様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　 ８ 月 ２１ 日現在

機関番号：１３４０１
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2019
課題番号：１６Ｋ１８１５５

研究課題名（和文）乾期バングラデシュにおける太陽熱淡水化装置による飲み水対策

研究課題名（英文）Countermeasures of Drinking Water by a triangular solar still for a family and small village in southern Bangladesh during the dry season

研究代表者
寺崎　寛章（Terasaki, Hiroaki）

福井大学・学術研究院工学系部門・助教

研究者番号：４０６０８１１３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では水不足に苦しむバングラデシュ沿岸地域(僻地)の住民を対象に三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)による乾期の飲み水確保を目標として学術面および実用面の両面から研究を行った。その結果、(1)熱･水分物質移動理論に基づいたTrSSの造水モデルを開発し、日造水量を予測することが可能となった、(2)造水量および水コスト、現地住民のヒアリングに基づいて最適と考えられるTrSSの設計を行った、(3)実際にバングラデシュのパイガサ地域でTrSSを導入して現地試験から造水量を調査した、(4)住民へのアンケートおよび造水量調査からTrSSの導入効果を総合的に判断した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究で対象とするパイガサ地域は同国だけではなく先進諸国の支援が殆ど行き届かない僻地である。その僻地にて乾期の飲み水対策に寄与する三角型太陽熱淡水化装置は国際貢献や技術支援の観点から社会的意義は非常に高い。また同地域に適した装置の設計および開発を行い、実際に現地に導入して評価する点は今まで殆ど行われておらず、その学術的意義も高い。なお、本研究成果を１つのモデルケースとして、同国の他地域や島嶼国、非常災害時にも応用でき、その波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The main objective of this study is to design a triangular solar still (TrSS) for providing potable water for a family or small village in remote and coastal areas in southern Bangladesh during the dry season. To achieve the objective, the four studies are conducted as follows: (1)Development of water production model based on the theory of heat and water movement, (2)Optimum designing of TrSS size and material in terms of production cost and local situation, (3)Quantitative evaluation of water production in Paikgacha area through field experiment, (4)Total evaluation of the effect of TrSS introduction by questionnaire and experimental results.

研究分野：環境水理学

キーワード：太陽熱淡水化　TrSS　蒸留　バングラデシュ　僻地　飲み水支援

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

１．研究開始当初の背景

バングラデシュを始めとする発展途上国では多くの人々が飲料水や生活用水などの水不足に苦しんでいる。バングラデシュの水に関する問題としては砒素汚染がよく知られているが、それ以外にも地下水の塩性化などの問題も顕著である。これらの問題を解決する手法の一つに淡水化技術(多段フラッシュ法や逆浸透膜法など)が開発されているものの、コストの増大、装置の大規模化、多大なエネルギーを要することから、バングラデシュなどのインフラが未整備の国では普及に至っていない。特に、バングラデシュの遠隔地や南部沿岸地(**図-1** を参照)では乾期における飲み水確保が緊急の課題となっている。現状は図に示すような不衛生な溜め池の水(**図-2** を参照)あるいは劣悪な井戸水(塩化物イオン濃度、鉄など多項目で日本の水質基準値を大幅に上回る)の飲用を余儀なくされている。したがって、同国における乾期の飲み水対策は緊急の課題となっている。

これらの現状を鑑みて、申請者らは 2013 年前より太陽熱淡水化装置の研究を行っている。既往の研究の多くが大規模な淡水化技術の研究を行っているのに対して、バングラデシュ、遠隔地や僻地に適した太陽熱淡水化装置に関する研究は殆どないのが現状である。なお、この太陽熱淡水化の研究が十分に進んでいない理由には、現地事情に十分に精通していないこと、住民との信頼関係が築けていないこと、僻地や遠隔地で研究を実際に実施する研究者がいないことなどが挙げられる。

そこで筆者らは特に水不足が深刻な乾期の飲み水確保の手段として、太陽エネルギーにより現地の(塩性)地下水や表流水の蒸留を行う三角型太陽熱淡水化装置(Triangular Solar Still、TrSS と呼称)を提案し、研究開発を行っている(**図-3** を参照)。TrSS は従来の円筒型太陽熱淡水化装置を改良したものであり、飲み水確保の方法として主流である逆浸透膜法(RO)や多段フラッシュ法(MSF)に対して造水性能では劣るものの、自然エネルギーのみを使用した装置であること、製作や使用・維持管理において特別な技術を必要としない簡易な構造であること、安価かつ軽量であること、などの利点を有する。そのため、インフラが整っておらず、支援が行き届かない遠隔地において、TrSS は住民自らが持続的に安全な飲み水を確保するための手段、あるいはバングラデシュで頻発しているサイクロンなどの非常災害時の飲み水確保の手段としても有効であると筆者らは考えている。

