

14. 帯水層の透水性評価に関する課題

Issues related to permeability evaluation of aquifers

○宮地修一・中根久幸（株式会社 地研）

1. はじめに

帯水層とは、地下水で満たされた砂層などの透水性が比較的良好な地層で、一般に地下水取水の対象となる地層である¹⁾。また、帯水層は地下水が流れる経路にもなることから、建設工事による突発湧水や地下水汚染、地下水位低下による井戸の水枯れ、地下水の塩水化・淡水化などの様々な地下水障害に関与する地層でもある。したがって、帯水層の透水性を適正に評価することは、これらの地下水障害の影響評価や回避および対策を講じるうえで非常に重要である。

地下水探査法として最も多く用いられるのは電気探査である。電気探査は、未固結堆積物や岩石を構成する鉱物の種類、鉱物粒子間の間隙を満たす水のイオン濃度や量などによって異なった比抵抗をもち、比抵抗分布から地下構造を推定できる物理探査の一手法である²⁾。電気探査の歴史は古く、19世紀の初めには既に欧米で試みられ、日本へ導入されたのは1920年代である。その後、地下水調査への導入が進み、1970年代のコンピュータ技術とそれを利用したシミュレーション技術の進歩に伴い、複雑な地下構造を精度よく表現することが可能になってきた³⁾。また、1990年代になると、比抵抗トモグラフィの導入や塩水などの通電性の良いトレーサーを用いた差分解析や降雨差分など、新たな探査・解析技術も発展してきた⁴⁾。しかし、比抵抗値のみでは、地盤の不均質性、地質や地下水状況の変化などにより、絶対的な評価が難しく、結果の解釈に個人差が生じることも多い。

筆者らは、電気探査結果の円滑な利用の一助となることを目的として、これまで実施した比抵抗と透水係数や地質情報から、比抵抗特性と地盤区分および透水性の関係について考察し、地盤の比抵抗値の評価に比抵抗変化率を加えることにより、比抵抗特性による細分化した土質の透水係数の目安を報告した⁵⁾。

本稿では、筆者らが提案した電圧差分法電気探査による比抵抗値と比抵抗変化率から帯水層の透水性を評価する一手法を、新たに調査された物部川扇状地の事例により検証し、大規模河川沿いの帯水層評価に向けた課題について検討した。その結果、提示手法の一定の有効性を確認でき、地形・地質を含めた地質的解釈の重要性や電圧差分法の課題や可能性も明らかになってきたことを報告する。

2. 電気探査の比抵抗による透水性の評価方法(案)

2.1 電圧差分法電気探査とは

電圧差分法電気探査は、電気探査の強制分極法（IP法：Induced Polarization Method）の一つで、同一測線で2度の探査を行うことにより、強制分極現象を促進させる探査方法である。使用した探査機器と機器諸元を図表-1に示す。

強制分極現象が顕著にみられる地盤としては、鉱脈や鉱床、地下水流動層が挙げられ、地下水流動が顕著（透水性が高い）であれば、強制分極現象が顕著



測定器	
【名称】	JCR CH-97T-C CURRENT SOURCE
【製造】	(株) ジェイ・シー・アール
【最大出力】	600V (1.25A)
【コントロール】	PCによる自動制御

電源（発電機）	
【名称】	HONDA EG-550
【製造】	本田技研工業（株）
【定格出力】	単相 100V 550VA (60Hz)

測定用ケーブル	
【名称】	電極付き測定ケーブル
【製造】	(株) ジェイ・シー・アール
【寸法】	Φ10mm

測定用電極	
【名称】	S形アース棒（SF-600 銅製）
【製造】	日動電工（株）
【寸法】	Φ10mm、L=600mm

図表-1 探査機器と機器諸元ほか

となり、差分が明瞭に現れる^{6),7)}。従来の IP 測定では、点 A (V_1) に昇圧後、負荷電圧を 0 に戻すとき、地盤内の誘電体（地下水流動層など）が存在すれば誘電体電位が生じる。このとき負荷電圧 $V = 0$ 時の電流 I_0 (点 C) が測定され、それに伴う V_0 (測定電圧) が生じて、 $\rho_a = \alpha (V_0 / I_0)$ が得られる (図-1)。一方、電圧差分法は、従来の IP 法測定の点 A (V_1) の直後に、点 B (V_2) に減圧して測定電流 (I_2) を計測する。このとき誘電体が存在する場合、減圧経路 AB は、昇圧経路 OA と異なる経路をたどり、次のような $\Delta\rho_a$ が生じると考えられている (式 1, 2)。

$$\left(k_1 = \frac{V_1}{I_1}\right) \neq \left(k_2 = \frac{V_2}{I_2}\right) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式 1)}$$

$$\Delta\rho_a - \rho_2 - \rho_1 - \alpha(k_2 - k_1) < 0 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式 2)}$$

