

# 風洞縮流壁における乱流境界層の逆遷移

三栖 功 (青山学院大学)

## Reverse transition of turbulent boundary layer flow on curved wall of two dimensional symmetrical contraction

I. Misu

Aoyama Gakuin University

### ABSTRACT

Investigation of reverse transition was done in a turbulent boundary layer along a curved wall of two-dimensional symmetrical contraction. The experiment was carried out on contractions of three kinds: Cheers, cosine, Witoszynski types. The reverse transition was examined in terms of the boundary-layer thickness, velocity profiles and turbulence of the boundary-layer flow. It was found that the criteria proposed by Patel-Head must be modified using the wall-curvature.

Key words: boundary layer, reverse transition, curved wall

### 1. 緒言

風洞整流筒で旋回性や非一様な速度分布がある程度除去された流れは、縮流筒を通過することによって相対乱れ強さを更に減少する。同様な現象は急加速下の乱流境界層内においても起こり、その結果として乱流境界層は層流状態へ移行する。この現象は Sternberg(1954)<sup>1)</sup>によって初めて超音速流で発見された。この現象を乱流境界層の逆遷移あるいは層流化と呼んでいる。平板乱流境界層の逆遷移は平板に沿う圧力分布形に関係せず、無次元圧力こう配の大きさがある値に達すると開始する。逆遷移過程の主な特徴は、相対乱れ強さの減少、局所表面摩擦係数(局所熱伝達率)の減少、対数速度分布からの逸脱などがあげられる。これらの特徴は、工学的な応用において数多く見られる縦方向に曲がった壁面(ターボ機械の羽根、航空機の翼や空気取入れ口、プロペラのハブ部、ロケットノズル)においても当てはまると思われる。本稿では逆遷移開始条件に及ぼす壁面曲率の影響を明確にするため、風洞で用いられる二次元縮流筒壁に沿う乱流境界層流の挙動について報告する。

### 2. 実験装置・方法・条件

装置全体図を図1に示す。図2に使用した3種類の縮流筒(Cheers型、cosine型、Witoszynski型)

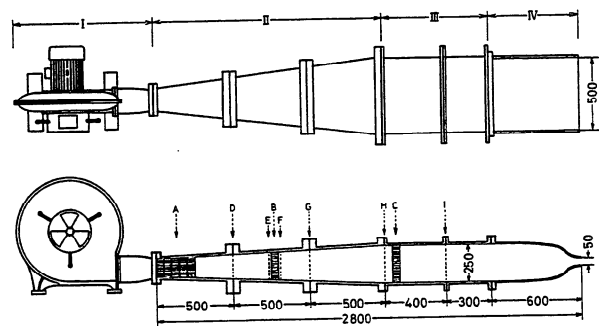


図1 実験装置

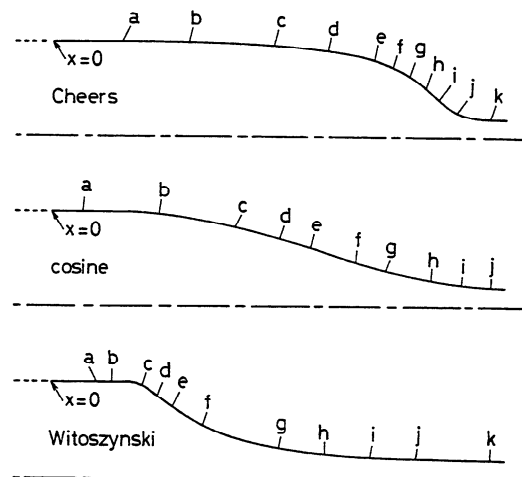


図2 縮流筒壁の曲率形状 (1) 測点位置

口断面は500mm×250mm, 出口断面は500mm×50mm, 面積収縮比は5である。その他の風路の寸法は図1に示す通りである。縮流壁の中心線に沿って壁面に垂直に直径0.3mmの静圧孔をあけ、それらの位置を図2中に記号a~kで示した。また境界層測定用ピトー管(開口断面1mm×0.07mm)およびI型熱線プローブ(直径5μm, タングステン線)の挿入用孔(直径8mm)を縮流壁の中心線から外側40mm、測定点より約25mm下流側に開けた。境界層速度および乱れ分布測定は縮流壁に垂直方向に行い、その際不用の孔はその都度粘土を用いて密閉した。測定は縮流筒出口速度 $U_0$ と出口の半幅 $d_0(=25\text{mm})$ に基づくレイノルズ数を $3.5 \times 10^4$ に固定して行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 縮流壁に沿う圧力こう配

