

1m 深地温探査を用いた渡良瀬川基盤漏水の 常時監視による流動地下水特性の考察

EXAMINATION OF CHARACTERISTICS ON LEAKAGE FLOW IN BASE OF WATARASE
RIVERBANK USING GROUND TEMPERATURE DETECTION OF 1 METER DEPTH

岡田崇¹・松本健作²・竹内篤雄³・玉置晴朗⁴・矢澤正人⁵・内堀寿美男⁶・瀬間武⁷・清水義彦⁸

Takeshi OKADA, Kensaku MATSUMOTO, Haruo TAMAKI, Masato YAZAWA, , Sumio UCHIBORI, Takeshi SEMA and
Yoshihiko SHIMIZU

¹学生会員 学(工) 群馬大学大学院工学研究科博士(後期)過程 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

²正会員 博(工) 群馬大学大学院工学研究科助教 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

³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)

⁴非会員 株式会社数理設計研究所代表取締役 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町太田リサーチパーク 1-101)

⁵非会員 株式会社数理設計研究所専務取締役 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町太田リサーチパーク 1-101)

⁶非会員 国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所調査課長 (〒326-0822 栃木県足利市田中町 661-3)

⁷非会員 国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所 (〒349-1198 埼玉県久喜市栗橋町北 2 丁目 19-1)

⁸正会員 博(工) 群馬大学大学院工学研究科教授 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Ground temperature detection of 1 meter depth was applied to riverbank in Watarase River. Ground temperature detection of 1 meter depth could get information of leakage flow in riverbank where there is the concern of existence of leakage flow. A real-time observation system using Spread Spectrum radio method with high-speed synchronize method and optical fiber network system in riverbank was constructed. Measurement results showed good agreement with boring investigation. Comparison between data obtained in deferent date showed that ground temperature detection of 1 meter depth has good stability and reproducibility. And the measurement results showed that the ground water could move to the other place or change their shape. Changing process of ground water was simulated by Poisson equation, with good reproducibility.

Key Words: *ground temperature detection of 1 meter depth, riverbank, leakage flow, real-time observation system*

1. はじめに

2004 年に、破堤を伴う洪水災害が多数発生したのを機に、河川堤防の全国一斉調査が開始された。その結果、安全性に問題があると診断された区間が多数存在することが発表されている。これらの背景を受け、河川堤防の安全性に対する関心は、河川管理者のみならず、周辺住民においても極めて高まっている。しかしながら、河川堤防がどの程度安全であるかを診断する手法は現在においても十分確立されているとは言えず、その確立が急務となっている状況にある。河川堤防のモニタリングシステムの確立が困難である主な理由は以下の 3 点であると考えられる。すなわち①河川堤防が長大な構造物であることで、その全域をカバー

しきれぬモニタリング手法の構築が困難であった。②構成材料施工方法などが様々で、内部構造に関して極めて局所性が高い。③河川整備の予算が縮減されてきており、高度経済成長期の様な潤沢な投資余力が見込めないことによる。

そこで本研究では、長大且つ局所性が高い河川堤防を対象とし、維持管理費減少の状況下であっても十分に実施可能な、堤体内に既設の光ファイバ網と無線通信の連携によるモニタリング手法の提案と、その診断手法の有効性の検討を行う。観項目としては、浸透性破壊に対する安全性の検討を念頭におき、堤体における浸透水に注目した。計測手法としては地下水探査手法として有効性が認められ、既の実務で用いられている 1m 深地温探査¹⁾を行い、渡良瀬川堤防を対象として基盤漏水

が懸念される観測サイトにおいて浸透水の検知とその特性の考察を試みる。

2. 計測手法

(1) 1m 深地温探査の概要

河川堤防の地質調査にはボーリング調査などが実施されるが、広域をカバーしようとする場合、費用的制約から密な調査間隔での実施は困難であり、全国一斉堤体調査においても平均的には1km間隔が限界であり、その地質データを元にF.E.M.解析等による検討が為されているのが現状であり、堤体の安全性の診断も、これらデータを元に為されている。大局的に傾向を掴む目的において、これらの手法は有意義であると言えるが、では、実際の河川堤防の維持管理する上で有用な知見であるとするには疑問がある。破堤の引き金となる堤体の劣化は極めて局所的であると考えられ、1km間隔でのボーリング調査ではカバーしきれない。従って、更に密な計測が可能で、その場合にも費用的に実現可能な調査手法が要求されている。

