

沙漠における天然水の水質形成機構について

——内蒙古自治区毛烏素沙漠を例として——

吉岡 龍馬・奥村 武信・平岡 義博

MECHANISM OF WATER QUALITY FORMATION OF NATURAL WATERS IN DESERT

—— A CASE OF MU US SHAMO DESERT, INNER MONGOLIAN
AUTONOMOUS REGION ——

By *Ryuma YOSHIOKA, Takenobu OKUMURA and Yoshihiro HIRAOKA*

Synopsis

27 water and 5 soil samples were collected to investigate a mechanism of water quality formation of natural waters in the Mu Us Shamo desert, Inner Mongolian Autonomous Region. The chemical and isotopic compositions in water samples were analyzed.

Quartz, feldspar, muscovite, chlorite, slate, chert, calcite and magnetite in soil samples were identified by means of both the polarization microscope and X-ray diffraction data. And also the chemical composition in the mineral was studied using X-ray microanalyser.

The results obtained were examined from a geochemical view point. The minerals reacted with CO₂-contained water in this area. Chemical constituents such as Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ and K⁺ were dissolved from the minerals to natural waters, and the Na-HCO₃·Cl water type of final evolution in this area was formed through ion exchange, precipitation and evaporation processes.

1. はじめに

森林破壊と並んで、自然破壊が沙漠化、不毛化、そして土壌侵食という形でも進行している。アフリカのスーダン・サヘル地域は、世界でもっとも沙漠化が進行している地域で、近年、大規模な干ばつによる飢餓が発生した。中国の北部から北西部にかけての内蒙古、甘肅、寧夏、青海、新疆の五つの省・自治区も、森林面積がわずか1.1%しかないという¹⁾。

沙漠における天然水の水質機構を調べるために、1950年代になって沙漠化が急速に進行した内蒙古自治区毛烏素沙漠の「毛烏素沙地開発整治研究中心」周辺で、1987年4月24日から8月28日までに採取された地下水、池水、ダム貯水、湖水、雨水の27試料の主要化学成分、水素・酸素の安定同位体比 (δD , $\delta^{18}O$)、トリチウム (3H) の測定を行った。

また、この地域の2地点で土壌5試料(0~30 cm 深)も採取し、鉍物同定(偏光顕微鏡, X線回折)、鉍物の元素分析(X線マイクロアナライザー)もあわせて行った。

2. 毛烏素沙漠の概略

中国の沙漠地帯は、北緯 37~47° の間に分布し、総面積 127万 km²、中国陸地面積の約13%を占めている²⁾。このうち、毛烏素沙漠は中国沙漠地帯の東端の沙漠で、黄河の流れに三方を囲まれたオルドス高原(標高 1000~1500 m)にある。本沙漠はこの高原の南半分を占めているが、最近の25年間に年間約 10万 ha の速度で沙漠化が進行しており、その面積は現在約 400万 ha と推定されている。それは内蒙古自治区、陝西省、寧夏回族自治区にわたって分布している³⁾。

本地域が沙漠化した要因には、自然環境要因と社会環境要因とがある。まず自然環境要因として、①気象要因がある。年降水量がわずか 340 mm 程度であるうえ、年変動が大きく、干ばつ年の降水量はさらに減少すること、北~北西の風速および降雨強度が大きく土壌の風食、水食が著しいことである。②水資源要因は、地下水源の全体的な開発、利用組織が十分でないので地下水の一部は利用されないまま南東部の河川に流出していること、およびこの地下水が塩類化している場合には塩類沙漠もみられることである。③土壌要因としては、地盤が脆弱な砂岩層で構成されている場合が多いので、風食、水食作用で砂状化しやすいことである³⁾。

次に、社会環境要因としては、住民の土地利用上の問題として植被の乱伐、過放牧、無計画な開墾、灌漑に伴う水管理や土壌管理の不備が上げられる。このような社会環境要因による加圧の結果、植被域の減少、砂岩層の露出が生じ、これに水食、風食等の自然環境要因が相乗的に作用して沙漠化の度合が一層進行することになる。さらに、無計画な水管理と土壌管理の結果、地下水源の涸渇と土壌の塩類化、ひいては地下水の二次的塩類化が生じ塩類沙漠化へ進行することが推測される³⁾。

3. 採水地点

試料の採取は、Fig. 1 に示した地点で、1987年 4月24日から 8月28日にわたって行った。研究中心の井戸水、東の池の水および雨水は毎月 1回採取し、その他の試料は 4月から 5月に 1度だけ採取した。また、研究中心周辺の 2地点で土壌試料の採取も行った。

