

河川堤防近傍における伏流水の電気伝導度の鉛直分布の出水時応答特性に関する研究

A STUDY ON RESPONSIVENESS OF VERTICAL PROFILE OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF UNDERFLOW WATER NEAR THE RIVER LEVEE DURING A FLOOD

松本健作¹・小野寺光二²

Kensaku MATSUMOTO and Koji ONODERA

¹正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 理工学府 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

²非会員 群馬大学大学院 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Continuous observation of electrical conductivity in two bore holes located in close proximity to a river Levee was conducted. Water level of the bore holes and the neighboring river were observed. The Chain-Array detection was also performed to examine the observed characteristics of the electrical conductivity. Vertical profiles of the electrical conductivity showed remarkable responsiveness for the floods. Vibration of the electrical conductivity was also observed. The vibration of the electrical conductivity disappeared during a flood. Characteristics of the electrical conductivity indicate the effectiveness of continuous monitoring of the electrical conductivity of underflow water in close proximity to a river.

Key Words: underflow water, electrical conductivity, response characteristics during a flood

1. はじめに

河川堤防近傍における伏流水は、堤内外における水位変動の影響を受け、更には出水に伴う顕著な水位増減の影響下にあることで複雑な動態を示すことが知られている¹⁾。この河川堤防近傍における伏流水と密接な関係にあると考えられる堤防基盤漏水は、河川堤防の浸透性破堤の一因とされ、その解明が急がれているが、水-土の境界領域における複雑な現象であることで取り扱いが難しいこと、現場における実現象として、その発生プロセスをモニタリングするシステムが存在しないことなどから、依然として未解明な状態にある²⁾。

著者らは、河川堤防近傍に設置した地下水観測孔を対象として種々のモニタリングを実施することで、河川堤防近傍を流動する伏流水の動態解明に取り組んできた³⁾。⁴⁾ 地下水観測孔を用いたモニタリング項目としては、孔内水位が最も一般的であるが、より詳細な伏流水の流動特性を解明するためには帯水層の存在深度およびその層厚、深度毎の流向・流速などを詳細に調査する必要がある。これらの観測を実施することで、詳細な伏流水の流動特性を把握することができる反面、そのためには機器費用、観測費用共に一般的には高コストを要し、多大な労力を

必要とする。このことは、局所的なサイトを対象とする観測である場合においては必ずしも阻害要因とはならないが、河川堤防近傍における伏流水を対象とした場合には、河川堤防が線状・長大構造物であることから広範囲・高頻度で観測する必要があるため、重要な検討課題となる。このため、河川堤防近傍伏流水を対象とした実用技術を念頭においたモニタリングシステムとしては、一定精度を確保したうえで、できるだけ簡便且つ安価なモニタリングであることが要求されることとなる。

前述した種々の観測をより簡便・安価に実施するための開発・改良も実施されているところであるが、一方で、より簡便な既存の観測手法を有効に活用することで堤防近傍における伏流水の動態をどの程度把握することができるとの検討も併せて取り組むべき重要な課題であると思われる。

そこで本研究では、観測項目として、比較的低コストで機器導入が可能であり、検層時のトレーサも不要、且つ観測作業も簡便であることから広範囲・高頻度での観測が可能な電気伝導度⁵⁾(Electrical Conductivity, 以下 EC と略す)に注目し、河川堤防近傍観測孔を対象として連続観測を実施し、伏流水の動態をどの程度把握することができるか、そのモニタリング手法としての有効性について検

討を行うこととした。観測期間中には小規模な出水が2回発生した。地下水の EC 値の差異はその状態や由来の推定に一般的に使用されている。本研究では主に、平常時と出水時の差異から、堤内外を含む堤防近傍域における伏流水の出水時応答特性を EC 値の変動特性から検討することとした。検証に際しては両孔の孔内水位、直近の河川水位に加え、微動チェーンアレー探査⁹⁾を実施して当該観測サイトの地盤特性を把握し、観測される EC 特性と地盤構造との相関性についても検証することで、EC の連続観測による河川堤防近傍伏流水のモニタリング手法としての有効性について考察を行うこととした。

