



## ナトリウム冷却高速炉 1 次系ホットレグ 配管流力振動評価指針(案)

Proposed Guideline of Flow-induced Vibration Evaluation for Hot-leg Piping of  
Primary Cooling System in Sodium-Cooled Fast Reactor

FBR 安全ユニット

FBR Safety Unit

次世代原子力システム研究開発部門

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

September 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

## ナトリウム冷却高速炉 1 次系ホットレグ配管流力振動評価指針（案）

日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門

FBR 安全ユニット

(2011 年 7 月 1 日受理)

日本原子力研究開発機構では、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)の一環として、ナトリウム冷却高速炉の概念検討を進めている。実用化のためのプラントシステム概念は、経済性向上のために1次主冷却系に2ループ方式を採用している。そのため、1次系ホットレグ配管の1ループあたりの冷却材の流量が増加しており、配管口径50Bの大口径配管に冷却材ナトリウムが平均流速9m/s で流れる設計となっている。また、熱応力緩和の観点で1次系ホットレグ配管の板厚は薄く設計されており、薄肉・大口径の配管となっている。

1 次系ホットレグ配管には、原子炉建屋のコンパクト化のためショートエルボを採用しており、エルボのはく離によって生じる流体の乱れはロングエルボに比べると厳しくなると予測される。その流体の乱れに起因して、1 次系ホットレグ配管では、流力振動が発生すると考えられる。設計者は、適切な設計を選択し、流力振動を抑制するとともに、流力振動による配管の健全性を評価し、確認することが必要である。

日本原子力研究開発機構では、FaCTにおいて高流速配管流力振動評価手法の開発を目的として、単一エルボを持つ配管の流動状況、流体の乱れに起因する加振力および流力振動応答を計測し、その成果により流力振動評価手法の整備、検証を進めてきた。これらの結果を反映して、単一エルボを持つ薄肉配管である1次系ホットレグ配管の流力振動評価方法を社内指針として整備していくため、日本原子力研究開発機構主催の熱流動研究専門委員会の下に外部の有識者を含む大口径配管流力振動指針化ワーキンググループを設置し、検討を進めてきた。本指針（案）は、第1次案としてワーキンググループの検討成果をまとめたものである。

## Proposed Guideline of Flow-induced Vibration Evaluation for Hot-leg Piping of Primary Cooling System in Sodium-Cooled Fast Reactor

FBR Safety Unit

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 1, 2011)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been conducting conceptual study of an advanced sodium cooled fast reactor (named Japan sodium-cooled fast reactor: JSFR) under the framework of Fast reactor Cycle Technology development (FaCT) project. The JSFR design adopts a two-loop cooling system that enables the scale merit to be significantly enhanced, thereby leading to reduction in the capital cost of the plant. Since the two-loop cooling system increases the primary coolant flow rate per loop, a large-diameter piping system is designed with high coolant velocity (9m/s). To reduce thermal stress, the primary hot-leg piping with large diameter in JSFR is designed to be thin.

JSFR adopts an L-shaped short elbow, the curvature radius of which is equivalent to the piping diameter, for the hot-leg piping system in order to compact the reactor building volume. The turbulence generated by flow separation in the short elbow is predicted to be more severe than that in the long elbow. Such a turbulent flow, may raise a flow-induced vibration issue. It is necessary for designers to select appropriate design and suppress the flow-induced vibration as well as to evaluate and confirm the integrity of piping against the flow-induced vibration.

JAEA has been developing a flow-induced vibration methodology applied to the JSFR piping under the FaCT project. As part of this development, flow pattern in the single-elbow pipe has been investigated with the measurement of fluid force induced by turbulence flow and of the flow-induced vibration response. The experimental results have served to the development and vibration of the flow-induced vibration evaluation methodology. Based on these outcomes, JAEA has established a working group on a guideline of large-diameter piping flow-induced vibration evaluation under the JAEA's Thermal-Hydraulic Research Committee for creating the JAEA internal guideline. This report is the first proposal of the guideline from the achievements of the working group activity.

Keywords: Sodium-Cooled Fast Reactor, Flow-Induced Vibration, Elbow, Flow Separation, Pressure Fluctuation

## 目次

免責条項	1
大口徑配管流力振動指針化ワーキンググループ 委員リスト	2
まえがき	3
Ⅰ. 用語	4
Ⅱ. 記号	5
1. 指針の目的	7
2. 指針の適用範囲および対象	7
2.1 構造物	7
2.2 流れ	7
2.3 考慮すべき流体力および振動現象	7
3. 評価方針	8
3.1 流力振動に対する評価方法の概要	8
3.2 管内流れの乱れに起因したランダム振動	8
4. 管内流れの乱れに起因したランダム振動の評価方法	9
4.1 流れの乱れによるランダム振動解析の入力	9
4.1.1 流速の設定	9
4.1.2 振動特性の算定	9
4.1.3 減衰比の設定	9
4.2 流れの乱れによるランダム振動応力の算出	9
4.3 流力振動に対する強度評価	10
4.4 その他	10
参考文献	13
付属書 A 指針の適用範囲および対象	14
A.1. 構造物	14
A.2. 流れ	14
付属書 B ホットレグ配管における流れの乱れに起因したランダム振動以外の現象	19
B.1. 周期的な流れの変動やポンプからの機械振動、圧力脈動と配管振動の共振	19
B.2. 管内流れによる配管の不安定現象（ダイバージェンス、フラッタ）	19
B.3. ホットレグ配管外部の流れによる振動	19
B.4. エルボ部の二次流れと旋回流れの干渉による不安定	20
付属書 C 管内流れの乱れに起因したランダム振動解析の入力	21
C.1. 流速の算定	21
C.2. 振動特性の算定	21
C.3. 減衰比の設定	21
付属書 D 管内流れの乱れに起因したランダム振動応力の算出	24

D.1.	配管の運動方程式	24
D.2.	配管のランダム振動応答	25
D.3.	管内流れの乱れに起因したランダム励振力	27
付属書 E	ピーク値換算係数	33
E.1.	ピーク値換算係数	33
参考文献		35

## Contents

Exclusion Clause .....	1
Member List of Working Group on the Flow-Induced Vibration Evaluation Guideline for a Large-Diameter Piping .....	2
Preface .....	3
I Terms .....	4
II Symbols .....	5
1. Purpose of Guideline .....	7
2. Applicable Scope and Objects of Guideline .....	7
2.1 Structural Objects .....	7
2.2 Flow Field .....	7
2.3 Fluid Force and Vibration Phenomenon to be Considered .....	7
3 Evaluation Approach .....	8
3.1 Outline of Flow-Induced Vibration Evaluation Methodology .....	8
3.2 Random Vibration Induced by Pipe Flow Turbulence .....	8
4. Evaluation Methodology for Random Vibration Induced by Pipe Flow Turbulence .....	9
4.1 Input of Flow-Induced Random Vibration Analysis .....	9
4.1.1 Velocity .....	9
4.1.2 Vibration Characteristics .....	9
4.1.3 Damping Ratio .....	9
4.2 Calculation of Random Vibration Stress induced by Flow Turbulence .....	9
4.3 Evaluation of Pipe Strength against Flow Induced Vibration .....	10
4.4 Miscellaneous .....	10
References .....	13
Appendix A Applicable Scope of Design Guideline .....	14
A1 Structural Objects .....	14
A2 Flow Field .....	14
Appendix B Various Phenomena Except for Flow Induced Random Vibration .....	19
B1 Resonance of Piping Vibration with Cyclic Flow Fluctuation or Mechanical Vibration from Pump .....	19
B2 Flow Induced Instability Phenomenon (Divergence, Flutter) .....	19
B3 Vibration Induced by Flow Outside Pipe .....	19
B4 Instability by Interference of Swirling Flow with Secondary Flow in Elbow .....	20
Appendix C Input of Flow Turbulence Induced Random Vibration Analysis .....	21
C1 Velocity .....	21
C2 Vibration Characteristics .....	21
C3 Damping Ratio .....	21
Appendix D Calculation of Random Vibration Stress Induced by Pipe Flow Turbulence .....	24

D1	Equation of Motion for Piping .....	24
D2	Response of Random Vibration .....	25
D3	Random Vibration Stress induced by Pipe Flow .....	27
Appendix E Peak Conversion Factor .....		33
E1	Peak Conversion Factor.....	33
References .....		35

## 図表一覧

図 1	適用範囲.....	11
図2	流力振動評価フロー.....	12
図 A.1	ショートエルボ.....	16
図 A.2	適用対象.....	16
図 A.3	エルボの全損失係数.....	17
図 A.4	1/3 縮尺試験で計測した管内流速の旋回成分.....	17
図 A.5	炉内流況模擬装置.....	18
表C.1	1/3縮尺モデル試験体を用いた打振試験結果.....	22
図 C.1	ホットレグ配管の解析モデルの例.....	23
図 C.2	1/3 縮尺モデル試験体を用いた打振試験結果.....	23
表 D.1	領域ごとの無次元圧力変動パワースペクトル密度.....	29
表 D.2	領域ごとの無次元相関長.....	29
図 D.1	無次元圧力変動パワースペクトル密度.....	30
図 D.2	無次元周方向相関長.....	31
図 D.3	無次元軸方向相関長.....	32
表 E.1	ピーク値 $a=C_0y_{rms}$ となる確率.....	34
図 E.1	$y=a$ から $y=a+da$ のバンド内にあるピークの同定.....	34
図 E.2	ピーク値のレーリー分布.....	34
図 E.3	確率分布.....	34

This is a blank page.

ナトリウム冷却高速炉 1 次系ホットレグ配管流力振動評価指針（案）

**免責条項**

この指針は、ナトリウム冷却高速炉の 1 次系ホットレグ配管で発生する可能性のある流力振動現象を対象として、流力振動の評価で必要とされる事柄を記載したもので、外部の有識者を含む「大口径配管流力振動指針化ワーキンググループ (WG)」の検討成果と WG メンバの知識と経験に基づくものである。この指針の目的は、ナトリウム冷却高速炉の円滑な設計・製作に資するため、流力振動評価法に関する基本的な考え方を示すことにある。WG は、この指針に記載されている内容の正確さと信頼性を保証するため、最大限の努力と注意を払っており、ここに含まれる内容について説明責任を持つ。しかしながら、この指針の使用に関連して、本 WG が異議申立てや保証を行うものではない。それゆえ、本 WG メンバ所属機関以外が、この指針の適用によって生ずる損失やこの指針と矛盾する法規の違反に対し、本 WG および WG メンバ所属機関は一切の責任を負わない。

## 大口径配管流力振動指針化ワーキンググループ 委員リスト

主査：中村 友道（大阪産業大学）  
委員：山口 彰（大阪大学）  
委員：西原 崇（電力中央研究所）

（独）日本原子力研究開発機構 担当者  
堺 公明（プラント安全評価 Gr）  
大島 宏之（炉システム開発計画室）  
田中 正暁（冷却材挙動解析 Gr）  
山野 秀将（プラント安全評価 Gr）（事務局）  
小野 綾子（冷却材挙動解析 Gr）  
金子 哲也（炉システム開発計画室）

実施側メンバ：徐 陽（三菱 FBR システムズ）  
実施側メンバ：佐郷 ひろみ（三菱重工）  
実施側メンバ：廣田 和生（三菱重工）

解説担当者：村上 貴裕（電力中央研究所）  
解説担当者：江原 真司（東北大学）  
解説担当者：岩本 幸治（愛媛大学）

## まえがき

現在設計を進めている次世代型ナトリウム冷却高速炉（JSFR）では、経済性の観点より1次主冷却系に2ループ方式を採用している。これに伴い、1次系ホットレグ（HL：Hot Leg）配管の冷却材の流量が増加し、配管口径50B（外径1.27m）の大口径配管に冷却材ナトリウムが平均流速が9m/sで流れる設計となっており、レイノルズ数(Re数)は従来データ<sup>1)</sup>の実績範囲 $Re=10^5\sim 10^6$ を大きく越えた $Re=4.2\times 10^7$ となっている。また、熱応力緩和の観点で1次系HL配管の板厚は薄く設計されているため、1次系ホットレグ配管は薄肉かつ大口径の配管となっている。

1次系ホットレグ配管は、建家のコンパクト化のためにショートエルボを採用しており、エルボのはく離で生じる流体の乱れに起因する加振力はロングエルボに比べると厳しくなると予測される。また、薄肉、大口径で単一のエルボを持つ1次系ホットレグ配管では、流体の乱れに起因してビーム振動だけでなくシェル振動をも含む流力振動が発生する。設計者は、適切な設計を選択し、流力振動を抑制するとともに、流力振動による配管の健全性を評価、確認することが必要である。

流力振動評価に関して体系立った指針としては、米国機械学会の指針<sup>2)</sup>などがあるが、単一のエルボを持つ薄肉配管の流力振動を視野に入れた技術基準は、国際的に見ても整備されていないのが現状である。

一方、日本原子力研究開発機構では、高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）において、単一エルボを持つ薄肉配管の流動状況、流れの乱れに起因する加振力および流力振動応答を計測し、その成果により流力振動評価手法の整備、検証を進めてきた<sup>3)</sup>。これらの結果を反映して、単一エルボを持つ薄肉配管である1次系ホットレグ配管の流力振動評価方法を社内指針として整備していくことは、設計者にとって重要かつ有用なことであると考え、日本原子力研究開発機構は、熱流動研究専門委員会の下に外部の有識者を含む大口径配管流力振動指針化ワーキンググループ（WG）を設置し、指針検討を進めることとした。本指針（案）は、第1次案としてワーキンググループの検討成果をまとめたものであり、今後予定されてある炉上部プレナム流動（乱れなど）を考慮した総合試験等の知見は適宜反映していくものである。

本指針（案）は、単一のエルボを持ち、内部を高速で流体が流れる大口径薄肉配管で、流れの乱れに起因する加振力を受ける1次系ホットレグ配管の流力振動に対する評価方法を定めたものである。この評価において、配管内部の流れは、単相流とし、構造物は、単一のエルボを持つ配管を対象としている。

本指針（案）では、指針「本文」のほかに、「付属書（規定）」、「解説」を設けることで利用される方の便宜を図った。「付属書（規定）」では、本評価方法の本文と本文に直結した内容の説明が記載されている。別途作成される「解説」では、本文の理解に参考となる技術的な議論が記載される。

## I. 用語

1 次系ホットレグ配管	我が国のナトリウム冷却高速炉（JFSR）において、原子炉容器からポンプ組込型中間熱交換器へナトリウムを流す 1 次系配管。
流力振動	流れに起因した構造物の振動。流力振動には、流れの乱れに起因したランダム励振力によるランダム振動、流れの周期的な変動成分と構造物の固有振動数が一致する場合の共振、構造物の振動が流れから自励的にエネルギーを取り込む自励振動がある。
ビーム振動モード	円筒シェル構造である配管において、配管断面形状は円の状態を保ったまま、配管の軸直角方向に振動するモード
シェル振動モード	円筒シェル構造である配管において、円周上に節や腹を持つ振動モード
ショートエルボ	配管の曲率半径 $R_c$ と配管内径 $D$ の比が 1.5 より小さいエルボのことをいう。一方、配管の曲率半径 $R_c$ と配管内径 $D$ の比が 1.5 より大きいエルボはロングエルボという。
旋回流	ホットレグ配管の入口部直管において旋回成分を有する流れ
偏流	ホットレグ配管の入口部直管において非対称な流速分布を有する流れ
超臨界領域	エルボ配管の全損失係数が低下して $Re$ 数によらずほぼ一定になる領域（ショートエルボ配管では、 $Re > 3.0 \times 10^5$ ）
N 成分	ポンプ回転数を主成分とする圧力脈動や機械振動の成分。ポンプインペラの不釣り合い等に起因する。
NZ 成分	ポンプ回転数にポンプインペラの羽根枚数をかけた振動数を主成分とする圧力脈動の成分。インペラがガイドベーン等の静止部分を通過する際に発生する。
$Re$ 数	流れの性質を調べるための重要な無次元数であり、慣性力と粘性力との比で定義される。エルボ配管では、代表長さを配管内径とする。
ベルマウス	入口損失の低減、はく離の抑制、キャビテーション防止等のために管路の入口に設置されるベル形状の吸込口
はく離	壁面近くの流体が壁面との表面摩擦でエネルギーを失い、流速がゼロになり、逆流が生じる現象
エルボ腹側	エルボの曲がりに対して内側。
エルボ背側	エルボの曲がりに対して外側。
設計疲労制限値	所定の繰り返し数に対応する設計疲労曲線のひずみ範囲から当該温度の材料ヤング率を用いて換算した応力振幅の制限値

## II. 記号

$A$	振動に寄与する変動圧力がかかる評価対象配管表面全体
$C_0$	ピーク値換算係数
$D$	配管内径
$dA_i$	任意の点 $i$ の微小面積
$E[ \ ]$	標本平均 (アンサンブル平均)
$\{F\}$	配管に加わる外力ベクトル
$f$	振動数
$\bar{f}$	無次元振動数
$f_i$	$i$ 次モードの固有振動数
$G(f)$	圧力変動のパワースペクトル密度
$G_{x_i}(f)$	点 $x_i$ の圧力変動のパワースペクトル密度
$g(\bar{f})$	無次元化されたパワースペクトル密度
$H_i(f)$	$i$ 次モードの周波数応答関数。 $H_i^*(f)$ はその共役複素数
$h_i(\tau)$	インパルス応答
$K$	応力集中係数
$[K]$	配管の剛性行列
$K_i$	配管の一般化剛性
$L$	点 $x_1$ と点 $x_2$ 間の配管の断面中心線に沿う長さ
$\ell$	点 $x_1$ と点 $x_2$ 間の配管周方向の弧の長さ
$[M]$	配管の質量行列
$M_i$	$i$ 次の一般化質量
$p$	圧力変動
$Q_i$	$i$ 次モードの一般化力
$q$	配管の一般化変位
$Rc$	配管の曲率半径
$R_\sigma$	配管の応力の自己相関関数
$Re$	Re 数 ( $=VD/\nu$ )。 $\nu$ は管内流体の動粘性係数である。
$R_{Q_i Q_j}$	一般化力 $Q_i$ 、 $Q_j$ の相互相関関数
$S_{p_1 p_2}(f)$	$x_1$ 、 $x_2$ の 2 点間に作用する変動圧 $p_1$ 、 $p_2$ のクロススペクトル密度
$S_{p_1 p_2}^c(f)$	変動圧のクロススペクトル密度の実数部 (コスペクトル)
$S_{p_1 p_2}^o(f)$	変動圧のクロススペクトル密度の虚数部 (カドラチャスペクトル)
$S_{Q_i Q_j}(f)$	一般化力 $Q_i$ と $Q_j$ のクロススペクトル密度
$S_\sigma(x, f)$	位置 $x$ の応力振幅のパワースペクトル密度
$V$	配管内平均流速
$x$ 、 $\ddot{x}$	配管の変位、加速度 (X 方向)

$y, \ddot{y}$	配管の変位、加速度 (Y 方向)
$\Phi_i(x)$	応力に関する $i$ 次の固有振動モード
$\phi_i(x)$	変位に関する $i$ 次の固有振動モード
$\lambda$	相関長 (添字の $c$ は周方向、 $a$ は軸方向)
$\bar{\lambda}$	無次元相関長 (添字の $c$ は周方向、 $a$ は軸方向)
$\nu$	動粘性係数
$\rho$	配管内流体密度
$\sigma_F$	設計疲労制限値
$\sigma_R$	ランダム振動応力
$\tau$	相関関数を算出するときのずらし時間
$\zeta_i$	$i$ 次モードのモード減衰比

## 1. 指針の目的

本指針は、ナトリウム冷却高速炉（JSFR）の1次系ホットレグ配管（以下単に「ホットレグ配管」と記す）の流力振動に対する配管の強度評価を行う方法を定めたものである。

## 2. 指針の適用範囲および対象

本指針の対象とする構造物および流れを図 1 に示す。付属書 A に詳細を示す。

### 2.1 構造物

- (1) 本指針の対象とする構造物は、ホットレグ配管とする。
- (2) ホットレグ配管は、途中に角度 90° のショートエルボを 1 つ有する配管である。
- (3) 上流側および下流側を支持されている配管である。

### 2.2 流れ

- (1) 非圧縮性の单相流を対象とする。
- (2) エルボ流れにおける超臨界領域である乱流を対象とする。
- (3) ホットレグ配管の入口からエルボ始端までの距離は、配管内径の 5 倍程度以上とする。
- (4) ホットレグ配管入口のベルマウスにより、入口ではく離が生じない流れを対象とする。
- (5) 入口部から流入する流れとしては、整流条件だけでなく旋回流成分と偏流成分を含む流れを対象とする。
- (6) ホットレグ配管のエルボ終端から出口までの距離は、下流側の出口が上流側のエルボの流れ（はく離域の構造）に影響を及ぼさない長さとする。

### 2.3 考慮すべき流体力および振動現象

2.1項に規定される構造物の2.2項に規定される流れにより励起される振動現象並びにJSFR体系において考慮すべき振動としては、下記のような現象が挙げられる。

- ① エルボ腹側のはく離域近傍の周期的な流れの変動と配管振動の共振
- ② 管内流れによる配管の不安定現象（ダイバージェンス、フラッタ）
- ③ ホットレグ配管外部の流れによる振動
- ④ ポンプからの圧力変動、機械振動と配管振動の共振
- ⑤ エルボ部の二次流れと入口部から流入する旋回流の干渉による不安定
- ⑥ 管内流れの乱れに起因したランダム振動

本指針では、流れにより励起される構造物の振動現象として、上記の①～⑥の振動現象を考慮する。配管振動の形態としてはビーム振動だけでなくシェル振動も考慮する。

### 3. 評価方針

#### 3.1 流力振動に対する評価方法の概要

流力振動評価方法の概要を、**図 2** に示す評価フローに従って説明する。本指針では、流体力および振動現象として、エルボ腹側のはく離域近傍の周期的な流れの変動と配管振動の共振、管内流れによる配管の不安定現象、ホットレグ配管外部の流れによる振動、ポンプからの圧力変動と機械振動と配管振動の共振、エルボ部二次流れと旋回流れの干渉による不安定、管内流れの乱れに起因したランダム振動を考慮して流力振動に対する評価を行う。

本指針の本文では、管内流れの乱れに起因したランダム振動の評価方法を記載し、付属書 B にランダム振動以外の共振や不安定を回避する評価方法を記載する。評価手順としては、付属書 B に従ってランダム振動以外の共振や不安定を回避する設計を行った後、以下に示す評価方法に従って、管内流れに起因したランダム振動に対する配管の健全性を評価する。

#### 3.2 管内流れの乱れに起因したランダム振動

以下のように管内流れの乱れに起因したランダム振動に対する配管の健全性を評価する。評価手法の詳細は 4 章に記載する。

- (1) 対象とするホットレグ配管について、固有振動数、固有振動モード、一般化質量などの振動特性をそれぞれ算出し、流速や減衰比を設定する。
- (2) 算出された固有振動数、固有振動モード、一般化質量をもとにして流れの乱れによるランダム励振力によってホットレグ配管に作用する応力  $\sigma_R$  を計算する。
- (3) 算出された応力に基づいて流力振動に対する強度評価を行う。ランダム励振力に対する疲労評価として、応力集中係数  $K$  を考慮した応力振幅が設計疲労制限値以内になるかどうかを評価し、「不可」であれば設計変更をしなければならない。

以上の評価に対して「可」であれば、対象とするホットレグ配管は流力振動に対する強度評価として健全と評価される。

#### 4. 管内流れの乱れに起因したランダム振動の評価方法

管内流れの乱れに起因したランダム振動を以下の4.1～4.4項に基づき評価する。ランダム振動解析の入力については付属書C、ランダム振動応力の算出については付属書Dに詳述する。

##### 4.1 流れの乱れによるランダム振動解析の入力

###### 4.1.1 流速の設定

配管内流量を配管の断面積で割った軸方向の平均流速 $V$ を用いる

###### 4.1.2 振動特性の算定

配管の形状、寸法、支持条件を適切にモデル化した有限要素法（FEM）によりホットレグ配管の振動特性（固有振動数、固有振動モード、一般化質量）を求める。ここで、配管内部および配管外部の流体による付加質量を考慮する。

###### 4.1.3 減衰比の設定

減衰比の値については、保守側の小さい減衰比として、ビーム振動モードに対する減衰比を0.5%、シェル振動モードに対する減衰比を0.2%に設定する。

##### 4.2 流れの乱れによるランダム振動応力の算出

管内流れによる圧力変動として、クロススペクトル密度 $S_{p_1 p_2}(f)$ で表されるランダムな圧力変動を受けるホットレグ配管の任意の位置 $x$ における応力のパワースペクトル密度 $S_\sigma(x, f)$ を次式で算出する。

$$S_\sigma(x, f) = \frac{1}{16\pi^4} \sum_i \sum_j \frac{\Phi_i(x)\Phi_j(x)}{f_i^2 f_j^2 M_i M_j} \frac{1}{\left[ \left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right\}^2 + 4\zeta_i^2 \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right] \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right\}^2 + 4\zeta_j^2 \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right]}$$

$$\times \left[ \left\{ \left( 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right) \left( 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right) + 4\zeta_i \zeta_j \frac{ff}{f_i f_j} \right\} \int_{A_1} \int_{A_2} S_{p_1 p_2}^c(f) \phi_i(x_1) \phi_j(x_2) dA_1 dA_2 \right.$$

$$\left. + \left\{ 2\zeta_j \frac{f}{f_j} \left( 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right) - 2\zeta_i \frac{f}{f_i} \left( 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right) \right\} \int_{A_1} \int_{A_2} S_{p_1 p_2}^o(f) \phi_i(x_1) \phi_j(x_2) dA_1 dA_2 \right] \quad (1)$$

