

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760158

研究課題名（和文）次世代火力発電用高湿分排ガス凝縮器の高性能化に向けた不凝縮ガス中蒸気凝縮伝熱促進

研究課題名（英文）Heat transfer enhancement at condensation from mixtures of steam and non-condensable gases onto horizontal tubes

研究代表者

井上 浩一（INOUE KOICHI）

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：70380574

研究成果の概要（和文）：

水平伝熱管外面における蒸気－不凝縮ガス混合気の凝縮熱伝達特性とその伝熱促進方法について実験的に調査した。伝熱管にベア管を用いた実験により基本的な熱伝達特性を明らかにした。また実際の大型凝縮器で問題となる伝熱管上方から落下する凝縮水が多い場合の熱伝達特性とフィン管と細管による伝熱促進の有効性について実験的に調査した。以上の検討により、不凝縮ガス－蒸気を取り扱う大型凝縮器の高性能化に貢献する伝熱促進方法の確立に向けて、多くの有効な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Fundamental knowledge of condensation from steam-air mixtures onto a single horizontal copper tube was experimentally studied by using a horizontal copper tube. The effect of condensate dripped from upper tubes on the condensation heat transfer was also investigated. Several methods for heat transfer augmentation, e.g. water-repellent finishing, finned tubes and mini-tubes, were tested and the efficient knowledge for the development of high-performance condensers adopted in the future power plant had been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：伝熱機器，凝縮，物質伝達，熱伝達，不凝縮ガス，火力発電，潜熱回収

## 1. 研究開始当初の背景

Graz サイクルなど各種 CO<sub>2</sub> 回収対応酸素燃焼システムの CO<sub>2</sub> 分離凝縮器、水噴射ガスタービンや燃料電池の潜熱回収器など、CO<sub>2</sub> 排出量削減を目指した次世代火力発電システムには、水蒸気-不凝縮ガスの混合気を取り扱う凝縮器の採用を前提としたものが多い。一方、水蒸気-不凝縮ガス混合気の凝縮に関連した研究は、低水蒸気質量分率域と高水蒸気質量分率域を対象として比較的多く実施されているものの、前述の凝縮器の作動範囲となりうる中間水蒸気質量分率域を対象としたものは少ない。特に不凝縮ガスの質量分率が高い場合の凝縮熱伝達率は、純蒸気のそれに比べて極めて低下するため、従来の火力発電プラント用復水器と比較して、大型の凝縮器となる。このため適切な伝熱促進方法の導入による凝縮器小型化は極めて重要な課題となる。

## 2. 研究の目的

本研究では中間水蒸気質量分率の水蒸気-不凝縮ガス混合気の管外強制対流凝縮時の基本的な熱・物質伝達特性とその伝熱促進方法について、水平伝熱管を用いた凝縮実験により調べる。試験流体には不凝縮ガスとして空気を用いた大気圧の水蒸気と空気の混合気を用いる。

## 3. 研究の方法

テストループを図1に示す。テスト部において水蒸気-空気混合気は鉛直下降流となるように流される。テスト部における混合気の水蒸気質量分率と温度は、予熱器、飽和器、過熱器への熱入力量により設定する。水蒸気質量分率は飽和器内での露点状態を仮定して求めるが、これは湿度計の計測値と良好に一致した。

テスト部は図2に示すように断面が250mm×125mmの透明ポリカーボネイト製矩形流路の中央に外径25mm、内径22mmの銅製伝熱管を水平に設置したものである。伝熱管には外径0.5mmのK型シーース熱電対が管頂部から管底部にかけて30°間隔で埋め込まれており、テスト部中央における伝熱管周方向壁面温度分布が計測できる。伝熱管内中心には外径1.0mmの銅線を10mmピッチで螺旋状に巻き付けた直径16.5mmのアクリル製丸棒を設置して管内面熱伝達抵抗を低減している。伝熱管は2000番の研磨紙で研磨した後、水洗いした場合には膜状凝縮を呈し、同様の処理の後に促進剤としてオレイン酸を吸着させた場合には滴状凝縮を呈した。