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイトの概要

観測は、利根川水系渡良瀬川支川桐生川右岸 10.5km 付近、右岸堤防と接する群馬大学理工学部敷地内における、堤防裏法尻から堤内側に 50cm の位置に設置した 2 孔の観測孔を対象として実施した。上流側(以下、1 孔と呼ぶ)と下流側(以下、2 孔と呼ぶ)の水平距離は 30.7m であり、孔深度はそれぞれ 15.35m および 13.00m である。VP50 保孔に直径 5mm の孔を開孔率 13% となるように穿孔し、保孔管周囲を防虫網で被覆したうえで地中に挿入した。地盤と保孔管の間隙には砂利を間詰め材として充填した。孔掘削時にはベントナイト水を循環水として使用したため、観測孔設置後にエアリフトによる孔内洗浄を 1 時間継続実施し、透明な排水が得られることを確認したうえで、各種観測を実施した。

観測サイトの概況を図 - 1 に示す。ボーリング調査による想定土質と孔内水位の模式図を図 - 2 に示す。両孔共に、上層部は玉石混じり砂礫、下層部は粘土混じり砂礫である。両層間の境界深度については、1 孔では GL-4.1m、2 孔では GL-4.5m と両孔間で 40cm 程度の差異があるが、平時における孔内水位はおおよそ GL-5.0m 付近にあり、両孔共に粘土混じり砂礫層に伏流水の孔内水位が存在している。孔内水位は季節性変動を示すと共に、降雨・出水イベントに対しても応答を示す。本観測期間中においても小規模な出水が 2 度発生しており、それらを含めた、観測期間内における最深(冬季)および最大(出水時ピーク)水位について、およその水位と共に図 - 2 中に示した。当該観測孔に関する土質調査結果の粒径、透水係数等の詳細については既報⁹⁾に詳述してあるため、ここでは省略する。

(2) 観測機器および観測概要

EC 測定には、YSI Pro30(ワイエスアイ・ナノテック株式会社製：電気伝導率計)を用いた。図 - 3 に装置の概観を示す。ケーブル(30m)の先端に設置された EC センサを孔内に挿入し、センサ深度を確認したうえで、地上部モニタによって EC および水温を測定するのみという簡便な

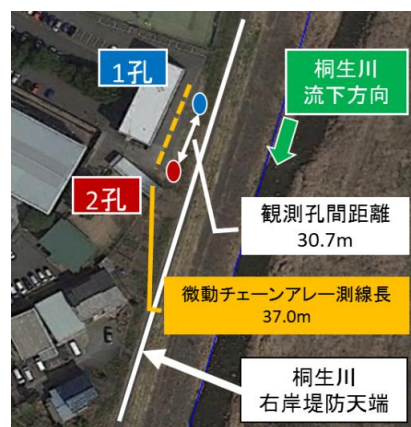


図 - 1 観測孔位置図

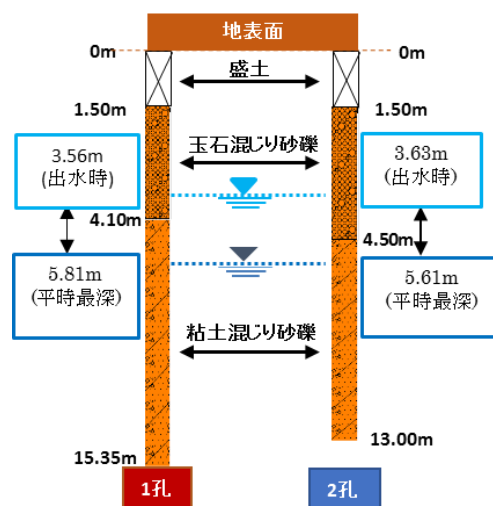


図 - 2 観測孔の想定土質と孔内水位の模式図



図 - 3 電気伝導率計(YSI Pro30)

ものである。EC 値は水温による影響を受けるが、本研究では 25℃換算された数値(観測装置によって自動換算)を検討対象として考察を行った。また、測定される EC 値は、測定深度に固定後直ちに一定値を示したが、後述する特定深度帯では EC 値が振動し、定値を示さなかった。この EC 振動帯における測定では、最長 5 分間観測を継続し、その間の最大・最小を記録し、その平均値を測定値とした。振動特性に関する詳細検討については後述する。測定はセンサ深度を順次設定して 1 深度毎に実施したため、厳密には孔内同時測定とはなっておらず、最大で 30 分程度の時間差が存在する。センサ挿入による孔内水の攪乱

