

ポットホールと節理による構造規制（第2報）：
和歌山県古座川町「滝の拝」の例

木村克己¹・金子 誠¹・山本俊哉²

¹ 深田地質研究所

² 和歌山県立田辺高等学校

Structural control of potholes by regional joints (Part II):
a case of “Taki-no-Hai” in Kozagawa Town, Wakayama Prefecture

KIMURA Katsumi¹, KANEKO Makoto¹ and YAMAMOTO Toshiya²

¹Fukada Geological Institute

²Wakayama-Prefectural Tanabe High School

要旨：珪化変質で硬化した熊野層群の分布域において、和歌山県古座川町滝の拝の小川河床に発達するポットホールと河道に平行および直交する両節理（河道平行系、河道直交系）を対象に、ドローン撮影を含む詳細な調査を実施した。そして第1報の成果も踏まえて、ポットホールと節理との関係を記載・考察し、以下の点を明らかにした。ポットホールとしては、蛇行状に伸長するスプーン型およびそれが縦列・重合した溝穴型が卓越し、それらは河道平行系節理に構造規制されて平行配列をなす。このポットホールの形成過程として、初期に河道平行系節理の亀裂に沿った河流の削摩でスプーン穴が形成され、引き続き河流の打撃や摩耗によって節理に沿って岩盤が側方に剥がれ、蛇行状に伸長するというモデルを提示した。また、河道直交系節理も岩盤の弱線として、スプーン穴の掘削の起点をなす重要な機能を果たしている。滝の拝周辺の小川河床の上流から下流にかけて変化する水理条件と岩盤侵食の現行過程を整理・考察した。

キーワード：滝の拝、ポットホール、熊野層群、節理、構造規制

Abstract: This study focuses on potholes and both stream-parallel and stream-perpendicular joint systems developed on the streambed of the Ogawa River at Taki-no-Hai, Kozagawa Town, Wakayama Prefecture, in the area where the Kumano Group has been hardened through silicification. A detailed investigation, including drone photography, was conducted, building upon the findings of the first report to describe and analyze the geometric relationships between potholes and joint structures. The following points were clarified: Spoon-shaped and groove-shaped potholes extend in a meandering pattern along the direction of stream-parallel joints. A formation model was proposed in which initial stream abrasion along stream-parallel joint cracks creates spoon-shaped holes, followed by impacts and wear from continued stream flow that exceed the tensile strength of the jointed rock, causing lateral detachment of the bedrock along the joint planes. Stream-perpendicular joints are also considered to function as zones of weakness in the bedrock, serving as important initiation points for the excavation of spoon-shaped holes. The study also organized the current hydraulic conditions and bedrock erosion processes from upstream to downstream in the streambed around Taki-no-Hai, and discussed the potential future development of potholes.

Key words: Taki-no-Hai, potholes, Kumano Group, joints, structural control

1. はじめに

河流による岩盤河床の侵食穴は通称ポットホールと総称され、その美しい景観美から日本各地で名勝地や天然記念物に指定されている（国土地理院, n.d.; 伊藤, 1979). 研究面ではポットホールは、山岳地の河川による侵食速度とその地形形状を制御する鍵として注目されている（Lorence et al., 1994; Whipple et al., 2000, 2013; Ortega-Becerril and Garrote, 2023). 日本では伊藤(1979)により、日本各地の代表的な事例の紹介とポットホールについて体系的な研究が行われた。伊藤(1979)が指摘しているように、ポットホール形状の注目点の一つは、断裂系による構造規制であり、ポットホールが岩盤の節理・断層破碎帯、鉱脈に沿って形成されている事例は国内外で数多く記述されている（伊藤, 1979; 鈴木・青木, 1996; 八釜調査会, 1984; Lorence et al., 1994). しかし、河川環境、基盤岩石の種類、そして節理の特性によって、ポットホールの構造規制のメカニズムは異なる可能性があり、個別の事象について検討を深める必要があると考えられる。

また、岩盤に発達する断層や節理などの断裂は、谷地形の方向を規制しその縦断勾配に大きく影響を与えることが知られている（田中ほか, 1993). したがって、断層や節理で構造規制されたポットホールの形成機構に関する研究は、岩盤侵食の過程を明らかにする上で重要であると考えられる。

研究調査地点は、和歌山県東牟婁郡古座川町の滝の拝^{たきはい}に位置している（図1). 滝の拝において、古座川支流の小川の長さ 200m, 幅 30m にわたる岩盤河床一面に、特徴的なポットホールが発達している。その魅力的な地形の造形から、和

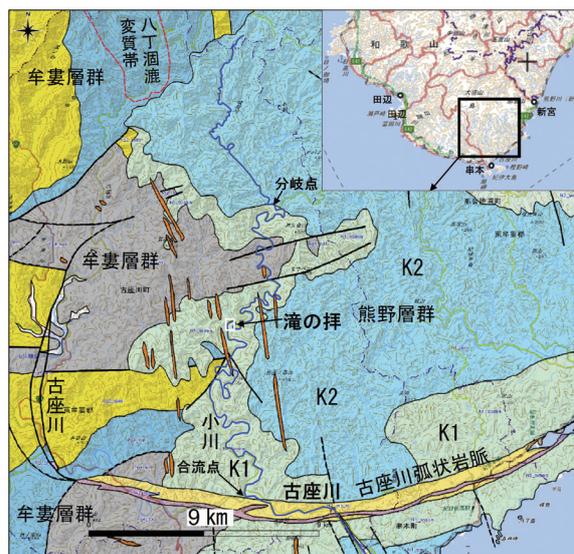


図1 調査地域周辺の地質概略図と位置図。青線：小川の河道，K1-K2：熊野層群（K1：下里累層，K2：敷屋累層）（地質図の出典：産総研 <2023>，地形概略図：国土地理院の標準地形図）。

歌山県の名勝地・天然記念物に指定され、南紀熊野ジオパークのジオサイトにもなっている。同地のポットホールについて、木村・金子（2024）（以下、Part I と呼ぶ）は、ドローン撮影と現地調査を実施してその形状と節理による地質構造規制の特徴を検討し、以下の結果を得た。

- ・古座川支流の小川の岩盤河床一面に溝穴型とスプーン型のポットホールが発達し、流路の谷壁に甌穴型や淵型のポットホールが限定的に分布する。産状から、溝穴型はスプーン型のポットホールが縦列および上下方向に累重して形成されたと考えられる。

- ・節理は垂直で河道方向に平行および直交する2方位が卓越し、ENE-WSW から NNE-SSW に湾曲する河道に符合するように、走向を変化させる。

- ・スプーン型・溝穴型の両ポットホールは河道方向に伸長しているが、河道平行系節理の壁面や亀裂を密接に伴っていることから、同節理に構造規制されていると考えられる。一方、河道直交系

