

下向き閉塞分岐配管に生じる流動挙動に関する研究 (分岐管内流速分布特性の検討)

Flow Structure in a Downward Branch Pipe with a Closed End
(Characteristics of Flow Velocity in the Branch Pipe)

三好 弘二 (Koji Miyoshi) *1 中村 晶 (Akira Nakamura) *1
竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka) *2

要約 主配管から下方へ分岐し下端部が閉塞された分岐配管では、主配管の高温水が分岐配管内に侵入することで、熱成層界面が発生する。この界面の変動は、熱疲労を引き起こすことが知られている。本研究では、下向き閉塞分岐配管を対象に実験により、管内の流速分布特性の検討を行った。実験では、内径 (= D_b) 21mmから43mmの分岐配管を対象に、レーザードップラー流速計を用い、管内の流速分布を計測した。その結果、分岐管入口から $4D_b$ 位置における旋回流は、その平均流速が半径方向に直線分布を示す強制渦であった。また、 $4D_b$ 位置における旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ と管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ を、主流流速および分岐管内径を用いて整理し、 $U_{\theta \max}$ と $U_{z \min}$ の管軸方向の分布を推定する式を提案した。

キーワード キャビティーフロー、鉛直分岐管、旋回流、侵入深さ、流速分布

Abstract Many pipes branch off from a main pipe in industrial plants. The penetration of hot water into the branch pipe causes thermal stratification. The thermal stratification layer fluctuates and causes thermal fatigue. The characteristics of velocity distributions in the branch pipe for inner diameters from $D_b = 21$ mm to 43 mm were investigated by laser Doppler velocimetry in this paper. As for the flow in the branch pipe at $L = 4D_b$, the mean velocity of the spiral flow was a simple forced vortex which indicated a straight velocity distribution. The maximum circumferential velocity $U_{\theta \max}$ and minimum axial velocity $U_{z \min}$ at $L = 4D_b$ were expressed with D_b and main flow velocity. Empirical formulas were proposed for estimating the distributions of $U_{\theta \max}$ and $U_{z \min}$ in the axial direction.

Keywords cavity flow, vertical branch pipe, spiral flow, penetration depth, velocity distribution

1. 序論

主配管から下方へ分岐し、内部に滞留した流体を有する下端部が閉塞された分岐配管（以下、閉塞分岐配管）では、分岐配管内にキャビティーフローが形成され、分岐配管の流体が主配管の流体よりも低温である場合には、このキャビティーフローが主配管の高温水を分岐配管内部へ輸送するため、管内に熱成層界面が発生する⁽¹⁾。そして、その熱成層界面の変動は、管壁の温度変動を引き起こし、原子力発電所の配管において熱疲労による貫通き裂が生じたことが報告されている^{(2),(3)}。

日本機械学会では、流体の温度変動に起因する熱

疲労を評価するため、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」⁽⁴⁾（以下、指針）を策定した。図1に示すとおり閉塞分岐配管では、高温の主流が曲がり部に到達した場合、水平配管部に滞留した冷水との熱成層界面が変動するため有意な壁温変動が発生し、熱疲労による損傷が懸念される。そこで、指針では、熱成層界面が曲がり部付近に存在しないようにするための評価方法が示されている^{(5)~(7)}。

熱疲労を防止するため、熱成層界面が曲がり部付近に存在しないよう設計することは有効であるが、たとえ曲がり部に熱成層界面が存在しても、発生する管壁温度を用いて疲労評価を行い、健全性を確認できれば、配管ルートの変更を回避することも可能

