

## 地温探査によるため池堤体の漏水調査

吉 迫 宏\*

### Investigation of Leakage for a Small Earth Dam by Underground Temperature Survey

Hiroshi YOSHISAKO\*

\* National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization,  
2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8609, Japan

#### Abstract

To establish a method to investigate leakage from small earth dams by measuring ground temperature at a depth of one meter, its daily range and seasonal variation and the surface temperature of the small earth dam body were measured at the Aoike Irrigation Pond in Kagawa Prefecture. The relationship between the ground temperature at a depth of one meter and the conditions of the small earth dam body surfaces, leakage paths and seepage surfaces was investigated through simulation. The results indicate that ground temperature anomalies caused by partial leakage from a low-height small earth dam can be detected by the measurement of the ground temperature at a depth of one meter on the crest of the small earth dam during summer or winter, when ground temperature differences are more likely to occur. A method to set leakage paths, seepage surfaces and fixed temperature boundaries for simulation is also presented. From the simulation of ground temperature at a depth of one meter, the width and depth of leakage paths can be estimated by determining the conditions of leakage paths and seepage surfaces that are concordant with the measured temperature values.

**Key words** : irrigation pond, small earth dam, underground temperature, leakage

#### 1. 緒 言

ため池堤体の漏水は、堤体の健全度合を判断する上での重要な指標である。土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省, 2006a)では、ため池改修の必要性を判定する際の指標の一つとして、堤体からの漏水を挙げている。また、改修に限らず、ため池の維持管理全般においても、堤体に生じている漏水は重要な指標である。例えば、2007年度から農林水産省によって実施されている農地・水・環境保全向上対策の技術マニュアルである「共同活動の手引き」(農林水産省, 2007)においても、漏水はため池堤体の点検項目として挙げられている。

堤体の漏水状況は、堤体表面を目視で観察し、漏水の浸出やパイピングで生じた穴等を把握することにより、

ある程度把握することができる。しかし、よりの確、確実に漏水状況を把握するためには、目視による調査だけではなく、堤体内部の探査を行う必要がある。

ため池堤体内部の漏水探査法として、竹内(1985)は電気探査ダイポール・ダイポール法を用いたため池堤体の緩みの範囲と漏水箇所の検出が可能であることを示した。また、堀ら(2002a)は地中レーダによる満水時と落水時との二時期の調査結果の比較から、漏水経路を特定する手法を開発した。これらの漏水探査法は、堤体内部の状態を三次元的に捉えることができ、有用と考えられる。しかし、探査のための機材や専門知識を必要とすることから相応の費用を要し、多数を占める小規模なため池での調査には実用的ではない。

温泉熱源や地下水流脈によって形成される地盤中の局

\* (独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

キーワード: ため池, 堤体, 地温, 漏水

所的な地温異常を1m深地温の測定で把握し、地下熱源や地下水流脈等の規模や深度を推定する地盤探査法として1m深地温探査法が知られている。1m深地温探査法は、白金測温抵抗体などの精度の良い温度センサーとこれに接続するデータロガー、及び土中に温度センサーを挿入する孔をあける用具があれば実施できることから、他の地盤探査手法と比して安価かつ簡便に実施できる。

竹内ら(1990)は、ため池堤体の下流側法面の全面に網目状の測点を密に設定して1m深地温の測定を行い、地温分布図を作成して水脈の存在位置を推定し、ため池堤体の漏水調査に対する1m深地温探査法の有効性を示した。また、奥山ら(2003)は、地すべりブロック冠頭部に位置するため池周辺の地下水流動状況を把握するため、ため池堤体下流側の法面と地すべりブロック上に多数の測線を平行に設定して1m深地温の測定を行い、ため池から地すべりブロック内へ浸透する地下水流脈の推定を行った。しかし、ため池堤体に対して1m深地温探査法を適用したこれらの既往の研究報告においては、池底から基礎地盤中へのため池貯水の浸透による地下水流脈とは別個に、かつため池堤体内部の漏水の位置や深度の推定を1m深地温の測定結果から行う方法は示されていない。

そこで、堤高の低いため池堤体を対象に、堤体天端に設定した測線・測点における1m深地温の測定と既往の見解に基づく簡略化したシミュレーション方法を組み合わせ、安価・簡便に漏水経路の幅と深度を推定する方法を開発した。開発に当たっては、まずため池堤体の漏水調査や1m深地温探査法に関する既往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理した。次に、ため池堤体天端上に設定した測点において1m深地温や堤体表面の温度を測定し、漏水と1m深地温との関係や1m深地温の日較差と年変化、堤体表面温度の特徴を明らかにした上で、1m深地温の測定方法やシミュレーション方法を決定した。その上で、漏水経路の幅と深度を推定する方法を提示した。また、実際に漏水を生じているため池堤体において漏水経路の位置と深度の推定を行い、推定結果の検証を行った。

## 2. 1m深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の開発

### 2.1 技術開発に当たっての課題

ため池堤体の漏水や1m深地温探査法に関する既往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理した。

土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省、2006a)では、ため池堤体等の漏水箇所として、堤体盛土

部と基礎地盤または兩岸地山との境界部、底樋や洪水吐等の堤体横断施設の周囲を挙げている。堀ら(2002b)は、豪雨による農業用ため池の破壊原因として、常時満水位付近の上流斜面を浸入点とする浸透破壊が最も多いことを明らかにしている。従って、1m深地温探査法による漏水調査においては、堤体中に生じたパイピング穴や堤体横断施設からの漏水によって生じた高透水域などの堤体内部への貯水の浸入経路とその周囲の高含水量(以下、堀ら(2002a)の例に倣い、これらを合わせて「漏水経路」とする)の位置や深度を把握できることが求められる。

湯原(1955)は地下熱源の規模や深度、竹内(1983b)は地下水流脈の規模や深度について、地盤中の熱源・地下水流脈を円柱型、地表面を半無限に広がる平面、かつ地下水流脈以外の土壌の熱伝導率は一定と見なした上で定常熱伝導方程式の近似解を求め、1m深地温から理論的に推定する方法を提案している。前述の奥山ら(2003)は、ため池堤体を基礎地盤と一体の長大な斜面と見なした上で、1m深地温の測定値とこの推定方法による計算値が一致する地下水流脈の規模と深度を求めるとともに、推定結果を検証している。しかし、ため池堤体自体は地すべりブロック等の長大な斜面とは異なり、法面の一方の大半は貯水に、天端ともう一面の法面は大気と接し、その構造も半無限平面と見なすことは出来ない。従って、ため池堤体内部の1m深地温のシミュレーションを行う場合には、ため池堤体の構造に即した1m深地温のシミュレーション方法を定める必要がある。

