

# 2016 年北海道豪雨における常呂川での 噴砂発生要因に関する調査

森田 大詞<sup>1</sup>・川尻 峻三<sup>2</sup>・川口 貴之<sup>3</sup>  
渡邊 康玄<sup>4</sup>・田中 悠暉<sup>5</sup>・古溝 幸永<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

E-mail: m1652200151@std.kitami-it.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 北見工業大学助教 工学部地球環境工学科 (同上)

E-mail: skawajiri@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 北見工業大学准教授 工学部地球環境工学科 (同上)

E-mail: kawa@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>4</sup> 正会員 北見工業大学教授 工学部地域未来デザイン工学科 (同上)

E-mail: y-watanb@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>5</sup> 学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (同上)

E-mail: m1652200105@std.kitami-it.ac.jp

<sup>6</sup> 非会員 国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 (〒093-8544 北海道網走市新町 2 丁目 6 番 1 号)

E-mail: komizo-y22aa@mlit.go.jp

2016 年北海道豪雨の際、常呂川では多数の噴砂が発生した。本研究では、この噴砂の発生要因を解明するため、発生した噴砂の規模と河川水位や河川縦断方向の土質との関連性について調べた。さらに、地盤調査によって噴砂が発生した周辺地盤の特性について把握した。その結果、裏のり尻から噴砂発生地点までの距離が大きくなるほど、噴砂の規模は小さくなる傾向にあることがわかった。また、噴砂より堤内側には行き止まり難透水性箇所と考えられる透水性の低いシルト質土層の分布が確認できた。さらに、表面波探査によって噴砂発生箇所に特徴的な地盤性状も把握できた。

**Key Words:** sand boil, geotechnical investigation, soil profile, S-wave velocity

## 1. はじめに

2016 年 8 月 17 日～23 日の 1 週間に、北海道には観測史上初めて台風が 3 度上陸した。これによって北海道各地では記録的な降雨を観測し、河川域において数多くの災害が発生した。特に、河川での地盤災害に着目すると、北海道北見市を流れる常呂川の下流域である常呂町日吉・福山地区では、多様な災害形態が確認された。例えば、常呂川の支川である柴山沢川との合流地点付近での堤防破堤、常呂川本川での堤防越水による侵食崩壊、堤内地盤での噴砂や空気湧出である<sup>1)</sup>。この中でも、噴砂は約 4km の範囲内に多数確認されており、今回の記録的な降雨による常呂川での特徴的な災害の一つであった。

河川増水による噴砂は平成 27 年 9 月の関東・東北豪雨における鬼怒川堤体でも発生しており、主に堤体裏の

り尻付近で発生したことが報告されている<sup>2)</sup>。堤体裏のり尻は、河道から基礎地盤に作用した水圧が最も開放し易い箇所であることを考えると、この位置での発生は合理的である。しかし、常呂川で発生した一連の噴砂は、裏のり尻近傍だけではなく、裏のり尻から最大 50m 程度離れた地点でも発生していた。このような噴砂の発生形態は、先述したような単純な水圧の開放条件のみからでは説明できない。また、このような噴砂が発生した際の状況や堤外水位との関係、堤内・外地盤や堤体の土質等を網羅した報告例は極めて少ない。

そこで本研究では、堤体裏のり尻近傍と、裏のり尻から堤内側に離れた箇所で確認された噴砂の地盤工学的な違いを明らかにすることを目的に、噴砂の発生規模や位置と、河川水位や堤体基礎地盤との関連性を検討した。また、噴砂発生箇所における堤内外・堤体の土質構成を

