

玉形弁流れの LDV 計測と非定常 RANS 計算

LDV measurements and URANS calculations downstream of a globe valve

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)*¹ 中村 晶 (Akira Nakamura)*¹
 長屋 行則 (Yukinori Nagaya)*¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase)*¹

要約 流れ加速型腐食が発生しうる配管部位の1つに玉形弁がある。しかし、これまで研究対象とされることはあまりなく、流れ場もあまりよくわかっていない。そこで、玉形弁下流の流れ場を明らかにするためにレーザドップラ流速計 (LDV) により流速分布を計測した。玉形弁はケージ付きタイプのもを採用し、配管径 50mm で管断面平均流速を 3.54m/s に設定した。また、数値シミュレーションを行い、玉形弁のような複雑流路において定量的に流れ場を評価する方法について検討を行った。数値シミュレーションでは標準 $k-\epsilon$ モデルと BSL-RSM の 2 つの乱流モデルを用いて非定常 RANS 計算を行い、時間平均処理により計算結果を評価した。LDV 計測によれば、流れ方向成分の流速分布は管中心で遅く、管壁付近で速くなるような分布になっていた。特に、弁下流の流路下側で、流れが加速されていた。また、鉛直方向成分の流速分布から、弁下流では双子の渦を持つような旋回流が発生していることが明らかになった。一方、玉形弁の流れ場を定常 RANS で計算すると、一意な解に収束せず解が変動し LDV 計測値を再現できなかったが、非定常 RANS 計算の結果を時間平均処理することにより、時間平均流れ場を精度よく再現することができた。この計算評価方法は、実機発電所の配管内流れのように、複雑流路を持つ流れ場の評価方法として有用であると考えられる。

キーワード 流れ加速型腐食, 玉形弁, LDV, 非定常 RANS 計算, 旋回流

Abstract A Globe valve is one of the possible piping geometries which cause flow accelerated corrosion (FAC). Studies on FAC related to a globe valve are, however, few and the flow field is not well understood. Hence, to understand the flow field downstream of the globe valve, velocity profile was measured using laser Doppler velocimetry (LDV). In addition, numerical simulations were performed and a method for quantitative simulation for such a complicated flow path as a globe valve was investigated. The diameter of the downstream pipe was 50 mm, and the cross-sectional average velocity was set to 3.54 m/s. In the numerical simulation, unsteady RANS calculations were performed employing standard $k-\epsilon$ and BSL-RSM models for turbulence models, and the results were evaluated by time-averaging procedure.

From the LDV measurements, axial velocity near the center axis of the pipe was lower than that near the pipe wall, especially around the lower wall near the outlet of the valve. Transversal velocity profiles revealed the existence of the swirl flow with twin vortices in the downstream of the globe valve. A steady RANS calculation of the globe valve did not converge to a unique result and fluctuated with iteration steps. On the contrary, time-averaged results of unsteady RANS calculations agreed well with velocity profiles measured by LDV. This evaluation method could be useful to simulate flows in a complicated geometry like pipe flows in the nuclear power plant.

Keywords flow accelerated corrosion, globe valve, LDV, URANS, swirl flow

1. はじめに

原子力発電所において重要な問題のひとつに、流れ加速型腐食 (FAC: Flow accelerated corrosion) がある。FAC は配管を減肉させ、時として配管破断を引き起こしうる。FAC は磨耗などの機械的な力に

よって生じるのではなく、一種の腐食現象であるといわれている。配管母材から壁面近傍の濃度境界層へ鉄イオンが溶出し、主流中へ輸送されるプロセスが、流れ場の局所的な乱れにより加速されるというのが FAC のメカニズムとされている。FAC による配管の腐食速度は環境 (温度, pH, 溶存酸素量など

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

の水質), 流れ場 (流速, 配管形状), 材料 (クロム, モリブデン, 銅などの含有量) などの種々の影響因子によって支配される⁽¹⁾.

FAC が発生しやすい部位としては, 流路断面積の変化を伴うようなオリフィス, 弁, レデューサ, デイフューザなどや, 流れの方向が変化させられるようなエルボ, 分岐・合流配管などが挙げられる⁽²⁾. 過去の配管減肉事故事例をみると, 1986 年米国サリー 2 号機の配管破損事故⁽³⁾ではエルボ部で, 2004 年関西電力美浜発電所 3 号機の配管破断事故⁽⁴⁾ではオリフィス下流で減肉が生じていた.

日本機械学会では 2005 年に「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格」⁽²⁾を制定し, FAC と液滴衝撃エロージョンによる配管減肉に対して, 民間規格として統一した管理方法を定めている. また, FAC に関しては国内外で環境因子, 流れ因子, 材料因子のそれぞれに対し研究されており, 流れ因子に関する国内の研究動向を見ても多数行なわれている⁽⁵⁾. (株) 原子力安全システム研究所 (INSS) でもこれまで FAC における水質や材料因子の影響⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 流れ因子の影響⁽⁸⁾について取り組んできている. 特に流れ因子の影響に関しては, オリフィスを単純な配管形状として取り上げ, 腐食速度測定実験, レーザドップラ流速計 (LDV: laser Doppler velocimetry) による流れ場の計測, 粒子画像流速測定法 (PIV: Particle image velocimetry) による流れ場の可視化, 定常 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 計算および LES (Large eddy simulation) による数値解析などに取り組んできた^{(8)~(12)}.

FAC 研究で取り上げられる配管形状は, オリフィスやエルボなど比較的単純な場合が多い. これは, 過去に減肉事故事例があったことだけでなく, 単純な形状であるため, 得られた知見を一般化しやすいからと考えられる. しかし, プラントにおいては, 例えば弁のように, FAC を生じうる部位として認識されているものの研究対象としてあまり取り上げられていない配管形状が存在する. 弁を対象とした FAC 研究事例は, 公開文献の範囲では数値シミュレーションによるもの⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾があるが, 流れ場の計測, 腐食速度測定などはまだ見られない. 研究事例が少ない理由として, 弁は流路構造が複雑であるため研究結果を一般化しにくいことが考えられる. しかし, プラントの配管内の流れ場はオリフィスやエルボ, 弁などが組合わされて構成されており, 実機評価を

行なう上では弁の影響評価は避けて通れない. よって, 玉形弁を対象とした FAC 研究が必要となる.

そもそも, 玉形弁に関する研究自体あまり行われていない. 玉形弁に関するこれまでの研究事例として, 高圧酸素流れに関する 2 次元数値計算⁽¹⁵⁾や, キャビテーションに関連した実験と数値計算⁽¹⁶⁾などが行われているが, 流れ場そのものを詳しく調べた研究例は見当たらない. そこで本研究では, 玉形弁下流の流れ場の構造を明らかにすることを目的として玉形弁を対象とした実験と数値シミュレーションを実施した⁽¹⁷⁾. 実験では玉形弁を模擬した試験体を用い, LDV により玉形弁下流の流速分布を計測した. また, 数値シミュレーションにより玉形弁流れの再現を目指した. 特に, 玉形弁のような複雑な形状において, 数値シミュレーションにより定量的に流速分布等の流れ場を評価する方法について検討を行う.

2. 実験方法

2.1 ケージ付き玉形弁

本研究で取り上げる玉形弁はケージ付きのタイプのものであり, 流量を制御する場合において多く用いられている. 一般的な玉形弁は, 弁箱内が上部水室と下部水室とに分けられた S 字の流路となっており, 上・下部水室の間にある弁座に弁体押し付けることで弁の開閉を行なう. 玉形弁は締め切り性能がよく, 短いリフトで全開できる等の長所があるが, 流量調節の性能を高めるためには, 弁体形状を変更しケージを付けた玉形弁が用いられている. ケージ付き玉形弁の特徴としては, 微開等の流量調節がしやすい, 大容量・高差圧の場合にも適用可能, キャビテーションが発生しにくい等が挙げられる. また, ケージ窓の形状を変えることで弁開度と流量の特性を変更することも可能となる⁽¹⁸⁾.

