

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：12102
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22404009
 研究課題名（和文） サハラ砂漠周縁部貯水池の持続的利用のための新たな管理・運営手法構築に向けた調査研究
 研究課題名（英文） Study on new concept of management for the sustainable use of the reservoirs in the surrounding of Sahara desert
 研究代表者 入江 光輝 (IRIE MITSUTERU)
 筑波大学・生命環境系・准教授
 研究者番号：50451688

研究成果の概要（和文）：

乾燥地の貯水池は集水域の植生被服率が低いいため土砂流入が多く、堆砂が進みやすい。対策として浚渫は有効だが、特に発展途上国では経済的理由で行われず利用可能な水資源量が減少している。そこで、チュニジアの貯水池で堆砂に関わる詳細な調査を行い、同時に堆砂を有効利用して得る収益によって浚渫事業を促進する可能性を検討した。土壌改良、機能性食品、レンガ原料といった用途での利用可能性を検証し、浚渫を含めた事業費負担の試算を行った。

研究成果の概要（英文）：Reservoirs in arid land has the catchment area which has low vegetation and much soil erosion. As a result, rapid sedimentation occupy their storage capacity. Dredging is effective countermeasure against the sedimentation but it is not carried out because its cost is quite expensive, especially for the developing countries. This study discussed about the potential of utilization of sediment in the reservoirs and economical feasibility to cover the cost of dredging.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
平成 23 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
平成 24 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	11,800,000	3,540,000	15,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：水資源、水工水理学、土木環境システム、農業工学、国際貢献

1. 研究開始当初の背景

サハラ砂漠周辺では気候変動の影響による砂漠化の進行が懸念されており、より安定的な水資源の確保が望まれている。しかし、乾燥地ゆえにその河川流域の植生被覆度が低く、雨季の降雨時には流域表土が激しく浸食され、流出した土壌は途中建設されている貯水池へと流れ込む。特にサハラ砂漠北部の北アフリカの地中海式気候地帯では雨季と乾季が明確であるため、雨季の降水を溜め込んで乾季に利用しており、貯水池回転率は 1

～ 2 程度で、日本などの湿潤地域(回転率 3～ 5)に比べて滞留時間が長い。したがって土砂堆積も顕著でそれによる貯留量低下は著しい。国土全体で貯水量低下は、モロッコ、アルジェリアで年に 0.5%、チュニジアで 1% に及ぶといわれており、早急な対策が必要であるが、現在までに考案されてきた浚渫や先進的な排砂技術はいずれも事業費が高く、経済的負担が大きいため、経済状況が思わしくない北アフリカ諸国では堆砂対策事業は全く行われていないのが実状である。

一方で、北アフリカを含む乾燥地の多くでは、農地におけるアルカリ塩類集積が問題となっている。乾燥による蒸発散量が降雨を上回る乾燥地では土壌水中に溶解して水分と共に表面に移動してきたイオン物質が水分蒸発時に地表面近くに取り残されて集積し、極端な pH や EC の上昇、および土粒子空隙を閉塞させて通気性や通水性を低下させ、植物の生育を阻害する。これについて腐植物質を含む材料を混入させることが有効であることが知られている。腐植物質は生物の死後、生物体有機物が微生物的・科学的作用を受けて崩壊して生じた化学構造が特定されない有機物の総称で、その構造の一部に含まれる酸性官能基は pH 緩衝能とイオン交換能を発揮し、アルカリ塩類集積土壌の問題を緩和する。このとき、貯水池の堆砂物中には上流域から運ばれた有機物も含まれており、それが貯水池の水底部で腐植物質化していることが知られている。

そこで本研究では北アフリカ地域の貯水池堆砂について有効利用の検討を行った。

2. 研究の目的

有効利用を考える上で重要となるのが資源量としての堆砂およびそれに含まれる腐植物質の量と基本的性質である。特に、貯水池環境が異なればそれらが変化し、機能性にばらつきが生じる可能性がある。そこで本研究では北アフリカ・チュニジアの4つの貯水池を対象としたケーススタディを行い、比較研究を行う。まず、

