

中国黄河流域の水資源需要将来予測に関する研究
Water Resources Demand forecast in Yellow River Basin in China

小澤 亮輔¹

Ryosuke Ozawa

小川 茂²

Sigeru Ogawa

方 偉華¹

Fang Weihua

井村 秀文¹

Hidefumi Imura

ABSTRACT: During the past 2 decades, Yellow River basin witnessed serious water resources shortage, which has become serious constraints on economic development and caused various adverse impacts on ecological system. In this study, the annual average water resource of Yellow River basin is estimated by instrument climate data. Then the annual agriculture, industry and domestic water demand scenarios from 2000 to 2050 are assessed based on the county-level socio-economic database. Further more, the effects of different regional and sector water allocation policy on future water supply and demand balance is modeled by equilibrium model with provincial level database.

KEYWORDS; Water Resources, Water Demand, Water allocation, System dynamics

1. はじめに

現在中国では、工業を中心として急速に経済成長が進んでおり、今後はWTO加盟によって貿易がより活発化する一方、国内でも経済構造改革が進むものと予想され、中国の将来は世界の関心事と言える。このような中国において、相次いで発生した黄河の断流を中心とする水資源問題は切実な問題となっている。

黄河流域における1人あたりの水資源量は、約500m³であり、世界平均の約20分の1と非常に少ない。また、近年の工業や灌漑農業の発達、生活用水の増加により、水資源の需要も増しており、早急な対策が必要とされる。このような、水資源不足の原因に水資源の管理体制が考えられる。具体的には水道の料金が安いこと、水の配分に偏りがあることなどが挙げられ、効率的な運営が望まれる。また、上流と下流の水資源の配分は流域全体を視野に入れ、その配分方法を是正する必要がある。広大な黄河流域において、上流では水資源不足に対する危機感は薄く、水資源を浪費している可能性もある。しかし、人口の増加を支えるためには農業生産の増加も必要であり、その解決は困難を極める。

上述した水資源不足は、需給のアンバランスにより起こるものである。黄河流域の水資源不足は農業・工業生産量の増加、人口の増大・都市への集中による都市生活用水の増大により発生している。解決策としては、供給量の拡大か、効率の改善、需要量の規制が考えられるが、『南水北調』のようなプロジェクトは、膨大な費用と環境への影響が懸念されるため、節水による需要量の減少が現実的な課題と言える。したがって水資源の需給を定量的に把握し、効率的に水資源を利用していく必要がある。本研究では、その第1段階として、水資源需給将来予測を行う。

2. 黄河流域の現状

2.1 黄河流域の地理的範囲

黄河は、全長約5500km、流域面積約75.2万km²、流域内居住人口は約1億5千万人（1992年）で、特に下流域では人口50万人以上の大都市が比較的狭い範囲に集中しており、図2-1に示したように全体で306県市（55

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

² 富士通エフ・アイ・ピー株式会社

の市及び251の県）が含まれる。

2.2 セクター別水使用量

中国水資源広報によれば、中国における流域別の給水量及びセクター別水使用量は図2-2に示した通りである。この表から、水資源不足の深刻な黄河流域においては、給水量に占める地下水の割合が高いことが分かる。また、水使用量の大半を、農業用水が使用している事も読み取れる。さらに黄河流域における生態用水は、200億 m^3 と言われており、水資源総量を580億 m^3 とすると、利用可能水資源総量は380億 m^3 である。すなわち、水使用総量は利用可能水資源総量を上回っている事が分かる。



