

I - B8

粗密波伝搬を考慮した高Re数空気流体解析Ⅲ

住友重機械工業 正員 谷本 健

1. はじめに

過去3年間に渡って、2次元FDM; SWAN (Sound Wave propagation Analysis)を開発してきた。その特徴をまとめると、①音速方程式による粗密波伝搬を考慮、②DNSの様に方程式が閉じているにもかかわらず数値粘性¹⁾が低い、④高解像度法²⁾の一種で、陽解法による圧縮性外部粘性流体解析、⑤時間ステップはMCS (Monotonicity Conserve Scheme)法で自動化、⑥TDSOR法(チェビシェフ+ディジタルフィルター+SOR)による高速解法、⑦近年、急速に価格低下と高速化したPCで動く、などである。

昨年度までは2次元円柱と2次元タンデム角柱の計算を行い、円柱問題では $Re = 8 \sim 3 \times 10^5$ の層流から亜臨界領域まで、かなり良い精度でCd値が合うことを示した。今年度は、 $b/d = 2/1$ の2次元角柱問題に対して、 $Re = 10^2 \sim 10^5$ まで計算を行った。本モデルは耐風不安定断面であることで知られており、 $Re = 190$ 近傍でおかしな挙動が発生するとの情報³⁾をもとにその近傍に関しての計算結果とTDSOR法について述べる。

2. 計算モデル

文献³⁾の岡島先生の論文のモデルを参考に b/d だけ $2/1$ に変更し、 80×160 の指数分布格子を用いた。但し、ソフト内部ではユークリッド空間をリーマン空間に写像して計算を行っている。境界条件は別段変わった点はない。初期条件はRe数に対応する初速を格子全面にかけたまま計算を開始させ、流入条件はそのままの初速を保持する。つまり、Re数漸増や初期外乱を入れず、階段関数状の初速(インディシアル応答)を用いて解く。

3. 計算結果の考察(図示以外のRe数に関し、OHP説明)

表-1に $Re = 10^2 \sim 10^5$ のケースのまとめを掲げる。辺長比 $2/1$ では $Cd \approx 1.5$ であり、 $Re = 100 \sim 250$ の領域で平均Cd値は数%の誤差である。 $Re \geq 500$ の領域では、不規則な乱流が発生し定常状態が得られない。図-1~3は特に目立った $Re = 190$ のCdの挙動を説明する為に掲げた。Clは階段関数状の初速を与えたにも拘らず、カルマン渦の発達による限定振動の定常状態に達する。つまり、風洞実験と似た渦の発達過程が見られる。同時にCd値も定常になるが $Re = 190$ では平均 $Cd = 1.447$ を中心にランダム振動を行っている。図-4~7は $Re = 150, 190$ の圧力分布と渦度分布の立体図で、風下から見ている。風上は斜め左上で、角柱前縁ではピークの鋭い正圧が発生している。また $Re = 190$ では前縁の淀み点近傍の圧力分布が滑らかな分布になっていない。図-7の渦度分布では $Re = 190$ で剥離渦の風下側での巻き込みが見られる。時計回りを正、反時計回りを負としているため、前縁の剥離渦発生箇所、非常にピークの鋭い正負の渦(スパイク状で微分不連続)が発生しており、 $Re = 190$ では負のピークが僅かに覗いて見える。最後に、風上からの剥離渦の再付着点が辺の長さに一致した結果、 $Re = 190$ のCdのランダム挙動が発生したと考えられる。

4. TDSOR法(OHPで詳細説明)

表-1に掲げた平均反復回数/ステップが1タイムステップ当たりのTDSOR法による反復回数である。相対ノルムで 10^{-6} が収束判定で、約1万2千自由度の圧力方程式の反復回数が計算時間の大部分を占め、単位ステップの反復回数が計算時間に大きく影響を及ぼす。本TDSOR法の概略を示すと以下の様になる。

- ①格子間隔によりヤコビ係数YをCOS関数で暫定的に決定
- ②連分数近似で $\omega < 2$ まで増加させ、チェビシェフ型2色SORを実施
- ③対数ノルムで2~3回収束速度が落ちる様に $\omega = f(Y)$ を調節
- ④対数ノルムで収束速度が大きくなり、かつ、収束ノルムに近付いた時 $\omega/2$ を数回使用
- ⑤収束ノルムの2倍程度になった時、強制的に $\omega/2, \omega/4$ を使用し収束ノルムまで落とす

5. おわりに

Re数を変えて計算する場合、数台の安価なPCで同時に計算を実施できるので、PCでの計算はメリットがある。また、圧力分布や渦度分布のスパイク状の鋭いピークから、流体FEMの内挿関数は余程注意して選択する必要があると思われる。今後の課題として、下記の諸点がある。

- ①各種モデルの数値計算と実験値との整合性の検討
- ②3次元渦・熱影響による渦消散効果の検討
- ③動的ブラフボディを用いた、流体/構造相関解析

表-1 計算ケースのまとめ

ケース	Re	平均Cd	1.5の誤差%	流れの状態	反復回数/ステップ	総タイムステップ
1	1.0E+02	1.428	-4.80	カルマン渦	270	13,897
2	1.5E+02	1.422	-5.20	カルマン渦	217	10,024
3	1.9E+02	1.447	-3.53	剥離渦巻込	438	14,126
4	2.0E+02	1.500	0.00	カルマン渦	487	9,783
5	2.5E+02	1.491	-0.60	カルマン渦	262	9,728
6	5.0E+02	1.633	8.87	不規則乱流	253	10,941
7	1.0E+03	1.694	12.93	不規則乱流	260	11,148
8	5.0E+03	1.627	8.47	不規則乱流	241	10,732
9	1.0E+04	1.774	18.27	不規則乱流	156	11,409
10	5.0E+04	1.810	20.67	不規則乱流	131	10,005
11	1.0E+05	1.678	11.87	不規則乱流	142	10,001

