

琉球大学学術リポジトリ

沖縄本島南部地区の水質

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2012-04-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 兼島, 清, 大森, 保, 山田, 保, Kaneshima, Kiyoshi, Oomori, Tamotsu, Yamada, Tamotsu メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/24154

沖縄本島南部地区の水質

兼島 清* 大森 保* 山田 保*

Study of Ground Waters on both GIJI and KIAN Watersprings in Southern OKINAWA

Kiyoshi KANESHIMA, Tamotsu OOMORI, Tamotsu YAMADA,

Abstract

The ground waters on both GIJI and KIAN have been collected, to discuss the geochemical nature of waters on southern OKINAWA during the last two years.

In this paper, the time dependence of chemical compositions in ground waters on both watersprings collected from June 1976 to December 1977 was studied and discussed with the consideration of regional variation at clay and limestone areas.

It was found out from this work that the ground waters at clay area were largely affected by rain-fall. The water level and K^+ ion concentration rised rapidly with the rain-fall but the concentration of Ca^{++} , HCO_3^- , Mg^{++} , SiO_2 , Cl^- and Na^+ ions decreased along with. The chemical compositions in waters at limestone area, however, remained comparatively unchanged as to compared with at clay area under the rain-fall of measured 90 mm. When it rained heavily through, the water level rised and the chemical compositions were affected considerably giving almost the same patterns with at clay area except for Na^+ and Cl^- ions. The K^+ ions in both areas seem to be contaminated from the human activities.

Since the water at GIJI waterspring have not been used for long time, the water was pumped out completely with the intervals of once a week during from Sept. 19th to Nov. 28th to check the circulation of the ground water. After pumping up, the concentration of all chemical compositions in water changed largely. The result showed that the concentrations of Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- , SiO_2 , Na^+ and Cl^- increased apparently whereas the K^+ and SO_4^{--} ions decreased.

The HCO_3^- , SiO_2 , Na^+ , Mg^{++} and K^+ concentrations are higher in clay area than at limestone area whereas the SO_4^{--} concentration gave the lower values in clay area. The higher positive correlations among

受付日：1978年4月27日

*琉球大学理工学部化学科

Ca⁺, SiO₂, Mg⁺⁺, Na⁺, Cl⁻ and HCO₃⁻ with each other were observed in waters at GIJI area. The same correlations among Ca⁺⁺, SiO₂ and HCO₃⁻ were observed in waters at KIAN area. These components in KIAN and GIJI areas were considered to be resulted from the interactions between water and limestone or clay materials at underground. The other components such as Na⁺ and Cl⁻, however, are affected by sea water significantly. The values of K⁺/Cl⁻ and SO₄⁻²/Cl⁻ ratios increased in inverse proportion to concentration of Cl⁻ in water on GIJI and KIAN areas. The geochemical considerations of excess Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, SO₄⁻² and K⁺ were discussed in detail in this paper.

1. 緒 言

沖縄本島南部地区の地質は大まかに分類して、琉球石灰岩地域と泥岩を主とする非石灰岩地域に大別出来る。そしてこれら二つの地域の表面土壌も大きな差違があり、琉球石灰岩地域の土壌は島尻マージと称し、赤褐色の重粘土質土壌からなり、一方非石灰岩地域の土壌はジャーガルと称し、第三紀層の泥岩に由来する灰色土壌からなっている。この二つの地域では地質ならびに土壌の相違から農作や水利用についても色々とおもむきを異にしている。すなわち島尻マージ地域では稲作の出来る田圃は全く見られず、水の保水力が弱い干ばつに対して弱く農作物の干ばつによる被害が大きい。これに対し、ジャーガル地域は土壌の保水力が大きく田圃で稲作も出来、干ばつに対する被害もマージ地帯ほどでない。

この二つの地域の水質を明らかにするには両地域全般に広く分布する多数の井戸や河川の水質を調べるのも一つの手法であるが、また両地域に代表的な観測井戸を設定して、長期間にわたり、水位や水質の観測を行なうのも水質を知る一つの手法と考え、今回は島尻マージ地帯の代表的な井戸として、喜屋武部落の水源に利用している井戸「栄喜の泉」を観測し、またジャーガル地域の代表的な井戸として東風平村宜次の民家の井戸を観測井戸として設定し、降雨、水位変化、水質の観測を行った。観測は1976年度は1976年6月25日から11月30日の6ヶ月間、1977年度は1977年5月30日から12月19日までの7ヶ月間5日～7日間隔で観測を行った、さらに宜次では1977年9月19日から11月28日の間1週間に1回の割合で井戸水を全部ポンプで汲み上げて観測を行った。本報告はこの両年の観測結果をまとめたものである。この研究は沖縄に3～4年に1回の割合で干ばつがあり、干ばつによる農業災害を防ぐ目的で九州大学農学部の藤川武信教授を研究代表者として、1976年度を初年度として文部省科学研究費の自然災害特別研究で研究を行っているもので本研究は水利用の一端として沖縄南部の水質を明らかにしようとするものであり、研究代表者の藤川武信教授をはじめ水利班の九州大学農学部の田中宏平教授其の他グループの方々に貴重なアドバイスをいただいた記して感謝の意を表します。また採水には喜屋武農協の大保氏や宜次の嘉数氏の世話になった、さらに水の分析には琉球大学理工学部の学生の協力を得た皆に感謝する。

2. 試 料

採水場所は図1に示すように、沖縄の南端の喜屋武部落の水源「栄喜の泉」と東風平村宜次の嘉数幸助氏の井戸を観測井戸と設定して、水位変化、水温の測定と同時に採水を行った。採水は

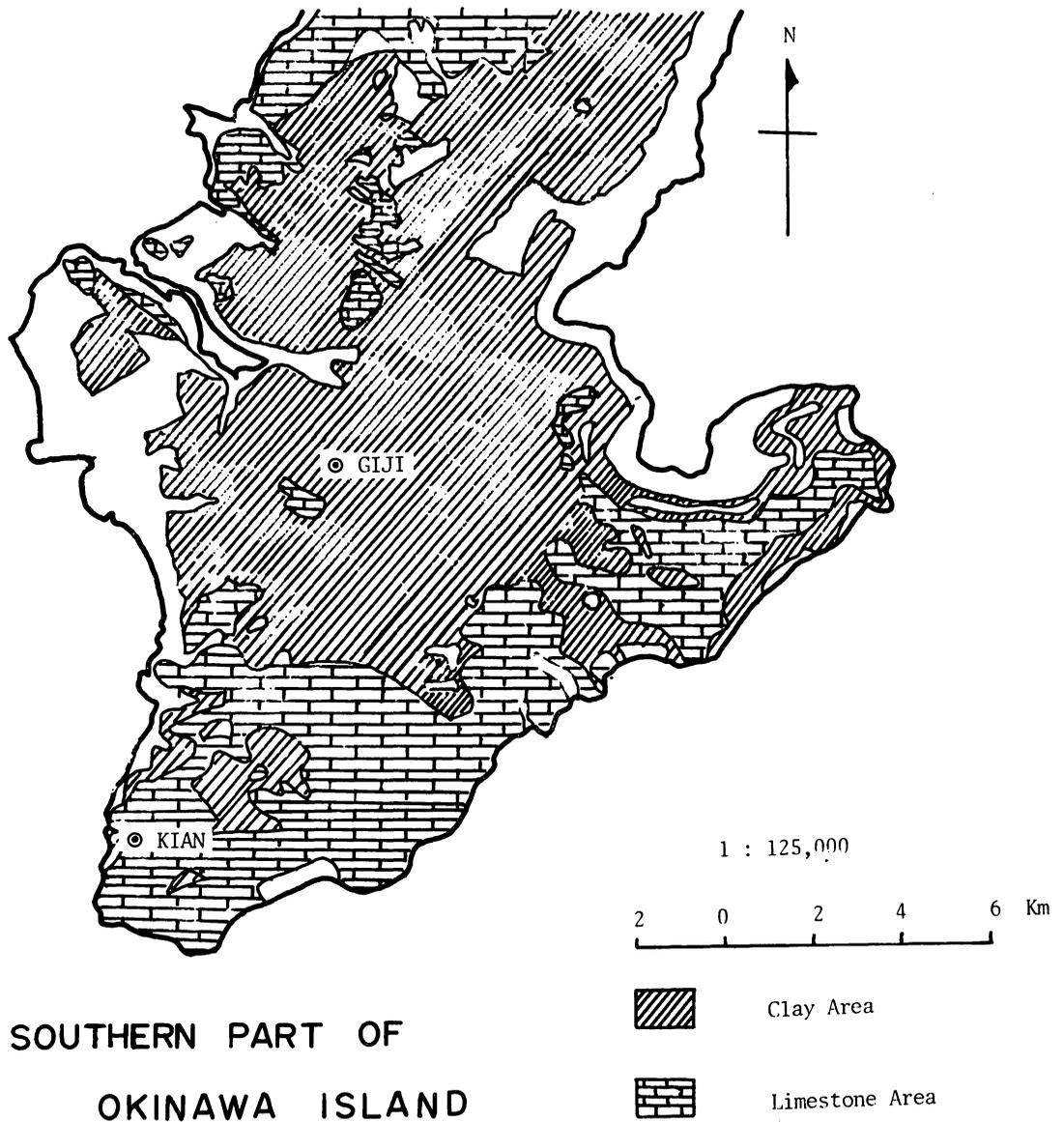


Fig. 1 Locaton of water samplihg stations.

1976年度は5日間隔を原則として地元の人に依頼して採水した。1977年度は地元の人にも依頼したが、さらに1週間に1回の割で著者ら自ら採水をし、気温、水温、水位、電導度、pHなどを現地で測定した。

3. 測定方法

電導度：セントラル科学製pK-5型携帯水質計を用いて現地で測定

pH：日立堀場H-7SD型pHメーターを用いて現地で測定

Ca⁺⁺：ドータイトN-Nを指示薬としてEDTA滴定法で測定

Mg⁺⁺：EBTを指示薬としてEDTAで滴定

Na⁺, K⁺：原子吸光分析法で測定

Cl⁻：クロム酸カリ液を指示薬として硝酸銀で滴定

HCO₃⁻：BCPを指示薬として0.02規定硫酸溶液で滴定

SO₄⁻：希塩酸で弱酸性にしてBaCl₂液を加えて沈殿せしめ重量法で測定

SiO₂：モリブデン酸アンモニウムを用いて比色分析法

4. 測定結果

測定結果を表1, 表2, 表3, 表4, 表5, および表6に示す。

Table. 1 Variation of chemical composition of ground waters in GIJI waterspring (1976)

No.	pH	Cl ⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (meq)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	NH ₃ (ppm) (x10 ⁻³)	PO ₄ -P (ppm)	W. L (cm) [*]	Date
GB-17	7.5	32.5		36.5	4.0		12.1	35.0	6.4				'76/7/29
GB-28	8.0	33.6		35.9	3.7		13.0	33.3	13.2			- 1	8/ 6
GB-29	7.8	34.1		35.4	4.5		12.0	33.3	13.4			0	8/10
GB-30	7.9	35.1		35.4	4.1		12.2	29.6	13.6			-12.5	8/15
GB-31	8.1	25.4		28.0	5.2		11.9	35.8	15.3			+16	8/20
GB-32	8.2	28.9		28.9	4.7		9.5	36.2	16.9			+10	8/25
GB-33	8.1	28.9		30.9	4.4		10.4	37.6	11.6			- 4.5	8/30
GB-34	8.0	32.1	6.48	32.8	4.2		11.4	34.2	18.9			- 7	9/ 5
GB-35	8.0	69.3	2.05	47.7	10.2		6.4	62.5	6.2			+ 2	9/10
GB-36	7.9	55.7	4.41	42.1	7.0		10.0	63.0	13.3			+18	9/15
GB-37	7.9	48.3	5.82	39.1	5.7	91.2	10.8	50.6	16.5			+ 8	9/20
GB-47	7.9	45.3	6.28	40.5	5.8	96.5	11.2	47.7	17.4			+ 4	9/25
GB-42	8.1	43.2	6.57	41.0	5.3		11.5	45.3	17.8			- 4	9/30
GB-43	7.9	42.0	6.80	41.0	5.1		11.7	41.2	18.3			-10	10/ 5
GB-48	7.8	44.3	6.37	40.5	4.6	102	12.9	38.8	15.1	6.5	0.036	-23	10/10
GB-49	7.8	42.7	5.94	37.9	4.6	101	11.9	38.0	14.5	8.0	0.041	+ 8	10/15
GB-50	7.9	38.5	4.41	34.8	5.8	80.4	9.3	40.9	8.3	4.4	0.045	+42	10/20
GB-51	8.1	32.9	2.98	33.2	7.9	74.2	10.0	83.3	9.3	5.9	0.028	+22	10/25
GB-52	8.1	40.2	5.16	38.3	5.6	99.1	12.6	56.5	11.2	4.9	0.045	+16	10/30
GB-53	7.8	40.4	5.72	39.5	5.1	103	13.1	48.7	11.4	4.9	0.043	+ 5.5	11/ 5
GB-54	7.9	42.5	5.73	38.3	4.5	103	12.6	44.2	13.5	5.4	0.048	+19	11/10
GB-55	7.9	43.2	6.16	39.8	4.4	105	13.2	43.8	13.8	13.4	0.061	+17.5	11/15
GB-56	7.9	42.5	6.06	39.3	4.7	107	12.9	42.1	12.4	11.6	0.056	0	11/20
GB-57	7.9	43.6	6.25	39.9	4.1	107	13.5	38.4	16.9	12.6	0.051	- 4	11/25
GB-58	7.9	42.7	6.50	40.2	4.2	107	13.7	41.7	13.5	8.0	0.048	-15	11/30

Table. 2 Variation of chemical composition of ground waters in KIAN waterspring (1976)

