

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：11301
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760821
 研究課題名(和文) 複雑流動場における多重乱流スケールの壁面物質伝達機構解明とFAC制御技術への挑戦
 研究課題名(英文) Elucidation of Multiple-scale Mass Transfer Mechanism from Wall to Complex Turbulent Flow and Challenge to FAC Control Technique
 研究代表者
 江原 真司 (EBARA SHINJI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30325485

研究成果の概要(和文)：流れ加速型腐食(FAC)による配管減肉と流体の乱流運動のスケール、つまり周波数との関連を明らかにすべく、PIV法による流れの可視化実験により流れ場の詳細を取得し、報告されている実機配管の減肉分布と比較した。実験から得られた速度変動パワースペクトル密度分布のレベルは、実機で減肉が最大となる位置で最大となるという結果となり、またローパスフィルタをかけた場合にさらに実機との相関が強くなる傾向を見出した。しかしレイノルズ応力分布の方がより強い相関を示すという結果も得られ、現象の解明までには至っていない。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the relationship between flow-accelerated corrosion and scales of fluid motion, i.e., frequencies in the turbulent motion, visualization experiments for fluid flow by using PIV method were conducted and the flow fields were analyzed in detail. When the levels of power spectrum densities of fluctuating velocities obtained from the experiments were compared to the profile of pipe wall thinning obtained from an actual plant, their trend showed a fair agreement with each other. Furthermore, they showed a better agreement when a low-pass filtering operation was done for the fluctuating velocities. However, Reynolds stress profile showed a much more better agreement with the actual profile of pipe wall thinning.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：流れ加速型腐食、旋回流、オリフィス、速度変動

1. 研究開始当初の背景

火力・原子力発電プラントにおける配管減肉現象は、高経年化プラントに多く見られる現象であり、プラントの運用および管理上、非常に重要な問題となっている。減肉現象は進行の度合いによっては、配管内の流体の漏えいや噴出に至る可能性もあるため、作業上の安全性への影響はもちろんのこと、プラントの計画外停止に伴う経済的・社会的な影響も大きい。発電プラントの系統配管で発生す

る減肉現象の中で、配管管理上もっとも重要視すべき現象は流れ加速型腐食(Flow Accelerated Corrosion, FAC)である。FACでは配管の広範囲にわたる領域が減肉され、重大事故につながる冷却材漏えい事故を引き起こすリスクが高いため、現在多くの機関がメカニズム解明や予測モデルの構築、減肉緩和策などさまざまな観点から研究を行っている。2004年の美浜3号機2次系配管の破

断事故はこの FAC が原因と考えられ、配管内で生じた旋回流がオリフィスを通することで減肉箇所の偏りが生じたと報告されている。FAC は、配管内壁から流体中への鉄の溶出、すなわち腐食現象が流体の挙動により促進される現象である。従って FAC を評価するためには、腐食される側の材料成分（材料因子）や水質や温度（環境因子）、腐食を促進する流体の流速や乱れの状態といった流体力学的な条件（流動因子）をそれぞれ考慮する必要がある。

FAC はオリフィスやエルボなど、剥離などが生じ流れ場が大きく乱される場所での発生が多く観測されている。各因子の FAC への影響は、環境因子としては水の pH や溶存酸素濃度、温度の影響が把握されつつあり、また材料因子としては材料中 Cr 含有量の影響が明らかにされようとしている。しかし流動因子に関しては、未だ十分な知見が得られているとは言い難く、減肉速度を推定するためのパラメータとして何が適当なのか研究者によって異なる見解を示しているのが現状である。

