

神奈川県内の温泉水のトリチウム濃度と年代

板寺一洋^{1)*}, 大山正雄²⁾

(令和3年9月24日受付, 令和3年12月29日受理)

Tritium concentrations and dating of hot spring waters
in Kanagawa Prefecture, JapanKazuhiro ITADERA^{1)*} and Masao OHYAMA²⁾

Abstract

Residence time and recharged time of hot spring waters in Kanagawa Prefecture were estimated based on their tritium concentrations measured in the early 1990s. The models used for this study were piston flow model, well-mixed cell model and combination of these two models, and the time series data of tritium concentrations in precipitation by the past researches were used as the input data for each model. In Hakone and Yugawara region, hot spring waters from shallow to about 1000 m in depth indicated tritium concentrations from nearly zero to several TU, and it was assumed that there could be various cases where the residence time of waters were from several to about 50 years or recharged time were before the 1960s. These results may correspond to that the infiltration of rain water and the groundwater flow are active in these regions belonging to volcanic area. Whereas, in the other regions, tritium concentrations of hot spring waters in a depth of 200 m or more were almost less than 1 TU, and by all models in this study, the residence time of waters were estimated to be several 10 years or more at the shortest. So, in the regions of Kanagawa Prefecture other than Hakone and Yugawara, it was inferred that decades being taken to recharge deep hot water in a depth of several 100 m.

Key words : Residence time of hot spring water, Tritium concentration, Piston flow model, Well-mixed cell model

要 旨

1990年代初頭に測定されたトリチウム濃度のデータを用い、神奈川県内の温泉水の滞留時間(または雨水により涵養された時期)を見積もった。滞留時間の見積もりには既往研究による雨水のトリチウム濃度の時系列を入力としたピストン流モデル、完全混合モデルおよび両者

¹⁾ 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586. ¹⁾ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 586 Iryuda, Odawara-shi, Kanagawa, 250-0031, Japan. *Corresponding author

²⁾ 一般社団法人日本温泉協会 〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-5-5 全国旅館会館. ²⁾ Japan Spa Association, 2-5-5, Hirakawacho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0093, Japan.

を組み合わせたモデルを適用した。その結果、箱根・湯河原の温泉水については、浅層から深度 1000 m に及ぶ範囲まで 0 TU 付近から数 TU までの様々なトリチウム濃度が得られており、温泉水の滞留時間として数年から 50 数年、あるいは涵養時期が 1960 年以前となるといった様々なケースが想定された。このことは、これらの地域が火山地域にあたり、雨水の浸透および地下水の流動が活発であることを反映している可能性が考えられる。一方、それ以外の地域の 200 m 以深では温泉水のトリチウム濃度は概して 1 TU よりも小さく、どのモデルにおいても地下水の滞留時間は短く見積もっても数十年以上であると推定された。このことは、そうした地域において雨水または雨水が元になった浅層の地下水が深さ数百 m 以上の大深度温泉を涵養するまでに数十年以上の相当長い時間を要することを示唆している。

キーワード：温泉水の滞留時間，トリチウム濃度，ピストン流モデル，完全混合モデル

1. はじめに

神奈川県内では 1980 年代中頃からの温泉開発ブーム以降、特に 1990 年ごろから 2010 年ごろにかけ、山岳部の温泉地周辺の平野部などにおいて深度 1000 m の孔井掘削を行ういわゆる大深度温泉の開発が盛んに行われた。神奈川県温泉地学研究所が確認したところ 2018 年 3 月までに県内において 80 本が掘削されている。全国的に見ても、概ね同様の傾向で大深度温泉の開発が進められてきたと見られるものの、平野部における深部の温泉水の成因や賦存状況に特化した調査事例はまだ少ない。環境省の温泉資源保護のためのガイドライン（環境省自然保護局，2014；以下ガイドライン）においても「大深度掘削泉に関する情報収集は未だ不十分であり、調査等を実施し大深度も含めた地域の温泉の賦存量等を把握することが望ましい。」としているなど、依然として詳細が不明なまま大深度温泉水の開発や利用が先行しているのが実状である。

地熱開発やそれに関わる調査の事例を除き、事前に調査井を掘削したり、資源量評価に関わる調査を実施したりして温泉開発が進められる事例は皆無といって良いであろう。その意味では、新規の温泉開発は、新たなデータを取得する貴重な機会となっているという事も出来る（板寺ら，2010）。神奈川県温泉地学研究所では、これまで、県内の大深度温泉井の掘削から利用までの事務手続きに関わる温度・成分・地質等のデータを収集・整理した結果にもとづき大深度温泉水の帯水層となっている地質の詳細や環境、温泉水の成因についての検討を進めてきた（大山ら，1995；小沢ら，1999；小沢・江藤，2005；小田原，2008；菊川ら，2007；菊川・板寺，2004；板寺ら，2010b；板寺ら，2012 など）。そうした取り組みの中、大深度温泉の開発が盛んになり始めた 1990 年代の初頭に、温泉水の実態や循環機構を把握するためトリチウム濃度の測定調査が実施された（神奈川県温泉地学研究所，1992；1993；1994；1995）。トリチウムなど水中に含まれる放射性元素の濃度に着目し水の年代を明らかにする手法（馬原，1996）は地下水分野において数多く試みられている。温泉水の年代（地下水としての滞留時間または涵養時期）に関する情報も、温泉水の生成機構に関わる地下水の流動や賦存の状況、持続可能な利用の在り方について検討する上で非常に重要なデータとなる。本稿では過去に分析された神奈川県内の温泉水等のトリチウム濃度のデータを整理し直し、温泉水の年代について検討したので、その結果について報告する。

2. トリチウム濃度と検討対象とした試料

水分子を構成する水素の同位元素として質量数 1 の通常の水素 H のほか質量数 2 の重水素（デュートリウム）と質量数 3 の T（トリチウム）が知られている。このうちトリチウムは、近年、福島第一原発の事故とその後の処理水に関連してたびたび話題となっているが、元来、天然に存在する水

素の放射性同位元素であり, 大気中の窒素や酸素が宇宙線の作用を受け核種変換することでも生成される. 通常の水素原子が陽子, 電子それぞれ1つずつから構成されているのに対し, 重水素原子は陽子と電子, そして中性子が1つずつ, トリチウム原子は陽子と電子が1つずつ, 中性子2つから構成されている.

