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 FIELD INVESTIGATION OF GROUNDWATER AND RIVERBED WATER ON BASIN OF OASHI RIVER

松本健作¹·竹内篤雄²·宮崎基浩³·原澤剛史⁴·野中航太⁵

Kensaku MATSUMOTO, Atsuo TAKEUCHI, Motohiro MIYAZAKI, Tsuyoshi HARASAWA and Kota NONAKA

¹正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 工学研究科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
 ²非会員 理学博士 自然地下水研究所所長(〒520-0014 滋賀県大津柳川2-1-11)
 ³非会員 芙蓉地質株式会社(〒520-0014 栃木県宇都宮市御幸ヶ原町57-25)
 ⁴非会員 群馬大学大学院(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
 ⁵非会員 群馬大学工学部(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

The influence of the river improvement on water level variation of wells located around the Oashi River was researched. Multipoint Temperature Logging and measurement of Flowing Direction and Velocity of groundwater were performed. Results of Multipoint Temperature Logging showed flowing groundwater with relatively high seepage velocity exists on upper area of the well. Results of measurement of Flowing Direction and Velocity of groundwater showed groundwater has various vertical distributions. These results showed that examination of the influence of the river improvement on groundwater condition, research in various depth in the well is quite effective.

Key Words: groundwater, riverbed water, Multipoint Temperature Logging, Flowing Direction and Velocity of groundwater

1. はじめに

大芦川は栃木県鹿沼市を流れる一級河川で,利根川水 系渡良瀬川支川思川の支川である.現在,そのほぼ全区 間を対象として,堰と護岸の改修および河床の掘り下げ による河川改修工事が継続的に実施されている.大芦川 は沖積低地に発達した河岸段丘上を足尾山地に挟まれる ように北西から南東方向へ平均河床勾配約 1/110 で流下 している.大芦川流域の概観を図-1に示す.当該河川改 修区間の周辺域では河川改修工事の実施とほぼ同時期に 井戸の水位低下が生じる事例が散見されており,河川改 修工事の影響が懸念されている.河川工事に伴い周辺井 戸に取水障害が生じる事例は一般的に知られており,そ の水位低下量と影響範囲の関係については,例えば Sichart¹⁰の式(1)などが検討に用いられている.

 $R = CS\sqrt{K}$

ここで、R は影響範囲(m)、C は無次元パラメータで通常 は3,000、S は水位低下量(m)、K は透水係数(m/sec) Sichart の式により算出される影響範囲R は水位低下の起



図-1 大芦川の概況と調査エリアの位置

因(本研究の場合,河道改修工事の一環としての河床掘 削) 点からの平均的な傾向を把握する意味で実用上有用 であり,周囲の観測井における孔内水位と算出される水 位低下量を比較することでその整合性を検証しながら影

(1)

響を検討する試みが一般的である.しかし、本研究の検 討区間のように、土質が玉石混じり砂礫主体であり、河 川由来の伏流水に加え、周囲の山地からの豊富な地下水 流入があることで複数の由来が想定される場合、仮に河 川周辺の井戸においてその孔内水位に変動が生じたとし ても、それが河床掘削による伏流水の低減によるもので あると断定することは厳密には難しい.実際、周辺井戸 の水位低下量が河川工事区間からの影響範囲と相関性が 低く、平均的傾向から外れるケースも散見されている.

そこで本研究では、実際に河川改修工事が実施される 大芦川周辺に、新たに2つの観測井を設置し、その孔内 水の特性を、多点温度検層²⁰および単孔式加熱型流向・流 速計測³⁰によってその実態について調査し、工事の前後で 観測結果を比較することで、河床掘削による周辺井戸の 孔内水に及ぼす影響について検討を行うこととした.

