

溶存アルゴンからみた地下水の動き (1)

吉岡 龍馬・出井 紘・富野 孝生
田中 稔章・豊田 恵聖・高橋 正美

RESEARCHES ON MOVEMENT OF GROUND WATER BY MEANS OF DISSOLVED ARGON (1)

By Ryuma YOSHIOKA, Hiroshi DEI, Takao TOMINO, Toshiaki
TANAKA, Yoshimasa TOYODA and Masami TAKAHASHI

Synopsis

The authors analyzed dissolved constituents of 35 wells to investigate ground water movement in the Iwakura area, Kyoto city.

The results were as follows:

- (1) The chemical composition of well waters was of $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ types.
- (2) The higher concentration of dissolved major inorganic constituents was detected in the area enclosed by contour lines between 110 and 130 meters, particularly an eastern part of the Nagatani stream.
- (3) The pattern of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ distributions was similar to that of major inorganic constituents, but the pattern of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ distribution was completely similar to that of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was not present in almost all well waters.
- (4) The dissolved oxygen estimated on basis of dissolved argon was considerably unsaturated in well waters of eastern part of the Nagatani stream.
- (5) The dissolved nitrogen of a great number of wells was considerably unsaturated, and denitrification was found in a small number of wells.
- (6) By using simultaneous measurement of dissolved argon, the effective velocity of ground water ranged from 1.7 to 3.0 meters per day, corresponding to different hydraulic gradients.

1. は じ め に

水文学や水収支あるいは水資源の立場からも、地下水に対する関心は、近年増々強まってきており、学問的にも、また応用的にも、地下水の循環、流動の実態の解明が強く望まれる所である。これらの調査・研究も近年アイソトープ技術を利用し、かなり活発に実施されているが、それらの研究例の大多数は地下水の年令として、比較的高いものを対象としている。

そこで筆者らは地下水の年令として極めて若いものの流動過程を明らかにする目的で、多数の井戸が残存し、しかも地質構造も比較的単純な京都市岩倉地域の地下水を研究対象とし、溶存アルゴンをトレーサーとする地下水の流速測定を試みるとともに、地下水の化学組成についても、若干の知見を得たので、簡単に報告する次第である。

2. 地形学のおよび地質学的概要

本地域は京都市の北部にあり、岩倉村誌¹⁾によれば「東山の山地中、所々石灰岩を包蔵し、西南の低地には、粘土質の層を成すも、全村おおむね砂質壤土にして耕作に適する。されど南方松ヶ崎北麓にある低地、

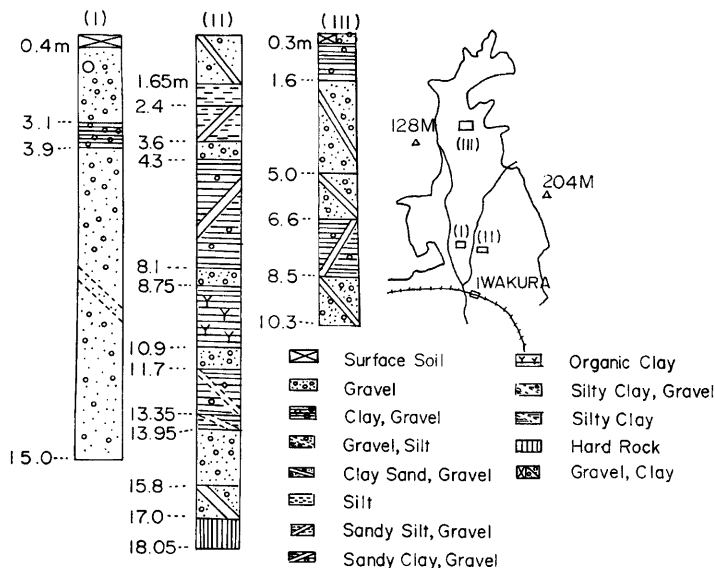


Fig. 1. Geologic column by boring

排水に便ならず。土地の傾斜東北西の三方に山をめぐるし、南方に向って低い」とある。

また、岩倉の実態²⁾によれば、「急傾斜による地下水の湧出多く、鞍馬電鉄（現京福電鉄）の線路の南側には、腰までのめり込む湿田も少なくなく、地下水浅く、湿潤性にとむ」等々が記されている。

Fig. 1 に本地域の地質柱状図を示す。(I)の柱状図は明徳小学校³⁾のもので、地下水15m以浅では砂礫層が主体であり、岩倉川の旧河川堆積物（沖積層）が分布している。(II)は左京区役所岩倉出張所⁴⁾のもので、基盤は凝灰岩質の砂岩頁岩を伴うチャートからなり、上部には風化崩出した黄褐色の砂礫粘土が堆積しており、またこの砂礫粘土層の拡張性は認められない。(III)は村松保育所⁵⁾のもので、基盤は凝灰岩質の砂岩頁岩またはチャートからなり、上部層は風化崩出した褐色の粘土質砂礫が主体である。

以上より、本地域の地層としては、地表面より10～15mのシルト混りの砂礫層が全体に分布していると考えられ、その中には特別の不透水層を考える必要はないであろう。したがって対象としている地下水は不圧地下水と考えてよいであろう。

3. 試料水の採取法および分析法

Fig. 2 に井戸および水質区分の分布状況を示す。本地域のほとんどの家庭では、家庭用水として上水道が利用されているが、旧家にはかつて家庭用水として使用していた井戸がよく保存されており、研究対象とした井戸35箇所中7箇所（No. 10, 31, 33, 35, 52, 58, 83.）は現在でもなお、家庭用水として使用されているが、No. 28, 36, 39, 43, 64, 67, 72, 80, 84, 102 の井戸は使用されていない。その他の井戸は生活雑水（洗濯・風呂など）として現在も一部使用されている。

