

立川ローム層内の地下水の流れ — 雨水浸透槽周辺 —

長瀬和雄

神奈川県温泉地学研究所*

Flow Rate and Pattern Induced by Water Recharge

by

Kazuo NAGASE

(Abstract)

The quick response of the free groundwater level to rainfall is generally explained by a piston flow model. In this model, the duration of water recharged down to groundwater table immediately after a rain in the Kanto loam, has an age of 4-5 years.

An experiment in a recharge system in Hadano by means of monitoring of Radon concentrations and groundwater temperatures confirms that a rain water percolating through large channels, reaches to the groundwater table a few days after a rainfall. The rapid water percolation observed in Hadano is brought about by relatively small effective porosity of the Kanto loam formation, which is calculated to be 6.7%.

はじめに

地表に降った雨の一部は、地下に浸透し、通気帯を下降し、やがて地下水面に達し、緩慢な地下水の流れとなる。

近年、通気帯を下降し地下水面に達するまでの水の動きに関し、いろいろと議論され、注目されている。

平田重夫(1971)は、容積を占める割合では小さいが、急速な下降浸透の役割を果たす間隙がローム層中に存在するとしている。

* 神奈川県足柄下郡箱根町湯本997 〒250-03

神奈川県温泉地学研究所報告 第15巻, 第5号, 97-106, 1984



図1 位置図

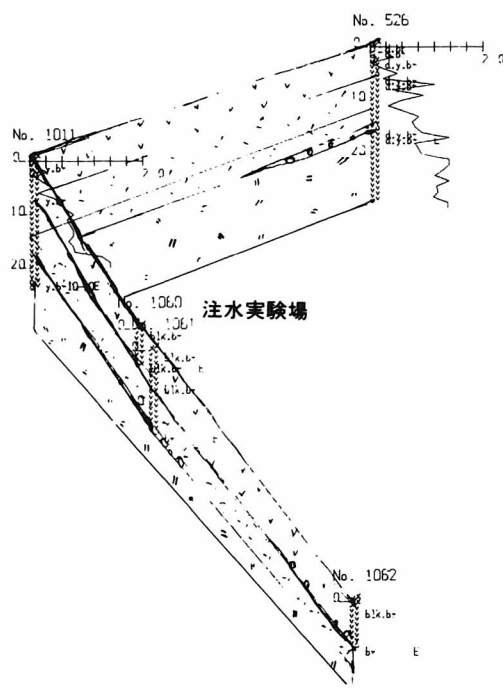


図2 地質断面図

これについて、木村重彦(1971)は、神奈川県相模原台地で、トリチウム濃度の分布からローム層の通気帯を下降する土壌水の流れに検討を加え、その流速を1.4m/年と計算した。榎根勇・他(1980)も、東京都清瀬市で関東ローム層の土壌水の通気帯における下降速度を1.3m/年と計算した。

谷誠(1983)は、榎根の調査した、清瀬市で、ローム層の透水係数を $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/秒と仮定して、土壌水の下降速度を30～300m/年と計算した。

筆者は、現在、秦野盆地の地下水の水収支シミュレーションをおこなっているが、盆地を覆っている立川ローム層の透水係数には、大きな値を与えざるを得ないとかねがね予想していた。

今回、秦野盆地の地下水かん養域にあたる戸川で、立川ローム層内に設置された雨水浸透槽の注水実験をする機会を得た。この実験の結果、浸透水は通気帯を非常に短時間で通過することが、地下水中のラドン濃度や水温で確かめられた。また、シミュレーションの手法を用いて立川ローム層内を流れる地下水の流速を計算したところ、透水係数は、 1.5×10^{-2} cm/秒と予想より大きな値となり、また有効空隙率は6.5%となった。

ラドン濃度や水温の調査結果、およびシミュレーションの結果は、それぞれ矛盾なく、立川ロームの透水性の大きさを示しているため、測定結果、計算結果をここに報告する。

注水実験場の地質

注水実験場は、秦野盆地の北部の戸川に位置する。この付近は、富士火山起源の立川ロームによって厚く覆われている（図1）。

図2は、ボーリング資料から描いた、注水実験場周辺の地下の地質断面図である。この付近で、立川ロームの厚さは16～18m前後である。地表から7～8mのところにはテフラの不連続面があり、立川ロームは上部と下部に分けられる。この面は、いわゆる田名面に対比される。この地形面の上には、砂や砂礫が分布するところがあるが、実験場の地下では、それらの地層はない。上部立川ロームのN値は、小さく10以下であるが下部立川ロームのN値は、10～30で上部に較べ下部は固い。上部立川ロームと下部立川ロームでは、透水性に差があるため、上部立川ロームへ浸透した雨水は、この地形面の上に溜って地下水面を形成し、地形面の傾斜に沿って流れながら、さらに下方の下部立川ロームへ浸透する。

