

水と地表物質との相互作用による水質について —福島・茨城県における湧水・地表水の調査例—

金井 豊* 関 陽児** 上岡 晃* 金沢康夫**
月村勝宏** 濱崎聡志** 中嶋輝允**

Yutaka KANAI, Yoji SEKI, Hikari KAMIOKA, Yasuo KANAZAWA, Katsuhiko TSUKIMURA, Satoshi HAMASAKI and Terumasa NAKAJIMA (1998) Study on water quality as a result of water-rock interaction —a case study in Fukushima and Ibaraki Prefecture—*Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 49 (8), p. 425-438, 13 figs., 3 tables.

Abstract: To understand the water-rock interaction and the relationship between geology and water quality, we have studied the spring and surface waters in Fukushima and Ibaraki Prefectures. The amount of total ion equivalent was linear with conductivity, which allows us to estimate the amount of dissolved materials from conductivity. The water quality was influenced by not only geology but also water temperature and standing time. The water quality from granitic area belongs to calcium carbonate-sodium carbonate type, and then increased in alkalinity and alkali ions with standing time. On the other hand, the composition of water from pyroclastic materials showed the tendency of alkali earth metal > alkali metal ions. In this study, we tried a new sampling method to collect the percolated water near the top of mountains. The water collected in this way is surface and shallow water, and contains little dissolved material. These data have been rarely reported although they are important to study the evolution of groundwater.

少ないため、貴重なデータが得られた。

要 旨

地表付近の地質やより深部の地質と水質との関わりを明らかにするために、福島県および茨城県を中心に温泉・鉱泉などの湧水や地表水等を調査した。その結果、水中の溶存イオン量と測定された電気伝導率との間に比較的良い直線関係があり、電気伝導率は溶存成分量を簡便に知るために有効であった。溶存成分量は花崗岩類、片麻岩、第三紀層、火山岩類の各岩石種毎に幅広い変化を示すのが特徴であるが、さらに水温や岩石との接触時間に大きく影響を受けているものと考えられる。花崗岩質岩石を通過した水の水質は、炭酸カルシウム型—炭酸ナトリウム型に属し、アルカリ度とアルカリ濃度の増加する傾向にある。一方、火山岩類からの水の水質は、アルカリ土類金属イオン > アルカリ金属イオンの傾向が見られた。今回野外における水採取法として、新たに源頭付近の水を採取する方法を試みたところ、表層浅部の水が採取された。これらの試料の水質では、組成的にいずれも溶存イオン量は少ない。このような試料の分析例は

1. はじめに

地層あるいは岩石中における元素の移動現象は、地下水に対する元素の溶解度に依存しているが、その溶解度は地下水の水素イオン濃度 (pH)、酸化還元電位 (Eh)、各種イオン濃度といった水質によって大きく変化する。地表に降った天水は、大気中の塵埃や気体成分をわずかながら溶かし込んではいるものの、ほとんど純粋な水である。しかし、地表に浸透した水は、移行もしくは滞留している間に地層物質あるいは岩石との相互作用によって、天水とは組成の異なる水へと変化する。従って、地下における元素の移動現象を明らかにするためには、地下水質の特性を明らかにすることが必要である。このように地下水は天水が複雑な相互作用を経て進化していくが、このような水質形成過程を解明する上で、実験室でのモデル実験と並行してフィールドでの調査は不可欠となっている。

著者らは、こうした観点から地表物質やより深部の地質ならびに水の履歴と水質との関わりを明らかにしよう

* 地殻化学部 (Geochemistry Department, GSJ)

** 資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)

Keywords: water geochemistry, water-rock interaction, spring, surface water, Fukushima, Ibaraki

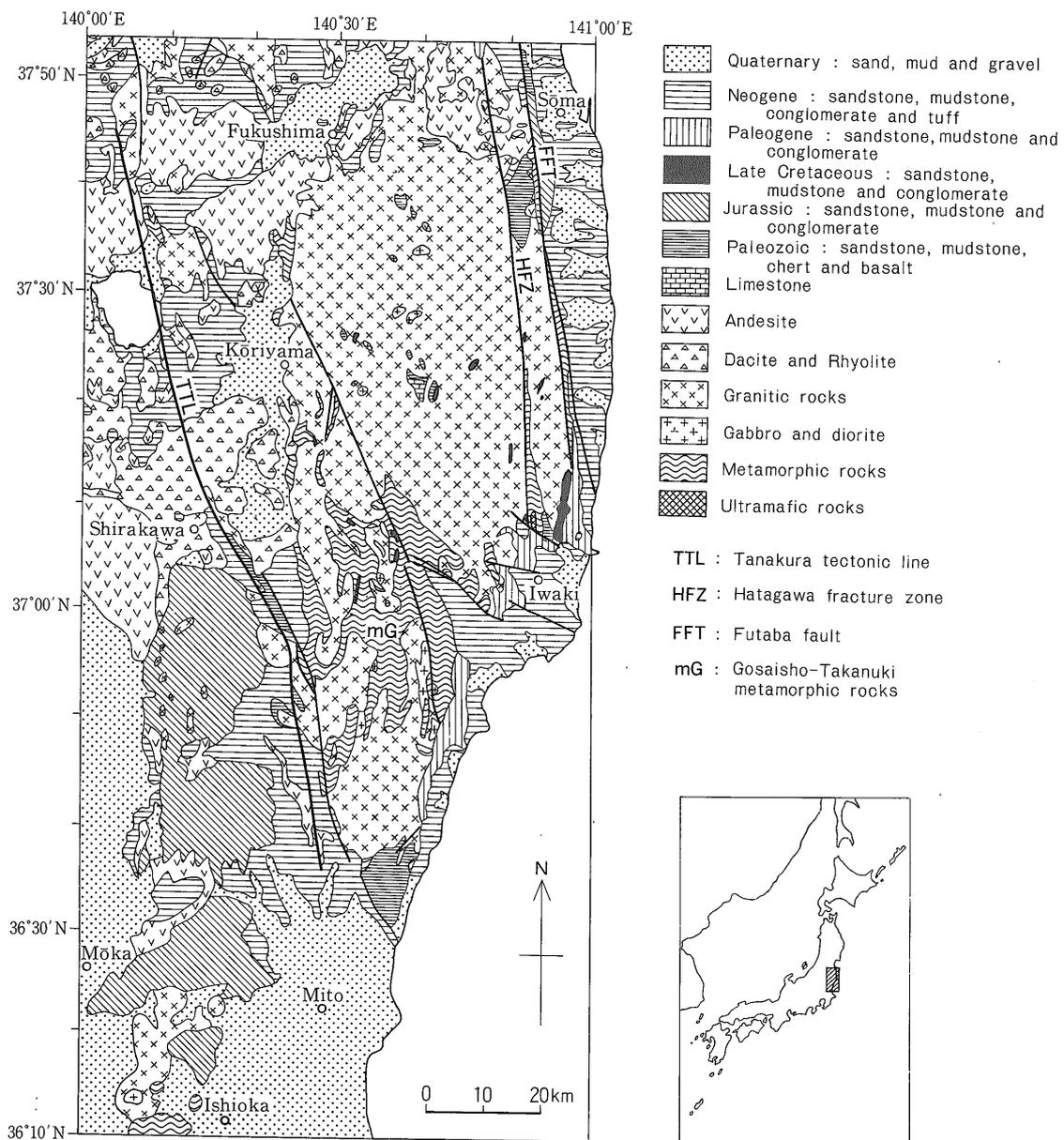
として、種々の水質調査を行ってきた。本報告では福島県および茨城県を中心に温泉・鉱泉水などの湧水や地表水等を調査した結果について報告する。なお、本研究は、国立機関原子力試験研究「高レベル放射性廃棄物地層処分に係る地層物質による地下水質変化に関する地球化学的研究」並びに重点基礎研究「環境中のラドン・トロンの地球化学的研究」の研究の一部として行われた。試料の採取を快く許可して下さった源泉の管理者ならびに関係者に厚く感謝する次第である。

2. 調査地域の地質概略

調査の対象地域は、福島・茨城両県にまたがる阿武隈

山地、八溝山地、常磐炭田地域、および脊梁山地の第四紀火山である吾妻・安達太良火山周辺である。本調査地域の地質に関しては、「20万分の1福島県の地質図」(福島県, 1955)の他に山田ほか(1982), 村田ほか(1992), 地質調査所(1992)による「100万分の1地質図」等の資料がある。他に幾つかの5万分の1地質図幅が利用できる。第1図はそれらの資料を基に編纂した地質概念図である。

阿武隈山地は花崗岩類を主とし、変成岩、中生界堆積岩などからなり、その東縁は太平洋岸に並走する双葉断層により第三紀以降の地層と、西-北西縁は棚倉構造線に沿う低地帯により八溝山地と、それぞれ境される。阿武隈山地の主体をなす白亜紀花崗岩類は、花崗閃緑岩



第1図 調査地域の地質概念図(地質調査所, 1992; 村田ほか, 1992を一部改変).
Fig. 1 Outline of geology in surveyed area (modified after GSJ, 1992; Murata *et al.*, 1992).

