

多孔質体による太陽エネルギーを利用した 蒸留・水輸送法の可能性

市川寿人^{*,***,†}・高見晋一^{**}・関 平和^{*}

(* 金沢大学
** 近畿大学
*** (株) アイビック)

Concept and experimental test of the ‘SolarPump’, a solar-still that transports water while distillation

Hisato ICHIKAWA^{*,***,†}, Sinichi TAKAMI^{**}, and Hirakazu SEKI^{*}

(*Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa, 920–1192, Japan
**Kinki University, Nara, Nara, 631–8505, Japan
***Ivic-Corporation, Akita, Akita, 010–0952, Japan)

Abstract

We devised an apparatus (the SolarPump) that transports water from a reservoir to the distillate collection at a distance while distilling the water, using solar energy alone. The basic component of the system is a vaporizer, which is enclosed with a condenser. The vaporizer is based on the same principle as a porous cup atmometer. The potential energy level of water, which is lowered at the evaporating surface of a porous material when energy is provided for evaporation, causes water to flow continuously along the gradient of the potential energy from a reservoir to the evaporating surface. In other words, the system conduit is completely filled by water all the time, as long as energy and water are supplied. To confirm the above principle and evaluate its performance, we conducted a series of field tests using an experimental apparatus supplied with tap water. Its vaporizer included a vessel made of a transparent plastic tube, which is capped with a porous cup on the top and is open at its distal end into the reservoir. The condenser was supported and sealed with an acrylic outer tube. The apparatus yielded distillate proportional to the global irradiance, while transporting water 0.5 m above the reservoir. We also confirmed that the apparatus was capable of transporting water 2.0 m above the reservoir while performing distillation.

Key words: Atmometer, Porous cup, Potential energy.

キーワード：多孔質導水体，ベラニ型蒸発器，ポテンシャル・エネルギー

1. はじめに

高見・宮崎 (2001) は、多孔質の吸水・導水特性を利用し、太陽エネルギーを駆動力とする、新しい水処理・輸送法を考案した。この方法は、「水理学的に連続な多孔質導水体の先端に熱エネルギーが吸収されると蒸発が生じ、この部分の水のマトリック・ポテンシャルエネルギーが低下、それが、水源から蒸発面に至る水移動のエネルギー

を供給する」という原理に基づく。この原理は、植物の蒸散作用と同じで、本方法はそれに倣ったものに他ならない。本研究は、この原理に基づいて実際に蒸留・水輸送が可能かどうかを実験的に確認することを目的とした。

現行の海水淡水化技術は環境負荷が大きい。近年、主流となってきた膜法は、蒸留法に比べて確かにエネルギー効率が低い。しかし、化石燃料に依存する環境負荷型の技術であることには変わらない。一方、古くから行われてきた太陽熱蒸留法は、環境調和型の技術といえる。しかしながら、広い地積を必要とし、装置の大型化がさけら

2011年2月16日 受付, 2011年5月10日 受理

† Corresponding Author: hisaichi@cocoa.ocn.ne.jp

れない。それは、太陽放射のエネルギー密度が低いからである。そこで、本研究では、第一にできるだけ狭い地積でコンパクトな装置を用いて、太陽熱による蒸留をおこなえる方法、言い換えれば日射エネルギー効率が高い方法を追求した。さらに、淡水化技術を使う際には、しばしば、遠くの水源から水を輸送する必要があることを考慮しなければならない。水源と水を必要とするところは必ずしも一致しないからである。従来の水処理技術のもう一つの問題点は浄水、淡水処理の後、さらに輸送のためのエネルギーやコストがかかることである。本研究では第二に、淡水化といった水処理と同時に、この水輸送もできる技術の可能性をさぐった。

植物は、太陽エネルギー（大気蒸発要求）によって、根圏から数十メートルの高さの葉冠にまで、水を汲み上げることができる。それは根圏と葉内蒸発面との間に水のポテンシャル・エネルギー（水ポテンシャル）の大きな落差を生じるからだ。例えば、気温 20℃で相対湿度が 50%だとすると、大気の水ポテンシャルは -943 bar (約 -930 気圧) にも達する (Sallisbury and Ross, 1969)。また、相対湿度が 99%でも -13.5 bar (約 -13 気圧) になる。植物が順調に成長できる範囲の土壌では、水ポテンシャルは -1 気圧以内であるから、根圏—大気間そして、根圏—葉内蒸発面間に非常に大きなポテンシャル落差が生じることが分る。

