

ラドンおよびトリチウムによる地球化学的手法と 地下水流動計算による湧水の滞留時間と集水域の推定

ESTIMATION OF RESIDENCE TIME AND CATCHMENT AREA OF
SPRING WATER USING GEOCHEMICAL APPROACH BY ^{222}Rn , TRITIUM
AND GROUNDWATER FLOW MODEL

松本 大毅¹・広城 吉成²・堤 敦³・神野 健二⁴・新井田 浩⁵

Masataka MATSUMOTO・Yoshinari HIROSHIRO・Atsushi TSUTSUMI
kenji JINNO・Hiroshi NIIDA

¹学生会員 九州大学大学院工学府 都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²正会員 工博 九州大学助教授 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 フジコンサルタント株式会社 (〒840-0857 佐賀市鍋島町大字八戸 3197-2)

⁴正会員 工博 九州大学教授 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁵正会員 工修 九州大学助教授 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Sayanokami spring water exists in the new campus of Kyushu University, which is located on the western part of Fukuoka City. This spring water is one of the important water resources for agriculture around the new campus area. The construction of the new campus started last June, 2000. In this study, to understand the hydrological properties of the Sayanokami circumference, ^{222}Rn and tritium were used as tracers, respectively. Consequently, it was found out that the residence time of Sayanokami spring water is 10 ~ 20 years. Moreover, the residence time and the catchment area of Sayanokami spring water were estimated using groundwater flow model. As a result, the residence time of Sayanokami spring water was evaluated to be about 25 years at most and the catchment area was specified. It is concluded that the accuracy of estimation of residence time and catchment area of the spring water can be improved by analysis of radioactive isotopes and groundwater flow model.

Key Words : ^{222}Rn , Tritium, Estimation of residence time and catchment area of spring water, Groundwater flow model

1. はじめに

九州大学が統合移転する福岡市西部の九州大学新キャンパスには、幸の神（さやのかみ）湧水が存在し、新キャンパス周辺の貴重な農業用水源となっている。新キャンパス造成工事は2000年6月より開始され、造成工事による湧水量の低下が懸念されている。そのため幸の神湧水の水文特性を把握し、湧水機構を解明することは極めて重要となる。

地下水流動の解明を試みる際に、トレーサーを用いることがある。トレーサーには様々な化学物質があるが、

本研究では湧水滞留時間の推定のためにラドン(^{222}Rn)とトリチウムを用いている。近年、ラドンを用いた水文学的研究として、Hoehn and Gunten¹⁾は、スイスのGlatt川から様々な距離にある観測井で採水した試料中のラドン濃度から、河川周辺の地下水の平均流速を推定している。日本国内におけるラドンを用いた水文学的研究では、濱田・宮崎^{2), 3)}が、茨城県笠間市の小流域において、流域内の台地部と平地部の灌漑期と非灌漑期における地下水中ラドン濃度の違いにより、表流水の浸透時間は約1日であると算定し、両者の浸透形態の違いについて報告している。

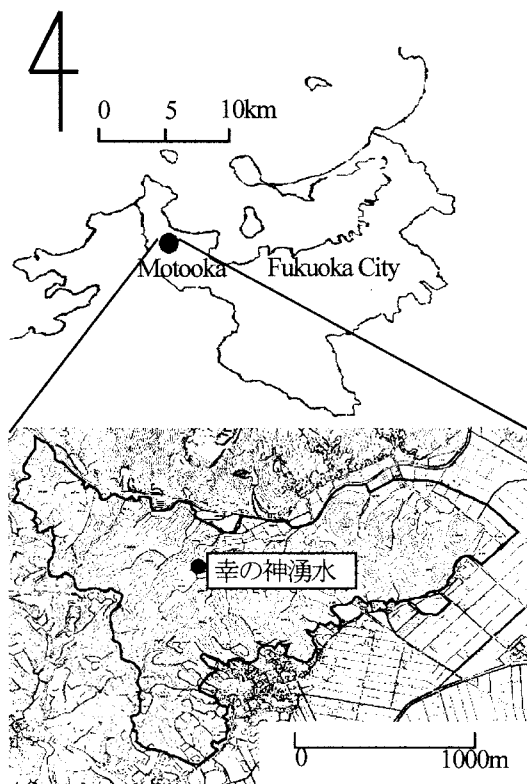


図-1 九州大学新キャンパス統合移転地

トリチウムを用いた研究としては、Y. Hayashi *et al.*⁴⁾は、近年の福岡における雨水中のトリチウム濃度は大気中の核実験の影響を受けておらず、季節ごとに変動するとしている。また、佐竹⁵⁾や岡村ら⁶⁾によっても福岡市における降水中のトリチウム濃度は季節変動することが報告されている。山田ら⁷⁾は、トリチウム濃度が場所、すなわち緯度経度によっても異なることを示している。

