

一般財団法人新潟県建設技術センター

令和3年度研究助成報告書

比抵抗マッピングによる河川の河道変遷と洪水履歴の復元

令和4年3月

研究代表者

新潟大学災害・復興科学研究所

卜部厚志

## 1. はじめに

2019年10月の令和元年東日本台風（台風19号）による集中的な降雨によって、東日本の広範な地域において氾濫、洪水や土砂災害が発生した。このうち長野県長野市穂保の千曲川左岸では、超過洪水による越水によって堤防が破堤した。これまでの堤防の決壊による洪水では、河川堤防の内部構造（堤体材料の不均一性）による流量超過時の堤体への水の浸透や堤防直下の地盤（旧河道の横断痕跡等）に起因した堤防直下での漏水など、越水を主要要因としながらも、急激な堤防の破堤につながる複合した要因の解明も重要となっている。

新潟県内においても近年、堤防の破堤や超過洪水が高頻度化している。2004年7月の新潟・福島豪雨では、刈谷田川や五十嵐川などにおいて越流により堤防が破堤している。一般に、平野部を流下する河川は、丘陵部や山地部と異なり蛇行流路の形態を有しており、明治時代以降の治水事業において、蛇行流路の直線化が進められてきた。この河道の直線化の過程において、旧流路を横断する形で新たな堤防が構築されており、旧流路部に当たる堤防直下での漏水やパイピングが懸念される。旧流路の復元は、旧版の地形図、1945-1950年に撮影された空中写真によって明らかにすることができる場合もあるが、明治時代以前の流路痕跡は、堤防高が低いこと、洪水による頻繁な流路改変や土地利用による平滑化によって地形図や空中写真では判読できないことも多い。このため、旧版の地形図や空中写真によらずに旧流路を特定する手法の開発が必要である。

堤防のパイピングによる破堤や堤防直下からの漏水箇所を予測することのほかに、堤防は江戸時代後期あるいは明治時代以降、複数時期の拡幅や堤防高のかさ上げなどの過程を経て現在の堤防に至っていることが多い。また、築堤時に使用する堤防の材料についても、昭和初期までは大型の重機による土砂運搬が困難であったことから、現地（近傍）の河川や高水敷を構成する堆積物によって築堤されていることもある。よって、河川の上流部や平野内陸部（長岡など）では、初期の築堤の材料として砂礫をコア材として使用していることもある。加えて、築堤初期の材料は、現地（近傍）の堆積物を用いていることから、場所や築堤時期の差異によって、堤防を構成する材料が不均一であることが多い。現在の河川堤防は、堤体を覆うカバー材として透水性の低い材料を用いているが、堤体内部に水が浸透した場合には、一連の堤防であっても場所や築堤時期の差異によって、浸透破壊のリスクがことなることが予測できる。現堤防の浸透破壊のリスク評価を行うためには、堤体内部の均一性を評価する必要がある。しかし、現堤防の内部構造を具体的に評価するためのボーリング調査は、約1kmごとの掘削に限定されており、連続的かつ簡便な方法によって堤体内部構造の把握とリスク評価を行う手法の開発も必要である。

堤体直下の地盤構造や堤体内部の均一性を評価する方法としては、直接的な方法はボーリングによる試料採取であるが、現実的には多地点を行うことが不可能である。このため間

接的に地盤構造や堤体の内部構造を評価する方法として、物理探査による様々な手法（弾性波探査、表面波探査、地下レーダ探査、電気探査など）が行われてきた。また、最近では宇宙線由来のミュオン粒子を用いた探査も行われている。しかし、より簡易な手法で堤体直下の地盤構造や内部構造を把握する手法が求められている。

そこで、本事業では、広帯域周波数 EM プロファイリング（電磁探査）装置を用いて、地下 10m 程度までの地盤の比抵抗を計測し、比抵抗分布の断面を作成することによって、堤体直下の地盤構造や内部構造の把握を試行した。これまで、いくつかの検討により、EM プロファイリングによる電磁探査の手法は、堤防直下の地盤構造の推定が可能なが示されているが、非常に少ない事例検討となっている。

このため、本事業では、EM プロファイリングの手法による物理探査の有効性を検証することを目的として、信濃川、刈谷田川、五十嵐川などにおける堤体直下の地盤構造や堤体の内部構造の把握を行った。本事業での比抵抗測定は、比較的簡易であり地盤の評価に有効であれば、活用範囲を飛躍的に増加させることができる。

破堤による洪水に対して、発生する場所を推定することに加えて、洪水のリスク評価のためには、洪水履歴の具体的な把握が必要となる。現在、洪水のリスクは降雨量の確率論に基づいて、1000 年に 1 度程度などの洪水の規模の評価を行っている。この発生確率論による超過洪水の推定手法により、各河川の基本高水量が設定され堤防などの河川構造物が設計されている。一方で、地震の履歴や地震による津波の履歴は、確率論による発生履歴と規模の推定ではなく、古文書の記載、地震による液状化の痕跡、津波による津波堆積物の存在から発生履歴が復元され、発生確率やリスクの評価が行われている。

洪水のリスクについても、発生確率論による洪水のリスク評価ではなく、堆積物から実際の洪水の履歴と規模を探ることで真の洪水リスク評価が実施できるものと考えられる。しかし、このような取り組みは行われていない。そこで平野の地層に記録されている洪水の痕跡について、従来では地層に挟在する砂層を洪水砂層としてとらえ、地層の年代を測定することにより洪水の履歴を求めようとしてきた。一方で、破堤による砂層の運搬と堆積は、砂層の分布が破堤箇所近傍に限定されることから（破堤箇所の近傍のみに砂層が堆積する）、砂層のみを洪水痕跡として認定することでは、平野部の洪水履歴を限定的にしかとらえることができない。他方、破堤による洪水の痕跡として、湛水した洪水から堆積した泥層や粘土層は、湛水範囲全般の広範囲に分布する。このため、1 回の洪水による泥層や粘土層の単層を的確にとらえ、地層に挟在する泥層や粘土層により洪水の履歴や規模（地層の厚さ）を推定することができる。本事業では、物理探査だけでなく、泥層や粘土層を洪水の履歴としてとらえるために粒度分析による基礎的な検討も行った。このような取り組みは、平野部の洪水履歴をとらえるための新規性の高い取り組みである。

## 2. 研究手法

### 2.1 EM プロファイリング（電磁探査）

物理探査は、土木や地質分野において様々な地層、探査対象深度や探査目的によってさまざまな手法がある。このうち比較的浅い地盤構造を効率的かつ非破壊で解析できる方法としては、表面波探査、地下レーダ探査、電気探査や電磁探査などがあり、探査対象とする地層の特性（材質や地下水位飽和など）によって使い分けられている（後藤・三ヶ田，2008；稲崎，2008）。

今回実施した EM 探査は、Electro-Magnetic-methods（電磁法）とよばれる電磁探査の一種で、地中における誘導電磁場の応答から、地盤の比抵抗値の逆数である導電率および磁化率を測定する方法である（三浦・稲崎，2010；大石ほか，2012；冠ほか，2012）（図 1）。

