

# 海洋温度差発電用プレート式蒸発器の性能試験

中岡 勉\*・上原春男\*

## Performance Tests of a Shell and Plate Type Evaporator for OTEC

Tsutomu NAKAOKA, Haruo UEHARA

The performance tests of a shell and plate type evaporator (total surface area=21.95m<sup>2</sup>, length=1450mm, width=235mm, plate number=100) for ocean thermal energy conversion (OTEC) plants are carried out under conditions of OTEC. Freon 22 (R22) and ammonia (NH<sub>3</sub>) are used as working fluid. The empirical correlations are proposed in order to predict the boiling heat transfer when using R22 and NH<sub>3</sub> and water side heat transfer coefficients for a shell and plate type evaporator. The water side pressure drop is about 3 m at the warm water velocity of 0.7 m/s. The water side friction factor is obtained.

Key words ; OTEC, Shell and Plate Type, Evaporator, Boiling Heat Transfer, Friction Factor

### 1. 緒 言

海洋温度差発電や工場の温排水発電を低コストでコンパクトに建設するためには、高性能でコンパクトで安価な蒸発器を開発する必要がある。

在来の発電所での熱交換器は、多管円筒式熱交換器が多く使用されている。しかし、低沸点媒体を使用する海洋温度差発電等の場合、在来の発電所に使用されている多管円筒式熱交換器を使用すると、発電コストが高くなり、経済的でない。また、海洋温度差発電は、熱源間の温度差が小さいために、熱交換器の終端温度差を出来るだけ小さくし、発電端出力を大きくする必要があるのである。在来の熱交換器の場合、終端温度差を小さくするためには、伝熱面の長さを長くする必要があるのである。このために、圧力損失が大きくなり、ポンプ動力を増大させる重大な欠点が生じる。

Thomas<sup>1)</sup>や Panchel<sup>2)</sup>は、実用規模のプレート式蒸発器を用いた性能テストの結果を報告しているが、いずれも熱通過係数のみを測定したものである。

プレート式の場合、プレートエレメントの形状によって性能が異なる。上原ら<sup>3)4)5)</sup>は、プレートエレメントの形状が異なる三種類のプレート式蒸発器を用いて、

種々の実験を行い、熱通過係数や圧力損失係数について報告している。

海洋温度差発電システムを設計する場合には、種々の条件下での熱通過係数を正確に見積る必要がある。そのためにも、作動流体側と海水側の熱伝達係数および圧力損失係数が必要になる。

本報は、上原らが発表したプレートエレメントのうち、最も熱通過係数が高いプレートエレメントを用いて製作したプレート式蒸発器の沸騰熱伝達係数、海水側の熱伝達係数および圧力損失係数を、作動流体にフロン22とアンモニアを使用して測定した結果を報告する。

### 使用記号

A : 総伝熱面積

$c_p$  : 定圧比熱

$D_{eq}$  : 相当直径 (= 2  $\delta$ )

$f_p$  : 圧力係数

$f_g$  : 起ほう度

g : 重力加速度

h : 熱伝達係数

H : 顕潜熱比

$\Delta H$  : 損失水頭

k : 熱伝導率

\*佐賀大学理工学部附属海洋熱エネルギー変換実験施設

$K_s$ : 砂の平均粒径  
 $l$ : プレートの長さ  
 $L$ : 潜熱  
 $\dot{m}$ : 流量  
 $Nu$ : ヌセルト数  
 $P$ : 圧力  
 $Pr$ : プラントル数  
 $q$ : 熱流束  
 $Q$ : 熱量  
 $R$ : 管半径  
 $Re$ : レイノルズ数  
 $t$ : プレートの厚さ  
 $T$ : 温度

$\Delta T_m$ : 対数平均温度差

$\Delta T_{sat}$ : 過熱度

$U$ : 熱通過係数

$V$ : 流速

$X$ : 無次元数 式 (13)

$Y$ : 無次元数 式 (12)

$\delta$ : プレートの間隙

$\lambda$ : 摩擦係数

$\mu$ : 粘性係数

$\nu$ : 動粘性係数

$\rho$ : 密度

$\sigma$ : 表面張力

添 字

B: 沸騰

cal: 計算値

exp: 実験値

E: 蒸発器

HW: 温水

I: 入口

L: 液体

O: 出口

V: 蒸気

W: 壁面

## 2. 実験装置

Fig. 1 に、実験装置のフロー線図を示す。実験装置は、耐圧20ataで製作されている。温水ボイラ(1.163×10<sup>6</sup>W)は、温水を作るために使用した。冷凍機(3.489×10<sup>6</sup>W)は、冷水を作るために使用した。凝縮器は、プレート式凝縮器(40.7m<sup>2</sup>)である。

Fig. 2 は、実験に使用したプレート式蒸発器の外観写真を示す。プレート式蒸発器は、縦2070mm、横400mm、厚さ366mmである。

Fig. 3 (a), (b) には、プレート式蒸発器に用いたプレート伝熱面を示す。このプレートは、長さ1450mm、幅235mm、厚さ1mmである。伝熱面材質は、チタニウムである。

Fig. 3 (a) は、作動流体側で、表面には、アルミ粉末が溶射されている。アルミ粉末の厚さは、約100 $\mu$ mである。この表面粗さ(約80 $\mu$ m)決定の際、伊藤ら<sup>6)</sup>の研究結果等を参考にした。

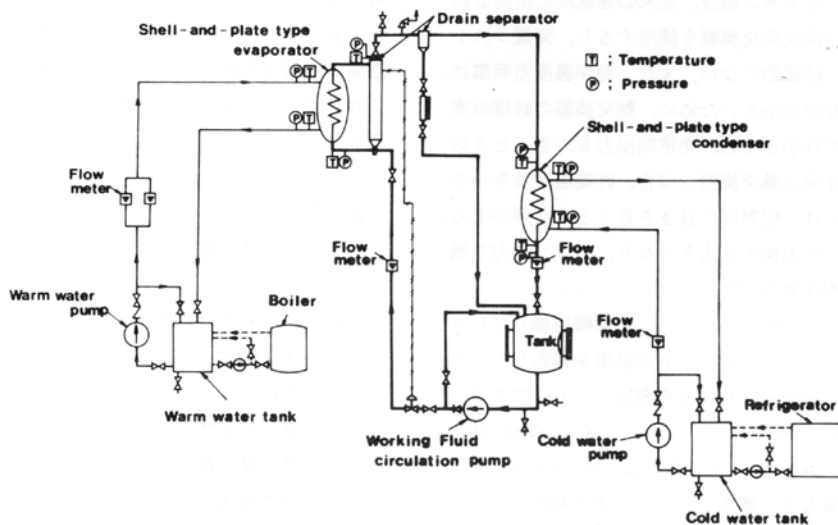


Fig. 1 Piping layout of test facility

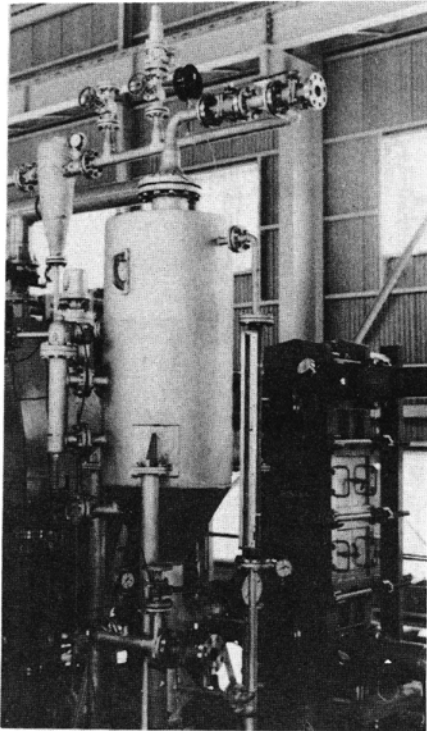
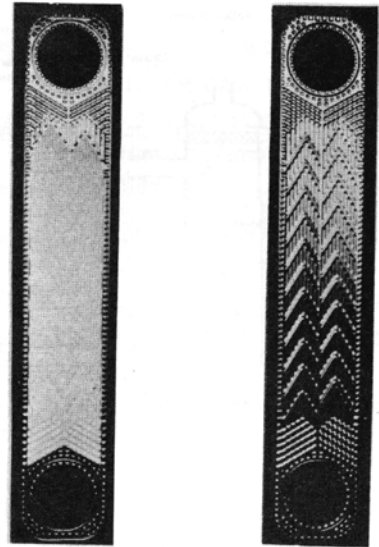


