

矩形 TSS における蒸発量に関する基礎的研究

三角 彰*・石井 義裕**

(平成27年10月30日受付)

Basic study of amount of water vapor in humid air in the rectangular-type TSS

Akira MISUMI and Yoshihiro ISHII

(Received Oct. 30, 2015)

Abstract

Safe drinking water may not be supplied steadily at some areas in the world. Water service facilities are not maintained at the water of a well, a river and the pond is used in these countries, therefore the use of the water conversion device using the solar heat is suitable as a method to produce low cost and safe drinking water. TSS devices are carried out to make clear the between patterns of solar radiation and production mechanism in outdoor on fine days at August in 2013-2014 in Hiroshima. The initial depth of water in TSS-device affects the production-inertia and the amount of water vapor in humid air in the device. The production of water varied according to three patterns of solar radiation in one day. The amount of the production of water increases as the water depth is shallow during the time of solar radiation increase after sunrise. On the other hand, the amount of the production of water increases as the water depth is deep, during the time of solar radiation decrease and after sunset.

Key Words: TSS, production, solar radiation, initial depth

1. はじめに

日本では、水道の蛇口をひねるだけでいつでも清潔で安全安心な水をごく簡単に得ることができる。日本総人口1億余が毎日、水を使用しても水が水道から出なくなるという状況は少ない。水道水は十分に飲料水として用いることもでき、それを飲んでも健康に大きな問題はない。しかし、世界では水道設備の整った一部の先進国を除いては、水道設備が整理されず、不衛生な井戸水や河川、湖水の水を使用しなければならない地域も多い。水を居住地から遥かに離れたところまで毎日汲みに行かなければならないという状況の国もある。

例えば、バングラディッシュ南部の遠隔地はインフラが未整備で電気も十分に届いていない地域である。安心安全な飲料水を一定量確保することが難しく、水環境が慢性的

な社会問題^{1),2)}となっている。そのため、このような地域の水資源を確保する対策が求められている。水供給の困難な地域では、淡水化装置の使用が適していると考えられる。淡水化技術には、代表的に3種類に分けることができる。海水を蒸発させ、真水を生成する多段フラッシュ法³⁾(MSF)。海水に圧力をかけて逆浸透膜と呼ばれる濾過膜の一種に通し、淡水を生成する逆浸透法³⁾(RO)。蒸発缶を多数並べて、最初の効用缶中の海水を加熱し蒸発した蒸気を次の効用缶の加熱蒸気として使用し、これを順次繰り返して蒸発させる多重効用法³⁾(MED)。これらの淡水化方法は大量の造水を可能とするが安定した電力の供給が困難な地域には適していない。電力・水資源の安定供給の困難な地域での水資源確保の手法として、図-1に示す太陽熱淡水化装置(Tubular Solar Still: TSS)の使用が適していると考えられる。

太陽熱淡水化装置は、他の淡水化手法と比べ造水能力が

* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

** 広島工業大学工学部都市デザイン工学科

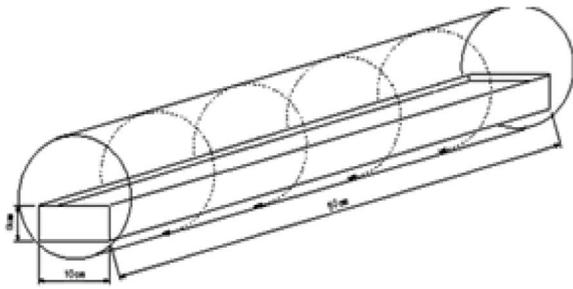


図-1 太陽熱淡水化装置 (Tubular Solar Still)