3.1 試料水の採取法

採水は降雨のない天候が一週間程度続いたのちに、**Fig. 2** に示した地点でおこなった。No. 33, 76, 101 の井戸はポンプを使用して採水を、他の井戸はすべて採水器で直接採取した。すなわち、無機主要成分用の試水は 250ml のポリビンに採取し、栄養塩類用の試水も 250ml ポリビンに HgCl_2 溶液を 4ppm になるよ

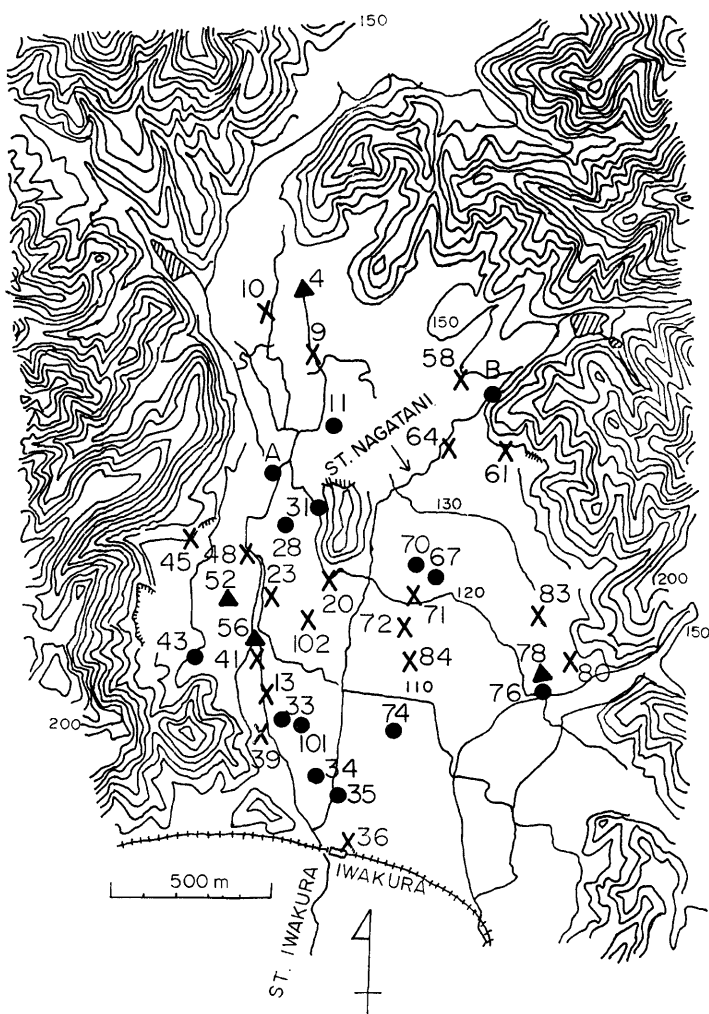


Fig. 2. Map showing sample localities and classification of ground water quality; ●: $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, ▲: $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ and X: $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$.

うに入れる。溶存気体用の試水は極力泡立ないように静かに 500 ml ガラスビンに採取し、シリコンゴム栓で気泡の入らないように完全に密閉し、氷水の入ったアイスボックス中に沈ませ、実験室まで搬入しすみやかに分析を行う。なお、同一試水の現場での溶存ガス量と冷却状態で実験室に搬入した試水中のそれとは全く一致していた。

3.2 分 析 法

3.2.1 無機主要成分⁶⁾

pH : 比色法, Ca^{2+} ・ Mg^{2+} : EDTA 法, Na^{+} ・ K^{+} : 炎光光度法, Cl^{-} : チオシアン酸水銀による比色法, HCO_3^{-} : B. C. P. 指示薬で塩酸による滴定法, SO_4^{2-} : クロム酸バリウム酸懸濁液による比色法, Soluble SiO_2 : モリブデン酸アンモニウムによる比色法

3.2.2 栄 養 塩 類⁷⁾

NO_2^{-} : スルファニールアシドによる比色法, NO_3^{-} : Cd アマルガムを用いて NO_3^{-} を NO_2^{-} に還元後スルファニールアミドによる比色法, NH_4^{+} : 次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いて NH_4^{+} を NO_2^{-} に酸化後スルファニールアミドによる比色法, PO_4^{3-} : モリブデン酸アンモニウムによる比色法

3.2.3 溶 存 ガ ス⁸⁾

溶存酸素: 試水中で大理石と塩酸で二酸化炭素を発生させ、その二酸化炭素に伴って追い出されてくる溶存ガスを、水酸化ナトリウム溶液をみたしたガスビュレットに集め、全炭酸以外の溶存ガスの全体積を測り、次にピロガロール溶液で酸素を吸収させ、その体積減量を溶存酸素量とする。

溶存窒素・アルゴン: 上記のピロガロール溶液による吸収後のガスをガスクロマトグラフィで定量する。カラムはモレキュラーシーブ 13X, 4m, キャリヤガスは酸素を使用する。

