

研究種目： 基盤研究（A）  
研究期間： 2006～2008  
課題番号： 18206101  
研究課題名（和文） 新型高性能マイクロチャンネル熱交換器の実証研究  
研究課題名（英文） Development of advanced microchannel heat exchangers  
研究代表者 原田 雅幸（HARADA MASAYUKI）  
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教  
研究者番号： 60133120

## 研究成果の概要：

液体二酸化炭素により冷却する蒸気タービンの復水器を対象として、二相流間の新型高性能マイクロチャンネル熱交換器の流路最適化と設計を行い、試験体を作成して、その性能を実験的に検証した。受熱側・与熱側それぞれの三次元熱流動解析と可視化実験から最適化された流路形状試験体を用い、超臨界二酸化炭素/水間伝熱流動試験装置の試験より、高い総括伝熱係数が得られ、凝縮・沸騰二相流間の熱交換器として、新型高性能マイクロチャンネル熱交換器の優位性が明らかとなった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,500,000	4,050,000	17,550,000
2007年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2008年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
年度			
年度			
総計	37,900,000	11,370,000	49,270,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・エネルギー学

キーワード： マイクロチャンネル熱交換器、三次元熱流動解析、二相流、超臨界二酸化炭素

## 1. 研究開始当初の背景

金属プレート上に微細な流路を形成する熱交換器、マイクロチャンネル熱交換器（Microchannel heat exchanger, MCHE）は、高伝熱性能・高耐圧性・高耐熱性・高耐食性により、これからの広範囲な適用が期待されている。S字型フィンモデルは、伝熱性能がほぼ同等のまま、圧力損失を大幅に低減できる新型マイクロチャンネル熱交換器であり、これまで超臨界二酸化炭素ガスタービン用の再生熱交換器およびエコキュート等の給湯器を対象としての研究が行われた。この研究では、単相流における三次元熱流動解析

（CFD）により設計し、その結果をもとに実際に試験体を作成しての実験検証を行った結果、新型フィンモデルの伝熱流動特性が精度良く再現された。

## 2. 研究の目的

本研究では、単相流向けに開発された新型マイクロチャンネル熱交換器をベースに、画期的高性能が達成される沸騰/凝縮二相流間の新型マイクロチャンネル熱交換器を開発し、性能を実験的に検証する。

## 3. 研究の方法

先に開発・検証を行った、超臨界二酸化炭素ガスタービンの再生熱交換器およびエコキュートの給湯器としての MCHE は、いずれも単相流（気相・液相・超臨界相）用の熱交換器であり、相変化を伴わないものであった。一方、二相流に関してはその気液界面の取り扱いが非常に難しく、連続体である液相の中に不連続体である気泡が入り込むことで、計算の予測精度を下げることから、CFD による計算で精度良く再現する事は困難である。よって、二相流となる、蒸気タービンの復水器内の熱交換器に関しては、CFD 計算のみで流路を最適化するのは困難である。また、熱水力特性、特に圧力損失は、流れの様子に大きく支配される。二相流においても、流れの様子が単相流と類似していれば、その熱水力特性のフィン形状依存性も単相流と類似した結果が得られる事が予想される。そこで、マイクロチャンネルにおける単相流での流動挙動を FLUENT 社（現 ANSYS 社）の提供する CFD ソフト、FLUENT6.2 を用いた CFD 計算によって求めた。さらに、本研究では、その復水器の設計方法として、単相流での CFD 計算に加えて、流路形状を模擬した試験片上の二相流に対する高速度ビデオカメラを用いた可視化実験を行い、流路の最適化を行うという手法を採用した。復水器内に設置する熱交換器の与熱側は水蒸気の凝縮面で、受熱側流体は二酸化炭素とし、液相の二酸化炭素が熱交換器内で沸騰する事で、受熱側・与熱側とも相変化を伴う熱交換器とした。沸騰側・凝縮側それぞれの二相流可視化実験の結果に、単相流での CFD 計算の結果を組み合わせ、二相流の沸騰側・凝縮側それぞれの流路形状を決定した。その流路形状を用いて、復水器試験体を設計・作成し、超臨界二酸化炭素試験装置による実験データからその復水器試験体の性能を検証した。