このような、大気—水源間の水ポテンシャル差に基づき、植物の驚異的な吸水、水輸送のしくみを人工的にまねすることはできないだろうか。実は、そのような人工的なしくみがベラニ型蒸発計 (atmometer) として既に実現されている (例えば、Brutsaert, 1982; マクシーモフ, 1985)。このタイプの蒸発計は素焼き製の蒸発管 (球) を吸水管 (通常ガラス製) で貯水槽に連結し、内部を蒸留水で満たしたものである。貯水槽は蒸発管より低いところに設置する。蒸発管より高いところにおくと、蒸発管より水が水滴として滴下するからである。蒸発管の表面から蒸発が生じると、管内から水が毛管現象ですぐに補給され、その蒸発管へは、水の凝集力で吸水管を通して貯水槽から水が補給されるので、蒸発管表面は常に湿っている。同様の仕組みは自動灌水装置にも利用されている (たとえば、田口, 1988)。上記の蒸発管を大気中に置く代わりに土壌中に挿入するところが違うだけである。土壌が乾燥すると、蒸発管へ吸引圧がかかり、常に土壌へ水が引っ張りだされる。しかし、こういった仕組みを蒸留・水輸送装置として利用する試みはこれまでされてこなかった。そこで本稿では、この仕組みを利用した蒸留・水輸送装置 (ソーラーポンプ) の作動原理を提示し、モデル装置によって実際に蒸留・水輸送が可能かどうか検証した。

2. 作動原理

Fig. 1 に本方法に基づく装置を模式的に表したものを示す。この装置は、導水・蒸発器と凝結器から構成される。導水・蒸発器は、管の一端に内部が中空のポーラスカップを装着したものである。この導水管を水で満たし、管の開口部を水源に浸して立てると、管内の水は大気圧のために、当初のままの位置で管内に維持される。また、ポーラスカップの多孔質体は水を吸収して、その全体がほぼ水で飽和される。そして、このカップを大気の蒸発要求にさらすと、表面からは蒸発が生じる。蒸発によって導水管内の水が管外へ引き出され、内部の圧力が低下すると、そこへ水が水源から大気圧によって押し上げられる。こうして、蒸発要求と水源の水がある限り蒸発が継続する。これは、Livingston (1908) によって再発見されたベラニ式蒸発計の仕組みと基本的には同じである。本装置は、この蒸発計のポーラスカップを日射に透明な凝結器で被って、蒸発した水を液体水として回収するようにしたものである。

3. 方法

実験は次のように行った。第一に、導水・蒸発器のみで構成される装置を用いて、どのくらいの高さまで水理学的に連続な流れが維持されるかどうかを調べた (実験 A, B)。第二に、凝結器を装着することで、ポーラスカップからの蒸発量がどの程度影響を受けるかを調べた (実験 B)。そして第三に、凝結器を被せても、水理学的に連続な流れが維持されるかどうかを調べた (実験 C)。なお実験 C では、性能評価の基礎資料を得るため、装置を作動させ

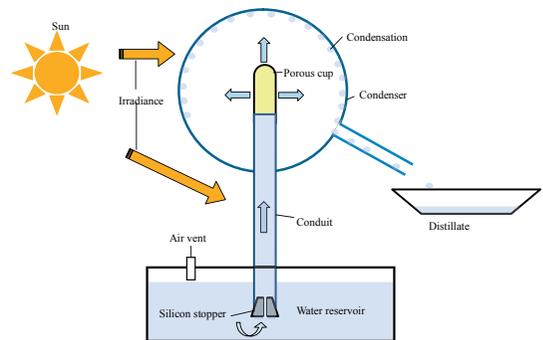


Fig. 1. Schematic of the “SolarPump”. The system is filled with water all the way from the reservoir to the top of the porous cup via conduit, so that continuous water flow takes place through the system when the energy is provided for evaporation from the surface of the porous cup.

