

# 久米島海洋深層水を利用した海水淡水化用 プレート式熱交換器の伝熱性能に関する研究

Heat transfer characteristics of plate heat exchanger for desalination  
using deep seawater in Kume Island

有馬博史<sup>1</sup>・稲富 諒<sup>1</sup>・松田昇一<sup>2</sup>

Hirofumi ARIMA<sup>1</sup>, Ryo INADOMI<sup>1</sup> and Shoichi MATSUDA<sup>2</sup>

## Abstract

The spray flash desalination system continues to attract the interest of researchers owing to its application in ocean thermal energy conversion. The system consists of a flash chamber, fresh water tank, vacuum pump, and plate type condenser. The desalination system requires a plate type condenser with good performance in order to improve overall system performance. The material used for the heat transfer plate of the condenser is usually titanium. However, the use of another material, such as aluminum alloy, is proposed by the author to achieve cost reduction and improve heat transfer performance. Furthermore, a special coating aluminum alloy plate is proposed as material for plate condenser of spray flash desalination system because the aluminum alloy has low corrosion resistance against seawater. In this study, the heat transfer performance of the material and its corrosion against seawater were investigated using deep and surface sea water of Kume island of Okinawa Prefecture. The plate heat exchanger incorporates three kinds of aluminum alloy plate coating, and its overall heat transfer coefficients under flowing seawater were derived. The three coating materials are 25  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$  thick PEEK and 5  $\mu\text{m}$  WIN KOTE<sup>®</sup>, respectively. In addition, evaluation test for heat transfer and corrosion test of the heat exchanger under flowing seawater were also conducted for a five months period. Results show that out of the three materials, the 25  $\mu\text{m}$ -thick PEEK coating plate had the largest overall heat transfer coefficient. The overall heat transfer of the three materials did not change during the five months test period. However, only the WIN KOTE<sup>®</sup> coating plate corroded owing to corrosion effects of the seawater.

**Key Words:** Plate heat exchanger, Heat transfer, Aluminum alloy, Deep sea water, Desalination

## 要 旨

フラッシュ蒸発法による海水淡水化装置のプレート式凝縮器の新たな材料として特殊コーティングされたアルミニウム合金板を提案し、その伝熱性能と海水に対する耐腐食性の評価に関する研究を沖縄県久米島の海洋深層水および表層水を用いて行った。実験では、25  $\mu\text{m}$ 厚PEEK、100  $\mu\text{m}$ 厚PEEK、WIN KOTE<sup>®</sup>膜で特殊コーティングされた3種類のアルミ合金板をプレート式熱交換器にそれぞれ組み込み、表層水および深層水を同時に流すことで熱交換を行い、その時の熱通過率を導出した。また、この熱交換器に5カ月連続で通水を行い、伝熱性能および腐食に関する評価を行った。その結果、熱通過率は25  $\mu\text{m}$ 厚PEEKが最も良い値を示した。また、連続実験の前後では、いずれのコーティングについても伝熱性能に変化は見られなかった。腐食については、WIN KOTE<sup>®</sup>のみエロージョンによる剥離で海水による腐食が発生した。

**キーワード:** プレート式熱交換器, 熱伝達, アルミ合金, 海洋深層水, 海水淡水化

<sup>1</sup> 佐賀大学 (〒849-4256 佐賀県伊万里市山代町久原字平尾1-48)

<sup>2</sup> 琉球大学 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

## 1. 緒 言

2013年に沖縄県久米島町に「沖縄県海洋温度差発電実証設備（以下、久米島OTEC）」が完成して実海域での実証試験が開始された（池上, 2015）のをきっかけに、2015年米国ハワイ島で105 kWのOTECのプラントが完成し運転が開始された（Makai, 2015）。また、フランスや韓国、中国などの複数の国々でもOTECの研究開発が盛んになっている。

ところでOTECの実用化に関する研究開発では、その複合利用に関する研究も進められているが、その中でもOTECで取水した海水を二次利用する海水淡水化に注目が集まっている。ここで用いられる海水淡水化法は「スプレーフラッシュ蒸発式」であるが、海水淡水化で一般に用いられているRO膜法や多段フラッシュ蒸発法と比べて低エネルギーで造水出来る特徴を持つ（宮武ら, 1979）。佐賀大学海洋エネルギー研究センター久米島サテライト（以下、久米島サテライト）では、スプレーフラッシュ蒸発式淡水化法を用いたOTECの複合利用の実証試験のため、2015年から同装置の連続運転（浦田ら, 2016）を開始し、久米島OTECの取水管から分水された海水の温度や流量の変動に対する造水量の動特性に関する調査を行っている。

スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化装置は、主に海水を真空下で蒸発させるフラッシュチャンバー、清水タンク、真空ポンプ、プレート式凝縮器で構成されている。この海水淡水化法の性能向上に向けて、フラッシュチャンバー内のノズル形状（上原ら, 1991; 佐々木, 2006）、ノズルの向き（池上ら, 2005）、噴流の分布が造水に与える影響（佐々木, 2006; Sami, 2012）について議論されている。一方、フラッシュチャンバーで発生した蒸気を凝縮させる凝縮器に関する研究はほとんど見当たらない。OTECと海水淡水化の複合プラントの性能解析（上原ら, 1994）では、シミュレーションに凝縮器の伝熱性能を仮定しているが、実機で測定された値ではなく一般的な凝縮器の推算式を使った評価にとどまっている。また、凝縮器については単位体積当たりの伝熱面積が大きいプレート式熱交換器が用いられているが、プ

