

(技術資料)

熱交換器用高伝熱チタン板HEET[®]

High Heat-transfer Titanium Sheet-HEET[®]- for Heat Exchanger



田村圭太郎*1
Keitaro TAMURA



逸見義男*1
Yoshio ITSUMI



岡本明夫*1 (博士(工学))
Dr. Akio OKAMOTO



大山英人*2 (博士(工学))
Dr. Hideto OYAMA



有馬博史*3 (博士(工学))
Dr. Hirofumi ARIMA



池上康之*3 (博士(工学))
Dr. Yasuyuki IKEGAMI

A plate-type heat exchanger (PHE) that use seawater as a cooling/heating medium is widely employed by chemical plants, power-generating facilities and large transport ships. Titanium is a common material for these heat exchangers, particularly for their primary members, including a heat exchanging plate and piping, thanks to its excellent corrosion resistance to seawater. Improving the heat-transfer performance of PHE enables the reduction in number and size of the plate used in PHE and thus enables the entire facility to be downsized. We have developed a high-heat-transfer titanium plate-HEET[®]-which has a heat-transfer performance that is significantly improved by fine irregularities imparted on its surface. The surface area increased by the fine irregularities, along with the promoted nucleate boiling, has improved the heat-transfer and particularly increased the evaporation heat transfer by approximately 20% or more.

まえがき = チタンは海水に対して極めて優れた耐食性を示す。このため、化学プラントや発電設備、大型輸送船舶などにおいて、海水を用いて冷却や加熱を行うプレート式熱交換器 (Plate type Heat Exchanger, 以下PHEという) の熱交換プレートや配管などの主要部材に数多く使用されている¹⁾。図1にPHEの構造と原理を示す。PHEは、プレートを挟んで逆方向に流れる海水と、海水によって冷却あるいは加熱される媒体との間で熱交換を行う装置である。熱交換は図2に示す3タイプがあり、工場などで排出される温水を冷たい海水にて冷却する液单相強制対流伝熱、海洋温度差発電などにおける作動流体を温かい海水で気体に変える蒸発伝熱、および作動気体を液体に変える凝縮伝熱がある。それらの伝熱性能を向上させることができれば高効率化が可能となる。また、PHEに使用するプレート枚数やサイズを減少させることにより、設備全体の小型化が可能となる。

これまでに、熱交換器の効率化のため種々の研究開発が行われてきた。とくに、蒸発伝熱において、プレートの素材からの熱伝達を向上させる方法として、プレート表面にステンレス粒を溶射することでポーラス加工を施すこと²⁾や、表面に銅の電着を利用した塗膜形成することで微細な凹凸を付与すること³⁾が報告されている。これらの方法では、表面の微細な凹凸が沸騰核となり、核沸騰を促進させることによって蒸発伝熱の向上が確認されている。しかし、これらいずれの方法も、表面凹凸が剥離(はくり)するなど長時間使用での安定性、および加工のコストや生産性などの問題がある。

