

超音速流中における凹状物体まわりの流れの高精度数値計算

尾崎 彰彦, 豊里 理紗, 高倉 葉子
東海大学大学院工学研究科機械工学専攻

Highly-accurate Computation of Supersonic Flows around a Concave Body

by

Akihiko Ozaki, Risa Toyosato and Yoko Takakura(Tokai University)

ABSTRACT

The supersonic parachute has been used to many space probes for aerodynamic deceleration at the time of the atmospheric re-entry. However, its detailed aerodynamic characteristics have not been made clear. The purpose of this study is to investigate basic flow phenomena and aerodynamic characteristics on a rectangular concave body in supersonic flows by means of high-resolution numerical computations using the WENO scheme. As results, the following characteristics have been captured: 1) in the case of quasi-stationary flows, vortices are shed from the detached bow shock wave, and especially in mean stream Mach number greater than three the vortices are to flow toward the inner portion of the concave body; 2) in time history of lift coefficients, peaks of low and high frequencies are observed in the FFT analysis, and the former and the latter oscillations are due to the outer and inner regions of the body, respectively; 3) in the transient cases when disturbances are given, pressure waves go and return in the space between the detached shock wave and the concave bottom, and vortices are shed from the center portion of the shock wave, with movements of shock location.

1. はじめに

これまで、大気圏再突入時の空力的減速法に関する研究が行われてきた。そのなかでもパラシュートは、確実に大きな抗力を得ることができる上に軽量かつコンパクトに収納できるという長所がある。そのため、今まで数多くの惑星探査機の大気圏突入時にパラシュートが用いられてきた。一方で、その空力特性についてはパラシュートの可撓性や衝撃波と渦の干渉による流れの複雑性のため明らかになっていない点も多い。超音速パラシュートの基礎的な空力特性を把握するために、可撓性を考慮しない剛体のパラシュートに関する研究がなされている。

平木らの風洞実験において、パラシュートを半円球の剛体で模したときの流れ場において、離脱衝撃波の非対称な振動が時折起こり、その振動はマッハ数が高くなるほど生じやすく、一度振動が持続しても、再び定常的な流れに戻ることを報告された^[1]。

高倉らは、パラシュートの単純モデルとして矩形凹状物体を流れに対向させて超音速流れの数値計算を行い、一様流中に擾乱を与えると渦と圧力波によるフィードバック現象が起こることを報告し、それが衝撃波の非対称な振動を引き起こす可能性があるとした^[2]。

また、最近になって、水書ら^[3]の風洞実験において、平木らの実験で報告された振動は、離脱衝撃波が回転しながら振動していることが示唆された。このような振動は圧力波が離脱衝撃波と凹状物体内部を数回往復した後に発生したりしなかったりし、特に超音速パラシュートに特徴的な実験的現象であろう。しかし、その詳細なメカニズムは未だ不明である。

研究[2]においては、衝撃波が格子の粗い部分に位置しており、渦放出がデフォルメされていた。そこで本研究では、離脱衝撃波の非対称な振動現象の原因解明のための手がかりを得ることを目的とし、衝撃波の解像度を良くした格子を用いて高精度衝撃波捕獲法により凹状物体まわりの流れの数値計算を行った。

2. 解法

支配方程式は Navier-Stokes 方程式を無次元化して用いた。

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \frac{\partial (\vec{E} - \text{Re}^{-1} \vec{E}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\vec{F} - \text{Re}^{-1} \vec{F}_v)}{\partial y} = 0$$

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix},$$

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \frac{1}{\text{Pr}(\gamma-1)} (\kappa \frac{\partial a^2}{\partial x}) \end{bmatrix},$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad \vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \frac{1}{\text{Pr}(\gamma-1)} (\kappa \frac{\partial a^2}{\partial y}) \end{bmatrix}$$

$$\tau_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x},$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{yy} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