を主とし、斑れい岩や超塩基性岩を伴う。山地の南部には被貫入岩である御在所変成岩、竹貫変成岩などの広域変成岩が分布する。御在所変成岩は塩基性火成岩起源の緑色片岩や粗粒角閃岩を、竹貫変成岩は堆積岩起源の珪質片麻岩を主とし、原岩年代はいずれも中生代と考えられている(加納ほか, 1973; 加納, 1989)。相馬地域には古生界の堆積岩類が、八茎地域には古生界の変成岩・堆積岩類がそれぞれ分布する。

八溝山地は関東平野の北東部に位置し、北から八溝、鷲子、鷄足、筑波の4つの山塊に分けられる。これらのうち八溝、鷲子、鷄足山塊は、砂岩、頁岩、チャートなどの非変成の中生界の堆積岩類を主とする。筑波山塊は、それらを原岩とする変成岩、古第三紀の花崗岩類などからなる(宮崎ほか, 1996)。

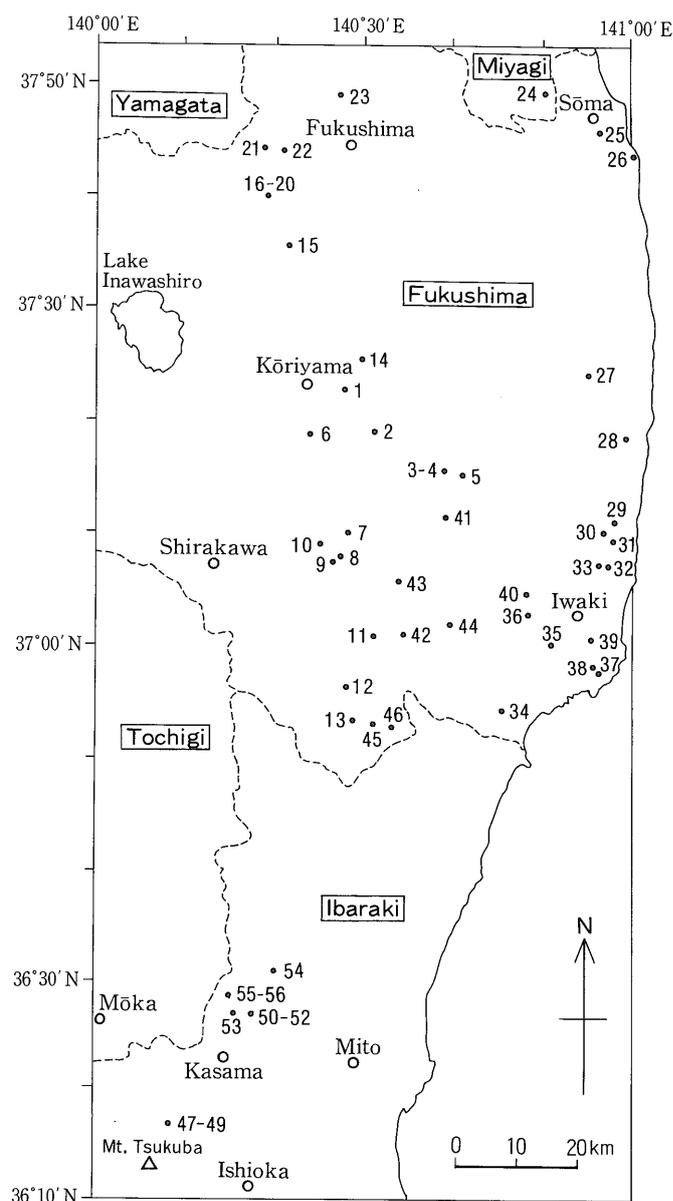
常磐炭田地域はいわき周辺の阿武隈山地東縁に位置し、主として第三系堆積岩類が分布する。一方、吾妻・安達太良火山は、阿武隈帯中の火山フロント上に位置する第四紀の安山岩質火山である。

3. 試料および分析方法

試料の採取地点を第2図および第1表に示した。今回の調査では、阿武隈山地の白亜紀花こう岩類・中生代変成岩類、八溝山地の中生代堆積岩類・古第三紀花こう岩類、常磐炭田地域の第三紀堆積岩類の分布地域、および吾妻・安達太良火山地域から水試料を採取している。試料水は、地質の面からみるとこのような地質に関連する地点から採取しているが、一方でまた、流出状況(水の履歴)からみると、温泉(鉱泉)として湧出しているものや表層をほんのわずかに浸透して地表に出てきた水などである。

試料水の採取法としては、鉱泉・温泉水が源泉で採取できるものに関しては可能な限り源泉で採取した。浸みだした水を溜めているものについては、その溜池から採取した。また、野外におけるその場での浸透地下水を採取する方法として、新たに源頭付近の水採取法が試みられた。これは集水域の小さな山頂付近で浸みだしてくる水を採取するものである(茨城県加波山周辺及び阿武隈山地域の一部において)。さらに、一部表流水の試料もある。

水質の分析法としては、一般の分析法にならった。すなわち、水素イオン濃度(pHと略記、以下同じ)・酸化還元電位(Eh)・電気伝導率(Conductivity)・溶存酸素濃度(DO)の測定には各種計器を用い、重炭酸・炭酸イオン濃度(アルカリ度: Alkalinity)は希硫酸を用いる滴定法によった。陰イオン濃度はイオンクロマトグラフィーで、陽イオンは原子吸光法で、シリカおよび磷酸イオン濃度は比色法で定量した。また、一部塩化物イオン濃度の定量には硝酸銀による滴定法も併用した。



第2図 試料採取地点。
Fig. 2 Locations of samples.

4. 結果と考察

試料水の化学組成をまとめて第2表に示した。ある地点における水質は、様々な要因によって変動していると考えられる。河川の場合、多摩川における毎日のアルカリ度の変動は正規分布で示されるような小さなものである(菅原・半谷, 1964)が、人間活動の盛んな箇所や水利用の行われているところでは大きく経時変動している可能性が高い。今回の試料水も鉱泉・温泉水の利用状況や採取日時によって大きく変動している可能性があるため、今回の水質データはその泉質を特定するものではなく、ある時期の一断面と考えた方がよい。しかし、多数のデータを用いれば地球化学的に水質を規制する因子を

地質調査所月報(1998年第49巻第8号)

第1表 試料の一覧.
Table 1 List of samples.

Station No.	Name	private name	location	*1 condition	*2 Geology	*3 temperature °C	*3 Flow rate l/m	*3 type
1	88110904	斉藤の湯「上の湯」	福島県田村郡三春町斉藤		Gd	12	16	自
2	88110905	ザクの湯「藤の湯」	福島県郡山市田村町糠塚下滝	a	G	17.5	21	自
3	88111006	小町温泉「太田屋」	福島県田村郡小野町谷津作	pump	Gd	25.2	18	自
4	88111007	小町温泉「金山旅館」	福島県田村郡小野町谷津作	a	Gd			
5	88111008	湯沢の湯「湯沢荘」	福島県田村郡小野町湯沢		Gd	27.5	36	自
6	88111009	守山温泉「白水館」	福島県郡山市田村町守山		G	19	20	動
7	88111010	母畑温泉「元湯」	福島県石川郡石川町母畑		Gd	15	15	動
8	88111011	片倉温泉「薬王館」	福島県石川郡石川町立ヶ岡		Gd			
9	88111112	猫啼温泉「井筒屋」	福島県石川郡石川町猫啼温泉		Gd			
10	88111113	成亀温泉	福島県石川郡石川町新屋敷成亀	pump	Gd			
11	88111114	下滝「滝」	福島県東白川郡鮫川村富田	a	Gd			
12	88111115	谷川温泉	福島県東白川郡埴山形		Gd	15	1.9	自
13	88111116	湯岐温泉「和泉屋」	福島県東白川郡埴町湯岐		G	38	35	自
14	89102401	馬場の湯「若松屋」	福島県田村郡三春町尼ヶ谷		G	15	5.2	自
15	89102402	岳温泉「ホテル白鳥」	福島県二本松市岳温泉ヒマヤ大通り		V			
16	89102403	川上温泉「山水」	福島県福島市土湯温泉町川上		V-t2			
17	89102404	26-7	福島県福島市土湯温泉町川上		V-t2			
18	89102405	混合	福島県福島市土湯温泉町川上		V-t2			
19	89102406	口	福島県福島市土湯温泉町川上		V-t2	72	7	自
20	89102407	26-5	福島県福島市土湯温泉町川上		V-t2	69	13.3	自
21	89102508	高湯温泉「仙気の湯」	福島県福島市町庭坂高湯		V	41	35	自
22	89102509	信夫温泉	福島県福島市桜本字木通沢	a	V	38	24	動
23	89102510	飯坂温泉「つたや」	福島県福島市飯坂町十網町		t3-d			
24	89102511	青葉温泉	宮城県伊具郡丸森町大内青葉	a	Gd			
25	89102512	レストラン「くるま」	福島県相馬市程田潜石	a-p	t4			
26	89102613	浦庭温泉	福島県相馬市浦庭前迫	a	t4	12	10	自
27	89102614	玉ノ湯「元湯」	福島県双葉郡大熊町野上	a	Gd	25.5	18	自
28	89102615	岩井土鉱泉「うめだや」	福島県双葉郡富岡町上郡山前沢	a-p	Gd	11	16	自
29	89102616	折木「目の湯」	福島県双葉郡広野町折木亀ヶ崎	a-p	Gd			
30	89102617	谷地鉱泉「石川屋」	福島県いわき市大久町大久下谷地	pump	Gd			
31	89102618	入間沢温泉「叶屋」	福島県いわき市大久町大久入間沢	a-p	Gd			
32	89102719	白岩温泉「金波」	福島県いわき市四倉町白岩	a	t3-t1	17	4	自
33	89102720	玉山温泉「石屋」	福島県いわき市四倉町玉山	a	Gd			
34	89102721	いわき市三沢町弓張	福島県いわき市三沢町弓張	pump	S2			
35	89102722	湯本温泉「古滝」	福島県いわき市常磐湯本町三函		Gd			
36	89102723	入の元湯「神泉亭」	福島県いわき市内郷高野町白狐	pump	Gd			
37	89102824	地切温泉	福島県いわき市小名浜上神白地切	a-p	t3			
38	89102825	神白温泉「国元屋」	福島県いわき市小名浜上神白追分	pump	t3	14.8	40	動
39	89102826	吉野谷鉱泉	福島県いわき市平吉野谷	pump	t2			
40	89102827	成沢の湯	福島県いわき市好間町大利成沢	pump	Gd			
41	89102828	湯の本温泉	福島県いわき市三和町中三坂湯の本		Gd			
42	89102829	入道温泉	福島県石川郡古殿町松川入道	pump	S1	13	0.6	自
43	TNK2-W1	古殿町(970313)	福島県石川郡古殿町作根	R	S1		(0.17)	
44	GZS1-W1	貝屋北東(970313)	福島県いわき市田町石住貝屋	R	S2		(0.20)	
45	HNW2-W1	埴町片貝(970312)	福島県東白川郡埴町片貝	R	G		(1.0)	
46	HNW1-W1	埴町矢塚(970312)	福島県東白川郡埴町矢塚	R	Gd		(9.6)	
47	KB1-1	足尾山西斜面(970108)	茨城県真壁郡真壁町白井	a	G		(6.0)	
48	KB1-3	足尾山西斜面(970108)	茨城県真壁郡真壁町白井	R	G			
49	KB1-4	足尾山西斜面(970108)	茨城県真壁郡真壁町白井	a	G		(0.60)	
50	NK1-2	電波中継塔南西(970109)	茨城県東茨城郡常北町	R	Sd			
51	NK1-3	電波中継塔南西(970109)	茨城県東茨城郡常北町	R	Sd			
52	NK1-4	電波中継塔南西(970109)	茨城県東茨城郡常北町	R	Sd			
53	NK3-4	新宿採石(970109)	茨城県西茨城郡七会村徳蔵	a	Sd			
54	KT2-1	仲岩船南方(970110)	茨城県東茨城郡桂村岩船	a	V			
55	NK4-3	八瓶山北斜面(970110)	茨城県西茨城郡七会村塩子	R	Chert		(4.0)	
56	NK4-4	八瓶山北斜面(970110)	茨城県西茨城郡七会村塩子	Snow				

