

諏訪市水道水源の水質及び涵養域に関する基礎調査

宮原 裕一

信州大学 山岳科学研究所

Basic research on water quality and catchment basin of tap water sources

in Suwa City

Yuichi MIYABARA

Institute of Mountain Science, Shinshu University

キーワード: 水道水源, 賦存量, 涵養面積

Keywords: source of tap water, abundance, recharge area

1. はじめに

諏訪市をはじめ諏訪地域では水道水源を地下水に頼っており、開発や土地取引から水源を保全・管理するためには、その涵養域や賦存量を明らかにする必要がある。

本研究では、標高の異なる地点で降水を採取し、諏訪地域における標高と降水の酸素・水素安定同位体比の関係を求め、これを根拠に各水源の涵養標高の推定を試みた。また、地下水中の六フッ化硫黄 (SF_6) 濃度から、その滞留時間を求め、年間取水量に乗じることで、水源ごとの賦存量の推定を試みた。さらに、取水量 (湧出量) を年間降水量で除すことにより涵養面積を算出した。

2. 方法

降水調査

諏訪市内 6 カ所で降水の採取を行った (霧ヶ峰配水池 (標高 1673m)、大曲処分場 (標高 1428m)、足倉配水池 (標高 1158m)、硯石配水池 (標高 1029m)、南真志野配水池 (標高 861m)、信州大学山地水環境教育研究センター屋上 (標高 780m)) (図 1)。蒸発防止用の玉を入れた漏斗 (直径 90mm) をポリビン

(容量 3L) に取り付けたものを、温度変化を避けるためアルミコーティングされた断熱シートを巻いた内径 150mm・長さ 500mm の塩ビパイプ内に収め降水を採取した (2015 年 4 月から 11 月)。冬期は凍結のおそれがあるため、内径 150mm の塩ビパイプ内側に 5 層フィルム of アルミ袋を挿入し、それらに降水を採取した (2015 年 12 月から 2016 年 3 月)。これら容器は 1 カ月ごとに回収し、降水の回収量を漏斗や塩ビパイプの断面積で除し、その地点の降水量とした。

採取した降水は、山梨大学にて Picarro 社 L1102-i を用いた CRD 分光光度法で、その酸素・水素安定同位体比を測定した。得られた安定同位体比は、採取期間の降水量に応じ加重平均し、採取標高との関係式にまとめた。この関係式を元に、水道水源の涵養標高を求めた。ここでは、水素安定同位体比から求めた涵養標高と酸素安定同位体比から求めた涵養標高の 2 つが得られたが、両者の平均値をその試料水の涵養標高とした。

また、水源の涵養面積は、各水源の取水量を、酸素・水素安定同位体比から算出された涵養標高における推定降水量で除して求めた。

この推定降水量の算出には、本研究での降水の採取標高と降水量の関係を用いた。今後、本研究で示した降水量と諏訪市が公表している市内各所の降水量データ（2015年6月以降公開）との整合性や、降水量の経年変化を確認し、この地域における標高別の降水量を補正・確定させる必要がある。

水源調査

諏訪市内のすべての水源について、2015年4月と10月の2回調査を行った（図1）。現場では、水温、pH、電気伝導度（25℃に補正）を測定し、GPSにより位置情報を得た。この位置情報に基づき、地図ソフトより採水地の標高を求めた。また、採取した試料は、イオンクロマトグラフにより陽イオン・陰イオン濃度を求め、さらに、滴定によりアルカリ度（炭酸水素イオン濃度）を求め、地下水のイオンバランスを明らかにした。また、降水同様、山梨大学にて、その酸素・水素安定同位体比を測定した。ここで得られた水素・酸素安定同位体比を、降水から得られた関係式に代入し、各水源の涵養標高を求めた。

また、10月には、専用のビンに大気が混入しないようにポンプでかけ流しながら採水し、（株）地球科学研究所にて水中のSF₆濃度を測定した。水中のSF₆濃度から涵養時の大気中SF₆濃度を求め、その涵養年代を推定した。この涵養年代の算出の際、上記の涵養標高で補正を行った。

水源ごとの賦存量の算出は以下の通りを行った。諏訪市水道局より提供された年間取水量をその水源の湧出量とみなし、涵養年代より得られた滞留時間（年）を乗じ賦存量とした。いくつかの水源の取水量がひとつにまとめられている水源では、個別の取水量が不明なため各水源の滞留時間を平均し、その値を取水量に乗じて賦存量を計算した。なお、水源付近に取水されずに流出する湧水（沢）がある場合は、少なくとも、その量を水源の湧出量に加える必要があり、実際の賦存量や涵養面積は、本報告の値よりも大きい。

水源ごとの涵養面積は、上述の通り、水源ごとの年間取水量（m³/年）を、推定年間降水量（m³/km²/年）で除すことで求めた。なお、4月と10月で、推定涵養標高が異なったため、それぞれ別に計算を行った。

3. 結果および考察

降水の安定同位体比

2015年4月から2016年3月の降水の酸素および水素安定同位体比を求め（表1）、地点ごと加重平均し、降水を採取した標高との関係を図2に示した。酸素および水素安定同位体比ともに、標高と極めて良好な相関が見られ、標高が高いほど安定同位体比は減少していた。酸素安定同位体比（δ¹⁸O）、水素安定同位体比（δD）は、それぞれ標高と次のような関係式が得られた。

$$\text{涵養標高} = -502.6 \times \delta^{18}\text{O} - 4648.5 \quad (\text{式1})$$

$$\text{涵養標高} = -80.02 \times \delta\text{D} - 5270.9 \quad (\text{式2})$$

なお、ここでの安定同位体比とは、標準海水の¹⁸OまたはD（²H）の割合からの試料水の偏差を千分率（‰）で表したものである。本研究では、これら関係式を用いて、各水源の涵養標高を求めた。

また、降水の採取標高と年間降水量との関係を図3にまとめた。降水量は標高が高くなるにしたがい増大し、霧ヶ峰（標高1673m）では信州大学（標高780m）よりも3割ほど多かった。これらの関係を直線近似し、各水源の涵養標高における降水量を推定した。

水源の水質

諏訪市水道水源の採水現場での観測値を表2に、イオン組成を表3にまとめて示した。水温、電気伝導度、イオン濃度とも、標高が高いほど低い傾向が見られた。また、4月と10月では、これら水質に大きな差は見られなかった。しかし、硝酸イオンは、絶対値が比較的小さいため、大きな差が見られた。