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 神戸大学工学部

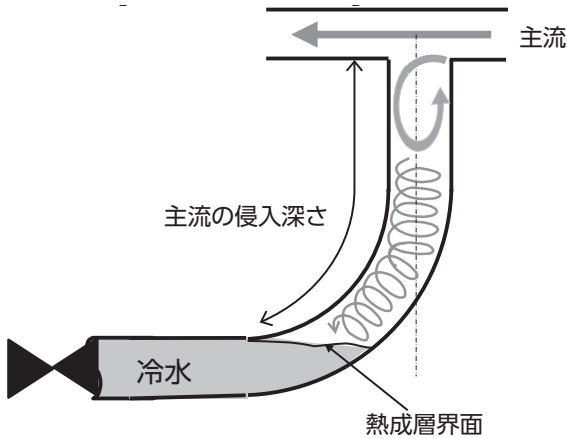


図1 閉塞分岐配管での壁温変動発生メカニズム

である。しかしながら、管壁温度を予測するためには、分岐管内の流体温度、流速、熱伝達率等の知見拡充が必要である。よって、本研究では分岐管内における流速分布特性を明らかにすることにした。

著者らは、これまで下向き閉塞分岐配管を対象に分岐管内の流動状態を調べ、以下の知見を明らかにしている。

- (1) 分岐管側面から観察した流動挙動は図2に示すとおり鉛直方向に回転するキャビティーフローの領域1、流れが乱れた遷移領域、旋回状の下降流れと中心付近の上昇流が見られる領域2から形成される。また、領域1の長さは主流流速によらずほぼ $3D_b$ （ここで、 D_b は分岐管内径）で一定であり、領域2の長さは主流流速とともに増加する^{(8),(9)}。
- (2) 主配管底部からトレーサ粒子の動いている位置までを主流の侵入深さと定義した場合、その深さは時間とともに変化するものの、その

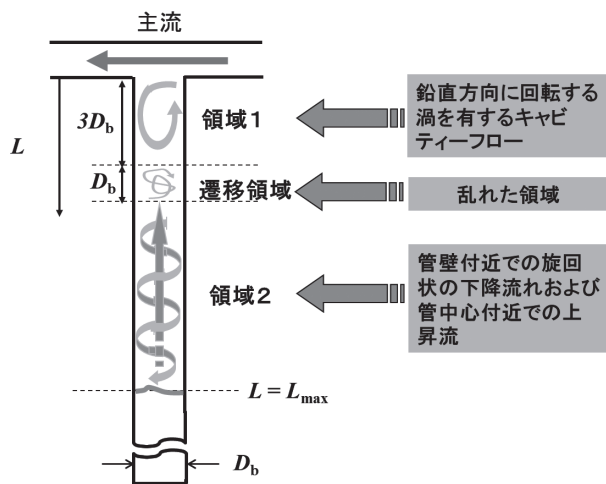


図2 鉛直下向き分岐管内の流動状態^{(8),(9)}

最大値である最大侵入深さ L_{max} （図2に示す）は、主流流速および分岐管内径を代表速度、代表長さとしたレイノルズ数で整理できた⁽⁹⁾。

- (3) $D_b = 43$ mmの場合を対象に分岐管内の流速分布を測定した結果、分岐管入口からの距離 L （図2に示す）が $4D_b$ 以上の範囲では旋回方向流速の半径方向分布が直線分布を示す単純な強制渦となっている⁽⁸⁾。

また、白石ら⁽¹⁰⁾は $D_b = 100$ mmの分岐配管を対象に分岐管内の流速分布を測定し竜巻上の渦が発生していることを明らかにしている。しかしながら、これまで $D_b = 43$ mm未満の小口径配管を対象とした分岐管内の流速分布について検討されていないことから、本報では小口径の分岐配管を対象に、流速分布を明らかにすることにした。上述のとおり $D_b = 43$ mmの場合の測定結果から $L = 4D_b$ 以上の範囲では単純な強制渦となっていることが明らかであることから、 $L = 4D_b$ 位置の流速を測定することで管軸方向の流速分布を推定する式を提案した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験ループおよび試験部

図3に実験ループの概略図を示す。試験流体には脱気水を用いた。また、分岐配管には約25℃の水を滞留させ、主流温度が分岐配管内の温度と等温になるように熱交換器により調整した。流量はポンプ出口に設けた弁で調整し、主流流速 U_m は試験部上流の電磁流量計（TOSHIBA製、精度 $\pm 0.5\%$ of Rate）により管断面平均値を測定した。