*1 : conditon
a:artesian flowing well
a-p:artesian flowing - pool
pump:pumping up
R:river water

*2 G:granite, Gd:granodiorite, D:diorite, V:pyroclastic material
S1:Takenuki-schist, S2:Gozaisho-schist, Cr:Cretaceous,
t1:Paleogene, t2-t4:Neogene, F:fault, d:Diuvium(pleistocene)

*3 : Hot springs in Fukushima Prefecture (Fukushima Prefecture, 1967) () means measured flow rate
自: artesian flowing 動: pumping up

水と地表物質との水質について—福島・茨城県の調査例— (金井 ほか)

第2表 福島・茨城県における湧水・地表水の化学組成.

Table 2 Water quality of spring and surface waters taken from Fukushima and Ibaraki Prefectures.

Station No.	Name	*4		pH	DO	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	t.Fe	Mn ²⁺	SiO ₂	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	
		Tw °C	Conductivity μS/cm																				Eh mV
1	88110904	14.2	161.3	241	6.3	-	47.6	0.0	0.08	8.4	20.2	12.6	1.71	19.3	3.32	0.00	0.00	33.0	0.74	-	-	-	
2	88110905	13.2	47.4	150	6.6	-	23.8	0.0	0.05	3.7	0.7	5.9	0.59	4.57	0.54	0.00	0.00	26.0	0.10	-	-	-	
3	88111006	20.2	184.1	38	9.8	-	20.1	11.4	0.24	28.7	11.8	34.6	0.71	4.68	0.12	0.00	0.00	24.5	0.01	-	-	-	
4	88111007	25.9	229.0	-280	9.9	-	13.4	15.6	0.30	35.1	11.4	39.8	0.58	3.22	0.00	0.00	0.00	24.0	0.00	-	-	-	
5	88111008	27.2	134.5	-261	9.9	-	9.4	21.0	0.28	4.7	7.4	23.0	0.50	2.42	0.01	0.00	0.00	26.2	0.00	-	-	-	
6	88111009	18.0	144.0	-2	6.1	-	51.8	0.0	0.16	14.6	2.1	11.4	1.45	8.92	4.74	4.76	0.14	66.8	0.01	-	-	-	
7	88111010	18.0	175.6	-293	10.2	-	6.1	36.0	0.80	12.7	10.7	40.6	0.71	1.27	0.00	0.00	0.00	44.8	0.00	-	-	-	
8	88111011	13.0	77.1	88	6.9	-	40.3	0.0	0.05	4.8	3.0	5.7	1.53	11.3	1.66	0.00	0.00	26.7	0.02	-	-	-	
9	88111112	11.1	34.0	127	7.2	-	18.5	0.0	0.05	3.7	0.9	4.3	0.48	3.69	0.36	0.00	0.00	21.9	0.08	-	-	-	
10	88111113	13.1	147.5	159	6.0	-	46.4	0.0	0.06	13.7	17.8	9.3	0.98	21.2	3.56	0.18	0.05	25.1	0.04	-	-	-	
11	88111114	15.8	80.1	92	8.0	-	41.5	0.0	0.16	2.8	6.5	8.1	1.16	9.75	1.06	0.00	0.00	19.3	0.05	-	-	-	
12	88111115	17.9	188.7	3	10.0	-	48.8	28.2	0.46	3.4	10.3	45.4	0.37	1.10	0.00	0.00	0.00	25.1	0.00	-	-	-	
13	88111116	30.7	233.0	-5	9.8	-	18.1	34.8	0.81	5.4	11.2	41.3	0.65	1.15	0.00	0.00	0.00	41.6	0.00	-	-	-	
14	89102401	14.0	195.8	158	6.7	4.6	63.8	0.0	0.00	10.3	22.8	13.9	1.53	24.5	4.82	0.00	0.00	35.7	0.04	20.6	-	-	
15	89102402	<i>43.9</i>	2140	476	2.7	7.1	0.0	0.0	1.03	1.9	426.	13.7	4.43	27.3	8.66	2.09	0.50	97.3	0.11	0.0	20.4	0.04	-
16	89102403	<i>20.3</i>	41.4	181	7.0	8.4	18.3	0.0	0.00	0.7	1.0	2.3	0.64	4.80	0.61	0.00	0.00	22.7	0.00	0.5	-	-	
17	89102404	<i>20.4</i>	689.0	175	7.1	2.8	118.	0.0	1.36	41.7	126.	100.	9.15	33.1	3.73	0.00	0.23	75.2	0.08	0.0	-	-	
18	89102405	<i>20.4</i>	859.0	178	7.3	6.5	131.	0.0	0.90	23.7	267.	66.4	6.97	100.	18.8	0.00	0.00	61.4	0.06	4.3	-	-	
19	89102406	<i>20.3</i>	981.0	167	7.3	6.0	143.	0.0	1.63	47.6	274.	100.	11.2	86.7	17.6	0.00	0.09	85.4	0.13	2.2	-	-	
20	89102407	<i>20.4</i>	966.0	158	7.5	6.8	135.	0.0	1.70	54.8	251.	121.	12.5	71.0	9.78	0.00	0.05	85.4	0.08	0.9	-	-	
21	89102508	47.3	2220	-126	2.9	0.0	0.0	0.0	1.34	42.8	616.	56.9	18.2	82.5	27.4	0.03	1.77	48.0	-	0.0	20.5	0.11	0.02
22	89102509	12.6	73.2	525	6.6	6.8	38.1	0.0	0.00	1.5	5.5	3.5	0.54	12.2	1.17	0.00	0.00	33.7	0.04	0.4	-	-	
23	89102510	<i>20.3</i>	1008	122	8.5	7.1	53.2	0.0	2.98	74.4	275.	185.	4.80	28.2	0.37	0.00	0.00	59.4	0.09	0.0	-	-	
24	89102511	15.0	135.3	-138	9.8	5.7	26.8	21.6	1.03	2.8	4.9	31.8	0.23	1.71	0.07	0.00	0.00	26.1	0.00	0.0	-	-	
25	89102512	12.9	127.8	-13	7.7	7.3	28.7	0.0	0.00	6.2	28.0	9.2	2.72	12.2	4.55	0.00	0.00	77.6	0.19	2.3	-	-	
26	89102613	16.8	161.0	-17	7.6	7.8	65.6	0.0	0.00	14.3	3.1	12.4	1.56	17.3	3.30	0.00	0.00	43.3	0.03	0.9	-	-	
27	89102614	24.8	207.0	-39	9.7	4.7	21.7	17.6	0.86	7.7	23.0	37.2	0.26	2.67	0.07	0.00	0.00	27.4	<0.02	0.0	-	-	
28	89102615	14.5	283.0	-57	7.6	2.4	65.3	0.0	0.23	5.6	92.4	9.7	2.82	37.2	9.90	0.00	0.00	78.7	0.20	1.1	-	-	
29	89102616	18.6	780.0	465	3.0	7.1	0.0	0.0	0.02	5.2	208.	8.2	3.90	7.89	4.77	4.53	0.63	69.6	0.02	0.1	19.3	0.07	0.01
30	89102617	15.8	321.0	-18	10.1	3.8	50.4	58.8	0.35	6.2	17.3	72.7	0.08	0.66	0.01	0.00	0.00	29.9	<0.02	0.0	-	-	
31	89102618	15.7	201.0	-162	8.7	0.5	94.6	0.0	0.08	5.5	19.0	35.7	0.93	10.6	2.08	0.00	0.00	22.3	<0.02	0.0	-	-	
32	89102719	16.1	844.0	418	4.1	5.0	0.0	0.0	0.61	8.3	474.	14.3	3.80	114.	43.2	0.29	1.19	41.6	0.03	0.0	-	-	
33	89102720	15.8	370.0	71	10.0	4.5	91.5	55.2	0.31	5.0	25.9	97.8	0.80	0.56	0.02	0.00	0.00	29.1	0.03	0.0	-	-	
34	89102721	17.9	647.0	-99	7.9	0.8	188.	0.0	0.33	6.5	179.	148.	1.19	4.80	1.25	0.00	0.00	33.0	0.20	0.9	-	-	
35	89102722	35.4	3480	106	7.6	4.6	96.7	0.0	3.13	421.	545.	495.	7.20	84.3	2.99	0.00	0.13	40.2	0.02	0.0	-	-	
36	89102723	16.1	322.0	12	10.2	0.7	53.4	66.6	0.05	2.4	9.0	81.4	0.23	0.54	0.01	0.00	0.00	20.0	0.02	0.0	-	-	
37	89102824	16.4	244.0	34	7.0	6.4	43.6	0.0	0.06	12.1	109.	11.2	2.07	39.3	14.9	0.14	0.00	63.1	0.05	0.1	-	-	
38	89102825	14.2	1545	-211	8.8	0.7	315.	7.2	0.00	228.	196.	398.	6.47	3.23	2.36	0.14	0.00	34.9	0.31	0.0	-	-	
39	89102826	15.6	316.0	176	7.3	3.2	104.	0.0	0.00	7.1	47.3	36.0	1.33	16.3	6.12	0.18	0.00	25.2	0.07	1.0	-	-	
40	89102827	16.5	187.2	79	7.2	2.4	87.8	0.0	0.00	4.6	17.1	42.5	0.53	3.59	1.05	0.00	0.00	23.8	<0.02	0.1	-	-	
41	89102828	18.2	179.1	-148	10.2	1.4	84.8	0.0	0.32	6.0	6.6	39.7	0.26	1.26	0.00	0.14	0.00	34.2	<0.02	0.0	-	-	
42	89102829	19.5	351.0	26	10.2	1.5	136.	0.0	10.4	19.3	3.9	81.8	0.50	1.12	0.01	0.00	0.00	37.6	0.03	1.4	-	-	
43	TNK2-W1	4.3	21.5	113	6.8	0.1	17.4	0.0	0.14	3.6	3.4	6.1	1.20	4.07	1.02	0.02	0.01	22.5	0.00	1.3	-	-	
44	GZS1-W1	10.0	102.4	276	7.9	7.2	59.6	0.0	0.09	2.0	8.4	4.9	2.41	19.1	2.88	0.00	0.00	16.0	0.00	2.5	-	-	
45	HNW2-W1	7.9	27.2	297	7.4	9.0	14.7	0.0	0.05	2.5	1.0	4.9	0.51	2.86	0.33	0.10	0.01	22.5	0.12	0.1	-	-	
46	HNW1-W1	9.8	24.4	327	6.9	8.3	12.5	0.0	0.00	1.7	0.8	3.3	0.62	2.48	0.55	0.00	0.00	19.6	0.07	0.0	-	-	
47	KB1-1	11.4	51.8	148	7.0	10.5	24.4	0.0	0.09	5.5	1.1	8.6	0.89	4.68	0.83	0.00	0.00	33.4	0.14	0.3	-	-	
48	KB1-3	8.9	43.3	153	7.5	10.5	15.9	0.0	0.06	4.7	2.0	7.0	0.62	4.31	0.73	0.00	0.00	24.2	0.02	3.8	-	-	
49	KB1-4	10.3	26.9	164	7.0	9.4	19.5	0.0	0.07	6.5	2.2	8.9	0.75	4.84	0.78	0.00	0.00	28.0	0.00	2.5	-	-	
50	NK1-2	7.0	21.6	82	7.0	11.2	15.9	0.0	0.23	3.3	4.0	5.2	0.28	4.52	1.54	0.06	0.01	17.8	0.00	2.8	-	-	
51	NK1-3	5.0	20.1	110	7.4	11.5	15.9	0.0	0.07	3.3	4.0	5.1	0.33	4.66	1.60	0.02	0.00	16.7	0.00	3.2	-	-	
52	NK1-4	6.9	22.8	122	7.6	10.8	19.5	0.0	0.05	4.2	3.3	5.2	0.41	5.62	1.59	0.01	0.00	16.7	0.00	1.7	-	-	
53	NK3-4	13.4	304.0	239	8.2	13.1	136.	0.0	0.04	2.6	149.	8.1	1.75	85.7	13.7	0.00	0.00	16.4	0.00	0.2	-	-	
54	KT2-1	12.0	32.2	159	7.3	5.8	34.2	0.0	0.10	3.1	3.1	6.7	0.60	7.02	2.31	0.00	0.00	26.4	0.02	1.5	-	-	
55	NK4-3	9.5	23.3	269	6.7	6.5	0.9	0.0	0.03	3.1	2.3	2.0	0.25	1.87	0.84	0.00	0.00	7.9	0.00	2.7	-	-	
56	NK4-4	-	-	-	-	-	-	-	0.14	0.2	0.7	0.3	0.25	0.45	0.09	0.00	0.00	0.0	0.00	0.1	-	-	

