

人工的な粗さによるカプセルの運動の相違

青木耀大 (九州工業大学・機械知能) , 平木講儒 (九州工業大学)

Akihiro AOKI (Kyusyu Institute of Technology) and Koju HIRAKI (Kyusyu Institute of Technology)

1. 序論

近年、宇宙からの人や物資の帰還には、再突入カプセルが利用されている。再突入カプセルは大気圏突入後、空気力による減速を最大限利用するため、扁平な鈍頭形状を有することが多い。このような形状を有するカプセルは、亜音速から遷音速で飛行中に、自励振動を起こすことが知られている。この自励振動は、カプセル形状やマッハ数によって大きく異なるため、それぞれの形状における空力特性を把握することが重要である。また、一部のカプセルでは、落下地点を制御し、誘導するために重心を機体対称からずらすことにより、揚力飛行を可能にする揚力型カプセルになっている。先行研究により、この揚力型カプセルは亜音速領域において、ロール運動が発生する可能性があることがわかっている。また、タフトを使った可視化によって、カプセル後部の流れに特徴が表れていることがわかった。また、このロール運動は、誘導制御を行う上で制御性を低下させる要因であるため、このロール運動を抑制する方法を考える必要がある。本研究では、カプセル前面の表面粗さを変えることにより、ロール運動が抑制可能であるか、また表面粗さを粗くした場合のカプセル後部の流れの様子を観察した。

2. 実験装置

2-1 3自由度自由回転支持装置

本実験で使用した3自由度自由回転支持装置を図1に示す。この装置は2つの深溝玉軸受によるジンバルによって、ピッチ・ヨー軸まわりの回転運動を行うことが可能である。さらに、スラスト軸受と2つの深溝玉軸受によって、ロール軸まわりの回転を許容する回転軸支持機構をもつ。これらの機構によって、取り付けられたモデルのピッチ・ヨー・ロール軸周りの回転を可能にしている。さらに、本装置は可動部の回転運動を固定、解除するための機械的なストッパー機構を有しており、遠隔でストッパー制御を行うことができる。

2-2 カプセル模型

本研究で用いたカプセル模型を図2に示す。全長が比較的短く、直径106[mm]の曲率半径の大きな前面を有する形状のカプセル模型(HTV-R型)である。重心位置が対称軸からヨー軸に沿って、それぞれオフセッ

トされた揚力型カプセルである。

またこれらのカプセル模型にはジャイロセンサが内蔵されており、取得したヨー・ピッチ・ロール軸周りの角速度を積分して姿勢角を算出している。

2-3 表面粗さ

人工的に表面粗さを与える方法として、3Dプリンターにより半球を与える方法、ガラスビーズで球を与える方法を用いた。なお、粗さの大きさを表1に示し、長さは球の直径で示している。

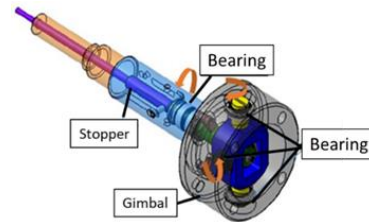
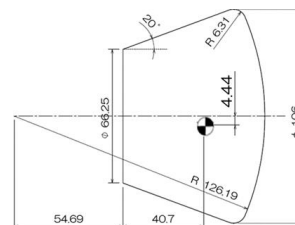


Fig.1 3DOF free rotational supporting device

Table1 size of roughness



粒度	μm
#10	1600
#20	800(710~1000)
#40	400(355~500)
#80	(180~250)

Fig.2 Test model specification (HTVR)

3. JAXA風洞実験結果

JAXA遷音速風洞試験設備において、3自由度自由回転支持装置を用いて、カプセル模型の回転挙動を観察した。風速はMach0.3、初期迎角は0[°]で実験を行った。なお、図3~図7のグラフは横軸が時間、主軸がピッチ・ヨー回転角、第二軸がロール回転角を表している。また、ピッチ角、ヨー角、ロール角をそれぞれ赤色、青色、緑色の線で表している。ストッパーの解除区間は、黄色の点線の間である。

粗さを付与していない図2のカプセル模型における、ピッチ・ヨー・ロール角の時間変化を図3に示す。ロック解除後すぐにピッチ軸まわりに運動を始め、約15[°]を中心に振動を続け、ヨー軸に関しても0[°]を中心に振動している。また、ロール軸ま

わりに回転を始め、ロック解除2秒後には約8[Hz]に達している。

次に3Dプリンターにより#10の粒度を付与したときのカプセル模型における回転挙動を図4に示す。ロック解除後すぐにピッチ軸，ヨー軸まわりに運動を始めた。それぞれ回転中心は約 $18[^\circ]$ ， $0[^\circ]$ となった。また，ロール軸まわりには回転することはなく，ロール回転が抑制された。

