

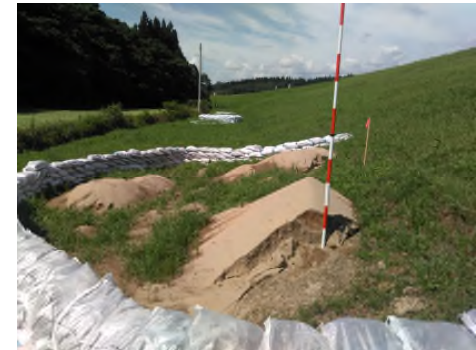
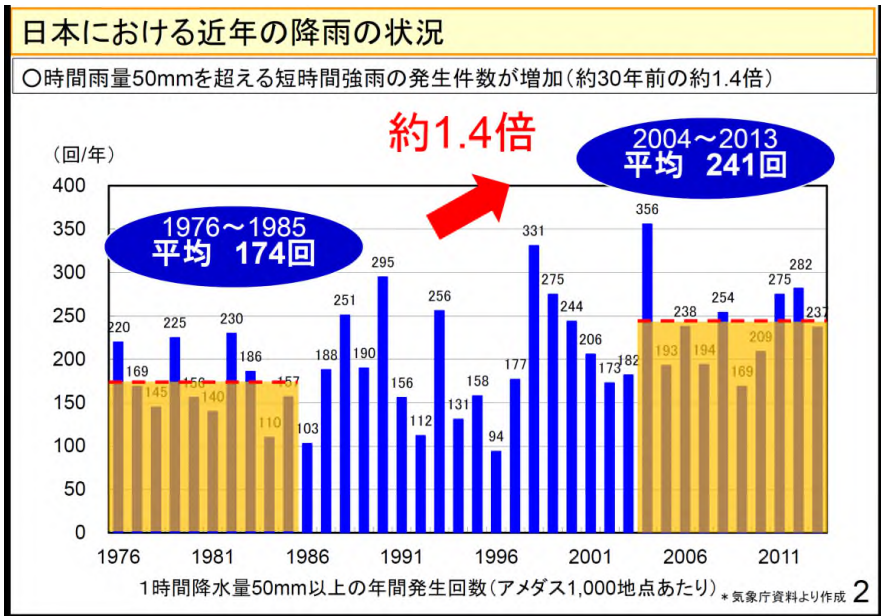
流域治水対策ソリューション  
**物理探査結果を活用した河川堤防の  
弱部の抽出技術の紹介**

応用地質株式会社

# 1. 社会背景

気候変動に伴う水害リスクの増大

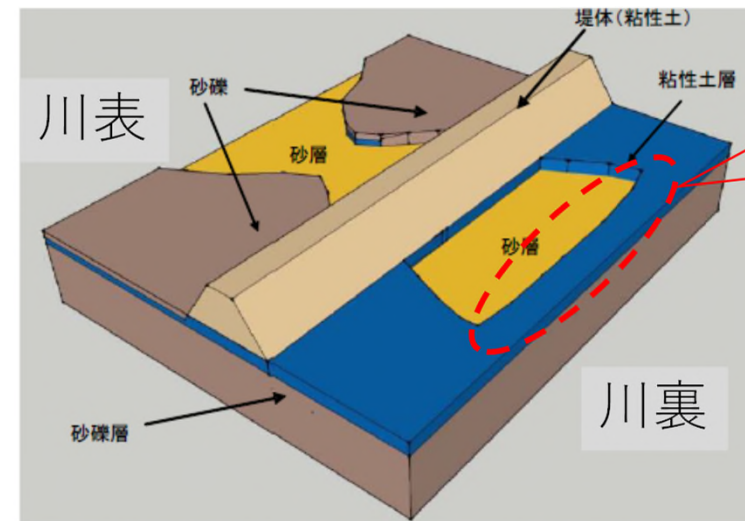
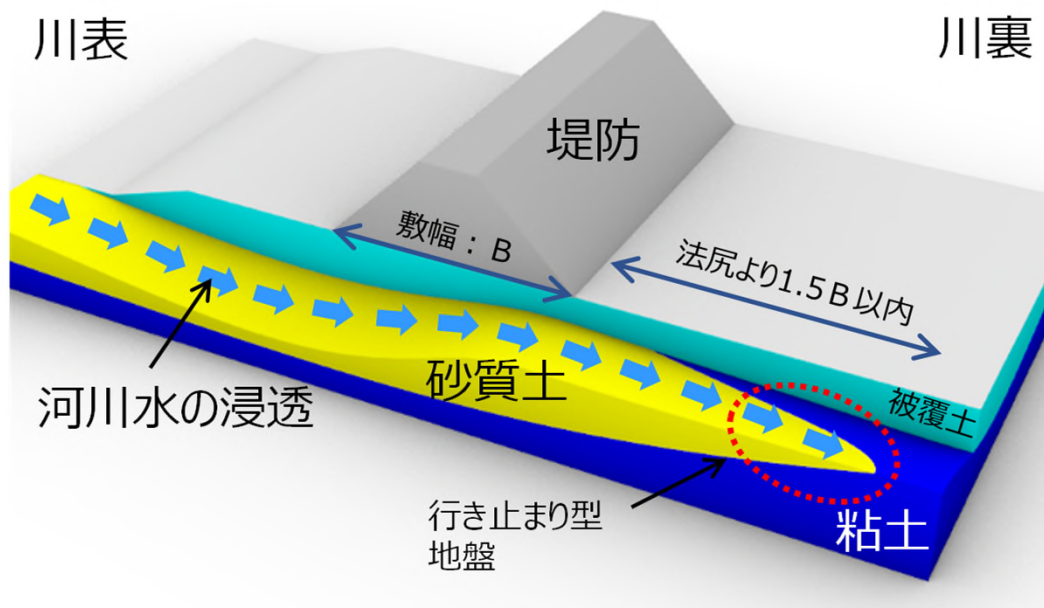
河川堤防の治水安全度の低下



## 2. 従来調査の問題点

### 物理探査結果を活用した河川堤防の弱部抽出を考えた背景

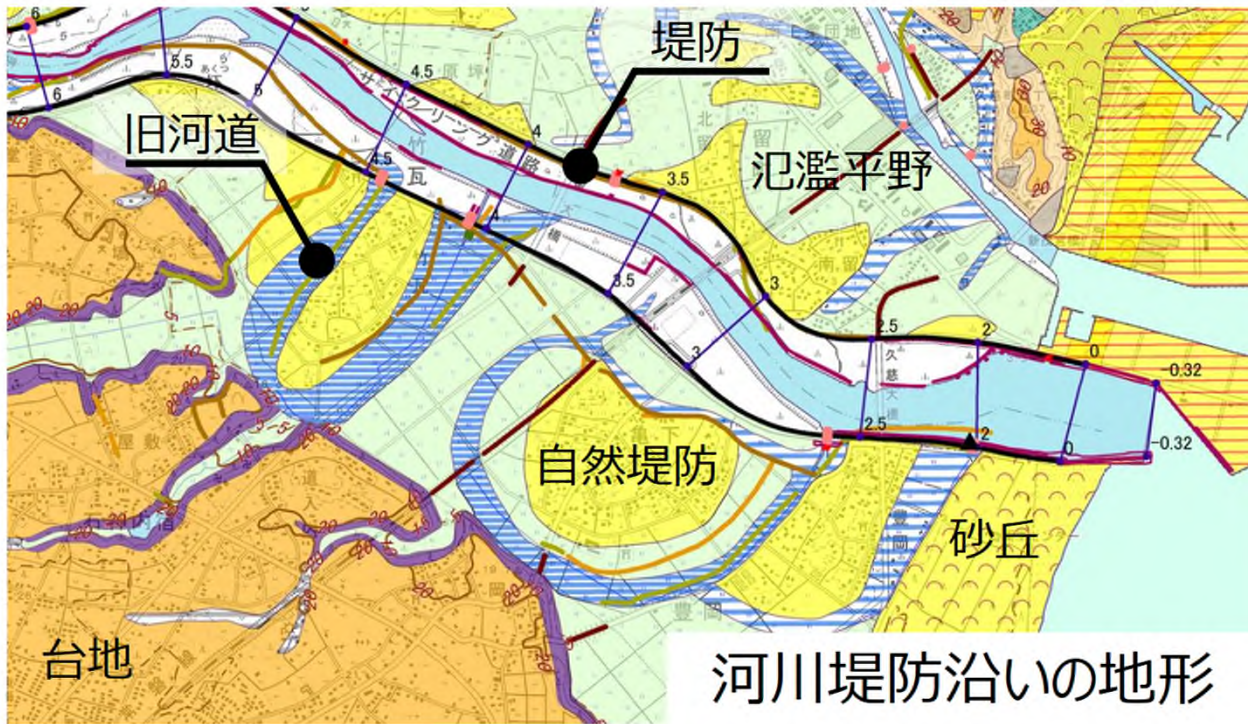
- 平成24年7月に発生した矢部川堤防の決壊は、事後調査により「パイピング破壊」と推定された（矢部川堤防調査委員会報告書、平成25年3月による）。
- その後の研究によりパイピング破壊のメカニズムが徐々に明らかになってきた。
- パイピング破壊は、堤防法尻から $1.5B$ （ $B$ :堤防敷幅）の範囲内の浅部に行き止まり型構造が存在する場合に発生しやすい。
- 今後の堤防整備を効率的に行うためには、堤内地の深度3,4m程度の浅部の地盤構造の把握が有効。
- 一方、これまで堤内地での調査は積極的に行われてこなかった。
- 堤内地（民有地）での調査となるため、**非破壊調査（物理探査）**が望ましい。



矢部川堤防調査委員会報告書、P4-59に一部加筆

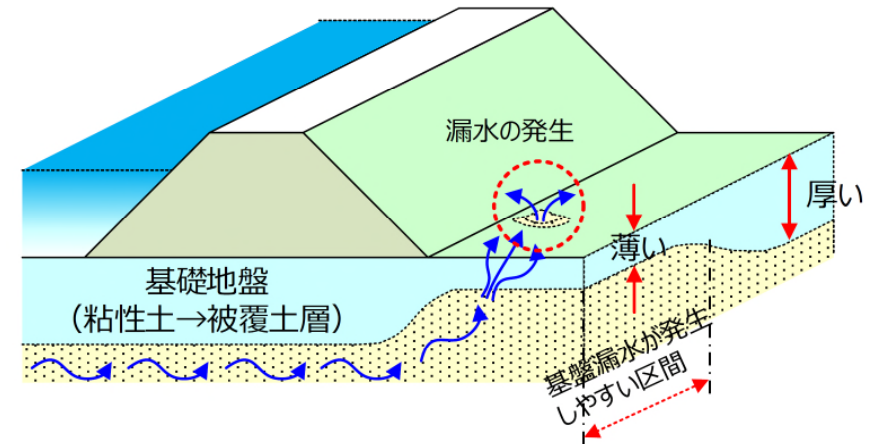
## 2. 従来調査の問題点

河川堤防は、様々な地形・地質の上に築堤されているため、地形・地質が同じでない。特に旧河道付近は地質構造が複雑であり、このような状況の中で、ボーリング調査のみで漏水発生箇所を把握することは困難。また、過去に漏水が発生した箇所は、漏水が発生しやすい地盤構造である可能性が高いため、再度、漏水が発生する可能性もある。