レート式凝縮器を用いた低圧水蒸気の凝縮に関する研究もほとんど行われてこなかった。海水淡水化装置では深層水による連続的な冷却により真空度を保つ必要があるため、装置全体の性能向上には凝縮器の性能向上は欠かせない。そこで、我々はプレート式熱交換器の伝熱面材料に注目し、現在一般に使われているチタン材料に代わる安価で伝熱性能の高い材料として、アルミニウム合金の利用を考えた。しかし、アルミニウム合金は海水に対して耐性が低いために腐食対策が不可欠である。アルミ合金の腐食対策として、著者ら（Arima *et al.*, 2016）はアルミ合金に特殊コーティングを施す方法を提案し、その試験体（テストプレート）を用いたアンモニアに対する腐食の評価を行っている。コーティング条件の異なる3種類の試験体を熱交換器に組み込み、温水とアンモニアの熱交換を3カ月連続で行い、試験体がアンモニアや温水に対してほとんど腐食しないことを確認した。

そこで、本研究ではArima *et al.* (2016) で用いられたのと同じ試験体について、海水における伝熱性能及び腐食に関する評価を行った。実験では、コーティング条件の異なる3種類のテストプレートを熱交換器に組み込んだ装置を久米島サテライトに設置し、深層水および表層水の通水による熱交換試験および5カ月の連続運転による伝熱性能および腐食に関する評価を行った。本報では、これらの結果について報告を行う。

## 2. 実 験

### 2.1 実験装置

Fig. 1に実験装置の概略図を示す。実験装置はテストセクションであるプレート式熱交換器、表層水給排水系、深層水給排水系で構成される。テストセクションとそれぞれの給排水系は、塩化ビニル製の配管で接続されている。テストセクションは計4個のポートを持つが、それぞれのポートに流入出する海水の温度を測定するために、K型シース熱電対が設置されている。また、それぞれの給水配管には流量を測定するために、渦+超音波式体積流量計（キー

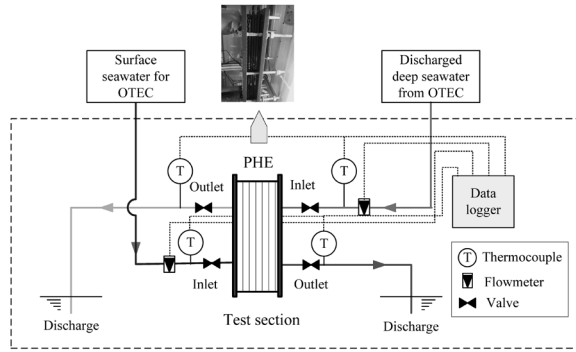


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

エンス製：FD-P05, レンジ0-5 L/min) および超音波流量計(同：FD-Q10C, レンジ0-10 L/min) が設置されている。これらの測定値は全てデータロガー(GRAPHTEC製：GL820)に集められ記録される。

表層水および深層水は、久米島OTECの表層水および深層水の取水管に設けられた分岐バルブを介して供給される。この時、表層水はOTECの蒸発器で熱交換される前、深層水は凝縮器で熱交換された後の海水が分水される。使用後の海水は排水槽に廃棄される。

## 2.2 テストプレートおよびテストセクション

Fig. 2(a)~(c) に、実験で使用したテストプレートの母材の寸法および写真を示す。テストプレートの母材はA5052アルミニウム合金製であり、幅100 mm, 高さ350 mm, 最大厚さ5 mm, 最小厚さ3.5 mmである。この母材にPEEK樹脂およびWIN KOTE<sup>®</sup>によるコーティングを施したものをテストプレートとして使用した。Fig. 3に3種類のテストプレートの写真を示す。テストプレートは左から順に平均膜厚100  $\mu\text{m}$  のPEEK樹脂(以下, TP-2), 25  $\mu\text{m}$  のPEEK樹脂(以下, TP-1), 5  $\mu\text{m}$  のWIN KOTE<sup>®</sup>(以下, TP-3)である。PEEK樹脂はPoly Ether Ether Ketoneが主成分のプラスチックの一種であり、酸やアルカリ、海水に強い性質を持つ。またPEEK樹脂は母材に対して塗料のようにスプレーでコーティングされる。樹脂であるため熱伝導率は低く約0.25 W/mKである。またWIN KOTE<sup>®</sup>は、工具表面のコーティングにも用いられているDLC(Diamond like carbon)の一種であり、炭素、ケイ素、水素を主成分として、化学蒸着法に

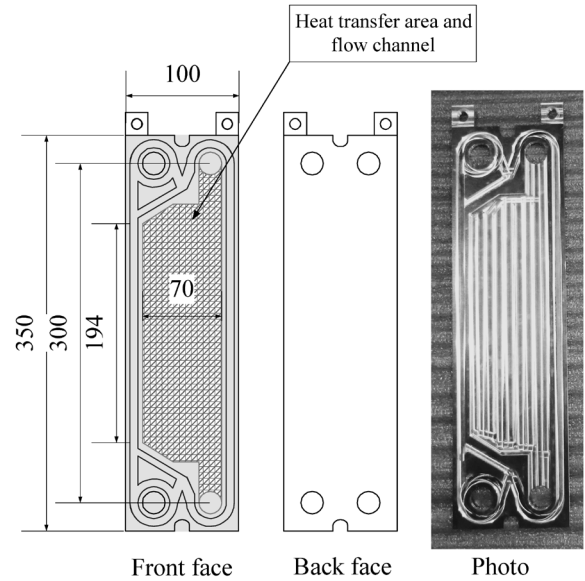


Fig. 2. Design of test plate.

