

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：51303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23651079

研究課題名（和文）自然エネルギーを用いた海水の淡水化・汚水の清浄化装置に関する研究

研究課題名（英文）Research of purification apparatus of desalination of seawater and sewage using nature energy

研究代表者

羽賀 浩一（HAGA KOICHI）

仙台高等専門学校・地域イノベーションセンター・教授

研究者番号：30270200

研究成果の概要（和文）：本装置は太陽光追尾可能なパラボラ反射板で太陽光を蒸発容器に集光し、蒸発容器内壁に霧状の微細水滴を噴霧して瞬時に蒸発させる高効率な単蒸留法を用いて淡水が得られる。使用した微細水滴は、スリットが形成された回転円盤への海水の導入により得られた。加熱した蒸発容器から黒体輻射による多大な熱輻射損失が発生するが、熱輻射損失を防ぐ選択吸収素材を導入し、淡水化効率 40% を達成した。

研究成果の概要（英文）：This apparatus condensed the solar light to the evaporating container with the parabola reflecting plate that was able to pursue the solar light, and achieved the desalination by a highly effective simple distillation method to spray the fog and microscopic a drop of water to the evaporating container inwall and to vaporize instantaneously. A microscopic drop of water was achieved by introducing seawater into the rotating disk with which the slit was formed. Moreover, the temperature radiation loss by the black body emission occurs from the heated evaporating container. The protecting selective absorption material of the temperature radiation loss was introduced, and the desalination efficiency 40% was achieved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境技術，環境材料

キーワード：人間生活環境，海水の淡水化

## 1. 研究開始当初の背景

地球の水資源は 97% が海水で残りの 3 % が淡水であり、淡水の 1.7 % が氷河からの雪解け水である。近年、温暖化による氷河の消滅が進み、氷河からの地下水に依存することが極めて困難になりつつある。さらに温暖化が原因となる異常気象が拍車をかけ、今年の冬のように北半球では寒波が続き、南半球では熱波による乾燥や山火事が起こるなど地球の気象条件が二分されつつある。砂漠地帯

が多く存在するアフリカ、中近東などは砂漠化が広がり続け、氷河からの雪解け水による地下水も年々減少している。近い将来、気温が 2℃ 上昇すると、世界中で 10 億人以上の人々の水不足が懸念されている。水に富む日本では水不足に全く無縁であったが、震災によるライフラインの遮断により飲料水が入手困難な状況に陥り、多くの人々が給水所を列をなしたことは記憶に新しい。

中近東の石油大国では、火力発電で得られた多大な電力と巨額なオイルマネーを利用して大規模な海水の淡水化システムを導入

している。大規模装置と豊富な電力で得られた淡水は原油の 10 倍という驚くべき価格となっており、これらの国の富裕層が安全な飲料水を利用している現状がある。しかし、地球規模の温暖化対策として化石燃料の使用が徐々に自粛され、これらの国々でもクリーンエネルギーによる淡水化装置の開発が緊急の課題となりつつある。開発途上国の人口増加に伴い、2025 年には世界人口の 2/3 が水不足に陥り、2050 年には地球全体で大幅な水不足が想定されている。砂漠化が進む開発途上国では未だに電力が供給されておらず、河川や沼などに滞留している雑菌の多い汚水を飲料水に使用している。これらの貧困な国々では伝染病が蔓延し、水戦争などの更なる二次災害が勃発する可能性が示唆されている。自然エネルギーを用いた海水の淡水化、汚水の清浄化装置の開発は、地球規模で温暖化が進む近未来に向けての重要な研究課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では過酷な環境で装置が使用されることを想定し、非常に簡便な淡水化方法である単蒸留法を見直すことにより、太陽エネルギーを効率的に利用して淡水化を達成させる斬新な方法を考案した。本研究では、その方法を活用した基本的な実験装置を製作し、実用化の可能性を見出す。

