

高粘性流体を含む堆積物の比抵抗と飽和度の関係

木村健太^{*,**}・後藤忠徳^{*3}・前田智輝^{*}・山田尊生^{*,*3}・萩谷健治^{*3}

要 旨

地下比抵抗構造は地下流体の分布や移動を議論する際に有益な情報であるが、流体の粘性の違いが地層の比抵抗に与える影響については、十分には議論されていない。本研究では実験室において、高粘性の泥水を堆積物試料に浸透させ、泥水飽和度と試料比抵抗の関係を調査した。試料として、砂礫混じりの川砂および細粒の砂を用いた。室内実験の結果、泥水使用時の比抵抗は、水道水を用いた時と比べて、低飽和域で高い値を示し、飽和係数も大きくなった。その要因について定性的な議論を行ったところ、泥水の非ニュートン流体（ビンガム流体）的性質により、泥水の毛管現象がほとんど起きなかった事が主な要因であると推測された。高粘性流体が探査対象の場合は、室内実験を通じて、流体の特性や飽和度と比抵抗の関係を調査しておく必要性が示唆された。

キーワード：高粘性流体・泥水・比抵抗・飽和・ビンガム流体

1. はじめに

地下での気体や液体（地下流体）の分布や移動の把握を目的として、地下比抵抗構造の可視化が多数実施されている（例えば、鈴木, 1997a; 鈴木, 1997b; 鈴木, 1998; Samouelian et al., 2005; 上嶋, 2009）。これらの研究では、電気探査・電磁探査や孔内検層によって得られた地下の比抵抗値に対して、以下のアーチーの式（Archie, 1942）を適用することで、特定の地層や岩体中での流体量（体積含有率）の推定が行われている。

$$\rho_r = \rho_w F S^{-n} = \rho_w (a \varphi^{-m}) S^{-n} \quad (1)$$

ρ_r は地層や岩体の比抵抗 (Ωm) であり、 ρ_w は流体の比抵抗 (Ωm)、 φ は間隙率、 S は間隙中の流体飽和度である。また $F = a \varphi^m$ は地層係数、 a は迂回係数、 m は膠結係数、 n は飽和係数と呼ばれており、例えば砂岩の場合は $a = 0.5 \sim 2.5$ 、 $m = 1.3 \sim 2.5$ 、 $n = 2$ である（物理探査学会, 2016）。従って ρ_w や φ を何らかの方法で求めて、 $a \cdot m \cdot n$ を仮定すれば、 ρ_r から飽和度 S を求めることができ、流体の体積含有率を求めることができる。

近年は通常の地下水に加えて、水よりも高粘性の地下流体にも注目が集まっている。例えば、石油・天然ガス

を地下から効率よく採取する手法の一つとして、原油増進回収法（EOR 法）がある。これは三次採取法にあたり、特殊な流体を油層に送り込んで、原油の粘性の低下や油層中の表面張力の低下を引き起こすことで、粘性の高い化石燃料を採取する技術である（例えば、山崎, 1982）。また、地盤沈下・地滑り・地盤の液状化などに関与する泥混じりの地下水（泥水）は、通常の地下水よりも粘性が高いと考えられる。これまでに地盤液状化や地滑りに関する地下比抵抗構造調査は行われているが（例えば、神宮司ほか, 2013; Perrone et al., 2014）、泥水に特化した比抵抗構造解析は行われてこなかった。また泥水を用いた室内比抵抗測定の実験例も見られない。

本研究では、高粘性流体が地層の比抵抗に与える影響を明らかにするために、室内での比抵抗測定を実施した。従来の研究では、原油と水の混合物を含む堆積物試料の比抵抗測定が行われてきた（例えば、Anderson, 1986; Donaldson and Siddiqui, 1989; Suman and Knight, 1997; Aggelopoulos et al., 2005; Liu et al., 2015）。これらの研究では、原油と水の混合過程や流体の表面張力については詳しく議論されているが、粘性が比抵抗値に与える影響については詳細には議論されていない。そこで本研究では、高粘性流体が堆積物の比抵抗構造に与える影響を議論す

