

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656555

研究課題名(和文)自己形成流動場を利用したダイバータの革新的除熱方法の開発

研究課題名(英文)Development of an Innovative Divertor Cooling Method Utilizing Self-forming Flow Field in Multi-elbow Piping

研究代表者

橋爪 秀利 (HASHIZUME, Hidetoshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80198663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では複数エルボの連続接続配管下流に形成される旋回流特性をダイバータ冷却に応用するために、流れ場の詳細解析を可視化実験により行い冷却に適する配管レイアウトの選定を試みた。まず立体接続2段エルボ体系でエルボ曲率の流れ場への影響を評価し、曲率の小さいショートエルボが強い旋回流を生成することが分かった。次いでショートエルボを用いた5つの3段エルボ体系で流れ場を評価し、1段目-2段目および2段目-3段目エルボが立体接続の時に2段体系より強い旋回流が生成することを明らかにした。乱流エネルギーなどの乱流統計量は2段エルボ体系が一番大きくなり、今後これらの体系の伝熱性能を実験により確認する予定である。

研究成果の概要(英文)：In this study, characteristics of swirling flows induced downstream of multi-elbow piping layouts were minutely analyzed by means of flow visualization experiments, and potentially suitable piping layouts were selected for divertor cooling as an alternative to the flow field induced by a swirl tube. First, the influence of curvature radius of the elbow was estimated by using a dual-elbow layout in which two elbows were connected three-dimensionally. And it was found that the shorter the curvature radius was, the stronger the swirling flow became. Subsequently, five three-elbow layouts comprising three short elbows were tested, and a 3D-3D layout, in which the first and second elbows and the second and third elbows were connected three-dimensionally, respectively, gave the most strong swirling flow. On the other hand, turbulent statistics such as turbulent energy became largest in the dual elbow layout. These layout will be tested in terms of heat transfer in the next step.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：ダイバータ冷却 エルボ配管 旋回流 流れの可視化

1. 研究開始当初の背景

核融合炉ダイバータでは、数 $10\text{MW}/\text{m}^2$ の超高熱負荷を定常的に除去できる冷却技術が不可欠であり、現在では円管内にねじりテープを挿入したスワール管や管壁内部に凹凸を施したスクリー管を用いれば除熱が可能であることが示されている。しかしながら、これらの冷却管では将来の核融合炉において使用する場合に、内部の構造物の熱疲労による割れの進展が大きな問題となり、即ち耐久性の観点で問題となる可能性が大きい。

一方、これまでに申請者らは複数エルボの連続接続配管の下流において旋回流が生じることを実験的に明らかにしてきており、この旋回流がスワール管内に生成する旋回流と局所的に同程度であることが分かっていた。このエルボ下流に自己形成される旋回流をダイバータ冷却に応用することが可能であれば、上述の耐久性は大幅に向上し、また内部に構造物を必要としないことから製造性の簡便化や湾曲した冷却面への適応性向上などの利点が多い冷却技術が確立されることが期待される。

2. 研究の目的

上述のように複数エルボの連続配管内における複雑な流動では、条件が整うとエルボ下流において局所的にスワール管内でのものと同程度の旋回成分を持つ旋回流が自発的に形成されることが申請者らの実験研究により分かっている。そこで、本研究ではこの自己形成する流れ場を核融合炉ダイバータ冷却へ応用することを念頭に、いまだ十分評価されていない複数エルボの連続配管内における流動場を実験により明らかにすることを目的としている。エルボ下流で生じる旋回流の特性、旋回流を生じさせる最適な配管レイアウトを実験により明らかにし、ダイバータの革新的除熱方法への展開を図る。

3. 研究の方法

実験は現有する流動ループおよび可視化システムを用いて行った。実験装置の概略を図2に示す。配管の内径は $D = 56\text{mm}$ である。流れの可視化には波長 808nm のダイオードレーザー (Oxford Lasers) および空間解像度 1024×1024 ピクセルの高速度カメラ (フォトロン FASTCAM)、解析ソフト VidPIV から成る 2D-PIV システムを用いた。1回の撮影において 2048 枚の粒子像を取得し、1024 個の速度ベクトルの時系列データ (フレームレート 30 fps) を取得し時間平均量等の解析を行った。トレーサーには直径 $10\ \mu\text{m}$ の銀コーティング粒子を用いた。流体にはヨウ化ナトリウム水溶液を用いることで屈折率をアクリル流路のものと同合わせ、撮影で得られる粒子像の歪みを低減し複雑なエルボ配管内の詳細な可視化を可能としている。Re 数は 15 万 (軸方向平均流速 2.3m/s) に設定した。