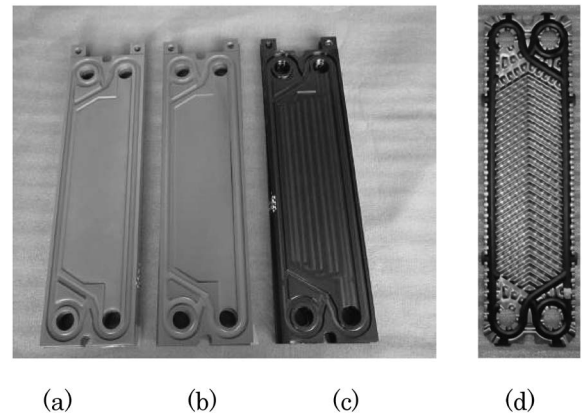


Fig. 3. Photo of test plates.

(a) 100  $\mu\text{m}$  PEEK, (b) 25  $\mu\text{m}$  PEEK, (c) 5  $\mu\text{m}$  WIN KOTE<sup>®</sup>, (d) Titanium.

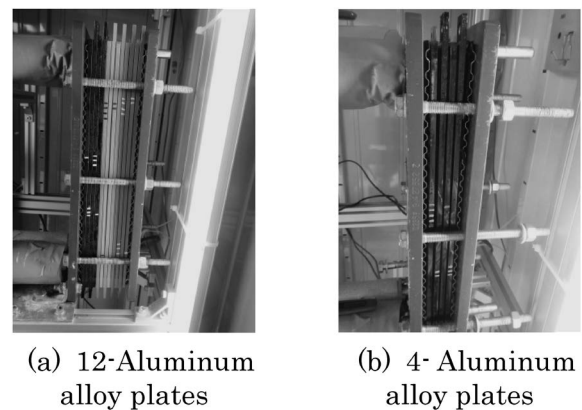


Fig. 4. Test section (PHE).

よって成膜が行われている。PEEK樹脂同様、酸アルカリ、海水に対して強い性質をもつ。また、熱伝導率はPEEK樹脂より高く、約20 W/mKである。ま



た、この実験では比較用のテストプレートとして Fig. 3(d) に示す市販のチタンプレート（以下、TP-4）も用いた。このチタンプレートは厚さ0.5 mmでヘリンボーン状の伝熱面を持つ。

テストセクションは、市販のプレート式熱交換器（アルファラバル製：T2-BFG）のフレームとTP-1～4のテストプレートで構成される。Fig. 4(a), (b) にテストプレートが組み込まれたテストセクションの写真を示す。Fig. 4(a) はTP-1, TP-2, TP-3の3種類、計12枚、Fig. 4(b) はTP-3が4枚組み込まれた状態を示す。

テストセクションのフレーム（青色の板）の片側には、2種類の流体の出入口となる計4つのポートが設けられており、各ポートはFig. 3に示したテストプレートの穴にそれぞれつながっている。Fig. 4の奥にある上下のポートが深層水の出口、入口側、手前のポートが表層水の入口、出口側である。

テストセクションの諸元を Table 1 に示す。

### 2.3 実験方法および実験条件

本研究は、Fig. 1の装置を久米島サテライトに設置して行った。実験では、久米島OTECから分水された表層水、深層水を任意の流量でテストセクションに流した。テストセクションで両海水の温度差により熱交換が行われるが、熱交換後の両海水の温度を測定することで熱通過率を求めた。

また本実験では海水の通水により、海水がテストプレートのコーティング面および伝熱性能に与える影響について確認するため、両海水をテストセクションに流した状態で5カ月間の連続運転を行った。

実験後には、各テストプレートの伝熱面の状態に

ついて目視による観察を行った。また、連続運転前後でのテストプレートの伝熱性能の変化について確認するため、各々のテストプレートに複数の海水流量条件を与えて熱通過率の測定を行った。

連続運転および各テストプレートの熱通過率測定実験では、テストセクションに組込むテストプレートの枚数を変えた。連続運転の場合、TP-1～3のプレート各4枚計12枚、熱通過率測定実験では、TP-1～3を各4枚セッティングした。また熱通過率の比較のため、TP-4の熱通過率の測定も行った。この時テストプレートは4枚セッティングした。

実験条件を以下に示す。連続運転実験の場合、両海水流量の初期値として2 L/minを与えた。しかし、両海水は久米島OTECからの分水であるため、その流量および温度は日時によって変動する。

一方、熱通過率測定実験の場合、各海水の流量を1-4 L/minとした。また、各海水の入口温度は測定時に得られた海水温度（表層水：29-30℃、深層水：13-23℃）とした。

これらのデータは、連続運転実験の場合1分毎に5カ月間、熱通過率の測定では1秒毎に2分間データロガーに記録された。また、熱通過率の整理には2分間値の平均値を用いた。

### 2.4 データ整理

データ整理に用いた熱通過率  $U$  [W/m<sup>2</sup>K] は以下の方法で導出した。熱通過率の導出では表層水の熱交換量  $Q_h$  [W]、伝熱面積  $A_s$  [m<sup>2</sup>]、対数平均温度差  $\Delta T_{lm}$  [°C] を用いて式 (1) で求めた。

$$U = Q_h / (A_s \Delta T_{lm}) \quad (1)$$

Table 1. Specifications of test plates.

