

黄河流域の水資源需給に関する基礎的研究

ASPECTS ON THE WATER SUPPLY AND DEMAND OF THE YELLOW RIVER BASIN

三枝 裕司*・金子 慎治*・陳 晋*・井村 秀文*

Yuji MIEDA*, Shinji KANEKO*, Chen JIN*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; The shortage of water is emerging as a key obstacle for continuing economic development in North China. In basin of the Yellow river- the second longer river in China, the water flow has been cut off almost every year in the low reaches from 1990, having adverse impacts not only on agriculture but industry and life of citizen in this region. This paper takes up the basin for a case study to analyze the situation of water cutoff and its causes in the macro viewpoint. Firstly, the characteristics of water cutoff were analyzed. Secondly, the distribution of water resources was estimated based on the IIASA mesh data using Thornthwaite model. Then, the amount of the water used by agriculture, industry and life of citizen was also calculated. Based on water supply-and-demand balance evaluation, the water cutoff in the low reaches could be explained as the decreasing of precipitation and increasing of irrigation water in the upper and middle reaches due to agriculture development.

KEYWORDS ; basin of the Yellow river, water cutoff, supply-and-demand balance

1. はじめに

水は、社会システムの基盤を支える重要な資源であるが、石炭や石油などの化石燃料と大きく異なり、絶えず循環を繰り返す再生可能資源であり、国や地域の自然条件に大きく左右される。その循環過程は自然現象に支配され、時間的・空間的に大きな変動幅を持つ。すなわち、水の安定供給が確保できるかどうかといった評価の方法は、他の資源とは大きく異なる。更に、水資源問題を考える視点は国や地域の自然条件によって異なる。例えば、我が国は、国土面積が小さく、比較的降水量が多いため、取水量の大部分は河川水（85%以上）であり、残りは地下水である。河川は、急峻な地形のため短く、流域面積も小さい。このため、我が国では、台風や梅雨にみられるような降水の地域的、季節的な変動が大きく、変動による影響は時間的にも空間的にも大きい。

中国では、1990年代に入り、黄河下流では川の水が全くなくなる断流が年々厳しさを増しつつある。一方で、1998年は長江流域の大洪水による深刻な被害が報じられている。黄河は全長5,460km（約17倍）、流域面積752,400km²（約45倍）であり、長江は全長6,300km（約20倍）、流域面積は、1,808,500km²（約107倍）にも及ぶ（カッコ内は我が国の代表的な河川である利根川との比較）。中国における渇水や洪水など水資源の問題を考える際には、我が国と異なった大きな時間的・空間的視点が必要となる。現象の把握とその影響、対策に至るまで我が国では扱うことの少なかった非常に長期の問題として捉えることが求められる。

中国では近年の急速な経済成長にともなう工業化と都市化によって、都市の水需要は高まる一方である。他方、巨大な人口を支えるために必要な食糧を生産することも必須の政策課題とされ、灌漑のための農業用水を減らすことはできない。むしろ、経済成長による都市部の豊かな食生活を支えるため、食糧増産の圧力は今後、大幅に高まるとみられる。中国の水資源を考える場合、こうした都市と農村、工業と農業という国家のあり方まで含めた大局的な社会変化を考察の対象に入れる必要がある。レスターブラウンはマクロな視点からの分析により、中国の水需給バランスの悪化が世界の穀物市場にまで影響をもたらす可能性を警告している¹⁾。このような背景から筆者らは、これまで、中国の省別の農業用水、工業用水、都市生活用水の需要を長期的に予測した²⁾。しかし、供給側の制約

*九州大学工学部環境システム科学研究センター

Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

などを含めた需要量を評価するためには、供給可能量や水資源量を把握することが必要となる。広大な地域を対象として衛星データにより水資源量を推計しようとする試み³⁾があるが、需要と供給の両面から分析するための方法は確立されていない。

本研究では、こうした視点から中国の水資源の長期的な需給バランスを考えるため、黄河流域を取り上げ、断片的に得られる情報をもとに総合的視点から分析する。まず、1998年5月に発表された黄河水利委員会による報告に基づき、黄河断流の現状を明らかにする。次に、メッシュデータを用い、気温、降水量のメッシュデータから水資源賦存量の分布を推計する。さらに、県別有効灌漑面積と灌漑定数から農業用水使用量、都市別工業廃水排出量から都市の工業用水使用量、都市別給水人口から都市生活用水使用量をそれぞれ推計する。以上から得られる情報により、黄河流域の断流について、定性的分析を行うとともに、今後の検討課題としての水需給評価フレームについて述べる。

