

表面への突起付与によるカプセル回転挙動への影響

○飯田侑（九工大・院）,平木講儒（九工大）,
青木耀大（IHI）, Harald Kleine（UNSW）

Yu HANDA, Koju HIRAKI (Kyusyu Institute of Technology)
Akihiro AOKI(IHI), Kleine Harald(UNSW)

Key Words : Reentry capsules, Low speed wind tunnel, lift flight, center of gravity,

1. 緒言

国際宇宙ステーションからの人や物資の帰還には再突入カプセルが用いられている。カプセルは空気力による減速を目的として扁平な鈍頭形状をしており、このような形状のカプセルは主に遷音速域において自励振動を起こすことがこれまでの研究によって明らかとなっている。カプセルの重心を機体対称軸上からずらして、非零の釣合迎角を持たせることにより発生する揚力を利用する場合もある。緩やかな減速加速度の達成と誘導修正が可能となる。このような揚力型カプセルでは釣合角がピッチとヨーで異なり、その影響を静的・動的に評価する必要があるが、動的に評価することは容易ではない。本研究では、揚力型カプセルを対象に、3自由度自由回転装置を用いた動的試験法による評価について報告する。

2. 実験装置

2-1 支持装置

本実験で使用したカプセル回転支持装置の基盤となっている3自由度自由回転支持装置をFig.1に示す。この装置は2つの深溝玉軸受によるジンバル機構によって、ピッチ・ヨー軸まわりの回転運動を許容している。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可能とする回転軸支持機構をもつ。これらの機構によってピッチとヨー、ロール軸周りの3自由度回転運動を可能としている。この装置のベアリングの箇所を減らして取り付けることによって1自由度、2自由度の装置へと転換し本研究に用いた。さらに、本装置は可動部を固定、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。

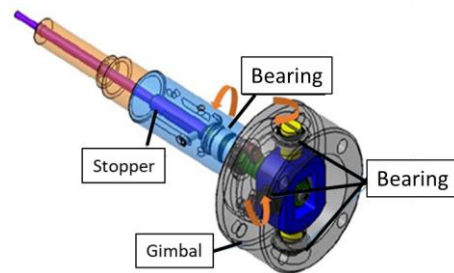


Fig.1 3DOF free rotational supporting device

2-2 カプセル模型

本研究で用いたカプセル模型をFig.2に示す。直径106mmで、大きな曲率半径の前面を有する形状である。回転中心が機体対称軸からピッチ面内でのみオフセットされた揚力型である。軸対称体であるカプセルを対称軸外の回転中心に取り付けるため、重力によるモーメントが発生するので、模型内部にももりを付与にして釣合を実現している。

カプセル模型にはジャイロセンサが内蔵されており、取得されるピッチ・ヨー・ロール軸周りの角速度を積分することで姿勢角を算出する。

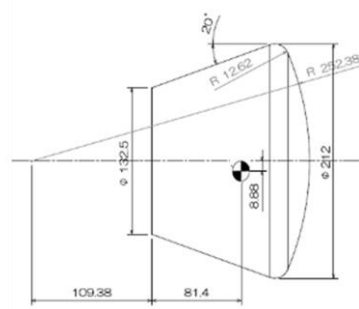


Fig.2 Test model specification

3. 実験結果と考察

3-1 遷音速風洞における評価

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の遷音速風洞にて、ロール挙動が確認されたMach0.3の気流中

で実験を行った。

3軸まわりに回転可能な試験において、得られたカプセル姿勢角の時間変化をFig.3に示す。

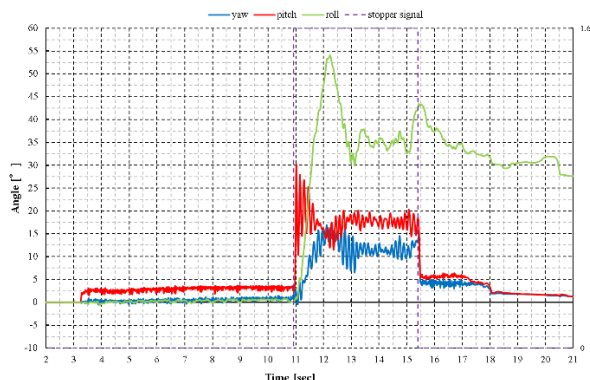


Fig.3 Angle transition of HTV-R in 3DOF (pitch, yaw and roll)

ロック解除と同時に、緑で示されたロール軸まわりの回転が発生している。

今度は、ロール軸まわりにのみ可動な1自由度実験を、先の3自由度実験と同様にMach0.3の条件下で行った。同じくカプセル姿勢角の時間変化をFig.4に示す。なお、ピッチ角およびヨー角はともに0°で固定である。

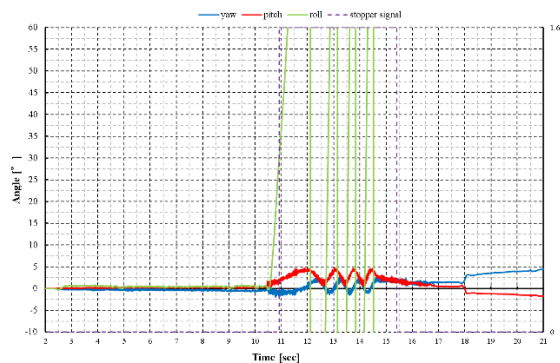


Fig.4 Angle transition of HTV-R in 1DOF(roll)

Fig.4に示されている通り、緑で示されたロール軸まわりの回転が発生している。ピッチ・ヨー角ともに0°で、迎角横滑り角ともに0°であるにもかかわらず、ロール回転の発生が確認された。

次に、ヨー軸は固定してピッチ軸・ロール軸まわりに回転可能な2自由度実験をMach0.3の条件下で行った。姿勢角の時間変化をFig.5に示す。

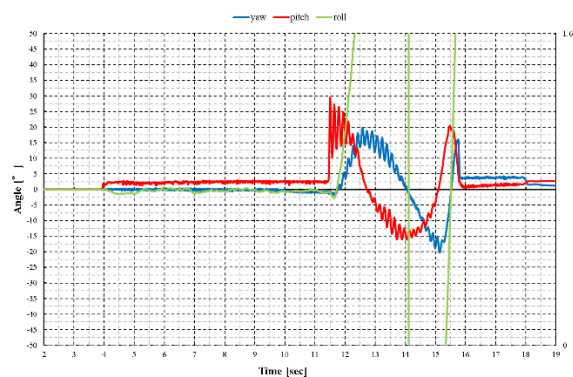


Fig.5 Angle transition of HTV-R in 2DOF (pitch, roll)

Fig.5より、緑で示されたロール軸まわりの回転運動が確認された。

異なる自由度下で実験を行った結果、3自由度実験や2自由度実験に比べ、1自由度実験は特にロール運動の角加速度が大きい。

3-2 低速風洞における評価

低速風洞試験設備(500mm×500mm)においてもカプセル模型の姿勢運動を観察した。風速は約23[m/s]、初期迎角は0度とトリム迎角に近い20度にて実験を行った。また、表面粗さによるロール運動抑制効果を検証するため、それぞれの粗さ付きカプセルについて20回ずつ試行し、ロール運動が発生した割合を調べた。Fig.6に表面粗さを変えた模型表面を示す。番号は目の番手である。



Fig.6 Surface of capsule provided roughness by sandpaper (Left#2000, Right: #40)

まずは、ロール軸のみに可動な1自由度実験を行った。ロール運動をした回数と割合をTable.1に示す。

Table.1 Number and percentage of roll(Roll)

	ロールした回数	ロールした割合
#2000 迎角0°	20	1
#2000 迎角20°	12	0.6
#40 迎角0°	20	1
#40 迎角20°	7	0.35

