

非軸対称配管減肉の発生メカニズム に関する研究

(Mechanism of Non-Axisymmetric Pipe-wall Thinning
downstream of Elbow-Orifice Pipeline)

高 野 剛

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

材料生産システム専攻

1. 緒論	1
主な記号	2
1.1. 損傷事例	3
1.1.1. 日本の原子力発電所における配管減肉事象例	5
1.1.2. 日本の火力発電所における配管減肉事象例	6
1.2. 過去の研究	6
1.2.1. 流れ加速型腐食	6
1.2.2. 流れ加速型腐食のメカニズム	10
1.3. 本研究の位置づけと概要	12
1.4. 本論文の構成	15
参考文献	15
2. オリフィス偏心と旋回流の組合せによる配管減肉の非軸対称性	22
主な記号	23
2.1. 緒言	24
2.2. ナフタリン昇華法による物質輸送の計測法	25
2.2.1 実験装置	25
2.2.2 物質移動係数の評価	26
2.2.3 ナフタリン昇華法の原理	28
2.2.4 物質輸送係数の算出	29
2.3. 結果および考察	32
2.3.1. 旋回流の計測	32
2.3.2. 円管の物質移動係数	33
2.3.3. オリフィス背後の物質輸送現象	33
2.3.4. 旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果	34
2.3.5. 旋回強度とオリフィス偏心の相互関係	38
2.3.6. 物質輸送現象と流れ場の相関	38
2.4. 結言	42
参考文献	43
3. エルボとオリフィスの組合せによる配管減肉の非軸対称性	45
主な記号	46
3.1. 緒言	47
3.2. 安息香酸を用いた物質輸送の計測法	48
3.2.1. 物質輸送係数の計測方法	48

3.2.2.	実験装置	49
3.3.	結果および考察	55
3.3.1.	円管の物質移動係数	55
3.3.2.	旋回を伴う直円管内オリフィス背後の物質移動係数	58
3.3.3.	エルボ・オリフィスの実験装置	59
3.3.3.1.	エルボ・オリフィスの配管減肉実験装置の特徴	59
3.3.3.2.	エルボ後方の円管内物質移動係数	60
3.3.3.3.	オリフィス背後の円管内物質移動係数	62
3.3.3.4.	美浜 3 号機配管減肉とオリフィス背後の物質移動係数	66
3.4.	結言	67
	参考文献	68
4.	結論	72
	謝辞	75
付録 1.	非軸対称配管減肉に及ぼす旋回流の影響	76
	主な記号	77
A1.1.	安息香酸を用いた物質輸送の計測法	78
A1.1.1.	直管流実験装置	78
A1.1.2.	回転式旋回流発生装置	78
A1.1.3.	物質輸送係数の計測法	80
A1.1.4.	円管の物質移動係数	80
A1.1.5.	エルボ・オリフィス実験装置	83
A1.2.	結果および考察	84
A1.2.1.	エルボ・オリフィスの物質移動係数	84
A1.2.2.	$S=0.9$ のエルボ・オリフィスの物質移動係数	84
A1.2.3.	旋回強度の異なるエルボ・オリフィスの形状係数分布	88
A1.2.4.	美浜 3 号機破断減肉とオリフィス背後の非軸対称配管減肉	89
A1.3.	オリフィス偏心とエルボ・オリフィスの非軸対称配管減肉の比較	90
A1.4.	結論	92
	参考文献	93

第 1 章 緒論

記号の説明

C	: 濃度 [g/m^2]
D_t	: Fe イオンの乱流拡散係数 [m^2/s]
dC/dy	: 濃度勾配 [g/m^3]
J_w	: 物質流束 [$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$]
pH	: 水素イオン指数
S_{ct}	: 乱流シュミット数 [-]
y	: 壁面からの距離 [m]
ν_t	: 流体の乱流動粘度 [m^2/s]

1.1. 損傷事例

流れ加速型腐食 (FAC) による損傷事例は、1986 年の Surry 2 事象以来、米国においていくつか報告されてきた。表 1.1 にアメリカ合衆国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) の公開情報から抜粋した FAC の事例を示す⁽¹⁾。尚、公開情報の文面上「FAC」と明記されていないとも、発生状況から FAC であると推測できるものも含めて記載している。少なくとも公開している事例はほとんど加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) におけるものであり、主に給水系統やドレン系統で発生している。発生事例の多くは「破断 (rupture)」に至っており、管内流体が漏洩もしくは破断による減圧でフラッシング (液体に周囲から熱が流入して気体に相変化すること) して蒸気が噴出している。

事例の中でも Surry 2 の事例は「大破断 (catastrophic rupture)」と記され⁽²⁾⁽³⁾、大きな面積の配管部位が破断し、人災を伴う大事故につながった。破断に至らずに過度の減肉が確認された事例についても、配管内の比較的広範囲が減肉しており、適切な処置がなければいずれは破断に至ると想定される状況であった。一方国内では、2004 年に美浜原子力発電所 3 号機において大破断事象が発生し、その原因は経済産業省の事故調査委員会の最終報告書でエロージョン/コロージョンによるものであるとされていたが、状況から見て FAC によるものである可能性が高いものと推測されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

表 1.1 NRC 情報から抜粋したプラント配管減肉事象例 (NRC- 2001-09 参照)⁽¹⁾

事象発生年月	プラント名	炉型	当該部位	破損減肉状況 外部への影響	NRC 情報源
1976	Oconee 3	PWR	抽気蒸気管エルボ	ピンホールから蒸気漏洩	IN 82-22
1982/01	Vermont Yankee	BWR	湿分分離加熱器 12” ドレン管	破損し蒸気漏洩	IN 82-22
1982/01	Trojan	PWR	蒸気配管破損		IN 82-22
1982/02	Zion 1	PWR	高圧抽気蒸気管溶接部割れ	蒸気漏洩	IN 82-22
1982/06	Oconee 2	PWR	24” の抽気配管	ロングエルボ	IN 82-22

第1章 緒論

				が破損 人災あり	
1982/06	Browns,Ferry 1	BWR	蒸気配管破損		IN 82-22
1983/03	Dresden 3	BWR	第3 低圧給水加熱器抽気入口ノズル付近より	蒸気漏洩	IN 99-19
1985/03	Haddam, Neck	PWR	給水加熱器水位制御弁下流側における配管破損		GL 89-08
1986/12	Surry 2	PWR	給水ポンプ吸い込み系統 18” 配管エルボ	大破断(破断面積 0.72m ²) 蒸気漏洩周辺設備損壊・人災発生	IN 86-106 BL 87-01 IN 88-17 GL 89-08
1987/06	Trojan	PWR	主給水系 14” 直管 2ヶ所エルボ等から 7D 以上下流	減肉(許容厚さ以下)	IN 87-36 IN 88-17 GL 89-08
1987/12	LaSalle	BWR	給水ポンプミニフロー制御弁下流 45° エルボ	ピンホール漏洩	IN 88-17
1988/09	Surry 2	PWR	給水ポンプ吸い込み系統エルボ	減肉(減肉速度 2.1mm/year)	GL 89-08
1988/12	Brunswick 1	BWR	低圧注入系統の弁	局所的な減肉	IN 89-01
1989/04	Arkansas Nuclear 1-2	PWR	高圧抽気系 14” 配管破断	蒸気漏洩	IN 89-53
1990/05	Surry 1	PWR	低圧給水加熱器ドレン水位制御弁下流側直管	破断(破断部肉厚 0.23mm)	IN 91-18
1990/05	Loviisa 2 (Finland)	PWR	主給水系統流量計オリフィス下流部配管フランジ破損	破断(破断部全周減肉、肉厚 0.195” 0.39”	IN 91-18
1990/07	San Onofre 3	PWR	給水制御弁バイパス管 20” 給水管と 6” バイパス管の溶接部の直下流側	蒸気漏洩	IN 91-18
1990/12	Millstone 3	PWR	湿分分離器ドレン系統 6”	配管 2 箇所破断 蒸気漏洩	IN 91-18
1991/11	Millstone 2	PWR	湿分分離器ドレンタンク高圧給水加熱器間配管 8” エルボ(制御弁、デフューザ下流)	破断、(破断部 95%減肉) 蒸気漏洩	IN 91-18
1991/11	Catawba 2	PWR	SG 給水ノズル 4” 配管	減肉、(減肉速度 1mm/cycle)	IN 92-07
1994/11	Sequoyah 1	PWR	第一低圧給水加熱器内 14” 配管、3 段オリフィス下流	亀裂、(周方向 180° 帯状、減肉) 復水漏洩	IN 95-11
1997/04	Fort Calhoun	PWR	高圧タービン第4 抽気系統 12” 配管	破断、(破断面積 0.56m ²) 蒸気	IN 97-84

			5D エルボ	漏洩周辺設備 損壊	
1999/01	Pilgrim	BWR	低圧給水加熱器胴 抽気管入口ノズル 付近破損	貫通穴 2 つ 蒸気漏洩	IN 99-19
1999/04	Susquehanna 2	BWR	低圧給水加熱器胴 抽気管入口ノズル 付近破損	貫通穴 1 つ 蒸気漏洩	IN 99-19
1999/05	Point Beach 1	PWR	低圧 4B 給水加熱 器胴抽気管入口部	破損	IN 99-19
1999/08	Callaway	PWR	再熱ドレンタンク ー高圧給水加熱器 配管	破損、(両端ギ ロチン破損) 蒸気漏洩	EN 36015

1.1.1. 日本の原子力発電所における配管減肉事象例

2000 年以降の NRC の公開情報を検索したが、FAC による損傷事例を探し出すことができなかった。日本における原子力発電所の配管減肉事象例については、日本の電力各社のプレスリリースに公開されているデータを使用し、表 1.2 配管減肉事象例に掲載した。データからわかるが、日本の原子力発電所の事象については、2000 年以前における事象例らしい事象はほとんどなかったようである。それに対して、2000 年以降になると配管減肉事象と発電所の事故が徐々に増加してきた。発電所の操業から 20 年以上が経過した発電所については、基準以下の配管肉厚に配管減肉が進行している部分が多くみられるようになる。美浜原子力発電所 3 号機の破断事故以降⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、電力各社の努力もあり、蒸気配管の破断事故にまで到達した事例は無い。高経年化した発電所の維持管理には多くの手間と費用が必要である。

表 1.2 日本の原子力発電所における配管減肉事象例

事象発生年月	プラント名	炉型	当該部位	破損減肉状況 外部への影響	情報源 プレスリリース
2001/11	浜岡原子力発電所 1 号機	PWR	余熱除去系配管が破断	蒸気漏洩・配管中の水素爆発	中部電力
2004/08	美浜原子力発電所 3 号機	PWR	二次冷却系腹水系配管破裂破断、(約 570 mm 破裂)	蒸気が噴出 142 °C	関西電力
2005/02	柏崎刈羽原子	BWR	第 2 復水器近く小	貫通穴 2 つ	東京電力

	力発電所 1号機		口径のドレン配管	蒸気漏洩	
2006/05	女川2号機	PWR	高圧給水加熱器ベ ント管の減肉事象	貫通穴	原子力資 料情報
2006/11	島根原子力所 1号機	BWR	復水フィルタ出口 ヘッダー配管	基準を下回る 減肉	中国電力
2007/02	伊方原子力発 電所	PWR	補助蒸気管 主蒸気管 2次系配管の減肉	基準を下回る 減肉 4.6-3.4	四国電力
2007/11	大飯原子力発 電所2号機	PWR	2次系主給水管曲 がり部の配管減肉 玉形弁下流部位	基準を下回る 減肉 15.7-10.9 鱗片模様確認	関西電力
2007/12	大飯原子力発 電所2号機	PWR	2次系主給水配管 曲り部	曲り部の減肉	原子力安 全委員会
2008/	Kakrapar 原子 力プラント ユニット-2	PWR	給水管のオリフィ ス背後	パイプライン の爆発 配管減肉	インド
2010/02	東海第2発電 所	PWR	残留熱除去系海水 系配管の減肉	基準を下回る 減肉 7.08-6.7	日本原子 力発電

1.1.2. 日本の火力発電所における配管減肉事象例

2004年8月9日の関西電力美浜原子力発電所3号機の配管破断事故を受けて、電力各社の自主検査により原子力発電所の蒸気配管だけでなく火力発電所の蒸気配管の肉厚が一斉に測定された。自主検査結果を電力各社から経済産業省へ報告書が提出された。各火力発電所における配管減肉データについては、電力各社プレスリリース公表データから抜粋して、「表 1.3 日本の火力発電所における配管減肉事象例」をまとめた。20年以上の経過蒸気配管に計算必要厚さを下回る配管厚さにまで、配管減肉が進行していたことが明らかになった。計算必要厚さを下回る配管（測定最少厚さ）については検査終了後に全て新たな配管に交換されているものと考えられる。しかし、蒸気管の配管減肉がどのようなメカニズムで進行するかは、いまだに不明であり、早急に明らかにする必要がある。

1.2. 過去の研究

1.2.1. 流れ加速型腐食

流れ加速型腐食（Flow Accelerated Corrosion, FAC）は⁽⁷⁾、配管ある

表 1.3 日本の火力発電所における配管減肉事象例

事象発表 年月日	プラント 名	配管減肉当該部位	計算必要 厚さ(mm)	測定最少 厚さ(mm)
2004/09/28	坂出發電所 3号機	給水ポンプ A 出口弁下流 給水ポンプ B 出口弁下流	41.4 41.4	40.9 40.4
2004/10/05	姫路第一発 電所 6号機	ガスタービン廃熱回収ボイ ラの高圧節炭器圧力制御弁 下流部	17.8	17.5
2004/10/09	姫路第一発 電所 5号機	ガスタービン廃熱回収ボイ ラの高圧節炭器下流肉厚 236℃, 24.5MPa, 18.2(公称) 入り口給水管流量測定用フ ローノズル下流部肉厚 236℃, 24.5MPa, 18.2(公称)	15.53 15.53	15.5 15.5
2004/10/12	玉島発電所 3号機	スチームエアヒータドレン 配管 T 管 レギュレーサ エルボ SC ドレン管 エルボ	3.3 3.5 2.1 2.4	2.3 2.3 0.1 0.96
2004/10/12	下関発電所 2号機	スチームエアヒータドレン 配管 SC ドレン管 エルボ	2.6 3.2	0.78 0.66
2004/10/12	海南発電所 1号機	過熱器スプレー配管レギュ レーサ部	18.6	18.5
2004/10/14	海南発電所 4号機	第 4 低圧給水加熱器出口の 復水管エルボ部	3.9	2.9
2004/10/22	岩国発電所 3号機	給水ポンプ出口管フローノ ズル下流部 第 4 給水加熱器ドレン管レ ギュレーサ	41.2 3.4	40.0 2.8
2004/10/26	玉島発電所 2号機	スチームエアヒータドレン 配管エルボ・T 管 復水配管逆止弁下流部	3.8 3.8 3.8	2.7 2.5 2.7
2004/10/29	阿南発電所 4号機	給水ポンプ A 出口配管エル ボ部 スチームコンバータドレン 配管エルボ部① スチームコンバータドレン 配管エルボ部②	37.42 2.7 2.7	35.6 3.4 1.9
2004/10/29	下関発電所 1号機	過熱器スプレー配管エルボ 給水ポンプ出口管オリフィ ス下流部	8.2 9.6	7.4 6.7
2004/11/01	武豊 3 号 四日市 3 号	20 年以上経過ユニット ボイラ過熱器一次スプレー 水配管調節弁下流部 高圧給水加熱器ドレン調節 弁下流レギュレーサ部 電動駆動給水ポンプ出口管 フローノズル部	10.86 3.4 25.12	6.2 2.4 23.5

第1章 緒論

	知多 3 号	高压給水加熱器ドレン管調節弁下流部	7.3	6.2
2004/11/01	川越 3-2 号	20 年未満経過ユニット 中圧節炭器入口給水管フローノズル部	3.9	3.8
	川越 3-6 号	中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	3.6
		中圧節炭器入口給水管フローノズル部	3.9	3.5
		中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	3.7
2004/11/01	知多 1 号	電動駆動給水ポンプ再循環配管オリフィス下流部	11.7	6.3
	知多 2 号	低圧第 1, 2 給水加熱器(B)ドレンレギュレーサ部	3.4	4.2
		ボイラ過熱器スプレースタンプミニマムフロー管オリフィス下流部	9.4	10.2
	知多 5 号	電動駆動給水ポンプウォーミング管エルボ部	3.4	3.3
2004/11/01	川越 3-1 号	タービン駆動給水ポンプウォーミング管エルボ部	3.4	4.1
	川越 3-3 号	中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	3.5
		中圧節炭器入口給水管フローノズル部	3.9	3.7
	川越 3-4 号	中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	3.8
		中圧節炭器入口給水管フローノズル部	3.9	4.0
	川越 3-7 号	中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	3.9
		中圧節炭器入口給水管フローノズル部	3.9	4.2
2004/11/17	玉島発電所 1 号機	中圧給水ポンプ出口給水管フローノズル部	3.9	4.1
		給水ポンプ出口管エルボ	29.1	28.1
		給水加熱器入口管エルボ	24.4	19.7
		給水加熱器入口管曲管	29.1	28.6
2004/12/03	知多火力発電所 4 号機	給水ポンプ出口寄管 T 管	37.1	36.9
		給水ポンプ連絡管タービン駆動給水ポンプ(A)ブースタポンプ出口部	4.81	4.7
		タービン駆動給水ポンプ(B)ブースタポンプ出口部	4.81	4.7
		フローノズル後流部	5.37	4.9
2004/12/08	堺港発電所 3・4 号機	ボイラドレン配管エルボ部	3.4	2.3
			3.8	2.2
2004/12/09	八戸火力	20 年以上経過ユニット		

第1章 緒論

	4号機	A 給水ポンプ出口給水配管 フローノズル下流部	35.82	34.40
		B 給水ポンプ出口給水配管 フローノズル下流部	35.82	34.10
2004/12/09	秋田火力 3号機	20年以上経過ユニット		
		A 給水ポンプ出口給水配管 フローノズル下流部エルボ	24.20	22.90
		B 給水ポンプ出口給水配管 フローノズル下流部エルボ	24.20	21.10
		第3ヒータ入口給水配管 レジューサ下流部	24.20	22.30
2005/01/28	水島発電所 3号機	給水ポンプ出口管レジュー サ	29.0	27.8
		給水加熱器入口給水管 T 管	37.1	36.3
		エルボ	24.4	23.8
		レジューサ	24.4	23.7
2005/03/11	岩国発電所 2号機	給水ポンプ出口配管 T 管	26.03	26.0
		給水ポンプ出口配管エルボ	26.03	25.9
2005/04/15	八戸火力 3号機	20年以上経過ユニット		
		C 給水ポンプ再循環配管 オリフィス後レジューサ	9.14	7.60
2005/04/15	東新潟火力 2号機	20年以上経過ユニット		
		A 給水ポンプ出口給水配管 逆止弁下流部	42.13	41.20
		B 給水ポンプ出口給水配管 逆止弁下流部	42.13	40.90
2005/05/24	新小野田発 電所 2号機	給水加熱器胴空気抜き配管 曲管	3.8	3.0
2005/06/17	阿南発電所 3号機	第5給水加熱器入口給水配 管エルボ部	76.90	72.2
		第6給水加熱器入口給水配 管エルボ部	52.69	52.2
		第8給水加熱器入口給水配 管エルボ部	52.69	51.3
2005/10/28	西条発電所 1号機	給水ポンプ C 号機出口曲管 部	21.07	18.6
2005/10/31	柳井発電所 1・2号機	高圧給水ポンプ出口連絡管	7.9	3.9
		エルボ・T 管	7.9	3.4
		高圧給水ポンプ出口連絡管 オリフィス	10.3	9.3

いは構造材料が流れの乱れる部分（曲がり管，T字管，オリフィスの後部配管等）に発生することが確認されている⁽⁸⁾。実際に流れ加速型腐食が発生している部分の事例は、日本の火力発電所「表 1.3 日本の火力発電所における配管減肉事象例」の給水ポンプ出口弁下流、ガスタービン廃熱回収ボイラの高圧節炭器圧力制御弁下流部、入り口給水

管流量測定用フローノズル下流部、スチームエアヒータドレン配管(T管・レジューサ・エルボ)、過熱器スプレー配管レジューサ部、給水ポンプ出口管フローノズル下流部、給水ポンプ再循環配管オリフィス後レジューサ、高圧給水ポンプ出口連絡管オリフィス、節炭器入口給水配管、給水加熱器ドレン配管などで確認されている。

日本の原子力発電所「表 1.2 日本の原子力発電所における配管減肉事象例」PWR⁽⁹⁾では給水ポンプ吸い込み系統エルボ、主給水系統流量計オリフィス下流部配管、2次系主給水配管曲り部、二次冷却系腹水系配管、低圧給水加熱器ドレン水位制御弁下流側の直管、給水制御弁バイパス管の溶接部の直下流側、湿分分離器ドレン系統配管、湿分分離器ドレンタンク高圧給水加熱器間配管エルボ(制御弁、デフューザ下流)の配管等で確認されている。沸騰水型原子炉(Boiling Water Reactor : BWR)は湿分分離加熱器周り、高圧注入系ドレン配管、復水フィルタ出口ヘッダー配管などの炭素鋼配管で確認されている⁽¹⁾。

流速の速い部分では腐食が加速されて、母材の減肉が確認されているが、流速の遅い部分では酸化膜の増大が確認されることが多いのが、過去の事例である⁽¹⁰⁾。流れ加速型腐食による減肉量については、侵漬時間に対して線形であると言われている。また、潜伏期があるという説もあるが、潜伏期があったとしてもその期間は発電所を管理する全期間内では短く、影響は小さいようである。減肉速度は約 0.1～10 mm/year に達することが報告されているが、この減肉速度は表面での質量移行に影響する速度境界層の厚さなどの流体力学条件および水質化学、温度および材料の組成などの腐食条件によって大きく影響すると考えられる⁽¹⁾⁽⁸⁾。

1.2.2 流れ加速型腐食のメカニズム

流れ加速型腐食(FAC)は、腐食(corrosion)現象が流れの作用により加速する現象と考えられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この流れによる加速効果のメカニズムについては、流れによる物質移動の促進⁽¹³⁾が酸化皮膜の発達を阻害し、酸化皮膜が薄くなって保護性が低下し腐食が加速するという説

が有力であるが、その他にも諸説が提案されている。

流れ加速型腐食の機構として、現在主流となっているものは、酸化皮膜の溶解と溶解に伴う酸化皮膜の保護性質の低下による腐食の加速によるものである。金属の溶解速度は、溶液中の金属イオン濃度とその飽和溶解度との差に比例する⁽¹⁴⁾。流れの影響が小さい場合は、溶出した金属イオンの影響で拡散層中での金属イオン濃度が飽和溶解度に近くなり、これが金属イオンの溶解を抑制するが⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾、配管内の構造物によって生成される壁面近傍での乱れ強さが大きい場合には⁽¹⁶⁾、FACが発生し得ることがあると考えられている⁽¹⁷⁾。流速が速くなり⁽¹⁸⁾濃度拡散層が薄くなると濃度境界層中での濃度勾配が増大し、金属の溶解を促進、すなわち腐食を加速する⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。

腐食速度は、酸化種濃度・ pH ⁽²³⁾・遷移金属イオンの濃度などにより、水質化学パラメータ⁽²⁴⁾・温度⁽²⁵⁾及び材料の組成などの腐食条件に影響されると考えられるが⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾、水質化学パラメータが同じであれば、流速が高速になると濃度境界層が薄くなり、母材から溶出した金属イオンが母材表面の濃度境界層から拡散し、流れに持ち去られる割合が増大し酸化皮膜の発達が阻害される。流れ加速型腐食では、腐食にともなう酸化皮膜の形成及びその保護効果が小さくなるため、溶出と酸化皮膜の形成がバランスする状態に早期に到達し、それが維持されて、時間に対して直線的に腐食が進むと考えられている⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾。

流れ加速型腐食の基本的現象は溶解であり、機械的作用は小さいものとするのが有力であるが、特に流速が速い場合には、流体力学的要因の一つとして、流れのせん断応力の影響で壁面近傍での乱れ強さが大きくなった場合にFACが起これと考えられている。外層酸化皮膜は比較的脆弱であると考えられることから、流速が速くなると、流れのせん断応力により外層酸化皮膜の酸化物粒子の機械的な剥離が無視できなくなり、外層皮膜による内層保護作用が低下し、腐食に対する保護性に直接関与する内層の劣化につながって、腐食量が増加するとするものであるが、どの程度の流速になるとその影響がでてくるかなどの詳細は十分明らかにされていない。

1.3. 本研究の位置づけと概要

発電プラントの各種配管における減肉量の高精度予測技術は、発電プラントの長寿命化および点検管理作業の効率化のために必要不可欠な課題である。このような発電プラントにおける配管減肉の発生原因としては、流れ加速型腐食 (FAC) と液滴衝撃 (Liquid Droplets Impingement, LDI) によるとされているが⁽¹⁾、これらの発生メカニズムについては、十分に理解されているとは言い難い。

近年、高経年化した原子力発電プラントの長寿命化を目的として、配管減肉現象に関する研究⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾が進められているが、これらは原子力発電プラント⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾のみならず火力発電プラントにおいても共通の課題である。オリフィス下流域において⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾ FAC による事故で代表的なものとして、2004 年 8 月に関西電力福井県美浜原子力発電所 3 号機の二次系復水系統において発生した配管破損事故がある⁽⁶⁾。現地調査データにより Fig.1.1 で示す 2 つの類似したオリフィス背後の配管系で⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾、それぞれ異なった減肉状況が確認された結果は美浜 3 号機 A 系統のオリフィス下流域の減肉 Fig.1.2 である⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。配管減肉の特徴は上部部分に偏った非軸対称の配管減肉となつて、破断事故にまで進行したものである。Fig.1.3 は美浜 3 号機 B 系統オリフィス下流域の減肉状況であり、配管減肉の特徴は軸対称な配管減肉となっていることである。

FAC による配管減肉現象は、配管材料から作動流体中へ鉄イオンが溶解する拡散現象が配管内の乱流流動現象によって加速される物質輸送現象と考えられる。配管母材の単位時間当たりの減肉量は、主として配管内の乱流現象による物質輸送によって支配される。乱流中における壁面での物質流束 J_w は(1-1)の式で表わされる。

$$J_w = -D_t \left(\frac{dC}{dy} \right)_w = -\frac{v_t}{S_{ct}} \left(\frac{dC}{dy} \right)_w \quad (1-1)$$

ここで、 D_t : Fe イオンの乱流拡散係数、 C : 濃度、 y : 壁面からの距離、

v_t : 流体の乱流動粘度、 S_{ct} : 乱流シュミット数である。物質流束は単位面積当たりの減肉速度であるので、この値を予測することが即ち減肉速度を評価することになる。FAC による配管減肉の発生メカニズムを理解する上で、乱流流動場の物質輸送現象を詳細に評価することが重要である。流動場に関しては、配管減肉が頻繁に観測される配管部位であるオリフィス背後の流動場に関する研究が、最近、実験と数値シミュレーションの両面から行われている。藤沢らは、オリフィス背後の流動場に注目し⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾、オリフィス偏心と上流側の速度分布がオリフィス背後の流れ場に及ぼす影響について研究を行っている。その結果、正方形ダクトを対象としたオリフィス背後の流れが元来不安定であることを実験的に見出し、配管の許容寸法誤差より僅かに小さいオリフィスの偏心($\pm 0.7\%$)で下流側流れに大きな非対称流が発生することを報告している⁽⁴³⁾。しかし、そのような偏心の影響は、実機で使われている円管では定量的にはかなり小さいのではないかと報告されている⁽⁴⁸⁾。また、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせにより、オリフィス偏心の方向に流れが強く偏り、再付着点が上流側に大きく移動することが報告されている。

実機配管における物質輸送現象については、計測が困難であることから、現在のところ定期点検時や事故発生時に計測した配管肉厚のデータが見られる程度である。また、実機配管で使用される炭素鋼やステンレス鋼の配管を用いた減肉実験の場合、必要な実験時間は数千時間のオーダーとなるため、流動場計測と対応したパラメータや各種配管要素に対するデータベースの構築は困難である。そのため、電気化学的手法⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾やナフタリン昇華法⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾を用いて物質輸送現象を模擬した実験が行われている。電気化学的手法では、オリフィス背後の配管壁に等間隔で電極を埋め込み、電極付近の鉄イオンの数の変化から物質伝達係数を評価している。以上のような知見より、本論文はFACの本質的な流体力学的因子である配管壁表面の物質移動係数を直接測定することにより、非軸対称配管減肉の発生メカニズムを明らかにする⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾。

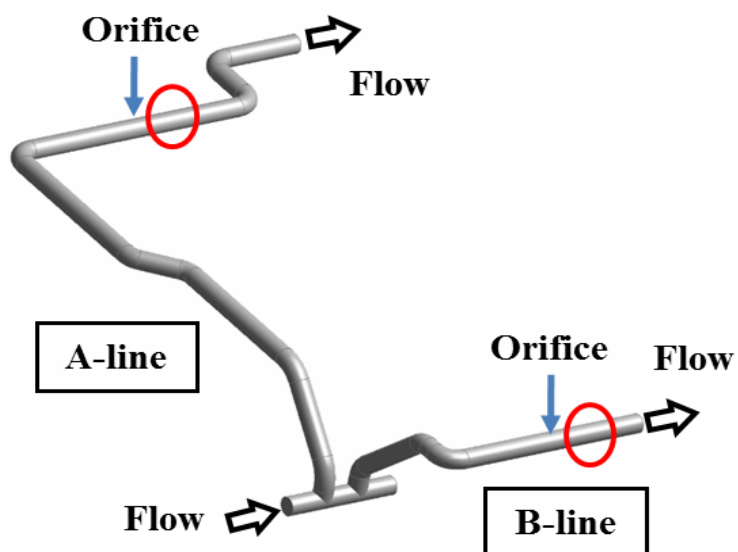


Fig.1.1 美浜 3 号機 A 系統、B 系統の配管レイアウト

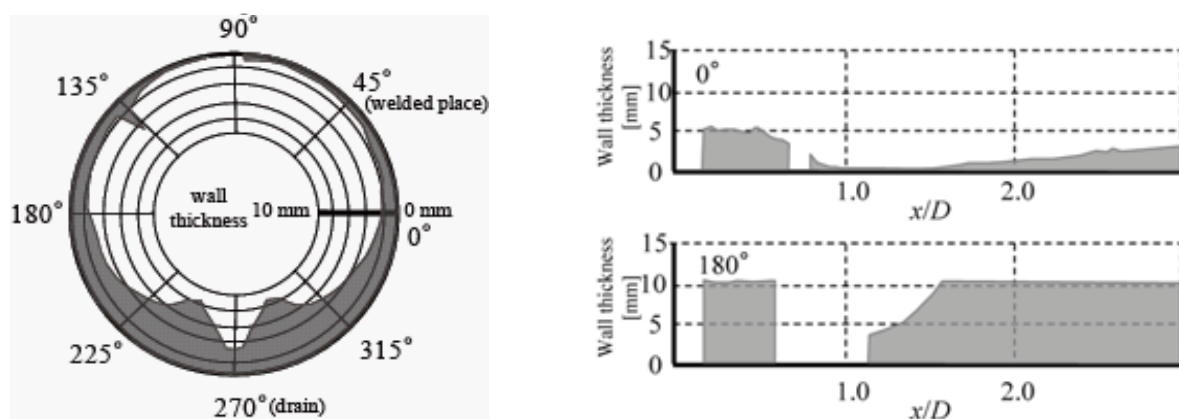


Fig.1.2 美浜 3 号機 A 系統オリフィス下流域の減肉状況

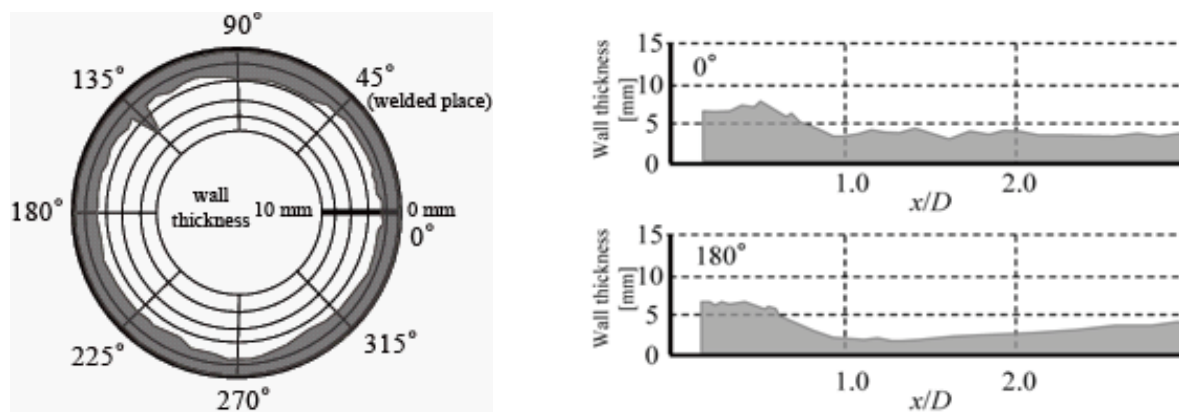


Fig. 1.3 美浜 3 号機 B 系統オリフィス下流域の減肉状況

1.4. 本論文の構成

本論文の目的は、オリフィス偏心と旋回流の組み合わせ効果によって発生した偏った流れがオリフィス背後の物質輸送現象にどのように影響するかについてナフタリン昇華法を用いて物質移動係数を直接測定することで検討する。また、旋回流とエルボの組合せによるオリフィス背後の物質輸送現象にどのような影響を与えるのか安息香酸減肉法を使って物質移動係数を直接測定することで検討する。安息香酸を用いて実機条件に近いシュミット数の実験を行い、物質輸送を明らかにする方法を提案する。

第2章ではオリフィス偏心と旋回流の組合せによる配管減肉の非軸対称性に関する研究を報告し、第3章ではエルボ・オリフィスの組合せによる配管減肉の非軸対称性に関する研究を報告する。第4章では結論である。付録では非軸対称配管減肉に及ぼす旋回流の影響といった構成となる。

参考文献

- (1) 日本機械学会，発電用設備規格，配管減肉管理に関する規格 (2005), JSME S CA1-2005, 2005, pp. 13-47.
- (2) NUREG/CR-4868, BNL-NUREG-52057, Metallurgical evaluation of an 18-inch feedwaterline failure at the Surry Unit 2 Power Station, 1987.
- (3) 腐食防食協会，エロージョンとコロージョン，裳華坊，1987.
- (4) 原子力安全・保安院，関西電力株式会社美浜発電所3号機二次系配管破損事故について(最終報告書)，2005-3-30，2005.
- (5) 原子力安全基盤機構，日本原子力研究所、オリフィス近傍配管流況解析，総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 美浜発電所3号機2次系配管破損事故調査委員会（第7回）配布資料7-1-1 別添2-1，2004-12-13，2004.
- (6) 関西電力株式会社，美浜発電所3号機「2次系配管破損事故」発生原因の調査について，総合資源エネルギー調査会 原子力安

- 全・保安部会 美浜発電所3号機2次系配管破損事故調査委員会
(第7回) 配布資料7-1-1 別添4, 2004-12-13, 2004.
- (7) 配管減肉管理高度化に向けた最新技術知見適用化のための調査研究分科会成果報告書, 日本機械学会, P-SCCII-3, 2012, pp. I-13-I-56.
- (8) 配管減肉管理改善に向けた基盤技術研究分科会成果報告書, 日本機械学会, P-SCCII-2, 2009, pp. 6-12; 113-117.
- (9) S. Trevin, F. Dupuis and P. Larderet, EDF knowledge of flow-assisted corrosion in PWR type NPP, EDF report ENTECH050089, 2005.
- (10) M. Kitamura, Y. Ozawa and S. Uchida, Temperature Dependence of Cobalt Release Rate From Stainless Steel in Neutral Water, Proc. the International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Water Reactors, Myrtle Beach, SC., Aug. 22-25, 1983, NACE National Association of Corrosion 16 Engineers, ISBN0-91666, 1984, pp. 623-635.
- (11) J. Postlethwaite and S. Nesic, Erosion-Corrosion in Single and Multiphase Flow, Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 249.
- (12) 機械工学便覧 基礎編 A5 流体力学, 日本機械学会
- (13) 浅野康一, 物質移動の基礎と応用, 丸善, 2004.
- (14) H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc. 1971.
- (15) W. G. Cook and D. H. Lister, Some Aspects of Electrochemistry and Corrosion Mechanisms Influencing Flow Assisted Corrosion in CANDU Outlet Feed Pipes, Proc. Int. Conf. Water Chemistry of Nuclear Power Systems, San Francisco, Oct. 8-11, 2004, EPRI, 2005, pp. 1413-1420.
- (16) S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, T. Ohira, H. Takiguchi, W. Sugino and S. Koshizuka, Evaluation Methods for Corrosion

- Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (IV), J. Nucl. Sci. Technol., 47, 2010, pp. 184-196.
- (17) 辻義之, 近藤昌也, FAC 評価における流動場および物質移動の影響と課題, 日本機械学会第16 回動力エネルギー技術シンポジウム, C232, 2011, pp. 333-334.
- (18) 稲田文夫, 米田公俊, 森田良, 藤原和俊, 古谷正裕, 配管減肉メカニズムに関する流体力学的考察, Zairyo-to-Kankyo, 57, 2008, pp. 218-223.
- (19) 日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第5 版, 丸善, 2009, p.46.
- (21) 米田公俊, 森田良, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価(その1) —流体力学因子と減肉率との相関—, 電力中央研究所報告, L06007, 2007.
- (22) 米田公俊, 森田良, 稲田, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価(その2) —壁面流動特性を用いた物質移動係数モデルの構築—, 電力中央研究所報告, L07015, 2008.
- (23) H. G. Heitmann and P. Schub, Initial experience gained with a high pH value in the secondary system of 5 PWRs, in proceedings of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, BNES, London, Vol. 243, 1983.
- (24) G. J. Bignold, K. Garbett, R. Garnsey and I. S. Woolsey, Erosion-corrosion in nuclear steam generators, in Proceedings of the Second Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, 1980, pp. 5.
- (25) G. J. Bignold, K. Garbett and I. S. Woolsey, in Ph. Berge and F. Kahn, eds., Mechanistic aspects of temperature dependence of erosion-corrosion, Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam (Fance: Electricite de France, Les Renardieres, Paper No. 12, 1982.
- (26) W. Kastner, M. Erve, N. Henzel and B. Stellwag, Calculation code

- for erosion corrosion induced wall thinning in piping systems, Nuclear Engineering and Design, 119, 1990, pp. 431-438.
- (27) W. H. Ahmed, Evaluation of the proximity effect on flow-accelerated corrosion, Annals of Nuclear Energy, 37, 2010, pp. 598-605.
- (28) H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc. 1971.
- (29) 松田誠吾, 松島巖訳, H. H. ユーリック著「腐食反応とその制御 (第2版)」, 産業図書, 1980.
- (30) L.E. Sanchez-Caldera, The Mechanism of Corrosion-erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1984.
- (31) V. K. Chexal, R. B. Dooley, D. P. Munson, R. M. Tilley, Control of Flow-Accelerated Corrosion in Fossil, Co-Generation and Industrial Steam Plants, in proceeding of the International Water Conference 58th Annual Meeting, Paper No. IWC-97-57, 1997, pp. 529-539.
- (32) H. Keller, Erosions corrosion an Nassdampfturbinen, VGB Kraft-werkstechnik, Vol. 54, No. 5, 1974, pp. 292-295.
- (33) Y. Utanohara, A. Nakamura, Y. Nagaya and M. Murase, Correlation between flow accelerated corrosion and wall shear stress downstream from an orifice, in Proceedings of the 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, Paper No. NURETH14-79, Toronto, Canada, 2011.
- (34) 矢島佐知子, 額賀孝訓, 梅村文夫, 絞り部付き炭素鋼管を用いた高温水減肉試験及び流体力学的解析, Zairyo-to-Kankyo, 56, 2007, pp. 222-227.
- (35) 米田公俊, 森田良, 配管減肉現象に関わる流動特性の解明 (その 1) 一単相流中のオリフィス下流域の乱流特性一, 電力中央研究所報告, L05007, 2006.
- (36) 米田公俊, 配管減肉現象に関わる流動特性の解明 (その 2) 一配

管径及びオリフィス径に依るはく離領域の流動特性ー，電力中央研究所報告，L06006，2007.

- (37) T. H. Chilton and A. P. Colburn, Mass transfer (absorption) coefficients: Prediction from data on heat transfer and fluid friction, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.26, 1934, pp. 1183-1187.
- (38) J. Ducreaux, The Influence of Flow Velocity on the Corrosion-Erosion of Carbon Steel in Pressurized Water, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 3, Vol. 1, British Nuclear Energy Society, 1983, pp. 227-233.
- (39) M. Naitoh, S. Uchida, S. Koshizuka, H. Ninokata, N. Hiranuma, K. Dosaki, K. Nishida, M. Akiyama and H. Saitoh, Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics, Major Targets and Development Strategies of the Evaluation Methods, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, 2008, pp. 1116-1128.
- (40) D. J. Tagg, M. A. Patrick and A. A. Wragg, Heat and mass transfer downstream of abrupt nozzle expansions in turbulent flow, Trans. I. Chem. E., Vol.57, No.12, 1979, pp. 176-181.
- (41) F. Shan, M. Tatematsu, M. Kondo and Y. Tsuji, Assessing effect of Large-Scale Fluctuating Structures behind Orifice on Mass Transfer by Time-Resolved PIV and POD, in proceedings of the 6th International Conference on Fluid Mechanics, 2011, pp. 123-137.
- (42) 長屋行則，歌野原陽一，中村晶，村瀬道雄，オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価（4. 腐食速度に与える流速の影響評価），日本機械学会第15回動力エネルギー技術シンポジウム，A109, 2010, pp. 363-364.
- (43) N. Fujisawa, H. Yamamoto, T. Syuto and T. Yamagata, Investigation on Flow Accelerated Corrosion behind an Orifice in a Duct through Simultaneous Temperature and Velocity Measurements Using

- Combined Two-Color LIF and PIV, Proceedings of the 8th International Symposium on PIV, Melbourne, PIV09-0042, 2009.
- (44) N. Fujisawa, H. Yamamoto, Occurrence of Asymmetric Flow Pattern behind a Double Orifice in a Square Pipe, Journal of Visualization, Vol.12, 2009, pp. 93-94.
- (45) 首藤智明, 藤澤延行, わずかに偏心した円管内オリフィス背後の流れ場に関する実験的研究, 第 37 回可視化情報シンポジウム講演論文集, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 309-310.
- (46) F. Shan, M. Tatematsu, M. Kondo and Y. Tsuji, The Flow Field of Pipe-wall Thinning Area behind the Orifice, in Proceedings of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (ISaG2010), 2010, pp. 29-37.
- (47) 大久保雅一, 山縣貴幸, 菅野翔, 藤澤延行, 流動加速腐食による配管減肉に関する研究 (旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による非対称流の発生), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 77, 2011, pp. 386-394.
- (48) M. Ohkubo, S. Kanno, T. Yamagata, T. Takano and N. Fujisawa, Occurrence of Asymmetrical Flow Pattern behind an Orifice in a Circular Pipe, Journal of Visualization, Vol.14, No.1, 2011, pp. 15-17.
- (49) F. P. Berger and K. F. F. L. Hau, Mass transfer in turbulent pipe flow measured by the electrochemical method, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, 1977, pp. 1185-1194.
- (50) 黒田祐志, 小城列, 近藤昌也, 辻義之, オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究: (1) 電気化学法による側面近傍の物質伝達率の測定 1, 日本原子力学会「2010年春の年会」, 2010.
- (51) 福井資夫, 森下輝夫, ナフタリン昇華法による熱伝達率の測定, 日本機械学会誌, 第 65 第 525 号, 1962, pp. 120-127.
- (52) R. J. Goldstein and H. H. Cho, A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, Experimental

- Thermal and Fluid Science, Vol.10, 1995, pp. 416-434.
- (53) 伊藤嘉人, 山縣貴幸, 藤澤延行, 高野剛, 偏心を有する円管内オリフィス背後の物質輸送係数の評価 – 旋回流の影響 –, 第18回 茨城講演会講演論文集, No. 100-2, 2010, pp. 261-262.
- (54) 高野剛, 山縣貴幸, 伊藤嘉人, 藤澤延行, 流動加速腐食による配管減肉に関する研究 (旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による物質輸送現象), 保全学, 10(2), 2011, pp. 30-35.
- (55) Tsuyoshi Takano, Takayuki Yamagata, Akihiro Ito and Nobuyuki Fujisawa, Mass Transfer Measurements behind an Orifice in a Circular Pipe Flow for Various Combinations of Swirl Intensity and Orifice Bias, Journal of Power and Energy Systems, JSME. Vol. 6, No.3, 2012, pp. 402-411.
- (56) T. Takano, T. Yamagata, Y. Sato, N. Fujisawa, Non-Axisymmetric Mass Transfer Phenomenon behind an Orifice in a Curved Swirling Flow, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2013, pp. 1-5.

第 2 章 オリフィス偏心と旋回流の組合せによる 配管減肉の非軸対称性

記号の説明

D_i	: 拡散係数 [m^2/s]
D_{naph}	: ナフタリンの拡散係数 [m^2/s]
d	: 円管内径 [m]
d_o	: オリフィスの穴径 [m]
h	: 物質移動係数 [m/s]
h_m	: ナフタリンの物質移動係数 [m/s]
P_{atm}	: 大気圧 [Pa]
$P_{v,w}$: ナフタリンの飽和蒸気圧 [Pa]
R	: ナフタリン気体定数 [$R=64.89 \text{ J}/(\text{mol K})$]
Re	: レイノルズ数 [$=Ud/\nu$]
r	: 中心からの距離 [m]
S	: スワール数 [-]
S_c	: シュミット数 [-]
Sh	: シャーウッド数 [-]
T	: 絶対温度 [K]
T_w	: ナフタリンの壁面温度 [K]
U	: 断面平均速度 [m/s]
x	: 距離 [m]
x/d	: 無次元距離 [-]
α	: スワロー羽根角度 [$^\circ$]
ε	: 偏心量 [%]
ν	: 流体の動粘度 [m^2/s]
ρ_x	: 固体のナフタリン密度 [kg/m^3]
ρ_v	: ナフタリンの飽和蒸気密度 [kg/m^3]
$\rho_{v,w}$: ナフタリンの壁面飽和蒸気密度 [kg/m^3]
$\delta z/\delta t$: 単位時間当たりの昇華量 [mm/s]

2.1. 緒言

原子力発電プラントの各種配管における配管減肉量の高精度予測は、高経年化プラントの長寿命化のために欠くことのできない重要な技術である。このような配管減肉の発生要因の一つとして、管内流による流れ加速型腐食が重要であると考えられている。しかしながら、流れ加速型腐食の発生メカニズムについては、配管レイアウトの影響もあり、十分に理解されているとは言い難い⁽¹⁾⁽²⁾。

流れ加速型腐食による配管減肉は、オリフィス背後の流れ場に見られるように、実機配管の中でも乱流強度の大きい部位でしばしば発生する。この現象は、実機配管（炭素鋼管あるいはステンレス鋼管）に含まれる鉄イオンが作動流体中に溶出する乱流物質輸送現象と考えられているが、どのようなメカニズムで乱流によって減肉が促進されるかについては明らかにされていない。一方、流れ加速型腐食に関する過去の研究によると、オリフィス背後の速度場についての計測結果⁽³⁾と配管減肉量の直接計測結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾はわずかに報告されている。しかしながら、オリフィス背後の物質移動係数分布を直接計測した研究結果は極めて少ない⁽⁶⁾。

藤澤ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、先にオリフィス背後の速度場を対象としたPIV計測実験を行い、オリフィス背後の流れ場に及ぼす旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果について実験的に検討した。実験結果によると⁽⁸⁾、大きな旋回流強度では、実機配管の外径許容誤差（ $\pm 0.8\%$ ）よりわずかに小さいオリフィスの偏心（ $\pm 0.7\%$ ）においても、オリフィス下流側の流れに大きな非軸対称性が発生することが分かった。そのような非軸対称な流れ場は、オリフィス背後において減肉分布に偏りを引き起こす可能性があるため注意を払う必要がある。このことは、一見同心円状に見えるオリフィス背後の配管で、配管径の許容誤差内であっても僅かな偏心があれば、上流側の流動状況に応じて偏った減肉分布が発生する可能性があることを示唆する。しかしながら、この結果はあくまでも速度場に対する知見であり、流れ加速型腐食による配管減肉に直接関係する物質移動係数分布の評価による検証までは至っていない。

以上のことから、本研究では、旋回流⁽¹⁰⁾とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって発生した偏流が、オリフィス背後の物質輸送現象にどのように影響するかについて、ナフタリン昇華法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を用いて物質移動係数分布を直接計測することで検討することを目的とする。

2.2. ナフタリン昇華法による物質輸送

2.2.1. 実験装置

Fig. 2.1 は、本実験に用いた風洞実験装置の概略を示す。実験装置は、送風機、スワラ、助走配管とオリフィス部を含む計測部からなる。なお、ナフタリン昇華法の場合、ナフタリンを空气中に晒して昇華量を計測することで物質移動係数を求めるため、作動流体は空気である。風量はオリフィスから十分下流に設けられた流量計で読み取り、送風機回転数をインバータにより調整することで、一定風量の実験を行った。本実験のレイノルズ数は $Re(=Ud/\nu)=1.9\times 10^4$ であり、既報⁽⁸⁾の速度場計測実験と同一レイノルズ数である。ここに、 U :断面平均流速、 ν :動粘度であり、断面平均流速は $U=5.1\text{m/s}$ である。研究の目的であるオリフィス偏心と旋回流の組合せによる配管減肉の非軸対称性を検証するために整流部の下流側には旋回流を発生させるためのスワラ(羽根角度 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ$)を取り付け、その下流側には、長さ 1.1 m の助走円管、オリフィス部を有する計測部、そして下流側円管が取り付けられている。ただし、オリフィスならびに計測部円管はアルミニウム製とし、機械加工によって十分な真円度の配管構造とした。なお、計測部および上流側、下流側円管の内径はいずれも 56 mm である。本実験の旋回流は、助走配管の上流側に設けたスワラで発生させた。スワラは旋回流を再現するための装置であるが、その構造は、青木ら⁽¹⁰⁾の水流実験と同様に、アルミニウム製の直線羽根 6 枚を周方向に一定角度傾けて固定した構造である。本実験では、羽根角度を主流に対して 15° と 30° 傾けたスワラ 2 種を使用した。本実験で使用したオリフィスは、実機配管⁽⁸⁾を模して絞り比 0.6 とした。ここでは、オリフィス偏心の影響を評価するため、オリフィスを配管に対して上下方

向に $\pm 0.4\text{mm}$ 移動可能な構造とすることで、偏心なし(Without bias)、正偏心(Positive bias)、負偏心(Negative bias)の3条件を実現した(Fig.2.1)。ただし、このときのオリフィス偏心量は、日本工業規格における配管外径の許容誤差 $\pm 0.8\%$ (JIS3456) よりわずかに小さい $\pm 0.7\%$ である。

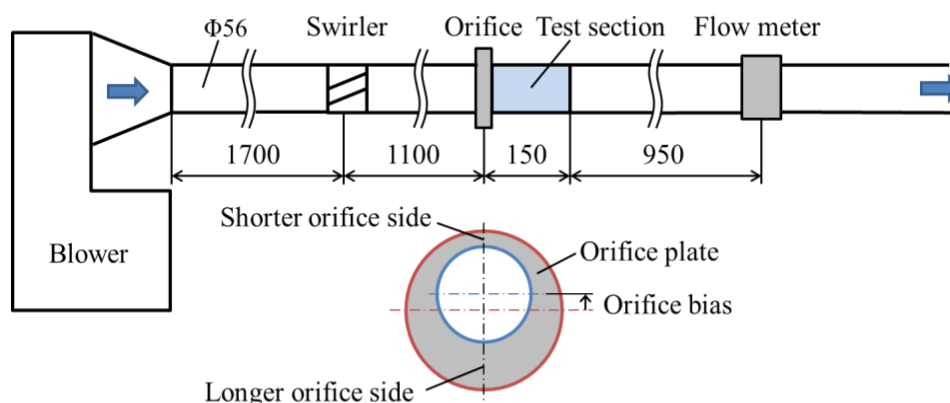


Fig. 2.1 物質移動計測用実験装置 (Unit in mm)

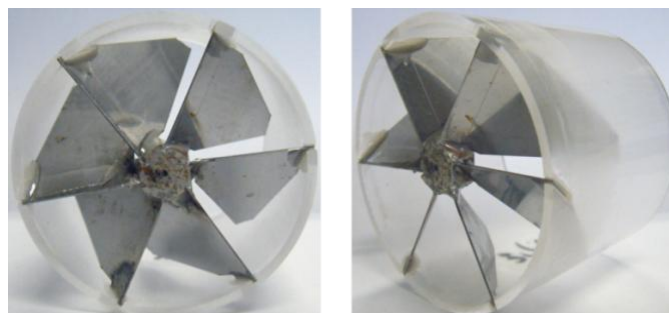


Fig. 2.2 swirler の写真

2.2.2. 物質移動係数の評価

オリフィス背後の物質移動係数の評価には、ナフタリン昇華法⁽¹²⁾を用いた。この方法は、ナフタリンを空气中に晒したときの昇華量を計測することで、物質移動係数を評価する方法である。Fig.2.3 は、物質移動係数の計測装置の概略である。オリフィス背後の配管を半割り構造とし、その内表面に設けた下流方向の溝にナフタリンを流し込むことでオリフィス背後の物質移動係数の計測を行った。ただし、この溝の大きさは、幅 10mm、深さ 2mm、長さ 140mm である。ただし、この溝は半割り構造の円管の中央に設けた。実験では、この溝を装置の上

下位置に配置することで、オリフィス背後の上下2断面の物質移動係数分布を計測した。なお、この位置は、オリフィス偏心の影響を最も強く受ける位置と考えられる⁽⁹⁾。実験に用いたナフタリンは常温では固体であるが、80℃以上に加熱すると融解するため、溶融したナフタリンを円管の溝部に沿って給湯して成型した。ただし、円管も同時にヒーターで加熱することで、ナフタリンの給湯温度を均一化した。さらに、装置をゆっくりと自然冷却することでナフタリンを凝固させた。その後、固体化したナフタリン表面をエメリー紙によって十分滑らかに仕上げて実験に供した。ただし、計測部は半割り構造とすることで、ナフタリン昇華量の計測を容易にした。ここに、ナフタリン表面の位置計測には、共焦点式レーザー変位計を用いた。この変位計はステッピングモータ駆動の自動トラバース装置に取り付け、溝の中央位置に沿って下流方向に移動することで、実験前後のナフタリン表面の位置変化を検出し、下流方向の物質輸送係数分布を算出した。焦点式レーザー変位計を用いた理由は、半透明なナフタリン表面の微細な形状の計測を高い精度で行うためである。その計測精度は $\pm 0.1\mu\text{m}$ である。実験時間は30分程度に設定したが、そのときに得られる最大減肉は50～60 μm であった。ナフタリン昇華法による物質移動係数 h は式(2-1)で求めた。

$$h = \frac{\rho_x}{\rho_v} \cdot \frac{\delta z}{\delta t} \quad (2-1)$$

ここに、 $\delta z/\delta t$:単位時間当たりの昇華量、 ρ_x :固体のナフタリン密度、 ρ_v :ナフタリンの飽和蒸気密度である。本研究では、ナフタリンの飽和蒸気圧は、管壁面温度を熱電対で計測し、Ambrose et al.の実験式⁽¹¹⁾から求めた。また、拡散係数は、Goldstein-Chouの実験式⁽¹²⁾から算出し、単位時間当たりの昇華量分布の計測結果から物質移動係数を求め、シャーウッド数 $Sh(=hd/D_i)$ を評価した (D_i : 拡散係数)。また、ナフタリンは管壁では飽和濃度、バルク流中では濃度零を仮定している。なお、本実験のシュミット数 S_c は2.29である⁽¹²⁾。

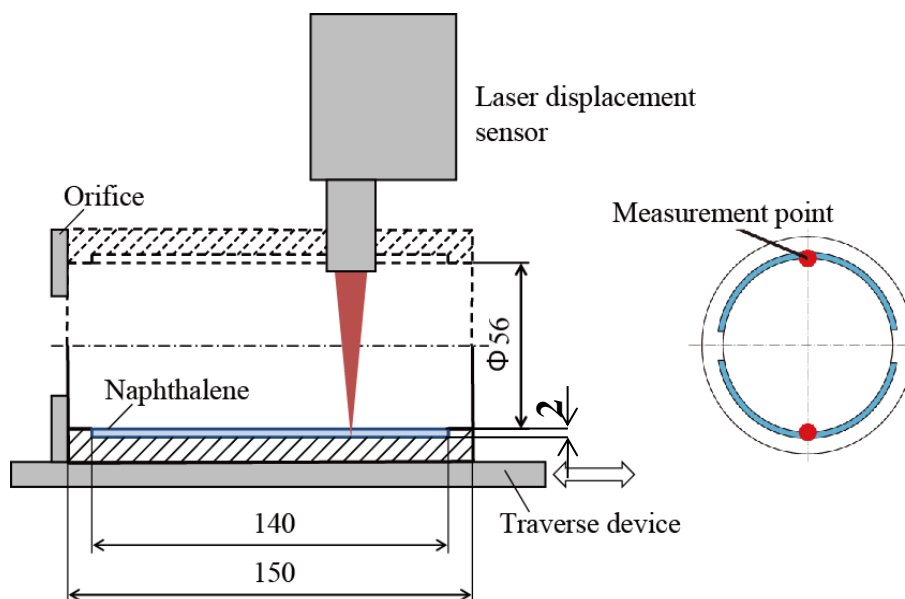


Fig. 2.3 試験区間の詳細 (Unit in mm)

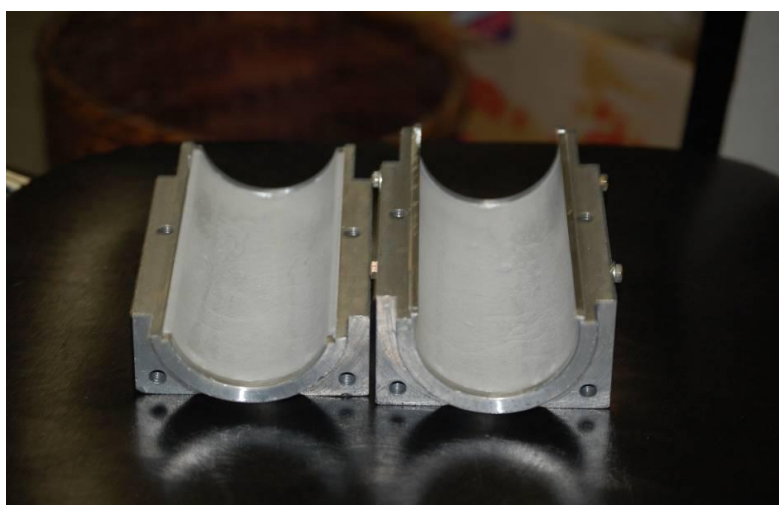


Fig. 2.4 試験区間の写真

2.2.3 ナフタリン昇華法の原理

本研究において用いたナフタリン昇華法とは、昇華性のあるナフタリンを空気流に晒し、その昇華量から物質移動係数を算出するものである。従来の研究では、物質輸送と熱輸送のアナロジから、熱伝達率の評価に用いられている⁽⁷⁾。ナフタリンは温度によって昇華量の性質が大きく変化する。ナフタリン昇華法で物質移動係数を算出する際の

一部に用いられる実験式は複数の過去の研究よりそれぞれ異なる式が提案されている。温度 ($T=288\sim 310[\text{K}]$)の間では、いずれを用いてもほぼ同じ様な結果となる。物質輸送現象は、流体中の濃度と表面の濃度を均一にしようとする拡散現象であるが、レイノルズ数が低い場合は単位時間当たりの物質輸送量が小さくなり、計測誤差の影響をより強く受けてしまう。一般的に $Re=1\times 10^4\sim 10^6$ の流れ場が本手法に適している。

2.2.4 物質輸送係数の算出

物質移動係数算出の手順を示す。まず、ナフタリンの壁面温度 $T_w[\text{K}]$ からナフタリンの飽和蒸気圧 $P_{v,w}[\text{Pa}]$ を算出する。飽和蒸気圧の実験式はいくつか報告されているが、本研究では以下に示す Ambrose の実験式(2-2)⁽¹¹⁾を用いた。Fig. 2.5 に、算出した飽和蒸気圧と壁面温度との関係を示した。

$$\log P_{v,w} = \frac{1}{T_w} \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^3 a_i E_i(x) \right) \quad (2-2)$$

$$a_0 = 301.6247; \quad a_1 = 791.4937; \quad a_2 = -8.2536; \quad a_3 = 0.4043;$$

$$x = \frac{(2T_w - 574)}{114}; \quad E_1(x) = x; \quad E_2(x) = 2x^2 - 1; \quad E_3(x) = 4x^3 - 3x;$$

