。また供給側については、黄河流域における水資源賦存量を緯度経度0.5度メッシュデータで推計した。しかし、断流のメカニズムを解明するためには、需要と供給の両者の構造を同じ地域ス

¹ (財) 地球環境戦略研究機関 Institute for Global Environmental Strategies (IGES)

² 九州大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyushu University

³ 佐世保市役所 Sasebo City

⁴ 名古屋大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University

ケールで把握する必要がある。そこで本研究では、地域区分の基本単位をデータが入手可能な限り細かく設定し、水資源需給の状況を1980年から1996年までの毎年について推計した上で、それを黄河最上流からの距離の関数として表して分析した。その結果、需給バランスの時間的・空間的な特徴を分析することが可能となった。ここで、こうした需給バランスの地域構造を分析する最終的な目標は、水資源のマクロ的管理にとって重要な自然要因(たとえば、気候変動)と社会経済要因(たとえば、社会構造変化にともなう需要構造の変化や水資源の利用効率の向上)の双方の将来変化が水資源の需給に及ぼす影響を総合的に評価する手法の確立にある。

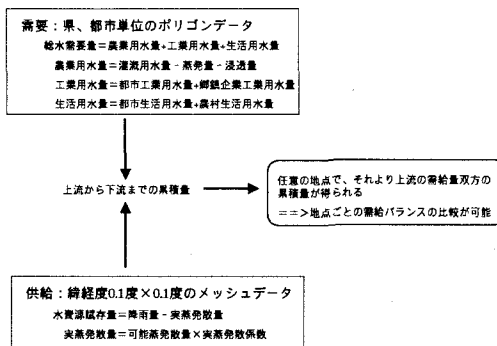


図1 本研究の分析の枠組

2. 分析方法

2.1 概要

図1に本研究の分析の枠組を示す。需要量については、地域別・セクター別需要量についての毎年のデータが得られないため、農業用水、工業用水、生活用水の用途ごとに県(262県)あるいは城市(80市)単位で推計する。ここで、工業用水は都市工業用水と郷鎮工業用水の合計とし、生活用水は都市生活用水と農村生活用水の合計とする。水資源賦存量については、気温、降水量の観測データからメッシュデータ(9475メッシュ)を作成し、メッシュごとの水資源賦存量をThorntwaite法により推計する。以上の推計方法を図2にまとめる。推計期間はいずれも80年から96年までの毎年とする。

次に各県、城市及び各メッシュのそれぞれ中心から黄河最上流点までの距離を求め、推計された水需要量と水資源賦存量をそれぞれ黄河最上流からの距離の関数として表す。さらに、各需要量、水資源賦存量を黄河最上流からの距離にしたがって積み上げることにより、累積水資源賦存量曲線、累積需要曲線が得られる。これにより、任意の地点において、その地点より上流における需給双方の累積値が得られる。