2.2 実験装置

図 1 に実験装置の概要を示す. 実験装置はタンク, 循環ポンプ, 試験体で構成されるループとなっており, 窒素ガスによりシステムを加圧することができる. また, この装置により 150°C の高温水環境で腐食実験も行うことができる⁽⁸⁾. 試験部には図 2 に示すような玉形弁試験体を取り付けた. 主要な寸法は図 3 に示す通りである. 試験体は上流管, 玉形弁本体

(ケージ付き), および下流管により構成される。配管の内径は $D = 50\text{mm}$ の円管である。配管内流速をLDVにより計測できるように試験体はアクリル製であり, 玉形弁本体, および弁上流・下流の配管の流路形状はアクリルブロックから削りだして作成している。上流管および下流管の長さはそれぞれ $3.6D$ および $11D$ である。玉形弁は, 弁本体, 8個の穴が付いたケージ, および蓋で構成されている。ケージの配置は図4に示すように, ケージ窓の間の柱が流れ方向 x 軸に正対するように配置した。ケージが付いてない玉形弁の場合, 圧力の高い上流側を弁体で押さえ込むようにするため, 流れ方向は下部水室から上部水室へ向かうのが一般的である。一方, ケージ付き玉形弁の場合, 流れ方向は上部水室からケージ穴を通り下部水室へ向かうのが一般的であり, 本研究においてもこれに従っている。

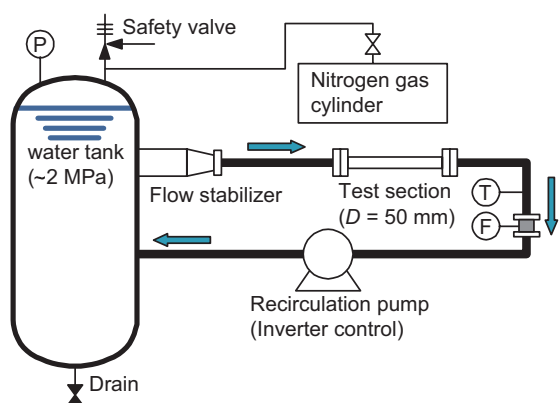


図1 実験装置の概要

流速はLDV (カノマックス製 Smart LDV, Model 8739-S) を使用して計測した。粒子には平均粒径 $4.1\ \mu\text{m}$ のナイロン粒子を用い, 計測サンプル数はおよそ50,000とした。座標系は, 図2に示す通り, x, y, z 方向をそれぞれ, 流れ方向, 水平面半径方向, 鉛直方向とした。座標原点は上流と下流とで別々とし, 上流管と下流管のそれぞれと玉形弁本体との接合部とした。作動流体は室温(約 20°C)の水で流量を $Q = 25\text{m}^3/\text{h}$ (管断面平均流速 $U_{ave} = 3.54\text{m/s}$, $Re = 1.76 \times 10^5$)に設定した。また, 系統内を窒素により約 0.25MPa の圧力に加圧することで弁内部でのキャビテーションの発生を防いでいる。

3. 数値計算方法

数値計算には ANSYS 社の汎用熱流体解析ソフトウェア CFX 11 を使用した。座標系は実験の場合と同じである。表1に計算条件の詳細を示す。計算領域の長さは約 $20D$ で, 流入境界は弁上流 $2D$, 流出境界は弁下流約 $15D$ に設置した。乱流モデルには, 標準 $k-\varepsilon$ モデル, shear stress transport モデル (SST モデル), Baseline レイノルズ応力モデル (BSL-RSM) の3種類のRANS型乱流モデルを用いた⁽¹⁹⁾。BSL-RSMはレイノルズ応力方程式モデル (RSM: Reynolds stress model) の一種であり, Menter⁽²⁰⁾によって提案された Baseline $k-\omega$ モデルおよび SST モデルをRSMに拡張したものである。通常のRSMでは粘性消散 ε の輸送方程式を解くが,

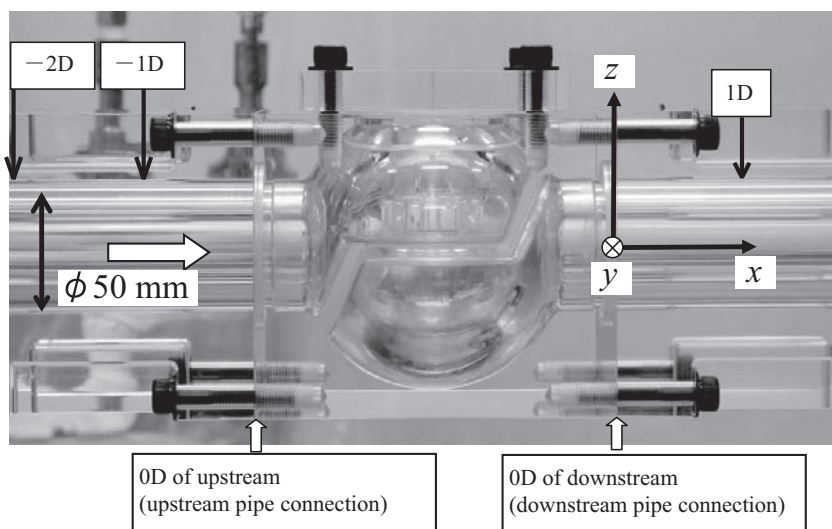
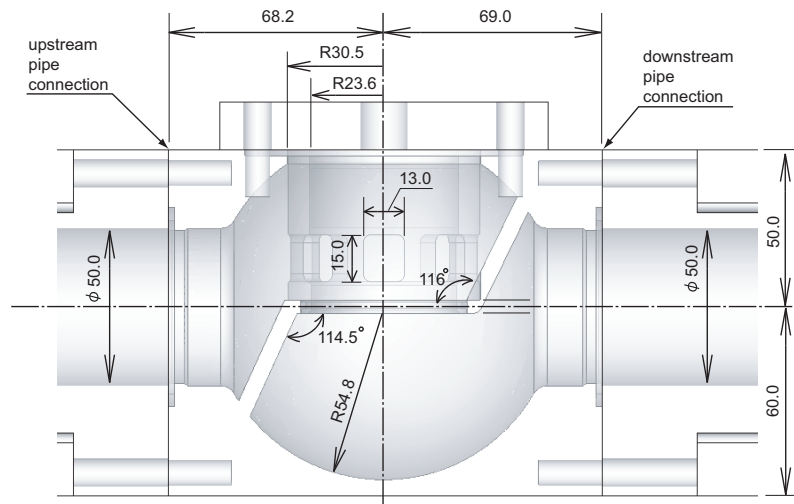
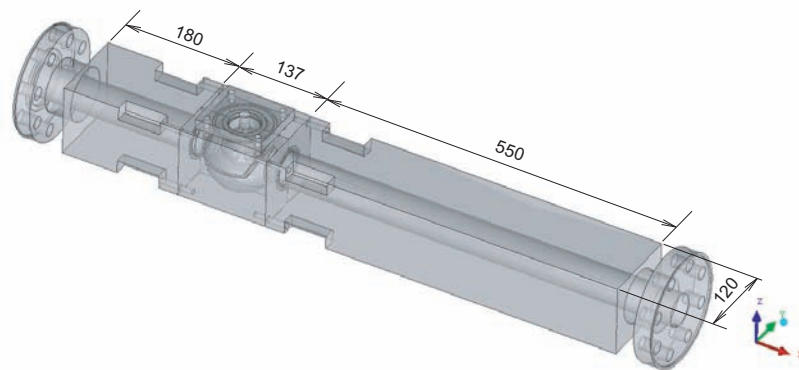


図2 ケージ付き玉形弁試験体の概観



(a) 中央断面（流れ方向-鉛直方向断面）での寸法（単位 mm）



(b) 各試験体の長さ（単位 mm）

図 3 玉形弁の寸法詳細

BSL-RSM は壁面近傍では局所スケールの渦度である ω の輸送方程式を解き、壁面から離れた主流においては ϵ 輸送方程式を解くことで、より精度が高く、かつ安定した計算が行えるようになっている。

本計算で用いた計算メッシュを図 5 に示す。また、表 2 にメッシュ数を示す。図 5 (a) に示すように、上流管および弁本体ではテトラメッシュ（四面体メッシュ）、下流管ではヘキサメッシュ（六面体メッシュ）を使用している。一般に、解像度とメッシュ増加数を考慮すると、ヘキサメッシュの方が計算負荷を低減できるが、弁本体のように形状が複雑な部分では、テトラメッシュの方が作成が容易である。また、本研究で注目するのは弁下流の流れ場であるので、下流管のみでヘキサメッシュを使用し解像度を高めた。上流管および弁本体のテトラメッシュは弁出口に近づくにつれ密になり、出口付近で一辺約 3mm 程度である。また、図 5 (b) に示すように、