なお実際の凝縮器における凝縮状況を模擬する実験では、伝熱管と同寸法の焼結金属製散水管を伝熱管の直上に設置して実験を

行った。この場合、散水管は伝熱管との中心間距離が外径の1.25倍となる位置に設置した。また伝熱促進に関する実験においては、前述の伝熱管の代わりにフィン管や細管を設置して同様な実験方法により熱伝達データを取得した。

伝熱管で発生した凝縮水は直下の傾斜といて捕獲された後、電子天秤上のドレンタンクに流入させられ、ドレンタンクの重量変化から凝縮水量 $m_d$ が計測される。

本報で用いた主な無次元数の定義を以下にまとめる。

$$Nu = Qd/\lambda_g(T_g - T_s)A \quad (1)$$

$$Re = ud/\nu_g \quad (2)$$

$$Sh = m_d d / \rho_g D_g (w_g - w_s)A \quad (3)$$

ここで $Q$ : 全伝熱量,  $d$ : 伝熱管外径,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $T$ : 温度,  $A$ : 伝熱面積,  $u$ : 混合気平均流速,  $\nu$ : 動粘度,  $m_d$ : 凝縮水量,  $\rho$ : 密度,  $D$ : 拡散係数,  $w$ : 水蒸気質量分率, である。添字は,  $g$ : 混合気,  $s$ : 伝熱管壁面, である。全伝熱量 $Q$ は冷却水の流量とエンタルピー上昇から求めた。 $T_s$ は伝熱管壁面温度の平均値で、管頂部から角度 $\theta$ の位置にある熱電対の測定値 $T_\theta$ から計算した。 $w_s$ は $T_s$ に対する飽和水蒸気質量分率として求めた。表1に主な実験範囲を示す。水蒸気-空気混合気の粘性係数、熱伝導率、拡散定数は、Wilke式、Lindsay-Bromeley式、Hirschfelderらの式で求め、他は理想気体の混合気として取り扱った。

## 4. 研究成果

### (1) 単管を用いた凝縮実験

膜状凝縮時には滑らかな水膜が伝熱管のほぼ全体を覆っており、管底部にぶら下がった水が定期的に落下する。一方、滴状凝縮時には図3に示すように管外面に大小さまざまな水滴が付着しており、各水滴が成長や合体をすることで水が落下してゆく。

図4に $Nu/Pr^{0.37}$ と $Re$ の関係を示す。 $w_g$ 一定の条件では、 $Nu/Pr^{0.37}$ は $Re$ の約0.5乗に比例しており、既存の単相強制対流熱伝達整理式の傾向と一致する。また $Nu/Pr^{0.37}$ は $w_g$ とともに増加しているが、これは混合気と伝熱管壁面の水蒸気質量分率の差が増加して物質伝達に基づく潜熱伝熱量が増加したことと、高物質流束効果などによる熱・物質伝達促進が生じたことの両方を含んだ結果である。一方、滴状凝縮時の $Nu/Pr^{0.37}$ は膜状凝縮時の値よりも低くなっており、伝熱管壁面温度分布の測定結果と同様に凝縮形態の変更によって伝熱状況が影響を受けて全伝熱量が低下したことが分かる。

図5に $Sh(1-w_s)/Re^{0.5}Sc^{0.37}$ と高物質流束効果を評価する際に用いられるパラメータ $1/\omega$ の

関係を示す。  $1/\omega$  は次式で定義され、  $1/\omega \rightarrow 1$  と  $1/\omega \rightarrow \infty$  は、  $m_d \rightarrow 0$  と  $m_d \rightarrow \infty$  の極限にそれぞれ対応する。

$$1/\omega = (1 - w_g)/(1 - w_g) \quad (3)$$

膜状凝縮時の  $Sh(1-w_g)/Re^{0.5}Sc^{0.37}$  は  $1/\omega$  とともに増加しており、凝縮量の増加によって物質伝達が顕著に促進されている状況が分かる。一方、滴状凝縮時にも同様の物質伝達促進傾向が認められるが、  $Sh(1-w_g)/Re^{0.5}Sc^{0.37}$  は膜状凝縮時の値よりも低くなっており、凝縮形態を滴状凝縮にしたことで物質伝達が劣化したこととなる。