	TP-1~3	TP-4
Material	Aluminum alloy (A5052)	Titanium
Number of plate	4 or 12	4
Number of channel (Hot/Cold side)	3/2 or 7/6	3/2
Plate thickness $d$ [m]	$1.5 \times 10^{-3}$	$0.5 \times 10^{-3}$
Total heat transfer area $A_s$ [m <sup>2</sup> ]	$6.7 \times 10^{-2} / 2.0 \times 10^{-1}$	$8.0 \times 10^{-2}$
Total cross section area of flow channel $A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$3.15 \times 10^{-4} / 7.35 \times 10^{-4}$	$4.49 \times 10^{-4}$
Thermal conductivity $k$ [W/mK]	140	22
Equivalent diameter $D_{eq}$ [m]	$3.00 \times 10^{-3}$	$4.16 \times 10^{-3}$

ここで、 $Q_h$ および $\Delta T_{lm}$ は以下の式で求めた。

$$Q_h = m_h C_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (2)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,in} - T_{c,in})}{\ln((T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in}))} \quad (3)$$

ここで、 $m_h$  [kg/s] は表層水の質量流量、 $T_{c,in}$ 、 $T_{c,out}$  [°C] は深層水の入口・出口温度、 $T_{h,in}$ 、 $T_{h,out}$  [°C] は表層水の入口・出口温度、 $C_{ph}$  [J/kg K] は表層水の定圧比熱である。

また、表層水流速は以下の方法で求めた。

$$V_h = m_h / \rho_h A_c \quad (4)$$

ここで $m_h$  [kg/s] は表層水の質量流量、 $\rho_h$  [kg/m<sup>3</sup>] は表層水の密度である。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 熱通過率の測定

各テストプレートの伝熱性能の評価のため、連続運転開始前における熱通過率 $U$ について測定を行い比較を行った。Fig. 5にTP-1~4の熱通過率について表層水側流速 $V_h$ に対する値を示す。また、Fig. 5には異なる深層水流量 ( $m_c = 1$ および $2$  L/min) における結果が示されている。

Fig. 5よりアルミ合金テストプレートの熱通過率はTP-1が最も高い値を示し、ほぼ同等のTP-2、TP-3の順で値が減少している。ヘリンボーン伝熱面を有したTP-4との比較では、平滑面であるTP-1~3が明らかに熱通過率が低い。また、いずれのテストプレー

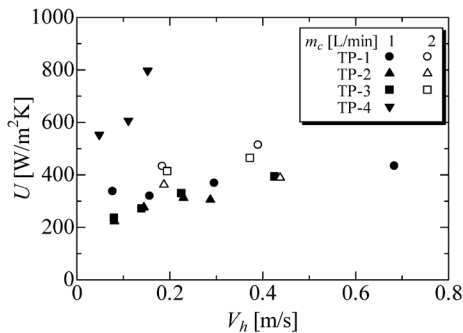


Fig. 5. Comparison with overall heat transfer coefficient against surface seawater velocity before the five-months period test.

トも表層水流速の増加に伴い、熱通過率が増加している。なお、本実験と同一のテストプレートを用いたアンモニア強制対流沸騰熱伝達の実験 (Arima *et al.*, 2016) ではTP-3の熱通過率が一番高い値を示しており、今回の結果とは異なっている。沸騰を伴うアンモニアの熱伝達では、強制対流による影響のみではなく核沸騰による熱伝達も大きく寄与する。著者ら (有馬ら, 2016a) によるTP-1, 3と同じコーティング材を用いたプール核沸騰の研究において、WIN KOTEはPEEKに比べて核沸騰による熱伝達率が高いことが明らかになっている。なお、これはコーティング材の熱抵抗の大小によるものであった。よって相変化を伴わない本研究における熱伝達率の結果とは異なる傾向を示したことがわかる。

ところで、Fig. 5より表層水の流速に対する熱通過率の相関が得られたことから、ウィルソンプロット法 (Wilson, 1915) を使って表層水側の平均熱伝達率 $h_h$  [W/m<sup>2</sup>K] を求めた。ウィルソンプロット法では平均熱伝達率と流速 $V_h$ の相関式を以下のように与える。

$$1/h_h \propto V_h^{-0.8} \quad (5)$$

式(5)では熱伝達率と流速は比例関係にあることを示していることから、式(5)は比例定数 $C_1$ を与えることで以下のように表すことができる。

$$1/h_h = C_1 V_h^{-0.8} \quad (6)$$

一方、熱交換器の熱通過率は、高温側と低温側の熱伝達率 $h_h$ 、 $h_c$ 、伝熱面の厚さ $t$  [m] およびその熱伝導率 $k$  [W/mK] を使って以下のように与えることができる。

$$1/U = 1/h_c + t/k + 1/h_h \quad (7)$$

式(7)の第一項、第二項を定数と仮定し、さらに式(6)を代入して、以下の式を与えた。

$$1/U = C_0 + C_1 V_h^{-0.8} \quad (8)$$

Fig. 6に各テストプレートの式(8)の相関を示す。また、Fig. 6の相関より得られた式(8)の係数 $C_0$ 、 $C_1$ をTable 2に示す。

式(6)の両辺の逆数をとることで、以下の式で熱

Table 2. Coefficients of Eq. (8) for each test plate.