迎角 0° ではどちらの粗さにおいて全てロール運動をした。また、トリム迎角付近では粗さの大きい模型の方がロール運動をする割合が低く、粗さによってロール運動が抑制されている。

次に、ピッチ軸とロール軸まわりに可動な2自由度実験を行った結果をTable.2に示す。

Table.2 Number and percentage of roll (Pitch and roll)

	ロールした回数	ロールした割合
#2000 迎角 0°	20	1
#2000 迎角 20°	16	0.8
#40 迎角 0°	20	1
#40 迎角 20°	17	0.85

迎角 0° においては1自由度実験と同様にどちらの粗さにおいて全てロール運動をした。迎角 20° においてはどちらも約8割がロール運動をした。初期迎角 20° 度、粗さ#2000におけるピッチ、ロールの角度変化をFig.7に示す。

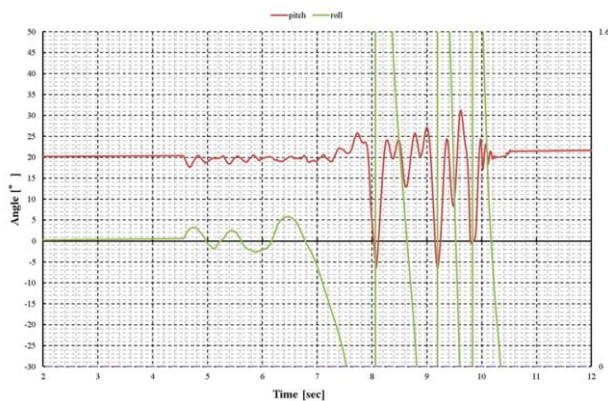


Fig.7. Pitch and roll angles(#2000)

ロールが開始する以前ではピッチ角の振動は小さく、ロール開始後で大きく振動している。角速度の時間変化をFig.8に示す。

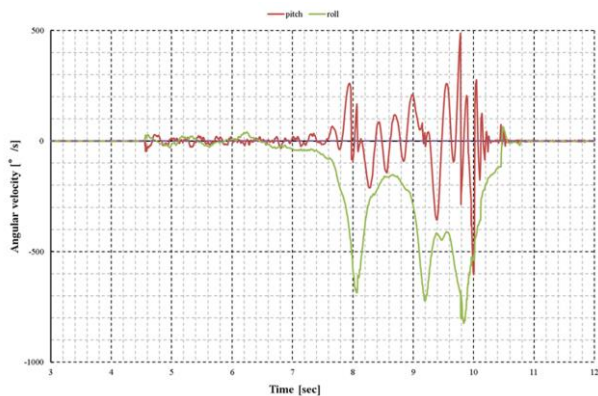


Fig.8 Pitch and roll angular velocity(#2000)

ロール角速度の大きさが増加する時間とほぼ同

時にピッチの角速度の大きさが大きくなる。

今度は、ヨー軸とロール軸まわりに可動な2自由度実験を行った。目の細かい#2000の模型において初期迎角 20° で実施した姿勢角の時間変化の様子をFig.9に示す。

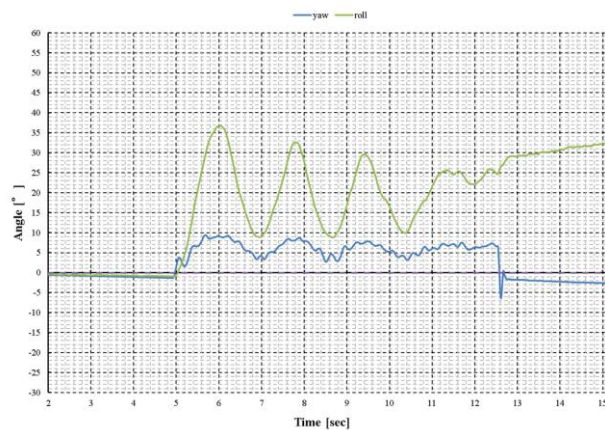


Fig.9 Yaw and roll angles(#2000)