そこで本研究では、堤体の状態を診断するうえで重要な1要素である堤体内の浸透水の状態を計測項目とし、その計測を1m深地温探査によって行うことを試みた。1m深地温探査は竹内¹⁾によって開発され、地すべり地や斜面崩壊現場、貯め池における漏水や一部の河川堤防を対象として、地下水探査あるいは流動浸透水の挙動把握において膨大な現地観測²⁾の結果から、その有効性が確認されている手法である。1m深地温探査は元々、地下水が層状に帯水しているのではなく、極めて局所的・選択的に流動している、所謂「自然地下水」として自然環境下において存在していることを前提として、その不規則且つ複雑な地下水の状態を調査する為に開発されたものである。写真-1に切り取り斜面の自然地下水状態で流動する地下水(以下、水ミチと呼ぶ)の路頭を示す。部分的に黒く見える領域が地下水流動のある領域で、防災上の観点から見た、比較的浅い深度においては、層状に存在する地下水の方が稀であり、その多くは自然地下水状態で存在している。河川堤防は、その内部構造が複雑であるため、同じく局所性の高い浸透流状態が予測されるため、その調査手法として1m深地温探査は有効な手法であると考えられる。1m深地温探査の計測手順は、①直径3cm程度杭を1mの深さまで打ち、孔を穿つ。②先端に測温体を設置したセンサを孔に挿入し、測温体が地温に馴染むまで5~10分待って温度を計測する、という比較的簡便なものである。計測データの解釈にあたってはいくつかの注意事項がある。1m深地温探査によって地下水検知を行える原理は夏季および冬季における1m深における地温と水温の差が安定して計測できる点にある。すなわち、夏季においては地温に対して低温部が、冬季



写真-1 斜面切り取り部の水ミチの路頭

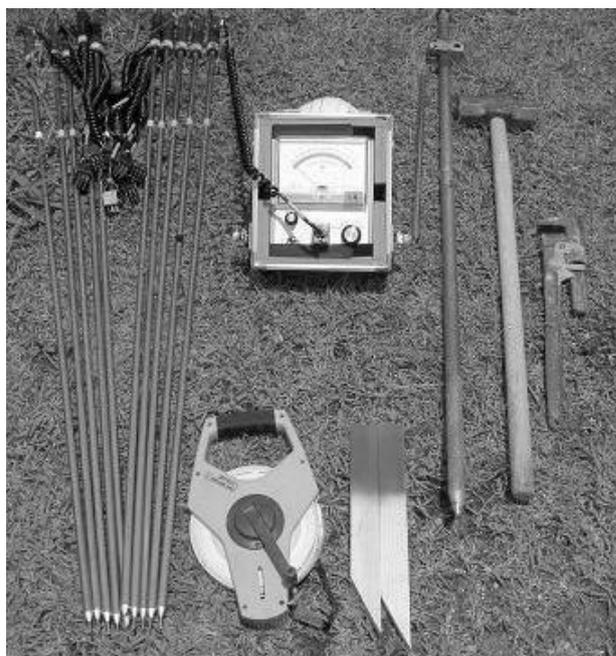


写真-2 1m深地温探査計測道具一式

においては逆に地温に対して高温部が地下水の存在する可能性を示唆する。他の電氣的物理探査に比べてデータの安定性が高いが、春期および秋期の地温と地下水温の差が顕著に見られなくなる時期においては実施することができないという欠点を持つ。また、水温が周囲の地温に有意に影響を及ぼすのに1~2カ月を要するため、必ずしも計測したその瞬間における地下水流動を捉えているとは限らず、過去2か月程度前から現在における時期に、地下水が存在したことを示唆する、ということの意味するものである。この特性より、1m深地温探査では、その適用期においては定常的な安定した計測結果を得ることができる半面速報性に欠けるため、何らかの物理探査を併用するか、あるいはボーリング等の調査を合わせて実施する機会が多い。写真-2に、1m深地温探査における計測機器一式を示す。

