琉球大学学術リポジトリ
University of the Ryukyus Repository

Title	はく離・再付着流れの非定常構造に関する実験的研究
Author(s)	照屋, 功; 具志堅, 貴之; 山里, 栄昭; 伊良部, 邦夫
Citation	琉球大学工学部紀要(44): 13-20
Issue Date	1992-09
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1998
Rights	

国立大学法人
琉球大学
University of the Ryukyus

はく離・再付着流れの非定常構造に関する実験的研究

照屋 功* 具志堅 貴之** 山里 栄昭* 伊良部 邦夫*

Experimental Study on Unsteady Stuctures in a Reattaching Separated Flow Field

Isao TERUYA* Takayuki GUSHIKEN** Eisho YAMAZATO* and Kunio IRABU*

Abstract

Separated and reattaching flow fields observed in engineering equipments are extremely complex because of its unsteadiness and three-dimensional structure. It is well known that of organized large-scale vortical structures appear in the separated shear layer.

The purpose of this study is to explore experimentally the large-scale vortices in a separated and reattaching shear layer evolving from a backward facing step edge and to find the width of the free stream and the periodicity of motion of large-scale vortices.

In this investigation, the reattachment length of the shear layer was determined based on the measurements with a thermal-tuft probe. The wall pressure and the velocity fluctuations were measured with a pressure sensor and an I type hot wire probe respectively. Those data were analyzed by a FFT analyzer.

The obtained results are described as follows. (1) The reattachment length increases with the expansion ratio, W_2/W_1. When the distance X in the flow direction is normalized by the width of reattachment region ΔX_R, the forward flow fraction distributions at different expansion ratio, W_2/W_1, fall on one curve near the reattachment region. (2) According to analysis of the frequency of pressure fluctuations, the frequency of large-scale vortices is $f \cdot H/U_0 = 0.7$, where H is height of the step, f is frequency and U_0 is velocity of the main flow. (3) the peak of power spectrum of the velocity fluctuations is $f \cdot H/U_0 = 0.3 \sim 0.5$.

Key Words : Backward Facing Step, Separation, Reattachment, Unsteady Structure, Frequency Analysis.

受付：1992年5月11日

*琉球大学工学部機械工学科
Dept. of Mechanical Eng., Fac. of Eng.
**琉球大学大学院工学研究科機械工学専攻
Graduate Student, Mechanical Eng.

1．緒言

流体機器・装置内の再付着流れ場は非定常性，三次元性を有し，極めて複雑ではあるが，はく離せん断層の組織的大規模渦の存在が知られている．はく離せん断層の組織的大規模渦が流れに及ぼす影響は大きいがその大規模渦の運動のうち周期性の強い運動に着目し，これを励起し，渦運動を統制化することで再付着流れ場の本質的な現象の強化抽出，流れ場制御での利用が出来る可能性がある．

はく離せん断層はこれまで様々な基本的形状について研究されている．例えば，前縁はく離の再付着流れでは大規模渦運動の明確な周期性を示すデータが報告されている[1]．また，ダクト内の乱流後方ステップ流れの研究でもあまり明確ではないが周期性は報告されている[2]．ダクト内の後方ステップ流れでは，主流が消滅あるいはわずかしか存在しないため，大規模渦は対向壁側の渦との相互干渉を起こし，そのためにその周期性が阻害され，捕らえにくいと考えられる．

本研究の目的は，はく離・再付着流れにおける大規模渦の周期運動を解明・利用するためにダクト内のステップ流れにおいて，主流部分，すなわち非粘性流れの部分の大きさと大規模渦の運動の周期性の強度との関係を明らかにすることである．

2．実験装置

本研究では，後方片側ステップ，つまり流路内の片側の壁に階段状のステップを有する流れ場を対象とする．Fig. 1 に実験装置の概略図を示す．実験装置は，テストセクションと枠組みを別構造とした．テストセクションは厚さ10㎜の透明アクリル板製のステップ側壁，フラット側壁および上下端板から構成される．ダクト内のステップ流れにおいて，主流部分，即ち非粘性流れの部分の大きさと大規模渦運動の周期性の強度との関係を明らかにするためステップ壁，フラット壁の間隔をボルトの調整による可変構造とした．その際，フラット壁を移動し，ステップ高さは変えない．テストセクションの寸法はスパン幅 $B=970$㎜，ステップ高さ $H=60$㎜（アスペクト比 $B/H=16.2$），ステップから上流の入口流路長さは 600㎜，ステップ下流長さは2000㎜である．入口幅は最大500㎜まで広げられる．また，アクリル板にたわみが生じないよう50㎜の角パイプではしごを組み，裏面から補強した．入口形状は入口による影響を軽減するためベルマウスを取り付けた．

