落雷を原因とした砂防施設の損傷事例の紹介

AN INTRODUCTION OF DAMAGE CASE OF THE SABO DAM CAUSED BY LIGHTNING

木下　篤彦[1]・高濱　洋介[2]・阿部　征輝[2]・諏訪園　胡楠[2]・佐々木　達生[2]・
永野　賢司[2]・廣井　幸治[1]・秋元　裕[1]
Atsuhiko KINOSHITA, Yosuke TAKAHAMA, Masateru ABE, Konan SUWAZONO,
Tatsuo SASAKI, Kenji NAGANO, Koji HIROI and Yutaka AKIMOTO

[1]国土交通省関東地方整備局日光砂防事務所（〒321-1414 栃木県日光市萩垣面 2390）
E-mail: kinoshita-a8310@mlit.go.jp
[2]大日本ダイヤコンサルタント株式会社（〒330-6011　さいたま市中央区新都心 11 番地 2）

***Key Words**: lightning, low sabo dam, damage*

1. はじめに

2023 年 11 月に，**図-1** に示す日光砂防事務所管内の芹沼床固工で損傷が発見された[1]．**図-2, 3** に損傷の写真を示す．芹沼床固工は，建設から 50 年以上経過しており，当初は，老朽化を疑っていた．また，出水時の巨礫の衝突による破壊や地震による崩壊なども想定された．しかし，この時期にあまり大きな出水がなかったこと，大きな地震もなかったこと，損傷の規模や床固工内部の鋼材を中心に損傷が広がっていることから，落雷ではないか，という意見が専門家から寄せられた．他にも同時期に近隣の入浴施設が落雷被害に遭っていた．このため，本研究では，落雷調査を行い，落雷が破損原因である証拠を掴みながら，破損のメカニズムを検証することとした．

既往研究では，落雷による土木構造物の損傷事例は少なく，鈴木ら[2]による農業用水路の損傷の報告がなされている．彼らは，コンクリート製の水路の損傷に規則性があること，鉄筋が露出しているかどうかで，落雷が原因かどうか判断できると結論づけている．また，土木構造物への被災事例ではないが，酒井ら[3]は，富山大学構内の木に落雷した事例を調査している．木の周辺の土壌の磁気探査の結果から，磁気強度を調べることが，雷電流の経路を知る上で有効であることを示している．また，落雷箇所から離れた場所でも地中を伝わって被災するおそれがあることも興味深い．

著者ら[1]はこれまで，床固工の損傷状況を調査する目的で，高周波衝撃弾性波法(透過法)とコア採取による一軸圧縮試験を行った．これらの結果，床固工の内部は健全な状態であることが分かった．また，損傷原因を調査する目的で電磁界解析を行った．その結果，打継ぎ目の隙間(不連続部)や隙間内に接点(鋼材)を設置した場合，温度が急激に上昇する可能性があることが分かった．本研究は，雷電流の移動経路や損傷原因の詳細分析を目的として，酒井ら[3]の研究を参考に磁気探査により，磁気強度の測定を行った．

2. 調査地の概要と調査方法

(1) 調査地の概要

芹沼床固工は，利根川水系鬼怒川の支川である大谷川に位置し，重力式コンクリート構造（堤高 H=3.0m，堤長 L=185.0m）である．**図-4** に損傷状況の概略図を示す．芹沼床固工の損傷は，左岸側袖部に集中していた．



