

14. 扇状地河川の瀬切れによる活断層発見の有効性について

Effectiveness of finding active faults due to the losing stream of alluvial fan rivers

○宮地修一・中根久幸（株式会社 地研）・長谷川修一（香川大学）

1. はじめに

日本では 2,000 以上の活断層が報告されているが、地下に隠れて地表に現れない伏在活断層もたくさん存在する¹⁾。その結果、2000 年 10 月の鳥取県西部地震 (M 7.3)、新潟県中越地震 (M 6.8)、2007 年 3 月の能登半島地震 (M 6.9)、2008 年 6 月の岩手・宮城内陸地震 (M 7.2)、2016 年 4 月の熊本地震 (M 7.3) など、この 20 年間でも既知の活断層がないとされた場所で、直下型地震による甚大な被害が多発している (図-1)²⁾。その要因の一つとして、 M 7 程度以下の地震では地表地震断層が現れない可能性が高いことが考えられる^{3),4)}。

活断層の認定は、変動地形解析からスタートすることが主流で、空中写真の実体視判読、衛星画像データの立体視判読、航空レーザー計測による詳細地形図の作成等により、活断層に伴う変位地形や活断層の可能性のある線 (帯) 状の構造地形を検出する方法がとられている^{5),6)}。これらの方法は、地表の変動地形に着目しているため、地表地震断層の痕跡が明確である場合は有効であるが、単位変位量の小さな活断層では、地表に明瞭な断層崖や撓曲を形成しないため、変動地形学的アプローチの限界となっている。

本稿では、変動地形的アプローチを補間する手法として、扇状地河川の瀬切れを手掛かりに伏在活断層を発見することの可能性について考察した。河川の瀬切れ現象は、地表において目視で確認でき、場所や範囲を比較的容易に絞り込める利点があり、伏在活断層を探し出す有効な手段の一つになり得ると考える。

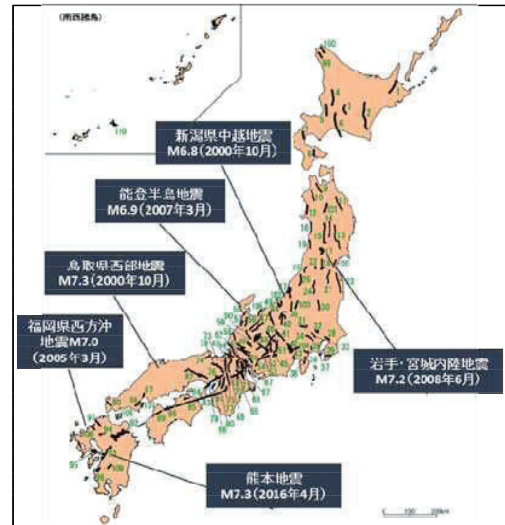


図-1 活断層分布と既知の活断層のない場所で発生した地震の例

(地震調査研究推進本部の主要活断層帯位置図²⁾に加筆)

2. 瀬切れと活断層の関係

瀬切れとは「河川水が伏没する現象」で、一般に降水量の減少や過剰な取水等により河川水量が減少することによって発生する。活断層は隆起する山地と沈降する平野との境界に沿って分布することが多いため、鉛直変位が大きい場合には断層の上下流で帯水層厚の変化が生じ、扇状地河川の瀬切れを起こすことがある (図-2)。なお、瀬切れ状況の定義は、河川水の状態から流水、不安定および安定に区分した (表-1)。

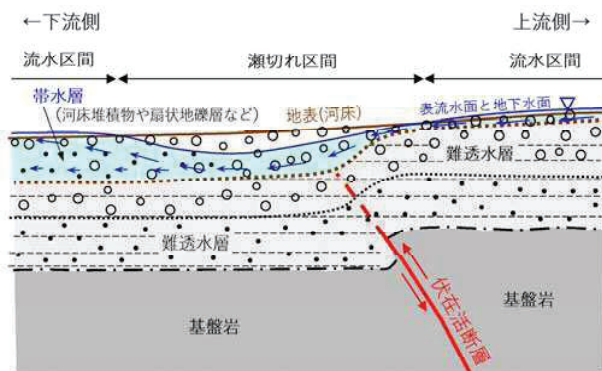


図-2 伏在活断層による瀬切れのイメージ

表-1 瀬切れ状況の定義

区間名	河川水の状態
流水	河川水が連続して存在し、流下している (安定した河川流水)。
不安定	河川水流が断続的に存在するも瀬切れが主体であるが、降水があれば瀬切れが一部解消される (流水と瀬切れの中間)。
安定	河川水がほぼ伏流している (恒常的な瀬切れ)。降水があっても水溜りが一部残る程度で、ほぼ瀬切れ状態を保つ。