4. 結果および考察

4.1 無機主要成分の分布

各井戸水中の溶存化学成分とガス成分の分析結果を Table 1 に示した。無機主要成分 7 種類のイオン間の当量比を使用した水質区分 (Key diagram) から、本地域の水質を分類し、地図上に示したのが Fig. 2 である。 HCO_3^{-} - K^{+} ・ Ca^{2+} 型の水は本地域にはみられなかった (但し、1978年1月の予備調査時の90試料中2試料はこの型の水であった)。 SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - K^{+} ・ Na^{+} 型に入る井戸は4例 (No. 4, 52, 56, 78) と少なく、大半の井戸は、 HCO_3^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} と SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - K^{+} ・ Na^{+} 型に入り、河川水 A, B はいずれも HCO_3^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型に分類される。

井戸の使用状態により水質分布状況を見ると、生活用水に使用している井戸 (No. 10, 31, 33, 35, 52, 58, 83) には水質区分上明確な傾向はみられないが、現在不使用の井戸10箇所中3箇所 (No. 28, 43, 67) は HCO_3^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型を示すが、他の7箇所 (No. 36, 39, 64, 72, 80, 84, 102) は SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型となり、不使用の井戸には SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型が多くみられる。一部使用の井戸では HCO_3^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型に入る井戸は6箇所 (No. 11, 34, 70, 74, 76, 101), SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型に入る井戸は9箇所 (No. 9, 13, 20, 23, 41, 45, 48, 61, 71), SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - K^{+} ・ Na^{+} 型には3箇所 (No. 4, 56, 78) となり、一部使用の場合にも、 SO_4^{2-} ・ Cl^{-} - Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 型の方が多く存在する。

Na^{+} : 最小値は 1.5mg/l (No. 10), 最大値は 36.8mg/l (No. 48), 平均値は 16.1mg/l となり、20mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 20, 35, 41, 48, 52, 56, 61, 71, 72, 76, 78 であり、これらの大部分は等高線 110~120m の範囲に分布している。10mg/l 以下の濃度を示す井戸は山際に近い所に多く分布する傾向がみられる。

K^{+} : 最小値は 0.3mg/l (No. 10), 最大値は 13.8mg/l (No. 72), 平均値は 4.1mg/l となり、5mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 4, 41, 52, 56, 64, 71, 72, 76, 78, 80, 84 であり、 Na^{+} と同様な分布を示している。つまり山際は比較的低濃度の井戸が多く、等高線 110~120m の範囲には高濃度の井戸が多く分布している。

Mg^{2+} : 最小値は 0.6mg/l (No. 10), 最大値は 9.0mg/l (No. 20), 平均値は 5.2mg/l となり、5mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 20, 31, 33, 35, 36, 43, 45, 48, 56, 61, 70, 71, 72, 74, 76, 78, 83, 84 となり、長谷川を境にして東側の方の井戸は比較的高濃度の傾向を示している。また上流部 (北側) ではほとんどの井戸は 5mg/l 以下であった。

Table 1 Chemical composition of natural waters in the Iwakura area.