水源水の涵養標高

諏訪市水道水源の酸素・水素安定同位体比

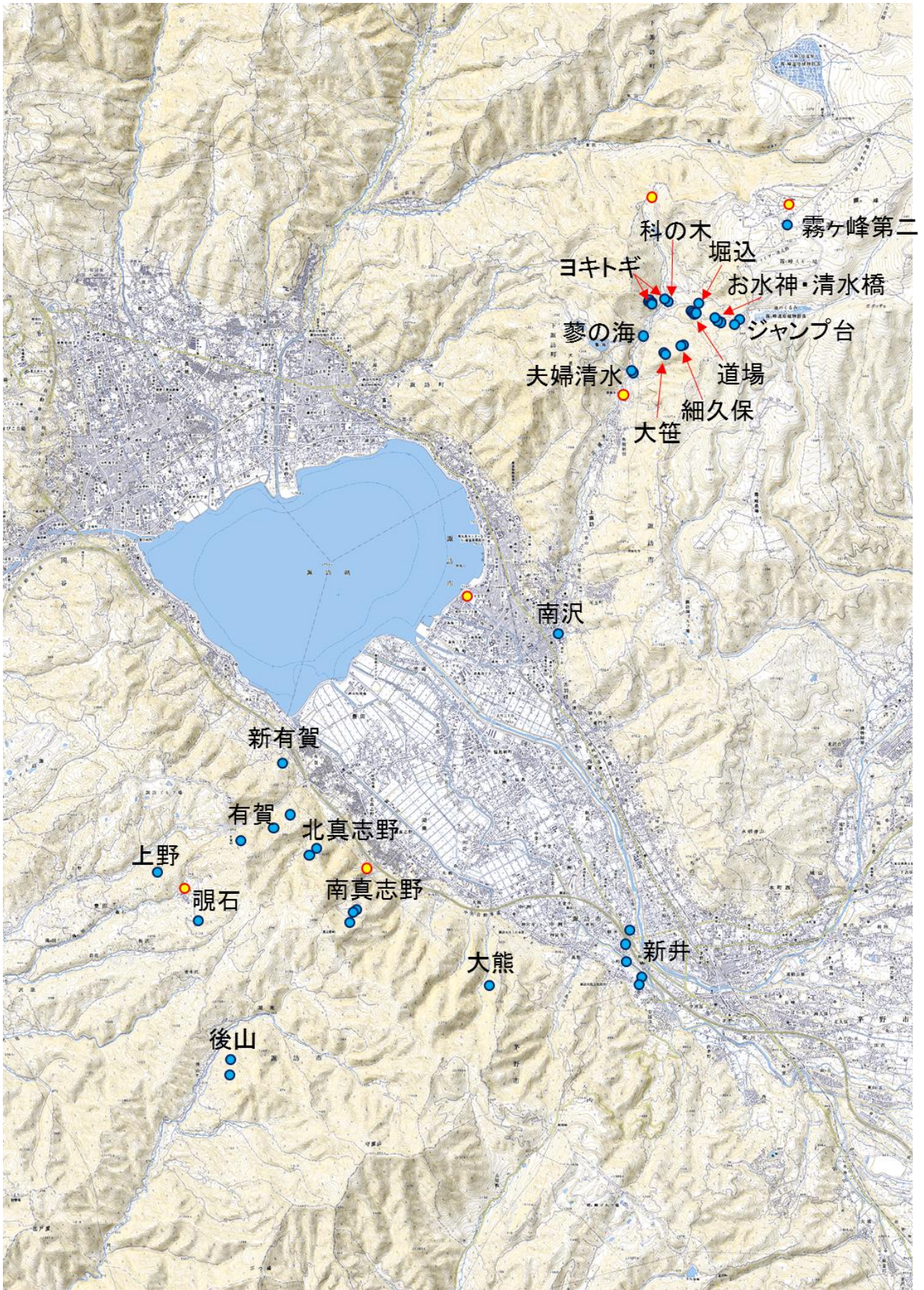


図1 試料採取地点 降水 ● 水源 ●

表1 諏訪地域の降水量と安定同位体比 上 降水量 中 δ¹⁸O 下 δD

採取地点	標高 m	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	降水量	
霧ヶ峰配水池	1673	161	71	236	193	292	288	82	151	49	95	96	75	1788	
大曲処分場	1428	150	66	203	181	256	247	57	171	42	97	107	72	1648	
足倉配水池	1158	168	63	193	166	216	251	61	157	36	103	93	73	1580	
親石配水池	1029	183	75	203	218	173	256	74	143	48	102	111	57	1644	
南真志野配水池	861	166	64	189	183	172	221	71	140	46	106	95	67	1519	
信州大学	780	131	46	161	138	173	245	51	131	40	94	92	64	1368	
霧ヶ峰配水池	1673	-10.1	-7.2	-13.2	-13.8	-11.7	-12.7	-12.8	-13.5	-11.7	-16.8	-12.1	-14.4	-12.5	
大曲処分場	1428	-9.8	-6.6	-12.7	-13.3	-11.8	-12.1	-12.3	-13.2	-10.5	-16.6	-11.7	-12.6	-11.9	
足倉配水池	1158	-9.7	-5.9	-12.0	-12.7	-10.6	-11.3	-11.1	-12.6	-9.5	-16.2	-11.2	-12.0	-11.2	
親石配水池	1029	-9.0	-5.8	-11.9	-11.9	-10.8	-11.9	-11.1	-12.4	-9.7	-15.9	-10.4	-10.7	-11.0	
南真志野配水池	861	-8.8	-5.1	-11.3	-11.9	-10.4	-11.1	-10.5	-11.8	-9.4	-15.6	-10.3	-11.5	-10.6	
信州大学	780	-8.7	-5.0	-11.3	-12.1	-9.4	-11.1	-9.7	-11.7	-9.3	-15.7	-10.6	-13.8	-10.9	
平均		-9.4	-5.9	-12.1	-12.6	-10.8	-11.7	-11.2	-12.5	-10.0	-16.1	-11.1	-12.5	-11.3	
採取地点	標高 m	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	年平均値	加重平均値
霧ヶ峰配水池	1673	-68.9	-44.7	-93.3	-102.0	-78.2	-87.0	-83.5	-93.8	-77.2	-119.0	-78.3	-102.9	-85.7	-86.8
大曲処分場	1428	-65.7	-40.5	-90.2	-98.3	-77.6	-83.4	-80.9	-91.0	-68.1	-117.9	-75.4	-94.6	-82.0	-84.0
足倉配水池	1158	-66.1	-35.1	-87.2	-95.8	-69.7	-77.4	-73.5	-87.9	-63.1	-115.0	-73.0	-89.8	-77.8	-78.9
親石配水池	1029	-61.6	-35.2	-86.8	-88.5	-72.7	-81.5	-73.1	-84.9	-65.0	-113.5	-68.2	-80.6	-76.0	-78.3
南真志野配水池	861	-60.5	-30.7	-82.7	-88.9	-69.7	-75.5	-69.1	-81.2	-60.8	-109.7	-69.5	-88.3	-73.9	-76.2
信州大学	780	-61.5	-29.7	-82.9	-92.1	-64.9	-78.1	-63.4	-80.4	-58.8	-111.5	-70.6	-87.9	-74.2	-76.7
平均		-64.0	-36.0	-87.2	-94.3	-72.1	-80.2	-73.9	-86.5	-65.5	-114.5	-72.5	-92.3	-78.3	

