

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04632

研究課題名(和文) 流れ加速型腐食によるプラント配管減肉の安全管理技術の高度化

研究課題名(英文) Development of safety management technology for pipe-wall thinning caused by flow-accelerated corrosion

研究代表者

藤沢 延行 (Fujisawa, Nobuyuki)

信州大学・工学部・特任教授

研究者番号：20165369

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)：原子力/火力プラント配管の安全管理上重要な課題として、流れ加速型腐食による配管減肉の現象解明とその予測技術の高度化がある。本研究では、広範囲のレイノルズ数における90°エルボの配管減肉の発生メカニズムを明らかにするため、種々のレイノルズ数と曲率の条件下においてエルボ内部ならびに下流側の物質移動係数と速度場の計測を行い、さらに、表面流れの可視化と定量計測を行うことで、物質移動係数と表面流れの相関関係を明らかにした。併せて、波状粗さによる物質移動係数の増大メカニズムを実験と数値解析の両面から検討することで、配管減肉の予測技術に関する新たな知見を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力/火力プラント配管の減肉はプラントの安全管理上重要な課題であり、減肉のメカニズム解明と予測法の確立はその運転上必要不可欠な技術である。本研究では、エルボにおける配管減肉を物質移動係数と表面流れの関係を実験的に評価し、それらの相関関係を初めて明らかにした。さらに、波状粗さの影響を実験と数値解析の両面から考察することで、配管減肉の予測法の基礎を確立した。

研究成果の概要(英文)：The investigation of pipe-wall thinning and its prediction are important topics of safety management for application to the nuclear/fossil power plant caused by flow accelerated corrosion. In this research, the mechanisms of the pipe-wall thinning for 90 degree curved elbows are investigated experimentally in and downstream of elbow of various Reynolds numbers and curvatures. Furthermore, the mass transfer enhancement mechanism is investigated on the wavy pipe walls of various height to wavelength ratios both experimentally and numerically to propose the numerical prediction method of pipe-wall thinning.

研究分野：機械工学

キーワード：配管減肉 流れ加速型腐食 はく離流れ 臨界レイノルズ数 表面流れ 定量可視化 物質移動係数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

原子力・火力発電プラント等で使用される炭素鋼管では、流れ加速型腐食 (FAC) による配管減肉が原因で徐々に配管の肉厚が薄くなる現象が発生する。この現象は、美浜原子力発電所 (2004) での配管破損事故に見られるように、オリフィス背後での FAC による配管減肉が原因と見られている。このようなオリフィス背後の配管減肉については、著者らの過去の研究 (科研費基盤研究 (B) 2012-2015) の成果報告書) に示したように、現状ではある程度の現象解明が行われた。しかしながら、同様な配管減肉事例は、プラント配管のエルボ部でもしばしば見られており、その現象解明とその予測技術の高度化は、プラント配管の安全性確保と維持管理上必要不可欠とされている。加えて、配管の表面粗さや旋回流の影響など、配管減肉を促進すると思われる様々な要素が存在しており、これらの影響も重要であるが、十分な検討までなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、プラント配管、特に、エルボ部における配管減肉の発生メカニズムならびに表面粗さの影響について、実験と数値解析の両面から考察することを目的とする。特に、エルボ形状としては、ショートとロングの2種類、また、レイノルズ数については、実機配管で予期される亜臨界と超臨界レイノルズ数で実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 実験装置と供試エルボの概容

実験は、回流実験装置を用い、作動流体として水を用いた。ただし、管内径は $d = 56\text{mm}$ 、エルボの曲率半径 $1.5d$ (ロングエルボ) と $1d$ (ショートエルボ) を用いた。ただし、エルボ角は 90° である。実験は、管内径基準のレイノルズ $Re (= Ud/\nu) = 5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ の範囲で行った。なお、臨界レイノルズは $Re = 2 \times 10^5$ である。図1に本実験で使用したショートエルボを示した。エルボ入口を基準とした角度を θ とし、周方向の角度を ϕ として定義した。

(2) 物質移動係数分布の計測

配管減肉は配管表面の物質移動現象として捉えることができるため、物質移動係数 K を実験的に評価した。

$$K = \frac{\rho_b \delta h / \delta t}{c_w - c_b}, \quad (1)$$

ただし、 ρ_b : 流体の密度、 h/t : 減肉率、 c_w : 壁面濃度、 c_b : 流体濃度。ここに、減肉率 h/t の計測法としては、図2に示すように、エルボ模型を2分割構造に製作し、石膏をエルボ表面で固化した後、水流による減肉実験から評価した。実験では、一定時間における減肉率をレーザー変位計で計測し、その結果を式(1)に代入して物質移動係数を算出した。

(3) PIVによる断面内速度と速度変動の計測

エルボ内部ならびに下流側の速度ならびに速度変動分布の計測には、粒子画像流速計測法 (PIV) を用いた。その計測システムは、高速度カメラ、連続ヤグレーザ、パルスジェネレータで構成されている。得られた2画像に直接相互相関法サブピクセル解析を適用した。

(4) 数値解析法

波状粗さを有する管内流の数値解析には、レイノルズ平均化したナビエ・ストークス方程式を基礎式とし、連続の式、低レイノルズ型2方程式乱流モデルを用いた。ただし、Launder-Sharma (LS) モデル、Lam-Bremhorst (LB) モデル、Abe-Kondou-Nagano (AKN) モデル、 k -shear stress transport (KOSST) モデルを用いた。

4. 研究成果

(1) エルボ内部の流れ場に及ぼすレイノルズ数の影響

過去の研究においては、エルボ内部の速度場に関する報告は多少見られるが、単一レイノルズ数での実験が多く、レイノルズ数の影響について考察した研究は極めて少ない。著者らは、先に、ロングエルボ ($r/d = 1.5$, r : エルボ曲率半径) の流れ場に対して PIV 計測を行い、レイノルズ数による流れ場の変化が小さいことを示した。しかしながら、エルボ曲率の小さいショートエルボ ($r/d = 1$) においては、これは当てはまらない。

図3は、ショートエルボ下流側における速度場の計測結果をレイノルズ数 $Re = 3 \times 10^4$, 5×10^4 , 1×10^5 において PIV 計測した結果である。レイノルズ数の増加とともに、はく離点 (図中の S) は下流方向に移動し、再付着点 (図中の R) は反対に上流側へ移動することが分かる。この結果、エルボ出口付近に見られるはく離領域は、レイノルズ数の増加とともに減少する。したがって、ショートエルボでは、ロングエルボと異なり、流れ場はレイノルズ数の影響を示すことになる。

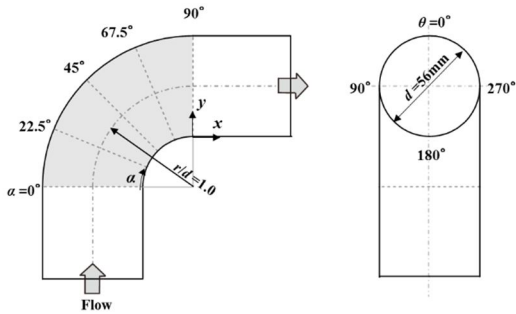


図1 供試エルボ

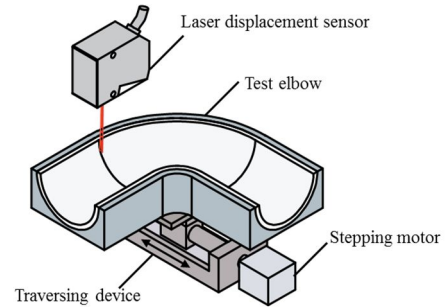


図2 物質移動係数の計測方法

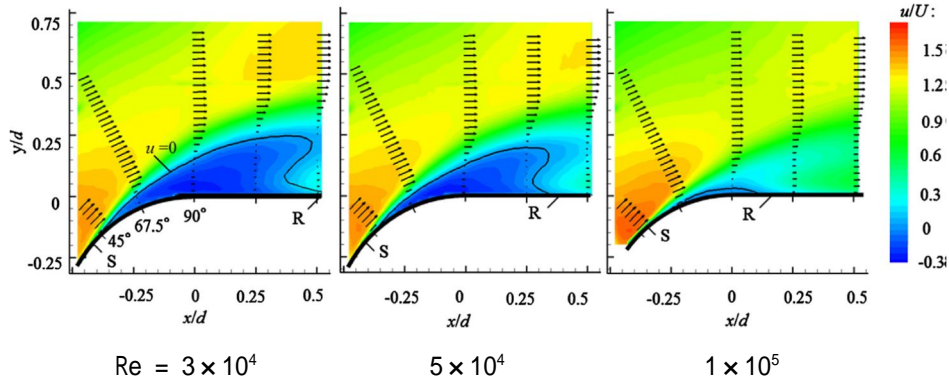


図3 ショートエルボ出口付近の速度場の計測結果

(2) 亜臨界レイノルズ数におけるエルボの物質移動係数とエルボ曲率の影響

亜臨界レイノルズ数 ($Re = 5 \times 10^4$) におけるエルボの物質移動係数に及ぼすエルボ曲率の影響を明らかにするため、エルボの内部ならびに下流側の物質移動係数分布を計測した。

図4は、種々のエルボ断面位置において計測したロングとショートエルボの物質移動係数分布である。ロングエルボのエルボ内側付近に注目すると、エルボ入口付近 ($\theta = 22.5^\circ, 45^\circ$) で物質移動係数に減少傾向が見られるが、エルボ出口に近づくにつれ ($\theta = 67.5^\circ, 90^\circ$) 増大傾向に転じ、エルボ下流では再び減少する。一方、ショートエルボでは、エルボ中央付近 ($\theta = 45^\circ$) で増加傾向が見られ、エルボ内側の両サイドに物質移動係数のピークが発生し、エルボ下流側でエルボ内側全体が大きくなり、下流側では減少傾向に転じる。一方、エルボ外側では、ロング、ショートの違いによる物質移動係数の変化は認められず、また、これらの値は直管の結果とほぼ一致する。このように、エルボ曲率の影響は、エルボ内側領域に限られる。

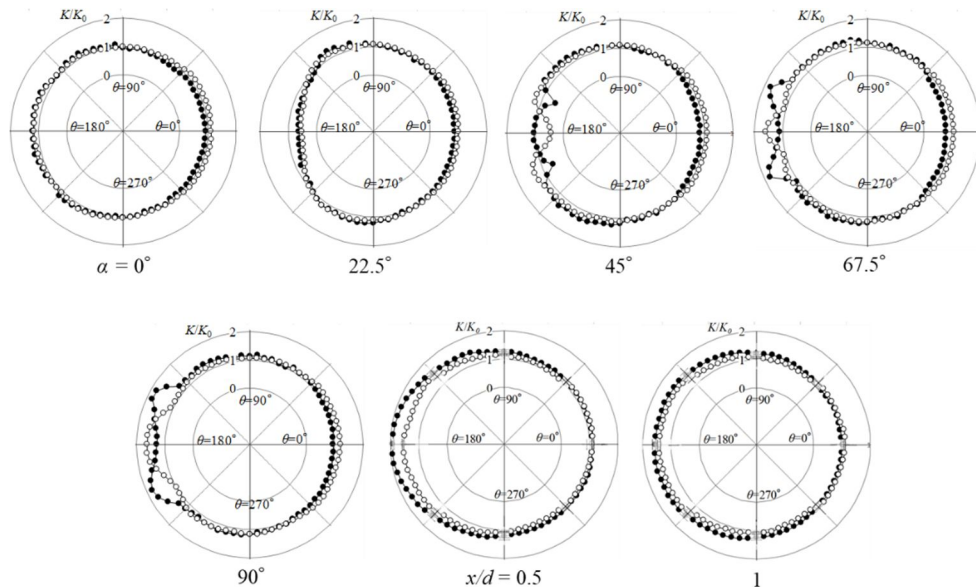


図4 亜臨界レイノルズ数 ($Re = 5 \times 10^4$) におけるロングとショートエルボの物質移動係数分布 (long $r/d = 1.5$, short $r/d = 1.0$)

(3) 超臨界レイノルズ数におけるエルボの物質移動係数とエルボ曲率の影響

図5は、種々のエルボ断面位置において計測したロング・ショートエルボの物質移動係数分布を比較した結果である。超臨界レイノルズ数では、亜臨界レイノルズ数域で見られたようなエル

ボ内側入口での物質移動係数の減少は認められず、曲がり部への流入後エルボ両サイドに増大部が見られる ($\alpha = 22.5^\circ$)。このようなエルボ内側両サイドにおける物質移動係数の増大は、エルボ出口側 ($\alpha = 45-90^\circ$) でも認められるが、その増大する領域はエルボ両サイド全域に及ぶ。このような物質移動係数の増大現象は、エルボ下流側にも認められ、 $x/d = 1$ の位置ではエルボ内側では直管の値に近づくが、両サイドでは増大状態にある。また、超臨界レイノルズ数におけるエルボの物質移動係数分布は、エルボ曲率にあまり依らないことが特徴といえる。