Locality No	Ground Water Level	Temp (°C)	pH	Ar (ml/l)	O ₂ (ml/l)	N ₂ (ml/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Soluble SiO ₂ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Date Collected
9	125.7	13.1	5.9	0.43	4.94	14.1	12.5	1.3	2.9	16.7	27.4	19.6	11.4	11.9	0	4.50	0.55	0.02	1979.1.11
10	128.8	9.0	6.0	0.50	7.46	16.6	1.5	0.31	0.6	1.9	6.9	2.6	2.4	9.2	0	0.33	0.47	0.02	"
11	—	12.8	7.3	0.44	4.23	15.5	3.6	1.2	0.8	19.9	74.0	4.6	2.6	20.3	0	0.08	0.68	0.04	"
13	108.7	11.6	6.0	0.36	4.06	11.8	13.2	4.1	4.2	16.5	37.6	16.2	17.0	19.9	0	3.70	0.51	0.20	"
20	116.9	11.5	6.1	0.45	5.45	15.1	28.0	3.0	9.0	20.2	17.6	34.0	8.7	13.0	0	9.75	0.61	0.06	"
28	117.5	12.4	6.6	0.45	2.63	16.5	11.8	2.3	3.8	13.7	50.9	11.7	12.4	11.5	0	0.41	0.58	0.20	"
31	115.9	14.0	5.8	—	—	—	—	2.2	8.6	14.5	42.9	12.5	15.6	13.7	0	1.08	1.66	0.08	"
34	107.9	14.9	6.2	0.42	4.85	14.9	14.0	3.4	1.8	19.7	66.4	12.7	17.6	12.3	0	0.93	0.85	0.17	"
35	108.9	11.1	6.2	0.43	2.85	17.8	26.0	3.7	6.8	37.3	129.2	21.2	17.6	10.0	0	1.17	0.68	0.10	"
36	108.1	11.9	6.1	0.43	4.10	15.8	14.4	1.6	7.6	26.4	68.9	18.6	30.4	11.0	0	1.02	0.58	0.07	"
39	108.5	11.0	6.0	0.39	4.41	14.5	8.0	2.3	3.7	8.4	25.7	10.6	10.2	16.6	0	1.20	0.89	0.10	"
41	117.5	12.1	6.5	0.41	4.69	17.0	20.0	6.4	4.9	13.5	40.2	19.4	15.8	17.0	0	5.60	0.69	0.40	"
43	119.1	12.0	7.5	0.49	5.07	13.1	6.4	3.0	6.6	22.5	64.0	4.6	11.0	9.2	0	0.97	0.66	0.08	"
45	130.0	11.9	7.0	0.42	8.54	16.2	2.5	1.0	8.2	0.7	9.1	5.2	0.7	8.2	0.005	0.65	0.84	0.01	"
48	120.6	13.8	7.2	0.40	8.06	13.9	36.8	4.2	6.6	26.7	48.5	60.3	27.6	10.4	0	1.66	0.88	0.06	"
52	123.6	12.8	6.4	0.42	4.19	14.8	30.4	5.0	3.6	18.1	45.7	32.0	27.3	11.4	0	0.47	0.68	0.17	"
56	116.7	13.5	6.0	0.50	4.05	13.3	27.5	11.0	6.0	16.5	25.3	31.4	24.4	22.3	0	4.10	0.85	0.58	"
58	133.5	13.9	6.2	0.41	7.93	13.3	13.2	3.5	3.8	10.0	26.7	18.6	12.2	6.2	0	1.72	0.41	0.15	"
64	132.8	13.0	6.0	0.39	7.04	14.7	12.1	5.7	3.9	9.3	7.2	15.1	15.3	13.4	0	5.10	0.79	0.12	"
101	106.7	13.5	6.2	0.43	5.44	14.8	9.2	2.6	3.6	18.6	55.0	10.3	15.8	7.9	0	0.35	0.52	0.06	"
A	—	9.1	7.3	0.48	7.26	17.0	3.3	0.72	2.6	9.3	36.9	3.6	5.0	10.6	0.032	0.19	0.86	0.04	"
4	126.0	12.0	6.6	0.38	5.07	16.6	17.2	10.1	2.6	7.8	17.9	20.3	19.8	9.8	0.007	1.86	0.57	0.05	1979.1.23
23	—	14.0	6.0	0.41	6.47	14.5	10.8	2.7	3.3	12.0	29.5	19.4	15.3	10.8	0	2.18	0.66	0.12	"
33	106.3	12.0	6.2	0.22	4.47	8.4	13.0	4.0	5.7	12.1	69.2	14.4	19.8	12.2	0	1.80	1.03	0.21	"
61	145.4	12.5	6.8	0.42	5.80	16.1	23.8	2.6	7.8	20.5	26.9	54.6	17.4	22.1	0.002	2.74	0.60	0.31	"
67	119.5	8.3	7.3	0.36	2.95	16.4	12.9	2.5	3.6	35.4	107.2	13.8	21.0	9.0	0.001	0.57	0.76	0.20	"
70	119.1	11.3	6.4	0.35	3.57	16.0	10.6	3.1	5.9	18.6	74.6	12.5	14.6	17.8	0	0.58	0.80	0.14	"
71	119.0	10.1	6.1	0.44	1.96	16.8	21.6	7.6	5.8	18.7	57.4	30.4	20.4	12.9	0.006	2.58	0.72	0.57	"
72	119.0	11.9	6.4	0.33	3.25	15.6	28.5	13.8	5.7	18.3	62.2	49.9	20.4	15.2	0	1.04	0.92	0.30	"
74	—	12.2	6.4	0.44	1.50	17.9	14.9	2.3	8.4	32.6	121.7	16.6	21.5	14.4	0	0.14	1.65	0.08	"
76	—	9.1	6.9	0.40	2.10	15.5	21.5	10.5	7.0	17.3	82.3	24.9	22.6	16.9	0	0.54	0.81	0.23	"
78	129.1	11.1	6.2	0.43	2.62	17.6	31.8	5.7	6.7	18.7	90.8	41.1	19.7	15.7	0.004	0.22	0.72	0.07	"
80	128.2	11.2	6.3	0.42	5.64	16.0	10.8	7.2	6.5	11.1	30.0	15.6	19.8	9.6	0	1.57	1.76	0.06	"
83	128.6	8.1	6.8	0.45	6.73	16.3	11.0	3.7	6.5	15.4	58.2	12.0	13.0	16.6	0.004	1.98	0.75	0.05	"
84	114.4	9.0	6.5	0.39	3.75	17.7	18.0	6.4	6.1	15.7	73.9	19.6	16.4	12.8	0	1.12	0.99	0.08	"
102	112.3	11.8	6.6	0.38	7.92	14.7	15.6	4.5	4.3	13.1	23.9	20.2	18.1	15.1	0	2.56	0.73	0.20	"
B	—	6.2	7.2	0.45	8.82	17.3	3.4	0.47	2.4	11.8	40.9	3.0	5.8	9.0	0.017	0.18	1.16	0.06	"

Ca^{2+} : 最小値は 0.7 mg/l (No. 45), 最大値は 35.4 mg/l (No. 67), 平均値は 17.1 mg/l であり, 20 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 20, 35, 36, 43, 48, 61, 67, 74 となり, 東側の方に比較的多く存在し Mg^{2+} とはほぼ類似した分布を示している。

HCO_3^- : 最小値は 6.9 mg/l (No. 10), 最大値は 129.2 mg/l (No. 35), 平均値は 51.3 mg/l であり, 75 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 35, 67, 74, 76, 78 であり, すべて長谷川より東側で, 等高線 130 m より低い領域に存在している。西側で比較的高濃度を示す井戸は等高線 110~120m の範囲に多く分布し, 130m より高い東北部領域では低濃度の井戸が多い。

Cl^- : 最小値は 2.6 mg/l (No. 10), 最大値は 60.3 mg/l (No. 48), 平均値は 20.8 mg/l となり, 20 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 20, 35, 48, 52, 56, 61, 71, 76, 78, 102 であり, これらのほとんどは等高線 110~120m で囲まれた領域に分布している。河川水 (A・B) の平均濃度が 3.3 mg/l, また井戸水の最小値 2.6 mg/l であることから, 本地域のほとんどすべての井戸は人為的汚染を受けているものと推定される。