2020年7月23日原稿受付；2022年4月23日受理

* 兵庫県立大学理学部

〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1

** 現在・奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科
〒630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-5

*3 兵庫県立大学大学院理学研究科

〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1

るために、同じ堆積物試料中に、水とそれよりも高粘性の泥水をそれぞれ浸透させて、不飽和状態における試料全体の比抵抗測定を実施した。

2. 実験手法

本実験では、Ca型ベントナイト（クミニネ工業製クニボンド）を使用した。ベントナイトと水道水を重量比1:2で混合することで、液体状の泥水を作成した。Table 1に泥水の密度、粘性、表面張力の測定結果を示す。粘性の測定にはオストワルド式粘度計（ガラス細管内径1.5 mm）を用いており、表面張力は内径1.3 mmの鉛直ガラス管を用いて液滴法（島田, 1967）により測定した。また水道水・泥水の比抵抗を導電率計（HANNA製DIST5）によって測定した。以後、泥水との対照実験には、水道水を使用した。

堆積物試料としては園芸用の川砂を利用した。川砂をふるいにかけて、シルト（粒径0.063 mm以下）、砂（粒径0.063～2 mm）、および礫（粒径2 mm以上）に分別したところ、シルトはほぼ含まれず、砂と礫の重量比はそれぞれ約78%および約22%であった。礫のサイズは最大で7 mm程度であり、小判状のものが多くを占めた。一方、砂は球状のものが多かった。川砂および砂試料の間隙率を測定したところ、それぞれ約42%および約38%であった。

Fig. 1に本研究で用いた実験装置を示す。堆積物試料はFig. 1(a)左下に示すアクリル製容器に入れ、四極法により試料のインピーダンスを測定した。電極には銅-硫酸銅電極（0.3 mm厚の銅製メッシュに硫酸銅水溶液を染み込ませた濾紙を巻き付けたもの）を使用し、Fig. 1(b)

Table 1. (a) Physical properties of mud fluid and tap water used in this study. The viscosity and surface tension of mud fluid are relative values to tap water. (b) Four settings in our experiments.

a		
Mud fluid	Density	1.16 g/cc
	Viscosity	6.2
	Surface tension	1.2
	Resistivity of fluid	4.6 Ωm
Tap water	Density(g/cc)	1.00 g/cc
	Resistivity of fluid	77 Ωm

b			Fluid	
Experiments	Grain	Porosity	Type	Resistivity
1	gravel+sand	42%	Water	10 Ωm
2	gravel+sand	42%	Mud	3.4 Ωm
3	sand	38%	Water	9.1 Ωm
4	sand	38%	Mud	3.3 Ωm

に示すようにアクリル製容器の四隅に配置した。比抵抗測定装置にはLCRメータ（NF製ZM2372）を用いた。

測定では間隙水の影響を際立たせるため、堆積物試料を水洗いすることで不純物を取り除き、110℃のオーブンで数十分乾燥させることで、間隙水を含まない初期状態を作成した。この初期状態の試料200 ccに間隙水を加えた後で、間隙水が均一に分布するように試料全体を棒で攪拌し、試料表面を平らにした上でインピーダンスを測定した。

また電極の分極の影響が最小となる周波数を知るために、あらかじめ複数の周波数（10～4000 Hz: 計7周波数）で測定を行った。例えば川砂を水道水で飽和状態にした場合、測定抵抗値は543～598 Ω、位相は-1.0～8.5度であった。このうち最も位相が小さかったのは400 Hz時であり、抵抗値は543 Ω、位相は0.3度であった。同じ測定システムを用いて、試料容器中を200 ccの水道水のみで満たしてインピーダンスを測定したところ、やはり400 Hz時の位相が最も小さい値であった（約0.7度）。従って、本研究では、電極での分極の影響が最も小さい400 Hzの値を用いて議論する。

LCRメータでは測定値として試料の抵抗値(Ω)が得られる。得られた抵抗値を0.050倍することで比抵抗(Ωm)