図-1 芹沼床固工位置図（地理院地図に加筆）



図-2 水通し袖小口上部の損傷



図-3 水通し袖小口下部の損傷

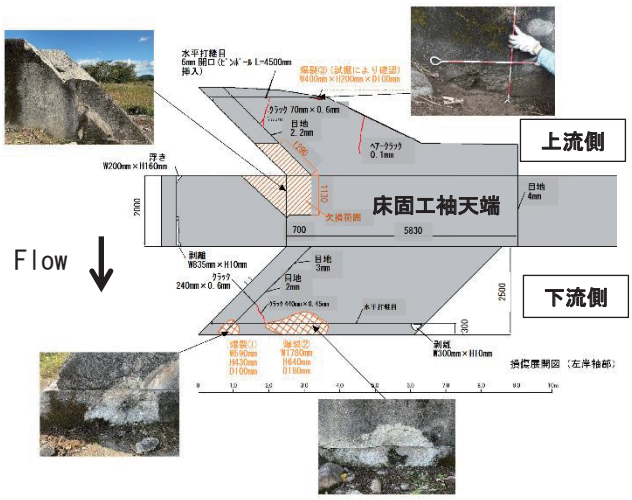


図-4 芹沼床固工左岸側の損傷の概略図

(2) 落雷発生日時

落雷が原因と考えられる損傷は，2023 年 9 月末～11 月 3 日の間に発生したと考えられる．これは，2023 年 9 月末の UAV による空撮と，2023 年 11 月 3 日の LP データとの比較により明らかとなったためである．前述の期間における気象庁(宇都宮地方気象台)の観測記録では，2023 年 10 月 27～28 日にかけて，芹沼床固工付近での落雷が複数回記録されている．

加えて，(株)フランクリン・ジャパンによる「JLDN 全国雷観測ネットワーク」により，同箇所付近において同時期に 2 度の落雷が記録されている．このうち，同箇所から南西に約 110m と最も距離が近い，2023 年 10 月 27 日(12:29 発生)の落雷が，損傷の直接原因になった可能性が高いと考えた．

(3) 調査方法

芹沼床固工袖部の爆裂状の損傷に対して，落雷により生じたであろう残留磁場の測定を実施した．**図-5** に磁場の測定位置図を示す．

これにより，落雷で損傷した可能性のある構造物及び地盤の磁化した部分を確認する．測定には 3 成分の測定が可能なフラックスゲート磁力計を用い，残差磁気及び全磁力を取得した．さらに，3 成分の磁場強度から磁場方向を把握した．測定は，床固工堤体の天端でセンサ高さ 0m(≒0.05m)を，天端とその周辺では，0.5m と 1.5m の測定を行った．測点数は，高さ 0m で 75 点，高さ 0.5m で 117 点，高さ 1.5m で 117 点の計 309 点とした．各測点では，フラックスゲート磁力計により 3 成分の磁気測定を行った．また，基準点及び校正用としては，オーバーハウザー磁力計により定点(基準点)にて全磁力の日変化を測定した．測定は，2026 年 2 月 16 日～20 日であった．測定当日の天候は晴れであった．

磁力計の方向は，床固工堤体に沿った方向（N35° W）を基準にして，センサが同一方向を向くように水糸を設置し目印とした．また，十字に組んだアクリル板上にセンサを固定し，設置した水糸を目印にしてセンサの方向，及び，アクリル板に取付けた水準器を用いてセンサの水平を確保した．測定高さは下段に塩化ビニールのパイプを取り付けることでセンサの高さを確認した．測定は 1 測点あたり 10 秒間行った．日変化による地球磁場の時間変化を除去するために基準点を設けた．全磁力に関しては，同時刻の値を測定した磁場強度から差し引いて，時間変化(日変化)を除去した残差磁気を求めた．