$$\begin{aligned}
 &\text{農業用水} \quad W_p^{(Agr)}(t) = \alpha(t) \times I_p^{(Irr)}(t), \quad I_p^{(Irr)}(t) = \beta_p(t) \times I_p^{(Agr)} \\
 &\text{工業用水} \quad \begin{cases} W_{p,q}^{(Ind)}(t) = \sum_{q=1}^N w_{p,q}^{(Ind)}(t) \\ w_{p,q}^{(Ind)}(t) = Y_q^* \times Y_{p,q}^{(Ind)}(t) \\ Y_{p,q}^{(Ind)}(t) = \delta_{k,q} \times Y_p^{(Ind)}(t) \quad \left(\sum_{q=1}^N \delta_{k,q} = 1 \right) \end{cases} \\
 &\text{生活用水} \quad \begin{cases} W_p^{(Liv)}(t) = \varepsilon_k(t) \times P_p^{(Liv)}(t), \quad W_p^{(Res)}(t) = \varepsilon_k(t) \times P_p^{(Res)}(t) \\ P_p^{(Liv)}(t) = \xi_k(y_k) \times P_k(t), \quad \varepsilon_k(t) = \lambda \times \varepsilon_k(t) \\ \varepsilon_k(t) = \eta_k \times \varepsilon(y^*) \end{cases} \\
 &\text{水資源賦存量} \quad \begin{cases} W_T = (Pre - Et \times 0.8) \times S, \quad E_t = 1.6 \left(\frac{10T}{T} \right)^4 \\ a = (492.390 + 17.920I - 77.1T^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6} \\ I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{T} \right)^{1.514} \end{cases} \\
 &W_p^{(Agr)}(t) : t\text{年の県}p\text{の農業用水量} \\
 &\alpha(t) : \text{黄河流域における単位面積当りの灌漑用水量 (灌漑定数)} \\
 &I_p^{(Irr)}(t) : \text{灌漑面積}, \beta_p(t) : \text{灌漑率}, I_p^{(Agr)} : \text{耕地面積} \\
 &W_p^{(Ind)}(t) : t\text{年の県}p\text{の工業用水量}, w_{p,q}^{(Ind)}(t) : \text{県}p\text{の業種}q\text{の工業用水量} \\
 &N : \text{工業の業種数} (N=17) \\
 &Y_q^* : \text{業種}q\text{の単位生産額当り水消費量 (原単位)} \\
 &y^* : \text{全国の一人当りGDP}, Y_{p,q}^{(Ind)}(t) : \text{県}p\text{の業種}q\text{の工業生産額} \\
 &\delta_{k,q} : \text{県}p\text{がそれぞれ属する省}k\text{の業種}q\text{の総工業生産額に占める割合} \\
 &W_p^{(Liv)}(t), W_p^{(Res)}(t) : \text{都市または県}p\text{の生活用水量} \\
 &\varepsilon_k(t), \varepsilon_k(t) : \text{省}k\text{の都市及び県の一人当り生活用水量} \\
 &P_p^{(Liv)}(t), P_p^{(Res)}(t) : \text{都市または県}p\text{の人口}, \xi_k(y_k) : \text{都市化率} \\
 &y_k : \text{省}k\text{の一人当りGDP}, P_k(t) : \text{省}k\text{の人口} \\
 &\eta_k : \text{地域調整係数}, \varepsilon(y^*) : \text{都市の生活用水量の全国値} \\
 &\lambda : \text{都市部と農村部の全国的生活用水量使用量平均値の比} \\
 &W_T : \text{水資源賦存量}, Pre : \text{降水量}, E : \text{可能蒸発散量} \\
 &S : \text{メッシュの面積}, T : \text{月平均気温}, I : \text{熱指数}
 \end{aligned}$$

図2 水資源賦存量及び水需要量の推計方法

2.2 推計方法の改善点

農業用水については、次の2点を改善した。まず、これまで流域内で一定かつ時間的にも一定としてきた灌漑定数(単位灌漑面積あたり灌漑用水量、1980年の値を使用)を既存研究の結果⁷⁾に基づき、毎年変化するものとした。次に、灌漑用水量から地表流出を差し引き、農業用水量とした。ただし、地表流出率には日本の水田の現状データ⁸⁾を用いた。

工業用水については、郷鎮工業の工業用水量を加えた。ここでは、各県の業種別(17業種)郷鎮工業生産額に業種別生産額当たり工業排水量原単位を乗じ推計した。

生活用水については、農村の生活用水を加えた。農村生活用水は、農村人口に農村一人当たり生活用水消費量を乗じて推計する。ただし、農村一人当たり生活用水消費量は全国平均値を用いる。