図-1　パイガサ(バングラデシュ)の位置

図-2　乾期に飲用される溜め池の水

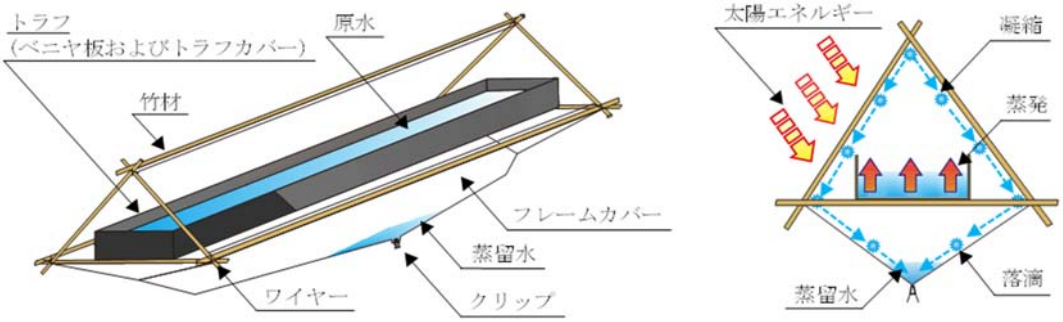

図-3　TrSS の基本デザインおよび造水メカニズム

２．研究の目的

そこで本研究では水不足に苦しむバングラデシュ沿岸地域(僻地)の住民を対象に、三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)による乾期の飲み水確保を最終目標とする。目標達成のために、具体的に以下の(i)～(iii)を目的として研究を実施した。

(i)　造水量、製作コストおよび現地住民のヒアリングに基づいたバングラデシュパイガサ地域に適した TrSS の設計および製作

(ii)　パイガサ地域に TrSS を実際に導入し、その効果の定量評価

(iii)　熱･水分物質移動理論に基づく TrSS の造水モデルの構築および検証

３．研究の方法

本研究では上述の(i)～(iii)に関連して、以下の室内および野外実験を実施した。

(i)　TrSS の設計および製作

TrSS は極めて簡易な構造であり、住民が持続的に使用・維持管理することが可能であると考えられる。**図-4** は長さ 1.6 m の TrSS のフレームカバーの展開図、TrSS の側面図および断面図をそれぞれ示す。TrSS はビニールシートを図面にしたがって切り取り、ヒートシーラーを用いて、フレームカバーおよびトラフカバーを熱溶着した後、ワイヤーを用いて短材をトラス型に結束する。その後、長材をフレームカバーに挿入し、トラス型に結束した短材と組み合わせる。次に、ベニヤ板に墨汁を塗り、矩形になるようにトラフを組み立てる。またトラフをカバーで覆い、熱溶着して密閉し、トラフをフレーム内部に挿入する。これらの工程後、トラフ内部に原水を入れ、トラフ挿入口および下部取水口をクリップで密閉し、日光を遮る物の無い場所に TrSS を設置する。これらの製作のうち、熱溶着を除けば、特別な技術や専門的な知識を必要としないため、現地住民が竹材の組み立てからトラフの挿入までを 10 分程度で行うことが可能である。

また TrSS（長さ 1.6 m）における製作コストを調べた。バングラデシュの一般的なベニヤ板は 4 ft×8 ft（1220 mm×2440 mm）であり、トラフの強度を考慮して板厚 10 mm のものを使用した。また竹材は日本で一般的に売られている白竹とは異なり、主に建築用の足場として用いられる安価かつ肉厚な竹材を用いた。ここで竹材は 1 本当たり 6 基分のフレームが切り出せることを想定した。

次に、対象地域におけるヒアリングに基づいて、長さ 1.0 m の TrSS と長さ 1.6 m の TrSS（以後、TrSS1.0 および TrSS1.6）を対象に、TrSS の使用期間毎の造水コスト（飲み水 1 L 当たりの TrSS のコスト、BDT/L）を調べるために造水シミュレーションを行った。なお、本計算にあたり以下の仮定および条件を設けた。