#### 4. 研究成果

二相流を用いた熱交換器として、蒸気タービンの復水器内の熱交換器に関して、新型高性能マイクロチャンネル熱交換器としての流路最適化と設計を行い、試験体を作成してその性能を実験的に検証した。

(1) 受熱側の流体の流れは、熱交換に伴い液体超臨界二酸化炭素が沸騰し、液相と気相が混在する二相流となる。単相流の CFD 解析は精度良く行えるが、二相流の CFD 解析は精度が良くない。そこで、受熱側の熱交換器の形状として、S 字フィンモデル、正弦曲線モデル、ルーバーフィンモデル、ジグザグモデル単相流 4 つの流路形状（図 1）を用いて検討を行った。メッシュサイズは、基本的に 0.2 mm とし、壁近傍には最少厚み 0.015 mm とする 5 層の境界層を配置して、充分な

予測精度を得られるようにした。伝熱計算は、

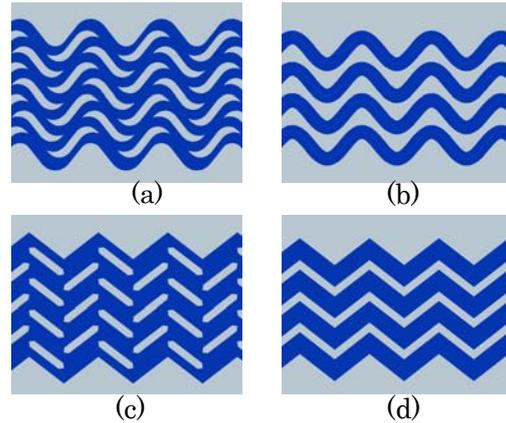


図 1 解析に使用した流路形状

- (a) S 字フィンモデル
- (b) 正弦曲線モデル
- (c) ルーバーフィンモデル
- (d) ジグザグモデル

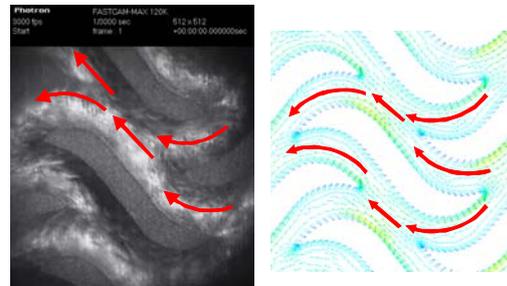


図 2 S 字型フィンモデルにおける二相流観測結果（左）と単相流 CFD 計算結果（右）

このモデルを高温側・低温側・高温側という

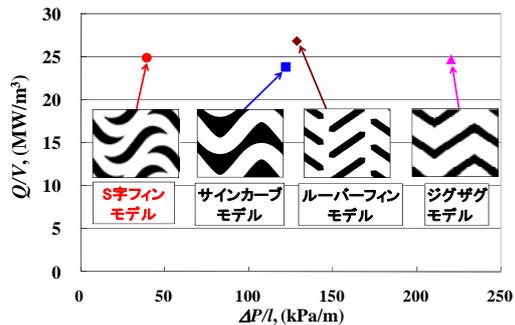


図 3 各モデルにおける単位体積あたり交換熱量( $Q/V$ )と単位長さ当たり圧力損失( $\Delta P/L$ )

形で三層のプレートを積み重ねた形で行った。計算モデルの形状寸法は約  $121 \times 10.2 \times 4.8$  mm であり、メッシュ数はモデルによって異なるが、平均すると 300 万強である。流路のパターン毎に、速度分布・伝熱流動性能を計算し、それぞれの流路形状で二相流の可視化実験を行い、単相流と二相流の速度分布

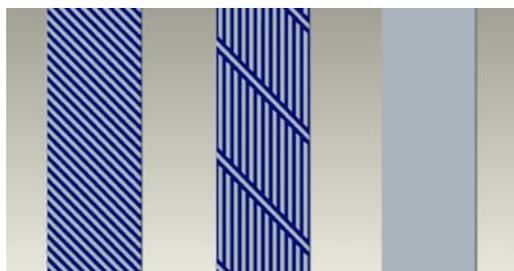
がほぼ同様である事を確認した(図2)。その結果、流路形状の違いによる二相流の伝熱流動性能の違いは、単相流 CFD 解析により、かなり良く予測可能であることが明らかとなった。

