

CS-49

LES、 $k-\varepsilon$ 、DS数値解法による角柱の抗力係数とストローハル数

金沢大 正員 岡島 厚, 金沢大院 小垣 哲也, 福岡工業大 正員 溝田 武人

1. はじめに

風による橋梁等の振動及び海流による海洋構造物の振動などの基礎的研究として、流れの中に置かれた物体の空力諸特性を数値シミュレーションによって明らかにすることは重要な課題となっている。そこで、低いレイノルズ数では直接解法(Direct Simulation)で、高いレイノルズ数範囲では、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる解法およびSmagorinskyモデルを用いたLES(Large Eddy Simulation)解法などの種々な方法を用いて広いレイノルズ数範囲にわたって一様流中の静止正方形角柱周りの流れの解析を行った。そして、清水ら^[1]による実験結果や従来のSmagorinskyモデル及びDynamic SGSモデルを用いたLESによる持田ら^[2]による計算結果と比較した。

2. 計算方法概要

QUICKによるDS解法およびKato&Launderモデルを用いた $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる計算方法は、従来のものと様であるのでここでは省略し、LESによる解法についてのみ、その概要を述べる。基礎方程式は、フィルタリング操作を施した非圧縮性流体の連続の式およびNavier-Stokes方程式である。SGSモデルとして、レイノルズ応力項にSmagorinskyモデルを使用している。従って、SGS乱流渦粘性係数 ν_t とSGS乱流エネルギー k_{SGS} は次式で与えられる。

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad k_{SGS} = \frac{\nu_t^2}{(C_K \Delta)^2}$$

式中の定数は、 $C_K=0.094$ 、Smagorinsky定数 $C_s=0.13$ ^[2]を用いる。また、壁面付近での急激な速度変化による過大な渦粘性の生成を補正するため、格子スケールにVan Driest型 wall damping functionを乗じ、基礎方程式の離散化は有限体積法に基づいて行う。空間微分項の差分近似には、計算の安定化のため対流項のみ3次精度風上差分であるQUICKを、その他については2次精度中心差分を用いる。ただし、対流項の離散化に風上差分を用いたLESの計算例^[3]は他にも見られるが、その影響は明らかでなく、また本研究で用いた格子はかなり粗いため数値粘性の影響が奇遇される。時間進行法として、対流項については2次精度Adams-Bashforth法により陽的に、その他をCrank-Nicolsonスキームにより陰的に取り扱い、時間間隔 dt は0.002としている。圧力と連続の式のカップリングアルゴリズムはHSMAC法に準じている。境界条件には、入口および計算領域側面に $u=U_\infty=1$, $v=w=p=0$ の一様流の条件、出口に一様流出条件、スパン方向に周期境界条件を課し、壁面にはH.Werner & H.Wengleによる線形一べき乗則型2層モデル^[4]を用いた。計算格子は $83 \times 63 \times 11$ で総点数54,054である。

3. 計算結果

まず、Fig.1にはDSによる2次元計算、Kato&Launderによる $k-\varepsilon$ 乱流モデル、そしてLESによる抗力係数 C_d およびストローハル数 St の計算結果を $Re=30 \sim 10^5$ の実験結果と比較して広いレイノルズ数範囲にわたってまとめて示す。 $Re=10 \sim 10^3$ の低 Re 数域では定性的には一致しているが、計算値 $Re=10 \sim 10^2$ では一様

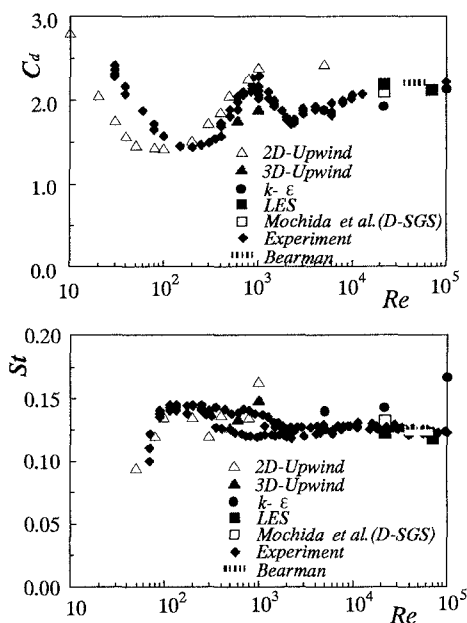


Fig.1 Comparison between computed and measured values of drag coefficient and Strouhal number of a stationary square cylinder.