2.1 重信川扇状地の重信断層と北方断層の研究事例

池田⁷⁾は、重信川扇状地の北縁に重信断層や北方断層が伏在していることを示し、反射法地震探査と残差重力異常に基づき、東西方向に伸びる両断層の南側に、北側より厚い鮮新統～更新統の層厚変化を明らかにしている(図-3)。重信川は断層付近で瀬切れ区間が見られる様になり、鮮新統～更新統の層厚が厚くなる断層より南側の区間は、完全に瀬切れ区間が連続している。また、栢木⁸⁾は、愛媛県松山市の重信川扇状地において、帯水層厚の変化をもたらす要因の一つが扇状地における活断層であることを指摘し、活断層による帯水盆の規制が瀬切れや特殊な湧水現象を起こしていることを報告している。

2.2 四国東部の中央構造線活断層系と瀬切れ

国土地理院の都市圏活断層図において、活断層が扇状地の地形に変状を与えているものや、扇状地に覆われ伏在している活断層が数多く存在する。例えば、四国東部の中央構造線活断層系でも、都市圏活断層図「池田」⁹⁾、「脇町第2版」¹⁰⁾の活断層トレースと瀬切れ開始地点を対比すると、池田断層の河内谷川、父尾断層の曾江谷川など、瀬切れと各扇状地内の伏在部付近がほぼ一致している箇所が多く存在する(図-4)。

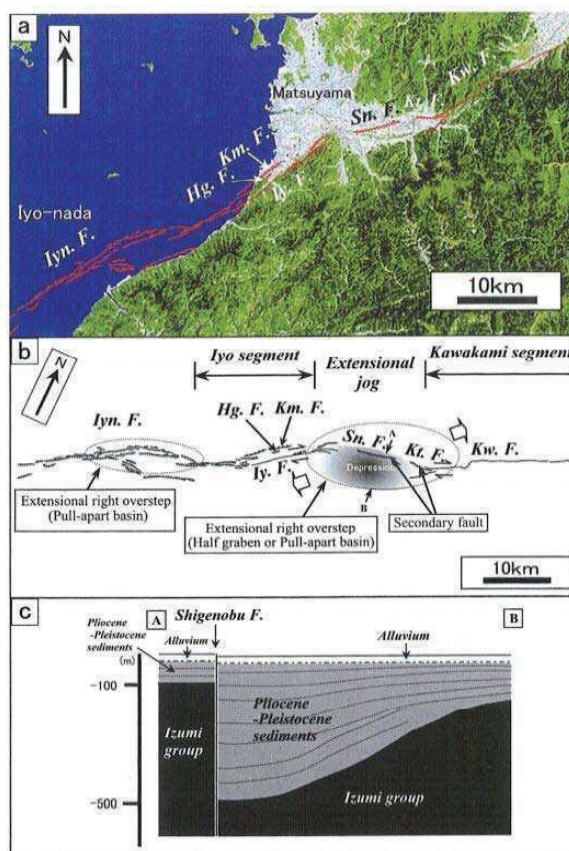


図-3 松山平野の地質構造図⁷⁾

国土地理院の都市圏活断層図において、活断層が扇状地の地形に変状を与えているものや、扇状地に覆われ伏在している活断層が数多く存在する。例えば、四国東部の中央構造線活断層系でも、都市圏活断層図「池田」⁹⁾、「脇町第2版」¹⁰⁾の活断層トレースと瀬切れ開始地点を対比すると、池田断層の河内谷川、父尾断層の曾江谷川など、瀬切れと各扇状地内の伏在部付近がほぼ一致している箇所が多く存在する(図-4)。