2. 研究の目的

FAC で生じている減肉現象は材料から流体中への酸化皮膜を通した鉄の溶出で物質移動現象そのものであり、減肉量や速度は物質伝達係数に支配されると考えられる。物質伝達係数は流れの状態によって変化するため、従ってこれをどう評価・算出するかが問題となる。加えて、鉄の溶出では水の動粘性係数 ν が $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダー、鉄イオンの水中の拡散係数 D が $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであり、物質輸送に関する無次元数であるシュミット数 Sc が $Sc = \nu/D \sim 10^2$ オーダーとなり、いわゆる高 Sc 数物質輸送流れとなる。この高 Sc 数流れでは単純体系でも物質と運動量伝達のアナロジーが成り立たないことが実験により示され、近年では流体の直接計算 (DNS) によりその実験データの妥当性が検証されている。また、固体壁面上における物質濃度はより低周波の速度変動のみに応答する (low-pass filtering 効果) ことがごく最近になって報告されるなど、高 Sc 数流れによる物質輸送現象はまだ十分に把握されておらず、未開拓の研究分野と言える。本研究との関連でいえば物質伝達の low-pass filtering 効果は非常に興味深く、これは減肉部で見られる鱗片模様が乱れの大きな箇所ほど鱗片スケールが小さくなるという事実が示す、減肉現象がある種の流れのスケールとリンクする現象である。従ってこれらの知見より、減肉現象における流動因子は流れの乱れ強度だけではなくそのスケール (周波

数) も重要な要素であると申請者は考える。本研究ではこれまでは考慮されなかった乱れのスケールに着目し、減肉現象の乱れのスケール・周波数依存を確認する。また乱れのスケールを抽出できる手法 (Large-eddy simulation) による数値解析を行い物質伝達係数を正確に評価し、報告されている減肉速度との比較を行うことで FAC の流動因子を特定することを試みる。

また、旋回流とオリフィスの組み合わせで報告されている減肉箇所の偏りについて、安息香酸を用いた減肉加速実験および流れの可視化実験によりその現象の解明を行う。

3. 研究の方法

実機配管において流れ加速型腐食 (FAC) が発生しやすい場所では、エルボやオリフィス・弁の下流域といった、複雑な乱流や剥離を伴う流れとなるため、実験においてそれらの流れ場を詳細に把握するには時間・空間分解能の高い計測手法でなくてはならない。本研究では PIV システム (OXFORD LASERS 社製) を用い、非定常で複雑な流れ場を正確に把握する。流路としてはオリフィスを対象とし、詳細な非定常流動構造を把握する。本実験では流路壁にアクリル、流体にヨウ化ナトリウム水溶液を用い、屈折率変化を計測上問題がない程度まで低減させる、屈折率調合による可視化計測を行う。

オリフィス流路の可視化実験では、流路全体の流動と壁面近傍に限定したクローズアップ計測の 2 種類を行い、乱流の強度やパワースペクトルを求める。実験ループは図 1 に示すように混合タンク、ポンプ、整流部、試験部、可視化部で構成されており、配管の内径は $D=56 \text{ mm}$ である。可視化部はアクリル製で、絞り比 0.6 のオリフィス (図 2) で構成されている。実験条件は Re 数を 0.5×10^5 、 1.0×10^5 、 1.5×10^5 ($U_m=0.83, 1.66, 2.49 \text{ m/s}$) とした。まず実機において減肉の非常に少ないストレート部での発達乱流を可視化し、配管の壁からおおよそ 0.13 mm の位置 (ほぼ粘性底層内) で速度変動の周波数特性を評価した。またオリフィス下流も同様に流路全体を主流に平行な断面で行い再付着点位置 (Z_R) を求め、壁近傍の流れに関してはこの再付着点位置を基準としそれぞれ 0.2、0.4、0.6、 $1.0Z_R$ の位置において可視化し、周波数特性を評価した。

また、旋回流とオリフィスの組み合わせによる減肉現象について、図 3 に示す三次元接続二段エルボの下流で生じる旋回流と図 4 に示す安息香酸を流路壁とした試験部を用いた減肉加速実験を行い、PIV システムによる可視化実験の結果と併せ、解析した。レイノルズ数は 15 万とし、まずエルボ下流で生じる旋回流の特性を調べ、その後にエルボ下

流にオリフィスを組み込んだ減肉試験部を設置し、減肉分布を計測した。

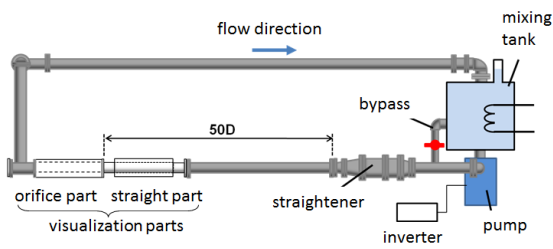


図1 実験ループ概略

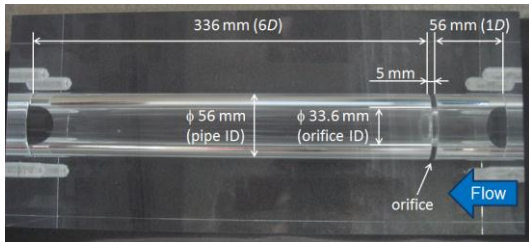


図2 オリフィス可視化部

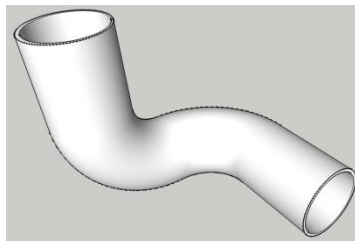


図3 三次元接続二段エルボ

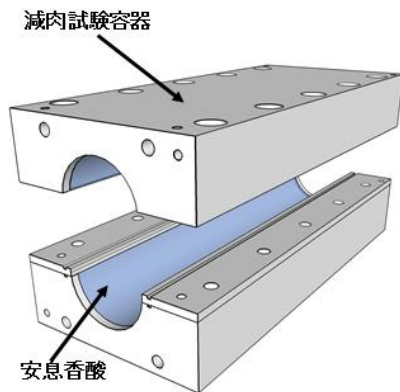


図4 減肉加速試験の試験部

4. 研究成果

図5に $Re=0.5 \times 10^5$ での軸方向速度の時間平均分布、図6、7に軸方向および壁方向速度変動の rms 分布を示す。図は 0.5D 毎に計測したものを重ね合わせているため、撮影時の境界で分布が若干不連続になっているが、オリフィスから噴流状の流れ場が形成され、再循環領域との速度剪断層において乱れが