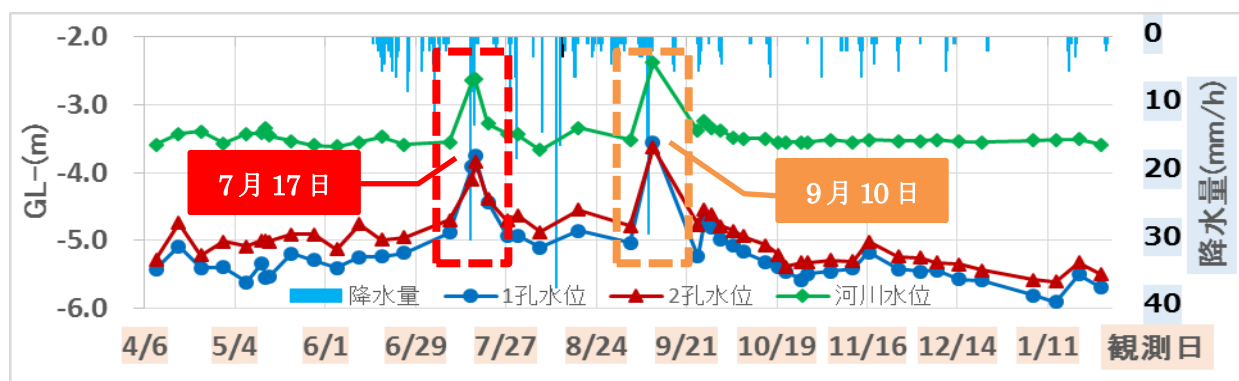


図 - 4 観測期間中の1孔・2孔水位，河川水位および降水量

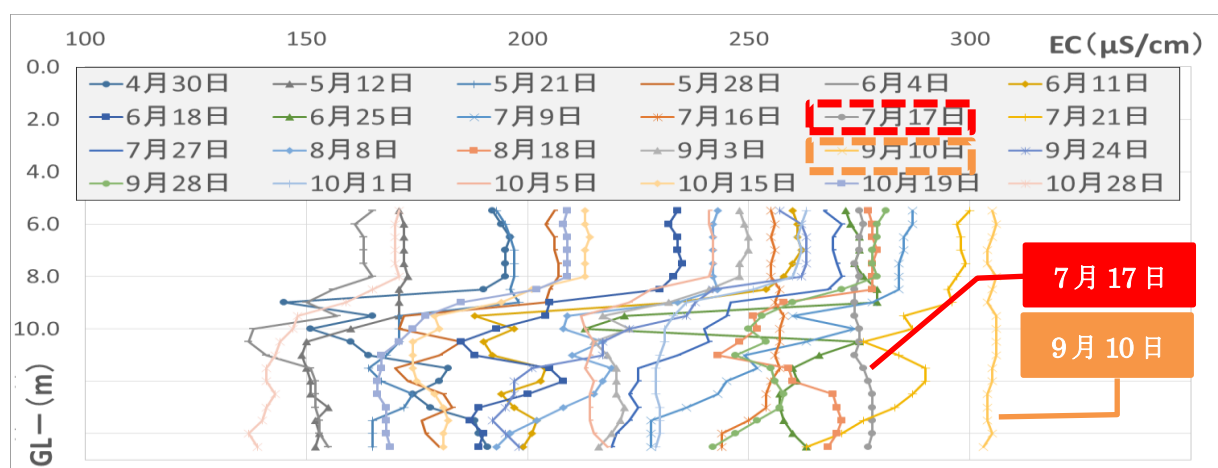


図 - 5 孔内ECの鉛直分布の測定結果(1孔)