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイトの概要

本研究における観測は大芦川中流域右岸にて実施した. 調査対象域を図-1内に「調査エリア」として示し、その 拡大図を図-2に示す.図-2に示したA孔およびB孔は、 本研究のために新設した観測孔で、大芦川右岸堤の工事 地点よりそれぞれ約30mおよび102mの距離がある. 観測 孔設置時のボーリング結果に基づく地質層序は、孔内水 位以浅の表層土はシルトおよび細砂であるが、孔内水位 以深については、A 孔では GL-1.8m~5.8m で玉石混じり砂 礫、GL-5.8m~7.8mで粘土混じり砂礫、GL-7.8~10.0mで 玉石混じり砂礫, また B 孔の土質は GL-1.4m~7.0m で玉 石混じり砂礫, GL-7.0m~1.0mで粘土混じり砂礫であった. 現場透水係数は調査エリア全域において 10⁻⁵~10⁻⁴m/s 程 度となっており、沖積砂礫層としての平均的な値となっ た. 当該調査エリアにおける地下水状態は総観的には, この孔内水位以深の沖積および洪積砂礫層に広く賦存し ていると考えられる.

(2) 多点温度検層の概要

地下水の存在状態に関する議論は多種なされているが、 直接観察することが困難であることから、未だ全容の解 明には至っていない.難透水層を下端とした滞水層が層 構造で複数存在しているという概念は一般的に認識され ているが、例えば同一土質想定がなされている層内であ っても浸透流の有無やその流向・流速が必ずしも一様で はないことが多くの現地観測によって報告されており、 平均的な土質想定区分毎に算出される透水係数に立脚し た挙動解析のみでは把握しきれない局所的且つ流動的な 地下水の存在が示唆されている.竹内²は、ボーリング孔 を利用して局所的な流動層を検出する多点温度検層を開 発し、豊富な現地観測³および室内実験⁴よってその有効



図-2 調査エリアの概況と観測井の位置

性を示している.原理・観測手法および検証結果につい ては既出であるのでここでは省略する.前述の通り,本 研究の対象エリアでは砂礫層が主体であり,明瞭な難透 水層は確認されていない.このような場合,地下水は想 定土質全域で平均的な存在状態として取り扱われること が一般的であるが,多点温度検層の結果からその詳細な 存在状態について検討を行うこととした.

(3) 単孔式加熱型流向・流速計測の概要

多点温度検層によって検出される流動層反応を元に, 明瞭な流動層反応が確認できた層に着目して、層毎の地 下水の浸透流速とその流向を、竹内によって開発された 単孔式加熱型流向・流速計³によって計測した.地下水の 流向・流速を計測するための機器はいくつか存在するが、 一般的に地下水位観測用に用いられる径50mmの保孔管を 利用して、短時間に繰り返し探査することが可能な機器 は未だ数少ない.本研究で用いた単孔式加熱型流向・流 速計は、センサ部中心に加電式ヒーターがあり、その周 囲に45度間隔で、半径10mmの円周上に8本、半径15mm の円周上に8本の計16本の高感度サーミスタ型温度計が 配されている. 中心部ヒーターの加電により昇温したセ ンサ周囲の地下水温の変化を周囲の温度計で計測する. このとき、周囲に地下水流動が無ければ周囲の水温はほ ぼ同様の昇温傾向を示す. しかし地下水流動が存在する 場合、昇温水よりも低温な地下水が流入することによっ て、流動方向の上流側に配された温度計においては周囲 と比して低温傾向を示すこととなる. この温度分布傾向 から流向を、さらに、室内実験によって得られた浸透流 速と温度上昇量との相関関係から浸透流速を算定する手 法である. 浸透流速と温度上昇量の相関については室内 実験によって詳細に検証³がなされているが、特にボーリ ング内の保孔管の開孔率次第でその傾向が大きく異なる ことが確認されており、同種の計測を実施するに際して は保孔管の開孔率を十分に考慮した検討を実施すること

表-1 単孔式加熱型流向・流速計の諸元

センサ外径	40 (mm)
センサ高さ	75 (mm)
方向精度	45(度)
対象地下水流速	$10^{-3} \sim 10^{0} (\text{cm/s})$



図-3 単孔式加熱型流向・流速計の概要

が肝要となる.表-1にセンサ諸元を、図-3にセンサの 概要とサーミスタ配置および測定原理の模式図を、図-4 に、本研究おける観測条件である開孔率13%の保孔管を使 用した場合における浸透流速と温度上昇量の相関式を示 す.