そこで当社は、これらの問題を解決する方法として、転写圧延技術によってチタン板の表面に微細凹凸を付与する方法を提案した⁴⁾。図3に転写圧延技術の概略図を

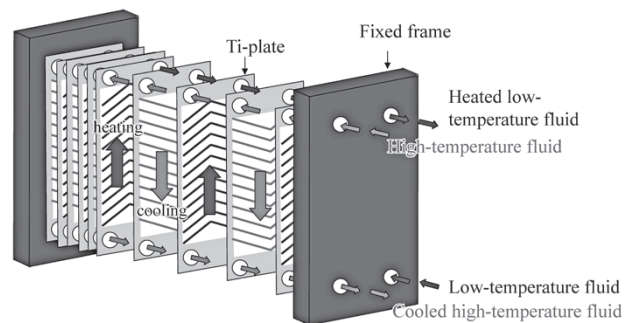


図1 プレート式熱交換器の構造と原理
Fig.1 Structure and principles of plate type heat exchanger

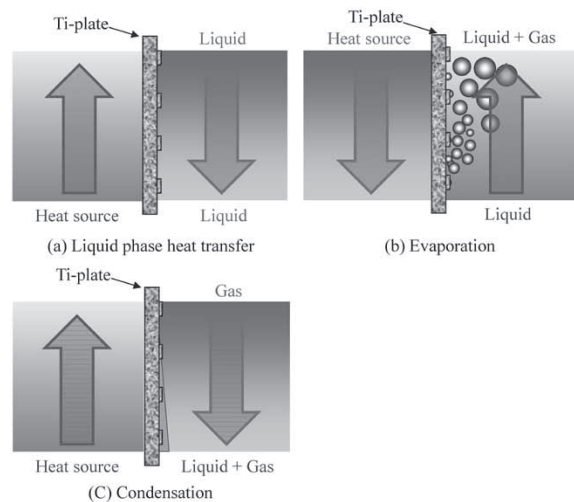


図2 伝熱タイプ概略
Fig.2 Outline of heat transfer type

示す。転写圧延技術とは、表面に微細凹凸加工を施したロールを用いて圧延することにより、ロールの凹凸をチタン板表面に転写する技術である。この技術を用いて

*1 鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン工場 *2 鉄鋼事業部門 チタン本部 *3 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター

図4に示すような微細凹凸溝（凹部幅200 μm 、凸部幅100 μm 、深さ30 μm ）を付与したチタン板は、微細凹凸溝が流れに対して垂直になるように配置した場合、通常の平滑板と比較して蒸発伝熱性能が約10~40%向上することが確認されている⁴⁾。

実際のPHEのプレートは、熱交換効率や機械的耐久性の向上のため、図5に示すような複雑な波形形状、例えばヘリンボーン（にしんの骨の意）にプレス成形される。PHE内部の流れはそのプレートの形状の起伏によって、方向を変えるため、どの方向に対しても高い熱交換効果が得られる形状（模様）とするのが望ましい。そこで、微細円柱状凹凸を千鳥状に配置した水玉模様とし、これを量産工程に適用することによって高伝熱チタン板HEET[®]（以下、HEETという）を開発した。図6に、HEETの転写圧延後のコイル、表面形態および

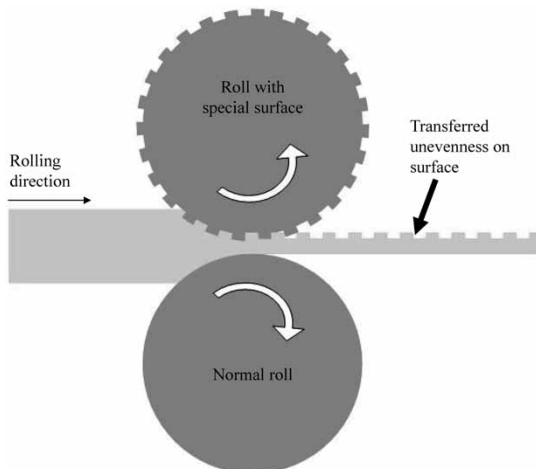


図3 転写圧延技術の概略

Fig. 3 Outline of transfer-printing technology in rolling process

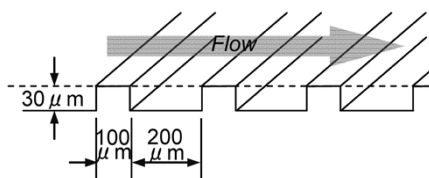


図4 微細凹凸溝の略図

Fig. 4 Schematic of unevenness of line pattern on surface

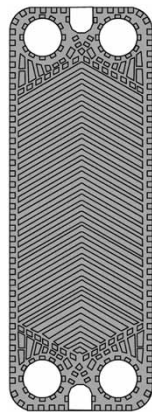


図5 代表的な熱交換プレートの模式図

Fig. 5 Pattern diagram of typical heat exchanger plate

脚注) HEETは当社の登録商標である。

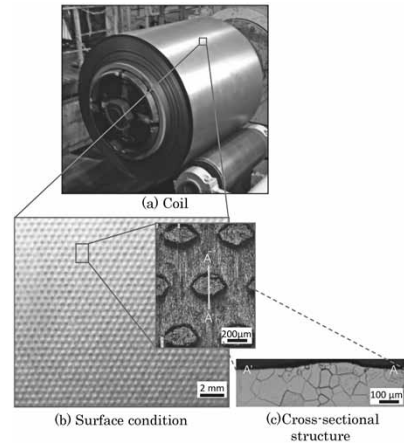


図6 高伝熱チタン板HEETのコイル、表面形態および断面組織
Fig. 6 Coil, surface condition and cross-sectional structure of high heat transfer titanium HEET

