

福井県越前市のカルスト性間歇冷泉（時水）について

藤井 厚志*・川上 一馬**

A karstic intermittent spring (Tokimizu), Echizen City, Fukui Prefecture

Atsushi FUJII・Kazuma KAWAKAMI

Abstract

Hydrogeological and hydraulic features of the Tokimizu were studied based on the hydrologic observation since 1995. A hydraulic structure with a siphon and two reservoirs over 20m³ is presumed (figs. 3 and 7). It's intermittent cycle shows about 20 minutes to over 12 hours unperiodically (fig. 5), probably by reason of an irregular swirl growth, but also basically under the influence of precipitation, or an amount of the inflow into the reservoir.

1. はじめに

時水は福井県文化財の名勝「時水」に指定（1992.5.1）されたカルスト性の間歇冷泉である（龍溪，1991）¹⁾。福井県越前市蓑脇の山中にあり、湧出口下に小さな滝をつくる。古くから山仕事の人達によってその音を3回聞くとお昼になると伝えられ、名称の由来になったと言われる。

筆者の一人、川上はこの湧泉の不思議な挙動に興味をもって1988年から観測を開始し、折々に地域の文化活動や各種メディアを通じてその



図-1 時水の位置と地形
基図は国土地理院ホームページ地図閲覧サービスの画面キャプチャーから利用した。

* 大阪経済法科大学地域総合研究所客員教授、元北九州市立いのちのたび博物館特別研究員

** 福井県自然観察指導員、元福井県鳥獣保護員、時水を守る会代表

実態の紹介に努めてきた（味真野の間欠冷泉調査委員会編，1989；川上，1991；タウンジャーナル委員会編，1991；川上，2007など）²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。1996年には環境庁の日本の音風景百選「蓑脇の時水」に選ばれ、2006年には福井県の「ふくいのおいしい水」に認定された。1995年11月からは藤井と共に三角堰と自記水位計を用いた観測に取り組んできた（川上・藤井，1999）⁶⁾。本論は16年にわたる観測から導かれた時水の水利構造と湧出特性に関して、水文地質学ならびに水理学的な考察を行ったものである。

2. 水文地質の概要

【水文地質】時水は大平山（標高611m）の北麓にある木呂谷（ころたん）の上方、標高320m付近に湧出する（図-1、図-2）。

山麓から時水までの一帯は花崗閃緑岩からなる。湧出口は組石状巨礫でできた径60～70cm、奥行き約1.3mの小穴奥にある。塩基性岩起源の普通角閃石ホルンフェルス（原岩は産状からみて恐らく輝緑凝灰岩）の割れ目から地下水が流れ出る。湧出口の直下には捕獲岩様暗色部の多い花崗閃緑岩が露出し、小さな滝をつくる。

時水よりも上流の谷（記載上、ムジナ谷と仮称）は約7haの流域をもつ。熱変成を受けた非石灰質堆積岩層（チャート、砂岩等）がわずかに分布するが、石灰岩の露出はほとんどない。ムジナ谷の谷頭、標高500m付近にムジナ清水（しょうず）と仮称する崖錐からの浸み出し程の湧き水があるが、ムジナ谷には定常的な谷流は見られない。豪雨時にも時水地点をムジナ谷からの谷流が流れ下る様子はない。時水よりも下流を時水谷（仮称）とする。

東側に約100mを隔てて隣合う谷（風穴谷と仮称）のほぼ同標高に小規模な結晶質石灰岩（変輝緑凝灰岩を伴う）の分布があり、その一部が湧出口の後方上部にわずかに露出する。風穴と呼ぶ深さ3～4mの小さな竪穴が石灰岩中にひとつ発見されているが、奥行きはなく、地下水流も見られない。風穴谷の東の谷を三ノ滝谷と仮称する。時水谷と風穴谷は三ノ滝谷の支谷である。

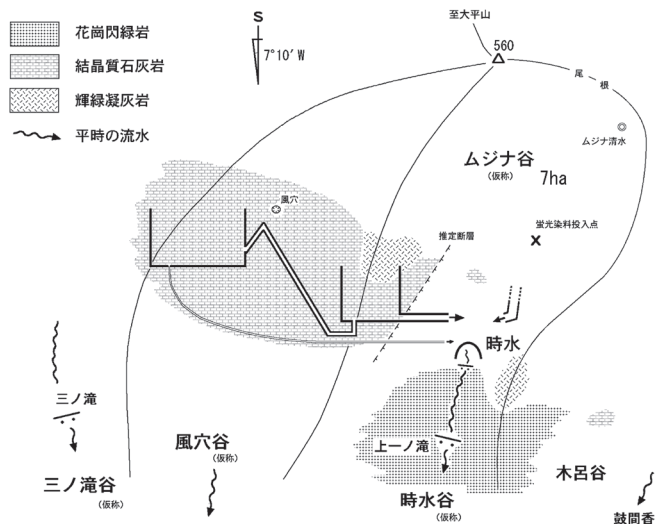


図-2 時水の水文地質と水理構造の概略

上記の花崗閃緑岩、非石灰質堆積岩層、結晶質石灰岩は、それぞれジュラ紀の船津花崗岩類、

ペルム紀の東俣層、石炭紀の古期堆積岩とされる（福井県，2010）⁷⁾。

【地下水】時水の水温は約11℃である。1995年11月7日の観測では、発作が始まると11.2℃から10.9℃へわずかながら低下した。2012年5月27日には、同じく10.6℃から10.5℃へ低下した。硬度変化の結果も併せみると、発作時と休止時とでは別系統の地下水をそれぞれ主とすることが分かる。

地下水の硬度は北陸公衆衛生研究所への委託分析では71.8mg/ℓ（1991. 9.10）、78.7mg/ℓ（1991.10. 3）、丹波地域環境研究会水分科会（朝日新聞，1996）⁸⁾や武生市環境調査報告会の2003年末公表資料ではそれぞれ99.4mg/ℓ、69.2mg/ℓである。2012年5月28日にカルシウム硬度ドロップテストキット（分析精度5 mg/ℓ；共立理化学研究所製）によって現地測定した結果は、発作中では95mg/ℓ、休止中では100mg/ℓであった。併せて、27～28日に三ノ滝谷、風穴谷、時水谷、木呂谷支流の鼓間香、の各谷尻で簡易測定した谷水のカルシウム硬度は、45 mg/ℓ、70 mg/ℓ、85 mg/ℓ、130 mg/ℓであった。

