

令和元年6月5日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06952

研究課題名(和文)高Sc数乱流物質伝達機構の流れ場スケール依存性解明と配管減肉制御技術実現への挑戦

研究課題名(英文)Clarification of flow scale dependency of mass transfer in high Schmidt number turbulent flow and challenge for pipe wall thinning control technique

研究代表者

江原 真司 (Shinji, Ebara)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30325485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではオリフィス下流で生じる配管減肉について、加速減肉実験、流れの可視化実験および濃度場可視化実験を行い、高Sc数物質輸送について解析を行った。オリフィス下流では壁面から数mm離れた流体中の全剪断応力の0.25乗が減肉分布とよく一致することが分かった。速度変動周波数と減肉の相関は見られなかった。減肉速度が大きい箇所では壁面近傍における高濃度流体の間欠的かつ頻繁な巻き上がりが見られた。当該箇所における粘性底層は0.1 mmオーダーと見積もられるが、高濃度流体の巻き上がりは瞬間的に高さ数mm程度まで達し、粘性底層・濃度境界層よりも大きな渦構造のスカラー量伝達への大きな寄与が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、各種プラントなどで生じる配管減肉の中の流れ加速型腐食について、その流動因子がレイノルズ応力も含めた全剪断応力にあることを明らかとした。しかも、壁面で生じる減肉現象に対して、壁面直近ではなく壁面から数mm離れた位置における全剪断応力が影響しているという結果が得られた。乱流物質伝達の研究は種々行われているが、オリフィス下流という複雑体系においては詳細な計測を行ったものは少ないため、本研究で大きな成果が得られたと言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, an accelerated wall thinning experiment using benzoic acid as thinning wall, flow visualization experiment by means of PIV and visualization experiment of concentration field using LIF were conducted in order to analyze mass transfer from a channel wall in a complex high Schmidt number turbulent flow downstream of an orifice. From the observation of the concentration field, it was found that frequent and intermittent ejections of high concentration fluid from a channel wall appeared in large wall thinning rate area. The ejections instantaneously reached up to several mm in height whereas the viscous sublayer thickness was assumed to be of the order of 0.1 mm and the concentration boundary layer thickness was assumed to be thinner than it in the area. This phenomena observed is considered to indicate that larger vortex structures than the viscous sublayer and concentration layer have a lot to do with the mass transport from the channel wall.

研究分野：原子力工学、核融合炉工学

キーワード：配管減肉 流れ加速型腐食 流れの可視化実験 濃度場可視化実験 PIV LIF 周波数解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原子力発電プラントで生じる配管減肉のうち、流れ加速型腐食(Flow-Accelerated Corrosion、FAC)は、広範囲にわたる減肉を生じさせ大規模な流体漏洩事故につながるリスクが高い。これまでに FAC に影響を与える流動場を解明するために、速度や乱流エネルギーの時間平均値に観点を置いた研究や、物質輸送と運動量輸送のアナロジーの観点から、壁面剪断応力の時間平均や RMS 値に観点を置いた研究も行われてきたが、未だに現象を十分解明できているとは言えずその解明が待たれている。

### 2. 研究の目的

FAC 発生部位では鱗片状の凸凹が生じることが知られており、何らかの時間・空間スケールが関係していることが示唆される。本研究では流体挙動、特に申請者独自の着想である乱れのスケール(周波数・時定数)に着目し、これらが減肉(=壁面からの物質伝達)に与える影響を実験により明らかにし、未だ解明されていない FAC の流動因子を特定することを目的とする。

### 3. 研究の方法

FAC は壁物質の流体中への溶出および溶出物質の流れによる輸送現象と考えることができる。炭素鋼配管の冷却水流れによる FAC の場合、鉄の拡散率などから高シュミット数(Sc)流れの物質輸送となる。本研究ではオリフィス下流で生じる配管減肉に着目し、安息香酸を用いた加速減肉実験と PIV による流れの可視化実験および LIF 法による濃度場可視化実験を行った。まず円管オリフィス流れについて加速減肉実験を行い減肉分布を取得し、次いで流れの可視化実験により減肉速度の大きい箇所・小さい箇所に対して壁近傍の流れ場計測を行い、速度の時間平均場や瞬時場に対して詳細な解析を行った。その後、濃度場可視化実験のために体系を矩形管オリフィス流れとし、同様に加速減肉実験、流れの可視化実験を行い減肉速度分布、速度場を得て、濃度場について可視化実験を行い評価した。

