

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05406

研究課題名（和文）太陽熱蒸留システムにおける界面現象の制御

研究課題名（英文）Interface Engineering for Solar Thermal Distillation System

研究代表者

亀谷 雄樹（Kameya, Yuki）

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50734422

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：太陽熱をエネルギー源とした蒸留システムの高性能化を目指し、蒸気を凝縮させるコンデンサの凝縮面と放熱面における界面現象の制御に取り組んだ。親疎水ハイブリッド表面パターンの形成による凝縮水のパッシブ排水制御、および分光エネルギー表面設計に基づく放射冷却の促進について、製作プロセスの確立と機能性の実証を行った。さらに、それらの周辺技術に関する基礎検討も進め、放射冷却コンデンサの基盤技術とその応用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギーと水資源の確保は地球規模での課題であり、水処理プロセスにおいて化石燃料の消費量低減と再生可能エネルギーの導入を促進することは、持続可能な水利用システム構築のために重要である。太陽熱利用の工学的な観点においては、高温場を形成するための集熱技術だけでなく、周囲環境への放熱を制御する技術を確立することで、新たな太陽熱利用システムに向けての展望が開ける。脱炭素社会の実現に近づくための多様なエネルギー利用技術の一つとして、今後さらなる発展が期待される。

研究成果の概要（英文）：Aiming to improve the performance of distillation systems using solar heat as an energy source, we addressed the control of interfacial phenomena at the condenser condensing and heat-dissipating surfaces where vapor condensation takes place. We established the fabrication processes of the proposed functional surfaces and demonstrated their functionalities, in terms of the passive drainage control of condensate through the formation of hydrophilic-hydrophobic hybrid surface patterns and the promotion of radiative cooling based on spectroscopic energy surface design. In addition, some basic studies on their peripheral technologies were carried out. Overall, we showed the potential of the radiative-cooling condenser for advanced solar distillation systems.

研究分野：エネルギー界面工学

キーワード：放射冷却コンデンサ エネルギー輸送界面設計 パッシブ水輸送制御 分光エネルギー輸送制御 機能性マイクロ表面加工 親疎水ハイブリッドパターンニング 高分子膜コーティング

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

エネルギーと水資源の確保は地球規模での課題であり、海水淡水化や蒸留水製造などの水処理プロセスにおいて化石燃料の消費量低減と再生可能エネルギーの導入を促進することは、持続可能な水利用システム構築のために重要である。さらに、太陽エネルギーで自立して駆動する技術が確立できれば、自然災害等によるインフラ機能停止時においても小型分散システムとして広く活用されることが期待できる。

太陽熱で駆動される蒸留システムは、太陽熱で水を蒸発させる蒸発器と、蒸気を凝縮させるコンデンサにて構成される。日射の光熱変換は申請者らの研究 [Kameya & Hanamura, *Solar Energy* 85 (2011) 299] を含め先行研究も多く、近年では蒸発器についての性能向上が報告されている。一方、コンデンサでの凝縮速度は蒸発速度を大きく下回り、コンデンサの性能向上を実現するための基礎技術の構築が求められている。

2. 研究の目的

コンデンサの凝縮面は、凝縮水が連続的に生成し、同時に蒸気の凝縮熱で加熱されるため、背面(放熱面)から周囲環境への放熱を要する。コンデンサ凝縮面・放熱面の性能向上に関する検討は、それぞれの界面における水と熱の輸送現象の観点からアプローチできる。凝縮面と放熱面のそれぞれに関し、日照下においてコンデンサでの凝縮速度を低下させる要因として、凝縮水が凝縮面を覆うことで熱抵抗となり連続的な蒸気の凝縮が妨げられる点、および日射と大気温度上昇により周囲環境への放熱が阻害され凝縮面温度が上昇する点が考えられる。そこで、本研究では、コンデンサの凝縮面と放熱面の双方において機能的な界面の設計を行うことを提案し、以下の内容について取り組む(図1)。