今回の注水実験は、上部立川ローム層内でおこなったものであり、この報告書では、上部立川ロー

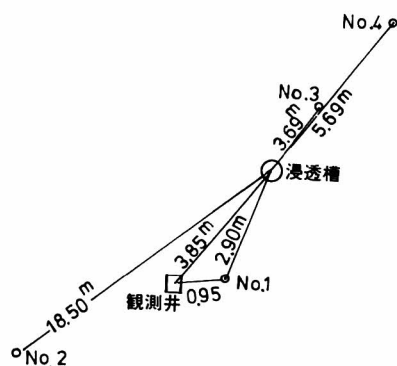


図3 浸透槽・観測井・観測孔配置図

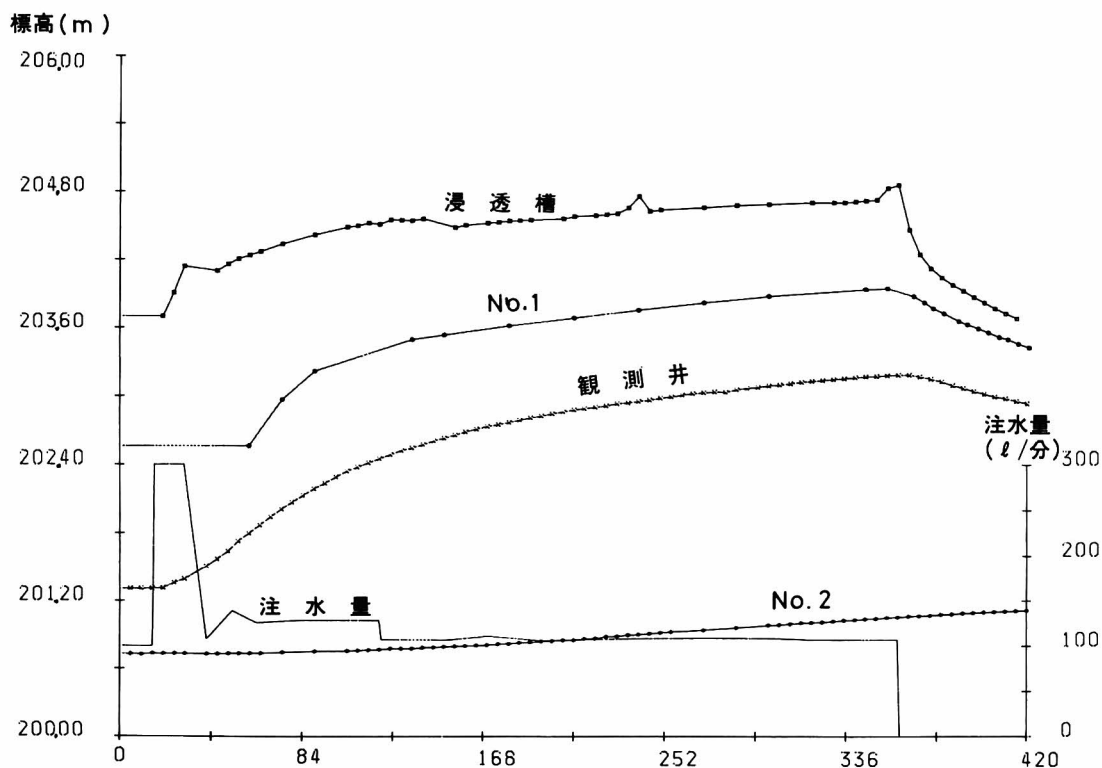


図4 注水量と地下水の水位変化

ム内での水の動きを論じる。

注水実験

図3は、戸川注水実験場にある雨水浸透槽と観測井、観測孔の配置図である。

浸透槽は、 $2 \times 2 \times 2.8\text{m}^3$ の直方体をしており、砂利で充填されている。そこへ、近くの民家と納屋の屋根、合計 157m^2 に降る雨水を導水し、浸透槽を通して地下水のかん養をはかっている。観測井戸は、水道が引かれる以前に、使用されていた浅井戸で、深さは 7.5m で、上部立川ロームの下底まで掘られている。この井戸には、自記水位計が設置してある。観測孔1、観測孔2、観測孔3、観測孔4は、ハンド・オーガーで掘った穴で、観測孔1の深さは、 3m 、それ以外はすべて 4m である。