図2-1 黄河流域の地理的範囲：県市行政区界

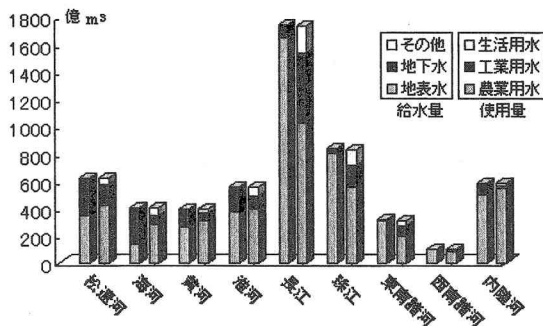


図2-2 中国における流域別の給水量及びセクター別水使用量

3. 水資源需要将来予測モデルの構築

3.1 モデルの概要

本研究で構築した水資源需要将来予測モデルは、市県レベルでの入手可能なデータを用いて、主に回帰分析によって構築した。本モデルは、図3-1のマクロフレームに示したように、経済社会マクロフレームと水資源需要モジュールに大別でき、水資源需要モジュールの中には農業用水、工業用水、生活用水の需給モジュールが更に個別に組み込まれている。以下の節では、(1)経済社会マクロフレーム、(2)農業用水、(3)工業用水、(4)生活用水それぞれに対して説明を行っていく。

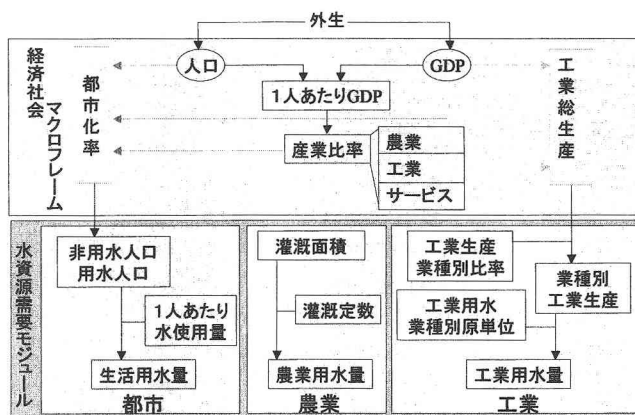


図3-1 水資源需要将来予測モデルのマクロフレーム

3.2 経済社会マクロフレーム

本研究では、既存研究を参考に、以下のような簡易シナリオを想定する。すなわち、2030年までについては、参考文献(12)で示されている全国及び省別の人口シナリオをそのまま採用する。次に、2030～2050年の期間については、省別に設定されたシナリオが存在しないため、まず2010～2030年の各省の成長率をそのまま用いて2050年の仮の省別人口(A)を求めた。しかし、2030～2050年の実際の人口成長率は2010～2030年の人口成長率よ

り低下することが予想されるので、次式によって下方修正を行った。

$$2050\text{年の省別人口} = A \times \frac{B}{\sum A} \quad (3.1)$$

ここで、Bは全国人口増加率の値（-0.01%）を使用して得られる2050年の全国人口である。

黄河流域の各市県別の人口予測に関しては、まず1990～2000年の各市県別成長率で推計を行い、その総和が上記の省別人口と一致するように上記と同様の補正を行った。

GDPについても、参考文献(12)が示している全国及び黄河流域のGDP成長率シナリオをそのまま採用した。黄河流域の省別GDP予測に関しては、まず1990～2000年の省別GDP成長率で推計を行い、人口推計の際と同様に、その結果の総和が上記の黄河流域全体のGDPと一致するように修正を行った。

後述の工業用水量推計のためには、工業総生産（あるいは、GDPに占める2次産業比率）の値、また、生活用水の推計のためには、都市人口及び都市人口に占める非農業人口と農業人口の比率の値が基軸となり、このためにもGDPに占める1次、2次、3次各産業の比率が必要である。ここでは、過去の時系列データを基にした簡単な回帰分析によって推計することとする。1次・2次・3次産業比率は、1952～2000年における各省別の時系列データが利用できるため、様々な推計式をあてはめて検討した。結果、1次及び2次産業比率と1人あたりGDPの関係については、次式によって比較的良好な一致を見た。

$$\ln\left(\frac{1}{3\text{次産業比率}} - 1\right) = a \cdot \ln(1\text{人あたりGDP}) + b \quad (3.2)$$

また、2次産業比率については、次式によって求めた。

$$2\text{次産業比率} = 1 - (1\text{次産業比率} + 3\text{次産業比率}) \quad (3.3)$$

3.3 農業用水

農業用水量は、灌漑定数と有効灌漑面積を乗じることによって得られるが、灌漑定数は地域、年によって大きな違いがある。そこで本研究では、黄河流域においてシナリオを設定し、推計を行う。

まず灌漑面積については、2つのシナリオを与えている。灌漑面積の増加について、1990年代の高い増加率が2005年まで持続した後、2050年に対2000年比で120にまで増大とする場合と、それが2010年まで持続した後、2050年に対2000年比で140にまで増大する場合の2つのケースを仮定する。

次に灌漑定数であるが、一般にGDPが増大するほど農業部門への投資も増大するため、灌漑定数は減少する。多期作・多毛作などによって土地を高度利用する機械化などの進行による技術の変化は直接的な予測が困難である。ここでは、灌漑定数の減少が小さい場合と大きい場合の2つのシナリオを設定し、それぞれに応じた農業用水需要を求めることとした。

表 3-1 農業用水に関する将来シナリオ

	基準	シナリオ1（灌漑定数の減少：小）						シナリオ2（灌漑定数の減少：大）					
		大灌漑面積				小灌漑面積				大灌漑面積			
	2000年	2010年	2030年	2050年	2010年	2030年	2050年	2010年	2030年	2050年	2010年	2030年	2050年
灌漑面積	100	132	136	140	114	117	120	132	136	140	114	117	120
灌漑定数	100	92	85	80	92	85	80	81	75	70	81	75	70
農業用水	100	121	116	112	105	99	96	107	102	98	92	88	84

3.4 工業用水

工業用水量は、単位工業生産当たり水使用量[m³/万円]（以下、工業用水原単位）に工業生産額[万円]を乗じることによって求められる。つまり、t年のi市における工業用水量W_i(t)を、t年のi市における工業用水原単位w_i(t)と、t年のi市における工業総生産Y_i(t)を用いて式(3.4)のように表わすことができる。

$$WI_i(t) = wi_i(t) \times Y_i(t) \quad (3.4)$$

現在、統計書類から入手できるデータとしては、以下がある。

- ① 全国について、19 産業部門の工業用水原単位（中国環境年鑑 1996-2000）
- ② 全国 666 市についての工業総生産値と総供水量（工業用水＋生活用水）（中国城市統計年鑑 1996）
- ③ 省別・流域別についての工業用水原単位（中国水資源広報 2000）
- ④ 全国 666 市について、39 部門の工業生産額（中国城市統計年鑑 1996）

1) ②と④のデータから、市県別の 40 部門の工業生産額を推計する。

まず、④の 39 部門の工業生産額に、この郷未満工業総生産を足した 40 部門で考えることにする。これら、40 部門の工業生産額は、城市の地区及び市区の 2 つのデータを持つ。この地区のデータは県を含んだ市のデータを、市区のデータには県を含まない市轄区のデータを意味する。そこで、i 市に含まれる n 個の県に関しては、同様の産業構造をしていると仮定して、j 県における k 産業の工業総生産 Y_{jk} を、以下のように推計した。

$$Y_{jk} = (Y_{ik} - Y_{ik}') \times \frac{Y_j}{\sum_n Y_j} \quad (3.5)$$

ここに、 Y_{ik} は i 市（地区）における k 産業の工業総生産、 Y_{ik}' は i 市（市区）における k 産業の工業総生産、 Y_j は j 県における工業総生産である。このようにして、市に属している県は全て推計可能であるが、一方で、市に属さない県も存在する。これらの県は、上記の手法と同様にして、省の業種別工業総生産から市（地区）の業種別工業総生産の和を差し引いた値を県別の工業総生産に応じて配分する事により求める事が可能である。しかし、この手法で推計した際、異なる統計書（城市統計年鑑と中国統計年鑑）を利用したため、地域、業種によっては工業総生産が負になるところが存在する。そこで、今回はある省に含まれる市に属していない県の産業構造は市に属している県と同様であると仮定して、j 県における k 産業の工業総生産 Y_{jk} を、以下の推計式によって求めた。

$$Y_{jk} = \left(\sum_m Y_{ik} - \sum_m Y_{ik}' \right) \times \frac{Y_j}{\sum_n Y_j} \quad (3.6)$$