4. 分析項目および分析方法

4-1 水の試料

pH: 比色管, 水温: アルコール温度計または Pt 測温体

Na⁺, K⁺: 炎光光度法, Mg²⁺, Ca²⁺: 原子吸光光度法

Cl⁻: チオシアン酸水銀比色法および AgNO₃ 滴定法

HCO₃⁻: HCl 滴定法

SO₄²⁻: クロム酸バリウム酸懸濁法

SiO₂: モリブデン酸黄色法

NO₃⁻-N: Cd-Cu カラムにより NO₂⁻ に還元後スルファニールアルミド比色法

NH₄⁺-N: フェノール・ニトロプルシッドナトリウム比色法

PO₄³⁻-P: モリブデン酸黄色法

³H: 低バックグラウンド液体シンチレーションカウンター法

δD: 金属ウランによる H₂O 還元法と質量分析法

δ¹⁸O: CO₂ と H₂O との交換法と質量分析法

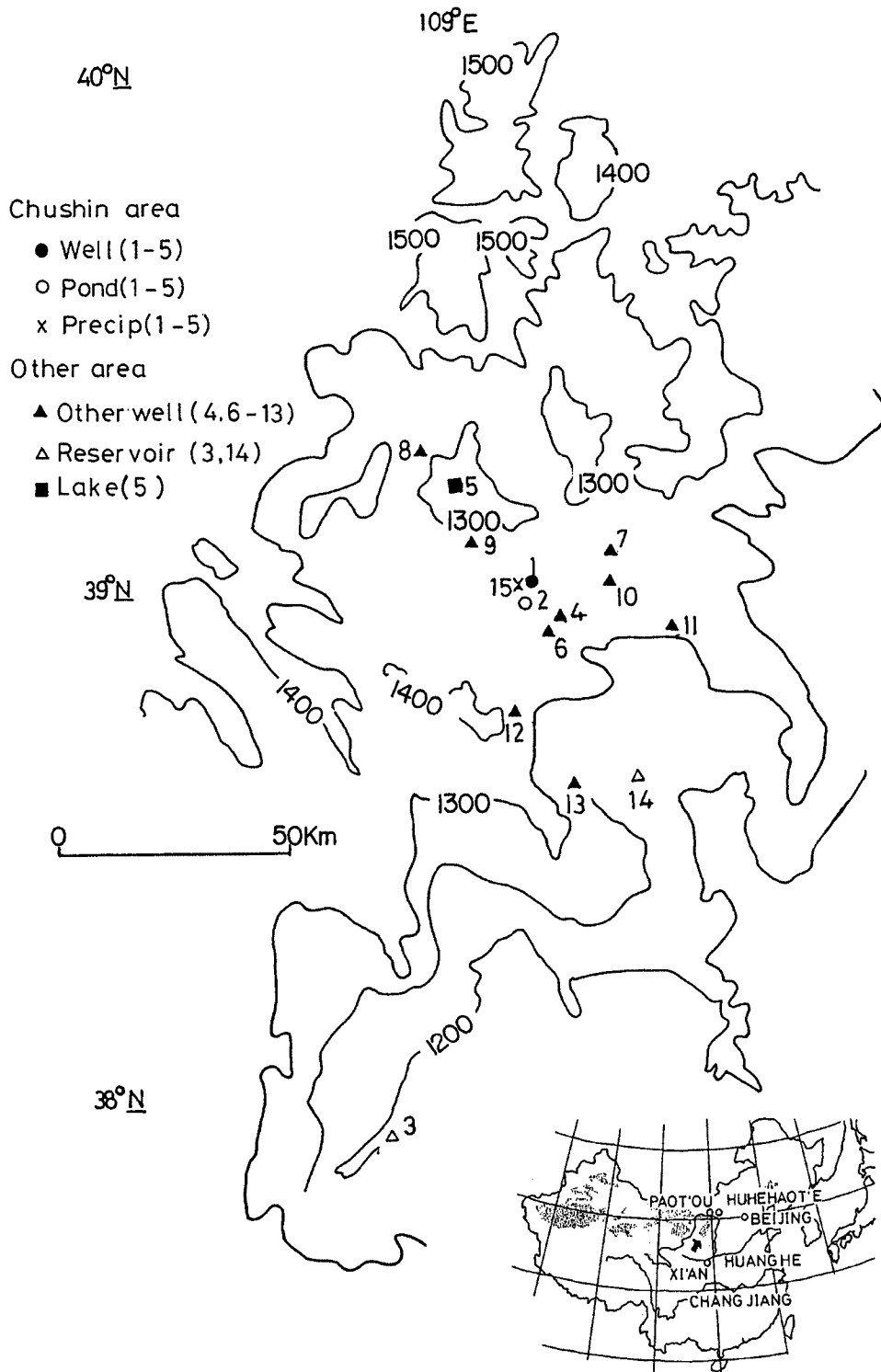


Fig. 1. Sample localities in the Mu Us Shamo desert. Dotted part shows desert. Arrow indicates the Mu Us Shamo desert.

4-2 土の試料

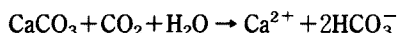
鉱物の同定：偏光顕微鏡，X線回折

鉱物の元素分析：X線マイクロアナライザー

5. 結果と考察

5-1 水の試料について

分析結果は Table 1 のとおりである^{4),5)}。以下、水質の概要を述べる。まず、雨水の成分をみることにしよう。ここでいう雨水の成分とは〔雨水+ドライフォールアウト〕の成分のことである。雨水の成分は Table 1 の下段 (15-1~5) に示してあるが、その特徴は Ca^{2+} 、 HCO_3^- および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の各濃度が高いことである。とくに Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度が高いのは、方解石を含むフォールアウトの影響によるものと推定される。15-1~5 の雨水の Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度を雨量による加重平均でみると、 Ca^{2+} 13.7 mg/l、 HCO_3^- 41.4 mg/l となる。これは、とりまなおさず次式の反応によることを示している。



研究中心の井戸水についてみると、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の各濃度および pH には大きな時間的変化は見られなかった。6月20日の K^+ および $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は、他の時期に比べて高い値を示していた。 Ca^{2+} 濃度は4月から8月にかけて高くなる傾向にあった。

「東の池」の水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度はほぼ一定値を示しているが、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の各濃度は最小値と最大値で大略2倍、また Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 では3倍、そして $\text{NO}_3^-\text{-N}$ では10倍の差がみられた。pH も大きな変化がみられた。中心井戸水の Ca^{2+} 濃度は Mg^{2+} 濃度より高い値を示していたが、東の池の水では Mg^{2+} 濃度は Ca^{2+} 濃度より高い値であった。ダム貯水 (No. 3, No. 14) の Mg^{2+} と Ca^{2+} の濃度関係は東の池の水と同様な傾向を示していた。

pH が 11 以上であったアルカリ湖水 (No. 5) では、 Ca^{2+} は沈澱してしまい検出されず、 SiO_2 も 2.8 mg/l と極めて低い値を示していた。この湖水の総塩分濃度は海水のその、実に8.4倍と著しく高濃度であった。

各試料ごとにヘキサダイアグラムに整理したのが、Fig. 2 である。これらの図から、各試料は次の9種類の水質型に分類することができよう。

Ca- HCO_3 型 (No. 1-3~5, 6, 7, 9, 15-1~5)

Na- HCO_3 型 (No. 8)

Na·Ca- HCO_3 型 (No. 4)

Na·Ca·Mg- HCO_3 型 (No. 1-1, -2, 10, 11, 13)

Ca- HCO_3 · SO_4 · NO_3 型 (No. 12)

Na·Mg- HCO_3 型 (No. 2-5, 3, 14)

Na·Mg-Cl· HCO_3 型 (No. 2-1, -4)

Na·Mg-Cl· HCO_3 · SO_4 型 (No. 2-2, -3)

Na-Cl· HCO_3 型 (No. 5)

Fig. 3 に Durov の拡張ダイアグラムによる水質区分を示す。

わが国では、このダイアグラムはほとんど利用されていないので、以下簡単に説明する。この図中の各区画の特徴は次のようである：

- ① HCO_3^- と Ca^{2+} が卓越。石灰岩、砂岩その他多くの堆積岩の滞水層に涵養される水。
- ② HCO_3^- が卓越。陽イオンとして Mg^{2+} が卓越または Ca^{2+} と Mg^{2+} が多いが、陽イオンでは区別できない水。しばしばドロマイトと関係があり、 Ca^{2+} と Na^+ とがかなりイオン交換している水。
- ③ HCO_3^- と Na^+ が卓越。通常はイオン交換により生成される水。ときには、深部で CO_2 が発生し

Table 1. Chemical and isotopic compositions of natural waters in the Mu Us Shamo desert