た場合についてその水収支を精密に測定した。

3.1 実験装置

Fig. 2 に装置の主要部である導水・蒸発器を示す。導水・蒸発器は、透明塩ビ製パイプ(外径 18 mm, 内径 15 mm)の先端に長さ 60 mm の蒸発管(ポラスカップ)を装着したものである。ポラスカップはセラミック製で、外径 18 mm, 内径 15 mm (先端)~16 mm (根元)、厚さ 1.5 mm の中空構造である。導水・蒸発管の長さは 2 m (実験 A), 1 m (実験 B) および 0.5 m (実験 C) とした。これらの導水・蒸発管は、その長さをのぞけば、アトメータの一種である簡易蒸発計(ウイジン, UIZ-PE100)の導水・蒸発管と全く同じである(簡易蒸発計の導水・蒸発管の長さは 0.2 m)。

3.2 実験方法

3.2.1 「2 m 装置」を用いた実験(実験 A)

この実験では、長さ 2 m の導水・蒸発管を用いた(「2 m 装置」)。この管全体に水を満たし、開口端に直径 1 mm 弱の細孔を開けたシリコン栓を差し込んだ。そして、開口端を下にして、容量約 6.1 L の発泡スチロール製容器(縦 220 mm, 横 220 mm, 高さ 310 mm)の貯水槽に直立させた。この装置 2 台を半日程、近畿大学農学部屋上に放置して、貯水槽の質量変化から蒸発量を求めた。同時に、簡易蒸発計(ウイジン, UIZ-PE100)で蒸発量を測定し、測定環境の指標とした。測定は、2008 年 5 月 7 日と 5 月 30 日に行った。天候は 2008 年 5 月 7 日が晴れ、5 月 30 日が晴れのち曇りであった。

3.2.2 「1 m 装置」を用いた実験(実験 B)

この実験では、Fig. 3 に示すように、長さ 1 m の導水・蒸発管を用いた(「1 m 装置」)。この導水・蒸発装置に凝結球を装着し、蒸留装置とした。凝結器は、厚さ 3.5

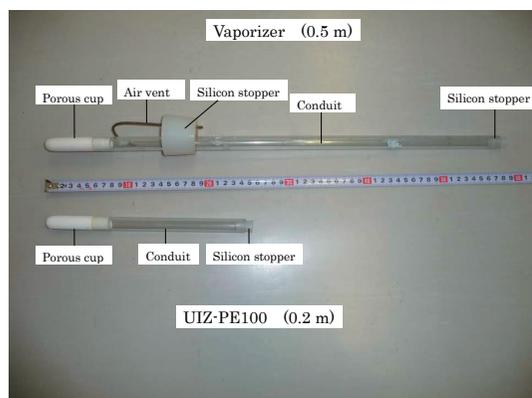


Fig. 2. Photograph showing the vaporizer (evaporimeter). The vaporizer includes a vessel made of a transparent plastic tube, which is capped with a porous cup on the top and open at its distal end into the reservoir.

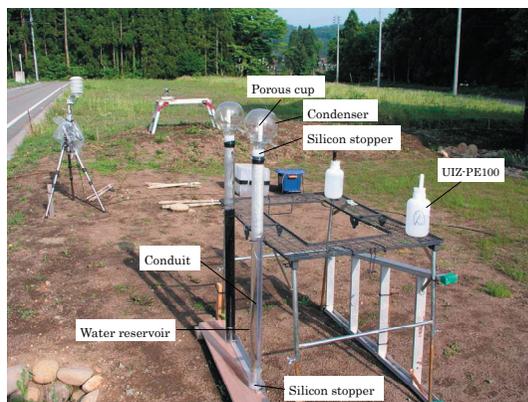


Fig. 3. Photograph showing the apparatus with a 1.0 m long vaporizer set up on the Climate-Engineering Campus, Tohkamachi, Niigata for the evaporation and distillation experiments conducted in May, 2008. Water in this apparatus was supplied from the outer tube surrounding the conduit of the vaporizer.

mm, 直径 135 mm の球状ガラス容器(容積約 1.2 L)で、内壁下部には流化した水滴を捕捉する樋がつけてあり、そこから水は排出口を通して外部へ流出する。導水・蒸発管は水を入れた貯水管内(直径 47 mm, 高さ 1.05 m)に挿入した。この装置 2 台を屋外に設置し(新潟県十日町市, クライメットエンジニアリング構内), 朝と夜の 2 回装置全体の重量を測定し、その差から蒸発量を求めた。測定は、2008 年 5 月 18 日から 5 月 23 日にかけて、凝結器を装着しない場合と、装着した場合について行った。蒸留量は、凝結器を装着した場合の蒸発量に等しいとして求めた。いいかえれば、蒸留量は蒸留水として回収して測ったのではなく、凝結器から排出口を通して、外部へ水蒸気や水滴として失われた量に等しいとみなして求めた。この間の全天日射量は、1 日あたり 22 ~ 24 MJ/m², 気温は 21 ~ 24°C であった。