表2 水道水源の基礎的な水質 2015年4月と10月

水源名	採水地標高 m	採取日	2015年4月			2015年10月			
			水温 °C	pH	EC ₂₅ mS/m	採取日	水温 °C	pH	EC ₂₅ mS/m
霧ヶ峰第2	1656	4月14日	8.2	6.70	2.31	11月12日	8.5	6.85	2.22
清水橋	1416	4月14日	8.4	6.93	3.63	10月27日	8.8	6.38	3.87
清水橋横	1414	4月14日	8.4	6.99	3.87	10月27日	8.4	6.58	3.87
お水神 1+2	1411	4月14日	8.5	7.10	3.93	10月27日	8.5	6.90	3.90
ジャンプ台 上+下	1456	4月14日	-	-	-	10月27日	9.4	7.04	3.08
ジャンプ台 上	1490	4月14日	8.7	7.68	2.39	10月27日	8.9	7.10	2.29
堀込 上	1366	4月14日	8.3	6.68	3.99	10月27日	8.5	6.84	3.97
堀込 下	1354	4月14日	8.6	7.10	4.22	10月27日	8.6	6.93	3.93
道場 下	1362	4月14日	8.4	6.88	3.28	10月27日	8.5	6.60	3.52
道場 上	1372	4月14日	8.7	6.99	3.98	10月27日	8.6	6.87	3.99
不明(道場の上)	1375	4月14日	8.6	7.02	3.99	10月27日	8.8	7.20	3.98
科ノ木	1317	4月14日	8.3	6.78	4.48	10月27日	9.9	6.28	3.99
ヨキトギ上 右	1326	4月14日	8.7	6.94	3.76	10月27日	8.9	6.75	3.78
ヨキトギ上 左	1326	4月14日	8.7	6.97	3.82	10月27日	8.8	-	3.84
ヨキトギ下 4	1338	4月14日	8.2	6.88	3.50	10月27日	8.8	6.85	3.75
ヨキトギ下 3	1343	4月14日	8.4	6.85	3.60	10月27日	8.7	6.91	3.76
ヨキトギ下 2	1379	4月14日	8.0	6.96	3.61	10月27日	9.0	6.63	3.74
ヨキトギ下 1	1381	4月14日	8.3	7.02	3.49	10月27日	8.9	6.81	3.57
第二接合井	1316	4月14日	8.3	6.94	3.74	10月27日	8.3	6.94	3.80
細久保 左	1332	4月14日	8.1	7.08	4.11	10月27日	8.1	7.07	4.13
細久保 右	1321	4月14日	8.1	7.13	3.85	10月27日	8.2	7.58	3.99
大笹 左	1294	4月14日	8.2	7.06	3.86	10月29日	8.4	6.88	3.98
大笹 右	1301	4月14日	8.2	7.01	5.02	10月29日	8.0	6.97	5.09
夫婦清水 下(集水溝)	1198	4月14日	10.7	7.30	5.49	10月29日	11.0	7.35	5.38
夫婦清水 上	1208	4月14日	9.3	7.03	6.24	10月29日	9.7	7.20	5.16
霧ノ海	1283	4月14日	8.9	7.00	3.97	10月29日	9.0	7.18	4.03
北真志野 上	926	4月15日	9.2	6.83	6.43	10月29日	10.1	6.81	6.78
北真志野 下	928	4月15日	9.3	7.21	5.80	10月29日	9.8	6.91	5.78
南真志野 上	1020	4月15日	9.4	6.93	5.47	10月29日	9.7	6.74	6.15
南真志野 中	977	4月15日	9.1	7.22	4.71	10月29日	9.8	6.80	4.69
南真志野 中の下	977	4月15日	-	-	-	10月29日	9.8	7.02	5.17
南真志野 下	962	4月15日	8.8	6.85	5.13	10月29日	9.9	6.70	5.20
大熊 下右	933	4月15日	-	-	-	10月29日	10.5	6.93	7.25
大熊 下中	933	4月15日	9.4	7.32	6.69	10月29日	10.5	7.10	7.87
大熊 上	934	4月15日	9.3	7.39	6.21	10月29日	10.5	7.18	6.76
有賀中沢 上(右)	885	4月15日	9.8	6.98	10.91	10月30日	10.4	6.22	9.14
有賀中沢 中	885	4月15日	10.2	7.05	10.11	10月30日	10.2	6.54	8.66
有賀中沢 下(左)	885	4月15日	9.5	7.08	7.96	10月30日	9.8	6.56	8.23
有賀金洞	949	4月15日	10.2	7.13	5.58	10月30日	10.2	6.73	5.42
有賀一本サワラ	1033	4月15日	9.3	7.01	10.07	10月30日	9.8	6.85	9.03
親石	1060	4月15日	11.4	7.08	4.88	10月30日	11.5	6.85	4.81
後山 第1	1102	4月15日	8.9	6.78	6.21	10月30日	10.1	7.45	7.79
後山 第2	1065	4月15日	10.0	7.06	7.48	10月30日	10.3	7.90	8.16
上野	1010	4月15日	10.5	6.96	6.56	10月30日	10.7	7.00	7.31
新井第1	763	4月15日	12.8	6.94	16.73	10月30日	16.2	6.57	16.88
新井第2	764	4月15日	12.9	6.56	17.97	10月30日	13.1	6.52	17.92
新井第3	764	4月15日	12.5	6.59	18.01	10月30日	12.9	6.39	18.26
新井第5	767	4月15日	12.7	6.65	17.12	10月30日	12.2	6.77	16.64
新井第6	766	4月15日	12.8	6.73	17.54	10月30日	12.7	6.66	17.65
新有賀	832	4月15日	15.6	7.58	10.69	12月12日	15.2	7.52	10.61
南沢	781	4月15日	18.0	7.35	7.60	11月12日	17.8	8.18	7.69

