

空気中の水分を吸着分離する太陽熱造水システムの研究

脱着・凝縮ユニットによる屋外実験の結果

Study of Solar Fresh Water System by Adsorption-Separation of Water Vapor in Air

Result of outdoor experiment by use of integrated unit for desorption and condensation

関 太 輔 *¹

Daisuke SEKI

棚 谷 吉 郎 *²

Yoshiro TOCHITANI

Abstract

An outdoor experimental study is carried out to obtain fresh water by use of adsorption to take water vapor out from moist air. Absorbed water vapor is detached from absorbent by use of solar thermal energy, and is condensed by use of air-cooling condenser. Silica gel is used as absorbent in this study. The insolation, the condensate, the temperatures in the silica gel packed bed and condenser are measured from the sunrise to the sunset. As a result, possibility of water production from moist air by use of desorption is shown. Obtained maximum mass of water is $1.19 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ under condition of $36.6 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ in solar energy.

キーワード：太陽熱，造水，吸着，吸着剤，脱着，シリカゲル。

Key Words：Solar Thermal Energy, Fresh Water, Adsorption, Adsorbent, Desorption, Silica Gel.

1. 緒論

砂漠などの乾燥地帯や離島における水の確保は、そこで生活する人々にとって切実な問題であり、雨水や地下水、河川水が水源とされることが多い。海水が得られる場合は脱塩による淡水化が可能であるが、沿岸地域とその周辺などに限られる。近年、河川や井戸の水、雨水については、季節による変動や灌漑農業による水量の減少、塩害や農薬による水質の悪化などの問題が指摘されている。

これらの原水から淡水を得る方法には、蒸留法や膜法がある。自然エネルギーの利用を前提にすると、蒸留法が主流であり、田中ら¹⁾、橋詰ら²⁾の報告をはじめ、数多くの研究が行われている。また、その性能向上を目指した研究例³⁾もある。しかしながら、従来の造水システムは上述のような原水の存在が前提であり、とくに乾燥地域においては、この種の原水を必要としない造水法が望まれよう。

本研究は、原水を得ることが困難な地域における造水を、自然エネルギーを利用して行うことを目指して開始したものである。種々検討の結果、湿り空気中の水蒸気に着目した。具体的には、空気中の水分を吸着剤に吸着し、その水分を脱着することにより水を得る。Alayli⁴⁾らは、このタイプの造水システムの提案、実験研究を行っており、夜間に水分を吸着剤に吸着させ、昼間に太陽光によって脱着さ

せることにより 1 m^2 あたり 1 l の水を得たと報告している。Abualhamayel and Gandhidasan⁵⁾は吸収を利用して同様の研究を行い、その性能を確認している。Kabeel⁶⁾は、このタイプの造水システムの性能について、解析と実験の両方による評価を試みて良好な一致をみたこと、ガラスカバーの面積を基準として、最大 $1.2 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ の淡水が得られたことを報告している。一方、国内においては、中村ら⁷⁾が吸・脱着を利用する造水方法に言及しているが、自然エネルギーを利用した装置の研究、試作、実験等は行っていないようである。また、このタイプの造水システムに関連して、吸着剤等の研究も行われている^{8)~10)}。

この造水システムは、Alayli⁴⁾らが述べているように、夜間の気温低下による相対湿度の上昇を利用した吸着過程、昼間の太陽熱を利用した脱着過程と凝縮器による水蒸気の凝縮過程の3過程から構成するのが効果的である。吸着と脱着に昼夜の温度差を利用しており、温度スウィング法(TSA)とよばれる方法である。システムの運転に必要なエネルギーは、湿り空気を吸着剤充填層へ送って吸着させる際の送風機用電力のみであり、その消費量は大きいものではない。この電力量は、太陽電池と蓄電池でまかない得る程度と考えられ、システムは自然エネルギーのみで運転可能と考えられる。このことから、電力設備などが無い地域における利用も十分期待できよう。

本報告の目的は、上記のシステム研究の第一段階として、上記3過程のうち、ほぼ飽和吸着状態にあるシリカゲルから太陽熱を利用して水蒸気を取り出す脱着過程と、空冷凝縮器による水蒸気の凝縮過程とを組み合わせた造水ユニットにより、システムの可能性と性能を、屋外実験により明らかにすることである。

*1 金沢工業大学大学院学生。現在、(株)大気社

*2 金沢工業大学工学部教授

(〒921-9501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

e-mail: totitani@neptune.kanazawa-it.ac.jp

(原稿受付：2008年4月28日)

本システムでは、原理上吸着剤の使用が不可欠である。吸着剤それ自体や、吸着剤が大気中の有害物質等を吸着することによる造水の水質低下の可能性を否定できないが、本報告では造水のみに着目することとし、水質および水質の改善等については取り扱わない。また、吸着剤の繰り返し使用に対する劣化についても扱っていない。

2. 実験

2.1 太陽エネルギーによる加熱方法の検討

本研究で扱う造水法では、吸着剤から水分を脱着する過程で加熱が必要であり、この加熱に太陽熱を利用する。吸着剤の加熱法としては、次の二通りが考えられる。一つは吸着剤に直接太陽光を当てる方法（以下、直接加熱とよぶ）であり、他の一つは太陽光を集熱板で受けた後、その熱で吸着剤を加熱する方法（以下、間接加熱とよぶ）である。

