

外来草本植物による積雪寒冷地の 堤防法面植生の根系強度に関する考察

STUDY ON ROOT SYSTEM STRENGTH OF EMBANKMENT SLOPE WITH NON-NATIVE SPECIES VEGETATION IN COLD REGION

谷瀬敦¹・井谷雅司²・佐藤嘉昭³・村山雅昭¹

Atsushi TANISE, Masashi ITANI, Yoshiaki SATOH and Masaaki MURAYAMA

¹正会員 工修 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

²正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 (同上)

³非会員 農修 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 (同上)

Embankment slope vegetation is important for flood control such as contributing to the erosion resistance of the levee against running water. With regard to Noshiro etc. of the vegetation of the embankment in Honshu, the relationship of vegetation covering condition, amount of roots, root system strength etc. and endurance time to erosion is shown. On the other hand, there has been no quantitative measurement or evaluation of embankment slope vegetation in Hokkaido. Therefore, we investigated the vegetation condition and the strength of the root system after embankment work, and analyzed the factors that affect the strength of the root system. As a result, it became clear that it is necessary to measure soil hardness in addition to root system strength in order to estimate the amount of roots..

Key Words : Cold region, Grass of non-native species, Amount of roots, Root system strength, Statistical analysis

1. はじめに

近年, 全国各地の河川で計画想定を上回る降雨により越水が生じ, 堤防が決壊し, 流域に甚大な被害を与える洪水が頻発している。そのため, 越水による堤防決壊の恐れを少しでも軽減すべく, 堤防天端の舗装や堤防法面にコンクリートブロックを敷設するなどの対策が「水防災意識再構築ビジョン」として2015年度から緊急的に行われている¹⁾。一方これらの対策は河川全川で実施されるわけではなく, 一部区間に限られてしまうため, その他の区間においては, 適切な堤防管理が一層重要になる。河川堤防の法面は一般に植生で被覆されているが, 法面植生は流水に対する堤体の耐侵食に寄与すると知られており^{2,4)}, 越水による決壊の可能性を少しでも低減させるために, 堤防の植生を健全な状態で管理することが必要である。既往の研究から, 本州以南の堤防植生に主に使用されるノシバなどについては, 植生の被覆状況や根毛量, 根系強度などと侵食に対する耐久時間の関係が示されている⁵⁾。特に, 植生の根毛量と流水に対する耐侵食

性には強い関連があると実験結果から示されている。一方, 河川の維持管理費用を抑制するため, 草刈りの回数が制限されており, 法面植生を適正な状態に維持することが困難になってきている。外来草本植物により被覆されている北海道の河川堤防においても, 同様に, その管理水準を維持することが困難になってきており, 効率よく, 的確に対策を実施していくためには, 植生の状態を耐侵食の面から適正に評価を実施する必要がある。また, 新規に植生工事を実施した後, 根系が十分に発達するまでには, 通常, 長い日数の経過が必要となるが, 定量的な計測や評価はなされていない。

耐侵食性と強い関連があるとされる根毛量と根系強度の関係を調査した既往の研究では⁶⁾, ノシバとチガヤについては, 根毛量と根系強度には線形の関係があり, 根毛量が多くなれば根系強度も大きくなり, また, 土壌硬度が高いほど根系強度も大きい値を示す結果が得られている。一方, 北海道の河川堤防植生として用いられている外来緑化種は, ノシバやチガヤとは根系の形態が異なっている。このため, 既往の研究結果をそのまま北海道の河川堤防の植生管理に活用することは出来ない。

本研究ではこれらの課題を明らかにするための第一段階として、根系の状態を簡易に評価出来る根系強度を堤防植生工事後の植生状況と合わせて現地調査し、根系強度に影響する因子の分析を行ったので報告する。

2. 調査方法

(1) 調査概要

北海道中央部を流れる石狩川水系漁川と同水系旧夕張川の堤防法面で実施された法面植生工事箇所において、2017年と2018年の2か年、植被率と土壌硬度とペーン式根系強度計を用いた根系強度の計測を行った。また、群落組成調査も行った。

