

後方ステップ再付着流れ

1999年12月

琉球大学工学部
宮城 功

後方ステップ再付着流れ

1999年12月

琉球大学工学部

照屋 功

目次

記号	iv
図名一覧	vi
表名一覧	xiv

第1章 序論

1.1 本研究の目的・意義	1
1.2 はく離・再付着流れの概要	2
1.3 過去の研究の紹介	2
1.4 本論文の概要	6

第2章 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置	8
2.2 測定機器	9
2.2.1 ピトー管	9
2.2.2 精密微差圧計	9
2.2.3 I型熱線プローブ	9
2.2.4 スプリットフィルムプローブ	10
2.2.5 熱線流速計システム	10
2.2.6 サーマルタフトプローブ	10
2.2.7 圧力センサ	11
2.2.8 ローパスフィルタ	11
2.2.9 パーソナルコンピュータ及びA/D変換器	11
2.3 各測定機器の校正及び調整	12
2.3.1 I型熱線プローブの校正	12
2.3.2 スプリットフィルムプローブの校正及び調整	12
2.3.3 サーマルタフトプローブの調整	13
2.3.4 圧力センサの校正	13
2.4 実験方法	13
2.4.1 流れ場の設定	13
2.4.2 かく乱の導入方法	14

2.4.3 基準断面における速度の測定	14
2.4.4 ステップ入口の速度及び乱れ強さの測定	14
2.4.5 ステップ下流の順流率の測定	14
2.4.6 ステップ下流の速度場の測定	15
2.4.7 壁面圧力変動の測定	15
2.4.8 壁面時間平均圧力の測定	16

第3章 再付着領域流れ場の構造

3.1 序	17
3.2 実験の概要	17
3.2.1 二次元かく乱の導入方法	17
3.2.2 三次元かく乱の導入方法	18
3.3 流入流れ	18
3.4 二次元かく乱の流れ場への影響	19
3.5 三次元的かく乱の流れ場への影響	20
3.5.1 三次元フェンスによる再付着流れ場の影響	20
3.5.2 ボルテックスジェネレータを用いたかく乱の流れ場への影響	21
3.6 再付着領域の幅で無次元化した順流率分布	22
3.7 まとめ	23

第4章 入口乱れ付加による再付着点距離の減少機構

4.1 序	24
4.2 かく乱の導入と流入条件	24
4.3 ステップ入口の速度及び乱れ強さ分布	25
4.4 ステップ下流の順流率分布	25
4.5 ステップ下流の速度分布とせん断層厚さの変化	26
4.6 連行流量の変化	27
4.7 まとめ	27

第5章 流れ場内の大渦の挙動	
5.1 序	28
5.2 流入境界層が薄い場合	28
5.2.1 はく離直後の渦挙動	28
5.2.2 はく離せん断層内の大渦挙動	29
5.2.3 壁面近くの大渦挙動	30
5.3 流入境界層が厚い場合	31
5.3.1 はく離せん断層内の大渦挙動	31
5.3.2 壁面近くの大渦挙動	32
5.4 流入境界層厚さの差異による大渦挙動の変化	34
5.5 ウェーブレット解析による渦構造の観察	34
5.6 まとめ	35
第6章 壁面近傍の乱れ強さが再付着現象に与える影響	
6.1 序	37
6.2 壁面近傍の最大乱れ強さが再付着点距離に与える影響	37
6.3 再付着流れ場の相似性	38
6.4 まとめ	38
第7章 圧力回復効率と再付着点距離の減少の関係	
7.1 序	40
7.2 ステップ下流の壁面圧力係数分布	40
7.3 圧力回復効率と再付着点距離の減少の関係	40
7.4 まとめ	43
第8章 結論	45
図および表	46
参考文献	169
謝辞	171

記号一覧

本論文で用いた記号の一覧を以下に示す

b	:せん断層の厚さ
B	:スパン幅
C_f	:壁面摩擦抗力係数
C_p	:壁面圧力係数 $(= (p - p_0)/(1/2)\rho U_0^2)$
C_p'	:壁面圧力変動係数
C_{pi}	:理想流体で得られる圧力回復後の 壁面圧力係数 $(= 1 - 1/ER^2)$
C_{pr}	:圧力が回復した後の C_p の最大値
C_{pm}	:運動量理論による急拡大損失
C_{pd}	:ロッドによる摩擦損失
C_{pex}	:ロッド設置により生じたかく乱 によるせん断層発達に伴う損失
d	:ロッドの直径
ER	:流路拡大比 $(= W_2/W_1)$
f	:周波数
h	:フェンス高さ
H	:ステップ高さ
H_{12}	:形状係数 $(= \delta^*/\theta)$
l	:フェンスの長さ
L	:ステップ入口からロッドあるいはフェンスまでの距離
p	:壁面圧力
p_0	:基準断面における壁面圧力
Q_E	:連行流量 $(= 1/U_0 H \int_0^H U dy)$
Re_H	:レイノルズ数 $(= U_0 H/\nu)$
R_p	:相互相関係数
R_{pmax}	:最大相互相関係数
Tu	:ステップ入口の乱れ強さ
Tu_{max}	:ステップ入口の $y^+ \leq 50$ における最大乱れ強さ

U	: x 方向速度及び x 方向時間平均速度
U'	: x 方向変動速度成分
U_0	: 基準断面における流路高さ中央の速度
u^+	: 摩擦速度 v^* で無次元化した x 方向時間平均速度
v^*	: 摩擦速度 ($= \sqrt{\tau_w / \rho}$)
W_1	: ステップ上流の流路幅
W_2	: ステップ下流の流路幅
x	: x 座標
x_R	: 再付着点距離
y	: y 座標
y^+	: 無次元距離 ($= yv^* / \nu$)
y_h	: ステップ面からの y 方向高さ
y_t	: U_{\max} の 95% をとる y 方向高さ
Δt	: サンプリング周波数
Δt_{sec}	: 時間遅れ
Δx_R	: 再付着領域の幅
γ	: 壁面近傍の順流率
δ	: 流入境界層厚さ
δ^*	: 流入境界層排除厚さ
η	: 圧力回復効率 ($= C_{Pr} / C_{Pi}$)
θ	: 運動量厚さ
ν	: 空気の動粘度係数
ρ	: 空気の密度
τ_w	: 壁面摩擦応力
—	: 時間平均値

図名一覧

第1章

図1.1 はく離再付着流れの概略図

第2章

図2.1.1 実験装置側面図

図2.1.2 実験装置平面図

図2.1.3 実験装置正面図

図2.1.4 実験装置の概略図

図2.1.5 ゲッチンゲン型大型風洞施設

図2.1.6 実験装置の座標系

図2.1.7 測定孔の位置

図2.2.1 測定系ブロック線図

図2.2.2 ピトー管の概略図

図2.2.3 I型熱線プローブの概略図

図2.2.4 スプリットフィルムプローブの概略図

図2.2.5 サーマルタフトプローブの概略図

図2.2.6 サーマルタフトプローブの信号処理法

図2.2.7 圧力センサ用アダプタおよび圧力センサの概略図

図2.2.8 ローパスフィルタの回路図

図2.2.9 ローパスフィルタの減衰特性

図2.3.1 スプリットフィルムプローブの設置方法

図2.3.2 スプリットフィルムプローブの較正結果

図2.4.1 I型熱線プローブの設置方法の概略図

第3章

- 図3.2.1 ロッドの直径と設置位置
- 図3.2.2 二次元かく乱におけるフェンスの寸法と設置位置
- 図3.2.3 三次元かく乱におけるフェンスの設置位置
- 図3.2.4 ボルテックス・ジェネレータの設置位置
- 図3.3.1 基準断面における時間平均速度分布
- 図3.3.2 基準断面における対数速度分布
- 図3.4.1 ステップ入り口における時間平均速度分布 (二次元かく乱, ロッド)
- 図3.4.2 ステップ入り口における時間平均速度分布 (二次元かく乱, フェンス)
- 図3.4.3 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (二次元かく乱, ロッド)
- 図3.4.4 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (二次元かく乱, フェンス)
- 図3.4.5 ステップ下流の順流率分布 (二次元かく乱, ロッド)
- 図3.4.6 ステップ下流の順流率分布 (二次元かく乱, フェンス)
- 図3.5.1 ステップ入り口における時間平均速度分布 (三次元かく乱)
- 図3.5.2 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (三次元かく乱)
- 図3.5.3 ステップ下流の順流率分布 (三次元かく乱)
- 図3.5.4 ステップ入り口における時間平均速度分布 ($l/H = 1.5$)
- 図3.5.5 ステップ入り口における乱れ強さ分布 ($l/H = 1.5$)
- 図3.5.6 ステップ下流の順流率分布 ($l/H = 1.5$)
- 図3.5.7 順流率のスパン方向分布 ($l/H = 1.5$)
- 図3.5.8 ステップ入り口における時間平均速度分布 (ボルテックス・ジェネレータ)
- 図3.5.9 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (ボルテックス・ジェネレータ)
- 図3.5.10 ステップ下流の順流率分布 (ボルテックス・ジェネレータ)
- 図3.5.11 順流率のスパン方向分布 (ボルテックス・ジェネレータ)
- 図3.6.1 再付着点領域の幅で無次元化した順流率分布

第4章

- 図4.2.1 ロッドの直径と設置位置
- 図4.2.2 基準断面における時間平均速度分布 ($ER=1.5$)
- 図4.2.3 基準断面における時間平均速度分布 ($ER=2.0$)
- 図4.2.4 基準断面における対数速度分布

- 図 4.3.1 ステップ入口における時間平均速度分布 ($ER=1.7$)
- 図 4.3.2 ステップ入口における乱れ強さ分布 ($ER=1.7$)
- 図 4.4.1 流入境界層厚さが薄い場合でのステップ下流の順流率分布 ($ER=1.33$)
- 図 4.4.2 流入境界層厚さが厚い場合でのステップ下流の順流率分布 ($ER=1.33$)
- 図 4.4.3 流入境界層厚さが薄い場合でのステップ下流の順流率分布 ($ER=2.0$)
- 図 4.4.4 流入境界層厚さが厚い場合でのステップ下流の順流率分布 ($ER=2.0$)
- 図 4.5.1 ステップ下流の時間平均速度分布 ($ER=1.5$, 薄い境界層)
- 図 4.5.2 ステップ下流の時間平均速度分布 ($ER=1.5$, 厚い境界層)
- 図 4.5.3 ステップ下流の時間平均速度分布 ($ER=2.0$, 薄い境界層)
- 図 4.5.4 ステップ下流の時間平均速度分布 ($ER=2.0$, 厚い境界層)
- 図 4.5.5 せん断層厚さ b/H の定義図
- 図 4.5.6 流入境界層厚さが薄い場合でのせん断層厚さ b/H の変化
- 図 4.5.7 流入境界層厚さが厚い場合でのせん断層厚さ b/H の変化
- 図 4.6.1 連行流量 QE の定義図
- 図 4.6.2 流入境界層厚さが薄い場合での連行流量 QE の変化
- 図 4.6.3 流入境界層厚さが厚い場合での連行流量 QE の変化

第 5 章

- 図 5.2.1 パワスペクトル密度 ($x/H=0.0$)
- 図 5.2.2 パワスペクトル密度 ($x/H=0.5$)
- 図 5.2.3 パワスペクトル密度 ($x/H=0.0$)
- 図 5.2.4 パワスペクトル密度 ($x/H=0.5$)
- 図 5.2.5 パワスペクトル密度 ($x/H=0.0$)
- 図 5.2.6 パワスペクトル密度 ($x/H=0.5$)
- 図 5.2.7 パワスペクトル密度 ($x/H=0.0$)
- 図 5.2.8 パワスペクトル密度 ($x/H=0.5$)
- 図 5.2.9 パワスペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)
- 図 5.2.10 パワスペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)
- 図 5.2.11 パワスペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)
- 図 5.2.12 パワスペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)
- 図 5.2.13 パワスペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)

- 図5.2.14 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)
図5.2.15 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)
図5.2.16 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)
図5.2.17 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)
図5.2.18 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)
図5.2.19 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)
図5.2.20 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)
図5.2.21 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)
図5.2.22 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)
図5.2.23 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)
図5.2.24 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)
図5.2.25 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)
図5.2.26 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)
図5.2.27 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)
図5.2.28 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)
図5.2.29 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)
図5.2.30 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)
図5.2.31 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)
図5.2.32 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)
図5.2.33 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)
図5.2.34 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)
図5.2.35 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)
図5.2.36 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)
図5.2.37 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)
図5.2.38 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)
図5.2.39 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)
図5.2.40 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)
図5.2.41 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H=1.0$)
図5.2.42 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H=1.0$)
図5.2.43 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H=1.0$)
図5.2.44 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H=1.0$)
図5.2.45 ステップ壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 ($ER=1.5$)

- 図5.2.46 ステップ壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=2.0)
- 図5.2.47 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=1.5)
- 図5.2.48 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=1.5)
- 図5.2.49 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=2.0)
- 図5.2.50 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=2.0)
- 図5.2.51 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.21 \sim 0.48$)
- 図5.2.52 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.74 \sim 1.28$)
- 図5.2.53 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.36 \sim 2.39$)
- 図5.2.54 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.44$)
- 図5.2.55 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.54 \sim 1.44$)
- 図5.2.56 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.45 \sim 2.69$)
- 図5.2.57 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.44$)
- 図5.2.58 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.69 \sim 1.18$)
- 図5.2.59 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.26 \sim 2.21$)
- 図5.2.60 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.47$)
- 図5.2.61 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.73 \sim 1.26$)
- 図5.2.62 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.35 \sim 2.14$)
- 図5.3.1 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)
- 図5.3.2 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d5L100)
- 図5.3.3 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)
- 図5.3.4 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d5L100)
- 図5.3.5 壁面圧力変動係数分布 (ER=1.5)
- 図5.3.6 壁面圧力変動係数分布 (ER=2.0)
- 図5.3.7 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)
- 図5.3.8 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d6L100)
- 図5.3.9 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)
- 図5.3.10 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d6L100)
- 図5.3.11 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)
- 図5.3.12 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d6L100)
- 図5.3.13 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)
- 図5.3.14 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d6L100)

- 図 5.3.15 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.20 \sim 0.64$)
- 図 5.3.16 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.73 \sim 1.35$)
- 図 5.3.17 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.44 \sim 2.02$)
- 図 5.3.18 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.18 \sim 0.58$)
- 図 5.3.19 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.66 \sim 1.22$)
- 図 5.3.20 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 1.29 \sim 1.81$)
- 図 5.3.21 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.49$)
- 図 5.3.22 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.75 \sim 1.29$)
- 図 5.3.23 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.37 \sim 2.17$)
- 図 5.3.24 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.44$)
- 図 5.3.25 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.68 \sim 1.16$)
- 図 5.3.26 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 1.24 \sim 1.95$)
- 図 5.3.27 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.48$)
- 図 5.3.28 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.74 \sim 1.26$)
- 図 5.3.29 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.35 \sim 2.35$)
- 図 5.3.30 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.45$)
- 図 5.3.31 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.69 \sim 1.18$)
- 図 5.3.32 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 1.26 \sim 2.20$)
- 図 5.3.33 ステップ下流の最大相互相関係数分布 (d0L0)
- 図 5.3.34 ステップ下流の最大相互相関係数分布 (d6L100)

- 図 5.3.35 最大相互相関係数分布の模式図 (ER=1.5)
- 図 5.3.36 最大相互相関係数分布の模式図 (ER=2.0)
- 図 5.4.1 境界層厚さの差異に着目した最大相互相関係数分布 (d0L0)
- 図 5.4.2 境界層厚さの差異に着目した最大相互相関係数分布 (d6L100)
- 図 5.5.1 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d0L0, $x/H = 0.5$)
- 図 5.5.2 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d5L100, $x/H = 0.5$)
- 図 5.5.3 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d0L0, $x/H = 1.5$)
- 図 5.5.4 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d5L100, $x/H = 1.5$)
- 図 5.5.5 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d0L0, $x/H = 2.5$)
- 図 5.5.6 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=1.5, d5L100, $x/H = 2.5$)
- 図 5.5.7 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 0.5$)
- 図 5.5.8 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d5L100, $x/H = 0.5$)
- 図 5.5.9 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 1.5$)
- 図 5.5.10 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d5L100, $x/H = 1.5$)
- 図 5.5.11 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 2.5$)
- 図 5.5.12 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d5L100, $x/H = 2.5$)
- 図 5.5.13 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 2.5$, $0 \leq b \leq 0.24$ sec)
- 図 5.5.14 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 2.5$, $0.24 \leq b \leq 0.48$ sec)
- 図 5.5.15 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 2.5$, $0.48 \leq b \leq 0.71$ sec)
- 図 5.5.16 速度変動のウェーブレット係数等値線図
(ER=2.0, d0L0, $x/H = 2.5$, $0.71 \leq b \leq 0.95$ sec)

- 図 5.5.17 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0.95 \leq b \leq 1.19$ sec)
- 図 5.5.18 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $1.19 \leq b \leq 1.43$ sec)
- 図 5.5.19 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d0L0$, $x/H = 8.5$)
- 図 5.5.20 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d5L100$, $x/H = 8.5$)
- 図 5.5.21 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 9.5$)
- 図 5.5.22 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d5L100$, $x/H = 9.5$)

第 6 章

- 図 6.2.1 $y^+ \leq 50$ の領域における
最大乱れ強さ Tu_{max} と再付着点距離 x_R/H の関係
- 図 6.3.1 再付着点領域の幅 Δx_R
と再付着点距離 x_R で再整理した順流率分布

第 7 章

- 図 7.2.1 流入境界層厚さが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=1.33$)
- 図 7.2.2 流入境界層厚さがが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=1.33$)
- 図 7.2.3 流入境界層厚さがが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=1.5$)
- 図 7.2.4 流入境界層厚さがが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=1.5$)
- 図 7.2.5 流入境界層厚さがが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=2.0$)
- 図 7.2.6 流入境界層厚さがが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 ($ER=2.0$)
- 図 7.3.1 理想流体の場合の回復量をもとにした
圧力回復効率 η と再付着点距離 x_R/H の関係

表名一覧

第4章

表 4.2.1 基準断面における境界層パラメータ

第1章

序 論

1.1 本研究の目的・意義

はく離・再付着流れは、流体機器等の工学的応用物のみならず自然・生活環境の中において随所で見られ、極めて重要な現象である。流体機器において流路内や翼周りで生ずるはく離・再付着流れは、全圧の損失、流路抵抗増大、圧力変動の原因となるばかりでなく機器の効率低下を引き起こす。このように流れのはく離・再付着現象は、一般に機器の効率低下などの障害の原因となるため、これまでは抑止することへの関心が高く、多くの研究がなされてきた。しかしながら、近年においてははく離せん断層内の熱・物質混合拡散の促進、再付着領域における高熱伝達率特性などの有益な面にも目を向けられ、その積極的な利用が試みられてきている。従って、このような二面性を持つはく離・再付着流れの性質を目的に応じてそれぞれ工学的に有効利用することが望まれる。そのためには再付着流れ場の機構解明を図るとともにその流れ場の制御について情報獲得が必要である。

はく離・再付着流れの研究において二次元後方ステップは、はく離線がステップ後縁に固定されているため、数多く取り上げられてきた。しかしながら、はく離・再付着流れとして比較的単純な流れ場とはいえ、Eaton らによる指摘⁽¹⁾に代表されるように二次元後方ステップ流れ場の基本的な量である再付着点距離についても研究者間のデータに大きなばらつきが認められている。すなわち、後方ステップ流れの再付着点距離は、ステップ入口の境界層の状態に大きな影響を受ける。このため、レイノルズ数、流入境界層の厚さ、主流乱れ強さなど流れ場を支配する因子について多くの研究がなされてきた^{(1)~(7)}。Eaton ら⁽¹⁾はステップ入口に流入する流れの乱れ強さの影響について乱れ強さの増加と共に再付着点距離は減少することを示している。また、磯本と本阿弥⁽⁴⁾は、かく乱要素として溝やロッドを用い壁近傍の乱れを変化させ、はく離点近傍での無次元高さ y^+ が 50 以下の領域における最大乱れ強さと再付着点距離が強い相関を持つことを示し、 y^+ が 50 より主流側における乱れは再付着距離に影響を与えないことを明らかにした。これによりにステップ入口乱れ強さの影響ははく離点近くの局所乱れにより整理できる可能性が示されてきた。

このように従来では、再付着点距離に影響をおよぼす個々の因子については数多くの研究が行われてきたが、複数の因子についての系統的な研究についてはあまりなされていない。そこで、本研究では後方ステップにおけるはく離・再付着流れに関して、ステップ入

口にかく乱を与え、入口乱れ強さ、流路拡大比、流入境界層厚さ、が再付着現象に及ぼす複合的影響について調べた、これらの結果から再付着流れ場の機構解明と再付着点距離制御の効果を検討した。

1.2 はく離・再付着流れの概要

はく離・再付着流れは、固体表面からいったんはく離した境界層流が下流で固体表面に再び付着するときに形成される流れである。はく離泡について図1.1のように流れの概要を考えることができる。ここで、時間平均のはく離・再付着現象を考えると、はく離点と再付着点とを結ぶ流線は時間平均分離流線となる。再付着点は表面摩擦応力の時間平均値が零となる位置であり、壁面近傍の順流率 γ (順流と逆流の時間割合) が0.5となる位置と一致する⁽⁸⁾。再付着点 x_R を中心とする流れの非定常性の大きな領域は、再付着領域と呼ばれ、再付着点は絶えず変動している。分離流線と固体壁との間の流れが再循環流れであり、その間では逆流が存在する。再循環流れを含む分離流線とステップに囲まれた領域は、はく離泡と呼ばれる。はく離した境界層はせん断層を形成するが、そのはく離せん断層内では、小さな渦が絶えず合体を繰り返し⁽⁹⁾、やがて再付着点付近では大きく成長した渦となる。はく離線のすぐ下流では、横渦の軸ははく離線とほぼ平行であるが合体を繰り返すことにより次第に三次元的になり、再付着点領域では、横方向に配列された三次元的な横渦が形成される⁽⁹⁾。この様な大きなスケールをもった渦を大規模渦あるいは大渦と呼ぶ。大規模渦(大渦)は再付着領域から $(0.5 \sim 0.8)U_0/x_R$ の中心周波数で放出される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

1.3 過去の研究の紹介

ここでは、膨大なはく離再付着に関する研究のうち過去の研究例として、まず再付着点距離に影響をおよぼす各因子について検討した研究を示す。

Eaton ら⁽¹⁾は、後方ステップ流れに関して1980年までの研究をまとめ、再付着点距離は、ステップ入口の境界層の状態に大きな影響を受けることを示した。

E.W.Adams ら⁽²⁾⁽³⁾は、ステップ高さによるレイノルズ数 $Re = 4 \sim 8 \times 10^4$ で境界層厚さが $0 < \delta/H < 2$ において、流入境界層の厚さが再付着点距離に与える影響について調べている。これより以下のことを示している。レイノルズ数が大きな領域 ($Re_H < 100000$) では再付着点距離はレイノルズ数にほとんど依存しない様になる。ER を大きくすれば再付着点距離は延びる。ステップ上流側の流入境界層が層流から乱流になると再付着点距離

が30%も増加する。流入境界層が乱流の場合、境界層厚さの変化に対する再付着点距離の変化は小さい。

磯本と本阿弥⁽⁴⁾は後方ステップ流れにおける乱流境界層のはく離・再付着現象に及ぼす乱れの影響を研究した。流路拡大比は1.5であり、乱れはステップ上流(1500mm)に乱流発生装置を付加し、かつロッドおよび溝によって壁近傍の乱れを変化させた。溝やロッドによる一連の実験から無次元距離 y^+ が50より主流側における乱れは再付着距離に影響を与えないことを明らかにした。はく離点壁近傍の最大乱れ強さと再付着距離の変化は一本の直線上に集約できた。入口速度分布による影響や境界層パラメータの差による影響は乱れの影響に比べて極めて小さいと結論づけている。

木谷⁽⁵⁾は流れと平行に置かれた厚い平板の前縁に形成されるはく離・再付着流れにおよぼす主流乱れの影響についての研究を行っている。乱れは厚板のよどみ流線上に細いロッドを置くことによって導入し、ロッド直径および厚板前面からロッド中心までの距離を変えて乱れ強さを制御した。乱れ強さの基準点は、はく離点上1.0mmとした。基準点の乱れの増加とともに再付着長さは減少している。再付着領域の幅 Δx_R は増加し、再付着点距離に及ぼす乱れの長さスケールの影響は少ないと結論づけている。壁面静圧分布は乱れ強さが大きいほど圧力回復領域は上流側に移動している。乱れによって再付着距離が1/3程度に短縮された場合でも圧力が回復するのに必要な x 方向の距離はほとんど減少していない。

Durst⁽⁶⁾は周波数シフト LDA を用いて種々のレイノルズ数および流路拡大比のステップ流れについての x 方向と y 方向の平均速度、乱れ強さ、乱流応力及び再付着点距離を測定している。再付着距離はレイノルズ数及び流路拡大比に大きく依存している。レイノルズ数の影響は単調なものではなかったが、レイノルズ数を増加していくと、再付着距離は減少して最小値となり、それから増加してある値でほぼ一定値になる。流路拡大比を1.1から2.0まで変化させると、再付着距離は約 $3H$ (H :ステップ高さ)増加している。

仲條と本阿弥⁽⁷⁾は二次元後方ステップにおけるはく離現象に対し、付加的な流路半径 R を与えることにより、遠心力の影響を明かにする実験を行っている。ステップを凸壁側(安定側)と凹壁側(不安定側)、そして直線流路の3種類について研究を行った。測定には定温度形熱線流速計を用いた。はく離せん断層外縁の有効曲率は安定なせん断層の場合、ステップ直後で直ちに流路曲率に一致し、不安定な場合は徐々に流路曲率に一致している。再付着領域における乱れ強さは流路曲率の安定効果により抑えられ、不安定効果により急峻なピークを示している。 $-0.04 < \delta/R < 0.05$ (δ :境界層厚さ、 R :流路曲率半径)の範囲において再付着点距離は顕著な変化は見られない。しかし、安定効果により増加し、不安定効果により減少する傾向を示している。

Kuehn⁽¹⁴⁾は後方ステップ流れにおけるステップ対向壁の角度の影響を調べている。再付着距離は目測によって測定され、ステップ対向壁の角度を大きくさせることによって再付着点距離を著しく増加させている。

Driverら⁽¹⁴⁾は高レイノルズ数における後方ステップ流れについて対向壁角度の影響を調べている。対向壁の角度の増加はせん断層の発達と再付着点距離を延ばしている。ステップ下流の運動量厚さと排除厚は対向壁角度を増加させることにより大きくなるが、圧力回復を遅らせている。また、レイノルズ応力に対する対向壁角度の影響はほとんどなく、その最大値は、ほぼ等しいことを示している。

次に、はく離・再付着流れ場の制御に焦点をあてた文献を紹介する。

Bhattacharjeeら⁽¹⁵⁾は、ステップ上のフラット壁面上にスピーカを設置し、その音波による応答を調べている。ステップ高さ H と主流速度 U_0 によるレイノルズ数が $Re_H = (2.6 \sim 7.6) \times 10^4$ の範囲で実験を行っている。かく乱速度は示されていない。このとき、スピーカによるかく乱無しの場合（流入境界層はほぼ乱流）、再付着点距離 x_R は $7H$ だが、かく乱を付加することにより約 $6.3 \sim 6.7H$ に減少している。再付着点距離が最も減少するときの周波数とステップ高さ・主流速度によるストロハル数は $0.2 \sim 0.4$ の間にあることを示している。

本谷ら⁽¹⁶⁾は、鈍頭円柱前縁に生じるはく離再付着流れに対して制御を目的として研究を行っている。かく乱は、鈍頭円柱の前縁の隙間からはく離流れにウーハで与えている。実験条件は、円柱直径を代表長さとするレイノルズ数 $Re = 6.9 \times 10^4$ 、かく乱強さは $0.01 \sim 0.2$ である。かく乱が大きい場合はく離泡の再付着点距離は約 4 割も減少することを示している。

金折ら⁽¹⁷⁾は、ステップ上流にフェンスを設置して再付着点距離 x_R の制御効果を調べている。 $H = 60\text{mm}$ 、アスペクト比 18、流路拡大比 $ER = 1.5$ 、 $Re_H = 3.2 \times 10^4$ である。フェンスの高さが 5mm の場合、設置しない場合と比べて x_R が約 20% も減少し、壁面での圧力回復量も変化せず、この高さでの x_R の制御方法が有効であることを示している。

J.J.Miauら⁽¹⁸⁾は、ステップ上流に流れと垂直になるようにフェンスを設置し、 $0 \sim 2\text{cm}$ の高さで移動させ、再付着点への影響を調べている。 $K = h_f f / U_0$ (h_f はフェンスの高さ、 f はフェンスの移動周波数、 U_0 は主流速度) というパラメータで流れ場を考察している。その結果 L_S / \sqrt{K} (L_S はフェンスからステップまでの距離) が 1.22 以下では非定常渦によりはく離流の再付着を妨げ、フェンスより下流の流れ場ではフェンスの移動で縦渦と人口的に生成された渦とが合併し下流方向へと流れることを示している。このフェンスの高さが 7mm 以上では、フェンスではく離した流れがステップまでに再付着しないためステップからのく離流れの再付着点距離が逆に延びることを示している。

Frederick W. Roos⁽¹⁹⁾は、ステップの上流側 $0.15H$ を薄板とし、これを振動させ、はく離せん断層にかく乱を与え再付着点距離に及ぼす影響を調べている。それによると大規模渦は、せん断層の乱れの増加により非定常性が増し、せん断層の状態が層流及び乱流のいずれの場合でも、かく乱の有無によらず大規模渦は再付着点の下流でも保持される。特に乱流の場合、かく乱が縦渦構造に対してより強い非定常性を与え、これにより再付着せん断層内やその近傍でより強い乱れ強さの影響を与える。このことは発達したせん断層の混合作用、連行流量の増加をもたらす。その結果再付着点距離を減少させるのだが、時間平均速度分布にはあまり変化がないことを示している。

Promode R. Bandyopadhyay⁽²⁰⁾は、後方ステップ流れ場の上流側にロッドを設置し、2種類の特性を持つ流入境界層において再付着点後のせん断層の発達の違いについて調べている。実験条件は、流路拡大比 $ER=1.25$ 、運動量厚さ θ による $Re_\theta = 1170$ 、形状係数 $H=1.426$ 、壁面摩擦抗力係数 $C_f = 4.2 \times 10^{-3}$ である。流入境界層が乱流の場合では、a) せん断層の発達が著しく大きい。b) その発達は壁付近まで広がる。層流境界層が再付着する流れ場ではせん断層がステップではなく離後スパン方向に波を持つ小さな渦として離散し直線的に大きくなることを示している。

次に、主にははく離・再付着領域での有効利用について焦点をあてた文献についていくつか紹介する。

馬淵⁽²¹⁾は、後方ステップ流れ場に尾板付きの三角柱を置き三角柱の頂角を変化させ再付着点距離 x_R と主流乱れ強さ、最大熱伝達率との関係について調べている。最大熱伝達率の増加は乱れ強さが8%のとき最も大きく、それ以上では減少する。2%以下では変化がない。最大熱伝達率は頂角を変えても x_R の近くで最大となり角度により変化しないことを示している。

鈴木⁽²²⁾は、後方ステップ下流の熱伝達は、流れの再付着点近傍で高い熱伝達が得られるが、再循環領域内では熱伝達が良くないことからこの領域での熱伝達の促進を試みステップ角上端付近に円柱を挿入してかく乱を与え、その効果が期待できることを示している。またその位置は、ステップ高さと同じか少し高く設置したほうがより高い効果が期待できるとしている。

親川⁽²³⁾は、後ろ向きステップ再循環領域内の伝熱特性の改善を目的とした研究を行っている。噴流および吸い込みなどの外部動力を用いた場合とスラットなどを流路内に設置した場合について、圧力分布および局所熱伝達分布の測定を行い、何もしない場合との流動損失の比較および熱伝達率の増加比の比較を行い、ポンプ動力を一定とした場合の熱的性能比を検討している。

親川⁽²⁴⁾は、後ろ向きステップ下流の再付着領域の熱伝達の促進及び制御を目的とし

て、ステップ面に対向する面にスラットを設置した実験を行い、スラット設置により低熱伝達域である再付着領域で著しい伝熱促進を得ている。また再付着点距離が短くなるほど、伝熱促進することを示している。さらに形状抵抗による圧力損失の増大を考慮した熱的性能評価を行い、その結果、適切にスラットを挿入し主流を沿わせることは挿入による損失を軽減し、伝熱促進として効果的であることを確認している。

加えて、最近の計算機および数値計算技術の発達により数々の乱流モデルを用いた計算のみならず、Navier-stokes 方程式の直接計算 (DNS) も報告されている⁽²⁶⁾。さらに流れ場の計測技術の発達も大きく、高精度の実験結果から数値計算結果の信頼性の確認を行うことにより乱流モデルの改良にも成果を得ている。非接触計測技術としてレーザードップラ流速計による、たとえば、Driver ら⁽⁸⁾、Adams ら⁽²⁾、Otugen⁽²⁶⁾、Chiang ら⁽²⁷⁾などの研究が多く見られる。また、Kasagi ら⁽²⁸⁾により粒子追跡流速計を用いて計測された乱流統計量は DNS の結果と比較検討の結果、良い一致を示しており、高精度の非接触計測法が示されている。

1.4 本論文の概要

本論文では、後方ステップ流れ場にステップ入口にかく乱を与え、再付着現象におよぼす影響を実験結果から検討する。

まず第2章において実験装置及び実験方法を示す。第3章では、ステップ入口上流において各種のかく乱要素を設置し流れ場にかく乱を導入することによって再付着点位置が変化することを示す。さらに、かく乱の種類によらず再付着領域の幅で整理した順流率分布は同一となることから再付着領域の流れ場はこの領域を通過する渦によって支配され、再付着領域の相似性が存在することを示す。第4章では、一本のロッドを用いた二次元的にかく乱について、かく乱の影響を検討し、第3章で示された入口乱れの付加により再付着点距離が減少する機構をかく乱を与えた場合はく離せん断層の発達および連行流量の増加から検討を行う。この際、流路拡大比および流入境界層の厚さの差異がおよぼす影響についても述べる。第5章では、ステップ入口における乱れの付加の影響をさらに明確にするため、はく離せん断層内の大渦挙動および壁面近くの大渦挙動について流入境界層が薄い場合および厚い場合について大渦挙動を検討した上で流路拡大比および流入境界層の厚さの差異が入口乱れを付加した再付着流れ場に対する影響を考察する。さらにウェーブレット解析を導入し、はく離直後の微細な渦の成長を観測する。第6章では、かく乱により与えられた乱れの強さと再付着点距離について、はく離点近くの局所乱れ強さを用いて整理をおこない、流路拡大比および流入境界層の厚さの差異がおよぼす影響も含めその

関係を示す。また、3章で示した再付着流れ場の相似性について、流路拡大比、流入境界層厚さの差異も含めた広範囲の条件のもとで検討する。第7章では、ステップ下流の壁面圧力分布からステップ流れ場の圧力回復を求め、圧力回復効率を定義し、再付着点距離の減少と圧力回復効率の関係を示す。最後に第8章で本研究で得られた結果を示す。

1. 論文の概要

本研究は、流体工学における流れの特性を明らかにし、その応用を図ることを目的とする。まず、基礎的な流れの現象を解析し、そのメカニズムを理解する。次に、数値解析と実験的検証を組み合わせ、流れの挙動を詳細に調査する。特に、境界層の発達と剥離、渦の生成と相互作用に焦点を当てる。得られた結果は、既存の理論と対照し、その妥当性を検証する。最終的に、本研究の成果が実際の工学設計にどのように貢献できるかを考察する。

本研究の主要な貢献は、流れ場の複雑な挙動を定量的に評価する新たな指標の提案にある。この指標は、流れのエネルギー損失と圧力回復の関係を明確に示すことが期待される。また、本研究で得られた知見は、航空機の翼設計や管路システムの最適化に重要な示唆を与える可能性がある。

今後の研究として、より複雑な幾何形状における流れの挙動を解析し、本研究の成果を他の流体工学分野に応用することを目指す。

第2章

実験装置及び実験方法

本章では、実験装置、測定機器及び実験方法について述べる。測定機器は測定系の中核であるパーソナルコンピュータからデータ採取の原点である各センサまでについて示す。一部の測定機器については、その校正、調整等についても言及する。

2.1 実験装置

実験装置の概略図を図2.1.1～図2.1.4に示す。テストセクションは厚さ10mmの透明アクリル製である。流路は、ステップ壁とフラット壁そして上下壁（端板）で構成されている。ステップ壁と上下壁は固定されており、フラット壁のみ可動の構造となっている。実験の際には、上記の実験装置を琉球大学工学部大型風洞施設の回流型大型風洞（吹出し口寸法：1m×1m）（図2.1.5）流路内に設置して各測定を行った。実験装置は、幅 $B = 970\text{mm}$ 、ステップ高さ $H = 60\text{mm}$ である。アスペクト比は $B/H = 16.2$ であり、二次元流れ場に関してアスペクト比を10倍以上にするべきという、いわゆるBradshawらの規約⁽²⁵⁾を満足している。ステップ上流側流路高さ W_1 とステップ下流側の流路高さ W_2 の比である流路拡大比 ER (Expansion Ratio, $= W_2/W_1$) は、フラット壁を移動させることにより変化させる。テストセクションの流入口には粗さ要素として、バルマウスにサンドペーパーを取り付け、発達した乱流境界層を持つ流れがテストセクション内に流入するようにしてある。流路入口からステップまでの助走流路長さは650mmが流入境界層の薄い場合、および1800mmが流入境界層の厚い場合の設定とした。

テストセクションの座標系を図2.1.6に示す。原点をステップ壁側のスパン中央に設定する。流れ方向に x 軸を設定し、下流方向を正方向とする。 z 軸は、流路スパン方向にとり、上方向を正方向とする。 y 軸は、 x 、 z 軸の両方に直交するように設定する。 y 軸原点は、ステップより下流側では、ステップ面下部とし、またステップより上流側ではステップ面上部とした。

測定孔の位置を図2.1.7に示す。ステップ壁では x 軸上に、壁面圧力測定用孔がステップ上流で30mm間隔、 x/H が18より下流では60mm間隔で設けてある。また、圧力センサ、サーマルタフトプローブおよび壁面圧力測定兼用の測定孔が、ステップ下流の $x/H = 0.83 \sim 10.8$ 、 $x/H = 12.5 \sim 16.5$ に40mm間隔で設けてある。さらに流れ場の二

次元性確認のためのサーマルタフトプローブ用測定孔が、 $z/H = \pm 2, \pm 5.83, -6.33$ の位置に設けてある。一方フラット壁では圧力センサ用の測定孔が $z/H = 0.5$ の位置に、 x/H が0.25, 1.0~11.6に40mm間隔, 11.6~13.6に60mm間隔, 16.3, 18.0の位置に設けてある。また、スプリットフィルムプローブ及びI型熱線プローブ用の測定孔が $z/H = -0.58$ の位置に、 x/H が0.5~3.5, 5.5~14.5に60mm間隔, 16.5, 18~30に180mm間隔で設けてある。

ステップ上流のステップ壁の壁面上にロッド、フェンス、ボルテックスジェネレータ等の要素を設置することにより、流れ場にかく乱を導入した。

2.2 測定機器

測定機器の接続方法について、測定系ブロック線図を図2.2.1に示す。熱線流速計、サーマルタフトプローブシステム及び圧力センサからの出力は、ローパスフィルターを通した後、A/D変換器を介してパソコンに取り込まれる。

2.2.1 ピトー管

本実験に使用したピトー管の概略を図2.2.2に示す。用いたピトー管は二股の構造をしており一方の管では全圧を、もう片方では静圧を測定できるようになっている。これは、全圧の測定位置と同じ流れ場内の静圧を測定できるようにしたものである。ピトー管は、流速の設定を目的として基準断面($x/H = -3$)におけるレイノルズ数 $Re_H (= U_0 H / \nu = 10^5)$ の設定及びI型熱線プローブを用いた測定の校正の際に使用した。

2.2.2 精密微差圧計

全ての測定前の設定である基準断面($x/H = -3$)での流速設定、I型熱線プローブの校正及びステップ壁面の壁面静圧の測定の際に使用した。表示が信号を時間平均したデジタル表示であり、その値を読みとり測定値とした。測定出力範囲は $-50 \sim +199.9 \text{ mmH}_2\text{O}$ である。実験で要した範囲は約 $-4 \sim 55 \text{ mmH}_2\text{O}$ である。最高分解能は $0.1 \text{ mmH}_2\text{O}$ である。

2.2.3 I型熱線プローブ

基準断面及びステップ入口での速度と乱れ強さを測定するために使用した。図2.2.3にI型熱線プローブの概略図を示す。基準断面での速度の測定にはTYPE-Aを、ステップ入口

での速度と乱れ強さの測定にはTYPE-Bを用いた。I型熱線プローブは、2本の針の間に1mmの非メッキ部分を持つ銅メッキを施した $\phi 5\mu\text{m}$ のタングステン線を溶接したものである。

2.2.4 スプリットフィルムプローブ

スプリットフィルムプローブは、ステップ下流流れ場内の速度、乱れ強さ等を測定するために使用した。スプリットフィルムプローブは、佐々木ら⁽²⁹⁾の実験より逆流領域を含む乱流特性を測定する場合に有効な計測手法とされている。なお、佐々木らはI型熱線流速計との比較から1.5kHz程度の応答性を得ているが、本実験において応答性は熱線流速計に内蔵されている矩形波発信器を用いて2kHz程度の応答性を得て佐々木らと大差ないことを確認した。図2.2.4にスプリットフィルムプローブの概略図を示す。センサ部は石英製の細線表面に白金を蒸着させたもので、白金膜は二本の分割線（スプリット面）によって二分されている。

2.2.5 熱線流速計システム

熱線流速計システムは以下の3つの部分からなり、これらを用いてI型熱線プローブからの信号より速度及び乱れ強さを調べた。またスプリットフィルムプローブを用いた測定にも使用した。

1. 定温度型熱線流速計 (Constant Temperature Anemometer)
2. リニアライザユニット
3. DC VOLTMETER

2.2.6 サーマルタフトプローブ

ステップ側下流壁面で、各測定断面での壁面近傍の順流率を測定するのに使用した。順流率とは、観察時間に対して流れが順方向となっている時間割合と定義する。サーマルタフトプローブの概略図を図2.2.5に示す。測定面から0.3mmの高さに、中心に加熱線として $\phi 0.1\text{mm}$ のモレキュロイ線を、それを挟んで平行に感熱線として、非メッキ部分1mmを持つ銅メッキが施された $\phi 5\mu\text{m}$ のタングステン線を通電により電極針と溶接した。

サーマルタフトプローブからの信号処理方法を図2.2.6に示す。加熱線からの熱が気流によって運ばれ、いずれかの感熱線が熱後流を感知し、その温度変化にともない電気抵抗が変化することを利用したもので、これを利用して瞬時の流れ方向を検出する。

2.2.7 圧力センサ

圧力センサを用いてステップ壁面及びフラット壁面近傍での圧力変動を測定した。図 2.2.7 に圧力用アダプタ及び圧力センサの概要図を示す。

圧力センサの仕様は、

Pressure Range	: 686kPa
Non-Linearity & Hysteresis	: $\pm 0.1\%$ BSL
応答性	: 25kHz

増幅器の仕様は、

Non-Linearity	: 0.0005%/FS 以内
応答性	: 100kHz/-3dB 以上

2.2.8 ローパスフィルタ

各センサの出力信号には高周波成分も含まれており、その高周波成分のノイズを取り除く必要がある。エイリアシング誤差を避けるためローパスフィルタ（アンチエイリアスフィルタ）を用い、各センサからの出力信号をローパスフィルタを通して取り込んだ。図 2.2.8 にローパスフィルタの回路図を示す。またローパスフィルタの減衰特性を図 2.2.9 に示す。減衰傾度は 24dB/Oct, カットオフ周波数に 0.5, 1.0, 2.1 及び 4.1kHz を選択できるが、各チャンネルとも同等な減衰特性を示しており、各チャンネル間の差異はないことが確認される。同時使用可能チャンネル数は 4 チャンネルである。使用カットオフ周波数は、サーマルタフトプローブを用いた測定で 0.5kHz, I 型熱線プローブを用いた測定で 4.1kHz, 圧力センサを用いた測定で 2.1kHz, スプリットフィルムプローブを用いた測定で 1.0kHz である。

2.2.9 パーソナルコンピュータ及び A/D 変換器

本研究では、各種センサの信号収集にはパーソナルコンピュータ（EPSON 製 PC-286VF）を使用した。パーソナルコンピュータの拡張 I/O スロットには 12 ビット 8 チャンネル同時サンプリング型 AD コンバータを装着させ、0 ~ +10V の電圧範囲でサンプリングが出来るようにしてある。サンプリングしたデータは大容量の記憶領域を持つ光磁気ディスク（1 枚当たり約 230MB）に保存し、パソコンおよびワークステーションで演算処理した。

2.3 各測定機器の較正及び調整

実験に用いられる測定機器は実験の度に較正及び調整する必要がある。本節では、測定機器の較正及び調整について述べる。

2.3.1 I型熱線プローブの較正

I型熱線プローブの較正（リニアライズ）は、 $W_1/2$ の流路高さの中心位置で行った。プローブと同時にピトー管も挿入し、流速を $U_0 = 0, 15, 30 \text{ m/s}$ に設定し、それぞれの流速に対し出力が 0, 5, 10V になるように熱線流速計のリニアライザユニットによって調節し、流速と電圧が線形関係になるようにした。

2.3.2 スプリットフィルムプローブの較正及び調整

図 2.3.1 にスプリットフィルムプローブの設置方法を示す。スプリットフィルムプローブに対して流速 U_N の流れがスプリット面から θ の角度で当たっている時、次式の関係が成り立つ⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。

$$E_1^2 + k^2 E_2^2 = a + b U_N^m \quad (2.3.1)$$

$$E_1^2 - k^2 E_2^2 = c U_N^n \sin \theta \quad (2.3.2)$$

ここで E_1, E_2 は各センサからの出力、 k, a, b, c, m, n は定数である。定数 k は 2 つのフィルムの感度差を補正するものである。熱線流速計のゲイン、オフセット電圧等を調整することにより、 $k = 1, a = 0$ として次式のように較正を行う。

$$E_1^2 + E_2^2 = b U_N^m \quad (2.3.3)$$

$$(E_1^2 - E_2^2) / \sin \theta = c U_N^n \quad (2.3.4)$$

較正実験より最小二乗法を使って b, m, c, n の値を定める。

図 2.3.1 において x, y 方向の速度成分は

$$u = U_N \sin \theta \quad (2.3.5)$$

$$v = U_N \cos \theta \quad (2.3.6)$$

で示される。しかし、スプリット面から θ の角度で流れが当たっている時、(2.3.4) 式より $\sin \theta$ の値は定まるが、 $\sin \theta = \sin(\pi - \theta)$ であるので θ は絶対値しかわからず、従って $\cos \theta$ の値も絶対値しかわからない。すなわちステップ下流の流れ場のように順流と逆流が間欠

的に変化するような流れ場の測定も可能だが流れ方向が極端に大きく変化する場所では精度が悪くなってしまう。

スプリットフィルムプローブの校正には大型風洞を使用して行った。校正実験は流速 U_N を $3\text{m/s} \sim 30\text{m/s}$ で 3m/s おきに变化させてそれぞれの U_N で角度 θ を $\pm 120^\circ, \pm 90^\circ, \pm 60^\circ, \pm 30^\circ, 0^\circ$ に設定して行った。図 2.3.2 に得られた U_N と $E_1^2 + E_2^2$ 及び $(E_1^2 - E_2^2)/\sin \theta$ の関係を示す。図中の曲線は最小二乗法により決定し、定数 b, m, c, n の値を定めた。

本測定では校正時と同様な特性が出るように調整する必要がある。本測定前の調整は同じく大型風洞を使用し、流速 U_N を $0 \sim 30\text{m/s}$ に変えて、 E_1^2 及び E_2^2 が校正時と等しくなるようにした。

2.3.3 サーマルタフトプローブの調整

サーマルタフトプローブの二本の感熱線の特性は、感熱線のメッキの具合、溶接の状態などによりそれぞれ異なるため、測定の前に調整を行う必要がある。調整方法は十分に順流である位置（再付着点より十分下流の位置）で敷居値（無風時の状態）の出力電圧に対するプローブの順方向および逆方向（順方向と 180° 向きを変えた方向）の出力電圧との差が等しくなるようにブリッジ回路に設けてある可変抵抗器で調整した。

2.3.4 圧力センサの校正

測定前には校正として、精密微差圧計を用い圧力センサの感度を調べた。圧力センサに加えた圧力とパソコンに出力された A/D 変換された出力値の線形性を確認し、各測定値の最小二乗法による 1 次近似曲線の傾きを算出し、壁面圧力変動係数 C_p^* を求める際に用いた。

2.4 実験方法

2.4.1 流れ場の設定

実験は、ビトー管と精密微差圧計を用いて基準断面 ($x/H = -3$) の位置においてレイノルズ数 $Re_H = (U_0 H / \nu) = 10^5$ となるように U_0 を設定して行った。ここで、 U_0 は基準断面流路高さ中央における速度、 H はステップ高さ 60mm 、 ν は空気の動粘度である。

2.4.2 かく乱の導入方法

本実験では、ステップ入口上流のステップ側壁面上に円形断面を有するロッド、フェンス、フェンスを流れに対して仰角を持たせもの、等の要素を設置することによりはく離点近傍に乱れを導入し、流れ場にかく乱を与えた。なお、各々の要素については後の章で詳細に述べる。

2.4.3 基準断面における速度の測定

基準断面における速度 U の測定に際しては、I 型熱線プローブおよび熱線流速計を使用した。I 型熱線プローブはプローブサポータを介してトラバース装置に取り付け、基準断面 ($x/H = -3$) の測定孔に設置して使用した。測定孔は、ステップ側壁面、フラット側壁面にそれぞれあり、ステップ側壁面近傍の測定にはフラット側の測定孔を、フラット側壁面近傍の測定にはステップ側の測定孔を用い、それぞれの壁面近傍からの距離が $W_1/2$ となる位置より 2.0mm を越えるところまで 2 回に分けて測定した。測定は、壁面からの距離が 0~0.5mm までは 0.1mm 間隔、0.7mm、1.0~5.0mm までは 0.5mm 間隔、5~10mm までは 1mm 間隔、その後は 2mm 間隔で行った。熱線流速計の出力信号はローパスフィルタを通りパソコンへと取り込まれる。サンプリング周波数は 8.0kHz、カットオフ周波数は 4.1kHz であり、サンプリング時間は約 8 秒である。

2.4.4 ステップ入口の速度及び乱れ強さの測定

ステップ入口の乱れ強さ Tu 及び速度 U の測定には、I 型熱線プローブおよび熱線流速計を使用した。図 2.4.1 に I 型熱線プローブの設置方法の概略図を示す。トラバース方向は y の正方向であり、壁面に近いところより測定を始めた。測定は 0~0.5mm までは 0.1mm 間隔、0.7mm、1.0mm~5.0mm までは 0.5mm 間隔、5mm~10mm までは 1mm 間隔、10mm~40mm までは 2mm 間隔で行った。熱線流速計の出力信号はローパスフィルタを通りパソコンへと取り込まれる。サンプリング周波数は 8.0kHz、カットオフ周波数は 4.1kHz で、サンプリング時間は約 8 秒である。

