

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560671

研究課題名(和文)簡易なセラミック膜を用いたハイブリッド型水浄化システムの開発と途上国への適用

研究課題名(英文)Development and application of water purification system using a simple ceramic filter in developing countries

研究代表者

中島 淳(NAKAJIMA, JUN)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：00309098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：バングラデシュの粘土と米糠から製作した簡易セラミック膜を用いて、現地溜池水のろ過による浄化を検討した。まず、模擬安定化池の室内実験により、簡易セラミック膜が藻類の分離に有効なことを示し、膜ろ過フラックス、BOD負荷量および滞留時間についての運転条件等を明らかにした。次に現地調査から、溜池を生活用、排水用、農業用、漁業用、都市生活用の5カテゴリーに分類し、それぞれの雨期と乾期の水質特性を明らかにした。これらの溜池水を対象とした簡易セラミック膜による浄化実験から、SS分の除去と大腸菌群および大腸菌の低減性能が確認され、生活用および都市生活用溜池水の衛生リスク低減に有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Pond water purification was studied by using a simple ceramic filter made of clay soil and rice bran in Bangladesh. Laboratory tests showed the separation performance of algae and operational conditions including filtration flux, BOD load and hydraulic retention time. Water storage ponds were categorized into domestic use, wastewater storage, agricultural use, fishery use and urban domestic use. Their water quality and seasonal changes were investigated. Water purification tests using the simple ceramic filter exhibited the removal performance of SS, total coliforms and Escherichia coli from the pond water. The results suggested that the water purification system using the simple ceramic filter was effective to reduce the hygiene risk of domestic and urban domestic pond water.

研究分野：水環境工学

キーワード：簡易セラミック膜 水浄化システム 安定化池法 途上国 バングラデシュ 溜池

## 1. 研究開始当初の背景

セラミックスや有機素材を用いた膜分離技術は、水中の様々な大きさの共雑物を取り除く技術として、広く水処理分野で適用がすすめられている。その分離膜の単独使用に加えて、他の水処理技術とのハイブリッド化によって、その除去性能や維持管理面に、大きな効果があることが知られており、従属栄養好気性細菌による有機物除去と精密ろ過膜あるいは限外ろ過膜とを組み合わせた膜分離活性汚泥法(MBR)は、今世紀に入って最も普及がすすんでいる下水処理技術のひとつといえる。膜分離で得られる処理水は清澄で、BODや病原リスクが低いことから、MBRは下水の再生・再利用において主要な技術のひとつとなっている。膜分離技術と生物処理との組み合わせによって、水利用の目的に応じた様々な魅力的な水再生・水処理への応用が学問的に期待される。

バングラデシュ農村部に代表されるようなアジア途上国の水処理や水再生においては、高価な施設導入や高度な維持管理の適用は不可能で、また水処理に電力の使用が困難な地域が多い。将来的にも水道敷設が期待されないこれらの地域では、飲用・炊事以外の水利用には、藻類が大量増殖した溜池水が用いられている。溜池の藻類は光合成によって酸素を供給し、共生する好気性従属栄養細菌による腐敗性有機物の減少を支えており、自然の安定化池(stabilization pond)の機能を果たしている。こうした一定の自然浄化が期待されるものの、汚染が残留する溜池水的生活用水としての利用は、水系伝染病の感染経路となり、住民の健康に大きな影響を与えていることは疑いがない。

そこで、こうした健康を損なうリスクを低減するために、自然の安定化池である溜池水に膜分離技術を組み合わせることを提案したい。しかしながら、これらの溜池の現状や使用実態に関する報告や、安定化池と膜分離とのハイブリッド化の報告はほとんどない。したがって、基礎的研究によってその可能性を検討し、その上で実用化につながる応用研究を展開させることが求められる。

これまでに、鉄酸化細菌(鉄バクテリア)と簡易セラミック膜とのハイブリッド化を検討し、バングラデシュ農村部の飲用地下水からの安価な砒素技術として鉄ハイブリッド型砒素除去フィルターを開発し提案した。すなわち、鉄バクテリアによる砒素除去とその安定化のために金属鉄を用いることを考案し、バングラデシュの粘土土壌で製作したセラミック膜によるろ過との組み合わせによって、持続可能な砒素除去フィルターの導入が可能であることを示した。これまでの研究成果から、以下のことが分かっている。