(2) SS 無線通信と堤体既設光ファイバ網の連携によるモニタリングシステムの概要

河川堤防の状態監視を行う上で重要となるのが、何を計測することで堤体の状態を捉え、その結果から、どのようにして状態の診断を行うか、である。河川堤防の状態推定にどのような指標を用い、どのように診断を行うか、現状では十分に確立されていないが、本研究では、堤体内の浸透水の挙動をその計測対象として、それを 1m 深地温にて計測することとした。他にも計測手法がある中で、維持管理費削減を念頭に置いた、比較的安価で簡便且つ高精度であることによる持続可能な計測手法ということから本選択に至った。しかし、平時において単発的に計測を行ったところで、堤体の状態推定および安全性の診断を行うことは難しい。すなわち、仮に 1m 深地温探査の結果として堤体内に漏水として浸透水の流動を捉える事が出来たとし、その漏水の存在が、そのまま堤体の安全性を損ねるかどうかにについては判断が難しい場合が多い。仮に検出された漏水を止めたとして、それによる過剰間隙水圧の増大が起きれば、帰って堤体は不安定となり、安全性は減ずることになる。一方で、漏水が過度に進行すると、パイピングなどの現象を引き起こし、堤体にとって看過できない重要な損傷となる。

そこで本研究では、構造物の劣化診断手法として多くの分野で用いられているヘルスマニタリングの手法を取り入れた取り組みを試みた。ヘルスマニタリング手法は、計測項目自体に着目し、計測した場所について診断を検討するローカルモニタリングと、計測した場所における計測項目によって、その対象構造物全体の状態について検討を試みるグローバルモニタリングに大別できる。計測すべき項目と検討すべき内容が予め明確であるとき、ローカルモニタリングが行われるが、河川堤防の場合、内部構造の複雑等を鑑みてローカルモニタリングの適用は難しい。よってグローバルモニタリングを実施することになるが、本研究を、このヘルスマニタリング的な視点で捉え直すと、堤体内のいくつかの場所における浸透水の挙動という計測結果を用いて、河川堤防というシステム全体の安全性を診断しようという取り組みであるといえる。更に、対象とする構造物の損傷あるいは劣化を検出する手法も 2 種類に大別され、直接損傷検出と間接損傷検出と呼ばれている。直接損傷検出は計測された結果そのものから対象の状態を評価するものであるが、これは対象の材料や構造などに関する特性が十分明らかになっている場合に有効な手法であり、内部構造が複雑で不明である状態での計測が一般的である河川堤防を対象とした場合、いまひとつの間接損傷検出という手法が有効となる。間接損傷検出は、計測された結果それのみを用いて対象の状態を診断するのではなく、その計測結果の相対的な変化をもって、対象の変質を検出する手法である。対象とする構造

物の内部特性などが詳細に判っていない場合などに有効な手法であり、河川堤防に対しては、この間接損傷検出という立場をとらざるを得ない状況であろうと思われる。換言すれば、河川堤防を診断対象とする場合、持続可能な簡便な計測手法と、この間接損傷検出との組み合わせによって始めて、高い局所性を持つ河川堤防の診断が可能になると考えられる。