## 3. 研究の方法

### (1) 海水の淡水化方法について

淡水化の手法には表 1 に示すような方法が研究されており、すでに大型装置も実用化されている。この表には淡水化の消費エネルギーも記載されており、最も消費エネルギーが少ない方法が逆浸透法である。日本が最も得意とするこの方法は、汚泥、砂、ゴミ等の不純物に弱く、事前に何段ものフィルタリングが必要とされている。最も簡便な方法として単蒸留法があるが、エネルギーコストが高く、これを改善する方法として減圧環境で水の蒸発率を向上させる多段効用蒸発法、多段フラッシュ蒸発法が提案されている。

表 1 様々な海水の淡水化方法

淡水化法	概略説明	長所	短所	消費エネルギー
逆浸透法	海水に圧力をかけて逆浸透膜と呼ばれる透過膜に通し、海水の塩分を凝縮して、淡水を蒸し出す	他の方法に比べてエネルギー効率が優れている	逆浸透膜に微生物や、不純物が詰まるなどメンテナンスコストが高い	0.69kwh/m <sup>3</sup>
単蒸留法	海水を加熱して蒸発させ、蒸気を冷却して蒸留水として取り出す	装置構造が簡単なためメンテナンス性に優れる	手法としては簡単なが、エネルギー効率が悪い	626kwh/m <sup>3</sup>
多重効用蒸発法	単蒸留法で得られたエネルギーを再利用して高効率化している	単蒸留法に比べてエネルギー効率が大幅に向上する	減圧装置が必要となり装置が大型化する	63kwh/m <sup>3</sup>
多段フラッシュ蒸留法	単蒸留法と減圧法を組み合わせて蒸留効率を向上させる	減圧により海水の蒸発効率を向上させて、エネルギー効率を向上させている	すべての蒸留に減圧装置が必要になるため装置が大型化する	42kwh/m <sup>3</sup>
冷凍法	海水を冷凍させることにより淡水を分離させる	淡水化効率が高い	大型の冷凍機が必要となる	93kwh/m <sup>3</sup>

### (2) 太陽光のエネルギーについて

太陽エネルギーの量は世界中で異なる値となる。赤道付近では日本の約 2 倍の太陽エネルギーが大地に降り注いでいる。日本で確認される 1200 kwh/m<sup>2</sup>/年のエネルギー量は 1 日 3.2 kwh/m<sup>2</sup> の太陽エネルギーが得られる計算になる。

表 1 に示される単蒸留法の消費エネルギー量と日本国内の太陽エネルギーの量を用いて、1 日に単蒸留で得られる淡水量を以下の条件で求めた。

- ・太陽光のエネルギー：1200 kwh/m<sup>2</sup>/年  
(日本の平均)
- ・直径 0.78m のパラボラ集熱器の面積：0.48 m<sup>2</sup>
- ・単蒸留法で得られる淡水量：624 kwh/m<sup>3</sup>

この条件下で得られた 1 日の淡水量は以下の通りとなる。

$$\text{淡水量} = \frac{1200 \times \pi \times 0.39^2}{624 \times 365} = 0.0025 \text{m}^3 = 2.5 \text{l} \quad (I)$$

直径が 2m のパラボラ集熱器を選び、赤道直下の太陽光のエネルギーを 2400 kwh/m<sup>2</sup>/年とすると得られる淡水量は 36 l と大幅に増加する計算となる。

(I) 式の結果は太陽エネルギーが全て利用された場合の計算値であり、実際のシステムでは図 1 に示すようないくつかの問題点が想定される。

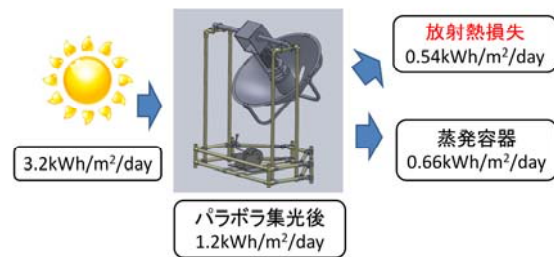
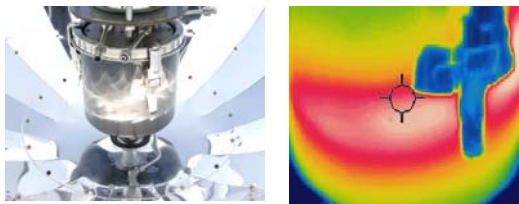


