

富士山南麓の地下水水質, 流動と窒素汚染

鹿園直建* 荒川貴之**+ 中野孝教***

Groundwater Quality, Flow, and Nitrogen Pollution at the Southern Foot of Mt. Fuji

Naotatsu SHIKAZONO*, Takayuki ARAKAWA**+ and Takanori NAKANO***

[Received 25 September, 2012; Accepted 24 February, 2014]

Abstract

Water samples (number of samples = 52) were collected from the vicinity of the southern foot of Mt. Fuji, central Japan, and were analyzed for major elements (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , etc.) and other chemical properties (pH, EC, ORP, etc.). The results show that major element concentrations increase with decreasing elevation, particularly at a low-elevation site.

In the Yoshihara area, located at the southwestern foot, anion and cation concentrations vary widely and increase from west to east. In this area, water samples with a high total concentration tend to contain a high NO_3^- concentration, suggesting NO_3^- pollution of the groundwater. By contrast, in the southeastern area, NO_3^- pollution was not recognized. Based on nitrogen isotopic and ionic concentration data, the high NO_3^- concentration in the southwestern area is considered to be due to inorganic fertilizer (e.g. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) used at tea farms. Analytical results show two groundwater flows in a high-elevation area along the Urui River and in the direction from a high-elevation site at the southwestern foot toward Susono City, and that they mix together at a low-elevation site. In the southeastern foot area, two groundwater flows derive from a high-elevation site on Mt. Fuji along the Gotenba mudflow and the Mishima lava flow. The latter groundwater mixes with groundwater derived from Ashitaka and the Hakone mountains.

Key words : Mt. Fuji, groundwater, groundwater quality, groundwater flow, nitrogen isotope, nitrogen pollution

キーワード : 富士山, 地下水, 地下水水質, 地下水流動, 窒素同位体, 窒素汚染

I. はじめに

富士山の地下水についての研究は、古くは神原 (1929) がまとめて以来多々なされてきており、

安定同位体組成、水温についての考察などがこれまでに行われ、その水文学的資料が蓄積されつつある (佐藤ほか, 1997)。しかしこれまでの研究では水質に関して、溶存化学成分に注目し、その

* 慶應義塾大学名誉教授 (2014 年 4 月 22 日逝去)

** 慶應義塾大学理工学部

*** 人間文化研究機構総合地球環境学研究所

+ 現所属 : 独立行政法人都市再生機構

* Professor Emeritus, Keio University (passed away on 22 April, 2014)

** Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama, 223-8522, Japan

*** Research Institute for Humans and Nature, Kyoto, 603-8047, Japan

+ Present address: Urban Renaissance Agency, Tokyo, 163-1382, Japan

山麓ごとの特徴について詳しく考察を行った研究は少ない。また地下水流動系についても、地形や地質についての地学的な考察はなされているが、地球化学的見地からの解釈は少ない。

近年、わが国では地下水汚染問題もたびたびとりざたされるようになってきており、そのなかでも硝酸性窒素および亜硝酸性窒素は、環境省による全国地下水水質の基準値超過率が全項目中で最も高く、その対策が緊急の課題になっている（環境省、2005 など）。富士山南側山麓の静岡県は茶の栽培が行われているため、硫酸アンモニウムなどの肥料が投与されている。したがって、富士山地域の地下水も硝酸性窒素汚染にさらされている可能性もある。

そこで本研究では、富士山麓の地下水として自然湧出している湧水をおもに採取し、水質分析によって特徴を把握し、地下水水質組成を形成する上で基本となる水-岩石反応の時間を反映していると考えられる湧水高度による水質の変化、そして人為的な汚染という観点から地球化学的に考察を行った。さらにそれを踏まえ、本研究では窒素同位体組成を用いて地下水の起源、流動、混合流動や、汚染源などについての検討を行ったので、以下で報告をしたい。

II. 研究対象地域

富士山麓には数多くの湧水の存在が知られている。南東麓の柿田川湧水、南麓の富士市吉原の湧水群、南西麓の富士山本宮浅間大社湧玉池、西麓の白糸の滝と猪之頭湧水群、北麓の富士五湖と忍野八海などは湧水量も多くとくに有名である。その他規模の小さい湧水まで含めると、今までに知られているだけでも数百の湧泉が富士山麓にはある。しかし常時、あるいは時期によって枯渇している湧水や、湧水量の減少が著しいものも多く、枯渇、あるいは減少の著しい湧水の総数は静岡県内全域で43.7%にものぼるという（静岡新聞社、2002）。

本研究では、富士山麓を大きく南北2つに区分し、南側をさらに東西に区分して計3つの地域に分ける（図1）。すなわち、南北については

ほぼ県境に順じて東側は麓坂峠、西側は割石峠へと富士山頂から引いた直線によって区分し、それぞれ北麓、南麓とする。南麓はさらに富士山頂から愛鷹連峰の越前岳を結ぶ直線によって東西を区分して、西側を南西麓、東側を南東麓とし、これらの地域を研究対象地域とした。

III. 研究試料

1) 試料採取地点

試料採取地点を表1に、その位置を図1に示す。富士南麓の50地点、富士山頂付近1地点から湧水試料、および富士山頂から雨水試料の採取を行い、以上52水試料の分析を行った。試料の採取は、2003年4月～2005年6月にわたって行い、2004年10月中に全地点でサンプリングを行ったデータを代表値として用いて解析を行った。

採取した試料は標高が約500 m以下のものが主体であり、標高の高い試料は1,500 m前後の2か所から採取した。

南西麓の湧水試料は標高500 m以下の裾野地域と潤井川沿いに多く分布しており、とくに富士宮市街地周辺と富士市吉原地域に多い。一方の南東麓は、御殿場市から三島市にかけての愛鷹山および箱根外輪山に挟まれた谷あいを通る黄瀬川沿いの湧水がおもで、それに加えて小山町の2試料（No. 45, 46）があり、南西麓のように富士山体上部の湧水試料はない。山本（1992）による1979年の調査結果などをみても、図1に示したような富士山体上部や御殿場市周辺の湧水は、湧出量がきわめて少ないか、測定できないほど微量なものがほとんどで、本研究における調査でも、枯渇により採取ができなかった箇所がいくつかあった。

南東麓の試料には地形的にみて明らかに愛鷹山由来の試料（No. 49）や箱根山由来の試料（No. 50）もある。さらに、小山町のNo. 45, 46は北側の丹沢山系にあたる三国山～不老山と連なる山地の谷間に位置しており、地形的に富士山水系とは異なる地下水流動系に属すると推測できる。また、No. 47, 48は地下深部からの汲み上げ水である（No. 47 深さ130 m；No. 48 深さ200 m）。

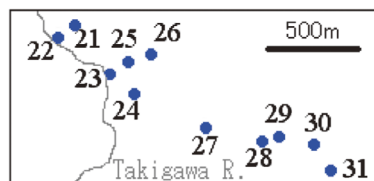
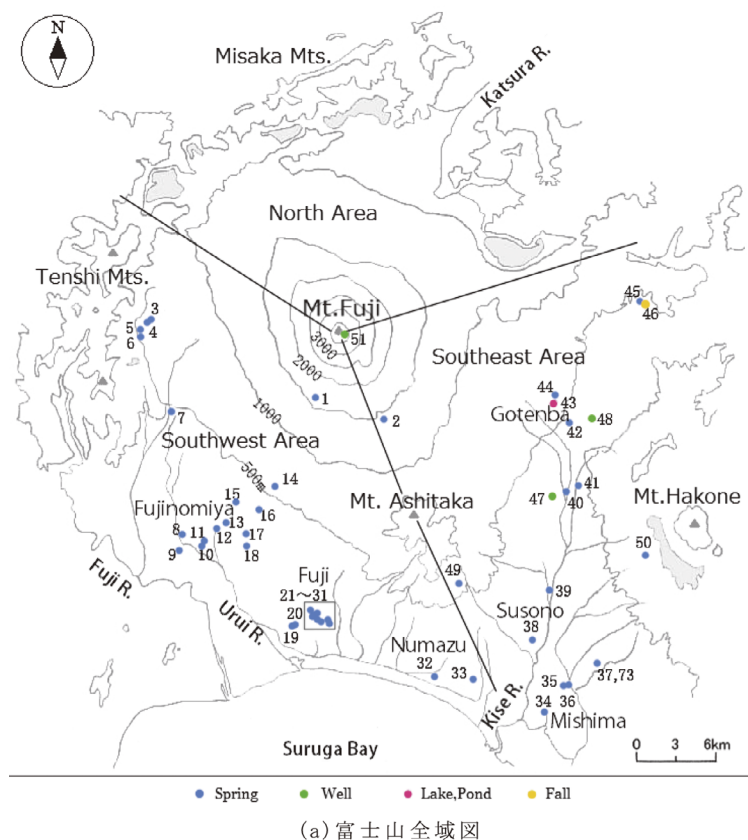


図 1 富士山南麓地域の試料採取地点。

Fig. 1 Sampling points in the Mt. Fuji southern foot area.

IV. 分析方法

1) フィールド分析

研究試料の pH、水温、電気伝導度 (EC)、酸化還元電位 (ORP)、 HCO_3^- 濃度の測定を各試料採取地点にて次の器具を使用し行った。pH、水温：東亜ディーケーケー製、ポータブル pH 計

HM-21P (以下 pH メーターと呼ぶ)、電気伝導度：東亜ディーケーケー製、ポータブル電気伝導率計 CM-21P (以下 EC メーターと呼ぶ)、酸化還元電位：東亜ディーケーケー製、ポータブル ORP 計 RM-20P (以下 ORP メーターと呼ぶ)、 HCO_3^- 濃度：株式会社東興化学研究所製、炭酸ガス測定器 Ti-9004 (以下 CO_2 メーターと呼ぶ)。

表 1 試料採取地点.

Table 1 Sampling points.

