

デュアルエルボにおける複雑流動構造の解明

Clarification of complex flow structure in dual elbow

東北大学工学部	矢内 宏樹	Hiroki YANAI	
東北大学工学部	吉田 和弘	Kazuhiro YOSHIDA	
東北大学工学部	結城 和久	Kazuhiisa YUKI	
東北大学工学部	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member
東北放射線科学センター	戸田 三朗	Saburo TODA	
東北電力	河上 晃	Akira KAWAKAMI	
東北電力	秋葉 真司	Shinji AKIBA	

Relatively a large number of pipe failures in a nuclear power plant occur in a multi-component region such as the bends, the orifices and so on. Especially, it has been reported that FAC (Flow Accelerated Corrosion) frequently occurs in a multi-elbow. In this study, therefore, a complex flow structure in a s-shaped dual elbow is observed by using a PIV system to clarify the flow structure. The diameter of the elbow D is 56mm and the curvature radius rate $\gamma (=R_c/D, \text{where } R_c \text{ is a curvature radius})$ is 1.5. A flow field obtained by the PIV system is analyzed to determine the velocity distribution and the fluctuation characteristics at Reynolds number of 4.3×10^4 . The experimental results showed that peak velocity in 1st elbow is about 1.6 times of average flow velocity at the entrance of 1st elbow while, the peak velocity in 2nd elbow velocity is about 2 times of average flow velocity at the entrance of 1st elbow. This result indicates that the FAC could occur more easily at the 2nd elbow than at the 1st elbow.

Keywords: FAC, multi-elbow, complex flow, s-shaped dual elbow,

1. 緒言

高経年化した原子力発電プラントが増加しつつある中で、プラントの安全性確保のために確実な保全活動の実施が必要である。原子力発電プラントにおいて多く報告されている事故・トラブルの事例は、配管の減肉である。中でも広範囲に減肉を及ぼし、大規模な配管事故に繋がる FAC (流れ加速型腐食) がある。FAC は酸化被膜の腐食や溶出が流体の流れの作用によって促進される現象であり、オリフィス下流など複雑な流れが生じる場所で多く報告されている。東北電力の女川原子力発電所で報告された二重曲がり管 (デュアルエルボ) での減肉は、その典型例であると考えられる。発電プラントは複雑な配管系を有しており、曲がり管も多く用いられているため、FAC の発生箇所を予測し、適切なメンテナンスを行うために、デュアルエルボによって生じる複雑な流動構造の解明が必須である。

過去の研究で単一曲がり管 (シングルエルボ) では、平均流動場は様々な実験や解析がなされており、須藤らはエルボ内の流速分布や壁面圧力分布を詳細に示し

ている[1]。また、非定常挙動において Belaidi らは 90° 曲りダクト管での流れについて熱線流速計を用いて実験しており、流れの非定常挙動や Re 数による周期性の変化など興味深い結果を得ている[2]。また円管においては結城らが二次流れの非定常挙動を実験的に得ており、曲率半径比の変化における変動強度への影響などは非常に重要である[3]。よって、デュアルエルボでもこのような複雑な非定常挙動が存在すると予想され、デュアルエルボで生じた減肉の原因や対策について議論する上で、これらの複雑な挙動は無視できないものと言える。しかし、著者の知る限りではデュアルエルボ内の流動構造についての研究は、村上らによるエルボ後の流速計測や圧力損失計測[4]だけであり、エルボ内の流れ方向の正確な流速分布や非定常挙動に関する報告はなされていない。そこで本研究では、屈折率整合を用いた PIV (Particle Image Velocimetry) によりデュアルエルボ内の非定常流れの可視化を行い、流動構造を把握する。これをシングルエルボの流動構造と比較することでデュアル接続の影響を考察する。さらにデュアルエルボでの流動構造と減肉箇所との比較を行い、

流れの減肉への影響因子を推測することを目的とする。

2. 実験

2.1 実験装置

図1に実験装置を示す。実験ループは混合タンク、循環ポンプ、助走部、試験部から構成されている。流速の調節はポンプ後のバルブ、およびポンプからタンクに戻るバイパス流路のバルブで行い、図1のBの位置で超音波流量計を用いて流量および流速を得る。整流タンクは上流部からデフューザ、多孔板、ハニカム、レデューサで構成されている。助走区間は試験部流入時に流れが十分に発達できるように、整流タンク出口後に44Dの直管部を設けている。また試験部手前の流れの発達や整流は可視化により確認済みである。流れの可視化はパルスレーザーとCCDカメラを用いたPIV法により行う。パルスレーザーとしてはダイオードレーザーを使用し、波長808nmの赤外線である。一度の計測で最大1024枚のベクトル画像を得ることができる。試験部はアクリル製で、曲率半径比 $\gamma (=R_o/D : R_i/D)$ は曲率半径) = 1.5の90°エルボ2つと直管部で構成されている。試験部は取り外し可能な構造となっており、これらの組み合わせで複数のデュアルエルボ形状を作ることが可能である。混合タンクに設置した温度計により作動流体の温度が測定されている。ポンプにより発生する熱は、混合タンクの熱交換器により水道水と熱交換され、これにより温度の調整が行われる。

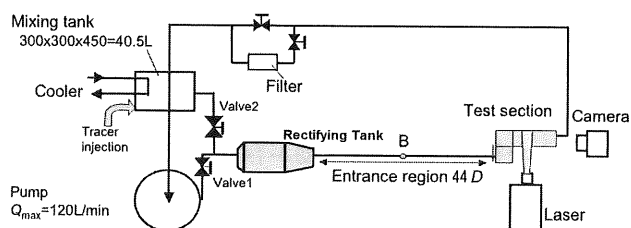


図1 実験装置

2.2 屈折率整合

可視化実験ではアクリルと同じ屈折率1.49の液体を用いなければ、流入するレーザーが屈折してしまう。屈折率整合に用いるNaI水溶液の物性については、西田らによって濃度と屈折率の関係が実験的に示されている[6]。NaI水溶液の屈折率は濃度変化に強く依存するため、今回の実験体系で可視化に影響が出ない屈折率の範囲を求める。ダイオードレーザーにおける屈折

率整合の結果、NaI水溶液の屈折率が $n = 1.500$ のとき、試験部のアクリルエルボでのレーザーの屈折が無くなる。この屈折率を基準に濃度変化させた結果、壁近傍でも正確な流速を得るための屈折率の条件は $1.498 \leq n \leq 1.501$ である。

2.3 実験条件と実験方法

今回はRe数が約 4.3×10^4 でのデュアルエルボにおける流れの可視化を行う。図2に示すように、1stエルボ内と2ndエルボ内を可視化する。流れ方向の可視化は屈折率の差が影響するため、作動流体にはNaI水溶液を用いる。断面方向においては1stエルボから2ndエルボへの遷移位置を可視化する。断面方向の二次流れの可視化は屈折率の差は影響しないため水を用いる。実験は以下の手順で行う。

1. ヒーターとポンプにより作動流体の温度を50°Cにし、流体中の気泡を除去するために数時間回す。
2. 熱交換器で実験条件の温度に調節する。
3. NaI水溶液を作動流体として使用する場合は、屈折率計により作動流体の屈折率を測定し、既定の値からずれがある場合は水溶液濃度の調整により屈折率を合わせる。このときにレーザーを壁近傍に照射し屈折の有無も測定する。
4. 実験条件の流速に調整し、トレーサー粒子を注入する。
5. レーザーを照射して画像データを取得し、液温および流速を記録する。
6. 画像を解析してベクトル画像を得る。

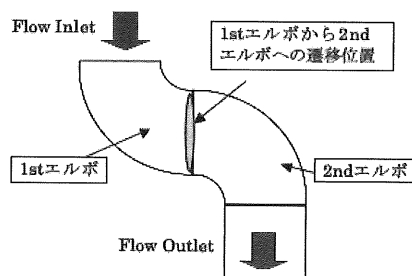


図2 可視化位置

3. 結果と考察

3.1 デュアルエルボにおける流動構造

3.1.1 1stエルボの軸方向の時間平均流動場

デュアルエルボ内の流速ベクトル分布を図3に示す。エルボ入口直後の腹側はレーザーの照射範囲の制限により、データは得られていない。1stエルボの

入口直後ではエルボ腹側で順圧勾配、外側で逆圧力勾配となり、腹側壁面近傍へ偏流が生じ、 20° 付近で腹側に高速域が形成される。その最大流速は 1.18m/s であり、入口平均流速の約 1.6 倍である。本実験ではこの位置を境に壁面圧力勾配が逆転しているが、須藤らの $\gamma=2.0$ の結果[1]では 30° の位置で見られるため、今回の結果は低曲率の影響で上流側へ遷移したと考えられる。その後は遠心力とそれにより発生した二次流れによって高速域が外側へと輸送されていく。このとき同時に腹側には低速域が輸送される。この付近から壁面の圧力勾配は逆転し、高速域の流速値は緩和される。 $\theta=75^\circ$ 付近では二次流れにより高速域が管壁に沿って腹側の低速域に輸送され、腹側の流速が回復される。これにより腹側と管中央の間に低速域が位置する。これは須藤らが確認した低速くぼみ域に相当する[1]。実験体系のデュアルエルボは 1st エルボの外側が 2nd エルボの腹側に繋がっている S 形状のため、2nd エルボの入口手前で発生する高速域の偏りが影響を与え、 90° の位置で最大流速の位置が外側に存在する。しかし低曲率による二次流れの影響も存在するため、現段階ではエルボ接続による影響であるかは判断できない。