直接加熱の場合、吸着剤充填層は太陽に向って開放された構造になる。この結果、凝縮面としては、basin型太陽熱蒸留器のようにガラスなどの透明カバーを利用するか、さもなければ充填層下部などに設けた凝縮面へ水蒸気を送る必要がある。

充填層上部に設けた透明カバー内面で凝縮させる方法では構造上、凝縮液が吸着剤充填層に落下する可能性がある。吸着剤が水にぬれると、発生する吸着熱のためにそれ自体が破壊する可能性があり、造水性能の維持、継続的使用に支障を招く恐れがある。加えて、冷却性能を向上させるための拡大伝熱面をカバー上に設けることは困難であり、凝縮性能の向上方法が限定される。利点としては、装置の厚みを薄くできること、低温の透明カバーが上方に、高温の吸着剤が下方になることから、水蒸気の輸送に自然対流を利用できる可能性がある。しかし、この対流は、同時に熱損失をも増加させる。一方、凝縮面を充填層下部に設け、水蒸気の流路を確保して送気する方法では、上記とは逆に、安定した高温水蒸気流を下方に向かって起こす必要があり、何らかの送気装置の設置が望まれる。また、このための流路スペース分だけ受光面積が減少し、装置の単位面積あたりの収量を減少させる要因になる。

他方、間接加熱には次のような利点、欠点が考えられる。集熱板を上部に、その直下に吸着剤充填層を設け、その下に少し離して凝縮板を配置すると、集熱板から下方に向かって温度が低下するので自然対流は発生しない。蒸気移動の駆動力は蒸気圧差のみとなるものの、熱損失は小さくなる。集熱板の存在により、凝縮面が太陽光で直接加熱されることはなく、また凝縮面の裏面に拡大伝熱面を設けることにより冷却効果を高めることが可能である。しかし、吸着剤が凝縮面上に落下することを防ぐ構造が必要であると同時に、その構造は蒸気を通過させる隙間をもたなければならない。当然のことながら、集熱面とその上部に配置する透明カバーとの間の熱損失が小さくなるように設計する必要がある。

造水システムとしてみた場合、本報告では扱っていないが、夜間の吸着過程が重要である。吸着の進行による吸着熱の発生はあるものの、直接加熱では夜間の放射冷却による結露の可能性が高い。一方、間接加熱では、放射冷却は間接的であり、吸着熱の発生とも相俟って適切な温度条件を維持でき、結露の可能性は低いと考えられる。

以上の検討の結果、今回は間接加熱法を採用することにした。

2.2 実験装置

吸着剤の選定は、本システムの性能を左右する。実験に用いる吸着剤として、竹炭やシリカゲルなどを検討した。竹炭は水蒸気の吸着に適した特性をもつと判断でき¹¹⁾、また無害であるなどの長所をもつが、形状、充填や入手の容易さ、低湿度における吸着特性などから判断して、シリカゲルを採用した。

前節の検討をもとに製作した実験装置の概略を Fig.1 に示す。装置は、シリカゲル中の水蒸気を太陽熱によって脱着し、空冷による凝縮面で凝縮させて、得られた水を装置から取り出すようにした脱着・凝縮ユニットと、測定系に分かれる。脱着・凝縮ユニットの詳細断面図を Fig.2 に示す。

日射は厚さ 3 mm のガラスカバーを透過した後、厚さ 3 mm の空気層を通過して、面積 720 mm×720 mm の集熱面で集熱される。この集熱面は、図のように水平方向に並べられた 36 本のアルミニウムチャンネル (20 mm×20 mm×2 mm, 長さ 720 mm) の外側底面を黒色ペイント (カンペ

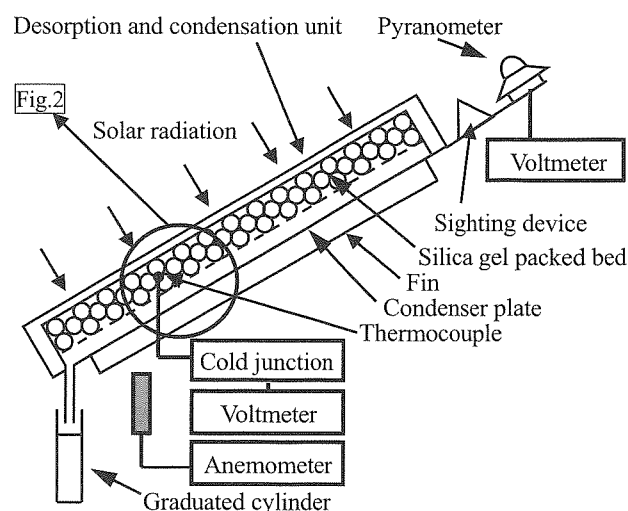
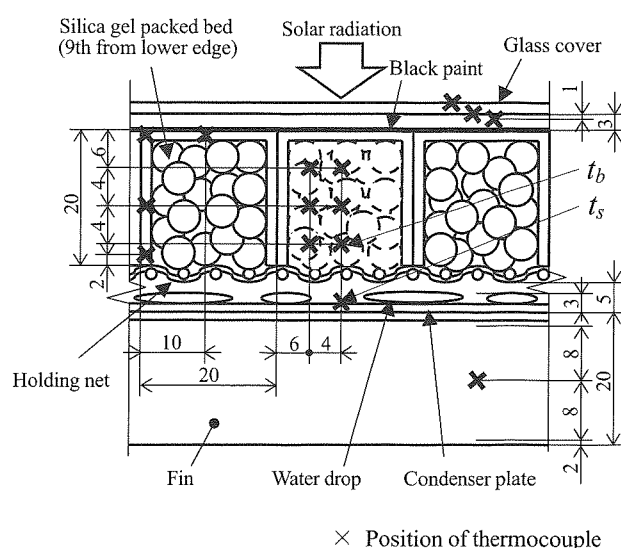


