

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450346

研究課題名(和文) 地域資源の木材と石材による、環境に配慮した水路護岸の開発

研究課題名(英文) Development of canal walls using timber pile foundations and fieldstones

研究代表者

佐々木 貴信 (SASAKI, Takanobu)

秋田県立大学・木材高度加工研究所・教授

研究者番号：00279514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：秋田県の豊富な地域資源である秋田スギと男鹿石を使い、多自然型護岸工法を開発した。本研究で提案する護岸工事の実現により、河川空間の景観形成や生態系保全のみならず、工事に伴うCO2排出量の削減や、建設資材の地産地消など、環境面や産業振興の面での貢献も期待される。本研究では、秋田県内の農業用水3カ所で試験施工を実施し、開発した工法の施工性や安全性の検証、施工後のモニタリングを実施し、得られた成果を基に最終的に設計手法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Nature-friendly canal walls that combine a timber pile foundation with fieldstone walls were built in Ogata-village, Akita. The timber piles, which provide a foundation, were 4 m long and 160 mm in diameter. First, the piles were driven into the bottom of the canal at intervals of 800 to 1000 mm, after which horizontal members were connected to the top of the timber piles using steel pins. This nature-friendly canal wall construction method, combining timber pile foundations and fieldstone walls is economical in comparison with the conventional method using steel sheet piles and concrete blocks. Furthermore, this method produces an attractive result. The safety of the canal wall construction method proposed in this study was demonstrated by a loading test after construction, as well as the results of monitoring of the behavior of the timber piles and fieldstone.

研究分野：土木工学

キーワード：農業水利 灌漑排水 環境配慮型水路 木材 自然石 木杭 護岸 軟弱地盤

1. 研究開始当初の背景

(1) わが国では、高度経済成長期に多くの土木工事が進められる中、経済性や耐久性に優れたコンクリートが土木材料の主流となり、河川工事でもコンクリートブロックによる護岸等が整備されていった。一方、江戸時代から続く石積み工事は、コスト面、職人不足などから次第にその工事量を減らしていった。木橋や木杭など木材を使用した昔ながらの土木工事もまた、戦後の資源不足や耐久性の問題から、コンクリートや鋼材を使用した工事に取って代わった。

平成の時代に入り、多自然型川づくりとして自然環境や景観に配慮した河川工事が実施されるようになり、河川法の改正（平成9年）などに伴い、コンクリート三面張りの河川から環境に配慮した多自然型護岸へと改修する試みなども見られるようになった。石積みの護岸工は多孔質な構造から生態系にも望ましく、景観性にも優れることから再び見直されるようになってきた¹⁾。

(2) 戦後植林されたわが国の人工林は、伐採時期を迎えており、近年、「森林林業再生プラン」や「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」（平成22年）等が整備されているように、国産材の利用拡大が急務となっている。木造住宅の着工戸数が減少を続ける中、木材の新規需要先として、土木分野での木材利用が期待されている²⁾。

秋田県はスギ人工林の蓄積が全国一多く、適切な森林管理のためにも間伐材等の利用拡大が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、秋田県の豊富な地域資源である秋田スギと男鹿石を使い、環境と景観に配慮した、自然素材による多自然型護岸工法を開発することを目的とする。

本研究で提案する自然素材を用いた護岸工事の実現により、河川空間の景観形成や生態系保全のみならず、建設工事に伴うCO₂排出量の削減効果や、建設資材の地産地消、持続可能性など、環境面や産業振興の面での波及効果も期待される。

本研究では、秋田スギの丸太で構成する基礎構造と、自然石（男鹿石）の石積み擁壁を組み合わせた護岸工を考案し、農業用水路を対象とした試験施工による施工性や安全性の検証、施工後のモニタリングを実施し、設計手法の整備等を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、木杭基礎の設計、石積み護岸の設計、構造物の安全性の検証の3つのテーマについて以下の方法でそれぞれ研究を行った。

(1) 木杭基礎の設計

木杭基礎の設計では、液状化対策工法など木杭による地盤改良技術^{3),4)}や、伝統的な基礎

補強工である梯子胴木の技術を参考にして2～3ケースの木杭基礎の設計を行った。木杭に用いる秋田スギ丸太は間伐材を想定し、建築用材として利用されない径級や、一般流通する長さ（3.8m～4m）の材を使用することを条件に、木杭基礎の構造に最適な使用丸太の検討を行った。