※国土地理院 治水地形分類図 常陸久慈 に加筆

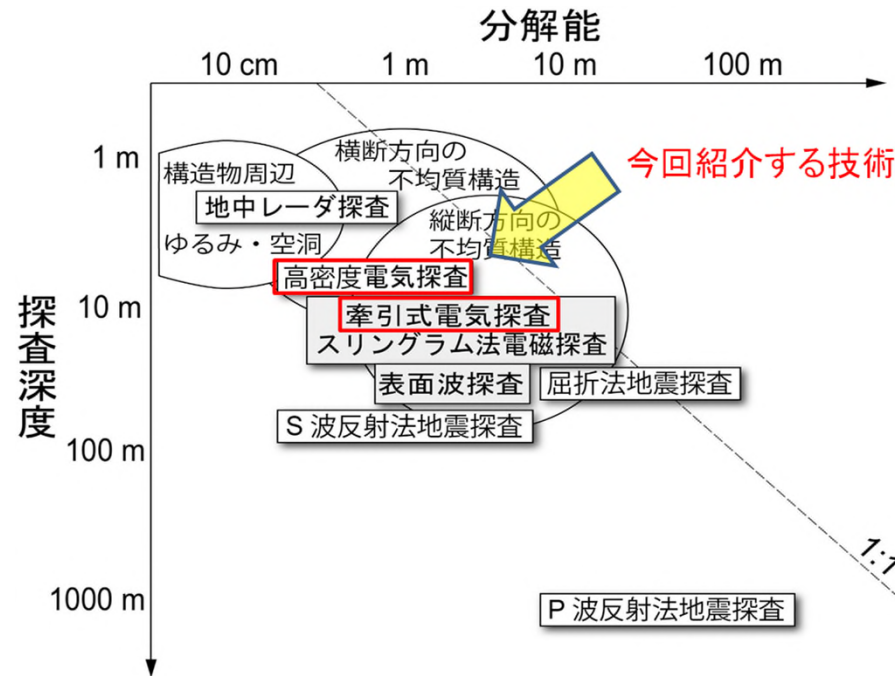
従来の調査のような点の調査では、堤防縦断方向の土質構成を連続的に評価することが困難なため、漏水が発生しやすい被覆土層が薄い箇所を評価することも困難であり、漏水発生箇所を見逃す恐れもある。



### 3. 新たな漏水発生箇所抽出技術

#### 行き止まり構造の把握

- 堤内地の行き止まり構造あるいは旧河道を含む複雑な地盤構造を、ボーリング調査等でその土質状況を把握するには多数の調査が必要となり現実的でない。
- 連続データが得られる物理探査が適している
- 今回の勉強会では、電気の流れにくさより、地盤内部の土質構造を連続的に推定することが可能な電気探査について説明を行う。



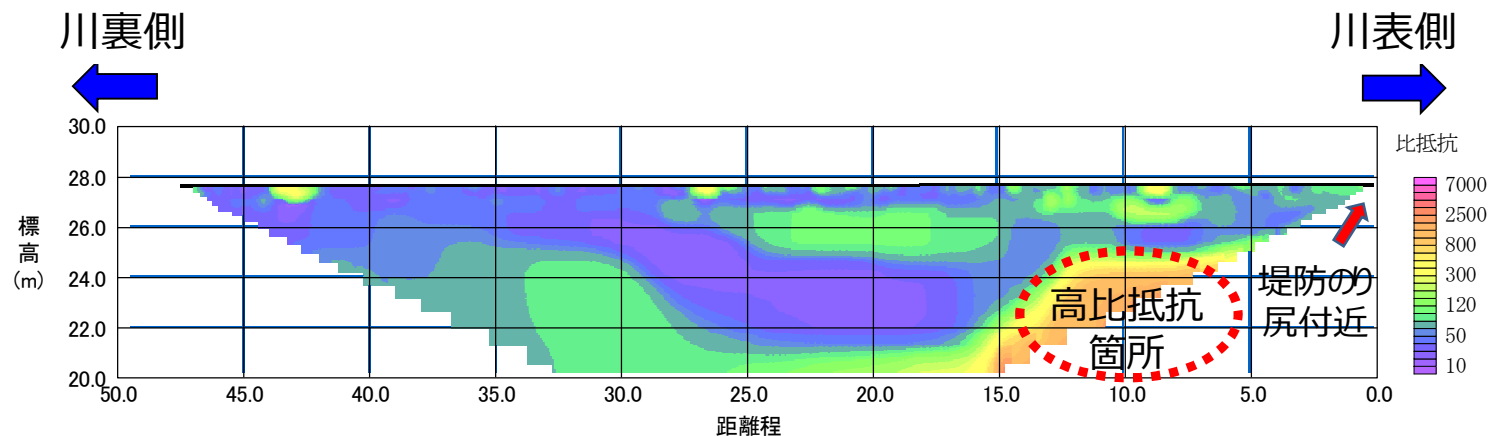
各種物理探査の探査深度・分解能

### 3. 新たな漏水発生箇所の抽出技術

電気探査とは、地盤に電気を流し、電気の流れにくさより、地盤内部の土質構造を推定するものである。

一般的に高比抵抗程（この図でいうと暖色系の範囲程）、砂質土や礫質土と推定されるため、この場合、堤防のり尻付近で高比抵抗箇所が確認され、砂質土や礫質土が分布していることが推定される。

このように物理探査を行うことで地盤内部の土質構造を連続的に推定することが可能となる。なお、物理探査は、ボーリング調査と異なり、周辺環境に対する負荷も小さく、作業時間も短いという利点がある。



比抵抗が高い→砂質土と推定される箇所→水が浸透しやすい→漏水の危険性が高い

電気探査結果(比抵抗値) による土質構造の評価

### 3. 新たな漏水発生箇所の抽出技術 電気探査の方法

土質構造を推定する電気探査には3つの方法がある。

一つは、電極を地盤に打設して地盤内に電気を流して地盤の比抵抗を測定する方法である。この調査は、地盤に直接電気を流すことでばらつきの少ない測定結果が得られる一方で、電極を打設する時間がかかるため、調査に時間を要することが欠点である。また、電極を打設するため、周辺環境への影響も他の方法と比較すると大きい。

次に示す牽引式電気探査は、電極を打設することなく地盤に電気を流し、地盤の比抵抗を測定するものである。電気探査と比較して電極を打設しない分、作業効率が高くなるが、地表面付近の比抵抗値を詳細に把握できない欠点がある。

3つ目は、従来の牽引式電気探査を改良した平板電極型オームマップパーである。この方法は、牽引式電気探査と同じで、地盤に電極を打設することなく、地盤の比抵抗を測定するものであるが、牽引式電気探査と異なり、地表面から2 m程度の浅い部分の比抵抗値を詳細に把握するために開発された測定機器である。



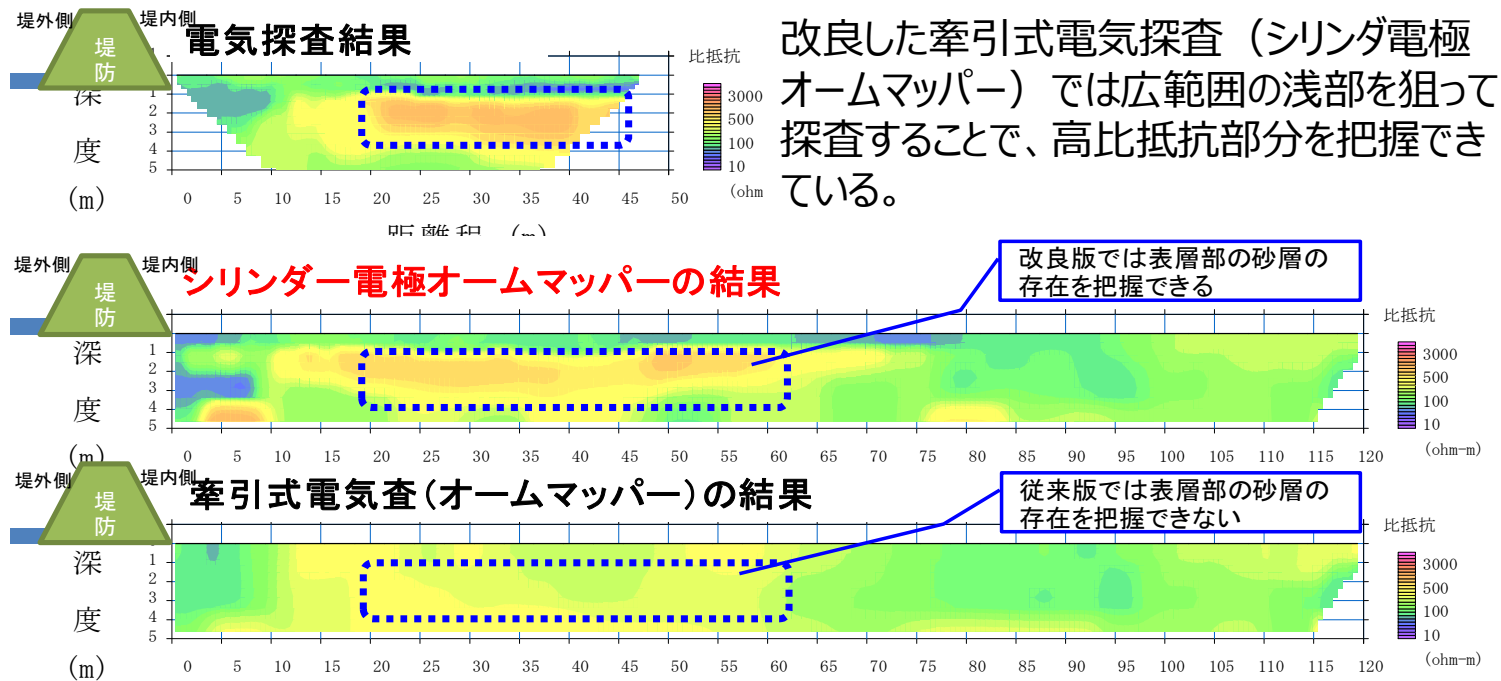
### 3. 新たな漏水発生箇所の抽出技術 浅部の地盤構造を把握する探査方法

下図は、同じ測線で電気探査の方法を変えて地盤内の比抵抗値を測定した結果である。

電極を設置する電気探査（一番上の図）では青点線で囲った範囲でオレンジ色の高比抵抗箇所（いわゆる水を通しやすい砂質土や礫質土）が確認されたが、牽引式電気探査(一番下の図)では高比抵抗箇所は確認されていない。

一方で、中央の図に示したシリンダー電極オームマップでは、電気探査と同様に青色点線で囲った範囲でオレンジ色の高比抵抗箇所が確認されている。 ※シリンダー電極型オームマップの測定原理は平板電極型オームマップと同じ（電極形状のみが異なる）

河川堤防の漏水発生箇所は、川裏側の深度3,4m程度の浅部の地盤構造の把握することが重要となるため、効率的・効果的に川裏側の地盤構造を把握するための電気探査方法としては、シリンダー電極オームマップが適していることがわかる。