竹内(1996)は、ため池堤体における1m深地温探査において、天端から堤体末端にかけて1×3mあるいは2×3mの測点網の設定を提案している。しかし、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省、2006b)では堤体法面の後法勾配を1:1.5~2.5(参考寸法)としているものの、実際には1m深地温測定に関わる諸作業が難しい急勾配の法面を持つため池も多い。従って、堤体法面上に密な測点網を設定することが困難なため池も少なくないことから、堤体天端上に設定した測点のみで漏水経路の探査が可能かどうかを検討する必要がある。

また竹内(1983a)は、地況の相違が1m深地温に与える影響を資料から整理した上で、1m深地温の補正方法を提案している。ため池堤体においても、例えば貯水には深度方向の温度勾配の存在が考えられることから、貯水と接する側の堤体表面はこれの影響を受け、堤体表面温度の相違が存在すると考えられる。しかし、調査に当たって堤体表面の温度や堤体土の物性値などを詳細に測定する必要があるれば、1m深地温探査法の長所である簡便性は失われる。従って、1m深地温以外の測定項目

は極力少なくする必要がある。

## 2.2 ため池堤体の温度環境

### 2.2.1 ため池堤体の漏水と1m深地温

堤体天端上に設定した測点において1m深地温を測定し、測定結果を検討する。

1m深地温の測定は、青池（香川県善通寺市生野町）において行った。青池の堤体においては、右岸側地山寄りの下端部分を中心に、表面に漏水が浸出している。堤体天端付近の表層土は日本統一土質分類法による分類で粘土質砂（SC）、その他の堤体土はシルト質砂（SM）である。水面下の部分を除いた堤体の表面は草で覆われ、年間を通じて草刈りが行われている。青池の平面図（諸元含む）を図-1に示す。

堤体中の漏水経路は特殊な場合を除き、堤体軸とほぼ直交すると考えられることから、堤体表面に漏水が浸出している区間とその前後の区間に対して天端中心に測線を設定し、測線上に1m間隔で測点を設けた。また、堤体中の浸透水の水温を測定するために、前述の漏水浸出区間、非浸出区間にそれぞれボーリング孔を1つつづ設

けた。測線・測点とボーリング孔の位置を図-1、2に示す。

1m深地温の測定に当たっては、直径6mmの鋼棒を1m弱の深さまでハンマーで叩き込んだ後に引き抜き、この孔へデータロガーに接続した白金測温抵抗体を深さ1mの位置に挿入して周辺土と密着させた。1m深地温は測定開始から4分経過した時点の値とした。また、合わせて図-1、2の地点1（非浸出区間）、地点2（浸出区間）においてボーリング孔内の浸出水の水温を測定した。1999年7月21日における測定結果を図-3に示す。

図-3より、測点40付近を中心に、38~42において明瞭な低温部が認められる。測点1~35の平均地温24.0℃を非漏水部の代表値、これと最も温度差がある測点39の地温23.3℃を低温部の代表値とすると、両者の間には0.7℃の温度差が認められ、温度差を明確に把握できることがわかる。従って、堤高の低いため池堤体においては、堤体天端上に設定した測点から1m深地温を測定することにより、地温異常の把握は可能であることがわかる。

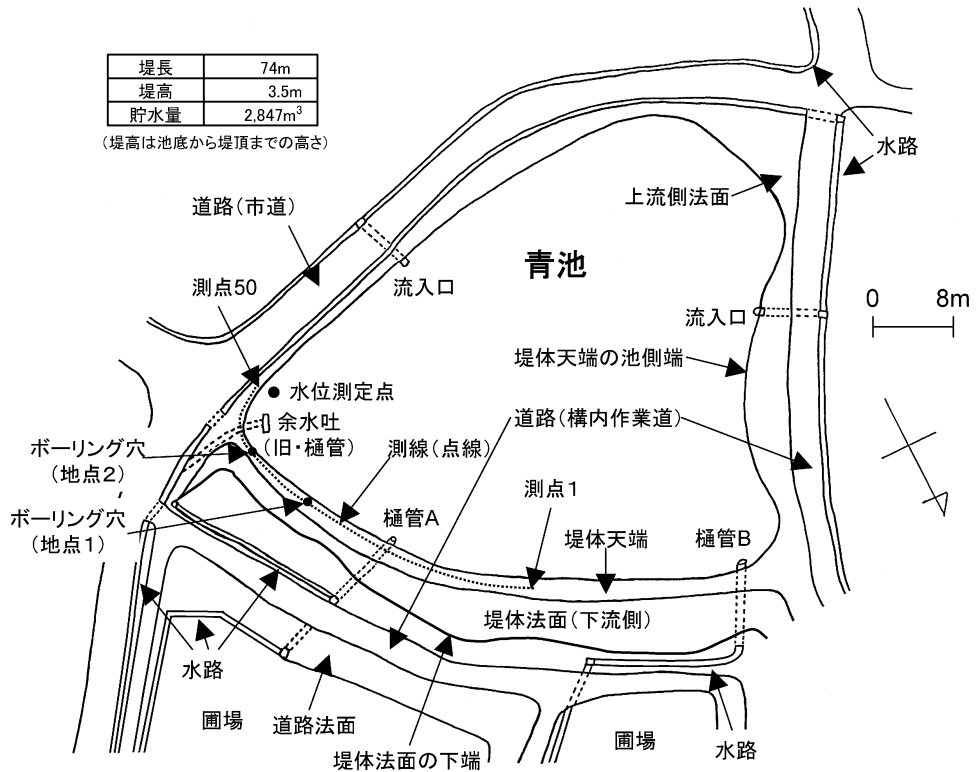


図-1 青池平面図

Fig. 1 Ground plan of Aoiike

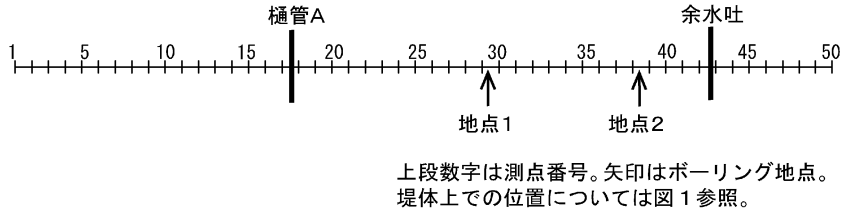
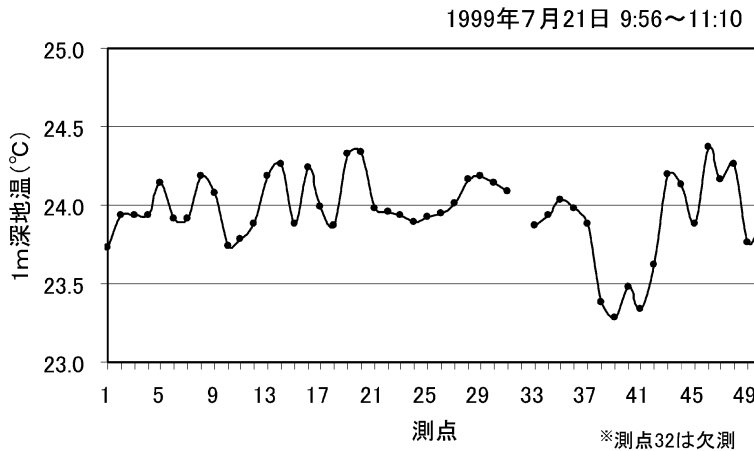