今回使用した GeoPhex 社製 GEM-2 は、マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査を実施できる機器で小型、軽量で現地での測定が容易な機器である（図 2）。この装置では、発生させた電磁波が周波数の違いによって透入深度が異なることを利用し、深度方向の導電率の変化を測定するものである。また、1 点の測定において 10～12 程度の異なる周波数の電磁波を発生させることができる特徴がある。周波数と深度の関係では、周波数が高い電磁波は浅層部分の地盤状況を、周波数が低い電磁波は深層部分の地盤の状況を反映することができる。さらに、複数の周波数を用いて同時取得したデータに対して地盤が水平多層構造であると仮定した逆解析（光畑，2006）を行い測定地点直下での深度方向の比抵抗分布をもとめ、推定された深度方向の比抵抗分布を全ての測点についてつなぎ合わせて測線ごとに比抵抗断面図を作成した。

本事業での測定では、堤防直下の旧流路跡の復元を目的として探査対象深度を 0～15m 程度とした設定①と堤体内部の均一性の測定を目的として探査対象深度を 0～5m とした設定②で同じ測線を調査し比較検討を行った。また、GEM-2 では、歩きながら連続的に測定する推測航法と各測点で停止して設定した秒数間の測定を行う定点観測法の 2 種類を実施することができる。このため、周波数設定①を用いて、歩きながら実施する推測航法と 2m ごとの定点で 10 秒間測定する定点観測法の比較検討も行った。

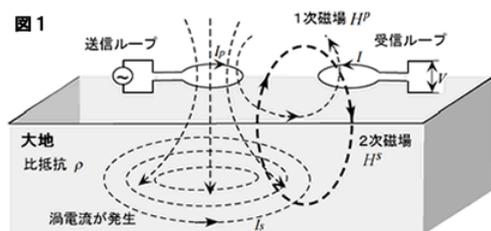


図 1 EM 探査の原理（光畑，2006）

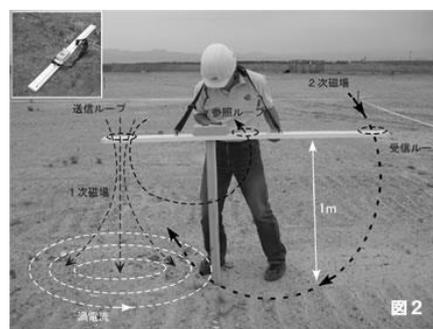


図 2 GeoPhex 社製 GEM-2（産総研 HP より）

測定は、長岡市天神地区、妙見地区の信濃川の堤防天端、見附市猫興野地区の刈谷田川の堤防天端や三条市三竹地区の五十嵐川堤防天端（2004 年新潟・福島豪雨による破堤箇所付近）で測定を行った。また、比較検討として測定した堤防近傍の旧流路や自然堤防地形においても測定を行った。

## 2.2 地層に記録された洪水履歴調査

津波や洪水の痕跡は、堆積物として地層に記録されている。一般に、津波が内陸部や海域へもたらした砂層は津波イベントを示す痕跡として多くの調査が行われている。同様に、土石流や洪水によって平野部に運搬された砂層は、土砂・洪水イベントを示す堆積物として認識されている。しかし、近年の洪水による堆積物の分布をみると、破堤箇所の近傍のみに砂層が堆積し、広範囲に及ぶ湛水域には、泥層や粘土層が堆積している。このことから、平野部での洪水の履歴をとらえるためには、平野の地層を構成する泥層や粘土層から、1回の洪水のイベントを読み解くことが必要となる。

本事業では、まず、洪水による泥層の累重関係（地層の積み重なり）がみられる遺跡調査地点での泥層の解析から洪水による地層の変化の特徴を解析した。対象とした遺跡は、新潟市江南区の曾我墓所遺跡である。曾我墓所遺跡は、阿賀野川左岸の自然堤防からやや内陸側に立地し、奈良・平安時代の住居跡や木製井戸枠を持つ井戸が見出されている。この遺跡の発掘基本セクションは、すべて泥層であり肉眼的には差異が非常にわかりにくい、遺物や遺構の検出状況から、遺構面（当時の生活している地表面）が区分されている。ある時期の地表面に累重する泥層は、阿賀野川の洪水による泥層であると推定されており、明らかに洪水の堆積物の累重が認定できるセクションにおいて泥層の粒度分析を行った。

また、信濃川左岸と中之口川右岸での洪水について、砂層ではなく泥層（粘土層）の累重に基づく洪水イベントの抽出と履歴を試行的に明らかにするために、新潟市南区鷺ノ木地区において、平野表層部の深度 10m までの地層を採取し、洪水イベントの検討を行った。後述するように、鷺ノ木地区は信濃川左岸と中之口川右岸からやや距離は離れているが、信濃川左岸と中之口川右岸が破堤して洪水を引き起こした場合、湛水する地区にあたる。また、江戸時代中期まで、中之口川は鷺ノ木地区より上流部までしか築堤されず、中之口川の流水は低湿地であった鷺ノ木地区に自然放流されていた（岩田，1933）。このため、泥層（粘土層）の累重に基づく洪水イベントの抽出が可能な地域であると推定した。

白根・鷺ノ木地区の試料採取は、白根北中学校敷地内と中学校入り口付近の県道 46 号線沿いにおいて、自走式ボーリング機器（エコプローブ）を用いて、口径 86 mm で深度 10m までのオールコアで地層を採取した。また、採取した試料は、半割後に記載を行い泥層～粘土層が連続する層位の試料の粒度分析を行った。粒度分析は、マルバーン・パナリティカル社製のレーザ式粒度分析装置（Mastersizer 3000）を用いて、1 cm ごとに粒度分析を行った。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 EM プロファイリング（電磁探査）

長岡市天神地区の信濃川右岸の堤防天端と周辺、妙見地区の信濃川右岸の堤防天端、見附市猫興野地区の刈谷田川右岸の堤防天端や三条市三竹地区の五十嵐川左岸堤防天端の探査結果の概要を以下に述べる。

