

「防災用・観光用自然エネルギーシステムの構築」

早稲田大学創造理工学部総合機械工学科 准教授（博士・工学）

梅津 信二郎

1. はじめに

本研究では、防災用・観光用に利用可能な自然エネルギーシステムの構築を目指す。現在図 1 に示すようなデザイン性に優れた太陽熱システムを開発している。フレネルレンズを周りに設置し、中央に黒い集光部を設置することによって、太陽の高さに依存せず、安定して、太陽熱を集めることを実現している。太陽熱の利用と併用して、太陽光を利用することで、防災時のような非常事態にも対応可能な自然エネルギーシステムの構築が可能になると考えた。そこで、本研究では、図 2 に示すような太陽熱と太陽光をハイブリッドに利用するシステムの構築を行う。そして、色素増感型太陽電池に関する研究を推進することで、さらなる高効率化を目指す。

2. 太陽光・太陽熱ハイブリッドシステム

本章では、太陽熱と太陽光をハイブリッドに利用するシステムの試作を行う。さらには、太陽熱と太陽光の割合を調整できるようなシステムを開発すれば、季節ごとの需要に応じたエネルギーの回収が可能になる。そこで、熱エネルギーを回収する液体に加える墨汁の量を調整することで、太陽熱と太陽光の割合の調整を目指す。

2. 1. 実験装置の開発

太陽熱エネルギーを回収し、蓄える媒体として、水を使用する。冬季に災害が発生した場合、温水は利用価値が高い。さらには、他の媒体を介すると、変換ロスを考慮する必要があると考えたからである。また、空気より比熱が高いため、集光部が比較的高温になりにくいので、安全面も優れていると考えている。図 3 に実験装置の模式図と実際の写真を示す。シリコン型または色素増感型太陽電池の真上に、熱エネルギーを回収するための水タンクを設置し、水 6L を入れた。水タンクの上に設置したフレネルレンズによって太陽光を集光した。日の出から日の入りまでの発電量と温度変化をモニタリングした。発電量は安川商事社の MPPT 電力計で測定し、電力測定機に接続されたデータロガーによって 5 分毎に記録した。熱エネルギーは、KN ラボラトリーズ社のスーパーサーモクロンという温度データロガーを防水した上で水タンク内に設置し、5 分毎の水温を測定した。また、気象観測に用いられている百葉箱の方式に則り、直射日光が当たらず風通しが良い、屋外の日陰

の気温を測定した。

水タンク内に墨汁を混合した状態で、太陽熱・太陽光それぞれの発電量を調査することで、太陽熱と太陽光のエネルギーの割合を調整できるかどうかを検証する。

2. 2. 実験結果

太陽熱エネルギーは温度データロガーを利用して調査した。水温が上昇した分だけ熱エネルギーを得たことになるので、実験終了時の水温と実験開始時の水温の差 ΔT に着目して、式(1)により、 E_T を算出できる。

$$E_T = \frac{\Delta T \cdot C \cdot m}{3600} \quad (1)$$

ただし、 E_T は水温上昇に伴う熱エネルギー、 C は比熱、 m は質量とする。

しかし、これでは熱のロスを考えていないので、熱のロスの見積もりを行う必要がある。ニュートンの冷却則から、液体や液体の媒質中におかれた高温の物体から媒質に熱が伝わる速度はその物体と媒質の温度差に比例するということがわかっている。それは次式で表される。

$$\frac{dQ}{dt} = -r(T - T_s) \quad (2)$$

ただし、 T は水タンク温度、 T_s は屋外の気温とする。

この冷却定数 r を実験的に求める。実験装置の水タンクにお湯をいれ、日没後の水温の変化を測定した。この実験を日没後に行うことで、水が得る太陽熱エネルギーがないので、水タンクから外に出ていく熱のみを評価できる。この実験結果から、冷却定数 r を推定した。 r は約 0.0422 となった。この値から、各計測間隔の熱のロスを求めた。計測間隔は 5 分なので、5 分毎に T と T_s が変わるが、水タンクのエネルギーロスの合計値 Q_{Loss} は