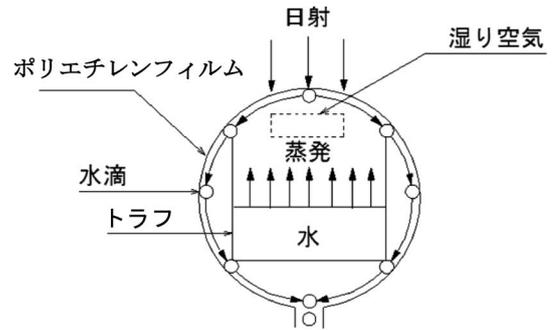


図-2 太陽熱淡水化装置 (TSS) 造水概要

極めて低いが低コストで大量生産可能であり、維持管理が容易であるため発展途上国等の小規模な生活空間での使用が可能である。太陽エネルギーを用いて、蒸留水を確保する太陽熱淡水化装置（以下、TSSとよぶ。）の国内での研究は福井大学福原らを中心に進められている。TSSには、水盤型太陽熱淡水化装置⁴⁾が一般的である。既往のTSSの研究では、福原⁵⁾はUAEでの造水試験から円筒型TSSの造水特徴を明らかにし、造水に及ぼすトラフ内の水面からの蒸発及びカバー内面で発生する凝縮の影響について明らかにした。伊良部⁶⁾らは海水淡水化装置を用いて造水実験を行い、蒸発・蒸留に伴う熱流速や蒸発量は定常的に推定できることを示した。また、寺崎⁷⁾らはバングラディッシュにて現地の水源を使用し蒸留水の水質検査を行い、比較的に安全な蒸留水の確保に成功している。

このように既往の研究は、TSSの基礎的な造水メカニズムの特徴や造水能力についての知見が示されている。また、実用化に向けた装置の開発をし、造水実験が行われている。今後は、装置の造水能力を向上させ対象地での実験サンプルを多数集めることで、実用化を目指すことが課題である。TSSの課題である造水能力の向上では、山路⁸⁾らが日没後も造水が続く（造水慣性と呼称）ことから屋内実験におけるトラフの初期供給水量（初期水深）と日造水量の関係および日造水量に及ぼす造水慣性の影響を明らかにした。

本研究では、屋外実験においてTSSの造水が日没後も継続する造水慣性を確認する。また、筆者及び既存の研究から初期水深の条件を変更した場合、日射量の上昇時と下降時及び日没後の時間造水量の造水傾向が異なることが予想される。そこで、初期水深による日射量上昇時・下降時・日没後の造水慣性について造水量および湿り空気の水蒸気

量・水温などからその関係性を明らかにすることを目的として造水実験を行った。

2. 実験概要

(1) 造水概要

図-2にTSSの造水メカニズムを示す。太陽光によってトラフ内の水が温められ蒸発が起きる。蒸発した水蒸気はカバー内面で凝縮し、水滴として付着する。その水を、装置下部より回収する。

(2) 実験装置・概要

実験では、矩形断面のトラフを持つ装置を製作した。トラフ部分は、縦0.08 m×横0.1 m×長さ0.5 mであり、段ボールで作製した。トラフは黒いポリエチレンフィルムで密着し、円筒状の針金を巻きつけフレームとし、フレームの周囲をカバー（透明のポリエチレンフィルム）する。透明のポリエチレンフィルムの透過率は約97%であり、造水に関しての影響は少ない。実験は、屋外実験を3回行い、それぞれをCASE 1～CASE 3とする。表-1に実験条件を示す。本研究では初期水深による造水特性を比較するため、矩形TSSを3基使用し、それぞれの初期水深を水深1 cm、水深2 cm、水深4 cmとし実験を実施した。水深に対応するそれぞれの装置名を装置1、装置2、装置3とした。装置内に入れる初期水には水道水を使用した。実験では、トラフ内の水温 T_w (°C)をデータロガー (Graphtec GL220)と電熱対を用いて計測した。また、TSS内の湿り空気温度（以下、内気温と呼ぶ） T_{ha} (°C)と相対湿度RH (%)、外気温 (°C)は温湿度センサー (Sensirion SH2)を用いて計

表-1 実験条件

総日射量 (MJ/m ²)		装置1 (水深1 cm)	装置2 (水深2 cm)	装置3 (水深4 cm)
初期水量 (ℓ)		0.5 ℓ	1.0 ℓ	2.0 ℓ
CASE 1	10.6	29.6	36.5	42.5
CASE 2	11.7	37.8	47.7	56.5
CASE 3	14.9	59.1	61.0	74.0

測した。日射量は、日射計 (PCM-01 (L)) を使用して計測を行った。それぞれ計測時間は実験日前夜の22:00から翌日22:00まで24時間計測した。造水量は9:00から回収できなくなるまで計測した。

3. 実験結果

(1) 総日造水量と日射量の関係

図-3 にトラフ内に供給する初期水深における総日造水量と日射量の関係について示す。総日射量については CASE 3 では、各 CASE の中で 1 番高い総日射量 14.99 MJ/m^2 を記録した。CASE 1 において、総日造水量は装置 1 (水深 1 cm) が 29.6 g 、装置 2 (水深 2 cm) が 36.5 g 、装置 3 (水深 4 cm) が 42.5 g であった。水深が深いものほど総日造水量は増加傾向にある。装置 1 と比較すると装置 2 は 1.3 倍、装置 3 は 1.8 倍の日総造水量を回収することが可能である。また、日射量が高い CASE ほど各装置の日総造水量は増加している。日射量が高くなるほど、初期水深が深いほど日総造水量が増加すると考えられる。CASE 2, CASE 3 においても同様の結果となった。

(2) 時間造水量および累積時間造水量と日射量

日射量が高くなるほど、初期水深が深いほど日総造水量が増加する。そこで、各装置の時間造水量と日射量の経時変化に着目し、造水の傾向について考える。

図-4 に CASE 1 の時間造水量と日射量の関係を示す。CASE 1 の総日射量 10.6 MJ/m^2 、時間最大日射量は、 1.8 MJ/m^2 である。日の出 (午前 5 時) から日射量が増加し 4 ~ 5 時間後に造水が始まる。最大時間造水量は、13時に装置 1 が 6.5 g 、装置 2 が 8.2 g 、装置 3 が 10.4 g となった。日射量が増加している13時までは、水深が浅い装置が多く造水している。13時までの総造水量は装置 1 が 10.2 g 、装置 2 が 9.2 g 、装置 3 が 5.2 g となった。CASE 2, 3 でも同様の傾向にある。日射量が下降した15時付近から、水深の深い装置 3 > 装置 2 > 装置 1 の順に造水しており、日

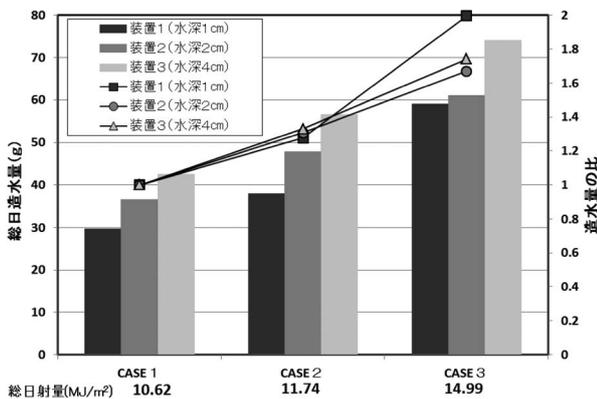


図-3 総日造水量と日射量の関係

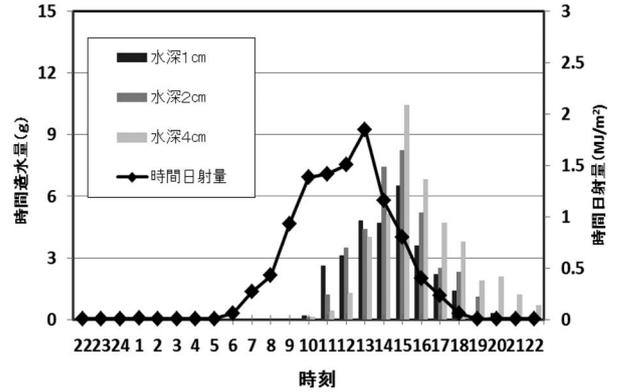


図-4 時間造水量と日射量の経時変化 (CASE 1)

