



大口径・高流速配管の流動励起振動試験

藤井 正 近澤 佳隆 此村 守 山口 彰*

大洗工学センター システム技術開発部

*大洗工学センター 要素技術開発部

Flow Induced Vibration Tests of Large Diameter and High Velocity Piping

Tadashi FUJII Yoshitaka CHIKAZAWA Mamoru KONOMURA Akira YAMAGUCHI*

System Engineering and Technology Division, O arai Engineering Center

*Advanced Technology Division, O arai Engineering Center

実用化戦略調査研究で検討しているナトリウム冷却炉では、建設コスト削減の観点から、冷却系ループ数を2ループに削減している。ループ数削減に伴い、従来設計と比較して、1次冷却系配管の口径が大型化し、かつ管内流速も増加する。このような大口径・高流速の配管系においては、エルボ（曲がり）部近傍での流動状況や、流れの乱れに起因する振動現象に関する知見が不足していた。そのため、ナトリウム冷却炉の1次冷却系ホットレグ配管を1/3縮尺で模擬した水試験装置を用いて、エルボを含む配管系の流動励起振動特性を把握する試験を開始した。これまでに、アクリル製試験体を用いて流れの可視化を行うとともに、管内の流速分布等の流動特性を把握した。また、配管への振動源となる流体の圧力変動に関しては、エルボ部での流れの剥離による乱れの程度に応じて配管内の圧力変動が4領域に区分できることを確認した。

The conceptual design study of sodium cooled reactor is in progress in the " Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems ". The cooling system is composed of two loops in order to reduce plant construction cost. With loop number reduction, large diameter pipings are adopted and mean velocity in the piping also increases as compared to the former design. As for these piping systems, knowledge concerning hydraulic behaviors around the elbow and vibration phenomenon, which is caused by the turbulence of fluid, was insufficient. Therefore, flow induced vibration tests were started using water test facility, which simulates a hot leg piping of primary cooling system of large scale reactor at 1/3 reduced scale. Until now, flow visualization was conducted using acryl model and hydraulic behaviors such as velocity distributions in the piping were clarified. Concerning pressure fluctuations of the fluid which become vibration sources to the piping, it was confirmed that the pressure fluctuations in the piping could be divided into four sections according to the degree of the turbulence caused at flow separation in the elbow.

キーワード

実用化戦略調査研究，ナトリウム冷却炉，1次冷却系，配管，エルボ，可視化，流速，流動励起振動，剥離，圧力変動

Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System, Sodium Cooled Reactor, Primary Cooling System, Piping, Elbow, Visualization, Velocity, Flow Induced Vibration, Flow Separation, Pressure Fluctuation

1. はじめに

実用化戦略調査研究で検討を進めているナトリウム冷却大型炉¹⁾(以下、大型炉)では、建設コス

トを低減する方策の一つとして、主冷却系の構成をもんじゅ等で採用された3ループから2ループに削減してシステムを簡素化している。しかし、ルー



藤井 正

FBRシステムグループ所属
ナトリウム冷却FBRの設計研究及び配管試験に従事



近澤 佳隆

FBRシステムグループ所属
副主任研究員
小型炉概念設計に従事
工学博士



此村 守

FBRシステムグループリーダー
原子炉プラントの設計研究及びグループ総括に従事
工学博士



山口 彰

流体計算工学研究グループリーダー
伝熱流動研究，原子力安全工学の統括に従事
工学博士

ブ数の削減により1ループあたりの冷却材流量がもんじゅの6倍程度まで増加するため、冷却系の配管口径を最大約1.3m(もんじゅの約1.5倍以上)まで大型化し、管内流速も従来設計を大幅に上回る9m/s台(もんじゅの約1.5~3倍近く)に増大する設計としている。

ナトリウム冷却炉は、軽水炉と比べて冷却系を低圧で設計でき、薄肉の配管を採用している。このため、大口径かつ薄肉構造の配管系では、冷却材流速の増大に伴い流体の乱れに起因する流動励起振動の発生に対して留意する必要があるが、平均流速9m/s台の配管系を対象とした流動励起振動特性に関する知見は限られていた。また、エロージョンやキャピテーションによる配管材料の損傷を回避する観点から、大口径の配管内における流動特性を把握する必要があった。

そこで、配管系の健全性評価に反映するため、大型炉の1次冷却系ホットレグ配管を1/3縮尺で模擬した水試験装置を製作し、エルボを含む配管系の流動励起振動試験²⁾を開始した。

本報告は、試験装置の概要、及びアクリル製試験体を用いた可視化試験の結果について述べる。

2. 試験目的と装置の概要

2.1 大型炉の冷却系構成と試験目的

大型炉の1次冷却系概念図を図1に、1次冷却系配管の断面図を図2に示す。また、1次冷却系

配管の主な仕様と流動条件をもんじゅ、実証炉設計と比較して表1に示す。大型炉では、実証炉設計概念を踏襲し、1次冷却系配管が原子炉容器のルーフデッキを貫通する上部流方式を採用している。配管材料には、オーステナイト系ステンレス鋼よりも高強度で低熱膨張率の特徴を有する12Cr鋼を適用し、配管長を大幅に短縮している。