2.4.5 ステップ下流の順流率の測定

順流率の測定には、サーマルタフトプローブを用いた。サーマルタフトプローブの信号は、ローパスフィルタ (カットオフ周波数 0.5kHz) を通し、サンプリング周波数 1.0kHz で A/D 変換器よりパソコンへと取り込んだ。測定位置はテストセクションの x 軸上にお

ける、 $x = 50\text{mm}$ 、 $90 \sim 650\text{mm}$ まで 40mm 間隔、 750mm 、 $790 \sim 870\text{mm}$ まで 40mm 間隔の計 20 点である。測定は、プローブ面が壁面と同一平面となり、加熱線が x 方向と垂直になるよう取り付けて約 1 分間のサンプリングを行った（これを「順方向の測定」と呼ぶ）。次にプローブを 180° 回転させ、一対の感熱線の位置関係が逆となる場合を測定し（これを「逆方向の測定」と呼ぶ）、さらに次の測定位置に移る前にプローブを約 20 秒間無風状態に保ちシステムの安定を保った。順方向と逆方向のサンプリングデータより両方向データの対称性を利用して敷居値を導き、これを基に順流率を計算した。再付着点は、順流率 $\gamma = 0.5$ となる位置から決定した。

2.4.6 ステップ下流の速度場の測定

ステップ下流の速度場の測定はスプリットフィルムプローブを用いて行った。トラバース装置に取り付けられたプローブはフラット壁側から挿入し、 y 方向に移動して測定を行う。トラバースする間隔は $ER = 2.0$ では 3mm 間隔で、 $ER1.5$ において $y \leq 60\text{mm}$ では 3mm 間隔、 $y \geq 60\text{mm}$ では 6mm 間隔である。測定点は流路拡大比によらず 37 点である。測定断面は $x/H = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 11.5$ の 10 断面である。サンプリング周波数は 2.1kHz 、カットオフ周波数は 1.0kHz であり、約 30 秒間サンプリングした。

2.4.7 壁面圧力変動の測定

壁面圧力変動の測定は、圧力センサを用いて行った。圧力センサはサーマルタフトプローブ用の測定孔に圧力センサ用のアダプタを取り付け、アダプタ面と壁面が同一平面となるように設置して測定を行った。圧力変動の相互相関係数の測定の際には圧力センサを二本用い、一方を再付着点近傍に固定し、他方の圧力センサを移動させて測定を行った。測定位置は、ステップ壁側については、 $x = 90 \sim 650\text{mm}$ まで 40mm 間隔、 750mm 、 $790 \sim 910$ まで 40mm 間隔の計 20 点である。フラット壁側については、 $z = +30$ の位置における $x = 15\text{mm}$ 、 $60 \sim 220$ まで 40mm 間隔、 760mm 、 820mm 、 980mm の計 20 点である。圧力変動の相互相関係数の測定の際に再付着点近傍に固定した圧力センサの位置は、 $ER = 1.5$ のとき、 $d0L0$ で $x = 450\text{mm}$ 、 $d6L100$ で 410mm 、また $ER = 2.0$ のとき、 $d0L0$ 、 $d6L100$ ともに $x = 490\text{mm}$ とした。測定は、サンプリング周波数 4.2kHz 、カットオフ周波数 2.1kHz とし、約 60 秒間サンプリングを行った。

2.4.8 壁面時間平均圧力の測定

壁面圧力は、基準断面 ($x/H = -3$) における壁面静圧孔から取り込んだ圧力と、ステップ壁面上の各圧力孔より取り込んだ圧力との差圧を、壁面における時間平均圧力として、精密微差圧計を用いて測定を行った。測定位置はステップ側壁の $x = 50\text{mm}$, $90 \sim 650\text{mm}$ まで 40mm 間隔, 750mm , $790 \sim 1030\text{mm}$ まで 40mm 間隔, 1080mm , $1140 \sim 1260\text{mm}$ まで 60mm 間隔, 1380mm , $1440 \sim 1920\text{mm}$ まで 60mm 間隔の計 38 点である。壁面圧力係数 C_p は、測定された壁面圧力を基準断面における流路高さ中央の動圧で無次元化して求めた。

第3章

再付着領域流れ場の構造

3.1 序

本章では、ステップ入口（はく離点）上流において各種のかく乱要素を設置し流れ場にかく乱を導入することによって再付着点位置が変化することを示す。さらに、かく乱の種類によらず再付着領域の幅で整理した順流率分布は同一となることから再付着領域の流れ場はこの領域を通過する渦によって支配されてることを示す。

3.2 実験の概要

本実験におけるかく乱の導入方法として、スパン方向に一様なかく乱を二次元かく乱、スパン方向に非一様なかく乱を三次元かく乱と定義して、ステップ流入流れにかく乱を与えた。なお、助走流路長さは1800mm、流路拡大比は $ER=1.5$ のもとで測定を行った。

3.2.1 二次元かく乱の導入方法

二次元かく乱の導入は、円形断面を有するロッドおよびフェンスを用いる二通りの方法を用いた。

ロッドを用いたかく乱の導入は、図3.2.1に示すような直径の異なる円形断面を有するロッドを用い、ステップ上流の流路壁面上に1本のロッドを設置することによりはく離点近傍に乱れを導入し、乱れ強さを制御した。表中の d はロッドの直径、 L ははく離点からロッドの中心までの距離を示している。ロッドの設置位置は、ロッドからのく離泡がステップ入口に影響を与えないように、 L を $15d$ 以上とした。ロッドと壁面との間に隙間ができないように粘着のりで固定し、さらに流れによってロッドが振動しないように粘着テープで固定した。

フェンスを用いたかく乱の導入は、図3.2.2に示すような高さ h の異なる厚さ2mmのフェンスを用い、ステップ上流側にフェンスの高さ h 、ステップ入口からの距離 L を変化させることではく離線近傍の乱れ強さを制御した。表中の h はフェンスの高さ、 L ははく離線からフェンスまでの距離を表している。フェンスの設置位置は、設置したフェンスからのく離泡がステップ入口まで影響を与えないように、 L を $15h$ 以上とした。フェンス

は壁面との間に隙間ができたり、流れによって振動しないように瞬間接着剤を用いて固定した。

3.2.2 三次元かく乱の導入方法

三次元かく乱の導入は、高さ $h=6\text{mm}$ 、スパン方向に長さ l のフェンスを l の間隔でステップ上流側の壁面に張り付けることにより、スパン方向に非一様なかく乱を与えた。フェンスの配置及び寸法を図 3.2.3 に示す。フェンスの長さ l をステップ高さ H で無次元化した l/H はかく乱ピッチを表し、この値をスパン方向への乱れのパラメータとした。フェンスの設置位置をスパン方向へずらすことで、スパン方向分布を測定した。

また、縦渦を流れ場に流入させるため、フェンスの流れに対して仰角を持たせて設置した。いわゆるボルテックス・ジェネレータを用いた。ボルテックス・ジェネレータの配置及び寸法を図 3.2.4 に示す。高さ $h=6\text{mm}$ 、長さ $l=15\text{mm}$ のフェンスを一对として、下流方向に末広がりとなるよう迎え角 $\alpha = \pm 20^\circ$ とし、ピッチ間隔 49mm で設置した。ボルテックス・ジェネレータの設置位置をスパン方向へずらすことで、スパン方向分布を測定した。

3.3 流入流れ

基準断面 ($x/H = -3$) における時間平均速度分布を図 3.3.1 に示す。横軸は、基準断面における流路高さでの流速 U_0 で無次元化した U/U_0 であり、縦軸はステップ高さ H で無次元化した壁面からの距離 y/H である。

基準断面における対数速度分布を図 3.3.2 に示す。横軸は摩擦速度 v^* を用いて無次元化した壁からの距離 y^+ 、縦軸は摩擦速度 v^* で無次元化した x 方向時間平均速度 u^+ である。

局所摩擦係数 C_f 及び摩擦速度 v^* は Ludwig-Tillmann⁽³¹⁾ の式を用いて以下の式のように求めた。

$$C_f = 0.246 \text{Re}^{-0.268} \times 10^{-0.678H_{12}} \quad (3.3.1)$$

$$= 0.246 \left(\frac{v \times \theta}{\nu} \right)^{-0.268} \times 10^{-0.678H_{12}} \quad (3.3.2)$$

ここで、 θ は運動量厚さ、 v は主流速度、 ν は空気 の 動 粘 度 係 数、 $H_{12} = \delta^*/\theta$ は形状係数である。 $v \approx U_0$ とすると、 $\text{Re} = U_0 \times H/\nu = 1.0 \times 10^5$ であるので、上式は

$$C_f = 0.246 \left(\frac{U_0 \times H}{\nu} \times \frac{\theta}{H} \right)^{-0.268} \times 10^{-0.678H_{12}} \quad (3.3.3)$$

$$= 0.246 \left(1.0 \times 10^5 \times \frac{\theta}{H} \right)^{-0.268} \times 10^{-0.678H_{12}} \quad (3.3.4)$$

となる。また、摩擦速度 v^* は

$$C_f \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho v} \quad (3.3.5)$$

$$v^* \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.3.6)$$

となるので、これらの式より

$$v^* = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \times v \simeq \sqrt{\frac{C_f}{2}} \times U_0 \quad (3.3.7)$$

として求めることができる。

また、図に示してある実線は大坂ら⁽³²⁾により検証された壁法則であり、次式によって表される。

$$u^+ = 5.62 \log y^+ + 5.0 \quad (3.3.8)$$

基準断面における対数速度分布は上式とよく一致していることから、流入流れは十分発達した乱流境界層であることが確認できる。基準断面における境界層パラメータは排除厚さ $\delta^* = 2.94\text{mm}$ 、運動量厚さ $\theta = 2.06\text{mm}$ 、形状係数 $H_{12} = 1.43$ である。

3.4 二次元かく乱の流れ場への影響

かく乱源として、一本のロッドあるいはフェンスを用いスパン方向に一様にかく乱を与え、はく離線近傍の乱れ強さを制御し、得られた結果を以下に示す。

ステップ入口壁面近傍 ($x/H = 0$) の時間平均速度分布をロッドの場合について図 3.4.1 にフェンスの場合について図 3.4.2 に示す。横軸は基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した時間平均速度 U/U_0 であり、縦軸はステップ高さ H で無次元化した

壁面からの距離 y/H である。かく乱源を設置することにより壁面近傍で速度欠損がいくぶんみられる。

ステップ入口における乱れ強さ分布をロッドの場合について図 3.4.3 に、フェンスの場合について図 3.4.4 に示す。横軸は摩擦速度 v^* で無次元化した壁面からの距離 y^+ であり、縦軸は変動速度成分 rms 値を基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu である。ロッドおよびフェンスとも設置条件により種々の乱れ強さが与えられていることが確認できる。

ステップ下流における壁面近傍の順流率分布をロッドの場合について図 3.4.5、フェンスの場合について図 3.4.6 に示す。横軸はステップ高さ H で無次元化したステップからの距離 x/H であり、縦軸は順流率 γ である。ロッドおよびフェンスを設置し流入流れにかく乱を与えることで再付着点位置は変化していることが確認できる。実験範囲において、L100 の設置条件のとき再付着点距離は最小となっている。 $x/H = 2 \sim 3$ より上流側の再はく離領域での順流率分布は、かく乱条件による分布の差異はみられない。これは、二次元かく乱の場合、再はく離領域にはほとんど影響を与えていないことを示唆している。

3.5 三次元的かく乱の流れ場への影響

3.5.1 三次元フェンスによる再付着流れ場の影響

二次元かく乱においてももっとも再付着点距離を減少させたフェンスの高さ $h=6\text{mm}$ 、設置距離 $L=100\text{mm}$ の設置条件をもとにして、かく乱ピッチ $l/H=1.5, 0.75, 0.5$ の三種類を測定位置をフェンスの中央 ($z/H=0$) として、スパン方向に対称となるよう設置し、ステップ流入流れに三次元かく乱を与えた。

ステップ入口壁面近傍 ($x/H=0$) の時間平均速度分布を図 3.5.1 に示す。横軸は基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した時間平均速度 U/U_0 であり、縦軸はステップ高さ H で無次元化した壁面からの距離 y/H である。二次元かく乱と同様壁面近傍では速度欠損がいくぶんみられる。

ステップ入口における乱れ強さ分布を図 3.5.2 に示す。横軸は摩擦速度 v^* で無次元化した壁面からの距離 y^+ であり、縦軸は変動速度成分 rms 値を基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu である。かく乱ピッチの違いにより種々の乱れ強さが与えられていることが確認できる。

ステップ下流における壁面近傍の順流率分布を図 3.5.3 に示す。横軸はステップ高さ H で無次元化したステップからの距離 x/H であり、縦軸は順流率 γ である。かく乱ピッチの違いによって、再付着点位置は変化していることが確認できる。どのかく乱ピッチにおい

でも再付着点距離はかく乱を与えない場合と比較して減少する。かく乱ピッチ $l/H = 1.5$ のとき再付着点距離は最小となり、かく乱を与えない場合と比較して約 23% 減少した。

次にかく乱ピッチ $l/H = 1.5$ の場合についてスパン方向に測定を行い、二次元かく乱を与えた場合と三次元かく乱を与えた場合について流れ場を比較する。

ステップ入口壁面近傍 ($x/H=0$) の時間平均速度分布を図 3.5.4 に示す。横軸は基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した時間平均速度 U/U_0 であり、縦軸はステップ高さ H で無次元化した壁面からの距離 y/H である。フェンス中央部付近の $z/H=0$, 0.375 を除くと壁面近傍の速度欠損はほとんどない。

ステップ入口における乱れ強さ分布を図 3.5.5 に示す。横軸は摩擦速度 v^* で無次元化した壁面からの距離 y^+ であり、縦軸は変動速度成分 rms 値を基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu である。 z/H の違いにより乱れ強さが異なる値をとり、フェンス中央部付近の $z/H=0$, 0.375 では乱れ強さは大きくなり、隙間部 $z/H=0.75$, 1.125, 1.5 ではかく乱を与えない場合とほぼ同一の値となる。

ステップ下流における壁面近傍の x 方向下流の順流率分布を図 3.5.6 に示す。横軸はステップ高さ H で無次元化したステップからの距離 x/H であり、縦軸は順流率 γ である。スパン方向の測定位置の違いによって、再付着点位置は変化していることが確認できる。どの測定位置においても再付着点距離はかく乱を与えない場合と比較して減少する。フェンスの中央 ($z/H=0$) において再付着点距離は最小となり、フェンスを設置していない中央 ($z/H=1.5$) において再付着点距離は最大となる。順流率のスパン方向分布を図 3.5.7 に示す。スパン方向測定位置は、 $z/H=0$, 0.375, 0.75, 1.125, 1.5 の 5 カ所であるが、対称性から $x/H=3 \sim 3$ までは展開して示す。再付着点位置は様でなく約 $x/H=1.1$ の幅で、スパン方向に対して歪んだ分布をしている。これは、三次元かく乱によって流れ場が影響を受けたためだと考えられる。再はく離領域においては、二次元かく乱の場合この領域には影響を与えなかったが、三次元かく乱においてはフェンスの設置していない中央 ($z/H=1.5$) では、この領域は上流側に移動していることが確認できる。

3.5.2 ボルテックスジェネレータを用いたかく乱の流れ場への影響

三次元的なかく乱としてボルテックス・ジェネレータを用い、縦渦を形成することで、はく離・再付着流れ場に与える影響を調べた。

ステップ入口壁面近傍 ($x/H=0$) の時間平均速度分布を図 3.5.8 に示す。横軸は基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した時間平均速度 U/U_0 であり、縦軸はステップ高さ H で無次元化した壁面からの距離 y/H である。ボルテックス・ジェネレータ

を構成する板の設置位置に対応した各 z/H において壁面近傍の速度分布が異なっている。

ステップ入口における乱れ強さ分布を図 3.5.9 に示す。横軸は摩擦速度 u^* で無次元化した壁面からの距離 y^+ であり、縦軸は変動速度成分 rms 値を基準断面流路中央高さにおける主流速度 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu である。スパン方向の測定位置の違いによる乱れ強さの違いは三次元かく乱よりも顕著には現れない。ボルテックス・ジェネレータの外端の隙間 $z/H=0.42, 0.32, 0.22$ が他の測定位置よりもわずかに大きな値をとる。

ステップ下流における壁面近傍の順流率分布を図 3.5.10 に示す。横軸はステップ高さ H で無次元化したステップからの距離 x/H であり、縦軸は順流率 γ である。ボルテックス・ジェネレータを用いて流入流れにかく乱を与えると、かく乱を与えない場合と比較していずれのスパン方向の測定位置でも再付着点距離は減少していることが確認できる。順流率のスパン方向分布を図 3.5.11 に示す。フェンスを用いた三次元かく乱のようなスパン方向における再付着点距離分布の変化はあまり見られない。再付着点距離の減少は、本研究の範囲においては、ボルテックス・ジェネレータによる縦渦の導入よりも横渦の三次元化の促進の方が、より効果的である。

3.6 再付着領域の幅で無次元化した順流率分布

順流率分布を再付着領域の幅 Δx_R で無次元化した順流率分布を図 3.6.1 に示す。ここで、再付着領域の幅は順流率 γ が 0.1 から 0.9 まで変化する間の x 方向距離と定義した。この幅は、再付着領域を通過する渦のスケールに比例するものである。図中の破線と実線は磯本ら⁽³³⁾、馬淵ら⁽²¹⁾の結果を示す。かく乱の種類が異なる場合でも再付着領域の幅 Δx_R で整理した順流率分布は同一曲線上に集約している。再付着領域での順流率分布が相似となることは厚板前縁はく離泡において、主流乱れを 3 例変化させ得られた木谷ら⁽⁹⁾の結果と一致する。木谷らによると、再付着領域の幅 Δx_R は再付着点における渦スケール L_R (積分時間スケール \times 局所速度) との間に、 $\Delta x_R = 4L_R$ の比例関係がほぼ成立し、再付着点近傍における流れがこの領域における組織的渦塊の運動によって支配されることを意味しているとしている。本研究においては、かく乱要素の違いおよび二次元的あるいは三次元的かく乱という種々のかく乱を流れ場に導入し再付着点距離が変化した場合、さらに他研究者の実験結果と比較しても再付着領域の幅で無次元化した順流率分布は相似性あることを示した。すなわち再付着領域の流れは、そこを通過する渦塊に支配され、再付着点距離が変化しても流れ場の相似性が成立することを示している。

3.7 まとめ

ステップ入口上流において、スパン方向に一樣である二次元的かく乱、スパン方向に非一樣である三次元的かく乱、についていくつかのかく乱要素を用いて流入流れに与えたかく乱が再付着流れ場に与える影響を調べ、得られた知見を以下に示す。

1. ステップ上流において各種のかく乱源を設置することにより種々の大きさの乱れ強さ分布がステップ入口で観察される。
2. ステップ入口上流において、ステップ流入流れにかく乱を与えると再付着点距離は変化する。
3. 再付着領域の幅で無次元化した順流率分布は、かく乱の種類や再付着点距離によらず同一曲線上に集約する。このことから、ステップ下流の再付着領域の流れ場はこの領域を通過する渦塊に支配されており、流れ場の相似性が成立する。

第4章

入口乱れ付加による再付着点距離の減少機構

4.1 序

前章では、ロッドやフェンスといったかく乱要素による違いおよびかく乱のスパン方向の一様性の有無によらず、再付着領域の流れ場の相似性の存在を示した。そこで、本章以降では設定の容易さからかく乱方法として、一本のロッドを用いた二次元的かく乱について、かく乱の影響を検討していくことにする。

本章では第3章で示された入口乱れの付加により再付着点距離が減少する機構をかく乱を与えた場合のはく離せん断層の発達および連行流量の増加から検討を行う。この際、流路拡大比および流入境界層の厚さの差異がおよぼす影響も調べた。

4.2 かく乱の導入と流入条件

かく乱の導入は、図4.2.1に示すような径の異なる円柱形状をしたロッドを用い、ステップ上流の流路壁面上に1本のロッドを設置することによりはく離点近傍に乱れを導入し、乱れ強さを制御した。表中の d はロッドの直径、 L ははく離点からロッドの中心までの距離を示している。ロッドの設置位置は、ロッドからののはく離泡がステップ入口に影響を与えないように、 L を $15d$ 以上とした。ロッドと壁面との間に隙間ができないように粘着のりで固定し、さらに流れによってロッドが振動しないように粘着テープで固定した。

基準断面 ($x/H = -3$) における y 方向の時間平均速度分布を図4.2.2および図4.2.3に示す。横軸は基準断面における流路高さ中央での流速 U_0 で無次元化した U/U_0 、縦軸はステップ高さ H で無次元化した壁面からの距離 y/H である。図より速度は対称的に分布しており、流れに偏りはみられない。

基準断面における対数速度分布を図4.2.4に示す。横軸は摩擦速度 v^* で無次元化した壁からの距離 y^+ 、縦軸は摩擦速度 v^* で無次元化した x 方向時間平均速度 u^+ である。

図中の実線は壁法則であり、以下のように表される⁽³²⁾。

$$u^+ = 5.62 \log y^+ + 5.0 \quad (4.2.1)$$

図より対数速度分布は、ともに壁法則の式と一致していることから、流入流れは発達した

乱流境界層であることが確認される。また流入境界層が薄い場合も流入流れは発達した乱流境界層であることが確認されている。

基準断面における境界層パラメータを表4.2.1に示す。境界層パラメータは、はく離点より上流の助走路長さが650mmの場合、排除厚さ $\delta^* = 2.9\text{mm}$ 、運動量厚さ $\theta = 1.0\text{mm}$ 、形状係数 $H_{12} = 1.4$ であり、助走路長さが1800mmの場合、 $\delta^* = 4.0\text{mm}$ 、 $\theta = 2.9\text{mm}$ 、 $H_{12} = 1.4$ である。そこで本論文では、前者を流入境界層が薄い場合、後者を厚い場合と表現する。

4.3 ステップ入口の速度及び乱れ強さ分布

ステップ入口壁面近傍($x/H = 0$)における時間平均速度分布の一例を図4.3.1に示す。横軸は基準断面流路高さ中央の流速 U_0 で無次元化した時間平均速度 U/U_0 であり、縦軸はステップ高さで無次元化した壁面からの距離 y/H である。

ステップ入口における乱れ強さ分布の一例を図4.3.2に示す。横軸は摩擦速度で無次元化した壁面からの距離 y/H であり、縦軸は変動速度成分のrms値を基準断面での流路高さ中央における流速 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu である。種々のロッド設置条件により異なる乱れ強さが与えられているのが確認できる。ロッド径がより大きく、ステップ入口に近いほど、境界層全体にわたって乱れ強さが大きい。また、境界層外端ではロッド設置条件によらず乱れ強さは一定であり、ロッド設置により壁面近傍の乱れ強さを増加させている。

4.4 ステップ下流の順流率分布

ステップ下流ステップ壁の壁面近傍 x 方向順流率分布の一例を、図4.4.1および図4.4.2に流路拡大比 $ER=1.33$ の場合、図4.4.3および図4.4.4に $ER=2.0$ の場合を示す、それぞれの拡大比について流入境界層が薄い場合および厚い場合を示した。種々の条件でロッドを設置し、乱れを付加することにより順流率分布が変化し、再付着点距離($\gamma=0.5$ となる距離)も変化している。流入境界層が薄い場合、 $ER=1.33$ と $ER=2.0$ を比較すると、流路拡大比が小さい $ER=1.33$ のほうが再付着点距離は短い。ロッドを設置せず乱れを付加しないd0L0の場合とロッドを設置して乱れを付加したd5L100とで再付着点距離の変化の大きさは、両流路拡大比ともほぼ等しい。一方、流入境界層が厚い場合、再付着点距離は流入境界層が厚い場合と同様に流路拡大比が小さい方が短い。乱れを付加しないd0L0の場合としたd6L100の場合での再付着点距離の変化の大きさは $ER=1.33$ と異なり、流

路拡大比が大きい $ER=2.0$ の場合が小さい。このように流入境界層厚さの差異により乱れ付加による再付着点距離減少の効果は異なる。

4.5 ステップ下流の速度分布とせん断層厚さの変化

ステップ下流の x 方向時間平均速度分布を、流路拡大比および流入境界層厚さが異なる場合に、乱れの付加の有無について図 4.5.1 から図 4.5.4 に示す。これらの測定には第 2 章で示したとおりスプリットワイヤプローブを用いたが、センサのサポートによる影響について、前縁はく離泡の乱流構造を調べた佐々木ら⁽³⁴⁾は、条件付き抽出におけるサンプリング個数のばらつき等から流れ場の変動特性が大きく変化するとは考えられない、としている。これより本測定においてもせん断層の大部分においてセンササポートの影響は小さいとした。乱れ付加の有無に関わらず、また流路拡大の差異によらず、いずれの場合も y 方向へのせん断層の発達を確認でき、乱れを付加した場合 (d5L100) が付加しない場合 (d0L0) よりせん断層の発達が大きいことが確認できる。また、流入境界層厚さの差異によるステップ下流の速度場の変化に注目すると、 $ER=1.5$ の場合では流入境界層が厚くても主流部の存在が認めらるが、 $ER=2.0$ の場合では流入境界層が厚い場合、はく離直後で既に主流部は消滅していることが確認できる。

せん断層厚さ δ を各断面内の最大速度差 ΔU の $1/4$ および $3/4$ の速度差を示す y 方向高さの差で定義し、図 4.5.5 に定義図を示す。図 4.5.6 に流入境界層が薄い場合、図 4.5.7 に厚い場合について、せん断層厚さの x 方向への発達を示す。せん断層厚さは、せん断層内の渦の大きさに対応する。せん断層は、はく離直後は自由せん断層の様に広がり、下流で壁面の影響を受け一定値をとる。その後、再付着点より下流では境界層の再発達によりさらに大きくなる。流入境界層が厚い場合では薄い場合に比べて、流入境界層が厚い場合の方がはく離前の流入境界層厚さが厚いため、はく離直後から再付着点までのせん断層厚さが大きい。流入境界層厚さが厚い場合と薄い場合では、せん断層厚さの発達に壁の影響を受けるまでの位置では、いずれの流入境界層厚さのでもせん断層の発達の割合は同程度となっている。いずれの境界層厚さでも乱れを付加した場合の方が乱れを付加しない場合に比べてせん断層の発達は大きくなっている。流入境界層が薄い場合と厚い場合とでは厚い場合の方が乱れを付加した場合としない場合とでのせん断層の厚さの差が小さく、流入境界層厚さの差異により乱れ付加によるせん断層の発達促進効果は異なる。

4.6 連行流量の変化

連行流量 Q_E を,

$$Q_E = \frac{1}{U_0 H} \int_0^{y_t} U dy \quad (4.6.1)$$

と定義する。図 4.6.1 に定義図を示す。ここで、 y_t は主流方向流れの 95 % の速度がみられる壁からの高さを示す。図 4.6.2 に流入境界層が薄い場合、図 4.6.3 に厚い場合の Q_E のステップ下流の変化を示す。

流入境界層が厚い場合では、 y_t が薄い場合に比べて大きくなってしまふ（特に流路拡大比 ER が 2.0 の場合）ので上の定義によれば、流入境界層が薄い場合と比較して極端に大きく計算されてしまうために薄い場合と連行流量を直接比較はできない。このため連行流量の増加割合を比較すべきである。流入境界層が薄い場合と厚い場合では、はく離直後の連行流量の増加割合は薄い場合の方が大きい。流入境界層厚さの差異によらず、乱れを付加した場合しない場合に比べて Q_E は増加していることから、流入境界層厚さの差異によらず、はく離点近傍での乱れの付加により、渦の発達が促進され Q_E が増加し再付着点距離が減少する機構は同一であると考えられる。流入境界層が厚い場合、薄い場合に比べて $ER=2.0$ の下流方向への Q_E の増加割合は小さくなっている。これは $ER=2.0$ の場合、はく離直後から主流部が消滅しているためであり、このため流路拡大比が大きいと、乱れ付加に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は小さくなる。

4.7 まとめ

ステップ入口乱れの付加により再付着点距離が減少する機構をせん断層厚さ、連行流量の変化を調べるにより検討を行った。その際流路拡大比および流入境界層の厚さの差異がおよぼす影響も調べた。得られた知見を以下に示す。

1. 再付着点距離は、流路拡大比がより小さいほうが短く、ステップ入口乱れ付加により減少する。また、流入境界層厚さの差異により乱れ付加による再付着点距離の減少効果は異なる。
2. 入口乱れの付加により、はく離直後のせん断層の発達が促進され、連行流量が増加しそれより再付着点距離が減少する。この機構は流入境界層が薄い場合でも厚い場合でも同一である。
3. 入口乱れを付加した場合、流入境界層厚さおよび流路拡大比が異なるとせん断層の発達に伴う連行流量の増加割合が異なるため乱れの付加に対する再付着点距離の減少効果は異なる。

第5章

流れ場内の大渦の挙動

5.1 序

本章では、第4章において示された再付着点距離におよぼすステップ入口における乱れの付加の影響をさらに明確にするため、流れ場内の大渦の挙動を調べる。はく離せん断層内の大渦挙動を得るために速度変動を、壁面近くの大渦挙動を得るために壁面圧力変動を周波数解析した。

まず流入境界層が薄い場合、つづいて流入境界層が厚い場合について大渦挙動を検討した上で流路拡大比および流入境界層の厚さの差異が入口乱れを付加した再付着流れ場に対する影響を考察する。さらに速度変動のウェーブレット解析を用いてはく離直後のせん断層内の渦の成長の観察をおこなった。

5.2 流入境界層が薄い場合

5.2.1 はく離直後の渦挙動

まず、ステップ入口の速度変動のパワースペクトルを求め、ロッドにより流れ場に与えられたかく乱の性質をみる。図5.2.1～図5.2.8に流路拡大比 $ER=1.5$ および $ER=2.0$ について、はく離点 ($x/H=0$) およびはく離直後 ($x/H=0.5$) における速度変動のパワースペクトル密度を示す。横軸に実周波数 f/Hz 、縦軸にパワに周波数をかけたものを $P \cdot f$ で表す。これにより顕著な卓越周波数を持たず広い周波数領域に渡ってパワを持つ乱れ構造を観察しやすくなる。

両流路拡大比とも乱れを付加しない $d0L0$ の場合、はく離点およびはく離直後においてほとんどパワの集中する周波数はみられない。乱れを付加しない $d0L0$ の場合、境界層内の乱れは小さく、はく離直後のせん断層に与える影響は小さいと考えられる。一方、ロッドを設置し、乱れを付加した $d5L100$ の場合、中心周波数約 $300Hz$ とするパワの集中した幅の広い周波数帯が両流路拡大比でみられる。Bearman ら⁽³⁴⁾によるとロッドと壁面の距離を0に近づけるほどカルマン渦の放出は確認できないこと、および幅の広い周波数帯がみられること、からカルマン渦のような周期性の強い渦放出を示すものではないと考えられる。

乱れを付加した場合、パワの最大値を示す位置は、 $ER=1.5$ 、 $ER=2.0$ とも $y/H = 0.1(6mm)$ であり、これはロッドの直径(5mm)の外縁付近である。また、壁面近傍のパワも大きく、ロッドにより壁面近傍の乱れ強さが大きくなっていることを示す。はく離直後($x/H = 0.5$)において乱れを付加した場合には中心周波数が約 $200Hz$ となり、はく離点よりも低周波数となっている。以上のように、ロッドを設置し乱れを付加した場合、はく離せん断層におよぼす影響は大きくなる。

5.2.2 はく離せん断層内の大渦挙動

図5.2.9～図5.2.40にステップ下流の各 x 断面における x 方向速度変動のパワスペクトル密度等値線図を示す。横軸には実周波数とともに無次元周波数を示してある。このパワスペクトル密度等値線図から渦の断面の空間的な広がり、および強度を知ることができる。

はく離直後の領域($x/H = 0.5$)においては、乱れを付加しない d0L0 の場合には強度が小さく、空間的な広がりも小さい渦がみられるが、ロッドを設置し、乱れを付加した d5L100 の場合、はく離せん断層内に中心周波数 $f \cdot x_R/U_0 = 2 \sim 5(110 \sim 300Hz)$ のパワの集中した周波数帯がみられる。はく離点でのパワの最大となる位置はロッドの外縁付近であったが、はく離直後ではほぼ $y/H = 1.0$ のステップ高さの位置にパワの集中がみられる。乱れを付加することにより渦の大きさおよび強さも大きくなることが確認できる。下流にいくに従い、乱れを付加しない場合でも渦の存在が明確になり、 $x/H = 1.5$ では、中心周波数 $f \cdot x_R/U_0 \approx 4(200Hz)$ のパワの集中がみられる。乱れを付加した場合は、はく離直後より渦の強さも大きく、 y 方向への広がりも大きくなっており、渦が大きく成長していることを示している。これはロッドを設置し、乱れを付加することによってはく離せん断層内の渦の発達を促されていることを示している。

下流にいくに従い、渦の中心周波数は低周波側へ移動し、渦の大きさも大きくなっていく。また、それと同時にパワの集中も y 方向の下方向に移動している。これは渦がステップ壁面に近づきながら移動している様子を示している。再付着領域で大きなスケールの渦は大規模渦と呼ばれているが、大規模渦ははく離後、Kelvin-Helmholtz 不安定により巻上がった渦層が、合体成長を繰り返しながら下流へと進みやがて再付着領域に達すると、合体が終了し、はく離泡の外へ放出されと考えられている⁽²⁾。大規模渦の中心周波数は $f \cdot x_R/U_0 \approx 0.5 \sim 1.0(30 \sim 60Hz)$ であり、はく離直後に比べて低周波数となっている。木谷ら⁽¹⁰⁾は大規模渦は $0.5 \sim 0.8 f \cdot x_R/U_0$ の中心周波数ではく離泡から放出されることを示しており、本結果と良く一致している。

$x/H = 7.5$ において流路拡大比 $ER=2.0$ と $ER=1.5$ の場合を比較すると、 $ER=2.0$ の場

合には対向壁側に大規模渦の中心周波数と同様な周波数帯がみられる。この対向壁の周波数帯は乱れを付加した場合は乱れを付加しない場合よりも強く現れているが、これは対向壁に発生する境界層と大規模渦との干渉を示すものである。このことは4章で述べた流路拡大比の大きい $ER=2.0$ の場合、 $ER=1.5$ より乱れ付加による再付着点距離の減少割合が小さいことの原因であると考えられる。つまり、 $ER=1.5$ の場合は大規模渦の広がり断面のおよそ半分であるが、 $ER=2.0$ の場合、断面全体に渦が存在し、主流がほとんど消滅している。これによりはく離泡への連行流量の増加が小さくなり、再付着点距離の減少割合も小さくなると考えられる。

引き続き、図5.2.41～図5.2.44に下流方向への渦の発達を見るため、下流断面に渡る速度変動パワースペクトル等値線図を示す。横軸に流れ方向の距離、縦軸に実周波数と無次元周波数を示している。渦の中心は図5.2.9～図5.2.40において $y/H=1.0$ からあまり変化していないことから $y/H=1.0$ の位置の図を示した。 $y/H=1.0$ での渦の強さが大きく、渦の移動も明確に確認できる。乱れ強さの有無に関わらず、両流路拡大比ではく離せん断層内の渦によるパワの中心は下流にいくに従い、低周波側に移動していき、やがて無次元周波数 $f \cdot x_R/U_0 = 0.5 \sim 0.8$ で変化しなくなる。この渦の中心周波数は再付着領域から変化しなくなるが、これはロッドで乱れを付加しても3章で述べたように再付着領域を通過する渦により支配されていることを示している。渦のパワの中心が高周波から低周波に移動していくのは、はく離後発生した渦が合体成長しながら下流へいく様子を示している。また、渦が合体することによって半分の周波数になるのも確認できる。これは大きさの同じ周波数帯の二つの渦が合体することにより一つの低周波数の渦に変化すると説明される。乱れを付加することによって、はく離直後からパワの集中がみられる。これは乱れを付加することにより大規模渦の発生が早まることを示している。また、渦が低周波に移動する $f = x/H$ の勾配は渦の成長の速度を示すが、その速度は乱れの有無に関わらず、一定の割合で変化している。これは、4章の連行流量の増加が、はく離直後の領域を除いて、一定の割合で増加していくことと一致している。以上のことから、乱れの付加によって再付着点距離が減少するのは、特にはく離直後の領域における渦の発達によるものである。

5.2.3 壁面近くの大渦挙動

図5.2.45、図5.2.46にそれぞれ $ER=1.5$ 、 $ER=2.0$ についてステップ壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度を示す。横軸に実周波数とともに無次元周波数を示し、縦軸にパワを示している。図中の数字は流れ方向距離 x を再付着点距離 x_R で無次元化したもので、測定断面を偶数番号の断面と奇数番号の断面に分けて示した。両流路拡大比とも再

付着領域において中心周波数 $f \cdot x_R / U_0 = \text{約} 1.0$ の幅の広いピークを持っており、パワの大きさもほぼ同様である。これは、図 5.2.9～図 5.2.40 の速度変動のパワスペクトルで示された中心周波数とほぼ同様の中心周波数であり、圧力変動からも大渦の存在を示している。

図 5.2.47 は $ER=1.5$ についてフラット壁の壁面圧力変動パワスペクトルを示している。乱れを付加していない $d0L0$ の場合であり、ほとんどパワの集中が見みられない。乱れを付加した $d5L100$ の場合を図 5.2.48 に示す。乱れを付加した場合でもほとんどパワの集中が見られない。流路拡大比 $ER=1.5$ では、速度変動パワスペクトルでも示したように対向壁側に大渦の存在が認められないこととも一致し、大渦と対向壁の干渉がほとんどない。乱れを付加した場合、無次元周波数 $f \cdot x_R / U_0 = 2.0 \sim 3.0$ において小さなパワが見られるが、これは高周波の小さな渦が発生しているものと考えられる。

図 5.2.49、図 5.2.50 は流路拡大比 $ER=2.0$ についてフラット壁の壁面圧力変動のパワスペクトルをそれぞれ乱れを付加しない場合、乱れを付加した場合について示したものである。乱れの有無によらず、ステップ壁で見られた大渦の中心周波数と同様な中心周波数のピークが見られる。これは、はく離せん断層内の大渦がフラット壁で発達する境界層まで影響をおよぼしていることを示している。このように流路拡大比が大きい場合、フラット壁と大渦の干渉のために流路拡大比によって乱れ強さによる再付着点距離 x_R/H の減少割合が異なると考えられる。

図 5.2.51～図 5.2.56 は $ER=1.5$ におけるステップ壁の再付着点付近の壁面圧力変動とフラット壁の壁面圧力変動の間の相互相関係数 R_p を示す。横軸に時間遅れ Δt を示し、縦軸に相互相関係数 R_p を示している。乱れの有無によらず $x/x_R = 0.54 \sim 0.74$ 付近より上流側においては相関は小さい。 $x/x_R = 1.0$ 付近の再付着領域においては $R_p = 0.25 \sim 0.3$ 程度の高い相関を持っている。図 5.2.57～図 5.2.62 は $ER=2.0$ の場合の相互相関係数 R_p を示している。 $ER=1.5$ と同様に $x/x_R = 0.48$ 付近より上流側においては相関は小さいが、 $x/x_R = 1.0$ 付近では $ER=1.5$ と比較して $R_p = 0.4 \sim 0.5$ と非常に大きくなっている。これからも、 $ER=2.0$ では、 $ER=1.5$ と比較してステップ壁側のはく離せん断層内の大渦の干渉を受けやすいことが確認できる。

5.3 流入境界層が厚い場合

5.3.1 はく離せん断層内の大渦挙動

解析には、流路拡大比 $ER=1.5$ と 2.0 における、ステップ高さ ($y/H = 1.0$) の位置での速度変動を対象として行った。ステップ下流 x 方向の速度変動パワスペクトル分布を図 5.3.1 から図 5.3.4 に示す。横軸に実周波数を、縦軸にパワをとる。

いずれの場合も、パワの集中する幅の広い周波数帯が確認され、その周波数帯の中心周波数は、下流に行くに従い高周波から低周波へと移行し、そのパワーも大きくなっていく。これは、はく離後発生した渦が、合体成長しながら下流へ移動していることを示唆している。また、乱れを付加した場合は乱れを付加しない場合に比べて、はく離後からパワーは大きく中心周波数も低周波に移行するのが早まっており、乱れの付加により渦の発達が進んでいることを示している。渦の発達により連行流量は増加するため、乱れを付加することにより再付着点距離は減少することがこれからもいえる。

大渦ははく離後、Kelvin-Helmholtz 不安定により巻きあがった渦層が合体成長を繰り返しながら下流へと進み、やがて再付着領域に達すると合体は終了し、はく離泡の外へ放出されると考えられている。図から再付着点より下流の位置での中心の周波数は、約 30~50Hz であり、無次元周波数に換算すると $f x_R / U_0 \approx 0.5 \sim 1.0$ である。木谷ら⁽¹⁰⁾は $f x_R / U_0 = 0.5 \sim 0.8$ の中心周波数ではく離泡から大渦が放出されることを示しており、本実験結果とよく一致している。

5.3.2 壁面近くの大渦挙動

壁面圧力変動係数 C_p' の x 方向分布を、 $ER=1.5$ のものを図 5.3.5 に、 $ER=2.0$ のものを図 5.3.6 に示す。横軸に x 方向距離を再付着点距離 x_R で無次元化したものを示し、縦軸に圧力変動の rms 値を基準断面流路高さ中央での動圧で無次元化した圧力変動係数 C_p' を示している。ER の差異により若干 C_p' の大きさは異なるが、いずれの場合もステップ側壁では、再付着点 $x/x_R = 1$ を中心とする再付着領域において C_p' は大きな値を示している。ER=1.5 の場合、ER=2.0 より C_p' が高い値を示しているのは、連行流量の増加割合がより大きく渦が強化されたためであると考えられる。一方、フラット側壁では、ER=1.5 のものについては、乱れの有無によらず、下流方向に緩やかな増加の傾向を示しているのに対し ER=2.0 では、再付着点直後から高い値を示している。これは ER=2.0 では、再付着点付近ではく離せん断層内の大渦と、フラット側壁で発達する境界層が干渉しているためであると考えられる。

また、壁面圧力変動のパワスペクトル分布を、ステップ壁のものを図 5.3.7 から 5.3.16 に、フラット壁におけるものを図 5.3.11 から 5.3.14 に示す。横軸に実周波数を、縦軸にパワーを示す。ステップ壁においては、流路拡大比の差異、また乱れの有無によらず、再付着領域においてパワーのピークは約 30~50Hz の周波数帯にみられ、先述の速度変動パワスペクトルの極大値の周波数に相当し、渦の放出周波数と一致している。パワーの大きさは、圧力変動からみた渦の強さと解釈されるが、図よりパワーは ER=1.5 のものが ER=2.0 のもの

よりも大きくなっている、これは $ER=1.5$ の方が主流部がより大きく、連行流量の増加割合が大きいため渦がより強化されているためであると考えられる。

フラット壁において、 $ER=1.5$ のものについては、乱れの有無にかかわらず十分下流においてステップ壁でみられた大渦の中心周波数と同等な中心周波数のパワのピークがみられるが、 $ER=2.0$ のものについては、再付着点付近から大渦の中心周波数と同等の中心周波数のパワのピークが確認できる。これは $ER=2.0$ においては、はく離せん断層内の大渦がフラット壁で発達する境界層に影響を及ぼしていることを示しており、図 5.3.6 で示したフラット側の壁面圧力変動係数が再付着点付近から高い値を示していることと対応している。このように流路拡大比が大きい場合、フラット側壁と大渦の干渉で確認されるように、より上流部で主流部がなくなるために連行流量の増加割合は小さく、最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は小さくなると考えられる。

$ER=1.5$ 、 2.0 における再付着点とステップ壁、再付着点とフラット壁の壁面圧力変動の相互相関係数分布の一例を図 5.3.15 から図 5.3.26 に示す。また流入境界層が薄い場合のものについては、 $ER=1.5$ 、 2.0 における再付着点とフラット壁の相互相関係数分布の一例を図 5.3.27 から図 5.3.32 に示す。横軸に時間遅れ Δt を示し、縦軸に相互相関係数 R_p を示している。流入境界層が厚い場合、 $ER=2.0$ に比べて $ER=1.5$ のものは、 R_p の極大値は変わらないが極小値は小さくなっている。これは $ER=2.0$ の場合は、対向壁が近いために渦の運動が拘束されているのに対し、 $ER=1.5$ の場合は、対向壁が遠いため渦の運動が比較的自由であるということを示している。

ステップ下流での最大相互相関係数の分布を図 5.3.33、図 5.3.34 に示す。横軸にはステップからの位置を再付着点距離で無次元化した x/x_R を、縦軸には先の壁面圧力変動の相互相関係数の図より、相互相関係数のピークが明確で、かつそのピークの R_p が 0.1 以上となるものを最大相互相関係数 R_{pmax} として示している。また流路拡大比による R_{pmax} の分布の差異を、より理解しやすくするために、 R_{pmax} の分布の模式図を図 5.3.35、図 5.3.36 に示す。ステップ側については、再付着点より上流では流路拡大比の差異による違いはみられないが、再付着点より下流では $ER=2.0$ の方が 1.5 に比べて R_{pmax} の減少割合が大きくなっている。このことから $ER=1.5$ の方が連行流量の増加割合が大きく、より大きい運動量が供給され渦が強化されていることがわかる。一方、フラット側については、 $ER=2.0$ では R_{pmax} は急激に上昇し、再付着点付近で極大値をとるのに対し、 $ER=1.5$ では徐々に増加し、再付着点よりも十分下流で極大値をとる。これは $ER=2.0$ ではすでに再付着点付近で、はく離せん断層内の大渦がフラット壁で発達する境界層にまで影響を及ぼしていることを示している。 ER が大きい場合、このフラット壁の境界層と大渦との干渉で確認されるように、より上流で主流部がなくなるために連行流量の増加割合は小さく、

乱れ強さに対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は小さくなると考えられる。また、乱れを付加すると渦の発達が促進されるため、より上流から R_{pmax} が現れるようになる。

5.4 流入境界層厚さの差異による大渦挙動の変化

さらに流入境界層厚さの差異による違いを調べるため、フラット側のみの最大相互相関係数分布を図 5.4.1、図 5.4.2 に示す。ER=2.0 のものについて、境界層が薄い場合 R_{pmax} は徐々に増加し極大値をとるのに対し、厚い場合は R_{pmax} は最初に極大値をとりその後徐々に減少している。また R_{pmax} の極大値をとる位置は、境界層が厚い場合は再付着点よりも上流側に存在し、薄い場合は下流側に存在する。これは境界層厚さの差異により渦の成長の早さと強さに違いがあり、フラット壁の境界層と干渉し始める位置が異なることを示している。流路拡大比の差異によらず乱れを付加した場合、付加しない場合に比べて R_{pmax} の存在する x/x_R の領域の幅は大きくなっているが、これは乱れを付加したことにより連行量を増し渦が強化されたためだと考えられる。

5.5 ウェーブレット解析による渦構造の観察

はく離直後のせん断層内の渦の成長を観察するため、5.3.1 節の速度変動に対し、ウェーブレット変換による解析を行った。ウェーブレット変換の大きな特徴は、さまざまなスケールの変動の時間変化を解析できることである。これにより時間的に継続する信号のみならずときおり出現する信号の変化を捕らえることが可能である。時系列信号 $s(t)$ (t : 時間) のウェーブレット変換は、次式で定義される。

$$C(a, b) = \int s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5.5.1)$$

$C(a, b)$ はウェーブレット係数、 $\Psi(t)$ はマザーウェーブレット、 a はスケール、すなわち時間軸上での幅を表すパラメータであり、 b は時間軸上の位置のパラメータである。マザーウェーブレット $\Psi(t)$ は、石川⁽³⁶⁾を参考にして Morlet のウェーブレットを採用した。本解析で用いた Morlet のウェーブレット⁽³⁷⁾を次式に示す。

$$\Psi(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (5.5.2)$$

ウェーブレット変換による解析結果の一例を、ウェーブレット係数 $C(a, b)$ の等高線図の形で図 5.5.1 から図 5.5.22 に示す。等高線は、絶対値で示しており、その刻み幅はすべて同じである。横軸は時間、縦軸はスケール、すなわち周波数に相当するもので、小さいスケールは高周波数、大きいスケールは低周波数に相当する。

はく離点からやや下流の領域にかけて、流路拡大比の差異によらず乱れを付加した場合に付加しない場合に比べて、 $a/\Delta t$ (Δt はサンプリング周波数で 2.1kHz) ≤ 20 のところに渦の存在を示す等高線の島がより上流から確認される。これは流路拡大比の差異によらず、乱れを付加することにより渦の発達が促進されていることを示している。また、乱れの有無によらず $ER=2.0$ は $ER=1.5$ に比べて等高線の分布密度、島の高さがより上流から高くなっている。その後下流に行くに従い、乱れ付加の有無による違いは明確ではなくなっていくが、 $ER=2.0$ ではより上流でその差異がみられなくなる。これは、 $ER=2.0$ では大渦の発達は $ER=1.5$ よりも早い、主流部の消滅により連行流量が増加しないため渦が強化されず、再付着点距離を短くするには至っていないことを示し、乱れ強さ Tu に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合が小さくなることと対応している。はく離点近傍では、乱れ付加の有無によらずいずれの場合でも、 C は時間に対して継続的でなく、ときおり、しかも弱くあらわれている。この小さい渦が後の現象に大きく関わってくるため、この挙動を知ることは重要である。このような微細で不連続な現象は、フーリエ解析では平均化され観察できないこともあり、ウェーブレット変換による解析はこのような渦生成の初期段階の挙動の観察には、有効な手段であるといえる。

再付着点付近では、 $a/\Delta t$ が約 40 のスケールにおいて C の高い値がほぼ継続してあらわれているが、フーリエ周波数 f とウェーブレット解析の時間スケールとの関係⁽³⁸⁾ ($f = k_\psi/2\pi a$: 本解析では $k_\psi = 5$) を用いると、これは先の速度変動スペクトルの極大値の周波数に対応し、渦の放出周波数とほぼ一致している。

5.6 まとめ

再付着点距離におよぼす流路拡大比とステップ入口における乱れの付加の影響を明確にするため、はく離せん断層内および壁面近くの大渦挙動を信号の周波数解析から解析した。流入境界層が薄い場合、つづいて流入境界層が厚い場合について大渦挙動を検討した上で流入境界層の厚さおよび流路拡大比の差異が入口乱れを付加した再付着流れ場におよぼす影響を考察した。さらにウェーブレット解析を用いてはく離着後のせん断層内の渦の成長の観察をおこなった。以上より得られた知見を以下に示す。

1. 本研究で採用したロッドを壁面上に設置するかく乱法によって付加した乱れは、ステップ入口でカルマン渦のような周期性の強い渦放出とはならない。
2. 乱れの付加によって再付着点距離が減少するのは、特にはく離直後の領域における渦の発達によるものである。
3. はく離せん断層内の渦は下流に進むに従い、合体成長を繰り返す。その渦の中心周波