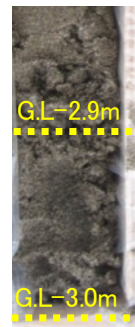
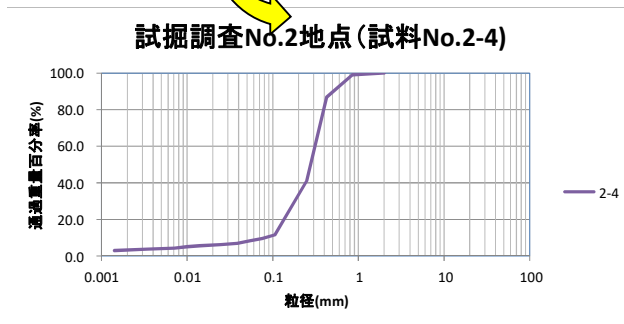
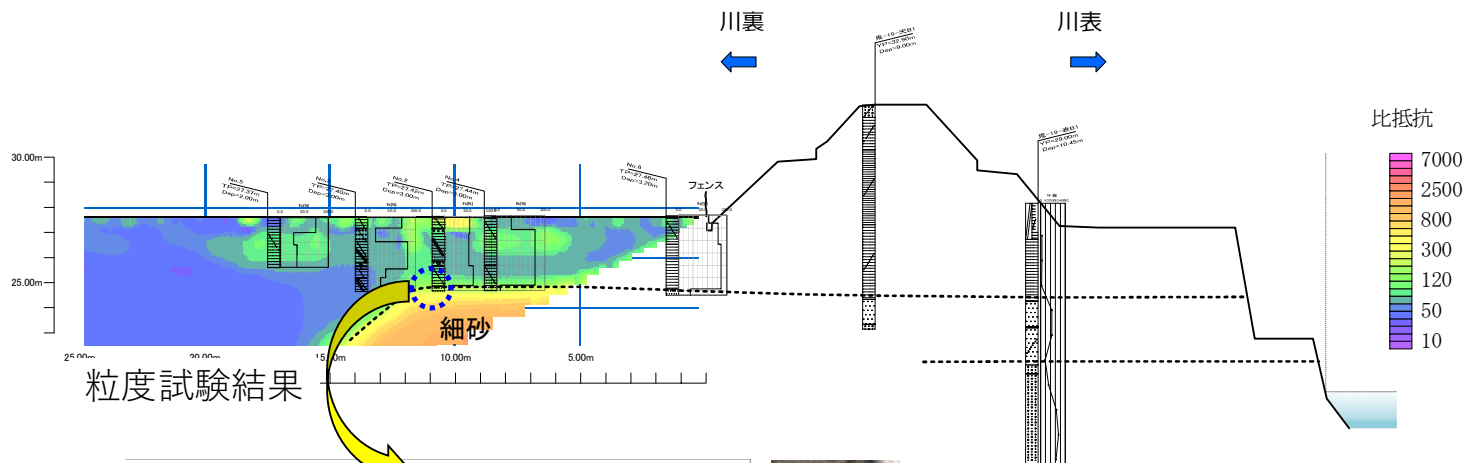


## 4. 新たな漏水発生箇所への抽出技術 物理探査技術を組み合わせた地盤構造の評価

P08

物理探査は、地盤構造を連続的に把握することが可能なので有効な調査方法と考えられる。一方で、物理探査にも欠点がある。それは、土質を直接確認できるボーリング調査等と比べ、土質を詳細に把握することが困難ということである。

したがって、連続的に地盤構造を評価するためには、物理探査結果のみならず、ボーリング調査結果等の従来調査を組み合わせることが必要と考える。



簡易ボーリング（振動式サンプラー）による土試料の採取

#### 4. 新たな漏水発生箇所の抽出技術 平板電極型オームマップパーの開発

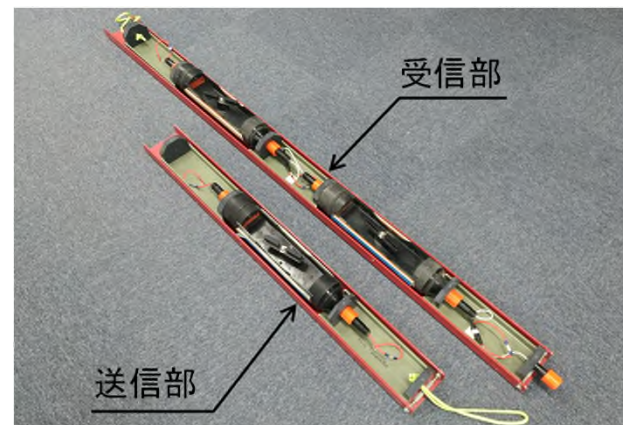
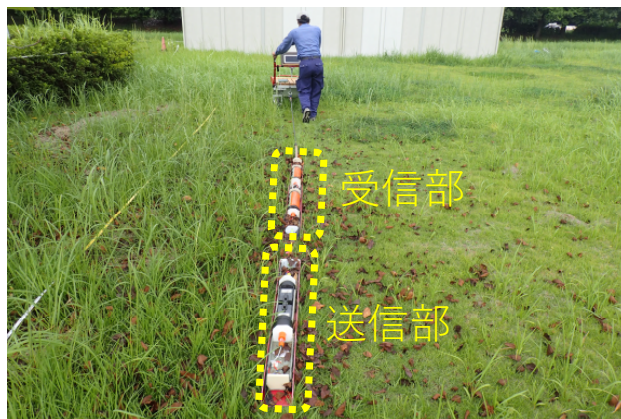
漏水に伴うパイピング破壊は、堤防法尻から堤防幅の1.5倍の範囲内の深度3,4mの浅部に行き止まり型構造が存在する場合に発生しやすいと考えられている。



従来の電気探査では、電極を地盤に設置し、地盤内の比抵抗を測定し、地盤構造を評価する必要があった（電極を地盤に設置しなければならないため効率性が悪いことが欠点）。



平板型電極オームマップパーは、浅部の比抵抗値を測定し、地盤構造を効率的に評価することが可能な探査方法。また、電極を設置することが無いので周辺環境への負荷も低減できる探査手法。

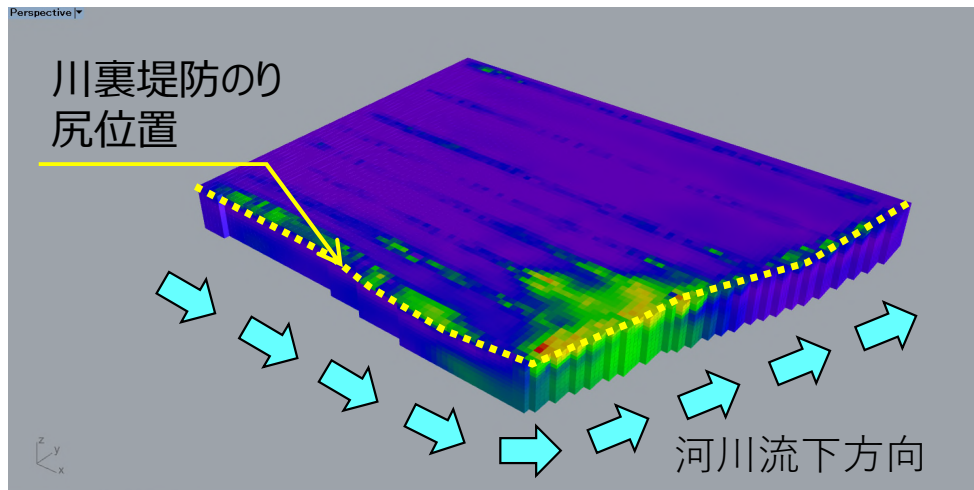


## 5. 河川堤防の漏水弱部の抽出の流れ

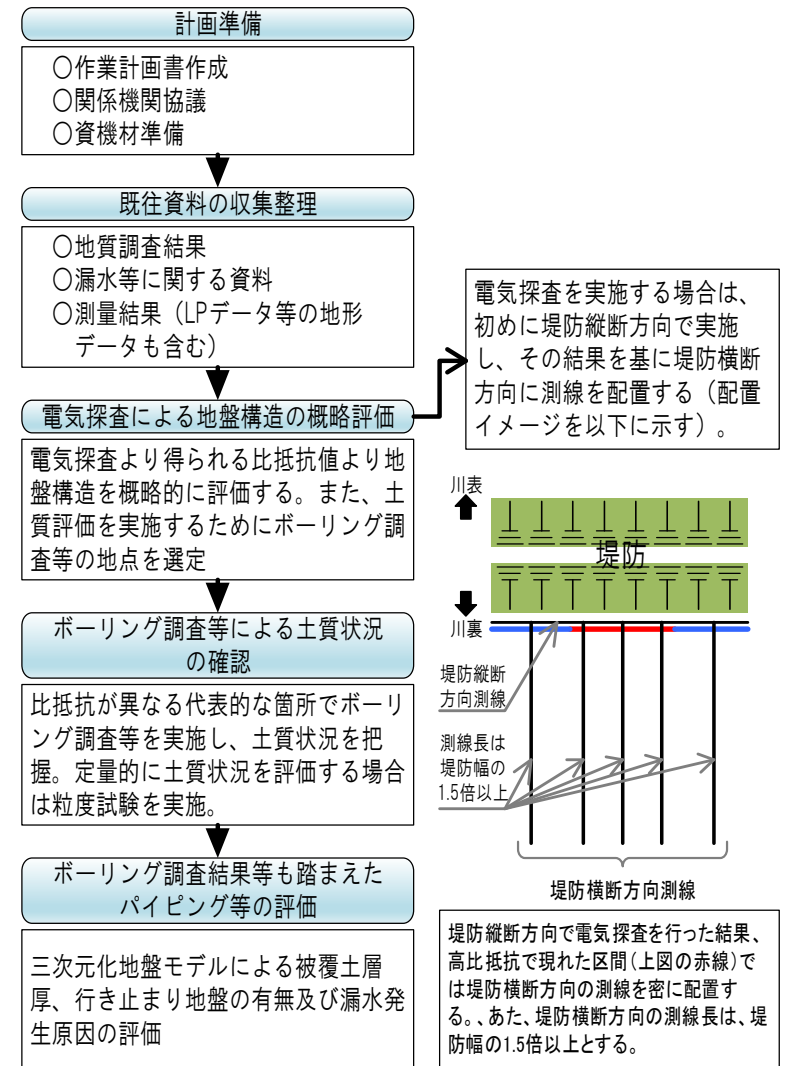
河川堤防の漏水弱部の抽出に当たっては、過去に漏水が発生した箇所あるいは旧河道周辺で地盤構造が複雑と推察される箇所、浸透対策範囲を設定する必要がある区間などで優先的に実施。