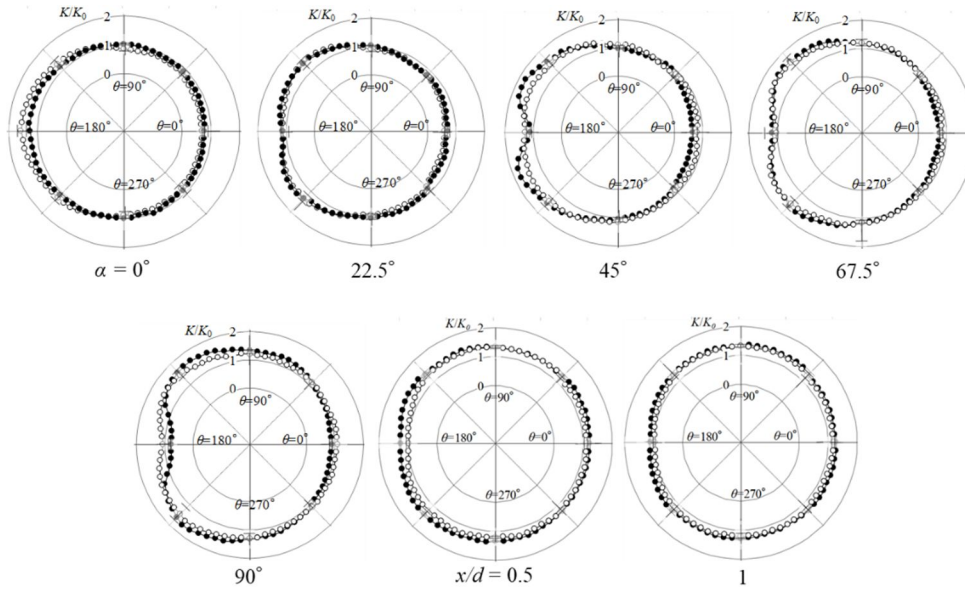


図5 超臨界レイノルズ数 ($Re = 2 \times 10^5$) におけるロングとショートエルボの物質移動係数分布 (○ long $r/d = 1.5$, ● short $r/d = 1.0$)

(4) 定量可視化による表面流れの解析

エルボ内側における物質移動係数分布は、表面流れの挙動に強く関係すると予期されるため、油膜法による流れの可視化が有効である。しかしながら、油膜による流れの可視化結果は定性的であり、表面流れの方向と速度の大きさを定量的に知ることはできない。そこで、本研究では、油膜法による連続した2画像に画像相関法を導入することで、表面流れの定量化を行った。

図6の上段は、亜臨界レイノルズ数 ($Re = 5 \times 10^4$) におけるエルボ内側の表面流れの画像解析結果をロング (左図) とショートエルボ (右図) について示した。実験結果によると、ロングエルボでは、エルボ内側中央付近に狭い低速領域が形成されているが、はく離までは至っていない。これに対して、ショートエルボでは、低速領域がエルボ内側に広く分布すること、また、エルボ下流には、下流から上流に向かう逆流が認められる。一方、エルボの両サイドからエルボ内側中心に向かう流れが認められ、二次流れの影響を示唆する。以上のように、エルボ内側における表面流れの挙動は、図4の物質移動係数分布と良く一致した特徴を示した。一方、超臨界レイノルズ数 (図6の下段、 $Re = 2 \times 10^5$) の結果によると、ロングエルボ (左図) ではエルボ内側中央付近では低速領域が形成されるが、はく離までは至らないこと、ショートエルボ (右図) ではエルボ下流から上流に向かう逆流の形成とはく離領域のエルボ両サイドへの広がりがわかる。また、このような低速領域あるいは逆流領域の大きさは、レイノルズ数の増加に伴って縮小することがわかる。したがって、表面流れに見られるレイノルズ数の影響は、エルボ内部と下流側に見られる物質移動係数分布の変化 (図4、図5) と良く対応しており、表面流れ場の挙動と物質移動係数分布間に強い相関があるといえる。

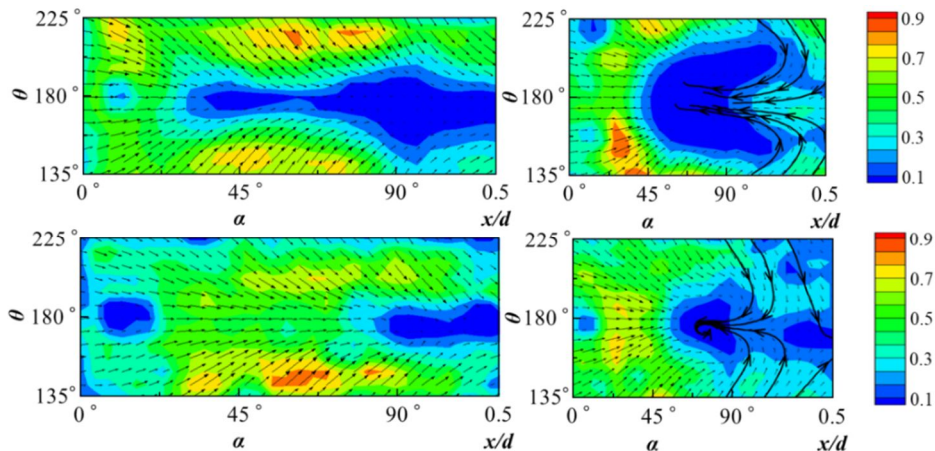


図6 表面流れの定量速度場

(5) 波状粗さを伴う管内流における速度分布と物質移動係数の数値解析

図7は、本研究で対象とする波状粗さを伴う管内流である。ここに、波高 h 、波長 λ の定義は、図に示したとおりである。

図8は、はく離点 x_s/λ ならびに再付着点 x_r/λ の位置が波高パラメータ h/λ によって変化する関係を種々の乱流モデルを用いて解析した結果である。図中には、本実験ならびに Zilker-Hanratty (1979) の実験結果を比較のため示した。これらの実験結果によると、波高パラメータ h/λ が増大すると、はく離点 x_s/λ は上流側に再付着点 x_r/λ は下流側へ移動するため、両者の間に形成されるはく離領域は拡大することになることがわかる。一方、数値解析結果を見ると、はく離点 x_s/λ はいずれの乱流モデルでも実験と良く一致した結果が得られているが、再付着点 x_r/λ は AKN モデルと実験結果は良く一致するが、LB, LS, KOSST については実験結果と一致するとはいえない。このように、波状粗さを有する管内流の数値予測には AKN モデルが比較的良好な予測結果を示した。

図9は、物質移動係数の管軸垂直方向成分 K_y/K_0 と波高パラメータ h/λ の関係である。ただし、 K_0 は、同一レイノルズ数における直管の物質移動係数値である。物質移動係数 K_y/K_0 の本実験結果は、波高パラメータ h/λ が増大すると増加傾向を示すが、 $h/\lambda > 0.05$ では飽和状態になる。このような実験結果の特徴は、KOSST, AKN では良好な一致を見たが、LB, LS では実験よりかなり大きな予測結果を示した。以上のことから、波状粗さを伴う物質移動係数の予測には、AKN モデルが比較的良好な予測結果を示した。

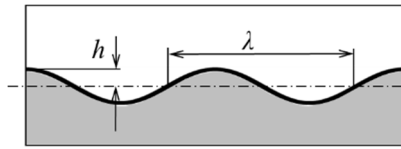


図7 波状粗さを有する管内流の数値解析

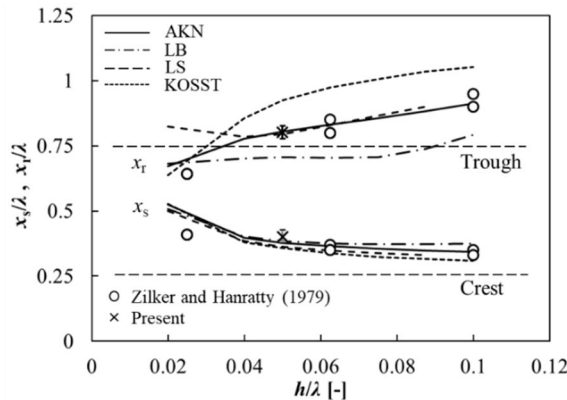


図8 はく離点 x_s/λ 、再付着点 x_r/λ と波高パラメータ h/λ の関係 ($Re_\lambda = 9400$)

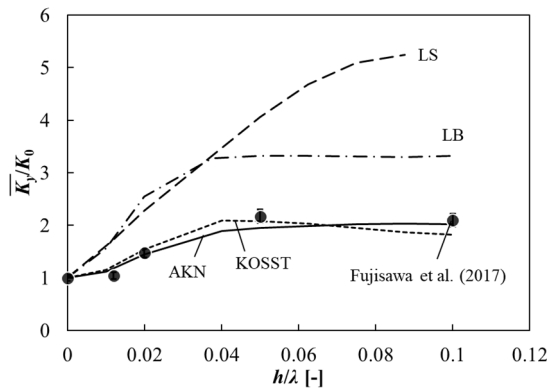


図9 物質移動係数と波高パラメータ h/λ の関係 ($Re = 3 \times 10^4$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujisawa Nobuyuki, Yamagata Takayuki, Nagasaki Takuma	4. 巻 110
2. 論文標題 Mass transfer behavior on sinusoidal wavy walls at different Reynolds numbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Communications in Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 104383 ~ 104383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takahashi Hideharu, Shwin San, Hamdani Ari, Fujisawa Nobuyuki, Kikura Hiroshige	4. 巻 8
2. 論文標題 Experimental and Numerical Investigation of Swirling Flow on Triple Elbow Pipe Layout	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 45 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/jfcmv.2020.82003	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 -
1. 著者名 Ikarashi Y., Yamagata T., Yamagishi F., Fujisawa N.	4. 巻 364
2. 論文標題 Unsteady turbulence structure in and downstream of a short elbow at post-critical Reynolds numbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 110649 ~ 110649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2020.110649	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Holmes A., Ewing D., Ching C. Y., Fujisawa N.	4. 巻 56
2. 論文標題 Experimental study on boiling instability and occurrence of cavitation in a two-phase square pipe subjected to natural convection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 2975 ~ 2982
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00231-020-02889-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamagata T., Fujisawa N.	4. 巻 57
2. 論文標題 Experimental and numerical studies of flow field and mass transfer phenomena on sinusoidal wavy walls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 715 ~ 722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00231-020-02975-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujisawa Nobuyuki, Takizawa Tomohiro, Yamagata Takayuki	4. 巻 123
2. 論文標題 Comparative study of mass transfer distributions and oil-flow visualizations with image analysis on long and short 90° elbows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 110332 ~ 110332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.expthermflusci.2020.110332	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikarashi Yuya, Fujisawa Nobuyuki	4. 巻 136
2. 論文標題 Mass transfer measurements and flow separation behavior in a 90° short elbow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1106 ~ 1114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikarashi Yuya, Uno Taku, Yamagata Takayuki, Fujisawa Nobuyuki	4. 巻 339
2. 論文標題 Influence of elbow curvature on flow and turbulence structure through a 90° elbow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 181 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2018.09.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山岸史典, 山縣貴幸, 藤澤延行
2. 発表標題 エルボ内および下流の非定常流特性に及ぼす曲率半径の影響
3. 学会等名 日本機械学会山梨地方講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 藤澤延行
2. 発表標題 “熱流体の可視化と計測” ; レビュー
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 阿部晃大, 藤澤延行, 山縣貴幸
2. 発表標題 気泡軌跡の可視化によるエルボ・オリフィスを通過する旋回流挙動の観察
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 N. Fujisawa, Y. Ikarashi
2. 発表標題 Mass Transfer Measurements and Flow Separation Characteristics of 90° Short Elbow
3. 学会等名 27th Canadian Congress of Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 丸山秋日呼, 五十嵐裕也, 藤澤延行, 山縣貴幸
2. 発表標題 気泡トレーサを用いたエルボ・オリフィス系配管の旋回流挙動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 瀧澤友宏, 山縣貴幸, 藤澤延行, 稲田文夫
2. 発表標題 半径比の異なるエルボの物質移動係数分布の計測と表面流れの可視化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 山縣貴幸, 卯野拓, 藤澤延行, 稲田文夫
2. 発表標題 90°エルボ内部の物質移動係数の数値解析とはく離流れの可視化
3. 学会等名 日本機械学会第24 回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 卯野拓, 五十嵐裕也, 山縣貴幸, 藤澤延行, 稲田文夫
2. 発表標題 定量油膜法を用いたエルボ内側のはく離挙動の評価
3. 学会等名 日本機械学会, 北陸信越支部 第56期総会・講演会
4. 発表年 2018年～2019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	山縣 貴幸 (Yamagata Takayuki) (50554284)	新潟大学・自然科学系・助教 (13101)	

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
---------	---------