

Title	連続有孔板における流れの干渉と整流に関する研究
Author(s)	門, 久義
Citation	大阪大学, 1986, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1751
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

連続有孔板における流れの干渉と整流に関する研究

昭和 61 年 7 月

門 久 義

主な記号

第	1章	序				•••••	• • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1
	1.1	まえ	がき	•••••		•••••		••••	1
	1.2	既往	研究と	その動向		•••••			3
	1.	. 2. 1	管路要家	素の抵抗に	こ対する流れ	の干渉		•••••••••••	3
	1.	2.2	流量計(こ対する洌	えれの干渉		• • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • •	4
	1.	. 2. 3	流れの	整流・		•••••			5
	1.3	本研	「究の目的	りと概要	•••••	•••••			7
第	2章	連続	オリフィ	ィスの抵抗	ことその干渉				11
	2.1	まえ	がき	•••••		•••••		• • • • • • • • • • • •	11
	2.2	実験	装置お。	よび方法	•••••	•••••		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	12
	2.	2.1	実験装調	置		•••••	• • • • • • • • • • •	••••••	12
	2.	. 2. 2	供試才「	リフィス	•••••	•••••			13
	2.	2.3	抵抗係夠	数と干渉係	《数の定義		• • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	13
	2.3	苚狨	まよび	多連オリラ	7ィスに生ず	る抵抗	•••••	•••••••••••	16
	2.	3.1	単独オ!	リフィスの)抵抗係数		• • • • • • • • • • • •	••••••	16
	2.	3.2	多連オリ	リフィスの)抵抗係数				17

	2.4	1.1	2連オ	リフィ	、ス	••••	••••	• • • • • •		••••	••••	• • • • •	• • • •	• • • •	•	19
	2.	4.2	多連オ	リフィ	ィス	••••	••••	•••••	• • • • •	••••	••••			••••	•	21
2	2.5	多連	オリフ	ィスを	構成す	る各	オリ	フィス	の特	性	•••		• • • •	• • • •	• -	23
	2.5	5.1	等間隔	多連オ	トリフィ	スの	干涉	特性	••	••••	••••		• • • •	• • • •	• `	23
	2.5	5. 2	不等間	隔多連	ミオリフ	ィス	の干	渉特性		••••	••••	• • • •		• • • •	•	25
2	2.6	オリ	フィス	近傍0)管内流	速お	よび	静圧分	布		••••		• • • •	• • • •	•	27
	2.6	5.1	単独オ	リフィ	マス	••••	••••	•••••	••••	••••	••••		•*•••	• • • •	•	27
	2.(6.2	多連オ	リフィ	ス		••••	• • • • • •		••••	•••••			• • • •	•	28
2	. 7	むす	σ	•••••		••••	• • • •	•••••	• • • • •	••••	••••		••••	• • • •	•	30
														÷		
第3	章	連続	有孔板	の抵抗	ことその	干涉		• • • • • •	• • • • •	••••	••••		• • • •	••••	•	32
3	1.1	まえ	がき	•••	• • • • • • •	••••	••••	• • • • • •	••••	••••	••••	• • • •	• • • •	• • • •	•	32
_																

3.2 実	険装置および方	法				• • • • •	32
3.2.1	実験装置	•••••				• • • • •	32
3.2.2	供試有孔板	•••••				• • • • •	33
3.2.3	諸量の定義	•••••			• • • • • • • • • • • • •	• • • • •	35
3.3 単刻	虫および連続有	孔板の抵抗	系数・	• • • • • • • • • • •		• • • • •	36
3. 3. 1	単独有孔板の	抵抗係数	•••••		• • • • • • • • • • • •	• • • • •	36
3. 3. 2	連続有孔板の	抵抗係数	••••••		• • • • • • • • • • • •	• • • • •	37
3.4 連絡	売有孔板の干渉	•••••	• • • • • • • • •	• • • • • • • • • •		• • • • •	38
3.4.1	有孔板間隔の	影響 …	• • • • • • • • •	• • • • • • • • • • •		• • • • •	38

	3.	4.2	ねじれ	,角の	影響	•••	• • • • •	• • • •	••••	• • • • •		•••••	• • • • • •	••••	Ĺ	12
3.	. 5	むす	び	••••		••••			••••	• • • •		•••••	• • • • •	••••	1	46
第4章	章	多孔	板の抵	抗係	数	••••	• • • • •			••••		••••		•••	2	17
4.	. 1	まえ	しがき	••	•••••	••••	• • • • •			• • • •		••••	••••		L	47
4.	. 2	実験	装置お	よび	方法	••••	• • • • •	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	• • • • •	•••	L	17
	4.	2.1	実験装	置		••••	• • • • •			• • • •	• • • • •	••••		••••	L	47
	4.	2.2	供試多	孔板	••	•••••	• • • • •	••••	••••	• • • •	• • • • •	••••	• • • • •	••••	2	18
4	. 3	多孔	し板前後	その流	n	••••	• • • • •		••••		• • • • •	••••	• • • • •		1	49
	4.	3.1	軸速度	分布		•••••	••••	••••	••••	• • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	••••	L	19
	4.	3.2	静圧分	↑布	• • • •	••••	• • • • •		••••	• • • •		••••		••••	Į	50
	4.	3.3	乱れ分	市		••••	• • • • •	••••	••••	• • • •	• • • • •	••••	• • • • •	••••	Į	51
4	. 4	抵抗	〔係数	••	•••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	• • • •		••••	• • • • •	••••	Į	52
	4.	4.1	抵抗係	数の	実測値	•	• • • • •	••••	••••	• • • •	• • • • •	•••••	• • • • •	••••	ţ	52
	4.	4.2	抵抗係	数の	特性	•••	• • • • • •	••••	••••	• • • •	• • • • •	••••	• • • • •	••••	Ĺ	54
	4.	4.3	金網の)抵抗	係数と	の比較	ž	••••	• • • • •	• • • • •	• • • • •	••••	• • • • • •	••••	Ę	55
4	. 5	抵折	に係数の)実験	式	••••	• • • • •		••••	• • • •	• • • • •	••••	• • • • •		Į	57
	4.	5.1	流れの)モデ	ルと抵	抗係数	Ż	••••	• • • • •	• • • •	• • • • •	••••	••••	••••	Ę	57
	4.	5.2	実験式	ረላወ	拡張	•••	• • • • •		••••		• • • • •	•••••		••••	ť	58
4.	. 6	むす	で	••••	• • • • • •	••••	• • • • •		••••	• • • •			• • • • •	••••	e e	51

第5章 多	し板の流出角係数	·····	•••••	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	62
5.1 ±	えがき		•••••	•••••	62
5.2 実	険装置および方法	•••••	•••••	•••••••••••	62
5.2.1	実験装置	••••••	••••••	•••••	62
5.2.2	供試多孔板	•••••		•••••••••	64
5.3 二2	欠元流入における流出	角係数	• • • • • • • • • • • • •		64
5.3.1	流入角と流出角の関	係 …	•••••	•••••••••••	64
5.3.2	流出角係数	••••	•••••		65
5.4 旋回	回流入における流出角	係数 …	•••••	• • • • • • • • • • • • • • •	66
5.4.1	多孔板前後の旋回流	n	•••••		67
5.4.2	流出角係数	•••••	•••••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	••• 69
5.5 旋[ョ流の整流	•••••	• • • • • • • • • • • •	•••••••••••••	70
5.5.1	抵抗係数	••••	••••••	••••••••••••••••	••• 71
5.5.2	軸速度分布の平坦化	•••••	•••••	•••••••••••••••••	72
5.6 むす	すび	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	•••••••••••••••	73
第6章 多子	七板を用いた流れの整	流理論	•••••	••••••••••••••••	••• 74
6.1 まえ	こがき ・・・・・・・	•••••	•••••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	74
6.2 二之	欠元流れの整流とその	考察 ···	•••••		75
6.2.1	基礎式と一般解	•••••	•••••		75
6.2.2	多孔板への流入・流	出流れ	•••••		77

6.2.3	多孔板における接続条件 …	••••••	79
6.2.4	解析結果とその考察		80
6.2.5	応用例		81
6.3 軸3	対称旋回流れの整流とその考察		83
6.3.1	基礎式と一般解 ・・・・・・・・		83
6.3.2	整流装置への流入・流出流れ		87
6.3.3	多孔板における接続条件 ・・		88
6.3.4	1枚の多孔板による整流 ・・		91
6.3.5	2枚の多孔板による整流 ・・		93
6.4 実月	月整流装置の性能 ・・・・・・・・		96
6.4.1	整流装置の設計 ・・・・・・・・		96
6.4.2	整流装置の性能予測 ・・・・・		98
6.4.3	実験結果および考察 ・・・・・		100
6.5 むき	すび		102

第7章	流量	計測におけ	る整流す	も置の効果	•••••	•••••	•••••	103
7.1	まえ	がき …	•••••			•••••	•••••	103
7.2	実験	装置および	方法	•••••	•••••	•••••	•••••	104
7.	2.1	実験装置	•••••	• • • • • • • • • • • • • •	••••••••••	•••••	• • • • • • • • • • •	104
7.	2.2	供試オリフ	ィス		• • • • • • • • • • • •	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	105
7.	2.3	整流装置	•••••			••••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	106

7.2	2.4	諸量の	測定	• • ·		• • • • •	•••••	• • • • •	••••		• • • •		••••	107
7.3	空間	曲り下	流の流	in	•••	• • • • •	••••	• • • • •	••••	••••	• • • •	• • • • •	••••	108
7.3	3. 1	整流装	置を設	置し	ない場	合	•••	• • • • •	••••	• • • • •	• • • • •	••••	• • • •	108
7.3	3. 2	整流装	置を設	置し	た場合	1				••••	• • • •	• • • • • •	••••	109
7.4	曲り	下流に	おける	流量	計測	••	••••		••••			••••	••••	110
7.4	4. 1	東一甲	10	••••			••••	• • • • •	• • • •	• • • • •	• • • •	•••.••	••••	111
7,4	1.2	空間二	重曲り	•	••••		•••••	• • • • • •	••••	• • • • •	• • • • •	••••	••••	113
7.4	4.3	空間三	重曲り			• • • • •	••••	• • • • •	• • • •	• • • • •		••••	••••	114
7.4	1.4	必要直	管長さ	の短編	宿	••••	•••••		••••	• • • •	• • • • •	• • • • •	• • • •	115
7.5	むす	び	•••••			• • • • •		• • • • •	••••			••••	••••	116
第8章	結	종스 여명		••••	••••	• • • • •	••••	• • • • •	•••••	• • • •	••••	••••	••••	117
謝	辞	••••	••••	••••		• • • • •	••••	• • • • • •	••••		• • • • •		••••	119
														•
参考文	献		•••••	••••		••••	••••	•••••	••••		• • • . • •	••••	••.••	120
著者の	研究	論文	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••		••••				••••	129

主な記号

- A : 軸速度分布の平坦度、式(5.6)参照
- A₂ : 式(6.63)参照
- B₂ : 式(6.63)参照
- *C*c : 収縮係数
- Cv : 速度係数
- Cp : 圧力係数
- D : 管直径
- Dc : 有孔板の穴の中心円直径
- De: : 有孔板の穴一つ当りの管断面積に等しい円管の内径
- *d* : 穴径、あるいは金網の線径
- f.g,h : それぞれ 4, y, pの非減衰成分を示す関数、あるいは係数
 - I : 多連オリフィス、あるいは連続有孔板の干渉係数
 - *Ii* : 多連オリフィスを構成する個々のオリフィスの干渉係数
 - *K* : 抵抗係数
 - *R* : 旋回流における多孔板の抵抗係数
 - *K*¹ : 厚比の大きな多孔板の抵抗係数
 - *K*s : 厚比の小さな多孔板の抵抗係数
 - K_t : 整流装置の抵抗係数
 - K。: 不均一多孔板の抵抗係数の平均値

- km : 一次の第1種円筒関数の零点
- L : 曲り部からオリフィスまでの距離
- 3 多連オリフィス・連続有孔板・多孔板の間隔、千鳥形多孔板の穴ピッチ、あるいは金網のピッチ
- m : オリフィスの絞り面積比
- N : 有孔板の穴数
- n : 多連オリフィスの連数
- *P* : 静圧またはその無次元量
- ▶ : 静圧または管断面内平均静圧からの無次元じょう乱静圧
- ₱u,₱a : 単独または多連オリフィス(あるいは連続有孔板)の十分上流および下 流の静圧こう配線から推定したオリフィス(あるいは有孔板)直前・直 後の静圧
 - △ *p* : オリフィスの差圧
 - △ 𝔑 : 連続オリフィスのオリフィス間静圧差からその間の直管摩擦損失を差し 引いた静圧
 - *R* : 管半径
 - Re : レイノルズ数、Ud/v
 - Rep : レイノルズ数、UD/v
 - r : 径方向座標またはその無次元量
 - s : 抵抗係数の平均値からの変化量
 - t : 板厚

- te : 金網の相当厚比
- U : 平均流速
- Uc : 多孔板の穴を通る流れの代表速度
- V : 流速またはその無次元量
- V_{Zmax} : 管内軸速度の最大値
- *v* : 微小じょう乱、あるいは乱れの速度成分
- X: 管断面内の水平方向座標
- Y : 管断面内の鉛直方向座標、あるいは多孔板の抵抗公式のパラメータ
- *x*, *y* : 二次元直交座標
 - *z* : 軸方向座標またはその無次元量
 - α : オリフィスの流量係数、あるいは多孔板の流出角係数
 - α。 : 基準オリフィスの流量係数
 - α_s : 旋回流入における流出角係数
 - β : 開口比
 - *β*。 : 単独有孔板の開口比
 - γ : Ω r からの無次元じょう乱循環関数
- **5**0, 5 : 単独および多連オリフィス(または連続有孔板)の抵抗係数
- θ,θ。: 連続有孔板のねじれ角とその最大値
 - λ : 管摩擦損失係数
 - λ_n : じょう乱減衰成分の減衰特性値
 - *v* : 流体の動粘度

- P : 流体の密度
- φ : 旋回流れにおける流れ角
- ∳₂ : 多孔板からの流出角
- ψ : 一様流からの無次元じょう乱流れ関数
- Ω : ωの無次元量、ω R / U、あるいは無次元角運動量
 - ω : 旋回成分の平均剛体回転角速度

添 字

- *i*: 領域*i*、多孔板*i*、あるいは*i*番目のオリフィスに属する量
- n : フーリェ・ベッセル級数のn次波数成分
- r, θ, z : それぞれ径、周、軸方向成分
 - x, y : それぞれ x、y 軸方向成分
 - 1 : 上流側の量
 - 2 : 下流側の量
 - ∞ : 無限上流または下流の量

第1章 序 論

1.1 まえがき

流体を輸送する水路・配管技術は、古代ローマにおける大規模な水道用水路建設から、 現代における原子力発電所や石油精製工場などの各種プラントの配管に至るまで、文明の 維持・発展に必要不可欠な技術の一つとして発達してきた。現代社会においては、例えば 大都市の上・下水道や高層ビルにおける空調・衛生用ダクト・管路配管、あるいは各種プ ラントや工場、さらには各種機械・設備における多種多様な配管など、その例を枚挙すれ はいとまが無いであろう。しかし、管内を流れる流体のエネルギ損失に関する精密な実験 やその予測に関する研究が系統的に行われるようになったのは、ほぼ19世紀に入ってから である⁽¹⁾。

Reynoldsの実験⁽²⁾ に代表される当時の管内流体摩擦に関する研究以来、管路抵抗に関 して非常に多くの研究が行われ、現在では各種管路抵抗だけでなく、例えばベンド、エル ボ、分岐・合流管、ノズル、ディフューザ、弁、絞り等の多くの配管要素の抵抗について も詳しく調べられている⁽³⁾。

近年、各種設備の大型化や設備配置の合理化が必要になるとともに、配管設計技術者は 多くの管路要素を非常に接近して取り付けなければならなくなってきた。しかし、このよ うな配管内を流れる流体のエネルギ損失を見積る場合には、管路抵抗に関する上述のよう な資料が必ずしも有効でないことがある。その理由は、これらの資料が十分発達した管内 流れにおける実験結果に基づいているのに反して、管路要素が接近して設置されと、上流 側の要素から流出した流れが十分発達しないまま下流側の管路要素に流入することになり、 流れの干渉が生ずるからである。流れの干渉は、流入する流れの状態とそこにある管路要 素の形状の組み合わせに応じて、複雑に変化する。各種管路要素の組み合わせによる抵抗 の干渉問題については 1.2.1で概説するが、このような問題を一般的に明らかにするため には、今後さらに膨大なデータの蓄積が必要となるであろう。

抵抗の干渉とは別に、さらに深刻な流れの干渉問題の一つとして、流量計に対する干渉 がある。流量計は配管内の流量を管理するための重要な計測機器であり、その精度に対す る要求は非常に厳しい。そのため、流量計の流量係数に及ぼす上・下流側配管要素の影響 に関しては非常に多くの研究が行われており⁽⁴⁾、1.2.2で概説する。

流量計の測定精度を低下させないで、しかも上流側必要直管長さをできるだけ短縮した いという、一見矛盾した要求に対して考えられる一つの解決策は整流である。各種配管要 素下流に生ずる偏流や二次流れを整流し、発達した管内流れを生成することができれば、 その下流にある流量計は上流側配管要素による干渉を全く受けなくなる。とくに、絞り流 量計に対してこのような整流装置を用いた場合、流量計の上流側必要直管長さを短縮でき るだけでなく、整流装置と絞り流量計の抵抗の合計が、整流装置を設置しない場合に用い るべき絞り流量計の抵抗値よりも、小さくなることさえ可能になる。このような理由から、 整流装置に関する研究も比較的多く行われており、1.2.3で概説する。

以上のように、近年における管内流れの重要な問題の一つとして、流れの干渉、とくに 各種管路要素の抵抗に対する干渉と流量計の流量係数に対する干渉が、非常に注目される ようになってきている。そして、後者の問題に関連して、干渉を防ぐ方法として性能の良 い整流装置の研究・開発が非常に望まれている⁽⁵⁾。 1.2 既往研究とその動向

1.2.1 管路要素の抵抗に対する流れの干渉

実際の配管系では、様々な局部抵抗が相接近して存在することも多く、その場合の全エ ネルギ損失つまり全抵抗は、個々の本来の抵抗を代数的に加算したものとは必ずしも等し くならない。このような現象を、損失あるいは抵抗の干渉と呼ぶ。この干渉は要素間の距 離、流路形態および表面あらさ、要素と要素の空間的位置関係、レイノルズ数、分岐・合 流管の場合にはさらに流量分配比などにより大きく変化するので、すべての場合について データを蓄積するには膨大な時間と労力を要するであろう。しかし、工業上多く使用され る管路要素の組み合わせについては、干渉の程度を見積るための基本的研究がかなり発表 されている。

エルボとエルボの組み合わせについては、Kirchbach⁽⁶⁾、Schubart⁽⁷⁾、村上・清水 ^{(8),(9)}、ベンドとベンドに関しては、村上・清水⁽¹⁰⁾、伊藤・今井⁽¹¹⁾、ベンドとディ フューザでは、Miller⁽¹¹⁾、連続分岐管については、高木・細川⁽¹²⁾、細川・森川⁽¹³⁾、 Parr⁽¹⁴⁾、川上ら⁽¹⁵⁾等の研究がある。これらのうち、エルボとエルボ、ベンドとベンド、 ベンドとディフューザに関して実用的観点から詳細にまとめられたもの⁽¹¹⁾や、相互干渉 の問題に詳しく考察を加えたもの⁽¹⁶⁾もある。しかし、上述のもの以外の管路要素におけ る損失の干渉については、ほとんど研究が行われていないのが実情である。

各種の弁やダンパ・絞りなどのように急縮小・急拡大流れを伴うものについては、その 下流側に大きなはく離領域が生ずるために干渉も激しく、しかも干渉の起こる区間が相当 長くなるものと予想される⁽¹⁶⁾。この問題に関するものとしては、 Shermanらが加圧水型 原子炉における冷却水配管での流量調整用可変抵抗器として、連続多孔オリフィス板の抵 抗特性を調べたもの⁽¹⁷⁾や、山田の多段減圧オリフィス装置に関する特許⁽¹⁸⁾などがある。 しかし、これらはともに抵抗装置の開発に的を絞ったものであり、連続絞りの抵抗の干渉 問題として広範な実験が行われたものではない。

管路要素の抵抗の干渉問題については、以上述べたような状況にあり、今後の大きな研 究課題の一つとして残されている⁽¹⁾と言っても過言ではないであろう。

1.2.2 流量計に対する流れの干渉

現在一般に使用されている流量計は、オリフィス⁽¹⁹⁾、ノズル⁽¹⁹⁾、ベンチュリ管⁽²⁰⁾、 などの絞り流量計、電磁流量計⁽²¹⁾、超音波流量計⁽²²⁾、タービン流量計⁽²³⁾、カルマン 渦流量計⁽²⁴⁾などがある。これらの流量計の校正は、通常それに流体を流し、その流量を 標準流量計によって測定することにより行われる⁽²⁵⁾。これに反してオリフィスやノズル などの絞り流量計は、その流量係数がJIS 規格に与えられており、絞り各部の寸法を規格 どおりに製作し、絞り前後の圧力差および流体の密度を測定すれば、流量を求めることが できる。大口径の流量計や特殊な流体用流量計、あるいは校正試験の困難なところに用い る流量計では、後者のような流量計が望ましいことは言うまでもない。工業計測の場でオ リフィスやノズルが広く用いられている⁽²⁶⁾理由は、その機構の簡単さとともに、上述の ように、標準流量計によって直接校正する必要がないことにあると思われる⁽²⁵⁾。

絞り流量計の測定精度に対する信頼性は高く、通常± 0.5%以上の精度が要求される。
それゆえ、その流量係数に及ぼす上・下流側配管要素の影響を除くために、かなり長大な
直管を設けるように規定されている。しかし、近年における各種設備の大型化や設備配置
の合理化に伴って、このようなことが困難となり⁽²⁶⁾、絞り流量計の流量係数に対する各

種配管要素の干渉問題とその対策が注目されるようになった(4)。

絞り流量計に対する干渉の問題について主な研究を挙げると、オリフィス、ノズル、ベ ンチュリ管の上流側必要直管長さに関する広範な実験⁽²⁷⁾、単一、空間曲りがノズル、オ リフィスに与える影響⁽²⁸⁾、ベンチュリ管やベンチュリノズルに与える影響^{(29), (30)}、 拡大・収縮管がオリフィスやベンチュリノズルに与える影響^{(31), (32)}、オリフィスに対 するベルマウス付管入口の影響⁽³³⁾、弁やベンド類の影響^{(34), (35)}、さらにはオリフィ ス、ベンチュリノズル、欠円オリフィス、ノズル等に対する旋回流れの影響⁽³⁶⁾などがあ る。また、流入する流れの旋回強度とオリフィスの流量係数との関係⁽³⁷⁾や、軸速度分布 とオリフィスの流量係数との関係^{(38), (39)}を調べた研究もある。

以上のような多くの研究成果によって、絞り流量計に対する各種配管要素の影響がかな り明らかになってきている⁽⁴⁾が、設計資料として利用したり、流量係数の補正値を正確 に予測するためには、まだまだ不十分である。そのため、流量計に対する流れの干渉問題 は、工業計測の分野において非常に深刻な問題となってきている。そこで、流れの影響を 受けにくい流量計の開発や、流れを整流して干渉を少なくする方法などの新たな研究課題 が注目され、これによって流量計に対する流れの干渉問題を克服しようとしているのが実 情である。

1.2.3 流れの整流

流れの整流に関する研究は、1900年代に入ってから風洞を用いた実験的研究が行われる ようになって、主流のじょう乱や乱れを減少させる必要から始まったと言えよう。その足 取りをたどってみると、まず金網や多孔板を用いて主流のじょう乱速度分布の低減率と抵 抗係数の関係を実験的に調べたCollar⁽⁴⁰⁾やMacPhail⁽⁴¹⁾の研究を挙げることができる。 また、多孔板、格子、金網、織布などの抵抗係数について、TaylorとDavies⁽⁴²⁾は詳しく 実験と考察を行い、Adler⁽⁴³⁾は金網の抵抗係数とマッハ数の関係を調べた。そして、金 網による風洞の乱れの減衰を調べていたDrydenとSchubauer⁽⁴⁴⁾は、金網を流れが通過す る際に、直角方向の抵抗力だけでなく接線方向の力も重要であることを認識し、初めて接 線力を測定しその特性を詳しく調べた。その結果は2年後TaylorとBatchelor⁽⁴⁵⁾によっ て公表された。

その報告において、TaylorとBatchelor は抵抗による流れの整流理論を確立し、抵抗係 数とともに流出角係数の重要性を明らかにした。そして、DrydenとSchubauer の研究を引 用し、金網の流出角係数は抵抗係数に依存して定まることを明示した。その後、 Simmons とCowdrey ⁽⁴⁶⁾、Schubauer ら⁽⁴⁷⁾は相次いで金網の流出角係数に関する研究結果を公表 した。