把握するためにボーリング調査や表面波探査を実施し、これらの結果と噴砂との関係についても検討した。

## 2. 気象・河川水位および調査対象箇所概要

2016年8月17日～23日の1週間に北海道へ襲来した台風は、そのすべてが北海道東部のオホーツク地方を通過した<sup>1)</sup>。1つめの台風である台風7号は8月17日17時半頃に北海道南部の襟裳岬付近に上陸し、17日21時に北海道北東部で温帯低気圧となってオホーツク海へ抜けた。この台風とそれが変化した温帯低気圧によって、北海道オホーツク地域では雨が降り続き、常呂川下流域の2つの雨量観測所で48時間の総雨量と、日降雨量が統計開始以来の最大値を記録した。図-1は噴砂発生地点近傍の水位観測所である太茶苗観測所(KP18.9)と北見雨量観測所(KP49.4)の河川水位と雨量の時刻歴である。台風による記録的な降雨によって常呂川が増水し、18日7時40分頃に計画高水位に達した。その後、降雨は小康状態となったものの、19日に北海道付近に停滞していた前線に向かって暖かく湿った空気が流れたため、再び降雨が続いた。この前線が停滞している間に2つめの台風である台風11号が本州三陸沖を北上し、21日23時過ぎに北海道太平洋側東部に上陸し、22日未明にオホーツク海を抜けた。また、3つめの台風である台風9号は23日6時頃に北海道太平洋側西部に上陸し、23日昼前にオホーツク海へ抜けた。前線や2つの台風によって再び記録的な降雨を観測し、オホーツク地域内の多くの観測所で8月の24時間降雨量や日降雨量の最大値を再び更新した。この降雨によって噴砂箇所近傍の観測地点である太茶苗観測所では、18日と併せて合計で約38時間に亘って計画高水位を超過した(図-1参照)。

図-2は噴砂発生箇所の概要を示している。噴砂は常

呂川の支川である隈川とポン隈川の合流地点付近であるKP24.6～KP28.0の左岸堤防で発生した。なお、当該箇所では過去の出水による漏水や噴砂は確認されていない。次に、治水地形分類図による旧河道との関連性を見ると、KP26.0～KP26.2の噴砂発生範囲は旧河道の付近に位置しているものの、全体的な傾向としては治水地形分類図による旧河道と噴砂発生箇所との優位な関連性は確認できない。図-3は、図-2中に示した調査地点A～Dにおける噴砂の発生状況を示している。調査地点Aにおける噴砂は、今回発生した噴砂の中で最も規模が大きく、直径約2.2m、高さ約0.5mの噴砂が裏のり尻付近に発生していた。しかし、調査地点Bについては、直径は調査地点Aの噴砂と同程度であるが、噴砂の高さは半分以下の0.2m程度である。また、調査地点Cでは小規模の噴砂が多数発生しているのに対し、そこから200m程度上流側に位置する調査地点Dでは噴砂の数が少なく、直径は1.8m程度であった。このように、常呂川では今回の河川増水によって同時多発的に噴砂が確認されているが、それらの発生形態は異なっており、それぞれの地点での地盤性状を反映したものと考えられる。そこで本研究では、広域での地盤性状を把握するための非破壊物理探査と、噴砂周辺地盤で機械式および簡易ボーリングを

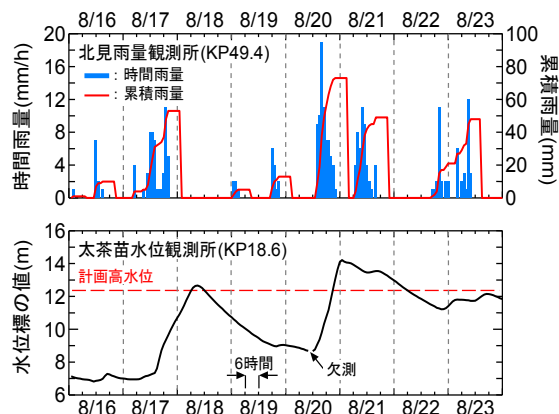


図-1 調査箇所の状況



図-3 調査地点の概要 (Google Earth および国土地理院治水地形分類図に加筆)

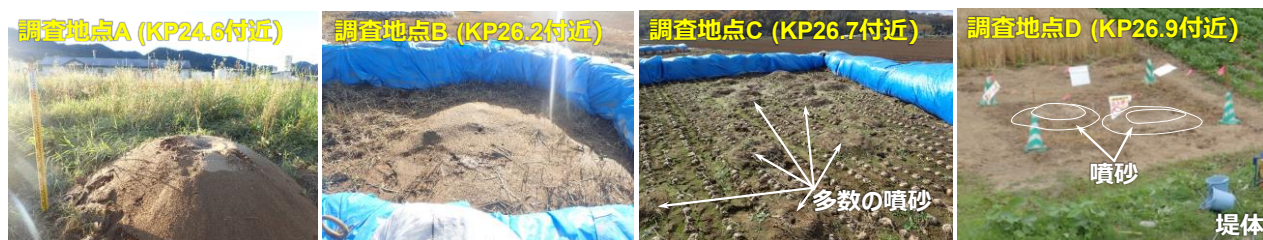


図-3 噴砂の発生状況



図-4 調査箇所状況 (Google Earth に加筆)

