

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25257306

研究課題名(和文) サハラ砂漠周縁の水資源に関わる2大問題解決に向けた調査研究

研究課題名(英文) Tackle the two big issues in water resources in the outskirts of Sahara desert

研究代表者

入江 光輝 (Irie, Mitsuteru)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：50451688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：乾燥地貯水池では堆砂で利用可能貯水量が減少している。既存の堆砂対策である浚渫等はコストが大きく、発展途上地域では実施されない。そこで、それが顕著であるチュニジアを対象とし、貯水池内濁水流動の精査に基づいて出水時の適切排水による堆砂量削減を検討するとともに、地下水フッ素汚染に鑑みて堆砂した底泥を有効利用してフッ素除去を可能とする浄水ユニットの開発に取り組んだ。ユニットは底泥を原料としセラミックスで作製する。フッ素と結合・固定化できるリン酸カルシウムをメディアに添加するとともに、その機能の寿命をモニタする濃度測定キットの開発を進め、貯水池堆砂と地下水フッ素汚染の同時解決のための基礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：The reservoirs in arid region loses their storage capacities rapidly due to sedimentation. Dredging, the conventional countermeasure is so costly that the developing countries cannot carry it out. This research program focuses Tunisia, one of the countries facing the severe sedimentation problem. Based on the field measurement and numerical simulation of the turbid inflow to the reservoir, the management of reservoir with a low cost was discussed. Exploitation of the sediment was also studied for covering the financial burden of dredging. We thought that the sediment of fine clay can be a raw material of ceramics and purification unit removing fluoride in groundwater that is main resource for drinking water of local farmers. Phosphate was added to the media in the unit, made from sediment, for removing fluoride in drinking water by chemical reaction. The life of the removal function of the media can be monitored with the fluoride concentration analysis kit developed.

研究分野：工学

キーワード：土木環境システム 水工水理学 環境材料 国際協力

1. 研究開始当初の背景

サハラ砂漠周縁では以下に示すように表流水水源について貯水池堆砂による貯水量低下、地下水水源について高濃度フッ素の混入による健康被害の問題があり、同地域乾燥地水資源の2大水源問題となっている。

同地域では農業用水を中心とした水需要が大きく、もとより水資源開発の必要性の高い地域であるが、今後、さらに気候変動による砂漠化進行も懸念され、水資源の安定的供給が望まれている。しかし、乾燥地流域からの土砂流出は著しく、また雨季と乾季の差が明瞭で貯水池滞留時間が長く堆砂速度が極めて早い。浚渫や排砂バイパスなどの堆砂対策技術はあるが、同地域は経済発展途上において、その事業費の大きさゆえ実施されない。

そこで申請者は以前より、底泥の有効利用によって経済的収益を上げ、それを浚渫等の対策費用にあてる可能性について検討してきた。現地観測とシミュレーションで貯水池内流動現象と水質変化を把握するとともに、具体的な底泥有効利用方法を検討してきたが、経済学的観点から考慮した結果、底泥を低含水率で浚渫すれば大幅なコストダウンが計れること、相応の市場規模を持った製品を適正価格で生産しなければ底泥は“消費”されないことが明らかとなった。その時点で産業として最も有力と考えられた建設用レンガによる底泥有効利用を想定すると、それだけでは明らかに原料供給過剰となる。したがってレンガ(セラミックス)としての使用のポテンシャルを生かしながらより付加価値の高い新たな底泥利用方法を模索する必要がある。

そこで本申請では一代替案として安価で小型のオンサイト飲料水浄化システムを新たに作製することを目指した。この構想に至ったのには現地での抱える水質汚染問題が背景にある。地下水を飲料水源とする現地貧困農村部の一部では天然フッ素汚染がひどく、斑状歯、骨格異常等の症例も見られる。これを処理する浄化装置の開発、普及を提案し、ユニットの内外装に底泥を原料としたセラミックスを使用する。これにより上記2つの課題を同時に解決することを目指す。