実験は、エルボ曲率半径の旋回流への影響

を評価するため、まず立体接続 2 段エルボ体系を用いて行った。図1は2つの 90° エルボを立体的に接続した体系で、この場合1段目エルボを通過した流れが2段目エルボ内で周方向に誘導され、下流において旋回流が発生する。エルボ曲率半径は2種類、中心軸の曲率半径と管直径との比 (γ) が 1.5 のものと 1.0 のもの (それぞれロングエルボ、ショートエルボと呼ばれる) を用意し、それぞれ図3の可視化断面 (流れ垂直断面および流れ方向断面) において計測を行った。

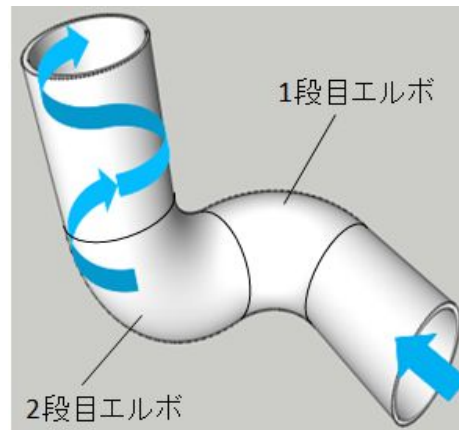


図1 3次元接続二段エルボ体系における流れ場の概略

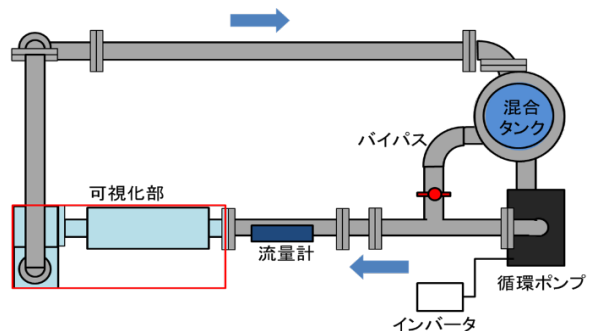


図2 実験装置概略

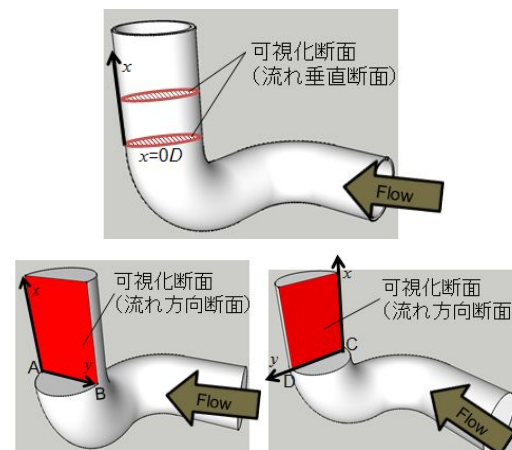
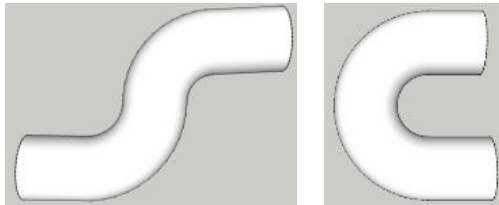


図3 可視化断面

次に、更なる強い旋回流発生の可能性を追求するため、3段エルボ体系により実験を行

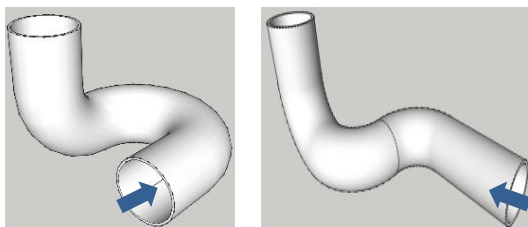
った。3段エルボ体系では上流側と下流側の2つのエルボの組み合わせが2か所現れ、また2つのエルボの組み合わせは図1の立体接続と図4に示す2つの組み合わせ(それぞれS字接続およびU字接続と呼ぶ)の合計3つがある。立体接続では前述のように旋回流が生成されることが分かっているが、S字接続においてはエルボ腹側で流れが加速されるということがこれまでの申請者らの実験により分かっている。またU字接続では曲りの距離が長いこと流体に大きな遠心力がかかり流れが加速すると考えられる。



