

遷音速風洞実験における柔軟構造エアロシェルFSI挙動

○戸張純希, 若林海人, 高橋裕介 (北海道大学)
森吉貴大, 山田和彦 (宇宙航空研究開発機構)

Fluid Structure Interaction behavior of Inflatable aeroshell in transonic wind tunnel experiments

Junki Tobari, Kaito Wakabayashi, Yusuke Takahashi (Hokkaido University)
Takahiro Moriyoshi, Kazuhiko Yamada (Japan Aerospace Exploration Agency)

1. 目的および背景

1-1 はじめに

宇宙開発の発展と共に宇宙からの物資を地上に持ちかえるサンプルリターンを対象とした様々な研究開発が行われている。宇宙機や再突入カプセルが地球に再突入するとき、空力加熱が重大な問題の一つとなる。これまで広く使われてきた鈍頭型再突入カプセルでは“空力加熱にいかにか耐えるか”という構想で設計されている。しかしこれは多くの場合高い重量の耐熱システムを必要とする。そのような問題を軽減・解消することができる新しい再突入技術の一つとして、柔軟構造再突入体の開発が進められている。

1-2 柔軟構造再突入体 SMAAC

柔軟構造再突入体は鈍頭型再突入カプセルとは異なり“空力加熱をいかに避けるか”というコンセプトのもと設計されている。2012年8月に観測ロケットを用いた柔軟構造再突入体の再突入実験 SMAAC (Sounding rocket experiment of membrane aeroshell for atmospheric-entry capsule)が実施された¹⁾。図1にSMAAC実験機の構造を示す。大面積かつ軽量の柔軟エアロシェルによって、大気密度の薄い高高度で効率的に減速を行うことができ、空力加熱や通信ブラックアウトなどを軽減させることができる。

カプセルは金属製でほぼ剛体である。一方トラスとエアロシェルには強度と難燃性に優れた繊維素材であるZYLONが使用されている。これによって構成されるエアロシェル部は大気から空気力を受け変形する。

実験機に搭載された機器によりエアロシェルの画像データや実験機の位置姿勢データ、機体各部の温

度や圧力履歴が計測された。この実験ではマッハ数0.1付近で機体が縦回転してしまうなど姿勢の空力不安定性が見られた。

高度、マッハ数の履歴を図2に示す²⁾。このデータをもとに静的安定性や動的安定性などに関して様々な研究が行われた。強制振動法によって解析を行った結果背面圧力の位相遅れにより亜音速領域で姿勢の不安定性が引き起こされると示された³⁾。また、Haら⁴⁾によって、エアロシェル部の変形に伴った、抗力や表面圧力の変化に関する研究が行われた。形状変形はエアロシェル部のみで生じると仮定し、カプセルやトラス部は剛体としていた。抗力係数を評価するにあたり、遷音速領域と亜音速領域ではエアロシェル部の変形を考慮する必要性が述べられた。

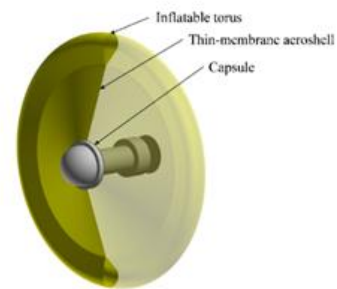


図1 SMAAC機体構造

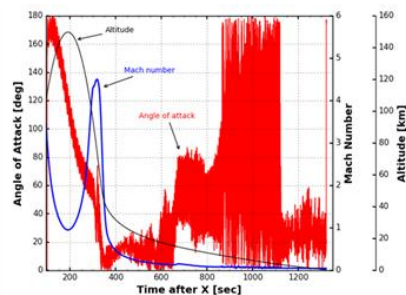


図2 SMAACにおける高度、マッハ数、迎角の履歴

1-3 目的

上で示したような CFD での姿勢安定性解析では SMAAC を剛体として扱っている。Ha による変形を考慮した解析でも流体解析は定常場を仮定しており解析中に流体力を受け時々刻々変形する様子は表現できていない。しかし実際には SMAAC のエアロシェル部分は柔軟構造であり、トーラス部とともに流体の力を受けて時々刻々変形する。変形を考慮した解析を行うことで、周囲の流れ場や物体が受ける流体力が変わり姿勢安定や着地着水点予測位置等の正確な議論が行えると考える。

このような理由から柔軟構造再突入体の柔軟部の変形も考慮した流体構造連成 (FSI) 解析を行う必要がある。しかし、FSI 解析が行われた例はまだ少なく効率的な計算手法の確立が必要である。また、実現象との比較や再現が行われている例も少ない。

以上より本研究では計算手法の確立と連成解析の知見を得ることを目的に再突入機体を模擬した模型を用いて FSI 挙動に着目した遷音速風洞実験とそれを再現した FSI シミュレーションを行う。

2. 遷音速風洞試験

本研究では、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所により大学共同利用設備として提供される高速気流総合実験設備を利用した (課題番号 W21-006)。遷音速風洞を利用し、M0.3 の一様流条件で試験を行った。

2-1 風洞用模型

図 3 に本実験で用いた風洞用模型を示す。再突入機体を模擬した模型であり、エアロシェル部の材料は実機と同じ ZYLON を織り込んだ布である。外側のトーラス部は外直径 80mm の中実アルミリングである。

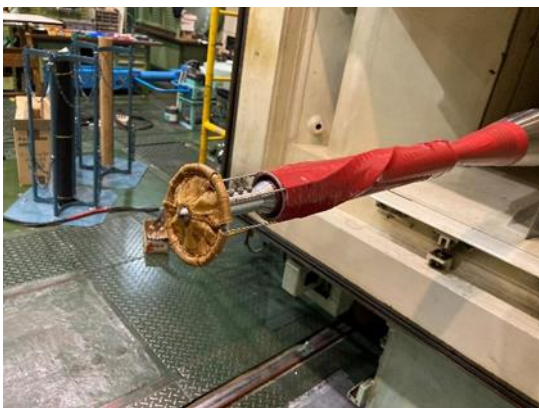


図 3 遷音速風洞用模型

2-2 計測項目

本実験では、気流中でのエアロシェルの挙動の観測が主な目的である。高速カメラと振動センサにより挙動の観測を行った。図 4 に高速カメラでの動画撮影の様子を示す。プレナム室に高速カメラと光源を設置し、模型後方から撮影を行った。

振動センサとして振動や変形を感知すると電圧を出力する piezofilm⁵⁾ を用いた。図 5 に示すように模型背面にフィルムを張り付け振動数の計測を行った。

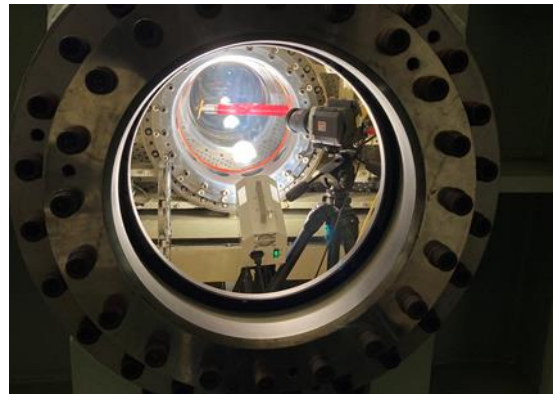


図 4 高速カメラによる撮影



図 5 ピエゾフィルムの貼付

3. FSI 解析に用いる計算手法

3-1 基礎方程式

今回用いる FSI 解析では流体領域と構造領域を分離し、連成面において必要な物理量を交換しながらそれぞれの数値解を得ていく分離型解法を採用する。

流体解析の基礎方程式として非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と連続の式を用いる。また構造解析の基礎方程式として応力ひずみ関係式、ひずみ変位関係式、運動方程式 (仮想仕事の原理) を用いる。

3-2 解析条件

流体ソルバーとして GNU General Public License (GPL)のもとで公開されているオープンソースの数値流体力学ツールボックスである OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) ⁶⁾ の pimpleFoam を用いる。乱流モデルとして LES の標準スマゴリンスキーモデルを用いている。

構造ソルバーとしてミュンヘンの MTU Aero Enginesのもとで開発、公開されているオープンソースのパッケージである CalculiX ⁷⁾ を使用し、線形弾性材料モードを用いて解析を行う。

流体・構造ソルバーを連結するライブラリとしてミュンヘン工科大学とシュトゥットガルト大学で開発されているカップリングライブラリー preCICE ⁸⁾ を用いる。

3-3 数値解析モデル

再突入機を模擬したモデルを作成し流体構造連成解析を行った。エアロシェルの膜面は ZYLON 織布の厚さに合わせ 0.15mm としている。また、模型全体の振動や変形に着目していくため、実験模型の膜面にある縫い代部はシミュレーションモデルには反映していない。シミュレーションモデルと計算領域を図 6、図 7 に示す。模型の材料は一様であるが、金属製のステイニングや頭部に当たる部分 (図 6 の緑色の部分) は完全固定条件としている。また、表 1、表 2、表 3 に計算条件を示す。

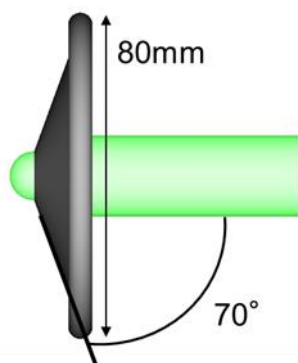


図 6 シミュレーションモデル

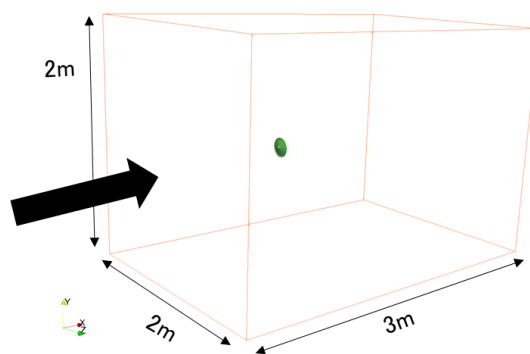


図 7 計算領域

表 1 カップリング条件

Coupling timing	1.25×10^{-5} [s]
Coupling scheme	parallel-implicit coupling
Data mapping Method	Nearest Projection

表 2 流体側解析条件

Time Integration	Euler implicit
Advection Term	Second-order upwind
Viscous Term	Second-order central
Time increment	1.25×10^{-5} [s]
Velocity	102 [m/s]
Reynolds number	7.4×10^5 [-]
Viscosity coefficient	1.1×10^{-5} [m ² /s]
Density	1.7 [kg/m ³]
Number of computational cells	988,222

表 3 構造側解析条件

Time increment	1.25×10^{-5} [s]
Density	2640 [kg/m ³]
Young's modulus	700 [MPa]
Number of nodes	42,546
Poisson's ratio	0.3 [-]
strain - displacement relation	Non linear

4. 結果と考察

4-1 遷音速風洞試験

図 8 に高速カメラで撮影した画像を示す。画像左方の奥側から流入する気体から力を受け模型が振動している様子が分かる。模型全体の挙動としては図 9 に示すように左右・上下に振動する首振り運動をしていることが分かる。首振り運動の周波数は高速カメラによる映像から 50Hz 程度と読み取ることができる。

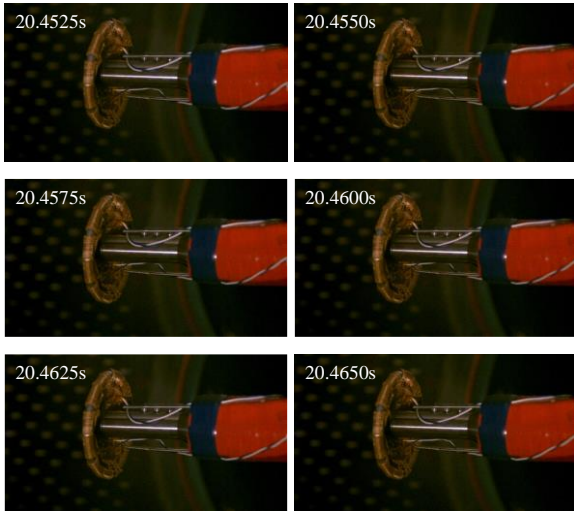


図 8 高速カメラによる撮影画像

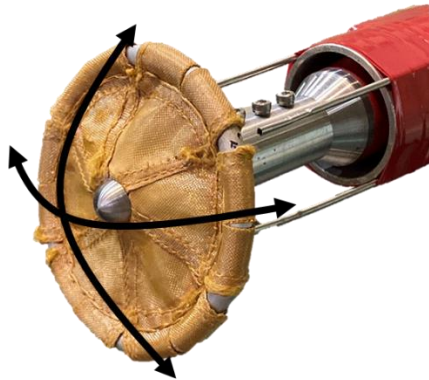


図 9 首振り運動のイメージ図

図 10 の左図にピエゾフィルムの時刻歴応答結果、右図に時刻歴応答結果を高速フーリエ変換によって周波数解析したものを示す。51Hz にピークがたっており、高速カメラにより目視で確認した振動周波数と近いことからこちらは首振り振動によるものと考えられる。

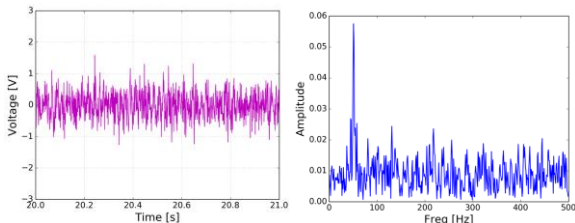


図 10 ピエゾフィルムの出力結果

図 11 に風洞天秤で計測した空力係数を高速フーリエ変換によって周波数解析した結果を示す。Cm 値

と Cl 値は首振り運動と同程度の周波数で変動しており、模型の振動の影響を受けていることが分かる。

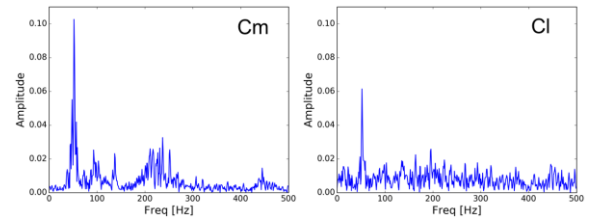


図 11 空力係数の周波数解析結果

4-2 FSI シミュレーション

図 12 に遷音速風洞試験を再現した FSI シミュレーションの結果を示す。速度の絶対値を可視化したものである。

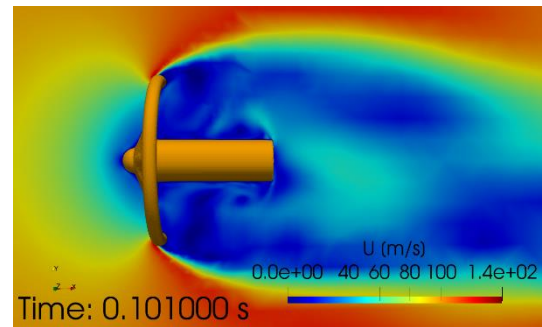
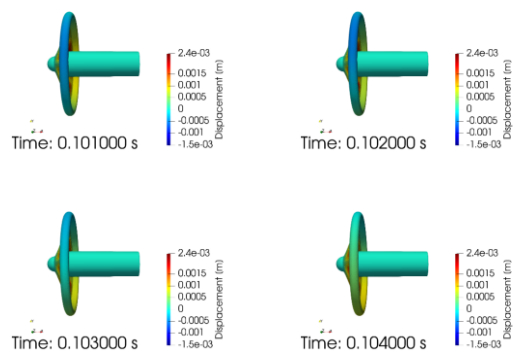


図 12 流れ場の様子

図 13 に模型の変形の可視化画像を示す。模型は左方から流入してくる流体から力を受け変形し、実験でも観測されたような首振り運動をしていることが確認できる。FSI シミュレーションによって模型の実験での気流中の挙動を再現することができた。



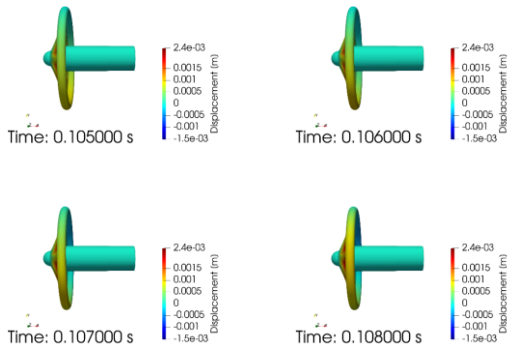


図 13 模型の変形

図 14 の黒点で示すエアロシェル上の一点の x 方向変位の時刻歴応答結果とそれを周波数解析した結果を図 15 に示す。52.5Hz 程度でエアロシェルが首振り振動していることが分かる。

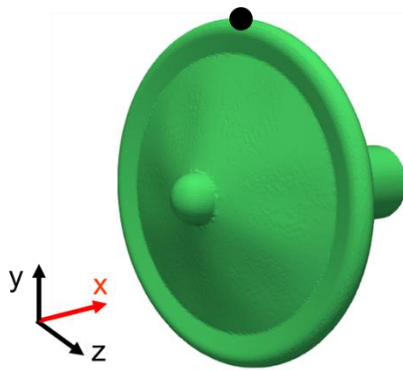


図 14 変位測定点

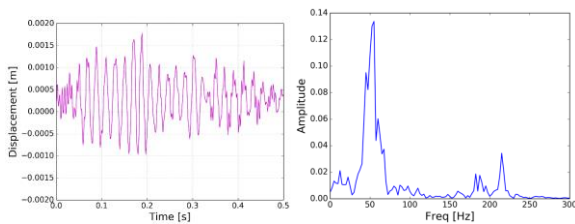


図 15 変位の時刻歴応答結果と周波数解析結果

図 16 に C_m 値と C_l 値を周波数解析した結果を示す。首振り運動と同じ周波数 52.5Hz にピークがあることが分かる。模型の変形・振動が空力係数にも影響を及ぼしていることを確認することができた。

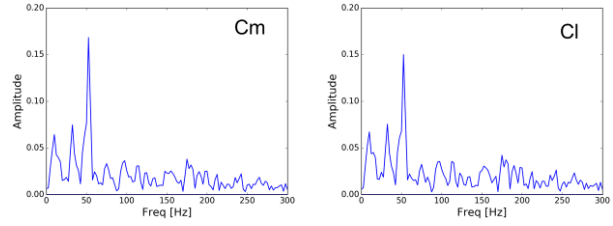


図 16 空力係数の周波数解析結果

5. おわりに

柔軟構造体を有する再突入機を模擬した模型を対象に気流中での変形・振動挙動に着目した遷音速風洞実験と流体構造連成シミュレーションを行った。シミュレーション中で実験でも見られた首振り運動を捉えられたことと、流体力への影響を再現することが出来たという点で一つの流体構造連成解析モデルを確立することができた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H02360 の助成を受けて行われたものである。本研究で実施された風洞実験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が大学共同利用設備として提供する高速気流総合実験設備にて行われた(課題番号 W21-006)。加えて、本解析は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)の支援による(課題番号: jh200035)。

参考文献

- 1) Yamada, K., Nagata, Y., Abe, T., Suzuki, K., Imamura, O., and Akita, D., Suborbital reentry demonstration of inflatable flare-type thin-membrane aeroshell using a sounding rocket, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.52, No.1 (2015), pp.275–284.
- 2) Nagata, Y., Yamada, K., Abe, T., and Suzuki, K., Attitude dynamics for flare-type membrane aeroshell capsule in reentry flight experiment, *AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference* (2013), Paper No.2013-1285
- 3) 大橋 達志, ”観測ロケット実験における柔軟構造再突入機の動的安定性解析”, 修士論文, 2018
- 4) Dongheun Ha, “Aerodynamic Simulation around Flare-type Membrane Inflatable Vehicle in Suborbital Reentry Demonstration”, H26 Master thesis

- 5) “Piezo Film”, 9 Dec. 2021,
<<https://www.parallax.com/product/piezo-film-vibratab/>>
- 6) “OpenFOAM”, 9 Dec. 2021,
<<https://www.openfoam.com/>>
- 7) “CALCULIX A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program”, 9 Dec. 2021,
< <http://www.calculix.de/> >
- 8) Bungartz, H. J., Lindner, F., Gatzhammer, B., Mehl, M., Scheufele, K., Shukaev, A., & Uekermann, B. (2016). preCICE – A fully parallel library for multi-physics surface coupling. *Computers and Fluids*, 141, 250–258.