##### 3.1.1 長岡市天神地区

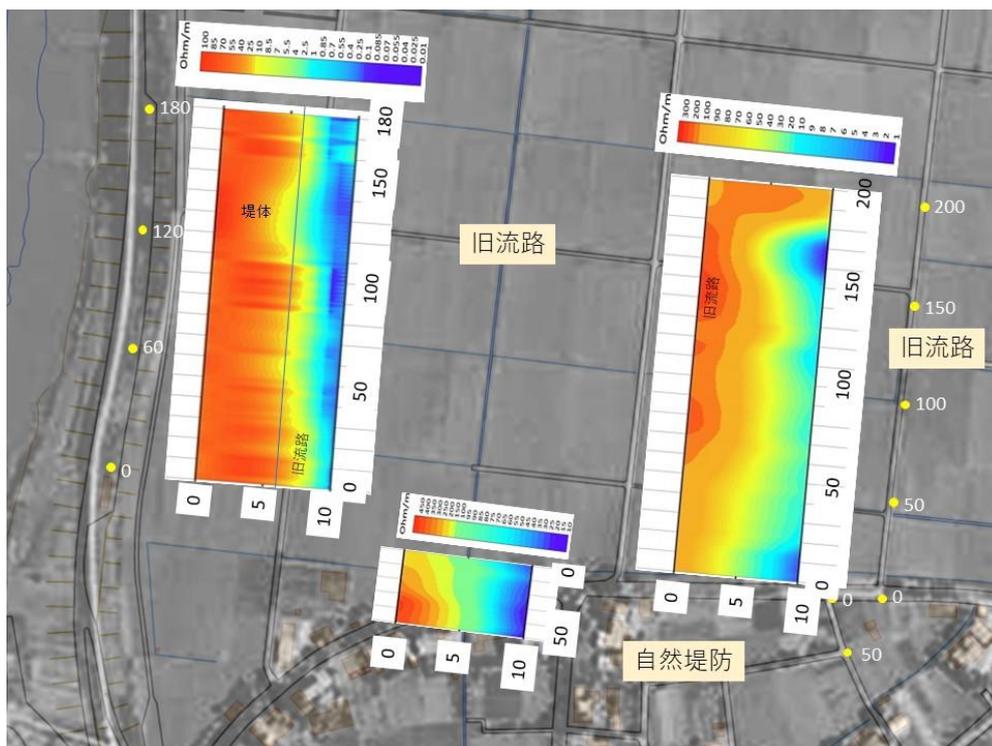


図3 長岡市天神地区での探査結果

信濃川右岸の長岡市天神地区では、地形判読から明瞭な旧流路と自然堤防の地形が認められる。ここでは、旧流路地形に位置する堤体直下の地盤構造の推定や旧流路地形内における層相変化の把握を目的として探査を実施した。比抵抗断面を図3に示す。

信濃川右岸の堤防天端での探査は、堤防の側帯部分で実施し、比抵抗分布から深度 5.5m 付近を境界として比抵抗の明瞭な差異が認定できる。また、堤体直下の地盤は、0～40m においてやや高比抵抗部分が深い深度まで確認でき若干の凹地状の形態を示している。また、50～180m では、ほぼ水平な地盤構造が認められ、泥質な層相と推定される低比抵抗部分が堤防直下の浅い深度に分布していることが推定できる。

旧流路の中の農道で実施した測線では、地形判読では旧流路地形と一括されるが、比抵抗分布からみると地下構造が不均一であることがわかる。特に、120～180m 区間は高比抵抗を示しており、旧流路の中でも砂礫質である河川流路が位置していたものと推定できる。

この地区の検討では、EM 探査の手法が旧流路地形内において地盤構造（層相）の差異を

認識できること、堤体直下の地盤構造においても相対的ではあるが、砂礫質部分の層厚の差異を読み取ることができた。この結果は、EM 探査が、旧流路を横断する堤体直下の地盤構造について、相対的ではあるが層相の把握を行うことができることを示しており、旧流路内でのパイピングや堤体直下からの漏水のリスクを評価することにつながる成果である。

### 3.1.2 長岡市天神地区

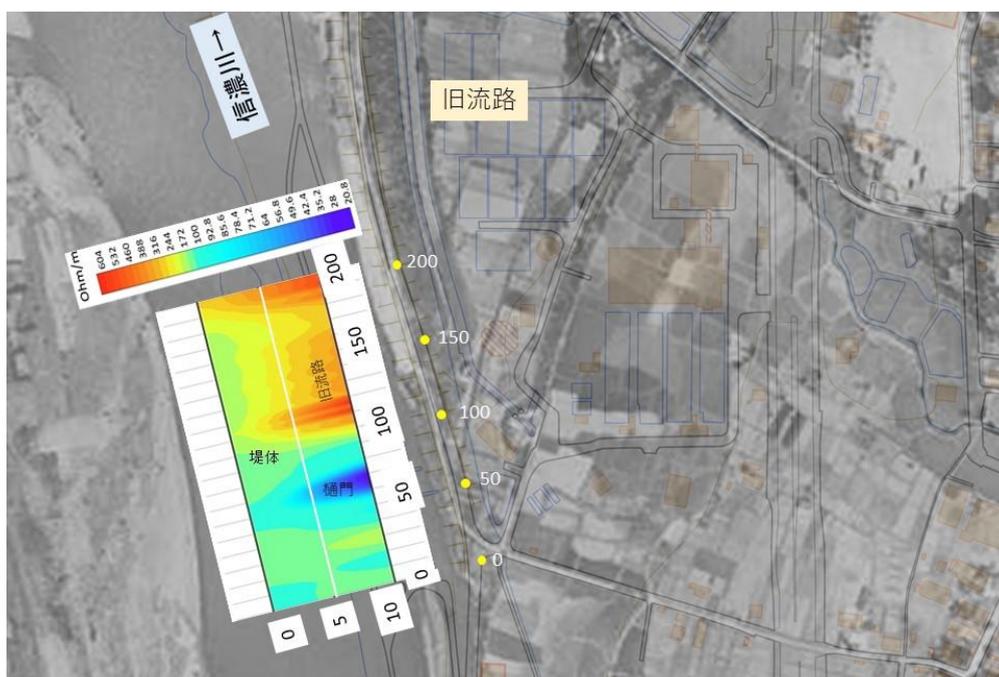


図4 長岡市妙見地区での探査結果

信濃川右岸の長岡市妙見地区では、地形判読から明瞭な旧流路が認められる。ここでは、旧流路地形に位置する堤体直下の地盤構造の推定や堤体の内部構造の把握を目的として探査を実施した。比抵抗断面を図4に示す。また、長岡市妙見地区の信濃川の現河道や高水敷は礫質であることから、初期の築堤材料として現地の砂礫質土砂を用いていた可能性がある。

信濃川右岸の堤防天端から探査を行った。堤体高は約5mであるが、地下5mまでの比抵抗構造をみると100m地点を境として堤体内部において比抵抗の不均一が認められる。このうち63~65m地点には堤防直下に堤内排水のための樋管が設置されており、局所的な低比抵抗部分は樋管に相当する。また、0~100mと100~200m区間を比較すると100~200m区間の方が堤体内部に高比抵抗な部分を有していることがわかる。堤体直下の深度5~10mまでの地盤構造では、100~200m区間が高比抵抗を有しており、旧流路(旧河道)を構成していた砂礫質な堆積物の分布が示唆される。

この地区の探査では、EM探査法は堤体内部の比抵抗の差異を把握できることが明らかとなった。100~200m区間の堤体は、相対的には高比抵抗をしめしており、堤体内部の層相と

しては砂礫質なコア材の分布が予測される。旧版の空中写真と現堤防の位置を比較すると、100～200m 区間は旧堤防と現堤防の位置が一致するが、0～100m 区間はこれらの位置がずれており、近代の堤防整備において堤防法線の変更と拡幅が行われ、新規の材料を用いて築堤整備された可能性がある（樋管設置などの工事も関係している可能性あり）。一方で、100～200m 区間は旧堤防をコア材として、新規の堤防整備が行われた可能性がある。また、堤体直下の地盤においても旧流路（旧河道）の砂礫質な堆積物の存在を明瞭に推定することができた。

