

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360391

研究課題名(和文)非軸対称配管減肉の発生メカニズム解明と減肉予測法に関する研究

研究課題名(英文)Study on mechanism and prediction of non-axisymmetric wall thinning in pipeline

研究代表者

藤沢 延行 (Fujisawa, Nobuyuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20165369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子力発電所の系統配管における非軸対称な配管減肉の発生原因を究明することを目的として、流れ加速型腐食と液滴衝撃エロージョンの現象解明を実験と数値シミュレーションの両面から研究を行った。研究結果によると、複雑系統配管に発生する旋回流と配管条件としてのエルボ・オリフィスの組み合わせ効果が原因で非軸対称な流れ場が発生すること、流れ場の変化に伴って物質移動係数分布に非軸対称性が発生すること、濃度と運動量の輸送方程式に標準k-εモデルを用いた数値シミュレーションで非軸対称減肉を予測可能であること、液滴衝撃エロージョン実験に基づく予測法、についての成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the mechanism of non-axisymmetric wall-thinning in a pipeline of nuclear power plant, the velocity field and mass transfer characteristics of the pipe due to the flow accelerated corrosion and liquid droplet impingement erosion are studied experimentally and numerically. The results are summarized as follows: 1. The flow downstream of elbow-orifice pipeline shows non-axisymmetric flow behavior, which is due to the combined effect of swirl upstream and the secondary flow in the elbow and orifice. 2. Mass transfer characteristics downstream of the elbow and orifice behaves similar to the flow field. 3. Non-axisymmetric behavior downstream of orifice can be predicted by numerical method based on the mass and momentum equations combined with the k-ε model of turbulence. 4. The wall-thinning due to liquid droplet impingement erosion is studied experimentally and the numerical prediction method is proposed.

研究分野：機械工学

キーワード：原子力学 安全工学 配管減肉 流れ加速型腐食 液滴衝撃エロージョン

1. 研究開始当初の背景

配管減肉は、配管材料である炭素鋼の腐食が流動によって加速促進される現象（流れ加速型腐食（FAC））ならびに蒸気流中に含まれる微小な液滴が減肉を引き起こす液滴衝撃エロージョン（LDI）が主因と考えられているが、これらは原子力発電所の配管の保全と原子力発電所の安全維持上極めて重要な課題である。配管減肉に関する研究は、申請者らの過去の研究を含め、流体側、材料側から総合的に研究が行われ、FACによる配管減肉現象は、配管材料が乱流物質移動現象によって流体中に溶解する物質移動現象として扱うことが適当であると考えられている。また、同時に、配管減肉の予測法の配管管理への必要性も指摘されているが、FAC、LDIいずれにおいても、信頼性のある基礎データベースが不足のため、実現していない。

2004年に起きた美浜原子力発電所の配管破損事故では、複雑系統配管（図1参照）の下流側に設置されたオリフィスの背後でFACに起因する非軸対称な減肉が発生し、片側のみに予想を超えた大きな減肉のため配管破損に至った。この配管減肉の発生原因は、種々の実験がなされているが、いまだ明らかではない。

我々は、高経年化対策事業において、元来不安定なオリフィス流に対し、配管外形の最大許容誤差0.8%（JIS3464）という僅かな配管許容誤差の影響に強い旋回流が加わると偏流が発生し、ナフタリン昇華法による物質移動計測結果においても非軸対称性が現れたことから、旋回流とオリフィス偏心の重要性を指摘した。しかしながら、実機における旋回流はエルボ等の影響で偏心することや、流れ場と物質移動現象の関係が十分明らかでないため、現在のところ、非軸対称減肉の解明まで至っていない。

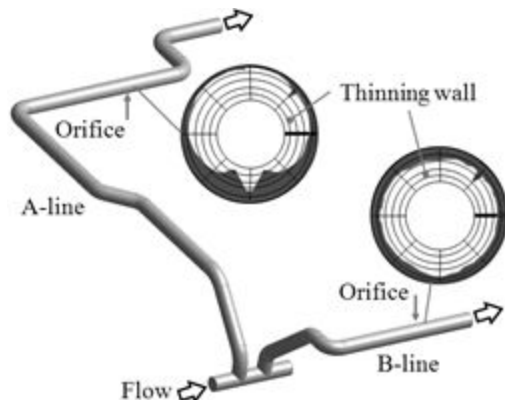


図1 美浜発電所の複雑系統配管と減肉

本研究では、複雑系統配管における非軸対称減肉の発生メカニズムの解明ならびにその予測法を確立することを目的とする。この

ため、複雑系統配管におけるFACによる非軸対称減肉解明に加えて、実機レベルのシュミット数における物質移動現象の基礎データの取得、実機レベルの液滴径（数十 μm ）によるLDI実験データの確立などの基礎データを整備し、予測モデルを構築する必要がある。また、実機への適用の際には、数値シミュレーションが必要不可欠であるため、それを含めた非軸対称減肉の予測法を考察する。以上、非軸対称減肉のメカニズム解明と基礎実験データベース作成による非軸対称減肉の予測法の確立を行うことで、原子力発電所等の安全管理の向上に資することを最終目的とする。

2. 研究の目的

(1) 複雑系統配管における偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果

美浜原子力発電所の配管破損事故で代表される非軸対称な配管減肉の発生原因を解明するには、同系統配管内3次元流動の定量計測が必要である。この研究課題は、申請者らがこれまで進めてきた理想的旋回流とオリフィス偏心による組み合わせ効果の一連の研究を一步進めた研究の位置づけである。すなわち、実機配管系をスケールダウンした配管系を製作し、エルボなどの複雑系統配管における旋回流の3次元速度場計測を行うことによって、旋回流の発生原因の解明と成長と発達過程の評価を行う。また、エルボによって生じた偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって、複雑な偏流がオリフィス背後に発生するメカニズムと発生条件を解明する。

(2) 実機レベルのシュミット数におけるオリフィス背後の物質移動現象の評価

実機における配管減肉モデル開発のためには、実機レベルのシュミット数におけるオリフィス背後の物質移動係数の実験データが必要不可欠である。我々は、最近、実機実験に代る方法として、安息香酸による物質移動係数分布の評価法を提案したが、本研究ではこの計測法をさらに発展させ、実機レベルのシュミット数の実現と偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果を受ける配管の物質移動現象を解明する。さらに、これらの基礎データを基に、非軸対称減肉の発生メカニズムの解明と予測法開発へ研究を展開する。

(3) 配管減肉のFACモデルの構築と数値シミュレーション法ならびに実機による検証

偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果の数値的予測法を実現するためには、速度場だけでなく濃度場も含めた数値シミュレーションが必要不可欠である。本研究では、 $k-\epsilon$ モデルに基づく速度場・濃度場の数値シミュレーションを実施することで、旋回流と複雑系統配管の干渉、ならびに偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果について考察する。また、本実験との比較検討

によって、非軸対称減肉に対応できる予測法を構築する。

美浜原子力発電所の配管減肉データベース (NISA 2005) に基づいて、本研究で構築した減肉モデルと数値シミュレーションを組み合わせた減肉予測法の最終評価を実施する。また、本予測結果と実機における非軸対称減肉の発生位置、減肉量分布などの詳細な実験データと比較検討を行うことで、予測法の有効性を最終評価する。

(4) 実機レベルの液滴径による減肉実験と L D I 減肉モデルの評価と検証

実機レベルの液滴径 (数十 μm 程度) による減肉速度と液滴パラメータ (液滴速度、液滴径、液滴数) の関係を明らかにするための新たな L D I 実験法を提案し、基礎データを取得する。まず、噴霧流を試験片より十分大きくした条件での減肉実験法を発展させ、L D I 減肉モデルを構築する。特に、減肉の速度依存性を示すべき乗数が大きくばらつく ($n=3-7$) 現状を鑑み、そのばらつきの原因を究明し、より正確なべき乗数を提案する。また、液滴速度と液滴径を独立に変えた減肉実験を行い、液滴速度依存性と液滴径依存性を独自に評価し、液膜厚さの影響を考察する。

3. 研究の方法

(1) 複雑系統配管における偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果

美浜原子力発電所 3 号系列の複雑系統配管で発生する旋回流の特性を実験的に明らかにするため、実験室内に同系統配管のスケールモデルを製作する。また、この実験装置を用いて、旋回流の発生と成長過程をステレオ P I V で定量評価し、基礎データとする。ここでは、旋回流強度、渦心の位置、速度場、速度変動場を計測対象とする。これを基礎データとして、上流側配管によって発生した旋回流が、種々の曲がりエルボで渦偏心を伴って成長発達する関係を明らかにする。また、偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって、オリフィス背後に偏流が発生するメカニズムと偏心旋回流とオリフィス偏心の相互作用を定量的に考察する。ここに、流れ場のステレオ P I V 計測では、照明用として Nd:YAG レーザーを用い、画像の取得は 2 台の C C D カメラ (空間解像度 1008×1008) で行った。また、速度 3 成分の解析は、本研究室で開発した解析ソフトウェアで行った。なお、これら複雑系統配管各部における速度場データは、数値シミュレーションによる旋回流の発生メカニズム解明の際の境界条件としても利用する。

以上、本研究では、複雑系統配管で発生する旋回流特性の評価、旋回流の発生機構の解明とエルボによる偏心旋回流の発生メカニズム解明、偏心旋回流とオリフィス偏心の干渉効果による偏流発生メカニズム解明とその発生条件を解明する。

(2) 実機レベルのシュミット数におけるオリ

フィス背後の物質移動の評価

既存のオリフィス背後の物質移動係数の評価は、電気化学的方法とナフタリン昇華法 ($Sc=2$) で行われたが、得られた物質移動係数は大幅に異なる。我々は、この原因をシュミット数の影響と考えている。したがって、減肉モデル構築には、実機シュミット数 ($Sc=100$ 程度) での物質移動係数の評価実験を実施する必要がある。この現状を踏まえて、我々は、作動流体が水に適用するため安息香酸ならびに硫酸カルシウム法を提案し、物質移動係数評価を行った。この方法は、実機に近い実験条件で物質移動係数分布の評価が可能であることや高い空間解像度での計測ができることが利点である。さらに、この実験法を偏心旋回流と偏心オリフィスの組み合わせに適用し、オリフィス背後の非軸対称な物質移動現象の定量評価を実施するための資料とする。

安息香酸溶解法を用いた物質移動係数の計測においては、半割り構造にした円筒測定部に液状の安息香酸を注入させ、さらに常温で固化させた後、表面をエメリー紙にて平滑化させて、実験を行った。実験前後の安息香酸の減肉量分布をレーザー変位計の電動トラバースによって計測し、物質移動係数分布を評価した。ただし、物質移動係数計測の不確かさは 6 % 程度である。このとき、物質移動係数 K は、次式で表される。

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

ここに、 c : 濃度、 ρ : 密度、 h/t : 減肉速度である。

(3) 配管減肉の F A C モデルの構築と数値シミュレーション法ならびに実機による検証

複雑系統配管に発生する F A C による配管減肉を数値的に予測するための数値シミュレーション法について考察する。その検証データとしては、本実験データである複雑系統配管で発生する旋回流とオリフィス背後の速度場と物質移動係数分布を用いる。本研究では、 $k - \epsilon$ モデルに基づく速度場・濃度場の数値シミュレーションについて考察する。

具体的には、 $k - \epsilon$ モデルを用いてオリフィス偏心を非構造格子で表現し、偏心旋回流とオリフィス偏心の相互干渉効果を検討する。さらに、実験結果との比較を行い、オリフィス背後に発生する偏流ならびに非軸対称な物質移動現象について考察する。

実機データによる検証としては、美浜原子力発電所の 3 号系列の配管減肉事象に適用し、実機配管減肉データベースと比較検討する。評価ポイントは、実機における非軸対称減肉の再現と減肉位置、減肉量分布などである。このことにより、本減肉予測法の有効性

を評価する。

(4)実機レベルの液滴径による減肉実験とLDI減肉モデルの評価

液滴衝撃エロージョンによる配管減肉の予測法を構築するには、高速噴霧流による減肉実験が有効である。噴霧流の可視化イメージを図7に示す。我々が先に提案した噴霧ノズルによる実機レベルの液滴径(数十 μm 程度)のLDI実験法に、PIV、シャドウグラフ、サンプリングプローブによる液滴パラメータの計測法を導入することで、アルミニウム材料の減肉速度と液滴パラメータの関係を実験的に評価する。ただし、本実験の液滴径は、30 μm である。過去の実験では、噴霧流より試験片が大きい為、減肉曲線の勾配は一定とはならず、特に定常減肉速度を高精度で評価できなかった。本研究では、一定減肉速度を得るための手段として、噴霧流が試験片より十分大きな条件下で減肉実験を行うことで、より高精度に減肉速度を評価した。また、減肉速度の予測式に含まれる液滴速度、液滴径のべき乗数を本実験から独自に決定することで、高精度の減肉モデルの提案を行う。

4. 研究成果

(1)複雑系統配管における偏心旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果

複雑系統配管の一例として、配管破損の発生した美浜原子力発電所配管系を模擬したエルボ・オリフィス配管系を対象として、流動特性の計測実験を回流水槽にて行った。ただし、実験条件は、作動流体として水、配管直径56mm、水温30 $^{\circ}\text{C}$ である。したがって、レイノルズ数 $Re=3\times 10^4$ である。なお、速度場の計測にはステレオPIVを用いた。

図2は、オリフィス下流側1dで計測した管断面内速度分布の計測結果である。旋回流あり(スワール数0.6)となしを比較して示した。これらの実験結果によると、旋回流なしの場合には軸対称な速度分布を示すが、ある程度大きい旋回流が存在すると、下流側速度場は旋回流の影響を強く示すことがわかる。これは、旋回流とエルボの二次流れの組み合わせ効果により、非軸対称な速度場がオリフィス下流側に発生するためである。

図3は、オリフィス下流側1dで計測した管断面内の乱れエネルギーの計測結果である。図2と同様に、旋回流の存在によって発生する流れ場の非軸対称性は乱れエネルギーにも認められる。また、乱れエネルギーの最大値は、旋回流なしの場合と比べ3倍程度大きくなる注目がされる。このように、旋回流の強度と非軸対称性には相関関係があり、旋回流強度が0.3を超えて大きくなると、流れ場の非軸対称性は急激に大きくなる。

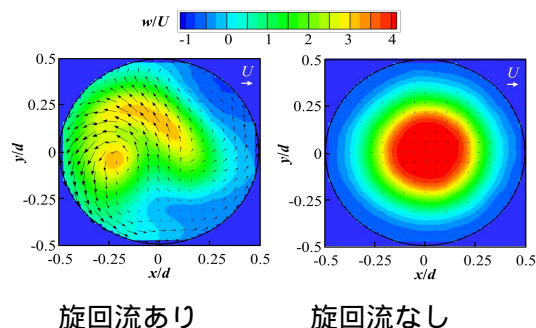


図2 オリフィス下流1dにおける速度分布

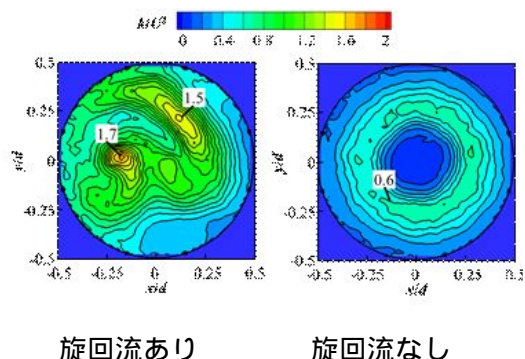


図3 オリフィス下流1dにおける乱れエネルギー分布

(2)実機レベルのシュミット数におけるオリフィス背後の物質移動現象の評価

供試配管系のオリフィス下流における物質移動係数を安息香酸法によって計測した。実験条件は、レイノルズ数 $Re=3\times 10^4$ である。図4は、オリフィス下流 $x/d=1\sim 4$ におけるシャーウッド数分布で、旋回流ありの結果を示す。ただし、図中の角度は、配管下流側から見た周方向角度であり、向って右側を $=0^{\circ}$ とした。図4によると、 $=0^{\circ}$ のシャーウッド数分布は直線円管の結果とほぼ一致するが、 $=180^{\circ}$ ではシャーウッド数の最大値は2倍程度に増大し、また、そのピーク位置はオリフィス側へと移動する。このことは、旋回流の影響によって、オリフィス下流側の物質移動係数は非軸対称性を増し、かつその物質移動量も増大する。以上のように、エルボ・オリフィス配管系では、強い旋回流の影響によってオリフィス下流側で非軸対称流が発生し、周方向に偏ったシャーウッド数分布を示すが、このことは図2、図3に示した平均速度、乱れエネルギーの分布にも見られる。また、これらの結果から、乱れエネルギーと物質移動量の相関性も読み取れる。

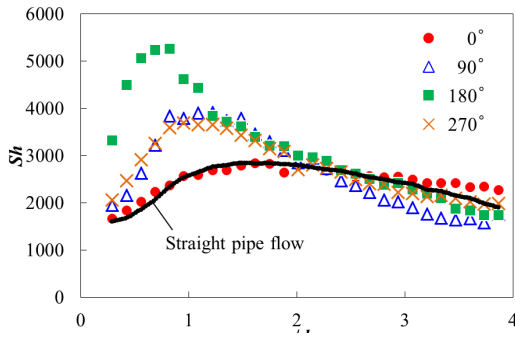


図4 シャーウッド数分布 (旋回流あり)

(3) 配管減肉のFACモデルの構築と数値シミュレーション法ならびに実機による検証

配管減肉予測のFACモデルでは、質量流束と濃度勾配の関係を用いる。ここに、質量流束は減肉率に対応することから、減肉率 h/t を、以下のように表すことができる。

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{(c_w - c_b) \cdot K}{\rho} \quad (2)$$

ここに、K:物質移動係数、 ρ :密度である。式(2)によると、減肉速度は、物質移動係数Kに比例することになるが、Kはナビエ・ストークス方程式と濃度方程式を連立し、標準k- ϵ モデルを用いて数値計算から評価することができる。

以上の数値計算法の検証を行うため、美浜原子力発電所の配管系であるエルボ・オリフィス配管系を対象として、予測計算を行った。ただし、計算条件は、美浜原子力発電所の配管条件である配管内の断面平均速度 2.2 m/s、温度 413 K、レイノルズ数 5.8×10^6 である。

図5は、オリフィス下流における減肉量 $h(\text{mm})$ が下流方向へ変化する関係を各周方向位置で実機実験結果と比較して示した結果である。実機実験結果で見られる減肉量の周方向変化は、数値計算結果にも再現されており、また、最大減肉量も実験との一致も見られた。しかしながら、最大減肉が得られる周方向位置には多少の相違が見られる。これは、k- ϵ モデルに基づく数値計算では、旋回流の挙動を正確に再現できないためと考えられる。

図6は、配管内の旋回流の計算結果である。上流側の旋回流がエルボへ流入すると、エルボ内部の2次流れとの組み合わせ効果によって強いうねりが発生し、エルボの下流 10d の位置 (オリフィス位置に相当) においてもうねりは残ることがわかる。このようなうねりがオリフィスに流入すると、オリフィスは流れの非軸対称性を強め、図5に示した偏った減肉分布が形成されたと考えられる。以上のことから、強い旋回流の存在は、異常な配管減肉を齎す可能性があるため、旋回流を抑制する措置が必要である。

また、FAC減肉においても、鱗片状粗さで代表される表面粗さの影響については、今後の課題とする。

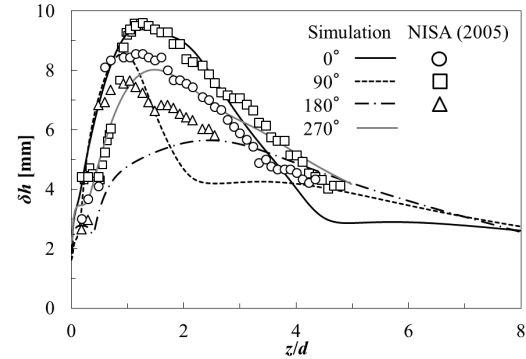


図5 減肉量分布の実験と計算結果の比較

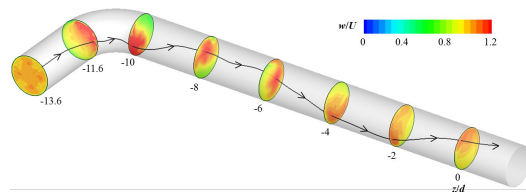


図6 配管内の旋回流の発達

(4) 実機レベルの液滴径による減肉実験とLDI減肉モデルの評価

液滴衝撃エロージョンによる減肉速度の評価を目的として、種々の材質の試験片を用いて減肉量 E_d の時間変化を実験した。図7は、炭素鋼 (S20C, SS400)、ステンレス鋼 (SUS304) の結果である。ただし、実験条件は、液滴速度 $V=186\text{m/s}$ の場合である。図には、試験片直径の2種異なる結果 $D=1.5\text{mm}, 2.5\text{mm}$ の場合を示した。これらの結果の違いは、材料表面に形成される液膜厚さの影響を示唆しており、試験片直径が小さいほど液膜厚さは薄く、その結果として減肉速度は大きくなる。また、減肉速度は、材料が硬いほど小さくなることからわかる。以上の実験結果をまとめると、減肉速度 V_m は、次式で与えられる。

$$V_m = c_2 \left(\frac{H_v}{H_{vAL}} \right)^{-4.5} \cdot V^7 \cdot \left\{ 1 + c_3 \left(\frac{h}{d} \right)^{c_4} \right\} \quad (3)$$

ここに、 H_v :ビッカース硬さ、 H_{vAL} :A1070のビッカース硬さ、 d :液滴直径、 h :液膜厚さ、 V :液滴速度、 c_2, c_3, c_4 :定数。

最後に、本LDI減肉モデルを女川原子力発電所でのエルボ配管におけるLDI配管減肉事例に適用した。実機減肉との比較結果によると、予測結果は減肉の発生位置や減肉速度などの結果は実験とほぼ一致することが確認された。

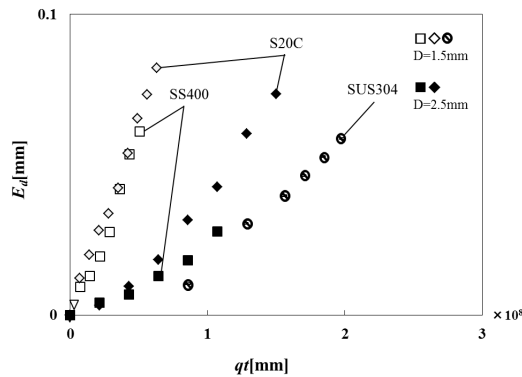


図7 減肉量と局所流量 q_r の関係

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)

N. Fujisawa, K. Wada, T. Yamagata, Numerical Analysis of Wall-thinning Rate of Bent Pipe by Liquid Droplet Impingement Erosion, Engineering Failure Analysis, Vol.62(2016), pp. 306-315. DOI:10.1016/j.engfailanal.2016.01.005 (査読有)

N. Fujisawa, T. Yamagata, N. Wada, Attenuation of Wall-thinning Rate in Deep Erosion by Liquid Droplet Impingement, Annals of Nuclear Energy, Vol.88(2016), pp. 151-157. DOI:10.1016/j.anucene.2015.10.024 (査読有)

T. Takano, Y. Ikarashi, K. Uchiyama, T. Yamagata, N. Fujisawa, Influence of Swirling Flow on Mass and Momentum Transfer Downstream of a Pipe with Elbow and Orifice, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.91(2016), pp.394-402. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.087 (査読有)

N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Takano, K. Saito, Ryo Morita, K. Fujiwara, Fumio Inada, The Influence of Material Hardness on Liquid Droplet Impingement Erosion, Nuclear Engineering and Design, Vol.288(2015), pp. 27-34. DOI:10.1016/j.nucengdes.2015.03.016 (査読有)

N. Fujisawa, T. Yamagata, N. Kanatani, R. Watanabe, Non-axisymmetric Wall-thinning Downstream of Elbow-Orifice Pipeline in Swirling Flow, Annals of Nuclear Energy, Vol.80(2015), pp. 356-364. DOI:10.1016/j.anucene.2015.01.043 (査読有)

N. Fujisawa, N. Kanatani, T. Yamagata, T. Takano, Mechanism of Non-axisymmetric Pipe-wall Thinning in Pipeline with Elbow and Orifice under Influence of Swirling

Flow, Nuclear Engineering and Design, Vol.285(2015), pp.126-133. DOI:10.1016/j.nucengdes.2012.07.001 (査読有)
T. Yamagata, A. Ito, Y. Sato, N. Fujisawa, Experimental and Numerical Studies on Mass Transfer Characteristics behind an Orifice in a Circular Pipe for Application to Pipe-wall Thinning, Experimental and Thermal Fluid Sciences, Vol.52 (2014), pp. 239-247. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2013.09.017 (査読有)

N. Fujisawa, T. Yamagata, K. Saito, K. Hayashi, The Effect of Liquid Film on Liquid Droplet Impingement Erosion, Nuclear Engineering and Design, Vol.265(2013), pp.909-917. DOI:10.1016/j.nucengdes.2013.07.039 (査読有)

T. Takano, T. Yamagata, Y. Sato, N. Fujisawa, Non-Axisymmetric Mass Transfer Phenomenon behind an Orifice in a Curved Swirling Flow, J. Flow Control, Measurement and Visualization, Vol.1(2013), pp.1-5. DOI:10.4236/jfcmv.2013.11001 (査読有)

[学会発表](計34件)

N. Fujisawa, Y. Ikarashi, T. Yamagata, T. Takano, Mass and Momentum Transfer Downstream of Elbow-Orifice Pipeline with Swirling Flow, Proc. 13th Int. Symp. Fluid Control, Measurement and Visualization, Doha, Qatar, November 15-18, (2015), 8 pages (査読無)

[図書](計1件)

N. Fujisawa, R. Watanabe, T. Yamagata, N. Kanatani, Characterization of Pipe-Flow Turbulence and Mass Transfer in a Curved Swirling Flow Behind an Orifice, In: Progress in Wall Turbulence 2, Vol.23 ERCOFTAC Series, eds. M. Stanislas, J. Jimenez and I. Murasic, Springer, 2015, pp 225-235 (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤沢 延行 (FUJISAWA, Nobuyuki)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 20165369

(2) 研究分担者

江原 真司 (EBARA, Shinji)
東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 30325485
山縣 貴幸 (YAMAGATA, Takayuki)
新潟大学・自然科学系・助教
研究者番号: 50554284