2. 断流の現状

2.1 解析対象範囲

本研究で対象とする黄河流域を図1に示す。通常、河川の流域は標高データから求められる稜線に基づいて決定する。しかし流域が広大であり、支流も多くあるため、ここでは、中国科学院地理研究所のデータセット (LREIS Data (1:4,000,000))⁴⁾ から河川データ及び県レベルの行政区データを用いて切り出しを行った。切り出しは、まず、黄河の本流、支流の河川ライン

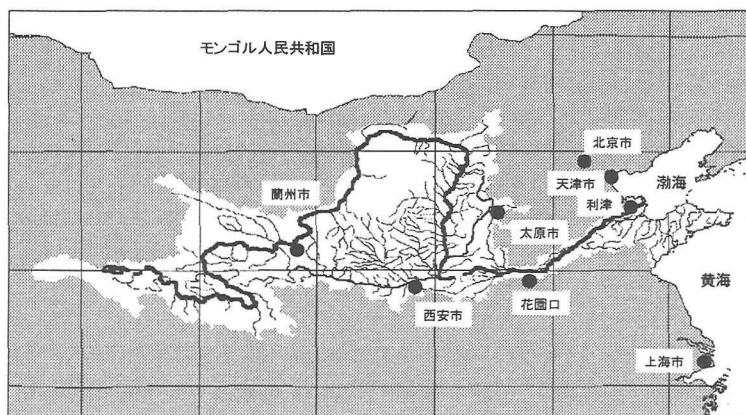


図1 黄河流域

リゴンデータのオーバーレイを行った。そして、河道と交わる県レベルの行政区は全て流域であるとみなすことにより流域境界を特定した。

図2は、メッシュデータから算出した流域全体の平均的な降水量の月変化をみたものである。黄河流域では、年次的変化が極めて大きいという特徴があり、ほとんどの降雨が6月から9月にもたらされている。また、近年、降雨量の減少による絶対的な水資源量の減少が見られる。「黄河下流断流状況及び対策」⁵⁾によれば、1990年から1997年の黄河流域の降水量は例年に比べ10%～21%減少している。特に1997年の降水量は、例年より13%～41%減少している。

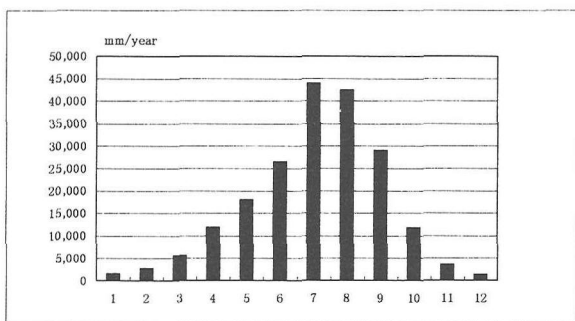


図2 黄河の流域全体の月別降雨量

需要に関しては、流域全体に渡り、消費量の年間を通じての増大があげられる。下流域（断流の観測された上流）では、夏小麦やトウモロコシ生産のために夏に灌漑水需要が集中する。図3は、黄河流域の人口分布であり、流域全体で約1億5千万人に上る。人口50万人以上の大都市は、黄河下流域及び渭河流域に集中している。これらの地域の経済発展及び都市化に伴う水需要の増大している。近年の断流現象の原因を解明するためには、水需要の定量的な把握が必要である。その上で、それぞれの地点の供水可能量と需要量の変化を時間的に捉える必要がある。河川から取水した水のどの程度が再び河川に戻されるのか、あるいは河川以外からの取水がどの程度であるかなど様々な要因を考慮に入れなければならない。

2.2 断流の状況及び特徴

黄河下流において、最初の断流が記録されているのが1972年の4月23日で、山東省の利津観測所で観測さ

れ、19日に及んだ。黄河下流で1972年から1997年の26年の中で断流が発生しなかったのは僅かに6年で、5年のうちの4年は断流が発生していることになる。表1は利津観測所における断流の観測状況を示したものであるが、20年間、累計で70回発生し、その日数は908日に上っている。断流が発生した年のみの平均では毎年45.4日断流が発生していることになる。1991年から1997年にかけては毎年断流が発生し、累計で717日、毎年平均で102.4日断流が起きている。