図-2 測線と測点 (青池・天端中央)

Fig. 2 Measurement line and points (Aoike : Center of dam crest)



地点1の水温:21.6°C、地点2の水温:20.6°C

図-3 1m 深地温の測定結果 (青池)

Fig. 3 Result of ground temperature measurement at a depth of 1m (Aoike)

青池堤体では地況や日射の条件はほぼ同じであり、1 m 深地温に大きな変動のない測点 1~35 区間に含まれる地点 1 で測定した浸出水の水温は 21.6°C であるのに対し、低温部に含まれる地点 2 で測定した浸出水の水温は 20.6°C と低いこと、低温部の下流側堤体表面では漏水の浸出が観察されることから、低温部の形成は漏水の影響によるものと考えられる。

2.2.2 ため池堤体 1m 深地温の日較差

ため池堤体における 1m 深地温の日較差を把握するために、青池において 1m 深地温の日変化を測定するとともに、比較のために気温の日変化を測定した。

図-3 において通常的な地温を持つ測点 35 と低温部である測点 39 において 1m 深地温を、青池から約 370 m 離れた気象観測露場において気温を測定した。1999 年 8 月 30 日の毎正時の測定値を図-4 に示す。

図-4 から、気温の日較差は 7.7°C であるのに対し、1m 深地温の日較差は両測点とも 0.1°C である。従って、堤

体天端上から測定した 1m 深地温の日較差は、気温の日較差と比較して極めて小さいことがわかる。

2.2.3 ため池堤体 1m 深地温の年変化

ため池堤体における 1m 深地温の年変化を把握するために、青池において 1m 深地温を季節毎に測定した。

図-3 において通常的な地温を持つ測点 28~31 と低温部である測点 38~42 の 1m 深地温、及び比較のために図-1, 2 に示した地点 2 におけるボーリング孔内への浸出水の水温について、1998 年 8 月 7 日~1999 年 7 月 21 日の間において季節毎に測定した。測点 28~31 の平均値 (通常)、測点 38~42 の間において平均値 (通常) と最も温度差のある測点の測定値 (特異)、両者の差、及び地点 2 の水温を図-5 に示す。

図-5 から、両者の 1m 深地温の間には夏期 (1998 年 8 月 7 日) で 1.4°C、冬期 (1999 年 1 月 29 日) には 1.3°C の温度差が認められる。これに対し、春期と秋期の温度差は小さい。従って、1m 深地温の測定は、両者の温度差

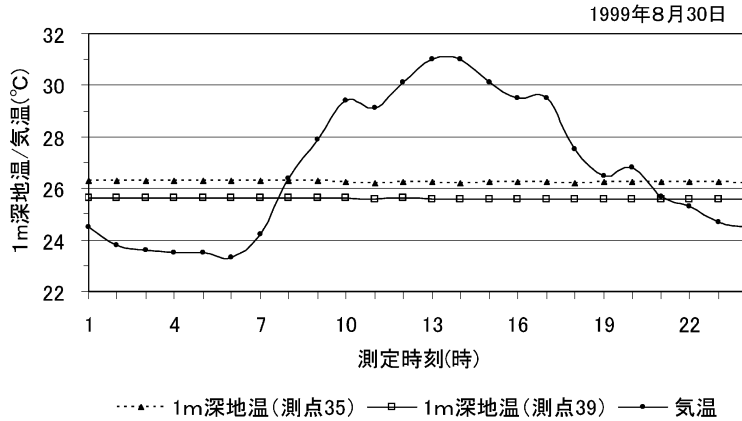
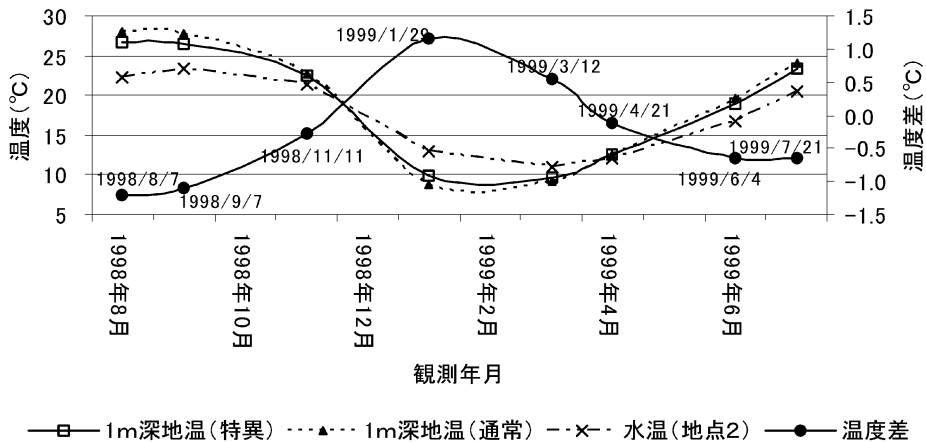


図-4 1m 深地温の日変化 (青池)

Fig. 4 Daily change of ground temperature at a depth of 1m (Aoike)



※温度差 = 1m 深地温 (特異) - 1m 深地温 (通常)  
 水温 (地点2) はボーリング孔内の水温 (位置は図1, 2参照)

図-5 1m 深地温の年変化 (青池)

Fig. 5 Annual change of ground temperature at a depth of 1m (Aoike)

が大きい夏期または冬期に行うことが適当である。

#### 2.2.4 ため池堤体の表面温度

ため池堤体表面における温度分布, 及び表面温度の日較差を把握するために, 堤体の表面温度を測定した。

新井・西沢 (1974) は人工貯水池の水温構造の特徴として, その水温分布は複雑なことと水温成層の形成を指摘している。青池の水深は約 2m と浅いことから, 堤体の表面温度の測定は人工貯水池に特徴的な水温構造が形成されると考えられる水深を持つ六道池 (広島県東広島市豊栄町乃美, 堤高 7m, 堤長 88m) において行った。大