3.2.3 「0.5 m 装置」を用いた実験(実験 C)

Fig. 4 にこの実験で使用した「0.5 m 装置」を示す。この装置の導水・蒸発管は長さ 0.5 m である。水源水槽にはプラスチック製容器(縦 200 mm, 横 300 mm, 高さ 243 mm)を用いた。さらに、蒸留水を回収するため、プラスチック製の容器(500 cc)へ凝結器からビニールホースで排水を導いた。

上記の装置を使って、2 回の実験を行った。1 回目(C-1)は、2009 年 9 月 23 日から 4 日間である。蒸留装置を、近畿大学奈良キャンパス(34° 40' N, 135° 40' E, 海拔 105 m)の研究棟屋上に設置した。期間の前と後に、上で述べた蒸留水回収容器のほか、凝結器を電子天秤で、

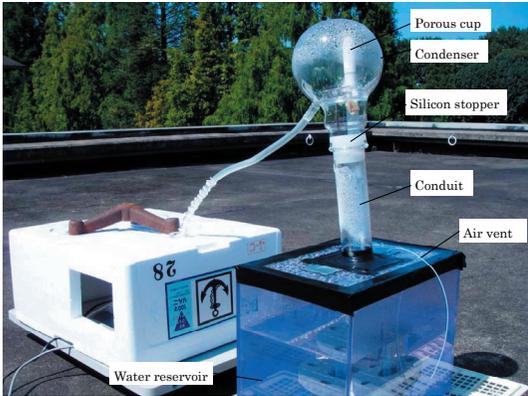


Fig. 4. Photograph showing the apparatus with a 0.5 m long vaporizer set up on the roof of the laboratory of the Kinki University Nara Campus for the distillation experiment conducted in September and November, 2009, Nara. Enclosed with a Styrofoam cover was a distillate collector placed on a balance for continuous measurements.

凝結器を除く蒸発装置を電子天秤 (新光電子, HR-33, 最大秤量 33 kg, 最小目盛り 0.1 g) で、測定した。日射量と気温は、キャンパス内の自動気象観測装置による測定結果を利用した。日射量は、前述の実験装置と同じ屋上に設置した全天日射計 (プリード, KIPP & ZONEN) で測定した。前 1 時間の 10 分毎の測定値を積算して毎正時の値とした。一方、気温は、研究棟北東端に近い地面に設置した百葉箱内の白金抵抗温度計 (VAISALA, HMP45D プローブ) によって測定した。日射量と同様、前 1 時間の 10 分毎の測定値を平均して毎正時の値とした。

2 回目 (C-2) の実験は、2009 年 11 月 5 日から 11 月 8 日まで 4 日間行った。蒸留量は、プラスチック製の蒸留水貯水容器 (500 cc) を電子天秤 (A&D 社, 最小目盛り 0.01 g, 最大秤量値 8.1 kg) で秤量することによって、求めた。貯水容器には、あらかじめ水 (約 200 cc) を入れ、その表面に食用油 (厚さ 2 ~ 3 mm) を展開した。これは、容器に流入した蒸留水が蒸発するのを抑えるためである。

この貯水容器を上記の天秤に載せて、連続的に秤量した。貯水容器と天秤は、風雨の影響を防ぐため、発泡スチロールの箱に収納した。収納箱のふたには、取り入れ口をあけ、ロート (直径 5 mm, 長さ 76 mm) を差し込んだ。凝結器からのビニールホースが貯留容器の取水口や内部の貯留液体に接触しないように、その先端をロートの口にテープで固定した。秤量は 10 分毎に行ない、1 時間平均値を用いた。