一方、広域の地下水流動の解析にあたっては、数値計算が実行されるが、モデルに含まれる透水係数や水理・地質構造の推定は、多くの場合、困難であり、計算精度の確認も難しい。したがって、前述のような放射性同位体を用いるなど、地球化学的なアプローチと、数値解析のアプローチを組み合わせることによって、両面から事象を解明することが望まれる。

本研究では、堤ら⁸⁾がおこなった九州大学新キャンパスを含む地域の地下水流動解析によって得られた流速分布の時系列をもとに、降雨浸透から湧水に至る滞留時間を推定し、放射性同位体であるラドンとトリチウムを用いた滞留時間推定とを比較し、湧水機構を解明したものである。

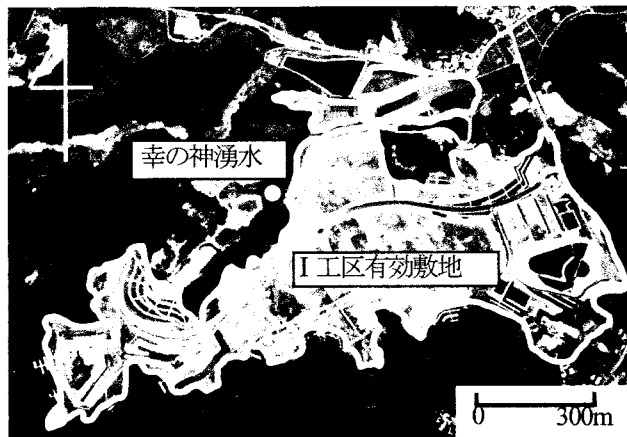


図-2 九州大学移転用地の航空写真(2002年3月)

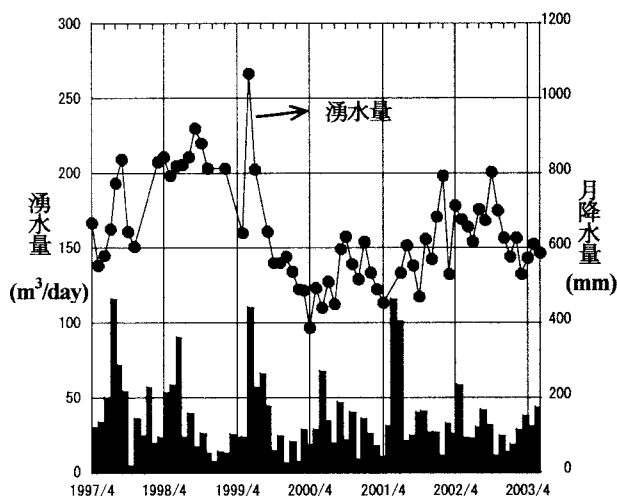


図-3 降水量と湧水量の変化

2. 研究対象地域の概要

九州大学新キャンパス統合移転予定地を図-1に示す。新キャンパス用地は275haであり、造成予定面積は、170haを計画している。造成予定地以外のエリアは保全緑地として残すことになっている。なお、新キャンパス計画の詳細については、九州大学新キャンパス・マスタープラン2001⁹⁾を、また新キャンパスの水循環系、水環境系、生態系の概略については、広城ら¹⁰⁾を参照されたい。