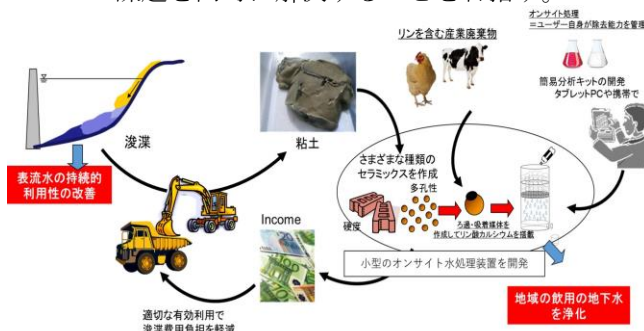


図-1 研究の全体像

2. 研究の目的

底泥発生から製品化までの一連プロセスを最適設計してコストを軽減し、社会実装ま

でつなげられる準備を進める。各プロセスごとに研究グループを編成し、最後に知見を統合化し、貯水池持続可能性と地域飲料水水質改善の2大水源問題の同時解決ための提案を行う。

(1)貯水池内濁水挙動解析

浚渫作業・運搬の経済的負担は大きいので、低含水率状態で運搬しコストを削減することが望ましい。特に乾季の水位低下が著しい乾燥地貯水池では堆積場所を限定して低水期に干上がる一帯に堆砂を集中させて低含水率とし、コストを大きく削減できる。本研究では密度界面上面での連行による拡散・希釈現象や底面への沈降現象および沈降後の再輸送などの詳細な現地観測を行う。それを検証データとして数値シミュレーションモデルを構築する。これに基づき貯水池内構造物設置や取水操作等の水理的施策で堆砂をコントロールする可能性をシミュレーション上で議論する。

(2)底泥セラミックスによる多孔体基質粒子と外装の作製

(3)で使用される担加粒子の吸着能を十分に発揮させるため、底泥を原料とした多孔質セラミックス作製の可能性について検討する。さらに浄化システムの外装部分も貯水池底泥を原料とした適度な強度を持つセラミックスの製造を目指す。

(3)浄化ユニット基本設計

地下水水質問題となるフッ素はリン酸カルシウムとの化学結合により不溶化し除去される。一方で、既知の事実として、骨炭によりフッ素が除去されるが、これにも上記の反応が関与する。骨炭のフッ素除去メカニズムに倣いながら貯水池底泥を原料にしたメディアの開発を行う。

(4)地下水フッ素汚染広域調査

広域調査は熟練分析者の不足で難しいが、分担者の間中らが開発してきた簡易型フッ素測定キット(比色法の色判別をタブレットのカメラから行う)を使用してある程度の精度の結果を得られる可能性がある。また同キットは浄化ユニットの実使用の際にメディア寿命の使用者自身による監視にも使用可能である。

(5)経済性評価

浄化ユニット需要を予測して市場規模を推定し、浚渫事業費とのバランスから浄水ユニットの期待される小売価格を見出す。

3. 研究の方法

(1) 貯水池内濁水流動の現地調査と数値シミュレーションおよび流域からの土砂生産量推定と侵食対策

図-2 に示すチュニジア北部に位置するJoumine 貯水池を対象として貯水池内濁水流動に関する詳細な調査を行った。雨期には上流部集水域から出水が生じ貯水池に濁水が流入する。そこで雨期に調査期間を絞って水温計、濁度計等を図-3 に示すように貯水池内

に設置し、出水規模に応じた濁水挙動の変化を捉えた。また、3次元密度流モデルを適用してその挙動の変化を再現した。その上で同モデルにより数値実験を行い、挙動に変化が現れる出水規模の閾値を見極めた。