行い、噴砂発生箇所における堤体と周辺地盤の土質構成を推定した。これらの結果は、今後の数値解析による噴砂の発生予測や、噴砂が堤体の安定性へ与える影響を詳細に検討する際に有用なデータになると考えている。

図-4 は各調査地点における地盤調査項目を示している。本研究では、河川域における広域での地盤調査性状を調べるために表面波探査を実施した。表面波探査では、地盤剛性に関するパラメータである S 波速度  $V_s$  の 2 次元分布（以下、 $V_s$  分布とする）を非破壊で簡便に取得することができる。この  $V_s$  と土質区分を関連付けることで、広域かつ迅速に河床下の地盤構造を把握することが試みられており<sup>3)</sup>、河川域でも地盤調査としての有用性が報告されている。簡易ボーリングについては、油圧式ブレイカーでサンプラーを地盤内に打ち込む、パーカッションタイプのボーリングである。基本的にはサンプラー径  $\phi$  が 120mm のものを用いたが、打ち込みが困難な場合には  $\phi=80$  mm と 60mm のサンプラーに適宜交換した。なお、礫質土などの硬質土質によって打ち込みが困難となった時点で掘り止めとした。調査地点 A では表面波探査と機械式および簡易ボーリング、調査地点 B では表面波探査と簡易ボーリング、調査地点 C では表面波探査のみ、調査地点 D では簡易ボーリングのみを行った。調査地点 C、D では、それぞれ表面波探査と簡易ボーリングのみの実施であるが、これらの調査結果を調査地点 A や B の結果と比較することで、噴砂発生地点の地盤性状を相対的に把握できると判断した。

### 3. 概略的な噴砂の発生形態について

噴砂は堤外地における河川水位の上昇で透水性基盤内の浸透圧が増加したことで発生すると考えれば、噴砂の規模と浸透圧が伝播した距離にはある程度の相関がある

と考えられる。つまり、規模の大きい噴砂ほど裏のり尻付近で、小規模な噴砂は裏のり尻から堤内地側の離れた箇所でも発生する可能性がある。しかし、これまでの噴砂発生に関する報告では、上述のような噴砂発生機構を裏付けるような検証は行われていない。そこで、現地踏査および航空写真から取得した解像度 12cm のオルソ写真を用い、噴砂の発生規模と発生位置について整理した。

図-5 は発生した噴砂の面積  $A_b$  と裏のり尻からの発生位置  $L_t$  の関係を KP 別に整理したものである。なお、噴砂の発生規模は噴砂量や体積などの指標を用いることが望ましいが、オルソ写真からは高さの判断が困難であるため、発生した噴砂の面積を噴砂の発生規模とした。全体的な傾向として、 $L_t$  が大きくなると  $A_b$  が低下する傾向にあるが、 $A_b$  の小さい噴砂は裏のり尻近傍でも多数発生していることがわかる。これは噴砂が発生している実際の地盤は、単純な土質構成ではなく、基礎地盤や堤内・外地盤には様々な土質が層状分布していることや、局所的な緩み領域が存在するためだと推察される。過去の縮尺模型試験<sup>4)</sup>や実物大の大型模型実験<sup>5)</sup>において、漏水や噴砂の発生条件は、基礎地盤の土質に着目して整理さ