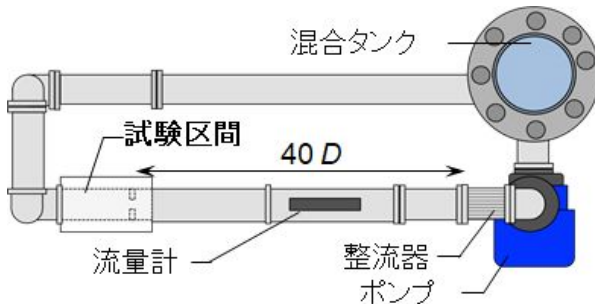


図1 流動試験装置

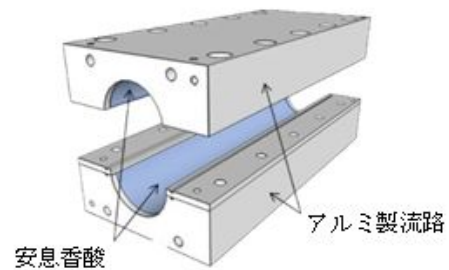


図2 円形流路加速減肉実験用試験部

図1に実験で用いた流動試験装置の概略を示す。減肉試験では、図2のようなアルミ製の流路の内壁に安息香酸を鋳込んだものを減肉試験部として用いた。円管流路は直径 56 mm (=D) でオリフィスは開口径 33.6 mm (絞り比 0.6) とした。作動流体は水であり、試験時間は 270 s とした。試験による減肉量を調べるために、試験を行う前後に減肉試験部の内壁位置を三次元座標測定機(Carl Zeiss、UPMC550CARAT)で計測した。計測箇所は、流れ垂直断面を周方向に約 2° 毎に計測した平均値をその位置での減肉量とした。その減肉量と (1)式から物質移動係数 k を評価した。

$$\rho_s \frac{dh}{dt} = k(C_w - C_b) \quad (1)$$

$$k_0 = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.33} \frac{d}{D} \quad (2)$$

ここで、(1)式の  $\rho_s$  は個体の安息香酸の密度、 $dh/dt$  は安息香酸内壁厚さの時間変化、 $C_w$ 、 $C_b$  は水中における安息香酸の内壁近傍での濃度および水中におけるバルク濃度である。(2)式は配管中の発達乱流における物質移動に関する式であり、 $k_0$  は発達乱流時の物質移動係数、 $d$  は拡散係数である。(2)式により求めた  $k_0$  で  $k$  を除したものをケラー係数  $k/k_0$  とし、減肉速度を評価していく。45℃ の水中における安息香酸の Sc 数は 360 であるため、水中に溶解した安息香酸は壁面ごく近傍に留まっていると考えられ、 $C_w$  は飽和濃度、 $C_b$  は 0 とした。

矩形体系について、図3および図4に試験部、減肉壁を示す。減肉壁には安息香酸に LIF 法で用いる蛍光物質であるローダミン B を混ぜ込んでいる。矩形流路は一辺 1D の正方形流路とし、オリフィスは円管体系と同様、絞り比 0.6 のものを用いた。LIF 法(図5参照)ではレーザーおよびカラーフィルタとして、波長 532 nm のグリーンレーザー-NEO-50MG (NEOARK 社製)および SCF-50S-560 (シグマ光機製)をそれぞれ用いた。PIV による流れの可視化実験ではトレーサー