	$C_0$	$C_1$
TP-1	$1.818 \times 10^{-3}$	$2.290 \times 10^{-4}$
TP-2	$2.059 \times 10^{-3}$	$3.155 \times 10^{-4}$
TP-3	$1.604 \times 10^{-3}$	$3.593 \times 10^{-4}$
TP-4	$1.096 \times 10^{-3}$	$6.579 \times 10^{-5}$

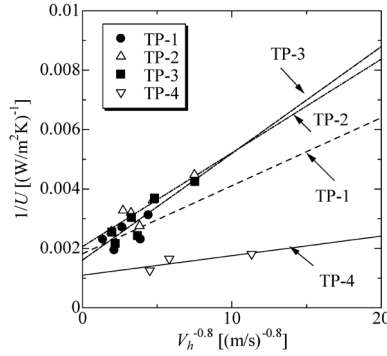


Fig. 6. Correlations of overall heat transfer coefficient against surface seawater velocity.

伝達率を表すことができる。

$$h_h = (1/C_1) V_h^{0.8} \quad (9)$$

さらに、この相関式の無次元化することで、熱伝達率をヌッセルト  $Nu$  数とし、さらにその式をレイノルズ  $Re$  数およびプラントル  $Pr$  数の関数として式 (10) で表した。この時、係数  $C_2$  は Table 2 の値と表層水の物性値を用いて式 (11) から求めた。

$$Nu_h = C_2 Re_h^{0.8} Pr_h^{1/3} \quad (10)$$

$$C_2 = (1/C_1) (Deq_h^{0.2}/\nu_h)^{0.8} / (Pr_h^{1/3} k_h) \quad (11)$$

ここで、 $Deq_h$  [m] は表層水側流路の相当直径、 $\nu_h$  [ $m^2/s$ ] は表層水の動粘度、 $k_h$  [W/mK] は表層水の熱伝導率である。また、 $Nu$  数、 $Re$  数、 $Pr$  数は以下の式で定義される無次元数である。

$$Nu_h = h_h Deq_h / k_h \quad (12)$$

$$Re_h = V_h Deq_h / \nu_h \quad (13)$$

$$Pr_h = \mu_h Cp_h / k_h \quad (14)$$

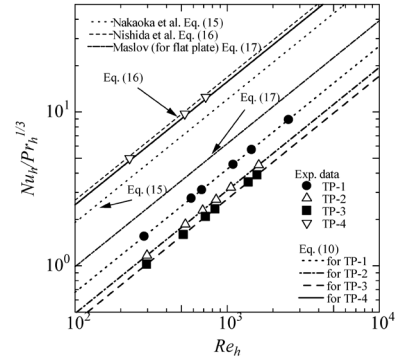
ここで、 $\mu_h$  [Pa·s] は表層水の粘度である。

式 (11) で求めた  $C_2$  の値を Table 3 に示す。

これらの推算式と、従来のプレート式熱交換器の

Table 3. Coefficients of Eq. (11).

	$C_2$
TP-1	0.0169
TP-2	0.0123
TP-3	0.0108
TP-4	0.0625

Fig. 7. Comparison with correlations of  $Nu$  number.

研究で得られた熱源側の熱伝達率の推算式との比較を Fig. 7 に示す。Fig. 7 は縦軸を  $Nu_h / Pr_h^{1/3}$  と横軸を  $Re_h$  で表した。ここで比較に用いた従来の研究による推算式は以下の式である。

中岡らの式 (中岡ら, 2000)

$$Nu_h = 0.048 Re_h^{0.8} Pr_h^{1/3} \quad (15)$$

西田らの式 (西田ら, 2008)

$$Nu_h = 0.067 Re_h^{0.8} Pr_h^{1/3} \quad (16)$$

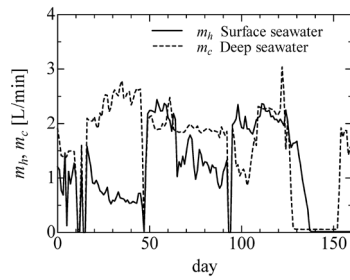
Maslov の式 (尾花ら, 1974)

$$Nu_h = 0.02 Re_h^{0.8} Pr_h^{0.43} \quad (17)$$

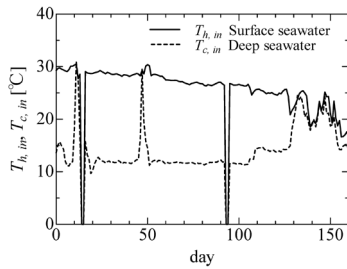
Fig. 7 より、比較に用いた TP-4 が同一の  $Re$  数で最も高い  $Nu$  数を示し、また式 (16) に近い値が得られた。一方、本実験で提案したプレートの中では TP-1 が伝熱性能が最もよいことがわかる。また TP-2 と TP-3 はほぼ同程度の伝熱性能を示している。また TP-1~3 のテストプレートは平滑面であるため、式 (17) の Maslov の平滑平板に対する式に近い値を示した。

### 3.2 5カ月連続運転における熱通過率の変化

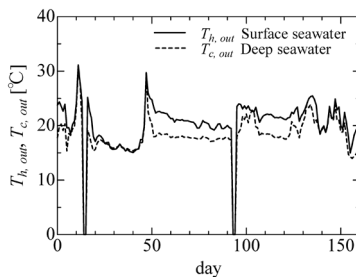
Fig. 8(a)~(c) に、5カ月連続運転において測定さ



(a) Volumetric flow rate of surface and deep seawater



(b) Inlet temperature of surface and deep seawater



(c) Outlet temperature of surface and deep seawater

Fig. 8. Time variation of several values during the five-months test.