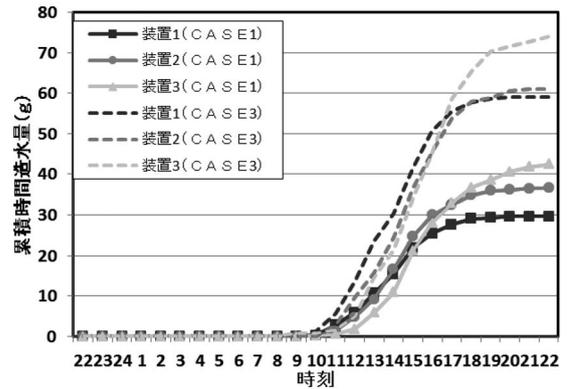


図-5 累積時間造水量の経時変化

射量上昇時と異なる造水傾向となった。日没後19時以降の造水量は、装置 1 が 0.3 g 、装置 2 が 0.4 g 、装置 3 が 4.0 g を回収した。各装置の19時以降の造水量は、総日造水量に対して装置 1 では 1.4% を回収している。装置 2 は、1.1%、装置 3 は 9.4% となった。装置 3 は日没後も造水しており、総日造水量の約 10% が日没後に造水していることが明らかとなった。

図-5 に CASE 1, CASE 3 における累積時間造水量 (g) の経時変化を示す。造水がはじまり、15時までは水深が浅い装置ほど累積時間造水量が多い。15時以降での装置 1, 2 では、造水は緩やかである。装置 3 は日射量が下降また日没後も日射に関係なく造水している。

このことから屋外実験においても、山路⁶⁾らが示した「初期水深が大きいほど造水継続時間が長く、日没後の総造水量に対する造水の割合が大きくなる」という造水慣性の特性を確認することができた。このことより、初期水深が日射量下降時および日没後の造水に影響を与えていると推測される。

(3) 水温

初期水深によっては、日射の少ない状況でも TSS は造水していることが明らかとなった。そこで、造水している

TSSの装置内の気温の影響に明らかにする。

造水状態の装置内では蒸発と凝縮が同時に行われていると考えられる。造水時の装置内の蒸発および凝縮は水温や内気温の変動が関係しているため、装置内の水温と内気温に着目する。

図-6に水温の経時変化を示す。各装置の水温は装置1を T_{W1} 、装置2を T_{W2} 、装置3を T_{W3} とする。日射量が上昇している時間は $T_{W1} > T_{W2} > T_{W3}$ となり、下降し始めると $T_{W1} < T_{W2} < T_{W3}$ となる。 T_{W1} 、 T_{W2} 、 T_{W3} の最高水温は、それぞれ 61.5°C 、 60.8°C 、 61.8°C であった。

水温に関しては、初期水深による最高水温及び、水温温度差に大きな変化は見られなかった。しかし、水温の温度上昇までの時間や温度の低下する時間帯に差異が見られた。日射量上昇時は水深が浅いほど水温が上昇しやすく、日射量下降時は水深の深いものほど冷めにくく、変化のパターンは造水量と同様の傾向を示した。

(4) 湿り空気中の水蒸気量

図-7に内気温より導いた装置内の湿り空気中の水蒸気量の経時変化を示す。湿り気空気中の水蒸気量の計算には、式(1)に示すテューテンズ(Tetens)の式より、飽和水蒸