間接損傷検出を実現するためには、計測結果の相対的な変化を捉える必要があり、河川堤防の経年劣化を診断するためには時系列的な複数の計測結果を比較する必要がある。そこで、本研究では常時計測システムの構築を検討した。常時計測を行えば、計測中の労力がかからない、荒天時等のデータを安全に取得できるなどの利点がある半面、計測データの送信施設の整備に費用がかかる。予め重点的にモニタリングを行う場所が確定している場合にはそれでも良いが、河川堤防のように、長大で、その全川が診断対象であるような場合には不適である。これは無線通信を行うことで解決できるが、無線通信で常時計測を行う場合には①電源の確保、②到達距離、③周波数帯の制限という制約がある。本研究では、これら諸問題を解決するため、スペクトラム拡散(Spread Spectrum)高速同期無線通信(以下、SS 無線通信と呼ぶ)の適用を試みた。SS 無線通信は数理設計研究所において開発された新技術であり、元々軍事技術であったスペクトラム拡散無線通信を独自の高速同期法を適用することによって 1 億分の 5 ワットという超低電力での無線通信を可能とした通信手法である。超低電力であることによって、例えば 10 分に 1 回程度の送信を行う場合、単 2 乾電池 1 個程度で年間を通じての連続計測を可能とし、電力確保の問題が解決される。送信の到達距離は使用電力とのトレードオフであるが、前記条件であれば平地で 5km、送受信機の高度差が確保されれば 10km 程度は通信可能である。無線通信におけるいま一つの懸案要素が、使用する周波数帯である。計測サイト周辺や送受信間に存在する植生によって特定の周波数が干渉を受け、十分通信可能な距離内であっても欠測が多々生じてしまう事象は良く知られているが、SS 無線通信では、超低電力であることで電波法の制約以下での通信が可能である。電波法の制約を受けないということは、計測環境に応じた最適な周波数を自由に選定することができる為、周波数による問題も解決できる。更に、電波法の制約を受けない為、特定の免許等が無くても誰でも自由に使用することができ、しかも軍用技術からの転用であることも明らかのように秘匿性に優れ、ノイズ等の混入にも強い通信手段である。本研究では、1m 深地温探査および検証用に併用探査を行った自然電位法³⁾の計測結果を、この SS 無線通信によって送信する。これによって、計測したい場所にセンサを設置するだけで、年間を通じての計測から送信といった常時計

測システムが構築されることになる。また、本システムは、計測が終了した後、そのまま次の重点監視エリアにセンサを移設するのみで転用することができる為、費用的にも効率的であると言える。

河川堤防のモニタリングを困難にしているいま一つの要因が、その長大性である。SS無線通信の到達範囲のみではカバーできない為、本研究では国土交通省によって全国の主要河川堤防内に既設されている光ファイバ網と連携することとした。全国の主要な河川堤防内部には通信用の光ファイバ網が既設されている。光ファイバには、その歪を検知することで状態変化をモニタリングすることができるタイプもあるが、現在設置されている光ファイバはあくまで通信用であり、これ自体ではモニタリングを行うことはできない。そこでまず、SS無線通信によって計測結果を近隣の光ファイバ網の中継ポイントまで送信する、その後は光ファイバ網を経由してデータ送信を行うというものである。本システムによって、光ファイバが埋設されている全国の主要河川堤防がカバーできることになるが、現在のところは群馬大学と渡良瀬川河川事務所間の取り組みであり、以下、本研究で対象とした領域も、渡良瀬川における取り組みのみを示す。

3. 現地観測の概要

現地観測の対象としたのは、渡良瀬川の 30km 地点、右岸の、福富町一帯のエリアである。本サイトは、渡良瀬川河川事務所による調査の結果、基盤漏水によってパイピングが発生する危険性が指摘された。具体的には、堤体の浸透性破壊に関して、30.500km および 31.000km 地点におけるボーリング調査では問題が無く、30.750km 地点におけるボーリング調査では前述の危険性が診断された。この段階では 30.500km～31.000km の 500m の区間に補強工事等の対策を必要とする領域が存在する認識となり、その後、危険区間を限定する目的で 30.835km 地点におけるボーリング調査を追加実施した結果、問題が検出されなかった。よってこの時点で 30.500km～30.835km の 335m 区間が安全性が確保されていない要検討区間という診断となった。しかしながらボーリング調査によってこれ以上の絞り込みを行うことは費用面から困難な状況であった。写真-3 に当該区間の概観を示す。そこで本研究では 1m 深地温探査および比較のための併用探査としての自然電位法計測³⁾を行った。自然電位法はやはり地下水探査手法として実用化されている手法で、地下水流動によって発生する自然電位を計測することで地下水の存在を検知する手法である。測線は堤体の裏法尻に沿って設定し、1m 深地温は 3m 間隔で、比較の為実施した自然電位法(流動地下水が存在する場合には高電位が計測される)は 5m 間隔で



写真 - 3 福富町サイトの様子

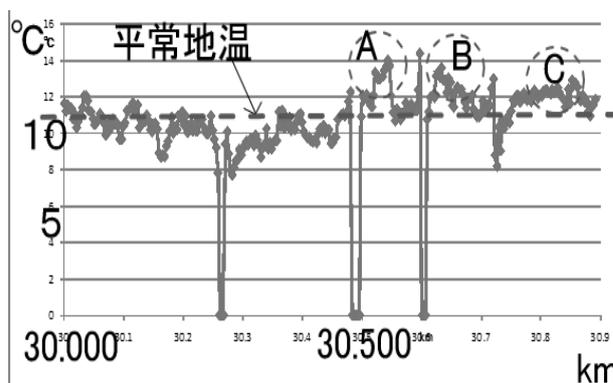


図 - 1 1m 深地温探査計測結果(2010/02/10)

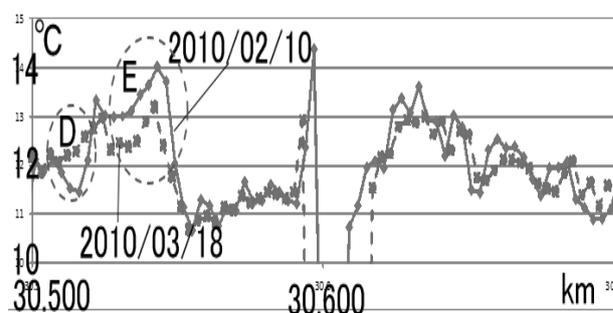


図 - 2 1m 深地温探査結果比較
(2010/02/10 および 2010/03/18,
30.500～30.700km 拡大)

計測を行うこととした。図-1 に 1m 深地温探査の結果(2010/02/10 データ)を示す。横軸が渡良瀬川の距離標表記とした測線長(km)、縦軸が計測地温(°C)である。図中 3 箇所ほど計測地温が 0°C となっている区間があるが、測線を横切ってアスファルト道路が存在したため計測できなかった地点である。計測日における平常地温は 11°C であり、図中に破線で示してある。冬季であるため、地下水流動がある地点では平常地温よりも高温となる。

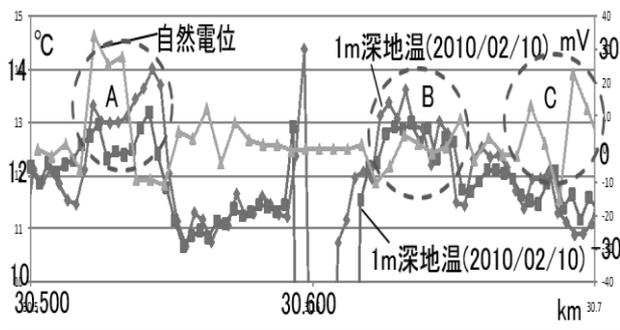


図-3 1m 深地温探査および自然電位法の比較
(2010/02/10 および 2010/03/18,
30.500~30.700km 拡大)

図を見ると、30.500km より下流側では平常地温を顕著に上回っている区間は無く、渡良瀬川河川事務所によるボーリング調査結果と符合する結果である。30.500km より上流側の内、主に3区間で平常地温を上回る結果が確認された。3カ所の高地温区間を図中にA、B、Cとして破線円で示した。A区間では13~14°C、B区間では12~14°CそしてC区間では12°C程度であり、AおよびB区間において基盤漏水を起こしている可能性が高い。ただし、本計測を行った際には河川水位に比べ測定点における比高が高く、この時点では堤内地側から堤外地側への流動であると考えられる。

ボーリング調査同様、30.500km より上流側において流動地下水が存在する可能性が高いことが確認できたので、30.500~30.700km 区間に注目した1m 深地温について、異なる計測日における計測結果の比較を行うこととした。図-2は30.500~30.700km 区間における、2010年2月10日および2010年3月18日における1m 深地温探査の計測結果である。計測地温についても10~15°C部分のみを拡大して示してある。図を見ると、全体的に再現性が高く、1m 深地温探査の手法としての安定性が伺える。特に30.550km より上流側において、両計測日における結果が極めて良好に一致しており、これら区間において両計測日間の36日の間においては、地下水流動に大きな変動は無いように見える。しかし、図-1に示したA区間に注目すると、地温が上昇している区間(図-2中にD区間として波線円で表記)および地温が減少している区間(図-2中にE区間として波線円で表記)が存在することが見て取れる。その他の区間における再現性を考慮すると、DおよびE区間においては、地温変化を励起する何らかの流動地下水の変化が起きたものと推察される。図-3に、図-2と同区間における1m 深地温探査と自然電位法による地表面電位の比較を示す。自然電位法では流動地下水が存在する区間において地表面電位が高くなり、±5mV以内を誤差範囲として、それを超えた場合に有意なデータと見なす手法である。軸設定は図-2と同様であるが、右

縦軸に自然電位法による計測電位(mV)を示している。図を見ると、図-1で示した高地温帯A、BおよびC区間に対応して高電位帯が現れており、併用探査を行った比較検討においても、1m 深地温による流動地下水の検出が良好に行えている可能性が高いことが判った。A、BおよびCの高電位帯に注目すると、A区間において最大の電位が発生している。1m 深地温探査の結果でもA区間が最大地温であったため、このA区間については流動地下水が存在する可能性が最も高いと判断できる。一方で、B区間およびC区間を見ると、B区間ではA区間に次ぐ高地温帯であるにも関わらず、電位は比較的 low、C区間においては、地温は12°C程度と比較的 low になっているが電位は大きな値を示す、といったように定量的な相関性が若干不明瞭ともいえる。自然電位法は周囲に金属性の物体がある場合に極端に高電位値を計測してしまうなど、外乱の影響を受け易い特性がある。計測現場において該当する物体は確認していないが、その影響によってC区間の電位が高くなっている可能性は捨てきれない。しかし、仮に金属物体による外乱でないと仮定すると、BおよびC区間の特性は以下のように考察できる。1m 深地温探査では、流動地下水が周囲の平常地温よりも高い(低い)ことによって周囲の地温を上昇(低下)させ、その影響が1m 深に到達することで検出が可能となる手法である。この地下水温が周囲の地温に有意に影響を与えるまでに1~2 ヶ月程度はかかる為、1m 深地温探査の結果は正確には「1~2 ヶ月程度前の段階で、そこに流動地下水が存在した」ことを示すものである。この、計測対象である地温の熱伝播特性の持つ時間スケールの大きさが、ひいては1m 深地温探査という手法の安定性につながっていると言える。一方で、自然電位法は計測した瞬間における流動地下水を検知しようとする手法であり、そのため外乱の影響を受け易いなどの不安定性を内包する手法である。この両探査手法の特性を念頭に入れてBおよびC区間を見ると、B区間では1m 深地温は高温であるが、自然電位法では低電位である、これは1~2 ヶ月前の段階では存在していた流動地下水域が縮小もしくは他区間へ移動した可能性があることを示している。またC区間においては反対に、1m 深地温は低温であり、電位が高い。よって、1~2 ヶ月前に比べて流動地下水域が拡大した、もしくは、他区間からC区間への移動があった可能性があることを示唆している。自然電位法による計測電位はその流量・流速によっても変化することが知られており、これらの影響についても検討の余地を残している状況である。これらの検討課題については現在、渡良瀬川河川事務所と協議を行って、注目区間を対象としたボーリング調査等を行うなど、今後、実態調査を行うことを検討している。

4. 楕円型方程式の解による地下水状態の再現

前章の図-2 および図-3 を元に、流動地下水が移動、あるいは拡大・縮小している可能性があることを示したが、竹内^{1),2)}は、これらの現象が現地観測においてしばしば確認されていることを示している。そこで本研究では、図-2 に示した D および E 区間を対象として、流動地下水の拡大・縮小を Poisson 方程式の解によって再現することを試みることにした。基礎方程式を式(1)に示す。

$$\Delta T=R \quad (1)$$

ここで、 Δ はラプラシアン、 T が地温、 R が流動地下水による温度ソースを意味している。解析領域はDおよびE区間を含むように測線長で40m区間をとり、深度方向にも40m区間を設定した。平常地温を11度とし、流動地下水温は伝播の結果として1m深で14度という計測結果を得ていることから推定して14.5度とした。実際の流動地下水は深度方向に幅を持つが、ここでは流動地下水の上端部分からの温度伝播に注目することとして、1格子において流動地下水温を設定することとした。すなわち、流動地下水の膨張を温度ソース点の浅化、縮小を温度ソース点の深化で表現することとした。図-4に、図-1におけるA区間の拡大図を示す。地温が上昇・低下していることが確認できるが、これを温度ソースの深度変化で再現したものが図-5-(1)(2010/02/10)および(2)(2010/03/18)である。横軸が距離(km)、縦軸が温度(°C)である。傾向としては良好に再現できており、流動地下水の変遷による1m深地温探査の計測結果に与える影響をPoisson方程式によって大まかに再現することが確認できた。

5. まとめ

これまでの成果によって、河川堤防の状態監視の為の1手法として、本手法の有効性を示すことができた。

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 堤体内の浸透水を1m深地温探査によって計測し、SS無線通信および光ファイバ網による通信システムによって常時計測を行うシステムを構築した。
- 2) 渡良瀬川堤防30km付近の基盤漏水懸念サイトにおいて、1m深地温探査によって、渡良瀬川河川事務所と同様の傾向を示しながら、更に危険箇所を限定することができた。

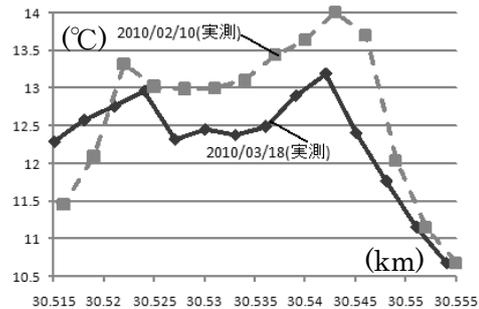


図-4 A区間における流動地下水の変遷(実測)

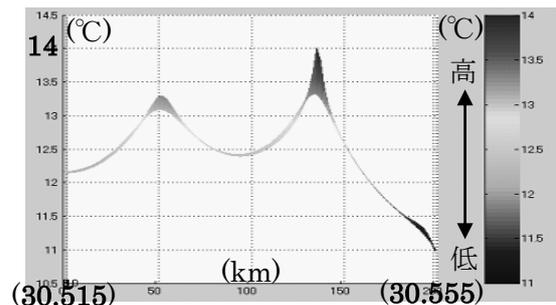


図-5-(1) 地温解析結果(2010/02/10)

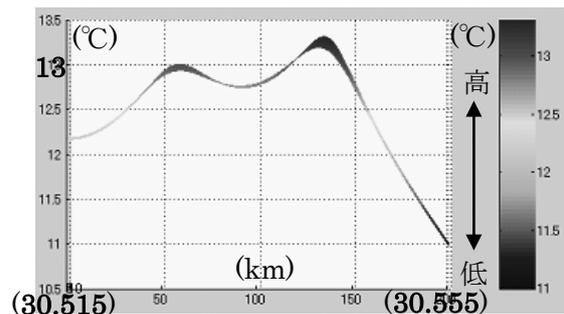


図-5-(2) 地温解析結果(2010/03/18)

- 3) 自然電位法による併用探査との比較においても良好な一致を示し、流動地下水の把握を行えた可能性が高いが、実態調査については今後の課題である。
- 4) 楕円型方程式の温度ソース深度を変化させることで、現地観測によって多々報告されている流動地下水の膨張・収縮といった変遷状況を再現することができた。

参考文献

- 1) 竹内篤雄, 中山健二, 渡辺知恵子著: 温度を測って地下水を診断する, 古今書院, 2001.
- 2) 竹内篤雄著: 流動地下水調査方, 古今書院, 1996.
- 3) 柴田東, 伊藤芳朗, 南雲政博: 自然電位法による地下埋設物の検出(II), 関東学院大学工学部研究報告, 第32巻, pp. 3-10, 1988.

(2010. 4. 8 受付)