注水実験は、浸透槽へ近くの消火栓の水を注水して実施した。注水開始から15分間は、 100 l / 分 の割合で注入したが、浸透槽内に水面が現われなかったので、15分後から注水量を増やし、 300 l / 分 とした。注水開始18分後に、浸透槽内に水面が現われ（浸透槽観測孔は、下方 80cm ほど砂利で充填されている）、それが急上昇した。そこで、注水開始30分～52分の間は調節し、注水開始52分～120分の間は、 135 l / 分 さらに、注水開始120分から注水を停止した360分の間は、 110 l / 分 の割合で注入した。注水開始前の観測井、観測孔2の水位は、それぞれ、標高 201.35m 、 200.70m であったが、浸透槽内観測孔、観測孔1には水は無かった。

観測井の水位は、注水10分後に注入水の影響を受け始め、注水開始20分後から水位の上昇速度が大きくなった。観測孔1では、注水開始60分後に、孔の底に水面が現われ、水面はその後急上昇した。観測孔2では注水開始60分後から緩慢な水位の上昇が始まった。360分間注水した後、注水を停止したところ、浸透槽や観測孔ではほとんど同時に水位が低下を始めたが、観測井では、注水停止5分後から低下が始まった。観測孔2では注水停止1時間後でも水位の上昇が続いた（図3）。

シミュレーション

注水試験時の地下水の流れをシミュレーションの手法を使って数量化してみる。

平面二次元水収支式

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x(i, j) \cdot \frac{\partial h(i, j)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y(i, j) \cdot \frac{\partial h(i, j)}{\partial y}) = S(i, j) \cdot \frac{\partial h(i, j)}{\partial t} + W(i, j, t)$$

をADI法で解く。

ここで $T_x(i, j)$ 、 $T_y(i, j)$ は、それぞれ (i, j) 座標の格子におけるX軸方向（東西方向）、Y軸方向（南北方向）の透水量係数、 $S(i, j)$ は、有効空隙率、 $h(i, j)$ は、地下水頭、 $W(i, j, t)$ は、かん養量、湧出量、揚水量、浸透量など、帯水層に直交する方向の水の出入量、 t は時間である。

浸透槽の周辺地域を1辺が 10m の格子に区分する。格子の数は、南北方向、東西方向それぞれ11個ずつとし、浸透槽を含む格子を北から4番目、西から5番目、つまり座標（4，5）となるようにす

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	203.09	203.38	203.34	203.32	203.28	203.23	203.18	203.14	203.04	202.97	202.96
2	203.27	203.19	203.16	203.17	203.18	203.08	202.97	202.89	202.82	202.78	202.78
3	203.08	203.01	203.02	203.11	203.27	203.01	202.82	202.69	202.61	202.58	202.57
4	202.89	202.83	202.88	203.13	203.84	203.03	202.67	202.49	202.40	202.37	202.37
5	202.69	202.61	202.62	202.72	202.89	202.62	202.40	202.26	202.19	202.17	202.17
6	202.45	202.38	202.35	202.36	202.37	202.25	202.12	202.03	201.98	201.97	201.97
7	202.23	202.16	202.10	202.06	202.02	201.95	201.87	201.81	201.78	201.77	201.77
8	202.08	201.97	201.89	201.82	201.77	201.71	201.66	201.61	201.58	201.56	201.56
9	201.87	201.77	201.69	201.62	201.56	201.51	201.46	201.42	201.39	201.37	201.36
10	201.67	201.57	201.50	201.44	201.38	201.33	201.28	201.24	201.20	201.17	201.17
11	200.95	201.36	201.31	201.26	201.22	201.16	201.12	201.06	201.01	200.96	200.95
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