ここで、 $\Phi_i(x)$ は応力に関する $i$ 次の固有振動モード、 $\phi_i(x)$ は変位に関する $i$ 次の固有振動モード、 $f_i$ は $i$ 次モードの固有振動数、 $M_i$ は $i$ 次の一般化質量、 $\zeta_i$ は $i$ 次モードのモード減衰比である。添字の $i, j$ はモード次数を表す。 $S_{p_1 p_2}(f)$ は、 $x_1, x_2$ の2点間に作用する変動圧 $p_1, p_2$ のクロススペクトル密度で、次式に示すように実数部と虚数部で表される。

$$S_{p_1 p_2}(f) = S_{p_1 p_2}^c(f) + i S_{p_1 p_2}^o(f) \quad (2)$$

また、クロススペクトル密度  $S_{p_1 p_2}(f)$  は次式で求める。

$$S_{p_1 p_2}(f) = \sqrt{G_{x_1}(f) \cdot G_{x_2}(f)} \cdot \exp\left\{-\frac{\ell}{\lambda_c}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{L}{\lambda_a}\right\} \cdot \exp\left\{i2\pi f \frac{L}{V}\right\} \quad (3)$$

ここで、 $G_{x_1}(f)$  と  $G_{x_2}(f)$  は 点  $x_1$  と 点  $x_2$  の 圧力変動  $p$  の パワースペクトル密度であり、 $\ell$  は 点  $x_1$  と 点  $x_2$  間の配管の周方向の弧の長さ、 $L$  は 点  $x_1$  と 点  $x_2$  間の配管断面中心線に沿う長さ、 $\lambda_c$  は 周方向相関長、 $\lambda_a$  は 軸方向相関長、 $V$  は 配管内平均流速である。圧力変動のパワースペクトル密度  $G(f)$  は、無次元化されたパワースペクトル密度  $g(\bar{f})$  から次式で算出する。

$$G(f) = \left(\frac{1}{2} \rho V^2\right)^2 g(\bar{f}) \frac{D}{V} \quad (4)$$

$$\bar{f} = \frac{fD}{V} \quad (5)$$

ここで、 $\rho$  は 配管内流体密度、 $D$  は 配管内径、 $\bar{f}$  は 無次元振動数である。点  $x_1$  と 点  $x_2$  間の圧力変動  $p$  のクロススペクトル密度を求める基となる軸方向相関長  $\lambda_a$  および周方向相関長  $\lambda_c$  は、無次元化された軸方向相関長  $\bar{\lambda}_a$  および周方向相関長  $\bar{\lambda}_c$  から次式で算出する。

$$\lambda_c = \bar{\lambda}_c D \quad (6)$$

$$\lambda_a = \bar{\lambda}_a D \quad (7)$$

位置  $x$  における応力  $\sigma_R$  は、応力のパワースペクトル密度  $S_\sigma(x, f)$  から次式を用いて求める。

$$\sigma_R(x) = C_0 \sqrt{\int_0^\infty S_\sigma(x, f) df} \quad (8)$$

ここで、 $C_0$  は 2 乗平均値からピーク値への換算係数であり、付属書 E に示すように適切に設定する。

### 4.3 流力振動に対する強度評価

ランダム励振力に対する疲労評価では、応力集中係数  $K$  を考慮した応力が設計疲労制限値  $\sigma_F$  以下になるよう、次式を満足しなければならない。

$$K\sigma_R \leq \sigma_F \quad (9)$$

### 4.4 その他

4.1~4.3 項によらず、その妥当性が示される場合は、流動解析あるいは実験等の適切な方法により評価することができる。

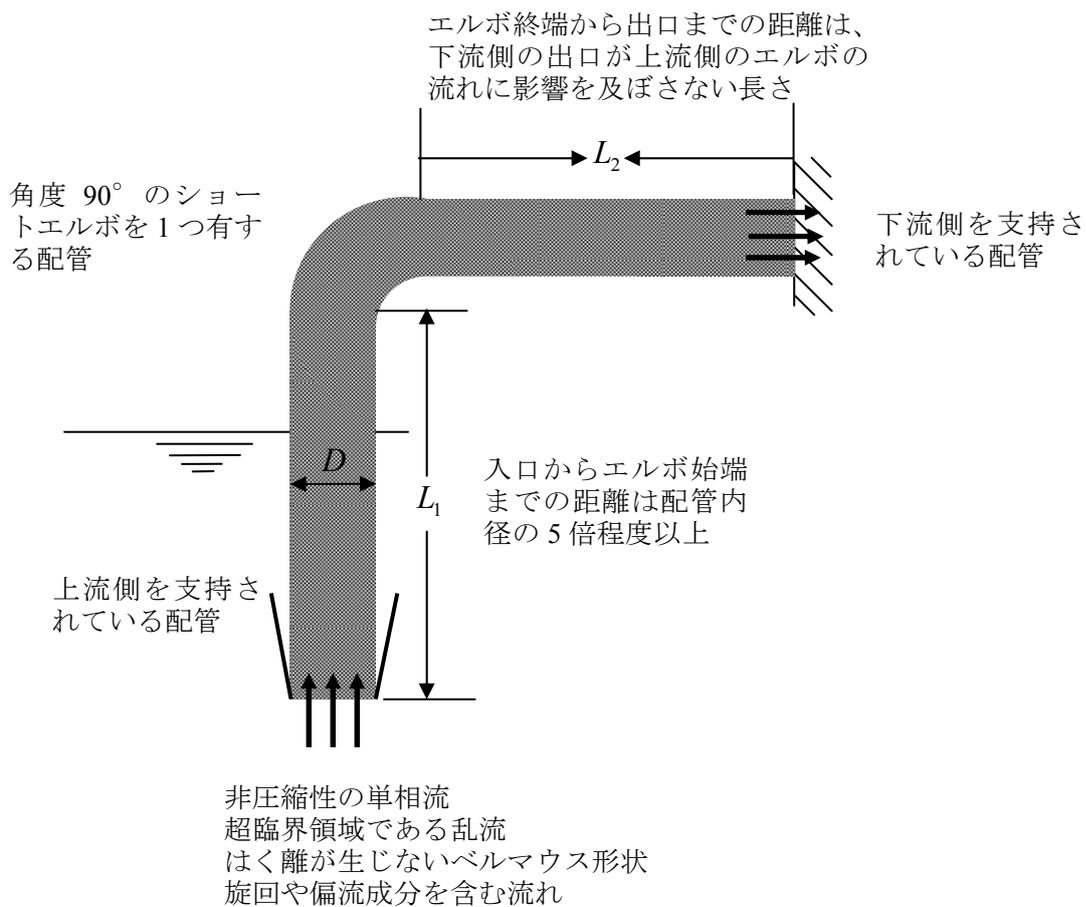


図1 適用範囲

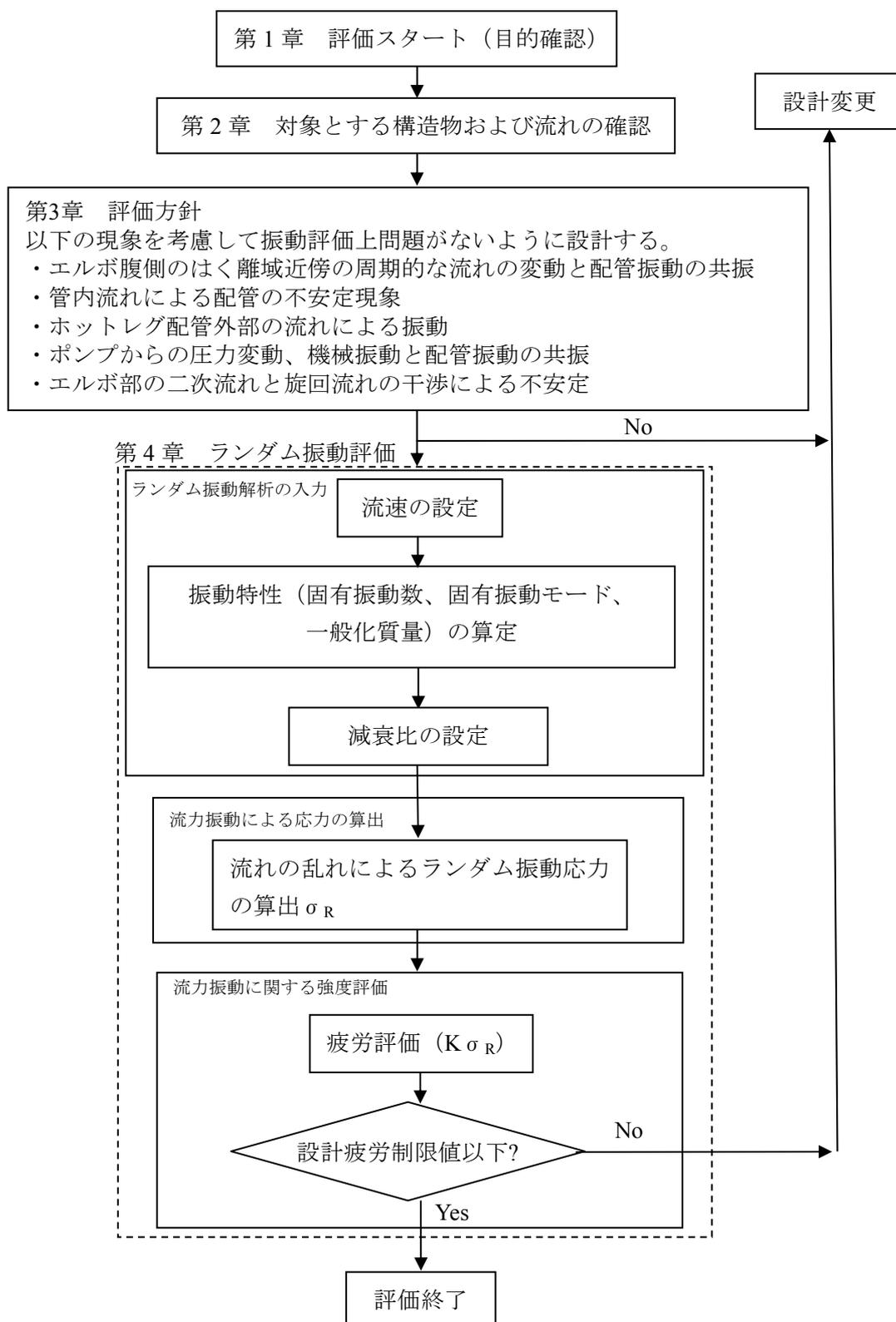


図2 流力振動評価フロー

## 参考文献

- 1) E. Fried, I.E. Idelchik: “Flow Resistance: A Design Guide for Engineers,” Hemisphere Publishing Corporation (1989).
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1 Appendix N, Article N-1300 ASME (1995).
- 3) H.Yamano, S.Kubo, K.Kurisaka, Y.Shimakawa, H.Sago: “Technological Feasibility of Two-Loop Cooling System in JSFR,” Nucl. Technol., Vol.170, p.159 (Apr. 2010).

## 付属書 A 指針の適用範囲および対象

(規定)

### A.1. 構造物

(1) 本指針の対象とする構造物は、ホットレグ配管とする。

ホットレグ配管とは、原子炉内で熱せられた一次冷却材を中間熱交換器まで流す配管のことをいう。

(2) ホットレグ配管は、途中に角度  $90^\circ$  のショートエルボを 1 つ有する配管である。

ショートエルボとは、配管の曲率半径  $R_c$  と配管内径  $D$  の比が 1.5 より小さいエルボのことをいう(図 A.1)。一方、配管の曲率半径  $R_c$  と配管内径  $D$  の比が 1.5 より大きいエルボはロングエルボという。本指針は、途中に角度  $90^\circ$  のショートエルボを 1 つ有する配管を対象(図 A.2)としており、複数のエルボを有する配管は、エルボ間の距離によってはエルボ部の二次流れがお互いに干渉するため、本指針の対象外としている。

(3) 上流側および下流側を支持されている配管である。

上流側および下流側が支持されているホットレグ配管を対象とする。ホットレグ配管の上流側や下流側が剛体に剛接合されるというのは実際にはあり得ず、ある有限の剛性を持つことになるが、その剛性がホットレグ配管の剛性（固有振動数）に比べて十分大きい場合は、固定とみなしてよい。

接合部の剛性がホットレグ配管の剛性に比べて十分大きいとはいえない場合には、接合部の剛性を考慮しなければならない。つまり、ホットレグ配管の振動特性（固有振動数、固有振動モード、一般化質量）を算出するための配管振動解析モデルに接合部の剛性を入力するか、又は、接合部も解析モデルに組み込むかを行う。

### A.2. 流れ

(1) 非圧縮性の単相流を対象とする。

本指針の根拠となる実験データは非圧縮性の単相流で採取されたものであるため、本指針の適用も非圧縮性の単相流に限定される。

(2) エルボ流れにおける超臨界領域である乱流を対象とする。

$Re$  数が大きくなると、流れの時間的変動は不安定になり時間とともに有限な大きさに発達する。流れを観察すると流体の塊が渦巻いて入り乱れながら流れており、運動量や熱の交換はこれらの流体塊の間で行われる。このような流れを乱流という。

ショートエルボ配管では、 $Re$  数  $Re = VD/\nu$  ( $D$  : 配管内径、 $V$  : 平均流速、 $\nu$  : 動粘性係数) が  $3.0 \times 10^5$  よりも大きくなると全損失係数が低下し  $Re$  数によらずほぼ一定となる超臨界領域に

なる(図 A.3)。 $Re$  数が低い領域ではエルボ部に層流境界層が発達し層流はく離するが、超臨界領域では乱流境界層が上流側へ成長し乱流はく離する。本指針は、超臨界領域において採取されたデータに基づき策定されているため、超臨界領域である乱流を対象とする。

(3) ホットレグ配管の入口からエルボ始端までの距離は、配管内径の 5 倍程度以上とする。

本指針で採用する流力振動評価用の圧力変動特性（圧力変動パワースペクトル密度や相関長）は、配管入口からエルボ始端までの距離を配管内径の 5.8 倍に設定した縮尺モデルを用いた流動実験で得たものである。したがって、入口からエルボ始端までの距離が配管内径の 5 倍程度以上の配管を本指針の対象とする。

(4) ホットレグ配管入口のベルマウスにより、入口ではく離が生じない流れを対象とする。

配管入口が円弧状でない場合には、入口部ではく離が生じて圧力損失が大きくなる場合がある。本指針は配管入口部にベルマウスを設けてはく離が生じないように設計された縮尺モデルによる流動実験において採取された圧力変動特性データに基づき策定されているため、入口ではく離が生じない流れを対象とする。

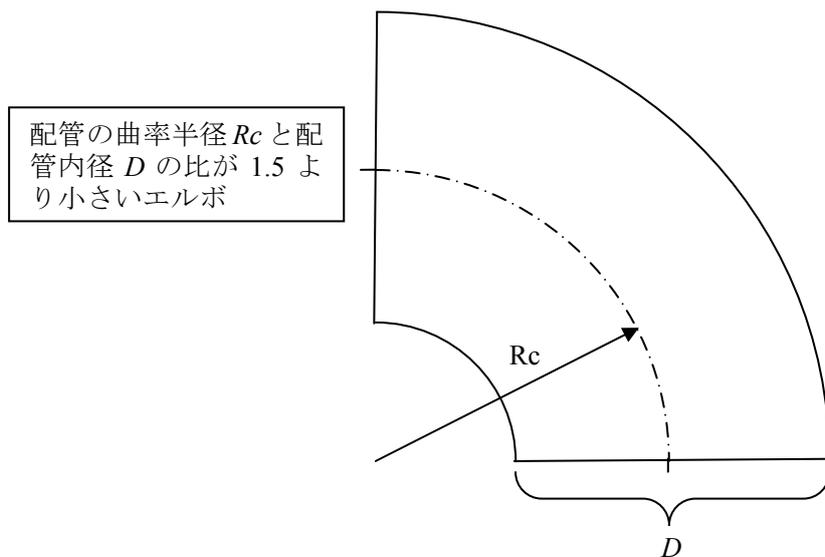
(5) 入口部から流入する流れとしては、整流条件だけでなく、旋回流成分と偏流成分を含む流れを対象とする。

入口部から流入する旋回流成分としては、15%程度までの旋回速度割合の流れを対象とする。旋回速度割合の定義は、ホットレグ配管上流側直管における平均軸方向流速に対する配管内表面から約 0.05D 離れた位置での周方向流速の割合である。本指針では、図 A.4 のように整流条件、最大 15%程度の旋回速度割合（スワール数 0.1 程度）を含む流れに対して採取された圧力変動特性データに基づき策定されているため、これらの入口旋回流条件の範囲に収まる流れを対象とする。

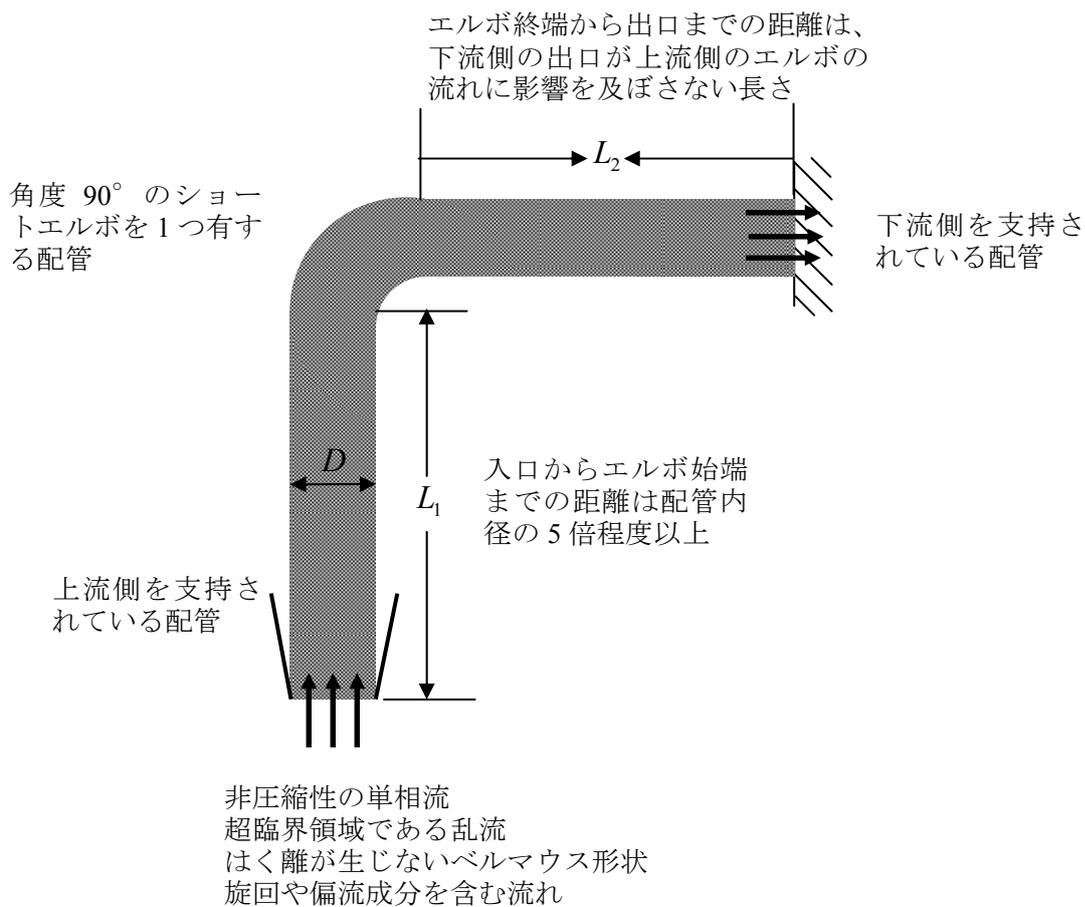
入口部から流入する偏流成分としては、図 A.5 の炉内流況模擬装置で発生する範囲の偏流成分を含む流れを対象とする。実機では炉上部機構により偏流が発生すると想定されることから、流動試験において図 A.5 に示すように炉内流況模擬装置を整流タンク内に設置して発生させた偏流を考える。この流動試験においては、第 1 バッフル板の開孔率（開孔率：0%、18%、100%）を調整して実機の偏流条件を包絡することとする。図 A.5 の炉内流況模擬装置で採取された圧力変動には偏流だけでなく入口乱れも含まれる。入口乱れはホットレグ配管の振動に影響を与えるため、本指針では図 A.5 の炉内流況模擬装置で模擬した入口乱れも含んだ偏流を対象とする。

(6) ホットレグ配管のエルボ終端から出口までの距離は、下流側の出口が上流側のエルボの流れ（はく離域の構造）に影響を及ぼさない長さとする。

ホットレグ配管の出口とエルボ終端の距離が短い場合（例えば、配管内径と同程度の距離しかない場合）には、下流側の出口が上流側のエルボの流れ、特に、はく離域の構造に影響を及ぼすと考えられる。本指針は、エルボ終端から出口までの距離が配管内径の約 4 倍程度離れたエルボ配管で採取された圧力変動特性データに基づき策定されているため、下流側の出口が上流側のエルボの流れに影響を及ぼさない流れを対象とする。



図A.1 ショートエルボ



図A.2 適用対象

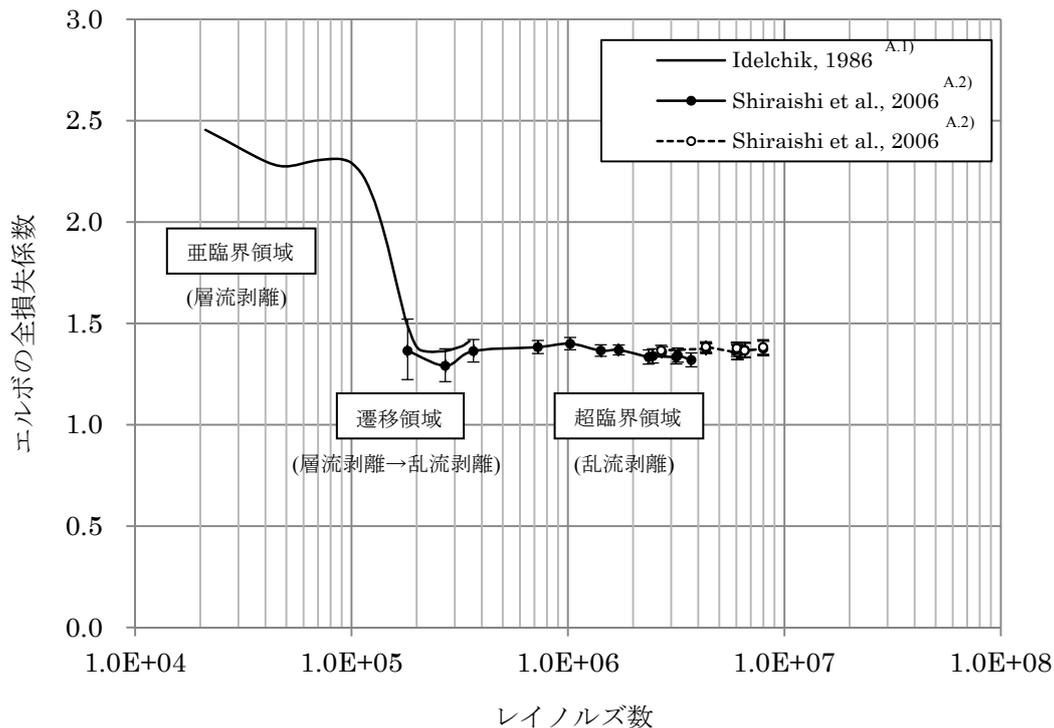
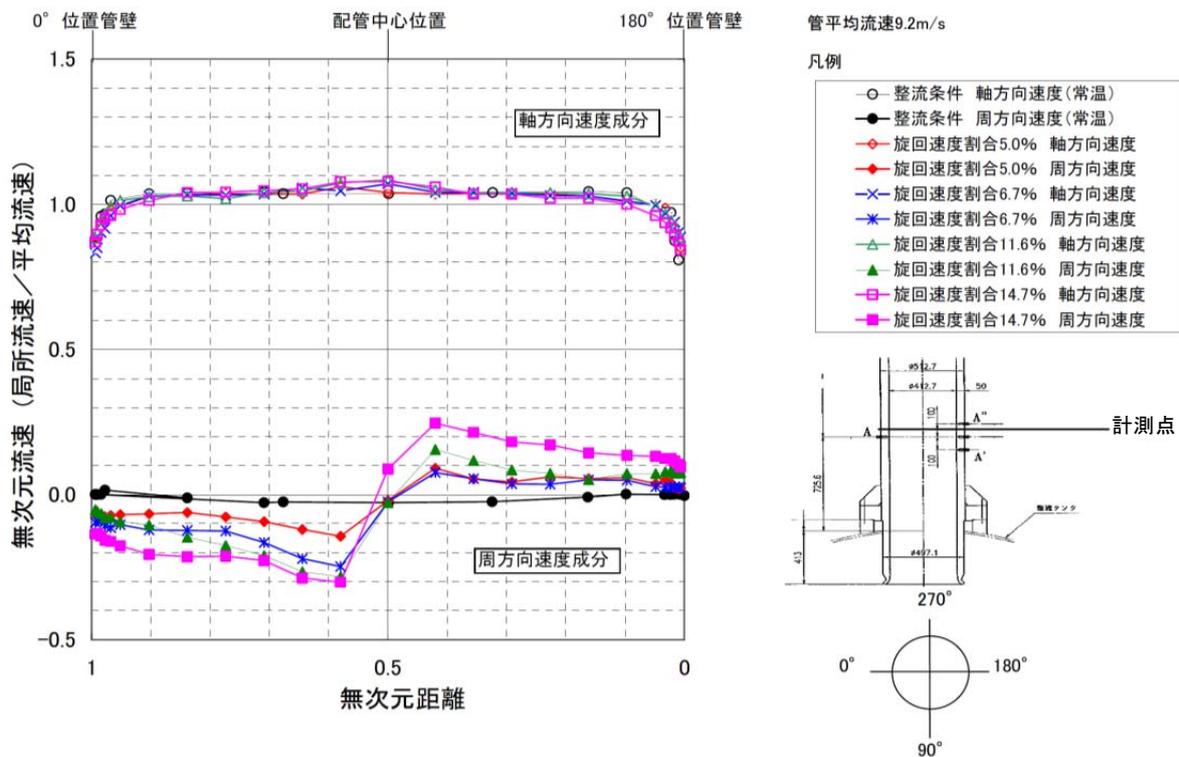