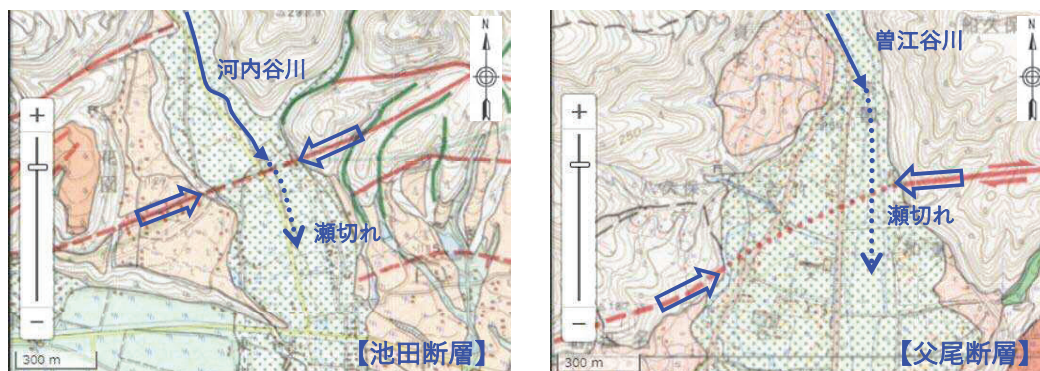


図-4 池田断層の河内谷川(上段)と父尾断層の曾江谷川(下段)の交差点付近
(国土地理院の都市圏活断層図「池田」⁹⁾、「脇町第2版」¹⁰⁾に瀬切れ位置を加筆)

3. 扇状地河川の瀬切れによる活断層発見へのアプローチ

香川県内の活断層もしくは活断層の可能性が指摘されている断層あるいはリニアメントは、長尾断層(確実度Ⅰ)、鮎滝断層(確実度Ⅰ)、岡田断層(確実度Ⅰ)、上法軍寺断層(確実度Ⅰ)、江畑断層(確実度Ⅱ)および竹成断層(確実度Ⅱ)である¹⁾。長尾断層を発見・命名した Saito¹¹⁾は、讃岐山脈から瀬戸内に向かって階段状に高度を下げる地形から、新たな階段状断層の存在を示唆している。また、Ting Wang ほか¹²⁾は、香川県において土器川扇状地と香東川扇状地の恒常的な瀬切れ地点で、国土地理院 5mDEM を用いた変動地形解析、瀬切れと

河床堆積物調査、常時微動による地下構造解析等を総合的に評価し、ほぼ東北東-西南西方向の飯山断層（仮称）と仏生山断層（仮称）（以下、（仮称）は省略）の未知の伏在活断層の存在を指摘している（図・5）。そこで本論では、これらの未知の伏在活断層について、変動地形解析、物理探査および水文調査などにより、瀬切れ地点の地質構造を総合的に評価した。

