

連成解析による気液二相流中構造物の振動・腐食評価手法の開発-4

乱流に起因する質量移行係数の評価

Development of Evaluation Method on Flow-induced Vibration and Corrosion of Components in Two-phase Flow by Coupled Analysis -4

The evaluation of the mass transfer coefficient induced by a turbulence flow

エネルギー総合工学研究所	上原 靖	Yasushi UEHARA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	内田俊介	Shunsuke UCHIDA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	内藤正則	Masanori NAITOH	Non-member
エネルギー総合工学研究所	白川典幸	Noriyuki SHIRAKAWA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	岡田英俊	Hidetoshi OKADA	Non-member
理化学研究所	王盛	Sheng Wang	Non-member

The pipe thinning phenomenon which is due to flow accelerated corrosion (FAC) is one of the major causes of unexpected troubles at current nuclear power plants. In order to prevent these troubles in the future, it is highly important to understand and analyze FAC mechanism. So, we calculated three dimensional flow to evaluate a turbulence energy and a mass transfer coefficient at pipe surface which is one of the key parameters of corrosion model.

Keywords: Single phase flow, Flow accelerated corrosion, Turbulence flow and Mass transfer coefficient

1. 緒言

軽水炉発電プラントにおいて、高温高圧の冷却水が構造材などに接すると腐食に係る様々な現象を引き起こす。本研究は腐食関連の事象のなかでも特に流れ加速型腐食 (FAC) に注目し、FAC の発生部位として知られている PWR 給水系配管オリフィス部周辺での腐食環境の評価を目的に、配管内冷却水の 3 次元流動解析を行った。さらに、FAC との強い相関が報告されている配管表面近傍での乱流エネルギー分布を求め、相関式を用いて配管壁面からの物質移動係数の算出を試みた。

平成 16 年 8 月 9 日に発生した関西電力株式会社美浜発電所 3 号機の二次系配管の破損事故を念頭に、破損箇所となったオリフィス周辺部の形状および冷却水物性値を模擬するように解析条件を設定した。

配管の破損箇所は、第 4 低圧給水加熱器から脱気器へ行く二系統(A・B 系統)ある復水配管のうち、A 系統復水配管のオリフィス下流近傍である。概要を以下の図 1 に示す。(参考文献[1]参照)

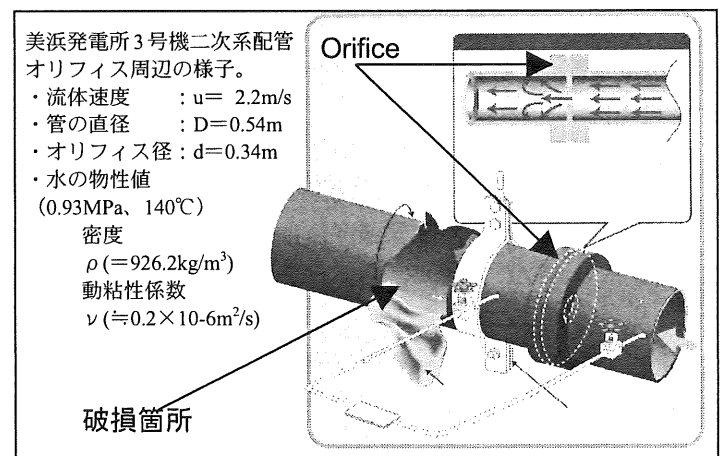


図 1 解析対象

連絡先：上原靖 〒103-003 東京都港区西新橋 1-14-2 新橋SYビル8階, (財) エネルギー総合工学研究所, 電話03-6367-0295, yuehara@iae.or.jp

2. 評価手法

2.1 解析手順

軽水炉発電プラント全体に亘って 3 次元流動解析を

行うことは計算コストが膨大になり現実的ではない。

図2に示すように、システム全体を RELAP5 などの1次元流動解析コードで計算し、注目する箇所について、エネルギー総合工学研究所原子力工学センター所有の3次元流動解析コード PLASHY を用いた2,3次元流動解析を行う。

