

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560153

研究課題名（和文）直接数値シミュレーションによるキャビティ自励振動流の
能動制御法の開発研究課題名（英文）Development of active control system for self-sustained oscillating
flows over cavity by direct numerical simulation.

研究代表者

吉田 尚史（YOSHIDA TAKASHI）

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90262857

研究成果の概要（和文）：平板上の開いたキャビティを過ぎる流れでは、流れが周期的に自励振動する。キャビティ流れの自励振動を抑制する新しい能動的制御方法の開発を三次元直接数値計算によって行った。制御方法はキャビティの底面を平行に負方向に駆動する底面駆動法である。アスペクト比2のキャビティ自励振動が十分に発達した流れ場に底面駆動法を適用した結果、自励振動は最大で無制御の場合の約1/3に低減することができた。

研究成果の概要（英文）：We investigate the control of self-sustained oscillating flows over an open cavity using a moving bottom wall. The three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations are solved by direct numerical simulation. A series of simulation are performed for a variety of bottom wall velocity. The results show that velocity fluctuations and pressure fluctuations are suppressed due to the moving bottom wall of cavity. The control method by moving bottom wall can suppress self-sustained oscillating flows over cavity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 平板上のキャビティを過ぎる流れでは、キャビティ上流角からはく離したせん断層が周期的に振動する自励振動流が発生する。キャビティ自励振動流は自動車、列車、航空機など移動物体上のくぼみや、各種流路におけるくぼみなど、多くの実際問題に現れる。自励振動は大きな周期的圧力変動を発生させ、流力騒音や振動の原因となる。

(2) キャビティは極めて単純な形状である

にも係わらず、流れの現象は複雑であり、基礎研究の対象としても興味深い。そのため、自励振動流の発生機構や振動特性の実験研究が多く行われてきた。Rockwellのレビュー（AIAA J., 21(1983), pp.645-664.）によれば、発生機構ははく離せん断層の不安定による攪乱増幅と渦生成、渦と角の衝突による圧力変動の発生、圧力変動が上流へ伝播、上流角付近の圧力変動の受容と渦度変動への変換、の四つの基本過程による圧力フィードバック

ク現象と一般的に説明される。しかし、実験研究では空間の圧力変動と渦度変動の相関は測定できず、圧力フィードバックを直接的に証明する結果は得られていない。また、せん断層の振動とキャビティ内に定在する循環渦との関連も明らかでない。

(3) キャビティ自励振動流は複雑な力学系の典型問題であり、その制御は非常に価値のある挑戦である。制御の実験研究が多く行われ Rowley らの詳細なレビュー (Annual Rev. Fluid Mech. 38(2006), pp.251-276.) にまとめられている。それらは、キャビティ上流角付近にフラップや小型ジェットを設置する方法が多い。これらの実験は、はく離せん断層を上流側で直接制御して振動を抑制する方法が主流である。これに対し、キャビティ内部の流れ場を制御して、せん断層の振動を制御するアイデアは研究されてこなかった。

(4) 著者らは、キャビティ内部の循環渦とキャビティ開口部のはく離せん断層の自励振動との関係に着目した。キャビティ底面を平行に駆動することにより渦構造を変化させ、せん断層の自励振動を停止させる新しい能動的制御方法を考案した。キャビティ深さ D に対する長さ L の比 (アスペクト比) 2 の二次元流れ場に対して、この制御方法を適用した二次元数値解析を行った。キャビティ底面を正負に一定速度以上で駆動すれば自励振動を停止させることができ、本制御方法が有効であることを明らかにした (JSME Inter. J. B, 49(2006), pp.1098-1104.)。

(5) 制御無しでキャビティのアスペクト比を変化させると自励振動のモード変化が起こる。アスペクト比を増加させると、自励振動は Mode II, Mode III, Wake mode の三つの振動モードに変化する。二次元数値解析から、モードの変化を捉え実験と良く一致する結果を得た。そして新たにキャビティ内の循環渦の個数変化とモード変化の相関関係を明らかにした。三つの異なるモードに本制御方法を適用した二次元数値解析を行い、異なるモードでも制御可能である結果を得た。(Proc. ASME/JSME Fluids Eng. Conf., FEDSM2007-37410(2007), pp.1-6.)。