節理については、これらのポットホールを構造制約する幾何学的な関係を示さないことが多いが、しばしばスプーン型ポットホールの掘削起点として機能している事例が認められる。

本論では、小川河床のポットホール研究の第2報として、新たに滝の拝下流区におけるドローン撮影を含む詳細調査を実施し、第1報の成果も踏まえて、ポットホールと節理との関係を記載・整理する。そして、これらの内容に基づき、ポットホールの河道平行系および直交系節理によって構造規制されたポットホールの形成機構のモデルを提示するとともに、滝の拝周辺の小川河床の上流から下流にかけて変化する水理条件と岩盤侵食の現行過程の特徴について考察する。

なお、本論では、伊藤 (1979) にならって、ポットホールの名称を河流による侵食穴の総称とし、個々の侵食穴の名称として伊藤の分類名称を用いる。すなわち、伊藤は、岩石の小型の節理に沿って削摩されて形成された皿型をなすやや細長いものをスプーン型、岩盤の節理や層理に沿って細長く溝状に掘削されたものを溝穴型、立体的に形状が甌型の垂直の穴をなすものを甌穴型、その特殊型で谷壁にできるものを釜穴型、淵型、そして滝壺型と称した。なお、本論では名称の冗長さを避けるため、便宜的に溝穴型ポットホールを溝穴、スプーン型ポットホールをスプーン穴とも呼ぶことにする。

2. 地形と地質の概要

Part I との繰り返しを避け、本論の記述において不可欠な内容に限って以下記載する。

2.1 地形

小川は、熊野川水系との分水嶺をなす山頂

(640m) を源流とし、開析の進んだ山地を流れる穿入蛇行河川であり、河口近くで古座川に合流する。滝の拝は古座川出合から 16.0 km 付近に位置している (図 1)。

滝の拝では、小川の右岸沿いにおおよそ幅 30m で、上流側では平坦な岩盤河床、下流側ではテラスが広がり、左岸沿いには滑滝を伴って狭長な流路が延びている (図 2)。滝の拝のすぐ上流で右支川の宇筒井川が合流する。小川は滝の拝から下流の長にかけて、ENE-WSW から NNE-SSW トレンドにくの字状に湾曲している。

岩盤河床・テラスは、河道にかかる橋の下流側にある右岸の凹みを境に風化の度合いやポットホール・地質の特徴が急変する。そこで、地名にちなんで同凹みから下流を長区、上流を滝の拝区と呼称して区別する (図 2)。なお、この凹みは急傾斜をなす支谷の出合にあたる。

2.2 地質

滝の拝付近の地質は熊野層群下部の下里累層 (久富; 1982) に対比され、多数の北北西方向の石英斑岩脈の貫入を受けている (図 1, 立石ほか, 1979; 徳岡ほか, 1982)。長区から滝の拝区の下流域にかけては成層砂岩が、滝の拝区の上流域では砂岩シルト岩互層がそれぞれ卓越する。全体に強く珪化変質作用を受けて砂岩は白色化し、シルト岩は新鮮な場合は青灰色、風化部では灰色を呈する。岩盤河床・テラスでの新鮮な露頭においては、堆積岩は層理面が癒着し塊状の硬い岩石に変化している。一方、長区の風化したテラス (河成段丘) では層理面は顕在化し開離している。

熊野層群の層理面の走向・傾斜は、滝の拝区において、NNW 走向で NE 方向に 5-10 度の緩傾斜をなす安定した構造を示すが、南側の長区では、



図2 滝の拝周辺の衛星画像 (Google Earth Pro 2018年5月11日撮影, Part 1の図2に加筆).

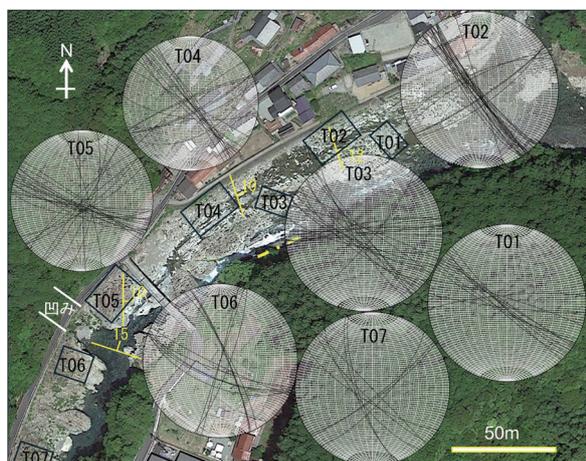


図3 小川の岩盤河床・テラスに発達する節理面のステレオネット図 (下半球投影).

WNW-ESE 走向, 北傾斜 15 度に変化する (図 2).

断裂系として, 節理およびせん断面, 断層が認められる. 特に節理は密に発達しており, 構造面はほぼ垂直で, 河道方向に直交するもの (河道直交系節理) と河道方向に平行 (河道平行系節理) するものが卓越する.

節理の方位の詳細を確かめるため, 現地にて T01-T07 の各小エリアで, 節理の面構造を測定した結果を図 3 に示す. 河道は上流から下流にかけて, ENE-WSW から NNE-SSW へとくの字型に湾曲した形状を示すが, 節理の卓越走向は, 河道に直交および河道に平行の姿勢を保つように変化

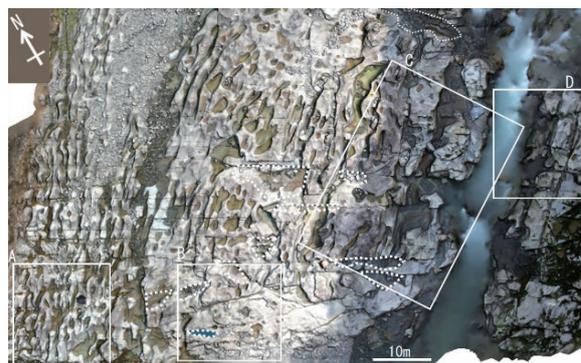


図4 滝の拝上流区の岩盤河床のドローン撮影画像. 点線: 岩盤の剥ぎ取り痕, 大白矢印: 河流の向き.