1) 現地の日射量は NASA prediction of world-wide energy resources における 2007 年から 2017 年までの対象地域の日射量の平均値から求めた（推定）月平均日射量を使用する。
2) 造水量の計算には日射以外の影響（気温や湿度など）は小さいと仮定して、月毎の平均造水量は日積算日射量と日造水量の関係から求める。
3) TrSS の製作コストは現地の市場価格などを基に計算する。
4) ベニヤ板、竹材およびビニールシートの耐用年数は、現地で実際にこれらを使用している住民へのヒアリング結果や既往文献から決定し、10 年、5 年および 3 年とする。
5) TrSS の使用時期は晴天日が多く、かつ造水量が期待できる乾期（1～4 月）を想定する。

また造水コストは現地の利用可能期間を考慮して計算する必要がある。本研究において、TrSS は乾期での使用を想定しているが、対象地域では乾期の終わり（4 月）にかけて天候不順が想定される。そこで、使用期間が 1～4 月の 4 ヶ月間（4 月も比較的晴天日が続いた場合をシナリオ 1 と呼称）と 1～3 月の 3 ヶ月間（4 月の天候不順を考慮した場合をシナリオ 2 と呼称）を考える。

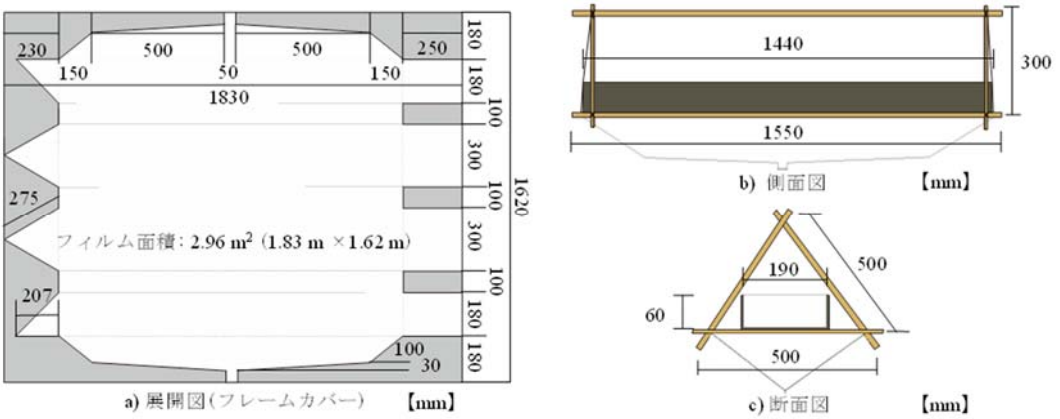

図-4　フレームカバーの展開図、TrSS の側面図および断面図

(ii)　パイガサ地域への TrSS の導入効果

本研究では 2018 年 3 月 12 日から 4 月 21 日までパイガサ地域の Charbanda（チャルバンダ）村の住民 24 世帯を対象として、合計 144 基（1 家庭 6 基）の TrSS（長さ 1.0 m）を導入した。TrSS の製作はフィルムのカットおよび溶着を日本で行い、それ以外を現地 NGO が、最後の組み立てを住民が行った。また住民への組み立て指導および片付け指導のためのワークショップを導入開始直前と導入後に開催し、マニュアルを用いて TrSS の使用から組み立て、片付け指導を行うとともに、アンケートを実施した。また現地 NGO が対象家庭を毎日訪問し、造水量の計測を調査した。また TrSS の造水量に及ぼす微気象の影響を調べるために、3/15～4/28 において現地の協力家庭に設置したワイヤレスデータロガーにより、照度、気温、湿度および紫外線量をそれぞれ測定した。なお、造水量に最も影響を及ぼすと思われる日射量は現地にて行った日射強度と照度の観測結果に基づいて試算した。

(iii)　熱･水分物質移動理論に基づく TrSS の造水モデル

本モデルは有限差分法を用いた一次元の数値解析モデルであり、モデルの構築に際して、以下の仮定および条件を設けた。

(1) フレームカバー、湿り空気、トラフおよびトラフ水はそれぞれ単一の要素である。
(2) 付着水滴は膜状凝縮として扱う。
(3) 対流熱伝達の計算簡略化のため、フレームカバー形状を円筒型として扱う。
(4) 放射の多重反射は無視する。
(5) 竹材およびトラフカバーの影響は無視する。

