

## No.10

## 超音速キャビティ流の振動機構について

西岡 通男（阪府大工） 浅井 智広（阪府大院）  
坂上 昇史（阪府大工） 白井 幸次（阪府大院）

## On the Mechanism of Supersonic Cavity Flow Oscillation

M. NISHIOKA, T. ASAI, S. SAKAUE and K. SHIRAI  
Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefecture University

## ABSTRACT

We have been working on the problem of supersonic cavity flows, which are characterized by violent self-sustaining flow oscillations generating strong vortical motions, hoping that such vortical motions can be used as a powerful means for supersonic mixing/combustion enhancement, a key technology developing scramjet engines. This paper summarizes our recent experimental, numerical and theoretical studies on the mechanism of supersonic cavity flow oscillations.

Key Words: Supersonic cavity oscillation, Supersonic mixing, Scramjet engine

## 1. まえがき

壁にうがたれた穴や溝などの空洞（キャビティ）を過ぎる流れをキャビティ流という。キャビティ流の特徴として、激しい自励振動（キャビティ振動）が起き、周期的で強い渦運動が生じる。筆者らはこの点に着目し、**キャビティ振動流を超音速域での乱流制御に用いることを考えている。**

超音速域では圧縮性の影響で渦運動が抑制され、混合能が著しく低下する。現在、超音速燃焼エンジン（極超音速推進スクラムジェットエンジン）や超音速化学レーザーの開発研究が世界的に進められているが、いずれにおいても超音速域での混合能の低下が技術課題となっている。超音速キャビティ振動流で強い乱流渦を生成できると、熱、物質、運動量の輸送・混合の促進技術に直結し、スクラムジェットエンジンや超音速化学レーザーの技術課題の解決に貢献する。

キャビティ振動流は、自励振動の機構そのものが興味深く、流体力学の重要課題として半世紀にわた

る研究が積み重ねられ、振動サイクルについては従来から次のような提案がある：**キャビティ前縁で剥離した境界層（剥離剪断層）の不安定波が下流に増幅し、キャビティ後縁に衝突すると圧縮波が発生する。その圧縮波はキャビティ内を伝播して前縁に達して、渦度攪乱をつくる。それが種となり、新しい不安定波が前縁から下流に成長し、次の振動サイクルが始まる。**しかし、このフィードバックループについては、不安定波の増幅過程、後縁での圧縮波の発生過程、圧縮波のキャビティ内の伝播過程、前縁で圧縮波が受容され渦度攪乱が生まれる受容過程のいずれについても、具体的なプロセスは従来から未解明であった。キャビティ振動を超音速混合促進制御などに応用するにはこれらの要素過程をよく知り、振動機構を把握する必要がある。

そこで筆者らは、超音速キャビティ流の振動機構の解明を目指し、流体工学上重要で基本的な平面壁上の2次元キャビティ（矩形断面：深さ  $D$ 、流れ方向長さ  $L$ ）を対象に、一連の研究を続けている。こ

ここでは、その成果をまとめている。

## 2. 圧縮波発生過程

第1報<sup>1)</sup>では、キャビティ流に関する従来の研究を精査してまとめた。そして、数値計算結果<sup>2)</sup>(主流マッハ数  $M_\infty = 1.8$ ,  $L/D = 1$ ) をもとに、剥離剪断層の挙動、キャビティ後縁における圧縮波発生過程およびキャビティ内の圧縮波伝播過程について考察し、**剪断層の“波打ちの山”がキャビティ後縁の真上に達した瞬間に圧縮波が発生する現象**を捉えた。これは「剪断層がキャビティ後縁の内側に入るとき(“波打ちの谷”の位相で)、主流側的高速流体が後縁壁に衝突して圧縮波が生まれる」という従来の定説を覆す結果であった。この新しい結果をキャビティ振動の理論としてよく知られた Tam and Block 理論<sup>3)</sup>(線形安定性理論に基づき剪断層の挙動を解析して振動周波数を計算)に適用し、振動周波数と  $L/D$  の関係を計算で求めたが、実験と一致する結果は得られなかった。

## 3. 超音速キャビティ振動の共鳴条件

第2報<sup>4)</sup>では、キャビティ前縁部での受容過程について考察し、前縁における渦度攪乱の生成がV字形の圧縮波によりパルス的になされることやV字形圧縮波が  $L/D$  の影響を直接的に反映することを見出した。そして、**フィードバックループの共鳴条件から  $L/D$  の影響が考慮された振動周波数予測式を導出し**、その妥当性を実験(主流マッハ数  $M_\infty = 1.5, 1.83, 2.5$ , 境界層はいずれもキャビティ前縁で乱流)と比較して確認した。

## 4. 剥離剪断層の不安定性

第3報<sup>5)</sup>では、キャビティ流における剥離剪断層の不安定性を調べるため、主流マッハ数が  $M_\infty = 1.85, 2.5$  で、キャビティ前縁の境界層が層流の場合について、 $L/D$  を種々に変えてキャビティ振動を実験で観察した。微小振幅振動流 ( $L/D = 1.5$ ) を対象とする熱線計測から、キャビティ振動モードの攪乱の空間増幅率を評価し、線形安定性理論による計算と比較・検討し、**キャビティ内に生じる定在渦(キャビティ渦)の速度場を考慮すれば、キャビティ振動モ**

**ードの攪乱の挙動は線形安定性理論で記述できること**を見出した。

## 5. 超音速キャビティ振動機構の理論的研究

第4報<sup>6)</sup>では、筆者ら前述の研究成果に基づき Tam and Block<sup>3)</sup>のキャビティ振動モデルを改善し、超音速キャビティ振動における剪断層の挙動を線形安定性理論により解析した。そして、振動周波数を理論的に求め、第2報で導出した振動周波数予測式とを比較し、**筆者らが提案する超音速キャビティ流の振動機構を理論的に検証した**。

本研究は部分的に文部科学省科学研究費(課題番号 12125203)の援助を受けた。

## 引用文献

- 1) 西岡 通男, 浅井 智広, 坂上 昇史, 白井 幸次, “超音速キャビティ流の振動機構に関する考察 第1報 圧縮波の発生と伝播の過程”, 日本流体力学会誌「ながれ」**21** (2002) 280-294.
- 2) M. Nishioka, T. Asai, S. Sakaue and K. Shirai, “On the Mechanism of Supersonic Cavity Flow Oscillations,” *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics 2001*, Edizioni ETS, Pisa, Vol. 1 (2001) 153-163.
- 3) C.K.W. Tam and P.J.W. Block, “On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow over Rectangular Cavities”, *Journal of Fluid Mechanics* **89** (1978) 373-399.
- 4) 西岡 通男, 浅井 智広, 坂上 昇史, 白井 幸次, “超音速キャビティ流の振動機構に関する考察 第2報 振動周波数予測式の提案,” 日本流体力学会誌「ながれ」**21** (2002) 368-378.
- 5) 浅井 智広, 西岡 通男, “超音速キャビティ流の振動機構に関する実験的研究,” 日本流体力学会誌「ながれ」**22** (2003) 131-145.
- 6) 浅井 智広, 西岡 通男, “超音速キャビティ流の振動機構に関する理論的研究,” 日本流体力学会誌「ながれ」**22** (2003) 147-156.