これまでのデータから言える事は、まず、発生期間が長くなっていることである。1972年から1991年までは早くても4月に発生していた断流が、92年以降になると、殆どの年で2月もしくは3月に発生している。最後の断流が終わる時期も8月から12月へと遅くなっている。次に、断流の日数も増加している。1972年から1991年は断流は平均で15日（断流が発生した年での平均）だったのが、92年以降には102.4日に増加し、特に過去3年間の発生日数は際立って多い。図4は黄河下流における断流の長さをグラフにしたものである。1981年は例外としても、1995年以降の長さはそれま

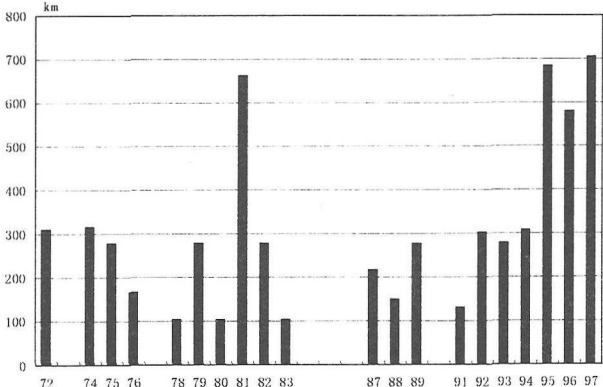


図4 黄河の断流の長さ
出典：「黄河下流断流状況及び対策」⁵⁾

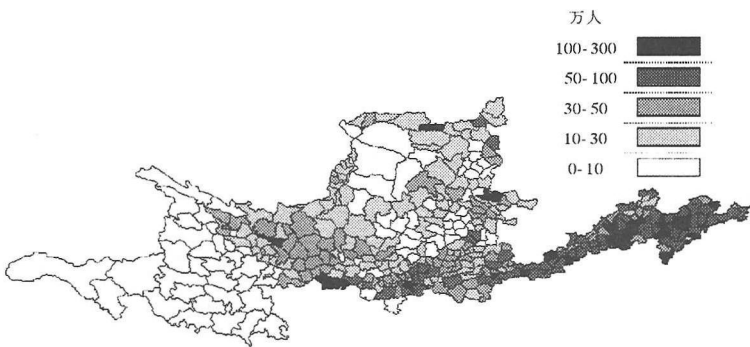


図3 黄河流域の人口分布（1990年）
出典：中国分県農村経済統計概要⁶⁾

表1 黄河下流域（利津：最下流観測地点）の断流の観測状況
出典：「黄河下流断流状況及び対策」⁵⁾

年	断流時間		対象期間 (日)	断流回数	断流日数(日)		
	最初	最終			全日	一時的	総計
1972	4月23日	6月28日	66	3	15	4	19
1973							
1974	5月14日	7月11日	58	2	18	2	20
1975	5月31日	6月27日	27	2	11	2	13
1976	5月18日	5月25日	7	1	6	2	8
1977							
1978	6月3日	6月27日	24	4		5	5
1979	5月27日	7月9日	43	2	19	2	21
1980	5月14日	8月24日	102	3	4	4	8
1981	5月17日	6月29日	43	5	26	10	36
1982	6月8日	6月17日	9	1	8	2	10
1983	6月26日	6月30日	4	1	3	2	5
1984							
1985							
1986							
1987	10月1日	10月17日	16	2	14	3	17
1988	6月27日	7月1日	4	2	3	2	5
1989	4月4日	7月14日	101	3	19	5	24
1990							
1991	5月15日	6月1日	17	2	13	3	16
1992	3月16日	8月1日	138	5	73	10	83
1993	2月13日	10月12日	241	5	49	11	60
1994	4月3日	10月16日	196	4	66	8	74
1995	3月4日	7月23日	141	3	117	5	122
1996	2月14日	12月18日	307	6	123	13	136
1997	2月7日	12月31日	327	13	202	24	226

表2 年間流量の実測値（億 m³）
出典：「黄河下流断流状況
及び対策」⁵⁾

年	花園口	利津
50年代平均	482.5	480.6
86	291.9	157.4
87	227.9	108.4
88	356.5	193.9
89	425.4	241.8
90	364.7	264.4
91	241.4	122.5
92	267.3	133.7
93	305.1	184.7
94	305.3	217.0
95	239.0	136.7
96	277.3	155.2
97	143.0	18.5