大きい様子が分かる。再付着点位置は 2.17D である。

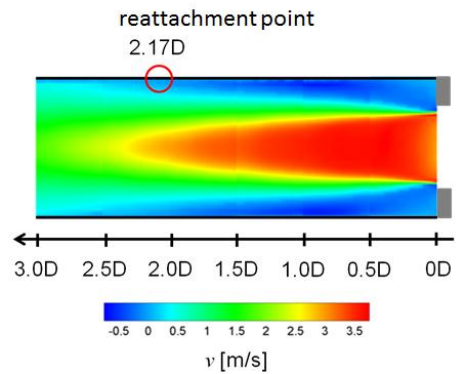


図5 時間平均軸方向速度分布

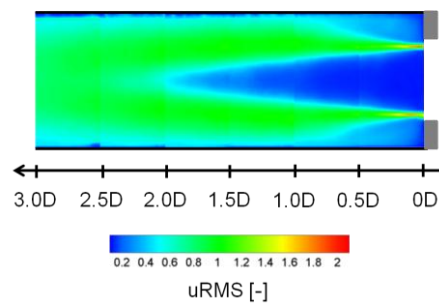


図6 軸方向速度変動強度分布

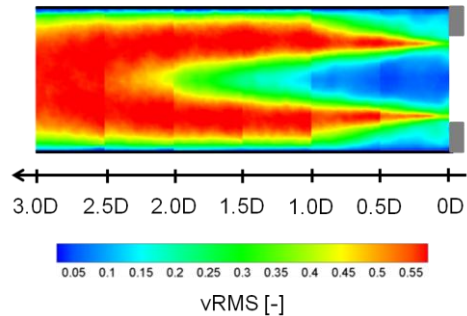


図7 壁方向速度変動強度分布

図8、9に、オリフィス下流 $0.4Z_R$ での軸方向および壁方向速度変動成分の時系列データをFFT解析した結果を、それぞれ助走区間での発達乱流のものと比較して示す。オリフィス下流におけるPSD分布も発達乱流におけるPSD分布と同様に50 Hz程度までほぼ一定の分布を持ち形状に関しては差異は見られない。オリフィス下流の他の位置においても、発達乱流と比べレベルは上がるが特徴的な分布は見られなかった。

図10にオリフィス下流の各位置でのPSDレベルを比較し示す。縦軸は50 HzまでのPSDの平均値(軸方向 u' 、壁方向 v')を発達乱流のそれで除したものである。いずれも0.4

～0.6 Z_R で最大値を取り、再付着点位置で急激に減少する分布となっている。この分布の形状は、図11に示す実機における減肉分布と相関はあるが、最大値を取った後に緩やかに減少する傾向は大きく異なる。