$$Q_{Loss} = \sum 0.0422 * 5(T - T_s) \quad (3)$$

となる。太陽熱エネルギーは E_T と Q_{Loss} を加えた値となる。

冬の環境（気温が $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ ）において、シリコン型の太陽電池、または色素増感型太陽電池を対象に、墨汁の混合量を変化させて、1日の発生エネルギーを調べた結果を図4に示す。市販のシリコン型と色素増感型の太陽電池を用いて実験を行ったが、シリコン型の効率が高くなった。いっぽう、トータルの発電エネルギーに関しては、シリコン型太陽電池を用いるよりも、色素増感型太陽電池を用いる方が高くなった。シリコン型太陽電池の場合、セルを仕切っている白いフレーム部が増えるため、太陽電池表面の温度が低くなるのが原因であると考えている。

当然のことながら、墨汁を含まない状態で、太陽光発電の発電量は最も高く、墨汁の量が増えるにつれ、太陽光発電は機能しなくなった。トータルの発生エネルギーに関しては、

水 6L に対して墨汁の量を 0.2mL 加えた場合に最も高くなった。墨汁が存在することによって、水タンク内に熱を保持しやすくなるが、墨汁の量が 0.2mL を超えると、水タンク内部にしっかりと太陽光が入ってこないため、水タンクを満足に温めることができなくなった。従って、水 6L に対して、墨汁量が 0~0.2mL の場合、発生エネルギーに対する太陽熱と太陽光の割合を調整可能であることを実証した。墨汁を用いることによって、水温が著しく上昇し、火災が起きる危険性があると考えたため、本実験は気温が低い冬場のみに実施した。実際に温める必要があるのは、気温が低い環境であり、有効性を示せたと考えている。いっぽう、検証はしていないが、夏場のような冷却が望まれる環境においては、太陽光発電により、冷却機器を運転することで対応可能であると考えている。

3. 色素増感型太陽電池の改良

前章にて、シリコン型太陽電池または色素増感型太陽電池と太陽熱システムをハイブリッドに組み合わせることが可能なことを実証した。本研究では、防災時の利用だけでなく、観光にも利用したいと考えている。従って、装飾性の高い太陽電池が好ましいと考えている。色素増感型太陽電池の場合、効率の低下を招くが、使用する色素をドロップオンデマンドにプリントすることによって装飾性の高さを実現できる。いっぽう、色素増感型太陽電池は低効率なことが知られているので、高効率化を図ることで、問題解決に向けた重要な知見を得ることに繋がると考える。さらに、チタニア層をポーラス状にすることによって、変換効率が上昇することが報告されている。申請者らは、静電インクジェット技術を利用し、塗布条件を調整することのみによって、ポーラス状のチタニア層を成膜する。

3. 1. 静電インクジェットによるポーラスチタニア層の成膜

本実験では薄膜を成膜するため、図 5 のような装置を使用する。テルモ社製注射器シリンジ (10 mL) の先端にサンエイテック社の導電性キャピラリーチューブを取り付け、チタニアペーストを 2.0 ml まで満たした。このノズルに高電圧を印加することで、静電インクジェットによって、チタニアペーストを吐出する。ノズル先端部とフッ素ドープ酸化スズ (FTO) 電極間に穴あき平板電極 (外形 100×145 mm, 穴径 50 mm) を設置することで、穴あき平板電極から FTO 電極までの空隙 Gap を変化させても、ノズル先端の電界を一定に保つことができる。チタニアペーストは以下のプロセスで作製した。P25 というチタニア粒子 1.85g と蒸留水 2.0 ml をスクリュ管に入れた。さらに、アセチルアセトン 0.2 ml、トリトン-X 30 % 1.0 ml、ポリエチレングリコール 0.185 g の順に混合し、攪拌機を用いて攪拌・脱泡することで作製した。また、同様に溶媒を同量の硝酸、エタノールに変更してペーストを作製した。