Sample No.	Localities	Date M:D	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	³ H (T.U.)	pH	Water tem. (°C)	Remarks
1-1	Well in Research	4:25	30.5	5.0	25.9	51.7	17.3	309.2	34.0	10.9	0.52	0.152	0.030	-58.1	-8.5		7.4	7.3	Depth 2 m
-2	Center	5:23	33.0	4.0	26.4	50.0	21.8	308.6	37.1	9.6	3.12	0.192	0.036	-59.7	-8.5	81±3	7.6	13.4	
-3		6:20	23.1	6.7	24.8	71.5	17.8	341.0	36.2	13.0	0.30	0.180	0.383	-57.3	-8.1		7.6	17.0	
-4		7:25	27.2	3.4	23.7	82.7	17.5	301.5	34.2	14.2	0.74	0.252	0.085	-61.6	-8.2		7.6	20.6	
-5		8:28	26.9	3.3	25.9	85.0	17.2	306.8	36.1	11.8	0.94	0.207	0.041	-59.0	-8.2		7.7	19.7	
2-1	Pond among the	4:25	415.0	20.6	89.4	27.5	381.9	631.3	193.5	12.3	0.29	0.142	0.050	-10.4	0	30±3	9.1	18.0	Pond
-2	lowland near	5:23	170.0	20.1	72.9	33.0	152.3	328.0	212.0	6.1	1.00	0.183	0.036	-4.0	+3.2	32±3	8.7	16.2	
-3	the Center	6:20	300.0	14.8	44.6	17.8	530.4	424.8	86.0	10.9	0.08	0.152	0.050	-38.9	-4.1		7.6		
-4		7:25	185.0	21.8	31.9	16.5	141.0	321.6	81.0	20.0	0.19	0.135	0.092	-26.2	+1.1		9.4	24.6	
-5		8:28	214.0	24.2	33.0	16.0	127.5	312.7	177.0	11.1	0.25	0.161	0.036	-27.3	-3.3		9.2	25.4	
3	Batuwan reservoir	4:27	86.0	4.0	46.8	41.3	59.3	250.8	135.0	5.8	0.42	0.055	0.010	-61.1	-7.7	19±3			Back water
4	Southern Test Field	4:30	86.0	2.6	19.3	66.0	51.7	329.8	65.2	6.0	8.40	0.161	0.010	-54.1	-7.6	42±3			
5	Hudongcha hannao	5:3	89000	5770	27.0	0.0	60600	117400	18800	2.8	0.13	0.282	0.999		-5.0	39±3	>11	19.0	Salt lake
6	Chagan shibutu	5:10	81.5	8.4	45.4	104.5	103.9	313.1	156.0	6.8	0.30	0.171	0.023	-59.1	-8.2		7.4		
7	Tuke	5:10	23.0	6.1	14.9	75.9	31.5	210.0	24.1	18.1	12.80	0.033	0.067	-59.8	-8.8	66±3	7.6		9.3 m
8	Zhahanniao	5:24	120.0	3.3	1.7	3.5	41.3	168.2	28.4	16.7	0.55	0.034	0.011	-82.4	-10.9	1±2	8.4	20.8	Flowing well
9	Wushenzhao	5:24	39.0	8.4	11.8	72.2	27.2	255.5	22.0	12.2	7.10	0.313	0.048	-55.7	-7.6	193±4	7.2	9.8	2.5 m
10	Meilinmiao	5:24	36.0	8.3	28.8	61.3	24.5	338.1	43.7	11.2	4.24	0.154	0.109	-61.1	-8.1		7.4	12.0	1.3 m
11	Hujierte	5:24	48.5	2.2	38.8	61.3	59.8	387.0	22.3	10.4	0.17	0.139	0.020	-59.7	-8.4	11±2	7.4	10.2	2.4 m
12	Wulan taolegai	5:25	31.5	2.5	17.9	104.5	35.4	195.9	41.9	10.7	32.50	0.024	0.145	-57.6	-8.0	169±3	7.2	10.8	5.8 m
13	Dalashi	5:25	58.5	3.3	56.4	78.4	49.0	411.8	43.6	18.5	9.20	0.412	0.047	-45.7	-7.8		7.5	8.9	1.3 m
14	Hekou reservoir	5:25	362.0	27.5	183.2	10.7	319.3	1068	113.0	11.2	0.35	0.279	0.067	-0.6	+2.7	35±4	9.2	17.0	Back water
15-1	Precipitation	4:24	3.9	1.0	2.9	18.2	7.6	44.3	9.4	0.6	0.79	0.968	0.016	-17.8	-4.1	35±3			
-2	at Research Center	5:23	3.3	1.3	3.7	19.4	4.6	65.5	9.8	1.9	0.79	1.60	0.050	-29.6	-5.0				
-3		6:20	2.4	0.9	3.4	23.9	3.2	77.9	8.3	1.4	0.83	1.45	0.147	-49.2	-8.1	43±3	7.1	21.8	
-4		7:25	0.7	0.5	1.0	12.7	1.5	62.0	2.1	1.4	0.47	1.45	0.130	-48.1	-7.8				
-5		8:28	1.2	1.0	0.8	9.0	2.7	15.3	6.4	1.3	0.25	1.17	0.046	-33.8	-5.2	56±4	6.9	24.5	

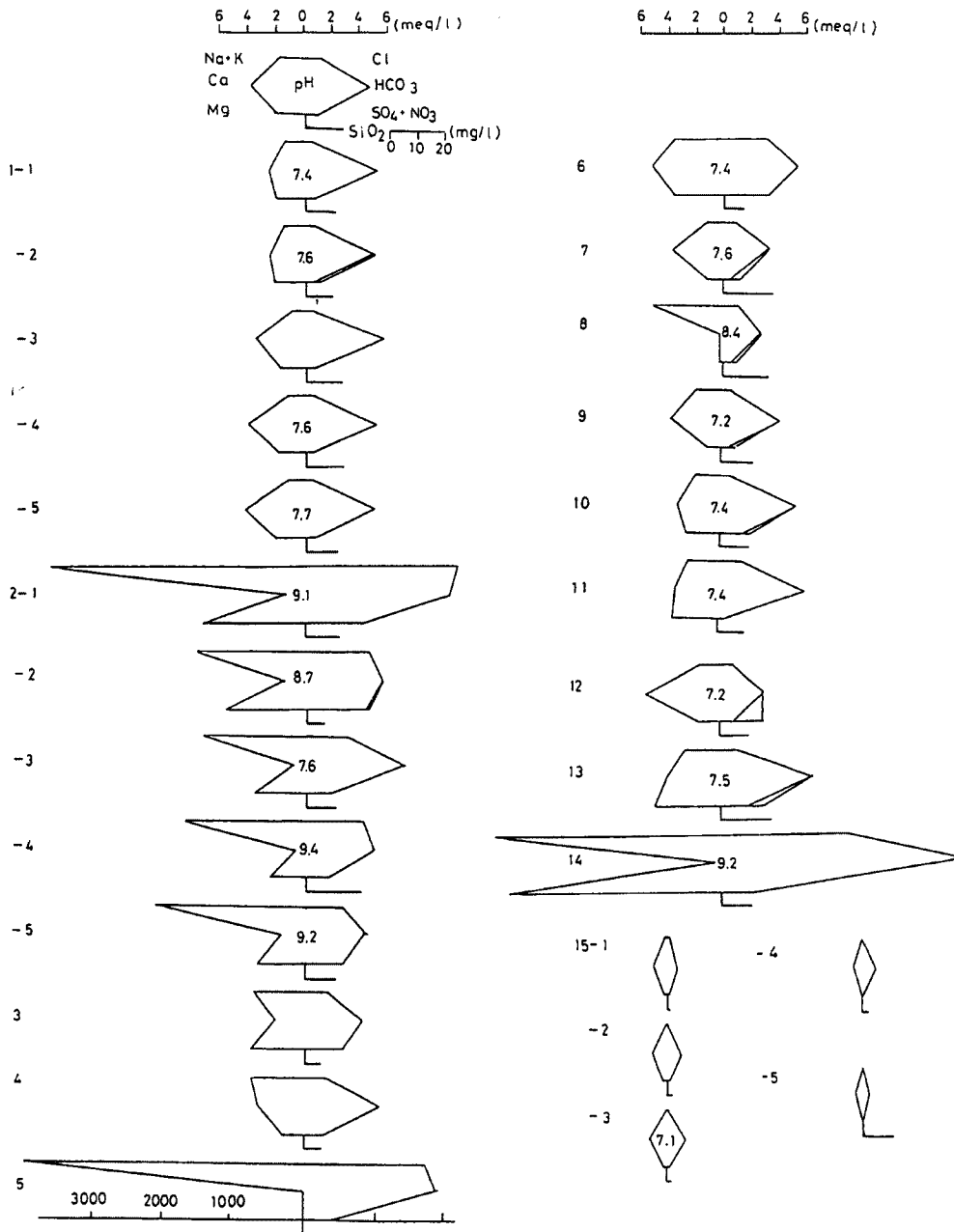


Fig. 2. Hexadiagrams used to represent milligram equivalents of major constituents of natural waters in the Mu Us Shamo desert.