### 3.1.3 三条市三竹地区

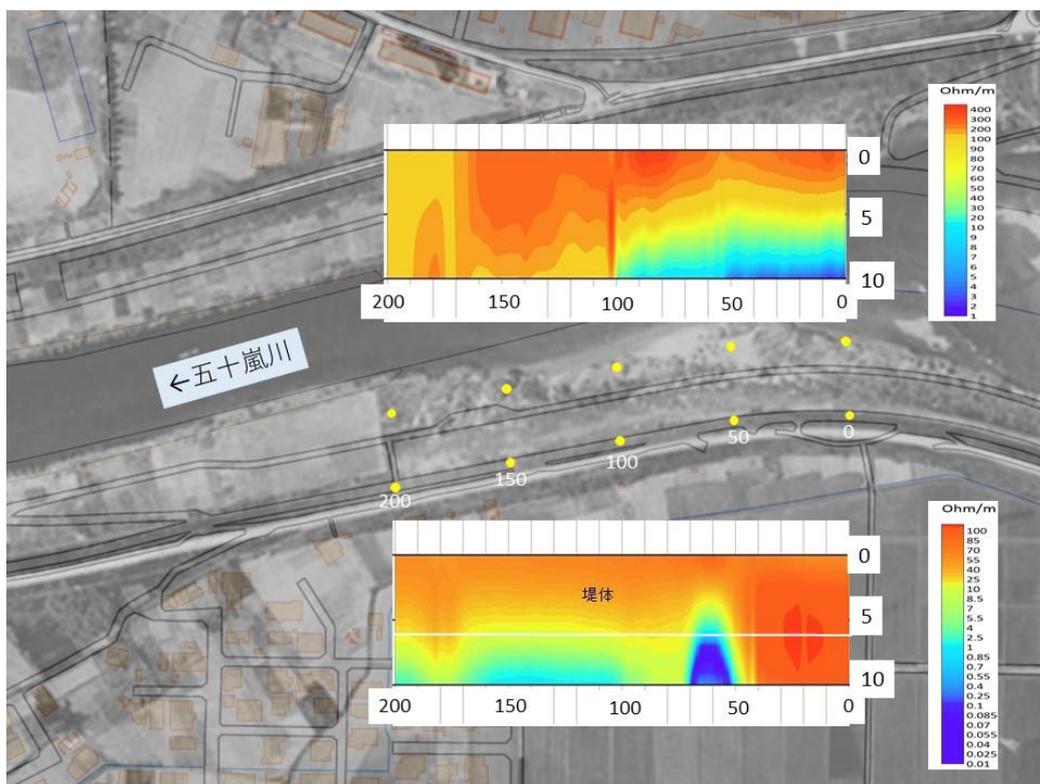


図5 三条市三竹地区での探査結果

五十嵐川左岸の三竹地区では、2004年7月の新潟福島豪雨によって、左岸堤防が破堤している。ここでは、災害による破堤区間の補修区間が明らかであるため堤体の内部構造の把握を主目的としてあわせて堤体直下の地盤構造の推定や高水敷での層相の把握を目的として探査を実施した。比抵抗断面を図5に示す。

五十嵐川左岸の堤防天端では、補修箇所を除いて深度約6mに比抵抗の差異が認められ、現堤防の比高と一致する。また、2004年の破堤による左岸堤防の補修区間は、0～63m区間と推定できる（図6）。よって、堤防天端測線の堤体内部において0～60m区間の高比抵抗を示す部分は補修により新規に築堤された部分の比抵抗分布をみていることになる。また、63m地点の堤体直下には、スポット的に低比抵抗（非常に低い）箇所が存在する。高水敷で

の探査測線では、全体に高比抵抗を示しており、現在の河道や高水敷が砂礫質であることを反映している。

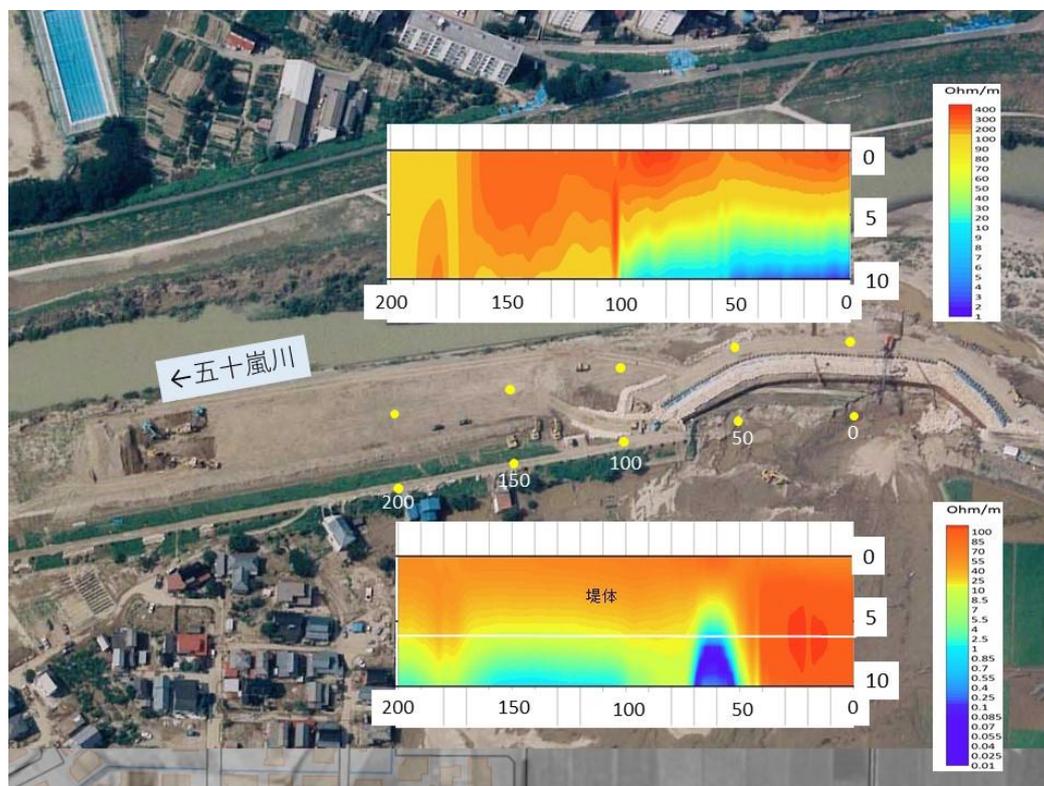


図6 三条市三竹地区での探査結果（2004年の災害時の破堤状況に投影）

堤防天端測線の堤体内部の0～60m区間は、補修により新規に築堤されており高比抵抗を示している。一般に高比抵抗は、相対的に砂礫質の割合が多い場合や地層の間隙水が少ない場合を示唆している。堤防の補修に際して、築堤材料にセメント系の固化剤を入れるなどの施工を実施したため、高比抵抗を示している可能性がある。また、63m地点の堤体直下の非常に低比抵抗な箇所が認められる。一般に比抵抗探査において、スポット的な極端な低比抵抗は、矢板や杭などの鉄製の人工物であることが知られている。この低比抵抗箇所は、旧堤防と補修堤防の境界部の止水のため鋼板矢板が施工された可能性を強く示唆している。

### 3.1.4 見附市猫興野地区

刈谷田川右岸の猫興野地区では、地形判読や空中写真判読から、蛇行した旧河道を横断して現堤防が位置していることが明らかである。ここでは、堤体直下の地盤構造の推定や堤体の内部構造の把握を目的として探査を実施した。比抵抗断面を図7に示す。

測線の比抵抗断面の全体をみると堤防の天端から深度5.5m程度で比抵抗の差異が認められる。刈谷田川右岸のこの区間の堤防高は5.5m程度であり、比抵抗の差異の全体分布と一致する。また、堤体内部の比抵抗構造は、やや均質ではなく、50～220m区間が相対的に高比抵抗を示している。堤体直下の地盤では、20～40m区間と150～200m区間において、凹地