静電インクジェット法ではシリンジ内の液体と基板との間に高電圧を印加することによって、微小な液滴がノズル先端から吐出する。印加電圧の調整だけでなく、ノズル先端部から FTO 電極までの Gap の調整によっても、ノズル先端の電界が変わるため、液滴の吐出状態をコントロールできる。チタニアペーストの粘度に依存して、綺麗に塗布できる最小の印加電圧が変わる。Gap を 30 mm とした際の最小の印加電圧は、蒸留水の場合 8.5 kV、エタノールの場合 7.0 kV、硝酸の場合 7.5 kV であった。

ソーラーシミュレーターで測定するには、6 mm 角の薄膜を成膜する必要があるので、6 mm 角のステンレス製マスクを FTO 電極上にセットし、チタニア層の成膜を行った。作製した薄膜断面の SEM 画像を図 6 に示す。溶媒に蒸留水を用いた場合、ポーラスリッチな薄膜が形成された。溶媒にエタノールを用いた場合、蒸留水の場合と同様にポーラスリッチな薄膜が形成されたが、チタニア粒子の球状凝集体が多く形成された。硝酸を用いた場合では水や硝酸の場合とは異なる形態の薄膜が得られた。

高電圧を印加して吐出されるチタニアペーストは帯電している。飛行中に溶媒が蒸発するため、液滴は過帯電状態になる。小さな液滴に分裂することで表面積を増やし、帯電状態の安定化を図る。この現象が繰り返し発生する。この現象をエバポレーションという。電極間の距離が長いほど、このエバポレーションプロセスによって、極めて小さな液滴が形成される。さらに長くすることによって、溶媒が完全に蒸発したものが対象物に着弾する。このエバポレーションプロセスによって、図 6 に示すようなポーラスリッチなチタニア層が成膜されると考えている。また、図 6 では、揮発性の異なる溶媒を使用することでエバポレーションの影響に差が出たため、各薄膜の形態が変化したと考えている。

なお、ソリッドなチタニア層を有する色素増感型太陽電池よりも、本手法で作製したポーラスリッチなチタニア層を有する色素増感型太陽電池の方が、発電に寄与する表面積が増加することから、変換効率が高いことを確認している。

3. 2. ナノロッド状チタニアペーストを用いたチタニア薄膜

図 5 の実験装置を用いて、ナノロッド状チタニアペーストのパターニングを行った。ナノロッド状チタニア粒子は 300×20 nm 形状である。ナノロッド状チタニア粒子を用いる理由は、図 7 に示すように、極力垂直に配置することができれば、チタニア粒子間の接触抵抗を減らすことができ、高効率化が図れるのではないかと考えたからである。ナノロッド状チタニアペーストは、ナノロッド状アナターゼチタニアを 1.85g、硝酸 2.0ml をスクリー管に入れた上で、アセチルアセトン 0.2 ml、トリトン-X 30% 1.0 ml、ポリエチレングリコール 0.185 g の順に混合し、攪拌機を用いて攪拌・脱泡することで、作製した。

静電インクジェット法によって作製した膜断面の SEM 画像を図 8 に示す。Gap10 mm

で成膜した場合、飛翔する液滴の溶媒が蒸発しきっていないため、マットなチタニア層が形成された。いっぽう、Gap30 mm で成膜した場合、溶媒が完全に蒸発するため、ポーラスリッチなチタニア層が形成された。図 6(a)と比較して、さらにポーラスの割合が増えていることが確認できた。全てのナノロッド状チタニア粒子が垂直に配列したわけではないが、図 7 に示すように、ナノロッド状チタニア粒子の接点が減り、接触抵抗を減らすことに繋がると考えている。今後、静電植毛の原理に基づき、FTO 電極にも電圧を印加することで、より垂直にナノロッド状チタニア粒子を配列することに挑戦していく。

