

中国甘肅省および内蒙古自治区における内陸河川の水質特性

Characteristics of Chemistry of Inland Rivers of Heihe and Shiyang River Basins
 in Gansu Province and Inner Mongolia, China

秋山知宏¹⁾ 藤田耕史¹⁾ 中尾正義²⁾ 安部 豊³⁾ 辻村真貴⁴⁾
 Tomohiro AKIYAMA Koji FUJITA Masayoshi NAKAWO Yutaka ABE Maki TSUJIMURA

- 1) 名古屋大学大学院環境学研究科
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
- 2) 総合地球環境学研究所
Research Institute for Humanity and Nature
- 3) 筑波大学大学院生命環境科学研究科
Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba
- 4) 筑波大学地球科学系
Institute of Geoscience, University of Tsukuba

本研究では、中国西北地方の乾燥域である黒河流域と、隣接する石羊河流域を対象とし水質形成過程を検討した。その結果、両流域ともに、沙漠域の地下水は山麓域のそれと比較して高塩分濃度であった。乾燥域では通常、流下に伴い蒸発作用により溶存成分の濃度が上昇することが一般的であるが、黒河流域では山麓域からオアシス域にかけて低濃度の地下水の流出によって希釈され、地下水の河川流量に対する寄与率は、オアシス域では80%程度にも達することが示唆された。石羊河の主流は山麓域でその全てが堰き止められているため、沙漠域に到達する河川水の大部分はオアシス域の支流から流れてきた水が占める。そのため、沙漠域における河川水の水質組成は支流と同じであった。

キーワード：乾燥域，黒河流域，石羊河流域，塩分濃度，主要溶存成分

Field investigations have been performed in order to understand the characteristics of chemistry of river water and groundwater in the Heihe and the Shiyang river basins in August and September 2001. These rivers are inland rivers in an arid area, which originate from glaciers in the headwaters and disappear in the desert area. The basins could be divided into three areas based on characteristics of water quality as well as the topography and the vegetation, those are mountain, oases and desert areas. High salinity was found in both basins, and the salinity was the highest in the desert area of both basins. Generally, a river in an arid area must be concentrated in salinity as it flows because of strong evaporation effect. In the mountain to oases areas of the Heihe river basin, however, the river was diluted with groundwater of low chemical concentration, and the contribution of groundwater to the total discharge would be approximately 80%. The discharge of the main stream of the Shiyang river is completely dammed up in the mountain area. Therefore, the chemical compositions in the desert area should be similar with that of a tributary in the oases area, but different from that of the main stream in the mountain area.

Key words: Arid area, Heihe river basin, Shiyang river basin, Salinity, Chemical composition

はじめに

中国では地下水の過剰揚水により、近い将来現在の食糧生産が困難になると予想されている(ブラウン, 1995)。とくに、中国総面積の24.5%をしめている新疆ウイグル自治区、甘肅省の河西回廊および

賀蘭山西側の内蒙古自治区は、内陸の乾燥地域を形成しており、きわめて水資源の乏しい地域である。これらの中国西北地方の乾燥地においては氷河や積雪の融解水が表流水の主要源となっており、全流出量の23~43%をしめる(Feng and Li, 1997)。甘肅省は西から疏勒河、黒河、石羊河の3つの大きな流域

1) 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 地球水循環研究センター 気付 c/o Hydrospheric Atomspheric Resesarch Center, Nagoya, 464-8601, Japan

2) 〒602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入の高島町335 Kyoto, 602-0878, Japan

3) 4) 〒305-8571 つくば市天王台1-1-1 Tsukuba, 305-8571, Japan

を保持しており、各河川の主流路はそれぞれおよそ250km程度離れている。これらの河川はいずれも、源流域の氷河を源とし、下流の末端において消失する乾燥地の内陸河川を形成している。

陸水の水質特性を把握することは、今後の気候変動に伴う降水量、蒸発散量および氷河流出量の変化、人為的な土地改変や産業の発展、さらに砂漠化が進行した場合などの環境変化に対する水資源の水質変化を予測する上で重要となる。