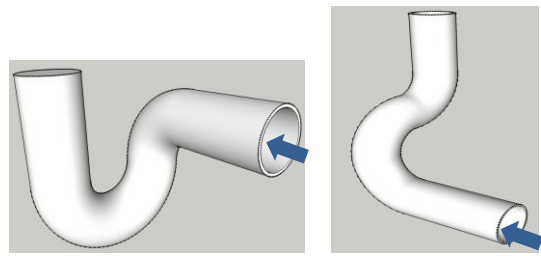
(a) S字接続 (b) U字接続

図4 立体接続以外の2つエルボの組合せ

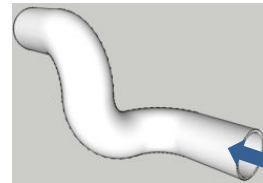
よって、今回設計した3段エルボ体系は旋回流を生成するための立体接続を組み合わせた体系として、立体接続の前にU字接続とS字接続を組み込み、流れを加速させる(a)1st・2ndエルボをU字接続、2nd・3rdエルボをU字接続した「U字+立体接続」体系、(b)1st・2ndエルボをS字接続、2nd・3rdエルボを立体接続した「S字+立体接続」体系を考案した。また立体接続の後にU字接続とS字接続を組み込み、立体接続で発生した旋回流を加速させる体系として(c)1st・2ndエルボを立体接続、2nd・3rdエルボをU字接続した「立体+U字接続」体系、(d)1st・2ndエルボを立体接続、2nd・3rdエルボをS字接続した「立体+S字接続」体系が強い旋回流生成に適していると考えられる。一方、エルボの腹側に高速流れが寄りやすい傾向があるため、高速流れを旋回させる組み合わせとして(e) 1st・2ndエルボを立体接続、2nd・3rdエルボを立体接続した「立体+立体接続」体系を考案した。それぞれの体系を図5に示す。



(a) U字+立体接続 (b) S字+立体接続



(c) 立体+U字接続 (d) 立体+S字接続



(e) 立体+立体接続

図5 3段エルボ体系

4. 研究成果

立体接続2段エルボにおける曲率半径の影響について、 $\gamma=1.0$ 、 1.5 のそれぞれの場合の時間平均二次流れ(流れ垂直断面内の流況)の下流方向への変化を図6に示す。図から両方の場合で旋回流が発生するが、曲率半径が小さい方が強い旋回流となっていることが分かる。また、旋回流は下流8Dまである程度の強さを持続し、強い旋回成分をもつ領域が管壁に沿って場所を変え旋回中心も下流に流れるに従って移動していることも見て取れる。旋回流は1stエルボで形成される高速流れが2ndエルボの管壁に沿って流れることにより生成することから、曲率半径が小さいほどより速い高速流れが2ndエルボ内に流入し $\gamma=1.0$ のほうが強く広域な旋回流が発生したと考えられる。

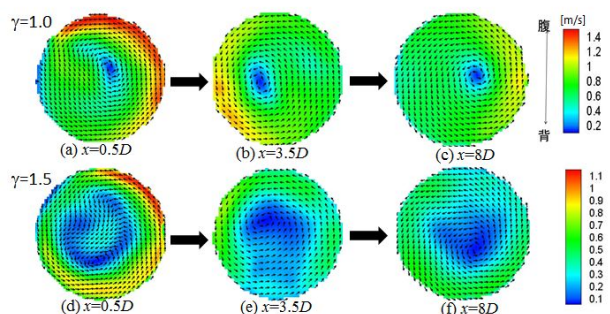


図6 流れ垂直断面における時間平均速度ベクトル場の下流における変化

旋回流の強さを定量的に評価するために、以下の式(1)で表される無次元数、スワール数を用いる。

$$Sw = G_{\theta} / (G_z \square R) \quad (1)$$

ここで G_{θ} は軸方向角運動量の軸方向流束の

流れ垂直断面内平均、 G_z は軸方向運動量の軸方向流束の流れ垂直断面内平均、 R は管内径である。曲率半径の違いによる旋回流強さの違いをスワール数で比較した結果を図7に示す。図中の全面・片面はそれぞれ G_0 、 G_z の積分範囲を全断面・エルボ背側の半断面にした結果である。この図から $\gamma=1.0$ の時は $\gamma=1.5$ の倍程度の旋回流強度となっていることが分かる。また全面と片面のグラフが互いに交差していることから、断面内の旋回流成分の大きい領域はらせん状に分布していることが分かる。

