JAEA-Research 2009-051



Na 冷却高速炉における大口径配管の 流力振動評価に関する研究

―エルボ下流の流速変動場に対するエルボ曲率の影響―

Study on Flow-Induced Vibration of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor -Influence of Elbow Curvature on Velocity Fluctuation Field-

小野 綾子 木村 暢之 上出 英樹 飛田 昭 Ayako ONO, Nobuyuki KIMURA, Hideki KAMIDE and Akira TOBITA

> 次世代原子カシステム研究開発部門 FBR システムユニット

FBR System Engineering Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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 +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

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 システムユニット

小野 綾子,木村 暢之,上出 英樹,飛田 昭+

(2009年12月1日受理)

現在,設計が進められている次世代型ナトリウム冷却高速炉 JSFR (Japan Sodium-cooled Fast Reactor)は,経済性の観点から,1次冷却系を2ループにする方式を 採用している.そのため,従来型の高速炉よりも1ループあたりの冷却材流量が増加し, ホットレグ配管は直径 1.3m に対し, 流速が 9m/s を超える設計となっている. このとき のレイノルズ数は 4.2x10⁷となる. さらに、炉容器をコンパクト化するために、ホット レグ配管の一部に曲率の大きい「ショートエルボ」を採用している.一方で、ナトリウ ム炉では,軽水炉よりも系統圧力が大幅に低いため,配管の肉厚は熱荷重を低減するよ う比較的薄い設計となっている.ゆえに、薄肉大口径のホットレグ配管において、流動 励起振動が発生し、配管系の健全性に影響を与えることがないことを確認することが重 要である. このような, JSFR の配管系の健全性を検証するために, エルボ部で発生す る流動励起振動の発生メカニズムを把握する必要がある.流動励起振動は配管内で発生 する圧力変動が加振力になることから、現象把握に向けてエルボを含む配管内の流速変 動と圧力変動の関連をつかむことが重要となる.そこで、本研究では、流動励起振動の メカニズムを解明する第一段階として、エルボの曲がりによって生じる配管内の流動変 動のメカニズムを明らかにすることを目的とし、ホットレグ配管の1/8スケールモデル を用いた水流動試験を行った. 試験では、曲率比の異なるエルボ (ショートエルボ、ロ ングエルボ)を用い、速度変動にエルボの曲率比が与える影響について検討した.速度 分布測定には,瞬時の2次元速度分布を得ることが可能な粒子画像流速計測法を用いた. 2 種類のエルボについて、非定常的な二次流れの流況やエルボ腹側の剥離の流況を捉え ることに成功し,剥離域の再付着点において配管側面に沿う二次流れが剥離域近傍の流 動に作用する構造を明らかにした.

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 +大洗研究開発センター,技術開発部

Study on Flow-Induced Vibration of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor —Influence of Elbow Curvature on Velocity Fluctuation Field—

Ayako ONO, Nobuyuki KIMURA, Hideki KAMIDE and Akira TOBITA⁺

FBR System Engineering Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 1, 2009)

The main cooling system of Japan Sodium-cooled Fast Reactor (JSFR) consists of two loops to reduce the plant construction cost. In the design of JSFR, sodium coolant velocity is beyond 9m/s in the primary hot leg pipe with large-diameter (1.3m). The maximum Reynolds number in the piping reaches 4.2×10^7 . The hot leg pipe having a 90 degree elbow with curvature ratio of r/D=1.0, so-called "short elbow", which enables a compact reactor vessel. In sodium cooled fast reactors, the system pressure is so low that thickness of pipings in the cooling system is thinner than that in LWRs. Under such a system condition in the cooling system, the flow-induced vibration (FIV) is concerned at the short elbow. The evaluation of the structural integrity of pipings in JSFR should be conducted based on a mechanistic approach of FIV at the elbow. It is significant to obtain the knowledge of the fluctuation intensity and spectra of velocity and pressure fluctuations in order to grasp the mechanism of the FIV. In this study, water experiments were conducted. Two types of 1/8 scaled elbows with different curvature ratio, r/D=1.0, 1.5, were used to investigate the influence of curvature on velocity fluctuation at the elbow. The velocity fields in the elbows were measured using a high speed PIV method. Unsteady behavior of secondary flow at the elbow outlet and separation flow at the inner wall of elbow were observed in the two types of elbows. It was found that the growth of secondary flow correlated with the flow fluctuation near the inside wall of the elbow.

Keywords: Elbow, Secondary Flow, Flow Separation, Curvature Ratio, Flow-Induced Vibration

⁺Technology Development Department, Oarai Research and Development Center

目 次

1.	序論·	
2.	実験·	
	2.1	試験ループとテスト部4
	2.2	配管内の流速測定方法(蛍光粒子を用いた PIV 法)4
	2.3	測定箇所
	2.4	実験条件
3.	実験約	吉果と考察
	3.1	エルボ内の流況(剥離域)
	3.2	エルボ出口近傍の流動構造8
	3.3	二次流れが剥離域近傍の流動構造に与える影響10
4.	結論·	
謝辞		
参考	·文献·	

C O N T E N T S

1.	INTR	ODUCTION······1
2.	EXPE	RIMENT ····································
	2.1	Test Loop and Test Section ······ 4
	2.2	Method of Velocity Field Measurement in the Pipe ······· 4
	2.3	Position of Measurements ······ 5
	2.4	Experimental Condition
3.	RESU	ULTS AND DISCUSSION ······7
	3.1	Unsteady Flow Structure in the Elbow
	3.2	Flow Structure near the Inside Wall at the Elbow Outlet
	3.3	Influence of the Secondary Flow on the Flow Structure
		Near the Inside Wall of the Elbow 10
4.	CON	CLUSION
AC	KNOW	LEDGEMENT ······13
RE	FEREN	NCES

< List of Table >

Table 1 : Experimental conditions.

< List of Figures >

Figure 1 : Schematic view of primary cooling system of the JSFR[1][2].

Figure 2: Schematic of the experimental test loop.

Figure 3 : Comparison of positions between mesh in pipe and captured image.

Figure 4 : Deformation rate at cross-section of the pipe.

Figure 5 : Schematic diagram of PIV method.

Figure 6: The position of measurements.

Figure 7-1: Stream line near the inside wall (Short-elbow/Low velocity case).

Figure 7-2: Stream line near the inside wall (Long-elbow/Low velocity case).

Figure 7-3 : Stream line near the inside wall (Short-elbow/High velocity case).

Figure 7-4 : Stream line near the inside wall (Long-elbow/High velocity case).

Figure 8 : Behavior of separation bubble (Short-elbow/High velocity case).

Figure 9 : Fluctuation of the separation bubble surface at A-line in Fig.7 (Short-elbow/ High velocity and Low velocity case).

Figure 10 : Power spectrum densities of the fluctuation of the separation bubble surface. Figure 11-1 : Time-averaged velocity fields near the inside wall

(Short-elbow/Low velocity case).

Figure 11-2: Time-averaged velocity fields near the inside wall

(Long-elbow/Low velocity case).

Figure 11-3 : Time-averaged velocity fields near the inside wall

(Short-elbow/High velocity case).

Figure 11-4 : Time-averaged velocity fields near the inside wall

(Long-elbow/High velocity case).

Figure 12 : Distribution of forward flow fraction at height of y/D=0.01 in the Short-elbow.

Figure 13-1 : Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Short-elbow/Low velocity case).

Figure 13-2 : Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Long-elbow/Low velocity case).

Figure 13-3 : Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Short-elbow/High velocity case).

Figure 13-4 : Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Long-elbow/High velocity case).

Figure	14-1:	Transverse	distribution	of velocity	component in	the streamw	ise direction
						in the she	ort-elbow.

- Figure 14-2 : Transverse distribution of velocity component in the streamwise direction in the long-elbow.
- Figure 15-1 : Time averaged velocity field in the cross section of the pipe (Short-elbow/Low velocity case).
- Figure 15-2 : Time averaged velocity field in the cross section of the pipe (Long-elbow/Low velocity case).
- Figure 15-3 : Time averaged velocity field in the cross section of the pipe (Short-elbow/High velocity case).
- Figure 15-4 : Time averaged velocity field in the cross section of the pipe (Long-elbow/High velocity case).

Figure 16-1: Time-series velocity field in the cross-section of the pipe

(Short-elbow/High velocity case).

Figure 16-2 : Time-series velocity field in the cross-section of the pipe

(Long-elbow/High velocity case).

- Figure 17-1 : Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Short-elbow/Low velocity case).
- Figure 17-2 : Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Long-elbow/Low velocity case).
- Figure 17-3 : Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Short-elbow/High velocity case).
- Figure 17-4 : Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Long-elbow/High velocity case).

1. 序 論

高速増殖炉サイクル実用化研究開発プロジェクト(<u>Fa</u>st Reactor <u>Cycle</u> System <u>T</u>echnology Development Project : FaCT)において、ナトリウム冷却高速炉 JSFR(<u>J</u>apan <u>S</u>odium-cooled <u>Fast Reactor</u>)の設計研究が進められている^{[1][2]}. JSFR の設計においては、

「建設コストの削減」,「高い安全性と信頼性の確保」が目標とされている.図1に,JSFR の一次冷却系システムの概念図を示す.日本原子力発電(株)において検討していた実 証炉^[3]では一次冷却系システムは3ループであったが, JSFR ではコスト削減の面から2 ループ方式を採用している. 出力の増大も図られていることから, 一次系ホットレグ配 管を流れるナトリウム冷却材の流量は増加し,直径約1.3mの配管内を流速 9m/s 以上で 流れることになる.このとき,最大レイノルズ数は Re=4.2x10⁷におよぶ.また,炉容器 をコンパクト化するために、ホットレグ配管の一部に曲率比 r/D=1.0(r:曲率半径,D: 配管径)のショートエルボ*が採用されている.高速炉では、軽水炉に比べ、ナトリウ ム冷却材の入口温度と出口温度の差が大きく、かつ運転温度が高い.よって、構造材へ の熱荷重を低減するためには、配管の肉厚は薄くすることが望ましい. ナトリウムは水 に比べて沸点が高いため、高速炉冷却系内の圧力は軽水炉に比べて大幅に低い. そのた め,配管の肉厚を薄くすることが可能であり,ホットレグ配管の肉厚は現在の設計にお いて 15.9 mmと設計されている. JSFR 設計においてはナトリウムが薄肉の大口径配管に 高流速で流れることになるため、ショートエルボを含むホットレグ配管系の Re 数がこ れまでの経験を超える高い値となっている. そのため, 高レイノルズ数の条件下におい て薄肉の大口径配管で流動励起振動が発生し,配管系の健全性に影響を与えることがな いことを確認することが重要である.JSFR の配管の健全性を検証するためには、レイ ノルズ数 Re=4.2x10⁷ で起こる流動振動が持つ周波数や振幅に関する知見を提示するこ とが必要である.しかし、レイノルズ数 Re=4.2x10⁷において流動実験を行い、データを 取得することは非常に困難である.よって、流動実験が可能なレイノルズ数の範囲にお いて配管内で起こっている流動現象を明らかにすることで、流動励起振動のメカニズム を把握し,機構論的に実機レイノルズ数での現象を評価する必要がある.一般に,流動 励起振動は配管内の流体の乱れによって引き起こされる配管内の圧力変動が加振力と なり発生する.よって、流動励起振動のメカニズムを解明するために、配管内の流動変 動挙動、ならびに、その流動変動と加振力との関係を把握する必要がある.しかし、エ ルボ内の流動は,腹部で生じる流体剥離と曲がりによって生じる二次流れが共存する非

^{*}JIS 規格では,エルボ曲率半径 r と配管径 D の比,曲率比 r/D=1.0 のものをショートエルボと呼び,曲率比 r/D=1.5 のものをロングエルボと呼ぶ.

定常かつ複雑なものとなっており、その流動構造の把握は容易ではない.

ベンドやエルボ内の流動に関する研究は数多く行われているが、ほとんどが工業的実 用の観点から圧力損失や流速分布を測定するものがほとんどであり、ベンドもしくはエ ルボ内の詳細な流動構造を調べたものは限られている.