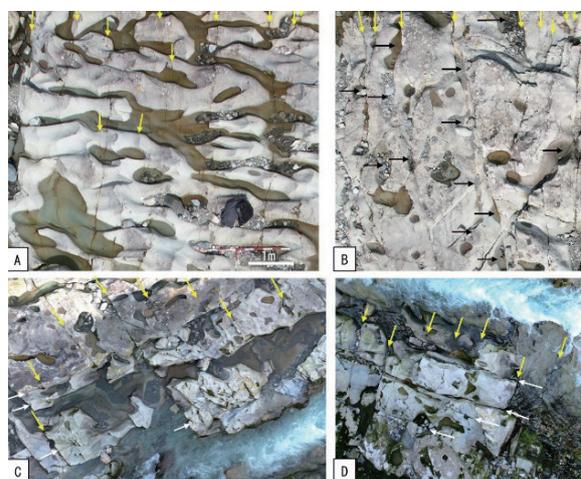


図5 滝の拝上流区の岩盤河床露頭. 黄矢印: 河道直交系節理, 白矢印: 河道平行系節理, 大白矢印: 河流の向き.

している.

せん断面は, 河道平行系節理がせん断されて薄い破碎帯を伴ったもので, 滝の拝下流部の岩盤テラスに出現し, 河道平行系節理に変位・変形を与えている (詳細は後述).

断層は河道が屈曲する付近の凹みから滝の拝下流部にかけて数条認められ, NW-SE ないし NNW-SSE 走向で垂直の姿勢をなす.

3. ポットホールと節理

3.1 滝の拝上流区・下流区・長区の概要

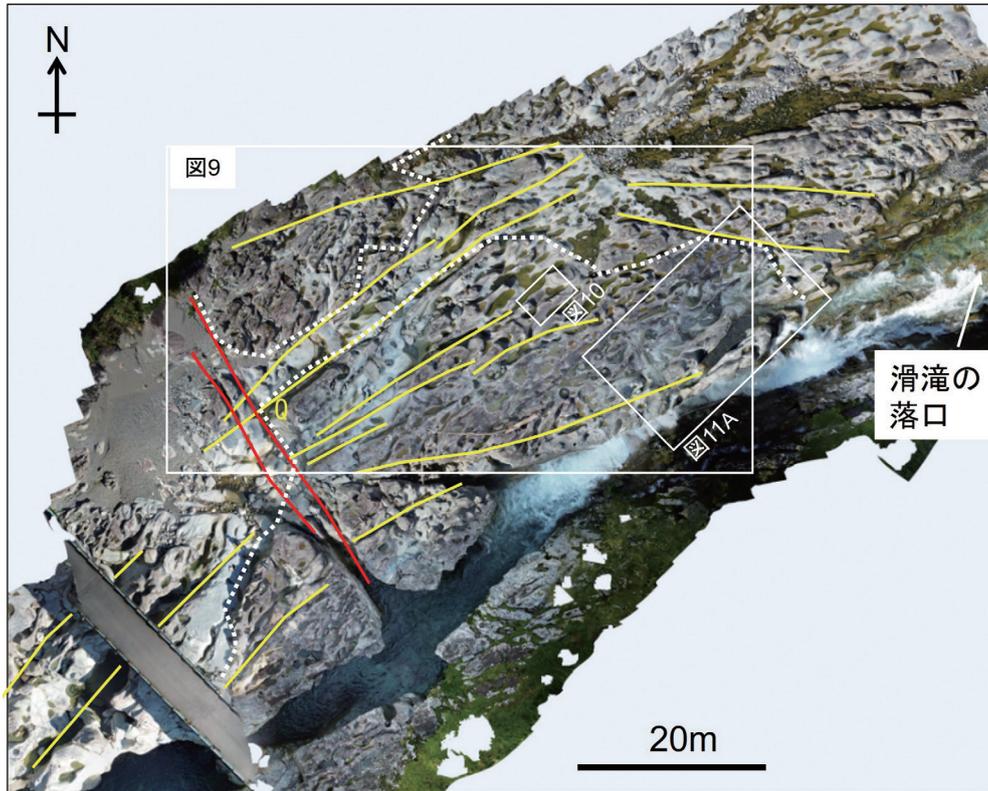


図6 滝の拝下流区の岩盤テラスのドローン撮影画像による3Dモデル。黄線：主要なせん断面，赤線：破碎帯を伴う断層，白点線：高低両平坦面の境界。

滝の拝区の岩盤河床・テラスについて，滑滝の落口をおおよその境として水理条件やポットホールの形状・サイズも異なるため，その上流側を滝の拝上流区，下流側を滝の拝下流区と呼称して区分する（図2）。

滝の拝上流区

Part I では滝の拝上流区について，ドローン画像も含めて詳細に記述したが，ここでは補足的に岩盤河床の概要を記述する．同区では植生はなく，白色から灰色を呈する平坦な岩盤河床が広がる（Part I の図7-1，図4）．岩盤河床において，河道平行系節理は右岸側では河道に平行に，中央部では河道にやや斜交する方向に配列し，その方向に平行に配列するスプーン穴・溝穴が発達している（図5A）．中央部では乾燥した岩盤表面がスレーキングでもろくなった箇所が広がり（図5B），河道

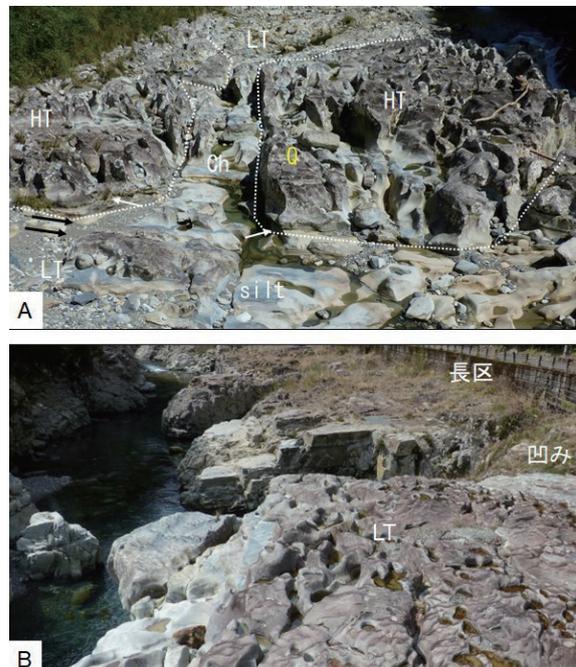


図7 滝の拝下流区の露頭写真。(A) 上流向き，(B) 下流向き。HT:高位平坦面，LT:低位平坦面 Ch: チャネル状凹地，silt: シルト岩，白点線：高位平坦面の輪郭，白矢印：層理面の位置，黒矢印：2条の断層の位置，Q: 図6，図8，図9AのQ位置に対応。



図8 滝の拝下流区のチャネル状凹地。下流向きの露頭写真。スケールバー：2m。

直交系節理に沿って下流側の岩盤が剥がれて凹地が形成されている。その一部は角張り岩層が残っているところもある（Part Iの図7-2C）。岩盤河床の右岸に比較して中央部のポットホール穴が浅いのは、このようなスレーキングと岩盤剥離の影響によるものと考えられる。左岸沿いの流路は水深が浅く、岩盤河床の凹みは水域ないし砂礫で覆われている（図4）。

