

6

円柱近傍後流に関する実験と計算の比較

大田黒 俊夫* 水藤 寛*

Comparison between Experiment and Computation for the Near Wake Behind a Circular Cylinder

Toshio OTAGURO and Hiroshi SUITO

Institute of Computational Fluid Dynamics

ABSTRACT

The near wake structure behind a circular cylinder was investigated using both experimental measurement and two-dimensional numerical simulation in order to test the feasibility of close cooperation between experiment and CFD. First, a comparative method was briefly discussed for complementary study with experimental and numerical methods. Results with both methods show that the present numerical method contains several serious drawbacks, in particular, to pressure estimation just behind the cylinder and to mass continuity calculation further downstream of the cylinder.

Key Words: cylinder wake, near wake, shear layer, hot wire, CFD, comparison

1. はしがき

CFD の質的向上を図るために未だ実験との比較検証が欠かせない。これまで、最も精力的に検証が行なわれたのは、スペクトル法によって計算されたチャネル内乱流で、その精度は実験を凌駕しているとまで言われている。しかし、これは低レイノルズ数、矩形断面、周期境界条件の内部流という限られた条件下での結果であって、もっと一般的な条件での計算の詳細な検証は非常に例が少ない。たとえあったにしても流れ場そのものではなく、物体に働く力のような低次の統計量でしか比較していない例が大部分である。本研究では、比較の基本的考え方を提示した後に、円柱近傍後流に関する実験と計算を新たに行い、できるだけ生のデータの詳細な比較検証を行なうことによって当該コードの精度を検証し、今後の改善への指針となるデータを提供する。

2. 比較の考え方

流体力学には大きく分けて、理論、実験、数値計算とい

* 計算流体力学研究所

う3つの手法があるが、これらは互いに長所短所を持ち、互いに相補って全体として総合的な力で我々の理解を助けてくれる。いま、実験と計算との関係を考えてみると、実験は長時間統計量、高レイノルズ数流れ、現実世界の現象、という点に強みを持ち、一方計算は、空間構造の把握、求まる物理量の多様さ、物体形状や流れのパラメータの変更の容易さ、などに長所がある。流れの種類や空間的部位に関する実験と計算とではそれぞれ得手不得手がある。例えば物体後流に関しては、実験は遠方場が得意であるし、計算は近傍場に関して精度が高い。

それぞれの守備範囲は互いに重なり合う部分があるので、そこでの相互比較が可能になる。相互比較の結果、重なり合う部分の合致度が高ければ、重なり合わない部分に対しても互いの結果にある程度以上の信頼性を与えることができる。これは解析接続に似た考え方として理解できるだろう。また、守備範囲を定義する場合は単に物理空間だけに留まらず、波数空間、時間、周波数空間、パラメータ空間なども含まれることに注意しておこう。

重なり合う部分での比較という概念には多少説明が必要であろう。実験で直接3次元の速度場を計測することは未だ一般的ではなく、多くの場合I型やX型の熱線流速計に

よる計測が行なわれるが、計算は直接2次元または3次元の速度場を求めることができる。実験結果との比較を行う場合には、計算結果を熱線での計測を模擬するような形式に変換してやることが必要になる。いま、実験での計測を最も単純で空間分解能の高いI型熱線プローブに限定すると、2次元または3次元の計算で求められた流れ場を改めて仮想的なI型プローブで模擬的に測る必要がある。この模擬測定をここでは“Single-wire Emulation”（以後SWEと略記）と呼ぶことにする。その結果が実験結果と合っていれば、元の計算結果は信頼できることになり、2次元または3次元の流れ場に関する情報を活用できる基盤が与えられる。

比較の対象とする物理量は各測定点での速度変動波形が最も直接的なものであるが、2つの定常確率過程の比較という観点からは、統計量どうしの比較が現実的であり、平均速度や乱れの分布、乱れのエネルギーの各周波数ごとの分布などが挙げられる。

3. 円柱近傍後流の測定

本論文では事例研究として、レイノルズ数約2,000の円柱近傍後流の風洞実験と2次元数値計算を行い、両者を比較検討した。レイノルズ数を2,000に選んだのは、剥離剪断層の発達やカルマン渦の放出などの鈍い物体の後流の基本的性質で工学的に重要なものが揃っていること、近傍後