図6は水蒸気質量分率  $w_g=0.5$  における膜状凝縮と滴状凝縮時の伝熱管壁面温度分布の測定結果である。横軸は管頂部からの管周方向角度  $\theta$ 、縦軸は無次元温度  $(T_\theta - T_s)/\Delta T$  である。壁面温度は管頂部で最高となり、管底部にかけて単調に低下している。また平均温度からの偏差はレイノルズ数  $Re$  の増加により拡大する。滴状凝縮時の温度分布は、膜状凝縮時よりも等温分布に近くなっており、凝縮形態を変えたことで伝熱管周方向の局所伝熱状況が変化したことが推測される。

図7はそれぞれ伝熱管外表面温度分布の計測結果から局所熱流束  $q_\theta$  と局所熱伝達率  $h_\theta$  を評価したものである。膜状凝縮の場合、気相中に層流境界層が形成される伝熱管上側の熱伝達率が高く、下方に行くに従って低下する。この傾向は、凝縮のない単相強制対流における熱伝達特性と同様である。ただし凝縮のない単相強制対流では、一般に剥離点の下流側で熱伝達率が増加する傾向が観察されるが、本実験では観察されていない。これは管底部に水滴がぶら下がっていることに関係するものと考えられる。滴状凝縮時の局所熱伝達は膜状凝縮の場合と同様な傾向を示すものの、膜状凝縮時に層流境界層が形成されていたと推定される  $\theta=0^\circ \sim 120^\circ$  の領域における熱伝達率が特に低くなっている。管頂部から  $\theta=30^\circ$  にかけての熱伝達率低下割合が他の領域に比べて大きいことから滴状凝縮時には、水滴が伝熱管に比較的長い時間付着しているために、伝熱管近傍の混合気層流境界層が膜状凝縮時よりも相対的に厚くなったために熱・物質伝達を劣化させた可能性が考えられる。

図8は大型凝縮器内の凝縮状況を模擬するために伝熱管の直上に焼結金属製散水管を設置したときの実験結果で、散水量  $W_d$  と全伝熱量  $Q_c$  の関係を示す。実験は水蒸気質量分率  $w_g=0.5$  と混合気レイノルズ数  $Re_g=800$  を一定とした条件で散水量のみを変えて行った。なお散水温度は伝熱管表面温度と同じになるように設定した。

図より全伝熱量  $Q_c$  は散水によって増加する。これは不凝縮ガス質量分率が高い場合に

は、伝熱管に付着した凝縮液膜の熱伝導抵抗に比べて、凝縮水近傍の気相内境界層における熱・物質伝達に基づく熱抵抗が大きいため、上方からの散水により気相内境界層が乱されて、ここでの熱抵抗が低下したことにより伝熱量が増大したものと解釈される。なお散水量が多い条件では、凝縮液膜が厚くなるために伝熱量が低下する。散水時にはオレイン酸を吸着させて撥水加工した条件でも伝熱管表面を流下する水量が多いため、伝熱管上に滴状の凝縮水が存在することはほぼ消滅する。この結果、撥水加工をしない場合と同様な凝縮状況となり、撥水加工の有無による全伝熱量の違いは消失する。

## (2) 伝熱促進実験

### ① フィン管

図9はフィンピッチの異なる伝熱管を用いて行った凝縮実験の結果を示す。伝熱管は銅製でフィン厚さ 0.3mm、フィン高さ 1.5mm とし、フィンピッチのみを 11.5fpi と 19fpi とした2種類を用いた。実験は水蒸気質量分率を  $w_g=0.5$  とし、混合気温度と伝熱管外面温度（フィン根元）の温度差を 50K とした。フィン根元温度は、熱電対による直接計測が困難であったため、冷却水温度と流量の測定値から平均熱流束を算出し、管内面对流熱伝達と伝熱管壁内一次元熱伝導を仮定して求めた。

図より伝熱面積が大きくなる 19fpi より 11.5fpi の伝熱管を用いた場合の全伝熱量が多くなっている。これは 19fpi の伝熱管ではフィン間隔が狭いために、凝縮水がフィン間に詰まって、有効な伝熱面積が減少したためと考えられる。一方、11.5fpi の場合はフィン間に凝縮水が詰まることが少なく、有効な伝熱面積が大きい状態で確保されている。実際の大型凝縮器では上方からの散水があるため、フィン間に留まる凝縮水の状況も影響を受ける可能性がある。散水条件下でのフィン管の凝縮性能を解明するのが次の課題となる。

### ② 細管

通常サイズのペア管を伝熱管に用いた実験では、滴状凝縮化によって伝熱劣化となった。この原因は伝熱管に凝縮液滴が比較的長い時間付着した状況となり、気相内境界層を厚くしたと考えられた。細管では液滴が付着しにくくなることから、撥水加工による伝熱促進が期待された。

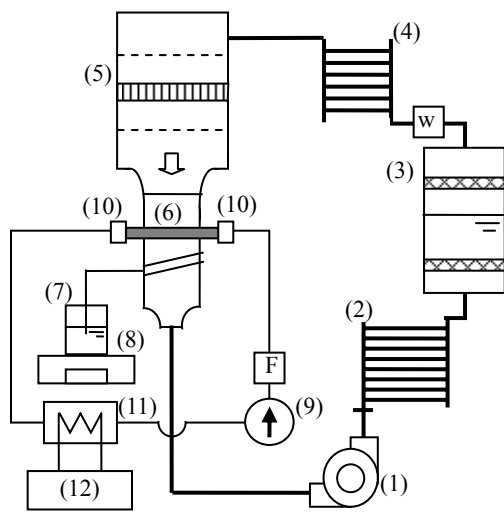
図10に外径 6mm、内径 4mm の細管を用いた場合の実験結果を示す。細管の材質は銅である。通常サイズ管で観察された滴状凝縮化による伝熱劣化は消滅したが、凝縮形態による伝熱量の違いは極めて小さい結果となった。滴状凝縮化によって伝熱管に付着する液膜の厚さは相対的に薄くなった可能性が考えられるが、気相内境界層の状況が膜状凝縮

時のものと同様であるために伝熱量も同程度になったと解釈される。

(3) まとめ

各種の伝熱管を用いた中間水蒸気質量分率の水蒸気-空気混合気の凝縮伝熱実験を行って基礎的な熱伝達特性を明らかにするとともに伝熱促進に向けた各種実験を行って重要な知見を得た。

中間水蒸気質量分率域の水蒸気-空気混合気からの凝縮伝熱を効果的に促進させるためには、凝縮水を適切に伝熱管から排除させるとともに伝熱管および伝熱管に付着した凝縮水の近傍の気相内境界層を制御することが有効である。



(1) Blower (2) Preheater (3) Saturator (4) Superheater (5) Honeycomb and Screen (6) Test section and test tube (7) Drain tank (8) Electronic balance (9) Cooling water pump (10) Mixing chamber (11) Cooling water tank (12) Chiller unit F: Flowmeter w: Hygrometer

Fig.1 Experimental apparatus

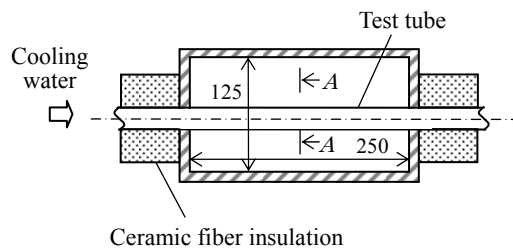


Fig.2 Test section for single bare tube Experiment

Table 1 Experimental condition.

Reynolds number of steam-air mixture	$Re = 296-805$
Steam mass fraction of steam-air mixture	$w_g = 0.21-0.51$
Temperature of steam-air mixture	$T_g = 68.6-87.5^\circ\text{C}$
Steam superheat of steam-air mixture	$\Delta T_{SH} = T_g - T_{dp} = 0.1-1.2\text{K}$
Temperature difference between steam-air mixture and tube outer surface	$\Delta T = T_g - T_s = 49.8-54.9\text{K}$
Cooling water temperature rise	$\Delta T_w = 0.6-2.0\text{K}$

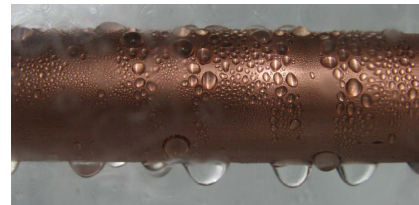


Fig. 3 Condensate on the tube during dropwise condensation.

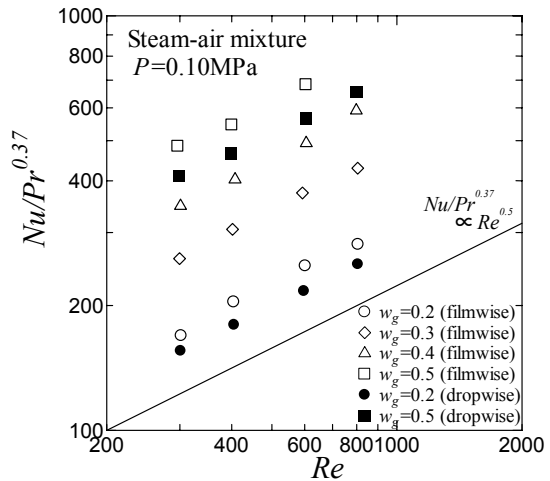


Fig. 4 Effect of  $Re$ ,  $w_g$  and condensation mode on heat transfer.

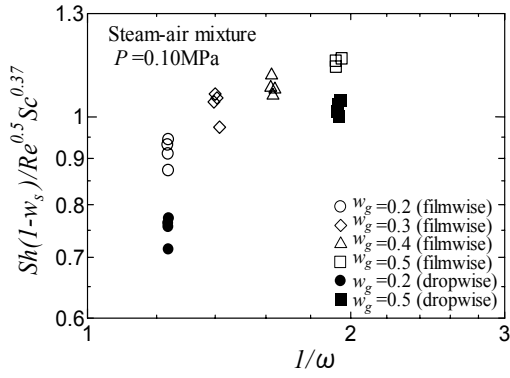
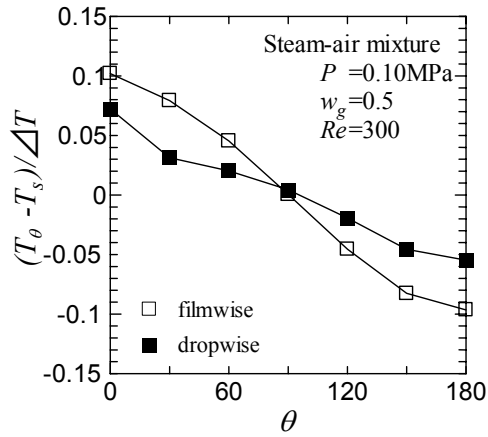
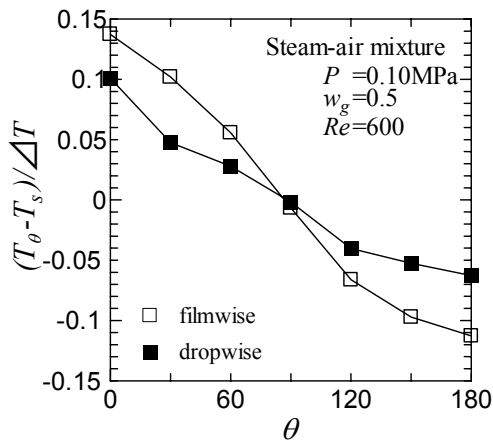


Fig. 5 Effect of  $l/\omega$  and condensation mode on mass transfer.