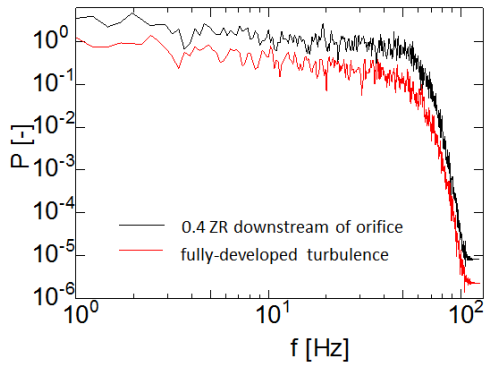


図8 軸方向速度変動のPSD分布：0.4 Z_R

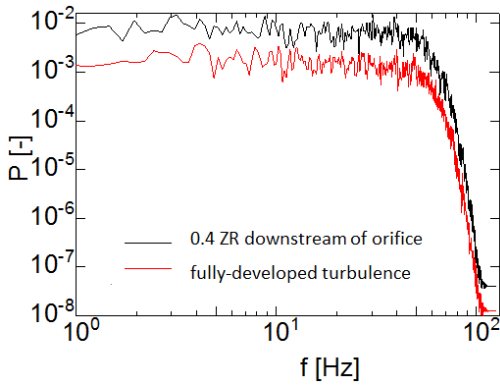


図9 壁方向速度変動のPSD分布：0.4 Z_R

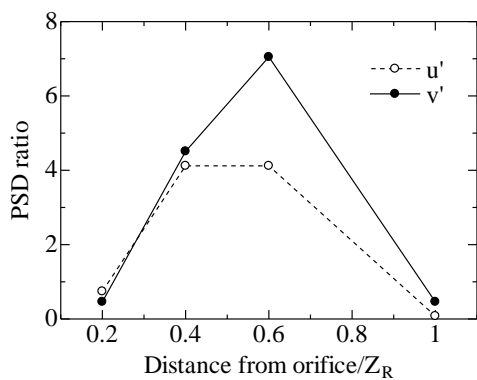


図10 PSD比の分布

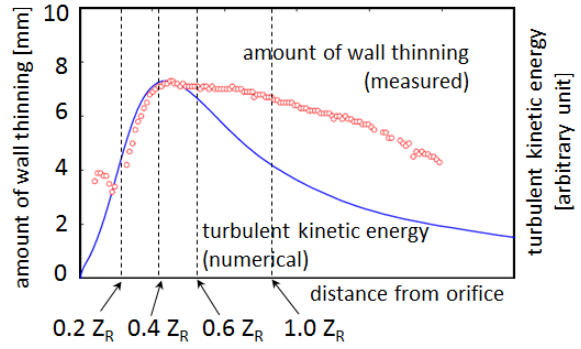


図11 実機における減肉分布と数値解析による乱流エネルギー分布

速度変動にローパスフィルターおよびハイパスフィルター操作を施した場合の乱流エネルギー分布を、図12、13にそれぞれ示す。フィルターを施さない場合と比べ、またハイパスの場合と比べ、ローパスにより得られる分布は減肉分布とより相関があることが分かり、さらにカットオフ周波数を低くした方が分布の形状が似通ったものになる。

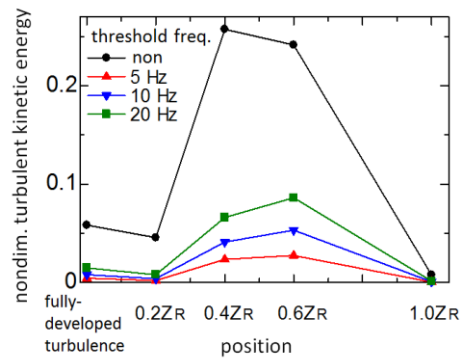


図12 ローパスフィルター操作を施した時の乱流エネルギー分布

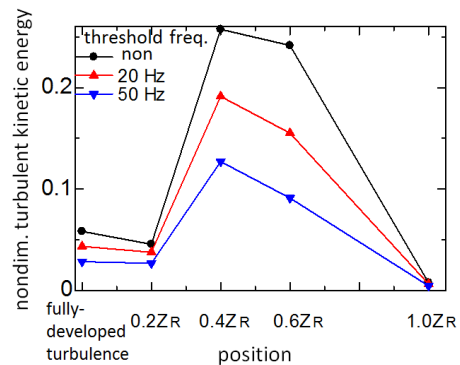


図13 ハイパスフィルター操作を施した時の乱流エネルギー分布

しかしながら、図 10、12、13 のいずれの分布も、再付着点 ($1.0 Z_R$) ではほぼ 0 になるという結果となり、この点で図 11 に示す減肉分布とは異なるという結果となる。ところが図 14 に示すレイノルズ応力の PSD レベル分布では、再付着点付近でも値はピーク値の半分程ではあるが相対的に大きく、減肉分布により近い分布になることが分かる。FAC は流れによる壁面物質輸送の促進であり、レイノルズ応力は乱流物質輸送とアナロジーが成り立つと考えられるため、この結果は FAC と乱流物質輸送が強く関連していることを示しているものと考えられる。

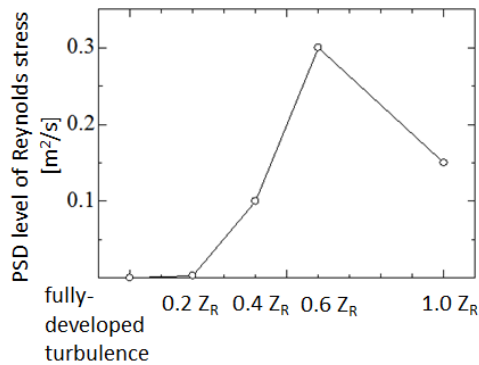


図 14 レイノルズ応力の PSD レベル分布

旋回流とオリフィスの組み合わせで生じる減肉の偏りに関する実験について、以下に述べる。流れ方向断面および流れ垂直断面における時間平均速度場を図 15、16 に示す。図中 A-D は図 17 に示す通りである。図から、流れはオリフィス通過後に AD 側に大きく曲り、また、AD 側で旋回速度が速くなっていることが分かる。このような偏った流れがオリフィス下流を流れることで、そこでの減肉も偏ったものになることが予想され、実際そのような結果が実験から得られた。