粒子として直径 20 mm のナイロン粒子を、レーザーとして波長 808 nm のダイオードレーザー FireFly300w (Oxford Laser 社製) を用い、解析ソフトとして VidPIV (Oxford Laser 社製) を用いた。両可視化実験では高速度カメラとして HAS-D72 (Ditect 社製) を用い、500 fps で撮影を行った。作動流体は、円管体系の可視化実験のみヨウ化ナトリウム水溶液とし流路材料であるアクリルと屈折率を合わせ詳細な可視化を実現している。その他については 45 °C の水 (蒸留水) を用い、配管径 ( $D$ ) を代表長さとするレイノルズ数は 75,000 とした。安息香酸の  $Sc$  数は 360、ローダミン B の  $Sc$  数は 2,000 程度である。

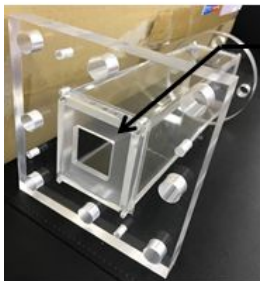


図3 矩形体系試験部

### 矩形オリフィス

- ・厚さ5mm
- ・絞り比  $d/D = 0.6$



図4 矩形体系減肉壁

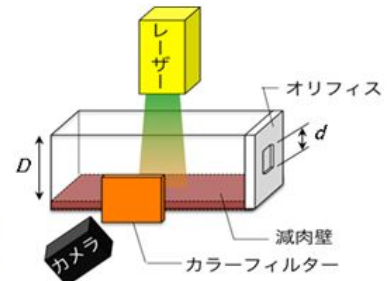


図5 LIF法概略

## 4. 研究成果

図6に円管体系での時間平均軸方向速度分布を示す。オリフィスは図の  $x = 0D$  に位置しており、再付着点は  $x = 2D (=Xr)$  である。図のコンターは軸方向平均速度  $U_m$  で無次元化している。同じく円管体系で得られた減肉分布を図7に示す。最大減肉位置は  $0.6Xr$  で観測された。この位置と減肉の比較的少ない位置である  $0.2Xr$  および  $2.0Xr$ 、減肉量が中位の位置である  $0.4Xr$  および  $1.1Xr$  での計5点について、壁近傍における速度場を取得し、流れ場の詳細な評価を行った。

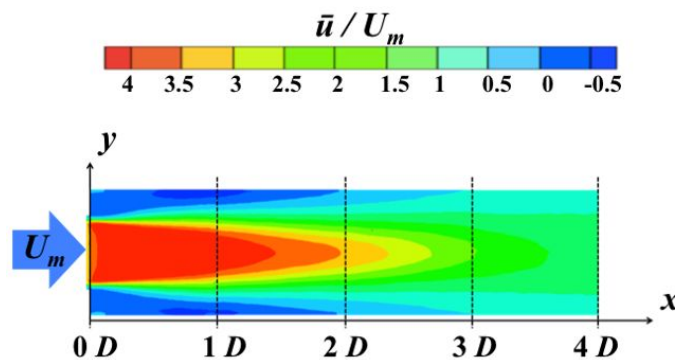


図6 円管体系での時間平均軸方向速度分布

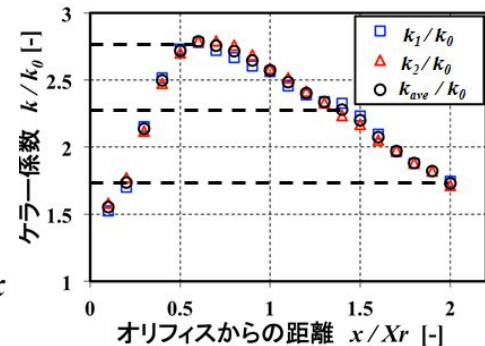


図7 円管体系での減肉分布

速度の変動成分について、ある位置における時間変化にフーリエ変換 (高速フーリエ変換、FFT) を施し周波数解析を行った。0.3 mm 離れた位置における軸方向および径方向速度変動 ( $u'$ 、 $v'$ ) のパワースペクトル密度 (PSD) を、オリフィスからの異なる位置、つまり異なる減肉を示す位置での値についてそれぞれ図8、9に示す。図から、減肉量が異なっても速度変動 PSD 分布の形状には大きな差異は見られず、従ってオリフィス下流における減肉速度は速度変動周波数に依存しない可能性があると考えられる。

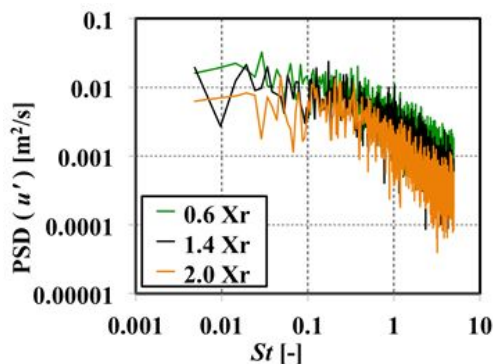


図8 軸方向速度変動 PSD 分布

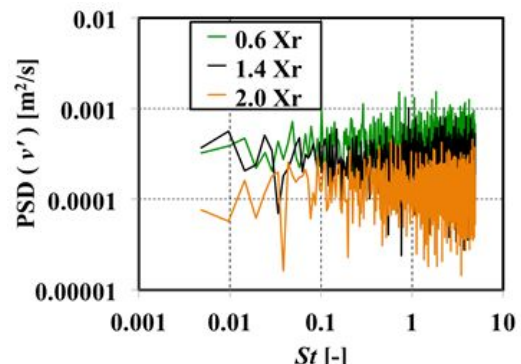


図9 径方向速度変動 PSD 分布

次に、壁近傍の乱流量について詳細に解析を行った。乱流エネルギー $K$ 、軸方向および径方向速度変動成分の rms 値の、壁からの距離 ( $y$ ) に対しての分布をそれぞれ図 1 0、1 1、1 2 に示す。縦軸  $y=0$  が壁面位置を示し、 $y < 0.25$  mm の範囲では計測誤差が大きいため、図では直線で内挿している。減肉量が等しい位置  $x=0.2Xr$ 、 $2.0Xr$  および  $x=0.4Xr$ 、 $1.1Xr$  においてこれらの値が異なっていることから、これらの乱流量は減肉速度と相関していないことが分かる。図 1 3 にレイノルズ応力も含めた全剪断応力 (式 (3) 参照) の分布を示す。図からはほぼ直線分布を取っていることが分かる。壁直近の  $y < 1$  mm では減肉速度の大小との相関は無いが、壁から離れた  $y > 1$  mm では減肉速度と相関していることが分かる。図 1 4 に、減肉分布および  $\tau_y^{0.25}$  の軸方向距離分布を示す。両者とも  $x=0.6Xr$  での値で規格化している。壁面上 ( $y=0$  mm) でのを用いた場合は減肉分布と差異が顕著であるが、それ以外の  $y=1, 2, 5$  mm の場合は減肉分布と  $\tau_y^{0.25}$  の分布がよく一致していることが分かり、オリフィス下流における減肉速度は全剪断応力と相関があることが分かった。ちなみに円管内の発達乱流では、経験式から減肉量は  $\tau_y^{0.474}$  に比例することになるため、この結果はオリフィス下流にのみ適応可能なものである可能性がある。