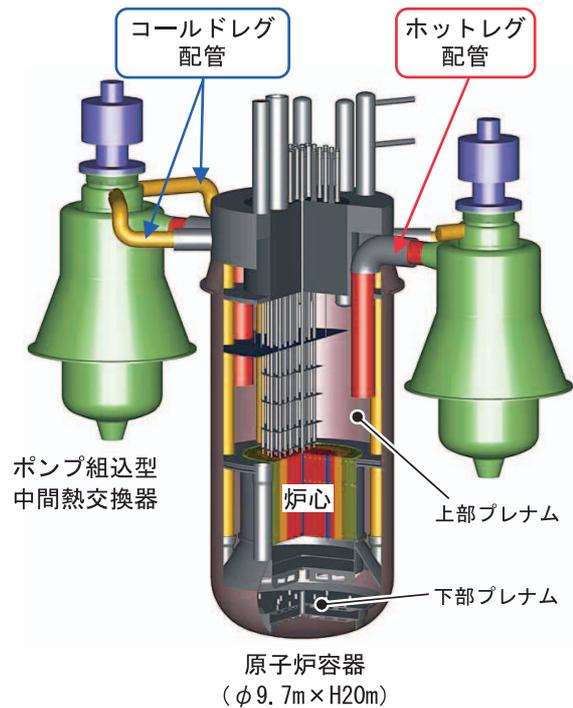


図1 Na冷却大型炉の1次冷却系概念図

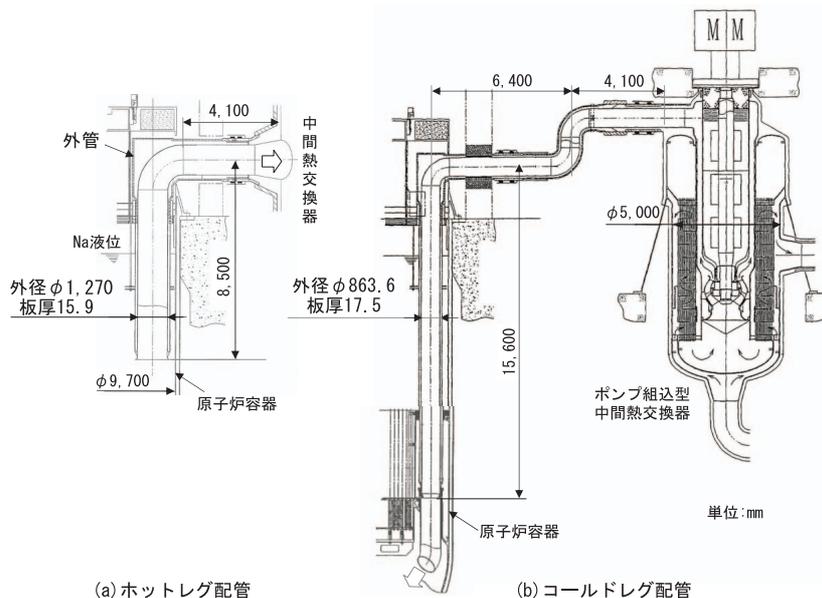


図2 1次冷却系の配管形状

表1 1次冷却系配管仕様の比較

		もんじゅ	実証炉設計	大型炉設計
電気出力		28万kWe	67万kWe	150万kWe
冷却系ループ数		3ループ	3ループ	2ループ
冷却材流量 / ループ		$5.12 \times 10^6 \text{kg/h}$	$9.79 \times 10^6 \text{kg/h}$	$3.27 \times 10^7 \text{kg/h}$
ホット レグ 配管	口径	32 B(812.8mm)	38 B(965.2mm)	50 B(1,270.0mm)
	板厚	11.1mm	12.7mm	15.9mm
	配管長	34.3m	22.3m	13.4m
	平均流速	3.5m/s	4.8m/s	9.2m/s
	平均Re数	1.0×10^7	1.7×10^7	4.2×10^7
コールド レグ 配管	口径	24 B(609.6mm)	30 B(762.0mm)	34 B(863.6mm) ^{*1}
	板厚	9.5mm	20.0mm	17.5mm
	配管長	38.0m	27.3m	26.9m
	平均流速	6.1m/s	7.8m/s	9.8m/s
	平均Re数	1.1×10^7	1.7×10^7	2.5×10^7
クローズ オーバ レグ 配管	口径	32 B(812.8mm)	削除 ^{*2}	削除 ^{*3}
	板厚	11.1mm		
	配管長	30.3m		
	平均流速	3.4m/s		
	平均Re数	8.2×10^6		

* 1 大型炉設計：コールドレグ配管は1ループ2本

* 2 実証炉設計：中間熱交換器と主循環ポンプを1次系容器内に収納

* 3 大型炉設計：中間熱交換器内部に主循環ポンプを組み込み

1次ナトリウムは、主循環ポンプで加圧されコールドレグ配管を介して原子炉容器の下部プレナムから炉心に流入する。炉心を出た高温のナトリウムは、原子炉容器の上部プレナムに配置されたホットレグ配管を経由して中間熱交換器に流入し、2次ナトリウムと熱交換した後、主循環ポンプに至る。なお、コールドレグ配管は、炉内では炉心槽と原子炉容器間のアニユラス部に配置されるが、原子炉容器径の増大を抑制するため1ループあたり2本に分割している。

配管内の流動条件としては、米国の実験炉FFTF (Fast Flux Test Facility) で実施されたナトリウム試験データ³⁾に基づき、エロージョンを抑制するための目安として、表1に示すように管内の平均流速を9 m/s台に設定している。しかしながら、流動場の指標となるレイノルズ数 ($Re = U \cdot D / \nu$ 、 U ：平均流速、 D ：配管内径、 ν ：流体の動粘性係数) は、配管の大口径化と流速増大に伴って、最大 4.2×10^7 となり従来実績を大きく上回る。

ループ数削減によって管内流速が増大することから、流体の乱れに起因する流動励起振動が大型炉配管設計における重要課題として顕在化してきた。そこで、配管系を対象とした流動励起振動評価手法の整備を進めてきた。これまでに、実証炉設計の逆U字管を模擬した水流動試験⁴⁾で計測さ

れた管壁での圧力変動データに基づいて流体励振力を推定し、1次冷却系配管の振動応答を概略評価している。ただし、参考とした逆U字管試験では、圧力変動の計測点がエルボ部中心領域の数点に限られていた。一方、エルボ出口部には剥離域が形成され、剥離域下流では配管内の流れの状態が大きく変化することが知られている。このため、配管系の振動応答を評価する観点からは、エルボ部のデータだけでは十分でなく、剥離域の影響を受けると考えられるエルボ下流の領域も含む圧力変動特性を詳細に把握する必要があった。

また、励振源となる圧力変動特性の流速やRe数に対する依存性の有無を確認すること、並びにキャピテーション評価のための局所最大流速を明確化すること等の課題もあり、配管内の流動特性も詳細に把握する必要があった。

そこで、冷却系ループ数を削減したプラント概念の成立性を見通すため、実機配管系の健全性評価に必要な流動及び振動特性に関するデータを詳細に取得することを目的として、2001年度から試験計画の検討を進めてきた。

2.2 試験装置の概要

本試験では、口径が最大の1次冷却系ホットレグ配管を代表部位として選定し、エルボ下流での

流動・振動特性を重点的に計測することにした。試験装置は、設計メーカが保有する国内最大規模の水流動試験設備を活用して製作している。励振源となる配管壁上の圧力変動は動圧に比例すると考えられるため、本試験では流動励起振動特性の支配因子として管内平均流速を選定し、実機と同一流速を基本条件とした。また、直径約1.3m規模の流動特性を予測するためには、可能な限り大きなスケールの試験体を用いて信頼性のあるデータを取得することが必要と考え、実機配管の1/3縮尺とした。これにより、実機流速9.2m/sにおけるRe数は、常温水で約 3.7×10^6 、60℃の温水で約 8×10^6 となり、実機配管体系（ナトリウム、550℃）の約1/5のRe数条件となる。なお、水とナトリウムの物性の相違やポンプ設備の制約により、実機Re数領域までのデータ取得は困難であるため、本試験で取得する各種データの流速及びRe数依存性を分析し、実機条件に対する外挿性を検討する。

試験装置の概略系統図を図3(a)に示す。2台の大型ポンプで貯水槽から水を吸込み、ポンプ脈動の影響を遮断するため中間タンクに一旦送水する。その後、原子炉容器に相当する整流タンクに送水し、ホットレグ配管を模擬したエルボ試験体内部を流れる際の流動・振動特性を計測する。試験体としては、流動特性の把握と振動応答評価での入力条件となる圧力変動データの詳細計測を目的として、配管側の振動を極力抑えた剛体と見なし得る可視化試験用アクリル管と、実機と剛性を

合わせて配管系の振動特性（変位、応力）を計測する振動試験用ステンレス管の2種類を製作し、支持架台も含めて交換できる構成としている。

なお、整流タンク内部には、多孔板とパイプを組合せた整流構造を設置し、試験体への吸込み流れを均一化した。また、試験体吸込部のベルマウスについても、キャビテーション防止の観点から、実機配管の形状を忠実に模擬した。

図3(b)は、アクリル製試験体の設置状況を示す。試験前の予備検討として行った流動解析結果に基づき、エルボ近傍に圧力計測点を集中的に配置した。また、鋼材をやぐら構造に組合せた試験体支持架台を設置して装置全体の剛性を高め、圧力変動計測時に試験設備側からの振動の影響を極力排除した。

表2にステンレス管を用いた場合の振動特性に関する相似則を示す。配管材料の縦弾性係数や固有振動数については、試験体の縮尺比や流体の密度比に基づく相似則をほぼ満足している。

3. 試験結果の検討

2003年度に実施した可視化試験では、常温水を用いて、平均流速を0.8m/sから9.2m/sの範囲で変化させ、流動状況の観察、速度分布や管壁上の圧力を計測した。

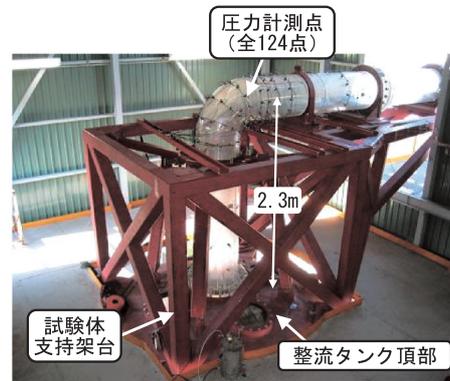
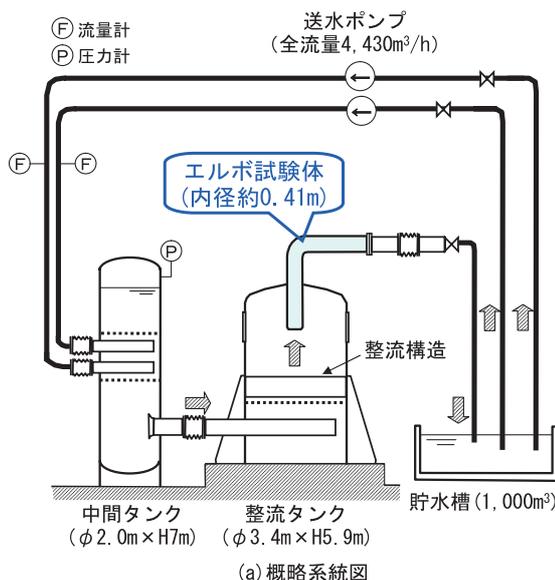


図3 1/3縮尺流動励起振動試験装置の構成

表2 振動特性に関する相似則

項目	実機配管 (12Cr鋼)	試験体 (SUS304)	実機との比率	備考
配管内径	1 238.2mm	0 412.7mm	1/3	
流体密度	820.2kg/m ³	983.2kg/m ³	1.2	実機550 水試験60
流速	9.2m/s	~9.2m/s	1	
材料密度	7 860kg/m ³	7 920kg/m ³	1.01	
縦弾性係数	1.66 × 10 ¹¹ N/m ²	1.95 × 10 ¹¹ N/m ²	1.17	
固有振動数	7.1Hz(1次モード)	21Hz	約3	
配管長	上流直管7.13m 下流直管4.14m	上流直管2.38m 下流直管1.38m	1/3	
肉厚	15.9mm	5.0mm	約1/3	
Re数	4.2 × 10 ⁷	~8 × 10 ⁶	最大1/5程度	
変位	-	-	1/3	
加速度	-	-	3	
応力	-	-	1.2	
圧力変動	-	-	1.2	

3.1 配管内の流動特性

(1) 管内の流況可視化

実機流速9.2m/s条件における流況可視化結果を図4に示す。なお、図中のアルファベット記号は圧力計測位置を示す。特に、エルボ出口部近傍では、流れ方向に約100mm間隔、各断面内では周方向に30度間隔で計測点を配置している。

試験体を設置している整流タンク内では十分に均一化された流れとなっている。このため、試験体吸込部では水中渦やキャピテーションの発生は見られず、エルボ上流側は良く整流された流れとなっている。その後、エルボ腹側の約67.5度(C'断面)付近で剥離が生じ、剥離点から約290~

340mm下流のF断面付近で再付着する。再付着点に関しては、F断面位置を境界として定常的に50mm程度変動している。この剥離点から再付着点までの領域が、剥離域と定義される。また、剥離域の下流側では、剥離域から渦が周期的に放出される状況が観察され、剥離域で生じる乱れが管内流れに大きく影響することを確認した。なお、流速を低下させた場合の流況も同様に観察したが、剥離域の形成範囲等は平均流速9.2m/sの場合と有意な差は見られなかった。

(2) 速度分布の計測

エルボ出口下流3箇所における速度分布をレーザー・ドップラ流速計により計測し、平均流速で無

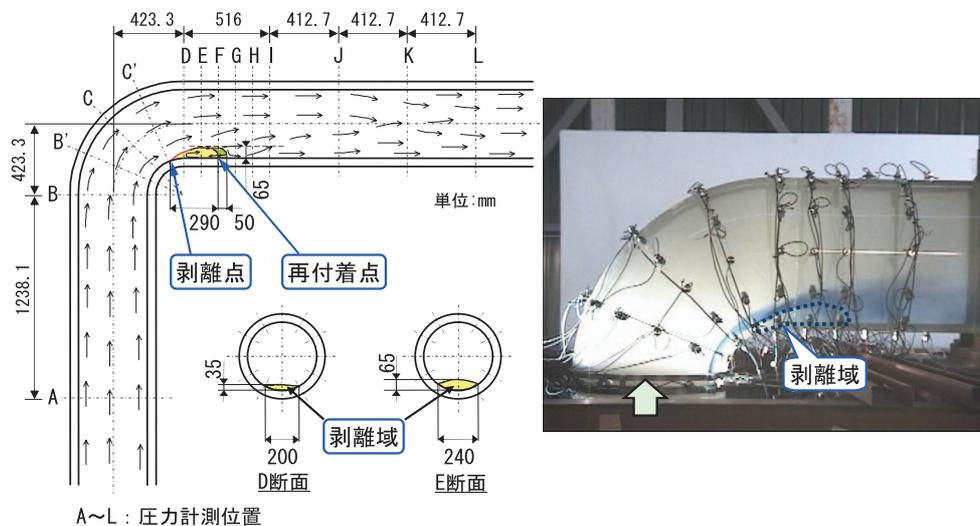


図4 実機流速条件での可視化状況

次元化した管内速度分布を図5に示す。

図中①の位置（エルボ出口に相当するD断面の下流75mm）では、軸方向（流れ方向）の速度成分が180度管壁からの無次元距離（径方向距離を内径で無次元化）約0.15の範囲でマイナス値を示し、逆流している。このことから、エルボ腹側の領域が剥離域に入っていることが分かる。この軸方向速度成分は、無次元距離約0.22付近で、無次元流速が約1.3まで増大するが、それより上の主流ではゆるやかに減少する傾向を示す。一方、周方向の速度成分は若干の偏りが見られるが、比較的バラツキは小さい。図中②の位置（再付着点近傍のF断面下流50mm）では、軸方向速度成分に逆流域は見られない。しかし、180度管壁近傍では、無次元流速約0.4まで上昇し噴流のような特徴を示した。この軸方向速度成分は、無次元距離約0.05から約0.1にかけて低下した後、再び増加している。図中③の位置（H断面下流50mm）では、剥離による逆流や偏流の影響が緩和され、180度管壁近傍でも無次元流速が0.5以上と低速度領域が解消されつつある。図5には、他の流速条件での計測結果も併せてプロットしているが、無次元速度分布はほぼ一致することを確認した。

次に、エロージョンやキャピテーションの発生可能性を確認する観点から、気泡を用いたトレー

サ法によってエルボ部での最大流速を評価した。直径5mm程度の気泡を整流タンクから注入して、高速度ビデオの画像2画面での気泡の移動距離を測定し、図6に示すような局所流速を求めた。最大流速は、エルボ腹側近傍で約14m/s（無次元流速で約1.5）となり、試験前に実施した流動解析での結果とほぼ一致した。この最大流速点の近傍でも、無次元流速1.2~1.5程度の高流速部が分布しているので、管壁近傍にも同程度の高流速部が生じていると考えられる。エルボ部での最大流速の計測結果に基づき、実機条件でのキャピテーションの発生の有無を評価した。評価方法としては、次式で定義されるキャピテーション数と局所の圧力係数（ $-C_p$ ）を求め、 $\sigma = -C_p$ をキャピテーション発生判定基準とする。

$$\sigma = \frac{\bar{p} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}, \quad -C_p = \frac{-(p - \bar{p})}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

ここで、 \bar{p} ：断面の平均圧力、 p_v ：飽和蒸気圧、 p ：局所圧力、 ρ ：流体の密度である。

実機ナトリウム条件では、キャピテーション係数 $\sigma = 5.72$ 、局所圧力係数（ $-C_p$ ） $= 2.25$ となり、局所の最低圧力は飽和蒸気圧を上回るため、キャピテーション発生を回避できる見通しを得た。な

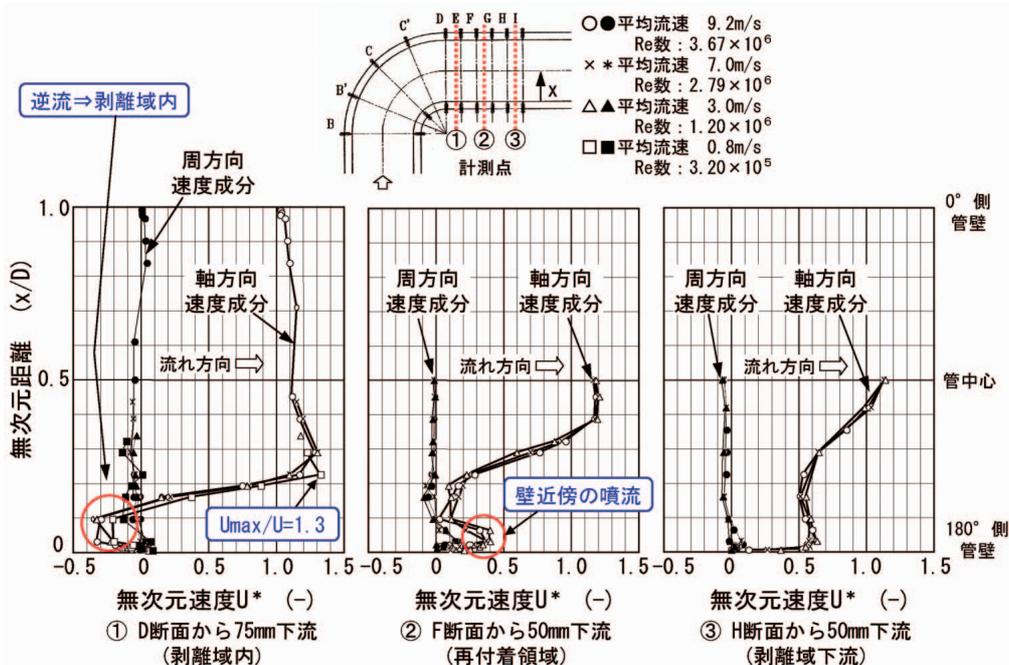


図5 剥離域近傍の無次元速度分布

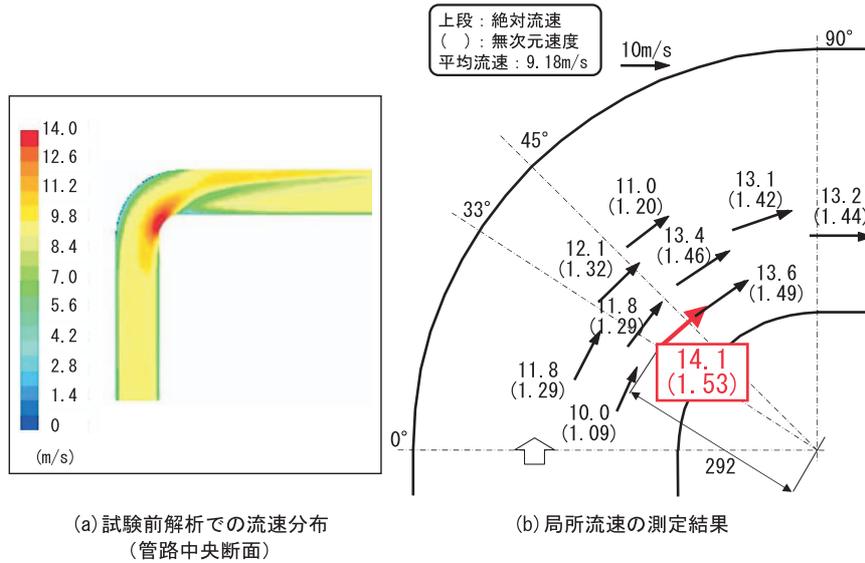


図6 エルボ部の最大流速

お、実機ホットレグ配管では、曲率の小さいベルマウス部での圧力低下がエルボ部より厳しくなるが、ベルマウス形状を適正化することでキャビテーション発生を回避できる見通しである。

(3) エルボ部の圧力損失

配管の圧力損失は、管内流体に与えられる乱れのエネルギーに相当する。そこで、エルボでの乱れ強さを評価する観点で、試験体全体での圧力損失係数を評価した。整流タンクと試験体出口部の差圧を動圧で除したものを全圧力損失係数として定義し、Re数に対する依存性を従来データ⁵⁾と併せ

て図7に示す。

全圧力損失係数 ζ_{tot} は、管の表面粗さにも影響される。従来試験では、表面粗度係数 (= 表面粗さ / 管内径) が0.0025の場合、Re数の増加に伴い、 ζ_{tot} が亜臨界域、遷移域を経て超臨界域に入りほぼ一定となる傾向が示されている。しかし、実機配管の表面粗さに相当する表面粗度係数0.00003の場合、Re数が 2×10^5 近傍で一旦極小値を示した後、Re数の増加に伴い ζ_{tot} が若干増加する傾向を示すが、一定値に至るかどうかは、この従来データのみでは明確でなかった。図7の印が今回の

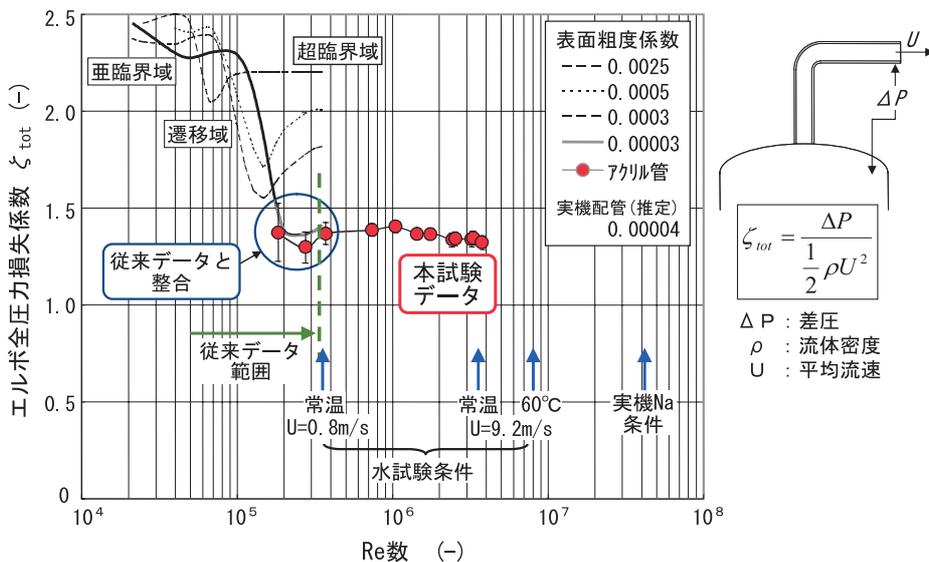


図7 エルボの全圧力損失係数

試験データを示す。Re数 3×10^6 以上の領域におけるデータは、今回初めて取得されたものである。Re数 3×10^6 以下の領域では、 σ_{tot} は従来データにおける表面粗度係数 0.00003 のカーブをやや下回る。平滑なアクリル管では、表面粗度係数はほぼ 0 と考えられるので、本試験データは従来データと整合している。