表3 水道水源のイオン成分 2015年4月と10月

水源名	採水地標高 m	4月測定									10月測定						
		Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg-N/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg-N/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L
霧ヶ峰第2	1656	1.75	0.61	0.29	1.26	0.80	0.40	0.27	9.82	1.61	0.61	0.37	1.23	0.73	0.33	0.26	7.81
清水橋	1416	2.15	1.02	0.68	2.48	0.60	0.23	0.24	18.42	2.38	1.35	0.94	2.73	0.43	0.14	0.19	19.84
清水橋横	1414	2.35	1.27	0.86	3.13	0.46	0.19	0.19	21.85	2.39	1.34	0.95	2.77	0.43	0.14	0.16	20.06
お水神 1+2	1411	2.39	1.33	0.87	3.21	0.47	0.23	0.22	21.49	2.38	1.38	0.95	2.85	0.46	0.20	0.22	19.97
ジャンプ台 上+下	1456	-	-	-	-	-	-	-	-	2.06	0.76	0.78	2.00	0.77	0.18	0.16	14.36
ジャンプ台 上	1490	1.86	0.61	0.42	1.68	0.52	0.15	0.47	12.28	1.82	0.66	0.51	1.36	0.48	0.08	0.14	11.19
堀込 上	1366	2.16	1.16	0.74	3.56	0.82	0.65	0.51	19.64	2.25	1.27	0.81	2.95	0.78	0.36	0.54	17.42
堀込 下	1354	2.44	1.36	0.93	3.74	0.59	0.23	0.30	22.10	2.33	1.37	0.92	2.97	0.54	0.19	0.30	19.81
道場 下	1362	2.07	0.97	0.68	2.53	0.64	0.12	0.34	17.07	2.25	1.14	0.88	2.59	0.55	0.14	0.31	18.09
道場 上	1372	2.31	1.22	0.91	3.34	0.56	0.18	0.23	21.85	2.33	1.27	1.00	2.96	0.56	0.12	0.21	20.46
不明(道場の上)	1375	2.35	1.24	0.84	3.08	0.57	0.17	0.22	22.10	2.31	1.27	1.00	3.01	0.53	0.11	0.21	20.64
科ノ木	1317	2.20	0.53	0.54	3.92	5.09	0.35	0.39	13.14	2.11	0.65	0.75	3.10	3.02	0.37	0.36	12.57
ヨキトギ上 右	1326	2.10	1.39	0.66	3.09	0.68	0.21	0.54	18.78	2.15	1.47	0.77	2.69	0.58	0.09	0.52	17.98
ヨキトギ上 左	1326	2.10	1.41	0.70	3.21	0.71	0.22	0.62	19.64	2.15	1.49	0.77	2.75	0.59	0.08	0.59	18.18
ヨキトギ下 4	1338	1.84	0.77	0.57	2.97	0.97	0.54	0.53	14.73	2.21	1.00	0.74	2.89	0.86	0.20	0.43	17.04
ヨキトギ下 3	1343	2.00	0.96	0.62	3.10	0.92	0.49	0.53	17.19	2.17	1.12	0.76	2.86	0.82	0.25	0.39	16.98
ヨキトギ下 2	1379	2.08	0.94	0.60	3.14	1.00	0.33	0.41	17.19	2.18	1.11	0.70	2.79	0.78	0.08	0.30	17.47
ヨキトギ下 1	1381	2.12	1.18	0.60	2.91	0.84	0.31	0.52	16.82	2.19	1.25	0.71	2.61	0.65	0.20	0.23	17.02
第二接合井	1316	2.10	1.03	0.80	3.15	0.70	0.13	0.31	19.64	2.23	1.14	0.93	2.91	0.63	0.07	0.29	19.49
細久保 左	1332	2.33	0.99	0.91	3.69	0.87	0.25	0.32	21.49	2.27	1.05	0.97	3.22	0.84	0.18	0.32	19.68
細久保 右	1321	2.19	1.00	0.78	3.18	0.93	0.22	0.30	20.26	2.24	1.64	0.96	3.14	1.34	0.21	0.33	19.22
大笹 左	1294	2.03	0.85	0.81	3.34	1.43	0.26	0.35	18.66	2.14	0.95	0.97	3.17	1.29	0.18	0.33	18.26
大笹 右	1301	2.35	0.57	1.09	5.14	1.68	0.48	0.42	24.68	2.39	0.64	1.21	4.68	1.47	0.23	0.33	23.73
夫婦清水 下(集水溝)	1198	3.42	2.11	0.89	4.67	0.95	0.06	1.25	29.47	3.48	2.20	0.97	4.01	0.63	0.00	1.19	27.16
夫婦清水 上	1208	4.04	2.20	1.12	4.86	4.61	0.16	1.21	25.54	2.89	1.91	1.21	4.02	1.92	0.18	1.00	23.58
夢ノ海	1283	2.28	1.88	0.70	3.27	0.88	0.24	1.27	18.66	2.31	1.94	0.80	2.79	0.69	0.12	1.17	18.47
北真志野 上	926	3.25	2.71	1.06	6.11	0.87	1.12	1.43	29.47	3.31	2.88	1.15	5.32	0.84	1.04	1.04	27.91
北真志野 下	928	3.13	2.40	1.08	5.26	1.06	0.68	1.24	27.01	3.28	2.62	1.29	5.16	0.98	0.75	1.01	28.74
南真志野 上	1020	2.95	1.49	0.94	5.12	0.86	0.73	1.02	25.78	3.26	1.73	1.27	5.47	0.84	0.43	1.10	29.63
南真志野 中	977	2.40	1.33	1.01	4.42	0.64	0.70	1.07	21.49	2.35	1.41	1.06	3.91	0.61	0.39	0.81	21.86
南真志野 中の下	977	-	-	-	-	-	-	-	-	2.36	1.42	1.06	3.90	0.57	0.45	0.79	21.77
南真志野 下	962	2.56	1.37	1.03	4.93	0.63	0.93	1.14	22.10	2.56	1.50	1.17	4.53	0.58	0.48	1.06	24.38
大熊 下右	933	-	-	-	-	-	-	-	-	3.82	0.42	0.84	7.23	0.64	0.50	7.78	23.83
大熊 下中	933	3.64	0.34	0.75	7.56	0.71	0.83	6.65	26.03	3.96	0.45	0.99	8.14	0.67	0.55	7.95	27.34
大熊 上	934	3.40	0.34	0.56	6.97	0.66	0.58	7.03	22.47	3.65	0.42	0.78	6.73	0.60	0.55	7.65	21.65
有賀中沢 上(右)	885	4.49	2.88	2.56	11.02	11.83	0.61	2.17	37.08	3.91	2.54	2.00	7.62	7.21	0.29	1.66	31.74
有賀中沢 中	885	4.34	2.85	2.35	10.14	9.43	0.67	1.87	38.06	3.89	2.65	2.01	7.58	5.68	0.49	1.50	33.81
有賀中沢 下(左)	885	3.55	2.20	1.84	8.47	1.90	0.86	0.70	39.04	3.46	2.19	1.86	7.38	1.50	1.31	0.61	35.32
有賀金洞	949	3.09	1.80	0.96	5.13	0.69	0.92	0.82	26.40	3.05	1.87	1.05	4.56	0.67	0.63	0.85	25.18
有賀一本サワラ	1033	4.54	1.86	1.90	9.79	16.25	0.73	0.88	22.84	4.41	1.85	1.70	7.43	13.45	0.27	0.69	20.54
観石	1060	3.07	1.37	0.84	4.68	1.28	0.20	0.39	25.78	2.88	1.31	0.96	6.11	1.32	0.06	0.41	30.07
後山 第1	1102	2.93	0.26	1.21	7.37	0.88	0.38	1.81	29.10	3.20	0.35	1.49	8.62	0.94	0.41	1.94	36.88
後山 第2	1065	3.48	0.24	1.39	9.80	0.74	0.44	2.53	38.67	3.56	0.26	1.58	9.37	0.72	0.44	2.55	39.92
上野	1010	3.54	1.43	1.33	6.39	2.58	0.38	0.58	30.69	3.74	1.53	1.63	6.62	4.37	0.42	0.52	30.65
新井第1	763	11.90	3.82	3.92	11.48	16.03	1.67	23.95	29.47	12.37	3.82	4.16	10.51	16.03	1.56	23.22	27.81
新井第2	764	10.93	3.77	4.23	14.74	16.56	1.98	25.22	33.39	10.75	3.77	4.19	13.14	16.10	1.91	24.41	28.43
新井第3	764	9.28	3.18	4.76	15.60	14.32	2.11	24.38	41.13	9.55	3.29	4.91	14.80	14.87	2.08	23.47	35.74
新井第5	767	6.97	2.56	5.09	15.87	9.06	2.14	23.64	44.81	6.66	2.51	5.32	13.90	9.17	1.91	21.45	39.25
新井第6	766	8.04	2.97	6.87	13.80	10.13	2.28	19.70	50.34	8.20	3.06	6.82	13.53	10.34	2.25	19.18	50.01
新有賀	832	11.61	2.94	1.83	6.63	3.40	1.97	2.27	44.44	9.70	2.95	2.05	6.94	4.18	2.66	2.14	40.25
南沢	781	5.42	2.22	1.64	6.12	2.09	0.79	3.17	31.68	5.45	2.27	1.70	5.36	2.25	0.82	3.22	31.33