座標系は，流れ方向を X軸，スパン方向を Z軸，両方に垂直になるようにステップ上面から Y軸を設定した．拡大比は ER（EXPANSION RATIO）と表し，出口流路幅 W_2 と入口流路幅 W_1 の比 W_2/W_1 で定義される．本研究では 1.2，1.33，1.5，1.75，2.0 の拡大比で測定を行った．

測定は主にステップ壁側で行った．ステップ壁側に圧力分布測定用の穴をステップ上流では30㎜間隔，$X/H=18$ 以上では60㎜間隔であけ，サーマルタフト，圧力センサ共用の ϕ30㎜の穴をステップから $X/H=$

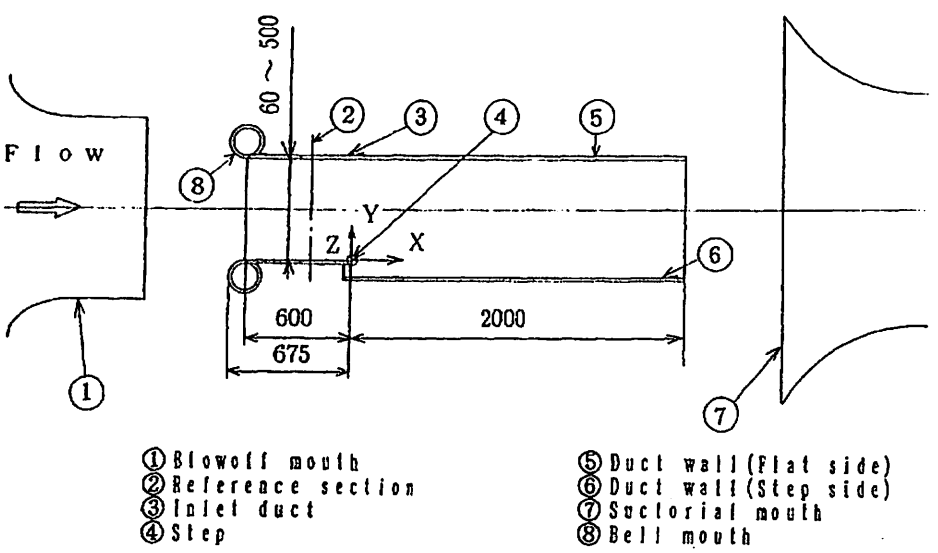

Fig. 1　Schematic view of test section.

18まで40㎜間隔であけた．実験は，琉球大学大型風洞施設（吹き出し口1 m）を用い，その流路内にテストセクションを組み込んで行った．

3．実験方法

3．1　順流率測定

はく離域の流れは定常ではなく，流速や方向は時間ともに変化して非定常の様相を呈している．そこで，流れ方向が近寄り流れと同じ方向の流れを順流，逆の方向の流れを逆流と名づける．順流となっている時間割合を順流率と定義する．さらに，再付着領域の壁面近くの流れは非定常であり，時間とともに順流，逆流と変化するので再付着点もたえず変化している．この場合，壁面近くの流れが順流率50%の位置を時間平均の再付着点と定義する．本研究ではサーマルタフトプローブ[3]を用い，順流率γを測定した．サーマルタフトプローブの信号は，約1 kHzでサンプリングし，ハードディスクに記録した後に順流率を求めた．

3．2　圧力変動

圧力センサはサーマルタフトプローブの孔に圧力センサ用のアダプタを取り付けて行う（Fig. 2）．圧力変動の信号はアンプで増幅しローパスフィルタで高周波成分をカットする．その後FFTアナライザで高速フーリエ変換し，パワスペクトルを求めフロッピーディスクに記録した．サンプリング周波数は1280Hzで一度に400個のデータを約5分間に1024回平均した．測定位置は各拡大比の再付着点付近4ケ所とした．

