

超音速境界層の振動マッハ波に対する受容性—前縁形状の影響

On the Leading-edge Receptivity of Supersonic Boundary Layer to Oscillating Mach Waves :
Effect of the Leading-edge Shape

○坂上 昇史 (阪府大工) 西岡 通男 (阪府大工)

Shoji SAKAUE and Michio NISHIOKA

Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefecture University, Sakai Osaka 599-8531, Japan

The present paper describes our numerical study of supersonic boundary layer receptivity to oscillating Mach waves incident onto leading edge at a freestream Mach number 2.2. We examine the external disturbance field around the leading edge in detail to clarify the formation of oscillating Stokes layer and its evolution into TS wave. The receptivity process is found to be essentially the same for two cases examined, namely a flat plate of zero thickness and a thin plate of parabolic cross section.

1. はじめに

超音速風洞実験で翼境界層の乱流遷移を調べる場合、風洞側壁の乱流境界層から放射される音波の影響が問題となることはよく知られている¹⁾。そのため、音波が物体前縁に入射する場合の超音速境界層の受容過程を調べた実験^{2,3)}や数値的研究⁴⁻⁷⁾が行われているが、音波が超音速境界層に入射する場合の流れ場は複雑で実験的に明らかにすることが困難であること、数値的研究でTS波動が励起される前縁近傍の受容領域を詳しく調べた研究がほとんど無いことから、入射音波に対する超音速境界層の受容性はまだ解明されていない。そこで、筆者らは、主流中を伝播する音波をポテンシャル流理論を用いて振動マッハ波として記述し、それが前縁に入射するときの受容過程を数値計算で調べ^{6,7)}、(1)TS波動は前縁のごく近傍で形成されること、(2)励起されるTS波動の振幅は物体前縁に形成される衝撃波直後の変動場に依存すること、などを明らかにした。

本研究では、物体前縁の形状がTS波動の形成に及ぼす影響を調べるため、平板上に形成される境界層排除厚さをもとにした薄い放物線形状の断面をもつ前縁部に振動マッハ波が入射する場合について数値計算を行い、平板境界層の場合との比較を行った。

2. 数値計算法と計算モデル

主流マッハ数 $M_1 = 2.2$ の超音速流中に迎角零で置かれた平板および放物線形状物体に形成される2次元超音速境界層を対象とする。座標原点を平板前縁におき、主流方向に x 軸、垂直方向に y 軸をとる。支配方程式は主流速度 U_1 、密度 ρ_1 、粘性係数 μ_1 で無次元化された2次元圧縮性 N-S 方程式を用いる。計算領域下流境界 $x = 40$ における排除厚さを基準長さとし、レイノルズ数は 649.44、前縁近傍の最小格子幅に基づくレイノルズ数は 3.25 である。放物線形状は、平板上に形成される境界層排除厚さをもとに、 $y = \pm (x/40)^{1/2}$ で与える。

計算は、対流項に3次精度の TVD 法⁸⁾、粘性項に2次精度の中心差分を用いて離散化し、時間積分は2次精度の陽解法を用いる。

振動マッハ波は、局所的・周期的で微小な強さの吹き出し・吸い込み源から放射され平板前縁に下方から入射するものとする。この局所攪乱源を y 方向速度変動 $\tilde{v} = v(x) e^{i\omega t}$ 、

$$v(x) = \begin{cases} A_w \cos^2(\pi(x-x_0)/2s) & : |x-x_0| \leq s \\ 0 & : |x-x_0| > s \end{cases}$$

で表し、角周波数 ω を 0.18、強さ A_w を主流速度の 0.2%、長さ $2s$ を 4.0、攪乱源の中心を $x_0 = -23.5$ 、 $y_0 = -12.0$ とする。この中心から引いたマッハ線上に前縁が存在する。なお、角周波数 $\omega = 0.18$ の TS 波動は $x = 60$ で増幅率最大となるものであり、その固有値は $\alpha = 0.2766 - i 0.1344 \times 10^{-2}$ 、波長 λ は 22.71 である。