図 18 にオリフィス下流における減肉分布を示す。縦軸はシャーウッド数で k 、 α をそれぞれ物質移動係数、安息香酸の水中での拡散係数とすると $Sh=kD/\alpha$ で表される。計測した管壁厚さを周方向 90° ずつ平均した値を用いている。図から AD 側で減肉量が大きくなっており、平均速度の高速域が偏っている側で減肉速度が速いことが分かる。次に流れの何の量が減肉と関連するのかについて考察する。図 19 はオリフィス下流での物質移動係数分布を示しており、縦軸は円管内発達乱流での値で無次元化している。図 20 に示す壁面近傍の乱流エネルギー分布を比較すると、ピークの位置や C と発達乱流が流入した場合の分布の大小関係などが一致していないことが分かる。これらのことから、乱流エ

ネルギーと減肉とは密接には関係していない、とすることができる。

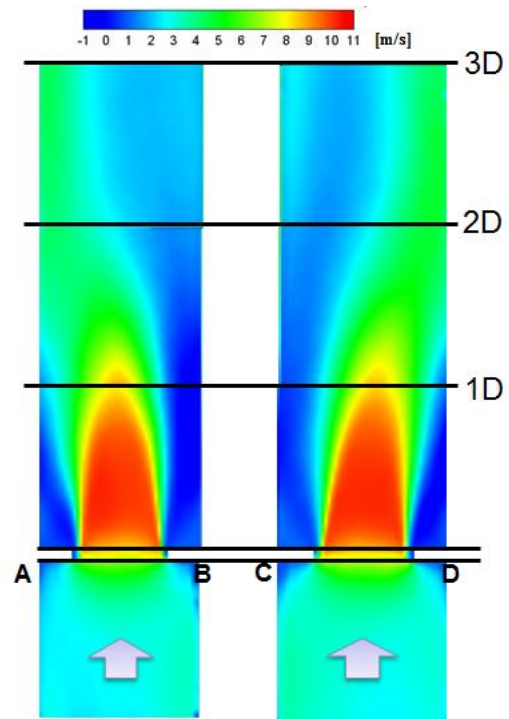


図 15 流れ方向断面の速度分布

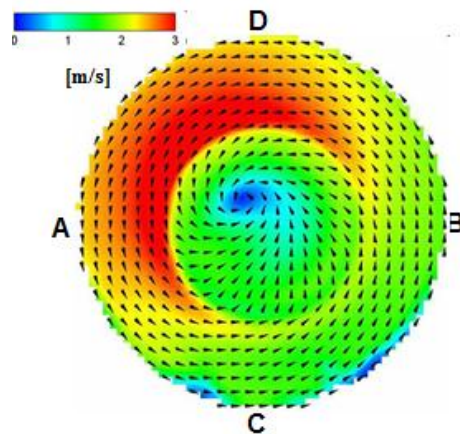


図 16 オリフィス背後における流れ垂直断面の速度分布

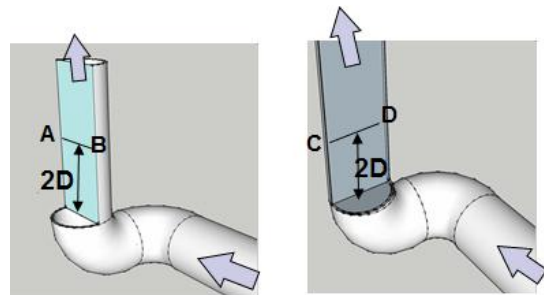


図 17 可視化断面位置

レイノルズ応力分布と減肉分布を比較すると、図 2 1 に示すように高減肉側 (A) ではピークの位置、ピークから下流のなだらかな減少等、分布は良く似ているが、低減肉側 (B) ではピーク位置は大きく異なり、良い一致を見せているとは言えない。