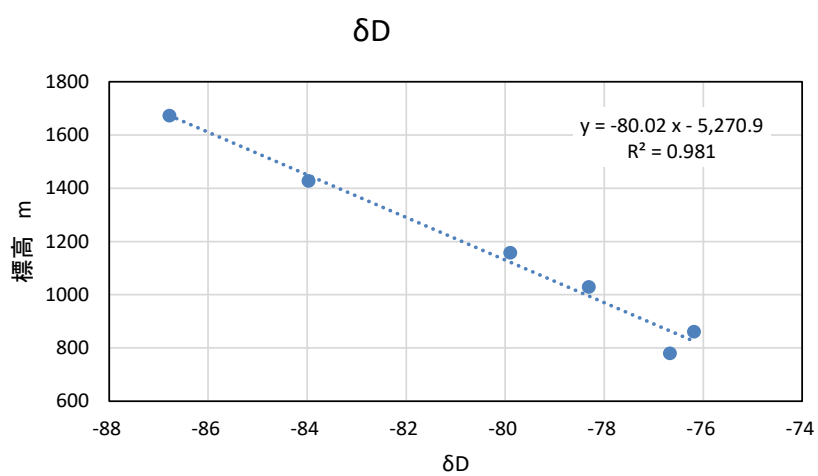
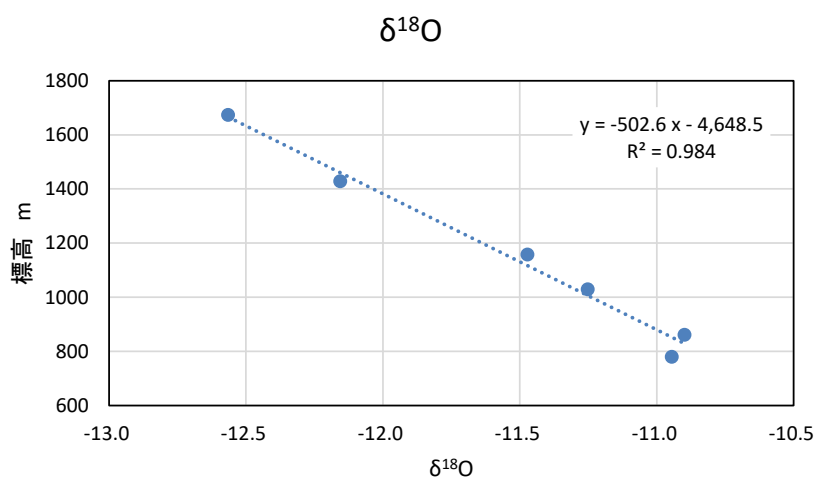