2) ①のデータに合うように、1)の部門数を 19 にする。

3) 2)の工業総生産と①工業用水原単位を乗じる事により工業用水量を求める。さらに①の全国における 19 産業部門の工業用水原単位を、2)で求めた工業生産高に乗じる事により、市県別の業種別の工業用水量を推計する。

4) 工業用水原単位の将来シナリオを設定する。

工業用水原単位は技術レベル及び節水政策等に大きく依存し、それによって様々なシナリオを描くことができる。本研究では、産業別の工業用水原単位として入手可能な日本のデータ（1999 年）を用いて、工業用水原単位の年減少率一定とした上で、2050 年時に日本と同等のレベルになるというシナリオを設定した。なお、産業によっては中国の工業用水原単位の方が低いものが存在するので、それに関しては現状維持という仮定を設けた。

3.5 生活用水

生活用水量は、1 人あたり水使用量（リットル/日・人）に人口を乗じて求める事ができる。したがって、生活用水量の将来予測のためには、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予測が必要である。

したがって、生活用水の将来予測には、

- ① 城市非農業人口と城市農業人口の値の将来予測
- ② 城市非農業人口及び城市農業人口に対する用水普及率の設定と用水人口
- ③ 都市及び農村の人口 1 人当たり水使用量の設定

の 3 つの要素が必要である。そこで、以下ではそれぞれの要素ごとに説明していく。

① 城市非農業人口と城市農業人口の値の将来予測

城市非農業人口と城市農業人口の推計方法であるが、省別の 1990 及び 2000 年の総人口、非農業人口、所得格差データが利用できるため、さまざまな推計式をあてはめて検討した。結果、式 (3.8) によって比較的良好な一致を見た。なお、所得格差は、次式で定義する。

$$\text{所得格差} = \frac{\text{GDP} \cdot (\text{第2次産業比率} + \text{第3次産業比率})}{\text{非農業人口}} - \frac{\text{GDP} \cdot \text{第1次産業比率}}{\text{農業人口}} \quad (3.7)$$

この結果得られた回帰式を以下に示す。

$$\ln \left(\frac{1}{\frac{\text{非農業人口}(t+1)}{\text{総人口}(t+1)} - \frac{1}{0.85}} \right) = 5.66 \cdot \frac{\text{非農業人口}(t)}{\text{総人口}(t)} - 0.51 \cdot \text{所得格差} + 2.48 \quad (3.8)$$

② 城市非農業人口及び城市農業人口に対する用水普及率の設定と用水人口

2050 年において 100% 普及するという仮定によって、以下のようなシナリオを設定した。

表 3-2 用水普及率シナリオ

	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
城市非農業人口	97%	100%	100%	100%	100%	100%
城市農業人口	8%	26%	45%	63%	82%	100%

③ 都市及び農村の人口 1 人当たり水使用量の設定（上水道ありと上水道なしの両者について）

参考文献(12)を参考に表 3-3 のようなシナリオを設定した。このシナリオは、地域全体を一律としている。

表 3-3 都市生活用水量（上水道有り）と農村生活用水量（上水道無し）シナリオ

	2000 年	2010 年	2030 年	2050 年
都市生活用水（上水道有り）（リットル／人・日）	130	145	160	175
農村生活用水（上水道無し）（リットル／人・日）	54	65	80	100

3.6 水資源需要将来予測結果

以上の結果をまとめたのが表 3-4 である。ここで行った予測は、人口と経済に関する将来シナリオを仮定した上でのシミュレーションの結果である。各セクターの水資源需要は、設定したマクロフレームとシナリオによって変化するので、ここでも出した結果は 1 つのモデルケースに過ぎないが、それでも黄河流域の水資源需給の大局的な構造を理解する上で参考となる。