流の色々な性質がレイノルズ数に対してほとんど変化しないこと、実験、計算ともに技術的に容易な領域であること、等による、まず本項では測定結果について簡単に述べる。

風洞は断面が500mm角の正方形で長さが2,000mmの測定部を持ち、熱線プローブを3次元トラバースすることができる。測定部入り口から250mm下流の測定部断面中心を座標軸の原点に取り、主流方向をx軸、断面内水平方向をy軸、垂直方向をz軸と定義した。y軸を一致させて直径dが6mmの円柱を置き、y=±220mmの位置に直径4dの円盤状の端板を取り付け、約5.0m/sの一様流速 U_e を与えた。 $0.75 \leq x/d \leq 8.0$, $y=0$, $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$ の範囲のxz断面内の後流場をx, z方向にそれぞれ 16×73 のメッシュに分割し、I型プローブを用いた熱線流速計の出力波形をメッシュの各点で10kHzで20秒間収集した。この波形を元に各点での各種統計量を算出し、xz断面内での空間分布を求めた。

図1は平均速度の等速度線を $0.05 U_e$ 間隔で描いたものである。太線は $0.5 U_e$ と U_e の等速度線を表わす。円柱外側の加速域や、剥離剪断層内の強い速度勾配、後流中心軸上の速度欠損の回復の度合がよくわかる。注意しなければならないのは、 $0.75 \leq x/d \leq 2.5$ かつ $-0.6 \leq z/d \leq 0.6$ の領域では逆流が起きている可能性があるので、I型プローブによる測定のために順流と逆流とが区別されていないという点である。この領域での統計量はこのままではあまり信

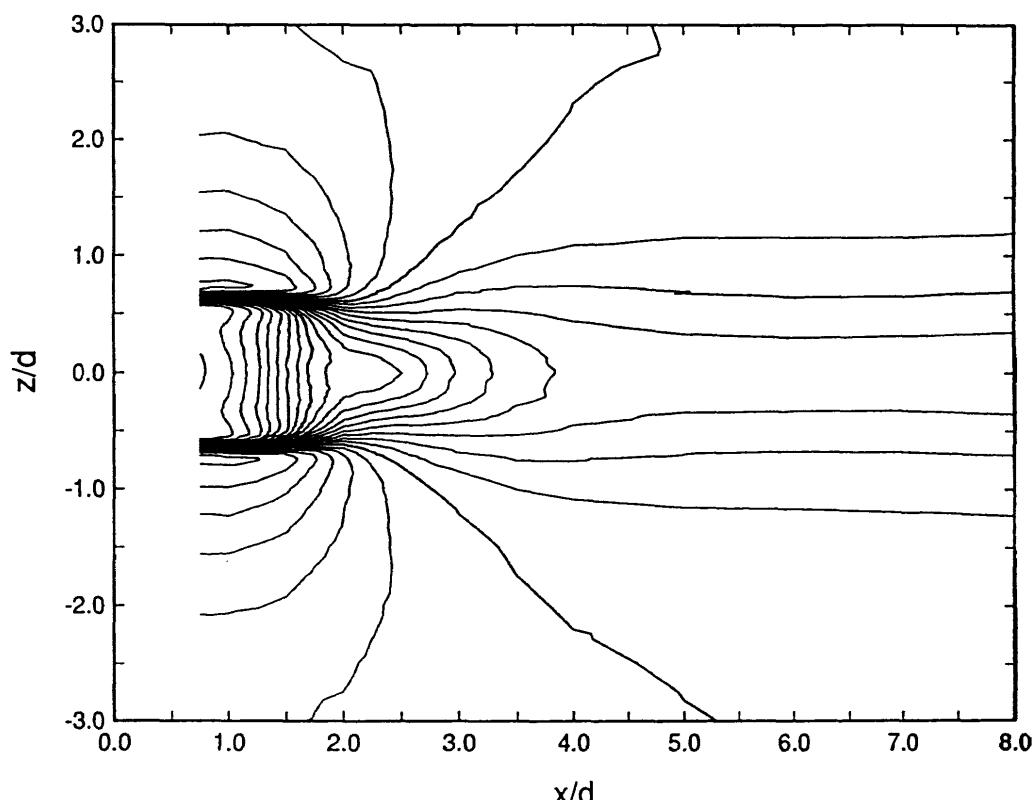


図1 時間平均速度 U を一様流速度 U_e で無次元化し、測定領域内で0.05間隔の等高線として表したもの。太線は U/U_e が1.0と0.5の等高線を表す。