これ以後、金網や多孔板の抵抗係数に関する研究はかなり報告されている^{(48) ~ (54)}が、 多孔板の抵抗については開口比との関係のみが考察され、穴径に対する厚さの比、すなわ ち厚比の差異による影響については、ほとんど考慮されていない。また、多孔板の流出角 係数に関しては、全く報告されていないようである。一方、整流に関する理論的研究は、 Taylorらの研究以後かなりの発展をみたが、そのほとんどが金網による風洞内の速度分布 の平坦化あるいは生成に関するもの^{(55) ~ (68)}である。

管内流れの整流、すなわち絞り流量計の上流側必要直管長さを短縮するための整流に関しては、1950年代以降、比較的多くの研究が行われた。抵抗体としては当初から金網は用いられず、多孔板が使用されてきた。その理由は恐らく目づまりに対する安全性、強度的

な信頼性、機械加工による製作の容易さなどにあると思われる。しかし、これらの研究は 上述のTaylorらの整流に関する研究の流れとは全く無関係に行われてきたため、多孔板の 抵抗係数や流出角係数を調べ、それに基づき整流装置を解析していくような試みは全くな かった。

整流装置に関する実験的研究は、Sprenkleら⁽⁶⁹⁾、Bluschkeら⁽³⁰⁾、鳥居ら⁽⁷⁰⁾,⁽⁷¹⁾ の報告などがある。これらの整流装置はいずれも穴の配列がほぼ一様になっている。その ため、偏流や二次流れを伴う流れは整流装置の下流で均一な軸速度分布となり、その後管 摩擦によって発達した管内流れへと移行するまでには、まだかなりの直管長さを必要とす る。田中^{(72),(73)}はTaylorらの考えを発展させて、このような整流装置について理論的 に考察を行っている。しかし、抵抗体として金網の特性を用いていること、軸速度分布を 平坦化することを目的としていることなどの点で、実用上問題を残している。

板面上不均一な抵抗分布をもつ多孔板によって、発達した管内乱流速度分布を作ること ができれば、絞り流量計の上流側必要直管長さをさらに短縮することが可能となる。しか し、このような目的をもつ整流装置に関しては、1枚の多孔板を用いた明石らの実験的研 究^{(74), (75)}を見るにすぎない。したがって、このような整流装置に必要な諸特性を詳し く検討することは、工学上非常に有用であると考えられる。

1.3 本研究の目的と概要

2節において、管内流れの干渉と整流に関する既往研究とその動向を明らかにした。
 その結果得られたいくつかの重要な問題点について、できる限り解明することが本研究の
 目的である。ここではこれらの問題点に関連して、各章の概要を説明する。

まず、連続して設置された管路抵抗の干渉において、最もその干渉が激しく、しかも干 渉距離が相当長くなると予想される⁽¹⁶⁾にもかかわらず、ほとんど調べられていない連続 絞りの干渉について、詳しく考察する。なお、本論文では、板面上に一つあるいは複数の 穴を開けた絞り板を有孔板と呼び、オリフィスおよび多孔板も含まれるものと考える。

第2章では、薄板オリフィスを管路に複数枚連続して設置し、そこに生ずる流れの干渉 を実験的に明らかにする。すなわち、同一絞り面積比のオリフィスを管路に最大5枚直列 に設置した多連オリフィスのエネルギ損失が、絞り面積比やオリフィス連数・間隔によっ てどのように影響されるかを実験的に解明するとともに、多連オリフィスを構成する個々 のオリフィスの抵抗特性についても調べる。さらに、多連オリフィス近傍の静圧や流速分 布の測定から、流れの相互干渉に関する定性的な考察を行う。

第3章では、一つあるいは複数の穴をもつ同一形状の有孔板を管路に2枚連続して設置 し、それに生ずる流れの干渉問題を実験的に明らかにする。すなわち、連続有孔板のエネ ルギ損失が、穴数や穴径あるいは開口比によってどのような差異を生じ、さらに有孔板間 隔や相対ねじれ角の変化によって、どのような影響を受けるかを実験的に詳しく調べる。 つぎに、管内流れの整流に用いられる多孔板の抵抗特性を明らかにする。

第4章では、千鳥形配列に穴を開けた多孔板についてその抵抗係数を測定し、それが開 ロ比と厚比によってどのように影響されるかを実験的に明らかにする。そして、抵抗係数 は開口比によって大きく変化するばかりでなく、厚比によってもかなり変化し、厚比が1 付近を境にその特性が全く異なることが示される。また、流れ学的考察に基づき、抵抗係 数を開口比と厚比によって評価できる実験式を導く。

第5章では、前章に引き続き千鳥形配列の多孔板について、その流出角係数を実験的に

詳しく調べる。その結果、多孔板の流出角係数は金網の場合とは全く異なり、主にその幾何学的形状である厚比、つまり穴径に対する板厚の比によって大きく値が変化することが わかる。さらに、円管内の旋回流れに対する多孔板の整流効果について実験を行い、旋回 成分の消去に最適な多孔板形状が見い出される。

最後に、第4、5章で明らかにされた多孔板の抵抗特性を参考にし、Taylorらの整流理 論⁽⁴⁵⁾を発展させた管内流れの整流法について詳しく考察する。

第6章では、まず二次元流れにおいて、流入する流れの速度分布と関係なく下流側に任 意の速度分布を生成する方法について述べ、整流理論の解説を行う。つぎに、軸対称旋回 流れを整流して下流側に十分発達した管内乱流速度分布を生ずる整流装置について、理論 的に詳しく検討する。旋回流れを上流側の流れとして解析する理由は、それが各種配管要 素下流によく発生し^{(76)~(78)}、絞り流量計の測定精度に大きく影響を与える^{(36),(37)} ので最も長い上流側直管長さを必要とするからである。整流装置の形態は複数の多孔板で 構成されるものを考える。流れの解析には作動円板理論を用い、作動円板における流れの 接続条件として第4、5章の多孔板の抵抗特性を利用する。そして、2種類の多孔板を組 み合わせた整流装置が最適な性能をもつことを明らかにする。さらに、それを試作して実 験を行い、十分実用に供し得ることを示す。

第7章では、絞り流量計としてオリフィスを取り上げ、配管要素の中で最も大きな直管 長さが必要とされる空間曲り下流において流量計測を行い、前章で設計・試作された整流 装置が実用上どの程度の効果を生ずるかを、実験的に詳しく調べる。その結果、本整流装 置はオリフィス流量計の上流側必要直管長さを大幅に短縮できることが明らかにされる。 以上のようにして、管内流れの干渉と整流に関連したいくつかの重要な問題が、本研究 によりかなり解明された。だが、管路抵抗の干渉問題については、広範な設計資料を完成 するうえで、今後まだ数多くの研究を必要とするであろう。一方、工業計測において非常 に深刻な問題となっている絞り流量計の干渉問題については、第7章において検討された 整流装置を用いることによってその干渉を十分抑制し、流量計測の精度の悪化を回避でき ることも明らかとなった。本研究において開発された整流装置は、工学・工業上の流量計 測にかなり貢献できるものと思われる。

第2章 連続オリフィスの抵抗とその干渉

2.1 まえがき

実際の配管系では、管路の構成要素が互いに十分な距離を保って配置されている場合ば かりでなく、相接近して存在することも少なくない。この場合、一つの管路要素を通過し た流れが、その後、管内流れとして十分発達する前に、再びつぎの管路要素に達すること になる。したがって、このような配管系に生ずる全エネルギ損失は、各構成要素がそれぞ れ単独で使用された場合のエネルギ損失を、代数的に加算したものとは必ずしも等しくな らない。管路系のコンパクト化が切望されている今日、このような管路要素間の相互干渉 問題は、とくに解明されるべき重要な課題となってきている⁽¹⁾。

干渉のある管路要素の組み合わせとしては、 1.2.1で述べたように、エルボとエルボ、 ベンドとベンド、ベンドとディフューザ、そして連続分岐管に関する研究がある。しかし、 これらの組み合わせ以外の管路要素における損失の干渉については、ほとんど研究が行わ れていないのが実情である。とくに、各種の弁やダンパ、絞りなどのように急縮小・急拡 大流れを伴うものについては、その下流側に大きなはく離領域が生ずるために、干渉も激 しく、しかも干渉の起こる区間が相当長くなるものと予想される⁽¹⁶⁾。

そこでこの章では、流路断面積が変化する管路要素の中で最も基本的な形態をもつ薄板 オリフィスを管路に複数枚連続して設置し、そこに生ずる流れの干渉問題を実験的に明ら かにする。すなわち、同一絞り面積比のオリフィスを管路に最大5枚直列に設置した多連 オリフィスのエネルギ損失が、絞り面積比やオリフィス連数・間隔によってどのように影 響されるかを実験的に解明するとともに、多連オリフィスを構成する個々のオリフィスの 抵抗特性についても調べる。さらに、多連オリフィス近傍の静圧や流速分布の測定から、 流れの相互干渉に関する定性的な考察を行う。

2.2 実験装置および方法

2.2.1 実験装置

実験装置全体の概略を図 2-1に 示す。地下水槽SからポンプPに よって揚水された水は、弁Vaから タンクTに送られる。この水は測 定部Mに導かれ、弁Vaを経て直角 三角せきWで流量計測された後、 水槽Sに戻る。タンクTの上部か らの配管は弁Vaをもつバイパス管 であって、弁Va、Va、







図 2-2 測定部の詳細

オリフィスは、規格 に定められた環状室を

V₂の開度の組み合わせ

によって、測定部Mに

おける流速と静圧を広

範囲に変化させること

ができる。

もつコーナタップ形式の圧力取出し板にはめ込まれ、図 2-2のように間隔 ? で管路に直列 に設置されている。なお、測定管には管璧静圧を測定するため、管璧に直径 1 mmの静圧測 定孔を設けている。各オリフィス前後並びに管壁の静圧は、プルドン管式精密圧力計によ って計測され、水温は直角三角せきWにおいて測定された。

2.2.2 供試オリフィス

実験に用いた薄板オリフィスは黄銅製で、その形状は 図 2-3に示すように JIS Z 8762 に基づいており、穴径 *d*が17.25, 30.00, 45.00 mm の3種類についてそれぞ れ5枚ずつ、穴径*d*が22.50, 37.50 mm の2種類はそれ ぞれ2枚ずつ、計19枚製作した。オリフィス前縁はとく に注意を払って仕上げ加工し、各オリフィスの流量係数 は規格を十分満足する精度であった。オリフィスを取り



図 2-3 供試オリフィス

付ける管は内径Dが75.0 mm の黄銅管で、オリフィスの絞り面積比m、つまり (d/D)²は 0.0529 ~ 0.36 の範囲である。

2.2.3 抵抗係数と干渉係数の定義

図2-4 (a),(b)のように、オリフィスが管内に単独に置かれた場合と、n個が連続して 置かれた、いわゆる多連オリフィスの場合における管璧静圧をの分布を考える。

まず図2-4 (a)の単独オリフィスの場合には、周知のように静圧はオリフィス前面でわずかに上昇するが、オリフィス面で急激に低下し、管径の半分ぐらい下流の流れの最収縮

部で極小値となり、その後徐々に回復する。 オリフィスから管径の数倍程度下流の断面で 静圧は極大となり、それ以後流れは通常の発 達した管内流れに漸近し、静圧も流体摩擦に よって直線的に降下していく。

さて、図中に示すように、オリフィスから 十分上流・下流における直線的な管壁静圧こ う配線を、いずれも破線のようにオリフィス 前面まで延長して求めた仮想の静圧、つまり オリフィスから十分上流・下流の管璧静圧か ら管摩擦損失圧力を考慮して推定したオリフ ィス直前および直後の静圧を、それぞれ丸、 丸とすると、単独オリフイスの抵抗係数5。は



図 2-4 記号の説明

式(2.1)で定義される。ただし、ρは流体の密度、Uは管内平均流速である。

$$\xi_{0} = \frac{p_{u} - p_{d}}{\rho U^{2}/2}$$
(2.1)

多連オリフィスの抵抗係数 ≤ は、それを一つのオリフィスとみなし、図2-4 (b) のよう に、その上流および下流における直線的静圧こう配線から推定される第1オリフィス直前 および直後の静圧 タュ、タュを用いて、単独オリフィスと同様に定義する。すなわち式 (2.2) である。

$$\xi = \frac{p_u - p_d}{\rho U^2 / 2}$$
(2.2)

いま、n連オリフィスの全抵抗が単独オリフィスの抵抗のn倍に等しければ、各オリフ ィス間で流れに相互干渉を生じていないと言えるが、もしオリフィスが互いに近接して置 かれているような場合には、抵抗の相互干渉が起こる。したがって、干渉係数1として式 (2.3)を定義する。

$$I = \frac{\xi}{n\xi_0} \tag{2.3}$$

なお、オリフィス間隔が十分ある場合には、1の値は当然1となる。

多連オリフィスの全抵抗に占める各構成オリフィスの抵抗分を明らかにするために、図 2-4 (b) に示すようにオリフィス間の静圧差からその間の管摩擦損失を差し引いた値△pi を用いて、個々のオリフィスの干渉係数ムをつぎのように定める。

$$I_{i} = \frac{\Delta p_{i}}{\xi_{0} \rho U^{2}/2} \tag{2.4}$$

ここで、添字iは多連オリフィスにおける上流からi番目のオリフィスに関する量を表す。

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} I_i$$
 (2.5)

さらに、単独および多連オリフィスにおけるオリフィス近傍の管璧静圧 p の分布を表す のに、前述のぬを基準として、式(2.6)で定義する圧力係数 C p を用いる。

$$C_{P} = \frac{p - p_{u}}{\rho U^{2}/2}$$
(2.6)

レイノルズ数Reoは、管内の諸量を用いて式(2.7)で表した。

$$R_{eo} = U D/\nu \tag{2.7}$$

ここで、νは流体の動粘度である。

なお、管摩擦損失の見積りにあたっては、Blasius の式を適用した。

2.3 単独および多連オリフィスに生ずる抵抗

単独および多連オリフィスの抵抗係数が、絞り面積比やオリフィス枚数あるいはオリフ ィス間隔に応じてどのような値となるのか、実験結果に従って説明する。

2.3.1 単独オリフィスの抵抗係数

JIS Z 8762 によれば、単独オリフィスの抵抗係数5%はつぎのようになる。

$$\xi_{a} = \frac{1-\alpha m}{1+\alpha m} \cdot \frac{1}{\alpha^{2}m^{2}}$$
(2.8)

ただし、αはオリフィスの流量係数であり、絞り面積比*m* とレイノルズ数*R* eoの関数である。また、沖⁽⁷⁹⁾によれば、与は*m*のみの関数として式(2.9)で与えられる。

$$\xi_{0} = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \left(\frac{2.75}{m} - 1.56\right)$$
(2.9)

実験に用いた個々のオリフィスの圧力損失を式(2.1) で定義する抵抗係数5°で表し、それのレイノルズ数 Repへの依存性

を示したものが、図 2-5である。 これから、本実験範囲内における 5ºはmのみによって定まり、 Rep に対してはほとんど一定の値とな ることがわかる。ちなみに、レイ ノルズ数 Rep が 5×10⁴ から10⁶ まで変化した場合の抵抗係数の変



図 2-5 単独オリフィスの抵抗係数(1)

化を式(2.8) によって計算してみると、m= 0.0529 のオリフィスでは 0%、m= 0.16 では 0.36 %の増加、m= 0.36 でも 2.3%増加する程度である。したがって、この実験 のレイノルズ数範囲においては、50の値はほぼ一定値をもつものとして扱うことが十分可 能である。



図 2-6 単独オリフィスの抵抗係数(2)

このようにして求められたち。と絞り面積比 mの関係を、図 2-6 に示す。実験値は沖の 式(2.9)と非常によく一致していることがわ かる。

2.3.2 多連オリフィスの抵抗係数
 多連オリフィスの抵抗係数 \$ とレイノルズ
 数R eo との関係を、図 2-7に示す。これは、
 面積比mが 0.16 で、オリフィス間隔 l/Dが
 2.5の多連オリフィスの例である。この図か

ら、いずれの場合も実 験範囲内では抵抗係数 らがレイノルズ数*Reo* によらずほぼ一定とな っていることがわかる。 このように、*Reo*を 変化させて、異なった



図 2-7 多連オリフィスの抵抗係数



図 2-8 各多連オリフィスの抵抗係数

面積比・間隔・連数をもった多連 オリフィスの抵抗係数をを測定し、 その一定値をオリフィス間隔1/D に対して示したものが、図 2-8で ある。図中の破線や各種の鎖線は、 いずれも同一面積比mの単独オリ フィスの抵抗係数5₀の連数倍、つ まりれらの値を示している。その 値がこのれらと等しくなるという ことは、多連オリプィスにおける 構成オリフィス相互間に抵抗の干 渉がないことを意味する。この図 からわかるように、5の実験値は 面積比や連数に関係なく、1/Dに

対してほぼ類似の傾向を呈している。すなわち、オリフィス間隔1/Dが小さい、つまりオ リフィスが比較的近接して置かれた場合には、5がかなり小さくなって干渉が激しいこと を示しているが、1/Dの増加とともに干渉は弱くなって5は大きくなり、1/Dが4程度以 上ともなれば干渉はほとんどなくなって、5はれ50に漸近している。

つぎに、この抵抗係数 5 を式(2.3) で定義した干渉係数 I で表現すると、図 2-9のよう になる。同図(a) は、面積比 mが 0.16 の2~5連オリフィスの結果をまとめたものであ る。この図から、いずれの場合もオリフィス間隔 1/Dが大きくなるに従って、干渉が少な



図 2-9 多連オリフィスの干渉係数

くなってくること、また連数に関しては、1/Dが 1.5以上では連数が多いほど、1/Dが 1 では逆に連数が少ないほど、干渉の程度が小さくなることが明らかである。

図 2-9(b)、(c)は、2および3連オリフィスについて面積比mの影響を見たものである。全体の傾向は図 2-9(a)と同様であるが、1/Dが一定の場合には面積比が大きくなるほど干渉を受けやすくなることがわかる。

2.4 オリフィス近傍の壁面静圧分布

多連オリフィスにおける壁面静圧の管軸方向への分布を測定し、単独オリフィスの場合 と比較することによって、多連オリフィスに生ずる抵抗の干渉問題を定性的に考察する。

2.4.1 2連オリフィス

面積比πが 0.16 のオリフィス2枚で構成される2連オリフィスにおいて、オリフィス



図2-10 2連オリフィスの壁面静圧分布

間隔*1/Dを*変えた場合 の壁面静圧分布を、図 2-10に示す。横軸の*2* は、上流側のオリフィ ス前面を原点とした管 軸下流方向への座標で ある。なお、この図に は、同じ面積比の単独 オリフィスの静圧分布 も比較のために併記し ている。また、測定し

た管内レイノルズ数 Rep の範囲は、(0.92 ~ 1.24)×10⁵ である。

この図において特筆すべきことは、 *UD*が 3.5以下の場合に、第1オリフィス直後から 第2オリフィスの上流 0.5Dまでの圧力係数*C* pの分布が、間隔*UD*にかかわらずほぼ同 じであり、しかもそれは単独オリフィス下流の分布にほぼ一致していることである。さら に、第2オリフィスの上流 0.5Dから第2オリフィス直前にかけて、*C* pの値が急激に増 加していることも注目すべきである。しかし、 *UD*が 4.5以上の場合には、第2オリフィ ス直前の*C* pの値も含めたオリフィス間の圧力係数*C* pの分布は、単独オリフィス下流の 分布にほぼ一致している。

つぎに、第2オリフィス直前・直後の圧力差を見ると、1/Dが 1の場合にはほとんどな く、1/Dが大きくなると増加するが、1/Dが 4.5以上になるとほとんど一定値のまま変わ らなくなり、その大きさは単独オリフィスの差圧とほぼ等しくなっている。第2オリフィ ス下流の静圧分布は、第1オリフィス下流の場合ほど(/Dの影響を受けず、単独オリフィ ス下流の分布と似ているが、(/Dが 3.5より小さくなると第2オリフィスから流出した噴 流の収縮部における静圧低下が顕著でなくなり、その後の圧力回復も弱まってくるようで ある。

以上のような結果から、2連オリフィスの干渉についてつぎのように考えることができ る。UDが 4.5以上の場合には、第1オリフィス下流の流れは第2オリフィスによってほ とんど影響を受けない。したがって、第1オリフィスの抵抗係数が受ける干渉の程度は、 その下流の流れが十分発達する前に第2オリフィスによって割り込まれるために生ずる影 響の程度である。そして、第2オリフィスが上流のオリフィスから受ける干渉の度合いは、 十分発達していない管内流れが流入するために生ずる影響の程度となろう。しかし、UD が 3.5D以下の場合には、第2オリフィスの上流側近傍の流れは、第2オリフィスの出現 によって激しく影響を受け、複雑な様相を呈していることが予測され、さらにその影響は 第2オリフィス下流にまで及んでいる。

とくに、1/Dが 1の場合、第2オリフィス前後の静圧はごくわずかであるが直後のほう が高く、その下流では圧力の最小値をもたず直ちに回復に向かっている。しかも、回復後 のC → の値が単独オリフィスのそれより大きくなっている。このことは、第1オリフィス 下流に形成された噴流が十分に拡大しないうちに第2オリフィスを通過するために、これ がかえって噴流の圧力回復を促進する効果を生じ、結果として単独オリフィスの場合より も圧力損失が少なくなっているものと考えられる。



図2-11 多連オリフィスの壁面静圧分布

2.4.2 多連オリフィス

図2-11に、面積比πが 0.16 の 単独および2~5連オリフィスの 静圧分布を示す。同図 (a)は抵抗 係数 5 に関して明らかに干渉が存 在する *UD*が 2の場合、同図 (b) は干渉がほぼ消失したと見られる *UD*が 4.5の場合の例である。

図2-11(a) の2~5連オリフィ スにおいて、各オリフィス下流の 静圧分布の形状は、連数にかかわ らずほとんど等しいと言える。た だし、それらは単独オリフィス下 流の静圧分布形状とはわずかに異 なっており、さらに第2オリフィ ス直前の静圧は、前述の2連オリ フィスのところで述べたように、

かなり大きな値を示している。また、3連以上のオリフィスにおける第3〜第5オリフィ ス直前、直後の圧力差はほぼ等しい大きさであり、第2オリフィスにおける圧力差はそれ に比較してかなり小さいことが明らかである。すなわち、等間隔に相接近して置かれた多 連オリフィスの場合、第2オリフィスによって流れが大きく変化させられ、第3オリフィ ス以降ではほぼ定まった流れ様相を呈するのではないかと推察される。

図2-11(b) からわかることは、各オリフィス下流の静圧分布形状やオリフィス前後の圧 力差が、連数にかかわらず等しいこと、しかもそれが第1~第5オリフィスのいずれの場 合でもほとんど変わらないことである。したがって、オリフィス間隔が 4.5の等間隔多連 オリフィスでは、オリフィス相互間の干渉がほとんどないということが納得できる。

2.5 多連オリフィスを構成する各オリフィスの特性

多連オリフィスの抵抗に関与する各構成オリフィスの特性を、式(2.4) で定義した個々のオリフィスの干渉係数 んを用いて、さらに詳細に考察する。

2.5.1 等間隔多連オリフィスの干渉特性

ー例として、面積比mが 0.16、オリフィス間隔ひDが 1.5の5連オリフィスにおける 第1~第5オリフィスに対応する干渉係数 I₁~ I₅とレイノルズ数 Reoとの関係を、図2-12 に示した。この図から、個々のオリフィスの干渉係数 I₄は、本実験範囲内ではほぼ Reoの



図2-12 5連オリフィスの各干渉係数

影響を受けないことがわかる。

図 2-13(a)、(b) は、面積比mが 0.16 の オリフィスを用いて、前者は5連オリフィス の第1~第5オリフィスに対応する干渉係数 *I*1~*I*5が、後者は2~5連オリフィスの*I*1~ *I*3がそれぞれオリフィス間隔*U*Dによってど のように変化するかを表したものである。同 図(a) から明らかなように、*UD*が 3.5以下



になると、各オリ フィスの特性の差 異が顕著になる。 それらは、あまり 干渉を受けない た 最も強い干渉を 受ける た、そして その中間の ム〜 ふ の三つのグループ

図2-13 多連オリフィスの各干渉係数

に分かれることが

わかる。とくに、 A~ Aが互いによく一致しているのが注目される。しかし、 UDが 4.5 以上になると、いずれの Aもともに 1へ漸近しており、各オリフィスの位置による差異が 明確でなくなる。

この傾向は、連数をパラメータとして示した図2-13(b) においても同様である。したが って、多連オリフィスの干渉係数 I の特性は、3連オリフィスの I₁、 I₂、 I₃の特性によっ てほぼ特徴付けられていると言うことができる。

図2-14(a)、(b)は、それぞれ面積比mが 0.0529、 0.36の3連オリフィスにおける $I_1 \sim I_5 \epsilon UD \ge 0$ 関係で表したもので、両図の $I_1 \sim I_5$ は、図2-13に示したmが 0.16の場 合と類似の傾向をもっている。詳細に見ると、図2-14(b)の $I_1 \sim I_5$ のいずれもが、UDが 十分大きくなっても 1に収束していないことがわかる。一方、図2-14(a)のようにmが小 さい場合には、UDの増加とともに $I_1 \sim I_5$ とも確実に 1に近づいている。しかし、このよ