中国の乾燥・半乾燥域における陸水の水質特性を研究した事例として、堀内ほか(1999)は中国新疆地域において河川・地下水の流下に伴い塩分濃度が上昇するとともに、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} および Cl^- の割合が変化すること、一方 Ca^{2+} が急速に低下しそれに換わり Na^+ が上昇することを指摘した。吉岡・奥村(1989)は、内蒙古自治区毛烏素沙地において、降水、地下水、池水、ダム貯水などの広域サンプリングを実施し、それらの化学的特徴を分類した結果、表層水の水質形成に蒸発が影響していることを示した。しかしながら、中国西北地方の乾燥域においては、きわめて水資源が乏しいと言われているにもかかわらず、いまだ基礎的情報さえ不足している。そこで、本研究ではとくに情報の不足している中国甘肅省および内蒙古自治区における黒河および石羊河流域を対象に、水質形成過程を検討する。

・対象流域と調査概要

1. 黒河流域

図-1に対象地域である黒河流域を示す。黒河流域は、中国青海省、甘肅省、内蒙古自治区にわたる、東経97度00分～102度00分、北緯38度00分～42度30分に位置し、緯度は日本の仙台～札幌にほぼ相当する。黒河(Heihe)は、チベット高原北縁を形成する祁連山脈に源を発し、甘肅省の中心地である張掖を通して北流し、内蒙古自治区に入って消滅する中国第2位の内陸河川で、全長約400km、流域面積約130,000km²である。黒河流域には、主として東側の黒河と西側の北大河の2つの水系が存在する。北大河はかつて中流の金塔付近において黒河と合流していたが、水需要が増大するに伴い金塔までは到達しなくなったと言われている。

黒河流域は、標高2,500～5,547mの山麓域、標高1,200～2,500mのオアシス域、標高850～1,200mの沙漠域からなる。山麓域には氷河があり、流域全体の涵養域となっている。オアシス域は、岩石沙漠で

覆われる山麓扇状地と、その末端に位置する湧水帯に発達するオアシス都市からなる。河川は沙漠域で末端湖を形成した後消失する(図-1)。山麓域では少数の遊牧民が暮らす程度であるが、オアシス域では灌漑農業を営む多くの人々が存在する。とくに張掖における1970年、1980年、1990年の人口は、それぞれ315,940,370,530,429,903人と急速に増加した(甘肅省張掖市志編集委員会,1995)。張掖市人民政府(http://www.zy.gansu.gov.cn/zygov/gov_leader/jbqk1.htm)によると2001年のそれは1,264,100人にも達しているようである。沙漠域では額濟納旗とよばれる小規模なオアシス都市に2万人程度が居住しているものの、それ以外には大きな都市がなく、少数の人々が遊牧を営んでいる。オアシス域では、近年工業化が進んでおり、灌漑用水だけでなく工業用水としての水需要も無視できなくなっている。中国科学院蘭州沙漠研究所編(1988)の黒河流域草場類型図に記載されている年降水量の等値線から読み取られる各地域の年降水量は、山麓域において200～400mmで標高が高いほど降水量は多い。オアシス域では100～200mm、沙漠域では100mm未満である。このような条件下で、山麓・オアシス域には複数のダムが建設されており灌漑用水等の水利用が管理されている。農業活動の盛んな春先から10月初旬にかけて山麓・オアシス域の甘肅省内で大部分の水が消費される(Wang and Cheng, 1999)。このため、オアシス域と沙漠域の境界付近において黒河は消失する。とくに、末端湖である居延澤は近年枯渇し、沙漠域で暮らす人々は地下水に依存した生活形態をとると言われている。しかしながら、1999年から2001年のLANDSAT TM画像の解析によれば、秋から春にかけての季節には、最下流域まで黒河が消失しないことが示唆されている(秋山,2001)。これは、黒河流域における地空相互作用に関する日中共同研究(HEIHe river Field Experiment: HEI F E)の流出データからも示されている。(玉川,2002)。