3．3　速度変動

速度変動の周波数解析にはI型熱線プローブを用いた．磯本ら[4]の論文では，はく離せん断層内の乱流値が再付着距離を決定する上で重要な役割を果たすのは，はく離直後の連行領域（X/H≒1.25～2.5）であると述べていることからX/H=0.5，1.5，2.5，3.5のステップ下流4断面を計測した．時間平均速度分布と乱れ強さ分布を求め，その結果より0，＋方向に8，10，12，14，16，24，－方向に－18㎜（Y/H=0，0.13，0.17，0.2，0.23，0.27，0.4，－0.3）の8点を周波数解析点に選んだ．プローブからの電気信号は，熱線流速計，リニアライザー，ローパスフィルタを通してFFTアナライザに取り込んで，1回当り400点のデータを高速フーリエ変換して1024回分（約5分間）の平均スペクトルを求め，これをフロッピーディスクに記録した．

4．実験結果および考察

新たに製作した実験装置の健全性を見るため，まず

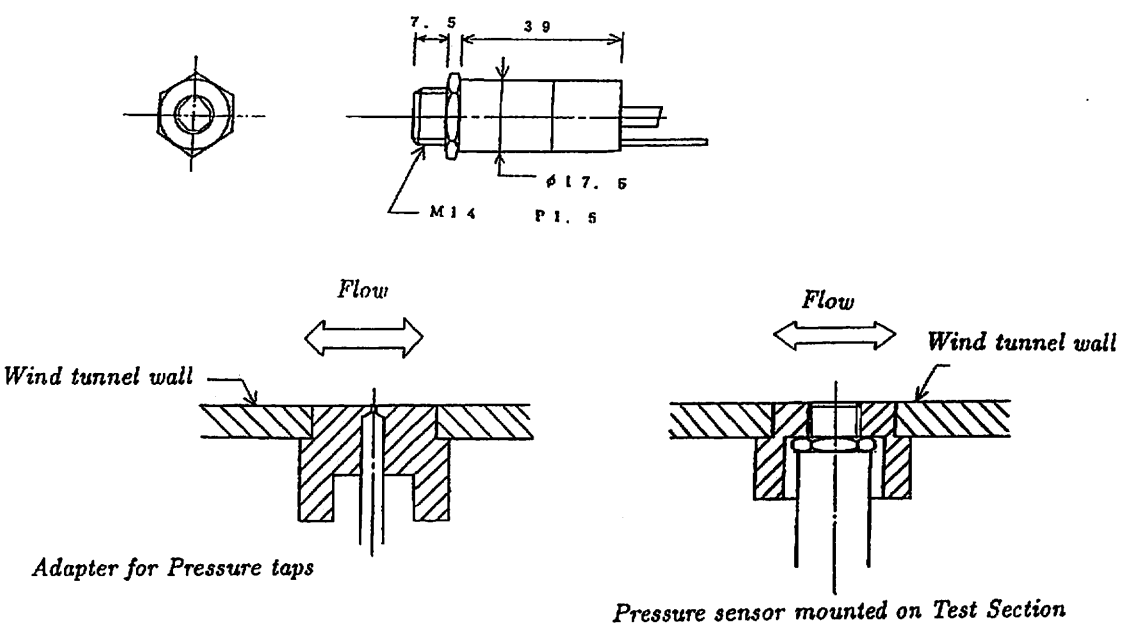

Fig. 2　Pressure sensor and wind tunnel wall on which the Pressure sensor is mounted.