同様のカプセル模型における実験結果を図5に示す。この場合，ロック解除後ピッチ軸，ヨー軸まわりに回転を始めた。また，ロール軸まわりにおいては，ロック解除後約0.8秒後に回転を始め，ロック解除から2秒後では，約1[Hz]の回転を起している。これは先ほどの実験結果とは異なり，ロール軸まわりの回転を起している。

次に粗さが#20のカプセルにおける実験結果を図6と図7に示す。このカプセル模型においては，どちらの場合もロール回転を起すことはなかった。また，ピッチ軸まわりには約 $20[^\circ]$ を中心に振動して，ヨー軸まわりには $0[^\circ]$ を中心に振動を起している。

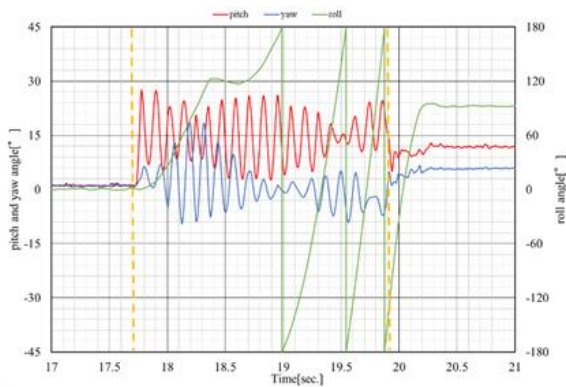


Fig.3 Pitch, yaw and roll angles of HTV-R (R0)