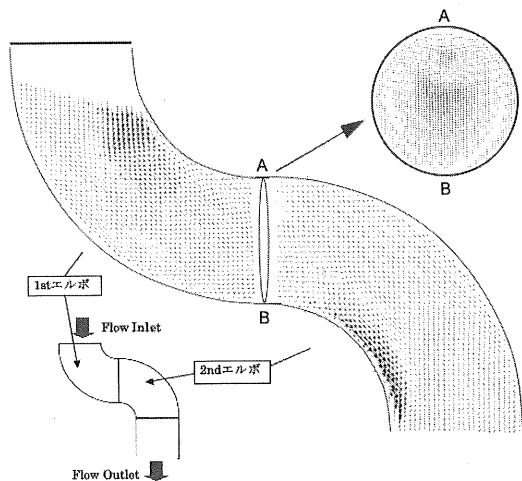


図3 デュアルエルボ内の流速ベクトル分布

3.1.2 エルボ間の二次流れの時間平均流動場

1stエルボから2ndエルボへの遷移をより詳しく把握するために、断面方向の流れを把握する必要がある。流速ベクトル分布より、曲がり管特有の上下対称な双子渦を持つ二次流れの発生が確認できる。高速域は管壁中央に位置し、エルボの腹側から外側に向かって水平に流れている。最大流速は管中央で 0.35m/s であり、

入口平均流速の約 0.5 倍である。高速域は断面内の広範囲を占めており、二次流れによる軸方向流れの輸送の強さが確認できる。また、1stエルボ腹側では軸方向の速度分布で速度回復が見られた箇所に対応するように高速域が位置する。このようにエルボを繋げてもシングルエルボと同様に上下対称な二次流れが発生することが確認された。しかし、須藤らのシングルエルボ直後 90° における二次流れ[1]と比較すると、双子渦の位置が異なる。シングルエルボ出口での二次流れの双子渦はやや腹側に位置するが、今回得られた二次流れでは中心から外側に位置し、2nd エルボの腹側の方へ移動している。さらに双子渦の形状も扁平になっている。これらも先ほどと同様に曲率の違いとエルボの相互作用、どちらの影響か判断できない。

3.1.3 2nd エルボ内の軸方向の時間平均流動場

2nd エルボ内の流動構造について述べる。軸方向の速度分布は 2nd エルボ入口で高速域が腹側の方に偏って流入する。上流で発生した二次流れによって高速域がさらに腹側へと輸送され、より偏流が促進される。2ndエルボ内の高速流の位置はエルボの腹側に位置し、およそ $\theta=60^\circ$ の位置で最大流速が 1.49m/s となり、これは入口平均流速の約 2 倍である。1stエルボ内に生じる流れよりも偏流が激しく、高速域も径方向に狭く、周方向に広いという特徴を持ち、壁近傍でのみ流れが速くなっている。遠心力の作用により二次流れは減衰されるが、2nd エルボ前半では二次流れが強いため、遠心力により形成される壁面圧力勾配の発生は下流側へと遷移する。このため、エルボ腹側の順圧勾配の領域が下流側まで続く。圧力勾配による作用と二次流れによる輸送の相乗効果により、2nd エルボでの偏流は促進される。 60° 以降の 2nd エルボ後半では遠心力と二次流れによる高速域の輸送により、徐々にエルボ外側の低速域が緩和されていく。しかし、ベクトル方向からまだ圧力勾配の影響が残っていると確認される。

このように 2nd エルボでの流動は入口の流動状態への依存度が強い。実機プラントでも入口条件によって流動構造が変わる可能性があるため、減肉現象が起きたときのエルボ入口流動の条件を明らかにすることも減肉の影響因子を推定するために重要である。

3.2 流れの減肉への影響因子の推測

流れの減肉への影響因子を推測するために、平均流

動場だけでなく式(1)に定義する速度変動強度の分布や瞬時速度場に注目する必要がある、それらを図4に示す。減肉の原因が平均流速に依存するものか強い変動に影響するものかを議論し、今後の減肉発生位置の予測や減肉緩和技術の開発に展開していく必要がある。

$$I = \sqrt{\left(\frac{\sum (u_1 - \bar{u}_1)^2}{n} + \frac{\sum (u_2 - \bar{u}_2)^2}{n} \right) / 2} / U \quad (1)$$