滝の拝下流区

全体のドローン撮影画像を図6に示す。左岸の流路では落差約8mの滑滝とその下流にゴルジュ状の流路が続き、岩盤河床は段丘化している。テラスには河道平行系・直交系の両節理、およびせん断面と断層が認められる（図6）。断層はNNW-SSE走向、垂直の姿勢で、右横ずれせん断帯を伴う。

テラスは、二段の平坦面から構成される。高位平坦面は中央部に広がり、境界は一部入り組んでいるが、その上流・下流側に低位平坦面が位置する。比高は上流側で数10cm、下

流側へ増大し最大1.5mになる。スプーン穴・溝穴は、高位平坦面では、深度が大きく一面に発達するのに対して（サイズの詳細は後述）、低位平坦面では深度が浅く散在している（図7A, B）。高位平坦面の背面は暗灰色を呈するが（図6）、そのポットホールの滑らかな摩耗面や低位平坦面は新鮮で砂岩は白色、シルト岩は青灰色を呈している（図7A, B）。図7Aは下流側の低位平坦面（写真手前）と高位平坦面（写真奥）との境界付近を捉えており、境界付近をNNW-SSEの断層が走る。中央の節理の壁面沿いにチャネルが延長している。チャネルは幅2.4mで、最大比高1.6mの河道平行系節理の壁面で両壁が画され、上流側に比高は小さくなる。底部は凸凹しており、2ないし3条の蛇行する溝穴底が帯状配列をなす（図8）。チャネル底の深度は、下流側に向かって漸増し小川左岸の流路に合流する（図6）。

高位平坦面と下流側の低位平坦面の背面は、両者の境界付近に出現する東へ傾斜する層理面におおよそ平行している（図7）。層理面はシルト岩とその上位に重なる砂岩との境界で、開離しており、近傍の岩石は褐色化し風化による緩みが認められる。こうした産状は、この層理面が底面をなし、上盤の岩盤が剥がれたことを示唆し、下流側の低平坦面はその結果生成されたものと推定できる。同平坦面は滑らかで散在するポットホール穴も浅いこともそのことを支持している（図7A, B）。

調査時の2024年3月19日および10月12-13日には、滝の拝上流区と下流区ともにポットホールの底部は水たまりとなっており、岩盤河床やテラスの凹地部は水域ないし砂礫で覆われていた。高位平坦面の背面を除く岩盤河床・テラスは摩耗された新鮮な岩相を呈

ポットホールの節理による構造規制 (第2報):
和歌山県古座川町「滝の拝」の例

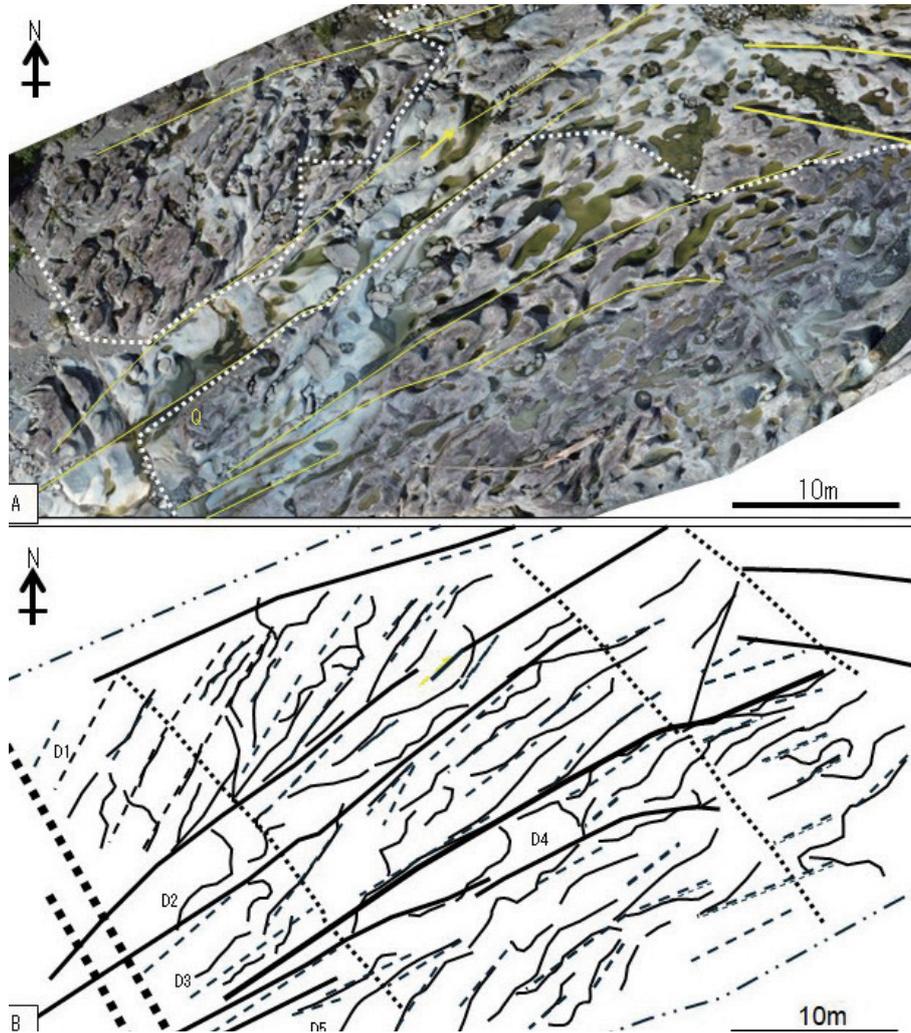


図9 滝の拝下流区の岩盤テラス中央部のドローン撮影画像(A)とその節理・せん断面・溝穴のトレース図(B)。黄線：せん断面，白点線：高低両平坦面の境界，破線：河道平行系節理，細実線；溝穴の長軸線，太実線：せん断面，点線：連続性の良い河道直交系節理，太点線：断層。

していることから，多少の降雨による水位増加でも容易に冠水し，水流で摩耗される環境にあったと考えられる。

長区

河道の右岸側に幅 20 ~ 30m，水面との比高 4 ~ 6m のテラス，そして左岸側に幅 10 ~ 15m の流路が位置する (図 2，図 7B)。岩盤は主に成層砂岩から構成され，風化して暗灰色ないし褐色を呈し，テラス面の大半は草で被覆されている。岩盤が露出するテラス面では，