図 A.3 エルボの全損失係数



図A.4 1/3縮尺試験で計測した管内流速の旋回成分 (Yamano et al.<sup>A.3)</sup> の Fig.10 を基に作図)

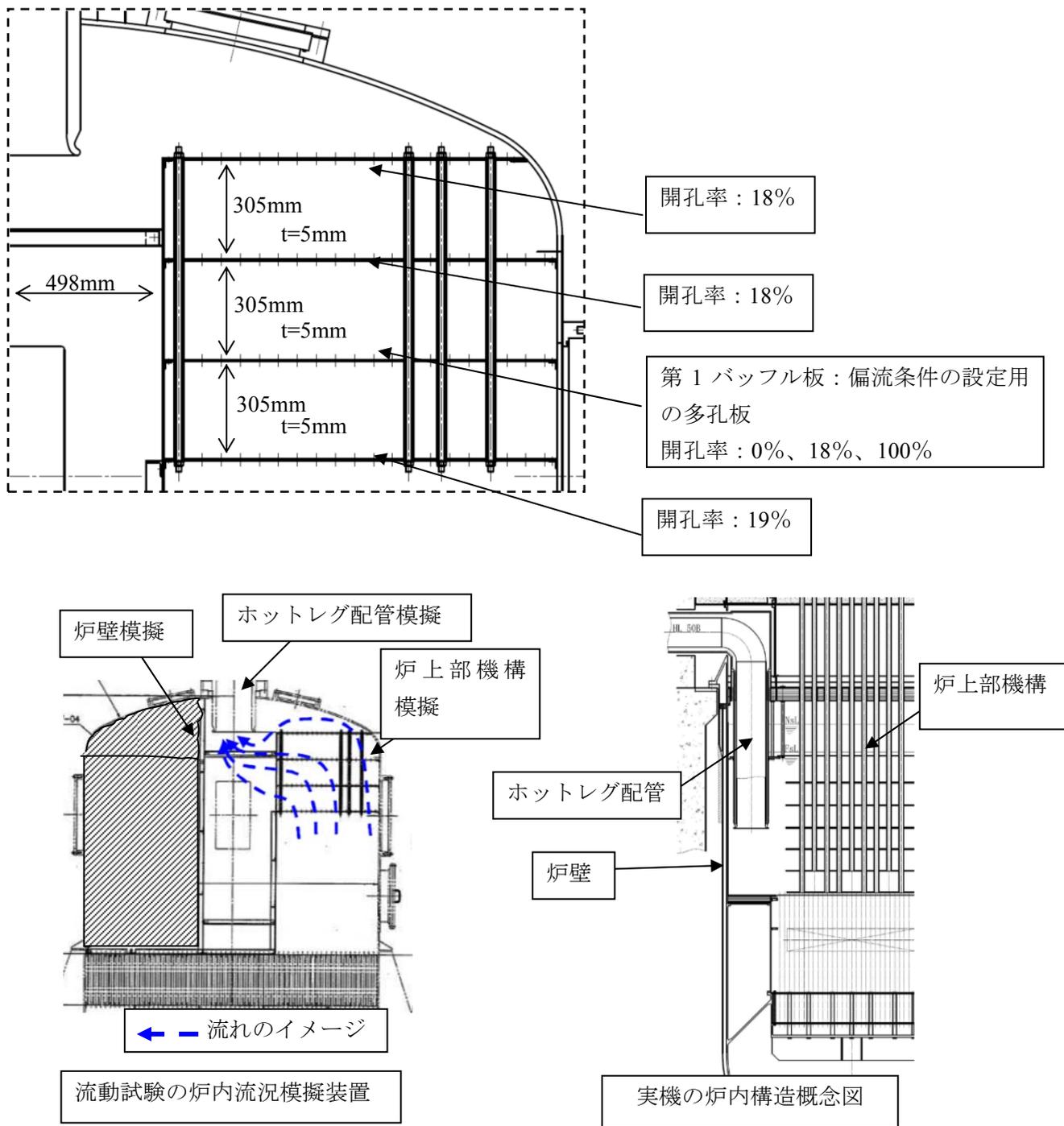


図 A.5 炉内流況模擬装置  
(Sago et al.<sup>A.4)</sup> の Fig.3 を基に作図)

## 付属書 B ホットレグ配管における流れの乱れに起因したランダム振動以外の現象 (規定)

### B.1. 周期的な流れの変動やポンプからの機械振動、圧力脈動と配管振動の共振

エルボ腹側のはく離域近傍では、周期的な流れの変動が発生する。圧力変動の周波数と配管の固有振動数が離れていて共振しない場合は、この周期的な流れの変動による圧力変動で加振される配管の振動応力は小さい。これは、周期的な圧力変動が発生する領域の面積が配管全体の面積に比べて小さいこと、および、周期的な圧力変動による加振方向がエルボ配管の面内方向であり、配管が振動しにくい方向であることによると考えられる。圧力変動の周波数と配管の固有振動数が一致した場合には、配管が大きく振動する可能性がある。

ポンプは、インペラ等の不釣り合い等に起因してポンプ回転数成分（N成分）の機械振動や圧力脈動を発生させる。また、インペラがガイドベーン等の静止部を通過する際に、ポンプ回転数にインペラの羽根枚数をかけた振動数成分（NZ成分）の圧力脈動を発生させる。このようなNZ成分やN成分の振動数と配管の固有振動数が一致すると、共振して配管が大きく振動する可能性がある。

エルボ腹側のはく離域近傍の周期的な流れの変動周波数、ポンプのNZ成分やN成分の振動数を計算し、それらの振動数に対してホットレグ配管の固有振動数を±20%以上離すように設計する。ポンプの機械的振動や圧力脈動成分の振動数に対してホットレグ配管の固有振動数を±20%以上離すことができない場合は、機械的振動又は圧力脈動のレベルを考慮し、ホットレグ配管の振動応力レベルが評価上問題ないように設計する。

### B.2. 管内流れによる配管の不安定現象（ダイバージェンス、フラッタ）

配管内の流速が高流速で、かつ、配管の剛性が低い場合には、ダイバージェンスと呼ばれる座屈やフラッタと呼ばれる配管の不安定現象が発生することがある。

ホットレグ配管は、上流端も下流端も構造物で支持されているが、下流側の支持剛性に比べて上流側の支持剛性が弱く自由端に近い条件になる。ホットレグ配管は、吸込み流れの配管であり、ダイバージェンスやフラッタというビーム型の不安定現象に対しては安定である。また、一般的にシェル振動モードのフラッタが発生する流速（限界流速）は非常に速い。したがって、ホットレグ配管はダイバージェンスやフラッタという不安定現象に対して安定であり、ホットレグ配管の場合、管内流れによる配管の不安定現象の評価をする必要はない。

### B.3. ホットレグ配管外部の流れによる振動

ホットレグ配管の外側の流れが高流速である場合には、外側の流れの乱れによるホットレグ配管の振動が無視できなくなる場合がある。炉上部プレナムの流れは複雑な非定常流れであり、定常的に直交する流れではない。日本機械学会の「配管内円柱状構造物の流力振動防止指針」で対象とする配管に直交する定常流れではないが、本指針を準用して外側の流れによるホットレグ配管の振動を評価する。

#### B.4. エルボ部の二次流れと旋回流れの干渉による不安定

遠心力に起因するエルボ部の二次流れ成分と入口部から流入する旋回流れ成分の周方向流速が一致すると、互いの流れが弱めあって不安定な流動状態になる場合がある。ホットレグ配管のエルボ入口において二次流れに対して有意な影響を及ぼす強い旋回流が発生しないよう設計する。

## 付属書 C 管内流れの乱れに起因したランダム振動解析の入力 (規定)

### C.1. 流速の算定

配管内流量を配管の断面積で割った軸方向の平均流速 $V$ を用いる。

本指針は、単一のショートエルボを有するホットレグ配管を対象としている。実際のホットレグ配管では、炉内流動の影響により旋回成分、偏流成分を有する。また、入口流れが整流である条件においても配管内の流速分布は完全にフラットな流速分布ではない。

しかし、本指針で採用している圧力変動特性（パワースペクトル密度、相関長）は、流動試験による計測結果を基にして軸方向の平均流速を用いて無次元化したものである。また、旋回成分や偏流成分がある場合も同様に軸方向の平均流速を用いて無次元化している。したがって、各種評価に用いる流速には配管内流量を配管の断面積で割った軸方向の平均流速を用いる。

### C.2. 振動特性の算定

ホットレグ配管の振動特性については、**図 C.1**のように配管の形状、寸法、支持条件を適切にモデル化して有限要素法（FEM）により求める。ここで、配管内部および配管外部の流体による付加質量を適切に考慮するため、有限要素解析においてポテンシャル流れを仮定するなどして流体と構造の連成を考慮した解析を実施するか、又は、流体付加質量を配管要素に付加した解析を実施する。

固有値解析によりビーム振動モードおよびシェル振動モードの振動特性（固有振動数、固有振動モード、一般化質量）を算出する。

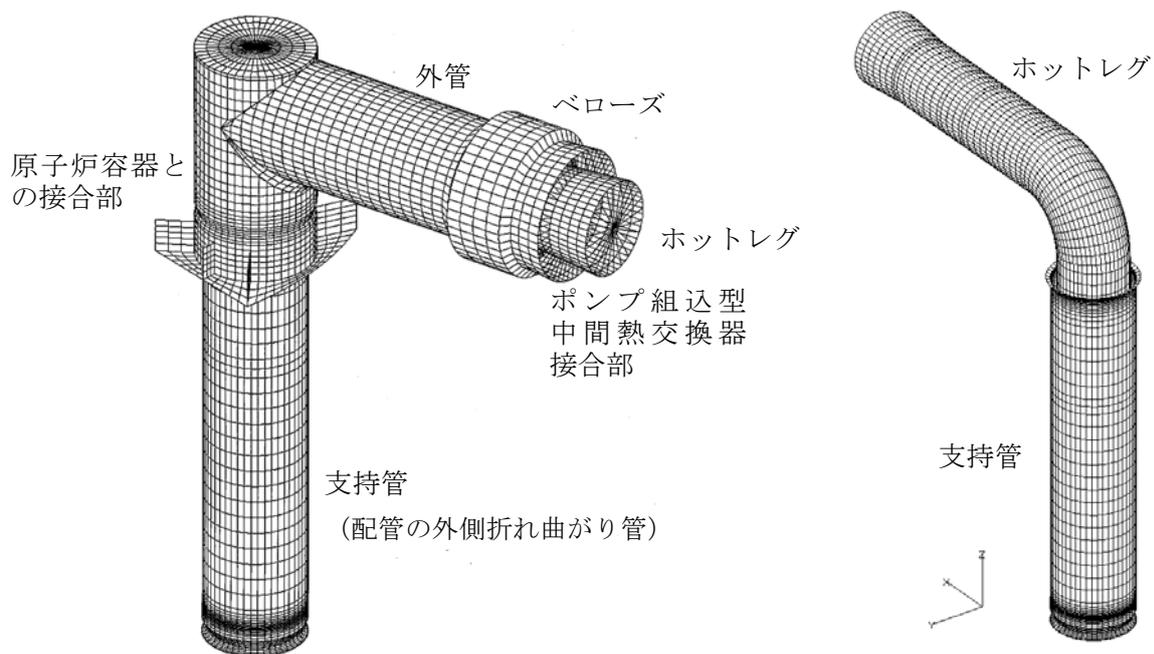
### C.3. 減衰比の設定

ホットレグ配管の配管寸法、支持条件を模擬したステンレス鋼で製作された 1/3 縮尺モデル試験体の打振試験結果（**表 C.1**、**図 C.2**）を参考にし、保守側の小さめの減衰比として、ビーム振動モードに対する減衰比を 0.5%、シェル振動モードに対する減衰比を 0.2%に設定する。