次に、状態方程式よりナフタリン飽和蒸気密度 $\rho_{v,w}[\text{kg/m}^3]$ を求める。ただし、気体定数 $R=64.89\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ とした。Fig.2.6 に算出したナフタリン飽和蒸気密度と壁面温度の関係を示した。

$$\rho_{v,w} = \frac{P_{v,w}}{RT_w} \quad (2-3)$$

また、ナフタリンの昇華量と実験時間から単位時間当たりの昇華量 $\delta z/\delta t$ を求め、ナフタリン 2 体のナフタリン密度 $\rho_s=1175.0[\text{kg/m}^3]$ を用いて式(2-4)よりナフタリンの物質輸送係数 h_m を求める。

$$h_m = \frac{\rho_s \delta z / \delta t}{\rho_{v,w}} \quad (2-4)$$

次に、管内の空気流温度 T [K] からナフタリンの拡散係数 D_{naph} [m²/s] を以下の実験式 (2-5) から求める。

$$D_{naph} = 0.0681 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.93} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{atm}} \right) \times 10^{-4} \quad (2-5)$$

ただし、 P_{atm} [Pa] は大気圧である。Fig.2.7 は拡散係数と温度の関係を示している。

これらより、求めたナフタリンの輸送係数 h_m 、拡散係数 D_{naph} 、代表長さである管内直径 d [m] を用いて、物質輸送係数であるシャーウッド数 Sh を式 (2-6) によって求めた。

$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (2-6)$$

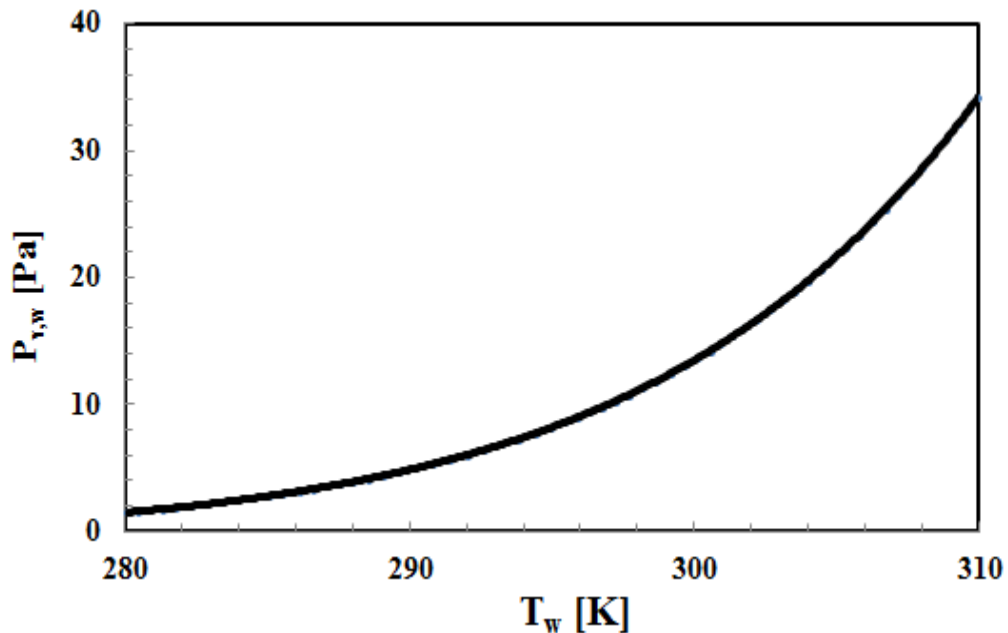


Fig.2.5 飽和蒸気圧と温度との関係 (作動流体: 空気)

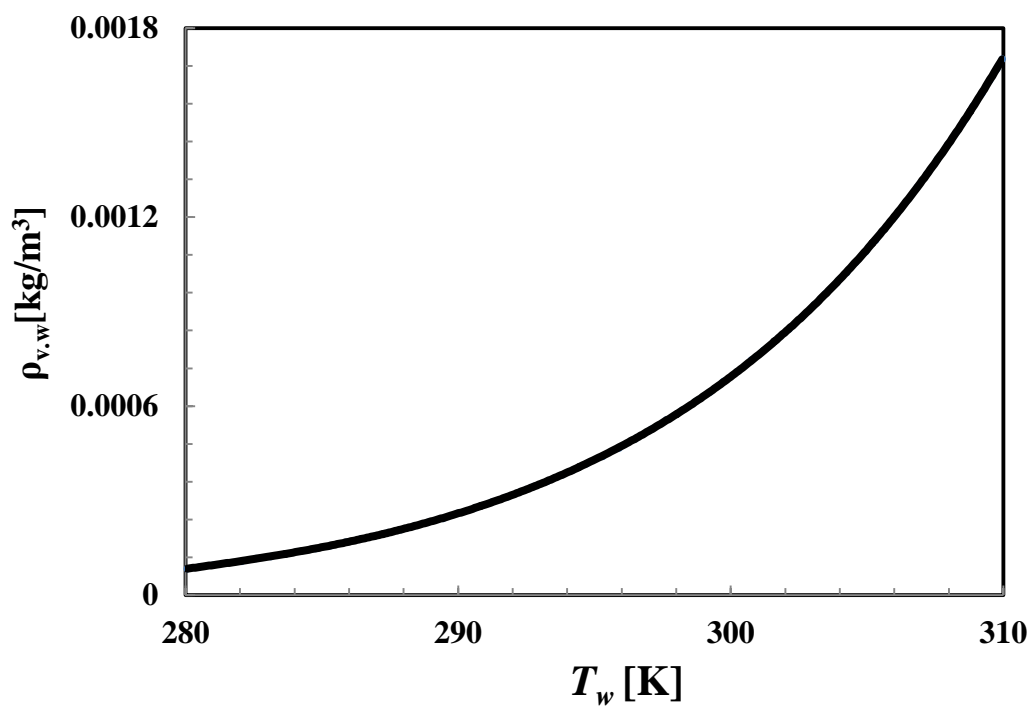


Fig.2.6 密度と温度の関係 (作動流体: 空気)

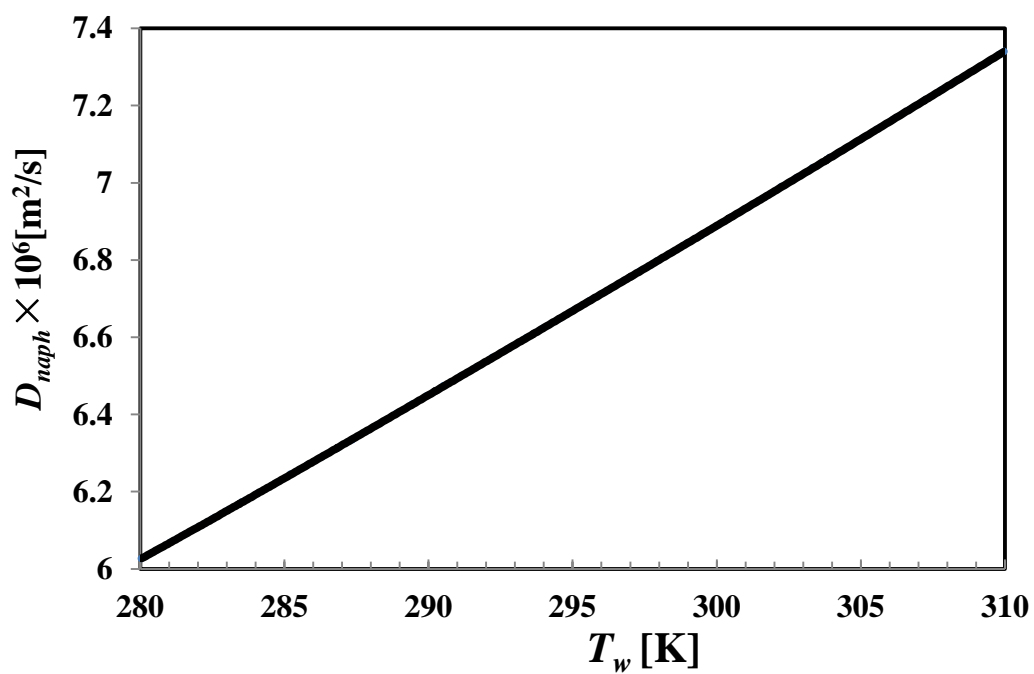


Fig.2.7 拡散係数と温度との関係 (作動流体: 空気)

2.3. 結果および考察

2.3.1. 旋回流の計測

スワラによって生成される旋回流の強さは、周方向運動量と管軸方向運動量の比であるスワール数 S で定義される⁽¹⁰⁾。

$$S = \frac{\int_0^R uv_{\theta} r^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr} \quad (2-7)$$

本実験のスワール数は、オリフィスなしの状態では位置 $x/d=1$ に5孔ピトー管を挿入し、3次元速度分布を計測することで評価した。ここに、5孔ピトー管の校正は、開放型風洞計測部の一様流中において、各孔の圧力と風向風速の関係を計測することで行った。なお、その校正方法としては、Wright⁽¹³⁾の方法を用いた。本実験結果によると、旋回流のスワール数は羽根角度 $\alpha=0^{\circ}, 15^{\circ}, 22.5^{\circ}, 30^{\circ}$ のスワラでは $S=0, 0.09, 0.16, 0.25$ であった。

Table.2.1 Relationship between plate angles α and swirl intensities S

α	0°	15°	22.5°	30°
S	0	0.09	0.16	0.25

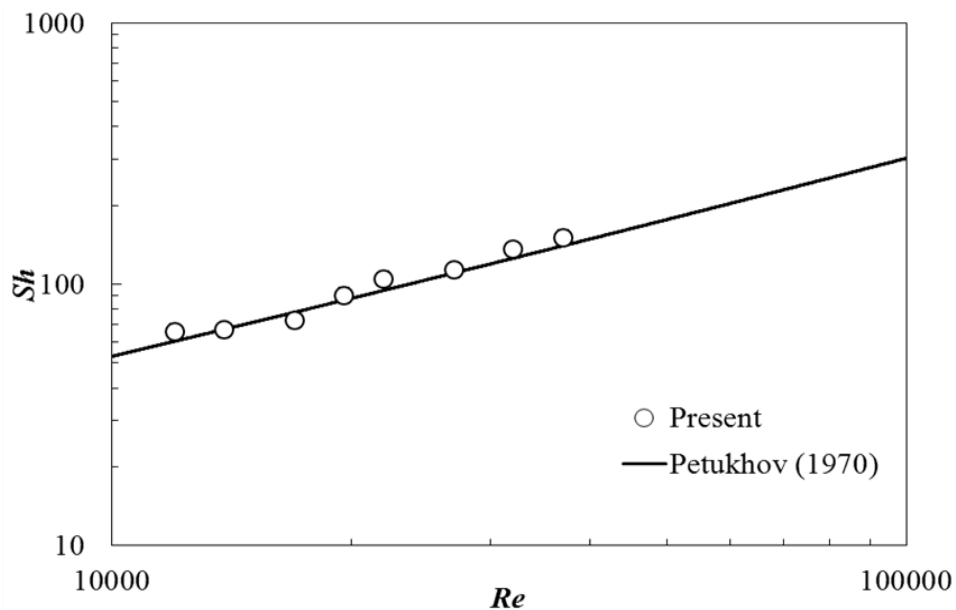


Fig.2.8 シャーウッド数と直円管のレイノルズ数

2.3.2. 円管の物質移動係数

旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果を実験的に評価する前に、予備実験として、オリフィスなしの直円管を用いた物質移動係数の計測を実施した。Fig.2.8 は、円管におけるシャーウッド数 Sh とレイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ (U :断面平均速度、 ν :動粘度)の関係である。本実験結果によると、過去の相関式⁽¹⁴⁾とデータのばらつきの範囲で一致することがわかる。このことは、本実験結果の健全性を示す。なお、この相関式は、円管内乱流における熱伝達の数値計算に基づく結果であるが、熱輸送と物質輸送の相似性を利用して比較に用いた。

2.3.3. オリフィス背後の物質輸送現象

Fig.2.9 は、オリフィス背後におけるシャーウッド数の下流方向分布である。横軸はオリフィスからの無次元距離 (x/d) である。ただし、旋回流なしの条件において、オリフィス偏心なし、正偏心、負偏心の場合について実験を行った。ただし、いずれの実験においても、実験はレイノルズ数 $Re=1.9\times 10^4$ で行った。本実験結果によると、オリフィス直後のシャーウッド数は小さいが、オリフィス背後の位置 $x/d=1\sim 1.5$ で最大値を示し、さらに下流側では緩やかに減少する分布傾向が見られる。このようなオリフィス背後におけるシャーウッド数の変化は、過去に報告された実機配管減肉分布⁽¹⁵⁾と定性的に一致する。このことは、配管減肉現象において物質輸送が支配的役割を演じていることを示唆する。また、本実験結果によると、オリフィス背後のシャーウッド数の最大値は 450 程度であるが、これは同一レイノルズ数の円管の結果と比較して 4~5 倍程度物質輸送が増大することを示す。なお、この値は、直円管に対するオリフィスの配管減肉量であるケラー係数 ($K=3.8$) とほぼ一致する⁽¹⁶⁾。図には、オリフィスが上偏心ならびに下偏心の場合の実験結果も示したが、これらの結果は、オリフィス偏心なしの結果と計測精度の範囲で一致している。したがって、旋回流なしの条件下では、オリフィス偏心の効果はほとんど現れない。

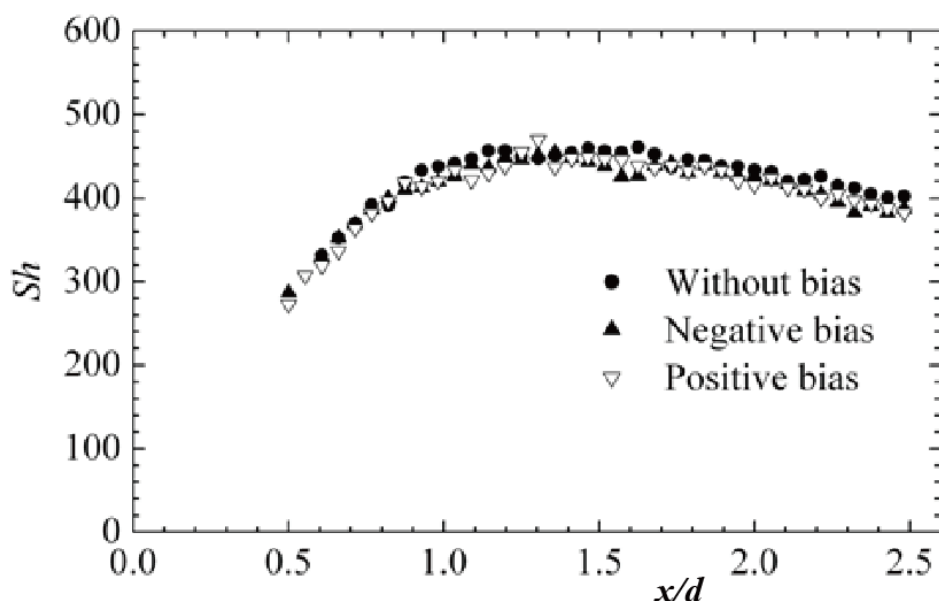


Fig.2.9 旋回無のオリフィス背後のシャーウッド数

2.3.4. 旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果

Fig.2.10(a),(b)は、旋回流が存在する場合において、オリフィス背後のシャーウッド数分布を計測した結果である。ただし、旋回流強度の小さい場合 ($S=0.09$, Fig.2.10(a)) と大きい場合 ($S=0.25$, Fig.2.10(b)) についての実験結果を示した。

旋回流強度の小さい場合 (Fig.2.10(a)) の結果を見ると、オリフィス背後のシャーウッド数分布は旋回流のない場合と実験誤差の範囲ではほぼ一致しており、オリフィス偏心の影響は見られないといえる。

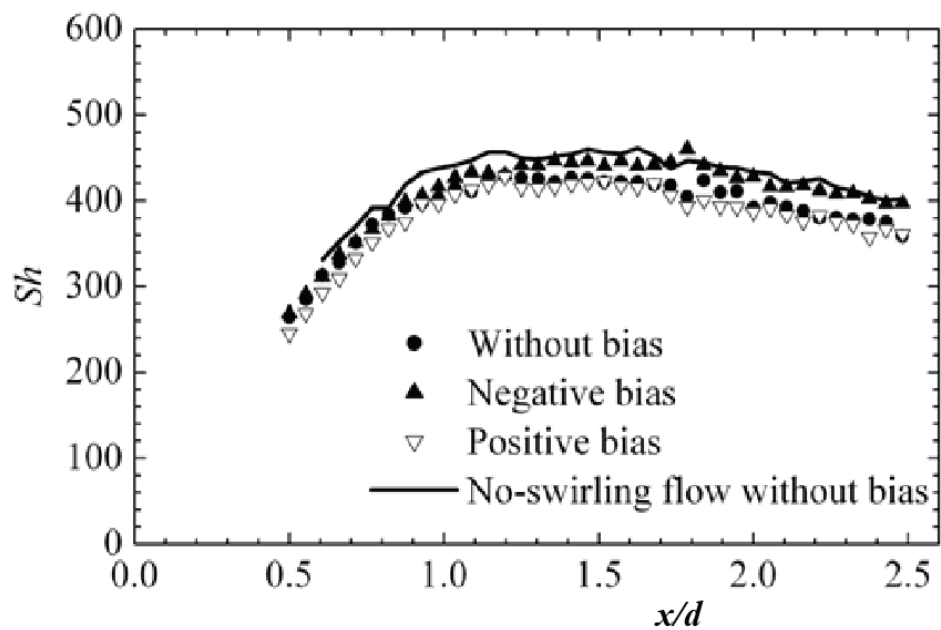
一方、旋回流強度の大きい場合の結果 (Fig.2.10(b)) を見ると、オリフィス偏心の影響によって、シャーウッド数分布がかなり大きく変化する様子が認められる。すなわち、正偏心側ではシャーウッド数は増加し、負偏心側では減少する様子が見られる。したがって、オリフィスの偏心によって、オリフィス高さの減少側壁面では物質輸送は増大し、反対に、増大側の壁面では物質輸送が減少することを示唆する。また、シャーウッド数分布形状に着目すると、オリフィス偏心の影響は $x/d=0.5 \sim 1.5$ の領域において顕著に認められる。特に、オリフィス高さの減少側壁面では、シャーウッド数のピークは上流側 ($x/d=0.8$ 付近)

に移動することが注目される。以上のように、強い旋回流が発生すると、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって、オリフィスの正偏心側とその反対の負偏心側では物質輸送量にかなりの差が生じ、配管内には偏った減肉が発生することになる。

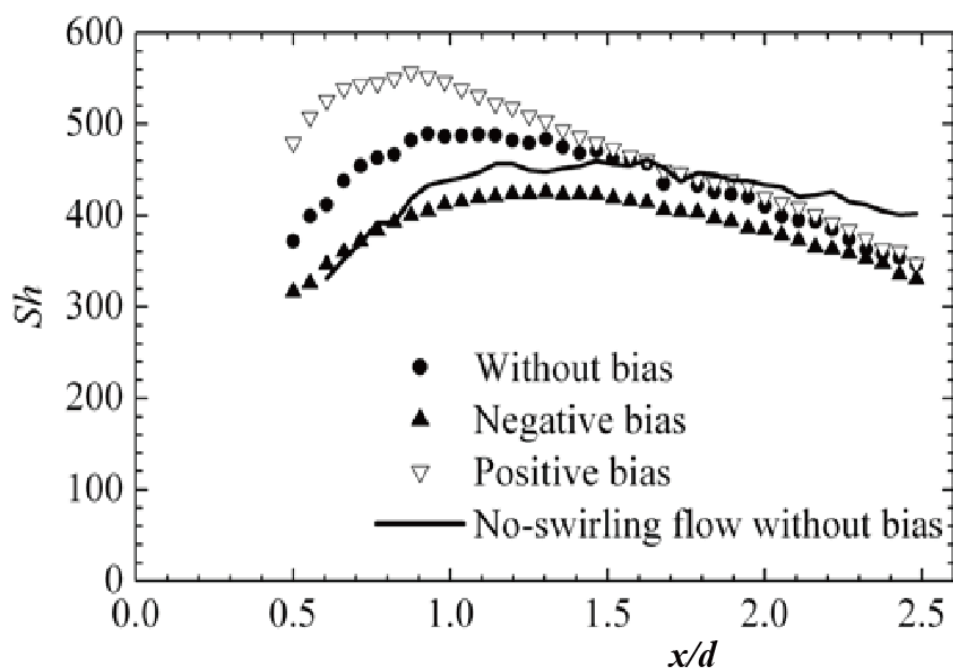
Fig.2.10(a), (b)には、比較のため、旋回流なし（偏心なし）のシャーウッド数分布（Fig.2.9）を実線にて示した。この結果と弱い旋回流（偏心なし、Fig.2.10(a)）の結果はデータのばらつきの範囲で一致する。しかしながら、強い旋回流（偏心なし、Fig.2.10(b)）ではオリフィス背後（ $x/d = 1$ 付近）でシャーウッド数分布に増大効果が認められる。これは、強い旋回流の発生によって、オリフィス背後のはく離流領域が上流側へ移動し乱流強度が増大するため⁽⁸⁾、物質移動係数分布に同様の変化をもたらしたと考えられる。

旋回強度と偏心の関係を詳細に知るために、旋回強度と偏心の組み合わせを Fig.2.11～Fig.2.14 に詳細に示す。Fig.2.11 は、旋回強度を4段階（ $S=0$, $S=0.09$, $S=0.16$, $S=0.25$ ）と偏心±3段階の組合せについてのオリフィス背後におけるシャーウッド数の下流方向分布である。偏心については、正偏心側（Positive bias）での偏心量を（ $\varepsilon=0.4\%$, 0.8% , 1.2% ）で示してある。負偏心側（Negative bias）での偏心量も（ $\varepsilon=0.4\%$, 0.8% , 1.2% ）で示してある。また、同心オリフィスのデータを実線で示してある。旋回流強度の無い場合（ $S=0$, Fig.2.11(a)）小さい場合（ $S=0.09$, Fig.2.11(b)）,（ $S=0.16$, Fig.2.11(c)）と大きい場合（ $S=0.25$, Fig.2.11(d)）について、4段階の旋回強度の異なる実験結果を示す。

Fig.2.11(a) は、旋回強度 $S=0$, 正偏心側の値も負偏心側の値も偏心の無い同心オリフィスの値よりも少しばかり大きい値を示している。シャーウッド数の最大値は $x/d = 1.5$ 付近である。Fig.2.11(b) は、旋回強度 $S=0.09$ は、旋回強度が弱く、旋回の無い Fig.2.11(a) とほぼ同じ物質輸送係数分布を示している。シャーウッド数の最大値は $x/d=1.3$ 付近である。Fig.2.11(c) は、旋回強度 $S=0.16$, 旋回強度が少し強く、正偏心側（Positive bias）の値と負偏心側（Negative bias）の値が同心オリフィス実験値（concentric orifice）を境に分離する傾向が見え始めている。



(a) 弱い旋回流 ($S = 0.09$)



(b) 強い旋回流 ($S = 0.25$)

Fig.2.10 旋回流とオリフィス背後のシャード数分布

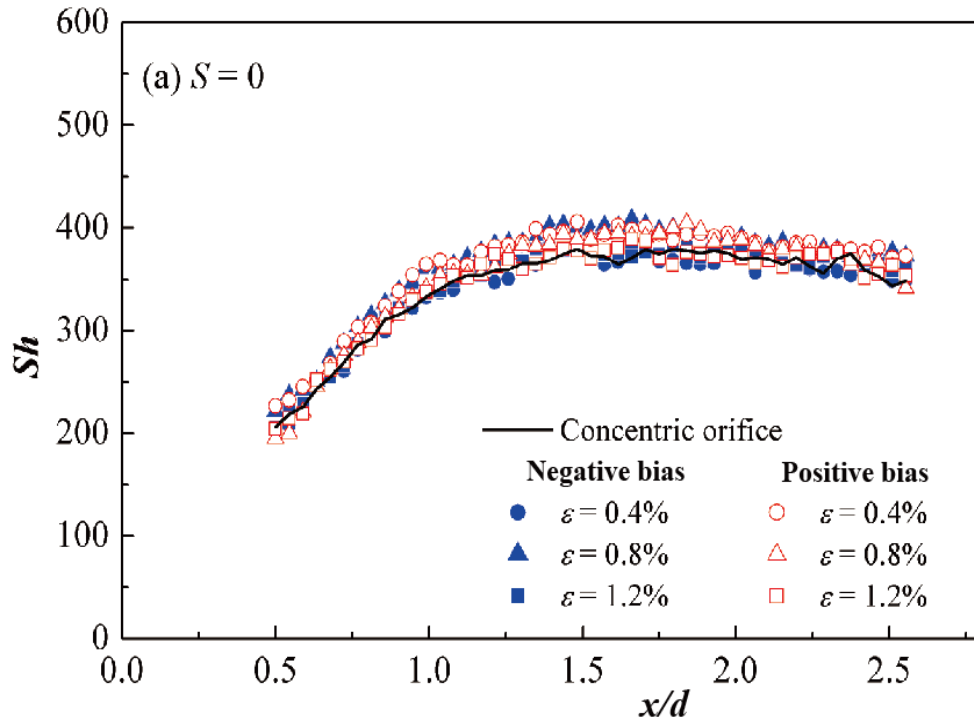


Fig.2.11 旋回流の無いバイアスオリフィス後方のシャーウッド数分布
($Re = 1.9 \times 10^4$): (a) $S = 0$

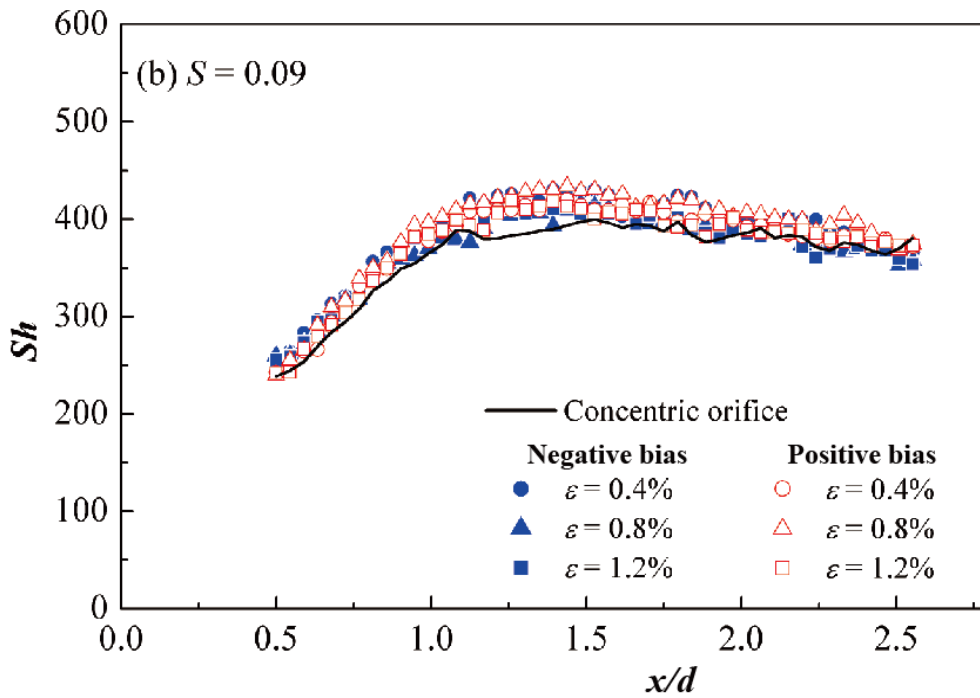


Fig.2.11 旋回流のあるバイアスオリフィス後方のシャーウッド数分布
($Re = 1.9 \times 10^4$): (b) $S = 0.09$

シャード数の最大値は $x/d=1.1$ 付近である。Fig.2.11(d) は、旋回強度 $S=0.25$ 、旋回強度が最も強く、正偏心側 (Positive bias) の値と負偏心側 (Negative bias) の値が同心オリフィス実験値 (concentric orifice) を境に分離し、正偏心側 (Positive bias) の偏心量の大きいものから小さいものへと順に段階を追って、変化している。同様に、負偏心側の値も偏心量により物質輸送が変化している。シャード数の最大値は $x/d=1.0$ 付近である。以上のように旋回強度が強くなるにつれてシャード数の最大値は流れの上流側に移行してゆく傾向がみられる。

2.3.5. 旋回強度とオリフィス偏心の相互関係

Fig.2.12(a) Positive bias と Fig.2.12 (b) Negative bias の相関カラーマップからは、旋回強度 ($S=0.25$) が大きくかつオリフィスの偏心量 ($\varepsilon=0.8\%$, 1.2%) が大きい場合においてのみ、最大シャード数が存在することになる。最大シャード数は最大旋回強度 S と最大バイアス ε で決まることが読み取れる。旋回強度 ($S=0.25$) とオリフィス偏心量 ($\varepsilon=0.8\%$) の組合せにおいても最大シャード数が存在することは、標準パイプライン (JIS3456) の直径誤差範囲にあり、非軸対称配管減肉の発生にとって大変重要である。その結果、オリフィス後方におけるパイプの非軸対称配管減肉を回避するには、何らかの方法で旋回強度をコントロールしなければならないことを意味する。

2.3.6. 物質輸送現象と流れ場の相関

Fig.2.13 (a), (b), (c) は、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって発生する流れ場と物質輸送量の変化を模式的に示した結果である。旋回流とオリフィス偏心のいずれも存在しない場合 (Fig.2.13(a)) には、オリフィス背後に軸対称な流れが形成され、シャード数分布は $x/d=1\sim 1.5$ 付近で最大となる。この位置は、オリフィス背後の再付着位置 $x/d=2\sim 2.5$ より上流側になる。一方、旋回流が発生すると (Fig.2.13(b)) は、旋回流の効果によってオリフィス背後のはく離領域は縮小するため、流れ場の軸対称性は保たれたままで再付着点は上流側

