

## 風と太陽エネルギーを効果的に活用する海水蒸発濃縮器の開発

野底 武浩

琉球大学工学部

**概要** 1. 研究目的 著者らは、風と太陽熱を効果的に利用する蒸発布方式の海水濃縮器を提案し、その実用化に向けて研究開発を進めている。本研究では蒸発布中の海水の流れを考慮に入れた次元非定常解析モデルを構築し、沖縄本島の気象条件下の蒸発量を見積もるとともに、実機レベルの蒸発器を製作して屋外実験を行った。

2. 蒸発布式濃縮器の構造 外気中に傾斜させて広げた布に海水を浸透させ、上面に吸収される太陽熱と上下の面を通る風を利用して海水を蒸発させる原理である。布の毛管浸透作用を利用して蒸発布の上端に海水を均一に供給し、蒸発布のスパン方向に張りを与えて蒸発布中を一様に流下させることによりスケールの発生を抑止する。蒸発布を、海水が浸透・流下する厚手の布の上に黒色の薄い布を重ねた構造にして、色落ちによる太陽熱吸収率の低下に対応する。また、日射量等の変化に対応して海水の供給量を変化させて、流出する濃縮海水の濃度を一定に保持するよう制御する。

### 3. 結果および考察

モデル解析により以下の知見を得た。

(1) 沖縄の多湿の不利な気象条件においても、蒸発布 1 m<sup>2</sup> 当たり平均 5.2 kg/m<sup>2</sup>・day の蒸発量が見込める。夏から秋の晴天日には約 10 kg/m<sup>2</sup>・day の蒸発が期待できる

(2) 蒸発量は、日射量、湿度、風速、気温、流出海水の濃縮の順に強く依存し、いずれの変数に対してもほぼ直線的に変化する。

(3) 海水が蒸発布中を浸透・流下する速度は遅く、気象変数の現在値に対応して供給海水量を制御する方法では、流出海水濃度に約 3 wt% の変動を生ずることがある。

また、実機レベルの蒸発器を用いた屋外実験により、次の知見を得た。

(4) 布の毛管浸透作用を利用して海水を供給するとともに蒸発布にスパン方向の張りを与えることにより、蒸発布中に海水を一様に流下させることができた。

(5) 1 時間当たりの蒸発量は、日射とともに直線的に増加し、モデル解析による予測値とばらつきの範囲で一致した。

(6) 12 月における 1 日の蒸発量は、過去の気象データの平均値を基に得られたモデル解析の結果とよい一致を示した。

以上の結果は、実用化に向けて本蒸発布方式が有望であることを示すものである。今後は、耐久性についての試験や海水供給量の制御方法の開発を目的に、長期間の屋外実験を行う。

### 1. はじめに

日本の比較的大きな製塩所においては、海水濃縮の工程としてイオン交換膜法が広く行われている。また、日本各地に点在する小規模の製塩所では、平釜を用いた直接加熱による海水蒸発や、古くから日本で発展を遂げた枝条架方式が採用されている<sup>1)</sup>。

イオン交換膜法では、製塩の全工程を通した視点から省エネルギー対策がかなり進んでいるが、電気エネルギーを消費することから CO<sub>2</sub> の排出源となっている。平釜による直接加熱蒸発方式は、エネルギー消費の面から効率が非常に悪い。そのため、再生可能で安価な薪などを燃料にしている製塩所が多いが、樹木の育成管理や遠地の

山林からの薪の運搬などにエネルギーを消費し CO<sub>2</sub> を排出している。

枝条架法は乾燥空気の利用するもので、エネルギーの消費は比較的安く抑えられるが、多湿の日本では比較的乾燥している瀬戸内海地域などに限定される。その他の地域では、空気が乾燥する秋から冬の期間に限定される。

湿度が高い春から夏にかけては、風の利用に加えて太陽熱を積極的に利用することが望ましい。風と太陽熱を利用した海水蒸発濃縮法として、日本では古くは塩田方式が行われており、やがてそれは流下式塩田方式へと発展した。流下式塩田は、全長が約 25 m の南向きのゆるい斜面に膜を作るように海水を流下させ、風と太陽熱で海水を蒸発させるものである。1 回の流下による海水濃縮を大きくするために、できるだけ流量を低くすることが望ましいが、海水膜の破断を防止するためには比較的多くの流量が必要である。

著者らは、流下式塩田方式と枝条架方式をより発展させた、簡便な蒸発布を用いる方式を考案した。この蒸発器は、**図 1** に示すように外空气中に傾斜させて広げた布に海水を浸透させ、その上面に吸収される太陽熱と上下の面を通る風を利用して海水を効果的に蒸発・濃縮させるものである。本蒸発布方式の特徴は次の通りである。

### 本蒸発布方式の特徴<sup>2,3)</sup>

#### (流下式塩田や枝条架式との比較)

- ①上下の両面を風が吹き抜け両面から蒸発が行われるため、蒸発面積が 2 倍になって風を効果的に利用できるので、蒸発量が多い。
- ②枝条架式に比べて太陽熱を効果的に利用できる。
- ③両面からの蒸発により布が効果的に冷却されるので、夜間には周囲から多くの熱を得て蒸発を行い、昼には熱損失が少なく、吸収した太陽熱をより多く蒸発に利用できる。
- ④流下式塩田の 1/50 以下の低流量で海水が布全体を濡らして蒸発するので、蒸発量の少ない助走区間が短くなり、また全流下距離(布の長さ)も約 2 m に大変短くできる。(流下式塩田では、約 5 m の助走区間と全長約 25 m の流下距離が必要)
- ⑤流下式塩田や枝条架式では、1 回の流下による濃縮が小さく、何回も流下を繰り返す必要があるが、本濃縮器

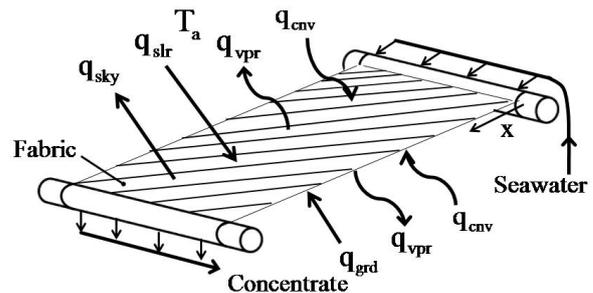


Fig. 1. Evaporating fabric and heat exchanges

では 2 回の濃縮で十分である。よって、循環ポンプの動力が著しく少ない。

- ⑥布が短く、支持台を地形に合わせて設計すれば布を南中に向けて設置できるので、地形や広さによらず用地を確保できる。(流下式塩田は、約 25 m 以上の長さの平地か、南向きのゆるい斜面に限られる。)また、熱効率が高いので、用地が小さくてすむ。
- ⑦後述の工夫により、10 m/s を超える強風時にも布から海水の飛散を防止できるので、海水の損失がない。そのため、ある程度の強風時にも稼働が可能である。(流下式塩田では、地中への漏洩が損失となる。また、枝条架式では、海水の飛散が比較的大きな損失となる。)