解析は、2 度の探査を実施することから、初期測定による通常の比抵抗断面と、初期測定と 2 回目測定の差分から比抵抗変化率断面が作成される。断面解析には、有限要素法と非線形最小二乗法からなる二次元逆解析^{8),9)}を用いている。また、差分測定によって得られた比抵抗値の差分($\Delta\rho$)より、比抵抗変化率(ΔQ)を断面分布として取り出せる (式 3, 4)。

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式 3)}$$

$$\Delta Q = -(\Delta\rho / \rho_0) \times 100 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式 4)}$$

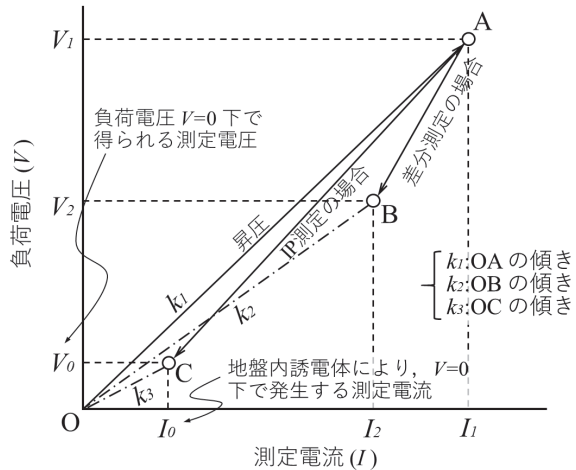


図-1 従来の IP 法と電圧差分法の違い

ここに、 ρ_a : 見掛け比抵抗, V : 測定電位, I : 負荷電流, α : 比例定数, k : 定数

2.2 検討手順

検討には、筆者らが実施した高知県内の電圧差分法電気探査の比抵抗分布と、それに対応するボーリング、現場透水試験、室内土質試験の各データの A~F の 6 地点、計 34 データを対象とした (図-2)。比抵抗値・比抵抗変化率・透水係数 (現場透水試験: JIS A 1218, D_{20} によるクレーガーの推定値) の 3 種類のデータを関連付け、地盤区分も考慮して、それぞれの関係を解析し、比抵抗値と比抵抗変化率を基にした地盤区分と透水係数の目安を提案した。

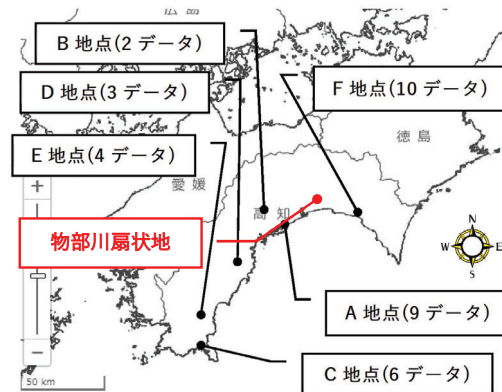


図-2 調査対象地点とデータ数
(※国土地理院の白地図に調査位置を加筆)

2.3 比抵抗値と比抵抗変化率および透水係数の関係

比抵抗値と比抵抗変化率の関係は、透水性が高くなると比抵抗値が、逆に透水性が低くなると比抵抗変化率がそれぞれ良い感度を示す。比抵抗値と透水係数の関係から、透水性が低い細粒土や中位の砂礫では、比抵抗値が概ね $500\Omega \cdot m$ 以下で、比抵抗変化率が高くなるほど透水係数が高くなる傾向にある。また、透水性が中位~高い砂礫では、比抵抗値が概ね $500\Omega \cdot m$