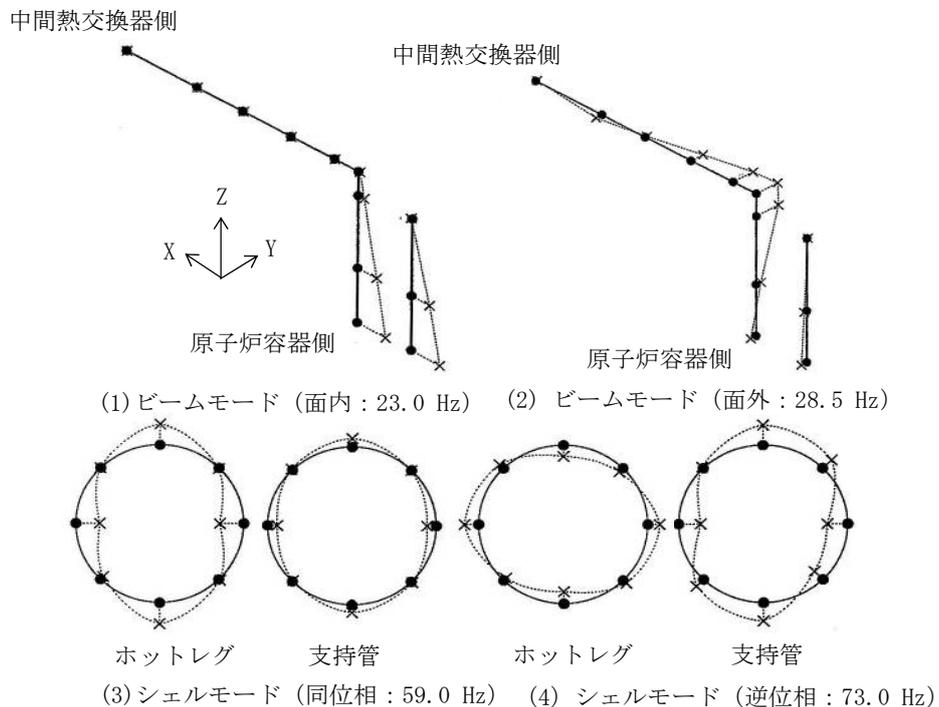
表 C.1 1/3 縮尺モデル試験体を用いた打振試験結果

固有振動モード (方向)	管内水無し		管内水有り	
	F(Hz)	$\zeta$ (%)	F(Hz)	$\zeta$ (%)
1次ビーム振動モード (X方向)	39.0	0.81	23.0	1.06
1次ビーム振動モード (Y方向)	53.0	0.48	28.5	1.66
2次シェル振動モード (同位相)	102.0	0.23	59.0	0.38
2次シェル振動モード (逆位相)	132.0	0.19	75.5	0.53
2次シェル振動モード (ホットレグ配管単独)	179.5	0.26	105.0	0.41
3次シェル振動モード (0°方向)			135.5	0.36
3次シェル振動モード (90°方向)			149.0	0.32
3次シェル振動モード (ホットレグ配管単独)			158.0	0.38
2次ビーム振動モード+2次シェル振動モード			186.0	0.34

(  $\zeta$  :モード減衰比)



図C.1 ホットレグ配管の解析モデルの例



図C.2 1/3縮尺モデル試験体を用いた打振試験結果  
(Hirota et al.<sup>C.1)</sup>の Fig.8 を基に作図)

## 付属書 D 管内流れの乱れに起因したランダム振動応力の算出 (規定)

### D.1. 配管の運動方程式

配管のランダム振動応答の評価手法を以下に示す。一般に外力  $\{F\}$  を受ける配管の運動方程式は次のように表される。

$$\left( \begin{matrix} M \\ \vdots \end{matrix} \right) \left\{ \begin{matrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \right\} + \left( \begin{matrix} K \\ \vdots \end{matrix} \right) \left\{ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} F \\ \vdots \end{matrix} \right\} \quad (D-1)$$

これを次式のように書く。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (D-2)$$

ここで行列  $[M]$ 、 $[K]$  はそれぞれ質量行列、剛性行列である。 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{x\}$  はそれぞれ配管の加速度ベクトル、変位ベクトルであり、その要素は各方向変位、回転角で構成される。配管の振動変位は、固有振動モードを用いて次のように表される。

$$\left\{ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \right\} = \sum_i q_i \left\{ \begin{matrix} \phi_i \\ \vdots \end{matrix} \right\} = \left( \begin{matrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \right) \left\{ \begin{matrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \right\} = [\phi]\{q\} \quad (D-3)$$

ここで  $[\phi]$  は固有振動モードの行列、 $\{q\}$  は一般化変位ベクトルである。これを、運動方程式に代入すると、

$$[M][\phi]\{\ddot{q}\} + [K][\phi]\{q\} = \{F\} \quad (D-4)$$

両辺に固有振動モードの転置行列  $[\phi]^T$  をかけると次式になる。

$$[\phi]^T [M][\phi]\{\ddot{q}\} + [\phi]^T [K][\phi]\{q\} = [\phi]^T \{F\} \quad (D-5)$$

固有振動モードの直交性から次のように表される。

$$\begin{pmatrix} M_1 & & & \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & O \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 & & & \\ & K_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & O \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} q \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cdots & \phi_1 & \cdots \\ \cdots & \phi_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (\text{D-6})$$

ここで、 $M_i$ 、 $K_i$ はそれぞれ一般化質量、一般化剛性である。したがって、配管の運動方程式が互いに独立な一般化変位 $q$ に関する1質点系の運動方程式に還元される。 $j$ は外力がかかる点を表すとすると、

$$M_i \ddot{q}_i + K_i q_i = \sum_j \phi_{ij} F_j \quad (i=1, 2, \dots) \quad (\text{D-7})$$

両辺を $M_i$ で割って式変形する。また一般化減衰も考慮する。

$$\ddot{q}_i(t) + 4\pi\zeta_i f_i \dot{q}_i(t) + (2\pi f_i)^2 q_i(t) = \frac{1}{M_i} Q_i(t) \quad (\text{D-8})$$

$$Q_i(t) = \int_A \phi_i p dA \quad (\text{D-9})$$

ここで、

$\zeta_i$  ……  $i$ 次モードのモード減衰比

$f_i$  ……  $i$ 次モードの固有振動数

$Q_i$  ……  $i$ 次モードの一般化力

$p$  …… 圧力変動分布

$A$  …… 振動に寄与する変動圧力がかかる評価対象配管表面全体

## D.2. 配管のランダム振動応答

外力 $Q_i(t)$ による応答 $q_i(t)$ は、インパルス応答 $h_i(\tau)$ を用いると、次式で表される。

$$q_i(t) = \int_0^t h_i(t-\tau) Q_i(\tau) d\tau = \int_0^\infty h_i(\tau) Q_i(t-\tau) d\tau \quad (\text{D-10})$$

よって、位置 $x$ での応力 $\sigma$ である $\sigma(x,t)$ は、

$$\sigma(x,t) = \sum_i \Phi_i(x) \int_0^\infty h_i(\tau) Q_i(t-\tau) d\tau \quad (\text{D-11})$$

で表される。次に、この時間領域における外力と応答の関係を振動数領域で表してみる。 $\sigma(x,t)$ の自己相関関数 $R_\sigma(x,\tau)$ は、

$$\begin{aligned}
 R_\sigma(x, \tau) &= E[\sigma(x, t)\sigma(x, t + \tau)] \\
 &= E\left[\sum_i \Phi_i(x) \int_0^\infty h_i(\tau_1) Q_i(t - \tau_1) d\tau_1 \sum_j \Phi_j(x) \int_0^\infty h_j(\tau_2) Q_j(t + \tau - \tau_2) d\tau_2\right] \\
 &= \sum_i \sum_j \Phi_i(x) \Phi_j(x) \int_0^\infty \int_0^\infty h_i(\tau_1) h_j(\tau_2) E[Q_i(t - \tau_1) Q_j(t + \tau - \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 \\
 &= \sum_i \sum_j \Phi_i(x) \Phi_j(x) \int_0^\infty \int_0^\infty h_i(\tau_1) h_j(\tau_2) R_{Q_i Q_j}(\tau_1 - \tau_2 + \tau) d\tau_1 d\tau_2 \quad (D-12)
 \end{aligned}$$

となり、応答の自己相関関数  $R_\sigma(x, \tau)$  は、一般化力  $Q_i$ 、 $Q_j$  の相互相関関数  $R_{Q_i Q_j}$  を含んだ形で表される。ここで、 $\tau$  はずらし時間、 $E[\ ]$  は標本平均(アンサンブル平均)を表す。式(D-12)をフーリエ変換することにより、 $\sigma(x, t)$  のパワースペクトル密度  $S_\sigma(x, f)$  が次式で求められる。

$$S_\sigma(x, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\sigma(x, \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (D-13)$$

パワースペクトル密度およびクロススペクトル密度は、以後片側スペクトルで定義する。式(D-13)に式(D-12)を代入し、更に  $\tau = t - \tau_1 + \tau_2$  とおき、 $e^{-i2\pi f(\tau_1 - \tau_2)} e^{i2\pi f(\tau_1 - \tau_2)} = 1$  等の技法を用いて変形すると、式(D-13)は次式に書き換えられる。

$$\begin{aligned}
 S_\sigma(x, f) &= \sum_i \sum_j \Phi_i(x) \Phi_j(x) \int_0^\infty h_i(\tau_1) e^{i2\pi f \tau_1} d\tau_1 \int_0^\infty h_j(\tau_2) e^{-i2\pi f \tau_2} d\tau_2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{Q_i Q_j}(t) e^{-i2\pi f t} dt \\
 &= \sum_i \sum_j \Phi_i(x) \Phi_j(x) H_i^*(f) H_j(f) S_{Q_i Q_j}(f) \quad (D-14)
 \end{aligned}$$

ここで、 $S_{Q_i Q_j}(f)$  は、一般化力  $Q_i$  と  $Q_j$  のクロススペクトル密度である。 $H_i(f)$  は  $h_i(\tau)$  のフーリエ変換により求められ、 $i$  次モードの周波数応答関数と呼ばれ、

$$H_i(f) = \frac{1}{4\pi^2 f_i^2 M_i \left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 + i2\zeta_i \left( \frac{f}{f_i} \right) \right\}} \quad (D-15)$$

で与えられる。また、 $H_i^*(f)$  は  $H_i(f)$  の共役複素数である。 $S_{Q_i Q_j}$  を変動圧  $p(x, t)$  のクロススペクトル密度の形で表すと、

$$S_{Q_i Q_j}(f) = \int_{A_1} \int_{A_2} S_{p_1 p_2}(f) \phi_i(x_1) \phi_j(x_2) dA_1 dA_2 \quad (D-16)$$

となる。ここで、 $S_{p_1 p_2}(f)$  は、 $x_1$ 、 $x_2$  の2点間に作用する変動圧  $p_1$ 、 $p_2$  のクロススペクトル密度で、一般に、次式に示すように実数部のコスペクトルと虚数部のカドラチャスペクトルで表される。

$$S_{p_1 p_2}(f) = S_{p_1 p_2}^c(f) + iS_{p_1 p_2}^Q(f) \quad (D-17)$$

式(D-14)に式(D-15)~(D-17)を代入して整理し、その実数部を表示すると、

$$\begin{aligned}
 S_{\sigma}(x, f) = & \frac{1}{16\pi^4} \sum_i \sum_j \frac{\Phi_i(x) \Phi_j(x)}{f_i^2 f_j^2 M_i M_j} \frac{1}{\left[ \left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right\}^2 + 4\zeta_i^2 \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right] \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right\}^2 + 4\zeta_j^2 \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right]} \\
 & \times \left[ \left\{ \left( 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right) \left( 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right) + 4\zeta_i \zeta_j \frac{ff}{f_i f_j} \right\} \int_{A_1} \int_{A_2} S_{p_1 p_2}^c(f) \phi_i(x_1) \phi_j(x_2) dA_1 dA_2 \right. \\
 & \left. + \left\{ 2\zeta_j \frac{f}{f_j} \left( 1 - \left( \frac{f}{f_i} \right)^2 \right) - 2\zeta_i \frac{f}{f_i} \left( 1 - \left( \frac{f}{f_j} \right)^2 \right) \right\} \int_{A_1} \int_{A_2} S_{p_1 p_2}^o(f) \phi_i(x_1) \phi_j(x_2) dA_1 dA_2 \right]
 \end{aligned} \tag{D-18}$$

となる。これが、管内流れによる圧力変動として、クロススペクトル密度  $S_{p_1 p_2}(f)$  で表されるランダムな圧力変動を受けるホットレグ配管の任意の位置における応力のパワースペクトル密度である。