No	試料名	採取地点	タイプ	備考
1	2 合目	富士宮市富士宮口登山道 2 合目水場	Spring	
2	水ヶ塚	裾野市須山水ヶ原・腰切塚	Spring	
3	猪之頭 1	富士宮市猪之頭 芝川水源	Spring	
4	猪之頭 2	富士宮市猪之頭 猪之頭伊勢大神明宮	Spring	
5	陣場の滝	富士宮市猪之頭 陣場の滝	Spring	
6	五斗目木	富士宮市猪之頭 猪之頭五斗目木橋西	Spring	
7	白糸の滝	富士宮市 白糸の滝	Spring	
8	淀師渋沢	富士宮市淀師 463 地先	Spring	
9	よしま池	富士宮市大中里 よしま池	Spring	
10	羽衣池	富士宮市西町 羽衣池	Spring	
11	湧玉池	富士宮市宮町 富士山本宮浅間大社 湧玉池	Spring	
12	八幡宮	富士宮市上小泉 神祖八幡宮	Spring	
13	出水不動	富士宮市 出水不動尊	Spring	
14	元村山	富士宮市元村山 村山浅間神社	Spring	
15	栗倉	富士宮市栗倉	Spring	
16	石原	富士宮市石原	Spring	
17	杉田	富士宮市杉田	Spring	
18	杉田不動	富士宮市杉田 杉田不動尊	Spring	
19	学校橋	富士市今泉 学校橋	Spring	
20	今泉	富士市今泉 今泉幼稚園脇	Spring	
21	五社宮東	富士市原田 五社の宮神社東側	Spring	
22	五社宮南	富士市原田 五社の宮神社南側	Spring	
23	鎧ヶ淵	富士市原田 鎧ヶ淵親水公園	Spring	
24	公会堂前	富士市滝川町 滝川公会堂前	Spring	
25	滝不動	富士市原田 永明寺東 滝不動	Spring	
26	鑑石園	富士市原田 鑑石園	Spring	
27	題唱寺	富士市中比奈町 題唱寺北側	Spring	
28	玉泉寺 1	富士市中比奈町 玉泉寺東側 (吉永第一小北側)	Spring	
29	玉泉寺 2	富士市中比奈町 玉泉寺東側	Spring	
30	医王寺	富士市東比奈町 医王寺	Spring	
31	長学寺	富士市東比奈町 長学寺	Spring	
32	原湧水	沼津市原 原湧水公園	Spring	
33	日吉神社	沼津市西沢田 日吉神社穀水	Spring	
34	柿田川	清水町伏見 柿田川	Spring	
35	白滝公園	三島市一番町 白滝公園	Spring	
36	菰池	三島市大宮町 菰池	Spring	
37	瀧川神社	三島市川原谷 瀧川神社	Spring	
38	不動湧水	裾野市富沢 不動の湧水	Spring	
39	平山水源	裾野市平山 平山水源地清水湧水	Spring	
40	中清水	御殿場市中清水 中清水水神公園	Spring	
41	二子水神	御殿場市沼田 二子水神湧水	Spring	
42	二枚橋	御殿場市二枚橋 二枚橋の滝不動	Spring	
43	八丁池	御殿場市中畑 八丁池	Pond	
44	上小林	御殿場市上小林 金明水	Spring	
45	湯船八幡	小山町湯船 湯船八幡神社	Spring	
46	金時神社	小山町中島 金時神社ちよろ七滝	Fall	
47	駒門 PA	御殿場市 東名駒門 PA	Well	汲み上げ水
48	足柄 SA	御殿場市 東名足柄 SA	Well	汲み上げ水
49	愛鷹	長泉町元長窪 愛鷹水神社	Spring	
50	箱根	裾野市茶畑 命の水 (箱根)	Spring	
51	銀明水	富士山頂 銀明水	Well	
52	山頂天水	富士山頂天水	Rain	

2) 室内分析

2-1) 原子吸光分析

日立製作所製、Z-6100 型偏光ゼーマン原子吸光分光光度計を使用し、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 濃度を測定した。

2-2) 分光光度計による比色分析

HACH 社製、多項目迅速水質分析計（分光光度計）DR/2010 を使用し、 Fe^{2+} 濃度、全鉄イオン濃度 (T.Fe)、シリカ (SiO_2) 濃度および F^- 濃度を測定した。 Fe^{2+} 濃度と T.Fe の値の差から Fe^{3+} 濃度を計算し求めた。

2-3) イオンクロマトグラフィー分析

日本ダイオネクス株式会社製、イオンクロマトグラフ DX-120、分離カラム AS12A を使用し、溶離液として 27 mM Na_2CO_3 、2 mM NaHCO_3 混合溶液を用いて Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 濃度を測定した。標準溶液には関東化学株式会社製陰イオン混合標準液Ⅳを用いた。

2-4) 窒素同位体比質量分析

窒素の安定同位体比を以下の方法により測定した。同位体比の測定値は、標準物質からの千分率偏差 (δ 値) で表した ((1) 式)。

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{SAMPLE}}}{R_{\text{STANDARD}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

ここで、窒素同位体比の標準物質は大気であり、同位体比 R は $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比である。

R の測定は以下のように行った。i) 窒素量としておおむね 0.5 ~ 1.0 mg 程度になるように試料水を取り、十分な大きさのナス型フラスコに入れた。ii) 硝酸の揮散を防ぐため 0.1 mol/l の水酸化ナトリウム水溶液を数滴加えた。iii) これをロータリーエバポレーターで数 ml まで濃縮した。ただし、湯浴の温度は 60℃ とした。iv) 試料を 10 ml 梨型フラスコに移し、さらにロータリーエバポレーター 0.1 ml 程度まで濃縮した。v) 試料を元素分析用銀カプセルに移し、80℃ の恒温器で蒸発乾固させた。vi) 乾固させた試料をグルコースとともに燃焼させ、そのガスを株式会社アムコ製自動元素分析装置 FlashEA1112 から、ConFlo III Interface 経由でサーモエレクトロ

ン株式会社製安定同位体比測定用質量分析計 Finnigan DELTA plus XP に導入し、 R を測定して $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定した。

V. 分析結果

分析結果を表 2 にまとめた。

1) 電気伝導度

図 2 に本研究地域における試料水（雨水などは除く）の電気伝導度の分布を示す。電気伝導度は試料水中の全イオン濃度の指標となることから、地下水-岩石反応の進行度や、人為的汚染の大小を知る手がかりとなる。図 2 より、富士山頂付近を最低値として、標高 1,000 m 以上の湧水試料や富士宮市北部の比較的標高の高い試料（猪之頭湧水群）の電気伝導度は低く、これらより標高の低いところでは数値が高いことがわかる。また、愛鷹山麓、箱根山麓にもそれぞれ電気伝導度の低い湧水試料があることがわかる。しかし、富士山麓の標高約 500 m 以下では、電気伝導度のばらつきが大きい。

富士宮市街地周辺の試料は、山麓の裾野方向に電気伝導度が上昇する傾向はあるものの、その傾向は潤井川沿いに分布する湧水試料にはあてはまらない。富士市においては、西側の 2 試料 (No. 19, 20 今泉) の電気伝導度が比較的高いデータを除くと、狭い地域にもかかわらず数値が西から東に向かって大きく上昇しているといえる。一方、沼津市の 2 試料は低い値を示している。

南東麓では、黄瀬川の上流部と下流部に位置する御殿場市と三島市における試料の電気伝導度が高く、中流部には比較的低い試料が分布している。

2) pH

図 3 に本研究地域における試料水（雨水などは除く）の pH の分布を示す。南西麓においては、電気伝導度が高い試料は pH が低く、電気伝導度が低い試料は pH が高いという pH と電気伝導度との対応がほぼあることがわかる。西から東に電気伝導度が顕著に上昇する傾向がみられた富士市の試料も、pH が西から東に下がる傾向がみられる。また、なかでも沼津市の 2 試料はとくに pH

表 2 水質分析結果.

Table 2 Analytical data on water quality.