Na⁺が多いような環境下で HCO₃⁻ に変化した水。

④ SO₄²⁻ が卓越または陰イオンでは区別できない水。陽イオンとして Ca²⁺ が卓越。Ca-SO₄ 型の水はラバや石膏を含む堆積物中で涵養されることが多い。それ以外は、混合または単なる溶解により生ずる水。

⑤ 卓越した陽イオン、陰イオンはない。単に溶解または混合を示す水。

⑥ SO₄²⁻ が卓越または陰イオンでは区別できない水。Na⁺ が卓越。このタイプの水は珍しい。混合水であることが多い。

⑦ Cl⁻ と Ca²⁺ が卓越。セメントの汚染がある水。それ以外は Na-Cl 型の逆イオン交換により生ずる。

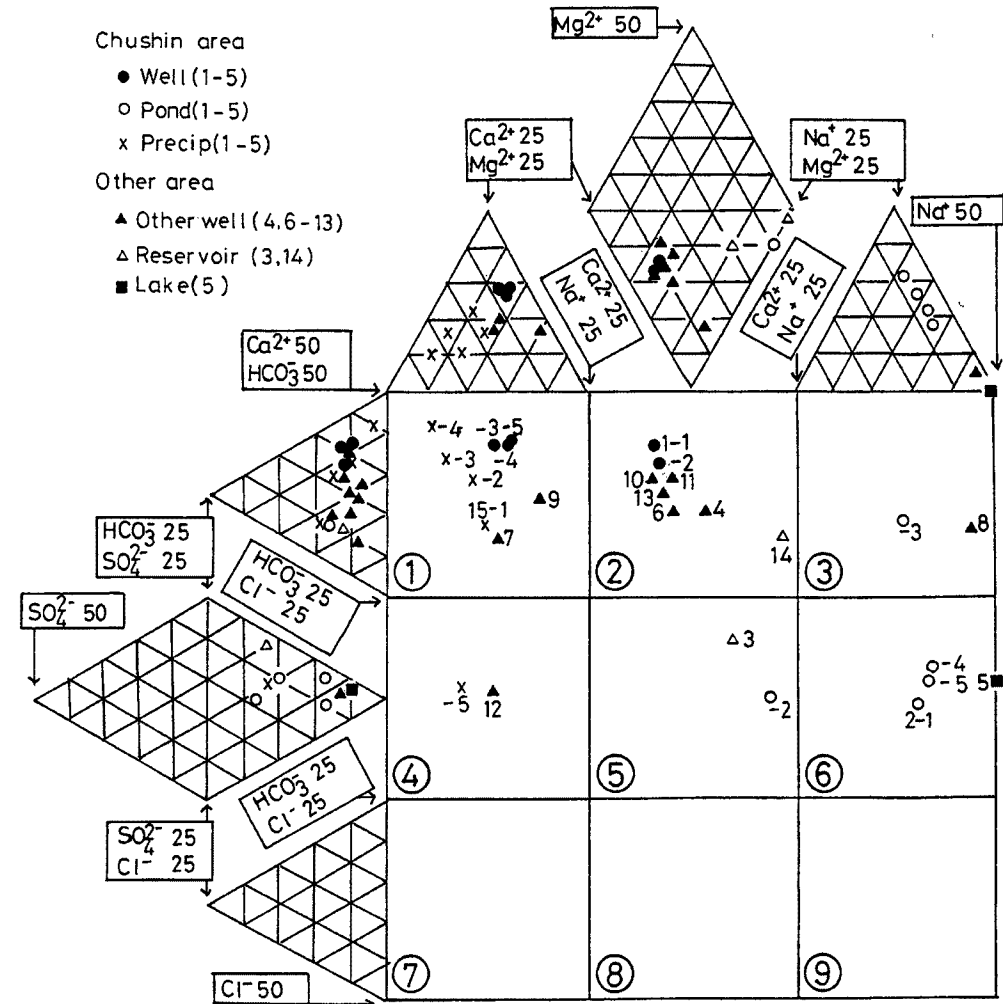


Fig. 3. Water types grouped using an expanded Durov diagram for natural waters: ①, fresh recharge water; ②・③, ion exchanged water; ④・⑤, simple dissolution or mixing; ⑥, brackish water.

⑧ Cl^- が卓越。卓越した陽イオンのない水。逆イオン交換により生成。

⑨ Cl^- と Na^+ が卓越。究極的な水とされる。

この図中の①区画に入る試料は、雨水 (No. 15-1~4)、中心井戸水のうち No. 1-3~5 および No. 7, 9 の地下水である。②区画に入る試料は、研究中心井戸水のうち No. 1-1, -2, No. 14 のダム貯水および No. 4, 6, 10, 11, 13 の地下水である。③区画に入る試料は、東の池のうち No. 2-3 および No. 8 の自噴井の水である。④区画に入るものは、雨水のうち No. 15-4 および No. 12 の地下水である。⑤区画に入る水は雨水 No. 2-2 および No. 3 のダム貯水である。そして、⑥区画に入る試料は、東の池の水 No. 2-1, -4, -5 およびアルカリ湖の水 No. 5 である。

これらのことから、本調査地域の大部分の地下水の化学組成はイオン交換反応に支配され、池水および湖水の化学組成は溶解反応、混合および蒸発に支配され、一部はイオン交換反応の影響下にあるものと推察される。

本調査地内の天然水中の Cl^- のペアイオンを Na^+ と仮定して、 Na^+ 濃度から Cl^- 濃度を差し引いた値と Ca^{2+} と Mg^{2+} の濃度を加えた値との関係を、Fig. 4 に示す。この図から、雨水が地中に浸透し地下水

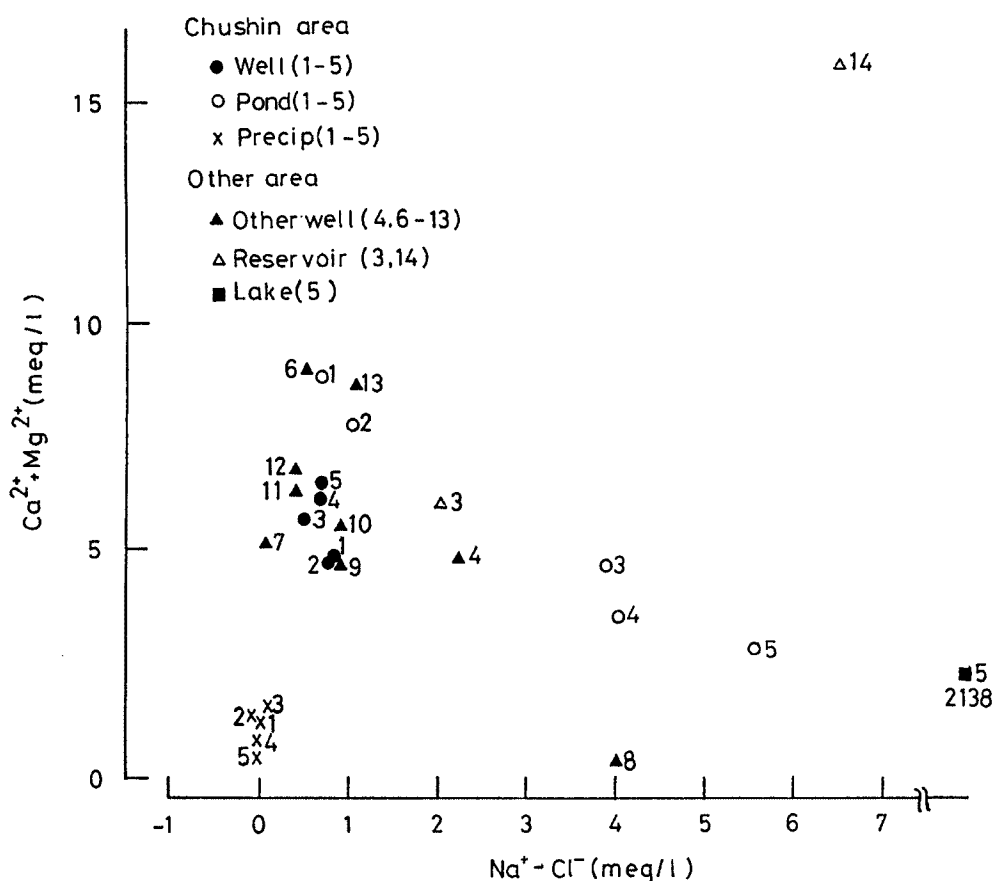


Fig. 4. $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ and $[Na^+ - Cl^-]$ relationships with reference to chemical evolution through ion exchange process.