図2 標高と降水の同位体比 上 $\delta^{18}\text{O}$ 下 δD

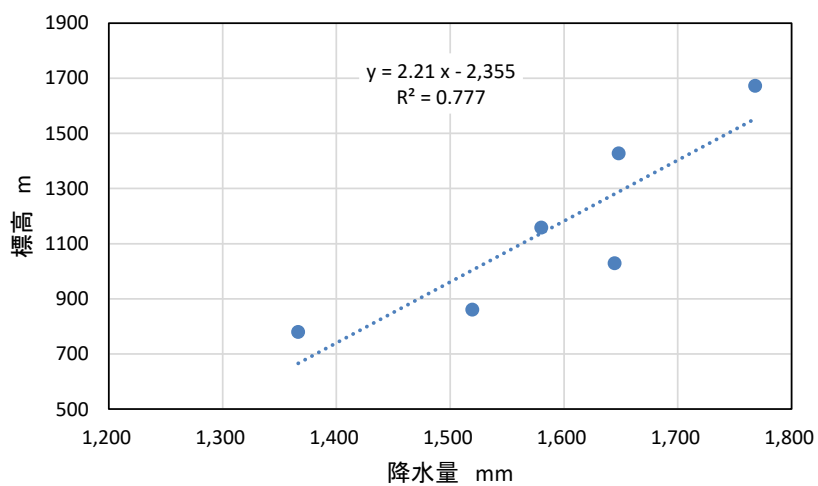


図3 標高と降水量 2015年4月から2016年3月

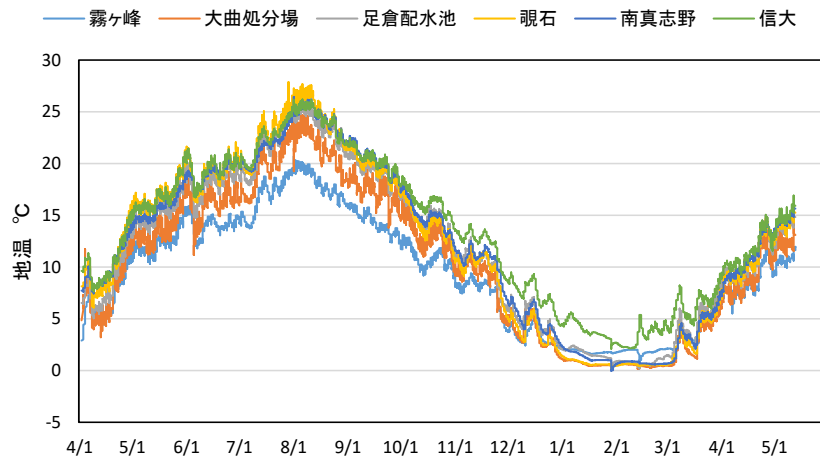
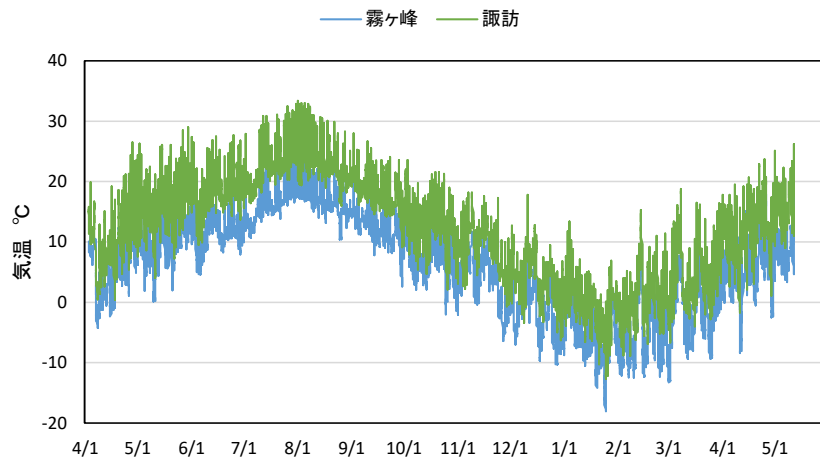


図4 諏訪地域の気温と地温の変化 上 気温 下 地温

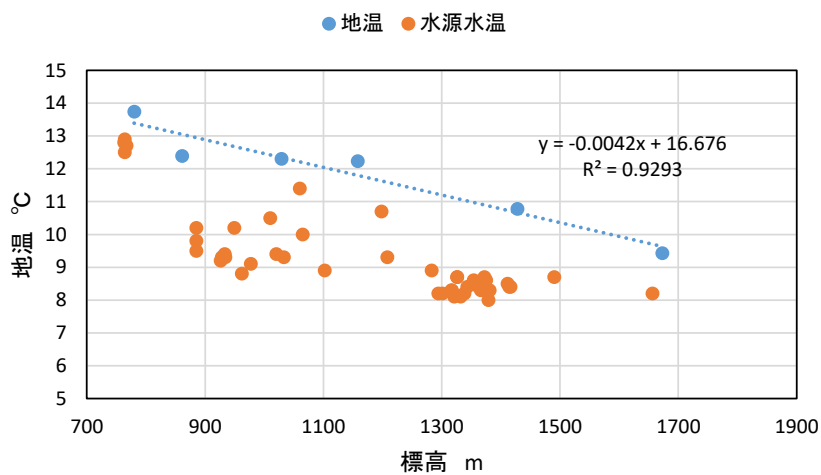


図5 標高と地温および水源水温

表4 水道水源の安定同位体比と推定涵養標高 2015年4月と10月

水源名	採水地標高 m	4月		10月		推定涵養標高 $\delta^{18}\text{O}$		推定涵養標高 δD		$\delta^{18}\text{O}$ と δD の平均	
		$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	4月 m	10月 m	4月 m	10月 m	4月 m	10月 m
霧ヶ峰第2	1656	-12.2	-83.7	-12.6	-83.9	1497	1673	1424	1445	1460	1559
清水橋	1416	-12.2	-83.4	-12.6	-85.5	1461	1688	1401	1571	1431	1629
清水橋横	1414	-12.2	-84.0	-12.6	-85.0	1494	1679	1450	1534	1472	1607
お水神 1+2	1411	-12.3	-84.2	-12.6	-85.1	1511	1680	1467	1540	1489	1610
ジャンプ台 上+下	1456	-	-	-12.5	-85.1	-	1615	-	1541	-	1578
ジャンプ台 上	1490	-12.0	-83.1	-12.5	-84.9	1405	1635	1380	1525	1393	1580
堀込 上	1366	-11.9	-81.7	-12.4	-82.6	1344	1564	1268	1335	1306	1449
堀込 下	1354	-12.1	-83.4	-12.5	-83.6	1428	1648	1400	1415	1414	1532
道場 下	1362	-12.0	-83.2	-12.5	-83.8	1391	1657	1388	1438	1389	1548
道場 上	1372	-12.2	-83.5	-12.5	-84.7	1483	1648	1408	1510	1446	1579
不明(道場の上)	1375	-12.1	-84.0	-12.5	-84.7	1451	1655	1448	1506	1449	1581
科ノ木	1317	-11.6	-79.8	-12.0	-80.9	1195	1366	1115	1205	1155	1286
ヨキトギ上 右	1326	-11.8	-80.5	-12.1	-81.6	1262	1435	1168	1258	1215	1347
ヨキトギ上 左	1326	-11.7	-80.5	-12.1	-81.7	1231	1431	1172	1269	1201	1350
ヨキトギ下 4	1338	-11.6	-78.8	-12.0	-80.8	1182	1370	1036	1192	1109	1281
ヨキトギ下 3	1343	-11.6	-79.7	-11.9	-81.0	1199	1357	1107	1208	1153	1282
ヨキトギ下 2	1379	-11.6	-79.3	-12.1	-81.6	1180	1430	1073	1256	1126	1343
ヨキトギ下 1	1381	-11.8	-79.8	-12.2	-81.9	1258	1496	1118	1284	1188	1390
第二接合井	1316	-11.9	-81.7	-12.3	-83.0	1328	1508	1270	1368	1299	1438
細久保 左	1332	-12.0	-82.1	-12.3	-83.4	1363	1531	1295	1399	1329	1465
細久保 右	1321	-11.8	-81.3	-12.3	-82.8	1299	1543	1234	1354	1267	1448
大笹 左	1294	-11.9	-81.0	-12.1	-82.5	1322	1427	1213	1328	1267	1378
大笹 右	1301	-11.8	-81.0	-12.2	-81.5	1261	1459	1214	1253	1238	1356
夫婦清水 下(集水溝)	1198	-12.3	-84.1	-12.6	-85.2	1522	1703	1458	1547	1490	1625
夫婦清水 上	1208	-11.7	-80.5	-12.0	-82.4	1212	1398	1174	1319	1193	1358
蓼ノ海	1283	-11.6	-79.9	-11.9	-81.1	1174	1337	1123	1217	1149	1277
北真志野 上	926	-11.3	-77.7	-11.7	-79.2	1013	1227	950	1063	981	1145
北真志野 下	928	-11.3	-78.5	-11.6	-78.8	1043	1198	1009	1037	1026	1118
南真志野 上	1020	-11.5	-78.8	-11.8	-79.7	1124	1285	1035	1109	1079	1197
南真志野 中	977	-11.5	-78.8	-11.9	-80.6	1114	1337	1034	1179	1074	1258
南真志野 中の下	977	-	-	-11.9	-80.8	-	1338	-	1196	-	1267
南真志野 下	962	-11.4	-79.5	-11.8	-80.6	1087	1289	1088	1179	1088	1234
大熊 下右	933	-	-	-11.9	-80.7	-	1329	-	1184	-	1256
大熊 下中	933	-11.4	-77.9	-11.8	-80.7	1098	1285	965	1187	1031	1236
大熊 上	934	-11.5	-78.7	-11.9	-80.0	1149	1350	1026	1130	1087	1240
有賀中沢 上(右)	885	-11.3	-77.5	-11.6	-78.3	1042	1200	934	991	988	1096
有賀中沢 中	885	-11.3	-78.0	-11.6	-78.6	1054	1177	970	1016	1012	1096
有賀中沢 下(左)	885	-11.2	-76.4	-11.6	-78.2	957	1203	844	986	900	1094
有賀金洞	949	-11.5	-78.8	-12.0	-80.3	1125	1396	1038	1157	1082	1276
有賀一本サワラ	1033	-11.5	-78.6	-12.1	-81.1	1113	1420	1021	1221	1067	1321
覗石	1060	-11.7	-80.3	-12.2	-81.7	1209	1460	1154	1270	1182	1365
後山 第1	1102	-11.5	-78.7	-12.2	-81.6	1121	1490	1024	1257	1073	1374
後山 第2	1065	-11.8	-80.6	-12.3	-82.7	1261	1542	1175	1343	1218	1443
上野	1010	-11.5	-79.1	-11.9	-80.5	1120	1355	1060	1170	1090	1263
新井第1	763	-11.7	-81.8	-12.3	-83.6	1247	1549	1277	1420	1262	1485
新井第2	764	-11.5	-81.0	-12.1	-82.4	1138	1444	1214	1325	1176	1384
新井第3	764	-11.6	-80.0	-11.9	-81.4	1176	1311	1132	1245	1154	1278
新井第5	767	-11.3	-79.9	-11.8	-80.4	1049	1281	1123	1162	1086	1222
新井第6	766	-11.3	-79.4	-11.8	-80.9	1031	1295	1081	1206	1056	1250
新有賀	832	-11.5	-79.2	-11.3	-79.2	1151	1054	1064	1069	1107	1061
南沢	781	-11.6	-80.5	-12.0	-82.2	1172	1366	1167	1303	1170	1334