ヨー、ロールが共に振動が見られたものの、一方方向へのロール回転は生じなかった。

これまでの結果と比較するため3自由度でも実験を行った。粗さ#2000模型を初期迎角 20° にて実験した時の角度変化をFig.10に示す。

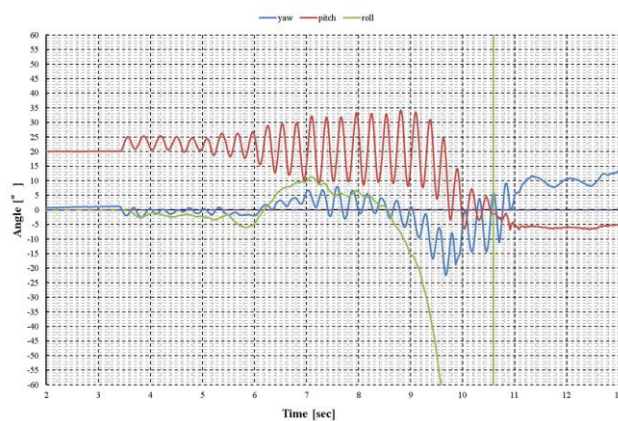


Fig.10 Pitch and yaw, roll angles(#2000)

約6~7[sec]からロール運動が開始している。角速度の時間変化を表すグラフをFig.11に示す。

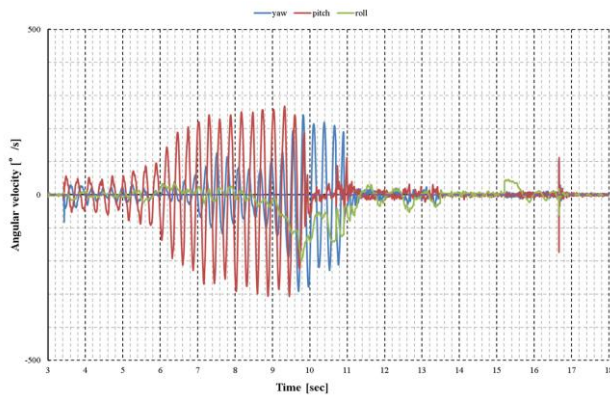


Fig.11 Pitch and yaw, roll angular velocity(#2000)

角速度について、ピッチ軸周りの角速度の増加後、9～10[sec]の間でロール運動の角速度が増加している。ヨー軸周りの角速度もロール運動角速度の増加とほぼ同時刻で増加している。

1自由度（ロールのみ可動）実験についてトリム迎角に近い20[°]で実験した際にもロール運動が確認されたことからピッチ、ヨー軸周りの振動に影響されることなくロール運動は発生するが、粗さの違いによってロールする割合に大きく違いがあった。2自由度（ピッチ、ロールに可動）実験においては、ロール運動の開始と共にピッチ軸周りの振動が増加しており、角速度の変化についてはロール運動の角速度増加とピッチ軸周りの角速度増加の時刻がほぼ一致していた。このことは3自由度実験でも確認されている。

4. 結論

一連の実験を通して、分かったことを以下にまとめる。

1. 迎角および横滑り角ともに0°であっても、ロール回転が発生する。
2. 表面粗さの付与によってロール運動は抑制される傾向にある。
3. ピッチとロール、もしくはヨーとロールの2自由度の組み合わせでは、ピッチとロール時のみ一方向へのロール回転が発生する。

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た（課題番号W17-003）。

参考文献

- 1) 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修士論文

2) 青木耀大, 人工的な粗さによるカプセルロール運動への影響, 九州工業大学2019修士論文

3) 滝澤潤一, 杉村文隆, 大窪拓哉, 平木講儒, 中須賀真一, 大気球を利用した μ -LRSのカプセル自由落下実験