単相流の CFD 計算結果から、伝熱性能は各モデル間であまり大きな違いはなく、圧力損失は S 字フィンモデルが最も小さく、次いで正弦曲線モデル、ルーバーフィンモデルとなり、ジグザグモデルが最も大きいという結果(図3)が得られている。

上記の沸騰二相流が単相流と流動特性が類似するという可視化実験結果と単相流の CFD 計算結果から、受熱側の流路形状として S 字フィンモデル流路が最適と結論した。

なお、受熱側は液相の二酸化炭素が沸騰する事で高い熱伝達率を実現し、全体の伝熱性能を向上させる。

(2) 与熱側の流体の流れは、水蒸気が熱交換に伴い凝縮し、液相と気相が混在する二相流となる。凝縮面における伝熱性能は、蒸気が滴状凝縮となる場合は高く、膜状凝縮となると、その伝熱速度は低下することが知られている。滴状凝縮となるか膜状凝縮となるかは凝縮面の形状に依存すると考えられる。そこで、超高速・高精細ビデオカメラを用いる可視化実験を行い、実際の凝縮面での状況を観測した。可視化実験の試験体として三種類の凝縮面形状を選定し(図4)、それらに対



(a) (b) (c)

図4 凝縮可視化試験 試験体；  
(a) 斜溝リブ (b) 斜溝リブと垂直リブの組み合わせ (c) 平滑

して可視化実験を行った。

凝縮二相流の観測結果(図5)から、伝熱性能の高い滴状凝縮が効率的に行われ、伝熱面積も大きい、斜溝リブ形状が最適であると判断した。水滴の排出を容易にするために、リブの角度を  $45^\circ$  から  $60^\circ$  に変更して、試験体の設計を行った。

(3) 液体二酸化炭素沸騰/水蒸気凝縮二相流間マイクロチャンネル熱交換器(凝縮器試験体)の伝熱面形状は、二酸化炭素側流路は、(1)に記した通り、二相流の流動可視化による観察結果と単相流の CFD 計算による解

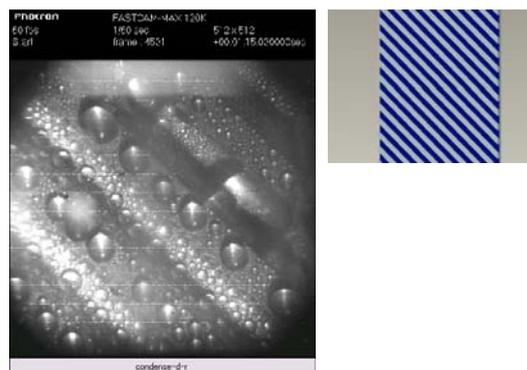


図5 斜めリブ表面での水蒸気凝縮

析結果から S 字フィンモデルの流路とした。また、水蒸気側流路は、凝縮面形状を(2)に記した通り、凝縮現象の可視化による凝縮面の挙動から、水蒸気凝縮面は斜めリブを配置する形状とした。リブは、幅 1mm、高さ 1.5mm、傾き角度は  $60^\circ$ 、溝幅 1.5mm とし、表面での凝縮水は熱交換気の両端から排出される形状とした(図6)。凝縮器試験体の定格条件は、設置する試験ループの設計条件から交換熱量、3 kW とする。1 個の熱交換器の両面で水蒸気凝縮が起こり、試験体 2 個 4 面で定格条件を実現することとした。また、最高使用圧力は 10 MPa とした。また、設定条件として、水蒸気側は絶対圧力 5 kPa、温度  $33^\circ\text{C}$  (飽和温度) とし、二酸化炭素出口

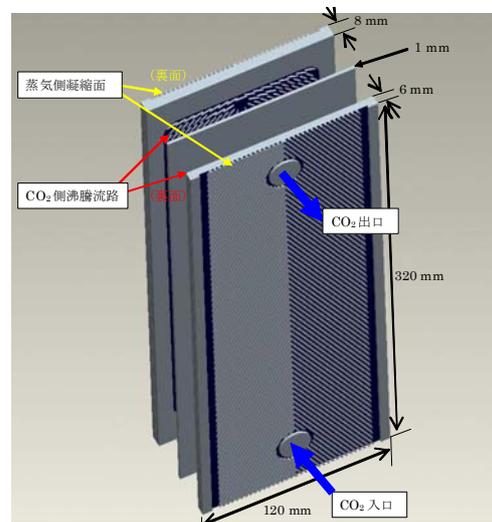


図6 凝縮器試験体の構成

温度は過熱度  $515^\circ\text{C}$  とした。受熱側・与熱側それぞれの最適化された流路形状を用いた試験体を作成し、超臨界二酸化炭素試験装置内に設置して、実験を行った。試験体入口のクオリティと総括伝熱係数の関係は図7のようになった。

実験結果から、Dittus-Boelter の式を用い

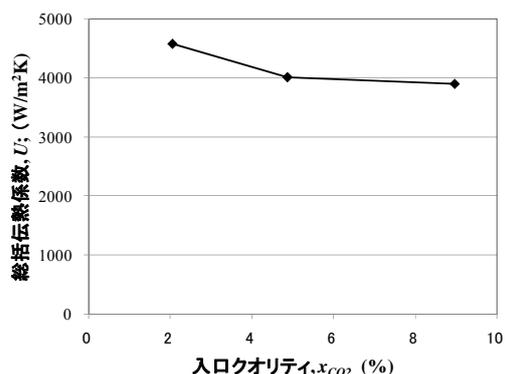


図7 CO<sub>2</sub>の入口クオリティに対する凝縮器の総括伝熱係数

で二酸化炭素側が二相流になっている区間での総括伝熱係数を算出した。二酸化炭素が単相気相流となっている区間と比較すると、総括伝熱係数が5~7倍大きくなっていることが明らかになり、沸騰二相流を利用した熱交換器の優位性が明らかとなった。その一方、Kutateladzeの式による値からは半分程度の速度である事がわかった。実験での二相流の伝熱形態は、核沸騰・膜沸騰・ミスト冷却などがあるが、Kutateladzeの式による計算では核沸騰のみで評価したことになるため、このような結果となった。また、本実験では、真空度を上げた際に、不凝縮性ガスの侵入が認められ、空気などの混入などによる伝熱特性の低下があった。

以上の結果より設計した新型MCHE熱交換器は従来の熱交換器と比較して伝熱特性が高いことが実証された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9件)

- ① Y. Kato, "Advanced High Temperature Gas-cooled Reactor Systems," in press, *J. Eng. Gas Turbines and Power* (2009). 査読有
- ② T. Tsuzuki, Y. Kato, K. Nikitin and T. Ishizuka, "Advanced Microchannel Heat Exchanger with S-shaped Fins," in press, published, *J. Nuclear Science and Technology* (2009). 査読有
- ③ M. Utamura, K. Nikitin and Y. Kato, "A Generalized Mean Temperature Difference (GMTD) Method for Heat Exchangers," to be published, *Int' l. J. Nuclear Energy Science and Technology* 4, pp. 11-31 (2008). 査読有

- ④ K. Nikitin, Y. Kato and T. Ishizuka, "Steam Condensing - Liquid CO<sub>2</sub> Boiling Heat Transfer in a Steam Condenser for a New Heat Recovery System," *Int' l. J. Heat and Mass Transfer*, **51**, pp. 4544-4550 (2008). 査読有

- ⑤ 宇多村元昭, ニキチンコンスタンチン, 加藤恭義, 「熱交換器の性能解析における対数平均温度作法の一般化」, *Thermal Science and Engineering*, **15** (3), pp. 163-173 (2007). 査読有

- ⑥ T. Lam, Y. Kato, K. Nikitin and N. Tsuzuki, "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations of Microchannel Heat Exchangers with S-Shaped and Zigzag Fins for Carbon Dioxide Cycles," *Int' l. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, **32**, pp. 560-570 (2007). 査読有

- ⑦ T. Tsuzuki, Y. Kato and T. Ishizuka, "High Performance Printed Circuit Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, **27**, pp. 1702-1707 (2007). 査読有

- ⑧ T. L. Ngo, Y. Kato, K. Nikitin and N. Tsuzuki, "New Printed Circuit Heat Exchanger with S-Shaped Fins for Hot Water Supplier," *Int' l. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, pp. 811-819 (2006). 査読有