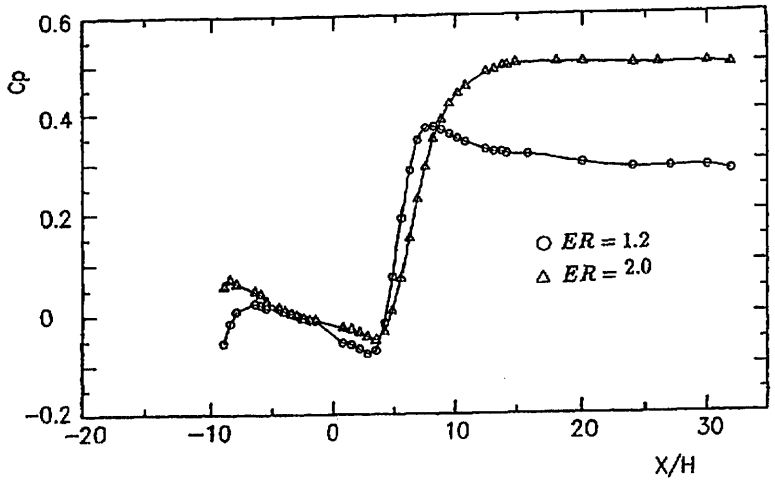

Fig. 3　Distribution of wall-pressure coefficients.

入口速度分布や壁面圧力分布，二次元性の確認などの予備実験を行った．壁面圧力分布をFig. 3に示す．入口付近で圧力係数Cp値がいったん上昇しているのは入口のベルマウスで流れが局所的に加速されるためである．その後各拡大比において$X/H=0$まで傾きがほぼ一定である．これは乱流境界層が十分発達していることを示す．ER =1.2とER =2.0を比べてみるとER =2.0の場合がステップ下流で圧力上昇が大きくなる．これは拡大比が大きい場合，速度エネルギが圧力エネルギに変換される量が大きくなるためである．ステップ下流方向でも圧力は緩やかに減少してきている．以上のことから本実験装置は後方ステップ流れ場の実験装置としてほぼ健全と言える．

4．1　順流率

Fig. 4に順流率分布を示す．順流率が0.5となる位置を，時間平均の再付着点とし，はく離点から再付着点までの距離をX_Rと表す．拡大比が大きくなるにつれ再付着距離が大きくなっている．これは，はく離せん断層がはく離してから再付着する過程で，はく離

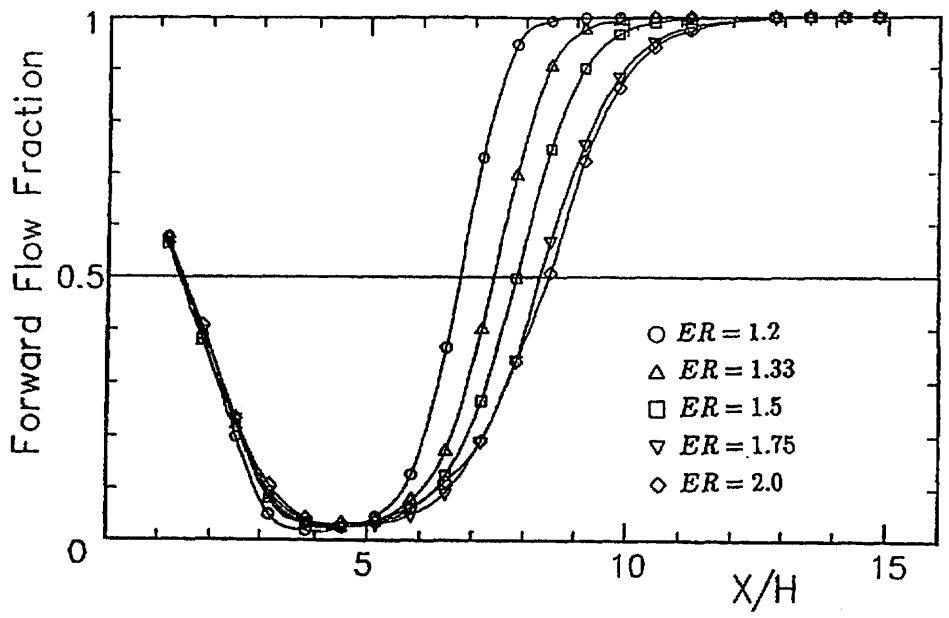

Fig. 4　Distribution of forward flow fraction.