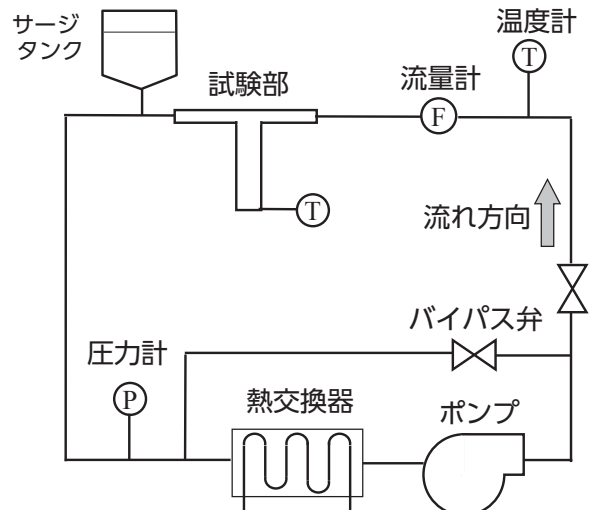


図3 実験ループの概略図

図4に試験部および試験部入口形状を示す。十分な主流流速を得るため図4に示すとおり主流流路形状は幅60 mm, 厚さ10 mmの矩形流路とした。また, 主流が十分発達するように矩形流路入口から分岐部までの距離は600 mmで主流流路の水力等価直径の約35倍とし, 上流に外乱がない場合を対象にした。試験部は下向き鉛直管であり, 分岐管内径は $D_b = 21, 30, 34, 43$ mm (JIS 1B, 5/4B, 3/2B, 2B相当)の4種類を使用した。これら実験ループおよび試験部は既報⁽⁹⁾と同じとした。

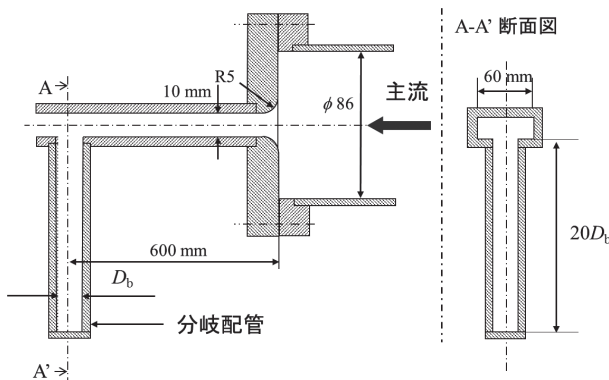


図4 試験部および試験部入口形状

2.2 実験方法および条件

分岐管入口からの距離 $L = 4D_b$ においてレーザードップラー流速計 (LDV) (カノマックス製 Smart LDV II, Model8741-S) を用いて流速測定を行った。LDVの散乱粒子としてナイロン粒子(平均粒径4.1 μm , 比重1.02)を使用した。主流流速 U_m と分岐管内径を変化させた場合の $L = 4D_b$ 位置における旋回方向流速 U_θ と管軸方向流速 U_z の半径方向分布を測定した。主流流速は $U_m = 4$ m/sから14 m/sの範囲で変化させた。図5に示すとおり U_θ および U_z の半径方向分布はLDVによる測定点を分岐配管壁面から分岐管軸中心方向に移動させ計測した。座標系は, 旋回方向流速 U_θ は分岐配管鉛直上方から見て反時計回りを正方向, 管軸方向流速 U_z は分岐配管の鉛直上向きを正方向とした。

3. 実験結果および考察

主流流速 $U_m = 14$ m/s, 分岐管内径 $D_b = 21, 30, 34, 43$ mmにおける旋回方向平均流速 U_θ と, 管軸方向平均流速 U_z の半径方向速度分布 ($L = 4D_b$ 位置)を図6に示す。流速は各々の計測箇所60秒間計