同5月27日に時水の上流、約150mのムジナ谷谷床に10gの蛍光染料（フルオレッセインナトリウム）を20ℓの水で浸透させた。この染料の流出確認を3ヶ所（三ノ滝谷と風穴谷との合流水、時水、鼓間香の谷水）において活性炭法（藤井，1987）⁹⁾によって試みた。しかし5月27日～6月10日、6月10日～7月5日の2回にセットした検体でいずれにおいても検出できなかった。その後7月15日～23日に時水にセットした検体でも検出されなかった。理由は明確でない。

このようなことから、ムジナ谷下流の谷床下には結晶質石灰岩体の延長が潜在し、ムジナ谷の地表水の全てがこれに浸透後、時水の基底流の一部として湧出するものと予想されるが、再度のトレーサー追跡による確認が必要である。

【流量観測と降水量】1995年末から湧出口の下流に簡易な直角三角堰を設置し、池田計器製自記減水位計による流量観測を行ってきた。流量への換算は一般式 $Q=8c/15(2g)^{0.5}H^{2.5}$ によったが、適正な水頭範囲（7～20cm）をも超えて適用した（流量係数 $c=0.6$ として）。三角堰の設置工作上の問題もあり、本文中に示した流量値は決して精度高いものとは言えない。降水量については、福井地方気象台アメダス観測所（板垣、今庄、武生）のWebサイトデータを参照した。

3. 水理構造の推定とハイドログラフの流量解析

時水の水理構造は図-3のようなものであると考えられる。観測される流量（見かけ流量）は、ムジナ谷からの浸透流を主とする基底流量 Q_m 、サイフォン系からの流量 Q_s 、第1槽のドレーンからの流量 Q_d が合わさったものである。ドレーン流量は非常に少なく、後述のように特別な条件下でのみ観測され、量的にはほとんど無視できる。サイフォンの出口は第2槽の水中に開口する。基底流量 Q_m の全てがムジナ谷からの浸透水であるか否かは、現時点では分からない。

サイフォン口からは空気を非常に吸い込みやすく、その吸い込みは、第1槽がほぼ空になった時 ($X_1 \div 0$; 空レベル) と吸込限界レベル以上で起こると考える (図-7のZ)。後者はおそらく強い渦の発生によるものと推測する。水位が空レベルを超え、吸込限界レベルに満たない範囲では空気を吸い込まない。

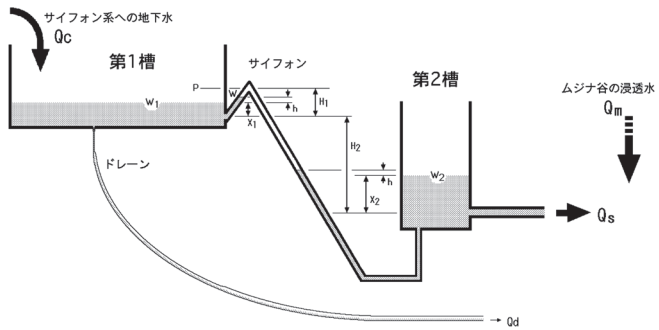


図-3 時水の水利構造モデル
空気の吸い込みによって発作が中断した様子を示す。

このような理由によって、時水特有のサイフォンの頻繁な発作と停止、無間歇現象が起こる。教科書的なサイフォンの動作では、供給量 Q_c が空レベルに平衡する流量以下の場合に間歇性が現れる。それを超えると第1槽の水位が一定レベルに停滞し、サイフォンは停止せず、間歇現象が生じない。

表-1 と図-4 に流量解析の一例（2003年10月31日～11月1日）を示した。発作毎に最大流量や総流出量、周期が変化する。

表-1 2003年10月31日～11月11日の流量解析

発作番号	周 期 分	基底流出量 m ³	最大流量 ℓ/秒	総流出量 m ³	平均基底流量 ℓ/秒	平均供給量 ℓ/秒
1	374	0.5	5.3	9	0.25	0.67
2	28	1.1	2.9	4.7		
3	62	3.1	2.3	4.8		
4	181	2	3.2	6		
5	112	2.3	2.6	5		
6	127	3.4	2.6	5.3		
7	194	1.5	4	7.2		
8	84	1.9	2.3	4.6		
9	103	2.5	2.3	4.7		
10	128	2.9	2.3	4.7		

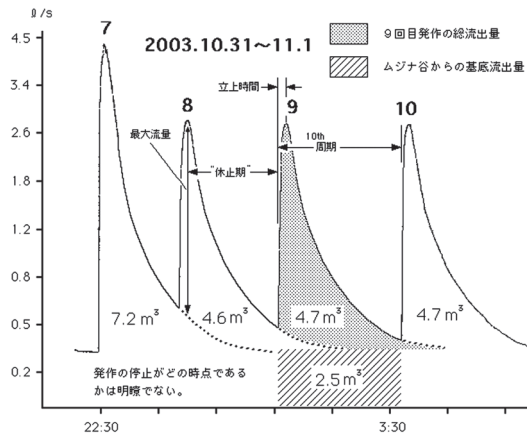


図-4 2003年10月31日～11月1日の流量解析

4. 湧出状況と考察

(1) 平時の湧出状況

時水にはふつう明瞭な間歇性が見られるが、周期は一定でない。平時には20分程度から数時間の間隔をもって不規則に次の発作が始まる。発作開始後、7～11分で見かけ流量が最大に達し、以降は減水する。この最大見かけ流量は発作毎に大きく変化する。平時における最大見かけ流量は1～10ℓ/秒、減水時の最低流量は数dl～2ℓ/秒である。時に最大見かけ流量が10ℓ/

秒を超える大きな発作が現れることがある。

前回の流出が完全に減水しない内に、次の発作が始まることが多い。減水が長く続くような時には、つづいて次の発作へ向けてわずかな流量の増加（0.3ℓ /秒程度）が見られることがある（図-5 矢印）。同図や表-1 から、休止期の長さ（≒周期）と次の発作の大きさには相関があることが分かる。また減水時のハイドログラフに遷急点（図-6 矢印）が現れることがある。厳密には遷急点（発作終了時点を示す）以降、次の発作開始までが真の休止期（貯留期）であるが、ハイドログラフには遷急点が明瞭に現れないことが多く、便宜的に最大見かけ流量時から次の発作開始までを休止期と呼ぶ。