試料名	標高 (m)	pH (-)	Temp. (℃)	ORP (mV)	EC (mS/m)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	SiO ₂ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	δD	δ18O	δ15N
2 合目	1630	7.41	8.6	234	5.27	0.100	0.027	0.155	0.220	0.409	0.018	0.000	0.021	0.518	-57.14	-9.10	
水ヶ塚	1430	7.55	9.5	139	3.40	0.062	0.012	0.085	0.147	0.235	0.023	0.010	0.023	0.301	-44.65	-7.22	
猪之頭 1	718	7.20	10.7	224	8.23	0.198	0.030	0.168	0.347	0.347	0.067	0.052	0.098	0.601	-55.67	-8.31	
猪之頭 2	710	7.13	10.7	321	7.95	0.217	0.031	0.162	0.381	0.341	0.067	0.032	0.093	0.648			
陸場の滝	700	6.82	11.9	229	7.31	0.136	0.026	0.139	0.353	0.318	0.041	0.055	0.084	0.509	-55.03	-8.49	
五斗目太	690	6.51	12.4	220	6.41	0.114	0.023	0.108	0.308	0.267	0.034	0.051	0.092	0.400	-52.67	-8.35	
白糸の滝	470	7.52	12.9	167	12.63	0.347	0.052	0.302	0.484	0.571	0.109	0.127	0.155	0.807	-57.80	-8.48	
淀御沢沢	150	6.95	14.5	342	15.01	0.417	0.060	0.286	0.731	0.601	0.109	0.134	0.197	1.339			
よしま池	120	6.97	13.8	194	12.78	0.365	0.046	0.281	0.532	0.638	0.084	0.104	0.128	0.877	-60.10	-8.84	
羽衣池	120	6.81	14.4	191	13.67	0.343	0.061	0.320	0.546	0.674	0.117	0.143	0.160	0.804	-54.84	-8.36	
羽衣池	120	7.06	14.2	258	16.63	0.388	0.071	0.484	0.734	0.685	0.136	0.197	0.215	1.288			
八幡宮	165	7.31	13.7	218	15.12	0.358	0.051	0.455	0.650	0.649	0.092	0.175	0.273	0.894	-53.53	-8.39	
出水不動	195	6.70	15.7	227	18.27	0.291	0.074	0.408	0.906	0.647	0.145	0.376	0.363	0.811	-49.16	-7.79	
元村山	525	7.44	14.3	301	13.54	0.267	0.016	0.364	0.726	0.261	0.097	0.197	0.176	1.108			
粟倉	420	7.42	16.6	220	15.98	0.212	0.024	0.391	0.808	0.555	0.098	0.433	0.180	0.751	-47.22	-7.35	
石原	325	6.66	14.8	229	15.67	0.231	0.065	0.383	0.785	0.670	0.103	0.277	0.211	0.833	-48.55	-7.57	
杉田	230	6.51	15.8	188	19.60	0.264	0.083	0.430	0.946	0.601	0.163	0.567	0.439	0.958	-50.02	-7.78	
杉田不動	200	6.55	15.7	190	21.40	0.249	0.124	0.521	0.965	0.605	0.191	0.646	0.487	0.608	-48.52	-7.48	3.6
学校橋	5	6.76	14.6	208	16.74	0.345	0.064	0.453	0.698	0.621	0.131	0.285	0.268	0.807	-52.83	-8.14	5.4
今泉	5	6.75	14.7	202	18.59	0.394	0.070	0.472	0.748	0.617	0.183	0.314	0.290	0.800	-51.85	-8.08	5.3
五社宮東	20	7.08	13.6	182	10.67	0.274	0.040	0.260	0.422	0.530	0.077	0.105	0.145	0.612	-52.28	-8.34	
五社宮南	20	7.01	13.8	188	10.85	0.274	0.038	0.273	0.436	0.535	0.077	0.108	0.137	0.628	-53.61	-8.48	
鯉ヶ淵	10	7.12	13.9	197	10.64	0.278	0.046	0.257	0.437	0.567	0.111	0.085	0.138	0.625	-52.61	-8.32	
公会堂前	15	7.05	13.8	253	13.72	0.329	0.071	0.342	0.544	0.329	0.116	0.152	0.185	0.920			
滝不動	20	7.25	13.9	202	10.58	0.275	0.025	0.259	0.442	0.569	0.116	0.086	0.127	0.625	-51.47	-8.15	
鑑石園	25	7.32			10.31	0.275	0.048	0.257	0.426	0.576	0.100	0.059	0.091	0.883	-52.52	-8.30	
題唱寺	15	7.12	14.1	193	11.76	0.288	0.058	0.294	0.481	0.603	0.140	0.119	0.152	0.633	-51.22	-8.14	
玉泉寺 1	10	6.96	14.3	195	13.38	0.300	0.065	0.351	0.539	0.642	0.165	0.174	0.189	0.641	-50.36	-7.85	3.8
玉泉寺 2	10	6.77	14.7	197	15.12	0.303	0.073	0.406	0.596	0.672	0.173	0.222	0.245	0.626	-49.61	-7.73	
医王寺	18	6.86	14.9	194	18.36	0.322	0.085	0.524	0.722	0.677	0.218	0.365	0.326	0.732	-46.98	-7.63	3.8
長学寺	20	6.71	16.5	228	23.60	0.362	0.107	0.731	0.964	0.697	0.228	0.619	0.492	0.798	-48.17	-7.09	4.7
原湧水	3	8.59	15.2	145	8.75	0.304	0.030	0.169	0.340	0.578	0.116	0.008	0.049	0.663	-47.42	-7.46	
日吉神社	15	8.39	15.5	160	12.84	0.305	0.039	0.411	0.531	0.699	0.154	0.032	0.021	1.082	-46.64	-7.23	
柿田川	17	6.83	15.1	184	16.15	0.403	0.053	0.410	0.665	0.608	0.161	0.061	0.308	1.054	-53.82	-8.36	
白滝公園	27	6.82	15.9		16.38	0.407	0.051	0.433	0.707	0.638	0.172	0.083	0.284	0.997	-52.56	-8.36	
菰池	37	6.74	17.1	196	17.74	0.425	0.053	0.464	0.733	0.654	0.191	0.101	0.304	1.216	-51.40	-8.13	
瀧川神社	45	7.79	16.1	164	11.45	0.234	0.033	0.266	0.529	0.606	0.138	0.094	0.059	1.231	-48.10	-7.75	
不動湧水	105	8.33	14.8	175	8.57	0.251	0.026	0.168	0.355	0.555	0.075	0.012	0.059	0.726	-46.87	-7.23	
平山水源	175	7.29	14.8		13.08	0.308	0.042	0.324	0.544	0.638	0.135	0.084	0.160	0.965	-46.89	-7.48	
中清水	382	7.21	13.3	147	13.54	0.289	0.045	0.397	0.593	0.562	0.056	0.055	0.134	1.113	-56.24	-8.79	
二子水神	390	7.90	13.1		15.71	0.360	0.044	0.462	0.683	0.496	0.058	0.026	0.254	1.292	-58.58	-9.06	
二枚橋	450	8.38	13.1		17.51	0.483	0.048	0.407	0.667	0.391	0.052	0.008	0.336	1.291	-65.13	-9.73	
八丁池	540	7.83	13.1	147	15.41	0.319	0.047	0.498	0.652	0.530	0.053	0.042	0.239	1.217	-54.75	-8.13	
上小林	556	8.28	13.7	127	15.35	0.319	0.040	0.506	0.641	0.446	0.049	0.031	0.316	1.186	-57.38	-9.04	
湯船八幡	330	7.20	17.0	261	10.80	0.224	0.034	0.437	0.471	0.909	0.067	0.026	0.061	0.869			
金時神社	310	8.03	19.4	240	13.75	0.218	0.030	0.440	0.826	0.651	0.067	0.035	0.078	1.094			
駒門神社		7.53	16.2	649	12.66	0.287	0.050	0.374	0.568	0.608	0.077	0.076	0.101	1.126	-52.68	-8.00	
足柄 SA		7.90	16.3	519	21.00	0.646	0.082	0.509	1.003	0.437	0.143	0.017	0.183	2.076	-51.07	-8.40	
愛蔵	550	7.32	13.4	234	4.58	0.138	0.032	0.068	0.144	0.471	0.062	0.032	0.026	0.271	-46.42	-7.45	
箱根	965	6.96	13.4	159	5.68	0.122	0.006	0.120	0.203	0.231	0.085	0.027	0.039	0.467	-43.10	-7.43	1.1
銀明水	3710	7.81	0.8	240	5.74	0.079	0.048	0.012	0.505	0.107	0.064	0.011	0.033	0.433			
山頂天水		5.67			0.41	0.013	0.017	0.002	0.024	0.011	0.023	0.000	0.006	0.005			

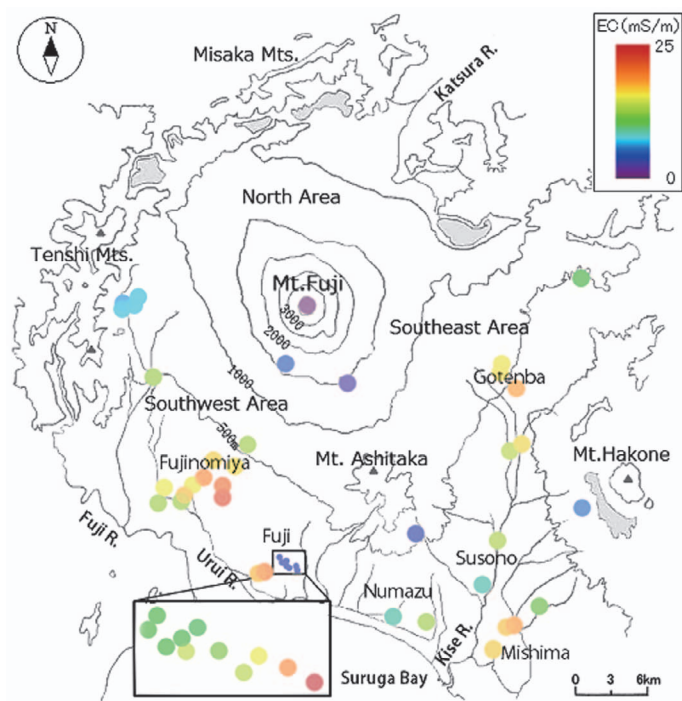


図 2 試料水の電気伝導度 (mS/m) の分布.

Fig. 2 Distribution of electric conductivity values of water samples.

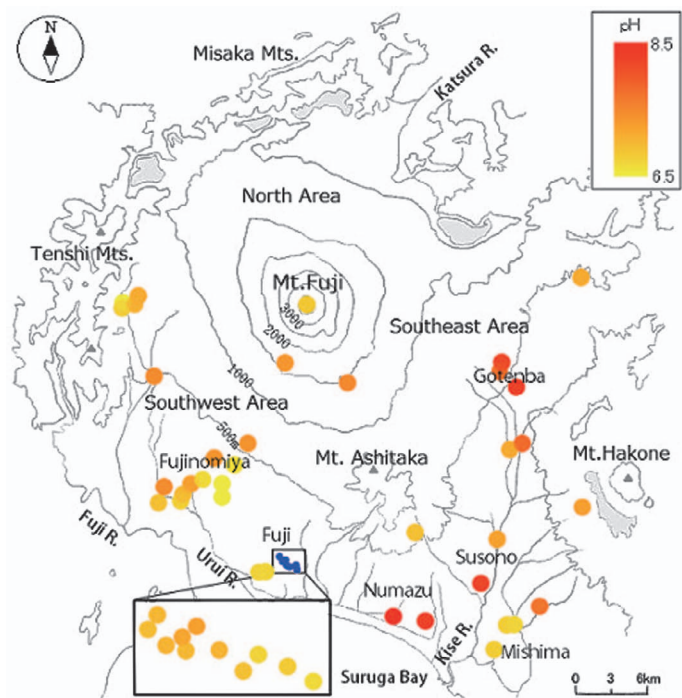


図 3 試料水の pH の分布.

Fig. 3 Distribution of pH values of water samples.

が高いといえる。

南東麓においては上記の傾向が必ずしもあてはまらず、電気伝導度の高い御殿場市と三島市の試料は、御殿場市ではpHが高いが、三島市では逆に低い値を示している。また、黄瀬川中流部ではpHが比較的高い。

3) 溶存成分組成

図4に南西麓の試料を採取した標高と各溶存成分の当量単位の濃度の関係を示す。個々の重要溶存成分(Na , Ca^{2+} , Si , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- など)濃度は、南西麓では標高が低くなるに従い濃度が高くなっていた(図4)。富士宮市街地周辺でも、北東側の標高が高い湧水(No. 14, 標高500 m位)から南西の標高が低い湧水(No. 15, 16 → No. 13, 17 → No. 18)に向かって濃度が高くなっていた。しかし、これらよりも標高の低い潤井川沿いの試料や、とくに右岸のよしま池(No. 9)は濃度が比較的低い。また富士市吉原地域では、電気伝導度の傾向と同じように西から東に向かって濃度が増加しており、とくに NO_3^- 濃度の増加が顕著で、最も東の医王寺(No. 30)と長学寺(No. 31)では40 mg/l以上と地下水環境基準値の44.3 mg/l(硝酸態、亜硝酸態の窒素としての合計が10 mg/l)に迫るほどの高濃度であり、長学寺では測定した日によっては環境基準値を超えていた。一方で、沼津市の2試料(No. 32, 33)はイオン濃度が比較的低く、陽イオンでは Na^+ が多く、陰イオンでは HCO_3^- の割合が顕著で SO_4^{2-} が極端に少ない。

南東麓の化学組成に関しては黄瀬川上流の御殿場市周辺と下流の三島市周辺では異なっている。すなわち、御殿場市周辺では陰イオンの HCO_3^- の割合がとくに大きく、三島市周辺では HCO_3^- の濃度自体が下がっている。また、裾野市にはイオン濃度が他と比べて低い試料(No. 38)があることがわかる。