4. 結果

4.1 蒸発による水の汲み上げ

Table 1 に「2 m 装置」による蒸発量を示す。また、Table 2 に「1 m 装置」による蒸発量を示す。「1 m 装置」からは簡易蒸発計と同程度、「2 m 装置」からは 2 倍ほどの蒸発量が生じた。導水・蒸発管の長さが 0.5 m の場合についても、2007 年度に行った予備実験で、簡易蒸発計からの蒸発量を 20% ほど上回ることを確認した。

4.2 凝結器による蒸発の抑制

同じく Table 2 には、凝結器を被せた場合の「1 m 装置」からの蒸発量も示されている。この場合、「装置」からの蒸発量は、簡易蒸発計からの蒸発量の 25% 程度に低下した。しかし、凝結器を被せなかったとすれば、「基準蒸発量」(簡易蒸発計からの蒸発量)と同程度の蒸発、つまり 2.5 ~ 2.6 g/h が生じたとみられる (5 月 18 日と 21 日の e/eo が 1 程度なので)。それゆえ、凝結器の装着によって 75% ほど、蒸発が抑制されたことになる。

4.3 蒸留過程の水理学的連続性

Table 3 に実験 C-1 における蒸留量測定期間中の気温と全天日射量を示す。蒸留実験を行った 3 日間の天候は晴れて、この間の全天日射量は 1 日あたり約 16 MJ/m²、日平均気温は 22°C であった。Table 4 に蒸留開始前後の秤量データから求めた蒸留量とその間の全天日射量を示す。測定期間前後の実験装置各部分の質量変化量から、用いた実験系について、次のような収支が得られた。この期間に貯水槽から蒸発した 35.1 g の水は、その 4.3 g が凝結器に残存し、0.8 g が装置の接続部から系外へ漏れて失われ、結局、残り 30.0 g が蒸留水として回収された。

Table 1. Evaporative water loss (e) from the apparatus with a 2.0 m long vaporizer as compared to that from the atomometer (eo), Nara, May 2008.

Measurement Period	Weather	Evaporation (e)* [g/h]	“Reference” Evaporation (eo)* [g/h]	Relative Evaporation (e/eo) [-]	Site
2008.05.07	Fine	4.4	2.2±0.2	2.0	Nara
2008.05.30	Fine/Cloudy	3.0±0.3	1.5±0.3	2.0	Nara

*Values are mean±SE (n=2).

Table 2. Evaporative water loss (e) from the apparatus with a 1.0 m long vaporizer as compared to that from the atomometer (eo), Tohkamachi, May 2008. Additionally shown are estimated distillates from the vaporizer covered with a condenser, in which distillate was assumed equal to evaporative water loss.

Measurement Period	Weather	Evaporation (e) [g/h]	“Reference”	Relative	Distillate [g]	Site
			Evaporation (eo) [g/h]	Evaporation (e/eo) [-]		
2008.05.18	Fine/Cloudy	2.8	2.8	1.0	–	Tohkamachi
2008.05.21	Fine	2.1	1.9	1.1	–	Tohkamachi
2008.05.22	Fine	0.62	2.6	0.24	0.62	Tohkamachi
2008.05.23	Fine/Cloudy	0.67	2.5	0.27	0.67	Tohkamachi

*Distillate was assumed to be equal to the evaporation.

Table 3. The temperature and the solar radiation during the first distillation experiment (EXP. C-1) conducted late September, 2009 in Nara, Japan.

JST*	2009.09.24		2009.09.25		2009.09.26	
	Air	Global	Air	Global	Air	Global
	Temperature [°C]	Irradiance [W/m ²]	Temperature [°C]	Irradiance [W/m ²]	Temperature [°C]	Irradiance [W/m ²]
0:00	18.5	0	20	0	18.6	0
1:00	18.0	0	19.5	0	18.7	0
2:00	17.9	0	19	0	18.5	0
3:00	17.6	0	18.8	0	18.1	0
4:00	17.9	0	18.5	0	17.9	0
5:00	18.0	0	18.1	0	17.6	0
6:00	18.0	38	18.1	52	17.7	55
7:00	18.8	231	19.7	206	18.8	223
8:00	20.4	419	21.3	328	20.9	366
9:00	22.0	572	22.8	429	23.1	563
10:00	23.9	686	24	635	25.5	675
11:00	25.6	732	25.3	696	27.4	727
12:00	26.4	733	26.1	570	27.6	500
13:00	27.3	656	26.1	397	27.2	369
14:00	27.7	542	26.2	393	27	267
15:00	27.5	348	26.3	379	26	112
16:00	27.1	218	25.6	220	25.1	79
17:00	26.0	57	24.2	43	24.1	13
18:00	24.4	0	22.5	0	23.1	0
19:00	23.1	0	21.3	0	22.4	0
20:00	22.1	0	20.5	0	22.2	0
21:00	21.0	0	20	0	21.7	0
22:00	20.3	0	19.4	0	21.7	0
23:00	19.2	0	19	0	21.6	0
Mean/ Total	22.0	18.8**	21.8	15.6**	22.2	14.2**

