

主論文の要約

論文題目 オリフィス下流およびエルボ管流れにおける
スカラー輸送の数値的研究
(Numerical study on scalar transport
downstream of an orifice and in an elbow
pipe)

氏名 恒吉 達矢

論文内容の要約

原子力発電プラントの炭素鋼配管における配管減肉事象の一因として流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion, 以下 FAC と略す) が挙げられる。FAC とは炭素鋼配管内壁からの鉄イオンの溶解および拡散に流動が何らかの影響を与え、腐食が促進され減肉が進行する現象である。日本国内の原子力発電プラントは高経年化が進んでおり、適切な配管安全管理が求められている。FAC の本質的な流体力学因子は、壁面からの鉄イオンの溶出速度を表す物質移行係数とされている。減肉予測の観点からは、オリフィスやエルボ等の配管要素における物質移行係数と円管発達乱流における物質移行係数の比として定義される形状係数として評価することが有用である。減肉予測の高精度化のためには、形状係数の空間分布も含めて、定量的に正確な値を導出する必要がある。

本研究では、FAC に対する信頼性の高い形状係数の算出方法を明らかにすることを目的として、オリフィス下流およびエルボ管を対象に、数値計算と電気化学実験を実施した。数値計算には、非定常な乱流現象を高い精度で計算可能な Large Eddy Simulation (LES) を用いた。流動場計算と鉄イオンの濃度場を模擬したパッシブスカラーとして温度場計算を行い、壁面の摩擦速度あるいは熱伝達率から形状係数を算出した。電気化学実験では、作用極として点電極を用いた対流ボルタンメトリーにより、物質移行係数を直接測定して形状係数を求めた。点電極のみ電圧を印加した点電極条件での測定だけでなく、点電極の周囲の試験部配管にも電圧を印加した全面電極条件での測定を実施した。LES 計算と電気化学実験の比較、ならびに LES 計算による流動場中のスカラー輸送の解析から、熱伝達率

に基づく形状係数の計算値と全面電極条件での形状係数の測定値が、FAC に対する形状係数として適切であることを明らかにした。求めた形状係数の実機プラント配管への適用性を検証するために、エルボ管を対象に、流動場のパラメータとしてレイノルズ数、温度場のパラメータとしてプラントル数を変えた数値計算を行い、それぞれが形状係数の算出に及ぼす影響を明らかにした。論文は全 8 章で構成され、各章の概要を以下に記す。

第 1 章では、オリフィス下流とエルボ管流れの複雑流動場と FAC に関する既往の研究を調査し、形状係数の算出における課題を示した。数値計算において、熱伝達率に基づく形状係数と摩擦速度に基づく形状係数の同等性は確認されていない。実験に関しては、壁面の伝達境界条件の違いが形状係数の算出に及ぼす影響が明らかではない。また、流動場中のスカラー輸送のメカニズムと、壁面の形状係数の関係も明確ではなく、算出される形状係数の信頼性も十分には検証されていない。これらの課題を踏まえて、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、LES による非定常計算の方法と対流ボルタンメトリーによる電気化学実験の方法についてまとめた。数値計算に関しては、メッシュ解像度の計算精度への影響と、時間平均統計量に対する不確かさを明らかにした。実験に関しては、円管発達乱流の測定結果から、物質移行係数の測定精度が十分に高く、全面電極条件と点電極条件の定量的な比較が可能であることを示した。また、点電極条件における形状係数に対する入口効果の補正法を提示した。

第 3 章では、オリフィス下流を対象として、レイノルズ数が 2.5×10^4 の条件で数値計算と電気化学実験を行い、熱伝達率の計算値に基づく形状係数と全面電極条件における形状係数が、定量的に一致することを示した。オリフィス下流においては、熱伝達率に基づく形状係数と全面電極条件における形状係数に対して、摩擦速度に基づく形状係数と点電極条件における形状係数は低い値を示す傾向があることを確認した。LES 計算で求めた瞬時場を対象とした可視化と乱流熱流束の統計量解析から、オリフィスエッジ下流の剥離せん断層で生じた渦構造が、主流部の低温流体を壁面方向へ運び、壁面の熱伝率の増加に大きく寄与することを明らかにした。

