

No.9 超音速境界層の振動マッハ波に対する受容性

坂上 昇史（阪府大工） 西岡 通男（阪府大工）

On the Receptivity of Supersonic Boundary Layer to Oscillating Mach Waves

Shoji SAKAUE* and Michio NISHIOKA*

* Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefecture University

ABSTRACT

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.

Key Words: Supersonic Boundary Layer, Receptivity, Oscillating Mach Wave, Stokes Layer

1. はじめに

超音速風洞実験で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、平板前縁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、外乱場としての前縁近傍の変動場を非粘性・粘性流について詳細に調べ、励起されるTS波動の受容過程やその強さを決める要因について調べた。

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上に形成される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、流れと垂直方向に 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 、代表長さ L 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代

表長さに取り、レイノルズ数は 649.44 である。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。

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。境界条件は、壁面は滑りなし・断熱、上下境界は無反射、下流境界は零次外挿とし、上流境界は一樣流に以下に示す振動マッハ波を重ね合わせて与えた。

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 および 18.0、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。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 $\alpha = 0.2766 - i0.1344 \times 10^{-2}$ 、波長 λ は 22.71 である。なお、結果は主に $2s = 4.0$ の場合について示す。

3. 計算結果と考察

前縁近傍の変動場を圧力変動と x 方向の速度 u 変動の等位相面で図1に示す。図1(a)は非粘性流、(b)は粘性流の場合である。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、不連続面下流は時間平均流

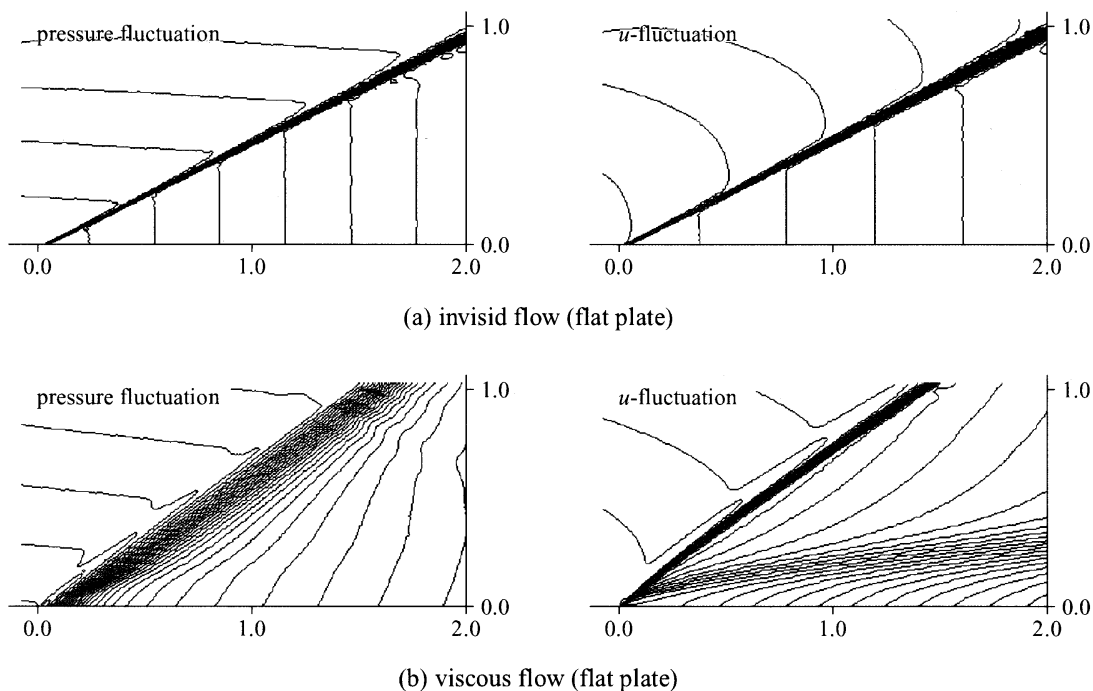


Fig. 1 Phase contour of pressure and u -fluctuations near the leading-edge.