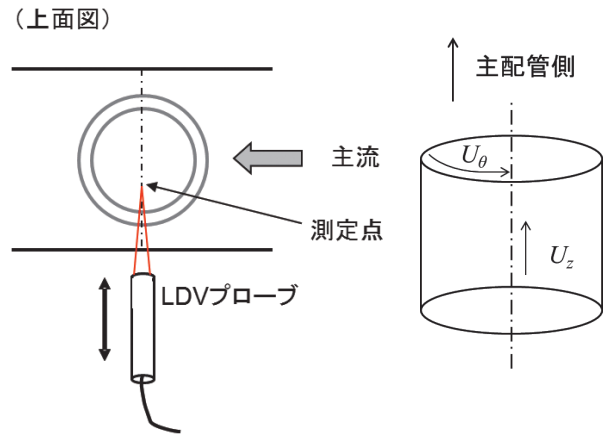


図5 流速測定方法および旋回方向流速と管軸方向流速の定義

測し, その平均値を示した。 U_θ は半径方向に直線的に増加する傾向が, U_z は半径方向に直線的に減少する傾向が確認された。また, その傾向は内径および主流流速を変化させた場合も同様であった。この結果は, 内径 $D_b = 43$ mmを対象にした大塚ら⁽⁸⁾の結果と同じであり, 強制渦が生成されているといえる。

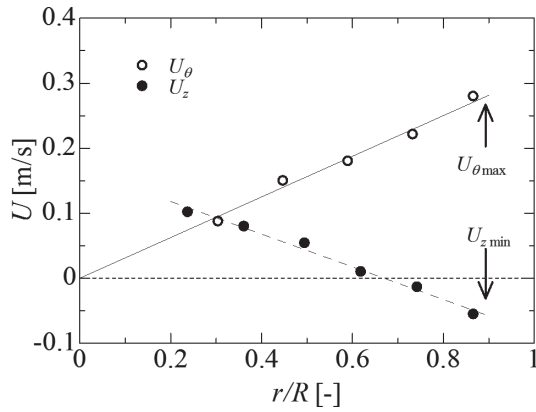
旋回方向流速 U_θ と管軸方向流速 U_z の平均速度分布は管内壁付近の境界層を除いた部分では直線とみなすことができる。図7に示すとおり $r/R = 0.9$ 位置での U_θ を旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ として, $r/R = 0.9$ 位置での U_z の絶対値を管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ として定義した。 $r/R = 0.9$ 位置で速度は図6に示すとおり $r/R = 0.9$ 以下の測定値を線形近似した外挿線から求めた。

図8に主流流速 U_m と旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ および管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ との関係を示す。いずれの分岐管内径においても U_m が増加するとともに $U_{\theta \max}$ と $U_{z \min}$ はほぼ直線的に増加する傾向が見られた。図8に示すとおり U_m と $U_{\theta \max}$ および $U_{z \min}$ の関係はおよそ比例関係にあることから, その傾きを次式に示すとおり分岐率(主流の分岐管への入りやすさ) α_θ, α_z として定義した。

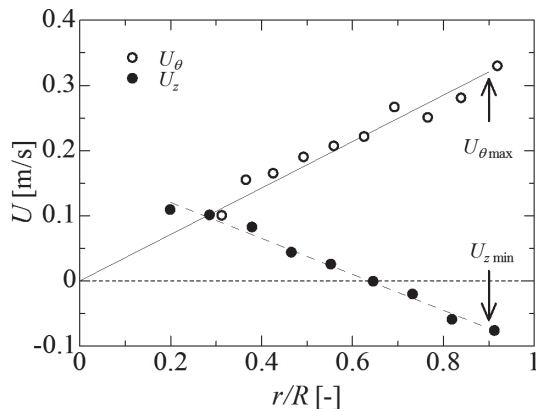
$$\alpha_\theta = \frac{U_{\theta \max}}{U_m} \tag{1}$$

