

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05403

研究課題名(和文)プレート式熱交換器の新可視化法の提案とそれを用いたアンモニア沸騰現象の解明

研究課題名(英文) Suggestion of the new visualization method of the plate-type heat exchanger and Elucidation of the ammonia boiling phenomenon of use the method

研究代表者

有馬 博史 (ARIMA, Hirofumi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究所・准教授

研究者番号：90346875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、オーガニック ランキン サイクルを用いた小温度差発電用プレート式蒸発器における熱効率の向上のため、核沸騰の可視化及び可視化解析手法の確立を目的としたものである。3年の研究期間において、可視化用のプレート式熱交換器の製作を行い、それを用いて、FC-72及びアンモニアの可視化実験を行った。また、可視化画像について機械学習の手法を取り入れた解析プログラムの作成を行い、それを用いた画像解析を行った。可視化画像からは画像解析によりボイド率の分布を得て、それらと別途測定した乾き度分布との相関について求めた。既存の相関式との比較では、条件によって既存のものとは一致することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液二相流の可視化解析は、熱交換器の性能向上に重要である。このことから、本研究は単に沸騰伝熱現象の解析手法の開発のみならず、熱交換器の性能向上につなげることで、将来的な海洋温度差発電の実用化に役立てることができる。海洋温度発電は再生可能エネルギーの一つであることから、その実用化が進むことで、CO2および枯渇エネルギー使用量の削減につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：The study aims to establish visualization and visualization analysis methods for nucleate boiling in order to improve the thermal efficiency of plate heat evaporator for low temperature thermal conversion using the organic Rankine cycle. In the research period for three years, I manufactured the plate type heat exchanger for visualization and visualization experiment using FC-72 and ammonia as a working fluid were performed. Moreover, I created the analysis program which took in the technique of machine learning about the visualization image, and image analysis were performed. From the visualization images, the distribution of void fraction was obtained by image analysis, and the correlation with the vapor quality distribution measured separately was determined. Comparison with conventional correlations, it is clarify that derived correlation is agreed with it.

研究分野：熱工学

キーワード：プレート式熱交換器 可視化 沸騰様相 沸騰熱伝達率

1. 研究開始当初の背景

海洋温度差発電 (OTEC) は、海洋表層水と深層水を熱源としてランキンサイクルで発電を行う。OTEC は現在、沖縄県久米島とハワイにおいて 100kW 級のプラントを用いた実証実験が行われているが、今後実用化に向けて発電効率の向上、熱交換器の性能向上が重要な課題となっている。

ところで、OTEC に限らずランキンサイクルによる発電には高温熱源および低温熱源が必要不可欠である。温泉水や工場の温排水等の低温熱源を利用した発電は小温度差発電 (Low-grade Thermal Energy Conversion, 以下、LTEC) と呼ばれ、また作動流体には、主に低沸点の有機媒体が用いられており、有機ランキンサイクル (Organic Rankine Cycle, 以下、ORC) と呼ばれている (図1)。特に LTEC は、“排熱”として捨てられる熱エネルギーの有効利用に最適であると考えられる。OTEC 自体も LTEC へ分類される。ORC は、主に「蒸発器」および「凝縮器」と呼ばれる熱交換器、タービンとポンプにて構成される。OTEC の性能向上にはプレート式熱交換器 (以下、PHE, 図2) の性能向上が必要不可欠である。PHE の性能向上のための研究として、伝熱面の形状の工夫や、伝熱促進に関する研究、沸騰熱伝達の測定、可視化による沸騰流の解析などがこれまで行われてきているが、本研究では可視化による沸騰流の解析に注目した。これまでの研究として行われていない、ヘリンボーン型プレート式蒸発器の伝熱面におけるアンモニアの沸騰様相を観察、解析することで、沸騰熱伝達特性について明らかにする。