Fig.1 Experimental apparatus.



× Position of thermocouple

Fig.2 Cross-sectional view of desorption and condensation unit.

ハビオ ヒットスプレー、つや消しブラック)で塗装したものである。チャンネルの内側(下側)はシリカゲル充填層になっており、実験開始時に、ほぼ飽和吸着状態のシリカゲルが充填される。本システムは砂漠地帯などにおける利用をも想定していることから、比較的低い相対湿度でも良好な吸着特性をもつ A 型シリカゲル(豊田化工, AMIX6 UP)を採用した。また、その径は比較的大きい約 6 メッシュとした。その理由は、吸着過程で湿り空気を通す際の圧力損失を小さくできること、脱着過程において水蒸気流路を確保できることの二点である。

チャンネル開口部に取り付けられている網(ステンレス製、線径 0.2 mm, 目開き 1.24 mm)は、シリカゲルを充填層内に保持し、凝縮面に落下するのを防止するためのものである。網から約 5 mm 離れて、厚さ 1 mm のアルミニウム板による凝縮板が設けられている。この間隔は、シリカゲルが凝縮面上にできる水滴と接触しない寸法で、できる限り小さい値とした。凝縮板の背面には長さ 720 mm のアルミニウムアングル(20 mm×20 mm×2 mm)が装置に向かって縦方向に密に設置されており、大気による空冷用フィンとして機能している。フィンを縦方向に配置することで無風時にも自然対流熱伝達を利用できるよう配慮した。拡大伝熱面積は 1.50 m² である。カバーガラスと集熱面からなる受光・受熱部と、空冷フィンを含む放熱部以外の部分は、厚さ 20 mm の断熱材で覆われている。

充填層内の熱電対は、Fig.2 中の×印で示される位置に配置した場合と等価となるように、複数の充填層に分けて設置した。一つの充填層に熱電対を集中的に配置するとシリカゲルの充填状態が他の充填層と異なり、測定値に影響することが懸念されたことによる。また、熱電対は、装置側壁からの放熱の影響を極力受けないように下部から 9 番目以上の充填層に、側面から約 200 mm 離して設置した。このようにすることで、異なる充填層に設置した熱電対の測定値を合わせてひとつの充填層内の温度分布として扱うことができるかと判断した。したがって、充填層ごとの温度分布のばらつきは無視している。

充填層内には温度分布の発生が予想される。充填層内の代表温度 t_b としては、Fig.2 に示すように、充填層中央下部

の熱電対で検出した値を採用した。この位置は温度上昇が最も遅れる点である。また、凝縮に対する温度条件は、Fig.2 に示すように、 t_b 用熱電対のほぼ直下の凝縮面に設けた熱電対で測定した温度 t_s で代表させた。充填層内および装置内の各点の温度は、それぞれ $\phi 0.1$ mm, $\phi 0.3$ mm の検定済み T 型熱電対により検出し、冷接点を介してデジタル電圧計(Agilent Technology, 34401A)により起電力を測定して温度に換算した。

日射量は全天日射計(英弘精機, MS-802)で測定した。また、気温 t_a に加えて、参考までに熱線風速計(カノマックス, 6141)により風速測定を行った。すべての測定は 15 分間隔で行い、凝縮水は 15 分間隔で集めて、その体積をメスシリンダで測定した。実験に使用したシリカゲルは、測定前に以下の手順で準備した。乾燥させたシリカゲル 5.33 $\pm$ 0.15 kg を内径 44 mm の円管 5 本に分けて充填し、温度 25 $\pm$ 0.4 $^{\circ}$ C, 相対湿度 70 $\pm$ 3 % の湿り空気を流量 120 l/min で 9 時間送気して吸着させ、ほぼ飽和状態とした。吸着後のシリカゲルの質量は 7.15 $\pm$ 0.20 kg であった。充填層へのシリカゲルの充填は、屋外実験の直前に行った。

装置には照準器をとりつけ、太陽を追尾する際の方位および角度の調節に使用した。実験は、受光面の方位および角度を 15 分間隔で太陽方向に向けて調節する太陽追尾測定(以下、追尾測定とよぶ)と、方位角 180 $^{\circ}$ (南向き)、対地角 30 $^{\circ}$ に静置した固定方位での測定(以下、非追尾測定とよぶ)の二種類とした。測定はほぼ日の出と共に開始し、日没までとした。実験は、本学の野々市キャンパスの建屋屋上(3 階建て建屋の屋上に相当)で行った。測定場所における装置の全体写真を Fig.3 に示す。