Fig. 2 Shell and plate type evaporator

Fig. 3 (b) は、Fig. 3 (a) の裏面で温水側の伝熱面形状を示したものである。温水側の熱伝達係数を増進させるために、縦溝（ピッチ10mm、深さ1mm）と斜め溝（ピッチ70mm、深さ1mm）を施している。Fig. 2 のテスト用蒸発器には、Fig. 3 に示した伝熱面が100枚入っている。有効総伝熱面積は、21.95m<sup>2</sup>である。ただし、沸騰側の粗さによる伝熱面の増加は考慮していない。

Fig. 4 (a), (b), (c) には、プレート式蒸発器の構造図を示す。Fig. 4 (a) は、全体の構造図である。プレート式蒸発器は、Fig. 3 (a) に示した作動流体側を内側にして2枚の伝熱面の外周を溶接したプレートをFig. 4 (a) のように重ね合わせて組み立てられている。温水は、上方の温水入口孔より入って、伝熱面の両側の上方側面から流入し、プレート内部を通り、伝熱面の両側の下方側面から流出し、下方の温水出口孔より出る。一方、作動流体は、ドレンセパレータの下部の下孔から入り、作動流体入口ノズルを通り、溶接されたプレート伝熱板の内側を通り、徐々に沸騰しながら、作動流体出口ノズルから蒸気と未蒸発液体の混合流体が流出する。蒸気は、ドレンセパレータの上方



(a) Working fluid side (b) Water side

Fig. 3 The surface of plates

から流出し、凝縮器に至る。未蒸発液体は、ドレンセパレータで気液分離された後、ドレンセパレータの下部に溜る。この未蒸発液体と液体タンクよりポンプで送られた過冷却液とを混合させることによって、プレート式蒸発器への供給液を若干予熱している。

### 3. 実験方法と測定方法

実験は、まず、作動流体を液タンクから作動流体循環ポンプで、ドレンセパレータに所定レベルまで液を送る。次に、プレート式凝縮器に冷却水を冷却水ポンプで送る。この冷却水は、冷凍機にて、予め所定の温度に冷却されてタンクにためられている。これらの準備をした後に、テスト用のプレート式蒸発器に、温水ボイラで予め所定温度に加熱され温水タンクにためられている温水を温水ポンプにて送る。

データは、蒸発量と凝縮量とがほぼ一致し、かつ全ての箇所の温度がほぼ一定になった時を定常状態とみなし採った。

温度測定は、シース型熱電対により、プレート式蒸発器、凝縮器の作動流体側の入口出口、また、水側も同様に入口出口で行った。

圧力測定は、圧力変換器〔作動流体側 {非直線性：0.2%定格出力 (20kg/cm<sup>2</sup>)}、水側 {非直線性：0.3%定

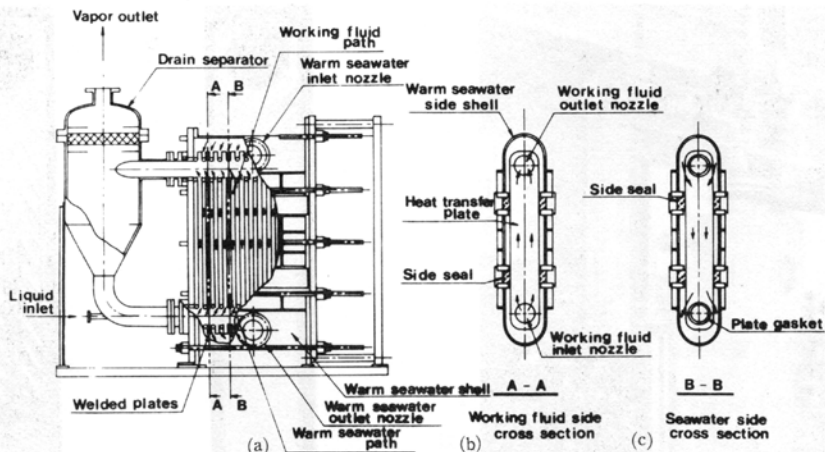


Fig. 4 Construction of a shell and plate type evaporator

格出力 (10kg/cm<sup>2</sup>)) を使用し行った。また、差圧測定は、差圧変換器 [作動流体側 {非直線性: 0.3% 定格出力 (0.5kg/cm<sup>2</sup>)}, 水側 {非直線性: 0.3% 定格出力 (1kg/cm<sup>2</sup>)}] を使用し行った。

流量は、電気発信器付浮子式流量計 [温水側 {精度: ±2% 最大流量 (196t/h)}, 冷却水 {精度: ±2% 最大流量 (250t/h)}, 蒸発量 {精度: ±2% 最大流量 (30t/h)}, 凝縮量 {精度: ±2% 最大流量 (30t/h)}] で測定した。

実験データは、A/D 変換器又は GP-IB を用いて、直接コンピュータ (TOSBAC DS 600/40) で取込んだ。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 実験条件

Table 1 に実験条件を示す。実験は、フロン22の場合には、海洋温度差発電の使用条件である温水入口温度 14.8°C~33.9°C の範囲で実験を行った。しかし、アンモニアの場合には、周辺設備の関係で、温水入口温度は、17.4°C~23.6°C の範囲で若干せまい。温水流速

は、フロン22の場合、0.53~1.89m/s、アンモニアの場合、0.9~1.69m/s である。

##### 4.2 熱通過係数

プレート式蒸発器の熱通過係数は、次式で定義する。

$$U_E = Q_E / \{A_E (\Delta T_m)_E\} \quad (1)$$

ここで、 $Q_E$  は、温水流量と温水入口温度と温水出口温度との温度差から算出される熱量  $Q_{HW}$  と蒸発量からの交換熱量  $Q_L$  との算術平均値を使用した。 $Q_{HW}$ 、 $Q_L$  は、それぞれ、次式から算出した。

$$Q_{HW} = \dot{m}_{HW} c_{pHW} (T_{HW1} - T_{HW0}) \quad (2)$$

$$Q_L = \dot{m}_L L \quad (3)$$

ここで、 $\dot{m}_{HW}$  は温水流量、 $c_{pHW}$  は定圧比熱、 $T_{HW1}$ 、 $T_{HW0}$  は温水入口、出口温度、 $\dot{m}_L$  は作動流体流量、 $L$  は蒸発

Table 1 Experimental conditions

作動流体		R22	NH <sub>3</sub>
温水入口温度	$T_{HW1}$ (°C)	14.8~33.9	17.4~23.6
蒸気出口温度	$T_{VO}$ (°C)	11.8~30.9	14.7~20.3
蒸気圧力 ×10 <sup>6</sup>	$P_V$ (Pa)	0.768~1.21	0.719~0.856
温水流速	$V_{HW}$ (m/s)	0.53~1.89	0.90~1.69
熱流束	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	2943~18071	8692~11764

潜熱である。

$A_E$ は総伝熱面積で、 $(\Delta T_m)_E$ は対数平均温度差で次式より算出した。

$$(\Delta T_m)_E = (T_{HWI} - T_{HWO}) / \ln \{ (T_{HWI} - T_{VO}) / (T_{HWO} - T_{VO}) \} \quad (4)$$

ここで、 $T_{VO}$ は蒸気出口温度である。なお、 $Q_{HW}$ と $Q_L$ が±20%以内のデータを採用し整理した。

また、本報では、フロン22の物性値には、文献[8]、アンモニアの物性値には、文献[9]、水の物性値には、文献[7]を使用した。

Fig. 5 (a)は、作動流体がフロン22の場合の熱通過係数 $U_E$ と温水流速 $V_{HW}$ との関係の1例を示したものである。△印のデータは、蒸気出口温度 $T_{VO} = 18.0 \sim 18.8^\circ\text{C}$ 、作動流体流量 $\dot{m}_L = 0.31 \sim 1.89\text{kg/s}$ である。○印のデータは、蒸気出口温度 $T_{VO} = 21.6 \sim 22.5^\circ\text{C}$ 、作動流体流量 $\dot{m}_L = 1.74 \sim 2.18\text{kg/s}$ である。□印のデータは、蒸気出口温度 $T_{VO} = 26.6 \sim 27.5^\circ\text{C}$ 、作動流体流量 $\dot{m}_L = 1.86 \sim 2.21\text{kg/s}$ である。