トリチウムは放射壊変により中性子の一つが電子を放出 (β 崩壊) して陽子となり, 質量数3のヘリウムになる. 一般に放射性物質の濃度は, 1秒間に崩壊する原子の個数(放射能)を表す単位であるBq(ベクレル)や, 1gの ^{226}Ra (半減期1600年)の持つ放射能との比であるCi(キュリー, 現在は1Ci=37GBq)で表されるが, トリチウム濃度の表記については, 慣例的に水素原子 10^{18} 個あたりに含まれるトリチウムの個数を示すTU(トリチウムユニット)が用いられることが多い. 本報告で扱うトリチウム濃度の測定値も(pCi/l)により表記されていたが, 以後の記述においては次式によりTUに換算した結果を示している.

$$1\text{ TU} = 0.118\text{ Bq/l} = 3.2\text{ pCi/l}$$

TUという単位の考え方が示す通り, 通常, 自然界を循環する水に含まれるトリチウムはごく僅かである. その測定手法についての詳細は省くが, 試料水の電気分解によりトリチウムを濃縮した後, 液体シンチレーションカウンターにより分析するのが一般的である. 測定精度は試料の濃縮過程と分析過程での様々な要因により影響を受け, 本稿で対象とした0~10TU程度の試料の場合, 測定精度は100分の1~10分の1Bq/l程度, すなわち0.1~1TU程度である.

本稿で検討を行った水試料のトリチウム濃度の測定は, 神奈川県衛生部生活衛生課(当時)の依頼を受け温泉地学研究所が1991年から1994年にかけて実施した「深層熱水循環地調査事業」の中で外部委託により行われた. 測定を行ったのは全部で72試料である. その内訳は温泉水が54(うち孔井の掘削深度1000m以上の大深度温泉が12), 地下水(湧水を含む)・表流水が18であった. また温泉水のうち箱根・湯河原地域の温泉は39(うち大深度温泉が7), その他の地域が15(うち大深度温泉が5)であった. 採水地点の位置を図1に, 測定結果の一覧を表1に示した. なお, 1991年採水分の試料については採取日が不明であったため, 便宜的に1991年6月1日としている.

図2にトリチウムの濃度の頻度分布を示した. 全試料のトリチウム濃度範囲は0から11TUだが,

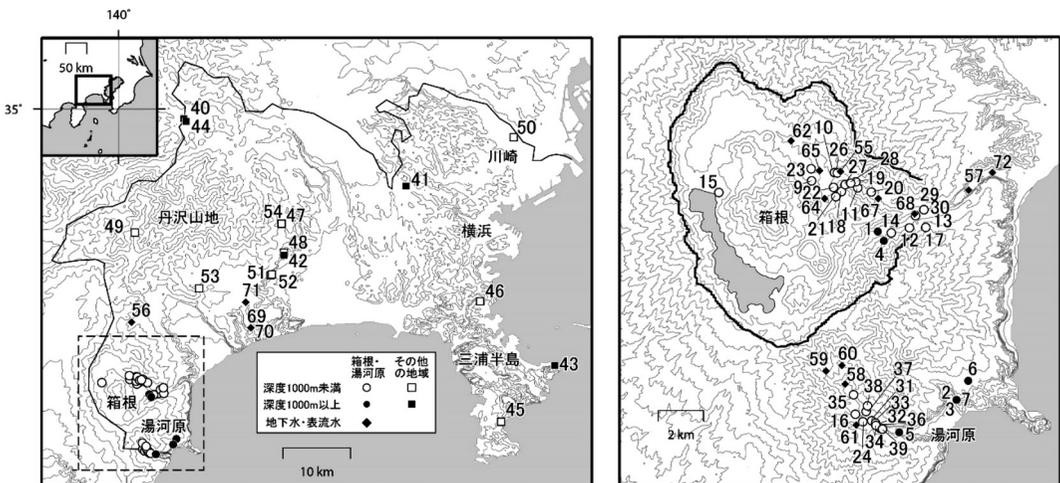


図1 採水地点の位置(番号は表1に対応. 詳細位置が不明なNo. 8, 25, 63, 66を除く)