本蒸発布方式は単純な発案ではあるが、以上の多くの優れた点を有する。しかし、実用化に向けて、以下の課題を解決する必要がある。

#### 実用化に向けた課題

課題として、以下の 4 つがある。

- ①風圧による蒸発布の破損の防止
- ②石膏スケール析出の防止

濡れ性のある材質の布を用いれば、乾き面の防止は可能であるが、単に布を広げて傾斜させただけでは、蒸発布中に浸透した海水の偏流が生じ、流量の多い通路(チャンネル)が間隔を置いて複数形成される。それらのチャンネルの間は流量が少なく、石膏のスケールが生じやすい。スケールが生ずると蒸発量が低下する。

- ③太陽光紫外線による色落ちへの対策

太陽熱を効率よく吸収するため、布の上面を黒色にする必要がある。しかし、太陽光の紫外線による色落ちは意外なほど急である。耐候性のある色落ちの少ない染料を用いると布の濡れ性が低下し乾き面が生じやすくなる。

#### ④海水供給量の制御方法の確立

布からの蒸発量は、日射量、気温、湿度、風速により変化する。それらの変動に対応して布への海水供給量を制御し、ほぼ一定の濃度の濃縮海水を流出させる必要がある。日射量や気温等への蒸発量の依存性を実験式を組み入れたモデル解析により明らかにし、その知見を基に海水供給量の制御方法を確立する必要がある。

海水が布を浸透流下するには時間を要し、供給側の変化が流出側に伝わるまでには時間遅れが生ずる。この時間遅れを考慮に入れた制御方法を確立する必要があるため、高度な解析が不可欠である。一方、製造コストの面から、制御方法は出来るだけ簡便にする必要がある。

以上の課題を解決し、実用化に目途を付けることが、本プロジェクトの目的である。

## 2. モデル解析

### 2.1 解析モデル

以下のことを目的として、解析モデルを構築し、蒸発量を計算するシミュレーション解析を行った。

- ①沖縄の気象条件下で、どれほどの蒸発能力があるかを見積もる。
- ②日射、気温、湿度、風速への蒸発量の依存性を明らかにし、供給量制御方式確立のための基礎データにする。
- ③蒸発布中を海水が浸透・流下する速度が及ぼす影響を明らかにする。

### エネルギー保存と連続の式

図1に海水が浸透し蒸発する布に出入りする各種の熱流束を示す。蒸発布は、太陽熱  $q_{slr}$  を吸収し、周囲空気より温度が低い場合には空気から対流伝達熱  $q_{cnv}$  と地面からふく射熱を得て、天空にふく射熱  $q_{sky}$  を放出するとともに、海水の蒸発により熱  $q_{vpr}$  を失う。これらの熱流束は、次式で表わされる。

$$q_{slr} = \alpha \cdot I \quad (1)$$

$$q_{cnv} = 2 \cdot h \cdot (T_a - T) \quad (2)$$

$$q_{grd} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{grd}^4 - T^4) \quad (3)$$

$$q_{sky} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{sky}^4) \quad (4)$$

$$q_{vpr} = L \cdot m_e \quad (5)$$

$$m_e = 2 \cdot k \cdot (p - p_a) \quad (6)$$

ここで、各熱流束  $q$  は、蒸発布の単位面積を基準として

いる。対流熱伝達と蒸発は布の上面と下面の両方から生ずるため、式(2)と(6)において係数2を掛けている。本解析では、海水が流下する  $x$  方向の熱伝導は無視できるほど小さいと仮定している。また、蒸発布のスパン方向には一様であり、流下の  $x$  方向にのみ変化があるとする空間一次元・非定常モデルである。エネルギー方程式は次のように表わされる。

$$M \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + m_f \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q_{slr} + q_{cnv} + q_{grd} - q_{sky} - q_{vpr} \quad (7)$$

また、海水についての連続の式(質量保存)は次式で表わされる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial m_f}{\partial x} + m_e = 0 \quad (8)$$

海水中に含まれる塩分の連続の式(質量保存)は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial (SM)}{\partial t} + \frac{\partial (Sm_f)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

この解析モデルを完結するには、海水の流量  $m_f$  についての関係式が必要である。本研究では、布中の海水の浸透流量  $m_f$  と布が含有する海水量  $M$  についての実験を行い、以下の実験式を導いた。用いた布の材質は厚手の綿である。

$$m_f = 0.443 \times 10^{-3} \cdot M^2 \quad (10)$$

なお、この実験式は、蒸発布の材質や織り方により指数や係数が異なる。

### 境界条件

解析に用いた境界条件は以下の通りである。

入口 ( $x=0$ ) において、

$$T = T_{in} \quad (11)$$

$$m_f = m_{f,in} \quad (12)$$

$$S = S_{in} \quad (13)$$

### 物性値および関係式

海水の飽和蒸気圧は純水のものより低い値を示し、塩分濃度とともに低下する。物性データより、以下の式を作成し、解析に用いた。

$$p = (1 - 0.5368 \cdot S) \cdot \exp\left(23.5526 - \frac{4030.18}{T - 38}\right) \quad (14)$$