数は下流に行くに従い、低周波側へ移動し、再付着領域を流出する。

4. 流路拡大比が大きいと再付着領域から下流において主流部の消滅およびフラット壁に発達する境界層と大渦の干渉がおこり、はく離泡内への連行流量の増加が小さくなり、再付着点距離減少割合におよぼす効果が流路拡大比が小さい場合とは異なる。
5. はく離せん断層内の速度変動のウェーブレット解析により、時間に対して継続的でなく、ときおり、しかも弱くあらわれている小さな渦をも観察できた。これを用いて、はく離点近傍において乱れを付加した場合、流路拡大比の差異によらず渦の発達が促進されていることを確認した。

第6章

壁面近傍の乱れ強さが再付着現象に与える影響

6.1 序

前章まで後方ステップ再付着流れ場においてかく乱による入口乱れの付加の有無により、はく離直後の大渦の発達促進、流路拡大比および流入境界層厚さの差異による大渦挙動の違い、について議論してきた。本章では乱れの付加の有無でなく、乱れの強さと再付着点距離との関係を検討する。また、3章で示した再付着流れ場の相似性について、流路拡大比、流入境界層厚さの差異も含めた広範囲の条件のもとで検討する。

6.2 壁面近傍の最大乱れ強さが再付着点距離に与える影響

後方ステップ流れの再付着点距離は、1章においても述べたようにステップ入口の境界層の状態に大きな影響を受けることが知られている。この内、磯本と本阿弥⁽⁴⁾らによって、はく離点近傍での無次元高さ y^+ が50以下の領域における最大乱れ強さ Tu_{max} と再付着点距離が強い相関を持つことからステップ入口乱れ強さの影響は、はく離点近くの局所乱れにより整理できる可能性が示されている。本研究では、はく離点近傍に乱れを導入し種々の強さの乱れ強さを与え再付着流れ場への影響を調べたが、再付着点距離について局所乱れによる整理をおこない、与えたかく乱が再付着現象におよぼす影響を検討する。

流入境界層が薄い場合および厚い場合について $ER=1.33$ から $ER=2.0$ の範囲の流路拡大比において4.2節で示したロード設置条件よりステップ上流でかく乱を与えた広範囲の条件の基での実験結果について検討する。ステップ入口のはく離点近傍での無次元高さ y^+ が50以下の領域における最大乱れ強さ Tu_{max} と再付着点距離 x_R/H の関係を図6.2.1に示す。図において各流路拡大比および流入境界層厚さによる分類群毎にほぼ再付着点距離はまとまっており、局所乱れによる整理法は可能であると判断できる。

まず、流入境界層厚さが薄い場合および厚い場合とも同一の最大乱れ強さにおいて流路拡大比が大きいほど再付着点距離は大きい。また、最大乱れ強さが約10%よりも小さい領域では、最大乱れ強さの変化に対して再付着点距離は各流路拡大比ともほとんど変化しない。一方、最大乱れ強さが約10%以上になると、最大乱れ強さの増加とともに再付着点距離は減少する。その減少割合は、流路拡大比が小さい領域においては流路拡大比による

に差異はない。

流入境界層が薄い場合で $ER=1.8$ ，流入境界層厚さが厚い場合で $ER=1.7$ ，を境界として流路拡大比の差異による最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は異なってくることを確認できる。それぞれより大きな拡大比では，拡大比の増加に伴い減少割合が徐々に小さくなり，流入境界層厚さが厚い場合の $ER=2.0$ では最大乱れ強さの増加に対してほとんど再付着点距離は減少していない。

以上より，流入境界層厚さ，流路拡大比の差異によらず，ステップ入口のはく離点近傍における最大乱れ強さ Tu_{max} がある値以上になると，再付着点距離は減少する。最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は，流路拡大比 ER が小さい場合と大きい場合では異なり，流路拡大比が大きいと減少割合は小さくなる。これは流路拡大比が大きい場合では，第4章および第5章で検討したように乱れを付加することにより，はく離直後の渦の発達を早めることはできるが，大渦がフラット壁で発達する境界層に影響を及ぼしていることから確認されるように，より上流部で主流部がなくなり連行流量の増加割合が小さくなるため，流路拡大比が小さい場合より最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は小さくなってしまう。

6.3 再付着流れ場の相似性

再付着流れ場の相似性については，3章で既に示したが，さらに流路拡大比，流入境界層厚さの差異も含めた広範囲な条件のもとで検討する。6.2節で取上げた実験結果の内，流入境界層が薄い場合および厚い場合のいくつかの流路拡大比について，乱れ付加の有り無し両者の条件を3章で議論した条件に加えて図6.3.2に再付着領域の幅 Δx_R で再整理した順流率分布を示す。図より流入境界層厚さ，乱れ強さ，流路拡大比の差異，かく乱法の差異によらず順流率分布は同一曲線上に集約されている。このことから，再付着領域における流れ場は，この領域を通過する渦により支配されており，再付着流れ場の相似性がやはり成立する。

6.4 まとめ

付加した乱れの強さと再付着点距離との関係を検討した。また，再付着流れ場の相似性について，流路拡大比，流入境界層厚さの差異も含めた広範囲の条件のもとで検討した。以下にこれらについてまとめる。

1. 流入境界層厚さ，流路拡大比の差異によらず，ステップ入口のはく離点近傍における

最大乱れ強さ Tu_{max} がある値以上になると、再付着点距離は減少する。最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は、流路拡大比 ER が小さい場合と大きい場合では異なり、流路拡大比が大きいと減少割合は小さくなる。

2. 流路拡大比が大きい場合、小さい場合より最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合が小さくなるのは、乱れを付加することにより、はく離直後の渦の発達を早めることはできるが、大渦がフラット壁で発達する境界層に影響を及ぼしていることから確認されるように、より上流部で主流部がなくなり連行流量の増加割合が小さくなるためである。

3. 流入境界層厚さ、流路拡大比、乱れ強さの差異、によらずステップ下流の再付着領域での流れ場は、この領域を通過する渦により支配され、流れ場の相似性が成立する。

第7章

圧力回復効率と再付着点距離の減少の関係

7.1 序

本章では、ステップ流路を管路流れ場とみなした場合、かく乱の付加に伴う流路損失を評価するため、ステップ下流の壁面圧力分布からステップ流れ場の圧力回復を求め、圧力回復効率を定義する、さらにかく乱を与えたことによる再付着点距離の減少と圧力回復効率の関係を議論する、圧力回復効率における流路拡大比の差異を流入境界層厚さの差異に置き換えて表現するモデルについても述べる、

7.2 ステップ下流の壁面圧力係数分布

流入境界層厚さが薄い場合および厚い場合についてステップ壁面上での壁面圧力係数分布を一例として、流路拡大比 ER が 1.33, 1.5, 2.0 についてそれぞれ図 7.2.1 から図 7.2.6 に示す、横軸はステップ高さで無次元化した x 方向距離 x/H 、縦軸は各測定位置と基準断面における壁面圧力との差圧を、基準断面流路高さ中央の動圧 $\frac{1}{2}\rho U_0^2$ で無次元化した壁面圧力係数 C_p である、

壁面圧力係数 C_p は、はく離後いったん最小値を取り、下流にいくに従い徐々に回復していく、圧力回復量 C_{pr} は圧力回復し、 C_p がほぼ一定となった値とした、流路拡大比および流入境界層厚さが同じ場合において、流入境界層の薄い場合と比較して厚い場合では圧力回復量は小さい、また、圧力回復量はロッドの径が大きい、すなわち、乱れ強さが大きいものほど小さくなっている、 C_p の極小値に着目すると、大きい乱れを付加したもののほど、はく離直後にある圧力の極小値は小さくなっている、この圧力の減少が再付着点距離の減少に結びついている、

7.3 圧力回復効率と再付着点距離の関係

圧力回復効率 η を理想流体で得られる圧力回復量 C_{pi} に対して実験結果で得られた圧力回復量 C_{pr} の比として定義する、圧力回復効率は後方ステップ流れ場を速度から圧力へのエネルギー変換器としてみた効率である、理想流体で得られる圧力回復量は次式で算出

し、圧力回復効率 η を求めた。

$$C_{Pi} = 1 - \frac{1}{ER^2} \quad (7.3.1)$$

$$\eta = \frac{C_{Pr}}{C_{Pi}} \quad (7.3.2)$$

圧力回復効率 η と再付着点距離 x_R/H の関係を図7.3.1に示す。流入境界層厚さの差異によらず、再付着点距離 x_R/H の減少に伴い、圧力回復効率 η はほぼ直線的に減少し、流路拡大比が小さい方が x_R/H の減少に対する η の減少割合は小さい。また、同じ流路拡大比のものに注目すると、流入境界層が薄い場合の方が η は大きくなっている。特に流入境界層が厚い場合の $ER=2.0$ のものは、乱れの付加による x_R/H の減少割合は小さく、ロッド設置による抵抗損失のため、 x_R/H の減少に対する η の減少割合は大きくなり、エネルギー変換器としての効果は小さい。かく乱を与え、再付着点距離をより減少させることを目的とすれば、かく乱付加に伴う圧力回復効率の減少はより小さいほうが望ましい。すなわち、圧力回復効率の面では、流路拡大比が小さく流入境界層が薄い場合が再付着点距離の減少により有利である。

さらに図に注目すると、流入境界層が厚い場合の $ER=1.3$ と流入境界層が薄い場合の $ER=1.5$ では、流入境界層厚さ、流路拡大比の大きさが異なっているにもかかわらず同様な効率を得られている。このように圧力回復効率では、流路拡大比の差異は流入境界層厚さの差異によって置き換えて表現できる可能性がある。

つづいて、圧力回復効率と再付着点距離の関係のモデル構築を以下に検討する。圧力回復量を C_{Pr} 、損失が無い場合の圧力回復量を C_{Pi} 、運動量理論による急拡大損失を C_{Pm} 、ロッド設置による摩擦損失を C_{Pd} 、ロッド設置により生じたかく乱によるせん断層拡散に伴う損失を C_{Pex} 、他に流入境界層厚さの違いによる補正係数として、 $\beta_j (j=1\sim3)$ を考える。ただし、 C_{Pi} 、 C_{Pm} は流路拡大比 ER のみの関数、 C_{Pd} は最大乱れ強さ Tu_{max} の関数(ER に無関係)、 C_{Pex} は Tu_{max} 、 ER 、流入境界層厚さ δ の関数である。以上より圧力回復量は、

$$C_{Pr} = \beta_1(C_{Pi} - C_{Pm}) - \beta_2 C_{Pd} - \beta_3 C_{Pex} \quad (7.3.3)$$

で表される。

式(7.3.3)に対して、乱れの付加により、再付着点距離 x_R/H が減少する領域について考える。まず、 Tu_{max} と x_R/H の関係についてまとめておく。今考えている領域では、 Tu_{max} が増加すると x_R/H は直線的に減少することから、以下のように両者の関係を示すことが考えられる。(図6.2.1参照)

$$x_R/H = -a_1 Tu_{max} + b_1 \quad (a_1 > 0, b_1 > 0) \quad (7.3.4)$$

a_1 はERが大きくなれば小さくなる。 δ が大きいと a_1 は小さくなる(ERが大きいのころでは、 δ が大きくなれば Tu を付加しても x_R/H の変化は小さいことから)。 b_1 はERが大きくなると小さくなる。(ERが大きくなると x_R/H の減少割合は鈍くなることから。)これらにより a_1 , b_1 をそれぞれ

$$a_1 = a_R ER^{-m\delta}, b_1 = b_R ER^{-n\delta} \quad m\delta, n\delta > 0 \quad (7.3.5)$$

とおく。 a_R と b_R は比例定数。 $m\delta$, $n\delta$ は、 δ の関数であり、 δ が大きくなると、 $m\delta$, $n\delta$ は大きくなる性質を持つ。従って式(3.10.4)は、

$$x_R/H = -a_R ER^{-m\delta} \times Tu_{\max} + b_R ER^{-n\delta} \quad (7.3.6)$$

$$Tu_{\max} = -\frac{ER^{m\delta}}{a_R} (x_R/H - b_R ER^{-n\delta}) \quad (7.3.7)$$

となる。

次に、 C_{Pd} と C_{Pex} のモデル化を行う。 x_R/H は、乱れ強さ導入によってはく離せん断層が励起され拡散が増すことによって減少する。すなわち、 C_{Pex} は Tu_{\max} の増加にともない増加する。また乱れ強さを導入しない場合の拡散損失(ボルダ・カルノーの損失)は、 $C_{Pm} = (1 - 1/ER)^2$ であり、ERの乗数に依存している。これを考慮して C_{Pex} は ER^{nex} に依存するとしてモデル化する。

$$C_{Pex} = a_2 ER^{nex} \times Tu_{\max} \quad (7.3.8)$$

a_2 は定数($a_2 > 0$)。nexは δ の関数($0 < nex < 1$)。

x_R/H が Tu_{\max} の増加に従い、減少する領域ではロッドの大きさそのものには依存せず、 Tu_{\max} のみで x_R/H が表されるので、 C_{Pd} は、ERには関係しない量であるが、 C_{Pm} に比べて小さい。従って、 C_{Pd} 、 C_{Pex} をまとめて C_{Pex} のみで表すことにする。これより、式(3.10.3)の右辺の第3項、第4項は、

$$\beta_2 C_{Pd} + \beta_3 C_{Pex} = a_{ex} ER^{nex} \times Tu_{\max} \quad (7.3.9)$$

とかける。 $(a_{ex} : a_2$ を含めた比例定数)これにより式(3.10.3)は、

$$C_{Pr} = \beta_1 (C_{Pi} - C_{Pm}) - a_{ex} ER^{nex} \times Tu_{\max} \quad (7.3.10)$$

Tu_{\max} を x_R/H の式で表せば式(3.10.7)より、

$$C_{Pr} = \beta_1 (C_{Pi} - C_{Pm}) - a_{ex} ER^{nex} \left\{ -\frac{ER^{m\delta}}{a_R} (x_R/H - b_R ER^{-n\delta}) \right\} \quad (7.3.11)$$

$$= \beta_1 (C_{Pi} - C_{Pm}) + \frac{a_{ex}}{a_R} ER^{(m\delta+nex)} x_R/H - \frac{a_{ex}}{a_R} b_R ER^{(m\delta-n\delta+nex)} \quad (7.3.12)$$

ここで、 $A = \frac{u_{ex}}{u_R}$, $B = b_R \frac{u_{ex}}{u_R}$ とおきかえ、効率 η を示すと

$$\eta = \frac{C_{Pr}}{C_{Pi}} \quad (7.3.13)$$

$$= \beta_1 \frac{C_{Pi} - C_{Pm}}{1 - \frac{1}{ER^2}} + A \frac{ER^{(m\delta+n\epsilon)}}{1 - \frac{1}{ER^2}} \times x_R/H - B \frac{ER^{(m\delta-n\delta+n\epsilon)}}{1 - \frac{1}{ER^2}} \quad (7.3.14)$$

$$= \beta_1 \frac{2}{1 + ER} + A \frac{ER^{(m\delta+n\epsilon+2)}}{ER^2 - 1} \times x_R/H - B \frac{ER^{(m\delta-n\delta+n\epsilon+2)}}{ER^2 - 1} \quad (7.3.15)$$

また $\beta_m = m\delta + n\epsilon + 2$, $\beta_n = m\delta - n\delta + n\epsilon + 2$ とおくと、

$$= \frac{2\beta_1}{ER + 1} + A \frac{ER^{\beta_m}}{ER^2 - 1} \times x_R/H - B \frac{ER^{\beta_n}}{ER^2 - 1} \quad (7.3.16)$$

$$= \frac{1}{ER + 1} \left(2\beta_1 + A \frac{ER^{\beta_m}}{ER - 1} \times x_R/H - B \frac{ER^{\beta_n}}{ER - 1} \right) \quad (7.3.17)$$

$$= \frac{1}{ER + 1} \left\{ 2\beta_1 + \frac{1}{ER - 1} (A \times ER^{\beta_m} \times x_R/H - B \times ER^{\beta_n}) \right\} \quad (7.3.18)$$

となる。ここで β_m , β_n は δ の関数、 δ が大きくなると β_m , β_n も大きくなる性質をもっている。

これより、 ER と δ が一定の場合では、 η は x_R/H の減少に対して直線的に減少することが示されている。同じ ER の場合には、 δ が大きくなって x_R/H が減少することに対して η は直線的に減少する。また、このとき δ が大きくなることによって勾配 $d\eta/d(x_R/H)$ は大きくなる。また、勾配 $d\eta/d(x_R/H) = A \times ER^{\beta_m}/(ER^2 - 1)$ および切片 $2\beta_1/(ER + 1) - B \times ER^{\beta_n}/(ER^2 - 1)$ は、 ER および δ でも組合せによって一致する可能性がある。よって圧力回復効率では、流路拡大比の差異は流入境界層厚さの差異によって置き換えて表現できる可能性があるといえる。

7.4 まとめ

ステップ下流の壁面圧力分布からステップ流れ場の圧力回復を求め、圧力回復効率を定義し、再付着点距離の減少と圧力回復効率の関係を調べた。また、圧力回復効率における流路拡大比の差異は流入境界層厚さの差異に置き換えて表現するモデルを構築した。以下にこれらについてまとめる。

1. 理想流体で得られる圧力回復量に対するかく乱を与えた場合に得られた圧力回復量の比として圧力回復効率を定義し、再付着点距離の減少に対する圧力回復効率の変化を示した。

2. 流入境界層厚さの差異によらず，再付着点距離 x_R/H の減少に伴い，圧力回復効率 η はほぼ直線的に減少し，流路拡大比が小さい方が x_R/H の減少に対する η の減少割合は小さい。
3. 圧力回復効率の面では，流路拡大比が小さく流入境界層が薄い場合が再付着点距離の減少により有利である。
4. 圧力回復効率では，流路拡大比の差異は流入境界層厚さの差異によって置き換えて表現できる可能性がある。

第8章

結 論

本研究では後方ステップにおけるはく離・再付着流れに関して、ステップ入口にかく乱を与え、入口乱れ強さ、流路拡大比、流入境界層厚さ、が再付着現象に及ぼす複合的影響について調べた。得られた知見を以下に示す。

1. 流入境界層厚さ、流路拡大比の差異によらず、ステップ入口のはく離点近傍における最大乱れ強さ Tu_{max} がある値以上になると、再付着点距離は減少する。最大乱れ強さ Tu_{max} に対する再付着点距離 x_R/H の減少割合は、流路拡大比 ER が小さい場合と大きい場合では異なり、流路拡大比が大きいと減少割合は小さくなる。
2. 流入境界層厚さ、流路拡大比、乱れ強さの差異によらずステップ下流の再付着領域での流れ場は、この領域を通過する渦により支配されている。
3. はく離せん断層内の速度変動のウェーブレット解析により、時間に対して継続的でなく、ときおり、しかも弱くあらわれている小さな渦をも観察できた。これを用いて、はく離点近傍において乱れを付加した場合、流路拡大比の差異によらず渦の発達が促進されていることを確認した。
4. 理想流体で得られる圧力回復量に対するかく乱を与えた場合に得られた圧力回復量の比として圧力回復効率を定義し、再付着点距離の減少に対する圧力回復効率の変化を示した。流入境界層厚さの差異によらず、再付着点距離 x_R/H の減少に伴い、圧力回復効率 η はほぼ直線的に減少し、流路拡大比が小さい方が x_R/H の減少に対する η の減少割合は小さい。また、圧力回復効率では流路拡大比の差異を流入境界層厚さの差異に置き換えて表現できる可能性がある。

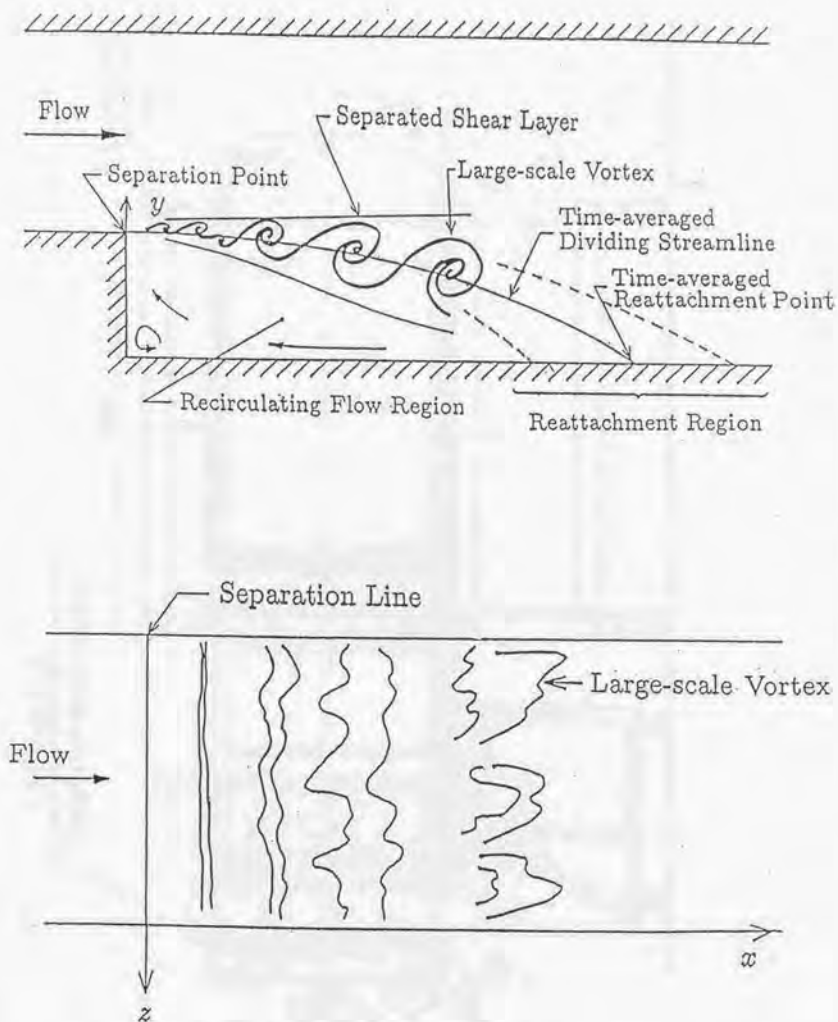


図 1.1 はく離再付着流れの概略図

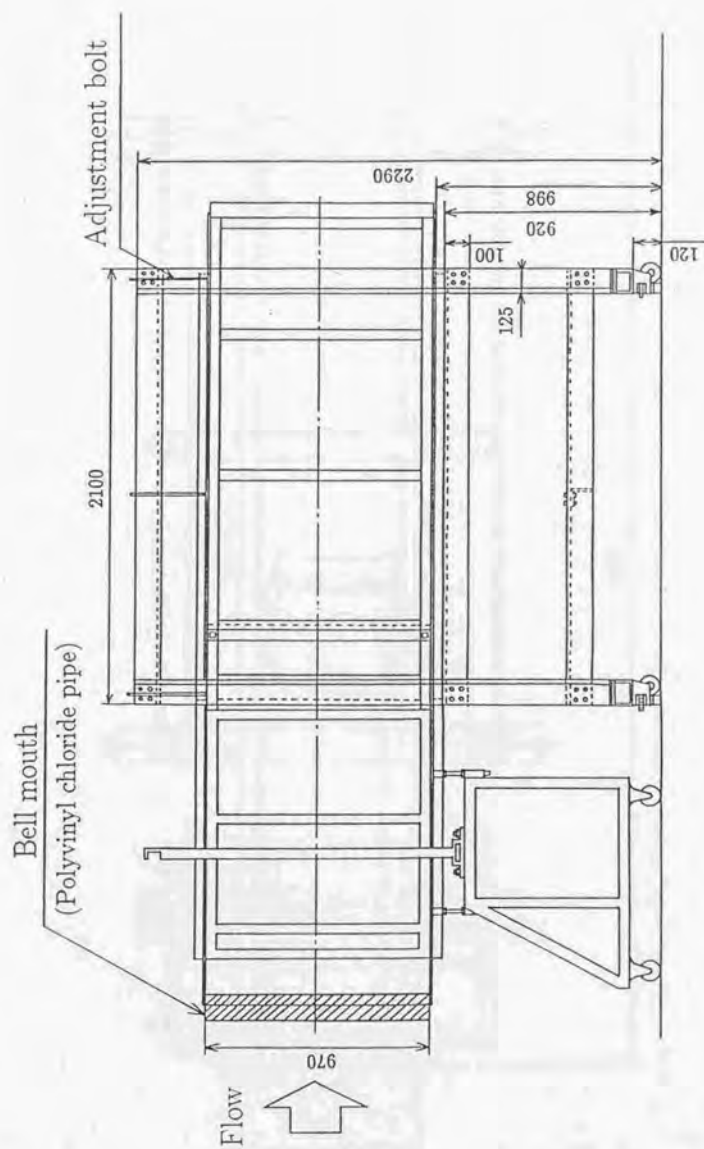


图 2.1.1 实验装置侧面图

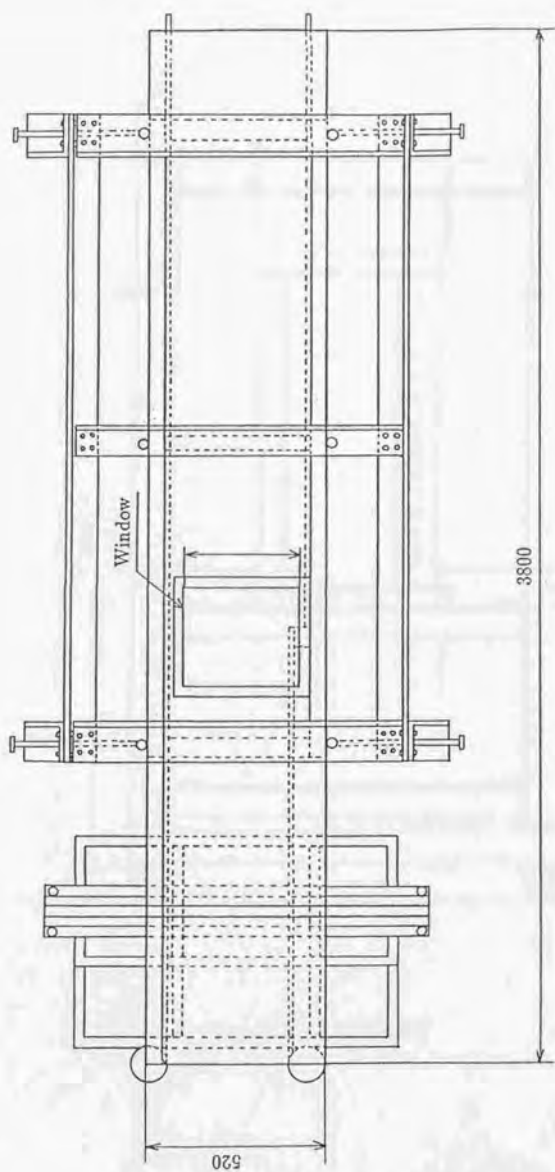


图 2.1.2 实验装置平面图

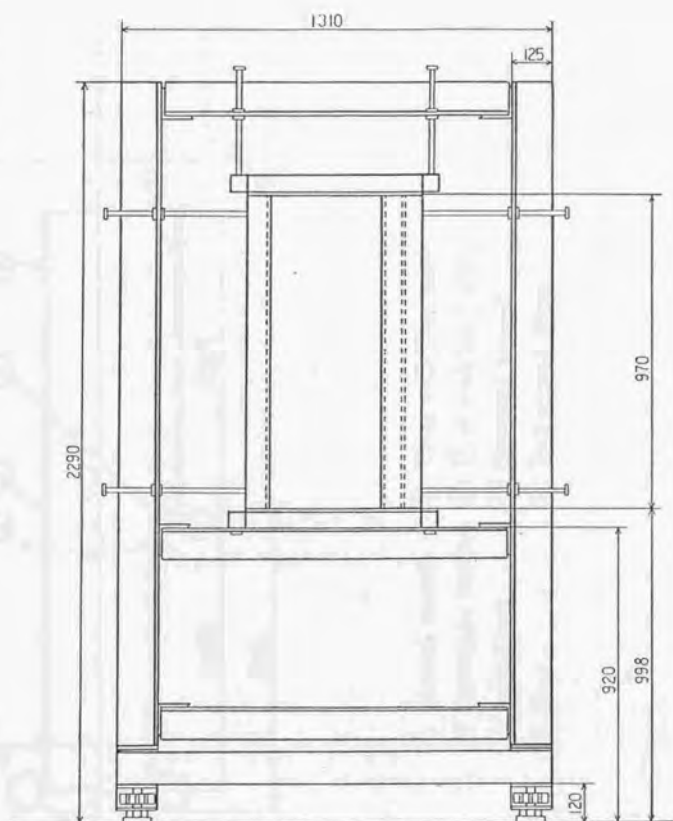
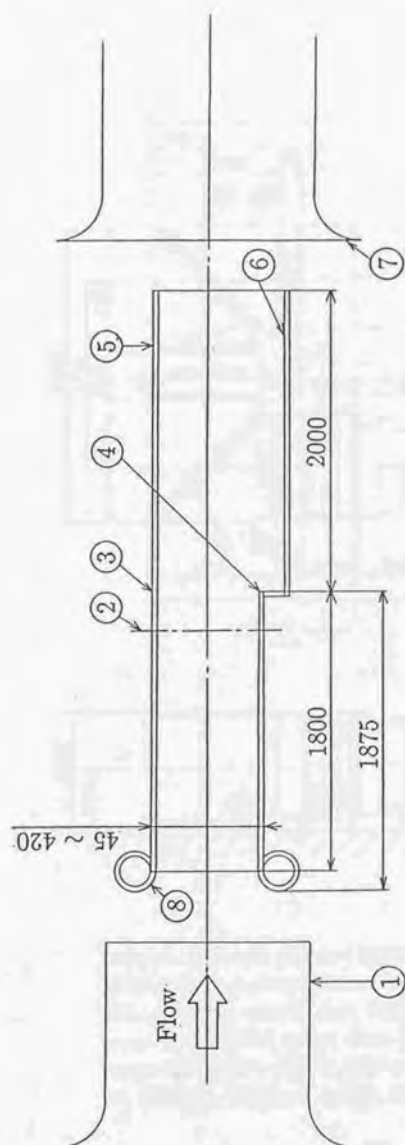
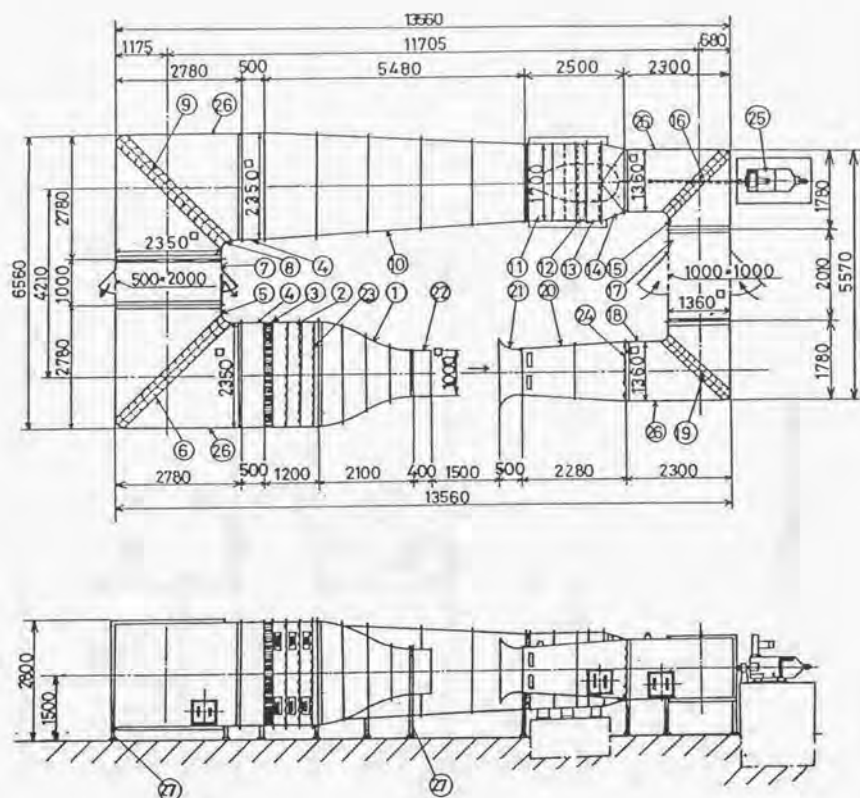


図 2.1.3 実験装置正面図



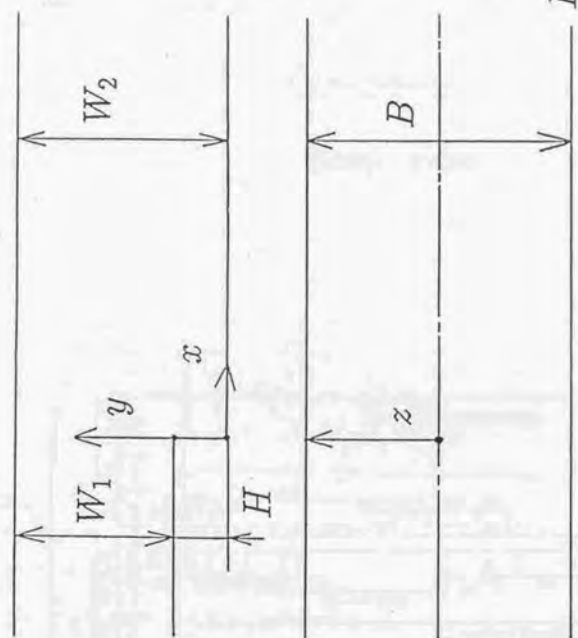
- ① Blowoff mouth
- ② Reference section
- ③ Inlet Duct
- ④ Step
- ⑤ Duct wall(Flat side)
- ⑥ Duct wall(Step side)
- ⑦ Suction mouth
- ⑧ Bell mouth Flow

図 2.1.4 実験装置の概略図



(1)Nozzle, (2)plenum chamber, (3)Honey - comb, (4)Straight duct, (5)4th corner duct, (6)4th corner vane, (7)2nd interim duct, (8)3rd corner duct, (9)3rd corner vane, (10)2nd diffuser, (11)2nd variable duct, (12)Fan, (13)Fan duct, (14)1st variable duct, (15)2nd corner duct, (16)2nd corner vane, (17)1st interim duct, (18)1st corner duct, (19)1st corner vane, (20)1st diffuser, (21)Bell mouth, (22)Flare, (23)Strainer nets, (24)Guard net, (25)Motor, (26)Check windor, (27)Foot.

図 2.1.5 ゲッチングン型大型風洞施設



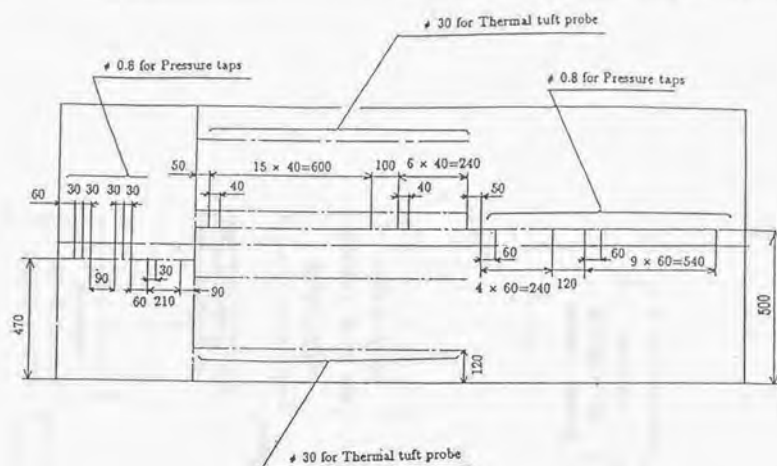
$$H = 60mm$$

$$W_1 = 45 \sim 420mm$$

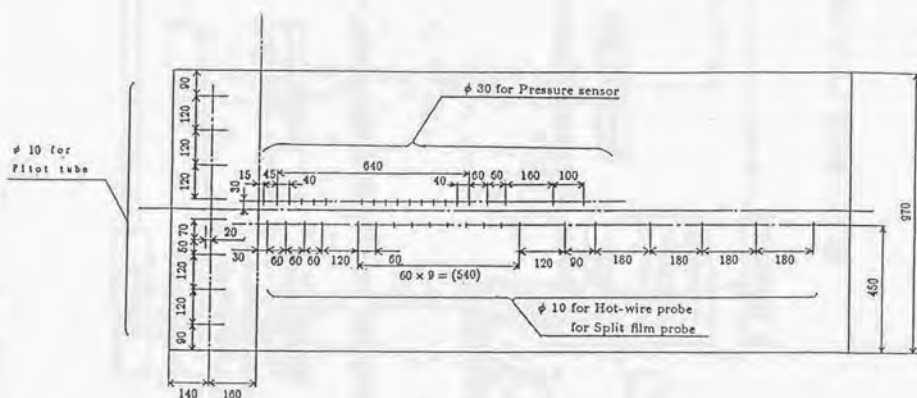
$$W_2 = 105 \sim 480mm$$

$$B = 970mm$$

図 2.1.6 実験装置の座標系



Step side



Flat side

図 2.1.7 測定孔の位置

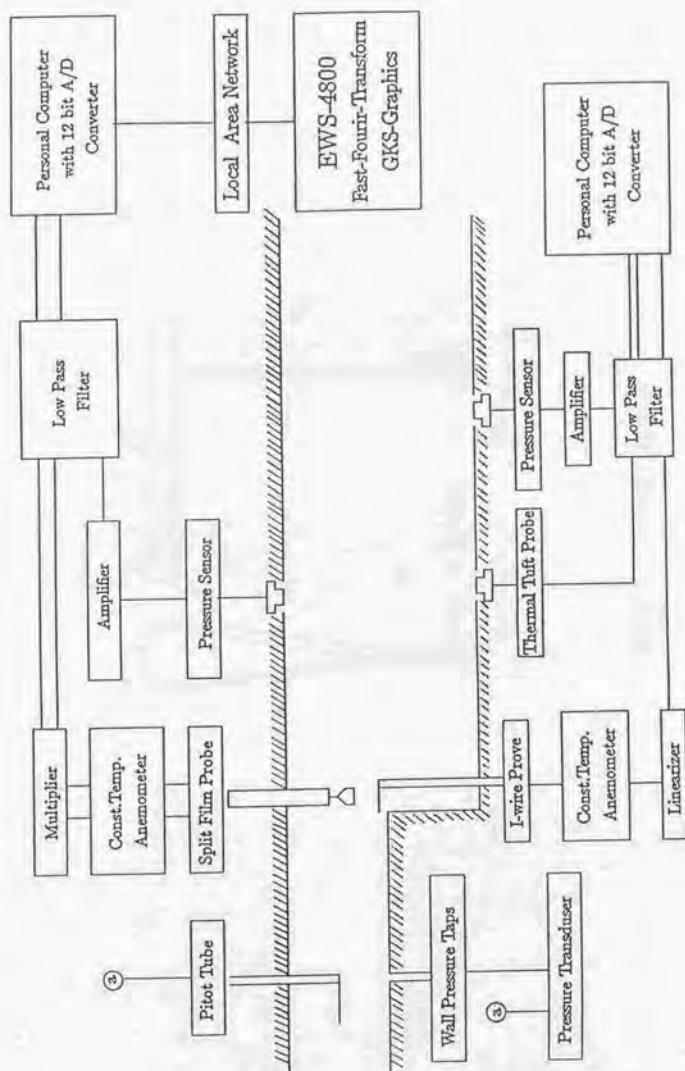


図 2.2.1 測定系ブロック線図

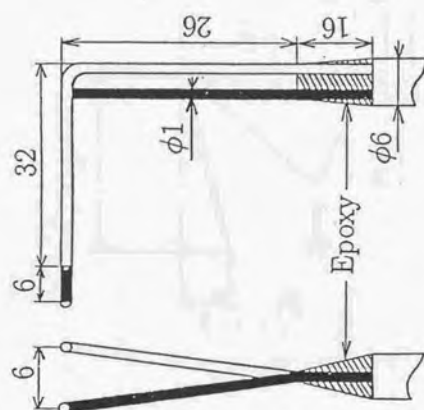
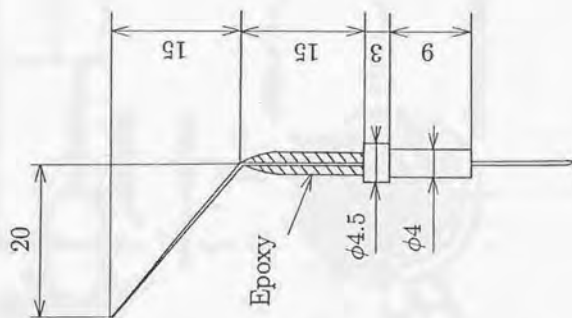


図 2.2.2 ピトー管の概略図

(A)



(B)

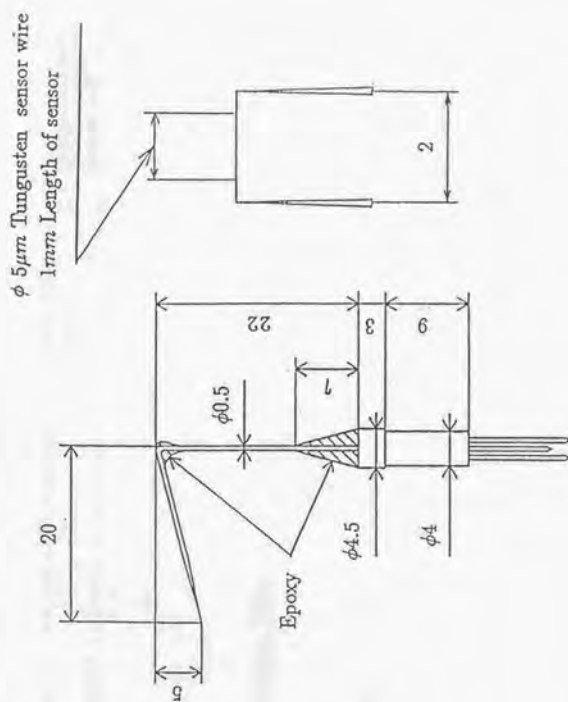


図 2.2.3 I 型熱線プローブの概略図

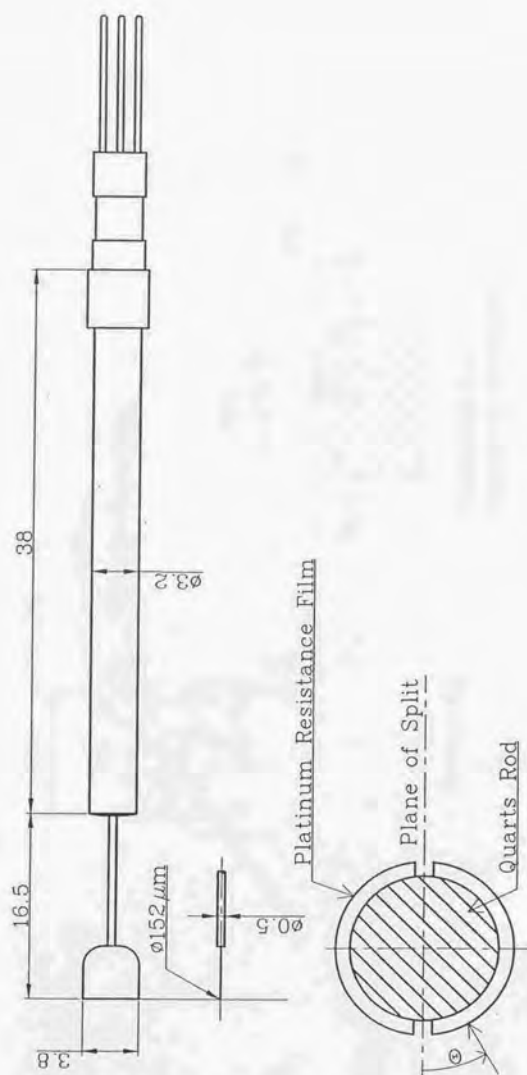


図 2.2.4 スプリットフィルムプローブの概略図

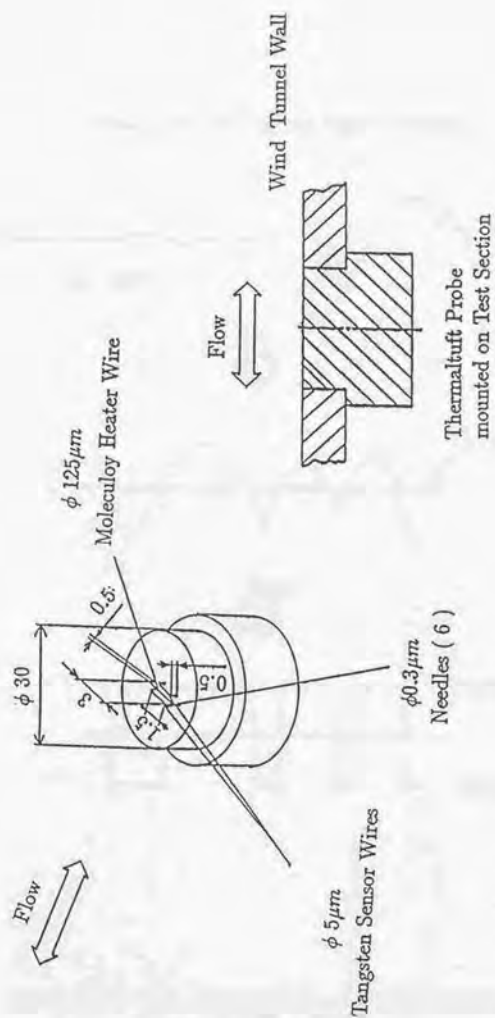


図 2.2.5 サ-マルタフトプローブの概略図

Outputs from Thermaltauft Probe

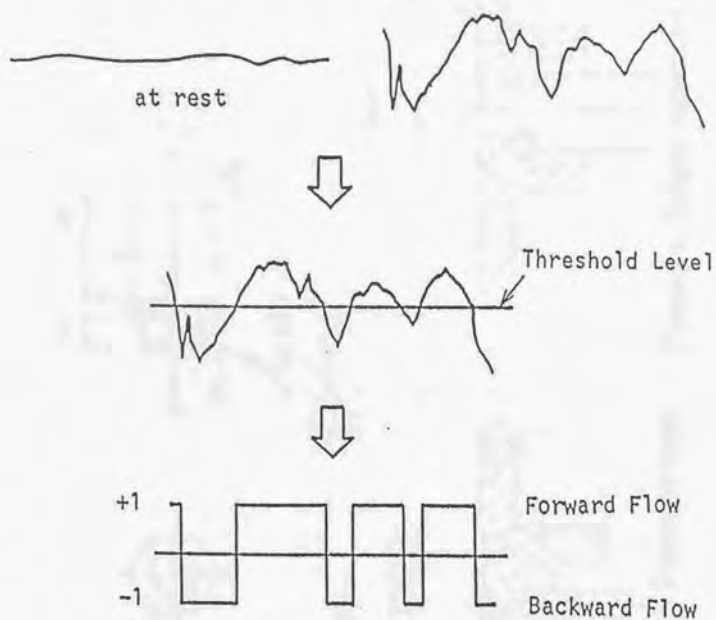


図 2.2.6 サーマルタフトプローブの信号処理法

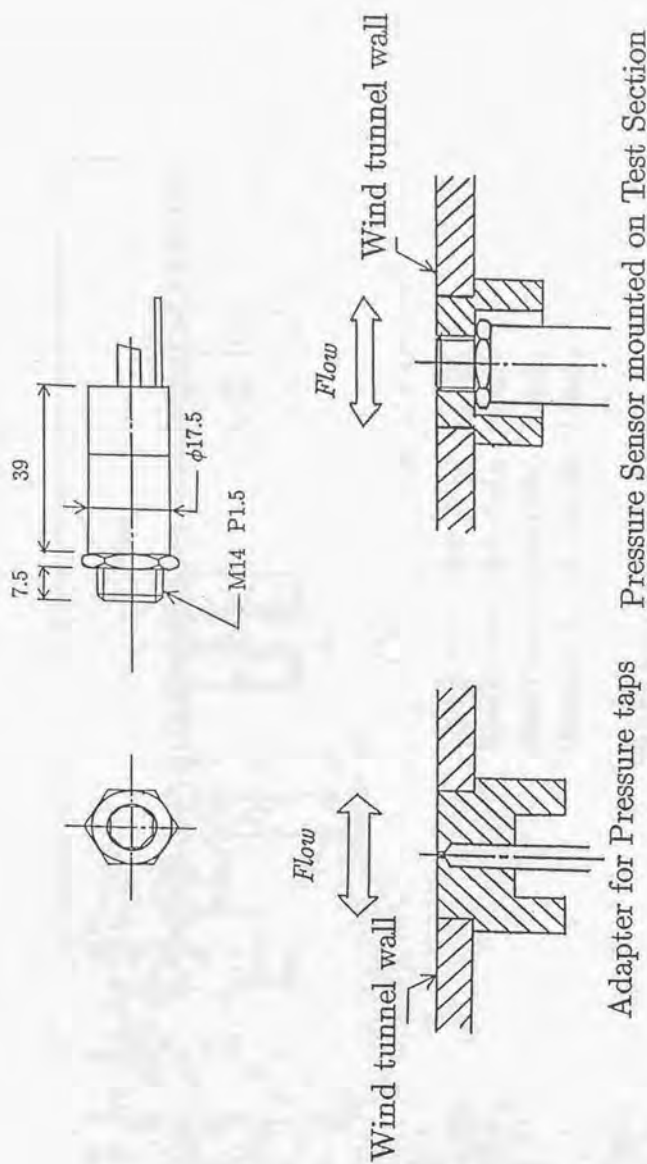
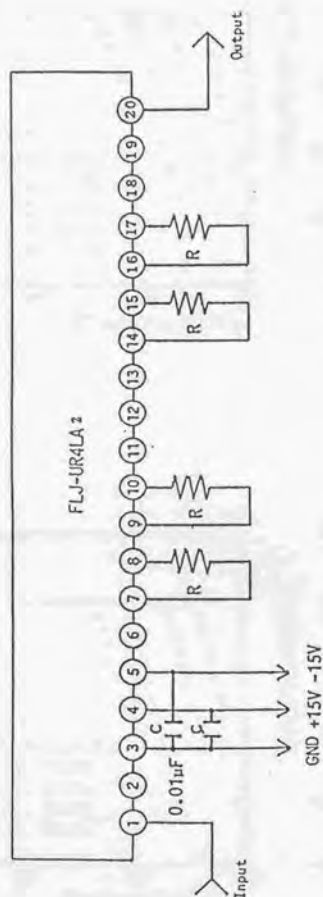


図 2.2.7 圧力センサ用アダプタおよび圧力センサの概略図



Cut Off Frequency

- Case 1 --- $R = 39k\Omega$ $4.1kHz$
- Case 2 --- $R = 75k\Omega$ $2.1kHz$
- Case 3 --- $R = 160k\Omega$ $1.0kHz$
- Case 4 --- $R = 330k\Omega$ $0.5kHz$