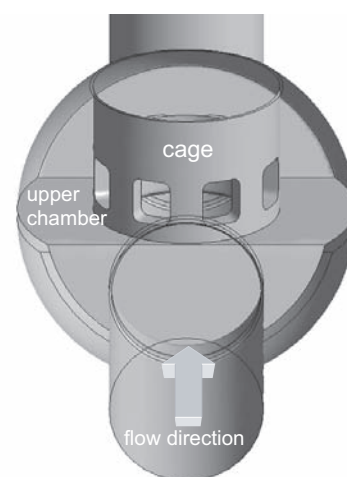


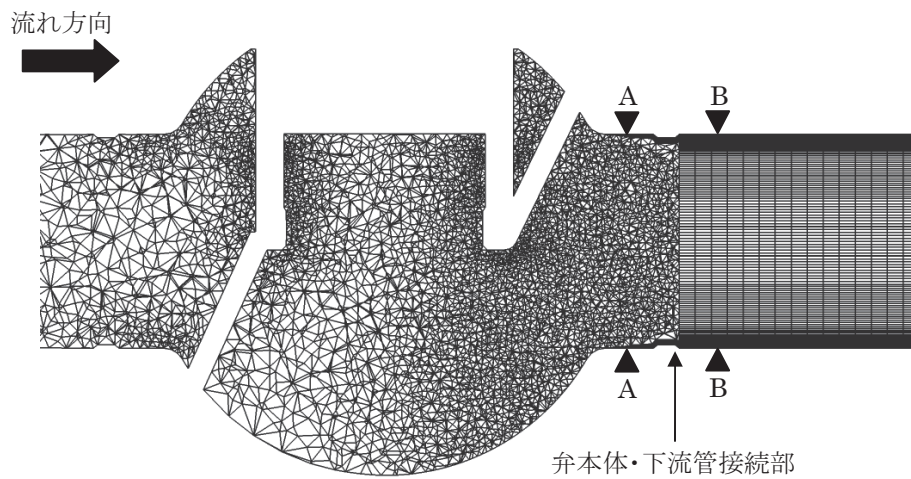
図 4 ケージの配置

表1 計算条件

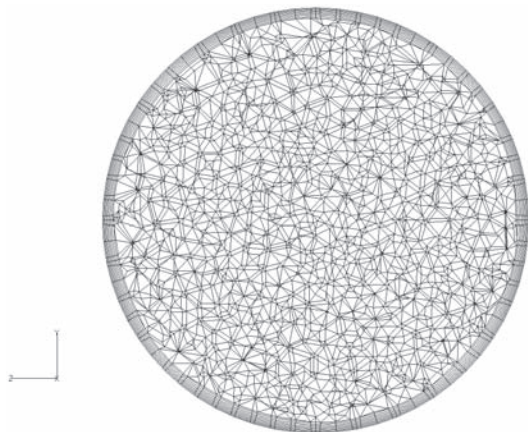
| 作動流体 | 水 (25℃) | | |
|-------|---------------------|-------------------------------------|--|
| | 密度 | 997kg/m ³ | |
| | 粘性係数 | 8.899 × 10 ⁻⁴ Pa·s | |
| 乱流モデル | 標準k-ε, SST, BSL-RSM | | |
| 時間 | 解法 | 2次精度オイラー後退 | |
| | タイムステップ | 0.05s | |
| 対流項差分 | 2次精度風上差分 | | |
| 境界条件 | 流入 | 25m ³ /h (3.54m/s), 一様流速 | |
| | 流出 | 圧力境界. (平均静圧 0Pa) | |
| | 壁面 | 壁関数 (一般化対数則) | |

表2 メッシュ数

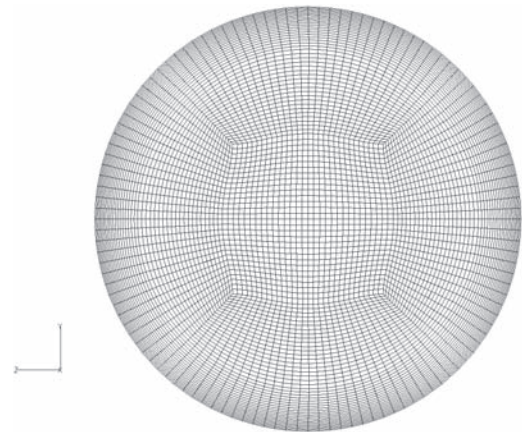
| 上流管および弁本体 | | | 下流管 | 合計 |
|-----------|-------|-------|-------------------|-----------|
| テトラ | ピラミッド | プリズム | ヘキサ (円管断面メッシュ数) | |
| 638,681 | 637 | 4,582 | 1,140,000 (5,700) | 1,783,900 |



(a) 中央断面 (流れ方向-鉛直方向断面) のメッシュ形状



(b) 円管断面メッシュ形状, (a) のA-A断面



(c) 円管断面メッシュ形状, (a) のB-B断面

図5 計算メッシュ

弁本体出口付近では壁面近傍にメッシュが沿うようにプリズムメッシュを使用しており、壁面から約1.5mmの厚さに10メッシュ程度の層を作成している。一方、下流管はヘキサメッシュで構成されており、O(オー)グリッド・トポロジーを使用することで壁面にメッシュが沿うようにしている。壁面から第1格子点では y^+ が100以下になることを確認している。

計算は定常の場合と非定常の場合で行なっている。通常、RANS型乱流モデルは定常計算を想定しているが、流路が複雑で非定常性の強い流れ場の場合、安定した収束解が得られにくい傾向にある。例えば、形状に由来する周期的もしくは非定常的な渦構造が存在する場合、計算解は1つの解に収束することなく、計算の反復回数に応じて変動する可能性がある。しかし、非定常性が強い流れ場といえども、実用的には流れ場の時間平均的な挙動を把握することが重要である場合が多い。よって、本研究では非定常RANS計算を行ない、その結果を時間平均処理をすることで、時間平均値を求めることにした。

4. 実験結果および計算結果

4.1 LDVによる流速分布計測結果

図6は玉形弁下流の流速分布を示したものである。流速は流れ方向(x 方向)成分であり、分布は管中心を通る鉛直線上のものである。LDVにより取得された流速分布は、50,000回の計測サンプルを平均した値であるため、時間平均値を示すことになる。玉形弁の上流 $2D$ では、流速分布は管中心軸に対して対称であるが、弁下流 $1D$ では非対称になっている。

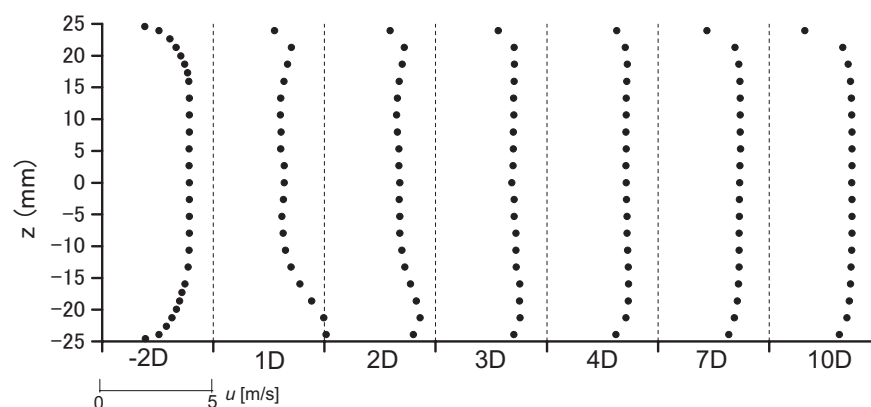


図6 LDV計測による流れ方向成分の時間平均流速分布、鉛直方向線上

弁下流 $1D$ では流路下部($z = -25\text{mm}$)付近で流速が 5m/s と極大となり、加速されていることがわかる。流路上部付近($z = 25\text{mm}$)でもわずかに流速分布が極大値を持つ。一方、管中心軸付近では流速が低下しており、弁上流 $2D$ で 3.92m/s であるのに対し、弁下流 $1D$ で 3.20m/s と2割程度低下している。また、 $z = -10\text{mm}$ から $z = 15\text{mm}$ にかけて流速はほぼ一定である。非対称な流速分布は下流に進むに従い徐々に平坦になる。弁下流 $10D$ では上流 $2D$ の分布にだいぶ近づいているが、壁面付近で非対称性が若干残っている。

図7は水平半径方向線上の流速分布である。弁下流 $1D$ では図6の鉛直線上の分布と同様、壁面近傍で極大値を持つ。管中央部分($y = -10\text{mm} \sim 13\text{mm}$)では平坦な分布になっているが、管中心で若干速度の盛り上がりがある。流速分布は管中心軸に対して若干非対称である。下流に進むに従い流速分布は平坦になるが、弁下流 $10D$ でも壁面近傍で非対称性が残る。試験体形状を考えた場合、管中心軸を通る鉛直断面で流路を分割すると、それぞれは対称な形状であり、水平半径方向線上の流速分布は対称になるのが妥当である。また、瞬時には流れが偏っていたとしても、ある程度時間をかけて計測を行えば、軸対称な分布となるはずである。しかし、計測結果では流れに若干偏りがみられ、おそらく試験体形状やケージ配置のわずかな非対称性が影響していると考えられる。

