

## 超音速キャビティ振動に関する研究

阪府大・工学研究科 西岡 通男 (Michio Nishioka)

阪府大・大学院 浅井 智広 (Tomohiro Asai)

阪府大・工学研究科 坂上 昇史 (Shoji Sakaue)

阪府大・大学院 白井 幸次 (Koji Shirai)

Department of Aerospace Engineering,

Osaka Prefecture University

### 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。本論文は、流体工学上重要で基本的なキャビティ、すなわち、平面壁にあげられた矩形断面(流れ方向の長さ  $L$ 、深さ  $D$ )の2次元キャビティを扱う。

キャビティ流の特徴は、流速や圧力が周期的に変動する自励振動が起きることである。高速流では強い音波(キャビティ音)が放射され<sup>1)</sup>、大きな抗力が生じる<sup>2,3)</sup>。たとえば、航空機の脚(着陸装置)格納部のキャビティ振動による空力騒音は優に150dBを超す<sup>4)</sup>。文献5~9)の解説が示すように、従来の研究は振動・騒音の抑制が主題であった。最近では能動制御による抑制法の研究が活発である<sup>9,10)</sup>。

これに対し、筆者らは、キャビティ振動の積極的な応用を考えている。圧縮性の影響で自然のままでは渦運動が抑制される超音速域において、キャビティ振動を用いた制御で強い乱流渦をつくることができると、熱、物質、運動量の輸送・混合の促進技術に直結する。筆者らは、スクラムジェットエンジンの超音速混合・燃焼促進制御の課題に取り組み、人為的な縦渦による混合促進を実現し<sup>11~13)</sup>、超音速燃焼を達成した<sup>14)</sup>。そして、これらの結果を踏まえ、混合・燃焼にさらに有利な流れが縦渦とキャビティ流を組み合わすと得られると考えている。激しいキャビティ振動でつくられた小スケール渦と縦渦を干渉させたり、振動が抑制された“静かな”キャビティ流を超音速燃焼の保炎に用いたりする組み合わせが有望である。保炎の目的ではキャビティ流を組み込んだスクラムジェットエンジンがすでに試作され、飛行試験も行われている<sup>15,16)</sup>。縦渦との組み合わせによる超音速混合燃焼性能の向上が期待される。キャビティ流に着目した混合・燃焼の促進制御に関する研究は、このような超音速域に限らず、ますます活発化すると思われる。

キャビティ流は、このような工学的重要性に加え、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ているのであるが、その機構は難解で、十分な理解は得られていない。それゆえ、超音速混合・燃焼促進制御への応用を目的に研究を始めた筆者らにとって、振動機構の解明が最重要の課題となった。

そこで本論文では、振動機構の解明を目指し、主流マッハ数  $M_\infty = 1.8$ 、 $L/D$ (キャビティ深さに対する長さの比) = 1のキャビティ振動流の数値計算結果をもとに、剪断層の不安定性、キャ