図 2.2.8 ローパスフィルタの回路図

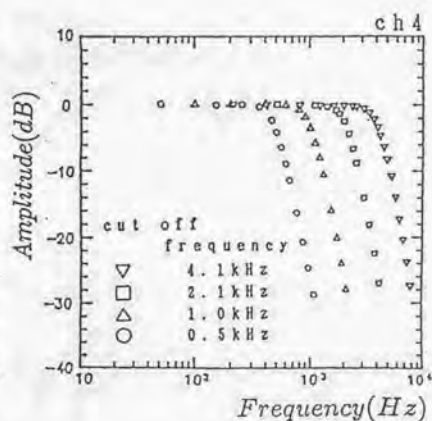
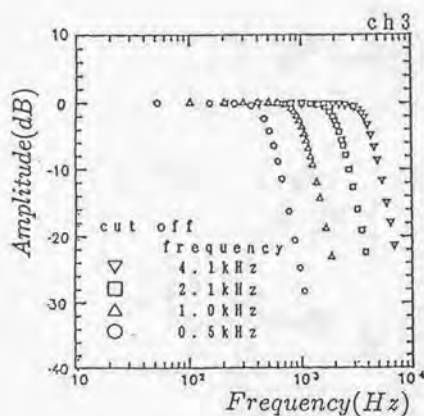
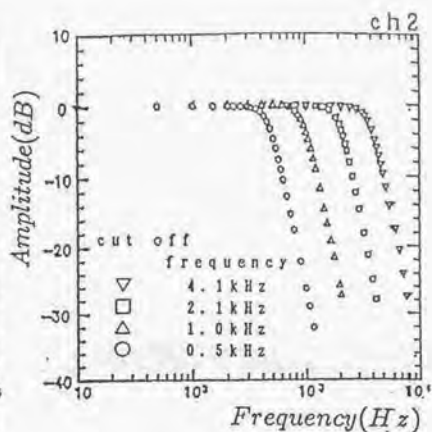
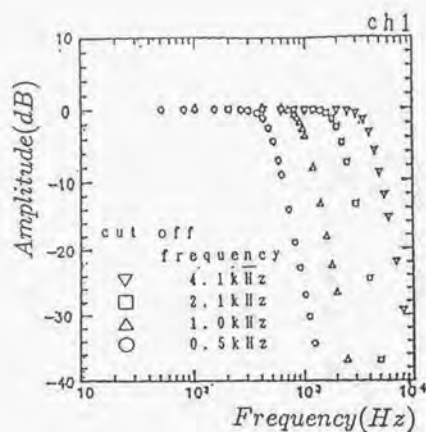


図 2.2.9 ローパスフィルタの減衰特性

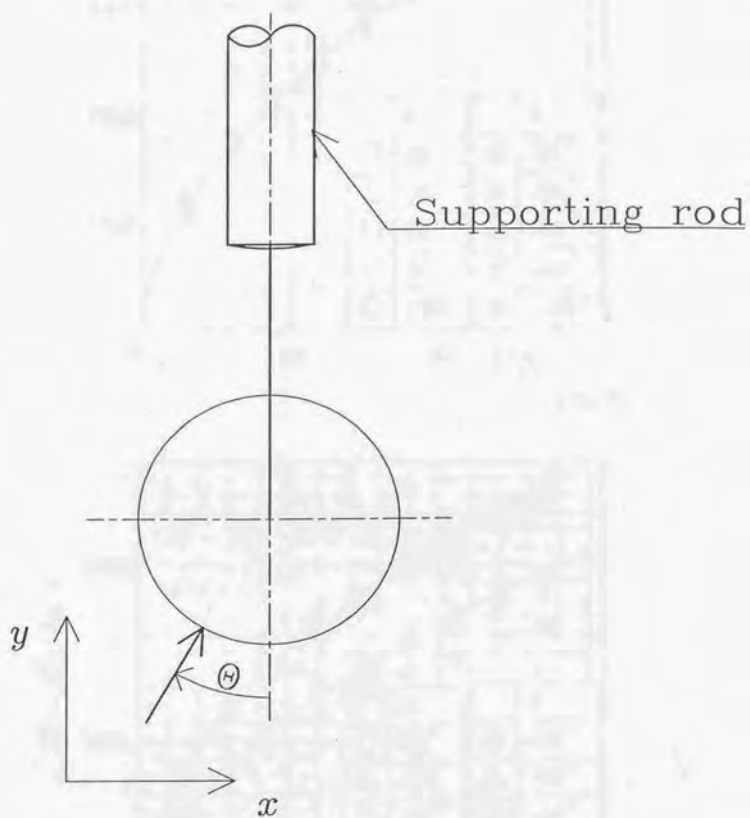


図 2.3.1 スプリットフィルムプローブの設置方法

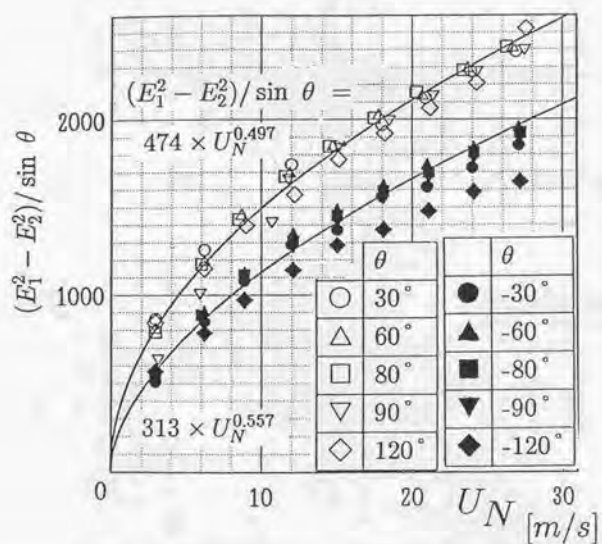
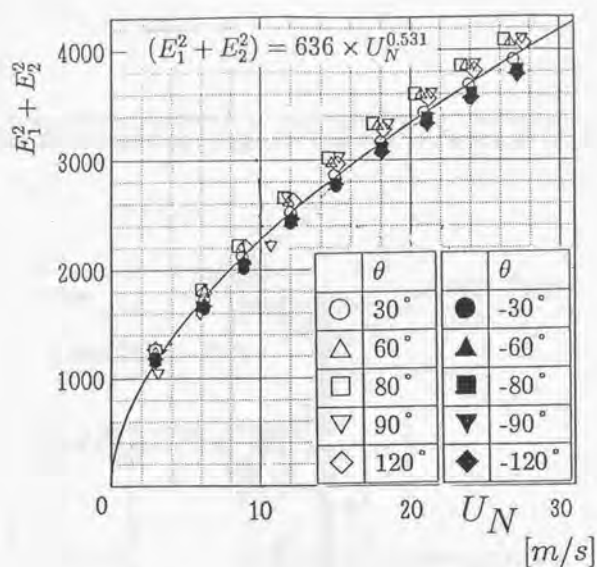


図 2.3.2 スプリットフィルムプローブの較正結果

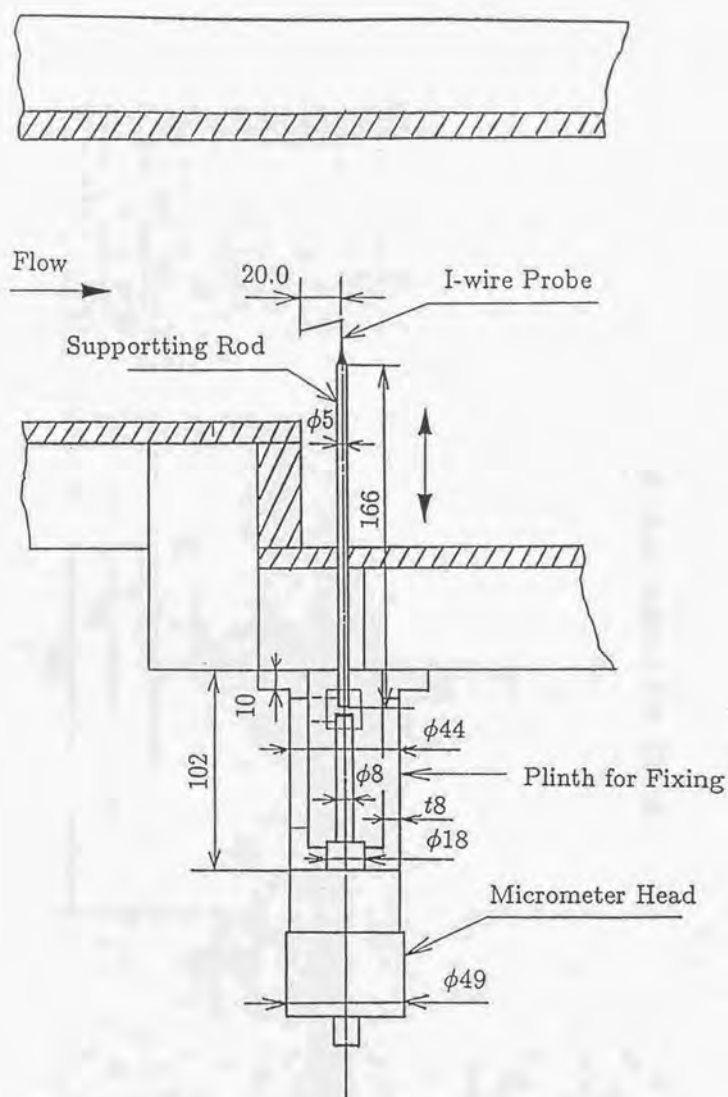


図 2.4.1 I 型熱線プローブの設置方法の概略図

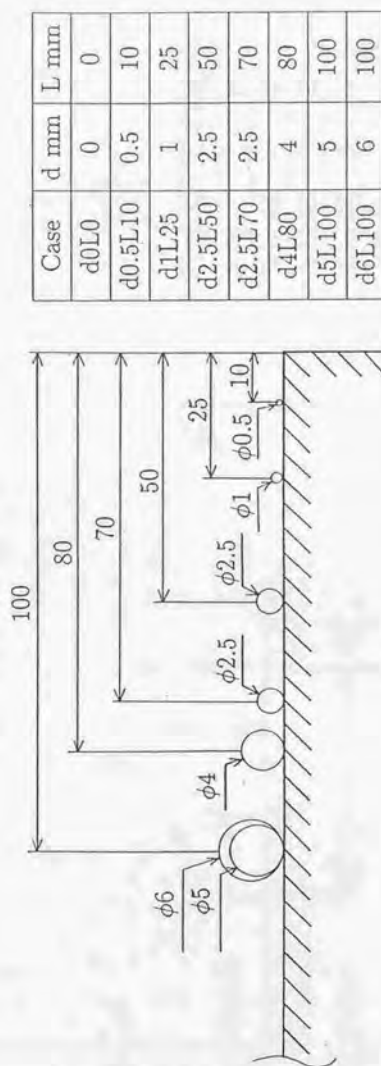


図 3.2.1 ロッドの直径と設置位置

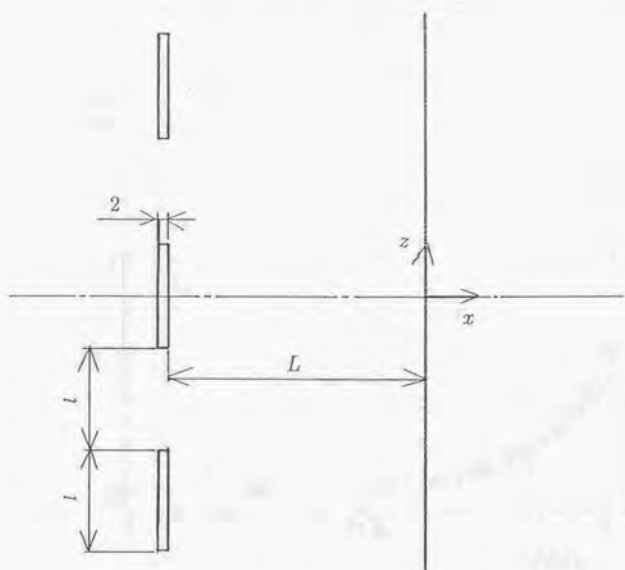


図 3.2.3 三次元かく乱におけるフェンスの設置位置

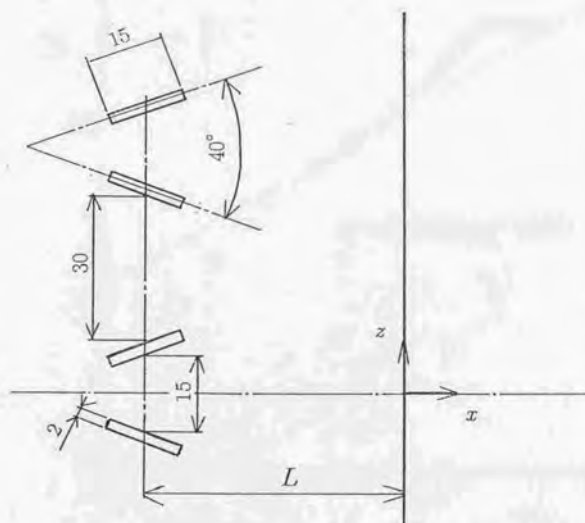


図 3.2.4 ボルテックス・ジェネレータの設置位置

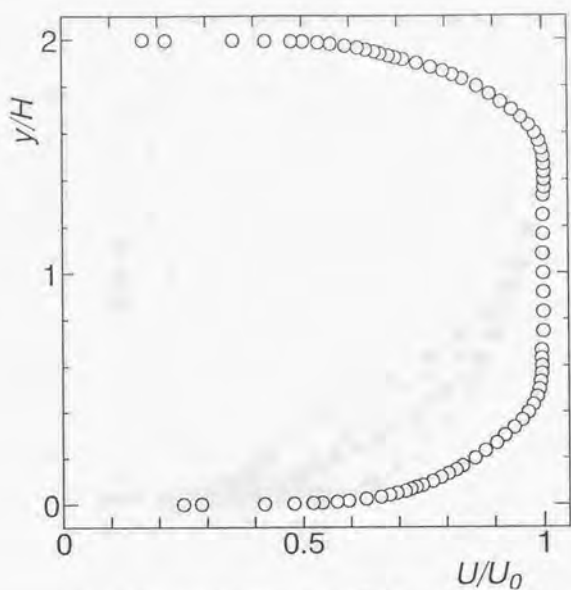


図 3.3.1 基準断面における時間平均速度分布

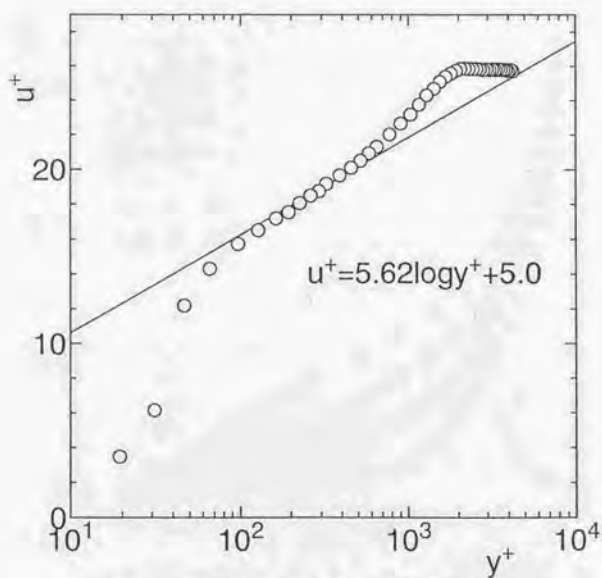


図 3.3.2 基準断面における対数速度分布

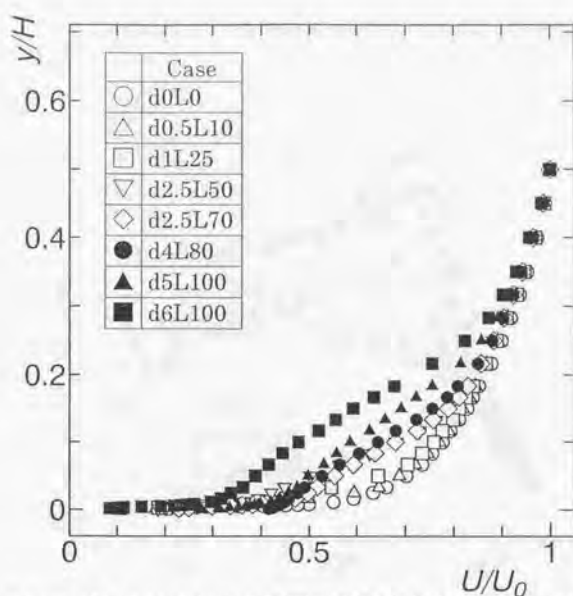


図 3.4.1 ステップ入り口における時間平均速度分布 (二次元かく乱, ロッド)

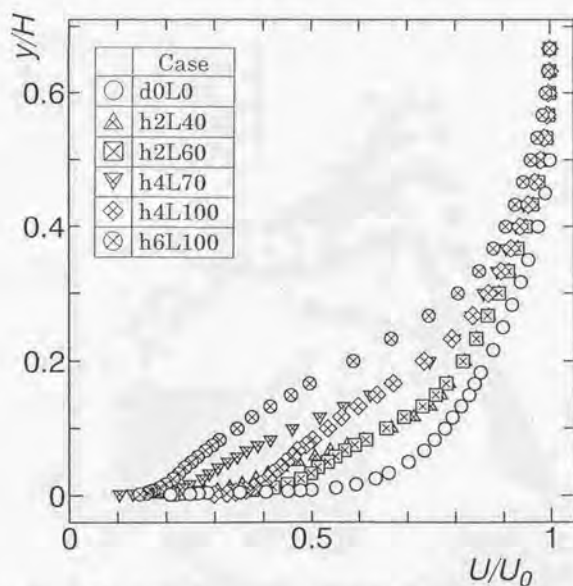


図 3.4.2 ステップ入り口における時間平均速度分布 (二次元かく乱, フェンス)

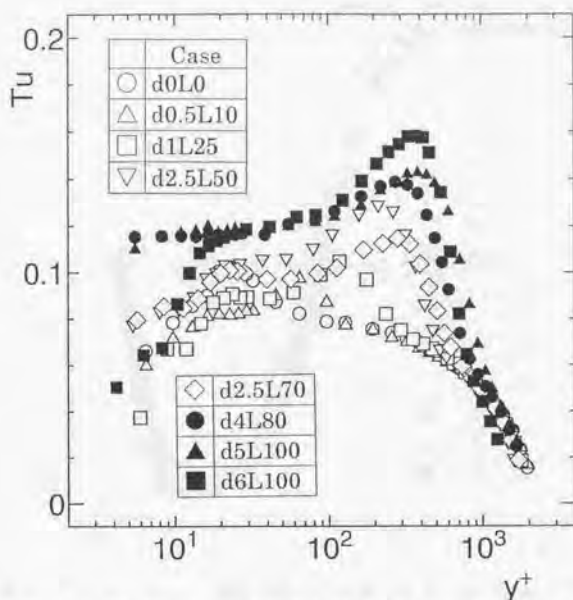


図 3.4.3 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (二次元かく乱, ロッド)

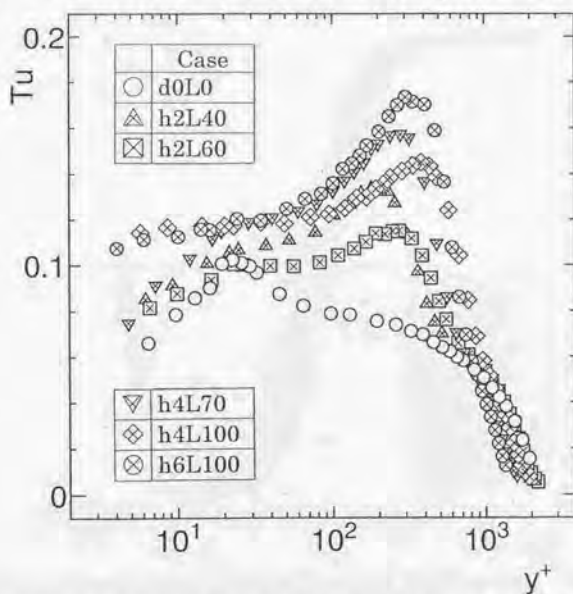


図 3.4.4 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (二次元かく乱, フェンス)

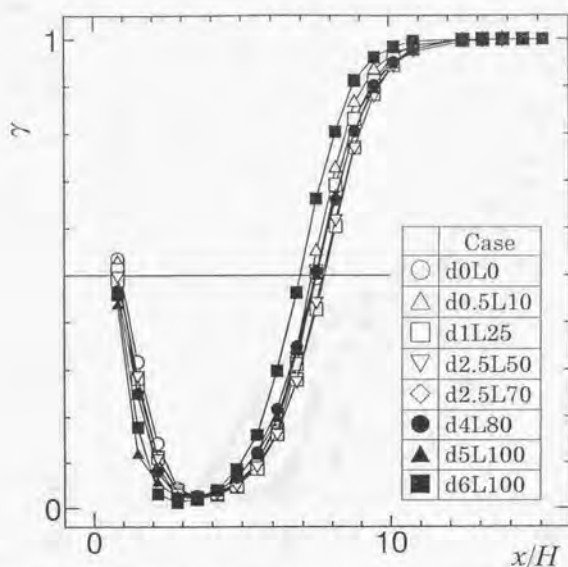


図 3.4.5 ステップ下流の順流率分布 (二次元かく乱, ロッド)

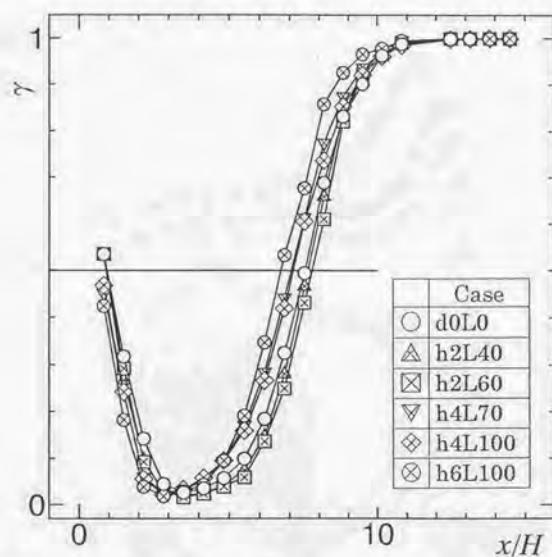


図 3.4.6 ステップ下流の順流率分布 (二次元かく乱, フェンス)

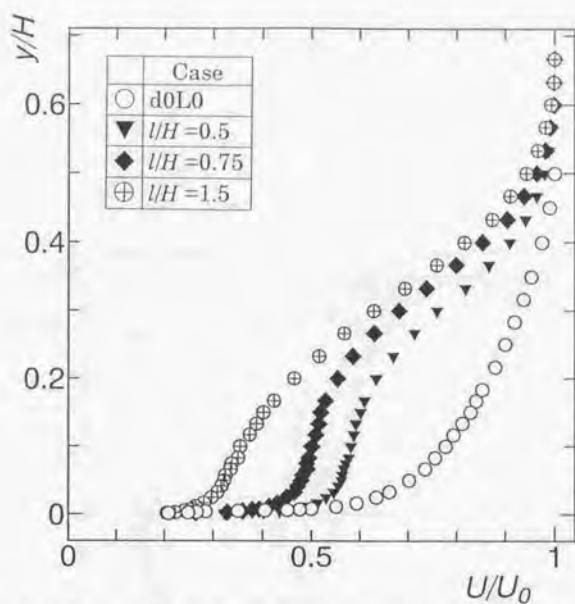


図 3.5.1 ステップ入り口における時間平均速度分布 (三次元かく乱)

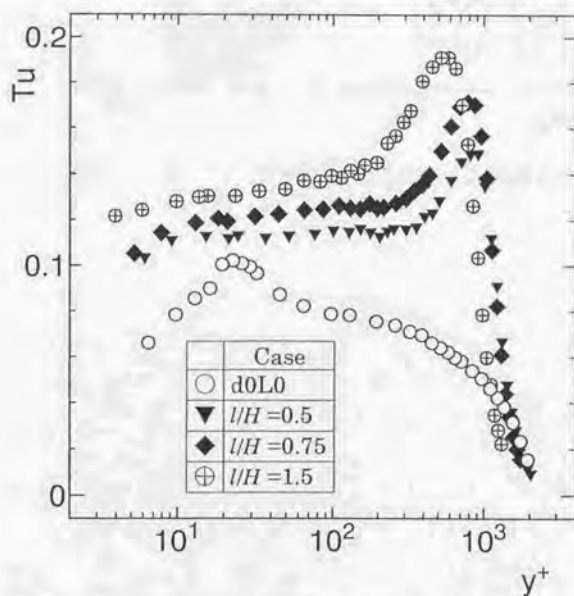


図 3.5.2 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (三次元かく乱)

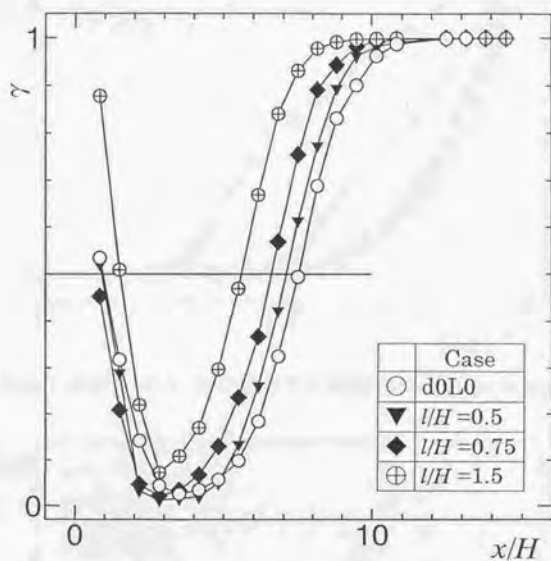


図 3.5.3 ステップ下流の順流率分布 (三次元かく乱)

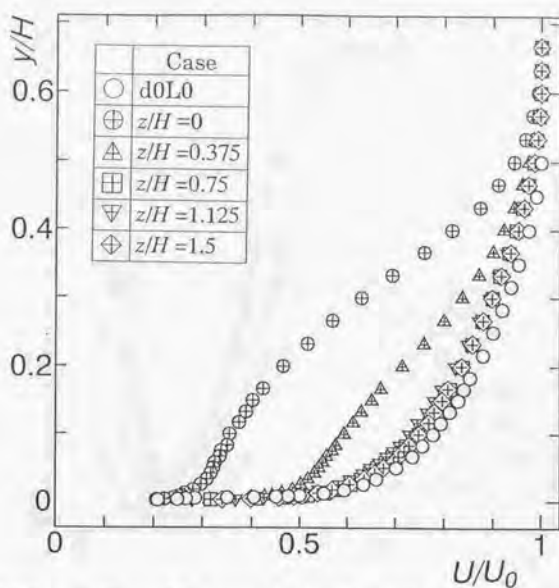


図 3.5.4 ステップ入り口における時間平均速度分布 ($l/H = 1.5$)

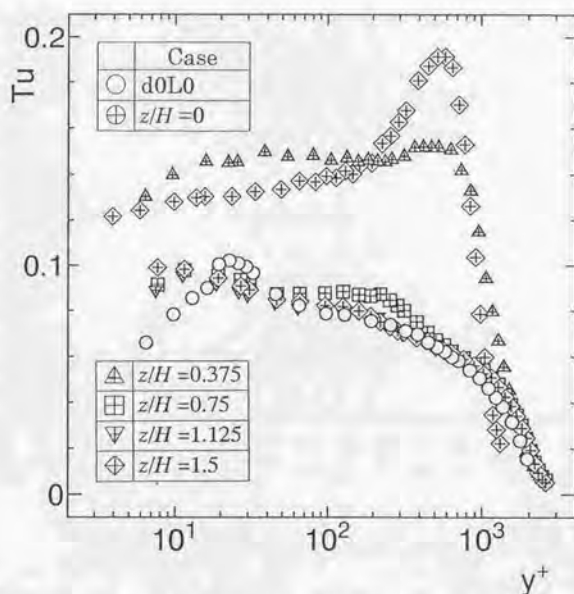


図 3.5.5 ステップ入り口における乱れ強さ分布 ($l/H = 1.5$)

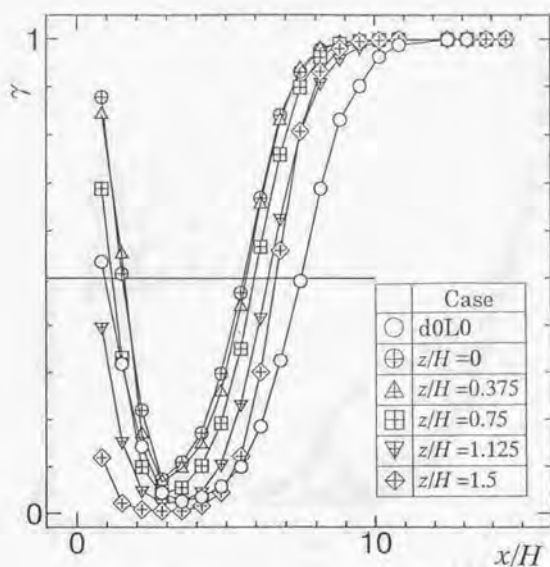


図 3.5.6 ステップ下流の順流率分布 ($l/H = 1.5$)

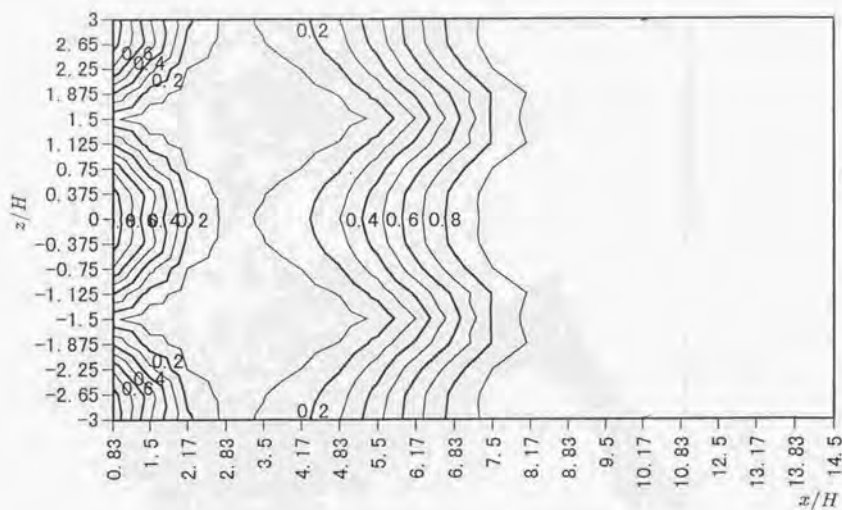


図 3.5.7 順流率のスパン方向分布 ($l/H = 1.5$)

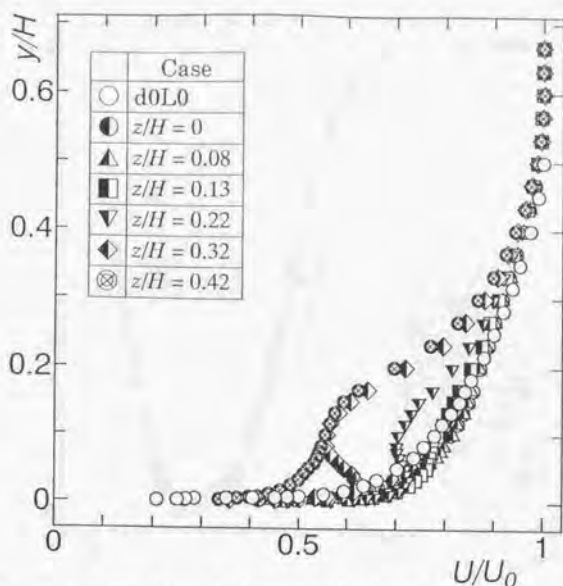


図3.5.8 ステップ入り口における時間平均速度分布 (ボルテックス・ジェネレータ)

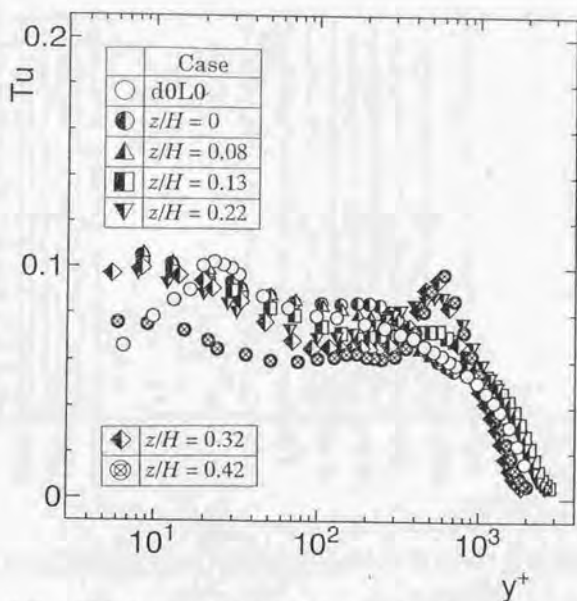


図3.5.9 ステップ入り口における乱れ強さ分布 (ボルテックス・ジェネレータ)

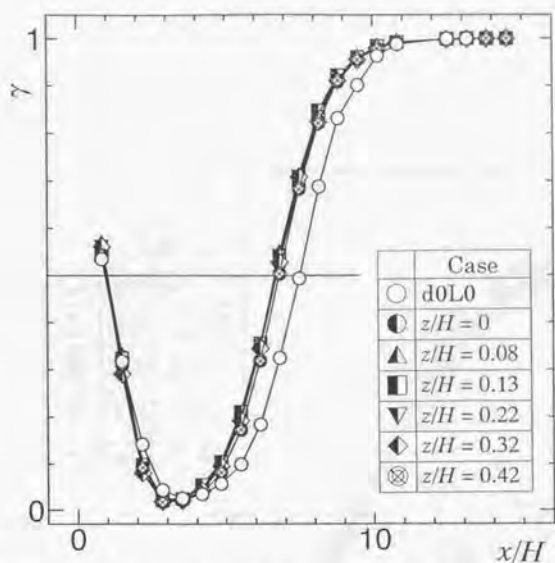


図 3.5.10 ステップ下流の順流率分布 (ボルテックス・ジェネレータ)

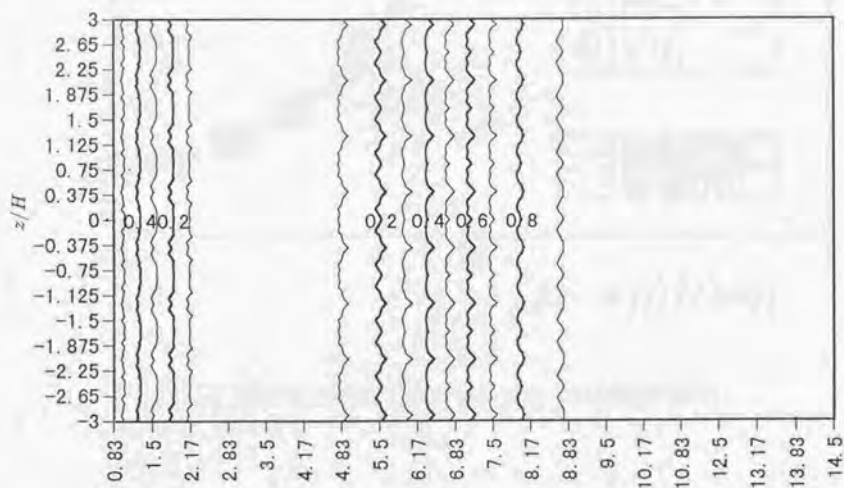


図 3.5.11 順流率のスパン方向分布 (ボルテックス・ジェネレータ)

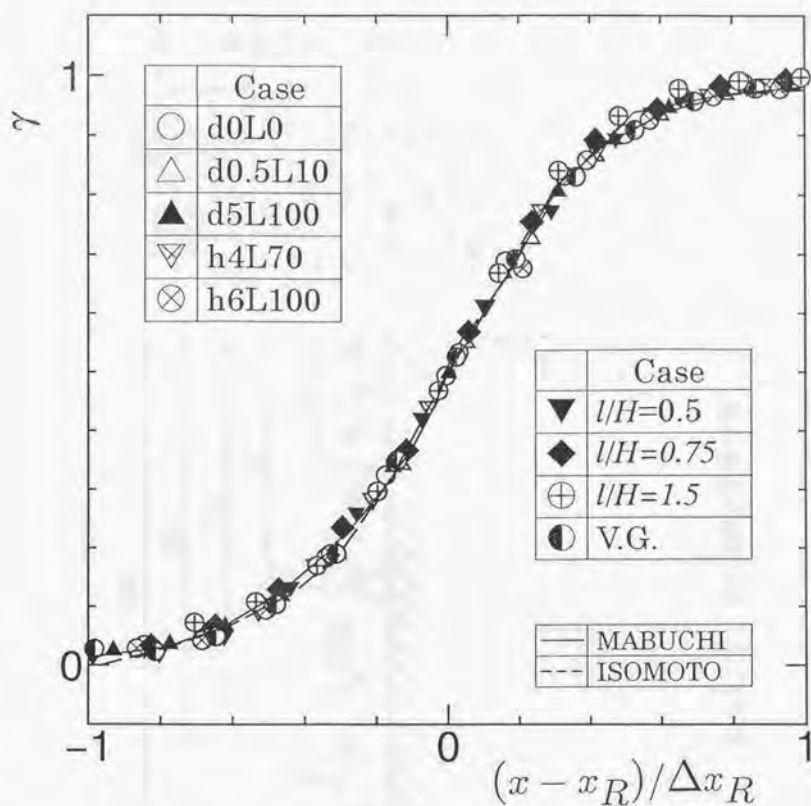


図 3.6.1 再付着点領域の幅で無次元化した順流率分布

Case	d mm	L mm
d0L0	0	0
d0.5L10	0.5	10
d1L25	1	25
d2.5L50	2.5	50
d2.5L70	2.5	70
d4L80	4	80
d5L100	5	100
d6L100	6	100

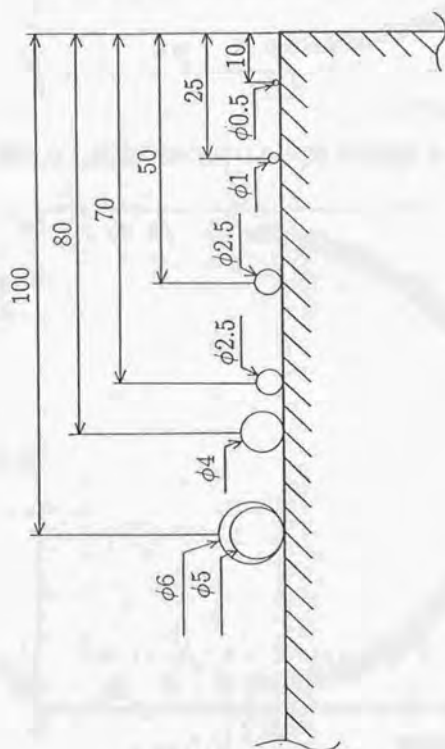


図 4.2.1 ロッドの直径と設置位置

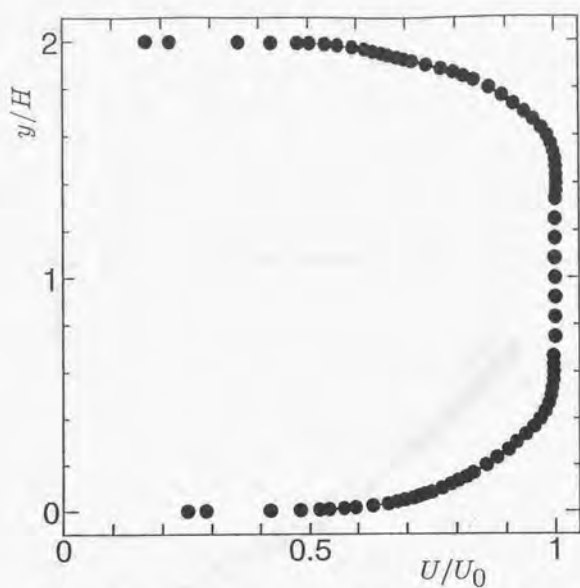


図 4.2.2 基準断面における時間平均速度分布 (ER=1.5)

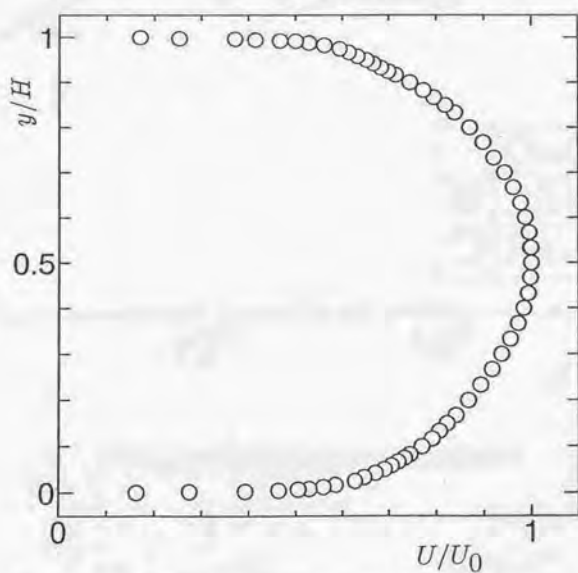


図 4.2.3 基準断面における時間平均速度分布 (ER=2.0)

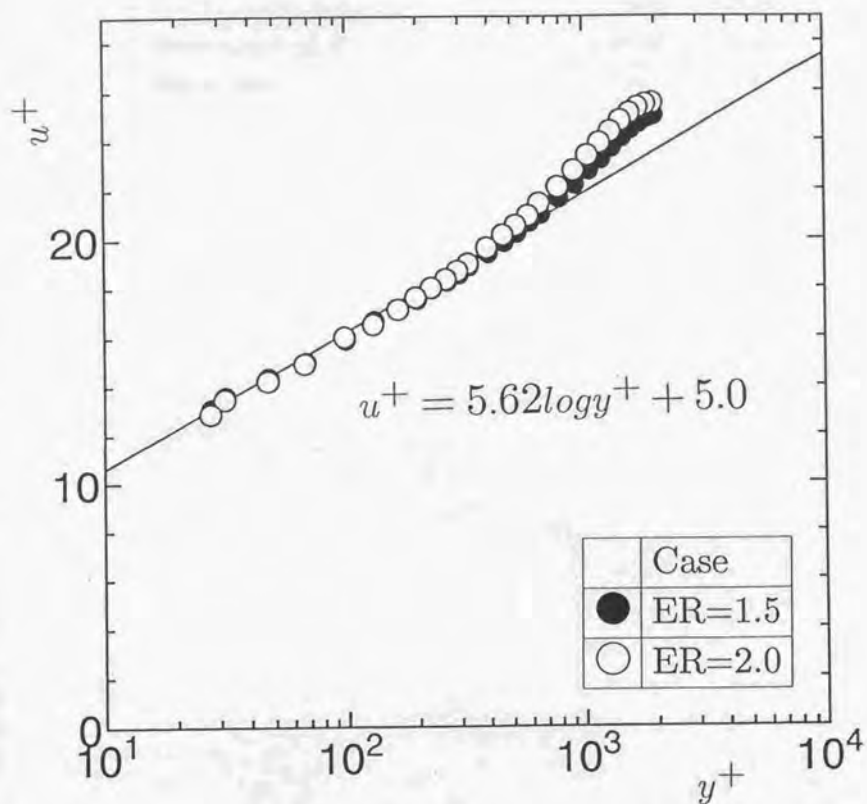


図 4.2.4 基準断面における対数速度分布

表 4.2.1 基準断面における境界層パラメータ

		Thinner	Thicker
Reynolds number	$Re_H = U_0 H / \nu$	10^5	10^5
Displacement thickness	δ^*	1.4mm	4.0mm
Momentum thickness	θ	1.0mm	2.9mm
Shape factor	$H_{12} = \delta^* / \theta$	1.4	1.4

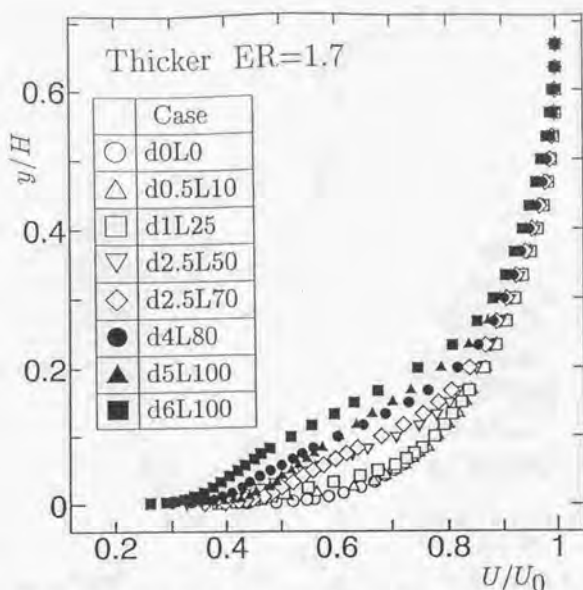


図 4.3.1 ステップ入口における時間平均速度分布 (ER=1.7)

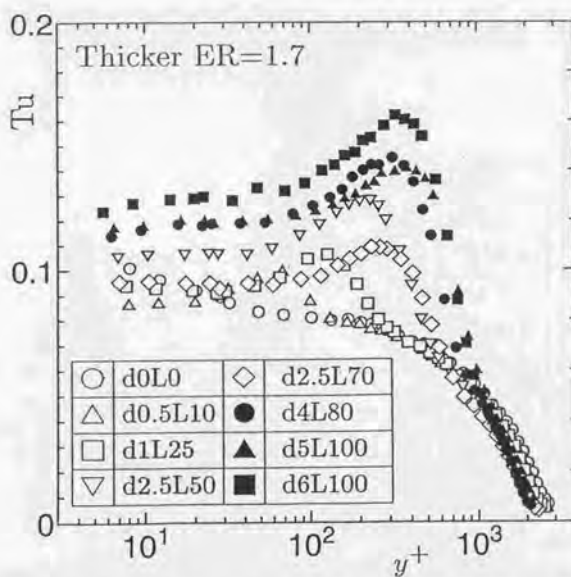


図 4.3.2 ステップ入口における乱れ強さ分布 (ER=1.7)

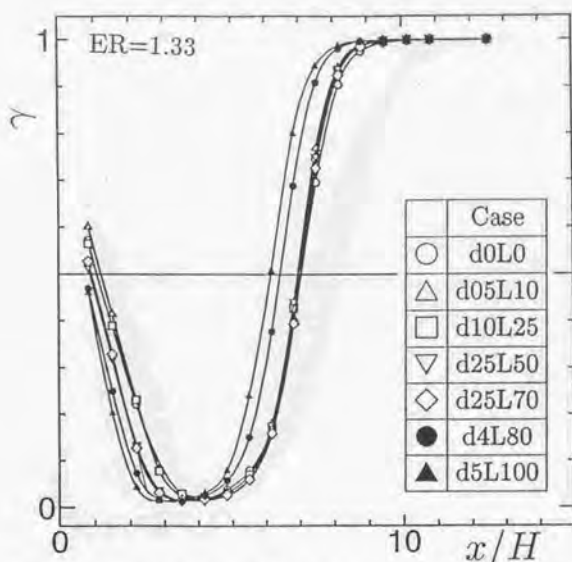


図 4.4.1 流入境界層厚さが薄い場合でのステップ下流の順流率分布 (ER=1.33)

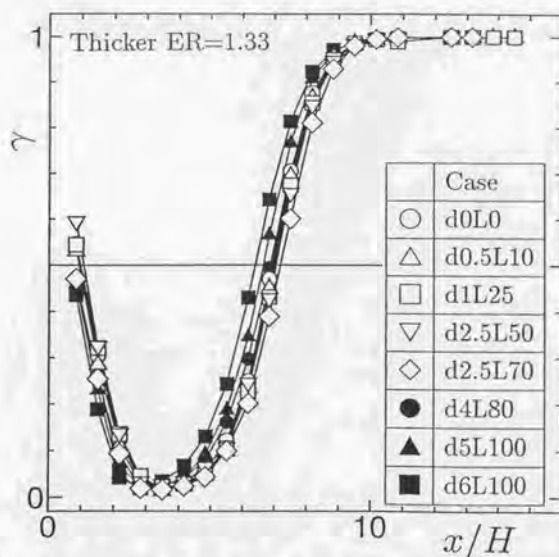


図 4.4.2 流入境界層厚さが厚い場合でのステップ下流の順流率分布 (ER=1.33)

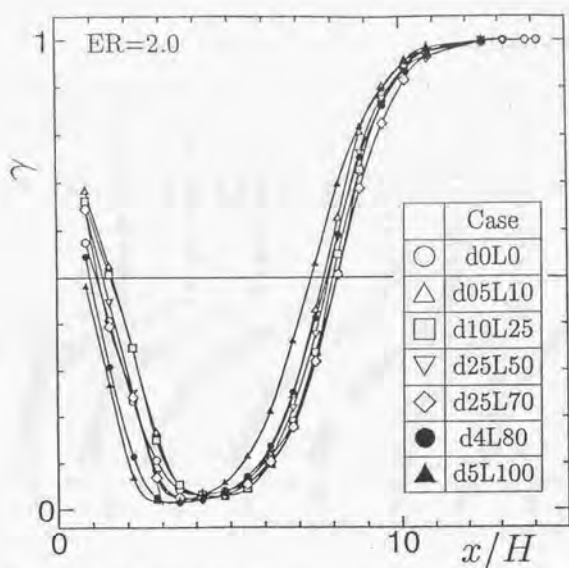


図4.4.3 流入境界層厚さが薄い場合でのステップ下流の順流率分布 (ER=2.0)

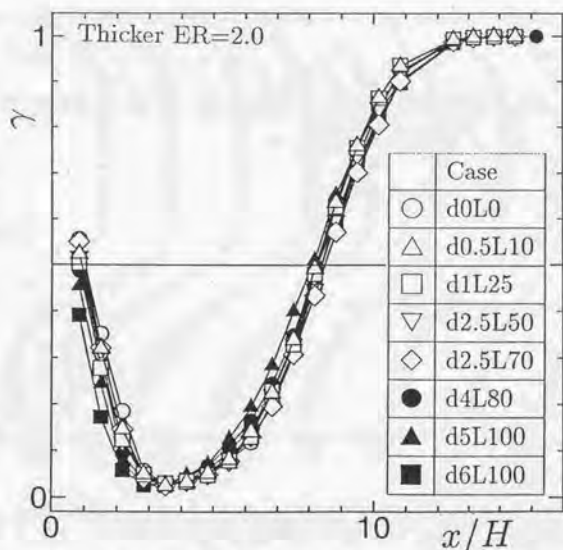


図4.4.4 流入境界層厚さが厚い場合でのステップ下流の順流率分布 (ER=2.0)

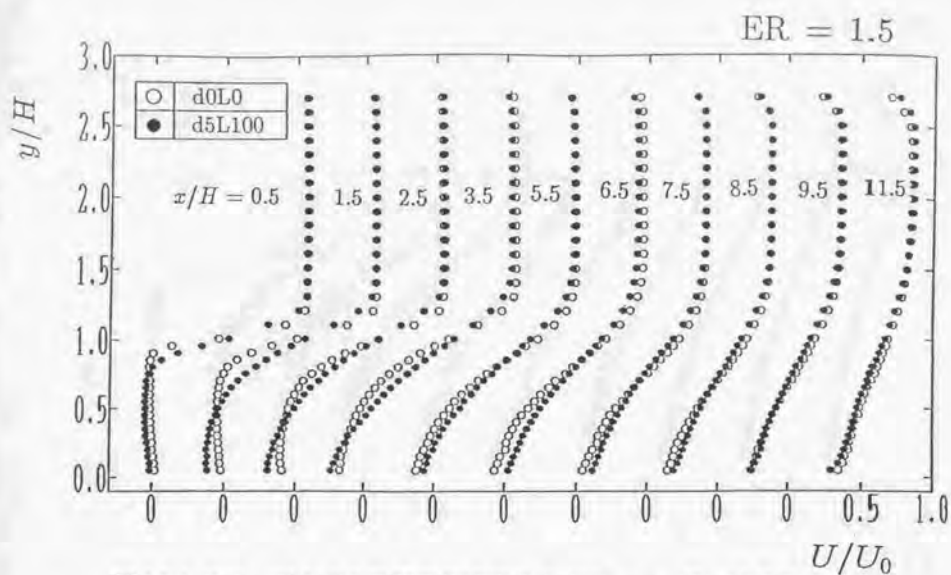


図4.5.1 ステップ下流の時間平均速度分布 (ER=1.5, 薄い境界層)