以上で、比抵抗変化率に関係なく比抵抗値と透水係数に正の相関があると考えられる(図-3)。

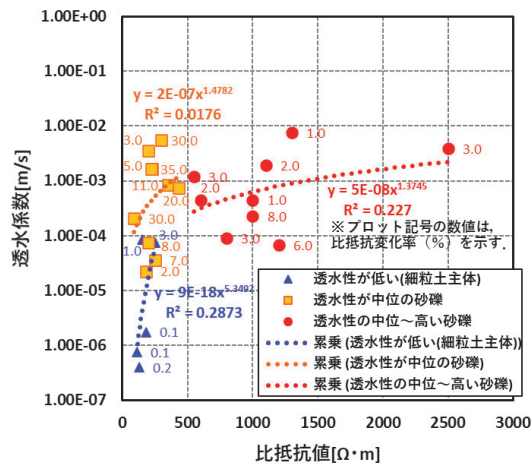


図-3 比抵抗値と透水係数・比抵抗変化率の関係⁵⁾

これらを総合して、筆者らは比抵抗値と比抵抗変化率から地盤区分と透水係数の関係を提案している(表-1)⁵⁾。

表-1 比抵抗による地盤の透水性評価(案)⁵⁾

比抵抗値 [Ω・m]	比抵抗 変化率 [%]	地盤区分	透水係数 [m/s]
～250	～5	粘性土、砂質土	$1 \times 10^{-7} \sim 10^{-4}$
	5～	粘性土質な粗粒土	$1 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$
250～500	～10	粘性土を一定 含む砂れき	$1 \times 10^{-5} \sim 10^{-4}$
	10～20		$1 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$
	20～		$1 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$
500～2,500	—	砂れき、礫、玉石等	$1 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$

3. 物部川扇状地の帯水層の透水性評価

前述の比抵抗による地盤の透水性評価(案)が、新たに調査した物部川扇状地の事例に適用できるかを検証した。

3.1 調査地の地形・地質

調査地は物部川扇状地の扇央から扇端部付近に位置し、地形勾配も4/1,000と緩いことから、砂礫層の礫径は全体的に小さく、細粒分も徐々に増えてくると考えられる(図-4)。また、扇状地の砂礫層も厚く分布することから、地下水位は比較的地表から深くなる傾向にある。



図-4 調査地と地形区分^{10)に加筆}

調査地では電気探査を実施後、GL-20m、φ66mmの試掘(W-1)を行い、2層の帯水層を確認した(図-5)。冬場の地下水位はGL-8m程度である。

帯水層Aは、GL-2.0～11.9m(層厚d=9.9m)に分布する沖積層で、下位に砂岩玉石を含むシルト混じり砂礫である。礫径はφ5～20mm(最大礫径50mm程度)で、砂は中～粗砂を主体とし、透水係数は $k=4.73 \times 10^{-4}$ [m/s](透水性：中位)であった。帯水層Bは、GL-11.9～19.2m(層厚d=7.3m)に分布する洪積層で、一部に玉石が混じるシルト質砂礫を主体とする。全体に褐色化し、風化礫も多く、礫径はφ2～20mm(最大礫径40mm程度)で、砂は中～粗砂を主体とし、透水係数は $k=1.05 \times 10^{-5}$ [m/s](透水性：中位～低い)であった。

その後、同じ深度でφ250mm仕上げの揚水試験孔(ストレーナー区間：GL-10～18m)を設置した。



図-5 調査地の試掘ボーリングコア

電圧差分法電気探査では、ボーリング地点で比抵抗値が $800 \Omega \cdot m$ を超える高比抵抗帯を、その下位に $200 \sim 600 \Omega \cdot m$ 程度の比抵抗値を示す範囲がほぼ水平に分布することから、この付近を沖積層と洪積層の境界と考えた。また、比抵抗変化率は $10 \sim 20\%$ 前後の比較的高い値を確認したものの、全体的に比抵抗変化率が低い結果となっている（図-6）。