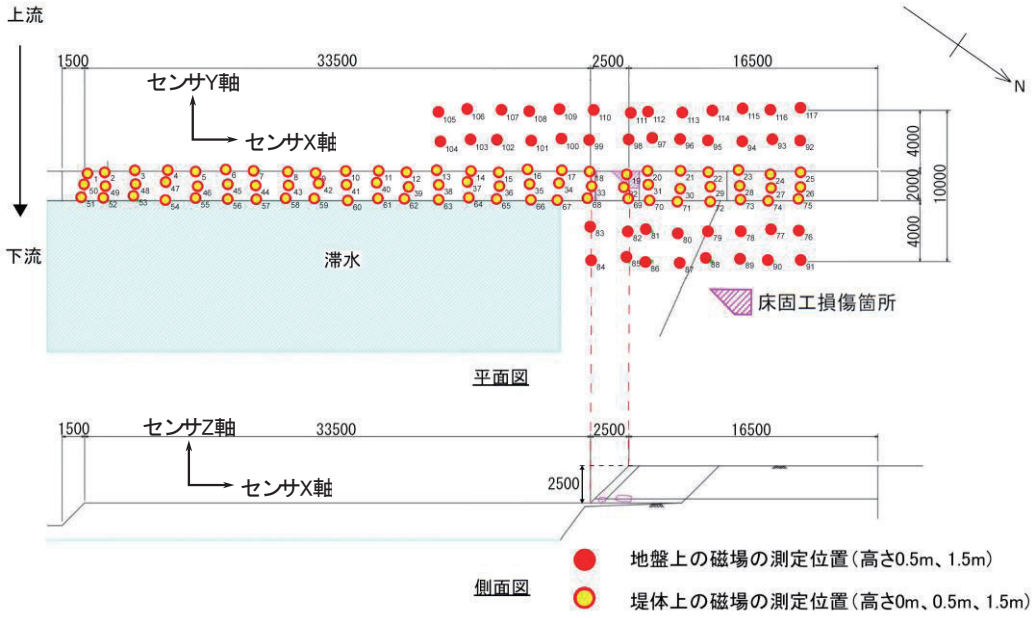


図-5 磁場の測定位置図

フラックスゲート磁力計により測定された 3 成分の測定値から真の磁力を得るためには，以下の 5 つのずれや誤差を補正する必要がある [4].

① 0 値のずれ
② センサ感度の誤差
③ センサ感度の非線形性
④ 3 成分のセンサの取付け角度の誤差
⑤ センサの周波数特性(移動しながら測定を行う場合)

今回，これらのキャリブレーションは，オーバーハウザー磁力計の近傍で，測定に使用するフラックスゲート磁力計の磁気センサを様々な方向に揺らすことにより行った. ここで, 上記各値を変数として，オーバーハウザー磁力計により測定された全磁力値が真の値であると考えて，各変数の値を非線形最小二乗法により求めさせた．また，これら変数は温度変化により変わる可能性があるため，調査日の測定前後にキャリブレーションを実施した．また，X 軸センサを床固工堤体に沿った方向(N35° W)に，Y 軸センサを床固工に直行方向に固定して測定した．磁場の方向を図化する際，後処理により座標を時計回りに 125° 回転させて, Y 軸センサを南北方向, X 軸センサを東西方向にした．水平磁場ベクトル図を得るために座標回転後の全測点の X 軸，Y 軸，Z 軸センサ値，それぞれについて平均し，各測点の X 軸，Y 軸，Z 軸センサ値のそれぞれより減算した．その後，水平成分の X 軸，Y 軸センサ値より各格子点での磁場の方向を求めて水平磁場ベクトル図を作成した．

3. 調査結果

(1) 残差磁気

図-6 に各高さでの全磁力図, **図-7** に各高さでの残差磁気異常図を示す．全磁力図から，調査地付近の平均磁力を差し引いて残差磁気異常図を作成した．残差磁気異常図は，相対的な磁気の違いを表しており，これにより雷による電流の影響を考察する．

センサ高さ 0m では，測定領域の南側を境にして，床固工堤体の北側と南側では残差磁気の状況は大きく異なり，北側では南側に比べて堤体沿いの高低差が明瞭である．南西側では残差磁気は高く，北東側では低い．床固工堤体欠損部付近では，残差磁気の高低が逆転していた．

センサ高さ 0.5m では, 堤体損傷部の南東側の調査地区中央部では，残差磁気はセンサ高さ 0m と同様な明瞭な変化が現れている．その他の箇所では，センサ高さ 0m より磁気の違いは不明瞭となった．