2. 研究の目的

(1) 二次元数値解析によって行ってきたキャビティ自励振動流の底面駆動法による能動制御法の研究を進展させ、現実の現象である三次元流れに本制御方法を適用し、実際のキャビティ流れに応用可能であるかを直接数値シミュレーションによって調べ、実用化につながる能動的制御方法を確立することを目的とする。

(2) 現実のキャビティ流は三次元流れであるので、初めに制御なしの場合について三次元直接計算を実行する。流入する境界層の条

件は二次元計算と同一にし、代表的なアスペクト比について計算を行う。振動モードが Mode II, Mode III, Wake mode のどのモードになるのかを調べる。制御しない自励振動の各モードについて、せん断層の振動、圧力変動、渦度変動の相互関係や、自励振動とキャビティ内の循環渦構造の関係などを調べる。

(3) Mode II の振動モードに対して底面を駆動する能動的制御方法を適用した計算を実行する。三次元流れに対して、底面駆動制御法が有効に作用するかを研究する。

3. 研究の方法

(1) 数値解法

支配方程式は三次元非定常非圧縮ナビエ・ストークス方程式と連続の式である。全ての変数はキャビティ深さ D とキャビティ上流の境界層主流速度 U を用いて無次元化した。計算法は有限差分法を用い、計算格子は不等間隔スタガード格子を用いた。連続の式は二次精度中心差分スキーム、ナビエ・ストークス方程式の対流項には Morinishi ら二次精度完全保存形スキーム (J. Comput. Phys., 197(2004), pp.686-710.), 他の項には二次精度中心差分スキームを用いた。時間離散化は対流項に二次精度アダムス・バッシュフォース法、粘性項にクランク・ニコルソン法を用いた。時間離散化は Armfield らの二次精度フラクショナルステップ法 (Int. J. Numer. Meth. Fluids, 38(2002), pp.255-282.) を用いた。

(2) 計算条件

計算領域を図 1 に示す。 x 方向はキャビティ上流側に $5D$, 下流側に $7D$, y 方向は $10D$, z 方向は $2D$ とした。流入条件は層流ブラジウス境界層速度分布、側方境界と境界層上方の主流境界はすべり壁条件、流出境界はゾンマーフェルト放射条件を用いた。 U と D に基づくレイノルズ数は $6,000$, U と運動量厚さ θ に基づくレイノルズ数は 193 である。

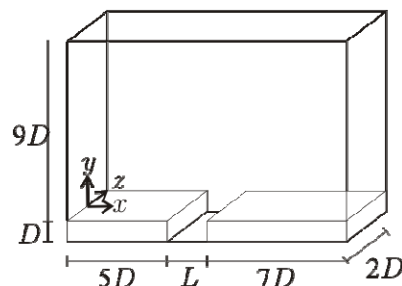


図1 計算領域

(3) 数値計算の並列化

使用したコンピュータは大阪大学サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータで、ベクトルCPUと共有メモリ型ノードで構成されている。直接数値シミュレーションの大規模高速計算に重要な点は、微分方程

式を差分して得られる大規模連立一次方程式の数値解法を並列化することである。並列計算プログラムの開発は大阪大学サイバーメディアセンターの協力で行った。行列解法は不完全 LU 分解前処理付安定化双共役勾配法を用いた。並列化は前処理の部分に局所不完全 LU(0)分解法を用いて領域分割し、Fortran の自動並列化機能で各領域を並列に計算するプログラムを開発した。

(4) 底面駆動制御法

底面駆動制御方法の概要を図 2 に示す。キャビティの底面を一定の駆動速度で平行に駆動することによって生じるせん断力によりキャビティ内の循環渦を変化させ、はく離せん断層の自励振動を制御する方法である。キャビティ底面を下流側から上流側の負の方向へ駆動する場合について駆動速度の大きさを変化させ、底面駆動制御法が三次元流れにおいて自励振動の制御に有効に作用するか、自励振動の応答を調べた。

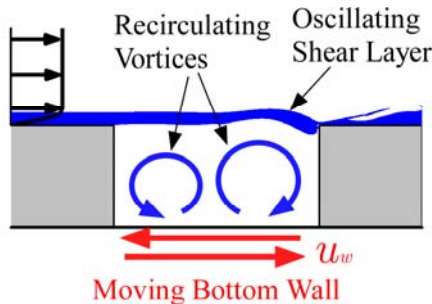


図 2 底面駆動制御法の概略

4. 研究成果

(1) 無制御のキャビティ自励振動流の直接数値計算結果

キャビティ長さ L/D を 2.0 から 5.0 まで 0.5 刻みで変化させた計算を行った。周期的な自励振動が発達するまで十分に長い時間の計算を行い、キャビティ下流角付近の速度変動のスペクトルから自励振動のストローハル数を求めた。図 3 は L/θ に対するストローハル数の変化である。ここでキャビティ長さ L とストローハル数は運動量厚さ θ で無次元化している。図中の黒四角が Knisely and Rockwell (J. Fluid Mech., 116(1982), pp.157-186.) らの実験値、白円は著者らによる二次元計算値、赤三角が本研究の三次元計算値である。 $L/D = 2.0$ から $L/D = 4.0$ において本研究の計算値が実験値および二次元の計算値とよく一致している。 $L/D = 2.0$ から $L/D = 2.5$ はストローハル数が減少し mode II の振動形態である。 $L/D = 2.5$ と $L/D = 3.0$ の間でストローハル数は高い値へ跳躍し、振動のモードが shear layer mode の mode II から mode III に変化する。 $L/D = 3.0$ から $L/D = 4.5$ で再びストローハル数は減少し mode III の振動が続く。そして、 $L/D = 5.0$ ではストローハル数が非

常に小さい値に不連続に変化し、振動のモードは shear layer mode からキャビティ内の大きな渦が周期的に主流へ放出される wake mode に変化する。三次元直接数値計算のストローハル数変化は Knisely らの実験結果とよく一致し、モード変化は Gharib and Roshko (J. Fluid Mech., 177(1987), pp.501-530.) の実験結果とよく一致した。

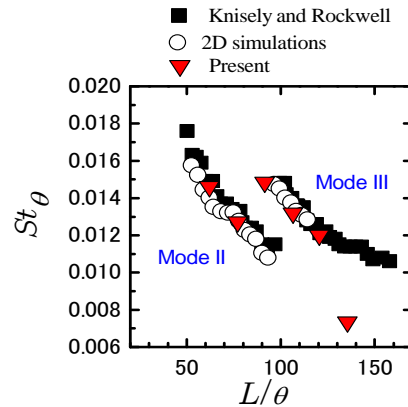


図 3 キャビティ長さに対するストローハル数変化の比較

(2) 底面駆動制御法を適用したキャビティ自励振動流の直接数値計算結果

キャビティ長さ $L/D = 2.0$ の自励振動流に対して、様々な底面速度で底面駆動制御法を適用して自励振動の応答結果から本制御法の有効性を調べた。負方向の底面駆動速度を -0.1 から -1.0 まで 0.1 刻みで変化させた直接数値計算を実行した。制御を適用した計算の初期値は無制御の流れ場で十分に周期的な自励振動状態となっている時刻 $t = 660$ の流れ場とした。自励振動の大きさをキャビティ下流角付近の垂直方向速度 v の rms 値で評価した。0.1 刻みの計算結果から底面駆動速度が -0.3 と -0.4 の間に rms 値の極小となる速度があると推察されたため、-0.3 と -0.4 の間は 0.01 刻みで底面駆動速度を変化させた計算を行った。底面駆動速度に対する v の rms 値の変化を図 4 に示す。制御無しの場合の rms 値は図中の実線で示された値である。底面駆動速度が -0.1 から -0.9 の rms 値は無制御の値より小さく自励振動を抑制できている。-0.1 から底面駆動速度の大きさを大きくしていくと rms 値は小さくなっていき、-0.3 を越えると急激に小さくなる。そして -0.34 の場合に極小値をとる。その rms 値は無制御の値に比較して 31.4% であり、無制御に対して約 1/3 まで振動を低減することができた。底面駆動速度を -0.34 から大きくすると、rms 値は増加に転

じる。この結果から底面駆動速度の最適値は-0.34であることが明らかになった。

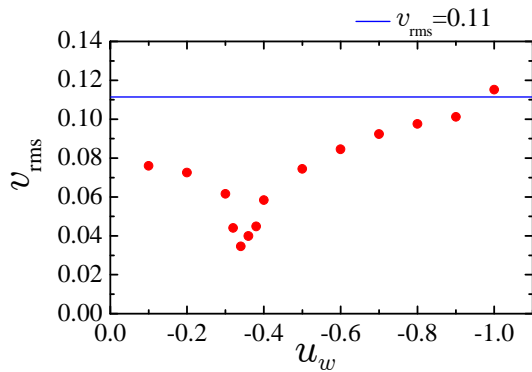


図4 負の底面駆動速度に対するキャビティ下流角付近の速度 v のrms値の変化と無制御時のrms値との比較

キャビティ自励振動流では、流れの振動による圧力変動によって騒音や振動が発生することが実用的には重要な問題である。キャビティ付近の圧力変動が、底面駆動制御法によってどのように変化したかを示す。図5はキャビティ下流角付近の圧力 p のrms値が底面駆動速度に対してどのように変化したかを示す。図4の速度変動のrms値の変化と同様に、-0.1から底面駆動速度を大きくしていくとrms値は急激に小さくなり、-0.34の場合に極小値をとる。そのrms値は無制御の値に比較して15.8%であり、無制御に対して約1/6まで低減することができた。本研究は非圧縮流れを計算しているため騒音は計算していないが、音源となるキャビティ下流角付近の圧力変動を制御前の1/6に低減できたことは、発生する音の大きさを相当に低減出来ることが推察される。

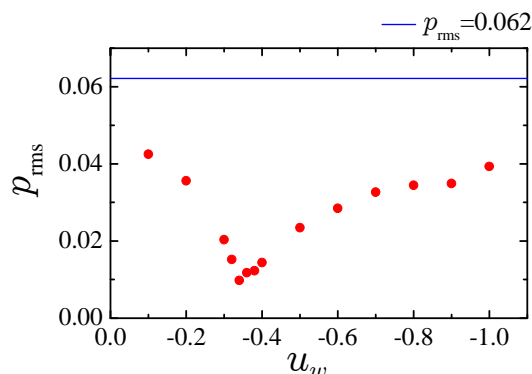
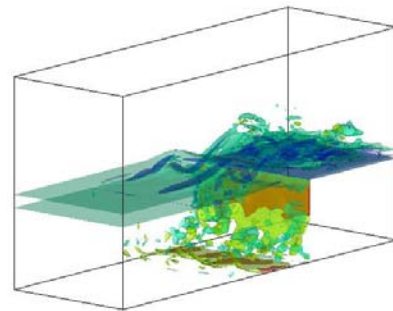
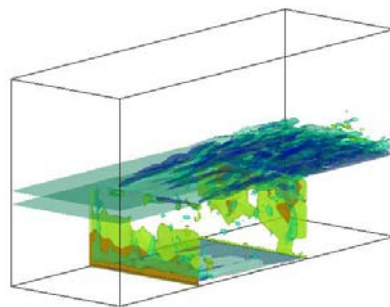


図5 負の底面駆動速度に対するキャビティ下流角付近の圧力 p のrms値の変化と無制御時のrms値との比較

底面駆動制御法によってキャビティ自励振動流がどのように変化したか、流れ場の可視化結果を示す。図6は瞬間の渦度等値面である。図6(a)は無制御の場合の $t=1060$ の瞬間の流れ場で、図6(b)は底面駆動速度-0.34の場合の $t=1060$ の瞬間の流れ場である。図6(a)は無制御の場合では、キャビティ開口部のせん断層は大きく波打ちケルビンヘルムホルツ不安定による渦の巻き上がりと下流角への渦の衝突が明確である。キャビティ内部では、キャビティ下流角からキャビティ底面中央付近にかけてキャビティ内の循環渦による渦層の巻き込みがある。これに対し図6(b)の底面駆動速度-0.34の場合、キャビティ開口部のせん断層はほぼ直線的になっており、せん断層の振動が小さくなっている。キャビティ内部の循環渦は下流側面から上流側面にわたって大きな循環渦に変化し渦層が下流側面、底面、蒸留側面に広がっている。このキャビティ内の循環渦の変化によって自励振動のフィードバック機構が変化し、せん断層の自励振動が抑制されたと結論づけた。



(a) 無制御の場合



(b) 底面駆動速度が-0.34の場合

図6 キャビティ付近の瞬間の渦度等値面

(3) 研究成果の位置付けと今後の展望

キャビティ自励振動流制御の研究はこれまで多く行われてきた。研究背景でも述べたように、これまでの御方法はキャビティ上流角の平板面にジェット、フラップ、圧電アク

チューエータなどの制御デバイスを設置しはく離せん断層を攪乱することによる方法であった。これに対し、本研究はこれまで注目されてこなかったキャビティ内部の底面二着目し、底面駆動によって制御を行う方法である。その結果、キャビティ自励振動流の振動の強さを大きく低減することができた。国内外でこれまでにない新しい制御方法を確立したことは大変意義のある研究成果である。また、キャビティ制御の研究は実験的研究によって行われてきたが、三次元直接数値計算で自励振動の制御に成功したことは、計算流体力学において意義のあることである。

二次元流れの数値計算に底面駆動制御法を適用した場合は振動を完全に停止させる事が出来た。三次元計算に底面駆動制御法を適用した場合は、振動の強さを大きく低減することができたが、完全に停止させることはできなかった。三次元流れで自励振動を完全に停止させることは今後の課題である。自励振動の完全な停止制御はこれまでの多くの実験研究においてもなされていない。そのためには、底面駆動制御法に加えて他の制御法を同時に適用する複合制御システムを研究する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計11件)

①Kouhei Fujita, Takashi Yoshida, Junpei Inamura, Takashi Watanabe, Three dimensional direct numerical simulations of control of self-sustained oscillating flows over cavity using moving bottom wall, Seventh International Conference on Fluid Dynamics, 2010.10.2, Sendai

② Yousuke Nakanishi, Takashi Yoshida, Takashi Watanabe, Numerical analysis of control of self-sustained oscillating flows over cavity using suction and blowing, 2010.10.2, Sendai

③藤田晃平, 吉田尚史, 稲村純平, 渡邊崇, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の底面駆動法を用いた制御の三次元直接数値計算, 日本流体力学会年会 2010, 2010.9.10, 札幌

④中西洋輔, 吉田尚史, 渡邊崇, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の吹出しと吸込みを用いた制御の数値解析, 日本流体力学会年会 2010, 2010.9.10, 札幌

⑤吉田尚史, 藤田晃平, 稲村純平, 渡邊崇, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の底面駆動を用いた制御の直接数値計算, 日本機械学会北陸信越支部第47期総会講演会, 2010.3.10, 新潟

⑥稲村純平, 吉田尚史, 渡邊崇, キャビティを過ぎる三次元非圧縮流れの直接数値計算, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.18, 仙台

⑦中西洋輔, 吉田尚史, 稲村純平, 渡邊崇, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の吹出しと吸込みを用いた制御の数値解析, 2009.11.7, 名古屋

⑧吉田尚史, 中西洋輔, 井上暢, 稲村純平, 渡邊崇, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の吹出しと吸込みを用いた制御の数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第46期総会講演会, 2009.3.7, 富山

⑨稲村純平, 吉田尚史, 井上暢, 渡邊崇, キャビティを過ぎる二次元非圧縮流れの振動モード変化の数値シミュレーション, 2008.12.17, 東京

⑩井上暢, 吉田尚史, 稲村純平, 渡邊崇, キャビティを過ぎる自励振動流の負方向底面駆動速度による制御の数値解析, 2008.12.17, 東京

⑪吉田尚史, 井上暢, 稲村純平, 渡邊崇, キャビティを過ぎる自励振動流の正方向底面駆動速度による制御の数値解析, 2008.12.17, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 尚史 (YOSHIDA TAKASHI)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号: 90262857

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

渡邊 崇 (WATANABE TAKASHI)
名古屋大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 40182927