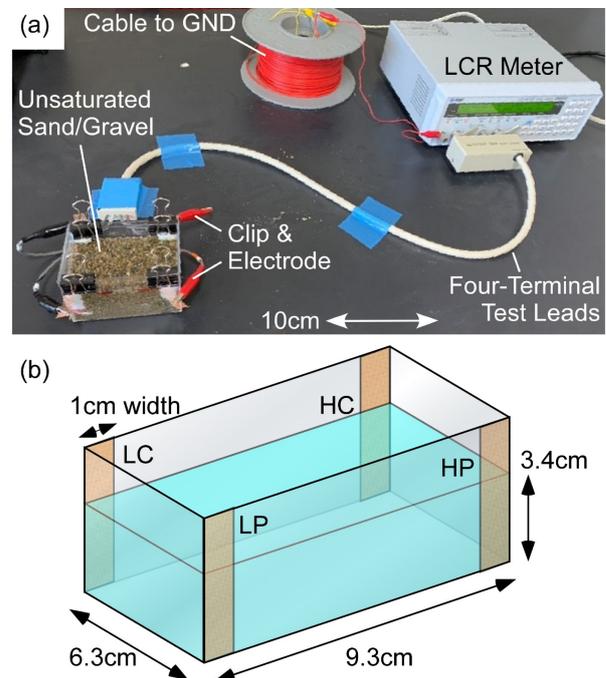


Fig. 1. (a) Photograph at resistivity measurement of a sediment sample. (b) Sample holder and arrangement of Cu-CuSO₄ electrodes. The inside dimensions of holder are also displayed. A blue cuboid represents the unsaturated sediment with volume of 200 cc. Brown meshes indicate the Cu-CuSO₄ electrodes; HC&LC=current electrodes, HP&LP=potential electrodes.

へと変換した。この係数は、水道水 200 cc に対して測定した 400 Hz 時の抵抗値と、導電率計で測定した同じ水道水の比抵抗値 (Ωm) の比から導いたものである。この倍率が適切かどうかを確認するために、抵抗測定の様子を数値シミュレーションで再現した。ここでは、3次元電気探査シミュレーションソフト“3ddcxh” (Spitzer, 1995) を用いて、Fig. 1(b) の試料 (200 cc)・容器・銅メッシュを数値モデル中に表現した。空気・容器の比抵抗と銅メッシュの比抵抗はそれぞれ $10^5 \Omega\text{m}$, $10^5 \Omega\text{m}$ と仮定して、Fig. 1(b) のように銅メッシュに通電すると仮定した。その結果、測定抵抗値の約 0.05 倍が試料比抵抗となることを確認した。

本研究では、試料の粒径 (2 種) と間隙水 (水・泥水) の組み合わせを変えて、4 種類の実験を行った (Table 1(b))。各実験では飽和度が概ね 10%, 30%, 50%, 80%, 100% となるように段階的に間隙水を加え、その度に LCR メータを用いて試料全体のインピーダンスを測定した。実験 1・2 では、川砂を用いているが、間隙水が異なっている (水道水と泥水)。川砂は実験 1 で用いたものをオープンで乾燥させて、実験 2 で再度使用した。実験 3・4 では、川砂からふるいを用いて採取した砂試料のみを用いた。実験 3 では砂試料と水道水を使用し、実験 4 では実験 3 で用いた砂を再度完全に乾燥させて泥水を加えた。なお、泥水で試料を飽和状態にしようとしたが、飽和度約 86% の段階でそれ以上の泥水を試料に加えることができず、実験 2・4 の飽和度の最高値は 86% に留まった。また、各実験で用いた間隙水の比抵抗 (Table 1(b)) は、水道水や泥水と、電極から試料中に染み出した硫酸銅水溶液 (約 $0.7 \Omega\text{m}$, 約 5 cc) とが混合された値になった。

3. 結果および議論

測定結果を Fig. 2 にまとめた。飽和度 0% 時の比抵抗は、飽和度 10% 程度時の比抵抗に比べて低くなる傾向が認められる。試料容器に乾燥した川砂や砂を充填する際、電極からは約 5 cc の硫酸銅水溶液が染み出してしまい、これが試料容器底面に薄く溜まってしまいう現象が目視で確認できた。その際に作られる導電性のパスのために飽和度 0% 時の比抵抗が低めの値を示したと思われる。他の飽和度では、水もしくは泥水を加えた後に試料を攪拌しているため、このような硫酸銅水溶液の薄膜は形成されなかった。以後では飽和度 0% の比抵抗値以外に着目する。