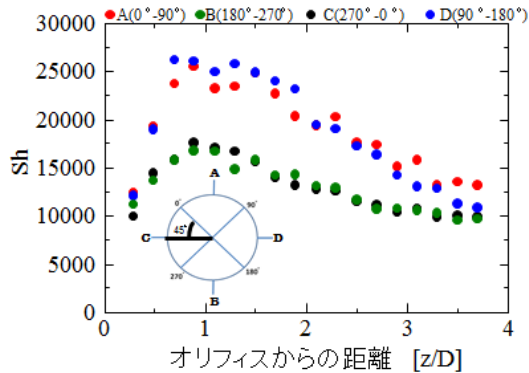


図 1 8 減肉分布

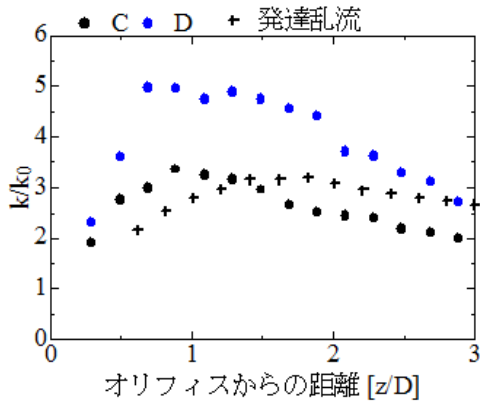


図 1 9 オリフィス下流におけるケラー数分布

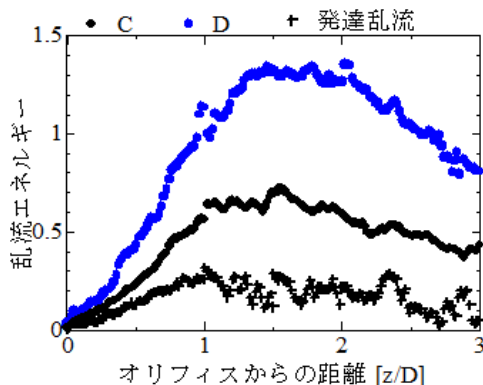


図 2 0 オリフィス下流における壁面から 1mm 付近の乱流エネルギー分布

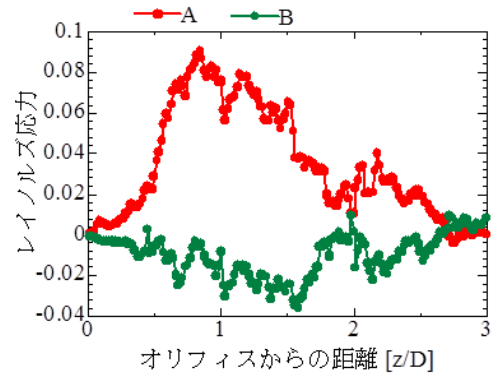


図 2 1 オリフィス下流における壁面から 1mm 付近のレイノルズ応力分布

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

① 江原真司、矢内 宏樹、橋爪 秀利、オリフィス下流複雑流動場における速度変動周波数特性の配管減肉への影響、日本保全学会第 9 回学術講演会、2012 年 7 月 25-27 日、東京

② T. Kubo, S. Ebara, H. Hashizume, EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF INLET FLOW CONDITIONS ON SWIRLING FLOW GENERATED IN A THREE-DIMENSIONALLY CONNECTED DUAL ELBOW, The 15th International Symposium on Flow Visualization, 2012 年 6 月 25-28 日、Minsk, Belarus

③ 江原真司、矢内宏樹、橋爪秀利、オリフィス下流における配管減肉への乱流速度変動周波数の影響、第 17 回動力・エネルギー技術シンポジウム、2012 年 6 月 21-22 日、福岡

④ 矢内宏樹、江原真司、橋爪秀利、オリフィス下流乱流場での配管減肉に対する速度変動周波数の影響評価、日本原子力学会東北支部 第 35 回研究交流会、2011 年 12 月 9 日、仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江原 真司 (EBARA SHINJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：3 0 3 2 5 4 8 5

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：