

剥離点まわりの流れの音波に対する受容性

浅井 雅人, 金子 正一

東京都立科学技術大学

Receptivity of Separated Flow to Acoustic Forcing

by

Masahito Asai and Masakazu Kaneko

Tokyo Metropolitan Institute of Technology

ABSTRACT

Receptivity of the flow separating at a convex corner is examined experimentally. Acoustic forcing is applied to excite instability waves. A particular attention is paid to the comparison of receptivity coefficient, i.e. ratio of the amplitude of excited instability wave to that of the external disturbance, between the cases of a sharp corner and a slightly round corner (whose radius of curvature is 20 mm). The results show that the receptivity coefficient is quite sensitive to such a slight difference of corner geometry. It is also found that the receptivity affects the reattachment location of the separated flow appreciably.

Key Words: separated flow, receptivity, flow instability, sound.

1. 序論

壁面上境界層は大きな逆圧力勾配に出会うと壁から剥離する。剥離した境界層（剥離剪断層）は攪乱に対して極めて不安定¹⁾となるので、再付着（乱流再付着）位置や剥離泡の規模は自由流中の乱れや音などの外乱の影響を強く受ける。また、人為的な音響外乱により剥離剪断層の不安定性を刺激し剥離構造を制御することも可能である^{2~7)}。

音波により渦が励起できるのは、音波が壁面上に誘起する渦度変動（変動ストークス層）が剥離点まわりの急激な空間変化により不安定波動（固有モード）の波数成分を生みだし、その波数成分（不安定モードの種）が変曲点不安定性により急成長するためである。この外乱から剪断層固有の波動モードが生まれる（或いは外乱により励起される）過程・機構は受容性⁸⁾と呼ばれ、外乱（音波）の強さと励起される固有モード（不安定波動）との強さの関係（Receptivity Coefficient）は受容性の強さの目安となる。個々の流れにおいて受容性の強さを知ることは流れの効率的制御を目指すうえでも、また遷移の予測にとっても重要である。しかしながら、受容性が剥離点近傍の流れや境界条件（剥離点近傍の壁面形状）の詳細にどれほど敏感かについてこれ迄のところ十分な

データが与えられていない。そこで本研究では、剥離流の典型的な例として、平面壁上に発達する境界層が平行壁から斜面壁に急に变化する壁の角部から層流剥離する流れを取り上げ、剥離点まわりでの外乱に対する受容性特に角部の壁面曲率と受容性の強さの関係を外乱として音波を用いて実験的に調べる。

2. 実験装置及び方法

実験は300mm×200mmの噴き口を持つ吹き出し式風洞で行なわれた。実験装置の概要を図1に示す。測定部の左右には大きな側壁（600mm×650mm）があり主流の二次元性を維持している。測定観察は、噴き出し口の50mm下流に置かれた斜面（傾斜角10°）付き平板モデル上で行われた。上流の平行部上面に発達する境界層が角部で剥がれ斜面上に剥離泡を形成する。ここで、実験には角部の曲率を変えた二つのモデルを使用した。一つは鋭利な角部を有し、他方は角部を半径20mmの円弧状に加工してある：それ以外の形状は全く同じである。音波は角部から800mm下流のスピーカにより与えられる。座標系は角部を原点とし、流れ方向にx軸、垂直上向きにy軸である。

時間平均速度及び変動の測定は定温度型熱線風速計で行なった。I型熱線プローブの受感部は直径5μm、長さ1mmのタングステン線である。以下の実験はすべて主流流速 $U_\infty = 5\text{m/s}$ で行われた。風洞噴き口での流速の非一様性は1%未満、乱れ強度は0.15%以下である。

3. 剥離泡における攪乱の増幅

図2は、音波を与えない自然状態での平均速度のy分布である。ただし、すべての分布は熱線風速計の出力(直線化器出力)をそのまま図示している。x=-10mm位置での境界層の運動量厚さ(約0.4mm)に基づくレイノルズ数 R_θ は約130である。x=20~60mmの速度分布が壁近くに向かって一度極小値をとり、再び少し増加するのは壁近くでの逆流を意味しており、角部からx=80mm付近まで剥離泡が形成されているのがわかる。ただし、再付着するまでに乱流に遷移して再付着位置はx=80~100mmの範囲で時間的に変動している。

図3は、この剥離泡における攪乱の発達をx=30mmおよび40mm位置でのu変動のワースペクトルで示している。いずれも攪乱が最大振幅をとる最大剪断y位置(速度分布の変曲点y位置)で測定されている。x=30mm付近から100~200Hzの周波数成分の変動が選択的に急増幅している。この増幅は剥離剪断層の変曲点不安定によるものであり、実際、線形安定性計算により最大増幅周波数が150Hz付近であることを確認している。