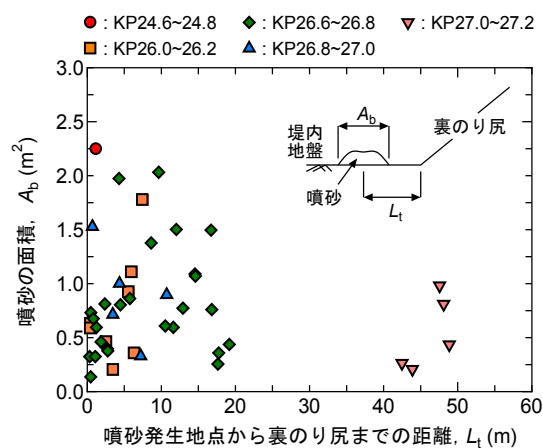


図-5 噴砂の発生規模とりのり尻までの距離



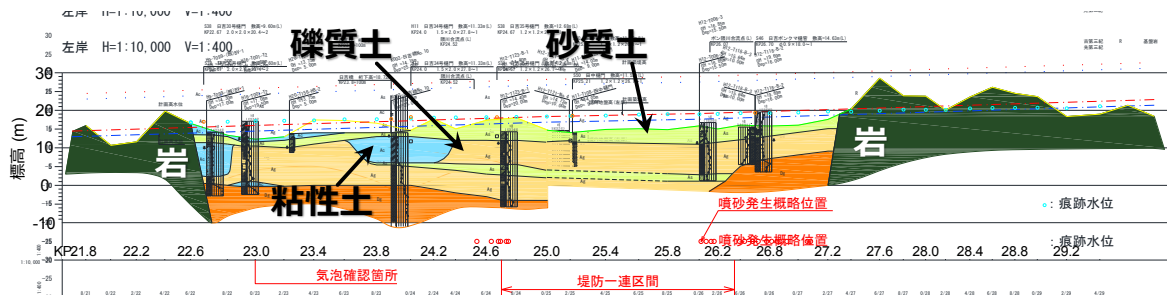


図-6 河川縦断方向の土質構成（文献<sup>9)</sup>に加筆）

れている。例えば、基礎地盤の上層が細砂、下層が砂礫の複層構造かつ下層の砂礫層厚が大きい場合には、比較的噴砂が発生しやすいことが報告されている。図-6は、過去のボーリング調査結果から推定した噴砂発生箇所付近における河川縦断方向の土質区分を示している<sup>9)</sup>。本研究では、図-7に示すように、河床下における各KPでの土質の層厚（以下、土層厚とする）や出水時の河川水位と、先述した $L_t$ や $A_b$ との関連性について検討した。なお、土層厚は図-7中の矢印の箇所を示すように、河床の深度方向に最初に出現したもののみを土層厚として長さを算出し、深度方向に局所的かつレンズ状に分布している土層については無視した。まず、 $L_t$ はKPが大きい上流で大きくなる傾向にあり、 $L_t$ の最大値は50m程度である。痕跡水位の標高は河川勾配に応じて上流ほど大きくなるものの、堤内地盤高も大きくなっている。特にKP27.0付近からは堤防が山裾にすり寄るため、噴砂の発生に関する痕跡水位と堤内地盤高の差は、KP27.0付近で最も小さくなっている。各KPにおける土質ごとの層厚の関連性については、 $L_t$ の増加に対応するように特定の土質層厚が大きくなるような傾向はない。このことから、裏のり尻からの噴砂の発生位置は、縦断方向よりも横断方向の土質構成に依存していると思われる。次に、 $A_b$ の全体的な傾向として、KP24.6（調査地点A）での大規模な噴砂を除くと、KP26.2（調査地点B）やKP26.8（調査地点D）で大きな値となっている。河川水位と関連性については、 $L_t$ と同様に優位な整合性は確認できない。一方、土層厚との関連性については、K25.8~KP27.0程度の範囲では礫質土の土層厚が大きくなる傾向にあり、 $A_b$ の傾向と概ね類似している。ここで、先述した過去の実験結果<sup>4)</sup>から、噴砂を伴うパイピングには基礎地盤が複層構造の場合、上層地盤に対して下層地盤の透水性が高いことが条件とされている。また、複層構造において下層の砂礫層厚が大きい場合には、小さい動水勾配でもパイピングに至ることが報告されている<sup>4)</sup>。すなわち、常呂川における噴砂規模についても、基礎地盤の砂礫質土の層厚との関連性があると考えられる。ここで、最も大きい噴砂となったKP24.6付近については、裏のり尻近傍が埋設管の設置に伴う盛土地盤であったことなど、他の発生箇所とは地盤工学的な素因が異なっていたことが予