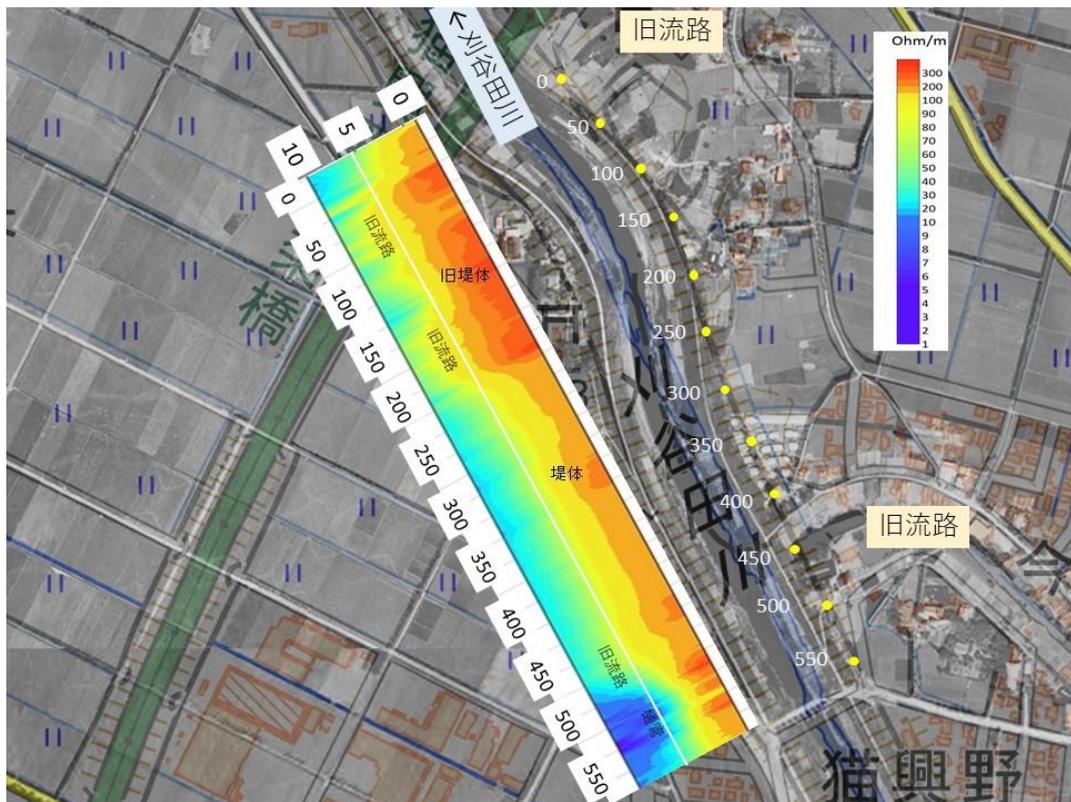


図7 見附市猫興野地区での探査結果

状に比抵抗のやや高い部分が分布する。加えて、520～530m 区間の堤体下部や堤体直下には低比抵抗部分が存在する。この区間には、堤内地側の排水のための樋管とゲートが存在する。

旧版の空中写真で旧堤防と現堤防の位置を比較すると、堤体内部の 50～220m 区間の相対的に高比抵抗な部分は、旧堤防をそのまま整備した区間であり、他の区間は、旧流路を堤内川に拡幅した際に新規に築堤された堤防を示している。堤体内での比抵抗の差異は、旧堤防をコア材としている区間と新規築堤区間における堤体材料の差異を示している可能性がある。また、堤体直下の 20～40m 区間と 150～200m 区間において認められる凹地状の比抵抗のやや高い部分は、蛇行していた旧流路の位置に相当するため、旧流路の存在と層相の差異を示している可能性が高い。一方、420～500m 付近の旧流路は、樋管による低比抵抗部分の影響範囲にあり、凹地状の構造が不明である。

### 3.1.5 見附市猫興野・今町地区

刈谷田川右岸の猫興野・今町地区では、地形判読や空中写真判読から、蛇行した旧河道を横断して現堤防が位置していることが明らかである。また、2004年7月の新潟福島豪雨によって刈谷田川左岸が決壊した地点の近傍であり、災害後の河道の直線化工事が実施された地点でもある。ここでは、堤体直下の地盤構造の推定や堤体の内部構造の把握を目的として探査を実施した。比抵抗断面を図8に示す。

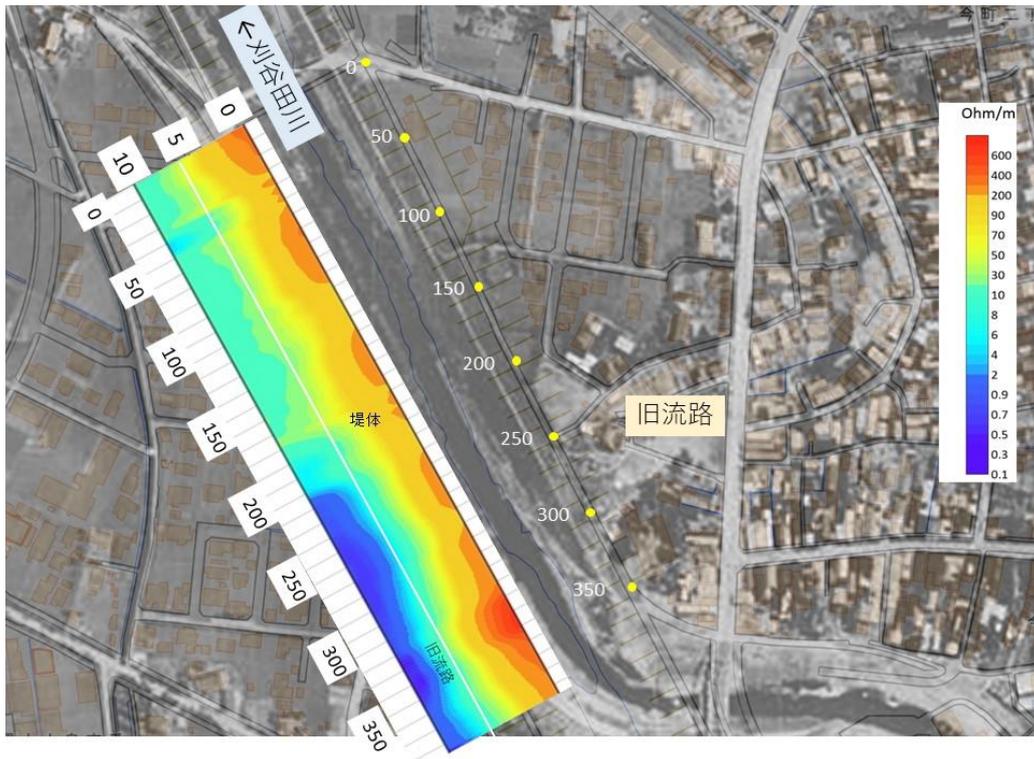


図8 見附市猫興野・今町地区での探査結果

測線の比抵抗断面の全体をみると堤防の天端から深度 5.5m 程度で比抵抗の差異が認められる。刈谷田川右岸のこの区間の堤防高は 5.5m 程度であり、比抵抗の差異の全体分布と一致する。また、堤体内部の比抵抗構造は、330m 付近を除いておおむね均一である。堤体直下の地盤では、220～380m 区間において低比抵抗部分が連続的に分布している。