表 3-4 将来シナリオ総括表（単位：億 m³）

		シナリオ 1（灌漑定数の減少：小）						シナリオ 2（灌漑定数の減少：大）					
		大灌漑面積				小灌漑面積		大灌漑面積			小灌漑面積		
	2000 年	2010 年	2030 年	2050 年	2010 年	2030 年	2050 年	2010 年	2030 年	2050 年	2010 年	2030 年	2050 年
水資源量	566	580				580		580			580		
利用可能量 A	380	380				380		380			380		
農業用水 W1	328	431	410	398	361	341	329	379	362	348	318	301	288
工業用水 W2	90	108	160	189	108	160	189	108	160	189	108	160	189
生活用水 W3	29	40	57	74	40	57	74	40	57	74	40	57	74
需要総量 B=W1+W2+W3	446	579	628	660	509	558	592	527	579	611	466	518	550
不足量 B-A	66	199	248	280	129	178	212	147	199	231	86	138	170

利用可能な水資源量が流域全体で一定とすれば、現在既に深刻な水不足はさらに深刻になる。現在（2000 年実績）と 2050 年を比べると、工業用水は 90 億 m³から 189 億 m³に、生活用水は 29 億 m³から 74 億 m³に増大する。工業用水と生活用水についてのこうした増加は、工業生産の拡大、都市人口の増加、都市住民の生活レベル向上とともにもたらされるものである。また、実際の水資源需給には、地域別のバランスも考慮に入れる必要がある。そこで、省別及びセクター別に、どのように水資源を配分すべきかを、分析できるモデルの構築を次章にて行う。

4. 水資源需給均衡モデル

4.1 モデルの概要

3 章において、市県別及びセクター別（農業・工業・生活）の積み上げ型による水資源需要将来予測モデルを作成した。次に本章では、システムダイナミクスを用いた省別セクター別の水需給バランスに着目した水資源需給均衡モデルを作成する。この水資源需給均衡モデルは、省レベルでの入手可能なデータを用いて回帰分析を行い、それによって得られた関係式をシステムダイナミクス（SD）上に構築し、省別及びセクター別に 2000 年を初期値として単年度ごとに均衡させるモデルである。このモデルは、大別すると経済社会マクロフレーム、水資源需給モジュール、省別及びセクター別配分モジュールから成っており、それぞれに関して次節以降で詳細を述べる。

4.2 経済社会マクロフレーム

水資源需給均衡モデルの経済社会マクロフレームを図 4-1、図 4-2 に示す。

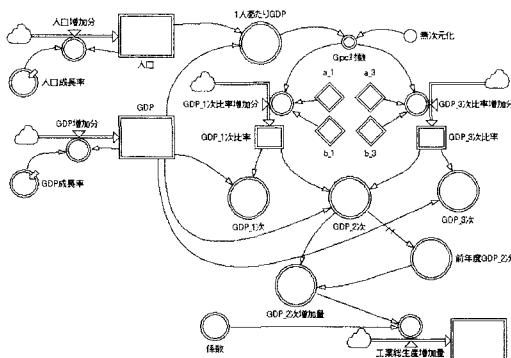


図 4-1 経済社会マクロフレーム 1

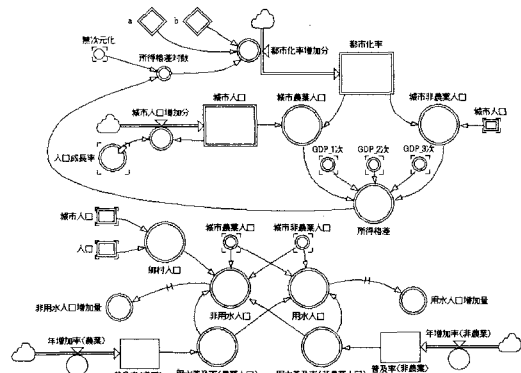


図 4-2 経済社会マクロフレーム 2

まず人口と GDP に関して、2000 年における各省の黄河流域部分のデータに成長率を乗じる事によって得られる人口増加分を足す事によって翌年の人口を得る事ができる。ここで、人口と GDP の成長率は水資源需要将来予測モデルと同じシナリオを用いている。この人口と GDP から、各省ごとの 1 人あたり GDP を求め、3 章で求めた式 (3.2)、(3.3) を用いて産業構造及び各産業別の GDP を求める。