漁川の調査箇所は2016年7月上旬に種子吹付工で植生工事を実施した箇所である。導入した種の概観を写真-1に示す。吹付けた種子の配合は表-1に示す通りであり、外来牧草種で多年草のケンタッキーブルーグラスと外来芝草種で多年草のクリーピングレッドフェスクとハードフェスクの合計の発生期待本数がおよそ18,800 本/m²となるよう配合して播種している。

旧夕張川の調査箇所は漁川より1年後の2017年6月中旬に同じく種子吹付工により植生工事を実施している。吹き付けた種子の配合は表-1に示す通りであり、漁川の調査箇所と同一である。

調査は2017年の6月と7月、8月および2018年の7月、8月、9月の計6回実施した。調査項目は植被率と土壌硬度と根系強度である。

(2) 植生調査

植被率は1 m×1 mの調査枠内の全面積に占める植生全体の割合を計測した。計測は、近赤外線カメラ(yubaflex, BIZWORKS社製)を用いて、1 m×1 mの枠内を人が立った状態で撮影した画像により行った。撮影した画像データの可視光画像(RGB画像)の赤成分と近赤外線画像データを用いてNDVI(Normalized Differential Vegetation Index: 正規化植生指数)⁶⁾を式(1)により求め、NDVI>0の領域を、植生により被覆されていると判定して植被率を求めた⁷⁾。

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

R: 可視域赤の反射率, IR: 近赤外域の反射率

全体植被率の測定の外に構成種を把握するため、調査枠内で生育している草本種についてブロン-ブランケの被度・群度による調査を行った。

(3) 土壌硬度・根系強度調査

調査枠内の土壌硬度は山中式土壌硬度計を用いて計測



写真-1 植生写真(左からケンタッキーブルーグラス、クリーピングレッドフェスク、ハードフェスク)

表-1 漁川および旧夕張川での播種量と発生期待本数

種名	1m2当り 播種量 (g/m ²)	種子 重量 (粒/g)	純度 (%)	発芽率 (%)	発生期 待本数 (本/m ²)
ケンタッキーブルーグラス	4.00	3,000	92.0	75.0	8,280
クリーピングレッドフェスク	4.00	1,000	97.0	80.0	3,104
ハードフェスク	8.00	1,200	97.0	80.0	7,450



写真-2 根系強度計

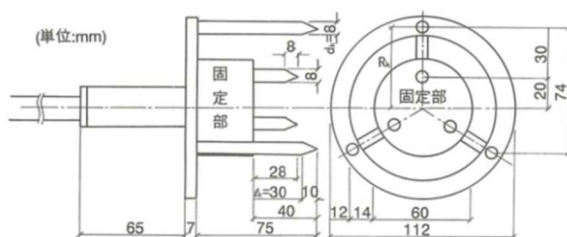


図-1 根系強度計の先端部分(文献³⁾から転記)

表-2 植生調査, 土壌硬度, 根系強度等調査結果一覧

河川名(植生工事実施日)	漁川 (2016年7月上旬)								
調査年月日	2017			2018 No.1			2018 No.2		
	6/23	7/31	9/15	7/2	8/3	9/12	7/2	8/3	9/12
土性	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土
土湿	適	適	適	適	適	適	適	適	適
草本草群落高 (m)				0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5
草本草植被率 (NDVIより)	58.3	75.4	90.8	50.1	68.1	93.5	95.4	93.0	99.4
土壌硬度 (mm)	12.9	21.4	12.9	10.6	19.8	18.7	11.1	16.4	18.0
根系強度 (N・m)	23.8	37.8	31.5	21.2	30.8	33.8	29.2	30.6	32.6
種名	被度・群度								
オオシノゲサ (クリヒツナグサ)	2・3	4・4	1・1	3・3	2・3	2・3	3・3	3・3	2・3
ナガハグサ (ケンタッキブルグラス)	1・2	2・3	1・2	+	+	1・2	1・2	1・1	1・1
ウシノゲサ (ハトフィソク)	2・3	2・3	4・4				+	+	+
スカボ属の一種 (Agrostis sp.)			2・3	1・2	2・3	3・3	1・2	3・3	3・3
シロツメクサ	+	1・2	+	+		+	+	+	+
ヒメムカシヨモギ			1・1			+			