次に TrSS の熱収支は以下のように表される。

トラフ水：
$$\frac{\partial(\rho CVT)_w}{\partial t} = R_w - Q_{ew} - Q_{tw} - Q_{cw} - Q_{rw} - Q_{rn}$$

トラフ：
$$(\rho CV)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = R_t + R_{lt} + Q_{tw} - Q_{tha} - Q_{rt} + Q_{rn}$$

湿り空気：
$$\frac{\partial(\rho CVT)_{ha}}{\partial t} = R_{ha} + R_{lha} + Q_{ew} - Q_{cdha} - Q_{cha} + Q_{cw} + Q_{tha} - Q_{loss}$$

フレームカバー：
$$(\rho CV)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_c + R_{lc} + Q_{cdha} + Q_{cha} - Q_{cc} + Q_{rw} + Q_{rt} - Q_{rc}$$

ここに、R：各要素に入射する日射量(W)、R_l：各要素に入射する底面反射日射量(W)、Q_{ew}：トラフ水の水表面から湿り空気への蒸発潜熱量(W)、Q_{cdha}：湿り空気からフレームカバーへの凝縮潜熱量(W)、Q_{cc}：フレームカバーと大気間の対流熱伝達量(W)、Q_{cha}：湿り空気とフレームカバー間の対流熱伝達量(W)、Q_{cw}：トラフ水の水表面と湿り空気間の対流熱伝達量(W)、Q_{tha}：トラフと湿り空気間の対流熱伝達量(W)、Q_{tw}：トラフとトラフ水の対流熱伝達量(W)、Q_{rc}：フレームカバーと大気間の放射伝熱量(W)、Q_{rw}：トラフ水の水表面とフレームカバー間の放射伝熱量(W)、Q_{rt}：フレームカバーとトラフ間の放射伝熱量(W)、Q_{rn}：トラフ水の水表面とトラフ間の放射伝熱量(W)、Q_{loss}：湿り空気からの漏気熱量(W)、下添え字 c、ha、t および w はフレームカバー、湿り空気、トラフおよびトラフ水、をそれぞれ意味する。

また、TrSS の質量収支は以下のように表される。

トラフ水：
$$\frac{dV_w}{dt} = -\frac{m_{evap} A_w}{\rho_w}$$

湿り空気：
$$\frac{\partial(V_{ha}\rho_{vha})}{\partial t} = m_{evap} A_w - m_{cond} A_c - m_{loss} A_{loss}$$

ここに、A_w：トラフ水の水表面積(m^2)、A_c：フレームカバー内面積(m^2)、A_{loss}：漏気断面積(m^2)、m_{evap}：質量蒸発フラックス密度(kg/m^2s)、m_{cond}：質量凝縮フラックス密度(kg/m^2s)および m_{loss}：質量漏気フラックス密度(kg/m^2s)、をそれぞれ意味する。

４．研究成果

(i)　TrSS の設計および製作

現地調査およびヒアリングに基づいて TrSS の製作コストを試算した結果、1 基当たりの TrSS(長さ 1.6 m および 1.0 m)の製作コストは 398 BDT および 272 BDT(バングラデシュタカ、約 530 円および 350 円)となった。なお、これらのコストには部材の輸送費、ビニールシートやベニヤ加工のための人件費は含まれてはいない。またこれらの単価は小売価格のため、部材の大量購入や工場加工などを行えば、さらに製作コストを抑えることができる。

野外実験期間中の平均積算日射量は 20.6 MJ/m2/day(13.2～23.4 MJ/m^2/day)であり、平均日造水量は 3.8 kg/m2/day(2.2～4.7 kg/m^2/day)となった。これより、TrSS の日造水量は積算日射量に概ね線形的に比例し、以下の式で表される。

$$Mpd = 0.22\Sigma Rs - 0.73$$

シナリオ 1(1～4 月)における長さ 1.0 m および 1.6 m の TrSS の平均造水量(0.558 kg/day および 0.834 kg/day)は、シナリオ 2 のそれの約 1.1 倍である。1 日に必要な最低限の飲み水(1.5 L/day)を確保するためには、長さ 1.0 m の TrSS は 3 基/人、長さ 1.6 m の TrSS は 2 基/人必要となる。現地において乾期(1～4 月、シナリオ 1)に TrSS を使用した場合、長さ 1.0 m および 1.6 m における TrSS の水コストは現地の基準水コスト(1.0 BDT/L、BDT=バングラデシュタカ)と同程度であり、TrSS は現地に導入可能であると考えられる。