(1) 鉄バクテリアと金属鉄をハイブリッド化することによって、水中の砒素を安定して不溶化し除去することが可能である。

(2) さらにセラミックフィルターに鉄バク

テリアを集積させ、金属鉄を添加することによって、安定した砒素除去が可能である。

(3) 本法による砒素除去に対して、原水中の2価鉄濃度は正に、リン濃度は負に作用し、その効果を示すモデル式を提案した。

(4) 本法をバングラデシュ農村部の汚染井戸水に適用し、金属鉄が消耗するまでの1年間の砒素除去性能を確認した。

以上の経過から、バングラデシュ農村部において製作が可能なが実証されている簡易セラミック膜を用いたシステム構築が、比較的容易でかつ実現の可能性が高いものと考えられた。

## 2. 研究の目的

バングラデシュ農村部の飲用地下水からの砒素除去の研究において開発された簡易セラミック膜は、現地材料を用いて安価に製造が可能である。本研究では、このセラミック膜を用いて、溜池水の浄化システムを開発・提案し、低所得の途上国における水の安全供給に資することを最終目的とする。

そのために、以下の3点を研究期間内に明らかにすべき研究目的とした。

(1) 安定化池と膜分離とのハイブリッド化について検討し、その可能性を明らかにする。

(2) バングラデシュ農村部の溜池をカテゴリー化して、それぞれの水使用実態と水質特性を明らかにする。

(3) バングラデシュ農村部の溜池に適用可能な簡易水浄化システムを提案する。

## 3. 研究の方法

(1) 安定化池と膜分離とのハイブリッド化の検討

アクリル水槽と人工光を用いた安定化池室内実験装置を作り、下水2次処理水程度の水質に設定した人工原水による連続実験を行った。簡易セラミック砒素除去フィルター研究の際に開発した簡易セラミック膜(粘土土壌と米糠に水を加え混合して焼成)を用いて、安定化池反応槽の混合液(藻類と細菌類が混合して浮遊)をポンプで吸引する過し処理水を得た。処理水質の測定から除去性能を把握するとともに、フラックスと膜間差圧を測定した。運転条件としては、膜ろ過フラックス、滞留時間(HRT)、BOD負荷量などを変化させ、それぞれの影響について検討した。

(2) 溜池のカテゴリー化と使用実態の把握

バングラデシュ西部のクルナ市および近郊の農村部(ルプシャ、ファカルハット、モラハット)を調査対象として、2012年9月(雨期)に、112の溜池の形状・サイズ(深さを含む)、流入水の種類、水質、用途などの基礎データを求め、得られた結果から、これらの溜池のカテゴリー分けを行った。また溜池の表層水を採取して、水質を測定した。これらのうち49の溜池について、2013年3月に乾期調査を行い、水量や水質の季節変化を検討した。

### (3) 溜池水浄化システムの提案

クルナ市および近郊の農村部の5カテゴリー溜池水に対して、2013年8~9月(雨期)に、簡易浄化装置を用いた浄化ろ過実験を行った。簡易浄化装置は、(1)で用いた簡易セラミック膜を基本とし、それに鉄網を付加したものの、もみ殻を焼成したくん炭を付加したものの、鉄網とくん炭を付加したものの4種類とした。各種の簡易浄化装置に溜池水を加えて重力ろ過を行い、ろ過の前後の水質を測定して除去効果を検討した。

また、2014年3月(乾期)には、同地域の生活用および都市生活用の溜池水を対象として、簡易セラミック膜、それに鉄網を付加したものの、くん炭を粘土と混合して低温で焼成した固定化くん炭を付加したものの3種類の簡易浄化装置を用い、同様のろ過試験を行った。

以上の現地での実験に加えて、富栄養条件で藻類を増殖させ大腸菌群を添加した人工溜池水を用いて、簡易セラミック膜ろ過による重力ろ過の室内実験を行い、本装置の除去特性に関するより詳細なデータを収集した。

## 4. 研究成果

### (1) 安定化池と膜分離とのハイブリッド化の検討

膜ろ過フラックス、BOD 負荷量および滞留時間(HRT)を変化させた実験を実施した。フラックスを0.1~0.4m/dに変化させた運転では、BOD 除去性能はいずれも良好であったが、フラックスの増加によって目詰まりリスクが増加した。

BOD 負荷量を0.003~0.017kg/m<sup>3</sup>/dに変化させた運転では、BOD 負荷量の増加に伴いpHとDOが低下し光合成の減少と硝化の抑制が示唆された。

フラックスとBOD 負荷量を固定した条件下で、HRTを2d、4d、7dの3条件に変化させた結果、HRTの違いによるDOの低下はみられなかったが、HRTの減少に伴い、TOCの増加と目詰まりリスクの増加傾向が認められた。

以上の膜ろ過フラックス、BOD 負荷量および滞留時間の範囲内において、簡易セラミック膜を用いた安定化池の固液分離が可能で、さらに安定化池と膜分離とのハイブリッド化の可能性が示された。また、安定化池の機能を果たしている溜池においても、簡易セラミック膜による固液分離が効果的と考えられた。