SO_4^{2-} : 最小値は 0.7 mg/l (No. 45), 最大値は 30.4 mg/l (No. 36), 平均値は 16.3 mg/l で, 20 mg/l 以上の値を示す井戸は No. 36, 52, 56, 67, 71, 72, 74, 76 となり, 長谷川より東側に多く分布している。

Soluble SiO_2 : 最小値は 6.2 mg/l (No. 58), 最大値は 22.3 mg/l (No. 56), 平均値は 13.3 mg/l で, 15 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 11, 13, 39, 41, 56, 61, 70, 72, 76, 78, 83, 102 で, 長谷川より東側では等高線 110~130m の範囲に, また西側では 110m 以下に多く分布している。

4.2 栄養塩類の分布

$\text{NO}_2^- - \text{N}$: はほとんどが検出限界以下であった。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$: 最小値は 0.08 mg/l (No. 11), 最小値は 9.75 mg/l (No. 41) となり, 平均値は 1.89 mg/l となりバラツキが大きく一定していない。2.0 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 9, 13, 20, 23, 41, 56, 61, 64, 71, 102 であり長谷川より西側に多く存在し, Cl^- , SO_4^{2-} 濃度の分布状況とことなっている。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 最小値は 0.41 mg/l (No. 58), 最大値は 6.72 mg/l (No. 71), 平均値は 0.94 mg/l となり, 1 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 33, 71, 74, 80 であり, No. 33 以外の井戸は長谷川の東側にあり, 西側に比し, 比較的高い濃度の井戸が多く分布している。

$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$: 最小値は 0.01 mg/l (No. 45), 最大値は 0.58 mg/l (No. 56), 平均値は 0.15 mg/l となり, 0.2 mg/l 以上の濃度を示す井戸は No. 13, 28, 33, 41, 56, 67, 71, 72, 76, 102 となり, 等高線 110~120m の範囲に多く存在している。

4.3 溶存ガスの分布

一般に地下水は流動期間が長くなるにつれて, 溶存酸素は好気性菌による生化学的反応のため次第に消費される。そして還元的環境が形成されるにつれて, 嫌気性菌の活動が盛んになり, 窒素酸化物から窒素の脱離(脱窒作用)がおこなわれるために溶存窒素は増加する。

この溶存酸素や窒素の変動の様相を知るには, 次の 4.4 で述べる理由によりアルゴンを指標とすればよい^{9), 10)}。すなわち, 地下水のアルゴン量はそれがかつて地表にあって, 大気と接していたときの飽和量を示すものであるから, このアルゴン量から理論的に浸透時の飽和酸素量や窒素量を知ることができる。この飽和酸素量や窒素量(理論値)と採水時のそれらの量(実測値)とを比較すれば, これらが地層中でどれだけ変動したかを定量的に知ることが可能となる^{12), 13), 14), 15)}。

溶存酸素 : Fig. 3 に飽和酸素量の等百分率線を示す。ここでの飽和酸素率とはアルゴン量から推定した酸素量で, 酸素の実測値を割ったものをさすことにする。山際の井戸は飽和率が比較的高い傾向を示し, 長谷川より東側の井戸のうち No. 35, 36, 67, 70, 71, 72, 74, 76, 78, 84 は低い値 (20~25%) を示している。このことは山際の井戸水は流動期間が短いので流動に伴う溶存酸素の消費は少ないが, 後者の井戸水は流動期間が長く, しかも流動過程の地層が還元的環境であることを意味するものであろう。なお溶存酸素が完全に消費されつくした井戸はなかった (No. 74 の16%が最小値)。

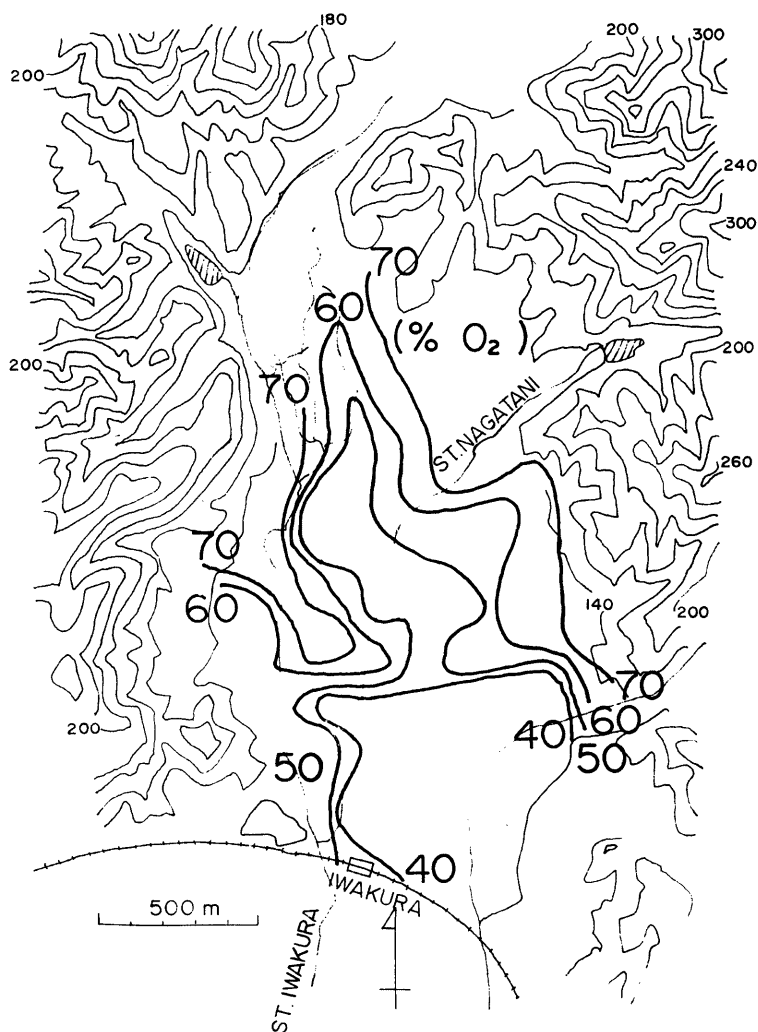
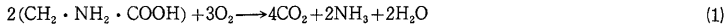


Fig. 3. Contour lines of dissolved oxygen estimated on basis of dissolved argon in ground water.

