# 高頻度・高密度観測による堤防近傍伏流水の 出水時応答に関する考察

# A STUDY ON RESPONSE OF THE UNDERFLOW WATER DURING THE FLOOD USING FREQUENT AND HIGH-DENSITY OBSERVATION ADJACENT THE RIVER LEVEE

松本健作<sup>1</sup>·小野寺光二<sup>2</sup>·南雲洋平<sup>2</sup>·堀込拓野<sup>3</sup>·小堀圭祐<sup>3</sup>

Kensaku MATSUMOTO, Koji ONODERA, Yohei NAGUMO, Takuya HORIGOME and Keisuke KOBORI

<sup>1</sup>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)
<sup>2</sup>学生会員 群馬大学大学院(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
<sup>3</sup>非会員 群馬大学(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Frequent and High-density field observations of the underflow water adjacent to the river levee were performed by using a flow visualization system which was developed in this study. Results shows that the direction and the velocity of the underflow water adjacent to the river levee of Kiryu River had the space-temporal variation. The flow direction and velocity during the flood also showed remarkable variations. Comparison of the direction and velocity of the underflow water between before and after the flood showed that the characteristics of the underflow water changed. It indicated that the ground conditions around the borehole changed by the flood history.

Key Words: underflow water, response characteristics during the flood, frequent and high-density observation

# 1. はじめに

河川近傍における伏流水は,堤内外の水頭差に加え,出 水等による河川水位の変動の影響を受けるため、複雑な 挙動を示すことが知られており、その動態については不 明な点を多く残している.伏流水動態の解明を困難なも のとしている要因の1つが,観測に要するコストが高く, 高頻度・高密度での観測を実施することが現実的に困難 であるという点が挙げられる.

著者らは数年前より,河川堤防近傍における伏流水の 動態を,地下水観測孔を用いた種々のモニタリングによ って把握する試みを進め,河川堤防近傍の伏流水が,平常 時においても,従来の一般的な認識以上に時空間的に大 きく変動している可能性があることを示してきた<sup>1)</sup>.しか しながら,伏流水の流向・流速という,動態解明にとって 重要な物理量の測定を高頻度・高密度に測定することが コスト面,労力面から現実的には困難であることから,依 然として詳細な動態解明には至っていない.

そこで本研究では、流速を、対象観測孔で生じている高 速域に限定し、且つオーダー精度の測定に留める一方で、 流向については詳細な測定を実施できる、高頻度・高密度 での実施が可能な観測手法を構築することとした.また その観測手法による高頻度・高密度観測を連続して実施 し、観測期間中に発生した出水を対象として河川堤防近 傍における伏流水の出水時応答特性の検討を行った.

#### 2. 観測機器の概要

#### (1) 既往観測機器の適用性に関する考察

はじめに、本研究で観測対象とした観測孔において、既 往の地下水流向・流速測定システムを用いて測定した結 果を示す.測定には実務で一般的に使用されている単孔 式加熱型流向・流速計<sup>20</sup>(以下、FDV と呼ぶ)を用いた.観 測孔は桐生川 10km 右岸の堤防裏法尻至近に設置した上 流孔(深度 15 m)および下流孔(深度 13 m)の2 つの観測孔 である.両孔の水平距離は 30 m 離れており、いずれも GL-4m 付近を境とし、その上層が玉石混じり砂礫、下層 が粘土混じり砂礫である.孔の諸元および各土質パラメ ータについては既報<sup>1</sup>)に詳述したため、紙面制約からここ では省略する.

FDV による地下水流向・流速の測定原理の概要を以下 に示す.図-1 左図に示すように、中央部に観測孔内の水 温を昇温させるためのヒータを有した円筒形センサ(図 -1 右図上段)を観測孔の注目深度に固定する.地上部制御 により,ヒータに一定時間通電し,孔内水温を昇温させ, その水温をヒータ周囲に設置したサーミスタ温度計(図 -1 中では16機のサーミスタ温度計が示されているが,本 研究では内側の8機のサーミスタ温度計のみを使用)で測 定する.孔内に地下水流動が存在しない場合には,図-1 右の下図の左のように,同心円状の等温線分布を示すこ ととなるが,地下水流動が存在する場合には,図-1下図 の右のように,その冷却効果により流動方向を主とした 水温低下が生じることにより,水温分布から流向を,また その水温値から流速を測定することが可能となる.