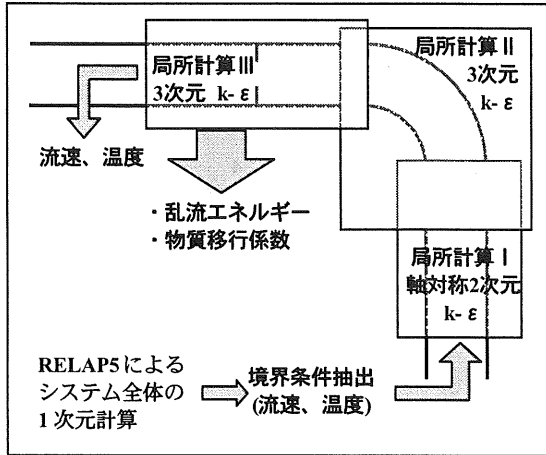


図2 1～3次元流動計算コードを用いた計算手順

2.2 乱流モデル

注目している系では濃度境界層厚さは約 $20\mu\text{m}$ と見積もれる。濃度境界層約 $20\mu\text{m}$ の物質移行を高精度に解析するためには乱流モデルに、LES を用いる必要があるが、LES を用いた計算は計算コストが膨大になる。実用的な運用を目指すには $k-\epsilon$ モデルを用いた解析が望ましいが、格子幅に制限があり十分な細かさでの解析ができない。本解析の条件で $k-\epsilon$ モデルを用いた場合には壁から最近接格子点までの距離は $\sim\text{mm}$ 程度になる。更に壁に接近した位置での速度は壁関数などを用いて求めることになる。

2.3 質量移行係数

質量移行係数 h_m は、スタントン数 St と流速 U との関係式

$$h_m = St \cdot U \quad (1)$$

を用いて求める。スタントン数 St は、LES モデルを用いた解析では Deissler の相関則(参考文献[3,4]参照)

$$\frac{h_m}{U} = St = 0.079 \sqrt{f} Sc^{-3/4} \quad (2)$$

$$f = \frac{2|\tau_w|}{\rho U^2}$$

$$\tau_{i,j} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

でスタントン数をモデル化し、 $k-\epsilon$ モデルを用いた解

析では、Ichikawa の方法 (参考文献[5]参照)

$$St = \frac{S}{(1 + P\sqrt{S})Pr_\tau} \quad (3)$$

を用いてスタントン数をモデル化した。ただし、

$$S = \left(\frac{u_\tau}{U} \right)^2 \quad (4)$$

$$P = 9.0 \left(\frac{Pr}{Pr_\tau} - 1 \right) \left(\frac{Pr}{Pr_\tau} \right)^{-1/4}$$

$$Pr_\tau = 0.9$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 1.12 \quad (140^\circ\text{C } H_2O)$$

u_τ : 摩擦速度 (m/s)

Sc : シュミット数 (-)

Pr : プラントル数 (-)

Pr_τ : 乱流プラントル数 (-)

ν : 動粘性係数 (m^2/s)

α : 温度拡散率 (m^2/s)

μ : 粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

$\tau_{i,j}$: せん断応力

τ_w : 壁面における $\tau_{i,j}$

2.4 LES モデルと $k-\epsilon$ モデルによる計算の比較

$k-\epsilon$ モデルを用いた解析の有効性を確かめるためオリフィス周辺直管部において LES を用いた解析結果と比較し、2つのモデル間の差を見た。LES モデルを用いた計算から得られた約 8.0 秒間の非定常解を時間平均したものと $k-\epsilon$ モデルを用いた計算で求めた定常解と比較した。

再付着点の位置は LES モデルでオリフィス後方 1.08m の位置にあり、 $k-\epsilon$ モデルでは 0.9m であった。質量移行係数を比較した結果、最大値が LES で $3.346 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、 $k-\epsilon$ で $3.43 \times 10^{-3} \text{m/s}$ であった (約 2.5% の差)。また、平均値は LES で $1.43 \times 10^{-3} [\text{m/s}]$ 、 $k-\epsilon$ で $1.575 \times 10^{-3} [\text{m/s}]$ (約 9.2% の差) であり、オリフィス下流における物質移行係数の解析では $k-\epsilon$ モデルが十分実用的であるといえた。

3. オリフィス周辺の3次元流動解析

前節の結果を受け $k-\epsilon$ モデルを用いた流動解析を行った。図3に示す体系を用いて表1に示す解析条件で3次元流動解析を行った。オリフィス流入時に流れの3次元構造を持たせるためにオリフィス上流に曲り管を配し、さらに流入時に旋回成分 (主流成分の 25% の大きさで時計回りの旋回成分) を与えた。

表1 主な解析条件

格子分割	53×53×269 (3次元 BFC)
壁面近接格子点距離	0.001m
入口	
流入速度 (主流成分)	$u=2.2\text{m/s}$
乱流エネルギー	$k=0.0726\text{m}^2/\text{s}^2$
乱流エネルギー散逸率	$\varepsilon=0.08522\text{m}^2/\text{s}^2$
出口	自由流出
壁面	速度対数則
乱流モデル	k-εモデル (※)