を表 4 に示した。安定同位体比は、4 月と 10 月に測定し、上述の式に代入し、それぞれ涵養標高を求めた。酸素および水素安定同位体比から求めた涵養標高を採取月ごと平均したところ、10 月に比べ、4 月の涵養標高の方が低くなる傾向が見られた。 δD に基づく涵養標高は 4 月と 10 月で大きな差は見られなかったが、 $\delta^{18}O$ では、4 月と 10 月で大きな差が見られた。地表に近くに存在する地下水では、 δD よりも $\delta^{18}O$ の方が、地表の加熱による蒸発や結露の影響を受けやすく、4 月と 10 月で差が見られたのかもしれない。

また、近接する水源の涵養標高は、概ね同等と計算されたが、夫婦清水上水源と夫婦清水下水源では、夫婦清水下水源の方が約 300m も涵養標高が高かった。同様な傾向は、堀込上水源と堀込下水源でも見られた。一方、霧ヶ峰第二、科ノ木、ヨキトギ上・下、蓼ノ海水源の涵養標高は、採水地の標高との差が比較的小さく、それらの涵養域は採水地の近傍と考えられた。一方、南沢と新井水源は、いずれも採水地の標高と涵養標高との差が約 500 から 700m と大きく、その涵養域は水源井戸から遠く離れている可能性が高い。新井水源は、上川と宮川に近いので、それらの伏流水を取水している可能性が高く、これら河川の涵養域の標高を反映したものと考えられた。

さらに、降水採取地点で観測した地温（深度 30cm）の季節変動を図 4 に示した。この図のから得られた標高と年平均地温の関係式に、各水源の湧出標高と水温の関係を重ね合わせ図 5 に示した。地温は地下水涵養時の水温と密接な関係がある。図 5 では、地温の近似直線よりも下側に水源の水温が分布したことから、涵養標高よりも低標高で地下水が湧出していることが分かる。同様に、信州大学理学部鈴木研究室で観測している霧ヶ峰の気温とアメダス諏訪局の気温の季節変動を図 4 に示した。冬期でも霧ヶ峰の地温は氷点下にならなかったが、気温は諏訪でも氷点下まで下がり、冬期は地表が凍結し地下水の涵養量

が低下することが分かる。

地下水の賦存量と涵養面積

地下水の SF_6 濃度から求めた滞留時間とともに、水源ごとの賦存量を算出した（表 5）。ここで、霧ヶ峰第二、南沢、新有賀、新井水源は、ポンプを用いて強制的に井戸から取水しているため、これらの賦存量については注意を払う必要がある。現在の取水量に対し地下水の水位変動がない（賦存量に変化がない）と仮定した暫定的な賦存量である。水源水の滞留時間が経年的に減少している（短くなっている）ようだと、その賦存量も減少していることとなる。

滞留時間

滞留時間は、新有賀、上野、夫婦清水下、南沢水源で比較的長く、蓼ノ海、大笹、霧ヶ峰第二、新井水源で比較的短かった。夫婦清水下や南沢水源は、安定同位体分析から涵養域から離れていると推定されたが、これは滞留時間が長いことと矛盾しない。一方、新井水源も安定同位体分析から涵養域から離れているとされたが、滞留時間は短く、比較的新しい河川伏流水を汲み上げていると考えるのが妥当であろう。かつて、 SF_6 を用いて新井第一水源と第三水源の滞留時間を求めた際は、それぞれ 8 年、10 年と推定されており、滞留時間の短縮傾向は見られないため、これら水源の賦存量は大きく変化していないと考えられるが、今後、その推移は注視すべきである。

なお、お水神水源は、水源となる水が大気と触れてから枡に流入しており、また、新井第六水源は、 SF_6 により汚染されていたため、それらの滞留時間は推定できなかった。そこで、これら水源の賦存量の計算には、それぞれ近傍の水源（清水橋水源、新井第三と新井第五水源の平均値）の滞留時間を用いて算出した。