図8は鉛直方向成分の流速分布を示したものである。分布は水平半径方向線上のものである。弁下流 $1D$ では、管中心付近において流れは下方へ向かうが、 $y = \pm 10\text{mm}$ を境に壁側では流れは上昇している。分布はほぼ左右対称であり、下流に進むに従い

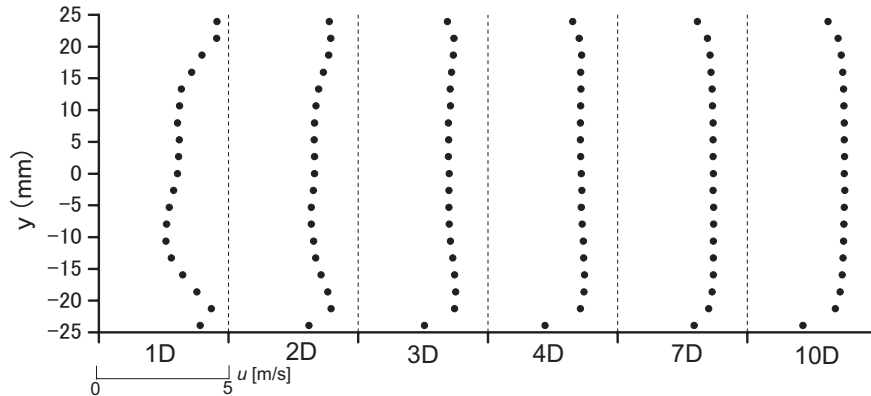


図7 LDV 計測による流れ方向成分の時間平均流速分布，水平半径方向線上

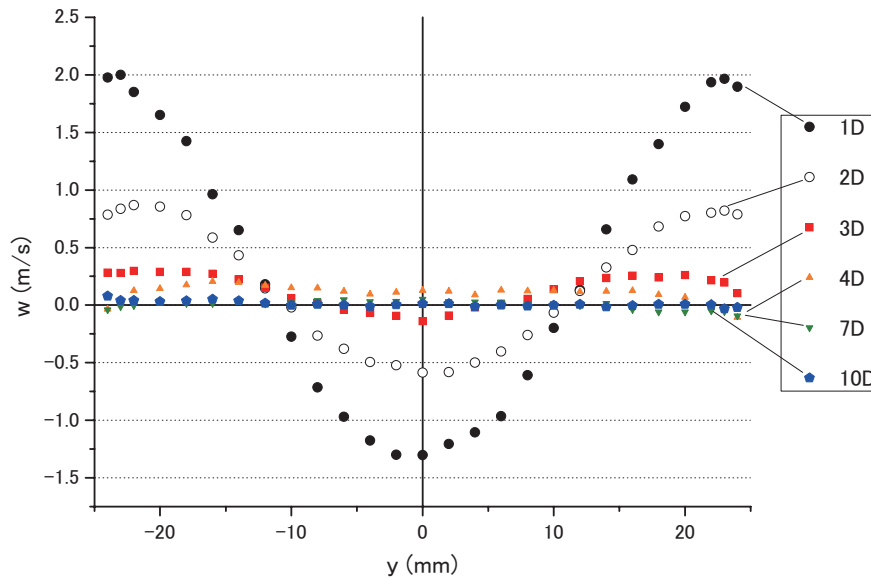


図8 LDV 計測による鉛直方向成分の時間平均流速分布，水平半径方向線上

速度が低下し，弁下流 7D でほぼ消失している。

4.2 定常計算と非定常計算結果

図9に，3種類の乱流モデル（標準 $k-\epsilon$ ，SST，BSL-RSM）を用いて定常計算を行なった場合の，流れ方向流速分布を示す。LDV計測データと計算値とを比べると，弁下流1Dでは両者はかなり異なった分布となっている。流速分布は下流に進むに従い徐々に測定値に近づき，弁下流7Dでかなり測定値に近い値を取るようになる。どの乱流モデルもLDV計測データと一致しておらず，乱流モデルの差は見られない。計算結果は反復回数200ステップの後のものであるが，図10に示すように200ステップでは

計算の残差はほぼ一定で推移している。その後計算反復回数を200ステップ追加し，400ステップ後の計算結果をLDV計測データと比較しても，ほとんど改善は見られなかった。よって，これ以上反復回数を増やしても残差が低下し，より収束した解が得られる可能性は低く，図9で示すような計算解が反復回数ごとに変動していくものと考えられる。このように，定常RANS計算では，弁のような複雑流路の時間平均流れ場を再現することは難しい。

そこで，変動する計算解を多数用いて平均化することで，時間平均流れ場を再現できると考えた。具体的には，非定常RANS計算を行い時間平均処理を行う方法を本研究では提案する。このようにして得られた計算解が図11～図13である。時間平均処理

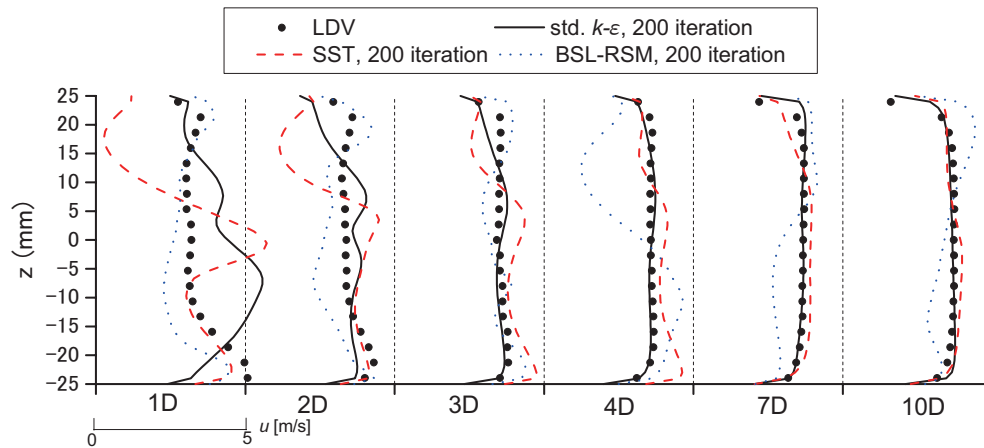


図9 定常 RANS 計算による流れ方向成分の流速分布，鉛直方向線上

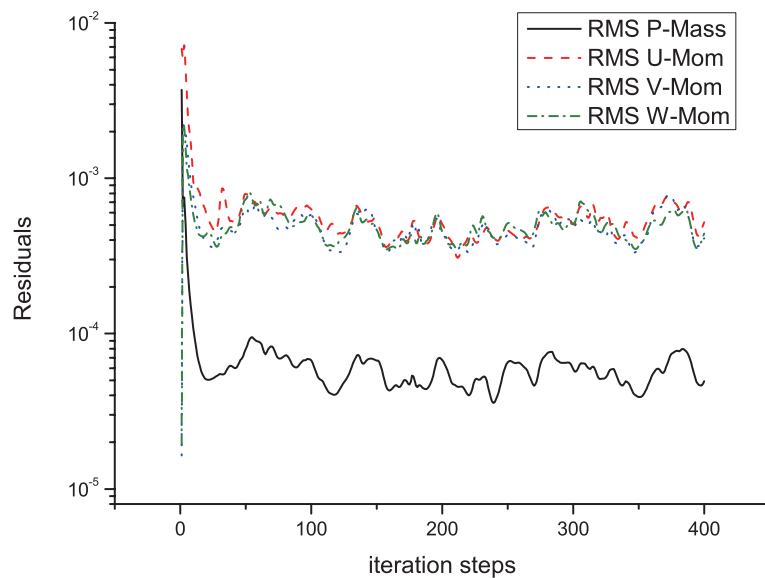


図10 標準 $k-\epsilon$ における計算反復回数（イタレーション）ごとの計算残差

におけるサンプル時間は 100 タイムステップ（5 秒間）である。定常 RANS 計算の場合と比べると，計算結果は LDV 計測データを良く再現するようになっている。図 11 では弁下流，壁面近傍の流速の増加や，管中心でへこむような流速分布も定量的に再現されている。標準 $k-\epsilon$ モデルと BSL-RSM では，若干 BSL-RSM の方が LDV 計測データに近い。弁下流では強く非等方的な乱流場なので，一様等方性を仮定して作成された標準 $k-\epsilon$ モデルよりも，ある程度非等方性を考慮している RSM の方がより再現精度が高かったと考えられる。図 13 は鉛直方向成分の流速分布（水平半径方向線上）である。弁下流 1D で標準 $k-\epsilon$ モデル，BSL-RSM とともに LDV 計測