3. 結果

3.1 総量

80年～96年までの毎年について推計した、県、城市別用途別水需要量とメッシュ別水資源賦存量を積み上げ、流域全体を合計したものを図3に示す。80年～85年までの水需要量の年平均増加率はわずか0.6%でほとんど変化しなかった。増加が始まったのは85年以降であり、85年～90年の年平均増加率は3.2%、その後、増加のペースは若干緩やかになるものの、90年～95年には年平均2.3%で増加した。用途別にみると、農業用水は過去17年間に若干増加しただけであるため、相対的なシェアは8割程度から6割へと減少した。一方、工業用水については、90年までに大幅に増加した都市工業用水が90年以降減少傾向に転じたのに対し、80年代後半から郷鎮工業用水が急速に増加を始め、96年では都市工業用水とほぼ同規模となった。その結果、工業用水全体でみると、80年以降一貫して増加を続ける結果となり、全水需要量に対するシェアも約4%から約13%に伸びた。生活用水については、80年以降年平均増加率1～3%程度で増加し続け、全需要量に対するシェアは約5%から約7%に伸びた。都市部と農村部の内訳は、次のように推移した。80年には若干農村生活用水が多かったものの、80年代にはほぼ同規模で推移していた。その後、90年代に入ると都市生活用水の需要増加が顕著となり、96年には4：3で都市生活用水の需要量が多い。

80年から96年までの過去17年間の水資源賦存量の推計量は、平均値が1000億 m^3 、最大1400億 m^3 、最低600億 m^3 であった。断流が厳しさを増した90年代に入ってから7年間の水資源賦存量をみると、平均以下の年は3年であり水資源量が減少しているとは言えない。

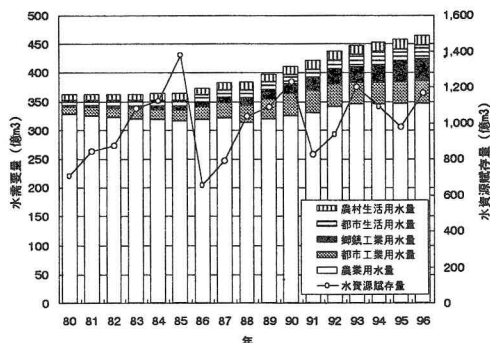


図3 水資源賦存量及び水需要量の推計結果

3.2 空間分布の比較

水資源賦存量の推計結果の例として、80年及び96年の空間分布を図4に示した。80年及び96年の総水資源賦存量は、それぞれ推計した17年間で資源量の少ない方から2番目（705億 m^3 ）、多いほうから4番目（1167億 m^3 ）である。低緯度地域、特に上流部分に豊富な水資源が分布し、高緯度の中流域では乾燥地帯が広がっている。降雨量の少なかった80年をみると、下流域にまで乾燥域が広がっていることがわかる。

