

超音速域での再突入カプセルのバルートの変形を推定するための流体—構造相互作用シミュレーション

目片 慎一郎

Shinichirou MEKATA

機械システム工学専攻修士課程 2年

1. 緒言

バルートは気球とパラシュートの2つの単語のブレンドです。ガスによって膨張した構造を使用して、より高い高度での再突入飛行のための抗力を増加させるように設計されています。再突入車両システムは、再突入カプセル、トロイダルバルート、およびケーブルで構成されています。トロイダルバルートは、複数のケーブルで再突入カプセルにつながるように設計されています。再突入カプセルシステムの空力特性は、ケーブルの長さを変更することで調整できます。

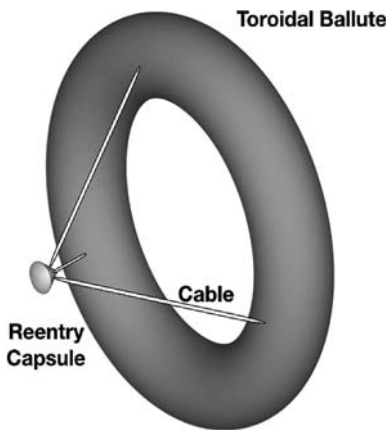


図1 バルートを備えた再突入カプセルの概略図

このシステムの問題の1つは、ガスによって構造が膨張するため、バルートの柔軟性です。バルート内のガス圧が十分に高くない場合、バルートはバルート表面に作用する空気力によって変形する可能性があります。表面圧力によってバルートの形状が

変化すると、バルートによる抗力も変化します。したがって、バルートの変形に対する柔軟性の影響と、バルートによる抗力に対する変形の影響を推定することが重要です。

空気力による柔軟なバルートの変形を推定するために、空気力によってバルートに作用する空力とバルートの構造変形を解く必要があります。これは、流体—構造相互作用 (FSI) シミュレーションと呼ばれます。本研究では、バルートの変形を推定するために FSI シミュレーションを実行し、超音速風洞実験を使用した実験結果と比較しました。

2. フレキシブルバルートのテストモデルの設計

バルートの正面形状は、ISAS 超音速風洞実験を考慮して半径 50 mm の六角形と八角形で設定しました。テストモデルの断面は、外径 d_{out} と内径 d_{in} のトーラス型です。すべての場合において、 d_{out} は 20 mm に設定しました。 d_{in} を変更することにより、バルートの柔軟性を制御しました。バルートモデルは、いくつかのケーブルで再突入カプセルとしての半径 10 mm の球体に接続しました。ケーブルは、バルートの位置を固定するために使用しました。

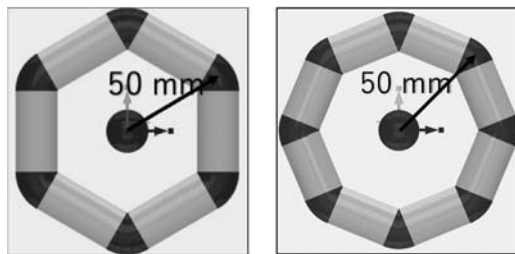


図2 フレキシブルバルートテストモデルの正面形状 (左:六角形, 右:八角形)

3. 数値解法

支配方程式は、圧縮可能な3次元ナビエ—ストークス方程式です。熱化学モデルは完全気体を想定しています。層流粘度はサザランドの公式によって

推定され、乱流モデルには $k-\omega$ モデルを選択しました。CFD 分析には CFD コード ANSYS AIM を使用しました。この FSI では、最初に試験モデル周辺の流れ場を解き、その後、試験モデルの表面の圧力分布と構造解析の境界条件を使用して、試験モデルの変形を解きました。

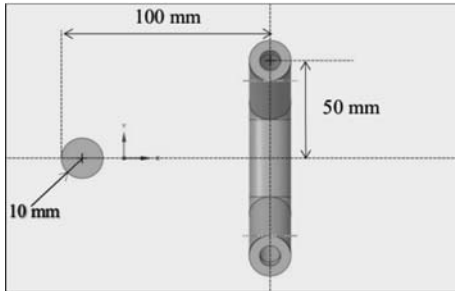


図3 バルーンとカプセルを含むテストモデルの側面図

4. 結果, 考察

4.1 バルーンの変形の分布

図4に六角形の正面形状のバルーンの変形分布の数値結果を示します。3本のケーブルの場合、最大変形は約10 mmと計算され、6本のケーブルの場合、最大変形は1 mm未滿と計算されました。図5は、実験時の六角形のバルーンのシュリーレン画像を示しています。この図から、ケーブルの数が増えるにつれて白い帯の位置が変化することから、変形が抑制され、バルーンの変形の分布が CFD 分析によって定性的に再現されたことがわかります。

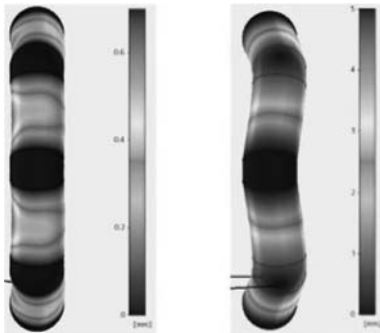


図4 六角形のバルーンの変形の分布

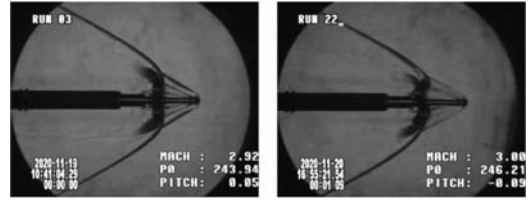


図5 六角形のバルーンの変形の実験画像

4.2 バルーンの変形に対する柔軟性の影響

バルーンの断面の内径を変えることにより、バルーンの変形に対する柔軟性の影響を調査しました。図6から、内径が大きくなると最大変形が大きくなり、CFD 解析でその傾向が再現されていることがわかります。定性的に数値的な結果は一致しましたが、定量的には CFD と実験の間の不一致が大きかったことがわかりました。

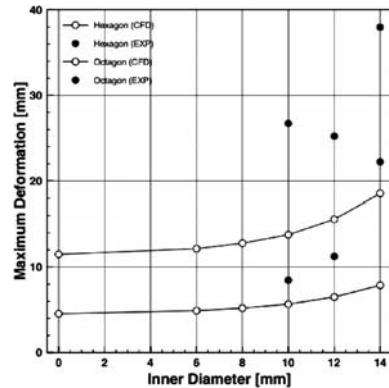


図6 バルーンの変形に及ぼす内径の影響

5. 結果

数値結果は、FSI が超音速領域で空気力によってバルーンがどのように変形したかを定性的に再現できることを示しました。

ケーブルの数を増やすことは、バルーンの変形を減らすのに役立つことを数値的および実験的に確認しました。

今回の学会はオンラインで英語での参加でしたので質疑応答に苦労しました。次回の学会ではうまく答えられるようにがんばりたいと思います。