3. 現地観測結果および考察

(1) 多点温度検層結果の比較

A および B 孔における多点温度検層を大芦川の河川改 修工事の前後で実施した.第1回計測が河川工事前,第2 回計測が河川工事後の実施である.観測実施状況を表-2 に示す.A 孔における多点温度検層の結果を図-5に示す. 多点温度検層では、ボーリング孔内に約60℃の温水を注 入し、孔内をほぼ一定温度に昇温した後、その冷却状態 から流動層の位置や数を探査する物理探査である.図-5 はボーリング孔内の温度の鉛直分布であり、縦軸が地表 面を原点とした深度 GL-(m)、横軸が温度(℃)である.孔 内温度の計測は、まず温水注入前の自然状態を計測し、 昇温後0分後から7分後までを1分間隔で計測する.そ の後は5分間隔で10分後から30分後まで計測して計測 を終了する.観測時の孔内水位はGL-2.6mであったため、

表-2 多点温度検層の実施状況

	実施日	備考
第1回	2012/11/11	河川工事前
第2回	2013/2/26	河川工事後



図-4 浸透流速と温度低下量の相関に関する実験結果 (保孔管開孔率13%)

孔内水位以深について図示してある.自然状態における 温度の鉛直分布をみると、ほぼ鉛直方向に一定の水温状 熊であることが判る. 温水注入による昇温作業完了直後 である0分後の温度分布をみると、ほぼ35℃程度まで孔 内水温が昇温されていることが確認できるが、GL-4.8m 以浅では水温が低く、27℃程度までしか昇温していない 区間が存在している. 温水注入による孔内水温の昇温は、 孔内がほぼ一定温度に昇温されることが望ましいが、実 際の現場作業においては厳密に一定温度とならない場合 がある.理由は2通り考えられ、うち一つは作業上の困 難さによる. モニターで水温を監視しながら温水噴出ホ ースを孔内で上下させながら孔内水を昇温させるが、作 業に熟練を要する、いまひとつの原因は、その深度に地 下水流動が存在することによって、昇温作業中に温度低 下をきたしてしまうことによる. この場合, 何時間温水 注入を施しても、周囲と同程度にまで昇温することはな い. 図-6は、図-5を元に式(2)によって算出した、各 時間における温度復元速度の鉛直分布である.

```
温度復元速度 = (t 分後の温度-0 分後温度) /
0 分後からの経過時間(sec) (2)
```

図-6を見ると、GL-4.8m以浅において、温度復元速度が 速く、GL-4.2m付近において最大0.11(℃/sec)の温度復 元速度が確認できる.このGL-4.2mと、顕著な温度復元 速度が見られない深度としてGL-8.2mを選定し、両深度



図-8 温度復元速度(B孔, 工事前)



図-9 温度復元速度(A 孔, 工事後)



図-10 温度復元速度(B孔, 工事後)



図-5 孔内温度の鉛直分布(A孔,工事前)



図-6 温度復元速度(A 孔, 工事前)



図-7 温度復元速度の経時変化

における温度復元速度の経時変化を図 - 7 に示した. 横軸 が時間(分),縦軸が温度復元速度である. 昇温された孔 内水の温度は流動層が存在しなくても熱拡散効果によっ て自然状態に復元する. 図 - 5 に示した GL-8. 2m における 温度分布を見ると,ほぼ一定の割合で温度が復元してい ることが判る. これを温度復元速度の経時変化として見 ると図 - 7 に示した GL-8. 2m における約 0.01 ($^{\circ}$ C/sec)の 一定値として示されている. 一方,図 - 7 の GL-4. 2m にお ける温度復元速度を見ると,初期において高い値を示し た後に漸減しており,自然状態との温度差が減じるに伴 って温度復元速度が GL-8. 2m と同様の約 0.01 ($^{\circ}$ C/sec)に まで低下している.