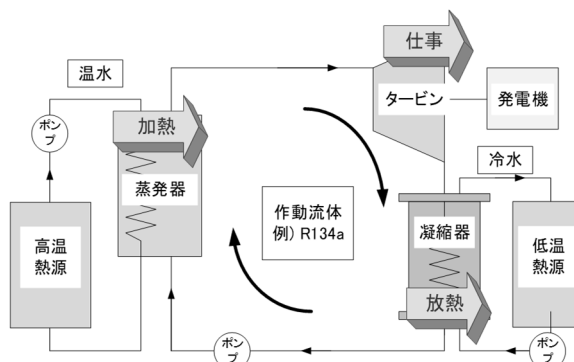


図1 有機ランキンサイクルの原理の概略

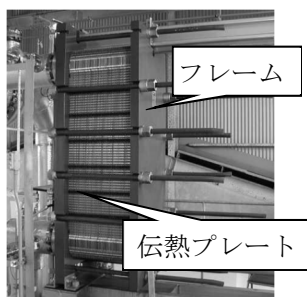


図2 プレート式熱交換器(PHE)

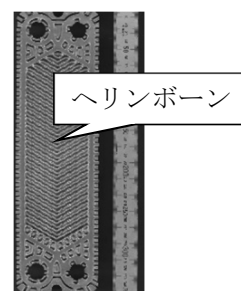


図3 ヘリンボーン型伝熱プレート

2. 研究の目的

本研究の目的は、ORC に使用する PHE 蒸発器の伝熱性能の向上に不可欠な沸騰伝熱特性について、可視化によって明らかにすることを研究目的とする。研究代表者が提案する直接式およびこれまでに全く無い新しい手法による間接式可視化法にて、これまで提起されてきた諸課題を克服し、可視化による作動流体の沸騰現象と伝熱特性の相関関係を明らかにし、PHE の伝熱性能向上に必須な知見を得た後、さらに本結果を熱交換器の設計に反映させることを研究目的とする。得られたデータをもとに PHE 蒸発器の伝熱性能の予測法を新たに確立し、ORC を用いた LTEC の普及および改良に貢献する。それにより CO₂ 排出が大幅に抑制されることが期待される。

3. 研究の方法

3.1 実験装置

図4に実験装置の概略図を示す。装置はテストセクション (熱交換器)、凝縮器、プレヒーター、温水タンク、冷凍機、循環ポンプ、可視化用高速度カメラ、光源、記録測定用 PC、データロガーで構成される。本実験では、作動流体としてアンモニアを用いた。作動流体、温水、冷水の各流体の温度、圧力、質量流量、体積流量は、K 型熱電対、圧力変換器、体積流量計、質量流量計で測定した。これらの測定値はデータロガーに収集・記録した。一方、可視化用高速度カメラで撮影した動画は PC に記録、保存した。高速度カメラはフレームレート 2000fps、解像度 1280×1028pixels で約 2 秒間撮影を行った。

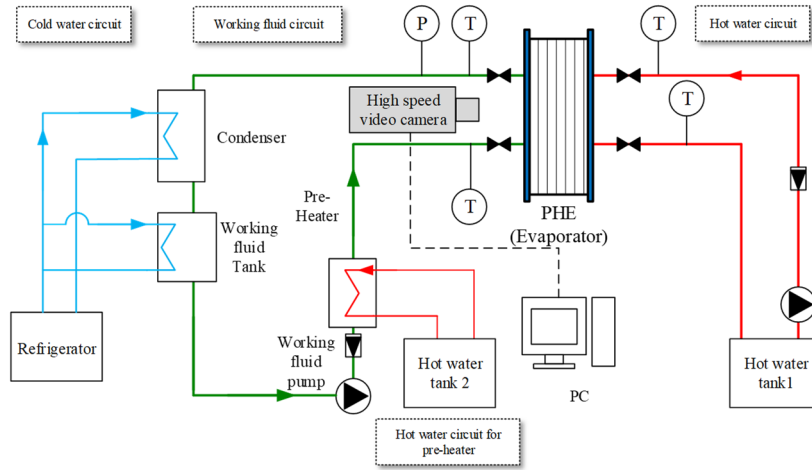


図4 実験装置概略図

3.2 テストセクション

図5に実験で用いた可視化窓付きプレート式熱交換器熱交換器(テストセクション, 以下 PHE)を示す. 図6に PHE のプレートは平滑アルミプレートおよびヘリンボーン型陽極酸化アルミプレート(シェブロン角 $\beta = 45^\circ$)を用いた.