- ⑨ K. Nikitin, Y. Kato and T. L. Ngo, "Printed Circuit Heat Exchanger Thermal-Hydraulic Performance in Supercritical CO<sub>2</sub> Experimental Loop," *Int' l. J. Refrigeration*, **29**, pp. 807-814 (2006). 査読有

[学会発表] (計 11件)

- ① 都築宣嘉、S字型フィンを有する新型マイクロチャンネル熱交換器の流路形状最適化、日本原子力学会2009年春の年会、2009.3.23-25、東京工業大学
- ② Y. Kato, T. Lam, K. Nikitin, and M. Utamura, "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations of Carbon Dioxide around Critical Point in Microchannel Heat Exchangers," Proc. *1<sup>st</sup> European Conf. on Microfluidics - Microfluidics 2008*, Bologna, Italy,

December 10-12, 2008, Paper #  $\mu$ FLU08-155.

- ③ Y. Kato, "An Advanced Concept for High Temperature Gas-Cooled Reactors," *Proc. 4<sup>th</sup> Int' l Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR2008*, Washington D.C., U.S.A., September 28-October 1, 2008, Paper # HTR2008-58324.
- ④ N. Tsuzuki and Y. Kato, "Advanced Microchannel Heat Exchanger with S-Shaped Fins," *Proc. Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale- III*, Whistler, British Columbia, Canada, September 21-26, 2008.
- ⑤ Y. Kato, T. Lam, K. Nikitin, and M. Utamura, "Empirical Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for a New Microchannel Heat Exchanger between Carbon Dioxide and Waters," *Proc. 8<sup>th</sup> Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conf.*, Copenhagen, Denmark, September 7-10, 2008.
- ⑥ T. Ishizuka, K. Nikitin, N. Tsuzuki and Y. Kato, "A Microchannel Heat Exchanger with CO<sub>2</sub> Boiling Heat Transfer for a Waste Heat Recovery System," *Proc. 6<sup>th</sup> Intl. Conf. on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology*, Potsdam, Germany, September 16-21, 2007.
- ⑦ K. Nikitin, N. Tsuzuki, Y. Kato T. Ishizuka and L. Ngo, "Experimental Thermal-Hydraulics Comparison of Microchannel Heat Exchanger with Zigzag Channels and S-shaped Fins for Gas Turbine Reactors," *Proc. 15<sup>th</sup> Int' l. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-15)*, Nagoya, April 22-26, 2007, ICONE15-10826.
- ⑧ T. Lam, Y. Kato, K. Nikitin, N. Tsuzuki and M. Utamura, "Empirical Correlations for Heat Transfer and Pressure Drop in a New Microchannel Hot Water Supplier," *Proc. Heat SET 2007, Int' l. Conf. on Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies*, Chambéry, France, April 18-20, 2007.
- ⑨ N. Tsuzuki, Y. Kato and T. Ishizuka,

"Advanced Microchannel Heat Exchanger with Low Pressure Drop and High Heat Transfer Performance," *Proc. Micro and Nanoscale Flows: Advancing the Engineering Science and Design Conf.*, Glasgow, U. K., December 7-8, 2006.

- ⑩ M. Utamura, Y. Kato, K. Nikitin, T. L. Ngo and T. Ishizuka, "Empirical Correlations for Thermal-Hydraulic Characteristics of Compact Heat Exchangers with Microchannels," *Proc. 5<sup>th</sup> Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS5)*, Jeju, Korea, November 26-29, 2006.
- ⑪ K. Nikitin, Y. Kato and T. Ishizuka, "Steam Condensing-Liquid CO<sub>2</sub> Boiling Heat Transfer in a Steam Condenser for a New Heat Recovery System," *Proc. 6<sup>th</sup> Int' l. Conf. on Boiling Heat Transfer*, Spoleto, Italy, May 7-12, 2006.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

(H20 年度)

原田 雅幸 (HARADA MASAYUKI)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教  
研究者番号：6 0 1 3 3 1 2 0

(H18・H19 年度)

加藤 恭義 (KATO YASUYOSHI)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授  
研究者番号：5 0 3 2 3 8 3 7

### (2) 研究分担者

(H19 年度)

原田 雅幸 (HARADA MASAYUKI)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教  
研究者番号：6 0 1 3 3 1 2 0

### (3) 連携研究者

なし