No.	pH	Cl (ppm)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	NH ₃ (ppm) ($\times 10^{-3}$)	PO ₄ -P (ppm)	W.L (cm)	Date
KA-1	7.1	31.9	4.51	23.4	2.6		7.4	86.0	5.5				76/6/25 13:40
KA-2	7.6	31.7	4.51	25.5	2.5		7.2	84.4	5.6				6/25 15:40
KA-3	7.8	31.7	4.48	25.5	2.5		6.8	82.7	6.5				7 / 2
KA-4	7.7	31.7	4.48	25.5	2.6		7.0	84.8	5.4				7 / 3
KA-5		31.7	4.48	25.5	2.5		6.8	81.5	6.4				7 / 4
KA-6		31.2	4.42	25.4	2.6		6.9	81.9	6.2				7 / 5
KA-7		25.9	4.22	22.2	3.0		6.4	78.6	6.6				7 / 10
KA-8		27.7	4.09	22.3	3.0		6.8	79.0	6.4				7 / 15
KA-9	8.1	27.4	4.27	22.2	2.2		6.8	80.7	6.3				7 / 20
KA-10		26.8	4.30	20.9	2.4		7.2	85.6	6.2				7 / 25
KA-11	8.0	27.2	4.52	21.7	2.4		7.1	81.9	6.3				7 / 30
KA-12	8.4	27.2	4.60	21.6	2.4		7.0	80.7	6.3				8 / 5
KA-13	7.8	27.8	4.58	22.6	2.5		6.9	84.4	6.3				8 / 7
KA-14	7.8	27.9		21.7	2.6		6.8	81.9	7.4				8 / 11
KA-15	7.8	28.2	4.66	22.1	2.4	108	6.9	85.2	6.2				8 / 16
KA-16	8.3	28.6	4.62	22.5	2.5	109	6.8	81.5	6.3		+ 1		8 / 21
KA-17	7.9	28.7	4.68	22.6	2.4	109	6.8	78.6	6.3		0		8 / 26
KA-18	7.9	28.7	4.58	22.6	2.3	108	6.7	78.6	6.1		0		8 / 30
KA-19	8.5	29.5	4.53	22.1	2.1		6.7	77.8	5.9		- 6		9 / 7
KA-20	8.5	29.7	4.57	22.6	2.1	107	6.8	80.2	6.1		-19		9 / 17
KA-21	8.4	29.8	4.59	22.6	2.1	108	6.7	79.9	5.8				9 / 20
KA-45		32.6	4.63	25.4	2.1	110	6.8	74.5	6.0				9 / 25
KA-44		31.7	4.70	25.3	2.3	111	7.0	78.6	6.1		- 2		10 / 1
KA-41	8.1	31.6	4.69	25.7	2.6	112	6.9	79.0	7.6		-10		10 / 5
KA-46		34.5	3.96	26.7	2.5	110	7.3	79.2	6.2	7.4	0.053	-11	10 / 10
KA-46	8.1	34.0	4.00	26.8	2.3	108	7.1	77.1	7.0	6.9	0.043	-20	10 / 15
KA-48	8.2	32.9	3.76	24.5	2.0	102	6.8	73.8	5.8	7.5	0.052	-11	10 / 20
KA-49	8.1	37.8	4.11	26.9	3.3	116	7.8	92.3	6.3	5.9	0.071	+47	10 / 26
KA-50	8.0	37.2	4.22	26.0	3.2	119	7.7	90.7	6.6	7.9	0.083	+27	11 / 1
KA-51	8.3	35.6	4.13	26.9	3.0	116	7.5	85.7	6.7	11.5	0.071	+21	11 / 5
KA-52	8.0	36.8	4.10	26.5	3.1	116	7.5	89.8	7.5	4.9	0.059	+18	11 / 10
KA-53	8.0	38.0	4.17	27.8	3.2	116	7.7	92.3	6.3	5.4	0.080	-12	11 / 16
KA-54	8.0	37.3	4.12	27.1	3.2	117	7.6	91.1	6.7	7.5	0.077	+ 4	11 / 22
KA-55	8.0	37.2	4.12	27.1	3.0	115	7.5	82.0	7.2	11.0	0.072	- 2	11 / 27

Table. 3 Chemical Composition of ground waters inGIJI waterspring (1977)

Sample No.	Temp (°C)	W.T (°C)	W.L (cm)	pH	Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ⁴⁻⁻ (ppm)	SiO (ppm)	Prceip. (mm)	Date
GF-1	29.0	22.0	15.0	7.40	740	5.89	122	19.8	40.5	3.5	52.7	27.7	30.8	7.2	77, 5.30
GF-2	27.5	22.2	26.6	7.33	740	5.88	123	19.5	40.5	3.5	49.8	24.4	28.1	34.6	6.6
GF-3	29.8	23.3	52.0	7.37	700	4.71	110	12.4	34.8	6.0	44.1	42.8	22.2	68.8	6.13
GF-4	25.8	24.2	91.0	7.57	540	3.86	82.8	8.3	28.8	7.2	31.0	26.7	20.1	44.9	6.20
GF-5	29.0	25.2	102.0	7.40	530	3.61	83.0	7.9	26.1	7.8	31.2	34.6	18.1	139.6	6.27
GF-6	32.7	25.4	75.0	7.42	650	4.06	90.1	9.7	30.1	7.2	34.7	41.6	19.7	0.4	7.4
GF-7	30.7	25.7	62.5	7.33	730	4.35	96.5	9.7	30.5	6.9	36.2	35.0	20.1	8.7	7.11
GF-8	32.3	26.3	45.3	7.32	700	4.97	103	10.2	33.1	5.5	36.3	35.0	20.5	4.7	7.18
GF-9	28.5	26.0	40.0	7.38	740	5.02	105	10.2	35.1	5.5	33.8	35.4	21.0	19.1	7.25
GF-10	31.4	26.6	75.7	7.40	680	4.45	93.4	9.2	31.5	6.5	35.2	33.5	19.7	67.2	8.1
GF-11	33.1	26.4	61.7	7.39	700	5.09	99.1	11.1	33.3	5.7	34.8	36.0	21.6	8.5	8.8
GF-12	31.9	26.4	57.8	7.40	720	5.18	99.3	11.4	33.7	5.7	35.7	33.1	21.6	12.1	8.16
GF-13	29.5	27.2	127.5	7.20	580	3.06	71.2	8.7	30.3	13.1	29.6	39.2	18.0	124.7	8.22
GF-14	29.1	26.2	81.4	7.30	590	3.19	74.5	7.6	27.8	11.5	26.5	38.0	17.9	70.6	8.30
GF-15	32.0	25.9	67.4	7.36	610	4.22	90.8	9.6	31.2	9.4	31.7	41.3	20.1	4.7	9.5
GF-16	27.4	25.2	129.4	7.46	490	3.15	68.3	7.6	25.6	8.9	25.9	40.1	17.5	170.1	9.12
GF-17	30.5	25.1	87.0	7.32	550	4.27	82.2	9.9	26.9	6.9	25.9	35.1	20.0	64.5	9.19
GF-18	29.8	25.2	92.1	7.02	820	6.52	115	15.5	39.7	5.0	41.6	31.0	26.9	42.4	9.26
GF-19	27.5	24.9	71.4	7.22	780	7.11	123	15.0	39.8	4.3	44.7	31.8	28.6	3.3	10.3
GF-20	25.6	24.0	94.5	7.32	503	4.21	81.2	8.9	27.7	6.2	20.8	26.9	20.5	140.6	10.11
GF-21	29.6	23.8	78.6	7.09	715	7.16	122	17.3	45.0	4.0	44.5	20.3	30.8	0.1	10.17
GF-22	27.8	23.7	64.0	7.16	810	7.31	123	17.3	44.1	3.9	45.7	24.8	30.6	0.5	10.24
GF-23	27.8	23.9	66.4	7.13	820	7.40	122	17.5	43.8	3.8	48.3	22.0	31.2	24.0	10.31
GF-24	26.7	23.4	55.2	7.15	800	7.66	124	17.4	45.2	3.6	49.7	22.4	32.7	7.3	11.7
GF-25	24.1	22.6	48.4	7.00	820	8.09	135	18.5	47.1	3.6	55.5	20.7	32.8	0.0	11.14
GF-26	22.4	22.1	112.6	7.07	530	4.40	83.2	9.6	28.6	6.0	26.8	21.6	21.5	111.9	11.18
GF-27	23.0	22.1	89.8	7.00	720	6.49	114	14.6	37.7	4.5	43.4	21.6	28.4	0.1	11.21
GF-28	18.7	21.8	105.4	7.01	803	7.64	128	17.7	44.7	3.8	50.2	22.0	30.3	34.4	11.28
GF-29	21.0	20.2	84.7	7.00	801	7.86	129	19.6	45.8	3.8	52.6	22.0	30.4	8.0	12.5
GF-30	19.2	20.0	81.3	7.09	802	7.61	125	18.9	45.2	3.8	50.7	23.2	29.3	12.0	12.12
GF-31	20.8	20.0	73.0	7.13	700	7.36	121	18.8	44.7	3.6	49.5	24.8	28.5	3.0	12.19

Table. 4 Chemical Composition of ground waters in GJJI waterspring (1977)

Sample No.	Temp (°C)	W.T (°C)	W.L (cm)	pH	Ec (μS/cm)	HCO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	Precip. (mm)	Date
GA-1	30.0	26.5	72	7.60	700	4.00	92.0	8.1	34.3	7.2	33.7	39.2	39.2		77, 7. 5
GA-2	29.0	27.0	62	7.56	630	3.97	88.9	9.3	33.3	6.6	35.2	46.7	20.6		7.10
GA-3	30.0	27.0	53	7.45	780	4.71	100	9.8	34.0	5.8	36.9	34.7	17.8		7.15
GA-4	30.0	27.0	40	7.52	790	4.80	103	9.1	35.7	5.6	35.8	37.6	21.3		7.20
GA-5	29.0	26.5	40	7.49	700	4.86	105	10.2	37.6	5.6	36.8	42.1	21.3		7.25
GA-6	27.0	26.5	74	7.45	720	4.58	94.7	9.1	32.9	6.3	33.1	30.6	20.6		7.30
GA-7	30.0	27.0	70	7.62	705	4.42	89.6	8.7	31.2	6.3	33.5	32.7	21.2		8. 5
GA-8	30.5	27.0	75	7.65	740	4.90	96.9	10.7	33.9	5.8	34.9	31.8	21.7		8.10
GA-9	30.5	27.0	70	7.83	760	4.91	96.3	10.9	34.0	6.0	35.6	35.1	21.8		8.15
GA-10	30.0	27.5	70	7.59	710	4.88	94.0	10.8	35.7	5.8	35.4	37.6	21.9		8.20
GA-11	28.5	27.0	104	5.54	530	2.88	67.9	6.6	25.0	11.5	24.3	40.5	17.3		8.25
GA-12	30.0	26.5	82	7.71	580	3.19	74.5	7.6	25.6	11.1	26.5	41.7	18.1		8.30
GA-13	27.0	26.5	140	7.48	455	2.50	57.1	4.8	26.5	9.3	23.0	42.1	15.1		9.10
GA-14	28.5	27.0	110	7.37	458	3.08	63.0	6.7	23.7	8.1	18.4	40.9	17.4		9.15
GA-15	29.0	26.5	95	7.10	800	6.54	112	15.5	36.4	6.4	41.3	29.8	26.6		9.20
GA-16	29.0	27.0	96	7.02	803	6.52	114	16.1	39.8	5.0	41.6	29.8	26.6		9.25
GA-17	28.0	26.0	94	7.23	870	6.89	119	15.0	40.0	4.8	43.6	28.1	28.7		9.30
GA-18	25.5	26.0		7.10	701	5.00	95.9	10.2	31.1	6.1	29.1	32.3	23.7		10. 5
GA-19	28.0	26.0		7.35	540	3.91	75.9	8.3	22.8	6.6	19.6	33.5	20.1		10.10
GA-20	26.0	24.5		7.03	870	7.38	124	17.3	44.7	3.6	45.8	22.4	31.6		10.15
GA-21	26.0	24.0		6.99	830	7.50	126	17.1	47.4	3.6	46.1	22.8	31.4		10.20
GA-22	23.0	24.0		7.05	890	7.71	126	17.3	45.2	3.4	48.9	22.8	33.1		10.25
GA-23	26.0	24.0		7.18	895	7.30	117	17.3	44.9	3.7	49.1	21.6	31.5		10.30
GA-24	25.0	24.0		6.91	890	7.62	124	17.5	46.6	8.6	49.2	19.5	32.7		11. 5
GA-25	21.5	24.0		6.96	830	8.02	131	19.0	46.6	3.6	49.2	19.5	32.7		11.10
GA-26	25.5	24.0		6.89	810	7.88	129	18.0	46.9	3.6	52.9	21.1	34.1		11.15
GA-27	17.0	23.5		6.98	710	6.38	110	14.3	37.4	4.6	40.8	23.6	27.8		11.20
GA-28	20.0	23.0		6.98	785	7.79	132	16.6	45.2	3.7	51.0	20.7	31.4		11.25
GA-29	16.0	23.0		6.98	815	8.01	129	19.4	44.9	3.6	51.4	24.4	31.8		11.30

Table 5 Chemical Composition of ground waters in KIAN waterspring (1977)

