

陽イオンと溶存けい酸の当量比に基づく 自然水の水質区分の試み

渡 辺 義 人
信州大学・繊維学部

Attempt to Classificate Water Quality Based on Dissolved Silica to
Cations Equivalent Ratio in Natural Water.

Yoshito WATANABE
Fac. Textile Sci. & Technol., Shinshu Univ.

Key word : classification of water quality, silica, cations, equivalent ratio, natural water.
水質区分、溶存けい酸、陽イオン、当量比、自然水

1. はじめに

一般に自然水の水質には二つの側面がある。一つは自然水つまり河川水や地下水の履歴に関する情報源としての水質であり、もう一つは自然水の資源的価値あるいは環境的価値を評価する要素としての水質である。前者はいわば地球化学的側面ともいうべき水質で、地質との関連を読みとったり、自然水の流動経路の推定などに利用される。後者は人間による水の利用や環境保全などの面で扱われる水質で、環境科学的側面を含んでいる。前者に関わる水質には、一般に自然水の主成分であるNa、K、Ca、Mg、Cl、SO₄、HCO₃、SiO₂の8成分がキー成分として用いられることが多い。ほとんどの自然水はこの8成分で全溶存成分の90%以上を占める。

自然水の化学的水質の特徴を把握する手法としては、これまでPiperらにより工夫されたトリリニアダイアグラムによる水質区分の方法やパターンダイアグラムと呼ばれる水質組成図によって水質の特徴を表現する方法などが利用されている。これらの方法は基本的には上に述べた主要溶存成分であるNa、K、Ca、Mg、の4種類の陽イオンとCl、SO₄、HCO₃の3種類の陰イオンの当量比など当量関係を利用したものである。本報告は水質の特徴を把握するキー成分として、もう一つの主要な溶存成分であるSiO₂を取り入れ、4種類の陽イオンとの等量比関係から自然水の水質の特徴づけ

すなわち水質区分を試み、その可能性について検討したものである。

長野県では平成4年に長野県水環境保全条例が制定、施行され「水源保全地域」を指定することにより、水道水源地域の開発行為を未然に防ぐ手だてがとられるようになった。しかし、すでに水源地域およびそれに近接する地域にゴルフ場開発や産業廃棄物の埋立地として計画されているところがあり、水源の水質汚染や水量減少が懸念されている。この懸念には二つの場合がある。一つは地形的にみても水収支などの水文学的な観点からも、開発地域が水源地域の一部または全部と重なっていることが明かな場合であり、この場合には開発行為による影響の有無またはその程度が問題となる。もう一つは水源地域の地下水と開発地域の地下水の関係がまだ解明されていない場合であり、この不明が最大の懸念、不安の原因となる。上流域の湧水や河川水の基本的な水質の特徴をあらかじめ明らかにしておくことは、こうした水源地域の環境問題を解く鍵の一つとして有効である。

2. 水質区分に利用したキー成分の当量比

上に述べた様に、本報告では自然水の水質区分のためのキー成分として、Na、K、Ca、Mgの4種類の陽イオンとSiO₂を選んだ。ここでは上流域を対象としているので、これらの成分の主要な供給源は大気からの降水物と岩石・土壌であり、人間活動の影響は小さい。

$$[\text{Na}] + [\text{K}] + [\text{Ca}] + [\text{Mg}] = [\text{Cl}] + [\text{SO}_4] + [\text{HCO}_3] \quad (1)$$

$$[\text{Na}] + [\text{K}] + [\text{Ca}] + [\text{Mg}] - [\text{Cl}] = [\text{SO}_4] + [\text{HCO}_3] \quad (2)$$

$$[\text{SiO}_2] / ([\text{Na}] + [\text{K}] + [\text{Ca}] + [\text{Mg}]) \quad (3)$$

なお、 SiO_2 については陽イオンに比べて大気からの供給量は少ない。また、ここで取り上げた地下水や河川はそれぞれ一つの流域内にあるので、各流域内での水質に対する大気から影響は同じであるとみなせる。すなわち、各湧水や河川水の水質にみられる特徴的な違いは、降雨が地上に達した後、地下または地表を流動する過程における岩石や土壌との反応の表れとみなして議論を進める。

一般に中性の自然水では主要なイオン成分を当量濃度で示せば下記のような等式(1)が成り立つ。

半谷 (1953) はClが岩石中には極めて少ない成分であり、海洋からの風送塩が主たる供給源であるとして、岩石起源の陽イオンの総量は(2)式で示した方が妥当であるとしているが、ここでは内地地である長野県ではその影響は小さいことと、煩雑さを考慮して(1)式が成り立つものとした。そこで水質区分には、この陽イオンの総和をとり、(3)式の様に各陽イオンの当量の総和と SiO_2 との当量比を主たる指標として用いた。なお、 SiO_2 は便宜上1モル2当量として算出した。