実験 1 と 2, 実験 3 と 4 を比較すると (Fig. 2), 泥水使用時 (実験 2 および 4) の方が水道水を用いたとき (実験 1 および 3) に比べて、飽和度変化に対する比抵抗の変化量が大きいことが分かる。この傾向をより詳細に見るために、Fig. 2 の両対数グラフを作成したところ (Fig. 3), 比抵抗と飽和度は直線関係 (べき乗則) にあ

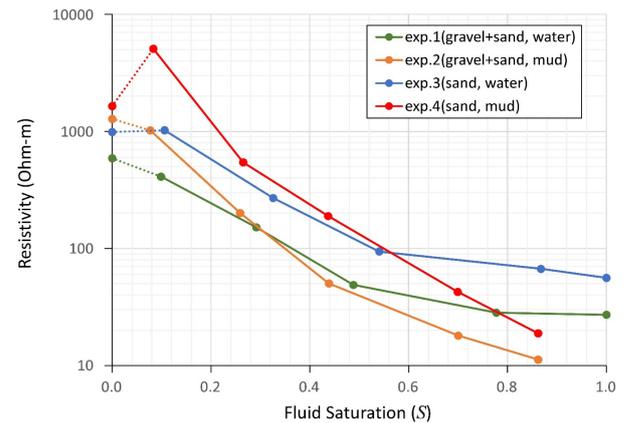


Fig. 2. Observed bulk resistivities of unsaturated sediment samples filled by tap water or mud fluid.

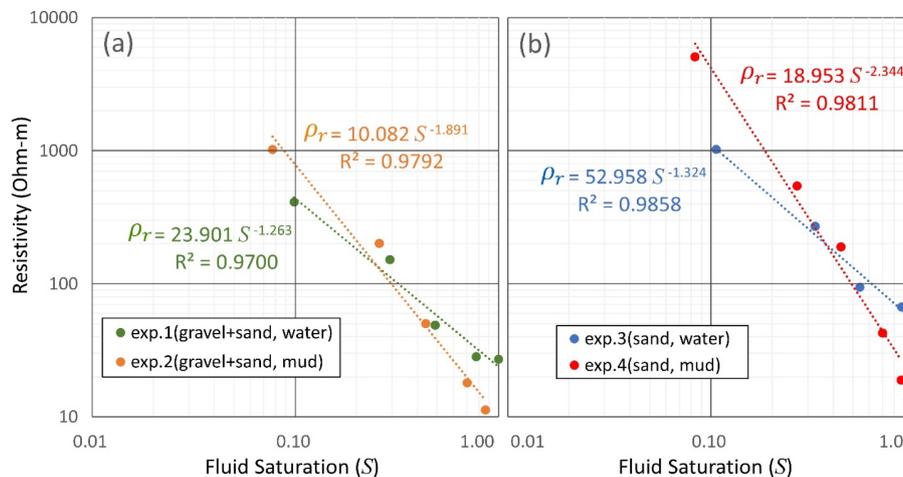


Fig. 3. Relationship between saturation and bulk resistivity at each experiment. (a) Sand and gravel mixture, and (b) sand only. Regression lines are based on the Archie's law (equation (1)). Coefficient of determinations, R^2 , are also printed.

ることが示された。これは、今回の測定結果が(1)式のアーチーの式で説明できることを示唆している。そこで、最小二乗法を用いて飽和係数 n を求めたところ、泥水使用時には2前後(実験2 = 1.89, 実験4 = 2.34)、水道水使用時には1.3程度(実験1 = 1.26, 実験3 = 1.32)であり(Fig. 3)、概して水道水よりも泥水の方が n の値は大きくなった。