また、新キャンパスの航空写真(2002年3月)を図-2に示す。図中には幸の神湧水地点とI工区の造成工事が完了(2003年3月竣工)している地域を示している。

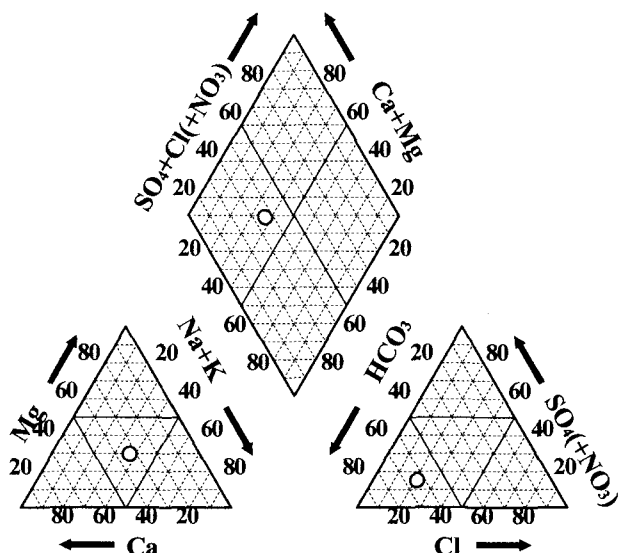


図-4 パイパーダイアグラム

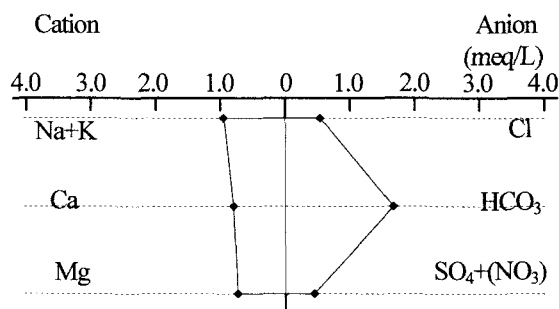


図-5 ヘキサダイアグラム

3. 幸の神湧水の湧水量と水質

1997年4月～2003年6月までのアメダス前原地点(湧水地から南南西約4km)の月降水量と幸の神湧水の湧水量を図-3に示す。この図から幸の神湧水の湧水量は約100～200m³/dayであり、新キャンパス造成工事着工前と変化はない。また、図-4には、湧水の水質をパイパーダイアグラム(Piper-diagram)上に、図-5には、ヘキサダイアグラム(Hexa-diagram)上に示したものである。なお、幸の神湧水の採水・分析は2001年7月から合計で22回おこなっている。両図には2002年7月11日の値をプロットしている。これらの図より、幸の神湧水は、アルカリ土類炭酸塩型の水質の分類され、浅層地下水であることが示された。なお、幸の神湧水の水質変動については、松本ら¹¹⁾により、測定期間中、変動幅は小さく、安定していることが示されている。以上のように水量・水質の面から判断し、現在のところ、造成による幸の神湧水への影響は認められない。湧水とその周辺の地下水水質についての詳細は、松本ら¹¹⁾を参考にされたい。

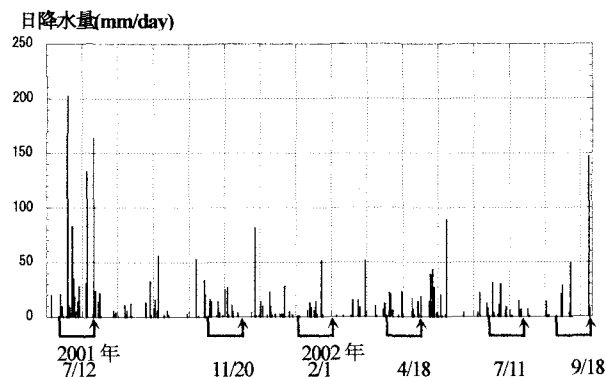


図-6 採水日前1ヵ月間の日降水量

4. ラドンを用いた湧水の滞留時間の推定

(1) ラドンの特徴

ラドンは化学的に不活性な希ガス元素である。半減期は約3.8日であり、生成・平衡・崩壊という他のトレーサーにはない特徴をもつ。ラドンの詳しい特徴については、松本ら¹¹⁾を参考にされたい。

地下水中でのラドン濃度変化は以下の式で表すことができる。

$$C(t) = C_e \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad (1)$$

ここで、 $C(t)$ ：地下での滞留時間が t の時のラドン濃度(Bq/L)、 C_e ：その帯水層における平衡ラドン濃度(Bq/L)、 λ ：ラドンの崩壊定数(0.18day⁻¹)、 t ：地下での滞留時間(day)である。地下水中のラドン濃度は(1)式に従い増加していき、約3週間で平衡状態に達する。このことより、地下水の滞留時間が3週間以内であれば、そのラドン濃度は3週間以内の降雨の影響を受けることになる。つまり、3週間以内の先行降雨が湧水に到達した場合は、ラドン濃度は平衡に達せず、濃度の減少がみられる。