一方で、濁質の沈降を考慮した2次元モデルを構築し、底質の再懸濁と再輸送に関わる検討を行なった。

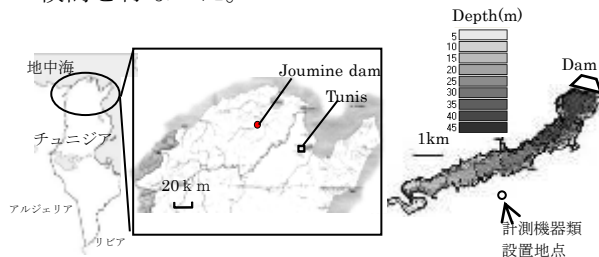


図-2 Joumine 貯水池の位置と深浅図

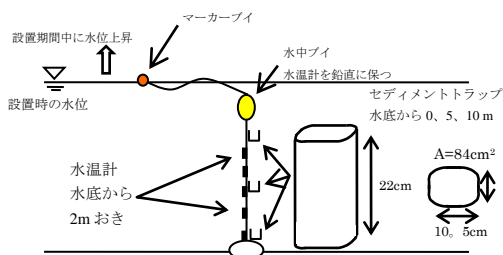


図-3 濁水挙動観測

また、期間中に現地治安の不安定化のため渡航制限や立入り制限地域の設定などがあって予定していた多数の貯水池での深浅測量や底泥採取などの調査が行えなかった。それを代替するために、衛星画像解析をもとに各流域の土砂生産量を推定し、貯水池堆砂の抑制に向けた流域土砂浸食対策を施した場合の費用対効果について検討を行なった。

(2) 浄化ユニット作成を目指した貯水池底泥による種々のセラミックスの作成

同国の貯水池底泥がレンガの原料となりうることは既に明らかにしていたが、浄化ユニットを構築するための材料としての機能を付与する開発を進めた。最終的に組み上げたいユニットを図-4のように考え、そこにフィルターおよびメディアとして使われるパーツとなる多孔性セラミックス、それを収める薄厚軽量の容器を作製した。多孔性セラミックスはゲルキャスティング法による作成を試みた。また、原料となる現地貯水池底泥の物性を考慮して成型から乾燥、焼成に至る最適なプロセスの検討を行なった。

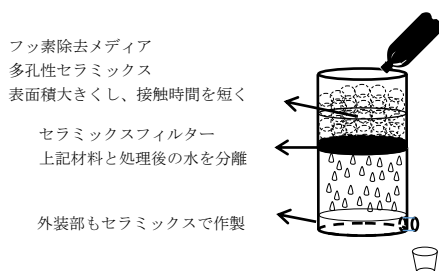


図-4 浄化ユニットイメージ

(3) 骨炭のフッ素除去能力に鑑みたメディアの開発

食品加工の際に発生する骨を炭化した骨炭は、我が国では糖蜜の脱色剤や肥料として利用される。骨はリン酸カルシウムの一の水酸アパタイト (HA) の低結晶性微粒子がコラーゲン繊維と複合した構造をしており、それを炭化すると炭化物と加熱処理によって HA の結晶化が進行する。その中の水酸基が水中のフッ化物イオンとイオン交換して安定な鉱物のフッ素アパタイト (FAP) を生成し、フッ化物イオンの除去資材として広く検討されている。これまでの研究では炭化温度を変化させ HA の結晶性と除去能力の関係性について議論が進められている。本研究では炭化温度を一定として炭化時間を種々変化させて合成した骨炭を準備し、それによるフッ化物イオン吸着量の変化を詳細に調べ、有機分由来の炭素分の影響を考察した。

また、従前の骨炭などのフッ素除去材は、フッ化物イオンを吸着して処理している。そのためより低濃度まで水中のフッ化物イオンを処理しようとする、その吸着能力は著しく低下する。それをもとに貯水池底泥と未利用食品資源から回収したリンを原料としたより高機能のメディアの開発を検討した。

(4) スマートフォン等を活用した簡易水質分析システムの開発

非熟練者による広域水質分布調査での使用、および上記のフッ素除去材料の日常的な使用下での機能を管理するツールとして使用されることを想定し、簡易水質分析システムの開発を試みた。上記のいずれの用途も使用者の技術的熟練に依らず安定した分析結果が得られることが望まれる。

具体的にはスマートデバイス用アプリケーションを用いて現地一般人レベルで実施可能な水質調査デバイスの開発を行った。現在カメラやGPSが内蔵され、アプリケーションをインストールできるスマートフォンも一般化してきている。そこで、フッ素濃度を比色法により測定するパックテスト(共立理化学研究所製)を活用し、発色したサンプルを付属のカメラで撮影し、アプリケーションによって客観的な色判別を行ってフッ素濃度を示す。

(5) 経済性評価

現地への渡航制限等もあり、浄化ユニット試作品の使用者へのアンケート等は実施できず、ユニットを実用レベルまで改良することができなかったが、浚渫コストと流域土砂浸食対策の比較やユニットのパーツの市販品との比較などの視点から検討を行なった。