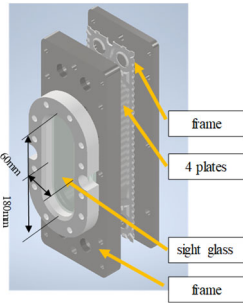
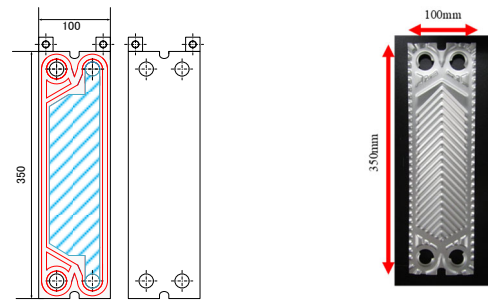


図5 テストセクション.



(a) 平滑プレート (b) ヘリンボーン
図6 テストプレート

3.3 実験方法

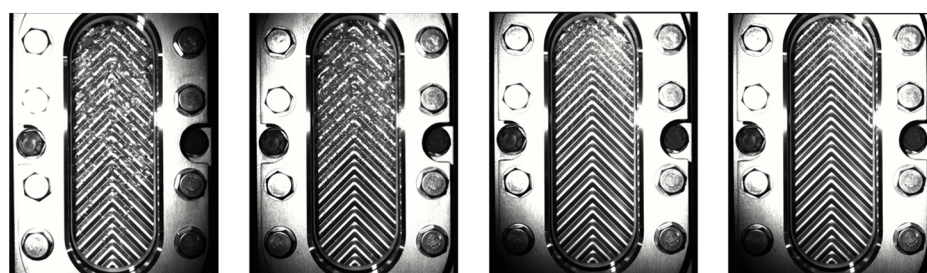
実験には図4の装置を用いた. 実験では図5のテストセクションに任意の温度と流量で温水と作動流体を対向流で循環させ熱交換を行う. 作動流体にはFC-72またはアンモニアを用いた. まず, 作動流体タンクに貯蔵された作動流体を作動流体ポンプにてテストセクションに流す. また, テストセクションには温水を対向に流すことで作動流体を加熱, 沸騰させる. 次に気液二相状態となった作動流体は凝縮器に送られ, 冷凍機から凝縮器に送られた冷水により凝縮する. その後液化した作動流体は作動流体タンクに戻される. タンクに貯蔵された作動流体をポンプで再度テストセクションに送り込むことで系内を循環させた. テストセクションの作動流体側および温水側の入口と出口の温度及び各流体の流量, 作動流体側の圧力を定常状態に保ち, これらの状態量をデータロガーで測定を行った. 各流体の温度と流量を定常に保ち, テストセクションの各流体の入口・出口温度と流量を測定した. FC-72の実験条件として, 作動流体の質量流束 G を 10, 20, 30, 40 kg/m²s, 温水の体積流量 m_{hw} を 2.5, 5, 7.5, 10 L/min, 温水入口温度 $T_{hw, in}$ を 60~65 °C, 過冷度 ΔT_{sub} を 0, 5, 10 °C, 操作圧力 P を 100 kPa ($T_{sat} = 55.7$ °C) を与えた. また, アンモニアの実験条件として, 作動流体の質量流束 G を 7, 14, 20, 27 kg/m²s, 温水の体積流量 m_{hw} を 1, 2, 3, 4 L/min, 温水入口温度 $T_{hw, in}$ を 28~32 °C, 過冷度 ΔT_{sub} を 0, 6 °C, 操作圧力 P を 700 kPa ($T_{sat} = 13.8$ °C) を与えた.

4. 研究成果

成果の一例として, アンモニアで行った可視化実験の結果を説明する. 図7に入口過冷度 6K, 温水質量流量が 1 L/min 一定の条件で, 質量流束 G を変化させた場合におけるアンモニア沸騰様相の可視化結果の比較を示す. 各画像において, 作動流体は右下から流入し右上から流出する. また, 温水はプレートの裏面を左上から左下に対向流で流れている. 図7(a)において, 沸騰気泡は左下部から発生していることがわかる. 発生箇所は温水の配管があり 30°C前後の温水がパッキンを介して接触しているため, 表面過熱度が高い. そのことから左下部からサブクール沸騰が発生していることがわかる. 一方, 出口付近においては気泡流+スラグ流に発達していることが分かる. 質量流束 G が増加した場合, 過冷度が下流側に広がることで, 伝熱面上に観察される発泡点も下流側にシフトする.