この測線の堤体は、昭和後期の河川改修工事によって、新規に堤内側に堤防を築堤した区間であり、350m 地点以降は、2004 年以後の改修によって築堤された区間である。

旧版地形図や空中写真判読から、蛇行した旧流路の存在は明瞭であるが、堤防直下の比抵抗断面では、旧流路の認定が困難であった。

### 3.1.6 EM 探査の有効性

堤体の内部構造や堤体直下の地盤構造の把握のため、様々な物理探査の手法が実施されてきたが、本事業で実施した EM 探査法は、簡便でありかつ堤体の内部構造や堤体直下の地盤構造の差異を比抵抗値の相対的な差異として解析できる手法であることが明らかとなった。また、測定方法として、推測航法と定点観測法の双方を同一測線において実施した結果、定点観測法が S/N 比が低く有効な探査結果を得られることが明らかとなった。

比抵抗断面は、1 断面の中での比抵抗の差異を示しているもので、相対的には高比抵抗部分は砂礫質あるいは間隙水が少ない、低比抵抗部は泥質あるいは間隙水が多いことを示している。堤体構造の不均一な部分や堤体直下のよりリスクの高い箇所的位置や分布概要を

推定する手法としては、有効性が高いものと考えられる。この簡便なEM法によって概要探查を行い、堤体内部や堤体直下の土質の試料採取による具体的な評価につながることを期待できる。

### 3.2 地盤を構成する泥層からの洪水イベントの認定

海岸平野を構成する地盤は、河川の運搬作用によって堆積物がもたらされ地層が形成されていく。また、平野地盤を構成する堆積物は、定常時の河川の運搬作用ではなく、洪水時にイベント堆積物として運搬された砂層や泥層によって構成されている。このため、平野を構成する堆積物は、そのほとんどが洪水による運搬堆積作用の累積の結果を示していることになる。一方、洪水時に運搬された砂層に着目した研究例はあるが、広範囲に運搬される泥層を洪水の履歴として検討した例はない。本事業では、洪水履歴を探る新規課題への予察的検討を行った。

#### 3.2.1 遺跡発掘セクションでの洪水泥層の認定

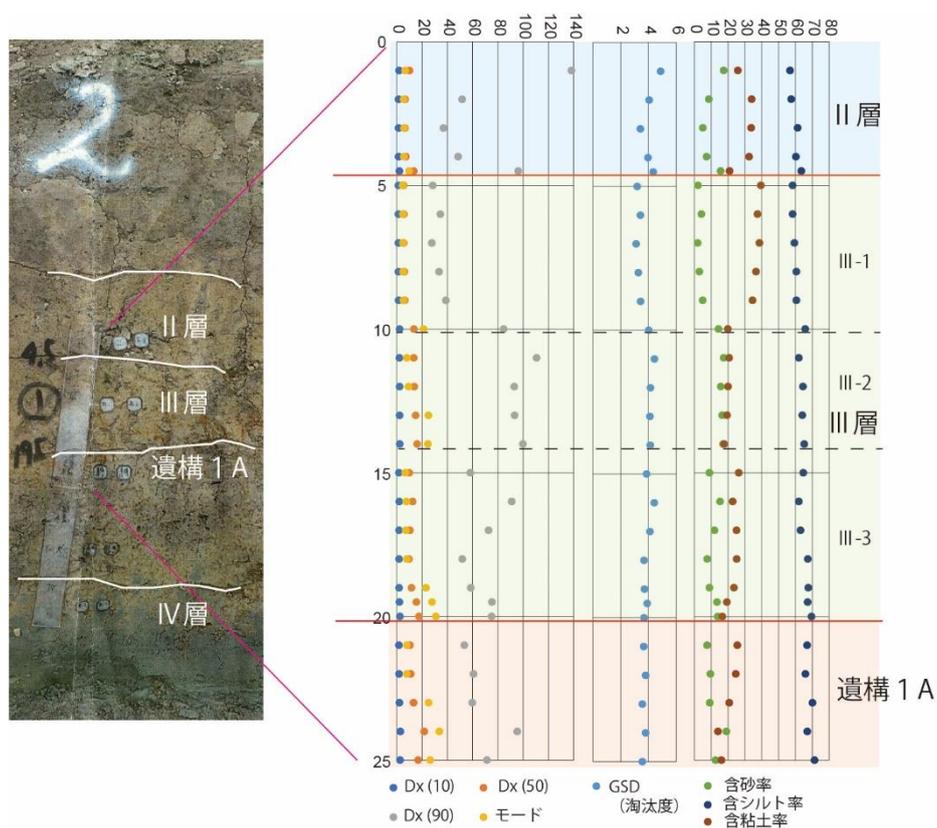


図9 新潟市曾我墓所遺跡 No. 2 地点セクションの層相と粒度変化

泥層の単層を洪水イベントと考えることについて、単なる粒度変化ではなく地層形成に関する明瞭な根拠が必要となる。新潟市江南区の平安時代の曾我墓所遺跡では、遺物の出土状況や遺構の確認面から、平安時代のなかで複数の生活面（当時の地表面）が認定されてい



低湿地であった鷺ノ木地区に自然放流されていた。このため、鷺ノ木地区（白根北中学校付近）は、泥層（粘土層）の累重に基づく洪水イベントの抽出が可能な地域であると推定した。このため、現在の白根北中学校敷地内（SRN-2）と近傍地点（SRN-1）において深度 10m までのボーリングによって試料を採取した（図 11, 12）。