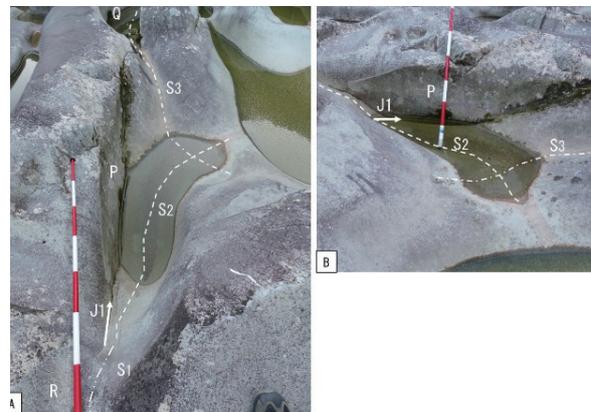


図10 スプーン穴と河道平行系節理の露頭写真。写真の向き：河道平行系節理に(A) 平行，(B) 直交。大白矢印：河流の向き，破線：スプーン穴の長軸のトレース，白矢印：節理の亀裂線，記号は本文参照，位置：図 6 参照。

シーティング節理が発達し、テラスの段丘崖は節理で画されている（図 7B）。テラス面の Google Earth Pro の衛星画像（図 2）では、節理沿いに溝穴や甌穴のポットホール様の凹みが散在的に認められる。

3.2 滝の拝下流区のポットホール

本区間全体を捉えたドローン撮影画像を図 9A に、溝穴の長軸線と節理・せん断面のトレースを図 9B に示す。

ポットホールのサイズと種類・形態的特徴

下流区の高位平坦面では、上流区と同様に、テラス一面にスプーン穴とそれが流れの方向に縦列し垂直方向に重合した溝穴が形成されているが、上流区間と比較してサイズ・蛇行度の増大化と種類の多様化という特徴が認められる。溝穴の間隔は 60～120 cm と 2 倍、深さは 80～150 cm と 3 倍ほどになる（Part I）。蛇行度は、上流区の事例として Part I の図 7-2E、下流区の実例として図 9B の両溝穴のトレース図を基に測定した。上流区・下流区ともに、多数の溝穴の蛇行度は 1.1 以下であるが、下流区では蛇行度 1.2-1.4 の大きなものが約 30% も出現する。

蛇行状を呈するスプーン穴と河道平行系節理との接触関係を示す典型的な産状例を図 10 に示す。同図には微小な高まり（バー）で隔てられた S1-S3 のスプーン穴が認められ、これらは縦列し一つの溝穴を構成している。これらの壁面は一般に湾曲し摩耗されている。スプーン穴に隣接する節理面（P, Q）は垂直で平坦面をなし、その縁には亀裂（J1）を伴っている。両者の接触箇所の P では、スプーン穴の湾曲面は平坦な節理面で途切れている。

スプーン穴（S3）の延長部では反対側に開いた節理面（Q）に接触している。一方、スプーン穴（S1）は、節理の亀裂沿いに延びその湾曲面（R）は節理面を横切って広がっている。これらのスプーン穴と節理との産状は、河流侵食によるスプーン穴の形成時に、節理面の亀裂に沿って侵食が進行するだけでなく、側方に岩盤が剥ぎ取られていることを示す。

下流区におけるポットホールの多様化では、溝穴沿いや溝穴間のバー上に円筒状の甌穴型ポットホール、および流路壁面には淵型のポットホールが多数形成されている（図 9B, Part I の図 5B）。こうした Part I で記述した特徴に加え、テラスの流路縁には著しく蛇行する溝穴型ポットホール（図 11）が、断層や後述するせん断面、開離した河道直交系節理に沿っては、直線状で狭長な溝穴型ポットホール（図 12）がそれぞれ認められる。前者は河道平行系節理の構造規制を受けておらず、流路底に向かって蛇行度が 2 前後と大きい形状を示す。流路底に流れ下る急流によって削磨されたものと考えられる。後者は、スプーン穴を伴わずに狭長な溝をなしており、岩盤の脆弱部をなすせん断面・断層の破碎帯を水流が選択的に削剥したものと考えられる。

ポットホール・節理・せん断面の配列

スプーン穴・溝穴およびそれらの方位を制御する河道平行系節理の配列（図 9A, B）は、上流区間とは異なるつぎの特徴を呈する。すなわち、河道平行系節理およびスプーン穴・溝穴の配列は、せん断された節理面（せん断面と呼称。詳細は後述）を境に方位が変化しており、せん断面に対して平行から反時計回りに最大 25 度の角度をなす。図 9B ではせん断面で境された地帯を D1-D5 と区別している。それらのうち D3, D5 帯では、

節理はせん断面近傍ではせん断面に平行し、離れると角度をなすパターンをなす。このような非対称な面構造の配列は、右ずれせん断が作用し、節理が変位・変形したことを示すものと考えられる。

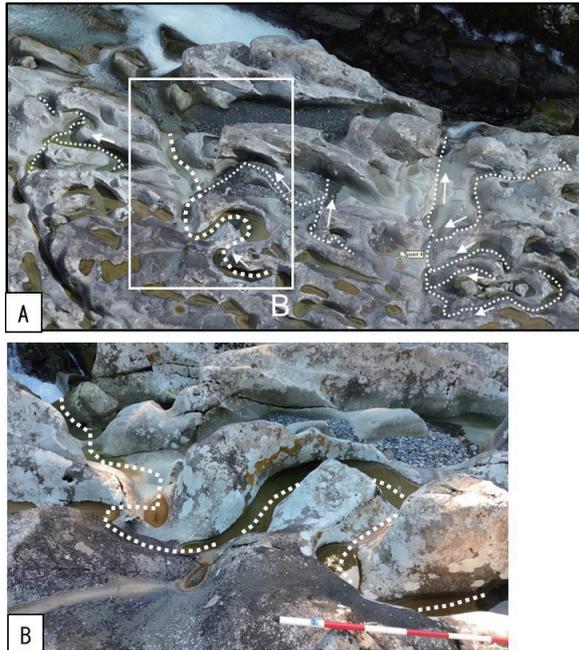


図 11 下流区間に認められる蛇行状溝穴型ポットホールのドローン撮影画像 (A) と露頭写真 (B)。
破線：蛇行状溝穴のトレース線，位置：図 9 参照。

3.3 節理とせん断面

主な断裂系として、滝の拝区には、河道直交系・河道平行系の両節理、およびせん断面が認められる。Part I で記述した内容も含めて主要な特徴を以下に記載して、断裂系相互の構造的関係を以下に整理する。