次に都市化率に、城市人口を乗じる事により、城市非農業人口を得る事ができる。また、1 から都市化率を差し引いたものを城市人口に乘じる事によって城市農業人口を得る事ができる。この城市非農業人口、城市農業人口及び各産業別の GDP より所得格差を求める事ができる。ここで、省別に 1952 年から 2000 年までの都市化率 UR_i を所得格差 DI_i で以下の式を用いて回帰分析を行った。

$$\ln(1/UR_i - 1) = a \times \ln DI_i + b \quad (4.1)$$

4.3 水資源需給モジュール

水資源需要モジュールは、図 4-3 で示したように 3 セクター（農業用水・工業用水・生活用水）から成る。ここで、省別の流域部分の水資源総量及び生態用水のデータを得ることができれば、式 (4.2) より利用可能水需要量を求める。これをセクターごとに配分するというモデルを構築することができる。

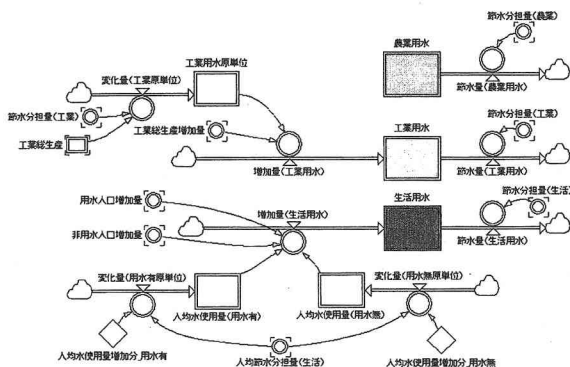


図 4-3 水資源需要モジュール

$$\text{利用可能水需要量} = \text{水資源総量} - \text{生態用水}$$

(4.2)

本研究においては、2000 年における農業用水・工業用水・生活用水のデータを利用して、この合計の値が利用可能水需要量であるという仮定を設ける。そこで、まず工業総生産の増加に伴って工業用水が増加、1 人あたり生活用水量（人均水使用量）及び用水人口の増加に伴って生活用水が増加するとし、その増加分を次節で説明する省別セクター別配分モジュールに従って各省ごと及びセクターごとに節水分担量という形で配分する。その節水分担量は、農業用水に関しては直接水使用量減少に、工業用水に関しては工業用水原単位の減少に、そして生活用水に関しては 1 人あたり水使用量の減少に作用する。

4.4 省別及びセクター別配分モジュール

前節で述べたように、省別及びセクター別配分モジュールにおいて、発生した水需要増加分をどの地域にどのように配分するかを決定する。まず、図 4-4 に示したように、省別配分において黄河流域関係 9 省を高節水省、中節水省、低節水省に分けてその配分率を決める。

これによって、例えば、沿海部で発生した水需要増加量を、水の浪費の激しい上流部で負担するシナリオの設定を行うことが可能である。次に、図 4-4 のセクター別配分において、各省ごとに農業用水、工業用水、生活用水の配分率を決める。

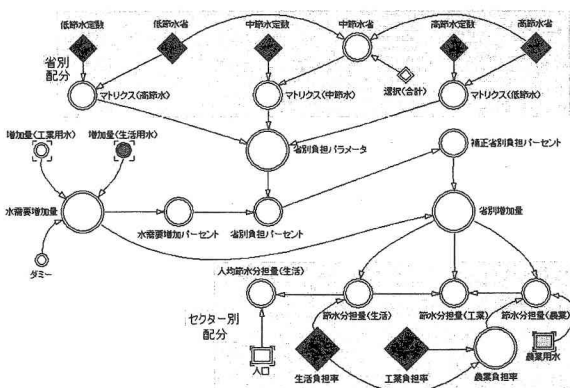


図 4-4 省別及びセクター別配分モジュール

4.5 水資源需給効果分析

前節のモデルを用いて各地域の負担率を変えることによる、農業用水減少量と工業用水原単位減少量の効果分析を行う。内蒙古・四川・甘肅・青海・寧夏を上流、山西・河南・陝西を中流、山東を下流と定義する。この地域区分に対して、以下の 3 パターンを考える。