3. 計算結果と考察

図1は前縁近傍の変動場を圧力変動と速度変動の等位相面で示す。図1(a)は非粘性流、(b)は平板、(c)は放物線形状物体の場合である。マッハ線の方向に伝播している変動が、前縁に形成される衝撃波等の不連続面を過ぎた後、下流方向へ伝播していく様子が見てとれる。非粘性流の場合、不連続面下流の流れ場は一樣であるので、平面波として伝播している。粘性流の場合、衝撃波下流の流れ場が一樣でないため、圧力変動に着目すると等位相面は変形しているが、境界層には平面波に近い圧力変動が周期的に加えられていることがわかる。また、前縁近傍で位相変化が急激であることから、境界層内に励起された変動はTS波動の空間スケールを容易に獲得することが予想される。一方、速度変動は境界層外縁付近で y 方向に急激な位相変化を示している。図2は、前縁近傍の u 変動の振幅と位相の y 分布を示す。 u 変動は、境界層外縁近傍に振幅のピークをもち、壁面に向かって位相が進んでいる分布となっており、図1に示す圧力変動によって振動 Stokes 層的な変動が形成されていることがわかる。この前縁近傍の Stokes 層が TS 波動の種となると考えられ、その振幅が大きな放物線形状物体のほうがより強い TS 波動が発生すると予想される。

図3は $x = 5$ および $x = 30$ における過渡変動の振幅と位相の y 分布を示す。図中○は平板、△は放物線形状物体、実線および破線はそれぞれの境界層分布を局所平行流を仮定して行った線形安定性解析の結果である。 $x = 30$ において過渡変動の振幅・位相の y 分布は固有解のそれにほぼ一致していることから、励起された変動はTS波動であることが確認される。また、位相分布に着目すると、 $x = 5$ (波長の 1/4 程度) まではTS波動の構造を獲得していることが確認できる。図4は過渡変動の壁面上の振幅と位相の x 方向変化を示す。前縁近傍で振幅が急激に減少しているのは、境界層の発達に伴う拡散が強調されているためである。TS波動の振幅は、先の予想とは異なり、 $x \geq 30$ では平板の方が大きくなっている。その原因として主流中に存在する外乱の影響などが考えられるが、今後より詳細な比較検討を行う必要がある。

この研究は一部、文部科学省科学研究費補助金(No. 12125203, No. 12750812, No. 14750722)の援助を受けた。

引用文献

- 1) J. Laufer: J. Aerospace Science, 28 (1961) 685-692.
- 2) A. D. Kosinov, A. A. Maslov, N. V. Semionov: J. Applied Mech. and Tech. Physics, 38-1 (1997) 45-51.
- 3) A. A. Maslov, A. N. Shiplyuk, A. A. Sidorenko, D. Arnal: 2001, J. Fluid Mech., 426 (2001) 73-94.
- 4) X. Zhong: (2001) J. Fluid Mech. 441 (2001) 315-367.
- 5) K. Yamashita, H. Maekawa: AIAA 2001-1798(2001).
- 6) S. Sakaue, M. Nishioka: *Laminar-Turbulent Transition* (Springer, 2000) 481-486.

7) S. Sakaue, M. Nishioka: *Proc. 9th Asian Congress of Fluid Mech.* (2002).

8) S. R. Chakravarthy, S. Osher: *AIAA 85-0363* (1985).