図 1 太陽エネルギーの利用効率

太陽光はパラボラ集光板で反射されて蒸発容器に到達する。パラボラ集光板は 24 枚のアルミ板を組み合わせて曲面を形成しており、図 1 では赤外領域の反射率を 80% と見積もっている。反射板は一体成形品ではなく多数枚のアルミ板であることから実際の反射率と集光の割合はさらに低下することが想定される。集光された太陽光は蒸発容器に照射されるわけであるが、図 2 (a) に示すように照射像は不均一で、(b) のサーモグラフィの熱測定の結果からも表面温度の不均一が確認できる。



(a) (b)

図2 蒸発容器の表面状態

放射熱損失も避けられない問題である。耐熱塗料で蒸発容器の表面を塗装し、黒体と近似して放射波長を計算すると 200℃以下の温度では 3-20 μm の範囲となる。図1では放射率を 0.8 とした。海水が蒸発する温度領域の放射率を低減させるには、0.3-3 μm の範囲で分布する太陽光を吸収し、それ以上の波長の放射率を減少させる選択吸収素材を導入する必要がある。

#### 4. 研究成果

##### (1) 太陽光による加熱予備実験

図3(a)は直径 80 cm のパラボラ反射板を用いて黒色のホウロウ金属容器に太陽熱を集光し、その表面温度を放射温度計により測定した結果である。周囲環境は9月上旬、外気温は 25℃、天候は晴れ時々曇りであった。太陽光の照射開始から 3 分でホウロウ容器底面は 255℃に達し、その後はその温度を保持した。これ以上温度上昇が見られないのは、周囲温度が 25℃と低く、太陽光による加熱と放熱による冷却が 255℃でバランスしたためであると考えられる。

図3(b)は同様な容器に水道水を 500 cc 入れ、図3(a)と同様にその温度上昇を測定した結果である。天候が晴天であったことが太陽光照射度から見て取れる。水道水の温度は 20 分で沸騰温度に達しており、直径 80cm の小さいパラボラ反射鏡で行った実験であったが、太陽エネルギーの大きさを再認識した。

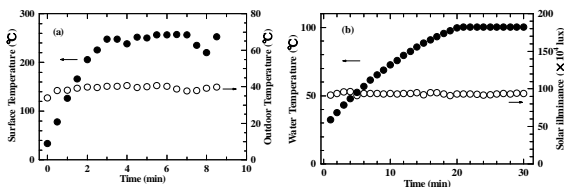


図3 太陽光による加熱予備実験

##### (2) 淡水化装置試作1号機

単蒸留を基本とした淡水化装置の全体構成を図4に示す。図の重要な部分は加熱蒸発部、空冷冷却部、風車の3カ所である。加熱蒸発部表面はパラボラ反射鏡の焦点位置に位置し、晴天時の太陽光照射により表面温度は高温になる。また、加熱蒸発部内部には回

転拡散板があり、3枚の拡散板に加熱海水が均等に滴下されるように、角度の異なるスリットが形成されている。回転拡散板は円筒パイプで風車に接続され、風車の風力により 50-400 rpm で回転する。不均一な風力で風車の回転数が不安定となることを想定して、風車上部に機械的クラッチを経由して接続されたアシストモータが設置されている。アシストモータの電力は風車上部に設置された太陽電池により供給され、図には記載されていないが風車上部には簡易的な風力発電も設置されている。

導入された加熱海水は回転拡散板により微細化され、高温に加熱された加熱蒸発部に衝突する。そこで瞬時に蒸発した水蒸気は加熱蒸発部と空冷冷却部との間に設置された水蒸気輸送パイプで空冷冷却部に移動し、冷却されて淡水となり外部に排出される。従来の単蒸留装置と異なる点は、加熱蒸発部の高温円筒部に海水を微細水滴化して拡散させることにより海水の蒸発を瞬時に実現し、最も蒸発効率の高い水の沸点温度を常時形成することにある。