気と接する側の堤体表面は, 草刈りがなされたほぼ一様の状態であることから, 2005 年 9 月 7 日~8 日に天端の表層地温 (地表下 0.2m) を測定した。水面下の堤体表面については, 2005 年 9 月 8 日に垂直方向の表面温度分布 (水面から水深 2.7m 地点までの堤体表面上の水温) を測定した。これらの結果を図-6, 7 に示す。

図-6 から, 大気と接する側の表層地温には日較差があることがわかる。従って, ため池堤体天端においても, 地すべりブロックなどと同様に, 地温異常の把握は日較差が十分に小さい 1m 深地温の測定によることが有利

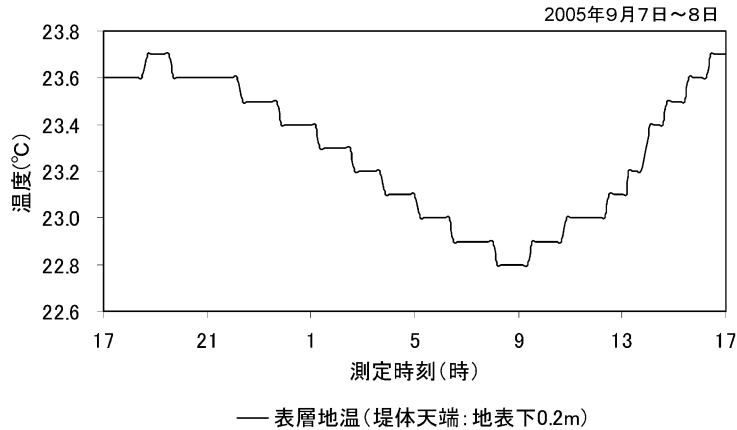


図-6 堤体表面温度(天端)の日変化(六道池)

Fig. 6 Daily change of temperature of a bank body surface (crest, Rokudoike)

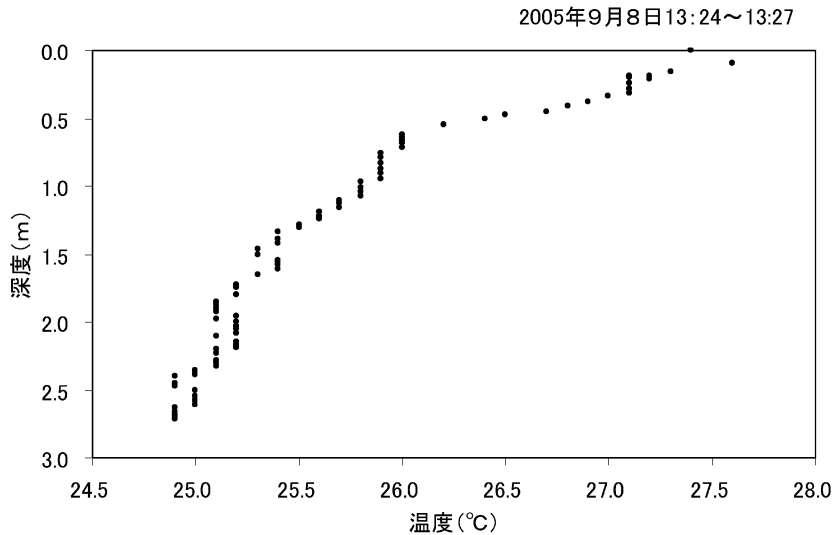


図-7 堤体表面温度(水面下)の垂直分布(六道池)

Fig. 7 Daily change of temperature of a bank body surface (underwater, Rokudoike)

である。図-7から、水面下の堤体表面温度は水深約0.5 mの地点を境として温度勾配が異なること、水面から水深約0.5 mまでの間に日射や気温等の影響を強く受ける層が、その下には別の層が形成されていることがわかる。また、夏季においては深層の貯水は表層より低温であり、この低温水が漏水として堤体内に浸透することによって地温異常(低温部)が形成されることがわかる。

### 2.3 ため池堤体1m深地温のシミュレーション

#### 2.3.1 基礎方程式とシミュレーション

2.2.2節の結果より、ため池堤体は1m深地温の日較差が極めて小さいことから、堤体内における熱移動はフーリエの法則による定常熱伝導問題(内部発熱なし)として扱う。また、前述した既往の1m深探査法では土壌の熱伝導を一定として扱っていること、熱伝導率と密接に関連する堤体土の水分状態の詳細な把握は困難なことから、近似的に浸潤面から上部の堤体土の熱伝導は一

定と見なし、定物性問題として扱う。従って、ため池堤体の1m深地温の形成に関わる熱移動の基礎方程式は、次式となる(庄司, 1995)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$T$ : 温度  $x, y, z$ : 各座標値

シミュレーションは、黒田(2003)の有限要素法による三次元熱伝導解析プログラムを用いて行った。シミュレーションに用いる堤体は、青池での測量結果を基に図-8に示す断面とした。有限要素法の計算には堤長12mかつ均一型の堤体を想定し、六面体20節点を持つアイソパラメトリック要素を用いて要素・節点を設定した。頂点節点間の間隔は、堤体天端下においてX(堤体軸)方向100cm, Y(堤体軸直交)方向35cm, Z(高さ)方向12.5cmとし、中間に中間節点を設定した。

### 2.3.2 温度境界の設定

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の温度境界条件の設定方法を検討する。

温度境界は、漏水経路と堤体表面(大気に接する面: 大気側/貯水に接する面: 貯水側)、堤体内の浸透流が形成する浸潤面から構成される。検討に当たっては、この温度境界の条件(形状/温度勾配)と1m深地温の関係をシミュレーションで求めた。

温度境界の条件は表-1に示す5条件とした。なお、堤体と基礎地盤の接面、堤体の両端面は断熱境界とした。

条件A~Cにおいては、放物線状の浸潤面を持つものとした。浸潤面は、貯水位を2.0mとして土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省, 2006c)及び土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム

編〕(農林水産省, 2003)に示されているA. Casagrandeの方法により決定した。条件D, Eにおいては、設定条件の単純化を検討するために堤体全面にわたって等しい高さ、すなわち水平の浸潤面を持つものとした。浸潤面の温度勾配は、条件A, Bについては線形の温度勾配とし、条件C~Eについては設定条件の単純化を検討するために温度勾配がない、すなわち全面に渡って等しい温度とした。条件D, Eについては水面と浸潤面との間の堤体表面(貯水側)も温度境界とし、条件Dは低温側の条件として図-3に示した青池のボーリング孔内(地点2)の浸出水の水温を、条件Eは高温の条件として図-1に示した水位観測点における水面下1mの堤体表面(貯水側)の水温(1999年7月21日測定)を設定し、浸潤面と同様に設定条件の単純化を検討するために温度勾配はないものとした。条件D, Eとも、温度勾配を想定しないことから、実際の堤体表面(貯水側)温度と比してそれぞれより低温側、高温側と考えられる条件であり、堤体表面(貯水側)の温度境界条件の相違に対する1m深地温の影響をより強く検討できる。なお、堤体表面(大気側)は、条件A~Eとも、全面にわたって等しい温度とした。これら条件の下で形成される堤体中央の1m深地温の計算値を表-1中に示した。