れた各状態量の経時変化を示す。Fig. 8(a) は表層水、深層水の体積流量、Fig. 8(b) は表層水、深層水のテストセクション入口温度の経時変化を示す。いずれの値も測定日によって大きく変動していることがわかる。Fig. 8(a) の表層水流量は初期流量を2 L/min と与えたものの0.5-2.5 L/min の範囲で、深層水流量も1-3 L/min の範囲で変動した。特に、表層水の流量は72日目から92日目まで徐々に減少した。両海水は久米島OTECの海水取水管から分水されているため、その稼働状況や深層水の利用状態によって大きく変動する。一方、Fig. 8(b) より表層水入口温度は30~20°Cまで徐々に減少している。これは実験期間が8月期から翌1月期まで行われたため季節変動によるものである。なお、15日目、47日目、137日目から152日目に両海水の流量がほぼ0となっている。

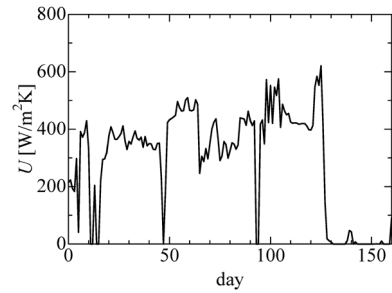


Fig. 9. Time variation of overall heat transfer coefficient during the five-months test.

また、14日目、93日目については、停電や機器の停止によりデータロガーへの記録がされなかったため、流量及び温度のデータが0を示している。

Fig. 8(c) は表層水、深層水のテストセクション出口温度の経時変化を示す。実験開始から47日目までの両海水の温度はほぼ同じ値を示しているが47日目から125日目までは徐々に温度差が開いてゆき、最終的に約5°C差を示している。熱交換器の出口温度は、入口温度、流量およびその時の熱交換量によって決まる。ここでは、まずFig. 8(a) の結果で示したように、72~92日の期間に表層水流量が徐々に減少しているのに対して、深層水流量はほぼ一定である。また、Fig. 8(b) で示した両海水の入口温度もほぼ一定である。よって、表層水流量の低下による表層水側からの熱交換量の減少で、深層水側の入口からの温度上昇が少なくなった。結果的に深層水側出口の温度が徐々に低下したことを示している。

これらの値から計算された熱通過率の5カ月連続運転期間における経時変化をFig. 9に示す。熱通過率は47日目を境に、その前後で値が増加していることが分かる。この変化はテストプレートの伝熱性能の変化も考えられる一方、両海水の流量および入口温度も変動があることから、次節で各々のテストプレートについて検証を行った。

### 3.3 テストプレート伝熱面への影響

海水のテストプレートへの影響について確認するため、TP-1~3のテストプレートの5カ月連続運転後のコーティング面の目視による観察を行った。目視に用いたテストプレート写真およびコーティング面で変化が見られた箇所のうち、特徴的な箇所につ



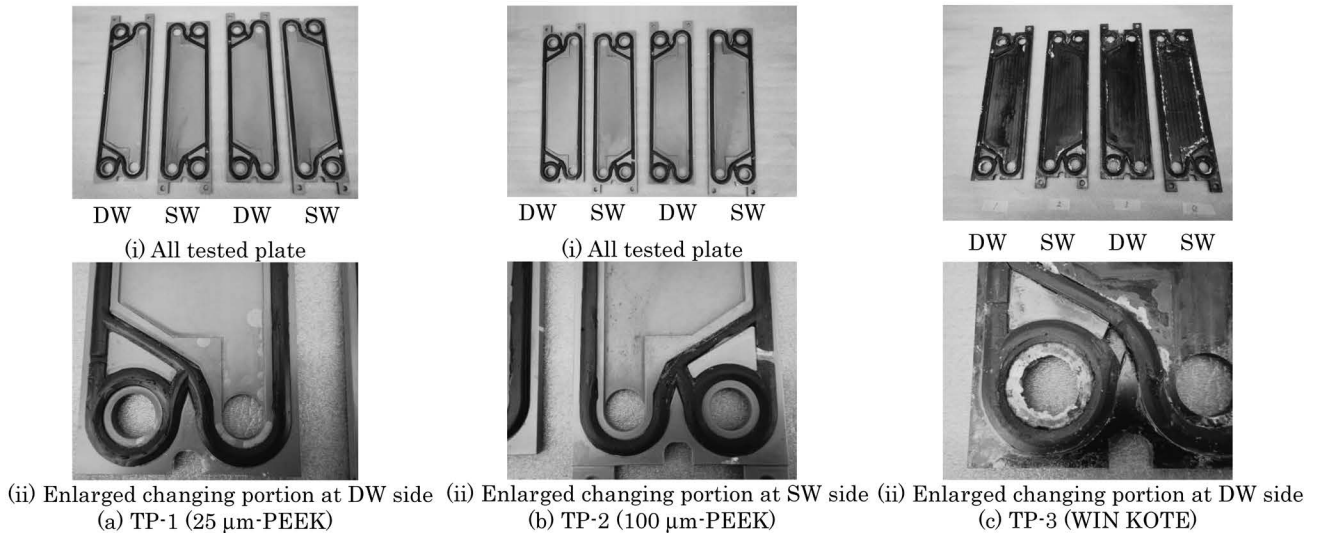


Fig. 10. Photos of each coating plates after the five-months test (SW: Surface seawater side, DW: Deep seawater side).