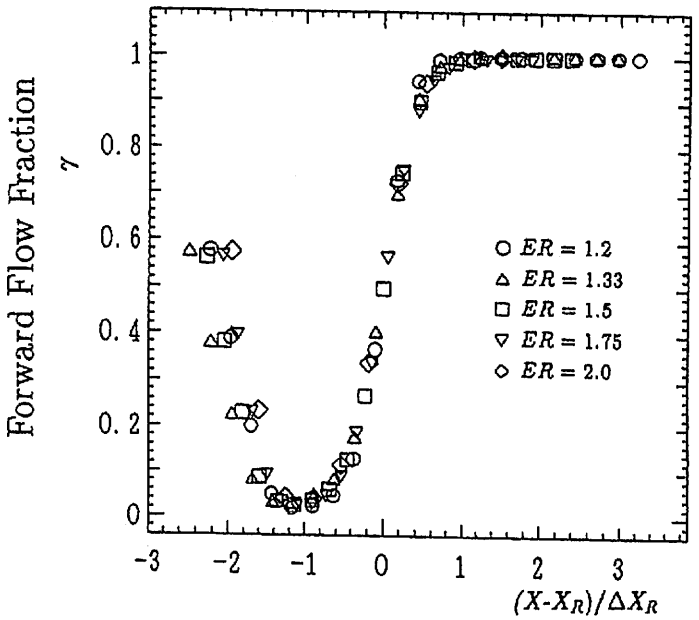

Fig. 5　Distribution of forward flow fraction versus distance normalized by length of reattachment region.

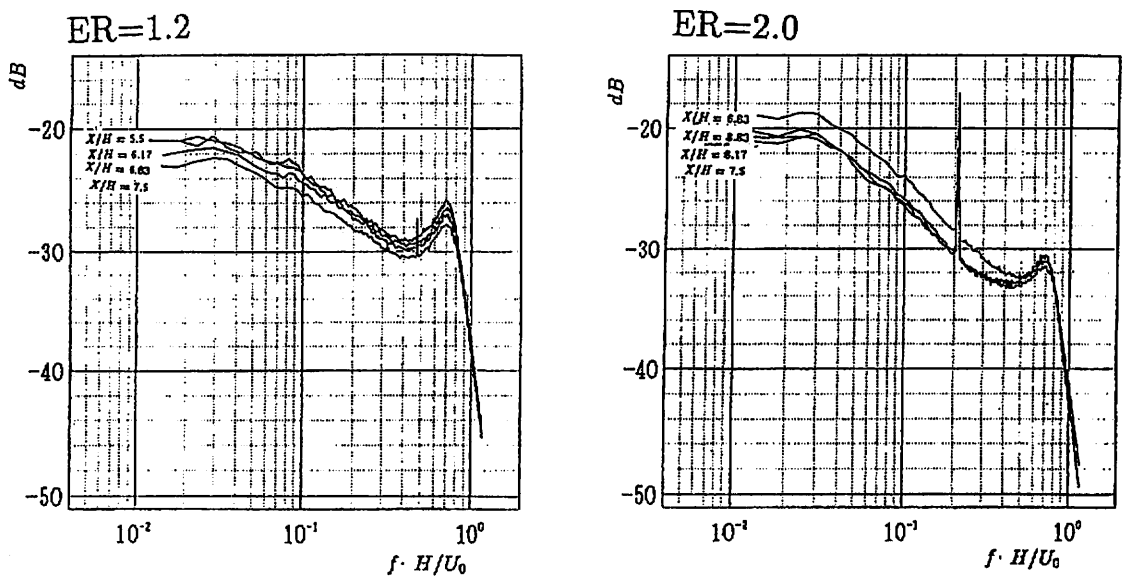

Fig. 6　Power spectrum density of pressure fluctuation.

せん断層外から流体の流入が必要であり，拡大比が大きくなるにしたがい供給源の主流部分が小さくなり，再付着距離が伸びると思われる．Fig. 5 はFig. 4 の横軸を再付着領域の幅ΔX_Rで無次元化して，順流率γの分布を再掲したものである．これをみると拡大比に関係なく再付着点をはさんで$\pm\Delta X_R/2$の領域でほぼ同じ曲線になることが判る．

4．2　周波数解析

4．2－1圧力変動

Fig. 6 に再付着点付近 4 点の圧力変動パワスペクトルを示す．$f\cdot H/U_0$=0.2 付近に鋭いピークが見られるがこれは拡大比が ER =2.0 の場合が最も高く，ER =1.2 になると消滅している．このピークの周波数は90Hz前後で，実験装置の気柱の基本振動数（音