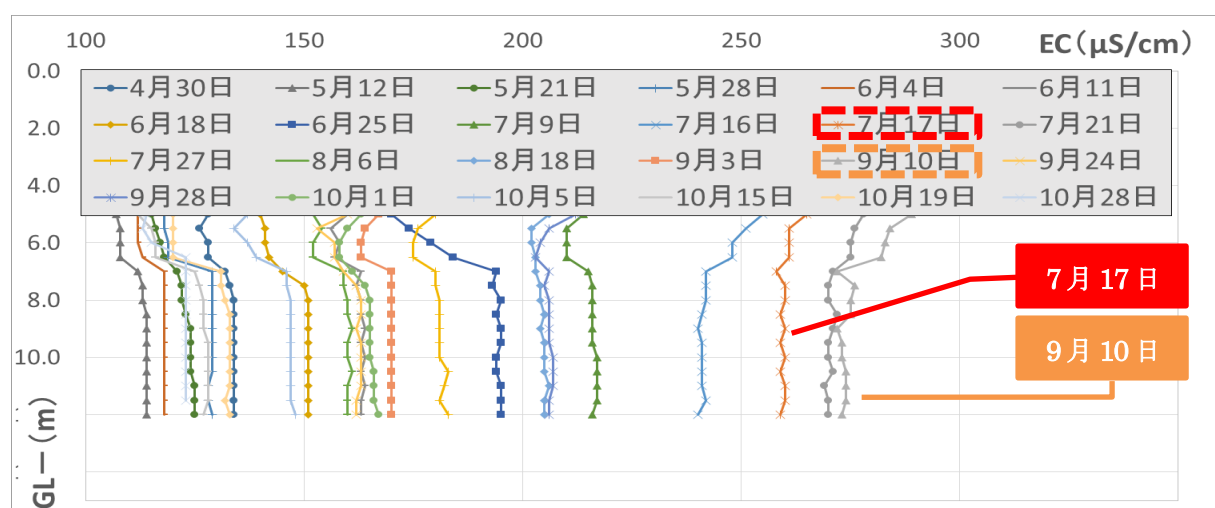


図 - 6 孔内ECの鉛直分布の測定結果(2孔)

の影響を抑えるため，浅部から深部方向に順次測定した。観測期間は2015年4月9日から2016年1月20日までである。平常時における週1回の観測に加え，降水および出水イベント発生時にはイベント毎に1回の臨時観測を行い，計50回の観測を実施した。

EC観測時には，考察の参考とするため両孔内水位および直近の桐生川水位を測定した。桐生川水位は，観測サイト直上流に存在する橋梁から測定し，1孔を通して桐生川

を横断する断面における水位として標高換算した。最終的に，両孔内水位および河川水位は，2孔近傍の基準点を地表面(GL-0.0m)として標高換算した。図-4に観測期間内に測定した両孔水位，河川水位および降水量(4月～5月は欠測)を示す。横軸が観測日，左縦軸が地表の基準点からの深度として示した観測水位，右縦軸が直近雨量観測所における時間降水量である。観測期間中，7月17日および9月10に，孔内水位で約1.5m，河川水位で約1mの