比抵抗値が異なる箇所では、簡易ボーリング調査（あるいはボーリング調査）やサウンディング調査などで土質状況を確認。

電気探査結果は、G N S Sにより、位置情報が付加されているため、三次元物理探査結果より地盤の構造を三次元化し、パイピング等の評価を実施。



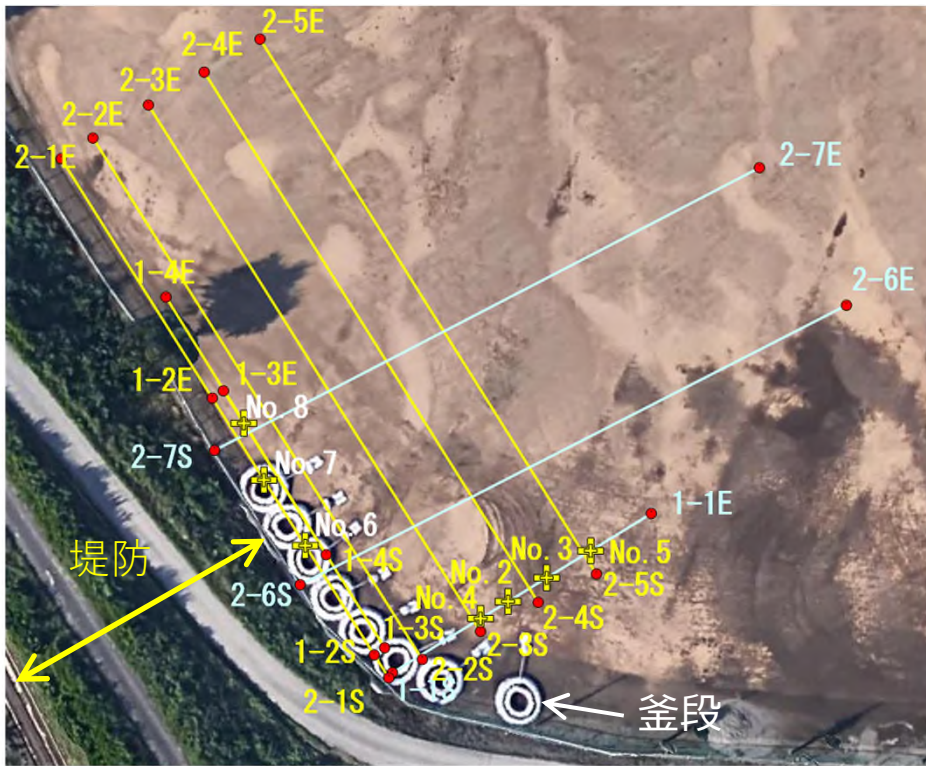
三次元物理探査結果の事例



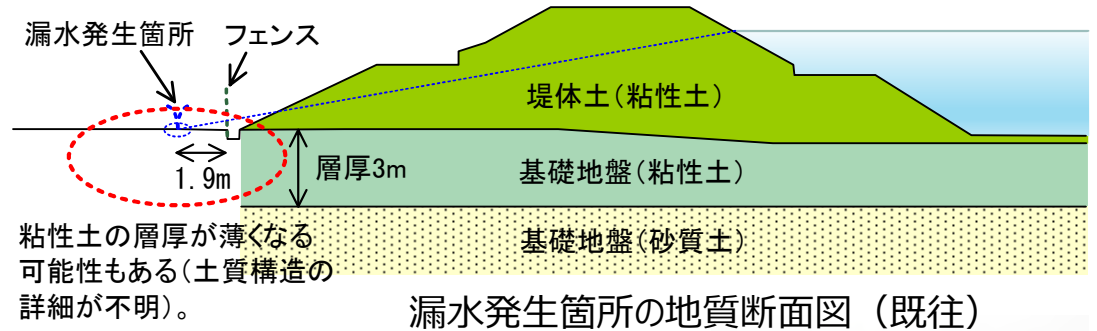
# 6. 新たな漏水発生箇所の抽出技術を活用した調査事例の紹介 事例①

事例① 関東東北豪雨中に漏水が確認され、応急対策(釜段)を実施。その後の地質調査では、被覆土層が3 m以上で、砂質土層も連続することが予想され、漏水が発生するような地盤構造である可能性は低いと推察。

川裏側の地盤構造を詳細に把握するため、電気探査や簡易ボーリング調査を実施し、三次元地盤モデルにより漏水発生原因の評価を実施。



漏水発生箇所 (応急対策箇所)  
※黄色線、白線は探査測線



シリンダー電極オームマップ  
実施状況

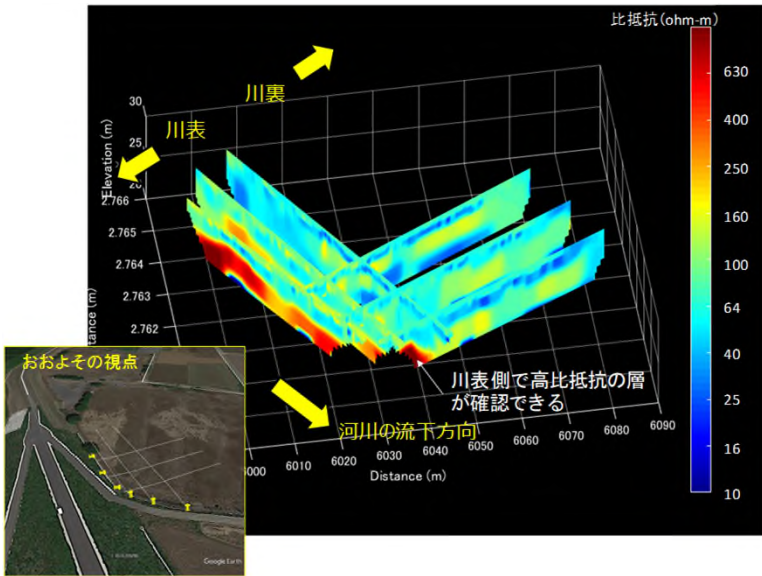
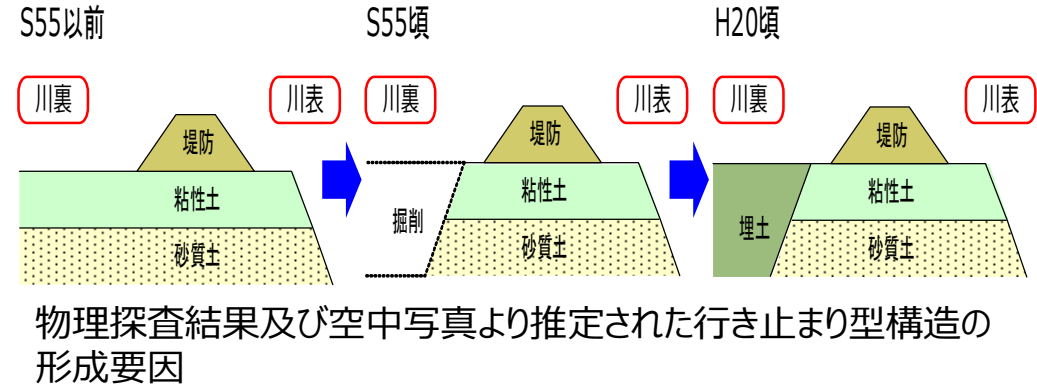


簡易ボーリング調査  
実施状況

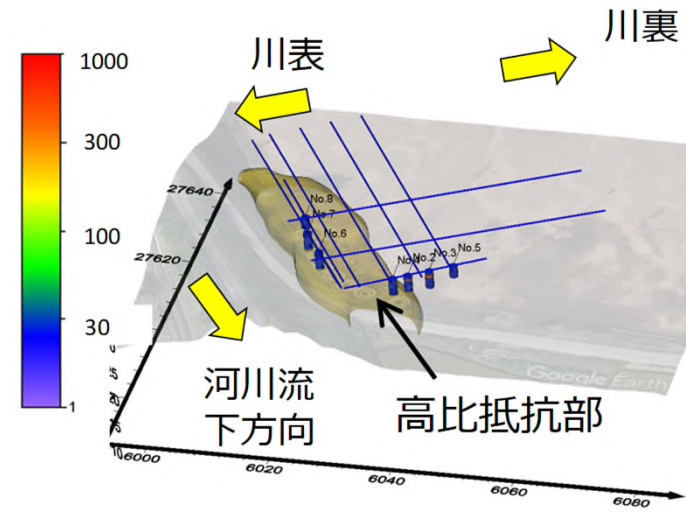
# 6. 新たな漏水発生箇所抽出技術を活用した調査事例の紹介 事例①

物理探査結果（鳥瞰図）を基に高比抵抗部分を抽出した結果、堤防のり尻付近に局所的に分布することが判った。また、高比抵抗部分を空中写真に重ね合わせた結果、掘削面と見られる箇所と高比抵抗部の境界が一致することを確認した。

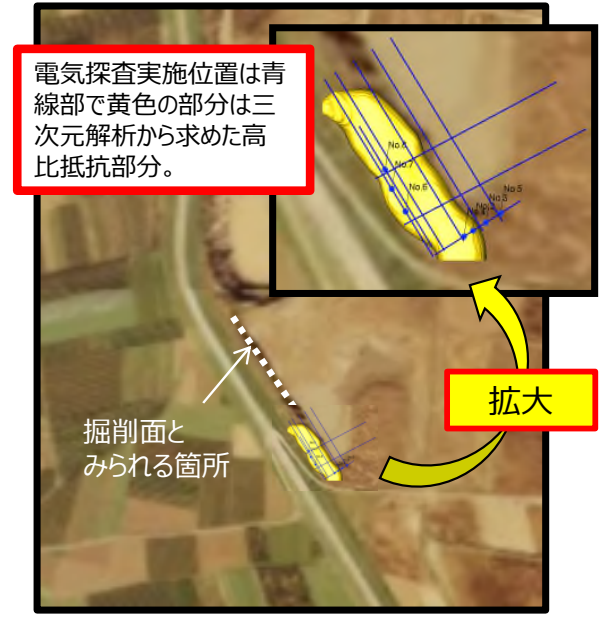
以上の結果より、砂利採取により堤防の川裏側が掘削され、砂質土が掘削面に現れた後、粘性土で埋め戻され、行き止まり構造が形成されたと推察した。なお、簡易ボーリング調査結果より、高比抵抗部分は砂質土、低比抵抗部は粘性土であった。



物理探査結果（鳥瞰図）



高比抵抗部の抽出

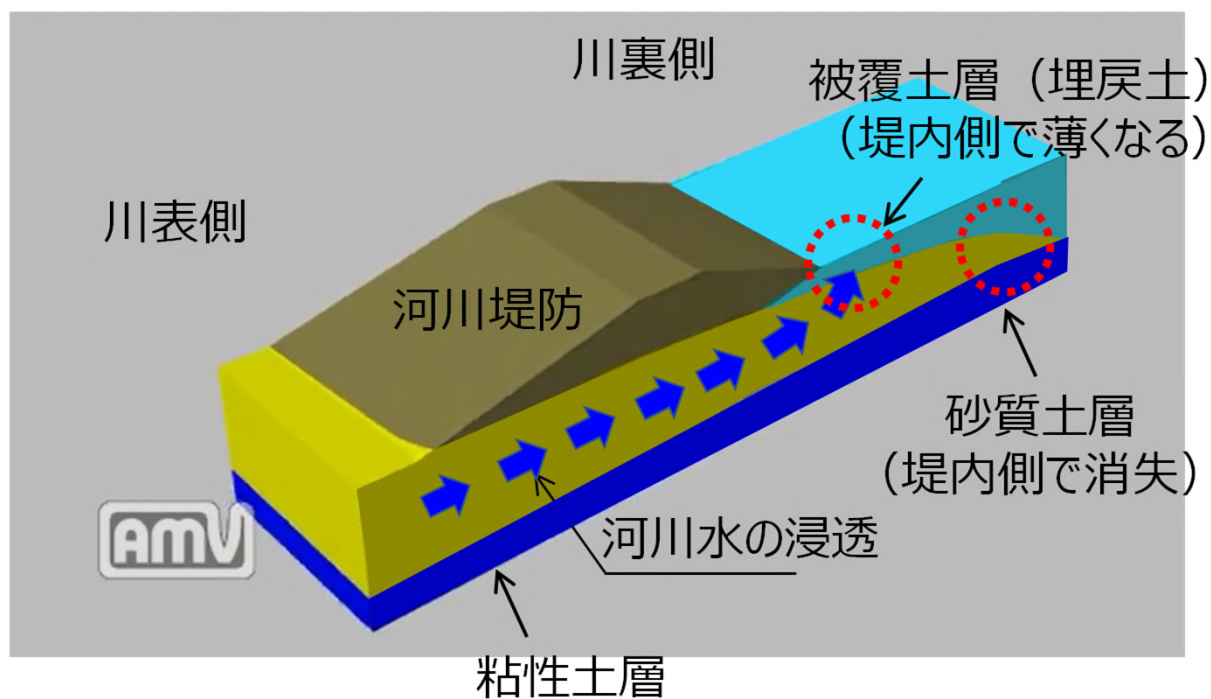


空中写真(S55)との重ね合わせ

### 【新たな漏水発生箇所の抽出技術の効果】

- 川表側から砂質土層を介して浸透した河川水は、川裏側で行き止まり、水圧が高まったことで、被覆土層の薄いところで地表面に漏水が発生したと推察。
- 物理探査結果と簡易ボーリング調査結果を組み合わせることで、精度の高い三次元地盤モデルを構築することができ、漏水発生原因となる地盤構造を評価することが可能となった。