(1) 現地貯水池環境と底質環境に関わる調査を行った。

そして得られた底質サンプルを用いて以下の3つの有効利用方法について検討した。

(2) 塩類集積が懸念される農地に対する土壌改良材としての利用の検討

(3) 底質中に含まれる腐植物質を抽出し、機能性食品としての利用に関する検討

(4) レンガ原料の粘土としての利用の検討

これらの目的での底泥再利用のための基本的な物性試験や機能性試験を行うとともに、特に(3)、(4)については経済的視点からも事業可能性の評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

① 深浅測量

図-1に示すチュニジア国内の4つの貯水池を対象として現況の深浅測量を行い、貯水池建設前の元地形と比較することによって堆砂量の評価を行った。

② 底泥サンプリングと分析および腐植物質抽出

4つの貯水池でそれぞれ複数の地点で底

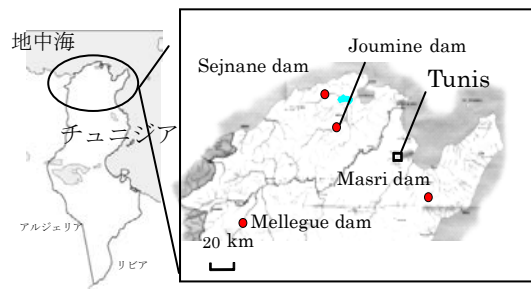


図-1 調査対象とした貯水池の位置

泥をサンプリングし、粒度分布、強熱減量、TOC、pH、土壌水溶存イオン、重金属濃度等の分析を行った。また、各底泥から国際腐植物質学会の定める腐植物質抽出基準方法に従い水溶性腐植成分であるフルボ酸を抽出し、その基本的な性質を調べた。

③ 定期水質観測と濁水挙動観測

対象とした4貯水池のうち、貯水池形状が比較的単純な Joumine 貯水池において重点的な水質観測を行った。最深部にサーミスターチェーンを設置し、水温鉛直分布の観測を行うとともに、全体的な水質挙動を見るためにおよそ1か月間隔でのSTD水質計による多地点鉛直観測を行った。

また、堆砂の要因となる冬期の雨期に流入する河川水濁水の挙動を観測するために、図-2に示すセットを複数地点に設置し、貯水池内での濁水挙動を把握した。

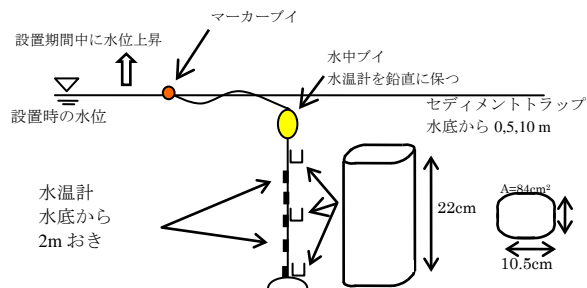


図-2 濁水挙動観測

(2) 貯水池底泥による土壌改良効果

水資源に乏しい地域では下水処理水の灌漑利用が進められている。下水処理水は通常の水源に比べて塩濃度が高く、また開発途上国では運用上の問題により処理水中に重金属が残留することも多い。本研究では底泥の土壌改良材としての有効利用可能性の検討を下水処理水灌漑区において行った。

(3) 抽出腐植物質のバイオアッセイによる機能性評価

抽出した腐植物質を適当な濃度に調整し、特殊な動物細胞を用いた in-vitro バイオアッセイによってその機能性食品としての可能性を検討した。

細胞内のエネルギー代謝指標であるATP産生の向上についてCaco-2セルを用いて評価を行った。また、腐植物質の機能性としてよく知られる抗アレルギー作用の評価にはRBL-2H3細胞を用いた。

(3) 建設用レンガの原料粘土としての利用可能性の検討

現地の建造物の多くは素焼きのレンガで建設される。その市場の大きさを鑑み、貯水池底泥の原料粘土としての利用可能性を検討した。現地のレンガ工場に聞き取り調査を行い、工場と同様の製造方法で粘土のみ貯水池底泥に置換して5cm四方のスレートを整形して焼成し、さらにそれを5mm角長さ4.5cmの小片に切り出して強度試験を行った。

また、現地の浚渫会社およびレンガ工場に聞き取り調査を行い、各工程別のコストに関わる情報を収集して浚渫からレンガ製造までの一連の事業可能性を経済的側面から検討した。