円形断面の 90°ベンドもしくはエルボの流動特性を調べた研究について,以下にいく つか例を挙げる. Bovendeerd ら⁽⁴⁾は、レーザードップラー流速測定法(LDV)を用いて 曲率比r/D=3のエルボ内の軸方向流速分布と配管断面の二次流れ流速分布を測定してい る.レイノルズ数は Re=700 であった.作動流体は、混合油と灯油である. Enayet ら^[5] は、LDV を用いて曲率比 r/D=2.8 のベンド内の流速分布と変動強度分布を測定した.作 動流体は水であり、レイノルズ数は、Re=500, 1093, 4.3x10⁴ と、過去の研究の中では比 較的高レイノルズ数領域で測定を行っている.須藤ら^[6]は、熱線流速計を用いて曲率比 r/D=2.0 のベンド内の軸方向速度分布・変動強度分布,配管断面の二次流れ流速分布・ 変動強度分布の測定を行い、ベンド内の流体構造について詳細な議論を行っている.作 動流体は空気で対象としたレイノルズ数は Re=6x10⁴ である.しかし、以上で紹介した 過去の研究で扱っているベンドもしくはエルボにおいては、流体の剥離現象が起こって いない.それゆえ、エルボ内の非定常で複雑な乱れ構造を明らかにする上で重要な流体 剥離と二次流れが共存する複雑な流動構造については検討されていない.

河村ら^[7]は、LDV を用いて曲率比 r/D=0.55, 1, 2 のエルボ内の流速分布と変動強度分 布の測定を行っている.作動流体は水であり、レイノルズ数 Re=5x10⁴,5x10⁵で試験を 行っている.特に,彼らは流動変動とその変動強度のパワースペクトルの周波数特性に ついて着目し,配管内断面平均流速と配管内径で規格化した無次元周波数(ストロハル 数:St)と無次元化した流速変動のパワースペクトル密度の関係はレイノルズ数に依存 せず,St=0.5 でピークを持つという重要な知見を見出している.河村らの試験では,曲 率比 r/D=0.55,1 で剥離がおこり,r/D=2 では剥離は起こらなかったと述べているが,剥 離と二次流れの相互作用については言及されていない.Shiraishi ら^{[8][9]}は,染料注入に よる定性的なエルボ内流況の観察に加え,流力振動のメカニズム解明にとって重要な配 管内の圧力変動を測定している.エルボは曲率比 r/D=1.0 のショートエルボを用い、レ イノルズ数 Re=8.0x10⁶,流速は 9.2m/s まで測定している.彼らは、剥離域と主流の境 界部分,再付着点近傍で強い圧力変動が発生していると指摘しているが、剥離域周囲の 複雑かつ非定常な流動メカニズムを十分に理解するための詳細な速度分布は測定して いない.

本研究では、流動励起振動のメカニズムを解明する第一段階として、エルボの曲がり によって生じる配管内の流動変動のメカニズムを明らかにすることを目的とし、JSFR 一次系ホットレグ配管の 1/8 スケールの水流動試験を行った.エルボ部の曲率比は、 JSFR ホットレグ配管に採用される予定のショートエルボ (r/D=1.0) と、設計において 裕度を持たせロングエルボ (r/D=1.5) を採用した場合の評価指針に関わるデータを得る ため2種類の曲率を選定した. 粒子画像流速計測法(Particle Image Velocimetry : PIV) を用いて,高時間分解能で軸方向速度分布と配管断面の二次流れ流速分布の取得を行った.

2. 実 験

2.1 試験ループとテスト部

図2にエルボ水流動試験の試験ループを示す. テスト部はウレタン樹脂製のエルボと アクリル製の直管から構成される. 配管系の内径は,実機ホットレグ配管の約1/8にあ たる150 mmである. 貯水タンクは30 m[®]の容量を有し,水温調節のために5本のヒータ ーが備えられている. ヒーターの総出力は200kW であり,50℃が本ループの最高温度 である. ループの最大流量は240 m[®]/h である. テスト部入口には,速度分布を平坦にす るためにバッファタンクが設置されている. バッファタンクは,3 枚のバッフル板と四 分円縮流ノズルから構成されている. バッファタンク出口とエルボ入口部の助走距離は 10D である.

本研究では、エルボの曲率比が内部流況に与える影響を調べるため、曲率比 r/D=1.0 と 1.5 のショートエルボとロングエルボを用いて試験を行った.配管内の流速分布測定 には粒子画像流速計測 (PIV) 法を用いた.PIV で高精度に流速を測定するためには、 配管壁面で屈折の影響を極力低減することが重要である.そこで、透明樹脂をエルボの 型へ流し込み、継ぎ目のない、かつ薄肉 (t=3 mm)の透明樹脂製エルボを作成し、屈折 の影響を極力低減した.また、可視化部に矩形のウォータージャケットを設置すること で、さらに屈折の影響を低減した.図3に、配管内に挿入された方眼紙の座標と実際に 測定位置からカメラで配管内を撮影した際の比較を示す.曲率の大きい配管壁面近傍に おいても両座標の差異は小さい.図4は、エルボ配管内に挿入した方眼紙座標と実際に カメラで撮影された像について、配管壁での屈折による像の変形率(ここでは、変形率 =縮小/拡大で定義する)を表したものである.配管中央付近(0 mm)は、流し込みの型 を併せた部分で若干のひずみはあるものの、曲率の影響が大きいと考えられる配管内壁 付近での変形率は小さい.よって、曲率の影響は小さいものと見なすことができる.

