

動的モード分解による非定常流体データ解析

Dynamic Mode Decomposition Analysis for Unsteady Flow Datasets

大道勇哉

Yuya OHMICHU

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

近年の数値流体シミュレーションでは、流れ場の時空間構造を精度良く捉えるために、大規模な計算格子を用いた非定常流体解析が行われる。しかしながら、たとえ精度の良いシミュレーションを実施できたとしても、そのような解析で得られる大規模な流体データの中から本質的な情報を抽出することは難しい。流体データに潜在する特徴構造を抽出する手法としては、主成分分析（流体分野では固有直交分解, Proper Orthogonal Decomposition, POD と呼ばれる）や動的モード分解 [1] (Dynamic Mode Decomposition, DMD) がよく利用されている。著者らは、大規模流体シミュレーション結果から流体现象の特徴構造 (パターン) を抽出する解析手法を提案し、いくつかの流れ場に対して適用を進めている [2,3]。本発表では大気突入カプセルの飛行時に動不安定をもたらす流体现象の解明を目的として実施した解析等について紹介する。

動的モード分解 (DMD) とは、時間発展や空間発展を表すデータから特徴構造を抽出する手法である。入力データセットを近似する線形力学系を求めることで、データに潜在する平均的なダイナミクスを抽出する。すなわち、 k 番目のデータ ψ_k と $k+1$ 番目のデータ $\forall bm\psi_{k+1}$ の間に、以下のような関係を仮定する。

$$\psi_{k+1} = A\psi_k \quad (1)$$

特徴構造は行列 A の固有値及び固有ベクトルとして求まり、入力データセットが時系列データの場合、それぞれ時間パターン（増幅率と周波数）及び空間パターンを表す。行列 A は、入力データセットのみから最小二乗法などのフィッティングにより計算する。

また、動的モード分解では固有値・固有ベクトル対の数だけ特徴構造が求まるが、その中から物理的に重要なモードを特定する方法は自明ではない。本研究では、圧縮センシングを用いた重要モードの特定 [3,4] を実施した。圧縮センシングでは、入力データを再現するために必要なできるだけ少数の DMD モードを選択することが可能である。

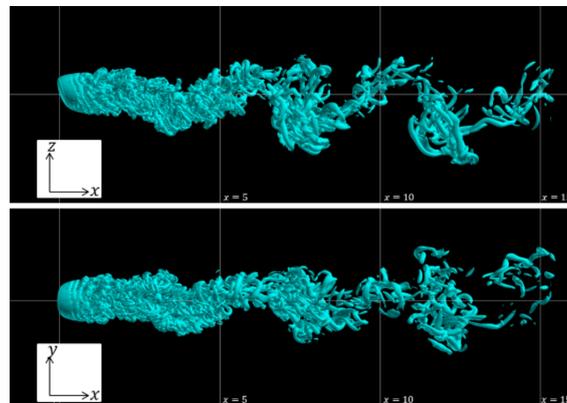


図 1: 数値流体シミュレーションによって得た大気突入カプセル周りの流れ場。Q 値の等値面により渦構造を可視化している。

図 1 は、数値流体シミュレーションによって得られた大気突入カプセル周りの流れ場である。カプセル肩部で剥離した流れが急激に不安定化し、小さな渦構造が多数生成されている。また、後流には規則的なうねり

構造が見られ、カルマン渦の放出に似た大規模な渦放出現象の存在が示唆される。図2はDMDにより得られた固有値および貪欲法に基づくアルゴリズム [2,3] により選択されたDMDモードを示している。この図から、無次元周波数 $St \approx 0.01$ と $St \approx 0.2$ に対応する現象が支配的であることがわかる。紙面の制約上ここには示していないが、各DMDモードの空間構造を調べると、 $St \approx 0.2$ の現象はカプセルの肩部からの流れの剥離により渦輪状の流体構造を放出する現象と螺旋状の流体構造を形成する現象から構成されていることがわかる。さらに、 $St \approx 0.01$ のモードはこれまで知られていなかった流体現象である。このモードの空間構造等を詳しく調べることで、カプセル後流の再循環領域において圧力が大きく時間変化する現象であることがわかった(図3)。また、再循環領域内の圧力勾配が変化するため、再循環領域の大きさの周期的な変化を伴っていることも観察された。この現象がカプセルに及ぼす空気力を調べると大きな抗力の変動を生じることがわかっており、今後、カプセルの姿勢運動への影響を調べていく予定である。