4. 研究成果

(1) 貯水池堆砂速度

深淺測量の結果を図-3に、また、堤体建設前地形との比較によって求められた堆砂量について表-1に示す。

北アフリカ諸国では北部地中海沿岸域は降雨量が年500-800mmある一方で、南下していくとアトラス山脈をはさんで非常に短い距離で年降水量0-50mmのサハラ砂漠へと達する。貯水池の堆砂傾向についても最も南に集水域を構えるMellegueダムにおいてきわめて高い堆砂速度を示している。これは乾燥により集水域の植生被覆が低いことに起因していると考えられる。同集水域では降雨量自体は少ないが、時折生じる降雨イベントによる乾燥裸地からの土砂浸食は著しく、土砂流出量は大きい。本研究で対象とした4ダム以外にチュニジア北部には20近くの大ダムが存在するが、全体的に南に位置するダムほど堆砂速度が高い傾向がみられる。

また、JoumineダムとSejnaneダムは降雨条件は類似しているが、Joumineダムの集水域が小麦畑を中心としている一方で、Sejnaneダムでは森林域がやや多く含まれる。こうした集水域の土地利用の違いが堆砂速度に大きな違いを生んでいる。

(2) 貯水池水質の季節的变化

図-4にJoumine貯水池における定期縦断水質観測結果の一例を示す。左列に夏季(8月)、右列に冬季(12月)の例を示している。

夏季には水温成層が発達し、下層の溶存酸素はほぼゼロとなっている。流入河川水は密度の関係で水温成層の界面に流入しており、濁度およびクロロフィルのピークが界面上

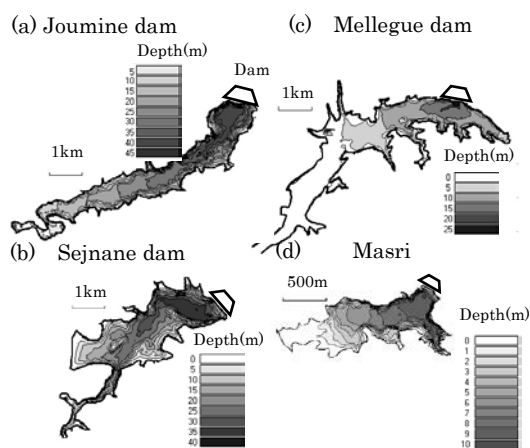


図-3 4ダムの深淺測量結果

表-1 深淺測量結果に基づく堆砂量評価

ダム名	完成年	初期貯水量 (Mil. m ³)	現況貯水量 (Mil. m ³)	堆砂量 (Mil. m ³)	年平均堆砂量 (Mil. m ³ /year)
Joumine	1986	120.50	108.70	11.80	0.513
Sejnane	1994	138.00	132.00	6.00	0.352
Mellegue	1954	267.70	40.00	227.70	3.819
Masri	1968	9.60	3.38	6.22	0.144

に現れている。

一方で冬季には水温成層が破壊され、底層部付近に濁度のやや高いところがみられる。特に、同地域は冬季が雨季で1-3月に出水が多い。図-5は同様に濁度の縦断分布を雨季の前後について示したものである。雨季前は貯水位が低くなり、河川流入部付近の浅水域では堆砂が露呈している。その露呈部では河川流入によって堆砂が再浸食される。また、浅水域では風波による堆砂の再懸濁が起きる。これらの結果、上流(図中左)の浅水域ではやや高い濁度がみられる。一方、雨季後には雨季中の幾度かの出水によって濁水が貯水池内に底層密度流として侵入した。その痕跡が濁度分布にも見られている。