(A) 親疎水ハイブリッド表面の創製による凝縮水の微小水滴形成とパッシブ排水

凝縮水が滞留すると蒸気の凝縮面への接触が阻害されるため、凝縮水を滴状に形成させ速やかに凝縮面上から排出することが望ましい。そこで、親疎水ハイブリッド表面の形成により凝縮形態を制御し、かつ凝縮水を導く排水路の形成により水輸送を制御する。

(B) 光学的な表面設計に基づく放射冷却機能による周囲環境への放熱促進

可視・近赤外光を中心とする太陽光を反射し、大気の窓の波長域(8~13 μm)を中心とした赤外光を熱放射するよう放熱面の光学特性を設計することで放射冷却機能を付与し、空気其自然対流による徐熱だけでは達成できない放熱を実現する。

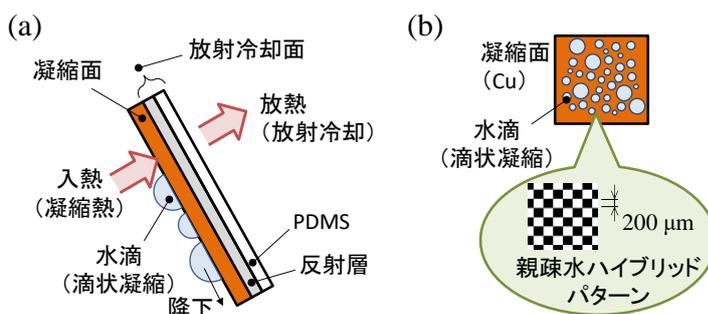


図1. (a) 放射冷却コンデンサ概要図 (b) 凝縮面における水輸送制御

3. 研究の方法

(1) 凝縮面の製作プロセス構築および排水機能の評価

凝縮水滴のサイズ制御のため、サンドブラスト用マスクに 200~500 μm の周期的パターンを作製し、銅板表面へのサンドブラストと疎水性コーティング剤の塗布により、マスクでデザインした親疎水パターンを得る。製作した凝縮面に水蒸気を吹き付け、滴状凝縮と排水の様子を観察し、界面制御による効果の検証と、排水路形状などの改良を行う。さらに性能の定量評価のため、温度・圧力の条件を制御した環境で、凝縮面における水回収速度の計測が可能なチャンバーを作製する。凝縮水の凝縮形態と排水の様子を観察できる計測系を構築する。太陽熱蒸留システムの蒸発器から供給される蒸気を想定して温度・圧力などの計測条件を設定し、計測を実施する。また、凝縮面に生成する水滴の様子を撮影し、水滴径のサイズ分布を画像解析から得る。実機にお

ける周囲環境条件の変化に対応できるよう、系統的なデータをまとめていく。

(2) 放熱面の製作プロセス構築および分光エネルギー輸送特性の評価

アルミ板を鏡面研磨して可視光の高い反射率を維持した上で、大気窓を中心とする赤外域において高い放射率を有する高分子素材であるPDMSをコーティングし、放射冷却機能を創出する。可視・近赤外・赤外域にわたる分光光度計測により表面の反射率スペクトルを計測することにより、分光エネルギー輸送についての特性を評価する。

(3) 蒸留システムにおけるコンデンサとしての性能評価、および設計指針の提示

蒸留システムへの適用を検討するため、放射冷却機能を備えたコンデンサを製作する。屋外の日照環境下で試験を実施することを想定した実験装置を準備し、湿り空気を供給することでコンデンサ性能を評価する。さらに、一連の実験により得られた結果をまとめ、周囲環境条件に応じて十分な性能を得るためのコンデンサおよび蒸留システムに関する設計指針を提示する。

4. 研究成果

(1) 凝縮面

金属面の親疎水ハイブリッドパターン形成により、凝縮形態および排水の制御が実現されることを示した(図2)。さらに、高分子素材による膜形成を用いて非金属面上に形成された高分子膜ハイブリッドパターンにおいても同様の効果が得られることを実証した。

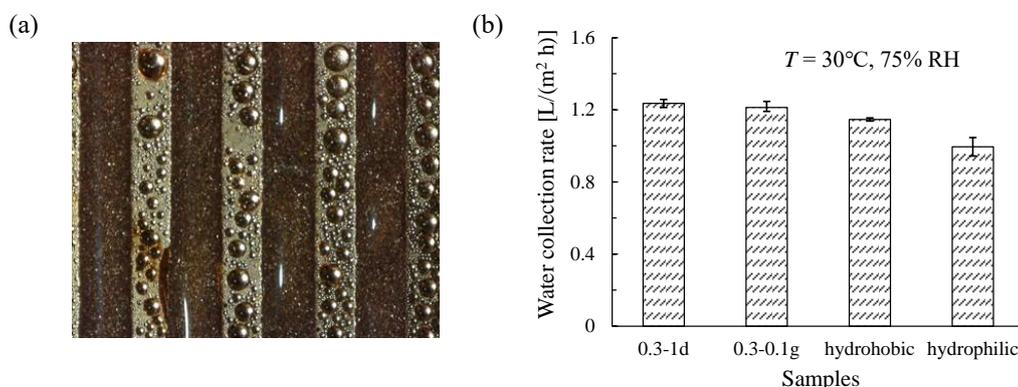


図2. (a) 親疎水ハイブリッド表面における凝縮水排水の様子 (b) 表面パターンごとの水回収速度

(2) 放射冷却

放射冷却コンデンサは、蒸留システムの設置環境や構成に応じて、要求される機能や適する形態が考えられる。そのため、当初の計画としていた太陽光を金属面により鏡面反射させる方法に加え、光散乱性セラミクス粒子の放射層内分散により拡散反射させる方法、さらに可視光を透過させシステム内部で熱利用する方法、のそれぞれについて放射冷却面を試作して評価を行った。各機能面の作製プロセスを構築するとともに分光エネルギー輸送特性を明らかにした。

(3) 放射冷却コンデンサ

日照下において放射冷却コンデンサによる凝縮水回収を行う試験を実施し、その性能を評価した。取得した温度データに加えて日射量や風速などの気象条件を考慮し、放射冷却による放熱量を推算することにより、本研究で作製した放射冷却コンデンサの放熱機能を実証した。

(4) 周辺技術の基礎検討

凝縮水回収を固体表面上で制御する応用的な手法として、親水性ナノ粒子コーティングを用いたパッシブな水輸送の基礎技術を構築した。さらに、放射冷却コンデンサが屋外の低温環境にさらされた場合に予期される着氷の問題に関し、放射冷却コーティング材料へのマイクロ表面パターン加工により水滴の凝固遅延の効果が得られることを明らかにした。

以上の検討により、本研究で提案した太陽熱蒸留システムのための放射冷却コンデンサについて、その応用に必要な各種の要素技術を提示することができた。また、各技術のさらなる展開へ向けた指針を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuki Kameya, Takahiro Yamada	4. 巻 655
2. 論文標題 Titanium oxide nanoparticle coating of PMMA open flow channels for spontaneous water transport	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	6. 最初と最後の頁 130265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.colsurfa.2022.130265	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 -

1. 著者名 Yuki Kameya, Yuki Takada	4. 巻 14
2. 論文標題 Prolonged water freezing on a superhydrophobic micropillar polydimethylsiloxane film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Results in Materials	6. 最初と最後の頁 100274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rinma.2022.100274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kameya Yuki, Osonoe Ryota, Anjo Yuto	4. 巻 Vol. 13
2. 論文標題 Hydrophilic coating of copper particle monolayer wicks for enhanced passive water transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13123294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 亀谷・他2名
2. 発表標題 ソーラー蒸留システムのための親疎水ハイブリッドCu表面を用いた凝縮水回収の検討
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀谷・他2名
2. 発表標題 ソーラー蒸留システムのための親疎水ハイブリッド金属表面上における水輸送特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------