熱伝達率  $h$  と物質伝達率  $k$  は、文献<sup>4)</sup>からの次式を用いた。これは、屋外実験データに基づく実験式である。

**Table 1.** Weather conditions, constants and values used in simulations

---

Length of fabric:  $\ell = 2$  m  
 Ambient air temperature:  $T_a = 298.15$  K  
 Temperature of ground:  $T_{\text{grd}} = T_a$   
 Sky temperature :  $T_{\text{sky}} = 288.1$  K  
 Partial pressure of water vapor in ambient air of 70 % relative humidity:  
 $p_a = 2.22$  kPa  
 Heat transfer coefficient at 5.0 m/s wind speed :  $h = 24.7$  W/m<sup>2</sup>·K  
 Mass transfer coefficient at 5.0 m/s wind speed :  $k = 7.33 \cdot 10^{-8}$  m/s  
 Solar radiation:  $I = 0$  for  $0 < t/3600 < 6$  hr and  $18$  hr  $< t/3600 < 24$  hr  
 and  $I = 1000 \cdot \sin[\pi \cdot (t/3600 - 6)/12]$  for  $6$  hr  $< t/3600 < 18$  hr  
 Infrared emittance and solar absorptance of fabric:  $\varepsilon = 0.9$  and  $\alpha = 8.5$   
 Specific heat capacity of seawater and seawater-soaked fabric:  $c = 4.2$  kJ/kg·K  
 Temperature of influent seawater:  $T_m = T_a$   
 Salt concentration of influent seawater:  $S_m = 3.45$  wt%

---

$$h = 5.68 + 3.8 \cdot u \quad (\text{W/m}^2 \text{ K}) \quad (15)$$

$$k = (19.3 + 10.8u) \cdot 10^{-9} \quad (\text{s/m}) \quad (16)$$

また、解析に用いた値は、表 1 の通りである。

ここで、蒸発熱効率  $\eta$  を以下のように定義し、結果について議論する際に用いる。

$$\eta = \frac{L \cdot \ell \cdot m_e}{\text{Total heat gained by fabric}} \quad (17)$$

### 数値計算

図 2 のように、蒸発布において海水の流下方向  $x$  に沿って等間隔の格子を取った。温度  $T$  と蒸発速度  $m_e$ 、各種熱流束  $q$ 、布が保持する海水量  $M$  は各々の格子点で定義した。一方、海水流量  $m_f$  と海水濃度  $S$  は、格子と格子の中間のセル境界で定義した。

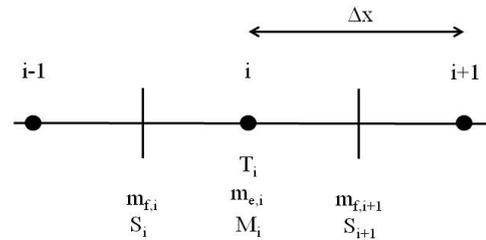
微分方程式 (7) では、空間微分の項について一次精度の風上差分を用い、時間微分の項は陽に積分した。微分方程式 (8) と (9) では、空間微分の項について一次精度の中心差分を用い、時間微分の項は陽に積分した。

格子間隔  $\Delta x = 5$  cm、時間増分  $\Delta t = 4$  s で計算を行った。それらより小さい値を用いた計算を行ったが、結果は 1.0% 以下の差に収まった。

## 2. 2 解析結果

### 気象の変数と操作変数への蒸発量の依存性

気象変数である日射量  $I$ 、気温  $T_a$ 、湿度  $\phi$ 、風速  $u$  が、蒸発量に影響する。また、操作変数としては海水供給量があるが、ここではその海水供給量によって変化する流出



**Fig. 2.** Grid points and variables

海水の濃度  $S_{\text{out}}$  を変数として取り上げた。他の変数を一定におき、注目した変数のみを変化させて計算することにより、個々の変数が蒸発量に及ぼす影響を調べた。得られた結果のうち3つの変数についての結果を図 3 に示す。

日射量に最も強い影響を受けて蒸発量は変化する。蒸発量は日射量に対してほぼ直線的に増加し、日射量がゼロから  $1.0$  kw/m<sup>2</sup> に変化すると、蒸発量は、 $0.17$  から  $0.8$  kg/k·m<sup>2</sup> まで増加した。日射量ゼロでも蒸発量が生ずる。これは、蒸発により布の温度が周囲空気の温度より低くなり、周囲空気からの対流伝達熱と地面からのふく射熱の蒸発布への流入が持続するためである。

蒸発量に対して、湿度は次に強い影響を示した。ここでは、 $(100 - \phi)$  [%] を「乾燥度」と定義し、それに対する蒸発量の変化を図に示した。蒸発量は乾燥度に対して直線的に増加する。乾燥度が 10% (湿度 90%) から 50% (湿度 50%) に変化すると、蒸発量がゼロから  $0.35$  kg/k·m<sup>2</sup> に増加した。これは、乾燥度の増加に伴い周囲空気の水蒸気

分圧  $P_a$  は低下し、蒸発布表面との水蒸気分圧の差 ( $P - P_a$ ) は大きくなるからである。その結果、式 (6) に示される様に、蒸発量  $m_e$  は増加する。

風速は 3 番目に強い影響を示した。蒸発量は風速と共にほぼ直線的に増加し、風速が 2 m/s から 8 m/s に変化すると、蒸発量は  $0.08 \text{ kg/k}\cdot\text{m}^2$  から  $0.25 \text{ kg/k}\cdot\text{m}^2$  に増加した。この直線的な増加は、式 (16) に示されるように、物質伝達率  $k$  が風速  $u$  に対して直線的に増加することによる。

気温  $T_a$  は、4 番目に強い影響を示した。気温が  $10^\circ\text{C}$  から  $35^\circ\text{C}$  に変化すると蒸発量は  $0.08 \text{ kg/k}\cdot\text{m}^2$  から  $0.25 \text{ kg/k}\cdot\text{m}^2$  に増加した。これは、飽和水蒸気圧が温度と共に指数関数的に増加することによる。同じ乾き度あっても、気温が高いと、水蒸気分圧の差は大きいからである。

流出する海水の塩分濃度  $S_{\text{out}}$  は弱い影響を示した。流出海水の濃度とともに蒸発量は低下した。これは、式(14) に示すように塩分濃度が増加すると海水の飽和水蒸気圧  $p$  が低下し、水蒸気分圧の差 ( $p - p_a$ ) が小さくなるからである。