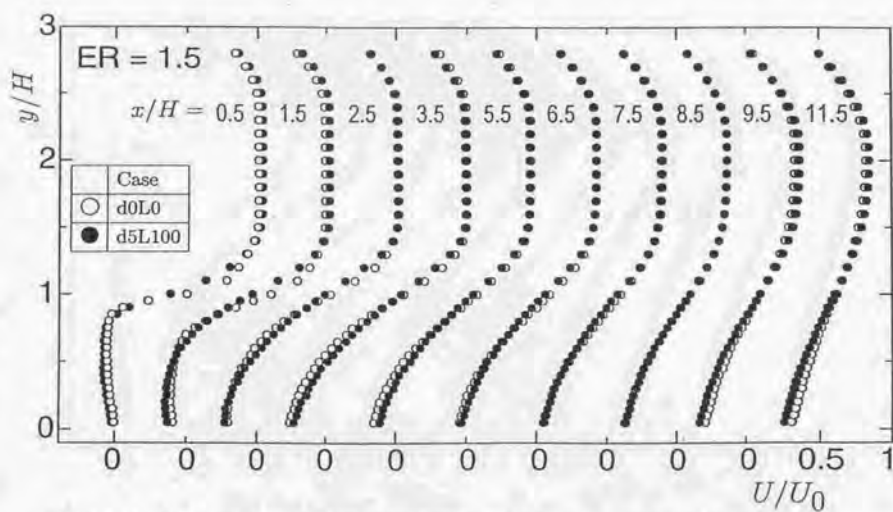


図4.5.2 ステップ下流の時間平均速度分布 (ER=1.5, 厚い境界層)

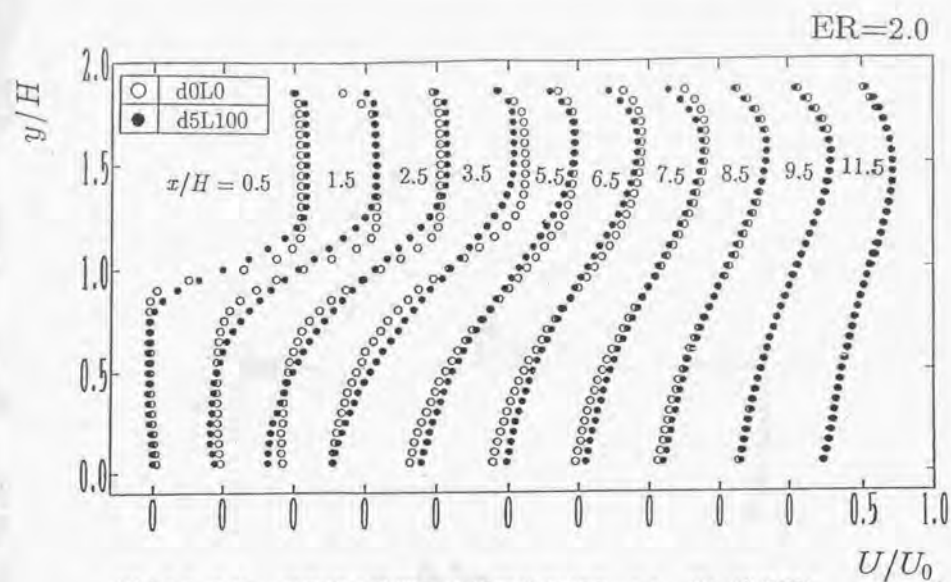


図 4.5.3 ステップ下流の時間平均速度分布 (ER=2.0, 薄い境界層)

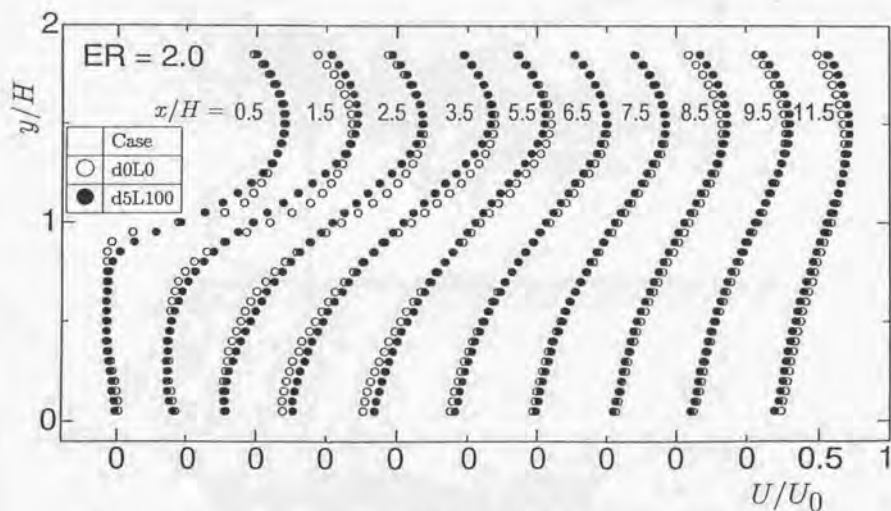


図 4.5.4 ステップ下流の時間平均速度分布 (ER=2.0, 厚い境界層)

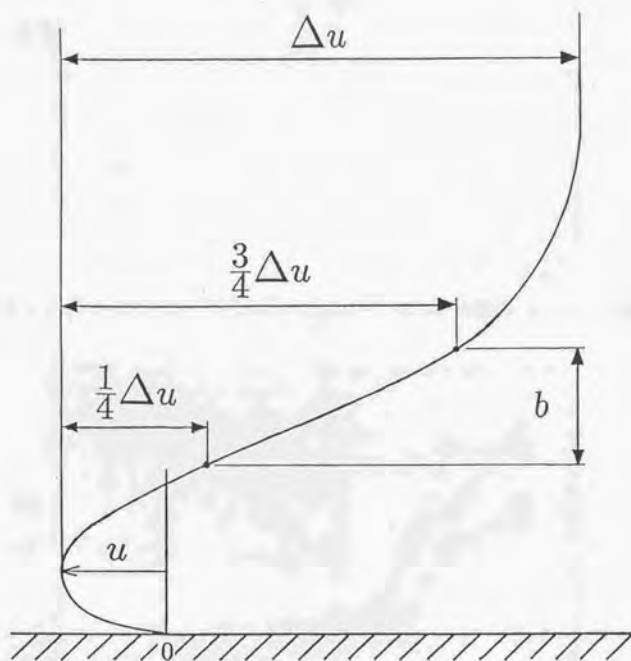


図 4.5.5 せん断層厚さ b/H の定義図

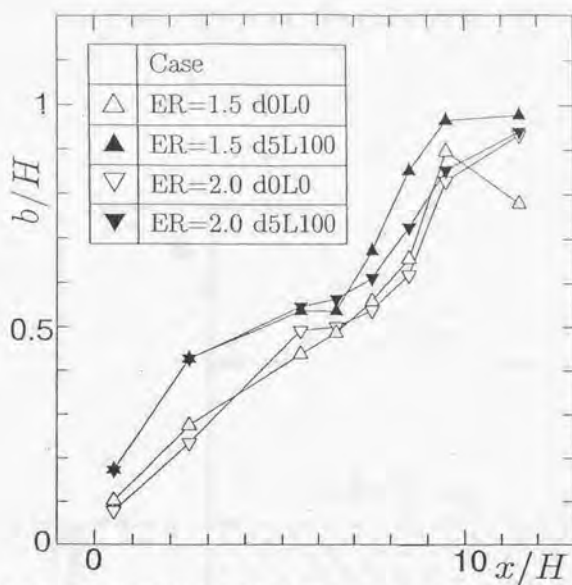


図 4.5.6 流入境界層厚さが薄い場合でのせん断層厚さ b/H の変化

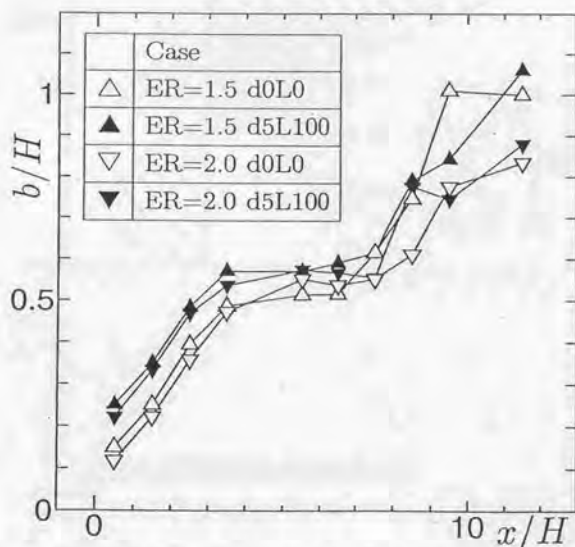


図 4.5.7 流入境界層厚さが厚い場合でのせん断層厚さ b/H の変化

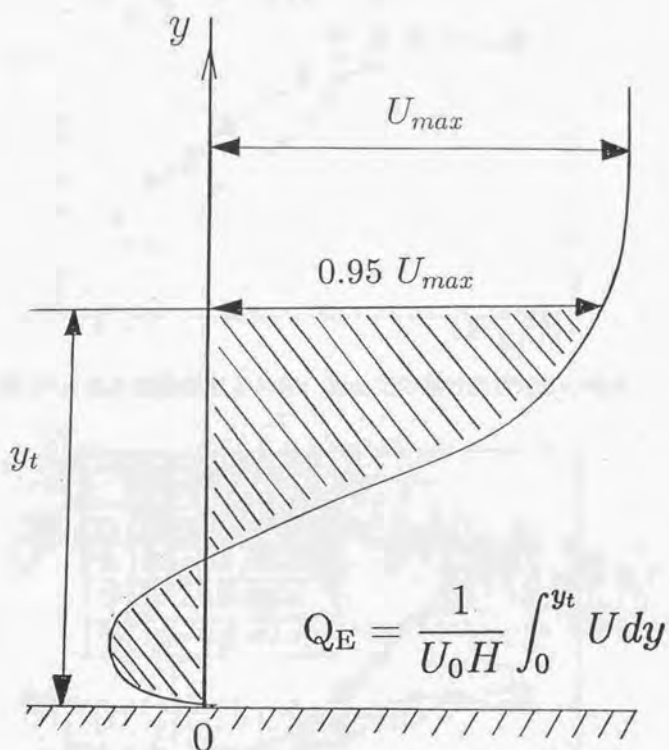


図 4.6.1 連行流量 Q_E の定義図

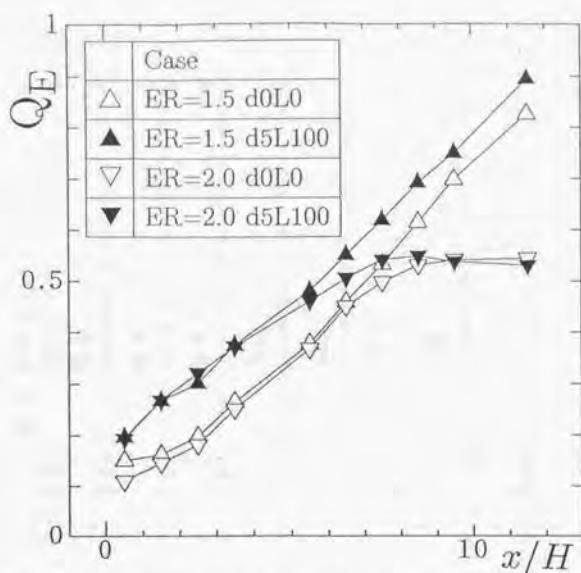


図 4.6.2 流入境界層厚さが薄い場合での連行流量 Q_F の変化

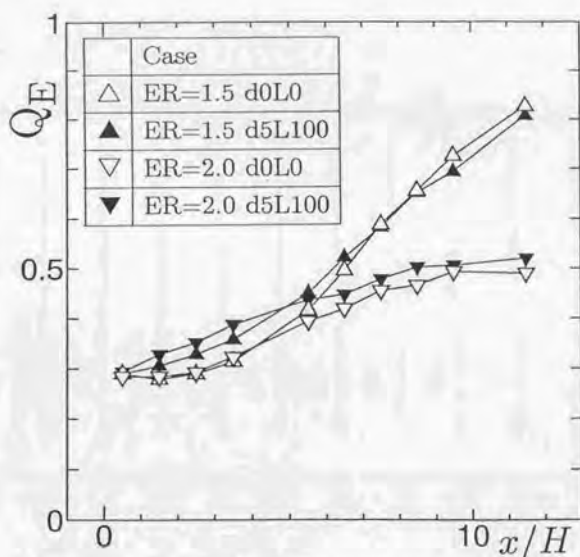


図 4.6.3 流入境界層厚さが厚い場合での連行流量 Q_F の変化

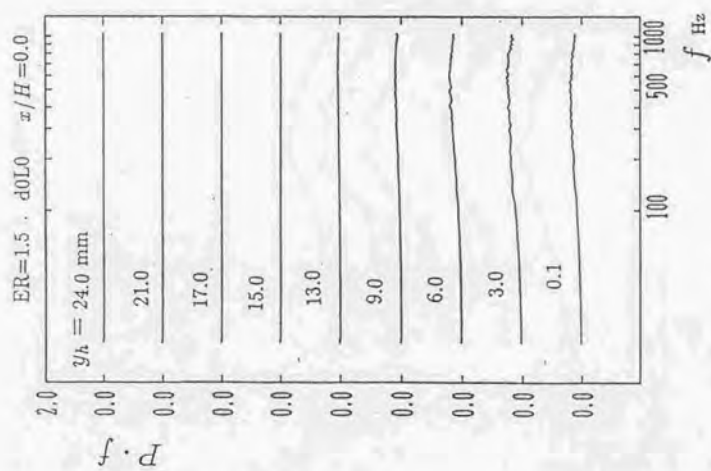


図 5.2.1 パワースペクトル密度 ($x/H=0.0$)

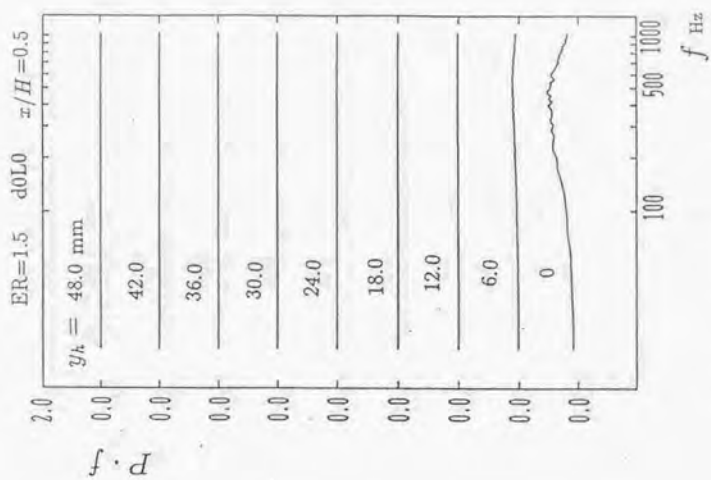


図 5.2.2 パワースペクトル密度 ($x/H=0.5$)

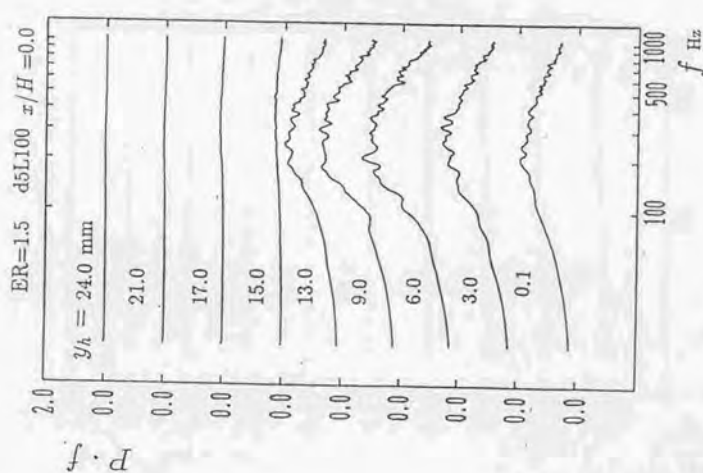


図 5.2.3 パワースペクトル密度 ($x/H=0.0$)

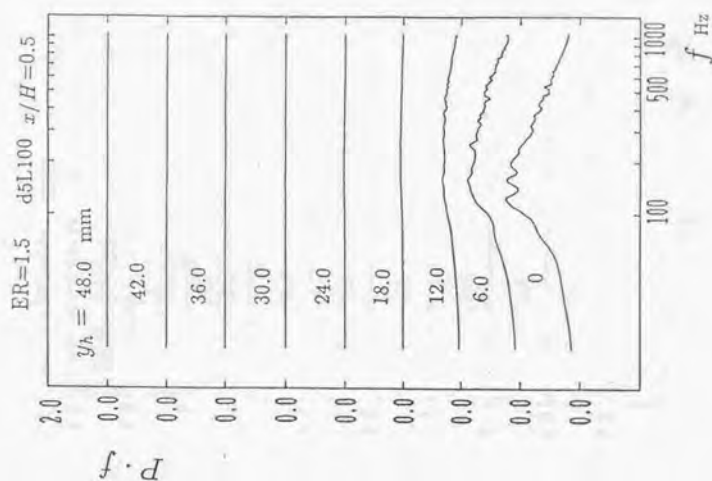


図 5.2.4 パワースペクトル密度 ($x/H=0.5$)

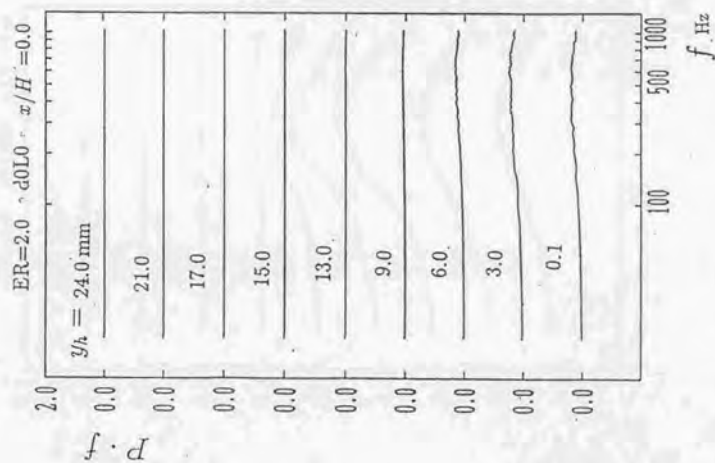


図 5.2.5 パワースペクトル密度 ($x/H=0.0$)

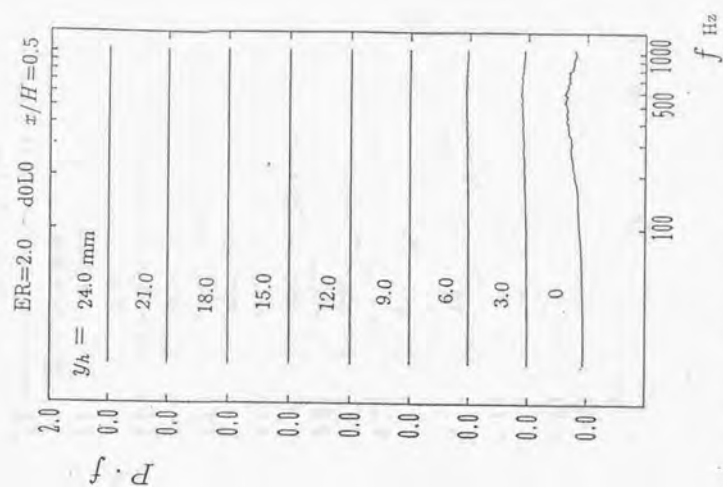


図 5.2.6 パワースペクトル密度 ($x/H=0.5$)

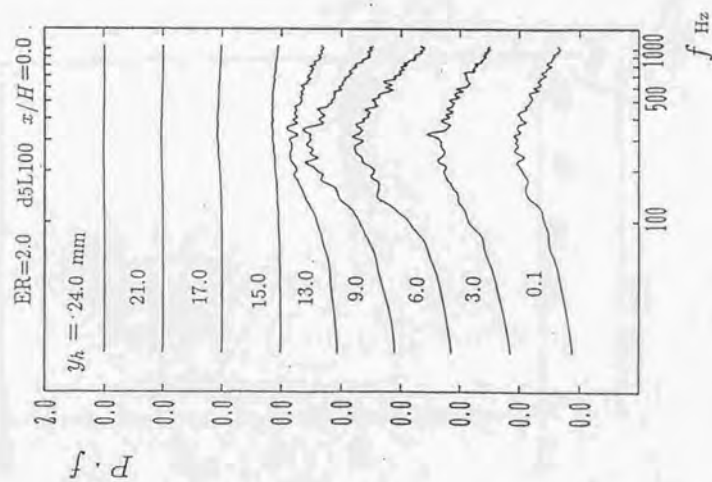


図 5.2.7 パワースペクトル密度 ($x/H=0.0$)

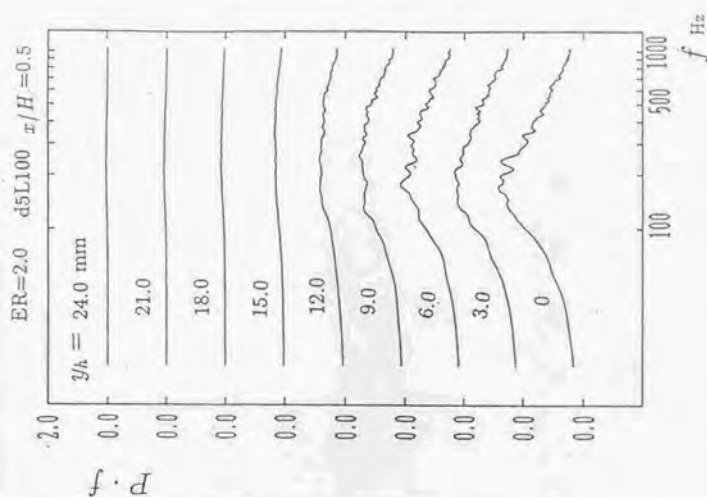


図 5.2.8 パワースペクトル密度 ($x/H=0.5$)

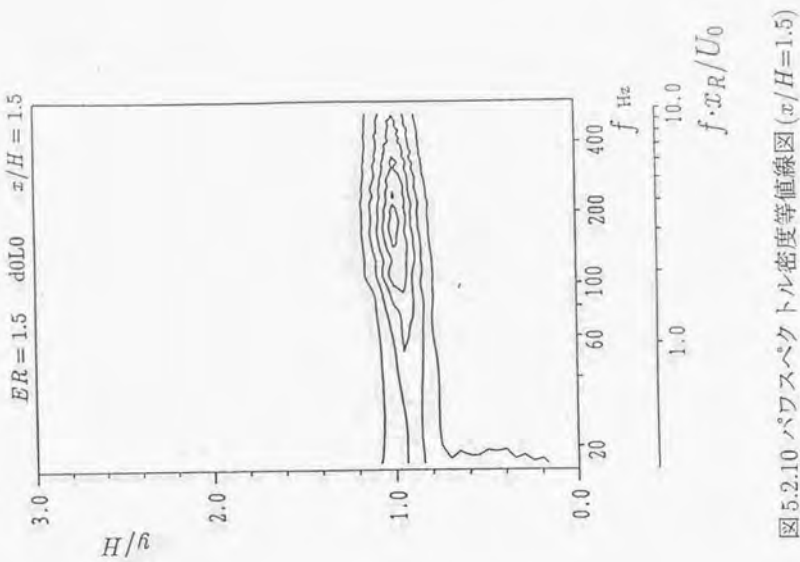


図 5.2.9 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)

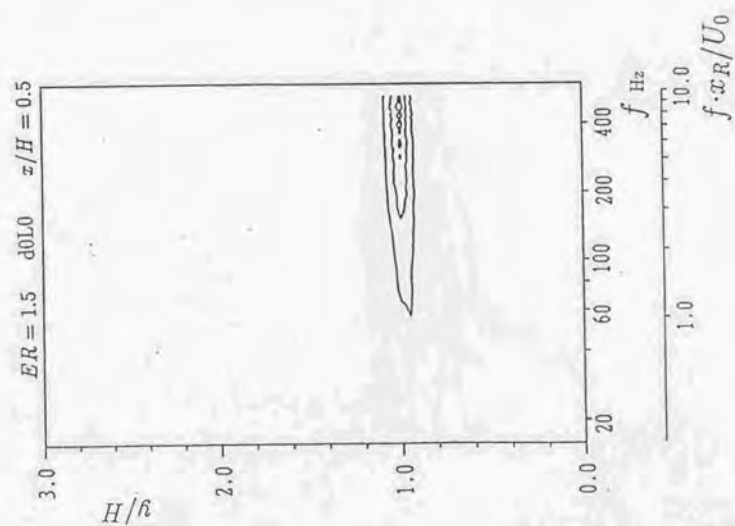


図 5.2.10 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)

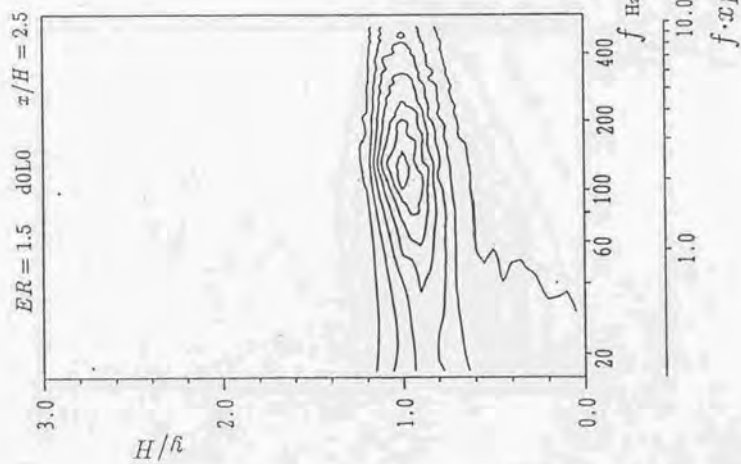


図 5.2.11 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)

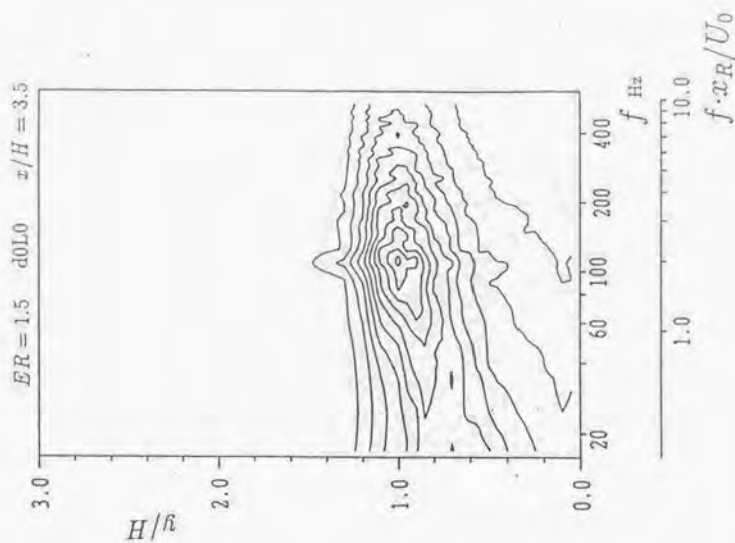


図 5.2.12 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)

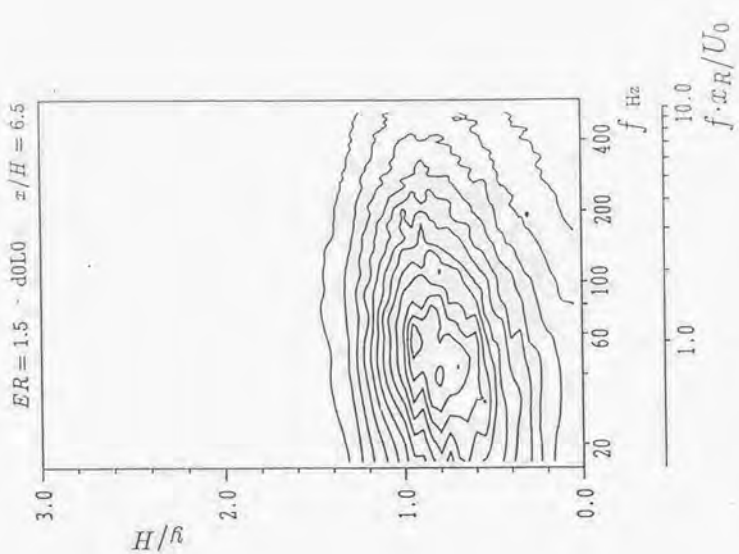


図 5.2.14 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)

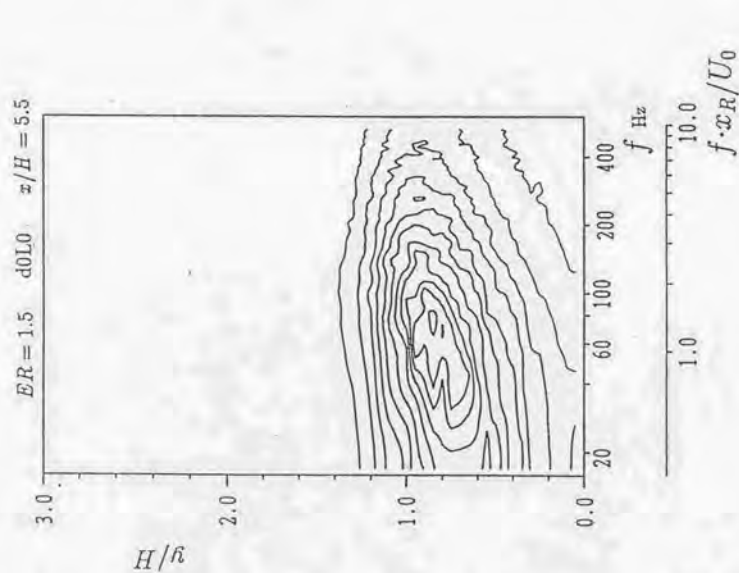


図 5.2.13 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)

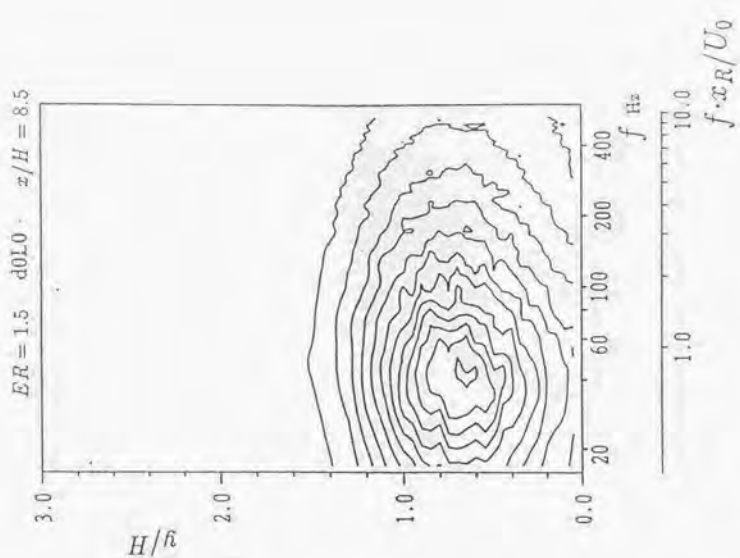


図 5.2.16 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)

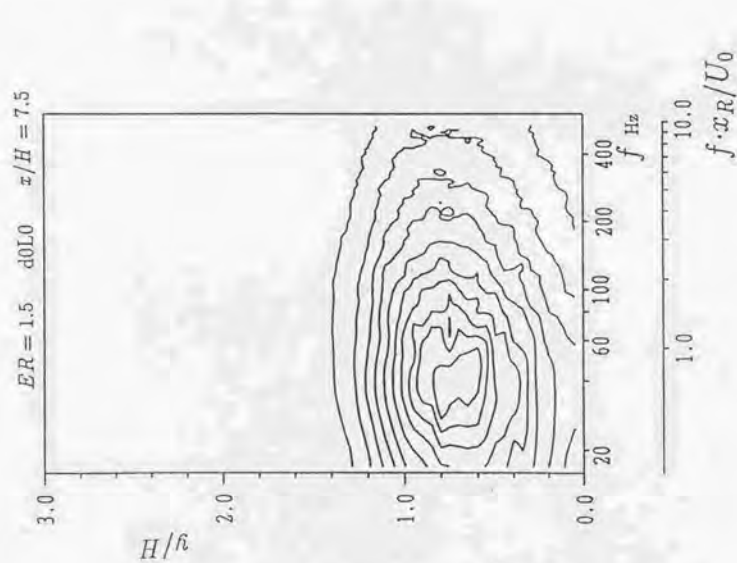


図 5.2.15 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)

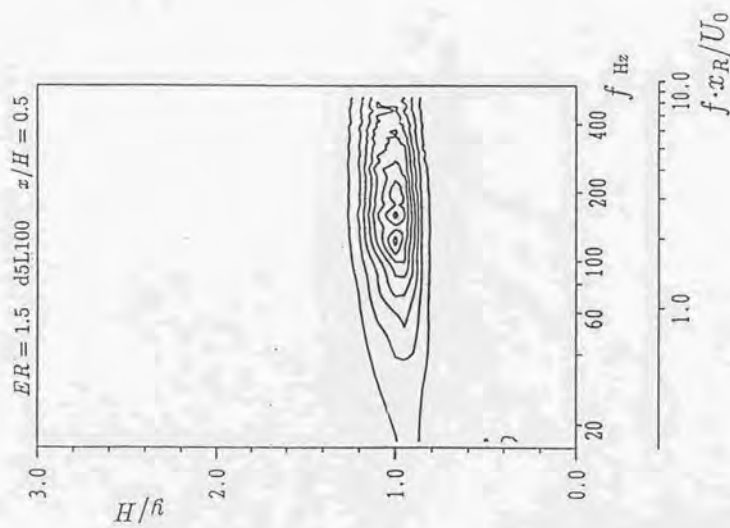


図 5.2.17 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)

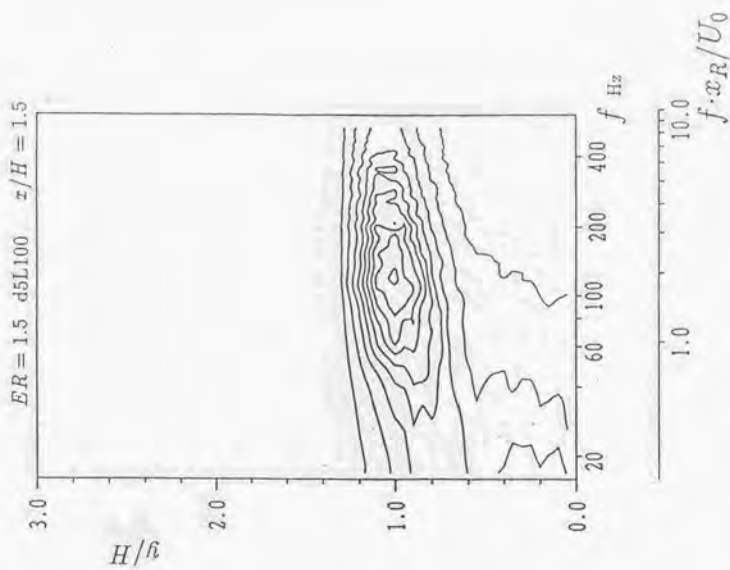


図 5.2.18 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)

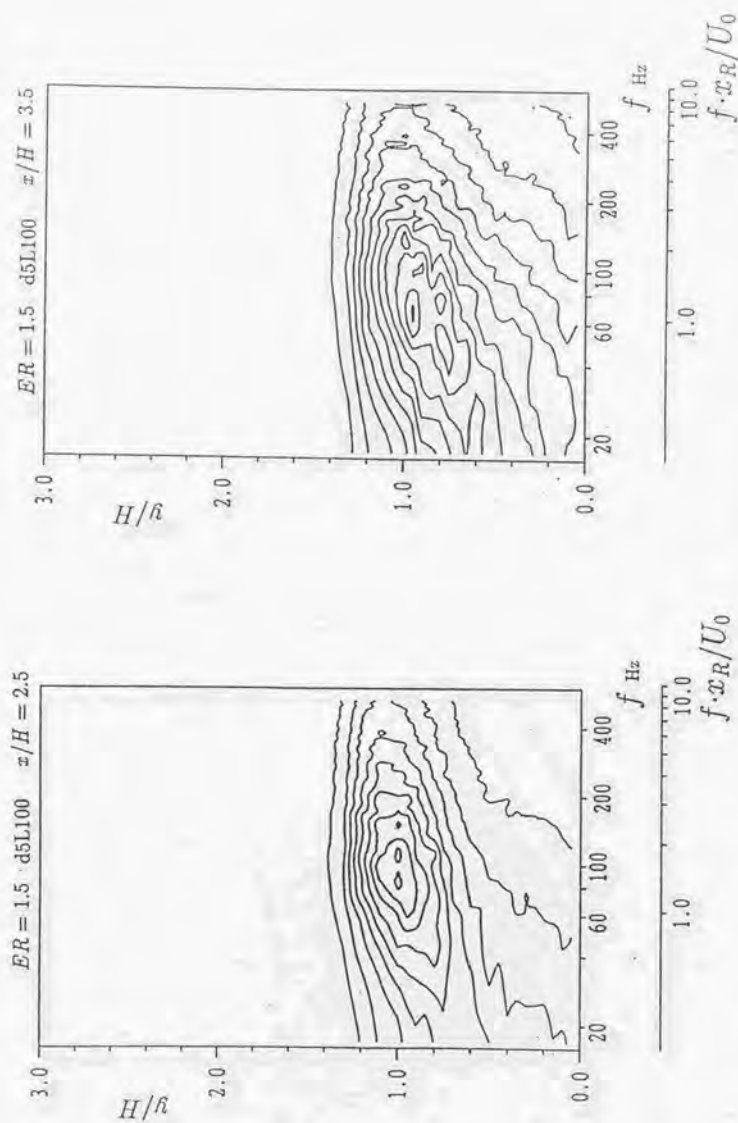


図 5.2.19 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)

図 5.2.20 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)

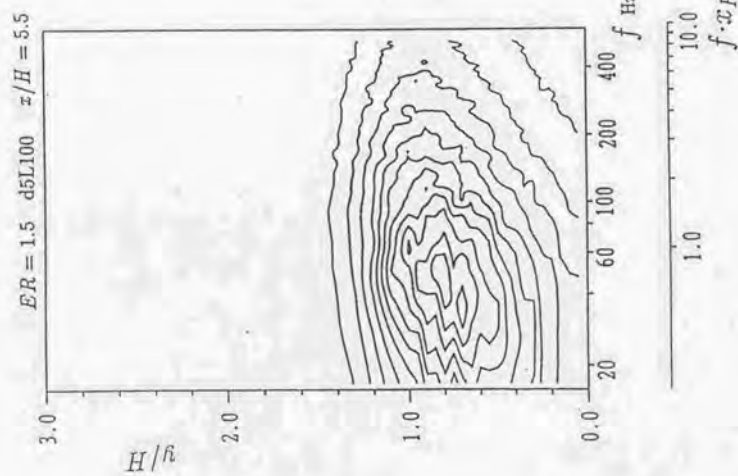


図 5.2.21 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H = 5.5$)

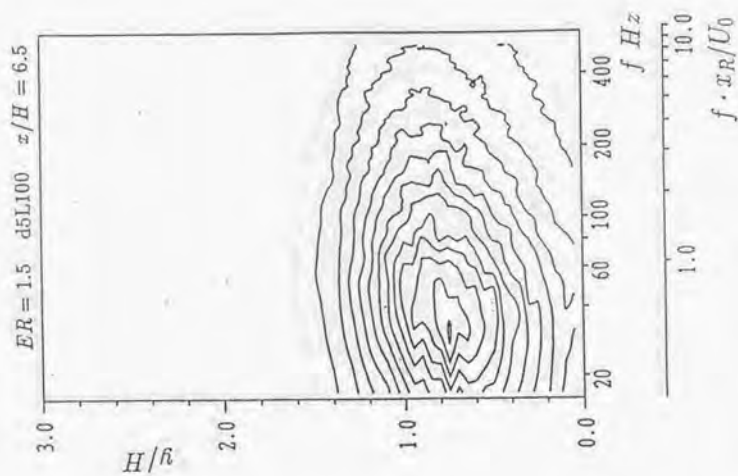


図 5.2.22 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H = 6.5$)

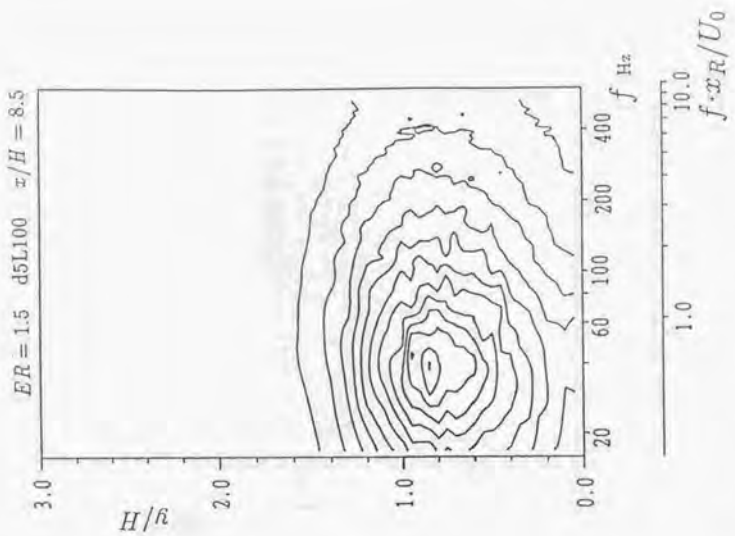


図 5.2.23 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)

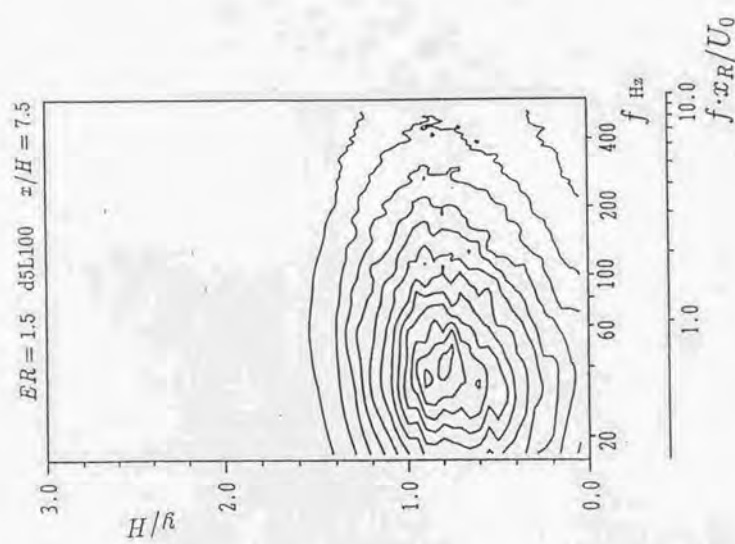


図 5.2.24 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)

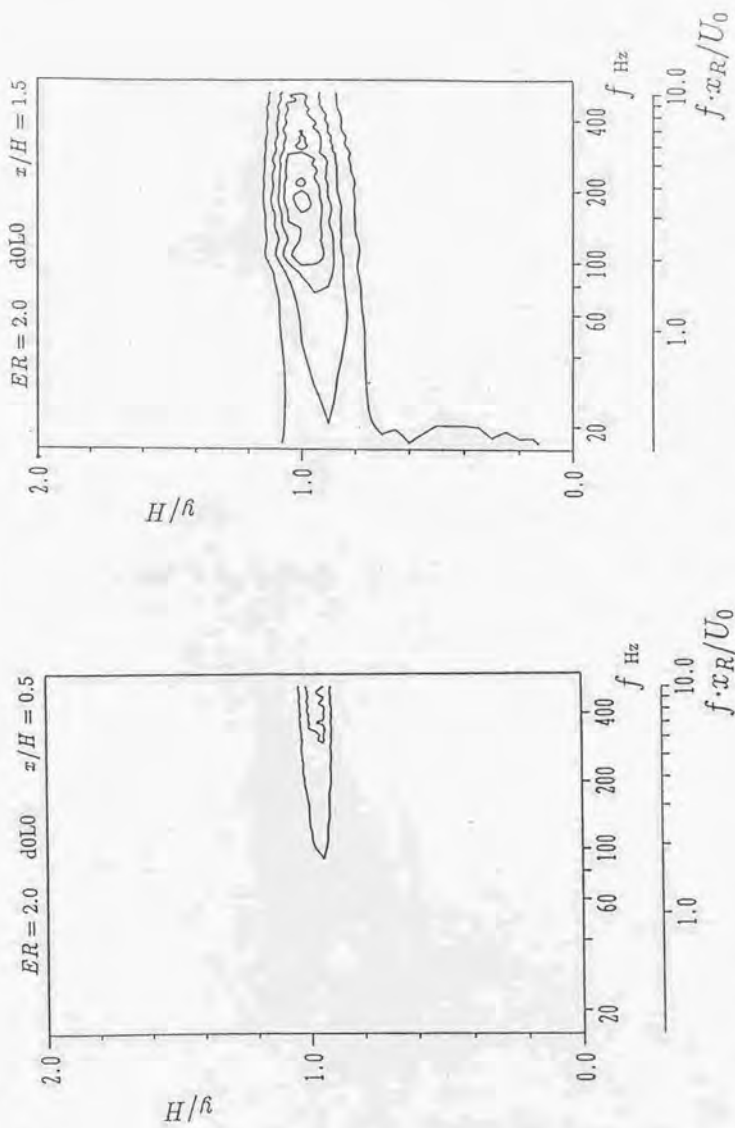


図 5.2.25 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)

図 5.2.26 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)

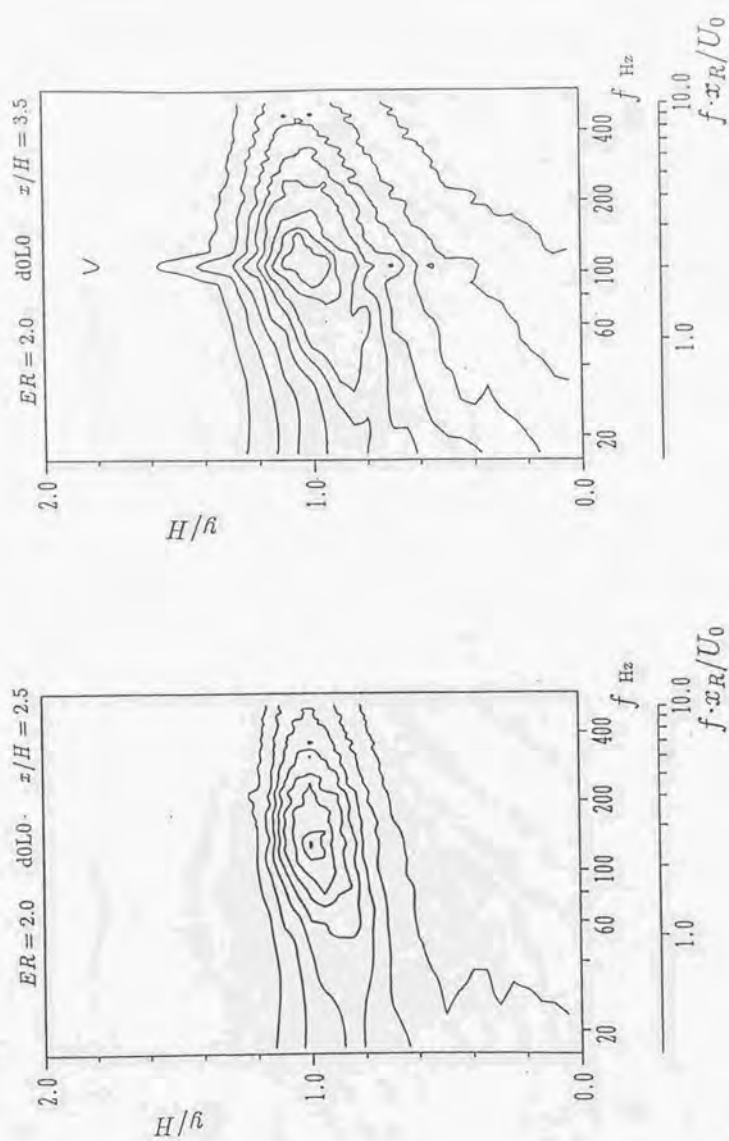


図 5.2.27 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)

図 5.2.28 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)

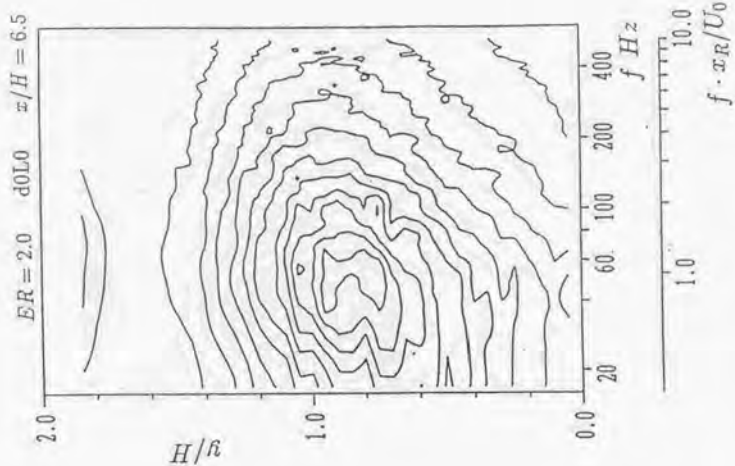


図 5.2.29 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)

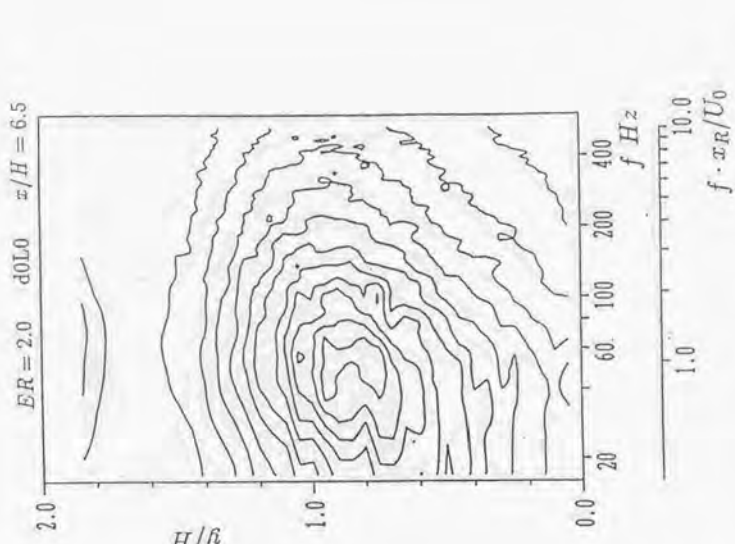


図 5.2.30 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)