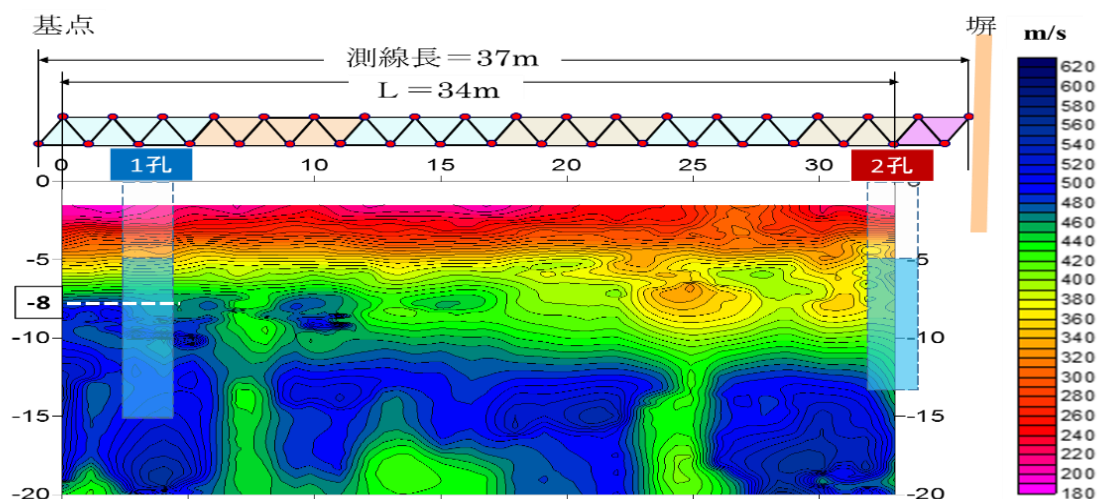


図 - 7 微動チェーンアレー探査の結果得られた S 波速度のカラーコンター図

水位上昇を伴う 2 度の小規模な出水が生じた(図 - 4 中にそれぞれ破線で囲み示した)。以降、当該イベント時における測定結果を出水時データとして考察を進める。なお、8 月 12 日において、観測期間中最大となる 37mm/h が発生しているが、降水継続時間が短かったため孔内水位、河川水位共に顕著な上昇は見られなかった。このため、当該イベントについては出水時イベントと見做していない。

3. 伏流水の孔内 EC の連続測定結果および考察

(1) 伏流水の孔内 EC の鉛直分布特性と地盤構造の相関

図 - 5 および図 - 6 に、両孔における EC 値の鉛直分布をそれぞれ示す。図の煩雑さを避けるため、ここでは顕著な水位変動が確認された期間を中心に、4 月から 10 月までのデータを抜粋して示した。縦軸が深度、横軸が測定 EC 値である。両図中には図 - 4 中で示した 2 度の出水との対応を付記した。

両図を総観的にみると、両孔共に季節性変動を示し、測定日によって約 100~300 の間で変動していることが判る。

図 - 5 を見ると、1 孔では GL-8.0m を浅の上層域では、ほぼ鉛直方向に均一であるものの、当該深度以深では急激な EC 値の低下域が存在している。

図 - 6 を見ると、2 孔においても GL-7.0m 付近で僅かながら変化が確認できるが 1 孔ほど顕著ではなく、鉛直方向にほぼ均一な EC 値の分布となっていることが確認できる。同一観測孔を対象とした連続測定を実施すると EC 値が深度毎に異なり、且つ季節性変動や異なる由来の地下水流動の影響によって経時変化を示すことは一般に知られており、本観測サイトにおいても同様の傾向が確認された。地下水の EC 値を各種検討に用いる際には、その季節性変動や鉛直方向の差異を考慮することが必要であることが判る。また、両観測孔間の距離は 30.7m であるが、この程度の間隔であっても、大きく EC 特性が異なる場合があることが示唆される。次に、測定された孔内 EC

値について、1 孔では GL-8.0m を境界として顕著な上下 2 層構造を呈し、2 孔ではほぼ全深度均一な鉛直分布となっている要因を検証するため、微動チェーンアレー探査を実施した。微動チェーンアレー探査は常時微動を入力信号として用いる微動アレー探査の一種で、複数のセンサで構成するアレーをチェーン状に連結させ、空間自己相関(SPAC)法⁹⁾を用いて高精度に地下の S 波速度構造を推定する探査法である。本研究ではセンサ間隔を 2m とし、3 個の振動計によって個々のアレーを構成した。微動チェーンアレー探査の詳細な手法については既報⁹⁾に詳しいため、ここでは省略する。微動チェーンアレー探査の実施測線は、1 孔と 2 孔を通る測線に平行に、堤内地側に 1m の位置に設置した。図 - 1 中の橙色破線で微動チェーンアレー探査の測線を示した。

図 - 7 に微動チェーンアレー探査の結果として得られた S 波速度分布を示す。図の上部に、地表面に設置したアレーの状況を示し、その下に、測定された S 波速度のカラーコンター図を示した。横軸は 1 孔の 4m 上流側を基点として下流方向にとった地表面測線長、縦軸は深度である。全測線長は 37m であったが、34m~37m の区間についてはセンサの故障で欠測している。図の右側に凡例を示した。180(m/s)~620(m/s)の速度域を、暖色ほど低速、寒色ほど高速となるよう示している。S 波速度は固い地盤中ほど高速となり、一般に地盤剛性と相関性が高いことが知られている。