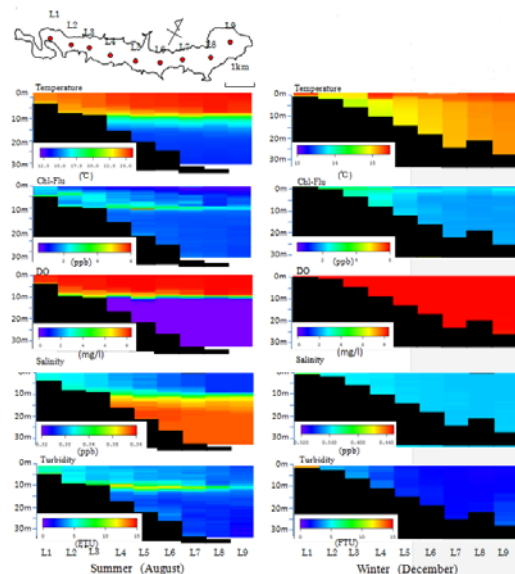


図-4 夏季と冬季の水質縦断分布

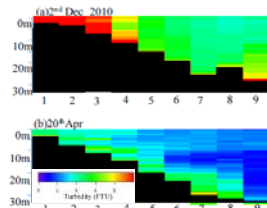


図-5 雨季直前直後の濁度縦断分布

(3) 貯水池内での濁水挙動

下図は底層密度流を観測するための図-2のセットによる2012年2-3月の雨季の間の観測点5, 7, 9(図-4)での水温観測結果である。図中上段に示されているのが気温と貯水位変化から求められた河川流入量の時系列で、河川水温はほぼ気温と等しいとみなせる。2月中旬までの流入河川水温が貯水池水温より相対的に低い場合には水温観測結果からも明確に底層密度流として流入している様子が判別できる。その層厚はおよそ5-6mである。一方で、2月下旬に大規模の出水があったが、流入河川水温と貯水池内水温がほぼ同じであったために、その様子は水温観測結果には表れていない。

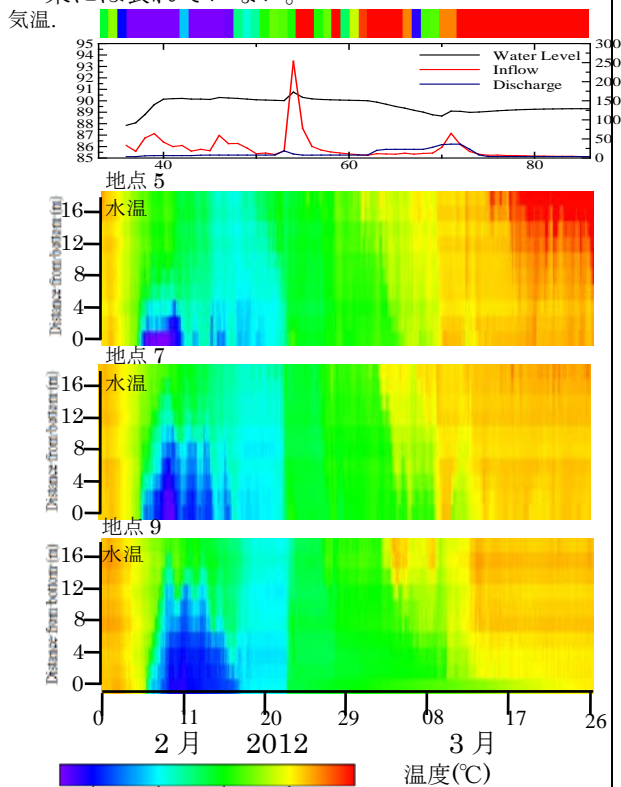


図-6 濁水挙動観測結果

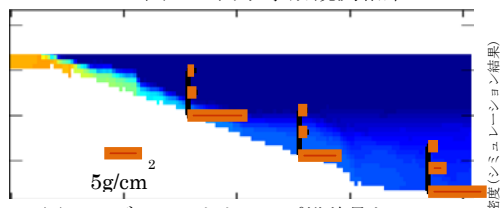


図-7 セディメントトラップ堆積量と底層密度流数値シミュレーション結果

図-7はセディメントトラップの結果を示している。背景は河川流入水の濁質による密度上昇を考慮して適当に密度を与えた濁水挙動のシミュレーション結果である。水底に設置されたトラップにのみ大量の堆積が見られることから底層密度流でありその層厚は5m以下だったことがわかる。また、3/22以降の大規模出水について河川水温が上昇しているために水温計ではとらえられなかったが、セディメントトラップの堆積量の差を見る限り同出水も底層密度流として流入している可能性が高い。

また、シミュレーションモデルも層厚のほか、3地点に設置した水温計の水温低下の時間差から評価される濁水流入流速と計算流速が良い一致を見せたことから現象をよく再現できており、今後、ゲートからの密度流排水や適切な浚渫箇所の設定、貯水池内構造物建設などによる堆砂対策検討を行う上でこのツールをJoumine貯水池について準備することができた。