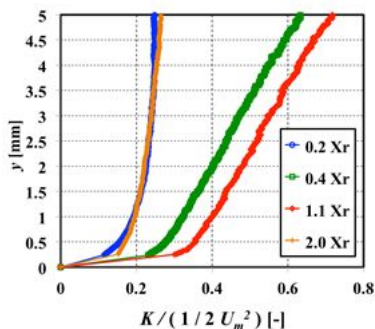


図 1 0 乱流エネルギー分布

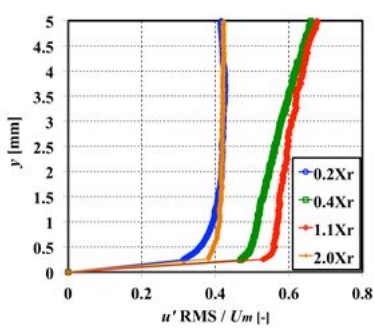


図 1 1 軸方向速度変動 rms

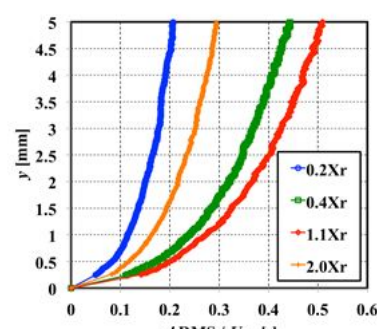


図 1 2 径方向速度変動 rms

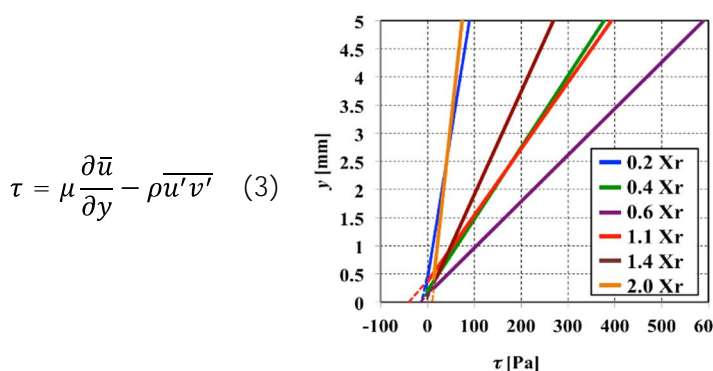


図 1 3 全剪断応力分布

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \quad (3)$$

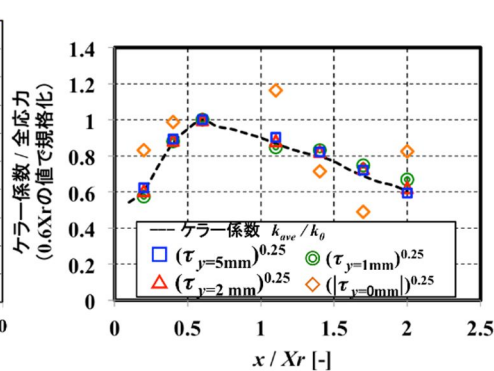


図 1 4 減肉速度と剪断応力の相関

矩形体系での減肉分布と時間平均軸方向速度分布を図 1 5、1 6 に示す。減肉分布は円管体系とほぼ変化はないが、時間平均速度場は再循環領域がないなど、大きな変化がある。減肉速度の大きい  $1.2 D$  位置および小さい  $4.0 D$  位置での壁面近傍速度計測および濃度場可視化を行い諸量を比較した。全剪断応力分布を図 1 7 に示す。円管体系同様、全剪断応力はほぼ直線分布となることが分かる。この全剪断応力の  $0.25$  乗を考えると、これも円管体系と同様、図 1 8 に示すように壁からの距離が  $2$  mm、 $5$  mm と離れるに従い減肉分布と良い相関を見せることが分かる。 $y=0$  mm の値は、直線分布を外挿して得られたものを使用している。

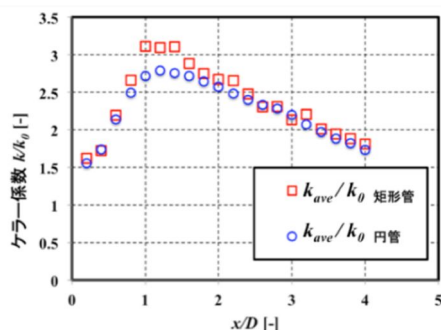


図 1 5 矩形体系での減肉分布

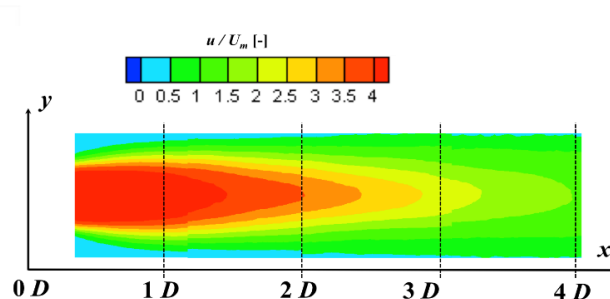


図 1 6 矩形体系での時間平均軸方向速度分布

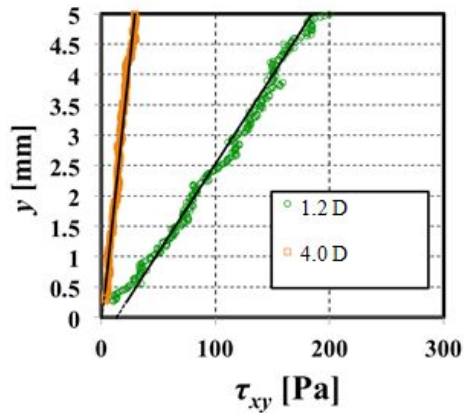


図 1 7 矩形体系における全剪断応力分布

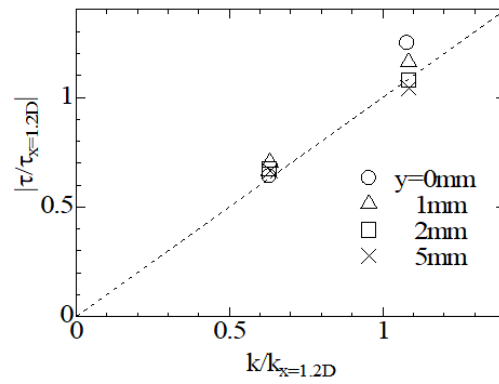


図 1 8 矩形体系における k と の相関

次に濃度場可視化実験で得られた結果について、図 1 9、2 0 に 1.2 D および 4.0 D 位置付近で得られた典型的なスナップショットを示す。減肉速度が大きい 1.2 D 位置では、対流により壁面近傍から沖合へ高濃度の溶出成分が頻繁に輸送されていることが観察された。一方減肉速度が大きい 4.0 D 位置では壁面近傍から沖合いへ溶出成分が輸送されることは少なく、このことが減肉に大きく影響している可能性が考えられる。壁面剪断応力から推定される粘性底層の厚さは両位置とも 0.1 mm オーダーであり、濃度境界層はこれよりも薄いことが考えられる。壁面近傍の高濃度流体の間欠的な巻き上がりは高さ数 mm 程度まで達し、減肉速度の大きい 1.2 D 位置では高頻度な巻き上がりが観測された。このことから、粘性底層・濃度境界層よりも大きな渦構造がスカラー量伝達に寄与している可能性が示唆される。また、この壁面からの巻き上がりは周期的ではなく間欠的な現象であることが観測結果から分かり、壁面からの物質輸送は周期的ではない間欠的な流れに影響を受けている可能性がある。

ん n

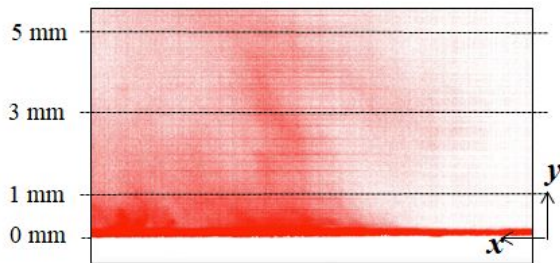


図 1 9 x = 1.2 D における濃度場

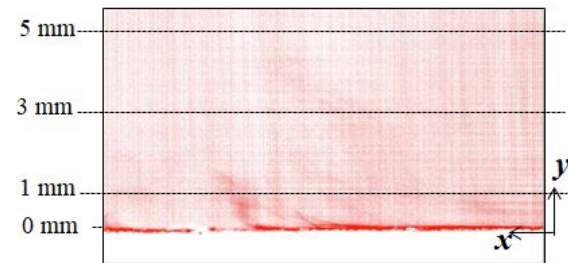


図 2 0 x = 2.0 D における濃度場

壁面からの流体の巻き上げが物質輸送に大きく影響していると考えられるため、流体の渦運動、その指標である渦度に着目をして 1.2 D および 4.0 D 位置付近の流れ場を比較し、図 2 1 に示す。カラーコンターが渦度の大きさを、矢印が速度ベクトルを表している。図の渦度は計測断面における 2 次元速度場から算出したものであるため、実際は当該断面に垂直方向の速度もあり正確性を欠いているが、傾向としては減肉の大きい 1.2 D 位置の方が渦度が大きく速度の時間変動も大きい。両者とも渦度の大きい（例えば  $|\omega| > 0.05$ ）時間帯が間欠的に表れるが、1.2 D 位置の方がより頻繁に表れ、領域内にその占める面積が大きい。頻繁に出現する比較的強い渦度の流れが、溶出成分の沖合への対流物質輸送に影響している可能性が示唆される。