VI. 考 察

1) 地下水の起源と流動系

以上の分析データ(pH, 電気伝導度, 主成分カチオン, ケイ素, 陰イオン濃度, 窒素同位体

データ, 地質, 山系分布など)をもとに以下では地下水の起源, 流動系, 汚染についての考察を行う。

中井(1996), 長瀬(2000)らは、富士山系地下水は SO_4^{2-} 濃度が高く, Cl^- 濃度が低いため, SO_4^{2-} と Cl^- の合計に占める SO_4^{2-} の割合(当量比)を求めることで, 平均が77%となる富士山水系と平均30%以下の愛鷹山および箱根山水系を明確に区分できるとしている。これによると, 沼津市のNo. 32が約28%, No. 33が約11%になり, その他(南西麓と定義した試料のうち, 沼津市のNo. 32, 33を除いた全試料)の平均約61%(47~75%)と比べて非常に小さいことがわかる。また, 愛鷹山水神社(No. 49)の試料は29.4%である。よって, これら3試料はおもに愛鷹山水系の地下水であると考えられる。

愛鷹山水神社(No. 49)の水質型は, 富士山水系のもものと類似しているが, イオン濃度の低さから滞留時間の短い地下水と考えられる。前述の $\text{SO}_4^{2-}/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比が約43%であることと, 湧出地点が黄瀬川の右岸に位置していることから, 愛鷹水系の影響を比較強く受けていると考えられる。地形的に富士山水系ではないと推測されたNo. 45, 46は, 陰イオンでは HCO_3^- 濃度が突出し, 陽イオンは Mg^{2+} が多く, Na^+ が少ない。全体的な傾向として, 南東麓では南西麓にみられるような NO_3^- 濃度が高い試料は存在せず, 顕著な窒素汚染はみられない。

南東麓では, 北側においては扇状地堆積物(御殿場泥流二次堆積物)となっており, 南側は三島市へと流下している新富士火山旧期溶岩流(三島溶岩流)であり, 地質が異なっている。山本(1971)は, 御殿場の付近においては三島溶岩が存在する南側の地区と, 泥流が覆う北側の地区との間で地下水のあり方に大きな差があり, 前者のタイプは溶岩トンネルや裂け目のなかを流れる地下川的性格をもっており大量の湧出量を有し, 後者は比較的浅層に蓄えられた地下水が不透水層上を流下し, 地形の変換点に沿って湧出している湧泉で, 湧出量はあまり多くないとしている。すなわち御殿場付近の地下水は古富士泥流を不透水層として, その上に堆積する赤マサ, 宝永砂のなか

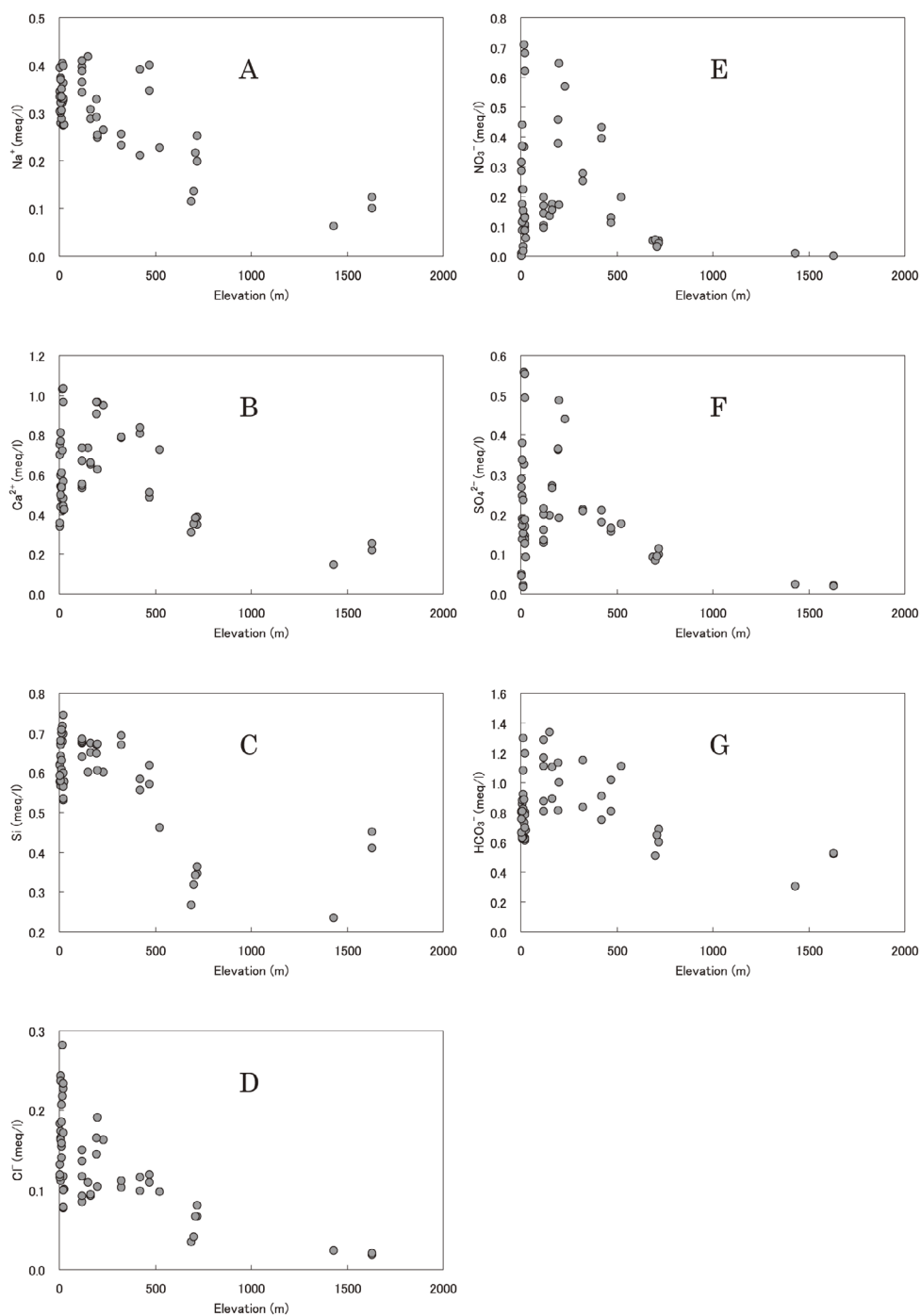


図 4 富士山南西麓地下水の湧出高度と各種元素濃度の関係。

Fig. 4 Relationship between elevation and each elemental concentration of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.

A: Na⁺, B: Ca²⁺, C: Si, D: Cl⁻, E: NO₃⁻, F: SO₄²⁻, G: HCO₃⁻.

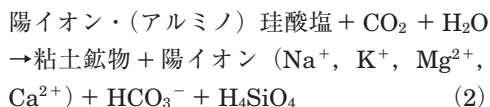
に賦存している。また、落合（1994）の本地域における自然放射能探査の結果より、強ガンマ線地帯に地下川があると考えられている。御殿場市北部から南への地下水流動があると考えられるが、御殿場市北部の地下水は少ない上に、勾配も傾度が小さく、三島溶岩流沿いの地下水が多量であることを考えると御殿場市北部からの流入は比較的少ないと推測できる。したがって、御殿場市南部に位置し、三島溶岩流と御殿場泥流との境から湧出している中清水（No. 40）や二子水神（No. 41）は、御殿場市北部から流動してくる地下水よりも、三島溶岩流が箱根外輪山にぶつかって南に進路を変えたことにより、溶岩流の末端のようになったことによって流出した三島溶岩流中を流動してきた地下水が主体であると考えられる。よって南東麓地域の地下水流動系は、大きく分けて御殿場泥流上の御殿場市北部地域、黄瀬川流域の三島溶岩流沿い、および愛鷹山・箱根山水系があることが考えられる。ただし No. 38 については愛鷹山由来の地下水の影響を受けていると考えられる。

2) 地下水質の特徴と窒素汚染

2-1) 地下水水質と水-岩石反応

図 4 より、すべての溶存成分について標高の低下と濃度の上昇が対応している大まかな傾向があり、また標高の低いところでデータがばらついている。これは標高の低下が流動距離に対応しているため、地下水の流動時間の大小を示していると考えられる。

富士玄武岩質火山の主要造岩鉱物は斜長石、輝石、カンラン石などである。よって、水-岩石反応による各陽イオン成分（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ ）の溶出は次式のような反応が主体をなしている（ここでは簡略化した反応式を示す）。



したがって、水-岩石反応では各陽イオン成分濃度と HCO_3^- 濃度とは同様に増減する。しかし、この反応では低標高地で HCO_3^- 濃度が低く、他

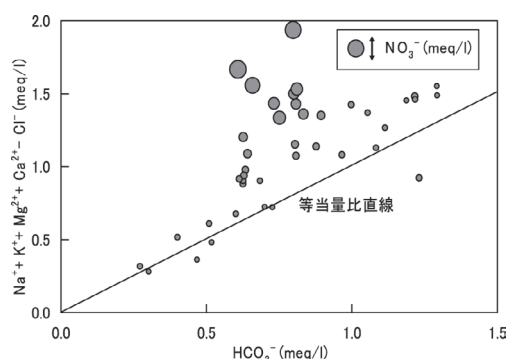
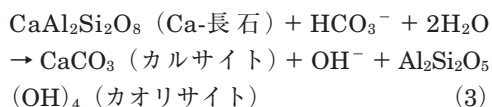


図 5 富士山南西麓地下水の HCO_3^- 濃度と全陽イオン濃度 - Cl^- 濃度の関係および NO_3^- 濃度との関係。

Fig. 5 Relationships among HCO_3^- concentration, total cation concentration - Cl^- concentration and NO_3^- concentration in the Mt. Fuji southwestern foot area.

の陽イオン濃度が低標高地で高いことを説明できない。なお、以下のような水-岩石反応も考えられ、この反応により HCO_3^- 濃度の減少は起こりうる。



これらの反応により、 HCO_3^- は減少し、 Ca^{2+} も減少する。しかし、 Ca^{2+} は Ca 長石だけでなく、他の Ca 鉱物（輝石、火山ガラス等）の溶解で上昇する。したがって、以上より、 HCO_3^- が減少し、 Ca^{2+} が上昇することも起こりうる。

(2) 式より、汚染の影響のない条件では、 HCO_3^- 濃度と、全陽イオン濃度は等当量比になる。そこで図 5 に両者の関係を示す。ただし、 Cl は岩石中にほとんど含まれないため、陽イオン濃度から Cl^- 濃度を差し引くことで風送塩などによる NaCl の影響を補正した。全体的にはやはり明瞭な相関関係はみられないが、等当量比直線を基準にしてみると、同直線の近傍にプロットさ

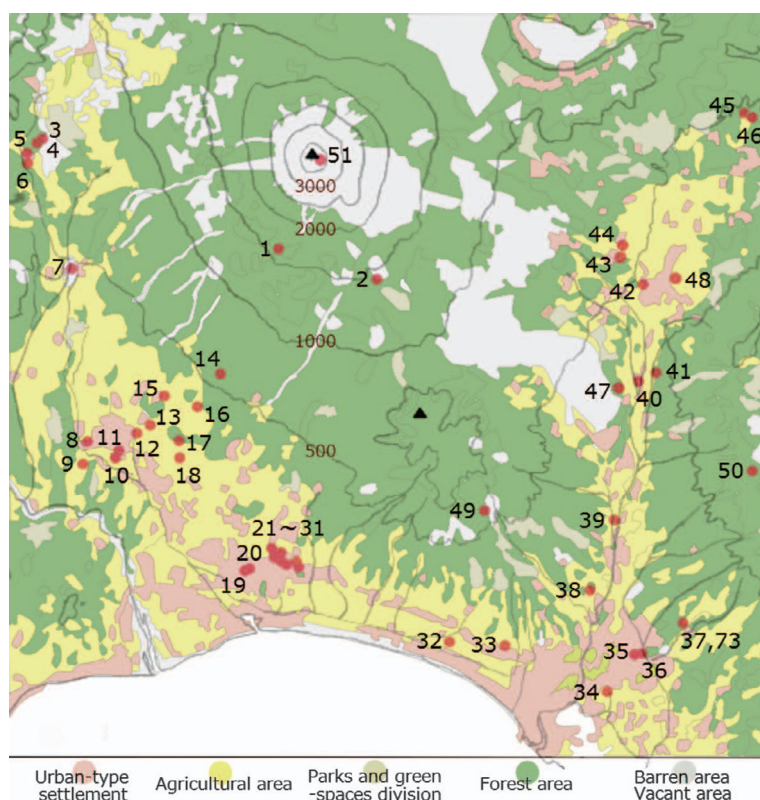


図 6 富士山南麓地域の土地利用図と試料採取地点（国土地理院，1982a, b に修正・加筆）。

Fig. 6 Land-use map of Mt. Fuji southern foot area (modified after Geographical Survey Institute, 1982a, b).

れている試料と、全陽イオン濃度側に偏っている試料があることがわかる。同直線からのずれが大きい試料は、共通して NO_3^- 濃度の高い試料であることがわかり、人為的汚染の影響を考慮に入れる必要があることがわかる。

そこで、この地域の土地利用のされ方をみるために、図 6 に国土地理院（1982a, b）の土地利用図を示す。この土地利用図でとくに目を引くのは南西麓の低標高の裾野地域に広く分布している茶畑を中心とした農地である。また、富士宮市街地から富士市街地にかけて潤井川に沿うように住宅密集地や工場が分布し、富士市街地近傍から海岸にかけて工場が密集していることがわかる。

一般的に茶畑には収穫や品質を向上させるために多くの肥料が撒かれている。藤原（1999）は茶園に施肥する窒素質肥料は、おもに有機質肥料

やアンモニア系化成肥料であるとしている。アンモニア系化成肥料として代表的なものは硝酸アンモニウム（硝安、 NH_4NO_3 ）、硫酸アンモニウム（硫安、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ）、リン酸アンモニウム（磷安、 $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ ）などがあげられる。これら化学肥料は散布された後に水に溶解、あるいは空气中で容易に分解し NH_4^+ が発生する。酸化還元電位の測定結果より、この地域の地下水はすべて酸化的条件にある。よって、 NH_4^+ は土壤中の硝酸化成菌の働きにより酸化され、 NO_2^- を経て NO_3^- となると考えられる。この硝化反応は 2 段階であるが、 NO_2^- は土壤中で速やかに NO_3^- に酸化される（藤原，1999）。この反応をまとめたのが以下の（5）式である。これにより、窒素が土壤に吸着されにくい硝酸態になることで地下水中に流出されやすくなり、地下水中の NO_3^- 濃度が

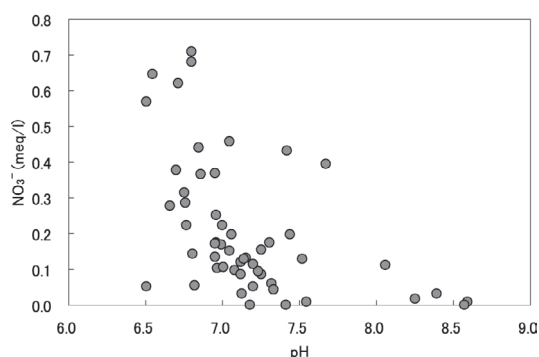


図 7 富士山南西麓地下水の pH と NO_3^- 濃度の関係。

Fig. 7 Relationship between pH and NO_3^- of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.

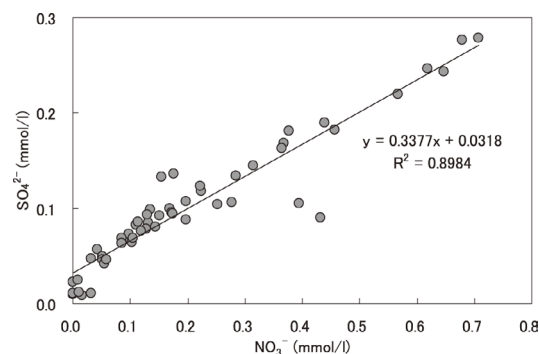
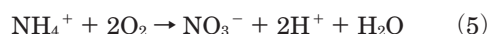


図 8 富士山南西麓地下水の NO_3^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係。

Fig. 8 Relationship between NO_3^- concentration and SO_4^{2-} concentration of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.

上昇したと考えられる。



また、この反応により H^+ が生成し、pH が低下すると考えられる。そこで、図 7 に pH と NO_3^- 濃度の関係を示す。この図より、 NO_3^- 濃度の上昇と pH の低下が対応していることがわかる。しかし、生成した H^+ が過剰になると以下の反応によって HCO_3^- と反応して H_2CO_3 となり、さらに過剰分は CO_2 となって地下水中から抜け出ていくことも考えられる。

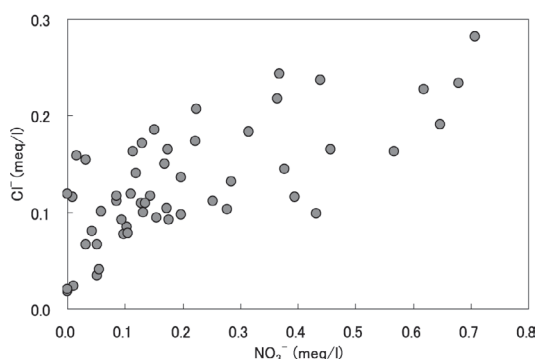


図 9 富士山南西麓地下水の NO_3^- 濃度と Cl^- 濃度の関係。

Fig. 9 Relationship between NO_3^- concentration and Cl^- concentration of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.

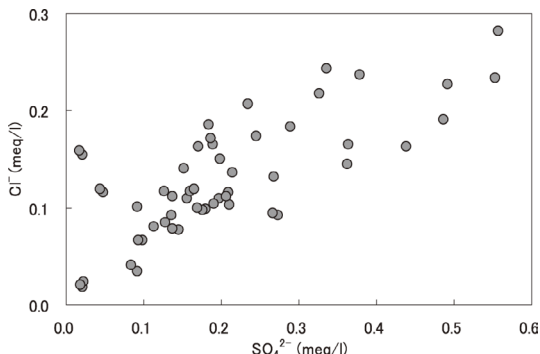


図 10 富士山南西麓地下水の SO_4^{2-} 濃度と Cl^- 濃度の関係。

Fig. 10 Relationship between SO_4^{2-} concentration and Cl^- concentration of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.



また、図 8 に NO_3^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係を示す。これより、茶畑からの窒素汚染が顕著にみられた南西麓においては、両者の相関は非常に高く、肥料として散布された硫安が主たる由来であることが考えられる。ここで、 NO_3^- と SO_4^{2-} のモル比をみると、硫安の 0.5 よりも NO_3^- 側に偏っていることがわかる。これは、硫安以外の窒素肥料の影響と考えられる。図 9 に NO_3^- 濃度と Cl^- 濃度との関係、図 10 に SO_4^{2-} 濃度と Cl^- 濃

表 3 硝酸性窒素供給源の $\delta^{15}\text{N}$ の測定例 (田瀬, 1996).

Table 3 Examples of $\delta^{15}\text{N}$ of various sources of nitrate nitrogen (Tase, 1996).

窒素供給源	$\delta^{15}\text{N}$ 値 (‰) の測定範囲	文献
大気 (基準)	± 0	
降水	$-1.0 \sim +1.5$	小倉ほか, 1986
化学肥料 (NH_4 系)	-0.97 ± 1.88	Hübner, 1986
化学肥料 (NO_3 系)	$+2.75 \pm 1.76$	Hübner, 1986
家畜糞尿	$+9.3 \sim +18.7$	Heaton, 1984
生活排水	$+11.3 \sim +17$	新井・田瀬, 1992

度との関係を示す。これらの場合も正の関係にあり, Cl^- も人為的関係が多いことが示唆される。しかし, この Cl^- は自然由来 (例えば風送塩) も考えられる。

2-2) 窒素安定同位体比による窒素汚染に関する検討

ここで, 硝酸性窒素の汚染源が化学肥料であるかについてさらなる検討をするために, 窒素安定同位体比からの考察を行う。窒素には ^{14}N と ^{15}N の 2 つの安定同位体が存在し, 大気中の存在比はほぼ一定である。そして同位体比は窒素供給源の種類によって変化するため, 同位体比を測定することで窒素供給源の推定が可能となる。表 3 に硝酸性窒素供給源の $\delta^{15}\text{N}$ 値の測定例を示す。井伊ほか (1997) は空気中の窒素を固定して製造される硫酸などの無機化学肥料の窒素安定同位体比は理論上 0‰ となるとしており, 表 3 から化学肥料の $\delta^{15}\text{N}$ 値は 0‰ 前後となっていることがわかる。図 11 に $\delta^{15}\text{N}$ 値と NO_3^- 濃度の関係を示した。まず NO_3^- 濃度が低く, $\delta^{15}\text{N}$ 値が $+1.1\%$ となっている試料については, 比較のために分析した試料 (No. 50) であり, 周囲の地形を考えると限られた集水域しかもっておらず, 上部には田畑や人工物はないため, この試料の硝酸性窒素は降水起源であると考えられる。次に, NO_3^- 濃度の高い試料については, 濃度の大小に関係なく $\delta^{15}\text{N}$ 値はそれよりやや高い $+2.9 \sim +5.4\%$ となっており, 表 3 から化学肥料由来である可能性が示唆される。ただ $\delta^{15}\text{N}$ 値は表 3 や理論上よりもやや大きくなっている。窒素同位体比が大

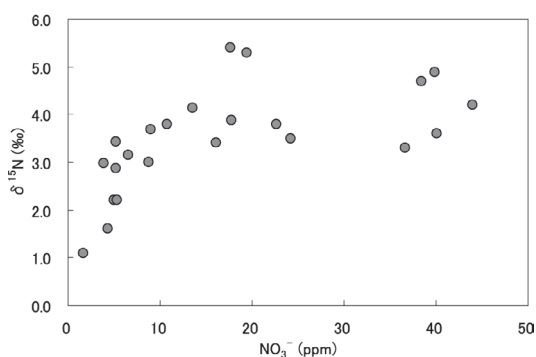


図 11 富士山南西麓地下水の $\delta^{15}\text{N}$ と NO_3^- 濃度の関係.