河道平行系節理

河道平行系節理は、ポットホールが一面に発達する岩盤河床やテラスにおいては、スプーン穴・溝穴の配列を制御する直線状の壁面や連続する直線状の凹地、不連続な亀裂として、断続的に産出し、おおよそ河道方向に平行配列をなす (図 9B)。節理の断続的な産状も、常に流水の影響を受ける左岸の流路沿いの岩盤では、壁面と亀裂を伴って連続している。河道平行系節理の出現間隔は、滝の拝上流区間 (Part I の図 7-2D から算出) で平均 0.5m 間隔、同下流区間 (図 9B から算出) で平均約 1.5m 間隔であり、それぞれ溝穴の平均間隔の範囲内に相当する。

本節理系の方位は、図 3 のステレオネットから、上流から下流へ河道が ENE-WSW から NNE-

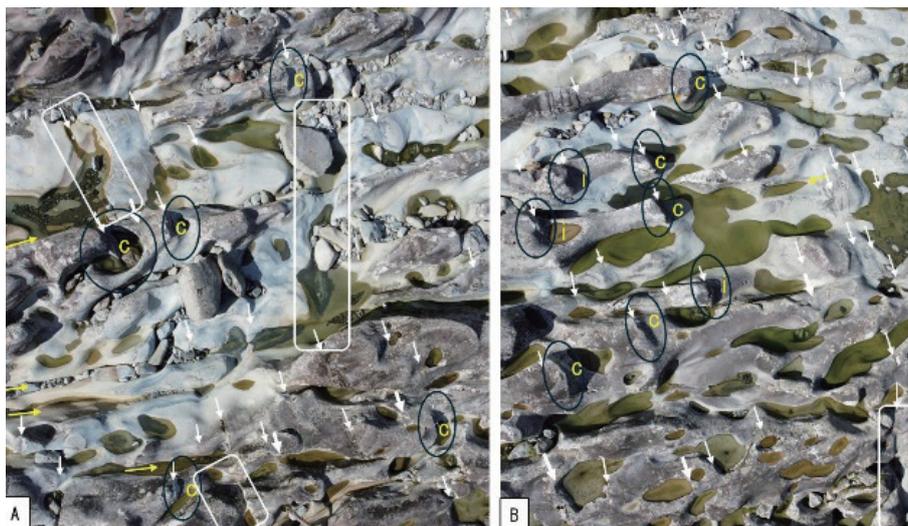


図 12 滝の拝下流区の節理・せん断面とポットホールの産状。
白矢印：河道直交系節理，太白矢印：スプーン穴の起点・終点にあたる河道直交系節理，黄矢印：せん断面，黒〇，矩形，C，i：本文参照。

SSW 方向に湾曲しているのに応じて、河道平行系節理もその卓越方向はおおよそ河道の方向に符合するように変化する。ただし滝の拝上流区の T04 (図 3) とせん断面を境に方位が変化する同下流区間 (図 9B) では、河道方向に斜交する走向を示す節理も出現する。

河道直交系節理

滝の拝上流区の岩盤河床では、高角傾斜の河道直交系節理が、20-100 cm の間隔で連続性のよい開口した黒い筋をなして出現する (Part I の図 7-1, 図 4, 図 5)。これらの多くは河道平行系節理に平行するスプーン穴・溝穴を横断しているが、一部はスプーン穴の掘削起点にあたるものもある (Part I の図 8B)。一方、節理の壁面が下流側に剥ぎ取られて生じた小さな段差の痕跡は頻繁に認められる (Part I の図 8)。表層部の風化・劣化が進む岩盤河床中央部では、節理面を境に下流側の岩盤が、節理沿いに数～10 数 m の長さで剥ぎ取られ、スプーン穴が破壊されている (図 4, 図 5B)。

滝の拝下流区では、河道直交系節理は、垂直の壁面、直線状の浅い溝や亀裂をなして断続的に出現する (図 12 の白矢印)。この様な産状は河道平行系節理に類似しているが、垂直の壁面 (図 12 の黒○) は河道平行系節理の壁面がなす長柱状のバーを横断する。この垂直の壁面の上流側に接して、それを内壁に下流側に湾曲したスプーン穴 (図 12 の c) やそれを壁として伸長が止まったスプーン穴 (図 12 の i) が配置している (図 12 の黒○)。ポットホールとの関係では、河道直交系節理は、スプーン穴・溝穴の形状と関連のないものだけでなく、これらの垂直の壁面のように、スプーン穴の起点や末端の壁をなすケースも少なくない。一方、スプーン穴が河道直交系節理に沿って延びる場合も一部に認められる (図 12 の白矩

形)。滝の拝上流区間で見られた節理に沿う大・小の岩盤の剥ぎ取り痕跡は認められない。

せん断面

滝の拝下流区に出現する断裂面であり、図 8, 図 9 に示すように、1-10m 間隔でまばらに出現し、河道平行系節理を变形し変位を与えている。河道平行系節理がこのせん断面に収れんする形状から、せん断面は河道平行系節理が右ずれせん断変形を受けて生成されたものと考えられる。露頭では、開離ししばしば数mmの破碎帯を伴って出現し、直線状にその亀裂は長く続く (図 13)。せん断面は河道平行系節理に平行するスプーン穴や溝穴の形状に影響を与えていない。

4. 考察

4.1 ポットホールの形成機構

伊藤 (1979) は、それまでのポットホールの事例と実験的データを踏まえて、やや細長いスプーン型ポットホールは岩石の小型の節理に沿って削摩されて形成され、溝穴型ポットホールは岩盤の節理や層理に沿って細長く溝状に掘削されたものと説明した。また、後者は前者が縦列することで形成されるとも指摘している。しかし、節理

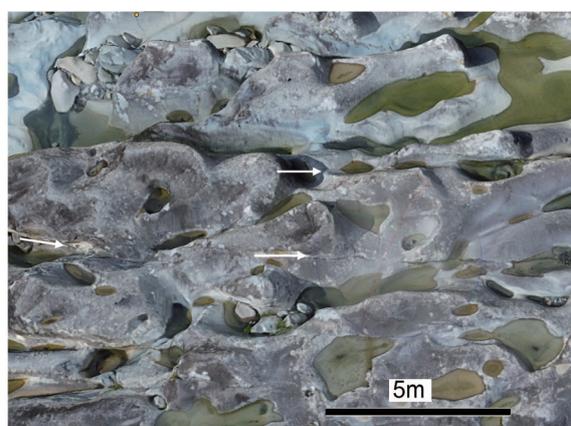


図 13 滝の拝下流区の岩盤テラスのポットホールとせん断面。白矢印：せん断面の位置，位置は図 9 参照。

の特徴や節理と河流との関係、基盤岩石の種類などについては言及がない。

ポットホール形成の基盤となる地質条件では、Part Iにおいて、調査地の岩盤を構成する地質は熊野層群の堆積岩であり、中期中新世の火成作用に伴う珪化変質作用で塊状・均質な硬岩となっていること、そして直交節理として、小川の河道に平行および直交する節理（河道平行系節理・同直交系節理）が密に発達していることを指摘した。また、本論では、個々の地点での節理面の走向・傾斜の測定により、両系統の節理の方位は、小川がENE-WSWからNNE-SSWにくの字に湾曲する形状に符合して変化していることを明らかにした（図3）。すなわち、小川の河道方向に対して、河道平行系と直交系の両節理が岩盤の弱線をなしている。