Fig. 5 (a) から明らかなように、熱通過係数 $U_E$

は、温水流速が大きい程、大きくなっている。また、同じ流速の場合を見てみると、蒸気出口温度 $T_{VO}$ が高い程、熱通過係数は、大きくなっていることがわかる。蒸気出口温度 $T_{VO} = 21.6 \sim 22.5^\circ\text{C}$ の場合、温水流速 $1\text{m/s}$ の時、熱通過係数は、約 $4000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ となる。

Fig. 5 (b)は、作動流体がアンモニアの場合の熱通過係数 $U_E$ と温水流速 $V_{HW}$ との関係の1例を示す。△印のデータは、蒸気出口温度 $T_{VO} = 14.7 \sim 15.7^\circ\text{C}$ 、作動流体流量 $\dot{m}_L = 0.16 \sim 0.20\text{kg/s}$ である。○印のデータは、蒸気出口温度 $T_{VO} = 16.5 \sim 17.5^\circ\text{C}$ 、作動流体流量 $\dot{m}_L = 0.19 \sim 0.21\text{kg/s}$ である。

Fig. 5 (b) よりわかるように、熱通過係数 $U_E$ は、温水流速が増加する程大きくなっている。蒸気出口温度 $T_{VO} = 16.5 \sim 17.5^\circ\text{C}$ の場合、温水流速 $0.9\text{m/s}$ の時、熱通過係数は、約 $3800\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ となっている。アンモニアの場合の $U_E$ がフロン22の場合より小さいのは、 $T_{VO}$ が低いためと考えられる。

### 4.3 温水側熱伝達係数

Fig. 6は、温水側の熱伝達係数 $h_{HW}$ を見積るためのウィルソン・プロット法による $1/U_E$ と $V_{HW}^{-0.8}$ を示す。横軸の $V_{HW}$ の指数 $-0.8$ は、文献[10]で述べた熱

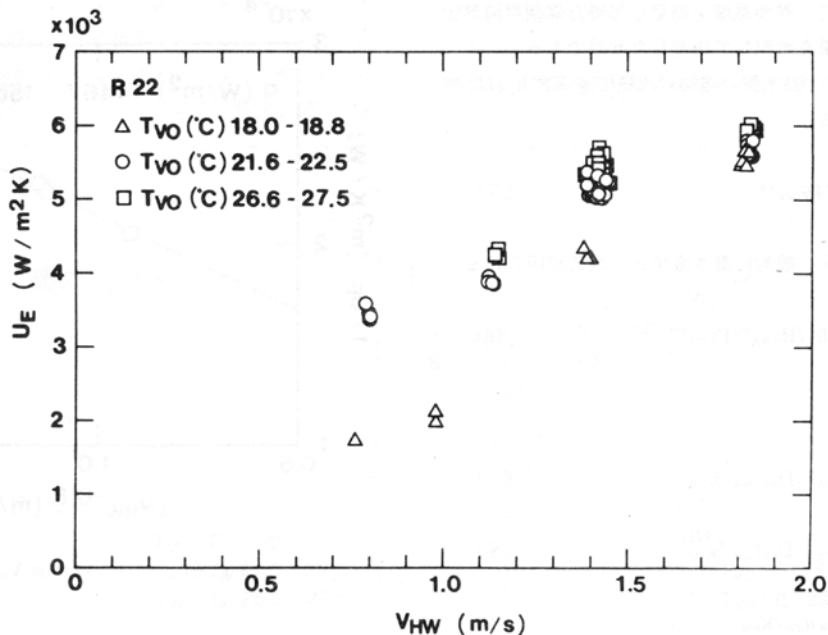


Fig. 5(a) Overall heat transfer coefficient for evaporator versus the velocity of the warm water (Freon 22)

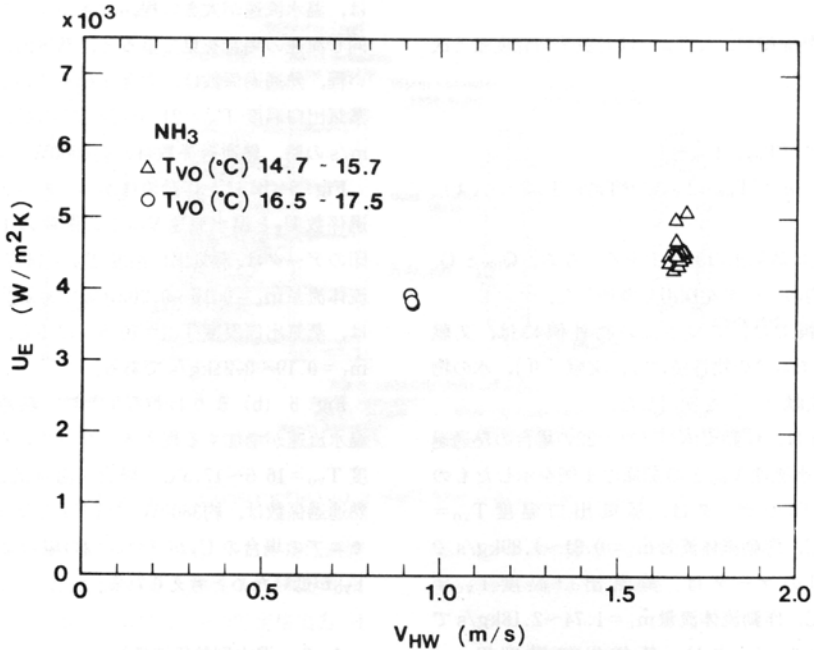


Fig. 5 (b) Overall heat transfer coefficient for evaporator versus the velocity of the warm water (Ammosia)

電対を用いて伝熱面温度を測定して得た強制対流熱伝達係数の結果を参照して決定したものである。

Fig. 6 より、温水側の強制対流熱伝達係数  $h_{HW}$  は、次式で表される。

$$h_{HW} = 10574 V_{HW}^{0.8} \quad (5)$$

式 (5) を一般的に書き直すと、次式が得られる。

$$Nu_{HW} = 0.047 Re_{HW}^{0.8} Pr_{HW}^{1/3} \quad (6)$$

ここで、

$$Nu_{HW} = h_{HW} (D_{eq})_{HW} / k_{HW} \quad (7)$$

$$Re_{HW} = V_{HW} (D_{eq})_{HW} / \nu_{HW} \quad (8)$$

$$Pr_{HW} = c_{pHW} \mu_{HW} / k_{HW} \quad (9)$$

ここで、 $D_{eq}$  は、相当直径 (=  $2\delta$ ) である。

Maslov の平滑平板の場合<sup>11)</sup>、式 (6) の係数が 0.021 となっているので、本報のプレートの場合、平滑平板

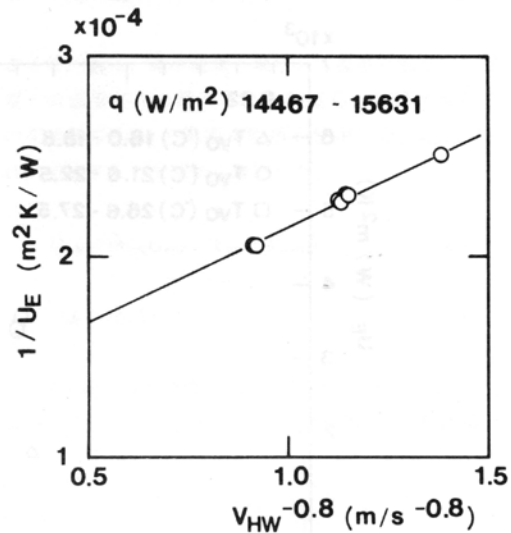


Fig. 6  $1/U_E$  versus  $V_{HW}^{-0.8}$

に比較すると 2.24 倍熱伝達係数が大きいことが分る。

#### 4.4 沸騰熱伝達係数

沸騰熱伝達係数  $h_B$  は、次式で算出する。

$$1/h_B = 1/U_E - (1/h_{HW} + t/k_w) \quad (10)$$

ここで、 $U_E$ には測定値を、 $h_{HW}$ は温水側の熱伝達係数で、式(6)から算出した値を用いる。 $t$ は伝熱面の板厚である。 $k_w$ は伝熱面の熱伝導率で、ここでは、チタンの熱伝導率( $k_w = 14.8 \text{ W}/(\text{mK})$ )を用いた。