図2-14 3連オリフィスの各干渉係数

うにmの値の差異によってんの収束性に比較的大きな違いがあるにもかかわらず、図 2-9 (c)に見たように、3連オリフィスの干渉係数Iはmの値によらず1/Dが 4.5以上でほぼ 1 となっていることは興味深い。このことは、Iがんの平均値として式(2.5)のように表 され、かつ図2-14に示す各んの収束特性から納得できる。

2.5.2 不等間隔多連オリフィスの干渉特性

個々のオリフィスの特性を詳しく見るために、面積比加が 0.16 の3連オリフィスにおいて、3枚のオリフィスを不等間隔に並べた実験を行った。その結果が図2-15である。これは図中に示すように、第2と第3オリフィスの間隔42-3/Dを 0(つまり2連オリフィ



ス)、 1、 2、 4.5でそれぞれー 定とし、第1と第2オリフィスの 間隔 l_{1-2} / Dを変化させたときの I_1 、 I_2 、 I_3 を表したものである。 図からつぎのことが明らかであ る。 $I_1 は l_{2-3}$ / Dの値にはほとん ど影響されず、ただ l_{1-2} / Dの変 化に対してごくわずか変わるだけ である。 I_2 も同様に、 l_{2-3} / Dに はほとんど影響されず、 l_{1-2} / D

図2-15 不等間隔3連オリフィスの各干渉係数

が 4.5以下になると急激にその値が低下する。したがって、第1オリフィスは第2オリフ ィスがかなり接近してくるとわずかな干渉を受けるが、第3オリフィスには干渉されない ことがわかる。また、第2オリフィスは、第1オリフィスによる干渉が非常に大きいため、 第3オリフィスの影響は無視できる程度である。

ムの挙動については2通りに分けて考える。まずℓ2-3 / Dが 4.5の場合には、ℓ1-2 / D に対してごくわずか変化するだけである。しかしℓ2-3 / Dが 1と 2の場合には、ℓ1-2 / D の値によって大きく変化し、ℓ1-2 / Dが10以上になってようやく一点鎖線で示す2連オリ フィスのℓ2の値に漸近している。したがって、これはつぎのようにも述べることができる。 第3オリフィスは、直前の第2オリフィスとの距離ℓ2-3 / Dが 4.5、すなわち第2オリフ ィスの干渉をほとんど受けない状態にある場合には、第1オリフィスの影響もごくわずか しか受けない。しかし、第2オリフィスの干渉を大きく受けるℓ2-3 / Dが 1、 2の場合に は、さらに上流にある第1オリフィスによっても大きく干渉され、その影響の及ぶ範囲は 1,-2 / Dが10程度にもなる。

2.6 オリフィス近傍の管内流速および静圧分布

多連オリフィスのエネルギ損失に関する干渉の問題を、管内流れ模様の観察から考察す る。実験は、内径Dが124 mmの管路に、面積比mが 0.16 の薄板オリフィスから構成され る多連オリフィスを設置し、それに空気を流して各オリフィス前後の数断面における管径 上の軸速度と静圧分布を求めた。測定には外径6 mmの3孔円筒形ピトー管を用い、それを 管直径に沿って挿入して得られるデータに基づき、軸速度 υおよび静圧 p を計算した。結 果は、管内平均流速Uで除した無次元流速υ/Uと、上述のオリフィス直前における仮想静 圧 μεを基準とした圧力係数 C p = (p - pu) / (P U²/2)によって表した。

2.6.1 単独オリフィス

図2-16は、単独オリフィス近傍の流速および静圧の分布を表す。図中の管軸に垂直な細線は各測定断面であり、そこを原点として、上半分には*い/U*、下半分には*C* の値をそれ ぞれ流れの方向を正にとって示している。軸速度分布を見ると、オリフィス直後で管中心 部の流速が非常に



大きく、噴流状態 は管径Dの3倍下 流の断面でも消滅 せず、 4.5D下流 の断面になって上

図2-16 単独オリフィス近傍の速度・静圧分布

流側の速度分布とほぼ近い分布となっている。

管断面内の静圧分布については、オリフィス下流 0.5Dでほぼ一様になっており、この 位置が流れの最収縮断面に近いことを示唆している。これより下流では、管中心部の噴流 速度が次第に減速するに従って圧力係数*C*pの値も大きくなり、圧力回復が行われている ことがわかる。しかし、 3D下流では*C*pの分布も再び断面にわたってほぼ一様となり、 とくに 4.5Dの断面においては完全に一様な静圧分布となっている。したがって、これ以



図2-17 5連オリフィス下流の 速度・静圧分布 後、流れは徐々に発達した管内流れへと移行し始めると思われる。 *い*Dが 4.5以上の 多連オリフィスにおいて干渉が非常に小さ くなる理由は、各オリフィスがこのような 流れの区間に設置されることによるものと 考えられる⁽¹⁶⁾。

2.6.2 多連オリフィス

図2-17は、干渉が激しく生ずる間隔*UD* が 2の5連オリフィス下流の流れ模様を示 したものである。まず第1オリフィス下流 の流れは、図2-16に示す単独オリフィス下 流の流れとよく一致しており、干渉係数*I*1 がほぼ 1となることを裏付けている。第2 以降のオリフィス下流 1Dにおける流れを 互いに比較してみると、静圧分布がほぼ平坦であり、流速分布も非常によく似ている。さらに、第1オリフィス下流 1Dにおける分布と比較してみると、流速分布はよく似ているが、静圧分布は後者の場合に管中心部でかなり大きな圧力回復があるため、平坦ではないことがわかる。したがって、第3~第5オリフィスへ流入・流出する流れはともにほぼ同じ流れ状態になっているのに対し、第2オリフィスへ流入する流れはまだそのような流れ状態には至らず、前後の流れ状態が異なっている。

以上のような流れの観察によって、多連オリフィスを構成する各オリフィスの干渉係数 んが、ほぼ 1に等しい A、急激に変化する A、ほぼ同じ特性を示す A以降の3種類に特徴 付けられる理由が定性的に明らかとなった。

図2-18の(a) では、*l/Dが*1の2連オリフィスにおいて第1および第2オリフィス下流 の流れ、(b) では*l*₁₋₂ / Dが 4.5、*l*₂₋₃ / Dが 1の3連オリフィスにおいて第2および第 3オリフィス下流の流れをそれぞれ示したものである。まず、図2-18(a) と図2-16の単独 オリフィス下流の流れを比較



(b) *l₁₋₁/D=4.5, l₁₋₁/D=1.0の3 連オリフィスの第2 および* 第3オリフィス下流

図2-18 多連オリフィス下流の速度・静圧分布

すると、第1オリフィスを起 点とした測定断面上の速度・ 静圧の両分布は、その形状お よび値ともほぼ等しくなって いる。したがって、2連オリ フィスの第2オリフィスの存 在が流れにはほとんど影響を 与えていないことがわかる。 そしてこれは、図2-13(b) において1/Dが 1付近になるとんが 0に近い値となることをよ く説明している。

図2-18(a)の第2オリフィス前後と、(b)の第3オリフィス前後のそれぞれにおける流 れの変化を見比べると、後者は明らかに第1オリフィスの影響を受けていると考えられる。 これは、図2-15において、(2-3 / Dが 1のときの 4 が (1-2 / Dの影響のために2連オリフ ィスの 4 の値と一致しないこととよく符合している。

2.7 むすび

同一絞り面積比のオリフィスを管路に直列に設置した多連オリフィスに生ずるエネルギ 損失や、管軸に沿う壁面静圧を測定するとともに、それを構成する各オリフィス近傍の静 圧および流速分布を調べた結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) 多連オリフィスの抵抗係数は、単独オリフィスの場合と同様、本実験範囲内において、レイノルズ数に無関係にほぼ一定値となる。
- (2) 多連オリフィスの抵抗係数に及ぼす干渉に関しては、以下のことがわかった。
 - (a) オリフィスの面積比および連数が同じ多連オリフィスでは、オリフィス間隔が小 さいものほど干渉を受けやすいが、間隔が管径の 4.5倍以上になると、ほとんど干 渉が生じなくなる。
 - (b) オリフィスの面積比が同じ多連オリフィスの場合、オリフィス間隔がごく小さい
 ときには連数が多くなるほど、また間隔が大きいときには連数が少なくなるほど、
 干渉を受けやすくなる。
 - (c) オリフィスの間隔および連数が同じ多連オリフィスでは、面積比の大きいものほ

ど干渉を受けやすい。

- (3) 等間隔多連オリフィスを構成する個々のオリフィスの干渉係数は、比較的干渉の少ない第1オリフィスの干渉係数、干渉の激しい第2オリフィスの干渉係数、それより 下流に属するオリフィスの干渉係数の3種類に分類され、特徴付けられる。
- (4) 不等間隔3連オリフィスの第1オリフィスは、第2オリフィスによってごくわずか 干渉を受けるが、第2オリフィスは第1オリフィスによって非常に大きく干渉される。 さらに、第2と第3オリフィスの間隔が小さい場合には、第3オリフィスは第2オリ フィスだけでなく、第1オリフィスによっても大きく干渉される。しかし、その間隔 が管径の 4.5倍以上の場合には、その干渉はほとんど消失する。
- (5) 多連オリフィスの管軸に沿う管璧静圧と、各構成オリフィス前後の断面上における 静圧および軸速度を測定した結果は、流れの相互干渉を定性的に説明できる。

なお、以上の結論は、管軸上に穴の中心をもつ同一絞り面積比のオリフィスを連続に設 置して実験を行った結果得られたものである。したがって、穴の形状が異なっていたり、 絞り面積比の異なったオリフィスを連続に設置した場合、あるいは複数の穴があるときや、 穴の位置が偏心したり相対的にねじれている場合などでは、さらに複雑な干渉が生ずるも のと思われる。このような問題は3章において考察する。

第3章 連続有孔板の抵抗とその干渉

3.1 まえがき

前章では、流路断面積が変化する管路要素の中で最も基本的な形態をもつ薄板オリフィ スを管路に複数枚連続して設置し、そこに生ずる流れの干渉問題を実験的に明らかにした。 しかし、穴の位置が管軸上から偏心している場合や複数の穴をもつ場合、さらには穴の位 置が相対的にずれている場合などには、どのような干渉が生ずるかという問題が残されて いる。これに関連するものとしては、Sherman らが加圧水型原子炉における冷却水配管で の流量調整用可変抵抗器として連続多孔オリフィス板の抵抗特性を調べたもの⁽¹⁷⁾や、山 田の多段減圧オリフィス装置に関する特許⁽¹⁸⁾などがある。しかし、これらはともに抵抗 装置の開発に的を絞ったものであり、連続絞りの抵抗の干渉問題として広範な実験が行わ れたものではない。

本章では、一つあるいは複数の穴をもつ同一形状の有孔板を2枚連続して設置し、それ に生ずる流れの干渉問題を実験的に明らかにする。すなわち、連続有孔板のエネルギ損失 が穴数や穴径あるいは開口比によってどのような差異を生じ、さらに有孔板間隔や相対的 なねじれ角の変化によってどのような影響を受けるかを実験的に詳しく調べる。そして、 流れの干渉は有孔板の穴数によって大きく様相が異なることを示し、また有孔板間隔やね じれ角の変化に伴う流れの干渉をより一般的に把握できることを結論づける。

3.2 実験装置および方法

3.2.1 実験装置



図 3-1 実験装置の概略



図 3-2 測定部の詳細

実験装置の概略を図 3-1に示す。 地下水槽SからポンプPにより揚 水された水は、弁∿とバイパス管 の分岐部を通過後十分な助走距離 を経た後測定部Aに入り、弁∿を 通って直角三角せきWから水槽S に戻る。測定部Aを通過する流量 は、弁∿、V₂とバイパス管の弁V、 によって広範囲に変化させること

測定部の詳細は図 3-2に示すように、内径 Dが75 mm の黄銅管路に同一形状の2枚の有 孔板がスペーサによって距離!だけ離れて取 り付けられている。直管部・スペーサとも壁 面静圧測定孔をもち、また有孔板直前・直後 にはJIS Z 8762に規定されている環状室をも つコーナ・タップ形式の測圧孔を設け、静圧

ができ、その測定には三角せきWを用いた。

はブルドン管式精密圧力計を用いて計測した。有孔板の間隔 (はスペーサを取り替えることにより、約(0.13 ~3) Dの範囲で変化させた。

3.2.2 供試有孔板



図 3-3 供試有孔板の種類

表	3-	1	供試有	孔板	のす	法	٠	形状
3.	~			10.02	~ J (J	144		10.01

dmm	βο	t/d			
24	0.102	0.208			
17	0.103	0.294			
24	0.205	0.208			
14	0.105	0.357			
20	0.213	0.250			
24	0.307	0.208			
28	0.418	0.179			
30	0.480	0.167			
7	0.100	0.714			
7	0.302	0.714			
	d mm 24 17 24 14 20 24 28 30 7 7	d mm Bo 24 0.102 17 0.103 24 0.205 14 0.105 20 0.213 24 0.307 28 0.418 30 0.480 7 0.100 7 0.302			

供試有孔板は黄銅製で、いずれ も板厚 t は5 mmである。その種類 は、図3-3(a)~(c) に示す穴数*N* が 1、 2、 3のものと、同図(d) に示す千鳥形配列のものである。 有孔板の形状は、前者の場合穴の 中心円直径*D。*を40 mm で一定と し、穴径 d を変化させることによ り、後者では穴径 d を 7mmで一定 とし千鳥形配列の穴ピッチを変え

ることにより、それぞれ定められた。同一形 状の有孔板は2枚づつ製作され、その詳しい 寸法や開口比A。、厚比t/dについて表 3-1に 示す。

2枚の有孔板を管軸方向にのぞき、穴が完 全に重なる状態から一方を角度θだけ回転さ せたときの例を図 3-4に示す。この図におい

て、ねじれ角 θ を 2 θ_0 とすると穴は再び完全に重なることになる。 2 θ_0 の値は、N=1の 有孔板では 360°、N=2 では 180°、N=3 では 120°、千鳥形配列の場合には60°と なる。したがって、連続有孔板においてねじれ角の影響を調べる場合には、 θ を 0から θ_0 までの範囲で変化させれば十分であることがわかる。 3.2.3 諸量の定義

一般に、穴径 d に対する板の厚さ t の 比 t/d は厚比、管断面積に対する穴断面 積の総和の比 β。は開口比と呼ばれる。次 式は β。と管径 D、穴数 N、穴径 d の関係 を表す。



図 3-4 連続有孔板のねじれ角

$$\beta_{\rm o} = N \left(\frac{d}{D}\right)^2 \tag{3.1}$$

単独有孔板の抵抗係数5。は、2章と同じく次式で定義される。

$$\xi_{0} = \frac{p_{u} - p_{d}}{\rho U^{2}/2}$$
(3.2)

ここで、*Pu、Pa*は有孔板から十分上流・下流における直線的な管壁静圧こう配線を、有孔 板前面までそれぞれ延長して求めた、直前・直後の仮想の静圧であり、*P*は流体の密度、 *U*は管内平均流速である。連続有孔板の抵抗係数 5 も式(3.2)と同様に定義される。

2枚連続に設置された有孔板の全抵抗係数 5 が単独有孔板の抵抗係数 5 ∞の2倍に等しけ れば、各有孔板間で流れに相互干渉が生じていないが、もし有孔板が互いに接近して置か れている場合には、抵抗の相互干渉が起こる。したがって、抵抗の干渉係数 *I* を式 (3.3) で定義する。

$$I = \frac{\xi}{2\xi_0} \tag{3.3}$$

干渉が生ずると、 I の値は一般に 1と異なった値となる。

本章におけるレイノルズ数Reは、次式に示すように代表長さとして穴径dが採用され ており、前章のRepと異なったものである。これは、多孔板などにおいて一般によく用い られるものである。

$$R_e = U d / v$$

3.3 単独および連続有孔板の抵抗係数

単独有孔板の抵抗係数がレイノルズ数、開口比、厚比に対してどのように依存するのか を実験的に調べ、また、連続有孔板の抵抗係数がレイノルズ数に依存しないことも明らか にする。

3.3.1 単独有孔板の抵抗係数

供試有孔板を単独に用いた場合の抵抗係数5°とレイノルズ数Reの関係を図 3-5に例示



図 3-5 単独有孔板の抵抗係数(1)

する。なお、厚比 t/ d が 0.714の有孔板 の抵抗係数を詳しく調べるために、この 図には、表 3-1に記載していない有孔板 の抵抗係数も表されている。これによる と、本実験範囲内における5。は、R。の 変化に対してほとんど一定の値となるこ とがわかる。したがって、以後5。の値と して各レイノルズ数範囲における実測値 の平均値を用いる。

(3.4)

このようにして求められた抵抗係数5。 を、厚比t/dをパラメータとして開口比



図 3-6 単独有孔板の抵抗係数(2)

A₀との関係で表したのが図 3-6で ある。厚比 t/ d が 0.357より小さ な有孔板の抵抗係数 t₀ は、穴数 N や穴径 d の差異にかかわらず破線 で示す沖の式 (2.9)⁽⁷⁹⁾と非常に よく一致していることがわかる。 また、図中の実線は多孔板の抵抗 係数に関する実験式であり、厚比 t/ d が 0.357以下および 0.714の 有孔板の抵抗係数 t₀をそれぞれよ く表している。この式については 4.5節で詳しく述べるが、式中 における収縮係数 c₀の値としては、

Benedictら⁽⁸⁰⁾によって与えられた次式を用いる。

 $c_c = 0.61373 + 0.13318\beta_0 - 0.26095\beta_0^2 + 0.51146\beta_0^3$ (3.5)

以上のことから、単独有孔板の抵抗係数は多孔板の場合と同様、穴数Nや穴径dにかかわりなく、厚比t/dと開口比A。のみによって決定されることが明らかである。

3.3.2 連続有孔板の抵抗係数

単独有孔板の抵抗係数は、厚比t/dと開口比β。のみによって一意的に定まることがわかったが、連続有孔板の場合にはさらに有孔板間隔 ℓ やねじれ角θ によっても大きく影響を



図 3-7 連続有孔板の抵抗係数

受けるであろう。連続有孔板の抵 抗係数に対するこれらの影響をよ り一般的にとらえることが、連続 絞りの干渉問題を解明するうえで 非常に重要である。

図 3-7は同一形状の有孔板を2 枚連続して設置した場合の抵抗係 数 5 とレイノルズ数 R e の関係を 例示したものである。これは、管 内径Dに対する有孔板間隔 l の比 UDが 0.133の例で、本実験範囲

内では最も接近して設置した場合に相当する。これによると、穴数Nや穴径d、あるいは ねじれ角θの差異によってきの値は大きく異なった値を示している。しかし、この例から わかるように、本実験範囲内では連続有孔板の抵抗係数5はレイノルズ数R。に依存せず ほぼ一定値をとるとみなしうる。したがって、以後扱う連続有孔板の抵抗係数については、 図中の実線で示す5の平均値を用いることにする。

3.4 連続有孔板の干渉

連続有孔板の抵抗係数の干渉が、有孔板間隔やねじれ角によってどのように変化するか を調べる。そしてそれらがある特定の尺度によって統一的に表されることを示す。

3.4.1 有孔板間隔の影響



図 3-8 開口比が一定の連続有孔板の干渉係数



図 3-9 穴径が一定の連続有孔板の干渉係数

ここでは、ねじれ角が一定の連 続有孔板において、有孔板間隔 (が変化したときの抵抗係数の干渉 について詳しく考察する。図 3-8 はねじれ角0が 0°で、開口比8。 がほぼ 0.1のものだけを比較した ものである。これによると、開口 比B。がほぼ等しいにもかかわらず、 1/Dに対する干渉係数1の変化は 大きく異なっている。穴径 d が小 さくなるほど、あるいは穴数Nが 増加するほど、干渉係数1の変化 は全体に緩やかなこう配となり、 しかもより短い有孔板間隔で 1に 近づくと言えよう。したがって、 1/Dに対する $\theta = 0^{\circ}$ の連続有孔 板の干渉係数は絞りの平均的な特 性量である開口比βωではなく、穴 径
d
の
大き
さ
あ
る
い
は
穴
の
数
N
と

いうような量によって大きく影響を受けることがわかる。

そこで、穴径 d が同じものについて干渉係数 1 の変化を比較し、それを図 3-9に示す。



図3-10 穴数が一定の連続有孔板の干渉係数

これによると、干渉係数 I が急激 に 1に近づく位置 UDは、穴数N が増加するほど小さくなっている。 すなわち、連続有孔板の干渉係数 は穴数Nが多いほど短い有孔板間 隔で1に近づく傾向にあると言え る。なお、図 3-8、9 からわかる ように、穴数Nが1の連続有孔板 と破線で示す連続オリフィスの例 を比較すれば、連続オリフィスの

ほうが干渉の生ずる間隔がより大きいことを示している。

このことから有孔板間隔1/Dに対する干渉係数1の変化は、穴数Nに大きく依存していると思われる。一例としてN=3の場合の干渉係数1の変化を図3-10に示す。開口比B。や 穴径dの差異にもかかわらず、1/Dに対する1の変化は比較的よく一致していることがわ かる。

以上のような結果から考えて、有孔板間隔(に対する干渉係数1の変化の傾向は、穴数 Nによって異なることが明らかである。このことは、板間隔(を無次元化する代表寸法と して、管内径Dではなく穴数Nに関連した適当な寸法が存在することを示唆している。そ こで、有孔板の穴一つ当りの管断面積を考え、それに等しい円管の内径をD。とすると、 つぎのように表される。

 $\pi D_e^2 / 4 = \pi D^2 / (4N)$

式(3.1) によってNを消去すれば、De はつぎのように定まる。

$$D_e = \frac{D}{\sqrt{N}} = \frac{d}{\sqrt{\beta_c}}$$
(3.6)

この式で与えられるDeを用いて、有孔板間隔しを無次元化すると、つぎのようになる。

$$\frac{l}{D_e} = \left(\frac{l}{d}\right) \sqrt{\beta_0} \tag{3.7}$$

なお、N = 1の場合には式(3.6)より $D_e = D$ となるので、前章で連続オリフィスの干渉 係数を調べる際に用いたUDは、式(3.7)で定義された UD_e と全く等価である。



図3-11 連続有孔板の干渉係数

この無次元有孔板間隔、すなわ ち(1/d)√ №を用いて、ねじれ 角のが一定の連続有孔板の干渉係 数を表したのが図3-11である。同 図(a) $\iota \theta = 0^{\circ}$ の場合であり、 図 3-8、9 の例と比較しても明ら かなように、有孔板の種類にかか わらず【の変化はかなりよく一致 するようになっている。とくに、 (1/d)√B₀が 0.5以下の範囲で は、どの場合も / が 0.4程度でほ ぼ一定となっている。そして、 (1/d)√3.が 1付近で I の値は 急激に増加し、5 以上になるとど

の場合にも」はほぼ1となり、干渉がほとんどなくなる。

(1/d)√元が1 付近での I の変化を詳しく見ると、連続有孔板の干渉係数のほとんど が階段状の急激な増加を示しているのに対して、N=11、35およびN= 3、d=14 mm の 連続有孔板の干渉係数だけが比較的緩やかに増加しているのがわかる。これらの有孔板は、 表 3-1に示したように、ともに厚比t/dが 0.714、 0.357と大きなものばかりである。そ れゆえ、厚比が 0.357程度以上の有孔板の場合とそれ以下のものとは、(1/d)√元が1 付近での干渉係数 I の変化の傾向が異なっていることがわかる。

図3-11(b) は連続有孔板のねじれ角が最も大きい、すなわち $\theta = \theta_0$ の場合である。この ときの干渉係数 *I* は非常に特異な振舞いをするが、その変化の傾向はどの有孔板の場合に も非常によく似ている。そして、 $\theta = 0^\circ$ の場合と同様に、やはり(l/d) $\sqrt{g_0}$ が5 以上 になると *I* の値はほぼ 1となっている。しかし、(l/d) $\sqrt{g_0}$ が 1付近で極大値、 0.4付 近で極小値をとり、その後は(l/d) $\sqrt{g_0}$ の減少とともに *I* の値は急激に増加し始める。 ただし、このような傾向は *d* = 7 mm、すなわち厚比t/dが 0.714の有孔板においては現れ ておらず、穴径 *d*が14、17、20 mm …と大きくなるほど、つまり厚比t/dが小さくなるほ ど顕著になっている。

3.4.2 ねじれ角の影響

連続有孔板の干渉係数に対するねじれ角の影響の程度は、 $\theta = 0^{\circ}$ の図3-11(a) とねじ れ角が最大の値、すなわち $\theta = \theta_{\circ}$ の同図(b) を比較すれば、おおよそ明らかになる。前者 の場合、(l/d) $\sqrt{B_{\circ}}$ が 0.5程度より小さくなると有孔板の種類にかかわりなく干渉係数 *I*はほぼ 0.4程度で一定となり、後者の場合、(l/d) $\sqrt{B_{\circ}}$ が 0.4より小さくなると*I*の



図3-12 (1/d)√30=0の連続有孔板

値は1程度から急激に大きくなる。 したがって、連続有孔板において ねじれ角0による干渉係数1の変 化が顕著となるのは、無次元有孔 板間隔(1/d)√3.がほぼ 0.5以 下の範囲であって、1 より大きな 範囲では、θによる影響がさほど 現れなくなると思われる。この場 合、接近して設置された2枚の有 孔板が相対的にねじられると、図 3-4 に示したように、2枚の有孔 板の穴を貫通して流れる流体噴流 の断面積が絞られることになる。 そのため、連続有孔板の開口比が 減少したのとよく似た効果が生ず るものと思われる。