GL-4.2m以浅の区間では、昇温完了後の水温がそれ以深 よりも低く、自然状態との温度差は比較的小さくなって いる.自然状態における水温との差が大きいほど温度拡 散による温度復元速度は高まるが、GL-4.2m以浅区間では、 自然状態との温度差が小さいにも関わらず温度復元速度 が速い.これは流動地下水が流入することによる冷却効 果である可能性が高い.

また A 孔は、前述のように、ボーリング調査の結果で は、GL-5.8m までは玉石混じり砂礫層と想定されている区 間である.一般に、土質想定が砂礫層であった場合、難 透水層などは存在せず、同一想定土質全域を代表する透 水係数が算定され、それに基づく地下水状態が検討され る.しかし、図-6から明らかなように、砂礫層として同 一土質想定された区間内であってもその地下水流速は鉛 直方向に様々な分布を有していることが判る.ボーリン グ調査には現場試料の採取に際しての様々な撹乱要因が 加わるため、そこから得られる物理諸量はあくまで概要 値である.総観場の平均的な検討を実施する場合には問 題無く、極めて重要な基礎情報となるが、より局所的な 現象に関しての検討を要する際には、本研究で用いた手 法に類する、何らかのより詳細な調査を追加することが 必須であると考えられる.

図-8に、B 孔における工事前の時点での多点温度検層 の結果から算出した各計測時刻における温度復元速度の 鉛直分布を示す.各軸等表記は図-7同様である.孔内水 位が GL-2.9m であったため、それ以深から計測を実施し た GL-6.7mまでの深度を対象として示してある.GL-3.8m ~4.2m 区間において、温度復元速度の高速帯が確認でき る.ただし、図-6に示したA 孔の GL-4.8m 以深のほどの 低速度とはなっておらず、ほぼ全深度で地下水流動が存 在しながらも、浅部ほどその浸透流速が速い速度分布を 有している状態となっていることが推定される.

次に、大芦川右岸、直近エリアの河川改修工事終了後に同孔にて同計測を実施した結果を示す。河床掘削は、 掘削前の平均水位が 1m で、そこから 3m の河床掘削を実施するため、工事後における河道内水位の低下量は 4m である.図-9が工事後の A 孔における多点温度検層の結果 から算出した温度復元速度である. 孔内水位は工事前から 1.68m 低下しており,別途,工事の影響の及ばない地 点で確認した季節性水位変動量である-0.25m を考慮する と,A 孔における孔内水位の低下量は 1.43m であった. Sichart の式から水位低下量を算出すると,4m の水位低下 地点から 30m 離れたA 孔における水位低下推定量は約 1.3m となり,概算値ともおよその整合性がとれているこ とが確認できる.GL-4.7m 付近を境として,それ以浅にお いて高速,以深において低速となる分布形状は,工事前 の計測結果と同様である.これらの結果から,A 孔におけ る河川工事の影響としては,孔内水位が 1.43m 低下し, その深度帯において工事前には存在していた浸透速度の 速い闊達な地下水流動がみられなくなった可能性が高い ことが確認できた.

同様に、B 孔についても工事前後の結果を比較検討する. A 孔同様に季節性変動-0.25m を差し引いたうえで水位低 下量を調べると 0.48m であった. A 孔同様に Sichart 式か ら 102m 離れた B 孔地点での水位低下概算値を求めると 0.4m となり, A 孔同様に整合性を示している. 工事後に は GL-6.5m 付近に比較的温度復元速度が速い区間が検出 されている. 深部における流動状態の変化が推定される が、現時点ではその不明であり、今後のデータの蓄積に よって検証を進める必要がある.

(2) 流向・流速計測結果の考察

河川工事後における A および B 孔の水位低下が Sichart の式による影響量算定結果と良好な整合性を示している ことは、その水位低下が河川工事の影響である可能性が 高いことを示唆している. 且つ, 多点温度検層の結果か らは、両孔の地下水構造に関し、約 GL-4.0m 付近を境と して、その特性が明瞭に異なっており、より闊達な上層 部流動層が工事後に消失していることが確認できた. そ こで次に、同一孔内の深度毎の流向および浸透流速を把 握するため、単孔式加熱型流向・流速計による計測を A 孔の複数深度において実施した. 図 - 11~13 が、A 孔に おける浅層部流動層が存在する工事前状態における, GL-3.3m, GL-7.0m および GL-9.7m の流向・流速計測の結 果である。10 秒毎の連続計測を中心ヒーターの加熱開始 から 1,200 秒後まで実施し、その計測回数を横軸に、45 度間隔で8方向に設置したサーミスタの温度(℃)を縦軸 にとってある. ほぼ定常となったサーミスタの昇温値か ら, 図-4の相関式を用いて浸透流速を算出する. 凡例の 表記は、この定常推移時のサーミスタ温度の上下関係と 対応させており, 凡例の一番下に示されている方向が最 低温度となったセンサの方向である.計測 20 回目から, 全サーミスタで加電による昇温がみられるが、GL-3.3m の結果が計測した3深度の内で最も低温で推移し、浸透 流速は 1.40×10⁻¹(cm/s)であった.GL-7.0m, GL-9.7m と 次第に高温推移(低浸透流速)となり、それぞれ、6.10×

10⁻³(cm/s)および2.60×10⁻⁵(cm/s)となった.8方向に配 したサーミスタのうち,最も低温で定常推移した方向を, その深度に存在する流動層における流向とすると, GL-3.3mとGL-7.0mのそれぞれにおいて,東および東北と, その流向が異なっていた.GL-9.0mでは浸透流速が低いこ とで冷却効果が低く,そのためヒーターによる昇温効果 が地下水流動によって相殺されず,計測終了時まで上昇 し続け定常状態に至らなかった.北が最も低温ではあっ たが,東北および東方向との差がほとんどなく,不明瞭 であった.

4. まとめ

A 孔直近の大芦川工事区間は真東に位置しており、流向・流速計測の結果として確認されたA孔、GL-3.3mにおける東からの高速浸透流は、Sichart 式の影響量評価、多点温度検層の結果も含め総合的に判断すると大芦川由来の伏流水である可能性が高い.一方で、GL-7.0mに代表される低速流動層は浅層域における高速流動層とは流向・流速共に異なる特性を示しており、且つ工事前後でその特性に顕著な変化も確認できず浅層部の大芦川伏流水とは異なる由来の地下水流動層である可能性がある.

A孔からさらに70mほど河川から遠方に存在するB孔に おいても、浅層の比較的高速な流動層と深部ほど浸透流 速が低くなるという A 孔と同様の傾向がみられたが、A 孔ほど顕著ではなく、河川からの距離が離れることで大 芦川伏流水の影響が減じていると考えられる.

本研究で検証したAおよびB孔においては、共に大芦 川からの伏流水の影響が浅部に存在し、それが河川工事 によって消失した状態である可能性が高いと考えられる.

一般に、不被圧地下水運動の取り扱いについては Dupite⁵⁰の準一様流の仮定が用いられ、任意の鉛直断面に おいて速度を均一として取り扱うことが多い.しかし、 本研究の結果から、地下水は流動層の位置、数、浸透流 速およびその流向など、時空間的に特性が大きく異なる ことが判った.本研究で対象としたような複雑な地下水 由来が想定される領域において詳細な検討を実施する際 は、深度毎の詳細な調査をすることが重要であることを 示すことができた.

参考文献

- 1) 新編土と基礎の設計計算演習,地盤工学会, p. 316, 2000.
- 2) 竹内篤雄・中山健二・渡辺知恵子:温度を測って地下水を 診断する,古今書院,2001.
- 3) 竹内篤雄:流動地下水調査法,古今書院,1996.
- 4) 竹内篤雄・松本健作・原澤剛史:温度復元率を用いた流動 地下水特性の検証と堤防基盤漏水調査への適用,水工学論 文集,第56巻,pp.571-576,2012.
- 5) 地下水ハンドブック,建設産業調査会, pp. 934-935, 1980.



図-11 流向・流速計計測結果(A 孔, GL-3.3m)





(2013.4.4 受付)