#### 4.4.1 熱流束 $q$ と過熱度 $\Delta T_{sat}$

Fig. 7 (a) は、作動流体がフロン22の場合の熱流束  $q$  と過熱度  $\Delta T_{sat} = (T_{vo} - T_{wv})$  との関係を示す。Fig. 7 (a) 中の  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$  の印データは、蒸気出口温度がそれぞれ  $T_{vo} = 18.0 \sim 18.8^\circ\text{C}$ ,  $T_{vo} = 21.6 \sim 22.5^\circ\text{C}$ ,  $T_{vo} = 26.6 \sim 27.5^\circ\text{C}$  の場合のものである。

Fig. 7 (b) は、作動流体がアンモニアの場合の熱流束  $q$  と過熱度  $\Delta T_{sat}$  との関係を示す。

Fig. 7 (b) 中の  $\square$  印のデータは、九州電力の徳之島プラントの実用機で得られたものである<sup>12)</sup>。Fig. 7 (b) よりわかるように、熱伝達係数は、熱流束が小さい場合と大きい場合とでは傾向が異なる。また、蒸気温度が大きい程、すなわち、蒸気圧力が大きい程、熱伝達係数が大きいことがわかる。

Fig. 7 (a), (b) より、粗面伝熱面を有するプレート式蒸発器の場合には、過熱度 (アンモニアは約  $0.8^\circ\text{C}$ ) を越えると沸騰曲線の勾配は小さくなり、粗面による伝熱促進の効果が小さいことが分る。粗面伝熱面で狭

い空間の場合、熱伝達係数は、ある過熱度以上では、上昇気泡量がある限度を越えると、プレート内で蒸気閉塞を起こし、低下していると考えられる。この点については、今後さらに詳細な研究を要するようである。

#### 4.4.2 熱伝達係数 $h_B$ と熱流束 $q$

Fig. 8 (a) は、作動流体がフロン22の場合の熱伝達係数  $h_B$  と熱流束  $q$  との関係を示したものである。Fig. 8 (a) よりわかるように、熱伝達係数は、熱流束が約  $1.7 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2$  で減少している。

Fig. 8 (b) は、作動流体がアンモニアの場合の熱伝達係数  $h_B$  と熱流束  $q$  との関係を示す。この場合には、熱伝達係数は、熱流束が  $1.0 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2$  を越えると減少している。

#### 4.4.3 熱伝達係数 $h_B$ と過熱度 $\Delta T_{sat}$

Fig. 9 (a) は、作動流体がフロン22の場合の熱伝達係数  $h_B$  と過熱度  $\Delta T_{sat}$  との関係を示す。熱伝達係数は、過熱度が約  $1^\circ\text{C}$  以上になると悪くなっている。

Fig. 9 (b) は、作動流体がアンモニアの場合の熱伝達係数  $h_B$  と過熱度  $\Delta T_{sat}$  との関係を示す。アンモニアの場合もフロン22と同様、熱伝達係数は、過熱度が約  $1^\circ\text{C}$  以上になると悪くなっている。

本プレート伝熱面を有効に利用するためには、過熱度が  $1^\circ\text{C}$  以下で利用することをすすめる。

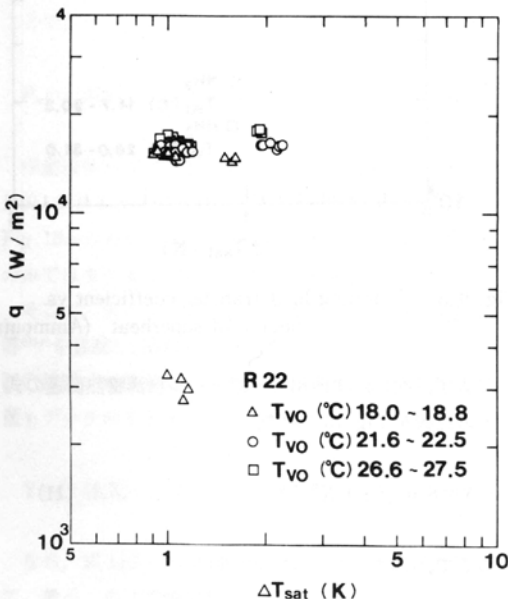


Fig. 7 (a) Boiling curve (Freon 22)

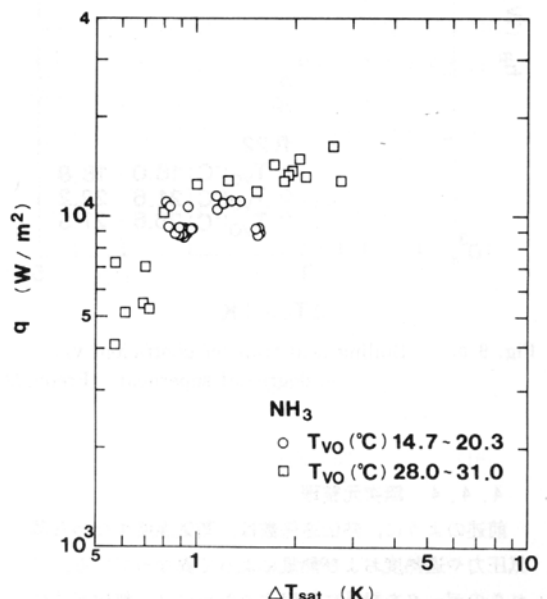


Fig. 7 (b) Boiling curve (Ammonia)

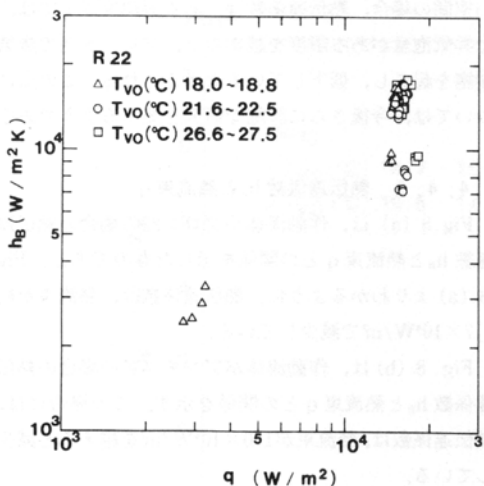


Fig. 8(a) Boiling heat transfer coefficient vs. heat flux (Freon 22)

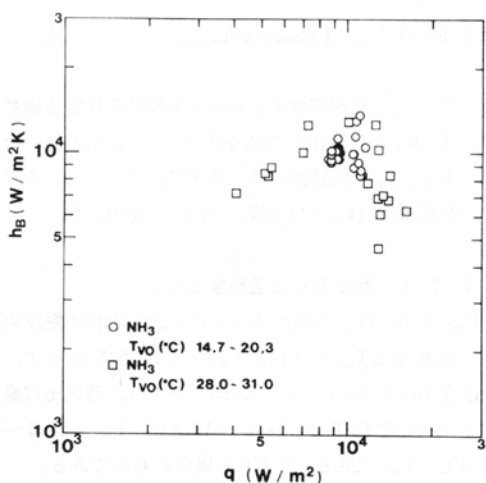


Fig. 8(b) Boiling heat transfer coefficient vs. heat flux (Ammonia)

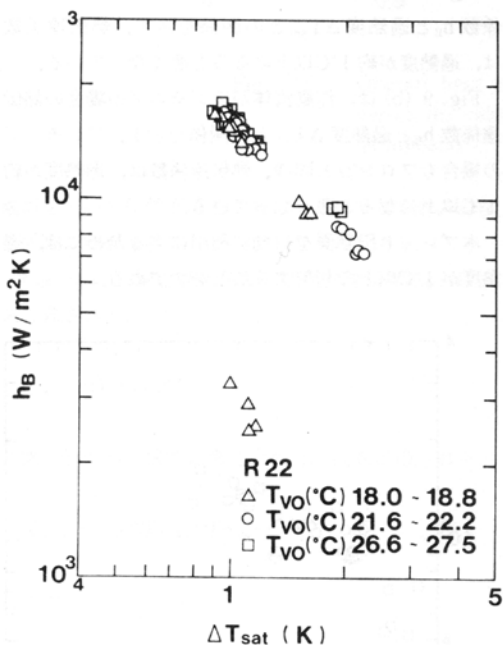


Fig. 9(a) Boiling heat transfer coefficient vs. degree of superheat (Freon 22)