溶存窒素：飽和窒素量が105%以上の値を示す井戸は No. 4, 35, 41, 67, 70, 72, 78, 84 であり、脱窒作用を示す井戸は35箇所中7箇所で、そのうち長谷川より東側に5箇所と多く、酸素飽和率の低い井戸とよい対応を示している。アルゴン量から推定した浸透時の窒素量の変化がほとんどみられない井戸は No. 28, 39, 45, 61, 71, 74, 76, 78, 80, 102 の10箇所で、これらの井戸では脱窒作用や固定作用はほとんど起こっていないものと推定される。これら以外の井戸は固定作用が卓越しているものと推測される。このように本地域の

地下水は脱窒作用よりも固定作用が卓越しているのが特徴的である。

なお、脱窒作用を示した井戸の飽和酸素量は28～63%とまだ酸化的環境であるにもかかわらず、脱窒現象がみられることの説明として、Koyama と Tomino¹¹⁾ は、湖水中の酸化帯の部分における脱窒現象は微生物による生化学的反応であると次のように推定していることから



地下水中でも同様な反応がおこるものと考えられる。またもう一つの説明として、還元的環境で溶存窒素が過飽和となっている地下水に、溶存酸素を多く含んだ地下水が混入してきたものとも考えられる。

4.4 溶存アルゴン量からみた地下水の流動

地下水の流速を求める方法は、従来水理学的方法、化学物質投入法などがあるが、これらはいずれも各観測井間の距離が短い場合には比較的有效ではあるが、長距離間の地下水の平均流速測定には最善な方法とは言い難い。

Sugisaki^{12),13)}や高倉^{14),15)}は溶存アルゴンをトレーサーとして長距離間の地下水の平均流速を求めている。

アルゴンが流速推定のトレーサーとして有効な方法^{9),10),12),13)}と考えられるのは、次の二つの理由による：(a)アルゴンは地中で化学変化を行わず、また水理学上問題となるような時間スケールでは、地中で⁴⁰Kより生成される⁴⁰Arは無視でき、測定されたアルゴン含量はすべて大気起源と考えられる、(b)アルゴンの溶解度は水温によって一義的に規定される。

したがって、降水や地表水が地下へ浸透してゆく段階では大気中のアルゴンはそれらの水温に対する飽和量だけ溶けていることになり、それらが地下水となり流動してゆく過程において、他からの浸透水の影響を受けない独立帯水層ならば、アルゴン量はそのまま保持されていることになる^{12),13),14),15)}。もちろん、地下水として永く停滞していると拡散、分散などによって均一化されるであろうが、水が浸透してからあまり長くなく、流速がかなりはやいところではアルゴン量は保持される。

逆に考えて、地下水中のアルゴン量を測定すれば、その水の浸透時の水温が推定できる。アルゴン量から降水や表流水の浸透時期がわかって、浸透地点が不明では流速の決定はできない。

Sugisaki^{12),13)}は同一帯水層に属する2箇所の観測井の溶存アルゴン量を1年間連続測定し、その最大値の時間的ずれを、観測井間を流れる時間として平均流出を算出している。また、もう一つの方法として同一帯水層に属する多数の井戸水中のアルゴンを同時測定して、流動方向にそってアルゴン量の変動を調べてその最大値、最小値のある位置を求め、二つの最小値間を地下水が1年かかって流動したものとして、平均流速を算出し、両方法の値はよく一致したと報告している。

筆者らは各観測井で同時にアルゴン量を測定し、そのアルゴン量より推定した降水や地表水などの浸透時の水温を算出し、その等水温線をひいたのが Fig. 4 である (Table 1 参照)。アルゴン量から推定した地下水の最高温度は 16°C、最低温度は 0°C であったが、実際には、これらの等水温線を引くことができなかったの、水温が 8°C から 8°C まで変化する、つまり線 $\overline{AB}$ 、または $\overline{CD}$ に沿って地下水が6ヶ月かかって流動すると仮定して、同図より距離を求め、平均流速を計算すると約 1.7～3.0 m/day となる。

Fig. 5 に本地域の等水位線を示す。これから地下水の流動は岩倉川をはさんで大きく二つに分けられる。すなわち、一方は東北の山裾から西南方向へ流動するものであり、他方は西の山から東へ向う流動である。通常の平野部に比較して、その勾配は 1/40 (線 $\overline{A'B'}$)～1/25 (線 $\overline{C'D'}$) と大きく、しかも川の流れから予想される北から南への直線的な流動はほとんどなく、西から東へ、あるいは東から西へというベクトル成分の大きいことなどが特徴的である。