新たな調査方法で推察された漏水発生箇所の地盤構造

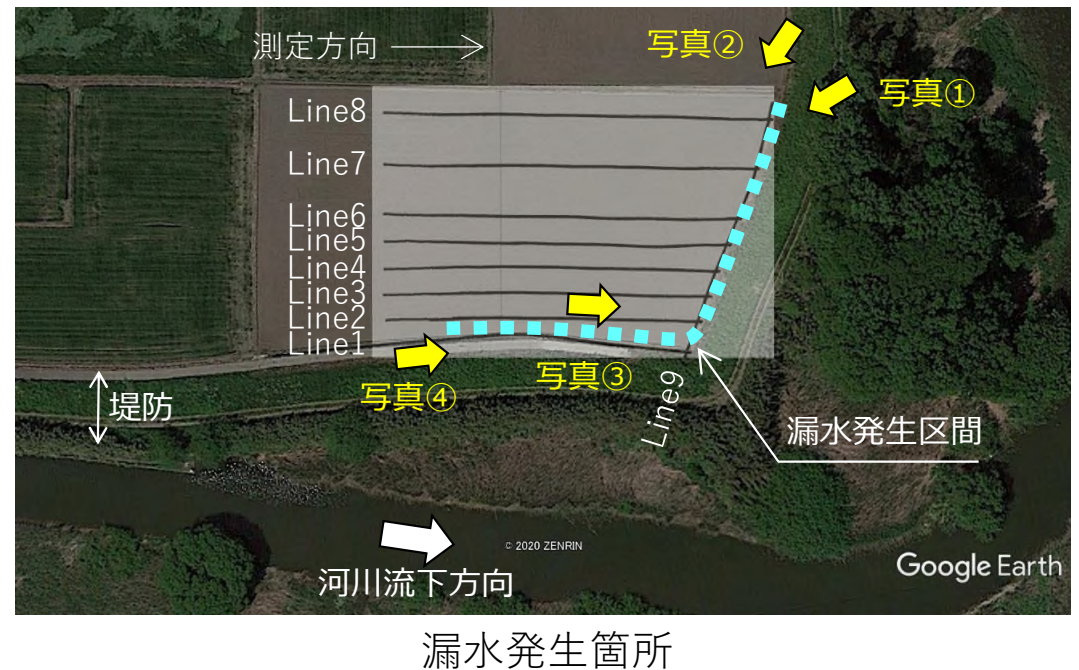
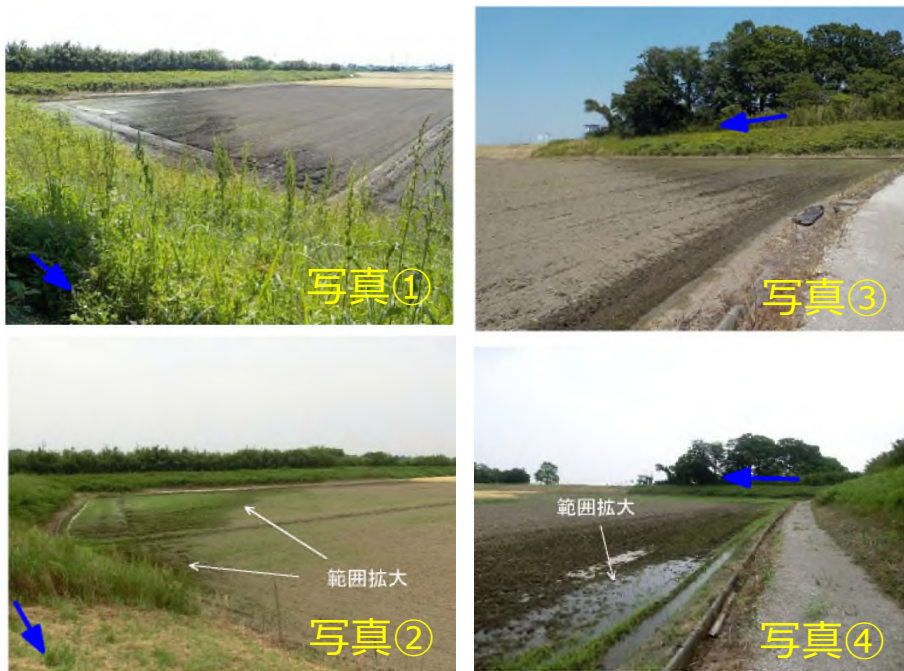


## 6. 新たな漏水発生箇所の抽出技術を活用した調査事例の紹介 事例②

事例② 自治体が管理する河川において、降雨後に堤防川裏のり尻で地下水の滲み出しが確認され、その範囲が拡大した。

当初の設計では、漏水が発生した箇所を含む、一連区間（650m）で川表遮水矢板工法が検討されていたが、地質調査結果が少なく、対策範囲の絞り込みを行うことを目的に追加調査を実施。

追加調査は、川裏側の地質調査結果が少ないことから、効率的・効果的に川裏側の地盤構造を詳細に把握するため、電気探査や簡易ボーリング調査を実施し、三次元地盤モデルにより漏水発生原因及び対策範囲の絞り込みを実施。



# 6. 新たな漏水発生箇所の抽出技術を活用した調査事例の紹介 事例②

比抵抗値の深度方向の平面スライスより、高比抵抗部分(砂質土層)は、川裏側の堤防のり尻より約10mの範囲に局所的に分布することが推定された。

高比抵抗部分(砂質土層)は、水の滲み出しが確認された区間と概ね一致すること、簡易ボーリング調査結果より砂質土であることを確認したことから、漏水は、行き止まり型地盤構造が原因で発生したと考えた。

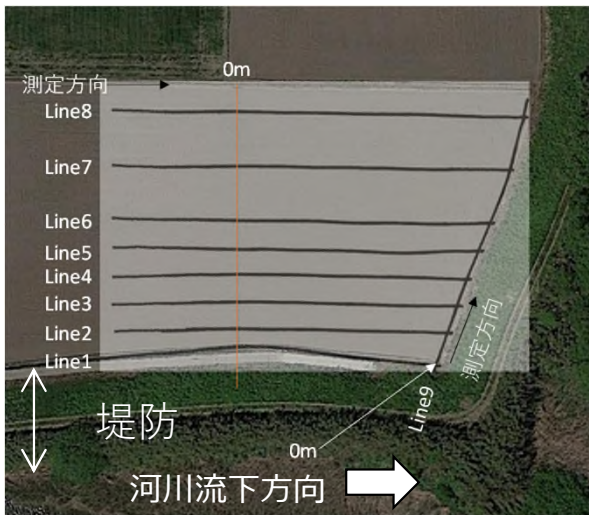
また、高比抵抗部分は局所的であることから、対策範囲の絞り込みを行うこともできた(最終的には、揚圧力G/Wを盛土荷重で抑える工法を採用したため、対策工費のコスト縮減にもつながった)。



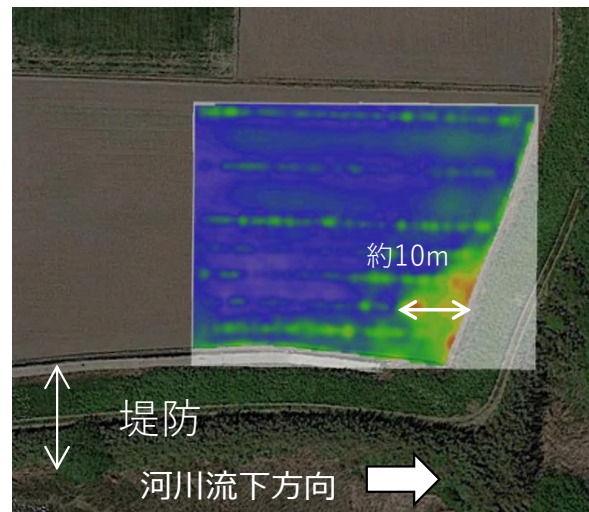
測定機器(牽引装置)



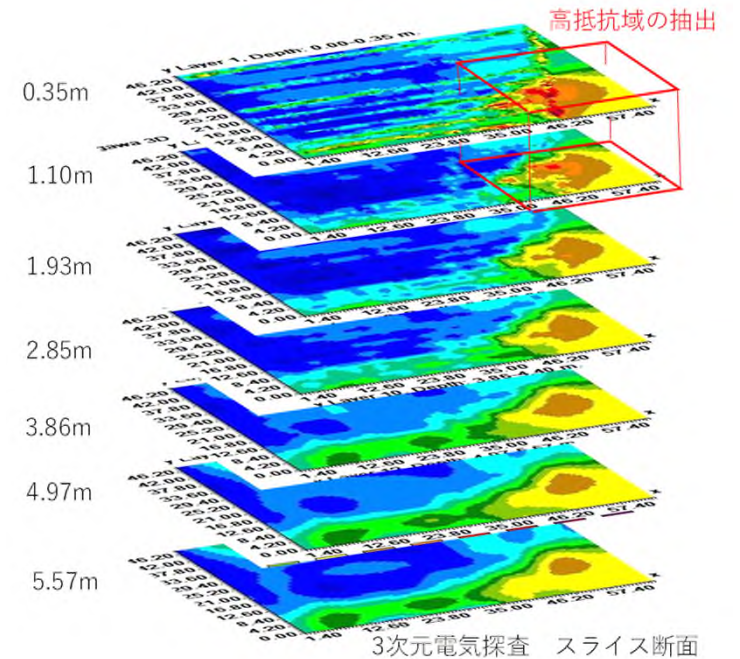
測定状況



測線配置図



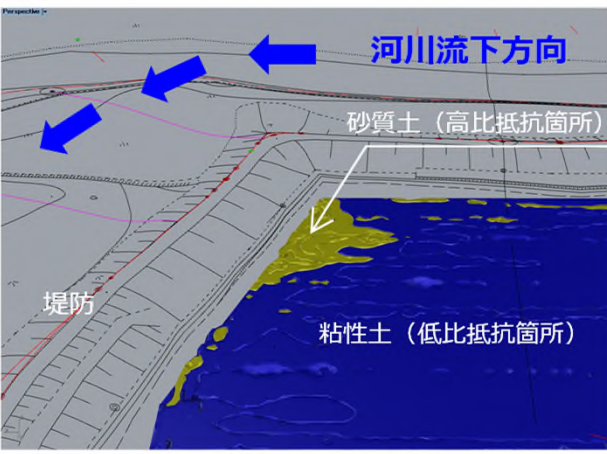
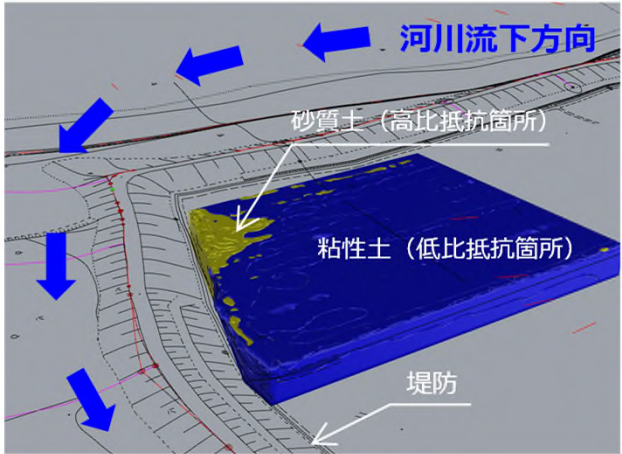
深度0.35m比抵抗の平面スライス