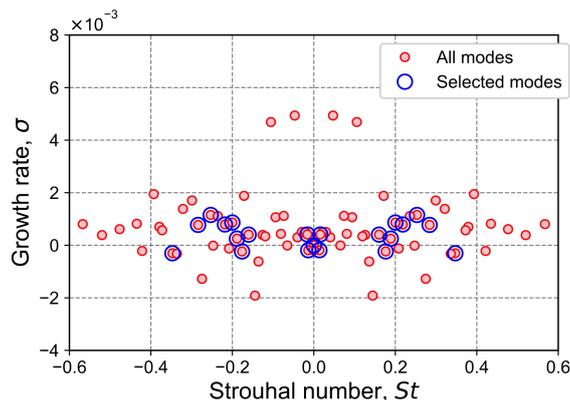


図2: 動的モード分解の固有値分布。赤丸は全てのDMDモード、青丸は圧縮センシングにより特定された重要モードを表す。

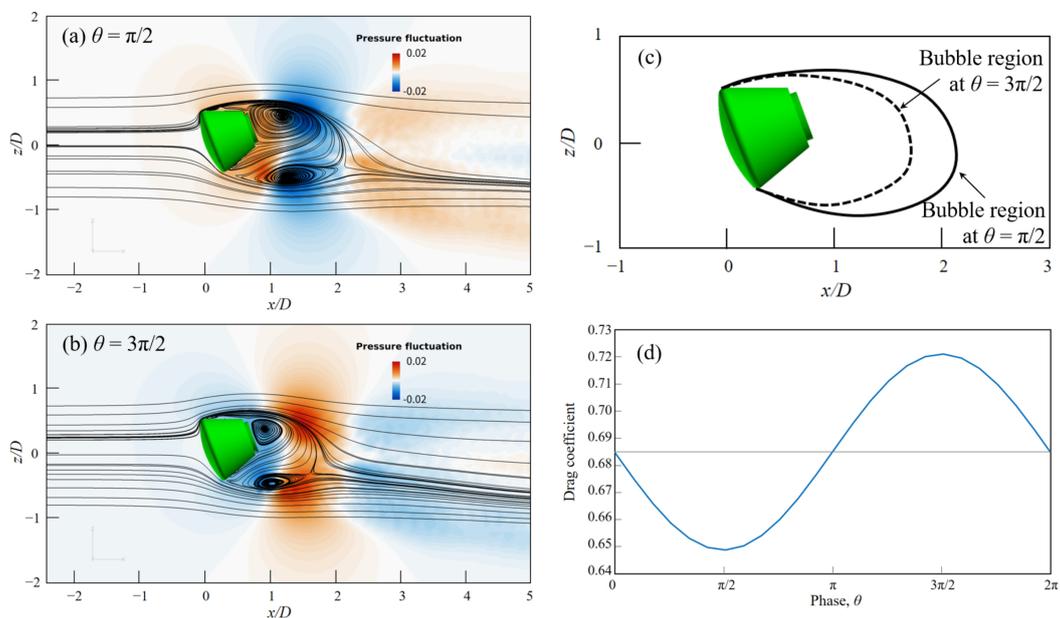


図3: $St = 0.159$ のDMDモードによる流れ場の変化。(a, b) 抗力最小および最大の瞬間における圧力変動と流線分布。(c) 再循環領域の大きさの変化。(d)DMDモードの位相と抗力変動の関係。

- [1] P. Schmid, J. Fluid Mechanics. **658**, 5–28 (2010).
- [2] Y. Ohmichi, T. Ishida, A. Hashimoto, AIAA J. **56** 3938–3950 (2018).
- [3] Y. Ohmichi, AIP Adv. **7** 075318 (2017).
- [4] M. Jovanović, P. Schmid, J. Nichols, Phys. Fluids **26** 024103 (2014).