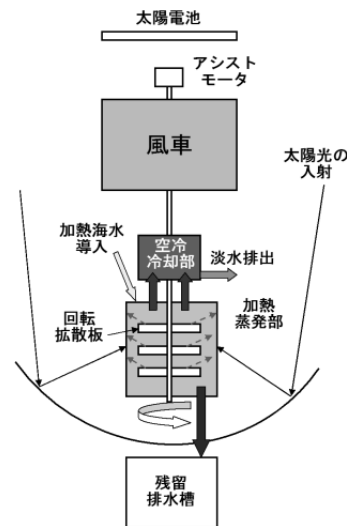


図4 淡水化装置試作1号機概略図

図5は図4の概略図を具体的にしたもので、回転機構に工夫を加え、空冷冷却部の冷却効率を高めるために 36 本のヒートパイプが水蒸気の導入部に直接挿入されている。装置に設置されている風車の位置は地表から 2 m と低くなっているが、実使用では 4-5 m まで延長させ多くの風力を獲得する計画である。不連続な強風による風車の強度低下については、数本のハーネスにより支柱を保持する予定である。

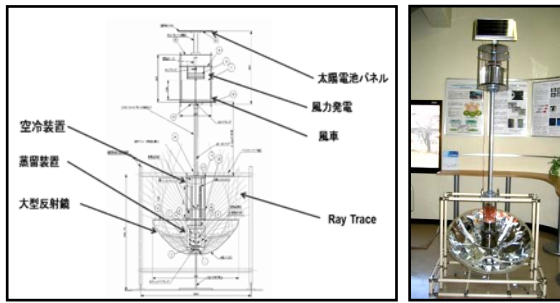


図5 淡水化装置試作1号機基本設計図面

仙台地域ではこの装置のフィールドテストが可能な時期は7-9月の期間に限定されてしまう。装置の完成時期が冬期となってしまったために装置の基本特性を確認する目的で、太陽光の集光による熱源に代わりリボンヒータを加熱蒸発部に巻き付け、風車による回転に代わりアシストモータを使用して基本性能を評価した。また、装置全体の腐食耐性が不明なことから、海水の代わりに90℃まで加熱した水道水を定量ポンプで加熱蒸発部に導入した。

図6は加熱蒸発部の外壁温度を160-175℃まで変化させて淡水化効率を測定した結果である。図に示した淡水化効率は流入水量と淡水化生成量の比から求めた。加熱蒸発部温度が175℃までは淡水化効率の増加が殆ど見られないが、この温度以上では急激な効率の増加が確認される。これは外壁温度が175℃以下では拡散した微細水滴の温度が沸点に至らず、その温度を境に水の沸点に到達し大量の水蒸気が発生したものと想定される。

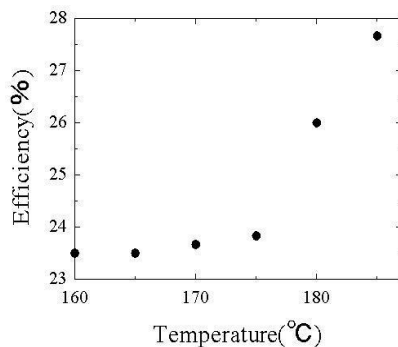


図6 ヒーター加熱による淡水化装置の評価

次に装置内部に設置した拡散板の評価を行った。4種類の拡散板について淡水化効率を実施し、図7に示す結果が得られた。写真の下部に滴下した水滴の拡散トレースを想定している。また、淡水化効率は注入した海水から淡水が得られた割合とした。最も淡水化効率が優れていた拡散板は3枚の平板にスリットを入れたものであり、その値は41%にも達した。