(4) 貯水池底泥による土壌改良効果

今回、オオムギを用いて栽培実験を行ったが、圃場の土質が砂質であったために明確な塩類集積は生じなかった。しかし、処理水中に重金属が含まれ、作物への取り込みが懸念されていた。そこで、作物中の重金属濃度を調べたところ、貯水池底泥施用によって取り込み量の低下が見られた。表-2にその結果を示す。底泥が鉄分に富むために鉄の取り込み量はやや増えた。それ以外の金属は底泥の粘土によって吸着されて作物への取り込み量が減ったものと考えられる。

表-2 オオムギの金属取り込み量の比較

	オオムギ中の各金属量 (mg・Kg ⁻¹)	
	底泥施用	無施用
Cu	5.1	8.1
Zn	37.8	49.2
Fe	37.2	25.4
Mn	6.5	9.1

さらに、ポット栽培によって底泥の金属吸着効果の確認を試みた(図-8)。亜鉛を代表金属とし、底泥の施用量、土壌の塩濃度、亜鉛濃度を変えてポットでオオムギ栽培実験を行ったところ、底泥の施用によって葉部の亜鉛含量が減少していることが確認できた。

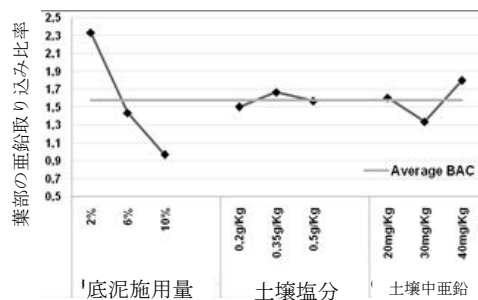


図-8 ポット栽培試験の結果

(5) 貯水池底泥のフルボ酸量と機能性

表-2 に各貯水池の底泥の基本的性質とフルボ酸抽出量を示す。ここには示さないが、金属含量のバランスや抽出されたフルボ酸の FT-IR 分析結果等を含め、同一貯水池内の底泥は採取場所が異なってもほぼ均質であった。腐植物質の性質が貯水池水質、特に水底付近の水中の溶存酸素量に依存すると考えられたが、結果的に成層化して下層が嫌気化するような深部の底泥でも乾季に貯水位が下がって露呈するような浅部の底泥でも同じ貯水池内では性質はほぼ一定であった。

表-2 底泥の基本的性質とフルボ酸量

Dam	Point No.	Depth from max. WL (m)	pH	EC (mS/cm)	Median Particle size (µm)	CEC (meq/100g)	Ignition loss (%)	TOC (mg/kg)	FA from 1kg dried sediment (mg)
(a) Joumine	1	13.5	7.64	0.366	4.5	30.79	17.5	94.86	28.0
	2	25.5	8.24	0.570	4.5	27.26	16.4	117.72	18.0
	2	(adding 6 M HCl at the beginning)							
(b) Sejnane	1	22.3	8.42	0.305	3.9	21.71	10.4	125.64	49.9
	2	27.0	8.18	0.310	4.2	24.30	11.5	94.52	49.8
(c) Mellegue	1	19.5	8.5	0.765	3.2	18.14	18.9	54.298	0.0
	2	14.6	7.99	0.805	3.3	25.10	18.3	47.56	0.0
(d) Masri	1	9.8	7.8	0.725	4.1	31.53	12.1	97.62	42.8

また、抽出したフルボ酸の元素分析を行い、原子比率を示したものが図-9 である。図中丸印で示したのが本研究の貯水池底泥中の腐植物質の結果で、既往研究にある天然の底泥に含まれるフルボ酸に比べて相対的に窒素量が多く、有機物の分解があまり進んでいないフルボ酸であると考えられる。また、これらのフルボ酸についてバイオアッセイにより ATP 産生向上と抗アレルギー機能の評価を行ったところ、機能性を確認できた。

次に浚渫からフルボ酸抽出にかかるコストとフルボ酸市場について調査し、事業化フィージビリティを検証した。結果として抽出量が少なく消耗品費が割高となり、事業採算性は得られなかった。今回、国際腐植物質学会の定める標準プロトコルに従い抽出を行ったが、現地底泥の性状に適した最適な抽出法を開発し、抽出効率を向上する必要がある。実際に本研究で初期に用いる塩酸の濃度を上げると抽出量は 4 倍となった。

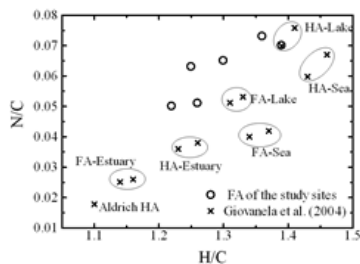


図-9 抽出フルボ酸の原子比率

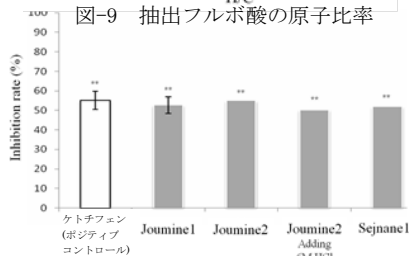


図-10 抽出フルボ酸の抗アレルギー作用

(6) レンガ強度試験とフィージビリティ

貯水池底泥を原料としたセラミックスの曲げ試験結果を表-3 に示す。最後の行に現地のレンガ工場で使用されていた粘土と同様に試作した試験片の試験結果を示す。これより Mellegue を除く貯水池の底泥で作成されたセラミックスはレンガ工場のもと同程度の強度を示すことが示された。

表-3 貯水池底泥レンガ曲げ試験結果

	最大負荷 (N)	破壊応力 (MPa)	破壊時の変異 (mm)
Joumine	34.36	12.37	0.053
Sejnane	37.70	13.57	0.068
Mellegue	22.34	8.04	0.033
Masri	36.57	13.17	0.053
現地レンガ工場	32.52	11.71	0.064

また、現地の浚渫会社に聞き取り調査を行い、機材の浚渫能力、運用費について情報を収集した。表-4 に各貯水池に浚渫船を一台ずつ導入した場合に全底泥浚渫に必要な年数を試算した結果を示す。堆砂速度の速い Mellegue を除いて 5-15 年で全堆砂を除去できる。また、事業費的に見ると貯水池からレンガ工場までの底泥輸送距離が総コストを大きく左右し、貯水池から概ね 30 km 圏内に工場があれば浚渫費用も含めてレンガの販売収益によって事業費がカバーできる。一方で、同浚渫機材から生じる底泥の量は現地の平均的なレンガ工場 4-5 軒分の原料需要に相当した。現在、チュニジア国内で操業する工場数は 20 件程度である一方、貯水池も 20 ほどあることから、全貯水池で浚渫作業を同時操業することは原料供給過多となって事業化は難しい。

表-4 各貯水池の底泥全除去にかかる年数の試算

Dam	年平均堆砂速度 (Mil. m ³ /year)	浚渫能力 (Mil. m ³ /year)	実効浚渫量 (Mil. m ³ /year)	全堆砂浚渫にかかる年数	底泥かさ密度 (ton/m ³)	全底泥の重量 (Mil. ton/year)
Joumine	0.513	1.31	0.80	14.80	0.69	0.90
Sejnane	0.352	1.31	0.96	6.26	0.61	0.80
Mellegue	3.819	1.31	-2.50	-	-	-
Masri	0.144	1.31	1.17	4.75	0.81	1.06

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- 1) Irie M., Han J., Kawachi A., Tarhouni J., Ksibi M., Kashiwagi K., Isoda H.: In vitro testing and commercialization potential of extracted fulvic acid from dredged sediment from arid region reservoirs, Waste and Biomass Valorization, 2013(Accepted) : 査読あり, DOI 10.1007/s12649-013-9234-y,
- 2) Irie M., Kawachi A., Nsiri I. and Tarhouni J.: Observation of floodwater behavior and sedimentation in the reservoir, Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1, 69, 4, 247-252, 2013 : 査読あり
- 3) 高比良翔, 中村恭志, 石川忠晴, 入江光輝, Jamila TARHOUNI, 小島崇; チュニジア国 Joumine 貯水池の成層流動シミュレーション

- ンのための計算条件設定, 土木学会論文集 B1(水工学), 69, 4, 835-840, 2013 : 査読あり
- 4) Irie M., Kashiwagi K., Ujiie K., Nsiri I., Bouguerra S., Tarhouni J.: Feasibility of Exploitation of the Sediment in the Reservoirs for the Sustainability of Surface Water Resource in Tunisia, Journal of Japan Society of Civil Engineering Ser.G, 68, 6, 1141-46, 2012 : 査読あり
- 5) Irie M., Kawachi A., Tarhouni J., Ghrabi A. and Isoda H.: Sedimentation trend and behavior of turbid water in the reservoir, Journal of Arid Land Studies, 22, 1, 91-94, 2012 : 査読あり
- 6) Kawachi, A., Yamada, P., Irie, M. and Isoda, H.: Characterization of humic substances in sediment on Joumine reservoir in Tunisia, Journal of Arid Land Studies, 22, 1, 49-52, 2012 : 査読あり
- 7) Mtibaa S., Irie M., Ksibi M., Trabelsi H., Hentati O., Kallel M., and Isoda H.: Soil amendment by sediment from water storage reservoir as a restoration technique in secondary treated wastewater irrigated area at El Hajeb region, Journal of Arid Land Studies, 22, 1, 315-318, 2012 : 査読あり
- 8) Irie M., Kawachi A., Tarhouni J. and Ghrabi A.: Development of sedimentation and characteristics of sediment on the reservoir in Tunisia, Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1, 67, 4, 163-168, 2011 : 査読あり https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej/67/4/67_4_I_163/_pdf [学会発表] (計 11 件)
- 1) Irie M., Improvement of land use classification based on the seasonal change of NDVI, 日本沙漠学会第 24 回, 2013 年 05 月 25 日~05 月 26 日, 広島大学 日本
- 2) Irie M., Tackle the two important issues of water resource in arid land at once, CW-WR-MED conference/ 2nd AOP Tunisia Conference for Sustainable Water Management, 2013 年 04 月 24 日~04 月 26 日, チュニス チュニジア
- 3) Irie M., Appropriate technologies for regional development, The 5th Indonesia Japan Joint Scientific Symposium (招待講演), 2012 年 10 月 25 日~10 月 26 日, 千葉大学
- 4) Irie M., Strength Evaluation of Construction Bricks Made from Reservoir Sediment and its Economical Feasibility for Sustainable Water Resource Management, The 2nd Algeria-Japan Academic Symposium Sustainable Society through Advanced Sciences, 2012 年 05 月 17 日, オラン工科大学 オラン アルジェリア
- 5) Irie M., Exploitation of Reservoir Sediment to Construction Brick Industry for Sustainable Water Resource Management, The 1st Morocco-Japan Symposium -Sustainable Society through Advanced Sciences, 2012 年 3 月 15 日, カディ・アヤド大学、マラケシュ、モロッコ
- 6) Irie M., Academic cooperation with Islamic countries by Alliance for Research on North Africa, 2nd round of Dialogue for the future between Japan and the Islamic World, 2012 年 2 月 29 日, ヨルダン大学、アンマン, ヨルダン
- 7) Mtibaa S., Irie M., Metal uptake by Bromus ramosus in soil amended by sediment from water storage reservoir: Implications for remediation, The 11th Tunisian Japanese Symposium on Science, Society and Technology, 2011 年 11 月 11 日, ハマメット、チュニジア
- 8) Nsiri I., Irie M., Interpolation of depth data measured continuously by sounding sonar and estimation of sedimentation in reservoirs, The 11th Tunisian Japanese Symposium on Science, Society and Technology, 2011 年 11 月 11 日, ハマメット、チュニジア
- 9) Bouguerra S., Irie M., Economical potential of exploitation of reservoir sediment to the production of construction brick, The 11th Tunisian Japanese Symposium on Science, Society and Technology, 2011 年 11 月 11 日, ハマメット、チュニジア
- 10) Irie M., Exploitation of the sediment on reservoirs for recovering storage capacity, Tunisia-Japan Symposium -Regional Development and Water Resource -A New Vision for Sustainable Society, 2010 年 11 月 28 日, チュニジア チュニス
- 11) Irie M., Potential of the sediment on reservoirs for soil amelioration, 1st Algeria-Japan Academic Conference -Towards the promotion of mutual academic cooperation-, 2010 年 11 月 9 日, アルジェリア アルジェ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 光輝 (IRIE MITSUTERU)
筑波大学・生命環境系・准教授
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・人文社会系・助教
研究者番号 : 0 0 4 4 7 2 3 6
梅田 信 (UMEDA MAKOTO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 1 0 4 4 7 1 3 8
韓 峻奎 (HAN JUNGYU)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号 : 4 0 4 5 5 9 2 8