3. 実験結果と検討

3.1 追尾測定

一例として、2004 年 8 月 27 日に行った測定結果をとりあげる。測定開始後の時刻に対する全天日射量 q [W/m²] と造水量 m [g/(m²·min)] の変化を Fig.4 a) に、15 分ごとの造水効率 η [-] と、 t_b , t_s , t_a の変化を同図 b) に示す。 η は次式で定義する。

$$\eta = \frac{L \cdot m \cdot \Delta \tau}{60 \cdot q \cdot \Delta \tau} \quad (1)$$

ここに、 L は凝縮潜熱[J/g]であり、 $\Delta \tau$ は測定の時間間隔で 15 min である。

実験上、時々刻々の m を測定することは困難である。本研究では、上述のように 15 min 間隔で測定したが、得られた m はかなりばらついた。その原因は、凝縮面上における水蒸気の凝縮が滴状凝縮であることによると考えられる。滴状凝縮では、流下を始める水滴の大きさと数が時間、凝縮面位置によりばらつくため、凝縮面上の流下は間欠的となり、収集される水量が測定ごとに大きく変化する。この結果、 m がばらつき、したがって η にも影響が及ぶ。以上のことから、 m , η については 15 min ごとの測定値そのものではなく、その前後の値を含めた三点平均値を採用することにした。Fig.4 以降の各図におけるこれらの値は、この平均値を使用している。

この日は晴天であり、太陽を追尾していることもあって q は 7 時ころまで急激に上昇している。その後、10 時ころまで緩やかに増加し、14 時ころまでほぼ一定の値をとった

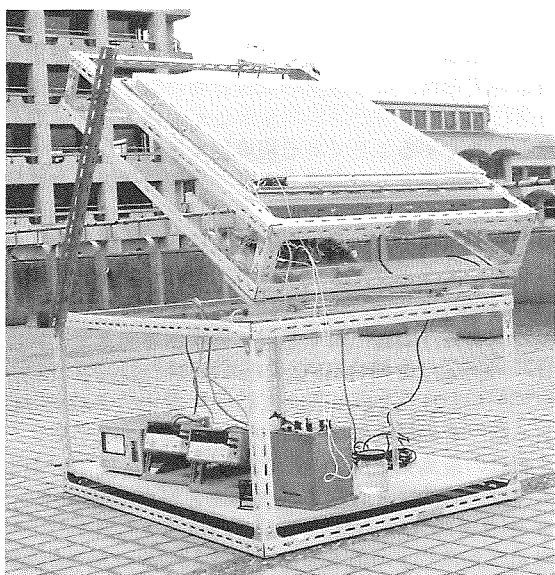
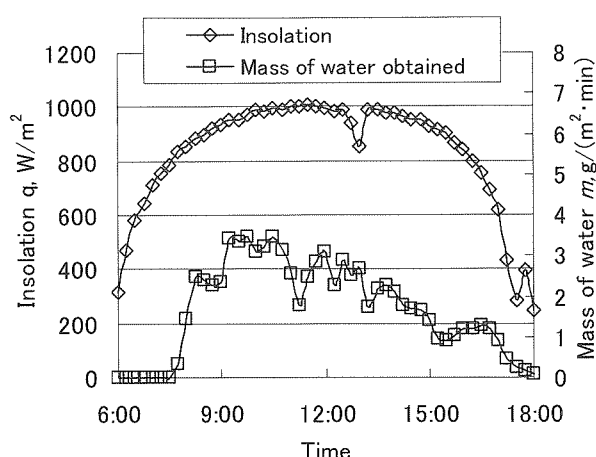
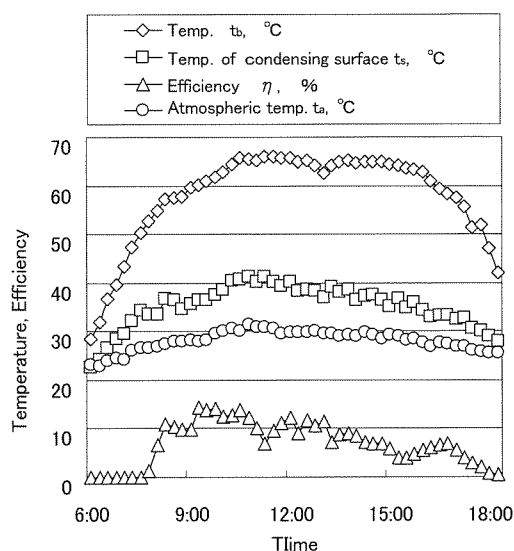


Fig.3 Photograph of apparatus.



a) Insolation and mass of water obtained vs. time.



b) Efficiency and temperatures vs. time.

Fig.4 Experimental results under solar tracking condition.
(27, August, 2004).

後、16時30分ころまで緩やかに減少している。その後、急激に減少して18時ころに日没を迎える。13時ころの一時的な q の低下は、雲の通過によるものである。測定開始後約2時間は装置自体の暖器時間であり、 $m = 0$ である。この期間は、後述の充填層内部温度 t_b から推して脱着は起こっていないか、もしくは極めて少なく、脱着熱は無視できると考えられる。したがって、立ち上がり時間は、主としてアルミニウムチャンネルを含むシリカゲル充填層部分の熱容量が支配しているとみてよい。この立ち上がり時間は、これらの熱容量を小さくすることにより短縮できる。

この後、脱着量が多くなるとシリカゲルによる吸熱が無視できなくなり、 t_b の上昇速度は低下し、やがて t_b はほぼ一定になる。この一定温度をできる限り高くすることは脱着を効果的に行う上で望ましいが、入射エネルギー、脱着による吸熱量、熱損失のバランスで定まる値であり、任意

に設定できる値ではない。しかしながら、シリカゲルの量、脱着特性も含めて考えれば最適値が存在する可能性があり、今後の検討課題である。

図において、午前11時ころに m の低下が見られる。この原因としては、1) シリカゲルからの脱着量の減少、2) 流路抵抗の増加による蒸気流量の減少、3) 凝縮面における凝縮量の減少、4) 上述の滴状凝縮に起因するばらつきなどが考えられる。充填槽内温度や凝縮面温度の変化を含めて詳細に検討した結果、原因は4)と判断した。凝縮面の様子を観察できないため、凝縮現象の詳細は明らかでないが、9時ころ、15時過ぎにも m の低下が認められることから、凝縮と集水に起因するばらつきと考えるのが妥当である。

図b)の t_b は、測定開始直後の約28 °Cから、時間の経過とともに上昇し、2時間経過した8時ころには約55 °Cに達している。この温度付近で $m > 0$ になっていることから、本システムの造水開始にはこの程度の t_b が必要であると考えられる。なお、他の測定日の結果についても、造水を開始する t_b は50 ~ 60 °Cの範囲であった。造水開始温度が範囲をもつ理由は、主として気温や風速、風向の影響を強く受ける凝縮面温度の変化によるものと考えられる。

本研究で使用したシリカゲルは、実験の章で述べた方法により準備していることから、25 °Cにおける吸着平衡状態にあると考えてよい。吸着量は温度の上昇とともに減少する^{1,2)}から、その差の分が加熱による脱着量になる。上記温度に達した時点では、すでに脱着がある程度進み、凝縮した水分が確認できる量に達している。本研究では詳述しないが、温度と脱着量の関係は、吸着等温線等から見積もることができる。なお、吸着剤や実験条件は異なるが、Alayliらも50 °C以上で脱着するようになると述べている。

$m > 0$ になった後、 q の上昇と共に t_b も上昇し、それにとともに m も増加する。

一方、 η に着目すると、8時ころの造水開始とともに上昇し、9時過ぎに約14 %に達し、最大となる。しかし、11時ころからは、 t_b がほぼ一定値を維持しているにも関わらず m の低下、したがって η の低下が見られる。

正午を過ぎると q の低下とともに t_b も低下し、 m も減少する。13時ころに、前述の雲の通過による一時的な q の低下にとともに t_b の低下が見られるが、 m の低下は大きくはない。充填層に用いたアルミニウムチャンネルの熱容量の効果と考えられ、30分程度の直達日射の低下による温度降下は3 °C程度であった。このような t_b の低下は充填層の熱容量を大きくすることである程度抑えることができるが、加熱時間や熱損失との関係もあり、装置全体としての検討が必要である。

凝縮面の温度 t_s は午前6時の約23 °Cから上昇し、凝縮液が最初に検出された8時ころには34 °C、10時15分に40 °Cに到達し、この日の最高温度は11時ころの41 °Cであった。また、凝縮に対する一つの指標と考えてよい温度差 $\Delta t = t_b - t_s$ は6時に6 °C、その後ほぼ直線的に増加し、8時ころには21 °C、 m が最大となった10時ころには24 °Cであった。その最大値は15時の29 °Cであった。

この日の最高気温は31 °Cであり、15 min間隔で測定した風速は一時的に3 m/sを超えることがあったものの、概ね1 ~ 2 m/sであった。

図a)における q の低下開始時刻は14時ころであるが、 t_b の低下開始時刻はほぼ16時ころである。 q の一時的低下は17時ころにもみられる。18時ころで造水が終了し、このと

きの t_b は約 47 °C であった。

この日の測定開始から終了までの全天日射量 Q は 36.6 MJ/(m²・day) であり、単位面積あたりに換算した一日の全造水量は 1.19 kg/(m²・day) であった。この値は、Alayli ら⁴⁾ が得た一日あたり 1 l/m²、および Kabeel⁶⁾ が得た一日あたり 1.2 l/m² と大差ない。吸着剤や気象条件等が異なることから、単純に比較することはできないが、本研究と同様の吸着量をもつシリカゲルが準備できれば、国内においてもこの程度の収量が期待できるものと考えられる。

測定終了後のシリカゲルの質量と、実験前の乾燥質量(初期質量)との差は 1.26 kg であった。シリカゲルに吸着されている水蒸気を効果的に脱着させるには、前述のように、充填層内部の温度が高温で、できる限り一様であることが必要である。シリカゲルへの伝熱量を増加するためには、充填層と集熱面の対策が考えられる。前者には、充填層内のシリカゲルへの伝熱を効果的に行う目的で採用したアルミニウムチャンネルの厚さ、フィン間隔の最適化や、充填層深さ、すなわちシリカゲル層の深さの最適化などがあり、後者には集熱面に選択吸収膜を採用することや、熱損失の低減などが考えられる。立ち上がり時間の短縮と立ち下がり時間の延長はトレードオフの関係にあり、システム全体としての最適化が必要であろう。