表-1中の条件A~Cに関する1m深地温(計算値)の比較から、浸潤面表面の温度勾配の違いによる温度差はほとんど生じないことがわかる。また、条件C, Dから浸潤面の形状の違いによる温度差もほとんど生じないこと、条件D, Eから浸潤面と水面との間の堤体表面温度(貯水側)の違いによる温度差もほとんど生じないことがわかる。

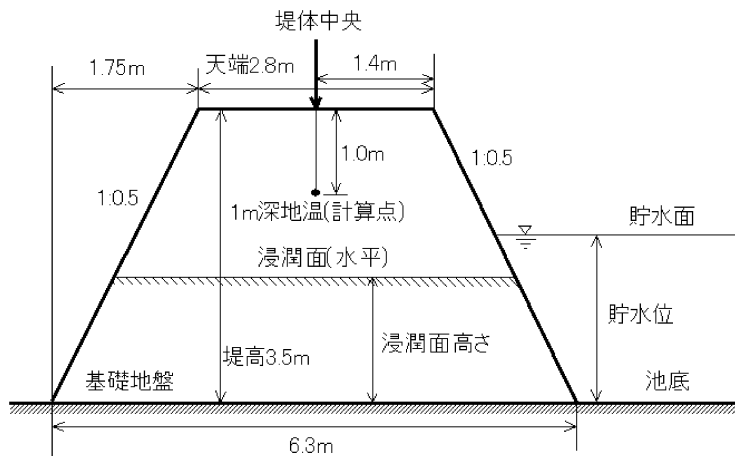


図-8 シミュレーションに用いた堤体断面(青池)

Fig. 8 Section of the bank body using simulation (Aoike)

表-1 計算条件 (1) と 1m 深地温の計算値

Table 1 Calculation condition (1) and calculation value of ground temperature at a depth of 1 m

| 温度境界の条件              | 条件 A   | 条件 B   | 条件 C   | 条件 D   | 条件 E   |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 浸潤面の形状               | 放物線    | 放物線    | 放物線    | 水平     | 水平     |
| 貯水位                  | 2.0 m  | 2.0 m  | 2.0 m  | 2.0 m  | 2.0 m  |
| 浸潤面高さ (堤体中央)         | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  |
| 浸潤面温度 (貯水との接点)       | 19.6°C | 17.6°C | 21.6°C | 21.6°C | 21.6°C |
| “ (堤体中央)             | 21.6°C | 21.6°C | 21.6°C | 21.6°C | 21.6°C |
| “ (堤体末端)             | 24.2°C | 26.7°C | 21.6°C | 21.6°C | 21.6°C |
| 堤体表面温度 (大気側)         | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C |
| “ (貯水側)              | —      | —      | —      | 20.6°C | 27.3°C |
| 1 m 深地温 (堤体中央 : 計算値) | 24.0°C | 24.0°C | 24.1°C | 24.0°C | 24.1°C |

※ 堤体軸平行方向の全長に対して同一条件を設定

表-2 計算条件 (2)

Table 2 Calculation condition (2)

| 温度境界の条件        | 条件 F   | 条件 G   | 条件 H   | 条件 I   | 条件 J   | 条件 K   | 条件 L   | 条件 M   | 条件 N   |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 漏水経路の形状        | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    | 長方形    |
| 貯水位            | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  |
| 漏水経路高さ         | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.8 m  | 2.0 m  |
| 漏水経路厚さ         | 0.5 m  | 1.0 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.5 m  | 1.8 m  | 2.0 m  |
| 漏水経路幅 (堤体平行方向) | 1.0 m  | 1.0 m  | 1.0 m  | 2.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  | 3.0 m  |
| 漏水経路温度         | 20.6°C | 20.6°C | 20.6°C | 20.6°C | 20.6°C | 19.6°C | 21.6°C | 20.6°C | 20.6°C |
| 堤体表面温度 (大気側)   | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C | 26.0°C |
| “ (貯水側)        | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C | 27.3°C |

これらの結果から、浸潤面の形状は堤体軸直交方向に対して等しい深度を持つ平面として単純化して設定する。浸潤面の温度についても、温度勾配は存在しない、すなわち全面に渡って均一な値を設定する。堤体表面温度 (大気側/貯水側) も、大気側、貯水側それぞれに対して均一な値を設定する。また、浸潤面の温度は堤体上に設置したボーリング孔への浸出水の水温から、堤体表面の温度は大気側、貯水側それぞれの任意地点での表層地温や堤体表面の水温、もしくはこれらを代替する観測データを基に設定する。日較差の存在する表層地温や堤体表面の水温については日平均値等を用いる。

### 2.3.3 漏水経路の設定

シミュレーションでため池堤体の 1 m 深地温を求め際の漏水経路の設定方法を検討する。

検討に当たっては、表-2 に示す 9 条件について、図-8 の堤体を用いてシミュレーションを行った。但し、漏水経路の条件が 1 m 深地温に与える影響を明確に捉える

ために、浸潤面は設定していない。漏水経路については長方形断面とし、前節の検討結果から堤体軸直交方向の形状や温度勾配の相違は 1 m 深地温に影響を及ぼさないと考えられるので、漏水経路は堤体軸直交方向の全長にわたって等しい厚さかつ温度勾配を持たない直方体とした。漏水経路を持つ堤体断面は図-9 に示す。1 m 深地温は堤体中央において堤体軸平行方向に 0.5 m 間隔で求めた。計算結果は図-10~13 に示す。

図-10 から、漏水経路厚さの違いによる温度差はほとんど生じない、すなわち漏水経路厚さの探査は出来ないことがわかる。これに対し、図-11 から、漏水経路幅の違いによって明確な温度差が生じることがわかる。図-12、13 から、漏水経路の温度が異なる場合と漏水経路高さが異なる場合には、いずれも明確な温度差が生じることがわかる。また、計算点 0 m 地点の 1 m 深地温と 0.5°C 以上の地温差を生じる範囲は、図-12 においては条件 K、J で計算点 3 m~10 m 地点、条件 L で計算点 3.5 m~9.5 m