図5 注水時の地下水頭分布図（単位：m）

る。水理定数の決定に関しては、原則として観測値や測定値を用いたが、その値のないものについては、反復計算法で決めた。地下水頭で観測値のない格子については、原則として地表面に平行と仮定して決めた。有効空隙率や透水量係数は、シミュレーション対象地域が110m四方と小さく、立川ローム層が一様に分布している地域なので、それぞれすべて同じ値を持つものとした。有効空隙率は、降雨後の水位上昇や注水時の水位変化、地下水温やラドン濃度の変化などから判断して6.7%とした。ま

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
3	0.000	0.009	0.009	0.010	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
4	0.000	0.009	0.009	0.011	0.013	0.011	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
5	0.000	0.009	0.009	0.010	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
6	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
7	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
8	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
9	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
10	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

図6 立川ローム層 上部層から下部層への浸透量（単位：m³/時）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-0.395	0.050	0.026	0.062	0.067	0.076	0.051	0.128	0.102	0.012	
	-0.242	0.252	0.242	0.207	0.138	0.209	0.275	0.332	0.293	0.247	0.242
2	0.099	0.038	-0.013	-0.008	0.142	0.147	0.110	0.092	0.056	0.007	
	0.251	0.240	0.195	0.079	-0.151	0.083	0.214	0.275	0.282	0.271	0.279
3	0.090	-0.011	-0.136	-0.245	0.392	0.290	0.177	0.101	0.044	0.012	
	0.271	0.251	0.197	-0.030	-1.086	-0.030	0.205	0.263	0.272	0.271	0.273
4	0.073	-0.072	-0.381	-1.336	1.507	0.551	0.247	0.113	0.041	0.009	
	0.277	0.299	0.366	0.625	1.760	0.631	0.369	0.298	0.277	0.270	0.270
5	0.097	-0.013	-0.147	-0.262	0.417	0.310	0.186	0.094	0.032	0.003	
	0.331	0.319	0.375	0.522	0.788	0.525	0.373	0.302	0.271	0.266	0.270
6	0.090	0.040	-0.013	-0.015	0.164	0.169	0.120	0.064	0.023	0.001	
	0.291	0.293	0.330	0.401	0.473	0.402	0.327	0.283	0.264	0.264	0.269
7	0.097	0.076	0.054	0.051	0.096	0.098	0.078	0.044	0.019	0.000	
	0.201	0.252	0.281	0.312	0.333	0.310	0.280	0.259	0.257	0.264	0.281
8	0.152	0.108	0.084	0.071	0.074	0.069	0.057	0.040	0.022	0.010	
	0.289	0.262	0.257	0.259	0.262	0.257	0.249	0.246	0.250	0.258	0.265
9	0.129	0.107	0.089	0.075	0.069	0.062	0.053	0.042	0.028	0.013	
	0.269	0.265	0.250	0.241	0.236	0.234	0.234	0.238	0.248	0.261	0.256
10	0.128	0.096	0.081	0.072	0.068	0.063	0.057	0.052	0.039	0.005	
	0.958	0.285	0.246	0.231	0.221	0.220	0.221	0.232	0.249	0.283	0.290
11	-0.544	0.058	0.068	0.064	0.069	0.064	0.069	0.070	0.073	0.011	

図7 注水時の立川ローム層上部層内での各格子間の地下水流量 (単位: $\text{m}^3/\text{時}$)

た、透水係数は、 $1.5 \times 10^{-2} \text{cm}/\text{秒}$ とし、透水量係数は、自由地下水が計算対象なので、水頭の変化に応じて変わるものとした。

いま、浸透槽 (格子 (4,5)) に、 $6.57 \text{m}^3/\text{時}$ ($110 \text{l}/\text{分}$) の割合で注水して、約5時間経過したときの計算結果について述べる。図5は、このときの各格子の地下水頭、図6は、この帯水層 (上部立川