4. 研究成果

(1) 貯水池および流域管理による堆砂量削減

① 濁水流動とゲート操作での流去の可能性

冬期出水観測の結果、セディメントトラップへの堆積量の分布や水温・濁度の変化から出水規模に応じて濁水の挙動が変化する傾

向が見られた。すなわち、大規模出水の場合、流量に準じて濁度も大きくなり、湖水との密度差が大きいため濁水は底層密度流として貯水池内を進行する。一方で、小規模出水では濁度が小さく、湖水との密度差も小さいので、流入した濁水は界面を保たずに流入直後に拡散しやすい。河川流入量の観測結果に基づいて湖内濁水流動の数値シミュレーションを行い、この傾向を再現できた。(図-5) 出水規模が大きく底層密度流が発生する場合には堤体部の湖底付近に設置された取水口から下流側に排水することで濁水を速やかに排除し、堆砂を抑制できる可能性がある。一方、小規模出水時に排水を行っても効率的な濁質排除はできず、水資源の浪費となる。

そこで、前出のシミュレーションモデルを使用し、各出水規模で底層密度流を形成するか否かを判別する数値実験を行った。その結果、Joumine 貯水池ではピーク流量がおよそ $40\text{m}^3/\text{sec}$ (過去 23 年の流量観測記録から 2 年に 1 度程度の発生確率と推定) を超えた場合に底層密度流が発生し、それ以下では流入部付近で拡散・沈降すると考えられた(図-6)。

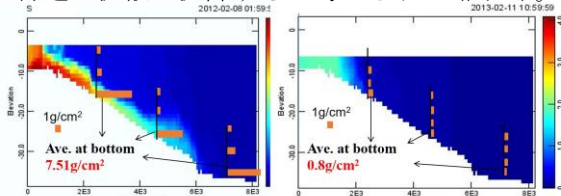


図-5 異なる出水規模での濁質トラップ量(棒グラフ)と流動シミュレーション結果(背景)

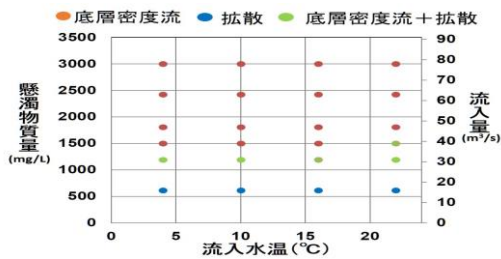


図-6 数値実験による底層密度流発生判別

土粒子の沈降と再浮上を考慮する鉛直 2 次元モデルを適用したところ、やはり頻繁に生じる小規模出水時には河川流入部付近での堆積が顕著だが、大規模出水の際にそれが再懸濁し、下流側深部に再輸送されることが明らかとなった(図-7)。したがって、大規模出水時にゲートを開けて排砂を促すとともに、小規模出水で進行する流入部付近浅水域の堆砂はより扱いにくい深部に輸送される前に速やかに浚渫すべきと考えられた。

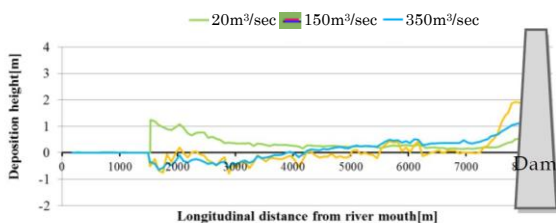


図-7 ピーク流量別の縦断方向堆積分布

②衛星画像解析による土砂生産量

SWAT モデルを適用し、集水域での土砂生産量を推定して侵食リスクの空間分布を判別した。その上で各種侵食対策を行った場合の土砂生産削減率を推定し、その施用コストとの比較で費用対効果を評価した。図-8 は Joumine 貯水池集水域の土壌侵食リスク分布を示している。さらに対策工別の費用対効果の評価を進め、その内容について投稿の準備を進めている。結論として、流域管理は貴重な土壌の保全という側面があるものの、堆砂抑制の観点だけから見ると効率的な対策としての優位性は高くないと判断された。