以上は、今後予定している海水供給量の制御方法の開発に有益な知見を与えるものである。

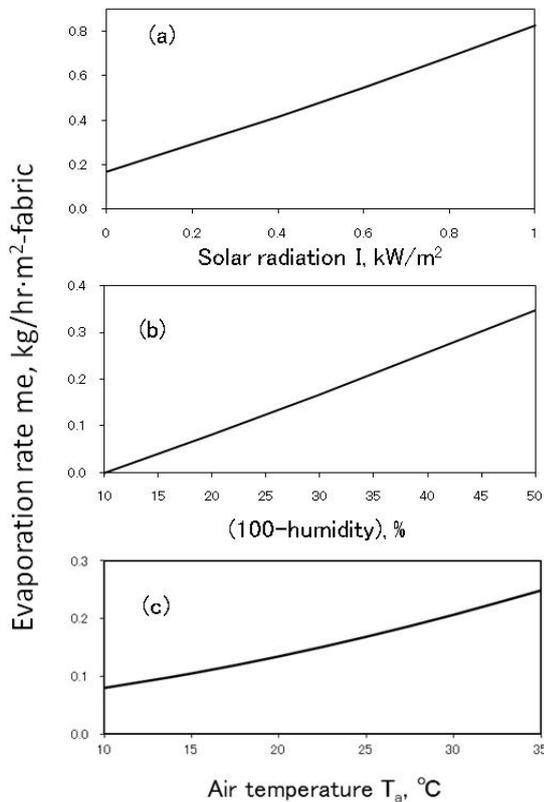


Fig. 3. Evaporation rate vs. weather factor

### 1 日を通した蒸発用の時間変化

沖縄本島の気象条件に近い条件下で晴天日を想定し、1日を通した数値シミュレーション計算を行った。計算に用いた数値を表 1 に示す。気温や天空温度、湿度、風速は 1 日を通して一定とした。日照時間は 6 時から 18 時までの 12 時間とし、日射量は正午に最大の  $1.0 \text{ kW/m}^2$  を取るとした。1 日の総日射量は  $27.6 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{day}$  である。

流出海水の塩分濃度をほぼ一定に保つように、海水供給量を日射量に応じて変化させた。その関係式は、次式で表わされる。

$$m_{f,\text{in}} = l \cdot (100 + 0.34 \times I) \cdot 10^{-6} \quad (\text{kg/m}\cdot\text{s}) \quad (19)$$

蒸発布に出入りする各種の熱流束と蒸発布の温度の時間変化についての結果を、図 4 に示す。日射量がゼロの夜間は、海水の蒸発によって蒸発布の温度が気温よりも低くなり、蒸発布は風から対流伝達熱と地面からふく射熱を得る。その熱の一部は天空にふく射熱として逃げるが、多くは蒸発を持続させる熱源となる。蒸発布の温度は、周囲空気よりも約 3K も低くなる。

日の出の後日射が強くなるとともに、蒸発布の温度は上昇する。その結果、周囲空気からの対流伝達熱と地面からのふく射熱は減少し、蒸発布温度が気温より高くなると、逆に蒸発布から周囲空気と地面へ熱が逃げようになる。そして、蒸発布に入る熱量は日射のみとなり、その一部は周囲空気と地面および天空へ逃げ、他は蒸発の熱源となる。

蒸発布の温度がほぼ気温と等しくなる 7:40 と 16:20 には、日射量の約 85% が蒸発の熱源となる。日射量が  $1 \text{ kW/m}^2$  の正午には、蒸発布の温度は気温よりも約 3.5K 高くなり、

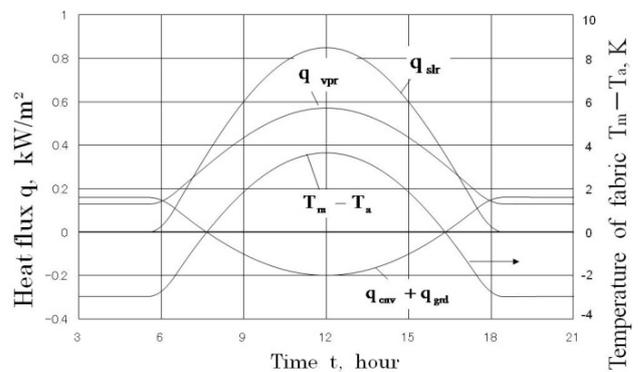


Fig. 4. Temporal variations of heat fluxes from/to fabric and temperature of fabric

周囲空気や地面および天空への放熱が増大する。そのため日射量のうち蒸発に利用される割合は 67%に低下する。6時から18時までの12時間の総蒸発量は  $7.1 \text{ kg/m}^2$  であり、夜間の蒸発量は  $2.3 \text{ kg/m}^2$ 、合計して1日の蒸発量は  $9.4 \text{ kg/m}^2$  である。日射量ゼロを仮定した計算結果との比較から、日射の寄与による蒸発量は  $4.8 \text{ kg/m}^2$ 、総蒸発量の 51% と見積もられる。

図 5 に流出海水の塩分濃度の時間変化を示す。実線は、供給海水量の変動が蒸発布の流出端に至る時間遅れを考慮した場合の結果であり、一点鎖線は、時間遅れをゼロと仮定した場合の結果である。なお、式 (10) の実験式を用いた結果、その時間遅れは 65 分という結果が得られた(表 2)。

時間遅れを考慮しない場合、式 (19) に示す、日射量の現在値に対応した海水供給量の制御方法により、流出

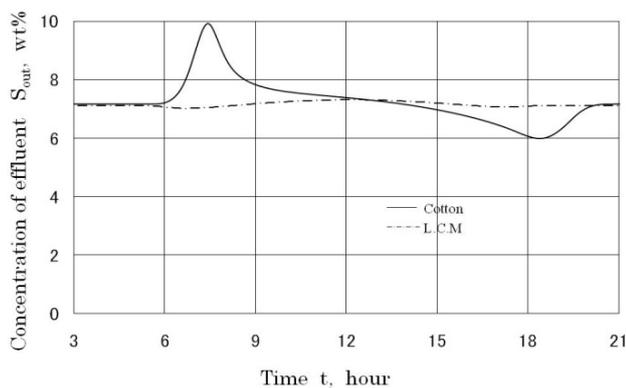


Fig. 5. Temporal variations of salt concentration of effluent

Table 2. Summary of simulations

Model	O.D.M.	L.C.M.
Time lag	65 minutes	-
Concentration of effluent $S_{out}$	Max: 9.91wt% Min: 6.00 wt% Av.: 7.24 wt%	Max: 7.11 wt% Min: 7.02 wt% Av.: 7.14 wt%
Temperature of fabric $T_m - T_a$	Night: -2.96 K Noon: 3.65 K	Night: -2.94 K Noon: 3.68 K
Evaporation rate $m_e$	Night: $0.187 \text{ kg/m}^2\text{h}$ Noon: $0.839 \text{ kg/m}^2\text{h}$ Total: $9.41 \text{ kg/m}^2\text{day}$	Night: $0.185 \text{ kg/m}^2\text{h}$ Noon: $0.837 \text{ kg/m}^2\text{h}$ Total: $9.37 \text{ kg/m}^2\text{day}$
Thermal efficiency	Night: 78.6 % Noon: 67.2 % Av.: 76.6 %	Night: 77.8 % Noon: 67.0 % Av.: 76.1 %