いて拡大した写真をFig. 10(a)～(c)に示す。まず、Fig. 10(a)-(i)およびFig. 10(b)-(i)に示したTP-1とTP-2のテストプレートの場合、表層水側(SW)のプレートのみ、海水が出入りする穴の周辺が茶色に変色していることが観察される。これは、表層水によるものではなく、表層水供給系の配管由来の錆であることが明らかになっているため、それ以外の変化について観察を行った。

Fig. 10(a)-(ii)に示すTP-1の深層水側(DW)の海水出入口の穴周辺にはコーティングが変色した部分が多数観察された。この変色は有馬ら(2016b)の同コーティング材を使用したアンモニア沸騰下での腐食試験においても同様な変色が観察され、さらにその変色部の切断面の観察により、コーティングの変質や母材であるアルミ合金の腐食はなかったことが述べられている。この原因として、コーティング表面から発生した沸騰気泡の流動によるエロージョンであると推察している。本実験の温度条件では沸騰は発生しないが、表面を2.2～6.6 cm/s程度で海水が連続的に通過するため、有馬ら(2016b)の結果と同様に、摩擦によるエロージョンであることが考えられる。また、本実験では変色部の断面観察は行われていないが、同様にコーティングの剥離や母材の腐食はないものと予想される。

一方、同じPEEK樹脂で厚さが異なるTP-2の場合、Fig. 10(b)-(ii)に例として示すように変色は観察さ

れなかった。これはコーティング厚さがTP-1の約4倍であるため、エロージョンによる変色にまで至らなかったと考えられる。

Fig. 10(c)のWIN KOTEの場合、コーティング面の一部が白く変色していることがわかる。

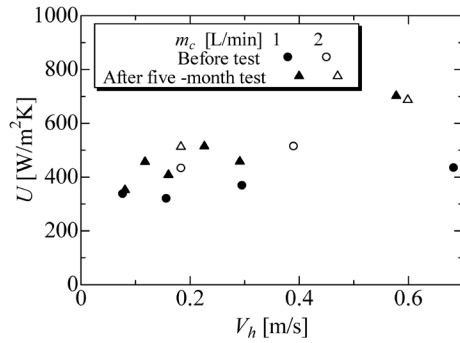
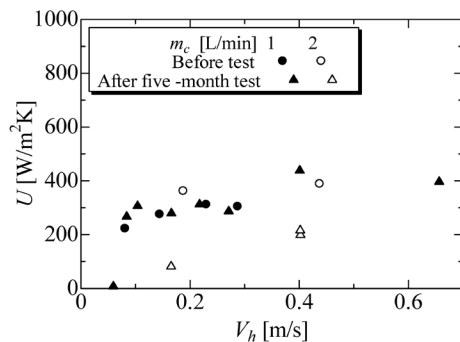
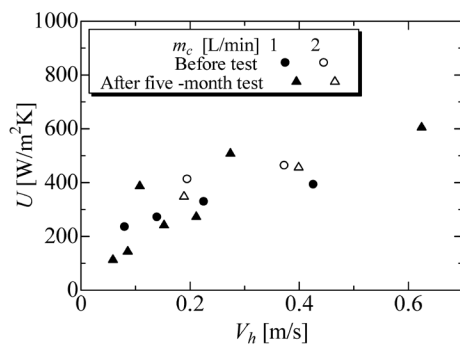
Fig. 10(c)-(ii)で示すように変色は出入口の穴周辺に特に集中しており、海水中の塩分の結晶が付着したものであった。この塩分を取り除いた後のコーティング表面を観察したところ、コーティングが完全に剥離し、母材が露出していることが明らかとなった。また露出した母材は腐食していた。この剥離は出入口の穴周辺に集中していることから、海水との摩擦によるエロージョンが考えられる。塩分結晶の付着の過程として、海水のエロージョンによる剥離→母材の腐食→塩分の結晶成長が考えられる。なお、剥離のない箇所については、塩分の付着はなかった。

5カ月連続運転によりTP-1、TP-3の海水出入口部分の流水による変色および剥離が発生したが、それ以外の領域やTP-2での変化は観察されなかった。また、これらの変化についてもいずれも高速の流水による影響であったため、コーティング厚さの調整により対策が可能である。

### 3.4 5カ月連続運転における熱通過率の比較

各テストプレートの5カ月連続運転による伝熱性



(a) TP-1 (25  $\mu\text{m}$  PEEK)(b) TP-2 (100  $\mu\text{m}$  PEEK)

(c) TP-3 (WIN KOTE)

Fig. 11. Comparison with overall heat transfer coefficient against surface seawater velocity between before and after five-month period test.