(※) k-εモデル係数

C_1	C_2	C_3	C_μ	σ_k	σ_ε	σ_T
1.44	1.92	0.0	0.09	1.3	1.0	1.0

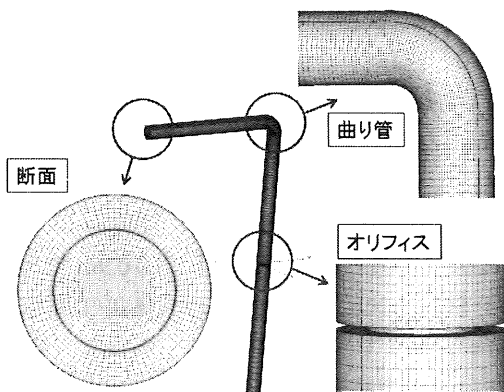
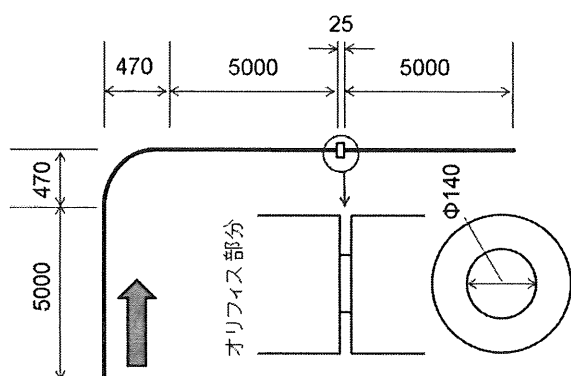


図5 計算体系

図6および図7に、PLASHYで求められたオリフィス下流部での3次元質量移行係数の分布を示す。本図ではオリフィス下流域での再循環領域で高い乱流エネルギーが発生し、質量移行係数が大きくなるため、局所的な流動条件によりFACが加速される。

謝辞

本発表は経済産業省の提案公募事業「革新的実用原子力技術開発費補助事業」“連成解析による気液二相流中

構造部物の振動・腐食評価手法の開発”において開発した平成19年度成果の一部である。

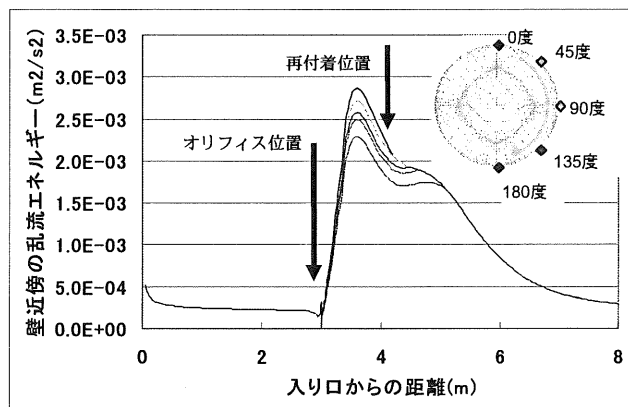


図6 オリフィス下流3次元乱流エネルギー分布

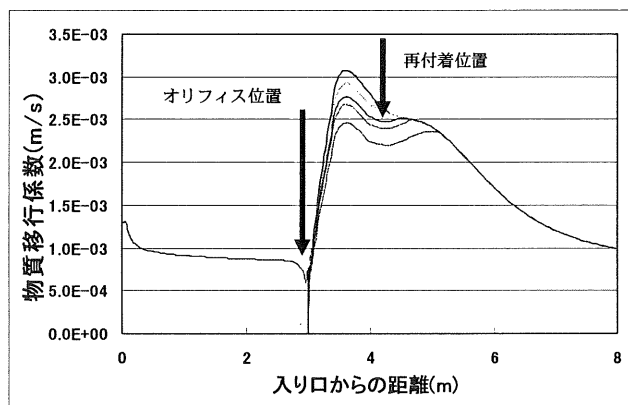


図7 オリフィス下流3次元質量移行係数分布

参考文献

- [1] 「美浜発電所3号機二次系配管破損調査(流況解析)報告書」平成16年12月13日 (独)原子力安全基盤機構 日本原子力研究所
- [2] 「腐食センターニュース No.032」(2004年12月1日)
- [3] R. G. Deissler, "Analysis of Turbulent Heat Transfer, Mass Transfer, and Friction in Smooth Tubes at High Prandtl and Schmidt Number", NACA Reports, 1210, 1955
- [4] K. Asano, "Mass transfer. From fundamentals to modern industrial applications", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006
- [5] N. Ichikawa. et.al. "Precise Evaluation of Corrosion Environments of Structural Materials under Complex Water Flow Condition, (I) Estimation of Corrosion Potentials in Reactor Pressure Vessel Bottom of BWRs", Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 8, p. 583-590 (August 200)