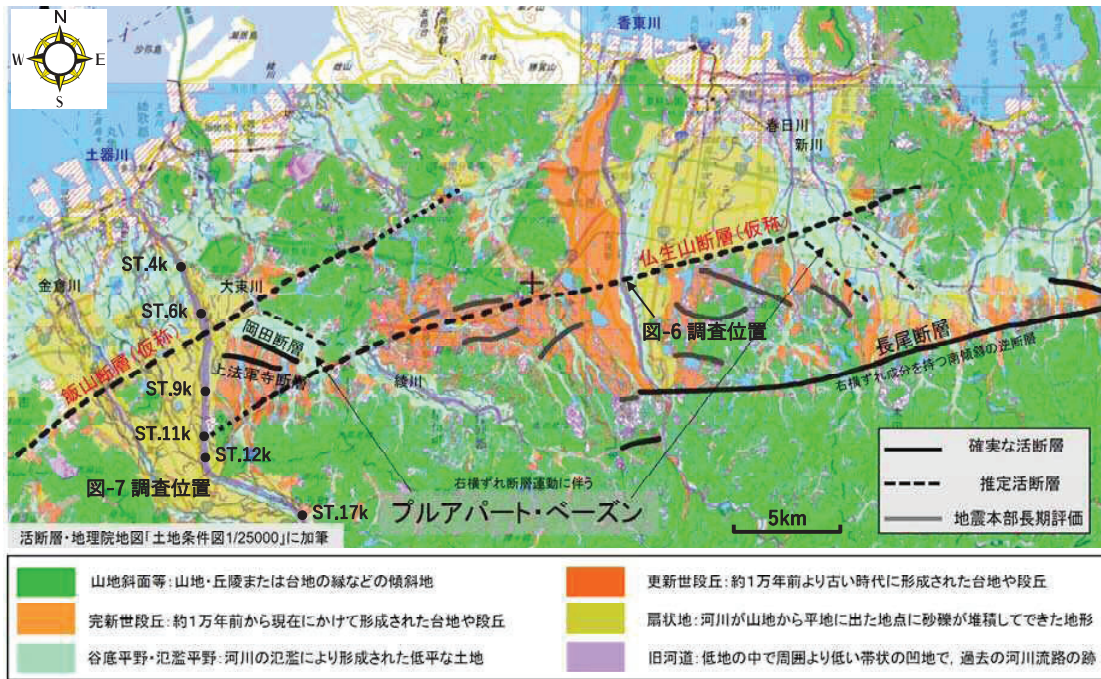


図-5 長尾断層と讃岐平野における未知の活断層の分布¹²⁾

（国土地理院の土地条件図 1/25000 に断層位置、調査位置等を加筆）

3.1 香東川の瀬切れと未知の仏生山断層

香川県中央部の香東川扇状地の瀬切れ地点において、常時微動探査、2次元微動アレイ探査および電圧差分法電気探査の物理探査を実施し、水理地質構造を総合的に解析して、帯水層厚の大きな変化が伏在する仏生山断層の撓曲構造を反映したものである可能性が高いことが判明した¹³⁾（図・6）。

- (1) 香東川扇状地の瀬切れ地点では、物理探査による地質構造や電気探査の比抵抗構造等から、通常の堆積や侵食作用で形成されたとは考えにくい 20～40m 程度の帯水層（Fg, Rg）厚の変化が判明した。
- (2) 地表面には撓曲崖等の変動地形はみられないものの、地形解析やボーリングデータ等から、焼尾層（Yk）に 20～40m 程

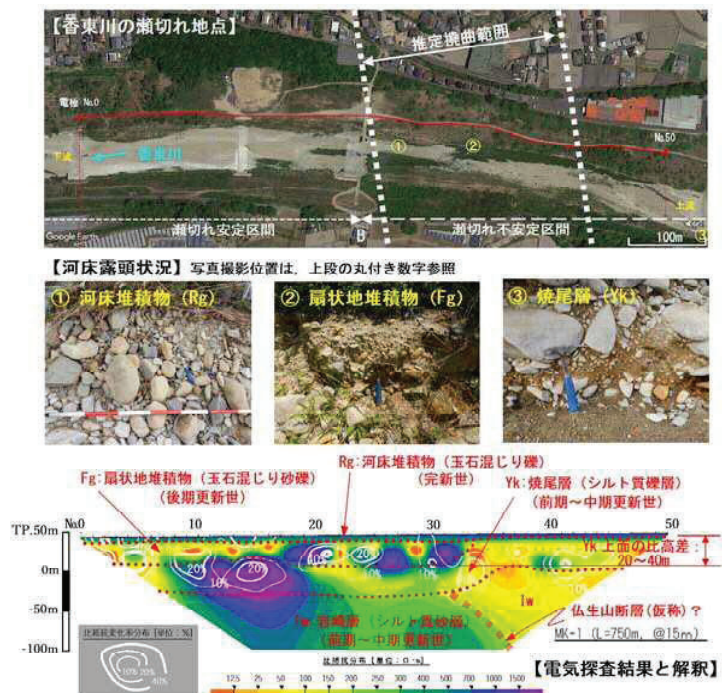


図-6 瀬切れ地点の表層露頭と推定地質断面解釈¹³⁾
（調査位置は図-5 参照）

度の高度不連続が、香東川とその東側へ東北東方向に少なくとも 4km 連続している可能性がある。なお、焼尾層 (Yk) は、扇状地性のシルト質礫層を主体とする難透水層で、鮮新～更新統の最上部層をなす。