速をv，代表長さをステップ下流長さにとりLとすると，$f=v/2L$）とほぼ一致する．また，中心周波数$f\cdot H/U_0=0.7$で幅を持ったピークがみられる．これは馬淵[4]らの実験結果とほぼ一致し，佐々木ら[5]により提唱されている再付着領域を通過する大規模渦の周波数に近い値である．よってこのピークは大規模渦の存在を示すものと思われる．ピーク値の高さは，拡大比が小さいほど大きく，拡大比が大きくなるのに伴い変動エネルギのピークパワは弱くなることを示している．これは拡大比が小さいほど流路をせん断層に比べ主流が占める割合が大きくなるので，せん断層内に主流から供給されるエネルギが大きくなり，ピークの持つエネルギも大きくなっている．

4．2－2　速度変動

はく離点下流4断面（$X/X_R=0\sim0.52$）におけるせん断層内のX方向時間平均速度U（Fig. 7）及び乱れ強さTu（Fig. 8）の分布を示す．速度分布，乱れ強さ分布より$X/H=0.5$から3.5へとせん断層が成長している．ER =2.0とER =1.2の速度分布を

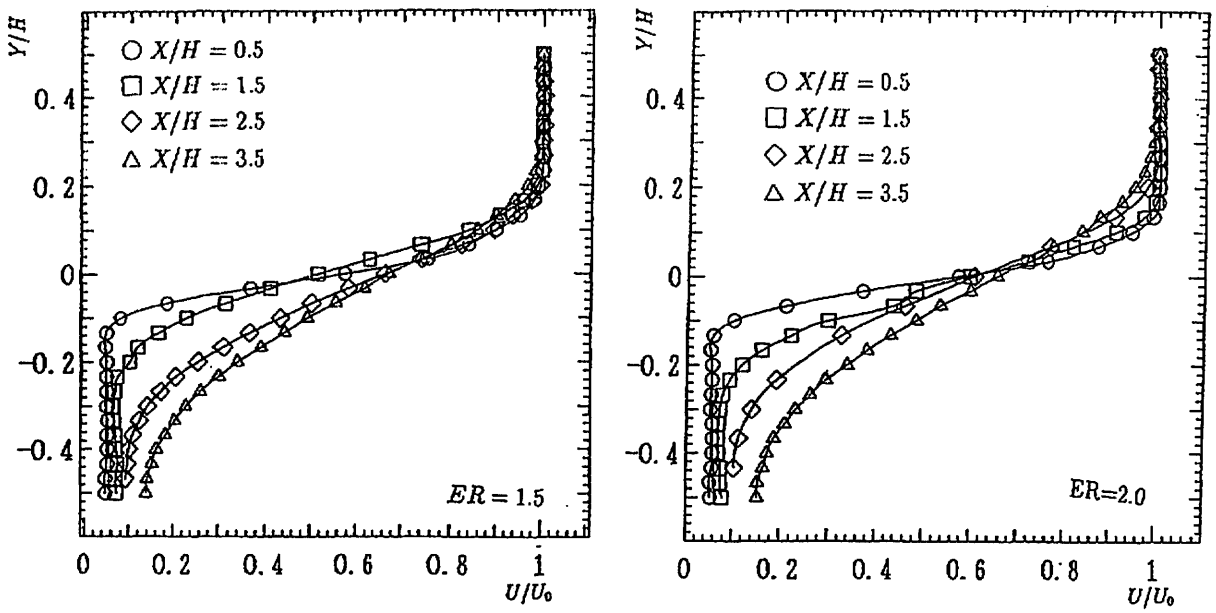

Fig. 7　Distribution of time-mean longitudinal velocity.