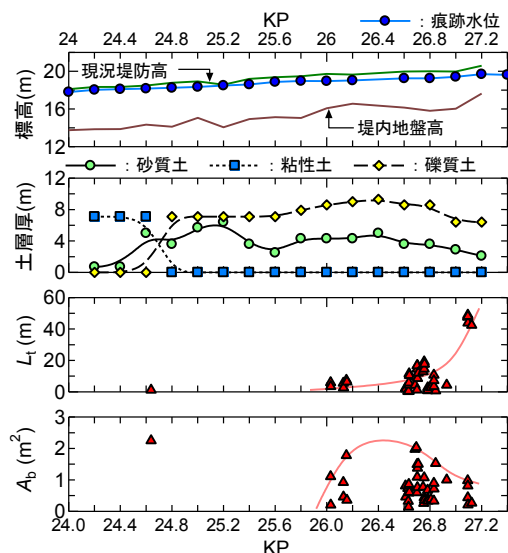


図-7 各KPにおける河川水位、土層厚、 $L_t$ 、 $A_b$

想される。今後は後述の地盤調査結果を反映させた浸透流解析を行うなど、より詳細な検討を行う予定である。

### 3. 横断方向の土質構成

図-8a), b), c)は、それぞれ調査地点A, B, Dにおいて実施したボーリング調査から推定した堤体横断方向の土質構成である。調査地点AとBについては、一部のボーリング採取試料を用いて粒度試験を行っているため、粒度特性を礫分、砂分、シルト+粘土分の含有率として深度方向に整理している。図-8a)に示した大規模な噴砂が裏のり尻で発生した調査地点A（図-3参照）に着目すると、先述したように噴砂が発生した裏のり尻付近は埋設管設置のための埋め戻し材料である火山灰が分布しているが、各ボーリング地点の堤内・外ともに深度1.0m程度までの表層地盤は、シルトと粘土分を40~60%程度含む細粒土である。その下層には、噴砂と同程度の粒度特性を有する砂質土が堆積している。この噴砂と同様の粒度特性を有する砂質土は、堤体直下では厚さ1.0m程度で堆積し、堤内・外に向かって厚さが0.4~0.6mと薄くなるようなレンズ状に分布していると予想される。すなわち、この砂質土層は堤内から堤外まで連続する、い

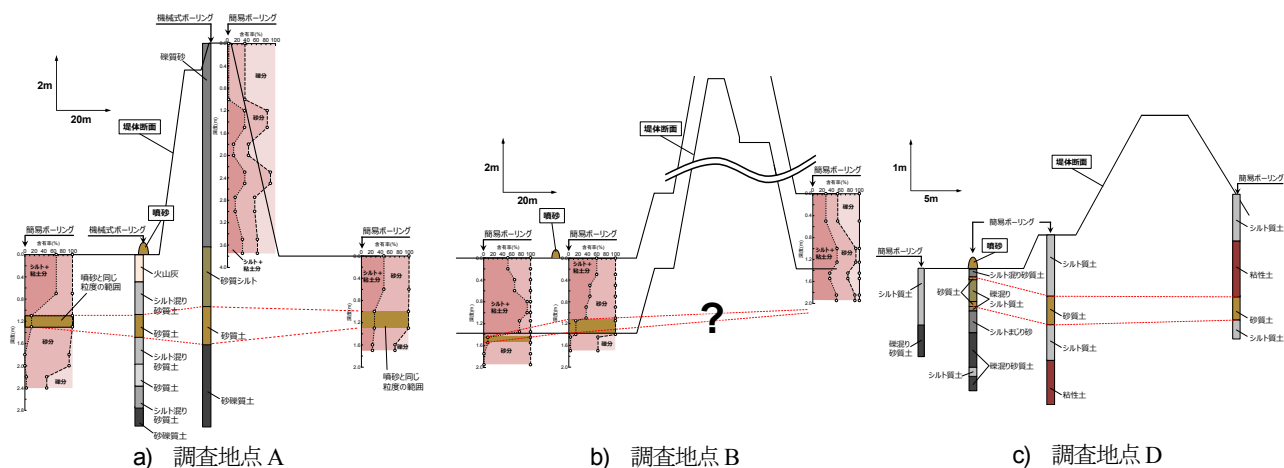


図-8 各調査地点での土質横断面図

わゆる連通した状態で分布している。

次に、図-8b)に示した裏のり尻から 20m 程度堤内側で噴砂が確認された KP26.2 (調査地点 B) 付近 (図-3 参照) では、噴砂と同様の粒度特性を有する砂質土は、堤内地盤の深度 1.45 ~ 1.55m、噴砂近傍では 1.1 ~ 1.4m の範囲で分布している。一方、堤外地盤の粒度特性を見ると、噴砂と同様の粒度特性を有する砂質土は確認できず、KP24.6 (調査地点 A) とは土質構成が異なっている。砂質土層上部は細粒土が地表まで分布しているが、噴砂より堤内側の地点では、細粒分含有率が 90%を超える粘性土に分類される耕作土が局所的に分布している。すなわち、堤内側に厚く分布しているシルト質土層は堤体側から水平方向に作用する浸透圧の伝播を妨げ、行き場を失った浸透圧が地表面方向に作用し、噴砂の発生を促したと推察される。