2. 石羊河流域

石羊河流域は図-2に示すように青海省、甘肅省にわたる、東経101度50分～104度00分、北緯37度50分～39度40分の範囲で、黒河流域の南東端に隣接している。石羊河は全長約250km、流域面積は約11,000km²で、黒河流域と比較すると小規模である。石羊河流域においても黒河流域と同様、地形および

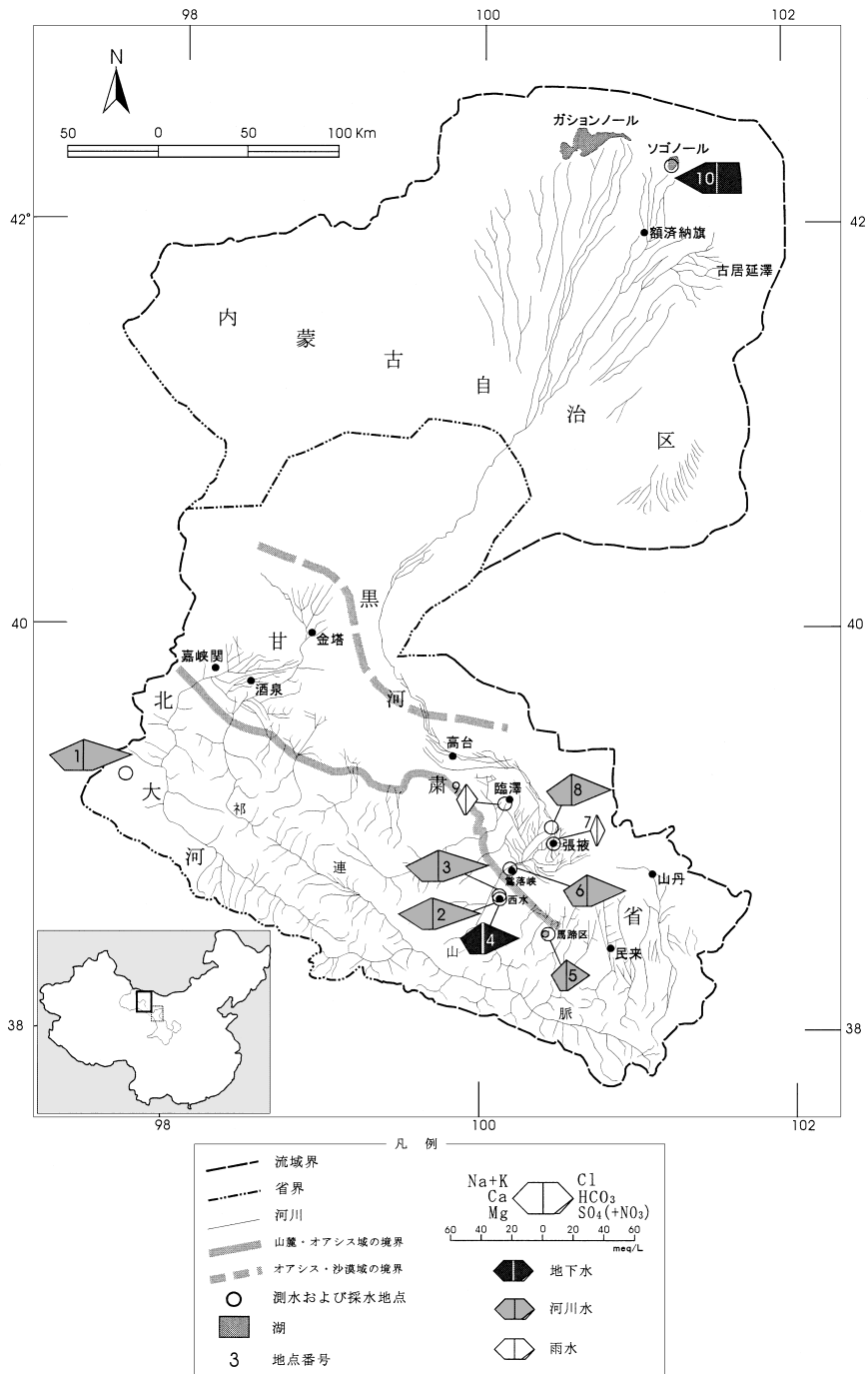


図 - 1 黒河流域におけるヘキサダイアグラムを用いて表現した河川水、地下水および降水の溶存イオン組成の空間分布。

Fig. 1 Spatial distribution of chemical composition of river water, groundwater and precipitation in the Heihe river basin.