4. おわりに

本研究では、防災用・観光用に利用可能な自然エネルギーシステムの構築を目指して、太陽光（シリコン型、色素増感型）と太陽熱をハイブリッドに利用するシステムの構築を行った。太陽熱を蓄える水タンクに入れる墨汁の濃度を調整することによって、太陽光と太陽熱の寄与度を変えることが可能なことを実証した。本試作機においては、水 6L に対して、墨汁 0.2ml を入れることで、トータルの電力が最大になった。

さらに、観光用の観点から、装飾性が高い色素増感型太陽電池の高効率化が重要と考えた。チタニア層をポーラスリッチにすることで、変換効率に寄与する表面積が増えるため、変換効率が上昇した。溶媒を変えることやチタニア粒子をナノロッド状にすることで、ポーラス割合を変更可能なことを示した。

以上

文中の図を以下に示す。

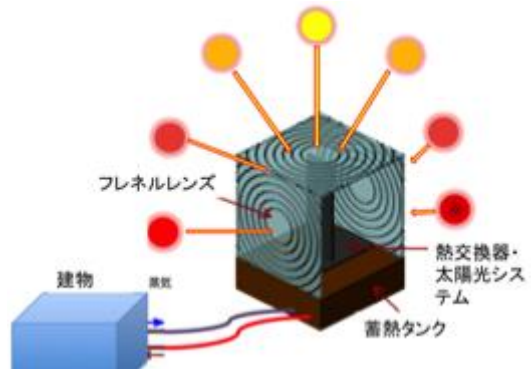


図1 ポリゴン・サンハウス 図2 太陽光・太陽熱ハイブリッドシステム

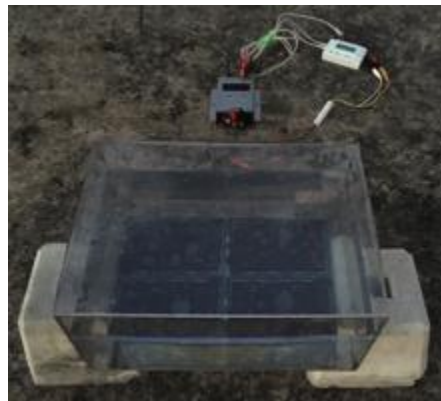
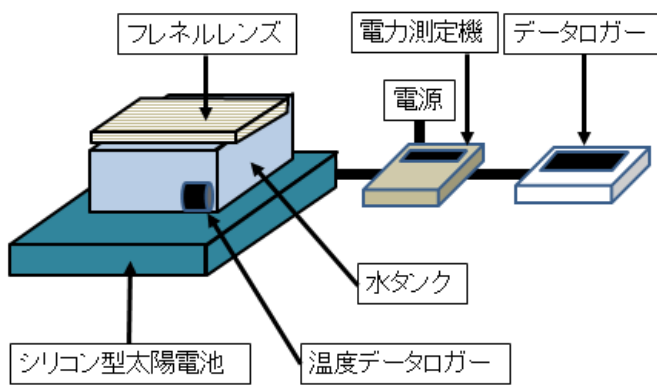


図3 実験装置の模式図と写真

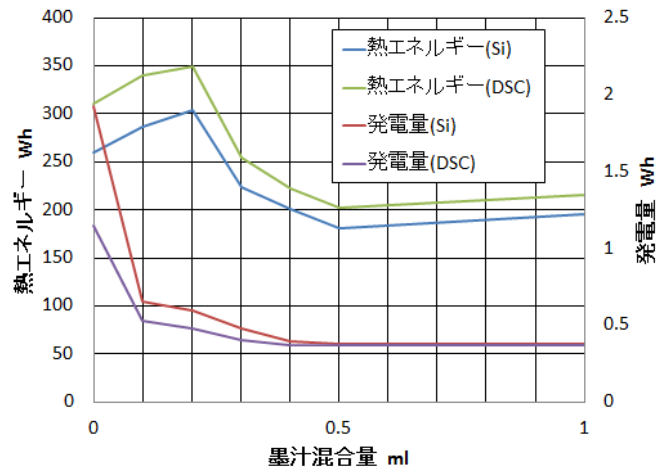


図4 墨汁混合量の調整による発生するエネルギーの変化(シリコン型太陽電池と色素増感型太陽電池を使用)

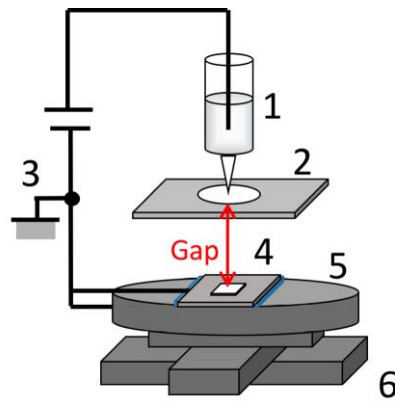
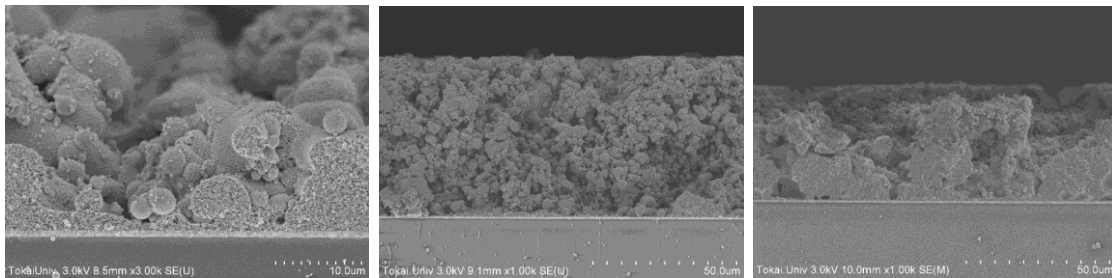


図5 実験装置図(1: シリンジ、2: 穴あき平板電極、3: 高電圧電源、4: ステンレスマスクを載せた FTO 電極、5: 平板電極、6: xy ステージ)



(a) H₂O

(b) Ethanol

(c) HNO₃

図6 チタニア層の断面 SEM 写真

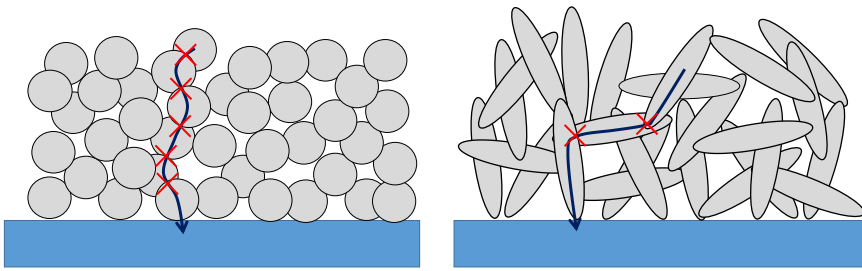
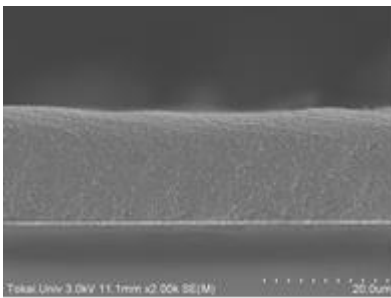
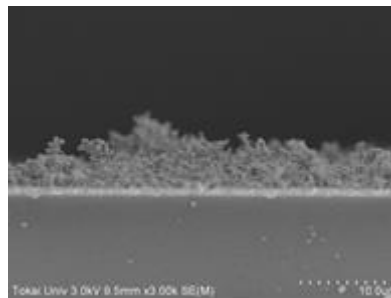


図 7 チタニア層内の電流の流れの模式図



(a) Gap 10 mm



(b) Gap 30 mm

図 8 ナノロッドチタニア層の断面 SEM 写真