となる過程で、地下水中の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および Na^+ の濃度は溶解およびイオン交換反応により増加することがわかる。また池水の化学組成はイオン交換反応や $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 、 $CaMg(CO_3)_2$ および $CaSO_4$ の沈澱反応などにより決まることを、この図は示している。

本調査域の天然水が Anhydrite ($CaSO_4$) あるいは Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) と飽和 (溶解平衡) になっているかどうかをみたのが、Fig. 5 である。ここで $CaSO_4$ の溶解積を 1.2×10^{-6} としている⁶⁾。井水の No. 6, ダム貯水の No. 3, 研究中心井戸の 4・5 月の水は過飽和状態になっていることが読み取れる。Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 2.27×10^{-5}) に対して、これらの水はすべてが未飽和である。

Fig. 6 は方解石とドロマイトの飽和度の関係を描いたものである。飽和度は地下水が更にどの程度岩石を溶解し得るか、また二次生成物を形成し得るかを判断するうえで重要な意味をもつものである。方解石およびドロマイトに関する飽和度 (SIc, SID) は、次式で計算した^{7),8)}。

$$SIc = \text{Log} \left\{ \frac{[Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]}{Kc} \right\}$$

$$SID = \text{Log} \left\{ \frac{[Ca^{2+}] \cdot [Mg^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]^2}{Kd} \right\}$$

ここに、Kc, Kd: 方解石, ドロマイトの溶解度積, (): 活動度

SIc および SID が 0 の時は溶解平衡 (飽和) であることを意味し、負の時は未飽和、そして正の時は過飽和であることを意味する。

研究中心井戸の 4・5・7・8 月の水, 同池水の 4・5・7 月の水, 他地域の No. 10, 11, 13, 14 の井水は方解石およびドロマイトに対して過飽和状態にある。研究中心の 8 月の池水, 他地域の No. 9, 12 の井

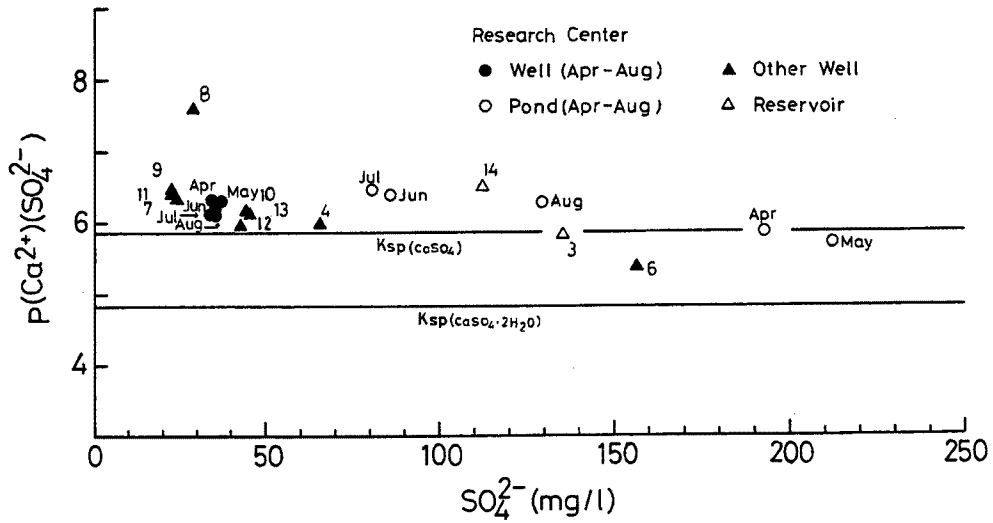


Fig. 5. $P(\text{Ca}^{2+})(\text{SO}_4^{2-})$ and SO_4^{2-} relationships with reference to anhydrite (CaSO_4) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

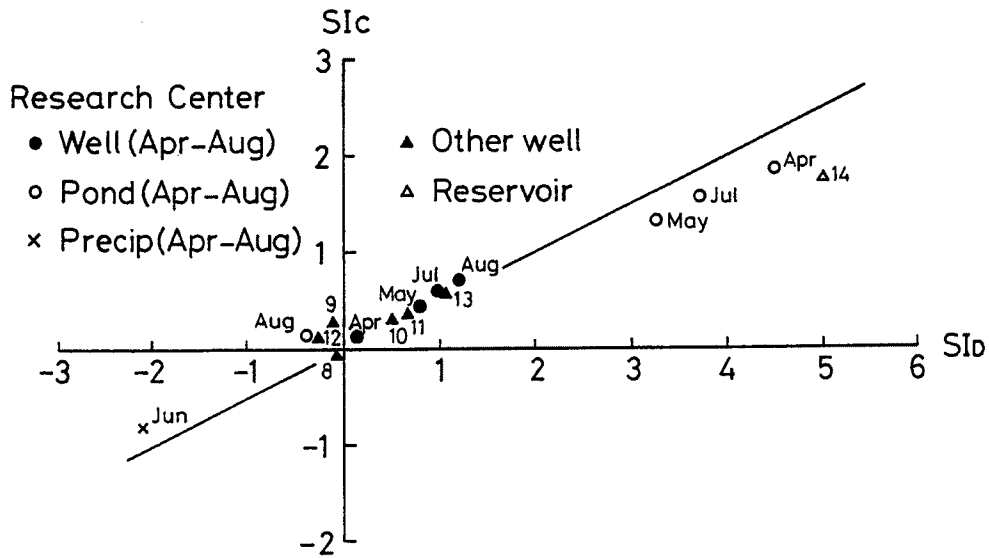


Fig. 6. SIC(calcite saturation index) and SID(dolomite saturation index) relationships. Many samples show supersaturation with respect to calcite and dolomite.

水は方解石に対して過飽和状態にあるが、ドロマイトに対しては未飽和状態である。他地域の井水 No. 8 および雨水は方解石、ドロマイト何れに対しても未飽和状態であった。

高い SIC および SID 値を示す地下水の存在は、 CO_2 分圧の低い土壌間隙へ向かっての地下水からの CO_2 放出が既に生じていて、間隙内の CO_2 分圧をたかめ、その場における溶解反応の促進条件を整えていることを示唆するものである。

Fig. 7 に δD と $\delta^{18}\text{O}$ との関係を示した。研究中心の 4・5・6・7 月の池水、8 月の雨水およびダム貯水池の No. 14 の試料水は、Meteoric Water Line (M.W.L.) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ より右側に大きくシフトしている。8 月以外の雨水も大きく変化しているが、ほぼ M.W.L. 上にある。8 月を除く池水は M.W.L. から大幅に外れ、 $\delta\text{D}=4.6\delta^{18}\text{O}-20$ の線上およびその近傍に分布している。これは、4 月から 7 月にかけての蒸発