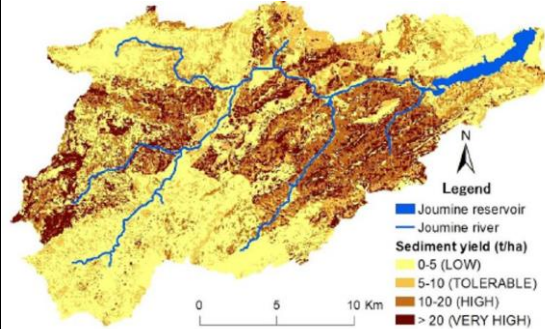


図-8 Joumine 貯水池流域の侵食リスク分布

(2) 浄化ユニットの外装および多孔性セラミックスの作製

堆積土成分は粒子が細かいため収縮が大きく、大型や複雑形状のセラミックス作製がやや難しい。この問題は $50\text{--}100\ \mu\text{m}$ 程度の大きさの砂を 30% 程度混入することで解決できた。図-9 に作製した小型のユニット外装を示す。これが鑄込により成形できたことから、大型機器を用いなくても中量産できる。焼成温度は $900\ \text{°C}$ 、1 時間以上の焼成で十分に焼き締めり止水することから、浄水フィルター用容器として十分に利用出来る。

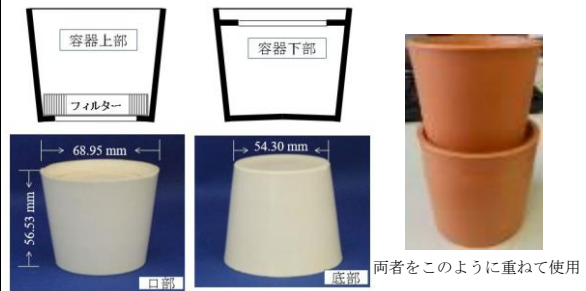


図-9 浄化ユニット外装

一方、この外装用の 2 つのカップの間に装着する多孔体フィルターはゲルキャスト法で作製した。上述したように高い収縮率を制御することがここでも課題となったが、成型前に添加するエポキシ樹脂を増量した結果、ひび割れを抑制することができた。

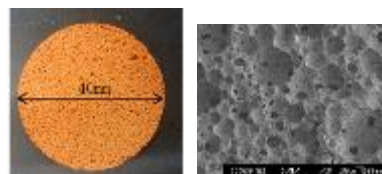


図-10 底泥を原料とした多孔質フィルター

(3)骨炭中炭素分とフッ素除去メディア開発

骨炭について、炭化時間を変化させても HA の結晶性には大きな変化は生じない一方で、含まれる炭素量に大きな変化が及んだ。炭化時間 6 時間までは時間が長くなるにしたがって炭素量を大きく減少させつつフッ素除去量は向上した。それ以上の炭化時間では炭素量の減少は大きくないが、フッ素除去能力が徐々に低下することが明らかとなった。したがって、長時間の炭化によって炭素分に何らかの変化が生じ、これがフッ素イオンの吸着に寄与していると考えられた。詳細な検討については別途投稿の準備を進めている。

骨炭以外の骨由来の未利用資源として、ゼラチン製造時に副生するリン酸排水から得られるリン酸カルシウム(DCPD)に着目した。DCPD によるフッ化物イオンの除去は化学反応による FAp 生成である。したがって、フッ素イオン濃度が低濃度域であってもその処理能力は低下しないものと期待された。図-11 は DCPD のフッ化物イオン処理能力を既往の骨炭と比較検討したもので、横軸に処理水のフッ素濃度、縦軸に材料 1g あたりのフッ素除去量を示している。骨炭が処理水濃度の低下とともに除去効率を著しく低下させているのに対し、DCPD は対象溶液のフッ素濃度が低くなっても除去効率が保たれている。本研究で対象とする地下水はフッ素濃度数～十数 mg/L 程度の地下水を WHO 基準の 2 mg/L 以下にすることを目的としており、DCPD の優位性が明らかである。