泥水使用時に飽和係数が大きくなる理由について、定性的な議論を試みる。まず泥水にかかる剪断応力に注目する。泥水の重要な性質の一つとして「非ニュートン流体的」な振る舞いがあげられる。例えば、非ニュートン流体の一つであるビンガム流体では、液体に流れがない場合でも剪断応力が働いている。

$$\tau = \tau_0 + \mu_B D \quad (2)$$

ここで、 τ は剪断応力 (Pa), D は剪断速度 (s^{-1}), μ_B はビンガム粘性係数 ($Pa \cdot s$), τ_0 はビンガム降伏値 (Pa) である。ニュートン流体では $\tau_0 = 0$ ($D = 0$ では $\tau = 0$) であるが、ビンガム流体では $D = 0$ の状態でも $\tau = \tau_0$ である。すなわち流体が停止していても、壁面と流体にはある一定の抵抗力が生じる。泥水は $D < 1$ (s^{-1}) ではビンガム流体としての性質を示すことが報告されており(鶴谷ほか, 1986)、本研究で用いた泥水(ベントナイトと水の混合比1:2)の場合は $\tau_0 =$ 約 235 Pa である(鶴谷ほか, 1986 から読み取った)。

このような非ニュートン流体の特性は、毛管現象に大きな影響を与える。例えば、液体の入った容器表面に設置した半径 r (m) の鉛直円筒管内で生じる毛管現象については、(3)式が成立することが知られている(宮沢ほか, 1991)。

$$qgh \cdot \pi r^2 = \Upsilon \cdot 2\pi r \cdot \cos\theta - \tau_0 \cdot 2\pi rh \quad (3)$$

h は円筒管内での液面上昇高さ (m), q および Υ はそれぞれ間隙水の密度 (kg/m^3) と表面張力 (N/m) であり, θ は接触角, g は重力加速度 ($9.8 m/s^2$) である。(3)式ではビンガム流体は静止しており、管内の流体に働く重力(左辺)と、表面張力による流体の引き上げ力(右辺第1項)、そして降伏値 τ_0 による管壁面での剪断力(右辺第2項)が釣り合っている。(3)式を h について整理すると(4)式が得られる。

$$h = \frac{2\Upsilon \cos\theta}{qgr + 2\tau_0} \quad (4)$$

ニュートン流体の場合 ($\tau_0 = 0$)、(4)式はよく知られた毛管現象の公式になる。なお、平行平板間で生じる毛管現象においても、 h は(4)式で示される(この場合の r は平板間の距離: Géraud et al., 2014)。

(4)式に基づいて、本研究での実験4(砂+泥水)の際にどの程度の毛管現象が生じたかを考える。間隙水の

土壌への浸透現象はしばしば円筒の毛細管の集合で近似されており、土粒子の平均半径を R とすると、毛細管の半径は $r = (\sqrt{2} - 1)R$ で近似される(玉井ほか, 1987)。本研究で用いた砂の平均粒径は未調査であるが、試みに砂粒子の最小半径と同程度と仮定する ($R = 3.0 \times 10^{-5} m$, $r = 1.24 \times 10^{-5} m$)。次に、 θ は間隙水の成分や堆積物粒子の組成で変化するが、本研究では測定を行っていない。そこで宮沢ほか(1991)による、ガラスビーズと水を用いた実験での測定値 ($\Upsilon \cos\theta = 69.35 \times 10^{-3} N/m$) を用いる。水の表面張力は $0.0728 N/m$ なので、 $\theta \approx 18$ 度である。泥水の場合の θ は未知であるが、試みに水の場合と同程度である仮定する。さらに Table 1(a) から、泥水については $q = 1.16 \times 10^3 kg/m^3$, $\Upsilon = 0.0728 \times 1.2 N/m$ であり、また前述のように $\tau_0 = 235 Pa$ である。これらを(4)式に代入すると、 $h \approx 0.035 cm$ となる。この値は、 θ が多少変化しても大きくは変わらない。また、 r が大きくなると h は小さくなるが、 r が小さくなくても $h \approx 0.035 cm$ である。