### (2) 溜池のカテゴリライズと使用実態の把握

バングラデシュ西部のクルナ市およびその近郊農村部に散在する溜池は、生活用、排水用、農業用、漁業用、都市生活用(面積に関しては大規模と小規模に分離)の5カテゴリーに分類できた。雨期調査における池面積は、都市生活用(大規模)>漁業用>農業用>生活用(=都市生活用(小規模))>排水用の順であった。溜池の水深には有意差はみられず、約1mであった。

漁業用、排水用および都市生活用の溜池水の透視度は低く、漁業用および都市生活用の溜池水のSSとTOCは他よりも高かった。他方、T-NおよびT-Pは、排水用および都市生活用の溜池水で高かった。漁業用および都市生活用の溜池においては、藻類の増殖が多いために透視度が低いと考えられた。

乾期には、生活用、排水用、都市生活用溜池で著しい水量の減少がみられ、農業用溜池では稲の耕作が行われていた。また、透視度は大きく低下して、雨期の透視度の約半分となった。乾期における溜池水の濁質増加などの水質悪化は、光合成による一次生産の増加に起因するものと考えられた。

水質データの主成分分析の結果、第1主成分は他と比較して寄与率が高く(38%)、第3主成分までで累積寄与率62%であった。第1主成分の因子負荷量は、T-N、T-P、TOC、SS等で正に高く、第1主成分が富栄養化の進行度を示していると判断された。また、第2主成分および第3主成分は、それぞれ排水の混入と季節変化を示していると考えられた。

生活用および都市生活用溜池の水質第1主成分は、雨期と比較して乾期で増加しており、衛生上のリスクが増加している。その対策として、濁質の分離を目的とする簡易セラミック膜による固液分離が効果的と考えられた。

### (3) 溜池水浄化システムの提案

雨期の5カテゴリーの溜池水のろ過実験の結果、簡易セラミック膜の簡易浄化装置のろ過によって、濁度の低下、透視度の上昇、SSの減少(99%以上の除去)が認められた。また、大腸菌群および大腸菌については、2log程度あるいはそれ以上の減少が得られた。

他方、炭素や窒素濃度の変化は見られず、リンはやや増加してフィルターからの溶出によると考えられた。鉄網を付加した簡易浄化装置では、このリン濃度が減少し、鉄網から溶出し酸化した鉄塩( )によるリン除去が示唆された。また、くん炭を付加した簡易浄化装置および鉄網とくん炭を付加した簡易浄化装置では、リン濃度の大幅な増加が認められ、くん炭からのリン溶出が顕著にみられた。

乾期においては、濁質が増加し衛生上のリスクが増加する生活用および都市生活用の2カテゴリーの溜池水を対象とし、ろ過実験を行った。また、雨期にリン濃度の増加が著しかったくん炭を付加した簡易浄化装置については、くん炭を粘土と混合して低温で焼成して固定化くん炭を作成し、その添加に変更をした。

簡易セラミック膜の簡易浄化装置のろ過によって、雨期と同様に濁度の低下、透視度の上昇、SSの減少が認められた。また、大腸菌群および大腸菌についても、2log程度の減少が得られた。炭素や窒素濃度についても、雨期と大きな差異はなかったが、くん炭を固定化することによって、くん炭からのリンの溶出が抑制された。また、乾期における溜池

水の濁度と SS の増加によって、ろ過速度の低下がみられた。

大腸菌群数および大腸菌の除去性能に関するより信頼性の高い資料を得るために、人工池水を用いた添加除去試験を行った結果、2log 以上の再現性のある除去結果が得られた。これらのことから、簡易浄化装置を用いたろ過は、溜池水の衛生上のリスクを低減させる効果を有することが明らかとなった。しかしながら、さらなる除去率向上や具体的な装置の設計のために、残された課題の継続的な検討が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

清水聡行, 中島淳, 近本智行, 仲上健一: 大学キャンパスにおける雨水・再生水利用の現状と考察, 用水と廃水, Vol.57, No.2, 122-131, 2015 査読有

中島淳: 海外におけるヒ素汚染実態と飲料水対策, 水環境学会誌, 37(A), 401-404, 2014 査読無

Md. Mahmudul Hasan and Jun Nakajima: Operational factors in membrane bioreactors using a simple ceramic filter, J. Water and Environment Technology, Vol.12, No.1, 65-75, 2014 査読有

Md. Shafiquzzam, Md. Mahmudul Hasan, Jun Nakajima: Iron mixed ceramic pellet for arsenic removal from groundwater, Environ. Eng. Res., 18(3): 163-168, 2013 査読有, DOI:10.4491/eer2013.18.3163