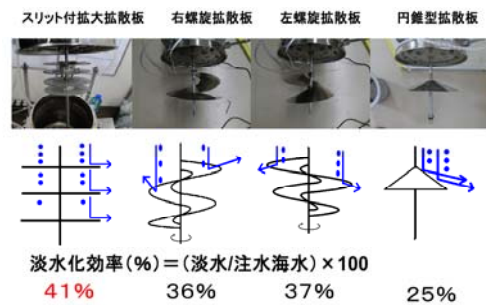


図7 異なる拡散板による淡水化効率の変化

淡水は単蒸留法による蒸留水であることから、塩分の除去は可能であるが、それ以外の汚染物質等がどの程度除去できるかについてバックテスト、pH、硬度測定等の水質検査を実施した。単蒸留法は沸騰した海水から淡水を得る方法であり、雑菌や大腸菌は殆ど死滅することから、他の淡水化法のように細菌検査は実施しなかった。これらの結果を表2に示す。比較として水道水の基準値、市販のミネラルウォーターの測定値の結果も示す。

表2 淡水の水質検査結果

調査内容	水道水基準 (mg/L)	ミネラル ウオータ	海水の淡水化		汚水の浄化	
			海水	海水 (蒸留後)	広瀬川	広瀬川 (蒸留後)
亜硝酸性窒素	10未満	0.005	0.005	0	0.05	0.005
硝酸性窒素	10未満	2	0	0	0.46	0.2
pH	6~8	8	7.2	6.4	7	6.5
塩分濃度	0	0	34(%)	0(%)	0	0
硬度	300以下	50	425	0	50	0

海水の淡水化結果では塩分濃度は0%となり、僅かに含まれる汚染物質である亜硝酸性窒素も0%となった。しかし、pHは僅かに酸性に傾き、特に硬度は0となり味覚の殆ど無い淡水となった。本校の近隣の広瀬川の河水は亜硝酸性窒素、硝酸性窒素が比較的多く含まれ、これらの値は軒並み減少した。pHと硬度は海水と同様な値を示す結果となった。硬度0のミネラルを全く含まない淡水は飲料水として適さないことから、ミネラルを含んだミネラル石を導入し、淡水にそれらの石を浸けておくことによりミネラル成分の改善が確認できた。

これらの結果を受け、屋外におけるフィールドテストを実施した。実施日の測定環境は以下の通りである。

- 測定日：2011/08/08
  - 気象条件：<sub>2</sub>気温 32℃ 湿度 66%，日射強度 950W/m<sup>2</sup>
  - 装置条件：拡散板回転数 400rpm，海水導入量 10ml/min，導入海水温度：約 70℃
- 真夏の高温環境下で実験を行ったにもかかわらず、4時間駆動の平均淡水化効率は

1.7%と非常に少ないものであった。この原因としては幾つか考えられるが、パラボラ反射鏡が小さすぎること、反射鏡の反射率が低いこと、蒸発容器と反射鏡が連動して太陽光に追尾出来ないことなどが挙げられる。

淡水化効率低下が最も懸念されるものとして最初に蒸発容器と反射鏡を連動させた実験装置を試作した。しかし、この構造にすると風車を設置することが難しくなる。当初の装置で風車の実験も繰り返したが、予想外に風力が弱い上に不安定で、上部に設置されたアシストモータが殆ど駆動している状態であったことから、風車の利用を諦め、太陽光発電で回転するアシストモータのみの駆動に設計を変更した。

図8は装置改良前後の蒸発容器の太陽光入射写真及びサーモグラフィによる熱分布である。図の左に3D設計図面と装置の写真を示す。

改良前の装置は蒸発容器前面の温度は上昇しているが背面は低いままである。装置改良後は正面、背面共に温度が均一となっていることが判る。

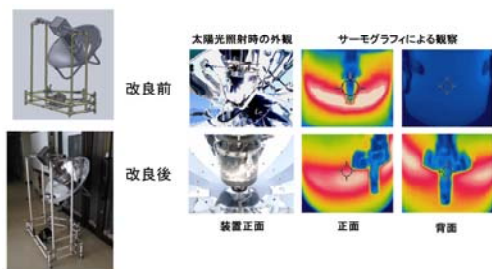


図8 装置改良前後の蒸発容器の温度

### (3) 淡水化装置試作2号機

パラボラ反射鏡を傾斜させた場合、回転拡散板が斜めになり、微細水滴が均一に散布されないことが懸念される。またパラボラ反射板の大型化と反射率の向上も重要な課題である。これらの課題を克服するために、図8の装置を基本とした装置の大型化に着手した。改良した装置の外観図面と構造図、試作写真を図9に示す。図8の装置では冷却部にヒートパイプを使用したが、本装置ではアルミダクトに銅製の放熱板を取り付け、その外部にファン付のダクトを設置した。