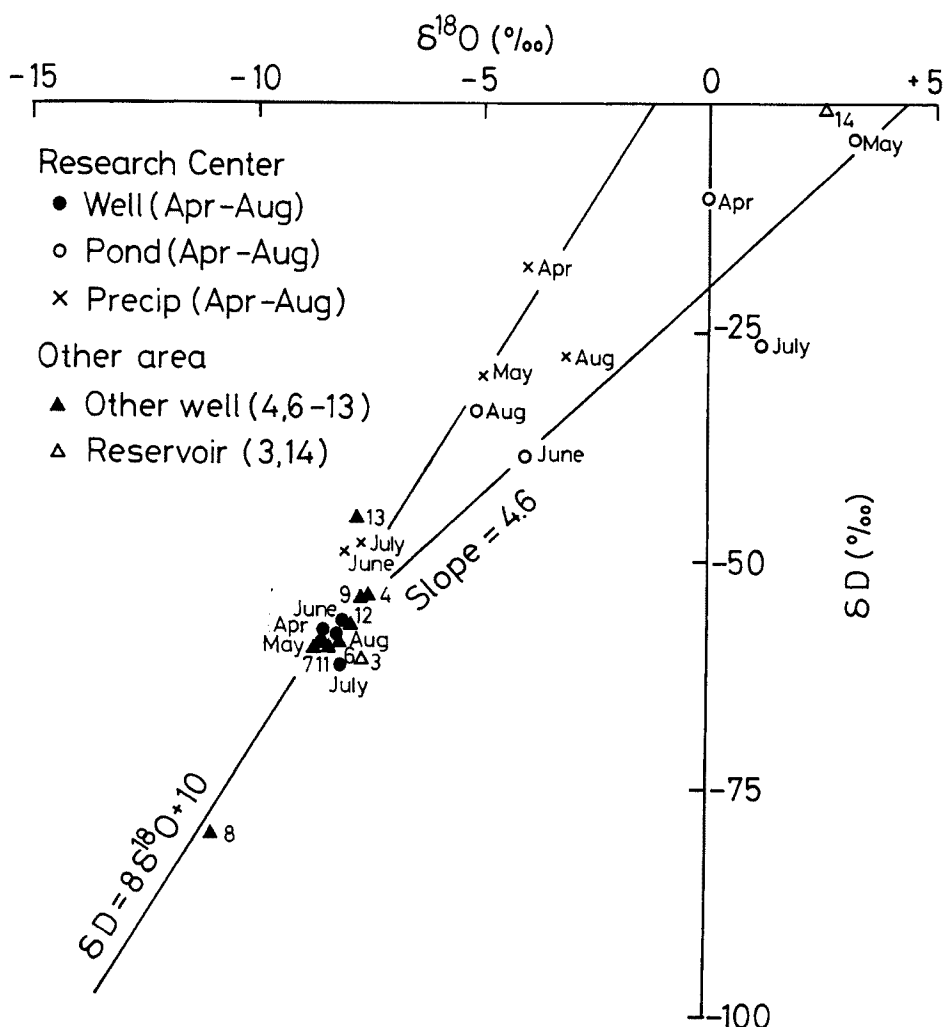


Fig. 7. $\delta^{18}\text{O}$ and δD relationships for natural waters. Evaporative influences can be seen in pond water.

が非常に激しいことを物語っている。この池水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の挙動から類推すると、ダム貯水 No. 14 も顕著な蒸発を受けているものと考えられる。

^3H の濃度の範囲は、1~193 TU と極めて広い。この原因は現在のところ不明であり、今後の課題としたい。

4-2 土の試料について

水質を規定する重要な因子の一つとして土壌がある⁹⁾。そこで、土壌の化学特性を調べるために、研究中心周辺の2地点で5試料を採取した [I 地点で、0~5 cm 深の土 (I_0 とする)、5~15 cm 深 (I_5); II 地点で 0~5 cm 深 (II_0)、10~15 cm 深 (II_{10})、30~35 cm (II_{30})]。各試料とも比較的均一の細粒の粒子 (106~425 μm の粒径は、I 試料で61~68%, II 試料で83~90%) からなる土壌であった。それぞれの試料の土色について標準土色帖¹⁰⁾に基づき観察したところ次のとおりであった; I_0 : 黄褐色, I_5 : 暗褐色, II_0 : にぶい黄橙色, II_{10} : にぶい黄橙色, II_{30} : 灰黄褐色。各試料の約 1 g を脱鉄後、149~250 μm の粒径の鉱物を分取し、プレパラートに封入し偏光顕微鏡で観察した結果によると、各試料とも長石類、石英を主体とし、粘板岩を少し含有するものであることがわかった (Table 2)。

Table 2. Minerals of soil samples in the Mu Us Shamo desert using a polarization microscope

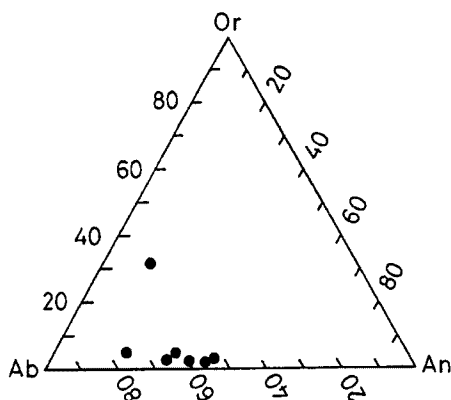
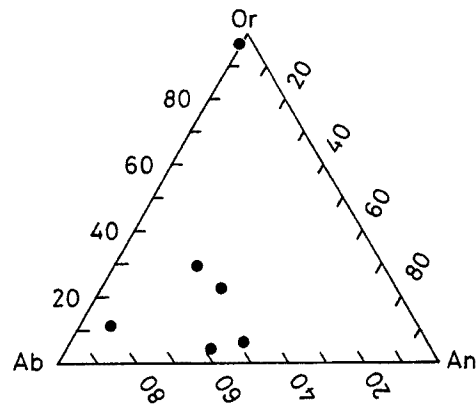
Samples No	Quartz-Feldspars	Slate	Chert	Mica	Magnetite
I ₀	+++	+	-	-	+
I ₅	+++	-	+	-	+
II ₀	+++	+	+	-	+
II ₁₀	+++	+	-	-	-
II ₃₀	+++	+	-	-	+

+++ : strong, ++ : moderate, + : weak, - : non-identified

脱鉄後の I₀ と II₀ の試料の鉱物のうち 250 μm 以上の粒径の鉱物を白色鉱物と有色鉱物とに分離し、それらを「ミニペレット」に包埋し研磨紙 (#180, #600) で表面を研磨後、カーボン蒸着を行って X線マイクロアナライザーで元素分析を行った。白色鉱物 (長石類) について Na₂O, K₂O, CaO 量がそれぞれ曹長石 (NaAlSi₃O₈: Ab), カリ長石 (KAISi₃O₈: Or), 灰長石 (CaAl₂Si₂O₈: An) から由来するものとして各鉱物の量に換算後、重量百分率で三角座標にプロットしたのが, Figs. 8a, 8b である。試料 I₀, II₀ とも一部にカリ長石が認められるものの斜長石が優勢であり, 特に An が 20~50% と多い。これらは中性長石と考えられる。また, 試料 II₀ の三角座標の中央部付近にプロットされるものは長石類以外のものである可能性が強い。

有色鉱物のうち黒色で磁性を有する鉱物 (A類とする), 褐色の鉱物 (B類), ピンク色透明な鉱物 (C類) について分析した結果を SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ (または MnO₂), Na₂O, MgO, K₂O, CaO についてのオクタダイアグラムに表したのが Figs. 9a, 9b である。なお, 鉄は全鉄として Fe₂O₃ で表した。おもに主成分元素の含有量の特徴をみると, A類 (黒色磁性) 鉱物は Fe₂O₃ を 5% 程度, MgO を 2% 程度含有することが特徴であり, B類 (褐色) 鉱物は CaO と MgO はほとんど検出されないが, Na₂O と K₂O に富む傾向にあった。また, C類 (ピンク色透明) 鉱物は B類鉱物とは逆に, CaO と MgO に富み Na₂O と K₂O を含有しない傾向があり, さらに Fe₂O₃ が 30% 程度も含有し, そのため SiO₂ 含有量が 40% に満たないことが特徴である。この傾向は異なる 2 地点での分析からも認めることができた。

白色鉱物 (長石類) および有色鉱物 (A, B, C類) について CaO と K₂O との関係を見るためにプロッ

Fig. 8a. Or(KAISi₃O₈)-An(CaAl₂Si₂O₈)-Ab(NaAlSi₃O₈) diagram for feldspars in I₀ sample.Fig. 8b. Or-An-Ab diagram for feldspars in II₀ sample.