図8に入口過冷度 0K, 温水質量流量が 1 L/min 一定の条件で, 質量流束 G を変化させた場合におけるアンモニア沸騰様相の可視化結果の比較を示す. 図8(a)においても図7(a)と同様に沸騰気泡は左下部から発生するが, 同時に右下の入口付近からも発生していることが分かる. 左下

部からの沸騰気泡についてはサブクール沸騰ではなく入口温度条件から飽和沸騰と考えられ、気泡径が図 8(a) より明らかに増大している。また、気泡流+スラグ流への変化は図 7 に比べより上流側で観察された。 G による沸騰様相の違いはほとんど見られなかった。



(a) $G = 7 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (b) $G = 14 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (c) $G = 20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (d) $G = 27 \text{ kg/m}^2\text{s}$

図 7 Visualized boiling phenomena image at different mass flux G ($m_h = 1 \text{ L/min}$, $\Delta T_{sub} = 6\text{K}$).



(a) $G = 7 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (b) $G = 14 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (c) $G = 20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (d) $G = 27 \text{ kg/m}^2\text{s}$

図 8 Visualized boiling phenomena image at different mass flux G ($m_h = 1 \text{ L/min}$, $\Delta T_{sub} = 0\text{K}$).

次に、可視化画像をもとに画像解析を行った。画像解析は画像の輝度を元に 2 値化にて気相及び液相の区別を行った。図 9 の上段の図は、同一の温水流量及び入口過冷度において、異なる質量流束 G の条件によって得られた可視化画像を縦 140mm、幅 50mm の範囲で切り出し、さらに画像処理によって気相及び液相に分別した画像である。また、これらの画像を基に流れ方向のボイド率の分布を求めた。その結果を図 9 の下の段にそれぞれ示す。図 9 のボイド率の分布図より、図面左部と右部のボイド率の差異がわずかに生じていることが分かる。これは、左下部で温水と作動流体とが構造上間接的に接触するため、そこだけ過熱度が大きくなり、結果的にサブクール沸騰が発生しやすい条件となったためである。また、質量流束の増加でボイド率が相対的に下がってくることも確認できる。