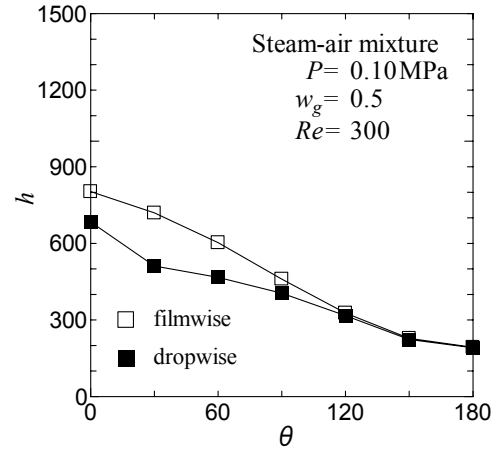


(a)  $Re=300$

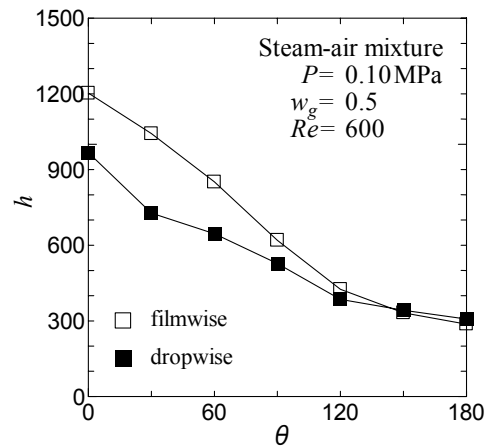


(b)  $Re=600$

Fig. 6 Distribution of measured tube wall temperature.



(a)  $Re=300$



(b)  $Re=600$

Fig. 7 Distribution of evaluated local heat transfer coefficients on the outer tube wall.

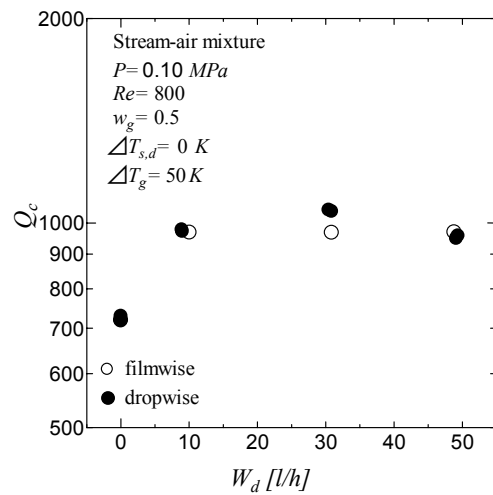


Fig. 8 Effect of water flow rate dripped from upper tube on total heat transfer rate.



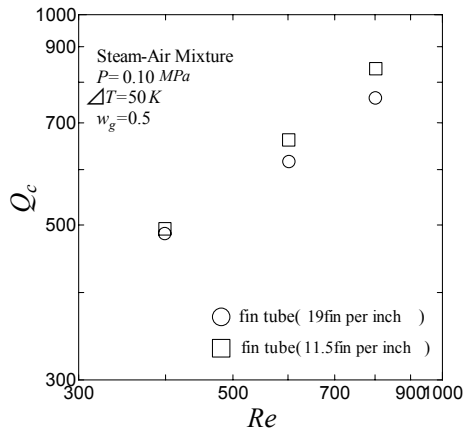


Fig. 9 Effect of fin pitch on total heat transfer rate.

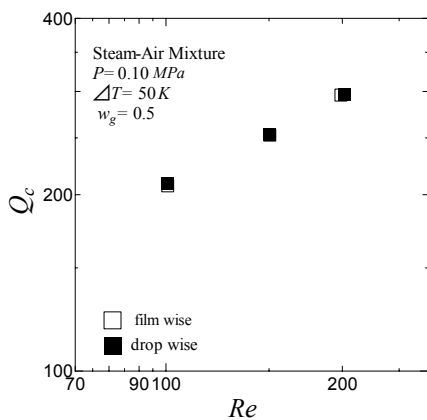


Fig. 10 Effect of condensation mode on heat transfer rate in the experiments of mini-tubes.

## 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2件)

- ①田畑祐樹, 井上浩一, 廣門達也, 室園明希, 水蒸気-空気混合気の水平円管外面への強制対流凝縮実験, 日本機械学会九州支部 第64期総会・講演会講演論文集, 査読無, p.253 (2011)
- ②井上浩一, 田畑祐樹, 廣門達也, 室園明希, 水蒸気-空気混合気の管外強制対流凝縮に関する実験的研究, 第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 査読無, p.747 (2011)

[学会発表] (計2件)

①田畑祐樹, 水蒸気-空気混合気の水平円管外面への強制対流凝縮実験, 日本機械学会九州支部 第64期総会・講演会, 福岡, 平成23年3月17日.

②井上浩一, 水蒸気-空気混合気の管外強制対流凝縮に関する実験的研究, 第48回日本伝熱シンポジウム, 岡山, 平成23年6月3日.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 浩一 (INOUE KOICHI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号: 70380574

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし