

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26257304

研究課題名(和文) 排砂バイパスによる土砂輸送およびダム下流生態系変化の解明

研究課題名(英文) Elucidation of sediment transport by sediment bypass and ecological change downstream of dam

研究代表者

角 哲也 (SUMI, TETSUYA)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：40311732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,300,000円

研究成果の概要(和文)：1. 日本とスイスのバイパストネルの形状・設計流速・通過礫の粒度・岩質・年運用日数、通過土砂量などのデータを収集整理した。

2. (1) 関西電力旭ダムの摩耗実績に関するデータを収集し、実績の流砂量を用いて、日本で広く用いられている摩耗予測式(石橋式)とスイス連邦工科大学で提案された摩耗予測式の両者の比較検討を行った。(2) 流砂量の観測技術において、従来のパイプ型ハイドロフォンに対して、高流速・大粒径の衝撃に耐えうるプレート型ハイドロフォンを開発した。水理実験により、計測可能な流砂の粒径範囲や、流砂量の推定に最適な信号(ゲイン)を特定し、通過礫の検知率が、流砂の飽和度と衝突率で表されることを示した。

研究成果の概要(英文)：1. Regarding sediment bypass tunnels in Japan and Switzerland, data of the shape of tunnel, design flow velocity, gran size distributions of passing gravel, rock quality, yearly operation days, passing sediment volume, etc. were collected.

2. (1) Data on abrasion performance of Asahi Dam of Kansai Electric Power Co., Inc. was collected. We compared the prediction accuracy of abrasion prediction formula widely used in Japan (Ishibashi formula) and Swiss Federal Institute Technology. (2) In the observation technique of sediment transport rate, a plate type hydrophone has been developed which can withstand the impact of high flow velocity and large particle diameter. By physical experiments, we have determined the measurable sediment particle size range and the signal (gain) optimum for estimating sediment load. It was revealed that the detection rate of passing gravel by hydrophone is represented by saturation rate and collision rate.

研究分野：水工水理学

キーワード：排砂バイパストネル スイス 流砂観測技術 ハイドロフォン 摩耗対策 河川環境 底生動物群集
遺伝子評価

1. 研究開始当初の背景

日本には約 3,000 箇所ものダムが存在するが、平成 23 年紀伊半島豪雨に代表されるように、深層崩壊などにより、ダムには大量の土砂流入に伴うダム堆砂が生じており、持続的に水資源を確保するための貯水池土砂管理手法の開発が急務である。本研究は、日本とともに世界の貯水池土砂管理技術をリードするスイスに着目し、特に、排砂バイパストンネルの水工学特性、下流河道への土砂供給に伴う河川環境へのインパクトの解明を通じて、排砂バイパストンネルの計画・設計・管理手法の確立を目指す。

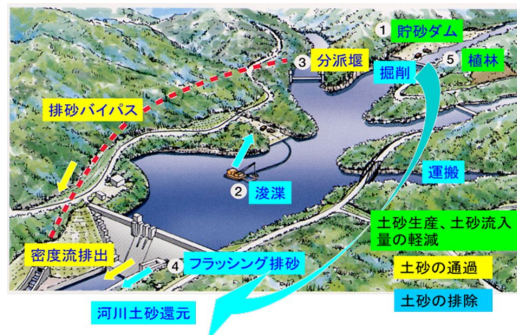


図-1 貯水池土砂管理の分類

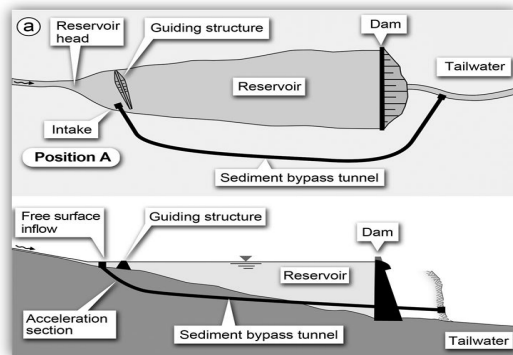


図-2 排砂バイパス概念図

ダムの貯水池土砂管理は、1) 流入土砂の軽減対策、2) 流入土砂を通過させる対策、3) 貯水池に堆積した土砂を排除する対策に分けられる(図-1)。このうち、流入土砂を通過させ、堆積量を軽減させる排砂バイパスは、上流端付近からダム下流までトンネルを設け、流入土砂をダム下流までバイパスさせるもので、世界では日本とスイスが技術をリードしている。その理由は、いずれも急峻な山岳河川にダムが存在することと、トンネル建設技術そのものが先進国であることがあげられる。これら排砂バイパス技術は、トンネル建設に伴う初期費用が発生するものの、貯水池の水位低下が不要であり、かつ洪水時の貯水池流入水の直接放流であることから、下流河川に対する環境問題はほとんど生じないなど、河川環境にも優しい貯水池土砂管理技

術と考えられる。

一方、砂礫が高速流でトンネル内を流れることから、トンネル底部のコンクリートが摩耗損傷することが懸念され、古くより摩耗対策に関する研究が行われてきた。スイスでは 5 箇所もの排砂バイパストンネルが 1920-1980 年代に建設され、その後の運用で大規模な摩耗損傷が発生し、系統的な調査が行われ国際大ダム会議などで報告されている (Vischer et. al, 1996)。

日本の代表事例は旭ダム(関西電力)であり、濁水長期化問題、堆砂問題に対して、排砂バイパス設備(トンネル長さ 2,350m、最大通水量 140m³/s)が設置された。1998 年 4 月より運用を行っており、年平均 16 回の操作で年総流入量の約 4 割がバイパス放流されている。対象土砂は、掃流砂、浮遊砂であり、平成 23 年台風 12 号では既往最大を上回る洪水流入量があったものの効果的な土砂バイパスに成功した。しかし、流下した大量の砂礫によりトンネル底面には大きな摩耗損傷が生じたことが報告されている (Fukuroi, 2012) が、そのメカニズムについては未解明な部分が多い。一方、旭ダム下流では、トンネルからの適度な土砂供給により災害に至らない形で良好な河床環境が形成されており、Takemon ら (2012) により、ヒメヒラタカゲロウの遺伝的多様性について調査検討が行われている。

2. 研究の目的

本研究では、日本で得られた知見をスイスに適用しつつ国際連携を深め、さらに、水工学および応用生態工学の両観点からこれら課題に取り組むことを目的とする。日本とスイスの両国には排砂バイパスの豊富な事例があり、両国の排砂バイパスの運用事例および高速流に伴う砂礫の流下に伴う摩耗損傷事例を収集して比較分析することで、世界に先駆けて摩耗対策のデータベースを構築することができる。ここでポイントとなるのは、トンネルの縦断・平面線形、設計流速、流入する砂礫の粒度分布(平均粒径、最大粒径)、岩質(石英の含有率など)、土砂流下量、年間平均運用回数・日数などであり、これらデータを説明変数として、排砂バイパストンネルの摩耗量の予測式の構築と対策手法の確立を目指す。

また、スイスでは、既設の Solis ダムに排砂バイパスが計画され 2012 年に完成した。スイス連邦工科大学水理・水文・氷河学研究所 (VAW) では、この計画に際して、排砂バイパストンネルの摩耗対策の革新を図るべく、水理模型を用いた実験的研究が行われており、本研究では、以下のような観点から、従来、十分に解明されていなかった排砂バイパストンネル内部の砂礫の動きの解明と、摩耗対策の設計に資する知見を得ることを目的とする。

- (1) トンネル内部の高速流れの3次元乱流構造の解明
- (2) 異なる流量時の砂礫の移動形態の分類
- (3) 砂礫の移動形態とトンネル摩耗損傷の因果関係の解明

さらに、排砂バイパスの導入による下流河川への影響予測も大きな課題として残されている。平成23年の台風12号では、熊野川上流域で数多くの深層崩壊が発生し、これに伴う過剰な土砂流入で河川環境も大きく影響を受けた。一方、旭ダムの下流では、トンネルからの適度な土砂供給により、災害に至らない形で良好な河床環境が形成されており、台風直後の調査でも水生昆虫や魚類が極めて高い多様性を維持していることが明らかとなった。そこで、このようなトンネル下流への土砂供給に伴う生態的応答に関して、日本とスイスの排砂バイパスの運用事例を対象に調査を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、(1)スイスおよび日本における排砂バイパストンネルの計画・設計・管理手法の比較分析、(2)トンネル内部の高速流の流下特性と土砂流下に伴う摩耗損傷実態と対策手法の検討、(3)トンネル下流への土砂供給に伴う生態的応答の検討、に大別される。

特に、(2)では、実際の排砂バイパス施設の摩耗損傷の実績調査を行って、トンネル縦横断面形状や流下土砂の特性と摩耗損傷発生との関係を明らかにするとともに、水理模型実験を通じて、トンネル内の摩耗発生機構と対策手法に関する知見の獲得を目指す。3)では、これまで日本やイタリアで確立した水生昆虫の種・遺伝的多様性からダムによる河川分断の影響を評価する手法をスイスの一連のダム上下流域に適用することによって、排砂バイパストンネルの有無やバイパス運用による河川分断の解消の効果について、より包括的な実証データの提示を目指す。

(1)スイスおよび日本における排砂バイパストンネルの計画・設計・管理手法の比較分析

Visher(1997)は、スイスの排砂バイパストンネルについて比較分析を行っており、これを参考に、トンネルの縦断・平面線形、設計流速、流入する砂礫の粒度分布(平均粒径、最大粒径)、岩質(石英の含有率など)、土砂流下量、年間平均運用回数・日数などの基本データの収集・整理を行う。特に、トンネル使用のタイミングおよび期間を明らかにし、土砂通過量の推計し、ダム堆砂の軽減効果を明らかにする。

(2)トンネル内部の高速流の流下特性と土砂流下に伴う摩耗損傷実態と対策手法の検討

排砂バイパス施設の摩耗損傷実績調査

スイス(Solis, Runcahez, Palagnedra,

Pfaffensprung ダム)および日本(旭ダム)の現地調査を行って、トンネル縦横断面形状や流下土砂の特性と摩耗損傷発生との関係を明らかにする。特に、トンネル中心ではなく、トンネル側壁に近い部分の摩耗損傷が顕著であるとの報告があり、この実態を明らかにする。

実績ダムにおける土砂輸送モニタリング

上記までの検討で明らかになったトンネル横断方向の土砂輸送量分布と砂礫による衝撃強度分布を明らかにするためにハイドロフォンを用いた現地モニタリングを実施する。ハイドロフォンは砂礫の衝撃を鋼製パイプ内に発生する音圧とパルスで計測するもの(小林ら(2013))で、スイスSolisダムには鋼製パイプのかわりに鋼製プレートによるGeophoneがすでに設置されている(Rickenmann(2012))。そこで、VAWの実験水路においてこれらシステムの特性比較を行うとともに、スイスのSolisダムを対象に土砂輸送モニタリングを実施し、土砂輸送特性と摩耗特性の関係について検証を行う。

排砂バイパストンネルに関する水理模型実験

スイス連邦工科大学水理・水文・氷河学研究所(VAW)では、排砂バイパストンネルの摩耗対策の革新を図るべく、水理模型を用いた実験的研究が行われており、これに参加する。模型実験の狙いは、1)トンネル内部の高速流れの3次元乱流構造の解明、2)異なる流量時の砂礫の移動形態の分類、3)砂礫の移動形態とトンネル摩耗損傷の因果関係の解明、であり、ここでは以下の点について焦点を絞って検討を行う。

i)「滑動」、「転動」、「躍動」による掃流砂の移動形態のうち、摩耗に最も影響を与えるのは「躍動」である、

ii)「躍動」の発生には、縦断形状の変化点に加えて横断形状内に発生する2次流が影響している

(3)トンネル下流への土砂供給に伴う生態的応答の検討

Takemonら(2012)による旭ダムでの実績をベースに、スイスの排砂バイパストンネル(Solis, Runcahez, Palagnedra, Pfaffensprung ダム)上下流の河川環境調査を実施する。一般に、ダム建設により上下流の生物群集の分断化が生じるが、排砂バイパスによる上流河道からの土砂供給により下流河道の河床環境がどのように変化したかを検証する。調査項目は、水質、河床材料、付着藻類、流下粒状有機物(POM)、底生昆虫であり、窒素・炭素安定同位体分析およびDNA分析用のサンプルを抽出する。なお、比較対象として、排砂バイパスの無い、分断化されたままの近隣のダム上下流についても調査を行う。