図 - 7 を見ると、上層ほど S 波速度が低く、比較的疎な地盤となっており、下層ほど次第に密となり、下層全域に密地盤が広域に存在している(図では青系統色)の推定結果となった。図中に 1 孔および 2 孔の位置を、測線上に投影した位置として示した。1 孔周辺の地盤構造を見ると、やはり GL-8.0m 付近を境界として下層域に、広域に存在している密地盤が存在しており、等高線の成層状況等も含め、GL-8.0m 以浅とは地盤剛性が異なっている可能性が高いことが見て取れる。一方、2 孔周辺の地盤構造に注

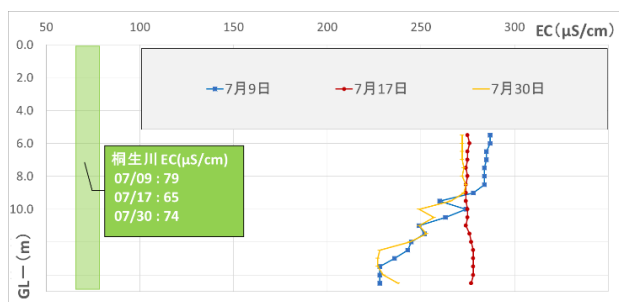


図 - 8(a) 孔内 EC の出水時応答 (1 孔 : 7 月出水)

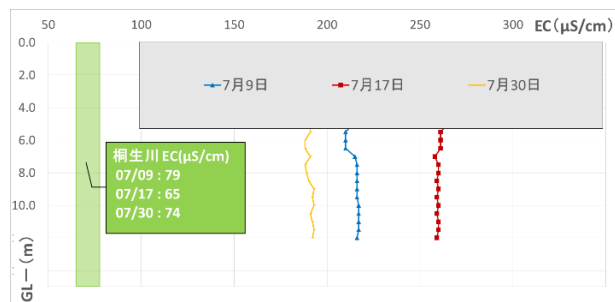


図 - 8(b) 孔内 EC の出水時応答 (2 孔 : 7 月出水)

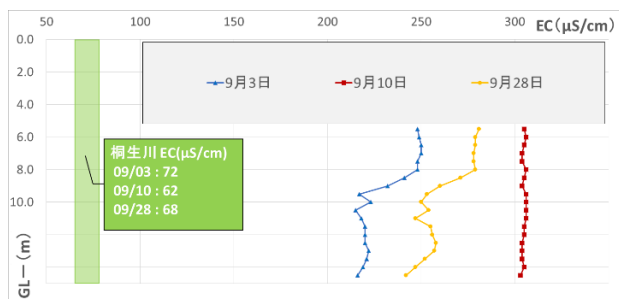


図 - 8(c) 孔内 EC の出水時応答 (1 孔 : 9 月出水)

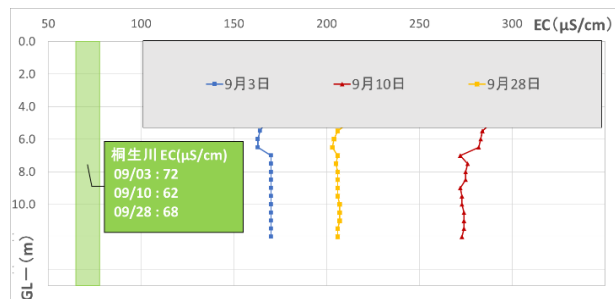


図 - 8(d) 孔内 EC の出水時応答 (2 孔 : 9 月出水)

目すると、全深度に亘って比較的 S 波速度の低い領域が存在しており、1 孔の GL-8.0m 以深に存在していた密地盤が存在していない。これらより図 - 5 および図 - 6 から確認された、1 孔にみられる GL-8.0m を境界とした EC の鉛直分布特性が 2 孔では確認されず全深度ほぼ均一となっており、それが、地盤特性と高い相関を示していることが確認できた。

(2) 伏流水の孔内 EC の鉛直分布特性の出水時応答

図 - 8(a) ~ (d) に、7 月および 9 月の出水に注目し、両孔における出水前後を含めた測定結果を抽出した図を示す。軸設定は図 - 5 および図 - 6 と同様である。図 - 8(a) ~ (d) の全図共に、出水前を青、出水時を赤、出水後を黄色として統一表記した。また、各図中には近傍の桐生川における EC の測定値も示した。河川 EC については深度を考慮しておらず、流路の中央付近、水面から 50cm 程の深度での測定値である。図中緑色の値域および凡例数値として示したが、河川 EC 値は出水時には僅かに低下する傾向が見て取れるものの、およそ 60~80 程度の値となっており、平常時および出水時共に、孔内において確認される伏流水の EC 値よりも顕著に低い数値となっている。

図 - 8(a) を見ると、1 孔における EC 値が出水に対して明瞭な応答を示していることが見て取れる。出水前(青線)においては、前述した GL-8.0m を境として、上層では鉛直方向にほぼ均一に、下層では EC 値が顕著に低くなるという明瞭な 2 層分離状態を呈している。これが出水時(赤線)の EC 分布では全深度でほぼ均一な分布形状となり、出水イベント終了後(黄線)には、出水前と同様の 2 層分離状態に復元している。図 - 8(b) は同じ 7 月出水に対する

2 孔の EC 分布である。2 孔では出水前後および出水時共に全深度ほぼ均一な EC 値であり、鉛直分布形状の変化としては出水時応答を示していない。また定量的な特徴に注目すると、出水時では EC 値が上昇する傾向が両孔共に確認できる。河川 EC 値は孔内 EC 値に比して低いいため、出水時に直近河川側から堤内方向への流動が顕著となっている場合、一般的な知見としては孔内 EC 値は低下すると考えられる。よって当該サイトでは河川側から堤内方向への流動が顕著となっている状態ではないことがうかがい知れる。図 - 4 に、河川水位および両孔内水位を示しているが、河川水位の方が常に 1.5m~2.0m 程度上回っている。伏流水の流動方向を直近河川堤防の横断方向に限定して検討すると、水頭の高い河川側から堤内方向への伏流場と判断される可能性があるが、EC の変動特性を考慮すると、直近堤防の横断方向における水頭差とは異なる主動的な動水勾配が別途存在する可能性が示唆される。この両孔における出水時応答の諸特性は、図 - 8(c), (d) に示した 9 月出水時においても確認でき、当該サイトにおける EC 値の出水時応答特性であると考えられることができる。

(3) EC 振動と出水時応答

1 孔の 9 月出水時前後には、いまひとつ明瞭な出水時応答が測定できた。1 孔の GL-8.5m から 11.0m の区間において EC 値が振動する現象が確認できた。通常は EC センサを孔内に挿入すると EC 値は直ちに一定値を示すが、EC 振動が生じている深度では EC 値が定まらない。そこで、最大 5 分間測定を継続し、最大・最小値を測定し、その両者の差の半値を EC 振動の振幅値として測定した。