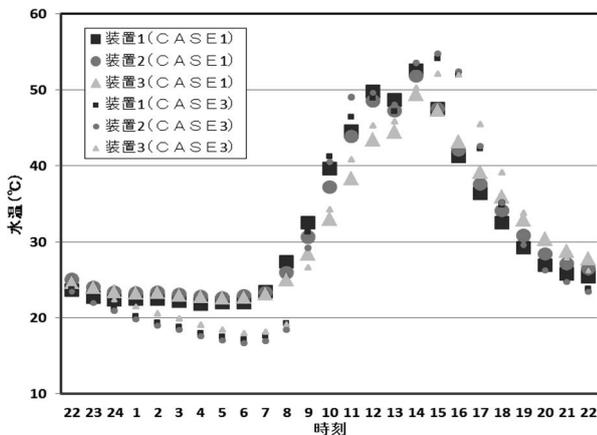


図-6 水温の経時変化

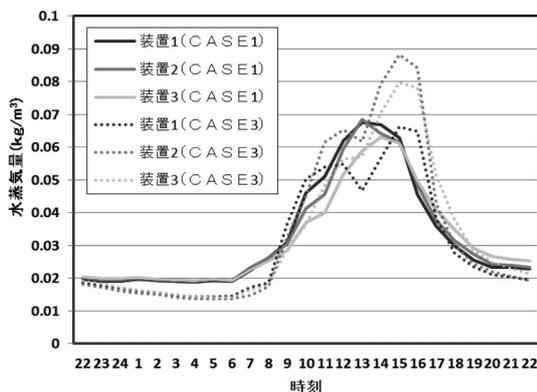


図-7 湿り空気中の水蒸気量の経時変化

気圧を求める。式(2)にて飽和水蒸気圧を飽和水蒸気量に換算し、式(3)にてあらかじめ計測した湿度RHと飽和水蒸気量 $a(T)$ から湿り空気の水蒸気量(kg/m^3)を求めた。

$$e_{s(T)} = 6.1078 \exp \left[\frac{a(T-0.01)}{T+237.29} \right] \quad (1)$$

$$a(T) = \frac{217e_{s(T)}}{(T+273.15)} \quad (2)$$

$$Me = \frac{RH(T)a(T)}{1.0 \times 10^5} \quad (3)$$

太陽の日射量と水温の上昇に伴い、各装置の水蒸気量が発生する。日射量上昇時には、装置1、2が活発に蒸発し水蒸気量を装置内に供給している。日射量下降時には、各装置の水蒸気量は低下するが水深の深い装置は水蒸気量の減少は、緩やかである。これは、水温の温度変化が関係していると考えられる。装置2、3は装置1と比較して、水深が深いため温められた水温の熱エネルギーが大きい。そのためトラフ内の水温がさめにくいことが原因と考える。

図-8に累積時間造水量と累積水蒸気量の関係を示す。水蒸気量の増加に伴い、累積時間造水量も増加している。累積水蒸気量が $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ を超えると各装置造水が始まり、 $0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上では装置3が他の装置と比較し造水していることがわかる。

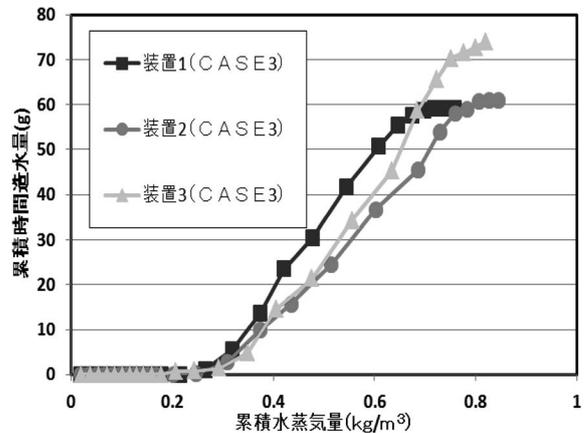


図-8 累積時間造水量と累積水蒸気量の関係

(5) 時間造水量と「内気温と外気温差」の関係

TSSの造水は装置内の湿り空気の水蒸気量・水温の変化だけでなく、湿り空気温度である内気温と外気温の関係も造水に影響を与えていると考えられる。

図-9. 10に時間造水量と「内気温と外気温差」の関係を示す。初期水深によって、時間造水量・水温・湿り空気中の水蒸気量の変化は、日射上昇時と下降時・日没後で傾向が異なることが予想される。そこで、日射上昇時と下降時・日没後の時間造水量と「内気温と外気温差」を比較す

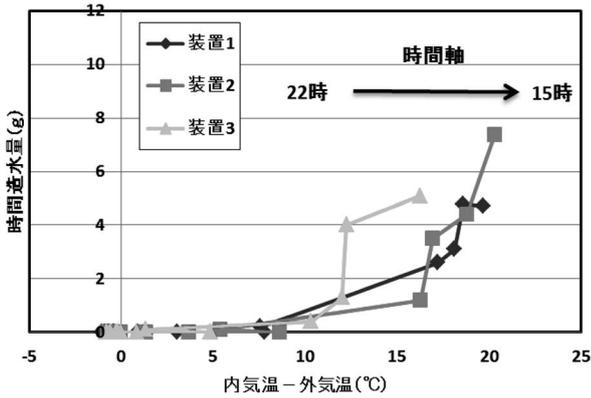


図-9 時間造水量と「内気温と外気温差」の関係 (22時～15時)

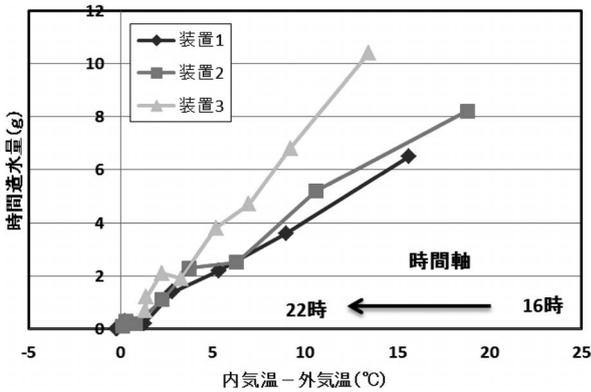


図-10 時間造水量と「内気温と外気温差」の関係 (16時～22時)

ることで各装置の温度差が造水に与える影響について検討する。

図-9では、実験前夜22時～日射下降時の15時までの時間造水量と「内気温と外気温差」の関係を示す。グラフの時間軸は、左→右に動く。日射上昇によって各装置の内気温は上昇し温度差が大きくなる。内気温と外気温の温度差は、最大で装置1が18.1℃、装置2が19.7℃、装置3が16.3℃となった。水深の浅い装置ほど、内気温と外気温の温度差は大きくなりやすい。水深の浅い装置は水温の上昇が早く、湿り空気の水蒸気量も多いため内気温が上昇しやすいと考えられる。

図-10に日射下降時16時から日没後の22時までの「内気温と外気温差」の関係を示す。グラフの時間軸は右→左に動く。日射下降時から日没後は温度差が小さくなり、時間造水量も低下していく。装置3の温度差の減少は、装置1、2と比べると緩やかである。これは水深の深い装置ほど水温が冷めがたく、湿り空気中の水蒸気量の減少が緩やかであることに関係していると考えられる。

$$M_{pd} = 0.14R_{sd} + 0.81 \quad (4)$$

$$M_{pd} = 0.16R_{sd} - 0.07 \quad (5)$$

$$M_{pd} = 0.11R_{sd} + 0.09 \quad (6)$$

$$M_{pd} = 0.36R_{sd} - 2.38 \quad (7)$$

$$M_{pd} = 0.24R_{sd} - 0.73 \quad (8)$$

(6) 日射量と単位体積造水量の関係

図-11に、日射量 R_{sd} ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{day}$) と単位体積日造水量 M_{pd} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{day}$) の関係を示す。この関係は、TSSの日造水量を規定する代表要因の1つとして福原らによって使用されている。 R_{sd} は M_{pd} に対応して線形的に増加しており、各装置の関係式は (5), (6), (7) に示す。福原らのアラブ首長国連邦 (U.A.E) での造水実験⁵⁾ の線形式を (8), 寺崎らのアラブ首長国連邦 (U.A.E) での造水実験⁹⁾ の線形式を (9) とする。今回の造水実験での線形式と福原・寺崎らの線形式を比較すると本研究のTSSは福原⁵⁾・寺崎⁹⁾よりも造水能力が低い結果となった。U.A.Eにおける実験では、日射量が高いCASE (20~30 $\text{kg}/\text{m}^2\text{day}$) での測定が行われていることも造水能力が低いことに影響していると考えら