センサ高さ 1.5m では，残差磁気の違いは，他のセンサ高さの平面図より不明瞭となる．残差磁気の傾向はセンサ高さ 0.5m の残差磁気と類似していた．

残差磁気の水平面での違いはセンサ高さが低いほど，コントラストが明瞭であった．これはセンサが対象物に近いほど反応が強いことを意味する. また, 対象物(地表)に近いセンサ高さ 0m では, 表面の影響を強く，逆に，センサ高さが高いと深部を含めた全体の変化を捉えていると考えられる．

今回の場合，センサ高さ 0.5, 1.5m の床固工堤体損傷部分の南東側の残差磁気変化は，落雷により堤体

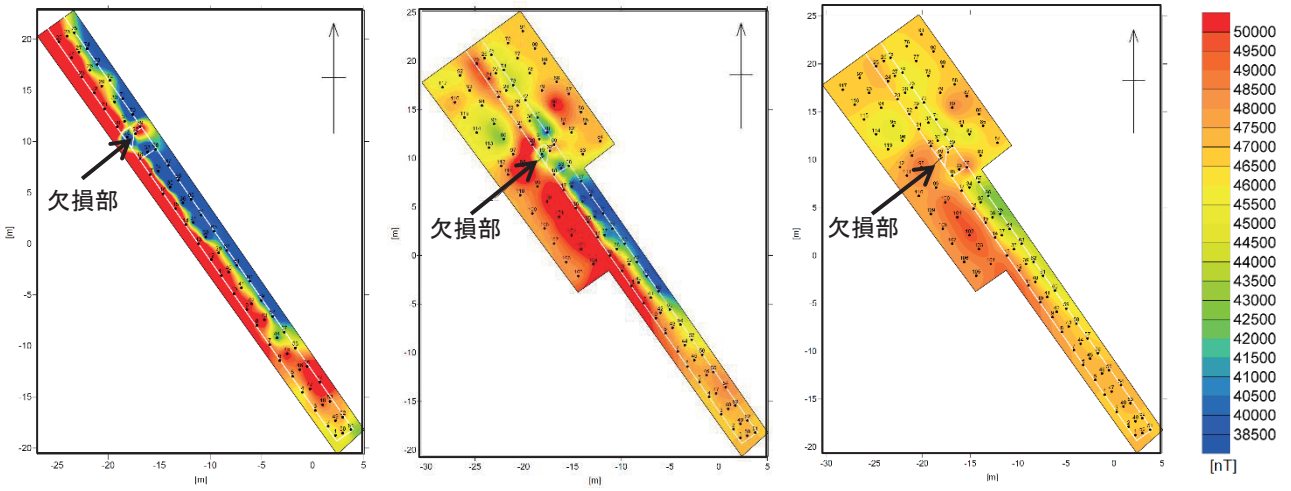


図-6 全磁力図．左図はセンサ高 0m，真ん中はセンサ高 0.5m，右図はセンサ高 1.5m．

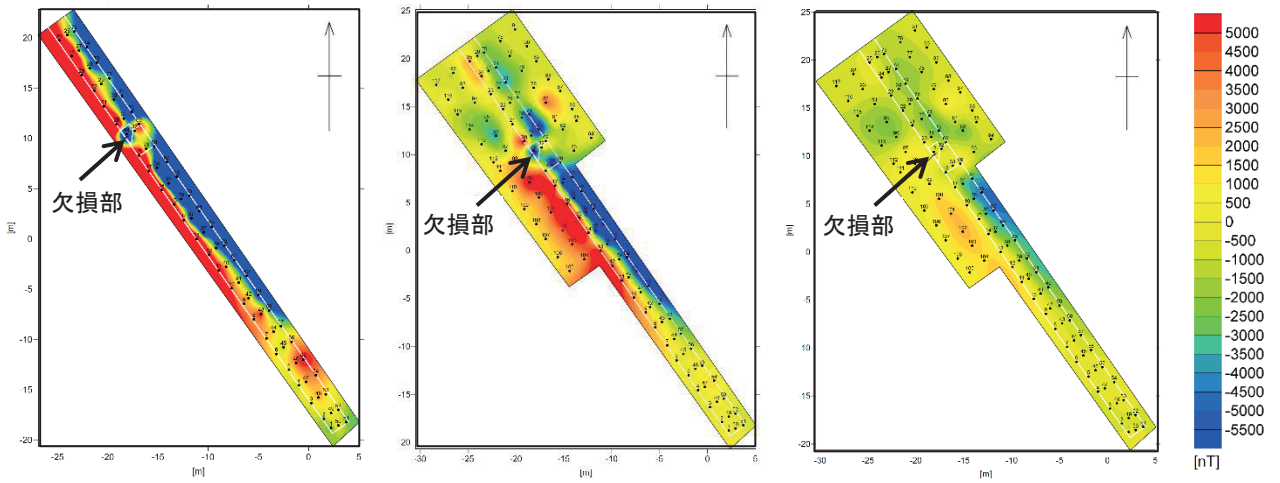


図-7 残差磁気異常図．左図はセンサ高 0m，真ん中はセンサ高 0.5m，右図はセンサ

が磁化したことにより生じたと考えられる．

(2) 水平ベクトル図

図-8 に水平磁場ベクトル図(平均値減算前)，**図-9** に水平磁場ベクトル図(平均値減算後)を示す．

平均値減算前の水平磁場ベクトルは，ほぼ同方向(磁北方向)を向く．ただし，堤体欠損部の主に南側の堤体部分では磁場の強度や方向が周囲と異なる．地球磁場を除いた異常を強調するために平均値減算後の水平磁場ベクトルを図化した．**図-9** には，以下の傾向があった．

