

## 常陸太田試験地における無降雨時河川水の平均滞留時間

久保田多余子・坪山良夫・壁谷直記（森林総合研究所）

**要旨：**茨城県北部の常陸太田試験地内における入れ子状の5流域（0.84～75.28ha）において、1998年から2001年にかけて、約10日に1回の割合で降水と河川水を採水し、酸素および水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ および $\delta\text{D}$ ）を分析した。 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ で表されるd値を計算した結果、降水においてはd値の明瞭な季節変化が見られたが、河川水においては不明瞭であった。一般に、降水の安定同位体比の季節変化は降水の地中における滞留時間が長いほど打ち消されると考えられる。そこで、降雨と河川水の安定同位体比の季節変化をそれぞれサインカーブで近似し、それらの振幅の比から平均滞留時間（MRT）を推定する方法がある。この方法により、d値から本試験地のMRTを推定した結果、2.1～8.0年であった。MRTと集水面積、平均勾配、平均流路長および平均流路勾配との関係をそれぞれ調べたところ、MRTと集水面積および平均勾配の間に相関はなかったが、平均流路長との間に正の、また平均流路勾配との間に負の相関が見られた。

**キーワード：**安定同位体比、平均滞留時間、常陸太田試験地

### I はじめに

無降雨時における河川水の平均滞留時間（MRT：Mean Residence Time）を明らかにすることは地下水の涵養、流出経路、起源、ならびに水質形成機構を明らかにするために重要である。近年、水の安定同位体比の分析が比較的容易になったため、降水や河川水の安定同位体比を用いて、河川水のMRTを推定する研究が多数行われてきた。しかしながら、我が国の森林小流域における河川水のMRTの推定例は少なく、またMRTと流域面積や地形との関係を調べた例はほとんどない。そこで本研究では、入れ子状の5つの森林小流域において無降雨時河川水のMRTを推定するとともに、MRTと流域面積や地形との関係を調べた。

### II 方法

**1. 調査方法** 茨城県北部の常陸太田試験地（ $140^{\circ}35' E$ ,  $36^{\circ}34' N$ ）内における入れ子状の5流域、HA（0.84ha）、HB（2.48ha）、HC（13.20ha）、HO（15.68ha）、およびHX（75.28ha）において、2000年から2001年にかけて、約10日に1回の割合で降水、樹冠通過雨と河川水を採水した（図-1）。HCはHO流域内においてHBからの河川が合流する前の地点である。

本試験地は標高182～343mに位置し、基岩は緑色片岩、土壤は褐色森林土である。年平均降水量は1426.9mm（1981～2001年の平均値）である。採水した水の酸素および水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ および $\delta\text{D}$ ；単位：%）をそれぞれ平衡法（3,4）により質量分析計（Finnigan MAT252）を用いて分析した。

**2. 平均滞留時間の推定方法** 降雨あるいは樹冠通過雨

と河川水の同位体比の季節変化をそれぞれサインカーブで近似し、それらの振幅の比から河川水のMRTを推定する方法（5）を使用した。この方法によれば、降雨と河川水の同位体比の季節変化をそれぞれ（1）式および（2）式のように近似するとMRT（T）は（3）式で表される。



図-1 常陸太田試験地および採水地点

Tayoko KUBOTA, Yoshio TSUBOYAMA, Naoki KABEYA (FFPRI)

Mean residence time in stream water during non-storm periods at Hitachi Ohta Experimental Watershed

$$C_{in}(t) = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$C_{out}(t) = B \sin(\omega t + \tau) \quad (2)$$

$$T = \omega^{-1} (f^{-2} - 1)^{1/2} \quad (3)$$

ただし、 $C_{in}(t)$  と  $C_{out}(t)$  はそれぞれある時刻  $t$  (日) における降雨と河川水の安定同位体比、 $A$  と  $B$  はサインカーブの振幅 (‰),  $\omega$  は角速度 ( $2\pi/365$  日),  $\tau$  は位相のずれ (日), および  $f$  は振幅の比  $B/A$  である。

**3. 地形解析** 各流域の流域面積、平均勾配、平均流路長、平均流路勾配、および河川密度を測定した。平均勾配は等高線延長法(1)により求めた。すなわち、まず各等高線の長さをプラニメータで計測して累計した。これを流域面積で除して等高線間の平均距離を求めた。この値で等高線間の高度差 (10m) を除して平均勾配とした。平均流路長は潜在的な流路も含め、本支川の長さの総計を本支川を合わせた流路総数で除して求めた。平均流路勾配は各流路の標高差を流路長で除したものを見積り、これを流路数で除して求めた。河川密度は本支川の長さの総計を流域面積で除して求めた。

### III 結果と考察

降雨と樹冠通過雨の  $\delta^{18}\text{O}$  および  $\delta\text{D}$  は明瞭な季節変化を示さなかったが、 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$  で表される  $d$  値を計算した結果、降水の  $d$  値は明瞭な季節変化を示した(図-2)。これは  $d$  値が水蒸気の生成時に決まり、日本では夏に  $d$  値の低い小笠原気団の影響を受け、冬に  $d$  値の高いシベリア気団の影響を受けるためである(2)。樹冠通過雨の  $\delta^{18}\text{O}$  および  $\delta\text{D}$  は降水の一部が樹冠上で蒸発するため、降水のそれよりも一般に高い値になるが、 $d$  値にはほとんど違いがなかった。一方、河川水の  $d$  値は降水に比べ振幅が小さく、明瞭な季節変化を示さなかった(図-2)。

樹冠通過雨と河川水の  $d$  値の季節変化をサインカーブでそれぞれ近似し、それらの振幅の比から、(3)式により MRT を推定した結果を表-1 上に示した。本試験地においては最も小さな流域 HA (0.84ha) においても数年の MRT があり、他の研究と比較しても無降雨時河川水の MRT が長いことが明らかになった。

MRT と流域面積、平均勾配、平均流路長、平均流路勾配および河川密度との関係を図-3 a~3 e に示した。流域面積および平均勾配と MRT には相関がなかった。一方、平均流路長と MRT には正の ( $R^2 = 0.389$ )、平均流路勾配および河川密度と MRT には負の相関 (それぞれ  $R^2 = 0.834$  および  $R^2 = 0.983$ ) が見られた。

このように MRT は必ずしも流域面積が大きい流域で長くなるわけではなかった。HA の土層厚は 0.40~4.69m の範囲にあり(6)、HB の中で比較的土層厚の厚い部分を占めている。このことから HA の MRT が HB より長いのは HA が比較的土層厚の厚い二つの谷頭斜面か

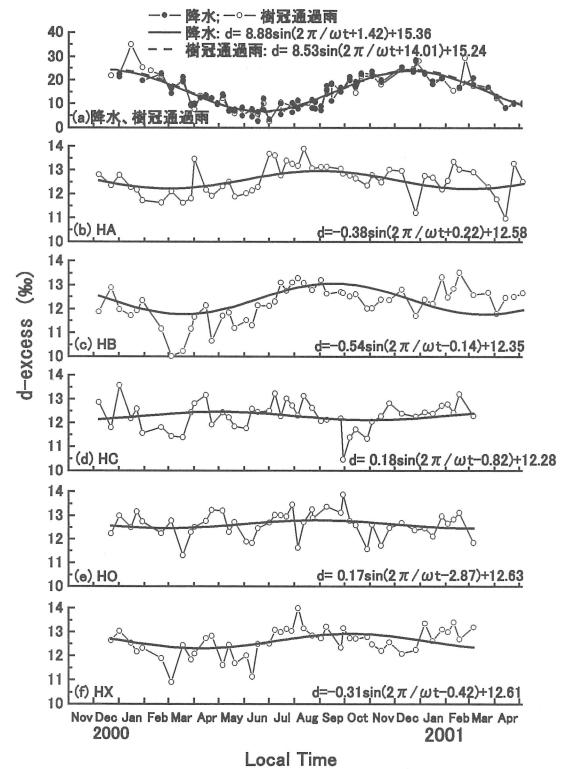


図-2  $d$  値の季節変化とその近似曲線

らの流出によって涵養されているのに対し、HB が比較的土層の薄い側斜面からの流出によっても涵養されているためと考えられる。一方、HC の MRT が最も長いことに対してはまだ説明がついていない。しかしながら、HO の MRT が長いのはこの地点が HB と HC から流出する河川の合流であり、HO 流域において HB よりも HC が占める面積が大きいため、より HC に近い MRT となったと考えられる。流域面積が最大である HX の MRT は HO と HB のそれの中間にあった。これは HX には流下の過程で HB と同規模の沢が何度も合流するため、徐々に HB に近い MRT になっていたと考えられた。

表-1 常陸太田試験地における無降雨時河川水の平均滞留時間

流域	平均滞留時間 (年)
HA	3.8
HB	2.1
HC	7.7
HO	8.0
HX	4.5

また、MRT は平均流路長が長くなると長く、平均流路勾配や河川密度が大きくなると短くなる傾向が見られた。流路長や流路勾配を求めるための対象とした流路は潜在的な流路も含んでおり、恒常的な流路に流出するま

での流路長が短く、かつ流路勾配が急な流域ほど、MRTが短くなったと考えられる。そして、無降雨時の河川を涵養している帶水層は恒常的な流路の両側や上端に形成されるため、結果的に流路密度が高くなる。したがって、河川密度が高い流域ほど、MRTが短くなつたと考えられる。

## V おわりに

常陸太田試験地内の入れ子上の5流域（0.84～75.28ha）において、樹冠通過雨と無降雨時河川水のd値から、MRTを推定した結果、2.1～8.0年であった。MRTと地形との関係を調べた結果、MRTは必ずしも流域面積が大きい流域で長くなるわけではなかった。

また、MRTは平均流路長が長くなると長く、平均流路勾配や河川密度が大きくなると短くなることが明らかになった。

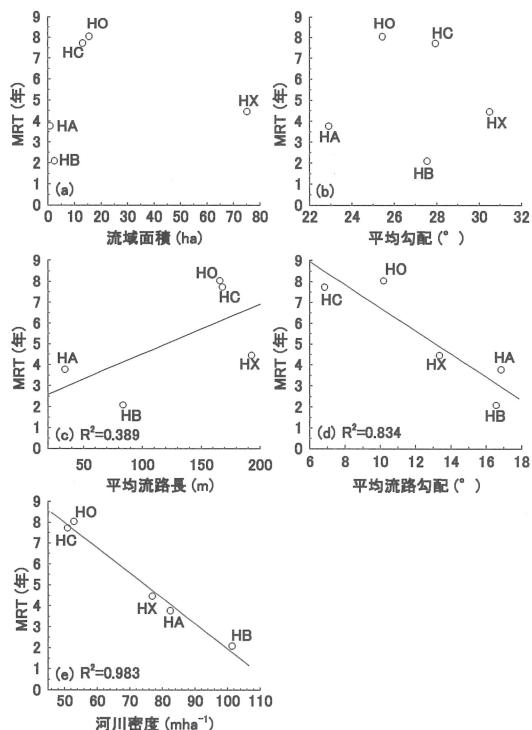


図-3 MRTと地形との関係

## 引用文献

- 高瀬信忠 (1995) 1. 2 河川流域, 河川水文学 pp. 328. 森北出版(株), 東京.
- 早稲田周・中井信之 (1983) 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成, 地球科学, 17 : 83-91.
- EPSTEIN, S and MAYEDA, T (1953) Variations of the  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratio in natural waters, Geochim. Cosmochim. Acta., 4 : 213-214.
- OHBA, T. and HIRABAYASHI, J. (1996) Handling of Pt catalyst in  $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$  equilibration method for D/H measurement of water, Geochemical Journal, 30 :

373-377.

- MALOSZEWSKI, P., RAUERT, W., STICHLER, W. and HERRMANN, A. (1983) Application of flow models in an Alpine catchment area using tritium and deuterium data, Journal of Hydrology 66 : 319-330.
- TSUBOYAMA, Y. (2006) An experimental study on temporal and spatial variability of flow pathways in a small forested catchment, Bulletin of FFPRI.5 (2) : 135-174.