ビティ後縁における圧縮波の発生、キャビティ前縁に到達した圧縮波による攪乱の生成など、キャビティ振動現象の一連のプロセスについて考察した。

## 2. 超音速キャビティ振動現象のプロセス

ここでは、筆者らの数値計算<sup>17)</sup>の結果をもとに、超音速キャビティ振動のフィードバックループを構成する一連の現象について考察する。

### 2. 1 剥離剪断層の挙動

筆者らが数値計算で調べたのは  $L/D = 1.0$  の矩形キャビティを過ぎる主流マッハ数  $M_\infty = 1.8$  の 2次元流である。3次元風上 TVD 法による数値計算の詳細は文献 17) に譲り、まず初期条件を簡潔に述べる。キャビティ上流の境界層は層流である。境界層厚さ  $\delta$  ( $0.99U_\infty$  で定義) は前縁で約  $0.0842D$  で、 $\delta$  と主流音速および主流動粘性係数でつくったレイノルズ数は  $6.321 \times 10^3$  である。最小グリッド寸法は流れ(x)方向と、それに垂直(y)方向にそれぞれ  $0.04\delta$ 、 $0.02\delta$  であり、キャビティ前縁の境界層内には厚さ方向に 50 点の格子点がある。主流領域 ( $3.947D \times 1.084D$ ) の格子点数は  $455 \times 165$  で、キャビティ内にも多数 ( $170 \times 180$ ) の格子点を用意した。初期条件の流れ場として、前縁で剥離した境界層が後縁に再付着する流れを採用し、キャビティ内は静止状態とした。

計算を開始すると、剥離剪断層の不安定性で変動が増幅し、周期的なキャビティ振動の状態に達する。しかし、キャビティ内の時間平均流は、後縁近傍に直径が  $0.2 \sim 0.3D$  程度の弱い渦運動が生じることを除くと、ほとんど静止状態に近い。時間が経過し十分に発達した段階になると、直径が深さ  $D$  にほぼ等しいキャビティ渦がしっかり形成され、キャビティ内の時間平均流はほぼ同心円の流線群をもつようになる。文献 17) では、初期段階と発達段階のキャビティ振動流を詳しく比較しているが、振動のストローハル数  $St$  が  $0.5838$  から  $0.8143$  に変化することを除くと、両者のキャビティ振動に本質的な差異はない。

ここでは、線形安定性理論で扱う単純な流れ場に近い初期段階のキャビティ振動流を取り上げる。まず、周期的なキャビティ振動の様子を見てみよう。図 1 には、無次元時間  $t = 154.2 \sim 167.2$  にわたり、渦度コンター、体積変化率を表す発散  $\text{div} \mathbf{u}$  のコンター、そして密度勾配  $\text{grad} \rho$  の絶対値に基づき可視化した増感シュリーレン像を示している。振動は周期的で、 $t = 154.2$  の流れは  $t = 165.5$  にほぼ再現されている。振動周期は  $165.5 - 154.2 = 11.3$  となり、ストローハル数  $St = (L/\delta)(1/11.3)(a_\infty/U_\infty) = 0.5838$  を得る。ただし、数値計算上の代表長さは  $\delta$ 、代表速度は  $a_\infty$  である。渦度コンターの時間経過を追うとわかるように、剪断層は  $t = 154.2 \sim 159.0$  にわたって前縁で擾乱を受け、それが下流に発達し、上下の波打ち運動が激しくなる。“波打ちの山” (付近) に渦度が集中し、それによって波打ちがさらに激しくなる。 $t = 157.5$  の渦度コンターは、キャビティ後縁下流の境界層において孤立的な渦が形成される可能性を示唆している。しかし、後縁の上流域で孤立的な渦が形成されることはない。この結果は Krishnamurty<sup>1)</sup> の風洞実験や Heller and Bliss<sup>18)</sup> の浅底水槽実験の結果と矛盾しない。

$y$  方向の速度変動  $v$  について、2 点の相互相関から計算した位相速度  $U_c$  は、キャビティ前縁の近くでは  $0.43U_\infty$ 、後縁に近づくと  $0.6U_\infty$ 、前縁から後縁までの平均値は  $0.55U_\infty$  であった。これは従来から知られている値<sup>19, 20)</sup>、 $U_c/U_\infty = 0.57$  にほぼ等しい。

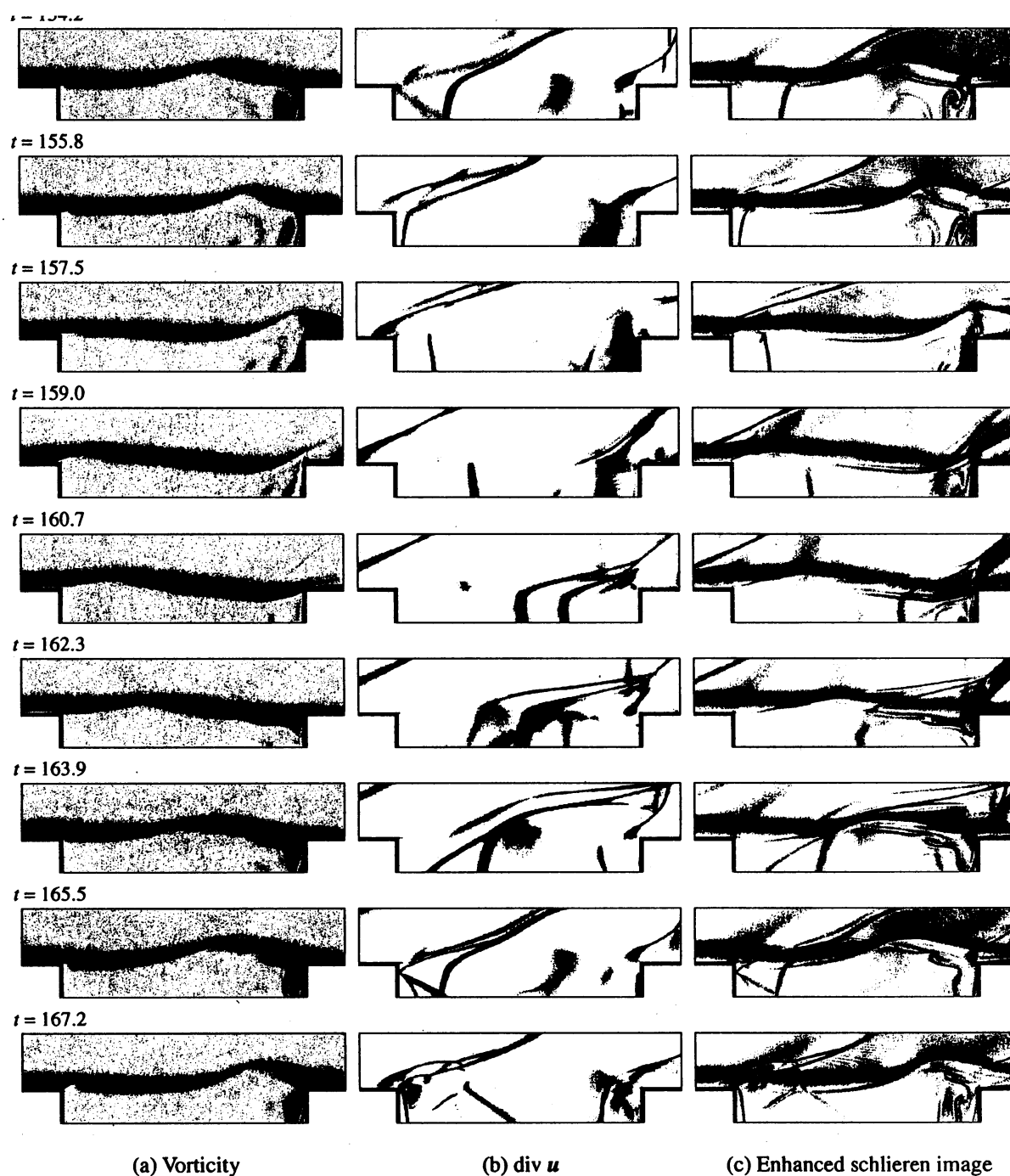


図1 超音速キャビティ振動のサイクル：  
 $M_\infty = 1.8$ ,  $L/D = 1$ , キャビティ前縁の境界層は層流.

