JAEA-Research 2013-011



高速炉冷却系配管における流れの 剥離現象に関する基礎研究

 一高レイノルズ数領域におけるマルチエルボ内複雑流動構造の解明

 (先行基礎工学研究に関する平成 20 年度及び平成 21 年度共同研究報告書)

Basic Study on Flow Separation Phenomenon in Cooling System Piping in Fast Reactors -Clarification of Complex Flow Structure in a Multi-Elbow in a High Reynolds Number Regime-(Joint Research Report in JFY2008 and JFY2009)

江原 真司 結城 和久 橋爪 秀利 相澤 康介 山野 秀将

Shinji EBARA, Kazuhisa YUKI, Hidetoshi HASHIZUME Kosuke AIZAWA and Hidemasa YAMANO

> 次世代原子カシステム研究開発部門 炉システム開発計画室

JSFR Systems Development Planning Office Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

October 2013

y | 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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(<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 +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

高速炉冷却系配管における流れの剥離現象に関する基礎研究 ー高レイノルズ数領域におけるマルチエルボ内複雑流動構造の解明-(先行基礎工学研究に関する平成 20 年度及び平成 21 年度共同研究報告書)

> 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 炉システム開発計画室 江原真司^{*1},結城和久^{*2},橋爪秀利^{*1},相澤康介,山野秀将

> > (2013年5月6日受理)

東北大学では、コールドレグ配管で発生する非定常流動メカニズム及び圧力変動特性を可 視化試験及び圧力測定試験により明らかにし、更にスケール効果を調べるため、異なる縮尺 モデルにおいて流動試験を実施した。可視化試験においては実機の1/15 及び1/7 縮尺モデル が、圧力測定試験においては1/15 及び1/7 縮尺モデルが用いられた。平成20 年度では、ま ず1/15 縮尺流動試験装置において Re 数が50,000 と100,000 に対する2 段エルボ内の可視化 試験を実施した。また、1/7 縮尺流動試験装置に1 段ショートエルボを設置して装置の健全 性(固有振動数、入口条件、全圧力損失係数)を確認し、Re=320,000 に対する可視化試験に 着手した。平成21 年度では、1/7 縮尺流動試験装置を用いて1 段エルボ及び2 段立体接続エ ルボに関する可視化試験を実施し、Re 数を最大1,000,000 まで変化させたときの詳細な流れ 場を観測した。その際、エルボ入口の流入条件を詳細に検討し、完全ではないがほぼ発達し た乱流速度分布を得た。これら試験データから、エルボ内流れの複数エルボ効果を検討した。 加えて、1/15 及び1/7 縮尺試験装置を用いて1 段エルボに関する圧力変動計測試験を実施し、 1/15 縮尺試験では Re 数を最大400,000 まで、1/7 縮尺試験では Re 数を最大1,000,000 まで変 化させたときの圧力変動特性を計測した。これらの配管スケールの異なる試験データより、 圧力変動特性へのスケール効果を検討した。

原子力機構では、実機設計の成立性評価に向けて解析評価手法の開発を進めている。その ため、東北大学で得られた試験データを用いて、流動解析コードの検証を実施した。商用熱 流動解析コード STAR-CD を用いて 1/7 縮尺 2 段エルボ流動試験解析を実施し、可視化試験結 果と流速分布の傾向は概ね一致していることを示した。本研究より、単エルボ配管体系を対 象に検証してきた URANS 解析手法が 2 段エルボ体系に適用可能なことを確認した。

本研究は日本原子力研究開発機構と東北大学との共同研究に基づいて実施したものである。 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

- *1 東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻
- *2 東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻(現在、山口東京理科大学)

i

Basic Study on Flow Separation Phenomenon in Cooling System Piping in Fast Reactors Clarification of Complex Flow Structure in a Multi-Elbow in a High Reynolds Number Regime - (Joint Research Report in JFY2008 and JFY2009)

Shinji EBARA^{*1}, Kazuhisa YUKI^{*2}, Hidetoshi HASHIZUME^{*1}, Kosuke AIZAWA and Hidemasa YAMANO JSFR Systems Development Planning Office, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 16, 2013)

In Tohoku University, different scale model experiments were carried out in order to clarify unsteady flow fields and pressure fluctuation characteristics in the cold leg piping by means of visualization experiment and pressure measurement, respectively, and to investigate the scale effect. The visualization experiments were done by using 1/15 and 1/7 scale models while 1/15 and 1/7 scale models were used for the pressure measurement. In JFY2008, the visualization experiment by PIV measurement for the 1/15 scale piping was carried out using a double elbow geometry, in which Reynolds number was set at 50,000 and 100,000. Besides, shakedown tests of the 1/7 scale model were conducted for the case of a single elbow. To check the soundness of the experimental loop, such as natural frequency, the inlet flow condition and total pressure loss coefficient, the visualization experiment for the Reynolds number of 320,000 has been initiated. In JFY2009, visualization experiments for the 1/7 scale models with the single and a three-dimensionally connected double elbow geometries were carried out by varying Reynolds number up to 1,000,000, and detailed flow fields were observed under the inlet flow condition of almost fully developed turbulence. From these obtained data, effects of the multiple elbows on the flow field were assessed. In addition, the pressure measurements for single elbow flows by using 1/15 and 1/7 scale models were performed by varying Reynolds number up to 400,000 for the 1/15 scale and 1,000,000 for the 1/7scale, respectively. Pressure fluctuation characteristics were examined in terms of power spectrum density of the pressure fluctuation, which have been provided to investigate the scale effect on the characteristics.

In JAEA, a numerical analysis method is being developed to evaluate the feasibility of the reactor piping design. For this development, in this study, the validation of the flow analysis method has been carried out using the experimental data obtained in Tohoku University. Numerical analyses for the 1/7 scale double elbow experiments were performed using the commercial thermal-hydraulics code STAR-CD. The analyses showed that the calculated velocity distributions were in good agreement with the visualization experimental results. It was confirmed, from these analyses, that the URANS analysis method validated for the single elbow flow has applicability to the flow in a double elbow.

Keywords: Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR), Elbow, Unsteady Flow

This work has been performed in JAEA as a joint research with Tohoku University.

*2 Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University (Presently, Tokyo University of Science, Yamaguchi)

^{*1} Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

目	次
	~ `

1 2	序 PIV	☆······1 17にトス可視化試験······3
2.1	コ-	ールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置によるダブルエルボ体系試験
2. 2.	.1.1 .1.2	試験装置及び条件
2.2	コ-	-ルドレグ 1/7 縮尺流動試験装置によるシングル及びダブルエルボ体系試験6
2.: 2.:	.2.1 .2.2	試験装置及び条件
2.3	まる	とめ
3	コ- 試験	ールドレグ 1/15 及び 1/7 縮尺流動試験装置によるシングルエルボ体系の圧力変動測定 検
3.1	試調	検装置及び条件
3.2	試調	検結果
3.: 3.: 3.:	.2.1 .2.2 .2.3	シングルエルボ全圧力損失係数の算出
3.3	まる	とめ
4	ダフ	ブルエルボ体系コールドレグ 1/7 縮尺流動試験の数値解析
4.1	解林	所体系及び条件
4.2	解林	斤結果
4. 4.	.2.1 .2.2	流速分布
4.3	まる	とめ
5 謝辞	結 …	侖 · · · · · · 18 · · · · · · · · 19
参考文	て献 …	

Contents

1	Introduction	1
2	PIV measurement for flow visualization	3
2.1	1/15 scale flow experiments for cold-leg piping by using double elbow geometry	3
2.1.1	Experimental apparatus and conditions	3
2.1.2	Experimental results	4
2.2	1/7 scale flow experiments for cold-leg piping by using single and double elbow geometries	
		6
2.2.1	Experimental apparatus and conditions	6
2.2.2	Experimental results	6
2.3	Summary	10
3	Pressure measurement experiment for cold-leg piping by using 1/15 and 1/7-sca	ale
2.1	model of single elbow geometry	11
3.1	Experimental apparatus and conditions	11
3.2	Experimental results	11
3.2.1	Total pressure loss coefficient for a single elbow	11
3.2.2	Pressure fluctuation characteristics	12
3.2.3	Scale effect of pressure fluctuation characteristics	13
3.3	Summary	14
4	Numerical analyses of 1/7 scale flow experiments by using double elbow geometry	15
4.1	Analysis geometry and conditions	15
4.2	Analysis results	15
4.2.1	Velocity distribution	15
4.2.2	Pressure fluctuation	16
4.3	Summary	17
5	Conclusions	18
Acknowl	edgements	19
Reference	es	20

図表リスト

表 3-1	1/7 縮尺試験装置での圧力変動 PSD 分布における卓越周波数及び St 数	22
表 3-2	1/15 縮尺試験装置での圧力変動 PSD 分布における卓越周波数及び St 数	22
表 4-1	解析条件	22
図 2-1	1/15 縮尺流動試験装置概略	23
図 2-2	1/15 縮尺ダブルエルボ可視化試験部	23
図 2-3	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第一エルボ及びその下流ス	
	トレート部での時間平均流れ場	24
図 2-4	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第一エルボ及びその下流ス	
	トレート部での流れの瞬時場	25
図 2-5	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第一エルボ出口下流ストレ	
	ート部での二次流れの時間平均場	25
図 2-6	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第一エルボ出口 0.09D 下流	
	の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場	26
図 2-7	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第一エルボ出口 0.29D 下流	
	の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場	26
図 2-8	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における直管における管軸方向速度	
	成分の周波数特性	27
図 2-9	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ におけるエルボ間直管及び第2エル	
	ボでの時間平均流れ場	28
図 2-10	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第 2 エルボ上流 0.16D で	
	の流れ垂直断面での時間平均流れ場	28
図 2-11	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ におけるエルボ間直管及び第 2 エ	
	ルボでの流れ場の瞬時場	29
図 2-12	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10 ⁴ における第 2 エルボの流れ方向断	
	面での流れ場の瞬時場	29
図 2-13	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10 ⁵ における第一エルボ及びその下流	
	ストレート部での時間平均流れ場	30
図 2-14	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10 ⁵ における第一エルボ及びその下流	
	ストレート部での流れの瞬時場	30
図 2-15	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10 ⁵ における第一エルボ出口 0.18D 下	
	流の流れ垂直断面での二次流れの時間平均	31
図 2-16	1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10 ⁵ における第一エルボ出口 0.18D 下	
	流の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場	31
図 2-17	1/7 縮尺流動試験装置概略	32
図 2-18	1/7 縮尺シングルエルボ可視化試験部	32
図 2-19	1/7 縮尺ダブルエルボ可視化試験部	33