断面組織を示す。凹凸は板全面に配置され、均一で安定した形状を示し、その高さは約25 μm である。

HEETは再生可能エネルギー源として注目されている、海洋温度差発電の実証プラント（沖縄県久米島）のPHEに採用され、2013年度より連続運転されている。本稿では、HEETの伝熱性能向上効果、また、実際の海洋温度差発電実証プラントのPHEを対象とする伝熱性能評価結果も合わせて紹介する。

1. 伝熱性能評価試験

1.1 試料作製

試料に供したHEETの製造方法を説明する。まず、純チタン（ASTM G1）素材を熱間圧延および冷間圧延によって所定の板厚まで圧延した後、転写圧延により板片面に図6に示す千鳥状に配置した微細円柱状凹凸を転写した。板厚は0.6mmとし、熱処理および平坦度矯正後、幅80mm、長さ200mmに切断して伝熱性評価用のHEETを作製した。比較材として同サイズの従来の平滑チタンプレートも用意した。

また、外周側が微細凹凸面となるようにHEETをロール成形および溶接することにより、外径19mm、肉厚0.6mm、長さ550mmの溶接管も作製した。

1.2 伝熱性能評価方法

作製したHEETと平滑チタンプレートを用いて蒸発伝熱試験を行った。図7に伝熱試験概略図を示す。熱交換器No.1を蒸発器とし、そこに平滑チタンプレートまたはHEETを固定し、HEETは凹凸を付与した面に作動流体フロンR134a、反対側の面に温水を流して熱交換を行い、R134aを気化させた。気体となったR134aは凝縮器で冷却して液化させ、装置内で循環させた。伝熱面積は50×150mmとし、それぞれの蒸発器の入・出側温度を測定した。得られた温度から熱量 Q および対数平均温度差 ΔT_m を式(1)および式(2)より求めた。

$$Q = l_h \rho_h c (T_{h1} - T_{h2}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h1} - T_{h2})}{\ln \frac{(T_{h1} - T_2)}{(T_{h2} - T_1)}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_{h1} 、 T_{h2} はそれぞれ温水の入側温度、出側温度、

T_1, T_2 はそれぞれR134aの入側温度, 出側温度, l_h は温水流量, ρ_h は温水密度, c は温水の比熱, A は熱伝達面積を示す。求めた Q および ΔT_m から蒸発熱通過係数 U を式(3)より求めた。

$$U = \frac{Q}{A\Delta T_m} \dots\dots\dots (1)$$

また, 凝縮伝熱および液单相強制対流伝熱におけるHEETの効果も併せて調査した。凝縮伝熱試験では, 図7の熱交換器No.2を凝縮器とし, そこに平滑チタンプレートまたはHEETを固定し, HEETは凹凸を付与した面に作動流体R134a, 反対側の面に冷水を流して熱交換を行った。一方, 液单相強制対流伝熱試験では, 図7の熱交換器No.1に平滑チタンプレートまたはHEETを固定し, HEETは凹凸を付与した面に冷水を流し, 反対側の面に温水を流して熱交換を行った。それぞれの試験において, 蒸発伝熱試験と同様に, 熱交換器の入・出側温度を測定し, 上記式(1)~(3)より熱通過係数 U を求めた。表1に各試験での条件を示す。

蒸発伝熱においては, 外表面に微細凹凸を付与したHEETの溶接管を用いて, 熱交換での気泡発生状況の可視化を試みた。図8に試験概略図および表2に試験条件を示す。溶接管外面の一部を研磨し, 微細凹凸を除去することによって通常の平滑面と同等の粗さに調整したものを使用した。R134aに溶接管を浸漬させて溶接管内に温水を流し, 溶接管外面でR134aを沸騰させた。試験装置にはのぞき窓を設けており, そこから微細凹凸面と