縮流壁に沿うx座標の原点を入口位置とし、各静圧孔の静圧と出口の静圧・動圧による静圧係数 $C_p = 2(p - p_0) / \rho U_0^2$ の無次元こう配を図3に示す。同図には縮流筒の対称面に平板を設置した時に得られる無次元静圧こう配を参考値として描いてある。cosine型とWitoszynski型の入口付近( $x/d_0 \approx 4$ )に僅かな逆圧力こう配領域が認められる。

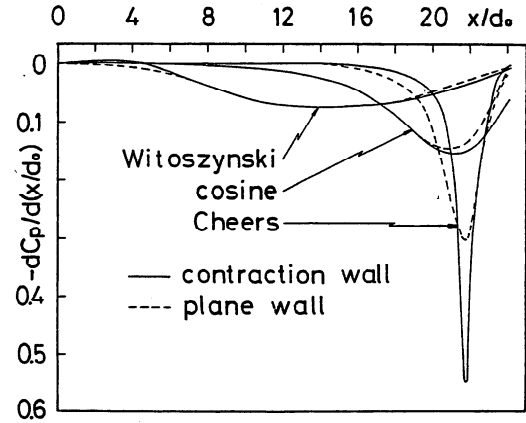


図3 縮流壁に沿う圧力こう配

#### 3.2 境界層の平均特性

縦方向の曲率半径がRである壁近傍において、壁からyの距離にある流れのポテンシャル速度を $U_p$ 、壁上( $y=0$ )の速度を $U_{pw}$ とすると、 $U_p/U_{pw} = R/(R+y)$ である。Cheersの理論<sup>2)</sup>、積分関係法<sup>3)</sup>より求めた $U_{pw}$ を用いて、境界層内の速度分布 $U/U_p$ を図4に示す。点線はポテンシャル速度分布 $U_p/U_{pw}$ である。Cheers型、cosine型、Witoszynski型に対する平均速度形を見ると、それぞれd, c, c点から加速の影響が現われ、壁近傍速度の顕著な増加が見られる。境界層内の速度がポテンシャル速度 $U_p$ に等しくなる高さを境界層厚さ $\delta$ と定義する。縮流壁境界層の局所表面摩擦係数 $C_f$ 、排除厚さ $\delta^*$ 、運動量厚 $\theta$ 、形状係数Hを次のように定義し、図5, 6にそれらの変化を示す。

