

# 南房総，神余弘法井戸とその周辺における 河川水への深部起源水の混入について

馬 淵 遼太郎\* 安 原 正 也\*\* 李 盛 源\*\* 稲 村 明 彦\*\*\*

キーワード：深部起源水，塩水上昇，河川水，塩化物イオン，混合

## 1. はじめに

日本列島の内陸・山間部には、高濃度の塩水が湧出する地点が全国各地で多数確認されている（たとえば、安原ほか，2006）。日本列島の形成過程を考えると、ヨーロッパ大陸などのように地下に蒸発岩（岩塩）が存在するとは考えにくいことから、その塩水の起源は古くから注目を集め、水質や各種同位体に基づく研究がこれまで多数行われてきた（たとえば、松葉谷ほか，1974；益田ほか，1988；Kusuhara *et al.*, 2020）。さらに近年は、放射性廃棄物の地層処分との関係で、このような塩水すな

わち深部起源水の空間分布，また深部起源水の上昇プロセスやそのフラックス（上昇量）が大きな関心を集めているところでもある。

房総半島最南端の安房丘陵に位置する神余弘法井戸（図1）は、このような深部起源水の湧出地点の一つである（安原ほか，2006）。本研究では、神余弘法井戸周辺の河川水の水質測定結果に基づき、同地域における深部起源水の上昇量の定量化を試みた。塩化物イオン（ $\text{Cl}^-$ ）に基づく近似的な評価手法の紹介，ならびに上昇量とその季節変化に関する予察的検討結果を速報する。



図1 研究地域

神余弘法井戸は巴川中流の右岸に位置。緑色と黒色の点線は、それぞれ神余弘法井戸より上流と下流の巴川の流域範囲を表す。断層・背斜・向斜は川上・宍倉（2006）による。基図は地理院地図（電子国土Web）。

\* (株) アウトソーシングテクノロジー

\*\* 立正大学地球環境科学部環境システム学科

\*\*\* (国研) 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門

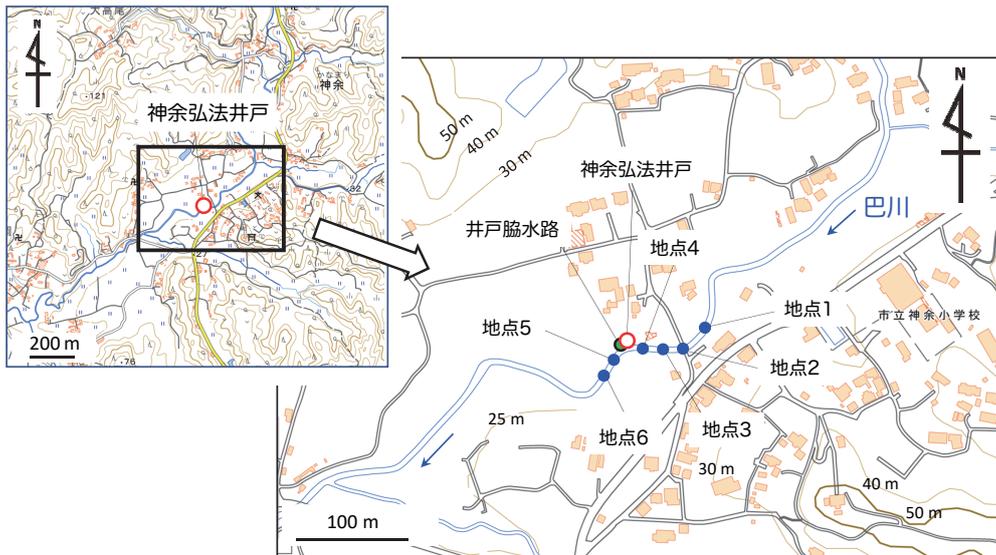


図2 神余弘法井戸とその周辺の地形，調査地点

神余弘法井戸（以後，弘法井戸）の脇に，南流して巴川に流入する小水路（以後，井戸脇水路）あり．河川水調査は地点1から地点6で実施．基図は地理院地図（電子国土Web）．

## 2. 研究地域

千葉県指定の有形民俗文化財でもある神余弘法井戸（以後，弘法井戸）は，巴川流域（流路長10.2km，流域面積13.7km<sup>2</sup>，最高標高180m）の中流部，標高約20mの巴川右岸の水流直近に位置する（図1，図2）．弘法井戸のすぐ脇には，小水路（以後，井戸脇水路）が南流後，右岸から巴川に流入する．ちなみに，弘法井戸より上流の巴川の流路長は5.2km，流域面積は5.6km<sup>2</sup>（図1中の緑の点線の範囲）であり，谷底には水田が広がり集落が点在する（図2）．

図3に弘法井戸（図3（A）），井戸脇水路（図3（B）），巴川（図3（C））の現況を示す．弘法井戸（図3（A））は直径1.7mの開放井戸であり，やや黄色を帯びた井戸水（後述するように，塩水）は井戸枠の上端を越えて巴川へとオーバーフローする．巴川の河床から井戸枠上端までの高さは0.55mである．したがって，地下水は0.55m以上の自噴高をもって谷底から自噴していることになる．なお，井戸内部の深度0.8m以深には洪水時にもたらされたと思われる土砂が堆積しているため，井戸の真の深さは不明である．井戸脇水路（図3（B））も弘法井戸と同じく塩水（後述）を巴川に排出する（図3（C））．同水路の上流側は暗渠となっているため，その水源を直接確認することはできない．地元住民への聞き取り調査でも水源の詳細は不明であったが，暗渠の先の土地利用（図2）から判断すると，水田の底部から集めた地下水を排水している可能性が高い．

館山市における1981年から2010年までの30年間の年平均降水量は1790mm（気象庁HP）である．川上・宍倉（2006）によると，流域は上部鮮新統～下部更新統の千倉層群，下部～中部更新統の豊房層群という，いずれも海成層である砂岩・シルト岩の互層からなる．地域には千倉断層や川口断層，また神余向斜，作名背斜，鬼ヶ瀬背斜，布良向斜等の東北東～西南西方向にのびる断層や背斜・向斜構造が卓越している（図1）．

## 3. 現地調査・分析方法

弘法井戸，井戸脇水路，巴川を対象に，2019年9月5日と同年11月27日の無降水日に現地調査を実施した（図4）．巴川については，9月5日には地点1から地点6までの6箇所，また11月23日には地点3から地点6の4箇所の調査地点を設定した（図2）．各地点間の流路長は，地点1→地点2；約30m，地点2→地点3；約20m，地点3→地点4；約20m，地点4→地点5；約30m，地点5→地点6；約20mである．弘法井戸と井戸脇水路は，地点4と地点5のほぼ中間に位置する．

流量測定は，弘法井戸（図3（A））については井戸枠上端を越流する井戸水（地下水）を対象に，ビニール袋を用いた総量法によった．井戸脇水路（図3（B））では，水流（幅約40cm）の中央部で6割水深の流速を測定し，水流の断面積と流速を掛け合わせて流量を求めた．巴川では，両調査日も弘法井戸の上流約35m地点に相当する地点3において流量を測定した．その水流幅

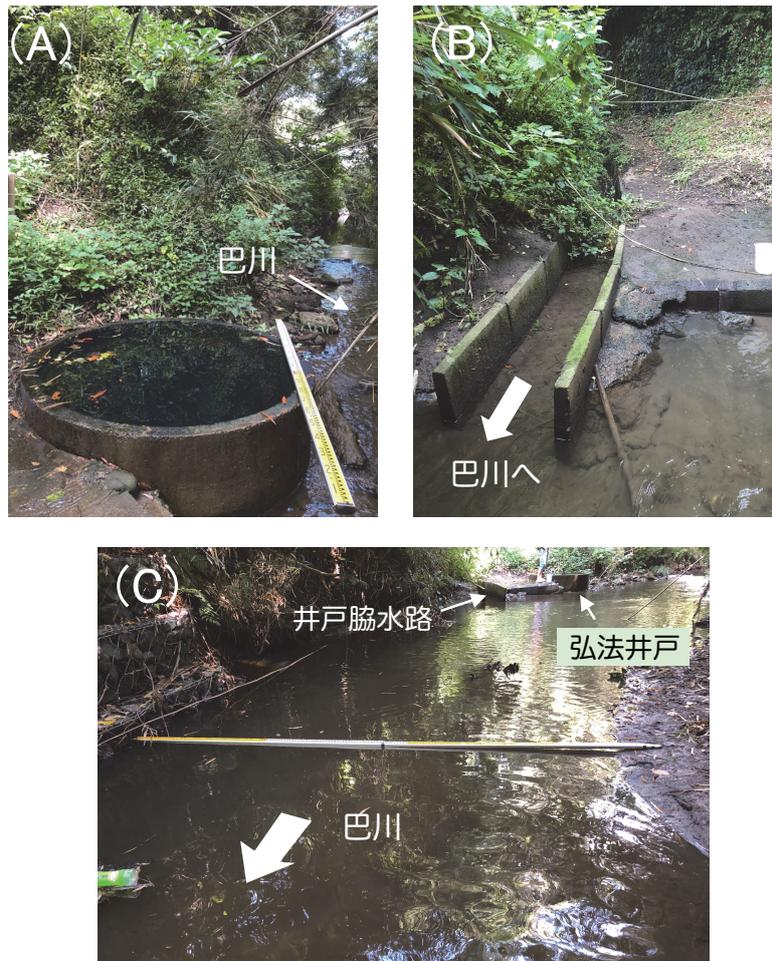


図3 現地概要 (2019年9月5日撮影)

(A) 弘法井戸；直径1.7mの開放井戸。井戸枠上端をオーバーフローした井戸水（塩水）が巴川に流入。(B) 井戸脇水路；U字溝中を塩水が巴川に流出。写真中の手付きピーカーの右手が(A)の弘法井戸。(C) 巴川；地点5（図2）から上流を望む。水流幅3.4m。