4 剥離流の受容性

上述の流れに潜む外乱から不安定波動が生まれ(受容され)、下流に増幅する様子をより詳細に調べるためにスピーカーから音波攪乱を与える。音波の周波数は自然の状態での最大増幅周波数付近の160Hzとした。音波攪乱の強さは、剥離点付近のポテンシャル領域(x,y)=(-10mm,10mm)で測定したu変動の実効値振幅u'で言えば主流の0.0022%である。図4はx=30および40mm位置の最大剪断y位置(最大実効値y位置)で測定したu変動のワースペクトルであり、音波周波数(160Hz)の線スペクトルが現れているのが見える。この160Hzの線スペクトルを抽出し、u変動の実効値と位相のx方向変化を求めた。ここで、抽出したu変動成分は

$$u(x, y, t) = \sqrt{2}u'(x, y)\cos[2\pi ft + \theta(x, y)]$$

のように表され、 $u'(x, y)$ は実効値振幅、 $\theta(x, y)$ は位相を表す。また、 $\alpha = -\partial\theta/\partial x$ は波数を与える。図5は最

大実効値 u'_m と位相 θ (最大剪断y位置で測定)のx方向変化を表している。攪乱の位相はx=10mm付近まで殆ど一定であり、波長の長い音波(160Hzの場合、波長は約2m)による変動が支配的であることを意味する。x=15mmからは位相が直線的に変化し、剥離点の下流で不安定波動(波長は約12.5mm)が指数関数増幅(増幅率は約0.2mm⁻¹)を行っているのがわかる。この時の剥離点まわりでの受容性の強さを剥離点での初期振幅 u'_0 とポテンシャル流領域での音波に伴うu変動振幅 u' の比、 u'/u'_0 で定義する。指数関数増幅曲線を原点の剥離点まで外挿し、剥離点での初期振幅 u'_{m0} を求めると $u'_{m0}/U_\infty = 0.0007\%$ となる。一方、ポテンシャル流領域でのu変動振幅は、 $u'/U_\infty = 0.0022\%$ である。従って、受容性の強さ $u'_{m0}/u'_s = 0.3$ となる。

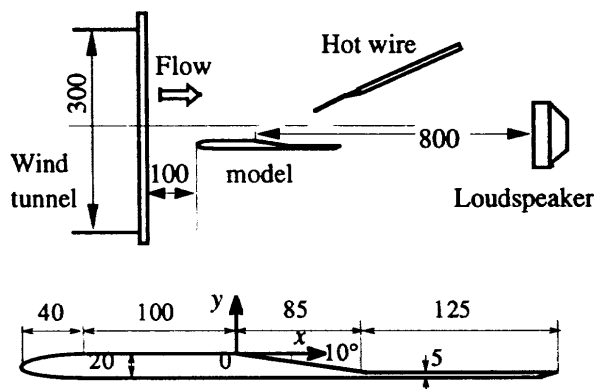


図1 実験装置の概要(単位mm)

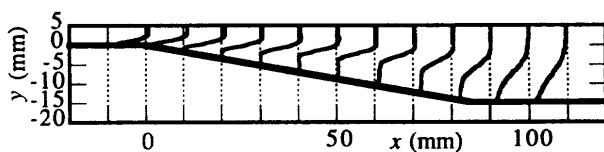


図2 平均速度分布

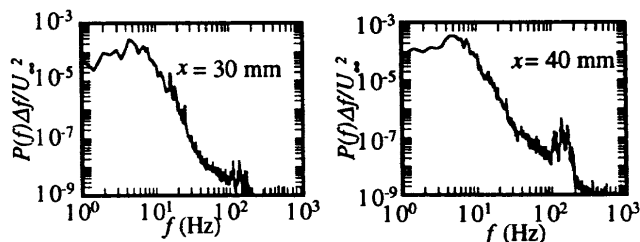


図3 u変動のワースペクトル

このような剥離点まわりの流れの受容性にとって鋭い角部の存在は重要である。即ち、角部では流体粒子は加速し強い渦度場を生み出すとともにその振動ストークス層が空間的に急激に空間変化 (x, y 方向) するため固有モード成分が顕著に生じると考えられる。しかも、実効値分布の波打ち (波長2mの音波と10mm程度の波長の固有モードとの重なりによる) が示すように、剥離点の上流 ($x < 0$) ですでに固有モードが生まれている。そこで、角部を少し丸めたモデルを用い受容性の強さの変化を調べた。図6は u 変動成分 (160Hz成分) の最大実効値と位相 (最大実効値 y 位置) の x 方向変化を比較している。剥離点 ($x=0$) での初期振幅を外挿すると、角部に丸みを付けたことによって励起される不安定波動の初期振幅が約半分になることがわかる。事実、丸い角部の場合には、音波と励起された固有モードとの重なりによる $x < 10\text{mm}$ までの実効値振幅の波打ちが顕著でなく、相対的に音波による速度変動が支配的であることがわかる。