能の変化について評価するため、その前後の熱通過率について比較を行った。Fig. 11(a)~(c)に各テストプレートの熱通過率の連続運転前後の比較を示す。また、Fig. 5と同様に深層水流量 $m_c=1$ および2 L/minにおける結果を同時にプロットした。図より、いずれのテストプレートにおいても連続運転の前後で熱通過率に大きな変化は見られなかった。3.3節のコーティング面の観察で述べたように、TP-3の局所での腐食を除いてTP-1~3での変化は見られなかつ

た。有馬ら(2016b)は、PEEKおよびWIN KOTE伝熱面の変質により熱伝達率が変化することを報告しているが、本実験では伝熱面の変化は見られず、熱通過率への影響もなかったものと考えられる。

#### 4. ま と め

アルミ合金を特殊コーティングしたテストプレートを組み込んだプレート式熱交換器を用いて、表層水・深層水を熱源とした伝熱性能の評価を行った。また、5カ月の連続運転を行い海水に対する腐食の有無と伝熱性能への影響について検討を行い、以下の結果が明らかとなった。

- 1) コーティングされた3種類のテストプレートを全て用いて行った5か月連続運転では、熱通過率の大きな増減が観察されたが、海水流量の変化に起因しているものであった。
- 2) 連続運転前後での各々のテストプレートの表面状態の比較では、WIN KOTEプレートのみ表面の一部に腐食が観察された。強い海水の流れによりコーティングが破壊されたと考えられる。それ以外のプレートについては大きな異常は観察されなかった。
- 3) 各々のテストプレートの連続運転前後での熱通過率の比較では、いずれのテストプレートもほとんど変化が見られなかったことから、海水の連続通水による伝熱性能の影響はないことが分かる。
- 4) 熱通過率および平均熱伝達の比較によりコーティングされた3種類のテストプレートの中で25  $\mu\text{m}$ 厚PEEK樹脂のものが一番良い伝熱性能を示した。しかし、チタンプレートとの比較では1/4~1/6程度の熱伝達率しか得られなかった。

#### 謝 辞

この研究は、JSPS科研費15K00637および佐賀大学学内研究プロジェクトにより資金の一部の助成を受けたものである。ここに記して感謝する。

## 参考文献

- 有馬博史・緒方大智・小山幸平 (2016a) コーティングされたアルミニウム伝熱面におけるアンモニア沸騰熱伝達. 日本伝熱学会論文集, 24, 23-30.
- 有馬博史・小山幸平 (2016b) コーティングされたアルミニウム合金のアンモニア沸騰環境下における利用可能性. 軽金属, 66, 498-502.
- Arima, H., R. Inadomi and Koyama, K. (2016) Heat transfer characteristics of plate heat exchanger using coated-aluminum plate for ammonia boiling. The 27th International Symposium on Transport Phenomena, ISTP27-041.
- 池上康之・佐々木 大・合田知二・上原春男 (2005) スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化に関する実験的研究 (噴流方向の影響). 日本海水学会誌, 59, 68-73.
- 池上康之 (2015) 再生可能エネルギーにおける安定電源の役割を目指す海洋温度差発電の新しい展開—沖縄・久米島から始まった海洋温度差発電の系統連系—. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 50, 54-58.
- Makai Ocean Engineering (2015) Makai Connects World's Largest Ocean Thermal Plant to U.S. Grid, [http://www.makai.com/makai-news/2015\\_08\\_29\\_makai\\_connects\\_otec/](http://www.makai.com/makai-news/2015_08_29_makai_connects_otec/).
- 宮武 修・富村寿夫・井手雄一・藤井 哲 (1979) スプレフラッシュ蒸発に関する実験的研究. 日本機械学会論文集, 45, 1883-1891.
- 中岡 勉・西田哲也・津田 稔・秋月隆宏・海保 健・福田喜伸・池上康之・上原春男 (2000) プレート式凝縮器の性能評価 (冷媒HFC410AおよびHFC404Aの場合). OTEC, 8, 1-14.
- 西田哲也・中岡 勉・一瀬純弥・池上康之 (2008) ヒートポンプ用プレート式凝縮器の実験的研究—冷媒がHFC134aの場合—. 空気調和・衛生工学会論文集, 138, 19-28.
- 尾花英明 (1974) 熱交換器設計ハンドブック. 工学図書, 東京, pp. 640-643.
- Sami, M. and Y. Ikegami (2012) On the evaporation of superheated water drops formed by flashing of liquid jets. International Journal of Thermal Sciences, 57, 37-44.
- 佐々木 大 (2006) 上向き噴流式フラッシュ蒸発海水淡水化に関する研究. 佐賀大学大学院工学系研究科 博士論文, 137 pp.
- 上原春男・Erich, S.・宮良明男・古賀 透・日野雅貴 (1991) スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化に関する研究—ノズル形状の影響について—. 日本海水学会誌, 45, 16-21.
- 上原春男・中岡 勉 (1994) インテグレートハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントと淡水化プラントの性能解析. 日本海水学会誌, 5, 21-53.
- 浦田和也・安永 健・岩崎君夫・池上康之・兼島盛吉 (2016) 久米島における海洋温度差エネルギーの複合利用に関する基礎研究. 海深研, 17, 55.
- Wilson E. E. (1915) A basic for rational design of heat transfer apparatus. Transactions of ASME, 37, 47-70.
- (2017年4月25日受付; 2017年7月11日受理)