に小さい。 $Re \geq 10^3$ における DS による C_d および St 値は定性的に相違してくる。 $Re \geq 5 \times 10^3 \sim 10^5$ における $k-\varepsilon$ による計算値は C_d 値は小さく、 St 値は大きく、 LES による計算値は実験値にかなり近い値となる。そして、流れの3次元性を見るため、 Fig.2 には $Re=10^3$ におけるスパン方向 $z=0, 0.8, 1.6$ における渦度分布を示すが、角柱背後のスパン方向の相違が著しい。 $Re=7.14 \times 10^4$ における LES による流れ場の Streak line と Time line を Fig.3 に示す。高レイノルズ数であるため、乱れを伴っているが、角柱背後に一連の渦列が形成されている。 Table 1 に LES 計算で得られた抗力係数 C_d 、背圧係数 C_{pb} 、ストローハル数 St 及び平均流における後流よみ点位置 $X_{w.s.}$ を溝田らの実験値^[5]と併せて示すが、計算結果は実験値にかなり近いが、小さい渦で抗力も若干小さい。実験において $Re > 5 \times 10^3$ の高レイノルズ数域では、レイノルズ数に対するストローハル数の変化は小さいが、 $k-\varepsilon$ モデルによる計算値は実験値よりもかなり大きく、一方、 LES による計算値は定性的・定量的に実験と良く一致している。

4. 結 論

LES、 $k-\varepsilon$ 、直接解法のそれぞれの解法の対応するレイノルズ数域に対して、角柱の抗力係数とストローハル数の解析を試みた。その結果、抗力、ストローハル数等の特性値は実験とほぼ一致した結果が得られた。

参考文献

- [1]清水、谷田、日本機械学会論文集B編、第44巻384号、pp.2669-2675(1978)
- [2]持田、村上、富永、小林、第7回数値流体力学シンポジウム講演論文集、pp.275-278(1993)
- [3]野澤、田村、第7回数値流体力学シンポジウム講演論文集、pp.283-286(1993)
- [4]H.Werner and H.Wengle, Proc.8th Symp. on Turbulent Shear Flows, 19-4, Munich(1991)
- [5]溝田、日本風工学会誌第13号、pp.15-27(1982)

Table 1 Comparison of computed and experimental value of C_d , C_{pb} , St , $X_{w.s.}$

	C_d	C_{pb}	St	$X_{w.s.}$
本計算 ($Re=2.2 \times 10^4$)	2.182	-1.483	0.123	1.079
本計算 ($Re=7.14 \times 10^4$)	2.123	-1.401	0.118	1.103
実験(溝田ら , $Re=7.14 \times 10^4$)	2.128	-1.640	0.125	1.500

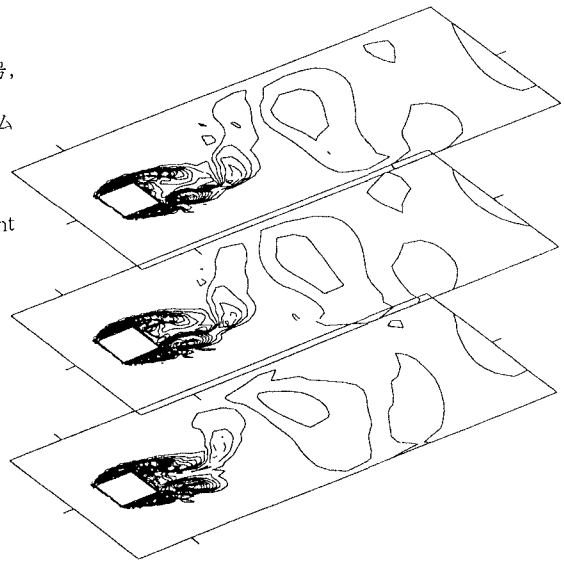
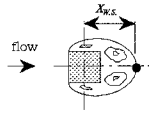


Fig.2 Vortex distributions of three-dimensional computations at $Re=10^3$

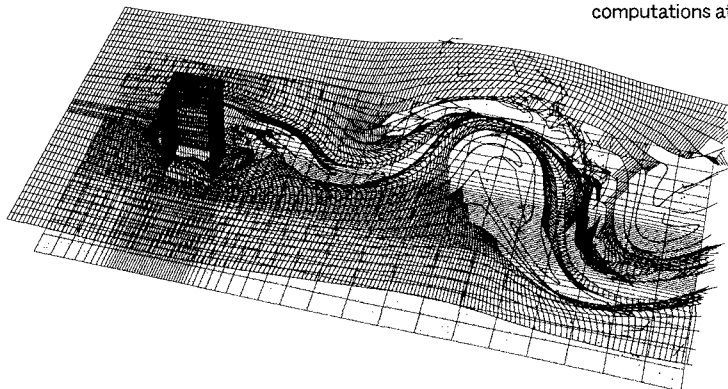


Fig.3 Streak lines & time lines of a stationary rectangular cylinder at $Re=7.14 \times 10^4$