- (3) 仏生山断層は、鉛直変位を伴う撓曲構造を有する未知の活断層である可能性が高い。ただし、活断層の認定には、地下深部での断層面の存在や基盤岩の明瞭な高度差など、断層の存在や性状を明らかにすることが必要不可欠である。

3.2 土器川の瀬切れと未知の飯山断層

宮地ほか (2018) ¹⁴⁾ は、飯山断層が土器川を横切ると考えられる河川周辺を対象に、河川流量観測、井戸や出水の地下水位観測および水質分析からなる水文調査を実施し、瀬切れ付近の地下水流が複雑であること、瀬切れ要因が断層による帯水層厚の変化である可能性を示した。

- (1) 2018 年 4 月 22～24 日の土器川の河川流量は、調査最上流の ST.17k (長炭橋) 付近で 1.95m³/min、取水による減少はあるものの徐々に流量を増やし ST.12k (乙井大橋) 付近で 2.32 m³/min となり、最下流の ST.4k (高速道路) 付近では 5.62m³/min に増加する (図-7)。この

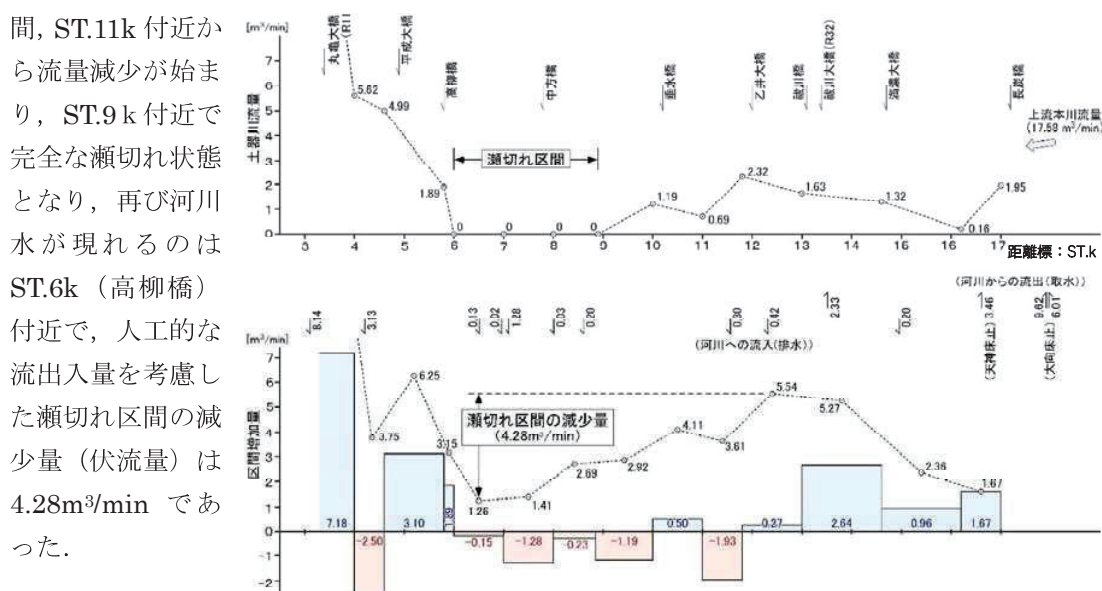


図-7 土器川の河川流量の変化 ¹⁴⁾ (調査位置は図-5 参照)

- (2) 通常、伏流河川では失水河川の特徴である下流に凸状の地下水面形を示すが、土器川は河川と地下水位がほぼ同じ状態である。また、飯山断層付近で地下水面勾配が緩くなることから、帯水層厚が飯山断層付近で変化していることを示唆していると考えられる。

- (3) 仏生山断層付近の河道部では下流に凸状の地下水面等高線となり、飯山断層と岡田断層の交差部や上法軍寺断層付近では地下水面等高線が密になるなど、断層に関連して地下水の誘導や堰上げが認められる (図-8)。

