

## 論文の内容の要旨

論文題目      **Computational Study on the Dynamic Stability of a  
Blunt Reentry Capsule at Transonic Speeds**

(遷音速域における再突入カプセルの動的不安定現象に  
関する数値解析)

氏名            寺本 進

先端半径が大きく全長の短い、平たい再突入カプセルは弾道係数が小さくなるため、突入時の最大加熱率を低く抑えることができる。宇宙研 Muses-C 計画のようなサンプルリターンミッションでは、衛星の重量を抑えるために惑星間軌道から高速のまま直接大気圏に突入するので、最大加熱率を抑えるために鈍頭の平たいカプセルが採用されることが多い。このようなカプセルは熱的に有利な反面、遷音速域でピッチ方向が動的に不安定になる傾向があり、大振幅の自励振動に入ることがある。カプセルの姿勢が不安定になると突入軌道の推定誤差が大きくなり、また最悪の場合減速用パラシュートの開傘ができなくなることもあるので、振動の抑制は工学的に重要な課題となっている。一方、この振動は無次元振動数が  $O(0.01)$  と非常に低く、マッハ 1 前後の遷音速域でのみ観察されるなど流体力学としても興味深い現象である。この動的不安定現象自体は 1960 年代から知られており、これまで実験的に研究がされてきたが動的不安定に至るメカニズムは未だ解明されていない。

本論文は、鈍頭再突入カプセルの遷音速域における動的不安定現象を数値解析によって解明することを目的とする。無次元振動数が低いことから長い実時間にわたって非定常シミュレーションを行なうので、大量の流れ場データが得られる。本

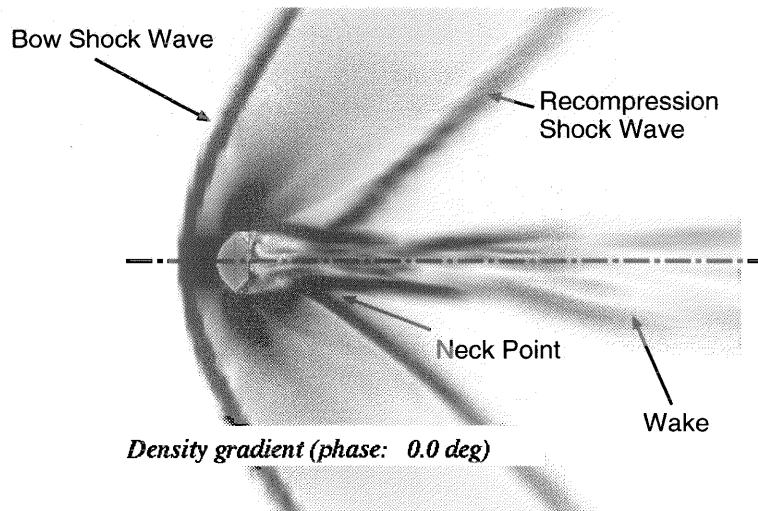


図 1: 密度勾配分布

研究ではカーブフィットや周波数フィルタを用いることで、膨大なデータの中から必要な情報を抽出する工夫をしている。

まず、カプセルをピッチ方向に強制振動させたシミュレーションより、カプセル背圧は迎角が正のとき頭下げモーメントを発生し、また背圧はカプセルのピッチ角変化よりも遅れて変動することがわかった。背圧の遅れによってカプセルに働く空力モーメントにヒステリシスが生じ、カプセル振動を動的に不安定にしている。

図 1 にマッハ 1.3 におけるカプセル周りの密度勾配分布を示す。カプセル前方に弓状衝撃波、下流には後流が観察される。後流は下流に行くにしたがって集束し、再圧縮衝撃波を生じる。再圧縮衝撃波の根本はネック・ポイントと呼ばれる。カプセルがピッチング振動したときの流れ場各部の変動を観察した結果、再圧縮衝撃波および再圧縮衝撃波下流の後流といったネック・ポイント近傍の流れ場が、背圧と同位相で変動している事が明らかになった。ネック・ポイントが上方へ変移するのと同期してカプセル背面上部の圧力が上昇し、背圧が頭下げモーメントを発生する。2つの変動が同期していることから、両者の間には何らかの関連があるものと考えられる。

ピッチング振動するカプセル周りとはピッチ角を固定したカプセル周りの流れ場を比較した結果、カプセルが振動する場合も流れ場の基本的な構造に変化は無く、ピッチ角固定時の流れ場が時間遅れを持って変動するという単純な「時間遅れモデル」でピッチング振動時の流れ場を表現できることが分かった。このモデルに基づ