表 1 測定結果一覧

No.	地域	種別	採水日	井戸深度 (m)	温度 (℃)	流量 (ℓ/分)	トリチウム濃度		
							pCi/l※	TU※	
1	箱根・湯河原	大深度温泉	1994/11/5	1100	93.9	59	0.8	0.3	
2	箱根・湯河原	大深度温泉	1993/12/8	1103	45.6	254	<0.77	<0.2	
3	箱根・湯河原	大深度温泉	1994/11/17	1103	44.6	300	<0.78	<0.2	
4	箱根・湯河原	大深度温泉	1992/6/12	1100	92.4	61	<3.06	<1	
5	箱根・湯河原	大深度温泉	1992/4/24	1100	49.8	89	12.3	3.8	
6	箱根・湯河原	大深度温泉	1992/4/14	1000	28.8	123	<3.02	<0.9	
7	箱根・湯河原	大深度温泉	1991/6/30	1103	45.9	300	<3.08	<1	
8	箱根・湯河原	温泉	1994/11/22	481	95.9	212	1	0.3	
9	箱根・湯河原	温泉	1994/4/26	473	87.8	73	10.5	3.3	
10	箱根・湯河原	温泉	1992/10/26	797	81.3	65	1	0.3	
11	箱根・湯河原	温泉	1993/10/26	697	71.6	110	<3.07	<1	
12	箱根・湯河原	温泉	1992/6/29	650	60.2	54	7	2.2	
13	箱根・湯河原	温泉	1992/6/25	631	55.9	65	<3.07	<1	
14	箱根・湯河原	温泉	1992/6/23	650	64.6	37	16.8	5.3	
15	箱根・湯河原	温泉	1993/2/21	872	30.7	104	11.6	3.6	
16	箱根・湯河原	温泉	1993/5/31	550	77.2	27	<3.00	<0.9	
17	箱根・湯河原	温泉	1992/6/26	548	56.0	93	7.1	2.2	
18	箱根・湯河原	温泉	1992/10/21	225	61.3	44	22.1	6.9	
19	箱根・湯河原	温泉	1992/11/30	535	72.8	69	<3.05	<1	
20	箱根・湯河原	温泉	1992/12/4	680	55.4	41	<3.05	<1	
21	箱根・湯河原	温泉	1992/11/18	294	65.5	66	21.4	6.7	
22	箱根・湯河原	温泉	1992/10/21	275	73.7	78	20.6	6.4	
23	箱根・湯河原	温泉	1992/11/12	431	60.2	58	<3.08	<1	
24	箱根・湯河原	温泉	1992/5/26	650	47.6	35	14.4	4.5	
25	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	-	82.9	-	23.6	7.4	
26	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	自然湧出	39.2	21	9.8	3.1	
27	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	自然湧出	93.0	-	22.1	6.9	
28	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	自然湧出	59.5	8	21.6	6.8	
29	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	自然湧出	53.0	5	7.5	2.3	
30	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	自然湧出	42.7	43	10.2	3.2	
31	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	278	82.3	46	9	2.8	
32	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	554	76.5	70	14.3	4.5	
33	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	360	80.2	33	4.7	1.5	
34	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	363	84.7	69	<2.93	<0.9	
35	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	355	80.1	37	7.8	2.4	
36	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	600	62.5	63	10.2	3.2	
37	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	387	79.5	50	9.1	2.8	
38	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	600	86.5	114	4.5	1.4	
39	箱根・湯河原	温泉	1991/6/30	600	62.8	85	7.4	2.3	
40	その他の地域	大深度温泉	1994/10/25	1400	46.9	234	<0.76	<0.2	
41	その他の地域	大深度温泉	1993/12/24	1500	42.3	124	<3.07	<1	
42	その他の地域	大深度温泉	1992/9/11	1001	35.8	146	<3.07	<1	
43	その他の地域	大深度温泉	1991/6/30	1005	21.7	1	4.3	1.3	
44	その他の地域	大深度温泉	1991/6/30	1400	44.0	160	<2.85	<0.9	
45	その他の地域	温泉	1994/11/8	958	29.9	63	<0.78	<0.2	
46	その他の地域	温泉	1994/9/26	70	17.6	527	5.6	1.8	
47	その他の地域	温泉	1994/11/28	600	27.3	95	<0.77	<0.2	
48	その他の地域	温泉	1992/10/7	810	26.1	61	<3.07	<1	
49	その他の地域	温泉	1993/10/13	286	34.3	59	<3.07	<1	
50	その他の地域	温泉	1992/5/28	80	16.8	87	<2.93	<0.9	
51	その他の地域	温泉	1991/6/30	500	37.2	268	<2.86	<0.9	
52	その他の地域	温泉	1991/6/30	45	20.7	50	11.1	3.5	
53	その他の地域	温泉	1991/6/30	700	24.0	47	<2.91	<0.9	
54	その他の地域	温泉	1991/6/30	600	27.7	69	<2.76	<0.9	
55	箱根・湯河原	表流水	1993/6/11	24.3	10200	15.2	4.8		
56	箱根・湯河原	表流水	1994/2/8	8.8	-	11.5	3.6		
57	箱根・湯河原	表流水	1993/7/26	-	-	8.6	2.7		
58	箱根・湯河原	表流水	1986/12/13	10.2	3323	27.1	8.5		
59	箱根・湯河原	表流水	1986/12/13	9.6	3003	34.7	10.8		
60	箱根・湯河原	表流水	1986/12/13	10.8	270	27.5	8.6		
61	箱根・湯河原	表流水	1986/12/13	10.1	2770	31.7	9.9		
62	箱根・湯河原	湧水	1991/6/30	15.9	2680	24.6	7.7		
63	箱根・湯河原	湧水	1991/6/30	18.0	1914	15.9	5.0		
64	箱根・湯河原	湧水	1991/6/30	21.4	651	21.4	6.7		
65	箱根・湯河原	湧水	1991/6/30	18.2	246	15.2	4.8		
66	箱根・湯河原	湧水	1991/6/30	16.4	73	22.2	6.9		
67	箱根・湯河原	地下水	1991/6/30	自噴	12.3	16	15.8	4.9	
68	箱根・湯河原	表流水	1991/6/30	14.9	2218	30.3	9.5		
69	その他の地域	地下水	1993/12/24	500	27.4	37	<2.97	<0.9	
70	その他の地域	地下水	1994/2/10	60	16.0	-	6.7	2.1	
71	その他の地域	湧水	1994/2/10	-	-	-	28.1	8.8	
72	その他の地域	表流水	1991/6/30	15.2	-	-	20.8	6.5	

※ < **は濃度が測定限界 (**未満であることを示す。

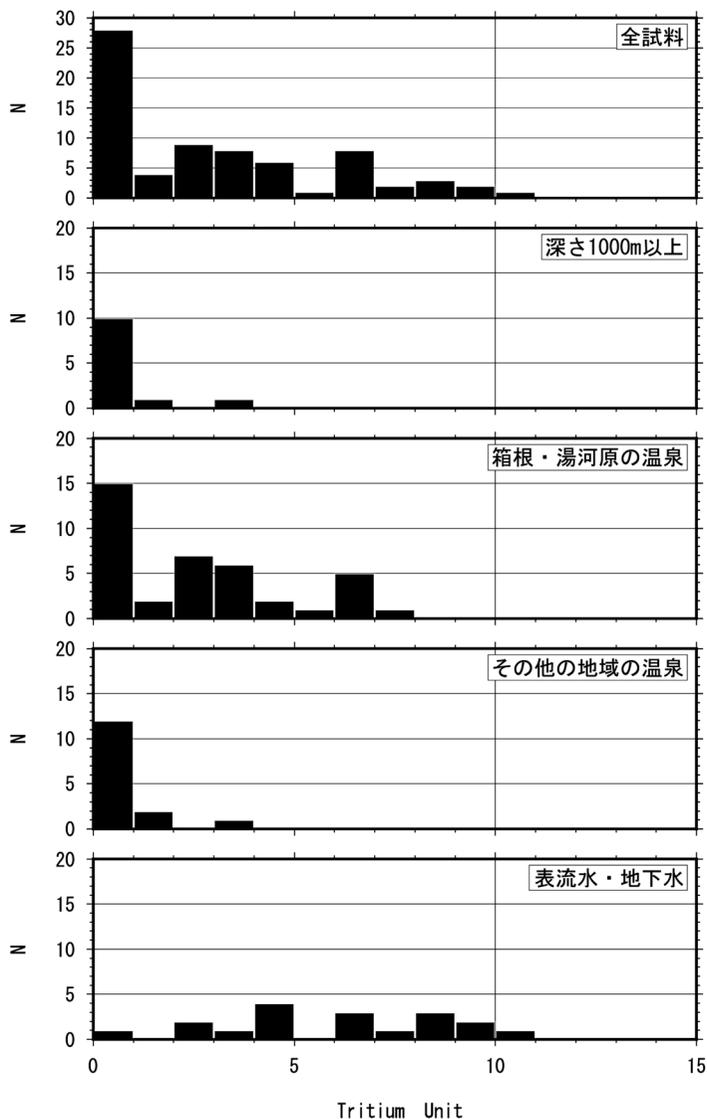


図 2 検討したトリチウム濃度の頻度分布

大半が1 TU 以下であった。また、箱根・湯河原地域の温泉水は0 付近～7 TU で、それ以外の地域（0 付近～4 TU）に比べて値の範囲が広がった。地下水・表流水等は0～11 TU までの様々な値をとり、温泉水のほうが概して低い値となっている。

図3 は井戸の深さとトリチウム濃度の関係を示している。水の賦存深度とトリチウム濃度の関係を検討するには井戸の構造（水止め位置やストレーナー深度）をもとに実質的な採水深度を考慮すべきであるが、それらを網羅した資料が入手出来ていないことから、井戸深度で代用することとし、湧水と表流水については深さ0 m とした。全体的には深度が増すほどトリチウム濃度が低くなる傾向が認められる。特に深度500 m 程度以上の温泉水についてはその他の地域の温泉水のほとんどが検出限界以下であったのに対して、箱根・湯河原の温泉水のトリチウム濃度は有意な値となってい

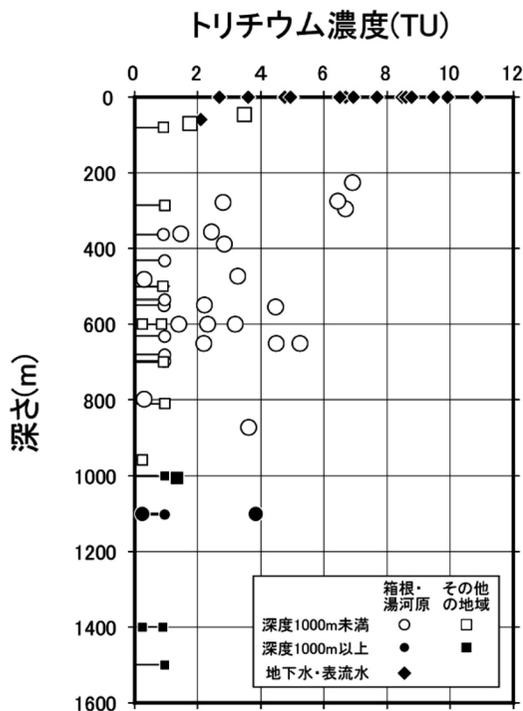


図 3 井戸の深さとトリチウム濃度の関係 (測定限界以下の試料については、プロットを小さくして測定限界値から 0 TU まで線を引いた)

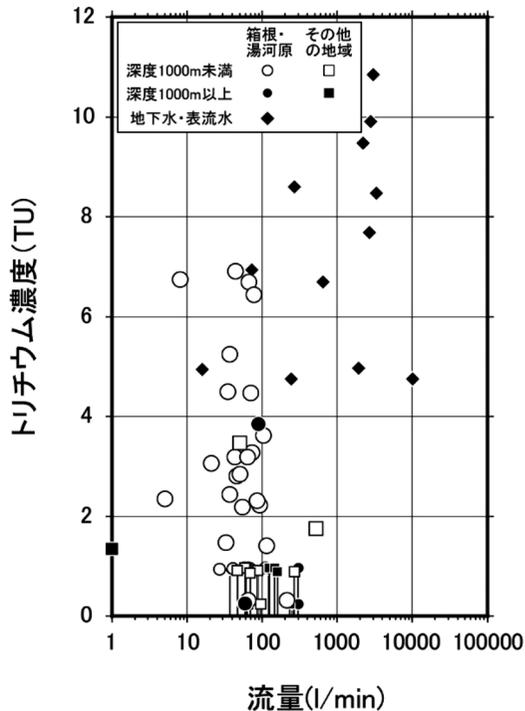


図 4 揚水量とトリチウム濃度の関係 (測定限界以下の試料については、プロットを小さくして測定限界値から 0 TU まで線を引いた)

る。このことから、後述のとおり、箱根・湯河原地域において雨水の浸透および地下水の流動が深部に及んでいることを反映している可能性が考えられる。

流量 (温泉・地下水は揚湯 (水) 量, 表流水は湧出量 (流量)) とトリチウム濃度の関係 (図 4) については、地下水・表流水では流量が多いほどトリチウム濃度が高い傾向があるのに対して、温泉水では今回の測定結果のとる範囲が狭く、明瞭な傾向は認められなかった。