する海水の塩分濃度がほぼ一定に保持できる。しかし、時間遅れを組み入れた計算においては、式 (19) の海水供給量制御では、流出海水の塩分濃度を一定に保持できない。塩分濃度は気象変数が一定の夜間は一定値を保つが、日の出とともに上昇し、7:25 に夜間の値よりも 2.8 wt% も高いピークを示す。その後、塩分濃度は減少し、日射量が時間と共に減少する午後には夜間の値よりも低くなり、日没直後の 18:20 に夜間の値より 1.2 wt% 低い最小値を示す。

この結果は、海水供給量の制御方法に関して、以下の重要な知見を与える。

- ①海水供給量を気象変数の現在値のみによって変化させる制御方法では、流出海水の塩分濃度を一定に保つことは困難である。
- ②流出する海水濃度の厳密な制御を行うには、数十分先の気象変数の値を予測し、その値を組み入れた制御が必要である。
- ③流出海水濃度の制御を容易にするには、海水が浸透・流下する速度が大きい、すなわち、供給と流出の間の時間遅れの小さい材質の蒸発布を選択する必要がある。

#### 流下方向への分布

海水は、蒸発布中を浸透・流下する間に蒸発が進行し、濃縮される。蒸発布中の海水の濃度分布を図 6 に示す。いずれの時間においても、塩分濃度は流下方向に増加するが、その増加の割合は流出端に近づくとともに大きくなる。日射量が時間と共に増加する午前は、塩分濃度の変化は大きく、流出海水の濃度は高い。一方、日射が減少する午後には、塩分濃度の変化は小さく、流出海水の濃度は低い。

図 7 に、蒸発流束の流下方向への分布を示す。蒸発流束は、海水供給端の近くの助走部で大きく増加または減少する。その助走区間は短く、蒸発布の全長の 1/20 以下である。助走区間下流の区間においては、蒸発流束は流下方向に漸減する。この漸減は、塩分濃度が増加することによるものである。塩分濃度の増加は海水の飽和水蒸気圧  $p$  を低下させ、水蒸気分圧の差  $(p - p_a)$  を小さくする。

#### 沖縄本島における年間の蒸発量変化の推定

沖縄本島の過去 20 年の平均気象データを用いて、各

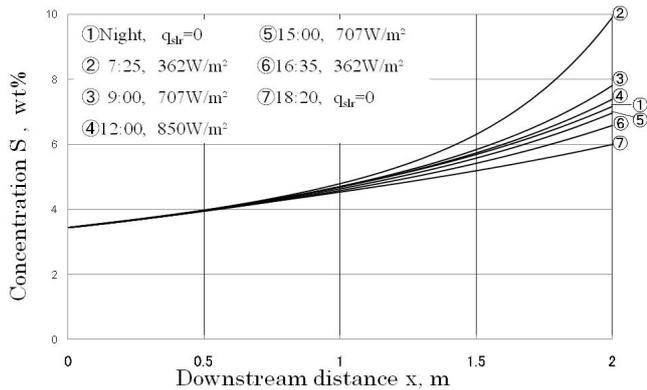


Fig. 6. Variations of salt concentration along fabric

月における1日の平均蒸発量を求めた。月平均の気温や湿度、風速と日中の平均日射量から夜間の蒸発量と日中の蒸発量を求め、合計して1日の蒸発量を求めた。その際、気温や湿度、風速は一定とし、また、日中の日射量は日照時間の間一定と置いて定常計算を行った。

図8に使用した月平均の気象データを示す。気温および1日の総日射量ともに7月に最大値、2月または1月に最小値をとる山形の変化をする。乾き度は6月に最小値、12月に最大値とる。湿度は年間を通して高く、乾き度は15~32%の範囲である。気温も16~28°Cで高く、典型的な高温多湿の気象であり、蒸発に有利な条件とは言えない。風速は、年間を通して約5m/sでほぼ一定である。

図9に計算結果を示す。1月から6月の期間は、蒸発量は比較的少なく4.5~5.0 kg/m<sup>2</sup>-dayの範囲である。7月から12月の期間には蒸発量は比較的多く5.5~6.0 kg/m<sup>2</sup>-dayの範囲である。梅雨の6月には最小値、梅雨明けの7月には最大値をとる。蒸発量は年間を通して大きな差はなく、年間の平均は5.2 kg/m<sup>2</sup>-dayである。

この平均5.2 kg/m<sup>2</sup>-dayの蒸発量が多いか否かは、本蒸発器の製造コストと維持コストの多寡による。著者らは、コストの面からも十分実用化が可能と判断し、実機に近い蒸発器を製作し実験を進めている。

### 3. 実験

#### 3.1 製作した蒸発器

##### 蒸発器本体

図10に、製作した蒸発器本体の模式図を示す。矩形の布の端を押さえ棒で挟んで支持棒に固定し、他方の端

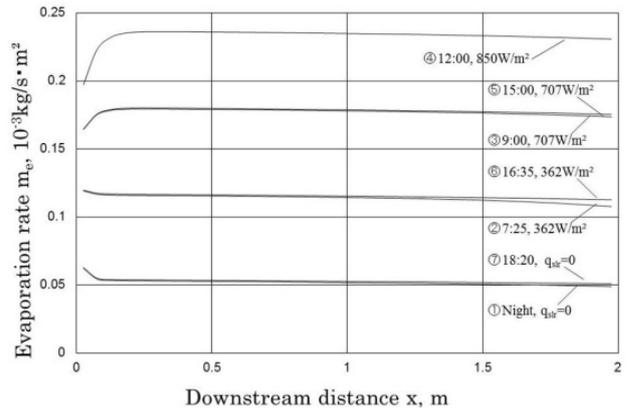


Fig. 7. Variation of evaporation flux along fabric

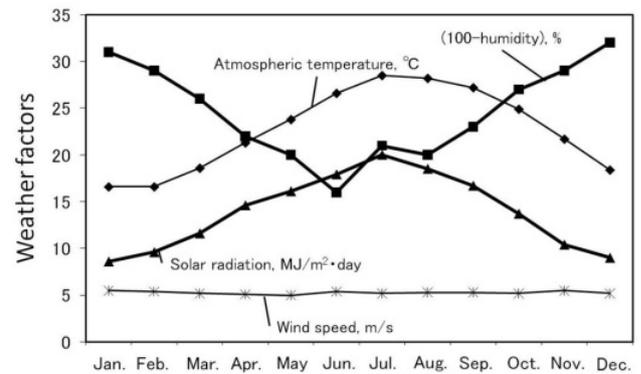


Fig. 8. Weather conditions in all months at Okinawa Island

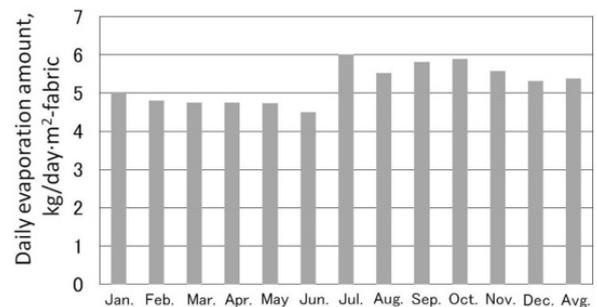


Fig. 9. Daily evaporation amounts in all months at Okinawa Island

は輪を作る様に縫いつけてそこにステンレスパイプを通し、布が南向きになる様に傾斜させて固定した。布の途中に等しい間隔をおいて3本の棒を渡し、それとゴム紐を利用して布にスパン方向の張りを与えた。これにより、布を浸透する海水の偏流は大幅に減少した。

図11に示すように、蒸発布の上端部の下面に帯状の布を縫いつけそれを深底桶の中に挿入した。深底桶には

海水が供給され、带状布の下端がその海水に浸かっている。海水は、带状布によって吸い上げられた後、蒸発布に浸透し全面を濡らして流下する。下端のステンレスパイプまで流下した後、海水はパイプの底部から集水樋に滴下し、回収される。蒸発布の蒸発面積は、幅 1 m、長さ 1.8 m である。

### 蒸発布

蒸発布は、海水が浸透・流下する布とその上に重ねた黒色の布の二枚重ねである。二枚重ねにすることにより、海水の浸透性を確保した上で比較的耐候性のある黒色塗料を使用することができる。

また、長期の使用により塗料の色落ちが進行したときには、上の布のみを取り換えることで済み、コストの面から有利である。

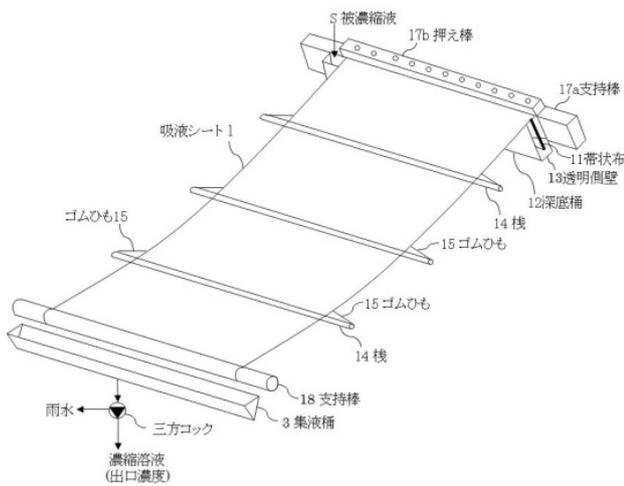


Fig. 10. Wet fabric evaporator

### 海水供給器

図 12 に海水供給器を示す。この供給器は、管路抵抗体である毛管と水頭圧を利用して、流量を制御するものである。海水供給量は、水頭高さに比例するので、水頭高さにより海水供給量を制御できる。水頭高さはレベルセンサーで常時モニターされ、現在の気象条件に対応した値になるよう電磁弁の開閉により海水が注入される。

ここでは、海水供給器のレベルセンサーとして、浮きとポテンシオメーターを用いて安価なものを製作した。水面の位置を示す浮きの上下によりポテンシオメーターの電気抵抗が変化し、水頭高さを電気信号に変換した。

### 3.2 実験結果

#### 一様な浸透流下

図 13 に蒸発布の下端から回収された濃縮海水の濃度分布を示す。濃縮海水をステンレスパイプの左側、中央、右側の3か所で採取しその濃度を測定した。いずれ時間帯の測定においても濃度は一様に分布しており、蒸発布中の流れがほぼ一様であることが分かる。なお、蒸発布中

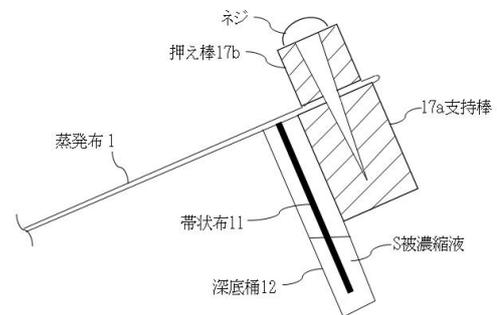


Fig. 11. Seawater feeding device

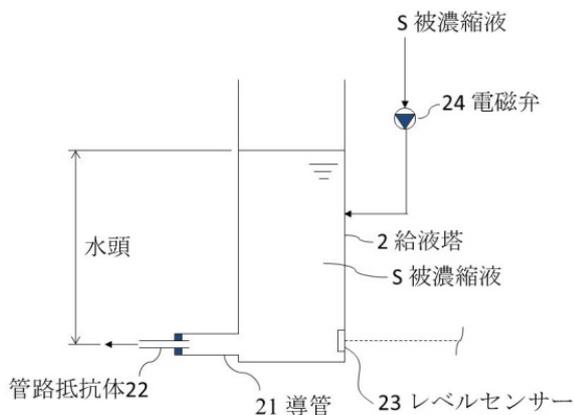


Fig. 12. Seawater feeding tank

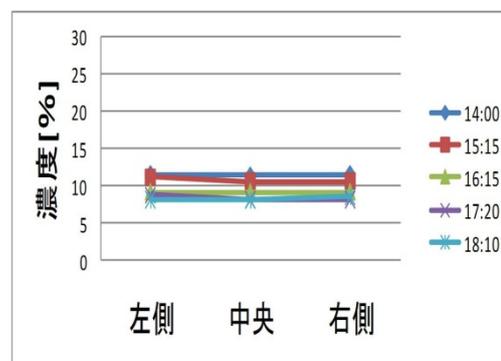


Fig. 13. Distribution of concentration of effluent

の流れが不均一の場合、流れが遅い所では、供給されてから流出するまで時間がかかり濃縮が進むので、濃度が高くなる。逆に、流速が早い所では濃度は低くなる。横棒を用いて布にスパン方向の張りを与えないときは、2 倍近い濃度の不均一が見られる場合もあったことから、スパン方向の張りの効果は絶大であると言える。

スパン方向の張りにはもう一つの効果がある。スパン方向の張りは布のはためきを抑え、蒸発布から海水の飛散を低減する。測定では風速約 10 m/s でも蒸発布からの飛散はほぼゼロであった。

### 蒸発量の時間変化

沖縄本島における 5 月の曇りの日の日中の蒸発量の変化を図 14 に示す。蒸発量は、海水供給量と濃縮海水回収量の差として求めた。蒸発量は日射量の変化とよく対応して変化する。

### 蒸発量と日射量の関係

図 15 に、1 時間当たりの蒸発量と日射量の関係を示す。蒸発量は日射量とともに増加する。日射量が約 0.95  $\text{kw/m}^2$  のときに、蒸発量 0.55  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$  の最高値を記録した。

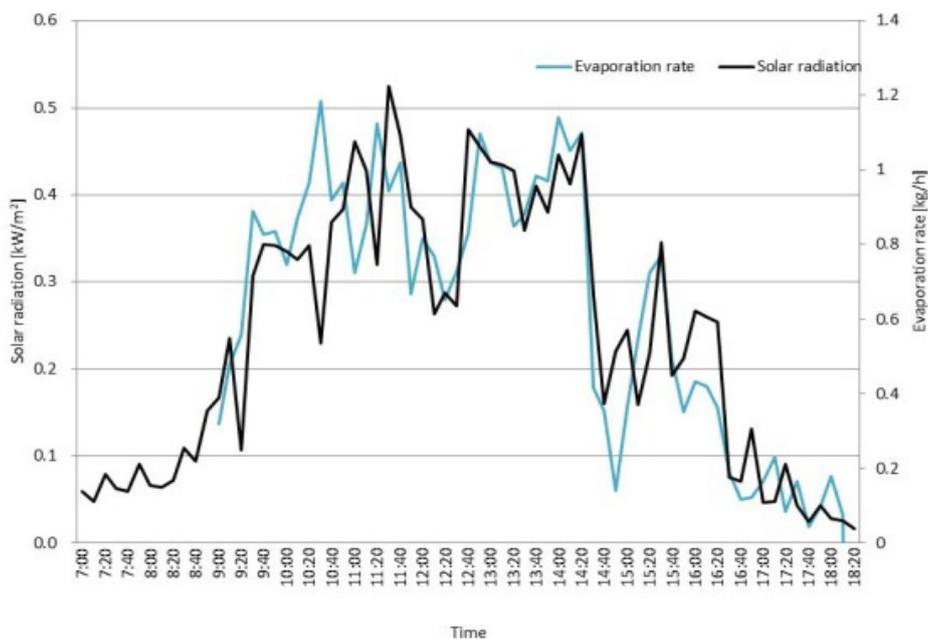


Fig. 14. Time variation of solar radiation and evaporation rate

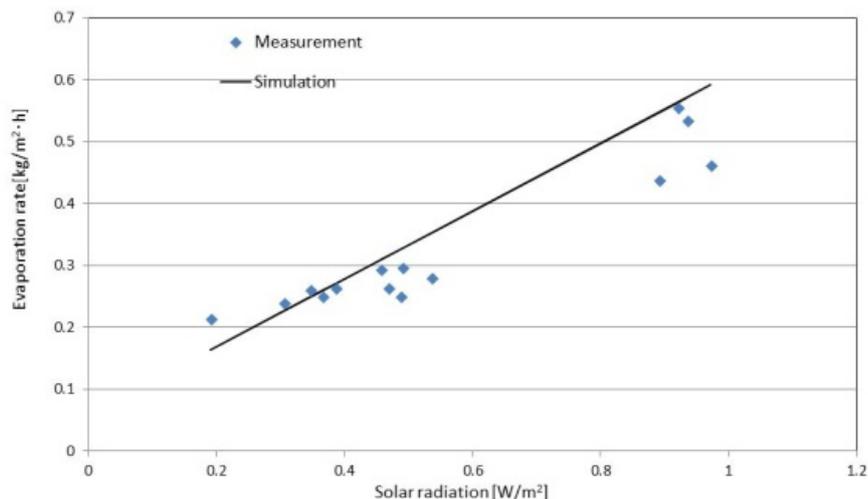


Fig. 15. Evaporation rate vs. solar radiation

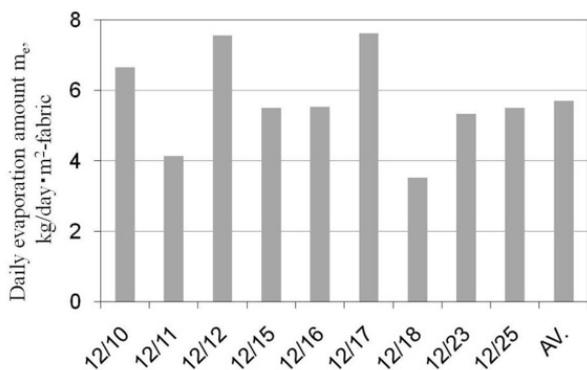


Fig. 16. Daily evaporation amounts

測定値は、気温 27°C、湿度 75%、風速 1.5 m/s の条件で計算した結果とばらつき範囲で一致している。日射量が多いところで、測定値が低い傾向を示すが、これは、黒色塗料の色落ちのため実際の太陽熱吸収率が計算に使用した値の 0.7 よりも低くなったためである。

#### 12 月における蒸発量

図 16 に、12 月における 1 日の蒸発量を示す。蒸発量はその日の天候、特に日射量によって大きく左右され、変動する。測定した 9 日間の値の平均は 5.7 kg/m<sup>2</sup>·day であり、その値は図 9 に示す、沖縄本島の過去の気象データに基づく予測値 5.3 kg/m<sup>2</sup>·day と良い一致を示す。このことから、本測定及びモデル解析は十分信頼できると言える。

#### 4. まとめ

得られた知見は以下のようにまとめられる。

##### モデル解析結果について

- (1) 沖縄の高温多湿の気象条件下において、平均して蒸発布 1 m<sup>2</sup> 当たり 5.2 kg/m<sup>2</sup>·day の蒸発が可能である。梅雨の 6 月には 4.5 kg/m<sup>2</sup>·day 梅雨明けの 7 月には 6.0 kg/m<sup>2</sup>·day の蒸発が見込める。また、夏から秋の晴天日には、約 10 kg/m<sup>2</sup>·day の蒸発が期待できる。
- (2) 蒸発量は日射量、湿度、風速、気温、濃縮海水の塩分濃度の順に強く依存して変化する。それらのいずれの変数に対しても、蒸発量はほぼ直線的に変化する
- (3) 材質や織り方にもよるが、海水が蒸発布中を浸透・流下する速度は小さく、2 m 流下するのに約 60 分要する。気象変数の現在値に基づいて蒸発量を予測し海水供給量を制御した場合、この時間遅れにより、流出海水の

濃度に 3 wt% 程度の変動が生ずる。

##### 屋外実験の結果について

- (4) 布の毛管浸透作用を利用して海水を供給し、蒸発布にスパン方向の張りを与えることにより、蒸発布中を海水が均一に浸透・流下するのを実現した。
- (5) 1 時間当たりの蒸発量は日射とともに直線的に増加し、シミュレーションモデルによる予測値とほぼ一致した。
- (6) 12 月における 1 日の蒸発量は、沖縄本島の過去の気象データの平均値を用いた予測値とよい一致を示した。

以上の結果は、本蒸発布方式が実用化に向けて有望であることを示している。今後は、耐久性等について屋外実験を実施すると共に、気象予測を組み入れた海水供給量の制御方法を開発する予定である。

##### 謝辞

本研究開発の一部は知念学氏と伊波司氏の卒業研究として行われたものである。彼らの協力に謝意を表す。

##### 記号表

- c: 海水および海水を含有する布の比熱, J/kg·K
- h: 蒸発布面の熱伝達率, W/m<sup>2</sup>·K
- I: 蒸発布上面での日射量, W/m<sup>2</sup>
- k: 蒸発布面の物質伝達率, W/m<sup>2</sup>·s·Pa
- ℓ: 蒸発布の流下方向の長さ, m
- L: 海水の蒸発潜熱, J/kg
- M: 布が単位面積あたりに含有する海水量, kg/m<sup>2</sup>
- m<sub>f</sub>: 蒸発布の単位幅当たりの流量, kg/m·s
- m<sub>f,in</sub>: 布の単位幅当たりの供給海水流量, kg/m·s
- m<sub>f,out</sub>: 単位幅当たりの海水流出流量, kg/m·s
- m<sub>e</sub>: 海水の蒸発流束, kg/m<sup>2</sup>·s, Eq. (6)
- p: 海水の飽和水蒸気圧, Pa
- p<sub>a</sub>: 周囲空気バルク中の水蒸気分圧, Pa
- q<sub>cnv</sub>: 対流伝達熱流束, W/m<sup>2</sup>-fabric, Eq. (2)
- q<sub>grd</sub>: 地面からのふく射熱流束, W/m<sup>2</sup>
- q<sub>vpr</sub>: 蒸発によるエンタルピー流束, W/m<sup>2</sup>
- q<sub>sky</sub>: 天空へのふく射熱流束, W/m<sup>2</sup>
- q<sub>slr</sub>: 蒸発布の太陽熱吸収量, W/m<sup>2</sup>
- S<sub>in</sub>: 供給海水の濃度, wt%
- S<sub>out</sub>: 流出海水の濃度, wt%

T: 蒸発布の温度, K  
T<sub>a</sub>: 気温, K  
T<sub>m</sub>: 蒸発布の平均温度, K  
T<sub>sky</sub>: 天空温度, K  
t: 時間, s  
u: 風速, m/s  
v: 蒸発布中を浸透する海水の流速, m/s  
x: 蒸発布の流下方向距離, m  
α: 蒸発布の太陽熱吸収率  
ε: 蒸発布のふく射率  
σ: ステファン・ボルツマン定数, W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>  
η: 蒸発熱効率, Eq. (17)  
Δt: 時間ステップ, s  
Δx: 格子間隔, m

#### 参考文献

- 1) 日本海水学会、ソルトサイエンス研究財団 共編, 海水の化学と工業, 東海大学出版会, 1994, pp. 16.457-16.478
- 2) T. Nosoko, S. Gima, H. Minakuchi, K. Ameku and K. Irabu, Desalination and Water Treatment 16 (2010) 254-261
- 3) T. Nosoko, K. Ameku and H. Minakuchi, International Communications in Heat and Mass Transfer, published online at 2011. 03. 20
- 4) S. Pancharatnam, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 11 (1972) 287-292.

## Development of Double-Sided Wet-Fabric Evaporator of Seawater Utilizing Wind and Solar Energy Efficiently

Takehiro Nosoko

Department of Mechanical and Systems Engineering, Faculty of Engineering,  
University of the Ryukyus

### Summary

A double-sided wet-fabric evaporator of seawater was examined experimentally and theoretically. The evaporator consisted of a rectangular fabric of hydrophilic material, which was stretched between two horizontal bars and slanted so as to utilize the effects of wind and solar energy efficiently. Seawater was soaked up from a gutter by a strip of cloth suspending from the rectangular fabric, and was then infiltrated through the fabric. The fabric was stretched tight crosswise so that the seawater flowed uniformly in the fabric.

The performance of the evaporator was simulated by a one-dimensional transient model, and the simulation results may be summarized as follows:

(1) Under the subtropical and maritime climate conditions of Okinawa Island, the wet fabric evaporates water of 5.2 kg/m<sup>2</sup>-day on average over a year. The evaporation rises to 10 kg/m<sup>2</sup>-day on fine days from summer to autumn.

(2) The evaporation rate increases with increasing solar radiation, wind speed and ambient air temperature, and decreases with increasing humidity and concentration of the effluent seawater. The strong factors are the solar radiation, the wind speed and the humidity.

(3) When the influent seawater is being controlled corresponding with the present values of the weather factors and the evaporation is rapidly increasing, the regulation of the effluent concentration fails and an about 3 wt. % rise of the effluent concentration occurs. When the evaporation is rapidly decreasing, an about 1 wt. % fall of the effluent concentration occurs. These are attributed to the slow flow rate of seawater in the fabric.

A double-sided wet-fabric evaporator was constructed and tested outside at Okinawa Island. The test results may be summarized as follows:

(4) The hourly evaporation increased linearly with the solar radiation, and the experimental data were in fair agreement with the model simulation results.

(5) The daily evaporations were measured on December, and the average of these data was in good agreement with the model simulation result obtained with the weather data of Okinawa Island.