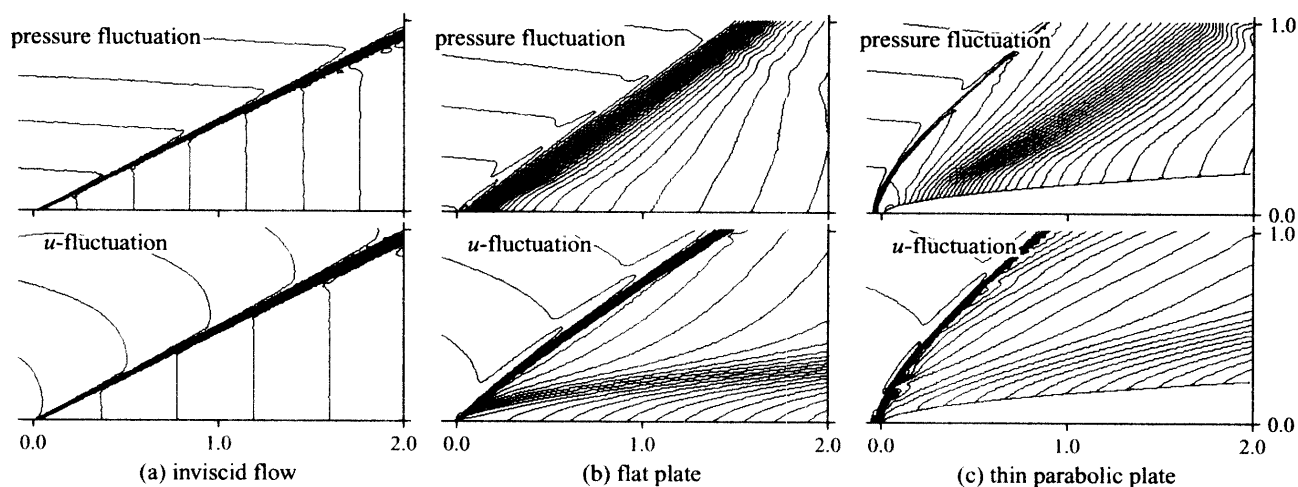


Fig. 1 Phase contour of pressure and u -fluctuations.