図-8c)に示した調査地点 D (KP26.9) (図-3 参照) では、堤外および堤内の基礎地盤に噴砂と同様の砂質土が分布しており、調査箇所 A と同様に砂質土層が連通している。噴砂直下では、やや浅い位置に砂質土が分布しており、噴砂の発生に伴って砂質土が地表面付近に移動している状況が伺える。噴砂より堤内側では、調査地点 B と同様にシルト質土が分布しており、噴砂と同様な砂質土は確認できない。このことから、当該箇所においても噴砂よりも堤内側のシルト質土層がいわゆる行き止まり難透水性領域となり、堤外側からの浸透圧を地表面方向へ作用させて噴砂の発生を促したと推察される。

#### 4. 噴砂周辺地盤の $V_s$ 分布

表面波探査から取得できる  $V_s$  は地盤の乾燥密度や含水比などの状態量と拘束圧の大小に応じて増減する。一般的には乾燥密度と拘束圧が大きく、含水比が小さくなるほど  $V_s$  は大きくなる。ただし、 $V_s$  のみから土質を把

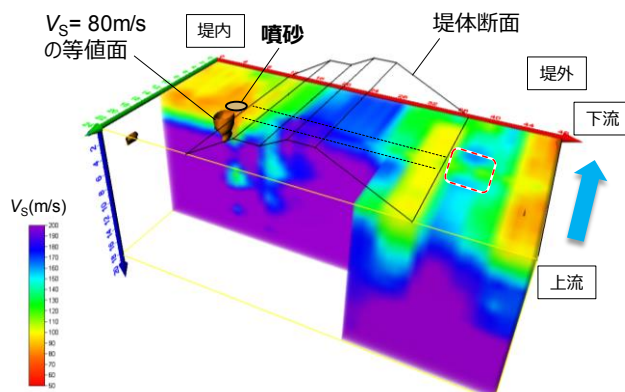


図-9 調査地点 A における  $V_s$  分布

握することは困難であるが、 $V_s$  の増減を相対的に比較することで探査領域の地盤性状を推定することは可能と判断した。図-9 は最も大きい噴砂が確認された調査箇所 A (図-3 参照) における  $V_s$  の三次元分布である。堤内側にある噴砂周辺では  $V_s = 80 \sim 100 \text{ m/s}$  程度の低速度領域となっていることがわかる。また、噴砂発生箇所より 1m 程度上流側には  $V_s = 80 \text{ m/s}$  程度の極めて低速度な領域が局所的に分布している。次に、堤外側では河道に近い領域ほど  $V_s$  が低くなる傾向にあるものの、図中の赤破線の領域は周辺よりもやや  $V_s$  が低下している領域であり、その延長線上は噴砂発生箇所である。堤体基礎地盤については、堤体の拘束圧の影響によって周辺地盤よりも  $V_s$  が大きくなっている。このため、堤体直下における堤外側の  $V_s$  の低下領域の状況は不明瞭であるが、噴砂箇所や堤内側の局所的な低速度領域と堤外側の低速度領域が概ね直線上にあることを考えると、河川増水時には堤外側からも土の移動が生じていた可能性があると考えている。

次に、図-10 は調査箇所 C (図-3 参照) における  $V_s$  分布を示しており、当該箇所では規模は小さいものの多数の噴砂が確認された。なお、図中の黄色丸印で示した地点が噴砂の発生箇所である。図中より、噴砂が密集して

発生している領域では  $V_s$  の相対的な低速度領域となっていることがわかる。これについては、多数の噴砂が発生したことで当該箇所密度が低下した可能性と、元々密度が低い箇所で噴砂が発生した可能性が考えられるが、いずれにしろ、このような  $V_s$  分布は、噴砂の発生メカニズムの検証や噴砂の発生範囲を把握する上で有用かつ特徴的な分布形状と考えられる。すなわち、噴砂の発生前からこのような分布形状であれば、地盤調査で事前に噴砂発生箇所を抽出できる可能性があり、噴砂によって生じた分布形状であれば、噴砂発生に伴う周辺地盤への影響を把握できると考えられ、いずれにしても噴砂地点周辺での表面波探査による  $V_s$  分布の把握は極めて有用だと考えられる。今後は、図-10 における噴砂地点よりも堤内側の領域など、噴砂が発生しなかった領域における  $V_s$  分布を取得し、比較・検討するでより詳細に噴砂発生メカニズムを考察していきたいと考えている。