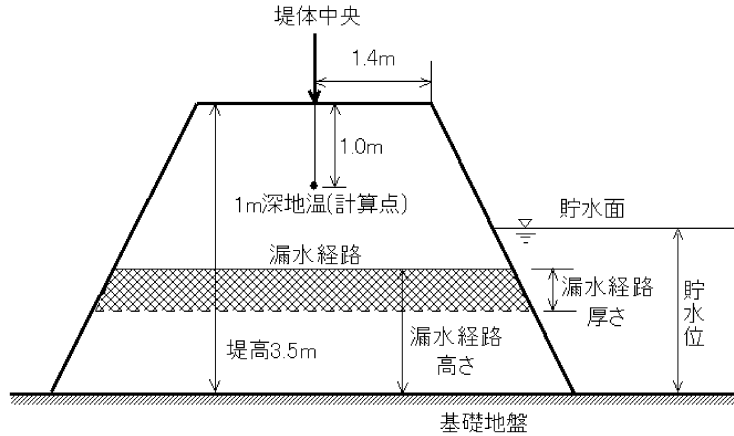
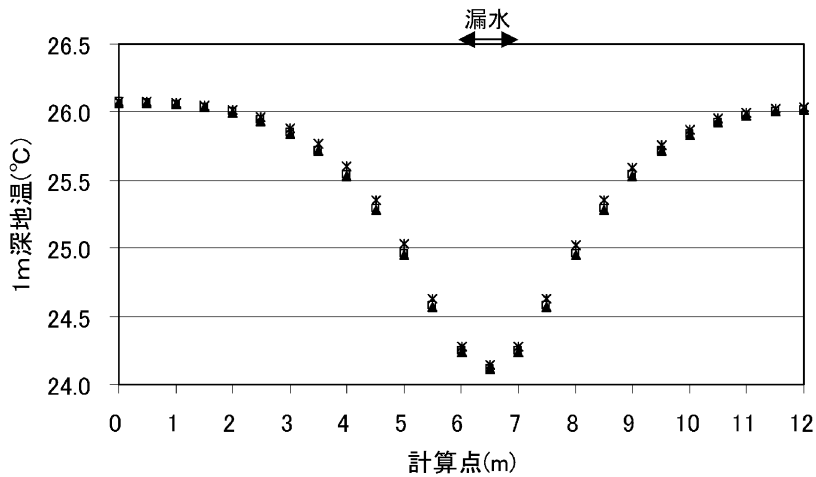


図-9 想定した堤体中の漏水経路

Fig. 9 Leakage paths in the bank



＊ 条件F(0.5m) □ 条件G(1.0m) ▲ 条件H(1.5m)

図-10 漏水経路厚さと1m深地温の関係

Fig. 10 Relations of depth of leakage paths and ground temperature at a depth of 1m

地点、図-13においては3条件とも計算点3m~10m地点の間である。従って、1m深地温の地温差を生じる範囲は、漏水経路温度や漏水経路高さに関わらず、ほぼ等しいことがわかる。

これらの結果から、漏水経路の温度が既知の場合には、堤体軸平行方向に設けた測点の1m深地温の実測値と計算値が整合するよう漏水経路の幅と深度を変えてシミュレーションを行い、両者をマッチングさせることで、測線と直交する漏水経路の幅と深度の推定が可能で

あることがわかる。

#### 2.4 ため池堤体中の漏水経路の推定手順

得られた結果を踏まえ、漏水経路の位置と深度の推定手順を次に提示する。なお、適用に当たっては、漏水経路は直方体で近似できることを前提とする。

- ① 堤体天端上に測線・測点を設定し、1m深地温を測定。
- ② 1m深地温の測定結果から、漏水経路の中心を推定。

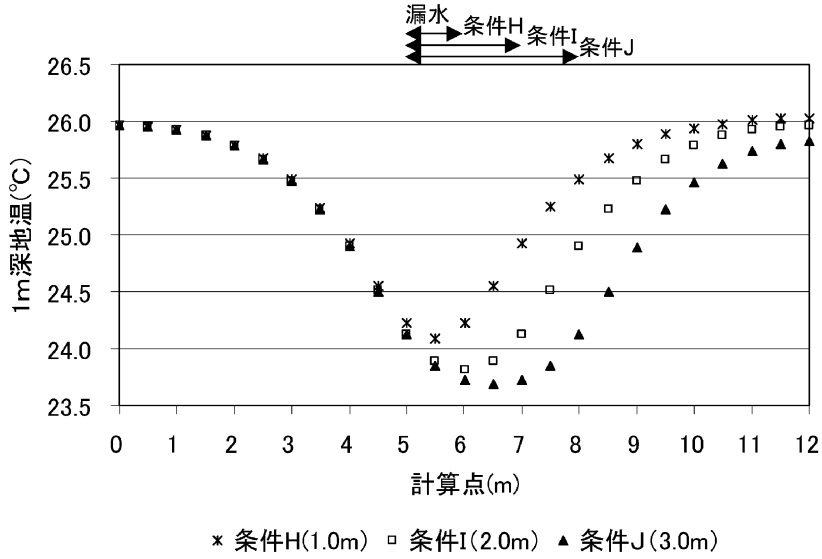


図-11 漏水経路幅と1m深地温の関係

Fig. 11 Relations of width of leakage paths and ground temperature at a depth of 1 m

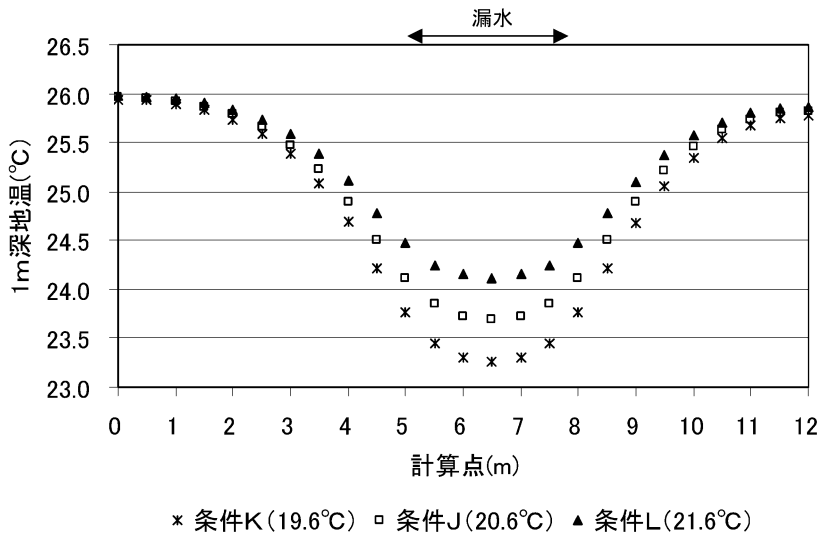


図-12 漏水経路温度と1m深地温の関係

Fig. 12 Relations of temperature of leakage paths and ground temperature at a depth of 1 m