ここで、有孔板間隔 / が零の場合を考えると、2枚の有孔板はともに同一の空間を占めることにな

る。すなわちこれは、図 3-4において黒く塗りつぶした部分を穴とする1枚の有孔板に相 当する。この有孔板の開口比 A と、図 3-6の抵抗公式にこの A を代入して計算された干渉





図3-13 ねじれ角と干渉係数の関係

係数 Lを図3-12に示す。これからわかるよう に、連続有孔板の開口比 B はねじれ角 θ によ って大きく変化し、これに伴って干渉係数 Lも非常に大きな変化を示している。しかし、 B あるいは L が急激に変化する θ の範囲は、 千鳥形配列の有孔板の場合 $0^\circ \sim 10^\circ$ 程度、 他の場合でも $0^\circ \sim 60^\circ$ 程度の範囲である。 したがって、(l/d) $\sqrt{B_0}$ が非常に小さな連 続有孔板においては、ねじれ角 θ と干渉係数 I の関係が図3-12(b) に示す L とよく似た傾 向になると予想される。

実測された干渉係数 I とねじれ角 θ の関係 について、図3-13に例を示す。図中の破線は それぞれ計算により求められた I_i の値である。 同図(a) は穴数N=1、穴径d=24 mm の例 で、(l/d) $\sqrt{g_0}$ が 0.4以下の場合には、 θ が80° 付近まで干渉係数 I は単調に増加し、 80° 以上になると θ の値にかかわらずあまり

変化しなくなる。この連続有孔板を通過する流れについて考えてみると、θが80°以下の 範囲では1枚目の有孔板の穴を通った噴流が2枚目の有孔板の穴によってさらに絞られる ことになり、θが80°以上になると2枚の有孔板の穴は全く重ならなくなり、1枚目の穴 を通り抜けた流れは2枚目の有孔板とのすき間に沿って流れたのち、2枚目の穴から流出 するという非常に複雑な流れとなる。連続有孔板のねじれ角を変化させた場合には、流れ の様相がこのように大きく異なった二つの現象が現われる。しかし、(1/d)√元の値が 1以上になると、このようなねじれ角によるIの変化の特徴が明確でなくなり、Iはθに よってあまり差異が生じなくなる。



図3-14 IとLiの関係

以上のような傾向は、図3-13に 示した例だけでなく、他のすべて の連続有孔板についても同様であ った。したがって、大きな減圧を 必要とする場合には、山田⁽¹⁸⁾が 考えたように多段絞りが有効であ るが、キャビテーションを生じな いためには、絞り板の無次元間隔 (*1/d*)√元は1程度以上とし、

穴は互いに重ならないようにする

ほうがよいであろう。Sherman ら⁽¹⁷⁾のように可変抵抗器として連続絞りを用いる場合に は、(1/d)√元を 0.5程度以下にすれば、ねじれ角を変化させることにより数倍の抵抗 係数の変化を得ることができる。

なお、図3-14は干渉係数 *I と L*の関係を示したものである。有孔板間隔(*U d*)√𝔅 が 図示のように小さく、 *L* が 0.5から 1.5程度の範囲、すなわちねじれ角θ が比較的小さな 範囲においては、有孔板の穴数や穴径の差異に関係なく *I と L* には一定の明確な比例関係 のあることが明らかである。

3.5 むすび

穴数、穴径および穴の分布が全く同じ2枚の有孔板を管路に直列に設置し、その連続有 孔板に生ずる抵抗の干渉について調べた結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) 単独有孔板の抵抗係数は、多孔板の場合と同様に、開口比と厚比のみの関数として 与えられる。
- (2) 連続有孔板の干渉係数と有孔板間隔 ℓとの関係は、穴数によって異なった傾向を示すが、無次元距離(ℓ/d)√扇によって統一的に表現できる。
- (3) 無次元距離(1/d)√30が5程度以上になると、ねじれ角にかかわりなく連続有孔板の干渉はほとんど消失する。
- (4) 無次元距離(1/d)√ãが 0.5程度以下になると、ねじれ角によって干渉係数 I は 大きく変化する。とくに、計算による干渉係数 L が 1.5より小さな値をとるねじれ角の範囲では、 I と L は普遍的な比例関係を示す。

第4章 多孔板の抵抗係数

4.1 まえがき

管路やダクト内の二次流れや偏流を整流するために用いられる抵抗体として、金網、織 布、格子、多孔板などがある。多孔板の抵抗係数に関しては、Collar⁽⁴⁰⁾、MacPhail⁽⁴¹⁾、 Taylorら⁽⁴²⁾、Bainesら⁽⁴⁸⁾、明石ら⁽⁷⁵⁾、鳥居ら⁽⁷¹⁾の資料がある。しかし、それらは ともにデータ数が少なく⁽⁸¹⁾、とくに穴径に対する厚さの比、つまり厚比、の影響につい てほとんど考慮されていない。

本章では、千鳥形配列に穴を開けた多孔板についてその抵抗係数を測定し、それらが開 口比と厚比によってどのように影響されるかを実験的に明らかにする。そして、抵抗係数 は開口比によって大きく変化するばかりでなく、厚比によってもかなり変化し、厚比が 1 付近を境にその特性が全く異なることを示す。また、流れ学的考察に基づき抵抗係数を開 口比と厚比によって評価できる実験式を導く。

4.2 実験装置および方法

4.2.1 実験装置

実験装置の概略を図

4-1 に示す。内径Dが
100 mmの透明アクリル
樹脂製測定管内に空気
を流し、下流側で大気



図 4-1 実験装置の概略

に放出させた。測定管への流入速度分布は管壁付近を除いた断面内でほぼ一様である。

多孔板を管軸に垂直な面内に取付け、その前後の各測定断面内の直径に沿って流速と静 圧(ゲージ圧)の分布を測定した。その測定にはそれぞれ熱線風速計と外径 2.5 mm の静 圧管を用いた。平均流速Uは多孔板より上流へ 1Dの断面における速度分布より求めた。

本実験における測定はすべて測定管のレイノルズ数 $R_{eo} = DU/v \dot{v}(1.9 \sim 14) \times 10^4$ の範囲で行い、多孔板について通例用いられるレイノルズ数 $R_e = Dd/v \dot{v}1300 \sim 9500$ の範囲に対応する。ただし、vは空気の動粘度である。以後、後者のレイノルズ数 R_e を用いる。なお、ここで使用する座標系は図 4-1に示す。

4.2.2 供試多孔板

実験に用いた多孔板はすべて黄銅製とし、図 4-2に示すように直径 d の穴をピッチ l の 千鳥形配列に開けたものである。多孔板の開口比 B はつぎのようになる。

 $\beta = (\pi/2\sqrt{3})(d/l)^2$ (4.1)

また、穴径 d に対する板厚 t の比t/dを厚比と呼ぶ。



図 4-2 供試多孔板

穴はすべて7 mmのドリルでせん削したのち、 多孔板の両面を800 番の研磨紙にて仕上げた。 開口比Bはlを 7.97 mmから10.39 mmまで六 とおりに変えることにより6 種類とし、その それぞれに対して、板厚tが1、2.5、4、 6、8、15、28 mmのものを準備し、合計42 種類の多孔板を製作した。穴径と板厚の仕上

表 4-1 供試多孔板の寸法・形状

		tmm	di mm	1 mm	t/d	ß]			tmm	d mm	£ mm	t/d	ß
A	1	1.01	7.01		0.144	0.702	1		1	1.01	7.03		0.143	0.525
	2.5	2.51	7.18		0.350	0.736			2.5	2.51	7.22		0.348	0.553
	4	4.09	7.04		0.581	0.708			4	4.08	7.08	}	0.576	0.533
	6	6.08	7.05	7.97	0.862	0.710		D	6	6.09	7.25	9.24	0.839	0.559
	8	8.04	7.05		1.14	0.709			8	8.03	7.25		1.11	0.558
	15	14.93	6.98		2.14	0.695			15	14.96	7.00		2.14	0.521
	28	28.05	7.11		3.95	0.722			28	28.07	7.25		3.89	0.559
	1	1.00	7.03	8.43	0.143	0.631			1	1.01	7.10	9.82	0.142	0.475
	2.5	2.51	7.20		0.349	0.662			2.5	2.51	7.12		0.353	0.477
В	4	4.08	7.02		0.581	0.629			4	4.08	7.11		0.573	0.476
	6	6.09	7.20		0.845	0.662		Ε	6	6.08	7.11		0.855	0.476
	8	8.04	7.13		1.13 .	0.649			8	8.06	7.09		1.14	0.473
	15	15.02	7.07		2.13	0.637			15	14.99	7.14		2.10	0.480
	28	28.06	7.16		3.92	0.654			28	28.06	7.10		3.95	0.475
	1	1.01	7.08	8.78	0.143	0.589			1	1.01	7.11	10.39	0.142	0.424
İ	2.5	2.51	7.23		0.347	0.616			2.5	2.51	7.21		0.348	0.437
	4	4.09	7.07		0.578	0.589			4	4.08	7.02		0.581	0.413
С	6	6.10	7.07		0.862	0.589		F	6	6.09	7.15		0.853	0.429
	8	8.06	7.04		1.15	0.583			8	8.04	7.05		1.14 "	0.417
	15	14.95	7.11		2.10	0.595			15	14.96	7.06		2.12	0.419
	28	28.10	7.07		3.97	0.589			28	28.09	7.11		3.95	0.424

がり寸法はそれぞれ万能投影器およびマイクロメータによって実測し、その詳細を表 4-1 に示す。

4.3 多孔板前後の流れ

この節では、管内に多孔板を設置してほぼ一様な流れを流入させた場合に、その前後の 速度分布や圧力分布、そして多孔板下流に生成される乱れの分布とその減衰について詳し く考察する。

4.3.1 軸速度分布

図 4-3は軸速度分布の実測例である。ほぼー様に流入した流れは、多孔板直後で多数の 平行噴流を形成するが、 2/d が14.3、すなわち 1D下流の断面では再びほぼー様な速度分



図 4-3 軸速度分布



布になっている。その後は管壁における境界 層の発達によって、通常の管内流れへと移行 し始めているのが観察される。このような軸 速度分布の変化は、他の多孔板の場合にもほ とんど同じである。

4.3.2 静圧分布

各測定断面内の静圧は、測定管出口の静圧 (大気圧)との差として測定した。その分布 は多孔板直後の断面を除けばほぼ均一で、そ れを断面内で平均しρU²/2 で無次元化して Cpで表す。Cpの管軸方向への変化は、図 4-4 のようになる。この図より明らかなよう に、多孔板下流の静圧はt/d、 βの値にかか わらず z/d が14.3 (z/D=1)の断面におい て最大値を示し、その後管摩擦損失による圧 力降下のために徐々に下流方向へ減少してい る。

図 4-4 多孔板下流の静圧変化 上流側のC>の値は多孔板によって大きく 異なるので図に示していないが、やはり管摩 擦損失による下流方向への圧力降下が見られ、さらに2/D≧- 0.5の範囲になると、多孔 板へ接近するとともに、せき止め効果のためわずかに静圧が増加するので、どの多孔板の 場合にも2/D=-1の断面にて静圧はほぼ最小の値を示していた。

4.3.3 乱れ分布

多孔板下流に生ずる乱れ速度のr.m.s.値vzの分布と下流方向へのその変化を測定した 一例を図 4-5に示す。多孔板直後の噴流によって生じた大きな乱れは、下流に行くに従っ て、断面内では一様になりつつ減衰して行く様子がわかる。z/dが57.1の断面においても 依然として2 %程度の乱れがあり、境界層の発達に伴う管壁近傍における乱れの増加も見 られる。乱れの計測については、厚比t/dが 0.143、 1.13 、 2.12 の三とおりの多孔板 についてのみ測定した。これらのうち、同じ開口比の場合について比較すると、多孔板直 後の乱れの強さはt/dが 0.143の場合が他の厚比の場合と比べて大きな値となっていた。 そして、同じ厚比の多孔板については、開口比が小さいほうが直後の乱れは大きな値を示



図 4-5 多孔板下流の乱れ分布の一例



図 4-6 乱れの減衰

した。このことより、多孔板直後の乱れの強さは、多孔板の穴から流出する噴流の速度に 大きく依存することが推論できる。

このような測定結果より、多孔板下流の乱れの減衰をまとめたのが図 4-6である。図中、 乱れ速度 v_z は各断面内で管壁の影響を受けずほぼ均一な値をもつ範囲における算術平均 値である。無次元化のための代表速度 U_c は、厚比が 0.143の薄い多孔板の場合には収縮 部の平均流速 $U/c_c \beta を$ 、厚比が 1.13 、 2.12 の場合には多孔板の穴の平均流速 U/β の値を用いた。なお、収縮係数 co値は後述の式(4.6) により与えられる値を用いた。こ の図より、多孔板下流の乱れは、BainesとPetersonの測定結果^(4.8)と同じく、多孔板から の距離 z の - 5/7 乗に比例して減衰することがわかる。

4.4 抵抗係数

ここでは、多孔板の抵抗係数とその特性について述べ、金網の抵抗係数との差異を明ら かにする。



図 4-7 抵抗係数に及ぼすレイノルズ数の影響

4.4.1 抵抗係数の実測値
 一般に、抵抗係数Kはつぎのように定義される。

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\rho U^2 / 2} \tag{4.2}$$

ただし、Pは静圧、Uは平均流速、 Pは流体の密度であり、添字 1、 2 はそれぞれ上、下流の量を意味



(a) 厚比が1以下の場合



図 4-8 抵抗係数に及ぼす開口比の影響

する。この実験では多孔板の抵抗 を円管内で測定するので、Uは管 内平均流速とし、P、P、Bはそれぞ れ多孔板より上、下流方向へ 1D 離れた断面の静圧とした。

こうして得られた抵抗係数Kを、 レイノルズ数Re に対して示すと 図 4-7のようになる。図から明ら かなように、開口比 β 、厚比t/dがともに小さい場合を除けば抵抗 係数KはReによってあまり変化 せず、本実験範囲内ではほぼ一定 と考えてよい。Taylorら⁽⁴²⁾の実 験値は厚比 t/d が不明であるが、 参考資料として図 4-7に併記した。 抵抗係数Kが、開口比B、厚比 t/dによってどのように変化する かを詳しく見るために、t/dをパ ラメータとし、βを横軸にして、

 $R_e = 6000付近のKの値を示せば図4-8(a)、(b) となる。後述する理由と図示の煩雑さを$ 避けるため、図4-8(a)には<math>t/dが1以下、(b)には1以上のものを示してある。これより、 抵抗係数Kは厚比t/dにかかわらず、開口比 β の増加とともに単調に減少することがわか る。t/dに対するKの変化を見ると、t/d <1 ではt/d = 0.853の一部例外を除きt/dの 増加とともにKはかなり激しく減少するのに反し、t/d >1 では漸増し、t/d =1 付近を 境にした逆傾向が注目される。

4.4.2 抵抗係数の特性

上述のような多孔板の抵抗係数の振舞いは、後述する金網の抵抗係数などと比較して非 常に特異であり、実験式化に先立って、もう少し流れ学的な考察を行うことにする。

図4-8(b)を詳しく見ると、厚比t/d = 1.13、2.12、3.94 と増加するにつれ、ほぼ それに比例してKの値も増加している。これは、多孔板の穴内における管摩擦損失による 圧力降下が増し、その増分だけ多孔板前後の圧力差に付加されるからである。したがって、 少なくともt/d ≥ 1.13 の多孔板では穴を通る流れは前縁ではく離し、縮流後穴内壁に再 付着していると考えられる。

図4-8(a)のt/d <1 における抵抗係数Kの挙動は特異であるが、これは円筒オリフィス において生ずる現象と類似している。Lichtarowiczらの報告⁽⁸²⁾によれば、厚比が1より 少し小さな円筒オリフィスの場合、噴流を取り囲むはく離領域内の循環による誘起作用の ために、噴流に沿ってかなり大きな圧力回復が生ずる。このような現象は、多孔板の穴内 における流れにも生じていると予測される。このため、t/dが大きくなって1に近づくに つれ、この循環により誘起される圧力回復によって、多孔板前後の圧力差はかなり小さく なり、その結果、抵抗係数は小さくなると推測される。

このように、多孔板の抵抗係数Kは開口比Bの変化によるだけでなく、厚比t/dによっ

ても大きく影響されることがわかった。したがって、厚比に対する考慮がされていない既存の抵抗公式は、図4-8(a)に示すように、多孔板の抵抗係数を十分に表しているとは言えない。同図中の破線は薄板オリフィスの抵抗係数に関する沖の公式⁽⁷⁹⁾であり、本実験の $t/d \leq 0.349$ における多孔板の抵抗係数とよく一致している。点線で示すBainesらによる 公式⁽⁴⁸⁾と一点鎖線で示すCollarの公式⁽⁴⁰⁾は、ともに多孔板の抵抗係数を表すものとし ては不十分であることがわかる。また、Collar⁽⁴⁰⁾、Taylorら⁽⁴²⁾のデータはレイノルズ 数がかなり小さい場合のものなので直接比較はできないが、Bainesら⁽⁴⁸⁾、明石ら⁽⁷⁴⁾、 鳥居ら⁽⁷¹⁾のデータは、本実験結果の傾向と非常によく一致していることがわかる。

4.4.3 金網の抵抗係数との比較

金網と多孔板を比べて、抵抗係数の特性に どのような違いがあるのかを明確にすれば、 それらを利用する際に大いに参考になると思 われる。そのため、まず金網の幾何学的形状 について、JIS Z 8801 標準ふるい に示さ れている金網を参考にして考えてみる。

金網の形状は、図 4-9に示すように、線径 *d*、線ピッチ!によって定まり、開口比 *B* と 厚比 *t e* は次式のようになる。

 $\beta = (1 - d/l)^2$ (4.3)

$$t_{e} = \frac{2 d/l}{(1-d/l)}$$
(4.4)



図 4-9 金網の厚比と開口比の関係

これより、金網の開口比 β と厚比 t e はd/ l の関数として一意的に定まり、すなわち β の 等しい金網はすべて幾何学的に相似であることを意味する。多孔板では開口比と厚比が与 えられて初めて、その幾何学的形状が定まることと比較して、これは金網の大きな特徴と 言える。なお、整流を目的として用いられる金網は、通常、 β が 0.7以下、つまり t e が 0.4以上のものである。また、金網の形状から推測して、それを通過する流れは多孔板の 穴を通る流れとは異なって、非常に複雑な3次元的流れになると思われる。

既存の金網の抵抗係数⁽⁸¹⁾と図4-8(a)に示した多孔板の抵抗係数を比較すると図4-10の ようになる。これからわかるように、多孔板はレイノルズ数が一定にもかかわらず開口比 &、厚比t/dによってKが大きく変化するが、金網は開口比、レイノルズ数のみに依存し ている。たとえば、レイノルズ数が 200程度のものがほぼ同じ曲線に乗っており、またす くなくともRe が16~35程度に小さくなると、Kがかなり大きく増加している。ただし、



図4-10 金網と多孔板の抵抗係数の比較

金網のレイノルズ数は上流の一様 流速び、流体の動粘度v、金網の 線径dによってびd/vで計算され たものである。

以上のように、金網の形状は開 口比 B のみによって定まるため、 レイノルズ数が一定の場合の抵抗 係数は、開口比によって一意的に 決定される。したがって、開口比 と厚比の二つの幾何学的量に依存 して抵抗係数が定まる多孔板と比較すると、金網は抵抗係数を決定する自由度が一つしか なく、利用範囲の狭い抵抗体であると言える。

4.5 抵抗係数の実験式

前節において、多孔板の抵抗係数は開口比だけでなく厚比によってもかなり変化することが明らかとなった。そこで、これを実験式で表すために、多孔板の穴を通る流れについてモデル化をして抵抗係数の式を誘導し、それをもとに実験式を組み立てる。

4.5.1 流れのモデルと抵抗係数

前節で述べた考察をもとにして、多孔板の穴を通る流れのモデルを図4-11のように考え る。同図(a) は上流側断面1において断面積At をもつ流管が、断面積A。の穴に流入し、 その前縁からはく離して縮流部Cを通過後、下流側断面2において再び流入前の流管の大 きさAt まで拡大する例である。この場合の抵抗係数をKs とすれば、断面1からcまで の急縮小による損失と断面cから



図4-11 多孔板の穴を通る流れのモデル

2までの急拡大損失との和と考え られ、抵抗係数の定義式(4.2) に 従って導くと次式が得られる。

$$K_{s} = \left(\frac{1}{c_{v}^{2}} - 1\right) \left(\frac{1}{c_{c} \beta}\right)^{2} + \left(\frac{1}{c_{c} \beta} - 1\right)^{2} \quad (4.5)$$

ただし、*c*_vは速度係数、*c*_cは収縮 係数である。 一方、図4-11(b) は厚比がかなり大きな場合の流れのモデルであり、穴の前縁からはく 離した流管が縮流部 c を経て穴内断面 o に再付着し、その下流で穴を満たしながら出口 e に達し、再び断面 2にてもとの流管の大きさ A t まで拡大している。この場合も、前述の 式(4.5) と同様な方法で抵抗係数 K : を導けば、つぎのようになる。

$$K_{1} = K_{s} - 2\left(\frac{1-c_{c}}{c_{c}-\beta}\right)\left(\frac{1}{\beta}-1\right) + \lambda \left(\frac{1}{\beta}\right)^{2}\left(\frac{t-t_{z}}{d}\right)$$
(4.6)

ただし、入は穴の管摩擦係数、t₀は穴前縁から再付着点までの距離である。

式(4.6)は、厚比の小さな多孔板の抵抗係数Ksと厚比がかなり大きな場合の抵抗係数 Kiの関係を示している。右辺第3項は穴における管摩擦損失を表し、右辺第2項は急拡 大による圧力回復の違いを表している。したがって、右辺第2項を適切に評価することに より、任意の厚比をもつ多孔板の抵抗係数Kの実験式を誘導することが、可能であると思 われる。

4.5.2 実験式への拡張

ここでは、パラメータY = Y(t/d)を導入し、式(4.6)における $K_s \ge K_t$ を結び付ける形で、つぎのように抵抗係数Kの式を仮定する。

$$K = K_{s} - 2\left(\frac{1-c_{c}}{c_{c}}\right)\left(\frac{1}{\beta}-1\right)Y + \lambda\left(\frac{1}{\beta}\right)^{2}\left\langle\frac{t}{d}-1\right\rangle$$
(4.7)

ただし、この式で噴流の再付着距離t₀は、前述のKの実験値に対する考察を参考にして、 t₀/d = 1と仮定してあり、今後このように取扱う。また右辺第3項における〈 〉の意 味は、その中の値が正のときその値をとり、負のときは零とおくものとする。

. . . .