図-2は、本研究で観測対象とした上流孔におけるFDV による測定結果を、左図に初期水温からの温度差、右図に 流速についてそれぞれ示したレーダーチャート図である。 図の上方に北をとり、センサ中心から周囲 8 方向に水温 および流速を示している.中心部にゼロをとり、外周側ほ どその数値が高くなることを意味する(図では最外周で 6°C).水温(左図)を見ると、ヒータによる昇温が全方位に 亘って1度強に留まっており、全体的に高速な地下水流 動が存在することが見て取れる.僅かに南東方向の水温 が相対的に低く分布もやや扁平化している.この昇温状 態から流速を換算(換算方法は後述)すると右図のように なり 0.5 cm/s から最大で南東方向に0.7 cm/s という、地 下水としては高速な流動が生じていることが確認できる.

図-3は、図-2と同様の測定結果を、同じく本研究で 観測対象とした下流孔において実施した測定結果である. ただし、数値範囲は水温については0.6度まで、流速につ いては1.4 cm/s までと数値範囲が図-2と異なっている. 水温(左図)をみると、昇温が0.1度未満(図中央付近の赤い 領域)に存在しており、全く昇温できていないことが確認 できる.これは流速が高速過ぎるため、ヒータによる昇温 効果が得られていない状況となっていることを意味して いる. 流速(右図)は1.4 cm/s という換算値を示している.

ここで、図-4に、昇温値から流速を算出するための実 験により求められた回帰式<sup>30</sup>を示す.横軸が、ヒータ昇温 された結果生じる初期水温からの温度差、縦軸が流速で ある.図-3で示した下流孔における結果についてみると、 図-4の横軸に赤破線で示した位置から回帰式によって 一応換算自体はできているものの、適用上限における結 果となっていることから、特に下流孔の測定結果につい ては有効値であるか検証を要する状況となっていること が確認できる.しかしながら、既存の観測手法の多くは、 1.E+01 cm/s という高速域を測定範囲としておらず、適用 が難しいことから、本研究では高速域に限定して簡易に 流向・流速を測定できるシステムを構築することとした.



図 - 1 FDV の測定概要と流向・流速の測定原理<sup>2)</sup>







図-3 FDV による下流孔の流向・流速の測定結果
(左:孔内昇温分布,右:孔内流速分布)



## (2) 指針目視型簡易流向・流速測定システムの概要

前節に示したように、本研究で観測対象とした観測孔 における伏流水の流速は 1.E+00~1.E+01 cm/s 程である と想定されるため、通常より高速域に適用できるシステ ムを構築する必要がある.一般に用いられている比抵抗 や熱をトレーサとする手法は、高速域では撹乱が大きく なり、特に流向の判定精度が低下する可能性が高い.また、 既往研究<sup>1</sup>により、当該サイトにおける伏流水の流向・流 速が時空間的に大きく変動する可能性が高いと考えられ ることから、その動態の把握には高頻度且つ高密度に観 測を実施でき、簡便且つ安価であることも重要な必要要 件と考えた.

そこで本研究では、測定原理を簡便化するために、孔内の流況に応じて向きを変える指針を録画し、その画像確認から、流向については一般的な地下水観測システム同様に16方位精度で判定し、流速については当該サイトにおいて確認されている1.E+00~1.E+01 cm/sの範囲に限定してオーダー精度で判定する仕様とした.また、孔内における上下方向流動の有無についても同時に判定できる仕様とした.本研究で構築した指針目視型簡易流向・流速システムの仕様を表-1に示す.

以下に測定原理を示す. 図-5は,指針目視型簡易流向・ 流速測定システムの流向判定および水平流速算出原理に 関する模式図である. 左図に示すような外観のセンサ部 を孔内に挿入し,流れに応じてその流下方向を指し示す 指針部を,その上部に取り付けた水中カメラによって録 画する.指針部の下部には方位磁針が設置されており,録 画画像の背景に方位情報を重ねて写り込ませることで, 指針の指し示す方位を判定することができる.