応力  $\sigma_R$  は、応力のパワースペクトル密度  $S_{\sigma}(x, f)$  から次式を用いて求める。

$$\sigma_R(x) = C_0 \sqrt{\int_0^{\infty} S_{\sigma}(x, f) df} \tag{D-19}$$

ここで、 $C_0$  は 2 乗平均値からピーク値への換算係数である。

### D.3. 管内流れの乱れに起因したランダム励振力

点  $x_1$  の圧力変動  $p_1$  と点  $x_2$  の圧力変動  $p_2$  のクロススペクトル密度は次式で求める。

$$S_{p_1 p_2}(f) = \sqrt{G_{x_1}(f) \cdot G_{x_2}(f)} \cdot \exp\left\{-\frac{\ell}{\lambda_c}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{L}{\lambda_a}\right\} \cdot \exp\left\{i2\pi f \frac{L}{V}\right\} \tag{D-20}$$

ここで、 $G_{x_1}(f)$  と  $G_{x_2}(f)$  は 点  $x_1$  と点  $x_2$  の圧力変動  $p$  のパワースペクトル密度であり、 $\ell$  は 点  $x_1$  と点  $x_2$  間の配管の周方向の弧の長さ、 $L$  は点  $x_1$  と点  $x_2$  間の配管断面中心線に沿う長さ、 $\lambda_c$  は周方向相関長、 $\lambda_a$  は軸方向相関長である。圧力変動のパワースペクトル密度  $G(f)$  は無次元化されたパワースペクトル密度  $g(\bar{f})$  から次式で算出する。

$$G(f) = \left( \frac{1}{2} \rho V^2 \right)^2 g(\bar{f}) \frac{D}{V} \tag{D-21}$$

$$\bar{f} = \frac{fD}{V} \tag{D-22}$$

無次元化された圧力変動パワースペクトル密度はホットレグ配管内の位置により異なるため、式(D-18)に基づく振動解析では、ホットレグ配管を流れの特徴が類似する領域に分け、それぞれの領域で平均した圧力変動パワースペクトル密度を設定する。具体的には、エルボ上流側の直管の領域1、エルボ部ではなく離点より上流側の領域2、はく離が生じて乱れが大きいエルボ腹側の領域3、エルボ背側の領域4、はく離域より下流側で流れの乱れが大きい領域5のように流れの特徴が似ている領域に分ける。

本指針では、付属書Aに示すように整流条件だけではなく、実機の炉上部プレナムで生成される旋回流、偏流、入口乱れ成分を含む流れを対象としてホットレグ配管の流力振動評価を実施できるように、JSFRを模擬した1/3縮尺モデルを用いた入口旋回流および偏流試験結果の各領域で平均した圧力変動パワースペクトル密度に関して全ケースを包絡して、直線的に表示した各領域の圧力変動パワースペクトル密度を用いて評価する。これらの流動試験結果を用いて設定した無次元圧力変動パワースペクトル密度  $g(\bar{f})$  を表D.1および図D.1に示す。

点  $x_1$  と点  $x_2$  間の圧力変動  $p$  のクロススペクトル密度を求める基となる軸方向相関長  $\lambda_a$  および周方向相関長  $\lambda_c$  は、無次元化された軸方向相関長  $\bar{\lambda}_a$  および周方向相関長  $\bar{\lambda}_c$  から次式で算出する。

$$\lambda_c = \bar{\lambda}_c D \quad (\text{D-23})$$

$$\lambda_a = \bar{\lambda}_a D \quad (\text{D-24})$$

ランダム振動解析による配管応力の解析結果が流動試験結果とよく一致することを確認することで、管内流れの乱れに起因したランダム振動解析手法の妥当性は確認されている。

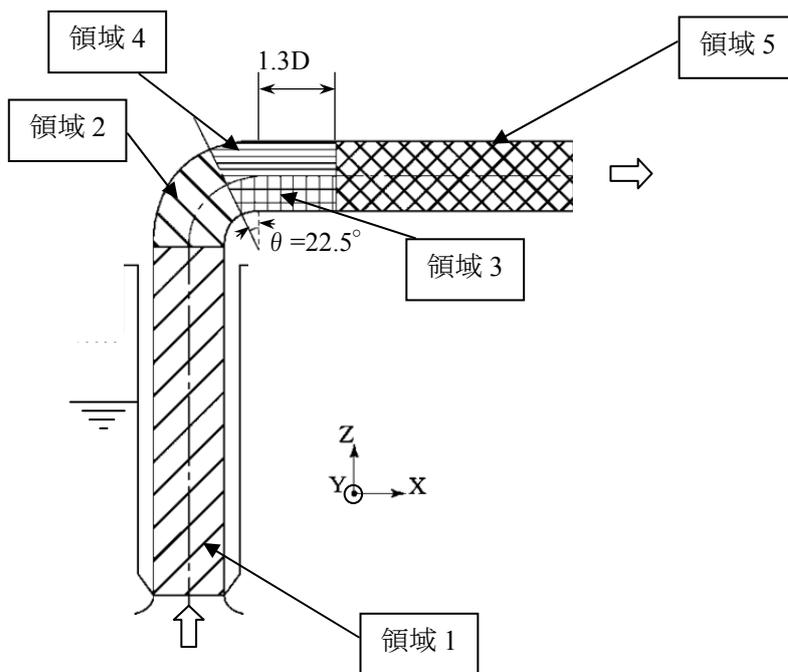
上記の流動試験結果を用いて設定した無次元軸方向相関長  $\bar{\lambda}_a$  と無次元周方向相関長  $\bar{\lambda}_c$  を表D.2、図D.2および図D.3に示す。

表 D.1 領域ごとの無次元圧力変動パワースペクトル密度

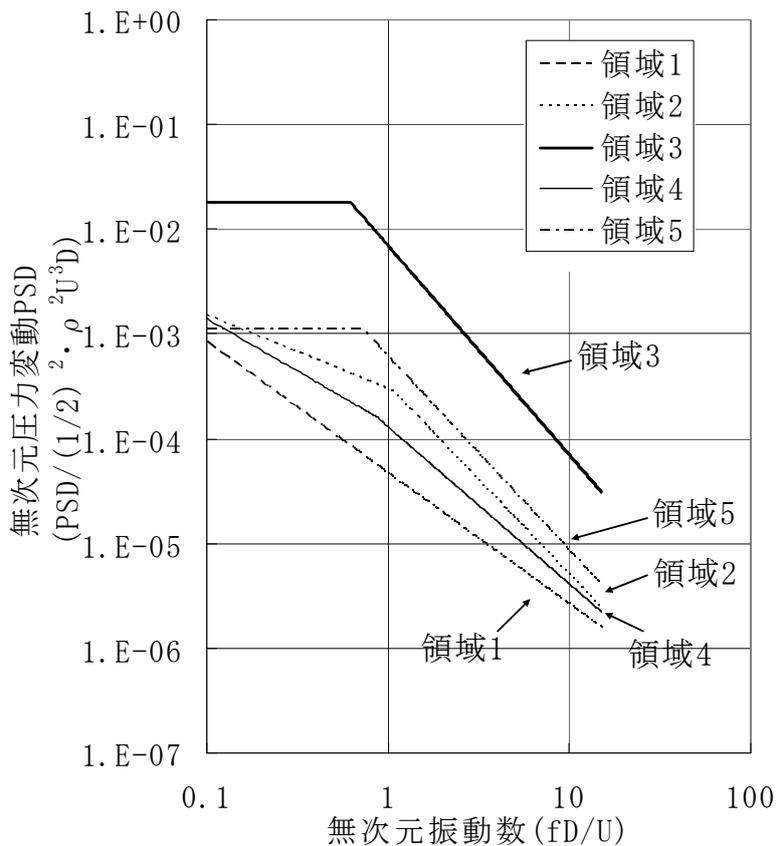
領域		無次元圧力変動パワースペクトル密度
1	ホットレグ配管入口からエルボ始端までの領域	$g_1(\bar{f}) = 4.7 \times 10^{-5} \times \bar{f}^{-1.25}$
2	エルボ始端とエルボ始端から 67.5° 位置の間の領域	$g_2(\bar{f}) = \begin{cases} 3.0 \times 10^{-4} \times \bar{f}^{-0.70} & \bar{f} \leq 1.09 \\ 3.2 \times 10^{-4} \times \bar{f}^{-1.80} & 1.09 < \bar{f} \end{cases}$
3	エルボ始端から 67.5° 位置とエルボ終端から 1.3D の間でエルボ腹側の領域	$g_3(\bar{f}) = \begin{cases} 1.8 \times 10^{-2} & \bar{f} \leq 0.62 \\ 7.0 \times 10^{-3} \times \bar{f}^{-2.00} & 0.62 < \bar{f} \end{cases}$
4	エルボ始端から 67.5° 位置とエルボ終端から 1.3D の間でエルボ背側の領域	$g_4(\bar{f}) = \begin{cases} 1.4 \times 10^{-4} \times \bar{f}^{-1.00} & \bar{f} \leq 0.89 \\ 1.3 \times 10^{-4} \times \bar{f}^{-1.50} & 0.89 < \bar{f} \end{cases}$
5	エルボ終端から 1.3D 以上、下流側の領域	$g_5(\bar{f}) = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-3} & \bar{f} \leq 0.72 \\ 6.1 \times 10^{-4} \times \bar{f}^{-1.85} & 0.72 < \bar{f} \end{cases}$

表D.2 領域ごとの無次元相関長

領域		無次元軸方向相関長	無次元周方向相関長
1	ホットレグ配管入口からエルボ始端までの領域	$\bar{\lambda}_{a1} = \frac{-1}{-1.25 - \bar{f}/0.817}$	$\bar{\lambda}_{c1} = \frac{-1}{-3.84 - \bar{f}/0.277}$
2	エルボ始端とエルボ始端から 67.5° 位置の間の領域	$\bar{\lambda}_{a2} = \frac{-1}{-0.914 - \bar{f}/0.989}$	
3	エルボ始端から 67.5° 位置とエルボ終端から 1.3D の間でエルボ腹側の領域		$\bar{\lambda}_{c2} = \frac{-1}{-0.235 - \bar{f}/0.198}$
4	エルボ始端から 67.5° 位置とエルボ終端から 1.3D の間でエルボ背側の領域		$\bar{\lambda}_{c3} = \frac{-1}{-0.832 - \bar{f}/0.0826}$
5	エルボ終端から 1.3D 以上、下流側の領域	$\bar{\lambda}_{a3} = \frac{-1}{-0.351 - \bar{f}/1.36}$	$\bar{\lambda}_{c4} = \frac{-1}{-1.99 - \bar{f}/0.407}$