での年のおよそ2倍ほどに増加している。70年代の年平均の長さは242kmで、80年代には256kmであったものが、90年代には427kmに増加している。また、黄河の年間観測流量の低下も顕著に表れている。表2は花園口及び利津における実測データをまとめたものであるが、50年代には花園口で482.5億 m^3 であったが、1997年には143.0億 m^3 、利津では50年代に480.6億 m^3 であったのが、97年には18.5億 m^3 と大幅に減少している。表3は断流日数の月別の分布を示したものであるが、70年代、80年代の月別の断流は4、5、6の3ヶ月に集中していたが、90年代には2～7月と10月に集中している。

表3 河下流域（利津：最下流観測地点）の月別断流日数（日）
出典：「黄河下流断流状況及び対策」⁵⁾

	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
1972			4		15							19
1973					1							1
1974				5	4	11						20
1975				1	12							13
1976				8								8
1977												
1978					5							5
1979				5	7	9						21
1980				2	5		1					8
1981				12	24							36
1982					10							10
1983					5							5
1984												
1985												
1986									17			17
1987												5
1988					4	1						24
1989			5		5	14						
1990												
1991				15	1							16
1992		2	6	18	30	26	1					83
1993	4	16	9	3	26							60
1994			12	18	30	1			2			74
1995			10	30	30	23			13			122
1996	16	30	20	22	30	15					3	136
1997	22	20	7	16	30	31	21	26	28	21	4	226
合計	42	97	73	155	273	131	23	26	60	21	7	908

1997年の黄河下流における断流は、降雨と河川流量が平年に比べ明らかに少なかったこともあり、観測史上最も厳しいものであった。最初の断流は利津において2月7日と最も早く発生し、延べ日数は最長の226日にも及び、回数も最多の13回発生した。断流の発生した期間も2月から12月と11ヶ月に及んでいる。長さも最長であり、最上部は開封柳園口まで延び、長さは約700kmに至った。満水期も発生し、このことは歴史上稀に見るものであった。

3. 水資源量と使用量

3.1 黄河流域における水資源賦存量の推計

水の供給可能量を把握するために、まず、それぞれの地域での水資源量を求めることが必要である。ここでは、水資源量の面的な分布を把握するためにIIASAによるデータセット（Leemans & Cramer IIASA Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, Cloudiness on a Global Grid）⁷⁾の気温及び降水量のメッシュデータを用い、0.5度メッシュの精度で流域内の水資源量を推計する。可能蒸発散量推計は、気温から簡便に推計する方法であるThornthwaite法⁸⁾を用いる。さらに、降水量から蒸発散量を差し引くことにより、水資源賦存量を求める。蒸発散量は、土壌水分、被覆状態などに依存すると考えられるが、ここでは文献⁹⁾を参考に可能蒸発散量の2割とする。図5は求めた黄河流域の水資源賦存量である。流域全体の年間水資源賦存量は、3,112億トンと推計された。

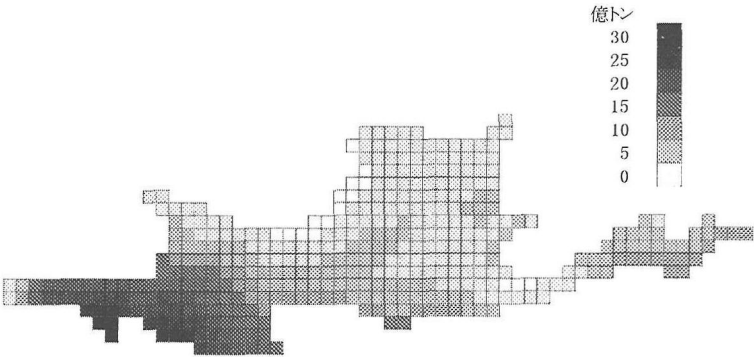


図5 黄河流域の水資源賦存量の分布

水量のメッシュデータを用い、0.5度メッシュの精度で流域内の水資源量を推計する。可能蒸発散量推計は、気温から簡便に推計する方法であるThornthwaite法⁸⁾を用いる。さらに、降水量から蒸発散量を差し引くことにより、水資源賦存量を求める。蒸発散量は、土壌水分、被覆状態などに依存すると考えられるが、ここでは文献⁹⁾を参考に可能蒸発散量の2割とする。図5は求めた黄河流域の水資源賦存量である。流域全体の年間水資源賦存量は、3,112億トンと推計された。