Fig. 11 Relationship between $\delta^{15}\text{N}$ and NO_3^- concentration of water samples in the Mt. Fuji south-western foot area.

きくなる要因としてまず考えられるのは脱窒による同位体分別である。生物・化学反応においては軽い同位体が選択的に代謝されるためである。しかし綿引ほか (1981) では NO_3^- が N_2 に還元される脱窒反応が起こるのは Eh が 140 mV 以下としているため, 富士山南西麓地下水中の NO_3^- は脱窒反応が起こっていないと考えられる。したがって脱窒反応が起こるとすればアンモニアの状態での空中揮散が考えられる (山本ほか, 1995; 朴ほか, 1996)。事実, 平田 (1996) によると, 無機化学肥料が施用されている農地地下水の窒素安定同位体比は, 硝化過程におけるアンモニア揮散によって平均 6.1‰ をとり, 同位体分別効果が現れているとしており, 本研究によって得られた $\delta^{15}\text{N}$ 値もその値の範囲におさまる。また, 同位

体比が変わるもう 1 つの要因とされる別の同位体比をもった水の混合について考えてみる。窒素同位体比が大きい窒素供給源としては家畜糞尿や生活排水があげられる。しかし、大腸菌群がいずれの試料からも検出されないことや、水質に明瞭な差異が認められないことから、この要因は考えにくい。よって、硝酸性窒素の起源は茶畑に散布された無機化学肥料であり、アンモニアが硝酸に酸化される過程においてアンモニア揮散が起きているために同位体分別によって濃縮が起きていると考えられる。

次に、南西麓において茶畑に散布された肥料による窒素汚染が各陽イオン成分に与える影響について考えてみる。図 12 に NO_3^- 濃度と Ca^{2+} 濃度の関係を示す。これより Ca^{2+} は NO_3^- と強い相関関係があることがわかり、低濃度領域と高濃度領域では傾きにやや違いがある。そのほかの Mg^{2+} ,

K^+ 濃度も NO_3^- 濃度と正の関係にある。また、表 4 には陰イオン成分も含めた各成分間における

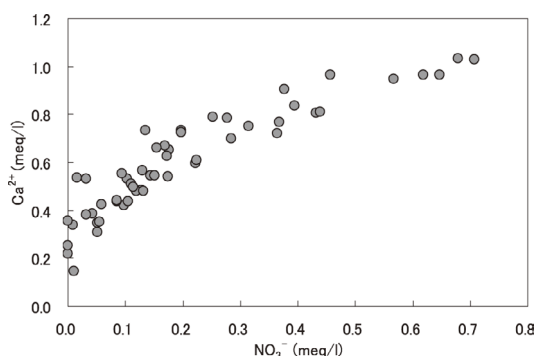


図 12 富士山南麓地下水の NO_3^- と Ca^{2+} 濃度の関係。

Fig. 12 Relationship between NO_3^- concentration and Ca^{2+} concentration of water samples in the Mt. Fuji southwestern foot area.

表 4 各成分間における相関行列。

Table 4 Interrelation procession between each element.

(a) 富士山南西麓									
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Si	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Na^+	1.000								
K^+	0.536	1.000							
Mg^{2+}	0.606	0.811	1.000						
Ca^{2+}	0.543	0.778	0.875	1.000					
Si	0.779	0.683	0.735	0.674	1.000				
Cl^-	0.679	0.810	0.825	0.715	0.708	1.000			
NO_3^-	0.363	0.795	0.853	0.912	0.484	0.714	1.000		
SO_4^{2-}	0.450	0.873	0.868	0.888	0.528	0.753	0.948	1.000	
HCO_3^-	0.666	0.331	0.485	0.522	0.657	0.344	0.202	0.240	1.000
(b) 富士山南東麓									
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Si	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Na^+	1.000								
K^+	0.895	1.000							
Mg^{2+}	0.620	0.686	1.000						
Ca^{2+}	0.815	0.820	0.868	1.000					
Si	-0.083	0.130	0.269	0.151	1.000				
Cl^-	0.383	0.435	0.220	0.345	0.389	1.000			
NO_3^-	0.003	0.229	0.190	0.172	0.524	0.674	1.000		
SO_4^{2-}	0.705	0.597	0.695	0.621	-0.056	0.379	0.169	1.000	
HCO_3^-	0.690	0.687	0.652	0.767	-0.172	-0.064	-0.139	0.355	1.000

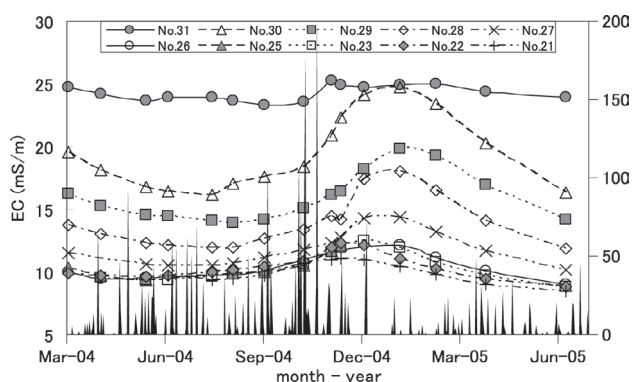


図 13 吉原地域湧水の電気伝導度の月変化と降水量.

Fig. 13 Monthly variations in electric conductivity of water samples and rainfall in the Yoshihara area.

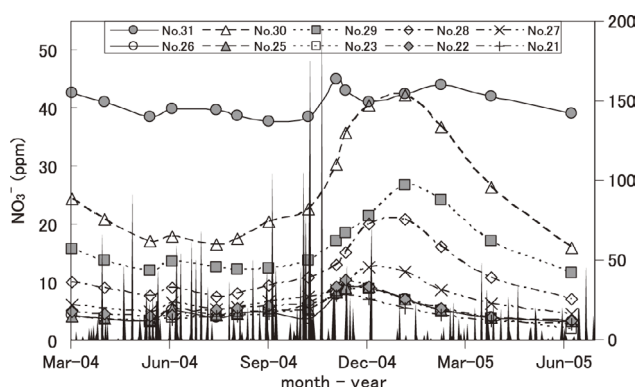


図 14 吉原地域湧水の NO_3^- 濃度の月変化と降水量.

Fig. 14 Monthly variations in NO_3^- concentration of water samples and rainfall in the Yoshihara area.

る相関行列を示し、比較のために表 4 には南東麓における相関行列を示す。両者は非常に対照的で、南西麓においては NO_3^- 、 SO_4^{2-} などと K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} との相関性が高く、南東麓においては Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の間での相関性がとても高く、 HCO_3^- との相関性も高いことがわかる。この南東麓の傾向は、明らかに水-岩石反応による各成分の溶出であることが推測できるが、南西麓においては NO_3^- や SO_4^{2-} との相関性の高さからも、水-岩石反応以外の影響も考慮に入れる必要があることがわかる。

陽イオン成分については、(3) 式の硝化反応による pH の低下により、水-岩石反応が促進されることによる溶出や、 H^+ の増加により、粘土鉱物との間によるイオン交換反応によつての溶出が考えられる。

ここで、図 13 に南西麓吉原地域湧水の電気伝

導度および各溶存成分濃度の月変化と降水量の関係を示す。電気伝導度の図が全体の特徴をよく表していて、10 月の日降水量が 100 mm を超える大雨が続いた期間の直後に、地下水中の陰イオン、陰イオン濃度が大きく上昇していることがわかる。ただし吉原地域の最も東に位置する長学寺 (No. 31) は年間を通じて非常に高い値であった。電気伝導度の図と対応するように、大雨の後に濃度が大きく上昇するのは Na^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- (図 14)、 SO_4^{2-} であり、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 濃度も上昇傾向が認められた。以上より、地下水の硝酸性窒素汚染がある吉原地域においては、大雨の直後に汚染が顕著に増大するといえる。

2-3) Cl^-/Na^+ 比, $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比

ここまでは水-岩石反応と肥料の地下水水質に対する影響についての議論をしてきたが、これらの適用ができない成分もある。それは Cl^- で、 Cl^-

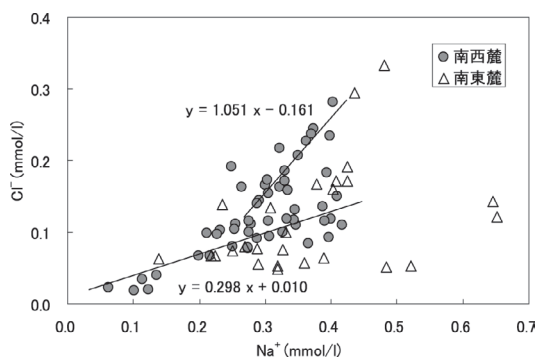


図 15 富士山南麓地下水の Na^+ 濃度と Cl^- 濃度の関係.

Fig. 15 Relationship between Na^+ concentration and Cl^- concentration of water samples in the Mt. Fuji southern foot area.