(2) 降水量とラドン濃度変化による考察

ラドン測定のための採水は合計6回おこなった。採水日と採水日前1ヵ月間のアメダス前原地点の日降水量を図-6に示す。この図より、2001年7月12日、2002年2月1日、同9月18日の採水日では、採水前1週間以内に50mm以上のまとまった降水があったことがわかる。また、湧水でのラドン濃度の経時変化を図-7に示す。この図から、湧水中のラドン濃度にはほとんど変化がなく、少なくとも3週間以内の降水との関係は認められなかった。したがって、湧水中のラドン濃度は平衡状態に達しており、3週間以上の滞留時間をもった水であることがわかった。次に、3週間以上の滞留時間を推定するために、半減期が約12.3年の放射性同位体であるトリチウムを用いて、滞留時間の推定をおこなった。

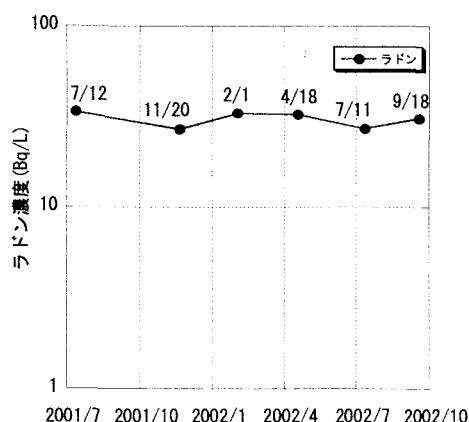


図-7 湧水中のラドン濃度変化

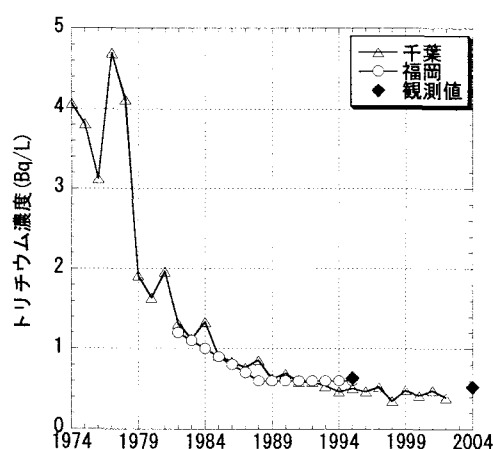


図-8 福岡および千葉での降水中のトリチウム濃度変化

5. トリチウムを用いた湧水の滞留時間の推定

(1) トリチウムの特徴

トリチウムは、水素の放射性同位体であり、半減期は約12.3年である。トリチウムは、天然と人工の両方で生成され、天然の生成は上層大気中の宇宙線的作用によるものであり、人工の生成は1952年以降の大気中の核実験によるものである。生成されたトリチウムは、降水となって地下に浸透した後、指数関数的に減少する。したがって、異なった年代の地下水との混合がないと仮定すると、雨水中のトリチウム濃度の継続的なデータと観測値から対象地下水の滞留時間の推定が可能となる。地下水中でのトリチウムの減少を表す式を以下に示す。

$$C(t) = C_0 \exp(-0.693 \cdot t / T) \quad (2)$$

ここで、 $C(t)$ ：地下での滞留時間が t のトリチウム濃度(Bq/L)、 C_0 ：降水中のトリチウム濃度(Bq/L)、 t ：地下での滞留時間(year)、 T ：トリチウムの半減期(12.3year)である。

表-1 湧水中のトリチウム濃度

	Bq/L	TU
1995年3月	0.63±0.03	5.2±0.3
2004年6月	0.52±0.02	4.4±0.2

(2) 降水中のトリチウム

前述のように、トリチウムを用いた地下水の滞留時間の推定には、降水中のトリチウム濃度の継続的なデータが必要である。しかし、福岡における降水中のトリチウム濃度のデータは測定された期間が短く滞留時間推定を行うには十分ではない。そこで、1973年から2002年まで継続した観測結果の存在する千葉県の降水中のトリチウム濃度を用いることにした。図-8に福岡における降水中のトリチウム濃度と千葉における降水中のトリチウム濃度を示す。図-8より、福岡および千葉における降水中のトリチウム濃度には大差はなく、千葉の降水中のトリチウム濃度を福岡での事例に適用することは可能であると思われる。

(3) トリチウム濃度による滞留時間の推定

幸の神湧水中のトリチウム濃度は、1995年3月と2004年6月に測定をおこなった。それぞれのトリチウム濃度を表-1に示す。幸の神湧水の滞留時間の推定は以下の通りである。まず、(2)式中の t (湧水の滞留時間)を変化させ、幸の神湧水でトリチウム濃度測定をおこなった時期から t 年前の千葉での降水中のトリチウム濃度を C_0 に代入し、 $C(t)$ を求めた。ここで得られた $C(t)$ が、表-1に示した測定値と一致した時間を幸の神湧水の滞留時間とした。この結果、幸の神湧水の滞留時間は、1995年のデータでは13年程度、2004年のデータでは23年程度であるということがわかった。したがって、幸の神湧水の滞留時間は10～20年程度であると考えられる。なお、1995年と2004年の観測結果から推定された湧水の滞留時間は一致しなかった。これは、トリチウムを用いた地下水滞留時間の推定は、前述のように、異なった年代の地下水との混合がないという仮定に基づいているが、ここでの地下水流動は、様々な滞留時間の地下水が混合していると考えられる。このことは、湧水量が一定ではなく、100～200m³/dayの変動幅をもっていることから示唆される。また、近年は降水中のトリチウム濃度が小さな値で安定しており、推定が困難になってきている。

6. ラグランジュ粒子追跡による滞留時間と集水域の推定

(1) ラグランジュ粒子追跡の手順

地下水流動モデルの基礎式を以下に示す。

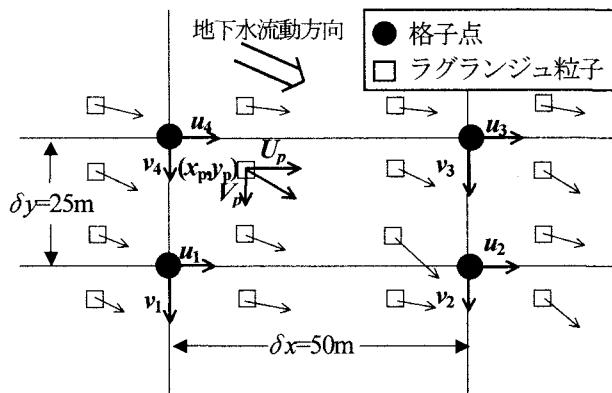


図-9 ラグランジュ粒子の初期配置(添字 p は粒子番号)

$$n_e \frac{\partial(h_f - b)}{\partial t} = - \frac{\partial\{(h_f - b) \cdot u_f\}}{\partial x} - \frac{\partial\{(h_f - b) \cdot v_f\}}{\partial y} - \sum_m Q_m(x, y, t) \delta(x - x_m) \delta(y - y_m) (3) + q_w(x, y, t) - EVT_2(x, y, t)$$

ここで、 n_e : 有効空隙率、 h_f, b : 基準面から上方にとった淡水面、基盤面の高さ、 Q_m : 井戸の揚水量、 (x_m, y_m) : 井戸の位置、 δ : デルタ関数、 u_f, v_f : 地下水の水平方向流速成分、 q_w : 地下水への涵養量、 EVT_2 : 地下水面からの蒸発量である。

この式を用いて、九州大学新キャンパス周辺を $50\text{m} \times 25\text{m}$ に分割し、各格子点上における実流速の時系列を求めた。蒸発散量の算定方法や水収支のチェック、地下水涵養に関する各パラメーターの決定法等、計算の詳細については、堤ら⁸⁾を参考にされたい。本報では、移動経路と湧水点までの到達時間を算定するために、各格子点内に流れと共に移動するラグランジュ粒子を配置した(図-9)。4つの格子点内の任意の点 (x, y) における流速は以下の式であらわされる。

$$v = a + bx + cy + dxy \quad (4)$$

(4)式を、粒子を囲んでいる4つの格子点上の流速を用いてあらわすと以下のようにあらわすことができる。

$$U_p = \frac{1}{\delta x \delta y} \{ (\delta x \delta y - x_p \delta y - y_p \delta x + x_p y_p) u_1 + (x_p \delta y - x_p y_p) u_2 + (\delta x \delta y) u_3 + (y_p \delta x - x_p y_p) u_4 \} \quad (5)$$

$$V_p = \frac{1}{\delta x \delta y} \{ (\delta x \delta y - x_p \delta y - y_p \delta x + x_p y_p) v_1 + (x_p \delta y - x_p y_p) v_2 + (\delta x \delta y) v_3 + (y_p \delta x - x_p y_p) v_4 \} \quad (6)$$

(2) ラグランジュ粒子追跡による湧水の滞留時間推定

(1)で示したように、ラグランジュ粒子を追跡することにより、各粒子の移動軌跡を求めることができる。初期

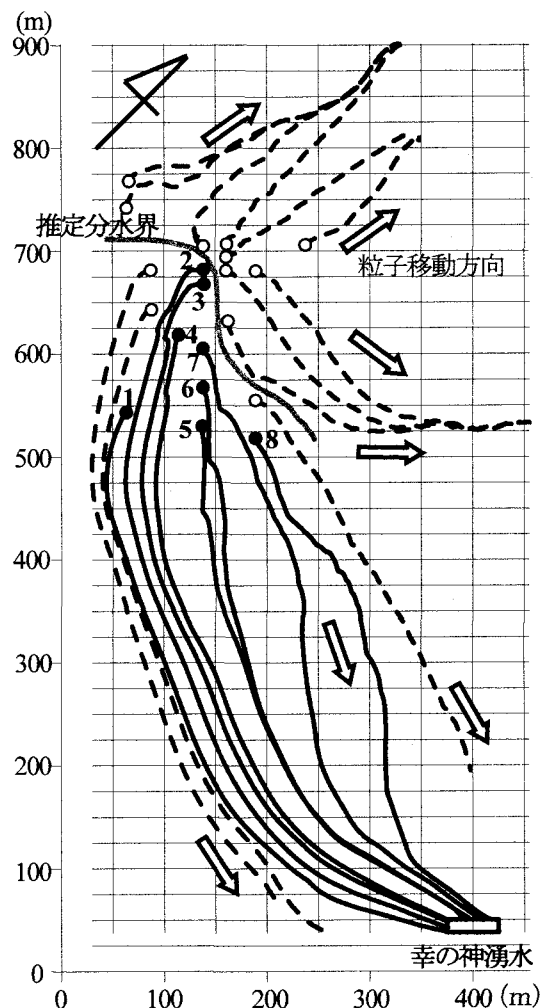


図-10 粒子の移動軌跡

表-2 各粒子の滞留時間

粒子番号	滞留時間(日)
1	1503
2	4224
3	5259
4	4626
5	3475
6	4816
7	7535
8	8033

配置(粒子の出発点)からの流動方向の違いを顕著にあらわしている粒子の移動軌跡を図-10に示す。湧水へ到達する粒子の移動軌跡を実線で、それ以外の粒子の軌跡は破線であらわしている。また、●粒子の、湧水へ到達するまでに要した時間(滞留時間)を表-2に示す。湧水へ到達しない粒子(○)の軌跡は、9125日(25年)間の移動距離を示している。また、図-10中の粒子の移動方向から地下水流動の分水界が推定された。そこで、湧水方向へ向かう分水界上に配置した粒子が湧水に到達するまでの時間を計算した結果、最長約25年であったので、幸の神湧水の滞留時間は25年以下であると推定された。