*JST: Japan Standard Time

**Unit: MJ/m²

Table 4. The measured mass balance composed of the evaporative loss from the reservoir, the amount of water droplets left on the wall of the condenser, the amount of distillate collected and the estimated leak from the system. Also shown is the total amount of incident solar radiation during the EXP. C-1.

Measurement Period	Duration [h]	Water Reservoir [g]	Condenser [g]	Distillate Collector [g]	Leak [g]	Total Irradiance [MJ/m ²]	
2009.09.23	18:30	0	11483.8	442.3	205.5	0	
2009.09.26	17:50	71.3	11448.7	446.6	235.5	48.6	
	Increment	71.3	-35.1	4.3	30	0.8	48.6

Table 5. The temperature and the solar radiation during the second distillation experiment (EXP. C-2) conducted early November, 2009 in Nara, Japan.

JST*	2009.11.05		2009.11.06		2009.11.07		2009.11.08	
	Air Temperature [°C]	Global Irradiance [W/m ²]	Air Temperature [°C]	Global Irradiance [W/m ²]	Air Temperature [°C]	Global Irradiance [W/m ²]	Air Temperature [°C]	Global Irradiance [W/m ²]
	0:00	8.7	0	9.7	0	10.5	0	11.7
1:00	8.2	0	9.1	0	10.6	0	11.2	0
2:00	8.4	0	8.7	0	9.7	0	11.3	0
3:00	7.6	0	8.4	0	9.3	0	10.3	0
4:00	8.1	0	8.1	0	9.0	0	10.3	0
5:00	8.3	0	7.6	0	8.7	0	10.2	0
6:00	7.9	5	7.6	8	8.7	9	10.1	4
7:00	8.0	47	8.0	115	9.9	105	10.3	70
8:00	9.3	138	9.6	279	11.1	269	11.9	230
9:00	10.6	180	11.8	425	13.1	415	14.2	399
10:00	12.2	192	14.6	531	15.4	517	16.4	474
11:00	13.1	184	16.6	588	17.4	572	18.4	511
12:00	14.1	276	17.7	546	19.4	565	20.3	592
13:00	15.4	334	18.4	533	20.7	514	21.6	504
14:00	15.9	173	18.6	403	20.7	392	21.4	345
15:00	15.7	126	17.7	232	19.5	230	20.3	201
16:00	15.1	55	16	59	17.3	53	18.9	60
17:00	13.6	1	15.2	1	15.9	1	17.2	1
18:00	12.8	0	14	0	14.9	0	17	0
19:00	12.5	0	13.4	0	14.6	0	15.4	0
20:00	11.9	0	13	0	14.6	0	14.5	0
21:00	11.1	0	12.6	0	13.8	0	13.8	0
22:00	10.9	0	11.6	0	12.9	0	13.7	0
23:00	10.2	0	11.1	0	12.2	0	13.2	0
Mean/	11.2	6.2**	12.5	13.4**	13.7	13.1**	14.7	12.2**
Total								

*JST: Japan Standard Time

**Unit: MJ/m²

Table 6. The measured mass balance composed of the evaporative loss from the reservoir, the amount of water droplets left on the wall of the condenser, the amount of distillate collected and the estimated leak from the system. Also shown is the total amount of incident solar radiation during the EXP. C-2.