次に造水シミュレーションの結果を示す。M_{ave} は ΣR_{s_ave} の最も高い 4 月に最大となり、TrSS1.0 では 0.662 kg/day、TrSS1.6 では 0.989 kg/day となった。シナリオ 1 における TrSS1.0 および TrSS1.6 の M_{ave} (0.558 kg/day および 0.834 kg/day)はシナリオ 2 のそれの約 1.1 倍となった。これ

より、それぞれのシナリオにおける 1 日当たりの造水量は大人が 1 日に必要とする最低限の飲み水(約 1.5 L/day)の約 1/3 および 1/2 に相当し、TrSS1.0 ならば 1 人当たり 3 基(= 816 BDT)、TrSS1.6 ならば 1 人当たり 2 基(= 796 BDT)必要となる。筆者らのヒアリングによれば、これらは同地域の平均月収(約 4000 BDT)の約 1/5 に相当する。バングラデシュ農村部における既存の家庭用水供給技術(ヒ素除去装置や雨水タンクなど)と比較すれば導入コストは安価なことから、TrSS は現地において導入可能であると考えられる。

1.0 BDT/L は対象地域においてろ過した水の移動販売価格(住民へのヒアリングに基づく)および現地企業が行うろ過した水の配達サービスにおける水価格と同じであり、同地域の普及の目安となる基準水コストとした。またペットボトル(1.0 L)の価格は 20 BDT 程度である。TrSS1.6 の造水コストは 3 年目までに急激に減少し、それ以降は緩やかに減少する。シナリオ 1 において、TrSS1.6 は 6 年目に 1.0 BDT/L を下回り、10 年目に 0.76 BDT/L となった。シナリオ 2 の場合、10 年目の TrSS1.6 の造水コストは 1.1 BDT/L であった。現地での導入および普及を考えると、TrSS の使用期間はシナリオ 1 が望ましいが、天候不順を考慮すればシナリオ 2 も考えられる。その場合、井戸水や地表水との差別化(水質や水源へのアクセス利便性など)を住民に明示することが重要と考えられる。なお、TrSS1.6 の造水量は TrSS1.0 のそれよりも多いものの、造水コストを比較すれば 10 年間の使用でその差は殆どない。そのため、取り扱いの容易さや持ち運び、設置可能敷地面積および使用期間などを考慮して導入することが重要だと考えられる。

(ii)　パイガサ地域に TrSS を実際に導入し、その効果の定量評価

図-5 は全 144 基の TrSS1 基当たりの平均日造水量を示す。曇天日(終日)を除けば 3 月および 4 月の 1 基当たりの平均日造水量は約 330 g であり、また 1 家庭当たり TrSS を 6 基導入したことから 1 家庭当たりの合計造水量は約 1980 g となり、大人 1 人当たり 1 日に必要とする最低限の飲料水(1.5～2.0 L)と同等の造水量であった。