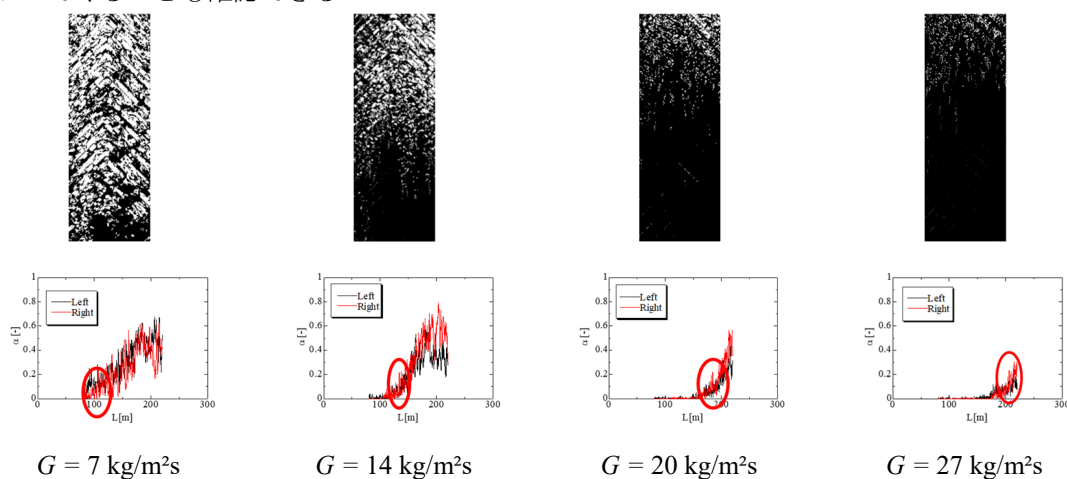


図 9 可視化画像 $m_{hw} = 1 \text{ L/min}$, $\Delta T_{sub} = 6 \text{ K}$

図 9 の手法で得られたボイド率 α の分布を基に、出口乾き度 x とボイド率 α の相関を図 10 に示す。また、式(1)の均質流モデル、式(2)のドリフトフラックスモデルの式との比較も行った。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\rho_g(1-x)}{\rho_l x}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{x}{c_0 \left\{ x + \frac{\rho_g(1-x)}{\rho_l} \right\} + \frac{\rho_g V_{GJ}}{G}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_l と ρ_g はそれぞれ液相と気相の密度、 x は出口乾き度を示す。

ドリフトフラックスモデルの分布パラメーター C_0 および平均ドリフト速度 V_{GJ} は Okamoto らおよび三島らのアンモニア沸騰可視化実験において得られた値である、 $C_0 = 0.35, V_{GJ} = 0.71, C_0 = 0.94, V_{GJ} = 0.77$ を与えそれぞれ推算値を求めている。過冷度 6K, 0K のいずれのボイド率分布は、均質流モデルからは大きくかけ離れている。一方、過冷度 6K におけるボイド率分布は、三島らの推算式、過冷度 0K の場合は、岡本らの推算式に近い分布であることが分かる。

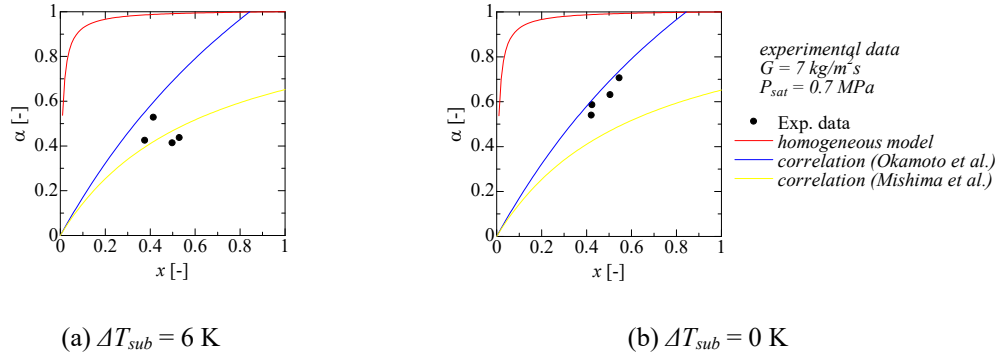


図 10 ボイド率相関式との比較.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirofumi ARIMA, Yuta SHIGENAGA, Masanao NISHIGUCHI	4. 巻 2021
2. 論文標題 Heat Transfer Characteristics of Plate Evaporator using Aluminum Herringbone Plate for OTEC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ORC2021 (6th International Seminar of ORC Power Systems)	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14459/2021mp1633146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 有馬 博史, 林 賢大
2. 発表標題 プレート式熱交換器におけるアンモニア強制対流沸騰現象の可視化
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Hayashi, Hirofumi ARIMA, Takuya Tanaka
2. 発表標題 Visualization of boiling FC-72 on plate heat exchanger
3. 学会等名 2022 International Ocean Energy Symposium & 19th Joint Young Researcher Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口 正尚, 有馬 博史, 松田昇一
2. 発表標題 久米島海洋深層水を利用した冷房装置の熱交換器の伝熱性能
3. 学会等名 第25回 海洋深層水利用学会 全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 賢大, 有馬 博史, 田中 拓也
2. 発表標題 アルミ伝熱面を用いたプレート式熱交換器におけるFC-72の沸騰伝熱特性
3. 学会等名 熱工学コンファレンス 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口 正尚, 有馬 博史, 松田昇一
2. 発表標題 海洋深層水を熱源とする冷房装置用熱交換器の伝熱性能評価
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有馬 博史, 重永 裕大, 西口 正尚
2. 発表標題 ヘリンボーン型アルミ伝熱面を用いたアンモニア蒸発器の伝熱特性
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	小山 幸平 (Koyama Kohei) (40597845)	東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (52601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	荒巻 森一郎 (Aramaki Shinichirou) (50274535)	西日本工業大学・工学部・教授 (37110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関