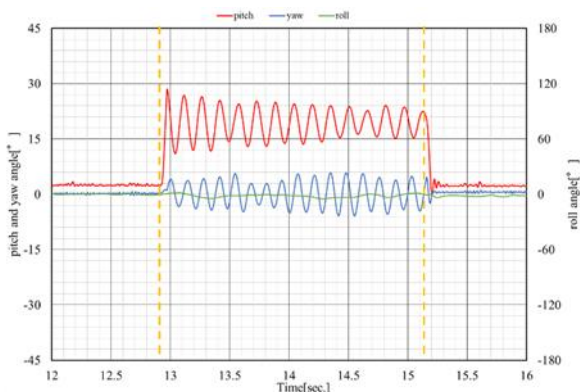


Fig.4 Pitch, yaw and roll angles of HTV-R (B#10) ①

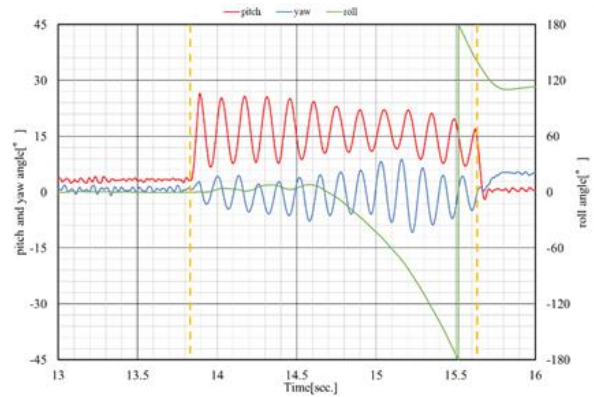


Fig.5 Pitch, yaw and roll angles of HTV-R (B#10) ②

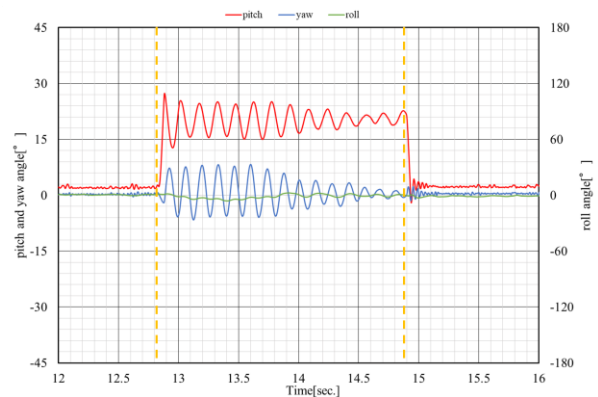


Fig.6 Pitch, yaw and roll angles of HTV-R (B#20) ①

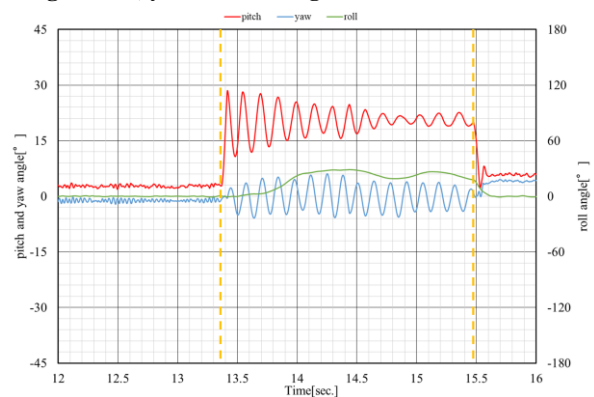


Fig.7 Pitch, yaw and roll angles of HTV-R (B#20) ②

4. 流れの可視化

前述で述べたような回転挙動になった要因を調べるために，表面タフト法を用いた流れの可視化を行った。

まず，ピッチ軸に沿った視点からの流れの様子を図8に示し，粗さを付与していない場合を(a)，粗さ#10を付与した場合を(b)に示す。どちらもほぼ同じ姿勢をとった時の画像である。模型表面に黒色のタフトを接着剤で貼り付けている。模型表面の上半分のタフトは大きな違いは見られないが，下半分のタフトには違いがみられる。図8(a)の下部では左から4本ともタフトの向きがそろっており，表面に沿った流れになっているのに対して，図8(b)の下部では左から2本は表面に沿っておらず，剥離している。このこと

より、表面粗さが大きい方がロール回転に与える空気が小さいと考えられる。

次に、ヨー軸に沿った視点からの流れの様子を図9に示し、粗さを付与していない場合を(a)、粗さ#10を付与した場合を(b)に示す。こちらの場合もほぼ同じ姿勢であり、ほぼ同じ回転速度であるときの画像である。図9(a)において上半分のタフトのほぼ全部が表面に付着しており、表面に沿った流れになっており、図9(b)において上半分のタフトはほとんど付着せず、剥離しているように見える。このことより、粗さが大きい方が左右非対称の力が小さいと考えられる。

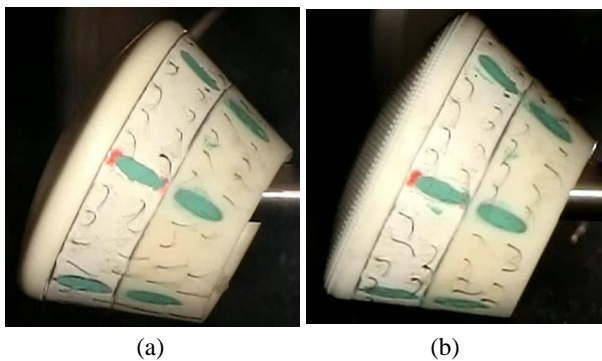


Fig.8 Visualization of flow around capsule,(along pitch)

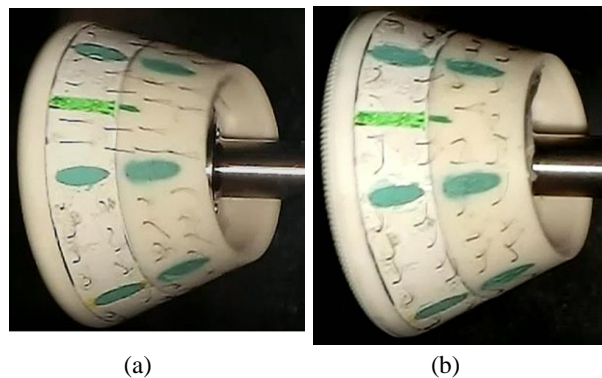


Fig.9 Visualization of flow around capsule,(along yaw)

5. 結論

今回の実験を通して、分かったことを以下に示す。

- ・揚力型カプセルにおいて、カプセル前面の粗さを変えることにより、ロール運動に影響を及ぼすことがわかった。
- ・揚力型カプセルにおいて、前面の粗さを粗くするとロール運動を抑制することができる可能性は高くなるが、必ずしも抑制できるわけではない。
- ・揚力型カプセルにおいて、前面の粗さを粗くすることにより、カプセル背面の剥離領域に違いがあることがわかった。

6. 謝辞

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ました(課題番号W17-003)。

7. 参考文献

- (1) 田中 光太, "異なる形状の再突入カプセルに生じる姿勢運動", 九州工業大学2017年度修士論文
- (2) 矢永 雄馬, "3自由度自由回転支持装置による揚力型カプセルの振動評価"九州工業大学2015年度修士論文
- (3) 平木 講儒, 大友晋輔, 田中光太, Harald KLEINE, "亜音速流中で誘起される再突入カプセルの回転運動" 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018講演論文集