以上の概略的な見積りから考えると、実験4では泥水の毛管現象はほとんど起きなかったと推測できる。すなわち、間隙水に泥水を用いた場合は、間隙中の泥水が相互に結合することができず、間隙空気が堆積物の随所に残存したと思われる。このために低飽和時において、泥水を含む堆積物試料は特に高い比抵抗を示し、飽和係数が大きくなったと考えられる。他方、間隙水に水道水を用いた場合(実験3), $q = 1.00 \times 10^3 kg/m^3$, $\Upsilon = 0.0728 N/m$, $\tau_0 = 0 Pa$ なので、(4)式の $h \approx 114 cm$ となる。間隙形状や間隙径に強く依存するものの、水道水を用いた実験3では毛管現象のために、堆積物試料全体に水分が行き渡りやすい状態であったと予想される。川砂試料の場合(実験1, 2)も同様に、泥水使用時は毛管現象が起きにくかったと考えられる。

泥水使用時の飽和係数の増大を説明できる要因は他にも考えられる。例えば、泥水の表面張力の大きさ(Table 1(a))が挙げられる。ただ、ビンガム降伏値を考慮しなければ、水よりも泥水のほうが(4)式の h は大きくなるので、礫・砂粒子表面の泥水同士がむしろ連結しやすくなると思われる。また、泥水の粘性係数の高さ(Table 1(a))も要因として挙げられる。低粘性流体は間隙を短時間で流れ下るが、高粘性流体の流速は遅いため、間隙水が互いに連結しにくく、試料比抵抗が低飽和時に増加する可能性が考えられる。しかし、本研究では間隙水が試料に十分浸透するように、試料への間隙水の追加・攪拌から比抵抗測定までは1分以上待機した。間隙水が静止した状態では、(3)式の中に粘性係数の項がなく、粘性そのものの影響は無視できると思われる。ただし、これらは詳細な実験に基づく推察ではないため、追加実験の実施が求められる。例えば、固体表面での泥水液滴の観察や、泥水の毛管現象の測定、堆積物試料の比抵抗の時間変化の計測などを行って、高粘性間隙水の影響を

より詳しく調べて、定量的な議論を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では、高粘性流体が地層の比抵抗に与える影響を明らかにするために、室内での比抵抗測定を実施した。間隙水2種、堆積物試料2種の組み合わせにより、合計4種類の実験を行った。その結果、泥水使用時は低飽和時の試料比抵抗が高くなり、飽和係数が大きくなる傾向が認められた。この要因を定性的に考えるため、泥水が持つペンガム流体的な性質（降伏値の影響）について議論を行った。その結果、泥水の毛管帯は水道水に比べて極端に薄く、泥水は試料中の広い範囲に浸透できなかったと予測された。このために、不飽和時の比抵抗増大が起きたと推測された。他の高粘性流体（原油など）も泥水と同じく巨大な分子からなる溶液であり、非ニュートン流体の性質を持つことが予想される。従ってこのような高粘性流体が探査対象の場合は、流体の性質を事前に室内で測定するとともに、それらが地層の比抵抗に与える影響を加味しておくことが重要であると言える。ただし、粘性そのものの影響や表面張力の効果に関する実験は本研究では行っていない。今後は泥水を用いた追加実験や微視的な固液境界の観察が必要である。