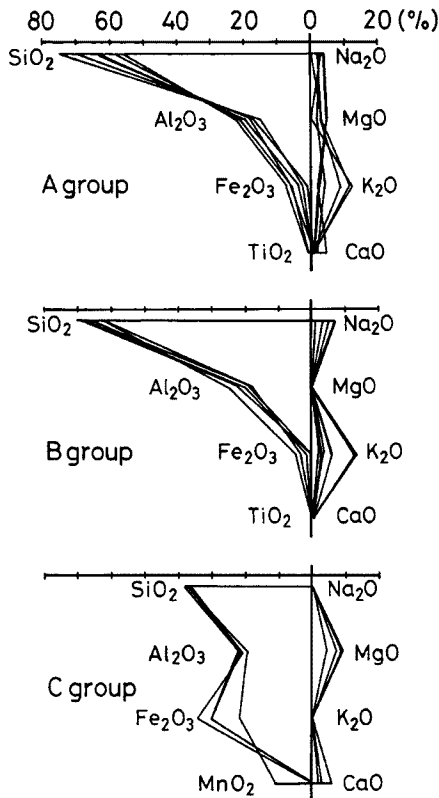


Fig. 9a. Octadiagram for coloured minerals in I₀ sample: A group, black and magnetic mineral; B group, brown mineral; C group, pink and transparent mineral.

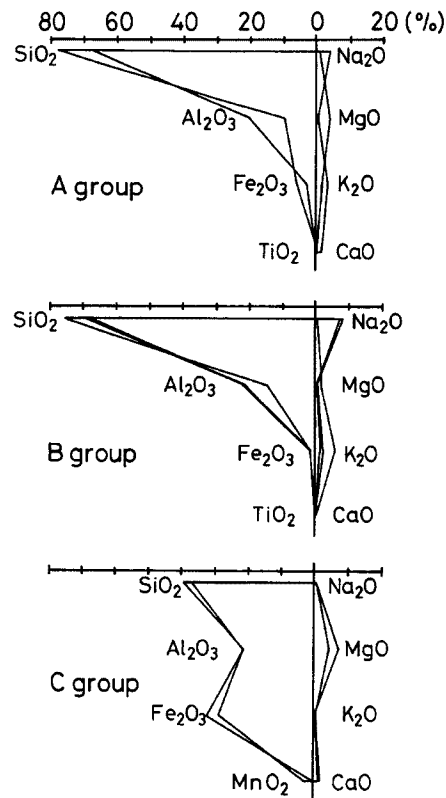


Fig. 9b. Octadiagram for coloured minerals in I₁₀ sample; A, B and C groups are same as Fig. 9a.

トしたのが Fig. 10 である。この図より次のことが指摘できる：(a)白色鉱物（長石類）は CaO に富むものが優勢である。(b)A類（黒色）鉱物は CaO に富むものと K₂O に富むものの両方がありこの図からは特徴が判然としない。(c)B類（褐色）鉱物は K₂O に富み CaO に乏しい。(d)C類（ピンク色）鉱物は CaO に富み K₂O に乏しい。

試料 I₀, I₁₀ と近畿地方の花崗岩質土とを比較すると、本試料の Sr (321~325 ppm), Ba (735~746 ppm) の値が相当高くアルカリ土類元素に富む特性を有する (Rb 55~56 ppm)¹¹⁾。この化学特性は、個々の鉱物ではカリウムなどに富むものも存在するがこれらは少数であり、カルシウムに富む斜長石が主な成分であることに起因するものと考えられる。

また X線回折（バルク、粉末法）の結果によると、偏光顕微鏡の観察結果と同様、石英、長石類を主体とし、白雲母、緑泥石を相当含有していた。そして方解石は I₀, I₅ 試料にのみ同定をされた。しかしながら 3N-HCl 溶液テストによると、いずれの試料も炭酸塩鉱物 [CaCO₃, MgCa(CO₃)₂ など] の存在が確認された (Table 3)。

4-3 水質形成機構について

本地域の水質形成に寄与している鉱物種には、4-1, 4-2 の結果から石英、斜長石、緑泥石、白雲母、方解石、ドロマイトなどが考えられる。これらの鉱物から溶出してくる成分を、陽イオン別にわけてみると、次のようにまとめられる。

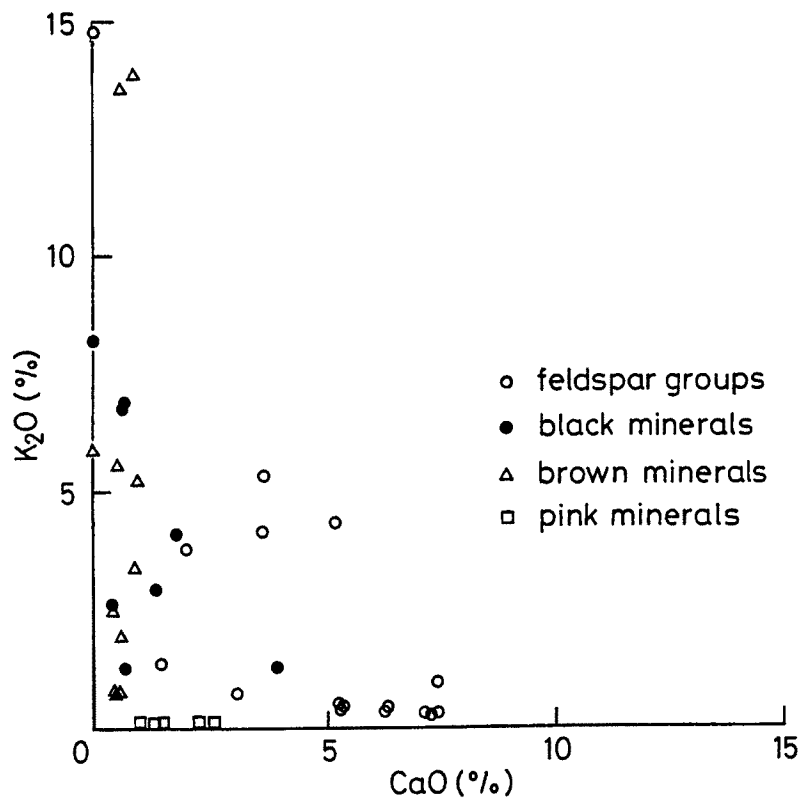


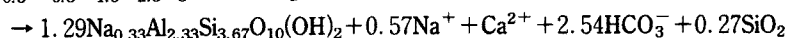
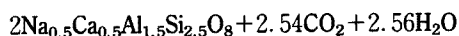
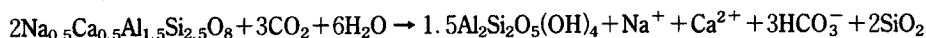
Fig. 10. K₂O and CaO relationships for feldspar groups and black, brown and pinkish minerals.