データからずれているが，定性的には流速分布を再現している。標準 $k-\epsilon$ モデルの流速分布は下流に行くに従いすぐに平坦になるが，BSL-RSM は弁下流 2D および 3D でもより LDV 計測データに近い計算結果となっている。

以上，非定常 RANS 計算を時間平均処理することにより，時間平均的な流れ場を精度よく再現できることが確認された。乱流モデルの違いは，鉛直方向成分の流速分布の再現性という点で標準 $k-\epsilon$ モデルよりも BSL-RSM の方が若干良い結果となった。

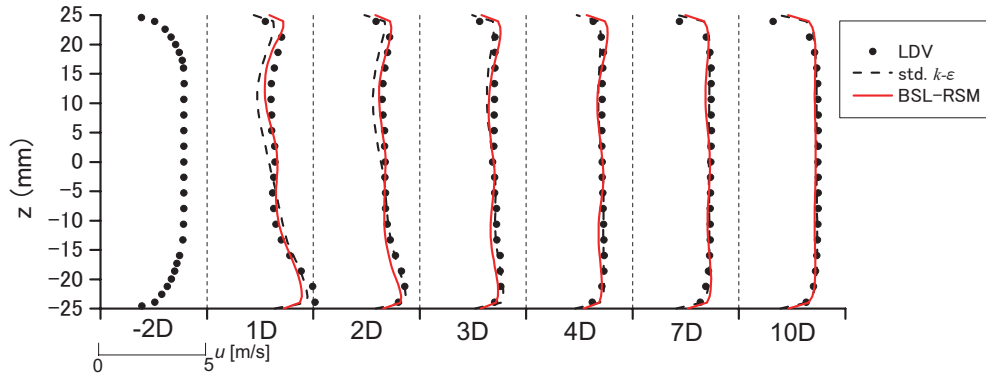


図 11 非定常 RANS 計算による流れ方向成分の時間平均流速分布，鉛直方向線上

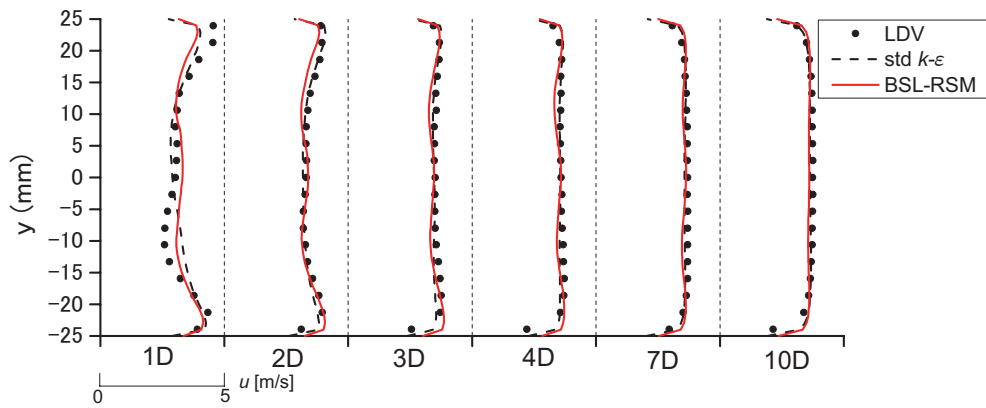


図 12 非定常 RANS 計算による流れ方向成分の時間平均流速分布，水平半径方向線上

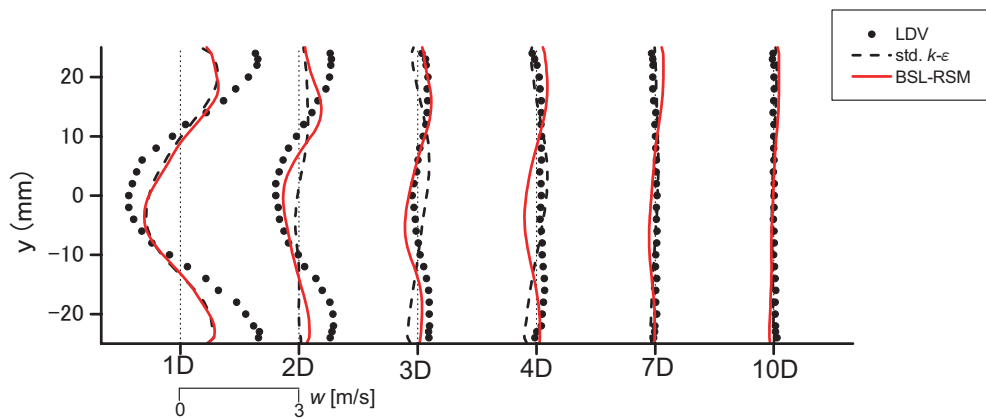


図 13 非定常 RANS 計算による鉛直方向成分の時間平均流速分布，水平半径方向線上

4.3 計算による流れ場の様子

図 14 は非定常 RANS 計算 (BSL-RSM) による時間平均流速分布を示したものである。描画した断面は、管中心軸を通る中央断面 (流れ方向-鉛直方向断面) である。流れは玉形弁内上部水室からケージ窓を通り下部水室へ流れ、下部水室に留まり循環するものと、そのまま直接下流へ流れ出るものに分かれる。流速は玉形弁内のケージ窓から下部水室へ抜ける箇所や、弁出口の流路下部で高い値となっている。弁出口の流路下部 (図 14 中の赤丸内) での高流速は、図 11 に示すように LDV 計測でも確認されて

いる。弁下流では流速ベクトルは斜め下方へ向かっているが、弁下流 $3D$ になると流速ベクトルはほぼ流れ方向に平行になっている。

図 15 は弁下流の各断面における断面内の流れの様子である。弁出口 ($0D$) で双子の渦が形成されており、中央では下降し、管壁で上昇している。ただ、左右対称の渦というよりは、若干斜めに傾いている。弁下流 $2D$, $4D$ と進むに従い対称性は悪くなり、弁下流 $7D$ になると単一の旋回流となっている。ここで示している時間平均場はサンプル時間 100 タイムステップ分のものであるが、さらに計算を進めて時間平均処理すれば、より渦の対称性が明確に現れる