参考文献

- Aggelopoulos, C., Klepetsanis, P., Theodoropoulou, M. A., Pomoni, K., and Tsakiroglou, C. D. (2005): Large-scale effects on resistivity index of porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, **77**, 299-323. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.02.002>
- Anderson, W. G. (1986): Wettability literature survey-part 3: the effects of wettability on the electrical properties of porous media, *Journal of Petroleum Technology*, **38**, 1-371. <https://doi.org/10.2118/13934-PA>
- Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transactions of the AIME*, **146**, 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- 物理探査学会 (2016): 物理探査ハンドブック 増補改訂版 (第二分冊), 365-696, 物理探査学会.
- Donaldson, E. C., and Siddiqui, T. K. (1989): Relationship between the Archie saturation exponent and wettability, *SPE Formation Evaluation*, **4**, 359-362. <https://doi.org/10.2118/16790-PA>
- Géraud, B., Jørgensen, L., Petit, L., Delanoë-Ayari, H., Jop, P., and Barentin, C. (2014): Capillary rise of yield-stress fluids, *Europhysics Letters*, **107**, 58002. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/107/58002>
- 神宮司元治・永尾浩一・前田幸男・中島善人 (2013): 繰り返し電気探査による人工液状化試験の比抵抗変化の計測, *物理探査*, **66**, 3-11. <https://doi.org/10.3124/seg.66.3>
- Liu, Y., Xue, Z., Park, H., Kiyama, T., Zhang, Y., Nishizawa, O., and Chae, K. S. (2015): Measurement of electrical impedance of a Berea sandstone core during the displacement of saturated brine by oil and CO₂ injections, *Journal of Applied Geophysics*, **123**, 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.024>
- 宮沢直季・萩原能男・小菅一郎 (1991): 多孔媒体中の降伏値をもつ流体の毛管浸透流に関する基礎的検討, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集 (第2部門), 200-201.
- Perrone, A., Lapenna, V., and Piscitelli, S. (2014): Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review, *Earth-Science Reviews*, **135**, 65-82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005): Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil and Tillage Research*, **83**, 173-193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- 島田昌敏 (1967): 表面張力と粘性係数の同時測定, 理科教育研究室報告, 大阪学芸大学理科教育研究室, 第2号別冊.
- Spitzer, K. (1995): A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods, *Geophysical Journal International*, **123**, 903-914. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06897.x>
- Suman, R. J., and Knight, R. J. (1997): Effects of pore structure and wettability on the electrical resistivity of partially saturated rocks; A network study, *Geophysics*, **62**, 1151-1162. <https://doi.org/10.1190/1.1444216>
- 鈴木浩一 (1997a): 物理探査法の地質工学への適用 (その1) - 第四紀層下の活断層調査地点での適用例 -, *物理探査*, **50**, 309-320.
- 鈴木浩一 (1997b): 物理探査法の地質工学への適用 (その2) - 地下水流動モニタリングへの適用例 -, *物理探査*, **50**, 497-505.
- 鈴木浩一 (1998): 物理探査法の地質工学への適用 (その3) - 硬質岩盤の透水性評価への適用例 -, *物理探査*, **51**, 83-95.
- 玉井信行・浅枝 隆・田中靖治 (1987): 毛管モデルによる不飽和透水係数の評価, 土木学会論文集, **381**, 75-81.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤 (1986): 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.0566.
- 上嶋 誠 (2009): MT法による電気伝導度構造研究の現状, *地震* 第2輯, **61** (Supplement), 225-238. <https://doi.org/10.4294/zisin.61.225>
- 山崎豊彦 (1982): 3次回収 (EOR) 研究開発の現状, 石油技術協会誌, **47**, 296-305. <https://doi.org/10.3720/japt.47.296>

Relationship between resistivity and saturation of sediments containing highly viscous pore fluids

Kenta Kimura^{**}, Tada-nori Goto^{*3}, Tomoki Maeda^{*}, Takaharu Yamada^{**3}, Kenji Hagiya^{*3}

ABSTRACT

Subsurface resistivity structure is useful for discussion about distributions and movements of underground fluids; however, the effect by fluid viscosity on the resistivity of strata has not been sufficiently discussed. In this study, we infiltrated highly-viscous mud fluid into sediment samples in the laboratory, then investigated the relationship between mud fluid saturation and the resistivity of sample.

River-bed sand, mixed with gravel and fine sand, was used in this study. As a result, the mud fluid samples indicate resistive feature at low saturated condition, higher than the samples filled by tap water, and have the larger saturation exponent. Based on qualitative discussion, the behavior of non-Newtonian fluid (Bingham fluid), which restricts the capillarity of mud fluid, seems to be the major cause. It is suggested that pre-survey investigations of characteristics of fluid and the relationship between saturation and resistivity through laboratory experiments are required, when high-viscosity fluid is the survey target.

Keywords: viscous fluid, mud fluid, resistivity, saturation, Bingham fluid

Manuscript received July 23, 2020; Accepted April 23, 2022.

* School of Science, University of Hyogo
3-2-1 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1297, Japan

** Now, Graduate School of Science and Technology,
Nara Institute of Science and Technology
8916-5 Takayamacho, Ikoma-shi, Nara 630-0101, Japan

*3 Graduate School of Science, University of Hyogo
3-2-1 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1297, Japan