3. トリチウム濃度による温泉水の年代決定

既往研究により、箱根・湯河原地域の火山性温泉は天水起源の水が火山活動に由来する成分を獲得したものであることが知られている (Matsuo *et al.*, 1985; 板寺ら, 2010a)。また、その他の地域の大深度温泉水の成因について、板寺ら (2010b) は、現海水との混合希釈系にあるもの、化石海水が関与しているもの、深層地下水 (天水起源) が関与しているものの 3 つに区分している。このため、特に現海水との混合希釈系にある系にある温泉水について海水の影響について留意する必要がある。高島 (1991) によれば、降水の影響を受けていない太平洋や日本海の表層トリチウム濃度は 0.4 Bq/l 程度、すなわち 3 TU 程度であると述べられているが、上述のとおり、その他の地域の深度 500 m 程度以上の温泉水のほとんどのトリチウム濃度は検出限界以下であることから、本稿で検討した温泉水のトリチウム濃度に海水が直接影響している度合いは小さいものと考えられる。以上のことから、温泉水の年代を検討するにあたって「水」は全て雨水由来とした。

地下に浸透した雨水は、その後の放射壊変によって経過時間とともにトリチウム濃度を減じてい

くこととなる。そうした水が地下水となって流動するプロセスは、元々あった古い水が新たに浸透してきた水に押し出される、あるいは置き換えられる過程であると考えられる。その際、新しく加わった水（雨水など）と元々系内にあった古い水とがどの程度混合するのかが対象とする地下水系によって異なっている。水のトリチウム濃度に基づいて地下水の年代（いつ頃、あるいは何年前に涵養された水であるか）や滞留時間（ある系にどれだけの時間とどまっていたか）を推定するためには、その間の放射壊変による濃度の低下とともに水の混合プロセスを加味する必要があるが、それを忠実にモデル化することは困難である。そのため、多くの先行研究（たとえば北岡・吉岡, 1984; 三條, 1987; Kitaoka, 1988; 吉岡ら, 1993 など）においてピストン流モデルや完全混合モデルといった水の混合過程を単純化したモデルが用いられている。本報告でもピストン流モデルと完全混合モデル、そして両者を組み合わせたモデルにより温泉水ほかの年代あるいは滞留時間を見積ることとした。

それぞれのモデルに入力として与えた月別の雨水のトリチウム濃度の時系列データは、Shimada *et al.* (1994) や藪崎ら (2003) に基づき、1953 年～1960 年は Ottawa で採取された降水の測定値 (IAEA) をもとに推定した値を、1961 年～1976 年 11 月までは東京で、1976 年 12 月以降は筑波大学 (茨城県つくば市) において採取された降水のトリチウム濃度を用いた。雨水のトリチウム濃度は 1952 年から 1967 年にかけて盛んに行われた大気中での熱核爆発実験の影響により急上昇し、1963 年から 1964 年には 1000 TU 以上となるピーク (Bomb ピーク) が形成された。本稿の解析において 1952 年以前の雨水のトリチウム濃度については、このピーク以前の状況であり、天然の値であったと考えられることから、藪崎ら (2003) に示された 1995 年以降の値を参考にして一律 5 TU とした。以下、それぞれのモデルの概略と検討結果について述べる。

3.1 ピストン流モデル

ピストン流モデルでは、新たに涵養された水が系内にあった古い水を押し出す形で流動するものとする。系内にあった古い水は新しい水と混合することはなく、トリチウムの放射壊変に従い濃度を低下させながら時間の経過とともに順次流出することになる。

このような系における涵養時の水のトリチウム濃度を C_0 、涵養されてから t (年) 経過後のトリチウム濃度を $C(t)$ とすると、

$$C(t) = C_0 \cdot 0.5^{(t/12.33)} = C_0 \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (1)$$

λ は壊変定数と呼ばれる定数で、 $\lambda = \ln 2 / 12.33 \text{ yr}^{-1}$ と表すことができる。

(1) 式では、経過時間をマイナス値とすることで測定時点から過去にさかのぼったトリチウム濃度を求めることができる。図 5 は入力として与えた月別の雨水のトリチウム濃度の推移とともに、1994 年 1 月時点のトリチウム濃度がそれぞれ 10 TU, 5 TU, 3 TU, 1 TU だった水について過去にさかのぼった場合のトリチウム濃度を (1) 式により計算した結果を直線で示している。ピストン流モデルにおいてはそれぞれの直線と雨水の推移を示す線が交差する時期が、それぞれの水が涵養された時期を示すことになる。

図 5 によれば、1990 年代初頭にトリチウム濃度が 10 TU の地下水は概ね 1960 年代初頭または 1970 年代初頭の雨水が示していた濃度が放射壊変により減衰した値に相当し、地下水の年代としてはおよそ 20 年～35 年程度と読み取ることができる。同様に 1990 年代初頭のトリチウム濃度が 5 TU の地下水は 1970 年代後半の雨水に対応するから、地下水の年代は概ね 10～20 年程度、3 TU の地下水は概ね 10 年以内、1 TU の地下水は 1960 年以降に該当がないことから 40 年以上前の雨水が起源となっている可能性があることになる。