ここで、1 日当たりの造水効率 η_d を式(2)で定義する。

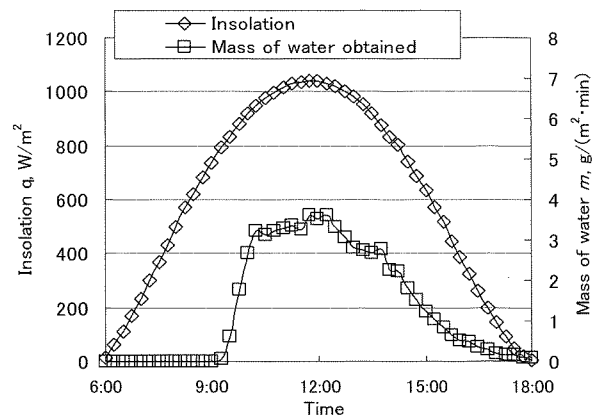
$$\eta_d = \frac{L \cdot \sum (m \cdot \Delta \tau)}{\sum (60 \cdot q \cdot \Delta \tau)} \quad (2)$$

この日の η_d は 7.9 % であった。この値は予想外に小さく、一般的な basin 型太陽熱蒸留器に比べてもかなり小さい。最大の原因は充填層、シリカゲルの熱容量が大きいことであるが、後述のように、脱着熱が蒸発熱よりも大きいことも影響していると考えられる。

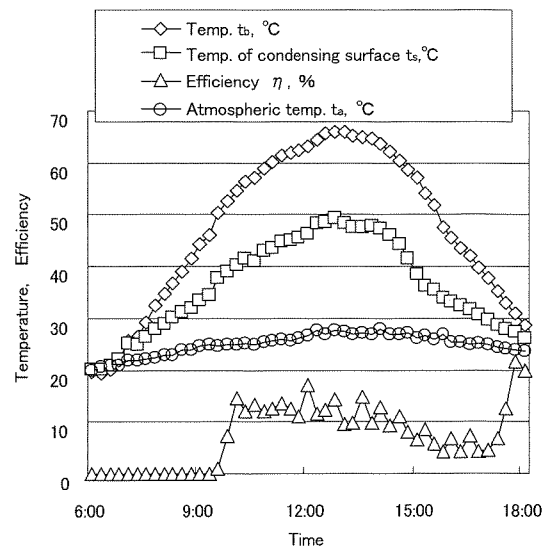
次にシリカゲル充填層内の温度分布について検討する。この温度分布は脱着量と密接な関係を持ち、集熱部からの加熱量と、脱着のための吸熱量とのバランスによって決まる。充填層内の熱移動が熱伝導支配であると仮定できれば、充填層内の温度分布を計算することができ、その計算結果と実験結果とをもとにして、脱着量の分布を推算できるはずである。Fig.6 は測定例であり、造水開始時刻である 8 時における温度分布を示している。複数の充填層に分けて設置した熱電対の測定値を一つの充填層内の対応する位置の温度としてまとめた後、測定位置間の温度を一次式で近似して得られた等温点を結んで作成した。図の外側の、太い線で囲まれた部分がアルミニウムチャンネルであり、上面が集熱面である。シリカゲル層は上面および側面から加熱され、温度分布は凸型となっている。充填層内の最高温度と最低温度との差は約 10 °C であり、また 1 日の測定を通してこの温度差は約 10 °C であった。シリカゲルの粒径が比較的大きく、粒子間の気相部体積が大きいこと、熱伝導率が低いことなどがその原因と考えられる。時間の経過とともに温度の絶対値は変化するが、温度分布はほぼ類似の形状で推移した。

3.2 非追尾測定

非追尾条件下の測定例として、2004 年 9 月 15 日に行った結果を示す。時刻に対する q と、三点平均値による m の変化を Fig.5 a) に、 η 、 t_b 、 t_s 、 t_a の変化を同図 b) に示す。この日も晴天で、安定した日射を得ている。最高気温は 29 °C



a) Insolation and mass of water obtained vs. time.



b) Efficiency and temperatures vs. time.

Fig.5 Experimental results under non-tracking condition. (15, September, 2004).

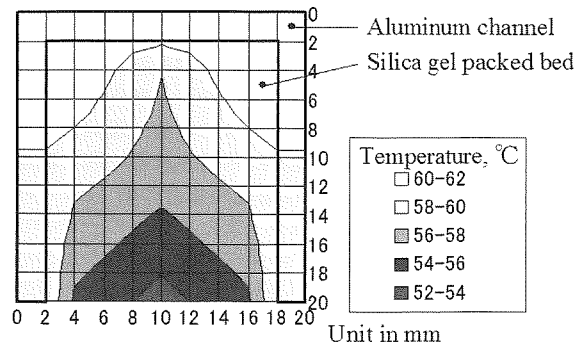


Fig.6 Example of temperature distribution in Silica gel packed bed (8:00am, 27, August, 2004).