いま、次の式がダルシーの法則より成り立つとすると

$$V = -K \frac{dh}{dl}, \quad V = nV_p \quad (4)$$

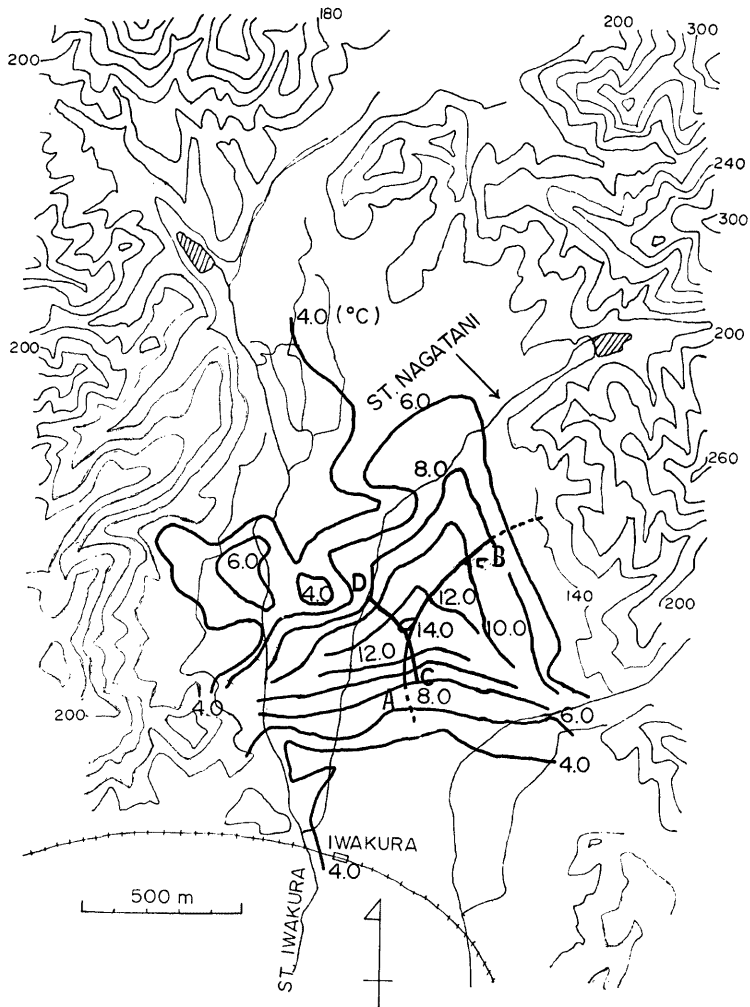


Fig. 4 . Contour lines of original temperature of ground water estimated on dissolved argon.

ここで V : ダルシー流速, V_p : 平均流速, K : 透水係数, n : 間隙率, $\frac{dh}{dl}$: 動水勾配

本地域の地質は全般的にシルトまじりの砂礫層で構成されていることから, $n=0.2$ および $K=10^{-2}$ cm/sec と仮定すると, 平均流速は 1.1~1.7 m/day となる。これはアルゴン量から推定した平均流速とよい一致を示しているといえよう。

なお, 今回の研究対象となった岩倉地域の地下水は不圧地下水であり, 大気との交流により地下水中の溶存アルゴン量が影響を受けるのではないかと危惧されたが, 水温分布図 (Fig. 4) と水位分布図 (Fig. 5)

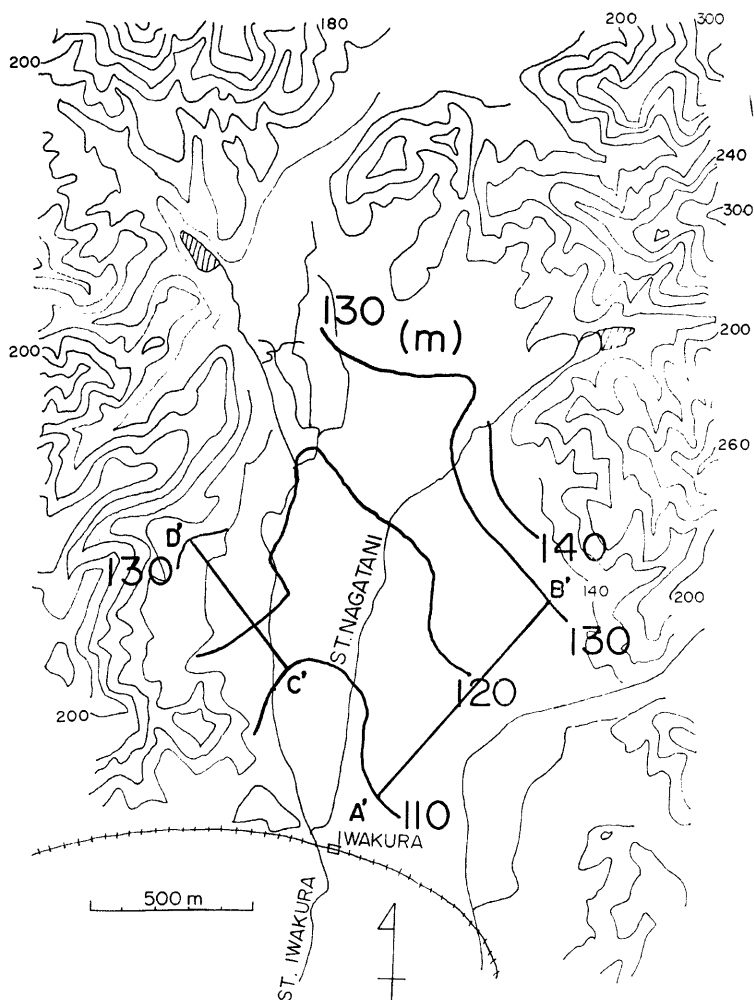


Fig. 5. Water level contour.