$$\alpha_z = \frac{U_{z \min}}{U_m} \tag{2}$$

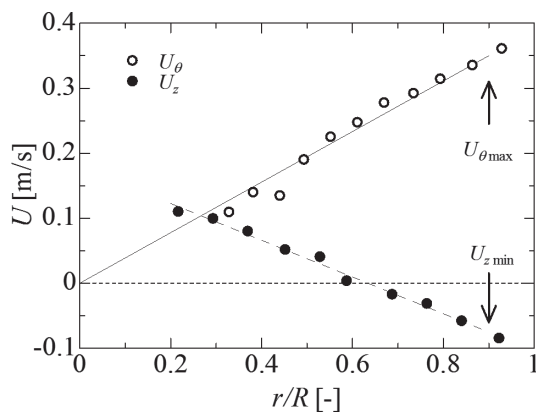
これら分岐率 α_θ および α_z と分岐管内径 D_b の関係を整理した結果を図9に示す。実験結果より α_θ, α_z



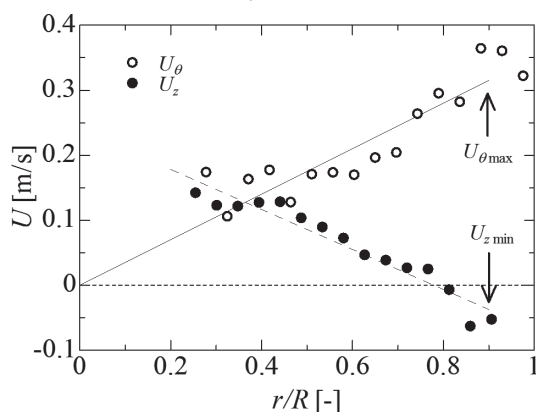
(a) $D_b = 21$ mm



(b) $D_b = 30$ mm

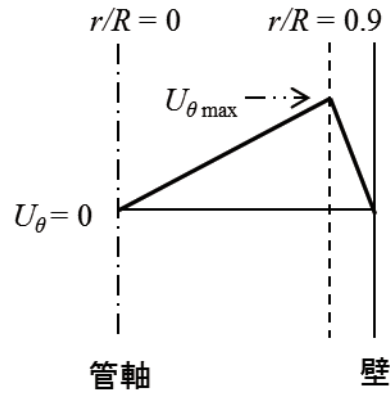


(c) $D_b = 34$ mm

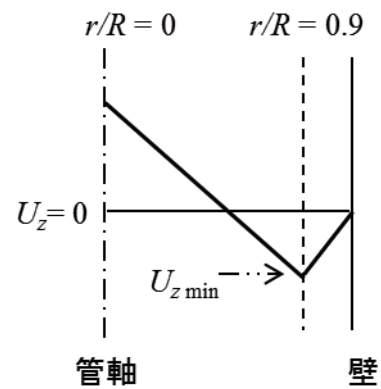


(d) $D_b = 43$ mm

図6 時間平均流速の半径方向分布
(at $L = 4D_b$, $U_m = 14$ m/s)



(a) 旋回方向流速分布



(b) 管軸方向流速分布

図7 旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ および管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ の定義

はほぼ次式で整理できることが分かった。

$$a_{\theta} = 0.132 \times D_b^{0.50} \quad (3)$$

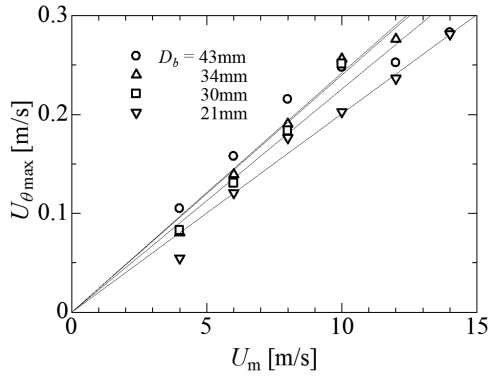
$$a_z = 0.023 \times D_b^{0.50} \quad (4)$$

以上、これらの式から主流流速 U_m と分岐管内径 D_b が与えられれば、 $L = 4D_b$ 位置における分岐配管内の旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ と管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ を推測できることがわかる。