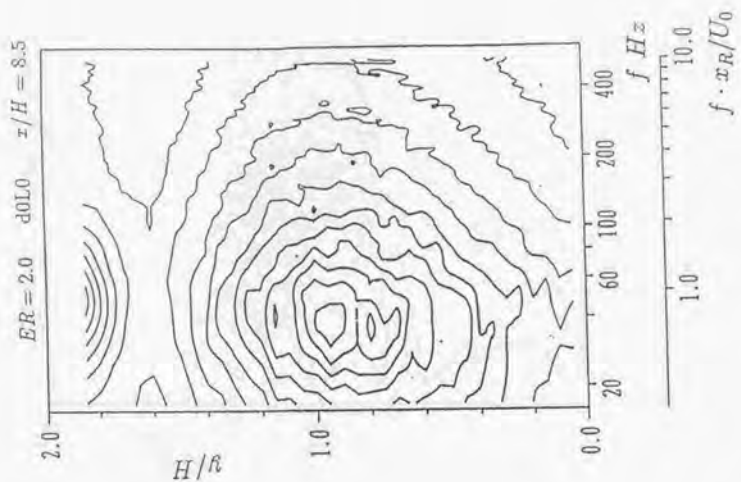


図 5.2.31 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)

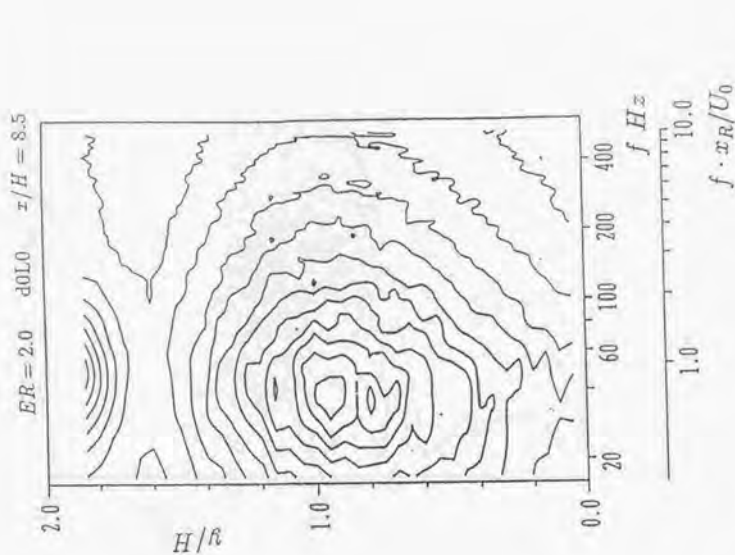


図 5.2.32 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)

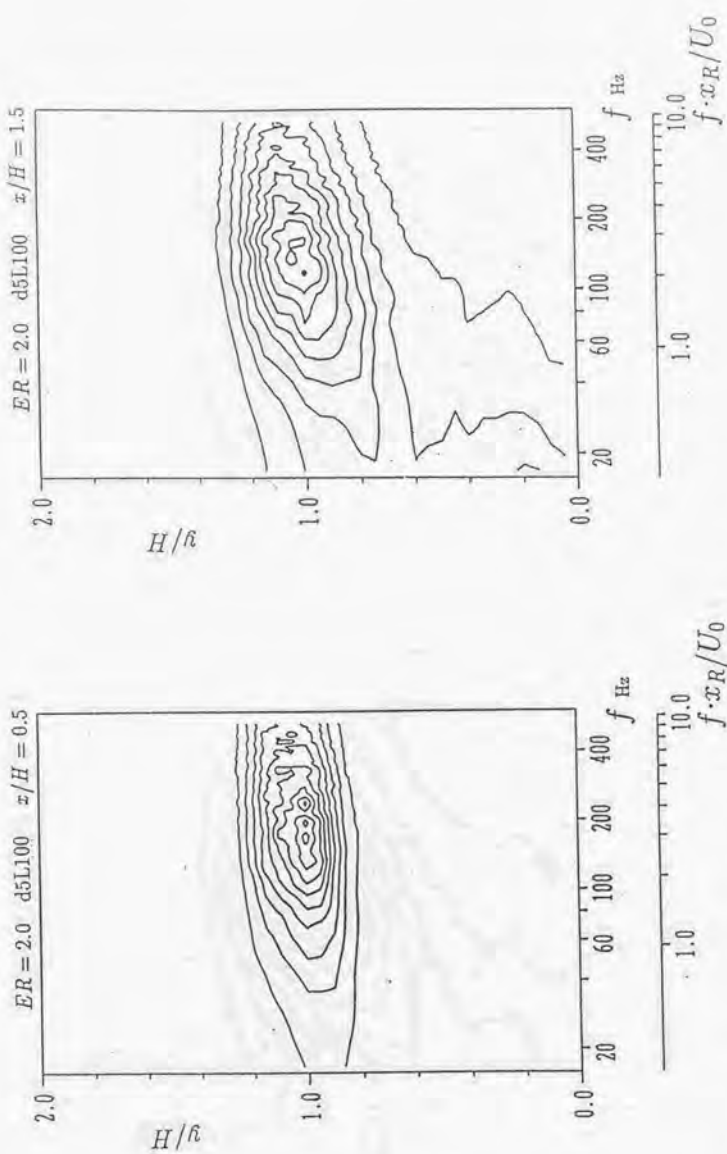


図 5.2.33 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=0.5$)

図 5.2.34 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=1.5$)

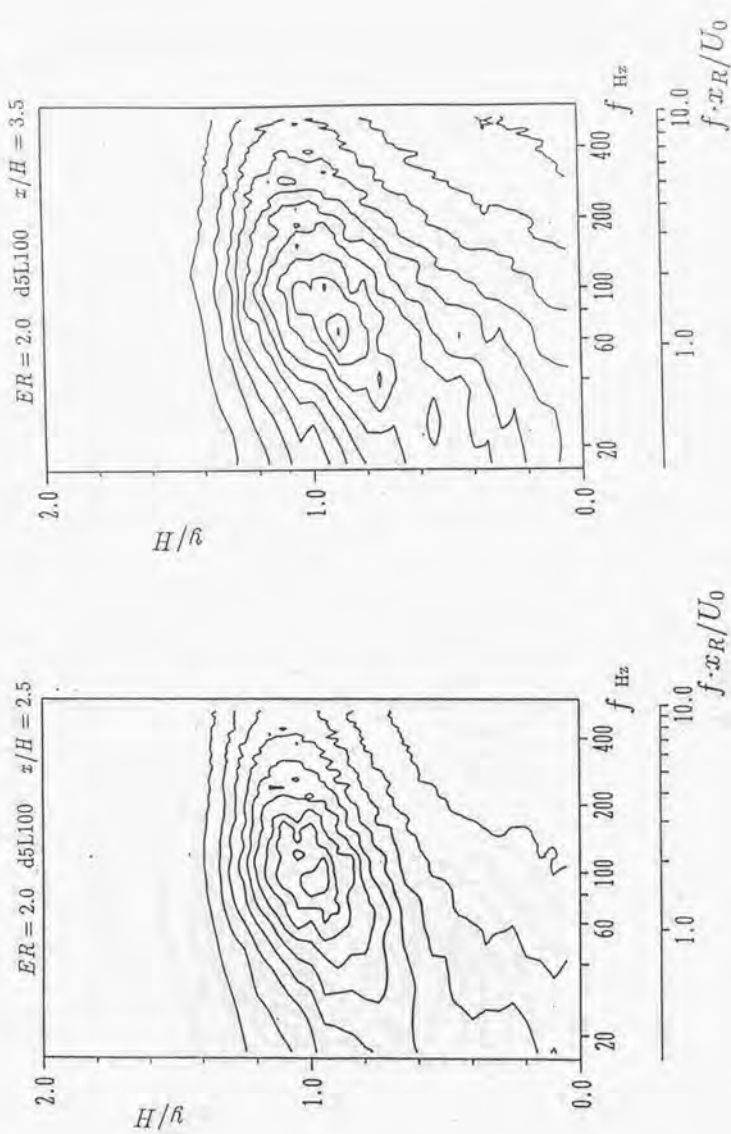


図5.2.35 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=2.5$)

図5.2.36 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=3.5$)

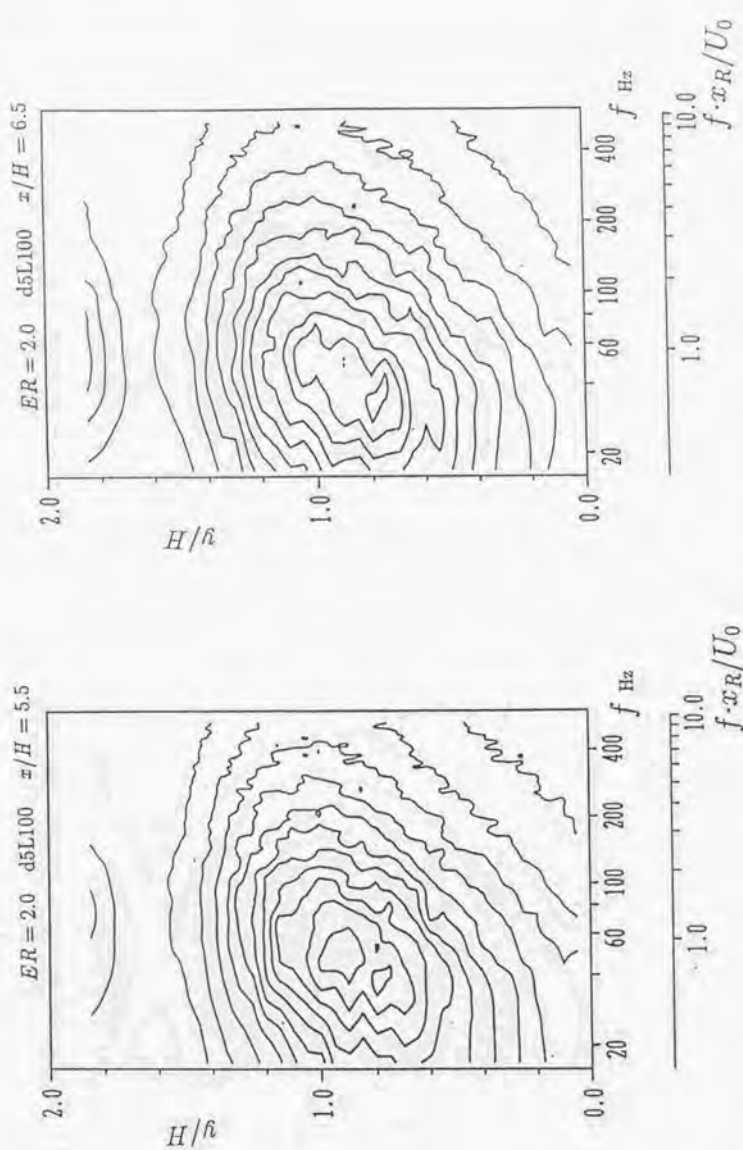


図 5.2.37 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=5.5$)

図 5.2.38 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=6.5$)

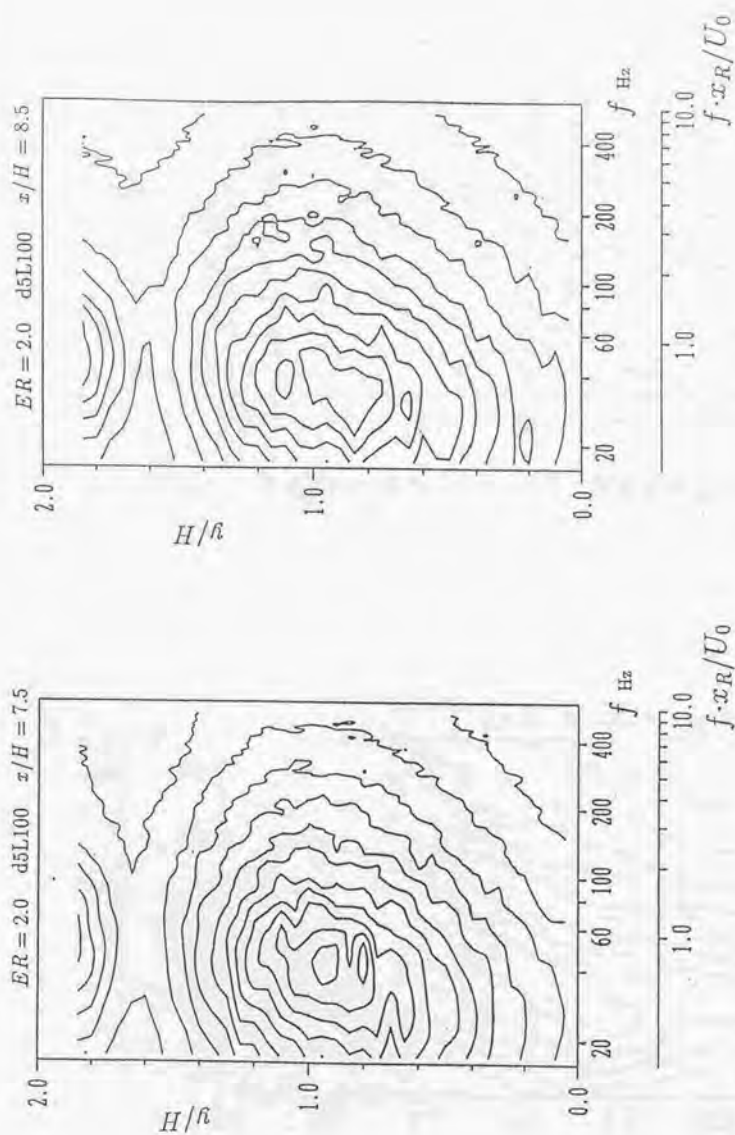


図 5.2.39 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=7.5$)

図 5.2.40 パワースペクトル密度等値線図 ($x/H=8.5$)

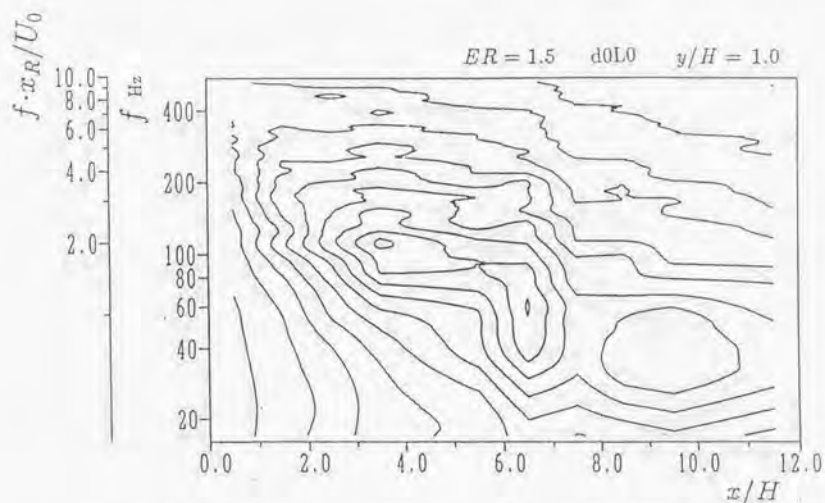


図5.2.41 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H = 1.0$)

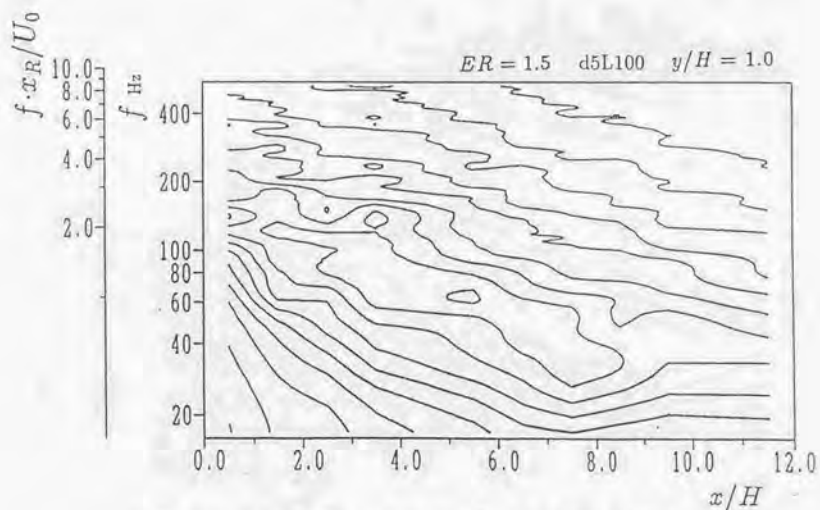


図5.2.42 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H = 1.0$)

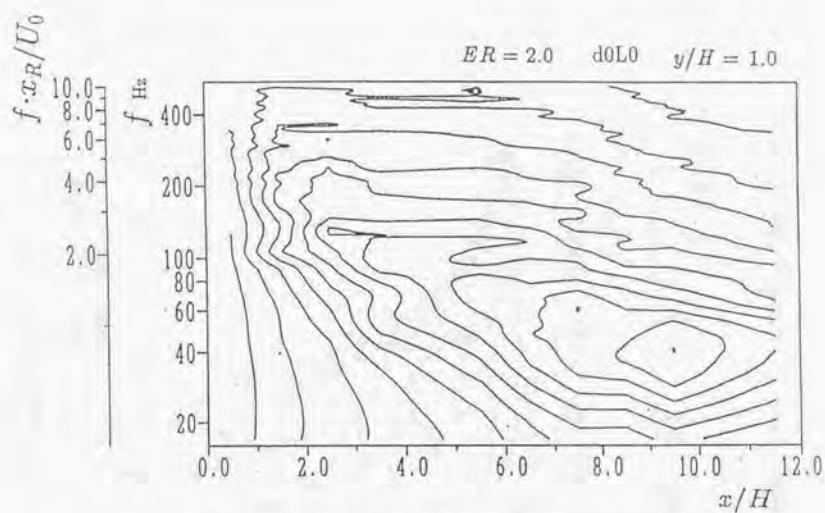


図 5.2.43 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H = 1.0$)

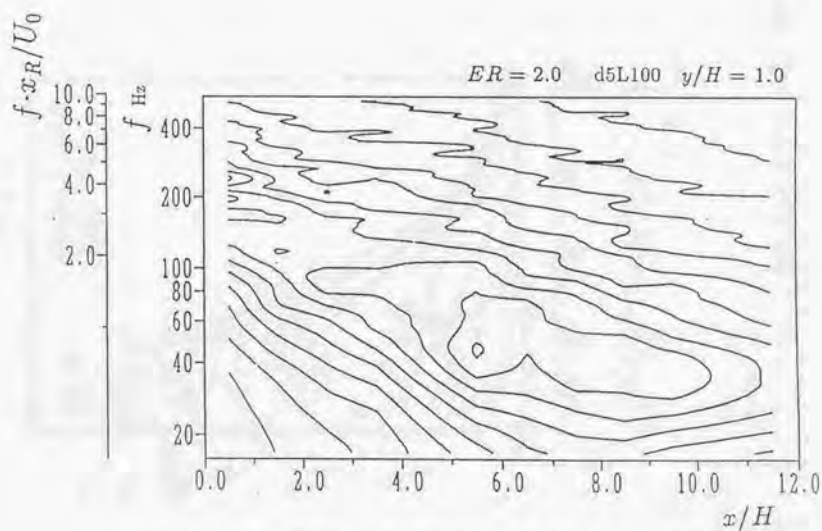


図 5.2.44 下流断面に渡るパワースペクトル等値線図 ($y/H = 1.0$)

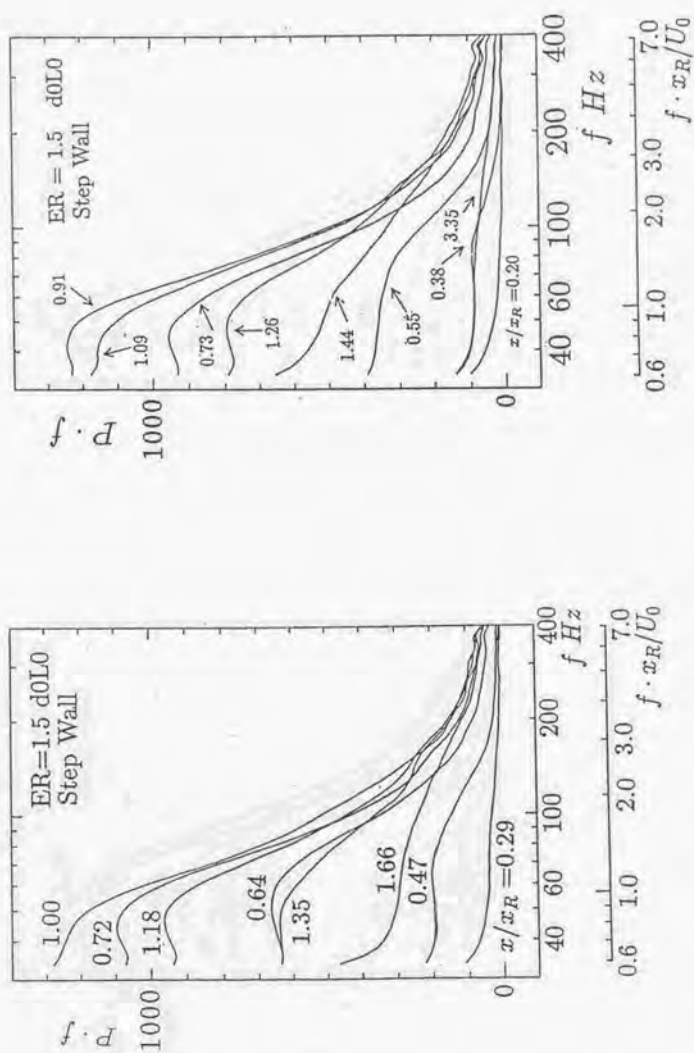


図 5.2.45 ステップ壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 ($ER=1.5$)

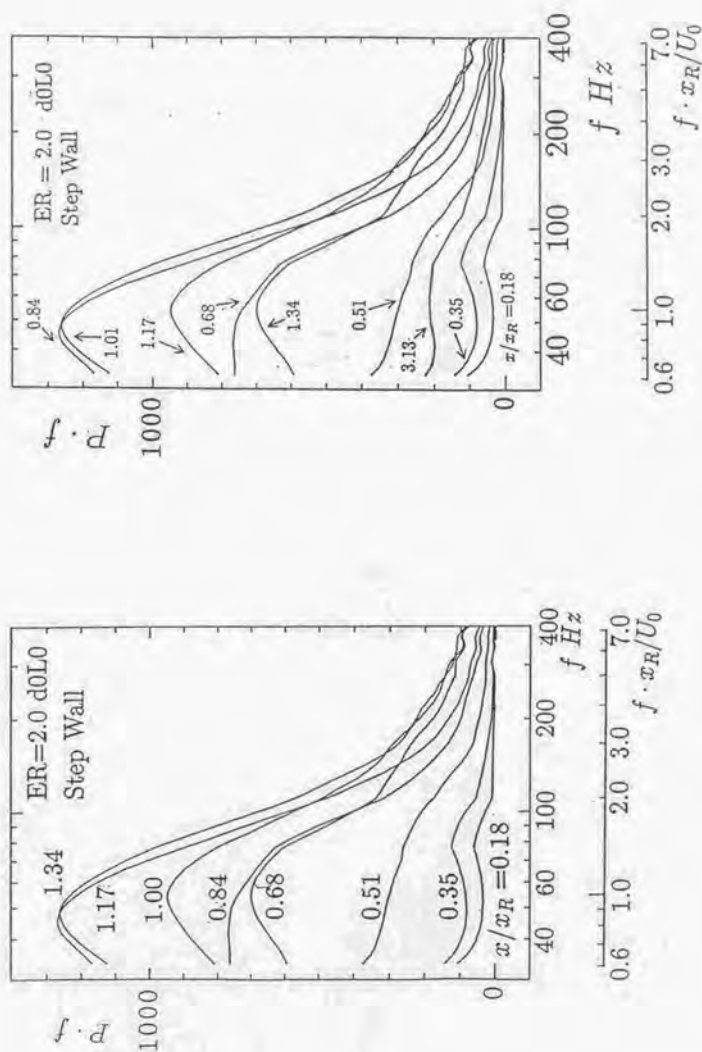


図 5.2.46 ステップ壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 ($ER=2.0$)

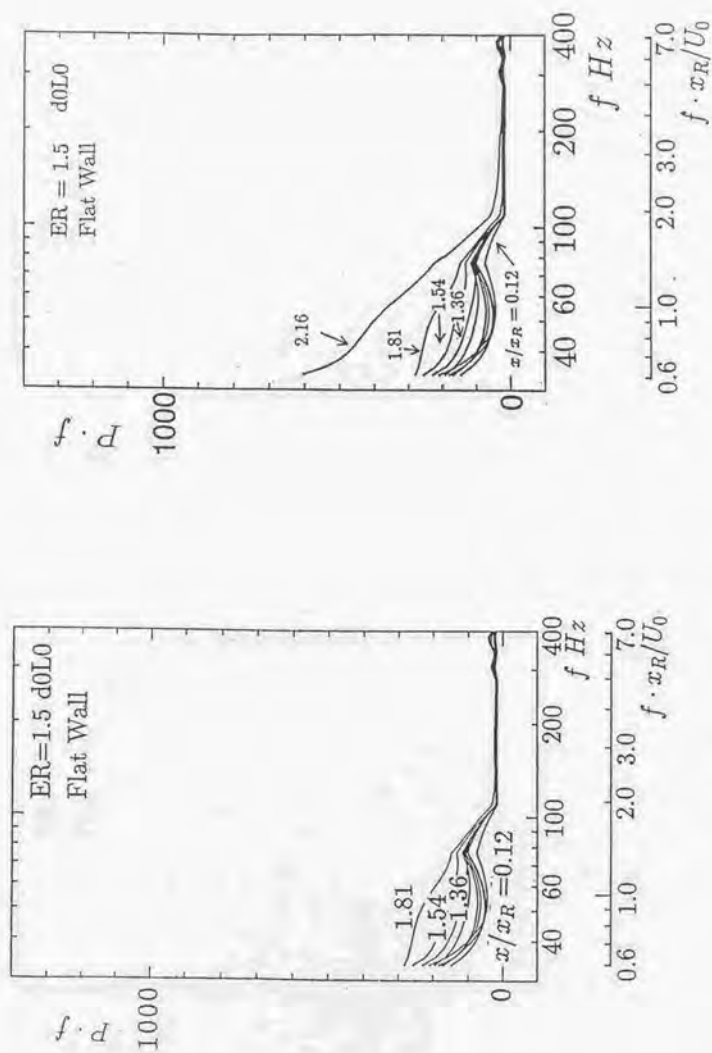


図 5.2.47 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=1.5)

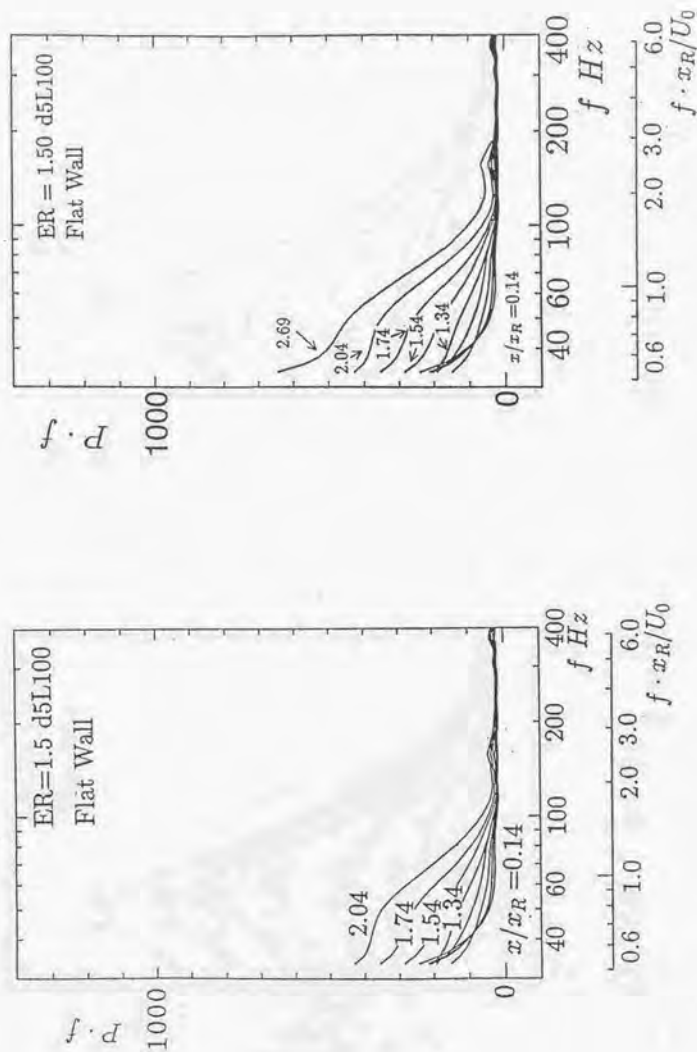


図 5.2.48 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=1.5)

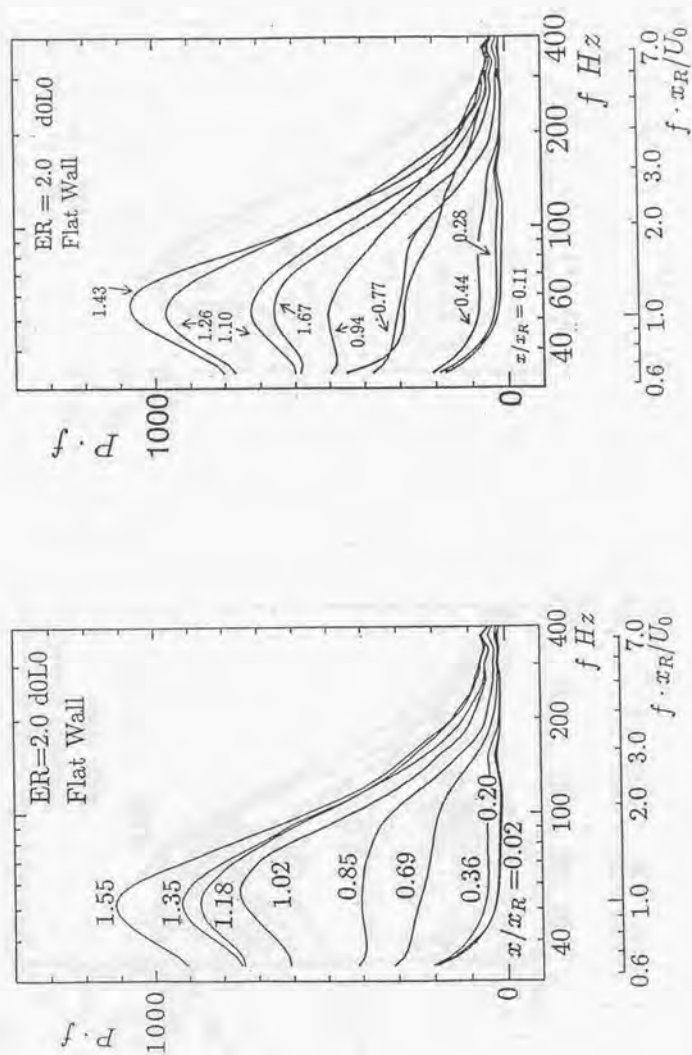


図 5.2.49 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 ($ER=2.0$)

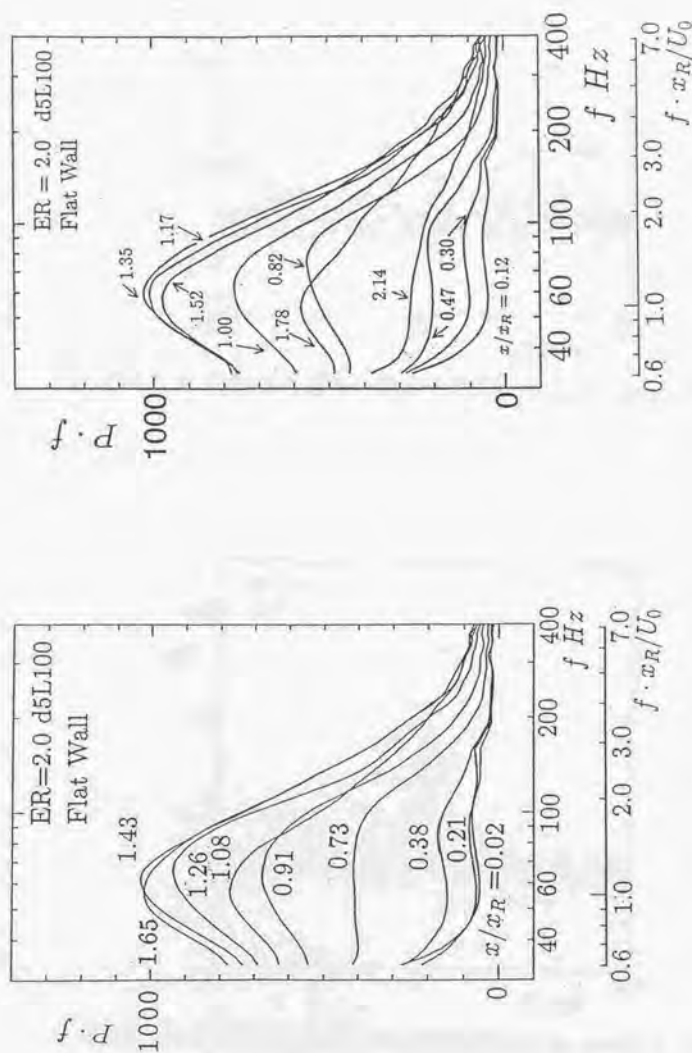


図 5.2.50 フラット壁における壁面圧力変動のパワースペクトル密度 (ER=2.0)

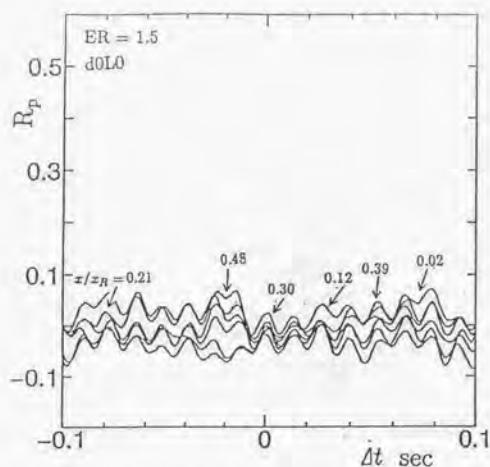


図 5.2.51 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.21 \sim 0.48$)

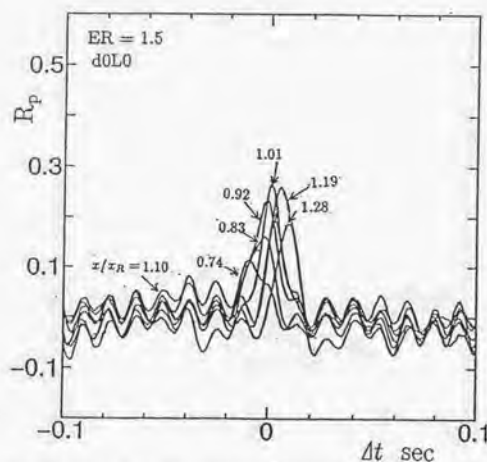


図 5.2.52 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.74 \sim 1.28$)

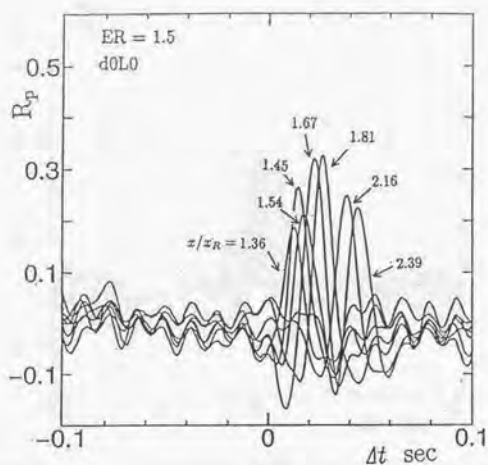


図5.2.53 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.36 \sim 2.39$)

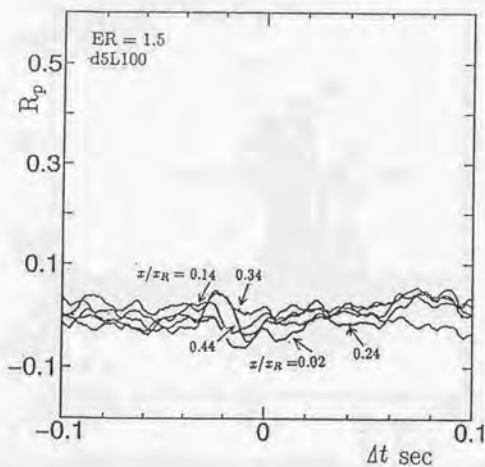


図5.2.54 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.44$)

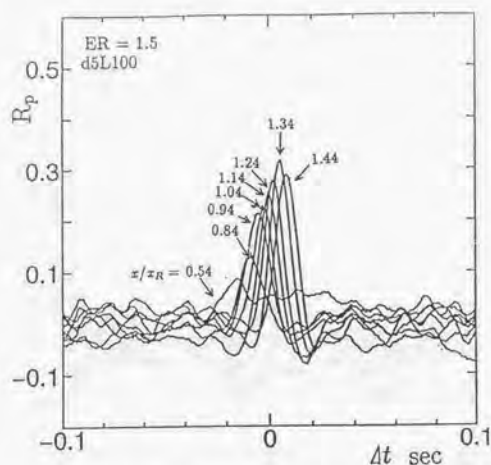


図 5.2.55 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.54 \sim 1.44$)

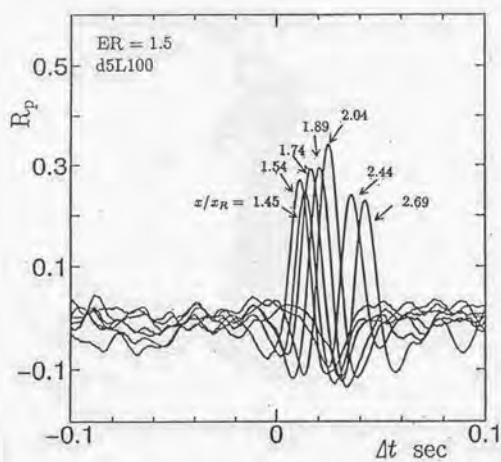


図 5.2.56 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.45 \sim 2.69$)

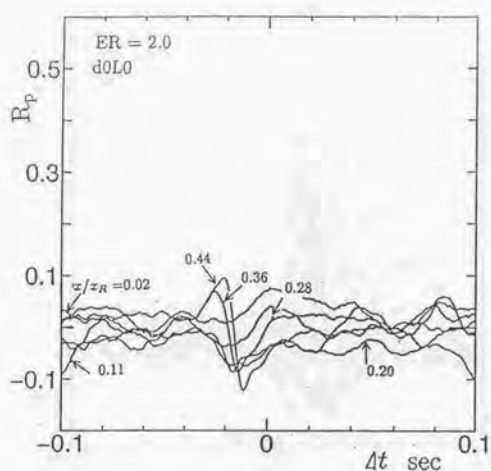


図 5.2.57 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.44$)

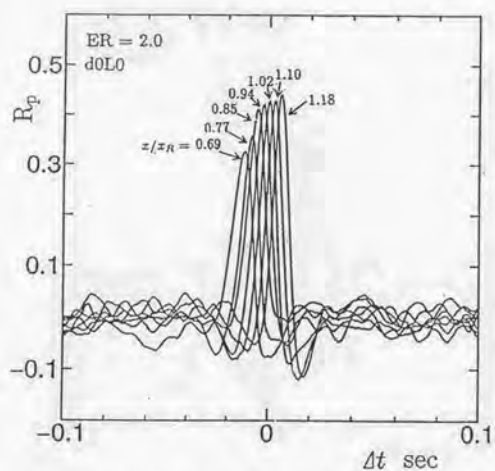


図 5.2.58 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.69 \sim 1.18$)

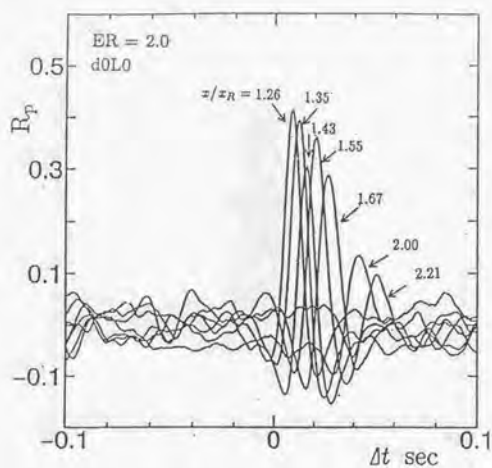


図 5.2.59 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.26 \sim 2.21$)

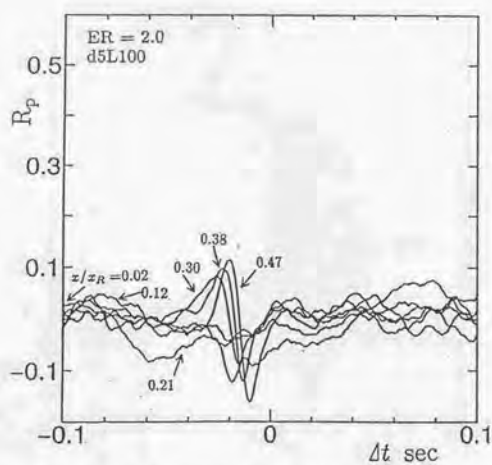


図 5.2.60 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.02 \sim 0.47$)

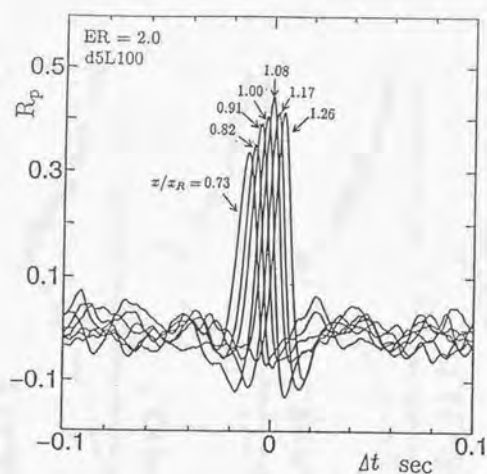


図 5.2.61 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 0.73 \sim 1.26$)

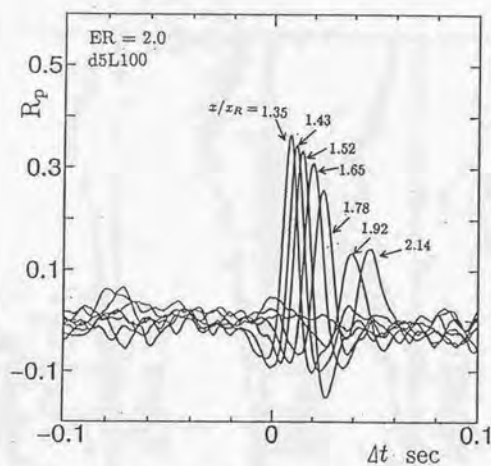


図 5.2.62 壁面圧力変動の相互相関係数 ($x/x_R = 1.35 \sim 2.14$)

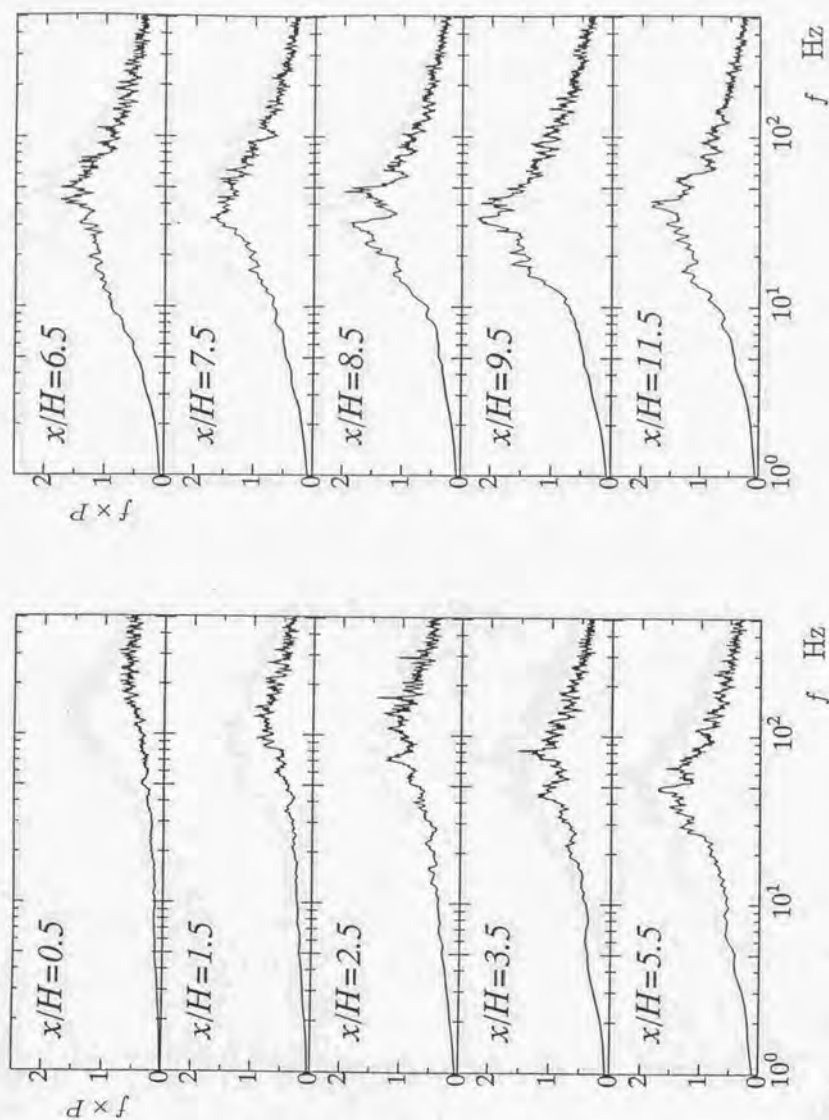


図 5.3.1 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)

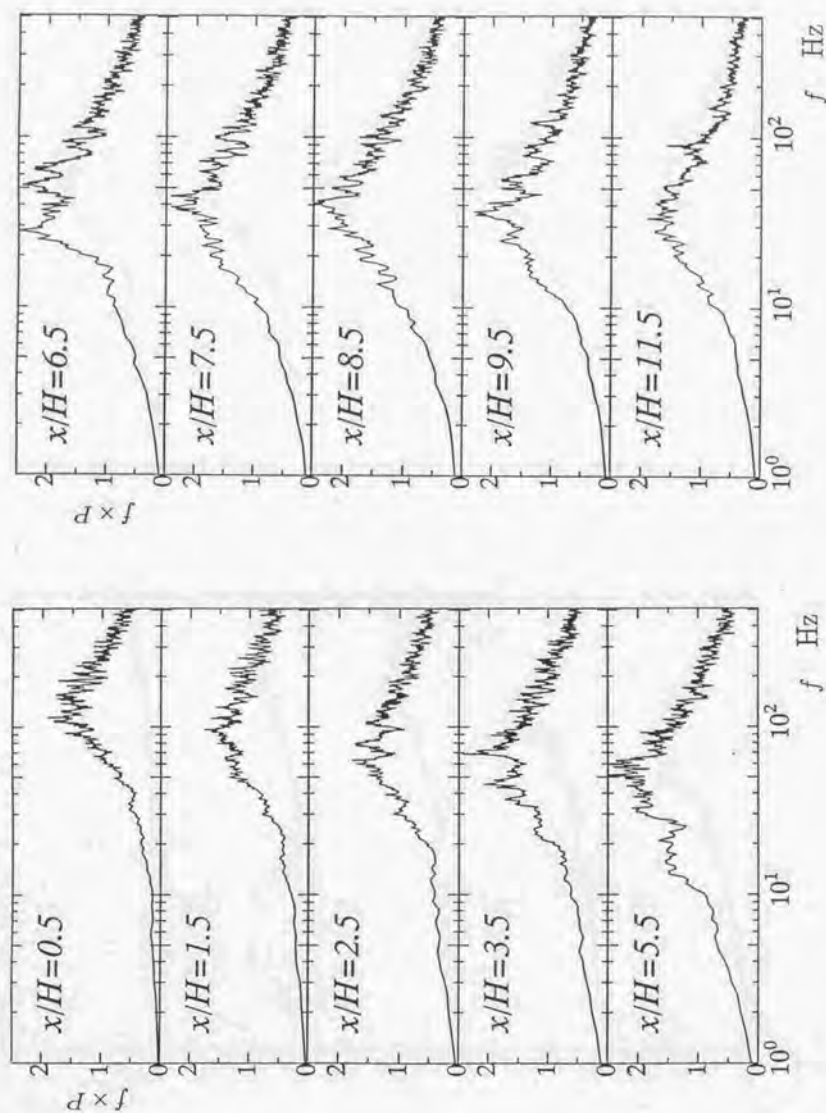


図 5.3.2 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d5L100)

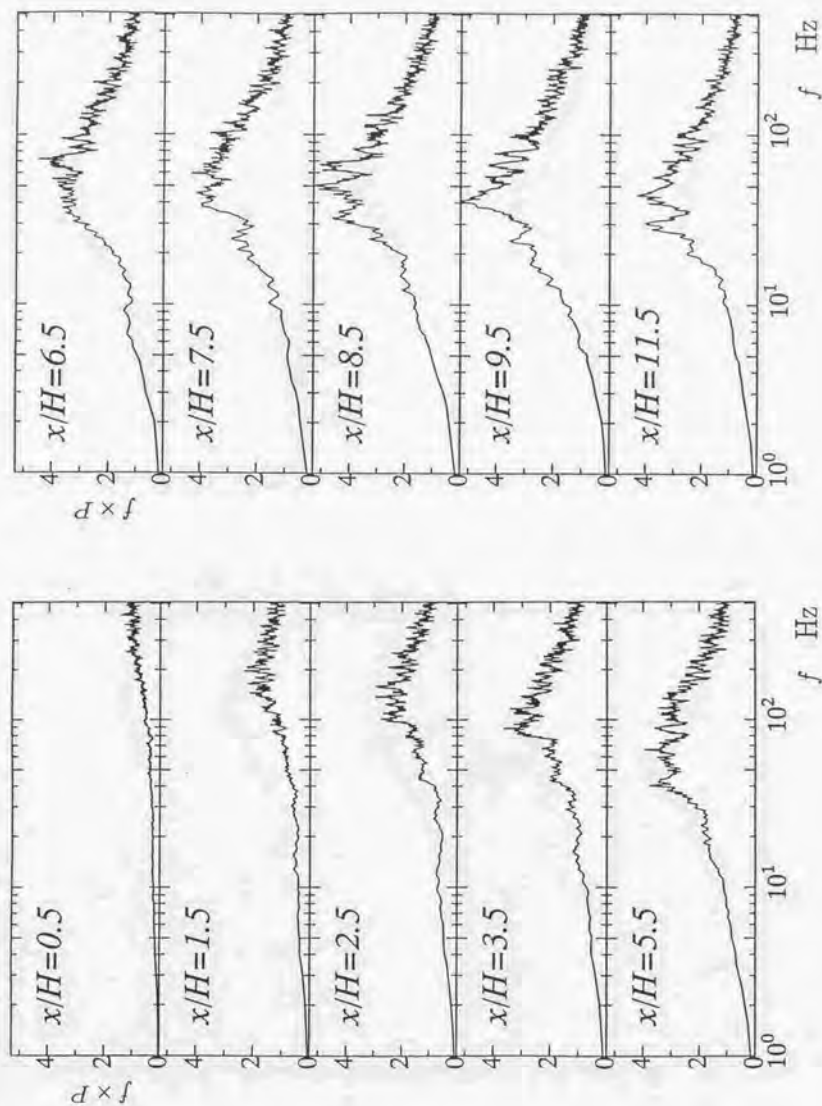


図 5.3.3 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)