乗近似して得た次式を用いる。

 $c_c = 0.61375 + 0.13318 \beta - 0.26095 \beta^2 + 0.51146 \beta^3$ (4.8)

管摩擦係数入は、穴内のレイノルズ数 $R_e / B \ge$ 穴内壁の相対粗さ ε / d に依存してい ると考えられる。そのため、 R_e が大きく変化すれば当然入の値も変化する。しかし、図 4-8(a)、(b)の実験値Kの値は、 R_e が 6000 付近のデータなので、穴内のレイノルズ数 R_e / B は開口比Bの範囲 0.4~ 0.75 に応じて 15000~8000となっている。また、供試 多孔板の穴内壁面の粗さは、表面粗さ計で測定した結果、最大高さがほぼ 20 μ m で、相 対粗さ ε / d は 0.003となっていた。

以上の結果より、多孔板の穴における管摩擦係数入をムーディ線図から求めると、開口 比 *B* = 0.4~ 0.75 に対応して、入= 0.034~ 0.037程度になると思われる。しかし、こ の値は十分な長さをもつ穴を流体が流れる場合の値である。ここで扱う多孔板の穴の長さ はたかだか 4*d* 程度であり、はく離流れが再付着後まだ十分発達するに至っていない、言 わば助走区間内の流れに相当する。そのため、入を上述の値よりも少し大きく定め、しか



図 4-12 パラメータどの値

もβによらず一定と考えても実用 上ほとんど問題はないと考えられ る。それゆえ、ここでは管摩擦係 数λの値を 0.04 で一定と仮定す る。

式 (4.7)と式 (4.5)、 (4.6)を 比較すれば明らかなように、パラ メータYの値は、t/dが非常に小





図 4-13 多孔板の抵抗係数と実験式

さい場合には、零とおくことによ り $K = K_s$ となり、t/dが1以上 の場合にはY = 1とおき $K = K_i$ となる。その間の厚比t/dについ ては、図 4-8のデータを用いて最 小二乗近似によって式 (4.7)から Yを評価できる。図4-12にその結 果を示す。ただし、速度係数 c₀は t/d < 1のとき 0.98 、 $t/d \ge 1$ のとき 0.96 とすると実験値と比 較的よく一致するので、ここでは そのように仮定した。

この結果、式 (4.7)は図 4-13 (a)、(b)の実線のようになり、 実験値と非常によく一致している のがわかる。したがって式 (4.7) は多孔板の抵抗係数を開口比と厚 比の関数として十分精度よく表し ていると言える。
4.6 むすび

穴の前縁が比較的鋭く加工された千鳥形多孔板について、抵抗係数を実験的に調べた結 果、以下のことが明らかになった。

- (1) 多孔板の抵抗係数は開口比によって変化するだけでなく、厚比によっても大きく影響を受ける。
- (2) 実験式(4.7)は、多孔板の抵抗係数を開口比と厚比の関数として十分精度よく表しており、今後技術資料としての意義は大きい。

第5章 多孔板の流出角係数

5.1 まえがき

整流のために抵抗体を用いる場合、抵抗係数と流出角係数が重要な特性値であることを、 Taylorら⁽⁴⁵⁾は二次元流れにおける整流の理論解析によって指摘している。多孔板の抵抗 係数に関しては、前章において詳しく述べたが、多孔板の流出角係数に関する報告は、全 く無いようである。

ここでは、前章に引き続き千鳥形配列に穴を開けた多孔板について、その流出角係数を 実験的に詳しく調べる。そして、多孔板の流出角係数は金網の場合^{(46), (47)}とは全く異 なり、主にその幾何学的形状である厚比、つまり穴径に対する板厚の比によって大きく値 が変化することを示し、さらに、円管内の旋回流れに対する多孔板の整流効果について実 験を行い、旋回成分の消去に最適な多孔板形状を明らかにする。

5.2 実験装置および方法

5.2.1 実験装置

二次元流入における流出角係数の測定装置を図5-1(a)に示す。これはSchubauer ら⁽⁴⁷⁾ が金網の流出角係数を測定するために用いた装置と基本的に同じものである。図示のよう に、多孔板はすべて穴列AAが流れ面、すなわち紙面に直角になるようにフランジへ取付 けられている。流入角めで多孔板にほぼ一様に流入した空気は、流出角かで大気中に流出 している。かは、角ダクトへの多孔板の取付け角に等しいとみなし、 5°、 10°、 20°、 30°、 40°、 50°とし、みは多孔板下流の流れの中に置かれた絹糸の方向を測定すること



図 5-1 実験装置の概略

により求めた。

この実験は、角ダクト内の壁面 付近を除きほぼ一様な速度分布を もつ流れが、図5-1(a)のように、 多孔板に対して特定の方向からほ ぼ二次元的に流入する場合につい て調べたものである。したがって、 穴列に対して任意の方向から流入 するときや、不均一な速度分布を もつ流れが流入する場合などでは、

異なった結果になる可能性がある。

そこで、図5-1(b)に示すように、多孔板に旋回流れを流入させて、同じく流入・流出特性を調べた。送風機から送られてきた空気は、うず巻ケーシング状の旋回発生部により旋回成分を付与されて、内径Dが100 mm、長さ4000 mm の塩化ビニル製直管内に流入し、その下流に接続された測定管を通過後、大気中に放出する。測定管上流の長さ40Dの直管を 通過することによって、測定管内の旋回流れは十分発達した強制うずー自由うず形旋回速 度分布となっていた⁽⁸³⁾。

測定には外径 5.9 mm の3孔円筒形ピトー管を用い、多孔板前後の各測定断面内で流速 ベクトル、全圧の分布を求めた。この実験における管レイノルズ数*Reo*の範囲は、(5.6~ 7.8)×10⁴ で、多孔板のレイノルズ数*Re* = *U d*/*v*では、3900~5500の範囲に対応する。 ただし、*U* は管内平均流速、*v* は空気の動粘度である。 5.2.2 供試多孔板

実験に用いた供試多孔板は、前章と同じく穴径 d = 7 mmの千鳥形多孔板である。開口比 βは 0.4から 0.7まで六とおり、穴径 d に対する板厚 t の比、つまり厚比 t/d は 1/7 から 28/7まで七とおり、合計42種類の多孔板について実験を行った。供試多孔板の詳細につい ては、 4.2.1に詳しい。

5.3 二次元流入における流出角係数

ここでは、一様な流れが多孔板に対して二次元的に流入する場合の流出角係数の特性について、詳しく考察する。

5.3.1 流入角と流出角の関係

一様な流れが多孔板に対して斜

めに流入する場合、その流入角 •1 と流出角 •2の関係を図 5-2に例示 する。これより明らかなように、 •1と •2の間にはほぼ比例関係が成 り立ち、金網の例 ⁽⁴⁶⁾と同様、式 (5.1)の関係が満たされている。

 $\phi_2 = \alpha \phi_1$ (5.1) この曲線の傾き、すなわち流出角 係数αは、厚比t/dの増加ととも に急激に小さくなり、t/dが1を



図 5-2 二次元流入における流入・流出角の関係

超えると負値を示すようになる点が、金網と大きく異なるところである。なお、多孔板へ 流入する一様流の風速を 4~24 m/sの範囲で変化させても、この流入・流出角関係はほと んど変化がなかった。



図 5-3 流出角係数に及ぼす開口比の影響



図 5-4 流出角係数に及ぼす厚比の影響

5.3.2 流出角係数

このような測定結果からすとす が直線的に比例する範囲において αを評価し、開口比βに対する関 係で表したのが図 5-3である。こ の図より、この実験範囲内におい ては、t/dの小さな場合を除き流 出角係数αは開口比βにあまり依 存せず、むしろt/dの変化によっ てその値が大きく変わることがわ かる。t/d = 0.853の場合には、 開口比βの値にかかわりなくαは ほぼ零となっており、流入角めに 無関係に下流側ではφ₂= 0°、つ まり多孔板に直角に流れが流出す ることを意味している。したがっ て、これは旋回成分を消去する場



図 5-5 金網と多孔板の流出角係数の比較

合などに非常に重要な特性である。

図 5-4は、流出角係数αを厚比 t/dに対して表したものである。 これによるとαはほぼt/dの値の みによって定まり、t/dが 0.85 付近でほぼ零となり、さらにt/d が大きくなるとαは負の値となり、 4程度に大きくなっても依然とし て負値のままである。

金網の特性との比較のために、流出角係数αと前章で述べた抵抗係数Kとの関係として 図 5-5に示す。これより明らかなように、厚比t/dが 0.349以下の多孔板は、破線で示す 金網の特性⁽⁴⁶⁾に比較的近いことがわかるが、それより厚比が大きくなるとαは全く異な った傾向を示している。

以上のことから、多孔板の流出角係数は厚比に応じて非常に広範な値を取り、しかも開 口比にはほとんど依存しないことがわかった。流れの整流のために多孔板を用いる場合、 このような特性は、金網などを用いる場合と比べてはるかに有利な条件となる。

5.4 旋回流入における流出角係数

二次元流入の場合と比較して、不均一な速度分布をもつ流れが任意の方向から多孔板へ 流入する場合には、どのような流入・流出特性となるのか。そして、それが二次元流入の 場合と比較してどの程度異なっているであろうか。このような疑問を解決するために、多



図 5-6 多孔板前後の流入・流出関係

孔板に旋回流れを流入させて、実験的に詳し く調べる

5.4.1 **多**孔板前後の旋回流れ

軸対称旋回流れが多孔板へ直角に流入する 場合、任意半径上の一つの流線は多孔板前後 において、図 5-6に示す流入・流出関係をも つ。図中、Vgは周速度、Vz は軸速度であ

る。 Φ₁とΦはそれぞれ多孔板への流入・流出角であり、式 (5.1)により関係づけられている。 ただし、この場合の流出角係数は、二次元流入におけるαと区別してα₅とする。また、 図 5-6より明らかなように、 Φ₁、 Φ₂はともに式 (5.2)で与えられる旋回流れの流れ角でも ある。

$$\phi = \tan^{-1} \left(V_{\theta} / V_{z} \right) \tag{5.2}$$

旋回流れの強さを表す量として、式 (5.3)に示す無次元の角運動量を考える。

$$\Omega = \frac{2\pi\rho \int_{0}^{\pi} V_{z} V_{\theta} r^{2} dr}{\rho \pi R^{3} U^{2}}$$
$$= 2 \int_{0}^{1} (V_{z} / U)^{2} \tan \phi \cdot r^{2} dr \qquad (5.3)$$

ただし、 ρは空気の密度、 Rは管半径である。 多孔板直前・直後の旋回強さ Ω₁、 Ωの関係 は、軸速度 V_{Z1}、 V_{Z2}が連続の条件より等しいので、流れ角φ₁、 φ₂がともに比較的小さい と仮定すれば、つぎのようになる。

$$\Omega_2 = 2 \int_0^1 (V_{Z2} / U)^2 \tan \phi_2 \cdot r^2 dr$$

$$= 2\alpha_s \int_0^1 (V_{Z1} / U)^2 \tan \phi_1 \cdot r^2 dr$$

$$= \alpha_s \Omega_1$$
(5.4)

この関係より、旋回流入における多孔板の流出角係数asを評価することができる。



図 5-7 多孔板前後の旋回流れ

図 5-7は、多孔板に旋回流れを流入させ、流れ角々と軸速度 Vz の分布を実測した例で ある。この実験では、測定管より上流に十分な長さの助走区間を設けているため、測定管 内の旋回速度成分はほぼランキン渦に近い分布をしているが、その渦心は不安定で、管軸 より半径の10%余りの範囲内で移動していた。 図中、厚比t/dが 0.350 (α = 0.572)の多孔板では、下流側でも流れ角がかなり大き な値をもっており、軸速度分布も多孔板のない場合と大きな差異はない。t/dが 0.581の 多孔板では、αが 0.218であるにもかかわらず下流側で旋回成分はかなり消失している。 そのため、軸速度分布は下流へ行くに従って平坦化してきている。さらに、t/dが 0.862 (α = 0.006)では、二次元流入の流出角係数αがほぼ零であるにもかかわらず、多孔板 下流でわずかであるが流れが逆方向に旋回している。これらの例から、千鳥形多孔板にお いてαとαsの値は等しくならないと推測される。

5.4.2 流出角係数



図 5-8 旋回流入における流出角係数

実験は、多孔板より上流へ 1D、 すなわち z/D = -1 の断面での旋 回強さ Ωの値が 0.30 ~ 0.43 の 範囲で行った。多孔板前後の速度 分布の測定結果より、多孔板下流 0.5Dの断面における軸速度分布 は、いずれの多孔板の場合にも上 流側 1Dにおける分布と比較的よ く似た形状をしていることがわか った。したがって、上流側 1Dと 下流側 0.5Dの断面における旋回 強さをそれぞれΩ₁、Ω2として求め、



図 5-9 旋回流入と二次元流入における 流出角係数の関係

式 (5.4)の関係により旋回流入に おける流出角係数α。を評価した。 このα。を厚比t/dに対して表すと 図 5-8のようになる。α。は図 5-4 に示すαの特性と明らかによく似 た傾向を示している。これより、 旋回成分が消失する条件(αs = 0) は、厚比t/dが 0.7付近の多孔板 によって達成されることがわかる。 同一多孔板におけるα。とαの関 係は、図 5-9のようになる。これ より、旋回流入におけるα。は二次

元流入におけるαとほぼ比例しており、ごくわずかであるが、α₀はαよりも小さくなって いることがわかる。

5.5 旋回流れの整流

管内流れの旋回成分や二次流れを消去するために、従来ハニカムなどがよく用いられているが、一般には流出角係数αsが零となる抵抗体を用いればよい。多孔板によってαs = 0の特性を得るためには、前述のように最適な厚比のものがあり、不注意に厚比を大きくしても逆効果となる。そこで、αsが零付近の多孔板で旋回流れを整流した場合に、抵抗係数

や軸速度分布がどのようになるかについて、詳しく説明する。

5.5.1 抵抗係数

多孔板を用いて旋回流れを整流する場合、抵抗係数がどのような値になるかということ が実用面で非常に重要となる。旋回流れでは、各断面内の静圧が均一ではないので、面積 平均した静圧を算出し、多孔板より上流側ではそれが最小となる断面の値を互、下流側で は最大となる値を互とし、一様流における抵抗係数Kの定義式(4.2)と同様に、旋回流れ における抵抗係数Rをつぎのように定義する。

$$\overline{K} = \frac{\overline{P_1} - \overline{P_2}}{\rho U^2/2}$$



図5-10 旋回流・一様流に対する 抵抗係数の関係

同一厚比の多孔板において、 $R \ge K$ の関係 を示したのが図5-10である。これによると、 厚比の等しい多孔板ではRの値がKに比例し、 かつKの値よりも大きくなっていることがわ かる。とくに、旋回成分をよく減衰させる厚 比 $t/d = 0.578(\alpha_s = 0.025 \sim 0.36)$ の多 孔板ではKに対するRの増加の割合が大きく、 整流のために消費される圧力が非常に大きい

(5.5)

ことを示している。しかし、 t/d = 0.853 (α_s = - 0.031~- 0.24)の多孔板では、同 程度の減衰効果をもつにもかかわらず、 R の増加割合がそれほど大きくないのが注目され る。 5.5.2 **軸速度分布の平坦化**

本実験範囲内において、とくに旋回成分の消去効果がよい、すなわちな。の非常に小さな 多孔板について、下流側の軸速度分布の変化を調べた結果が図5-11である。縦軸のAは、 軸速度分布の平坦度を表す量で、式(5.6)に示すように、断面内の最大軸速度 V zmax と平 均流速 U との差を、上流側 z/D = -1 における同じ量で除したものである。

$$A = (V_{z_{max}} - U) z_{/D} / (V_{z_{max}} - U) z_{/D=-1}$$
(5.6)

この図において、 a_s = 0.025、 - 0.031の場合を見ると、多孔板より下流へいくに従っ てAは急激に小さくなっていくことがわかる。これは、多孔板によって旋回成分がほとん ど消失した結果、図5-7(b)に示した旋回流れ独特の軸速度分布、すなわち管中心部で小さ な値をもつ凹形の軸速度分布が、下流側で管壁における管摩擦の効果によって中心部が加 速され、急速に平坦化するからである。したがって、旋回成分を消去すると、軸速度分布 は下流側 4Dの断面でほぼ平坦と



図5-11 旋回成分の整流により得られる 軸速度分布の平坦度

なることがわかる。

さらに、 $\alpha_s = -0.073$ 、 0.067 の場合を見ると、上記の場合と比 べて α_s の絶対値が少し大きく、か なり弱いが旋回成分が残っている ために、z/D = 4の断面において もAの値は上記の場合より大きな 値になっている。なお、R = 7.01の多孔板では、Rの値が大きいの で多孔板の上流側において軸速度分布を平坦化する効果が高まるために、下流側1 ~ 2D の断面においてAの値はかなり小さくなり、十分平坦な軸速度分布が得られている。その 後、弱い旋回成分の影響により不均一化がわずかに増し、*z*/*D*=4 でAの値が少し大きく なっていると考えられる。

5.6 むすび

穴の前縁が比較的鋭く加工された千鳥形多孔板について、流出角係数を実験的に調べた 結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 多孔板の流出角係数は、金網の場合とは全く異なった特性をもち、主に幾何学的形状である厚比によって大きく値が変化する。
- (2) 多孔板の流出角係数を、二次元流入の場合と旋回流入の場合とで測定した結果、両 者はほぼ比例するが、後者のほうが少し小さな値となる。
- (3) 旋回流れを整流するために最適な多孔板の形状は、厚比が 0.7付近のものである。 また、その抵抗係数は、開口比を大きくすることにより1以下にすることも可能であ る。

第6章 多孔板を用いた流れの整流理論

6.1 まえがき

近年、プラントの大型化による配管の大口径化と設備配置の合理化に伴い、絞り流量計 に対してJIS Z 8762に定められた直管長さの確保が困難となる場合が多くなり、ときには 精度を犠牲にして必要直管長さ以内で測定が行われる場合も少なくない⁽²⁶⁾。このため、 配管要素下流の偏流や二次流れを消去し、十分発達した管内流れを発生させる整流装置の 開発が切望されている⁽⁴⁾。

整流装置に関する実験的研究としては、Sprenkleら⁽⁶⁹⁾、Bluschkeら⁽³⁰⁾、そして鳥居 ら⁽⁷¹⁾の報告などがある。これらの整流装置はいずれも穴の配列がほぼ一様な多孔板を用 いている。つまり、多孔板面上の抵抗分布はほぼ一様になっている。そのため、偏流や二 次流れを伴う流れは、整流装置の下流で均一な軸速度分布となり、その後管摩擦によって 発達した管内流れへと移行するまでにはまだかなりの直管長さを必要とする。そこで、板 面上不均一な抵抗分布をもつ多孔板によって、発達した管内乱流速度分布をつくることが できれば、絞り流量計上流側必要直管長さをさらに短縮することが可能になる。しかし、 このような整流装置に関しては1枚の多孔板を用いた明石らの実験的研究⁽⁷⁵⁾を見るにす ぎない。したがって、このような整流装置に必要な諸特性を詳しく検討することは、工学 上非常に有用であると考えられる。

本章では、ダクトや管路内の流れに対象を限定し、そこを流れる偏流や二次流れ成分を もつ主流を、多孔板を用いて整流する方法について解析的に考察し、整流の基本的考え方 や、2、3の応用例について説明する。しかし、本題に入る前に『整流』という言葉の流 体工学的意味について厳密に定義しておく。整流と言う言葉が速度分布を一様にするとい う意味や、また往々にしてあいまいなままに使われるからである。

本研究において、整流とはつぎの三つの目的を同時に達成するものでなければならない。

(1) 二次流れや旋回速度成分を除去すること。

(2) 整流装置の上流側の流れが、下流側の流れに影響を与えないこと。

(3) 下流側の流れは、目的とする定まった速度分布をもつこと。

なお、目的とする速度分布のなかには、当然一様な速度分布をも含めて考える。

6.2 二次元流れの整流とその考察

ここでは、偏流のみを伴う角ダクト内の流れを、二次元流れとして扱うことにより、多 孔板を用いた整流の方法について簡単に説明する。なお、以下の理論的取扱いは、Taylor ら⁽⁴⁵⁾の解析をより一般的に発展させたものである。

6.2.1 基礎式と一般解

図 6-1に示すように、流れは二次元で定常、非圧縮、非粘性とし、流路に平行にx'軸、 直角にy'軸をとる。x'およびy'方向速度成分をそれぞれV'x、V'y、静圧をP'、それら のじょう乱成分をそれぞれv'x、v'y、t'とすると、つぎのようになる。



図 6-1 二次元流路と物理量

 $CCC, V'_{X}, V'_{Y} \in UC, P' \in \rho U^{2}$

で無次元化し、さらにx'、y'座標をともに流路幅Lで無次元化して、オイラーの運動方程 式を表すとつぎのようになる。

$$\frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial x} + \left(\upsilon_{x} \frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial x} + \upsilon_{y} \frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial x} + \left(\upsilon_{x} \frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial x} + \upsilon_{y} \frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y}$$
(6.2)

ただし、式中の各量はすべて無次元量で、式 (6.3)で与えられる。

$$v_{x} = v'_{x} / U, \quad v_{y} = v'_{y} / U, \quad p = p' / \rho U^{2},$$

 $P_{0} = P_{0}' / \rho U^{2}, \quad x = x' / L, \quad y = y' / L$
(6.3)

無次元じょう乱速度成分 v_x 、 v_y に対して流れ関数 ϕ を導入し、式(6.1)の V_x 、 V_y 、 P'の無次元表示 V_x 、 V_y 、Pとともに式(6.4)に示す。

$$v_{x} = \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad v_{y} = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$V_{x} = 1 + v_{x}, \quad V_{y} = v_{y}, \quad P = P_{0} + p$$
(6.4)

じょう乱速度 Ux 、 Uy は一次の微小量と考え、式 (6.2)左辺の ()内に示す二次の 微小量の項を無視すると、つぎの基礎式が得られる。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_y}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y}$$
(6.5)

ここで扱う流れ場を図 6-2に示す。抵抗係 数K、流出角係数αをもつ多孔板が流路に直 角に設置されてあり、その上流側を領域1、 下流側を領域2と定める。各領域に属するす べての量は、それぞれ添字 1、2 を付して表



図 6-2 多孔板前後の流れ

領域 i における流れ関数 4iの基礎式は式 (6.5)よりつぎのようになる。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \quad \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{6.6}$$

この式の一般解は次式で与えられる。

$$\left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x_i}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{in}^{i} \exp\left(-\lambda_{in} x_i\right) + b_{in}^{i} \exp\left(\lambda_{in} x_i\right) \right] \\ \times \left(\sin\lambda_{in} y + c_{in}^{i} \cos\lambda_{in} y\right)$$
(6.7)

ただし、a'm、b'm、c'm、λin は定数である。

y方向じょう乱速度 $v_{yi} = -(\partial \phi_i / \partial x_i)$ は壁面上、すなわち y = 0 および y = 1 において零となることから、式(6.7)で $c_{in}^{i} = 0$ となり、定数 λ_{in} はつぎの条件を満足しなければならない。

$$\sin \lambda_{in} = 0 \quad ; \quad \lambda_{in} = n \pi \tag{6.8}$$

したがって、式(6.7)を積分して4iを求め、さらに式(6.5)の関係より piを定めると、つ ぎのようになる。

$$\psi_{i} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{in} \exp(-n\pi x_{i}) + b_{in} \exp(n\pi x_{i}) \right] \sin n\pi y + f_{i} (y)$$

$$(6.9)$$

$$p_{i} = -\sum_{n=1}^{\infty} n\pi \left[a_{in} \exp(-n\pi x_{i}) + b_{in} \exp(n\pi x_{i}) \right] \cos n\pi y$$

これが領域iにおける 4iとかの一般解である。ただし、fi(y)はyの任意関数である。

6.2.2 多孔板への流入・流出流れ

領域1 ($x_1 \leq 0$)の無限上流 ($x_1 \rightarrow -\infty$)では、式 (6.9)の各量が有限値でなければな

す。

らないので、 a_{in} = 0 となる。さらに、上流側のじょう乱の流れ関数 4_{1∞} が次式のように 正弦級数で与えられるものと考える。

$$\psi_{1\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{1n} \sin n \pi y \tag{6.10}$$

ただし、 f_{in} は任意定数である。すると、 $x_1 \rightarrow -\infty$ において $\phi_1 \rightarrow \phi_{1\infty}$ となることから、任意関数 f_1 (y)は $\phi_{1\infty}$ となることがわかる。これより、領域1における解はつぎのように表される。

$$\psi_{1} = \sum_{n=1}^{\infty} [b_{1n} \exp(n \pi x_{1}) + f_{1n}] \sin n \pi y$$

$$p_{1} = -\sum_{n=1}^{\infty} n \pi b_{1n} \exp(n \pi x_{1}) \cos n \pi y$$
(6.11)

領域2($x_2 \ge 0$)の無限下流($x_2 \to \infty$)においても、やはり、式(6.9)の各量が有限値 でなければならないことから、 $b_{2n} = 0$ となる。そして、下流側では目的とする速度分布 $\psi_{2\infty}$ が式(6.12)のように正弦級数で表されているものとする。

$$\phi_{2\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{2n} \sin n \pi y$$
 (6.12)

したがって、領域2における解はつぎのようになる。

$$\psi_{2} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{2n} \exp(-n\pi x_{2}) + f_{2n} \right] \sin n\pi y$$

$$p_{2} = -\sum_{n=1}^{\infty} n\pi a_{2n} \exp(-n\pi x_{2}) \cos n\pi y$$
(6.13)

式(6.10)のψ₁m、すなわちfinは上流側の偏流を表すものであり、式(6.12)のψ_{2m}、す

なわち fan は、多孔板による整流の結果下流側に生ずべき速度分布を表している。

6.2.3 多孔板における接続条件

領域1、2における解は、多孔板の位置においてつぎのような関係を満足しなければならない。

連続の条件 :

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial y}\Big|_{\chi_{2=0}} = \frac{\partial \psi_1}{\partial y}\Big|_{\chi_{1=0}}$$
(6.14)

流入・流出角条件 :

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x_2}\Big|_{x=0} = \alpha \frac{\partial \phi_1}{\partial x_1}\Big|_{x=0}$$
(6.15)

圧力損失条件 :

$$p_1|_{x_{1=0}} - p_2|_{x_{2=0}} = K_0 \quad \forall x_1|_{x_{1=0}} + (K_0 \not 2) \le (y)$$
(6.16)

多孔板の抵抗係数は y 方向に変化するものと考えているので、 K をつぎのように仮定している⁽⁵⁶⁾。

 $K = K_{a} [1 + s (y)], |s (y)| \ll 1$ (6.17)

ただし、K。はKの平均値で、一次微小量s(y)はつぎのように正弦級数に展開でき、 snはその係数とする。

$$\int_{0}^{y} s(y) dy = \sum_{n=1}^{\infty} s_{n} \sin n \pi y$$
 (6.18)

金網の流出角係数αと抵抗係数Kはともに開口比の関数で、そのため、つぎのような関係⁽⁴⁶⁾となり、これらを独立な量として扱うことができない。

しかし、多孔板のαとKは、4、5章で述べたように、つぎのような関数となる。

 $\alpha = \alpha (t/d), K = K (B, t/d)$ (6.20) これより明らかなように、 α の値は厚比t/dを決めるとある一定値に定まり、さらに開口 比Bを変化させることにより、Kの値のみを任意に設定することができる。金網と比べて 多孔板のこのような特性は、整流装置を設計するうえで非常に大きな利点となっている。

6.2.4 解析結果とその考察

式(6.11)と(6.13)を式(6.14)に代入すれば、つぎの関係が得られる。

 $a_{2n} - b_{1n} + f_{2n} - f_{1n} = 0 \tag{6.21}$

同じく式(6.15)よりつぎの式が得られる。

$$a_{2n} + \alpha \ b_{1n} = 0 \tag{6.22}$$

そして、式(6.16)より次式を得る。

 $a_{2n} - (K_0 + 1) b_{1n} - K_0 f_{1n} - (K_0 / 2) s_n = 0$ (6.23)

式(6.21)~(6.23)より、fan について解くとつぎのような関係となる。

$$f_{2n} = A_2 f_{1n} - (K_0 B_2 / 2) s_n \tag{6.24}$$

$$A_{2} = \frac{1 - \alpha (K_{0} - 1)}{1 + K_{0} + \alpha}, \quad B_{2} = \frac{1 + \alpha}{1 + K_{0} + \alpha}$$
(6.25)

式(6.24)から明らかなように、下流側の速度分布を決定する f_{2n} は上流側偏流の波数成 分 f_{1n} と多孔板の抵抗係数分布 s_n によって定まる。したがって、 f_{2n} が上流側の偏流の影 響を受けないようにするためには、 $A_2 = 0$ とすればよい。式(6.25)からわかるように、 A_2 および B_2 は多孔板の流出角係数 α と平均抵抗係数 K_{\circ} のみによって定まる定数であるから、 $\alpha \ge K_{\circ}$ の値をつぎのような関係を満たすように設定すれば、 $A_2 = 0$ となる。

$$K_0 = 1 + 1/\alpha$$
 (6.26)

このとき、下流側速度分布の波数成分 fan は、式(6.24)からつぎのようになる。

$$f_{2n} = -\left(\frac{K_{3}B_{2}}{2}\right) S_{n} = -\frac{1}{2}S_{n}$$
 (6.27)

これより、fan は多孔板の抵抗係数分布Snのみによって定まることになる。それゆえに、 Snは目的とする速度分布Фоm とつぎのような関係をもっていなければならない。

$$s_{n} = -\left(\frac{4}{K_{0} B_{2}}\right) \int_{0}^{1} \phi_{2\infty} \sin n \pi y \, dy$$

= -4 $\int_{0}^{1} \phi_{2\infty} \sin n \pi y \, dy$ (6.28)

このSnを用いると、多孔板の抵抗係数分布はつぎのように定まる。

$$K \neq K_{o} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n \pi s_{n} \cos n \pi y$$
 (6.29)

以上のようにして、整流に最適な多孔板の形状は、式(6.26)、(6.28)、(6.29)を同時に 満たすものであることがわかる。

6.2.5 応用例

ここでは、上述の二次元偏流の整流について、具体的に解説する。まず、流れを整流し てつぎのような速度分布Vx2∞を発生させることを考える。

$$V_{x_{2}\infty} = 1 + v_{x_{2}\infty}$$
(6.30)

この式において、 $v_{x_{2\infty}}$ は既知の一次の微小量で、式(6.12)の $\phi_{2\infty}$ によって、つぎのよう に与えられているものとする。

$$v_{x_{2\infty}} = \frac{d\psi_{2\infty}(y)}{dy} = \sum_{n=1}^{\infty} n \pi f_{2n} \cos n \pi y$$
 (6.31)

この速度分布 U x2∞ を生ずるために必要な多孔板の抵抗係数分布は、式(6.29)、(6.28)よ りつぎのようになる。

$$K = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} n \pi s_n \cos n \pi y$$

= $1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} n \pi \int_{0}^{1} \phi_{2\infty} (z) \sin n \pi z \, dz \, \cos n \pi y$ (6.32)

右辺の積分は式(6.12)を代入して計算すると、つぎのようになる。

$$\int_{0}^{1} \phi_{2\infty} (z) \sin n \pi z \, dz = \sum_{n=1}^{\infty} f_{2n} \int_{0}^{1} \sin n \pi z \sin n \pi z \, dz$$
$$= \frac{1}{2} f_{2n}$$

したがって、式(6.32)はつぎのように表される。

$$K / K_0 = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} n \pi f_{2n} \cos n \pi y$$
$$= 1 - 2 v_{x2\infty} = 3 - 2 V_{x2\infty}$$

(6.33)



て簡単に説明する。多孔板の厚比



図 6-3 二次元偏流の整流の例

を適当に選定し、図 5-3を参照して流出角係数αを読み取る。このαの値を式(6.26)に代入し、K。の値を定める。与えられたV_{x2∞}の分布とK。の値を式(6.33)に代入して、K の分布を計算する。Kの分布が求まれば、多孔板の抵抗公式(4.7)を用いることにより、 開口比βの分布を逆算できる。

開口比 A の分布を与える場合、多孔板の穴径 d を変えるのではなく穴のピッチを変化さ せなければならない。そうでなければ、多孔板の厚比 t/dを一定に保つことが困難になる。 また、穴径 d の値はできるだけ小さい方が、滑らかな速度分布 V x2∞ が得られるので、実 用上可能な限り小さくすることが好ましい。

6.3 軸対称旋回流れの整流とその考察

本節では、軸対称旋回流れを整流して下流側に十分発達した管内乱流速度分布を生ずる 整流装置について、理論的に詳しく検討する。旋回流れを上流側の流れとして解析を行う 理由は、それが各種配管要素下流によく発生し^{(76)~(73)}、絞り流量計の測定精度に大き く影響を与える^{(36), (37)}ので最も長い上流側直管長さを必要とするからである。整流装 置の形態は、複数の多孔板で構成されるものを考える。流れの解析には作動円板理論を用 い、作動円板における流れの接続条件として、4、5章で述べた多孔板の抵抗特性を利用 する。そして、2種類の多孔板を組合せた整流装置が最適な性能をもつことを示し、それ を試作して実験を行い、十分実用に供し得ることを明らかにする。

6.3.1 基礎式と一般解

ここで扱う整流装置前後の流れは定常、非圧縮、非粘性の円管内軸対称旋回流れである。 径、周、軸方向速度成分をそれぞれVテ、Vテ、Vテ、Pテン・静圧をP'とし、それらが剛体回 転一様流とそれからのじょう乱成分 υ ゲ、 υ δ 、 υ δ 、 ^p の和として式 (6.34)のように表 す。

$$V_{r}^{2} = v_{r}^{2}, \qquad V_{\theta}^{2} = \omega r^{2} + v_{\theta}^{2}, V_{z}^{2} = U + v_{z}^{2}, \qquad P^{2} = P_{\theta}^{2} + p^{2}$$
(6.34)

ただし、Uは管内平均流速、ωは剛体回転角速度、P。'は平均静圧で、ともに定数である。 また、r'は径方向座標である。ここで、V_f、V_d、V_dをUで、P'をρU²で無次元 化し、さらに径、軸方向座標r'、z'をともに管半径Rで無次元化して、オイラーの運動方 程式を表すとつぎのようになる。

$$(\partial \upsilon_{r} / \partial z) - \Omega^{2} r - 2\Omega \upsilon_{\theta} + [\upsilon_{r} (\partial \upsilon_{r} / \partial r) + \upsilon_{z} (\partial \upsilon_{r} / \partial r) \\ - \upsilon_{\theta}^{2} / r] = -(\partial p / \partial r) ,$$

$$(\partial \upsilon_{\theta} / \partial z) + 2\Omega \upsilon_{r} + [\upsilon_{r} (\partial \upsilon_{\theta} / \partial r) + \upsilon_{z} (\partial \upsilon_{\theta} / \partial z) \\ \upsilon_{r} \upsilon_{\theta} / r] = 0 ,$$

$$(\partial \upsilon_{z} / \partial z) + [\upsilon_{r} (\partial \upsilon_{z} / \partial r) + \upsilon_{z} (\partial \upsilon_{z} / \partial z)] \\ = -(\partial p / \partial z)$$

$$(6.35)$$

ただし、式中の U_{r} 、 U_{θ} 、 U_{z} はそれぞれ径、周、軸方向の無次元じょう乱速度であり、 pは無次元じょう乱静圧、 Ω は無次元角速度で、ともに式(6.36)で与えられる。

$$v_{r} = v_{r}^{2} / U, \quad v_{\theta} = v_{\theta}^{2} / U, \quad v_{z} = v_{z}^{2} / U,$$

$$p = p^{2} / \rho U^{2}, \quad \Omega = \omega R / U \quad (6.36)$$

じょう乱速度成分に対して流れ関数 ψ と循環関数 γ を導入し、無次元の径、周、軸方向速 度 V_r、V_θ、V_z、静圧 P とともに式 (6.37)に示す。

$$\begin{aligned}
\upsilon_{r} &= -(1/r) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right), \quad \upsilon_{z} &= (1/r) \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right), \\
\upsilon_{\theta} &= \gamma/r, \\
V_{r} &= \upsilon_{r}, \quad V_{z} &= 1 + \upsilon_{z}, \\
V_{\theta} &= \Omega r + \upsilon_{\theta}, \quad P = P_{0} + p
\end{aligned}$$
(6.37)

ここで、じょう乱速度 U₂、 U₈、 U₂ は一次の微小量と考え、式(6.35)中の []内に 示す二次の微小量の項を無視すると、つぎの基礎式が得られる。

$$(1/r) (\partial^2 \phi / \partial z^2) + \Omega^2 r + 2\Omega \gamma / r = \partial p / \partial r$$

$$(6.38)$$

$$\partial (\gamma - 2\Omega \phi) / \partial z = 0$$

$$(6.39)$$

$$\partial [p + (1/r) (\partial \phi / \partial r)] / \partial z = 0$$

$$(6.40)$$





2枚組合せた整流装置の場合を図 6-4に示す。 多孔板で区切られた各領域は、整流装置の上 流側を1、下流側を2、多孔板の間を3と定 める。各領域1、2、3に属するすべての量 は、それぞれ添字1、2、3を付して表し、 各多孔板の抵抗係数Kと流出角係数αは、そ

ここで扱う流れ場の一例として、多孔板を

れぞれその下流の領域の添字を付して区別する。

領域 i における流れ関数 ϕiの基礎方程式を式(6.38)~(6.40)より導くと、つぎのように なる。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + 4\Omega_i^2\right) \frac{\partial \psi_i}{\partial z_i} = 0$$
(6.41)

この式の一般解は式(6.42)で与えられる。

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial z_i} = \sum_{n=1}^{\infty} r \left[a_{in}^{\prime} \exp(-\lambda_{in} z_i) + b_{in}^{\prime} \exp(\lambda_{in} z_i) \right] \\ \times \left[J_1 \left(k_n r \right) + c_{in}^{\prime} N_1 \left(k_n r \right) \right]$$
(6.42)

ただし、 $J_1(k_n r)$ 、 $N_1(k_n r)$ はそれぞれ一次の第1種および第2種円筒関数であり、 a_{in} 、 b_{in} 、 c_{in} 、 λ_{in} 、 k_n は定数で、 λ_{in} と k_n の関係を次式に示す。

$$\lambda_{in} = \sqrt{k_n^2 - 4 \Omega_i^2} \tag{6.43}$$

径方向じょう乱速度 $v_{ri} = -(1/r)(\partial \phi_i / \partial z_i)$ は、管軸(r = 0)および管壁(r = 1) で0となることから、式(6.42)において $c_{in} = 0$ となり、定数 k_n はつぎのような条件を満 足しなければならない。

$$J_1(k_n) = 0 \quad (k_1 < k_2 < \dots < k_n < \dots)$$
(6.44)

すなわち、 Mu は 一次の 第1種円 筒関数の 零点である。

このようにして求まった 3*4i/3 2i*を積分して*4i*を定め、さらに式(6.39)、(6.40)に代入 して求められた*Yi*、*pi*を下式に示す。

$$\phi_{i} \equiv \sum_{n=1}^{\infty} \gamma \left[a_{in} \exp(-\lambda_{in} Z_{i}) + b_{in} \exp(\lambda_{in} Z_{i}) \right] J_{1} (R_{n})$$

$$\phi_{i} = \phi_{i} + \gamma f_{i} (\gamma)$$
(6.45)

 $\gamma_i = 2\Omega_i \phi_i + \gamma g_i (\gamma)$

$$p_i = (1/r) (\partial/\partial r) [rh_i(r) - \phi_i]$$

ただし、 a_{in} 、 b_{in} は定数であり、 $f_i(r)$ 、 $g_i(r)$ 、 $h_i(r)$ はrの任意関数である。 なお、r = 0において v_{zi} 、 p_i が有限値をもち、 $v_{\theta i}$ が零となるためには、 ϕ_i 、 γ_i 、 p_i の 右辺の任意関数はr = 0で2位以上の零点をもたなければならないので、便宜上それらを $rf_i(r)$ 、 $rg_i(r)$ 、 $rh_i(r)$ のように表してある。

さて、任意関数 $f_i(r)$ 、 $g_i(r)$ 、 $h_i(r)$ は一般につぎのようにフーリェ・ベッセル展開できる。

$$f_{i}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} f_{in} J_{1}(k_{n}r), \quad g_{i}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} g_{in} J_{1}(k_{n}r),$$

$$h_{i}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} h_{in} J_{1}(k_{n}r) \quad (6.46)$$

したがって、式(6.45)、(6.46)より、領域 *i* におけるじょう乱の流れ関数、循環関数、静 圧は次式のようになる。

$$\psi_{i} = \sum_{n=1}^{N} \left[a_{in} \exp(-\lambda_{in} z_{i}) + b_{in} \exp(\lambda_{in} z_{i}) + f_{in} \right]$$

$$\times r J_{i} (k_{n} r)$$

$$\gamma_{i} = \sum_{n=1}^{N} \left\{ 2\Omega_{i} \left[a_{in} \exp(-\lambda_{in} z_{i}) + b_{in} \exp(\lambda_{in} z_{i}) \right] + g_{in} \right\} \quad (6.47)$$

$$\times r J_{i} (k_{n} r)$$

$$p_{i} = \sum_{n=1}^{N} \left[-a_{in} \exp(-\lambda_{in} z_{i}) - b_{in} \exp(\lambda_{in} z_{i}) + h_{in} \right]$$

$$\times k_{n} J_{0} (k_{n} r)$$

この式の右辺は厳密には無限級数でなければならないが、本報では項数Nが20、30、40の 場合について計算し、N=20で実用上十分な精度が得られることがわかった。なお、任意 定数fin、gin、hinのうち、hinとginは互いに独立ではなく、旋回成分と半径方向の 静圧分布との平衡を表す式(6.38)によって、つぎのように関係づけられている。

 $h_{in} = -(2\Omega_i / k_n^2) g_{in} - 2\Omega_i^2 / [k_n J_2 (k_n)]$ (6.48) また、定数 a_{in} 、 b_{in} は、多孔板がじょう乱の各波数成分に与える影響の大きさを表し、 λ_{in} はそれらの軸方向への減衰特性を意味している。それゆえ、式(6.43)からわかるよう に、旋回成分 Ω_i が大きい程 λ_{in} は小さくなり、多孔板の影響がより遠方まで及ぶことにな る。

6.3.2 整流装置への流入・流出流れ

領域1 ($z_1 \leq 0$)の無限上流 ($z_1 \rightarrow -\infty$)では、式(6.47)の各量が有限値でなければな らないので、 $a_{in} = 0$ となる。さらに、流れ関数、循環関数が整流装置への流入条件とし てψ_{1∞}、ソ_{1∞}で与えられ、式(6.47)はつぎのようになる。

$$\psi_{1\infty} / r = \sum_{n=1}^{N} f_{1n} J_{1} (k_{n} r)$$

$$\gamma_{1\infty} / r = \sum_{n=1}^{N} g_{1n} J_{1} (k_{n} r)$$
(6.49)

すなわち、 f_{1n} 、 g_{1n} はそれぞれ $\phi_{1\infty}$ /r、 $\gamma_{1\infty}$ /rに関するフーリェ・ベッセル級数の係数 である。なお、 Ω_1 は流入条件として与えられ、 h_{1n} は式(6.48)により既知であるので、未 知定数は b_{1n} のみとなる。

整流装置下流の領域2(0 $\leq z_2$)では、無限下流($z_2 \rightarrow \infty$)においてやはり式(6.47)の各 量が有限値でなければならないので、 $b_{2n} = 0$ となる。そして流れが整流されて、旋回成 分のない十分発達した管内乱流速度分布 $\phi_{2\infty}$ が生ずるためには、定数 f_{2n} 、 g_{2n} 、 h_{2n} 、 Ωがつぎに示す流出条件を満足する必要がある。

$$\psi_{2\infty} / \gamma = \sum_{n=1}^{N} f_{2n} J_1 (k_n \gamma), \quad g_{2n} = h_{2n} = \Omega_2 = 0$$
 (6.50)

6.3.3 **多**孔板における接続条件

ここでは、多孔板の穴径とそのピッチが流れに影響を与えない程度に十分小さいと仮定 する。そして、多孔板を作動円板とみなすと、その前後の領域の諸量は以下に示す三つの 条件によって接続することができる。なお、便宜上ここでは多孔板の直前および直後の各 物理量に、それぞれ添字 u、 d を付して表す。

連続の条件 :

$$\partial \phi_u / \partial r = \partial \phi_u / \partial r \tag{6.51}$$

流入・流出角条件 :

$$\begin{aligned}
\Omega_d &= \alpha \ \Omega_u \\
\gamma_d &= \alpha \ \gamma_u
\end{aligned} \tag{6.52}$$

 $\partial \phi_{\theta} / \partial z = \alpha \ (\ \partial \phi_{u} / \partial z \) \tag{6.54}$

6.2.3 で述べたように、金網の流出角係数αと抵抗係数Kはともに開口比の関数で、 そのためα = 1.1/√K+Tのような関係となり、これらを独立な量として扱うことがで きない。しかし、多孔板のαとKは、式(6.20)のような関数となる。αの値は厚比t/dを 決めるとある一定値に定まり、さらにその厚比の多孔板において開口比 A を変化させるこ とにより、Kの値を任意に設定することができる。金網と比べて多孔板のこのような特性 は、整流装置を設計するうえで非常に大きな利点となっている。

多孔板の圧力損失条件としては、式(6.55)に示す抵抗の定義式を用いる。

 $P_u - P_d = K \, V_{zu}^2 / 2 \tag{6.55}$

抵抗係数*K*の値が多孔板面上で半径方向に変化している、すなわち不均一な抵抗係数の場合には、*K*はつぎのように表される⁽⁵⁶⁾。

 $K = K_{\circ} [1 + s(r)], |s(r)| \ll 1$ (6.56) ただし、K。はKの平均値で、一次微小量s(r)は次式のようにフーリェ・ベッセル展 開でき、Smはその係数とする。

$$\frac{1}{r} \int_{0}^{r} r \, s \, (r) \, dr = \sum_{n=1}^{N} s_{n} J_{1} \, (k_{n} r)$$
(6.57)

式(6.55)に式(6.37)の諸量を代入し、一次微小量vz あるいはsの二次以上の項を無視して、さらにじょう乱のない平均流れに適用した式(6.55)を減ずることにより、次式が得ら

れる。

圧力損失条件 :

均一な抵抗係数の場合 ;

 $p_u = p_d + (K/r) (\partial \psi_u / \partial r)$ (6.58)

不均一な抵抗係数の場合 ;

 $p_{u} = p_{d} + (K_{0} / r) (\partial \psi_{u} / \partial r) + K_{0} s (r) / 2$ (6.59)

旋回成分がなく微小じょう乱のみがある流れが多孔板を通過する場合には、個々の流線 において式(6.55)あるいは式(6.58)、(6.59)の関係がほぼ成立すると考えられる。しかし、 多孔板前後で流れが大きく変化するときには、式中のKの値は式(6.20)で与えられる値よ りも大きくなると思われる。たとえば、流れが整流格子に斜めに流入するときの全圧損失 係数は、流入角が大きくなると急激に増加する⁽⁵⁴⁾。それゆえに、旋回成分を消滅させる 多孔板(α= 0)では、それに流入する流れの旋回成分が強いほど、Kの値をより大きく 見積らなければならない。しかし、後述のごとく、整流装置ではα=0とする多孔板の抵 抗係数Kの増加は、下流側軸速度分布に対する上流側じょう乱の影響を低減させるという 好ましい効果を生ずる。したがって、式(6.20)で与えられるKの値を式(6.58)、(6.59)に 用いると、実際よりも厳しい条件で整流装置を解析することになる。それゆえ、その結果 得られた最適な整流装置を用いて実際に旋回流れを整流した場合、下流側に現われる上流 側じょう乱の影響は、解析的に予測された程度よりもさらに小さくなる可能性がある。

以上より、多孔板の直前および直後の物理量を接続する関係式は、式(6.51)~(6.54)と 式(6.58)または式(6.59)の合計五つの式である。 6.3.4 1枚の多孔板による整流

ベンド、収縮・拡大管、弁、分岐・合流管などの配管要素下流の流れ模様は種々異なっ た様相を示し、さらにそれらは流量によっても変化し、ときには旋回成分を伴うこともあ る。したがって、このような流れを整流するためには、6.1で述べたように、多孔板の 抵抗特性を利用してつぎの三つの問題を解決しなければならない。

(1) 旋回成分を消去する。

(2) 上流側の流れが下流側の流れに影響を与えない。

(3) 下流側の流れは、十分発達した管内乱流速度分布をもつ。

これら三つの問題を解決する方法を模索することによって、最適な整流装置を見いだすこ とができる。

まず、ここでは1枚の多孔板による整流について考える。この多孔板は流出角係数 α_2 と 不均一な抵抗係数 $K_2 = K_0$ (1+s)をもつものとする。多孔板前後の領域1と2の諸量 を $z_1 = z_2 = 0$ における五つの接続条件式によって関係づけ、下流側の旋回成分 Ω_2 、 g_{2n} について表すとつぎのようになる。

$$\Omega_{2} = \alpha_{2} \ \Omega_{1},$$

$$g_{2n} = \alpha_{2} \ [g_{1n} + 2\Omega_{1} (f_{2n} - f_{1n})] \qquad (6.60)$$

この式より、Ω₂、 g_{2n} をともに零とするためには、多孔板の流出角係数α₂ を零とする必 要がある。α₂=0 の場合、下流側軸速度分布の各波数成分 f_{2n} はつぎのように表される。

$$f_{2n} = -\frac{K_0}{2(K_0 + 1)} [s_n - (\frac{2}{K_0}) (f_{1n} + h_{1n})]$$
(6.61)

この式から明らかなように、fan は上流側じょう乱の波数成分(fin + hin)と多孔板の 抵抗係数分布 sn によって定まる。したがって、fan が上流側じょう乱の影響を受けない ようにするためには、多孔板の平均抵抗係数K。を無限大にしなければならない。しかし、 実用上からはK。ができるだけ小さくなることが望ましい。それゆえ、1枚の多孔板によ る整流では上流側の流れの影響を排除することができず、十分な性能が得られないことが わかる。

流入する流れに旋回成分がなく、軸対称じょう乱のみがある場合を考える。このとき、 $\Omega_1 = g_{1n} = 0$ であるので、式(6.60)からわかるように、 α_2 の値と無関係に下流側でも旋 回成分はなく、 $\Omega_2 = g_{2n} = h_{2n} = 0$ となり、 f_{2n} はつぎのようになる。

$$f_{2n} = -(K_0 B_2 / 2) S_n + A_2 f_{1n}$$
(6.62)

ここで、定数 B₂、A₂は多孔板に固有の量で、次式で与えられる。

$$B_{2} = \frac{1 + \alpha_{2}}{1 + K_{0} + \alpha_{2}}, \qquad A_{2} = \frac{1 - \alpha_{2} (K_{0} - 1)}{1 + K_{0} + \alpha_{2}}$$
(6.63)

したがって、 A_2 が零となるように K_0 と α_2 の組合せを選べば、式(6.62)は式(6.64)の ようになり、 f_{2n} は s_n のみで決まることになる。

$$f_{2n} = -(K_0 B_2 / 2) s_n \tag{6.64}$$

このとき、 s_n がつぎのように定められていれば、 f_{2n} は流出条件(6.50)を満足するようになる。

$$s_{n} = -\frac{4}{K_{0} B_{2} [J_{2}(R_{n})]^{2}} \int_{0}^{1} J_{1}(R_{n}r) \psi_{2\infty} dr \qquad (6.65)$$

以上の考察から考えると、1枚の不均一多孔板を用いた整流装置は、旋回成分のない場合には下流側に十分発達した管内流れを生成することができるが、旋回を伴う流れに対しては整流効果が期待できないことになる。それゆえに、はん用性のある整流装置を1枚の 多孔板によって作ることは不可能である。 6.3.5 2枚の多孔板による整流

1枚の多孔板で旋回流れを整流できない理由は、旋回成分を除去する機能(α₂ =0) と上流側じょう乱の影響を消去する機能(A₂ =0)とが、1枚の多孔板で同時に成立た ないからである。そこで、これら二つの機能を分離し、上流側の多孔板によって旋回成分 を除去することを考える。