具体的には陽イオンの総当量と SiO_2 の当量比をX軸にとり、Y軸には岩石の主成分であるMgとCaの当量比 $[\text{Mg}] / [\text{Ca}]$ をとってグラフ上にプロットし、二次元的に展開された位置から水質を区分しようとするものである。なお、参考にY軸方向の指標として $[\text{K}] / [\text{Na}]$ をとり、同様に水質区分を試みた。上記の方法で水質区分を試みた水域は次の3カ所である。

(1)千曲川の支流である神川 (上田市地籍で千曲川に合流) の上流域 (菅平高原周辺)。

(2)諏訪湖流入河川である上川、宮川、砥川、横河川の各上流域。

(3)八ッ岳西南山麓の富士見高原湧水。

3. 神川上流域の例

図1は神川の上流域図である。対象とした上流域の河川名と採水地点が示されている。神川については上流域をA、B、Cの3つの小流域にわけ、A流域はさらに小川毎に4つの流域a、b、c、dに分けて水質区分を試みた。

図1に示した対象流域のうちB、Cが菅平高原地域にあたる。唐沢と大明神沢の流域Cは四阿山と根子岳の山麓にあたり、溶岩は輝石安山岩類に属する。流域Cの山側の表層地質は第三紀の深成岩からなり、大松

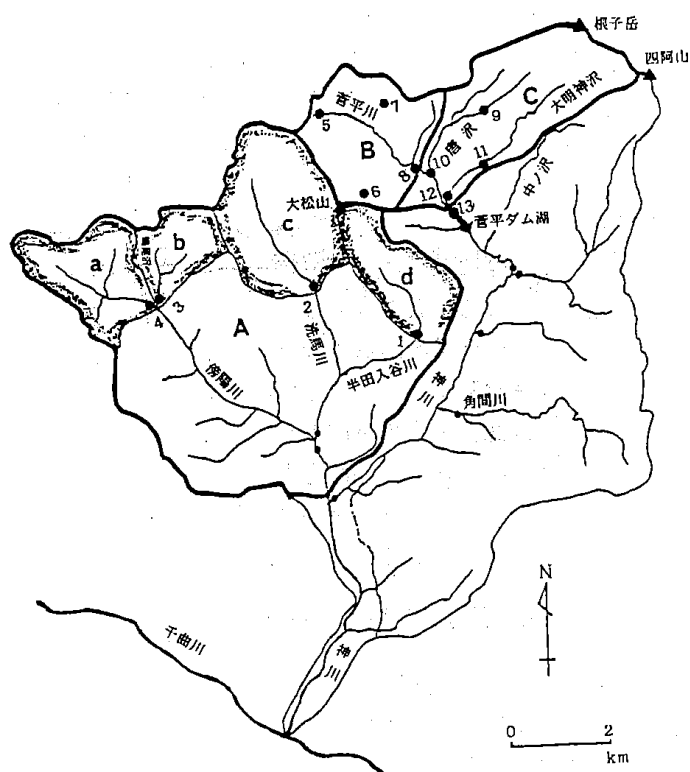


図1 神川上流域河川の採水地点と流域区分

表1 神川上流域の流域別河川の平均水質 (mg/l)

No.	河川名	Na	K	Ca	Mg	Cl	SiO ₂
流域A							
1.	半田入谷川	3.0	0.44	4.5	2.2	1.7	15.2
2.	洗馬川上流	3.5	0.46	3.9	1.2	2.3	12.5
3.	鳴尾沢	3.4	0.47	4.7	1.4	1.7	12.2
4.	傍陽川上流	3.2	0.55	3.8	1.2	1.8	12.1
流域B							
5.	菅平川上流	1.6	0.36	1.9	0.7	1.4	10.4
6.	大松山沢水	2.5	0.80	3.5	0.9	2.2	19.7
7.	白銀沢水	2.4	0.19	4.1	1.6	1.6	14.2
8.	菅平川・羽根尾	4.6	1.55	14.2	5.1	7.0	13.1
流域C							
9.	唐沢上流	2.5	0.67	4.8	1.1	2.3	21.3
10.	唐沢下流	3.2	1.48	5.4	1.7	2.7	29.2
11.	大明神沢上流	3.2	0.87	6.0	1.0	1.0	27.9
12.	大明神沢下流	2.8	0.84	5.4	1.3	1.6	27.3
13.	菅平川・大洞橋	3.8	1.37	7.8	2.7	4.2	22.2

13地点 (大洞橋) は流域B + 流域C

自然水の水質区分

山を中心に石英閃緑岩が分布している。高原の平坦部には黒褐色のローム層が広がっていて畑地として利用されている。流域Aの対象河川は大松山山塊の南側山麓に発しており、流域の表層地質は主に第三紀の深成岩からなる。

表1に各地点の水質を流域毎にまとめて示した。いずれも年に4ないし6回採水して分析した水質の平均値である。これによると流域Cの各地点の SiO_2 濃度は流域A、Bのどの地点と比べても明らかに高く、地質の影響が顕著に示されている。Kについても同様のこ

とがみられる。地点8は流域Cの最下流地点にあり、農地排水や生活排水の影響を受けてClをはじめ SiO_2 を除く各成分の濃度が高くなっている。なお地点13は流域Bと流域Cの水がすでに合流している地点であり、当然ながら人為の影響を強く受けている。

図2はX軸に $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ を、Y軸に Mg/Ca の当量比をとった場合の各地点の分布図である。これによると各地点をX軸の方向に3つのグループに分けることができる。すなわち $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の値が1.5~2.0の範囲にあるもの、1.0前後に分布

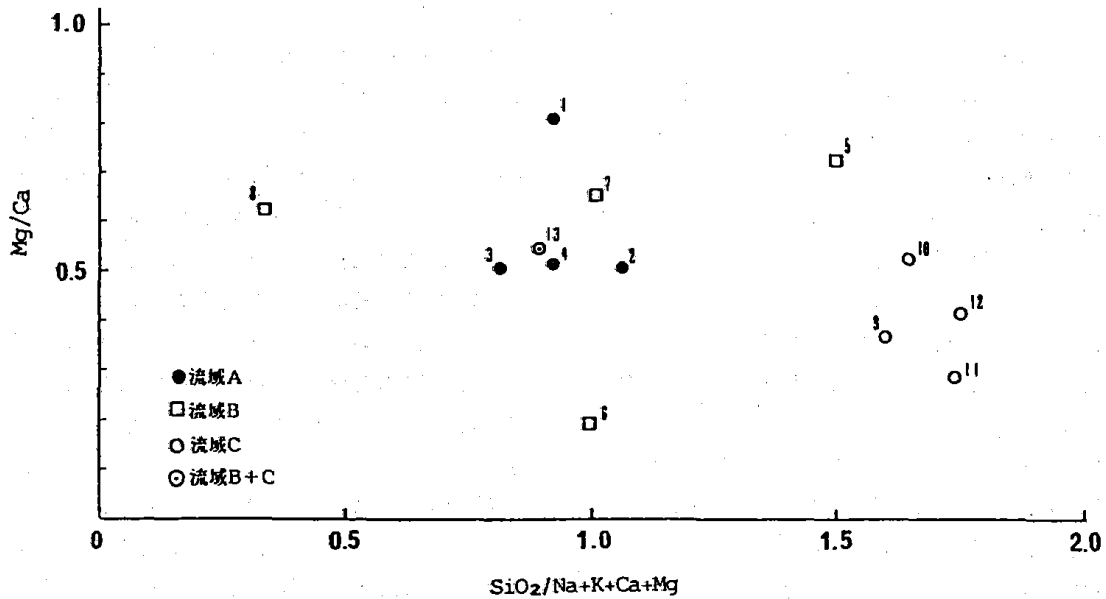


図2 神川上流域河川の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と Mg/Ca の関係（当量比）

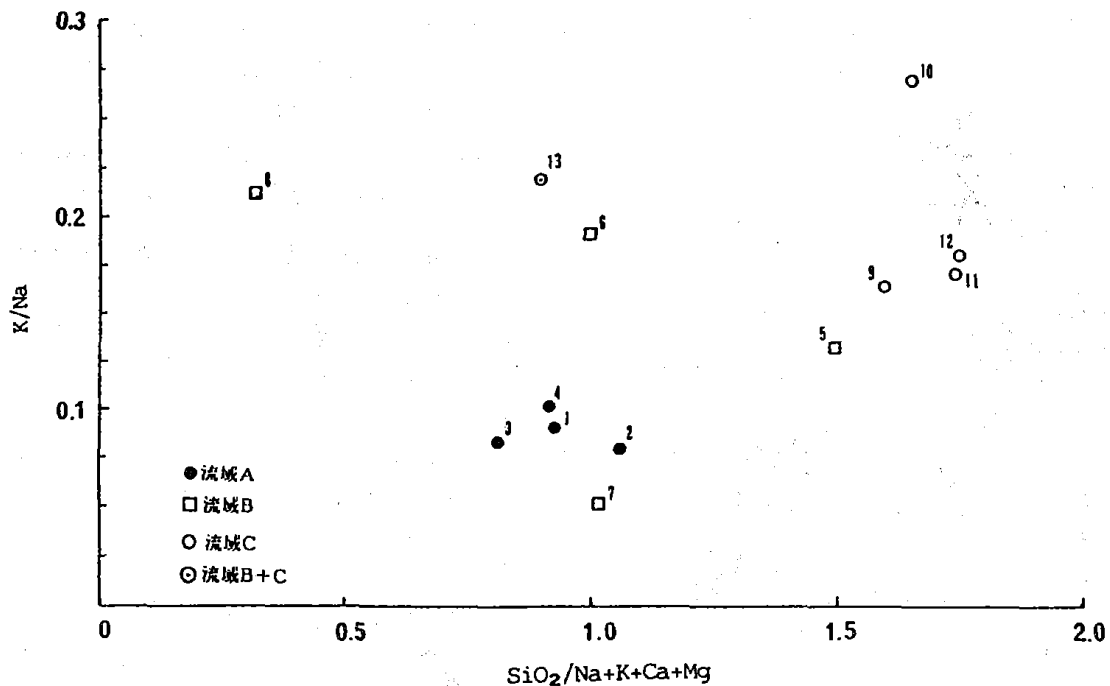


図3 神川上流域河川の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と K/Na の関係（当量比）

してるもの、それと1点だけであるが0.5以下のものである。1.5~2.0の範囲のグループには最下流地点の13を除く流域Cの各地点が入っている。1前後のグループには流域Aの全地点が入り、陽イオンに対する SiO_2 の等量比が相対的に流域Aの方が小さい化学特性を有していることを示している。地点13はすでに述べた様に人為の影響を強く受けているために陽イオンの総量が相対的に高くなっている。流域Bは地点によって異なり、地点6、7は流域Aと同じ1.0前後のグループには入っているが、地点5はそれより高く、地点8はそれより小さい。地点8は農地排水が流入しているため陽イオン濃度が極めて高く、その分当量比を小さくしていることは明かである。地点5は集水域が小さいため、地点6、7とは異なった局所的な地質の影響を受けているものと思われる。

次にY軸の方向をみると、 Mg/Ca の当量比はほぼ0.5を境にして流域A、Bは高く、流域Cは低い傾向がみられ、この面からも各流域河川の化学特性の違いが示唆される。なお、流域B内にある地点6のみが Mg/Ca が全地点の中で際だって小さく、特異的な水質であることを伺わせている。

同様に図3の K/Na をみると Mg/Ca とは逆に相対的に流域Bの方が流域Cより小さく、両者に明かな違いがみられる。流域Bの下流地点8、流域Cの下流地点10および両流域の河川が合流する地点13はいずれも K/Na は高く、農地排水によるKの供給が大きいことを物語っている。

以上のことをまとめると人為的な影響の大きい下流

地点は別として、各上流域の水質は $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比から三つの化学特性に区分される。そのうち流域Aと流域Cとでは Mg/Ca 、 K/Na いずれの当量比からみても異なった化学特性を有していることがわかる。

4. 諏訪湖上流域の例

諏訪湖には大小含めて27ほどの流入河川があるが、そのうち主要河川として南部から流入する上川と宮川、北部から流入する砥川と横河川の4河川の上流域を対象に、同様の手法で河川水の水質区分を試みた。

図4に諏訪湖を中心とした河川図と各流域の対象地点およびその番号を示した。上川では白樺湖に流入する音無川など3河川（地点1~3）と滝湯川（地点4）を選んだ。白樺湖の水源は霧が峰の車山と大門峠からの湧水（右岸）と八子ヶ峰からの湧水（左岸）である。この上流域の地質面は霧が峰火山群、古期火山碎屑岩類の安山岩や凝灰角レキ岩でおおわれている。滝湯川は北八ッ岳の蓼科山と双子山の間にある大河原峠下の天祥寺平に源を発し、いったん伏流して竜源橋下で湧出する。天祥寺平は蓼科溶岩・北横岳新期溶岩からなる。

宮川の上流域では左岸に流入する大崩川など二つの支流（地点5、7）と湧水（地点6）を対象とした。これらの水は入笠山系を源としており、その地質面は入笠山層群、黒川層群、塩嶺累層などの砂岩、粘板岩、凝灰角レキ岩を主としている。

砥川は和田峠のトンネル下の源流付近（地点10）と左岸に流入する支流の東俣川の上流2地点（8、9）の合わせて3地点である。砥川の左岸と右岸の地質構造は異なり、左岸は主として、霧が峰火山岩類からなり、凝灰角レキ岩を主体としているのに対して、右岸

表2 諏訪湖上流域河川の水質 (mg/l)

No.	河川名	K	Na	Ca	Mg	Cl	SiO_2
1.	音無川	1.8	3.0	4.2	1.2	0.7	23.8
2.	間屋川	1.6	3.0	3.6	1.1	0.8	22.0
3.	岩下川	1.6	2.8	4.3	1.4	0.9	22.4
4.	滝湯川	1.4	2.6	3.5	0.9	0.6	21.1
5.	金山沢川	1.0	1.4	3.5	2.9	0.8	10.0
6.	"湧水	1.5	1.9	4.5	3.3	0.8	12.8
7.	大崩川	1.0	1.0	3.8	5.0	0.7	11.2
8.	東俣川	1.4	2.0	3.2	0.7	0.8	17.0
9.	"支流	1.4	2.2	3.7	0.7	0.7	19.3
10.	砥川	2.4	4.0	2.1	0.3	0.6	30.2
11.	横河川	0.7	2.8	8.2	1.2	0.8	11.5

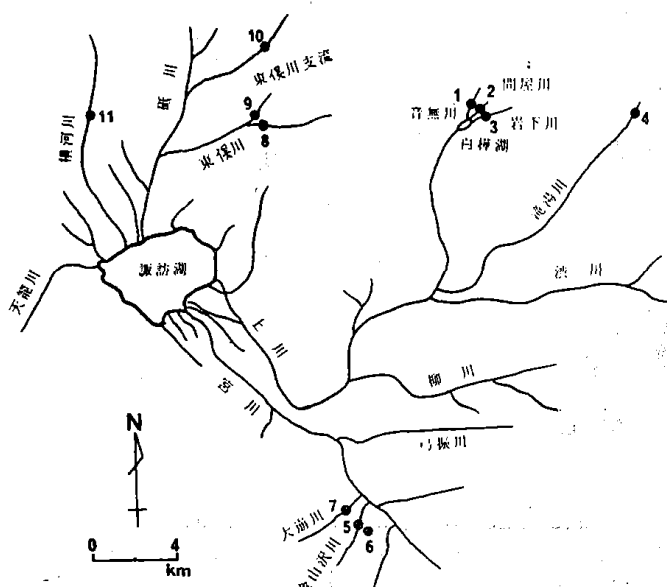


図4 諏訪湖上流域河川の採水地点

は、二つ山累層による安山岩質凝灰角レキ岩・緑色凝灰岩・砂岩、塩嶺累層など多様な岩石が入りこんでいる。

横河川は中流にあるダムの上流（地点11）である。横河川の流域は、北は鉢伏山・二つ山、東は二つ山・赤渋平、西は高ボッチ・横峰・鉢伏山を結ぶ稜線で囲まれた区域である。この地域には緑色凝灰岩・泥岩・砂岩・れき岩からなる第三紀層が広く分布している。

表2に各成分の濃度を示す。これによると SiO_2 の濃度は相対的に上川と砥川上流の各地点が高い。これに比べて宮川上流と横河川はかなり低い。また、横河川

は他の地点に比べてCaが高く、K濃度が低いという特徴が認められる。

図5は図2同様、 $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と Mg/Ca の当量比の関係から得られた各地点の分布図である。これによると $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比が、2～3の間にあるもの、1～2の範囲にあるもの、1以下のものと河川の水質を3つに区分することができる。当量比が2～3と相対的に最も高い地点は、 SiO_2 濃度が最大値を示した砥川の上流、地点10である。1～2の範囲に入るのは上川上流域の各地点1～4と東俣川の二つの地点8、9である。これらの河川はいずれも霧が峰山塊を水源としている。また当量比が1以下にある宮川上流域の3地点5～7と横河川地点11は、その流域の地質面がすでに述べたように第三紀の堆積岩の分布域であるという共通性を持つ。