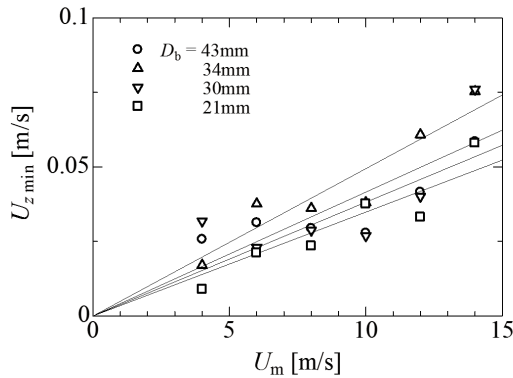
大塚ら⁽⁸⁾ は、 $D_b = 43$ mm の場合、分岐管入口からの距離 L が $4D_b$ 以上の範囲では旋回方向流速の半径方向分布が直線分布を示す単純な強制渦であることを示している。よって、主流の最大侵入深さ L_{\max} から $4D_b$ を差し引いた長さ、すなわち旋回流長さ $L_{\max} - 4D_b$ を考え、次に示すレイノルズ数を用いて整理することにした。

$$Re_{\theta} = \frac{U_{\theta \max} D_b}{\nu} \quad (5)$$

$$Re_z = \frac{U_{z \max} D_b}{\nu} \quad (6)$$

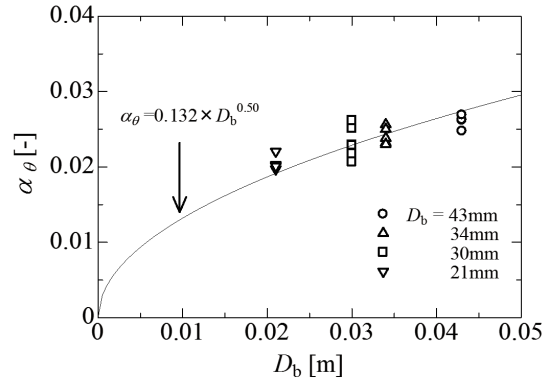


(a) 旋回方向最大流速

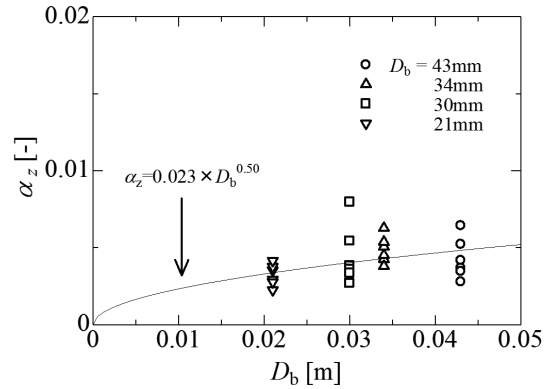


(b) 管軸方向最小流速

図8 主流流速 U_m と旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ および管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ との関係



(a) 分岐率 α_{θ}



(b) 分岐率 α_z

図9 分岐率と分岐管内径の関係

ここで、 ν は水の動粘度である。

式(5),(6)から求まるレイノルズ数と分岐管内径 D_b で無次元化した旋回流長さ $(L_{\max} - 4D_b) / D_b$ との関係を図10に示す。ここで主流の最大侵入深さ L_{\max} には既報⁽⁹⁾で示した実験結果を用いた。

図10に示すとおり無次元旋回流長さは以下の式でよく整理できることがわかった。

$$\frac{L_{\max}}{D_b} - 4 = 0.261 Re_{\theta}^{0.40} \quad (7)$$

$$\frac{L_{\max}}{D_b} - 4 = 0.518 Re_z^{0.40} \quad (8)$$

これは、分岐管内に形成される旋回流(図2の領域2に示す)の長さ $L_{\max} - 4D_b$ が旋回流開始位置の速度の0.4乗に比例すること意味する。そこで任意の位置 L より下の旋回流の長さ $L_{\max} - L$ も L の位置における速度の0.4乗に比例すると仮定することで、逆に任意位置 L における速度を推定できると考えられる。よって、以下、確認することにした。まず、式(5)を用い、式(7)を次式のように変形する。

$$U_{\theta \max}(4D_b) = \frac{\nu}{D_b} \left(\frac{L_{\max} - 4D_b}{D_b} - \frac{4D_b}{D_b} \right)^{0.40} \quad (9)$$

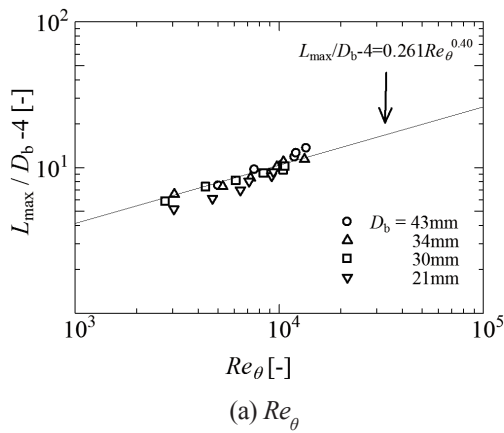
一方、式(9)の最大侵入深さ L_{\max} は、既報⁽⁹⁾で示したとおり次式により推測できることがわかっていいる。ここで Re_b は、主流流速および分岐配管内径を用いたレイノルズ数である。

$$\frac{L_{\max}}{D_b} = 0.28 Re_b^{0.30} = 0.28 \left(\frac{U_m D_b}{\nu} \right)^{0.30} \quad (10)$$

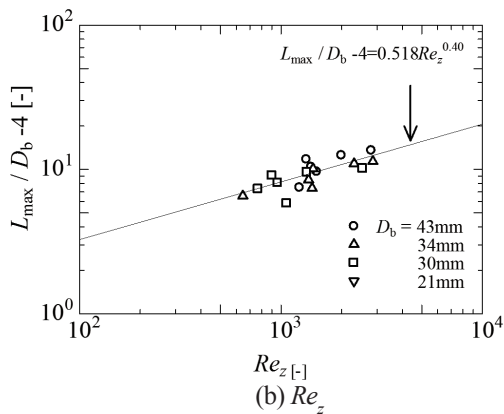
ここで、式(9)中の $4D_b$ を分岐管入口からの距離 L に置き換え、式(10)を用い、次式のとおり整理することで、位置 L ($L \geq 4D_b$) における旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ が予測できると考えた。

$$U_{\theta \max}(L) = \frac{\nu}{D_b} \left(\frac{0.28 Re_b^{0.30} - L}{D_b} \right)^{0.40} \quad (11)$$

同様な考えで式(6),(8),(10)を用いて、位置 L (L



(a) Re_θ



(b) Re_z

図10 無次元旋回流長さとしてレイノルズ数の関係

$\geq 4D_b$) における管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ を予測する式は以下のとおりとなる。

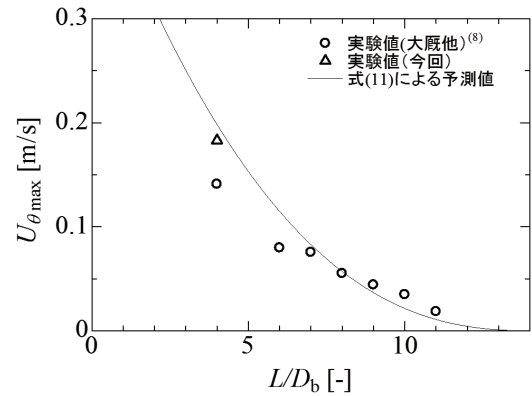
$$U_{z \min}(L) = \frac{v}{D_b} \left(\frac{0.28 Re_b^{0.30} - \frac{L}{D_b}}{0.518} \right)^{\frac{1}{0.40}} \quad (12)$$

得られた予測式の妥当性を調べるために、主流流速 $U_m = 7 \text{ m/s}$ 、内径 $D_b = 43 \text{ mm}$ の場合を対象に式(11),(12)から求まる予測値と大塚ら⁽⁸⁾が示した $U_{\theta \max}$ と $U_{z \min}$ の実験結果との比較を行った。図11に示すとおり式(11),(12)は、実験結果を比較的よく予測できていることがわかる。

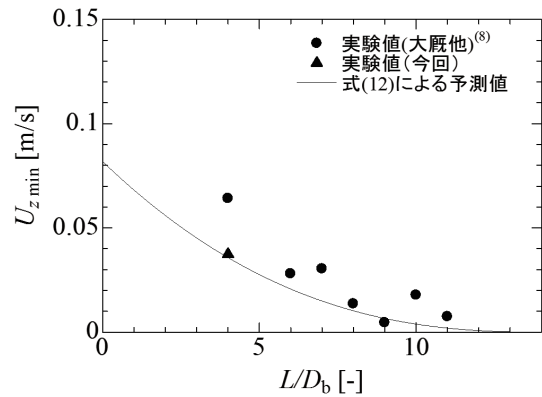
4. 結論

本研究では、主流上流に外乱がない内径 $D_b = 43 \text{ mm}$ 以下の下向き閉塞分岐配管を対象に分岐管内の流速分布特性を調べた。その結果、得られた知見は以下のとおりである。

(1) 主流流速および分岐管内径に関わらず $L = 4D_b$



(a) 旋回方向最大流速



(b) 管軸方向最小流速

図11 管軸方向流速分布 ($U_m = 7 \text{ m/s}$, $D_b = 43 \text{ mm}$)

位置における旋回方向流速 U_θ は半径方向に直線的に増加する傾向が、管軸方向流速 U_z は半径方向に直線的に減少する傾向が確認された。その流れの構造は単純な強制渦であった。

- (2) 旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ と管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ の主流流速 U_m との比である分岐率 α_θ および α_z は、分岐管内径により整理できた。
- (3) 分岐管内径およびレイノルズ数 Re_b を用いることで、分岐管入口からの位置 L ($L \geq 4D_b$) における旋回方向最大流速 $U_{\theta \max}$ と管軸方向最小流速 $U_{z \min}$ を予測する式を提案した。

文献

- (1) 中森信夫, 鈴田忠彦, 上野隆司, 笠原二郎, 半沢克巳, 桶谷浩一郎, 鶴飼修, 枝管内における熱成層現象, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D252 (1993), pp. 646-648.
- (2) 関西電力株式会社, 美浜発電所2号機の点検結果について(余剰抽出水系統配管からの漏えいの原因と対策), プレスリリース1999

- 年 分, < <http://www1.kepco.co.jp/pressre/1999/0525-1j.html> >, (参照日2013年9月20日).
- (3) Nuclear Regulatory Commission, Assessment of pressurized water reactor primary system leaks, US NRC, NUREG / CR-6582 (1999).
 - (4) 日本機械学会編, 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針, 初版 (2003), 日本機械学会.
 - (5) 近藤喜之, 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 千種直樹, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (Lsh評価手法の概要), 日本機械学会論文集B編, Vol. 70, No. 689 (2004), pp.178-191.
 - (6) 椎名孝次, 河村勉, 大塚雅哉, 水野正, 久恒眞一, 小倉健志, 谷本浩一, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 班目春樹, 閉塞分岐滞留部の熱成層化による水平管内渦侵入深さ予測 (温度変動特性に及ぼす放熱条件の影響), 日本機械学会論文集B編, Vol. 71, No. 703 (2005), pp.954-961.
 - (7) 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (L1評価手法の概要), 日本機械学会論文集B編, Vol. 70, No. 689 (2004), pp.176-183.
 - (8) 大厩徹, 中村晶, 長谷正紹, 細川茂雄, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム- 第1報 鉛直分岐配管に生じる流動現象-, 日本機械学会論文集B編, Vol. 75, No. 749 (2009), pp.68-76.
 - (9) 三好弘二, 中村晶, 土蔵孝博, 杉本勝美, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム (第4報, 配管内径が侵入深さおよび変動特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0026.
 - (10) 白石直, 並河孝治, 鈴木盛喜, 閉塞分岐配管内の旋回流の速度分布の研究, 可視化情報学会誌, Vol. 20, Suppl. No.2 (2000), pp.93-96.