が一様流でかつ壁面の境界条件 ($v=0$) より、変動は壁面に沿った平面波として伝播している。粘性が作用する場合、境界層の形成に伴って v 成分 (時間平均) が生じるため、圧力変動に着目すると等位相面は平面波の状態から変形しているが、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、 u 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ストークス層の変動が形成されており、この前縁近傍の振動ストークス層が TS 波動の種となると考えられる。

下流における u 変動の振幅と位相の y 分布を図 3 に示す。図中実線は各断面で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。 $x=30$ において振幅・位相の y 分布は固有解の分布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) までに TS 波動の構造を獲得していることが確認できる。

図 4 は壁面上渦度変動の振幅と位相の x 方向変化を示す。図中実線は線形安定性解析の結果から予想される TS 波動の振幅と位相の変化である。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。振幅変化は主流中に振動マッハ波に伴う変動が存在するため安定性解析の予測からはずれているが、位相変化から境界層内に励起された変動が TS 波動であることが前縁から $1/4$ 波長程度から確認される。

TS 波動の強さを決定する要因について考察するため、振動マッハ波、振動ストークス層および励起される TS 波動の振幅を表 1 にまとめる。振動マッハ波の振幅は、平板が存在しない場合の平板前縁位置での振幅である。Maslov ら³⁾は、この振動マッハ波の振幅と TS 波動の振幅の比 (A_{TS}/A_M) で受容係数を定義し、実験条件によってその値が大きく変化することを指摘している。表より、本計算でも同じ傾向であることがわかる。一方、振動ストークス層の振幅との比 (A_{TS}/A_S) はほぼ一定であり、TS 波動の振幅は、入射する振動マッハ波ではなく前縁に形成される振動ストークス層の振幅に比例することがわかる。すなわち、TS 波動の受容領域は前縁近傍の振動ストークス層が形成される領域であると考えられる。なお、今回の計算結果は、単一周波数の外乱に対する厚み零の平板境界層の応答のみで