で、風速は 3 m/s を超えることが二回あったが、それ以外は $1.5 \sim 2.5 \text{ m/s}$ であった。装置の方向を固定しているため、 q がピークをもち、測定開始後から正午ころまで緩やかに増加する。 q の最大値は正午付近の約 1 kW/m^2 であり、追尾測定とほぼ同じ値である。その後、 q は日没まで時刻と共に穏やかに減少する。

造水は 9 時 30 分ころから確認され、このときの t_b は約 50°C で、造水開始温度は太陽追尾の場合とほぼ同じである。その後、 m は q の増加と共に増加し、午後は q の減少と共に減少する。

図 b) では、 t_b の最高到達温度が約 64°C で、追尾条件のそれと大きい差は見られない。しかし、その温度に保持される時間は異なり、追尾した場合が 10 時から 16 時までの約 6 時間であるのに対して、12 時 30 分から 14 時までの約 1 時間 30 分であり、持続時間は $1/4$ と極めて短くなっている。Fig.4 b) と比較すると、追尾、非追尾の方式の違いは、加熱、冷却の速度の違いと見ることができる。このことは、脱着を効果的に行うための重要な示唆を与えると考えられる。

非追尾測定における t_b は、追尾測定のそれに比して約 10°C 高くなっている。この凝縮面温度は、凝縮量とフィンからの放熱量の影響を強く受ける。はじめに凝縮量について考える。非追尾条件における t_b は、追尾条件のそれに比べて鋭いピークをもち、平坦部分はほとんどみられない。追尾条件における $m > 0$ の時間が 8 時ころから日没近くまでであるのに対して、非追尾条件での $m > 0$ の時間は 9 時 30 分ころから 16 時ころと短く、とくに 10 時ころから 14 時ころにかけて集中的に造水している。この凝縮潜熱の集中的発生が、高い t_b の一因であると考えられる。一方、放熱量は風速、風向の影響を強く受け、本実験では、とくに風向の影響が大きいと考える。追尾の場合、冷却フィンの方向は時間とともに変化するのに対して、非追尾の場合はフィン方向が固定されており、風向によってはフィンの効果が十分に得られなくなる。言うまでもなく風向は自然現象であり、空冷用フィンによる放熱量がその影響を受けることを考えると、少なくとも風向の影響を受けにくい凝縮器の構造やフィン形状の工夫が望まれる。

図の η は、9 時 30 分の造水開始とともに上昇し、ばらつきはあるものの 12 時過ぎまではほぼ一定値を示す。しかし、その後は t_b の低下とともに η も低下する。17 時以降に急激に η が上昇しているが、 t_b が低いことから、シリカゲルから新たに脱着したものではなく、凝縮板に滴状に残っていた水が流れ出たものと考えられる。この日の Q は $26.8 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{day)}$ であり、 m は $0.97 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{day)}$ 、 η_d は 8.8% であった。

日射量などの条件が異なるので、追尾と非追尾の測定結果を単純に比較することはできないが、条件が異なることを承知の上でまとめると次のようになる。最高到達温度はほぼ同じであるが、最高温度に維持される時間は極端に異なり、非追尾の場合のそれは追尾の場合の約 $1/4$ と非常に短いことは上述の通りであり、また非追尾の一日の日射量も約 26% 少なかった。この条件の違いにもかかわらず、非追尾の収量は追尾の 20% 減に留まっている。一日の日射量あたりの収量で比較すると、追尾が 0.034 kg/MJ 、非追尾が 0.036 kg/MJ である。

先に、basin 型太陽熱蒸留器よりも熱効率が低い理由の一つとして、水の脱着熱が蒸発熱よりも大きいことをあげた。吸着熱は湿潤熱と潜熱の和とされており、シリカゲルが水

分を吸着する場合の値は約 3260 kJ/kg である¹³⁾。脱着熱と吸着熱が等しいと考えると、水の蒸発のみを利用するシステムに比べて脱着を利用する本システムでは、充填層の熱容量に加えて、さらにこの分だけ低効率になる。この脱着熱の大小は、本システムにおける吸着剤選定の際の因子の一つであることを強調しておきたい。

3.3 追尾測定と非追尾測定の造水効率の比較

前述のように、日によって気象条件が異なるため、追尾測定と非追尾測定の結果を単純に比較することには無理がある。仮に、日射量が同じであっても気温、風速等が異なれば、空冷凝縮器の性能や熱損失が異なる可能性があるからである。しかしながら、比較を阻むこれらの要因に極端な差が無ければ、概略の傾向を知るための比較は可能であると考えられる。なお、本研究の屋外実験時の風向については自然界におけるばらつきの範囲であると判断している。

Fig.8 は、上記の考え方に立ってまとめたものであり、日を変えて行った測定結果を含めて、 Q と η_d の関係を示している。測定日によって天候に若干の違いがあったが、 η_d は 8% 前後であり、追尾、非追尾による明らかな差はみられない。太陽追尾の効果は Q の値に強く現れており、今回