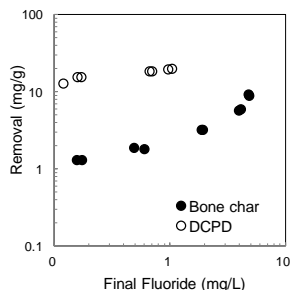


図-11 DCPD と骨炭のフッ素除去量の比較

次に、炭酸カルシウムの添加による DCPD とフッ化物の反応性向上について検討した。ある一定量までは添加にしたがってその処理量が向上するが、それ以上の炭酸カルシウムの添加は反応性を向上させることはないことがわかった。最適な炭酸カルシウム添加量によって DCPD 単位重量あたりの処理効率は添加しない場合より 25% 程度上昇し、骨炭のそれに比すれば 10 倍程になることが明らかとなった。また、処理効率の向上を考慮に入れて原料コストを評価すると、添加する炭酸カルシウムの価格を考慮しても DCPD+炭酸カルシウムは骨炭の価格のおよそ 1/10 程度にできることがわかった。一方で、必要とされる炭酸カルシウムは貯水池底泥中に多量に含まれており、DCPD と底泥を混合して適切に加工することによりそのコストはさらに引き下げられる可能性が示唆された。

(4)簡易水質分析システムの開発

市販の分析キット(共立理化学研究所製パックテスト)を用いて試料溶液を試薬が封入されたチューブに吸引し、軽く振り混ぜ試薬を溶解させて発色させる。発色した溶液をプラスチック製ディスコーザブルセルに移し、専用のセルフホルダーを用いて試料セルをタブレットデバイスのカメラ部分の直上に固定する。専用のアプリケーションソフトウェアを用いて試料を撮影し、画像データの色情報と色強度 y, u, v 値(y :輝度, u :青色強度, v :赤色強度)を測定し、 v 値の強度から試料濃度を計算した。

開発にあたっては、現地での実際のユーザーと想定される方々による試用が諸般の事情で行えなかったため、筑波大学在学のチュニジア人留学生、JICA 第三国研修に参加していたサブサハラアフリカ出身の研修員などに協力いただき、開発途中の機材を実際を使用して開発上の課題抽出を行った。セルフホルダーからカメラへの採光方法や外的環境によってカメラによる色の数値化にバラツキが生じることなどが問題となった。それに対し、外部の光ではなくスマートフォンの画面の光を採光するアタッチメントを作成したほか、色情報からの濃度判定を端末で行わず、情報集積センターにデータを転送した後に人工知能システムで濃度判別を行うシステムを開発し、測定データの安定化をはかった。

また、撮影された色情報のほかに測定地点の位置座標などを集積センターに転送できるアプリケーションをつくり、使用目的としている非熟練者による広域水質モニタリングやフッ素除去メディアの機能監視の実用に供するシステムの基本形を作り上げた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

- 1) Irie M., Taga S., Tarhouni J., Fuji M., Trial production of porous ceramics filter made from sediments in water reservoirs for sustainable use of surface water resource in arid land, *International Journal of Environmental Science and Development*, 査読有, 2017 (印刷中)
- 2) 入江光輝: 乾燥地における貯水池堆砂問題, *沙漠研究*, 査読有, 27 巻, 4 号, 2017 (印刷中)
- 3) 間中淳, 横田優貴, 中村尊, 古山彰二, 袋布昌幹, 入江光輝, スマートデバイスによる携帯型オンサイト水質分析～乾燥地における硝酸態窒素測定を例として～, *沙漠研究*, 査読有, 27 巻, 4 号, 2017(印刷中)
- 4) 古山彰二, 中村尊, 小林龍也, 藤島政樹, 間中淳, 入江光輝, 色情報を用いた水質調査用 Android アプリケーションの開発, *沙漠研究*, 査読有, 27 巻, 4 号, 2017(印刷中)
- 5) 袋布昌幹, 藤田沙也, 京角早織, 豊嶋剛司, 高松さおり, 間中淳, 入江光輝, 未利用資源を用いたフッ素処理資材の開発と性能