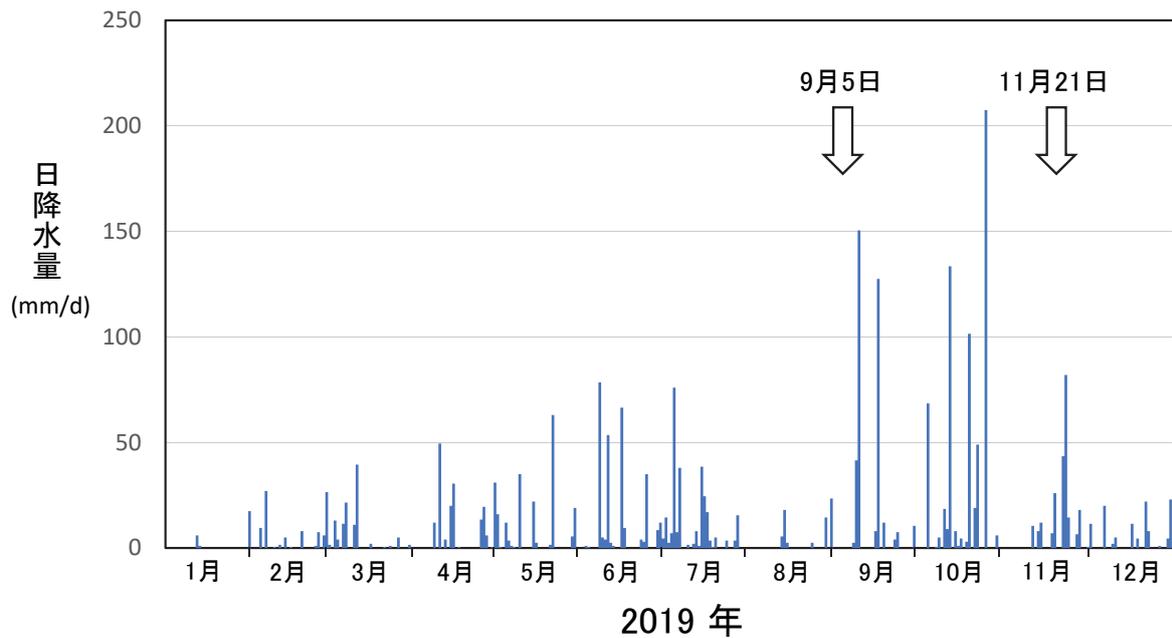


図4 館山市における2019年の日降水量

気象庁HPによる。現地調査は2019年9月5日と11月21日に実施。

（9月5日；4.2m，11月23日；5.0m）を考慮し，まず河川断面を1m毎に5分割した．そして，各区分の中央部の流速（6割水深）の測定値に基づいて区分ごとに流量を算出し，それらを合算することで河川断面全体の流量とした．以上の流速の測定には，いずれもプロペラ式流速計（VR-301，ケネック製）を使用した．

現地では水温（D617，テクノセブン社製），pH（WM-32EP，東亜DKK社製）ならびに電気伝導度（EC）（同上）を測定した．試料水は，溶存イオン（ $\text{Na}^+$ ， $\text{K}^+$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{NO}_3^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{HCO}_3^-$ ）濃度測定用に100mLのポリエチレンボトルに採水したのち，冷蔵保存した．巴川における現地測定ならびに採水は，河川断面中央の水面直下で実施した．採水した試料水は実験室に持ち帰り，0.22 $\mu\text{m}$ メンブレンフィルター（Millex<sup>®</sup>-GP，MerckMillipore社製）で濾過を行った．その後， $\text{HCO}_3^-$ はpH4.8アルカリ度滴定法，その他の溶存イオンはイオンクロマトグラフ（Dionex ICS-1600，Thermo Fisher Scientific社製）を用いて濃度を測定した．

## 4. 結果と考察

### 4.1 水質・流量

現地測定結果と溶存イオン濃度の分析結果をそれぞれ表1，表2に示す．また，トリリニアダイアグラムを用いて水質を表示した（図5）．弘法井戸の地下水は海水の1/3程度の非常に高いEC（1,500mS/m以上）と塩化物イオン（ $\text{Cl}^-$ ）濃度（5,000mg/L以上）で特徴づけられる塩水である（表1，表2）．井戸脇水路を流下する水（地下水）も，弘法井戸に比べればその濃度は低いものの，河川水（11月21日の地点6を除き，20mg/L台）の10数倍～30倍程度の $\text{Cl}^-$ 濃度（360mg/L～762mg/L）を有する塩水であった．弘法井戸と井戸脇水路では，ともにフッ化物イオン（ $\text{F}^-$ ）や臭化物イオン（ $\text{Br}^-$ ）も検出された．

弘法井戸の地下水の起源については，地域の地質発達史やトリリニアダイアグラム（図5）から考えて，地層堆積時に取り込まれた海水が地下深部での長期の続成作用によって変質したものである可能性が高い．地域の天水ラインから明らかに外れる酸素・水素同位体比， $10^{-5}$ オーダーという低いLi/Cl比，また地殻起源ヘリウムに特徴的な低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（産総研未公表データ）とも整合的であり，このような深部起源水が断層や褶曲構造（図1）に規制されて地表付近まで上昇してきたものと考えられる．一方，井戸脇水路の水は，トリリニアダイ

アグラム上（図5）で陽イオン，陰イオンとも弘法井戸と河川水を結んだ線上にプロットされる．これは両調査日とも同じである．河川水は流域の浅層地下水の水質を反映しているものと考えられる．したがって，井戸脇水路については，1）弘法井戸で代表されるような地下深部から上昇してきた深部起源水と，2）地域の浅層地下水が混合することで形成された水であると判断される．河川水と同様に，人為起源と考えられる硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）が検出される（9月5日；7.0mg/L，11月21日；12.6mg/L）ことも，浅層地下水との混合の発生を裏付けている．

9月5日と11月21日の地点3の巴川の河川流量（表1）を比較すると，前者は15,000 $\text{m}^3/\text{day}$ ，後者は19,000 $\text{m}^3/\text{day}$ と11月21日の方が25%程度大きい．これは，両調査日の先行降雨量の違い（図4；一例として調査前の1ヶ月間をあげると，前者；66mm，後者；345mm）からも支持されるように，河川水を涵養する浅層地下水の水位や流動活性といった流域の地下水環境の違いに起因するものと考えられる．

ここで，弘法井戸からの流出量は4.3 $\text{m}^3/\text{day}$ と両調査日で変化はなかった（表1）．その一方で，井戸脇水路については巴川と同じく，11月21日には9月5日と比べ約30%の流量増加が認められた．流量と同様に，弘法井戸ではECや $\text{Cl}^-$ 濃度についても両調査日で顕著な差は認められなかったが，井戸脇水路ではEC， $\text{Cl}^-$ 濃度とも11月21日に大幅に低下した（表1，表2）．この事実は，1）弘法井戸の地下水は，深部起源水が浅層地下水の影響をほとんど受けることなく地表に湧出したものであること，また2）井戸脇水路の水は，深部起源水と浅層地下水の混合の割合によってその量・質とも時間的に大きく変動することを示唆している．