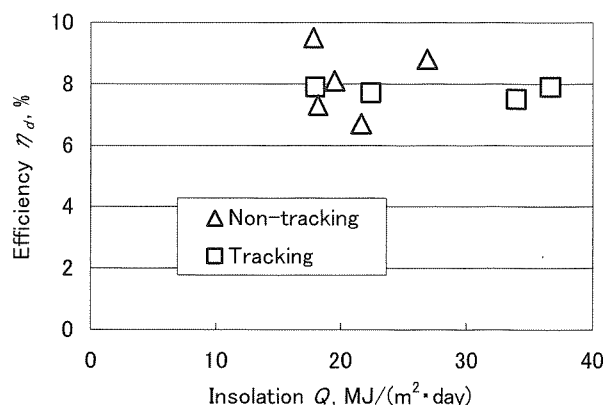


Fig.7 Relationship between insolation and efficiency under tracking and non-tracking conditions.

の測定においては $18 \sim 36 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{day)}$ となっている。一方、非追尾の条件では $17 \sim 27 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{day)}$ でその値は追尾に比べて小さい。太陽を追尾するための装置は一般に大掛かりで高価であるため、上記の収量の差がそのコストに見合うか否かについて、今後検討が必要であろう。

収量に対しては、単に日射量や熱損失のみでなく、凝縮面からの放熱量が強く影響する。今後、シリカゲルの量のほか、初期吸着条件（状態）も含めた詳細な研究が必要であると考えられる。また、本研究の q は最大でも 1 kW/m^2 程度であり、さらに大きい q が期待できる砂漠地帯では Fig.7 の関係は変化する可能性がある。また、熱損失の低減対策など、システムに何らかの改良を加えたときの η_d についても今後の研究が必要であろう。

4. 結論

吸着剤を用いて空気中の水分を吸着した後、太陽熱により脱着して水蒸気を発生し、空冷により凝縮して真水を得るシステムのうち、脱着・凝縮ユニットを試作して、屋外実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 太陽を追尾して実験を行った結果, $36.6 \text{ MJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ の日射量に対して収量 $1.19 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ が得られ, 一日の造水効率は 7.9% であった.
- 2) 太陽を追尾せず, 装置を南向, 対地角 30° に固定して行った実験の結果, $26.8 \text{ MJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ の日射量に対して収量 $0.97 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ が得られ, 一日の造水効率は 8.8% であった.
- 3) 一日の日射量あたりの収量は, 太陽を追尾した場合が $0.034 \text{ kg} / \text{MJ}$, 非追尾の場合が $0.036 \text{ kg} / \text{MJ}$ であった.
- 4) シリカゲル充填層の温度が $50 \sim 60^\circ \text{C}$, 凝縮面との温度差が $15 \sim 18^\circ \text{C}$ に達すると造水が確認できた.

謝辞

実験に際しては, 当時の学部生 林 邦彦, 本間 純 両君の協力を得た. 謝意を表する.

参考文献

- 1) 田中大・中武靖仁・田中真人, ヒートパイプを用いた太陽熱蒸留器の屋内実験, 太陽エネルギー, Vol.30, No.3, (2004)45-50.
- 2) 橋詰健一・松江孝博, 膜蒸留法による高濃度塩水の淡水化(ソーラーポンドの底部高温水を原水とするシステムの可能性について), 太陽エネルギー, Vol.26, No.4, (2000)48-52.
- 3) たとえば, 棚谷吉郎・谷口隆生, 太陽熱蒸留器用多重効用ユニットの性能に対するイオン風の強制対流効果, 太陽エネルギー, Vol.20, No.6, (1994)33-39.
- 4) Alayli Y., Hadji N. E., Lebrond J., A new process for the extraction of water from air, Desalination, Vol.67, No.1-3(1987), 227-229.
- 5) Abualhamayel H. I. and Gandhidasan P., A method of obtaining fresh water from the humid air, Desalination, Vol.113, No.1(1997), 51-63.
- 6) Kabeel A. E., Application of sandy bed solar collector system for water extraction from air, Int. J. Energy Res., Vol.30, No.6(2006), 381-394.
- 7) 中村晃一, 長谷川常栄: 水資源造出装置, 特許公開平 10-71320.
- 8) Elmer T. H. and J. F. Hyde, Recovery of water from atmospheric air in arid climates, Separation Science and Technology, Vol.21, No.3 (1986), 251-266.
- 9) Aristov Yu I., Tokarev M. M., Gordeeva L. G., Snytnikov V. N. and Parmon V. N., Solar Energy, Vol.66, No.2 (1999), 165-168.
- 10) Ji J. G., Wang R. Z. and Li L. X., New composite adsorbent for solar-driven fresh water production from the atmosphere, Desalination, Vol.212, No.1-3 (2007), 176-182.
- 11) 安部郁夫・岩崎訓・丸山純・大江猛・福原知子, 竹炭の水蒸気吸着特性, 科学と工業, Vol.75, No.7(2001), 331-333.
- 12) 竹内 雍, 吸着分離—入門から操作設計まで—, 2000年6月, 培風館, p.162.
- 13) 国部 進, 圧縮空気の除湿(空気の脱湿), 新增補 吸着, 工場操作シリーズ No.7, 平成 11 年 7 月, 化学工業社, p.278. (単位換算は著者ら)