【研究開発】

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 6 年度）－

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

能登　勝久*　中島　　健

神戸大学工学部 機械工学科

1　序

1.1　目　的

平成 5 年度までに、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を、『**局所補間法**』と『**ポアッソン方程式の厳しい収束法**』の手法を提案し、数値解析し、流体力学的に重要な知見を得た。例えば、レイノルズ数が増大すれば、定常後流、ゼロ流線の振動開始、振動する双子渦へと変化することなどである。

しかし平成 5 年度結果には、格子依存性が残った。そのため、本年度は、低レイノルズ数の円柱後流で、格子依存性を除去する数値解析の方法を、先ず、提案する。次に、その方法によって、低レイノルズ数域の、等温円柱の後流を、数値解析で解明する。

1.2　解析モデル

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する後流である。レイノルズ数によって、後流挙動は、『定常の対称流れ』→『振動ゼロ流線流れ』→『振動双子渦流れ』→『セントピード流れ』→『進行波状流れ』→『カルマン渦列流れ』、と変化することを、著者が、既に、明らかにした。

*E-mail : *noto@mech.kobe-u.ac.jp* ,　Fax: 078-803-1131 ,
Phone : 078-803-1109 (dial in) , 078-881-1212 , ext.5309.

1.3　基礎方程式系

この後流現象は、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、時間依存する Navier-Stokes 方程式である。2 項で述べるように、妥当な初期条件および境界条件を、設定する。これらの基礎方程式、初期条件、境界条件を、差分法で離散化する。

2　開発した『微細化法』の概要

2.1　開発内容の基本思想

低レイノルズ数の円柱後流域の流れは、円柱後方岐点近傍のみに、絶対不安定性が閉じ込められ、その外側では、完全定常状態であることが、著者によって、既に、明らかにされた。上記の事柄に着目すれば、計算領域が縮小され、格子間隔を微細に出来、その結果、格子依存性の除去の向上、および領域を縮小しない時に比較して、計算のスピード・アップの可能性が、期待できる。この発想内容を、『**微細化法**』と呼ぶことにする。

微細化法による計算結果を検討し、計算領域が、縮小可能ならば、領域を更に縮小し、格子間隔を更に微細化すれば、格子依存性を、さらに、除去した結果が、得られる可能性がある。この発想内容を、『**逐次微細化法**』と呼ぶことにする。

2.2　「局所補間法」による数値計算

まず、円柱半径の約 100 倍の位置に外側境界を設定し、境界条件を与える。この外側境界の内部領域に、構造格子を生成し、初期値を与える。これらの境界／初期条件のもとで、局所補間法で、数値計算する。局所補間法で、円柱表面の渦度の値が、高精度で求まる。基礎方程式の数値計算法の概略を、2.3 項に述べる。

2.3　基礎方程式の数値解析

離散化して得られた、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。流れ関数のポアッ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。

局所補間法では、後流の非対称分布の発生のトリガーとして、初期撹乱を与え、微細化法と逐次微細化法では、それを、与えない。

2.4　「微細化法」

(1) 計算領域の特定

2.2 項の局所補間法で得た、異なる時刻の数値結果から、円柱後方岐点近傍の、絶対不安定域を、特定する。この特定された計算領域の外縁を、「境界位置」と呼ぶ。この境界の外側域では、流れは、時間依存せず、定常状態である。時間依存現象は、境界の内側に、閉じ込められる。

（2）格子生成

次に、2.4（1）項で特定された計算領域内に、2.2 項の局所補間法の計算時の格子間隔より、相当に細かい格子幅の格子系を、構造格子として、与える。

（3）境界値の決定

境界上では、局所補間法で、流れ関数と渦度の値が、既に決っている格子と、値が未定の格子が、存在する。後者の未定値は、既に値が決っている格子の間を、補間して、決定する。

（4）初期値の設定

計算領域内では、局所補間法で、流れ関数と渦度の値が、既に決っている格子と、値が未定の格子が、存在する。後者の未定値は、既に値が決っている格子の間を、補間することによって、決定する。