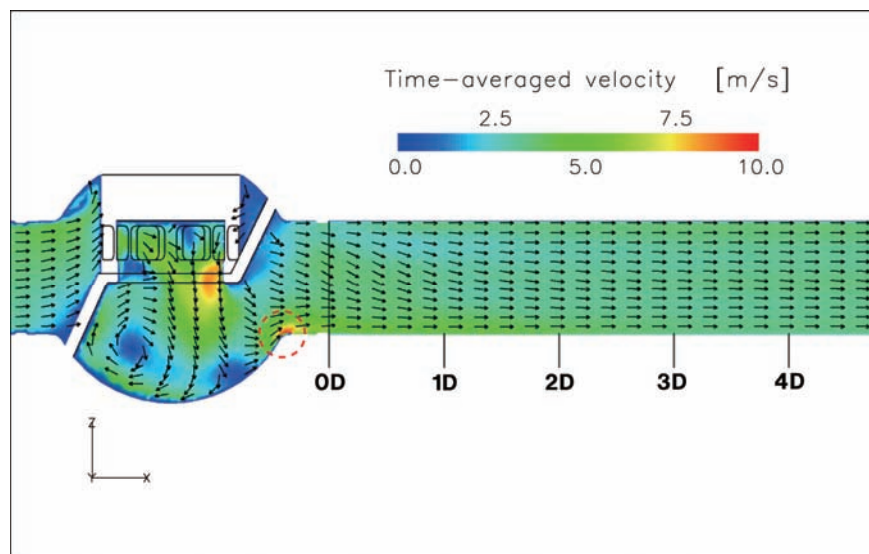


図 14 非定常 RANS 計算 (BSL-RSM) による時間平均流速分布, 流れ方向-鉛直方向断面

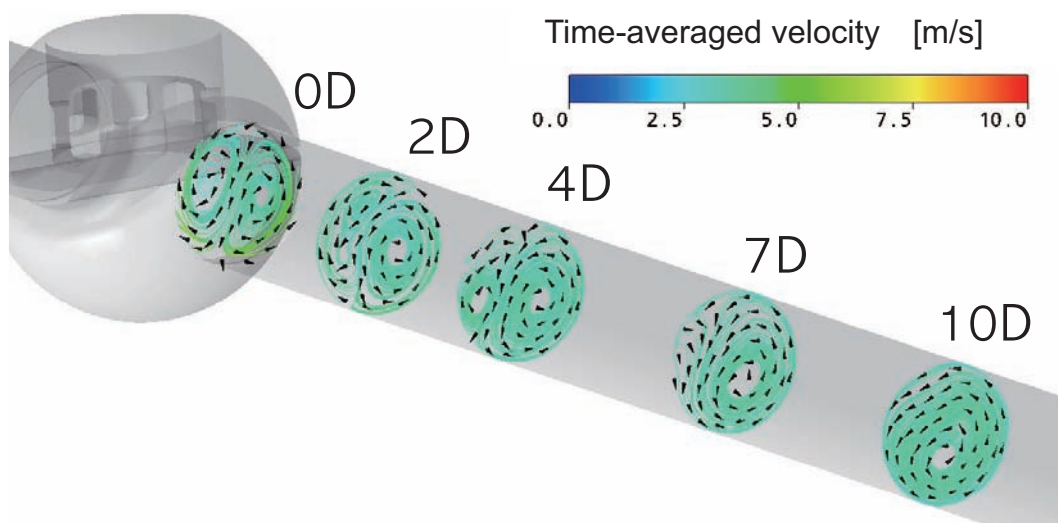


図 15 非定常 RANS 計算 (BSL-RSM) による時間平均場の管断面流線分布

と考えられる。

5. 考察

5.1 弁下流における双子の渦を持つ旋回流

図13で示したように、LDV計測および数値計算による弁下流の鉛直方向成分の流速分布は、管中心付近で下方へ向かい壁側で上昇していた。図15の管断面流線分布と合わせて考えると、図13のような流速分布は弁下流で発生する双子の渦を持つ旋回流によって生じることがわかる。このように、玉形弁下流ではエルボ流れで見られるような双子の渦を持つ旋回流⁽²¹⁾⁽²²⁾が存在している。LDV計測結果によると、旋回流は時間平均的にはほぼ左右対称に分布しており、下流に進むに従い速度が低下し、弁下流7Dでほぼ消失している。一般に、円管で旋回流が発生する場合、流れ方向流速分布は旋回中心に近づくにつれ減少し、極小値を持つことが知られている⁽²³⁾。玉形弁下流の場合旋回中心は2か所にあるが、図7の水平半径方向線上の流速分布からもわかるように、弁下流1Dで $y = \pm 10\text{mm}$ 付近に流速の極小値がわずかに現れており、旋回流の影響によるものと考えられる。

5.2 流路下部で流速が高くなる理由

LDVによる計測結果および数値計算結果では、弁下流直後の流路下部で流速が高くなる領域（図14中の赤丸内）が存在していた。この領域が高流速となった理由として、流路下部は弁出口の端部であるため、凸面形状により流れが加速されたということが考えられる。しかし、流れ場を詳細に検討すると、別の要因がより強く影響することがわかる。

非定常RANS計算による時間平均流れ場の計算結果（図14）によると、玉形弁内上部水室からケーシングを通過した流れは、下部水室内で循環するか、もしくは循環せずそのまま流出するかのいずれかに別れる。流速はケーシングを通過し下部水室へ向かう際に流路減少のため増加しており、循環せずそのまま流出する流れも高い流速を保つ。図16の時間平均場の流線分布を見ると、高流速の流れ場が循環せずに流出している様子がより明確にわかる。直接流出する流れは、弁下流へ流出する際に弁出口の端部に当たってから下流へ流出している。このように、高流速な流れが直接流路下部へ流れ込んでいることが、流路下部流速が高くなる主な要因と考えられる。

図17は非定常RANS計算（BSL-RSM）による瞬時の圧力分布である。値は200タイムステップ後のものである。弁の下部水室の壁面近傍で圧力が高い領域が存在している。図16と合わせて考えると、圧力の高い領域は上部水室から下部水室へ向かう流れ

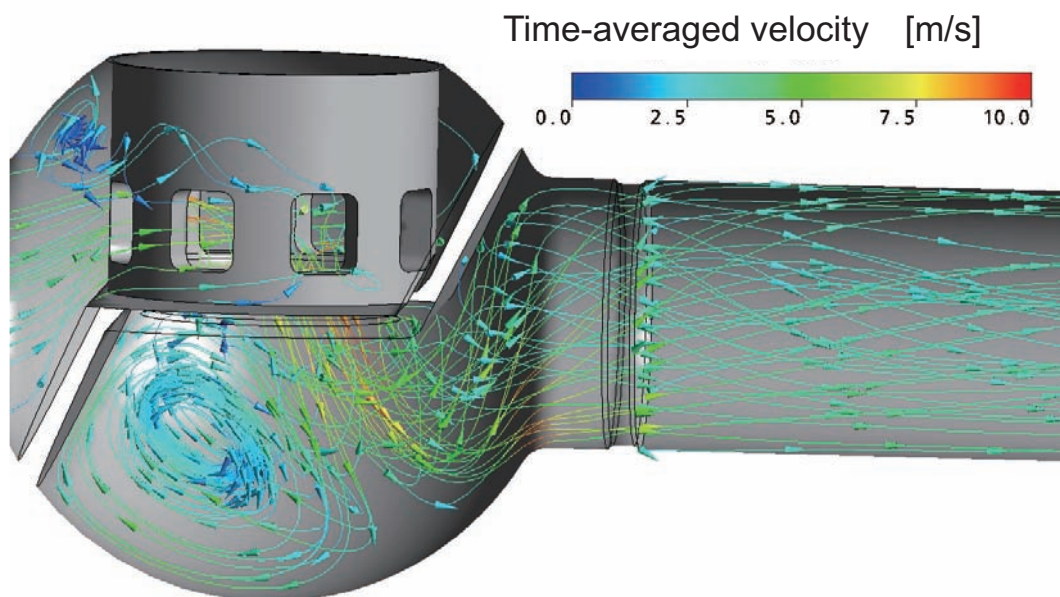


図16 非定常RANS計算（BSL-RSM）による時間平均場の流線

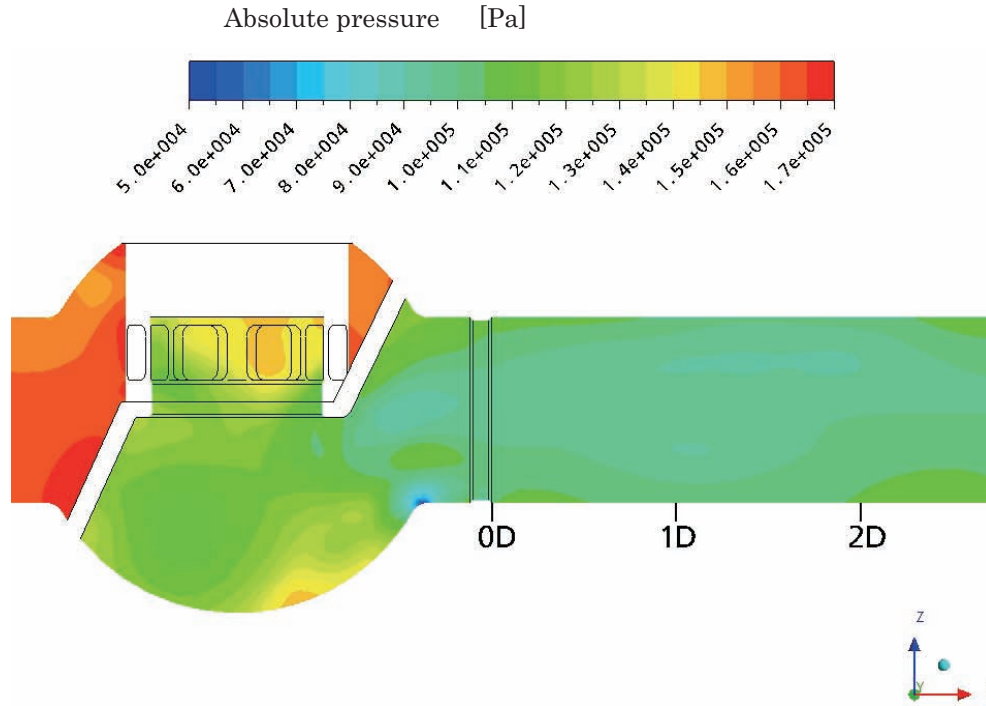


図 17 非定常 RANS 計算 (BSL-RSM) による瞬時の絶対圧力分布, 200 タイムステップ後, 流出境界を大気圧 1atm としている.

が衝突している部分であり, この領域で流れがよどみ, 圧力が高くなっている. 上部水室から下部水室へ向かう流れは圧力の高いよどみ領域を避け, 下部水室内で循環するか, もしくは弁下流へ直接流出していくと考えられる.

5.3 非定常 RANS 計算の妥当性

本研究で用いた玉形弁の場合, 定常 RANS 計算は LDV 計測値を再現しなかった. 玉形弁下流の乱流場は非等方性が非常に強いと考えられるので, 標準 $k-\varepsilon$ モデルのように乱れの一様等方性を仮定した乱流モデルでは, 再現性が低いことは想定できる. しかし, 非等方性をある程度考慮できる BSL-RSM でも定常計算結果は計測値を再現していない.

ここで, 基本に立ち返り考えると, RANS 計算は, ナヴィエ・ストークス方程式にアンサンブル平均を施すことにより得られる式 (1) で表わされるレイノルズ方程式を基礎方程式としている.

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{U}_j \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\rho u_i u_j} \quad (1)$$

ここで, ρ は密度, \bar{U}_i は平均流速, \bar{p} は平均圧力である. もし流れ場が準定常状態であれば, レイノ

ルズ方程式が表す流れ場は時間平均化された流れ場と一致する.

標準 $k-\varepsilon$ モデルにせよ, BSL-RSM のようなレイノルズ応力方程式モデルにせよ, レイノルズ方程式に現れるレイノルズ応力 $\tau_i = -\rho \overline{u_i u_j}$ を渦粘性モデル用いるか, 直接 $\tau_i = -\rho \overline{u_i u_j}$ の輸送方程式を解くかで算出し, レイノルズ方程式を解いている. ここで改めて式 (1) のレイノルズ方程式を眺めた場合, RANS 計算とは層流の場合よりもレイノルズ応力 $\tau_i = -\rho \overline{u_i u_j}$ の分だけ運動量の拡散が強い流れ場を計算していることに他ならない. $\tau_i = -\rho \overline{u_i u_j}$ の強い拡散効果により変動が抑えられることで, 時間平均解が算出される. 時間平均場に比べ, 流れ場の構造に由来する変動があまり大きくなければ, 変動は平滑化され, 得られる定常解が時間平均値と一致する. しかし, 本研究で取扱った玉形弁のように, 強い変動が生じる流れ場では, レイノルズ応力の拡散効果によって変動を抑えることができない. よって 4.2 節で示したように, 定常 RANS 計算では玉形弁の流れ場を再現することはできなかったと考えられる. そして, 非定常計算であるかのように, 計算の反復回数ごとに流れ場は変動していた. このように流れ場はレイノルズ応力により拡散的になりながらも, 計算反復回数ごとに変動する計算解となる.

本研究では非定常 RANS 計算を行っているが、あくまで時間平均値を算出する手段として行っており、瞬時の流れ場の評価は考えていない。時間平均的な解を算出するはずの定常 RANS 計算結果が変動しているため、定常 RANS 計算を複数回行い平均処理のサンプル数を増やす、これと同等のことを非定常 RANS 計算の時間平均処理により行う、というのが本研究での基本的な考え方である。

一般に、非定常現象の数値シミュレーションでは、RANS ではなくラージエディシミュレーション (LES) で行なうことが望ましいとされる。そもそも、非定常 RANS 計算を行なうということは、時間平均化された流れ場の時間挙動を追跡するということであり、幾分矛盾を含んだ数値計算を行うことになる。また、梶島はレイノルズ平均の時空間スケールの曖昧性を指摘しており⁽²⁴⁾、噴流等に現れる組織的な渦と乱流変動の区別が明らかでないため、非定常計算を行なった場合、組織的な渦がレイノルズ平均の非定常性として現れるのか、変動成分とみなされ定常解になるのかは一概にわからないと述べている。しかし、LES は計算コストの面で不可能な場合が多く、実用的には非定常 RANS 計算が多く用いられ、過渡現象、もしくは非定常現象を良好に再現することもできている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。児玉らは非定常乱流場に対する非定常 RANS 計算の適用可能性について検討しており⁽²⁷⁾、RANS モデルによる乱流拡散が、現象の支配的要因である対流効果（周期的に放出される渦など）を覆い隠さない限り、妥当な予測が可能

であるとしている。

本研究においても、非定常 RANS 計算により得られたアンサンブル平均化された流れ場が、実際の瞬時の流れ場を良好に再現していたため、時間平均値も LDV 計測値を再現したとも考えられるが、現在のところ瞬時の流れ場について計算結果の妥当性を評価する実験データがないため、詳細は不明である。

以上、本研究では非定常 RANS 計算の時間平均処理を行なうことで、LDV 計測値に良好に一致する計算解を得た。非定常 RANS 計算の是非に関しては議論があるが、本研究ではあくまで、定常 RANS 計算では変動する計算解となる流れ場に対し、定常 RANS 計算を複数回行い平均処理のサンプル数を増やす目的で非定常 RANS 計算を用いている。

5.4 流れ場の非定常性と玉形弁の影響範囲

本研究では時間平均場のみ注目して、計測および数値シミュレーションを行った。しかし、玉形弁下流は変動が強く非定常的な流れ場であるため、旋回流のような影響が継続する範囲を評価する場合、時間平均場の評価だけでは不十分である。本研究で行なった非定常 RANS 計算により、瞬時の流れ場の定性的な挙動はある程度把握できると考えられるため、ここで非定常場について述べる。

図 18 は非定常 RANS 計算により得られた瞬時における旋回流の様子である。瞬時の流れ場では、図

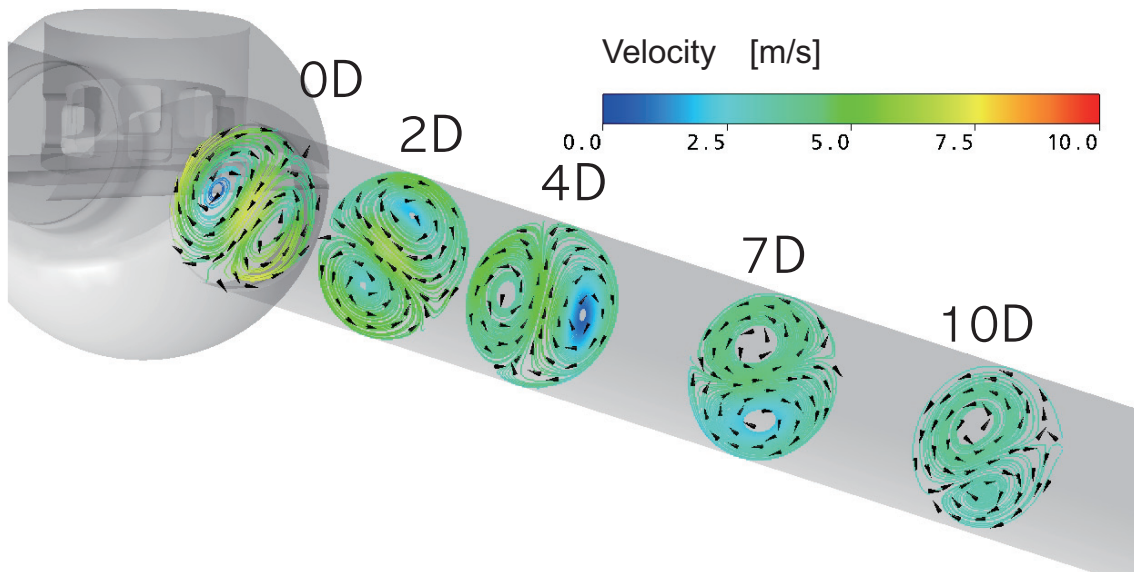


図 18 非定常 RANS 計算 (BSL-RSM) による瞬時 (200 タイムステップ後) の流れ場、管断面の様子

15の時間平均場に比べ、旋回流の速さが局所的に速い部分が存在している。また、弁下流10Dでも双子の旋回流が継続している。管断面内における双子の渦の配置角度は下流に進むに従い変化しおり、旋回中心そのものが回転するような計算結果となった。このように、瞬時でみると時間平均場で評価するより旋回流がより下流まで継続している。

図19はLDV計測により得られた流れ方向成分の乱れ強度分布である。弁上流2Dでは乱れは壁面近傍で一番強く、離れるに従い減少するような分布になっている。弁下流では、乱れた流れ場が下流に進むに従い徐々に減衰していった。しかし、弁下流10Dに到っても、上流の値までは乱れが減衰していない。つまり、弁下流10D程度までは弁による変動がある程度継続していることがわかる。

以上のように、瞬時の流れ場は時間平均場とは異なっていることが示唆される。また、弁による変動の影響範囲を時間平均場の情報から評価すると、過小評価する可能性がある。このことは、弁だけではなく他の配管要素にも当てはまることであり、実際のプラント配管を対象とした流れ場の評価を行なう際に考慮すべき点である。実際のプラント配管は様々な配管要素の組み合わせで構成されており、ある配管要素の流れ場は上流側配管要素の変動により影響される。よって、本研究で提案した非定常RANS計算の時間平均処理方法を用いれば、定常RANS計

算による時間平均的な評価方法に比べて、弁の影響範囲をより適切に考慮できると考えられる。

6. 結論

本論文では、FACが発生しうる配管部位として玉形弁を取り上げ、玉形弁下流の流れ場の様子明らかにするためにLDV計測を行なった。また、数値シミュレーションを行い、流れ場を再現できる方法について検討を行なった。その結果以下のような知見が得られた。

- LDV計測から、流れ方向成分流速分布は管中心で遅く、管壁付近で速くなるような分布になっていた。特に、弁下流の流路下部で、流れが加速されていることが明らかになった。
- 鉛直方向成分の流速分布から、弁下流では双子の渦を持つような旋回流が発生していることが明らかになった。流れ方向成分流速分布に見られた、管中心付近でへこみ管壁付近で盛り上がるような分布は、旋回流発生のためと考えられる。
- 流速分布における管中心でのへこみ、管壁付近での盛り上がり、旋回流は、弁下流に行くほど減衰していた。
- 非定常RANS計算を行い、時間平均処理することにより、時間平均流れ場を精度よく再現することができた。特に流れ方向成分の流速分布は定量的

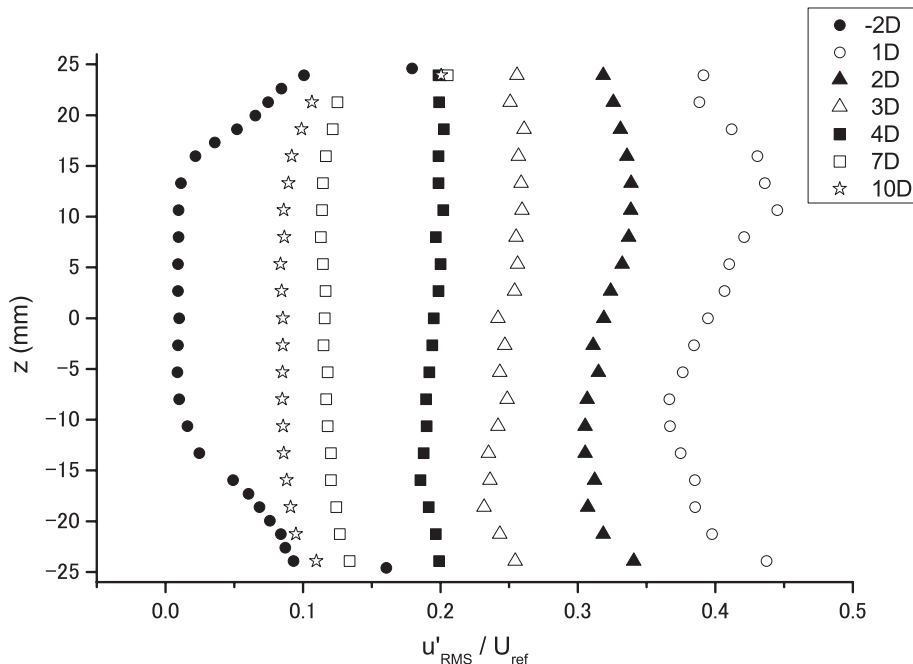


図19 流れ方向成分の乱れ強度分布，鉛直方向線上

に再現可能である。

- ・弁内部の流れ場の計算結果から、弁下流の流路下部で流れが加速される原因は、玉形弁内上部水室から下部水室へ流入する際に加速された流れが、弁出口流路下部へ直接流れ込むことが原因であると考えられる。
- ・非定常 RANS 計算の時間平均処理は、実機発電所の配管内流れのように、複雑流路を持つ流れ場の評価方法として有用であると考えられる。

文献

- (1) Dooley, R. B. and Chexal, V. K., Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77 (2-3), 85-90, (2000)
- (2) 日本機械学会, 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2005 年版) (増訂版), (2006)
- (3) Czajkowski, C. Z., Metallurgical Evaluation of an 18 Inch Feed Water Line Failure at the Surry Unit 2 Power Station, NUREG/CR-4868, BNL-NUREG-52057, 1987
- (4) 原子力安全・保安院, 関西電力株式会社美浜発電所 3 号機二次系配管破損事故について (最終報告書), (2005)
- (5) 稲田文夫, 軽水炉冷却材流れが構造に及ぼす影響に関する研究動向, *ながれ*, 27 (6), 445-452, (2008)
- (6) 福村卓也, 有岡孝司, 加圧水型原子力発電所における流れ加速型腐食速度に及ぼすエタノールアミン注入の影響, *INSS JOURNAL*, Vol. 14, p. 266 (2007)
- (7) 山田卓陽, 戸塚信夫, 流れ加速型腐食速度に及ぼすクロム含有量, 硬さ, 金属組織の影響—実機取り替え配管からの検討—, *INSS JOURNAL*, Vol. 15, p. 217 (2008)
- (8) 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 長屋行則, 流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響—研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測—, *INSS JOURNAL*, Vol. 15, p. 78-87
- (9) 歌野原陽一, 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価 (1. 流れ場の計測と数値解析), 第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム, A108, (2008)
- (10) 長屋行則, 歌野原陽一, 中村晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価 (1. 腐食速度の測定と流れ場の影響評価), 第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム, A109, (2008)
- (11) Utanohara, Y., Nakamura, A., RANS Prediction of Orifice Flow and Comparison with Measurements and LES, *Proc. of the International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2008)*, Berlin, (2008)
- (12) Utanohara, Y., Nakamura, A., Murase, M. and Nagaya, Y., Measurement of Flow Field and Flow Accelerated Corrosion in the Down stream of an Orifice, *Proc. of the 7th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-7)*, Seoul, (2008)
- (13) Uchida, S., Naitoh M., Uehara Y., Okada H., Ohira T., Takiguchi H., Sugino W. and Koshizuka S., Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (IV), Comparison of Wall Thinning Rates Calculated with the Coupled Model of Static Electrochemical Analysis and Dynamic Double Oxide Layer Analysis and Their Values Measured at a PWR Plant, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47 (2), 184-196, (2010)
- (14) 米田公俊, 森田良, 藤原和俊, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価 (その 4) —主要配管要素の減肉傾向評価—, 電力中央研究所報告, L09006, (2010)
- (15) Oza, A., Ghosh, S. and Chowdhury, K., CFD Modeling of Globe Valves for Oxygen Application, *Proc. of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC)*, Gold Coast, Queensland, 1356-1363, (2007)
- (16) Ferrari, J. and Leutwyler, Z., Measurement of the Fluid Flow Load on a Globe Valve Stem under Various Cavitation Conditions, Preprint arXiv: 0909.0874, (2009)
- (17) 歌野原陽一, 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 弁

- 下流の流れ場の LDV 計測と可視化, 第 14 回
動力・エネルギー技術シンポジウム, B108,
(2009)
- (18) Fisher Controls International LLC, Control
Valve Handbook, 4th Edition, 2005
- (19) ANSYS, Inc., ANSYS CFX-Solver Modeling
Guide, ANSYS CFX Release 11.0, (2006)
- (20) Menter, F. R., Two-equation eddy-viscosity
turbulence models for engineering applica-
tions, AIAA Journal, 32 (8), 269-289,
(1994)
- (21) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗,
(1979)
- (22) Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic
Resistance, 3rd Edition, Begell House, Inc.,
(2001)
- (23) 村上光清, 片山裕, 飯田芳彦, 鬼頭修己, 旋回
を伴う管内流れの実験的研究, 日本機械学会論
文集, 41 (346), 1793-1801, (1975)
- (24) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢
堂, (1999)
- (25) Ohno, S., Ohshima, H., Sugahara, A. and
Ohki, H., Numerical Analysis of Sodium
Experiment for Thermal Stratification in
Upper Plenum of Fast Reactor, Proc. of the 13
th International Topical Meeting on Nuclear
Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13),
N13P1191, (2009)
- (26) Yamano, H., Tanaka, M., Kimura, N.,
Ohshima, H., Kamide, H., and Watanabe
O., Unsteady Hydraulic Characteristics in
Large-Diameter Pipings with Elbow for JSFR,
(1) Current Status of Flow-Induced Vibration
Evaluation Methodology Development for the
JSFR Pipings, Proc. of the 13 th International
Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal
Hydraulics (NURETH-13), N13P1186, (2009)
- (27) 児玉和也, 戸田和之, 山本誠, 非定常乱流に対
する RANS 計算に関する研究 (周期的吹出
し・吸込みを伴うバックステップ流の場合),
日本機械学会論文集 (B 編), 72 (724),
2894-2900, (2006)