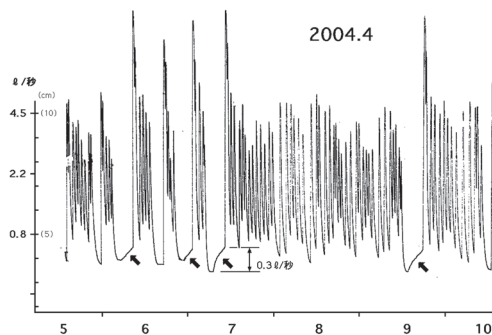


図-5 ハイドログラフに現れるドレーン排水の例（2004年4月）

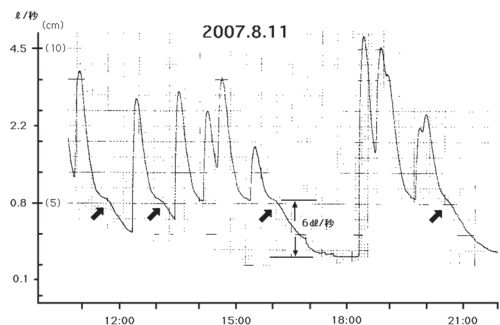


図-6 ハイドログラフに現れる遷急点の例（2007年8月11日）

【考察1】 第2槽内にあるサイフォン出口での流量は発作開始直後に最大流量を示すが、得られるハイドログラフでは第2槽の存在のために7～11分の遅れをもって最大流量（最大見かけ流量）に達する。

吸込限界レベル以上で空気が吸い込まれやすいために、通常はA→B→C→Aのサイクルで間歇現象を繰り返している。停止と発作が次の過程で進行する（図-7）。

i) 吸込限界レベル以上の任意の水位で空気の吸い込みが起こり、サイフォンの流出が停止する（ステージB）。ただし空気量が一定量以下の場合には、サイフォンは停止せず、流出が継続する。

ii) 第2槽の流出が続き、水位W2の降下によってサイフォン内の負圧が増し、管内の上流側水位Wが引き上げられる。同時に、第1槽の水位回復によっても、水位Wが押し上げられる。

iii) 第1槽の水位W1が満水位（レベルP）に達しなくても、前記二つの効果によって、管内の水位WがレベルPに達すると発作が始まる（ステージC）。

このようにサイフォンに空気を吸い込みやすく、かつ一時的な空気滞留が起こるために、第1槽が空になることなく任意の水位で流出が停止し、つづいて満水位Pに達する前に再発作が始まる。すなわち一回一回の間歇流出の総量は一定したものではなく、かつ最大見かけ流量が

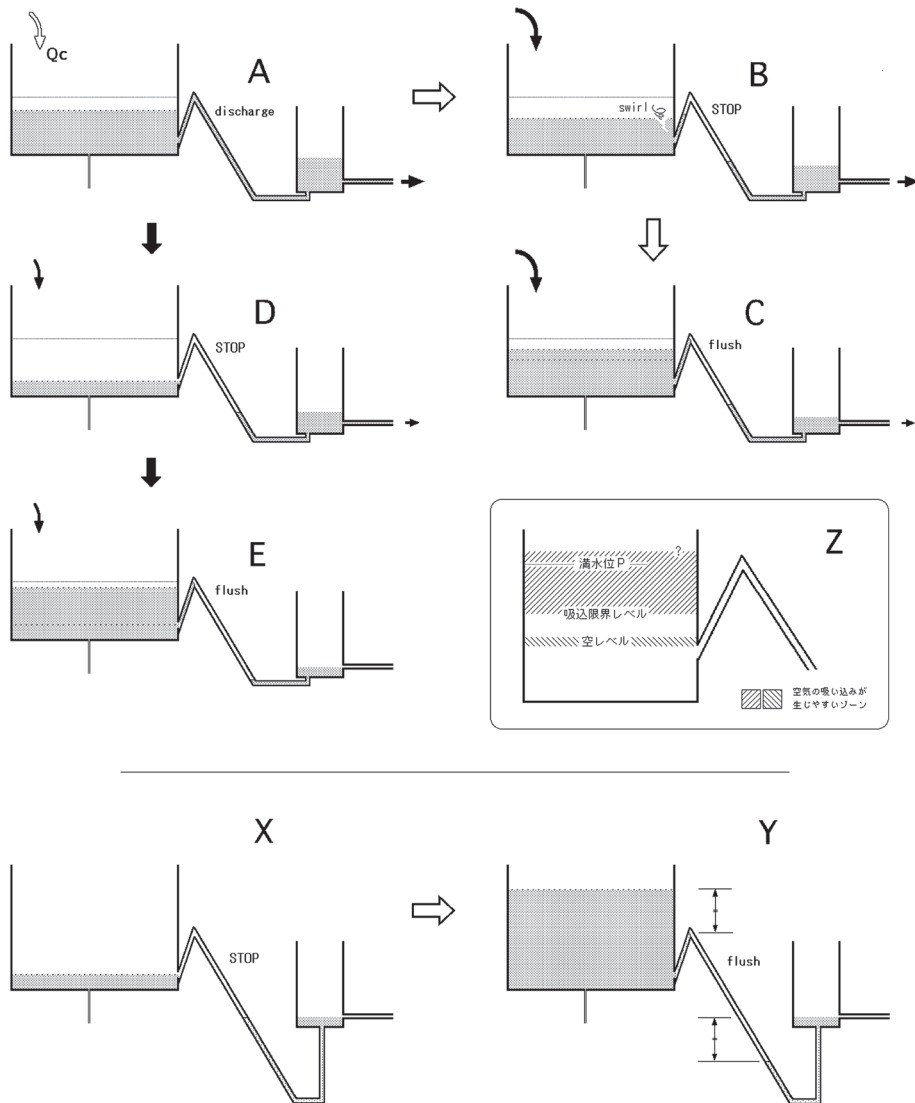


図-7 時水の間歇現象モデル

発作毎に変化する。また、第2槽がほぼ空の状態（ $X_2 \approx 0$ ）になれば、第1槽の水位回復による水頭圧増加を受けて、ドレインからのわずかな流量増加がハイドログラフに現れる（図-5：基底流量が大きい場合には観測精度上認めにくくなる）。ふつうはこの段階まで進まずに次の発作が始まる。

サイフォン系への供給量 Q_c が空レベルに平衡する流量以下にまで減水すると、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ のサイクルに加えて $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$ のサイクルが現れるようになり、間歇現象を繰り返す。その過程は次のように進行する。