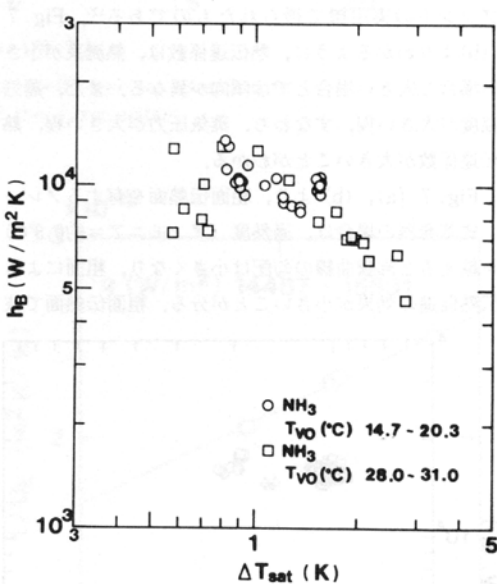


Fig. 9(b) Boiling heat transfer coefficient vs. degree of superheat (Ammonia)

#### 4.4.4 無次元整理

前述のように、熱伝達係数は、蒸気温度すなわち蒸気圧力や過熱度および熱量によって異なっている。これらのデータを設計に利用するためには、無次元式にまとめた方が便利である。

まず、次に示す西川ら<sup>13)</sup>のプール核沸騰熱伝達の式との比較を Fig.10に示す。

$$Y = 8.0 [f_{\zeta} f_p X]^{2/3} \quad (11)$$

ここで、

$$Y = h_B (D_{eq})_E / k_L \quad (12)$$



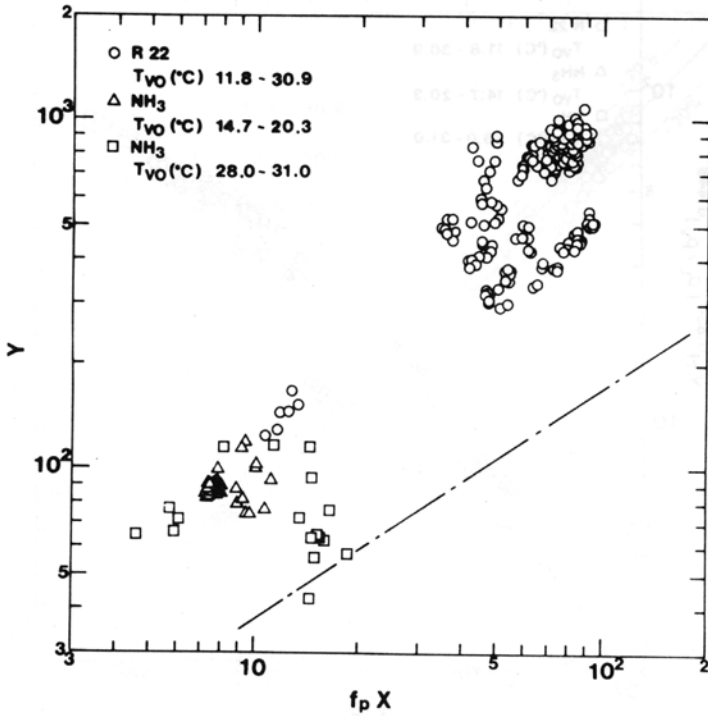


Fig. 10 Correlation of boiling heat transfer coefficient

$$X = \frac{[c_{pL} \rho_L]^2}{P_0 M^2 k_L \sigma L \rho_V}^{1/2} (D_{eq})_E^{3/2} \quad (13)$$

ここで、

$$P_0 = 1.976 \text{ W}, M = 900 \text{ m}^{-1} \quad (14)$$

作動流体がフロン22の場合、西川らの式(11) ( $f_\xi = 1.0$ )より  $f_p X = 50$ の時、約3~9倍大きい。また、Fig. 10からわかるように、実験値は、無次元数  $Y$ ,  $f_p X$ のみではまとまりが悪いことがわかる。

そこで、ポーラス面上の核沸騰熱伝達係数の実験式等<sup>6)14)</sup>を参照し、沸騰熱伝達係数を種々のパラメータで試行錯誤的に整理してみた。そのうち、次の関係式が最もデータのまとまりが良かった。

$$Y = C (f_p X)^m (H)^n (\rho_L / \rho_V)^l \quad (15)$$

なお、式(15)中の指数  $m$ ,  $n$ ,  $l$  は、実験値を用いて、最小二乗法で決定した。

Fig. 11は、縦軸に  $YH^{0.834} (\rho_L / \rho_V)^{0.448}$  と横軸に  $f_p X$

をとって実験データを整理したものである。

Fig. 11より明らかなように、データは、Fig. 10よりまとまりがよい。また、 $f_p X$ が増加するに従って  $YH^{0.834} (\rho_L / \rho_V)^{0.448}$ の値も増加する。しかし、作動流体がフロン22の場合は、 $f_p X$ が62で増加の傾きがゆるやかになっている。アンモニアの場合は、 $f_p X$ が14.9で傾きがゆるやかになっている。アンモニアの場合、本報の結果と九州電力の徳之島プラントで得られたデータは、ほぼ一致している。

実験値は、それぞれ、次式で表される。

フロン22の場合：

$$Y = 1.180 (f_p X)^{0.919} H^{-0.834} (\rho_L / \rho_V)^{-0.448}, \quad f_p X \leq 62 \quad (16)$$

$$Y = 6.646 (f_p X)^{0.5} H^{-0.834} (\rho_L / \rho_V)^{-0.448}, \quad f_p X \geq 62 \quad (17)$$

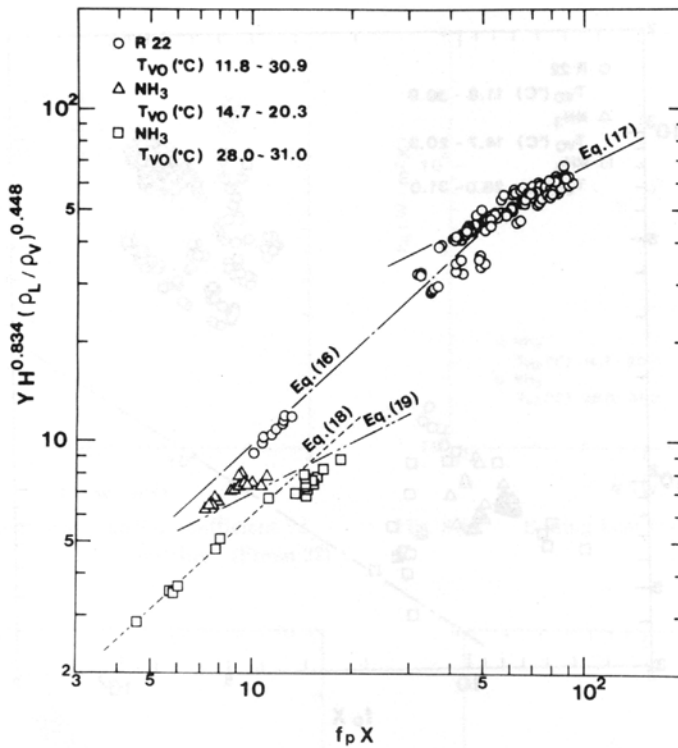


Fig. 11  $YH^{0.834}(\rho_L/\rho_V)^{0.448} \sim f_p X$

アンモニアの場合：

$$Y = 0.716 (f_p X)^{0.919} H^{-0.834} (\rho_L/\rho_V)^{-0.448},$$

$$f_p X \leq 14.9 \quad (18)$$

$$Y = 2.218 (f_p X)^{0.5} H^{-0.834} (\rho_L/\rho_V)^{-0.448},$$

$$f_p X \geq 14.9 \quad (19)$$

Fig. 12は、実験値から得られる  $Y_{exp}$  と式(16)～(19)で得られる  $Y_{cal}$  とを改めて比較したものである。当然のことながら、両者の相関は、 $\pm 20\%$  で極めてよい。