河川名(植生工事実施日)	旧夕張川 (2017年6月中旬)								
調査年月日	2017			2018 No.1			2018 No.2		
	6/23	7/31	9/15	7/2	8/3	9/12	7/2	8/3	9/12
土性		シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土	シルト質壤土
土湿		適	適	乾	乾	乾	乾	乾	乾
草本草群落高 (m)				0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
草本草植被率 (NDVIより)		8.9	43.1	19.6	15.9	50.1	25.3	30.4	55.9
土壌硬度 (mm)		19.0	12.2	11.0	20.7	17.2	11.6	18.9	18.1
根系強度 (N・m)		13.00	11.8	14.0	23.6	23.6	14.6	23.4	30.0
種名	被度・群度								
オオシノゲサ (クリヒツナグサ)		1・3	1・2	3・3	2・2	2・2	3・3	3・3	3・3
ナガハグサ (ケンタッキブルグラス)		+	1・2	+	+	+	1・1	1・1	1・1
ウシノゲサ (ハトフィソク)			1・2	+	+	+	+	+	+
シロツメクサ			+			+		+	+
イヌビエ		+	2・1	+	+	1・1	+	+	+
ヒメムカシヨモギ				+		+	1・1	+	+
ヒメジョオン							1・1	+	+
イヌカミツレ				+			1・1	+	+
オオイヌタデ			2・1						

※種名は被度・群度が1以上記録された種を記載

した。

根系強度は、土木研究所が開発したベーン式根系強度計³⁾を用いて計測した(写真-2, 図-1)。ベーン式根系強度計の計測部は、内側の金属製円盤と外側の円盤の2種類の円盤で構成されており、円盤には、堤体土中に差し込む金属のとがった棒が同心円状に固定されている。内側円盤の突起部は30mmであり、30mmの深さまでの根系の強度を計測するものとなっている。上部はハンドルとトルク計が設置されており、外側の円盤を固定点にして、内側の円盤をハンドルにより回転させ、金属棒上部に設置されたトルク計によって最大値を読み取る方式である。このベーン式根系強度により、調査枠内の植生を乱さないように、調査枠直近の外側で複数回測定して平均値により根系強度を求めた。現地調査時に裸地が多く植生がわずかしき確認できなかった箇所では、裸地を避け、植生が生えている個所をピンポイントで計測した。

3. 調査結果

(1) 植生調査結果

表-2に調査結果の一覧を写真-3に2018年調査時の漁川



漁川 No. 1 2018/7/2 旧夕張川 No. 1

漁川 No. 1 2018/8/3 旧夕張川 No. 1

漁川 No. 1 2018/9/12 旧夕張川 No. 1

写真-3 調査実施時の植生の状況

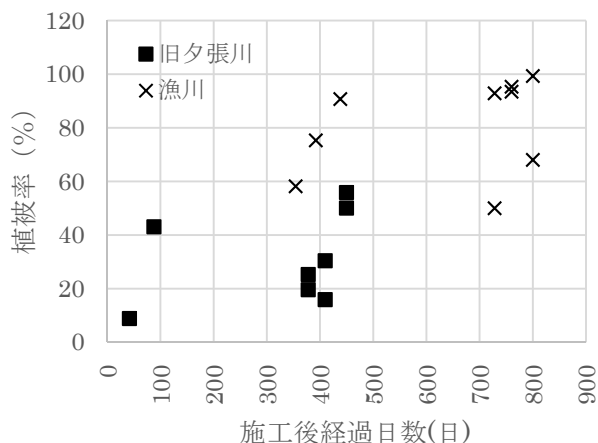


図-2 植被率の施工後経過日数による変化

と旧夕張川のNo.1地点の植生の状況を示す。2017年は漁川と旧夕張川で周辺を見渡して、平均的な植生状況の箇所それぞれ1地点の調査枠で調査し、2018年はそれぞれ平均的な場所1地点と比較的良好な場所1地点を選定して調査した。

施工後1年を経過した漁川の2017年の調査では、植被率は6月調査時点では58.3%と低い値であったが、9月には90%を超える値となった。2年経過後の2018年調査では、7月時点で植被率が50%程度の箇所もあったが、9月には2地点とも90%を超えた。群落高の計測は2018年しか行わなかったが、2018年9月時点でも0.5 mであり、草丈は低かった。群落組成調査の結果では導入種であるクリーピングレッドフェスクとケンタッキーブルーグラスの被度・群度が大きい結果ではあったが、ヌカボ属の一種やシロツメクサの群落も確認された。