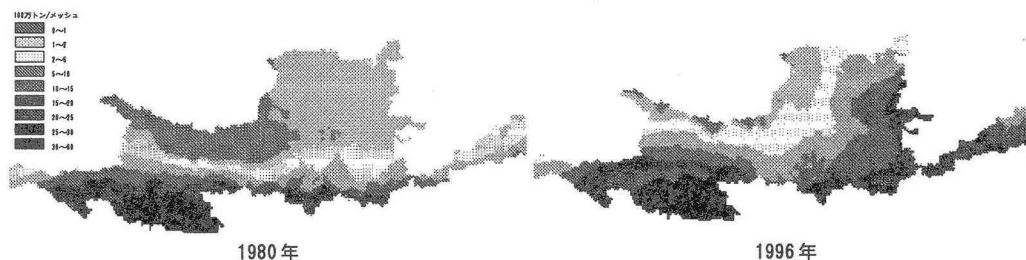


図4 水資源賦存量の空間分布

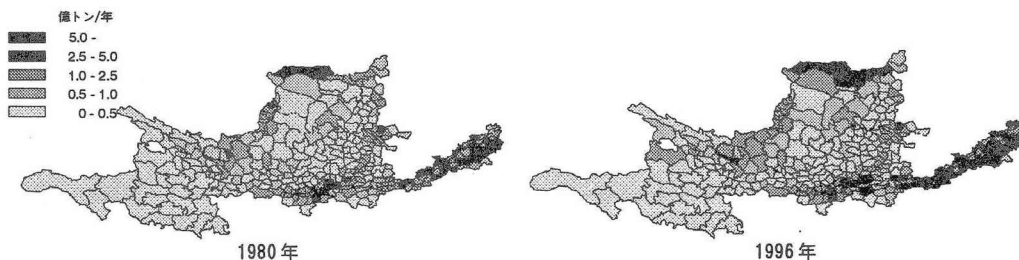


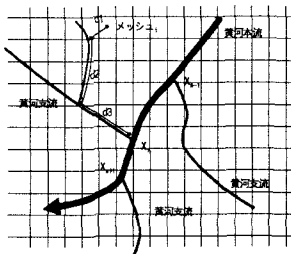
図5 水需要量の空間分布

図5は水需要量の推計結果の例として、同じく80年及び96年の分布図を示した。下流域に年間5億 m^3 以上の需要のある県あるいは城市が集中しており、その数が増加していることがわかる。また、中流域における需要増加も見取れる。

3.3 累積量

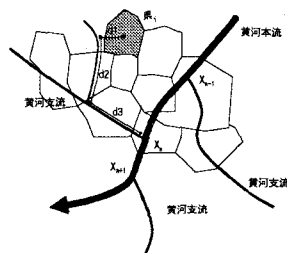
以上のように行政区分単位で推計した需要量とメッシュ単位で推計した水資源賦存量はスケールが異なり、直接比較することは困難である。しかし、何らかの方法で直接比較を可能とし、需要と供給のバランスを示すことが必要である。ここでは、図6に示す方法で面情報から線情報へと変換することにより、各地点ごとの需給バランスを評価する。まず、ある行政単位あるいはメッシュから最も近い黄河本流あるいは支流までの距離を求める($d1$)。次に支流から別の支流へ($d2$)、さらに本流へと距離を計測し($d3$)、本流と合流する地点の最上流からの距離を求める(Xn)。これらをすべて足し合わせた距離($d1+d2+d3+Xn$)を着目している行政単位やメッシュの最上流からの距離と定義する。当然、最短距離にある支流によって(あるいは本流の場合もある)、 $d1$ 、 $d2$ などの数は増減する。以上により、各行政単位、メッシュそれぞれの水資源量賦存量、水需要量を最上流からの距離の関数で示すことが可能となる。

メッシュの最上流からの距離 = $X_n + d1 + d2 + d3$



水資源賦存量

県の最上流からの距離 = $X_n + d1 + d2 + d3$



水需要量

図6 各メッシュ、県、城市への最上流からの距離の計測方法

これらをすべて足し合わせた距離($d1+d2+d3+Xn$)を着目している行政単位やメッシュの最上流からの距離と定義する。当然、最短距離にある支流によって(あるいは本流の場合もある)、 $d1$ 、 $d2$ などの数は増減する。以上により、各行政単位、メッシュそれぞれの水資源量賦存量、水需要量を最上流からの距離の関数で示すことが可能となる。

地点ごとに求めた水資源賦存量及び水需要量を最上流から順に積み上げた結果がそれぞれ図7、図8、図9

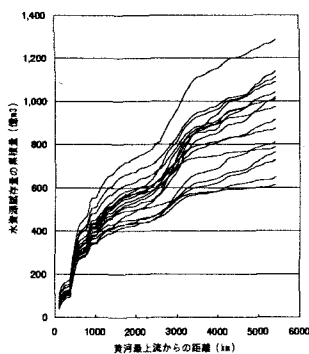


図7 水資源賦存量累積量と黄河最上流からの距離との関係 (80年～96年)

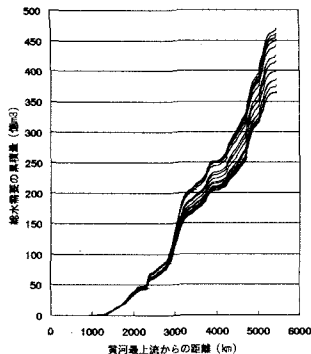


図8 水需要量累積量と黄河最上流からの距離との関係 (80年～96年)

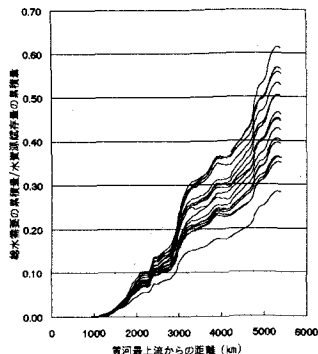


図9 水需給バランス指標と黄河最上流からの距離との関係 (80年～96年)

である。図7から、上流ほど水資源が豊富であること、年変動が大きいたことが分かる。また、図8から、最上流から3000km当たりで急速に需要が伸びる地域があること、下流に近い地域が需要の伸びが大きいことが読み取れる。図9には水需要の累積量を水資源賦存量の累積量で除した結果を示す。ある地点の水資源需給バランスをマクロに考える場合には、それより上流での資源量と消費量の総量が重要な意味を持つ。こうした考察に基づき、この値を各地点ごとの水需給バランスを示す一種の指標と解釈することが出来る。また、これらを年間流量^{2), 7)}の観測データが得られる利津(河口から97km)と花園口(河口から788km)で比較したものが図10である。これらの間には一定の関係がみ

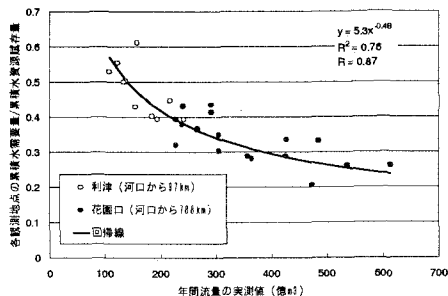


図10 水需給バランス指標と利津・花園口における観測流量との関係

られ、本手法が各地点ごとの需給バランスの実態把握にとって有効であることを示している。

4 地域構造の検討

前節で得られた推計結果を利用すれば、黄河流域を最上流からの距離によって任意に地域分割することが可能である。ここでは、1000km単位で6地域に分割し、地域ごとの水資源量賦存量及び需要構造を検討する。図11は、水資源賦存量を地域分割し、17年間の地域別水資源賦存量シェアの最低、平均、最高を示したものである。最上流から1000kmまでの地域は、平均でみて50%弱の水資源が集中し、その年変動も大きい。一方、1000km-2000kmの地域は、これとは対照的に大幅に資源量が少なく年変動も小さい。この地域と2000km-3000km、3000km-4000kmの中流域を比較すると、中流域の方が若干水資源量が多いが、特に年変動が大きいことが特徴である。また、下流域では流域面積が小さいこともあり、水資源量が少ないことが分かる。

次に同様に1000km単位で地域分割した場合の需要構造の経年変化をみる。図12は、80、96年の地域別需要構造である。80年には総需要量、96年には80年からの総需要量の増加率を併記した。80年当時、すべての地域で80%以上が農業用水であった。96年にはすべての地域で農業用水のシェアが80%を下回る。また、特に下流域では、郷鎮工業用水、都市生活用水の大幅な増加によるシェアの拡大が見て取れる。総量の変化を地域別にみると、上流域では大きな増加が見られないのに対して、中流域から下流域にかけて全体的に需要が増加したことが分かる。特に、下流域の増加率が高い。

5. まとめと今後の課題

本研究では、80～96年について、黄河流域の水資源賦存量及び水需要量を推計し、これらを最上流からの距離の関数として表すことにより、地域ごとの水需給バランスを分析した。これにより、さまざまな地域スケールで見た需給バランスの特徴が比較可能となった。まず、最上流からの距離の関数として表した水資源賦存量と水需要の累積量曲線によって、流域全体の需給構造の特徴を見ることが出来る。また、任意の地点について、それより上流域にある水資源の総量と需要総量との比を求め、これによって地点ごとの需給バランスを比較することが可能である。さらに、流域全体を任意の地域に分割し、分割した地域内での需要構造を見ることが出来る。

