

# 大気圏再突入飛行体のためのバルートの流体構造連成解析に関する研究

## Numerical Simulation for Deformation of Ballute of Reentry Vehicles

- 大津 広敬, 龍谷大, 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5, E-mail : otsu@rins.ryukoku.ac.jp  
 吉村 勇人, 龍谷大(院), 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5, E-mail : T18m036@mail.ryukoku.ac.jp  
 Hirotaka OTSU, Ryukoku Univ., Yokotani 1-5, Seta Oecho, Otsu, Shiga, 5202194, Japan  
 Yuto YOSHIMURA, Ryukoku Univ., Yokotani 1-5, Seta Oecho, Otsu, Shiga, 5202194, Japan

Deformation of Ballute was simulated using ANSYS AIM Fluid-Structure Interaction model. Flight velocity and atmospheric pressure was set to be Mach 4 and 10 kPa, respectively. The Ballute was connected to the reentry capsule with 4 and 8 cables. This means that the deformation of the ballute was fixed at 4 and 8 locations, respectively. The Young's modulus for ballute was varied from 10 MPa to 500 MPa to investigate the effect of Young's modulus on the deformation of the ballute. Numerical results showed that as Young's modulus increased the deformation of the ballute was suppressed. Additionally, numerical results showed that as the number of cables increased the deformation was drastically suppressed. These results suggested that increasing the number of cables is effective to suppress the deformation of the ballute.

### 1. はじめに

バルート (Ballute) とは、Balloon と Parachute を組み合わせた造語で、大気圏再突入飛行時に再突入カプセルなどからパラシュートのように後方に放出し、バルーンのようにガスを封入することで膨らまし、展開することによって、空気抵抗を増加させて、効率よく飛行体を減速させることを目的とした空力デバイスである。Fig. 1 にその概略図を示す。このデバイスは風船のような膜面構造体内部にガスを封入することによって展開させるため、大型かつ軽量にすることが可能となることから、飛行体単体の場合に比べて、大きな空気力を発生させることができる。また、このデバイスは、飛行体と複数のケーブルで接続されるため、そのケーブルの長さを調整することにより飛行体に対して傾けることが可能となるため、揚力を発生させることも可能である。

このデバイスは、ガスを封入することによって展開させるため、インフレーター構造体である。したがって、大気圏再突入飛行時に受ける圧力によって、その形状が変化する可能性がある。形状が変化する、飛行体にかかる空気力が変化する、飛行体の飛行経路の予測や姿勢安定性に大きな影響を及ぼす懸念があるため、大気圏飛行中にどのように変形するかを把握する必要がある。

過去の研究において、バルートの変形を断面が円のはりと簡略化すると、ケーブルとバルートを接続する箇所を固定端と仮定し、その間の部分が 4 次関数のように変形すると予測し、その変形量をいくつか設定した形状を作成し、それを元に CFD 解析や風洞実験を行った。その結果、変形量の増加に伴って、抗力が減少することが明らかとなった。

以上の結果から、実際の飛行経路などの予測には、どの程度変形するかを正確に予測することが必要である。そこで、本研究では、流体構造連成解析を行うことにより、バルートの変形量の予測と、その変形を抑制する手法について検討を行った。

### 2. 解析モデル

解析には、ANSYS AIM 2019R2 を用いた。このソフトウェアでは、いわゆる 1Way Fluid Structure Interaction の解析が可能である。すなわち、最初に流体解析を行い、その流体解析によって得られたバルート表面の圧力分布を用いて、設定された拘束条件のもとに構造解析を行うものである。そのため、流体解析のためのモデル化と構造解析のためのモデル化が必要である。

数値流体解析には、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルには  $k-\omega$  モデルを用いている。これらは、ANSYS AIM に組み込まれている標準的なモデルである。

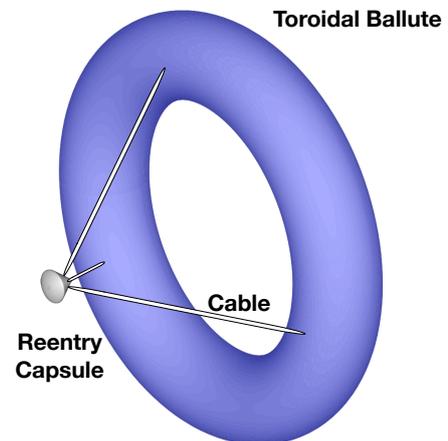


Fig. 1: Schematic View of Reentry Capsule with Ballute

バルートは、膜面で構成された中空のトーラス形状で、内部にガスを封入することで形状を保持するインフレーター構造体である。内部のガス圧力が増加するにつれて、インフレーター構造体の強度が増加することが予想される。本研究では、簡単のために、このインフレーター構造体を単純なトーラスとみなし、内部ガス圧力の増加に伴う強度の変化を、ヤング率の変化に置き換えることで評価することを試みた。

そのため、構造解析では、再突入カプセル後方に展開されたバルートをトーラス形状とし、ケーブル接続部を固定端と設定するために、トーラスを 90 度ずつ、45 度ずつに分割したモデルを作成した。これは、それぞれケーブルを 4 本、8 本に設定したことに相当する。構造解析時には、この分割断面における変位 0 と設定することで、バルートの構造解析を行った。

再突入カプセルを直径 40cm の球体を仮定し、カプセル中心から 160cm 後方に半径 160cm、断面直径 40cm のトーラスを配置して解析を行う。Fig. 2 に再突入カプセルおよびバルートの大きさおよび位置関係の概略を示す。飛行条件は、一様流圧力 10000Pa、一様流温度 250 K、一様流マッハ数を 4 とした。この飛行条件において、カプセルから発生した衝撃波がバルートの内側を通るため、バルートの姿勢が安定することから、同じようなバルートと衝撃波の位置関係となることが望ましい<sup>(1)</sup>。

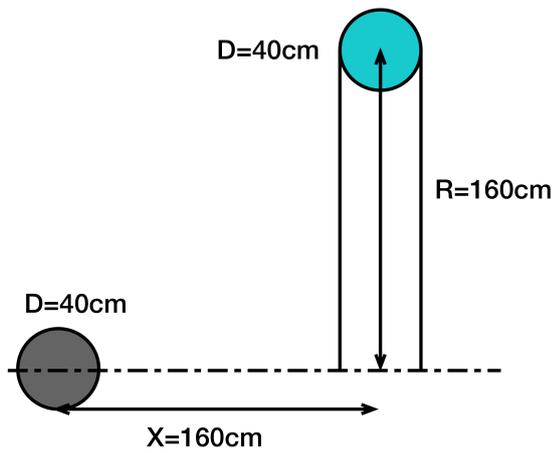


Fig. 2: Schematic View of Analysis Model

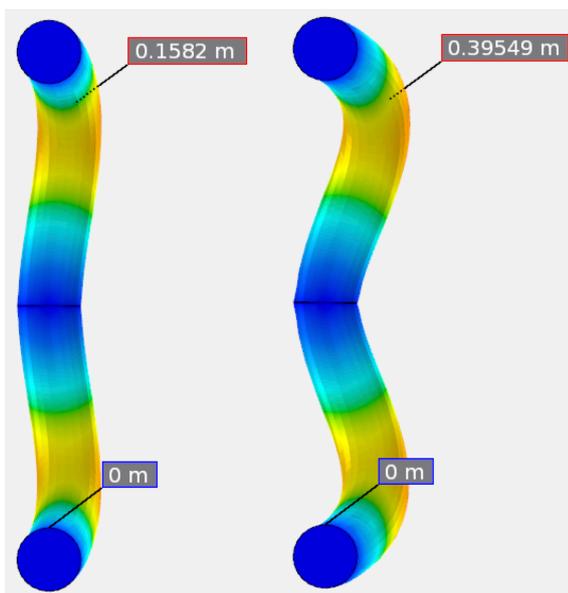


Fig. 3: Deformation of Ballute with 4 cables and specified Young's modulus of 50 MPa (left) and 20 MPa (Right)

### 3. 解析結果

Fig. 3 にバルートの変形の解析結果の一例を示す。この解析で用いた気流条件では、バルートおよびカプセルの淀み点における圧力は 230 kPa 程度となる。この結果では、4 本のケーブルで再突入カプセルと接続されているため、バルート上の 4 箇所に変位が 0 となる拘束条件を設定し、バルート表面の圧力分布によってどのように変形したかを示したものである。この結果から、流れ方向（右向き）にバルートが引き伸ばされて変形している様子がわかる。左の図がヤング率が 50 MPa とし、右の図がヤング率を 20 MPa としたものである。これらの結果から、固定した箇所から離れるにつれて、下流側に変形することと、ヤング率の低下に伴い変形量が増加することがわかる。

Fig. 4 にケーブルの数が 4 の場合のヤング率と変形量の関係を示す。この図では、変形量をバルートの半径  $R$  で無次元化した値で示している。この図からヤング率の増加に反比例して変形量が減少していることがわかる。このことから、変形を抑制するためには、バルート内部の圧力を増加させることによって、みかけのヤング率を増加させることが有効であることがわかる。

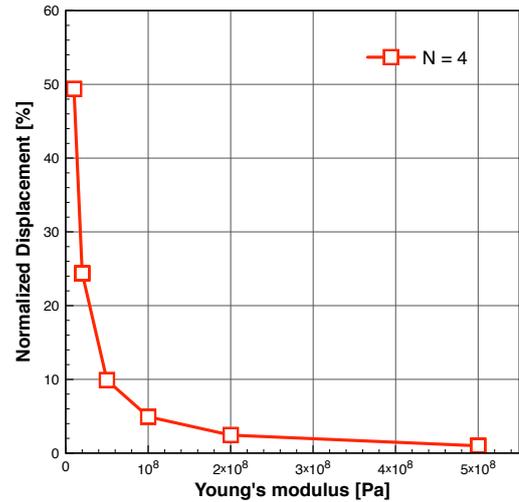


Fig. 4: Relationship between Normalized Displacement of Ballute and Young's modulus with 4 cables

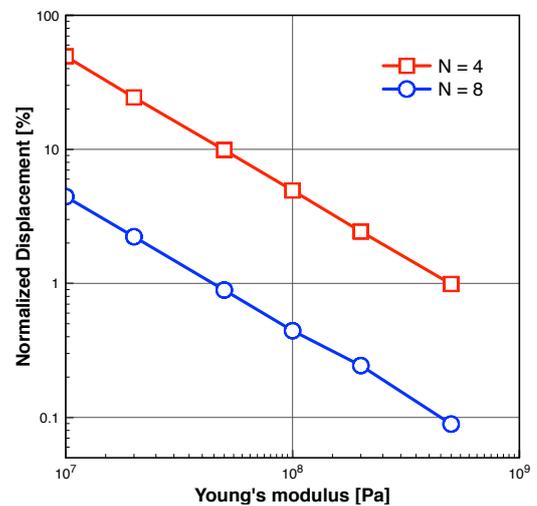


Fig. 5: Comparison of Relationship between Normalized Displacement of Ballute and Young's modulus with 4 and 8 cables

Fig. 5 にケーブルの数を 4 から 8 に変えた結果との比較を示す。ケーブルの数を 2 倍にすると、2 つの固定箇所間の長さが半減するため、変形量を抑制できることがわかる。本解析の場合、変形量をおおむね 1 桁下げることができていることがわかる。これは、バルートの材料などの問題によりバルート内部の圧力を増加させることが困難な場合、ケーブルの数を増やすことによって変形量を大幅に抑制できることを示している。

### 4. まとめ

本研究では、再突入飛行体に用いるバルートの変形量の予測を ANSYS AIM を用いて行った。その結果、ヤング率およびケーブルの数を増やすことによってバルートの変形量を抑制できることを定性的に示すことができた。特に、ケーブルの数を増やすことによって、固定箇所の距離を半分にする変形量を約 1 桁抑制できたことから、変形量の抑制には、ケーブルの数を増やすことが有効であることが明らかとなった。今後の予定としては、気流条件などを変えた場合の解析を行い、本解析手法および解析結果の有効性を評価したいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04847 の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) H. Otsu and T. Abe, “Effect of the Shock Interaction on the Attitude Stability of the Toroidal Balute for Reentry Vehicle,” *Shock Waves*, 2016, DOI: 10.1007/s00193-016-0632-5.