図7は丸い角の場合の角部の上流 $x = -5\text{mm}, -10\text{mm}, -20\text{mm}$ 位置での u 変動の実効値の y 分布である。境界層の外側 ($y > 3\text{mm}$) のポテンシャル流域ではどの x 位置でも違いは殆ど無いが、壁近くでは角 ($x=0$) に近づくにつれて流体粒子の加速により振幅が大きくなり平板上の振動ストークス層の分布と大きくずれる。このようなストークス層の空間変化 (x, y 方向) は固有モードを生み出すことになる。シャープな角の場合にはストークス層の空間変化はより大きくなり、励起される固有モードの振幅が増すと考えられる。

最後に、上述のような受容性の違いは、同じ外乱環境下でも剥離泡の発達に当然顕著な影響を及ぼす。例えば、図8は音波を導入していない自然状態での二つのモデル上の平均速度分布を比較したものである。剥離点近くの $x=20\text{mm}$ では平均速度分布の差はごく僅かであるが、下流の $x=80\text{mm}$ においては受容された攪乱の初期振幅の差により、剥離泡の発達に大きな違いが生じるのがわかる。

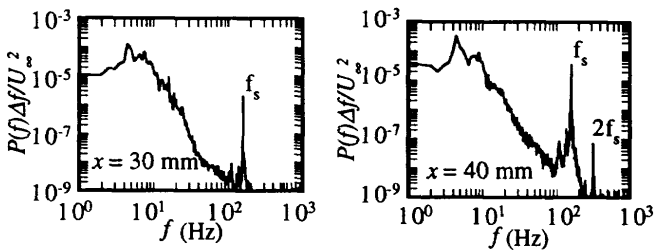


図4 u 変動のパワースペクトル (音波有り)

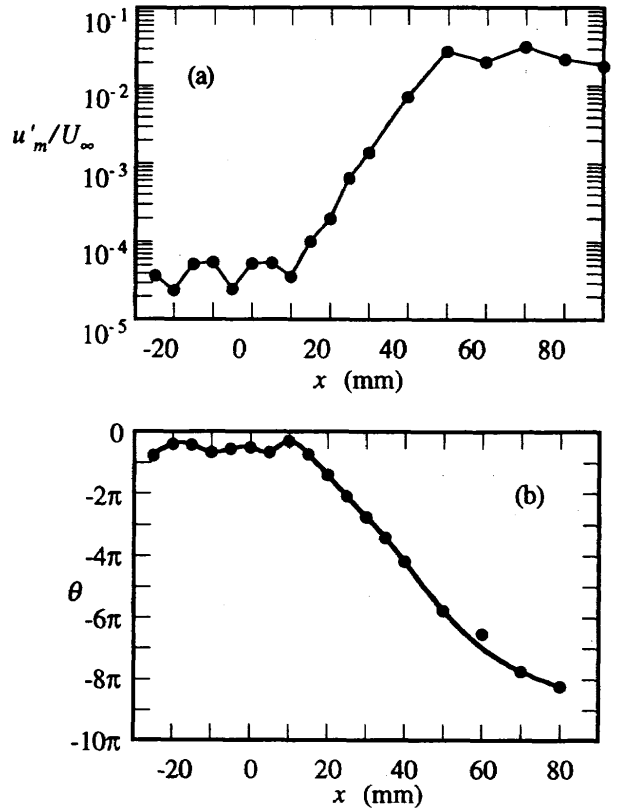


図5 u 変動の実効値と位相の変化 (160Hz成分抽出)

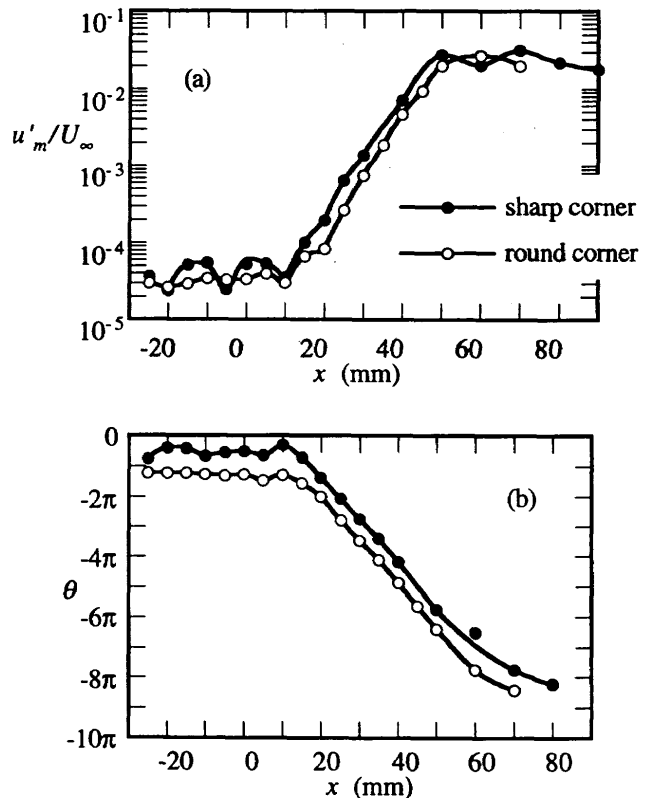


図6 u 変動の実効値と位相の変化 (160Hz成分抽出)