Sample No.	Temp (°C)	W.T (°C)	W.L (cm)	pH	Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	HCO ₃ (me/l)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	Precip. (mm)	Date
KA-1	29.0	23.0	21.0	7.30	620	2.74	100	7.9	23.9	2.6	32.1	64.3	5.2	14.1	77, 5.30
KA-2	27.5	23.1	30.0	7.20	620	2.83	100	7.4	20.7	2.6	32.1	59.4	5.2	21.5	6.6
KA-3	30.8	23.0	30.0	7.37	640	3.54	102	7.1	22.6	2.6	33.3	59.4	5.7	50.3	6.13
KA-4	25.8	22.2	36.0	7.38	660	3.52	101	6.8	24.8	2.6	34.7	57.3	7.9	119.5	6.20
KA-5	29.2	24.2	66.0	7.42	680	3.47	99.5	6.3	21.8	2.7	35.4	55.7	7.9	119.5	6.27
KA-6	32.7	24.5	78.5	7.35	630	3.54	105	7.8	21.9	2.7	34.0	66.8	8.3	1.4	7.4
KA-7	30.8	24.0	61.5	7.32	620	3.48	106	6.8	23.5	2.6	36.5	63.5	8.0	14.2	7.11
KA-8	32.6	24.3	51.1	7.38	690	3.57	105	6.6	22.6	2.8	34.3	67.6	7.7	0.0	7.18
KA-9	29.0	24.0	50.3	7.29	620	3.58	107	7.1	23.9	2.7	33.8	62.7	7.9	11.5	7.25
KA-10	32.3	23.5	62.7	7.31	680	3.53	105	7.9	26.6	2.7	35.2	63.9	7.8	57.9	8.1
KA-11	33.1	23.8	34.6	7.27	700	3.59	106	7.2	27.2	2.7	34.6	65.6	8.1	3.5	8.8
KA-12	31.7	23.5	44.7	7.34	720	3.60	105	8.1	28.7	2.7	34.8	66.4	7.7	13.1	8.16
KA-13	29.6	25.0	66.0	7.38	500	2.96	75.9	5.7	23.4	3.4	25.9	43.4	8.2	156.0	8.22
KA-14	32.0	25.0	93.6	7.31	445	2.85	70.6	5.8	25.0	4.6	23.1	39.7	8.1	53.2	8.30
KA-15	31.6	24.1	99.0	7.30	680	3.54	110	7.3	24.4	3.3	36.1	69.7	8.4	2.0	9.5
KA-16	29.1	24.8	120.0	7.56	560	2.37	74.0	6.7	36.0	5.3	63.5	48.7	6.9	151.0	9.12
KA-17	29.8	24.9	151.0	7.34	603	2.56	74.7	7.8	37.1	5.7	59.9	50.8	7.9	5.3	9.19
KA-18	31.2	25.0	156.0	7.52	605	2.62	79.6	6.8	37.7	5.8	57.6	53.4	8.1	13.7	9.26
KA-19	31.0	24.0	133.0	7.41	710	3.53	112	7.7	27.4	4.2	43.5	74.6	9.0	13.9	10.3
KA-20	26.1	23.0	127.0	7.17	720	3.75	120	8.7	23.1	3.4	37.1	83.7	9.0	35.8	10.11
KA-21	28.5	22.8	113.0	7.16	710	3.72	119	7.6	26.6	3.1	36.0	82.0	8.9	0.0	10.17
KA-22	27.0	22.9	104.0	7.20	710	3.73	118	8.2	25.5	3.4	35.3	82.0	8.8	0.0	10.24
KA-23	28.1	23.4	95.0	7.18	702	3.71	114	7.1	25.5	3.1	34.8	75.5	8.4	32.3	10.31
KA-24	28.0	23.1	77.0	7.16	701	3.72	113	7.7	24.7	2.9	33.8	77.1	8.8	1.8	11.7
KA-25	24.2	22.2	44.0	7.14	640	3.71	111	7.4	24.5	2.9	32.6	74.6	8.4	0.0	11.14
KA-26	22.2	22.4	48.0	7.13	680	3.72	113	7.4	24.5	3.2	34.1	81.2	8.5	90.0	11.18
KA-27	24.0	22.4	40.0	7.20	650	3.75	113	7.4	26.0	3.0	34.4	75.5	8.4	0.0	11.21
KA-28	18.5	21.9	40.0	7.25	640	3.75	113	7.4	26.0	2.9	34.0	79.2	8.4	39.7	11.28
KA-29	23.0	21.4	5.0	7.20	670	3.75	114	7.2	25.3	2.9	33.1	75.0	8.5	8.0	12.5
KA-30	20.1	21.1	30.0	7.24	670	3.75	114	7.2	24.7	2.7	33.4	76.7	8.5	12.0	12.12
KA-31	23.0	21.4	1.2	7.21	610	3.73	109	7.7	24.8	2.7	32.9	74.2	8.4	3.0	12.19

Table. 6 Chemical composition of ground waters in KIAN waterspring (1977)

Sample No	Temp (°C)	W.T (°C)	pH	Ec	HCO ₃ ⁻ (me/l)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	Dats
K-1	33.2	24.8	7.78	670	3.55			27.4	2.9	33.4	73.8	8.2	77, 7. 5
K-2	31.2	24.6	7.53	710	3.55			25.0	3.0	35.6	71.7	8.4	7.11
K-3	33.2	23.8	7.43	700	3.71			27.5	3.2	36.3	73.4	8.4	7.15
K-4	34.5	24.5	7.52	702	3.73	100	7.2	26.6	3.2	35.7	75.1	8.8	7.22
K-5	31.5	24.5	7.78	710	3.70	102	7.3	26.8	3.2	35.8	77.9	8.5	7.28
K-6	30.5	26.5	7.60	601	2.73	84.3	6.2	33.2	5.5	55.4	55.7	9.0	9.29
K-7	28.7	24.0	7.26	720	3.70	120	7.4	28.1	3.5	35.8	82.4	8.5	10.19
K-8	27.0	23.8	7.26	703	3.73	116	7.6	26.0	3.2	36.2	81.6	8.8	10.26
K-9	26.8	24.4	7.25	750	3.78	114	8.0	24.8	3.4	35.9	76.3	8.5	11.11
K-10	28.0	24.0	7.28	630	3.69	112	7.5	26.0	3.1	34.7	75.0	8.7	11. 8
K-11	27.8	24.2	7.32	680	3.72	113	7.5	26.0	3.1	33.6	75.5	8.5	11.16
K-12	20.0	15.8	7.21	700	3.75	113	7.7	26.2	3.2	34.4	74.2	8.8	12. 1

注. Table 4とTable 6は、地元の人が採水したサンプル
 pH, Ec, HCO₃⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺の測定は、採水日より1~7日遅れている。

5. 結果に対する考察

表1~表6までをプロットして図にしたのが図2, 図3, 図4, 図5, 図6および図7である。

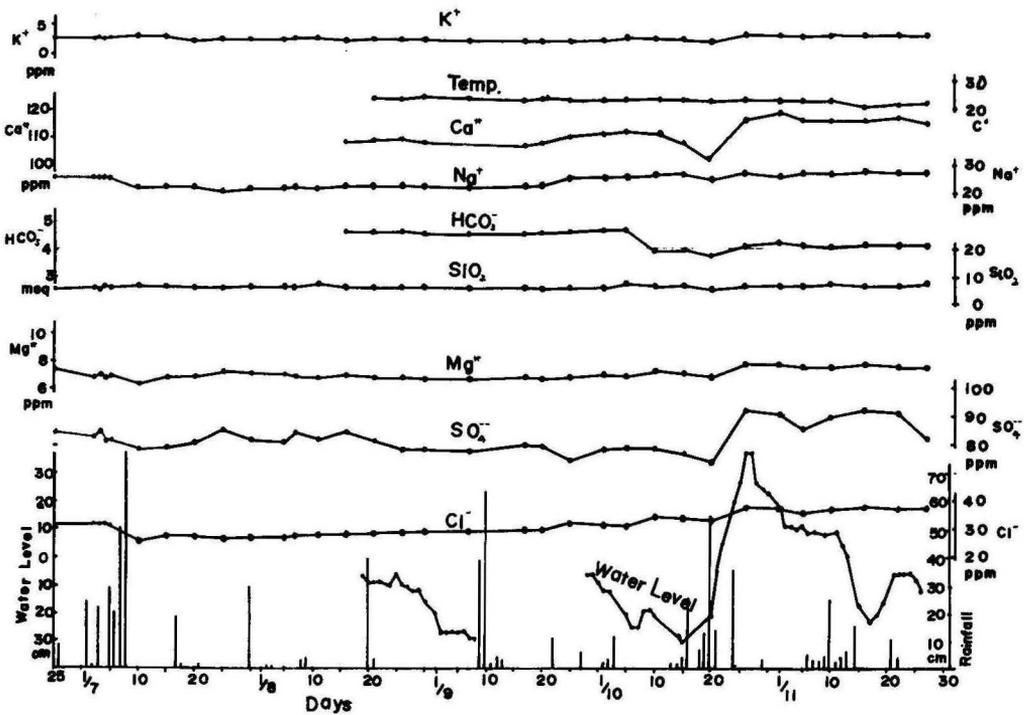


Fig. 2 Variation of water level, rainfall and chemical composition in waters on KIAN

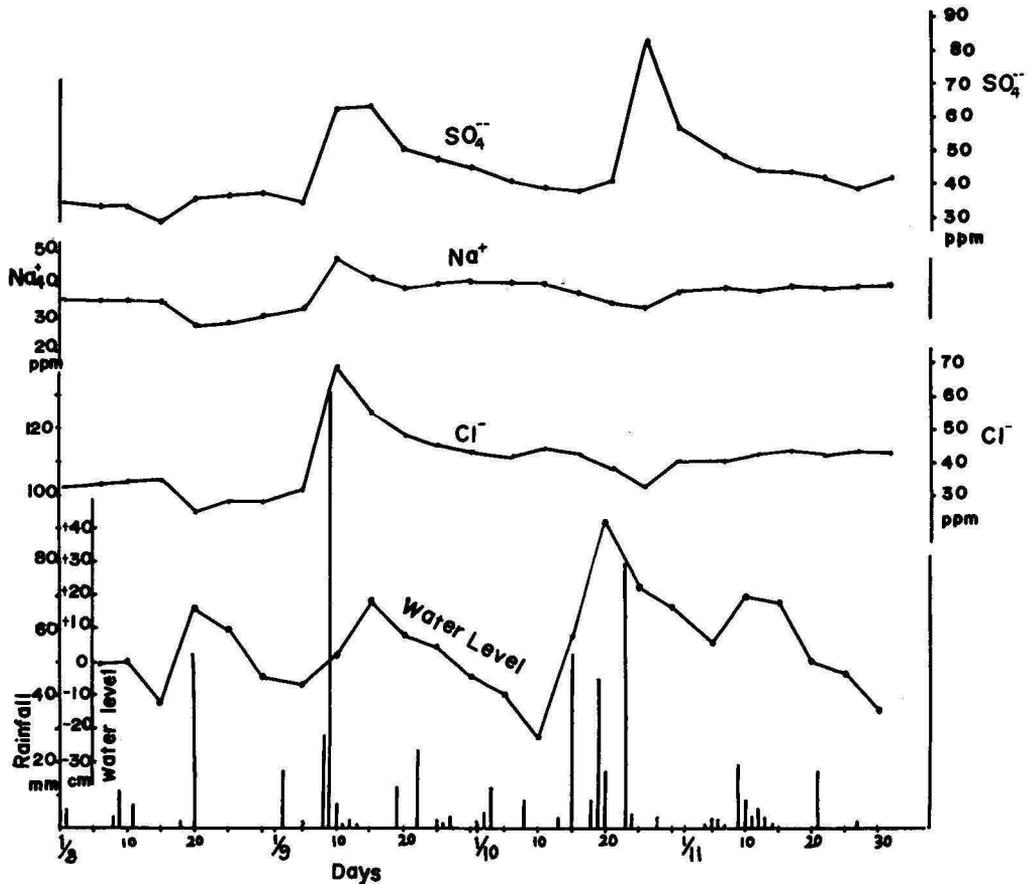


Fig. 3 Variation of water level, rainfall and chemical composition (Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-}) in waters on GIJI

5-1 喜屋武の井戸の全般的な特徴

図2と図6は喜屋武の井戸の日変化による水位、降雨量、水質の変化を示したもので、図2は1976年度の観測結果、図6は1977年度のものである。降雨量と水位の変化は大雨の場合を除き、一般的にゆるやかで、降雨後水位の上昇に一週間ほどの時間がかかっている。これは1977年6月20日～27日の間に喜屋武でも宜次でも130mmほどの降雨があったが、これが喜屋武では7月4日に水位のピークが出ているのに、宜次では6月24日にでていることでもわかる。喜屋武の水質の変化は大きな変動はみられず、1976年度では Cl^- で26～38ppm、 Na^+ で22～28ppm、 Mg^{++} で6.4～7.8ppm、 K^+ で2～3ppm、 SiO_2 で5.4～7.6ppmの程度である。しかし SO_4^{2-} や Ca^{++} および HCO_3^- などは水位の増大にともなっていくぶんか増大する傾向もみられるが、いつでも水位と一致することはなく SO_4^{2-} で73.8～92.3ppm、 Ca^{++} で107～119ppm、 HCO_3^- で3.76～4.7meq/lの範囲である。1977年度には台風の影響で多量の降雨があり、そのため8月22日から9月29日の間に海水のしぶきや風送塩によるものと見られる大きな変化が見られたが、その他の期間には変化はあまりなく、一定している。しかし100mm以上の大雨が続くと水位の上昇と共に Ca^{++} 、 HCO_3^- 、 Mg^{++} 、 SiO_2 、

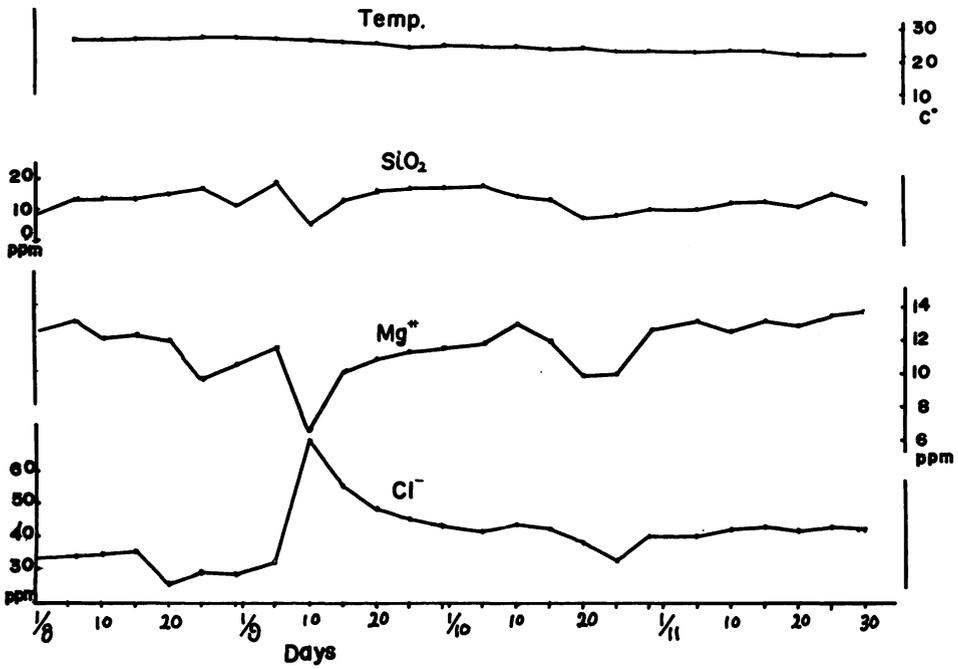


Fig. 4 Variation of Cl, Mg⁺⁺, SiO₂ and Temp. in waters on GIJI

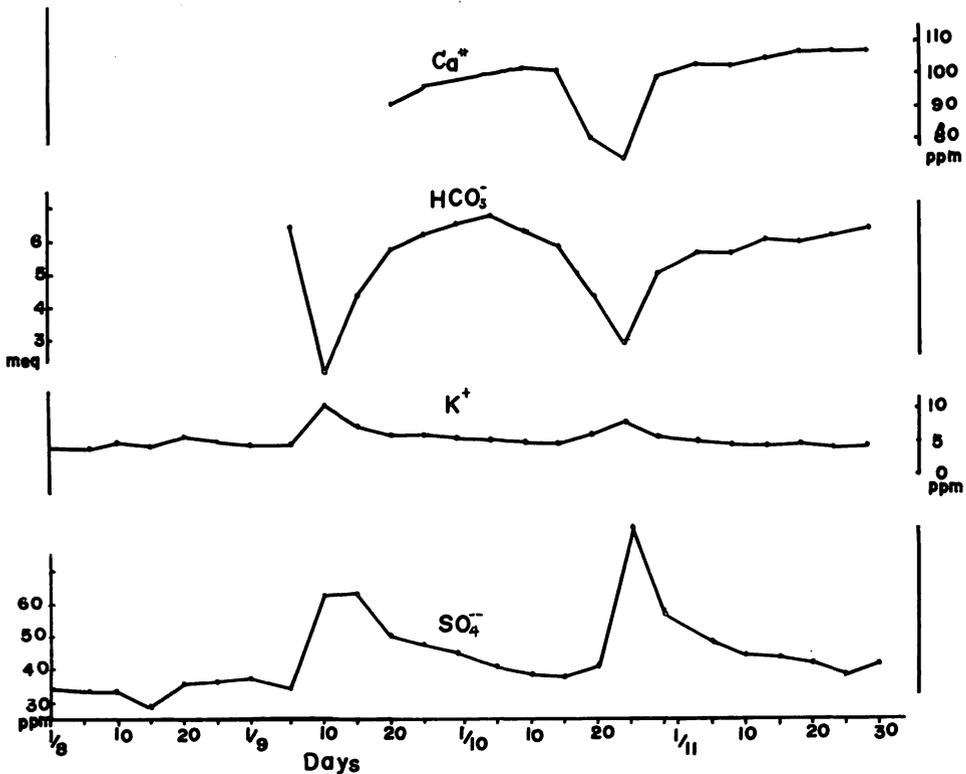


Fig. 5 Variation of SO₄⁼, K⁺, HCO₃⁻ and Ca⁺⁺ in waters on GIJI

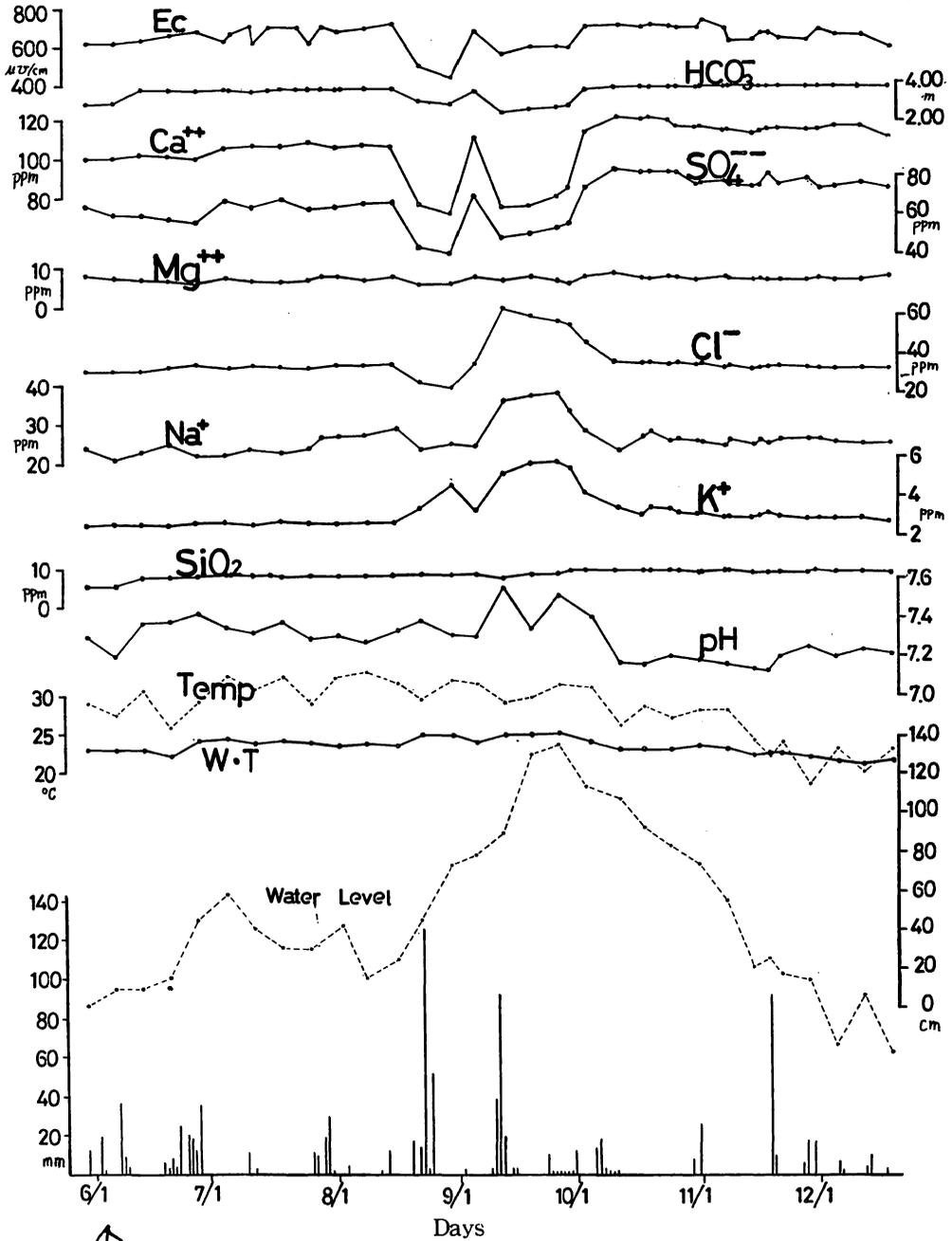


Fig. 6 Variation of water level, rainfall and chemical composition in waters on KIAN

↑
1977年

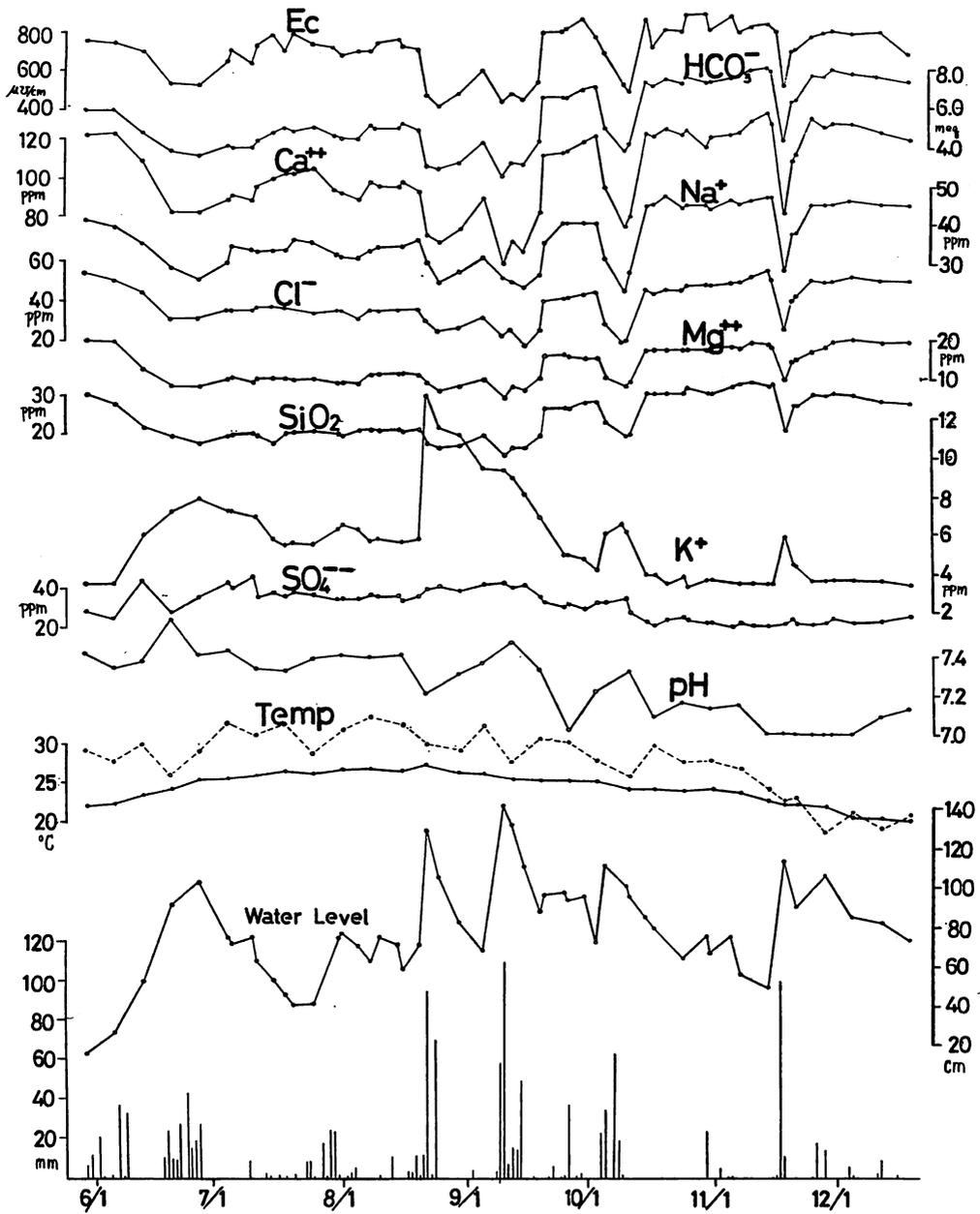


Fig. 7 Variation of water level, rainfall and chemical composition in waters on GIJI

SO₄⁻は濃度が減少し、K⁺は増加している。台風接近による降雨で9月5日から12日にかけて、Cl⁻、Na⁺、K⁺、の濃度が増大し、Cl⁻の場合35.3ppm（9月5日）から63.5ppm（9月12日）と約2倍に増大した。これは9月9日台風9号の接近による強い風と150mmの雨をもたらしたためと見られる。

5-2 宜次の井戸の全般的な特徴

図3、図4、図5、および図7は宜次の井戸の降雨量と水位や水質の日による変化を図示したもので、図3、図4、および図5は1976年度の観測結果を、図7は1977年度の観測結果を示したものである。

宜次の井戸では降雨による水位の変化は鋭敏に影響を受ける。1976年および1977年の両年とも降雨のあったその日から水位は上昇し、水質も大きく変化する。その変動幅も喜屋武に比較して大きく、1976年度にCl⁻で25.4~69.3ppm、Na⁺で28.0~47.7ppm、SO₄⁻で29.6~63ppm、K⁺で3.7~10.2ppm、Mg⁺⁺で6.4~13.7ppm、Ca⁺⁺で74.2~107ppm、SiO₂で6.2~18.9ppmと何れも大きな変動が見られた。しかし水位の変化とこれら化学成分の濃度の増減とは一部に一致するのも見られるが全般的には必ずしも一致はしない。1977年の観測でも水質の変動は大きく、HCO₃⁻、Ca⁺⁺、Mg⁺⁺、Na⁺、Cl⁻、SiO₂は降雨による水位の上昇により希釈されて濃度が減少し、K⁺は降雨によって逆に濃度が増大し、雨水によって井戸に流入して来るのが見られ、SO₄⁻は雨水の影響をK⁺ほどに受けてない。

5-3 各種化学成分の濃度分布

Cl⁻、Ca⁺⁺、Mg⁺⁺、K⁺、Na⁺、SO₄⁻、HCO₃⁻などの各種の化学成分についてその濃度の頻度分布を図8、図9、図10、図11、図12、図13および図14にヒストグラムで示す。

5-3-1 Cl⁻の分布

Cl⁻は図8に示すように宜次で1976年には25.4~69.3ppm、1977年に20.8~55.5ppmの範囲にあり、全体で平均39.1±2.0ppmを示す。喜屋武で1976年に25.9~38.0ppmで1977年に23.1~63.5ppmの範囲にあり全体で平均34.3±1.5ppmと宜次より低い。宜次では特に1977年に頻度分布に明瞭な二つのピークがあるのが特徴でこれは別の成分にも見られるもので汲み上げの影響を示すものである。

5-3-2 Ca⁺⁺の分布

Ca⁺⁺の分布は図9で見られるように宜次で1976年に74.2~107ppmの範囲で1977年に57.1~135.1ppmの範囲で両年の平均は103.0±4.5ppmで、喜屋武で1976年に102~119ppmで1977年に70.6~120.8ppmの範囲で総平均が107.0±3.0ppmを示す。宜次と喜屋武の相違は喜屋武にいくらCa⁺⁺濃度が高いが宜次は濃度の変動が大きく、特に1977年にはその範囲が大きい、これにもCl⁻の場合と同様に二つのピークが見られる。

5-3-3 Mg⁺⁺の分布

Mg⁺⁺の分布は図10に示すように1976年に6.4~13.7ppm、1977年に4.8~19.8ppmの範囲で平均12.4±0.8ppmであり、喜屋武で1976年に6.4~7.8ppmで1977年に5.7~8.7ppmで平均7.1±0.1ppmを示し、Mg⁺⁺の場合も宜次が高く変動幅も大きく、1977年には二つの明瞭なピークがあ

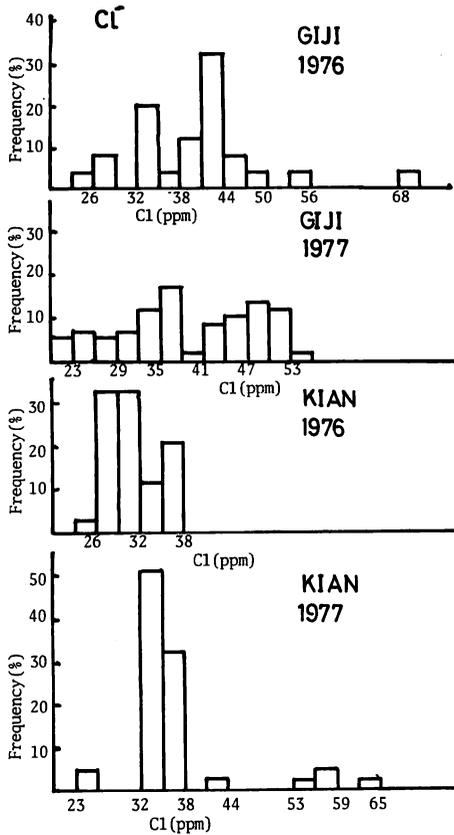


Fig. 8 Distribution of Cl^- in ground water on GIJI and KIAN

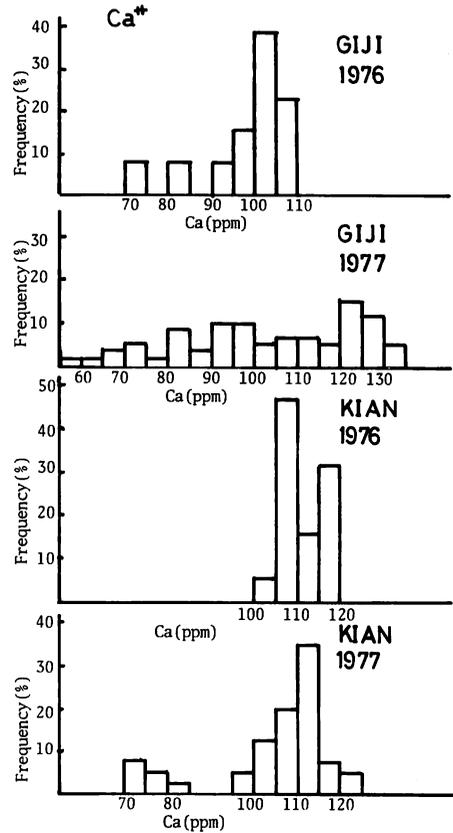


Fig. 9 Distribution of Ca^{2+} in ground water on GIJI and KIAN

るのが特徴である。

5-3-4 K^+ の分布

K^+ の分布を図11に示す。 K^+ は宜次で1976年に3.7~10.2ppmで、1977年に3.4~13.1ppmで平均 5.6 ± 0.4 ppmを示し、喜屋武では1976年に2.0~3.3ppmで1977年に2.6~5.8ppmで全体の平均値が 2.9 ± 0.2 ppmでこの場合もやはり宜次が高く変動の幅も大きい。

5-3-5 Na^+ の分布

Na^+ の分布は図12に見るように、宜次の1976年では28.0~47.7ppm、1977年に22.8~47.4ppmで全体の平均値 36.6 ± 1.4 ppmであり、喜屋武で1976年に20.9~27.8ppmで1977年に20.7~37.7ppmで平均 25.3 ± 0.7 ppmである。この場合も宜次が高い値を示し、変動幅も大きい。1977年には二つのピークが見られる。

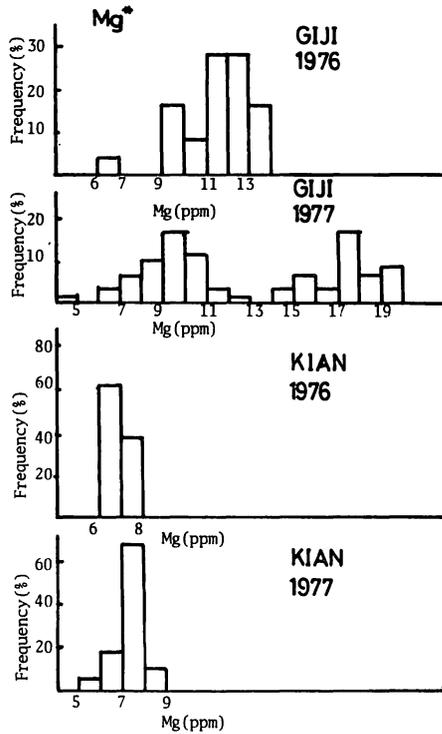


Fig. 10 Distribution of Mg^{2+} in ground water on GIJI and KIAN

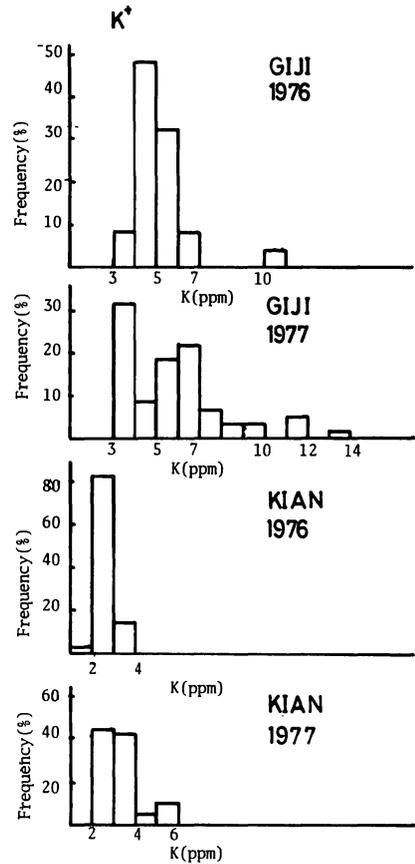


Fig. 11 Distribution of K^+ in ground water on GIJI and KIAN

5-3-6 SO_4^{2-} の分布

SO_4^{2-} の分布は図13に示すように、宜次で1976年に29.6~83.3ppmで1977年に19.5~46.7ppmの範囲にあり平均値は 34.6 ± 2.3 ppmを示し、喜屋武で1976年に73.8~92.3ppm, 1977年に39.7~83.7ppmの範囲で平均が 74.8 ± 2.5 ppmで SO_4 は喜屋武が宜次よりはるかに高い値を示している。

5-3-7 HCO_3^- の分布

HCO_3^- は図14に示すように宜次では1976年に2.05~6.8meq/lで1977年に2.50~8.09meq/lの範囲で全体の平均値は 5.55 ± 0.36 meq/lを示す。喜屋武で1976年に3.76~4.7meq/l, 1977年に2.37~3.78meq/lで平均 3.86 ± 0.13 meq/lでこの場合も宜次が高く、変動幅もはるかに大きい、そして1977年には二つのピークが見られる。このように Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- と1977年の宜次の水質の濃度分布に二つのピークが見られるがこれは宜次の井戸でこの年の9月19日から11月28日までの間に一週間おきに11回にわたって井戸水を全部底の見えるまでポンプで汲み上げ、この汲み出しによって水質がどのように変化するかの観測を行った。その結果汲み上げを実施する前とその後に明らかな相違が見られ、特に上記の成分は変化がはげしかった。これ

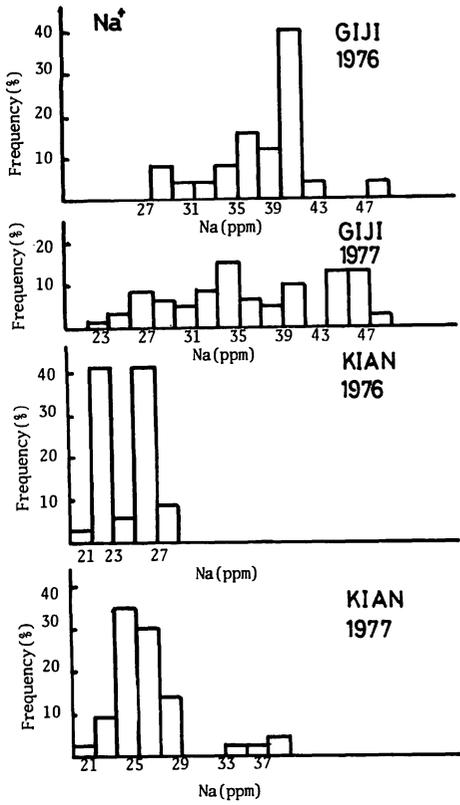


Fig. 12 Distribution of Na^+ in ground water on GIJI and KIAN

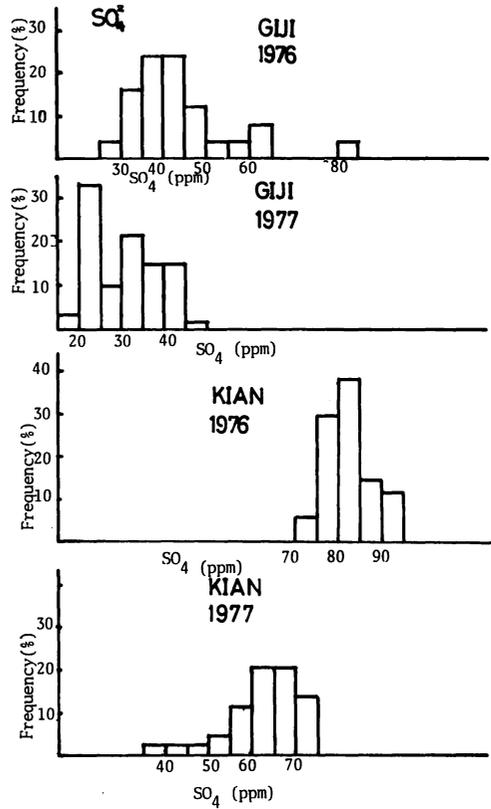


Fig. 13 Distribution of SO_4^{2-} in ground water on GIJI and KIAN

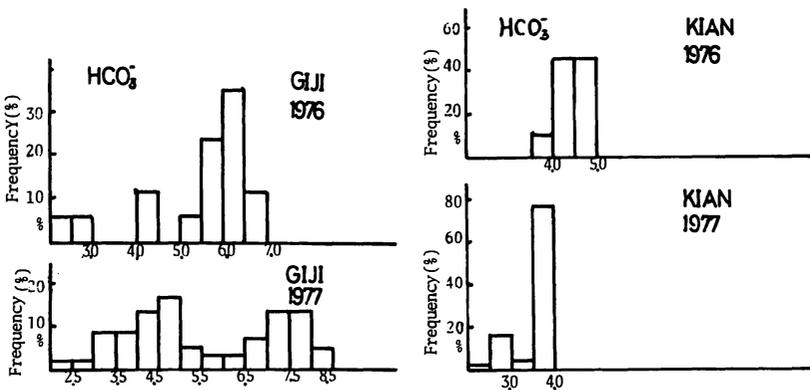


Fig. 14 Distribution of HCO_3^- in ground water on GIJI and KIAN

が濃度分布にも明らかに示されている。これについて次の項でさらに詳細に述べてみよう。

5-4 井戸水の汲み上げによる水質の変化

宜次の井戸はジャーガル地帯の粘土質のところであり、深さ2.5 mでセメントの円形枠で底までかためてある。水の汲み上げによって徐々に底またはセメント枠のつぎ目から水が湧き出し、約20時間ほどで水位は回復する。この井戸で井戸水を全部汲み出し、新しい水が湧出することで、どのように水質が変化するかを観測した。その結果、汲み上げによる水質の変化は顕著である。次の表7は1977年9月19日午前11時に採水後ただちに汲み上げ、その翌日9月20日午前8時に水位が回復したので再び採水して分析した結果である。

Table. 7 Variation of chemical compositions in ground waters on GIJI after pumping up

Elements	Ca ⁺⁺ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)
Sept. 19	82.2	4.27	9.9	26.9	25.9	20.0	35.1	6.9
Sept. 20	112.	6.54	15.5	36.4	41.3	26.9	29.8	6.4

表7に見るようにCa⁺⁺, HCO₃⁻, Mg⁺⁺, Na⁺, Cl⁻等は濃度が増大し、それに反してK⁺とSO₄⁻は濃度が減少したのが見られる。このことは其の後9月19日より11月28日までの間毎週1回計11回の汲み上げを実施した結果、9月19日以前とそれ以後とでK⁺とSO₄⁻は共に減少したのに反しCa⁺⁺, HCO₃⁻, Mg⁺⁺, Na⁺, Cl⁻などは何れも増加し、表7の結果とよく一致し、より明瞭にこの傾向を示した。これを表8に示す。

Table. 8 Mean Values of Chemical Composition in waters on GIJI and KIAN

	G I J I				K I A N			
	A	B	B/A	C	A	B	B/A	C
PH	7.36	7.10	0.90	7.25	7.38	7.23	0.98	7.30
Ec ($\mu\sigma/cm$)	636	748	1.18	691	625	677	1.08	648
HCO ₃ ⁻ (me/l)	4.20	6.88	1.64	5.54	3.28	3.63	1.12	3.43
Ca ⁺⁺ (ppm)	89.1	117.	1.32	104.	95.9	112.	1.17	103.
Mg ⁺⁺ (ppm)	9.4	16.0	1.70	13.2	7.5	7.5	1.00	7.5
Na ⁺ (ppm)	30.4	41.1	1.35	36.1	26.3	26.3	1.00	25.8
K ⁺ (ppm)	7.7	4.6	0.60	5.9	3.4	3.4	1.00	3.2
Cl ⁻ (ppm)	32.1	44.2	1.38	39.3	37.4	36.9	0.99	36.5
SO ₄ ⁻ (ppm)	36.8	23.9	0.65	30.2	58.8	76.2	1.30	66.8
SiO ₂ (ppm)	19.7	28.8	1.46	24.5	7.9	8.6	1.09	8.0
Rainfall (mm)	711	385	0.54	1254	589	248	0.42	926

* A... 6/27~9~19

Number of Sample 13

B... 9/26~12/12

Number of Sample 13

C... 5/30/12/19

Number of Sample 31

表8の中でAは6月27日~9月19日の汲み上げ前の13週の平均値を示し、Bは9月26日~12月12日までの13週の平均値を示したもので、その比率B/Aの値も示した。Cは5月30日から12月

5-5 各種成分相互の関係

表9と表10に1977年に観測した宜次と喜屋武の成分相互の相関関係表を示す。両表中気温、水温、水位、降水量、pHは正の相関が見られる。

5-5-1 Na^+ と Cl^- の関係

図15に1976年に観測した結果を、図16に1977年に観測した Na^+ と Cl^- の関係を示す。面図で明らかのように喜屋武、宜次共に相関係数0.87~0.95と高い正の相関があり、何れも海水の Na^+/Cl^- 比よりも Na^+ が高い値を示し、特に宜次に於て Na^+ が高い値を示す。これは宜次は粘土質の地質

で粘土鉱物中のモンモリロナイト中の Na^+ などが変質によって溶脱して来たことなどが考えられる。1976年では Na^+ も Cl^- も宜次に於てその濃度の変動幅が大きい。

海水との関連を見るために Na^+/Cl^- の比と Cl^- との関係をプロットしたのが図17である。図に見るように Cl^- 濃度が低いところは宜次でも喜屋武で

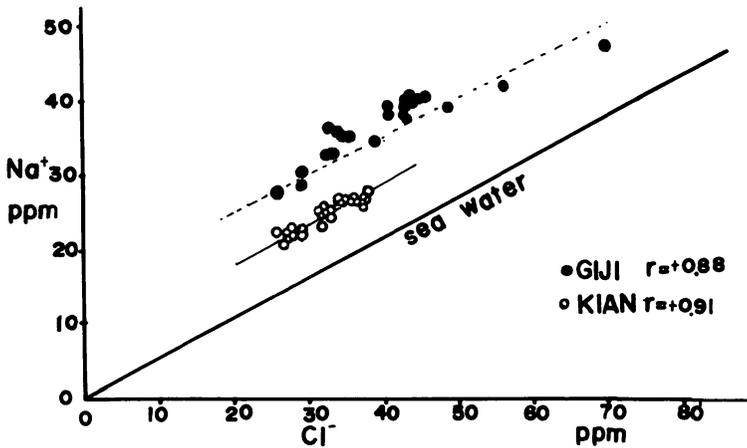


Fig. 15 Relationship between Na^+ and Cl^- in waters on GIJI and KIAN (1976)

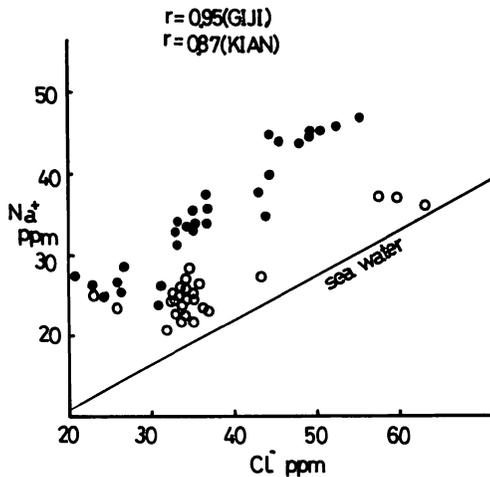


Fig. 16 Relationship between Cl^- and Na^+ in ground waters on GIJI and KIAN (1977)

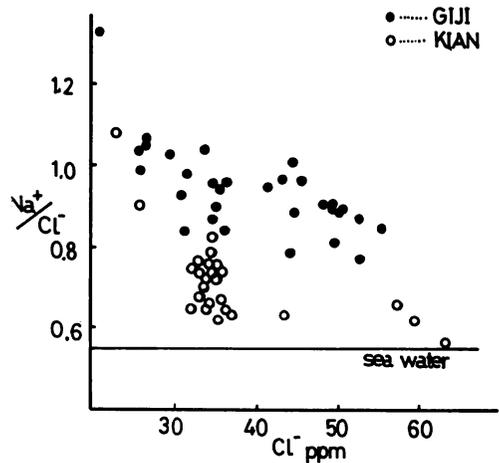


Fig. 17 Plots of Na^+/Cl^- against Cl^- content of ground waters in GIJI and KIAN areas (1977)

も Na^+/Cl^- の比の値は大きく海水以外からの Na^+ の供給が見られるが Cl^- 濃度が増大すると低下する。

特に喜屋武の場合海水の比に一致するようになる。これは喜屋武の場合 Cl^- が大きいときは台風の影響で多量の海水のしぶきや風送塩が雨水に混り Cl^- が増大したものと考える。

5-5-2 Ca^{++} と Cl^- との関係

図18に Ca^{++} と Cl^- との関係を示す。これは1977年の結果をプロットしたもので、喜屋武と宜次では Ca^{++} と Cl^- の関係が全く逆になる。宜次では正の相関で係数0.96と高い相関を示すが喜屋武では-0.39と負の相関があり逆になっている。しかしこれもよく詳しく見てみると台風の影響のあった9月12日から9月28日までの試料が特に Cl^- が高いため負の相関を示したものでこの試料を除外すれば宜次と同様な正の相関を示す。

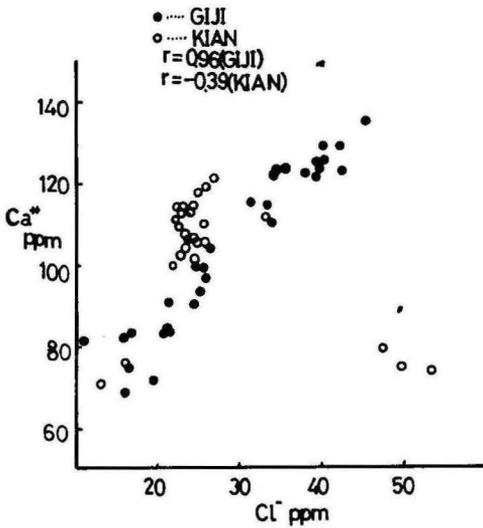


Fig. 18 Relationship between Cl^- and Ca^{++} in ground waters on GIJI and KIAN (1977)

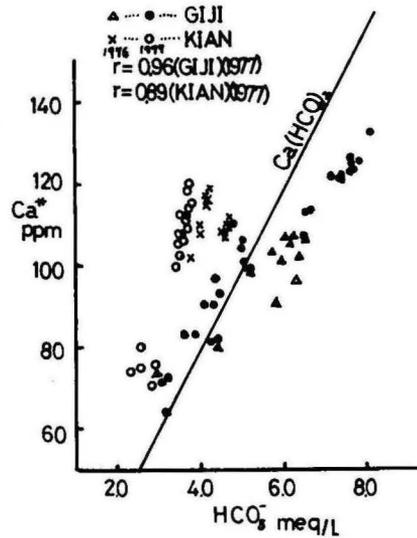


Fig. 19 Relationship between HCO_3^- and Ca^{++} in ground waters on GIJI and KIAN (1976)

5-5-3 Ca^{++} と HCO_3^- との関係

図19に1976年と1977年の喜屋武と宜次の Ca^{++} と HCO_3^- との関係を示す。喜屋武と宜次何れに於ても正の相関があり、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の線に近い。そして喜屋武では HCO_3^- に比較して Ca^{++} が多く、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 線よりも上に分布し、宜次ではその線より低目かその線に近い。 Ca^{++} が $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の線より低いところにプロットされる試料はすべて井戸水を汲み上げた後の試料で粘土層中に過剰の HCO_3^- の存在を示している。 Ca^{++} や HCO_3^- 両成分とも宜次の方が濃度変化も大きい。

このように喜屋武の場合 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の線よりも大きくずれて Ca^{++} 濃度が大きいことは兼島ら (1973) 1), (1977年) 2) が与那国島や南北西大東島の石岩地帯の水について報告していることと幾分が相違することであり、 HCO_3^- 以外に Ca^{++} とイオン対をつくる陰イオンのあることを示すものであり、沖縄南部の特徴ともなろう。

5-5-4 Ca^{++} と SO_4^- との関係

図20に1976年の観測結果を図21に1977年の観測結果をプロットした図を示す。

Ca^{++} と SO_4^- の関係は喜屋武と宜次では全く逆の関係が何れの年の観測でも認められる。相関係数は喜屋武では1976年に0.78, 1977年に0.93と正の高い相関があるのに反し, 宜次では1976年に-0.65, 1977年に-0.75と負の相関が見られる。これは喜屋武の場合次に示す, 石灰岩に由来すると見られる SO_4^- に大きな原因があらうかと思われる。また宜次の場合は Ca^{++} の少い雨水による土壌などからの SO_4^- の供給によるものと考えられ, これは宜次の井戸の汲み上による K^+ と SO_4^- との正の相関関係からも推定される。

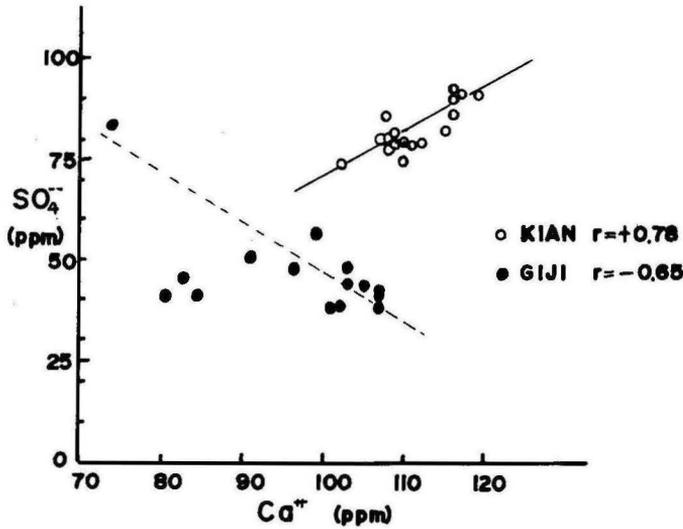


Fig. 20 Relationship between Ca^{++} and SO_4^- in waters on GIJI and KIAN (1976)

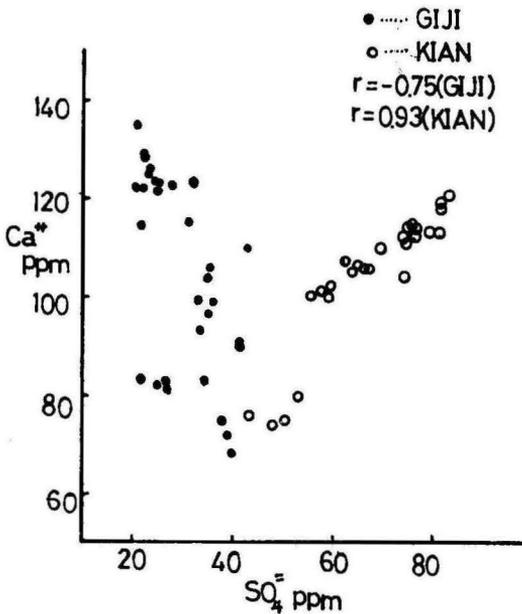


Fig. 21 Relationship between SO_4^- and Ca^{++} in ground waters on GIJI and KIAN areas (1977)

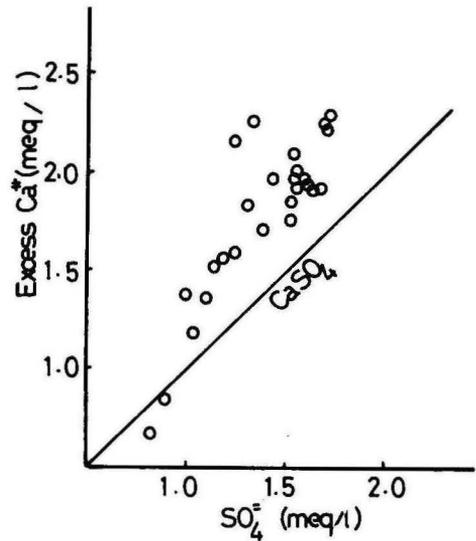


Fig. 22 The relationship between excess Ca^{++} and SO_4^- in ground waters of KIAN

次に5-5-3の Ca^{++} と HCO_3^- の関係の項で述べたように喜屋武の水には $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ よりも過剰の Ca^{++} があることを述べたが、その過剰の Ca^{++} と SO_4^{--} とを単純にプロットした図が図22である。

図で見ると、喜屋武の水は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の式から計算される Ca^{++} より過剰の Ca^{++} と SO_4^{--} とは当量比 CaSO_4 の線に近いところに分布し、喜屋武のような石灰岩地帯では石灰岩からの CaSO_4 の溶出の可能性も考えられる。これは琉球石灰岩には最高0.18%、平均0.02%含有され、またサンゴ礁中には最高0.88%、平均0.57%も含まれていることは兼島(1965)³⁾の報告にもあり、石灰岩地帯の水の SO_4^{--} は石灰岩からの溶出によるものである可能性は充分考えられることである。

5-5-5 HCO_3^- と SO_4^{--} との関係

HCO_3^- と SO_4^{--} との関係をプロットしたのが図23である。

図23に見るように HCO_3^- と SO_4^{--} との関係も Ca^{++} と SO_4^{--} の関数に似ており、宜次では負の相関が喜屋武で正またはばくぜんとした負の相関がある。これは宜次の場合汲み上げによって、粘土層間隙中の Ca^{++} や HCO_3^- の濃い水が移動して来たのに反し、 SO_4^{--} は主として、 Ca^{++} や HCO_3^- の少い雨水によって運ばれて来たためと考えられる。

喜屋武の場合1976年には-0.18とばくぜんとした負の相関が、1977年には0.79と明瞭な正の相

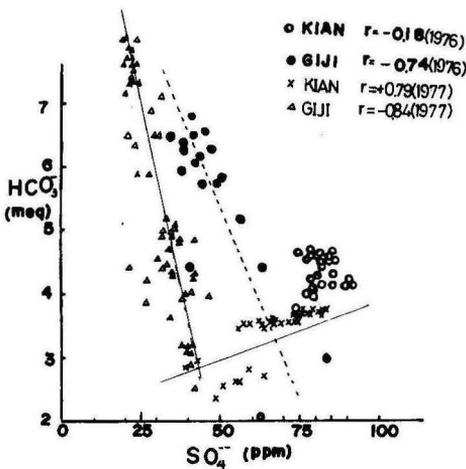


Fig. 23 Relationship between SO_4^{--} and HCO_3^- in waters on GIJI and KIAN (1976)(1977)

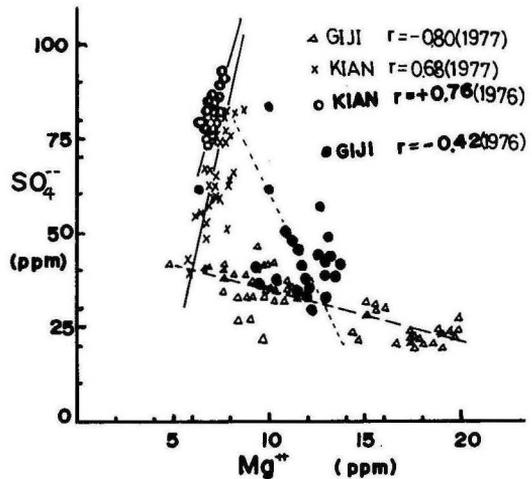


Fig. 24 Relationship between Mg^{++} and SO_4^{--} in waters on GIJI and KIAN (1976)(1977)

関が出ており、これは石灰岩地帯では雨水からの SO_4^{--} の供給が少なく、 SO_4^{--} も HCO_3^- や Ca^{++} と共にくすめられるためとも考えられる。

5-5-6 Mg^{++} と SO_4^{--} との関係

Mg^{++} と SO_4^{--} との関係を図24に示す。 Mg^{++} と SO_4^{--} との関係も Ca^{++} と SO_4^{--} や HCO_3^- と SO_4^{--} との関数に似て、喜屋武で正の相関、宜次で負の相関がみられる。宜次では Mg^{++} は Ca^{++} や HCO_3^- と挙動を

共にし、 SO_4^- とは異った経路で井戸に運ばれていることを示している。しかし喜屋武の場合は Mg^{++} も SO_4^- も Ca^{++} や HCO_3^- と共に動き、宜次の場合と異っていることが1976年や1977年の観測で認められた。

5-5-7 K^+ と SO_4^- との関係

K^+ と SO_4^- の関係を図25に示す。図から喜屋武と宜次において、また観測年の違いによって幾分が様相を異にしている。すなわち1976年には喜屋武、宜次とも正の相関を示し、宜次の場合は K^+ と SO_4^- の比が海水に近いのに喜屋武では海水の比より SO_4^- が K^+ より大きい。1977年には宜次では正の相関を示し、 SO_4^- と K^+ の比は海水の比より K^+ が大きい、そして K^+ の濃度の大きいものほどそれが大きくなっているのが特徴である。そしてこれは降雨量が多く水位の高い時期に多いことから、 K^+ は雨水によって供給されていることが推則される。喜屋武においては1977年には前年とは逆に負の相関を示している。しかし図を詳細に分析すると K^+ の多いのは降雨量の多いときでこの二三の試料を除外して見ると1976年と同様な正の相関を示している。図25から K^+ と SO_4^- は海水の比と一致せず喜屋武に於ては SO_4^- が高く、宜次に於ては K^+ が高いことから海水からのものばかりでなく、 K^+ は表面土壌中にとけ易い状態で分布し、雨水によって運ばれ易く、これに比べ SO_4^- は K^+ ほどには溶け易さはなく、割合に難溶性の状態のものとして推則される。 K^+ の多水は人為的汚染を受けている水が多いことは兼島ら(1973)⁴⁾や渡久山(1972)⁵⁾が与那国島や南大東島および宮古島にあることを報告していることから宜次の井戸も周囲に人家、田畠のあることから生活排水によることも予想され、さらに今後の観測により確めるべき問題である。

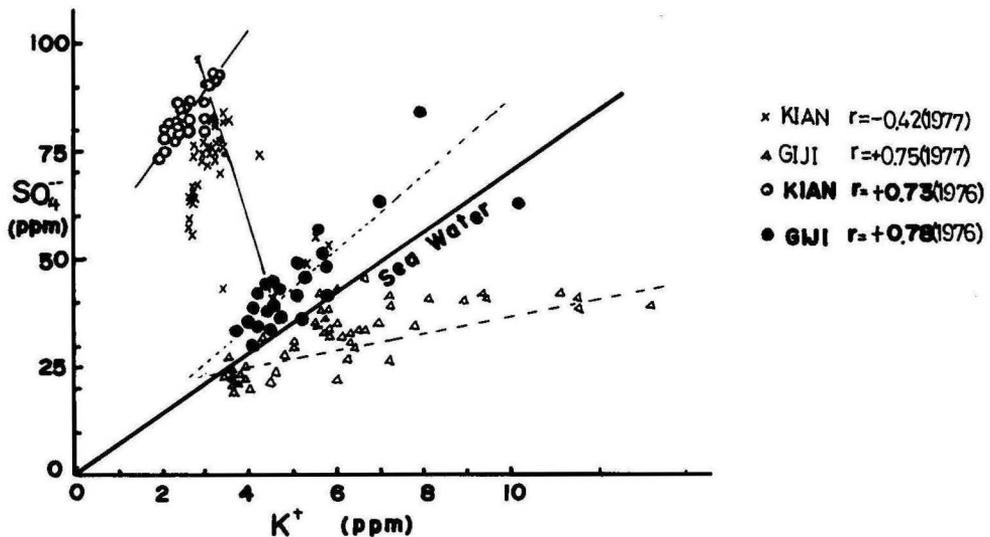


Fig. 25 Relationship between K^+ and SO_4^- in waters on GJI and KIAN (1976)(1977)

5-5-8 K⁺とCl⁻との関係

K⁺とCl⁻との関係を図26に示す。

図に見るようにK⁺とCl⁻とは喜屋武で正の相関が宜次では負の相関がある。そして何れの場合も海水の比よりもK⁺がはるかに高い値を示している宜次の場合、降雨により井戸水の塩分が薄められる際にK⁺が多量に混入して来ることを示し前に述べたことがここでも見られる。このことは図27のK⁺/Cl⁻とCl⁻の関係を示した図を見ればより明瞭になりCl⁻が少いときのK⁺/Cl⁻の値は宜次に於て特に大きな値を示しており海水の影響よりむしろ他からのK⁺の混入を明らかに示している。

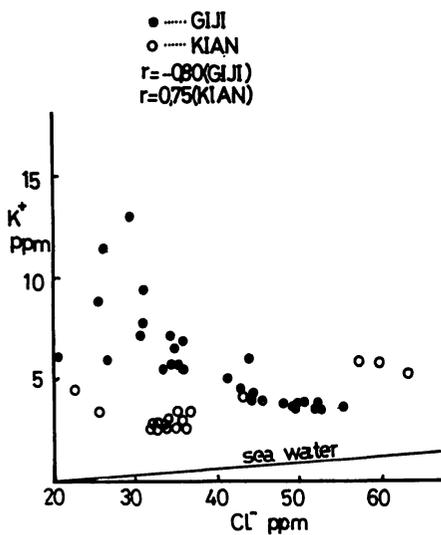


Fig. 26 Relationship between Cl⁻ and K⁺ in ground waters on GIJI and KIAN (1977)

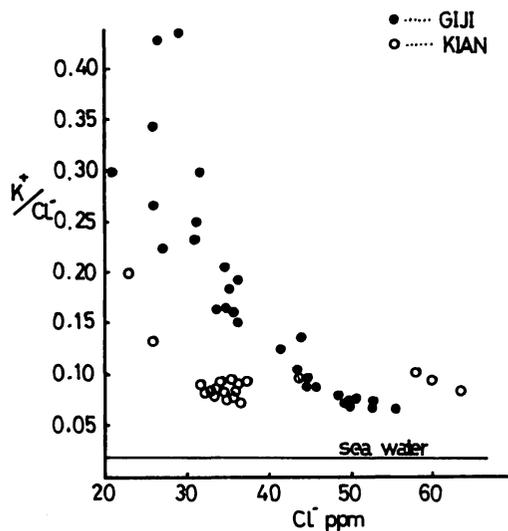


Fig. 27 Plots of K⁺/Cl⁻ against Cl⁻ content of ground waters in GIJI and KIAN areas. (1977)

5-5-9 SO₄²⁻とCl⁻との関係

SO₄²⁻とCl⁻との関係を図28に示す。

図28にはSO₄²⁻/Cl⁻の比とCl⁻の関係をプロットしたもので喜屋武に於ても宜次に於てもCl⁻が低いときはSO₄²⁻/Cl⁻の比が高く、塩分の少ない水にSO₄²⁻が多いことを示している。そしてその値は海水の値よりも皆高い。これはK⁺とCl⁻の関係にもよく似ておりSO₄²⁻がK⁺と同様に海水以外からの供給源から雨水などによって運ばれて来ていることを示している。そして宜次よりも石灰岩地帯である喜屋武の場合に大きいことも5-5-4のCa²⁺とSO₄²⁻の関係で述べたように石灰岩からのSO₄²⁻の溶出によることを物語っている。

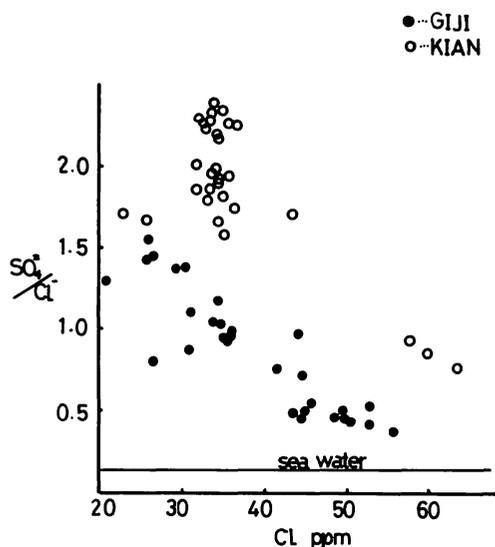


Fig. 28 Plots of $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ content of ground waters in the GIJI and KIAN areas (1977)

5-5-10 主成分相互の相関関係

宜次と喜屋武の相関係数表9と表10から主成分のみについての相関関係を整理したのが表11と表12である。

表11と表12から宜次と喜屋武の類似点と相違点を整理すると、宜次に於ては、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 SiO_2 などは相互に高い正の相関を示し、同一行動を示している反面 K^+ と SO_4^{2-} は相互に正の相関があるが他の成分とは全く逆の負の相関を示し、 K^+ と SO_4^{2-} の挙動が Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 、 Cl^- や Na^{2+} などとは全く別の動きをしていることを示している。ところが喜屋武では Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SiO_2 などは相互に正の相関を示すが、宜次ほどに高い相関はなく、宜次では負の相関を示した SO_4^{2-} が喜屋武では正の相関を示している。それに反し、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- は相互に正の相関を示すが他の成分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 などとは負の相関を示し、 K^+ を除き宜次との逆の関係にある。このよう

に宜次と喜屋武すなわちジャーガル土壌地域と石灰岩地域の間には共通するところと相異するところが明瞭に分かれている。

Table. 11 Correlation Coefficient among Chemical Composition in waters on GIJI (1977)

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SiO_2	Cl^-	Na^+	K^+	SO_4^{2-}
Ca^{2+}	1.00	0.94	0.96	0.93	0.96	0.95	-0.88	-0.75
Mg^{2+}		1.00	0.95	0.96	0.94	0.93	-0.82	-0.80
HCO_3^-			1.00	0.97	0.91	0.96	-0.87	-0.84
SiO_2				1.00	0.90	0.94	-0.83	-0.85
Cl^-					1.00	0.95	-0.80	-0.70
Na^+						1.00	-0.82	-0.75
K^+							1.00	0.75
SO_4^{2-}								1.00

Table. 12 Correlation Coefficient among Chemical Composition in waters on KIAN (1977)

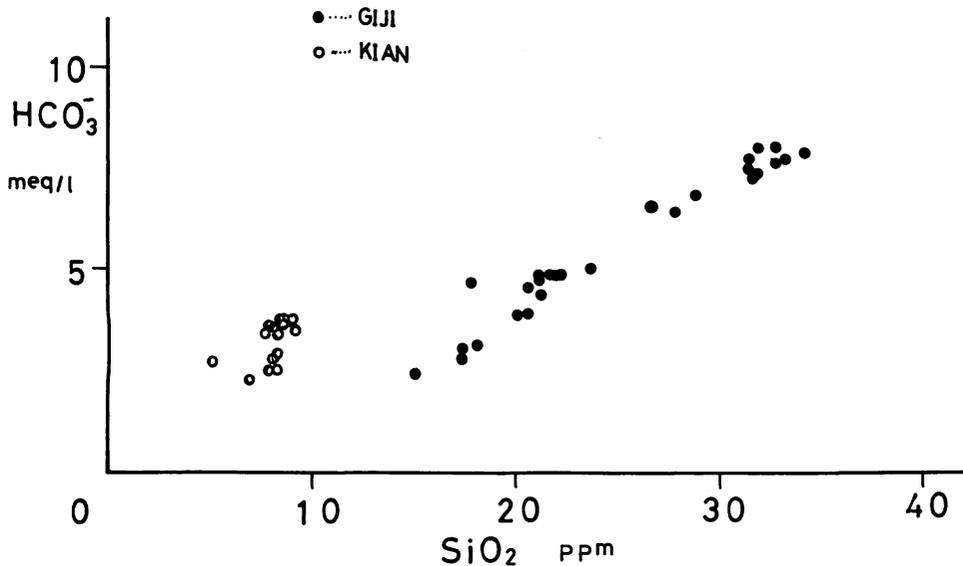
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	SiO_2	Na^+	K^+	Cl^-
Ca^{2+}	1.00	0.60	0.89	0.93	0.37	-0.51	-0.66	-0.39
Mg^{2+}		1.00	0.36	0.68	0.10	-0.02	-0.18	0.11
HCO_3^-			1.00	0.79	0.61	-0.55	-0.68	-0.53
SO_4^{2-}				1.00	0.46	-0.28	-0.42	-0.21
SiO_2					1.00	0.04	0.09	-0.06
Na^+						1.00	0.84	0.87
K^+							1.00	0.75
Cl^-								1.00

5-6 岩石土壌構成鉱物と水質組成

河川水や地下水の化学組成は流域に分布する岩石や土壌の種類によって影響されるので、喜屋武および宜次の地下水の化学組成と岩石土壌構成鉱物との関係を連続観測結果から検討する。

5-6-1 HCO_3^- と SiO_2

HCO_3^- と SiO_2 濃度の関係を図-29に示す。試料中には Cl^- 濃度が 18.4~55.4ppm で、これに見合う海水起源の HCO_3^- は 0.4% 以下であった。また海水中の SiO_2 濃度は極く微量であるのでこれらの成分はほとんど全て岩石から溶出したものと考えてよい。二つの地点を比較すると宜次の方が HCO_3^- 、 SiO_2 とともに濃度が高く強い正の相関を示す (相関係数 +0.97)。泥灰岩や土壌中の有機物質が分解して炭酸物質が供給されることにより silicate rock の風化分解が進行しているものと考えられる。降雨がはげしく、水位が上昇した時には HCO_3^- 濃度が著しく減少し相対的に $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ 比が小さくなっており、 SiO_2 の一部は比較的とけやすい状態で土壌中に保持されている可能性がある。喜屋武では全体的に $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ 比が高く、 HCO_3^- が carbonate rock から供給されていることを示す。

Fig. 29 Relationship between SiO_2 and HCO_3^-

5-6-2 岩石土壌構成鉱物との関係

地下水の化学成分がどのような鉱物と反応することによって供給されるのかを議論するために、測定値から海水成分の寄与を Cl^- 濃度で補正した“過剰量”のイオン濃度について考える。岩石を風化させる主要な因子は炭酸物質と考えられ、過剰量のイオン濃度が HCO_3^- と正の相関を示すものは、喜屋武で Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 SiO_2 であった。 SO_4^{--} は降雨のはげしい時を除けば正の相関があり一部は岩石から供給されている。宜次においては、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 Na^+ 、 SiO_2 が正の相関を示す。島尻泥灰岩中の構成鉱物はシルト部分で石英、長石、カルサイト、粘土質部分でモンモリロナイト、カオリナイト、Al-バーミキュライト、クロライト等であるが詳しい組成についてはデータが無い (渡嘉敷, 1975) ⁶⁾。ここでは表13に示す反応を用いて鉱物との関係を議論する (W. Stumm and J.J. Morgan 1970) ⁷⁾。

Table. 13 Equilibrium constants used to establish stability field of minerals⁷⁾

(1) Na-Feldspar + H ⁺ + 4 ½ H ₂ O = ½ Kaolinite + 2 H ₄ SiO ₄ + Na ⁺	K = 10 ^{-1.9} (25°C, latm)
(2) 3 Na-Montmorillonite + 11 ½ H ₂ O = 3 ½ Kaolinite + 4 H ₄ SiO ₄ + Na ⁺	K = 10 ^{-9.1} (" ")
(3) Ca-Feldspar + 2 H ⁺ + H ₂ O = Kaolinite + Ca ⁺⁺	K = 10 ^{14.4} (" ")
(4) 3 Ca-Montmorillonite + 2 H ⁺ + 23 H ₂ O = 7 Kaolinite + 8 H ₄ SiO ₄ + Ca ⁺⁺	K = 10 ^{-15.4} (" ")
(5) Kaolinite + 5 H ₂ O = 2 Gibbsite + 2 H ₄ SiO ₄	K = 10 ^{-9.4} (" ")
(6) SiO ₂ (amorphous) + 2 H ₂ O = H ₄ SiO ₄	K = 10 ^{-2.4} (" ")
(7) CaCO ₃ (calcite) = Ca ⁺⁺ + CO ₃	K = 10 ^{-8.3} (" ")
(8) HCO ₃ ⁻ = H ⁺ + CO ₃	K = 10 ^{-10.3} (" ")

*Ca-Feldspar (Anorthosite) = CaAl₂Si₂O₈ Na-Feldspar (Albite) = NaAlSi₃O₈
 Ca-Montmorillonite = Ca_{0.33}Al_{4.67}Si_{7.33}O₂₀(OH)₄ Na-Montmorillonite =
 Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O₁₀(OH)₂ Kaolinite = Al₂Si₂O₅(OH)₄ Gibbsite = Al₂O₃·
 3 H₂O

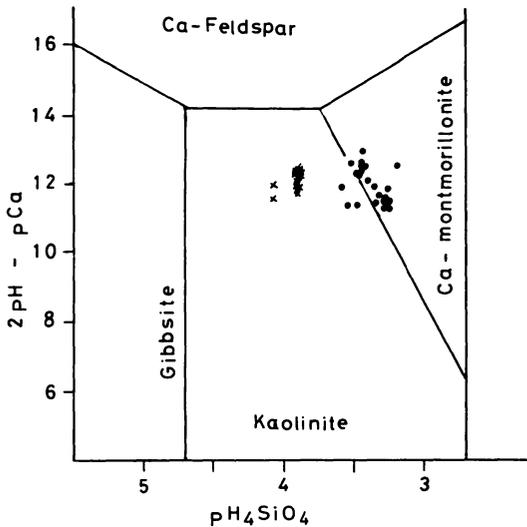


Fig. 30 Stability field of Ca⁺⁺ bearing mineral phases calculated from equilibrium constants given in Table 13, (●; Giji, X KIAN)

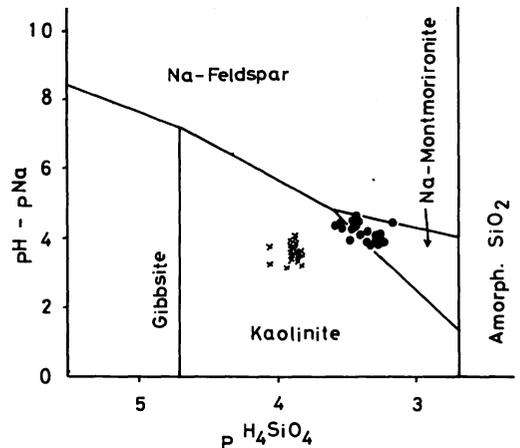


Fig. 31 Stability field of Na bearing mineral phases calculated from equilibrium constants given in Table 13, (●Giji, X KIYAN)

Caを含む鉱物の安定領域を図-30に示す。Ca-モンモリロナイトはpH, Ca⁺⁺, SiO₂の高い溶液系で安定である。直次ではCa-モンモリロナイトとカオリナイトが共存するところに集中しており、このことは、水の汲み上げによって濃度に変化しても変わらない。直次の地下水中のCa⁺⁺

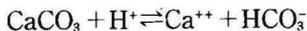
SiO₂, pH等は, これらの鉱物の関与する反応系によって供給されていることをうかがわせる。喜屋武では, カオリナイトの領域に入っているけれども, カルシウムのかなりの量が carbonate rockから供給されているので詳しい議論はできない。

Naを含む鉱物の安定領域を図-31に示す。宜次において過剰量のNa濃度はHCO₃⁻と正の相関があり, silicate rockから溶出する部分があると思われる。宜次の試料はNa-モンモリロナイトとカオリナイトの共存する領域にプロットされる。喜屋武ではカオリナイトの領域に入ってもHCO₃⁻とExcess Na量が相関しないので詳しい議論はできない。

宜次において全ての過剰のイオンがsilicate rockから溶出すると考えるとSiO₂量が少ないので, 一部はcarbonate rockから供給されるか, 又はsilicate rockの分解によって溶出したシリカが, 再び沈殿することも考えられる(R.W.Luce et al, 1972)⁸⁾。このシリカが溶けやすい形で存在するのかもしれない。とにかく, 宜次の地下水組成は, カオリナイトとモンモリロナイトの反応による寄与が大きいと思われる。大屋ら(1976)⁹⁾は土壌中のCa⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺の置換塩基量を測定しており, イオン交換反応による地下水水質への寄与も考慮する必要がある。またこれらの成分がどのような形で土壌中に保持されているのか問題である。

5-6-3 カルサイトとの平衡関係

カルサイトの溶解反応は



で表わされ, この時の平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{Ca}^{++}} \cdot a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{H}^+}} = 10^2 \quad (25^\circ\text{C}, 1 \text{ atm})$$

である。ここで $a_{\text{Ca}^{++}}$, $a_{\text{HCO}_3^-}$, a_{H^+} はそれぞれの化学種の活量である。逆対数で示すと

$$\text{pH} - \text{p}[\text{Ca}^{++}] = 2 + \text{p}[\text{HCO}_3^-] + \text{p}\gamma\text{HCO}_3^- + \text{p}\gamma\text{Ca}^{++}$$

となる。ここで $[\text{Ca}^{++}]$, $[\text{HCO}_3^-]$ はイオンの濃度, $\text{p}\gamma\text{HCO}_3^-$ と $\text{p}\gamma\text{Ca}^{++}$ は活量係数でイオン強度を用いて Debye-Hückell の理論より計算できる。喜屋武と宜次における結果を $\text{pH} - \text{p}[\text{Ca}^{++}] \sim \text{p}[\text{HCO}_3^-]$ 図に示す(図-32)。両地点の地下水はカルサイトに対して平衡もしくは, やや過飽和である。

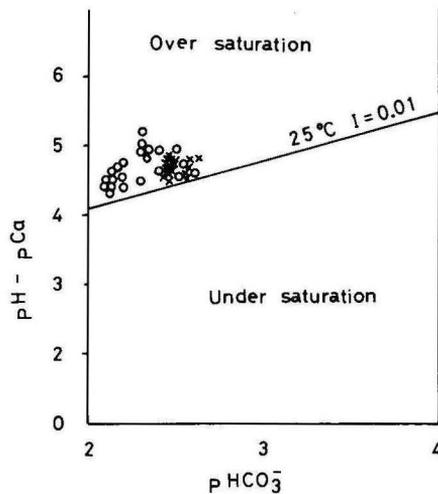


Fig. 32 PH - pCa ~ p[HCO₃⁻] diagrams calculated from equilibrium constants given in Table 13. (○; GIJI, X KIYAN)

5-7 喜屋武と宜次の井戸水の水質組成

喜屋武と宜次の井戸水の水質組成をみるため, その主成分をとってキ-ダイヤグラムで表示したのが図33である。喜屋武と宜次何れも水質組成はCa(HCO₃)₂型に入る。しかし喜屋武の場合台風の影響で海塩の混入等により宜次よりも幾分かNaCl型に移行するところが見られる。

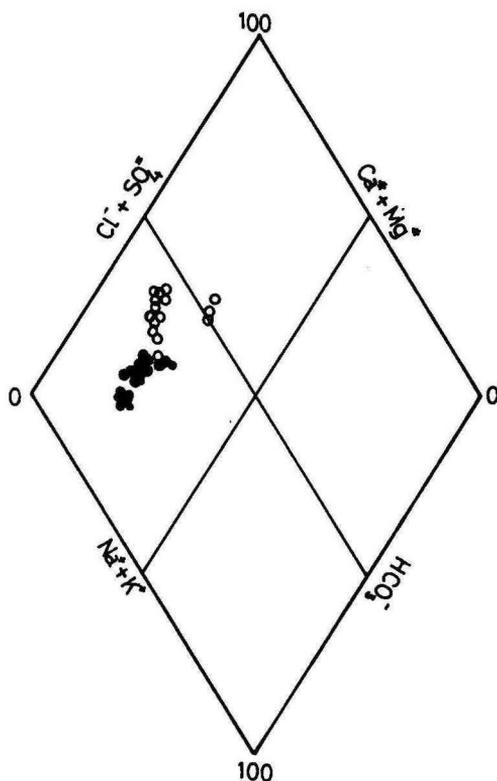


Fig. 33 Key diagram concerning chemical compositions in ground waters on GIJI and KIAN

6 まとめ

石灰岩地域と非石灰岩地域の地下水を継続観測を行って次のことがらを明らかにした。

- 1) 非石灰岩地域の地下水は雨の影響を敏感に受け、雨が降ると水位はすぐに上昇し、 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SiO_2 , Cl^- , Na^+ などのイオン濃度は減少し、 K^+ イオン濃度は増大する。
- 2) 石灰岩地域では地下水は雨の影響を敏感に受けず、雨が降っても水位が上昇するまでに或程度の日数を要し、化学成分の濃度は比較的变化が少なく一定している。しかし台風のような大風と大雨によっては大きな影響を受け化学成分も変化する。9月10日の台風通過後 Na^+ や Cl^- イオン濃度は平常値の2倍近くにも増加した。
- 3) 化学成分相互の関係は宜次で Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} , SiO_2 等は相互に高い正の相関関係があり挙動を共にするが、 K^+ と SO_4^{2-} はこれらのイオン種と全く逆の負の相関を示し行動を別にしている。
- 4) 喜屋武での化学成分相互の関係は台風の影響もあってか Na^+ と Cl^- は相互に正の相関が高いが Ca^{2+} や HCO_3^- とは負の相関を示し、宜次とは異っている。
- 5) K^+ は喜屋武、宜次とも雨が降ると濃度が増加し、化学成分の中では独特の変化をする。特に宜次においては濃度が高く変化も激しい。

6) Ca^{++} と Cl^- の含量は喜屋武, 宜次共に同程度であるが, HCO_3^- , SiO_2 , Mg^{++} , Na^+ , K^+ は宜次の方が高濃度であり, SO_4^{--} だけは喜屋武の方が高い。

7) 宜次は井戸水を全部汲み上げた後, SiO_2 , HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , Na^+ の各イオン濃度が大きく増大し, K^+ , SO_4^{--} のイオン濃度は逆に減少した。

8) SO_4^{--} は宜次では喜屋武に比べ濃度が低く井戸水汲み上げ後その濃度が減少し, K^+ と正の相関関係がある。一方喜屋武では Ca^{++} と強い正の相関があり, 石灰岩より CaSO_4 として溶出して来るものと見られる。

9) 海塩などの影響を除外して陸水組成を考えるため過剰 Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , SO_4^{--} , K^+ などについて検討し, 過剰 Ca^{++} は宜次で HCO_3^- より不足し, 不足分は Mg^{++} や Na^+ によって補われており, SiO_2 と HCO_3^- は正の相関があり, また Ex. Na^+ は HCO_3^- と正の相関がある, これは粘土鉱物のモンモリロナイトからカオリナイトへの変質過程の溶出と見られる。

また Ex. Mg^{++} も粘土鉱物の Ca^{++} とのイオン交換と考えられる。さらに Ex. K^+ と Ex. SO_4^{--} も宜次に於て高い相関を示し, K^+ は特に溶解し易く, SO_4^{--} はそれほどには溶解しない傾向が見られる。

10) 各主成分の濃度分布をヒストグラムで示し, 宜次では井戸水の汲み上げによって二つのピークのあることを示した。

参 考 文 献

(1), (4): 兼島清, 吉田一晴, 平良初男, 渡久山章 (1973); 与那国島の水質, 琉球大学理工学部紀要 (理学編) No.16, 162-180

(2): 兼島清, 平良初男, 渡久山章, 大森保, 西浜完治, (1977); 南大東島および北大東島の池沼ならびに地下水の水質, 琉球大学理工学部紀要 (理学編) No.23, 13-14

(3): 兼島清, (1965); 琉球諸島に産する各種石灰岩の比較, 琉球大学理工学部紀要 (理学編) No. 8, 23-54

(5): 渡久山章, (1972); 堆積環境における元素の移動, 石灰岩地方の水(1), 琉球大学理工学部紀要 (理学編) No.15, 81-98

(6): 渡嘉敷義浩・大屋一弘・鎮西忠茂, (1975); ジャーガルとその母材に関する研究沖縄本島具志頭村白土原の土壤粘土鉱物について, 琉球大学農学部学術報告 Vol. 22, 177-190

(7) Werner Stumm and James J. Morgan, (1970); Aquatic Chemistry

(8) R. W. Luce, R. W. Bartlett and G. A. Parks (1972); Dissolution Kinetics of magnesium Silicates. Vol. 36, 35-50

(9) 大屋一弘・渡嘉敷義浩・高江洲均・多喜和彦・西垣晋 (1976); ジャーガルとその母材に関する研究 (第2報) 沖縄本島糸満市阿波根および西原村棚原土壌断面における粘土鉱物と水溶性成分について, 琉球大学農学部学術報告 Vol. 23, 165-176