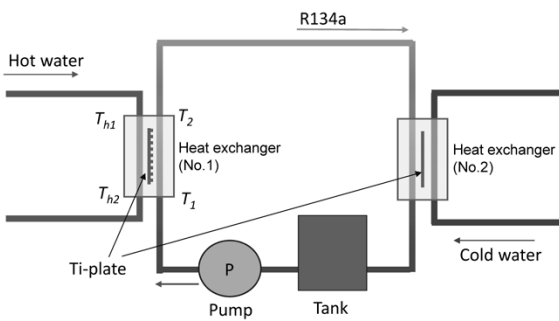


図7 伝熱試験装置概略図

Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus

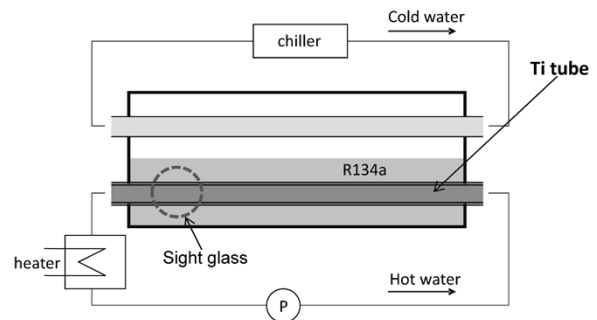


図8 可視化試験概略図

Fig. 8 Schematic diagram of visualization experimental apparatus

平滑面の気泡の発生状況を高速度カメラで撮影した。

2. 伝熱性能評価結果

2.1 蒸発伝熱

図9にHEETおよび平滑プレートの蒸発伝熱試験結果を示す。HEETは平滑プレートに対して約24%の伝熱性能向上が確認された。HEETは微細凹凸により平滑板に比べて表面積が約6%大きい, その拡大率よりも伝熱性能向上効果が大きい結果となっている。図10は溶接管の沸騰の様子を高速度カメラで撮影した例である。写真中央の破線から左側は, 表面の研磨によって微細凹凸を除去し, 通常の平滑面と同等の粗さに調整したもので

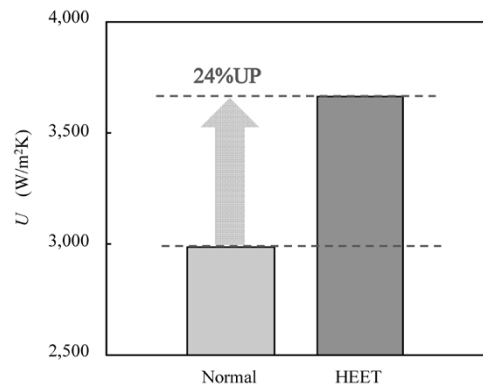


図9 HEETと平滑プレートの蒸発伝熱性能

Fig. 9 Evaporation heat transfer performances of HEET and normal plate

表1 伝熱試験条件

Table 1 Test conditions of heat transfer performance

	Hot water			Cold water			R134a		
	Inlet temperature (°C)	Flow volume (m³/s)	Flow rate (m/s)	Inlet temperature (°C)	Flow volume (m³/s)	Flow rate (m/s)	Flow volume (m³/s)	Mass flux (kg/m²s)	Saturation pressure (MPa)
Evaporation	35	3.0	0.6	10	5.0	0.8	0.1	23	0.5
Condensation	40	3.0	0.6	10	2.0	0.4	0.1	22	0.9
Liquid phase heat transfer	70	5.0	0.9	20	1.0	0.2			

表2 可視化試験条件

Table 2 Conditions of visualization experiment

Hot water		Cold water		R134a		
Inlet temperature (°C)	Flow volume (m³/s)	Inlet temperature (°C)	Flow volume (m³/s)	Evaporative temperature (°C)	Saturation pressure (MPa)	Heat flux (kW/m²)
40.0	25.0	6.0~17.0	1.0~2.0	30.0~33.0	0.65~0.74	20.0~40.0

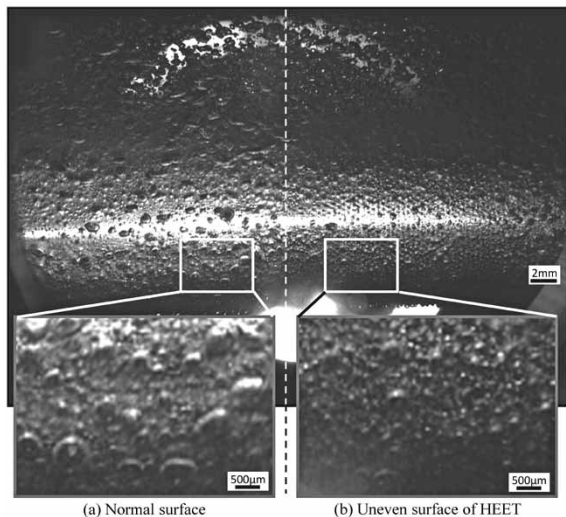


図10 溶接管での微細凹凸面と平滑面での沸騰状況
Fig.10 Boiling situation in uneven surface and normal surface in titanium pipe