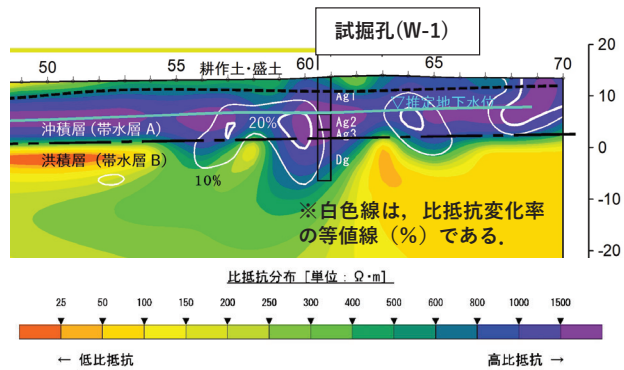


図-6 A 測線 (L=350m@5m) の東端部の探査結果断面

3.2 物部川扇状地の比抵抗と透水係数の関係

物部川扇状地の比抵抗値は、帯水層 A が $2000 \Omega \cdot m$ 、帯水層 B が $1200 \Omega \cdot m$ であり、これまでの透水性評価(案)の ○ のプロットに対し、帯水層 A はほぼ分布範囲であるものの、帯水層 B では低い透水係数を示している（図-7(1)）。また、比抵抗変化率も全体的に高い傾向を示し、これまでの透水性評価(案)のデータプロットから外れる結果となった（図-7(2)）。

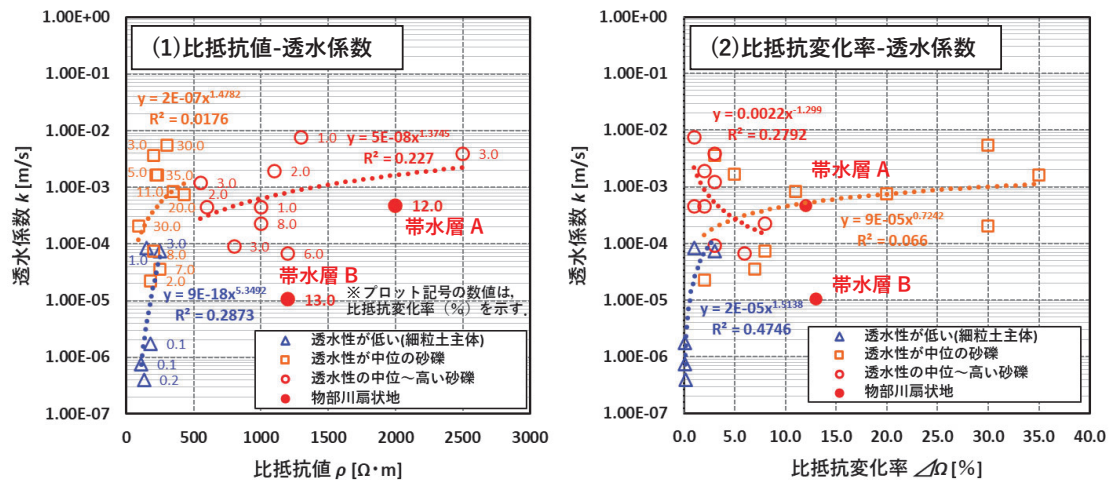


図-7 物部川扇状地の比抵抗と透水係数の関係

3.3 四万十川・安芸川および物部川の帯水層特性

物部川扇状地の比抵抗特性がこれまでの透水性評価(案)と異なることから、四万十川と安芸川の河川平野の帯水層と比較し、その要因について考察した。なお、調査地点は、四万十川が図-2 の E 地点、安芸川が同 F 地点で、河川諸元は表-2 のとおりである。

(1) 粒度特性の比較

3 河川の帯水層の粒度特性を整理した（図-8）。粒度特性は JIS A 1204 の土の粒度試験の結果を用いたが、全地点で室内土質試験が行えていないため、周辺の試験データも追加して、地点ごとの平均値を求めた。四万十川の粒度分布は、細粒分が 4.9%、砂分が 18.6%、礫分が 76.5%である。また、安芸川と物部川は、細粒分が 5.5～9.6%、

表-2 3 河川の諸元と年間降水量

河川名	河川区分	幹線流路長 RL[km]	流域面積 RS[km ²]	年間降水量※ Rain[mm/y]
四万十川	1級	196.0	2,186	1,800～3,000
安芸川	2級	27.8	143	2,000～2,800
物部川	1級	71.0	508	2,400～3,000

