

# 太陽熱利用膜構造蒸留器内の熱収支評価

## The Assessment of Heat Budgets in Solar Still with Envelope Architecture

○松尾 智仁 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学) 井上 義雄 (大阪大学)

Tomohito MATSUO<sup>\*1</sup> Akira KONDO<sup>\*1</sup> Yoshio INOUE<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Osaka University

In this study, the simulation model for estimating temperature, vapor and condensation in solar stills with envelope architecture was developed. The model consists of heat budget on four layers (outer side and inner side of envelope, inner air, and water). Temperature on four layers was obtained from the heat budget of sensible heat flux, and latent heat flux, radiation heat flux and conductive heat flux. In order to estimate the heat flux through the condensing surface on the still, the theory that the size distribution of the dropwise condensation obeys to the fractal law was used. From comparison with the model with the filmwise condensation, it was found that the model with dropwise condensation made heat flux large.

### 1.はじめに

太陽熱による蒸留は古来行われている。かつては海水・汽水から塩を得るために、昨今では塩に加えて淡水を得るためにも蒸留は行われる。地球人口の増加にともない淡水需要は年々増加している一方で、森林の減少や路面舗装などにより環境の淡水保持力が低下してきていることは広く知られている。環境省によれば、水需要の60%以上は農業用水であるが、これは一般に海水で代用できない。そのため、増加する淡水需要に対応するためには、豊富に存在する海水から淡水を得る技術が有用であると考えられる。本研究で扱う蒸留器も、そうした海水淡水化技術の一つに位置付けられる。

ところで、水蒸気が固体表面で冷やされて凝結するとき、凝結の形態として滴状凝結(dropwise condensation)と膜上凝結(filmwise condensation)の2形態があり、滴状凝結の方が凝結面を通過する熱フラックスが大きいことは広く知られている。Meiら<sup>1)</sup>によると、凝結面上の液滴のサイズ分布は凝結がある程度進行すると定常状態となる。また、Meiら<sup>2)</sup>によると凝結面を通過する熱フラックスは、凝結面上の液滴分布と液滴ひとつあたりの熱輸送から計算することができる。

本研究では、Meiら<sup>2)</sup>の提案した凝結面の熱輸送モデルを蒸留器の凝結面に適用し、蒸留器内の熱収支の評価を行うことを目的としている。蒸留器内の熱収支を詳細に検討した研究は少なく、特にその凝結面の熱フラックスが液滴凝結によるものであることに注目している研究はほとんどない。そこで本研究ではMei<sup>2)</sup>のモデルを導

入して蒸留器内の熱収支モデルを構築することで蒸留器内の熱収支のより詳細な評価を可能とすることを目的とする。また、本研究で構築した熱輸送モデル(以下松尾モデルと記す)の妥当性の検証のため、紀田<sup>3)</sup>の研究を参照して紀田の実験結果との比較を行うとともに、一般的な熱輸送モデルを用いて蒸留器内の熱収支を評価するモデル(以下紀田モデルと記す)を構築して比較を行った。以下、松尾モデルと紀田モデルを総称して両モデルという。

### 2. 蒸留器内熱輸送モデル

本研究ではシミュレーションによって蒸留器内の熱収支、造水量などを評価した。シミュレーションは1次元でおこなうため、蒸留器内を膜、内部空気、水の3層に分け、さらに膜は外側(蒸留器外に面する側)と内側(内部空気に面する側)の2層に分けた。これら4層を蒸留器と定義し、各層の流入出フラックスを計算することで蒸留器内の熱収支を評価した。

#### 2.1 基礎方程式

上述1次元モデルの各層に対する熱フラックスを式(1)に代入することで各層の温度変化を求めた。

$$\rho d C_p \frac{dT}{dt} = S_{HD} + R + H + L + C \quad (1)$$

$\rho$ :密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $d$ :厚さ(m)、 $C_p$ :比熱(J/kg·K)、 $T$ :温度(K)、 $S_{HD}$ :短波放射フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $R$ :長波放射

フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $H$ :顕熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $L$ :潜熱

フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $C$ :熱伝導フラックス(W/m<sup>2</sup>)

## 2.2 各フラックスの計算

両モデルでは、太陽からの短波放射フラックス、大気からの長波放射フラックスを計算によって求める。短波放射フラックスは、計算対象となる蒸留器の地球上の位置と蒸留を行う日時を用いて太陽位置を近似的に計算することで求めた。長波放射フラックスは雲量、外気温などを気象条件として入力することで Brunt の公式より求めている。また、膜内外面や水面からも長波放射が生じるため、これらは式(2)によって求め、大気からの長波放射と合算して長波放射フラックスを求める。

$$R = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

$\varepsilon$ :放射率(-)、 $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数(W/m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>)

両モデルでは、膜外側から外気、水から内部空気、内部空気から外気への顕熱フラックスを式(3)によって、求める。

$$H = h(T_h - T_l) \quad (3)$$

$h$ :顕熱輸送係数(W/m<sup>2</sup>・K)、 $T_h$ :高温側温度(K)、 $T_l$ :低温側温度(K)

さらに、紀田モデルでは内部空気から膜内側への顕熱フラックスも式(3)から求める。松尾モデルでは、内部空気から膜内側への顕熱輸送は後述の式(10)と式(8)から求める。

また、両モデルでは、水面からの蒸発や膜内側への凝結による水蒸気フラックス  $E$  (kg/s・m<sup>2</sup>)を式(4)と式(5)から求める。

$$E = e(q_{sat}(T) - q_s) \quad (\text{符号は蒸発が正}) \quad (4)$$

$$q_{sat}(T) = 0.622 \left( \frac{e_s}{P_p - 0.378e_s} \right) \quad (5)$$

$e$ :水蒸気輸送係数(kg/s・m<sup>2</sup>)、 $q_{sat}(T)$ :温度  $T$  での飽和蒸気比湿(kg/kg)、 $q_s$ :内部空気比湿、 $e_s$ :内部空気の飽和水蒸気圧(hPa)、 $P_p$ :大気圧(hPa)

ここで、 $e_s$  は Tetens の式より求められる。また、 $q_s$  は水分量保存則より式(6)で求める。

$$\rho_s d_s \left( \frac{dq_s}{dt} \right) = E_{ws} - E_{ss} - E_{sDin} \quad (6)$$

$\rho_s$ :内部空気の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $d_s$ :内部空気の厚さ(m)、

$E_{ws}, E_{ss}, E_{sDin}$ :それぞれ水から内部空気、内部空気から内部空気、内部空気から膜内側への水蒸気フラックス(kg/s・m<sup>2</sup>)、

ここで、内部空気から内部空気の水蒸気フラックスとは、内部空気が過飽和状態となったとき式(7)にしたがって水蒸気が内部空気中で等エンタルピー変化により凝縮することを表している。

$$E_{ss} = 0.375(q_s - q_{sat}(T_s)) \quad (7)$$

両モデルでは、水蒸気フラックスから潜熱フラックスを式(8)で求める。

$$L = X_L E \quad (8)$$

$X_L$ :蒸発潜熱(J/kg)、

松尾モデルでは、凝結面を通過する熱フラックスを Mei ら<sup>2)</sup>のモデルによって求める。このモデルでは、まず水の物性と内部空気温度、膜内側温度から凝結面の液滴のサイズ分布を求める。Mei ら<sup>1)</sup>によれば凝結面の液滴のサイズ分布はフラクタル則に従うため、フラクタル則を微分することで凝結面の液滴のサイズ分布関数の導関数(式(3))を導出できる。

$$N'(r_c) = N_0 d_f \frac{r_{c,\max}^{d_f}}{r_c^{d_f+1}} \quad (9)$$

$r_c$ :液滴半径(m)、 $N'(r_c)$ :半径  $r_c$  の液滴の密度(m)、 $N_0$ :

定数(-)、 $d_f$ :液滴分布のフラクタル次元、 $r_{c,\max}$ :凝結面に存在する液滴の最大半径(m)

また、Mei ら<sup>2)</sup>は液滴ひとつあたりの熱輸送式(式(4))を導出している。

$$H_s + E_s = \frac{\Delta T - \frac{2T_s \gamma}{h_{fg} \rho r_c}}{\frac{1}{2\pi h_i r_c^2} + \frac{1}{4k\pi r_c}} \quad (10)$$

$H_s$ :液滴ひとつあたりの顕熱輸送(W)、 $E_s$ :液滴ひとつ

あたりの潜熱輸送(W)、 $\Delta T$ :内部空気と膜内側の温度差

(K)、 $T_s$ :内部空気温度(K)、 $\gamma$ :表面張力(N/m)、 $h_{fg}$ :蒸発潜熱(J/kg)、 $\pi$ :円周率(-)、 $h_i$ :液滴表面の伝熱係数(W/m<sup>2</sup>·

K)、 $k$ :水の熱伝導率(W/m·K)

式(9)、式(10)の積をすべての液滴半径について積分することで凝結面を通過する熱フラックスが求められる。

$$H + E = \int_{r_{c,\min}}^{r_{c,\max}} N_0 d_f \frac{r_{c,\max}^{d_f}}{r_c^{d_f+1}} \frac{\Delta T - \frac{2T_s \gamma}{h_{fg} \rho r_c}}{\frac{1}{2\pi h_i r_c^2} + \frac{1}{4k\pi r_c}} dr_c \quad (11)$$

ここで、最大半径 $r_{c,\max}$  (m)とフラクタル次元 $d_f$  (-)、 $h_i$  (W/m<sup>2</sup>·K)の導出には、Meiら<sup>2)</sup>の式を用い、最少半径 $r_{c,\min}$ はKelvinの式より内部空気の過飽和度を0.1%と仮定して求めた。

しかし、式(11)は未知定数 $N_0$ を含むため、 $N_0$ を求める必要がある。本研究では、フラクタル則と凝結面の液滴の面積率 $\Phi$  (%)の関係式(12)を用いて、サイズ分布関数と各液滴の面積から求められる凝結面の液滴の面積率が $\Phi$ に一致するよう、 $N_0$ の値を定めた。

$$\Phi = \left( \frac{r_{c,\min}}{r_{c,\max}} \right)^{2-d_f} \quad (12)$$

$$\int_{r_{c,\min}}^{r_{c,\max}} N_0 d_f \frac{r_{c,\max}^{d_f}}{r_c^{d_f+1}} * \pi r_c^2 dr_c = \Phi \quad (13)$$

式(10)では顕熱フラックスと潜熱フラックスの合計が計算される。顕熱フラックスを分離する必要がある場合は、式(10)で求めた熱フラックスから式(8)で求めた潜熱フラックスを差し引くことで求めた。

両モデルでは、膜内側から膜外側への熱伝導を、以下の式(14)から求めた。

$$C = \lambda \frac{T_{Din} - T_{Dout}}{\frac{1}{2} d_D} \quad (14)$$

$\lambda$ :膜の熱伝導率(W/m·K)、 $T_{Din}$ :膜内側の温度(K)、

$T_{Dout}$ :膜外側の温度(K)、 $d_D$ :膜全体の厚さ(m)

両モデルでは、膜内側への水蒸気フラックス $E_{sDin}$

から、造水量 $Y$ を以下の式(15)から求める。

$$\frac{dY}{dt} = E_{sDin} \quad (15)$$

### 3.計算条件

シミュレーションは冬季条件と夏期条件の2条件で行った。また、紀田<sup>3)</sup>の実験は冬季条件で行われている。

計算に用いた蒸留器の形状・物性をTable.1、Table.2、Table.3、Table.4に示す。

Table.1 properties of still

|                            | 膜     | 内部空気  | 水    |
|----------------------------|-------|-------|------|
| 放射率(-)                     | 0.87  | -     | 0.95 |
| 密度(kg/m <sup>3</sup> )     | 1710  | 1.226 | 1025 |
| 厚さ(cm)                     | 0.027 | 22.0  | 5.0  |
| 比熱(J/kg·m <sup>3</sup> ·K) | 1230  | 1005  | 3900 |

Table.2 property of the envelope

|             | 膜     |
|-------------|-------|
| 短波透過率(-)    | 0.88  |
| 短波吸収率(-)    | 0.082 |
| 長波透過率(-)    | 0.083 |
| 熱伝導率(W/m·K) | 0.097 |

Table.3 thermal transfer coefficients

|                                 | 水から<br>内部空気 | 内部空気<br>から内膜 | 外膜<br>から外気 | 水から<br>外気 |
|---------------------------------|-------------|--------------|------------|-----------|
| 顕熱輸送係数<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) | 20.0        | 20.0         | 20.0       | 3.5       |

Table.4 transfer coefficients of vapor

|                                   | 水から<br>内部空気 | 内部空気から<br>内部空気 | 内部空気<br>から膜 |
|-----------------------------------|-------------|----------------|-------------|
| 水蒸気輸送係数<br>(kg/s·m <sup>2</sup> ) | 0.020       | 0.375          | 0.020       |

### 4.シミュレーション結果

シミュレーション結果をFig.1 Fig.2 Fig.3 Fig.4に示す。

両モデルによる冬季条件でのシミュレーションはよく似た結果となった。また、シミュレーション結果では、13~17時の水温が紀田による実験値よりも3~4K程度高くなったが、それ以外の時間帯ではよく一致した。ま

た、膜温は1日を通してよく一致した。しかし、積算造水量は大きくずれた。ここから蒸留器内部の自然対流の影響をモデルが過小に見積もっていることが示唆される。

また、夏季条件でのシミュレーションでは、紀田モデルと松尾モデルの結果に違いがみられた。この違いは凝結面を通過する熱フラックスの計算モデルの違いであると考えられる。紀田モデルに比べて松尾モデルは日中の内部空気と膜内側の温度差が小さくなっており、これは松尾モデルにおける内部空気から膜内側への熱フラックスが紀田モデルよりも大きいことを意味する。

一般に、滴状凝結面の熱輸送は非凝結面や膜状凝結面

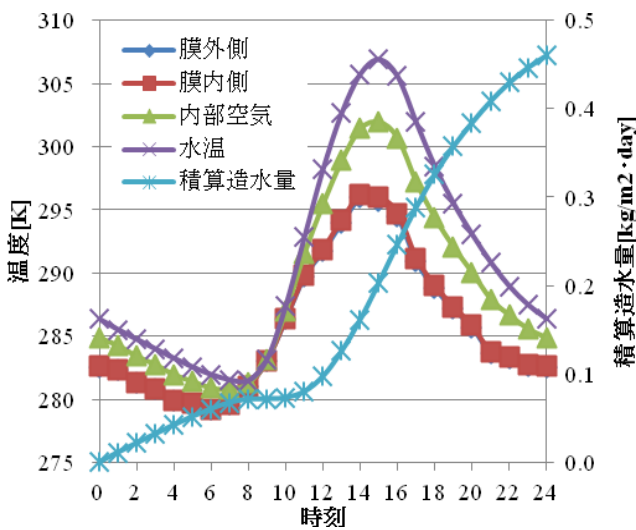


Fig.1 Temperatures and integrated distilled water in simulation of Matsuo-model under winter condition

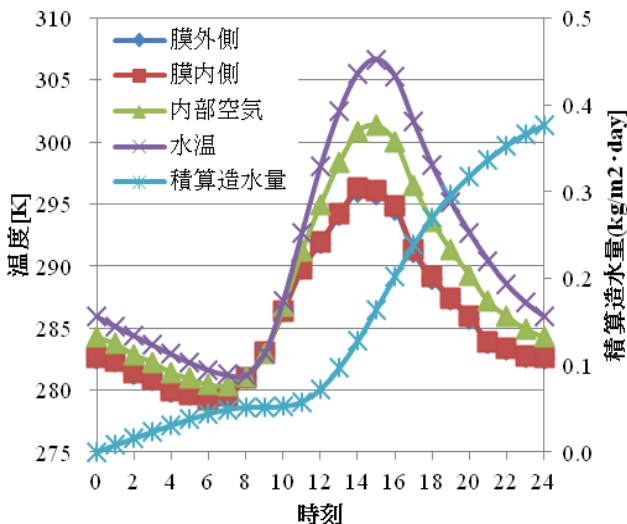


Fig.2 Temperatures and integrated distilled water in simulation of Kita-model under winter condition

の熱輸送よりも大きくなることが知られるため、滴状凝結の影響を考慮していない紀田モデルに対して滴状凝結の影響を考慮している松尾モデルの熱フラックスが大きくなったことは、松尾モデルの妥当性を示唆している。

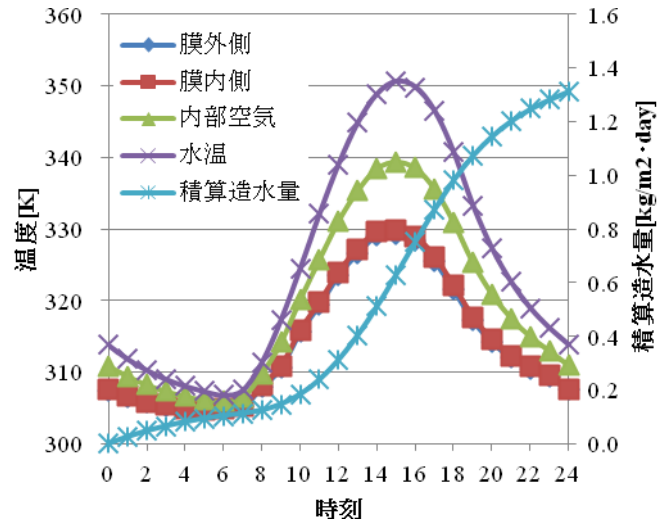


Fig.3 Temperatures and integrated distilled water in simulation of Matsuo-model under summer condition

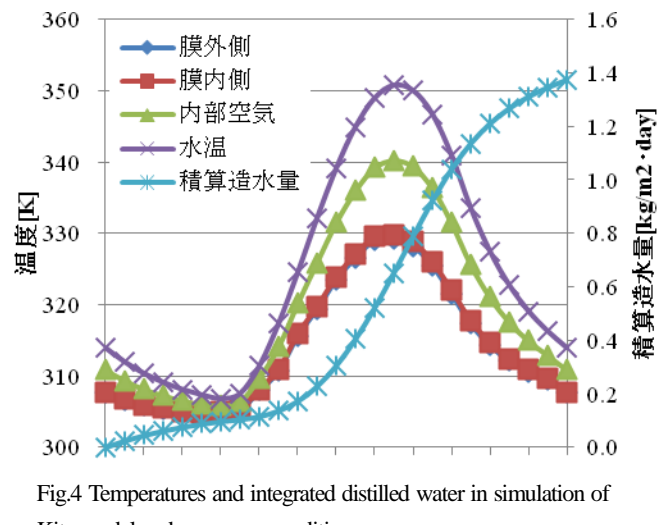


Fig.4 Temperatures and integrated distilled water in simulation of Kita-model under summer condition

#### 参考文献

- 1) M. Mei, B. Yu, M. Zou, L. Luo, "A numerical study on growth mechanism of dropwise condensation", International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) pp.2004-2013
- 2) M. Mei, B. Yu, J. Cai, L. Luo, "A fractal analysis of dropwise condensation heat transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) pp.4823-4828
- 3) 紀田征也, "太陽熱利用膜構造蒸留器による海水淡水化システム", 1992