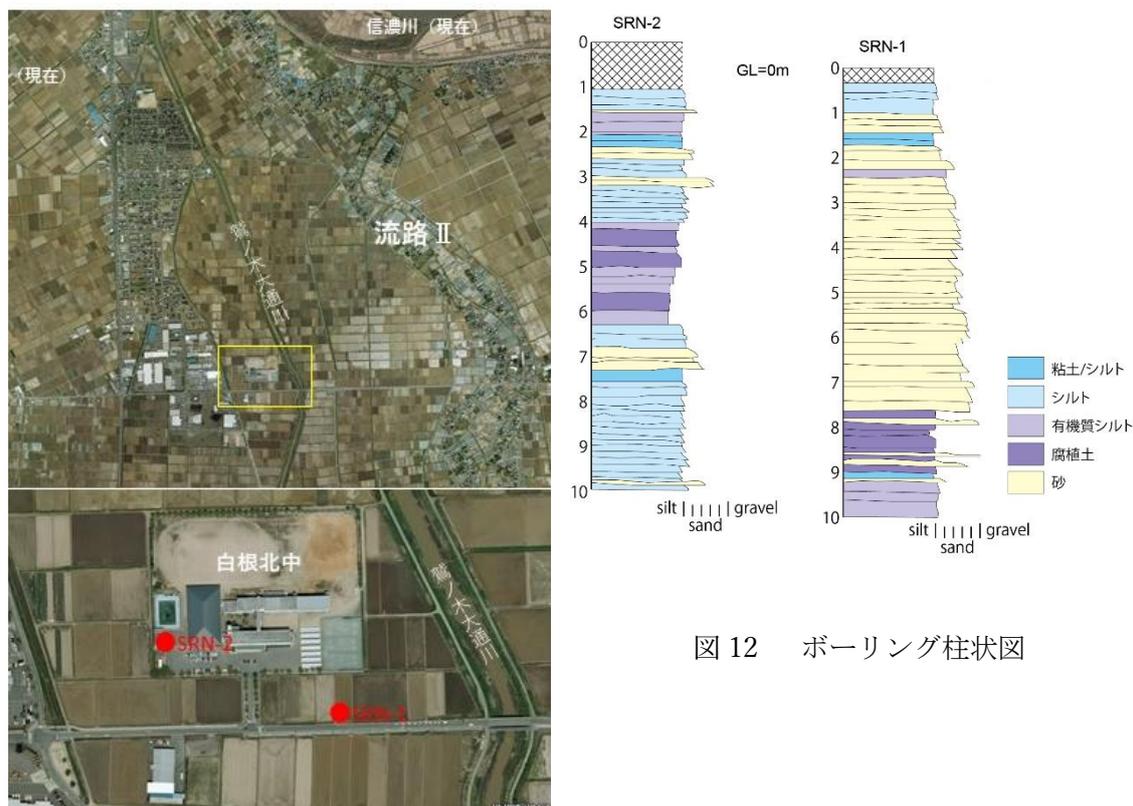


図 12 ボーリング柱状図

図 11 ボーリング地点の位置図

ボーリングコア試料の層相は、SRN-1 では、深度 2～7.5m 程度まで河川流路起源の砂層、深度 7.5～10m は腐植土や有機質シルト層からなることが明らかとなった（図 12）。また、SRN-2 は、深度 4～6.2m の有機質シルト層をのぞいて、全体に泥層や粘土層から構成されている（図 12）。これらのコア試料では年代測定を実施していないが、白根地区の沖積層のこれまでの層序から、深度 6m 層準は約 2500 年前、深度 10m 層準は約 4000 年前の年代を示している。

一般に、沖積層に挟在されている砂層は、洪水起源であると考えられているが、本事業では泥層の層準での洪水の認定を志向しているため、SRN-2 コアの泥質層準について、粒度分析を行った（図 13, 14, 15）。

SRN-2 (深度 7.28-7.79m)

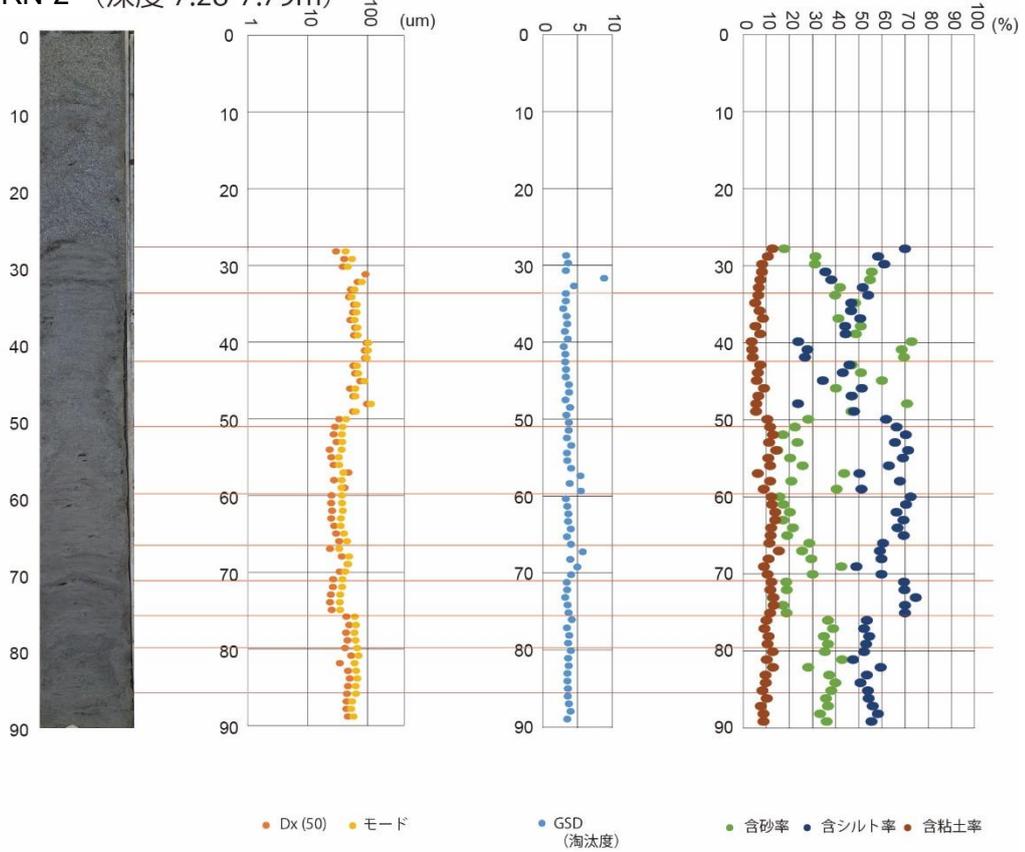


図 13 SRN-2 コアの深度 7~8m の層相と粒度変化

SRN-2 (深度 8.0-8.8m)