さらに、ダム上下流で採取したサンプル群

集の種多様性を明らかにする。この種多様性評価は、研究分担者（竹門、渡辺）が参加する「基盤研究(A)海外学術調査（H24-26）：アルプス自然流域に残された生物多様性の大規模ゲノム解析による解明とその保全（代表：大村達夫）」で開発された DNA 分析による手法であり、従来の評価で行われる形態目視による種同定ステップを省略し、雑多な種が混在する群集サンプルをそのまま遺伝解析して種数を定量化するものである。これら結果をもとに、ダムによる河川分断の影響とバイパスによる河川分断の解消の効果について検討する。

4. 研究成果

（平成 26 年度）

(1) 日本とスイスの排砂バイパストンネル（日本：4、スイス：6、建設中もあり）の計画・水理設計・管理の基本情報として、トンネルの形状・設計流速・通過礫の粒度・岩質・年運用日数、通過土砂量などのデータを収集整理した。

(2) 既存の排砂バイパストンネルである関西電力㈱の旭ダムの磨耗実績に関するデータを収集し、実績の流砂量を用いて、日本で広く用いられている磨耗予測式（石橋式）とスイス連邦工科大学で提案された磨耗予測式の両者による磨耗予測精度の比較検討を行った。

流砂量の観測技術において、従来のパイプ型ハイドロフォンに対して、高流速・大粒径の衝撃に耐えるプレート型ハイドロフォンを開発した。スイス連邦工科大学の水理実験施設における実験により、計測可能な流砂の粒径範囲や、流砂量の推定に最適な信号（ゲイン）を特定した。ハイドロフォンによる通過礫の検知率が、流砂の飽和度（流砂量の関数）と衝突率（流量や流速の関数）で表されることを明らかにした。

スイス連邦工科大学におけるトンネル内の流速分布や磨耗発生空間分布についての実験をもとに、磨耗発生機構についての検討を行った。

3. 日本とスイスのダム上下流における河床環境・底生動物調査により、排砂バイパスの運用前や運用直後のダムの下流では、河床の粗礫化が生じており、安定河床や止水環境を好む動物群集が生じているが、バイパス運用年数の長いダム下流では、こうした状況は解消されダム上流に近い環境が生じていることを明らかにした。また、ダムのない河川、ダムのある河川（バイパスある河川とない河川）の計 16 河川地点で水生昆虫を採集し、H27 年度に実施する次世代 DNA シーケンシング解析による地域間交流の遺伝的評価に必要なサンプルを揃えた。

（平成 27 年度）

(1) スイス連邦工科大学で開催された「排砂バイパスに関する国際ワークショップ」に参加し、これまでの研究成果を発表し、他諸国のバイパス計画・設計・管理運用の最新情報を収集するとともに、統一的ガイドライン策定のための討議を行った。

(2) 排砂バイパスの通過土砂量と磨耗損傷のデータを用いて、日本とスイスそれぞれで提案されている磨耗損傷予測式の予測精度の検証を行い、適切なパラメータ設定と磨耗に関する各プロセスの相対的重要性を明らかにした。

(3) 流砂観測において従来のパイプ型のハイドロフォンに対して、高流速・大粒径の衝撃に耐えるプレート型マイクロフォンを開発し、またマイクロフォンに代わる新たにプレート型振動センサを導入した。小粒径の掃流砂が検知されることが確かめられ、流砂の検出率を下げる要因として衝突の飽和度や衝突率を定義した。実際の排砂トンネルを想定した高流水路において動画撮影により流砂の跳躍距離など計測機器付近での移動特性を確かめた。京都大学穂高砂防観測所の足洗谷観測水路において、パイプハイドロフォン、プレートハイドロフォン、およびスロットサンプラーによる掃流砂観測とともに、高精度観測を想定した縦・横パイプハイドロフォンセットによる観測を導入し、流砂量予測精度を高めた。

(4) 排砂バイパスの運用年数が異なる日本とスイスの 4 つのダムで調査したデータの分析を行い、バイパス運用年数の長いダムの下流ほど環境や底生動物群集の状態が上流に近いこと、それには河床攪乱や流水環境の回復が関わることを明らかにした。また、水生昆虫の DNA 次世代シーケンシング解析から 24 種を同定するとともに、排砂バイパスのあるダムでは通常のダムに比べてダム上下流間の群集距離が小さいことを明らかにし、排砂バイパスによるダム下流生態系の回復効果を示した。

（平成 28 年度）

本研究では、(1) スイスおよび日本における排砂バイパストンネルの計画・設計・管理手法の比較分析、(2) トンネル内部の高速流の流下特性と土砂流下に伴う磨耗損傷実態と対策手法の検討、(3) トンネル下流への土砂供給に伴う生態的応答の検討、を行った。

(1) では、日本とスイスで提案されている磨耗損傷予測式の予測精度の検証を行い、適切なパラメータ設定と磨耗に関する各プロセスの相対的重要性を明らかにした。

(2)では、流下土砂量の評価手法として、スイスの Geophone や日本のパイプマイクロフォンを参考に、高流速・大粒径の衝撃に耐えるプレートマイクロフォンを開発し、水理実験および現地検証試験（天竜川小渋ダムの実物トンネルを使用）を通じて、その特性検証を行った。その結果、検知可能な粒径範囲を明らかにするとともに、流砂の検出率に影響する衝突の飽和度や衝突率を加味しながら、トンネル流量と単位時間当たりのパルス信号を用いて掃流砂量を推定する手法を提案した。また、トンネル内の土砂の流下特性として、大粒径土砂が小粒径土砂に比べ吐口に早く到着すること、トンネルカーブの内側に偏って土砂が流れていることを明らかにした。

(3)では、排砂バイパスの運用年数が異なる日本とスイスの4つのダムで河床環境と底生動物群集の比較検討を行った結果、バイパス運用年数の長いダムほどダム下流の河床や底生動物はダム上流に近づくことを確認した。またドローン空撮による砂州の河床地形変化の評価により、土砂供給効果が評価可能であることを示した。

(4)2017年5月に京都大学を会場に第2回排砂バイパス国際会議を開催（日本、スイス、台湾など合計9か国、170名以上参加）し、世界のバイパス比較、ダム上流、トンネル内部、ダム下流、ダム運用の4つのトピックに分けて研究発表および討議を行い、排砂バイパストンネルの現状技術の到達点および今後の課題について討議を行った。（詳細結果はHPに掲載）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

土砂計測関係

Takahiro Koshihara, Christian Auel, Daizo Tsutsumi, Sameh Kantoush and Tetsuya Sumi: Application of an impact plate – Bedload transport measuring system for high-speed flows, *International Journal of Sediment Research*, Vol.33, pp.35-46, 2018.

小柴孝太, 角哲也: 小渋ダム排砂バイパストンネルにおけるインパクトプレートを用いた掃流砂量計測, *土木学会論文集*, B1 (水工学), Vol.73, 2018.

Takahiro Koshihara, Christian Auel, Daizo Tsutsumi, Sameh Kantoush and Tetsuya Sumi: Improvement of a bedload transport rate measuring system in sediment bypass tunnels, *River Sedimentation*, Wieprecht et al. Eds., © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02945-3,

2017.

小柴 孝太, 角 哲也, 堤 大三: プレート型振動センサを用いた掃流砂量計測手法に関する研究, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 72(4), I_925-I_930, 2016.

ダム下流環境関係

Sohei Kobayashi, Takahiro Koshihara and Tetsuya Sumi: Current and future study topics on reservoir sediment management by bypass tunnels, *Journal of Disaster Research*, Vol.13(4), 2018.

Christian Auel, Sohei Kobayashi, Yasuhiro Takemon and Tetsuya Sumi: Effects of sediment bypass tunnels on grain size distribution and benthic habitats in regulated rivers, *International Journal of River Basin Management*, vol.15(4), pp.433-444, 2017.

Christian Auel, Sohei Kobayashi, Tetsuya Sumi and Yasuhiro Takemon: Effects of sediment bypass tunnels on sediment grain size distribution and benthic habitats, *River Sedimentation*, Wieprecht et al. Eds., © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02945-3, 2017.

〔学会発表〕(計29件)

Takahiro Koshihara and Tetsuya Sumi: Application of the wavelet transform to sediment grain sizes analysis with an impact plate for bedload monitoring in sediment bypass tunnels, *River Flow*, Lyon, France, 2018.

Sohei Kobayashi, Hajime Fukuroi, Tetsuya Sumi and Yasuhiro Takemon: Sediment derivation by bypass tunnel restores downstream environment, *Proc. 26th ICOLD Congress*, Vienna, Austria, Q100, 2018.

Joeselle Serrana, Sakiko Yaegashi, Shunsuke Kondoh, Bin Li, Christopher Robinson and Kozo Watanabe: Ecological Influence of Sediment Bypass Tunnels on Macroinvertebrates in Dam-fragmented Rivers by DNA Metabarcoding, *Water and Environment Technology Conference 2018 (WET2018)*, 2018

Joeselle Serrana, Sakiko Yaegashi, Shunsuke Kondoh, Bin Li, Christopher Robinson and Kozo Watanabe: Ecological Influence of Sediment Bypass Tunnels on

Macroinvertebrates in Dam-fragmented Rivers by DNA Metabarcoding, Pest Management Council of the Philippines 50th Anniversary and Annual Scientific Conference, 2018

Takahiro Koshiba, Sameh Kantoush and Tetsuya Sumi; Application of bedload transport rate measurement systems at Koshibu sediment bypass tunnel, Proc. 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017

Takahiro Koshiba, Sameh Kantoush and Tetsuya Sumi; Field experiment of bedload transport rate measurement at sediment bypass tunnel, Proc. Intl. Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic, 2017.

Takahiro Koshiba and Tetsuya Sumi; Bedload monitoring with impact plates at Koshibu sediment bypass tunnel, Proceeding of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, FP19, 2017.

Sohei Kobayashi, Hajime Fukuroi, Yasuhiro Takemon and Tetsuya Sumi; Invertebrate community changes in the downstream of dam after the operation of sediment bypass tunnel, Proceeding of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, FP23, 2017.

Joeselle Serrana, Sakiko Yaegashi and Kozo Watanabe; Metabarcoding-based assessment of the influence of sediment bypass tunnels on the macroinvertebrate communities in damfragmented river, Proceeding of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, FP24, 2017.

Joeselle Serrana, Sakiko Yaegashi and Kozo Watanabe; Metabarcoding-based assessment on the influence of sediment bypass tunnel on the macroinvertebrates community structure in dam-fragmented rivers, 第4回環境水質工学シンポジウム, 2017
小林草平, 袋井肇, 角哲也, 竹門康弘 : ダム下流における排砂バイパス運用後の底生動物群集の変化, ELR2017, 2017

Christian Auel, Michio Sanjou, Takaaki Okamoto, Sohei Kobayashi and Tetsuya Sumi; Mean flow and turbulence variation due to invert abrasion, The 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, 2017

Christian Auel, Sohei Kobayashi, Yasuhiro Takemon and Tetsuya Sumi; Effects of sediment bypass tunnels on sediment grain size distribution and benthic habitats, The 13th International Symposium on River Sedimentation, 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://ecohyd.dpri.kyoto-u.ac.jp/index/2nd+Bypass+Tunnel+Wokshop.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

角 哲也 (SUMI, Tetsuya)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：40311732

(2) 研究分担者

竹門康弘 (TAKEMON, Yasuhiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50222104

堤 大三 (TSUTSUMI, Daizo)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：40372552

カントウシュ サメ・アハメド
(KANTOUSH, Sameh Ahmed)

京都大学防災研究所・准教授

研究者番号：70750800

渡辺 幸三 (WATANABE, Kozo)

愛媛大学・理工学部(工学系)・教授

研究者番号：80634435

山上 路生 (SANJO, Michio)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

(3) 研究協力者

Robert Boes

スイス連邦工科大学チューリッヒ校

水理水文氷河学研究所 (ETH-VAW)・教授