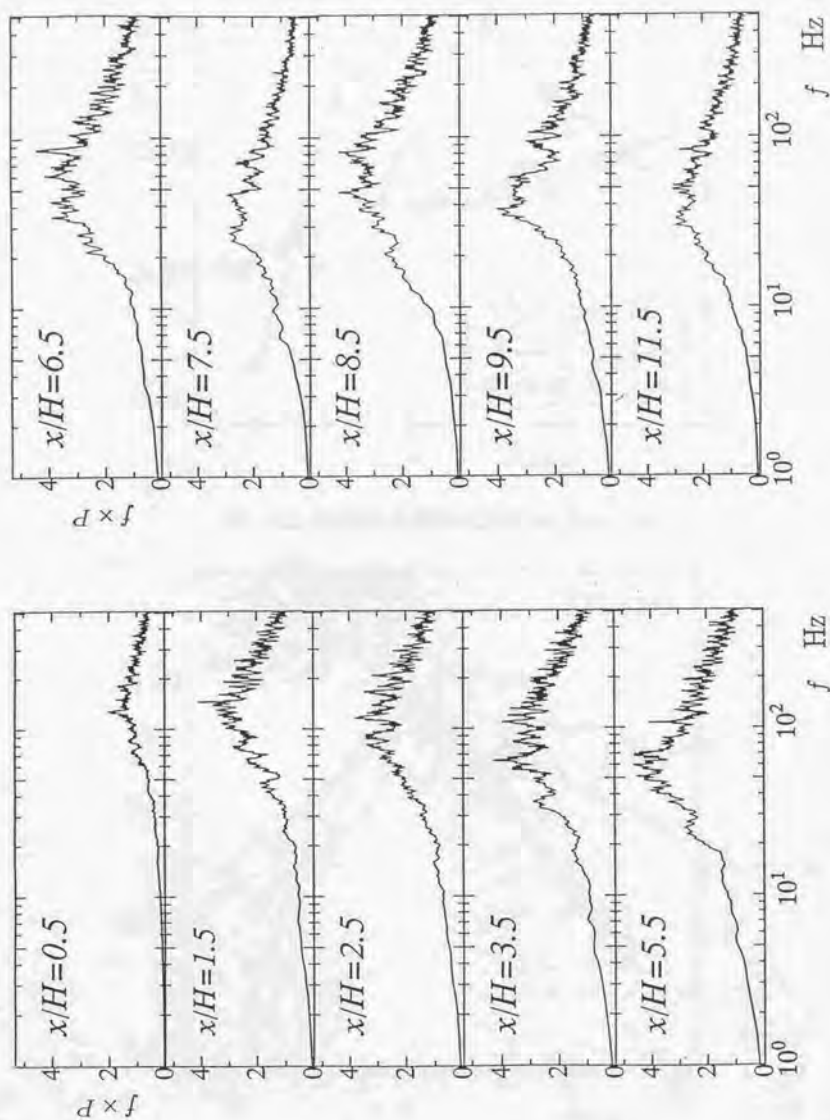


図 5.3.4 流れ場内の速度変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d5L100)

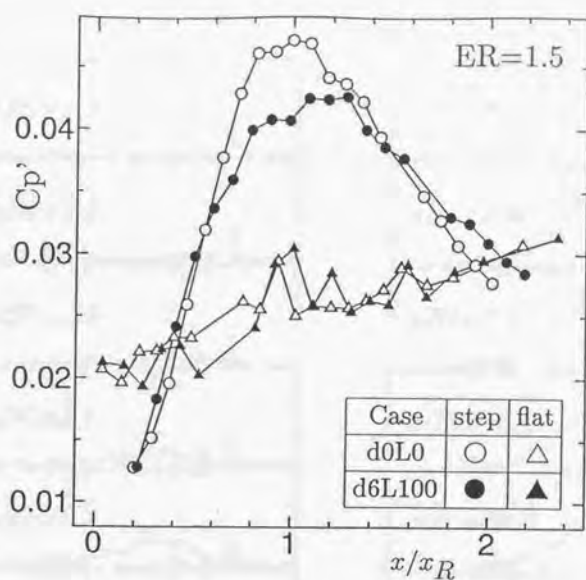


図 5.3.5 壁面圧力変動係数分布 (ER=1.5)

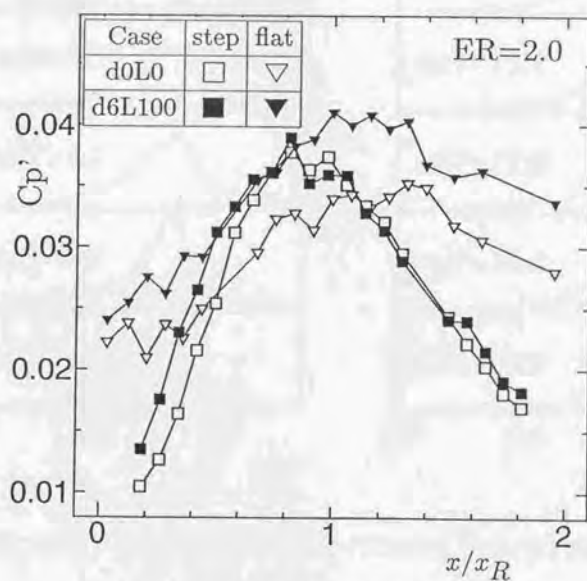


図 5.3.6 壁面圧力変動係数分布 (ER=2.0)

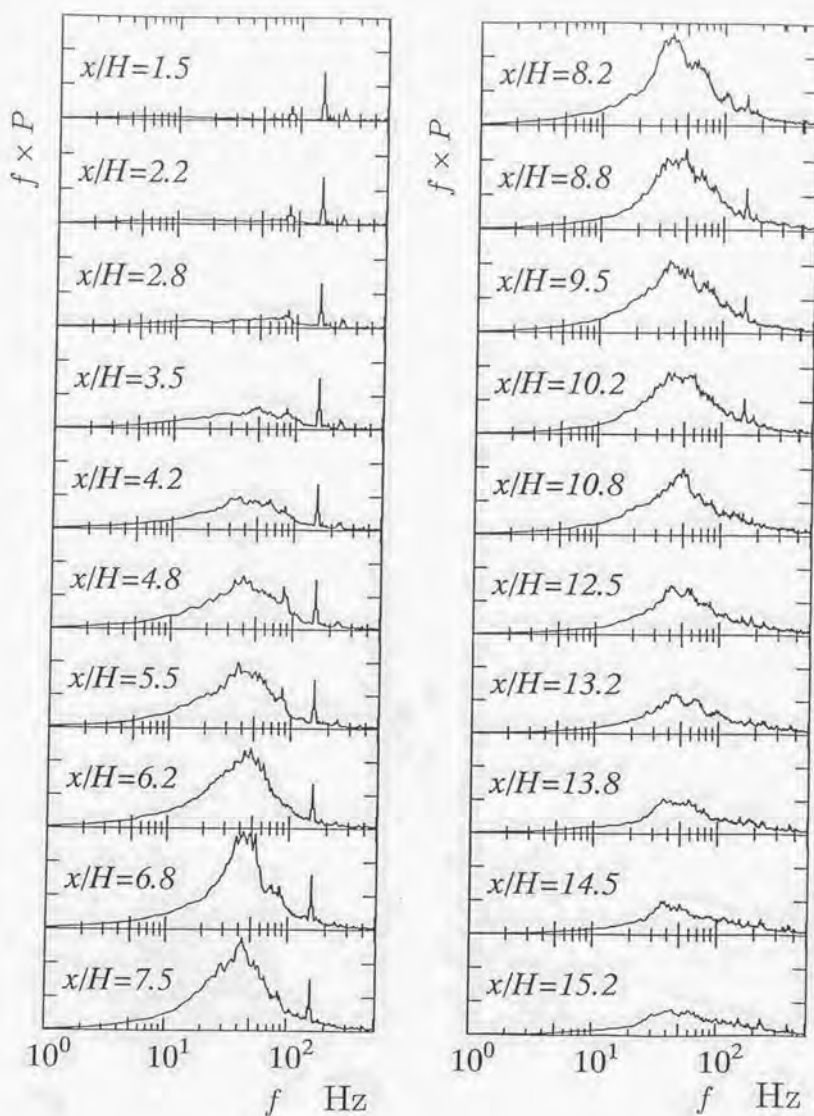


図5.3.7 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)

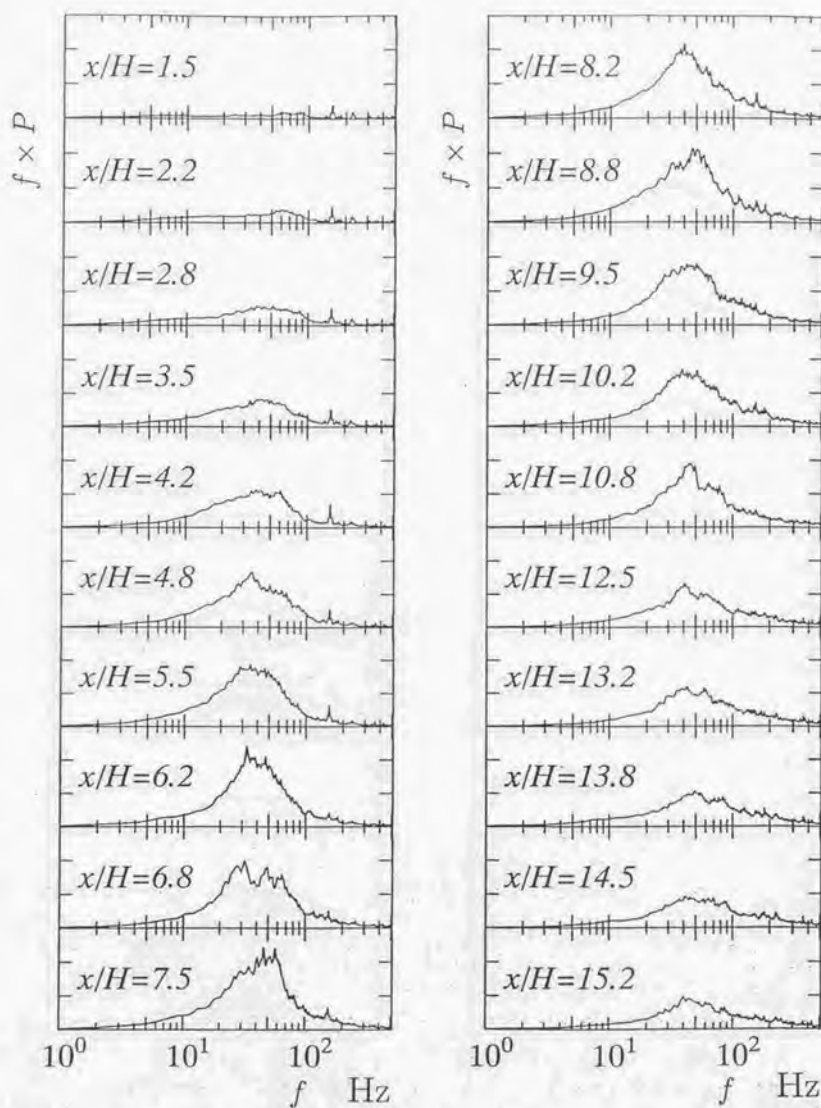


図 5.3.8 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d6L100)

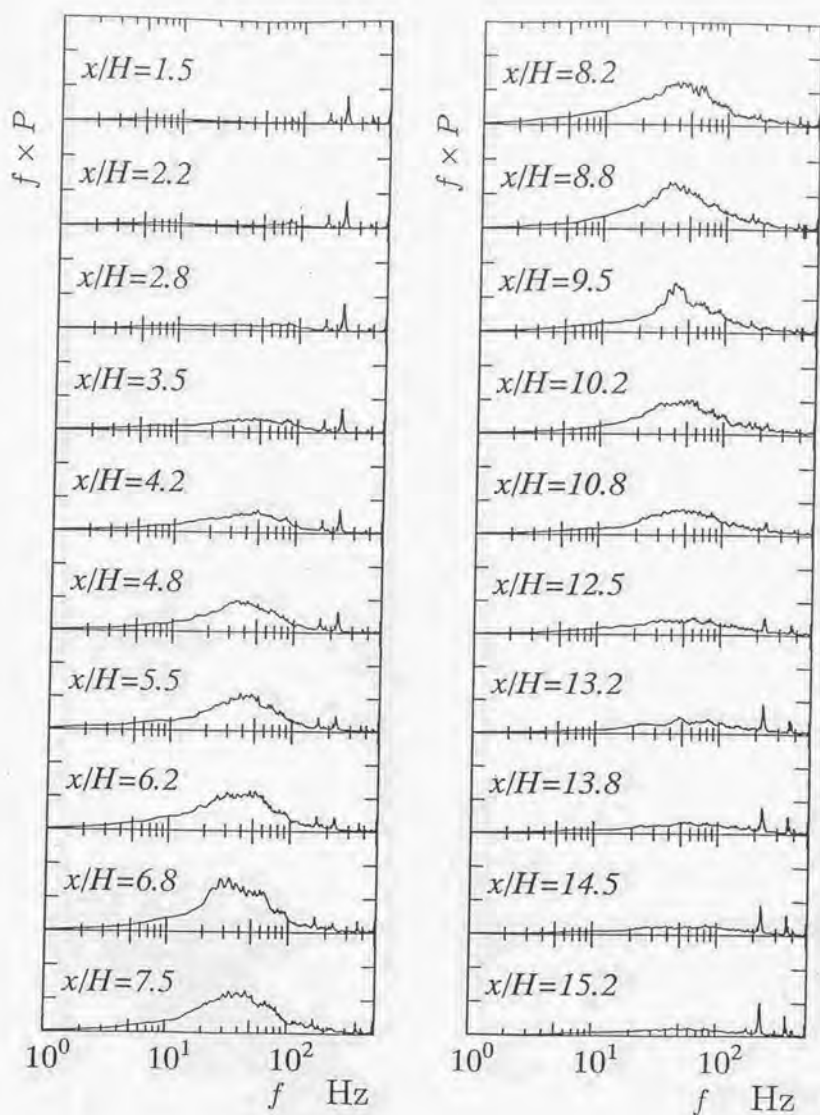


図 5.3.9 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)

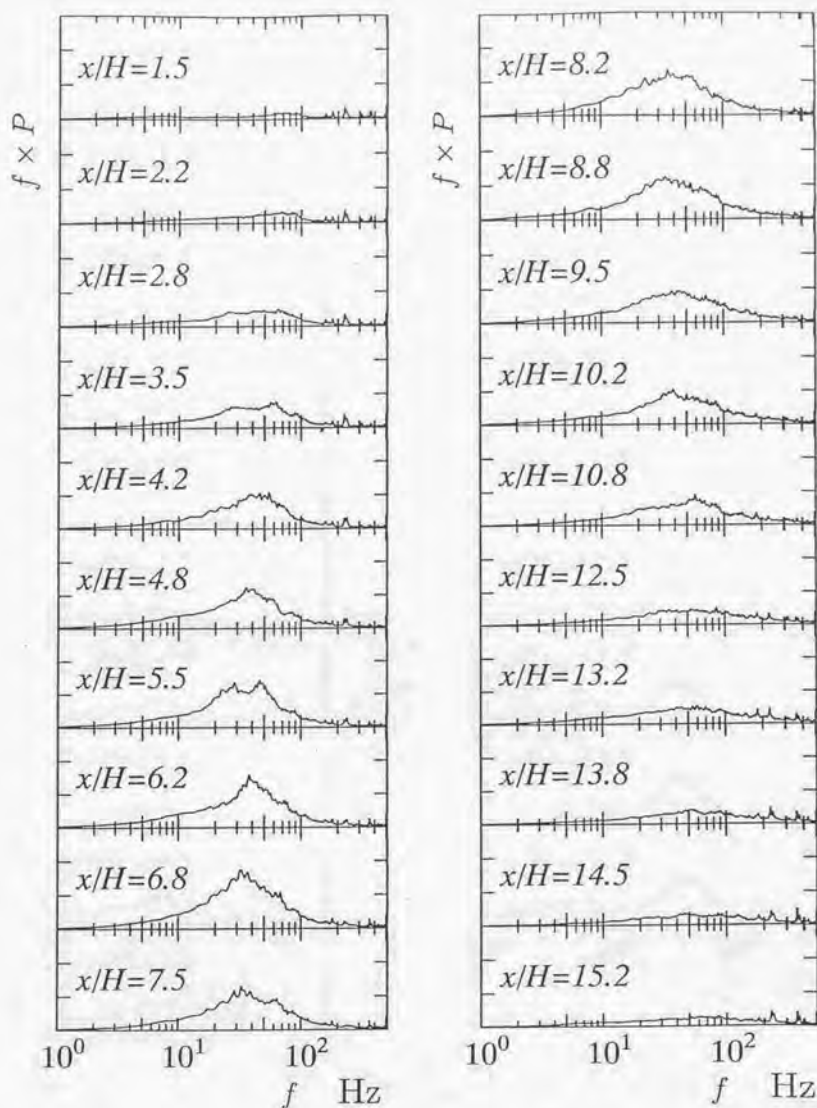


図 5.3.10 ステップ壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d6L100)

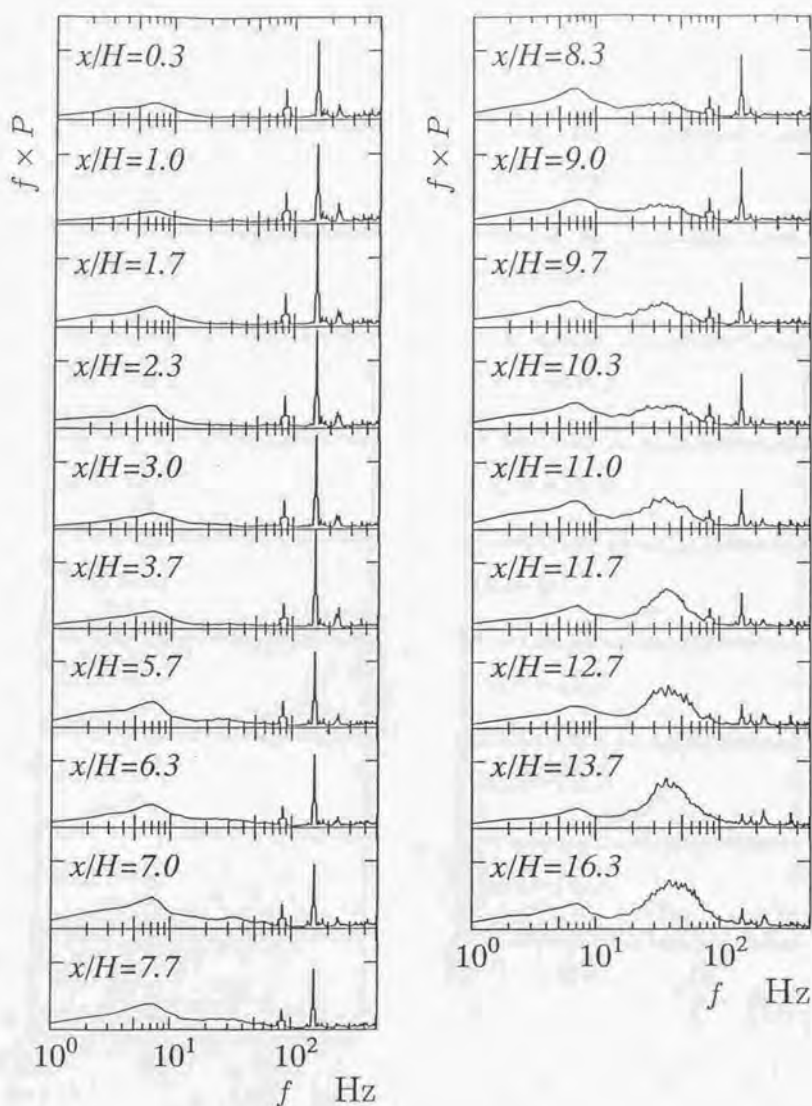


図 5.3.11 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d0L0)

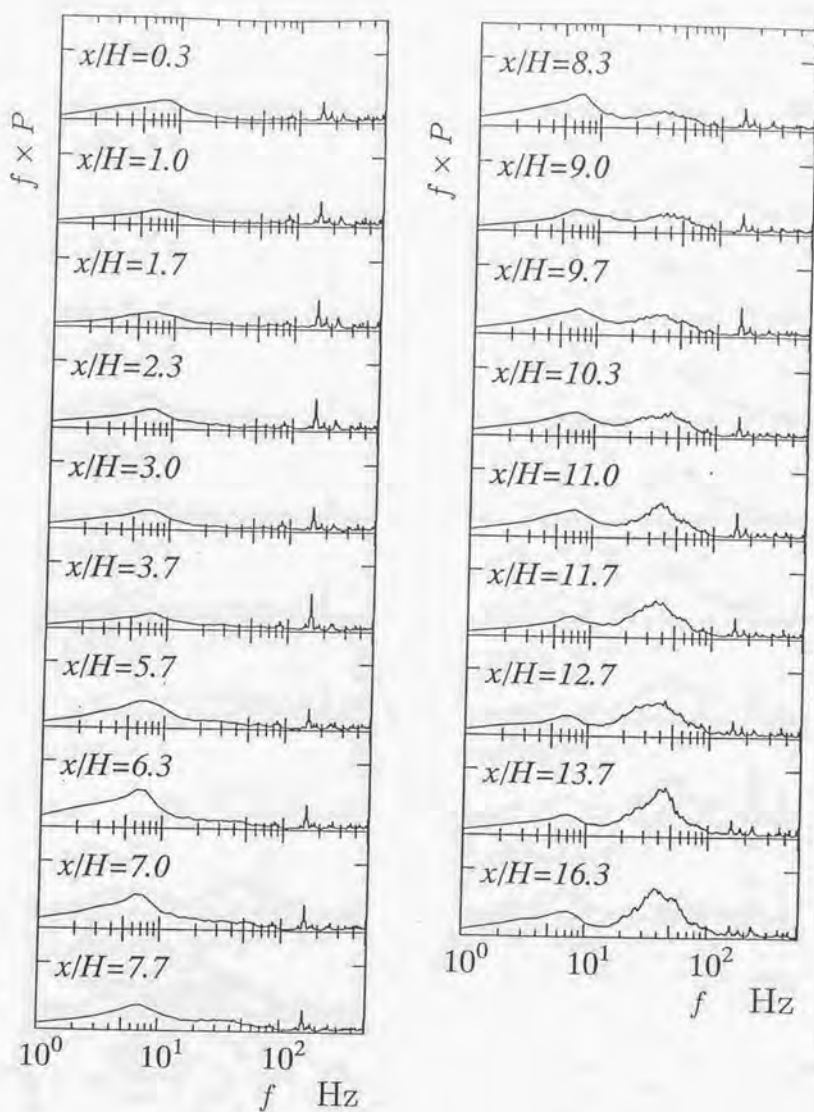


図 5.3.12 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=1.5, d6L100)

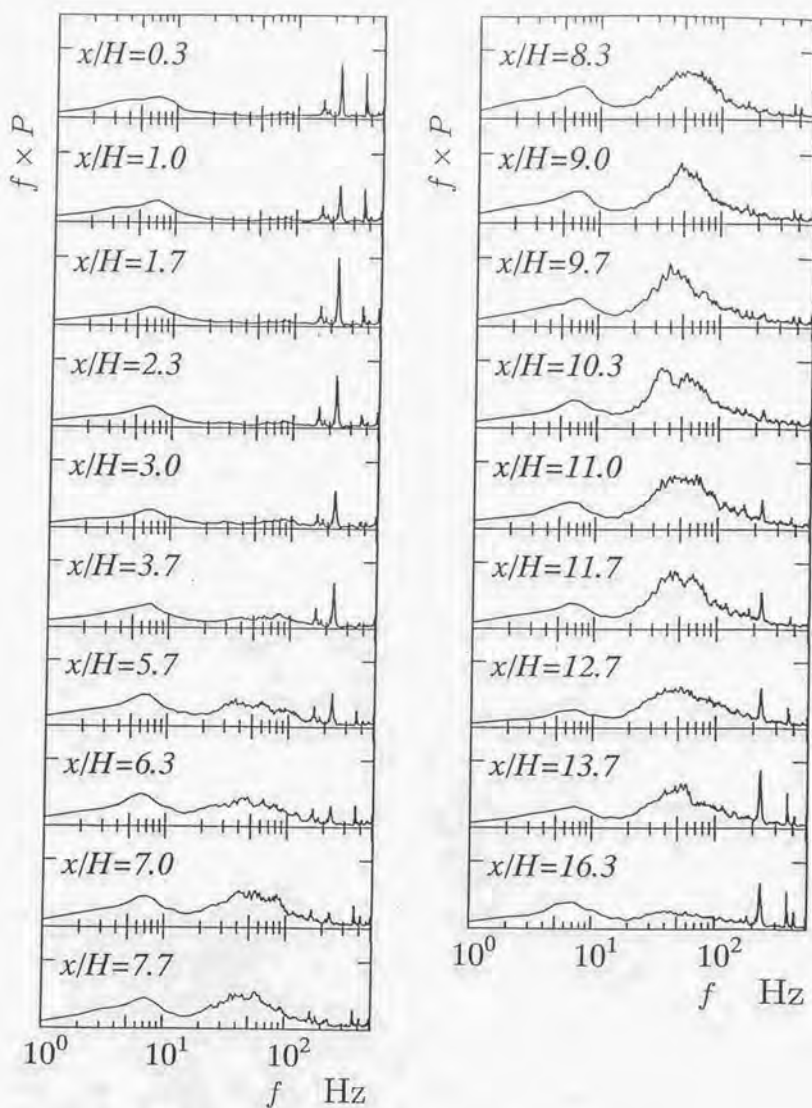


図 5.3.13 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d0L0)

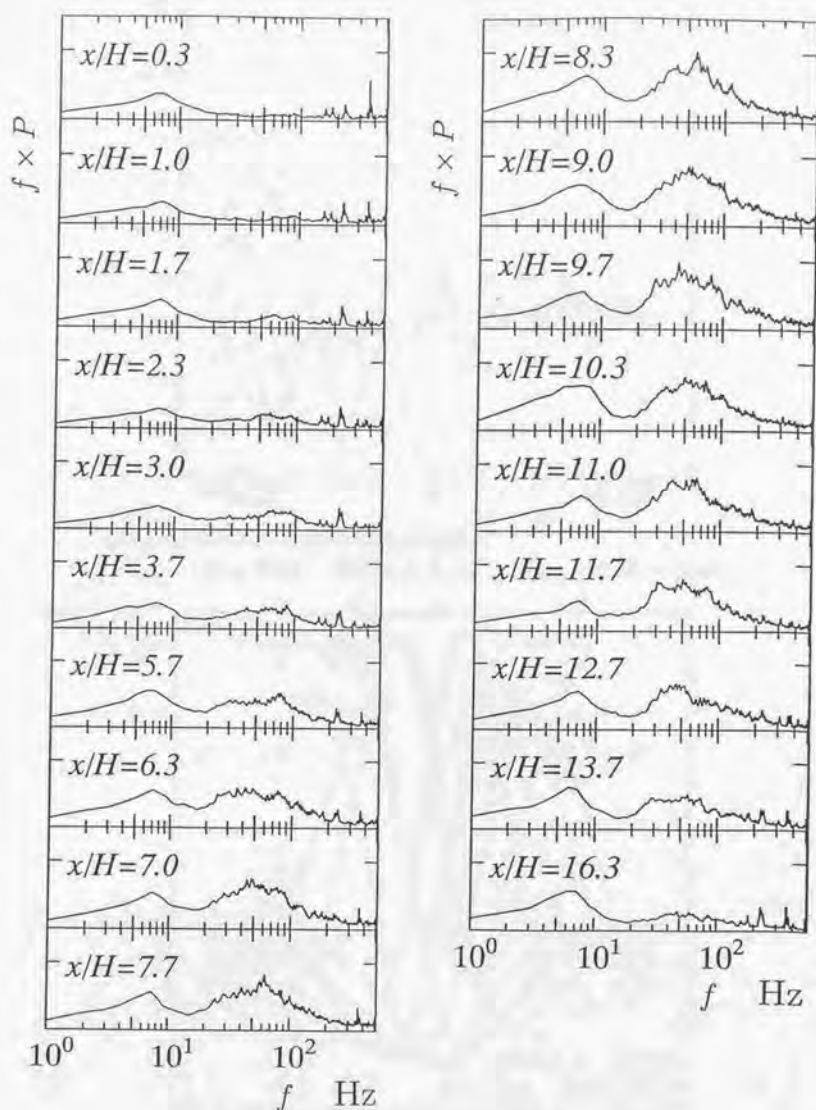


図 5.3.14 フラット壁面近傍の圧力変動パワースペクトル分布 (ER=2.0, d6L100)

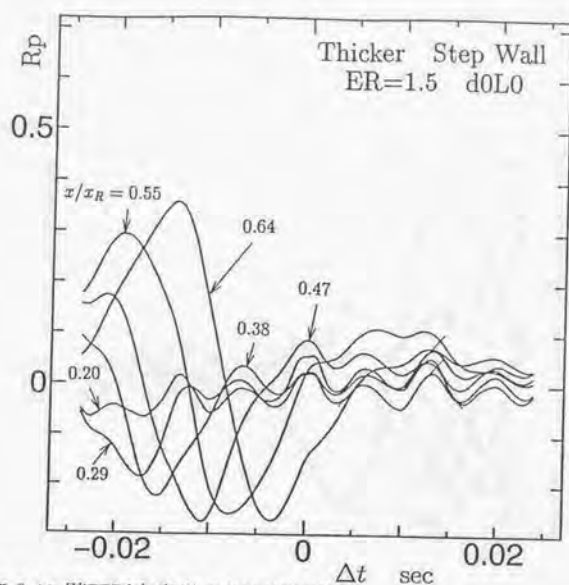


図5.3.15 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.20 \sim 0.64$)

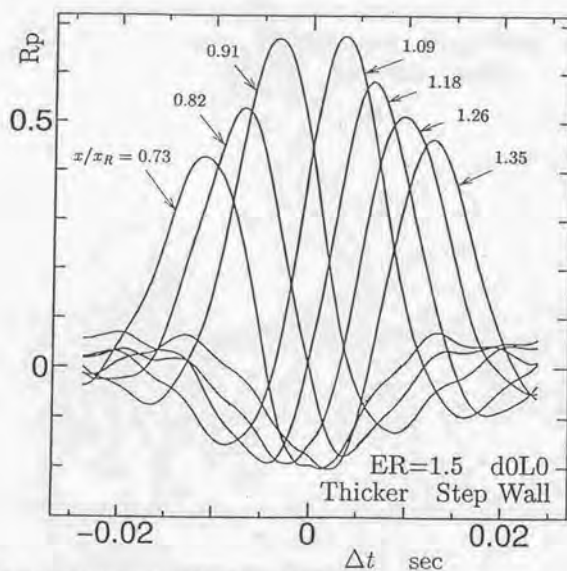


図5.3.16 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.73 \sim 1.35$)

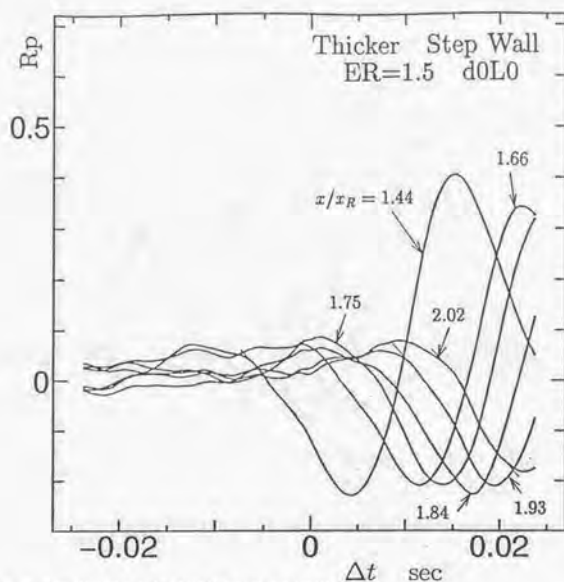


図 5.3.17 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.44 \sim 2.02$)

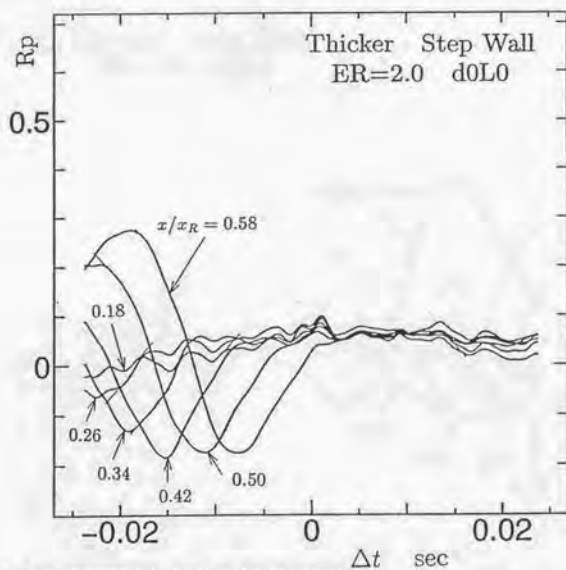


図 5.3.18 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.18 \sim 0.58$)

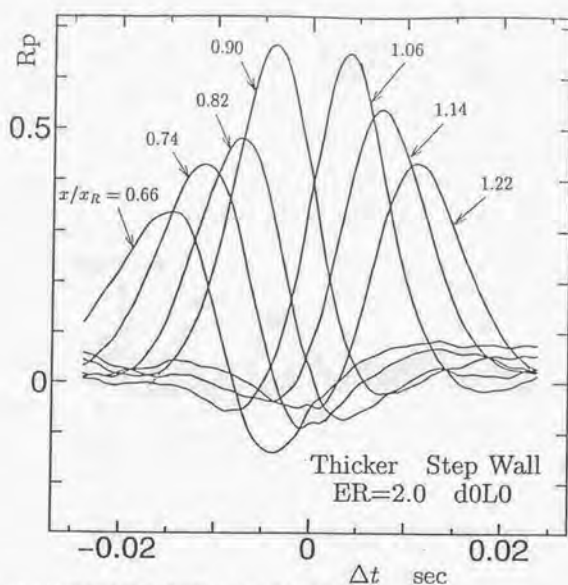


図 5.3.19 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall $ER=2.0$ $d0L0$ $x/x_R = 0.66 \sim 1.22$)

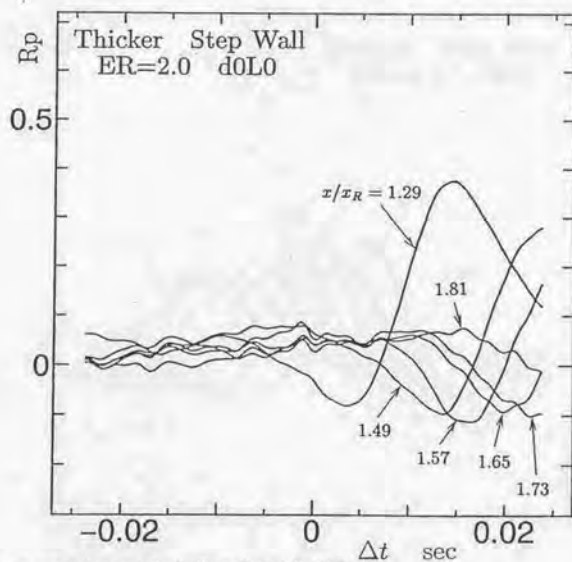


図 5.3.20 壁面圧力変動の相互相関係数
(Step Wall $ER=2.0$ $d0L0$ $x/x_R = 1.29 \sim 1.81$)

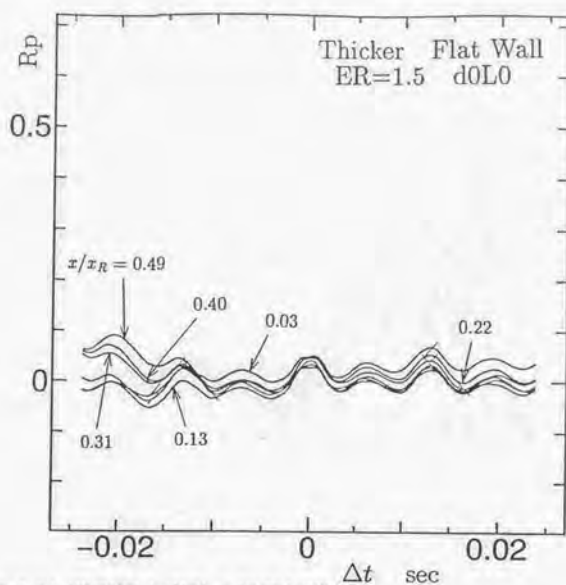


図 5.3.21 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.49$)

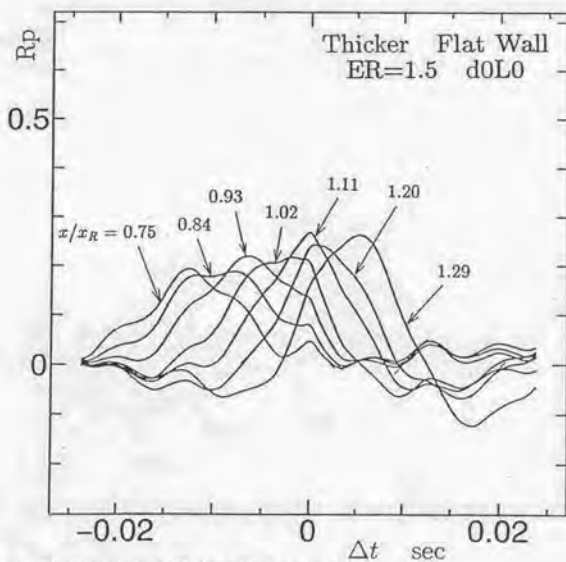


図 5.3.22 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.75 \sim 1.29$)

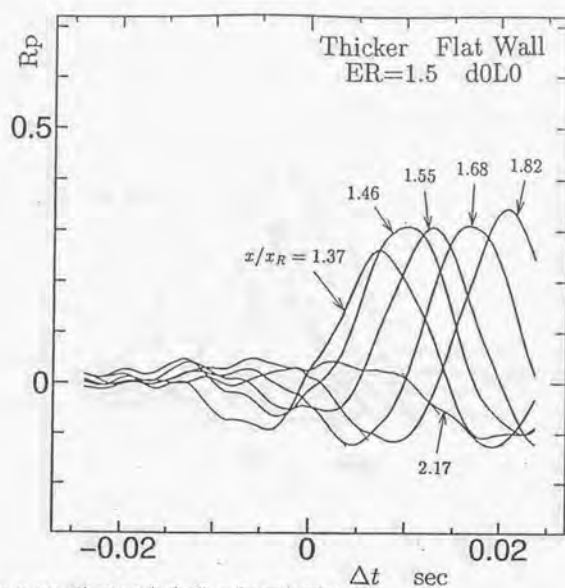


図 5.3.23 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.37 \sim 2.17$)

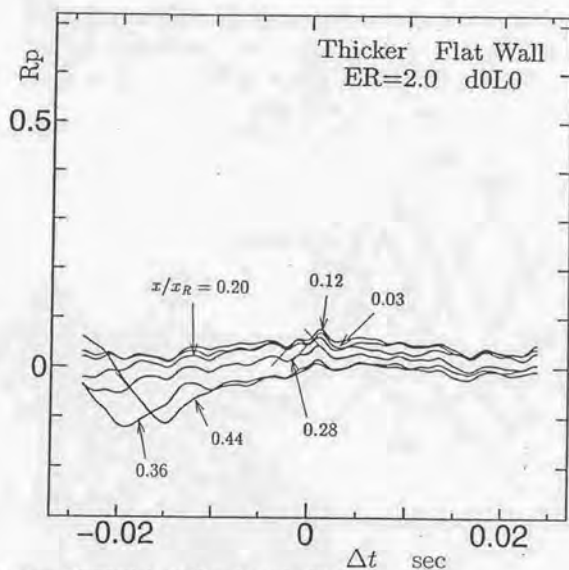


図 5.3.24 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.44$)

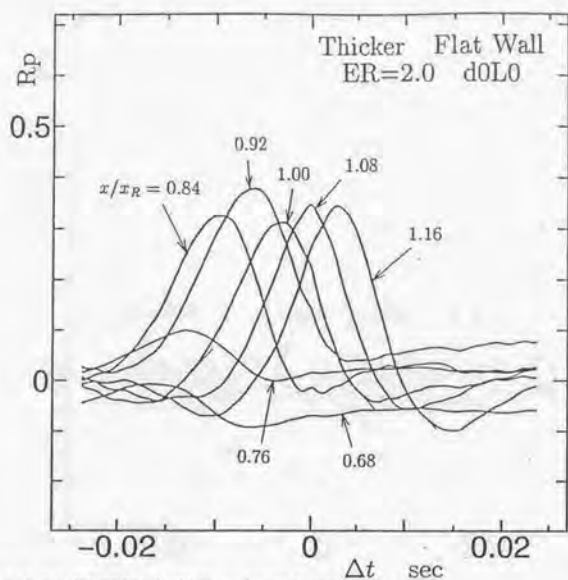


図 5.3.25 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.68 \sim 1.16$)

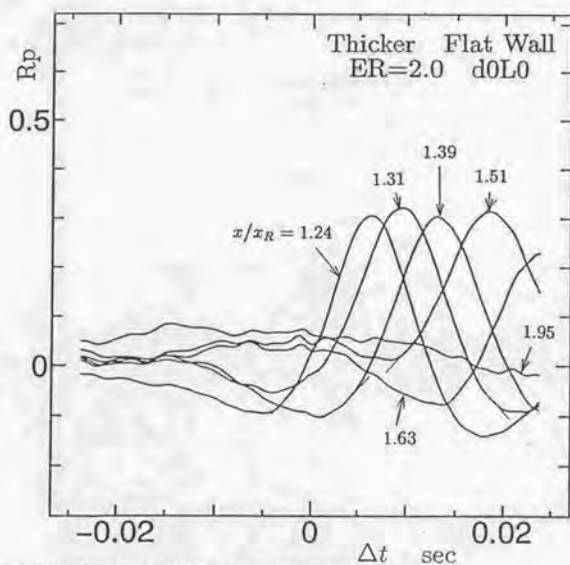


図 5.3.26 壁面圧力変動の相互相関係数
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 1.24 \sim 1.95$)

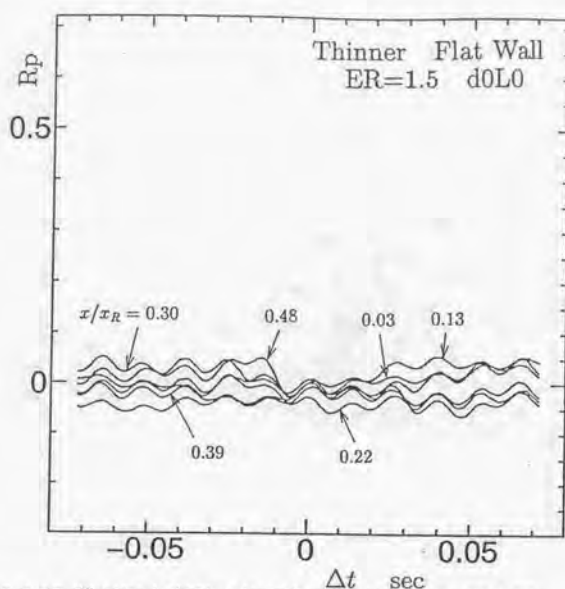


図 5.3.27 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.48$)

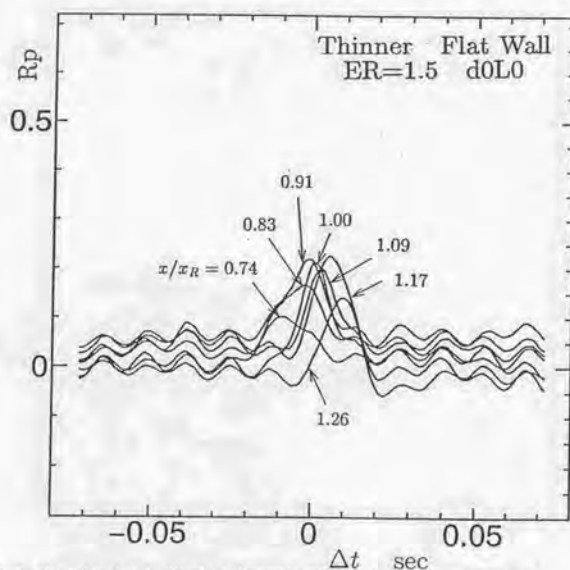


図 5.3.28 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 0.74 \sim 1.26$)

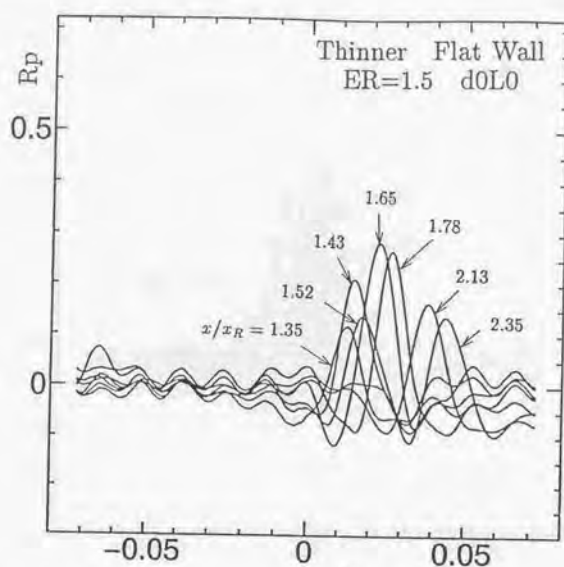


図 5.3.29 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=1.5 d0L0 $x/x_R = 1.35 \sim 2.35$)

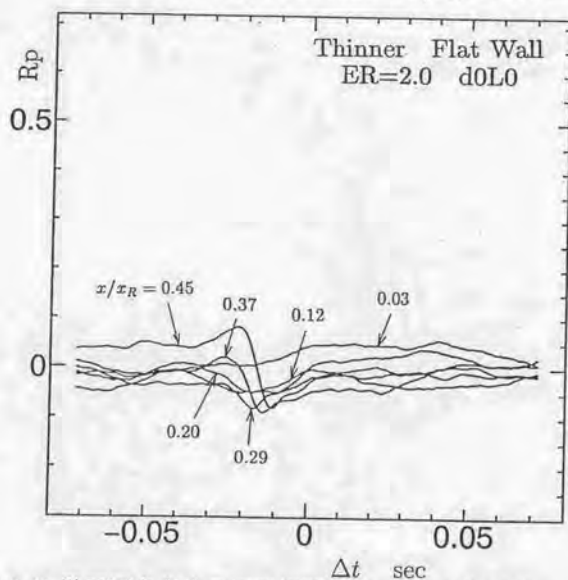


図 5.3.30 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.03 \sim 0.45$)

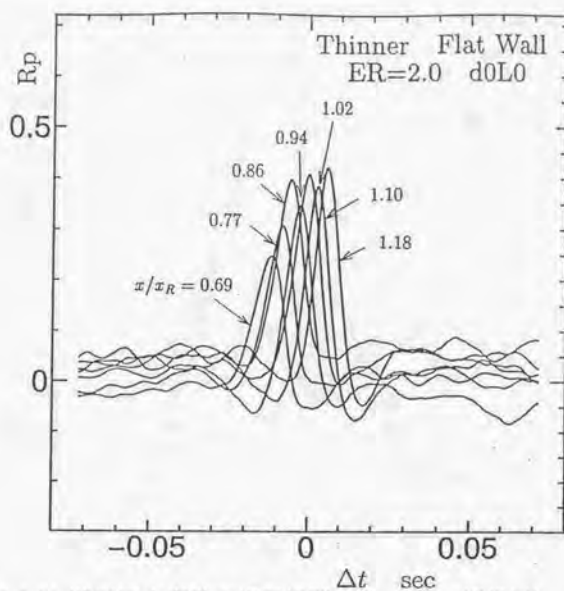


図 5.3.31 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 0.69 \sim 1.18$)

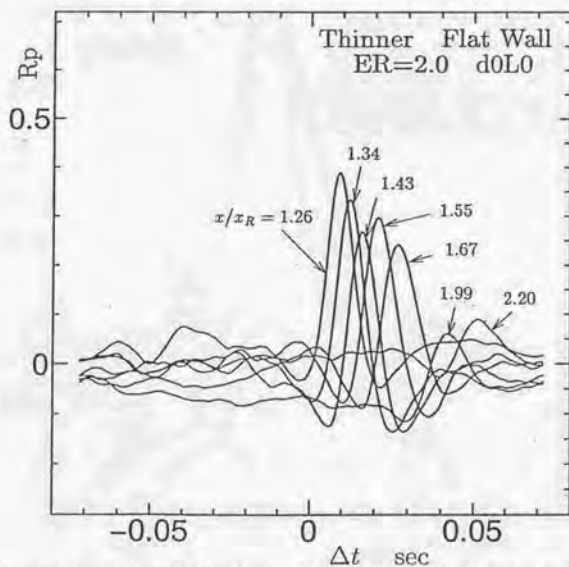


図 5.3.32 壁面圧力変動の相互相関係数 (薄い境界層)
(Flat Wall ER=2.0 d0L0 $x/x_R = 1.26 \sim 2.20$)

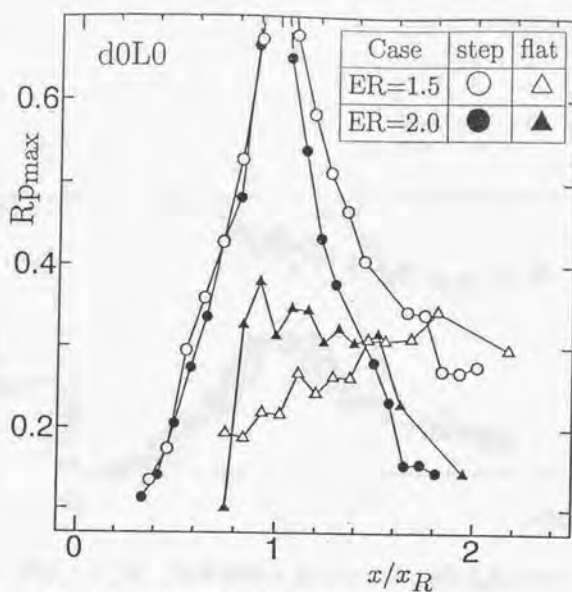


図 5.3.33 ステップ下流の最大相互相関係数分布 (d0L0)