から解析される流動方向の一致より、地中での物質交換は比較的緩慢であり、大気との交流はあまり行われていないように見受けられた。

したがって、上述の溶存アルゴン量より推定した地下水の平均流速は妥当であり、本地域のような不圧地下水に対しても溶存アルゴン量法は適応できるという結果が得られた。

5. まとめ

前述の岩倉地域の地下水中の無機主要成分、栄養塩類、溶存ガスの分布状況を地下水の流動という観点か

ら、4章の補足かたが以下とめる。

まず、主要無機成分はいずれも、河川に近い井戸ではその濃度は低い値を示す傾向があり、等高線 110～120m に囲まれた領域で、長谷川を境にして東側には高い値を示す井戸が多かった。このことは、地下水および岩倉川(A)、長谷川(B)の水質分布図 (Fig. 2) をみると、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 型の河川水が流下にとともに汚染され、この水が地下に浸透し東南の方へ移動しながらさらに汚染度が高まっていることを意味するものであろう。これは Fig. 3 の溶存酸素および Fig. 4 の溶存アルゴンより推定した水温分布から得られる流動方向に地下水が移動していることをうづけるものと考えられる。

次に $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の高濃度を示す井戸は西側に多く、しかも河川に近い地点に多く存在している。これは溶存酸素を多く含んでいる河川水の浸透により、地層中の有機物が前述の反応式(1)、(2)により分解され $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度を高めるものと考ええるならば、相当多くの河川水が浸透していることになる。この推測は河川水の影響を受けにくいとみられる地下水の $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度が流動過程で減少の傾向を示していることや $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ が長谷川より東側の地域により多く分布していること、あるいは溶存酸素の分布図 (Fig. 3) から妥当なものと考えられる。

溶存酸素の分布図 (Fig. 3) から地下水の流動をみると、東側では長谷川による地下水の函養がみられ、西側からは 110～120m の等高線に囲まれた領域へ、山際から岩倉川を通して東南の方へ地下水が移動しているものと推定される。また平坦部中央で溶存酸素の少ないのは、地下水の流動期間が長いいためか、あるいは溶存酸素を比較的消費しやすい地層が存在しているためかのいずれかであろうが、Fig. 4 の水温分布図からみると、後者の原因によると考える方が妥当であろう。

溶存アルゴン量から推定した浸透時の水温分布 (Fig. 4) は 0～16℃ となり、気温の高低の差より小さかった。この原因として、この分布が極めて規則的になっていることから、溶存アルゴン自身の拡散などにより、みかけ上温度差が小さくなったこと、あるいは雨水、表流水などの浸透により従来の地下水の浸透時の水温より比較的新しい水の混入で温度は小さくなったとも考えられる。本地域の地下水は不圧地下水であり、また田畑が多いことなどから、後者の理由により温度差は小さくなったものと推定される。Fig. 4 より地下水の流動方向をみると、大きく分けて、東の山麓から西北への流れと、西の山麓から東北への流れとがあり、これらは平坦部、すなわち等高線 110～120m の間の長谷川と岩倉川に囲まれた領域に集中し、その後南の方へ移動していることがわかる。またこの図より、地下水の平均流速を求めると 1.7～3.0 m/day となり水理学的求めた流速 1.1～1.7 m/day とよい一致を示しているといえる。

上述のように、地下水中の種々の化学成分の移動、地下水と土壌との相互作用、人為的活動と地下水水質の関係などを知る上で、溶存アルゴンによる地下水流向および流速の測定は極めて有効であると考えられる。

終りに、「村誌」および「岩倉の実態」の資料を閲覧する機会をあたえて下さった元明德小学校教諭竹田源氏 (現小川小学校) に厚くお礼申し上げます。また明德小学校などの地質調査報告書の閲覧を許可して下さい京都市住宅局営繕課に対し感謝します。さらに井戸の観測を心よくお許し下さった所有者の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 明德尋常高等小学校：村誌，1930
- 2) 明德国民学校：岩倉の実態，1942
- 3) 京都市住宅局営繕課：京都市明德小学校工事用地の地質調査報告書，1976
- 4) 京都市住宅局営繕課：岩倉出張所新築工事用地の地質調査報告書，1977
- 5) 京都市住宅局営繕課：村松保育所増築用地地質調査報告書，1977
- 6) 三宅泰雄・北野康：新水質化学分析法，地人書館，1976
- 7) JPF 生産力測定方法論グループ：陸水生物群集の生産力測定法 (第Ⅵ部無機環境)，1968，pp. 20-28
- 8) 小穴進也：水中に溶存するガスの分析法，分析化学，第3巻，1954，pp. 522-528

- 9) 小穴進也 : アルゴンの地球化学, 科学, 第24巻, 1954, pp. 117-121
- 10) Oana S : Bertimmung des Argon im besonderen Hinblick auf gelöste Gase in natürlichen Wässern. J. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol 5, 1957, pp. 103-124
- 11) Koyama T. and T. Tomino : Decomposition process of organic carbon and nitrogen in lake water. Geochem. J., Vol. 1, 1967, pp. 109-124
- 12) Sugisaki R. : Measurement of effective flow velocity of ground water by means of dissolved gases. Am. J. Sci., Vol. 259, 1961, pp. 144-153
- 13) Sugisaki R. : Geochemscal study of ground water. J. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol. 10, 1962, pp. 1-33
- 14) 高倉盛安 : 富山県内地下水の水質 (I) 一射水平野の地下水, 陸水学雑誌, 第30巻, 1969, pp. 29-43
- 15) 高倉盛安 : 富山県内地下水の水質 (II) 一庄川左岸平野部の地下水の水質と流速, 陸水学雑誌, 第30巻 1969, pp. 139-150