*4: italic number is not spring/river water temperature, but cooled temperature for measurement

-: not determined

抽出することができる。そこで、第2表のデータを使用して以下の検討を行った。

4.1 試料水中の溶存イオン量

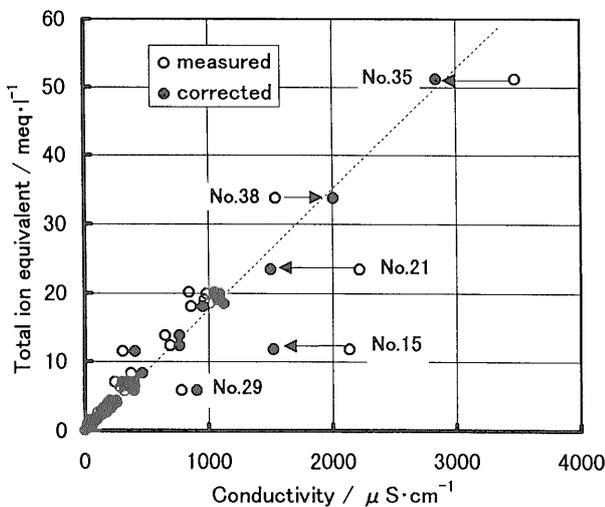
鉱泉・温泉水として利用されている地下水は、その定

義から温水(25℃以上、温泉水)またはある種の溶存成分濃度が一定量以上含まれている水(鉱泉水)である(例えば、環境庁自然保護局, 1978)。従って、これらの試料水では溶存成分濃度が高いと期待される。主として福島県内で採取された試料の多くは、溶存成分濃度の高

いものとなっている。一方、主として茨城県内で採取された試料では比較的溶存成分の少ない浅層水、もしくは表流水である。これについては後で詳しく検討する。分析された主化学成分 (F^- , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , t. Fe , Mn^{2+}) をイオン当量に換算し、測定された電気伝導率との関係を第3図上に白丸で示した。比較的良好な直線関係にあり、電気伝導率は溶存成分量を簡便に知るために有効であることがわかる。

この図では、No. 15, 21, 29, 35等、幾つかの点が直線からはずれている。これは、電気伝導率が温度の関数であり、試料の測定水温がまちまちであることに起因している。そこで、NaCl 溶液での温度勾配率 (2.15%/°C とした) を用いて 25°C での電気伝導率に補正してみると、第3図の黒丸のようにほとんどの点が直線上にのる。直線からはずれる試料については、分析していない他の溶存成分の寄与が推定される。例えば、No. 15, 29 は液の pH が低く酸性であり (H^+ イオンが存在している)、ICP でこの試料中の他成分を分析したところ、 Al^{3+} が 20 ppm 程度溶存していることが明らかとなった。

試料水を採取した地域の岩質とその試料水中のイオン溶存量との関係を第4図に示した。岩質は、花崗岩類 (Granites; G-Gd)、片麻岩 (Schist; S1-S2)、第三紀層 (Tertiary sedimentary rock; t1-t4)、火山碎屑岩 (Volcanic; V)、砂岩 (Sandstone; Sd)、チャート (Chert) 等に分類した。水質は、溶存イオン量に関してはチャートを除き地質の相違は直接的な影響を与えておらず、それぞれの地質条件で幅広い分布を示している。一方、水温と溶存イオン量との関係を第5図に示した。第三紀層 (□) の一部および火山碎屑岩 (△) の一部は湧出温度と分析時の温度とが異なっているためばらつき

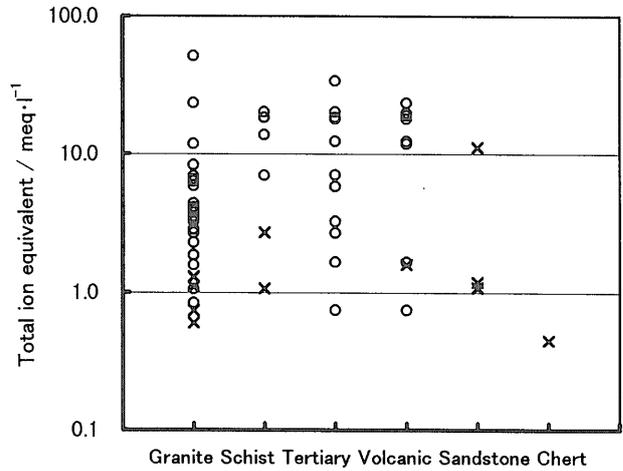


第3図 溶存イオン量と電気伝導率との関係。○: 測定値, ●: 25°C に補正された電気伝導率。
Fig.3 Correlation between amount of total ion and conductivity. ○: measured conductivity. ●: corrected conductivity at 25°C.