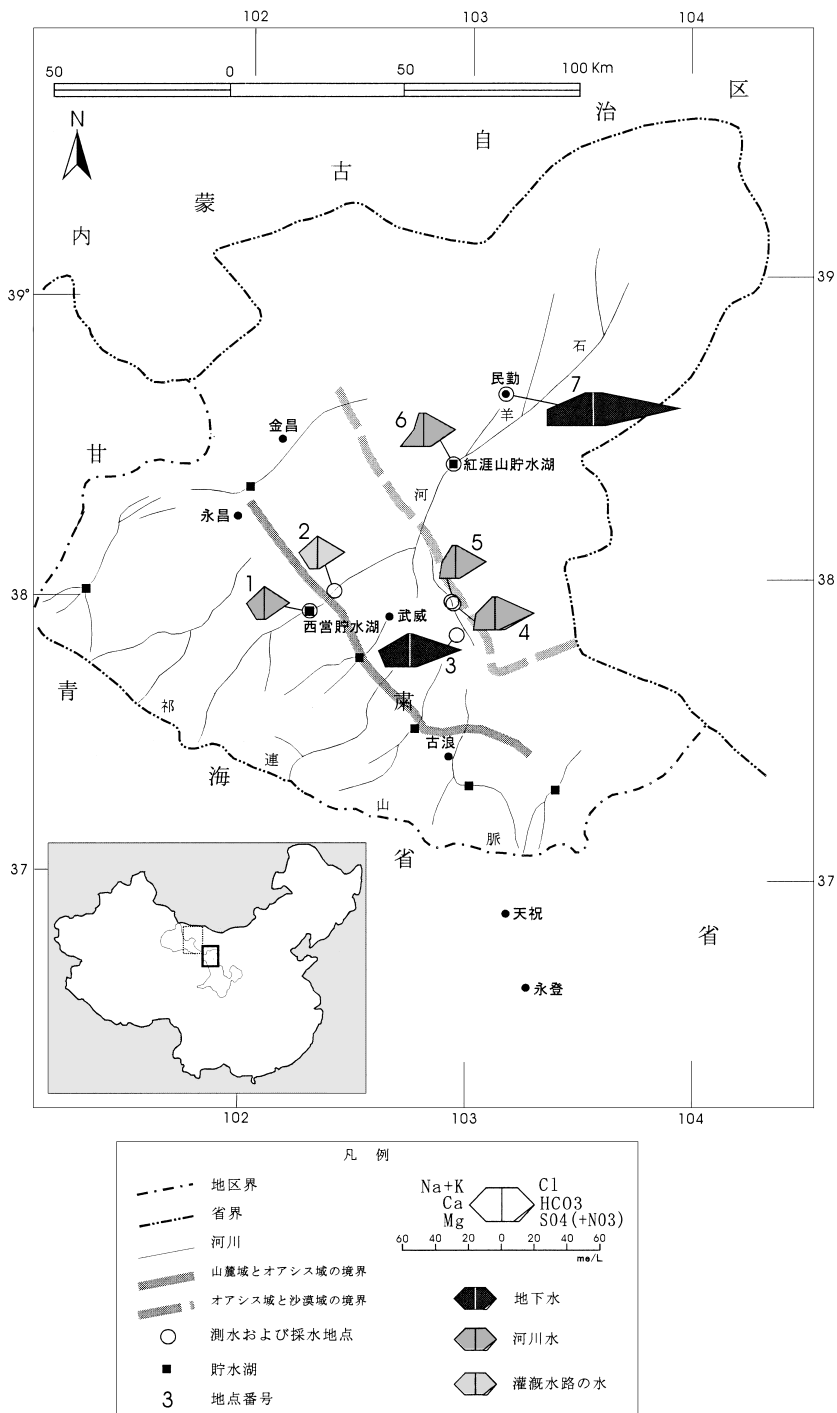


図 - 2 石羊河流域におけるヘキサダイアグラムを用いて表現した河川水および地下水の溶存イオン組成の空間分布。

Fig. 2 Spatial distribution of chemical composition of river water and groundwater in the Shiyang river basin.