ある。HEETの微細凹凸面では、平滑面に比べて細かい気泡が多く発生していることが確認できた。一般に沸騰は、板表面の微細なキズやキャビティが沸騰核となり、そこから気泡が発生して起こるが、HEETでは、微細凹凸がキズやキャビティの役割を果たし、核沸騰の促進が主要因となり、伝熱性能向上したと考えられる。

2.2 凝縮および液单相強制対流伝熱

凝縮伝熱試験では、平滑チタンプレートおよびHEETの U 値はそれぞれ、 $910 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $943 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり、HEETは平滑プレートに対して約6%の性能向上を示した。また、液单相強制対流伝熱では、平滑チタンプレートおよびHEETの U 値はそれぞれ、 $2,050 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $2,283 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり、HEETは平滑プレートに対して約11%の性能向上を示した。

この伝熱試験においては、性能向上メカニズムについては推定ではあるが、表面積拡大や乱流発生により熱交換器内での液が攪拌（かくはん）されたことが寄与したと考えられる。

3. 熱交換器での検証

実際のPHEでは、プレートは図5に示すような複雑な波形形状にプレス成形された状態で熱交換器に組み込

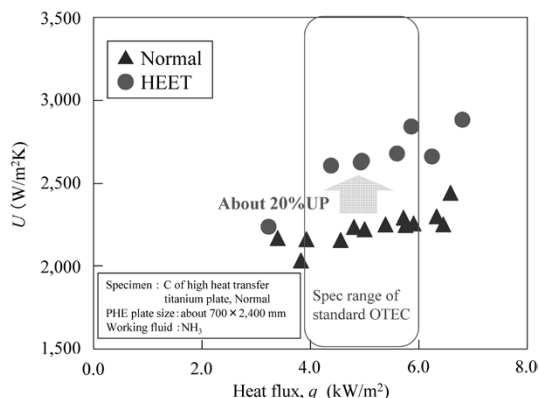


図11 OTECと同タイプの熱交換器での蒸発伝熱試験結果
Fig.11 Relationship between overall heat transfer coefficient U of evaporation and heat flux q on PHE of OTEC



図12 OTEC実証プラント
Fig.12 OTEC demonstration plant

まれる。このため、効果の確認にあたっては、海洋温度差発電の実証プラントに用いられる約 $700 \times 2,400 \text{ mm}$ サイズのPHEを対象に評価を行った。所定の形状にプレス成形した後、熱交換器に組み込んで蒸発伝熱性能を確認した。図11に結果を示す。HEETは実際のPHEにおいて性能が約20%向上することを確認した。図12は2013年に沖縄県に建設された100kW級海洋温度差発電実証プラントである。HEETは本プラントにおいても、蒸発伝熱性能が約20%向上したことが確認され、有効性が証明されている。

むすび= 高伝熱チタン板HEETは、圧延転写技術を活用して表面に微細凹凸を持たせている。この微細凹凸による表面積拡大や核沸騰の促進などによって伝熱性能が向上すると考えられ、とくに蒸発伝熱においては約20%以上の性能向上を確認した。

また、凝縮伝熱においては、生成する液膜がプレート表面を覆うことによって伝熱性能の低下につながるの一般的なであるが、微細凹凸を有するHEETは液膜の排出を促進させる効果が期待される。今後、微細凹凸形状の最適化を検討することで、様々なタイプの熱交換器への展開を推し進める。

なお、本開発における成果の一部は、平成23~26年度独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「風力等自然エネルギー技術研究開発/海洋エネルギー技術研究開発/次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（海洋温度差発電）」への取り組みにおいて得られたものであり、ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 草道英武ほか. 日本のチタン産業とその新技術. 株式会社アグネ技術センター, 1996, p.18.
- 2) 池上康之ほか. 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集. 2000, p.825.
- 3) Furberg et al. ASME Journal of Heat Transfer. 2009, Vol.131, p.101010.
- 4) 岡本明夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.60.
- 5) 日本機械学会. JSME テキストシリーズ 伝熱工学. 丸善, 2005, p.123.
- 6) 小山 繁ほか. 冷凍. 2000, Vol.75, No.874, p.654.