Table 3. Minerals of soil samples in the Mu Us Shamo desert using X-ray diffraction and HCl solution

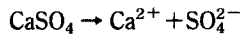
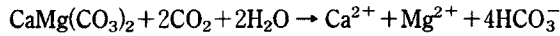
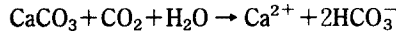
Sample No	X-ray diffraction				3N-HCl solution
	Quartz·Feldspars	Muscovite	Chlorite	Calcite	Calcite
I ₀	+++	++	++	+++	+++
I ₅	+++	++	++	++	+++
II ₀	+++	+	+	-	+
U ₁₀	+++	+	+	-	+
I ₃₀	+++	++	++	-	++

+++ : strong, ++ : moderate, + : weak, - : non-identified

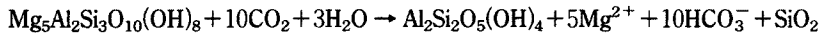
① Na⁺ は斜長石の次のような溶解反応で供給される。



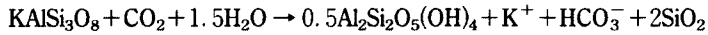
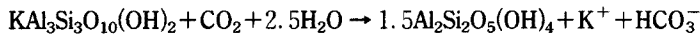
② Ca²⁺ は斜長石の上述の溶解反応式に加えて



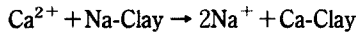
- ③ Mg^{2+} は②のドロマイトの溶解反応に加えて



- ④ K^+ は



そして、次のイオン交換反応によって



天然水中の Na^+ は増加し 4-1 で述べたような種々の型の水質が形成されているものと推察される。池、湖の表面からの水の蒸発によって pH が相対的に高くなると、 CaCO_3 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ などが沈澱し、これらの水質は $\text{Na}\cdot\text{Mg}\text{-HCO}_3\text{-Cl}$ になり、さらに pH が高くなると、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 MgCO_3 、 CaSO_4 などが沈澱し、その水質は $\text{Na}\text{-HCO}_3\text{-Cl}$ 型に変わっていくものと推定される。

これらの概念図を Fig. 11 に示した。前述の①、③、④の溶解反応で粘土鉱物（カオリンとモンモリロナイト）が形成されること、そしてイオン交換反応がおこることを記しているが、これらの鉱物は同定されなかった。それは、今回の X 線回折の試料はバルクを粉末にして用いたために石英、長石類の存在が多いために、方解石、カオリンなどがマスクされたものではないかと推察する。その根拠は、3N-HCl 溶液をバルク試料に滴下した場合に、試料 II₀、II₁₀ で CO_2 の発泡現象がみられなかったが、75 μm 以下の粒子に 3N-HCl 溶液を滴下するといずれの試料も CO_2 の発泡現象がみられたことによる。したがって、これらの試料から可能な限り粘土分を分離して X 線回折の再検討をおこなうことが今後の課題である。

これらの反応系に加えて、水の蒸発効果の寄与が非常に高いことがわかる (Fig. 7)。

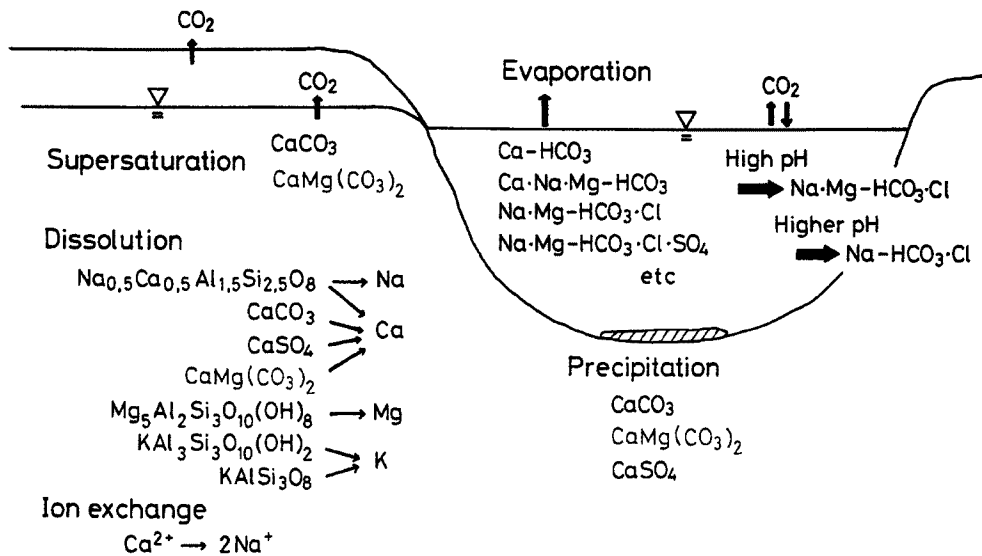


Fig. 11. Processes of water quality formation in the Mu Su Shamo desert.

5. おわりに

以上に述べた天然水の主成分、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ および ^3H の分布と鉱物の同定・化学分析から、溶解反応、イ

オン交換反応，沈澱反応，蒸発効果などが研究中心周辺の天然水の水質形成に大きく寄与しているものと推定した。

本研究の機会を与え，試料の採取に協力頂いた内蒙古沙漠開発研究会のメンバー各位及び毛烏素沙地開発整治研究中心の廖 茂彩所長・姚洪林氏に謝意を表したい。また δD ， $\delta^{18}O$ の分析には岡山大学地球内部研究センターの日下部 実教授に， 3H の分析には本研究所の小泉尚嗣助手に，X線回折には大阪市立大学理学部の三田村宗樹助手に協力頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 増田善信：地球環境が危ない，新日本出版社，1990，pp. 128-131.
- 2) 松田昭美・神近牧男・山本太平：乾燥地の分布と気候特性，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——毛烏素沙漠の沙漠緑化と農業開発に関する基礎的研究——」（内蒙古沙漠開発研究会 代表者・松田昭美），1989，pp. 7-21.
- 3) 神近牧男・小林哲夫・松田昭美：気候特性と環境コントロール技術，同上，1989，pp. 22-36.
- 4) 吉岡龍馬・奥村武信：内蒙古自治区毛烏素沙地における天然水の化学組成について，緑化研究，第10号，1988，pp. 22-29.
- 5) 吉岡龍馬・奥村武信：毛烏素沙地における天然水の化学・同位体組成について，1988年日中共同研究講演論文集（中国の乾燥地における砂漠化の機構解明と動態解析），1988，pp. 17-20.
- 6) 日本化学会編：化学便覧基礎編（改訂2版），丸善，1975，1682 pp.
- 7) Lloyd, J. W. and J. A. Heathcote: Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, Clarendon Press, 1985, 296 pp.
- 8) Langmuir, D.: The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 35, 1971, pp. 1023-1045.
- 9) 北野 康・加藤喜久雄・金森 悟・金森暢子・吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能，京都大学防災研究所年報，第10号A，1967，pp. 558-587.
- 10) 農林水産省農林水産技術会議事務局監修：標準土色帖，財団法人日本色彩研究所，1991，pp. 1-70.
- 11) 平岡義博：土壌の蛍光X線分析——花崗岩質土の地域差に関する研究——，日本地球化学会年会講演要旨集，1991，p. 279.