次に,水平流速の算定方法を以下に示す.指針部は,本 研究で検討対象とした 1.E+00~1.E+01 cm/s の範囲の高 速流動場において、常時左右に揺動している。この揺動幅 は流速の増大に伴って増大することから、その揺動幅か ら流速を算定することとした. 流速と指針揺動幅の相関 を図-6に示す室内実験によって検証した.実験は、横幅 1m,奥行き 50cm,高さ 50cm のアクリル製水槽内に 十層に見立てたポリウレタン製スポンジを設置し、その 中央部に、実際の観測孔と同一の直径 5 cm の保孔管を 設置した状況で実施した.水槽両端部の水頭差によって 流速を生じさせ、電磁流速計を用いて孔内流速を確認し ながら流速を調整したうえで指針の最大揺動幅を測定し た. 各流速における最大揺動幅は, 指針部の形状を試行錯 誤的に修正しながら、区切りの良い数値に調整した. 結果 は、図-5右図および下図に示す通り、1.E+00 cm/sで10°、 1.E+01 cm/s で 30° となった. 定量的な評価はこのオーダ ー範囲に限定した両流速のみであり、実際の観測に際し ては、この両閾値を用いて3段階で流速を評価すること とした.一般的な微速浸透流では指針揺動は生じない可 能性が高く、本手法でも1.E-01 cm/s では指針の揺動は

	流速システムの仕様	・流速シ	(前)	指針目視型簡易	表 - 1	쿶
--	-----------	------	-----	---------	-------	---

	• HI · · · · · · ==		
	測定項目	方式	精度
流向	水平流向	方位計&指	16 方位
		針目視	周辺地盤磁性確認
	鉛直流向	指針目視	上昇・水平・下降
流速	水平流速	指針目視	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>1</sup> (cm/s)範囲
			限定オーダー精度



 図-5 指針目視型簡易流向・流速測定システムにおける流向判定および水平流速算出原理の模式図
(左図:センサ概観、右図:指針振動幅と流速の対応、 下図:測定対象とする地下水流速の範囲)



生じないため、あくまで1.E-01~1.E+01 cm/s の流速帯域 に限定したオーダー精度の孔内水平流速測定である.

図-7に、孔内鉛直流向判定の原理を示す. 簡便に孔内 の鉛直流の状況を確認することを目的として、図に示す ように、水平流速算定に使用する指針部を静水状態では 支柱中央に設置された状態とし、上下流に伴って支柱に 沿って上下動する状況から孔内の上昇・下降流の存在を 判定する.前述の水平流向および水平流速算定用と同一の指針挙動から判定する仕様であることによって,水平 流向および水平流速に加え,孔内の鉛直流向についても 同時に観測することが可能となる.なお,鉛直流について は上下方向の流向を判定するのみであり,定量的な鉛直 流速については算出していない.

### (3) 孔周辺地盤の磁性誤差の検証

本研究で構築した水平流向測定システムでは, 孔内の 方位磁針を直接目視する原理であるため, 方位磁針に誤 差が含まれると成立しない.本システム以外の単孔式流 向システムの多くも,目視型ではない物も含め,同様の孔 内方位計の情報を元に水平流向判定を行う物が多種ある が,一般的に,地盤内部には磁性に影響を及ぼす自然また は人工の埋設物が存在している可能性があるため,厳密 には孔周辺地盤によって生じる磁性に及ぼす影響を検証 する必要があると考えられるが,そのような検討が報告 された例はほとんどない.

そこで本研究では、孔周辺地盤の及ぼす磁性の影響に ついて検証することとした.図-8に、磁性誤差検証実験 の模式図を示す. 伸長可能なカーボン製ロットの先端に 方位磁針を設置し、その状態を水中カメラで録画する、地 上において真北を確認し、ロット部材の引き出し時に、部 材間で真北の位置を合わせ固定しながら 50cm 毎の測定 深度に固定し、方位磁針の真北からの角度誤差を測定し た. 結果を図 - 9 に示す. 左図が上流孔, 右図が下流孔に おける真北からの角度誤差の鉛直分布である. 横軸が真 北をゼロとして反時計回り方向を正にとった角度誤差。 縦軸が地表面をゼロとした深度である.両孔で孔深度が 異なるため、データの深度方向の存在域が異なっている. なお、本検証観測は複数回実施し、同様の結果が得られて いることを確認したうえで考察に用いた。両図を全体的 に見ると、±10°程度の角度誤差が全体的に存在してい ることがわかる.本研究における流向精度は16方位であ るため、各判定方位の角度幅は 22.5°である. これはそ の判定流向を中心として 11.25°の範囲が当該流向と判 定されていることを意味している.図-9中に11.25°の 値域を緑破線で示した.上流孔の GL-7 m において 11.25°を超える角度誤差が生じているため、当該深度に おいては流向を反時計回りに1 方位ほど修正する必要が ある. それ以外の深度においては、16 方位流向判定の誤 差範囲に留まる角度誤差であったことから、以下の考察 で補正は実施していない.しかしながら本検証は、孔内方 位計が磁性誤差を有しているという貴重な事例であり, 単孔式流向判定において孔内方位計を根拠とする判定を 実施する場合には、考察に先立って、深度毎の磁性による 角度誤差を検証する必要があることを示唆している. な お、当該サイトにおいて磁性誤差が生じる具体的な要因 については判明しておらず、今後の課題とした.