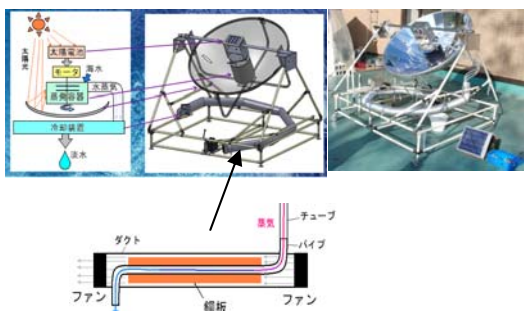


図9 大型化淡水化装置

この装置を設置し、太陽光のエネルギー量と容器温度の上昇を確認した。図10はその結果である。太陽エネルギーの上昇に伴い容器温度は上昇を続け1100W/m<sup>2</sup>で180℃の値が得られた。この条件下では蒸発容器に市販の耐熱塗料を塗布したのみで、容器から輻射される輻射熱の処理をしていない。

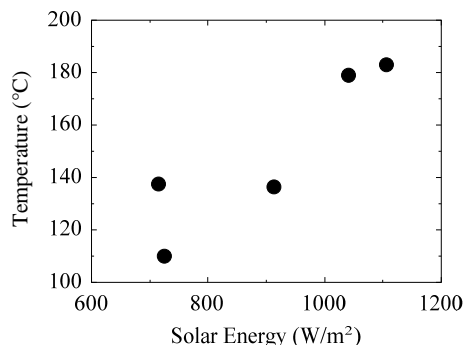


図10 太陽光エネルギーと容器温度の関係

また、太陽光に追尾する装置構造による水滴の分散ムラについては30度の角度までは影響しないことが確認された。

### (4) 蒸発容器の輻射熱対策

蒸発容器に輻射熱は容器に入射したエネルギーの半分を奪ってしまうことが実験結果から明らかとなっている。本研究では輻射熱の低減を目指し、選択吸収膜の導入を行った。選択吸収膜とは紫外から近赤外領域の分光特性を有する太陽光を高効率で吸収し、吸収した太陽光で発熱した容器の輻射率を低減させるものである。輻射率は材料固有のもので、FeやSUSは大きく、ALは小さい。これは入射光の遠赤外反射率に比例する。図11は容器温度200℃における黒体輻射率の計算結果である。使用した計算式は図の中に記載した。

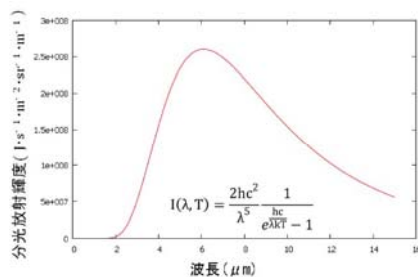


図11 黒体輻射光の分光特性

この図から明らかなように200℃の容器から輻射される輻射熱の分光特性は、6μmをピークとして2μmから長波長側に分布しており、太陽光の入射波長とは明らかに異なる。

この波長特性の違いを利用した選択吸収膜が国内外で市販されており、耐熱塗料に変

わる塗料として使用することにした。選択吸収膜は alanod 社製の sunselect, 国内のオキツモ社製の GSP-1 がある。前者はこの膜が Cu 薄板に塗布された形態で、後者は塗料として市販されている。両者を使用した。alanod 社の製品は Cu 薄板と蒸発容器との間の熱抵抗が非常に大きく、異形材料に容易に塗装可能なオキツモ社の製品を主に使用した。図 12 は黒色耐熱塗料と 2 社の選択吸収膜の反射率の測定結果である。比較として太陽光スペクトルを記載した。