2.2 配管内の流速測定方法(蛍光粒子を用いた PIV 法)

配管の曲がりによって発生する二次流れや腹部で生じる流体剥離によって,エルボ内の流動構造は複雑かつ非定常である.エルボ内の非定常かつ複雑な流動現象を把握するために,流速の空間・時間変化を取得する必要がある.そこで,本研究では,瞬時の2次元速度場を得ることができる高速 PIV による流速分布測定を行った.図5に,PIVの原理を示す.PIVでは,作動流体に混入されたトレーサー粒子を測定したい断面にてレーザーシート光で照射し,粒子画像を撮影する.連続した2枚の粒子画像の差分により求めた粒子の移動量から流体の速度を算出し,速度ベクトル場を得ることができる.連

続した 2 回のレーザー照射時間間隔を極めて短くすることでトレーサーのすばやい動き(トレーサーの移動量)を正確に捉えることができる. 2 回のレーザー照射間隔は,主流速度に依存して 0.2 から 1.5ms の範囲で調整した.連続した二つのフレームは 5ms ごと (200Hz) に撮影した.一回の測定で得られるフレーム数は 2048 枚であり,これより 1024 枚のベクトル図を 5ms の時間間隔で得た.ゆえに,測定時間長さは 5.12s である.各測定箇所において,測定は統計的精度を出すため,3 回測定し平均値を求めている. PIV の画像処理には,相互相関法とサブピクセル法を用いた.参照領域の大きさは 30 x 30 pixel であり,サブピクセル法を用いた場合の空間誤差は 0.2 pixel^[10]と見積もられる.

壁面近傍の流速を測定する際には、粒子からの反射光のみならず、構造物壁面での反 射光(ハレーションの発生)も同時に撮影されるため、正確に粒子の移動量を測定する ことが困難となる.そこで、本実験ではレーザー光波長(λ=527nm)に対して、蛍光を 発する粒子をトレーサー粒子として採用した.カメラのレンズにレーザー光波長を持つ 光のみを通さないノッチフィルタを装着し、粒子の放つ蛍光のみを撮影できるようにし た.この「蛍光粒子法」により、ハレーションのない状態でエルボ腹側壁面近傍の流速 を正確に測定することができた.本実験で使用した蛍光粒子は蛍光染料 Rhodamine-640 (蛍光波長:約 640nm)で約 80 µmのイオン交換樹脂を着色したものを用いた.

2.3 測定箇所

図6に、本実験での撮影箇所を示す.ここで、「エルボ出口」とはエルボの曲がりが 終了する位置を示す.「エルボ出口」は、ショートエルボでは上流側配管の中心軸から 下流側へ1Dの箇所であり、ロングエルボでは上流側配管の中心軸から下流側へ1.5D の箇所となる.それぞれ、図6では(b-1)断面が「エルボ出口」部に対応する.エルボ出 口の腹側壁面の点を原点Oと定義し、軸方向をx座標、腹側から背側に向かう座標をy 座標、x,yに垂直な座標をz座標とする.図6下段で示した腹側の(a)断面は、エルボ腹 側で発生する剥離挙動を撮影するためであり、ショートエルボ、ロングエルボともにエ ルボ出口を中心に1枚 (a-1)、その下流側71 mmの地点で1枚 (a-2)を撮影した.(b)断面 は、エルボの曲率により発生する二次流れを撮影することを目的とした、配管の垂直断 面である.ショートエルボでは、エルボ出口断面 x/D=0 (b-1)、0.5 (b-2)、0.75 (b-3)、ロン グエルボでは、エルボ出口断面 x/D=0 (b-1)、0.25 (b-2)、0.5 (b-3)について撮影を行った. (a)の画角サイズは、110 mm x 110 mm (1024 x 1024 pixel)、(b)の画角サイズは、160 mm x 160 mm (1024 x 1024 pixel)である.

2.4 実験条件

Idelchik^[11]は、短い直管が接続されたベンドにおける全圧力損失係数の過去のデータをまとめている。その全圧力損失係数のレイノルズ依存性に着目し、亜臨界域

(Re<1x10⁵),遷移域(1x10⁵<Re<4x10⁵),超臨界域(Re>4x10⁵)の3つの領域分けをしている.亜臨界域から超臨界域に移る遷移域において全圧力損失係数は低下し,超臨界域でレイノルズ数に無関係に一定値をとるようになる.Shiraishiら^{[8][9]}は,LDVを用いて超臨界域で90°エルボ内の流速分布を測定し,Re<8.0x10⁶の範囲において主流速度で規格化した軸方向流速分布はレイノルズ数に依存しないことを示している.彼らは,超臨界域で全圧力損失係数が一定になる理由として,腹側で形成される剥離泡(剥離域の動的な表現を以後「剥離泡」という.)は超臨界域でレイノルズ数の変化に対して,その存在領域を変えないことに起因するとしている.

以上のことから, 超臨界域においてエルボ内の流動構造を明らかにすることが, JSFR で想定されている Re=4.2x10⁷の流況予測につながる.しかし, 超臨界域にあたる高レイ ノルズ数域で流動変動と圧力変動に焦点を当て, その双方の関連性について議論したよ うな研究は, 筆者が知る限りでは Shiraishi^{[8][9]}らによる研究の一例しかない.本研究に おいては, 超臨界域でのエルボ内における流動構造を把握するために, Re=4x10⁵以上の 領域での実験と, また, 過去の研究による知見が比較的多い亜臨界・遷移域での実験を 行うこととした.

表 1 に実験条件を示す.実験パラメタは配管断面平均流速 U_m で,低流速ケースの U_m =1.0m/s と高流速ケースの U_m =3.0m/s とした.また,作動流体温度は 28℃とする.よって,Idelchik の分類に従うとすれば,低流速ケースでは Re=1.8x10⁵ (遷移域),高流速 ケースでは Re=5.4x10⁵ (超臨界域) となる.

3. 実験結果と考察

3.1 エルボ内の流況(剥離域)

図 7-1, 図 7-2, 図 7-3, 図 7-4 に低流速ケース (U_m=1m/s) と高流速ケース (U_m=3m/s) におけるショートエルボとロングエルボで内部の瞬時流況を 0.5s ごとに流線で表したものを示す.速度はそれぞれ主流速度 U_mで規格化した.撮影画像は,ロングエルボ,ショートエルボ共に,図 6 で示した(a-1)の箇所にあたり,各図の中央がエルボ出口に対応している.図 7-1,図 7-3 より,低流速ケース/高流速ケースにおいて,ショートエルボの腹側近傍には,低速の領域が存在しており,常に剥離が起こっていることが分かる.更に,この剥離泡は繰り返し上下に運動しているのが分かる.一方,ロングエルボでは,剥離泡は時間的に常に存在するわけではなく,発生と消滅を繰り返している.図 7-2 では,t=0.5, 2.0s のとき,図 7-4 では t=1.0s のときに剥離泡が形成されているのが分かる.