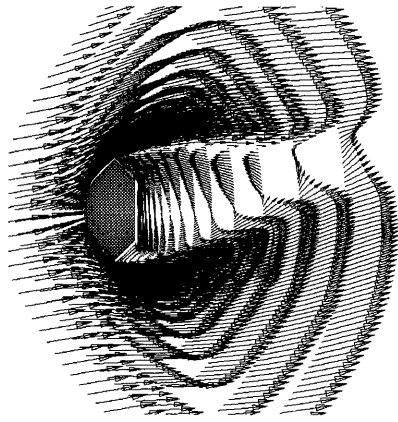


図 2: 速度ベクトル図

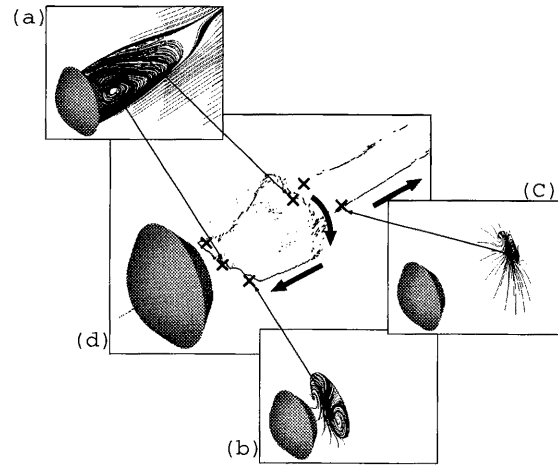


図 3: 渦中心

いてピッチ角を固定したカプセル周りの流れ場を詳細に観察することで、動的不安定のメカニズムについて考察した。

図 2 にカプセル周りの速度ベクトル図を示す。カプセル背後には強い逆流域が存在している。この逆流域は背面に衝突して背圧の高い領域をつくり出す。したがって、逆流がカプセル背面に衝突する位置で背圧分布が決まる。逆流域の位置はカプセル背後の循環流領域内の渦構造と密接な関連がある。図 3 にカプセル背後の渦中心の軌跡を示す。カプセル背後の渦は、歪んだリング渦と下流に伸びる縦渦対から構成され、両者はネック・ポイント付近で干渉している。リング渦はカプセル背後の逆流に対応し、逆流域の位置はリング渦の形状と関連している。下流の縦渦対は迎角正のとき前視右側で時計周り、左側で反時計周りであり、2本の縦渦の間では吹き上げ速度を誘起する。吹き上げはリング渦の下半分を強め、リング渦を変形させる。これらから、リング渦と縦渦対の干渉によってカプセル背後の渦構造が支配されていることが分かる。

カプセル背後の剪断層内の流れ場を観察すると、迎角が正の時に剪断層内には周方向の速度成分が生じ、流線が下方を向いている (図 4)。流線は下流に行くにしたがって集束し、ネック・ポイントで巻き上がる。この巻き上がりがネック・ポイント下流に縦渦対を誘起し、上流側のリング渦を変形させる。カプセル下流の剪断層は実質的な物体形状として外部流に作用するので、外部流と剪断層内の流れ場は直接影響を及ぼし合っていると考えられる。

剪断層内の流れは後流外部の流れ場の影響を直接受けているので、カプセル迎角が変化したとき、剪断層内には直ちに周方向の速度成分が発生する。しかし、周方

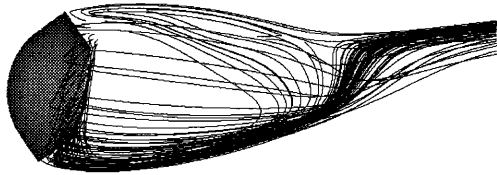


図 4: 剪断層内流線

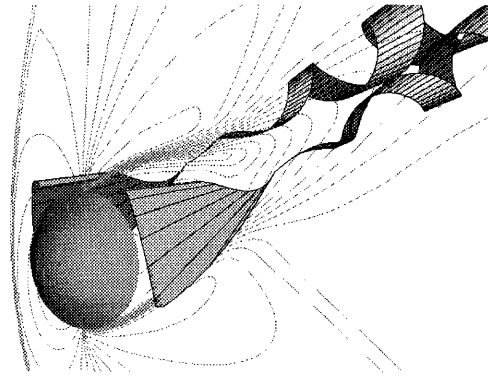


図 5: 縦渦対 (模式図)

向の速度成分が下流に伝播するのに時間を要するため、ネック・ポイントでの巻き上がりはカプセル迎角の変化から遅れる。カプセル背圧はネック・ポイントでの巻き上がりの影響を受けるので、背圧もカプセル迎角の変化から遅れることになる。図5の模式図に示す縦渦対がカプセルからネック・ポイントまで伝播する時間が、背圧の遅れの原因となっている。

カプセル背圧分布と背圧の遅れ、どちらもカプセル下流の縦渦対と密接な関連があり、縦渦対の挙動によって動的不安定のメカニズムを説明出来ることが分かった。数値解析より導いた一連の動的不安定のメカニズムは、過去の実験で観察されている現象の特徴を矛盾無く説明することができる。