数値計算法として、空間の離散化には有限体積法を、時間積分には3次精度のTVDルンゲクッタ法を用いた。非粘性流束の評価には、渦と衝撃波の干渉を高精度に解像するために、WENOスキーム^[4] (空間精度9次精度)とセル境界においてHLLC flux Riemannソルバーを用い、粘性項には2次精度中心差分、乱流モデルにはSub-Grid Scale Smagorinskyモデルを用いた。

Fig. 1に計算において用いた格子と、計算対象の物体を示す。太い線で囲まれた矩形凹状物体がパラシュートをモデル化した物体であり、物体内側のx方向の長さ基準長さ1とした。格子数は衝撃波が解像度の良い格子領域 (Fig. 2(a)から(d)における物体周囲の赤線内)に入るよう、流入マッハ数1.36を計算した格子はx方向に1085点、y方向に532点、流入マッハ数2の格子はそれぞれ485点、532点、マッハ数3の格子はそれぞれ385点、532点、流入マッハ数3.5の格子はそれぞれ380点、420点である。

計算領域の左側は流入境界、右側および上下の境界は流出境界とした。また、レイノルズ数は凹部流れ方向を代表長さ、一様流の音速を代表速度として、 $Re = 1.0 \times 10^5$ の流れ場を数値計算により求めた。

3. 結果および考察

3.1 定常的な流れ現象

ここでは、定常的な流れの定義として、離脱衝撃波の位置がほぼ一定となった状態の事とする。Fig. 3に一様流マッハ数3のときの凹状物体まわりの定常的な流れ場を等密度線と流線により示す。この流れ場は物体上流側に生じる弓型の離脱衝撃波と物体背後の大きな亜音速領域に特徴づけられる。定常的な流れ場において、凹状物体背後の亜音速領域が周期的に振動する現象が観察された。

3.1.1 流入マッハ数の効果

計算条件として、一様流マッハ数を1.36、2、3、3.5の4通りを与えた。Fig. 4にそれぞれの条件における圧力分布を示す。図から凹状物体前方に離脱した弓型衝撃波が存在していることが分かり、流入マッハ数の効果として、マッハ数が高くなるほど弓型衝撃波の離脱距離は短くなり傾斜していき、理論的には遠方でマッハ角に漸近する。