賦存量の推定

賦存量は、取水量に滞留時間を乗じ算出し

表5 水道水源の推定賦存量と推定涵養面積

水源名	取水量＝湧出量							SF ₀ による 滞留時間 年	賦存量 × 10 ⁶ m ³	涵養面積 km ²	涵養標高		推定降水量	
	2009 m ³ /年	2010 m ³ /年	2011 m ³ /年	2012 m ³ /年	2013 m ³ /年	2014 m ³ /年	平均 m ³ /年				4月 m	10月 m	4月 mm	10月 mm
新有賀	444,087	432,498	459,136	470,727	515,934	520,185	473,761	82	38.85	0.307	1107	1061	1566	1546
有賀	91,254	127,936	126,024	107,647	79,601	76,194	101,443	17	1.75	0.062	1082	1276	1555	1643
北真志野	19,189	45,403	26,412	17,952	24,560	24,504	26,337	10	0.28	0.017	1004	1131	1519	1577
南真志野	316,147	336,869	326,828	282,964	250,827	291,166	300,800	11	3.24	0.185	1080	1239	1554	1626
大熊	115,946	[35,491]	[9,002]	-	-	-	115,946	19	2.15	0.071	1059	1244	1545	1628
後山	37,090	38,406	40,627	37,641	37,367	39,303	38,406	27	1.02	0.023	1145	1408	1584	1702
上野	18,839	17,410	18,487	18,430	18,006	17,841	18,169	36	0.65	0.011	1269	1425	1640	1710
一之瀬	133,586	169,008	168,932	93,876	廃止	廃止	141,351	-	-	-	-	-	-	-
夫婦清水	201,396	232,802	214,376	137,247	74,077	128,407	164,718	16	2.60	0.098	1193	1358	1605	1680
夫婦清水 下	274,684	280,876	285,480	278,708	273,504	289,368	280,437	41	11.50	0.156	1490	1625	1740	1800
蓼の海	54,765	57,620	33,129	44,891	48,180	52,231	48,469	8	0.39	0.029	1149	1277	1585	1643
大笹 左	14,079	23,399	24,695	22,117	21,302	22,515	21,351	9	0.19	0.013	1267	1378	1639	1689
大笹 右	67,725	94,589	90,705	81,117	73,347	81,515	81,500	6	0.51	0.049	1238	1356	1625	1679
細久保	184,580	68,004	54,175	143,105	135,977	141,535	121,229	9	1.12	0.070	1298	1457	1652	1724
ヨキトギ 下	106,576	82,762	49,256	43,300	43,878	55,160	63,489	13	0.79	0.038	1144	1324	1583	1664
ヨキトギ 上	159,990	187,268	132,912	112,708	133,334	130,284	142,749	16	2.24	0.085	1208	1348	1612	1675
科の木	14,869	30,430	47,464	44,396	36,828	39,797	35,631	22	0.80	0.022	1155	1286	1588	1647
道場 上	127,715	161,551	166,017	151,733	151,800	159,496	153,052	20	3.06	0.086	1446	1579	1719	1780
道場 下	6,120	6,570	6,984	6,660	6,543	6,750	6,605	20	0.13	0.004	1389	1548	1694	1765
堀込	47,812	57,839	49,797	51,443	53,990	50,750	51,939	13	0.70	0.030	1360	1490	1681	1740
お水神	1,395,100	1,136,686	1,121,904	1,091,571	1,076,526	1,061,312	1,147,183	14	16.27	0.640	1489	1610	1739	1794
清水橋	1,085,666	1,273,175	1,151,722	1,089,659	1,008,620	1,026,744	1,105,931	14	15.69	0.614	1431	1629	1713	1802
霧ヶ峰第2	170,445	193,056	174,753	204,787	203,273	204,445	191,793	5	0.89	0.108	1460	1559	1726	1771
清水橋流入	104,542	111,741	105,891	138,066	137,276	132,099	121,603	14	1.70	0.068	1472	1607	1731	1792
ジャンプ台	-	46,522	32,671	39,057	41,020	41,863	40,227	12	0.49	0.023	1393	1580	1695	1780
南沢	422,607	419,027	394,367	405,441	408,003	409,233	409,780	38	15.57	0.246	1170	1334	1594	1669
新井第1	786,909	835,059	396,597	857,137	645,050	709,884	705,106	13	9.46	0.406	1262	1485	1636	1737
新井第2	861,877	874,529	544,684	765,345	1,246,440	1,156,750	908,271	13	11.74	0.537	1176	1384	1598	1692
新井第3	980,821	898,420	1,659,329	923,166	956,567	948,251	1,061,092	7	7.14	0.646	1154	1278	1587	1643
新井第5	735,729	759,459	725,159	831,450	740,246	838,539	771,764	2	1.70	0.477	1086	1222	1557	1618
新井第6	1,004,385	1,067,384	1,368,165	1,290,960	1,294,830	1,179,362	1,200,848	4	5.37	0.736	1056	1250	1543	1631

た。そのため、取水量が多いか、滞留時間が長い水源ほど賦存量が大きくなる。井戸から地下水をくみ上げている水源を除くと、取水量が比較的多いお水神や清水橋水源の賦存量が多いことが確認された。

涵養面積

次に、水源ごとの年間取水量を賄う降水が見込める範囲を涵養面積として算出した。推定降水量は図3に示した関係から算出した。

新井水源では、5つの水源を合わせると、直径約1kmの範囲がその涵養面積と推定された。これらに次いで、涵養面積が大きかったのは、霧ヶ峰上部で互いに近接する、お水神、清水橋、清水橋横、ジャンプ台水源を合

計した水源であり、少なくとも霧ヶ峰スキー場周辺までがその涵養域と考えられた。

一方、いくつかの水源の取水量をまとめて計測している水源では、涵養面積もまとめざるを得ず、水源別の涵養面積（涵養域）を求めることはできない。個別の涵養域を求めるには、水源水の混合割合を明らかにする必要がある。例えば、合流後の配水池の水についても、その水質分析が必要といえる。また、水源ごと、取水量に含まれない湧出水（伏流水）の水量を把握しないと、今回の方法では涵養面積を小さく見積もってしまう。

今後、本研究で算出した涵養面積を地形に合わせ涵養域を推定する必要がある。さらに、沢水の流量を測定するなどし、流域ごとの水

収支を求め、上記涵養域の推定が正しいか確認する必要もある。しかし、今回の調査では4月と10月で涵養標高が大きく変動したため、現時点で涵養域を定められる状況にない。今後、その変動要因を明らかにする必要がある。

4. まとめ

諏訪市水道水源すべてについて、その基礎的な水質が明らかになった。また、標高別の降水の酸素・水素安定同位体比から各水源の涵養標高が算出された。さらに、水中のSF₆濃度から滞留時間が推定され、各水源の賦存量が明らかになった。これらに基づき、各水源について、涵養面積の推定を行うことができた。しかし、4月と10月で水源の涵養標高が大きく異なったため、各水源の涵養域の特定には至らなかった。また、個別の湧出量が不明な水源については、賦存量や涵養面積の推定ができないため、今後、その把握に努める必要がある。また、ここで得られた値（賦存量・涵養域）の妥当性を判断するためには、流域ごとの水収支を明らかにし、本研究結果が過大もしくは過小評価となっていないことを確認する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試料採取やデータ提供など、諏訪市水道局および諏訪市役所生活環境課の皆様には、多大なご協力をいただきました。この場を借り、厚く御礼申し上げます。また、霧ヶ峰スキー場上部で観測された気象観測データを快く提供していただいた信州大学理学部鈴木研究室の皆様にも御礼申し上げます。

(原稿受付 2017.3.3)