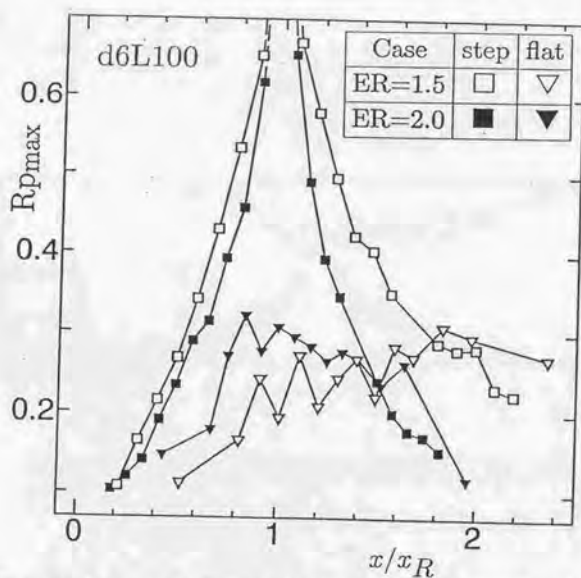


図 5.3.34 ステップ下流の最大相互相関係数分布 (d6L100)

Case	Step	Flat
d0L0	□	▽
d6L100	■	▼

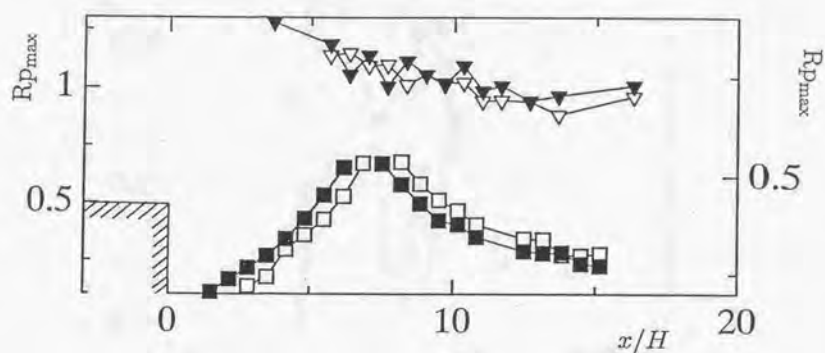


図 5.3.35 最大相互相関係数分布の模式図 (ER=1.5)

Case	Step	Flat
d0L0	○	△
d6L100	●	▲

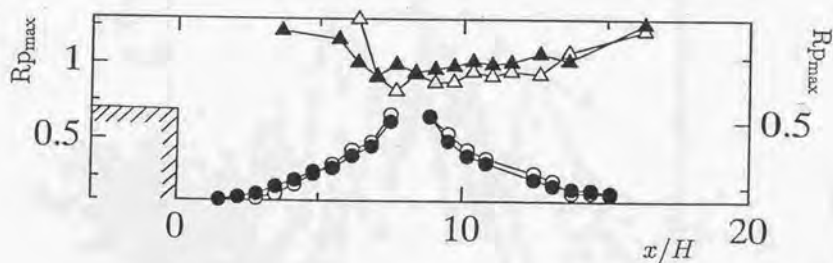


図 5.3.36 最大相互相関係数分布の模式図 (ER=2.0)

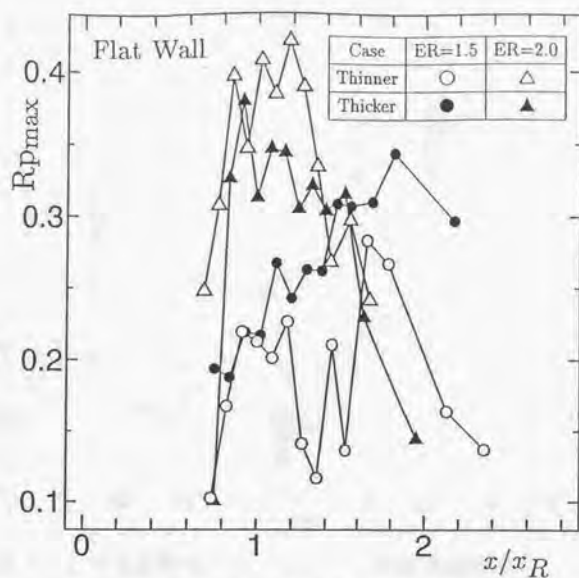


図5.4.1 境界層厚さの差異に着目した最大相互相関係数分布 (d0L0)

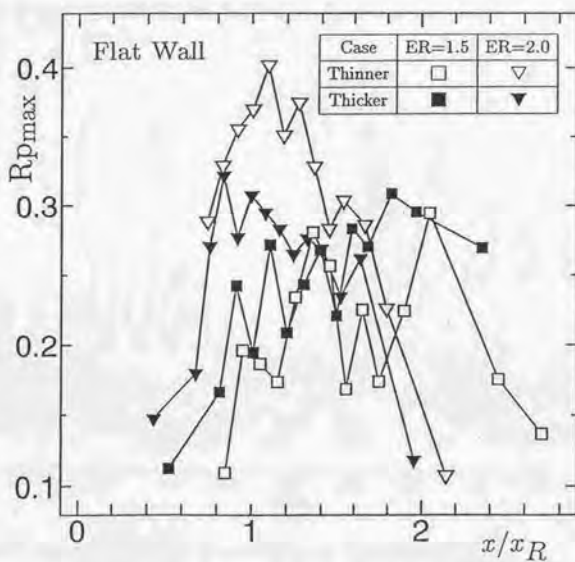


図5.4.2 境界層厚さの差異に着目した最大相互相関係数分布 (d6L100)

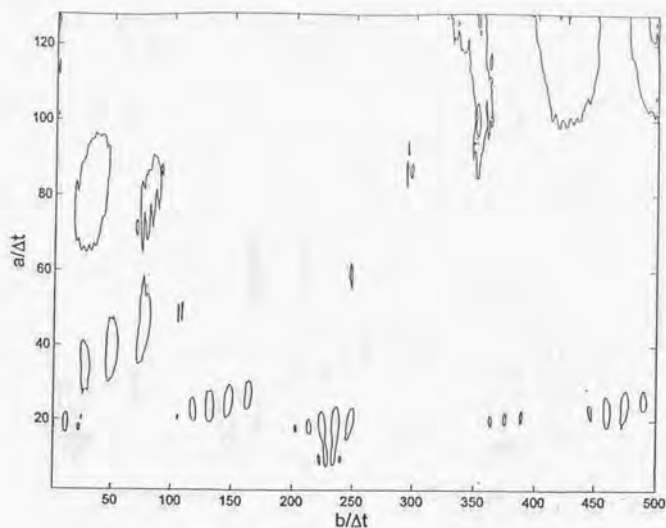


図 5.5.1 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d0L0$, $x/H = 0.5$)

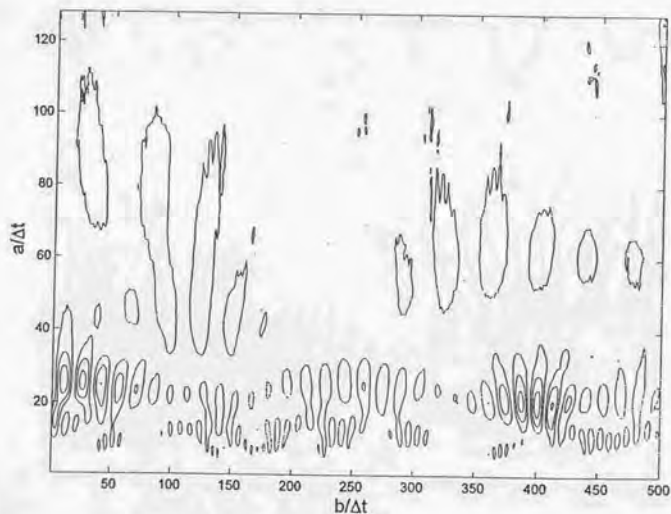


図 5.5.2 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d5L100$, $x/H = 0.5$)

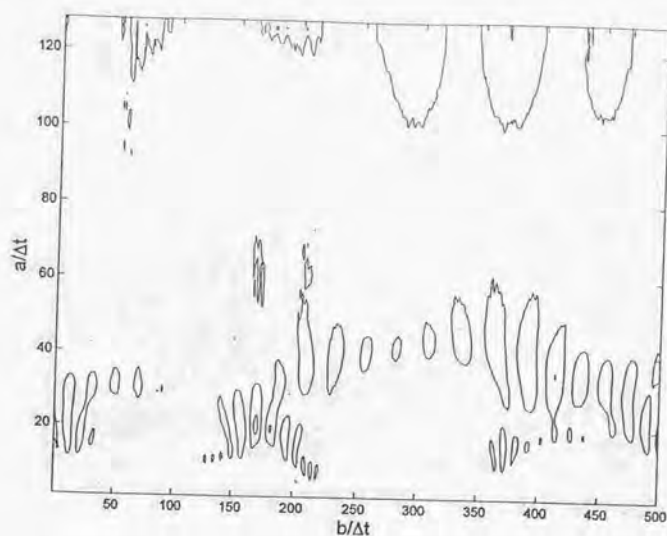


図 5.5.3 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d0L0$, $x/H = 1.5$)

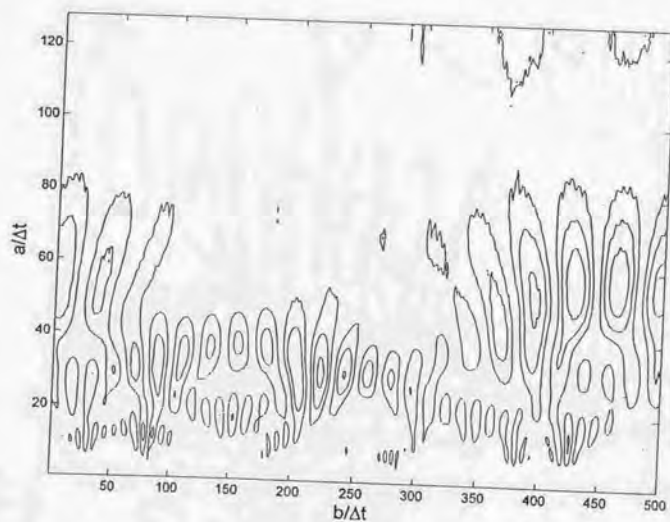


図 5.5.4 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d5L100$, $x/H = 1.5$)

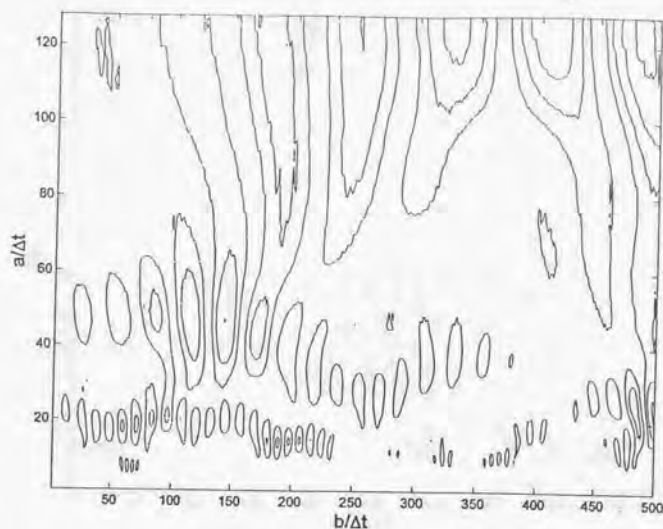


図 5.5.5 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d0L0$, $x/H = 2.5$)

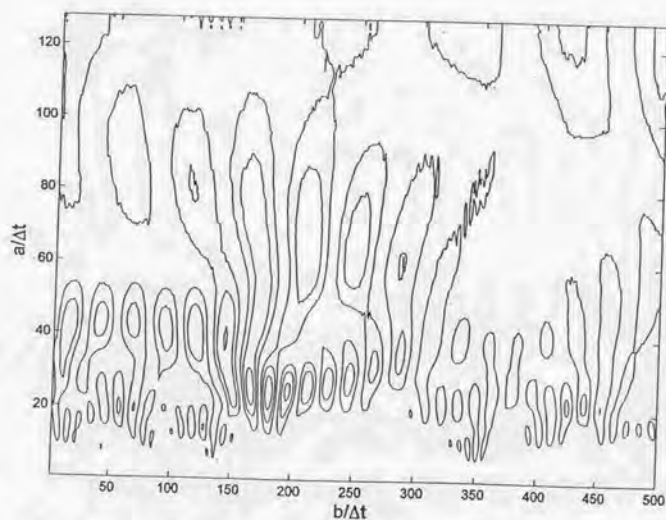


図 5.5.6 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d5L100$, $x/H = 2.5$)

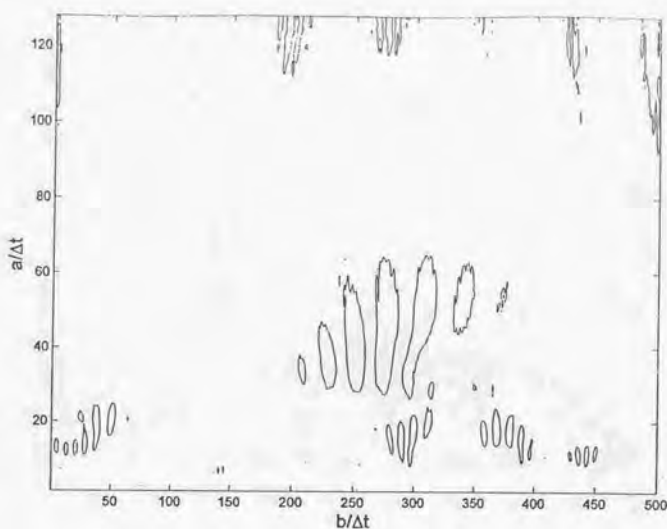


図 5.5.7 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 0.5$)

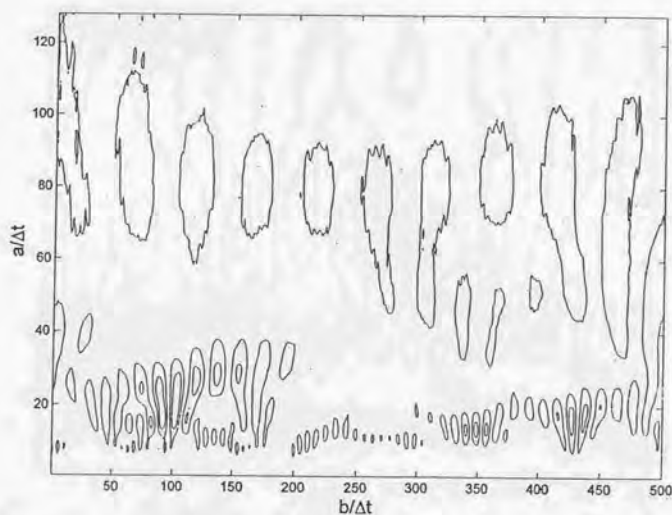


図 5.5.8 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d5L100$, $x/H = 0.5$)

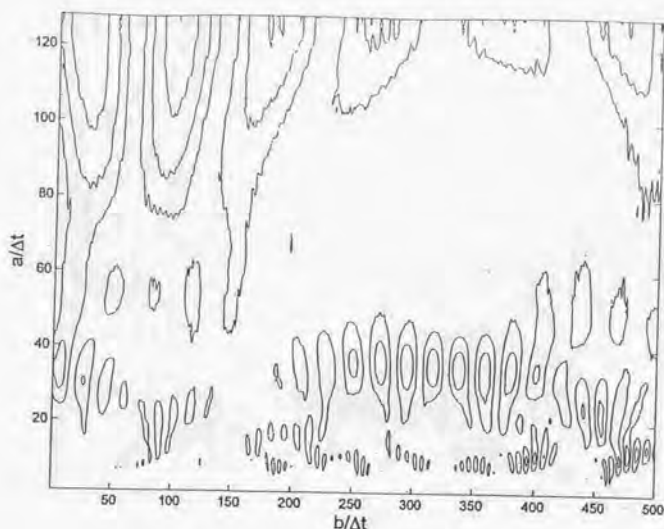


図 5.5.9 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 1.5$)

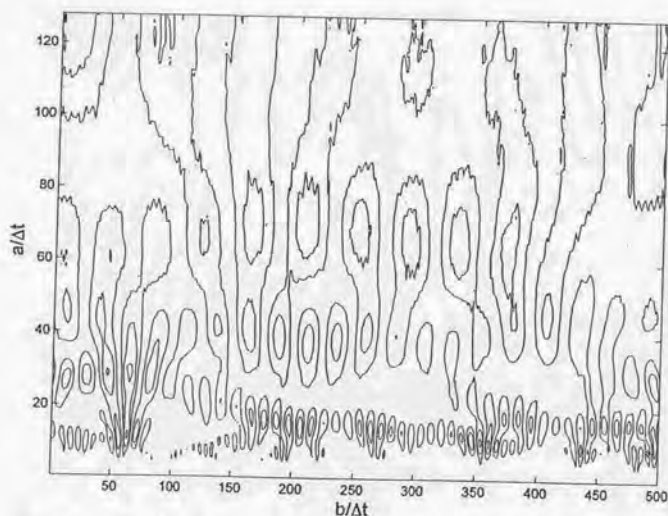


図 5.5.10 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d5L100$, $x/H = 1.5$)

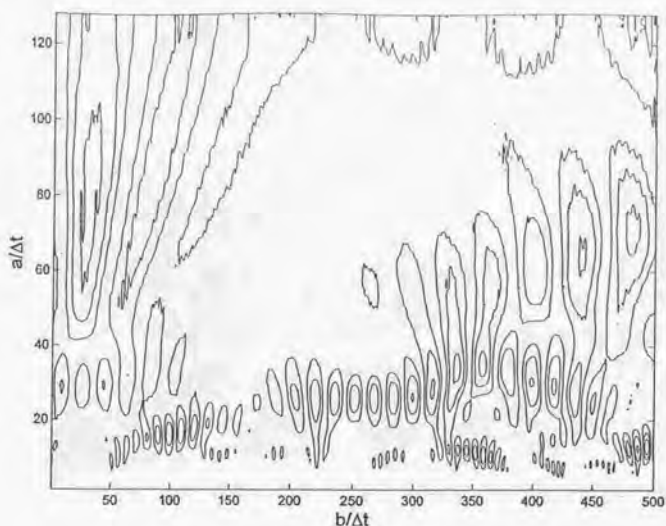


図 5.5.11 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$)

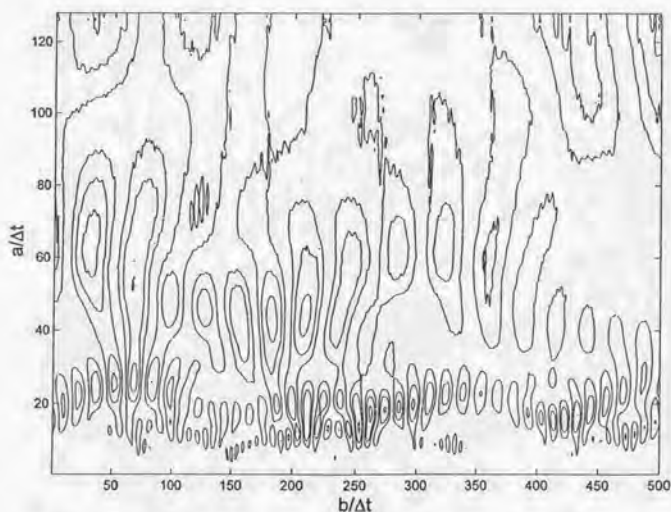


図 5.5.12 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d5L100$, $x/H = 2.5$)

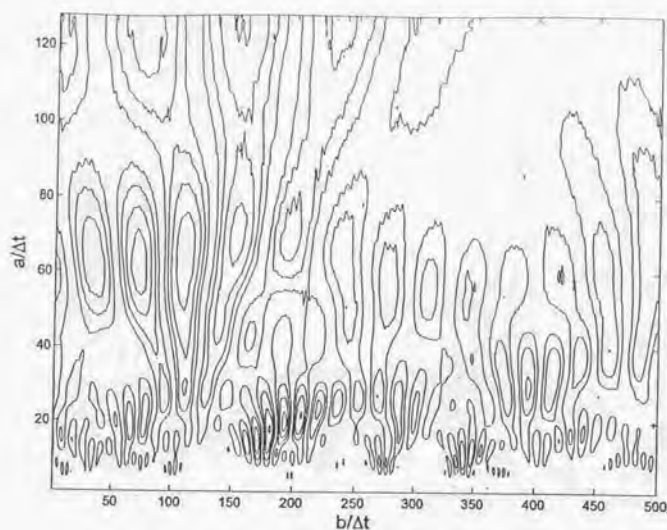


図 5.5.13 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0 \leq b \leq 0.24$ sec)

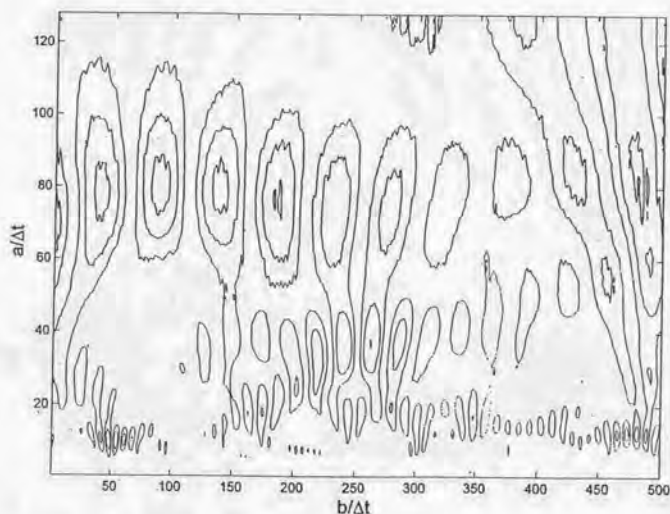


図 5.5.14 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0.24 \leq b \leq 0.48$ sec)

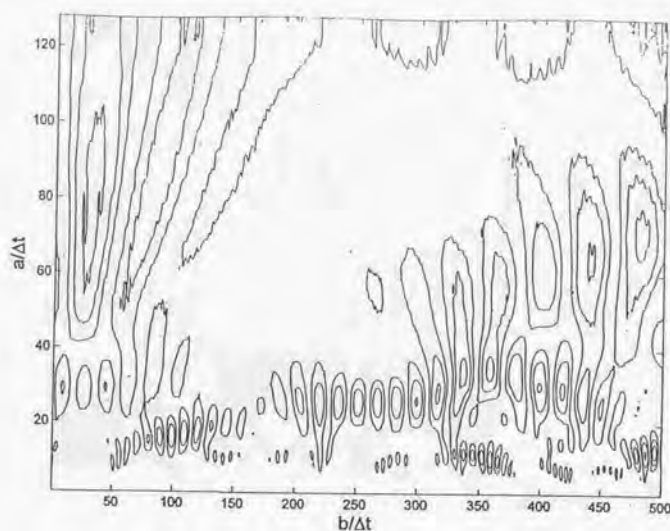


図 5.5.15 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0.48 \leq b \leq 0.71$ sec)

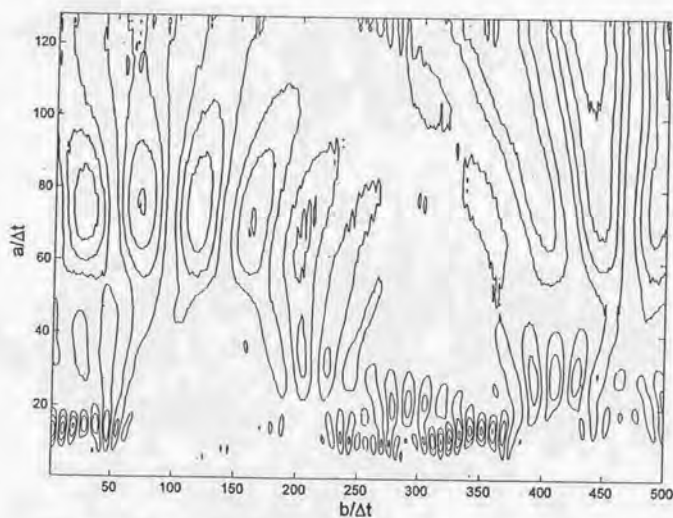


図 5.5.16 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0.71 \leq b \leq 0.95$ sec)

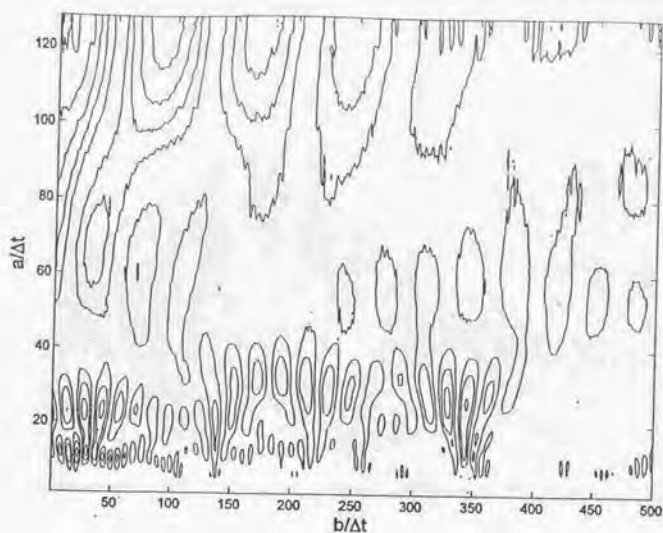


図 5.5.17 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $0.95 \leq b \leq 1.19$ sec)

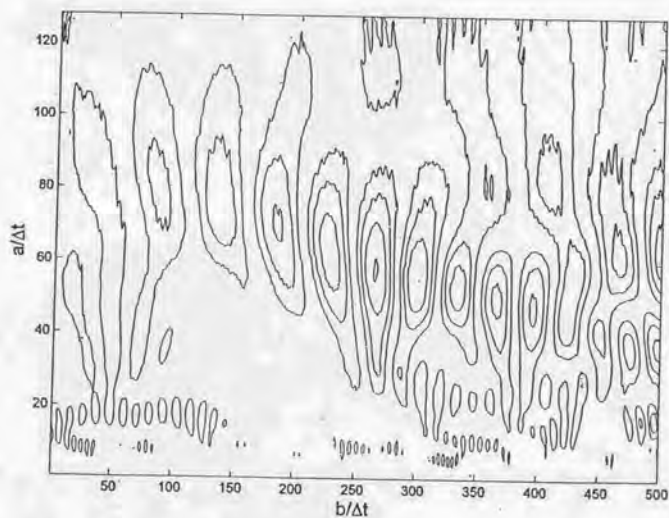


図 5.5.18 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 2.5$, $1.19 \leq b \leq 1.43$ sec)

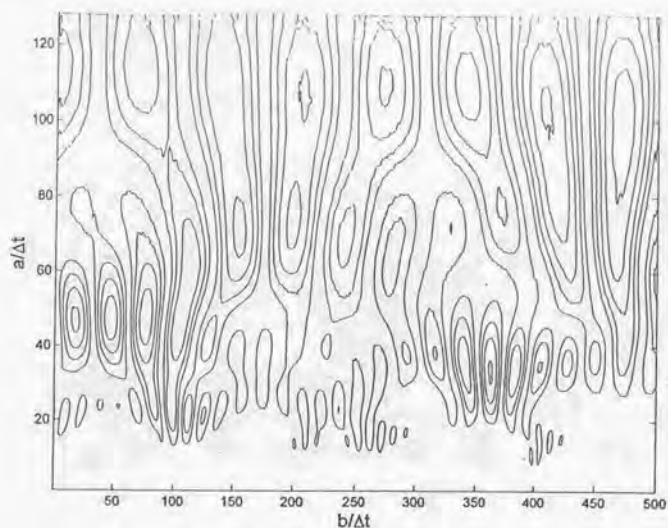


図 5.5.19 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d0L0$, $x/H = 8.5$)

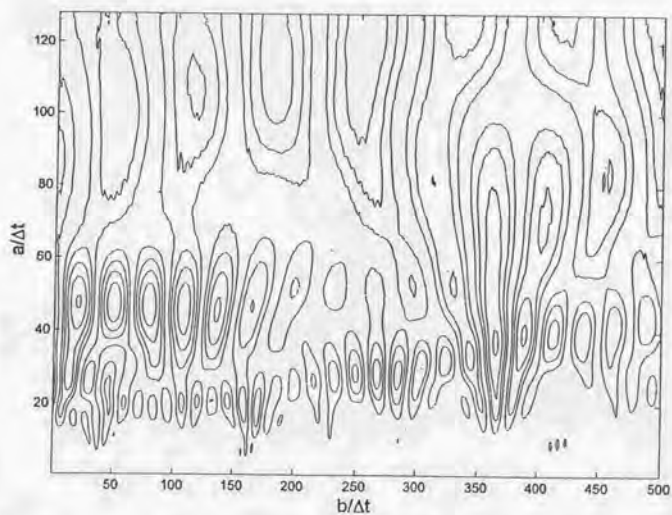


図 5.5.20 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=1.5$, $d5L100$, $x/H = 8.5$)

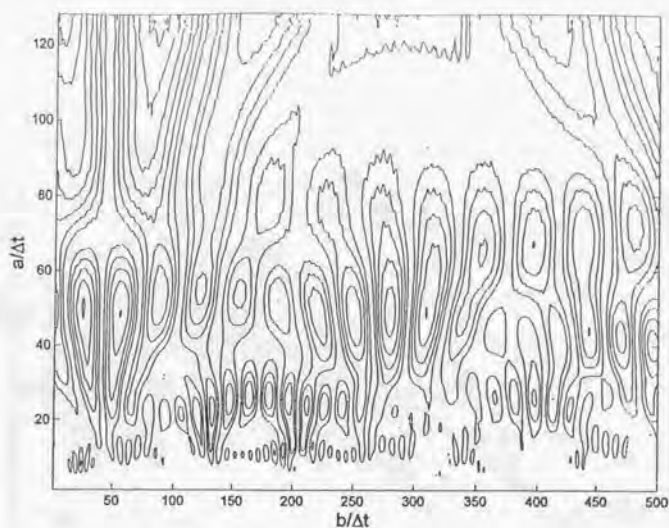


図 5.5.21 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d0L0$, $x/H = 9.5$)

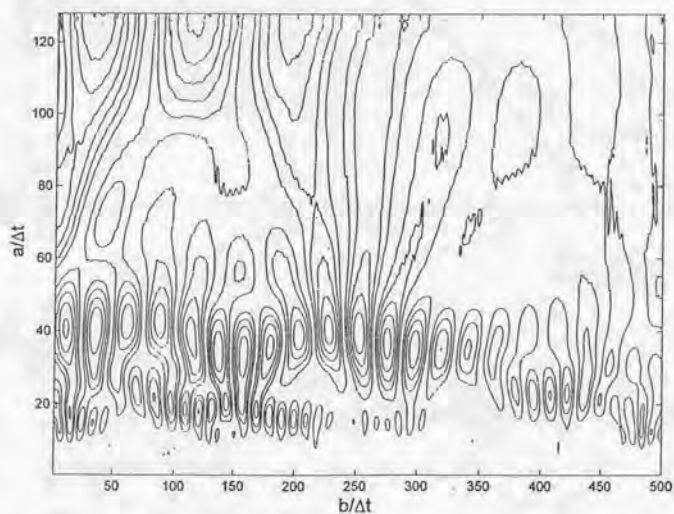


図 5.5.22 速度変動のウェーブレット係数等値線図
($ER=2.0$, $d5L100$, $x/H = 9.5$)

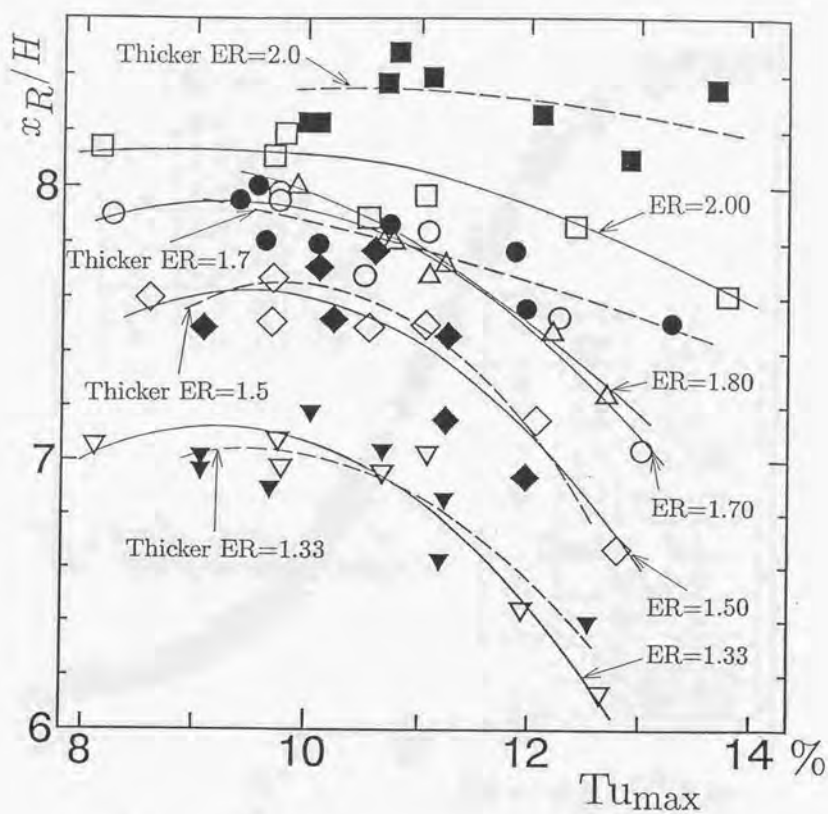


図 6.2.1 $y^+ \leq 50$ の領域における
最大乱れ強さ Tu_{max} と再付着点距離 x_R/H の関係

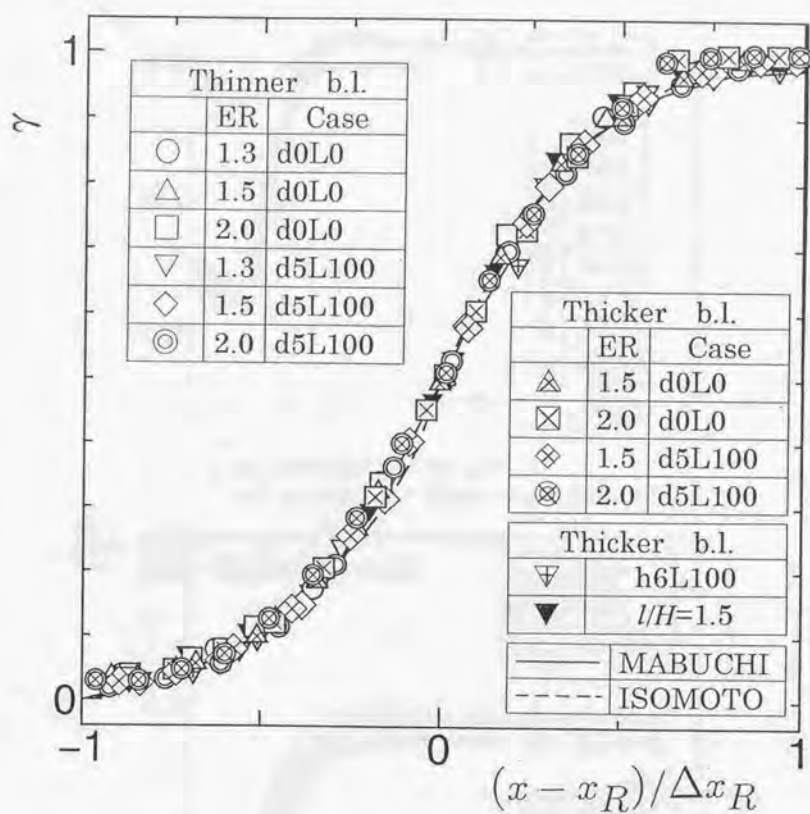


図 6.3.1 再付着点領域の幅 Δx_R
と再付着点距離 x_R で再整理した順流率分布

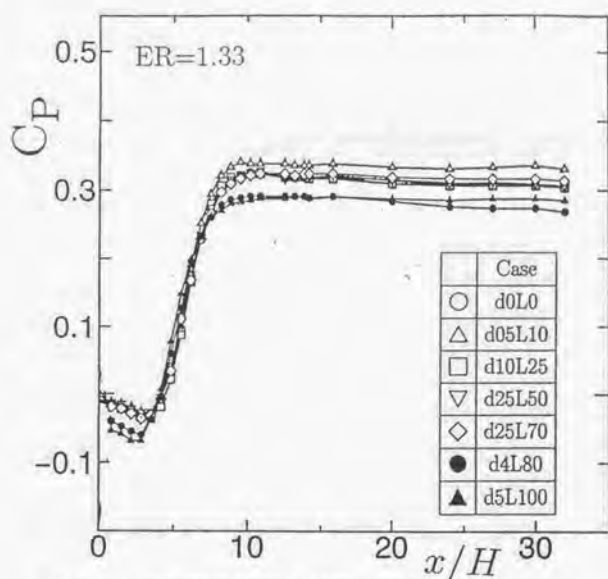


図 7.2.1 流入境界層厚さが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=1.33)

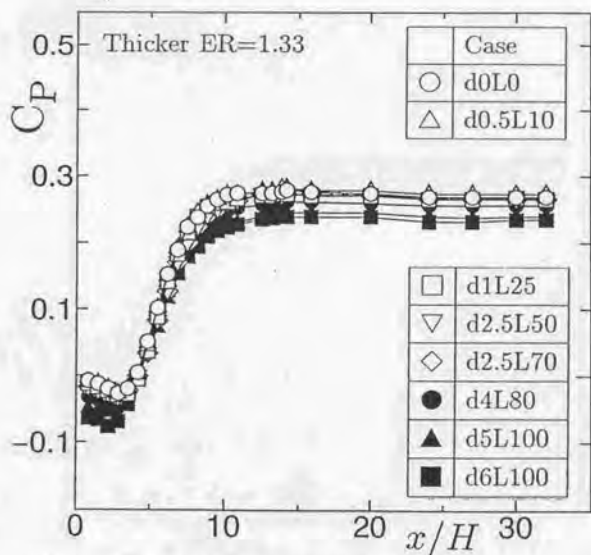


図 7.2.2 流入境界層厚さがが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=1.33)

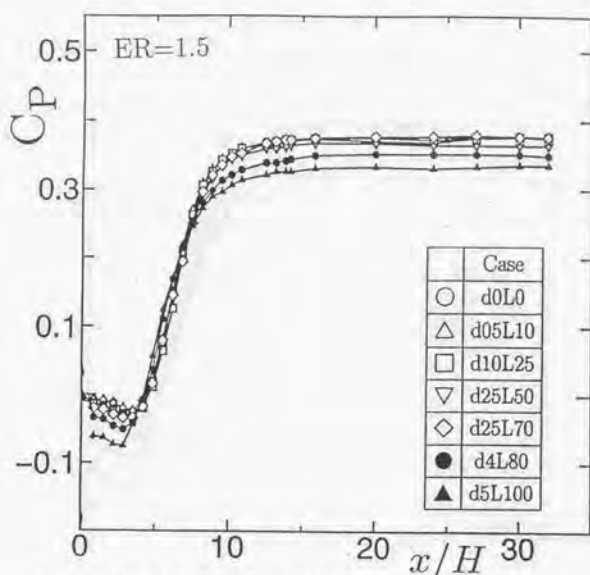


図 7.2.3 流入境界層厚さが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=1.5)

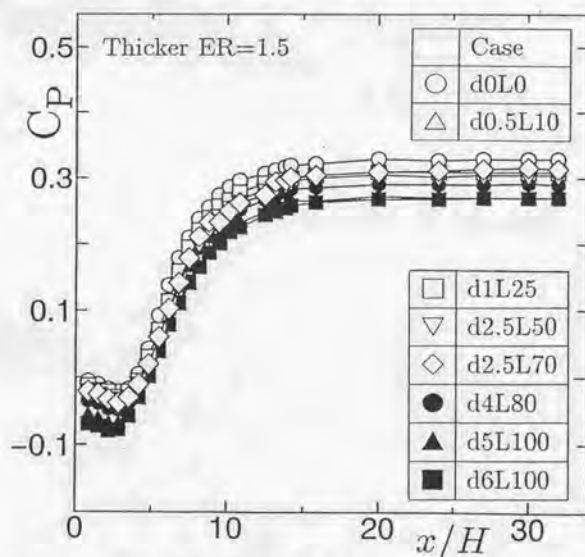


図 7.2.4 流入境界層厚さが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=1.5)

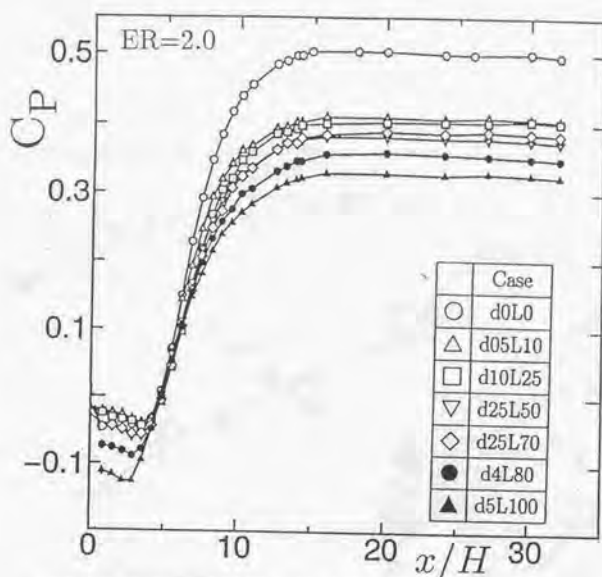


図 7.2.5 流入境界層厚さが薄い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=2.0)

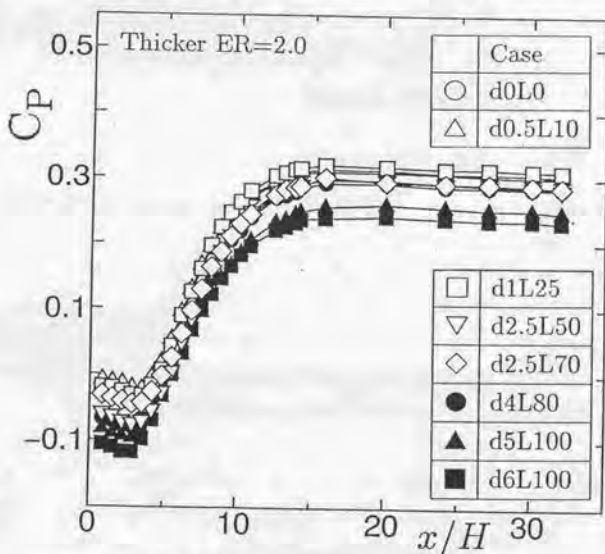


図 7.2.6 流入境界層厚さが厚い場合の
ステップ壁面上の壁面圧力分布 (ER=2.0)

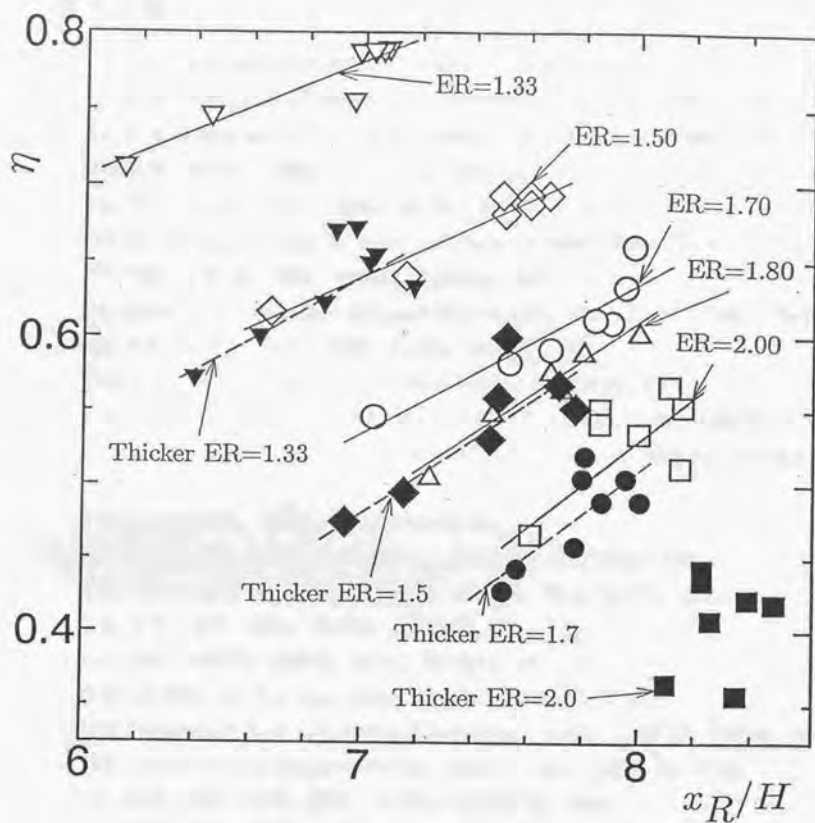


図 7.3.1 理想流体の場合の回復量をもとにした
圧力回復効率 η と再付着点距離 x_R/H の関係

参考文献

- (1) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., AIAAJ., 19-9(1981).
- (2) E.W.Adams and J.P.Johnston, Experiments in Fluids 6, (1988), 400.
- (3) E.W.Adams and J.P.Johnston, Experiments in Fluids 6, (1988), 493.
- (4) 磯本・本阿弥, 機論, 54-497, B(1988), 51.
- (5) 木谷・佐々木・有江, 機論, 50-452, B(1984), 967.
- (6) Durst, F. and Tropea, C., Proc. 3rd Symp. Turbulent Shear Flows, (1981), 18.1.
- (7) 仲條・本阿弥, 機論, 50-460, B(1984), 3159.
- (8) Driver, D.M., Seegmiller, H.L. and Marvin, J.G., AIAA J., 25-7(1987), 914.
- (9) 木谷・佐々木・安川, 機論, 51-416, B(1985), 12.
- (10) Kiya, M. and Sasaki, K., J.Fluid Mech., 137(1983), 83.
- (11) Cherry, N.J., Hillier, R. and Latour, M.E.M.P., J.fluid Mech., 144(1984), 13.
- (12) Cherry, N.J., Hillier, R. and Latour, M.E.M.P., J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., 11-1(1983), 95.
- (13) Kuehn, D.M., AIAA J., 18-3(1980), 343.
- (14) Driver, D.M. and Seegmiller, H.L., AIAA J., 23-2(1985), 163.
- (15) Bhattacharjee, S. and Scheelke, B., AIAA J., 24-4, (1986), 623.
- (16) 木谷・望月, 機論, 59-558, B(1993), 366.
- (17) 金折・本阿弥, 機論, 91-17, B(1991), 193.
- (18) J.J.Miau and K.L.Lee, AIAA J., 29-7, (1991-7), 1140.
- (19) Frederick, W. Roos and Jerome, T. Kegelman, AIAA J., 24-12, (1986), 1956.
- (20) Promode, R. and Bandyopadhyay, AIAA J., 29-7, (1991-7), 1149.
- (21) 馬淵・村田・熊田, 機論, 52-479, B(1986-7), 2619.
- (22) 鈴木・鈴木・喜多・中前, 機論, 57-536, B(1991-4), 1410.
- (23) 親川・照屋・瀬名波・屋我・馬淵, 機論, 62-595, B(1996-3), 1104.
- (24) 親川・齊藤・照屋・馬淵, 機論, 61-592, B(1995-12), 4426.
- (25) Le, H., Moin, P. and Kim, J., J.fluid Mech., 330(1997), 349.
- (26) Otugen, M.V., Experiments in Fluids 10, 1991, 273.
- (27) Chiang, S. and Chih-Ming, H., Transactions of ASME, Vol.116, JUNE 1994, 228.
- (28) Kasagi, N. and Matsunaga, A., Int.J.Heat and Fluid Flow, 16, 1995, 477.
- (29) 佐々木・木谷, 機論, 51-465, B(1985), 1615.
- (30) Ervin, J.S., Suryanarayana, N.V. and Hon Chai Ng, Transactions of ASME, J.Fluid

Eng., 111(1989), 378.

(31) Ludwig, H. and W. Tillmann, Boundary Layer Theory: Ingr. Arch., 17, 288, (1949).

(32) 大坂・亀田・望月, 機論, 62-598, B(1996-6), 2230.

(33) 磯本・本阿弥, 機論, 51-471, B(1985-11), 3732.

(34) 佐々木・木谷, 機論, 49-447, B(1983-11), 2610.

(35) Bearmann, P.W. and Zdoravkovich, J. Fluid Mech., 89(1978), 33.

(36) 石川・木谷・望月, 機論, 61-587, B(1995-7), 2409.

(37) Wavelet TOOLBOX For Use With MATLAB, The Math Works, Inc(1996).

(38) 小林・高橋, 海岸工学論文集, 41 卷, (1994), 186.

謝 辞

本研究をおこなうにあたり私は数多くの方々にお世話になりました。本論文をまとめるに際し、お世話になった方々に対して感謝の意を申し上げさせていただきます。

まず、学生時代のご指導のみならず助手として採用していただいた東京大学工学部総合試所での間、さらに私が琉球大学に職を移してからも気遣っていただき、たえず研究指導していただいた東京大学の松本洋一郎教授に心からの感謝を申し上げます。

東京大学の荒川忠一教授、笠木伸英教授、小林敏雄教授、吉識晴夫教授には本研究に対し重要かつ適切な助言とご指導をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

学生時代の指導教官である大橋秀雄東京大学名誉教授には私が琉球大学に移動後も引き続き激励いただきました。深く感謝申し上げます。

私が現在所属する琉球大学の流体工学研究室では、山里栄昭名誉教授、伊良部邦夫助教授、故真栄田義才教授、に本研究のテーマ設定および研究結果内容のディスカッションならびに公私ともに未熟な私を指導していただきました。深く感謝をささげるとともに真栄田教授のご冥福を祈らせていただきます。

また、琉球大学の親川兼勇教授、永井教授にはそれぞれ大変魅力ある分野において共同研究研究者に加えていただき、本研究にも重要な助言とご指導をいただきました。厚くお礼を申し上げます。

私が初めて流体工学の分野にふれた山口大学の流体研究室では、大坂英雄教授に卒業論文および修士論文のご指導をしていただきました。大坂教授にはその後も、東京大学、琉球大学と私自身場所を移りましたが、常に気に掛けていただき、本研究にも重要な助言とご指導をいただきました。深く感謝を申し上げます。また、影山芳郎元教授には工学に携わる者として薫陶をいただきました。深く感謝申し上げます。

最後に人生の伴侶となった香代子にはあたたかい励ましをもらいました。深い感謝の念を贈らせてもらいます。