図-8 孔周辺地盤の磁性誤差検証観測の模式図



図-9 孔周辺地盤の磁性誤差の鉛直分布 (左図:上流孔,右図:下流孔)



図-10 孔内鉛直流向の鉛直分布(上流孔)

	11/22	11/29	12/6	12/13	12/20	1/10		
-5.5	Ţ	Ţ	Ţ	Ļ	Ļ			
-6.0	Ļ	Ţ	1 I	Ţ	Ţ	Ţ		
-6.5	$\rightarrow$	Ţ	1 I	Ļ	Ļ	Ţ		
-7.0	$\rightarrow$	$\rightarrow$	1 I	Ţ	Ļ	$\rightarrow$		
-7.5	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		
-8.0	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		
-8.5	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		
-9.0	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		
-9.5	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		
-10.0	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	1	$\rightarrow$		
-10.5	1	Î	1	1	1	1		
-11.0	1	1	1	1	1	1		
図 - 11 孔内鉛直流向の鉛直分布(下流孔)								

### 3. 堤防近傍伏流水の出水時応答に関する考察

#### (1) 観測結果の概要

前述のように、本観測では、鉛直流向、水平流向および 水平流速の3項目について測定を実施している.始めに、 鉛直流向について結果を示しながら考察する. 図 - 10 お よび図-11は、それぞれ上流孔および下流孔における鉛 直流向の測定結果のうち、平時における観測期間中の一 部(11/22~1/10)について抜粋したものである。両図共に、 横軸に観測日を,縦軸に深度をとってあり,欄内の矢印が 当該深度における鉛直流向を示している. 矢印は3種で あり,上向き矢印が上昇流場,下向き矢印が下降流場およ び横向き矢印が上昇・下降流を伴わない水平流場である ことをそれぞれ表している. 図を見ると, 両孔共に孔中層 部において水平流動帯が存在していることが見て取れる. この両孔における水平流動帯をそれぞれ橙色および水色 で示した.水平流動帯の上層部を見ると、全ての深度にお いて下降流場となっており,また水平流動帯の下層部を 見ると、こちらも全ての深度で上昇流場となっているこ とがわかる.これらの結果より、当該観測孔はいずれも、 中層部に水平流動帯を有し、そこに上層部からの下降流 および下層部からの上昇流が流れ込んでいる大きな3層 構造となっていることが確認できた. よって以下の水平 流向および水平流速については、両孔の水平流動帯を対 象として考察を行うこととする.

図 - 12 に、それぞれ上流孔および下流孔における水平 流動帯を対象とした流速および水平流向の測定結果の16 方位レーダーチャートを示す. 上図が上流孔, 下図が下流 孔のそれぞれ測定結果である. 左図が平常時, 中央図が出 水時および右図が出水後の平常時における測定結果であ る. ここでは出水前の平常時測定結果である左図につい て考察することとし、中央図および右図については次節 で後述する.図中の3つの同心円中心を流速ゼロとし、 最内円が 1.E+00 cm /s 以下, 最外円が 1.E+01 cm/s 以上 である. 流速に対応する円周上の水平流向に該当する位 置に丸印を付してある. 各流向について観測日および深 度方向に累積してあり、出現頻度を透過度 10%の丸印の 濃淡で表し、その定量的な出現数を同心円最外周の該当 方位毎に数字で示した. 観測期間内で唯一発生した小規 模な出水(後述)の前までの, 2017年4月14日~10/18に おける平常時における測定結果である. 図の右下に示し た緑破線は、観測孔南東方向 30m の位置を流下する桐生 川の流下方向であり、矢印に示す通り北東から南西方向 に流下している. 図を見ると, 上流孔では出現数から北西 (25)から北北東(24)方向への流れが卓越していることが見 て取れ,河川の流下方向と逆行し,僅かに河川側から堤内 地側へと伏流する漏水浸透場となっていることがわかる. 流速は最内円の1.E+00 cm/s および1.E+01 cm/s を超えな