(2) 石積み護岸の設計

石積みは秋田県男鹿市の船川漁港など現存する歴史的構造物にも見られるように、男鹿石の産地である男鹿市の伝統的技術でもある。本研究でも石積みの隙間をモルタル等で充填しない伝統的な空積みでの護岸の設計を行った。石積みの方法や背面の構造などの断面設計は、男鹿石を用いた文化財の復元工事等を参考に検討した。また、石積みの安定性の検証や、構造解析モデルの検討を行った。

(3) 構造物の安全性の検証

秋田県大潟村内の農業用水路を対象に、管理者や秋田県の協力を得て、試験施工を行った。試験では、護岸背面に水位計、土圧計、間隙水圧計を設置して、施工後の背面土圧や水位の変動、木杭に作用する鉛直荷重等の経時変化をモニタリングした。また、定期的に河川断面や護岸の形状計測を行い、安定性の検証を行った。

4. 研究成果

本研究では、大潟村内の2カ所の農業用排水路を対象に、木杭基礎と石積みによる護岸工法の試験施工を行った。また、当初の研究計画では考慮していなかったが、木杭基礎の応用として同村内の農業用水路を対象に、木杭基礎を用いたコンクリート水路の試験施工を行った。これら3つの試験施工を進める上で、本研究でテーマとした木杭基礎の設計、石積み護岸の設計、構造物の安全性の検証をそれぞれ行った。

(1) 木杭基礎と石積み護岸の試験施工

木杭基礎と石積みによる護岸工法の試験施工は、軟弱地盤が課題の秋田県大潟村の2箇所農業用水路において、延長12mおよび延長約30mの片側護岸を対象に行った。

木杭基礎と石積み護岸の断面図を図1に示す。木杭基礎の設計では、伝統的な基礎補強工である梯子胴木の技術を参考に、木杭基礎の間隔を800～1000mmに打設して、杭頭部に横木や胴木を連結して格子状の基礎が構成されるようにした。試験施工は、軟弱地盤の箇所を想定しているが、木杭の長さは丸太の流通長さに合わせて4mとした。また、施工性を考慮して杭材はφ160mm、横木および胴木はφ140mmの丸棒にそれぞれ加工している。木材同士の連結は、φ15mmの先孔を加工した後に、D16異形棒鋼を打ち込むことで一体性を確保している。

石積みは自然石（男鹿石）の空積みとして、

控えが約 600mm の剖面石を乱積みで積み上げていく。石積み護岸の勾配は五歩とし、法高は 3m とした。背面には栗石や砕石で裏込めし、裏込材と地山の間には吸出し防止マットを設置した。また、石の控えの長さに合わせて、石積み直下の木杭の間隔は 800mm とした。

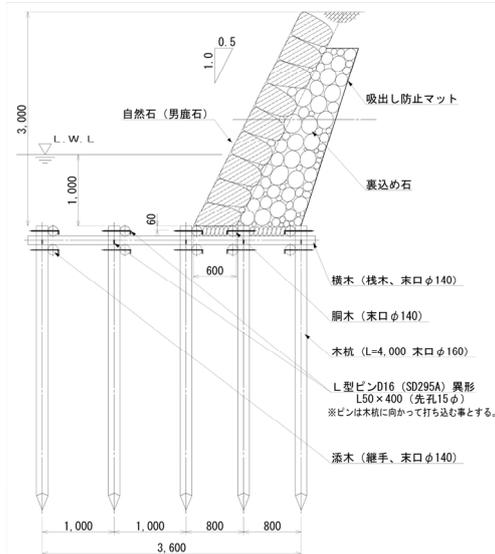


図1 木杭基礎と石積み護岸の断面図

①試験施工 1

最初の試験施工は、秋田県大潟村内の農業用排水路を対象に行った。水路を床堀した後木杭を打設した状況を図 2 に示す。このとき流路方向の木杭の打ち込み間隔は 1m とし、図 1 の配置で延長 8m、図 1 の左 1 列の木杭を打設しないケースを 4m の計 12m の延長で施工した。木杭打設後に木杭の頂部を横木および胴木で連結し (図 3)、次に、石積みの位置の基礎までを埋戻し、最下段の石を設置し (図 4)、所定の法高まで施工した。



図2 木杭の打設



図3 木杭基礎の構造



図4 石積みの施工

②試験施工 2

2 箇所目の試験施工は同村内の農業用排水路を対象に、水路断面の片側の法面 (高さ 2.5m) を同様に施工した。図 1 の左 1 列の木杭を打設しないケース (木杭 4 列) を 17m、左 2 列の木杭を打設しないケース (木杭 3 列) を 10 m の計 27m の延長で試験施工を行った。なお、17m のケースでは、作業性や経済性の比較のために、護岸の構造を一般的なフトン籠工 7m と、石積み (空積み) を 10m ずつ施工した。木杭 3 列のケースは石積み護岸とした。図 5 にフトン籠構造の断面図を、図 6 に完成した水路護岸を示す。

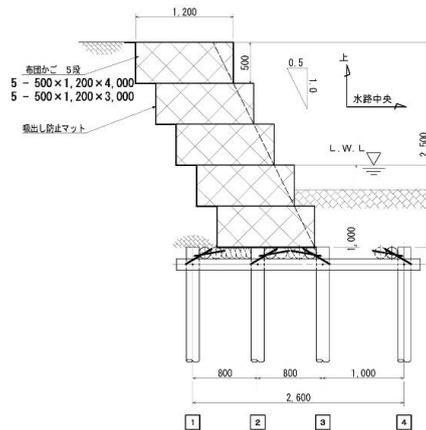


図5 木杭基礎とフトン籠護岸の断面図



図5 完成した水路護岸
(手前：石積み、奥：フトン籠)

(2)木杭基礎とコンクリート水路の試験施工

秋田県大潟村は琵琶湖に次ぐ日本第 2 の広さであった八郎潟が干拓されて昭和 39 年に誕生した。八郎潟干拓地の多くはヘドロ土壌が分布しており、極めて排水が悪い重粘質土壌 (軟弱地盤) であり、深いところでは地下

40mにも達している。干拓地に造成されれば基幹用水路は建設から40年を経過して不同沈下が生じている箇所もあり、大規模な改修工事が計画されている。

コンクリート水路の沈下を防ぐことを目的として、いくつかの基礎工法の試験施工が行われており、木杭工法もその一つとして採用され、平成27年度に延長10mの試験施工を実施した。

施工箇所の地盤調査結果を基に、木杭の配置、末口径、杭長を選定し、構造計算および沈下量の照査を行った。木杭の配置は1m²当たり1本とし、末口径は約18cm、杭長は丸太の流通長さも勘案して4mと8m（下流側の8本を4m+4mの継杭）とした（図6）。

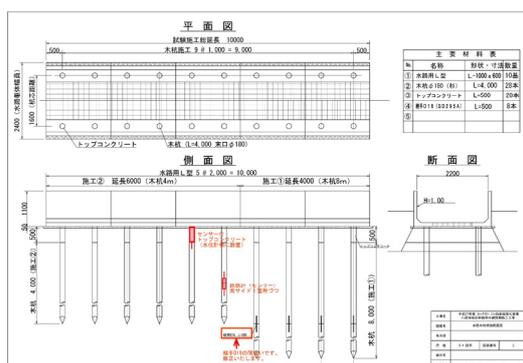


図6 木杭基礎とコンクリート水路の構造



図7 試験施工の工程

なお、地下水位の上下する区間は木杭の腐朽を防止することを目的に長さ50cmのコンクリート杭（トップコンクリート）を打ち継ぎした（図7）。

(3) 木杭基礎および護岸構造の安定性の検証

(1)および(2)で示した計3箇所の試験施工では、それぞれ完成直後からの構造物の変形や沈下量の観測や、各種センサーを用いて、周辺地下水の変動、護岸背面の土圧や水圧、木杭基礎の支持力や傾斜などのモニタリングを実施し、木杭基礎および護岸構造の安定性の評価を行った。

① 試験施工1

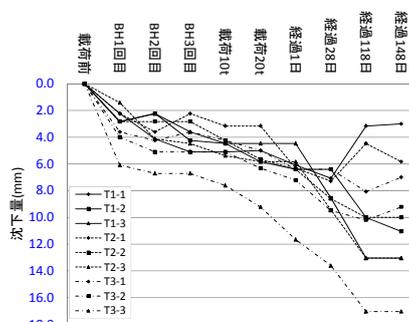
始めに試験施工を行った現場では、施工完了直後に荷重試験を実施し、荷重時の土圧、水圧の変化や護岸の変形を観察した。荷重試験では、まず、車両重量約20tの油圧ショベルを石積み護岸の天端に位置を変えて荷重し（図8左）、次に、重量1tのフレコンバッグ