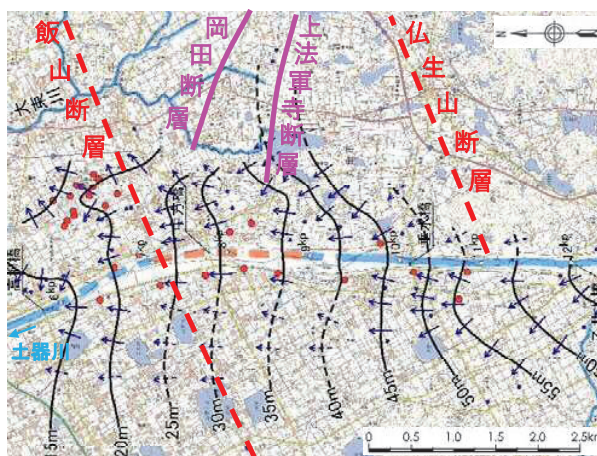


図-8 土器川周辺の地下水面等高線と地下水流向 ¹⁴⁾

3.3 瀬切れを手掛りにする活断層調査の課題

前述の仏生山断層や飯山断層は、現在のところ活断層認定に至っていないが、断層交差点付近で断層活動に起因する帯水層厚の変化が推定され、瀬切れ形成に関与している可能性は高いと考えている。仏生山断層は帯水層厚が急激に厚くなる瀬切れ開始位置に、飯山断層は逆に薄くなることによる瀬切れ解消位置にそれぞれ対応すると考えられる。ここでは、瀬切れから活断層発見につなげる上での課題について考察した。

(1) 帯水層厚の変化に起因する瀬切れの認定

瀬切れの要因として、渇水や人工的な取水など、層厚変化に起因しない河川流量の減少も挙げられる。また、河川の流量の変化によって、瀬切れ区間が発生しない期間があること、また瀬切れ区間も一定でない等の不確定要素もある。したがって、降水量と瀬切れの関係や瀬切れの性状など十分検討し、帯水層厚の変化に起因する瀬切れを認定する必要がある。

(2) 帯水層厚の変化と地質構造の評価

帯水層厚の変化を把握するためには、文献調査や地質踏査による河床露頭調査に加え、高密度電気探査を実施し、地形発達史も考慮した地質断面図の作成が重要となる。また、発見段階での地質構造の評価は、常時微動探査による2次元探査が有効であり、既往のボーリングデータ等も考慮した総合的な評価・解析が必要と考える。

(3) 断層通過位置の絞り込み

仏生山断層では、流水区間から瀬切れ区間へ移行するのではなく、降水時には瀬切れから一時的に流水区間が生じる瀬切れ不安定区間を挟む。この要因は断層による撓曲構造が帯水層厚に急激な変化を与えていないことも想定され、地下深部の地質構造を十分検討する必要がある。

飯山断層では、全体的な工学的基盤面の分布状況から、鉛直変位に加え水平変位も大きい場合も考えられる(図-9)。この場合、不明瞭な帯水層厚の変化や地下水流動特性が複雑となるため、地質構造の水平方向の分布や横ずれ断層の視点も必要と考える。

したがって、瀬切れ開始や解消地点に着目することは勿論であるが、瀬切れの不安定区間の範囲や河川流量の変化なども含めた総合的な評価が重要となる。

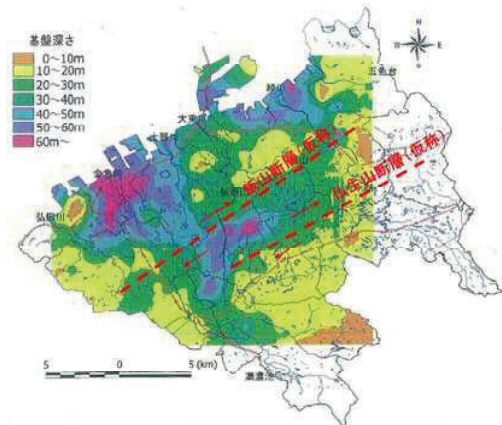


図-9 丸亀平野の工学的基盤深さ¹⁵⁾に推定断層位置を加筆

3.4 瀬切れを手掛かりとすることの有効性について

近年、活断層の認定・評価手法の高度化が課題となっており、地表で認定しにくい活断層の調査手法として、航空レーザー測量の詳細DEM(数値標高モデル)による断層変位地形の抽出、侵食等の地形変化速度の定量化による活動時期の評価など様々な研究が進められている¹⁶⁾。瀬切れを適正に精度よく認定できれば、周辺の地質情報と併せて比較的簡易に活断層の位置が絞り込み、断層の変位様式や変位速度の推定も可能になることから、有効な活断層調査手法となる可能性を有している。