## 6. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 裏のり尻から噴砂発生地点までの距離が大きくなるほど、噴砂の規模は小さくなる傾向があるが、裏のり尻近傍でも小規模な噴砂が多数発生しており、噴砂の規模と裏のり尻から発生地点までの距離に強い相関性は確認できなかった。
- 2) ボーリング調査結果から、噴砂の規模が最も大きい地点を除く、全ての調査地点において、噴砂より堤内側には行き止まり難透水性箇所と考えられる透水性の低いシルト質土層が確認できた。
- 3) 表面波探査から得られる  $V_s$  分布によって噴砂発生箇所の特徴的な地盤性状を把握できることがわかった。

謝辞：本研究の一部は、公益財団法人 河川財団の河川基金助成事業によって実施したものである。末筆ながら

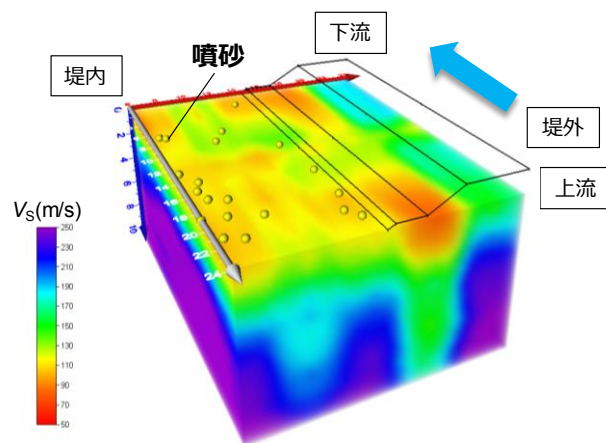


図-10 調査地点Cにおける  $V_s$  分布

記して深甚なる謝意を表す。

## 参考文献

- 1) (公社)土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団：2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団報告書，2017.
- 2) 国土交通省関東地方整備局：第4回鬼怒川堤防調査委員会資料-堤防における漏水発生箇所の詳細調査報告-，2016，閲覧ホームページ URL: [http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000642509.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000642509.pdf) (2017.1.6 閲覧)
- 3) 森田大詞，川尻峻三，渡邊康玄，田中悠暉：河道水面下における表面波探査の適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.73，No.4，pp.I\_547-I\_552，2017.
- 4) 櫛山総平，前田健一，齊藤啓，西村証哉，李兆卿，泉典洋：漏水・噴砂の動態に着目した河川堤防のパイピングの進行性に及ぼす地盤条件と水位条件，第4回河川堤防技術シンポジウム講演概要集，pp.9-12，2016.
- 5) 笹岡信吾，上野俊幸，森啓年，中村賢人，福島雅紀，諏訪義雄：大型模型実験に基づく河川堤防におけるパイピング発達過程の考察，河川技術論文集，Vol.23，pp.417-422，2017.
- 6) 常呂川堤防調査委員会：常呂川堤防調査委員会報告書，国土交通省北海道開発局 網走開発建設部，2017.

(2017.9.29 受付)

## INVESTIGATION FOR OCCURRENCE FACTOR OF SAND BOIL IN TOKORO RIVER DUE TO HOKKAIDO HEAVY RAIN DISASTER IN 2016

Taishi MORITA, Shunzo KAWAJIRI, Takayuki KAWAGUCHI, Yasuharu WATANABE, Yuki TANAKA and Yukinaga KOMIZO

There were many sand boil in Tokoro River due to Hokkaido heavy rain disaster in 2016. In this research, in order to investigate the generation factor of the sand boil, we examined the relationship between the size of the sand boils and the water level of river and the soil profile in longitudinal direction of the river. In addition, the geotechnical investigate was conducted to evaluate the geotechnical characteristics of the surrounding ground of the sand boil. As a result, a silty soil layer with low water permeability was distributed inside the bank from the sand boil. It is possible to evaluate the geotechnical properties of surround the sand boil by using the S-wave( $V_s$ ) distribution.