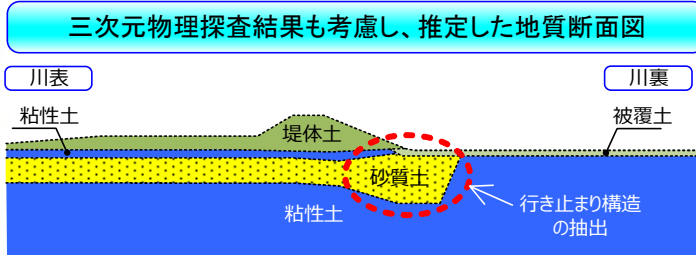
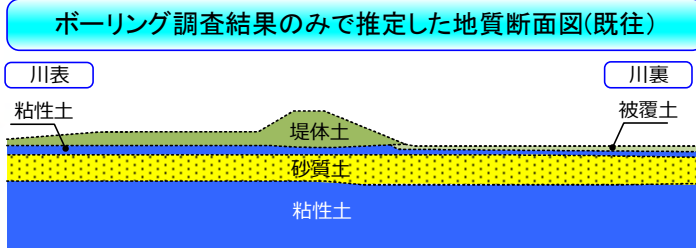
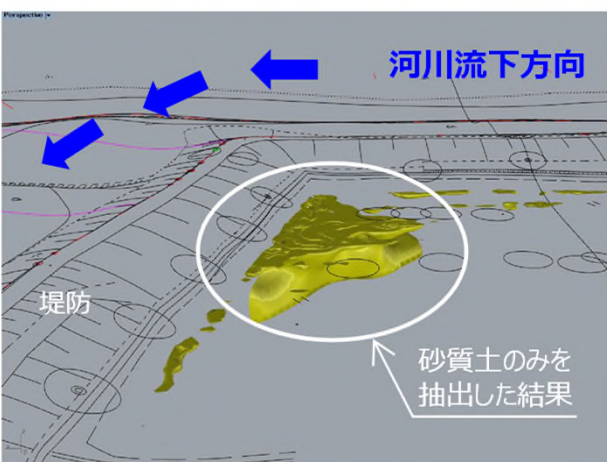
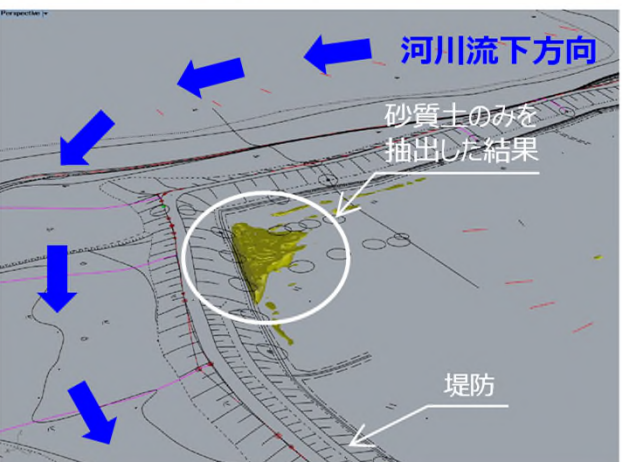


# 6. 新たな漏水発生箇所への抽出技術を活用した調査事例の紹介 事例②

三次元物理探査(平板電極型オームマップ)の結果より、三次元地盤モデルを作成した結果を以下に示す。  
川裏側の法尻付近において、砂質土を抽出することができた(高比抵抗箇所)。



拡大  
→

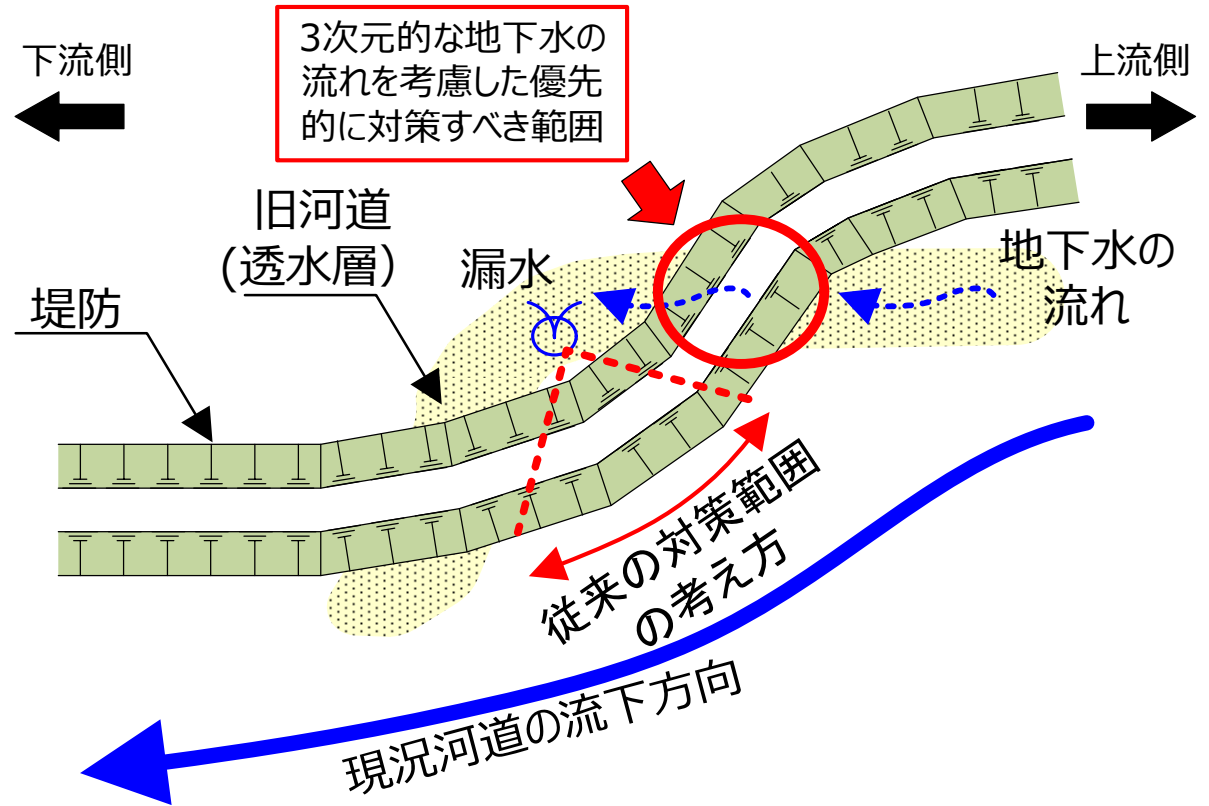


三次元地盤モデルを基に既往の地質断面図(上図)を見直した結果、川裏側の法尻付近において、行き止まり型構造を抽出することができた。

## 7. 今後の展望(活用事例) 対策工および範囲の設定

これまで、漏水が発生した場合、上下流45°の範囲を対策範囲として設定することが多い。  
この設定方法の場合、対策範囲外に河川水(地下水)の流入箇所があると、対策後にも漏水が発生する可能性がある。

物理探査を活用した技術(今回は、電気探査)は、地盤の比抵抗値とボーリング調査結果を基に地盤構造を連続的に評価でき、効率的に漏水弱部や対策工の範囲を設定することが可能。  
また、横断方向に電気探査を実施することで地盤構造の三次元化も可能。

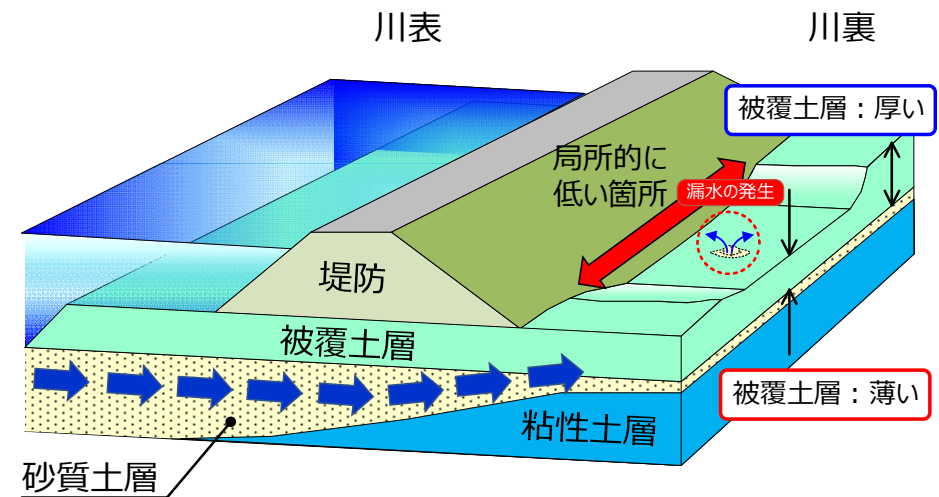
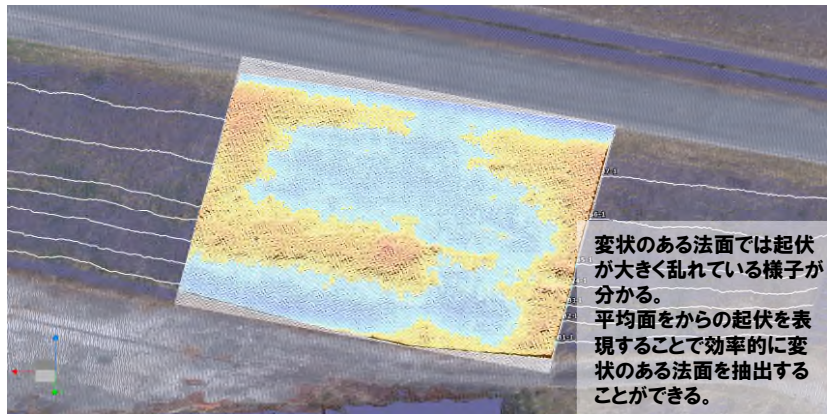


## 7. 今後の展望(活用事例) 効果的な漏水弱部の抽出方法

地形に起因する漏水発生箇所を抽出するため、ドローンにより平面的な地盤高を測定し、堤防表面に現れる不陸や堤防高、局所的な川裏地盤高が低い箇所を評価するとともに、その結果と合わせ、川裏側の地盤構造を評価することで、より詳細に漏水に対する危険箇所の評価を行うことが可能となる。

例えば、地形的要因で漏水に対する危険性が高い箇所は、川裏の地盤高が局所的に低くなっている箇所であり、このような箇所は、被覆土層が薄くなることによって、土被り荷重が小さく、漏水が発生しやすい状況になる。このような地形の変化をドローンによる測量を行い、把握することで、より効率的に漏水弱部を抽出することが可能となる。

草の影響を少なくするため、除草直後に計測



# 参考資料 比抵抗値の差分を利用した河川堤防内の弱部の抽出技術

(1)点検・モニタリング・診断技術の研究開発



29・32

### 比抵抗による堤体内滞水状態モニタリングシステムおよび物理探査と地下水観測技術を活用した堤防内部状態のモニタリングシステム

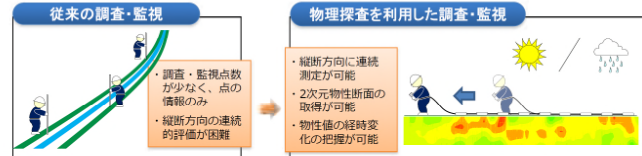


研究責任者 応用地質(株) 齋藤秀樹 および 新清晃

#### 研究開発の目的・内容

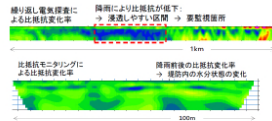
##### 研究開発の目的

・堤防の浸透に対する要監視箇所を絞り込む技術と、絞り込んだ箇所での堤防内部状態の変化を監視する技術を開発



##### 研究開発の内容 (平成26~28年度)

- ・降雨・出水前後の繰り返し物理探査結果の評価法の開発
  - 比抵抗変化から要監視箇所の絞り込みを実現
- ・出水時の堤防内部状態の監視技術の開発
  - 降雨・出水による堤防内部の水分状態の監視を実現



#### 現状の成果①

(平成26~28年度に実施)

##### 1. 降雨前後の電気探査

長大な堤防を効率よく探査できる「牽引式電気探査」を採用。降雨や小規模出水の前後での機動的な探査に対応可能。

牽引式電気探査実施状況

- ・ 短時間・低コストでの探査を実現
- ・ 連続的な比抵抗変化の取得を実現

##### 2. 要監視箇所の絞り込み

降雨・出水前後の比抵抗変化率を算出し変化率分布断面図を作成。比抵抗低下区間は雨水や河川水の浸透しやすい区間と判定できる。

- ・ 比抵抗低下域の抽出を実現
- ・ 出水時要監視箇所の絞り込みを実現

##### 3. 出水前後の表面波探査

長大な堤防を効率よく探査できる「ランドスリーマ方式表面波探査」を採用。S波速度変化率の2次元断面を取得。出水による緩みはS波速度の低下を示す。

- ・ S波速度の変化率分布断面の取得を実現
- ・ 出水による堤防緩みの有無判定を実現

**活用例**

測線長1,050mの探査区間から降雨による比抵抗の低下が顕著な約350m区間を抽出

降雨前後の電気探査により出水時の要監視箇所の絞り込みが可能

#### 現状の成果②

(平成26~28年度に実施)

##### 4. 堤防内部状態の把握

比抵抗変化により堤防内の水分状態の変化を把握。  
※ 簡便な牽引式電気探査で把握が可能か、比抵抗モニタリング結果と比較検討

S波速度変化により堤防の緩みの有無を把握。  
※ 本研究期間中の出水では、堤防の緩みは発生しなかったと判定

牽引式電気探査による比抵抗変化率断面

比抵抗モニタリングによる比抵抗変化率断面

高分解能な比抵抗モニタリング結果との比較により牽引式電気探査の妥当性を検証

- ・ 出水による堤防内部の水分状態の変化の把握を実現
- ・ 出水による堤防内部の緩みの有無の把握を実現

#### 成果の活用フロー

1. 降雨前後の電気探査
2. 要監視箇所の絞り込み
3. 出水時の重点監視
4. 出水後の物理探査
4. 堤防内部状態の把握

水防活動・維持管理の効率化を実現

#### 最終目標

**最終数値目標**

要監視箇所の絞り込みによる、重点監視の効率化。監視費用の10%削減。

**対象ユーザー**

河川管理者

**使用方法・使用場所等**

河川堤防において、降雨あるいは出水の前後に同一測線で物理探査を適用する。

**販売、利益創出等の流れ**

物理探査技術者による電気探査・表面波探査を実施。 → 河川技術者による探査結果の解釈とコンサルティング。 → 河川管理者による、水防活動・維持管理への活用。

**提供サービスの概要**

繰り返し物理探査による要監視箇所の選定、出水後の堤防内部状態の変化状況を提供。

堤防縦断方向物理探査

- 要監視箇所の選定
- 被災後の堤防内部の緩み状況の把握

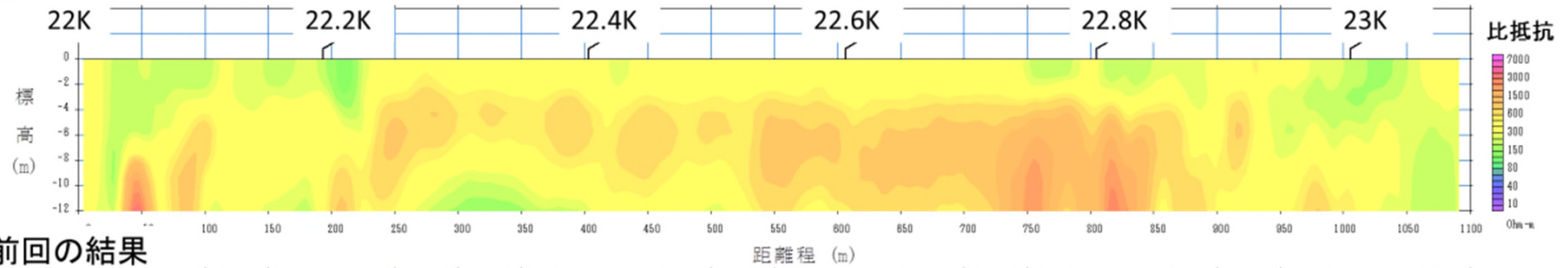
水防活動・維持管理への活用

出水時の要監視箇所の選定ならびに出水後の緩みの有無の判定が可能  
→ 河川堤防以外(斜面・盛土など)への適用も期待できる

比抵抗の差分（変化率）により、堤体内で水が通りやすい区間を抽出した事例

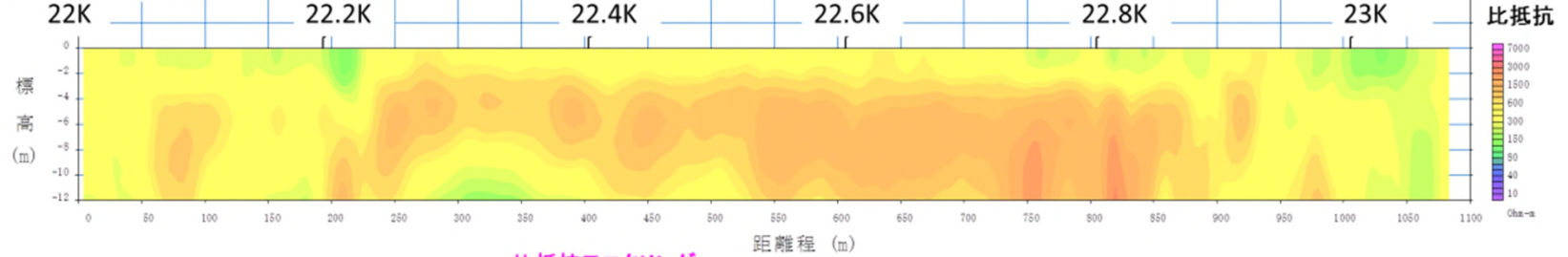
降雨後

今回の結果

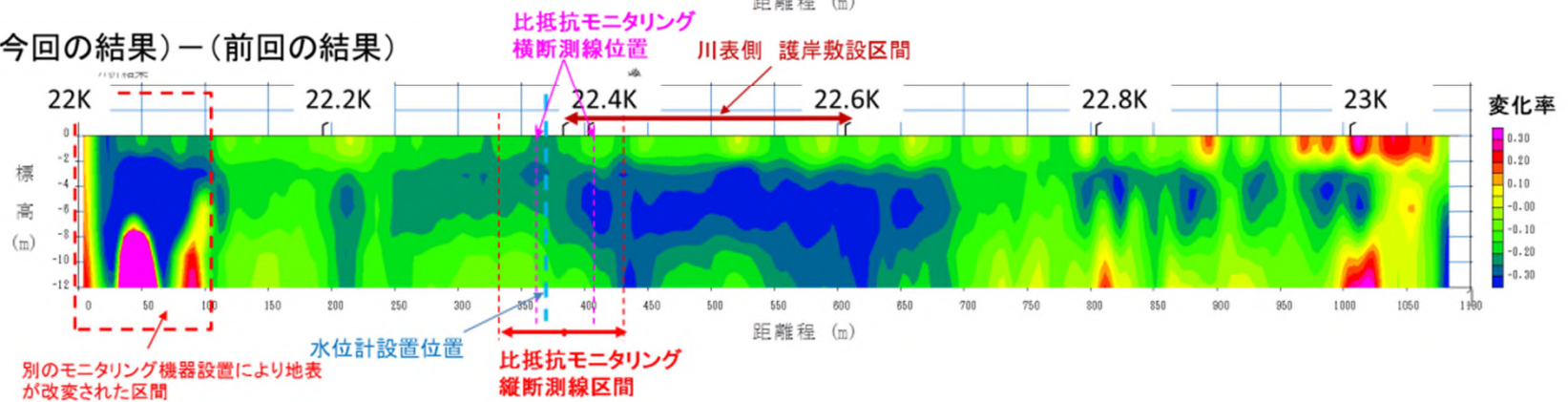


降雨無し

前回の結果



(今回の結果) - (前回の結果)