用できない。しかしながら、数値計算結果に SWE を施し実験結果と比較することによって、真の値を回復させる可能性は残されている。

図 2 は乱れの強さの等高線を 2.5% 間隔で描いたものである。図 1 の平均速度分布と重ね合わせて見ることによって、剥離剪断層内に強い乱れが発生していること、やがてそれはカルマン渦列の変動場へと移り変わり、いったんカルマン渦列が出来上がるとそれはなかなか減衰しない、ということがわかる。ただしこの場合も逆流領域での精度の信頼性は低く、数値計算との照合を待たなければならぬ。

測定ではこの他に剥離剪断層内の不安定波動などの知見も得られたが、本稿の範囲外なので別の機会に述べることにする。

4. 計算結果と実験との比較

次に数値計算について述べる。計算格子は円柱周りの 400×100 の 2 次元 O 型グリッドで、最外周の半径を $30d$ に取った。半径方向に対しては、円柱表面に近づくにつれて格子密度を高くしてあるが、円周方向に対しては一様な格子密度とした。Navier-Stokes 方程式を離散化し、乱流モデルを入れずに差分法で解いた。その際、対流項は 3 次の風上差分を使って離散化し、時間方向には 1 次精度の陽解法を用いた。境界条件として、円柱より上流側の境界では Dirichlet 条件で一様流を与え、下流側境界では Neumann 条件で流出条件を与えた。初期の過渡的な状態を経た後、

カルマン渦が定常的に放出されるようになってから速度波形の収集を開始した。収集された波形は I 型プローブでの測定結果と直接比較するためにさらに SWE を施し、その後測定データと同様にして統計量を求めた。従って、以下に示すデータは SWE 後のものであることに注意されたい。

図 3 は図 1 と同じ範囲の平均速度分布の等高線で、 $0.025 U_e$ の間隔で描いてある。図 4 は図 3 に対応する乱れ強さの分布の等高線で、これらは 1% の間隔で描いた。一見してわかるることは、剥離剪断層内の速度勾配が大変弱いこと、中心軸上での速度欠損の回復の様子が実験とは大きく異なり、 $x/d = 5.0$ 付近までは流速の絶対値は U_e よりもむしろ大きく、後流の速度分布には見えないこと、速度欠損が回復するのとは逆で徐々に減速されており、さらに下流ではそのことで周囲の流体との間にかなり強い速度勾配を作っていること、である。以下、個別に考察を加えてみたい。

剥離剪断層の剪断の弱さは、強い数値拡散によるものと思われる。計算結果はあたかも設定したレイノルズ数よりもずっと低いレイノルズ数の流れのように見える。数値拡散はグリッドの構造や密度、またソルバーのスキームにも左右され、関係する要素が多いので原因は未だ特定できていない。また、剪断の強さが弱いので、剪断層内に発生する筈の不安定波は、あったにしても波数や周波数が実験とは大きく異なるだろうと予想される。

中心軸上の速度の回復に関して特筆すべきことは、SWE 後のデータで見ると、円柱の下流の速度が U_e を超えてい

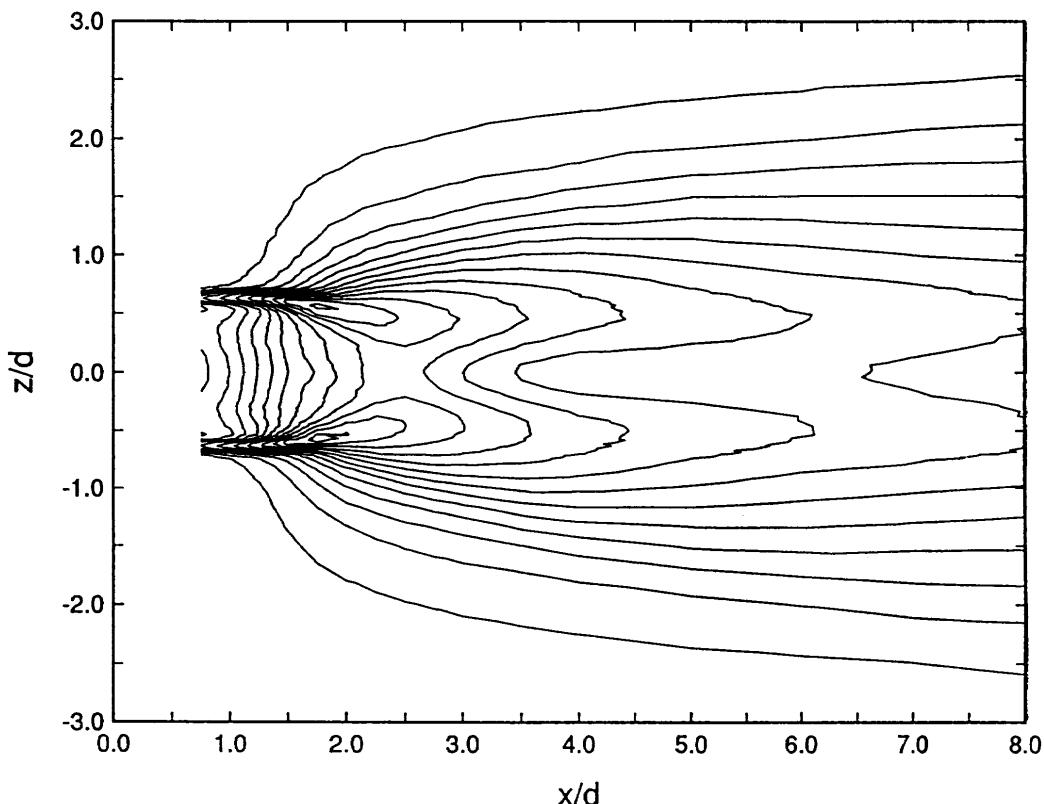


図 2 速度変動の rms 強度を U_e で無次元化し、0.025 間隔の等高線として描いたもの。

ることである。これは実験常識とは余りにもかけ離れているので、詳しく調べてみた。SWE前の x 方向の平均速度分布 $U(z)$ と乱れ強さの分布 $u'(z)$ 、 z 方向の平均速度分布 $w(z)$ と乱れ強さの分布 $w'(z)$ を描いてみると、少なくとも $U(z)$ は剪断が弱いにせよ通常の近傍後流の速度分布に近いことがわかったが、 z 方向の乱れの強さ $w'(z)$ が中心軸上で非常に強く、そのことがSWE時に速度の絶対値を大きくする原因であることがわかった。即ち、円柱の近傍では後流中心軸に向けての流体の巻き込みが大変激しく、それが大きな w 成分をもたらし、SWEでの速度の絶対値の

計算に大きく寄与している、ということである。

レイノルズ数2,000程度では、円柱のすぐ下流は死水領域になっており、渦の巻き込みは $x/d=2.5$ の付近で起こることは既知の事実である。今回の計算では、円柱直後で渦が強く巻き込んでいるために、速度分布が実験と大きく異なるということができる。この渦の巻き込み位置は渦度分布の時系列を追うことによっても確かめられた。ところで、円柱表面の圧力分布を計算してみると、境界層の剥離点よりも下流では $-C_p$ は既知の測定値よりも大きい、ということがわかった。即ち、実際には死水領域になる筈の場所の

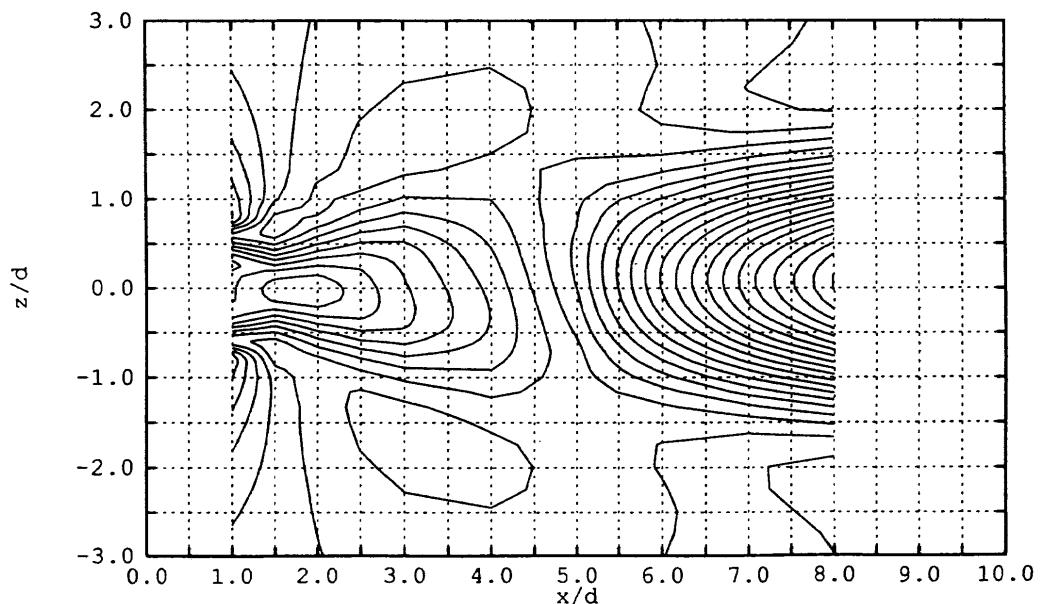


図3 数値シミュレーション結果にSingle-wire Emulationを施し、その時間平均速度場を図1と同様に描いたもの。等高線の間隔は図1と異なり0.025である。

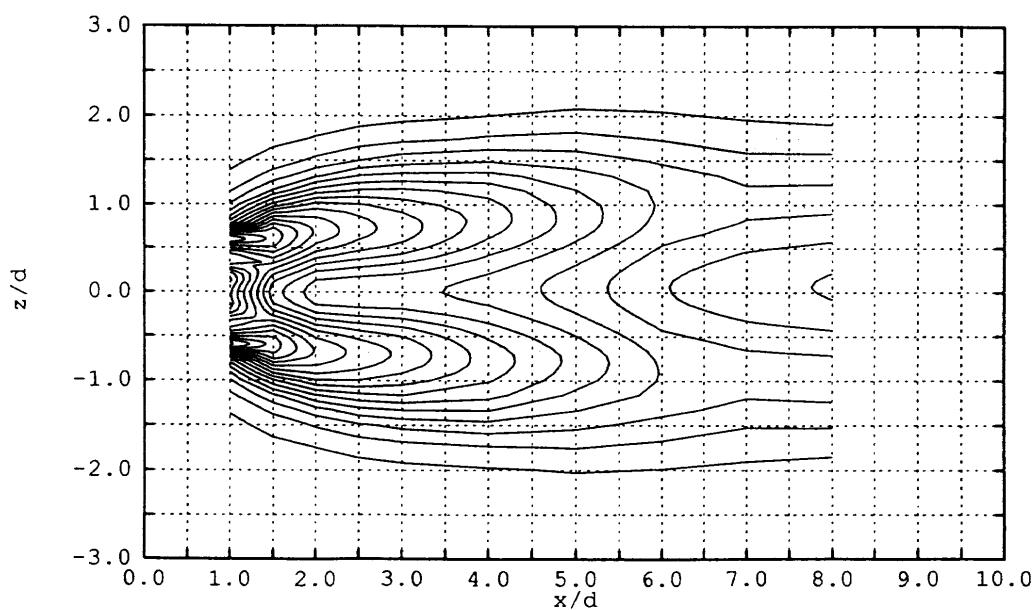


図4 数値シミュレーション結果にSingle-wire Emulationを施し、その速度変動のrms強度を図3と同様に描いたもの。等高線の間隔は図2と異なり0.01である。

圧力が低すぎるために、剥離剪断層は円柱直後で中心軸に向かって巻き込んでいることになっていて、計算結果はそれ自体では辻褄が合っていることがわかる。ただ、なぜそのように圧力が低くなってしまうのかは未だよくわからっていない。

$x/d=5.0$ 以降で速度欠損が大きくなっていく現象も不可解である。実際に SWE をする前の真の $U(z)$ で調べるとこの現象はいっそうはっきりする。計算グリッドが粗くなつていくための数値粘性の影響もあるだろうと想像されるが、具体的な説明は今後の課題である。連続の条件が正しく成り立っているかどうか、境界条件がどの様に影響しているのか、などを詳細に検討する必要がある。

5. まとめ

今回行なった 2 次元差分計算では、流れ場に対してはあまりいい一致を見なかった。それでも、 C_D や C_L は既知の結果と比較的よく合う。カルマン渦放出の Strouhal 数もそれほど違わない。物体にかかる力という観点からのみの

評価をすれば、今回のような計算でも実用的なのかも知れない。しかし、流れ場の物理を理解するという点ではまだ不十分な結果でしかない。今後、他の方法による 2 次元計算やさらには 3 次元計算との比較も行なって、数値計算の信頼性を高める努力を続けていきたい。今回の測定結果がそのためのデータベースとなれば幸いである。

参考文献

- M. F. Unal and D. Rockwell : On vortex formation from a cylinder. Part 1. The initial instability., J. Fluid Mech. (1988), Vol.190, pp.491-512.
- J. R. Filler, P. L. Marston and W. C. Mih : Response of the shear layers separating from a circular cylinder to small-amplitude rotational oscillations., J. Fluid Mech. (1991), Vol.231, pp.481-499.
- 西岡通男、浅井雅人、古本伸一：カルマン渦列形成領域における擾乱増幅特性、ながれ (1991), Vol.10-4, 269-276.