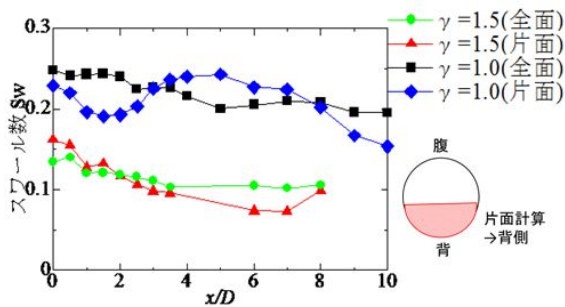


図7 2nd エルボ下流でのスワール数変化

立体接続2段エルボの実験結果から、曲率半径の小さいショートエルボが強い旋回流を生じさせることが明らかとなったため、3段エルボ体系での実験は3つのショートエルボの組合せのみを実験に用いた。図8に5つの3段エルボ体系および3次元接続2段エルボ体系での流れ方向におけるスワール数の変化を示す。図からスワール数は、立体+立体接続体系が3段エルボ体系では一番大きく、また2段エルボ体系よりも1.4倍大きいことが分かる。また、立体+立体接続体系の場合、下流5Dまで進んでもスワール数は大きく減衰しないことが分かった。このことから旋回流特性の観点からは立体+立体接続体系が適していると言える。

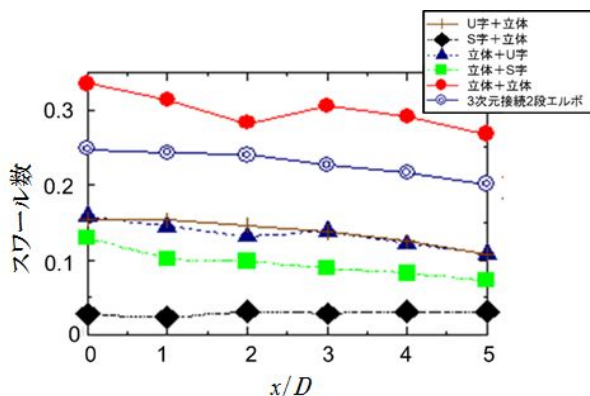


図8 エルボ下流におけるスワール数変化

伝熱の観点から、流れの乱れが大きい場所では流体の混合が促進されるため、伝熱もより促進されると考えられる。また、運動量と熱の輸送のアナロジーから、流れのせん断応

力、つまりレイノルズ応力が大きい場所では伝熱促進が期待される。ここでは乱流の強度を表す乱流エネルギーと流体の乱流による流体のせん断応力を表すレイノルズ応力を用いて伝熱促進の評価を行う。そこで、時間平均流れにおける旋回流特性が優れている(強い旋回流が発生する)3次元接続2段エルボ体系および立体+立体接続3段エルボ体系において、乱流量を評価した。