$$C_f = 2\tau_w / (\rho U_{pw}^2)$$

$$\delta^* = \int_0^\delta (1 - U/U_p) R/(R+y) dy$$

$$\theta = \int_0^\delta (U/U_p)(1 - U/U_p)(R/(R+y))^2 dy$$

$$H = \delta^* / \theta$$

ここに $\delta^* \ll R$ ,  $\theta \ll R$ とする。

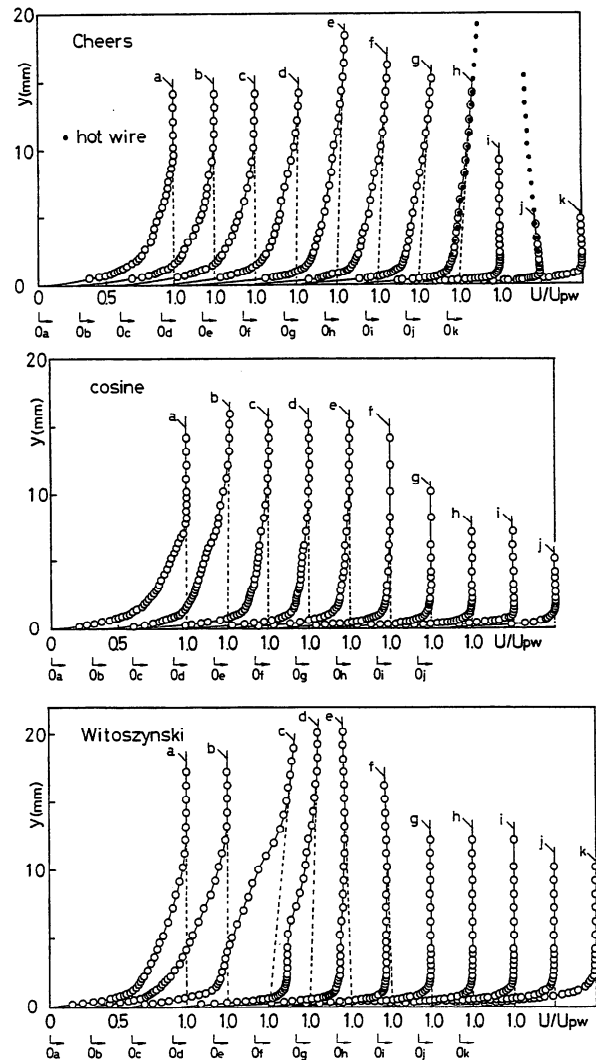


図4 縮流壁上の境界層の速度分布

なお壁面せん断応力 $\tau_w$ は壁近傍の速度分布の傾斜から求めている。著者の行った平板境界層の実験結果によれば、運動量厚さが最小になる位置が逆遷移の終了位置となり、また形状係数Hの極小位置のやや上流側で逆遷移が開始することが分かっている。

図7は境界層厚さと曲率半径の比を示す。So-Mellor<sup>4)</sup>によれば $\delta/R \approx \pm 0.1$ の場合でも壁法則が成立することを述べている。図8は壁法則の一例である。高加速状態下の乱流境界層速度分布は壁法則から上方へ逸脱する。これは平衡乱流境界層の崩壊を示していると考えられる。Patel-Head<sup>5)</sup>は円管の中心部に軸対称物体を置き逆遷移の研究を行った。彼らは、速度分布が壁法則を上回った時を逆遷移開始時とする判定基準を提唱している。縮流壁境界層に対してこの基準を適用すると、Cheers, cosine, Witoszynski型に対して、それぞれh点、c点、d点付近で逆遷移が開始し、すべて凹曲面部分にある。図9は逆遷移過程における相対乱れ強さ分布の一例である。縦軸は流れ方向の変動速度のrms値を $U_{rms}$ で除した値である。同図からCheers型ではf点、cosine型ではb点、Witoszynski型ではc点の外層領域において乱れ強さの増加領域が見られ、これらの位置は逆遷移の開始点より上流の凹曲面上にある。乱れ強さが増加している領域には速度分布の変曲点が存在し(図4)、凹曲面に沿う境界層の逆遷移開始は、何等かの形で流線曲率の影響が現れるものと思われる。図10に境界層のバッファ領域で乱れ強さが極大になる壁面からの高さを壁座標 $Y_{max}^+$ で示した。形状係数 $H$ の極小点、壁法則から上方への変速分布の逸脱位置、 $Y_{max}^+$ が増加し始める位置を比較すると、これらの位置は良く合致することが分かる。

### 3.3 在来の逆遷移開始基準との比較

逆遷移開始基準の代表としてPatel-Headの基準を示す。ここに $\nu$ 、 $u_\tau$ 、 $p$ は動粘性係数、摩擦速度、壁面静圧である。

$$\Delta p = \frac{\nu}{\rho u_\tau^3} \frac{dp}{dx} \approx -0.0235$$

図11に $\Delta_p$ の変化を示す。図中矢印は $Y_{max}^+$ の変化から決定した逆遷移の開始点であり、これらの位置はいずれの縮流壁境界層に対しても、Patel-Headの基準に達した下流側位置になる。図12に縮流壁境界層の逆遷移開始位置における $\Delta_{pc}$ と $\delta^*/R$ 、 $\theta/R$ の関係を示す。

## 4. 結言

曲面上の乱流境界層が急加速されると乱流から層流状態へ逆遷移する。平板境界層に対する逆遷移基準を、境界層厚さと曲率半径の比を用いて修正することにより、縮流壁境界層に対する逆遷移開始基準を表わすことが出来た。

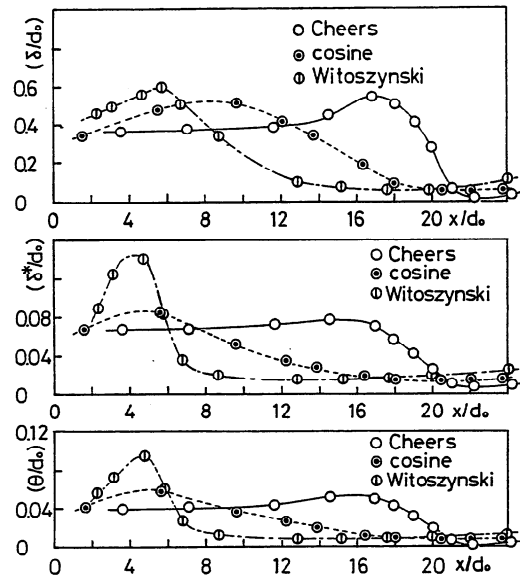


図5 境界層厚さ、排除厚さ、運動量厚さ

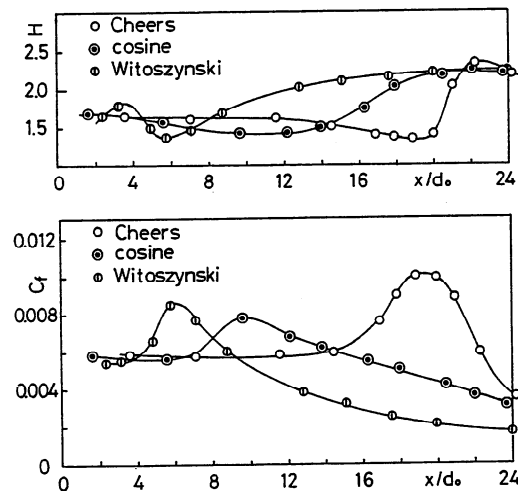


図6 形状係数、局所表面摩擦係数

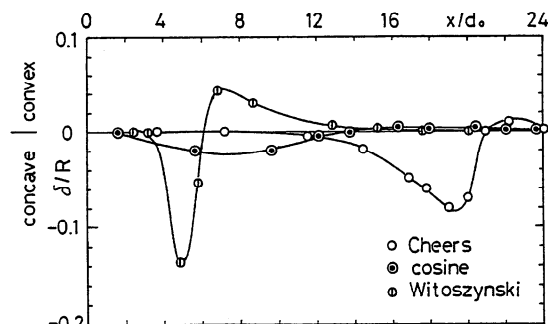


図7 境界層厚さと曲率半径の比

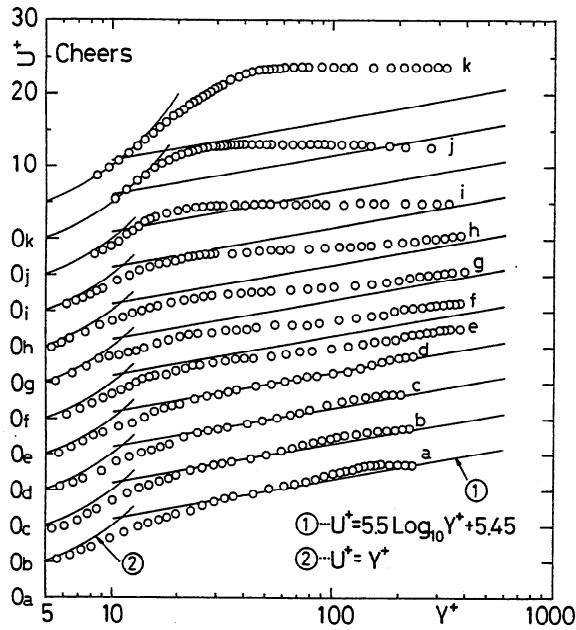


図8 壁法則 (Cheers 型の場合)

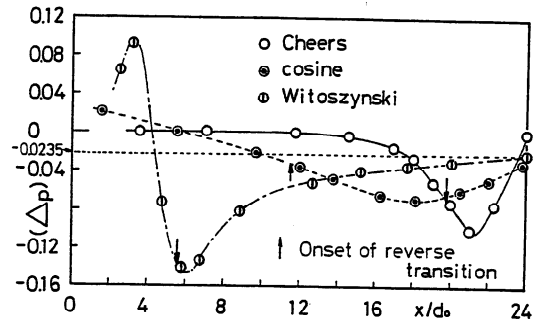


図11 逆遷移開始基準 (Patel-Head)

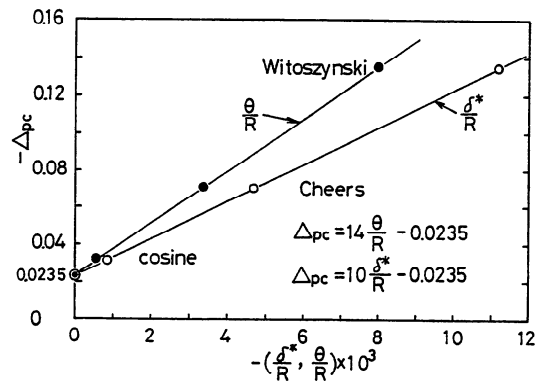


図12 縮流壁に対する逆遷移開始基準

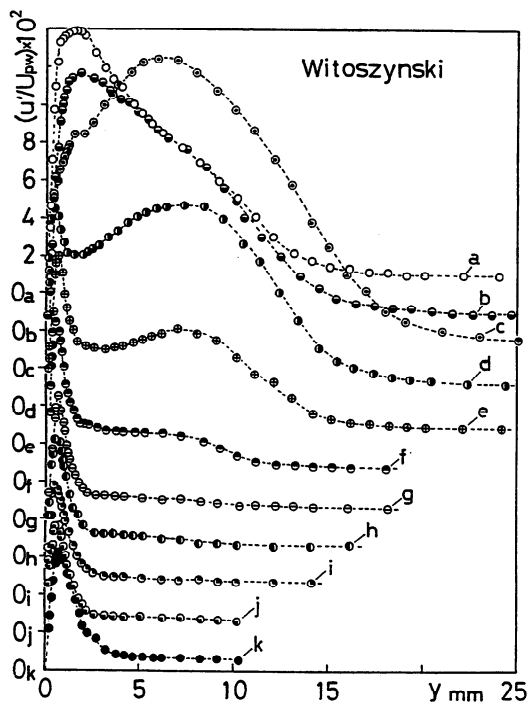


図9 乱れ強さ分布 (Witoszynski 型の場合)

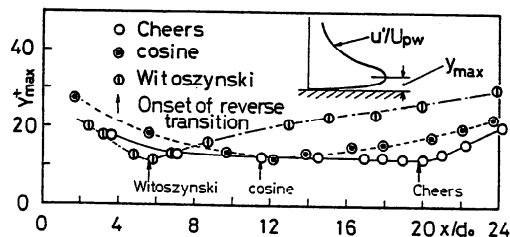


図10 バッファ領域で最大乱れ強さを示す高さ

参考文献

- 1) Sternberg, J., U. S. Army Bal. Res. Lab., No. 906 (1954)
- 2) Cheers, F., A. R. C., R. & M. No. 2137 (1945)
- 3) Little, S. G. and Archer, R. D., J. Hydronautics, Vol. 5, No. 1 (1971), pp. 25-30
- 4) So, R. M. C. and Mellor, G., Aero. Quart., Vol. 26, Part 1 (1975), pp. 25-40
- 5) Patel, V. C. and Head, M. R., J. Fluid Mech., Vol. 34, Part 2 (1968), pp. 371-392