い中間円上のプロットに留まっていることが確認できる. 一方,下図の下流孔における測定結果を見ると,出現数から南東(27)方向への流れが卓越しており,上流孔とは異なり,河川流下方向に直行し堤内地側から河川側へと伏流する涵養浸透場となっている. 流速は中間円から最外円に亘ってプロットが見られ,1.E+01 cm/s 以上の高速な伏流水の流動場となっている. 上流孔より高速な流動状況がみてとれ,前述のFDV による測定結果(図-3)との整合性も確認できる. 両孔は 30 m 程の距離を隔てて設置されているが,大きく流向・流速特性が異なっていることが確認できる.

#### (2) 堤防近傍伏流水の出水時応答およびその履歴効果

次に、出水時応答および出水後の伏流水の状況につい て考察する.図-12の中央図および右図は、2017年10月 23日~26日にかけて発生した台風21号の通過時および その後の平常時における測定結果である.出水時には直 近桐生川の水位で、最大1.5mの水位上昇がみられた. また出水後の測定は、出水前の平常時同様の孔内水位に 復元したことを確認したうえで実施した.

上流孔(上図)をみると、出水時においても、平常時同様、 北向きの伏流場となっていることがわかるが、平常時に おいては北西から北北東にかけて比較的流向変動がみら れていたのに対し、出水時においては北向き流動に集中 している様子が見て取れる.流速に注目すると、出水時に は、最外円上のプロットが発生しており、平常時に比べ、 より高速な伏流水が流動している状況となっている.

一方,下流孔の出水時における測定結果(下図,中央図) をみると,最大出現頻度としては北北東(9)となっている 点や,出現頻度として顕著な集中が確認できない等の点 において,平常時とは流向・流速特性が変化している.

次に、両孔の出水後における測定結果(右図)について考察する.まず上流孔(上図)を見ると、流向については平常時および出水時と同様、北向き流動が卓越している.しかし、北方向の出現数34に対して、周辺方向への流動が相対的に少なく、出水時応答としてみられた流向の集中が出水後も継続している.流速についてみると、出水前における中間円上のプロットから、出水時には最外円上のプロットへと流速の増大が確認できていたところ、出水後にはほとんどが最内円上のプロットに留まっており、出水を経験することで上流孔周辺の伏流水の流速が低下したことを示唆する結果が得られた.

一方,下流孔の出水後における測定結果を見ると,出水 時応答として北北東に流向変化していた状況が,出水後 の平常状態においても継続していることが確認できる. 出現頻度からみても,出水時以上に北北東(16)から北(15) 方向への出現頻度が相対的に突出しており,出水を経験 することで下流孔周辺の伏流水の流向が大きく変化した ことを示唆する結果が得られた.



図 - 12 流向・流速測定結果(上図:上流孔,下図:下流孔) (上流孔・下流孔共に,左図:平常時,中央図:出水時,右図:出水後)

# 4. **まとめ**

本研究では、週1回の測定を年間通じて高頻度に、且 つ2つの観測孔を対象として深度50cm毎に高密度で観 測を実施することで、時空間的に疎なデータからは確認 し難い、種々の伏流水の時空間変動特性を確認すること ができた.本研究によって得られた主要な成果を以下に 示す.

- 地下水観測孔内の鉛直流向,水平流向および水平流速 を目視により簡易に測定できる観測システムを構築 することで,時空間的に大きく変動する河川堤防周 辺における伏流水を高頻度・高密度に測定すること ができた.
- 2) 出水時において、河川堤防近傍における伏流水が流向・流速を変化させる出水時応答が実測でき、動態解明に資する有益な知見を得ることができたことに加え、出水前後における比較から、出水を経験することで、観測孔周辺の地盤特性が変化したことを示唆する、伏流水の流向・流速の変化を実測することができた。出水履歴による場の変化が現地で実測された例は前例がなく、貴重な知見を得ることができた。

謝辞:本研究の推進にあたり,科学研究費補助金(挑戦 的萌芽研究:16K12852)および公益財団法人河川財団の河 川整備基金助成事業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

- 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.
- 竹内篤雄:温度測定による流動地下水調査法,古今書院, 1996.

(2018.4.3受付)