キーワード：音速方程式、低数値粘性、リーマン空間、Cd値、剥離渦の巻き込み、高速解法、PC
連絡先：東京都品川区北品川5-9-1(住重ビル11F)、電話：03-5488-8162、FAX：03-5488-8147

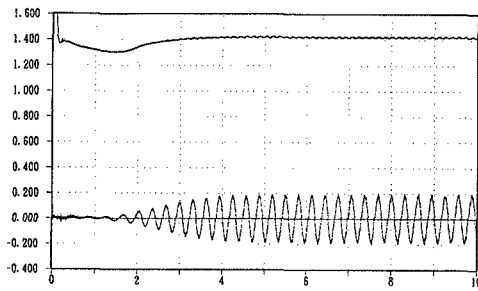


図-1 $Re=150$ の C_d , C_l 推移

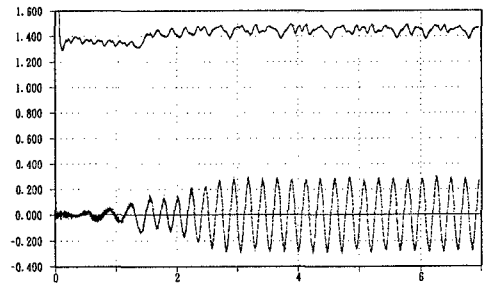


図-2 $Re=190$ の C_d , C_l 推移

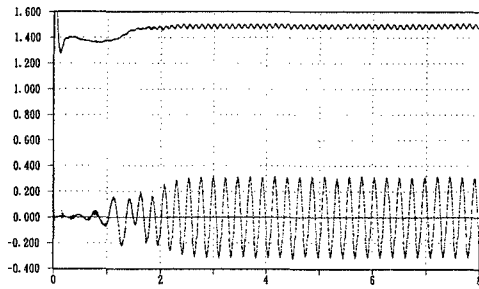


図-3 $Re=200$ の C_d , C_l 推移

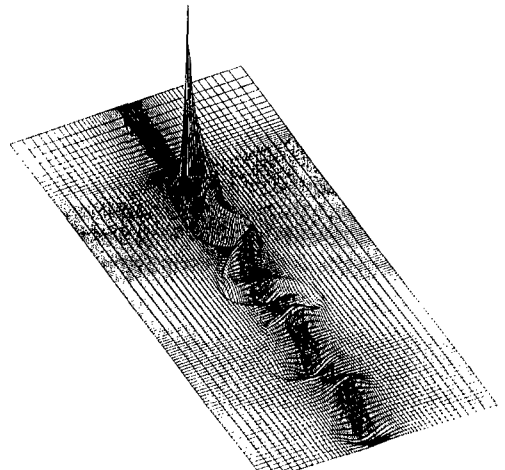


図-5 $Re=150$ の渦度分布

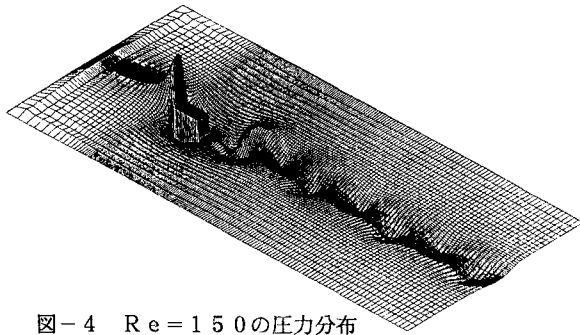


図-4 $Re=150$ の圧力分布

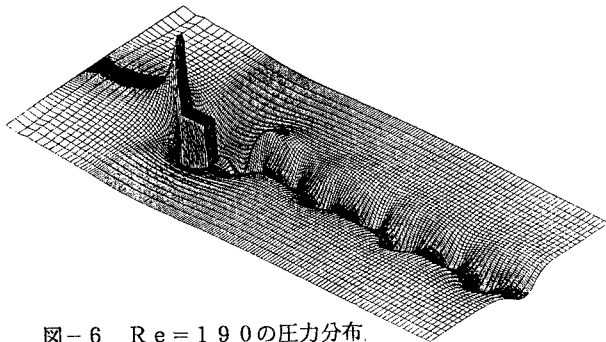


図-6 $Re=190$ の圧力分布

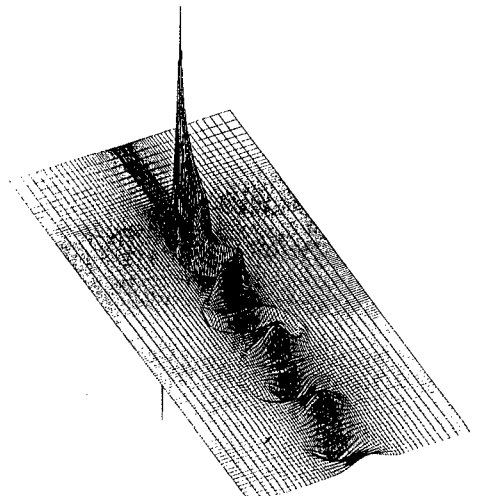


図-7 $Re=190$ の渦度分布

参考文献)

- 1) H. Takewaki, A. Nishiguchi and T. Yabe, Cubic Interpolated Pseudo-particle Method (CIP) for Solving Hyperbolic-Type Equations, J. of Computational Physics, 1985
- 2) 保原, 大宮司, 数値流体力学 基礎と応用, 東京大学出版会, 1992
- 3) 平野, 岡島, 土木学会「風工学における数値計算の応用と評価」研究小委員会, 第2期報告書, 平成8年3月