3.2 黄河流域における水使用量の推計

水の使用用途を農村用水として農業用水、都市用水として工業用水と都市生活用水として推計を行う。

水使用量 = 農村用水 + 都市用水

農業用水はすべて灌漑用水として推計する。中国分県農村経済統計概要（1991年）¹⁰⁾から、黄河流域に含まれる県及び市の有効灌漑面積のデータを得る。その値に中国水資源利用¹¹⁾から得られた黄河流域平均の有効灌漑

面積当たりの灌漑用水量（灌漑定数）を乗じることにより、農業用水の使用量を求める。都市用水については、工業用水は、データの制約上、工業廃水排出量を工業用水とする。工業廃水排出量については中国城市統計年鑑（1992年、1996年）¹⁰ から都市毎のデータを得る。これを工業用水の使用量とする。次に都市生活用水については、まず中国城市統計年鑑（1992年、1996年）¹⁰ から生活給水人口を得る。また中国統計年鑑（各年版）¹¹ から一人当たり生活用水使用量の全国平均値と1996年の省別の一人当たり生活用水使用量を得る。1996年の一人当たり生活用水使用量から全国平均に対する省の使用比を求める。この比が1992年でも成り立つとして、1992年の

一人当たり生活用水使用量の全国平均値に乘じ、1992年の省別での一人当たり生活用水使用量を求める。1992年及び1996年の生活給水人口に省別での一人当たり生活用水使用量を乗じることにより、都市生活用水使用量を求める。

図6は、1992年及び1996年の都市用水使用量の流域全体の合計を表したものである。工業用水については減少する傾向にあり、工業生産額が増加していることを考えると、工業用水の使用に関する技術は進歩していることが伺える。一方、都市生活用水は、給水人口及び一人当たりの使用量の増加に伴い、総使用量は増加している。特に、大都市である西安市や蘭州市での増加が大きい。

図7、8は農業用水と都市用水の推計結果を示したものである。

農業用水については、下流域への集中がわかる。これは、下流域が、中国で最も早くから農業が営まれた地域で、灌漑率も際立って高いためである。内蒙古での農業用水の多さは、この地域での灌漑率の高さによるものである。都市用水については、大規模な都市用水利用が、上流、中流、下流にそれぞれ点状にしている。これらの地域は、大きく5つに別れ、上流から蘭州市、包頭市、太原市、西安市、済南市をそれぞれ中心とした地域である。そのうち、太原市、西安市は支流（汾河、渭河）からの利用である。内陸地域ではそれほど都市用水の使用量は大きくないが、沿海地域では比較的大きい値を示している。

3. 需要と供給のバランス

本研究では、黄河流域の水資源需給バランスの悪化が断流とどのような関係にあるのかを評価するための最初のステップとして、水資源量の分布と使用量の分布を求めた。水資源量（図5）と使用量（図7、8）の面的な分布