（5）基礎方程式の数値解析

壁面渦度は、「局所補間法」で求める。2.4（3）と（4）項の条件で、2.3 項の方法で、数値計算する。所定の無次元時刻になるまで、計算を繰り返す。

2.5 「逐次微細化法」

（1）計算領域の特定

2.4（5）項の微細化法で得た、異なる時刻の数値結果から、円柱後方岐点近傍の、絶対不安定域の「境界位置」を、特定する。計算領域は、2.4（1）項で、特定された領域より、小さい。

（2）格子生成

次に、2.5（1）項で特定された計算領域内に、2.4（2）項の微細化法での格子間隔より、相当に細かい格子幅の格子系を、構造格子として、与える。

（3）境界値と初期値の決定

方法は、2.4（3）と（4）項と同様である。

（4）基礎方程式の数値解析

壁面渦度は、「局所補間法」で求める。2.5（3）項の条件で、2.3 項の方法で、数値計算する。所定の無次元時刻になるまで、計算を繰り返す。

2.6 プログラミング

（1）計算プログラム

A-1: 2.4（1）と 2.5（1）項の領域特定は、手作業によった。

A-2: 2.4（2）項の格子間隔は、局所補間法のそれの 1/4 とした。2.5（2）の格子間隔は、微細化法のそれの 1/4 とした。

A-3: 2.4（3）と（4）項の境界値と初期値の設定は、2.2 項の局所補間法の計算結果を、また 2.5（3）項の境界値と初期値の設定は、2.4（5）項の微細化法の計算結果を、それぞれ読み込み、プログラム上で、自動的に、決定するようにした。

A-4: 2.4（5）と 2.5（4）項の基礎方程式の数値解析の計算プログラムを、作成した。

A-5: 上記の『**微細化法計算プログラム**』と『**逐次微細化法計算プログラム**』の作成には、種々の綿密さと煩雑さが伴うため、計約 3 ヶ月間を要した。

（2）作図プログラム

流れ関数の等値線を、微細化域、または逐次微細化域に、描く『**作図プログラム**』を、作成した。

2.7 計算の実行

B-1: 局所補間法で計算する。

B-2: 局所補間法の各時間ステップの数値データを、磁気テープに、メモリーする。

B-3: 磁気テープのメモリーされた局所補間法の数値データを、計算機のファイルに、転送する。

B-4: ファイルの局所補間法の数値データを用いて、微細化法の領域の特定、境界値の決定、初期値の決定を、行う。

B-5: B-4 の数値データで、『**微細化法計算プログラム**』による計算を、開始する。

B-6: 微細化法での時間ステップは、局所補間法でのそれの、1/4 にした。

B-7: 微細化法による計算の CPU 時間は、約 1.0 時間だった。

B-8: 微細化法の各時間ステップの数値データを、磁気テープに、メモリーする。

B-9: 磁気テープにメモリーされた微細化法の数値データを、計算機のファイルに転送する。

B-10: ファイルの微細化法の数値データを用いて、逐次微細化法の領域の特定、境界値の決定、初期値の決定を、行う。

B-11: B-10 の数値データで、『**逐次微細化法計算プログラム**』による計算を、開始する。

B-12: 逐次微細化法での時間ステップは、微細化法でのそれの、1/4 にした。

B-13: 逐次微細化法による計算の CPU 時間は、約 2.0 時間だった。

B-14: 逐次微細化法の各時間ステップの数値データを、磁気テープに、メモリーする。

2.8 計算結果と考察

（1）レイノルズ数が、約 15.0 より大きければ、『**微細化法**』結果は、『**局所補間法**』結果に一致した。

（2）このことによって、『微細化法』の正しさの必要条件が、満足された。

（3）レイノルズ数が、さらに小さくなれば、両者の差異は大きくなった。

（4）レイノルズ数が約 7.0 より大きければ、『逐次微細化法』結果は、『微細化法』結果に、一致した。

（5）このことによって、『逐次微細化法』の正しさの必要条件が、満足された。

（6）レイノルズ数が、さらに小さくなれば、両者の差異は大きくなった。

（7）『局所補間法』→『微細化法』→『逐次微細化法』と、格子が細かくなる程、作図結果の流線分布に、突起やギザギザが、なくなる傾向にあった。

（8）よって、本開発内容は、格子依存性を除去できる方法である。

2.9 開発内容の有効性

現象の初生と消滅の問題を、数値計算で、正確に解明しようとすれば、格子依存性の問題が、不可避的に、必ず、発生する。本開発で試みた発想・方法は、本稿で述べた円柱後流現象のみならず、他の多くの現象にも、応用可能であって、上記問題の解決に有効である。

3 研究発表

（平成 6 年 4 月以降）

（1）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. 3rd Asian Symposium of Visualization, 1994, pp.621-626.

（2）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.13-Suppl., No.1, 1994, pp.47-50.

（3）能登勝久,『低速風洞』, 可視化情報学会誌「可視化情報 －日本の低速風洞－ 」, Vol.14-Suppl., No.3, 1994, pp.144-145.

（4）NOTO,K., YAMAMOTO,K. and NAKAJIMA,T.,『Computation on Disappearance and Development of the Karman Vortex Street Due to Natural Convection - Fixed Separation Effect - 』, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.44, 1995, on print.

（5）NOTO,K., TSUGUI,H. and NAKAJIMA,T.,『Wake Visualization of Generation or Development of the Karman Vortex Street Due to Negative Buoyancy in Opposing Flow』, Proc. 7th International Symposium of Flow Visualization, 1995, pp.74-79.

（6）NOTO,K., KUROSHIMA,Y. and NAKAJIMA,T.,『Grid Resolution on a Circular Cylinder Wake at the Low Reynolds Numbers』, Proc. 6th International Symposium of Computational Fluid Dynamics（CFD）,Vol.2 , 1995, pp.907-912.

(7) 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，pp.412-413.

(8) 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，pp.432-433.

(9) 能登勝久・瀬畑 昌央・中島 健,『低レイノルズ数の円柱後流に自然発生する非定常性 − 後流振動の初生検出の試み − 』，日本数値流体力学会主催「第8回日本数値流体力学シンポジウム」(於:東京)，1994年12月，pp.419-421.

(10) 能登勝久,『ワーク・ショップ：円柱まわりの流れの数値計算 − 2次元』，日本数値流体力学会主催「第8回日本数値流体力学シンポジウム」特別企画2（於:東京)，1994年12月.

(11) 能登 勝久・山本 和司・中島 健,『自然対流によるカルマン渦列の発生と消滅 −はく離効果− 』，日本学術会議主催「第44回応用力学連合講演会」(於:東京)，1995年1月，pp.127-128.

(12) 能登 勝久・山本 和司・中島 健,『カルマン渦列の自然対流による発生と消滅におけるはく離効果』，日本機械学会主催「関西支部第70期定時総会講演会」(於:大阪)，1995年3月，No.954-2, pp.17-18.

(13) 能登 勝久・黒島 康仁・中島 健,『円柱冷却によるカルマン渦列の発生 − 低レイノルズ数の非定常性の初生に関する数値解析 − 』，日本機械学会主催「第8回計算力学講演会」(於:長野)，1995年11月，印刷中.

後記

本年1月17日（火）未明、阪神・淡路地方に、突然に発生した大地震現象で、ほぼ一瞬にして、非常に多くの箇所で、建造物などが崩壊し、非常に多数の方々が亡くなられ、その後の大混乱状態に接し、地震現象に強い脅威・恐怖を覚えると同時に、従来の地震学に全くの素人ながら、『地震現象の発生予測』の必要性の重大さを、直接、肌で感じた。本稿のような、現象の数値解析・シミュレーションの発想・視点から、『地震現象の発生予測の方法論』が、次のように提起できます。『地表層内の詳細な計測データを捕獲し、そのデータを初期／境界条件にし、基礎方程式を、順次、時間積分して行き、数日、数ケ月後の数値計算結果を得、その結果に基づいて、地震現象の発生を予測しようとする、大規模数値（コンピュータ）シミュレーションの発想に基づく予測法』です。この方法は、初期値になる計測データの捕獲などが、現在、容易でないため、具体的な予測が、当面は無理で、明日にでも予測可能な方法ではなく、完成迄に、何世代かを要する。今後、理工農学などの幅広い、多くの分野の方々の叡知を集結し、進めれば、完成が早くなって、将来的には、計算機の進歩と相まって、正確かつ確実な予測方法に成長すると確信できます。また、対策が可能な日数が確保できる時期以前に、地震発生の予報が、発令されることが必要と思う。御批判を頂ければ幸いです。