#### 4.5 実験式と経験式との比較

Fig. 13は、実験値より求めた熱通過係数  $U_{exp}$  と作動流体がフロン22の場合、温水側の熱伝達係数に式(6)、沸騰熱伝達係数に式(16)～(17)、アンモニアの場合、温水側の熱伝達係数に式(6)、沸騰熱伝達係

数に式(18)～(19)を用いて算出した熱通過係数  $U_{cal}$  との比較を示したものである。

$U_{exp}$  と  $U_{cal}$  との相関は、 $\pm 30\%$  となっている。

#### 4.6 圧力損失

Fig. 14は、損失水頭  $\Delta H_{HW}$  と温水流速  $V_{HW}$  との関係を示したものである。Fig. 14より、温水流速が  $0.7 \text{ m/s}$  の時、損失水頭は、約  $3 \text{ m}$  である。

プレート式蒸発器の摩擦係数  $\lambda$  は、次式により算出した。

$$\lambda = \Delta H_{HW} / [\{V_{HW}^2 / 2g\} \{l / (D_{eq})_{HW}\}] \quad (20)$$

Fig. 15は、摩擦係数  $\lambda$  とレイノルズ数  $Re_{HW}$  との関係を示したものである。

このプレート式蒸発器の場合の摩擦係数  $\lambda$  は、Nikuradseの実験値 ( $R/K_s = 15$ )<sup>15)</sup>より、レイノルズ数  $Re_{HW}$  が  $5 \times 10^3$  の時、約11倍大きい。

#### 5. 結論

プレート式蒸発器を用い、作動流体にフロン22とアンモニアの場合について実験を行い次の結果を得た。

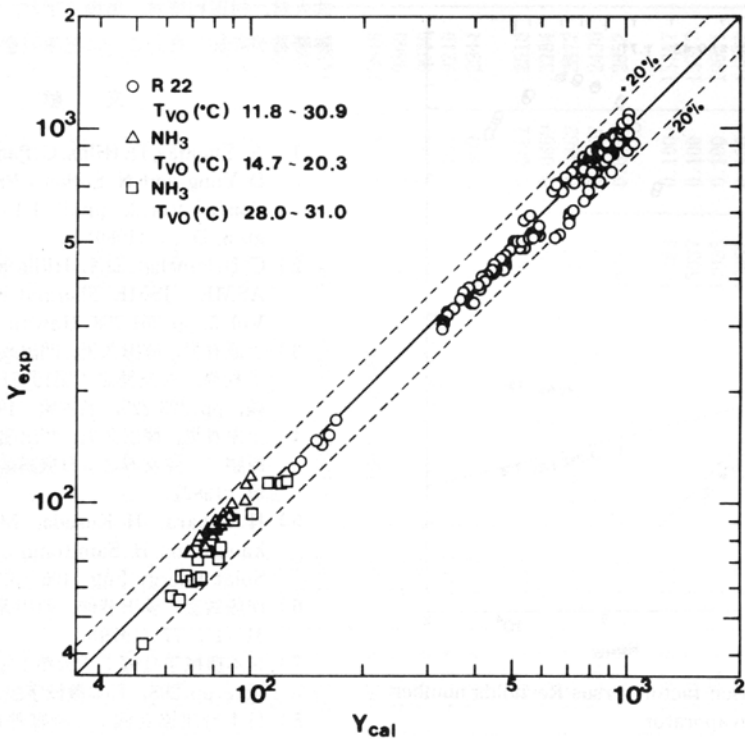


Fig. 12 Comparison between  $Y_{exp}$  and  $Y_{cal}$

1) 作動流体がフロン22の場合、蒸気出口温度  $T_{vo} = 21.6 \sim 22.5^\circ\text{C}$ 、温水流速  $1 \text{ m/s}$  の条件のもとで、熱通過係数は、 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  である。

作動流体がアンモニアの場合、蒸気出口温度

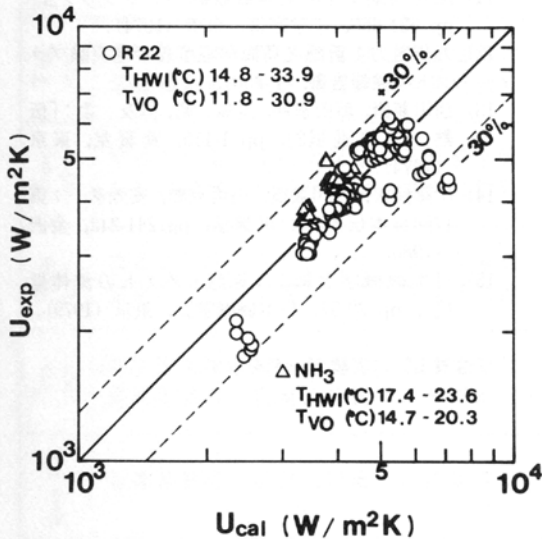


Fig. 13 Comparison between  $U_{exp} \sim U_{cal}$

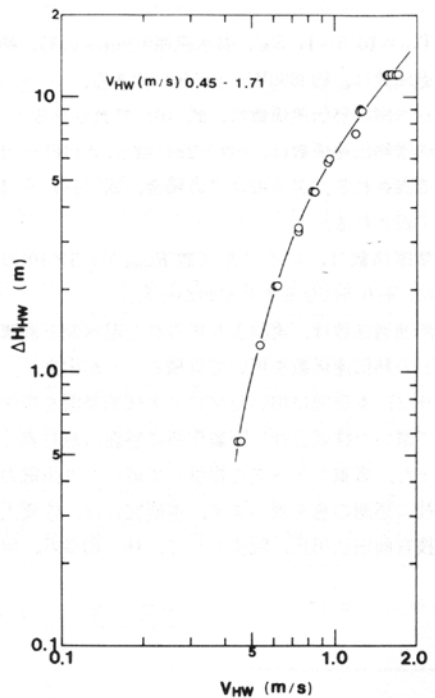


Fig. 14 Head loss for evaporator plates

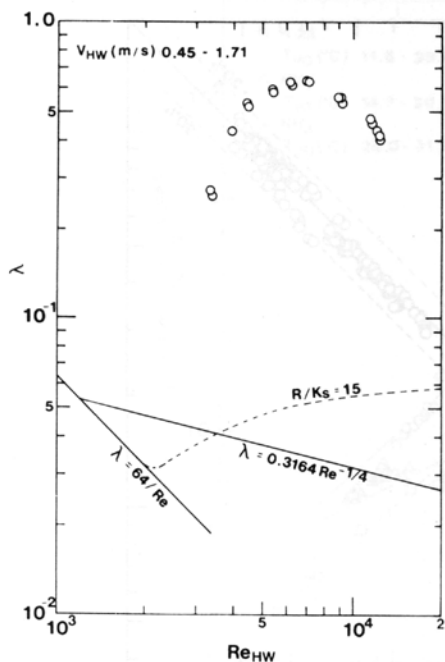


Fig. 15 Friction factor versus Reynolds number for evaporator

$T_{vo} = 16.5 \sim 17.5^\circ\text{C}$ , 温水流速  $0.9\text{m/s}$  の時, 熱通過係数は, 約  $3800\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  である.

- 2) 温水側の熱伝達係数は, 式 (6) で表される.
- 3) 沸騰熱伝達係数は, フロン22の場合, 式 (16)~(17) で表される. アンモニアの場合, 式 (18)~(19) で表される.
- 4) 摩擦係数は, レイノルズ数  $Re_{HW}$  が  $4.5 \times 10^3$  の時に, 約  $0.5$  になることがわかった.
- 5) 熱通過係数は, 実験より得られた温水側と沸騰側との熱伝達係数を用いて見積ることが出来る.

終りに, 本研究に用いたプレート式蒸発器を製作提供して戴いた株式会社日阪製作所に感謝の意を表します. また, 貴重なデータを提供して戴いた九州電力株式会社に感謝の意を表します. 本研究には, 佐賀大学文部技官前田法男氏, 院生として, 林 和幸君, 伊東

武人君, 村田和博君, 馬場幸雄君, 卒研究生として, 龍勝勢君が参加した. ここに感謝の意を表する.

## 文 献

- 1) A. Thomas, D. Hillis, C. Panchal, J. Lorenz, D. Yung and N. Sather: Proc., 7th OTEC Conf., Vol. 2, pp. 12.1-1 - 12.1-8, Washington, D.C. (1980).
- 2) C.B. Panchel, D.L. Hillis and A. Thomas: ASME - JSME Thermal Eng. Joint Conf., Vol. 2, pp. 261-268, Hawaii (1983).
- 3) 上原春男, 楠田久男, 門出政則, 中岡 勉, 山下利秀, 住友博之: 第19回日本伝熱シンポ講演論, pp. 223-225, 名古屋 (1982).
- 4) 上原春男, 楠田久男, 門出政則, 中岡 勉, 萩原勝二, 住友博之: 日機講演, pp. 250-252, 新潟 (1982).
- 5) H. Uehara, H. Kusuda, M. Monde, T. Nakaoka and H. Sumitomo: Trans. ASME. J. Solar Energy Eng. 106 (3), 286 (1984).
- 6) 伊藤猛宏, 藤田恭伸, 西川兼康: 機械の研究, 31 (1), 77 (1979).
- 7) 日本機械学会編: 「伝熱工学資料・改訂版第3版」, pp. 298, 日本機械学会, 東京 (1975).
- 8) 日本冷凍協会編: 「冷媒熱物性値表」, pp. 1-123, 日本冷凍協会, 東京 (1975).
- 9) W.M. Rohsenow and J.P. Hartnett: 「Handbook of Heat Transfer」, pp. 2-10-2-14, McGraw Hill, U.S.A. (1973).
- 10) 上原春男, 中岡 勉, 萩原勝二: 冷凍, 59 (675), 3 (1984).
- 11) 尾花英朗: 「熱交換器設計ハンドブック」, pp. 631-665, 工学図書, 東京 (1974).
- 12) 九州電力: 新徳之島海洋温度差発電実験プラント実験報告書, T-85013, (1985).
- 13) 西川兼康, 藤田恭伸, 長島 昭, 国友 孟: 「伝熱工学の進展2」, pp. 1-115, 養賢堂, 東京 (1974).
- 14) 伊藤猛宏, 西川兼康, 田中克典, 安元孝一: 第17回日本伝熱シンポ講演, pp. 241-243, 金沢 (1980).
- 15) 日本機械学会編: 「管路・ダクトの流体抵抗」, pp. 22-52, 日本機械学会, 東京 (1979).

(付表1) に実験データを示す。

(R.22)

付表 1 実験データ

年/月/日	Run No.	$T_{vo}$ (°C)	$T_{hwi}$ (°C)	$T_{hwo}$ (°C)	$T_{vm}$ (°C)	$T_{hwo}-T_{vo}$ (°C)	$V_{hw}$ (m/s)	$U_E$ (W/(m <sup>2</sup> K))	$\Delta T_{sat}$ (°C)	$1/U_E \times 10^{-3}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$V_{hw}^{-0.8}$ (m/s) <sup>-0.8</sup>	q (W/m <sup>2</sup> )	$P_v \times 10^7$ (Pa)	$h_B$ (W/(m <sup>2</sup> K))
56/9/29	47	30.38	33.13	31.45	30.38	1.07	1.11	4734.0	0.72	0.2112	0.921	8426	0.119	11707
	48	30.07	32.84	31.21	30.07	1.14	1.10	4506.0	0.78	0.2219	0.926	8273	0.118	10589
	49	29.66	32.41	30.78	29.66	1.12	1.10	4889.0	0.68	0.2045	0.921	8871	0.118	13111
	50	29.06	31.39	31.27	29.06	1.21	1.53	5072.0	0.69	0.1972	0.711	8669	0.115	12475
	64	29.71	32.55	30.82	29.71	1.11	1.06	4539.0	0.76	0.2203	0.958	8358	0.117	10942
	65	29.73	32.55	30.85	29.73	1.12	1.06	4498.0	0.77	0.2223	0.958	8281	0.117	10752
56/10/12	73	30.94	33.94	32.29	30.94	1.35	1.21	4490.6	0.92			9279	0.121	10106
	74	30.79	33.73	32.20	30.79	1.41	1.21	4290.3	0.96	0.2331	0.859	8933	0.120	9266
	75	30.58	33.58	31.98	30.58	1.40	1.21	4355.3	0.96			9143	0.119	9532
	76	30.63	33.87	31.60	30.63	0.97	0.81	4754.4	0.65	0.2103	1.18	8949	0.120	13858
	77	30.63	33.82	31.50	30.63	0.87	0.82	5087.5	0.55			9084	0.120	16403
	78	30.53	33.73	31.43	30.53	0.90	0.83	5029.8	0.58	0.2164	0.6009	9120	0.119	15756
57/1/29	82	25.61	28.00	27.09	25.61	1.48	1.89	4620.7	0.92			8774	0.105	9588
	83	25.82	27.98	27.04	25.82	1.22	1.89	4714.0	0.79			7757	0.106	9841
	85	25.97	28.12	27.16	25.97	1.19	1.89	5541.5	0.63	0.1805	0.6009	8994	0.107	14389
	86	25.56	28.15	26.60	25.56	1.04	1.04	5017.8	0.54	0.1993	0.969	8524	0.114	15818
	87	25.39	28.12	26.48	25.39	1.09	1.04	4257.0	0.77			7604	0.105	9860
	88	25.17	27.95	26.33	25.17	1.16	1.04	4077.6	0.84			7558	0.105	9030
59/1/26	89	25.24	27.98	26.38	25.24	1.14	1.04	4113.8	0.82			7506	0.105	9210
	166	19.83	22.34	21.02	19.83	1.19	0.53	1861.3	1.12			3292	0.899	2944
	169	18.79	20.90	20.11	18.79	1.32	0.76	1747.5	1.17			2943	0.0882	2510
	172	18.49	20.36	19.66	18.49	1.17	0.98	2127.8	0.99			3252	0.0869	3284
	174	18.27	20.23	19.56	18.27	1.29	0.98	1987.2	1.11	0.503	1.016	3183	0.0862	2877
	176	18.59	20.31	19.88	18.59	1.29	1.34	1825.6	1.12	0.5478	0.791	2729	0.0867	2430
59/1/26	183	19.19	21.18	20.38	19.19	1.19	0.78	1917.9	1.05			2984	0.0884	2852
	1	22.3	26.39	24.28	22.30	1.98	1.42	5093.9	1.08			14183	0.100	13747
	2	22.42	26.61	24.40	22.42	1.98	1.42	5103.7	1.10			15037	0.100	13717
	3	22.45	26.59	24.40	22.45	1.95	1.43	5055.1	1.10			14925	0.100	13611
	5	22.20	26.27	24.10	22.20	1.90	1.44	5280.1	1.01	0.1894	0.744	15052	0.100	14862
	6	22.03	26.05	24.01	22.03	1.98	1.44	5078.9	1.07	0.1969	0.749	14626	0.100	13635
59/1/26	7	21.86	25.95	23.86	21.86	2.00	1.42	5050.6	1.09	0.1980	0.756	14775	0.101	13539
	8	21.83	26.05	23.78	21.80	1.95	1.43	5238.0	1.05	0.1909	0.750	15410	0.101	14643
	9	21.98	26.32	24.01	21.98	2.03	1.44	5117.1	1.14	0.1954	0.748	15545	0.101	13660

(R.22)

