

論文の内容の要旨

論文題目 Study of Mach Number Effect on the Dynamic Stability
of a Blunt Re-entry Capsule

(和訳 鈍頭型再突入カプセルの動的不安定に与える
マッハ数効果に関する研究)

氏名 飯塚 宣行

本論文では鈍頭型再突入カプセルに生じる遷音速域でのピッチング運動の動的な不安定性を、一様流が超・亜音速、両者の場合について流れ場の数値シミュレーションを行い比較・解析している。再突入カプセルの形状には過去の研究例が豊富な宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の Muses-C 計画に用いられている再突入カプセルを用いた。一様流のマッハ数はピッチング運動が顕著となる 1.3, 0.9, 0.8, 0.7 の条件で解析を行った。

超音速の条件であるマッハ数 1.3 でピッチング方向に強制振動を行ったシミュレーションでは、過去の実験・数値シミュレーションの研究と同様、カプセルピッチング振動時の背面に生じるピッチングモーメントにヒステリシスが存在することを確認した。そしてこの背面ピッチングモーメントに生じるヒステリシスによって、1 周期の間にピッチング振動に対する負減衰を生じるという過去のシミュレーションと同様の結果を得た。

亜音速の条件である、マッハ数 0.9, 0.8, 0.7 で強制振動を行ったシミュレーションでは超音速側であるマッハ数 1.3 のときと同様に背面のピッチングモーメントにヒステリシスが存在することがわかった。またこの 1 周期のヒステリシスが負減衰のピッチングモーメントを発生するという、超音速側と似た動的不安定メカニズムが存在することがわかった。超音速側ではカプセルエッジから放出されるせん断層は再圧縮衝撃波に到達するまで超音速で加速膨張するが、亜音速側では流れはほぼマッハ数 1 の状態を保ったのち弱い垂直衝撃波により減速するかまたは亜音速で減速する。亜音速側の条件ではこれらに伴う逆圧力勾配によるせん断層の不安定性が顕著にみられ、大きな擾乱成分を生ずる。この大きな擾乱成分が亜音速側遷音速の大きな特徴となっていることもわかった。このため亜音速側での背面のピッチングモーメントは超音速側のものと比べ、ランダムな擾乱成分の大きさが背面ピッチングモーメントと同

じオーダーにまで達し、周期ごとの滑らかな位相平均を得るまで約40周期分を要した。今回のシミュレーションでは流れ場の周波数特性の定量性を議論することはできないが、亜音速側は超音速側に比べ全時間変動量は数倍の大きさを持つ。

過去に行われた超音速でのシミュレーション結果からカプセル運動時の背面ピッチングモーメントは静的なピッチングモーメント特性と振動時の一定な時間遅れによって与えられるということがわかっており、静的な背面ピッチングモーメント特性が動的特性に大きな役割を果たしている。亜音速時も同様な説明がなされるか否かを確認するため、強制振動シミュレーションを行った条件と同じマッハ数でピッチ角固定のシミュレーションを行った。超音速側であるマッハ数1.3の条件では背面ピッチングモーメントはピッチ角5°付近でほぼ最大に達しその後はほぼ一定になるという、過去のシミュレーションと同様の結果を得た。亜音速側ではマッハ数0.9,0.8とマッハ数0.7で特性に違いが見られた。マッハ数0.9,0.8では、背面ピッチングモーメントはピッチ角20°付近で最大となりその後はピッチ角が増加すると共に絶対値は減少する。一方マッハ数0.7では最大となるピッチ角が15°付近となり、以降ピッチ角の増大と共に絶対値が減少する傾向は同じである。マッハ数0.7でのこの特性の違いはカプセルエッジから放出されるせん断がこのマッハ数を境に亜音速となっていることに関連していると思われる。これらすべてのマッハ数においてピッチ角が増大するにつれてカプセル背面の後流が短くなり、最大のピッチングモーメントに達するピッチ角以降になるとほぼ変わらないという傾向が見られた。このことからカプセル背面の流れは背面ピッチングモーメントが最大となるピッチ角前後で特性が変わっていることがわかった。

亜音速側において、静的な背面ピッチングモーメント特性と動的な特性である時間遅れがどのようにして動的な背面ピッチングモーメントを作り出しているのかについて、過去に行われた超音速側の研究と同様に、動的な背面ピッチングモーメントを静的な背面ピッチングモーメントと時間遅れという式で表し、シミュレーションから得られた背面ピッチングモーメントにフィッティングを行った。その結果、亜音速側においても静的な背面ピッチングと時間遅れという現象が起きていることを確認した。