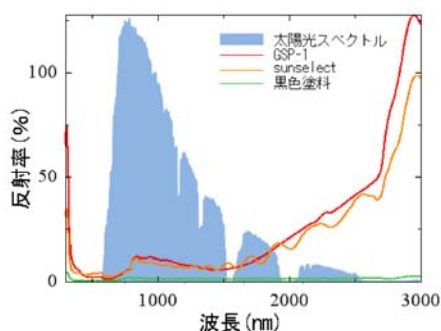


図 12 選択吸収膜と黒色耐熱塗料の反射率

この図から明らかなように、黒色耐熱塗料は全ての波長で低反射率であるが、選択吸収膜は両者とも  $2\mu\text{m}$  以上の長波長で急激に反射率が増加する。

これらの実験結果を基本に 2012 年夏季に屋外においてフィールドテストを実施した。パラボラ反射板の材質は反射率 92% の Al 研磨材を使用し、選択吸収膜はオキツモ製 GSP-1 をステンレス蒸発容器に 1 回塗りして乾燥させた。塗膜を重複して塗装するにつれて遠赤外領域の反射率が低下することから、最適な値として 1 回塗りを選択した。また、太陽光の追尾を行うために蒸発容器を傾斜させることから、傾斜時の水滴の軌道を高速カメラで確認した。

淡水化実験は図9の装置を使用し、蒸発容器に選択吸収塗料 (GSP-1) を塗布した。この装置はウインチを用いて太陽光を追尾できる機能を有している。太陽光の入射位置が低くなるに従い蒸発容器の傾斜が大きくなり、拡散板から微細水滴が放出されないことが懸念されたが、夏期の入射角程度では問題ないことも実験により確認された。

図 13 はこの淡水化装置を用いて屋外で蒸留水を得た結果である。装置の腐食を懸念して今回は水道水を用いた。快晴の日を選んで実験を進めたが、日照量は時間により大きく変化し、風の影響で蒸発容器の表面温度も変化することから測定結果にバラツキが表れた。全測定点の傾向としては太陽エネルギー量に比例して蒸留水量が単調増加していることが確認できる。導入した水道水が 20 ml/min であることから淡水化効率は最大で

50% 近くに達した。

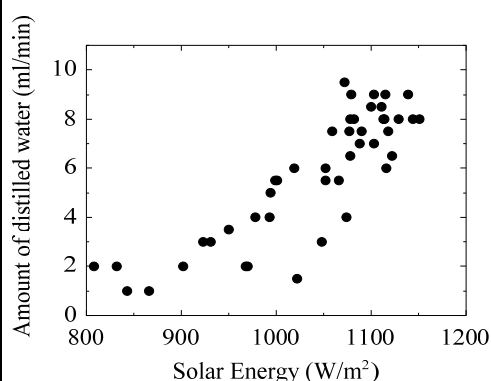


図 13 太陽エネルギーと取得淡水量の関係

## (5) まとめ

本研究では太陽エネルギーのみで海水の淡水化を実施することを目的とし、既存の単蒸留方法を見直した新しい淡水化装置の提案とその評価を行った。仙台地域での屋外測定により多くの知見が得られ、淡水化効率が不十分ではあるが、この方法により淡水(蒸留水)が得られることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

1. 日本機械学会東北支部第 48 期講演会  
羽賀浩一, 瀧澤義浩, 金子義生, 狭間大, 及川信吾 “太陽エネルギーを利用した海水の淡水化装置の開発” 予稿集 p. 114 東北大学 (2013. 3. 15)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 淡水化装置  
発明者: 羽賀浩一  
権利者: 独立行政法人国立高等専門学校機構  
種類: 特許  
番号: 特開 2010-194500 (2013/5 特許査定)  
取得年月日: 2013/5  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ:  
<http://hagalab.web.fc2.com/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

羽賀 浩一 (仙台高等専門学校・地域イノベーションセンター)

研究者番号: 30270200