3次元接続2段エルボにおける乱流エネルギー、レイノルズ剪断応力の流れ方向断面内の分布をそれぞれ図9、10に示す。

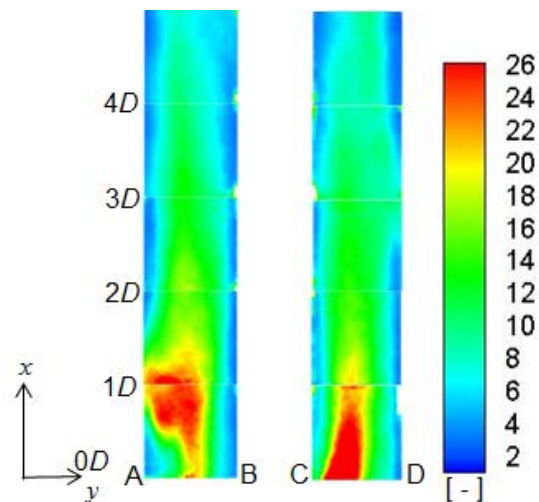


図9 3次元接続立体エルボにおける乱流エネルギー分布

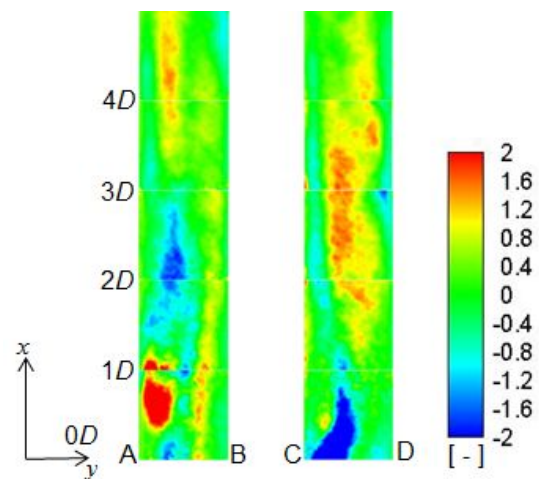


図10 3次元接続立体エルボにおけるレイノルズ剪断応力分布

それぞれの量は同じレイノルズ数における発達乱流の壁面摩擦速度で無次元化している。図から、それぞれの乱流量は管中心付近で大きく壁面付近では小さいことが分かる。壁面からの伝熱を考えた場合、管壁近傍のこれらの値が大きく影響するため、管壁近傍($r/D=0.4\sim 0.48$)での平均量を求め、3次元接続2段エルボ体系および立体+立体接続3段エルボ体系の値を平滑管のものと比較し

た。

表1 乱流量の壁面近傍における平均値

	3次元接 続2段 エルボ	立体+立 体接続3段 エルボ	平滑管
乱流エネル ギー	5.92	4.54	3.17
レイノルズ 剪断応力	2.68	2.32	0.876

表1から、乱流エネルギー、レイノルズ剪断応力とも3次元接続2段エルボ体系が一番大きいことが分かる。時間平均場における旋回流が最も強かった立体+立体接続3段エルボ体系も平滑管よりは大きくなるが、乱流量の観点からは3次元接続2段エルボ体系が伝熱促進をより期待できる。

以上のように、時間平均場における旋回流強度の観点からは、立体+立体接続3段エルボ体系のスワール数が最も強く、下流5Dまで進んでも大きく減衰しなかったため伝熱促進が期待できる。しかしながら乱流量の観点からは3次元接続2段エルボ体系において管壁近傍の乱流量が大きいと、2段エルボのほうが除熱に適していると言える。今後は実際に伝熱実験を通して、可視化実験で伝熱促進が期待できるこの2つのエルボ体系の伝熱性能を取得し、スワール管との比較を行うことによってダイバータ冷却への適用性を伝熱性能とポンプパワーの観点から評価する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Shoichi Kodate, Tatsuya Kubo, Shinji Ebara, Hidetoshi Hashizume, Feasibility Study on Application of a Self-Formed Flow Field downstream of Elbows to Devtor Cooling, Proceedings of the 21st International Conference on Nuclear Engineering, 査読有, 2013, ICONE21-16105 (doi:10.1115/ICONE21-16105).

〔学会発表〕(計4件)

古舘翔一、江原真司、橋爪秀利、連続三段エルボ配管下流で生じる旋回流の可視化計測とダイバータ冷却への適用可能性の検討、日本原子力学会2014年春の年会、2014年3月26-28日、東京

Shoichi Kodate, Tatsuya Kubo, Shinji Ebara, Hidetoshi Hashizume, Feasibility Study on Application of a Self-Formed Flow Field downstream of Elbows to Devtor Cooling, The 21st International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 21), 2013年7月29日-8月2日、中国・成都

古舘翔一、江原真司、橋爪秀利、三段エルボ下流流動場の可視化計測及びダイバータ

冷却への適用の検討、第50回日本伝熱シンポジウム、2013年5月29-31日、仙台
古舘翔一、久保達也、江原真司、橋爪秀利、エルボ下流自己形成流動場のダイバータ冷却への適用可能性の評価1、日本原子力学会東北支部第36回研究交流会、2012年12月7日、仙台

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋爪 秀利 (HASHIZUME, Hidetoshi)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80198663

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし