

大気圏突入カプセルの遷音速領域における動的不安定の LES

LES Analysis for Dynamic Instability of Atmospheric Entry Capsule at Transonic Speeds

○ 松山 新吾, JAXA, 東京都調布市深大寺東町 7-44-1, E-mail: smatsu@chofu.jaxa.jp
Shingo Matsuyama, Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo

Dynamic stability characteristic of atmospheric entry capsule was investigated using large-eddy simulation (LES). The static and dynamic simulations are conducted for a wind tunnel test for 25 % MUSES-C capsule model at Mach 1.1. The static aerodynamic coefficients obtained by the LES agreed well with the experimental data at angles of attack from 0° to 30°. The results of the single degree-of-freedom simulations by LES showed that the predicted limit cycle oscillation was almost same result as observed in the experiment. The present simulation results demonstrated the capability of LES to predict the dynamic instability of sphere-cone shaped capsules at transonic speeds.

1. はじめに

HAYABUSA カプセルなど、地球大気圏への再突入で用いられるカプセルには半頂角が 45° を超えるような sphere-cone 形状が用いられることが多い。そのような sphere-cone 形状カプセルでは、遷音速領域で動的不安定が発生することが知られている⁽¹⁾。大気圏突入の最終フェーズにおいて減速をするために遷音速域でパラシュートを開傘する場合、動的不安定が重大な問題となる。カプセルの挙動をコントロールして安全にパラシュート開傘を行うためには、動的不安定を正確に予測することが重要であるが、既存研究⁽¹⁻³⁾によると、動的不安定はカプセルの振動と後流での圧力変化のラグによって発生することが指摘されている。そのような非定常の問題を精度良く予測するには LES による乱流解析が最適である。本研究では、遷音速域 ($M=1.1$) におけるカプセルの動的不安定を LES によりシミュレーションした結果について報告する。

Table 1 Freestream condition

U , m/s	M	P , kPa	T , K	$Re \times 10^6$
382.2	1.10	69.39	300.0	1.668

2. 解析条件および数値解析手法

解析の対象は MUSES-C (HAYABUSA) カプセルの 25% モデル (直径 100 mm) を用いた遷音速および超音速風洞試験⁽⁴⁾である。解析を行った $M = 1.1$ での主流条件を表 1 に示す。模型の重心はノーズ先端から 25 mm の位置、また慣性モーメントは $6.07 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ とした。

本研究では JAXA において開発を進めている熱化学非平衡流解析コード JONATHAN⁽⁵⁾を用いて解析を行った。主流条件がマッハ 1.1 であるため、流れ場は化学反応が無い凍結流を仮定した。また、粘性係数はサザーランドの式により評価し、熱伝導係数をプラントル数一定 ($Pr=0.72$) として求めた。

カプセル肩部で剥離した流れによる乱流を精度良く捕らえるため、本研究では LES による解析を実施する。支配方程式としてフィルター操作を施した圧縮性三次元 Navier-Stokes 方程式を考慮する。本解析ではサブグリッドスケール (SGS) モデルは用いずに、陰的 LES による解析を行った。対流流束の計算に SLAU2 スキーム⁽⁶⁾を用い、空間高次精度化にはスカラー量 (ρ, p, Y_i) について 3 次精度 MUSCL 法で補間を行い、速度成分 (u, v, w) についてはリミッタの無い 5 次多項式による補間⁽⁷⁾を用いた。また、低マッハ数領域において数値粘性を低減するため、Thomber によって提案された修正法⁽⁸⁾を速度成分に対して適用した。粘性

項は 2 次の中心差分により評価し、時間積分は 2 段 2 次精度の Runge-Kutta 法により行った。

対象とする風洞試験は一自由度の自由振動試験であるため、動的不安定の解析はピッチ角のみの一自由度を仮定して、移動格子を扱うために必要な ALE 法へのコード拡張⁽⁹⁾を行った。

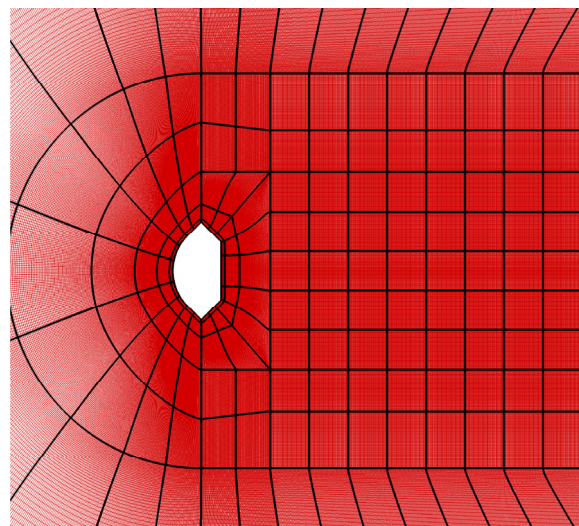


Fig. 1 An example of computational mesh at AoA $\alpha=0^\circ$.

図 1 に解析に用いた計算格子を示す。総格子セル数は 7906 万セル ($60 \times 60 \times 60$ セル $\times 366$ ブロック) である。本解析では模型支持スティングを無視し、カプセル模型のみを考慮した。流入・流出条件は超音速流入・流出とした。また、LES の壁面境界条件としては、単純なすべりなしの断熱壁条件とした。LES では乱流境界層を捉えるために壁面境界条件として壁モデルを用いることが多い。しかし、今回のケースでは主流レイノルズ数が 10^6 前後の条件であり、過去の風洞試験データ⁽¹⁰⁾などをみてもレイノルズ数に対する依存性は小さく、模型壁面上で乱流遷移は起こらないか、乱流遷移していても空力係数にはほとんど影響が無いと推測される。したがって、本解析ではカプセル模型壁面上での乱流遷移を考慮しない。

3. 解析結果

3. 1. 静的空力特性の評価

最初に静的な空力特性を LES により評価した結果を風洞試験データと比較する。図 2 に迎角 $\alpha=0 \sim 30^\circ$ に対する LES の解析結果 (密度勾配による擬似シュリーレン) を示す。流れ場の

特徴として、まず、カプセル前面に弓状衝撃波が生じ、いずれの迎角条件においてもカプセル肩部で流れが剥離する。剥離により生じたせん断層流れとともに、後流内部で微細な乱流構造とカプセル背後の循環流が確認できる。また、後流域においては流れの再圧縮による斜め衝撃波が発生している。迎角変化に対する流れ場の変化の傾向として、迎角が増加するにしたがって、カプセル背後の循環領域のサイズがコンパクトになる傾向が確認できる。また、それに伴い斜め衝撃波が生じるネック部より下流の後流が大きく揺動する傾向がみられた。さらに、最も迎角の大きい $\alpha = 30^\circ$ の条件において風下側 ($Y > 0$) でカプセル表面に垂直衝撃波が発生している。

図 3 に LES 解析による非定常流れデータ (約 100 ms) から得られた静的空力係数の評価結果を示す。LES の結果にはエラーバー ($\pm\sigma$) を付加して非定常性による変動を表示している。また、実験データは参考文献³⁾のプロットをスキャナで読み込み数値化したデータであることを付け加える。全ての空力係数 (C_D, C_L, C_M) について迎角に対する大まかな傾向が十分に捉えられている。実験データからの誤差は C_D で最大 10% 程度、 C_L と C_M では最

大 20% 程度であった。静的空力係数における誤差の要因について、また、その誤差が動的不安定の予測への程度影響があるかについては、今後、検討をすべき課題である。

3. 2. 動的不安定のシミュレーション

次に、動的不安定のシミュレーションを行なった結果を図 4 に示す。実験データのプロットは参考文献³⁾からカプセル振動のピークのみをスキャナで読み込み数値化したデータである。シミュレーションの開始にあたり、最初に迎角を 0° に固定して 50 ms 程度の LES 解析を実施して定常的な流れ場を得た後、迎角の固定を解除して動的シミュレーションを開始した。まず、実験データでは初期迎角 0° の状態から約 1.2 s でリミットサイクルに到達し、迎角の最大振動は $\pm 20^\circ$ を超える。それに対して、LES による動的解析の結果では実験データよりも過大にカプセル振動が増幅し始めるが、実験データと同様に約 1.2 s で $\pm 20^\circ$ のリミットサイクルに到達する。LES によるカプセル振動の周波数は約 16 Hz 程度でこれも実験データとほぼ一致する。LES の結果にみられる初期の過度な振動増幅の原因としては、空力係数の誤差や

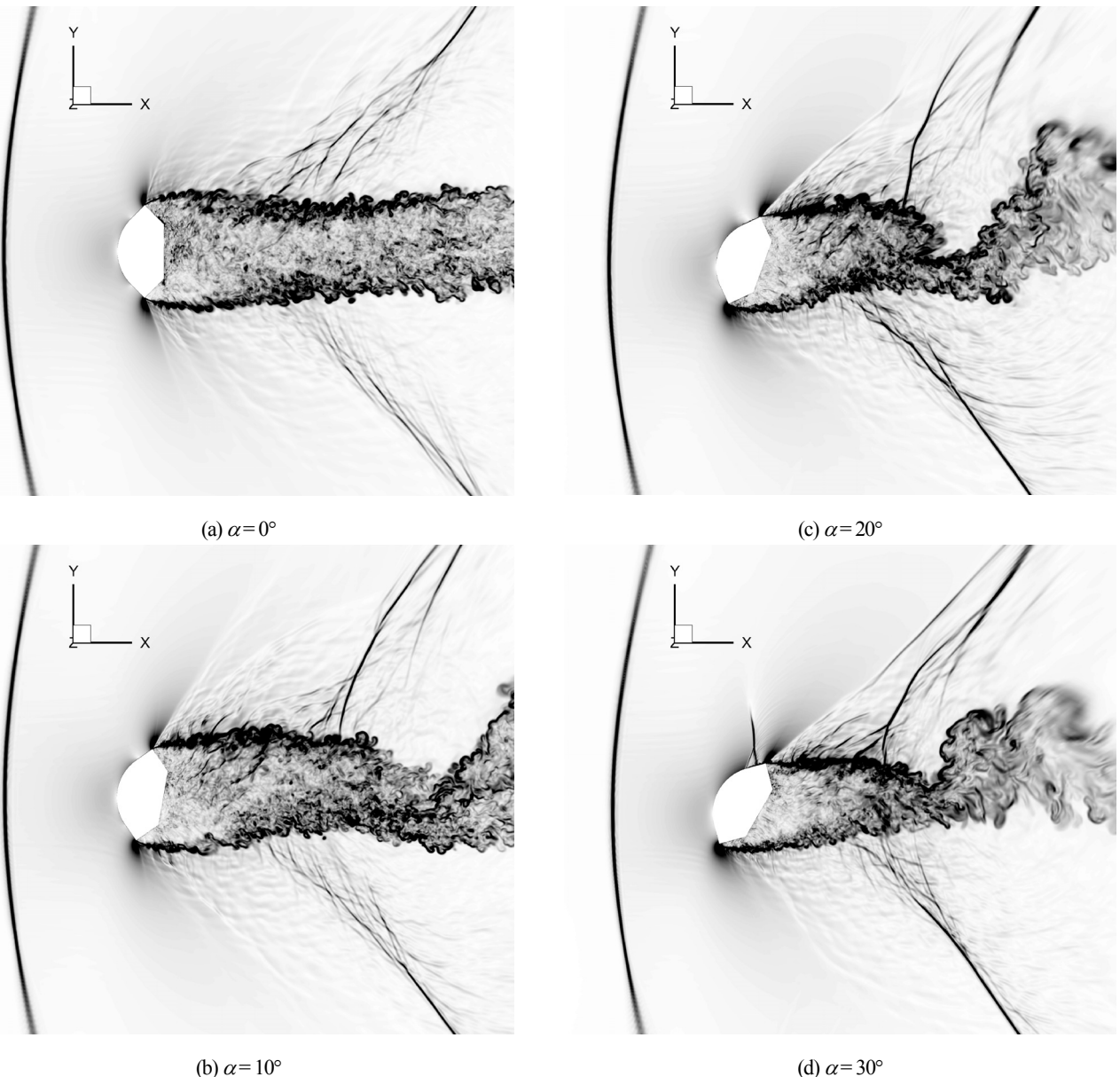


Fig. 2 Instantaneous contours of density gradients in the Y - Z plane at different α .

スティンギングによる効果などが考えられる。今後、予測精度の改善に向けた対策は必要ではあるが、LES が動的不安定を予測するためのツールとして非常に有効であることが示された。また、得られた流れ場のデータから動的不安定を発生させるメカニズムを明らかにすることが期待される。

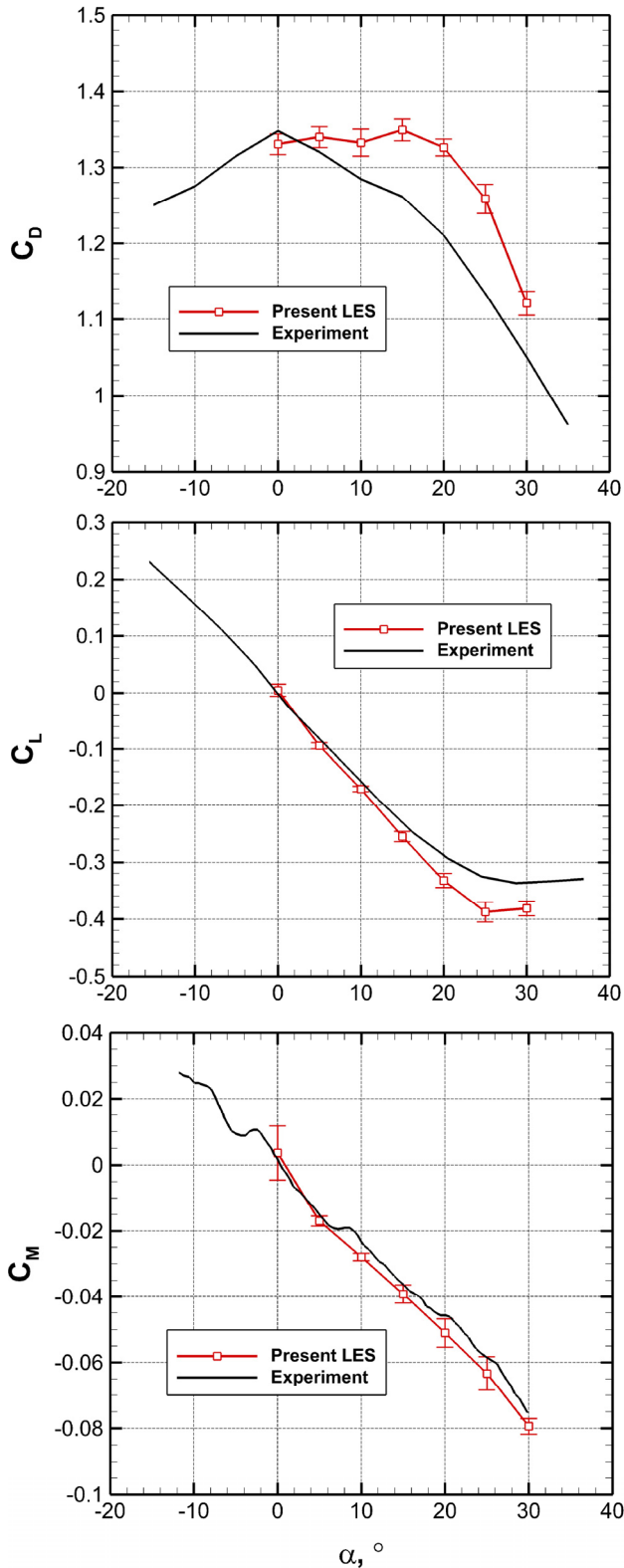


Fig. 3 Static aerodynamic coefficients at different α .

4. まとめ

本研究では LES により遷音速領域 ($M = 1.1$) におけるカプセル動的不安定を評価した。LES による静的な空力係数と実験データとの誤差は 10~20% 程度であった。LES による動的不安定の解析結果では過大な振動増幅がみられたが、実験データと同様のリミットサイクルを再現することに成功した。予測精度の改善に向けた対策は必要ではあるが、LES は動的不安定を予測するためのツールとして非常に有効であることが示された。また、LES により得られた流れ場のデータから動的不安定を発生させるメカニズムを明らかにすることが期待される。

謝辞

本研究における数値計算を実行するにあたっては、宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータ『JSS2』を用いた。ここに記して関係者各位に謝意を表す。

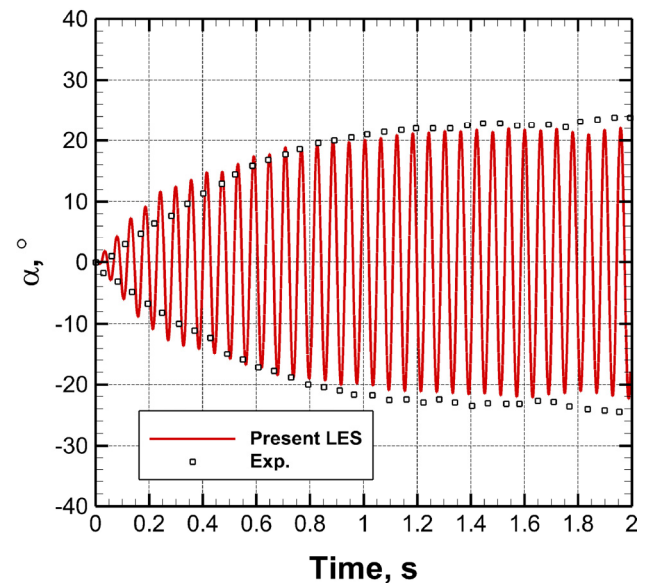


Fig. 4 Time histories of capsule oscillation.

参考文献

- (1) Kazemba, C. D., et al., *J. Spacecraft and Rockets* 54, 2017, pp.109-127.
- (2) Teramoto, S., et al., *AIAA Journal* 39, 2001, pp.646-653.
- (3) 平木, 宇宙科学研究所報告 第 103 号, 1999.
- (4) 松山, 藤田, 第 49 回流体力学講演会/第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 講演論文集, JAXA-SP-17-004, 2017, pp.110-115.
- (5) 松山, 藤田, 第 49 回流体力学講演会/第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 講演論文集, JAXA-SP-17-004, 2017, pp.117-112.
- (6) Kitamura, K. and Shima, E., *J. Comput. Phys.*, Vol.245, 2013, pp.62-83.
- (7) Matsuyama, S., *Computers & Fluids* 91, pp.130-143, 2014.
- (8) Thomber, B., et al., *J. Comput. Phys.*, Vol.227, 2008, pp.4873-4894.
- (9) Matsuyama, S., and Fujita, K., 30th International Symposium on Space Technology and Science, Paper 2015-e-06, Kobe, Japan, 2015.
- (10) McGhee, R. J., et al., NASA TM X-2354, 1971.