Supattra Jiawkok, Suda Ittisupornrat, Chittima Charudacha & Jun Nakajima: The potential for decentralized reclamation and reuse of household greywater in peri-urban areas of Bangkok, Water and Environment Journal, Vol. 27 229-237, 2013 査読有, DOI:10.1111/j.1747-6593.2012.00355.X

Supattra Jiawkok, Jun Nakajima: Estimation of surfactants discharge loadings by domestic detergent use in Thailand, J. Water and Environment Technology, Vol.10, No.4, 421-428, 2012 査読有

Tuyet Thi Tran, Md. Shafiquzzaman, Jun Nakajima: Recycle and reuse of charcoal made from excess sludge in membrane bioreactor, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), Vol. 68, No. 3, 182-188, 2012 査読有

Supattra Jiawkok and Jun Nakajima: Wastewater treatment using a biofilm process for greywater reclamation and reuse, Jpn J. Water Treatment Biology,

Vol.48, No.3, 109-116, 2012 査読有

Md. Mahmudul Hasan, Md. Shafiquzzaman, Jun Nakajima and Quazi Hamidul Bari: Application of a simple arsenic removal filter in a rural area of Bangladesh, Water Science & Technology: Water Supply, Vol.12, No.5, 658-665, 2012 査読有

[学会発表](計 10 件)

Md. Mahmudur Rahman, 中村俊哉, 清水聡行, 中島淳: Water quantity and quality in artificial water storage ponds and its simple purification, 第 49 回日本水環境学会年会, 2015 年 3 月 16 日, 金沢大学(石川県)

Jun Nakajima, Toshiyuki Shimizu, Sengkeo Tasaketh, Outthachack Vanhsaveng, Supattra Jiawkok: Sludge accumulation and BOD removal performance in three anaerobic baffled reactors installed in Vientiane City, 12<sup>th</sup> Specialized Conference on Small Water and Wastewater Systems, IWA, 2014 年 11 月 3 日, Muscat, (Oman)

Jun Nakajima, Md. Mahmudur Rahman, Md. Mahmudul Hasan, Toshiya Nakamura: Water usage and water quality of several types of artificial water storage ponds in the urban and rural area of Khulna, Bangladesh, 16<sup>th</sup> International Symposium on River and Lake Environments "Climate Change and Wise Management of Freshwater Ecosystem", 2014 年 8 月 26 日, Chuncheon (Korea)

山崎智之, 金本紗季, Chittima Charudacha, 中島淳: 生活雑排水再生処理における洗剤成分の低減特性, 第 48 回日本水環境学会年会, 2014 年 3 月 19 日, 東北大学(宮城県)

Md. Mahmudul Hasan and Jun Nakajima: Operational factors in membrane bioreactors using simple ceramic filter, Water and Environment Technology Conference 2013, 2013 年 6 月 15 日, 東京農工大学(東京都)

Jun Nakajima, Hiroaki Oda and Tuyet Thi Tran: Feasibility test for cyclic reuse system of charcoal made from excess sludge in membrane bioreactor, 2013 International Environmental Engineering Conference, 2013 年 6 月 12 日, ソウル(韓国)

山崎智之, Supattra Jiawkok, 金本紗季, 松田智子, Chittima Charudacha, 中島淳: 洗剤を含む生活雑排水の再生処理実験, 第 47 回日本水環境学会年会, 2013 年 3 月 13 日, 大阪工業大学(大阪府)

尾田浩章, 奥谷真衣, Tuyet Thi Tran, 中島淳: 膜分離活性汚泥法における余剰汚泥の炭化とその循環システム, 第 47 回日本水環境学会年会, 2013 年 3 月 12 日, 大阪工業大学(大阪府)

Jun Nakajima: Decentralized local water

reuse and sustainability, 4<sup>th</sup>  
International Conference on  
Sustainability Science in Asia, 2013年2  
月6日, Canberra (Australia)

Supattra Jiawkok, Jun Nakajima:  
Estimation of surfactants discharge  
loadings by domestic detergent use in  
Thailand, Water and Environment  
Technology Conference 2012, 2012年6月  
30日, 東京大学(東京都)

〔図書〕(計1件)

Jun Nakajima, Md. Shafiquzzaman:  
Alternative and simple technology for  
water treatment, In "Strategic adaptation  
towards water crisis", Ken'ichi Nakagami,  
G.A. Choudhury, Li Jianhua, Kensuke  
Fukushi (ed.), 2014, The University Press  
Limited, p.289

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 淳 (NAKAJIMA JUN)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00309098