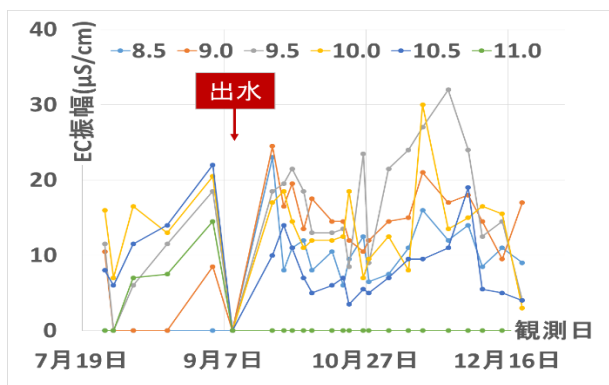


図 - 9 EC 振動の振幅の経時変化

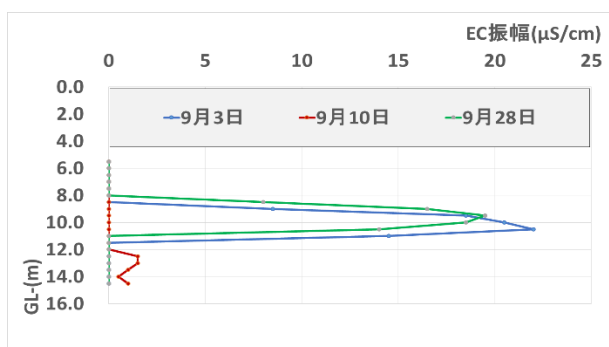


図 - 10 EC 振動の振幅値の出水時応答

EC 振動は観測開始初期から確認されていたが測定を実施したのは7/27以降のみである。

図 - 9 に1孔の当該区間において測定されたEC振動の振幅の経時変化を示す。横軸が観測日、縦軸がEC振動の振幅、図上方の凡例が深度をそれぞれ示している。図を見ると、出水前後においては平均15程度、最大で32 μ S/cmのEC振動の振幅が測定されているが、出水時である9/10のみ全深度でEC振動が消失している。また、GL-8.5mから9.5m区間に注目すると、出水前においては振動が一時的に消失している観測日があるが、出水後にはEC振動が常態化している。一方、GL-11.0mに注目すると、出水前には生じていたEC振動が、出水後には消失し、その後も振動は復元していない。これらは、出水イベントによって観測孔周辺における伏流水の流動特性に何らかの変化が生じたことを示唆しているものと考えられる。

図 - 10 は、9月出水の前後のみに注目して抽出したEC振動の振幅の鉛直分布である。縦軸が深度、横軸がEC振動の振幅である。平常時においては顕著であるEC振動が出水時には消失し、出水後にはほぼ同様の分布状況に復元している。出水時データをみると、逆に平常時においては振動していなかったGL-13m付近に微弱な振動が生じ、出水後には再び当該EC振動は消失している。この1孔の8.5m以深のみに見られるEC振動は図 - 7 において確認された地盤構造の不連続深度であるGL-8mの直下層部に位置しており、当該区間において由来の異なる伏流水が流入し、出水時にはその流入が増大することで攪拌

による均質化が生じEC振動が消失したと考えられる。このようなEC振動と出水に伴う振動の消失は報告例が無く、そのメカニズム解明も含め、今後の詳細な検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究によって得られた主要な成果を以下に示す。

- 1) ECの鉛直分布構造は30m離れた2孔間で全く異なる特性を示し、高い局所性を示した。1孔におけるECの上下2層構造は、微動チェーンアレー探査の結果として得られた地盤構造と高い相関性を示した。
- 2) 出水時において、平時の1孔で確認された明瞭なECの上下2層構造が消失して全深度一定となり、出水後に再び上下2層構造が復元するという顕著な出水時応答を示すことが確認できた。
- 3) 特定の深度において、伏流水の局所的な流動を示唆するEC振動領域が存在することが確認できた。EC振動は平時において顕著であり、出水時において消失する特性を有していることが明らかとなった。
- 4) ECの鉛直分布を連続して測定するのみの簡便な観測で、地盤特性や伏流水の流動および出水時応答等を検出でき、ECの鉛直分布測定の伏流水モニタリング手法としての有用性を確認することができた。

謝辞：本研究を推進するにあたり、公益財団法人河川財団の河川整備基金による補助を受けた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法，古今書院，1996。
- 2) 服部敦，前田健一：河川堤防の効率的補強に関する技術的課題とその取り組みの方向性、河川技術論文集，第21巻，pp.367-372，2015。
- 3) 松本健作，竹内篤雄，宮崎基浩，原澤剛史，野中航太：大芦川流域を対象とした地下水および河川伏流水の混在場の実態調査，河川技術論文集，第19巻，pp.531-536，2013。
- 4) 松本健作，宮崎基浩，野中航太，大友悠大：河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察，河川技術論文集，第21巻，pp.389-394，2014。
- 5) 井岡聖一郎，酒井利彰，五十嵐敏文，石島洋二：揚水を伴わない地下水の原位置物理化学パラメータ測定時における電気伝導度の留意点，地下水学会誌，第52巻第2号，pp.195-204，2010。
- 6) Okada, H.: Theory of efficient array observations of micro tremors with special reference to the SPAC method, Butsuri-Tansa, Vol. 59, 73-85, 2006。

(2016. 4. 4 受付)