古座川町滝の拝周辺における小川の岩盤河床・テラスには、図4と図6のドローン撮影写真で捉えたように、ポットホールとしてはスプーン穴とその縦列及び重合により発達した溝穴が卓越し、それらは平行配列をなしている。河道平行系節理はスプーン穴・溝穴の直線状の壁面をなし、それらの底部に亀裂として断続的ながらも密に出現する。両者の方向はおおむね平行している。節理面は河流の侵食において弱線になることはよく知られており、こうした両者が密接に随伴する産状は、ポットホールの平行配列の方位は河道平行系節理の構造規制を受けていることを示す。この詳細を検討する上でつぎの3つの論点をあげて、ポットホールの構造規制について考察する。第一は、河道平行系節理は河道方向、すなわち河流の卓越方向からどの程度斜交してもポットホールの構造規制面として機能するのか、第二は、河道平行系節理と対をなす直交系節理の果たす役割は何か、第三は、河流による節理に沿う侵食の様式は

どのようなものか、である。

第一 河道平行系節理の構造は、滝の拝下流区では、おおむね河道方向に平行する上流区とは異なり、河道に平行に1-10m幅で発達する7-8枚のせん断面を境に最大25度走向を転じ、かつ形状もせん断面に収れんするようにS字状に変形している（図9）。このように変形を受け、河道方向、すなわち河流の卓越方向に最大25度まで斜交した河道平行系節理であっても、スプーン穴と溝穴は節理に概ね平行に配列していることが判明した。

第二 Part Iでは、滝の拝上流区の産状に基づいて、河道直交系節理は、一部でスプーン穴の掘削起点にあたるものもあるが、大半は多くスプーン穴を横断しそれらの形成に寄与していないように見えると指摘した。しかし、河流に直交する節理は弱線として機能しやすく、節理沿いにブラッキングが発生することが実際の河道での産状や実験でよく知られている（田中ほか、1993；戸田、1993）。したがって、河道直交系節理は、河流によりブラッキングを起こしやすく、スプーン穴の起点になりやすいと期待できる。実際の事例との矛盾はつぎのように考えると解消できる。すなわち、河流に直交する節理がスプーン穴の起点になっても、継続する河流による削摩が継続すると、節理で生じた初期のブラッキングの痕跡も削摩されて消失する。特に、スプーン穴が縦列し重合して溝穴が形成される場合、そのような初期の痕跡が残されることはまれになるだろう。

一方、下流区では、図12が示すように、河道直交系節理も、少なくない割合で、河流方向に湾曲したスプーン穴の下流側の内壁を構成している（図12のc）。このような内壁の場合、そこで河流が左右に分流するので、スプーン穴の起点に比べて継続する河流による削摩に対して保存されや

すいと推定できる。この場合の内壁は河道平行系節理で画されたバーの上流端の横断面にあたるので、河道平行系節理に沿って伸長するポットホール形成に続き、その壁面をなす岩盤が引き続く河流によって河道直交系節理で剥がれて形成されたと考えられる。

以上の考察に基づくと、河道直交系節理系は、それに平行配列をなすスプーン穴の形成において、その掘削起点として重要な役割を果たしたと考えられる。加えて、こうして生じたスプーン穴の側壁をなすバーの上流端が剥がれる際の弱線にもなり、その場合、バーの横断壁を内壁とする湾曲したスプーン穴が形成される。

第三 図10は、節理に構造規制されたポットホール形成過程を考慮する上で鍵となるポットホールの産状を示している。河道平行系節理は、直線状に伸びているが、それに沿って伸長するスプーン穴・溝穴の長軸線は多少とも蛇行した形状を示す(図9B)。下流区ではスプーン穴の蛇行度は1.2-1.4と大きいものが約30%を越している(図9B)。単純に岩盤の弱線をなす節理に沿って削摩が進むとする従来のスプーン穴の形成モデル(伊藤, 1979など)では、スプーン穴の伸長方向が蛇行状を呈することの説明がつかない。

図10の露頭写真から、節理にスプーン穴の伸長方向が規制される過程を、図14の模式図に示すように読み取ることができる。すなわち、河流による削摩は、岩盤の弱線である河道平行系節理の亀裂沿いに進行しスプーン状の穴が形成される(図10, 図14のS1)。スプーン穴の先端部で壁をなす岩盤は、河流の打撃や摩耗に晒され、その破壊力が岩盤の節理面の引張り強度を越えると、節理面で岩盤の剥離が発生する。図14では岩盤が側方に剥がれるために必要なスペースとして、S1のスプーン穴に平行に伸長するスプーン穴

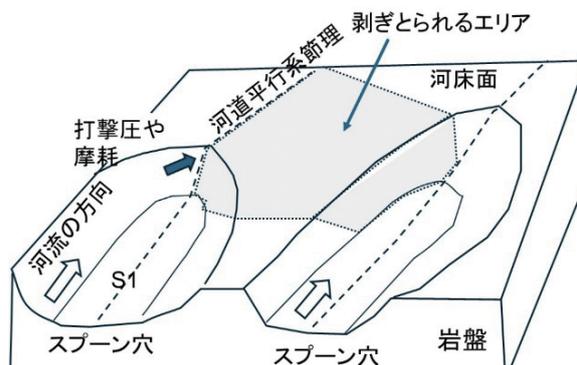


図14 河道平行系節理に伸長方向が規制されたスプーン型ポットホール(スプーン穴)の形成モデル。

ン穴を右側に設定している。その結果、生じた節理面はスプーン穴の側壁となり(図10のP)、スプーン穴の伸長方向は蛇行状を呈することになる(図10のS2)。岩盤の剥がれはある長さで終焉し、その下流端では通常の削摩により湾曲した壁が形成され、さらにその前方で新たな節理面に沿った岩盤剥がれが発生する(図10のQ; この場合反対側の岩盤が剥がれる)。こうしたプロセスの繰り返しで、スプーン穴の伸長方向は、河道平行系節理による構造規制によって蛇行状を呈することになる。このようなプロセスは、スプーン穴・溝穴の間隔がおおよそ河道平行系節理の間隔に符合していることと調和的である。

4.2 滝の拝周辺の小川の岩盤河床・テラスの水利条件と現行過程

長区も含めた各地区の水利条件を踏まえ、ポットホールの特徴と現行過程を考察する。

滝の拝上流区では、流路底と岩盤河床との標高差が小さく、多少の水位の上下で、河床は冠水、乾燥を繰り返す状況にある。岩相は砂岩シルト岩互層で、岩盤河床の右岸側は砂岩、中央部はシルト岩が卓越している。右岸側はスプーン穴・溝穴が規則的に平行配列をなして発達しているのに対して、中央部ではスプーン穴・溝穴の輪郭が崩れ、

底が浅いものが多い(図4)。こうしたポットホールの劣化は、風化とスレーキングでシルト岩が卓越する岩盤の土砂化が進行しているため、河流の削摩を受けやすく、河道直交系節理に沿う大規模な岩盤の剥がれの発生(図5B)に起因する。

滝の拝下流区において、上流区から続く岩盤河床は、滑滝からゴルジュ状の流路底との比高の増大により、段丘崖で画された岩盤テラスへと変化した。水位上昇期には岩盤テラス上の河流は、落差のある流路へ流れ下るため、上流区に比較して流速が増大し、侵食力が増大する。このような水理条件の変化は、下流区では上流区に比べて2-3倍の規模で蛇行度の高いスプーン穴と溝穴が形成されていることに対応している。下流区のポットホールの摩耗された壁面は新鮮であり、現在も風化よりも侵食が優勢であることを示す。一方、前述したとおり、薄いシルト岩と砂岩との境界をなし緩く上流側へ傾く層理面(図7A)は開離しており、岩盤が剥がれる分離面になっている。下流側の低平坦面はそのような機械的侵食で形成されたものと推定できる。

最下流の長区では、右岸の岩盤テラスは、滝の拝の岩盤河床・テラスとは河道の凹みで隔てられており(図2, 図7B)、その大半が植生で覆われていることを考慮すると、通常の水位上昇レベルでは離水状態にあると判断できる。岩盤テラス表面は風化し暗灰色から褐色を呈し、シーティング節理による岩盤剥離が進行している(図7B)。段丘崖は節理面で画されて矩形の輪郭をなし、開離した層理面に平行する小段を河岸側に付随する(図7B)。これらの地形形状は、節理と層理面を分離面とする岩盤崩落が進行していることを示す。この長区ではポットホールは地上では識別が難しい状態であり、Google Earth Proの衛星画像(図2)で円形の甌穴が散在している様子がか

がえるだけである。

5. まとめ

第1報において、古座川町滝の拝の小川の岩盤河床・テラス一面には、スプーン穴とそれが縦列および重合して形成される溝穴が発達していること、そしてこれらは河道平行系節理に平行に構造配列をなしていることが明らかにされている。第2報では、新たに滝の拝下流区におけるドローン撮影を含む詳細調査を実施し、第1報の成果も踏まえて、ポットホールと節理との関係を記載・整理し、以下の特徴および規則性を明らかにした。

- ・ポットホールの新たなタイプとして、テラスの流路側に限定的に形成された著しく蛇行状を呈する溝穴、スプーン穴を伴わない直線状で狭長な溝穴型ポットホール、および下流方向に湾曲したスプーン穴とを記載し、その形成機構を考察した。

- ・滝の拝下流区の岩盤テラスを捉えたドローン撮影画像の解析から、せん断面群が右横ずれセンスで河道平行系節理を切断し、最大25度で反時計回りに回転変形させていること、そしてこの回転変形を受けた河道平行系節理にもスプーン穴・溝穴は節理に平行に配列していることを示した。

- ・河道直交系節理とスプーン穴との産状に基づき、同節理は河流方向に直交する岩盤の弱線としてスプーン穴の掘削起点や末端壁をなしていたと考えられる。

- ・蛇行するスプーン穴が河道平行系の節理面に接する露頭記載に基づき、一般に蛇行状を呈するスプーン穴・溝穴が河道平行系節理に構造規制を受ける形成過程のモデルを提示

した。

・滝の拝周辺の小川河床の上流から下流にかけて変化する水理条件と岩盤侵食の現行過程を明らかにし、ポットホールの変化を考察した。

本論文の内容が今後ポットホールの保全施策に必要な調査・研究に資することができれば幸いである。

文献

- 久富邦彦 (1981) : 紀伊半島島南部の熊野層群の地質と堆積. 地質学雑誌, **87**, 157-174.
- 伊藤隆吉 (1979) : 日本のポットホール. 古今書院, 132p.
- 木村克己・金子 誠 (2024) : ポットホールの広域節理による構造規制 : 和歌山県古座川町「滝の拝」の例. 深田研年報, **25**, 137-149.
- 国土地理院 (n.d.) : 4. 河川の作用による地形 - 甌穴 (ポットホール) 群, 日本の典型地形ウェブサイト, https://www.gsi.go.jp/kikaku/tenkei_kasen.html (2025 年 9 月 1 日参照).
- Lorenc, M.W., Barco, P.M, and Saavedra, J. (1994): The evolution of potholes in granitic bedrock, W Spain. *Catena*, **22**, 265-274.
- Ortega-Bercerril, J.A. and Garrote, J. (2023): Magnitude of formative flows in stream potholes. *Geomorphology*, **434**, 1-20.
- 鈴木富志郎・青木哲哉 (1996) : 京都府笠置町, 布目川の甌穴群について. 立命館地理学, **8**, 50-60.
- 田中幸哉・恩田裕一・安形 康 (1993) : 河床縦断面形に対する岩石物性の影響 - 花崗岩溪流と古生層溪流について - . 地理学評論, **66A-4**, 203-216.
- 立石雅昭・別所孝範・原田哲朗・久富邦彦・井内美郎・石上知良・公文富士夫・中屋志津男・坂本隆彦・鈴木博之・徳岡隆夫 (1979) : 江住地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 65p.
- 徳岡隆夫・原田哲朗・鈴木博之・八尾 昭 (1982) : 20 万分の 1 地質図幅「田辺」, 地質調査所.
- 戸田真夏 (1993) : 岩盤河床の侵食に及ぼす割れ目の影響に関する実験的研究. 地理学評論, **66A-6**, 327-337.
- Whipple, K.X., DiBiase, R.A. and Crosby, B.T. (2013): 9.28 Bedrock Rivers, In Shroder, J.F., eds., *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, 550-573.
- Whipple, K.X., Hancock, G.S. and Anderson, R.S. (2000): River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geol.Soc.Amer. Bull.*, **112**(3), 490-503.
- 八釜調査会 (1984) : 特別天然記念物「八釜の甌穴群」調査報告書. 八釜調査会, 187p.