を20個用意して石積み護岸の延長12mに等分布に荷重されるように、天端に1列2段に並べた（図8右）。試験では、予め石積み護岸に取り付けた9箇所のターゲットをトータルステーションで観測することで、護岸の面外変形や沈下量を測定した。

測定の結果、石積み護岸の変形は、荷重状態によらず面外方向への変位は認められず、鉛直方向へ僅かに沈下が認められる程度であった（図9）。荷重試験時の測定と同様に、施工後の護岸の沈下量を定期的に測定した。また、土圧、間隙水圧の変化も同時に測定した。施工後、約5ヶ月経過時点までの石積み護岸の沈下量の変化を図9に示す。木杭の打ち込み数が少ないT3の位置で沈下量が13mm~17mmと大きいのが、この程度の沈下量は、石積みの噛み合わせが進んだことによっても生じる程度であり、安定した性状を示していると言える。



図8 荷重試験（左：重機、右：重り）



(BH1~BH3：重機、荷重10tf,20tf:重り)

図9 石積み護岸の沈下量の経時変化

② 試験施工2

2箇所目の試験施工では、護岸背面の地盤や各ケースの木杭基礎にそれぞれ傾斜計を埋設して施工後の挙動を観測した。計測開始から約3ヶ月間の傾斜計および水位計の計測データを図10に示す。傾斜計は水路方向に傾斜した時を正(+), 護岸の背面側に傾斜した時を負(-)として表示している。図中の凡例の杭③は、木杭4列のフトン管工の区間の木杭の傾斜を表しており、水路中央方向に傾斜し続けていることが分かる。また、この杭の頂部から1mの位置の傾斜計は傾斜計の容量±5degをオーバーしたものであると思われる。一方、

杭②と杭①は石積みの区間の護岸の傾斜を表しており、傾斜量は少なく安定していた。

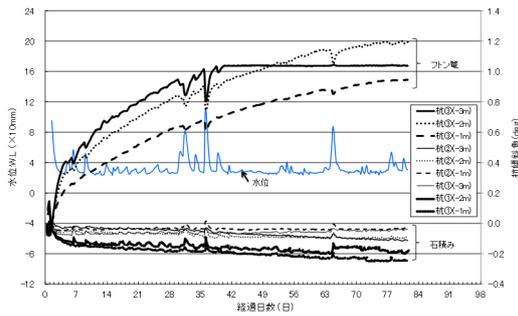


図 10 木杭の傾斜および水位の変動観測結

③試験施工 3 (コンクリート水路の基礎)

木杭基礎とコンクリート水路の試験施工では、施工完了後から定期的に水路の天端高を測定することで、水路の沈下量を観測した。図 11 に施工後から 15 か月間の右岸側の天端高の測定結果を示す。図中の 1m、3m、5m は木杭の長さが 4m の区間であり、7m、9m は 4m の木杭を継いだ長さ 8m の区間である。同図より、木杭の打ち込み深さが長い、7m および 9m の位置で沈下量がより少なくなっていることが分かる。水路に水が流れる 5 月以降に沈下量が大きくなっていることが分かる。また、冬期間に沈下量が回復しており、9m の位置では初期値よりも高い位置に浮き上がる傾向が見られた。これは、水路の水がない冬期間に地下水の位置が高くなり、水路全体に浮力が発生しているためと推察される。

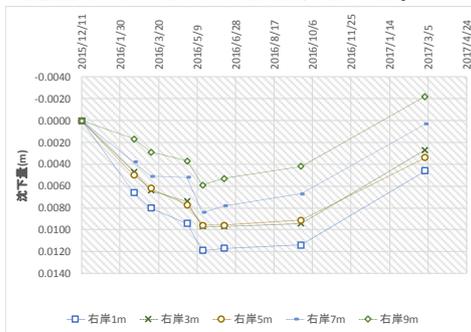


図 11 水路天端高の推移

(4) 木杭基礎と石積み護岸の設計法の検討

前述の木杭基礎と石積み護岸の 2 箇所目の試験施工では、地盤が非常に軟弱であったため護岸の一部では施工後にすべり破壊を生じた。本研究では一軸圧縮試験及びフェルニウス法による安定解析から、原地盤の強度分布および護岸がすべり破壊にいたった要因について検証し、逆解析によってこのような軟弱地盤上に木杭基礎及び石積みによる護岸を安定して施工するための木杭や石積みの寸法等の条件を検討した⁶⁾。

図 12 に代表的な解析結果を示す。工事中に護岸上に作用していた重機による荷重を考慮した場合、安全率は大きく低下し、石積みおよびふとんかごに杭を組み合わせた場合でも

安全率はおよそ 1.03 であり、破壊に近い状態であることが分かる。また、すべり面の位置は末端は法尻から約 7m の位置となったが、これは実施工での破壊時の状況と合致した。このことから、重機による荷重がすべり破壊の主な要因になっていたものと考えられた。

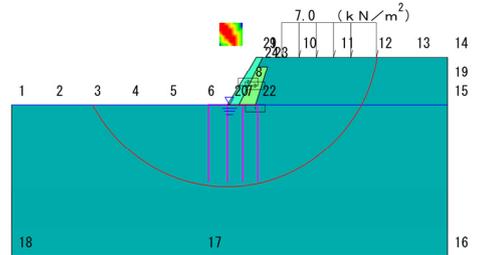


図 12 代表的な解析結果
($l=4\text{m}$, $b=1\text{m}$, 重機荷重を考慮)

木杭の長さ l を 0.5~7m に変えた場合の安全率の変化を図 13 に示す。すべり面は杭を通過することはなく検討した全てのケースで杭の先端よりも下を通った。同図から l が 3m の場合までは安全率に大きな変化は無く、3m 以降は安全率が増加していくことがわかる。これは l が 3m 以下の場合、すべり面が杭の先端よりも深い位置を通り、杭の強度がすべりに対して抵抗しないためであると考えられる。

本解析の結果より、地盤の強度や作用荷重に応じて、木杭の打ち込み深さの設計が可能となった。

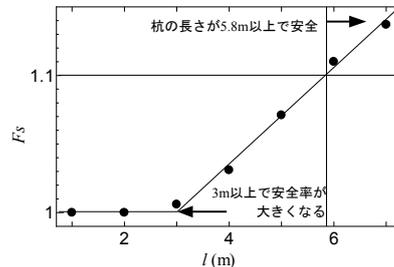


図 13 木杭の打ち込み深さの影響

<引用文献>

- 1) 国土交通省 河川局 河川環境課：河川の景観形成に資する石積み構造物の整備に関する資料，1996。
- 2) 土木学会木材工学特別委員会：JSCE 木材利用ライブラリー001，土木分野における木材利用入門，2011。
- 3) 土木学会木材工学特別委員会：JSCE 木材利用ライブラリー005，国内の構造物基礎における木材利用事例と設計方法の変遷，2012。
- 4) 原忠，坂部晃子，沼田淳紀，水谷羊介，池田浩明：丸太打設で補強した液状化地盤の原位置調査，木材利用研究論文報集 11，pp.87-94，土木学会木材工学委員会，2012。
- 5) 佐々木貴信，萩野俊寛，後藤文彦，原田紀文，野田龍，清水光弘：木杭基礎と自然石の空積みによる多自然型護岸，土木学会第 68 回年次学術講演会，V042，p.83-

84, 2013.

- 6) 佐野雄麻, グエン・チェン・フン, 荻野俊寛, 高橋貴之, 佐々木貴信, 原田紀文, 後藤文彦: 木杭基礎および石積みによる護岸の安定解析, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2016.3.5

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) 佐々木貴信, 渡辺千明, 永吉武志, 矢治幸夫, 水谷洋介, 中村博: 復興住宅基礎地盤への木杭利用の可能性, 秋田県立大学ウェブジャーナル B, Vol.3, pp.257-261, 2016. (査読無し) <https://akita-pu.repo.nii.ac.jp/>
- 2) 佐々木貴信, 渡辺千明, 永吉武志, 水谷洋介, 中村博: 復興住宅基礎地盤への木杭利用の提案, 木材利用研究論文報告集 15, pp.56-59, 2016. (査読無し) <http://committees.jsce.or.jp/mokuzai/node/10>
- 3) 佐々木貴信, 渡辺千明, 永吉武志, 中村博, 上田康広, 芳賀正彦: 大槌町の木材資源を活用した復興支援 復興住宅基礎地盤への木杭利用の提案, 秋田県立大学ウェブジャーナル B, Vol.2, pp.203-208, 2015. (査読無し) <https://akita-pu.repo.nii.ac.jp/>
- 4) 佐々木貴信, 清水光弘, 永吉武志, 荻野俊寛, 後藤文彦, 原田紀文, 鈴木博: 木杭基礎と自然石を用いた用水路護岸工の試験施工, 木材利用研究論文報告集, 13, 土木学会, pp.22-27, 2014. (査読無し) <http://committees.jsce.or.jp/mokuzai/node/10>
- 5) 佐々木貴信, 永吉武志, 荻野俊寛, 後藤文彦, 原田紀文, 鈴木博: 秋田スギの木杭による水路護岸基礎工および地盤補強工法の開発, 秋田県立大学ウェブジャーナル A, vol. 2, pp.1-9, 2014. (査読無し) <https://akita-pu.repo.nii.ac.jp/>
- 6) Sasaki, T., Nagayoshi, T., Ogino, T. and Gotou, H.: CONSTRUCTION OF CANAL WALLS USING TINBER PILE FOUNDATIONS AND FIELDSTONES, Proceedings of the International Symposium on Woods Utilization, pp.85-90, 2014.

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 沼田淳紀, 村田拓海, 吉田雅穂, 松下克也, 佐々木修平, 佐々木貴信: 排水機能を付けた丸太の粘性土地盤における鉛直支持力, 第 67 回日本木材学会大会, 2017.3.18, 九州大学 (福岡県福岡市)
- 2) 佐々木貴信, 渡辺千明, 永吉武志, 水谷洋介, 中村博: 復興住宅基礎地盤への木杭利用の提案, 第 15 回木材利用研究発表会, 土木学会, 2016.8.8, 土木学会 (東京都新宿区)
- 3) 佐野雄麻, グエン・チェン・フン, 荻野俊寛, 高橋貴之, 佐々木貴信, 原田紀文, 後藤文彦: 木杭基礎および石積みによる護岸の

安定解析, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2016.3.5, 岩手大学 (岩手県盛岡市)

- 4) 柿崎杏奈, 永吉武志, 佐々木貴信, 高橋順二, 神田啓臣, 嶋田浩: 複列砂礫堆の挙動とミオ筋変動に及ぼす流路平面形状の影響, 平成 27 年度農業農村工学会東北支部研究発表会, 2015.10.26, コラッセふくしま (福島県福島市)
- 5) 柿崎杏奈, 永吉武志, 佐々木貴信, 高橋順二, 神田啓臣, 嶋田浩: 広狭流路における複列砂礫堆の挙動とミオ筋変動との関係, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 2015.9.2, 岡山大学津島キャンパス (岡山)
- 6) 柿崎杏奈, 永吉武志, 佐々木貴信, 高橋順二, 神田啓臣, 嶋田浩: 広狭流路における複状砂礫堆の挙動特性, 平成 26 年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会, 2014.12.4, 農林水産技術会議事務局筑波事務所本館 (茨城県つくば市)
- 7) 柿崎杏奈, 永吉武志, 佐々木貴信, 高橋順二, 神田啓臣, 嶋田浩: 複列砂礫堆の挙動に及ぼす流路平面形状の影響, 平成 26 年度農業農村工学会第 57 回東北支部研究発表会, 2014.10.30, ハーネル仙台 (宮城県仙台市)
- 8) 佐々木貴信, 清水光弘, 永吉武志, 荻野俊寛, 後藤文彦, 原田紀文, 鈴木博: 木杭基礎と自然石を用いた用水路護岸工の試験施工, 第 13 回木材利用研究発表会, 土木学会, 2014.7.24, 土木学会 (東京都新宿区)

[図書] (計 1 件)

- 1) 佐々木貴信ほか: 土木技術者のための木材工学入門, 公益社団法人土木学会木材工学委員会, 丸善出版 (株), 第 6 章, 治山治水, p.136, 2017.

[その他]

- 1) 秋田県立大学ウェブジャーナル <https://akita-pu.repo.nii.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 貴信 (Sasaki Takanobu)

秋田県立大学・木材高度加工研究所・教授
研究者番号: 00279514

(2) 研究分担者

永吉 武志 (Nagayoshi Takeshi)

秋田県立大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号: 50331286

(3) 研究分担者

荻野 俊寛 (Ogino Toshihiro)

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 80312693

(3) 研究分担者

後藤 文彦 (Gotou Humihiko)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 10261596