- ③ 漏水経路直上とそれ以外の堤体天端上でボーリング等を行い、漏水経路と浸潤面の水温を測定。
- ④ 既往の観測資料や実測により、堤体表面温度（大気側/貯水側）を決定。
- ⑤ A. Casagrandeの方法やボーリング孔内の水位測定で測線直下の浸潤面深度を決定。
- ⑥ 漏水経路の幅と深度を仮定し、直方体として漏水経路を設定。
- ⑦ ②～⑥の条件に基づいてシミュレーションにより1m深地温を求める。
- ⑧ ①と⑦の結果を比較し、両者がほぼ等しいと見なせるようになるまで作業を繰り返す。

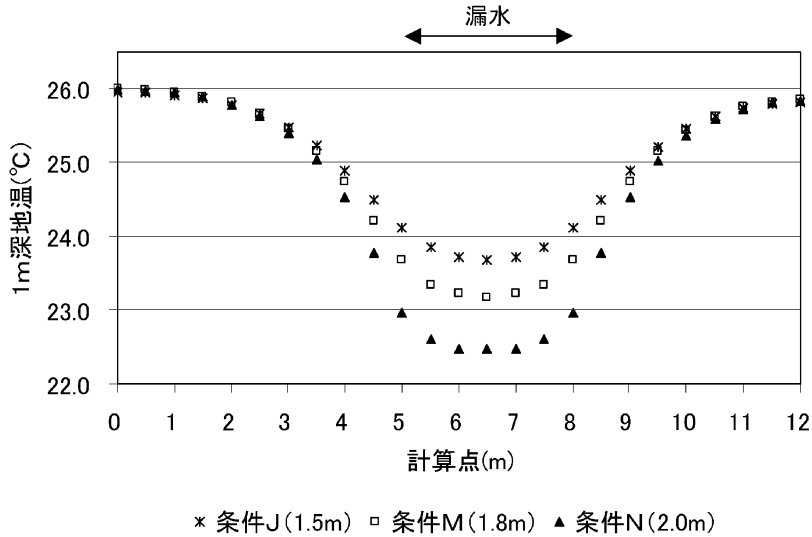


図-13 漏水経路高さ と 1m 深地温の関係

Fig. 13 Relations of thickness of leakage paths and ground temperature at a depth of 1m

⑨ ①と⑥の結果がほぼ等しいと見なせた時点の漏水経路の幅と深度を推定結果とする。

### 3. 青池における漏水経路の推定と検証

#### 3.1 漏水経路の推定

前章で提示した手順に従い、図-3に示した1m深地温の測定結果を用いて青池堤体における漏水経路の探査を行う。

シミュレーションに用いた温度境界条件は、1m深地温の測定と同時にを行った測定値等を用いた。漏水経路水温は図-3に示す地点2におけるボーリング孔内への浸出水の水温、漏水経路外の浸潤面温度は同様に地点1における水温、及び堤体表面温度(貯水側)は地点1付近の堤体表面(貯水側)の水温(水面下1m地点)とした。池水位は図-1に示す水位測定点における測定値とし、浸潤面深度はこの値を用いてA. Casagrandeの方法で求めた。また、堤体表面温度(大気側)は、前述の気象観測露場において1m深地温の測定日と同時期の1993年7月15日~29日に観測された地表下0.2mの地温の平均値を用いた。既出のものを含め、これらを表-3に示す。

得られた1m深地温の計算値と実測値を図-14に、漏水経路の諸元を表-4に示す。青池には図-1, 2に示す位置に、余水吐として機能している旧樋管がある。貯水池側の堤体法面においては、パイピング穴等の漏水の浸入点となるような場所は旧樋管(余水吐)の流入口付近を

表-3 計算条件 (3)

Table 3 Calculation condition (3)

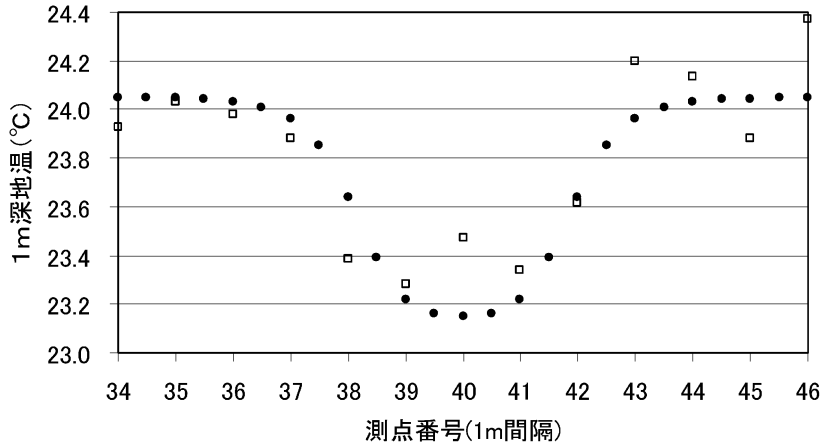
| 項目          | 値      |
|-------------|--------|
| 浸潤面温度       | 21.6°C |
| 漏水経路温度      | 20.6°C |
| 堤体表面温度(大気側) | 26.0°C |
| 堤体表面温度(貯水側) | 26.7°C |
| 池水位(天端から)   | 1.51 m |
| 浸潤面深度(天端から) | 2.0 m  |

表-4 推定した漏水経路の諸元(青池)

Table 4 Specifications of leakage paths (Aoike)

| 項目             | 値     |
|----------------|-------|
| 漏水経路深度(天端から)   | 1.7 m |
| 漏水経路幅(堤体軸平行方向) | 3.0 m |

除いて観察されなかったことから、青池堤体の漏水は旧樋管(余水吐)の流入口付近から旧樋管の管路に沿って堤体内に浸入していると考えられる。また、下流側の道路法面下端の水路周辺一帯(図-1参照)では、漏水が常時浸出している。従って、青池堤体においては、旧樋管(余水吐)の流入口付近から堤体内に浸入した漏水が、測点番号40地点を中心として推定した深度・幅の経路で



● 計算値 □ 実測値(1999年7月21日)

図-14 計算値と実測値の比較 (1m 深地温: 青池)

Fig. 14 Comparison of a calculation value and actual survey value (ground temperature at a depth of 1 m : Aoike)