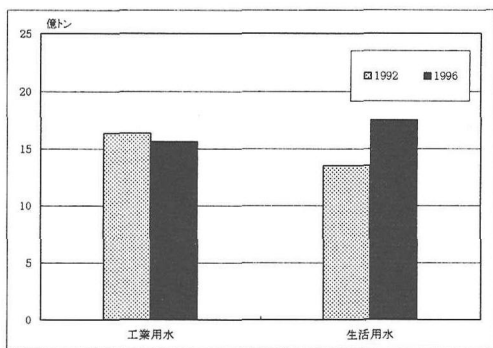


図6 都市用水使用量

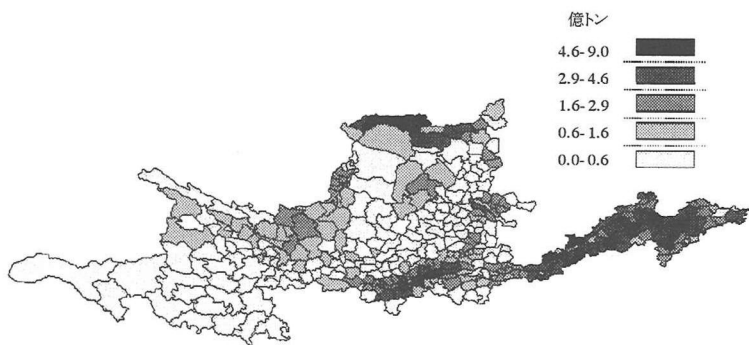


図7 県別農業用水使用量（1990年）

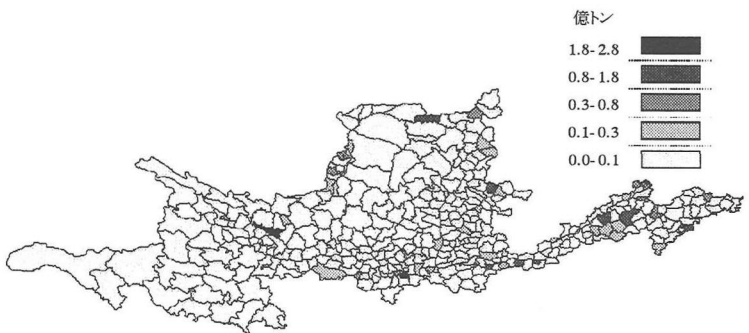


図8 都市用水使用量（1992年）

をマクロな視点から比較してみると、水資源の豊富な地域と大規模に使用する地域とは一致していない。図9の気温分布から、水資源の最も豊富な地域は、気温が低く、氷河または雪の状態での水資源であり、その多くは雪解けの起こる春以降、夏期にしか利用できないと推察される。上流で供給された水が、中流、下流で消費されるという地理的傾向をうかがうことができる。

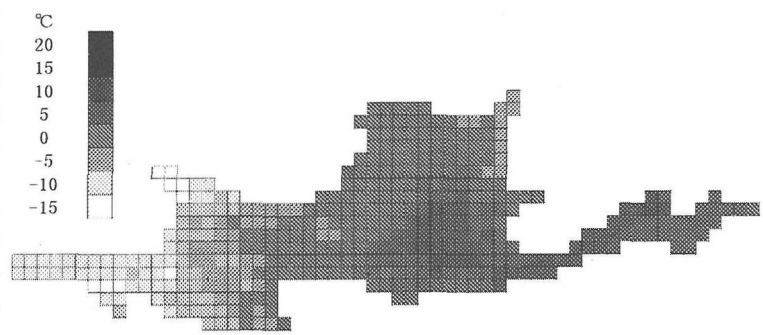


図9 年間平均気温

4. まとめと今後の課題

本研究では、黄河断流の現状把握を行った。さらに、この流域の気候分布データから水資源賦存量を推計し、さらに、農業用水、都市用水について県、都市レベルでの使用量を推計した。今後は、断流現象を引き起こすに至った自然による影響と人間活動による影響とを定量的に評価するためのモデル構築が課題である。広範な地域での水不足のメカニズムがモデル化されることとなれば、長期的な予測、さらに、そのために行う効果的な対策を可能とする。これは、水資源の不足が経済成長の制約となることが懸念されている中国の水資源問題を考えるための有益な考察材料となる。このためには幾つかの課題を解決していかなければならない。まず、水の供給地点と消費地点が地理的に隔たっているため、流域の各地点における供給可能量を定量的に推計するための水理モデルを作成しなければならない。また、取水された農業用水がどの程度、河川に再放流されるかを推定することが必要である。工業用水と生活用水における取水量と放出量との関係も把握しなければならない課題である。本研究は黄河における水資源を考える上での第一歩であり、このような研究成果を積み上げて、断流のメカニズム解明を目指していきたい。

参考文献

- 1) Lester R. Brown and Brian Hawell : China' s Water Shortage Could Shake World Food Security, <http://www.worldwatch.org/mag/1998/98-4a.html>(World Wide Web Resources), April 27, 1998
- 2) 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
- 3) 越智士郎, 柴崎亮介 : 1 KM DEMを用いたグローバル流域データセットの作成と水資源モデルの開発, 土木学会第6回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.309-314, 1998
- 4) 中国科学院資源及び環境情報システム国家重点実験室 (LREIS) : 中国1:400数値地図 (CD-ROM), 1996
- 5) 除効国 : 黄河下流断流状況及び対策, 1998
- 6) 国家統計局農村社会経済調査総隊 : 中国分県農村経済統計概要, 1991
- 7) IIASA : Leemans & Cramer IIASA Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, Cloudiness on a Global Grid, 1994
- 8) 樫根勇 : 水と気象, 朝倉書店, 1989
- 9) 水理電力部水利水電規画設計院 : 中国水資源利用, 1989
- 10) 国家統計局城市社会経済調査総隊 : 中国城市統計年鑑, 1992, 1996
- 11) 国家統計局 : 中国統計年鑑, 各年版