図8に、図7に示すショートエルボ内の流況について、主流速度以下の低速部分の流 速についてベクトル表示したものを示す.壁面を除いて、ベクトルが書かれていない箇 所は, 主流速度以上の流速で流れていることを示している. 剥離域内の流速が, 周囲流 体よりも遅くなることを考えると、このベクトル表示された低速部分がおおよそ剥離域 に一致していると考えることができる. 剥離域内では, 円で示すように渦塊が生成され 移動してゆく挙動が見られる.後流側では剥離泡の揺動がより大きく, A 断面を例にと ると上下に剥離泡界面が動いている様子が分かる.Shiraishi ら^{[8][9]}は、剥離泡が存在し ている壁面上,また再付着点において,大きな圧力変動(Shiraishiらは「負のスパイク」 と呼んでいる)が時折発生することを報告しており,藤井ら[14]は剥離泡が特に大きく変 動した際に,負のスパイクが発生すると予測している.よって,剥離泡の挙動を把握す ることは重要であると考えられる.図8に示した剥離泡の上部界面を各時間ごとに抽出 し、A 断面における剥離泡界面の y 方向の変動を求めたものを図9に示す.界面が時間 とともに上下に揺動している様子が見られる. Shiraishi らの知見に従うとすれば、この 変動は配管壁面の圧力変動に影響を与えていると考えることができる. 図 10 は図 9 で 示した A 断面での剥離泡界面変動に関するパワースペクトル密度を算出したものであ る. 低流速ケースでは, f=3.5Hz, 高流速ケースでは, f=6.4Hz に卓越周波数が出ており, 各卓越周波数を有する周期的な剥離泡の運動が起きていると考えられる. 流速が速くな ると、卓越周波数は高くなるものの、流速と卓越周波数は比例の関係にはならなかった. ここで, 配管内断面平均流速と配管内径で規格化した無次元周波数(ストロハル数: St=fD/U_m)によって示すと,低流速ケースでSt=0.53,高流速ケースでSt=0.32であった.

3.2 エルボ出口近傍の流動構造

図 11-1, 図 11-2, 図 11-3, 図 11-4 に、ショートエルボ/ロングエルボ出口近傍の低流 速ケース/高流速ケースにおける平均流速分布を示す.速度は主流速度 Umで規格化して 示す.ショートエルボ(図 11-1,図 11-3)では、低流速ケース/高流速ケースともに、 エルボ腹側近傍で流速の低い領域が形成されており, 剥離が起こっているのが確認され る. 図 12 にショートエルボの腹側 y/D=0.01 の地点において軸方向の順流率を算出し, プロットしたものを示す. 順流率とは、全測定時間に対して、順流(主流方向の向き) が現れる時間の割合として定義される.一般に、剥離域の再付着点は、順流率が 0.5 に なる地点とされている^{[13][14]}.図 12 より,低流速ケースの再付着点が x/D=0.1,高流速 ケースの再付着点が x/D=0.27 と特定できる. 遷移域に属する低流速ケースよりも超臨 界域に属する高流速ケースの方が、より下流側に再付着点が存在していることが分かる. ロングエルボ(図11-2,図11-4)では、剥離が間欠に起こるため、時間平均の流速分布 で表すと低流速域が明瞭に確認することができなくなるが,図中の配管腹側の緑色コン ターで表されている主流よりも比較的流速が低い部分が間欠的に起こる剥離域に対応 していると考えられる.河村ら⁽⁷⁾は,曲率比 r/D=0.55, 1, 2 の 90° エルボ内の流動変動 をレーザードップラー計(LDV)で測定し, r/D=0.55 および r/D=1(ショートエルボ) で剥離が起こり, r/D=2 では剥離が起こらなかったことを報告している.よって,河村 らの実験結果はr/D=1とr/D=2の間に剥離が起こり始める曲率が存在することを示して おり、曲率比r/D=1.5のロングエルボで剥離域の発生が間欠的であることは、河村らの 実験結果と適合する.

図 13-1, 図 13-2, 図 13-3, 図 13-4 に, ショートエルボ/ロングエルボ出口における時 間平均の x 方向速度の変動強度分布を示す.速度の変動強度値 u_{xRMS}は,以下のように 表される.ここで, u_{xi}は主流方向の瞬時速度, u_x は主流方向の平均速度である.

速度変動強度値は、主流速度 Umで規格化して示す.ショートエルボでは、低流速ケース/高流速ケース双方で剥離域と主流の境界部分に高い変動強度が見られる.また、腹側壁面近傍において変動強度が比較的高い箇所がある(破線円で囲んだ領域).図13-1,図13-3 には、図12の順流率分布から計算した再付着点を示してある.ショートエルボでは、壁面近傍の高変動強度領域が再付着点の後方に存在しているのが分かる.これは、剥離泡の再付着挙動が、再付着点近傍の流れに大きな変動を与えているためと考えられる.ロングエルボについては、定常的な剥離域が形成されていないため、ショートエル

ボで見られるような剥離域と主流の境界部分での強い変動強度は見られないが, 腹側壁 面近傍に変動の高い箇所がわずかに見られる.これは, 間欠的に形成される剥離域の再 付着点付近の速度変動を捉えているものと考えられる.よって, ロングエルボのケース では, 再付着点は順流率によって特定することはできなかったが, 壁面近傍の変動強度 が高い箇所の上流側, すなわちエルボ出口近傍 (x/D=0) に再付着点が存在すると考え ることができる.

図 14-1, 図 14-2 にショートエルボ/ロングエルボの腹側における軸方向の平均速度分 布を示す.縦軸は,配管径 D で規格化した腹側壁面からの無次元距離 y/D で,横軸は 主流速度で規格化した無次元流速ux/Umで表してある.ショートエルボ/ロングエルボと もに、エルボ出口 x/D=0 から約 20 mmずつ下流の軸方向速度分布として示す.まず、シ ョートエルボのケースでは、図 14-1(a)において低流速ケース、高流速ケース共に、腹 側近傍で逆流が生じており、剥離が起こっていることが分かる. 図 12 で定義したショ ートエルボの再付着点は,低流速ケースで x/D=0.1,高流速ケースで x/D=0.27 であった. よって,再付着点は低流速ケースでは(a)から(b)の間に存在し,高流速ケースでは (c) に存在する. この再付着点と壁面近傍の流速に注目すると, 低流速ケース/高流速 ケースともに再付着点の下流で壁面近傍の流速が大きくなっている. ロングエルボでは、 低流速ケース,高流速ケースともにエルボ出口後流で壁面近傍の加速現象が起きている のが分かる.Shiraishi ら^{[8][9]}はLDVによるエルボ内の軸方向速度分布測定を行い、同様 な壁面近傍での加速化現象を捉えている.彼らは,配管の両側面から腹側に流れる二次 流れが再付着点後方に一斉に流入し合流することで,腹側壁面に加速域が生じるものと 推測し、この加速化を「ジェット」という言葉を用いて表現している. Tanaka ら^[15]は ショートエルボ体系において LES による数値解析を行っているが,同様な軸方向速度 の加速化現象を再現している. Tanaka らは、この加速化現象の要因として、比較的軸方 向流速成分の大きい流体塊が配管側面から腹側へ交互に流入することで,軸方向速度が 速くなることを指摘している.

以上のように,剥離域再付着点後方では剥離泡の運動による流体変動や壁面近傍の加速化現象が起こっており,非常に複雑な流体挙動が起こっていることが分かる. Shiraishi^{[8][9]}らは,剥離泡再付着点で大きな圧力変動が起こっているという実験結果を報告しており,再付着点近傍の流体変動に着目することは,圧力変動が加振力となる流力振動のメカニズムを解明する上で有意義であると考える.次のセクションでは,再付着点後方での複雑な流動変動に対して,エルボの曲率のために生じる二次流れがどのように作用しているのかについて議論する.

3.3 二次流れが剥離域近傍の流動構造に与える影響

図 15-1,図 15-2,図 15-3,図 15-4 にショートエルボ/ロングエルボの配管垂直断面における時間平均の速度分布を低流速ケース/高流速ケースについて示す.ショートエルボでは,x/D=0(エルボ出口),0.5,0.75の位置における断面,ロングエルボでは x/D=0

(エルボ出口),0.25,0.5の位置における断面で撮影を行った.ショートエルボでは, エルボ出口の配管中央部付近で腹側から背側に向かって速い流れが存在しているのが 見て取れる.図11-1,図11-3と併せて考えると,腹側から背側に向かう速い流れは剥 離域上部を通過する主流の速い流れであることが分かる.低流速ケース/高流速ケース ともに,再付着点の下流(低流速ケース再付着点:x/D=0.1,高流速ケース再付着点: x/D=0.27)となる x/D=0.5,0.75の位置では,配管両側面部から配管壁面を沿って腹側 に向かう二次流れが発生しているのが分かる.よって,再付着点後流側には,配管両側 面部から配管側面を沿って腹側に向かう流れが流入する構造となっている.一方,ロン グエルボでは,x/D=0位置において配管中央部付近で腹側から背側に向う流れの流速は ショートエルボのエルボ出口で見られたものほどは速くない.しかし,ロングエルボの 場合,両側面部から腹側に向かう二次流れがエルボ出口の x/D=0の断面から観察されて おり,エルボの出口を基準にするとショートエルボよりもより上流側で配管側面部から 腹側に流入していることが分かる.

図 16-1,図 16-2 に、エルボの内側側面に向かって、左右の配管壁から発達する二次 流れについて、ショートエルボ(x/D=0.5)とロングエルボ(x/D=0.25)における瞬時の 配管断面流速分布を示す.図より配管側面部から腹側に流入する流れは、図に示したよ うに時刻とともに左右から交互に生じて腹側へ流入しており、配管中央付近に一つの大 きな渦を形成している.すなわち、時間経過を考慮した流況は、時間平均流速分布で見 られるような腹-背を軸とする軸対称の流況にはなっておらず、両側面部から一斉に腹 側へ流入し二つの二次流れが交わるというような状況とは異なることが分かる.そして、 図 14-1、図 14-2 で見られたような、腹側壁面近傍での軸方向速度の加速化現象は、こ の側面部から腹側へ交互に流入する流れによって加速されることによって引き起こさ れると考えることができる.

図 17-1 から図 17-4 にショートエルボ/ロングエルボにおける配管垂直断面の速度変動 強度分布を示す.右側が図中の座標で示す x 方向の速度変動強度,左側が図中の座標で 示す y 方向の速度変動強度を表す.速度変動強度値は,主流速度 Um で規格化して示す. ショートエルボでは,配管側面部から腹側にかけての領域,腹側近傍,配管中央部で高 い変動強度の部分が見られる.図 13 の速度変動強度分布では,ショートエルボにおけ る順流率から求めた再付着点(低流速ケースで x/D=0.1,高流速ケースで x/D=0.27)は, x/D=0 と x/D=0.5 の間に存在している.y 方向速度変動強度については,再付着点後流 側の x/D=0.5 以上でエルボ腹側に比較的広くかつ強度の高い領域が存在することが分か る.これは,再付着点後流において,剥離泡の運動による流体変動や配管両側面部から 交互に腹側へ流れ込む流体が,大きな流体変動をもたらしているものと考えられる. – 方ロングエルボでは,配管側面部,配管中央部で変動強度の高い領域が見られるが,そ の面積や強度値はショートエルボに比べて小さいことが見てとれる.そして,腹側近傍 の変動強度が高い領域は,ショートエルボと比べるとかなり小さくなることが見てとれ る.

ショートエルボ,ロングエルボそれぞれにおいて,低流速ケースと高流速ケースを比較する(図 17-1 と図 17-3,図 17-2 と図 17-4の比較)と,変動強度の高い領域の分布やその強度値(主流速度 Umで規格化されている)において大きな差は見られない.よって、ショートエルボ/ロングエルボともに低流速ケース(遷移域)と高流速ケース(超臨界域)の間で剥離泡の再付着点位置に若干の差があるものの,流速分布や速度変動強度の高い部分の分布形状に関して大きな差は見られず,遷移域から超臨界域にかけて特別な流動構造の変化は起こっていないと言える.

本研究により,常に剥離域が形成されるショートエルボのケースは,間欠的に剥離域 が形成されるロングエルボのケースよりも,再付着点近傍の速度変動強度値が高いこと, 剥離域の形成や再付着点近傍に流入する周囲二次流れがエルボ腹側の速度場に大きく 影響することを明らかにした.

今後は、エルボ内での流動励起振動のメカニズムを解明する第二段階として、配管振動の加振力となりうる壁面の圧力変動を測定し、以上で述べたようなメカニズムによって生じるエルボ腹側の複雑な流体変動と圧力変動の相互の特性を調査する.

4. 結 論

ナトリウム冷却炉において大口径かつ薄肉の実機配管系の中を高流速のナトリウム が流れるために,流動励起振動の発生が配管系の健全性に影響を与えないことを示すこ とが求められている.そこで,実機の流動条件(Re=4.2x10⁷)における流動励起振動評 価の開発・適用に向け,そのメカニズムを機構論的に予測することを目的とし,1/8 縮 尺モデルにおいて水流動試験を行った.試験は,曲率比の異なる2種類のエルボを用い, 配管内流速分布を PIV によって測定した.以下に,本試験で得られた知見を示す.

- (1) 曲率比 r/D=1.0 のショートエルボでは, 剥離は定常的に起こるが, 曲率比 r/D=1.5 のロングエルボでは, 剥離は間欠的に起こる.
- (2) 再付着点後流は、剥離泡の運動により、速度変動強度が大きくなる.また、エルボ腹側に対して左右の側面部から腹側へ交互に流入する二次流れが観察された.この二次流れが、再付着点後流において壁面近傍の流速を大きくする.
- (3) ショートエルボとロングエルボにおいて、流速分布や高変動強度の分布形状に 関しては、低流速ケース(遷移域)と高流速ケース(超臨界域)とで大きな差 は見られず、遷移域から超臨界域にかけて特別な流動構造の変化は起こってい ないといえる.

本試験により,エルボの腹側に形成される複雑な流動構造に関する知見を得ることが できた.今後は,エルボで発生する流動励起振動のメカニズムを解明へ向けて,配管振 動の加振力となりうる配管壁面での圧力変動を測定し,本試験で得られた流動構造との 関連を調査する予定である.

謝 辞

本研究において, 試験装置の運転, データ取得と整理において常陽産業(株)の試験・ 運転員の方々に多大な協力をいただきました.また, 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 シミュレーショングループの田中正暁研究員からは, 多数のご助言を賜りました.

ここに深く感謝いたします.

文 参 考 献

- M. Ichimiya, T. Mizuno and S. Kotake, "A Next Generation Sodium-Cooled Fast Reactor Concept and Its R&D Program"., *J. Nuclear Engineering and Technology*, 39, pp.171-186 (2007).
- [2] S. Kotake, T. Mihara, S. Kudo, K. Aoto and M. Toda, "Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan (1) : Current Status of JSFR Development", *Proc. of the 2008 International Congress on the advanced in Nuclear Power Plants*, ICAPP'08-8226, Anaheim, USA (2008).
- [3] M. Ueta, K. Takakura, H. Wada, H. Hiyama, M. Hayashi, H. Ozaki and Y. Ooka, "Current Status of Elevated Temperature Structural Design Guide for DFBR in Japan", Proc. of the 3rd JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, ICONE3-S212-1, Kyoto, Japan.
- [4] P. H. M. Bovendeerd, A. A. Steenhoven, F. N. Vosse and G. Vossers, "Steady entry flow in a curved pipe" *J. Fluid Mech.*, (1987), **177**, pp.233-246.
- [5] M. M. Enayet, M. M. Gibson, A. M. K. P. Taylor and M. Yianneskis, "Laser-Doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend", *Int. J. Heat and Fluid Flow.*, **3**, No.4, pp.213-219.
- [6] 須藤,檜原,「曲がり管内流れの発達過程」,機論(B),58,548, pp.1015-1021(1992).
- [7] 河村, 中尾, 高橋, 「エルボ下流の乱れに及ぼすレイノルズ数の影響」, 機論 (B), 68, 667, pp.645-651.
- [8] T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, M. Konomura, A. Yamaguchi and T. Fujii, "Resistance and Fluctuating Pressure of a Large Elbow in High Reynolds Numbers" *J. of Fluids Engineering*, **128**, pp.1063-1073.
- [9] T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, S. Kotake and H. Yamano, "Pressure Fluctuation Characteristics of the Short-Radius Elbow Pipe for FBR in the Postcritical Reynolds Regime", *Proc. of Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows*, ICJWSF-2008, Berline, Germany (2008).
- [10] J. Sakakibara, K. Hishida and M Maeda, "Simultaneous measurements of two dimensional velocity and temperature field using correlation technique and LIF, flow visualization VI", *Proc. of the 6th Int. Symp. on Flow Visualization,* Springer-Verlag, pp.677-681.
- [11] I. E. Idelchik, "Handbook of Hydraulic Resistance", Second Edition, Hemisphere Publishing Co., pp.271-275, (1986).
- [12] J. K. Eaton et al., Proc. 2nd Symp. Turbulent Shear Flows, (1979-7), 16-7.
- [13] Sandborn, V. A., Proc. 2nd Symp. Turbulent Shear Flows, (1979-7), 4-1.
- [14] 藤井, 近澤, 此村, 山口, 「大口径・高流速配管の流動励起振動試験」, サ イクル機構技報, No.26, pp.63-76 (2005).
- [15] M. Tanaka, H. Ohshima and M. Monji, "Numerical Investigation of Flow Structure in Pipe Elbow with Large Eddy Simulation Approach", *Proc. of 2009* ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77598, Czech Republic (2009).

	Case name	Mean flow velocity, U _m [m/s]	Temperature [°C]	Re number [-]
Short albow	Low velocity case	1.0	28	1.8x10 ⁵
Short-endow	High velocity case	3.0	28	5.4x10 ⁵
	Low velocity case	1.0	28	1.8x10 ⁵
Long-elbow	High velocity case	3.0	28	5.4x10 ⁵

Table.1 Experimental conditions.



Fig.1 Schematic view of primary cooling system of the JSFR^{[1][2]}.



Fig.2 Schematic of the experimental test loop.



Fig.3 Comparison of positions between mesh in pipe and captured image.



Fig.4 Deformation rate at cross-section of the pipe.



Fig.5 Schematic diagram of PIV method.



*The arrangement to obtain separation flow near the inside wall of the elbow.

*The arrangement to capture the secondary flow on the cross-section of the pipe.



Fig.6 The position of measurements.



Fig.7-1 Stream line near the inside wall (Short-elbow/Low velocity case).



Fig.7-2 Stream line near the inside wall (Long-elbow/Low velocity case).



Fig.7-3 Stream line near the inside wall (Short-elbow/High velocity case).



Fig.7-4 Stream line near the inside wall (Long-elbow/High velocity case).



*The center line corresponds to 'elbow outlet'. The white circle corresponds to the eddy. Fig.8 Behavior of separation bubble (Short-elbow/High velocity case).



Fig. 9 Fluctuation of the separation bubble surface at A-line in Fig.7. (Short-elbow/ High velocity and Low velocity case)



Fig.10 Power spectrum densities of the fluctuation of the separation bubble surface.





Fig.11-1 Time-averaged velocity fields near the inside wall (Short-elbow/Low velocity case).



Fig.11-2 Time-averaged velocity fields near the inside wall (Long-elbow/Low velocity case).



Fig.11-3 Time-averaged velocity fields near the inside wall (Short-elbow/High velocity case).



Fig.11-4 Time-averaged velocity fields near the inside wall (Long-elbow/High velocity case).



Fig.12 Distribution of forward flow fraction at height of y/D=0.01 in the Short-elbow.







u_{xRMS} / U_m 0 0.5

Fig.13-1 Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Short-elbow/Low velocity case).



Fig.13-2 Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Long-elbow/Low velocity case).



Fig.13-3 Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Short-elbow/High velocity case).



Fig.13-4 Contour of the velocity fluctuation intensity in x-direction (Long-elbow/High velocity case).









Fig.14-1 Transverse distribution of velocity component in the streamwise direction in the short-elbow.



Fig.14-2 Transverse distribution of velocity component in the streamwise direction in the long-elbow.





0



Fig.16-1 Time-series velocity field in the cross-section of the pipe (Short-elbow/High velocity case).



Fig.16-2 Time-series velocity field in the cross-section of the pipe (Long-elbow/High velocity case).

JAEA-Research 2009-051



Fig.17-1 Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Short-elbow/Low velocity case).



Fig.17-3 Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Short-elbow/High velocity case).



Fig.17-2 Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Long-elbow/Low velocity case).



Fig.17-4 Contour of the velocity fluctuation intensities in y-direction and z-direction (Long-elbow/High velocity case).

表1.	SI 基本单位	<u>z</u>
甘土县	SI 基本ì	单位
基半里	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

和午春	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	m ²
体	積立法メートル	m ³
速さ,速	度 メートル毎秒	m/s
加速	度 メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数毎メートル	m^{-1}
密度,質量密	度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密	度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体	積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強	さ アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度モル毎立方メートル	mol/m
質量濃	度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率	^(b) (数字の) 1	1
比诱磁率	^(b) (数字の) 1	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

	固有の名称と記す	デじ衣さ	れるSI組立単位	
			SI 組立単位	
組立量	to the	和日	他のSI単位による	SI基本単位による
	泊你	記万	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^{2}$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gy	.I/kg	$m^2 e^{-2}$
カーマ	/ • 1	ay	5/Kg	ш 5
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 ^(g)	\mathbf{Sv}	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ 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、ペクレルは放射性核種の統計的道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、温度差や温度問隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)単位少ペールトし、(P)の270 205) とついてけCUPの軸定?
 (f)単位少ペールト
 (b)単位少ペールト
 (b)単位少ペールトし(P)の270 205) とついてけCUPの軸定?
 (c)単位少ペールト
 (c)単位少ペルト
 (c)単位少ペールト
 (c)単位少ペルト
 (c)単位270 2012 (c)の270 205) とついてけCUPの軸定?
 (c)単位少ペルト
 (c)の270 205) とついてけCUPの軸定?
 (c)単位少ペルト (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

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{\cdot 2} K^{\cdot 1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$	
熱 伝 導 率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	育クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ^{$\cdot 2$} A ^{$\cdot 2$}	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
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)	$m^2 kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デ カ	da	10^{24}	ヨクト	у		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位

衣り、SIに、	衣も、SIに属さないか、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	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^{3}$ 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

	アス決切に行りれいよりや				
名称				記号	SI 単位で表される数値
電	子ズ	ドル	Υ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統	一原子	質量単	自位	u	1u=1 Da
天	文	単	位.	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	- トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロ	ーム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	Μ	1 M=1852m			
バ	-	ン	b	$1 \text{ b=100 fm}^2 = (10^{-12} \text{ cm}) 2 = 10^{-28} \text{m}^2$			
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np `	の形体しの粘体的な眼体は			
ベ		ル	В	し 31 単位 C の 数 値 的 な 関 係 は 、 対 数 量 の 定 義 に 依 存。			
デ	ジベ	N	dB -	// 众重 // 足我 作 因 1 。			

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 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークス	\mathbf{St}	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルブ	$^{\rm sb}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²					
フォト	$_{\rm ph}$	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx					
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$					

(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						
	1	名称			記号	SI 単位で表される数値
+	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	ŀ	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				F	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	T.		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	(系)	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ			IJ	5	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
			ĺ		Sui	(「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

(第8版, 2006年改訂)

この印刷物は再生紙を使用しています