第 4 章では、伝達境界条件の違いが形状係数の算出に及ぼす影響を明らかにするために、レイノルズ数が 1.5×10^4 のエルボ管を対象に、数値計算において全面加熱条件だけでなく、電気化学実験の点電極表面を再現した局所的な加熱条件での温度場計算を実施した。点電極加熱条件で求めた形状係数は、摩擦速度に基づく形状係数とほぼ同一の値を示すことを明らかにした。これは、点電極加熱条件で形成される温度境界層が非常に薄く、熱輸送の大半が壁面近傍の伝導底層内の熱伝導によってなされるためである。一方、全面加熱条件では、壁面全面で温度境界層が形成されるため、伝導底層上部における壁垂直方向の乱流熱流束が熱伝達の増減に対して支配的となる。よって、点電極条件と全面電極条件では流動場中のスカラー輸送のメカニズムが本質的に異なっており、それを反映した壁面の形状係数の値も一致しない。

第 5 章では、レイノルズ数が 4.5×10^4 におけるエルボ管流れを対象に、数値計算と電気化学実験を行い、熱伝達率の計算値に基づく形状係数と全面電極条件における形状係数、摩擦速度の計算値に基づく形状係数と点電極条件における形状係数が、それぞれ同様の空間分布を示すことを明らかにした。また、LES 計算の時系列データの解析結果から、壁面から主流部へと離脱する渦構造が存在しており、その渦により壁垂直方向の強い乱流熱流束が生じることを明らかにした。エルボ腹側出口における形状係数の増加は、流動場全体でスカラー場を発達させ、壁面の伝達現象に乱流スカラー輸送の効果を反映させた結果としてあらわれる。FAC は炭素鋼配管の内壁全面で生じる腐食現象であり、第 4 章の結果とあわせて、実機に対する形状係数予測としては、熱伝達率に基づく計算値および全面電極条件での実験値の使用が適切であると考えられる。

第 6 章では、エルボ管を対象に、レイノルズ数が 4.5×10^4 の条件に加えて、実機プラント配管のレイノルズ数を視野に入れた 1.8×10^5 と 5.4×10^5 の高レイノルズ数条件で流動場と温度場の数値計算を実施し、熱伝達率に基づく形状係数を算出した。レイノルズ数の増加により、エルボ腹側の強い渦が発生する領域は狭まり、壁面の形状係数もわずかに減少することを示した。形状係数の最大値はエルボ管形状によらずエルボ腹側で確認され、レイノルズ数が 5.4×10^5 の条件において、ショートエルボの場合が 2.32、ロングエルボの場合が 1.76、INSS エルボの場合が 1.41 であった。さらにレイノルズ数が高い条件に対して、エルボ管流れのレイノルズ数依存性を考慮すると、形状係数はレイノルズ数が 5.4×10^5 における値から大きくは変化しないと推定される。

第 7 章では、レイノルズ数が 1.5×10^4 のロングエルボを対象に、プラントル数を 1, 5.847, 25, 64 と変えて温度場計算を実施した。熱伝達率に基づく形状係数のプラントル数依存性として、熱伝達の増加が主に熱伝導の増加を要因とする場合には、高プラントル数化は形状係数の増加を抑制する効果があり、熱伝達の増加が主に乱流熱流束の増加を要因とする場合には、高プラントル数化は形状係数の増加を強調する効果があることを明らかにした。プラントル数により算出される形状係数には差異が生じるが、プラントル数が高くなると、その差異は一定値に収束する傾向があることを確認した。実機プラント配管の FAC では、拡散係数としてプラントル数に相当するシュミット数が 100 から 1000 程度である。水の熱伝達としてプラントル数が 5.847 の条件で求めた形状係数は、さらに高いプラントル数条件と比較して、形状係数の空間分布はよく一致しており、定量的な差異もわずかであった。よって、プラントル数が 5.847 の熱伝達計算から求めた形状係数は、実機の FAC に対して信頼性の高い値であると結論付けた。

第 8 章では、各章で得られた結果を総括した。FAC に対する形状係数としては、複雑流動場全体で生じるスカラー輸送の効果を反映する必要がある、パッシブスカラーとしての温度場計算から求めた熱伝達率に基づく値および全面電極条件での物質移行係数の測定値に基づく値が適切であることを結論付けた。また、形状係数のレイノルズ数依存性とプラントル数依存性を検証し、本研究で求めた形状係数が実機条件に対しても適用可能である

ことを示した.