は岩石中にはほとんど入っておらず、その起源としては風送塩や雨水による自然由来のものや、人為的汚染によるものがほとんどであると考えられる。風送塩や雨水であればそれぞれ海水中、雨水中の組成比、人間活動によるものであれば Cl^-/Na^+ （モル比）はほぼ1.0で混入するであろう。日本の雨水および標準的な海水の平均組成によると、 Cl^-/Na^+ 比はそれぞれ0.65および1.18である（北野，1992）。図15に Na^+ 濃度と Cl^- 濃度の関係を示す。表4の相関係数にもあるように、両者には正の相関関係が認められ、南西麓において2種類の相関があることがわかる。南東麓においてもばらつきは大きいが、このような傾向はみてとれる。

まずひとつの相関は下底部にプロットされているデータで、 Cl^-/Na^+ 比は0.30となっている。これらの試料の、 Cl^- の起源として雨水や風送塩など自然由来が考えられ、地下水の流下に伴いほぼ均一に混入していったと考えられる。そして、水-岩石反応によって Na^+ は地下水中に溶出するために、その影響で Cl^-/Na^+ 比は Na^+ 側に大きく偏り、0.30という値になると考えられる。

2つ目の相関は下底部のプロットの途中から枝分かれしたようなプロットになっており、 Cl^-/Na^+ 比は1.05である。これらは、汚染の影響ではないと考えられる Cl^-/Na^+ 比が0.30となって

いるプロットの途中から枝分かれしているように濃度が上昇していることから、明らかに地下水の流下の途中で汚染による NaCl の混入があることが推測される。 Cl^-/Na^+ 比は1.05ということから、風送塩あるいは人為的汚染が考えられ、雨水については Cl^-/Na^+ 比が離れていることと、分析結果からももとの濃度が低いために除外できると考えられる。このようにプロットされた試料をとりだしてみると、富士宮市街地周辺のNo. 13、吉原地域のNo. 23～31、沼津市のNo. 33である。そのなかでも、吉原地域東側の硝酸性窒素汚染が大きい試料で高濃度となっていることがわかった。よって、 NaCl の混入が推測される試料のなかにも異なる性質をもつものがあるといえる。

まず富士宮市街地周辺のNo. 13（出水不動）は、その周辺にもいくつか湧水があるにもかかわらず1点のみ特異的に濃度が高い。このことから、広範囲に影響を与える風送塩ではなく、なんらかの人為的な汚染が考えられる。図6の土地利用図より、No. 13周辺は茶畑となっているが、サンプリング時の調査では周辺は住宅地や公園も整備されていた。

一方の吉原地域では特異的に濃度の高い地点があるのではなく、その地域にわたって高濃度となっている。2003年の調査においては吉原地域に流れる滝川より東側のNo. 23～31で高濃度になっていて、2004年においてもその傾向があったが、高濃度になるのはさらに東のNo. 27（題唱寺）からであった。このように吉原地域では NaCl 汚染があると考えられる。

また、鈴木ほか（1984）は、 Na^+/Cl^- と $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ の比が小さいほど汚染が進行しており、よい汚染指標となることを示している。すなわち、 Cl^- は岩石中にほとんど含まれないため汚染のパラメータとし、 Na^+ は岩石との反応によって溶出、 HCO_3^- は岩石と CO_2 との接触の結果できたイオン種であるという根拠に基づいている。図16にこの指標の図を示し、人為的（ NO_3^- ）汚染があると推測される試料と分けてプロットした。プロットの傾向は汚染が最大を意味する $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- = 0$ および $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1$ に収束していき、

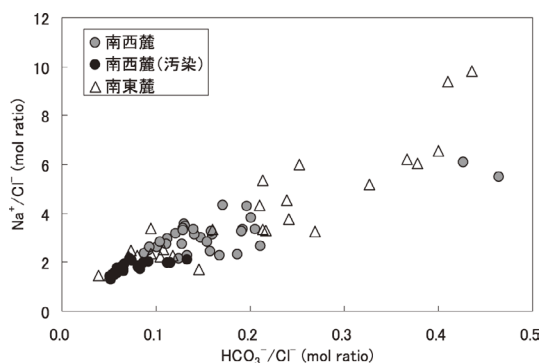


図 16 富士山南麓地下水の $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ と Na^+/Cl^- の関係。

Fig. 16 Relationship between $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ and Na^+/Cl^- of water samples in the Mt. Fuji southern foot area.

数値が大きくなるほどある程度の幅をもっていることがわかる。また、汚染があると推測される試料はプロットが収束していく先端部にプロットされ、汚染を示すよい指標になることを裏付けている。プロットのされ方が直線状ではなくある程度の幅をもっているのは、汚染の要因として Cl^- のみでなく、前述のように NO_3^- 汚染による HCO_3^- 濃度の減少もあるためであろう。以上より、この汚染の指標の図は、これら 2 種類の Cl^- 汚染と NO_3^- 汚染を示すことができると考えられる。

2-4) 南東麓地下水の各溶存成分

図 17 に南東麓における試料を採取した標高と各溶存成分濃度の関係を示す。各図より、全体として標高の低下と各溶存成分濃度との間には明瞭な相関関係がみられない。なかでも比較的よい相関関係があるのは Si と Cl^- である。 Si は水-岩石反応によって溶出する成分であり、標高の低下とともに濃度が上昇する傾向があることはその進行度を表している。一方の Cl^- に関しては、標高の低下が海岸線からの距離の短小と対応しているため、風送塩の影響と考えられる。一方で、陽イオン成分には標高との相関関係はほとんどみられず、各成分濃度が低いため愛鷹や箱根の地下水の影響を受けていると考えられる試料 (No. 37, 38) を除くと Na^+ と K^+ ではやや上昇傾向があ

るが、 Mg^{2+} と Ca^{2+} は標高にかかわらず濃度がほぼ一定かやや減少傾向であった。1) 節で述べたように南東麓においては富士山系の地下水にも御殿場市北部と黄瀬川流域の 2 種類があると推測されるためその影響が考えられる。とくに御殿場泥流低部に位置する御殿場北部の試料 (No. 42) の Na^+ 濃度はとくに高い。ただし Cl^- 濃度はとても低く、かなり内陸に位置するために風送塩の影響も小さいと考えられる。これは、御殿場市北部の帯水層が安山岩を中心とした鉱物で成り立っているため、黄瀬川流域のものとは異なる地下水流動系であることを示している。この御殿場市北部の試料は、津屋 (1971) による新富士玄武岩溶岩流の分析結果に比べて Na と K の割合が大きく、 Ca と Mg の割合が小さくなっている。

VII. 結 論

富士山南西部・南東部地域の地下水試料の主成分元素濃度分析、窒素同位体分析を行い、以下の結論を得た。

1) 地下水水質

・陽イオン濃度、 H_4SiO_4 濃度は標高の低下とともに高くなる傾向があるが、山麓や地域によって特異的な傾向を示す。この高くなるおもな原因として水-岩石反応の進行が考えられる。

・風送塩や人為的汚染によって NaCl の混入を受けている地下水もあり、 Na^+/Cl^- 比と $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比がよい指標となる。

2) 窒素汚染

2-1) 南西麓地下水

・南西麓地下水は硝酸性窒素汚染が顕在化しており、とくに富士市吉原地域では西から東にかけて NO_3^- 濃度の顕著な上昇があり、大雨の後に汚染が増大する。

・窒素同位体データ、地下水水質より硝酸性窒素の汚染源は裾野地域に広く分布している茶畑に散布された無機化学肥料と考えられる。

2-2) 南東麓地下水

・南東麓地下水は高高度地域と低高度地域で溶存成分濃度が大きいなど特異な傾向があるが、顕著な窒素汚染はみられない。

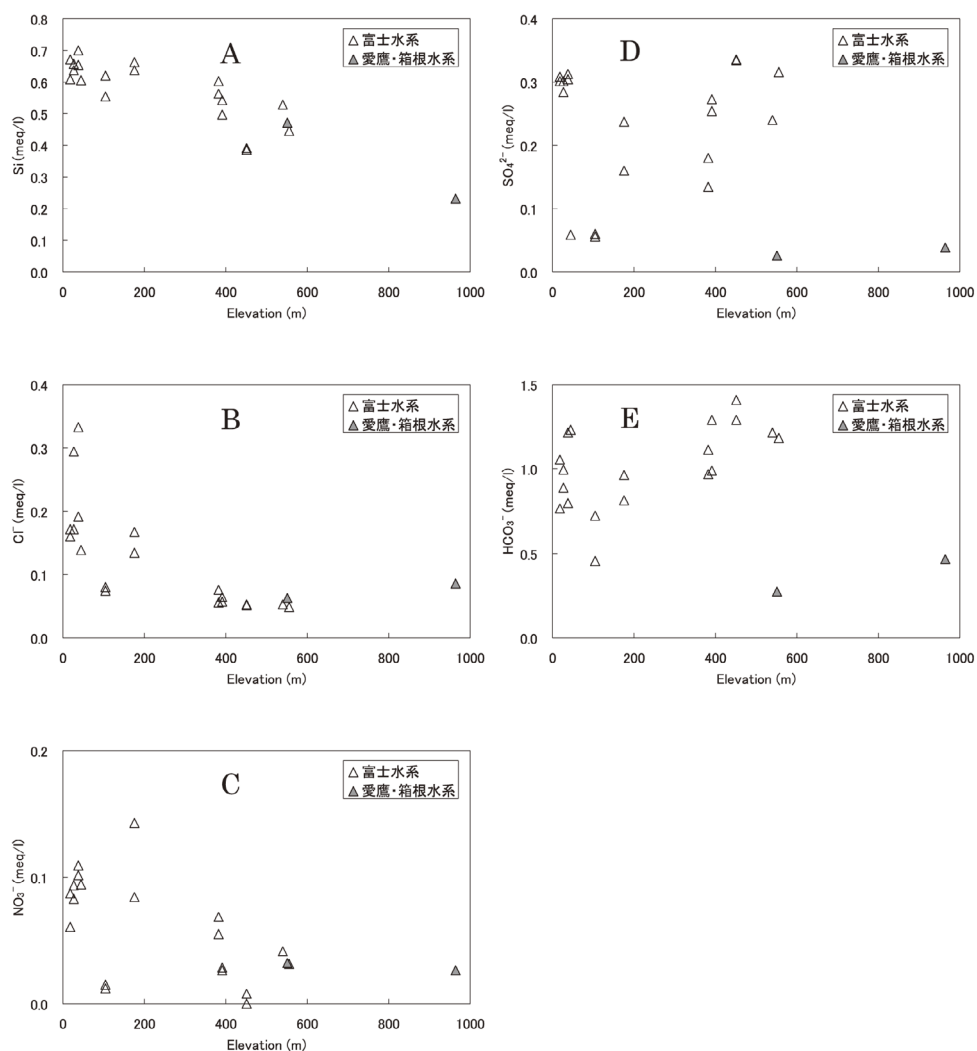


図 17 富士山南東麓地下水の湧出高度と各種元素濃度の関係。

Fig. 17 Relationship between elevation and each elemental concentration of water samples in the Mt. Fuji southeastern foot area.