4. まとめ

帯水層の層厚変化に起因する扇状地河川の瀬切れは、地形に現れない伏在活断層の存在を発見する有効な手掛かりになると考える。ただし現状で、瀬切れや地質構造の認定、断層通過位

置の絞り込みなど課題もあり、活断層調査手法としての確立はまだ先の話である。今後、活断層発見の一手法として確立するためには、新たな地質調査の実施による仏生山断層や飯山断層の検証が待たれるものの、活断層調査の新たな視点となり得る可能性は十分あると考える。

5. おわりに

現状で、仏生山断層や飯山断層は、断層活動に伴う急激な帯水層厚の変化を生じさせている可能性があることを示した段階であり、活断層の認定には至っていない。今後は、反射法地震探査やボーリング調査、トレンチ調査等の詳細な地質調査が必須で、活断層の発見や変位様式の把握、活動性評価を行い、瀬切れ現象との関係解明につなげていきたい。

最後に、この様な有意義な経験の場を与えていただいた国土交通省 四国地方整備局 香川河川国道事務所土器川出張所、香川県高松土木事務所、丸亀市、まんのう町の方々をはじめ、調査や解析にご協力を頂いた関係各位に、ここに記して感謝の意を表します。

【参考・引用文献】

- 1) 活断層研究会編 (1991) : 新編 日本の活断層—分布と資料—, 東京大学出版会, 437p.
- 2) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター (2019) : 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/search>, (2019年8月14日閲覧).
- 3) 武村雅之 (1998) : 日本列島における地殻内地震のスケール則—地震断層の影響および地震被害との関連, 地震, Vol.51, pp.211-228.
- 4) 片岡正次郎・日下部毅明 (2005) : 内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.21-32.
- 5) 岡田篤正 (2013) : 活断層の調査・研究の現状紹介, 地質と調査, 第2号 (通巻136号), pp.1-7.
- 6) 鈴木茂之 (2013) : 活断層調査の方法と断層活動の特徴, 環境制御, Vol.35, pp.8-13.
- 7) 池田倫治・大野一郎・大野裕紀・岡田篤正 (2003) : 四国北西部地域の中央構造線活断層系の地下構造とセグメンテーション, 地震第2輯, Vol.56, pp.141-155.
- 8) 栢木智明 (2010) : 中国四国地方の応用地質学 第7章 地下水問題, (一社)日本応用地質学会 中国四国支部, pp.217-219.
- 9) 国土地理院 (1999) : 1:25,000 都市圏活断層図「池田」, 技術資料番号 D1-No.368.
- 10) 国土地理院 (2009) : 1:25,000 都市圏活断層図「脇町第2版」, 技術資料番号 D1-No.524.
- 11) Minoru SAITO (1962) : The geology of Kagawa and northern Ehime Prefectures, *MEMOIRS OF FACULTY OF AGRICULTURE KAGAWA UNIVERSITY*, No.10, pp.1-74.
- 12) Ting Wang・長谷川修一・野々村敦子・山中 稔・宮地修一 (2017) : 高松平野と丸亀平野における未知の活断層, 日本応用地質学会 平成 29 年度研究発表会 講演論文集, pp.265-266.
- 13) 宮地修一・王 婷・長谷川修一・山中 稔・野々村敦子 (2021) : 伏在活断層発見の手掛かりとしての扇状地河川の瀬切れ, 応用地質, Vol.62, No.3, pp.156-169.
- 14) 宮地修一・栢木智明・寺本光伸・宮崎精介・渡辺 修・肘井敬明・露口耕治・菅原大介・長谷川修一 (2018) : 瀬切れと地下水環境から読み解く丸亀平野南部の活構造, 日本応用地質学会 平成 30 年度研究発表会 講演論文集, pp.33-34.
- 15) 斉藤章彦 (2009) : 地域地盤防災に向けた常時微動の活用に関する研究, 香川大学大学院工学研究科博士論文, pp.108-119.
- 16) 吉岡敏和 (2009) : 地表での活断層調査からわかること, 地質ニュース, Vol.663, pp.11-13.