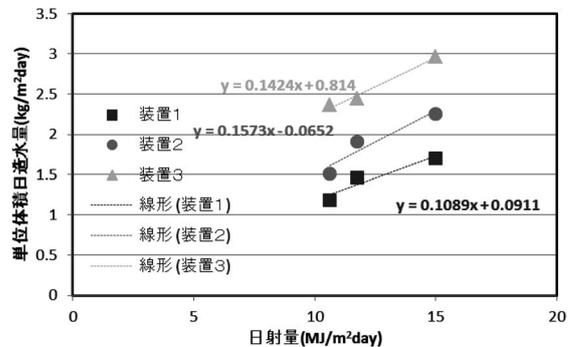


図-11 日射量と単位体積造水量の関係

れる。また、今後は装置内の空気の漏気が造水に与える影響も考慮しなければならない。

4. まとめ

本研究では、屋外でのTSSの造水実験を行った。日没後もTSSの造水が続く造水慣性を確認し、日射上昇時・下降時また、日没後の装置内の造水について調べた結果を示す。

- (1) TSSの屋外における造水実験においても造水慣性を確認することができた。初期水深が深いほど造水慣性は顕著に表れる。
- (2) 初期水深は、水温・内気温・湿り空気の水蒸気量に影響を与える。そのため造水の傾向が異なる。

- (3) 日射が上昇する場合には、水深が浅いものほど造水効果が高い。水温・内気温の上昇により水面より蒸発する水蒸気量が多く、凝縮されることで造水していると考えられる。
- (4) 日射が下降または、日没後では、水深が深いものほど造水時間が長く、造水効果の期待が持てる。水深の影響により温められた水温・内気温が冷めにくく空気中の水蒸気量も低下しにくいいため、また外気温の低下により、日射がなくても造水していると考えられる。

文 献

- 1) 酒井彰, 坂本麻衣子, 高橋邦夫: バングラディッシュの2つの農村における安全な飲料水供給と衛生に関する住民意識の比較, 流通大学論文集, 第22巻, 第2号, 1-12, 2012.
- 2) 福原輝幸, 石井義裕, shafiul Islam: TSS 導入を目指したバングラディッシュ, パイガサ地区の水環境調査, 平成22年度土木学会全国大会概要集, VII-116, 2010.
- 3) 須藤皓平, 西村泰法, 柏木隆矢, 佐藤翔馬, 平嶋紀子: 発展途上国への海水淡水化技術の導入に関する研究, 早稲田社会科学総合研究学生論文集, 2010.
- 4) 永井二郎, 福原輝幸, 浅野文朗: UAEにおける太陽熱淡水化装置の開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス2003講演論文集, No. 03-30, pp. 339-340, 2003.
- 5) 福原輝幸, kh.Md. shafiul Islam: アラブ首長国連邦における円筒型太陽熱淡水化装置の造水性能, 地下水技術, 第48巻, 第6号, pp. 31-35, 2006.
- 6) 伊良部邦夫, 新垣洋作, 照屋功, 原田周作: 太陽熱利用による海水淡水化装置の開発, 日本機械学講演論文集, No. 048-1, pp. 199-200, 2004.
- 7) 寺崎寛章, shafiul Islam, 梅村朋弘, 山元謙侑, 福原輝幸: 円筒型太陽熱淡水化装置による塩性化した溜め池の水質浄化試験—バングラディッシュ, パイガサ地域での水環境改善活動—, 土木学会第69回年次学術講演概要集, 2014.
- 8) 山路昂央・寺崎寛章・福原輝幸・石井義裕: 円筒型太陽熱淡水化装置 (TSS) の造水慣性, 土木学会論文集 B1 (水工学 Vol. 69, No. 4, 1_1441-1_1446, 2013).
- 9) 寺崎寛章, 山路昂央, 草間政寛, 福原輝幸: アラブ首長国連邦における円筒型太陽熱淡水化装置 (TSS) の造水性能評価, 土木学会第66回年次学術講演概要集, Vol. 66/VII-003, pp. 5-6, 2011.