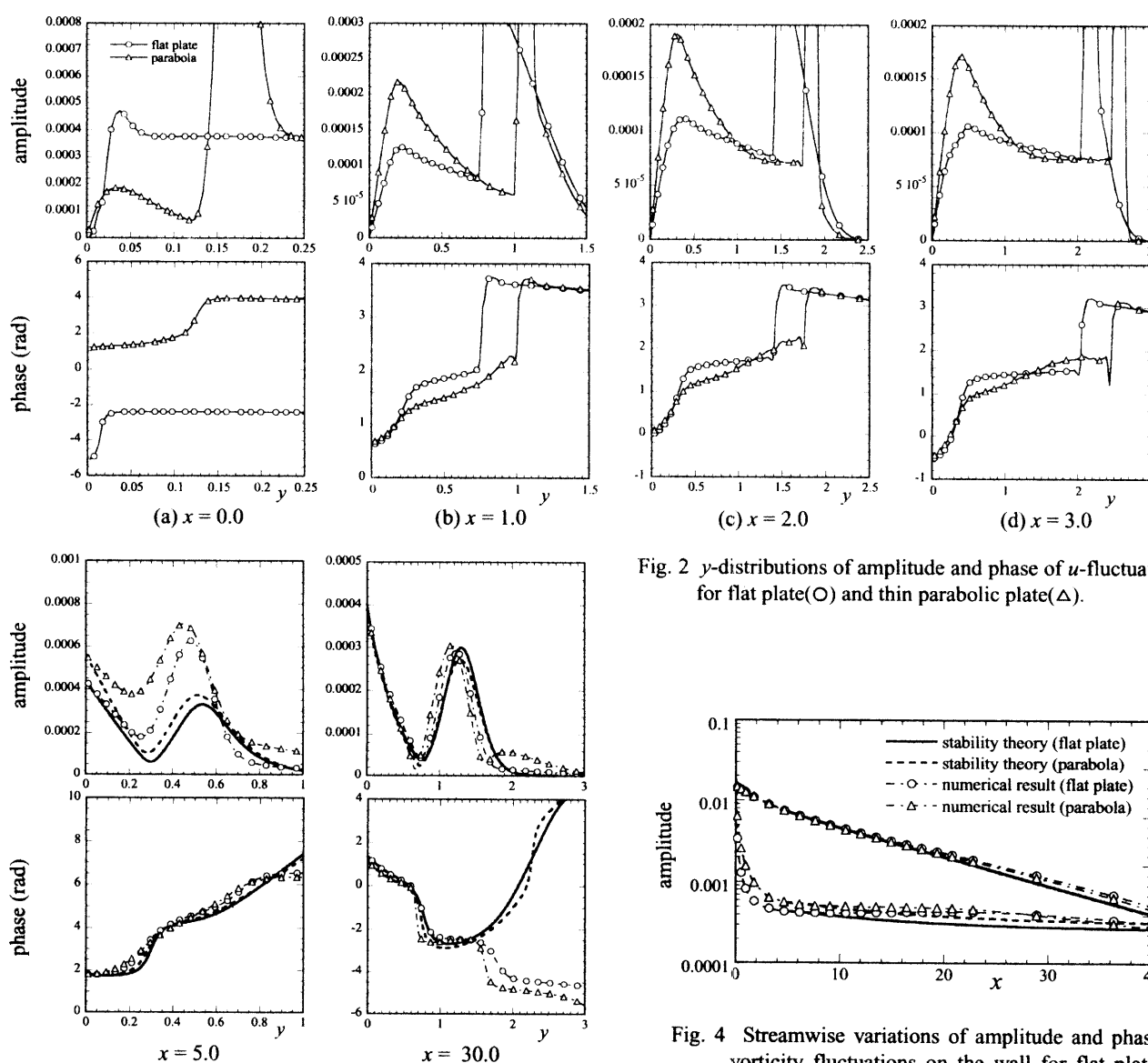


Fig. 2 y -distributions of amplitude and phase of u -fluctuations for flat plate(O) and thin parabolic plate(Δ).

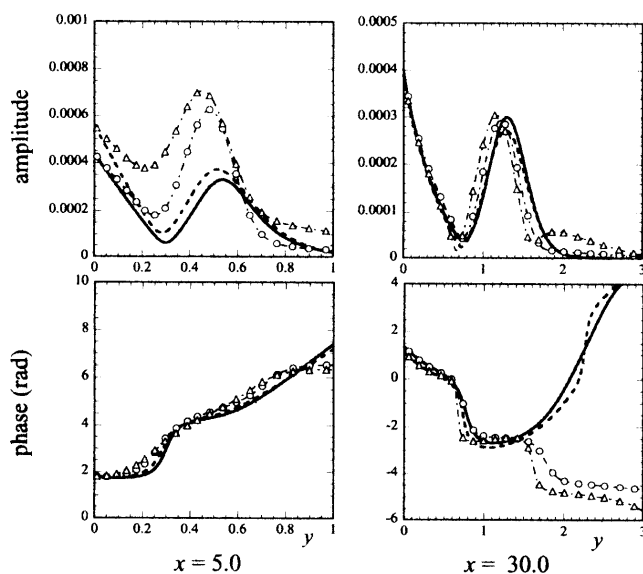


Fig. 3 y -distributions of amplitude and phase of vorticity fluctuations for flat plate(O) and thin parabolic plate(Δ). Solid lines and broken lines represent the results from linear stability analysis.

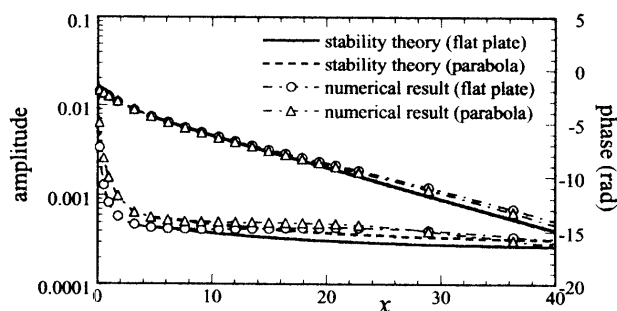


Fig. 4 Streamwise variations of amplitude and phase of vorticity fluctuations on the wall for flat plate(O) and thin parabolic plate(Δ). Solid lines and broken lines represent the results from linear stability analysis.