・水平磁場ベクトルは，特定の地点を中心に放射状に広がっていた．
・水平磁場ベクトルは，互いに反する方向の水平磁場ベクトルが帯状に集まる傾向にある(欠損部より南側で顕著)．

国土地理院，磁気図(偏角)2020 年値/偏角一覧図より調査地の磁北は N7.5° W であった．今回測定された平均値減算前の水平磁場ベクトル(**図-8**)は，地球磁場方向(N7.5° W)に近いことが分かった．ただし，堤体損傷部の南側の堤体部分では磁場の強度や方向が異なるが，これは落雷により構造物や地盤が磁化したことにより水平磁場ベクトルの方向や強度が歪んだためであると考えられる．

磁気測定から分かることは，雷の電流が通った経路ではなく，それにより磁化された構造物や地盤である．電流が流れた経路は，このような残留した磁化から類推することになる．ここで、平均値減算後の磁場ベクトル(**図-9**)について，Z 軸方向の成分を考慮して傾斜角の算出を行う．傾斜角はベクトル図と重ねたコンター図とし，磁力線の立体的な分布を考慮して雷の電流が流れた経路を考察する．

図-10 に傾斜角を考慮した磁力線のベクトル図を示す．ここから，以下のことが分かる．

・高さ 0.5m 及び 1.5m の図から，損傷部より南側において，平均値減算後の水平磁場ベクトルの強度が強い(矢印の長さが長い)．
・落雷の電流が堤体の天端に沿って水平方向に流れ

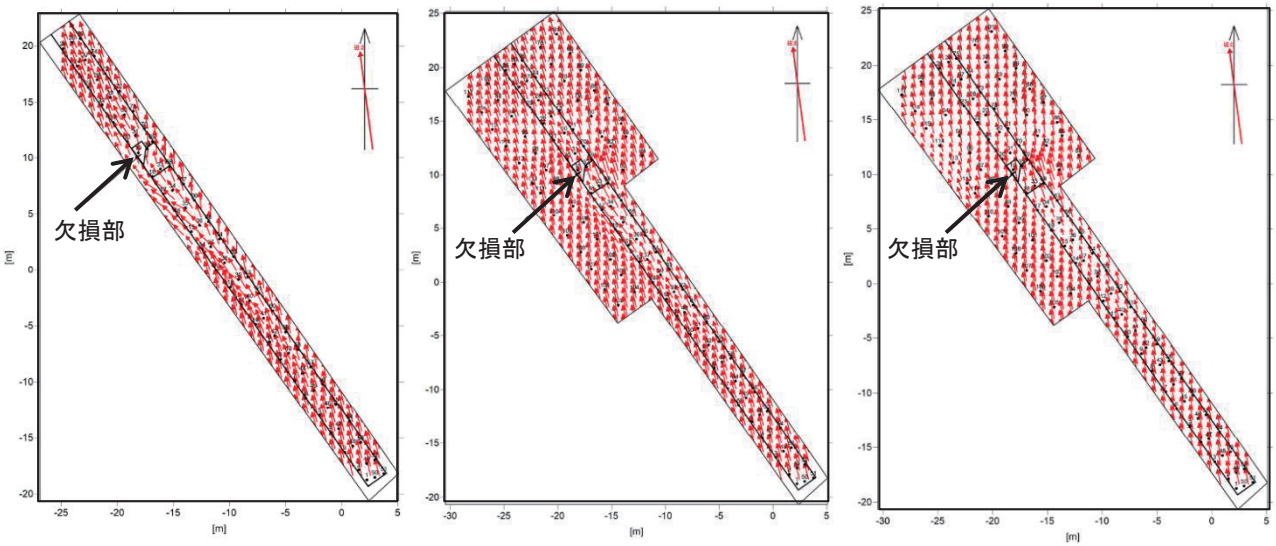


図-8 水平磁場ベクトル図(平均値減算前). 左図はセンサ高 0m, 真ん中はセンサ高 0.5m, 右図はセンサ高 1.5m

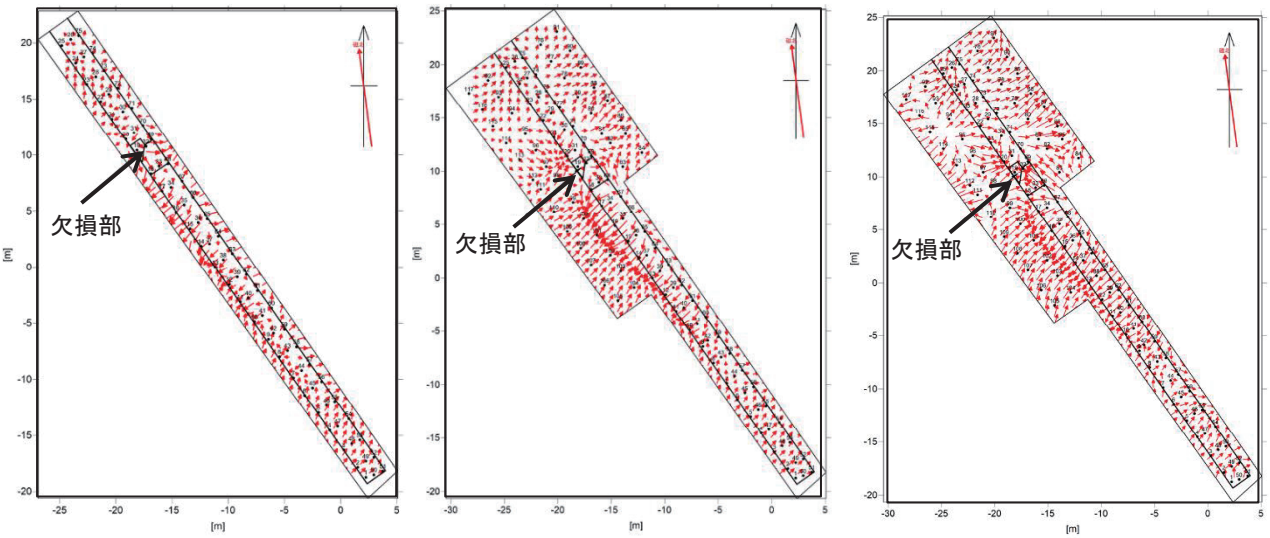
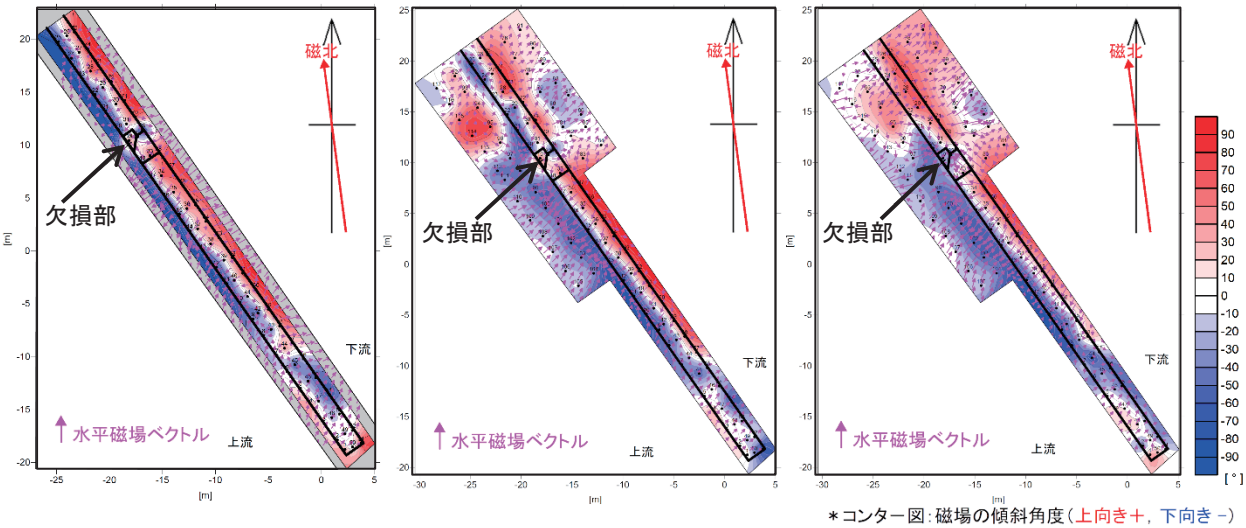


図-9 水平磁場ベクトル図(平均値減算後). 左図はセンサ高 0m, 真ん中はセンサ高 0.5m, 右図はセンサ高 1.5m



＊コンター図:磁場の傾斜角度(上向き＋, 下向き－)

図-10 水平ベクトル図と傾斜角のコンター図(平均値減算後). 左図はセンサ高 0m, 真ん中はセンサ高 0.5m, 右図はセンサ高 1.5m

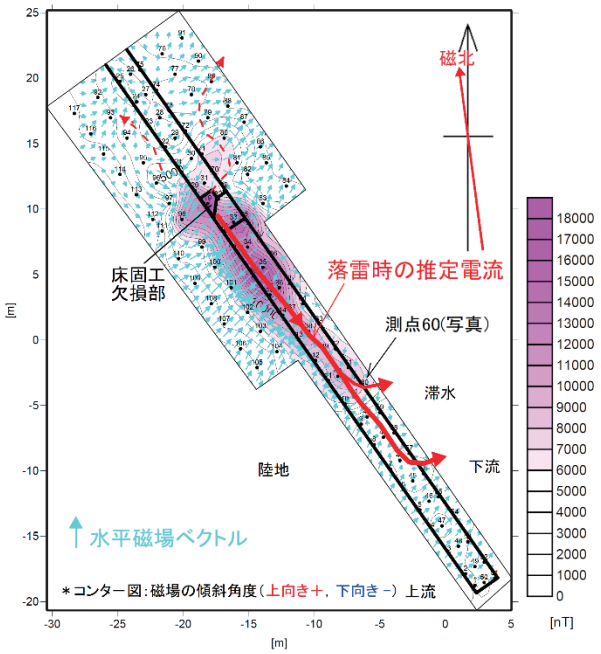


図-11　平均値減算後の水平磁場ベクトルと残差磁場ベクトル強度(センサ高 0.5m)

たと仮定すると，電流が流れた位置ではベクトルの傾斜角はほぼ 0°　となる．

・ビオ・サバールの法則「右ねじの法則」から，電流の方向に沿って右側は磁力線の鉛直成分が下向き 45～55 度の磁力線を強め，左側は逆に弱める．

・床固工のほとんどの領域で中心線に沿ってベクトルの傾斜角がほぼ 0°　であり，上流側が下向き，下流側が上向きの傾斜角であることから，雷電流は堤体の上面に沿って南方向に流れたと推測される．

図-11 に落雷時の電流経路と方向を予測した図を示す．雷の電流は，主に堤体損傷部より堤体の上流に沿って流れ，堤体の途中から下流側の滞水部へ流れたと推定される．なお，その時の損傷らしき堤体の欠損部が存在している(**図-12**)．また，電流の流れの向きより，電流経路の上流側では残留磁場が下向きとなり下向きの地球磁場と強め合い，下流側では残留磁場が上向きとなり下向きの地球磁場と弱め合ったと考えられる．

・強い磁化が残っている場合，水平磁場ベクトルの強度は強い（矢印の長さが長い）．

・電流が流れた位置ではベクトルの傾斜角はほぼ 0°　となる．

・残留する磁場は「右ねじの法則」と地球磁場により強弱が決まり，およそ電流の方向が分かる．

4. おわりに

本研究では，落雷により発生したと考えられる床固工の損傷のメカニズムについて，磁気探査によってその原因を調査した．得られた結論は以下の通りである．

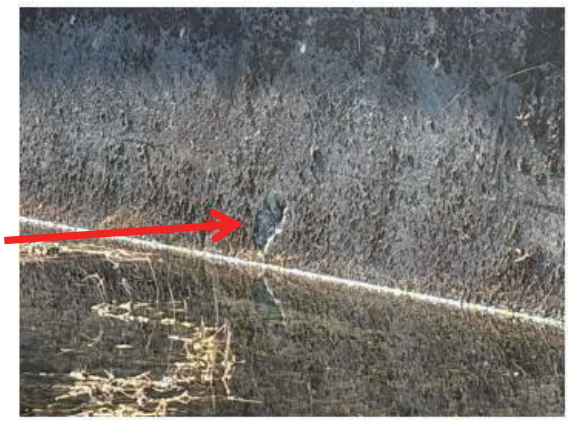


図-12　雷の電流が通ったであろう付近の堤体の損傷（矢印の先端付近のくぼみ）

1)残差磁気，水平磁場ベクトル(平均値減算前後)，磁場の傾斜角」の図から，床固工欠損部とその南側の堤体に磁気異常があることが分かった．

2)「水平磁場ベクトル（平均値減算後)」と「磁場の傾斜角」を重ね，落雷時に流れたであろう電流の経路とその方向を予測することができた．

3)今回の磁気探査により，電流経路及び流向も推測でき，破損部に落ちた雷電流は主に堤体沿いに南側へ流れ，滞水部へ逸流したことが分かった．

参考文献

1)　高濱洋介，阿部征輝，諏訪園胡楠，佐々木達生，永野賢司，木下篤彦，廣井幸治，秋元 裕，上原浩明，金井駿杜:落雷を原因とした芹沼床固工の損傷メカニズムについて，令和 8 年度砂防学会研究発表会概要集，2026. https://jsece.or.jp/event/conf/abstract/2026/pdf/257.pdf

2)　鈴木純，五味義弘，城取信久：落雷による農業用水路の破損の特徴と判定マニュアル，農業農村工学会誌，85 巻，9 号，　pp.859-864，2017.

3)　酒井英男，卜部厚志，竜田尚樹，泉吉紀，伊藤光：北陸地域の落雷･雷被害の大地からの研究－地球電磁気を中心に，新潟大学災害･復興科学研究所共同研究報告書，2023. https://www.nhdr.niigata-u.ac.jp/wp-content/uploads/2023/12/02ce0769d85e8db81646fd4a2876079a.pdf

4)　宇津木充，橋本武志，城森敦善：ドローンを用いた空中磁気観測システムの開発，日本地球惑星科学連合2018年大会，SEM19-P02，2018.

(2026.5.29　受付)