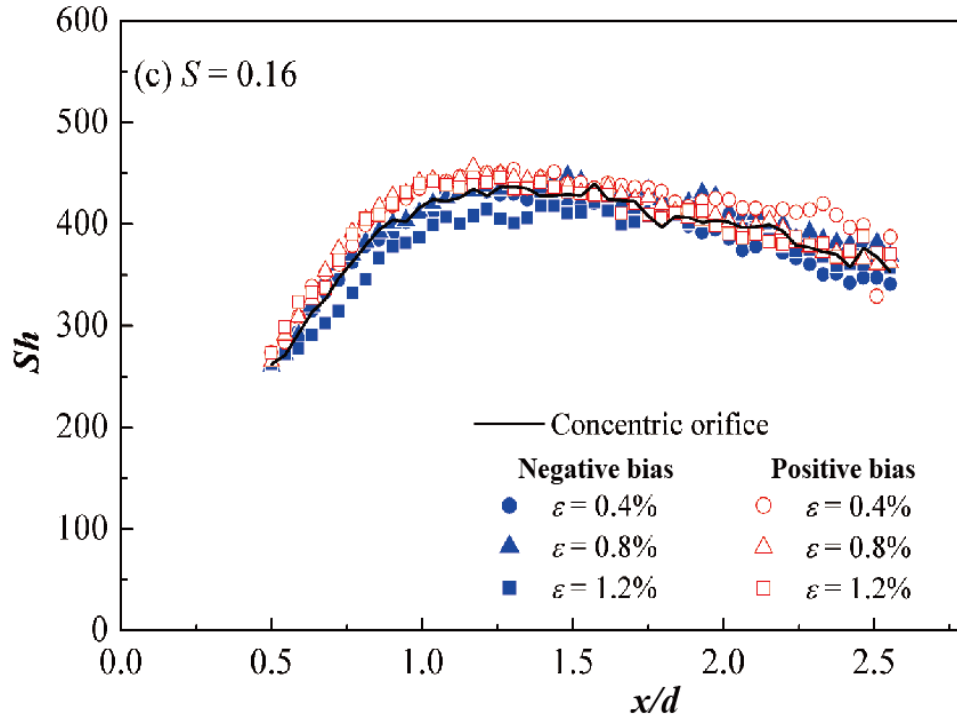


Fig.2.11 旋回流のあるバイアスオリフィス後方のシャーウッド数分布 ($Re = 1.9 \times 10^4$): (c) $S = 0.16$

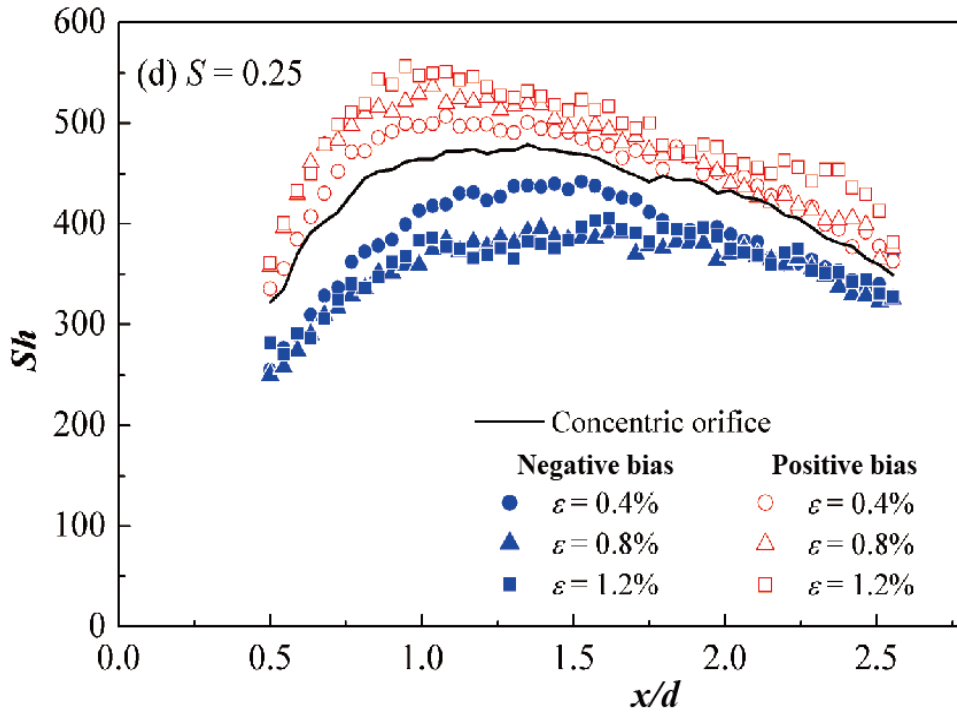
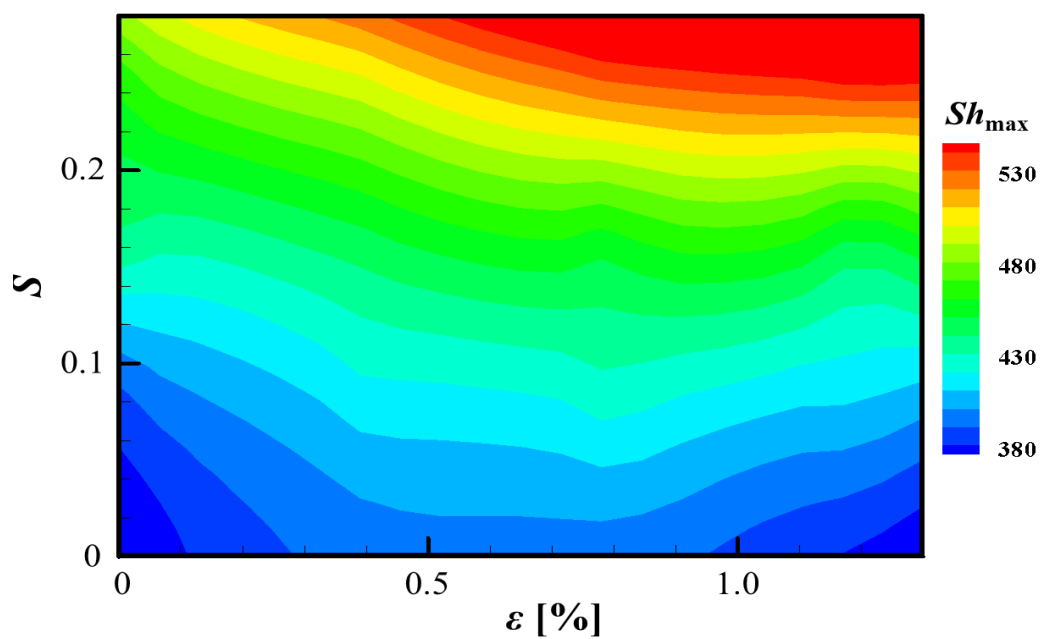
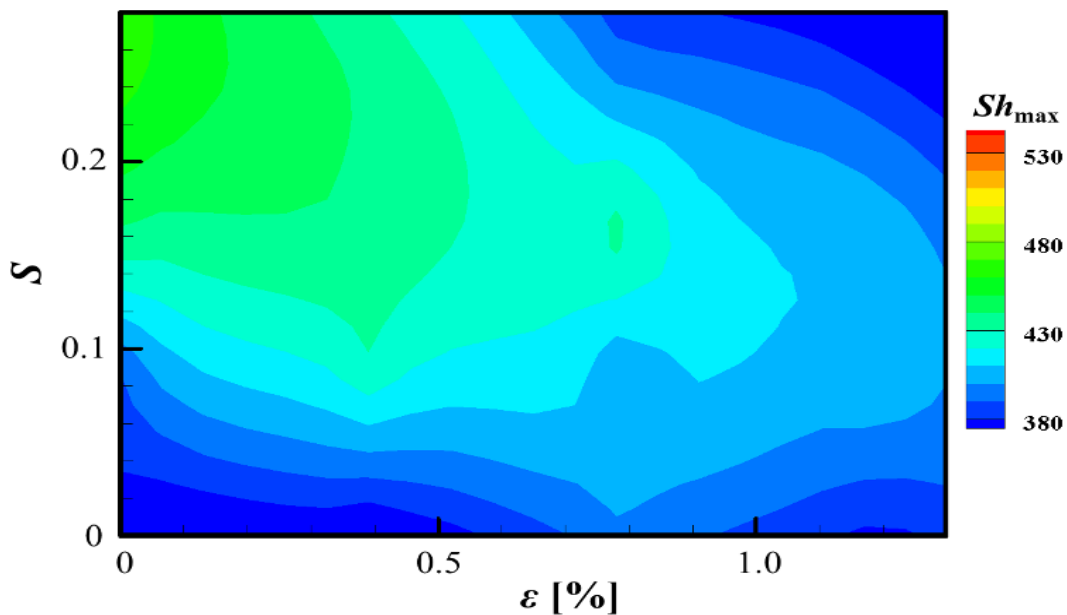


Fig.2.11 旋回流のあるバイアスオリフィス後方のシャーウッド数分布 ($Re = 1.9 \times 10^4$): (d) $S = 0.25$



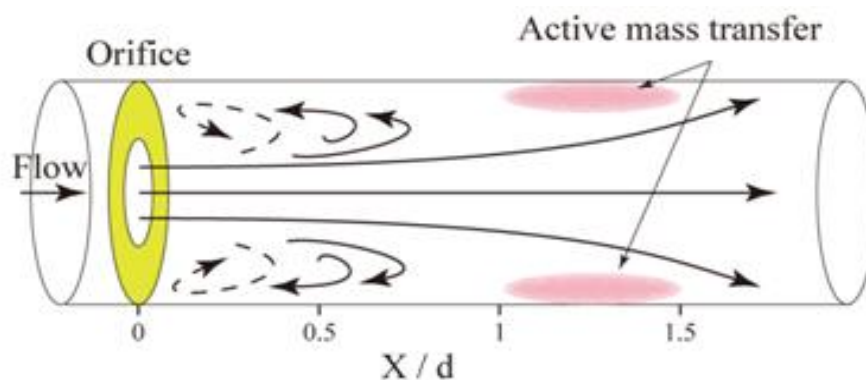
(a) Positive bias

Fig.2.12 旋回強度 S とバイアス ε の関係

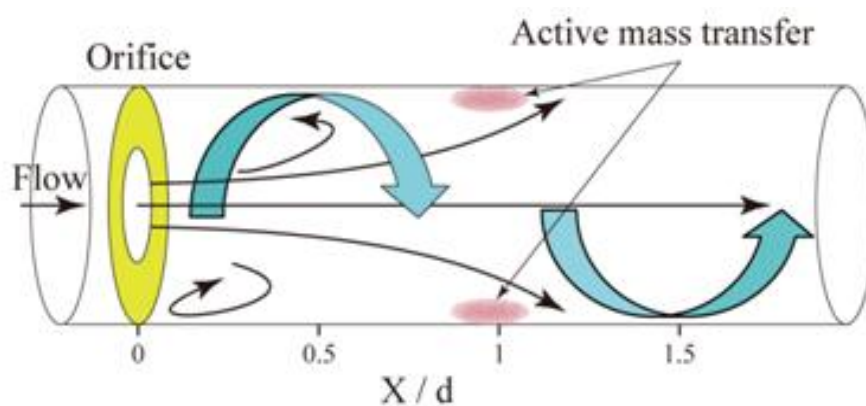


(b) Negative bias

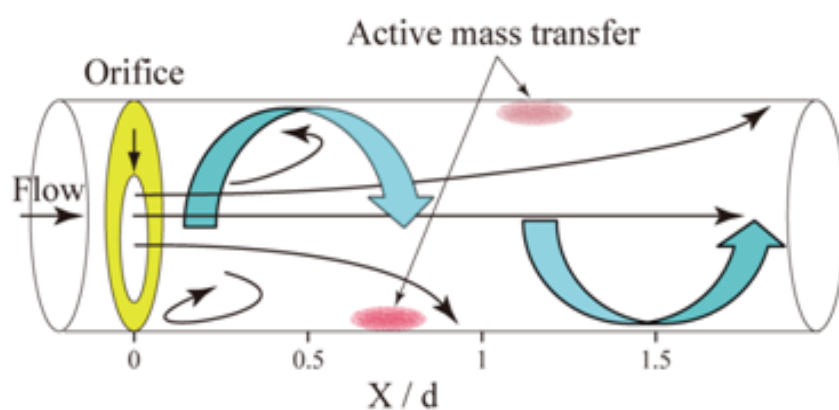
Fig.2.12 旋回強度 S とバイアス ε の関係



(a) Concentric orifice without swirling flow



(b) Concentric orifice with swirling flow



(c) Eccentric orifice with swirling flow

Fig.2.13 旋回流および旋回流のないオリフィス後方の流れ
および物質移動の略図

へ移動する。さらに、この旋回流にオリフィス偏心が加わると (Fig.2.13(c)) 旋回流の効果によるはく離領域の縮小効果に加えてオリフィス偏心による効果が重なるため、流れ場に非軸対称性が発生する。すなわち、旋回流の効果によってオリフィスの正偏心側であるオリフィス高さの減少側に向かう偏流が強く認められる。このとき、偏流の付着側の壁面では物質輸送現象は強まり、その最大となる位置は上流側 $x/d=0.8$ 付近へ移動する。他方、オリフィスの負偏心側の壁面では、偏流は弱められるため再付着位置は下流側へ移動する。このため、上側壁面では物質輸送現象は弱まり、また、その最大となる位置はより下流側寄りに移動する。したがって、オリフィス背後の速度場と物質輸送現象の間には強い相関が認められるといえる。以上のように、オリフィス背後の配管部位では、強い旋回流が予期される場合には、オリフィス偏心との組み合わせ効果によって、偏流が発生するため、一方の壁面側に強い物質輸送現象が発生する可能性があるため、注意を要する。

2.4. 結言

オリフィス背後における配管減肉現象のメカニズムの解明を目的とし、ナフタリン昇華法を用いた風洞実験によって物質移動係数分布の評価を行った。ここでは、特に、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による物質輸送現象の変化について考察した。

本研究で行った実験条件の範囲では、弱い旋回流 ($S=0.09$) では、オリフィス偏心の影響はあまり顕著には認められないが、強い旋回流 ($S=0.25$) では、わずかなオリフィス偏心によってもオリフィス背後の物質移動係数分布は強い非対称性を示した。このとき、オリフィスの正偏心側の壁面では物質輸送は増大し、反対側では減少する。このような物質輸送の増大と減少は、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって実機配管内に偏った減肉分布が発生する一つの可能性を示唆する⁽¹⁷⁾。

参考文献

- (1) 日本機械学会，発電用設備規格，配管減肉管理に関する規格 (2005)，JSME S CA1-2005, 2005, pp. 13-47,
- (2) 日本機械学会，配管減肉管理改善に向けた基盤技術研究分科会成果報告書，日本機械学会，P-SCCII-2, 6-12, 2009, pp. 113-117.
- (3) 米田公俊，森田良，配管減肉現象に関わる流動特性の解明（その1），単相流中のオリフィス下流域の乱流特性，電力中央研究所報告，L05007, 2006.
- (4) 中村晶，村瀬道雄，歌野原陽一，長屋行則，流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響，研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測，INSS Journal, 15, 2008, pp. 78-87.
- (5) 米田公俊，森田良，佐竹正哲，藤原和俊，流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価（その3），減肉予測モデルの提案，電力中央研究所報告，L08016, 2009.
- (6) T. Sydberger, and U. Lotz, Relation between mass transfer and corrosion in a turbulent pipe flow, Journal of Electrochemical Society, 129[2], 1982, pp. 276-283.
- (7) N. Fujisawa, and H. Yamamoto, Occurrence of asymmetric flow pattern behind a double orifice in a square pipe, J. Visualization, 12, 2009, pp. 93-94.
- (8) N. Fujisawa, H. Yamamoto, T. Syutoh, and T. Yamagata, Investigation on flow accelerated corrosion behind an orifice in a duct through simultaneous temperature and velocity measurements using combined two-color LIF and PIV, Proc. 8th Int. Symp. PIV, PIV09-0042, 2009.
- (9) 大久保雅一，山縣貴幸，菅野翔，藤澤延行，流れ加速型腐食による配管減肉に関する研究（旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による非対称流の発生），日本機械学会論文集（B），77, 2011, pp. 386-394.
- (10) 青木克己，中山泰喜，岩槻光昭和，旋回流を伴う円筒形燃焼機内流れの研究（第1報，スワール数に対する流動特性），日本機械学会論文集（B），51, 1985, pp. 2759-2766.
- (11) D. Ambrose, I. J. Lawrenson, and C. H. S. Sparke, The vapor pressure of naphthalene, Journal of Chemical Thermodynamics, 7, 1975, pp. 1173-1176.
- (12) R. J. Goldstein, and H. H. Cho, A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, Experimental Thermal

- and Fluid Science, 10, 1995, pp. 416-434.
- (13) M. A. Wright, The evaluation of a simplified form of presentation for 5 hole spherical and hemispherical pitometer calibration data, Journal of Physics E, Scientific Instruments, 3[5], 1970, pp. 356-362.
 - (14) B. S. Petukhov, Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties, Advances in Heat Transfer, 6, 1970, pp. 503-564.
 - (15) 経済産業省, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 美浜発電所 3 号機 2 次系配管破損事故調査委員会, 2004, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/g40906aj.html>
 - (16) H. Keller, Erosions corrosion an Nassdampf-turbien, VGB-Kraftwerkstechnik, 54[5], 1974, pp. 292.
 - (17) N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Kanno, A. Ito, T. Takano, The mechanism of asymmetric pipe-wall thinning behind an orifice by combined effect of swirling flow and orifice bias, Nuclear Engineering and Design, 252, 2012, pp. 19-26.

第3章 エルボ・オリフィスの組合せによる 配管減肉の非軸対称性

記号の説明

C_b	: 安息香酸の流体中の濃度 [g/m ³]
C_e	: 安息香酸の飽和溶解度濃度 [g/m ³]
C_w	: 安息香酸の壁面での濃度 [kg/m ³]
D	: 安息香酸拡散係数 [m ² /s]
D_i	: 拡散係数 [m ² /s]
D_{naph}	: ナフタリンの拡散係数 [m ² /s]
D_{rate}	: 溶解率 [g/(m ² ・min)]
d	: 円管内径 [m]
d_o	: オリフィスの穴径 [m]
K	: 安息香酸の物質移動係数 [m/s]
K_0	: 直円管流の物質移動係数 [m/s]
K/K_0	: 形状係数 [-]
pH	: 水素イオン指数
R	: ナフタリン気体定数 [R=64.89 J/(mol K)]
Re	: レイノルズ数 [= Ud/ν]
r	: 中心からの距離 [m]
S	: スワール数 [-]
S_c	: シュミット数 [-]
Sh	: シャーウッド数 [-]
T	: 絶対温度 [K]
T	: 温度 [°C]
t	: 時間 [sec]
U	: 断面平均速度 [m/s]
α	: スワール羽根角度 [°]
ϕ	: デカルト座標角度 [°]
ν	: 流体の動粘度 [m ² /s]
ρ	: 安息香酸の密度 [kg/m ³]
$\delta z/\delta t$: 単位時間当たりの減肉量 [m/s]

3.1. 緒言

発電プラントの各種配管における減肉量予測技術の高精度化は、プラントの安全性確保、長寿命化および点検管理作業の効率化のために必要不可欠な課題である。2004年に発生した美浜原子力発電所3号機での配管破裂破断事故においては、オリフィス下流の $1\sim 2d$ (d :配管内径)において強い配管減肉が観察された⁽¹⁾。なお、オリフィス(絞り比 $d_o/d=0.6$)背後における再付着点位置は $2.5d$ と予測されており、最大の配管減肉ははく離領域で発生したと考えられる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。オリフィス背後の速度場に関して LDA や PIV⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いた研究が行われており、流れの乱流特性や旋回流の効果などが検討されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかしながら、速度場に関する研究だけでは、実際のプラントにおける配管減肉のメカニズムを解明することは困難である。

配管減肉現象を作動流体中へ鉄イオンが溶解する拡散現象と考えると、減肉速度は物質移動係数により決定することができる⁽¹⁵⁾。これまでにステンレスの減肉速度の計測がいくつか行われている⁽¹⁶⁾。また、電気化学的方法は⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、化学溶液中で不活性な電極で電気抵抗を計測する方法であり、ナフタリン昇華法⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾は空気中に晒して、ナフタリンの単位時間当たりの昇華量から物質移動係数を求める方法である。しかし、両手法により計測された物質移動係数には大きな差異が見られる。これは、物質輸送に関係する無次元数であるシュミット数 $S_c=v/D$ (v :動粘度, D :拡散係数) やレイノルズ数 $Re=Ud/v$ (U :平均流速, d :配管内径) の影響と推定される。ここで、各手法のシュミット数は電気化学的手法が $S_c=1.46\times 10^3$ ナフタリン昇華法が $S_c=2.29$ 程度である。一方、実機配管におけるシュミット数は、高温であることから数 100 程度と予想されており、既存の実験方法では十分に実機条件を模擬できていないのが実情である。

本研究では、FAC⁽²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾による配管減肉の発生メカニズム⁽³⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を理解する上で重要な物質輸送現象を詳細に評価するため、安息香酸を用いて⁽²²⁾、水温 50℃で実験を行った場合には、物質輸送に関係する無次元数であるシュミット数は $S_c=305$ となり、実機により近い物

質輸送に関わるシュミット数を得ることができる。以上のことから安息香酸を用いた評価法を提案し、実機に近いシュミット数条件において円管内オリフィス背後の物質移動係数の計測を行う。

3.2. 安息香酸を用いた物質輸送

3.2.1 物質輸送係数の計測方法

物質輸送係数の計測方法には、表.3.1 物質移動係数計測法の比較に記述したように、ナフタリン⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾・電気分解⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾・安息香酸⁽²²⁾などを使用した計測法がある。

ナフタリンは媒体が空気であることとナフタリンそのものが、防虫剤の一種であることから空気に拡散したナフタリンは、毒性の高い臭気性の性質を持っているので取扱いには、十分注意が必要である。

電気化学的手法は、化学溶液中で限界電流密度拡散を制御された電気化学反応の限界電流密度を不活性な電極で電気抵抗を計測する方法である。オリフィス下流の流動場に23箇所作用極(直径1mm程度の金電極)などが使用される⁽¹⁸⁾。計測電極の如何なる汚れも誤った結果に繋がる可能性があるため十分な注意が必要とされる。

安息香酸を使用する物質輸送係数の計測方法は⁽²²⁾、円筒形状の試験区間を半割にした壁面に安息香酸を溶かして、中子(外径51.4mm、長さ250.0mm)に湯道を通して安息香酸を鑄込み中子表面の粗さで試験区間が作られる。内径51.4mm 厚さ $t=3.0\text{mm}$ 長さ200mm(前後5mm基準面)の安息香酸の試験区間を作成し、安息香酸の内表面を1000番の紙やすりで仕上げた試験区間を実験前と実験後に計測することによって、単位時間当たりの減肉量を求める。実験条件は、水温50℃の水道水を用いて実機に近いシュミット数 $S_c=305$ である。

安息香酸の拡散係数は、Fig.3.1のように安息香酸の拡散係数と水の動粘性係数の温度との関係で示す。Fig.3.2はシュミット数と温度の関係、Fig.3.3は安息香酸の溶解度と温度の関係、Fig.3.4は安息香酸の濃度と溶解率の関係などについて、実験で得られた結果をグラフで示す。

表.3.1 物質移動係数計測法の比較

種類	作動流体	計測法	拡散係数	シュミット数
ナフタリン	空気	固液界面での個体の溶解率ナフタリンの拡散係数補正式・温度圧力補正 $D=D_n \times (T/273.15)^2 \times 101325/P$ $D=6.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ となる。 実験時間 50 分、 減肉量 100～300(μmm)	$D_n=5.13 \text{ mm}^2/\text{s}$ $(=5.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ 0℃	$S_c=2.29$ 25℃
電気分解	化学溶液	限界電流密度拡散を制御された電気化学反応の限界電流密度を不活性な電極で計測する。 物質輸送計測に使われる酸化還元系はヘキサシアノ鉄酸塩、ヨウ化物・ヨウ素、第二銅イオンシステムである。計測電極の如何なる汚れも誤った結果になる可能性がある。 実験装置・実験が精密で高い精度を必要とする。定量的結果が得られる。	$D=6.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ $(=6.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec})$	$S_c=1460$ 25℃
安息香酸	水道水	固液界面での溶解率 $S_c=305(50^\circ\text{C})$ における拡散係数が大きい ため、水温管理・実験時間・減肉量の計測などについて、十分に管理した実験が必要である。高い精度の物質移動係数の計測が可能である。実験時間は 10～30 分程度であった。	$D=18.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$S_c=305$ 50℃
		固液界面での溶解率 $S_c=705(30^\circ\text{C})$ の実験は水温管理・実験時間・減肉量の計測精度など管理した実験を必要とする。高い精度の物質移動係数の計測が可能である。実験時間は 10～40 分程度であった。	$D=11.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$S_c=705$ 30℃
			$D=9.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$S_c=894$ 25℃

3.2.2. 実験装置

Fig.3.5 は、直円管物質移動係数計測用の実験装置の模式図である。装置は、ポンプ、タンク、流量計、計測部により構成されており、インバータおよび計測部後方に設置されたバルブにより流量を調節する。オリフィスの絞り比は美浜原子力発電所 3 号機の配管破損事故該当箇所と同様に 0.6 とした。Fig.3.6 は、実機と同様に流れに旋回を与える

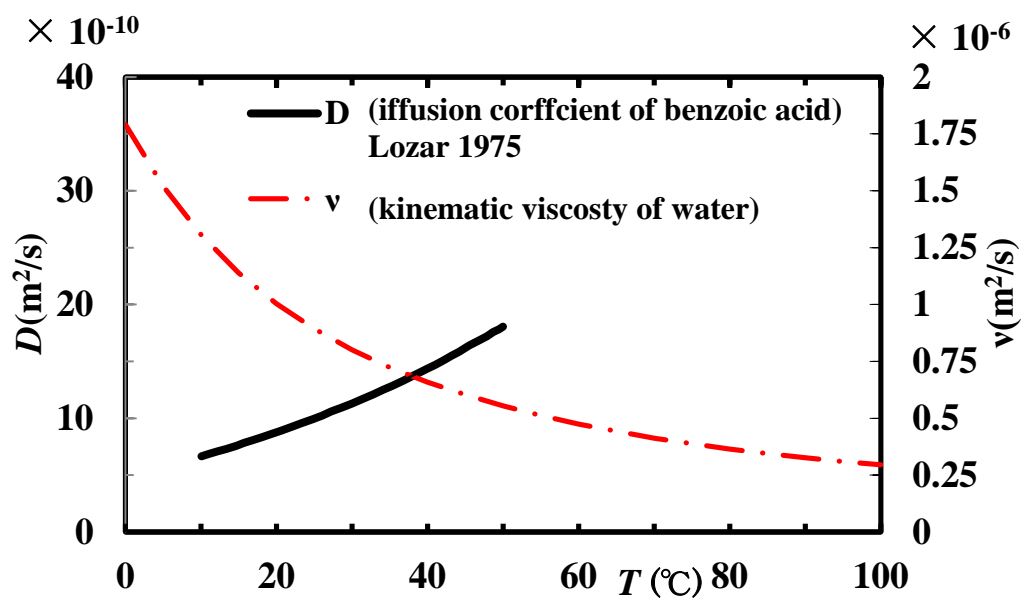


Fig.3.1 安息香酸の拡散係数と水の動粘性係数の温度との関係⁽²²⁾

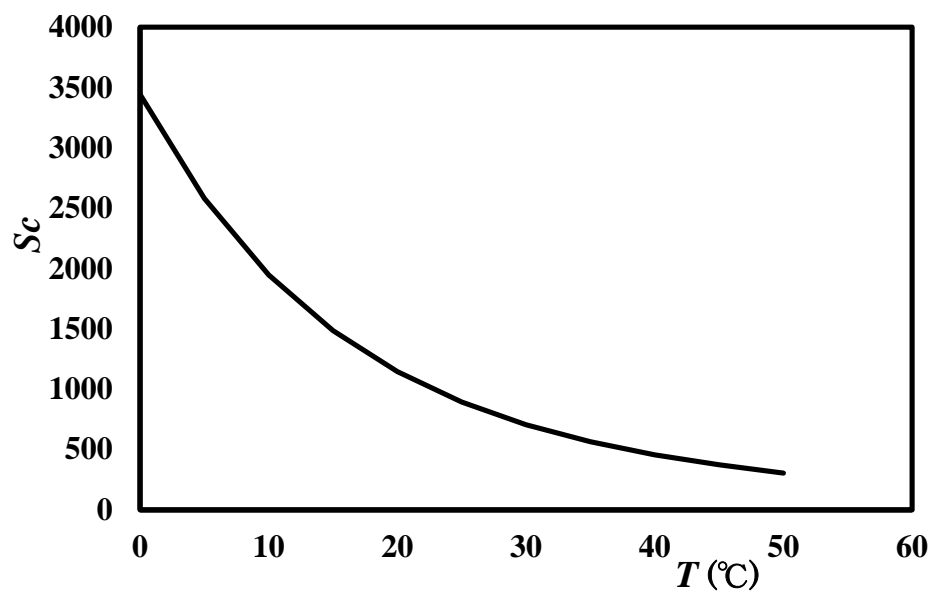


Fig.3.2 シュミット数と温度の関係⁽²²⁾

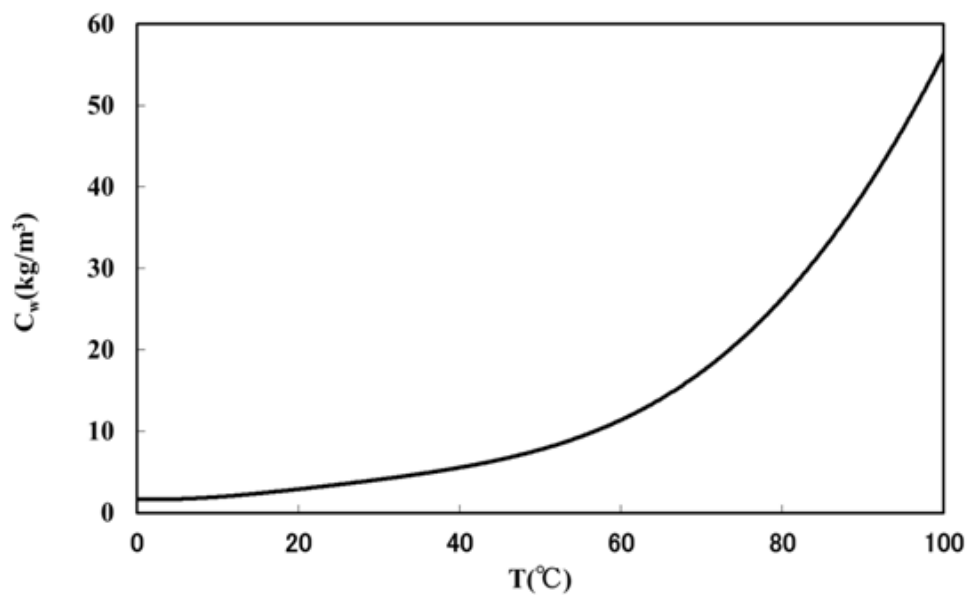


Fig.3.3 安息香酸の溶解度と温度の関係

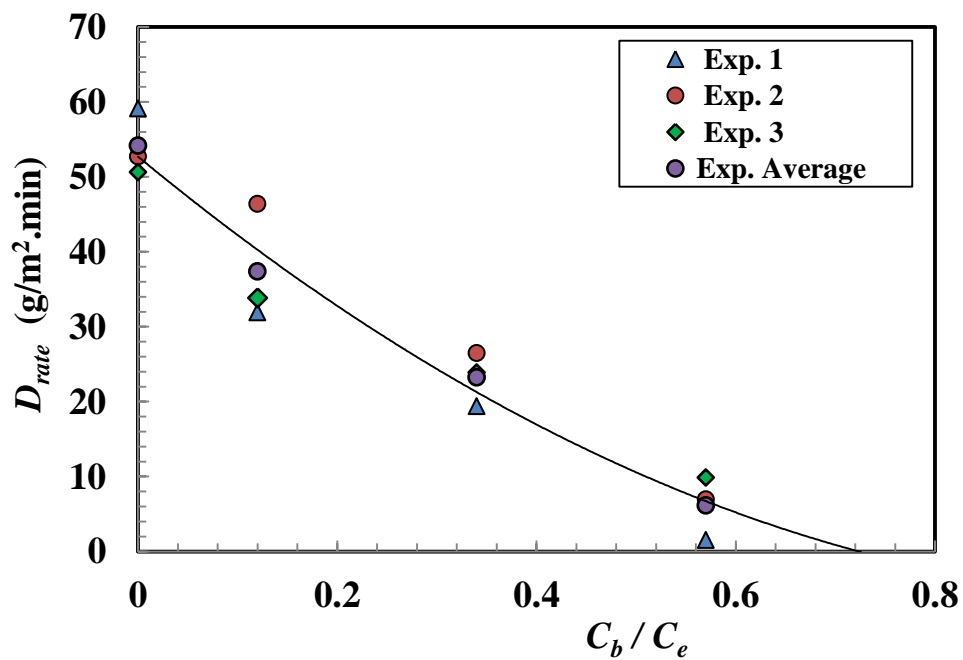


Fig.3.4 安息香酸の濃度と溶解率の関係

ための旋回流発生装置(スワラ)である。内径は円管の内径は $d=51.4$ mm であり、6枚の羽根は半田づけで 60° 間隔に配置され、流れに対する角度は $\alpha=45^\circ$ ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$) に保持されるように溝が掘られ羽根がその溝に入り角度の誤差が生じない構造になっている。旋回強度は、流れ場の PIV(Particle Image Velocimetry) で計測し速度比から軸方向と周方向の運動量の比で表され、スワール数 S で表せる⁽²³⁾。

$$S = \frac{G_\theta}{G_z \cdot R} = \frac{\int_0^R u V_{th} r^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr} \quad (3-1)$$

