

# 熱制御によるカルマン渦列の発生と消滅 に関する数値解析

－ 研究開発の中間報告（平成 5 年度）－

能登 勝久<sup>†</sup>      中島 健  
神戸大学工学部 機械工学科

Numerical Analysis on Control of Generation and Suppression  
of the Karman Vortex Street Due to Thermal Effect

## 1 研究の概要

### 1.1 報告内容の範囲

本一連の研究のうち、主に平成 5 年度の研究概略のみを記す。

### 1.2 目的と成果の概要

平成 5 年度は、前年度に引続き、従来から未解明の等温円柱の後流挙動を、数値解析で解明した。その動機は次のようである。能登らが、初めて見出した熱制御によるカルマン渦列の発生と消滅現象を、さらに解明するためには、その前提となる、等温流れを明らかにしておく必要があるためである。そのため、平成 5 年度では、低レイノルズ数の円柱後流の、振動と渦の初生、およびそれらの成長などを解明した。これらの解明事項は、数値解析によってのみ解明が可能であって、現状の計測と可視化実験では、精度不足のため、解明不可能な現象である。

### 1.3 手法の開発

上記の成果に至る過程で、平成 5 年度に、次の二つの手法を開発した。

- (1) 『局所補間法』：格子依存性除去と解像度向上のために、『局所補間法』を考案し、その妥当性を得た。『局所補間法』で円柱の表面渦度の精度を高めることによって、円柱の後縁近傍で初生する振動と二つの渦の発生の解像が、可能になった。
- (2) 『ポアソン方程式の厳しい収束法』：小振幅で、長周期の変動を、数値計算で捕獲するためには、ポアソン式の収束判定を、非常に厳しくしなければならないことを、明らかにした。次に、その条件値を明らかにした。

<sup>†</sup>Tel:078-881-1212 ext.5309, Fax:078-803-1131, E-mail : noto @ mech.kobe-u.ac.jp

## 1.4 数値解析の概要

解析対象は、空気の一様流中に円柱が設置され、この円柱の下流に形成される後流である。レイノルズ数によって、後流挙動は変化する。後流現象は、非圧縮、二次元、時間依存と考えられる。基礎方程式は、連続の式と、Navier-Stokes 方程式である。妥当な初期条件および境界条件を設定した。これらの基礎方程式、初期条件、境界条件を、差分法で離散化した。離散化して得た、代数方程式群を、数値的に解いた。行列は、三項対角の大型行列である。流れ関数のポアソン方程式の数値解法は、SOR 法、渦度および温度の時間項を含む方程式は、ADI 法を基本とした。後流の非対称分布の発生のトリガーとして、物理的に明確な初期攪乱を与えた。

## 1.5 プログラミング

【局所補間法】と【ポアソン方程式の厳しい収束法】を組み込んで、平成4年度に開発した【計算プログラム A】のバージョン・アップをし、各時間ステップでの、流れ関数および渦度を、【磁気テープ A】にメモリーした。流れ関数と渦度の等値線を作図するために、平成4年度に開発した【計算プログラム B】および【作図プログラム A】のバージョン・アップをし、磁気テープにメモリーされている流れ関数および渦度データを、等値線分布の図で表現した。各時間ステップの流れ関数から、流脈を求めるために、平成4年度に開発した【計算プログラム C】のバージョン・アップをし、流脈データを、【磁気テープ B】にメモリーした。数値的に得られた流脈値を作図するために、平成4年度に開発した【作図プログラム B】のバージョン・アップを行った。磁気テープにメモリーされている流脈データを、この作図プログラムによって、図で表現した（第2章参照）。

## 1.6 研究成果

熱制御によるカルマン渦列の発生と消滅に関する研究の前提である、従来から未解明の、低レイノルズ数の等温円柱の後流の、振動発生、ゼロ流線の発生、双子渦の発生などの、重要な流れを、数値解析で明らかにし、流体力学的に重要な知見を得た。例えば、極低レイノルズ数の定常後流からレイノルズ数が増大すれば、安定な対称分布の双子渦が発生すると、従来から云われてきたが、本数値計算で、定常状態から、いきなり双子渦が発生せず、ゼロ流線が振動し、次に、ゼロ流線が巻き込み、異なる渦サイズの双子渦が発生し、さらにレイノルズ数が増大すれば、同一のスケールの二つの渦を持つ双子渦に成長することが、分かった。

# 2 開発プログラムの概要

## 2.1 開発プログラムの種類

開発したプログラムは下記の四つである。使用言語は FORTRAN77 である。

- (1) 「後流の計算プログラム」
- (2) 「後流の等値線計算および作図プログラム」

(3) 「後流の流脈計算プログラム」

(4) 「後流の流脈作図プログラム」

これらに類する市販のソフトウェアはない。平成 5 年度に開発した格子解像が向上できる『局所補間法』と、『ポアソン方程式の厳しい収束法』を、平成 4 年度に開発した『後流の計算プログラム』に、組み込んだ。さらに平成 4 年度に開発した『後流の等値線計算および作図プログラム』、『後流の流脈計算プログラム』、『後流の流脈作図プログラム』を、利用しやすいように、次の事項のバージョン・アップを行った。

(1) 汎用性、

(2) プログラム上で、計算速度（数値解を得るための CPU 時間）の向上、

(3) 使いやすさ。

## 2.2 後流の計算プログラム

バージョン・アップした『後流の計算プログラム』の概要と取扱は、次のようである。

A-1: 2 次元、時間依存の後流計算がなされ、各時間ステップごとの、流れ関数と渦度の数値データが得られる。

A-2: 後流計算の本プログラムの特徴は、『局所補間法』と『ポアソン方程式の厳しい収束法』で、格子依存性を除去し、解像度を向上させることが、可能になったことである。現在の可視化と計測実験で解像が不可能な、非常に小さい振動や渦などの微細流れを求めることが、可能になった。

A-3: 後流計算の本プログラムの、もう一つの特徴は、後流の非対称分布を得るために、初期攪乱を導入したことである。数値計算で発生する桁落ちによる丸め誤差の累積を、非対称性のトリガーと見なす発想は、誤りではないが、このトリガーは計算機の機種に依存する。したがって本プログラムでは、物理的に合理的な初期攪乱を与え、その増幅または減衰によって、判定した。

A-4: 入力値は、半径方向と円周方向の格子数、流体プラントル数、時間ステップ値、流れ関数のポアソン式の収束の許容誤差、時間ステップ、初期攪乱付与の時間ステップ数、計算する時間ステップ数である。

A-5: 出力データは、各時間ステップと各格子上の、流れ関数と渦度である。

A-6: A-5 の数値データを、磁気テープにメモリーする。

## 2.3 後流の等値線計算と作図プログラム

バージョン・アップした『後流の等値線計算および作図プログラム』の概要と取扱は、次のようである。

- B-1: 本プログラムの入力データは、A-6 の磁気テープよりなされる。
- B-2: 各時間ステップの流れ関数と渦度の等値線分布を求める作図計算がなされる。
- B-3: 各時間ステップの流れ関数と渦度の等値線分布の作図がなされる。

## 2.4 後流の流脈計算プログラム

バージョン・アップした『後流の流脈計算プログラム』の概要と取扱は、次のようである。時間依存流れのため、次のように、若干複雑になる。

- C-1: A-6 の流れ関数データを、入力データとする。
- C-2: 流れ関数から、速度ベクトルを求める。
- C-3: 円柱近傍の数点（位置  $A_1$ ）に、理想的な仮想トレーサを、時間ステップ  $\Delta t$  ごとに注入し続ける。
- C-4: C-3 の各粒子注入点の速度ベクトルを、補間で求める。
- C-5: 注入点から  $\Delta t$  後の位置（位置  $A_2$ ）を求める。
- C-6: 時間依存流れであるため、円柱近傍点（位置  $B_1$ ）と位置  $A_2$  の速度ベクトルを求める。
- C-7:  $\Delta t$  後の、位置  $B_1$  と位置  $A_2$  の移動先の位置  $B_2$  と位置  $A_3$  を求める。
- C-8: 同様の手順を繰り返して、 $n\Delta t$  後の、位置  $B_i$  と位置  $A_{i+1}$  の移動先の位置  $B_{i+1}$  と位置  $A_{i+2}$  を求める。ここに、 $i=1,2,\dots,n$  である。
- C-9: ある時刻での、全粒子群の位置が求まる。
- C-10: これらの位置データを、磁気テープにメモリーする。

## 2.5 後流の流脈作図プログラム

バージョン・アップした『後流の流脈作図プログラム』の概要と取扱は、次のようである。

- D-1: C-10 の膨大な粒子群の位置に、小さな点をプロットして、流脈分布が作図される。
- D-2: 出力は、日本語プリンタの用紙上の図である。

### 3 研究発表

- (1) 能登 勝久・沢谷 尚樹・中島 健、『円柱冷却によるカルマン渦列の発生に関する数値解析（低レイノルズ数の後流の非定常性）』日本機械学会主催「第6回計算力学講演会」（於：仙台），1993年11月.
- (2) 能登 勝久・山本 和司・沢谷 尚樹・中島 健、『渦発生物体の加熱によるカルマン渦列の崩壊原因（順向共存対流）』、日本機械学会主催「関西支部第69期定時総会講演会」（於：神戸），1994年3月.
- (3) 能登 勝久・瀬畑 昌央・中島 健、『円柱冷却によるカルマン渦列の発生に関する数値解析—低レイノルズ数等温後流での不安定性の芽の検出とその冷却増幅性—』、日本機械学会主催「第7回計算力学講演会」（於：東京），1994年11月.
- (4) 能登 勝久、『基調講演—流体力学現象を自然対流でコントロールする（自然対流によるカルマン渦列の発生と消滅に関する数値解析）』、日本機械学会主催「第7回計算力学講演会」（於：東京），1994年11月.
- (5) 能登 勝久、沢谷 尚樹、中島 健、『低レイノルズ数の円柱後流の非定常性』、可視化情報学会誌「可視化情報」, Vol.13-Suppl., No.1, 1993, pp.47-50.
- (6) 能登 勝久・瀬畑 昌央・中島 健、『低レイノルズ数の円柱後流の双子渦の振動形成』、可視化情報学会誌「可視化情報」, Vol.14-Suppl., No.1, 1994, pp.47-50.
- (7) NOTO, K. and NAKAJIMA, T., 『Wake Instability behind a Circular Cylinder at Low Reynolds Number』, Proc. of 5th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Vol. II, 1993, pp.369-374.
- (8) NOTO, K., NAKANISHI, H. and NAKAJIMA, T., 『Control of Wake Frequency by Heating a Circular Cylinder』, Proc. of International Symposium on Flow-Induced Vibrations in Engineering Systems, Vol.1, 1993, pp.102-107.
- (9) NOTO, K., SEBATA, M., SAWATANI, N. and NAKAJIMA, T., 『Visualization of Essentially Oscillating adhered to a Circular Cylinder at the Low Reynolds Number Wake』, Proc. of 3rd Asian Symposium on Visualization, 1994, pp.621-622.