Y軸方向の Mg/Ca でみると、宮川上流の3地点が非常に大きく、他の河川の化学的特性はかなり異なっている。

Y軸に K/Na の当量比をとった図6をみると、ここでも他地点に比べて宮川上流域の3地点が1以上と高く、また横河川は逆に0.2以下と極めて小さい。以上、今回対象とした諏訪湖上流域河川の水質は $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比から三つのタイプに区分される。そのうち宮川上流域の3地点の水質は Mg/Ca と K/Na の当量比がいずれも明らかに高く、他の地点とは異なった化学的特性を示している。

図5 諏訪湖上流域河川の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と Mg/Ca の関係（当量比）

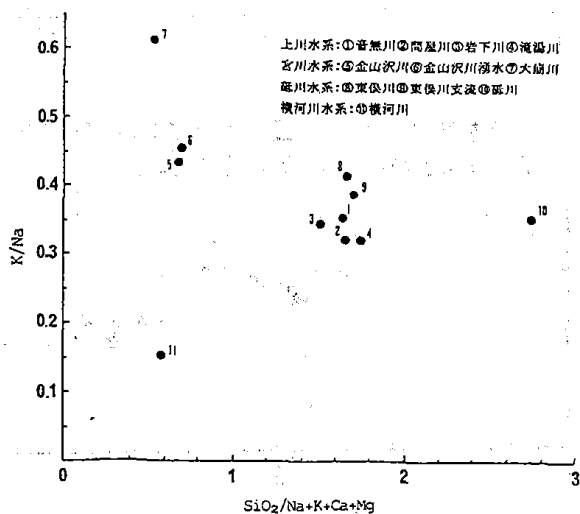
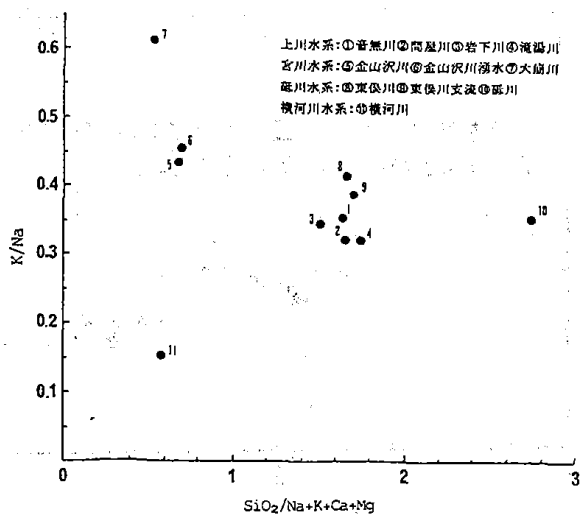


図6 諏訪湖上流域河川の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と K/Na の関係（当量比）



5. 富士見高原湧水の例

図7は今回対象とした富士見高原湧水周辺の地形図と湧水採水地点である。富士見高原開発計画調査報告書によると、これら湧水灌養地帯の基本的な地質構造は表層に佐久ローム層があり、下層に向かって順に西原扇状地礫層（礫混り粘土）、弘法坂礫層（砂礫）、三里ヶ原溶岩（玄武岩質安山岩）、鼻戸屋溶岩（角閃石・複輝石安山岩）、韭崎岩屑流堆積物（砂礫）からなっている。このうち西原扇状地礫層と弘法坂礫層には地下水の流動が確認されている。また、鼻戸屋溶岩と韭崎岩屑流堆積物には透水性のあることが認められている。

図8に示したように、6地点のうち不動清水は標高1500mと最も高い位置にあり、湧水の電導度は $35\mu\text{S}/\text{cm}$ と最も小さい。これとは逆にししの口の標高は最も低く、電導度は $55\mu\text{S}/\text{cm}$ で最大である。その他の4地点はほぼ1000mから1200mの範囲にあり、電導度も不動清水とししの口の間である。表3に示した水質は

この電導度の傾向を裏づけており、不動清水はどのイオンの濃度も最も低く、逆にししの口はどのイオン濃度も最も高い。 SiO_2 は不動清水を除くと16.2~18.1 mg/lとほぼ同レベルであるのに対して、不動清水は10.3mg/lと他に比べて明らかに低い。

図9、図10はそれぞれ $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と Mg/Ca 、 $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と K/Na の当量比の関係から得られた各地点の分布図である。これによると $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比から、各湧水の化学的特性を2.6前後の湧水と、2前後の湧水の二つに区別される事がわかる。小泉、大泉、葛窪各湧水が前者に相当する。また、この3つの湧水の Mg/Ca や K/Na の当量比も殆ど同じである。このことは三者極めて良