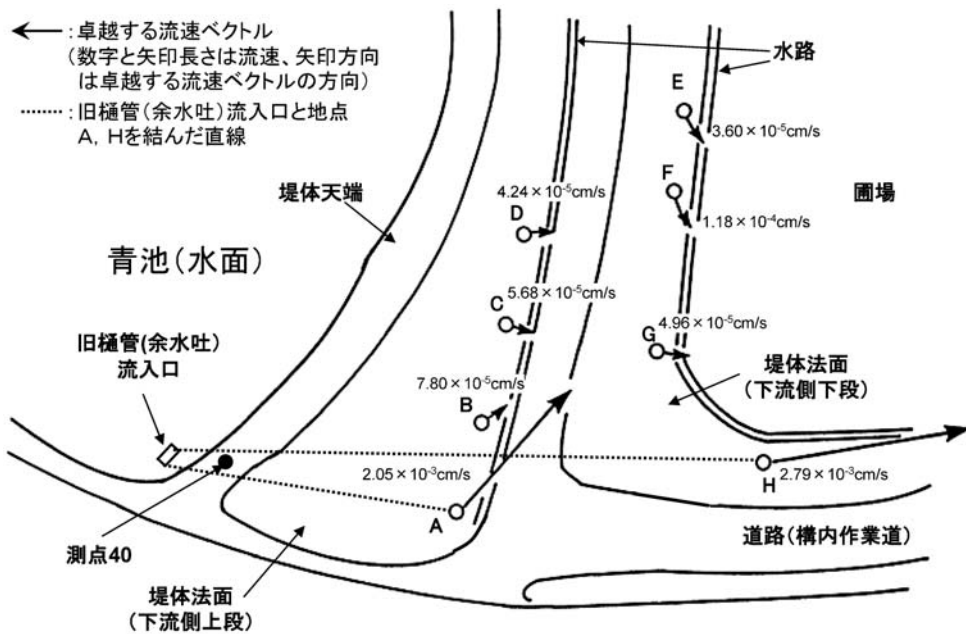


図-15 流速ベクトルと推定した漏水の主な水みち(青池)

Fig. 15 Velocity vector and main leakage paths

測線下を流下した後、下流側の道路法面の浸出地点に達していると推定される。

3.2 推定結果の検証

旧樋管の管路の埋設深度は、貯水池内の流入口と下流

側水路への流出口の位置から推定すると、堤体天端下約1.7mである。測線付近の漏水経路の深度は管路の深度に近いものと考えられることから、深度の推定結果は妥当であると判断できる。

堀ら(1995)は、青池において塩水トレーサ法により、図-15に示す堤体表面に浸出する漏水の卓越する流速ベクトルを求めた。他地点と比して著しく速い流速が測定された地点A、Hと旧樋管流入地点を結んだ直線は、漏水経路の中心と推定された測点40を包括し、かつそれぞれ推定した漏水経路内で測線と交差する。従って、測線上の漏水経路の推定位置も妥当なものと考えられる。

これらの検証結果から、提示した手順により測線下における漏水経路の位置と深度の推定を行うことが可能であると判断できる。

#### 4. 結 言

堤高の低いため池堤体を対象に、堤体天端に設定した測線・測点における1m深地温の測定とシミュレーションを組み合わせ、漏水経路の幅と深度を推定する方法を開発した。

(1) 青池における1m深地温の測定結果から、堤高の低いため池堤体においては、漏水による温度差が形成され易い夏季及び冬期に堤体天端上から測定した1m深地温により、漏水によって生じた温度異常が把握できることを示した。

(2) 1m深地温の測定とシミュレーションにより、ため池堤体の漏水経路の幅と深度を推定する方法を提示した。また、1m深地温のシミュレーションに際して必要な漏水経路や浸潤面の形状、温度境界の設定方法も、ため池堤体における温度環境の測定やシミュレーションによる検討に基づいて示した。

(3) 提示した方法を青池において実際に適用し、漏水経路の位置と深度と推定するとともに、得られた推定結果が妥当なものであることを検証した。

#### 謝 辞

青池における現地作業に際しては、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター研究支援センターの各位、及び朝日テクノ(株)の山下恒雄氏(元近畿中国四国農業研究センター)に協力を頂いた。記して謝意を表する。

#### 引 用 文 献

新井 正・西沢利栄(1974):水温論. pp. 185-190, 共立出版, 東京.  
堀 俊和・毛利栄征・青山咸康(2002a):豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴. 農業土木学会

論文集, 218:127-137.

堀 俊和・森充広・毛利栄征・青山咸康(2002b):地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法. 農業土木学会論文集, 218:115-125.

堀 俊和・山下恒雄・吉迫 宏(1995):塩水トレーサ法によるため池の漏水調査法について. 農業工学研究所技報, 192:41-53.

黒田英男(2003):Visual Basicによる3次元熱伝導解析プログラム. pp. 176-246, CQ出版, 東京.

農林水産省農村振興局(2007):共同活動の手引き. p. 23, 農林水産省農村振興局, 東京.

農林水産省農村振興局(監修)(2003):土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム編〕. pp. II-60-62, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006a):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 3, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006b):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 46, 農業土木学会, 東京.

農林水産省農村振興局整備部設計課(監修)(2006c):土地改良事業設計指針「ため池整備」. p. 48, 農業土木学会, 東京.

奥山武彦・黒田清一郎・中里裕臣・長束 勇(2003):地すべりブロック内におけるため池の浸透防止工による地下水流動の変化. 農業工学研究所技報, 201:165-172.

庄司正弘(1995):伝熱工学. p. 17, 東京大学出版会, 東京.

竹内篤雄(1983a):地すべり地温測定による地下水調査法. pp. 46-50, 吉井書店, 東京.

竹内篤雄(1983b):地すべり地温測定による地下水調査法. pp. 59-64, 吉井書店, 東京.

竹内篤雄・門川泰人・窪田開拓(1990):ため池漏水箇所検出に対する地温測定調査の有効性について. 応用地質, 31(2):20-27.

竹内篤雄(1996):温度測定による流動地下水調査法. p. 70, 古今書院, 東京.

竹内睦雄(1985):電気探査ダイポール・ダイポール法による地下浅部探査. 土と基礎, 33(7):29-32.

湯原浩三(1955):地下1m深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する方法. 物理探査, 8(1):27-33.

## 要 旨

1 m 深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の確立に向けて、青池堤体において1 m 深地温の測定を行うとともに、1 m 深地温の日較差や季節変化、堤体表面温度等の測定を行った。また、シミュレーションにより堤体表面や漏水経路・浸潤面の各種条件と1 m 深地温の関係を求めた。これらの結果から、堤高の低いため池堤体において、漏水による地温異常の把握は温度差が形成され易い夏季及び冬期に堤体天端上で測定した1 m 深地温から可能なことや、シミュレーション時の漏水経路や浸潤面、温度境界条件の設定方法を明らかにした。さらに、1 m 深地温のシミュレーションから1 m 深地温の測定結果と整合する漏水経路や浸潤面の条件を得ることにより、漏水経路の幅・深度が推定できることを明らかにした。

受稿年月日：2006年9月21日

受理年月日：2007年12月28日