整流装置として、均一な抵抗係数 K_3 と流出角係数 α_3 (=0)をもつ多孔板と、その下流 に距離 L_3 を隔てて $K_2 = K_3$ (1+s) と α_2 をもつ多孔板を設置する。以後、前者を旋回 除去用多孔板、後者を速度分布用多孔板と呼ぶ。この場合、整流装置下流の流れを決める 量はつぎのようになる。

$$Q_2 = g_{2n} = h_{2n} = 0 \quad (\because \quad \alpha_3 = 0) \tag{6.66}$$

$$f_{2n} = E_n [s_n + \delta_n (f_{1n} + h_{1n})]$$
(6.67)

$$E_n = -\frac{K_0}{2} \cdot \frac{B_{2n} - C_n / \cosh(\lambda_{3n} l_3)}{1 + K_0 C_n / \cosh(\lambda_{3n} l_3)}$$

$$\delta_{n} = \frac{-2A_{2n}/K_{0}}{B_{2n}-C_{n}/\cosh(\lambda_{3n} l_{3})} \times \frac{1-K_{0} C_{n}/\cosh(\lambda_{3n} l_{3})}{1+K_{3}-K_{3}(K_{0}-1+A_{2n})/K_{0}\cosh(\lambda_{3n} l_{3})},$$

$$A_{2n} = \frac{1-\alpha_{2}(K_{0}-1)\tanh(\lambda_{3n} l_{3})}{1+K_{0}+\alpha_{2}\tanh(\lambda_{3n} l_{3})},$$

$$B_{2n} = \frac{1+\alpha_{2}\tanh(\lambda_{3n} l_{3})}{1+K_{0}+\alpha_{2}\tanh(\lambda_{3n} l_{3})},$$

$$C_{n} = \frac{K_{3}/(K_{3}+1)}{1+K_{0}+\alpha_{2}\tanh(\lambda_{3n} l_{3})} \qquad (6.68)$$

式(6.66)に示すように、下流側の旋回成分は旋回除去用多孔板によって零となっている。 下流側の軸速度分布 fan が上流側じょう乱の影響を受けないためには、式(6.67)において



図 6-5 整流装置の性能に及ぼす板間隔の影響

n=1の成分が最も減衰しにくく、その影響が遠くまで及ぶことになる。したがって、こ れが十分減衰しない範囲に多孔板を接近して設置することは許されず、多孔板間距離なに は最小値がある。

図 6-5はn=1 の波数成分に対するδ1を計算した例である。これによると、45をほぼ1 以上にすればδ1は一定値に収束している。したがって、多孔板に生ずるじょう乱が十分減 衰し、互いに影響を与えなくなる最適な設置距離として、本報では以後45=2 を採用する ことにする。

いま、この最適距離を式(6.67)に適用すれば、次式が得られる。

$$f_{2n} = -\left(\frac{K_0 B_2}{2}\right) [s_n + \delta (f_{1n} + h_{1n})] \qquad (6.69)$$

ただし、δは多孔板に固有の定数で、つぎのように表される。

$$\delta = -\frac{2A_2}{(1 + K_3) K_0 B_2}$$
(6.70)

上流側じょう乱の影響を表す δを零とするためには、A2 =0 とする必要がある。したが って、下流側の速度分布用多孔板に対しA2=0とすると、式(6.69)の関係は式(6.64)と 同じになり、 fan は sn のみの関数となる。そして、 sn を式(6.65)によって与えると、 fn は流出条件(6.50)を満足するようになる。

以上の考察から明らかなように、旋回除去用多孔板はα3 =0 の特性をもち、速度分布 用多孔板はA。=0と式(6.65)の特性をもたなければならない。そして、距離な=2だけ それらを離して設置したものが、最適な性能をもつ整流装置となる。なお、速度分布用多 孔板は、 6.3.4で述べた旋回のない流れを整流できる多孔板と全く同じ特性であり、それ



図 6-6 sに及ぼすA2 の影響とK3 の効果

ゆえ旋回のない場合には、速度分

布用多孔板単独でも使用できるこ

とがわかる。

さて、実際にこの整流装置を製 作する場合、A2を正確に零とす ることは容易でなく、♂は小さな 値をもちうる。このとき、♂の値 に比例して上流側じょう乱の影響 が下流側速度分布に現れ、整流装 置の性能が低下する。しかし、式

(6.70)からわかるように、K。を大きくとることによってこの影響を小さくでき、この効果を示したのが図 6-6である。これより、旋回除去用多孔板の抵抗係数K。の値は、実用上許される範囲内で大きくとる方がよく、抵抗の小さいハニカムなどはあまり有効でないことがわかる。また、使用中の目づまりなどは抵抗を増加させ、そのため A₂ の値が零からずれたとしても、K。も大きくなるので i s の増加は抑制され、長期にわたって比較的性能が安定しやすいと考えられる。

6.4 実用整流装置の性能

前節の考察から、最適な整流装置は旋回除去用多孔板(Straightener)と速度分布用多 孔板(Velocity profile generator)を、管径Dだけ離して設置したものであることがわ かった。しかし、理論的に導かれたこれらの多孔板は、穴径とピッチが無限に小さいもの と仮定されている。したがって、有限の大きさの穴をもつ実用的な多孔板によって、これ らを近似する方法を検討しなければならない。さらに、このようにして設計された整流装 置が、目標とする軸速度分布Vz2∞ をどの程度実現できるかをも調べる必要があろう。

6.4.1 整流装置の設計

表 6-1 旋回除去用多孔板 の形状と特性

数K₃ がともに一定値であればよく、実際にこのような
特性の多孔板を作るのは容易である。ここでは、表 6-1
に示すような仕様のものを試作し実験に供した。

旋回除去用多孔板は流出角係数 α_{3} (= 0)と抵抗係

速度分布用多孔板の抵抗係数K₂ は、下流側の4_{2∞} が 与えられると式(6.65)によって計算でき、半径方向に連

 Straightener

 β
 0.75

 t/d
 5/7

 K₃
 1

 α₃
 0


図 6-7 速度分布用多孔板の設計

続な関数である。そこで、K2分 布を有限の大きさの穴をもつ実用 的な多孔板の抵抗係数分布K20に よって、近似する必要がある。以 下にその手順を説明する。

図 6-7に十分発達した管内乱流 速度分布 V_{22∞} の実測値を示す。 これをフーリェ・ベッセル展開で 近似して 42∞ を定め、式(6.65)の 関係を用いて sn を求めると、式 (6.57)、(6.56)より速度分布用多 孔板の抵抗係数K2 を計算するこ とができる。図中の実線K2 はこ

うして得られたものである。ただし、平均の抵抗係数K。は 4、 α_2 は 0.4(多孔板の厚 比t/d = 2.5/7)と設定し、 $A_2 = -0.04$ となっている。なお、 $K_3 = 1$ であるので、 式(6.70)の δ の値は 0.036となっている。

さて、多孔板の開口比 *B* と抵抗係数*K*の関係は、厚比 *t*/*d* が 2.5/7の場合、式 (4.5)よ りつぎのように与えられる。

$$K = 0.041 \left(\frac{1}{c_c \beta}\right)^2 + \left(\frac{1}{c_c \beta} - 1\right)^2 - 0.317 \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \frac{1 - c_c}{c_c \beta},$$

$$c_c = 0.61375 + 0.13318 \beta - 0.26095 \beta^2 + 0.51146 \beta^3 \qquad (6.71)$$

この関係は、多孔板面上で局部的に区切られた基本面積要素において定義されるβとKの

表	6-2	速度分	} 布用	多子	し板の	寸法
---	-----	-----	-------------	----	-----	----

rm	nm	β _m	κ _{2D}	
0	1			
0.176	6	0.590	2.03	
0.288	6	0.575	2.26	
0.368	6	0.565	2.43	
0.463	12	0.556	2.59	
0.568	12	0.541	2.88	
0.660	12	0.522	3.30	
0.742	12	0.512	3.53	
0.854	24	0.489	4.13	
1.0	24	0.434	6.12	
Remark ; $d/R=7/50$ $K_0=4$, $\alpha_2=0.4$ (t/d=2.5/7) $A_2=-0.04$				

間にも適用できると仮定する。実用の速度分 布用多孔板の抵抗係数K20は軸対称分布であ るから、図 6-7の下に示すような穴の分布を 考え、基本面積要素として半径7m-2と7mに囲 まれた環状部をとる。その部分の開口比Am を式(6.71)のAに代入すれば、対応する抵抗 係数K20の値を計算することができる。K20 の分布は図 6-7中に破線で示す不連続な階段 関数で表され、各区間でK2の平均値に一致

するように、7mが決定されている。このようにして計算された速度分布用多孔板の詳細な 寸法・形状を表 6-2に示す。

6.4.2 整流装置の性能予測

以上のようにして設計された整流装置が、目標の軸速度分布 V_{22∞} をどの程度実現でき るかを、解析的に検討してみる。そのために、K₂₀についても式(6.56)と同様な形式に、 K₂₀ = K₀ [1+ s₀(r)]と表し、さらに、s₀(r)についても式(6.57)と同じくフー リェ・ベッセル展開し、(1/r) $\int_{0}^{r} r s_{0} dr = \sum_{n=1}^{N} s_{0n} J_{1}(k_{n}r)$ と表す。上述のK₂₀とK₂ の関係を考慮すると、係数 s_{0n} は s_n よってつぎのように表される。

$$S_{DR} = \frac{2}{k_{n} \left[J_{2}\left(k_{n}\right)\right]^{2}} \sum_{m=1}^{9} \sum_{j=1}^{N} \frac{S_{j}}{\left(\gamma_{m}^{2} - \gamma_{m-1}^{2}\right)} \left\{\gamma_{m}\gamma_{m-1}\left[\gamma_{m-1}J_{1}\left(k_{j}\gamma_{m}\right) - \gamma_{m}J_{1}\left(k_{j}\gamma_{m-1}\right)\right] \left[J_{0}\left(k_{n}\gamma_{m}\right) - J_{0}\left(k_{n}\gamma_{m-1}\right)\right] + \left[\gamma_{m}J_{1}\left(k_{j}\gamma_{m}\right) - \gamma_{m-1}J_{1}\left(k_{j}\gamma_{m-1}\right)\right] \left[\gamma_{m}^{2}J_{2}\left(k_{n}\gamma_{m}\right) - \gamma_{m-1}^{2}J_{2}\left(k_{n}\gamma_{m-1}\right)\right]\right\}$$
(6.72)



図 6-8 計算に用いた流入条件

実用の整流装置下流の軸速度分布は、この Son を式(6.69)のsn に代入することによっ て計算できる。計算に際して、整流装置への 流入条件は3種類の旋回強さΩiをもつ発達し た円管内旋回流れを用いた。それらの軸・周 速度分布を図 6-8に示す。Type1はΩi=0.49 で、Type2はそれよりもΩiが小さく軸速度分 布がほぼ平坦で、Type3は逆にΩi=0.79 で旋 回成分がかなり強く、軸速度は管中心部で極 端に小さくなっている。

これらの流れを整流装置に流入させ、その

前後の軸速度分布につ

いて、計算した結果を 図 6-9に示す。実線は K2 をもつ理想的な多 孔板を、破線はK20を もつ表 6-2の実用的多 孔板を用いた場合であ る。図から明らかなよ うに、流入する流れの タイプにかかわらず、



図 6-9 計算による整流装置前後の軸速度分布

整流装置下流 1D (Z₂= 2)の断面における軸速度分布は、実・破線ともそれぞれほとん ど同じ形状をしている。とくに実線は、図中に明示していないが、VZ2∞ にほぼ完全に一 致している。

破線で示す実用の多孔板の場合には、管壁付近において実線からのずれが比較的大きく 生じている。この理由は、図 6-7に示すように、K₂ に対するK₂₀の近似精度が管壁付近 で極端に悪くなるからである。したがってこれを改善するには、孔径のできるだけ小さな 多孔板を用いるか、あるいは管壁付近の穴径をできるだけ小さくするような方法で、実用 の多孔板を設計することである。なお、管半径Rに対する孔径dの比d/Rを、7/50からそ の半分の 3.5/50 にして、同様の計算を行った結果、この程度ではあまり大きな改善がな



かった。

6.4.3 実験結果および考察
表 6-1、2 の多孔板を試作し、
整流装置の性能を実験的に調べた。
実験装置の概略を図6-10に示す。
送風機から送られてきた空気は渦
巻ケーシング状の旋回発生装置で
旋回成分を付与され、内径100 mm、
全長 6 mの塩化ビニル製円管内へ

図6-10 試作整流装置とその試験装置の概略

流入する。流れは整流装置を通過後、同じく内径100 mm、全長 1.8 mの塩化ビニル製円管 を通って大気中へ流出している。整流装置の概略は、図6-10の下部に示すように、表 6-1 の旋回除去用多孔板(Straightener)と、表 6-2の速度分布用多孔板 (Velocity profile Generator)を管径Dだけ離して取付けたものである。

整流装置前後の各断面において、半径上の速度分布を熱線風速計により測定し、その結 果を図6-11に示す。図示のように、整流装置へ流入する3種類の旋回流れは、互いにかな り異なった速度分布をもっている。しかし、どの場合にも整流装置下流で旋回成分はほぼ 完全に消え、軸速度分布も管径の2倍下流(*z*₂=4)の断面で、十分発達した乱流速度分 布V_{22∞}によく一致している。実用整流装置では管壁近傍においてV_{22∞}からのずれが生 ずるという解析的予測どおり、*z*₂=2 における速度分布は管壁付近で平坦な形状となって いる。それにもかかわらず、*z*₂=4 に至る非常に短い区間でそのずれが補正される理由は、 管壁の粘性作用に加えて、管中央部で速度分布がV_{22∞}になっているためであろう。 以上の結果から、この整流装置は抵抗係数が約5で、旋回流れに対しても十分な整流効



図6-11 試作整流装置前後の旋回流れ

の断面において発達し た乱流速度分布を生ず るという、三つの大き な特徴をもっているこ とが明らかになった。 したがって、従来の整 流装置と比べて性能が 大幅に改善され、実際 面に十分活用できるも

果があり、下流側 2D

のと考えられる。

6.5 むすび

管路やダクト内の流れを、多孔板を用いて整流する方法について理論的に考察を行い、 また実験をした結果つぎのような結論を得た。

- (1) 二次元流れの整流については、目的とする軸速度分布が与えられれば、式(6.33)に より容易に多孔板の抵抗係数分布を定めることができる。ただし、抵抗係数の平均値 と流出角係数の値は、式(6.26)の関係を満足しなければならない。
- (2) 軸対称旋回流れを整流する場合には、旋回除去用多孔板(表 6-1)と速度分布用多 孔板(表 6-2)を管径Dだけ離して設置すればよい。
- (3) 速度分布用多孔板の一般的な設計法を確立した。この方法は、乱流速度分布以外の 流れを作り出す手法としても十分利用できる。
- (4) 実用の整流装置を試作し実験した結果、上流側の旋回流れの強さにかかわらず、下流 2Dの断面にほぼ目標の乱流速度分布を得ることができた。この装置の抵抗係数は約5であり、十分実用に供することができる。
- (5) 軸速度分布を平坦化して、その後管摩擦によって発達した流れを得ようとする既存のSprenkleら、Bluschkeら、鳥居らの整流装置と比べて、本整流装置は直接発達した管内流れを生成でき、またその抵抗もかなり小さく、さらに明石らの整流装置よりも旋回流に対して安定した性能をもっていると思われる。したがって、本整流装置の性能は、既存のものと比較して大きく向上している。

第7章 流量計測における整流装置の効果

7.1 まえがき

通常の配管内における流量計測では、ベンド、エルボ、分岐・合流管、弁、収縮・拡大 管などの各種配管要素下流に、絞り流量計を設置する場合がほとんどである。このとき、 流れの速度分布が発達流のそれと異なっていたり、強い乱れや旋回成分を伴っていれば、 流量係数がJIS Z 8762に定められた値から大きくずれることになり、流量の計測値に大き な誤差を生ずる結果となる。そのため、オリフィス、ノズルなどの絞り流量計では、流入 する流れが発達流となるように上流側に十分な長さの直管を設けることが、JIS に規定さ れている。

近年、各種プラントの大形化に伴い、絞り流量計上流側必要直管長さの確保が困難にな り⁽²⁶⁾、さらには設備配置の合理化のために、流量計測のためだけに設けられる長大な配 管を不合理と考える傾向さえある。そこで、絞り流量計の流量係数に誤差を生ずるような 流れを整流し、発達した管内流れを生成することが強く要望される⁽⁴⁾。前章においては、 このような整流装置に要求される条件を詳しく考察し、それを設計・試作して、十分実用 に供し得ることを明らかにした。

本章では絞り流量計としてオリフィスを取り上げ、配管要素の中で最も大きな直管長さ が必要とされる空間曲り下流において流量計測を行い、前章に従い設計・試作された整流 装置が実用上どの程度の効果を生ずるかを、実験的に詳しく調べる。そして、本整流装置 が絞り流量計上流側必要直管長さを大幅に短縮できることを明らかにする。 7.2 実験装置および方法

7.2.1 実験装置

図 7-1に実験装置の概略を示す。ポンプにより水槽から圧力タンクへ送り込まれた水は、 試験管路に流入し、管路出口の直角三角せきにおいて流量と水温を計測されたのち、水槽 に戻る。試験管路は、まず圧力タンクに接続された、管内径80.7 mm の 9.4倍の長さをも つ直管とその曲り部、そしてその下流の管内径D=75 mm の供試管路からなる。

曲り部は市販の3インチ突き合わせ溶接式90°ロングエルボから構成され、図示のよう にその組み合わせにより単一、空間二、三重曲りとなる。なお、90°ロングエルボの管中 心軸の曲率半径と管直径との比は、 1.46 である。また、ロングエルボと供試管の内径が わずかに異なっているので、半頂角 4.35 °、厚さ40 mm の縮小管を用いて、内面が段差 なく連続に変化するよう配慮されている。

供試管路は黄銅製で、その上流端から距離Lの位置にオリフィスを設置し、さらにその オリフィスから48D以上下流に同一絞り直径比の基準オリフィスが設置されている。距離



図 7-1 実験装置の概略

ィスの間に種々の長さ の直管を挿入すること により可変とした。オ リフィス上流側に整流 装置を設置する場合、 その位置は曲り部直後 とした。したがって、

しは、曲り部とオリフ

距離しては整流装置の長さが含まれることになる。

7.2.2 供試オリフィス

実験に用いた供試オリフィスの穴径 d は 30.0、37.6、44.9 mm であり、絞り直径比 d/D は 0.40 、 0.50 、 0.60 となっている。同一絞り直径比のものを 2 枚づつ用意し、これ らの流量係数がJIS に規定された値に一致するかを確認するために、単一曲り下流54Dに 取り付け流量係数の検定を行った。オリフィスの差圧は環状室付きコーナ・タップにより 取り出し、フルスケール 2 mHg のU字形水銀マノメータにより測定した。流量の計測は前 述のように直角三角せきにより行った。この結果を図 7-2に示す。供試オリフィスの流量 係数はわずかなばらつきはあるものの、実線で示すJIS の規定値に対してすべて± 0.5% の課差範囲に納まっており、同一絞り直径比の 2 枚のオリフィスの流量係数もほとんど差 異がないことがわかる。



図 7-2 供試オリフィスの流量係数

なお、この実験にお いて、流量の計測は十 分な精度が要求される ので、三角せきは重量 法による精密流量測定 装置によってあらかじ め検定されたものを用 いた。この装置は容量 0.5 m³ の容器をもつ



図 7-3 整流装置の概略

精度1/2500のロードセ ル指示はかりと最小目 盛1/100 秒の電子時計、 そして配管から流出す る水流の向きを空気圧 シリンダ駆動により容 器の内・外へ切り換え るダンパから構成され ている。この装置によ る検定の結果、直角三

角せきは本実験のレイノルズ数Reoに換算して少なくとも(3.2~41)×10⁴の範囲内で、 JIS B 8302の流量算出公式によく一致することが確認された。

7.2.3 整流装置

整流装置の概略を図 7-3に示す。上流側の

表 7-1 旋回除去用多孔板の詳細

Open area	ratio	β	0.694	
Thickness	ratio	t/d	0.786	
Triangular arrangement				

表 7-2 速度分布用多孔板の詳細

r /R	Number of openings
0	1
0.236	6
0.386	6
0.494	6
0.625	12
0.772	12
0.903	12
1.0	12
t/d =	= 0.357, d/D = 0.187

旋回除去用多孔板(Straightener) と下流側の速度分布用多孔板(Velocity profile generator)が 1Dの距離に設置されたものである。これらは今回新たに設計・試作されたもので、前章の表 6-1、2 のものとは少し異なっており、表 7-1、2 にその詳細を示す。

7.2.4 諸量の測定

オリフィスの流量係数αに対する曲り部の影響を調べる実験では、そのオリフィスの差 圧Δpと基準オリフィスの差圧Δpoを同時に測定することにより、式 (7.1)のように、量 (α-α)/αoを算定した。

$$\frac{\alpha - \alpha_{\rm o}}{\alpha_{\rm o}} = \sqrt{\frac{\Delta \dot{p}_{\rm o}}{\Delta \dot{p}}} - 1 \tag{7.1}$$

これは基準オリフィスの流量係数α。に対するαの相対誤差を表しており、絞り流量計に

よる流量計測の問題に関連してよ

く用いられる量である⁽⁴⁾。

供試管路断面内の流速分布は、 直径 5.8 mm の3孔円筒形ピトー 管で測定した。曲り部からこの位 置にある断面内の軸速度Vz と周 速度Veの測定は、図 7-4に示す ように水平方向Xおよび鉛直方向

Yに沿って行われた。図中のVz、Veはともに正の方向を示している。





図 7-4 管路断面内の流速と座標

7.3 空間曲り下流の流れ

空間二重曲りを例にとって、その下流の流れの様相を明らかにし、それが整流装置によってどのように発達した流れに近づくかを調べる。

7.3.1 整流装置を設置しない場合

図 7-5は、空間二重曲り下流の速度分布の実測例である。図中、Vz、Vgは管内平均 流速Uで、XとY座標は管半径Rでそれぞれ除してある。これからわかるように、周速度 成分はほぼ剛体回転に近い分布をしており、その減衰がわずかなためz/D=49.9におい ても旋回成分が残っている。また軸速度分布は旋回成分のため管中心付近で少し小さくな





図 7-5 空間二重曲り下流の速度分布

が阻害されている。こ のような傾向は、空間 三重曲りの場合にもほ ぼ同様である。

っており、流れの発達

空間曲り下流の流れ について、旋回強さQ。 の滅衰を表したのが、 図 7-6である。ここで Q。は次式に示す無次元 の角運動量である。た だし、ρは流体の密度、 r は半径方向座標であ

り、
$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
となる。

0.2

0.1 Us

> 0L 0

0

$$\Omega_{S} = \frac{2\pi \rho \int_{0}^{R} V_{z} V_{\theta} r^{2} dr}{\rho \pi R^{3} U^{2}}$$
$$= 2 \int_{0}^{1} \left(\frac{V_{z}}{U}\right) \left(\frac{V_{\theta}}{U}\right) \left(\frac{r}{R}\right)^{2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Double bend

Triple bend

z/D

0

20

図 7-6によると、本実験における 空間二、三重曲りの場合、旋回強 さにほとんど差はなく、ともに十 分減衰するためには、ほぼ70D程 度の直管長さを必要とすることが 推測される。

図 7-6 空間曲り下流の旋回強さの減衰

40

Rep 1.8×10⁵

1.6×10⁵

60

7.3.2 整流装置を設置した場

合

整流装置の抵抗係数Kt を図 7-7に示す。 これより、Kt はほぼ4 であり、絞り直径比 d/D= 0.4、 0.5、 0.6のオリフィスの抵抗 係数がそれぞれ82、28、11であることから考 えても、実用上十分小さな値であることがわ かる。

整流装置を空間二重曲り直後に取り付けて、 その下流の速度分布を測定した結果が図 7-8







である。周速度成分 V_{θ} / U はほとんど消失し、軸速度分 布Vz / UもZ/D= 4.9、す なわち整流装置の下流 3.9D の断面以降では、図中に示す 発達流の分布(\$5)に近いもの となっている。なお、軸速度 分布が軸対称でなく少し偏っ ているが、これは速度分布の 測定の際、3孔円筒形ピトー 管をX軸上では負から正の方 向へ、Y軸上では正から負の 方向へ挿入しており、それが 流れに抵抗として作用したた



めに生じたものと思われる。したがって、実際にはもう少し軸対称性が保たれた流れであ ると推測できる。空間三重曲りについても速度分布を測定した結果、ほぼ同様の流れが得 られることがわかった。

7.4 曲り下流における流量計測

空間曲り下流の旋回流れに対して、整流装置を設置した場合の効果が前節において明ら かになった。そこで、ここでは実際に曲り下流にオリフィスを設置して流量の計測を行い、 その流量係数に生ずる誤差が整流装置を設置することにより、どの程度小さくなるかを実 験的に調べる。そして、整流装置により、流量計測の精度を損うことなくオリフィス上流 側曲りまでの直管長さを、どの程度短縮することが可能であるかを明らかにする。

7.4.1 単一曲り

旋回がなく 偏流のみを伴う流れの代表として単一曲りを取りあげ、その下流におけるオ リフィスの流量係数について、まず検討する。

図 7-9は、絞り直径比d/D= 0.4、 0.5、 0.6のオリフィスを単一曲り下流 5Dに設置



し、(α-α。)/α。の値をパー セントで表した例である。図から わかるように、レイノルズ数*Reo* に対する(α-α。)/α。の値は 比較的ばらついているが、全体と して*Reo*への依存性は認められな い。しかも、どのオリフィスにつ