植生の状況から、水資源の涵養域である上流の山麓域、人間活動の盛んな中流のオアシス域、末端湖を形成し河川が消失する下流の沙漠域に地域区分が可能である(図-2)。石羊河は山麓域の西営貯水湖において河川流量のすべてが堰き止められ、中流のオアシス都市である武威周辺に供給される。そのため西営貯水湖より下流において河川は消失する。この対策として、黄河から導水が行われ、オアシス域のNo.4およびNo.5付近の支流に放流されるが、それにも関わらず沙漠域では深刻な水不足が生じている。ただし、今回の調査期間である2001年8月10日から8月14日は、黄河からの導水は行われていなかった。現地において西営貯水湖および沙漠域に位置する紅涯山貯水湖の管理者に対し実施した聞き取り調査によれば、近年灌漑用水の取水量が涵養量を上回ってきたため、両貯水湖の水位が著しく低下してきたと考えられる。調査期間中の西営貯水湖の貯水量は約28%で、紅涯山貯水湖のそれは約3%であった。

3. 調査概要

黒河流域において、2001年8月28日～9月19日、全10地点の降雨、河川水、地下水を、石羊河流域において、2001年8月10日～8月14日、全7地点の河川水、灌漑水路の水、地下水を採取し、電気伝導度(EC)、水温、pHを測定した。試水に溶解している全溶存イオン濃度の指標となるECおよびpHは、携帯用分析器(横河電機 pH81-11, SC82)を用いて測定したが、現地において未測定のサンプルについては、帰国後、コンパクト分析器(堀場製作所 Twin Cond B-173, Twin pH B-212)を用いて測定した。これは、試水の量に制約があったことによる。一方、水サンプルについては、試水で共洗いした30mlポリエチレン製容器に0.20μmフィルターで濾過した後採水し、帰国後溶存成分を筑波大学分析センターにおいて分析した。Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、F⁻、Br⁻、PO₄²⁻についてはイオンクロマトアナライザー(島津製作所 PIA-1000)を用いて測定し、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、SiO₂、Fe²⁺についてはプラズマ発

表 - 1 黒河および石羊河流域における主要溶存イオンの重量濃度および塩分濃度。白色、薄灰色と灰色網掛けはそれぞれ河川水、地下水、降雨を示す。上流、中流、下流域はそれぞれ山麓、オアシス、沙漠域である。

Table 1 Concentration of chemical composition and salinity of water samples in the Heihe and Shiyang river basin. River water, groundwater and precipitation are shown with white, gray and gray mesh, respectively. Upper, middle and lower reaches correspond with mountain, oasis and desert area, respectively.

	No.	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si	Fe ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ²⁻	塩分濃度	
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
黒河 流域	上	1	2.6	5.3	441.8	152.6	3.9	0.003	5.7	5.7	271.5	1939.1	0	0	0	0	2824.3
		2	17.4	7.4	455.3	79.8	13.9	0.007	14.4	10.2	44.4	1925.0	0	0	0	0	2553.9
		3	17.5	7.2	428.3	132.9	14.1	0.006	25.1	13.2	117.7	2001.6	0	0	0	0	2743.4
		4	9.6	10.6	297.5	104.3	11.8	0.005	8.4	6.2	91.2	1465.4	0	0	0	0	1993.0
		5	3.4	2.4	203.9	50.4	12.0	0.003	3.5	4.3	18.6	936.3	0.034	0	0	0.3	1222.7
		6	8.2	8.3	309.5	115.4	14.9	0.004	7.3	3.9	104.9	1543.7	0.08	0	0	0	2101.0
		7	2.5	13.7	87.1	6.7	6.8	0	7.4	0.3	18.9	318.3	0.019	0.2	0	1.2	454.9
		8	8.2	6.3	313.0	110.9	14.8	0.005	4.9	3.2	72.6	1578.1	0	0	0	0	2097.1
		9	0.5	2.7	122.4	12.5	10.9	0.015	1.5	1.5	4.7	473.0	0.042	4.7	0	0	618.7
		下	10	168.3	9.7	555.1	114.2	38.5	0.001	508.3	24.1	756.6	951.1	0.409	0	0	14.1
石羊 河流域	上	1	2.5	2.5	219.7	57.4	13.8	0	2.8	38.4	37.4	963.3	-	-	-	-	1324.1
		2	2.9	3.2	229.5	59.8	14.0	0	3.0	35.7	40.2	1010.3	-	-	-	-	1384.5
		3	25.5	13.2	382.2	183.0	39.4	0.003	59.6	72.1	188.2	1930.5	-	-	-	-	2854.3
		4	37.8	19.9	238.0	163.6	40.5	0.003	50.7	94.7	134.1	1456.8	-	-	-	-	2195.6
		5	29.9	33.0	168.8	121.7	36.7	0	40.8	2.3	111.5	1143.6	-	-	-	-	1651.7
		6	44.6	36.9	127.5	174.6	4.3	0	55.3	-	205.1	1191.6	-	-	-	-	1835.6
		7	93.1	33.4	568.8	347.7	39.4	0.010	181.7	43.7	379.6	3227.1	-	-	-	-	4875.1

光分光分析装置(Nippon Jarrell-Ash ICAP-575 Emission Spectrometer)を用いて測定した。HCO₃⁻は、測定した陽イオンの総当量濃度と陰イオンのその残差として計算した。塩分濃度は、測定した陽イオンおよび陰イオンの総重量濃度と、推定したHCO₃⁻の重量濃度の和によって表現した。

・結果及び考察

黒河および石羊河流域における主要溶存イオンの重量濃度および塩分濃度を表 - 1 に示す。黒河流域の地下水の試水は山麓域の不圧地下水と沙漠域の被圧地下水で、塩分濃度は山麓域の 1,990mg/l から沙漠域の 3,090mg/l まで約 1.5 倍に上昇した。一方、石羊河流域の地下水の試水はオアシス域と沙漠域の不圧地下水で、塩分濃度はオアシス域の 2,850mg/l から沙漠域の 4,880mg/l まで約 1.7 倍に上昇した。河川水の塩分濃度は、いずれの流域とも局所的な差が大きかった。黒河流域の pH は、河川水で 8.0 ~ 8.4 の間にあり、地下水では 8.0 ~ 8.2、降雨では 7.8 ~ 8.0 であった。

1. ヘキサダイアグラムを用いて表現した溶存イオン組成の空間分布

黒河および石羊河流域におけるヘキサダイアグラムを用いて表現したサンプルの溶存イオン組成の空間分布をそれぞれ図 - 1、図 - 2 に示す。

黒河流域における沙漠域の地下水は山麓域のそれに比較して Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ がそれぞれ 6.9meq/l、12.9meq/l、14.1meq/l、13.8meq/l 高く、HCO₃⁻ は 7.7meq/l 低かった。この傾向は、新疆地域における堀内ほか(1989)の結果とも一致する。河川水の水質組成の型は一様に Ca-HCO₃ 型であるが、山麓域(No. 2)からオアシス域(No. 8)にかけて溶存成分の濃度が低下する傾向が見られる(図 - 1)。

石羊河流域における沙漠域の地下水はオアシス域のそれと比較し Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ がそれぞれ 2.9meq/l、9.3meq/l、13.6meq/l、3.4meq/l、4.0meq/l、19.4meq/l 高く、水質組成の型は Ca-HCO₃ 型から Mg-HCO₃ 型へ変化する。また、オアシス域支流(No. 4, No. 5 を通る流線)の河川水は、山麓域本流(No. 1, No. 6 を通る流線)のそれに対して Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ が高く、水質組成の型は支流が Mg-HCO₃ 型であるのに対して本流は Ca-HCO₃ 型であった。本流は西営貯水湖でその全てが堰き止められているため、沙漠域に到達する河川水

の大部分が、オアシス域の支流から流れてきた水によって占められる。したがって、沙漠域における河川水の水質組成の型も支流と同じ Mg-HCO₃ 型であった(図 - 2)。

以上から、黒河および石羊河流域において、山麓域、オアシス域および沙漠域の水質組成の型を試水の種類別にまとめると、それぞれ表 - 2、表 - 3 のようになる。

2. トリリニアダイアグラムを用いて表現した水質組成

黒河および石羊河流域におけるトリリニアダイアグラムを用いて表現した河川水、地下水および降水の水質組成をそれぞれ図 - 3、図 - 4 に示す。

黒河流域の河川水、地下水のイオンバランスは、沙漠域の地下水を除けばほとんど同じであった。とくに、山麓域(No. 2)やオアシス域(No. 8)の河川水のイオンバランスが同じであるだけでなく、山麓域の地下水(No. 4)のそれもまた同じであった。したがって、前述した山麓域(No. 2)からオアシス域(No. 8)にかけての濃度低下の原因は、山麓域の低濃度の地下水(No. 4)が河川に混入するためであると考えられる。河川は流下に伴って蒸発の影響を受けるはずであるが、それ以上に希釈の影響が強いと

表 - 2 黒河流域の山麓域、オアシス域および沙漠域における試水の種類の水質組成。

Table 2 Types of chemical composition of water samples in mountain, oasis and desert area of the Heihe river basin.

	山麓域	オアシス域	沙漠域
降雨		HCO ₃ -Ca	
河川水	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	
地下水	HCO ₃ -Ca		SO ₄ -Ca

表 - 3 石羊河流域の山麓域、オアシス域および沙漠域における試水の種類の水質組成。

Table 3 Types of chemical composition of water samples in mountain, oasis and desert area of the Shiyang river basin.

	山麓域	オアシス域	沙漠域
降雨			
河川水	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Mg	HCO ₃ -Mg
地下水		HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Mg

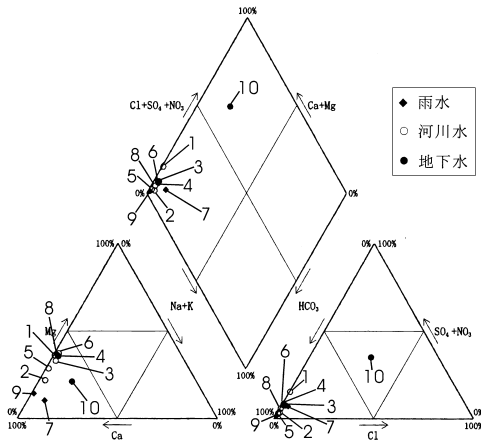


図 - 3 黒河流域におけるトリリニアダイアグラムを用いて表現した河川水、地下水および降水の水質組成。

Fig. 3 Trilinear diagram of river water, groundwater and precipitation in the Heihe river basin.

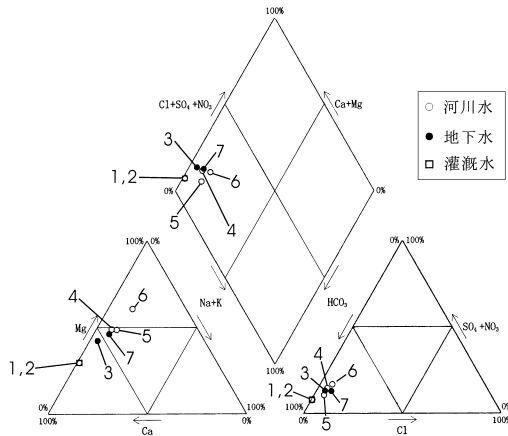


図 - 4 石羊河流域におけるトリリニアダイアグラムを用いて表現した河川水および地下水の水質組成。

Fig. 4 Trilinear diagram of river water and groundwater in the Shiyang river basin.

考えられる．そこで，河川が No. 2 から No. 8 にかけて流下に伴い，No. 4 と同じ濃度の地下水により一様に希釈されると仮定したときのそれぞれの混合割合は，下記の式で求められる．なお，流下過程における濃縮の寄与が全くないと仮定する．

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \tag{1}$$

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C_3Q_3 \tag{2}$$

ここで， Q_1, Q_2, Q_3 はそれぞれ混合前の河川水，混合する地下水，混合後の河川水の流量 C_1, C_2, C_3 はそれぞれ混合前の河川水，混合する地下水，混合後の河川水の塩分濃度で，それぞれ 2550mg/l, 1990 mg/l, 2100mg/l を適用する(表 - 1)．塩分濃度を用いた理由は，それぞれの組成がほぼ同じであったためである．その結果，中流域の河川水は，少なくとも 8 割程度が地下水，残りは上流の河川水によって構成されていることが示唆された．本計算では，流下過程に伴う水面からの蒸発は無視し得ると仮定したが，その影響を考慮すれば地下水が河川に流出する成分は 8 割を超えると考えられる．また，地下水は山麓域と沙漠域とは水質組成の型が著しく異なり，Ca-HCO₃型から Ca-SO₄型へ変化する．オアシス域より下流では人口密度が 0.6 人/km² ときわめて小さく，人間活動の影響は大きくないと考えられるため，主として岩石や土壌からの溶出によるものか，あるいは水質組成の異なる水が混入している可能性がある(図 - 3)．

石羊河流域では各地点のイオンバランスのばらつきは小さいが，本流と支流の水系の 2 つに区分することができる．支流の水系はイオンバランスがほぼ同じであるため，支流は流下する過程で水質が大きく異なる水との混合やイオン交換作用があまり無く，主として強い蒸発作用によって濃縮されていると考えられる(図 - 4)．

謝辞：本研究は文部科学省総合地球環境学研究所によるプロジェクト「水資源変動負荷に対するオアシス地域の適応力評価とその歴史の変遷(研究代表者：中尾正義)(略称：オアシスプロジェクト)の補助を得ました．総合地球環境学研究所の窪田順平助教，福井工業大学工学部の宇治橋康行助教，名古屋大学大学院環境学研究科の上田豊教授には本稿に関し，有益な御助言をいただきました．記して感謝します．

引用文献

秋山知宏(2001): 居延澤の変動解析に向けて．総合地球環境学研究所 オアシス地域研究会報, 1, 14-21 .
 ブラウン・レスター(今村奈良臣訳)(1995): だれが中国を養うのか?．ダイヤモンド社, 195pp .
 Feng, G. and Li, P(1997): Defects of natural distribution and strategies of sustainable development

and utilization of water resources in northwest China. *Agricultural Research in the Arid Area*, **15**, 64-71.

甘肅省張掖市志編集委員会編(1995): 張掖市志. 甘肅人民出版社, 1062pp.

堀内清司・渡辺真木・北岡豪一(1989): 乾燥地域の水 中国新疆地域を例として. *日本水文科学会誌*, **29**, 111 - 122.

玉川一郎(2001): 河西回廊での水文気象研究 HEIFE. *総合地球環境学研究所, オアシス地域研究会報*, **1**, 61-74.

Wang, G. and Cheng, G. (1999): Water resource development and its influence on the environment in arid areas of China -the case of the Hei river basin. *Journal of Arid Environments*, **43**, 121-131.

吉岡龍馬・奥村武信(1989): 毛烏素沙地における天然水の化学・同位体組成について. トヨタ財団助成研究報告書, 中国の乾燥地における沙漠化の機構解明と動態解析 毛烏素沙漠の砂漠緑化と農業開発に関する基礎的研究, 128-132.

(受付: 2002年10月2日, 受理: 2003年8月26日)