※年間降水量は、河川管理者の流域管理計画などの資料より引用した。

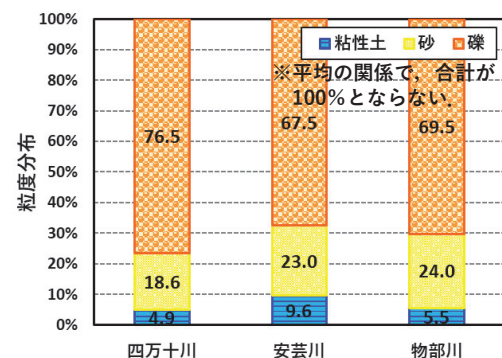


図-8 河川別の粒度特性

砂分が 23～24%，礫分が 67.5～69.5%で，物部川がやや粗粒分が多い傾向にあるものの，3 河川に有意な差はないと考えられる。

(2) 試掘時と揚水試験時の透水係数の変化

3 河川の地下水調査は水源開発調査であるため，試掘孔の現場透水試験と拡孔した試験孔における揚水試験が実施されている．ここでは，現場透水試験による透水係数と，揚水試験時の逆算した透水係数を比較した．帯水層に細粒分や砂分が多いと，口径の拡大や揚水試験孔の孔内洗浄による細粒分や砂分の除去により，一般に透水係数が高くなる傾向となる．なお，揚水試験時の計算は，不圧地下水が Boreli (ボレリー)，被圧地下水が Kozeny (コツエニー) の井戸の取水量公式¹⁾を用いて，揚水量と水位低下量の関係から透水係数を逆算した．

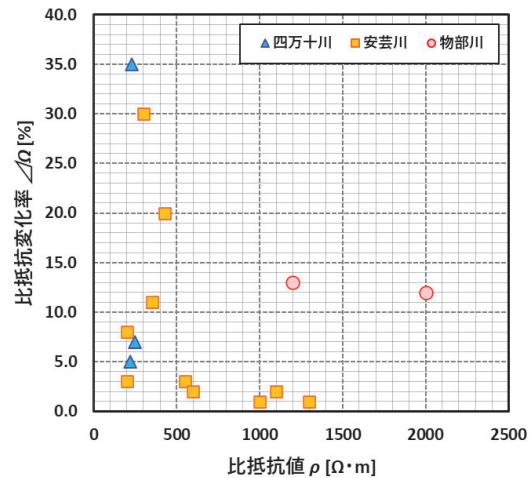
試掘孔の透水係数は，安芸川の F-3 と物部川で $k=1.96\sim7.45\times10^{-4}[\text{m/s}]$ とやや低いものの，それ以外は $10^{-3}[\text{m/s}]$ オーダーであった(表-3)．揚水試験後の透水係数は， $k=2.63\times10^{-4}\sim5.15\times10^{-3}[\text{m/s}]$ であり，試掘孔とほぼ同程度であった．両者の変化率は 40～140%程度であり，透水係数としては，ほぼ同じと考えられる．なお，透水係数がかかるのは氾濫平野で多く，一般に地下水が多いとされる旧河道や扇状地では高くなる傾向にある．

表-3 3 河川の地盤・地下水条件ほかと透水係数の変化

地点番号	水系	地盤・地下水条件ほか				透水係数 k [m/s]		
		地形区分	地質帯	帯水層厚[m]	存在状態	a.試掘孔	b.揚水試験孔	c.変化率(b/a)
E-1	四万十川	氾濫平野	四万十帯	4.9	被圧	4.16E-03	1.63E-03	39.16%
E-2		旧河道		10.1	被圧	3.59E-03	5.15E-03	143.45%
F-1	安芸川	氾濫平野	四万十帯	17.3	被圧	5.50E-03	2.57E-03	46.73%
F-2		氾濫平野		33.5	不圧	1.93E-03	1.68E-03	87.05%
F-3		氾濫平野		12.6	被圧	7.45E-04	8.81E-04	118.26%
G-1	物部川	扇状地	秩父帯	17.2	不圧	1.96E-04	2.63E-04	134.51%

(3) 3 河川の比抵抗値と比抵抗変化率の関係

地下水流動の観点から比抵抗特性を整理すると，比抵抗値が $500\Omega\cdot\text{m}$ 以下では比抵抗変化率が高いほど地下水流動（透水係数）が大きく，同 $500\Omega\cdot\text{m}$ 以上では比抵抗値が大きいほど地下水流動が高く，比抵抗変化率は小さくなる傾向がある(図-9)．データが少ないものの，物部川扇状地では，比抵抗値が高く，比抵抗変化率も 12～13%と一定高くなり，四万十川と安芸川の傾向と異なる．