ヘキサダイアグラム（図6）をみると，弘法井戸や井戸脇水路は典型的なNa-Cl型，また巴川はCa- $\text{HCO}_3$ 型の組成を有する．図6のヘキサダイアグラムの形状だけでは巴川の流下に伴う水質の変化は確認できないが，表2のナトリウムイオン（ $\text{Na}^+$ ）濃度と $\text{Cl}^-$ 濃度には塩水の流入に伴う河川水質の明らかな変化が示されている．たとえば $\text{Cl}^-$ 濃度は，地点3～地点6の流路長70mという短い区間で9月5日に3.9mg/L，また11月21日には6.1mg/Lの上昇が生じている．前述の通り，地点3における調査時の巴川の河川流量がそれぞれ15,000 $\text{m}^3/\text{day}$ ，19,000 $\text{m}^3/\text{day}$ であったことを考慮すると，深部起源の大量の塩水が弘法井戸とその周辺において巴川にもたらされているものと考えられる．

表1 現地測定結果 (2019年9月5日, 11月21日)

| 試料名         | 採水時間  | 分類           | 水温<br>(°C) | pH  | EC<br>(mS/m) | 流量<br>(m <sup>3</sup> /day) |
|-------------|-------|--------------|------------|-----|--------------|-----------------------------|
| 2019年9月5日   |       |              |            |     |              |                             |
| 巴川地点1       | 10:12 | 河川水          | 21.1       | 8.1 | 53.2         |                             |
| 巴川地点2       | 10:35 | 河川水          | 21.2       | 8.1 | 53.3         |                             |
| 巴川地点3       | 11:02 | 河川水          | 21.3       | 8.1 | 53.3         | 15,000                      |
| 巴川地点4       | 09:47 | 河川水          | 21.1       | 8.1 | 53.0         |                             |
| 巴川地点5       | 11:20 | 河川水          | 21.4       | 8.1 | 54.0         |                             |
| 巴川地点6       | 11:43 | 河川水          | 21.4       | 8.1 | 54.9         |                             |
| 弘法井戸        | 12:09 | 井戸水          | 20.1       | 7.8 | 1,570.0      | 4.3                         |
| 井戸脇水路       | 12:15 | 河川水<br>(地下水) | 23.8       | 7.7 | 273.0        | 54                          |
| 2019年11月21日 |       |              |            |     |              |                             |
| 巴川地点3       | 12:30 | 河川水          | 12.9       | 8.3 | 49.2         | 19,000                      |
| 巴川地点4       | 12:00 | 河川水          | 12.9       | 8.3 | 49.6         |                             |
| 巴川地点5       | 13:10 | 河川水          | 13.1       | 8.4 | 50.0         |                             |
| 巴川地点6       | 14:10 | 河川水          | 13.2       | 8.5 | 50.6         |                             |
| 弘法井戸        | 14:44 | 井戸水          | 17.0       | 8.0 | 1,517.0      | 4.3                         |
| 井戸脇水路       | 14:50 | 河川水<br>(地下水) | 14.4       | 7.9 | 169.0        | 68                          |

表2 溶存イオン濃度 (2019年9月5日, 11月21日)

| 試料名         | Na <sup>+</sup><br>(mg/L) | K <sup>+</sup><br>(mg/L) | Mg <sup>2+</sup><br>(mg/L) | Ca <sup>2+</sup><br>(mg/L) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) |
|-------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|---|
| 2019年9月5日   |                           |                          |                            |                            |                           |  |   |   |
| 巴川地点1       | 29.3                      | 10.6                     | 11.0                       | 61.0                       | 25.9                      | 5.3                                    | 26.3                                    | 227.1                                   |
| 巴川地点2       | 29.6                      | 10.9                     | 11.2                       | 61.1                       | 25.7                      | 5.2                                    | 26.1                                    | 227.5                                   |
| 巴川地点3       | 30.1                      | 11.2                     | 11.4                       | 62.1                       | 25.5                      | 5.3                                    | 27.0                                    | 227.8                                   |
| 巴川地点4       | 29.5                      | 10.1                     | 11.3                       | 61.3                       | 26.0                      | 5.4                                    | 26.3                                    | 226.8                                   |
| 巴川地点5       | 30.9                      | 11.1                     | 11.3                       | 61.0                       | 28.8                      | 5.3                                    | 26.5                                    | 228.7                                   |
| 巴川地点6       | 32.3                      | 11.4                     | 11.3                       | 61.0                       | 29.4                      | 5.2                                    | 26.2                                    | 229.6                                   |
| 弘法井戸        | 3,851.5                   | 59.7                     | 26.8                       | 42.7                       | 5,786.0                   | 0.0                                    | 0.0                                     | 694.9                                   |
| 井戸脇水路       | 496.8                     | 15.3                     | 13.0                       | 41.0                       | 762.4                     | 7.0                                    | 14.1                                    | 240.9                                   |
| 2019年11月21日 |                           |                          |                            |                            |                           |  |   |   |
| 巴川地点3       | 23.4                      | 6.6                      | 9.3                        | 56.2                       | 24.6                      | 5.5                                    | 23.6                                    | 216.5                                   |
| 巴川地点4       | 25.1                      | 7.7                      | 10.2                       | 60.3                       | 26.2                      | 5.9                                    | 25.5                                    | 217.7                                   |
| 巴川地点5       | 24.7                      | 6.9                      | 9.6                        | 57.3                       | 27.0                      | 5.6                                    | 24.2                                    | 214.6                                   |
| 巴川地点6       | 27.3                      | 7.7                      | 9.9                        | 57.6                       | 30.7                      | 5.5                                    | 24.9                                    | 212.8                                   |
| 弘法井戸        | 3,430.2                   | 51.0                     | 14.0                       | 56.8                       | 5,110.5                   | 0.0                                    | 0.0                                     | 752.6                                   |
| 井戸脇水路       | 256.4                     | 9.1                      | 8.9                        | 44.6                       | 360.2                     | 12.6                                   | 28.6                                    | 219.8                                   |