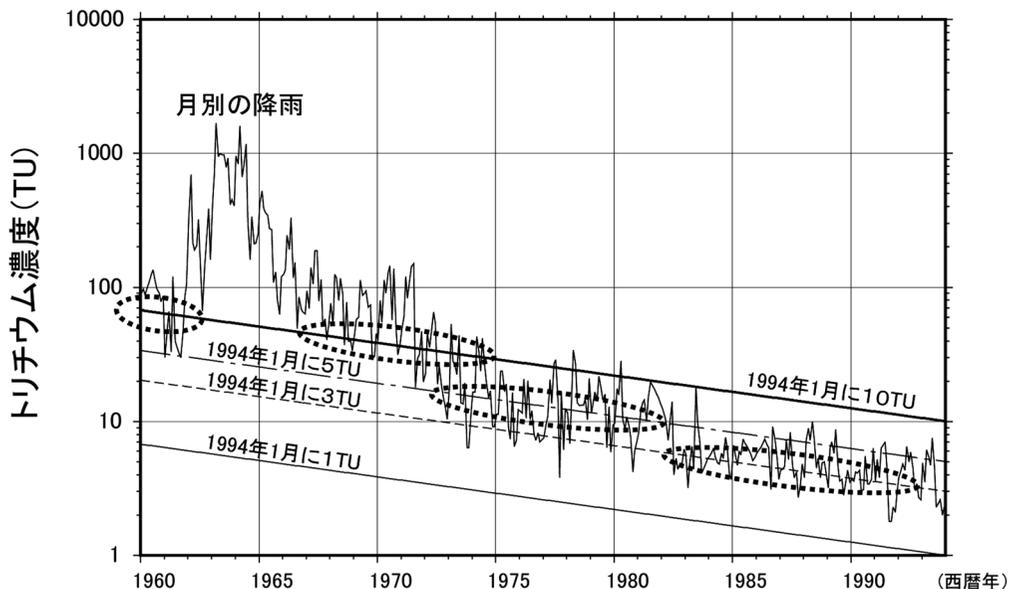


図 5 雨水のトリチウム濃度の時系列とピストン流モデルによる計算結果の比較

3.2 完全混合モデル

一方、完全混合モデルでは、新たに涵養された水はもともと系内にあった古い水と瞬間的に混合するものと仮定している。北岡・吉岡 (1984) は六甲山系における地下水循環の速さについてトリチウム濃度により解析するため、一様な媒質の半無限直角領域で上方から一様な供給を受ける厚さ一定の地下水帯を想定し、その内部に形成される二次元流を考え、流出水のトリチウム濃度の時系列 $C_o(t)$ が次式で表され、常に系全体にわたる瞬間混合を仮定した混合モデルによる表現と完全に一致しているとした。

$$C_o(t) = \frac{1}{T} \int_0^\infty C_i(t-\tau) e^{-(\lambda + \frac{1}{T})\tau} d\tau \dots\dots\dots(2)$$

ここで T は地下水の平均通過時間すなわち平均滞留時間、 $C_i(t)$ は地下水面上における供給水の時刻 t におけるトリチウム濃度、 τ は時刻 t からさかのぼった時間、 λ はトリチウムの壊変定数である。

図 6 はピストン流モデルの場合と同じ雨水のトリチウム濃度の月別時系列を入力とし、(2)式において地下水の滞留時間（地下水が系を通過するのに要する時間）を 1 年、5 年、10 年、20 年とした場合に入力（形成）される水のトリチウム濃度の時系列を示している。それぞれの 1990 年代初頭における出力結果と実際の測定結果を比較することにより地下水の滞留時間を見積もることができる。図 7 は水の滞留時間とそれぞれの滞留時間における完全混合モデルによる 1994 年 1 月時点の水のトリチウム濃度の関係を示した。この図よれば、測定時（1990 年代半ば）におけるトリチウム濃度が 10 TU の地下水の滞留時間は 20~30 年程度、5 TU の地下水で 5 年~6 年程度であると見積もることができる。また 1990 年代半ばにおいて 4 TU より低いケースについては該当がないことから、滞留時間が相当長い場合に対応すると考えることが出来る。

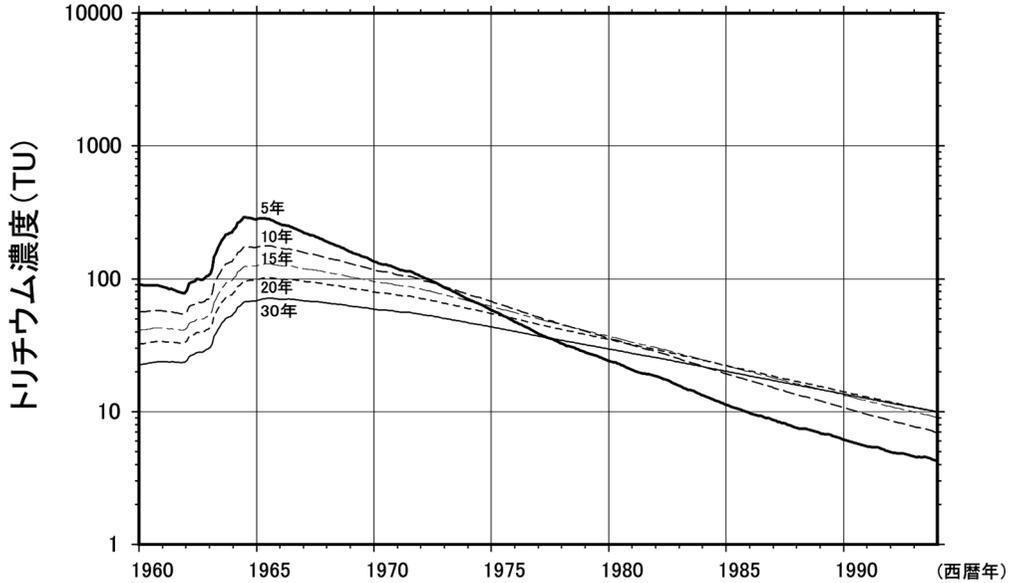


図 6 滞留時間を 5 年, 10 年, 15 年, 20 年, 30 年とした完全混合モデルによる出力の時系列

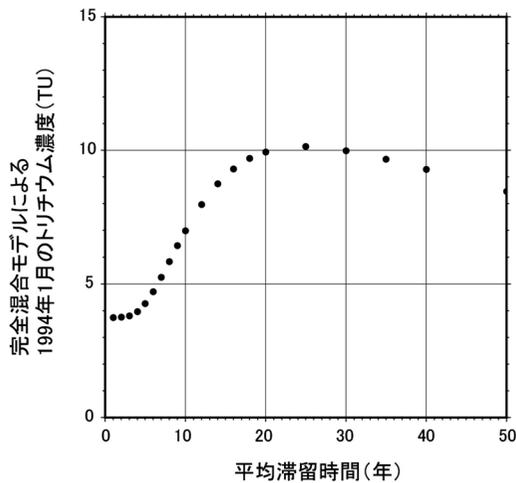


図 7 完全混合モデルによる 1994 年 1 月の出力値と滞留時間の関係

3.3 組み合わせモデル

ピストン流モデルと完全混合モデルは、雨水が浸透してから流出する（多くの温泉水の場合は動力揚湯される）までのプロセスを極端に簡略化した場合にあたり、実際の多くのケースは、これら 2 つの間をとったプロセスをたどるものと考えられる。また、一般的に言われる浅層地下水のように表層付近の地下水系にある水が、さらに浸透して 1000 m を超えるような深部に至るケースもありうる。そうしたケースの中には、表層付近である時間をかけて十分に混合した後の水が、ピストン流的にさらに深部に浸透していくといった近似が可能な場合もあり、上記 2 つのモデルの組み合わせにより検討することができる。