## 2. 2 圧縮波の伝播

圧縮波のキャビティ内の伝播について考察しよう。図2は発散  $\text{div } u$  のコンターマップで圧縮波の活動を可視化したもので、図1の各時刻に対応する結果を示す。キャビティ内の音波や圧縮波の伝播がこのように鮮明に捉えられたのはこの数値計算が最初と思われる。

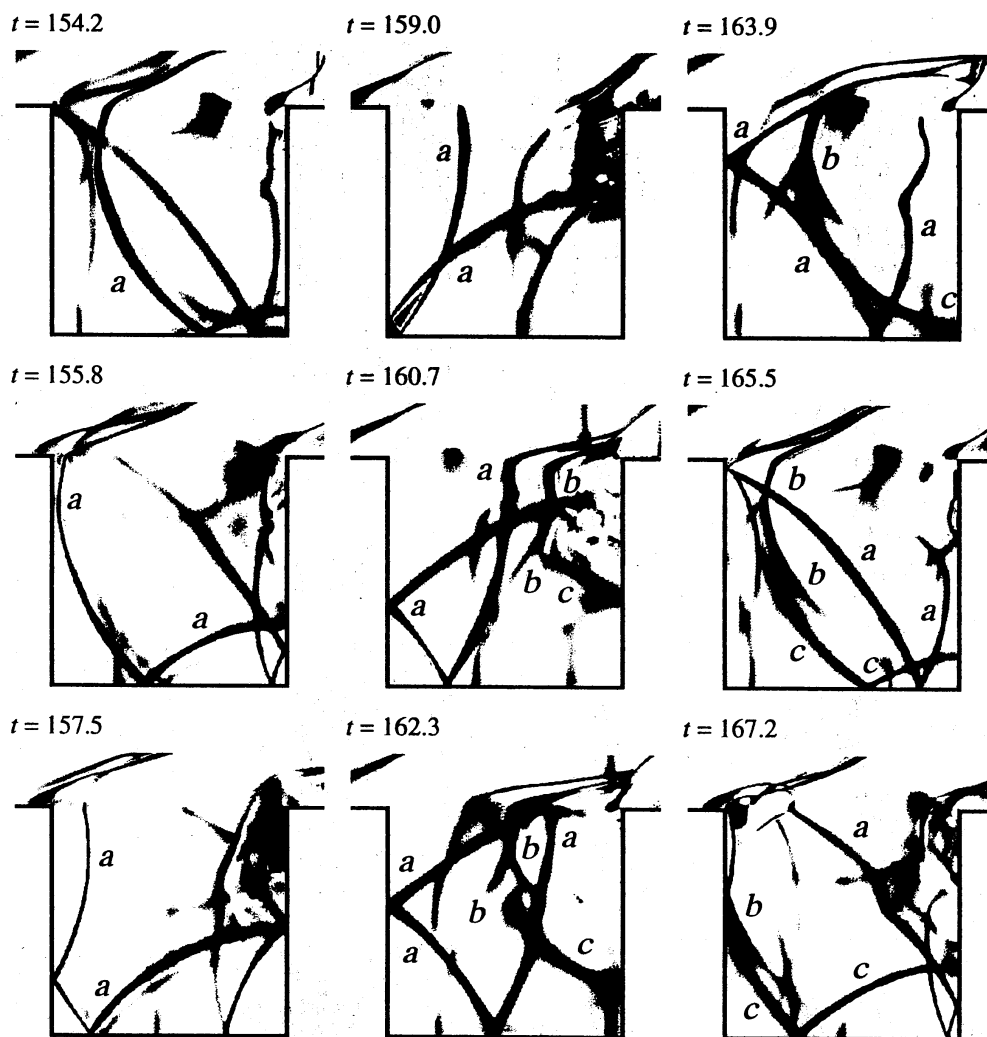


図2 超音速キャビティ振動における圧縮波の挙動 ( $\text{div } \mathbf{u}$  コンターによる可視化) :  
 $M_\infty = 1.8$ ,  $L/D = 1$ , キャビティ前縁の境界層は層流.

さて、 $t = 154.2$  の圧縮波 **a** に注目する。この波は少し前の時刻に後縁近傍で発生した圧縮波であり、上流壁に向かって進行中の上方の部分と、すでに底面で反射した波面を含む下方部分からなり、後縁近傍の音源から放射され伝播してきたことを示す形をみせている。上方の部分は  $t = 155.8$  で上流壁に衝突直前まで近づき、 $t = 157.5$  では反射波が下流向きに伝播している。下方の“底面で反射した圧縮波”は  $t = 159.0$  では上流壁でも反射し、その反射で生じた“横に倒したV字の形”の圧縮波 ( $t = 160.7$ ) はその形を保ったまま上流壁を前縁に向かって駆け上がる。V字の先端がキャビティ前縁に達すると  $t = 165.5$  のパターンが現れる。そのパターンと  $t = 154.2$  のパターンを比べるとわかるように、両者はほぼ重なる。 $t = 154.2$  では圧縮波 **a** として1本であったものが、 $t = 165.5$  では圧縮波 **b** と圧縮波 **c** の2本の波から成る点を除くと、パターンは全く同一で、周期性を明確に示している。

圧縮波 **a** は  $t = 155.8$  の直後に、発生後の第1波として直接的に前縁に衝突する。2度目は、底面で反射した波が、 $t = 165.5$  に、V字の形で前縁に達している。 $t = 165.5$  における圧縮波 **a** を時

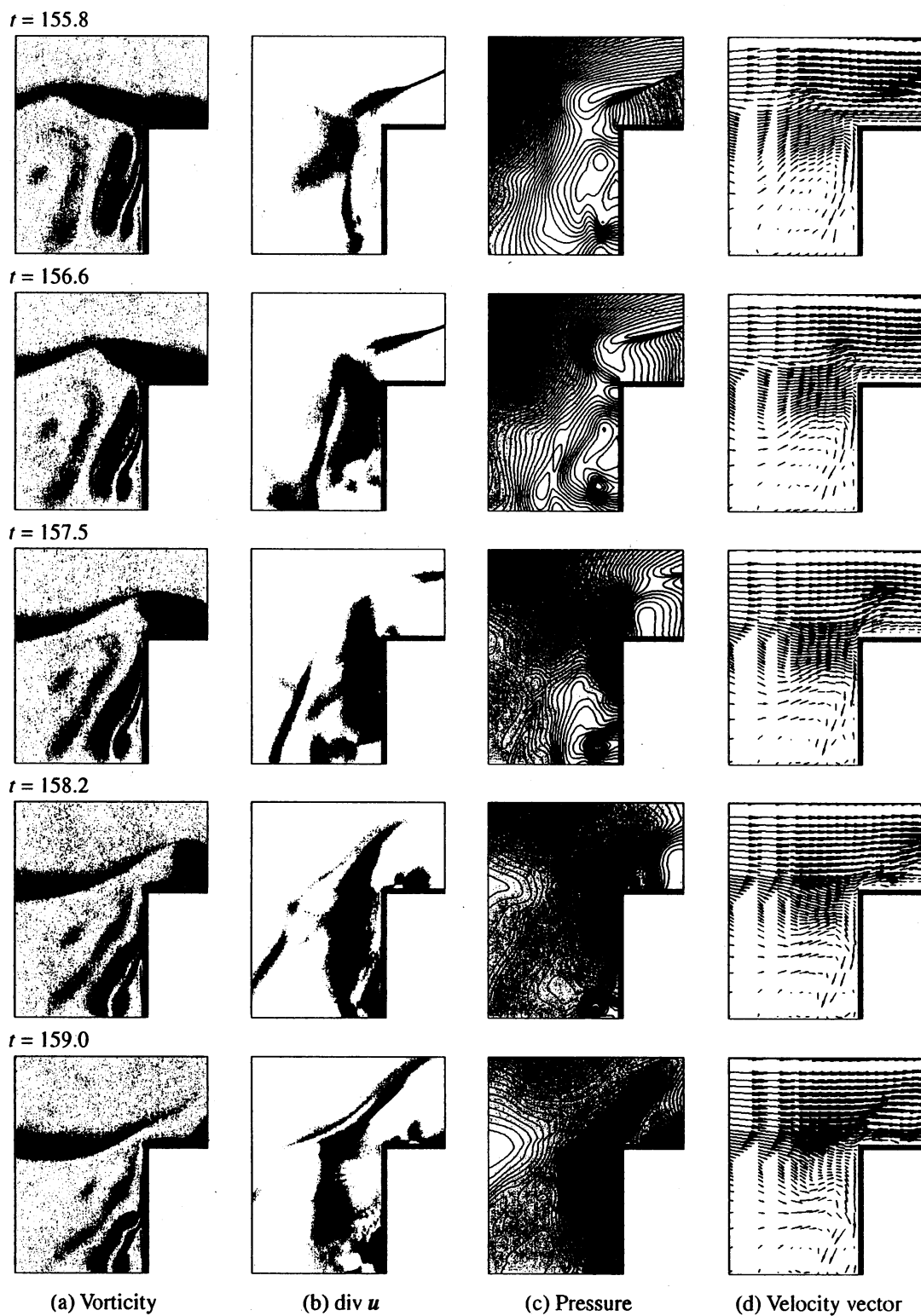


図3 超音速キャビティ振動における圧縮波の発生：  
 $M_\infty = 1.8$ ,  $L/D = 1$ , キャビティ前縁の境界層は層流.

間的にさらに追跡すると（周期性を利用し、1周期前の  $t = 154.2$  に戻って対応するパターンを追跡すると）わかるように、圧縮波 a はもう一度上流壁に衝突して反射し、そして下流への伝播の

途中で減衰して消える。圧縮波 **a** は、結局、発生から消滅までの間に、少なくとも3回、前縁に衝突する。3本の圧縮波が前縁近傍に集まった  $t=154.2$  と  $t=165.5$  のパターンはこの3回の衝突を象徴する。 $t=154.2$  のパターンでは、圧縮波 **a** とともに、その1周期前と2周期前に生まれた圧縮波が見えている。周期的であるから圧縮波 **a** の1周期後、2周期後の姿を示していると解釈してもよい。

さて、時間を遡り、いつどこで圧縮波 **b** と圧縮波 **c** が生まれたかみてみると、 $t=157.5$  に後縁で発生したことがわかる。次にその発生の過程を考察しよう。

### 2. 3 圧縮波の発生過程

圧縮波発生のプロセスを明らかにするため、渦度コンター、発散  $\text{div}u$  のコンター、圧力コンター、および速度ベクトル場が  $t=155.8 \sim 159.0$  にわたって時間変化の様子を図3に示している。まず、 $t=155.8$  の圧力コンターを見ると、キャビティ後縁の少し上方に斜め衝撃波が存在する。この衝撃波は速度ベクトル場からわかるように、超音速流が流れの向き変えることにより発生する。 $\text{div}u$  コンターにも対応するパターンがあるが、その“マッチ棒の先端”のすぐ下から下方に伸びる細い線は、上流から伝播してきた圧縮波が下流壁で反射したものであり、 $t=156.6$  のパターンを見れば、上流向きに伝播していることがわかる。この  $t=156.6$  の  $\text{div}u$  コンターには下流壁に衝突する形で圧縮領域が出現しているが、これは剪断層の波打ち運動に伴う圧縮領域であり、波長の  $1/4 \sim 1/3$  の偏平な渦度集中領域（の上流部分）の直下に生じ、“波打ちの山”とともに流下する。 $t=155.8 \sim 157.5$  までの渦度コンターも合わせて見ると、“波打ちの山”が高さを増しつつ後縁に到達すると、渦度を有する流体塊がキャビティ内に取り込まれ、強い圧縮を受けることがわかる。 $t=157.5$  の圧力コンターには後縁近傍に強い圧力上昇の領域が出現しているが、これは、速度ベクトル場が示すように高速流が後縁近傍の下流壁に衝突するためであり、その瞬間に圧縮波が発生するのである。その圧縮波の伝播の初期段階は  $t=158.2, 159.0$  の結果が示す通りである。このように、キャビティ後縁における音波・圧縮波の発生の瞬間が捉えられたのはこの数値計算が最初と思われる。

さて、興味深いことに、先述の孤立渦直下で圧縮波が発生する現象が捉えられている。図2の  $t=159.0$  の  $\text{div}u$  コンターにおいて、キャビティ前縁と後縁を結ぶ線上で反射波 **a** と前縁とのほぼ真ん中の位置に斑点が見えるが、これは渦度攪乱の成長（波打ち運動）に伴って生じる圧縮領域である。この圧縮領域は、剪断層の“波打ちの山”のほぼ真下に位置し、一緒に流下する。 $t=160.7, 162.3, 163.9, 165.5$  と追跡していくと、圧縮領域は、流下とともに、拡大し、強さを増す。特に、 $t=163.9$  では、圧縮波 **b** の通過で、一気に圧縮され、その影響で、 $t=165.5$  には尻尾のように見える線状の圧縮領域が現れ、それは  $t=167.2$  では圧縮波として斜め下に伝播している。このように剪断層の波打ち運動に伴って強い圧縮波が現れる場合には、壁での反射を繰り返して、前縁に衝突する可能性もある。

もう一度図2の  $t=154.2$  と  $165.5$  のパターンを比較するとわかるように、尻尾のような線状の圧縮領域は  $t=154.2$  にも現れている。そして、 $t=155.8$  には、圧縮領域の“本体部分”が後縁に近づく一方で、その尻尾がしっかり伸び、一見して圧縮波とわかるパターンが確認できる。 $t=157.5$  になると、圧縮領域の“本体部分”は正面から後縁に衝突し、その直後に圧縮波 **b** と圧縮

波  $c$  が姿を現す。

さて、後縁における圧縮波の発生であるが、図3  $t=157.5$  の流れが示すように、“波打ちの山”がキャビティ後縁の真上に達した瞬間に、その直下のやや高速の流れが後縁近傍の下流壁に正面衝突する状態となり、圧縮波が発生する。これは、剪断層がキャビティ後縁の内側に入るとき（すなわち、波打ちの谷の位相で）、主流の高速流体が下流壁に衝突して圧縮波が生まれる、とする Heller and Bliss<sup>18)</sup> 以来の定説を覆す結果である。すなわち、筆者らの図3の結果では、位相が従来の定説とは180度異なり、後縁壁に衝突するのは主流側の流体ではなく、キャビティ側の流体である。圧縮波の発生の瞬間を捉えるには、図3のような詳細な情報が必要である。従来の実験観察では情報が乏しく、正しい判断は困難であったと言える。

### 3. まとめ

本論文では、超音速キャビティ流の振動機構について従来の研究成果と筆者らの数値計算結果や実験結果をもとに考察した。超音速キャビティ振動の典型的なサイクルは次のとおりである。キャビティ前縁から剥離剪断層の不安定波が下流に成長して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、前縁に達して、そこに渦度攪乱をつくる。それが種となって新しい不安定波が下流に成長し、次の振動サイクルが始まる。この振動サイクルのフィードバック機構として重要な圧縮波の発生とそのキャビティ内の伝播については従来から未解明であったが、本論文でその詳細が明らかにされた。特に、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様子が捉えられた。これは、剪断層の“波打ちの谷”が後縁でキャビティ内に入り込むとき音波が発生するという従来の定説を覆す結果である。

なお、考察をさらに進めた結果が文献21)に示され、従来の研究成果についてもより詳しく解説されている。

### 参考文献

- 1) K. Krishnamurty: Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces, NACA Technical Note 3487 (1955).
- 2) A.F. Charwat, J.N. Roos, F.C. Dewey, Jr. & J.A. Hitz: An investigation of separated flows-part1- the pressure field, J. of Aerospace Sciences, 28 (1961) 457-470.
- 3) O. W. McGregor & R. A. White: Drag of rectangular cavities in supersonic and transonic flow including the effects of cavity resonance, AIAA J., 8 (1970) 1959-1964.
- 4) H.H. Heller & W.M. Dobrzynski: Sound radiation from aircraft wheel-well/landing-gear configurations, J. Aircraft, 14 (1977) 768-774.
- 5) D. Rockwell & E. Naudascher: Review — Self-sustaining oscillations of flow past cavities, J. Fluids Engineering, 100 (1978) 152-165.
- 6) D. Rockwell & E. Naudascher: Self-sustained oscillations of impinging free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech., 11 (1979) 67-94.

- 7) D. Rockwell: Oscillations of impinging shear layers, *AIAA J.*, **21** (1983) 645-664.
- 8) N. M. Komerath, K. K. Ahuja & F. W. Chambers: Prediction and Measurement of flows over cavities — a survey, *AIAA Paper 87-0166*, 25<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 12-15, 1987.
- 9) T. Colonius: An overview of simulation, modeling, and active control of flow/acoustic resonance in open cavities, *AIAA Paper 2001-0076*, 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, January 8-11, 2001.
- 10) 菊池 聡, 福西 祐, 大田黒俊夫: ピエゾフィルムを用いたキャビティ騒音の能動制御, 日本流体力学会誌「ながれ」**19** (2000) 200-206.
- 11) 西岡通男, 須浪徹治: 超音速混合の促進制御に関する考察と実験, 日本流体力学会誌「ながれ」**14** (1995) 377-389.
- 12) 西岡通男, 須浪徹治, 上山茂晴: 縦渦を用いた超音速促進制御に関する数値的研究, 日本流体力学会誌「ながれ」**15** (1996) 35-44.
- 13) 須浪徹治, 西岡通男: 超音速縦渦列の崩壊過程, 日本流体力学会誌「ながれ」**16** (1997) 415-424.
- 14) T. Sunami, M.N. Wendt & M. Nishioka: Supersonic mixing and combustion control using streamwise vortices, *AIAA Paper 98-3271*, 34<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, OH, July 13-15, 1998.
- 15) A.S. Roudakov, Y. Schikhmann, V. Semenov, Ph. Novelli & O. Fourt: Flight testing an axisymmetric scramjet - Russian recent advances, *IAF Paper 93-S.4.485*, 44<sup>th</sup> IAF Congress, Graz, Austria, Oct. 1993.
- 16) A. Ben-Yakar & R. K. Hanson: Cavity flameholders for ignition and flame stabilization in scramjets — review and experimental study, *AIAA Paper 98-3122*, 34<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, OH, July 13-15, 1998.
- 17) M. Nishioka, T. Asai, S. Sakaue & K. Shirai: On the mechanism of supersonic cavity flow oscillations, in *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 2001*, Edizioni ETS, Pisa (2001) 153-163.
- 18) H.H. Heller & D.B. Bliss: The physical mechanism of flow-induced pressure fluctuations in cavities and concepts for their suppression, *AIAA Paper 75-491*, 2<sup>nd</sup> AIAA Aero-Acoustics Conference, Hampton, VA, March 24-26, 1975.
- 19) J.E. Rossiter: Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds, *ARC R&M 3438* (1964).
- 20) H.H. Heller, D.G. Holmes & E.E. Covert: Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities, *J. Sound Vib.*, **18** (1971) 545-553.
- 21) 西岡通男, 浅井智広, 坂上昇史, 白井幸次: 超音速キャビティ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.