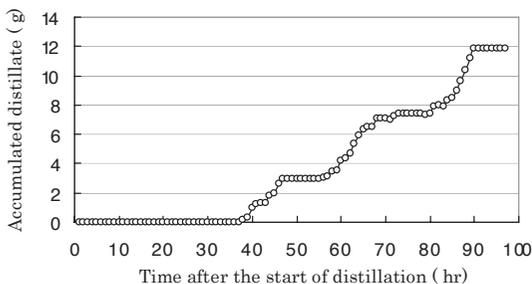
Measurement Period	Duration [h]	Water Reservoir [g]	Condenser [g]	Distillate Collector [g]	Leak [g]	Total Irradiance [MJ/m ²]
2009.11.05	0:00	0				0
2009.11.08	23:00	95				44.9
Increment	95	–	–	11.9	–	44.9

Table 5 に実験 C-2 における蒸留量測定期間中の気温と全天日射量を示す。測定期間 4 日間のうち最初の日は曇り、残りの 3 日は晴れて、この間の平均日射量は 1 日当たり約 11 MJ/m²、日平均気温は 13℃であった。このような条件のもとで、蒸留量は、一定の時間が経過したあとは、全天日射量の積算値に追従して増加した (Fig. 5)。その結果、この期間全体では 11.9 g の水が蒸留水として回収された (Table 6)。

5. 考 察

ここで用いた、簡易蒸発計の導水・蒸発管は長さが 0.2 m である。この蒸発計については、水源に水がある限り、大気蒸発要求に応じて連続的に蒸発が生じるとともに、水源から蒸発面に至る水理学的に連続な流れが維持されることが分かっている。本研究では、導水・蒸発管の長さが 1 m と 2 m の場合について、凝結器を被せない場合、簡易蒸発計の蒸発量と同等かそれ以上の蒸発量が生じることを確認した (Table 1, 2)。したがって、本装置の導水・蒸発管は、大気蒸発要求にさらされた場合、少なくとも高さ 2 m までは水源から連続的に水を移動させながら水を蒸発させ得ることが分かった。

本研究では、さらに、導水・蒸発管の長さが長いほど蒸発量が増える傾向が認められた (Table 1, 2)。また、データは示さなかったが、導水・蒸発管に細粒木炭を充填すると蒸発量が多くなった。これらは一種の「温水路効果」、

**Fig. 5.** Accumulated distillate as a function of time after the start of distillation. See Table 5 for the conditions under which the measurements were made.

つまり水源から蒸発面へ移動する間に水温が上昇することによるものと思われる。ただし、実験条件がまちまちであったため、この「温水路効果」の存在を定量的に確認するにはいたらなかった。

凝結器を被せることによって、水源から蒸発面に至る水理学的に連続な流れは阻害されるだろうか。確かに、凝結器によって蒸発管からの蒸発は大きく減少した (Table 2)。しかし、これは蒸発面への蒸発要求を低下させるだけで、水源から蒸発面に至る流れの連続性には何ら影響しなかったと考えられる。蒸発量は、2 昼夜から 3 昼夜に渡る測定期間中、一定の時間が経過した後は、全天日射量の積算値によく追従し、不連続な推移は見られなかったからである (Fig. 5)。なお、ここで用いた装置では、貯水槽から蒸発・凝結した水はいったん凝結器に溜り、それが一定量を超えると、蒸留水貯水容器に流出する。上記のようなタイムラグが生じたのは、そのためと考えられる。

ここで、本装置の性能を評価するために、蒸発係数 f と蒸留係数 j という 2 つの指標を導入する。蒸発係数 f は単位日射量当たりの蒸発量、蒸留係数 j は単位日射量当たりの蒸留量で、いずれも単位は g/(MJ/m²) である。このように、装置全体の蒸発 (留) 量を使う点で、後で述べる通常の蒸発効率等とは異なる。また、蒸留係数は蒸発係数より小さい。それは、蒸発した水の一部が装置から漏れ出し、一部は凝結器に残留し、その残りが蒸留水として回収されるからである。2009 年 9 月に行なった実験 C-1 では $j = 0.61 \text{ g}/(\text{MJ}/\text{m}^2)$ であった。これに対して、2009 年 11 月の実験 C-2 ではその半分以下の値となった。これは、蒸発係数 f が低下したためと考えられる。系外へ漏れ出した量や凝結器への付着量は蒸発量に比べて非常に少ない上に、大きく変化するとは考えられないからだ。では、何が蒸発係数そして蒸留係数の低下をもたらしたのだろうか。単水盤型太陽熱蒸留装置では、夏季に比べて冬季の蒸留効率が低下すること (蒸発効率が低下するため) が知られている (たとえば, Foster *et al.*, 2005)。本装置についての 2009 年 11 月の測定も、2009 年 9 月の測定に比べて、気温が 10℃ 近く低い条件下で行なわれた。そのため、気温の低下によって蒸発係数ひいては蒸