- ① 上流負担型（上流節水定数=1.25, 中流節水定数=1.00, 下流節水定数=0.75）
- ② 省別負担無し（上流節水定数=1.00, 中流節水定数=1.00, 下流節水定数=1.00）
- ③ 下流負担型（上流節水定数=0.75, 中流節水定数=1.00, 下流節水定数=1.25）

また、セクター別の節水負担率の配分は、全パターンにおいて農業用水 40%, 工業用水 50%, 生活用水 10% とする。その結果、各省別の 2000 年から 2050 年における工業用水原単位減少量は図 4-5 となった。

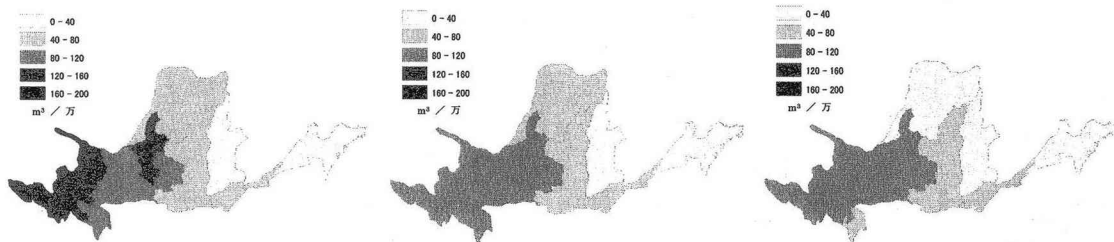


図 4-5 2000 年から 2050 年における工業用水原単位減少量（左から上流負担・負担無し・下流負担）

既に原単位の低い近代的な施設を持つ省よりも、非効率な生産を行っている省の方が費用対効果は高いことを考慮に入れば、上流域において負担する方が工業用水原単位削減コストはかからない。

5. 結論

本研究によって、黄河流域の水資源需給の現状を定量的に把握するとともに、2つの将来予測モデルを構築した。特に、3章の水資源需要将来予測モデルと4章の水資源需給均衡モデルを比較する事により、以下の知見を得た。

- 1) 利用可能な水資源量が流域全体で一定とすれば、現在既に深刻な水不足はさらに深刻になる。特に、工業用水、生活用水は著しく増加する。
- 2) 上流負担型・・・農業用水量の負担が大きい。工業用水原単位は1999年の日本レベルまで減少させる必要性は無く、節水は比較的容易である。
- 3) 下流負担型・・・農業用水量の負担が小さい。工業用水原単位は1999年の日本レベルよりさらに減少させなければならず、非常に厳しい節水を行う必要がある。

参考文献

- 1) 井村秀文：中国北部水資源問題の実情と課題に係る調査報告，平成13～14年度名古屋大学受託研究（国際協力銀行）研究成果報告書（forth coming）
- 2) 金子慎治、三枝裕司、松本亨、井村秀文（1998）：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
- 3) 三枝裕司、金子慎治、陳晋、井村秀文（1998）：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，pp501-506
- 4) 三枝裕司、金子慎治、陳晋、井村秀文（1999）：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
- 5) 国家統計局農村社会経済調査総隊（1991）「中国分県農村経済統計概要」中国統計出版社
- 6) 国家統計局国名経済総合統計司（1999）「新中国五十年統計資料集編」中国統計出版社
- 7) 水利部黄河水利委員会（1998）「黄河年鑑1998」黄河年鑑社
- 8) 水利部南京水文水資源研究所・中国水利水電科学研究院水資源研究所（1998）「21世紀中国水供求」中国水利水電出版社
- 9) 全国政協人口資源環境委員会（2000）「西部大開発及水資源文集」中国水利水電出版社
- 10) 中華人民共和国国家統計局：各種統計年鑑，中国統計出版社
- 11) 中華人民共和国水利部（1997-2000）「中国水資源公報」
- 12) 錢正英、張光斗他（2001）「中国可持續發展水資源戰略研究報告集」第1～9巻 中国水利水電出版社
- 13) Brown, L.R (1995)：誰が中国を養うのか？ 訳者：今村奈良臣，ダイヤモンド社