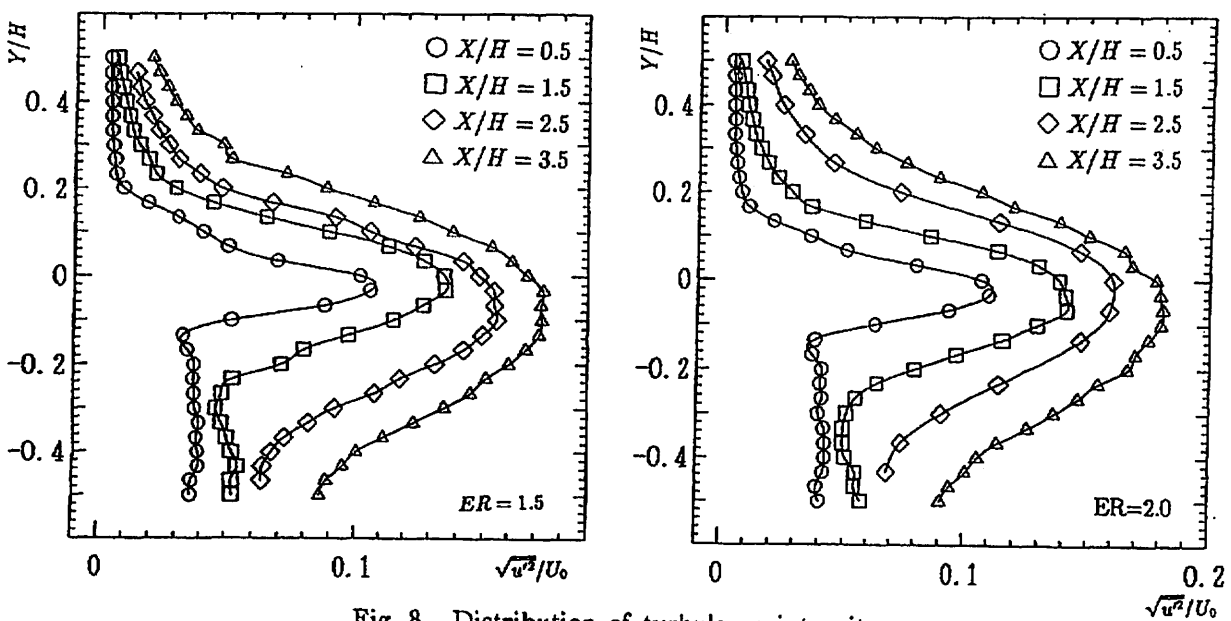

Fig. 8　Distribution of turbulence intensity.

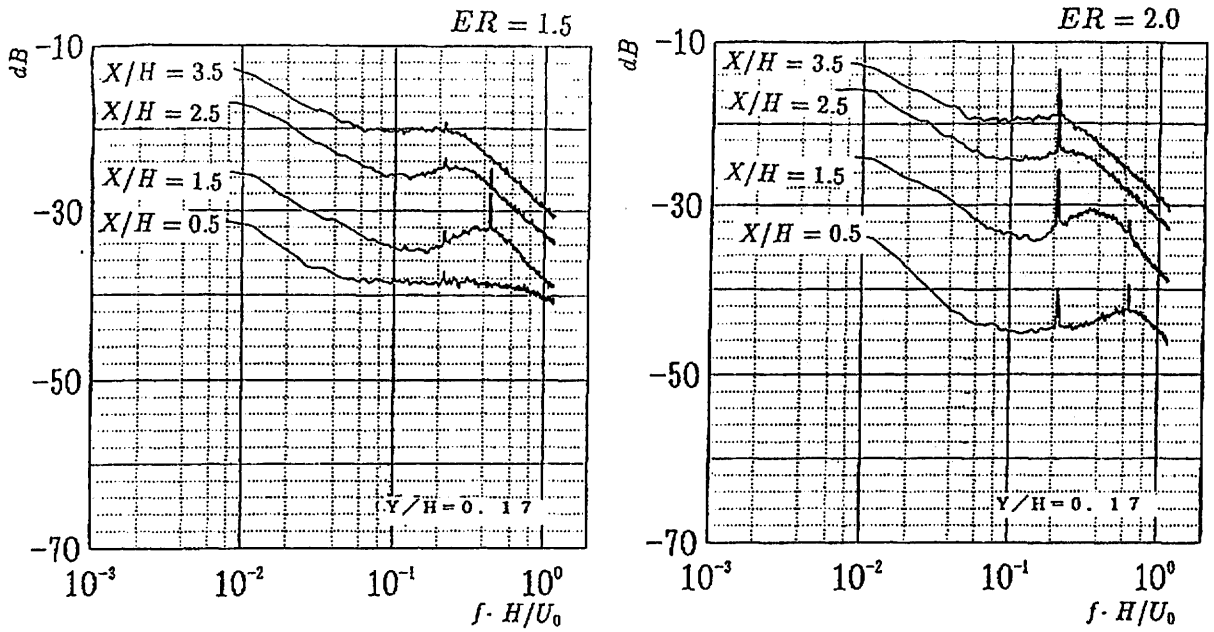

Fig. 9　Power spectrum density of velocity fluctuation.

比べてみると，ER =2.0 の場合，X/H=0 ～ 0.3 付近で主流が消滅してきているのがわかる．これより拡大比が大きいとはく離せん断層と対向壁の境界層が相互干渉を起こしていると思われる．乱れ強さ分布からは，拡大比による差異は見られない．これらの分布より周波数解析の対象としてせん断層外縁付近の計測点を選んだ．

速度変動のパワスペクトルを示す．Fig. 9 はそれぞれER =1.5 とER =2.0 の場合である．$f\cdot H/U_0$= 0.2 付近で卓越したピークがある．これは気柱振動による影響と思われる．しかし，この周波数$f\cdot H/U_0$= 0.2 で円柱からの渦放出が知られており，詳細な検討が必要である．各測定断面のX/H=1.5 ～ 3.5 については中心周波数$f\cdot H/U_0$=0.3 ～ 0.5 で，ある程度幅をもったピークがあるが，ER =1.5 の場合，X/H=0.5 ではピークがない．ピークの原因は渦のエネルギがそこに集中しているからであり，下流に行くにしたがって，中心周波数が高周波領域から低周波領域へと移動している．これは，せん断層のエネルギの高周波成分が低周波成分に移ってきていることを示す．また中心周波数のパワは下流にいくに従って大きくなってきている．森ら[9]によるとこれらは，はく離せん断層内の大規模渦が次々と合体を繰り返しながら移動しているためである．次に二つの拡大比を比較すると無次元化周波数$f\cdot H/U_0$=0.3 ～ 0.5 の比較的大きなピークの中心周波数は変わらない．また乱れ強さ分布にも見られるように測定位置での乱れ強さは拡大比によってあまり変化がない．しかし拡大比が大きくなるにつれてある程度幅を持ったピークもより顕著になり，ER =2.0 の X/H=0.5 ではピークが現れてくる．

5．結論

新たに設計・製作した実験装置の健全性を確認し，拡大比による再付着距離への影響及び，拡大比と大規模渦の周期性との関係の解明を試みた．これらより，以下の結論を得た．

1）拡大比が大きくなると，再付着距離も長くなり，距離 X を再現付着距離ΔX_Rで無次元化すれば拡大比に関係なく順流率分布は同一曲線になる．

2）大規模渦に関係すると思われる再付着点付近の壁面圧力変動のパワスペクトルピークは$f\cdot H/U_0$= 0.7 にある．またスペクトルピークは拡大比が小さくなるほど高くなる．

3）大規模渦に関係すると思われるはく離せん断層の速度変動のパワスペクトルピークは中心周波数$f\cdot H/U_0$=0.3 ～ 0.5 にある．

4）中心周波数のパワは下流にいくに従って大きくなり，はく離せん断層内の大規模渦が次々と合体を繰

り返しながら移動していると思われる．また，はく離直後の渦のパワは拡大比が大きくなるに従い顕著になる．

今後は，この新しく製作したアスペクト比の大きい実験装置を用いて，流れ場制御の観点から周期的かく乱を付加した場合の大規模渦の挙動などを探っていきたい．

終わりに実験装置の設計及び製作にあたり助力を受けた當間進一技官，実験に協力して下さった当時大学院生の日下部　純二君，また当時卒研生の古吉功明，島袋善和の両君に謝意を表する．

参考文献

(1) 佐々木・木谷，機論，49－447，B (1983).
(2) ROOS，F.W. and KEGELMAN, J.T., AIAA Journal，Vol.24，Dec. 1986，1956－1963.
(3) 照屋・山里・伊良部，琉球大学工学部紀要，40 (1990)，11.
(4) 馬淵・村田・熊田，機論，52－479，B (1986).
(5) 佐々木・木谷，機論，51－461，B (1985).
(6) 森・内田・酒井，機論，52－481，B (1986).