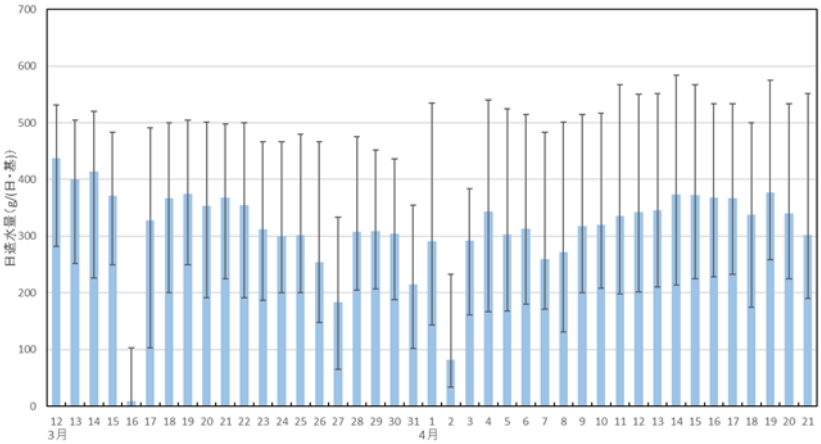

図-5　TrSS1 基当たりの平均日造水量

なお、事前の評価では日積算日射量の増加に伴い日造水量も増加することが予想されたが、現地での調査結果では両者に明確な関係は見られなかった。この理由として、建物や草木による TrSS の日射遮蔽の影響、原水に含まれる懸濁物質などが残留したことによるフィルムの白色化(トラフの日射吸収量の減少)などが考えられる。事実、24 世帯の内、TrSS を屋上に設置し、原水に雨水(最も含まれる懸濁物質が少ない)を使用した家庭の造水量は導入した全 TrSS 144 基のうち、造水量は最も大きかった。ここで周囲に遮蔽物がない場所に設置したことを想定すると、現地の日造水量は日積算日射量に概ね線形的に比例し、日本で得られた実験結果とおおむね一致する。したがって、同地域においても日積算日射量を用いることで概ね日造水量の推定は適用可能であると思われる。

各世帯の代表者にアンケート(対象 : 24 名)を実施した結果、90%以上の利用者が原水に比べて TrSS の水は美味しいと回答し、TrSS の購入を検討すると回答した。また 90%以上の利用者が TrSS を今後も継続して使用したいとの回答を得た。また使用面に関しても、半数以上の世帯が TrSS の使用は難しくないと答えており、現地での普及可能性を示すことができた。

(iii)　熱･水分物質移動理論に基づく TrSS の造水モデルの構築および検証

計算値と実験値の時間造水量 M_{hp} が最大となる時刻に相違はなかったものの、造水開始時刻は 1～2 時間ほど計算値の方が遅く、時間差が生じた。これはトラフ水の水面直上の湿り空気温度を単一要素として取り扱っていること、風などの外的要因により M_{vmax} 到達前に流滴が生じること、などが原因として考えられる。また各温度に関して、T_t および T_w は概ね温度を再現できたものの、T_{ha} および T_c は実験値を過小評価した。これは前述した TrSS 上部と下部における温度の空間的不均一性に起因すると推察される。なお、M_{pd} における実験値と計算値の平均誤差は 2.7%であり、本モデルにより概ね M_{pd} の再現計算は概ね可能であると考えられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 加藤 隼也，寺崎 寛章，梅村 朋弘，高橋 礼，福原 輝幸，長谷川 美香，日下 幸則	４．巻 75(5)
２．論文標題 三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)の造水シミュレーション－バングラデシュ沿岸部パイガサ地域の事例－	５．発行年 2019年
３．雑誌名 土木学会論文集G（環境）	６．最初と最後の頁 I_155-I_163
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2208/jscejer.75.I_155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計6件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 大野 晃裕，寺崎 寛章，加藤 隼也，梅村 朋弘，福原 輝幸，長谷川 美香，日下 幸則
２．発表標題 野外環境下における三角型太陽熱淡水化装置の造水特性
３．学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
４．発表年 2020年

１．発表者名 古市 健二，寺崎 寛章，梅村 朋弘，加藤 隼也，福原 輝幸，長谷川 美香，日下 幸則
２．発表標題 三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)の蒸留過程における大腸菌群検査
３．学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
４．発表年 2020年

１．発表者名 大野 晃裕，寺崎 寛章，加藤 隼也，古市 健二，梅村 朋弘，福原 輝幸，長谷川 美香，日下 幸則
２．発表標題 太陽熱淡水化装置のフレームカバー形状が造水性能に及ぼす影響
３．学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 古市 健二，寺崎 寛章，梅村 朋弘，加藤 隼也，福原 輝幸，長谷川 美香，日下 幸則
２．発表標題 三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)の殺菌性能に関する実験的研究
３．学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 Kenji Furuichi, Hiroaki Terasaki, Tomohiro Umemura, Shunya Kato, Mika Hasegawa, Yukinori Kusaka, Teruyuki Fukuhara, Yoshihiro Ishii
２．発表標題 Removal effect of coliform bacteria in a process of distillation by triangular solar still
３．学会等名 2018 XUT Annual Graduate Conference and International Academic Symposium
４．発表年 2018年

１．発表者名 加藤隼也、寺崎寛章、梅村朋弘、長谷川美香、日下幸則、福原輝幸
２．発表標題 バングラデシュ沿岸漁村部における三角型太陽熱淡水化装置(TrSS)の造水量予測
３．学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
４．発表年 2018年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考