年/月/日	Run No.	$T_{vo}$ (°C)	$T_{hwi}$ (°C)	$T_{hwo}$ (°C)	$T_{vm}$ (°C)	$T_{hwo}-T_{vo}$ (°C)	$V_{hw}$ (m/s)	$U_E$ (W/(m <sup>2</sup> K))	$\Delta T_{sat}$ (°C)	$1/U_E \times 10^{-3}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$V_{hw}^{-0.8}$ (m/s) <sup>-0.8</sup>	q (W/m <sup>2</sup> )	$P_v \times 10^7$ (Pa)	$h_B$ (W/(m <sup>2</sup> K))
59/1/26	10	22.08	26.54	24.15	22.08	2.07	1.43	5022.2	1.20	0.1991	0.753	15659	0.101	13006
59/1/27	11	23.97	28.41	25.77	23.97	1.80	1.43	5683.2	0.96			16644	0.106	17360
	13	24.16	28.61	26.09	24.16	1.93	1.42	5359.7	1.05			16140	0.106	14935
	14	24.07	28.37	25.99	24.07	1.92	1.46	5393.2	1.08			15938	0.106	15134
	15	24.02	28.27	25.84	24.02	1.82	1.45	5610.9	0.95			16109	0.106	16877
	16	23.53	27.44	25.33	23.53	1.80	1.41	5516.9	0.88			15028	0.107	17058
	17	23.48	27.47	25.30	23.48	1.82	1.43	5524.3	0.91			15297	0.107	16837
	18	23.62	27.81	25.45	23.62	1.83	1.44	5626.1	0.92			16003	0.107	17359
	19	23.72	28.03	25.60	23.72	1.88	1.45	5555.0	0.98			16242	0.107	16563
	20	23.94	28.46	25.84	23.94	1.90	1.43	5553.1	1.03			16791	0.107	16367
	21	24.11	28.76	26.06	24.11	1.95	1.45	5485.5	1.09			17020	0.107	15592
	22	24.19	28.73	26.14	24.19	1.95	1.44	5441.4	1.08			16678	0.107	15373
	23	24.19	28.66	26.09	24.19	1.90	1.43	5494.9	1.04			16507	0.107	15870
	24	24.09	28.39	26.04	24.09	1.95	1.46	5373.4	1.07			15966	0.107	14976
	25	23.99	28.20	25.87	23.99	1.88	1.46	5518.1	0.98			15920	0.107	16219
	26	23.55	27.54	25.35	23.55	1.80	1.43	5613.2	0.88			15451	0.105	17620
	27	23.38	27.32	25.21	23.38	1.83	1.45	5555.3	0.89			15278	0.105	17128
	28	23.21	27.12	24.94	23.21	1.73	1.45	5842.1	0.78			15635	0.105	19981
	29	23.18	27.15	24.99	23.18	1.81	1.45	5662.5	0.86			15540	0.105	18077
	30	23.28	27.47	25.18	23.28	1.90	1.44	5475.7	0.98			15850	0.105	16253
	31	23.43	27.68	25.38	23.43	1.95	1.45	5363.9	1.04			15851	0.105	15219
	32	23.65	28.7	25.62	23.65	1.97	1.41	5337.0	1.10			16409	0.105	14968
	33	23.77	28.17	25.77	23.77	2.00	1.44	5274.7	1.11			16052	0.105	14435
	34	23.80	28.12	25.79	23.80	1.99	1.43	5202.8	1.11			15683	0.105	14070
	35	23.72	27.98	25.70	23.72	1.98	1.44	5267.2	1.08			15643	0.105	14494
	37	23.33	27.39	25.21	23.33	1.88	1.44	5466.2	0.95			15472	0.104	16342
	39	22.99	26.93	24.89	22.99	1.90	1.47	5436.8	0.95			15221	0.104	16085
	40	22.89	26.88	24.81	22.89	1.92	1.45	5358.1	0.98			15191	0.104	15567
	41	22.94	27.10	24.86	22.94	1.92	1.45	5428.1	0.99			15755	0.104	15898
	42	23.04	27.34	24.96	23.04	1.92	1.43	5434.8	1.01			16084	0.104	15937
	43	23.21	27.66	25.16	23.21	1.95	1.41	5355.0	1.06			16235	0.104	15281
	44	23.48	27.86	25.45	23.48	1.97	1.39	5216.6	1.10			15747	0.104	14375
	45	23.70	28.00	25.70	23.70	2.00	1.42	5166.4	1.12			15526	0.104	13906

(R.22)

年/月/日	Run No.	T <sub>vo</sub> (°C)	T <sub>nwi</sub> (°C)	T <sub>nwo</sub> (°C)	T <sub>vm</sub> (°C)	T <sub>nwo</sub> -T <sub>vo</sub> (°C)	V <sub>nw</sub> (m/s)	U <sub>E</sub> (W/(m <sup>2</sup> K))	ΔT <sub>sat</sub> (°C)	1/U <sub>E</sub> × 10 <sup>-3</sup> (m <sup>2</sup> K/W)	V <sub>nw</sub> <sup>-0.8</sup> (m/s) <sup>-0.8</sup>	q (W/m <sup>2</sup> )	P <sub>v</sub> × 10 <sup>7</sup> (Pa)	h <sub>B</sub> (W/(m <sup>2</sup> K))
59/1/27	46	27.82	31.97	29.76	27.82	1.94	1.43	5262.9	1.09			15302	0.118	14015
	47	27.70	31.85	29.69	27.70	1.99	1.41	5131.1	1.13			15083	0.118	13300
	48	27.65	31.73	29.52	27.65	1.87	1.42	5410.0	1.01			15321	0.118	15134
	49	27.50	31.56	29.37	27.50	1.87	1.42	5389.6	1.01	0.1855	0.757	15216	0.118	15063
	50	27.33	31.37	29.23	27.33	1.90	1.42	5345.7	1.02	0.1871	0.756	15130	0.118	14814
	52	27.21	31.37	29.15	27.31	1.94	1.42	5287.6	1.07	0.1891	0.755	15388	0.118	14323
	53	27.33	31.56	29.23	27.33	1.90	1.41	5415.1	1.04	0.1847	0.760	15736	0.118	15195
	54	27.48	31.80	29.47	27.48	1.99	1.41	5200.9	1.14	0.1923	0.762	15640	0.118	13669
	56	27.63	31.90	29.54	27.63	1.91	1.43	5391.4	1.07			15848	0.117	14790
	57	27.53	31.76	29.37	27.53	1.84	1.41	5530.1	0.99			15886	0.117	16011
	58	27.43	31.61	29.37	27.43	1.94	1.41	5321.1	1.06	0.1879	0.759	15531	0.117	14589
	60	27.16	31.27	29.11	27.16	1.95	1.41	5315.0	1.05	0.1881	0.760	15368	0.116	14694
	61	27.09	31.10	28.96	27.09	1.87	1.42	5469.8	0.97			15349	0.116	15853
	62	26.92	30.94	28.74	26.92	1.82	1.43	5635.8	0.91	0.1774	0.752	15638	0.115	17170
	63	26.80	30.74	28.67	26.80	1.87	1.42	5479.4	0.95	0.1825	0.756	15225	0.115	16103
	64	26.68	30.57	28.50	26.68	1.82	1.42	5603.0	0.89	0.1785	0.753	15287	0.115	17160
	65	26.53	30.38	28.30	26.53	1.77	1.39	5670.1	0.84			15184	0.115	18184
	66	26.65	30.60	28.52	26.65	1.87	1.41	5452.6	0.95	0.1834	0.758	15154	0.114	15945
	67	26.82	30.84	28.72	26.82	1.90	1.42	5404.2	0.99	0.1850	0.757	15256	0.114	15433
	69	27.29	31.47	29.18	27.29	1.89	1.39	5321.3	1.05	0.1879	0.770	15365	0.116	14692
	70	27.38	31.54	29.32	27.38	1.94	1.42	5250.5	1.09	0.1905	0.754	15276	0.116	14002
	71	27.36	31.54	29.25	27.36	1.89	1.41	5349.4	1.05	0.1869	0.759	15444	0.116	14702
	72	27.29	31.42	29.20	27.29	1.91	1.41	5285.1	1.06	0.1892	0.760	15454	0.114	14343
	73	27.14	31.25	28.91	27.14	1.77	1.42	5663.6	0.92	0.1766	0.756	15738	0.114	17144
	74	26.99	31.10	28.94	26.99	1.95	1.42	5253.4	1.07	0.1904	0.755	15194	0.114	14147
	76	26.87	31.23	28.84	26.87	1.97	1.41	5295.5	1.11	0.1888	0.759	15905	0.117	14322
	77	27.07	31.47	29.06	27.07	1.99	1.41	5238.3	1.15	0.1909	0.758	15911	0.117	13853
	78	27.21	31.68	29.20	27.21	1.99	1.42	5288.0	1.15	0.1891	0.754	16208	0.117	14046
	79	27.24	31.71	29.25	27.24	2.01	1.41	5203.2	1.18	0.1922	0.762	16031	0.114	13607
	80	27.21	31.59	29.18	27.21	1.97	1.40	5260.2	1.13	0.1901	0.764	15840	0.114	14067
	81	27.07	31.42	29.08	27.07	2.01	1.44	5238.6	1.15	0.1909	0.749	15897	0.114	13806
	82	26.97	31.23	28.91	26.97	1.94	1.41	5311.1	1.08	0.1883	0.761	15664	0.114	14538
	83	22.18	26.51	24.18	22.18	2.00	1.39	5219.0	1.06	0.1916	0.771	15767	0.114	14810