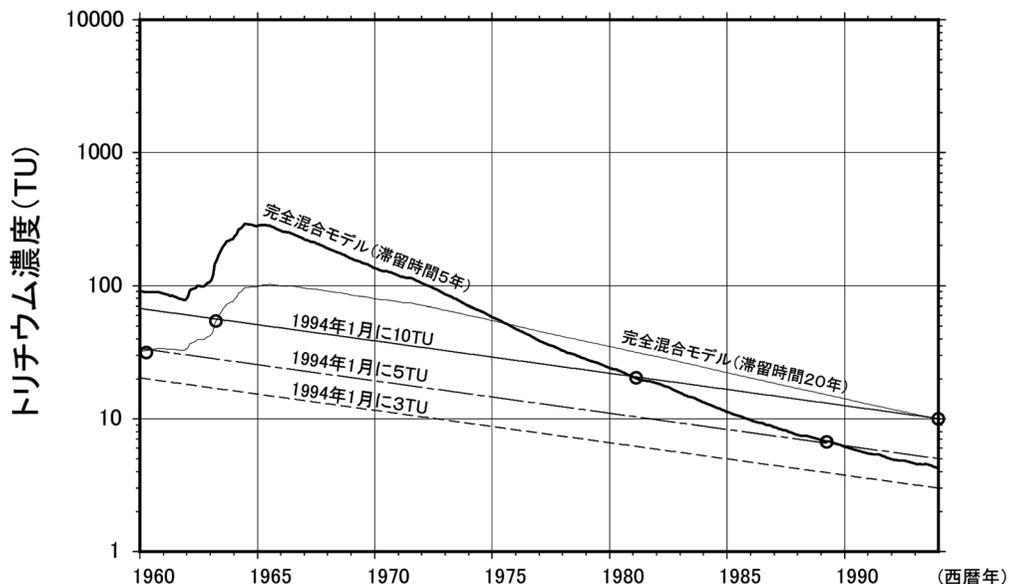


図 8 完全混合モデルとピストン流モデルの組み合わせによる地下水の年代推定

この場合、様々な条件の組み合わせがあり得るが、たとえば三條 (1987) は、関東地方周辺の小流域 40 カ所における渇水期の河川水のトリチウム濃度にもとづき平均的な地下水の滞留時間を約 5 年としていることから、滞留時間を 5 年とした完全混合モデルの出力値の時系列を入力と考えてピストン流モデルによる時系列と比較する (図 8) と、1990 年代半ばにおけるトリチウム濃度が 10 TU の地下水は 1980 年代初頭に浅層地下水により涵養された水に該当することから、地下での通過時間は 15 から 20 年程度と見積もることできる。同様に 5 TU の水は 1980 年代後半に浅層地下水により涵養された水で、地下での通過時間は 10 年程度以内、3 TU の水は 1960 年代初頭に浅層地下水により涵養された水で、地下での通過時間は 30 数年程度以上と考えられる。また、1 TU の水については 1960 年までの間に該当がないことから、それ以前の水である可能性が考えられる。

同様に滞留時間 20 年とした完全混合モデルの出力値を入力としたピストン流モデルによる時系列と比較した場合は、1990 年代半ばにおけるトリチウム濃度が 10 TU の地下水は、同時期の浅層地下水系の値に相当 (滞留時間は 20 年) するか、1960 年代初頭に浅層地下水により涵養された水で、地下での通過時間は 50 年程度以上、5 TU の水は 1960 年代初頭に浅層地下水により涵養された水で、地下での通過時間は 35 年程度と見積もられる。1 TU の水については、やはり該当がないことから、1960 年以前の水である可能性が考えられる。

4. ま と め

上述したそれぞれのモデルによって見積もられる地下水の滞留時間 (または雨水により涵養された時期) を表 2 にまとめた。これと図 3 とを比べてみると、箱根・湯河原の温泉水については、深度 1000 m に及ぶ範囲まで数 TU までの有意な濃度でトリチウムが検出されており、温泉水の滞留時間として数年から 50 数年、あるいは涵養時期が 1960 年以前となるといった様々なケースが想定される。このことは、火山地域にあたるこれらの地域において雨水の浸透および地下水の流動が深部に及んでいることを反映している可能性を示している。これに対して、それ以外の地域の温泉水

表 2 検討したモデルによって推定された水の年代または雨水による涵養時期

1994年1月の トリチウム濃度 (TU)	ピストン流モデル(PFM)	完全混合モデル(WM)	複合(WM5年+PFM)	複合(WM20年+PFM)
	(涵養時期)		(滞留時間または経過時間)	
10	20~25年前 または35年ほど前	20~30年	15~20年程度	20年程度 または50年程度以上
5	概ね10~20年前	6年程度	10年程度以内	35年程度
3	概ね10年以内	該当なし (1960年以前の水)	30数年程度以上	該当なし (1960年以前の水)
1	該当なし (1960年以前の水)	該当なし (1960年以前の水)	該当なし (1960年以前の水)	該当なし (1960年以前の水)