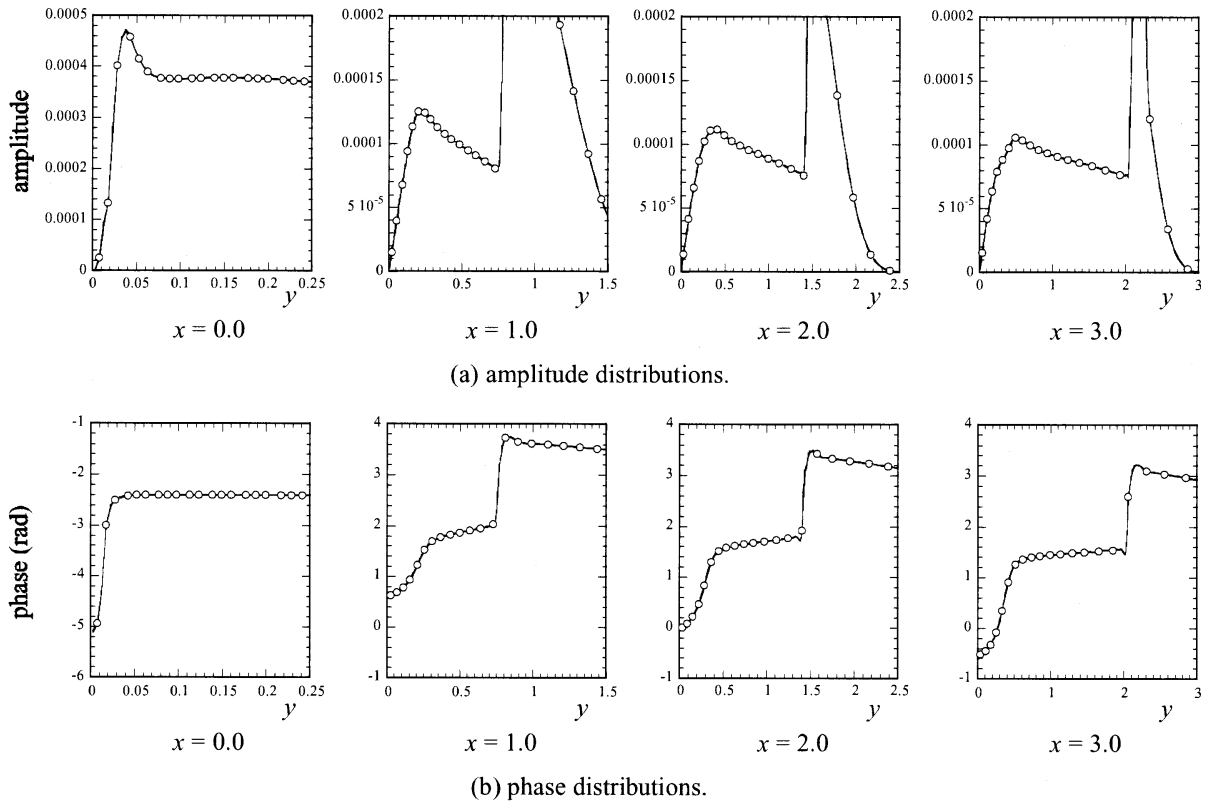


Fig. 2 y -distributions of amplitude and phase of u -fluctuations for flat plate near the leading-edge.

あるので、物体形状や外乱周波数、主流マッハ数を変えたときの TS 波動の受容過程についてさらに詳しく調べる必要がある。

4. まとめ

本研究では、前縁近傍の変動場を非粘性・粘性流について詳細に調べ、振動マッハ波の入射によって前縁近傍に振動ストークス層が形成されること、TS 波動の振幅はこの振動ストークス層の振幅に比例すること、などを明らかにした。

この研究は一部、文部科学省科学研究費補助金 (No. 14750722, No. 12125203) 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. Shpiilyuk, 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).

Table 1. u -fluctuation amplitude ($\times 10^{-3}$).

| | $2s$ | TS wave; A_{TS} ($x = 20.0$) | Mach wave; A_M ($x = 0.0$) | Stokes layer; A_S ($x = 2.0$) | A_{TS}/A_M | A_{TS}/A_S |
|------------|------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Flat plate | 4.0 | 0.1297 | 0.3934 | 0.1122 | 0.3297 | 1.1560 |
| | 18.0 | 0.3479 | 0.1988 | 0.2886 | 1.7502 | 1.2058 |