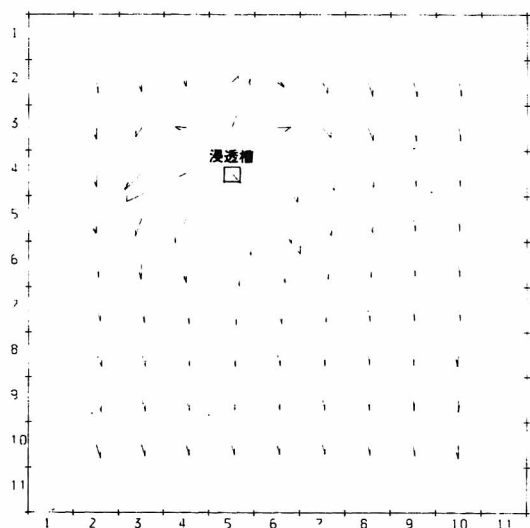


図8 注水時の流速分布

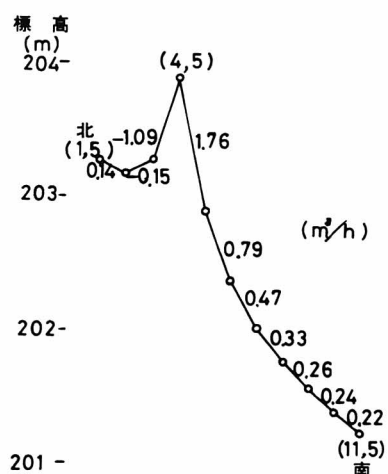


図9 地下水面断面図 (南北)

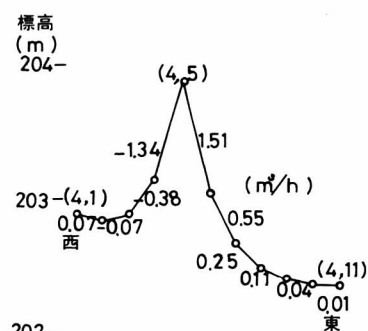


図10 地下水面断面図 (東西)

ローム) から、さらに下方 (下部立川ローム) への浸透量, 図7は, 帯水層内の各格子間の地下水流
量である。

流量は, 北から南, および西から東への流れを正, その逆を負として現わした。図8は, 各格子の
地下水の流速をベクトルで現わしたものである。また, 図9, 10は, 格子 (4, 5) を通った, 南北

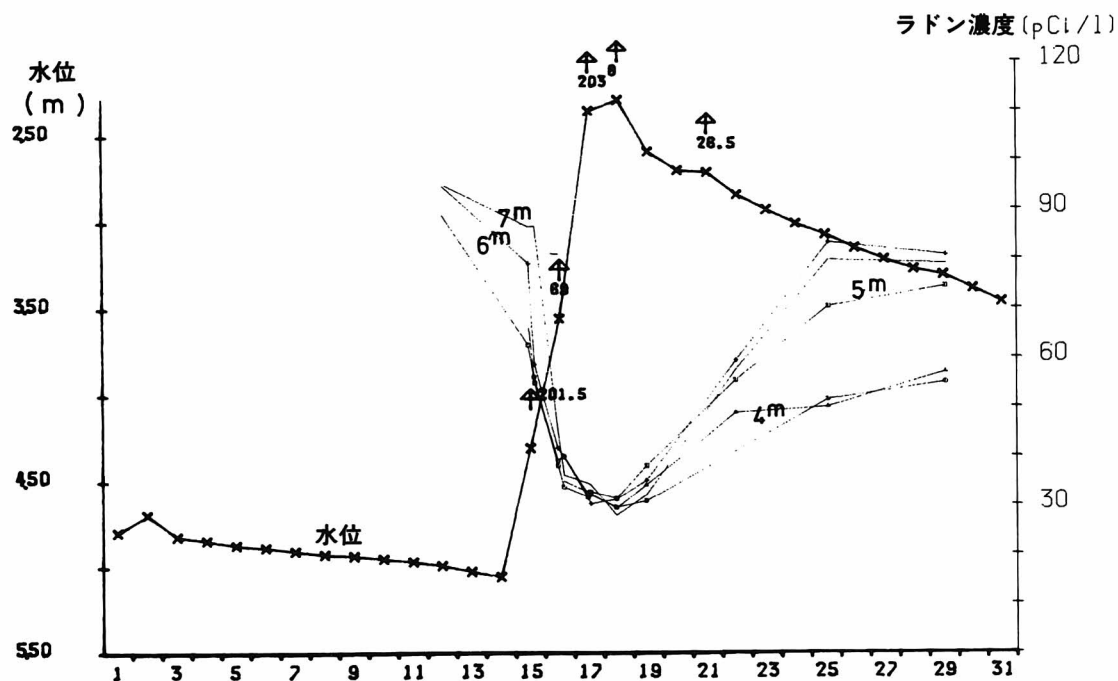


図11 地下水位変化とラドン濃度変化と降水量

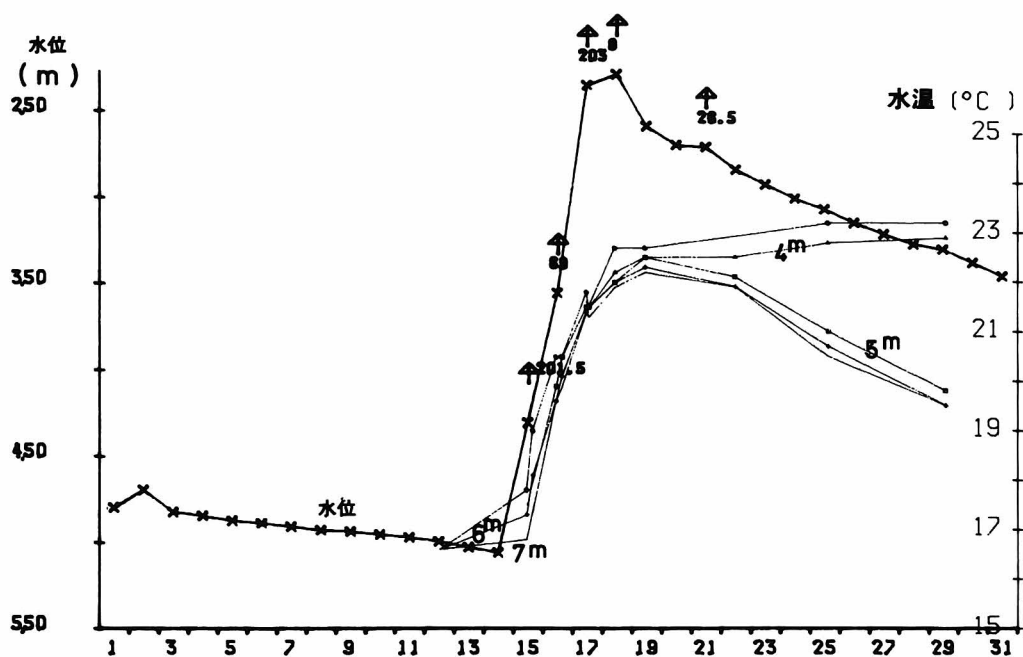


図12 地下水位変化と水温変化

方向と東西方向の地下水面断面図で、図中の数字は、格子間の地下水流量である。この時の、上部立川ローム層内の地下水面は、浸透槽を中心として、半径が20mほどの、逆漏斗状の形をし、地下水は、拡大する方向に流れており、その外側では地形面に沿った、ほぼ南北方向の流れとなっている。

降雨後のラドン濃度と水温の変化

1983年8月15日～18日に注水実験場付近には481.5mmに達する記録的な豪雨がかった。そのため、観測井の水位は、降雨前に比べ、約3mも上昇した。この機会を捕え、観測井で、深度別に採水し、ラドン濃度と水温を測定した。

図11は、水位変化とラドン濃度変化、図12は、水位変化と水温の変化を示す。降雨前の8月12日には、深度7m、6m、および地下水面付近（深度5.1m）のラドン濃度は、それぞれ94.9pCi/l、94.8pCi/l、89.0pCi/lと高く、水温は、すべて16.6°Cで一定で低かった。しかし、15日から降りだした激しい降雨により、各深度のラドン濃度は、急激に減少し、水温は、急激な上昇を示した。ラドン濃度は、18日に最も低くなり深度7mで27.9pCi/l、深度6mで31.2pCi/l、深度5mで31.3pCi/l、深度4mで29.3pCi/l、深度3mで32.8pCi/l、深度2.7mで29.5pCi/lを示した。降水にはラドンは含まれていないのでこのようなラドン濃度の低下は、浸透槽から浸透した雨水が、帯水層（上部立川ローム層）の下底まで達し、横方向に拡がって、少なくとも観測井付近まで流動してきて、それまでの地下水と入れ換わったことを示す。水温の上昇は、帯水層による熱の吸収のため少し遅れ、降雨以

前に地下水が存在していた深さ5～7mの所で、19日に最高に達し、その値は7mで22.2℃、6mで22.3℃、5mで22.5℃であった。深さ5.2m以浅は降雨前は、通気帯であったため、5.2m以深の地下水とそれ以浅の地下水では、降雨後のラドン濃度や水温の変化に大きな違いが生じた。5m以浅の地下水の水温の最高は、8月29日に現われ、深度4mで22.9℃、深度3.4mで23.2℃であった。

深度5m以深のラドン濃度や地下水温は、最低値あるいは最高値を示した後、それぞれ降雨前の状態へ向かって変化した。ラドン濃度は、8月25日に深度7mで79.7pCi/ℓ、深度6mで83.3pCi/ℓ、深度5mで70.7pCi/ℓとなり、その後、ほぼその値を保った。

このことは浸透槽から浸透した水の影響を受けなかった地下水が、上流から流れてきて、再び観測井付近の地下水と入れ換ったことを示す。5m以深の地下水の水温が最も低くなったのは、約1ヵ月後の9月19日で、深度7mで17.0℃、深度6mで同じく17.0℃、5mで17.7℃であった。水温の変化は、ラドン濃度の変化から推定される水の動きより、かなり遅れて現われた。

前述のシミュレーションで使用した水理定数を用いると、注水実験場付近の上部立川ローム層内の地下水は、1日に2m程の流速を持つと計算される。このことは、8月15～17日の降雨で、浸透槽から浸透した雨水が1～2日後に、浸透槽周辺の地下水と入れ換わり、再び1週間後に上流から流れてきた、浸透槽から浸透した水と無関係な水と入れ換わるというモデルを都合よく説明できる。

ま と め

ローム層の中の通気帯を移動する浸透水に対し、全体の空隙の中で占める割合は小さいが、急速な下降浸透の役割を果たす空隙が存在し、ここを浸透水は大きな流速で流動できるという考えと、ローム層内の体積含水率は、65～75%と大きいので数mの厚さのロームは、数年間分の浸透水を保有可能で、浸透水は、ローム層の中を非常に緩慢に下降するという考え方とがある。今回、上部立川ローム層内に設置した雨水浸透槽で実験した結果から、浸透水や地下水は、立川ロームの中を大きな速度で流動しているということが確かめられた。その流動に関係する空隙率(有効空隙率)は6.7%と計算された。

秦野盆地は、透水性の大きい立川ロームに覆われているので、地表で取り扱われる有害物質の使用や使用後の保管には、厳重な監視と管理が必要である。

謝 辞

この研究を実施するにあたって、秦野市水道局からは、注入水を提供していただくなど全面的なご協力をいただいた。特に、水道局計画係の小泉米次郎氏、振原滋氏、水野和義氏には、注水実験時の水位測定にもご助力いただいた。東海大学土木学科学生の矢部俊男君は、卒業論文のテーマとして、注水実験場での現場透水試験の方法を選びハンドオーガーによる観測孔の掘さくや降雨時の水位観測などに協力していただいた。注水実験場付近の土地所有者上村亮氏には、降水量の観測の他、いろいろのご助力を戴いた。また、大木靖衛温泉地学研究所長には、本調査結果をこの報告書に掲載する機

会を与えていただいた。これら関係者の方々に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 平田重夫（1971） 本郷台，白山における不圧地下水の涵養機構，地理評，44，14-46.
- 木村重彦（1971） 水中のトリチウムによる地下水の流れの研究，農業土木試験場報告，9，1-46.
- 木村重彦（1979） 土壌水の ^3H による垂直浸透機構の解析，放出放射能による環境汚染と被曝評価に関する研究，昭和53年文部省科学研究費総研（A）.
- 木村重彦（1979） 環境放射能等による流動機構の研究，地下水の水収支の解析手法に関する総合研究，科学技術庁.
- 榎根勇・田中正・島田純（1980） 環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壌水の移動，地理学評論，53，225-237.
- 長瀬和雄（1980） 水収支シミュレーションにおける透水量係数決定の一方法—反復計算法について—神奈川温研報告，Vol. 12，No. 2，43-50.
- 谷 誠（1983） 地下水面上昇の観測結果に対する不飽和浸透，ハイドロロジー，No. 13，41-50.