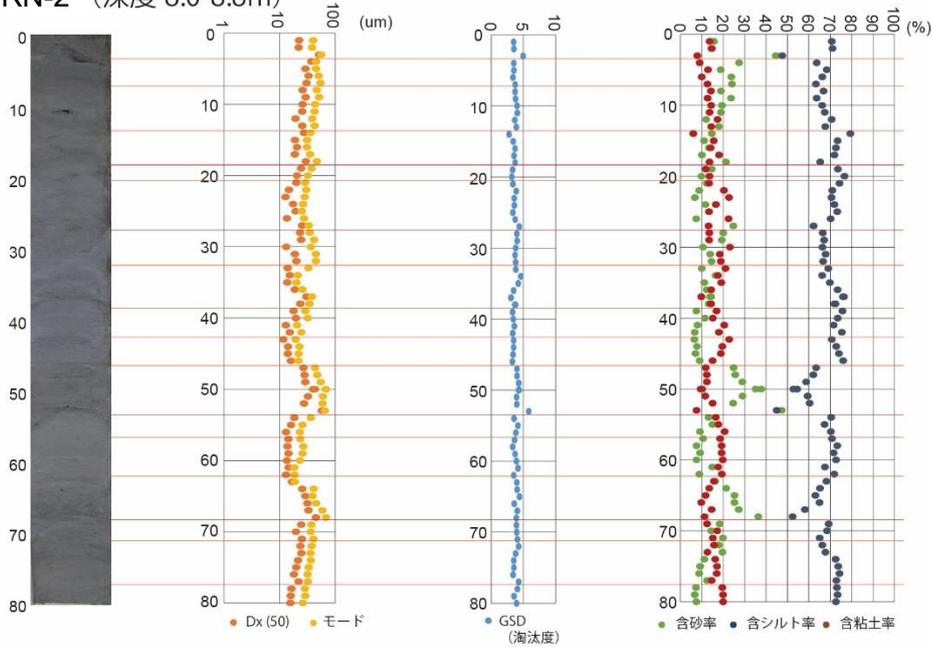


図 13 SRN-2 コアの深度 8~8.8m の層相と粒度変化

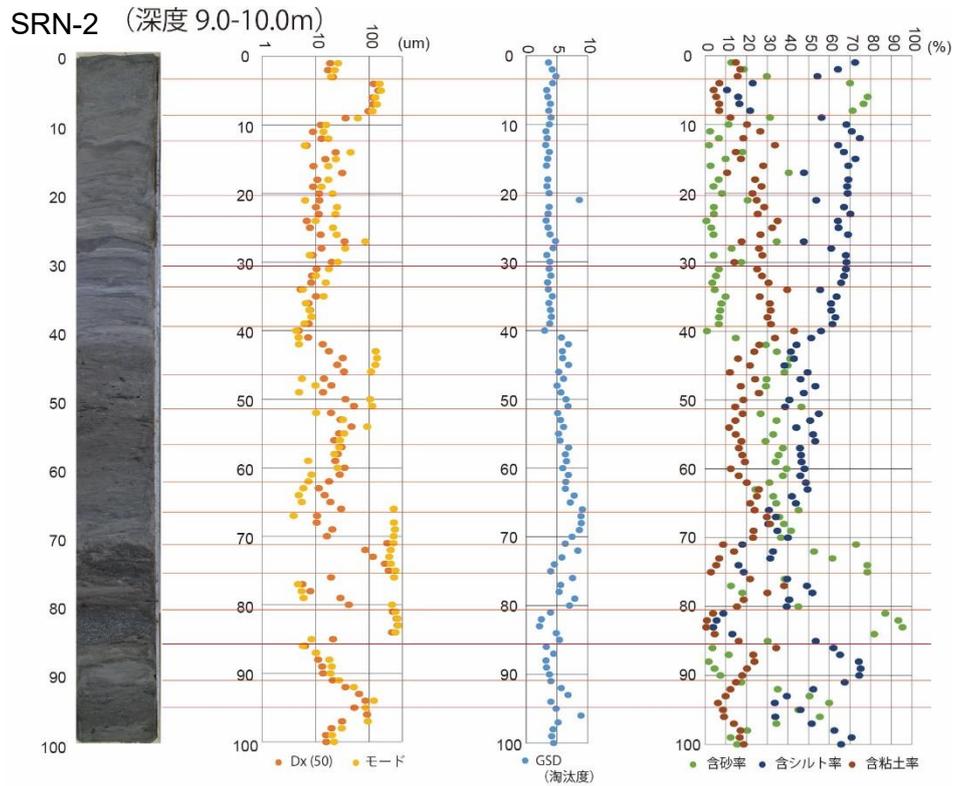


図 13 SRN-2 コアの深度 9～10m の層相と粒度変化

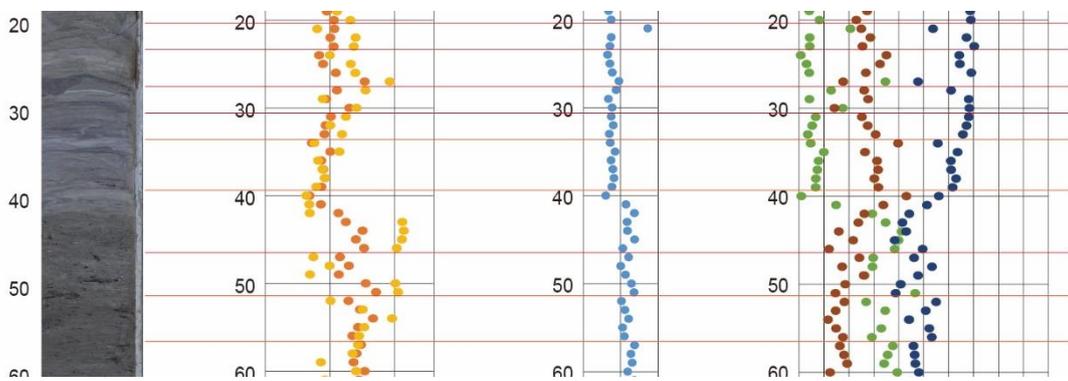


図 14 SRN-2 コアの深度 9.2～9.6m の層相と粒度変化

SRN-2 コアの下部について、1 cm ごとに粒度分析を行った結果、中央粒径 (Dx50) に加えて、含砂率、含シルト率、含粘土率を指標として、区分してみると約 5 cm 程度の層厚で地層の下位で含砂率が高く地層の上位に向かって含粘土率が高くなるような複数の繰り返しが認定できることが明らかとなった。特に、深度 9.34～9.39m、深度 9.40～9.46m、深度 9.47～9.51m などの粒度変化で認められるように、泥層や粘土層の繰り返しを 1 回の泥層の洪水イベントを示している可能性が高い (図 14)。このような観点で、泥層が卓越する層準において、泥層の粒度変化の特徴を 1 回の洪水によるイベントとした場合、約 7～10m の層準

の堆積年代は約 1000 年間と見積もることができ、約 1000 年の間に 47 回の洪水イベントを記録していることになる。

このような視点で砂層に加えて、泥層を用いて 1 回の洪水イベントを認定していくことにより、全体の流域での洪水履歴を見積もることができる。

#### 4. まとめ

本事業では、EM 探査法が堤体内部や堤体直下の地盤構造を簡便に評価する手法として、非常に有効であることを明らかにした。また、この手法は新潟県内の他の河川や県外の河川でも活用できる手法であり、手法としての広い活用が期待できる。また、発生確率論による洪水評価（1000 年に一度など）は、発生規模や頻度について具体的ではなく実際の地域の洪水リスクを示していない可能性がある。実際の洪水履歴を用いたリスクの提示は、河川防災や住民への啓発普及においても活用できる。

#### 5. 文献

- 後藤忠徳・三ヶ田均（2008）電磁気法探査（EM 法探査）技術の現状と展望 - 地震探査と統合  
柄解析に向けて - . 地学雑誌, 117, 997-1010.
- 稲崎富士（2008）統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術に関する研究. 統合物理  
探査による河川堤防の内部構造探査技術に関する研究, 8p.
- 岩田孝三（1933）越後平野に於ける河川境界に就いての政治地理学的研究. 大塚地理学会論  
文集第二輯（上）, 285-320.
- 冠 秀昭・関矢博幸・遊佐隆洋・大谷隆二（2012）電磁探査法による津波浸水農地の土壌電  
気伝導度迅速調査法. 土壌の物理性, 121, 19-28.
- 光畑裕司（2006）電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査-九十九里浜平野に  
おける例-. 地学雑誌, 115, 416-424.
- 三浦 豪・稲崎富士（2010）広帯域周波数 EM プロファイリング装置 GEM - 2 による河川堤防  
周辺比抵抗マッピング例. 物理探査学会学術講演会公演論文集, 122, 293-295.
- 大石 修・香村一夫・磯部友護・田中宏和（2012）廃棄物層調査における電磁探査法の適用  
事例（3）. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 23 卷 D2-11\_Poster2.
- 佐藤善輝・宮地良典・卜部厚志・小松原純子・納谷友規（2016）鬼怒川中流域, 茨城県常総  
市上三坂地区における平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の破堤堆積物. 第四紀研究, 56, 37-  
50.