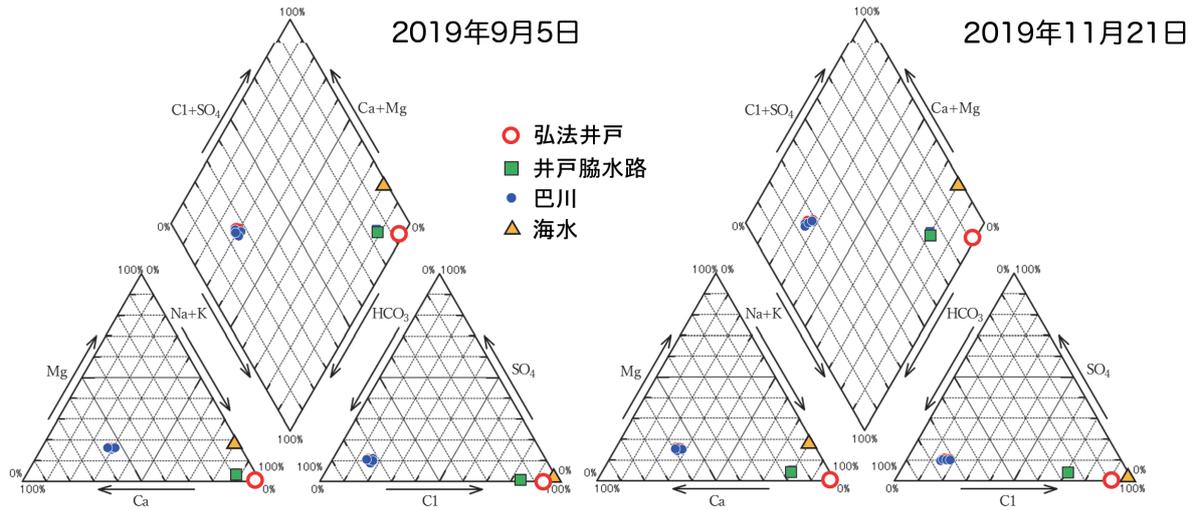


図5 トリリニアダイアグラム

左図：2019年9月5日，右図：2019年11月21日．参考のため海水をプロット．

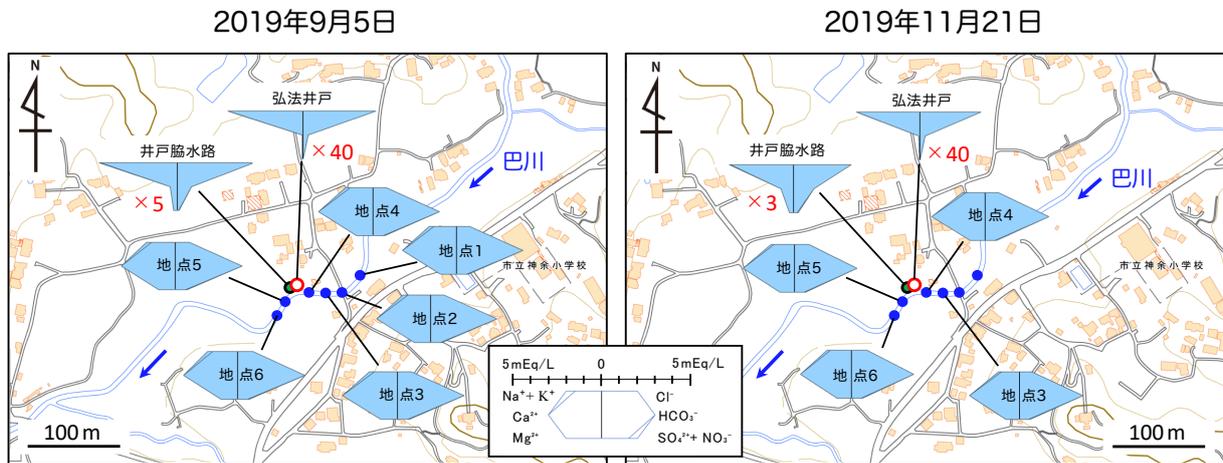


図6 ヘキサダイアグラム

左図：2019年9月5日，右図：2019年11月21日．弘法井戸と井戸脇水路についてはスケールの違いに注意．基図は地理院地図（電子国土Web）．

#### 4.2 巴川のCl<sup>-</sup>負荷量

流域における浅層地下水の最終的な流出域は河川である．したがって，河川のCl<sup>-</sup>負荷量（流量×濃度）の変化を評価することは，流域あるいは対象地域内において生起する浅層地下水と深部起源水の混合，すなわち深部起源水の昇量の定量化に繋がる．そこで，流量（表1）とCl<sup>-</sup>濃度（表2）に基づき，巴川の地点3～地点6（流路長70m）の区間におけるCl<sup>-</sup>負荷量の変化について検討を行う．

河川流路区間における負荷量の変化は，下流側の負荷量から上流側のそれを減ずることで評価できる．しかし，流量が15,000m<sup>3</sup>/dayを超える巴川のような規模の河川において，また地点3～地点6のようにわずか70m程度の流路区間で流量の変化を正確に求めることは，流量測定

の誤差（たとえば，新井，1982；太田・大森，2004）を考えると事実上不可能である．このため，本稿では図7に基づき，以下の近似的な手法で巴川の流下に伴うCl<sup>-</sup>負荷量の変化を検討した．

まず下流端の地点6の流量 $Q_6$ は，上流端の地点3の流量 $Q_3$ に区間での水の流入量を加えた式（1）となる．また，地点6のCl<sup>-</sup>濃度を $C_6$ ，地点3のそれを $C_3$ とすれば，Cl<sup>-</sup>の収支は式（2）で表すことができる．

$$Q_6 = Q_3 + Q_g + (Q_{sa} + Q_{sb} + Q_{sc}) \cdot \dots \cdot (1)$$

$$C_6 \cdot Q_6 = C_3 \cdot Q_3 + C_g \cdot Q_g + (C_{sa} \cdot Q_{sa} + C_{sb} \cdot Q_{sb} + C_{sc} \cdot Q_{sc}) \cdot \dots \cdot (2)$$

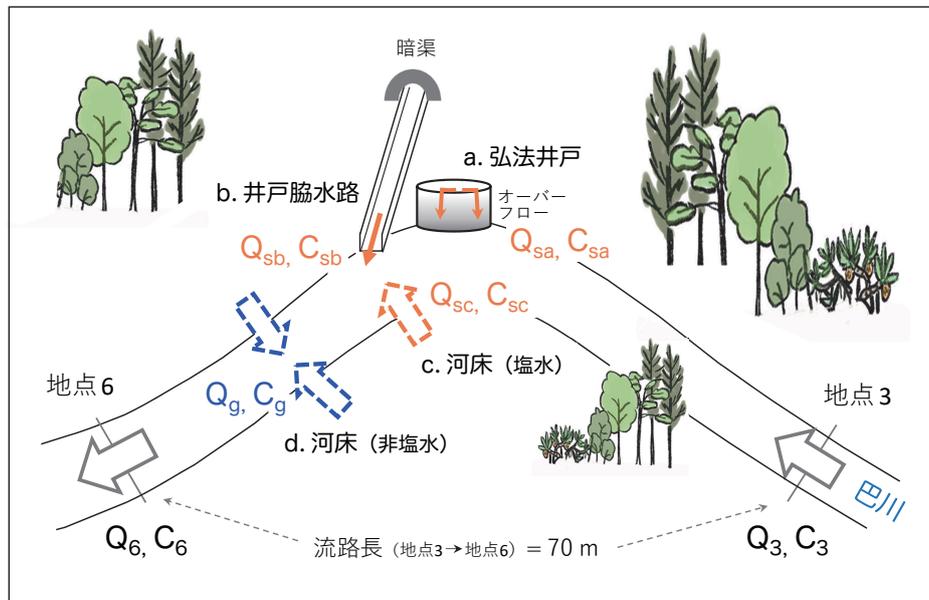


図7 巴川への塩水の混入と流量増加を示す概念図

流下に伴う流量とCl<sup>-</sup>濃度の増加（図2の地点3～地点6；流路長70m）は、塩水（オレンジ色の成分 a, b, c）と流域の浅層地下水（青色の成分 d）の流入によるものと想定。図中の記号については本文参照。

ここで、 $Q_g$ ,  $Q_{sc}$ は地点3～地点6で河床を通じて河川へもたらされる地下水（非塩水）ならびに塩水の流入量、また $Q_{sa}$ ,  $Q_{sb}$ は弘法井戸、井戸脇水路からの塩水の流入量を表す。 $C_g$ ,  $C_{sa}$ ,  $C_{sb}$ ,  $C_{sc}$ はそれぞれのCl<sup>-</sup>濃度である（図7）。

式（1）と式（2）から $Q_6$ を消去して変形すると、

$$(C_{sc} - C_6) \cdot Q_{sc} = (C_6 - C_3) \cdot Q_3 + (C_6 - C_g) \cdot Q_g + C_6 \cdot (Q_{sa} + Q_{sb}) - (C_{sa} \cdot Q_{sa} + C_{sb} \cdot Q_{sb}) \dots (3)$$

この式（3）の右辺第1項の $(C_6 - C_3)$ と第2項の $(C_6 - C_g)$ はほぼ同じ大きさとみなすことができる。一方で、第1項の $Q_3$ は第2項の $Q_g$ よりはるかに大きいことは明らかである。したがって、第2項は第1項に比べて無視しうる。この結果、 $Q_{sc}$ は最終的に次のように求められる。

$$Q_{sc} = \{(C_6 - C_3) \cdot Q_3 + C_6 \cdot (Q_{sa} + Q_{sb}) - (C_{sa} \cdot Q_{sa} + C_{sb} \cdot Q_{sb})\} / (C_{sc} - C_6) \dots (4)$$

式（4）の右辺の未知数は $C_{sc}$ 、すなわち河床を通じて流入する塩水の濃度のみである。ここで、 $C_{sc}$ として、深部起源水と浅層地下水が混合した水を起源とする井戸脇水路の塩水（第4.1節）のCl<sup>-</sup>濃度（9月5日；762.4mg/L, 11月21日；360.2mg/L）を採用し、その他のパラメーター値を表1, 表2に求めると、9月5日

の $Q_{sc}$ は $-8\text{m}^3/\text{day}$ 、また11月21日の $Q_{sc}$ は $218\text{m}^3/\text{day}$ となる。さらに、これらに $C_{sc}$ を乗ずると、河床を通じてもたらされるCl<sup>-</sup>負荷量 $S_{sc}$  ( $=C_{sc} \cdot Q_{sc}$ )は9月5日には $-6\text{kg}/\text{day}$ 、11月21日には $78\text{kg}/\text{day}$ と算出される。ちなみに、 $C_{sc}$ として弘法井戸のCl<sup>-</sup>濃度（9月5日；5,786.0mg/L, 11月21日；5,110.5mg/L）を採用した場合、9月5日の $Q_{sc}$ と $S_{sc}$ は $-1\text{m}^3/\text{day}$ ,  $-6\text{kg}/\text{day}$ 、また11月21日には $14\text{m}^3/\text{day}$ ,  $72\text{kg}/\text{day}$ と求められる。

以上の結果を、弘法井戸からのCl<sup>-</sup>負荷量 $S_{sa}$  ( $=C_{sa} \cdot Q_{sa}$ )と井戸脇水路からのそれ $S_{sb}$  ( $=C_{sb} \cdot Q_{sb}$ )ともに表3にまとめた。9月5日の河床からのCl<sup>-</sup>負荷量 $S_{sc}$ はマイナスとなったが、これは計算上の誤差であると考え、表では便宜上ゼロとして表してある。表3において、11月21日に地点3～地点6の区間で深部起源水からもたらされるCl<sup>-</sup>負荷量 $S_{total}$  ( $=S_{sa} + S_{sb} + S_{sc}$ )は $124\text{kg}/\text{day}$ と、9月5日の $66\text{kg}/\text{day}$ と比べてほぼ2倍となる。また、11月21日に河床を通じてもたらされるCl<sup>-</sup>負荷量 $S_{sc}$  ( $78\text{kg}/\text{day}$ )は、弘法井戸 ( $S_{sa}$ )と井戸脇水路 ( $S_{sb}$ )の合計 ( $46\text{kg}/\text{day}$ )よりかなり大きい。ここで、同日の巴川のCl<sup>-</sup>濃度の変化（表2）をみると、弘法井戸と井戸脇水路が巴川に流入する地点4～地点5の下流側の区間（地点5～地点6）においてCl<sup>-</sup>濃度の急上昇が認められる。このように、Cl<sup>-</sup>は9月5日にはほぼ弘法井戸と井戸脇水路によってもたらされていたものが、11月21日にはさらに大量のCl<sup>-</sup>が、より広い範囲から巴川に供給されていることがわかる。9月5日と11月21日の巴川の河川流

**表3 弘法井戸周辺の巴川における塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)負荷量の増加とその成分分離(2019年9月5日, 11月21日)**  
 巴川の地点3～地点6(図2; 流路長70m)における計算結果. S<sub>sc</sub>の算出に際しては, 河床を通じて流入する塩水のCl<sup>-</sup>濃度として井戸脇水路と同じ値を使用.  $S_{total} = S_{sa} + S_{sb} + S_{sc}$

|  | 2019年9月5日 | 2019年11月21日 |
|--|-----------|-------------|
| Cl <sup>-</sup> 負荷量の増加: S <sub>total</sub>   | 66kg/day  | 124kg/day   |
| 弘法井戸からのCl <sup>-</sup> 負荷量: S <sub>sa</sub>  | 25kg/day  | 22kg/day    |
| 井戸脇水路からのCl <sup>-</sup> 負荷量: S <sub>sb</sub> | 41kg/day  | 24kg/day    |
| 河床からのCl <sup>-</sup> 負荷量: S <sub>sc</sub>    | 0 kg/day* | 78kg/day    |

\* 計算上はS<sub>sc</sub>=- 6 kg/day

量の違いからも示唆されるように, 両調査日の流域の浅層地下水環境の違い(11月21日における地下水位の上昇や流動の活性化)がその原因の一つと考えられるが, 原因の詳細な検討については今後の研究を待ちたい.

最後に, 表1のCl<sup>-</sup>負荷量S<sub>total</sub>(9月5日: 66kg/day, 11月21日: 124kg/day)を弘法井戸のCl<sup>-</sup>濃度(9月5日: 5,786.0mg/L, 11月21日: 5,110.5mg/L)でそれぞれ除することで, 弘法井戸と同じCl<sup>-</sup>濃度を有する塩水に換算した場合の“塩水上昇量”を求めた. 計算の結果, それぞれ11m<sup>3</sup>/dayと24m<sup>3</sup>/dayとなり, 研究地域においては, 11月21日には9月5日に比べて2倍程度の深部起源水が上昇していたものと推定される.

## 5. おわりに

房総半島南部の巴川流域において, Cl<sup>-</sup>濃度に基づき深部起源水の上昇量の定量化を試みた. その結果, 神余弘法井戸を挟んだ巴川の流路長70mの区間において, 2019年9月5日と11月21日にそれぞれ66kg/day, 126kg/dayのCl<sup>-</sup>が河川水へ混入していることが明らかとなった. 神余弘法井戸と同じCl<sup>-</sup>濃度を有する塩水に換算した場合, 深部起源水の上昇量は9月5日には11m<sup>3</sup>/day, また11月21日には24m<sup>3</sup>/dayと推定された.

巴川のような規模の河川において, 極めて短い流路区間で負荷量の変化を正確に把握することは事実上不可能であるため, 本研究では近似的な計算を行った. しかし, 計算結果が一部で若干マイナスになるなど, その精度については検討の余地がある. 精度に影響を及ぼす要因のひとつとして, 河川断面における溶存成分濃度の不均質性に関する問題(太田・大森, 2004; 木村ほか, 2019)を挙げることができる. 特に河川水に塩水が混入する今回のようなケースでは, 両者の密度の違いから, 河川断

面でのCl<sup>-</sup>濃度の不均質な状態が下流側で長く維持される場合も考えられる. したがって, 本手法の適用にあたっては, 河川断面におけるCl<sup>-</sup>濃度の代表性という問題(断面のどの位置で, またどの深度で水試料を採取すればよいか)についても, 現場において十分な注意を払う必要がある.

最後に, 巴川の河川水は調査地域の上流側の地点1あるいは地点3において, すでに25mg/L程度とかなり高いCl<sup>-</sup>濃度を呈している(表2). これは小林(1962)による関東地方の河川水の平均値6.1mg/Lよりはるかに高い. 海岸に近い流域では風送塩の影響を受けるため, 河川水のCl<sup>-</sup>濃度が20mg/L程度と高くなる場合があることが報告されているが(たとえば, 角皆・品川(1977)による日本海沿岸のデータ), 巴川流域ではこのような風送塩の影響だけでなく, 河川水への深部起源水の混入が上流地域においても発生し, これが河川水のCl<sup>-</sup>濃度の上昇の一因となっているのかもしれない. 同地域には東北東～西南西方向にのびる断層や背斜・向斜構造が卓越していることから(図1), これらに規制される形で深部からの塩水上昇が広範囲で発生している可能性がある. 実際, 神余弘法井戸以外にも, 近傍の安房丘陵内には塩水の自然湧出地点がいくつか確認されている(産総研未公表資料). 巴川流域あるいは安房丘陵における深部起源水の上昇の全体像を把握するためには, その起源の詳細な地球化学的検討とともに, 今後さらに範囲を広げた広域水文調査が必要となろう.

## 謝辞

本稿は立正大学地球環境科学部環境システム学科に提出した2019年度卒業論文を加筆修正したものである. 同学科の流域物質循環研究室ならびに水文環境学研究室の学生・院生諸氏には水質分析やデータ解析に際し, 多大

なご協力ならびにご教示をいただいた。記して感謝いたします。

## 引用文献

- 新井 正 (1982) : 溪流の流量観測について. 三井嘉都夫教授還暦記念事業会編「環境科学の諸断面—三井教授還暦記念論文集—」, 土木工学社, 5-7.
- 川上俊介・宍倉正展 (2006) : 館山地域の地質. 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅, 東京 (8) 102号, NI-54-26-3, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 木村真夏・安原正也・李 盛源 (2019) : 河川の流水断面における主要溶存成分ならびに溶存態重金属類の濃度分布について—埼玉県福川を例として—. 地球環境研究, 21, 169-178.
- 気象庁 : 館山 / 2019年 (日ごとの値) 日降水量  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily\\_sl.php?prec\\_no=45&block\\_no=47672&year=2019&month=1&day=&view=p1](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_sl.php?prec_no=45&block_no=47672&year=2019&month=1&day=&view=p1) (2020年12月5日閲覧)
- 気象庁 : 館山 / 平年値 (年・月ごとの値) 降水量  
[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml\\_sfc\\_ym.php?prec\\_no=45&block\\_no=47672&year=&month=&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=45&block_no=47672&year=&month=&day=&view=) (2020年12月5日閲覧)
- 小林 純 (1962) : 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究, 48(2), 63-106.
- Kusuhara, F., Kazahaya, K., Morikawa, N., Yasuhara, M., Tanaka, H., Takahashi, M. and Tosaki, Y. (2020) : Original composition and formation process of slab-derived deep brine from Kashio mineral spring in central Japan. *Earth, Planets and Space*, 72(107). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01225-y>
- 益田晴恵・橋爪 伝・酒井 均 (1988) : 鹿塩地域に湧出する塩水の季節変動とその要因. 地球化学, 22, 149-156.
- 松葉谷 治・酒井 均・鶴巻道二 (1974) : 有馬地域の温泉, 鉱泉の水素と酸素の同位体比について. 岡山大学温泉研究所報告, No.43, 15-28.
- 太田 剛・大森博雄 (2004) : 河川の溶存無機イオン負荷量測定法の改良とその精度検討. 日本水文学会誌, 34, 173-187.
- 角皆静男・品川高儀 (1977) : 冬季モンスーンによって輸送される化学成分. 地球化学, 11, 1-8.
- 安原正也・稲村明彦・高橋正明・林 武司・河野 忠 (2006) : 内陸浅層部における高Cl<sup>-</sup>濃度地下水の分布とその地球化学的特徴. 第16回環境地質学シンポジウム論文集, 157-162.

## Deep-seated saline groundwater ascent and its mixing with river water in and around a shallow well, *Kanamari Kobo Ido*, in the Boso Peninsula, Japan

MABUCHI Ryotaro\*, YASUHARA Masaya\*\*, LEE Seongwon\*\*, and INAMURA Akihiko\*\*\*

\* Out-Sourcing Technology Co., Ltd.

\*\* Faculty of Geo-Environmental Science, Rissho University

\*\*\* Geological Survey of Japan, AIST

### Abstract :

Ascent of deep-seated saline groundwater toward the ground surface and its mixing with local shallow groundwater and river water has long been recognized to take place in and around a shallow well, *Kanamari Kobo Ido*, in the southernmost part of the Boso Peninsula, Chiba, Japan. The deep-seated saline groundwater in the study area is characterized by the high chloride ion ( $\text{Cl}^-$ ) concentration of about 5,000 mg/L. In this study, on the basis of changes in  $\text{Cl}^-$  concentrations along the course of the river, we attempted to quantify the amount of  $\text{Cl}^-$  brought from the depth by the deep-seated groundwater ascent for the 70-m long section of the Tomoe River. The amount of  $\text{Cl}^-$  mixed into river water was estimated at 66 kg/day and 124 kg/day for September 5 and November 21, 2019, respectively. Taking into account the  $\text{Cl}^-$  concentration of *Kanamari Kobo Ido* groundwater, the volume of deep-seated saline groundwater contributing to river water was estimated to be 11 m<sup>3</sup>/day and 24 m<sup>3</sup>/day for September 5 and November 21, respectively. The higher water table and more active groundwater movement on November 21 may account for these differences in  $\text{Cl}^-$  amount and quantity of deep-seated groundwater mixed into river water along the 70-m course of the river.

**Key words** : deep-seated groundwater, saline groundwater ascent, river water, chloride ion, mixing