のトリチウム濃度は深さ 200 m まではある程度の幅があるものの、それ以深では概して 1 TU よりも小さく、今回検討したどのモデルにおいても該当がないことから、少なくとも 1960 年以前に涵養された水である可能性が高く、地下水の滞留時間は短く見積もっても数十年以上であると推定することができる。このことは、そうした地域において雨水または雨水が元になった浅層の地下水が深さ数百 m 以上の大深度温泉を涵養するまでに数十年以上の相当長い時間を要することを示唆しており、板寺ら (2012) が箱根・湯河原以外の地域における大深度の温泉帯水層について、透水性が極めて低く、多量の揚湯に対して水の供給が追いつかない場合がある可能性を指摘していることも整合的である。

ガイドラインでは、地域の温泉の賦存量等を把握するため参考となるデータのの一つとして温泉水の年代測定結果が上げられている。本稿で検討したのは 20 年以上前の分析結果であるが、大深度温泉の特性を理解するための基本的な情報として意義があるものと考えている。個々の温泉水の年代については、温泉水を貯留している地層の性状や想定される地下水の流動経路などを加味して適切なモデルを設定して推定する必要がある。また、近年、CFCs (クロロフルオロカーボン類) や SF₆ (六フッ化硫黄) などトリチウム以外の項目による地下水の滞留時間推定も試みられており (たとえば浅井・辻村, 2010; 利部ら, 2011)、これらも含めて、時期を変えて温泉水の年代調査を行うことにより、その間の水の循環 (流動) 状況の変化も含め、大深度温泉の賦存状況についての理解が深まることが期待される。

謝 辞

原稿の改善に有益なコメントをいただいた二名の査読者に深謝いたします。本稿で解析に用いたデータは平成 3 年度から 7 年度にかけて行われた深層熱水循環調査により得られたものである。分析試料の採取及び関係機関との調整に携わられた全ての方々に改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 浅井和由・辻村真貴 (2010): トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法 — 火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用 —, 日本水文科学誌, 20 (3), 67-78.
- 板寺一洋・菊川城司・代田 寧 (2010a): 湯河原温泉の酸素・水素同位体比, 神奈川温泉地学研究所報告, 42, 63-66.
- 板寺一洋・菊川城司・小田原啓 (2010b): 神奈川県の大深度温泉水の起源, 温泉科学, 59, 320-339.
- 板寺一洋・菊川城司・代田 寧 (2012): 神奈川県における大深度の温泉取水層の透水性, 神奈川

- 温泉地学研究所報告, 44, 47-53.
- 利部 慎・嶋田 純・島野康雄・樋口 覚・野田尚子 (2011): 阿蘇カルデラ内における地下水の流動機構, 日本水文科学会誌, 41 (1), 1-17.
- 神奈川県温泉地学研究所 (1992): 神奈川県温泉地学研究所 平成 3 年度事業概要, 105 p.
- 神奈川県温泉地学研究所 (1993): 神奈川県温泉地学研究所 平成 4 年度事業概要, 94 p.
- 神奈川県温泉地学研究所 (1994): 神奈川県温泉地学研究所 平成 5 年度事業概要, 98 p.
- 神奈川県温泉地学研究所 (1995): 神奈川県温泉地学研究所 平成 6 年度事業概要, 91 p.
- 環境省自然保護局 (2014): 温泉保護のためのガイドライン (改訂), 102 p.
- 菊川城司・板寺一洋 (2004): 神奈川県における大深度温泉の酸素水素同位体比と化学成分, 第 57 回日本温泉科学会講演要旨集.
- 菊川城司・小田原啓・板寺一洋 (2007): 孔底温度から見た神奈川県内の地温勾配, 神奈川温泉地学研究所報告, 39, 79-84.
- Kitaoka K. (1988): A Model of Quality Distribution in Groundwater With Reference of Natural Tritium Concentration, 地下水学会誌, 30 (2), 77-93.
- 北岡豪一・吉岡龍馬 (1984): トリチウム濃度から推定される六甲山系の水循環の速さについて, 日本地下水学会誌, 26 (4), 131-145.
- 馬原保典 (1996): 環境放射能測定による地下水年代の推定—トリチウムと溶存ヘリウムの活用例—, *RADIOISOTOPES*, 45, 435-445.
- Matsuo S., Kusakabe M., Niwano M., Hirano T., Oki Y. (1985): Origin of thermal waters from Hakone geothermal system, Japan, *Geochemical Journal*, 19, 27-44.
- 小田原啓 (2008): 横浜市及び川崎市内の大深度温泉井の掘削資料から推定される上総層群/三浦層群境界, 神奈川県温泉地学研究所報告, 40, 87-90.
- 大山正雄・石田敏夫・石坂信之・平野富雄 (1995): 丹沢山地東北部の深部温泉調査, 神奈川県温泉地学研究所報告, 26, 1-10.
- 小沢 清・江藤哲人・大山正雄・長瀬和雄・松沢親悟 (1999): 温泉観測井による神奈川県中央部の地下地質, 神奈川県温泉地学研究所報告, 30, 41-52.
- 小沢 清・江藤哲人 (2005): 神奈川県中・東部地域の大深度温泉井の地質および地下地質構造, 神奈川県温泉地学研究所報告, 37, 15-38.
- 三條和博 (1987): 関東地方小流域のトリチウム濃度, *ハイドロロジー*, 17, 25-35.
- Shimada J., Matsutani J., Dapaah-Siakwan S., Yoshihara M., Miyaoka K., Higuchi A. (1994): Recent trend of tritium concentration in precipitation at Tsukuba, Japan. Annual Report of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba, 20, 11-14.
- 高島良正 (1991): 環境トリチウム —その挙動と利用, *RADIOISOTOPES*, 40, 520-530.
- 藪崎志穂・辻村真貴・田瀬則雄 (2003): 関東における降水のトリチウム濃度の近年の変動について, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 4, 119-124.
- 吉岡龍馬・北岡豪一・小泉尚嗣 (1993): 同位体組成から推定される地下水の流動系について —三島市及びその周辺地域を例にして—, 地下水学会誌, 35 (4), 271-285.