留係数の大幅な低下が生じたものと考えられる。

太陽熱蒸留装置の性能は、一般に、次のように評価される。いま一定期間の蒸留量が w g、その期間の全天日射量が S MJ/m² であったとする。さらに、この装置は面積が A m² の地面に水平な受熱面で熱を受け取ると仮定する。すると、蒸留“効率” ε 、つまり受熱量のうち、蒸留に使われた割合は次式となる。

$$\varepsilon = (w \cdot L) / (10^6 \cdot S \cdot A) \quad (1)$$

ただし、ここで L は蒸発の潜熱 (2442 J/g, 25°C) である。したがって、本装置の受熱面積 A を凝結器の断面積 (1.43×10^{-2} m²) にとり、2009年9月と11月の実験結果を用いると、 $\varepsilon = 0.05 \sim 0.12$ となる。あるいは、1日あたりの全天日射量を 15 MJ/m² とし、蒸留量を造水量に等しいとすると、 $0.3 \sim 0.7$ L/m² の造水量に相当する。一般的な単水盤型太陽熱蒸留器の造水量は、1日あたり 2 L/m² 程度 (八木ら, 2003) といわれているので、本装置の性能はそれより、一桁小さいことになる。しかし、 A を蒸発体であるポーラスカップの断面積 (2.54×10^{-4} m²) にとると、 $\varepsilon = 2.6 \sim 5.9$ となる。これは、多重効用型太陽熱蒸留装置に匹敵する (佐藤ら, 2004)。したがって、当該装置の性能を上げるには、蒸発管を束にして凝結器の中にできるだけ多く挿入するといった改良が必要である。

以上のように、我々は、ペラニ型蒸発計に基づく装置によって、水源から連続的に水を汲み上げながら、蒸留がおこなえることを実験的に確認した。また、これらの実験結果に基づいてその性能を見積り、熱効率をあげる1つの方策を示唆した。今後は、まず、性能評価を定量的に行うための手段を開発する必要がある。その上で、ここに示唆した方策の妥当性を実験によって検討しなければならない。

謝 辞

この研究は、筆頭著者の学位論文研究 (金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程) の一環として行なったものです。研究を進めるにあたり、実験装置の製作には

(有) クライメットエンジニアリング宮崎伸夫氏の助力を得ました。また、実験の遂行にあたっては、近畿大学農学研究科古根川浩之氏からの協力を得ました。さらに、査読者および担当編集委員からは綿密な査読に基づく有益な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお、本研究は、科学技術振興機構からの研究助成 (平成21年度地域シーズ発掘試験、課題番号10-092) によって行ないました。

引用文献

- Brutsaert, W., 1982: *Evaporation into the atmosphere*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 256–257.
- Foster, R. E., Eby, S., and Amos, W., 2005: Ten years of solar distillation application along the U. S. -Mexico border. *Solar World Congress, International Solar Energy Society*, (<http://solar.nmsu.edu/publications/1437ISESpaper05.pdf>).
- Livingston, B. E., 1908: A simple atmometer. *Science*, **28**, 319–320.
- マクシーモフ, N. A., 1985: 植物と水 (野口弥吉監修). 農山漁村文化協会, 東京, 895 pp.
- Salisbury, F. B., and Ross, C., 1969: *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Co., Inc., Belmont, California, 747 pp.
- 佐藤春樹・山口雄一・濱田祐行・数野裕樹, 2004: 高効率低温集熱パネルとその輸送システム. 特開 2004–156818, 日本国特許庁.
- 田口亮平, 1988: 植物生理学大要—基礎と応用 (第2次増訂改版). 養賢堂, 東京, pp. 130–131.
- 高見晋一・宮崎伸夫, 2001: ソーラーポンプ及びそれを備えたシステム. 特開 2001–129538, 日本国特許庁.
- 八木孝幸・斉部一文・山口克人・町村 尚, 2003: 酸化チタン塗布膜を利用した太陽熱蒸留器の性能評価と造水量シミュレーション. 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, **32**, 95–98.