- 評価, 沙漠研究, 査読有, 27 卷, 4 号, 2017(印刷中)
- 6)川上智規, 宮崎光, 今井裕規, 小西美咲, 電解法による飲料用水からのフッ素除去-スリランカでの実例-, 沙漠研究, 査読有, 27 卷, 4 号, 2017(印刷中)
- 7)藤 正督, 高井千加, 土本順造, 入江光輝, Jamila Tarhouni, チュニジア国 Joumine 貯水池堆積土を用いた浄水フィルター用容器の作製, 沙漠研究, 査読有, 27 卷, 4 号, 2017(印刷中)
- 8)Manaka A., Ichida T., Nakamura T., Furuyama S., Satoda M., Tafu M., Irie M. and Igarashi S.: Development of Original Attachment and Application Software for Simple Fluoride Analysis using Smart Device, Modern Environmental Science and Engineering, 査読有, Vol. 2, No.5, 2016, pp.289-293
- 9)Irie M. and Tarhouni J.: Water reservoir as resource of raw material for ceramic industry, J. Phys.: Conf. Ser. , 査読有, 596 012003, doi:10.1088/1742-6596/596/1/012003, 2015
- 10)石川忠晴, 王明陽, 入江光輝: チュニジア国 Joumine 貯水池の土砂堆砂特性に関する研究, ダム工学, 査読有, 25 卷, 1 号, 2015, pp.29-37,
- [学会発表] (計 39 件)
- 1)Mtibaa S., Irie M.: Simulation of soil conservation measures using SWAT model: case of Joumine river basin, Tunisia, International Conference on African Large river basins Hydrology, Dakar, Senegal, November 26 - December 3, 2016.
- 2)Arioka Y., Sensui M., Fuji M., Tafu M., Kawakami T., Irie M., Fabrication of porous ceramics by Gelcasting method with agar and reservoir sediment in Tunisia, 9th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites and Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development 2016, Toronto, Canada, June 28-30, 2016
- 3)藤正督, 土本順三, 高井千加, 後藤良輔, 入江光輝, Tarhouni J., チュニジア国 Joumine 貯水池堆積物のセラミックス原料への活用, 日本セラミックス協会第 3 回資源・環境セラミックス材料・技術研究講演会, 早稲田大学, 2016 年 3 月 14 日
- 4)入江光輝, セラミックスと水資源 乾燥地でそれらをつなげる, 平成 27 年度 公益社団法人日本セラミックス協会第 28 回秋季シンポジウム, 特定セッション「セラミックス科学・技術からアプローチする環境ソリューションの新展開」, 富山大学, 2015 年 9 月 16 日(招待講演)
- 5)Irie M. :Sedimentation in reservoirs; Problem for sustainability or resource for new innovation?, Workshop sur la valorization de la recherché scientifique dans le secteur de l'eau,

- Tunis, Tunisia, March 17-18, 2015. (Invited)
- 6)Tafu M., On-site removal apparatus for fluoride in the water environment, Workshop sur la valorization de la recherché scientifique dans le secteur de l'eau, Tunis, Tunisia, March 17-18, 2015. (Invited)
- 7)Irie M., Exploitation of sediment in reservoirs to building up the fluoride remover unit for drinking water, International conference on clean water governance in Africa. Water days for a better future, Tunis, Tunisia, November 4-6, 2014. (Invited)

[図書] (計 1 件)

- 1)Irie M., Tafu M., Kawakami T., Manaka A., Furuyama S. 他, Sustainable North African Society -Exploring Seeds and Resources for Innovation-, 2015, 139-148, 177-186

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 光輝 (IRIE MITSUTERU)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 5 0 4 5 1 6 8 8

(2) 研究分担者

柏木 健一 (KASHIWAGI KENICHI)

筑波大学・人文社会科学系・准教授

研究者番号: 0 0 4 4 7 2 3 6

川上 智規(KAWAKAMI TOMONORI)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号: 1 0 2 4 9 1 4 6

河内 敦 (KAWACHI ATSUSHI)

筑波大学・生命環境系・助教

研究者番号: 1 0 5 8 2 3 6 4

藤 正督 (FUJI MASANORI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 5 0 2 3 8 5 2 3

袋布 昌幹 (TAFU MASAMOTO)

富山高等専門学校・物質化学工学科・教授

研究者番号: 5 0 2 7 0 2 4 4

間中 淳 (MANAKA ATSUSHI)

富山高等専門学校・物質化学工学科・准教授

研究者番号: 9 0 4 1 3 7 5 7

古山 彰一 (FURUYAMA SHOICHI)

富山高等専門学校・電子情報工学科・教授

研究者番号: 9 0 3 2 1 4 2 1

(3) 研究協力者

Jamila Tarhouni

チュニジア国立農業学院・教授