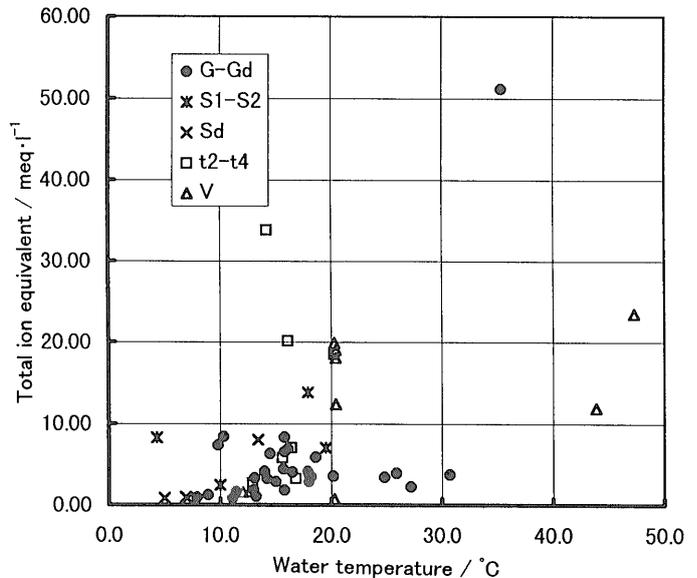
が大きい。高水温ほど溶存イオン量の多い傾向が認められる。しかし、この場合でも岩質との関係は明らかではなかった。すなわち、溶存イオン量は岩石の種類によっても影響されるであろうが (例えば、風化・変質鉱物等の微細鉱物の量比等)、むしろ水温や岩石との接触時間に大きく影響を受けているものと考えられる。

4.2 試料水の化学組成

天水 (雨水) は、雨滴の核となる塩類を溶かし込んで



第4図 岩質と溶存イオン量との関係。○: No. 1-42, ×: No. 43-55。
Fig.4 Correlation between rock type and amount of total ion. ○: No. 1-42. ×: No. 43-55.



第5図 水温と溶存イオン量との関係。G-Gd: 花崗岩-花崗閃緑岩, S1-S2: 片麻岩, Sd: 砂岩, t2-t4: 新第三紀層, V: 火山碎屑岩。
Fig.5 Correlation between water temperature and amount of total ion. G-Gd: granite-granodiorite. S1-S2: schist. Sd: sandstone. t2-t4: Neogene sedimentary rock. V: Pyroclastic materials.

いるため幾分溶存成分を有するが、大気中の二酸化炭素を吸収し、さらに地表土壌中では微生物の働きによって生じた高い二酸化炭素濃度の帯を通過するので、より重炭酸濃度が上昇する。初期の雨滴の化学組成としては、原 (1992) によると日本の平均で Cl^- が 0.11 meq/l (3.8 ppm), SO_4^{2-} が 0.055 meq/l (2.6 ppm), Na^+ が 0.086 meq/l (2.0 ppm), K^+ が 0.005 meq/l (0.2 ppm), Ca^{2+} が 0.026 meq/l (0.5 ppm), Mg^{2+} が 0.021 meq/l (0.3 ppm), pH 4.7 である。つくば市並木における 1986 年のデータから、 Cl^- が 1.17 ppm, SO_4^{2-} が 1.78 ppm, Na^+ が 0.54 ppm, K^+ が 0.13 ppm, Ca^{2+} が 0.34 ppm, Mg^{2+} が 0.10 ppm, pH 4.7 の値を岡本ほか (1992) が報告している。天水は溶存成分が少ないため海塩の影響を受けやすいので、内陸部に位置し海塩の影響を受け難いつくば市では少なくなっているであろう。このように天水の化学組成に関しては変動が幾分大きいと推定される。いずれにしても溶存成分量は少なく、本研究における No. 56 の降雪もこれに該当しているが、降雪の方が塩分量が少ない。このような水が、岩石と反応して種々の水質を形成し、河川水・温泉水となっていく。

測定された物理化学的水質および化学組成を用いて、統計処理による検討を行った。第 3 表には全試料を用いて相関係数を求めた結果を示した。この表から、電気伝導率には塩化物イオン、硫酸根、ナトリウム・カリウム・カルシウム・マグネシウムイオンのそれぞれがよく相関していることがわかる。言い換えると、これらの主要イオンが電気化学的な作用をしているといえる。また、pH が炭酸イオンと正の相関を持ち、逆に硫酸根やカルシウム・マグネシウムイオン、鉄・マンガンイオン

と負の相関関係にあることも示されている。このことは pH が高いと炭酸を溶かしやすく、また、重金属イオンは溶け難くなるのと調和的である。相関係数は大きなデータがあるとそれに引きずられて大きな値となる可能性があるがあるので、その数値自体には注意が必要であるが、本試料に関しては塩化物イオンや硫酸根が主な陰イオンであり、多くの陽イオンはこれらと相関を有しており、塩化物イオンや硫酸根が水質に大きく寄与していると考えられる。これらの陰イオンは、岩石と反応して陽イオンを溶かし出すときにカウンターイオンとなるのであろう。

さらに、溶存シリカとの相関をみると、硫酸根、カリウム・カルシウム・マグネシウム・鉄イオン等多くのイオンと正の相関を有していた。これは、岩石の風化・溶脱に伴い、種々の鉱物構成元素がシリカと共に溶け出ているためと考えることができる。

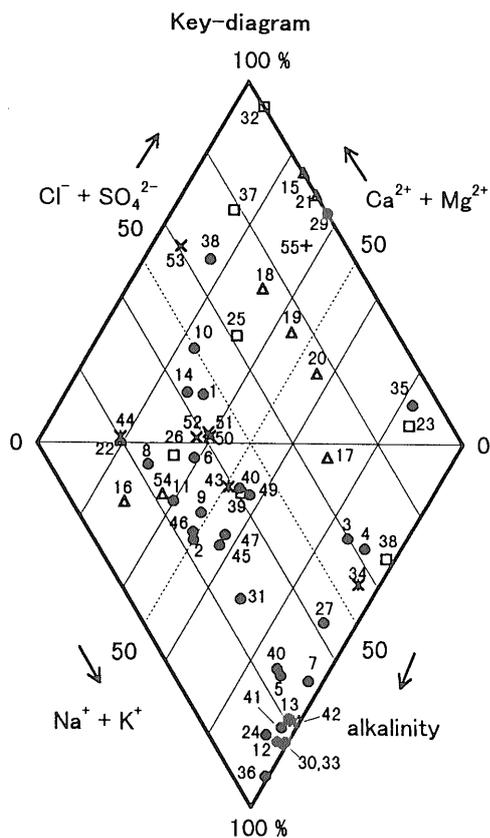
4.3 キーダイアグラム

水質を図示する方法の一つに、キーダイアグラムがある。キーダイアグラムでは、陰・陽イオンの組成比で比較するため、溶存イオン量の大小には関係しない。水質はキーダイアグラム上の位置によって、炭酸カルシウム型 ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ または $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ を主とするタイプ)、非炭酸カルシウム型 (CaCl_2 または CaSO_4 を主とするタイプ)、非炭酸ナトリウム型 (NaCl を主とするタイプ)、炭酸ナトリウム型 ($\text{Na}(\text{HCO}_3)_2$ を主とするタイプ)、中間型等に分類される (地質調査所, 1978)。水質と関連すると推定される地質を、花崗岩類、片麻岩、新第三紀層、火山砕屑岩、砂岩等に分類して第 6 図に示し

第 3 表 全試料における相関マトリックス。
Table 3 Correlation matrix of all samples.

	Tw	Conductivity	Eh	pH	DO	HCO_3^-	CO_3^{2-}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	t.Fe	Mn^{2+}	SiO_2	PO_4^{3-}	NO_3^-
Tw	1.00	0.72	-0.18	-0.16	-0.34	0.00	0.12	0.29	0.34	0.66	0.33	0.55	0.36	0.29	0.17	0.53	0.45	0.03	-0.03
Conductivity	+	1.00	0.05	-0.32	-0.27	0.30	-0.08	0.31	0.77	0.90	0.75	0.71	0.58	0.39	0.13	0.51	0.45	0.14	-0.05
Eh			1.00	-0.63	0.49	-0.21	-0.37	-0.07	-0.13	0.17	-0.23	0.04	0.25	0.24	0.24	0.16	0.11	0.00	0.03
pH			-	1.00	-0.17	0.24	0.58	0.18	0.04	-0.50	0.19	-0.41	-0.39	-0.53	-0.45	-0.64	-0.34	-0.14	-0.05
DO			+		1.00	-0.39	-0.25	-0.22	-0.18	-0.19	-0.34	-0.23	0.02	-0.06	0.07	-0.21	-0.11	-0.39	-0.06
HCO_3^-					-	1.00	-0.06	0.24	0.43	0.19	0.63	0.31	0.23	0.05	-0.13	-0.21	0.17	0.36	0.08
CO_3^{2-}				+			1.00	-0.05	-0.08	-0.20	0.09	-0.22	-0.28	-0.24	-0.11	-0.13	-0.16	-0.16	-0.09
F^-								1.00	0.26	0.23	0.32	0.21	0.15	0.03	-0.06	0.07	0.21	-0.04	-0.01
Cl^-		+				+			1.00	0.53	0.93	0.40	0.33	0.03	-0.05	0.05	0.13	0.11	-0.05
SO_4^{2-}		+		-						1.00	0.51	0.79	0.79	0.71	0.14	0.73	0.51	0.14	-0.05
Na^+						+					1.00	0.41	0.26	-0.02	-0.10	0.00	0.16	0.18	-0.07
K^+				-								1.00	0.71	0.58	0.04	0.62	0.60	0.22	0.02
Ca^{2+}				-									1.00	0.85	-0.04	0.51	0.45	0.11	0.10
Mg^{2+}				-										1.00	0.07	0.73	0.40	0.09	0.06
t.Fe				-											1.00	0.26	0.40	-0.06	-0.06
Mn^{2+}				-												1.00	0.28	-0.04	-0.08
SiO_2																	1.00	0.22	0.09
PO_4^{3-}						-	+											1.00	0.05
NO_3^-																			1.00

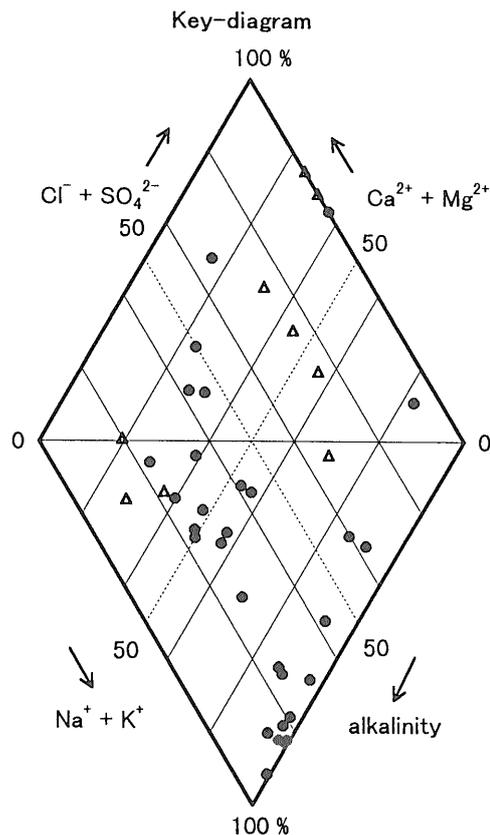
+ and - mean positive and negative correlations at 99% confidence



第6図 調査地域における水試料のキーダイヤグラム。●: 花崗岩-花崗閃緑岩, *: 片麻岩, ×: 砂岩, □: 新第三紀層, △: 火山碎屑岩, +: チャート。
Fig. 6 Key diagram of water samples in surveyed area.
●: granite-granodiorite. *: schist, ×: sandstone. □: Neogene sedimentary rock. △: Pyroclastic materials. +: chert.

た。いずれの岩質においてもダイヤグラム上で分散しているのが特徴である。これは、水質を一次的に規制しているものが他にあり、岩質によってのみ個々の水質を特徴づけることが困難であることを示唆している。しかし、大まかに見ると(第7図参照)、花崗岩類起源と考えられる水質は、pHの特に低いNo. 29や幾つかの例外を除くと炭酸カルシウム型-炭酸ナトリウム型に属するように見受けられる。アルカリ度(Alkalinity; 重炭酸イオンと炭酸イオンの含量)も高めとなっている。また、火山碎屑岩起源と考えられる水質は、アルカリ土類金属イオン>アルカリ金属イオンの傾向が見られる。

参考に、雨水、海水および河川水の化学組成の文献値(半谷, 1960; 原, 1992; 岡本ほか, 1992)をキーダイヤグラム上に示したものが第8図である。雨水は海塩や大気中の硫酸塩等の核となる物質の組成に引きずられ、炭酸イオンは少ないようである。河川水は中央から幾分カルシウムよりにあり、炭酸カルシウム型もしくは中間型に属している。また、森・池田(1968)は郡山盆地周辺における被圧地下水についての水質調査をしており、当該地の限られた領域内における水質ではかなり類似する



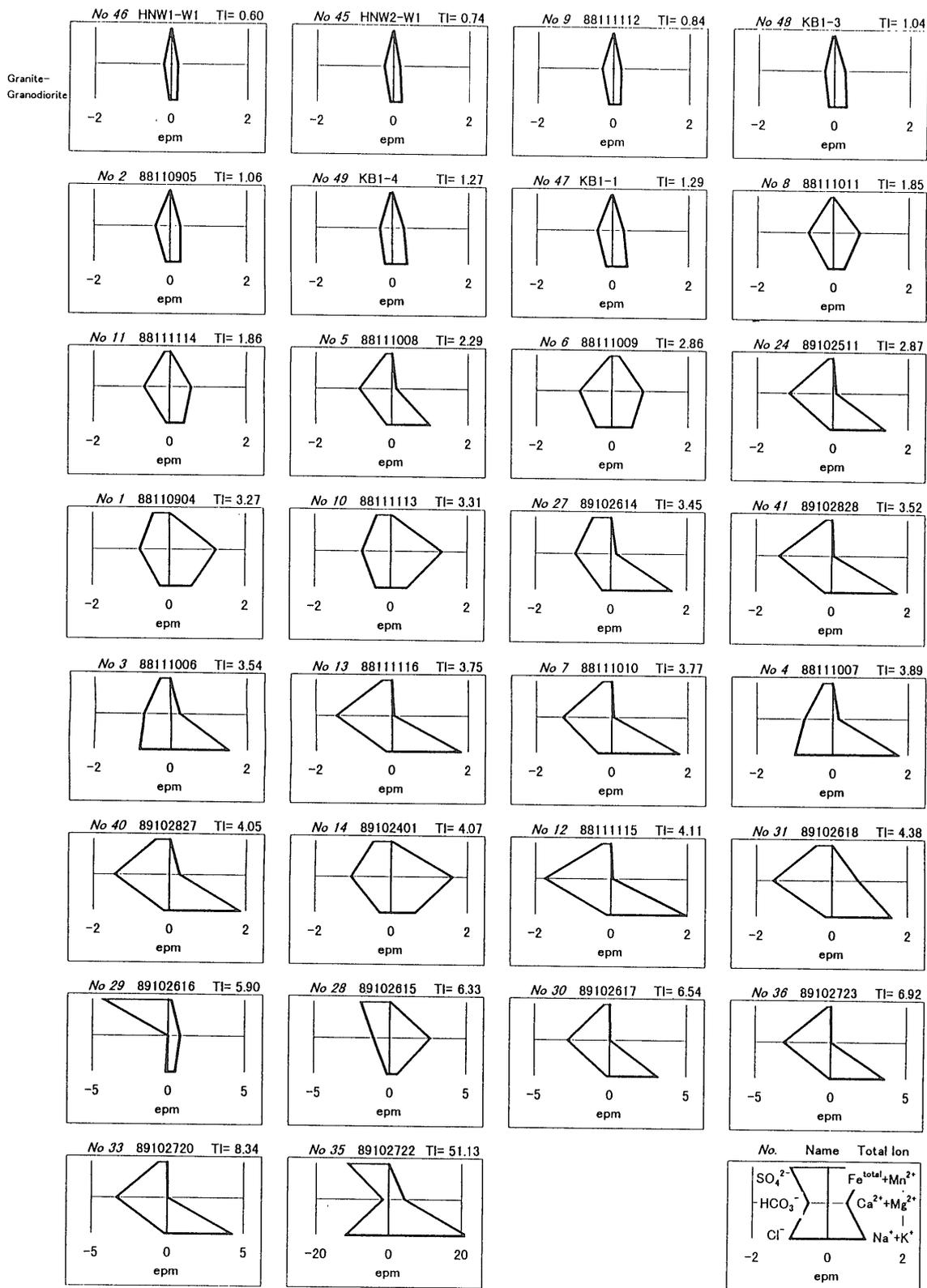
第7図 花崗岩-花崗閃緑岩(●)および火山碎屑岩(△)と関連すると推定される試料水のキーダイヤグラム。
Fig. 7 Key diagram of samples related to granite-granodiorite (●) and pyroclastic materials (△).

水質であることを報告している。例えば吾妻町一帯の被圧地下水では非炭酸カルシウム型に集まっている。一方、本研究で得られた火山碎屑岩と関連する水質は第7図に示されたように分散していた。このように、本研究における広域的な水質はより複雑であることが示唆される。

4.4 ヘキサダイヤグラム

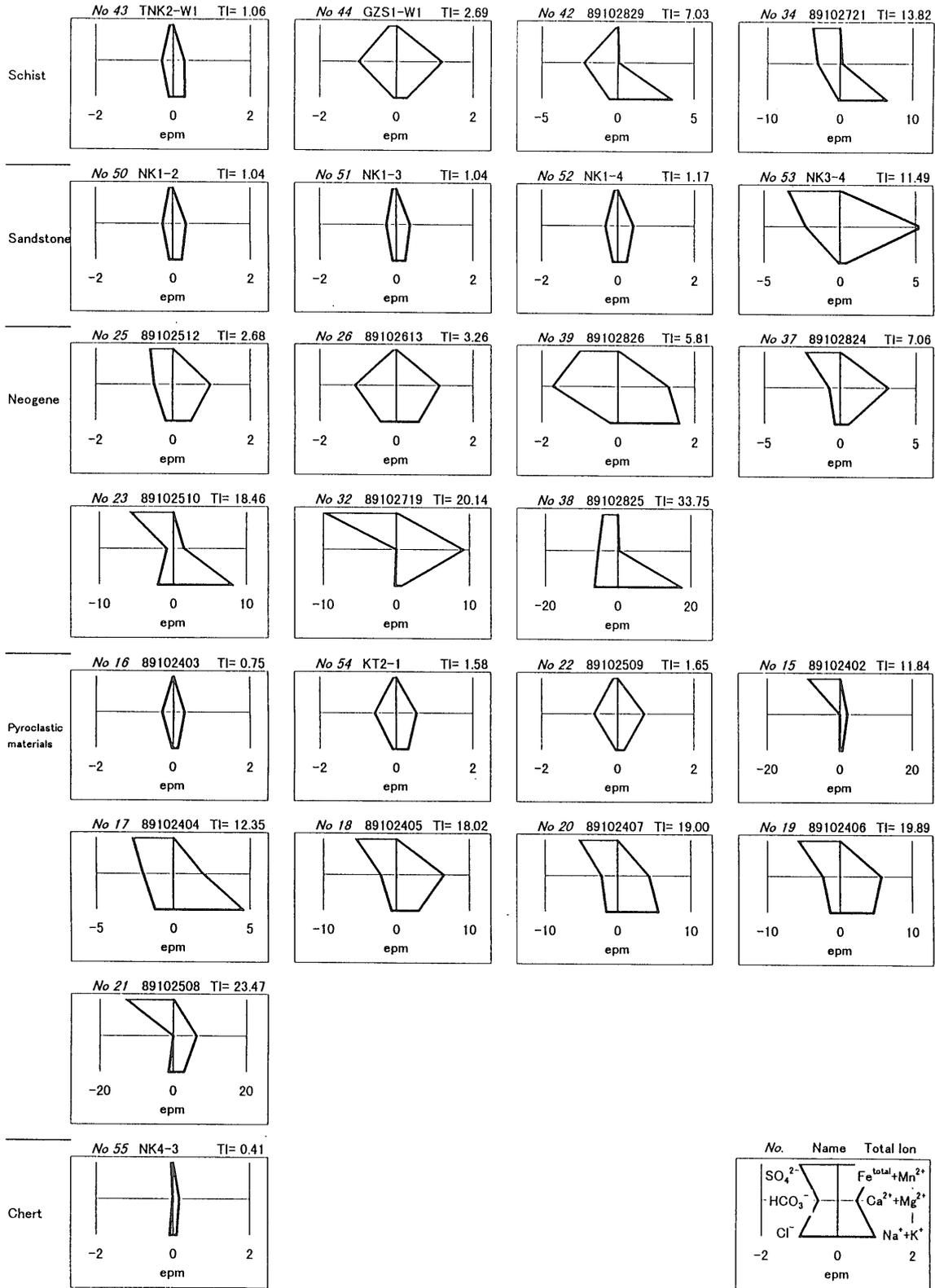
水質の溶存イオン量と組成とを表示する方法にヘキサダイヤグラムがある。本研究の試料の水質を、上記の地質分類に従い、さらに溶存イオン量の少ない順に並べて第9図に示した。溶存イオン量は実際には岩石との反応時間に対応して変化し、水の通過した経路の積分値であるが、このように並べたヘキサダイヤグラムから大まかな水質進化の過程が推定できる。

花崗岩類に関連すると考えられる水質では、初期の水質がCO₃-Ca・Mg型でダイヤグラム上では中段の膨れた六角形を示している。しかし、硫酸根の特に多いNo. 29, 28, 35等の特異な試料を除くと、次第に全体の大きさが大きくなりながらアルカリ度とNa・Kが増大して左中と右下に伸びたゆがんだ形に変形していくのが分かる。これは、花崗岩を構成する鉱物が水との反応によ

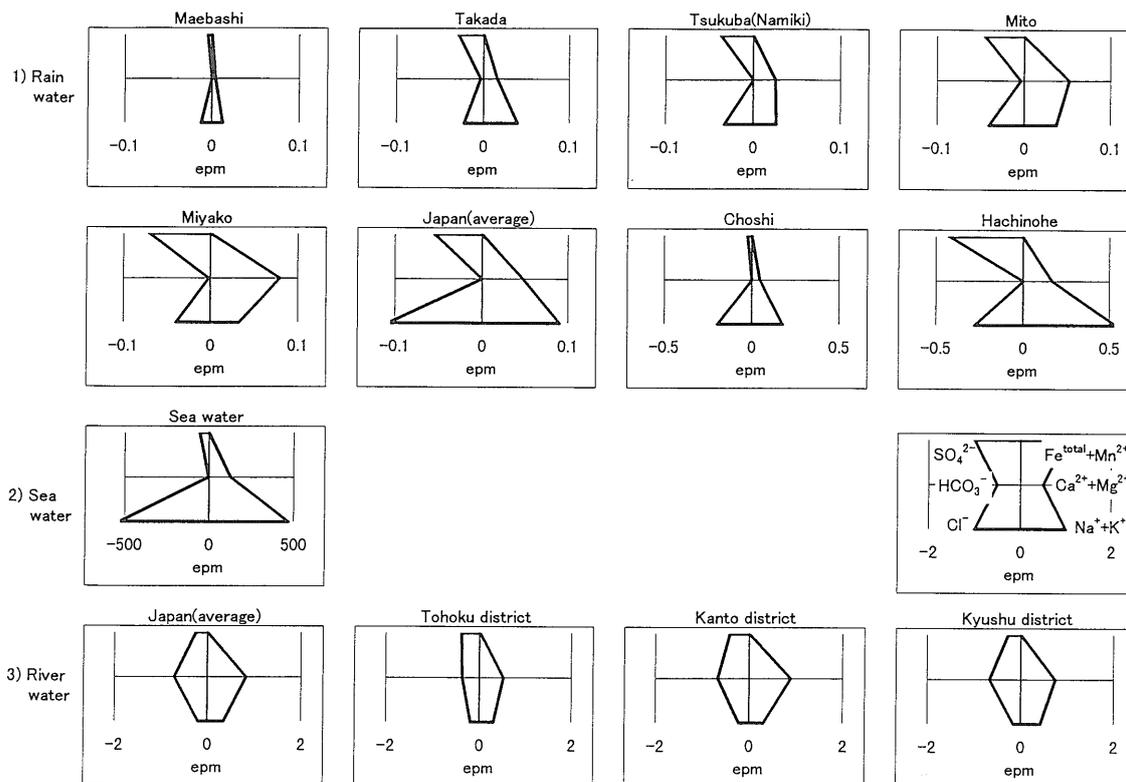


第9図 関連する地質分類によるヘキサダイアグラム.
Fig. 9 Hexadiagram of water samples with related geology.

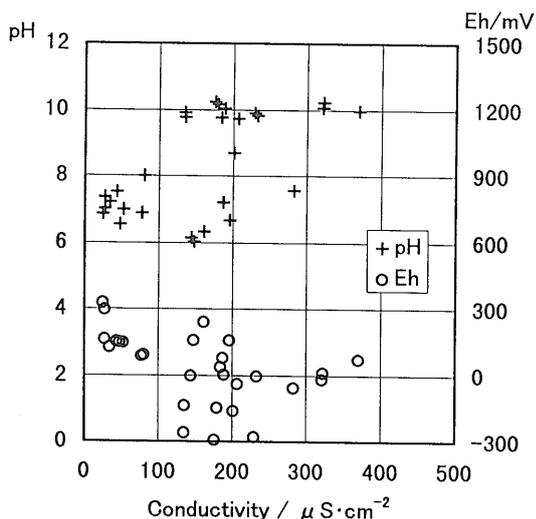
水と地表物質との水質について—福島・茨城県の調査例— (金井 ほか)



第9図 (つづき).
Fig. 9 (continued).



第10図 雨水・海水・河川水のヘキサダイアグラム。
Fig. 10 Hexadiagram of rain water, sea water, and river water.



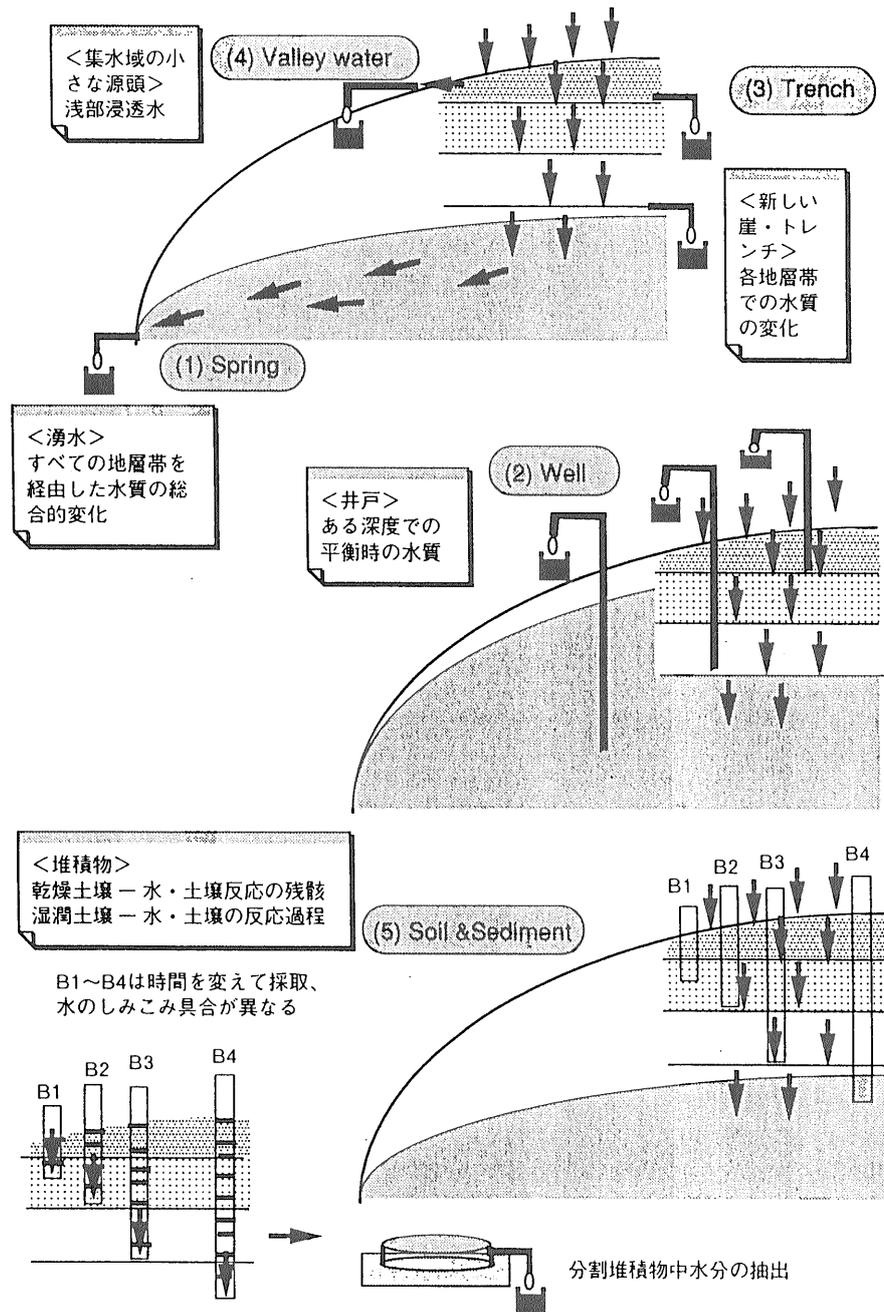
第11図 花崗岩地域における pH と Eh の変化
Fig. 11 Variations of pH and Eh in the granites area.

野外において地下にしみ込んだ水の採取法には、幾つかの方法が考えられる(第12図参照)。例えば、福島県内で行われたような(1)湧水地点での採取法他に、(2)深度の異なる井戸水の採取、(3)新しいトレンチ、崖での採取・観察、(4)集水域の小さい源頭での水採取、(5)深度別分画土壌の採取と水分抽出、等が考えられる。(1)は水

が通過してきた流路での反応全ての結果である。(2)は井戸の帯水層での反応が主と考えられるが、そこに達するまでの流路での反応も含まれている。(3)では上部から浸透していく水が断面で観察調査できる可能性があるが、大きな断面をとるのは容易ではなく常時採取できるかも不明である。(4)は表面での浸透水である。(5)はしみ込んでいく水を追跡していくように深度を変えて土壌を採取し、その水を調べる方法である。

これらの方法は採取の難易度、採取試料の特性などに相違があり、また、これらの方法によって行われた採取の時期も水質に大きな影響を与えていると考えられる。これらの中で今回新たに(4)源頭付近の水採取法を試みた。これは山頂から数十-数百m下がった集水域の小さな谷間でしみだしてくる水を採取するものである。しみ出す水は流量が少ないため採取に時間はかかるものの、分析用に十分な量を採取可能であった。福島県の一部と茨城県内で採取された試料(No. 43-56)は、いずれもこのようにして採取した表層浸透水や表流水である。

これらの試料の水質では、組成的にいずれも溶存イオン量は少ない。このような試料の分析例は少ないため、データとして非常に貴重である。これらについてのキータダイアグラムを第13図に示した。花崗岩に関するものは中間型に、ある領域の砂岩に関する試料は炭酸カルシウム型にそれぞれまとまって分布しており、このよ



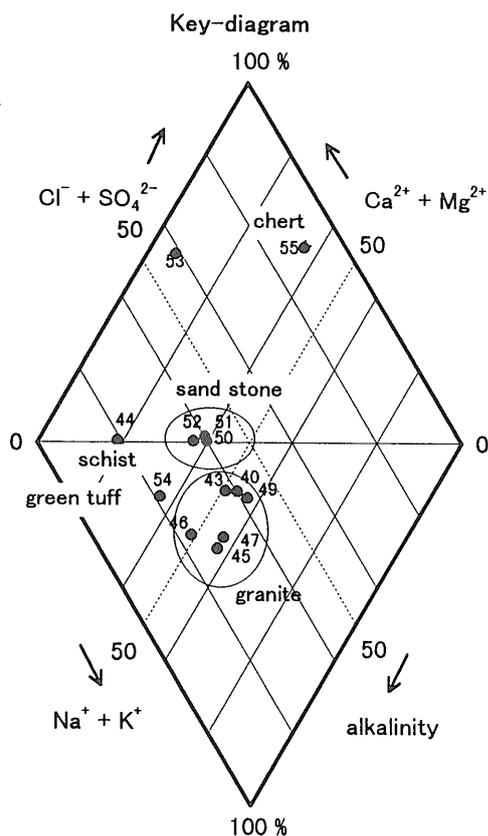
第12図 野外における試料水の採取方法の一例
Fig. 12 Examples of sampling method of water samples in field.

うにして得られた試料では種類別にグループを作っていることが分かる。No. 53の試料は、黄鉄鉱を多く含む砂岩であるため特異的である。また、チャートの所で採取された試料 (No. 55) は溶存イオン量も少なく、第9図の雨水に近いところに位置している。今後、こうした試料の詳細な検討を継続的に行っていく予定である。

5. まとめ

地表物質や基盤を構成する地質と水質との関わりを明

らかにするために、福島県および茨城県を中心に温泉・鉱泉などの湧水や地表水等を調査した。その結果、化学組成から計算される溶存イオン量と測定された電気伝導率との間には比較的良好な直線関係があり、電気伝導率は溶存成分量を簡便に知るために有効であった。地質と溶存成分量の関係については、花崗岩類、片麻岩、第三紀層、火山砕屑岩類等、それぞれが幅広い溶存成分量の変化を示すのが特徴で、溶存イオン量は岩石の種類によっても影響されるであろうが、むしろ一次的に規制する要因としては、水温や岩石との接触時間が大きく影響する



第13図 源頭で採取された試料のヘキサダイアグラム
Fig. 13 Hexadiagram of samples taken at mountain head.

ものと考えられる。キーダイアグラム上では大まかに見ると、花崗岩類起源と考えられる水質は、幾つかの例外を除くと炭酸カルシウム型-炭酸ナトリウム型の傾向が、火山碎屑岩起源と考えられる水質は、アルカリ土類金属イオン>アルカリ金属イオンの傾向が見られたが、ばらつきも大きく、岩質以外にも水質を特徴づける要因が多いと考えられた。ヘキサダイアグラムでは、花崗岩類に関連すると考えられる水質において、初期の水質が $\text{CO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型からアルカリ度(重炭酸イオンと炭酸イオンの合量)と $\text{Na}\cdot\text{K}$ が増大してしていく水質進化の過程が認められた。今回野外における水採取法として、新たに源頭付近の水を採取する方法を試みたところ、表層浅部の水であること、適当な量が採取可能である、等の利点が認められた。これらの試料の水質では、組成的にいづれも溶存イオン量は少ない。このような試料の水質分析例は少ないため、非常に貴重なデータである。今後、こうした試料を定期的に採取して詳細な検討を行っていく予定であり、それについては別途報告する。

文 献

地質調査所 (1978) 地球化学的試料の化学分析法

2. 520-523.

地質調査所 (1992) 100万分の1 日本地質図 (第3版).

福島県 (1955) 20万分の1 福島県地質図.

福島県 (1967) 福島県の温泉 (改訂版). 福島県厚生部薬務課編. 80 p.

半谷高久 (1960) 水質調査法. 丸善, 48-53.

原 宏 (1992) わが国の酸性雨の現状. 環境と測定技術, 19, 60-74.

金井 豊・坂巻幸雄・瀬尾俊弘 (1991) 岐阜県東濃地域におけるウラン系列核種の挙動とナチュラルアナログとしての有用性. 地調月報, 42, 249-260.

環境庁自然保護局 (1978) 鉱泉分析法指針 (改訂). 温泉工学会誌, 13, 1-75.

加納 博 (1989) 御在所・竹貫変成岩. 日本の地質“東北地方”編集委員会編: 日本の地質2“東北地方”, 62-65.

加納 博・黒田吉益・宇留野勝敏・濡木輝一・蟹沢聡史・丸山孝彦・梅村隼夫・光川 寛・瀬戸延男・大平芳久・佐藤 茂・一色直記 (1973) 竹貫地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 109 p.

宮崎一博・笹田政克・吉岡敏和 (1996) 真壁地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 103 p.

森 和雄・池田喜代治 (1968) 1/5万日本水理地質図28「福島県郡山盆地水理地質図」, 地質調査所.

村田泰章・牧野雅彦・広島俊男・駒沢正夫・中塚正 (1992) 阿武隈地域の重力異常について. 地調月報, 43, 291-334.

岡本玲子・大嶋秀雄・山口武則・尾崎保夫・川上一夫・藤井国博 (1992) 筑波地区における降雨の化学的性状に関するモニタリングデータ (1985-1990). 農業環境技術研究所資料第13号.

瀬尾俊弘・清水和彦 (1992) 我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析. 動燃技術報告, PNC-TN7410 92-017.

菅原 健・半谷高久 (1964) 地球化学入門. 丸善, 161-162.

山田直利・寺岡易司・秦 光男ほか編 (1982) 100万分の1地質図 日本地質アトラス. 3-19, 22-25, 地質調査所.

(受付: 1998年2月17日; 受理: 1998年5月18日)