5. まとめ

本研究では角部からの剥離流について、剥離点まわりの受容性を外乱として音波を用いて実験的に調べた。重要な結論は以下の通りである。

- 1) 剥離点の上流からすでに固有モード成分が生まれ始めており、その成分が剥離点下流の変曲点不安定により剥離点の一波長内で音波成分よりも卓越した不安定波動に成長する。
- 2) 励起される不安定波動の初期振幅 (u'_{m0}/u'_s) は剥離点の角部を少し丸める (曲率半径20mm) と鋭利な角部の場合の半分程度に下がる。
- 3) このような受容性の強さの違いは、剥離泡の発達に顕著な影響を与え得る。

なお、本研究は部分的に東京都特定学術研究費の援助を受けた。

引用文献

- 1) Dovgal, A.V., Kozlov, V.V. and Michalke, A. (1994) Prog. Aerospace Sci. 30, 61-94.
- 2) Ahuja, K.K. and Burrin, R.H. (1984) AIAA paper 84-2298.
- 3) Zaman, K.B.M.Q, Bar-Sever, A. and Mangalam, S.M. (1987) J. Fluid Mech. 182, 127-148.
- 4) Nishioka, M., Asai, M. and Yoshida, S. (1990) AIAA J. 28, 1909-1915.
- 5) 浅井雅人, 西岡通男 (1991) ながれ 10, 35-46.
- 6) 浅井雅人, 西岡通男, 古本伸一 (1994) 日本航空宇宙学会誌 42, 395-402.
- 7) 西岡通男, 浅井雅人, 古本伸一 (1995) 日本航空宇宙学会誌 43, 53-58.
- 8) Morkovin, M.V. (1969) AFFDL-TR-68-149.

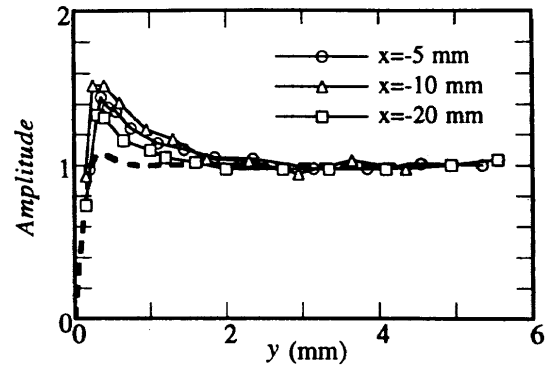


図7 剥離点上流での u 変動の実効値 (160Hz成分抽出) の y 分布: 角部の曲率半径 $R=20\text{mm}$ の場合。破線: 平板上の振動ストークス層。

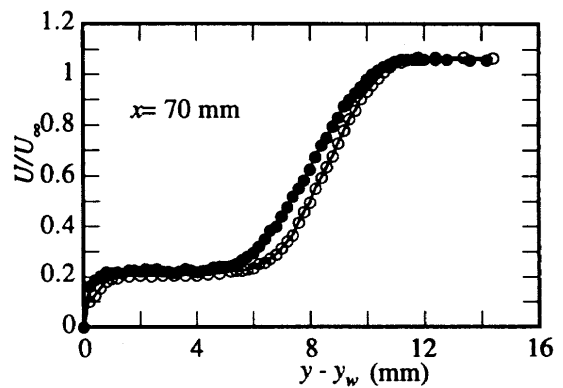
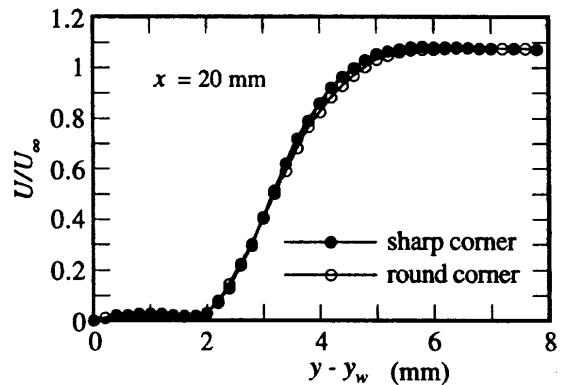


図8 平均速度分布の比較