カプセルピッチング振動の動安定を設計段階である程度把握するためには静的なピッチングモーメント係数と運動することによる寄与分を算出できればよい。カプセル前面から生じる減衰係数はカプセルの形状と前面圧力分布からほぼ算出可能である。背面から生じる(負)減衰係数は今までの議論から静的なピッチングモーメント特性と時間遅れで決まることが分かっているから、時間遅れを算出または計測できればよい。静的なシミュレーション結果からこの時間遅れは背面ピッチングモーメントの一次遅れ系に近いこと、そして時間遅れを一次遅れ系によるものとしても議論に変わりがないことがわかった。カプセル背面に生じている流体现象が遅れ系であるならば背面ピッチングモーメントの時間履歴を採取し、自己相関解析を行うことでその系の時定数を同定できる可能性があることから、それぞれのマッハ数において背面の自己相関解析を行った結果、時間遅れと自己相関関数の間に明確な関係を得ることができた。背面の現象を2次、または3次の遅れ系で近似し、自己相関関数へのフィッティングを行うことで、振動時の時間遅れをピッチ角固定時のデータから採取できることが分かった。またこの結果は、背面の時間遅れがピッチ角の関数となることを示した。過去の超音速側シミュレーションによる研究では時間遅れを一定とみなしていたが、これは超音速時には後流の特性変化を起こすピッチ角以降で背面ピッチングモーメントがほぼ一定の値をとるため時間遅れの変化の効果を無視できることから説明可能であり、後流の特性変化とともに時間遅れも変化するという結論と矛盾はない。以上の結果より、動的な背面ピッチングモーメントは静的なものから推測でき、カプセルを振動させることなく不安定効果を見積もることができる。

背面から生じる負減衰の係数は静的なピッチングモーメントのピッチ角に対する傾斜と時間遅れの積で表されるため、今回のシミュレーションの結果から時間遅れがピッチ角の関数であることを考慮すれば背面から生じる負減衰の係数もまたピッチ角の関数となることがわかる。カプセルピッチング運動の安定性は全ピッチングモーメントに左右されるため、安定性の議論には前面に発生する動的なピッチングモーメントも考慮しなければならない。今回のシミュレーションでは前面に発生する動的なピッチングモーメントはピッチング運動に対して減衰効果を生ずるといった過去の実験結果と同じ結果を得ている。ピッチング運動が励振状態から定常振幅のリミットサイクルに至る理由は前面から発生する減衰と背面から発生する負減衰とが平衡状態に達するためと考えられることから、リミットサイクル時の振幅はシミュレーションが行われたすべてのマッハ数で振動の周期によらないことを示すことができる。これにより、過去に行われた風試による自由振動実験と自由落下実験において異なる無次元振動数にもかかわらずほぼ同じ振動履歴を示すことが説明される。また亜音速側では背面ピッチングモーメントの絶対値を示すピッチ角が大きいことを踏まえると、大振幅に至るまで減衰と負減衰が平衡にならない可能性があることから、超音速側に比べリミットサイクル時の振幅が大きいことも説明できる。

風試による自由振動実験では、亜音速側での振動には大振幅でリミットサイクルに至る振動と、小さなピッチ角の範囲で振幅が増減を繰り返すという二つのモードの存在が確認されている。リミットサイクルに至る経緯は先に述べたとおりであるが、小振幅で増減を繰り返す現象に関する検証は現在までの研究では見受けられない。一般に、振幅が定まらない1自由度振動現象では減衰係数が小さい振動系に外力が加わっていることが予想される。風試による自由振動実験からこのカプセルのピッチング振動系の減衰係数は正負に関わらず小さいことがわかっており、振幅の増減には亜音速側の特徴である大きな擾乱が関係していると思われる。この確認のために、実験によってこの現象が現れるマッハ数0.7において、ピッチ角を 0° に固定したときの背面ピッチングモーメントの時間履歴をシミュレーションにより採取し、この力を外力としてカプセルの振動と共振周波数を一致させた系の常微分方程式に加え振幅の様子を調べた。この結果では系の減衰係数を小さくした時に振幅の増減が確認されたことから、この現象は前面と背面による減衰、負減衰の力が小振幅で常に均衡している条件で亜音速側特有の大きくランダムな擾乱が組み合わさることによって起きる現象で説明できる。