改良版オームマッパー測定状況（動画48秒）



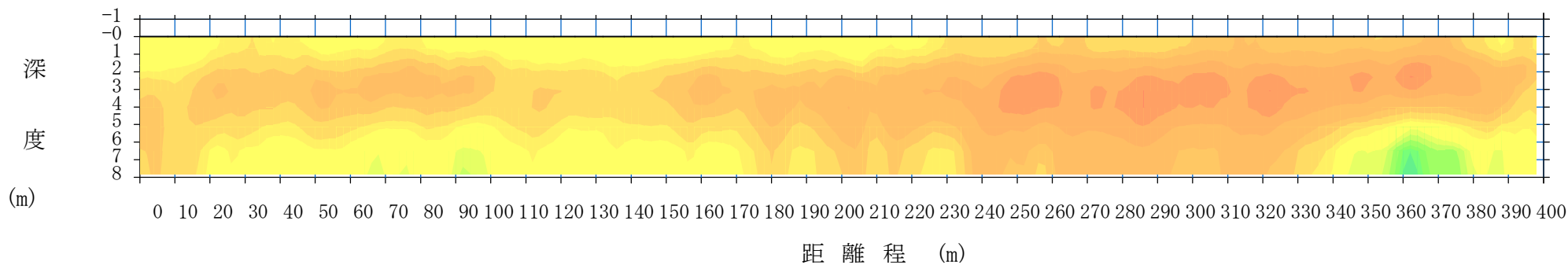
簡易ボーリング作業状況（動画13秒）



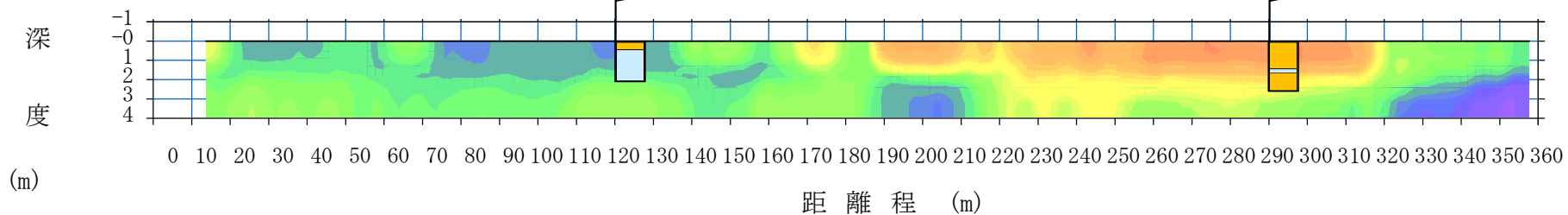
簡易ボーリングコア写真



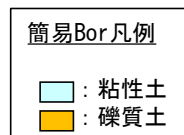
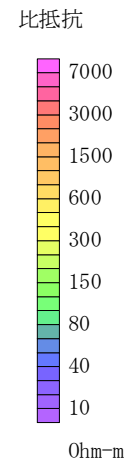
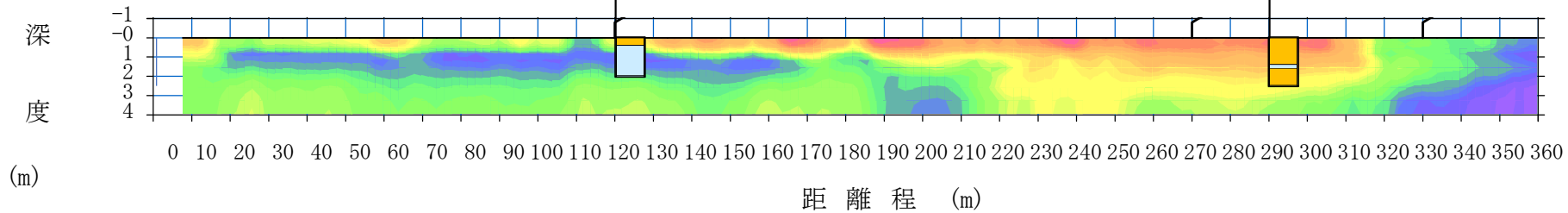
天端

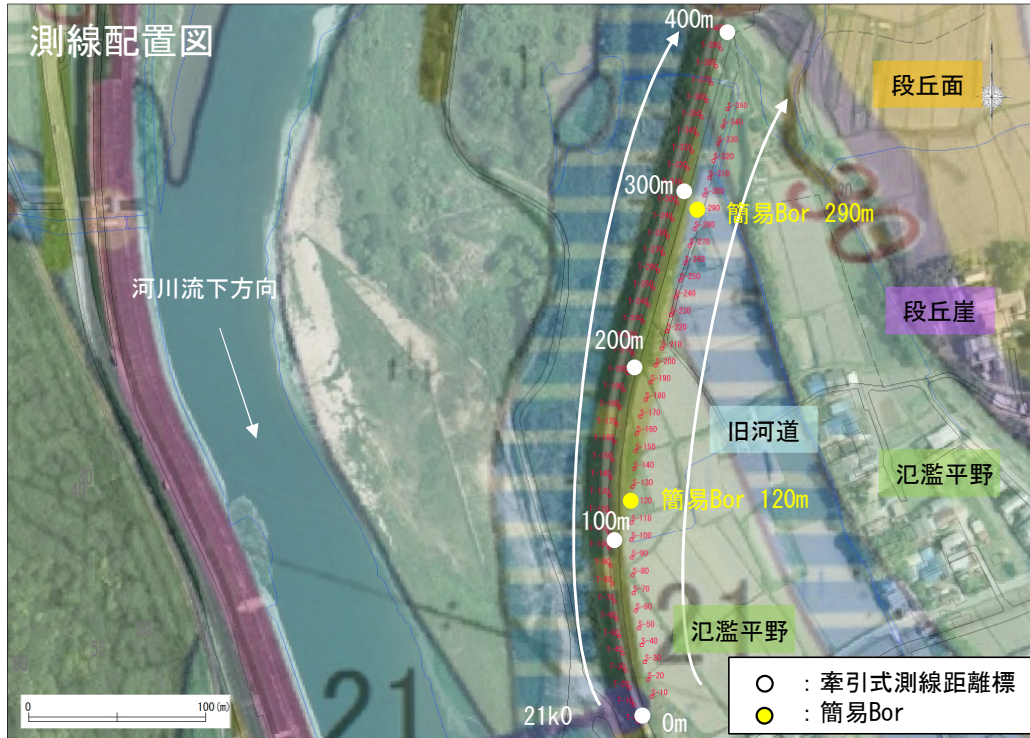


法尻 (通常版)

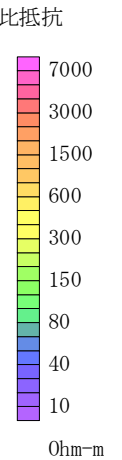


法尻 (通常版+平板型)

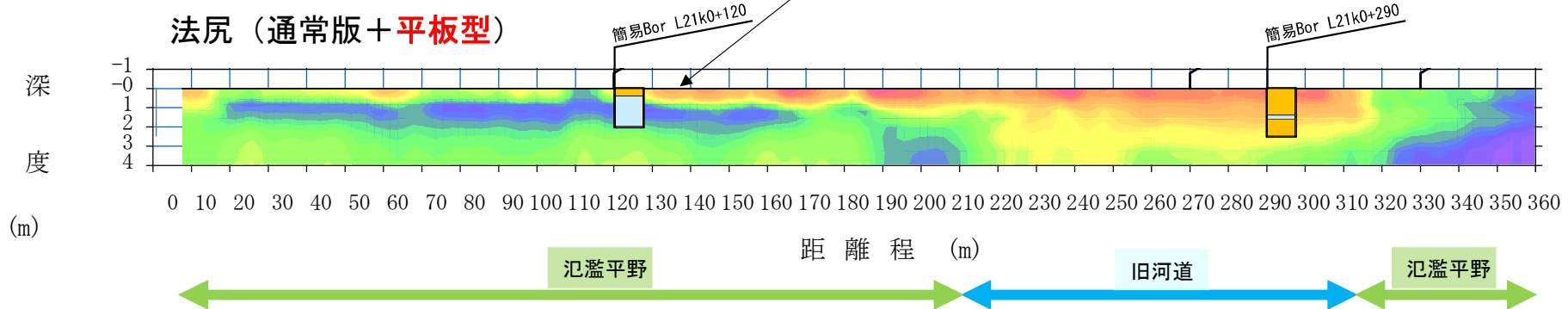




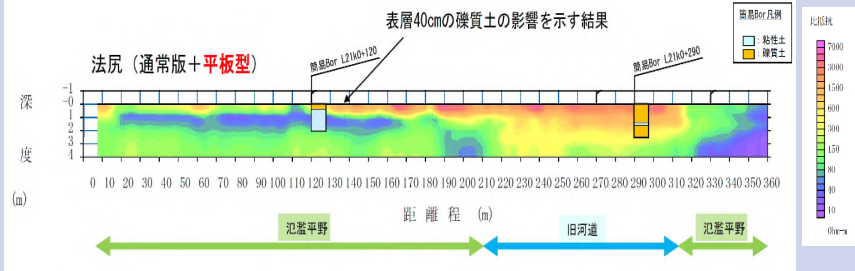
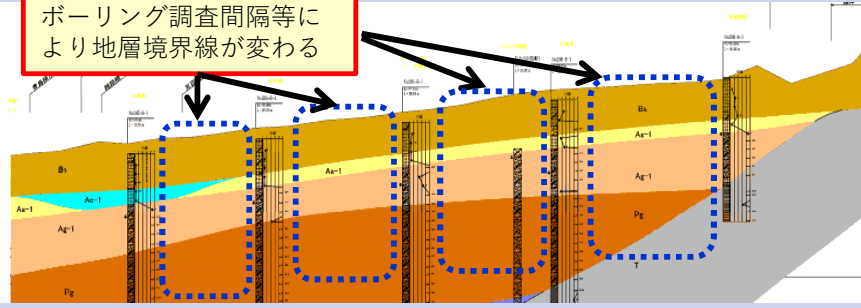
- 電気探査で得られた比抵抗値と治水地形分類図に示される旧河道の範囲は概ね整合する結果となった。
- 旧河道では高比抵抗値を示し、簡易ボーリング結果 (BorL21k0+290) より、礫質土を確認した。また、低比抵抗値を示した120m付近では、簡易ボーリング結果 (BorL21k0+120) より、粘性土が確認された。



表層40cmの礫質土の影響を示す結果





調査方法	平板型電極牽引式電気探査を活用した河川堤防の弱部抽出		従来技術（ボーリング調査による河川堤防の弱部抽出）	
調査概要	<p>【調査概要】 堤防縦断方向の基礎地盤構造を牽引式電気探査を活用し河川堤防の弱部を抽出する。簡易ボーリング調査結果も含め、土質構造を評価。</p> 		<p>【調査概要】 堤防縦断方向の基礎地盤構造をボーリング調査より、地質断面図を作成し、河川堤防の弱部を抽出する。</p> 	
コスト (km当たり)	<p>探査費用：430万円 簡易ボーリング・粒度試験費用：90万円 ※4m/本×4本、粒度試験8試料を想定</p>	<p>合計 520 万円</p>	<p>ボーリング調査費用：150万円/本 ×10本 1500万円（粒度試験費用含む） ※4m/本×10本（100m間隔）、粒度試験20試料を想定</p>	<p>合計 1500 万円</p>
作業日数 (km当たり)	<p>現地調査：3日(簡易ボーリング含む)、電探解析：1日、室内土質試験(粒度試験)+地質解析(断面作成)：8日</p>	<p>合計 12日</p>	<p>ボーリング調査：10日(2班体制)、柱状図作成：2日、室内土質試験(粒度試験)+地質解析(断面作成)：15日</p>	<p>合計 27日</p>
評価	<p>コスト、作業日数も従来技術と比較すると優位である。また、土質構造を連続的（面的）に評価することが可能であり、従来技術では把握することが困難であった河川堤防の弱部の抽出が可能。</p>		<p>電気探査を活用した調査方法（左側）と比較するとコスト、作業日数も劣る。調査地点の土質構造は詳細に評価することは可能であるが、ボーリング調査地点間隔等により土質構造(地層境界)が変わることもあり、河川堤防の弱部を見逃す恐れがある。</p>	

## 関 連 論 文

- ① シリンダー電極牽引式電気探査による浅部地盤調査（地盤工学会誌）2020
- ② 電気探査を用いた堤内地における行止まり構造の把握手法（土木学会第6回河川堤防シンポジウム）2018
- ③ 肱川阿蔵箇所支川との合流部における漏水対策検討の事例（令和3年度 四国地方整備局管内技術・業務研究発表会）2021
- ④ 物理探査技術を活用した基盤漏水に関する河川堤防の健全度評価（土木学会第9回 河川堤防技術シンポジウム）2021

ご清聴ありがとうございました