オリフィス背後の物質移動量の計測には安息香酸を用いた。安息香酸は水に可溶であり、温度により拡散係数が変化するためシュミット数を変えた実験が可能である。本実験では、シュミット数 $S_c=305$ (50°C) で実験を行った。レイノルズ数は $Re=3 \times 10^4$ の条件で実験を行い、管内平均流速は $U=0.32\text{m/s}$ とした。

計測部の詳細および計測方法を Fig.3.7 に示す。オリフィス背後の計測部はアルミニウム製の半割り構造とし、機械加工により作成した。その内表面に深さ 3mm の段差を設けて、そこに溶融した安息香酸を流し込んだのち、装置を自然冷却することで安息香酸の内壁を作成した。ただし、実験前にエメリー紙により研磨することで、壁面状態を均一にした。Fig.3.8 は、安息香酸を流し込んだあとの計測部の状態である。物質移動量の計測では、Fig.3.7 に示すトラバース装置と差動トランス式変位センサ (LVDT) を組み合わせた装置により、実験前後のオリフィス背後の安息香酸の壁面位置を約 6.8mm 間隔で計測した。LVDT センサの計測誤差は $\pm 0.1\mu\text{m}$ である。回流水槽による実験時間は安息香酸の減肉量が最大約 $300\mu\text{m}$ を超えないように、条件に応じて 10~30 分とした。安息香酸は、内表面深さ 3mm の段差の中に溶融した安息香酸が流し込まれているため、減肉量が多い壁面部分が崩れて計測が不可能となる場合があったことから 10% 以内の減肉量に抑えた。減肉量が大きいと配管の内径が大きい実験に繋がりデータの信頼性が下がる。計測した減肉量から、式(3-2)によりオリフィス背後の安息香酸の物質

移動係数 K を算出した。ここで、 $\delta z / \delta t$ は単位時間あたりの減肉量、 ρ は安息香酸の密度、 C_w は壁面での濃度、 C_b は流体中の濃度である。

$$K = \frac{\rho \cdot \delta z / \delta t}{C_w - C_b} \quad (3-2)$$

ただし、壁面での安息香酸濃度には溶解度から算出した飽和濃度を用いた。最終的な評価には、実験結果から算出した物質移動係数 K から求められる無次元数であるシャーウッド数 $Sh = Kd/D$ を用いた。本実験における計測精度は、偶然誤差が 4.2%、LVDT センサによる計測誤差が 0.49%、減肉により生じる直径誤差が 1.4%、実験条件の温度誤差が 0.22% となり、 Sh 計測の不確かさは 8.6% 程度である。

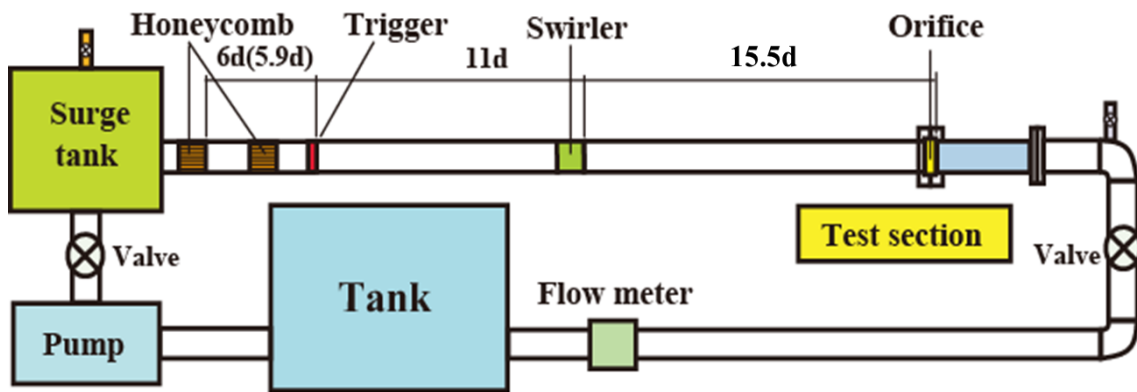


Fig.3.5 直円管物質移動係数計測の実験装置

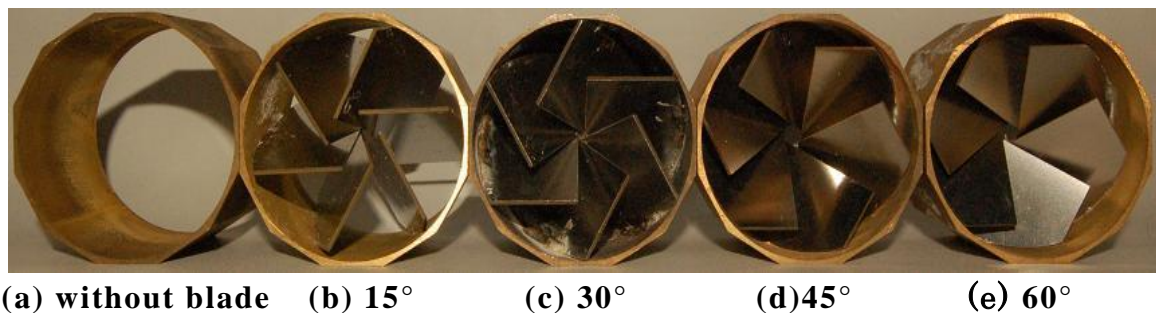


Fig.3.6 旋回流発生装置(スワラ)

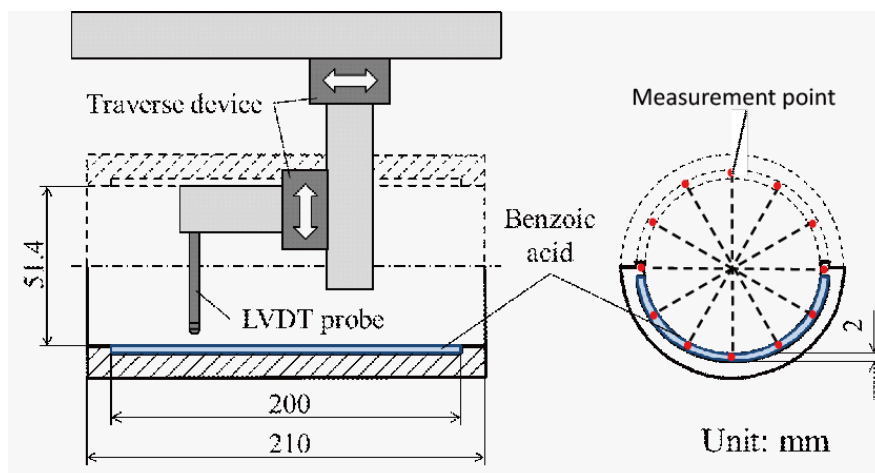


Fig.3.7 試験区間の詳細(unit in mm)



Fig.3.8 試験区間の外観

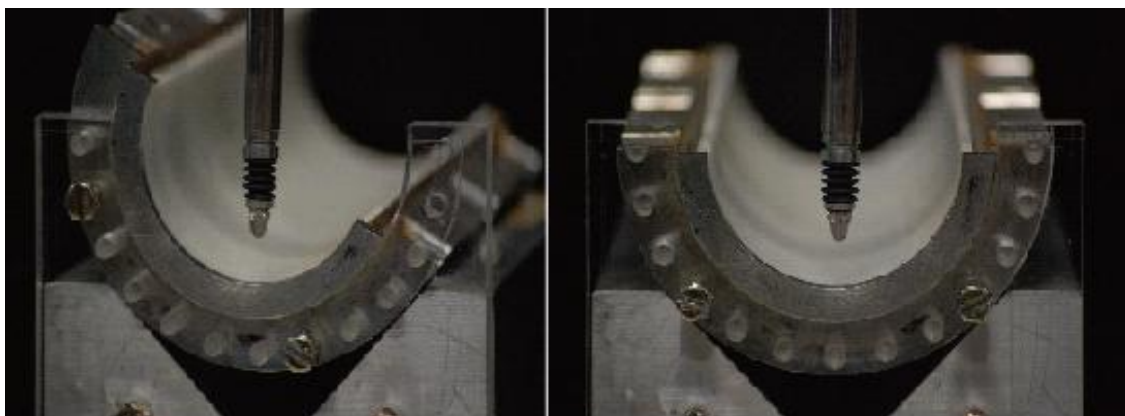


Fig.3.9 試験区間の詳細(減肉量の計測写真)

3.3. 結果および考察

3.3.1. 円管の物質移動係数

エルボ・オリフィスを実験的に評価する前に、予備実験として、オリフィスなしの直円管を用いた物質移動係数の計測を実施した。

Fig.3.10 は、円管におけるシャーウッド数 $Sh=Kd/D$ (K :物質移動係数、 d :円管の内径、 D :安息香酸の拡散係数)とレイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ (U :断面平均速度、 ν :動粘度)関係である。 $Re=3 \times 10^4$ $Re=4 \times 10^4$, $Re=5 \times 10^4$ の実験結果によると、*Berger and Hau*⁽¹⁷⁾のデータよりは少し大きい値を示すが、*Petukhov*の相関式⁽²⁴⁾とデータのばらつきの範囲で一致することがわかる。このことは本実験結果の健全性を示す。

Fig.3.11 は、直円管内の物質移動係数の計測を実施した結果である。実験条件は、水温 50℃, $Re=3 \times 10^4$ 旋回無における直円管内の 4 角度の平均シャーウッド数は $Sh=880$ であった。

Fig.3.12 は、旋回無の直円管内オリフィス背後の物質移動係数の計測結果である。4 角度の流れ方向分布は $x/d=0.3 \sim 1.5$ までは、多少のばらつきを見せるが、最大値 $x/d=1.5$ 付近から $x/d=3.9$ までほぼ一致する分布である。

Fig.3.13 は、旋回を有する直円管内オリフィス背後の物質移動係数の計測結果である。旋回流発生装置は 6 枚の板羽根を $\alpha=45^\circ$ に周方向に固定したスワールを使用した。スワール数はスワールから $8d$ 下流で $S=0.63$ である。強い旋回が与えられているにも関わらず軸対称を保持した減肉分布を示していることが特徴である。物質移動係数の最大値は $x/d=0.82$ で $Sh=4 \times 10^3$ を示し、旋回無の物質移動係数と比較すると上流側に移動する特徴を示す。4 角度の流れ方向分布は $x/d=0.4 \sim 0.96$ までは、上昇するが最大値 $x/d=0.96$ 付近から $x/d=4.0$, $Sh=1.74 \times 10^3$ までなだらかに減衰する分布である。4 角度の流れ方向分布は、どの位置においても誤差の範囲内で重なるようなシャーウッド数分布である。軸対称性の強い旋回流であるならば、軸対称な物質移動係数分布を保持するのが、直円管旋回流の特徴である。

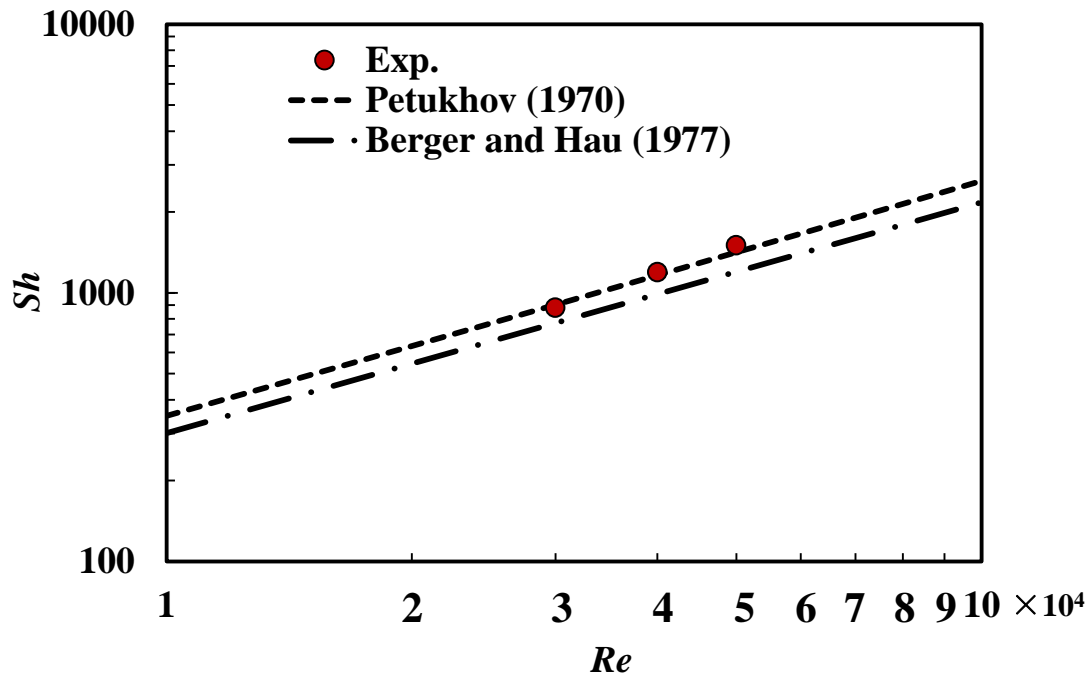


Fig.3.10 直円管のシャーウッド数の変化⁽¹⁷⁾⁽²⁴⁾

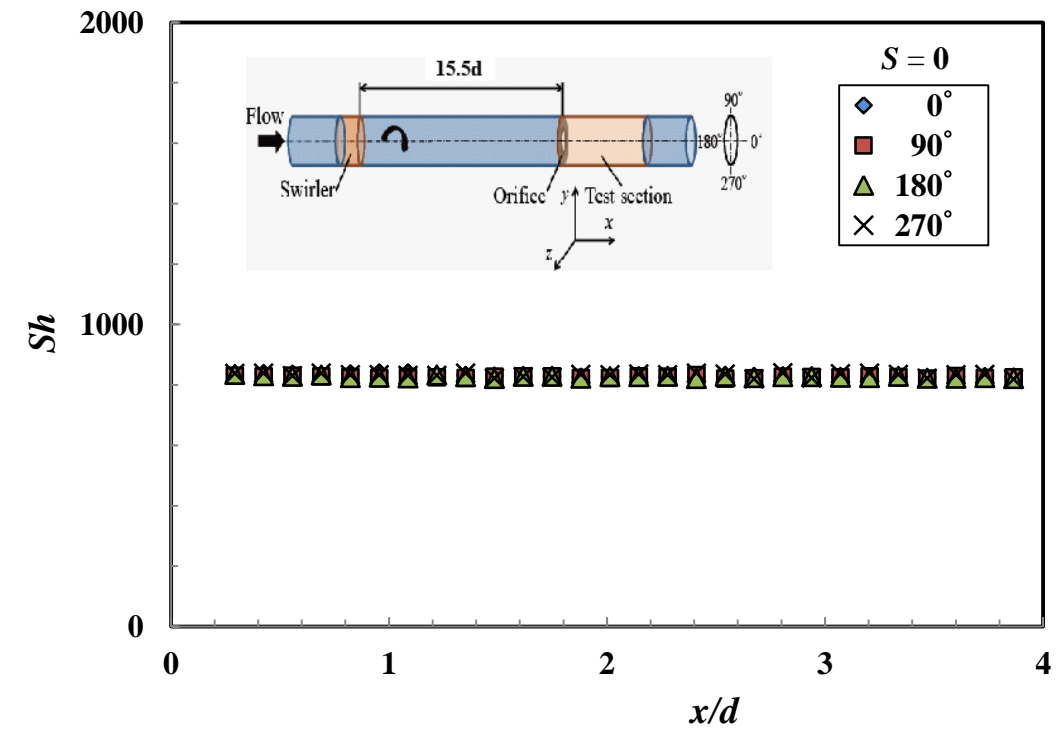


Fig.3.11 直円管内の物質移動係数

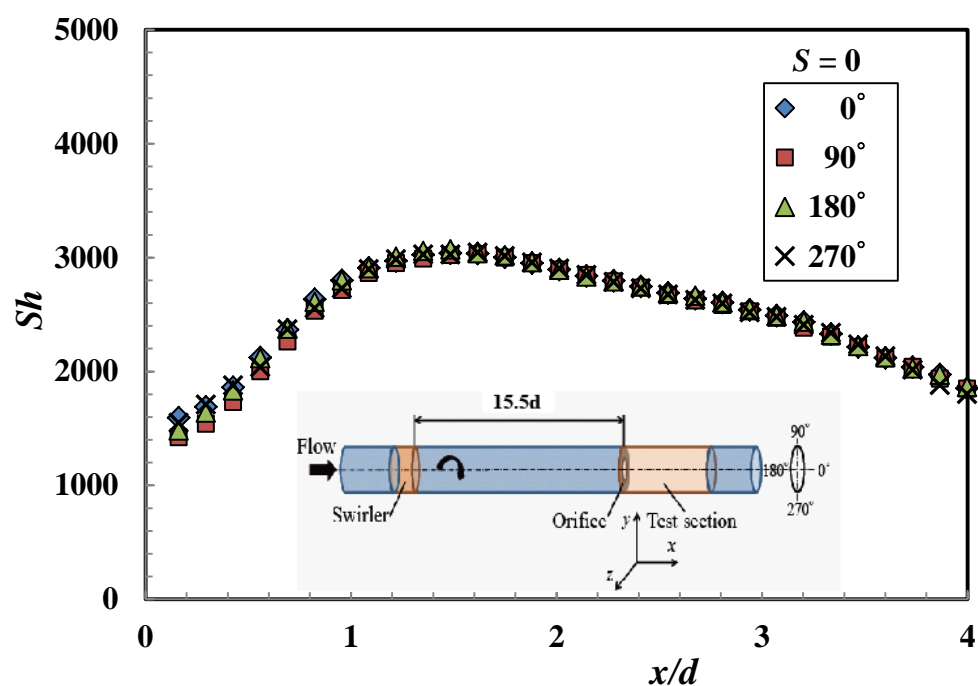


Fig.3.12 直円管内のオリフィス背後の物質移動係数

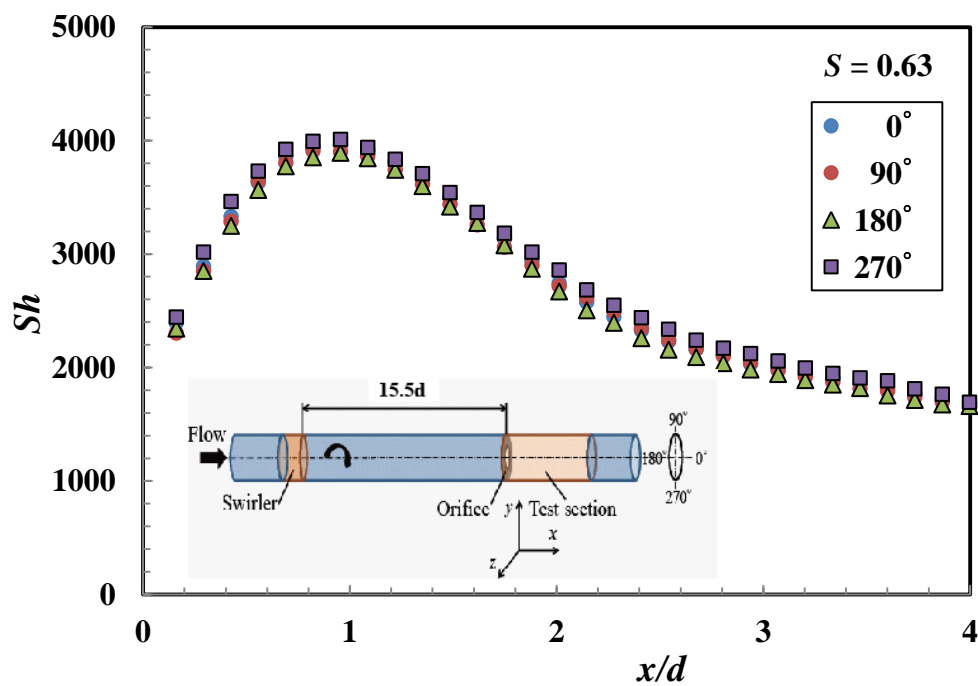


Fig.3.13 直円管内のオリフィス背後の物質移動係数

3.3.2. 旋回を伴う直円管内オリフィス背後の物質移動係数

Fig.3.14 は、旋回強度を与えるスワーラの模式図(羽根角度 45°)である。流れがスワーラに流入すると羽根に沿って、軸心を中心に流れ全体が羽根角度の旋回流となるようにスワーラは設計製作した。スワーラ羽根角度は、 $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ である。

Fig.3.15 は、旋回を有する直円管内オリフィス背後の物質移動係数の計測結果である。試験区間はスワーラ後方 $15.5d$ にオリフィスがありその後方に設置されている。羽根角度 $\alpha = 0^\circ$ の最大物質移動係数は、 $Sh = 3.03 \times 10^3$ であった。 $\alpha = 15^\circ$ は $Sh = 3.2 \times 10^3$ 、 $\alpha = 30^\circ$ は $Sh = 3.7 \times 10^3$ 、 $\alpha = 45^\circ$ は $Sh = 4.1 \times 10^3$ 、 $\alpha = 60^\circ$ は $Sh = 5.3 \times 10^3$ であった。6枚の固定羽根を使った旋回流発生装置の場合に強い旋回強度を与えているにも関わらず、ほぼ軸対称の減肉分布を示していることが特徴である。旋回強度を増すにつれて最大物質移動係数の値は徐々に大きくなり、物質移動係数の最大値の位置がオリフィスに近づくように、上流側に移動する特徴を示す。個々のデータは誤差の範囲内で重なる軸対称なシャード数分布である。

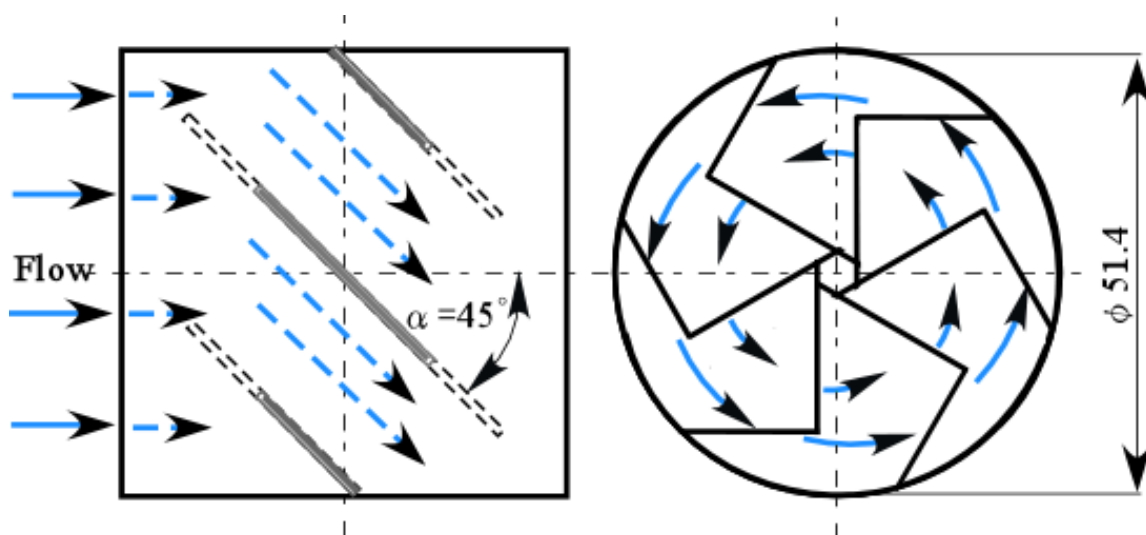


Fig.3.14 旋回流発生装置(スワーラ羽根角度 45°)

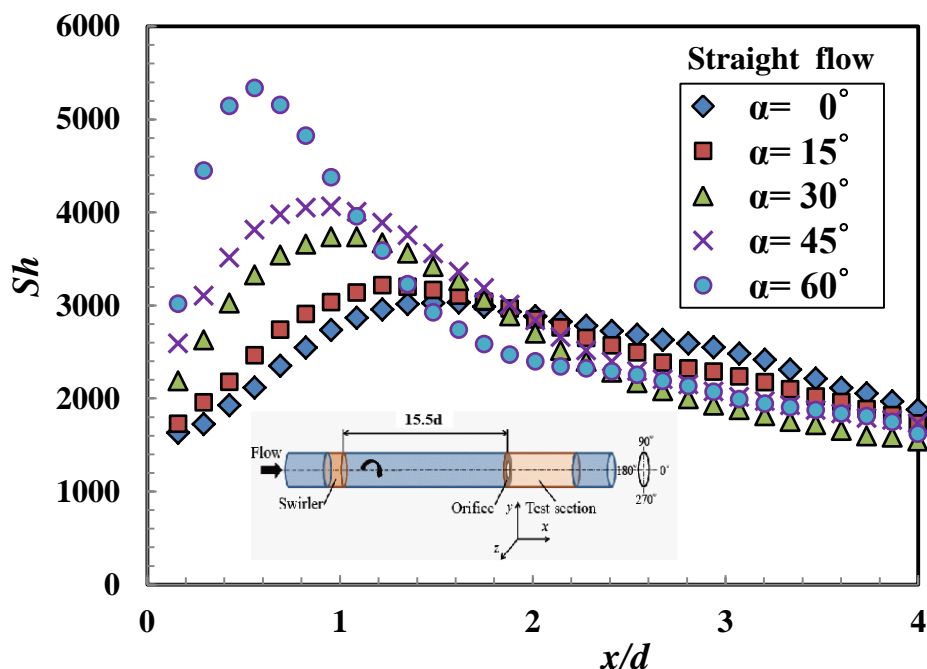


Fig.3.15 直円管内のオリフィス背後における物質移動係数

3.3.3. エルボ・オリフィスの実験装置

3.3.3.1. エルボ・オリフィスの配管減肉実験装置の特徴

エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数の計測には回流水槽で実験を行った。エルボ・オリフィスの配管減肉実験装置の概要は Fig.3.16 に示す。ただし、ロングエルボ(曲率半径 $r/d=1.2$)の後方に長さ $10d$ 、オリフィス絞り比を 0.6 と同一とした。美浜の場合のプロトタイプ・パイプラインと相似に作られている。物質移動係数の計測方法には電気化学的方法のシュミット数は $S_c=1.46 \times 10^3$ 、ナフタリン昇華法のシュミット数は $S_c=2.29$ であり、安息香酸減肉法のシュミット数は $S_c=305$ (50°C) である。それらの計測法より実機条件の $S_c=100$ に近い。ただし、実験条件は $Re=3 \times 10^4$ で試験区間の直径は 51.4mm である。旋回強度を与える実験には板羽根を使った旋回流発生装置がロングエルボの上流 $3d$ に設置し、旋回流強度はオリフィスの上流 $x=-3d$ の位置で計測されたスワール数である⁽²³⁾。

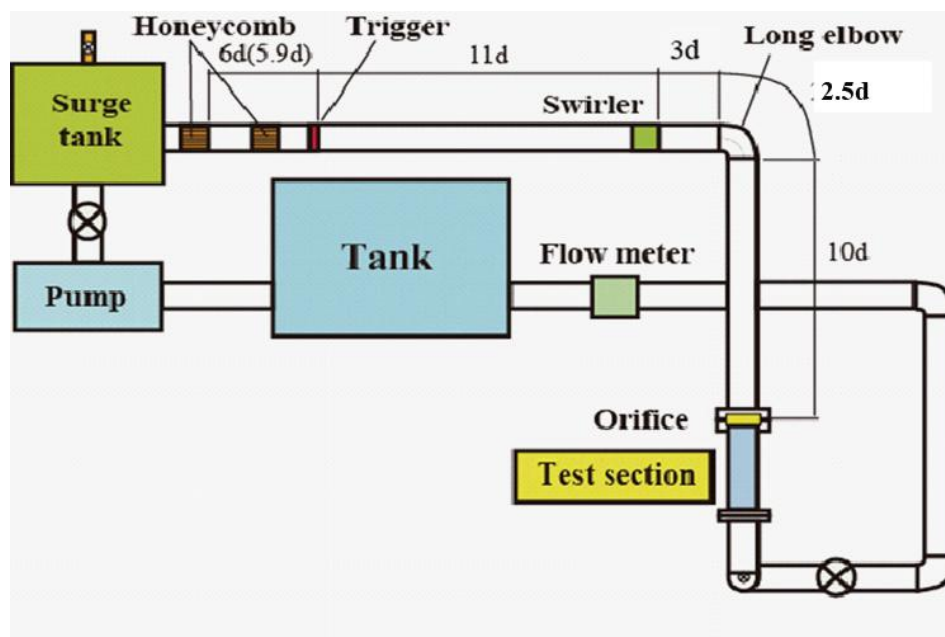


Fig.3.16 エルボ・オリフィスの実験装置

3.3.3.2. エルボ後方の円管内物質移動係数

Fig.3.17 は、旋回無のエルボ後方の円管内物質移動係数分布を示す。旋回強度はエルボの上流 $x=-2d$ で計測されたスワール数 $S=0$ である⁽²³⁾。エルボ後方の配管内物質移動係数は、エルボ出口 $x/d=1.0$ では、最も大きい値 $Sh=1.2 \times 10^3$ を示すのが $\phi=180^\circ$ の角度である。エルボ内の物質移動係数の大きい個所が内壁側であることと一致する。角度 $\phi=0^\circ, 90^\circ, 270^\circ$ は同じような値 $Sh=1 \times 10^3$ を示し、 180° の物質移動係数は徐々に減衰し $x/d=2.2$ で 270° の物質移動係数と交差し、 $x/d=4$ で $Sh=860$ まで緩やかに減衰する。 270° の物質移動係数が 180° を超えて $x/d=2.8$ で $Sh=1.2 \times 10^3$ の最大値を示してから徐々に減衰し、角度 $\phi=90^\circ, 180^\circ$ と同じ $Sh=1 \times 10^3$ 以下の値を示すことが特徴である。旋回の無い流れがエルボを通過することにより、二次流れが生成され旋回流が付加された非軸対称な旋回流に変化する物質移動係数分布である。その値は小さな物質移動係数値ではあるが、角度ごとの差異の割合は大きい。

Fig.3.18 は、旋回の有る流れのエルボ後方の円管内物質移動係数分布を示す。弱い旋回強度はエルボの上流 $x=-2d$ で計測されたスワール

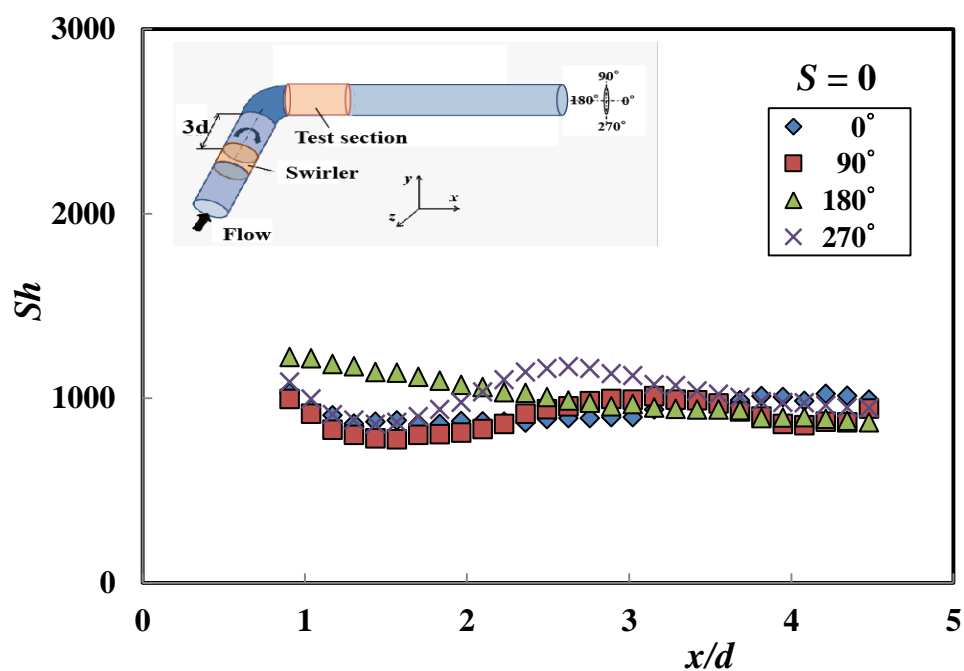


Fig.3.17 旋回無いエルボ後方の円管内物質移動係数

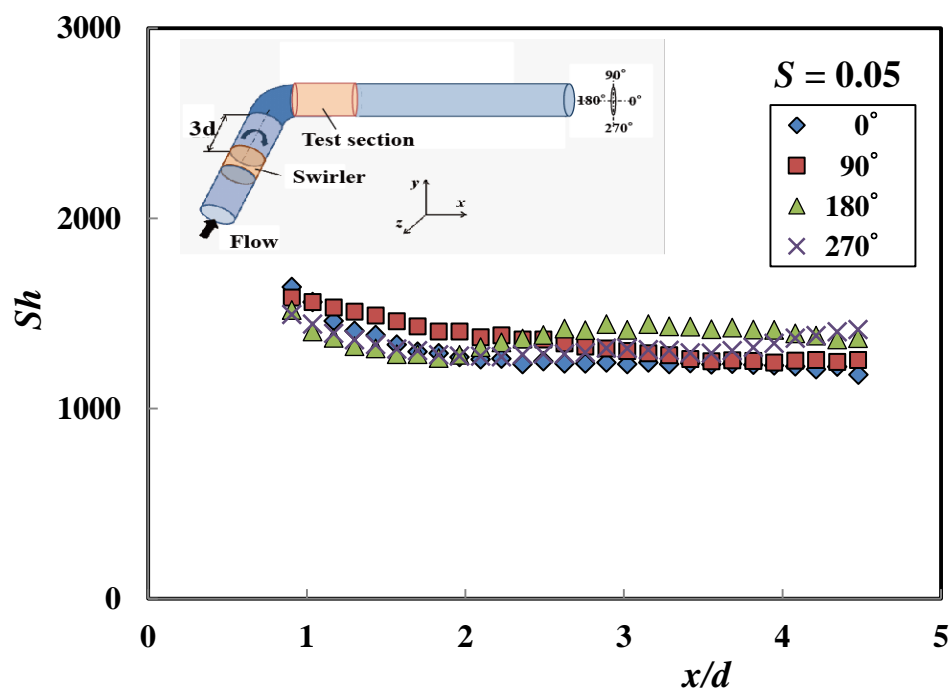


Fig.3.18 旋回流エルボ後方の円管内物質移動係数

数は $S=0.05$ である⁽²³⁾。エルボ後方の配管内物質移動係数は、角度 $\phi=0^\circ$ が $x/d=0.9$ で $Sh=1.7 \times 10^3$ を示し、角度 $\phi=180^\circ, 270^\circ$ は $Sh=1.5 \times 10^3$ を示すが、角度 $0^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ は急に減衰し、 $x/d=2$ で $Sh=1.3 \times 10^3$ を示す。角度 $\phi=90^\circ$ は $Sh=1.6 \times 10^3$ を示し、緩やかに減衰し $x/d=4$ で $Sh=1.3 \times 10^3$ を示す。90°の角度の物質移動係数分布が緩やかな減衰を示す。180°の値は徐々に上昇し、 $x/d=2.3$ で 90°を超え、 $x/d=3.2$ で $Sh=1.5 \times 10^3$ の物質移動係数分布を示し緩やかに減衰を示す。軸対称の弱い旋回流が曲りエルボを通過する際に二次旋回流を生成し、エルボ後方の物質移動係数値を全体的に上昇し、弱い非軸対称な物質移動係数分布である。

3.3.3.3. オリフィス背後の円管内物質移動係数

Fig.3.19 は、旋回無のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数分布は、旋回を与えないにも関わらずオリフィス上流 $x/d=-3d$ において計測された旋回強度が $S=0.037$ を示していることから、エルボによって弱い旋回流が付加されたことがわかる。しかし、 $x/d=0.2$ の $Sh=1.5 \times 10^3$ から $x/d=1.5$, $Sh=3 \times 10^3$ で最大値を示す。4 角度の流れ方向物質輸送係数分布は $x/d=4.0$, $Sh=1.8 \times 10^3$ まで、軸対称で誤差の範囲内で同じ値である。

Fig.3.20 は、旋回無のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の周方向物質移動係数分布を示す。 $x/d=1.2$ の周方向物質移動係数分布をみるとほぼ軸対称の周方向物質移動係数分布である。 $x/d=3.0$ の周方向物質移動係数は、ほぼ軸対称の周方向物質移動係数分布である。

Fig.3.21 は、旋回強度 $S=0.36$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の角度 $\phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の物質移動係数分布を示す。角度 180° の物質移動係数は $x/d=0.69$ で最大値 $Sh=5.23 \times 10^3$ となり、 $x/d=1.6$ まで急激に減衰する。その後 $x/d=4.0$ まで他の角度の物質移動係数と同様に緩やかに減衰する。角度 270° の最大物質移動係数は、 $x/d=1.08$ で $Sh=4 \times 10^3$ である。角度 90° の最大物質移動係数は、 $x/d=1.22$ で $Sh=4.3 \times 10^3$ である。角度 0° の最大物質移動係数は、 $x/d=1.6$ で $Sh=2.6 \times 10^3$ である。旋回強度 $S=0.36$ の場合は、軸対称の強い旋回流がエルボを通過すると

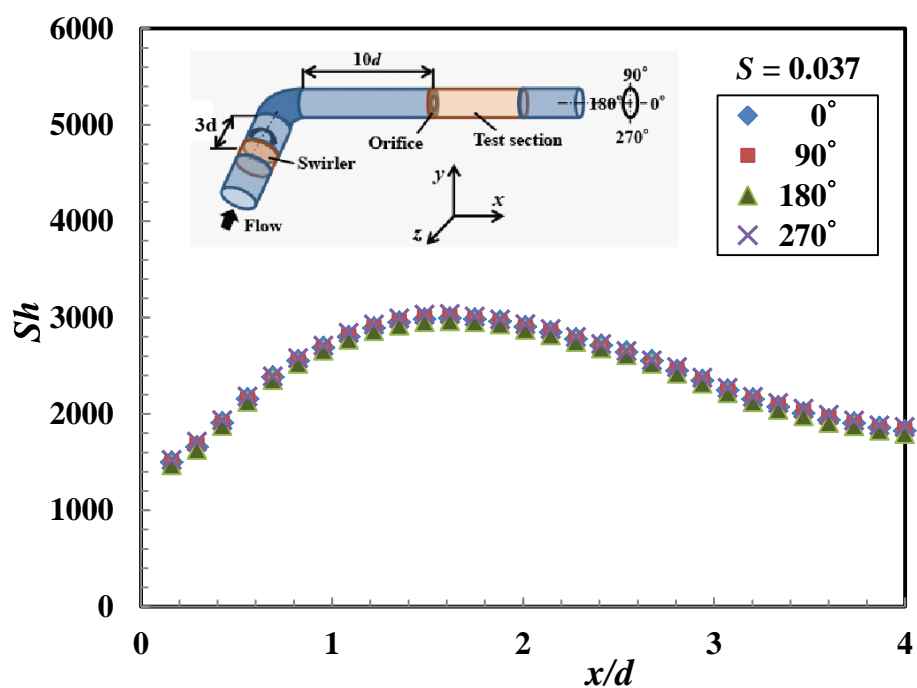


Fig.3.19 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

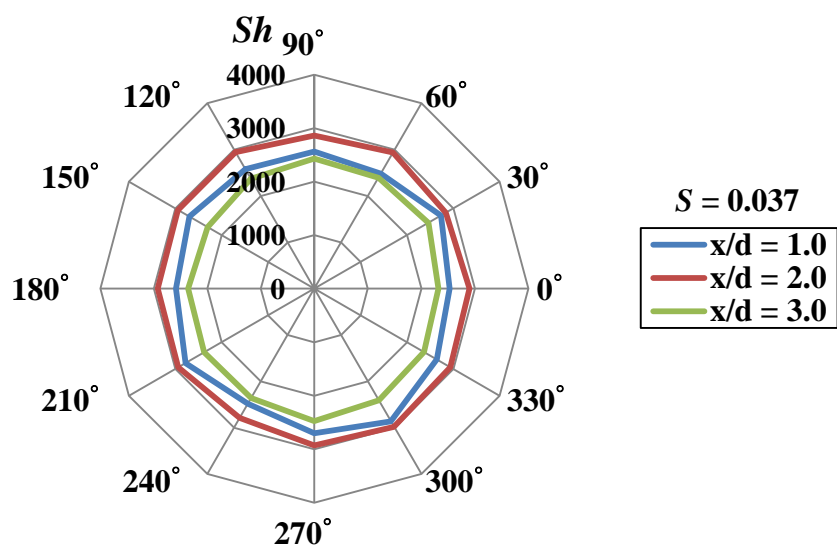


Fig.3.20 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の周方向物質移動係数

きに、二次旋回流が付加されてエルボ後方の物質移動係数に強い非軸対称性を与える。流れは非軸対称性を持つ旋回流に変化する。 $10d$ 後方のオリフィスまで強い非軸対称性はわずかであるが、減衰しながらオリフィスに流入する。オリフィス背後の流れ方向物質移動係数は、強い非軸対称な物質移動係数分布となる。

Fig.3.22 は、旋回強度 $S=0.36$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の周方向物質移動係数分布である。 $x/d=1.0$ の最大値は $\phi=120^\circ$ の $Sh=5 \times 10^3$ をはじめ、 150° , 180° の角度方向に物質移動係数の高い領域が存在する。最小値の角度は、 0° の $Sh=2.2 \times 10^3$ である。 $x/d=1.0$ の周方向物質移動係数は、非軸対称性を持つ物質移動係数分布である。オリフィス背後の配管が軸対称な減肉が発生するものと予測していたとするならば、実験データが示すように2倍以上の減肉差が発生することになる。 $x/d=2.0$ の周方向物質移動係数分布を見ると急激に減衰し、 $\phi=120^\circ$ の $Sh=3.4 \times 10^3$ を最大に、最小値 60° の $Sh=2.4 \times 10^3$ の物質移動係数である。 $x/d=2.0$ の周方向物質移動係数分布は、軸対称化しつつある物質移動係数分布である。

Fig.3.23 は、直円管旋回有無とエルボ・オリフィス旋回有無のオリフィス背後 $x/d=1.0$ の周方向物質移動係数分布である。旋回の無い直円管と旋回の無いエルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数値は $Sh=2.7 \times 10^3$ で誤差の範囲以内に同じ値を示す。旋回の無い場合でもエルボを通過することによって、若干の非軸対称性が発生するのではないかと想像していたのであるが、非軸対称性の発生は見られない。また、直円管旋回流とエルボ・オリフィスのオリフィス背後 $x/d=1.0$ の周方向物質移動係数は、直円管旋回流の値 $Sh=3.56 \times 10^3$ と直円管旋回無の物質移動係数値 $Sh=2.57 \times 10^3$ をみるとどちらも軸対称な周方向物質移動係数分布である。エルボ・オリフィスになると最大値は $\phi=120^\circ$ の $Sh=5.03 \times 10^3$ と大きくなり、非軸対称性が強くなることがこの周方向物質移動係数分布から知ることができる。 $x/d=1.0$ の断面で、直円管流・旋回有の周方向物質移動係数の減肉量とエルボ・オリフィスの周方向物質移動係数の減肉量が等しいのではないかとと思われる。

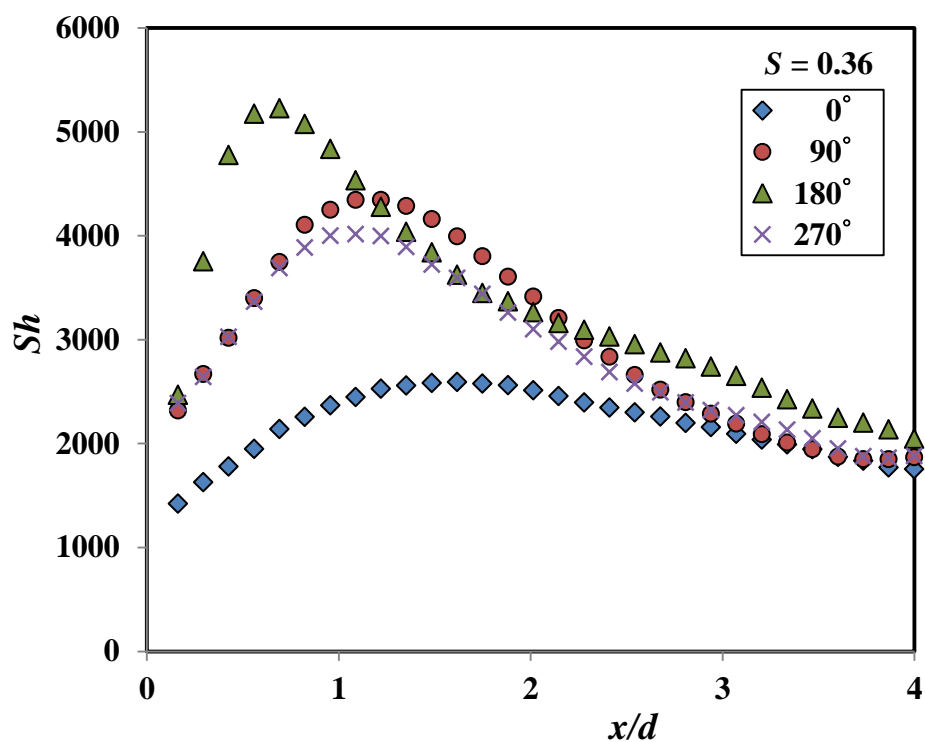


Fig.3.21 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

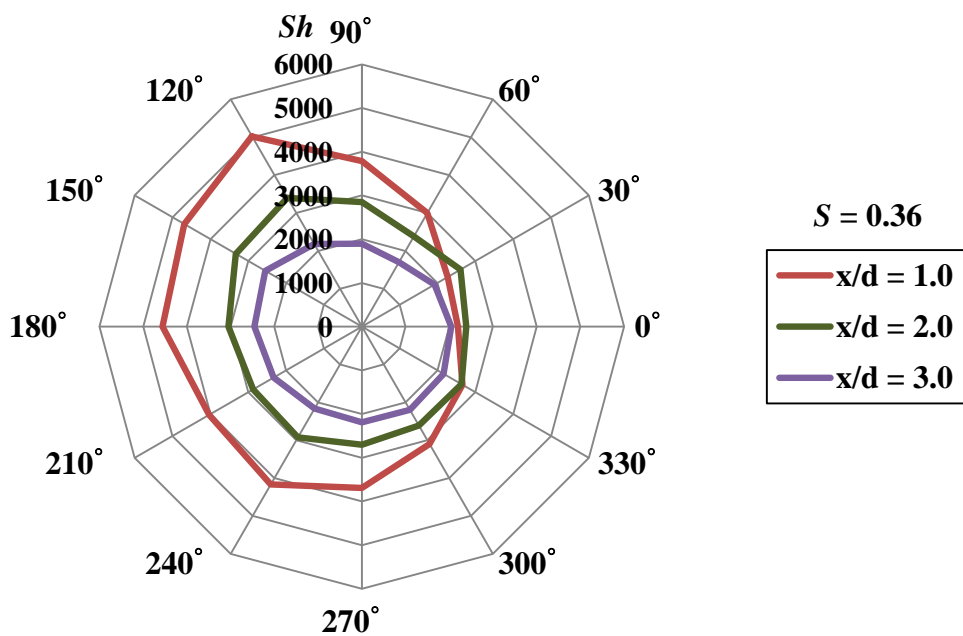


Fig.3.22 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

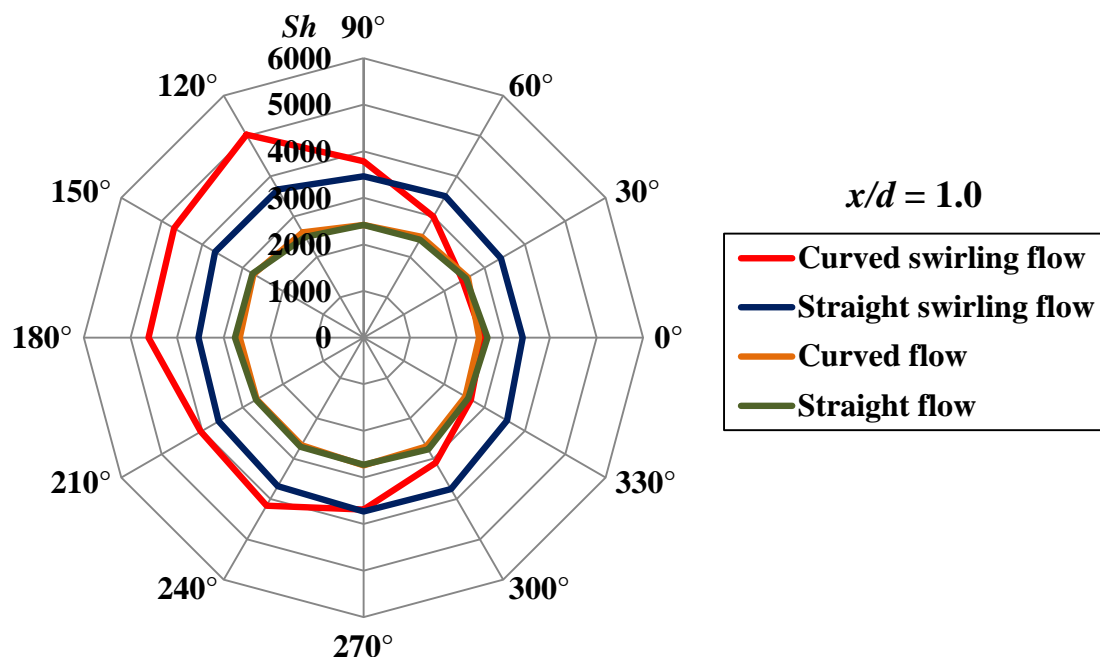


Fig.3.23 エルボ・オリフィスの直円管旋回有無のオリフィス背後 $x/d=1.0$ の周方向円管内物質移動係数

3.3.3.4. 美浜3号機配管減肉とオリフィス背後の物質移動係数

Fig.3.24 は、シュミット数 $S_c=305$ (50°C)、 $Re=3\times 10^4$ 旋回強度 $S=0.36$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の $x/d=1.0$ の周方向物質移動係数と美浜3号機の破断事故を起こしたオリフィス背後の $x/d=1.0$ の周方向配管減肉分布を重ね合わせた図である。また、同じ断面を PIV 計測したエルボ・オリフィスのオリフィス背後の旋回流を付図した⁽²⁵⁾。美浜3号機の配管減肉状況は、配管上部部分に減肉が進行し、破断を起こした角度は $\phi=90^\circ\sim 130^\circ$ の領域である。配管内径 $d=51.4\text{mm}$ を代表寸法にとり、配管ラインを美浜3号機の A ラインを約 1/10 に縮尺したエルボ・オリフィス実験装置を製作し、安息香酸を使用した減肉実験により模擬実験を試みた結果、最大スワール数 $S=0.36$ の実験条件に於いて、大きな配管減肉部分は $\phi=120^\circ\sim 180^\circ$ の領域である。最大減肉角度が少しずれているようにも思えるが、美浜3号機に類似した配管減肉を配管左斜め上部部分に、FAC による非軸対称配管減肉を確認する

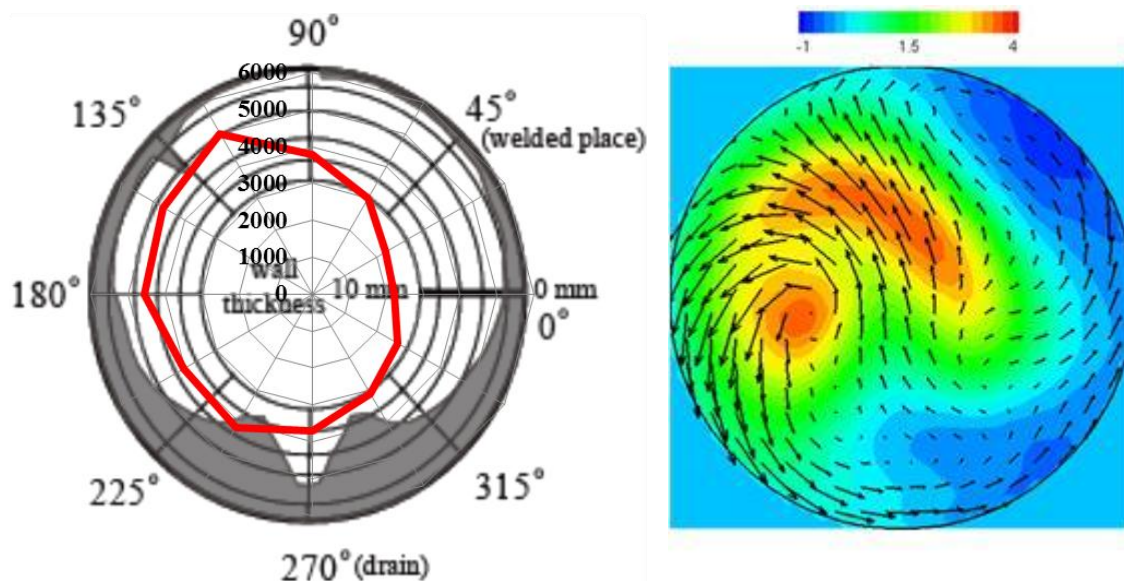


Fig.3.24 オリフィス背後 $x/d=1.0$ の非軸対称な旋回流⁽²⁵⁾
と美浜3号機の配管減肉と物質移動係数分布

ことができる。非軸対称な旋回流と周方向物質移動係数分布からわかることは、軸対称な旋回流がエルボを通過する際に二次流れが生成され旋回が付加された非軸対称な旋回流に変化し、非軸対称な旋回流がオリフィス背後の非軸対称な物質移動係数分布を発生させる。

3.4. 結言

本研究は、FACによるオリフィス背後の非軸対称配管減肉のメカニズムの解明を目的として、安息香酸を用いた実験を行い、エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数の計測と物質移動係数の妥当性の評価を行った。また、安息香酸を用いることで、作動流体を水とする実験が可能となった。

(1) 直円管旋回流オリフィス背後の物質輸送現象

直円管オリフィス背後の物質移動係数分布は、旋回の有無に関わらず、物質移動係数は軸対称である。旋回強度が増加すると最大物質移動係数の位置が上流側に移動する。

(2) 旋回流を伴うエルボ後方の配管内物質輸送現象

旋回の無い流れのエルボ後方の配管内物質移動係数は、エルボ出口では最も大きい値を示すのが円管を下流から見て左側の内壁側である。エルボ内の物質移動係数の大きい個所が下流から見て左側の内壁側であることと一致する。旋回の無い流れがエルボを通過することにより、二次流れが生成され旋回流が付加された非軸対称な旋回流に変化する物質移動係数分布である。その値は小さな物質移動係数値ではあるが、角度ごとの差異の割合は大きい。

旋回を伴うエルボ後方の円管内物質移動係数は、円管上部部分の物質移動係数分布は緩やかに減衰する。軸対称の弱い旋回流が曲りエルボを通過する際に、二次流れが生成され旋回が付加された非軸対称な旋回流に変化し、全体的に上昇したエルボ後方の物質移動係数分布となる。

(3) エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質輸送現象

軸対称な旋回流がエルボを通過する際に二次流れが生成され旋回が付加された非軸対称な旋回流に変化する。非軸対称な旋回流がオリフィス背後の非軸対称な物質移動係数分布を発生させる。エルボ・オリフィスにおいても旋回強度が増加すると流れ方向物質移動係数の最大値の位置が上流側に移動すると共に最大物質移動係数値が大きくなり、物質移動係数分布の非軸対称性も強くなる。

参考文献

- (1) 経済産業省，配管破損メカニズムの調査結果について，
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g41213aj.html>， (Accessed on July 30, 2010).
- (2) H. Keller, Erosions corrosion an Nassdampfturbien, VGB Kraft-werkstechnik, Vol. 54, No. 5, 1974, pp. 292-295.
- (3) T. Sydberger and U. Lotz, Relation between Mass Transfer and Corrosion in a Turbulent Pipe Flow, Journal of Electrochemical Society, Vol. 129, No. 2, 1982, pp. 276-283. [doi:10.1149/1.2123812](https://doi.org/10.1149/1.2123812)

- (4) L. E. Sanchez-Caldera, The Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Station, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1984.
- (5) R. B. Dooley and V. K. Chexal, Flow-Accelerated Corrosion of Pressure Vessels in Fossil Plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, No. 2-3, 2000, pp. 85-90.
[doi:10.1016/S0308-0161\(99\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(99)00087-3)
- (6) J. M. Pietralik and C. S. Schefski, Flow and Mass Transfer in Bends under Flow-Accelerated Corrosion Wall Thinning Condition, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 133, No. 1, pp. 2011, Article ID:012902. [doi:10.1115/1.4001061](https://doi.org/10.1115/1.4001061)
- (7) N. Fujisawa, and H. Yamamoto, Occurrence of asymmetric flow pattern behind a double orifice in a square pipe, J. Visualization, 12, 2009, pp. 93-94.
- (8) N. Fujisawa, H. Yamamoto, T. Syutoh, and T. Yamagata, Investigation on flow accelerated corrosion behind an orifice in a duct through simultaneous temperature and velocity measurements using combined two-color LIF and PIV, Proc. 8th Int. Symp. PIV, PIV09-0042, 2009.
- (9) 米田公俊, 森田良, 配管減肉現象に関わる流動特性の解明 (その1), 単相流中のオリフィス下流域の乱流特性, 電力中央研究所報告, L05007, 2006, pp. 1-23.
- (10) 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 長屋行則, 流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響, 研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測, INSS Journal, 15, 2008, pp. 78-87.
- (11) 大久保雅一, 山縣貴幸, 菅野翔, 藤澤延行, 流動加速腐食による配管減肉に関する研究 (旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による非対称流の発生), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 77, 2011, pp. 386-394.
<http://www.atomdb.jnes.go.jp/content/000025568.pdf>

- (12) M. Kondo, Y. Kuroda, R. Kojyo, Y. Tsuji, On the Evaluation of Mass Transfer Coefficient behind the Orifice in Pipe Flow, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, ASV11-13-03, 2011.
- (13) T. Kagawa, Flow behind an Orifice in a Pipeline of Mihama Power Station, Yomiuri Newspaper, 25 August, 2004, pp. 36.
- (14) K. Yoneda, R. Morita, M. Satake and I. Inada, Quantitative Evaluation of Effective Factors on Flow Accelerated Corrosion (Part 2), Modelling of Mass Transfer Coefficient with Hydraulic Features at Wall, CRIEPI Research Report, No. L07015, 2008, pp. 1-33.
- (15) 日本機械学会, 発電用設備規格, 配管減肉管理に関する規格 (2005), JSME S CA1-2005, 2005, pp. 13-47.
- (16) NISA, Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3, of the Kansai Electric Power Co. Inc. (Final Report), 2005.
- (17) F. P. Berger and K. F. F. L. Hau, Mass transfer in turbulent pipe flow measured by the electrochemical method, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, 1977, pp. 1185-1194.
- (18) 辻義之, 近藤昌也, FAC 評価における流動場および物質移動の影響と課題, 日本機械学会論文集(B 編), 78 巻 787 号, 2012-3, pp. 83-87.
- (19) R.J. Goldstein, and H.H. Cho, A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, Experimental Thermal and Fluid Science, 10, 1995, pp. 416-434.
- (20) 高野剛, 山縣貴幸, 伊藤嘉人, 藤澤延行, 流動加速腐食による配管減肉に関する研究 (旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による物質輸送現象), 保全学, Vol. 10, No. 2, 2011, pp. 30-35.
- (21) N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Kanno, A. Ito, T. Takano, The mechanism of asymmetric pipe-wall thinning behind an orifice by combined effect of swirling flow and orifice bias, Nuclear Engineering and Design, 252, 2012, pp. 19-26.

- (22) J. Lozar, C. Laguerie and J.P. Couderc, Diffusivity of benzoic acid in water: Influence of the temperature, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 53, 1975, pp. 200-203.
- (23) 金谷信明, 高野剛, 山縣貴幸, 藤澤延行, 曲り旋回流におけるオリフィス背後の流れと物質輸送に及ぼす旋回強度の影響, *日本機械学会北陸信越支部講演論文集*, 2014, pp. 306.
- (24) B.S. Petukhov, Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties, *Advances in Heat Transfer*, 6, 1970, pp. 503-564.
- (25) Nobuyuki Fujisawa, Nobuaki Kanatani, Takayuki Yamagata, Tsuyoshi Takano, Mechanism of non-axisymmetric pipe-wall thinning in pipeline with elbow and orifice under influence of swirling flow, *Nuclear Engineering and Design*, 285, 2015, pp. 126-133.

第 4 章 結 論

本論文は全4章で構成されている。第1章は本研究の背景と本論文の構成についてまとめた緒論。第2章はオリフィス偏心と旋回流の組合せによるオリフィス背後の流れ場に及ぼす影響について、物質輸送現象の計測の観点からナフタリン昇華法の提案と考察。第3章はエルボとオリフィスの組合せによるオリフィス背後の非軸対称配管減肉について、安息香酸減肉法の提案と評価。第4章は結論である。付録では非軸対称配管減肉に及ぼす旋回流の影響について記述した。

第1章は、配管減肉研究の背景と目的について説明した。

第2章は、配管減肉が頻繁に観測される部位であるオリフィス背後の流動場に着目し、オリフィス偏心がオリフィス背後の流れ場に及ぼす影響について実験を行いナフタリン昇華法の有用性を確認した。強い旋回流 $S=0.25$ では、わずかなオリフィス偏心によってもオリフィス背後の物質移動係数分布は強い非対称性を示した。このとき、オリフィスの正偏心側の壁面では物質輸送は増大し、反対側では減少する。配管の許容寸法誤差 $\pm 0.8\%$ より僅かに小さいオリフィスの偏心 $\pm 0.7\%$ により下流側流れに大きな非対称流が発生することを検証した。偏った流れが発生する臨界条件は、相関マップから旋回強度 $S=0.25$ が大きくかつオリフィスの偏心量 $\varepsilon=0.8, 1.2\%$ が大きい場合に最大シャーウッド数が存在する。最大シャーウッド数は最大旋回強度 S と最大バイアス ε で決まることが読み取れる。標準パイプライン (JIS3456) の直径誤差範囲内にあり非対称の配管壁減肉を生じる可能性があることを検証した。

第3章は FAC によるオリフィス背後の非軸対称配管減肉のメカニズムの解明を目的として安息香酸を用いた実験を行い、エルボとオリフィスのオリフィス背後の物質移動係数の計測と物質移動係数の妥当性の評価を行った。安息香酸を用いることで、実機と同様の作動流体を水とする実験が可能となった。

直円管オリフィス背後の物質移動数数は、旋回の有無に関わらず、どちらも物質移動係数は軸対称である。旋回強度が増加すると最大物質移動係数の位置が上流側に移動する。

旋回の無い流れのエルボ後方の配管内物質移動係数は、エルボ出口では最も大きい値を示すのが円管を下流から見て左側の内壁側である。エルボ内の物質移動係数の大きい個所が下流から見て左側の内壁側であることと一致する。旋回の無い流れがエルボを通過することにより、二次流れが生成され旋回流が付加された非軸対称な旋回流に変化する物質移動係数分布である。その値は小さな物質移動係数値ではあるが、角度ごとの差異の割合は大きい。

旋回を伴うエルボ後方の円管内物質移動係数は、円管上部部分の物質移動係数は緩やかに減衰する。軸対称の弱い旋回流が曲りエルボを通過する際に、二次流れが生成され旋回が付加された非軸対称な旋回流に変化し、全体的に上昇したエルボ後方の物質移動係数分布となる。

以上まとめると、軸対称な旋回流がエルボを通過する際に二次流れが生成され旋回が付加された非軸対称な旋回流に変化する。非軸対称な旋回流がオリフィス背後の非軸対称な物質移動係数分布を発生させる。エルボ・オリフィスにおいても旋回強度が増加すると流れ方向物質移動係数の最大値の位置が上流側に移動すると共に最大物質移動係数値が大きくなり、物質移動係数分布の非軸対称性も強くなる。

・謝辞

本論文は、新潟大学大学院自然科学研究科・材料生産システム専攻藤澤延行教授並びに山縣貴幸助教の指導のもとにまとめられたものである。先生方のご指導ならびに激励に対して、深く感謝しお礼申し上げます。

また、論文の副査を担当していただいた鳴海敬倫教授ならびに松原幸治教授には、深く感謝しお礼申し上げます。

博士3年の前田篤志君、博士1年の渡部龍太君、大学院修士課程を修了した伊藤晃宏君、金谷信明君、佐藤祐紀君、伊藤嘉人君、その他、後輩の皆様に併せてお礼申し上げます。

なお、私事ながら、長岡工業高等専門学校、新潟大学工学部の在職後、本課程で研究できたことは、家族の支えにもほかならず、心から感謝する。

付録 1 非軸対称配管減肉に及ぼす旋回流の影響

記号の説明

C_b	: 安息香酸の流体中の濃度 [g/m ³]
C_e	: 安息香酸の飽和溶解度濃度 [g/m ³]
C_w	: 安息香酸の壁面での濃度 [kg/m ³]
D	: 安息香酸拡散係数 [m ² /s]
D_{naph}	: ナフタリンの拡散係数 [m ² /s]
D_{rate}	: 溶解率 [g/(m ² ・min)]
d	: 配管内径 [m]
d_o	: オリフィスの穴径 [m]
K	: 安息香酸の物質移動係数 [m/s]
K_0	: 直円管流の物質移動係数 [m/s]
K/K_0	: 形状係数 [-]
n	: 毎分の回転数 [rpm]
pH	: 水素イオン指数
Re	: レイノルズ数 [= Ud/ν]
r	: 中心からの距離 [m]
S	: スワール数 [-]
S_c	: シュミット数 [-]
Sh	: シャーウッド数 [-]
T	: 絶対温度 [K]
T	: 温度 [°C]
t	: 時間 [sec]
U	: 断面平均速度 [m/s]
α	: スワール羽根角度 [°]
ϕ	: デカルト座標角度 [°]
ν	: 流体の動粘度 [m ² /s]
ρ	: 安息香酸の密度 [kg/m ³]
$\delta z/\delta t$: 単位時間当たりの減肉量 [m/s]

A1.1. 安息香酸を用いた物質輸送の計測法

A1.1.1. 直円管流実験装置

Fig.A1.1 は、直円管流実験装置の模式図である。実験装置は、ポンプ、タンク、流量計、計測部より構成されており、インバータおよび計測部後方に設置されたバルブにより流量を調節する。円管の直径は $d=56\text{mm}$ であり、オリフィスの絞り比は美浜 3 号機の配管破損事故該当箇所と同様に 0.6 とした。

A1.1.2. 回転式旋回流発生装置

Fig.A1.2 は、実機と同様に流れに旋回を与えるための回転式旋回流発生装置である。外形はタイミングベルトの突起が噛み合うように等間隔に円周に溝が掘られている。この溝はすべり止めの役割を果たし、回転ロスを防ぐ効果がある。円筒の内径は旋盤の仕上げ加工により滑らかに加工されている。上流側に直径 56mm の真円にワイヤーカットでカットされたハニカムが嵌め合いも固く滑ることなく挿入されている。回転式旋回流発生装置の上流側に入った水は、回転しているハニカムに流入する。ハニカムを通過する際には流れが整流され、一定の回転力が与えられる。回転力の強さが旋回強度になる。旋回流はどの回転数においても同心円で軸対称である。旋回強度は、軸方向と周方向の運動量の比であるスワール数 S で定義される⁽¹⁾。

$$S = \int_0^R w v_{th} r^2 dr / R \int_0^R w^2 r dr = r\omega / 2U \quad (\text{A-1})$$

ここで、 w は軸方向速度、 v_{th} は周方向速度、 r は管中心からの距離、 R は管半径、 ω はスワラの角速度、 U は平均速度である。旋回強度はロータリースワラの回転数を $n=0, 87, 175, 260\text{rpm}$ で実験を行い、このときのスワール数はそれぞれ $S=0, 0.3, 0.6, 0.9$ である。オリフィス背後の物質移動量の計測には安息香酸を用いた。安息香酸は水に可溶であり、温度により拡散係数が変化するためシュミット数を変えた実験が可能である。本実験では、 $Sc=705$ (30°C)、レイノルズ数は $Re=3 \times 10^4$ の条件で実験を行った。

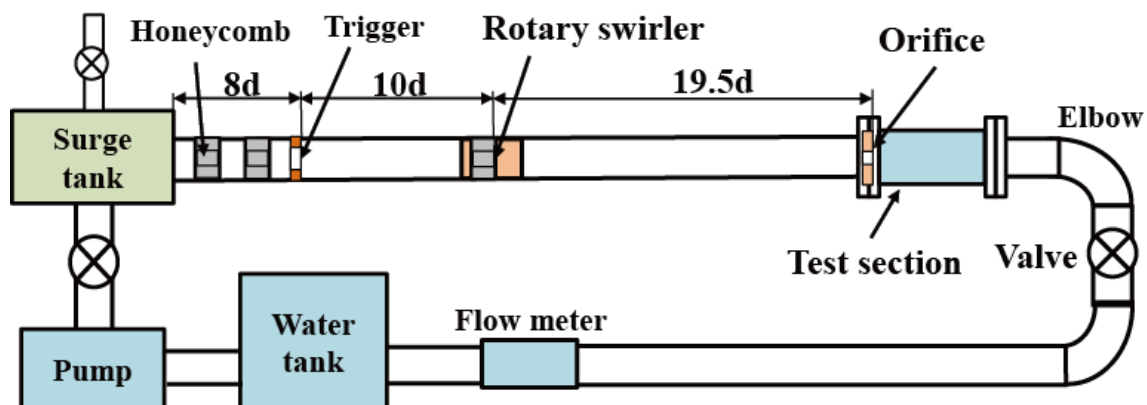


Fig.A1.1 直円管内流れの実験装置

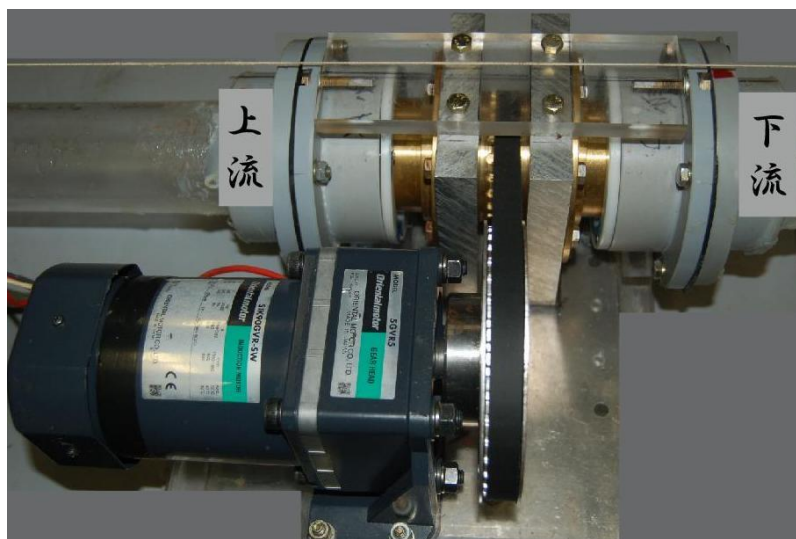


Fig.A1.2 回転式旋回流発生装置

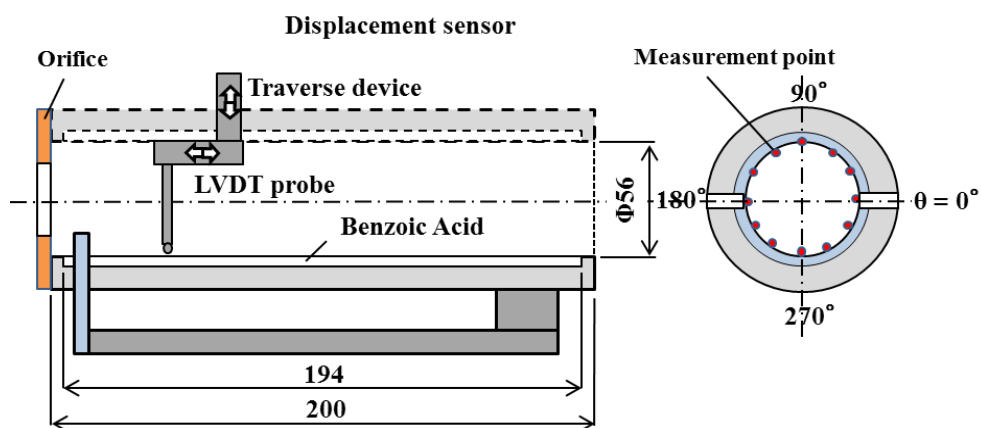


Fig.A1.3 試験区間の詳細(unit in mm)

なお、管内平均流速は $U=0.43$ m/s とした。試験区間の詳細および計測方法を Fig.A1.3 に示す。オリフィス背後の計測部はアルミニウム製の半割り構造とし、機械加工により作成した。その内表面に深さ 4mm の段差を設けて、そこに溶融した安息香酸を流し込んだ後、装置を自然冷却することで安息香酸の内壁を作成した。ただし、実験前に 1000 番の紙ヤスリで研磨することで、壁面状態を均一にした。

A1.1.3. 物質輸送係数の計測方法

Fig.A1.4 は、安息香酸を流し込んだあとの計測部の状態写真である。物質移動量の計測では、Fig.A1.3 に示すトラバース装置と差動トランス式変位センサ (LVDT) を組み合わせた装置により、実験前後のオリフィス背後の安息香酸の壁面位置を約 6.35mm 間隔で計測した。LVDT センサの計測誤差は $\pm 0.1\mu\text{m}$ である。回流水槽による実験時間は安息香酸の減肉量が最大約 $300\mu\text{m}$ になるように、条件に応じて 10～30 分とした。計測した減肉量から式(3-2) $K = \rho (\delta z / \delta t) / (C_w - C_b)$ でオリフィス背後の物質移動係数 K を算出した。最終的な評価は、実験結果から算出した物質移動係数 K から求められるシャーウッド数 $Sh = Kd/D$ を用いた。本実験における計測精度は、偶然誤差が 4.2%、LVDT センサによる計測誤差が 0.49%、減肉により生じる直径誤差が 1.4%、実験条件の温度誤差が 0.22% となり、 Sh 計測の不確かさは 8.6% 程度である。

A1.1.4. 円管の物質移動係数

Fig.A1.5 は、直円管物質移動係数分布図である。平均物質移動係数は、 $Sh=550$ であった。形状係数を求めるときの基礎データとなる。試験区間の始まりから $x/d=0.5$ までは、フランジと試験区間の接続部のわずかな段差によって上昇した部分は表示していない。

Fig.A1.6 は、直円管オリフィス背後の物質移動係数分布図である。旋回の無い場合に 50°C は $x/d=1.5$ で最大値が $Sh=3 \times 10^4$ の値を示し、 30°C は $x/d=1.6$ で最大値が $Sh=1.75 \times 10^3$ の値を示す。それぞれの最大値の位置が $x/d=1.5, 1.6$ でほぼ相似である。物質移動係数の計測法は安息

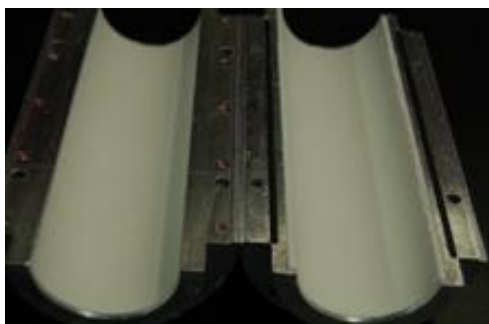


Fig.A1.4 試験区間の状態写真

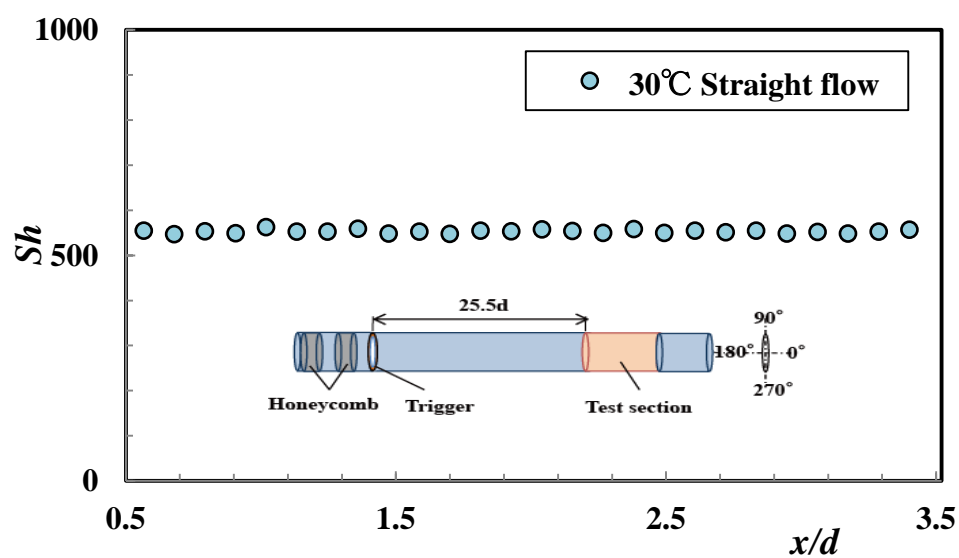


Fig.A1.5 直円管物質移動係数

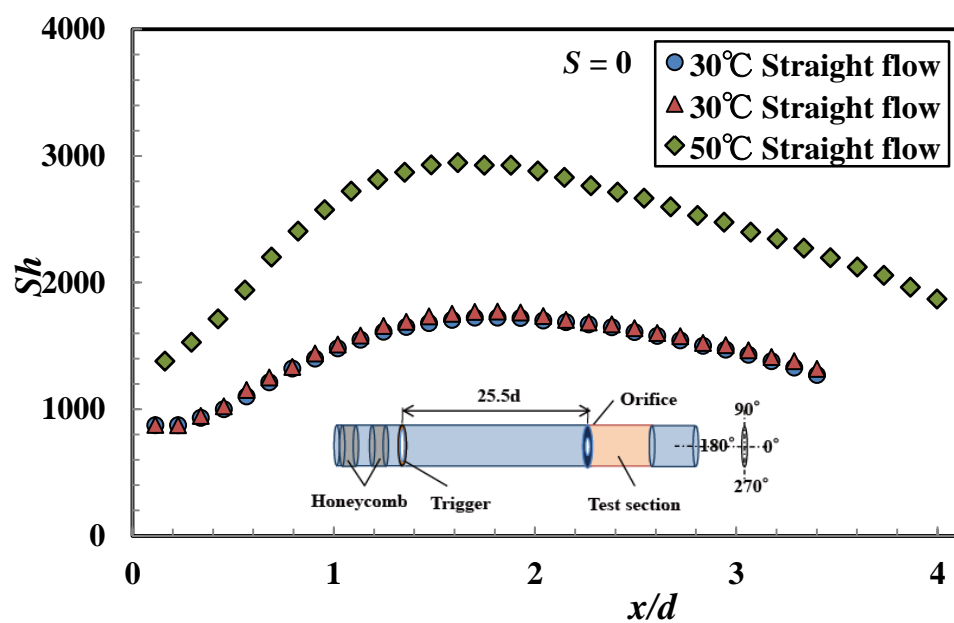


Fig.A1.6 直円管オリフィス背後の物質移動係数

香酸を使用した、実験温度 50°C の場合拡散係数値 $D=18.14\times 10^{-10}$ 、 30°C の場合拡散係数値 $D=11.35\times 10^{-10}$ である。拡散係数比は $D_{30}/D_{50}=0.63$ であり、誤差が $7.4\%\sim 8\%$ 以内にあることが理解できる。誤差解析の Sh 計測の不確かさは 8.6% 以内にあることは確かのようなのである。

Fig.A1.7 は、直円管オリフィス背後の形状係数の比較についてのグラフである。 \blacktriangle はナフタリンは $Sc=2.29(25\sim 30^{\circ}\text{C})$, $Re=1.9\times 10^4$ で実験した。 \blacklozenge は安息香酸 $Sc=305(50^{\circ}\text{C})$ と \blacksquare は安息香酸 $Sc=705(30^{\circ}\text{C})$ で、 $Re=3\times 10^4$ で実験した。電気分解法 $Sc=1.46\times 10^3(25^{\circ}\text{C})$ で \blacktriangle $Re=5.5\times 10^4$ と \bullet は $Re=3.5\times 10^4$ で実験された値である⁽²⁾。ナフタリン $Sc=2.29$ で計測された形状係数の最大値は $x/d=1.48$, $K/K_0=4.19$ である。安息香酸 $Sc=305$ で計測された形状係数の最大値は $x/d=1.6$, $K/K_0=3.36$ である。安息香酸 $Sc=705$ で計測された形状係数の最大値は $x/d=1.8$, $K/K_0=3.24$ である。電気分解法 $Sc=1.46\times 10^3(20^{\circ}\text{C})$, $Re=5.5\times 10^4$ で計測された形状係数の最大値は $x/d=1.29$, $K/K_0=1.78$ である。電気分解法 $Sc=1.46\times 10^3$, $Re=3.5\times 10^4$ で計測された

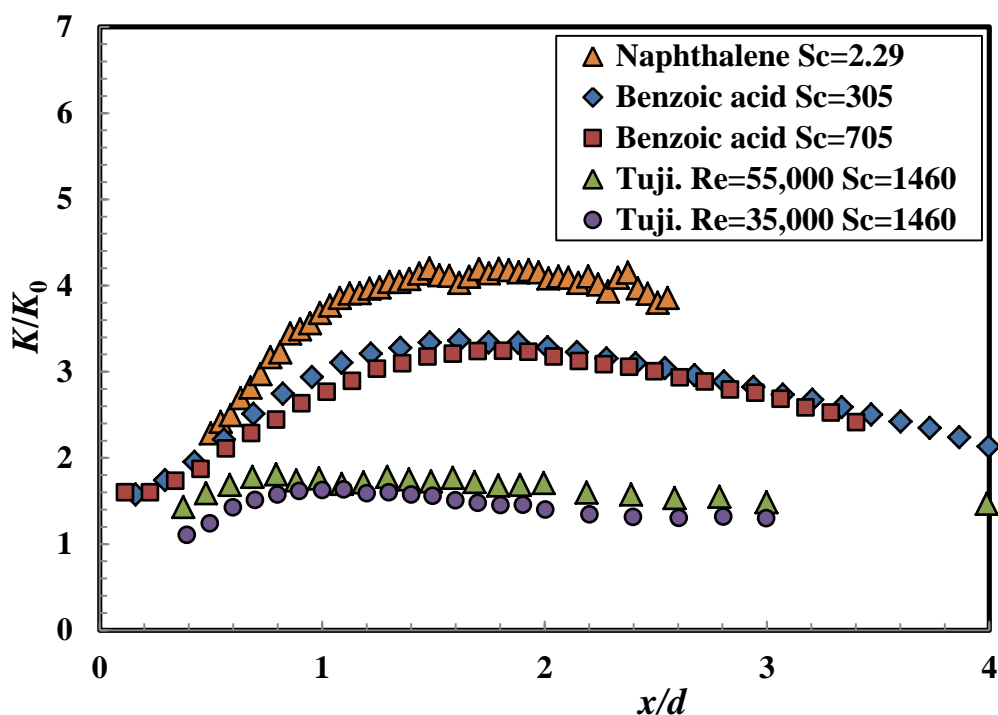


Fig.A1.7 直円管オリフィス背後の形状係数の比較

形状係数の最大値は $x/d=1.1$, $K/K_0=1.63$ である。3 種類の計測法による直円管流のオリフィス背後の形状係数を比較するとそれぞれ一定の値を示すが重なることはない。 S_c 数の小さいものほど最大形状係数値 K/K_0 の値が大きい。その順位はナフタリン $S_c=2.29(25^\circ\text{C})$ 、安息香酸 $S_c=305(50^\circ\text{C})$ 、安息香酸 $S_c=705(30^\circ\text{C})$ 、電気分解法 $S_c=1.46 \times 10^3 (25^\circ\text{C})$ である。作動流体の動粘度と拡散係数の比を現す無次元数であるシュミット数ではあるが、一般的には「気体のシュミット数はおよそ 0.2 から 5 程度、液体の場合は 10^3 から 10^4 程度の値をとる。」と言われている。そのことから、考えると安息香酸を使用した実験は、液体にもかかわらず、これまでの経験値から外れた領域の範囲に入る実験領域であると考えられる。

A1.1.5. エルボ・オリフィス実験装置

Fig.A1.8 は、エルボ・オリフィス実験装置の模式図である。装置は直円管流実験装置と同じ構成である。直円管流と異なる部分は、回転式旋回流発生装置の $7d$ 後方に曲率 $r/d=1.2$ のエルボが接続されエルボ後方 $10d$ に試験区間が接続されている構造である。これらの構成は美浜 3 号機の配管破損事故に該当する A ラインと同様の縮尺になるように構成されている。円管の直径は $d=56\text{mm}$ であり、オリフィスの絞り比は事故該当箇所と同様に 0.6 とした。

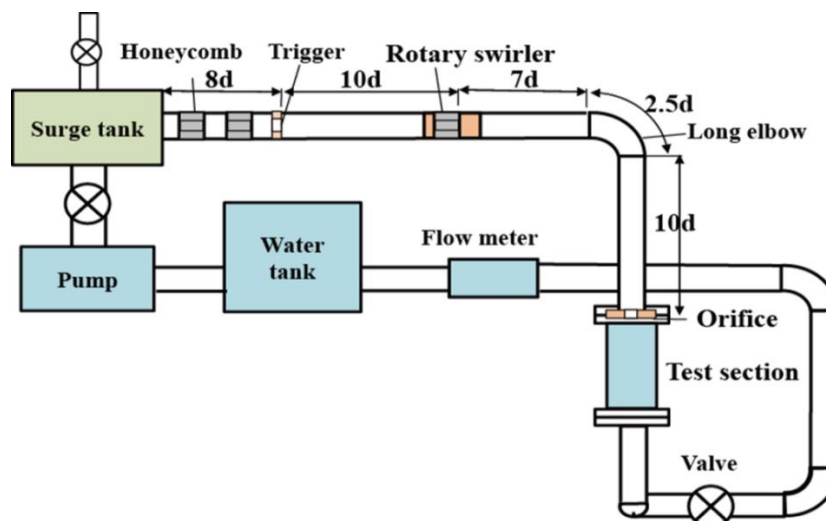


Fig.A1.8 エルボ・オリフィスの実験装置

A1.2. 結果および考察

A1.2.1. エルボ・オリフィスの物質移動係数

Fig.A1.9 は、旋回の無い場合のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数分布である。物質移動係数の最大値が $x/d=1.7$ で最大値が $Sh=1.7 \times 10^3$ の値を示す。 $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の 4 角度流れ方向物質移動係数分布は、データは 2.2% 程度のばらつきで物質移動係数分布が重なる状況であり、試験区間 $x/d=0.1 \sim 3.5$ まで、軸対称な周方向物質移動係数分布である。

Fig.A1.10 は、旋回強度 $S=0.28$ (82rpm) エルボ・オリフィスの軸対称な周方向物質移動係数分布である。旋回強度 $S<0.3$ (87rpm) エルボ・オリフィスのオリフィス背後の場合には旋回の無い流れ $S=0$ と同様に軸対称な物質移動係数分布である。

Fig.A1.11 は、旋回強度 $S=0.3$ (87rpm) エルボ・オリフィスのオリフィス背後の非軸対称な物質移動係数分布である。旋回強度が $S=0.3$ になると物質移動係数が非軸対称になりはじめる。エルボを通過する際に二次流れが付加されて、軸対称流が非軸対称流に変わる境界である。4 角度の流れ方向物質移動係数のデータはオリフィスに近い上流側において、重なることがなくなる。

Fig.A1.12 は、 $S=0.6$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数分布である。 $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の 4 角度流れ方向物質移動係数分布がそれぞれの変化を示す非軸対称な配管減肉である。 90° の物質移動係数の最大値 $x/d=1.0$, $Sh=3.1 \times 10^3$ 次に大きな値示すのが 180° であり $x/d=1.3$, $Sh=2.6 \times 10^3$ 、 $270^\circ, 0^\circ$ の順である。 $S=0.6$ の旋回強度にもかかわらず、非軸対称性の強い配管減肉を示した物質移動係数分布である。

A1.2.2. $S=0.9$ のエルボ・オリフィスの物質移動係数

Fig.A1.13 は、 $S=0.9$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数分布である。ここでは代表的な $\phi = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の 6 角度の流れ方向物質移動係数分布がそれぞれの変化を示し、

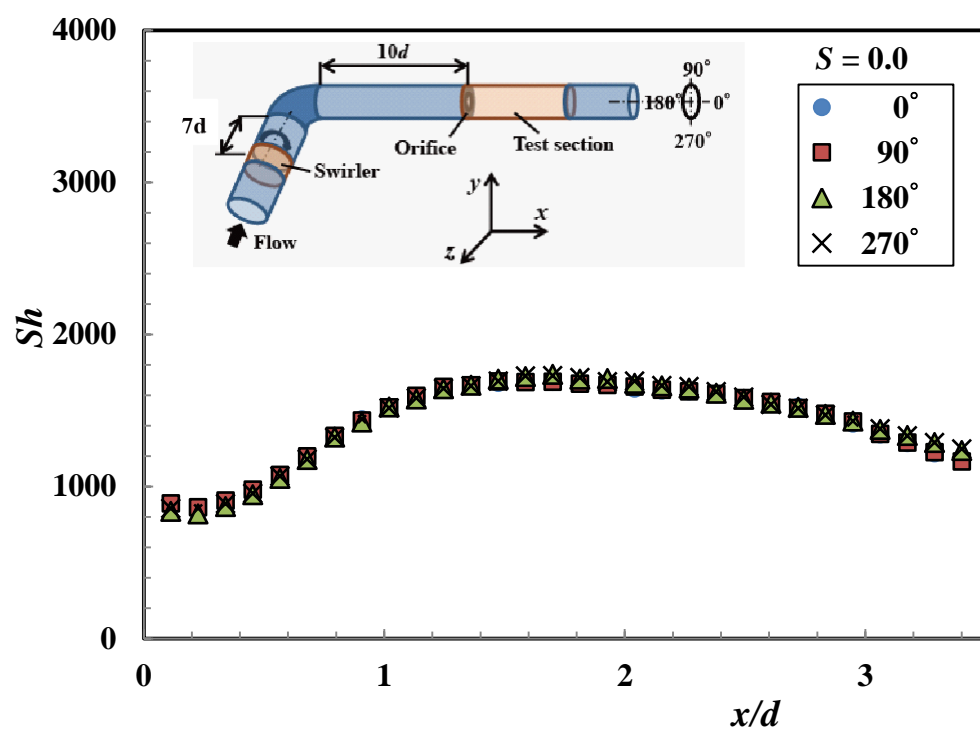


Fig.A1.9 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

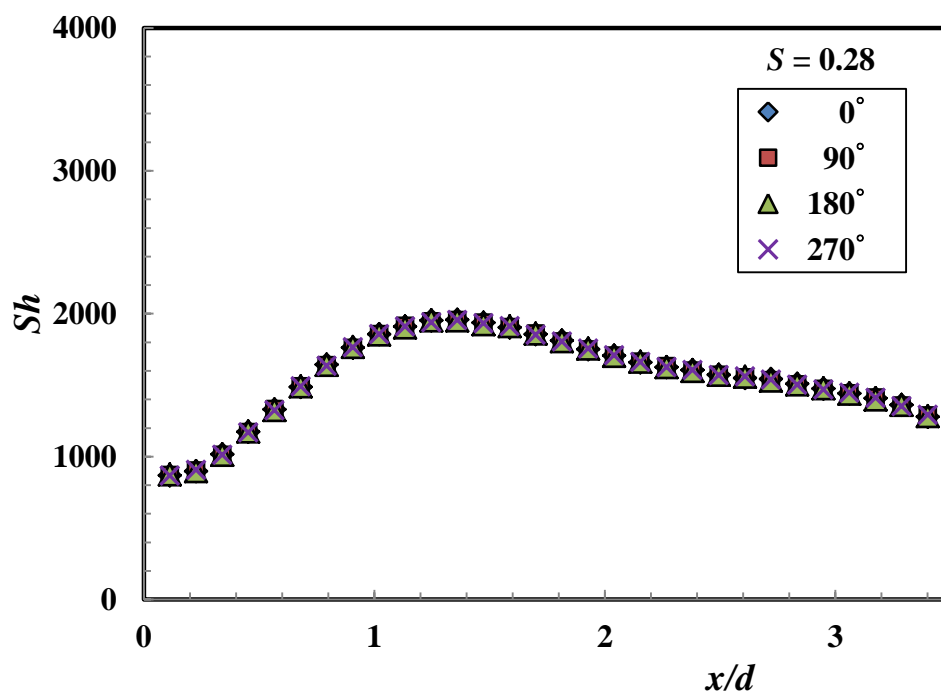


Fig.A1.10 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

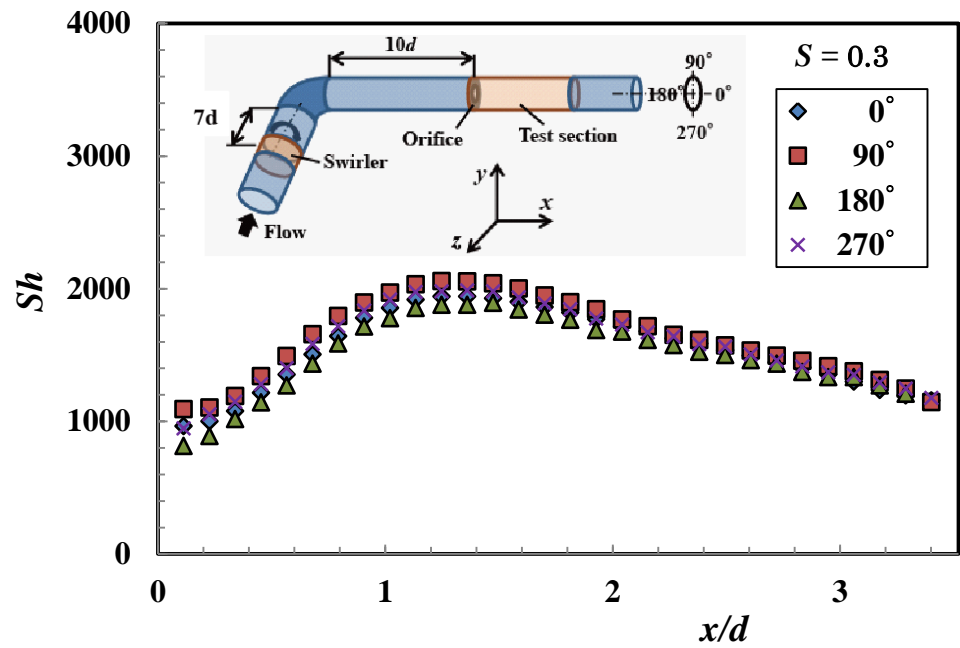


Fig.A1.11 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

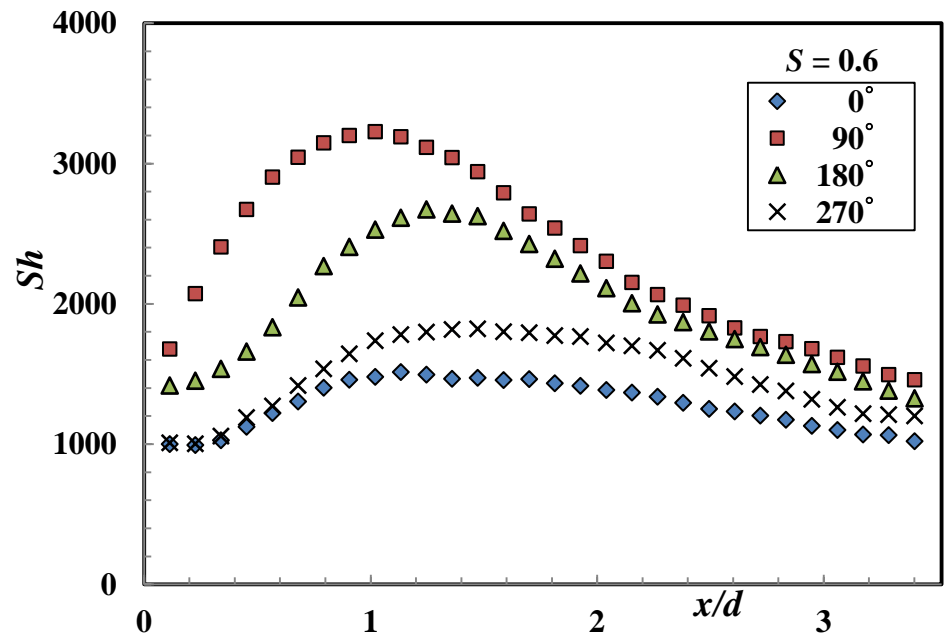


Fig.A1.12 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

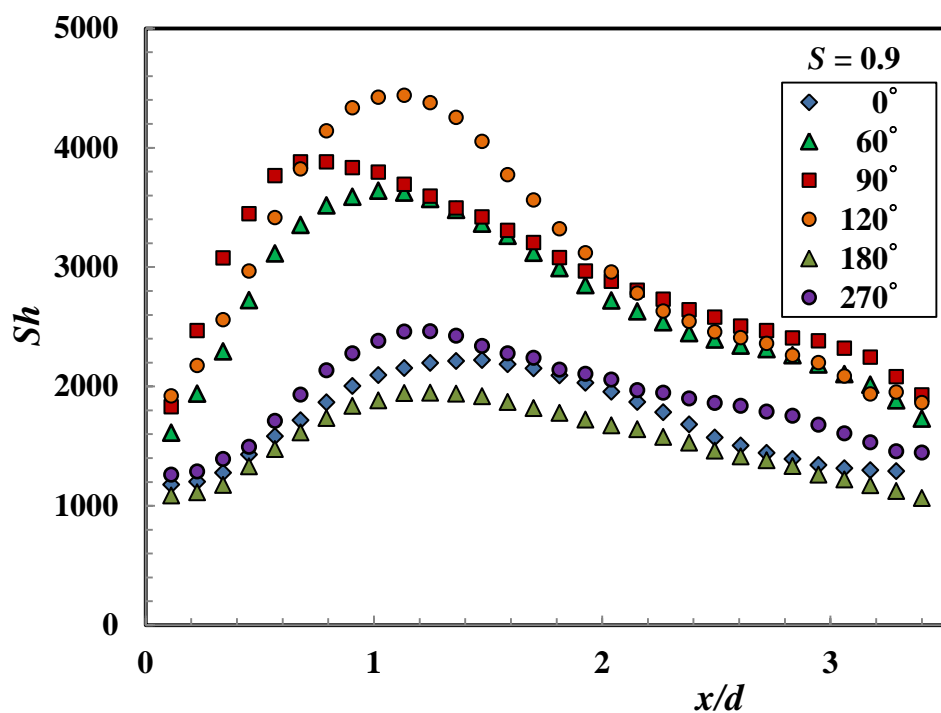


Fig.A1.13 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数

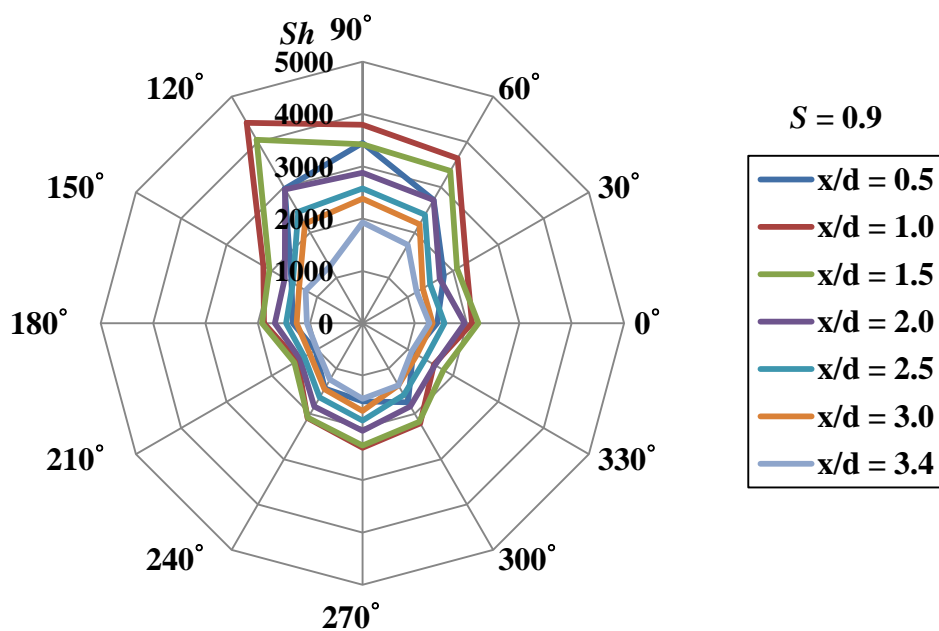


Fig.A1.14 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の周方向物質移動係数

非軸対称の流れとなっている。大きな値を示す 120° の物質移動係数の最大値 $x/d=1.2$, $Sh=4.4 \times 10^3$ 、 90° は $x/d=0.8$, $Sh=3.9 \times 10^3$ 、 60° は $x/d=1.0$, $Sh=3.6 \times 10^3$ の値を示し、この 3 角度が最も大きな減肉領域となっている。 270° , 0° , 180° 最大値 $x/d=1.25$, $Sh=2.5 \times 10^3$ 、 $x/d=1.5$, $Sh=2.2 \times 10^3$ 、 $x/d=1.25$, $Sh=1.9 \times 10^3$ の値である。 $S_c=705$ の流れ方向物質移動係数の大きな値を示すのが 120° , 90° , 60° である。 $S_c=305$ の流れ方向最大物質移動係数 120° , 150° , 180° である。流れ方向最大物質移動係数分布はどちらも 120° である。

Fig.A1.14 は、 $S=0.9$ のエルボ・オリフィスのオリフィス背後の周方向物質移動係数分布である。流れ方向 12 角度の計測を行い周方向分布の表示を行ったものである。 $x/d=1.0$ で最も周方向物質移動係数が大きい。 60° , 90° , 120° の 3 角度の領域の配管減肉が最も大きく局部的に集中しているのが特徴である。旋回強度が強くなると局部的に集中した非軸対称の物質移動係数分布になることは、短期間に大きな非軸対称配管減肉を引起す要因であることを示唆する。他の角度については、 $x/d=1.0 \sim x/d=3.4$ まで、値も小さくわずかな変化である。 $S_c=705$ の実験で $x/d=1.0$ の周方向物質移動係数の大きな値は上部部分 120° , 90° , 60° である、 $S_c=305$ の実験の周方向物質移動係数の大きな値は 120° , 150° , 180° である。周方向最大物質移動係数の値はどちらも 120° である。

A1.2.3. 旋回強度の異なるエルボ・オリフィスの形状係数分布

Fig.A1.15 は、エルボ・オリフィスのオリフィス背後の $S=0 \sim S=0.9$ までの形状係数分布である。どの条件においても代表的な 90° 方向の流れ方向形状係数分布である。Straight flow $S=0$ と Curved flow $S=0$ が最大形状係数分布 $x/d=1.7$, $K/K_0=3.15$ を含め全域ではほとんど重なる。Curved flow $S=0.28$ は、まだ、旋回の影響がなく 4 角度の物質移動係数が重なる軸対称の分布である。形状係数分布の最大値は上流側に移動し、最大形状係数分布 $x/d=1.36$, $K/K_0=3.58$ である。スワール数が $S=0.3$ になると 4 角度の物質移動係数分布は、オリフィスに近い側で差異が大きくなる。ここで示す形状係数は 4 角度の平均値である。スワール

数が $S=0.28$ よりも $S=0.3$ が全体的に少し大きな形状係数を示す。エルボ・オリフィスの実験 Curved flow $S=0.6$ になると形状係数分布の最大値はさらに上流側 $x/d=1.02$, $K/K_0=5.91$ に移動し、最大値は大きくなる。Curved flow $S=0.9$ になると形状係数分布の最大値はさらに上流側に移動し、最大値は $S=0.6$ より大きく $x/d=0.79$, $K/K_0=7.1$ になる。Curved flow $S_c=305$, $S=0.36$ のエルボ・オリフィスの実験 120° 方向の形状係数分布は、最大値が $x/d=0.69$ の位置であり、 $K/K_0=5.96$ の値を示す。旋回流強度の定義が異なりますが、回転旋回流発生装置のスワール数 $S=0.6$ と $S=0.9$ の間にある。 $S=0.6$ よりも、少し強い旋回流強度であることがこの形状係数分布から理解できる。

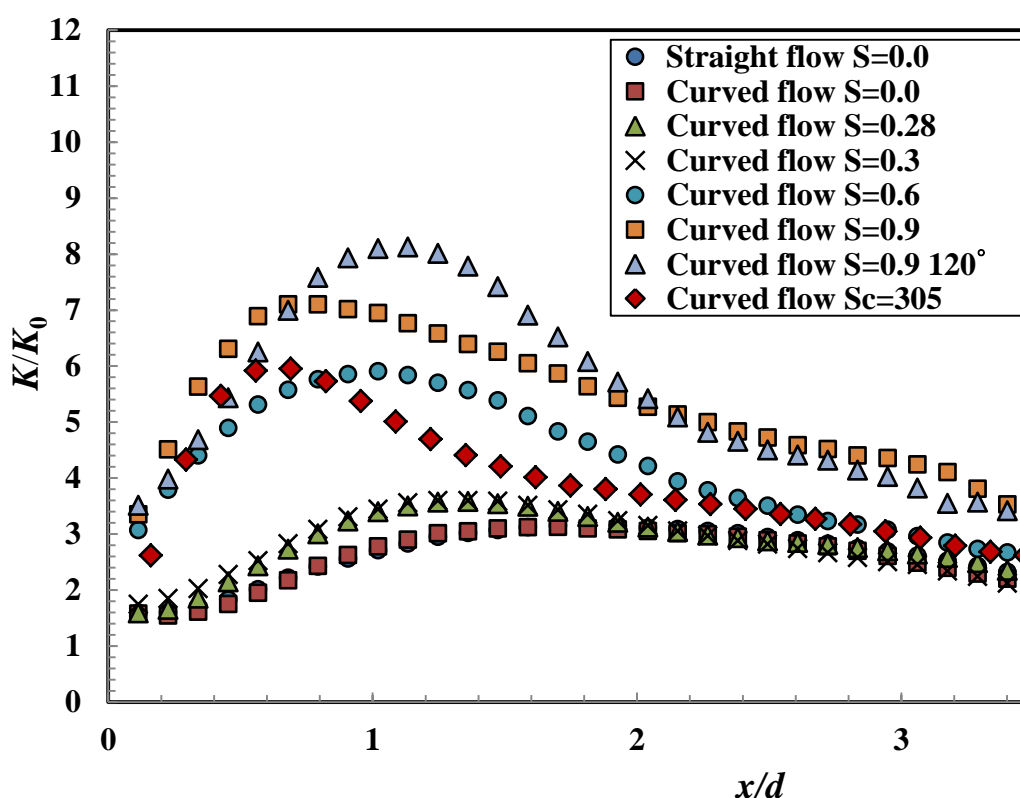


Fig.A1.15 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の最大物質移動係数

A1.2.4. 美浜 3 号機破断減肉とオリフィス背後の非軸対称配管減肉

Fig.A1.16 は、シュミット数 $S_c=705$ (30°C), $Re=3\times 10^4$ 管内平均流速は $U=0.43\text{m/s}$ エルボ・オリフィスのオリフィス背後 $x/d=1.0$ の周方向物質

移動係数と美浜原子力発電所 3 号機の配管破断事故を起こした $x/d=1.0$ の減肉断面を重ね合わせたものである。 $x/d=1.0$ で周方向物質移動係数分布は、角度によって大きな物質移動係数差がある。60°, 90°, 120°の 3 角度領域の減肉が大きく局部的に集中している。60°は $Sh=3.64 \times 10^3$ 、90°は $Sh=3.79 \times 10^3$ 、120°は $Sh=4.42 \times 10^3$ であり、徐々にシャーウッド数も大きく増大してゆく。それに比べて、最小値は 210°の $Sh=1.43 \times 10^3$ で、最大値の 1/3 の物質移動係数である。このように非軸対称性が強く局部的に集中した最大物質移動係数分布であることは、短時間に局部的に大きな配管減肉が起こりうる可能性を示していると考えられる。美浜原子力発電所 3 号機の配管破断事故の FAC による配管減肉について、配管ラインを美浜 3 号機の A ラインを縮尺したエルボ・オリフィスの実験装置を製作し、安息香酸を使用した減肉実験により模擬実験を試みた結果、配管の減肉上部部分に FAC による偏った非軸対称配管減肉を再現することができた。

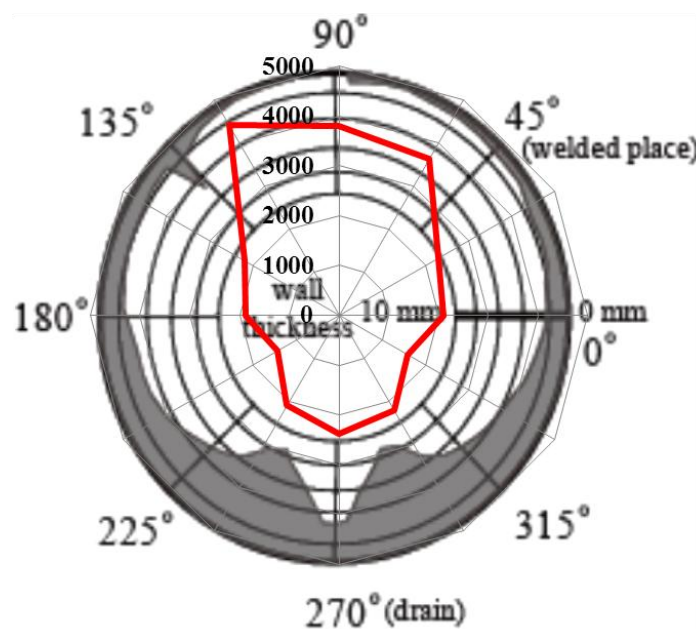


Fig.A1.16 エルボ・オリフィスのオリフィス背後の最大物質移動係数分布と美浜原子力発電所 3 号機の減肉断面 ($x/d=1.0$)

A1.3. オリフィス偏心と旋回強度の非軸対称配管減肉の比較

Fig.A1.17 は、オリフィス偏心とエルボ・オリフィスの非軸対称配管減肉の比較についての流れ方向物質移動係数分布である。オリフィス偏心無 0%・旋回強度無 $S=0$ の形状係数は \blacklozenge $x/d=1.5$, $K/K_0=4.2$ である。オリフィス偏心 0%で旋回強度 $S=0.25$ の最大形状係数は \blacksquare $x/d=1.39$, $K/K_0=5.24$ である。また、オリフィス偏心 8%で旋回強度 $S=0.25$ の最大形状係数は \blacktriangle $x/d=1.04$, $K/K_0=5.92$ である。形状係数の変化は、旋回強度による変化が大きく、オリフィスの偏心 8%の形状係数の値は小さい⁽³⁾。エルボ・オリフィス旋回無のオリフィス背後の形状係数は、Curved flow $S=0$ 、 \bullet は $x/d=1.7$, $K/K_0=3.13$ であり、エルボ・オリフィス旋回流で旋回強度 $S=0.9$ の場合の形状係数は、 \blacklozenge $x/d=1.13$, $K/K_0=8.13$, $\theta=120^\circ$ である。

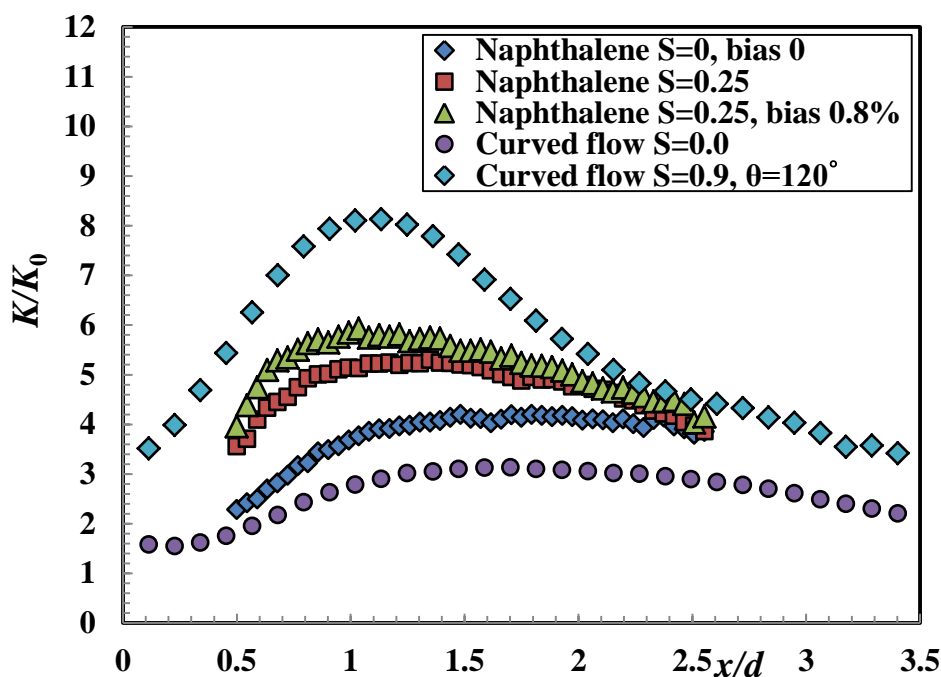


Fig.A1.17 オリフィス偏心とエルボ・オリフィスの非軸対称配管減肉の比較

オリフィス偏心の形状係数値に比べて、強い旋回が付加されたエルボ・オリフィスの形状係数値は大きい。旋回強度が増加すると物質移動係数値は大きくなり、物質移動係数分布の非軸対称性も強くなる。

A1.4. 結論

本研究は、FAC によるオリフィス背後の非軸対称配管減肉の発生メカニズムの解明を目的として、安息香酸を用いた実験を行い、エルボ・オリフィスのオリフィス背後の物質移動係数の計測と物質移動係数の妥当性の評価を行った。付録では、非軸対称配管減肉に及ぼす旋回流の影響について検討した結果をここにまとめる。

(1) 計測法の異なる直円管流オリフィス背後の物質輸送現象

3 種類の計測法による直円管オリフィス背後の物質輸送について、形状係数を使って比較したところ、ナフタリン昇華法 $S_c=2.29$ で計測した形状係数の最大値は $K/K_0=4.19$ である。安息香酸 $S_c=305$ で計測した形状係数の最大値は $K/K_0=3.36$ である。安息香酸 $S_c=705$ で計測した形状係数の最大値は $K/K_0=3.24$ である。電気分解法 $S_c=1.46 \times 10^3$ (20°C), $Re=5.5 \times 10^4$ で計測された形状係数の最大値は $K/K_0=1.78$ である。電気分解法 $S_c=1.46 \times 10^3$, $Re=3.5 \times 10^4$ で計測された形状係数の最大値は $K/K_0=1.63$ である⁽²⁾。3 種類の計測法による直円管流のオリフィス背後の形状係数を比較するとそれぞれ一定の値を示すが重なることはない。しかし、その違いは S_c 数の小さいものほど最大形状係数値 K/K_0 の値が大きい。実機のシュミット数は数 100 と考えられていることから、安息香酸のシュミット数は $S_c=305$ であり、「一般的に気体のシュミット数はおよそ 0.2 から 5 程度、液体の場合は 10^3 から 10^4 程度の値をとると言われている。」気体と液体の間を補完するものであり、高温・高圧の熱水が流れるプラントに対する模擬実験において、配管内の物質移動係数の計測に対応できたことと物質輸送現象の解析方法が得られた。

(2) 旋回強度の定義の異なる形状係数分布の比較について

エルボ・オリフィスの実験 Curved flow $S=0.6$ になると形状係数分布の最大値は、 $x/d=1.02$ に移動し、 $K/K_0=5.91$ は大きくなる。Curved flow $S=0.9$ になると形状係数分布の最大値はさらに上流側に移動し、最大値は $S=0.6$ より大きく $x/d=0.79$, $K/K_0=7.1$ になる。Curved flow $S_c=305$, $S=0.36$ のエルボ・オリフィスの実験 120° 方向の形状係数分布は、最大値が $x/d=0.69$ の位置で $K/K_0=5.96$ の値を示す。旋回強度の定義が異な

るが、回転旋回流発生装置のスワール数 $S=0.6$ と $S=0.9$ の間にあり、スワール数(旋回強度) $S=0.6$ の形状係数値より少し大きな値であり、最大形状係数の位置がオリフィスに近い上流側に大きく移動する。

(3) オリフィス偏心と旋回強度の非軸対称配管減肉の影響

オリフィス偏心の形状係数値の変化に比べて、強い旋回が付加された非軸対称配管減肉の形状係数値の変化は大きい。旋回強度が増加すると物質移動係数値の変化は大きくなり、物質移動係数分布の非軸対称性も強くなる。

参考文献

- (1) 五十嵐裕也, 高野剛, 山縣貴幸, 藤澤延行, 円管内曲がり旋回流のオリフィス背後におけるステレオ PIV 計測, 日本機械学会山梨講演論文集, 2014, pp.123-124.
- (2) 辻義之, 近藤昌也, FAC 評価における流動場および物質移動の影響と課題, 日本機械学会論文集(B 編), 78 巻 787 号, 2012-3, pp. 83-87.
- (3) N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Kanno, A. Ito, T. Takano, The mechanism of asymmetric pipe-wall thinning behind an orifice by combined effect of swirling flow and orifice bias, Nuclear Engineering and Design, 252, 2012, pp. 19-26.