図 2-20	1/7 縮尺試験シングルエルボ体系 Re=1.0×10 ⁶ でのエルボ上流助走区間における速度
	分布
図 2-21	1/7 縮尺試験シングルエルボ体系 Re=1.0×10 ⁶ でのエルボ上流助走区間における速度
	変動 rms 分布 34
図 2-22	1/7 縮尺試験シングルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における
	時間平均速度ベクトル分布
図 2-23	1/7 縮尺試験シングルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における
	平面内乱流エネルギー分布
図 2-24	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系における可視化断面 37
図 2-25	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 Re=1.0×10 ⁶ でのエルボ上流助走区間における流動状
	態
図 2-26	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における時
	間平均速度ベクトル分布 39
図 2-27	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系における 1 段目エルボ下流とシングルエルボ体系の
	エルボ下流のそれぞれの位置での速度分布の比較
図 2-28	1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10 ⁶ でのエルボ間(1 段目の 0.3D 下流)の流れ垂
	直断面における時間平均速度ベクトル分布41
図 2-29	1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10 ⁶ でのエルボ間(1 段目の 0.3D 下流)の流れ垂
	直断面における時間平均速度ベクトル分布の拡大図41
図 2-30	1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10 ⁶ でのダブルエルボ体系 2 段目エルボ内及びそ
	の上下流の流れ方向断面における時間平均速度ベクトル分布分布
図 2-31	1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10 ⁶ でのダブルエルボ体系 2 段目 0.2D 下流にお
	ける流れ垂直断面の時間平均速度ベクトル分布
図 2-32	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 2 段目エルボ上流における速度分布(1 段目エルボ
	の 0.04D 下流(2 段目エルボの 0.53D 上流)及び 1 段目エルボの 0.52D 下流(2 段
	目エルボの 0.05D 上流))の位置での比較) 43
図 2-33	1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 2 段目エルボ下流における速度分布(2 段目エルボ
	出口及び2段目エルボの0.62D下流)の位置での比較) 43
図 3-1	1/15 縮尺ダブルエルボ圧力変動測定試験部 44
図 3-2	圧力変換機の設置方法
図 3-3	圧力変換器設置位置(流れ方向垂直断面における設置位置) 45
図 3-4	圧力変換器設置位置(流れ方向垂直断面位置及び設置位置)
図 3-5	1/7 縮尺ダブルエルボ圧力変動測定試験部
図 3-6	シングルエルボ全圧力損失係数のレイノルズ数による変化
図 3-7	1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10 ⁵ における測定圧力の時系列データ
図 3-8	1/7 縮尺試験装置での Re=1.0×10 ⁶ における測定圧力の時系列データ
図 3-9	1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10 ⁵ における圧力変動 PSD 分布
図 3-10	1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10 ⁵ におけるそれぞれの測定点での圧力変動 50
図 3-11	1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=3.2×10 ⁵ における圧力
	変動 PSD 分布 51

図 3-12	1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=6.0×10 ⁵ における圧力
	変動 PSD 分布
図 3-13	1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=1.0×10 ⁶ における圧力
	変動 PSD 分布
図 3-14	1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=2.0×10 ⁵ における圧
	力変動 PSD 分布
図 3-15	1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=3.2×10 ⁵ における圧
	力変動 PSD 分布
図 3-16	1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=4.0×10 ⁵ における圧
	力変動 PSD 分布
図 3-17	1/15 縮尺試験装置での Re=3.2×10 ⁵ における圧力変動 PSD 分布の細パイプ長さによ
	る違い
図 3-18	エルボ下流 0D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較
図 3-19	エルボ下流 0.4D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較
図 3-20	エルボ下流 0.75D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較
図 4-1	解析モデル
図 4-2	解析入口(第1エルボ入口 5D 上流)における流速分布
図 4-3	第1エルボの中心断面内速度ベクトル(瞬時値)
図 4-4	第2エルボの中心断面内速度ベクトル(瞬時値)
図 4-5	第1エルボ下流の流れ方向流速分布(10 秒間平均)
図 4-6	第2エルボ下流の流れ方向流速分布(10 秒間平均)
図 4-7	第1エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)
図 4-8	第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)
図 4-9	第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れ(瞬時値)
図 4-10	第 2 エルボ 0.2D 下流の断面内の流れ方向流速コンター(瞬時値)
図 4-11	第 2 エルボ 6.4D 下流の断面内の流れ方向流速コンター(瞬時値)
図 4-12	第1エルボ内の圧力変動
図 4-13	第1エルボ 0.2D 下流の圧力変動
図 4-14	第2エルボ 0.2D 下流の圧力変動
図 4-15	第1エルボ 0.2D 下流の圧力変動 PSD
図 4-16	第2エルボ 0.2D 下流の圧力変動 PSD

This is a blank page.

1 序論

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、安全性・信頼性・経済性を向上させたル ープ型ナトリウム冷却大型炉(電気出力 150 万 kWe)の研究開発を実施してきた。¹⁾ この設計 概念は、従来設計に比べ薄肉構造の1次系配管が大口径化し、かつ管内平均流速も 9m/s 台に増 大する。このような冷却系を設計する上で、エルボ周辺での流体の乱れに起因する流力振動に対 する配管の健全性について確認することとし、大口径配管内流動特性の把握及び配管の流力振動 に関する評価手法の開発のための研究を実施してきた。²⁾

1次主冷却系は2ループ体系で1ループにつきL字型エルボを1つ有するホットレグ配管(直径 1.27m) 1本と、エルボを3つ有するコールドレグ配管(直径 0.86m) 2本で構成される。これらのエルボは配管設計の結果としてショートエルボとし、レイノルズ数は、ホットレグ配管では4.2×10⁷、コールドレグ配管では2.5×10⁷に達する。²⁾これまで、レイノルズ数の大きなホットレグ配管について、配管の流力振動評価上もっとも重要と考えられるエルボ部における剥離の影響に着目して、1/3 縮尺水試験装置を用いて入口整流条件下での流動試験を実施した。³¹⁴⁵⁹配管にかかる流体力は動圧支配であり、実機とほぼ同等の流体力条件とするため、1/3 縮尺水試験では実機条件での流速でも試験を行った。⁷⁾1/3 縮尺水流動試験では、スケール並びに流体の粘性の違いにより、実機ホットレグ配管のレイノルズ数の 1/5(Re=8×10⁶)までしか達していないが、これまでの試験で水温を変えることにより粘性の影響を調べており、その影響は小さいことを明らかにしている。⁶⁾配管スケール効果については、1/3 縮尺水試験より大きな試験を行うことは困難であるため、1/10 縮尺水試験装置を用いて、スケール依存性は有意でないことを確認した。⁸⁹⁹

実機評価のためには Re 数条件に関する外挿が必要となるが、圧力変動発生のメカニズムを明 らかにすることが外挿の妥当性を示す上で重要である。そこで、商用解析コードである STAR-CD を用いて非定常解析を行って、流動メカニズムの把握を行うこととし、これまでに 1/3 縮尺水試 験の試験解析を実施し、単エルボ体系(ホットレグ体系)に適する解析手法を構築してきた。¹⁰⁾¹¹⁾

コールドレグ配管については、エルボが複数連結され上流側エルボで形成される渦が下流側エ ルボへ流れ込むため、流動構造は複雑となり、複数エルボの影響を調べることが重要である。3 段エルボ体系で実機条件に近い 1/4 縮尺水試験を行う計画としているが、複数エルボの影響を 個々に分離するなど詳細に調べることは困難である。そこで、本共同研究では、1/7 縮尺水試験 装置(内径 126.6mm)を製作し、1段、2段、3段エルボ体系と拡張していき、複数エルボの影響 を調べることとした。また、既存の 1/15 縮尺水試験装置(内径 56.0mm)を使用して、1段、2段 エルボ体系で試験を行い、1/7 縮尺水試験と比較することで、スケール効果も調べることとした。 さらに、高レイノルズ数条件下におけるエルボ部での複雑流動現象の把握を目的として、試験で は、流動場計測に優れている PIV 計測技術を使用することとした。また、配管内の圧力計測を行 い、圧力変動特性を評価することとした。これらの試験で得たデータは解析コード検証にも資す ることとした。3年間の先行基礎工学研究に関する共同研究では、東北大学が1段及び2段エル ボ体系における流動試験及び圧力計測試験を担当し、原子力機構はそれらのデータを用いて解析 コードの検証を担当することとした。

研究初年度(平成19年度)では、東北大学において、2段エルボ体系の1/15縮尺水試験装置

を用いた PIV 可視化試験を実施し、第1エルボ内では低速域(剥離領域と渦放出領域)が形成されるのに対し、第2エルボでは剥離領域が形成されず大きな旋回流が存在していることを確認した。また、1/7 縮尺水試験装置の設計・製作を実施した。さらに、原子力機構において、1/15 縮尺試験解析を実施し、定性的な流動を捉えることができることを確認した。¹²⁾

本報告書では、研究2、3年度(平成20年度及び21年度)に実施した研究成果について述べる。 第2章では、東北大学で実施した既存の1/15 縮尺試験装置及び新設の1/7 縮尺試験装置で得られ た流動試験結果(それぞれ低 Re 数域、高 Re 数域に対応する)を記述する。第3章では、東北大 学で実施した1/15 縮尺及び1/7 縮尺流動試験装置を用いた圧力測定試験で得られた結果について 報告する。第4章では、原子力機構で実施した1/7 縮尺水流動試験解析について記述する。最後 に、第5章で本研究成果をまとめる。

2 PIV による可視化試験

2.1 コールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置によるダブルエルボ体系試験

2.1.1 試験装置及び条件

コールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置の概略を図 2-1 に示す。装置は循環ポンプ、整流部、助走 部、試験部、トレーサー除去部、混合タンクから構成される。循環ポンプには流量範囲が10-200 L/minのイワキ社製のマグネットポンプ、MDH-425を用い、インバータによる周波数調整及びバ イパスラインのバルブ開閉によりその流量を調整する。整流部は上流からデフューザ、多孔板、 ハニカム、レデューサで構成されポンプ下流の偏流・旋回流など非均一性の強い流れを整流し、 助走部へ送り出す。助走部は内径 D=56mm の塩化ビニル製円管及びジャケット付きアクリル製 配管で構成され、その長さは約2800 mm である。これは管内径の約50倍であり、したがって、 十分発達した乱流がその下流に接続される試験部に流れ込むことになる。試験部はアクリルブロ ックをくり抜いて製作された内径 56 mm の流路で、曲率半径比が 1.0 の 90° エルボ 2 つとその間 に設置される長さが 0.57D のストレート部から構成される。この試験部は、3 つのエルボから構 成されるコールドレグの熱交換器側のエルボを模擬するものとなっており、その2つのエルボは 同じ曲率半径を含む平面が互いに直交するように接続されている。図 2-2 に試験部の写真を示す。 トレーサー除去部は試験終了後など、ループ内の流体を回収する際に用い、主に円筒型のポリプ ロピレン製カートリッジフィルターから構成される。フィルターは1 µm の粒子まで除去可能で、 耐圧強度は25 ℃において0.49 MPa、最大流量は10 L/min である。混合タンクはアクリル製で、 循環ポンプの発熱による作動流体の温度上昇を制御するために銅細パイプ製熱交換器を内蔵して いる。また自由液面からの気泡巻き込みを防ぐため多孔板を上部に設けている。配管内を流れる 流体の流速は、富士電機システムズ社製のポータブル型超音波流量計ポータフローXを助走部に 取り付け、平均流速を計測する。

本研究で流れの可視化に用いた PIV システムは、パルスシートレーザーと高速度 CCD カメラ、 タイミングコントローラー、そして解析用 PC から構成される。レーザーは波長 808 nm(赤外光)、 最大出力 200 W の Oxford Laser 社製 HSI Diode レーザーで、パルス間隔は最大 5 kHz である。カ メラは Photron 社製 Fastcam-MAX を用い、解像度は最大で 1024×1024 ピクセル、一度の撮影で 最大 2048 枚の画像取得が可能であり、フレームレートはフルフレームで 2000 fps である。解析ソ フトとしては Oxford Laser 社製 VidPIV を用いる。

通常、PIV システムによる流れの可視化では、流路材料と流体との間の光の屈折率の違いに起因する画像の歪みが生じ、特に壁近傍で正確な計測を行うことが難しくなる。本試験では流路材料としてアクリル、流体として屈折率をアクリルと合わせたヨウ化ナトリウム (Nal) 水溶液を用いることで、画像の歪みのない粒子像を得ることが可能となっている。流れのトレーサー粒子としては平均直径 20 µm、比重 1.03 のナイロン粒子を用いる。

試験条件は、パルスレーザーをパルス間隔200 μs程度のダブルパルスとし、その発振周波数を 30 Hz、撮影時間約34秒で1024組のペア画像を撮影しこれから1024個のベクトルデータを解析 により得る。管直径と平均流速に基づくレイノルズ数を5.0×10⁴及び1.0×10⁵とし、ダブルエルボ への流入条件としては完全に発達した管内乱流を用いて試験を行った。

2.1.2 試験結果

(1) Re= 5.0×10^4

図 2-3 に Re=5.0×10⁴の可視化試験で得られた第一エルボとその下流の直管領域での平均流動場 を示す。Idelckik によれば、Re=5.0×10⁴以下を亜臨界域、5.0×10⁴~3.0×10⁵を遷移域、3.0×10⁵ 以上を超臨界域と定義される。¹³⁾可視化断面は配管の中心軸を含む面となっている。図ではエ ルボ腹側の剥離領域(主流に対して逆流している領域)は曲がり角 55°で開始している。剥離領 域の発生点が先行研究^{7/8)}と比べ上流側になっているのは、エルボへの流入条件の違いであり、 境界層が発達した乱流速度分布がエルボへ流入するためであると考えられる。また、剥離形成に 伴う低速領域は、主として「剥離域」と二次流れによる高速流体の輸送によって形成される「速 度回復域」の2つの領域に大きく分けられる。速度回復が始まる位置はエルボ出口後の0.23D下 流(D:管直径)である。流れ場の非定常特性に着目すると、図2-4 に示す瞬時流動場から分かる ように、剥離域では小さな渦が生成され剥離領域と高速領域の境界付近での速度の搖動が大きい。 また、速度回復域では、高速領域のはためくような動きがさらに大きくなり非定常性が非常に強 い複雑な流れになっていることが分かる。これには、二次流れによって高速流がエルボ腹側に回 り込んでくる流れも影響していると考えられる。

そこで、この特徴的な二つの低速領域の三次元構造を明らかにするため、それぞれの領域にお いて二次流れを可視化した。図 2-5(a)、(b)はそれぞれ剥離域(エルボ出口から 0.09D 下流位置で の流れ垂直断面)及び速度回復域(エルボ出口から 0.29D 下流位置での流れ垂直断面)で形成さ れる二次流れの時間平均場を表している。図の上がエルボ腹側で下が背側となっている。まず、 剥離域に着目すると、管中央部に腹側から背側に向かう高速域が、また管壁付近の背側から腹側 に向かう高速域が形成されていることが確認できる。さらに、遠心力によって形成される Dean 渦に加え、エルボ腹側近傍の剥離領域にも双子渦のような一対の縦渦と低速スポットを観測する ことができる。この領域では図 2-4 で示される流れ方向平行断面でも渦(横渦)が観察されてお り、二次流れによる運動量輸送によって縦渦も次第に発達していると言え、すなわち剥離域では 横渦と縦渦が共存した流動構造を有すると言える。図 2-6 はこの断面における流れの瞬時場であ り、管側壁側から内壁側に形成されている高速流れ(以降、高速巻き込み)が間欠的かつ交互に エルボ腹側に流入していることが分かる。また高速巻き込みが剥離領域の直前で管中央部に流入 するものと剥離領域に流入するものへの分岐が観察されており、これは剥離領域を避けるように 高速巻き込みが腹側に流れ込んでいることを示していると言える。剥離領域はこの高速巻き込み の流入により搖動しているものと考えられる。

一方、速度回復域における断面の二次流れの様子(エルボ下流 0.29D、図 2-5(b)参照)から、前述の縦渦領域が大きくなり、低速スポットとともに管中央側に移動していることが確認できる。 これは二次流れ中の高速巻き込みが管壁に沿ってエルボ腹側に流れ込み、剥離領域を管壁から引き離すためであると解釈できる。図 2-7 にこの位置における流れの瞬時場を示す。図から、管側 壁に形成される高速巻きこみのほとんどが管壁に沿って腹側(図の上側)にまで流入し、衝突していることが見てとれる。

次に、速度変動の周波数特性を調べるために、剥離域と速度回復域のそれぞれの領域における 管軸方向(直管における管軸方向)速度成分の周波数解析を実施した。それぞれの領域における パワースペクトル密度分布を図 2-8 に示す。図 2-8(a)はエルボ下流 0.5D で壁からの距離 0.10D(速 度回復域)、図 2-8(b)はエルボ下流 0.2D で壁からの距離 0.13D(エルボ下流の剥離域)、そして 図 2-8(c)はエルボ入口から下流 65°で壁からの距離 0.16D(エルボ内の剥離域)の位置における 結果である。これにより、速度回復域における高速巻き込みに伴う速度変動が 10 Hzの卓越周波 数を有することが分かる。この周波数はストローハル数に換算すると 0.47 であり、先行研究²⁾ で確認されているストローハル数とほぼ一致する。更に、剥離領域内部においても既に 10 Hz 付 近にピークが確認されるため、エルボ腹側における周期的運動は、縦渦、横渦と異なる向きの渦 の存在とは関係なく、ある一つの周期的運動に支配されていると考えられる。その周期的運動の 候補としては、二次流れ、剥離泡の搖動が考えられるが、どちらが根源的な"原因"なのかは、 今回の試験からは特定することは難しい。

次に、第2エルボ内の流動に着目する。図2-9は第1エルボの管軸を含む断面(図2-3、2-4の 可視化断面)で第2エルボを切り取り、その面を第2エルボ背側から撮影した結果の時間平均流 れ場である。これにより第1エルボで形成された偏流(第一エルボ背側が高速、腹側が低速)が 第2エルボにそのまま流入していることが確認できる。すなわち第2エルボで発生する旋回流は、 この偏流と第2エルボの形状効果によって形成されたものである。図2-10に示す第2エルボ直前 の二次流れの様子からも、対称な二次流れ構造が崩壊し、第2エルボ内壁側へ偏向する様子が確 認できる。一方、図2-11に示す時間変化の様子から、速度回復域における高速域と低速域の間 の速度剪断層の大きな搖動も、第2エルボの存在により減衰するということは特になく、そのま ま第2エルボを流れていく様子が確認できる。第2エルボでは流れの様相は第1エルボと大きく 異なり、エルボ腹側では剥離域は生じない。図2-12に第2エルボ内の流れ場の瞬時場を示すが、 高速領域は主に腹側壁面近傍の狭い領域と背側に生じ、腹側はほぼ定常的に高速流体が存在し、 背側は間欠的である。これは、この上流の第1エルボ下流速度回復域における速度の搖動が影響 しているものと考えられる。

(2) Re= 1.0×10^5

Re=1.0×10⁵ に対してデータを取得し、流動構造に対する Re 数の影響を評価した。エルボ入口 条件は、Re=5.0×10⁴と同様発達乱流である。図 2-13 に Re=1.0×10⁵ における第一エルボ及びその下 流ストレート部での時間平均流れ場を示す。剥離域はエルボ内側の曲がり角 55°付近からエル ボ下流 0.13D までとなっており、その管壁からの高さは約 0.06D までとなっている。Re=5.0×10⁴ の場合と比較すると、Re=1.0×10⁵の方が剥離域の大きさが縮小していることが分かる。これはレ イノルズ数の増加による乱流拡散の増加により剥離域の成長が抑制されたためと考えられる。同 様の傾向は Iwamoto らの研究⁸⁾ でも確認されている。一方、Shiraishi らの研究⁶⁾ では、超臨界域 (乱流剥離状態)において剥離域の位置や大きさは変化しないという知見が得られており、この 結果の違いは今回の試験条件が亜臨界域¹³⁾に位置しているためであると考えられる。今後さら に高い Re 数での可視化試験が必要であるが、亜臨界域と超臨界域では流動特性が大きく変化す る可能性があると考えられる。一方、剥離域下流の速度剪断層に着目すると、Re=1.0×10⁵の場 合では速度勾配がなだらかになっていることが分かる。増大した乱流拡散によって速度差の平坦 化が促進されたためであると考えられる。Re=1.0×10⁵における第一エルボ及びその下流の管軸を 含む断面での流れの瞬時場は図 2-14 に示す通りで、剥離域上流側の比較的少ない変動の様子や 下流側の大きな変動、横渦の存在や速度剪断層の大きな搖動など、Re=5.0×10⁴のものと大きな変 化はない。

Re=1.0×10⁵における流れ垂直断面の流れ場について、第一エルボ下流 0.18D の断面における時 間平均及び瞬時場を図 2-15、2-16 にそれぞれ示す。時間平均場における Dean 渦、エルボ腹側の 管壁近傍における高速巻き込みなどの特徴は、Re=5.0×10⁴ におけるものと変わらないが、管中央 部における高速域とエルボ腹側管壁の間に一対の縦渦は見られない。瞬時場からはエルボ腹側の 縦渦はいくつか見られるが、恐らくその位置の時間変動が大きく、平均するとあたかも渦がない ような結果になっているものと考えられる。この特徴は Re=1.0×10⁵ が亜臨界領域に属することに 起因するものなのかどうかについては、今後更なる高レイノルズ数における試験を行うことで検 証する必要がある。

2.2 コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置によるシングル及びダブルエルボ体系試験

2.2.1 試験装置及び条件

コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置の配管内径は D=126.6 mm であり、図 2-17 に示すように流動用 ポンプ(最大流量 5300 L/min、最大流速 7.0 m/s)、高さ 2 m の混合タンク、長さ 1 m の整流タンク、 長さ 27D の助走部、曲率半径比 $R_o/D=1.0$ のエルボ(試験部)から成る。作動流体は水であり、インバ ータによって制御するポンプから吐出された水は混合タンクにおいて脱気され、整流タンクへと流入す る。整流タンクでは流入した流れを整流し(偏流や旋回流の除去)助走部を経て、発達した乱流として 試験部のエルボへ流入する。なお、助走距離 l_e に関しては流動試験での目標レイノルズ数である Re=1.0×10⁶ を Latzko の理論式(1921)¹⁴⁾に代入すると $l_e \approx 22D$ となるため助走部長さはこの値より長 く、かつ設置スペース内で最大限とした 27 Dを採用している。ポンプは振動防止のために防振マット 上に載せられており、さらにポンプとタンク及び混合タンクと整流タンク間はステンレス製の防振継ぎ 手(フレキシブルチューブ)によって接続されている。

シングルエルボ体系及びダブルエルボ体系の可視化試験部をそれぞれ図 2-18、19 に示す。試験体は アクリル製であり、直管部は厚さ 3.2mm、エルボ部は厚さ 10mm となっている。また、PIV 計測にお ける壁近傍の屈折による歪みを緩和する目的で、コールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置で使用した高 価な Nal を用いずに、配管の周囲はウォータージャケットで覆うこととした。

PIV システムは 2.1.1 項と同様であり、1 回の撮影において 2048 枚、すなわち 1024 ペアの画像を 撮影する。フレームレートは 60 fps で、1 ペアにおけるレーザーパルス間隔は計測領域や Re 数に 応じて約 200~800 µm で変化させている。トレーサー粒子はナイロン製で直径 20 µm のものを使 用し、可視化断面はエルボ曲がり部の管軸を含む断面とし、エルボ部及びエルボ下流部に分割し て撮影した。本試験では Re 数を超臨界域である Re=3.2×10⁵、6.0×10⁵、8.0×10⁵、1.0×10⁶の4 つで変化 させる。なお、水温は 45 ℃にて試験を行い、流速は超音波流量計を用いて計測した。高レイノルズ数 の試験においてはループ全体の圧力損失増大によるポンプ吸込口での圧力低下にともなうキャビテー ション泡等の発生を防ぐ目的から混合タンク部を大気圧よりおよそ 0.4 気圧ほど加圧した。

2.2.2 試験結果

(1) シングルエルボ体系試験

流れ場としてまずエルボ入口における速度分布の検証を行った。エルボ内の流れにおいて、その入口速度分布は多大な影響を与えるため、その把握は非常に重要となる。実機ではコールドレ グ配管は旋回や偏流を含む非常に複雑な入口条件となることが予想されているが、本試験では数

値解析との比較を行うことを念頭に置いているという点及び基本的なエルボ流れを解明するとい う観点から、比較的単純な入口速度条件、発達乱流を用いることにしている。エルボの入口速度 条件をエルボ上流 5D(D=円管直径=126.6 mm)で評価したところ、全ての Re 数で完全ではない がほぼ発達した乱流を得ることができた。図 2-20 に PIV 計測した円管流れ方向断面における Re=1.0×10⁶のときの入口における時間平均速度分布を示す。図 2-20(a) は横軸に円管半径で無次 元化した管中心からの距離を、縦軸に平均流速で無次元化した可視化断面上での管軸右側及び左 側の時間平均速度をとっており、この図から管内が偏流のない中心軸対称流れになっていること が分かる。図 2-20(b) は横軸を Blasius 則から算出した摩擦速度と流体の動粘度で無次元した壁か らの距離、縦軸を摩擦速度で無次元化した時間平均速度とし、入口速度分布を壁法則と比較した ものである。この図から、試験の入口速度分布はほぼ壁法則と一致していることが分かる。完全 に発達した乱流と比べ管中心で平坦な速度分布となっているが、試験でもほぼ発達した乱流をエ ルボ入口で得ることができたと言える。他の Re 数に関しても同様な入口速度分布を得ており、 また平均速度だけでなく速度変動の rms 値も評価し、図 2-21 に示すように主流方向 rms 分布 (Ums)では壁近傍で急峻なピークを持つ分布を、壁方向rms分布(Vms)においても壁近傍でな だらかなピークを持つ分布を得た。これらは発達乱流特有の分布と同様の傾向を示し、速度変動 rms 分布からも、本試験ではほぼ発達した乱流をエルボ入口で得ることができたと推察される。

シングルエルボ流れのエルボ内及びエルボ下流の可視化試験はエルボの曲率半径を含む平面 (曲がり面)内のみで行い、平均流れ場におけるエルボ腹側の剥離現象や速度変動分布などを調 べた。図 2-22(a)-(d) にそれぞれの Re 数におけるエルボ内及びエルボ下流の時間平均速度ベクト ル図を示す。流れ場はエルボ入口では既にエルボ背側の高圧領域の影響を受け、腹側で高速領域、 背側で低速領域が形成されていることが図から分かる。また腹側では高速で流れる流体がエルボ の曲率に追随することができずに剥離が生じ、遠心力により腹側から配管中央へ向かい流れてい ることも見て取れる。剥離点下流では主流方向流れの向きが主流と逆向きになっている剥離領域 が存在し、その下流に低速領域が続く。剥離領域が配管壁面と接している上流側を剥離開始点、 下流側を速度回復点と呼び、剥離現象の特徴的な量として着目した。Re=3.2×10⁵、6.0×10⁵、 8.0×10⁵及び 1.0×10⁶における剥離開始点はそれぞれエルボ入口から 62°、64°、64°及び 62°、 速度回復点は Re=3.2×10⁵の時のみ 0.14D で、それ以外は 0.29D となっている。Re 数による剥離開 始点の違いはほとんどないが、速度回復点に関しては 3.2×10⁵のときが他と比べ上流に位置し、 つまり剥離領域が 3.2×10⁵のときだけ他と比べ小さくなっており、遷移域に近い Re 数(3.2×10⁵) の場合は他と異なる結果となった。

可視化平面内のみの速度成分だけを考慮した疑似的な乱流エネルギー分布に関しては、図2-23 に示すようにRe数による顕著な変化は観測されず、どのRe数に関しても剥離領域の境界付近及 び剥離領域下流の低速域で乱れが大きい分布となっており、流れの乱れの大小からはRe数によ る剥離領域の大きさの変化を説明することはできない。過去の研究から、剥離領域付近における 流れ方向垂直断面内では、管中心付近では遠心力によるエルボ腹側から背側への流れ(二次流れ) が存在し、管壁付近では背側から腹側へ向かう流れが形成されることが分かっている。エルボ背 側では主流方向の高速領域が、腹側では低速領域が存在するため、この管壁付近の背側から腹側 への流れは背側から腹側への運動量の輸送を担っており、剥離領域及びその下流の速度回復を引 き起こしている。このことから、剥離領域の大きさやそのRe数依存は速度変動ではなく二次流 れが重要であり、試験により二次流れを計測し評価する必要があると言える。

(2) ダブルエルボ体系試験

ダブルエルボに関する可視化試験結果について述べる。ダブルエルボでの観察面は図 2-24 に 示すように、1 段目及び 2 段目エルボの曲がり面、両エルボ中間における流れ方向垂直断面、2 段目エルボ下流 0.2D の位置での流れ方向垂直断面で、Re 数は 3.2×10⁵、6.0×10⁵及び 1.0×10⁶であ る。エルボ間の距離は 0.57D で 1 段目と 2 段目エルボは立体的に接続されており、それぞれの曲 がり面は同一平面上にはなくお互い直交している。これらの計測を行う前に、シングルエルボ試 験のときと同様、まずエルボの入口条件の確認を行った。1 段目エルボの上流 5D で計測を行っ た結果、1 段エルボのときと同様ほぼ発達した乱流を確認した。

図 2-25 に Re=1.0×10⁶における時間平均軸方向速度分布及び速度変動 rms 分布を示す。シングル エルボ体系の時とほぼ同じ分布が得られているのが分かる。ダブルエルボ流れの全体の流況は、 1 段目エルボでは剥離を生じるが 2 段目エルボでは剥離は生じず、立体接続となっているため旋 回流成分が発生し、2 段目エルボ通過後には全体的に旋回流となっている。

図 2-26(a)-(c) にそれぞれの Re 数におけるダブルエルボ体系でのエルボ内及びエルボ下流の時 間平均速度ベクトル図を示す。1 段目エルボにおける剥離開始点は Re=3.2×10⁵、6.0×10⁵、1.0×10⁶ に対しそれぞれエルボ入口から 81°、74°、76°となっており、シングルエルボ体系と同様に Re=3.2×10⁵のときだけが異なり、剥離開始が他と比べ下流にずれている結果となった。また速度 回復点はそれぞれの Re 数に対し、それぞれエルボ下流 0.11D、0.24D、0.24Dとなり、これもシン グルエルボ体系同様 Re=3.2×10⁵のときだけが異なり、より上流で速度回復が生じる結果となった。 Re 数が 3.2×10⁵のときだけ速度回復が早いのは二次流れにその原因があると考えられる。後述す るエルボ中間の流れ垂直断面における可視化結果から、主流平均速度に対する二次流れの速度の 大きさは、最大値のみを示すと Re=3.2×10⁵のときは 67%、6.0×10⁵、1.0×10⁶のときはともに 58% となり、3.2×10⁵のときは他と比べ強い二次流れが形成されていることが分かった。なぜ 3.2×10⁵ のときだけ二次流れが強くなるかはその原因は特定できていないが、剥離開始点位置の違いも含 め、今後の検討事項としたい。

シングルエルボの結果と比べるとダブルエルボの場合はいずれの Re 数に対しても剥離領域が 縮小されて計測されているが、これは可視化面内だけでそうなっているのか、つまり剥離領域の 大きさ自体はさほど変化していないが2段目エルボの影響を受けて曲がり面に対して移動した結 果小さく観測されたのか、それとも現象として剥離領域の縮小が生じているのかは今回の結果か らは判断できない。しかし後述するエルボ間の流れ垂直断面の可視化結果から、二次流れの流況 は1段目エルボ曲がり面に対して大きく対称性を崩していないため、剥離領域が2段目エルボの 影響で曲がり面に対して大きく移動しているとは考えにくい。これらのことから、断言はできな いが、ダブルエルボ流れの1段目エルボにおける剥離領域は、シングルエルボ流れの場合と比較 し縮小していると考えるのが妥当であると言える。ダブルエルボ流れの1段目エルボで剥離領域 が縮小した原因は、二次流れがシングルエルボ流れのときと比べ強くなったからではないかと考 えられる。上述のように1段目と2段目の二つのエルボは比較的近い距離(0.57D)を隔てて立体 的に接続されており、2段目エルボ下流における流れ方向は1段目エルボ下流の二次流れ面と平 行になっている。管内の二次流れは、ストレート管であれば流動抵抗となる管壁に囲まれた状態 で形成されるが、ダブルエルボ流れにおいては1段目エルボの少し下流では抵抗となる管壁がな くなり2段目エルボの入口となっているため、二次流れが強くなることが可能ではないか、と推 測できる。

可視化面内の速度分布に関するシングルエルボ流れのエルボ下流とダブルエルボ流れの1段目 エルボ下流との違いとしては、剥離領域の縮小に加え剥離領域下流の低速領域もダブルエルボ流 れではシングルエルボ流れよりも縮小していることが挙げられる。図 2-27 にそれぞれの Re 数に おけるダブルエルボ体系での1段目エルボ下流における軸方向速度分布をシングルエルボ体系の ものと比較した結果を示す。シングル、ダブル体系とも流れが下流に行くにしたがって低速領域 が広がっていくが、ダブル体系の方が低速領域は少し縮小していることが分かる。これに関して も、ダブルエルボでは二次流れがシングルエルボよりも強くなっていると考えると説明すること ができる。エルボ背側の高速領域の持つ大きな運動量を腹側の低速領域へ輸送するのは二次流れ の中の管壁付近の流れである。この流れが速くなればなるほど低速側へ輸送される運動量が大き くなり、つまりエルボ腹側下流の低速域での速度が速くなるはずである。また、エルボ背側の高 速領域は、シングルエルボのときよりも若干速度が大きくなっており、こ のこともダブルエルボ流れでは1段目エルボ下流の二次流れがシングルエルボ流れよりも大きく なっていることを示唆している。

エルボ中間の流れ垂直断面における二次流れについては、シングルエルボ流れでは管中心を通 る線に対し対称な双子渦状の流れ場になることが分かっているが¹⁵⁾、今回のダブルエルボ流れ においては対称な流れ場ではなく、2 段目エルボの腹側に位置する渦が大きく速度も速くなって いることが分かった。図 2-28 に Re=1.0×10⁶における時間平均速度ベクトル図を示す。ほかの Re 数でもほぼ同じ結果が得られており、双子渦のうち2段目エルボ腹側の渦が大きく速度も速くな っている。これは上述したように2段目エルボの腹に近い側では二次流れを抑制する管壁の抵抗 が相対的に小さくなるため、二次流れが発達し易く速度も大きくなるためと考えられる。またこ の可視化断面では図 2-29 に示すように1段目エルボの腹側に互いに逆回りする小さな二つの渦が 観測された。1/15 縮尺の可視化試験でも同様の渦が観測され、これはエルボ腹側で形成される 2 つの縦渦が垂直断面では 2 つの互いに逆回りする渦として観測されたものである。1/15 縮尺の試 験は Re 数の範囲としては亜臨界域¹³⁾ での試験となるが、平成 21 年度に実施した超臨界域にお いても亜臨界域と同様、剥離領域から渦放出は二つの縦渦の形で現れると考えられる。

2 段目エルボの可視化結果を以下に述べる。曲がり面の可視化から、2 段目エルボの腹側では 剥離を観測することはできず、2 段目エルボ下流 0.2D の位置での流れ方向垂直断面における可視 化から、流れが旋回流になることが分かった。図 2-30 は Re=1.0×10⁶ でのダブルエルボ体系 2 段目 エルボ内及びその上下流の流れ方向断面における時間平均速度ベクトル分布、図 2-31 は Re=1.0×10⁶ での2 段目エルボ 0.2D 下流における流れ垂直断面の時間平均速度ベクトル分布である。 他の Re 数でも同様の流れとなっており、2 段目エルボの腹側では剥離は生じず、2 段目エルボの 下流ではっきりとした旋回流が生じる。1 段目エルボ下流で生じた管中心から背側の高速領域は 2 段目エルボの側壁に向かって進み、側壁の曲率に沿って 2 段目エルボ内を通過し下流に流れて いくと考えられ、この過程で旋回流が形成されると推測される。そしてエルボ内ではこの旋回成 分による遠心力で流体が管壁側に押しつけられるため、エルボ腹側では剥離が生じないものと考 えられる。また 2 段目エルボの曲がり面における 2 段目エルボの入口速度分布は、入口に近づく に従い 2 段目エルボ腹側の速度が大きくなる。この速度分布は図 2-32 に示すように Re 数による 変化はほとんど見られない。また同じ曲がり面における 2 段目エルボ下流の速度分布はエルボ背 側が速度の大きい分布となり、これに関しては図 2-33 に示すように Re 数、0D~0.62D までの位 置による違いはほとんどない結果となった。

2.3 まとめ

1/15 及び 1/7 縮尺流動試験装置による可視化試験を行い、シングルエルボ及びダブルエルボ体系の流れ場の詳細を解析した。

1/15 縮尺流動試験装置による可視化試験では、Re 数が 5.0×10⁴~1.0×10⁵のいわゆる亜臨界域に おけるダブルエルボ体系の流れ場を計測し、1 段目エルボの低速域は主に剥離領域と速度回復域 (渦放出域)の2つの領域に分けることが可能であることが分かった。また、剥離点近傍は速度 剪断層から形成される横渦構造とエルボ流れ特有の二次流れ(Dean 渦)による縦渦も発生してお り、剥離領域は横渦と縦渦が共存し、速度回復域では縦渦が支配的で下流側に大きく成長してい く。二段目エルボ内の流れ場としては、1 段目エルボによる偏流と 2nd エルボの形状効果により 旋回流が発生することが分かった。

1/7 縮尺流動試験装置による可視化試験では、Re 数が 3.2×105~1.0×10⁶の超臨界域における試 験を行った。シングル及びダブルエルボ体系での1段目エルボ腹側では剥離が生じ、ダブルエル ボ体系ではシングル体系に比べ剥離開始点は下流側にシフトし、1段目エルボ下流の速度回復域 は上流側にシフトする結果を得た。つまりダブルエルボ体系では剥離領域が縮小しており、これ は二次流れが強くなっていることを示唆している、と考えられる。剥離領域の大きさを議論する には今後二次流れを詳細に計測する必要がある。1段目エルボ下流の二次流れで縦渦が観測され、 これは亜臨界域と同様の結果であり、超臨界域でも剥離領域からの渦放出は2つの縦渦の形で現 れることが明らかにされた。また、ダブルエルボ体系の2段目エルボでは剥離は生じずに旋回流 が生じ、Re 数による大きな違いはないことも分かった。

3 コールドレグ 1/15 及び 1/7 縮尺流動試験装置によるシングルエルボ

体系の圧力変動測定試験

3.1 試験装置及び条件

1/15 縮尺流動試験装置における圧力変動測定試験は、図 2-1 に示す流動試験装置に図 3-1 の試 験部を組み込むことで行う。圧力変換器は共和電業の PGM-1KG(測定最大圧力 100kPa)を、デ ータロガーは KEYENCE のマルチユニット対応データ収集システム NR-500 及びひずみ計測ユニ ット NR-ST04 を用いる。圧力変換器は図 3-2(a)のようにソケット(short socket attachment)によ って固定し、配管に開けた ¢ 2mm の穴を通して測定する。しかし設置スペースと計測点数の兼ね 合いから、至近のソケット同士が干渉してしまう箇所については、図 3-2(b)のようなステンレス 製の細パイプ(long socket attachment)を介して測定を行う。サンプリング周波数を 500Hz、サン プル数を 65,536 点として測定し、時系列の圧力データに高速フーリエ変換(FFT)を施し測定箇 所における圧力変動特性の周波数解析を行う。圧力変換器の設置位置を図 3-3、3-4 に示す。エル ボ腹側の剥離渦が通過するであろう位置に多数のセンサーを配置し、圧力変動を重点的に計測す る。Re 数の範囲は 2.0×10⁵~4.0×10⁵ である。

1/7 縮尺流動試験装置における圧力変動測定試験も 1/15 縮尺試験と同様の手法で行う。図 2-17 に示す流動試験装置に図 3-5 の圧力計測用試験部を組み込む。圧力変換器も同様図 3-3、3-4 に示 す位置に設置する。Re 数を 3.2×10⁵ から 1.0×10⁶ の間で変化させ試験を行う。

加えて、超臨界域において Idelchik¹³⁾の試験結果と同様に、全圧力損失係数のレイノルズ数依存性の有無について検証するため、平均圧力の計測を行う。圧力変換器はエルボ上流 3D 及びエルボ下流 6D にそれぞれ周方向に 90°ごとに 4 個ずつ、計 8 個設置している。サンプリング周波数は 500Hz、サンプリング数を 65536 点とし、各圧力変換器のデータを時間平均し、さらにこれをエルボ上流側 4 点及び下流側 4 点でそれぞれ平均したものを平均圧力とし全圧力損失係数を計算する。

3.2 試験結果

3.2.1 シングルエルボ全圧力損失係数の算出

1/15 縮尺試験装置において Re=2.0×10⁵、3.2×10⁵及び 4.0×10⁵、1/7 縮尺試験装置において Re=3.2×10⁵及び 4.0×10⁵~1.0×10⁶まで 1.0×10⁵刻みでのシングルエルボ全圧力損失係数を算出 し、その特性を確認した。その結果を図 3-6 に示す。図にあるように超臨界域では本研究で用い る試験装置においても特に高レイノルズ数において ζ_{tot} はほぼ一定であり、Shiraishi らの実施し た過去の試験結果 ⁶⁾ とほぼ一致する結果となった。超臨界域における結果は計測誤差範囲に収 まっているが、遷移域付近での結果は、Shiraishi らの試験結果よりわずかに ζ_{tot} が高い値を示し ている。本試験が SUS 管であるのに対して Shiraishi らの試験はアクリル管であるが、内表面の粗 さについては本試験が 3 µm 程度、Shiraishi らの試験が平滑管のためほぼ 0 であり、どちらもそれ ぞれのレイノルズ数における乱流の粘性底層厚さ(17 µm 程度)以下のため、流れに影響は無い と考えられる。しかし、エルボの上流及び下流の圧力の測定位置間隔が本試験と比べて Shiraishi

らの試験では短縮されていることから、これによって結果に差が生じたと考えられる。圧力測定 位置間隔が大きくなるほど圧力損失も増大するため、本試験の結果がわずかに高くなったと考え ることができる。また、遷移域では*ζ*_{tot}の変化が他の領域と比べて大きいことから流動が不安定 であると考えられ、そのためにわずかな条件差などによって計測値に差が生じていると考えられ る。この結果から、超臨界域における本研究に用いる試験装置の妥当性が示されたということが できる。

3.2.2 圧力変動及びその特性

測定圧力の変動成分の時系列変化について、1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10⁵ 及び1.0×10⁶に おける代表的な測定点でのものをそれぞれ図 3-7、3-8 に示す。圧力の変動範囲は Re=3.2×10⁵に おいて±1 kPa 程度、Re=1.0×10⁶でも±10 kPa 程度であるが、可視化結果から得られた剥離渦の 影響のある場所(剥離領域及びその下流)と無い場所で比較すると、いずれのレイノルズ数にお いても剥離渦の影響のある場所での変動が大きいことがわかる。この中でも特に剥離領域内の腹 側(0°)においてはいくつかの圧力の負のスパイク(図の下方に生じるピーク)が見られる。こ れに関しては剥離泡が大きく変動するのに伴い現れるとする報告があり⁴⁾、本試験においても負 のスパイクが現れる場所は剥離領域内であるため、剥離泡の変動によるものと考えられる。

これら圧力の時系列データにFFT処理を施すことで圧力変動の卓越周波数を抽出することがで きるが、得られる圧力変動パワースペクトル密度(PSD)分布には試験装置の固有振動数と思わ れる複数のピークが現れてしまい、流体運動(剥離渦の放出)起因の周波数特性を評価すること ができない。図 3-9 に Re=3.2×10⁵にける各測定点での圧力変動 PSD 分布を示す。図から、剥離 領域とその下流((c)-(h))とそれ以外の場所((a)、(b))では分布の形状が異なることが分かり、 つまり周波数特性が異なることが推察される。エルボ流れにおける圧力変動については、剥離領 域及びその下流で剥離渦放出に起因する卓越周波数が現れることが Shiraishi らの研究⁶において 明らかになっているが、前述のように図 3-9 では試験装置の固有振動数と思われる多数のピーク があり、その有無を判別することが非常に困難である。そこで、装置固有振動数を取り除くため に以下の操作を試みた。まず、エルボ流れにおける圧力変動は3つの現象の寄与があると考えら れる。装置の固有振動と流体運動(乱流運動及び剥離渦放出)に起因するものである。装置固有 振動成分は配管内を音速で伝播すると考えられ、従って今回の測定点程度の距離しか離れていな い場合、それはほぼ同時に計測されることが期待される。各測定点における圧力の時系列データ は図 3-10(縦軸任意)に示すように非常に似通った上下動を示す。この似ている部分が恐らく装 置固有振動に起因すると考えられるため、この成分を取り除くことができれば、残った圧力変動 データから流体運動起因の周波数特性が得られるはずである。そこで、流体運動のうち剥離渦放 出に起因する圧力変動がない測定点でのデータをバックグラウンドデータとし、それを各測定点 における圧力データから差し引くことで装置固有振動による成分を消去できると考えた。バック グラウンドデータとして、エルボ入口における背側 (0°背側)の圧力データを選び、以上の操作 を図 3-10 のデータに対して行った結果を図 3-11 に示す。図から剥離渦の影響がない領域((a)、 (b)) では装置固有振動数でのピークはすべて消えていることが分かる。また、影響がある領域 ((c)-(h)) では約6Hz付近に卓越ピークが見られ、特に腹側30°のデータでピークの大きさが際 立っていることが分かる。

図 3-12、3-13 に Re=6.0×10⁵ 及び 1.0×10⁶におけるバックグランド処理を施した圧力変動 PSD

分布を示す。Re= 3.2×10^5 の場合と同じように、剥離影響領域では Re= 6.0×10^5 、 1.0×10^6 でそれぞれ 12 Hz、18.5 Hz の卓越周波数が現れる。これを周波数 f、管径 D、平均流速 u_m を用い以下の式で定義されるストローハル(St)数によって整理すると表 3-1 のようになり、いずれのレイノルズ数でもほぼ St=0.5 となる。

$$St = \frac{f \cdot D}{u_m} \tag{1}$$

剥離の影響を受ける領域において St=0.5 程度の圧力変動ピークが発生することは過去に Shiraishi らの試験⁶⁾をはじめ複数の試験⁵⁾において確認されており、したがって、本試験で得られた圧力変動の卓越周波数は剥離領域からの渦放出によって発生したものであると考えることができる。

次に、1/15 縮尺試験装置での圧力変動特性について述べる。Re=2.0×10⁵、3.2×10⁵、4.0×10⁵に おける各測定点での圧力変動 PSD 分布を、1/7 縮尺試験装置と同様にバックグラウンド処理を施 し、図 3-14~3-16 に示す。バックグラウンドは同じく 0°外側(エルボ入口背側)としている。 1/7 縮尺試験での結果と同じく、剥離の影響を受けない領域である(a) 45° 背側や(b) 0D 背側 では目立ったピークは見られない。一方で剥離の影響を受ける領域では周方向±30°の位置で顕 著なピークが見られ、0°の位置でもわずかではあるがピークが見られる。ピークの周波数はお よそ Re= 2.0×10^{5} では 17 Hz、Re= 3.2×10^{5} では 25 Hz、Re= 4.0×10^{5} では 32.5 Hz である。これを 無次元数であるストローハル (St) 数によって整理すると表 3-2 のようになり、いずれのレイノ ルズ数でもほぼ St=0.5 となり、1/7 縮尺試験装置と同様に剥離領域からの渦放出によるものと考 えられる。一部の測定点ではおよそ数 10~100 Hz の範囲でこの剥離渦による周波数ピークとは 全く異なるピークが存在する。1/15 縮尺装置では図 3-1、3-2 に示すようにほとんどのセンサーは 細パイプを介して配管に接続されており、これがこの高周波領域における周波数ピークの原因と して考えられる。図 3-17 に細パイプの長さを L=80 mm、170 mm と変えた時の圧力変動 PSD 分布 を示す。この時バックグランド処理は施していない。図から両者の分布が大きく異なることが分 かる。細パイプにより流れ起因で卓越周波数が複数生じていると考えられ、それがセンサー毎に 異なっておりバックグランド処理をしても消去できなかったものと推測できる。しかし、渦放出 に起因する卓越周波数と細パイプに起因するものは周波数がおよそ数倍異なるため、両者の間に 干渉は生じづらいと考えられ、したがって、1/15 縮尺試験装置においても剥離領域からの渦放出 に起因する特有の圧力変動周波数のピークが存在するといえる。

3.2.3 圧力変動特性のスケール効果

前節で示したように、シングルエルボ内流の圧力変動特性は無次元数であるストローハル数を 用いてまとめることができ、いずれの縮尺、レイノルズ数においても剥離領域からの渦放出に伴 う卓越周波数は St=0.5 で現れる。すなわち圧力変動特性についてスケールによる違い(スケール 効果)はないということができる。しかし、卓越周波数は一致しているがその強度については差 異がある可能性がある。そこで圧力変動 PSD についても無次元化し、比較を行った。PSD の無次 元化は次式に示す通りである。

$$\frac{\text{PSD}}{\left(\frac{1}{2}\rho u_m^2\right)^2 \cdot \frac{D}{u_m}} \tag{2}$$

ここで、PSD は圧力変動 PSD の値 [kPa²・s]、 ρ は流体の密度 [kg/m³] である。無次元化処理 を施し、特に剥離渦放出による圧力変動のピークが顕著であったエルボ下流 0D の 30°、0.4D の 30°、0.75D の 30° についてそれぞれ図 3-18~3-20 に示す。比較したのは 1/15 縮尺の Re=3.2×10⁵、 1/7 縮尺の Re=3.2×10⁵、6.0×10⁵、*Re*=1.0×10⁶ の 4 つである。図では圧力変動 PSD 分布をシャープに するために各データは時系列データを 8 等分したものそれぞれを FFT 処理し、得られた圧力変動 PSD を平均したものを用いている。これらの図から、無次元圧力 PSD は試験装置のスケール、レ イノルズ数に依らずほぼ一致した分布を取ることが分かり、圧力変動周波数特性についてスケー ル効果は生じないと言うことができる。これにより、実機条件における圧力変動特性も同様であ ることが期待される。

3.3 まとめ

1/15 及び 1/7 縮尺流動試験装置による圧力測定試験を行い、シングルエルボ体系の全圧力損失 係数及び圧力変動特性を解析した。両試験装置において 30 万程度以上の Re 数で全圧力損失係数 が一定となることが分かり、本試験においても超臨界域を確認することができた。また、圧力変 動特性について、試験装置のスケール、Re 数に関係なく、エルボ腹側の剥離領域及びその下流 において剥離領域からの渦放出によると考えられる圧力変動の卓越周波数が現れ、それらの無次 元化した圧力変動 PSD 分布はお互いよく一致することが分かった。本試験における Re 数は 1/15 縮尺装置を用いた試験では Re=2.0×10⁵~4.0×10⁵、1/7 縮尺装置では Re=3.2×10⁵~1.0×10⁶ であ り実機よりも一桁以上も小さいが、本試験の結果である、超臨界域において圧力変動 PSD 分布 はスケールに依存しないという圧力変動特性は、本試験結果を実機条件まで外挿できる可能性を 示唆していると言える。

4 ダブルエルボ体系コールドレグ 1/7 縮尺流動試験の数値解析

4.1 解析体系及び条件

ここでは、前述のダブルエルボ体系の 1/7 縮尺流動試験を対象とした非定常解析を実施した。 Re 数 80 万(平均流速 3.84m/s)の条件の解析を実施した。解析モデルを図 4-1 に示す。コールド レグ配管は連続するエルボの 6.4D 下流にエルボが存在するが、本解析では対象外としている。 配管内径は試験と同じく 126.6mm であり、エルボ間距離も試験と同じく 0.57D である。第1エル ボの 5D 上流側を入口境界とし、第2エルボの 15D 下流を出口境界とした。壁第一メッシュ幅は、 y+を理想的な範囲(25~100)近傍に収まるよう設定し、0.45mmとした。総メッシュ数は約 43 万である。解析コードは、STAR-CD ver4.10を用いた。解析条件を表 4-1 に示す。乱流モデルは RSM、運動量式の対流項離散化は MARS(1.0)とした。本解析条件は、1/3 縮尺ホットレグ配管 (単一エルボ体系)の水流動試験⁷⁾を対象として構築された解析手法¹¹⁾である。定常解を初期 状態として、タイムステップ0.5msで約12秒間の過渡解析を実施し、時間平均の流速分布を算出 する際は最後の約 10 秒間のデータを用いた。

入口流速は、以下に示す発達乱流(指数法則)の流速分布とした。

$$U = \frac{95}{81} U_{ave} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{9}}$$
(3)

ここで、rは管中心からの距離、Rは管半径である。図 4-2 に解析入口(第1エルボ入口 5D 上流)における流速分布を示す。試験と解析は壁面近傍を含めて概ね一致しており、試験において 発達乱流に近い流れであることがわかる。解析入口乱流強度は、断面平均流速の 5%を均一に与 えた。

4.2 解析結果

4.2.1 流速分布

図 4-3 に第1エルボの中心断面内速度ベクトル(瞬時値)を示す。エルボ出口内側において低 速域が生じており、この低速域はエルボ中心まで達していることわかる。また、流れは非定常性 を有していることがわかる。図 4-4 に第2エルボの中心断面内速度ベクトル(瞬時値)を示す。 第1エルボ出口と同じく、第2エルボ出口内側においても低速域は生じているが、その範囲は第 1エルボと比較して小さいことがわかる。第2エルボ出口においても、流れは非定常性を有して いることがわかる。

図 4-5 に第1エルボ下流の流れ方向流速分布(10 秒間平均)を示す。横軸は管内平均流速で無 次元化した流速であり、縦軸は配管直径で規格化しており、-0.5 が配管腹側、+0.5 が配管背側で ある。0.18D 下流では、壁面近傍も含めて試験結果を良く再現できていることがわかる。0.3D 下 流の流速分布に着目すると、概ね良く再現出来ているが、解析は壁面近傍(-0.5~-0.3)の局所高 流速を大きく評価することがわかる。この局所高流速は、2 次流れが剥離域を回り込むために生 じると考えられる。後述するように(図 4-7)、試験と比較して、解析は 2 次流れを強く評価し ており、これに伴い壁面近傍(-0.5~-0.3)の局所高流速を大きく評価したと考えられる。図 4-6 に第2エルボ下流の流れ方向流速分布(10秒間平均)を示す。0.18D及び0.62D下流ともに、壁 面近傍も含めて試験結果を良く再現出来ていることがわかる。

図4-7に第1エルボ0.2D下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)を示す。 解析データは、8~9秒の1秒間の平均値である。試験はRe=1.0×10⁶条件の結果である。図2-27 により、試験においてRe=6.0×10⁵条件とRe=1.0×10⁶条件では流速分布が同様であることが示さ れており、Re=8.0×10⁵条件の試験結果もRe=1.0×10⁶条件と同様であると考えられる。解析にお いても、剥離領域からの渦放出が確認出来る。解析では、第1エルボ内側に生じた剥離域は第2 エルボ内側に寄っているが、試験では確認できない。また、解析では、流れ方向に向かって反時 計回り(以下、反時計回り)の2次流れは、流れ方向に向かって時計回りの2次流れと比較して 強いが、試験では二つの流れは同程度である。解析の反時計回りの2次流れは、平均流速の約 90%と評価されたが、試験では約60%と評価されており、解析は2次流れを強く評価することが わかった。

図4-8に第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)を示す。 第1 エルボ内側から第2 エルボ内側方向に流れる強い旋回流が生じており、試験及び既往研究 ¹⁶⁾¹⁷⁾の知見とも整合する。第1エルボ下流と同じく、解析は2次流れを試験結果より強く評価し ており、平均流速の約60%となっている。第2エルボ内側には、第1エルボ下流の第1エルボ内 側と同じく、流れ方向流速の低速域がある。解析では、低速域に僅かではあるが逆流が観察され、 剥離が生じていることがわかる。図4-9に第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れの瞬時値、図 4-10に第2エルボ 0.2D 下流の断面内の流れ方向流速コンターの瞬時値を示す。図より、2次流れ が強くなると、エルボ内側の低速域が押し上げられていることがわかる。2 次流れが弱くなると、 エルボ内側の低速域は平らになることがわかる。この流れの周期は、0.05 秒(20Hz, St=0.65)程度 である。この非定常流れが圧力変動の要因となると考えられる。また、強い2次流れにより、エ ルボ内側の低速域が押し上げられた時に、逆流が生じていることがわかる。図4-11に第2エルボ 6.4D 下流の断面内の2 次流れと流れ方向流速コンター(瞬時値)を示す。第2 エルボ 6.4D 下流 は、JSFR のコールドレグ配管の第3 エルボ入口に相当する。図より、第2 エルボ 6.4D 下流にお いても、旋回流が維持されており、第3 エルボでは旋回流を考慮した検討が必要であることがわ かった。

これらの結果より、解析は試験を良好に再現出来ており、単エルボ配管体系を対象として整備 した URANS 解析手法が2段エルボ体系に適用可能な事を確認した。

4.2.2 圧力変動

図 4-12 に第1エルボ内における圧力変動時刻歴を示す。0°及び±30°の圧力変動は、他の位置と比較すると大きくなっている。これは、0°及び±30°位置は剥離点が近く、剥離に伴う流動の非定常性の影響を受けているためと考えられる。図 4-13 に第1エルボ 0.2D 下流の圧力変動を示す。0°及び±30°において圧力変動が大きくなっている。これは、単エルボ 1/3 縮尺試験⁶、3章で示した単エルボ 1/7 縮尺試験と同一であり、剥離に起因すると考えられる。圧力変動は、0°が最も大きく約±2000Paであり、エルボ内 0°の圧力変動と比較して 10 倍以上となっている。図 4-14 に第2エルボ 0.2D 下流の圧力変動を示す。第1エルボ 0.2D 下流と同じく、0°及び±30°において圧力変動が大きくなった。第1エルボ下流と第2エルボ下流では流況が異なるが、同程度の圧力変動が生じることがわかった。

図 4-15 に第1エルボ 0.2D 下流における圧力変動 PSD を示す。約8.5~12.5 秒の4096 点のデー タより算出した。剥離域近傍の0°、±30°では、19.7Hz (St=0.65) と43.2Hz (St=1.42) に明 確なピークが見られる。また、剥離域から離れた位置における±90°においても、同様のピーク が若干ではあるが確認出来る。図4-16に第2エルボ0.2D 下流における圧力変動 PSD を示す。0°、 30°において、第1エルボ下流と同じく、19.7Hz (St=0.65) と43.2Hz (St=1.42) のピークが見 られるが、第1 エルボ下流と比較してその卓越性は小さい。これより、19.7Hz (St=0.65) と 43.2Hz (St=1.42) の流動現象は、第1エルボを起因としていることが示唆される。図4-9 に示し たように、19.7Hz (St=0.65) の卓越周波数は2 次流れと強い相関があると考えられるが、43.2Hz (St=1.42) の卓越周波数の流動現象については調査中であり、今後も検討が必要である。3 章で 示したように単エルボ体系では、剥離領域からの渦放出に伴う卓越周波数は St=0.5 で現れること が知られている。ダブルエルボ体系の解析では、第1 エルボ下流及び第2 エルボ下流において 19.7Hz (St=0.65) の卓越周波数が得られた。単エルボ試験と比較して、卓越周波数が異なった原 因として、流路体系が異なること、図4-7 及び4-8 に示したように解析は試験より2 次流れを強 く(速く)評価することが挙げられる。今後実施するダブルエルボ体系の試験結果を基に、再度 検討を行う必要がある。

4.3 まとめ

1/7 縮尺 2 段エルボ試験を対象に非定常解析を実施した結果、解析は試験の壁面近傍を含めた エルボ下流の流速分布を良好に再現可能なことを示した。これより、単エルボ配管体系を対象と した URANS 解析手法が 2 段エルボ体系に適用可能な事を確認した。解析より、第1エルボ下流 と第2エルボ下流では流況が異なるが、同程度の圧力変動が生じることが示された。また、JSFR のコールドレグ配管の第3エルボ入口に相当位置(第2エルボ 6.4D 下流)においても、旋回流が 維持されており、第3エルボでは旋回流を考慮した検討が必要であることを示した。

5 結論

本研究では、ナトリウム冷却大型炉の1次系コールドレグ配管内の流動特性を把握するために、 平成20年度は1/15縮尺流動試験装置を用いた可視化試験を実施するとともに、スケール効果を 確認するために実施する1/7縮尺流動試験装置のシェイクダウンを実施した。平成21年度は1/7 縮尺流動試験装置を用いた可視化試験及び圧力測定試験を実施した。また、1/7縮尺2段エルボ 試験を対象とした非定常流動解析を実施した。解析コードはSTAR-CD ver4.10を用い、乱流モデ ルはRSMを用いた。

1/15 縮尺流動試験装置による可視化試験では、Re 数が 5.0×10⁴~1.0×10⁵のいわゆる亜臨界域に おけるダブルエルボ体系の流れ場を計測した。1 段目エルボ腹側の流れついて、剥離開始点近傍 は速度剪断層から形成される横渦構造とエルボ流れ特有の二次流れ(Dean 渦)による縦渦も発生 しており、剥離領域は横渦と縦渦が共存し、再付着点下流では速度回復域では縦渦が支配的で下 流側に大きく成長していくことが分かった。

1/7 縮尺流動試験装置による可視化試験では、Re数が3.2×10⁵~1.0×10⁶の超臨界域におけるシン グル及びダブルエルボ体系での試験を行った。両体系での1段目エルボ腹側では剥離が生じ、ダ ブルエルボ体系では観察断面での剥離領域は縮小している結果となった。このことは二次流れが 強くなっていることを示唆しており、今後二次流れを詳細に計測し検証する必要がある。1 段目 エルボ下流の二次流れで縦渦が観測され、超臨界域でも剥離領域からの渦放出は2つの縦渦の形 で現れることが明らかにされた。また、ダブルエルボ体系の2段目エルボでは剥離は生じずに旋 回流が生じ、Re数による大きな違いはないことも分かった。

1/7 縮尺 2 段エルボ試験を対象とした非定常流動解析を実施し、解析は試験の壁面近傍を含め たエルボ下流の流速分布を良好に再現可能なことを示した。これより、単エルボ配管体系を対象 とした URANS 解析手法が 2 段エルボ体系に適用可能な事を確認した。解析より、第1エルボ下 流と第 2 エルボ下流では流況が異なるが、同程度の圧力変動が生じることが示された。また、 JSFR のコールドレグ配管の第3エルボ入口に相当位置(第2エルボ 6.4D 下流)においても、旋 回流が維持されており、第3エルボでは旋回流を考慮した検討が必要であることを示した。

謝辞

本研究を実施するに当たり、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻の佐藤司氏に 多大な協力を頂きました。また、STAR-CD コードによる解析の実施に当たっては、(株) NESI 和田明氏にご協力頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- S. Kotake, Y. Sakamoto, T. Mihara, S. Kubo, N. Uto, Y. Kamishima, K. Aoto, and M. Toda, "Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan," Nucl. Technol., Vol.170, No.4, pp.133–147 (2010).
- H. Yamano, M. Tanaka, N. Kimura, H. Ohshima, H. Kamide, and O. Watanabe, "Development of Flow-Induced Vibration Evaluation Methodology for Large-Diameter Piping with Elbow in Japan Sodium-Cooled Fast Reactor," Nucl. Eng. Des., Vol.241, pp.4464–4475 (2011).
- 3) T. Nakamura, T. Shiraishi, Y. Ishitani, H, Watakabe, H. Sago, T. Fujii, A. Yamaguchi, M. Konomura, "Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping based on Random Force Measurement caused by Conveying Fluid," Proc. 2005, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Denver, Colorado (July 17-21, 2005) PVP2005-71277.
- T. Fujii, M. Konomura, H. Kamide, A. Yamaguchi, M. Toda, "Thermal-Hydraulic Design for Reactor Upper Plenum and Large Diameter Piping for an Innovative Sodium-Cooled Fast Reactor," Proc. 13th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE13), Beijing, China (May 16-20, 2005) ICONE13-50210.
- 5) 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.
- 6) T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, H. Yamano, S. Kotake, "Pressure Fluctuation Characteristics of the Short Radius Elbow Pipe for FBR Nuclear Plant in the Postcritical Reynolds Regime," Proc. The 2nd International Conference on Jet, Wakes and Separated Flow (ICJWSF-2), Berlin, Germany, (Sep. 16-19, 2008).
- T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, M. Konomura, A. Yamaguchi, T. Fujii., "Resistance and Fluctuationg Pressures of a Large Elbow in High Reynolds Numbers," J. of Fluids Engineering, 128, pp. 1063-1073 (2006).
- 8) Y. Iwamoto, K. Yasuda, M. Sogo, H. Yamano, S. Kotake, "Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (4) Experiments on the 1/10-Scale Hot Leg Test Facility in Reynolds Number of 50000 and 320000", Proc. Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), N6P1010 (2008).
- 9) H. Yamano, M. Tanaka, A. Ono, T. Murakami, Y. Iwamoto, K. Yuki, H. Sago, and S. Hayakawa, "Unsteady Elbow Pipe Flow to Develop a Flow-Induced Vibration Evaluation Methodology for Japan Sodium-Cooled Fast Reactor," J. Nucl. Sci. Technol., Vol.48, No.4, pp.677–687 (2011).
- 10) K. Aizawa, S. Nakanishi, H. Yamano, S. Kotake, S. Hayakawa, O. Watanabe, K. Fujimata, "Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (1) Sensitivity Analysis of Turbulent Flow Models for Unsteady Short-Elbow Pipe Flow," Proc. Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), Okinawa, Japan (Nov. 24-27, 2008) N6P1053.
- 11) M. Tanaka, H. Ohshima, H. Yamano, K. Aizawa, T. Fujisaki, "U-RANS Simulation of Unsteady Eddy

Motion in Pipe Elbow at High Reynolds Number Conditions," Proc. 2010 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'10), San Diego, CA, USA (June 13-17, 2010) No.10272.

- 12) 結城 和久、橋爪 秀利、中西 繁之、相澤 康介、山野 秀将「高速炉冷却系配管における流 れの剥離現象に関する基礎研究-高レイノルズ数領域におけるマルチエルボ内複雑流動構 造の解明-(先行基礎工学研究に関する平成 19 年度共同研究報告書)」JAEA-Research 2009-017 (2009).
- 13) I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd ed., Hemisphere, New York (1986).
- 14) 相原利雄, 伝熱工学, 裳華房 (1994).
- 15) 結城和久,熊野孝保,戸田三朗,橋爪秀利,村松壽晴,「90°ベンドで発生する二次流れの非定 常減衰挙動」,日本機械学会論文集(B編)70巻693号,pp.1163-1169 (2004).
- 16) G. E. Mattingly and T. T. YEH, "Effects of pipe elbows and tube bundles on selected types of flowmeters", Flow Meas. Instrum. Vol. 2, pp. 4-13 (1991).
- 17) 村上、清水,"連続曲管内の流れと損失(主として3個の90°エルボによる曲管の場合)",日本機械学会論文集(第2部),38巻314号,pp.2600-2611(1972).

Re 数 [×10 ⁵](平均流速 [m/s])	卓越周波数 [Hz]	St 数	
3.2 (1.53)	6.0	0.49	
4.0 (1.91)	7.8	0.52	
6.0 (2.87)	11.7	0.51	
8.0 (3.83)	15.0	0.49	
10.0 (4.79)	18.5	0.49	

表 3-1 1/7 縮尺試験装置での圧力変動 PSD 分布における卓越周波数及び St 数

表 3-2 1/15 縮尺試験装置での圧力変動 PSD 分布における卓越周波数及び St 数

Re 数 [×10 ⁵](平均流速 [m/s])	周波数 [Hz]	St 数
2.0 (1.94)	17.0	0.55
3.2 (3.17)	25.5	0.50
4.0 (3.83)	33.0	0.54

表 4-1 解析条件

項目		解析条件
乱流モデル		RSM Gibson-Launber
壁モデル		Craft
出口条件		Outlet (勾配型)
	数值解法	Implicit
定常解析	運動量対流項	CD
	ε 方程式対流項	UW
	Re 応力対流項	UW
	数值解法	3-time
	運動量対流項	MARS(1.0)
非定常解析	ε 方程式対流項	UW
	Re 応力対流項	UW
	タイムステップ	0.0005 s



図 2-1 1/15 縮尺流動試験装置概略



図 2-2 1/15 縮尺ダブルエルボ可視化試験部



図 2-3 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第一エルボ及びその下流 ストレート部での時間平均流れ場

JAEA-Research 2013-011



図 2-4 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第一エルボ及びその下流 ストレート部での流れの瞬時場



図 2-5 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第一エルボ出口下流スト レート部での二次流れの時間平均場

(a)エルボ出口から 0.09D 下流(剥離域) (b) エルボ出口から 0.29D 下流(速度回復域)



図 2-6 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第一エルボ出口 0.09D 下 流の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場



図 2-7 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第一エルボ出口 0.29D 下 流の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場


図 2-8 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における直管における管軸方向速 度成分の周波数特性

(a) 速度回復域(エルボ下流 0.5D、壁からの距離 0.10D)、(b) 剥離域(エルボ下流 0.2D、壁からの距離 0.13D)、(c) 剥離域(エルボ入口から下流 65°、壁からの距離 0.16D)



図 2-9 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴におけるエルボ間直管及び 第2エルボでの時間平均流れ場



図 2-10 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第2エルボ上流 0.16D で の流れ垂直断面での時間平均流れ場



図 2-11 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴におけるエルボ間直管及び第 2 エ ルボでの流れ場の瞬時場



図 2-12 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 5.0×10⁴における第2エルボの流れ方向断 面での流れ場の瞬時場



図 2-13 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10⁵における第一エルボ及びその下流 ストレート部での時間平均流れ場



図 2-14 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10⁵における第一エルボ及びその下流 ストレート部での流れの瞬時場



図 2-15 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10⁵における第一エルボ出口 0.18D 下 流の流れ垂直断面での二次流れの時間平均



図 2-16 1/15 縮尺ダブルエルボ試験レイノルズ数 1.0×10⁵における第一エルボ出口 0.18D 下 流の流れ垂直断面での二次流れの瞬時場





図 2-18 1/7 縮尺シングルエルボ可視化試験部



図 2-19 1/7 縮尺ダブルエルボ可視化試験部



図 2-20 1/7 縮尺試験シングルエルボ体系 Re=1.0×10⁶でのエルボ上流助走区間における速度 分布

(a):可視化断面上での管軸右側及び左側の速度分布、(b):実験値と対数速度分布の比較



図 2-21 1/7 縮尺試験シングルエルボ体系 Re=1.0×10⁶でのエルボ上流助走区間における速度 変動 rms 分布





図 2-22 1/7 縮尺試験シングルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における 時間平均速度ベクトル分布



注: 乱流エネルギーは、「速度変動成分の二乗の和の 1/2」の時間平均を時間平均主流速度の二 乗の 1/2 で除したものと定義。

図 2-23 1/7 縮尺試験シングルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における 平面内乱流エネルギー分布



図 2-24 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系における可視化断面



図 2-25 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 Re=1.0×10⁶でのエルボ上流助走区間における 流動状態

(a):可視化断面上での管軸右側及び左側の速度分布、(b):速度変動 rms 分布



図 2-26 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系でのエルボ及びその下流の流れ方向断面における時 間平均速度ベクトル分布



図 2-27 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系における1段目エルボ下流とシングルエルボ体系の エルボ下流のそれぞれの位置での速度分布の比較



図 2-28 1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10⁶でのエルボ間(1段目の 0.3D 下流)の流れ垂 直断面における時間平均速度ベクトル分布



図 2-29 1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10⁶でのエルボ間(1 段目の 0.3D 下流)の流れ垂 直断面における時間平均速度ベクトル分布の拡大図



図 2-30 1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10⁶ でのダブルエルボ体系 2 段目エルボ内及び その上下流の流れ方向断面における時間平均速度ベクトル分布



図 2-31 1/7 縮尺ダブルエルボ試験 Re=1.0×10⁶でのダブルエルボ体系 2 段目 0.2D 下流にお ける流れ垂直断面の時間平均速度ベクトル分布



図 2-32 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 2 段目エルボ上流における速度分布(1 段目エルボの 0.04D 下流(2 段目エルボの 0.53D 上流)及び1 段目エルボの 0.52D 下流(2 段目エルボの 0.05D 上流)の位置での比較)



図 2-33 1/7 縮尺試験ダブルエルボ体系 2 段目エルボ下流における速度分布(2 段目エルボ 出口及び 2 段目エルボの 0.62D 下流の位置での比較)



図 3-1 1/15 縮尺ダブルエルボ圧力変動測定試験部



図 3-2 圧力変換機の設置方法



図 3-3 圧力変換器設置位置(流れ方向垂直断面における設置位置)



図 3-4 圧力変換器設置位置(流れ方向垂直断面位置及び設置位置)



図 3-5 1/7 縮尺ダブルエルボ圧力変動測定試験部



図 3-6 シングルエルボ全圧力損失係数のレイノルズ数による変化



図 3-7 1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10⁵における測定圧力の時系列データ



図 3-8 1/7 縮尺試験装置での Re=1.0×10⁶における測定圧力の時系列データ



図 3-9 1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10⁵における圧力変動 PSD 分布



図 3-10 1/7 縮尺試験装置での Re=3.2×10⁵におけるそれぞれの測定点での圧力変動



図 3-11 1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=3.2×10⁵ における圧力 変動 PSD 分布



図 3-12 1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=6.0×10⁵における圧力 変動 PSD 分布



図 3-13 1/7 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=1.0×10⁶における圧力 変動 PSD 分布



図 3-14 1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=2.0×10⁵における 圧力変動 PSD 分布



図 3-15 1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=3.2×10⁵における 圧力変動 PSD 分布



図 3-16 1/15 縮尺試験装置でのバックグラウンド処理を行った後の Re=4.0×10⁵における 圧力変動 PSD 分布



図 3-17 1/15 縮尺試験装置での Re=3.2×10⁵における圧力変動 PSD 分布の細パイプ長さによ る違い



図 3-18 エルボ下流 0D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較



図 3-19 エルボ下流 0.4D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較



図 3-20 エルボ下流 0.75D の腹側 30°における無次元圧力変動 PSD 分布の比較



図 4-1 解析モデル



図 4-2 解析入口(第1エルボ入口 5D 上流)における流速分布



図 4-3 第1エルボの中心断面内速度ベクトル (瞬時値)



図 4-4 第2エルボの中心断面内速度ベクトル (瞬時値)




図 4-7 第1エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)



図 4-8 第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れと流れ方向流速コンター(時間平均)



図 4-9 第2エルボ 0.2D 下流の断面内の2次流れ(瞬時値)



図 4-10 第2エルボ 0.2D 下流の断面内の流れ方向流速コンター(瞬時値)



図 4-11 第2エルボ 6.4D 下流の断面内の流れ方向流速コンター(瞬時値)



図 4-12 第1エルボ内の圧力変動



図 4-13 第1エルボ 0.2D 下流の圧力変動



図 4-14 第2エルボ 0.2D 下流の圧力変動



図 4-15 第1エルボ 0.2D 下流の圧力変動 PSD



図 4-16 第 2 エルボ 0.2D 下流の圧力変動 PSD

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を	2用いて表されるSI組立里(豆の例				
和辛量	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 ³				
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				
比透磁率的	(数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount conce	entration) は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) とも上げれる						

(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

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 立	ステラジアン(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	~ 1. W (d)	Hz	1	-1 -1
л іх "м т	ニュートン	N		m ka e ⁻²
正力 応力	パスカル	Pa	N/m^2	m ⁻¹ kg s
エネルギー 仕事 執量	ジュール	T	Nm	m ² hg a ⁻²
			11 11	111 Kg S
位 争 举 , 上 举 ,	ワット	w	J/S	m ² kg s [°]
竜 何 , 竜 気 重	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	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
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,	HIL	a	TA	2 -2
カーマ	9 1 1	Gy	J/kg	m~s~
線量当量,周辺線量当量,方向	2 2 2 1 (g)	C	T/law	2 -2
性線量当量, 個人線量当量	2-212 F (8)	ov	J/Kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹mol]
 (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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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

	S	[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
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ミラジアン毎秒毎秒	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	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
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	う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 卒	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻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	ゴグレイ毎秒	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	E	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	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^{3}	+ 1	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	v		

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	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	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

衣される奴値が夫缺的に待られるもの					
名称 記号		記号	SI 単位で表される数値		
電	子ズ	ドル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	〔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	-	N	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・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形はないの教徒的な眼球は
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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 ⁻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	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	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 Oe ≙ (10 ³ /4π)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 帰	禹さないその他の単位の例
	名称 言			記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	~	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	T.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルヌ	系カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	lcal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています