

Title	開いたキャピティを過ぎる流れの直接数値シミュレー ション		
Author(s)	吉田, 尚史		
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2013, 3, p. 37-40		
Version Type	VoR		
URL	https://doi.org/10.18910/70469		
rights			
Note			

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

# 開いたキャビティを過ぎる流れの直接数値シミュレーション

吉田 尚史 信州大学 工学部 環境機能工学科

## 1. はじめに

開いたキャビティを過ぎる流れ場は、幾何学形状 がきわめて単純な形であるにも関わらず、はく離せ ん断層が自励振動を起こす複雑な流れ場である。こ の流れ場は、高速列車の車両連結部や航空機が離着 陸する際に車輪格納室を開いた状態で飛行する場合 など実際の流れ場においても多く存在する。さらに、 キャビティ流れの自励振動はそれによる圧力変動が キャビティ音と呼ばれる流力音を発生させる。この ようなことから開いたキャビティ流れは流体力学の 基本的な問題として、また振動を抑制する流れ制御 の典型的な対象として多くの研究が行われてきた。

開いたキャビティ流れの自励振動の特性はこれま で多くの実験研究で明らかとなっている。特に、キ ャビティのアスペクト比の変化によって、自励振動 のモードが分類されることはよく知られている。 Knisely and Rockwell[1]やGharib and Roshko[2]によれ ば、キャビティ長さL とキャビティ深さDのアス ペクト比L/Dの変化に対して、自励振動のピーク周 波数であるストローハル数は図1のように変化し、 shear layer mode はストローハル数の不連続な変 化によってmode II と mode III に分けられる。これ らの振動モード変化は、流れ場の時空間的な構造の 変化による結果であるが、流れの三次元構造を実験 だけで明らかにすることは難しい。

本研究は、Navier-Stokes方程式の直接数値シミュ レーションにより、キャビティ流れの三次元空間構 造や渦のダイナミックスを解き明かすことを目的と する。そのために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システムを利用して大規 模かつ長時間のシミュレーションを行っている。本 稿では、数値計算法の概要とシミュレーションの結 果について報告する。

### 2. 数値計算法

支配方程式は三次元非定常非圧縮 Navier-Stokes 方 程式と連続の式である。離散化は有限差分法を用い、 差分格子は不等間隔スタッガード格子である。空間 の離散化には Morinishi ら[3]の二次精度完全保存形 スキームを用いる。時間の離散化には Armfield and Street[4]の P2 pressure correction method を用いる。計 算領域を図2に示す。流入条件は層流ブラジウス境 界層速度分布、境界層上方の主流境界と側方はすべ り壁条件、流出境界は Sommerfeld 放射条件を用い対 流速度は主流速度 Uに等しいとする。UとDに基づ くレイノルズ数は 6,000 である。

離散化した式は速度成分と圧力時間変化量につい ての大規模連立一次方程式となる。係数行列は非対 称規則的スパース行列で、反復解法である



図1:振動モード変化の概略図



図2:計算領域

Bi-CGSTAB 法で解く。特に圧力の時間変化量につい てのポアソン方程式から導出される連立一次方程式 は1ステップあたりの計算量の約95%になるため、 Bi-CGSTAB 法の並列化が必須である。本研究では、 大阪大学サイバーメディアセンターと日本電気株式 会社の協力によって並列化したプログラムを用い た。並列化の方法は行列の前処理に局所 ILU(0)分解 [5]を用いた Bi-CGSTAB 法で、係数行列をブロック に分けてブロック外の係数を0としてブロック間の 依存関係を無視し、FORTRAN90/SX の並列化指示行 を入れて自動並列化コンパイルを行う方法である。 ただし、自動並列化機能のため並列可能な CPU 数は 1 ノード内に限られる。このプログラムの開発につ いてはサイバーメディアセンターの計算機利用ニュ ース[6]を参照されたい。

#### 3. 計算結果

## 3.1 計算パラメータと計算時間

キャビティアスペクト比L/D を 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 とした 6 ケースの計算を行っている。計算機 は SX-8R を用い、1 ノード 8CPU で並列計算してい る。表 1 に主な 3 ケースの格子点数、メモリサイズ、 1 ステップ当たりの経過時間(Real time)を示す。

本研究の流れ場は乱流であり、かつ大規模な組織 的構造であるコヒーレントストラクチャーが発生す る流れ場である。そのため、乱流の統計的性質と大 規模構造の周期平均的性質、そして瞬時の非定常な 渦構造の性質、といった異なる時間スケールの情報 を取り出さなくてはならない。したがって自励振動 流が十分に発達した状態において長時間の計算を必 要とする。図3にL/D = 2.0, 3.5, 4.0 におけるキャビ ティ下流角近傍のy方向速度成分vの時間変化を示

表1:格了点数·	メモリー	・計算時間
----------	------	-------

L/D	Grid points	Memory	Real time
		size (GB)	/step (sec)
2.0	$447\!\times\!202\!\times\!240$	10.4	34.293
	(21,670,560)		
3.5	$617 \times 202 \times 240$	14.0	56.877
	(29,912,160)		
4.5	$730 \times 202 \times 240$	16.3	62.253
	(35,390,400)		

す。計算の時刻は流れ場の代表時間 D/U で無次元 化した無次元時間である。L/D = 2.0の速度変動は 比較的周期性があり FFT によって得られるパワース ペクトルは明確なピーク周波数を持つ。これに対し、 L/D = 3.5の速度変動は複雑でおおよそt = 150 を 境に振動周波数が変化する。L/D = 4.5の速度変動 では、おおよそt = 70までの変動とそれ以降の変動 では振動のパターンが大きく変化している。これら の結果からL/D が長くなるにつれて速度変動は複 雑化し、十分な統計量を得るにはより長い無次元時 間のデータが必要となる。

1 ステップの計算時間刻みは Δt = 0.0005 である。 表 1 より無次元時間でt = 250 まで計算するのに要 する SX-8R のジョブ時間は、L/D = 2.0 で 4,763 時 間、L/D = 3.5 で 7,900 時間である。レイノルズ数 6,000 において無次元時間 250 を現実の空気や水の 実時間に換算すると 25 秒である。実験では十分に発 達した状態で 30 秒程度のサンプリング測定を行う のが一般的である。したがって、例えばL/D = 3.5 の ケースでは無次元時間で 500 まで計算してようやく 実験と比較できる統計データを得ることができる。 その場合のトータルのジョブ時間は、16,000 時間を 超える計算が必要となる。



図3:キャビティ下流角付近の速度Xの時間変化

#### 3.2 振動モード変化

キャビティアスペクト比L/D を 0.5 間隔で変えた 6 ケースについて振動モードの変化を変動速度のパ ワースペクトルより求めたストローハル数の変化で 示す。長いL/D の計算は前節で述べたように流れが 発達した状態で統計量を計算するには計算の時刻が 十分ではないが、パワースペクトルから振動のピー ク周波数を求めた。図4にL/D に対するストローハ ル数の変化を示す。L/D = 3.0 と 3.5 の間でストロー ハル数が不連続に変化していることから、mode II と mode III の変化が明確である。ほぼ同じレイノル ズ数で測定された Knisely and Rockwell の実験値と 比較するとよく一致している。ストローハル数の計 算値が実験値とよく一致することは本研究の計算精 度が高いことを示している。

振動モードの違いは自励振動する剥離せん断層の 渦構造の違いの結果である。図5にmode II である L/D = 2.0の圧力ラプラシアン等値面の時間変化を 示す。圧力ラプラシアンの等値面は渦管を表現する。 せん断層はケルビンヘルムホルツ不安定によって渦 を形成しそれがキャビティ下流角へ衝突する。図 5(a)のキャビティ開口部中央付近に横に直線的に伸 びた赤の等値面がケルビンヘルムホルツ不安定によ って巻き上がり形成された渦で、主流に対して横方 向につながったロール状である。この渦が図5(b)の 状態を経て図5(c)では下流角に衝突する。Mode II ではせん断層に形成されるロール状の渦は一つで、 渦が下流角に衝突した後に次の渦が発生する。

図6にmode IIIのL/D = 3.5の圧力ラプラシアン等 値面の時間変化を示す。L/D = 2.0では横方向のロ ール渦が形成されたのに対して、L/D – 3.5では図 6(a)の赤の細長い等値面で示されるような細長い縦 方向の渦管が形成され、それが褶曲するように巻き 上がり縦渦の集合体としてロール状の構造を形成す る。そしてロール状の構造が下流角に衝突する図 6(c)では、キャビティ中央付近で次のロール状の形 成が始まっている。Mode IIIでは、キャビティ内の せん断層に二つのロール状に巻き上がる渦構造が存 在する。このように、モードが異なる流れ場では、



渦構造が大きく異なることを明らかにした。

# 4. おわりに

本研究は、開いたキャビティの自励振動流れを直 接数値シミュレーションで解明することを目的に行 っている。キャビティアスペクト比の違いによる振 動モードと流れ場の違いを明らかにするために、6 ケースの直接数値シミュレーションを行っている。 これまでそれぞれ数千時間のジョブを実行してきた が、乱流の統計量を求めるには計算時間が不十分で、 少なくとも各ケースで無次元時間 500 程度まで計算 を進める必要がある。計算機は SX-8R を使用してき た。SX-9を使用すれば二倍以上の高速化が図れると 推測できるが、一回のジョブ時間が24時間に限られ 使用ユーザも多い。SX-8Rの120時間ジョブで実行 したほうがトータルで効率的であると判断したため である。今後は、スーパーコンピュータシステムの 能力をさらに向上させていただき、かつ高速で長時 間のジョブが実行できるような環境を作っていただ けることを希望したい。筆者の所属する大学では、 残念なことに大規模な科学技術計算の研究を行う計 算機システムを大学として整備しないことになって しまった。このような環境下で数値シミュレーショ ンの研究をしている者にとっては、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システ ムを自分の研究室から利用できることは大変有用で ある。本研究をはじめ様々な研究テーマの大規模シ

ミュレーションを実行できた大阪大学サイバーメデ ィアセンターの関係各位に感謝したい。そして今後 ますます利用しやすいシステムを整備していただく ことを希望したい。

# 参考文献

- C. Knisely and D. Rockwell, J. Fluid Mech., 116, 157-186, (1982).
- [2] M. Gharib, and A. Roshko, J. Fluid Mech., 177, 501-530, (1987).

- [3] Y. Morinishi, et al., J. Comput. Physics, 197, 686-710, (2004).
- [4] S. Armfield, and R. Street, Int. J. Numer. Methods Fluids, 38, 255-282, (2002).
- [5] 矢川元基,奥田洋司,計算力学[VII], 129-151, (2002).
- [6] 吉田, 大阪大学 CMC 計算機利用ニュース, 5(1), 10-11, (2009).





