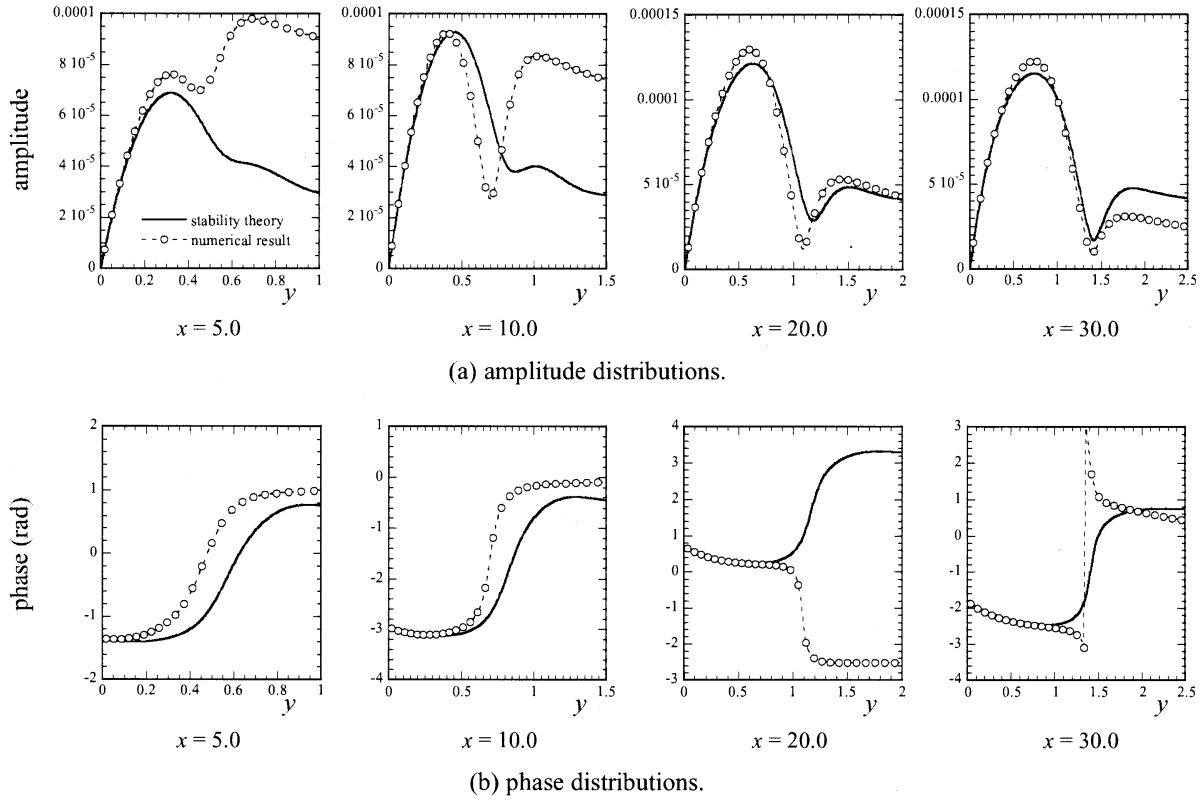


Fig. 3 y -distributions of amplitude and phase of u -fluctuations for flat plate. Solid lines represent the results from linear stability analysis.

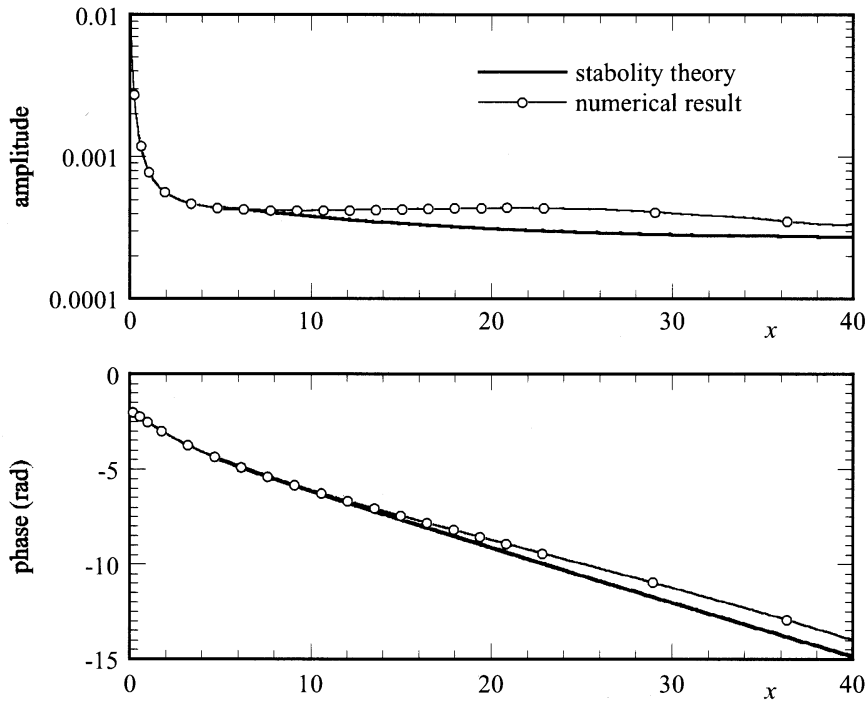


Fig. 4 Streamwise variations of amplitude and phase of vorticity fluctuations on the wall. Solid lines represent the results from linear stability analysis.