本試験でも、遷移域における σ_{tot} の極小値は Re 数 3×10^6 付近にある。その後、 σ_{tot} は Re 数の増加に伴い緩い右下がり度で 1.3 程度に収束することが明確になった。従来データ範囲より一桁大きい高 Re 数領域においても、 σ_{tot} が 1.3 程度と小さいことは、エルボでの曲がりにより乱れに与えられるエネルギーが少ないことを意味するので、配管振動防止の観点から好ましい傾向である。このようにエルボの全圧力損失係数は、Re 数 10^6 以上の超臨界域ではほぼ一定値に収束する傾向を示しており、Re 数依存性は小さいと考えられる。

今後、粘性の小さい温水を用いた可視化試験や表面粗さが実機配管相当のステンレス管を用いた振動試験を予定しており、表面粗さの影響確認も含めて、さらに高 Re 数領域 ($\sim 8 \times 10^6$) のデータを取得し、管内の流動特性や圧力損失係数の Re 数依存性を明確化する予定である。

3.2 配管内の圧力変動特性

(1) 圧力変動の概念

図 8 に、配管内における圧力変動の概念を模式的に示す。管内を流れる流体の乱れによって生じた渦が圧力変動を引き起こし、配管内面に振動外力として作用する。このような渦による加振力は、温度計ウエルのような構造物後流に生じるカルマン渦による強制振動で見られる卓越振動数での周期的な成分のみが存在するわけではなく、ある程度広い振動数範囲にわたって加振力が存在する。したがって、広い振動数範囲に存在する加振力のうち、配管系の固有振動数における成分で励振⁷⁾されることになる。

この圧力変動源となる渦は、流れによって下流側に移送されるため、配管壁上で計測した各圧力変動信号は、管内流速と計測点間の距離に依存する時間遅れの影響を受ける。したがって、各計測点における圧力変動の大きさや振動数特性に加えて、圧力変動の移流に伴う時間遅れの影響及び渦の大きさ等に関する圧力変動のスケールの影響、すなわち任意の 2 点間での圧力変動信号の相関が配管系の振動応答評価に必要な情報となる。

そこで、実機流速条件で試験体各部の圧力変動を計測し、管内流れ場との関連や各計測点間の軸方向・径方向の相関について分析・整理した。

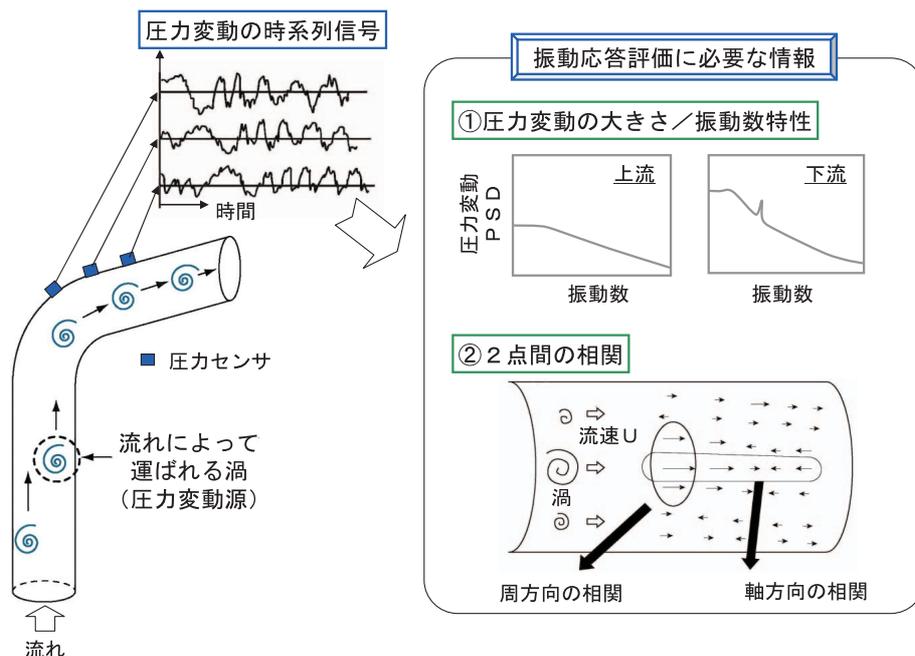


図 8 配管内の圧力変動の概念

(2) 圧力変動データの分析

剥離域内での特徴的な圧力変動計測結果の一例として、エルボ出口部（D断面）における時系列データとパワースペクトル密度（以下、PSDと略す）を図9に示す。D断面の上流側では、時系列データでの圧力変動の振幅が ± 6 kPa程度であり、各断面の周方向計測点のデータに有意な差は見られなかった。これに対し、図9(a)に示すD断面の時系列データでは、剥離域の境界近傍となる150度と210度位置で、圧力変動の振幅が ± 15 kPa程度まで増加している。また、図9(b)に示す圧力変動PSDに関しては、150度と210度位置において10 Hzに卓越ピークが現れている。この卓越ピークについては、以下のような剥離域の変動と渦放出に関連するものと考えている。

流況の可視化では、再付着点が定常的に変動すること、すなわち剥離泡（剥離域の立体的な表現）の体積が拡大・収縮を繰り返すことが観察されている。剥離泡が拡大して主流との間の剪断層が不安定になると、剥離域内での渦が分離して主流に放出される。その結果、剥離泡は収縮するが、再付着点から剥離域内への逆流により剥離泡が再度拡大するものと考えられる。したがって、可視化で観察された剥離域からの渦は、この卓越ピークに相当する振動数で周期的に放出されていると考えている。

一方、エルボ腹側の180度位置での時系列データ

には、数秒から数十秒間隔でスパイク状の負の圧力変動（最大 - 50 kPa程度）が見られた。ただし、圧力変動PSDには、剥離域からの渦放出に相当する10 Hzのピークが現れない結果となった。これに関しては、剥離域からの渦は主流との境界近傍で下流に放出されると考えられるため、剥離域中心の180度位置での圧力変動PSDには渦放出のピーク振動数が直接現れなかったのではないかと考えている。また、剥離域内では再付着点からの逆流の影響が大きく作用して複雑な流れ場となっており、剥離泡が特に大きく変動した際に、負のスパイクが発生したものと考えている。

なお、120度位置において、40 Hz以上の領域でもピークが見られるが、エルボ上流の計測点でも同様の振動数成分が見られ、試験装置固有の振動数成分と考えている。

次に、圧力変動の大きさと分布に着目し、圧力変動の分散の空間分布を図10に示す。図10は、横軸を流れ方向の計測位置、縦軸を各計測断面での周方向角度として、流れ方向に沿って試験体内面を展開した形で分散の分布を示している。図中には、剥離域の境界を白い破線で示している。図10に示すように、エルボ上流のB断面までは圧力変動が小さく、剥離点近傍のC'断面から下流に向かって圧力変動が増加する傾向を示す。特に、主流が配管壁表面に衝突する再付着点に相当するF断面180度位置近傍で最大値を示す。剥離域で作ら

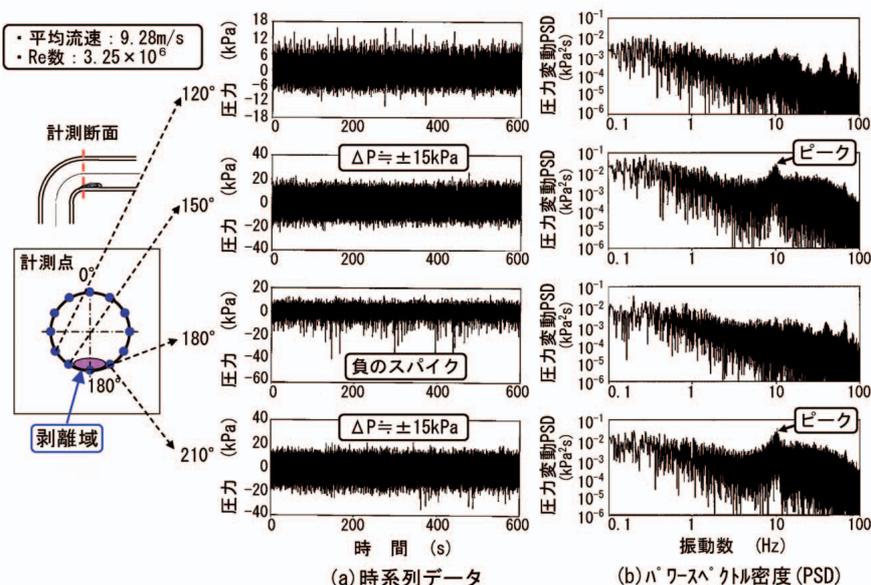


図9 剥離域内の圧力変動データ（D断面）

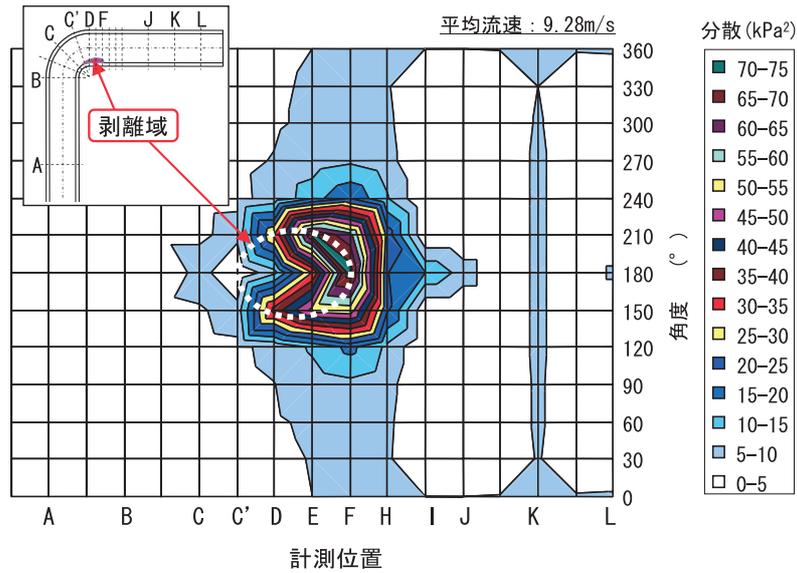


図10 圧力変動の分散の空間分布

れた乱れにより，圧力変動の大きな領域は下流側のJ断面まで拡大しており，流れ方向に沿って圧力変動特性が大きく異なることを確認した。

(3) 圧力変動データのRe数依存性

圧力変動を計測した4ケース（流速0.8m/s，3.0m/s，7.0m/s，9.2m/s）を対象として，代表位置における圧力変動の標準偏差を動圧で無次元化した無次元圧力変動係数を図11に示す。各グラフ

は，横軸にRe数，縦軸に動圧で無次元化した圧力変動係数をとっており，各断面の周方向5点の計測結果をプロットしている。

剥離点近傍のD断面では，図9(b)の圧力変動PSDと同様に，剥離域境界の150度位置で最大値を示している。再付着点近傍のF断面では，図10の圧力変動分散の分布と同様に，180度位置で最大値を示している。図11から分かるように，Re数 = 1.1

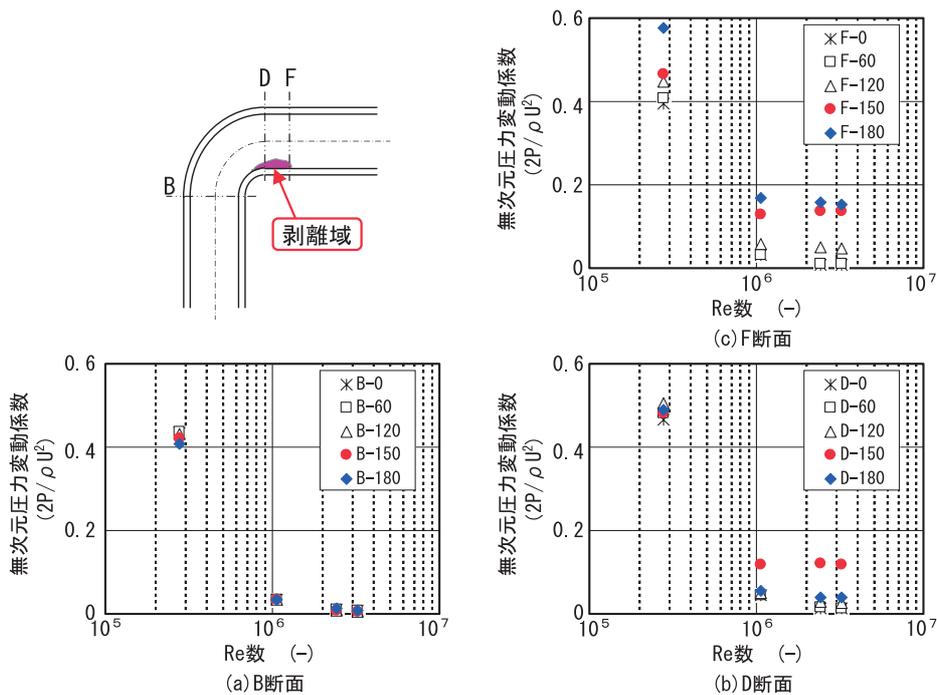


図11 無次元圧力変動係数のRe数依存性

$\times 10^6$ (流速3.0m/s)以上の領域では,各計測点の圧力変動係数は,Re数に対してほぼ一定値を示しており,今回の試験範囲においてはRe数に対する依存性は小さいことが分かった。なお,Re数 $=2.8 \times 10^6$ (流速0.8m/s)の場合には,試験装置のわずかな振動によるノイズの影響を受け,流体の乱れが小さいエルボ上流のB断面においても圧力変動を過大に計測したものと考えている。

前節で述べた管内の速度分布や圧力損失係数等の流動場の傾向と同様,従来の試験条件を上回るRe数 10^6 以上の領域で取得した無次元化圧力変動係数にもRe数依存性はほとんど見られないことが明らかとなった。今後,圧力変動特性についても,温水条件のデータを補充して,管内流速またはRe数に対する依存性を明確化し,縮尺試験での結果を無次元化した形で整理することで実機の特性が推定できるものとする。

(4) 圧力変動PSDの分布

各計測点における圧力変動PSDについても無次元化して整理した結果を図12に示す。図12のグラフは,横軸が無次元振動数($=fD/U$, f :振動数),縦軸が無次元圧力変動PSD($=$ 圧力変動PSD/ $\rho^2 U^3 D$)をとっており,流速9.2m/sと7m/sでの結果をプロットしている。図10に示したように,剥離域で作られる乱れの影響度合いに応じて,試験体各部の圧力変動が流れ方向に沿って大きく変

化することから,試験体各部の圧力変動PSDが以下の4つの領域に大別できることが分かった。

- ・領域1:エルボ上流(A-C断面)
- ・領域2:エルボ腹側(C'-H断面,90度-270度間)
- ・領域3:エルボ背側(C'-H断面,90度-270度間)
- ・領域4:エルボ下流(I-L断面)

特に,剥離域を含む領域2に作用する流体力が最大の励振力を与えることが分かった。また,無次元振動数0.45で流速9.2m/sと7m/sでの卓越ピークが一致している。このようなエルボ下流での乱れに関しては,直径100mmの円管を用いて流体の速度変動スペクトルを評価した例があり,エルボの曲率半径やRe数にかかわらず,エルボ近傍では無次元振動数約0.5で周期的な乱れが発生するとの報告⁷⁾がある。一般に,流れの中に置かれた物体の表面に形成される剥離流れの特徴として,再付着点近傍における圧力変動PSDに明確なピークが現れ,このピークに対応する周波数は再付着点を渦塊が通過する周波数に対応することが知られている⁸⁾。これらの知見に基づくと,エルボ腹側の圧力変動PSDに関して無次元振動数0.45で卓越ピークが見られたことは,エルボでの剥離現象に起因する特徴,すなわち剥離域からの渦放出の周期性に対応するものとする。

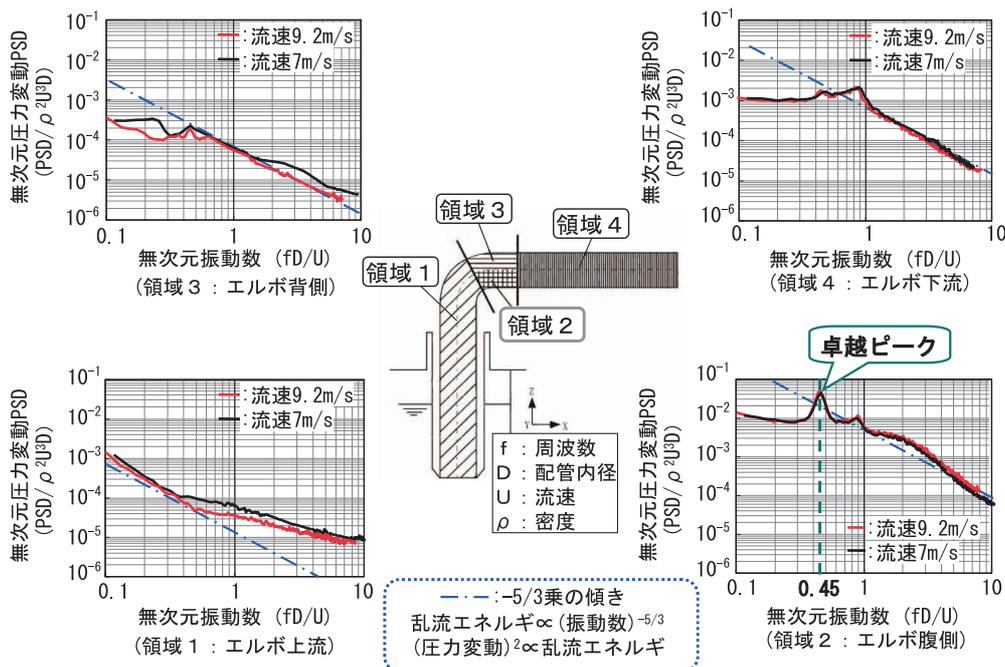


図12 配管内圧力変動PSDの分布

この剥離域からの渦放出に相当する無次元振動数0.45を実機条件に換算すると約3Hzとなる。一方、実機ホットレグ配管の固有振動数は約7Hzと評価されており、剥離域からの渦放出の振動数成分によって配管系が大きく励振されることはないと考えている。

また、一般的な乱れのスペクトルは、高振動数領域では乱流エネルギーが振動数の5/3乗に比例することが知られている⁹⁾。この乱流エネルギーは、圧力変動の2乗に比例する関係があるので、圧力変動PSDについても振動数の5/3乗に比例することになる。図12には、一点鎖線で振動数の5/3乗の補助線を加えているが、エルボ上流(領域1)を除くと、無次元振動数1.0以上の領域では、無次元圧力変動PSDは振動数の5/3乗にほぼ比例する傾向にあることが分かった。

エルボ上流では、理想的な流入条件を作るために設けた整流タンクの効果で非常に乱れの少ない状態となっていることから、5/3乗則から外れたものと考えている。ただし、実機ホットレグ配管は、炉心上部機構や各種の機器・配管が配置される炉上部プレナム内に設置される。したがって、ホットレグ配管流入部の流れ場は、炉上部プレナム内の流動特性に依存しており、流入部の流れが配管内の圧力変動特性に及ぼす影響を確認することが今後の課題となっている。このため、炉上部プレナム水流動試験²⁾の結果等から判断して、整流タンク内に旋回流を発生させる機構を取り付けて、配管内の圧力変動特性に対する影響の有無を確認する試験を計画している。

さらに、本試験で特に着目したエルボ下流(領域4)での圧力変動PSDに関しては、剥離域(領域2)の1/10程度の励振力となっている。このように、剥離域だけでなくエルボ下流での励振力も有意に作用することが明らかとなり、振動応答評価手法の高度化に資するデータが取得できた。

(5) 圧力変動の相関

平均流速9.2m/s条件での圧力変動データに基づき、軸方向及び周方向で隣り合う計測点間での相関を求めた。相関の評価には、それぞれの信号の大きさを規格化したクロススペクトル(無次元化クロススペクトル)の実部を用いた。X、Yの2点で計測された圧力変動の無次元化クロススペクトルは、次式で定義される。

$$\Gamma_{XY} = \frac{W_{XY}}{\sqrt{W_{XX}} \sqrt{W_{YY}}}$$

ここで、 W_{XX} 及び W_{YY} は各点のパワースペクトル、 W_{XY} はクロススペクトルである。一例として、エルボ出口部のD断面-E断面での無次元化クロススペクトルを図13に示す。軸方向(流れ方向)の無次元化クロススペクトル実部は、振動数に対して周期的に変動しながら減少する。これは、流れ方向の相関が振動数とともに小さくなるだけでなく、管内流速 U と計測点間の距離に依存する圧力変動の時間遅れによるものと考えられる。

一方、同一断面内の周方向の無次元化クロススペクトル実部は、振動数に対して単調に減少する傾向を示す。これは、周方向には圧力変動の時間遅れがないためである。

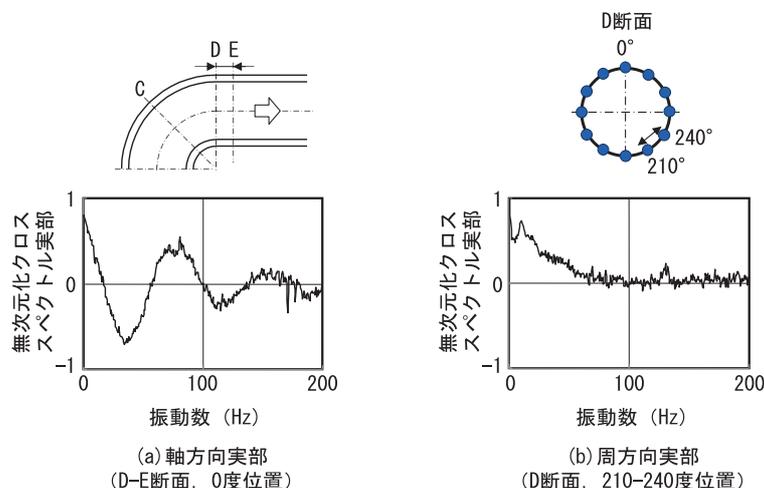


図13 無次元化クロススペクトルの一例

この無次元化クロススペクトルとセンサ間距離の関数として、以下のように相関長（圧力変動による振動外力が時間的に有意な関連を持って作用する範囲）を求める¹⁰⁾。

(a) 軸方向の場合

無次元化クロススペクトルは、2点間の距離（ x ）が離れるにしたがって指数関数的に低下するとして取扱う。また、移流によって生じる時間遅れによる位相ずれ成分も含めて次式で考慮する。

$$\text{Re}(\Gamma_{xy}) = \exp(-|\Delta x|/\lambda) \cos(2\pi f|\Delta x|/U)$$

が相関長であり、無次元化クロススペクトルが $1/e$ （ e ：自然対数の底）になる距離として、次式のように定義される。

$$\lambda = \frac{-|\Delta x|}{\ln(\Gamma_0) - f/f_0}$$

ここで、 Γ_0 は振動数 0 Hzでの無次元化クロススペクトルの実部、 f_0 は無次元化クロススペクトルの大きさが $1/e$ になる振動数である。

(b) 周方向の場合

周方向における無次元化クロススペクトルも、渦の空間スケールに応じて距離が離れるにしたがって指数関数的に低下するとして取扱う。また、相関長も軸方向の評価と同様に取扱う。

$$\text{Re}(\Gamma_{xy}) = \exp(-|\Delta x|/\lambda)$$

$$\lambda = \frac{-|\Delta x|}{\ln(\Gamma_0) - f/f_0}$$

図14には、無次元振動数に対する軸方向及び周方向の無次元相関長（ $= \lambda/D$ ）を示す。図12に示す無次元圧力変動PSDの分布と同様に、剥離による乱れの影響度合いに応じて、軸方向3領域、周方向4領域に区分して相関長を整理できることが分かった。なお、エルボ上流の領域では、いずれも相関が見られない結果となっている。

4. おわりに

4.1 試験結果のまとめ

冷却系ループ数を削減しているナトリウム冷却大型炉における流動上の重要課題であった大口径・高流速配管の流動励起振動特性を把握するため、実機ホットレグ配管を1/3縮尺で模擬した試験装置を製作した。今回、アクリル製試験体を用いて、従来の配管流動試験におけるRe数条件を超えた条件（最大Re数 3.7×10^6 ）の下で、流況の可視化、流速分布、圧力変動等のデータを分析・整理し、以下の結果を得た。

(1) エルボ部の流動特性

・今回の試験範囲内では、全体流況や配管内の相

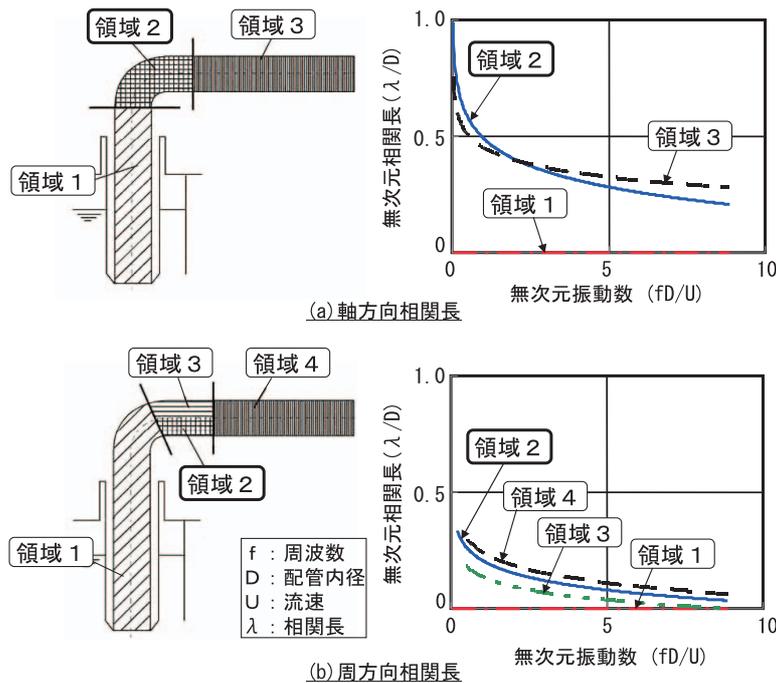


図14 軸方向/周方向の無次元相関長

対速度分布にはRe数依存性が見られない。

- ・エルボ部の局所最大流速は、平均流速の約1.5倍となり、試験前解析とほぼ一致した。
- ・エルボ全圧損係数は約1.3となり、エルボでの剥離を伴う管内流れから与えられる乱れのエネルギーは小さい。

(2) 圧力変動データの分析

- ・配管内の流れ方向に沿って多数点の管壁表面の圧力を計測した結果、エルボの剥離域を含む領域での圧力変動が支配的となる。
- ・剥離域での圧力変動には、無次元振動数0.45での卓越ピークが現れる。これは、剥離域からの渦放出の周期性に対応している。
- ・実機配管の振動応答評価に用いる圧力変動PSD及び相関長については、剥離による乱れの度合いに応じて、エルボ上流、エルボ部、エルボ下流に区分して整理できる。

4.2 今後の進め方

現在は、温水条件での可視化試験が終了して流動関連データの分析・整理を進めており、今後ステンレス管を用いた振動試験を予定している。また、配管流入部に旋回流れを与える体系での試験も計画しており、配管内の圧力変動特性に対する影響の有無を確認する予定である。

これらの試験により、流動・振動関連データの流速やRe数に対する依存性をより明確化するとともに、実機配管の振動応答評価に向けた入力条件（圧力変動PSD、相関長）の精度向上を図って

いく。

なお、本試験の実施に当たっては、三菱重工業株式会社の佐郷ひろみ、白石直、渡壁壽人、中村友道、石谷嘉英の各氏の協力を得ており、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 此村守, 小川隆, 他: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ 中間報告 - 原子炉プラントシステム技術検討書 -”, サイクル機構報告書, JNC TN9400 2004-035 (2004).
- 2) 此村守, 上出英樹, 他: “高速増殖炉の要素技術開発(1) - 各冷却炉個別の技術開発 -”, サイクル機構技報, No.24 別冊, p81 (2004).
- 3) F.R.Standley: “FFTF Sodium Erosion Tests T 1 B and T 1 D”, HEDL TME71-99, (1971).
- 4) T.Inagaki, T.Umeoka, et al.: “Flow induced Vibration of Inversed U shaped Piping Containing Flowing Fluid of Top Entry System for LMFBR”, Proc. 9th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, p.295 (1987).
- 5) I.E.Idelchik: Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Pub. Corp., (1978).
- 6) 日本機械学会編: 事例に学ぶ流体関連振動, 技報堂出版, (2003).
- 7) 河村勉, 中尾俊次, 他: “エルボ下流の乱れに及ぼすレイノルズ数の影響”, 日本機械学会論文集B編, 第68巻第667号 (2002).
- 8) 谷一郎編: 流体力学の進歩 境界層, 丸善, (1984).
- 9) 巽友正編: 乱流現象の科学, 東京大学出版会, (1986).
- 10) M.K.Au Yang, K.B.Jordan: “Dynamic Pressure inside a PWR - A Study Based on Laboratory and Field Test Data”, Nuclear Engineering and Design, 58, p.113 (1980).