施工1年目の旧夕張川の2017年の調査では、植被率は7月の調査では8.9%，9月の調査でも43.1%と低い値であった。1年経過後の2018年調査でも、15.9%から55.9%と低く、群落高も0.3 mと低かった。群落組成調査結果では導入種のクリーピングレッドフェスクの被度・群度は大きかったが、ケンタッキーブルーグラスとハードフェスクの被度・群度はわずかであった。侵入種の被度・群度は漁川と比較して小さいが、確認された種数は多かった。

図-2に漁川と旧夕張川の両地点の植生工事実施後の経過日数と植被率の関係を示す。施工後経過日数の0から約100日までの間が施工1年目の結果で、およそ300日から500日までの間が施工後1年経過、700日～800日までの間が施工後2年目の結果に当たる。植被率を概観すると、年の初めの調査時点では小さく、その後秋にかけて拡大する。翌年の初夏にはまた小さくなるが、秋にかけて再度拡大する。このサイクルを繰り返して年を追うごとに徐々に植生が拡大する調査結果となった。

(2) 土壌硬度・根系強度等調査結果

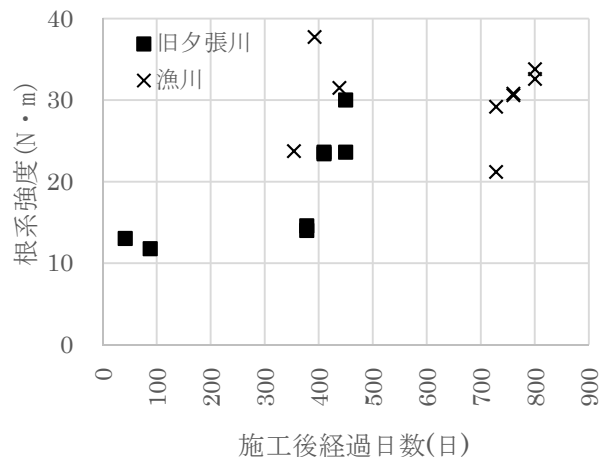


図-3 根系強度の施工後経過日数による変化

漁川および旧夕張川の土壌の土性分類は、どちらもシルト質壤土であった。土壌硬度の計測値は調査回毎の変動が大きく、漁川では最低で10.6 mm，最高で21.4 mm，旧夕張川では最低で11.0 mm，最高で20.7 mmであった。この結果は、調査日前の降水量や気温などの気象条件により左右されたものと推測される。

根系強度は漁川で21.2 ～ 37.8 N・m，旧夕張川で11.8 ～ 30.0 N・mであった。漁川の根系強度については施工後1年経過の平均値は31.0 N・m，2年経過後の平均値は29.7 N・mであり、1年経過後から2年経過後までの平均には差が生じなかった。一方、旧夕張川では施工1年目と施工後1年経過の根系強度に差が生じ、1年目の平均は12.4 N・mであったのが、1年経過後の平均は21.5 N・mになり、1年経過後の方が大きい値を示した（表-2、図-3）。

4. 考察

(1) 植生調査結果および土壌硬度と根系強度について

植生調査結果から考察すると、漁川と旧夕張川の両調査地点とも、植生工事実施後には、当初期待していた程の植生状況までには至らなかったと思われる。両地点とも種子散布工で実施され、発生期待本数は18,800 本/m²を超えていたが、現地調査実施時点で生育を確認できた株数は少なく、裸地が多く見受けられた。工事完了時点における生育株数について、発注者の受取基準はないものの、目安として1 m²当り5,000本程度の生育数が必要とされているが、これを満たしてはいないと推察される。特に旧夕張川の植生不良が目立っており、そのため、本研究による堤防植生の考察は、比較的植生不良個所についての結果の考察となる。

石狩川流域での調査⁸⁾と釧路川での調査^{9,10)} 結果では、根系強度は植生工事実施後の経過年数が少なく、また、植生の状況が悪いほど小さくなるという結果が得られており、実施後1年未満の調査では30 N・m（およそ300

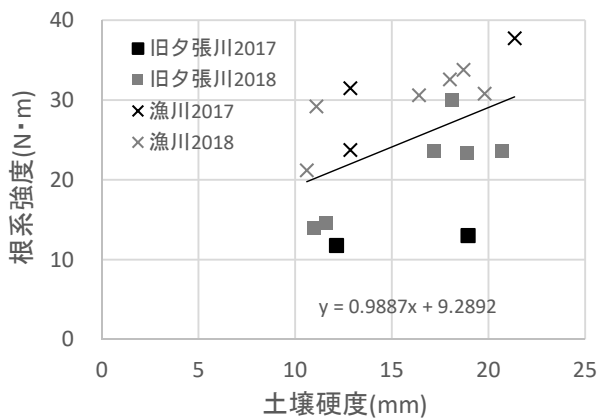


図-4 土壌硬度と根系強度の関係

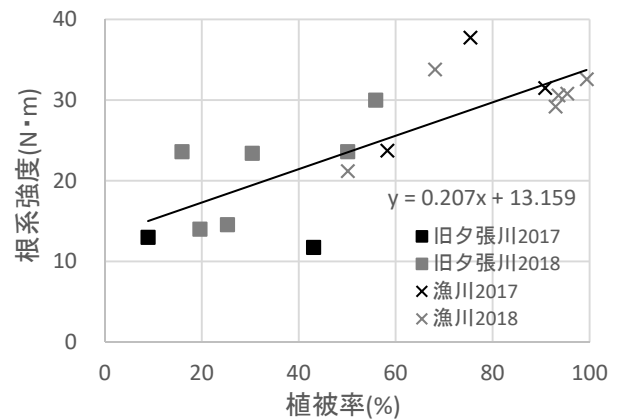


図-5 植被率と根系強度の関係

kgf-cm) 以下の地点が殆どで、2年目でも植生が不良の箇所は30 N-m以下の箇所が殆どであった。これは、根毛量も多く植生の状態も良いと判定される根系強度300 kgf-cmを³⁾ 超えておらず、生育が不十分の状態であったと言える。本研究による漁川の調査では、植被率が比較的小さかった2017年の6月調査と2018年の7月調査でも根系強度が30 N-mを超えず、生育が十分でなかったと判定される。旧夕張川では2年間の調査期間中に30 N-mを超えたのは最後の調査の2018年9月のみである。根系強度の調査結果からみても、旧夕張川の植生の生育が十分でない状態が多かったと言える。

土壌硬度と根系強度の計測結果について図-4に散布図で示す。図には全調査結果についての回帰直線も記す。図より、土壌硬度が大きくなると根系強度も大きくなることがわかる。また、土壌硬度が同じ大きさでも、旧夕張川と比較して漁川の方が根系強度は大きくなる結果が得られた。

次に、植被率と根系強度の計測結果について図-5に散布図で示す。図には全調査結果についての回帰直線も記す。旧夕張川と比較して漁川の植被率は大きい。全プロットを見ると、植被率が大きくなると根系強度も大きくなり、一本の回帰直線上に旧夕張川と漁川のデータの両方が当てはまることわかる。図-4についての説明で述べた同じ土壌硬度でも旧夕張川と比較して漁川の根系強度が大きかった理由は植被率の違いによるものと推定される。

(2) 重回帰式による根系強度の推定

図-3、図-4、図-5に示した通り根系強度は施工後経過日数が長くなるほど、土壌硬度が大きくなるほど、また植被率が大きくなるほど大きくなる結果が得られた。この結果を用いて、重回帰分析により根系強度と植被率、土壌硬度、経過日数との関係を分析した。

重回帰分析の目的変数を根系強度とした場合に、簡便で、最適な説明変数を選択するため、各説明変数間の相関係数と各説明変数の組合せ毎の小標本の補正をした赤

表-3 各説明変数間の相関係数

	植被率	土壌硬度	経過日数
植被率	1	0.044	0.7017
土壌硬度	0.044	1	0.0524
経過日数	0.7017	0.0524	1

表-4 目的変数が根系強度の時に選択した説明変数の組合せと赤池情報量基準 (c-AIC) の値

選択した説明変数	c-AIC
植被率、土壌硬度、経過日数	102.391
植被率、土壌硬度	100.304
植被率、経過日数	111.288
土壌硬度、経過日数	112.006
植被率	108.958
土壌硬度	121.416
経過日数	115.681

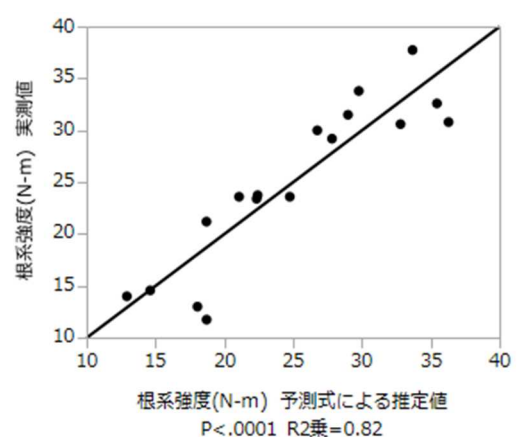


図-6 根系強度の実測値と植被率と土壌硬度から求めた推定値の関係

池情報量基準 (c-AIC) を求めた。(表-3、表-4)。その結果、植被率と経過日数の間の相関係数が0.7017と大きく、どちらかの変数を省略できる可能性があることが分かった。赤池情報量基準を用いた評価でも、経過日数

を除外して、植被率と土壌硬度の説明変数の組み合わせが最適と判定された。この結果から、植被率と土壌硬度を説明変数とする重回帰式が式(2)の通り得られた。

$$Y = -1.1370 + 0.2019X_1 + 0.9174X_2 \quad (2)$$

Y: 根系強度, X_1 : 植被率, X_2 : 土壌硬度

図-6に実測値と式(2)による推定値の結果の分布を示す。決定係数は0.82, p値は0.0001未満と精度よく関係式を導くことが出来た。

5. おわりに

根系強度計は地表面から深さ3cmまでの植物の根のせん断強さを計測するために開発されたものであり、堤防法面の根毛量を簡易に推定するには最適の装置である。この装置を使って、宇田ら³⁾は根系強度は土壌硬度に関係なく根毛量を推定することが可能と述べている。一方、河川環境総合研究所報告⁶⁾では、土壌硬度が大きいほど根系強度が高い値となることを示している。

本研究においては、根毛量の計測は行ってはいないものの、土壌硬度が大きくなるほど根系強度も大きい値を示し、植生の条件の外に、土壌条件の違いによっても、根系強度の大きさが左右されることを明らかにした。このことは、根系強度から根毛量を推定する際には、土壌硬度も計測して補正する必要があることを示唆している。

本研究による調査は石狩川下流域の2河川の2年間の結果のみによる考察であり、植生も不良個所に限った結果となっている。そのため、根系強度と植被率および土壌硬度の関係式の適用範囲は限定される可能性がある。また、根毛量も現地で計測はしていないため、今後は多くのフィールドでこれらの計測を行い、検証を進めてい

く必要があると考える。

謝辞: 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部千歳川河川事務所には現地調査の協力と資料の提供を、同釧路開発建設部釧路河川事務所には資料の提供を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：水防災意識社会再構築ビジョン, <http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/> (2019年3月現在)
- 2) 福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治：堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集第491号/II-27, pp31-40, 1994.
- 3) 宇田高明ら：洪水流を受けた時の多自然型河岸防壁工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料第3489号, 1997.
- 4) 谷瀬敦, 矢部浩規, 新目竜一：平成28年8月洪水により決壊した常呂川堤防の耐侵食評価, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2017
- 5) 土木学会：水理公式集（平成11年版）, 1999.
- 6) (財)河川環境管理財団河川環境総合研究所：河川環境総合研究所報告第17号, pp.44-62, 2011
- 7) 井谷雅司, 佐藤嘉昭, 谷瀬敦：画像解析による河川堤防の植被率判定手法の基礎的検討—NDVIによる植被率判定手法の提案—, 土木学会北海道支部論文報告集第75号, 2019
- 8) 谷瀬敦, 田倉利浩, 新目竜一：河川堤防植生の適切な施工・管理に向けた現地植生調査, 河川技術論文集第24巻, 2018
- 9) 福田水文センター：平成 25 年度施行釧路川堤防調査業務報告書, 2014
- 10) 福田水文センター：平成 26 年度施行釧路川堤防調査業務報告書, 2015

(2019. 4. 2受付)