ここで u_i は瞬時速度、 \bar{u}_i は平均流速である。しかし、今回の速度変動強度や渦度はデカルト座標系での値であり、エルボでの評価に用いるには最適ではない。定性的な特徴は得られるが、定量的な評価のためにはエルボに沿った極座標で計算する必要がある。

速度変動強度を各エルボで比較し、減肉に関して議論する。2nd エルボの速度変動強度の最大値は 0.9131 で、1st エルボの速度変動強度の最大値は 0.91776 なのではほぼ同じである。高変動の領域を比較すると両者とも前節で見られた高速域に存在する。1st エルボ腹側半分の領域で速度変動の強い領域が存在する。瞬時場から判断してまっすぐであるので慢性的な要素が強い。また 45° 以降は壁面から管中央部へと高変動領域が存在し、壁面に対する影響範囲は狭い分布である。1st エルボで減肉は発生しないので、壁面から離れた位置での高速流や高速度変動は減肉への影響因子ではないと推測される。一方、2nd エルボ内の速度変動の分布は先ほどと異なり、腹側壁近傍を覆うように広範囲に存在する。流速の方向に関しても壁面に沿うような流れであり、1st エルボと異なり二次流れや圧力勾配の影響が顕著に現れる。さらに速度変動の強い領域が縞状に分布している。高 Re 数域での乱れの微細化を考慮すると、減肉形状である間欠的な絞肌状の亀裂と一致する可能性は十分あると考えられる。ゆえに、壁面近傍での高速流や高速度変動は減肉への影響因子であると推測される。

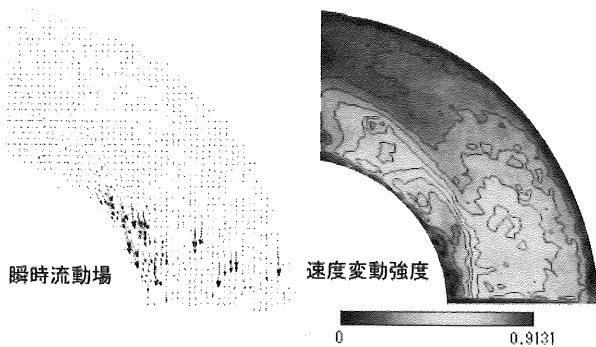


図4 2nd エルボの瞬時速度場と速度変動強度分布

4. 結言

今回はデュアルエルボにおける流動構造を可視化し、エルボ接続の影響や減肉現象への影響因子について議論した。得られた知見を以下に述べる。

(1) デュアルエルボにおける流動構造

- ・1st エルボに関してはシングルエルボでの流動構造と酷似するものが多かったが、エルボ出口に近づくにつれて 2nd エルボの影響を受け、接続による流動構造への影響が生じることが明らかになった。

- ・1st エルボ後の二次流れは管中央の高速域が広く、強い輸送を生むことが確認された。

- ・2nd エルボにおける流速分布は 1st エルボで生じた偏流がさらに促進され、2nd エルボ腹側の壁近傍に最大流速が存在し、入口平均流速の 2 倍以上の流速であった。これによりエルボを接続することで、壁面圧力勾配のピークが下流側へ遷移することも推測される。また、流動構造は遠心力の影響よりも上流側の流れの影響を受けやすく、特に二次流れの影響を顕著に受けた。

(2) 減肉への影響因子

- ・減肉発生箇所である 2nd エルボ腹側壁近傍で、速度変動の強い領域が広範囲に壁近傍を覆うように分布していた。さらに速度変動の強い領域が縞状に分布し、減肉形状との関連性を示唆した。これらにより、壁に沿う高速流と速度変動が減肉への影響因子である可能性が高いと推定された。

- ・1st エルボにおける最大平均流速は入口平均流速の 1.6 倍、2nd エルボにおける最大平均流速は入口平均流速の 2 倍になっている。よって、FAC の発生は 2nd エルボの方が可能性が大きくなる。

謝辞

本研究は東北電力株式会社殿との共同研究「配管減肉事象の発生メカニズム研究」の成果の一部であり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 須藤浩三 機論 B 58 巻 548 号(1992-5)p.1015-1021
- [2] A.Belaidi Journal of Fluids Engineering, December 1992, Vol.114/585
- [3] 結城和久 機論 B 70 巻 693 号(2004-5)p.1163-1169
- [4] 村上光清 機論 B 35 巻 272 号 p.763-773
- [5] 西田正浩 日本機械学会第 74 期通常総会講演会講演論文集, Vol.1, pp.266-267, 1997