A: Si, B: Cl⁻, C: NO₃⁻, D: SO₄²⁻, E: HCO₃⁻.

3) 地下水流動系

3-1) 南西麓地下水

・南西麓の地下水流動系には、潤井川沿いと富士山体の裾野方向に流下する2つの流動系が存在し、下部ではそれらの水系の地下水が混合している。

・吉原地域の地下水と今泉湧水群は和田川付近

を境として分水界が存在し、吉原地域は富士山の裾野方向から流動してきた污染を受けていない地下水と、愛鷹由来でかつ高濃度の硝酸性窒素污染を受けた地下水が混合しているために西から東へ連続的に水質が変化している。

3-2) 南東麓地下水

・南東麓の地下水流動系には、富士山系である

御殿場市北部の御殿場泥流上と三島溶岩流沿いの流動系があり、後者には愛鷹・箱根山系由来の地下水が混入している。

謝 辞

富士宮市の湧水について丁寧に説明をしてくださり、諸々の資料、地図を提供していただいた富士宮市役所環境経済部水とみどりの課自然保全係の秋葉貴広主査に深く感謝致します。また、富士山頂の湧水、雨水の採取を快く承諾してくださいました富士山本宮浅間大社殿と、山頂で案内をしてくださった奥宮の西口様に深く感謝致します。匿名査読者2名の方からは、大変有意義なコメントをいただき、それをもとに原稿を大幅に修正致しました。記して深謝申し上げます。

文 献

- 新井秀子・田瀬則雄 (1992): 安定同位体を利用した河川浄化機能の評価。環境科学会誌, **5**, 249-258. [Arai, H. and Tase, N. (1992): Evaluation of self-purification in Tamagawa Josui channel by ^{15}N natural isotope. *Environmental Science*, **5**, 249-258. (in Japanese with English abstract)]
- 藤原敏郎 (1999): 茶園からの硝酸性窒素流出量の低減。月刊水, **41**(13), 23-30. [Fujiwara, T. (1999): The reduction of nitrate nitrogen outflow from tea gardens. *Gekkan Mizu*, **41**(13), 23-30. (in Japanese)*]
- Heaton, T.H.E. (1984): Sources of the nitrate in phreatic groundwater in the western Kalahari. *Journal of Hydrology*, **67**, 249-259.
- 平田健正 (1996): 安定同位体存在比を利用した硝酸性窒素の起源探査。地下水技術, **38**, 48-56. [Hirata, T. (1996): Origin survey of nitrate nitrogen using stable isotope abundance ratio. *Journal of Ground Water Technology*, **38**, 48-56. (in Japanese with English abstract)]
- Hübner, H. (1986): Isotope effects of nitrogen in the soil and biosphere. in *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. 2. The terrestrial Environment, B edited by Fritz, P. and Fontes, J.Ch., Elsevier, Amsterdam, 361-425.
- 井伊博行・平田健正・松尾 宏・田瀬則雄・西川雅高 (1997): 茶畑施肥に由来する硝酸性窒素と周辺表流水に及ぼす影響。土木学会水工学論文集, **41**, 575-580. [Ii, H., Hirata, T., Matsuo, H., Tase, N. and Nishikawa, M. (1997): Nitrate nitrogen due to fertilizer application to tea plantation and its effect on ambient surface water. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, **41**, 575-580. (in Japanese)]
- 神原信一郎 (1929): 富士山の地質と水理。博進館, 482p. [Kanbara, S. (1929): *Geology and Hydrology of Mt. Fuji*. Hakushinkan, 482p. (in Japanese)]
- 環境省 (2005): 平成 17 年版環境白書。280p. [Ministry of the Environment (2005): *Annual Report of the Environment in Japan 2005*. 280p. (in Japanese)]
- 北野 康 (1992): 化学の目でみる地球の環境—空・水・土—。裳華房, 152p. [Kitano, Y. (1992): *Earth's Environment in the Eyes of Chemistry: Air, Water and Soil (Kagaku No Me De Miru Chikyū No Kan-kyō)*. Shokabo, 152p. (in Japanese)*]
- 国土地理院 (1982a): 20 万分の 1 土地利用図 甲府。[The Geographical Survey Institute (1982a): *1:200000 Land Use Map, Kofu (20 Manbun No 1 Tochi Riyozyu Kofu)*. (in Japanese)*]
- 国土地理院 (1982b): 20 万分の 1 土地利用図 静岡。[The Geographical Survey Institute (1982b): *1:200000 Land Use Map, Shizuoka (20 Manbun No 1 Tochi Riyozyu Shizuoka)*. (in Japanese)*]
- 長瀬和雄 (2000): 地下水系の諸相—富士山の地下水と人間生活—。(財) 日本科学協会編: 「海洋科学から見る水惑星の多角的視点にたつ基礎研究」研究報告書。日本財団図書館, 202-238. [Nagase, K. (2000): Various aspects of groundwater and human activity. in *Basic Study on Aqua Planet from Ocean Science* edited by The Japan Science Society, Nippon Foundation Library, 202-238. (in Japanese)]
- 中井信之 (1996): 三島市及び周辺地下水の化学成分・同位体組成の特徴とその涵養源。三島市地下水涵養方策研究報告書 [その 2], 13-36. [Nakai, N. (1996): Characteristic features of chemical and isotopic compositions and source of groundwater in Mishima City and surrounding area. *Research Report No. 2 on Source of Groundwater in Mishima City*, 13-36. (in Japanese)]
- 落合敏郎 (1994): 東富士の地下水系と地下水流出 (I)。地下水技術, **36**(9), 1-12. [Ochiai, T. (1994): Groundwater system and effluence of ground-water of the east ride of Mt. Fuji. (1). *Journal of Groundwater Technology*, **36**(9), 1-12. (in Japanese with English abstract)*]
- 小倉紀雄・石野 哲・丹下 勲 (1986): 多摩丘陵表面流出水中の窒素化合物の挙動。陸水学雑誌, **47**, 17-26. [Ogura, N., Ishino, T. and Tange, K. (1986): Behavior of nitrogen compounds in surface runoff water at small watershed of Tama Hill Jpn. *Japanese Journal of Limnology*, **47**, 17-26. (in Japanese with English abstract)]
- 朴 光来・山本洋司・中西康博・熊澤喜久雄 (1996): アンモニウム溶液よりのアンモニア揮散に伴う残留アンモニア態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化。日本土壤肥科学雑誌, **67**, 314-316. [Park, K-L, Yamamoto, Y., Nakanishi, Y. and Kumazawa, K. (1996): Variation of ammonium in solution due to the evaporation of ammonia. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **67**, 314-316. (in Japanese with English abstract)]
- 佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・高山茂美 (1997): 富士山周辺の湧水および地下水の水質について。日本水文科学会誌, **27**(1), 17-25.

- [Sato, Y., Yasuike, S., Kono, T., Kitagawa, M., Suzuki, Y. and Takayama, S. (1997): Water qualities of spring and groundwater around Mt. Fuji. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **27**(1), 17-25. (in Japanese with English abstract)]
- 鈴木孝雄・平野富雄・大木靖衛 (1984): 富士五湖の水質. 神奈川県温泉地学研究所報告, **15**(5), 109-114. [Suzuki, T., Hirano, T. and Ohki, Y. (1984): Water chemistry of Fuji five lakes. *Bulletin of the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture*, **15**(5), 109-114. (in Japanese with English abstract)]
- 静岡新聞社 (2002): 静岡県の湧き水 100. 128p. [Shizuoka News Paper Publishing Company (2002): *Spring Water 100 in Shizuoka Prefecture (Shizuoka No Wakimizu 100)*. 128p. (in Japanese)*]
- 田瀬則雄 (1996): 地下水中の硝酸性窒素濃度と窒素安定同位体存在比一汚染源の同定は可能か一. 月刊水, **38**, 70-78. [Tase, N. (1996): Nitrate nitrogen concentration and abundance ratio of nitrogen stable isotope in groundwater. Identification of pollution source. *Gekkan Mizu*, **38**, 70-78. (in Japanese)*]
- 津屋弘達 (1971): 富士山の地形・地質. 国立公園協会編: 富士山—富士山総合学術調査報告書—. 富士急行, 1-131. [Tsuya, H. (1971): Geography and geology of Mt. Fuji. in *Scientific Investigation on Mt. Fuji (Fujisan Sogo Gakujutsu Chosa Hokokusho)* edited by The Natural Park Association of Japan, Fuji Kyuko, 1-131. (in Japanese)*]
- 綿引正則・小島勝宏・相田徳二郎 (1981): 硝酸塩汚水を浸透した湛水土壤からの脱窒. 日本土壤肥科学雑誌, **52**, 420-426. [Watanuki, M., Kojima, K. and Aida, T. (1980): Denitrification in submerged soil percolated with nitrate sewage. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **52**, 420-426. (in Japanese with English abstract)]
- 山本莊毅 (1971): 富士山とその周辺の陸水. 国立公園協会編: 富士山—富士山総合学術調査報告書—. 富士急行, 151-209. [Yamamoto, S. (1971): Spring water in Mt. Fuji and its surrounding area. in *Scientific Investigation on Mt. Fuji (Fujisan Sogo Gakujutsu Chosa Hokokusho)* edited by The Natural Park Association of Japan, Fuji Kyuko, 151-209. (in Japanese)*]
- 山本莊毅 (1992): 富士山はゆたかな湧き水の宝庫である. 諏訪書院, 197-217. [Yamamoto, S. (1992): *Mt. Fuji is a Treasure House of Spring Water (Fujisan Ha Yutaka Na Wakimizu No Hoko De Aru)*. Suwa Shoin, 197-217. (in Japanese)*]
- 山本洋司・朴 光来・中西康博・加藤 茂・熊澤喜久雄 (1995): 宮古島の地下水中の硝酸態窒素濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値. 日本土壤肥科学雑誌, **66**, 18-26. [Yamamoto, Y., Park, K-L., Nakanishi, Y., Kato, S. and Kumazawa, K. (1995): Nitrate concentrations and $\delta^{15}\text{N}$ Values of Groundwater in the Miyakojima Island. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **66**, 18-26. (in Japanese with English abstract)]

* Title etc. translated by T.A.