3.1.2 離脱衝撃波面上から放出される渦

マッハ数1.36、2、3、3.5のすべての計算において、定常的な流れ場において離脱衝撃波面から定期的に渦が放出さ

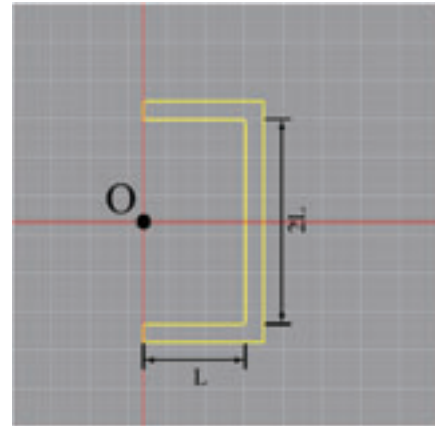


Fig. 1 Enlarged View around Concave Body

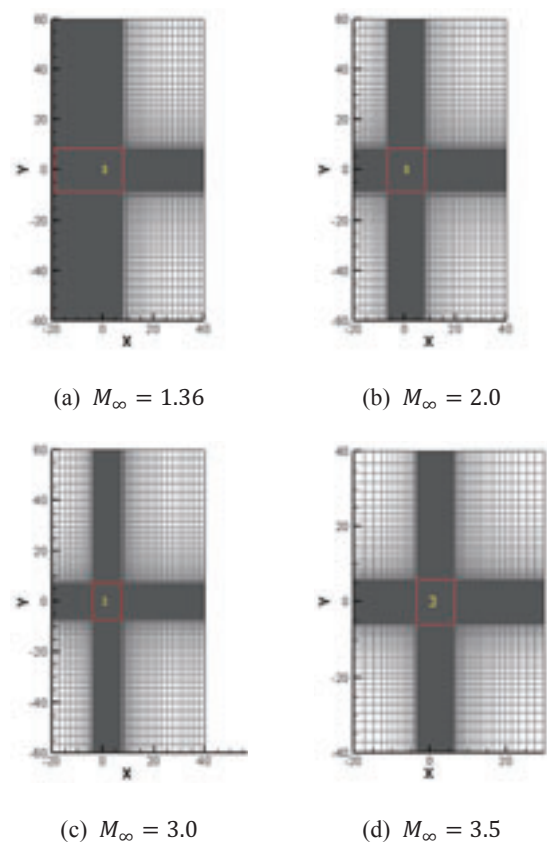


Fig. 2 Grid on Whole Domain

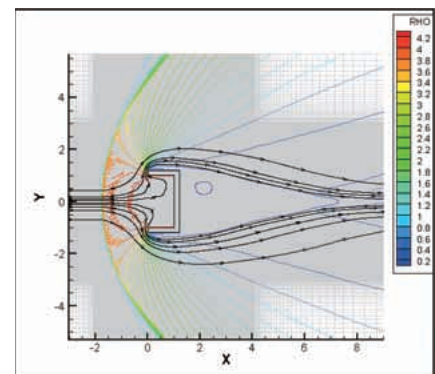
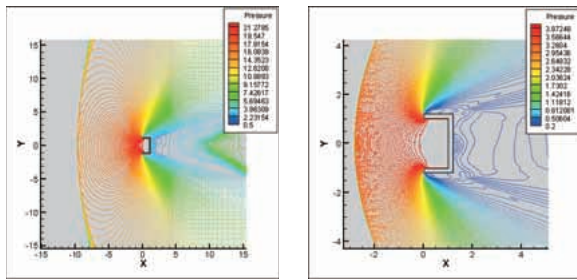
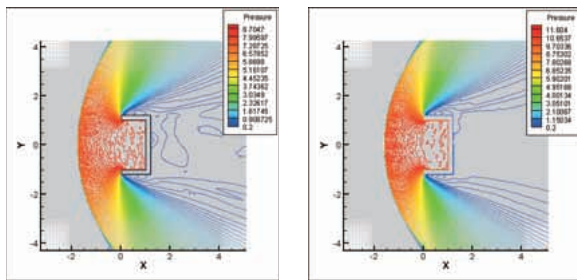


Fig. 3 Flow-field around Concave Body ($M_\infty = 3.0$)



(a) $M_\infty = 1.36$

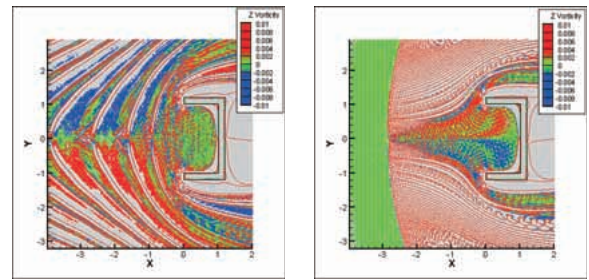
(b) $M_\infty = 2.0$



(c) $M_\infty = 3.0$

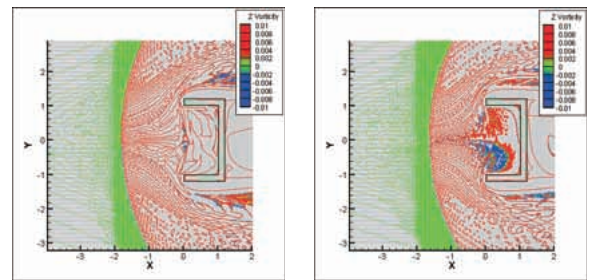
(d) $M_\infty = 3.5$

Fig. 4 Pressure Contours



(a) $M_\infty = 1.36$

(b) $M_\infty = 2.0$



(c) $M_\infty = 3.0$

(d) $M_\infty = 3.5$

Fig. 5 Vorticity Contours

れる現象がみられた。各々のマッハ数における流れ場の温度分布の図を Fig. 5 に示す。この渦の発生は、弓型衝撃波の波の角度が変化するにつれ背後の流体の物理量が変化するので、流線に垂直方向にエントロピが変化すると渦が発生するというクロッカの定理により説明される。Fig. 5 より、マッハ数 1.36 および 2 では生成された渦が凹状物体外部に流れていくが、マッハ数 3 および 3.5 では、生成された渦が凹状物体内部に入ろうとしている様子が見取れる。