3.4 物部川扇状地の透水特性の評価について

物部川の透水係数は，四万十川や安芸川と比較して 1 オーダー低い傾向にあるが，粒度特性に明瞭な差はみられない．一方で比抵抗特性は，比抵抗値の割に比抵抗変化率が高い傾向にある．なお，物部川と，四万十川と安芸川は，異なる地質帯を流下している(表-3)．以上より，物部川の比抵抗特性が四万十川や安芸川と異なる要因としては，物部川流域の多くが秩父帯に属しており，玄武岩質火山岩類や蛇紋岩などを侵食した Fe, Mg, Ca などの金属元素を多く含む堆積物が強制分極現象を顕著にし，比抵抗変化率を上昇させた可能性が考えられる．ちなみに，これまでの透水性評価(案)は，四万十帯の砂岩や泥岩に起因する堆積物や盛土材を対象としたデータで作成されたものである．

4. まとめ

電圧差分法電気探査の比抵抗分布を基にした帯水層の透水性評価は、四国地方南部の堆積岩地帯限定であるが、一定の適用性はあると考える。ただし、検討データ数がまだまだ少ないこと、堆積物の成分や地質帯の影響評価などの課題も残る。以下に、本稿の結果をまとめる。

- (1) 比抵抗値と比抵抗変化率を基にした帯水層の透水性評価は、地盤性状を考慮した透水係数の推定（目安）が一定可能で、地層分布も考慮すれば、断面上での透水性評価も精度よく、効率的に行えると考えられる。
- (2) 旧河道や扇状地の透水係数は、孔内洗浄で 1.3～1.4 倍程度上昇し、氾濫平野では 40% 程度まで低下することが予想され、水源開発時の本掘削への移行判断に活用できると考える。
- (3) 四万十帯や秩父帯など、地質帯の違いにより比抵抗特性も異なる可能性があり、異なる地質帯でのデータを蓄積し、比抵抗への影響や特性について検討する必要がある。

5. おわりに

電圧差分法電気探査は、探査結果として比抵抗値と比抵抗変化率のデータが得られ、比抵抗値から従来の地層区分や物性などを、比抵抗変化率から地下水流動性を同時に評価できる有効な探査手法であると考えられる。今後は、幅広い地盤条件でのデータを蓄積し、比抵抗による地盤の透水性評価(案) (表-1) の推定精度を向上させていきたい。

最後に、この様な有意義な経験の場を与えていただいた高知県 農業振興部 農業基盤課の方々、調査や解析にご協力を頂いた(株)JCR の方々などの関係各位に、ここに記して感謝の意を表します。

【参考・引用文献】

- 1) 井田徹治 (2009) : 見えない巨大水脈 地下水の科学, 講談社, ブルーバックス B-1639, pp.79-81.
- 2) 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック, pp.247-250.
- 3) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹 (1995) : 建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法, 古今書院, pp.5-8.
- 4) 山井忠世 (1993) : 最近の地下水調査方法と計測技術(4) 1.帯水層の分布調査・探査法-, 地下水学会誌, 第 35 巻 第 2 号, pp.123-130.
- 5) 宮地修一・中根久幸 (2021) : 電気探査の比抵抗値による地盤の透水性評価に関する一考察, 地盤工学会四国支部, 令和 3 年度技術研究発表会 論文概要集, pp.25-26.
- 6) 西谷忠師・筒井智樹・坂中伸也 (2007) : キミもトライだ 物理探査, 技報堂出版, 91p.
- 7) 伊藤芳郎・楠見晴重・竹内篤雄 (1998) : 斜面調査のための物理探査-地すべり・地下水・岩盤評価-, 吉井書店, pp.111-114.
- 8) 佐々木裕 (1981) : 比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析(I),物理探査学会誌, 第 34 巻 5 号, pp.341-350.
- 9) 佐々木裕 (1981) : 比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析(II),物理探査学会誌, 第 34 巻 6 号, pp.422-434.
- 10) 国土地理院 (2022) : 電子国土 Web の土地条件図の 3D 表示, https://maps.gsi.go.jp/index_3d.html?z=16&lat=33.56983558265154&lon=133.66020441055298&pxsize=1024&ls=std%7C1cm25k_2012&blend=0#&cpx=0.000&cpy=-100.000&cpz=100.000&cux=0.000&cuy=0.000&cuz=1.000&ctx=0.000&cty=0.000&ctz=0.000&a=1&b=0&dd=1, (閲覧日: 2022 年 2 月 21 日).
- 11) 土木学会 水理委員会 水理公式集改定委員会 (1985) : 水理公式集, 技報堂, pp.377-379.