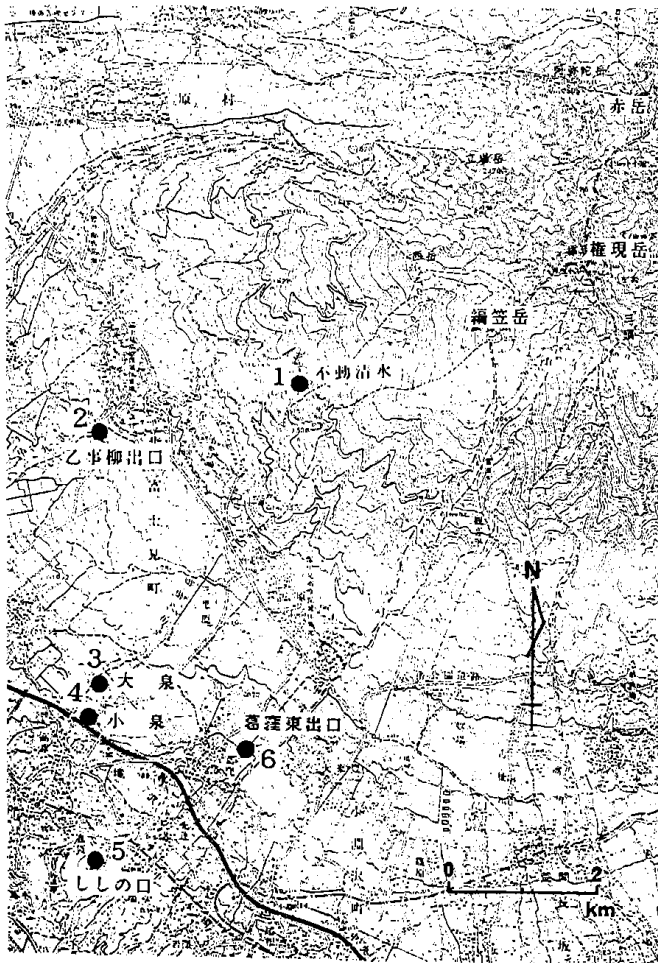


表3 富士見高原湧水の水質 (mg/l)

No.	湧水地点	K	Na	Ca	Mg	Cl	SiO_2
1.	不動清水	0.87	2.0	4.1	0.8	1.0	10.3
2.	乙事湧水	1.60	3.4	5.2	1.4	1.3	16.2
3.	大 泉	1.28	3.6	4.4	1.1	0.7	17.7
4.	小 泉	1.30	3.7	4.3	1.0	0.7	18.0
5.	ししの口	1.87	4.8	5.3	1.6	3.9	18.1
6.	葛窪湧水	1.26	3.6	4.2	1.1	0.7	17.8

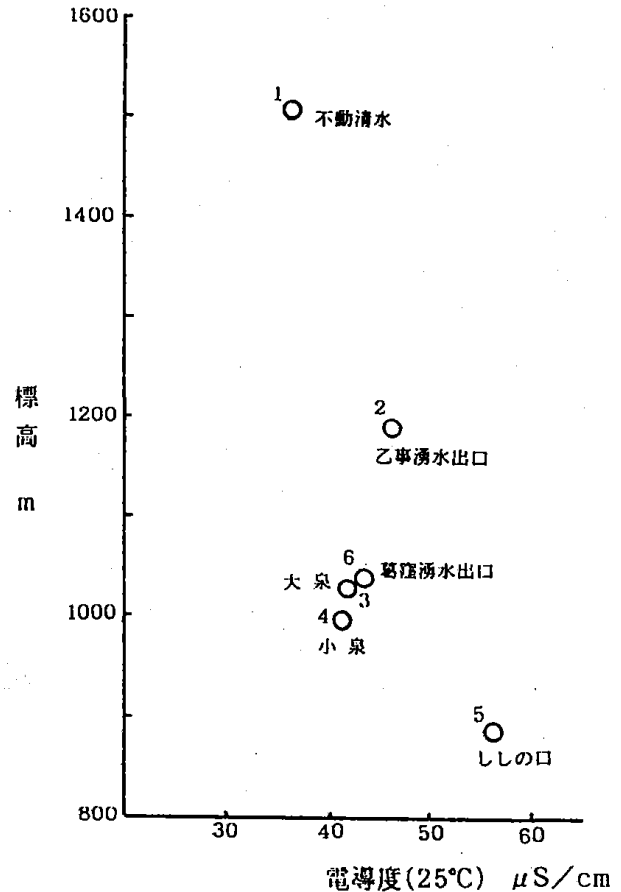


図8 電導度と標高の関係

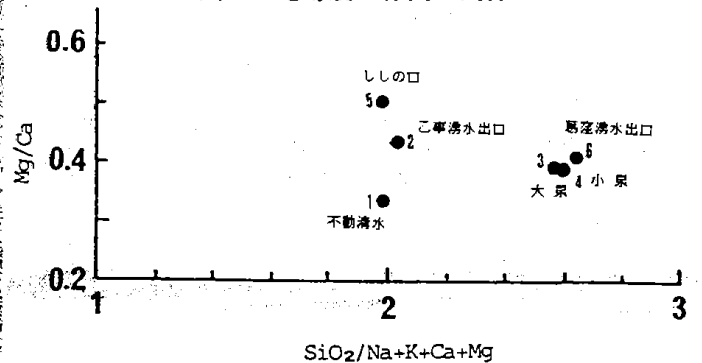


図9 富士見高原湧水の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と Mg/Ca の関係 (当量比)

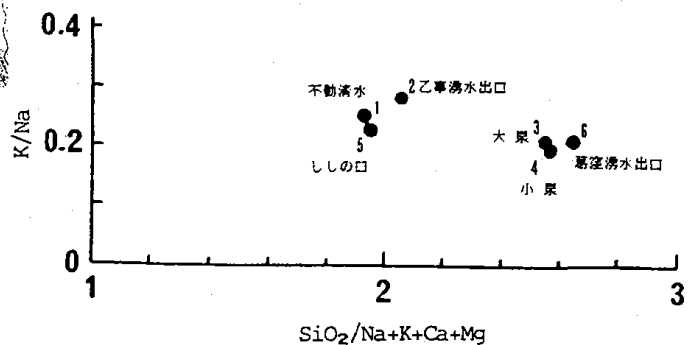


図10 富士見高原湧水の水質における $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ と K/Na の関係 (当量比)

く似た化学的特性を有していることを表している。一方、 $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比が2前後の湧水、すなわち不動清水、乙事湧水、ししの口湧水について Mg/Ca をみると、若干分布の幅が広がっており、他の4地点に比べてししの口湧水がやや高く、また不動清水は低い傾向が認められる。しかし、 K/Na の等量比は両者殆ど差はなく、乙事湧水の K/Na 比にも近い。したがってこの場合には、基本的に不動清水、乙事湧水、ししの口湧水三者の化学的特性は同じであると考えた方が妥当であろう。このように $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の当量比から区分された化学的特性はそれぞれに属する各湧水の帯水層における地質の特徴を反映しているものと考えられる。

6. おわりに

以上、自然水の化学的特性を区分する手法を検討するため、 SiO_2 をキー成分にとり、陽イオンの総等量との比を主たる指標として用い、神川と諏訪湖上流域河川および富士見高原湧水を対象に水質区分を試みた。 SiO_2 は不安定な成分であり、河川において他の成分が上流から下流に増大する傾向にある時でも流下の過程で沈澱により減少することが知られている。したがって $\text{SiO}_2/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}$ の等量比の大小と地質との関係をただちに結びつけるのは危険である。しかし、本報告で検討した結果からも明かなように、限られた範囲の上流域における河川や地下水を対象とする場合

には水質の化学的特性は基本的にはその流域の地質的条件を反映しており、水質を区分する目安として十分利用可能と思われる。今後こうした事例を積み重ねて、指標としての有効性を確かめる必要がある。

7. 参考文献

- 1) 渡辺義人：集水域からの無機溶存成分の流出特性と流出負荷，環境科学研究報告集「河川における物質循環」，49，(1985)
- 2) 渡辺義人：諏訪湖上流域における河川水の化学特性，諏訪湖集水域生態系研究報告書，第8号，1～6，(1982)
- 3) 渡辺義人・沖野外輝夫：湖沼の水質保全からみた白樺湖流域の自然環境容量，信州大学環境科学論集，第7号，18～24，(1985)
- 4) 半谷高久：天然水の化学的性質と地質環境との関係に関する考察（第1報～第3報），日本化学雑誌，74（5～7），365，450，522，(1953)
- 5) 日本化学会編：日本の陸水，化学総説，14，(1992)
- 6) 諏訪教育会：諏訪の自然誌・陸水編，1982
- 7) 水収支研究グループ編：地下水資源・環境論，共立出版，(1993)
- 8) 同友興産株式会社：富士見高原開発計画に係わる環境影響評価準備書，(1991)
- 9) 茅野市：茅野市史別巻・自然，(1986)

(受付 1994年1月5日)