本研究で示した手法の適用課題としては、さまざまな将来予測分析や政策分析があげられる。たとえば、気候変動による降雨パターン、気温分布の変化が与える水資源量への影響を水需給バランスの視点から評価するという課題がある。また、「南水北調」プロジェクトに見られるような流域外からの大規模な水資源供給による水需給バランスの改善効果の評価も大きな課題である。さらには、経済発展にともなう産業・社会構造変化と需要量、需要構造の変化が水資源需給バランスにどう影響するか、特に下流域へ及ぼす影響の評価するとい

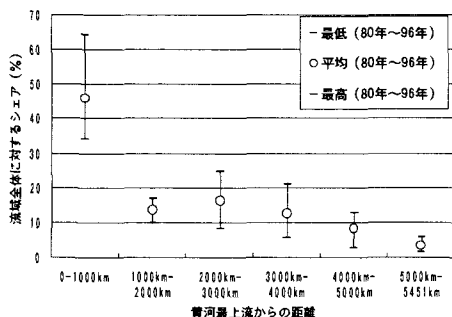


図11 1000km単位で地域分割した場合の水資源賦存量

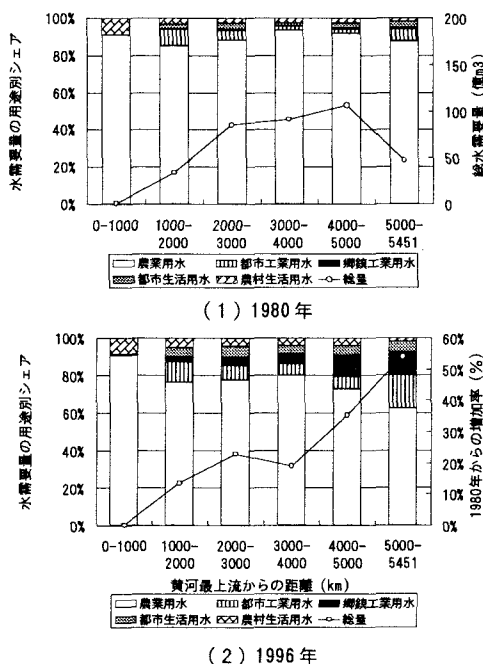


図12 地域別水需要構造

う課題もある。これについては、内陸地域へ積極的・優先的に投資を行おうとする西部開発のような大規模地域開発によって引き起こされる急激な産業・社会構造変化の評価などがある。

一方、本手法には限界もある。本手法は1年を単位にその総量に基づいて分析を行っているものの、断流のメカニズムの解明には、月単位、日単位などより細かな時間単位で分析することや水資源の移動についてのメカニズムが組み込まれる必要がある。また、下流にいくほど水質が悪化していることを考えると、水量だけではなく水質も考慮したバランスを考えないといけない。これらの要因も含めて分析評価することは、今後の課題である。

参考文献

- 1) 「人民日報海外版」2000年8月24日1面
- 2) 陳效国：黄河下流断流状況及対策、1998（私信）
- 3) 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、土木学会第6回地球環境シンポジウム講演論文集、pp.315-322、1998
- 4) 金子慎治・三枝祐司・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
- 5) Shinji Kaneko, Yuji Mieda, Hidefumi Imura: Study on the water demand and supply in China based on business as usual scenarios, Journal of Global Environmental Engineering, Vol. 5, pp. 139-154, 1999
- 6) 三枝祐司・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
- 7) 国家環境保護局自然保護司：「黄河断流与流域可持續發展—黄河断流生態環境影響及対策検討会論文集」、中国環境科学出版社、1997
- 8) 農水省：農水省パンフレット「農業用水」