いても実線で示すそれらの平均値は明らかに零からのずれを示している。このような傾向 は、他のL/Dの場合だけでなく、空間二、三重曲り下流で計測を行った場合にも同様で あることがわかった。したがって、以後オリフィスの流量係数に対する曲りの影響を表す 場合には、各レイノルズ数範囲における(α-α。)/α。の平均値とその最大および最小 値を用いたばらつき範囲を示すことにする。

なお、流量計の測定精度を考える場合には、(α – α。)/α。の平均値だけでなく、そのばらつき範囲をも含めて、要求される精度内に納まることが必要なのは当然である。以





(b) 整流装置がある場合

図7-10 単一曲りの影響

下においては、この条件を前提に 考察を行っている。

図 7-10(a)は単一曲り下流の位 置L / Dにオリフィスを設置した ときの ($\alpha - \alpha_{o}$)/ α_{o} を表して いる。絞り直径比が大きいほど絶 対値も大きく、さらにL / Dが4 付近で流量計測の精度は最も悪く なるが、L / Dが大きくなると、 ($\alpha - \alpha_{o}$)/ α_{o} の値も零に漸近 している。この図より、オリフィ ス流量計の精度が 0.5%以内にな るのに必要な直管長さは、絞り直 径比d/D = 0.4のオリフィスでは L / D = 10、d/D = 0.5では 15、

d/D= 0.6では 20 であることがわかる。しかし、JIS に規定されている単一曲り下流の 必要直管長さを見ると、例えばd/D= 0.6のオリフィスに± 0.5%の計測誤差を許容する 場合にはL/D= 9でよいことになっている。このことから明らかなように、JIS 規格に 示されているオリフィス流量計の上流側必要直管長さの値は、必ずしも十分な条件でない ことがわかる。

単一曲り直後に整流装置を取り付け、その下流で流量計則を行った結果を図 7-10(b)に

示す。整流装置を用いることにより、 ($\alpha - \alpha_{\circ}$)/ α_{\circ} の値が非常に小さくなっている。 この図において、オリフィス流量計の精度が± 0.5%以内になるのに必要な直管長さは、 d/D = 0.4ではL/D = 4、d/D = 0.5では 2、d/D = 0.6では 3である。したがって、





図7-11 空間二重曲りの影響

これら両図の結果を比較すれば、 整流装置によりオリフィス流量計 の上流側直管長さを大幅に短縮で きることが明らかである。

7.4.2 空間二重曲り

前節において述べたように、空 間曲り下流の管内流れは比較的強 い旋回成分を伴い、それが十分減 衰するためには管径の70倍程度の 直管長さを必要とする。そのため、 空間曲り下流に十分な直管長さを 設けないでオリフィス流量計を設 置すると、旋回成分のため大きな 計測誤差が現われることになる。

図 7-11(a)は、整流装置を用いないときの空間二重曲り下流におけるオリフィス流量計の相対誤差(α-α。)/α。を表している。旋回流れがオリフィスを通過する場合、絞り 直径比d/Dが 0.6程度より小さくなると、オリフィス直後の静圧は旋回強さΩsの増加と ともに大きくなり、また旋回流れの渦心がオリフィスを通過後非常に不安定となり、管軸 から大きく偏心するために、オリフィス下流の管壁面上の圧力分布も大きく偏心すること が報告されている⁽³⁷⁾。そのため、流量係数の相対誤差(α – α。)/α。は正の値となり、 またばらつき幅も非常に大きくなっている。

前述の単一曲りの図 7-10(a)の例と比較するとよくわかるように、これは旋回流れによ る顕著な特徴であり、空間曲り下流における (α – α。)/α。の値の予測を非常に困難な ものにしている。したがって、空間曲り下流で流量計測を行う場合には、整流装置が必要 不可欠なものと思われる。

図 7-11(b)は整流装置を設置した場合の例である。相対誤差(α-α。)/α。の絶対値 やばらつき幅がかなり小さくなっているのがわかる。この図より、オリフィス流量計の精 度が 0.5%以内になるのは、絞り直径比d/D= 0.4のオリフィスではL/D=2、d/D= 0.5では3、d/D= 0.6では4となっており、直管長さを大きく短縮できることが明らか である。

7.4.3 空間三重曲り

図 7-12(a)は整流装置がない場合の結果である。*L*/*D*に対する(α-α。)/α。の変 化の傾向は、図 7-11(a)に示した空間二重曲りの例と比較的よく似ているが、その値は全 体により大きくなっていることがわかる。

この場合も、整流装置を設置すると同図(b)のようになり、整流装置の効果が大きく表れている。オリフィス流量計の精度が± 0.5%以内になるのは、絞り直径比d/D= 0.4の オリフィスではL/D=2、d/D= 0.5、 0.6ではL/D=8となっている。



表 7-3 曲り部とオリフィスとの間に必要な直管の最小長さ

Kinds of	Orifice	Necessary pipe length on inlet side within 0.5% orifice meter accuracy		
bent pipes	d/D	JIS		Authors' experiment
		010		with rectifying device
	0.4	7	10	4 (6)
Single bend	0.5	7	15	2 (7)
	0.6	9	20	3 (7)
	0.4	18	20	2 (5)
Double bend	0.5	20	>20	3 (16)
	0.6	24	20	4 (>16)
	0.4	18	25	2 (8)
Triple bend	0.5	20	35	8 (8)
	0.6	24	35.	8 (8)
Pipe length in () is needed within 0.25% accuracy.			thin 0.25% accuracy.	

7.4.4 必要直管長

さの短縮 オリフィスによる流 量計測において許容さ れる精度の一つの目安 として、αの相対誤差 $(\alpha - \alpha_{\circ})/\alpha_{\circ}$ の値 が± 0.5%の範囲内と なる場合を考える。こ の条件を満足するため に必要なオリフィス上 流側直管長さの最小値 を、図7-10~12の結果 に従ってまとめると表 7-3 となる。これより、 整流装置の設置によっ て、オリフィス上流側

必要直管長さの大幅な 短縮が明らかである。

すなわち、本実験範囲 内においては、単一、

- 115 -

空間二重曲り下流に整流装置を設置した場合、オリフィスをL=4Dの位置に取り付ける ことが可能となり、空間三重曲りの場合でもL=8Dで十分な精度が得られる。

7.5 むすび

曲り部下流でオリフィスを用いて流量計測を行い、表 7-1、2 および図 7-3に示した整 流装置を設置しその効果を調べた。その結果、つぎのような結論が得られた。

- (1) 空間曲り直後に整流装置を設置すると、その下流では旋回成分がほぼ消失し、軸速 度分布も整流装置下流4Dの断面以降でほぼ発達流に近い分布となる。
- (2) 曲り部とオリフィスとの間に必要な直管長さは、整流装置の設置によって、表 7-3 に示すように大幅に短縮することが可能となる。

なお、本実験に用いられた整流装置の抵抗係数は約4である。

第8章 結 論

近年における各種設備の大型化や設備配置の合理化に伴い、管内流れの干渉問題が引き 起こされ、とくに各種管路要素の抵抗の相互干渉や流量計の流量係数に対する上流側配管 要素の干渉は、配管設計技術者に深刻な問題を提起している。さらに後者の場合には、流 れの干渉が流量計測に大きな誤差を生ずるために、流れを整流して干渉を少なくする方法 などの新たな課題が着目されている。本研究は、このような問題を取り上げ、その解明に 取り組んだものである。具体的な結論は各章末に列記したとおりであり、ここではそれら の概要について述べ、さらに本研究に関連する今後の展望について少し触れることにする。

まず、第2、3章においては連続絞りの干渉について、連続オリフィスと連続有孔板を 例にとり、実験的に明らかにした。すなわち、同一絞り面積比のオリフィスを管路に最大 5枚直列に設置した多連オリフィスのエネルギ損失が、絞り面積比やオリフィス連数・間 隔によってどのように影響され、また多連オリフィスを構成している個々のオリフィスの 干渉がどのようになるかを示すことができた。さらに、一つあるいは複数の穴をもつ同一 形状の有孔板を管路に2枚連続して設置して実験することにより、連続絞りの穴数や穴径 さらには間隔や穴の相対的位置関係による干渉の程度をより一般的に解明することができ た。これにより、今までほとんど行われていなかった連続絞りの干渉を、かなり詳しく解 き明かすことができたと思われる。

つぎに、第4、5章では、整流装置に用いられる多孔板の抵抗係数と流出角係数につい て詳しく実験を行い、その特性を明らかにした。その結果、多孔板の抵抗係数は開口比と 厚比によって大きく変化することがわかり、流れ学的考察に基づき、抵抗係数を開口比と 厚比によって評価できる実験式を導くことができた。流出角係数については、開口比によ ってほとんど影響を受けず、厚比によって大きくその値が変化することを示した。さらに、 管内流れの旋回成分の除去に最適な多孔板形状を見い出すことができた。

多孔板の抵抗特性に関する既存の資料が不十分であり、とくに多孔板の厚比の影響についての考慮が全くなされていない既存の抵抗公式や、流出角係数に関する資料が全く見当たらなかったことから考えると、これらの結果は工学的な意義が十分あるものと思われる。

最後に、第6、7章では、多孔板を用いた管内流れの整流法について理論的に詳しく考察し、最適な整流装置を実際に設計する方法について述べ、さらに、試作された整流装置 が十分な整流効果を発揮することを実験的に示した。とくにオリフィス流量計の上流側必 要直管長さを短縮する目的でこの整流装置を用いると、精度を低下させることなく大幅な 直管長さの短縮が可能であることを実験的に明らかにできた。

以上のように、本研究は1.3節に述べた当初の目的をほぼ達成したものと考えられる が、管内流れの干渉問題全般から見れば、まだほんの一部を解明したにすぎない。とくに、 管路要素の抵抗の相互干渉については、既存のデータと合わせて考えても、とても十分な 資料とは言えない。しかし、配管設計に際して、その組み合わせ方法をある程度配慮でき るだけの資料がそろいつつあることも事実である。他方、本研究における整流装置につい ては、十分な成果が得られたものと思われる。これによって、絞り流量計の流量係数に対 する上流側配管要素の干渉を効率よく遮断することが可能となり、今後工業計測の分野に 十分貢献できるものと考えられる。 本研究論文の上梓にあたり、本研究に終始懇切な御指導と御激励を賜わり、とりまとめ にあたって原稿の御校閲をいただいた大阪大学工学部・森川敬信教授に、謹んで深謝の意 を表します。また、本研究論文の作成に際し、有益な御助言と御討論をいただいた大阪大 学工学部・三宅裕教授、世古口言彦教授に厚く御礼申しあげます。

本研究は、昭和54年 4月より姫路工業大学機械工学教室において行われたものであるが、 この研究の構想と遂行に、有益な御教示と多大の御援助をいただいた姫路工業大学・細川 款延教授、研究の進展に則して適切な御討論と御助力をいただいた藤原良樹助教授に深く 感謝致します。

さらに、大阪府立大学名誉教授・飯田周助氏、同大学工学部航空工学教室の宮城敏夫助 教授を始めとする諸先生方には、しばしば御激励を賜わり、また、姫路工業大学機械工学 教室・関ロ久美教授ほかの諸先生方には、力強い励ましや有形無形の御助力をいただき、 心から御礼申しあげます。

最後に、各種実験装置の製作に際しては姫路工業大学・工作センタ職員各位の御尽力を 賜わり、実験に際しては水力実験室の卒業生諸君に多大の御協力を得た。ここに、改めて 御礼申しあげます。

参 考 文 献

- (1) 伊藤、管内流れの予知 今と昔、日本機械学会誌、84-747(昭56)、166。
- Reynolds. O., An Experimental Investigation of The Circumstances
 Which Determine Whether The Motion of Water Shall Be Direct
 or Sinuous, and of The Law of Resistance in Parallel Channels.
 Phil. Trans. Roy. Soc. London, 174-3 (1883), 935.
- (3) 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会、 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗、
 (昭54)、53、日本機械学会。
- (4) 石原・古屋、絞り流量計の問題点 (1) 測定精度におよぼす諸因子の影響 -、
 機械の研究、23-1(昭46)、229。
- (5) 田中、絞り流量計の問題点 (3) 整流装置に対する考え方 、機械の研究、
 23-1(昭46)、247。
- (6) Kirchbach , H . , Der Energieverlust in Kniestücken , Mitt. Hydr. Inst.
 T . H . München , Ht. 3 (1929) , 68.
- (7) Schubart, W., Der Energieverlust in Kniestücken bei glaffer und rauher Wandung, Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, Ht. 3 (1929), 121.
- (8) 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)、38-314(昭47)、2600。
- (9) 村上・清水、ねじ込み式45°エルボを用いた曲管路の水力損失、日本機械学会論文
 集(第2部)、40-334(昭49)、1739。

- (10) 村上・清水、連続曲り管路の水力損失と流れについて(曲り半径比および曲り管内 壁あらさの影響)、日本機械学会論文集(第2部)、43-365(昭52)、174。
- (11) 文献 (3)の p. 100 。
- (12) 高木・細川、近接した2本の支管をもつ直角分岐管路の損失について、日本機械学
 会論文集、34-262(昭43)、1133。
- (13) 細川・森川、分岐損失の干渉に関する研究、空気調和・衛生工学、48-4(昭49)、251。
- (14) Parr, G. A., Interaction between Adjacent T-Junctions in a Dividing Flow Manifold, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa, (1973).
- (15) 川上・ほか2名、分岐管の研究(第5報)多連直角分岐管における流量分配の類似 性と干渉、日本機械学会講演論文集、No.710-3(昭46)、153。
- (16) Smith , A. J. W., Component Interactions and Their Influence on The Pressure Losses in Internal Flow Systems , Proc. Instn. Mech. Engrs., 190-8 (1976) , 349.
- (17) Sherman, J., ほか2名, Variable Flow Resistance with Adjustable
 Multihole Orifice Plates in Series, Trans. ASME, Ser.D., 82 (1960),
 645.
- (18) 山田、多段減圧オリフィス装置、特許公報、昭51-42776、日本国特許庁。
- (19) JIS Z 8762 1969 絞り機構による流量測定方法。
- (20) JIS Z 8763 1972 ベンチュリ管による流量測定方法。

- (21) JIS Z 8764 1975 電磁流量計による流量測定方法。
- (22) 山本、超音波流量計、計測と制御、18-5(昭54)、 418。
- (23) JIS Z 8765 1980 タービン流量計による流量測定方法。
- (24) 栗田、カルマン渦流量計、計測と制御、18-5(昭54)、 407.
- (25) 川田・小宮、流れ計測に関する最近の動向、計測と制御、18-5(昭54)、 385。
- (26) 坪田・ほか6名、流れの計測に対する現場からの要望、計測と制御、18-5(昭54)、
 431。
- (27) Sprenkle, R. E., Piping Arrangements for Acceptable Flowmeter Accuracy, Trans . ASME, 67 (1945) , 345.
- (28) Schröder, A., Notwendige störungsfreie Rohrstrecken für Düsen und Blenden, Brennst. Wärme Kraft, 13-1 (1961), 20.
- (29) Bluschke, H., ほか3名, Ergänzende Versuche über den Einfluß von Rohrkrümmern auf die Durchflußzahlen von Normventuridüsen, Brennst. Wärme Kraft, 18-12 (1966), 605.
- (30) Bluschke, H., ほか2名, Versuche über den Einfluß von Rohr krümmern auf die Durchflußzahlen von Normventuridüsen und Klassischen
 Venturirohren, Brennst, Wärme Kraft, 18-2 (1966), 68.
- (31) Herning, Fr. und Bellenberg, H., Neue Versuche mit Normblenden,
 Brennst, Wärme Kraft, 12-3 (1960), 89.
- (32) Bluschke, H., ほか3名, Untersuchungen über den Einfluß von Konfusoren und Diffusoren auf die Durchflußzahlen von

Normventuridüsen, Brennst , Wärme – Kraft , 20-3 (1968) , 104.

- (33) Bogema, M., ほか2名, Quadrant Edge Orifice Performance Effect of Upstream Velocity Distribution, Trans. ASME, Ser.D., J. of Basic Eng., 84 (1962), 415.
- (34) Murdock, J. W.、ほか2名、Effect of a Globe Valve in Approach Piping on Orifice-Meter Accuracy, Trans. ASHE, 78 (1956), 369.
- (35) 古山・ほか2名、流量測定法の研究 単一障害物のオリフィス流量係数への影響、三菱重工技報、 6-4(昭44)、 379。
- (36) Lugt, H., Einfluß der Drallströmung auf die Durchflußzahlen genormter Drosselmeßgeräte, Brennst. Wärme Kraft, 13-3 (1961),
 121.
- (37) 村上・鬼頭、旋回流における絞り流量計の特性(オリフィスの場合)、日本機械学 会論文集、43-369(昭52)、1811。
- (38) Ghazi, H. S., A Pressure Index for Predicting the Effect of Flow Profiles on Orifice Meter Performance, Trans. ASME, J. of Basic Eng., 88 (1966), 93.
- (39) 小宮・長塩、流速分布が絞り流量計の流量係数に及ぼす影響についての一実験、計 測自動制御学会論文集、5-3 (昭44)、198。
- (40) Collar, A. R., The Effect of a Gauze on The Velocity Distribution in a Uniform Duct, ARC Rep. Memo., 1867 (1939).
- (41) MacPhail, D. C., Experiments on Turning Vanes at an Expansion,

ARC Rep. Memo, 1876 (1939).

- (42) Taylor, G. I. and Davies, R. M., The Aerodynamics of Porous Sheets, ARC Rep. Memo, 2237 (1944).
- (43) Adler, A. A., Variation with Mach Number of Static and Total Pressures through Various Screens, NACA CB L5F-28 (1946).
- (44) Dryden, H. L. and Schubauer, G. B., The Use of Damping Screens for The Reduction of Wind-Tunnel Turbulence, J. Aero. Sci., 14-4 (1947), 221.
- (45) Taylor, G. I. and Batchelor, G. K., The Effect of Wire Gauze on Small Disturbances in a Uniform Stream, Quart. J. Mech. and Applied Math., 2 (1949), 1.
- (46) Simmons, L. F. G. and Cowdrey, C. F., Measurements of The Aerodynamic Forces Acting on Porous Screens, ARC Rep. Memo, 2276 (1949).
- (47) Schubauer, G. B., ほか2名, Aerodynamic Characteristics of Damping Screens, NACA Tech. Note, 2001 (1950).
- (48) Baines, W. D. and Peterson, E. G., An Investigation of Flow Through Screens, Trans. ASME, 73 (1951), 467.
- (49) Идельчик, И. Е., Определение Козффициентов Сопротивления при Истечении через Отверстия, Гидротехническое

-124 -

строительство, 5 (1953) ,31.

- (50) Wieghardt, K. E. G., On The Resistance of Screens, Aeronaut. Q., 4 (1953), 186.
- (51) Annand, W. J. D., The Resistance to Air Flow of Wire Gauzes, J. Royal Aeronaut. Soc., 57 (1953), 141.
- (52) Grootenhuis, P., A Correlation of The Resistance to Air Flow of Wire Gauzes, Proc. Inst. Mech. Eng., 168-34 (1954), 837.
- (53) Cornell, W. G., Losses in Flow Normal to Plane Screens, Trans. ASME, 80 (1958), 791.
- (54) Идельчцк, И. Е., Учет Влияния Вязкости на Гидравлическое Сопротивление Диафрагм и Решеток, Тенлознергетика,
 9 (1960), 75.
- (55) Owen, P. R. and Zienkiewicz, H. K., The Production of Uniform Shear Flow in a Wind Tunnel, J. Fluid Mech., 2(1957), 521.
- (56) Elder, J. W., Steady Flow through Non-Uniform Gauzes of Arbitrary Shape, J. Fluid Mech., 5 (1959), 355.
- (57) 新津・ほか3名、多孔板の整流特性(第1報) 二次元流の場合 –、日本機
 械学会関西支部第36期定期総会講演会前刷、(1961)、39。
- (58) McCarthy, J. H., Steady Flow past Non-Uniform Wire Grids, J. Fluid Mech., 19 (1964), 491.

- (59) Livesey , J. L. and Turner, J. T. , The Generation of Symmetrical Duct Velocity Profiles of High Uniform Shear , J. Fluid Mech. , 20 (1964) , 201.
- (60) Bradshaw, P., The Effect of Wind-Tunnel Screens on Nominally Two-Dimensional Boundary Layers, J. Fluid Mech., 22 (1965), 679.
- (61) Rose, W. G., Results of an Attempt to Generate a Homogeneous Turbulent Shear Flow, J. Fluid Mech., 25 (1966), 97.
- (62) Lau , Y. L. and Baines, W. D. , Flow of Stratified Fluid throughCurved Screens , J. Fluid Mech. , 33 (1968) , 721.
- (63) Turner, J. T., A Computational Method for The Flow through
 Non-Uniform Gauzes : The General Two-Dimensional Case, J. Fluid
 Mech., 36 (1969), 367.
- (64) Rose, W. G., Interaction of Grid Turbulence with a Uniform Mean Shear, J. Fluid Mech., 44 (1970), 767.
- (65) Koo , J. -K. and James , D. F. , Fluid Flow around and through a Screen, J. Fluid Mech. , 60 (1973) , 513.
- (66) Liversey, J. L. and Laws, E. M., Flow through Non-Uniform Gauze Screens, J. Fluid Mech., 59 (1973), 737.
- (67) Castro, I. P., Some Problems concerning The Production of a Linear Shear Flow using Curved Wire-Gauze Screens, J. Fluid Mech., 76 (1976), 689.

- (68) 木谷・ほか2名、平面壁上の多孔平板をよぎる非粘性せん断流れ、日本機械学会論 文集、45-393, B (昭54)、 758。
- (69) Sprenkle, R. E. and Courtright, N. S., Straightening Vanes for Flow Measurement, Mech. Eng., 80-2 (1958), 71.
- (70) 鳥居・根本、流量測定における整流装置の効果、ターボ機械、4-10(1976)、37。
- (71) 鳥居・ほか2名、絞り流量計用整流装置に関する実験的研究、幾徳工業大学研究報告、B-5 (昭55)、9。
- (72) 田中、管内流における複数抵抗体による整流効果(軸対称じょう乱の場合)、日本
 機械学会論文集(第2部)、40-339(昭49)、3122。
- (73) 田中、管内流における複数抵抗体による整流効果(S字状じょう乱速度分布の場合) 日本機械学会論文集(第2部)、41-346(昭50)、1802。
- (74) 明石・ほか2名、管路流量計測用非一様多孔板式整流装置(第1報、基礎実験)、
 日本機械学会講演論文集、No. 720-15 (1972)、275。
- (75) 明石・山中、整流装置による流量計上流側配管の短縮、配管技術、 21-11(1979)、
 51。
- (76) 村上・ほか2名、三次元曲管内の流動に関する実験的研究、日本機械学会論文集、 35-272(昭44)、763。
- (77) Tunstall, M. J. and Harvey, J. K., On The Effect of a Sharp Bend in a Fully Developed Turbulent Pipe-Flow, J. Fluid Mech., 34 (1968), 595.
- (78) 細川・森川、分岐損失の干渉に関する研究(2) 十字分岐管路内の損失とその流れ、

空気調和·衛生工学、49-7(昭50)、 625。

- (79) 沖、水力学、(昭17)、 442、岩波書店。
- (80) Benedict, R. P., ほか2名, Flow Losses in Abrupt Enlargements and Contractions, Trans . ASME, Ser.A . 88-1 (1966) . 33.
- (81) 文献 (3)の p.109。
- (82) Lichtarowicz, A., ほか2名, Discharge Coefficients for Incompressible
 Non-Cavitating Flow through Long Orifices, J. Mech. Eng. Sci., 7-2
 (1965), 210.
- (83) 村上・ほか3名、旋回を伴う管内流れの実験的研究、日本機械学会論文集(第2部)41-346(昭50)、1793。
- (84) Spanglar, J., Untersuchungen über den Verlust an Rechen bei
 Schräger Zuströmung, Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, Ht. 2 (1928),
 46.
- (85) Laufer, J., The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, NACA Rep., 1174 (1954).

著者の研究論文

本論文に集録した著者の研究論文は以下のとおりである。

(第2章) 連続して設置した絞りの抵抗とその干渉

空気調和・衛生工学会論文集、No.28 (昭60)、33。

- (第3章) 連続して設置した絞りの抵抗とその干渉 第2報 2枚の有孔板の干渉 空気調和・衛生工学会論文集、No.31 (昭61)、870。
- (第4章) 多孔板の抵抗特性 第1報 抵抗係数
 日本機械学会論文集、50-455、 B(昭59)、1808。
- (第5章) 多孔板の抵抗特性 第2報 流出角係数と旋回流の整流日本機械学会論文集、50-455、 B(昭59)、1812。
- (第6章) 多孔板を用いた気流の整流について
 空気調和・衛生工学会近畿支部 環境工学研究会資料 112号(昭60)、 9。
 多孔板を用いた整流装置の研究
 日本機械学会論文集、51~461、B (昭60)、106。
 Production of Fully Developed Pipe Flow Using Perforated Plates
 Bull. of JSME, 28-243(1985), 1955.
- (第7章) 多孔板を用いた整流装置の研究 第2報 流量計測における整流装置の効果
 日本機械学会論文集、52-477、 B(昭61)、2094。