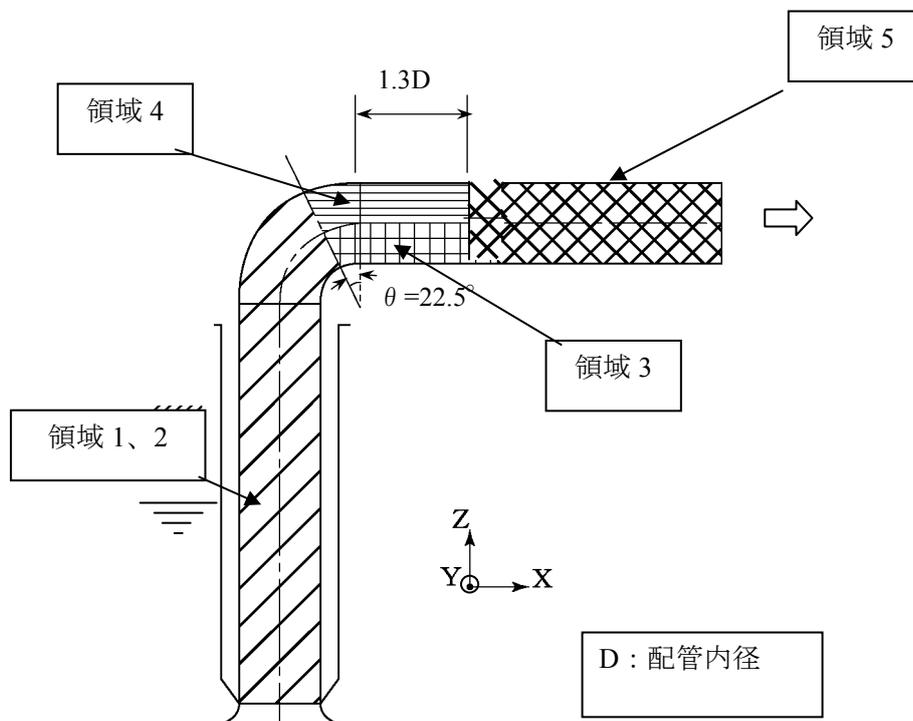


(1) 圧力変動パワースペクトル密度の領域分割

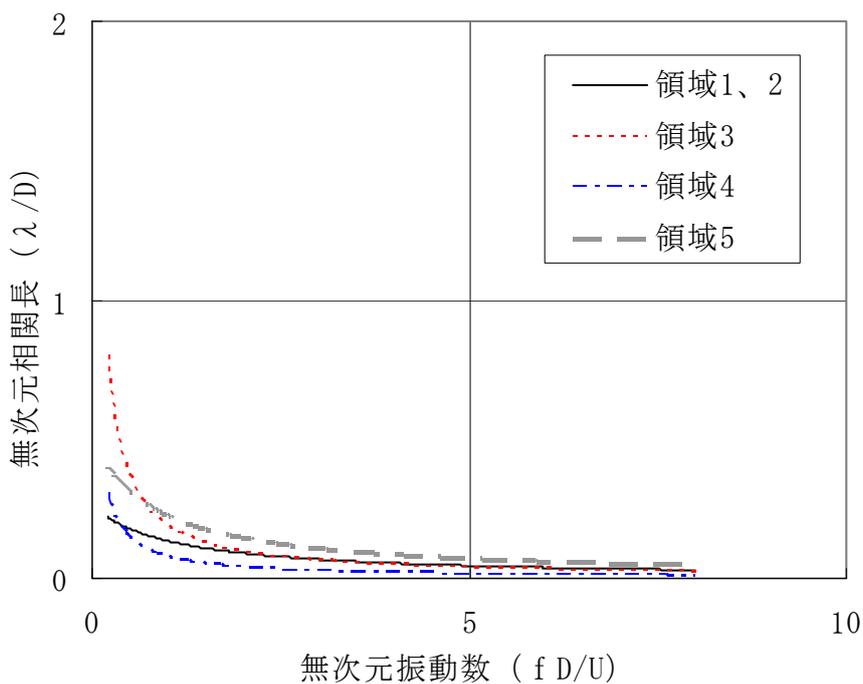


(2) 領域ごとの無次元圧力変動パワースペクトル密度

図D.1 無次元圧力変動パワースペクトル密度

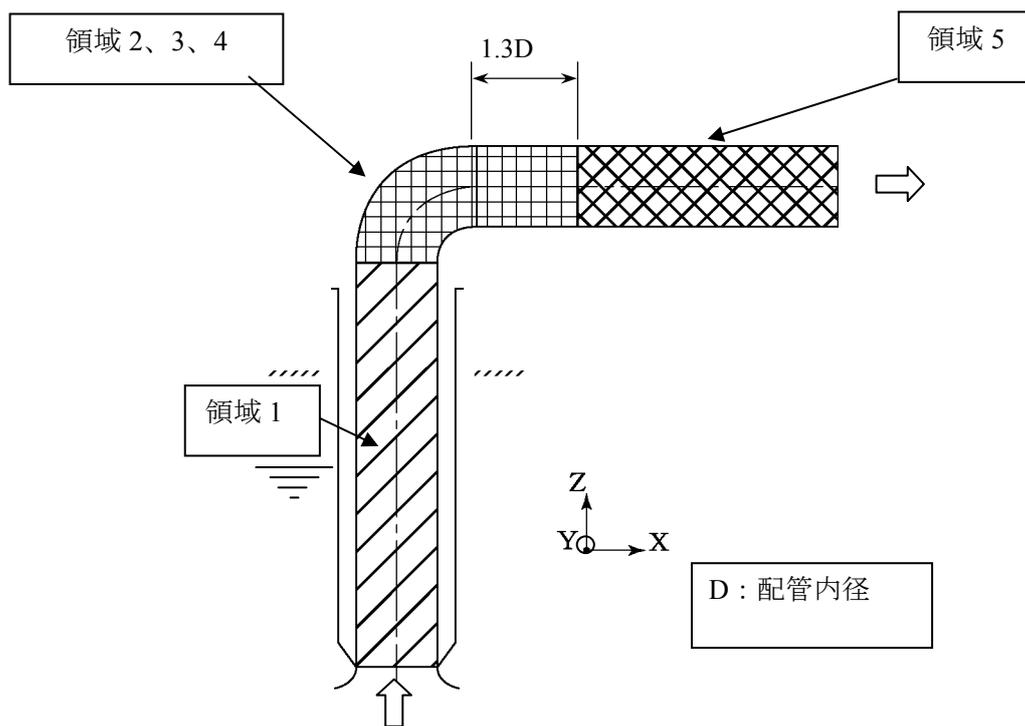


(1) 無次元周方向相関長の領域

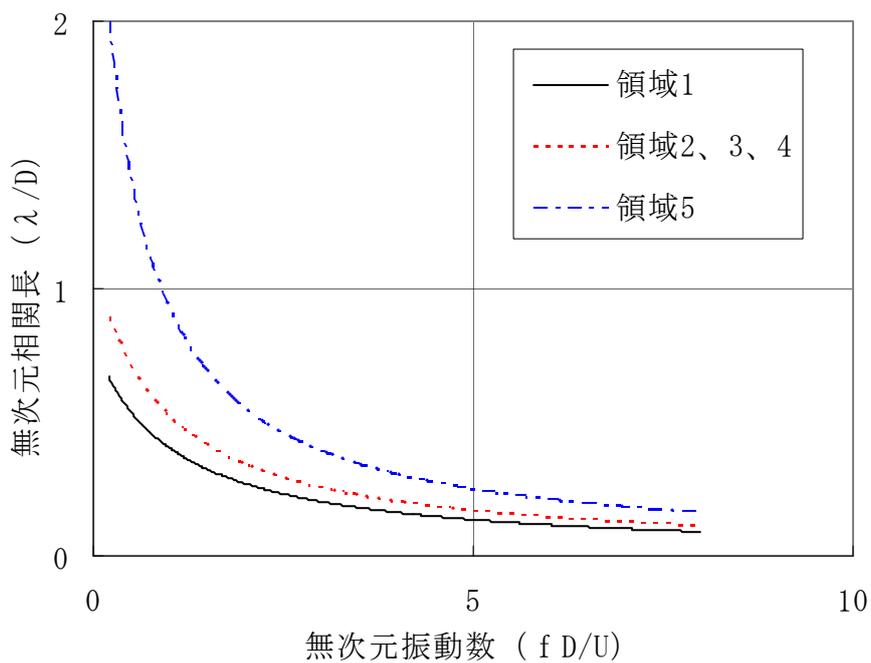


(2) 領域ごとの無次元周方向相関長

図D.2 無次元周方向相関長



(1) 無次元軸方向相関長の領域分割



(2) 領域ごとの無次元軸方向相関長

図D.3 無次元軸方向相関長

## 付属書 E ピーク値換算係数

(規定)

### E.1. ピーク値換算係数

2乗平均値からピーク値への換算係数としては、 $C_0 = 5$ を使用する。

不規則波形  $y(t)$  のピーク値が図 E.1 に示すように  $a$  と  $a + da$  の範囲に入る確率を  $P(a)da$  とする。不規則波形  $y(t)$  にガウス性があれば、 $P(a)$  は図 E.2 に示すようなレーリー分布

$P(a) = \frac{2}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}$  に従うことになる。このとき、 $P(a)$  は  $a = \sigma$  ( $\sigma$  : 標準偏差 = 2乗平均値  $y_{rms}$ )

の位置に極大値を有する。不規則波形  $y(t)$  のピーク値が  $a$  より小さい確率  $p(\text{ピーク値} < a)$  は、

$$p(\text{ピーク値} < a) = \int_{-\infty}^a P(a)da = 1 - e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-\frac{a^2}{2y_{rms}^2}} \quad (\text{E-1})$$

で与えられる。式(1)を図 E.3 に示す。式(1)において  $a = C_0 y_{rms}$  がピーク値を下回る確率  $p(\text{ピーク値} < a = C_0 y_{rms})$  は表 E.1 のようになる。したがって、不規則波形  $y(t)$  のピーク値を2乗平均値  $y_{rms}$  で推定する場合、ピーク値換算係数を  $C_0 = 5$  とすればピーク値をほぼ包絡することになる。

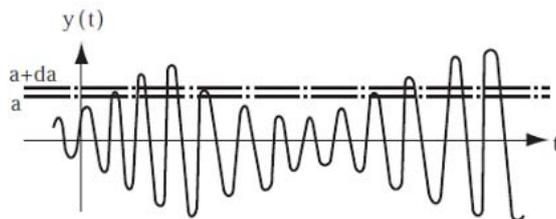


図 E.1  $y=a$  から  $y=a+da$  のバンド内にあるピークの同定<sup>E.1)</sup>

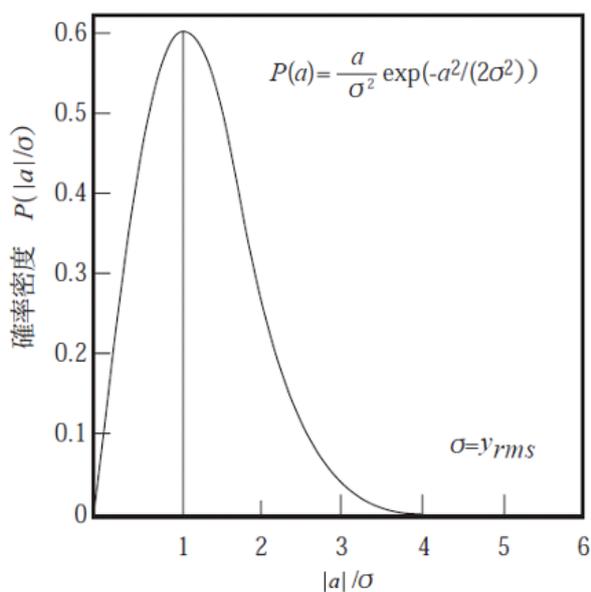


図 E.2 ピーク値のレーリー分布<sup>E.1)</sup>

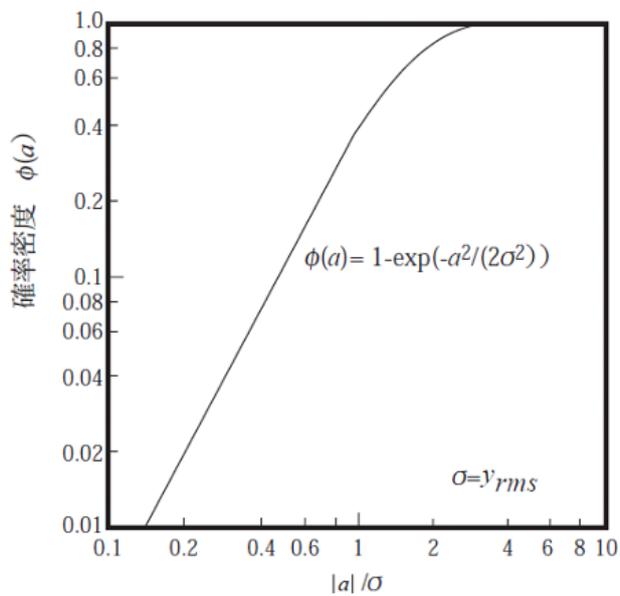


図 E.3 確率分布<sup>E.1)</sup>

表E.1 ピーク値  $a=C_0y_{rms}$  となる確率

換算係数	$a = C_0y_{rms}$ ピーク値を下回る確率 $p(\text{ピーク値} < a = C_0y_{rms})$
1	39.3%
2	86.5%
3	98.9%
4	99.97%
5	99.9996%

## 参考文献

- A.1) I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, Hemisphere, New York, pp271 (1986)
- A.2) T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, M. Konomura, A. Yamaguchi, T. Fujii, : “Resistance and Fluctuating Pressures of a Large Elbow in High Reynolds Numbers,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 128, pp. 1063-1073 (Sep. 2006)
- A.3) H. Yamano, T. Sakai, M. Tanaka, H. Sago, K. Hirota, Y. Xu, S. Hayakawa, : “Study on Flow Induced Vibration Evaluation for a Large Scale JSFR Piping: (1) Current Status of Flow Induced Vibration Evaluation for Hot-Leg Piping,” *Proc. 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19)*, Chiba, Japan (May 16-19, 2011) ICONE19-43650.
- A.4) H. Sago, T. Shiraishi, H. Watakabe, Y. Xu, K. Aizawa, H. Yamano, : “Study on Flow Induced Vibration Evaluation of Large Diameter Piping with Single Elbow for a Large Scale JSFR: (3) Pressure Fluctuation Characteristics in 1/3 Scale Hot-Leg Piping Experiments under Deflected Inflow Conditions Due to UIS Structures,” *Proc. 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19)*, Chiba, Japan (May 16-19, 2011) ICONE19-43712.
- C.1) K. Hirota, Y. Ishitani, T. Nakamura, T. Shiraishi, H. Sago, H. Yamano, S. Kotake, : “Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping in High Reynolds Number Range; Random Force Measurement and Vibration Analysis,” *Proc. 9th International Conference on Flow-Induced Vibrations (FIV2008)*, Prague, Czeck Republic (June 30 – July 3, 2008) No.264.
- E.1) 日本機械学会, : S-012, 「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」 (1998).

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウエーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