本研究ではオリフィス下流で生じる配管減肉について、加速減肉実験、流れの可視化実験および濃度場可視化実験を行い、高 Sc 数物質輸送について解析を試みた。その結果、オリフィス下流では壁面から数 mm 離れた流体中の全剪断応力の 0.25 乗が減肉分布とよく一致することが分かった。減肉速度が大きい箇所では壁面近傍における高濃度流体の間欠的かつ頻繁な巻き上がりが見られた。当該箇所における粘性底層は 0.1 mm オーダーと見積もられ、濃度境界層はそれよりも薄いと考えられるが、高濃度流体の巻き上がりは瞬間的に高さ数 mm 程度まで達し、粘性底層・濃度境界層よりも大きな渦構造のスカラー量伝達への大きな寄与が示唆された。また、壁面近傍から沖合いまでの間欠的な対流物質輸送が減肉を促進すること、および頻繁に存在する強い渦度の流れが壁面近傍の溶出成分の対流物質輸送に影響している可能性が示唆された。

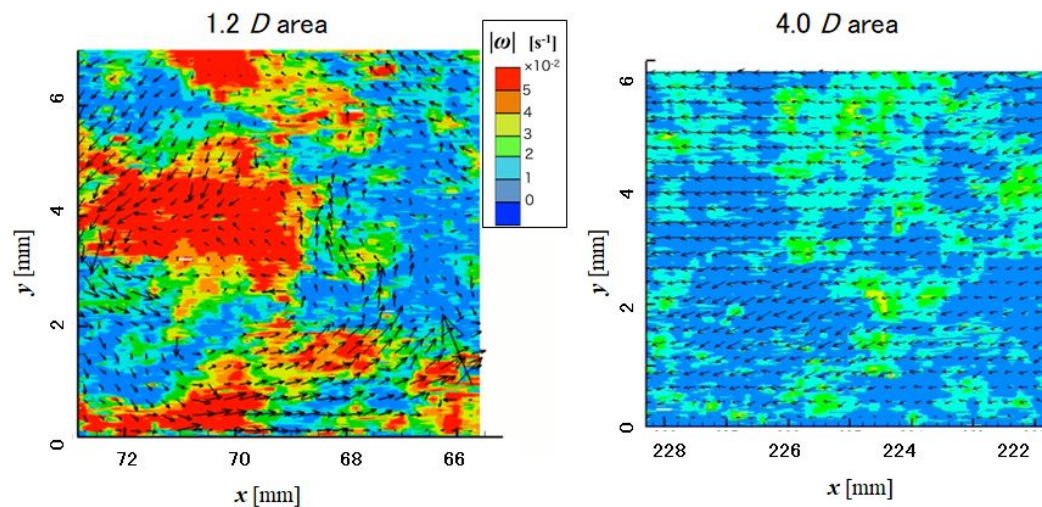


図 2.1 x = 1.2 D 付近および 4.0 D 付近における渦度分布の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T. Kaneko, S. Ebara, and H. Hashizume, EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF TURBULENT NEAR-WALL FLOW ON FLOW ACCELERATED CORROSION BEHIND AN ORIFICE, Proceedings of The 29th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, 2018, ISTP29-153

〔学会発表〕(計 2 件)

Tatsuru KANEKO, Shinji EBARA and Hidetoshi HASHIZUME, Study for influence of frequency characteristic of turbulent velocity fluctuation upon flow-accelerated corrosion, 4th International Conference on Maintenance Science and Technology, 2018  
金子立、江原真司、橋爪秀利、流れ加速型腐食への乱流場速度変動周波数特性の依存性調査、第 23 回 動力・エネルギー技術シンポジウム、2018 年

〔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〕

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

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、研究者個人に帰属されます。