- i) 吸込限界レベル以上で空気の吸い込みがあってもその量が少なく、流出が中断せずに継

続すると、教科書的に第1槽がほぼ空になるレベル($X_1 \div 0$)までサイフォンの流出がつづく。

ii) サイフォンの停止（ステージD）によって第2槽の水位降下速度が大きくなる。この時点でハイドログラフに遷急点が現れる。2007年8月には遷急点が顕著に現れた（図-6）。

iii) 第1槽では水位の回復が進むが、一方で第2槽がほぼ空（ $X_2 \div 0$ ）になると、ドレーンからの流量増加がハイドログラフに現れる（図-5）。

iv) サイフォン内の水位Wが満水位Pに達し、発作が始まる。この時、出口が水中に開口しているために、管内が加圧される。そのため第1槽の水位W1は満水位Pを若干超える。第2槽が空の時（ $X_2 = 0$ ）、水頭差 $H_1 + H_2 + a$ でもって始まる発作がサイフォンの示す論理的な真の最高流量である。発作停止時に第2槽に水が残っている状態（ $X_2 > 0$ ）の時は、前述のように第1槽の水位W1が最高水位に達する前に発作が始まり、最高流量を示さない（図-7のステージD～Eの状態）。

サイフォンの出口が深い位置から第2槽内に開口している場合には、休止状態（ステージX）から発作開始（ステージY）に達するまでに満水位Pを相当に超えて貯留し、最高流量もより大きなものとなる。ステージYで発作が始まる時、サイフォン屈曲部が動水勾配線よりも下位にある状態では、サイフォン内に負圧が生じない。そのため、空気の吸い込みがあっても滞留は生じず、流出中断には至らない。

（2）増水時の挙動

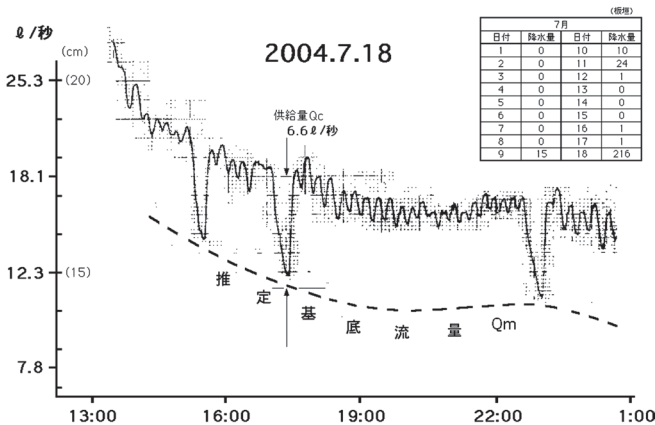


図-8 増水時のハイドログラフの一例（2004年7月18日）

増水時にも、たいていは間歇性が失われず、見かけ流量は15 l/秒以上、時には30 l/秒を超える（図-8～図-12、図-15左図）。

図-8 から、増水時には10分程度の短い周期をもつ、間歇的というよりも律動的な流量の増減を示すことが分かる。流量の増減は一般に2～3 l/秒であるが、散発的に5～7 l/秒の大きな増減が現れる。後者のハ

イドログラフは平時の間歇形に比較的似ている。三角堰がオーバーフローしたため正確には不明であるが、18日正午前後に見かけ流量約30 l/秒以上に達したようである。17時30分頃の供給量として6.6 l/秒と求められる。

【考察2】 増水時は基底流量が大きいために、間歇的の流出が見かけ上矮小化されて描かれる。サイフォンは前述のA→B→C→Aのサイクルで間歇現象を繰り返している。空気の吸い込みによって流出が中断するが、供給量が大きく、かつ第2槽の水位降下速度も大きいために、す

ぐに再発作に至る。時折空気を大きく吸い込むことによって、長く中断し、流量が大きく低減する。

一回一回の増減による流出の総量は、観測精度の問題もあるが、定常間歇時とおおよそ同じと見なせるようである。基底流量が減少すると、ハイドログラフが通常の間歇形に移化する。

図-9～図-12から、激しい雨の影響は数時間内に現れ、基底流量が大きく増水することが分かる。サイフォン系供給量も同じように増水すると見られる。ほかにも1998年9月22日、2006年7月17日、2010年7月12日、2012年7月20日等に類似例がある。

1998年7月10日（図-15左図）の豪雨では、掲げた縮小図では不鮮明であるが、増水開始直後に基底流量が14.5ℓ/秒、供給量が12～13ℓ/秒に増加しているらしいことが読みとられる。2006年7月18日の例では基底流量14.5ℓ/秒、供給量8.7ℓ/秒まで増加している。2012年7月20日の例では同じく17～19ℓ/秒、8～9ℓ/秒まで増加している。

(3) 間歇性の消失と再出現

大きな降雨の後には時に間歇性が見られなくなることがある。通常の湧水へと変わり、数週間にわたって長く続くこともある。積雪期を除くこれまでの観測で、増水後の間歇性消失は2007年頃から目立ち始め、それ以前には希なことであった。とくに2011年はこの現象が頻繁に起こった。このことが何

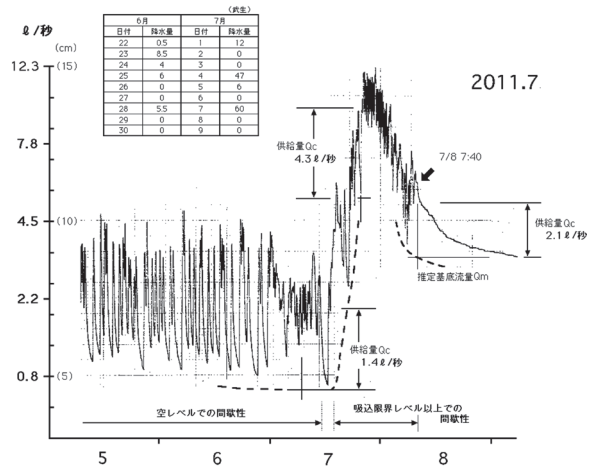


図-9 増水時のハイドログラフの一例 (2011年7月)

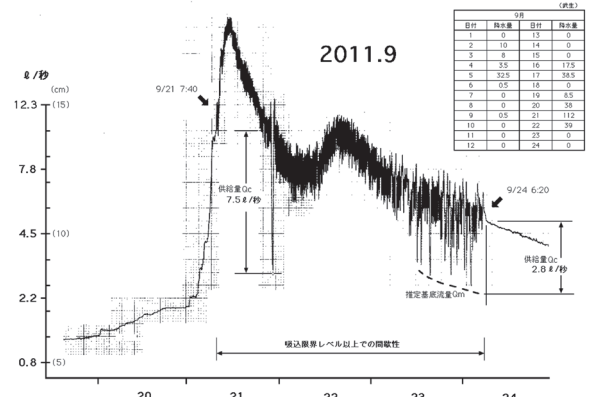


図-10 増水時のハイドログラフの一例 (2011年9月)

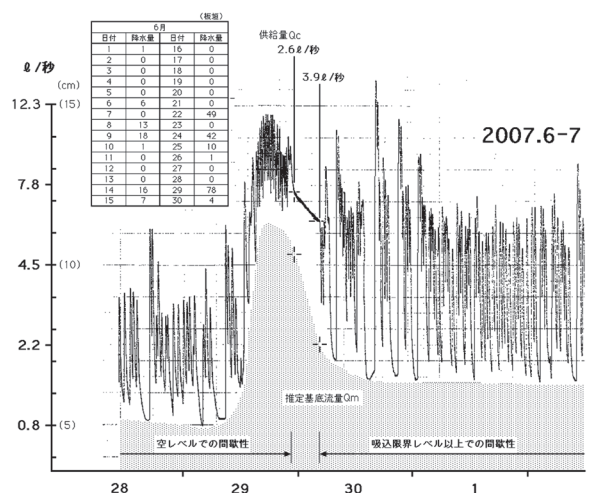


図-11 増水時のハイドログラフの一例 (2007年6月)

かを意味しているのか否か、現時点では明らかでない。

間歇性の消失後、再び間歇性をもって流出が始まる時には、ハイドログラフは空気の流入を意味する流量の急激な減少から始まっている。

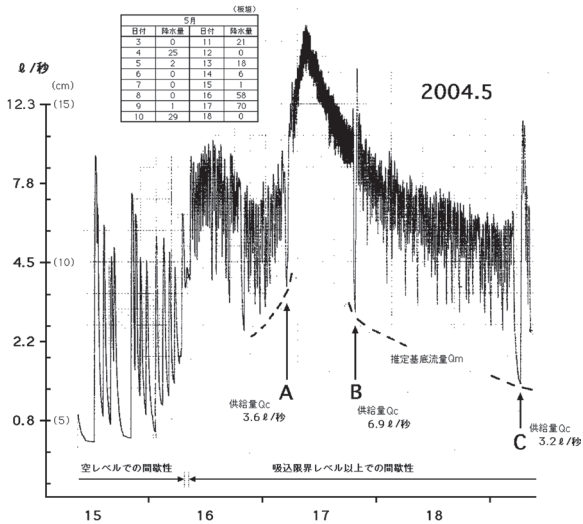


図-12 増水時のハイドログラフの一例(2004年5月)

供給量は前記の2.1ℓ/秒（吸込限界レベル）に達せず、この間空気の吸い込みが起こらなかったと推測される。しかし図-10に示すように同月20日から強い雨で基底流量が増加を始め、遅れて21日7：40頃に供給量が吸込限界レベルを超え、間歇性が現れ始めたと思われる。この時点での基底流量は約9.5ℓ/秒である。

21日夜半には供給量7.5ℓ/秒に達したが、まもなく減少を始め、24日6：20頃には吸込限界レベル以下に低下し、間歇性が再び消失したようである。この時点での供給量は同図から2.8ℓ/秒である。後述のように、この間歇性消失は10月23日まで続いた。

モデル的にはこのふたつの値、2.1ℓ/秒と2.8ℓ/秒は一致すべきである。図-9と図-10に示す例のほかに、吸込限界レベルでの間歇性消失現象と考えられる別の例（2006.7.17、2007.7.14; 12.9）では、移行時点の供給量として2～2.7ℓ/秒が得られた。

2007年6月29～30日（図-11）の例では、29日の豪雨によって供給量が2.6ℓ/秒に増した時点で空レベルを超え、間歇性が消失した。さらに約6時間の後に吸込限界レベル（3.9ℓ/秒）をも超え、再び間歇状態に入ると推測されるが、基底流量の推定に不確かな点も残る。この間歇状態は7月13日まで継続し、翌日から間歇停止（無間歇）に入ったが、移行時点での供給量は2ℓ/秒であった。

【考察4：空レベルでの間歇性出現と消失】

2005年観測開始日（4月24日）以来の無間歇状態の中で約12時間ほど間歇性が出現し、すぐに消失した同年5月4～5日の例（図-13）を見ると、間歇性出現/消失時の供給量は1.2～1.3ℓ

【考察3：吸込限界レベルでの間歇性消失と再出現】図-9（2011年7月8日）では、基底流量の増加開始から1日近く遅れて間歇性が消失している。同時に1.4ℓ/秒から4.3ℓ/秒以上へと増加した供給量が次第に減少し、7月8日7：40頃に吸込限界レベルを切ったために渦による空気の流入がなくなり、間歇性が消失したものと推定できる。その時点の供給量は2.1ℓ/秒と求められる。

同年9月13日からは無間歇が続き、見かけ流量1.2～1.8ℓ/秒であった。供

/秒と求められ、[考察3] で述べた2.1ℓ/秒や2.8ℓ/秒との間に有意な差があるように思われる。この流量は第1槽が空に近くなった状態（ $X1 \div 0$ ；空レベル）での流量を示すものと考えられる。

4月、5月期に長く続く無間歇現象は、2005年のほかに2000年、2008年、2012年にも見られたが、間歇性出現時の供給量はそれぞれ1.4ℓ/秒（2000.4.15）、1.3ℓ/秒（2008.5.5）、1.0ℓ/秒（2012.5.21）であった。これらの無間歇現象は、2008年以外は遅い雪解けに理由があるらしい。類似の例として、図-14（2011年10月23日）では移行時点の供給量1.1ℓ/秒である。9月24日から無間歇状態が続き、10月23日に至って供給量が空レベルまで減少し、間歇性が始まったと考えられる。

いずれも空気滞留による短周期の間歇性を示す振幅の小さいハイドログラフから始まっている。小さな渦の発生によるものであろう。これらの例を含めた間歇性開始の同様15例（ほかに2005.5.13、2007.8.2、2008.7.12、2010.6.7；7.26、2011.7.15；7.26；8.31；9.2；9.4）で、移行時点の供給量として最小0.7ℓ/秒、最大1.7ℓ/秒が得られた。

逆に間歇性停止が始まった例としては先の例（図-13）のほかに、2008年7月10日、2010年5月29日、2011年8月6日、9月3日、9月13日などの例があり、0.8～1.8ℓ/秒で移行している。残念ながら、間歇性開始、停止ともに、2011年7月下旬から9月中旬のデータには[考察5]に述べる信頼性の問題が残る。

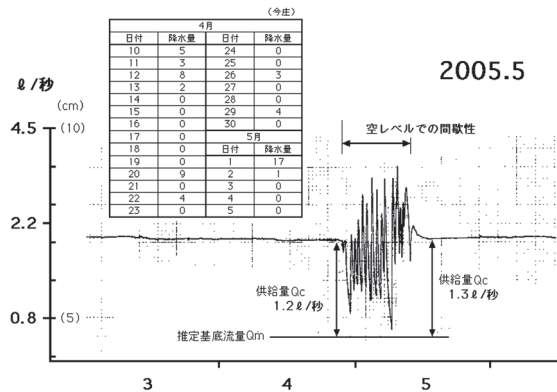


図-13 間歇性の出現と消失の一例（2005年5月）

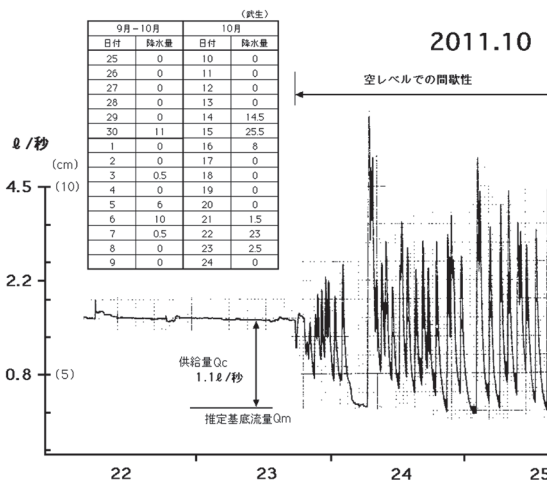


図-14 間歇性の出現の一例（2011年10月）

図-4と表-1に掲げた流量解析（2003年10月31日～11月1日）では供給量0.7ℓ/秒と求められ、同じように空レベルでの間歇現象と見なされる。図-6の遷急点が示す流量0.6ℓ/秒も空レベルの最小値と理解できる。

全体として、空レベル、吸込限界レベルともに、データ信頼性に疑問が残る期間を除外しても、間歇性開始時や同停止時の供給量にバラツキが見られるのは、おそらく渦発生の不確定さに起因するのであろう。

【考察5：理解が難しい例】 以下のように、これまでに述べた考え方でよく説明できないデータもある。

i) 2004年5月17日のハイドログラフ（図-12）から、図中のA、B、C時点での供給量をそれぞれ概略3.6ℓ/秒、6.9ℓ/秒、3.2ℓ/秒と推測することができる。間歇現象は以後9月まで途切れることなく継続し、8月下旬以降5～8時間の休止期が現れるようになり、供給量1ℓ/秒を切る程度にまで低下した。同じような現象は1998年7月中旬（図-15）以降、2006年7月下旬以降、2008年9月初旬以降にも見られた。これらの例では吸込限界レベル以下での間歇停止は現れず、空レベルに至るまでの幅広い供給量にわたって空気の吸い込みがあったことを示している。

図-11や図-12の例で、供給量が豪雨後に2.6ℓ/秒あるいは3.6ℓ/秒に増加するまで空レベルからの間歇性が続いていることも、同様の現象を意味するものかもしれない。

ii) 一方、2007年12月には平常の間歇現象が夏季から続いていたが、12月9日午前の間歇性が消失し（当該時点での推定供給量1.8～2.2ℓ/秒）、当年の観測終了（12月29日）まで続いた。12月9日以降、見かけ流量は中旬に9～12ℓ/秒に達し、年末時点で約3ℓ/秒であった。この間に2度ほど、単発的に小発作の兆候があったが、前例とは逆に、幅広い供給量にわたって間歇現象が起こらなかった。2008年12月にも同様の無間歇の現象があった。ハイドログラフ上で基底流量の分離ができないために細かな解析ができないが、吸込限界レベル以上でも渦の発生が全くなかったのであろうか。

iii) 2011年7月下旬から9月中旬（7月26日、8月31日、9月2日、9月4日）の空レベルデータでは、0.8～0.9ℓ/秒で無間歇状態から間歇湧出へ移行した（他の期間の11例では1.0～1.7ℓ/秒）。逆に、同年8月6日と9月3日、9月13日には0.8～1ℓ/秒で間歇停止へと移行した（他の期間の4例では1.3～1.8ℓ/秒）。このように2011年7月下旬から9月中旬にかけては、移行時点の供給量に全体に低い傾向が見られるように思われる。三角堰槽のハード面の問題も考えられるが、よく分からない。

iv) 細かいことであるが、図-5に示した点でも、同じように減水しながらドレーン流量の増加が現れる場合と、そうでない場合があることも不思議である。

（4）少雨の影響

2005年4～6月は非常に少雨（1981～2010平年値の57%；今庄観測所）であった。同年は4月24日から観測を始めたが、5月13日までは間歇性が消失していた。図-13に示すように5月4～5日に半日ばかり間歇したが、すぐに元に戻った。13日午前10時頃以降、連続的な間歇性が始まった。6月上旬までは平常の間歇状況が続いたが、中旬から4～5時間の休止期が時折見られるようになり、下旬には5時間を超える例が頻繁になった。6月27～28日には約12時間の休止を置いた。

【考察6】 5月4～5日には半日間にわたって供給量が空レベル上限値（図では1.2ℓ/秒）に

下がり、間歇性が出現したと推測できる。また、5月1日の降水が4日遅れて供給量の増加に現れ、再び空レベル上限値を超えて間歇性が消失した。5月13日以降は継続的に空レベルに下がったとみられ、連続的な間歇性が始まった。少雨の影響が現れ始めたと解釈される。6月27～28日に約12時間の休止を置いた時点では、ハイドログラフの流量解析から供給量が0.7ℓ/秒まで下がっていることが分かる。

図-4（2003年10月31日～11月1日）の流量解析では供給量0.7ℓ/秒が計算された。10月から11月にかけては5～10時間の休止期が頻繁に見られ、9月の少雨（1981～2010平年値の38%：今庄観測所）の影響が現れている。寡雨による影響は1ヶ月から2ヶ月の遅れをもって現れるようである。図-5（2004年4月上旬）にも同じような少雨の影響が見られ、長い休止期が頻発している。しかし2006年8月の月降水量4mmの影響は、7月の多雨（484mm）や9月上旬の大雨（138mm）の影響からか認められない（降水量は今庄観測所）。

ドレーンが小さいため、供給量が若干減少しても第1槽は満水に達する。少雨によって間歇現象が消失することは無く、次の発作までの休止期が長くなるに過ぎない。供給量がドレーン流量の最大値（0.3ℓ/秒）以下に下がるような極度の干ばつが起これば、間歇現象が長期に消失することが考えられる。

（5）流量の微増減

一定の流量レベル（5～3ℓ/秒）の時に限って、流量の細かな増減が数分～15分間程度現れる（図-15右図）。この間、数10秒の一定しない周期で流量に1ℓ/秒程度の増減が生じる。1998年7月5日～21日のハイドログラフ（図-15左図）には“虎縞”（左右の白抜矢印で挟んだ部分）のように表れており、この現象が基底流量や供給量の大小とは関係なく、一定の流量レベルで現れることをよく示している。増水時にわずかに高く、平時にわずかに低い。この流量レベルに限って2003年まで現れたが、2004年以降はほとんど現れなくなった。

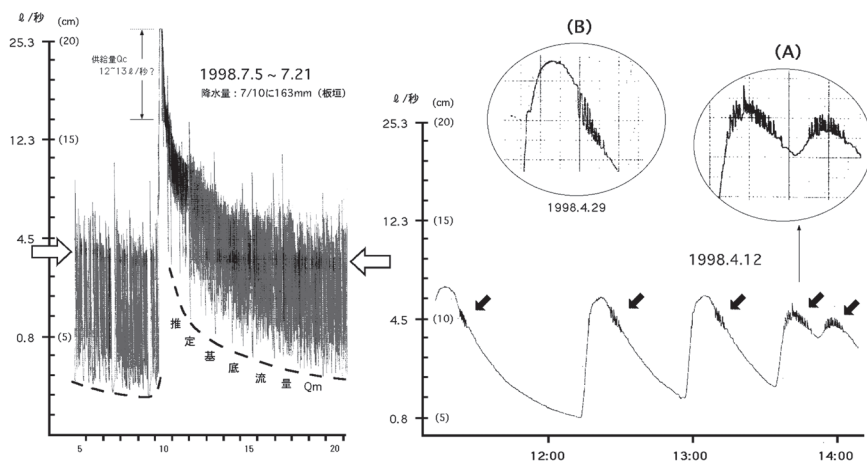


図-15 特定流量レベルに現れる流量の微増減

【考察7】ハイドログラフには流量の急激な減少から始まる場合と逆の場合がある。見かけ流量の増加時（A）と減少時（B）とで逆のパターンを示している。サイフォン系で生じているものではなく、流量3～5ℓ/秒の時に空気を吸い込みやすい管路構造が、第2槽の排水 Q_s とムジナ谷基底流 Q_m との合流部よりも下流、ドレーン Q_d との合流部よりも上流にあるものと推測できる。

発生の過程は、i) 渦の発生による流量増大、ii) 空気の吸い込み、iii) 気泡の抵抗で流速減少（かつ空気の体積分だけ水の量が減少）、iv) 空気の吸い込み停止、v) 流速回復、この繰り返しによって流量に細かな増減が生じる。発生初期に見かけ流量が増加中（A）であれば i) のステージがしばらく続き、減少中（B）であればすぐに ii) のステージに入ることによって、ハイドログラフに逆のパターンが現れるものと考える。

5. 貯留槽の容積の推定

第1槽の容積（貯留可能容積）は、発作毎に変化する総流出量の最大値から概略推定することができる。2006年8月1日のハイドログラフ（図-16）から求めた総流出量、供給量 Q_c 、基底流量 Q_m 等は図中ならびに以下に示すとおりである。前後の貯留期にドレーン流量 Q_d の増加が見られ、両期間とも第2槽はいったん空になったことが分かる。

2006.8.1 (AM 1 : 00 ~ 5 : 00頃)

三角堰の最大水位15.8cm（見かけ流量14.1ℓ/秒；真の最大流量12.9ℓ/秒）

供給量2.7ℓ/秒、平均基底流量0.9ℓ/秒

真の最大流量とは、見かけ流量から基底流量とドレーン流量を減じたサイフォン系の流量で

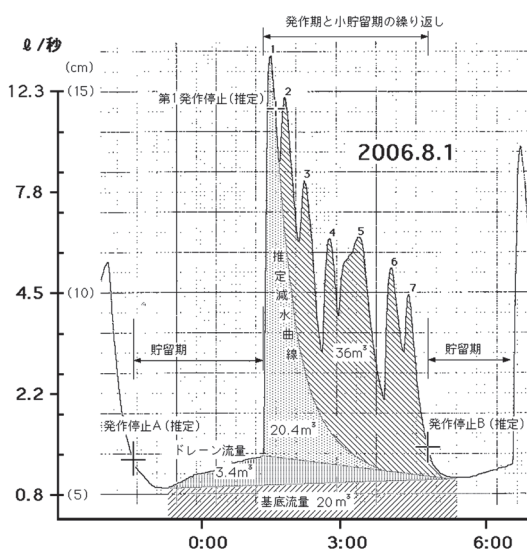


図-16 2006年8月1日の流量解析

ある。供給量は、サイフォン系流出量とドレーン排出量の合算値を、発作停止Aと発作停止Bの時間差で除したものである。供給量が2.7ℓ/秒と大きいので、吸込限界レベル付近での間歇現象と分かる。

総流出量（第1発作では20.4 m³）には発作直前の第1槽の貯留量に加えて、発作中に第1槽へ流れ込む水量が加わっているが、発作停止後に流れ込む量は次の発作に加算される。発作がどの時点で停止したのか、遷急点が高イドログラフに現れていないので、最大見かけ流量時と次の発作開始時（あるいは最低流量時）の中間点と仮定

した。第1発作の推定減水曲線から求めると、発作直前の貯留量として 20.2m^3 が求められる。第1発作から第7発作までを通算すると、 24.0m^3 が求められた。

これまでの最大級観測値である三角堰水位 17.1cm （2008.9.3；見かけ流量 $17.1\ell/\text{秒}$ ；真の最大流量 $14.6\ell/\text{秒}$ ）、同 16.2cm （2006.8.8；同 $15\ell/\text{秒}$ ；同 $14.5\ell/\text{秒}$ ）では、残念ながら詳細なハイドログラフが得られていないので求めることができない。

現時点では、岡山県の潮滝（国天然記念物）や広島県の弘法の一杯水などのように（藤井, 1998）¹⁰⁾、サイフォン系のもつ各緒元（H1、H2、第1槽や第2槽の容積・底面積など）を決定するに至っておらず、将来の研究の進展に託したい。

発作開始後、最大見かけ流量に達するまでの立ち上がり時間（7～11分；図-16で8.5分）を潮滝（8.9～9.6分）や弘法の一杯水（70数秒）と比較すれば、サイフォン系は相当の奥部にありと推測される。潮滝では第2槽の底面積が 31.64m^2 と求められるので、第2槽を横幅30cmの水路状のものと単純に考えれば、奥行き約105mと計算される。時水がもつサイフォン構造は東隣の風穴谷の石灰岩分布域にあると考えられるので、100m以上の奥行きを想定することが十分可能である。

表-2 時水と潮滝、弘法の一杯水の発作時湧出状況の比較

	潮滝（岡山）	弘法の一杯水（広島）	時水（福井）
最大見かけ流量	8～11.5 $\ell/\text{秒}$ 豪雨時には間欠しない	10～11 $\ell/\text{秒}$ 豪雨時には間欠しない	2～17 $\ell/\text{秒}$ + 豪雨時約30 $\ell/\text{秒}$ +
周期	2.4～10時間 定期的	約20分～約4時間 定期的	約20分～12時間以上 不定期的
貯留可能容積	約 10m^3	1.8m^3	20m^3 以上
立ち上がり時間	約9分	70数秒	7～11分

6. まとめ

時水の主要な水文地質学・水理学的特徴は次のようにまとめられる。

- i) 時水は 20m^3 を超える第1貯留槽とサイフォン構造を相当の奥部にもつと推定されるカルスト性間歇冷泉である。水温は約 11°C 、硬度は $70\sim 100\text{mg}/\ell$ である。
- ii) サイフォン系は時水の南東に分布する小規模な結晶質石灰岩体に胚胎する。
- iii) 時水の上流にある非石灰質堆積岩分布域、約7haのムジナ谷では全ての地表水が地下に浸透し、時水の基底流の一部として現れるものと予想される。
- iv) サイフォンの出口が第2槽の水中に（水面下直下でなく、やや深くに）開口し、かつ第1槽の排水途中でも空気を吸い込みやすい性質をもつと考えられるため、非常に不定期かつ頻繁に発作が起こる。ほとんどは発作時の流出が完全に減水しない内に、次の発作が始まる。

v) 発作時には発作開始から7～11分で最大見かけ流量に達する。基底流量等を減じた真の最大流量は発作毎に最小1ℓ/秒程度から最大14.5ℓ/秒前後まで変化し、かつ一定しない総流出量を示す。これらには直前の休止期との間に相関が見られる。

vi) サイフォン系地下水の供給量増減によって、間歇現象が出現したり、消失したりする。平時の供給量は3ℓ/秒未満であるが、大きな雨の直後には10数ℓ/秒まで増加することがある。供給量 Q_c が空レベル超過～吸込限界レベル未満の範囲（概略1～3ℓ/秒）にある時に無間歇状態になることが多いが、間歇性が続くこともある。

vii) 非常に激しい雨の影響は、基底流量、サイフォン系供給量ともに数時間内の急激な増水として現れる。基底流量は平時には数 dl ～1ℓ/秒程度であるが、激しい雨の直後には約20ℓ/秒まで増加する。

viii) 4～5月期には、恐らく遅い雪解けによるサイフォン系地下水の供給量増大によって、長期に無間歇状態が続くことがある。

ix) 少雨による影響は、1～2ヶ月の遅れをもってサイフォン系供給量が減少する結果、長い休止期（数時間～10数時間）が頻発して現れる。

x) 基底流量やサイフォン系供給量が著しく増加する豪雨時にも、また逆の少雨時にも間歇性は失われない。

蛇足ながら、時水の湧出パターンは本稿に示した水理構造モデルによって大体説明可能であるが、[考察5] のようになお説明し難い現象も知られる。レベルを異にした渦発生メカニズムも課題として残る。本研究は時水解明の一里程にすぎないことを付記して、より精度高い研究の誕生を今後に待ち望みたい。



図-17 時水（2012年5月28日）
背後にある扇様のものは、麓の村から発作中如何が遠望できるように作られた装置。

謝辞

長年の調査に当たって、以下の方々、ならびにここに掲げることができなかった多くのボランティアの方々にも、調査や土木工作、資料収集などに際して大変お世話になった。心より御礼申し上げたい。飯田明、西野竹男、宮川隆、福田久美、龍溪信行、萩原茂、畠山嘉和、飯田幸雄、山本秀樹、上山明、萩原惣一、柴田晃、藤井弘志、味真野自治振興会および関係地権部落の諸氏、味真野地区公民館、味真野間欠冷泉調査委員会（時水を守る会）、越前市教育委員会文化振興課、大場保孝（故人）、八田七郎右エ門（故人）、上山助治（故人）、川端治（故人）、小泉剛康（故人）、榎本二郎（故人）〔敬称略、順不同〕。

北九州市立いのちのたび博物館の森康博士には湧水口の岩石について検鏡をいただいた。（社）あすの福井県を創る協会から「魅力あるまちづくり推進事業」の活動助成費を、味真野自治振興会より研究助成費を交付いただいた。元大阪経済法科大学沢勲先生には本紀要への小論投稿のお薦めをいただいた。これらの関係の方々に厚く感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 1) 龍溪信行「味真野の間欠冷泉—その自然条件と発生のしくみについて—」福井県指定史跡名勝天然記念物指定申請書（別紙）資料（武生市教育委員会文化振興課1991、手稿）。
- 2) 味真野の間歇冷泉調査委員会編『味真野の間歇冷泉—「時水」観察・調査の記録—』（味真野の間歇冷泉調査委員会1989）18頁＋付図付表。
- 3) 川上一馬「蓑脇の時水—豊かな自然とその不思議さ—」あじまの再発見2号（味真野自治振興会文化教養部1991）8-9頁。
- 4) タウンジャーナル委員会編「蓑脇の時水 “大自然のおりなす不思議”」多恵府22巻（武生商工会議所青年部1991）14-15頁。
- 5) 川上一馬「間欠冷泉 周期は水もの」（日本経済新聞2007.11.9）。
- 6) 川上一馬・藤井厚志「福井県武生市の間歇冷泉時水 付.味真野の洞窟とケイビング」日本洞窟学会第25回大会秋吉台大会講演要旨（1999）14-15頁。
- 7) 福井県『福井県地質図及び同説明書（2010年版）』（福井県地質図改定委員会編、福井県建設技術公社2010）173頁。
- 8) 朝日新聞（福井版）「名水を科学する1—丹南18ヵ所巡り」（1996.2.28）。
- 9) 藤井厚志「水系調査における蛍光染料検出の一工夫」洞窟学雑誌12巻（日本洞窟学会1987）50-51頁。
- 10) 藤井厚志「カルスト性間歇冷泉の水理学的解析とその水文地質学的意義」北九州市立自然史博物館研究報告17巻（1998）111-198頁。