3.1.3 揚力変化

一様流マッハ数 2.0 中の定常的な流れ場における凹状物体の揚力係数の時間変化を Fig.6 に示す。図より、低周波の振動の中に高周波の振動が付加されている様子が見られた。さらに、凹状物体外部の圧力に起因する揚力係数 (青い線) と内部の圧力に起因する揚力係数 (赤い線) の時間変化を Fig. 7 に示す。前者は凹状外部の圧力係数を x で積分、後者は凹状内部の圧力係数を x で積分して得られたものである。y 方向のせん断応力に起因する揚力成分は小さいので表示しなかった。これより、物体の揚力のうち、低周波の振動は物体の外側の流れに、高周波の振動は物体の内側の流れに起因することが明らかになった。

さらに、時刻 $t=13.02$ における外側と内側の物体近傍圧力分布を Fig. 8(a), (b) に、外側と内側の物体表面上の C_p 分布を(c), (d)に示す。この図において、物体内部の圧力分布は

波打っているのに対し、外部の圧力分布は滑らかであることは、低周波の振動は物体の外側に、高周波の振動は物体の内側に起因することを説明している。

次に流入マッハ数 2、および 3.5 における揚力係数の時間変化を FFT 解析した結果を Fig.9 に示す。両者とも低周波の支配的成分があり、高周波にもいくつかの支配的成分があることが分かる。高周波および低周波の FFT 解析結果と揚力係数の変化を対応させる。マッハ数 2 における低周波のピークは Fig.7(低周波成分は青線のグラフ)の周期数から求められ、無次元時間 160 の間に約 9 周期である。その為、周波数は 0.05625 となり、FFT 解析における赤線の低周波のピークに相当している。同様に高周波のピークは Fig.7 (高周波成分は赤線のグラフ) の周期数から求められ、無次元時間 20 から 40 の間で計測すると、その周期は 50 周期であった。その為周波数は 2.5 となり、FFT 解析における赤線の高周波のピークに相当する。

FFT 解析結果より、マッハ数が高くなると低周波で乱雑性が増していることが分かった。また高周波には鋭いピークが立っている。これは平木^[1]らの報告に上がっている定常状態とされる結果とほぼ傾向は一致している。

また、凹状物体後方の亜音速領域の振動数を数えてみると高周波成分のピーク振動数とほぼ同じ値を示したので、高周波の振動は物体内部からのあふれによる振動であると考えられる。

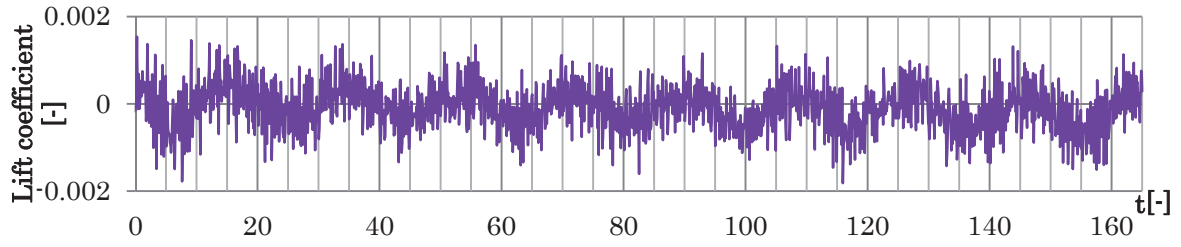


Fig.6 Time History of Lift Coefficients ($M_\infty = 2.0$)

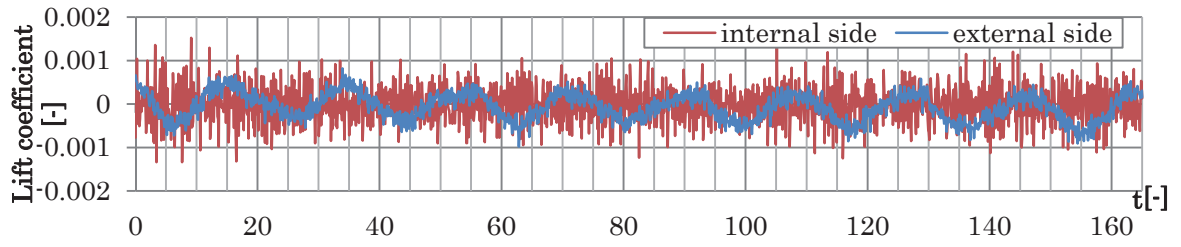
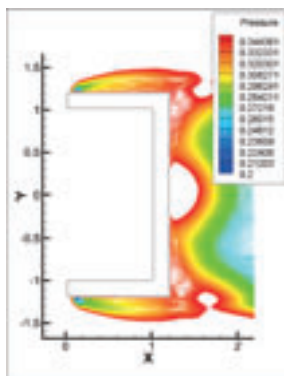
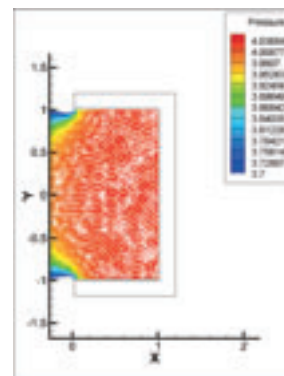


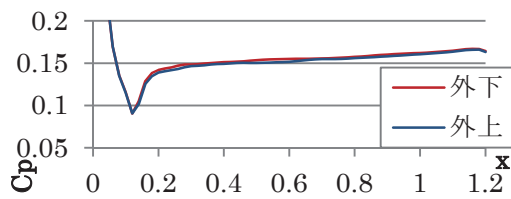
Fig.7 Time History of Lift Coefficients for internal and External Surfaces ($M_\infty = 2.0$)



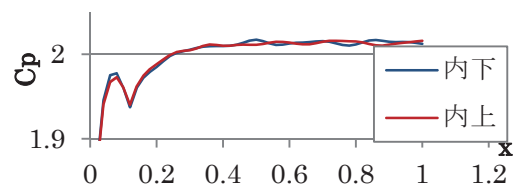
(a) Pressure contours outside body



(b) Pressure contours inside body



(c) Cp distribution along outer surface



(d) Cp distribution along inner surface

Fig. 8 Pressure and Cp Distribution about Concave Body ($M_\infty = 2.0$, $t=13.02$)

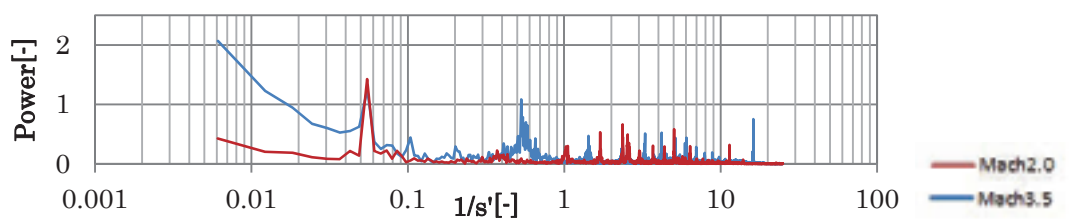


Fig. 9 FFT Analysis for Lift Coefficients

3.2 過渡的な流れ現象

定常的な流れ現象においては際立った非定常現象は生じなかったため、次に一様流マッハ数 2 の定常的な状態から、流入マッハ数に+10%の擾乱が生じたとしてマッハ数 2 ならば 2→2.2 として計算を行った。無次元時間と中央部における衝撃波位置のグラフを fig. 10 に、密度分布、圧力分布、渦度分布を Fig. 11 に示す。

擾乱を加えた結果、擾乱を加える直前 (Fig.11(a)の定常的な流れ)と比較して、擾乱を加えた後は衝撃波が下流方向(物体に近づく方向)に向かい (Fig. 11(b))、圧力波が離脱衝撃波から凹状物体内部に伝播し (Fig. 11(b))、物体内部で反射した圧力波が再び離脱衝撃波に向かう (Fig.11(c))。圧力波が離脱衝撃波に到達すると、衝撃波位置は再び上流方向に戻り、衝撃波で反射した圧力波が再び凹状物体内部に向かっていく (Fig.11(d))。こういった圧力波の往復を数回繰り返すとともに、離脱衝撃波の曲がり部から圧力波が発生し (Fig.11(e))、離脱衝撃波の 3.1.2 節で取り上げた渦 (Fig.5(b)の渦)とは異なる位置(衝撃波中央部)から渦が発生し、凹状物体の内側方向に移流する (Fig.11(f))。

この渦は、無次元時間 587 で初めて確認され、無次元時間 620 まで間欠的に発生するのが確認できたが、その後間欠的な渦の発生は確認できなかった。このことと Fig.10 より、衝撃波位置の変化に伴い渦が発生しているといえる。

ここでは流入マッハ数の擾乱を入れることにより、衝撃波位置の変化とともに圧力波の往復と渦の発生が確認された。平木^[1]らおよび水書^[3]らの風洞実験では、マッハ数 3 以上において衝撃波の振動現象が発生することが報告されており、このような高マッハ数では定常的な渦放出が凹状内部へと向かう(3.1.2 節参照)。

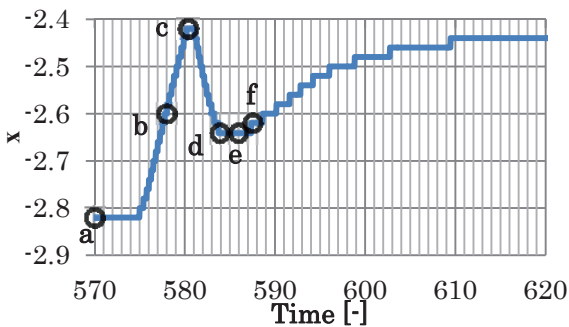


Fig. 10 Time History of Shock Location

それにより発生する擾乱が衝撃波の非対称な振動を引き起こす可能性がある。

4. 結論

- 1) 定常的な流れにおいて離脱衝撃波面から放出される渦は、マッハ数 1.36、2、3、および 3.5 の全ての場合に確認できた。また、マッハ数 3 以上の時は、渦が物体内部に入ろうとしている様子が見て取れた。
- 2) 揚力の高周波の振動は物体の内側の流れに、低周波の振動は物体の外側の流れに起因している。
- 3) 流入マッハ数に擾乱を与えることによって、凹状物体内部への圧力波と内部からの反射波が確認され、その後反射波と離脱衝撃波が干渉し、衝撃波の位置変化に伴い衝撃波中央部から渦が間欠的に放出される。
- 4) マッハ数が高いほど 1)の離脱衝撃波面から放出される渦が凹状内部へと向かっていくので、擾乱として作用して衝撃波の非対称な振動を引き起こす可能性がある。

謝辞

Tecplot による図の表示には、高橋俊講師 (東海大学) の助言を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1]平木 講儒 “超音速領域における半球殻の空力特性に関する実験的研究”, 東京大学修士論文, 1992.
- [2] 高倉 葉子, 平木 秀龍, 新井紀夫 “超音速流中の凹型物体まわりの流れ場について”, 第 41 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2009 講演集, 2009.
- [3] Takafumi KAWAMURA and Toshiharu MIZUKAKI, “Aerodynamic Vibrations Caused by a Vortex ahead of Hemisphere in Supersonic Flow,” 20th ISSW, 2011.
- [4]Chi-Wang SHU, “Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws,” ICASE Report No.97-65, 1997.

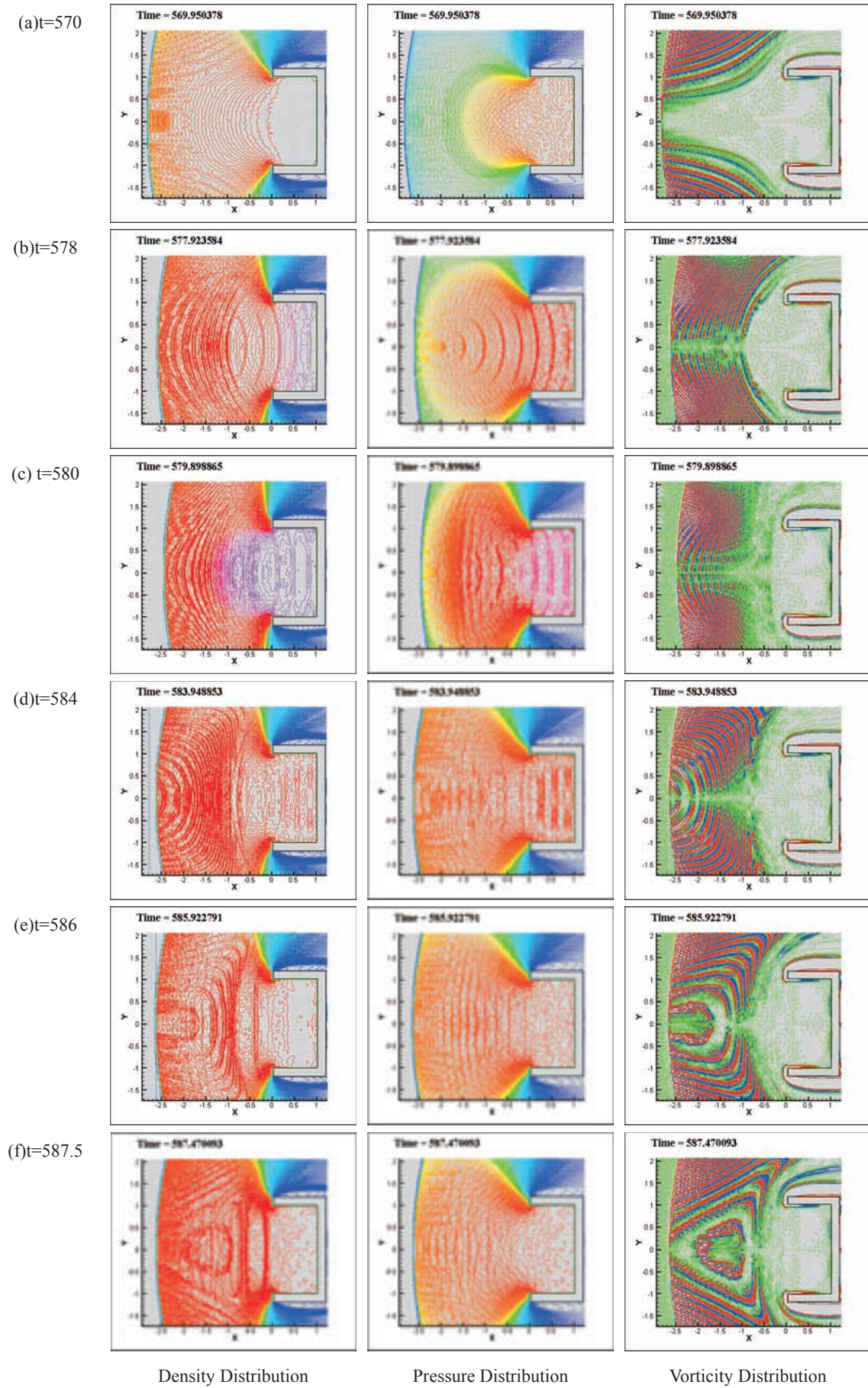


Fig. 11 Transient phenomena