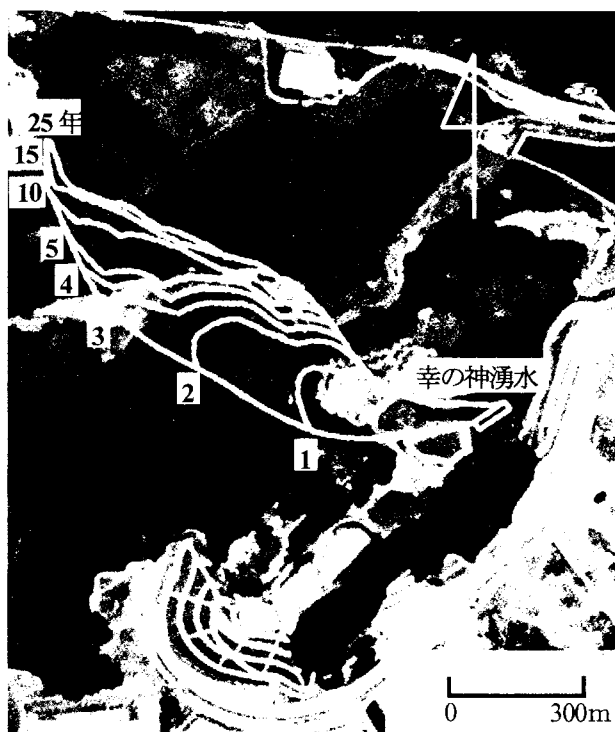


図-11 幸の神湧水の集水域と等年代線

(3) ラグランジュ粒子追跡による湧水の集水域の推定

次に、幸の神湧水を表している地点にのみ粒子を複数配置し、それらの粒子を過去に遡るように移動させ、その軌跡により幸の神湧水の集水域を推定した。集水域と等年代線を図-11 に示す。等年代線はそれぞれ 1 年, 2 年, 3 年, 4 年, 5 年, 10 年, 15 年, 25 年を示している。図-11 より、15 年前の等年代線と 25 年前のそれとの間隔がほとんどないことがわかる。これは、ここでの流速が小さいためであると考えられる。

7. 結論

ラドンを用いた幸の神湧水の滞留時間の推定では、湧水は3週間以上の水であることがわかった。このため、より半減期の長いトリチウムを用いて推定をおこなった結果、幸の神湧水の滞留時間は、10～20 年程度であると推定された。

ラグランジュ粒子の追跡による湧水の滞留時間の推定では、湧水の滞留時間は25 年程度以下となった。また、湧水の集水域の推定では、湧水の保全に必要な領域が明らかになった。

以上のように、地球化学的手法では、湧水が異なった年代の地下水の混合により形成されていることが示唆された。一方、数値解析によって、湧水は主として10 年程度以下の地下水で形成されているものの、25 年程度以下の異なった年代の地下水の混合であることが示された。

本報では、ラドンやトリチウムといった放射性同位体をトレーサとして用いた地球化学的手法と、数値解析を組み合わせる湧水機構の解明をおこなったが、湧水の

滞留時間と集水域の推定において、ほぼ同じ結果が得られたことにより、両手法は補完しあう形で推定結果がより確かなものとなったといえよう。

なお、平成15年4月から湧水の北西側で造成工事が開始された。本報により湧水の集水域は北西側であることが推定されたため、今後、湧水に何らかの影響があらわれる可能性も示唆され、その評価については今後の課題としたい。

謝辞：ラドン、トリチウム、主要化学種の分析にあたっては、(財)九州環境管理協会の岡村正紀様、仲島賢様、田籠久也様、右田義臣様にご協力頂きました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Hohn E. and von Gunten H.R: Radon in Groundwater, A Tool to Assess Infiltration from Surface Waters to Aquifers, *Water Resources Research*, 25, 83-94, 1989.
- 2) 濱田浩正, 宮崎毅: 水文学の新分野-ラドン水文学, 水利科学, 253, 1-25, 2000.
- 3) 濱田浩正, 宮崎毅: 水文学の新分野-ラドン水文学, 水利科学, 254, 28-52, 2000.
- 4) Y. Hayashi, N. Momoshima, Y. Maeda, H. kakiuchi: Relation between tritium concentration and chemical composition in rain at Fukuoka, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol239, No3, 517-522, 1999.
- 5) 佐竹洋: 富山における降水, 降雪の安定同位体およびトリチウムの動態, 地球化学, 20, 90-92, 1986.
- 6) 岡村正紀, 平井英治, 松岡信明: 福岡市における降水中のトリチウム濃度の最近の変動, 地下水学会誌, 35, 87-93, 1993.
- 7) 山田芳宗, 翫幹夫, 加藤岩夫, 阪上正信: トリチウムによる陸水の地球化学的研究, 地球化学, 20, 93-97, 1986.
- 8) 堤敦, 神野健二, 森牧人, 広城吉成: 表流水 - 地下水系水循環機構の解析—九州大学新キャンパス建設地を対象として—, 土木学会論文集, 747, 29-40, 2003.
- 9) 九州大学: 九州大学 新キャンパス・マスタープラン 2001-21 世紀を生き続けるキャンパスの創造-, 2001.
- 10) 広城吉成, 神野健二, 中野芳輔, 河村明, 森牧人, 古賀誠司, 新井田浩: 九州大学新キャンパス統合移転事業における水循環系の保全と管理について, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 277-282, 2002.
- 11) 松本大毅, 広城吉成, 新井田浩, 神野健二, 岡村正紀, 仲島賢, 田籠久也, 右田義臣: ラドンと水質から推定される湧水周辺の水文・地球化学的特性について—福岡市西区幸の神湧水における事例—, 水文・水資源学会誌, 第17巻, 第6号, 627-635, 2004.

(2004. 9. 30 受付)