38 二次元ステップをもつ流れのLarge Eddy Simulation による数値実験

東大生研 小林敏雄, 狩野正徳, 佐賀徹雄

Numerical Experiment of the Flow around Two-Dimensional Steps
by Large Eddy Simulation

Toshio KOBAYASHI*, Masanori KANO* and Tetsuo SAGA*

Turbulent flow in two-dimensional channel with rectangular turbulence promoters has been predicted numerically by Large Eddy Simulation (LES). 9,000 grid points were distributed on three-dimensional co-ordinates. Timelines, streaklines, Strouhal number of vortex shedding and so on were calculated, and also compared with those of the flow visualization experiments by use of dye-injection and hydrogen-bubble methods. It is shown that the large-scale structure of the flow around the steps can be described well by LES.

1 まえがき

本研究で対象としているような乱流促進体をもつ二次元チャンネル流れでは、乱流促進体からのはく離流れが生じ、これに伴い混合層が形成され、うず放出が現われる。このような流れの構造を明らかにする手段として流れの観察が有効なことが多い。従来より本研究の流れ場に類似した流れを注入流脈法やけん濁法を適用し可視化した例⁽¹⁾もあるが、概略の流れを観察したものが多く、たとえば、はく離領域付近での個々の流脈・時間線に対する詳細な検討は行われていないようである。これは、この種の複雑な流れ場を可視化することが難しいこと、またもし可視化できたとしてもその可視化結果をどう解釈するかが難しい問題であることを意味している。一方、最近の乱流計算の活発化は、数値計算によって流れの細部の状態をシミュレートする可能性を生じさせている。乱流計算の代表的なものの一つ Large Eddy Simulation (LESと略記する)は流れ場の時々刻々の変化を追跡することができる。したがってあたかも可視化写真のような流跡・流脈や時間線を算出することが可能である。既に堀内、Moinらは壁乱流の発達過程をLESで計算し、burstやsweepのシミュレートも可能であるとしている。^{(2),(3)} しかし、はく離を伴うような流れ場にLESを適用し、混合層のうず構造を追跡した例は未だ少ない。⁽⁴⁾ 本報では、計算機上で特定の時刻、特定の場所にトレーサを発生させ、流脈および時間線を計算し、これと染料注入法による流脈、水素気泡法による時間線の可視化結果との比較を試みたものである。

* Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo: Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

2 LES による流脈・時間線の形成

本報で対象とした流れ場は二枚の平行平板の一方の壁上に無限長さの矩形柱が周期的に平行に配置された流れ場で, 流路の概略を示すと図1のようになる。図において各部の寸法比は $d_1=d_2=d$, $(L/2d)=3.2$, $Re/d=5.0$ である。

LES では前述のように各瞬間の各空間位置での流体粒子の速度が算出される。⁽⁵⁾ このデータを基にして流脈, 時間線などを算出することができる。その計算手順を図2に示す。すなわち, ある時刻にある線上の点から同時にトレーサを発生させてその時刻の速度で計算時間刻み $\Delta t=0.001$ だけ移動させる。次に移動後の各点での速度で再び $\Delta t=0.001$ だけトレーサを移動させる。この操作を50行なう。後に新しいトレーサを発生させ同様の操作を繰り返す。同時刻に発生させたトレーサ同士を結べばその瞬間の時間線が, 同位置から移動したトレーサを順に結べば流脈が計算される。このようにして計算された時間線の一例を図3に示す。図3は無次元時刻 $t=6.005$ においてステップの後端断面I上の67点から同時に発生されたトレーサの時刻 $t=6.255$, 6.435 における時間線である。時間線の間隔は $5\Delta t=0.005$ である。ステップの後縁S付近から放出されたうずが成長していく様子も示されている。図4にも $t=6.005$ における流脈を示す。図より大規模うずの形成の過程が流脈によって示されること, 乱れが三次元的に発達する様子がわかる。なお, Re 数, 無次元時間 t は代表長さ l および断面IIにおける x_1 方向平均流速 U によって無次元化されている。

3 可視化実験

図5に可視化実験装置の概略を示す。時間線の可視化法としては水素気泡法を選び, ステップの後 $x_1=0.21$, $x_3=0$ に 0.1 mm の白金線電極を張り水素気泡を発生させている。時間線の間隔は 0.1 秒, 印加電圧は 50 V である。流脈の可視化法としては

Fig.1 Model flow field

Fig.2 Computational procedure of timelines and streaklines

(a) $t = 6.255$

(b) $t = 6.435$

Fig-3 Time-dependent structure of timelines
(computation, $Re = 1.1 \times 10^4$)

Fig.4 Formation of streaklines (computation, $t = 6.605$)

Fig.5 Experimental apparatus

染料注入法を選び、染料として赤色のローダミンBと緑色のフルオレセインを用いている。矩形柱(一辺30mmの正方形柱)の上面2点($x_1 = 0.073, 0.115$)に 1mm^2 の小孔をあけ、そこから前述の染料を別々に注入することにより流脈を形成し、モータドライヴ付カメラによって0.2秒間隔で連続・カラー撮影を行った。同時にうずの発達・放出過程を観察し、その周波数を計測した。実験 Re 数は $3.7 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^4$ である。

図6に時間線の可視化実験結果の一例を示す。うず成長の位相は計算結果の図3(a)に近いと思われる。スリットの後縁からうずが放出されている様子が認められ、図3の計算結果と定性的に一致しているように思われる。なお、実験に

Fig.6 Timelines (hydrogen-bubble experiment, $Re = 3.7 \times 10^3$) (a) $\tau = 0.0$ (b) $\tau = 0.28$ (c) $\tau = 0.56$ Fig.7 Time-dependent structure of streaklines (experiment, $Re = 1.2 \times 10^4$)

Fig.8 Comparison of streaklines

Fig.9 Comparison of Strouhal number

おける時間線の無次元時間間隔は $\Delta t = 0.010$ である。

図7に3時刻の染料による流脈写真を示す。図よりステップの後縁からうずが放出され成長していく様子が観察される。

図8は流脈写真の中から, うず成長の位相が計算流脈の $t = 6.435$ に相当するものを選び出し, 重ね合わせたものである。両者は定性的に比較的良好に一致していると思われる。

図9はうず成長過程の周波数をも無次元化した値 $St = fd/u$ の計算値と実験値とを比較したものである。図から両者は比較的良好に一致している。

4 まとめ

矩形乱流促進体をもつ二次元チャンネル内の流れのLES乱流計算を基に時間線および流脈を算出し流れの構造を把握するとともに, 可視化実験を行い計算結果との比較を行った。水素気泡法, 染料注入法によりステップ背後での大規模うずの成長・崩壊が観察されたが, この現象をLES乱流計算によって定性的に表現できることが示された。このうず発生周期のストローハル数は計算結果と実験結果とで比較的良好に一致する。

なお, 本報の計算は東京大学大型計算機センター HITAC M200/280H システムにより行われた。

文 献

- (1) 椎名・ほか6名, 流れの可視化シンポジウム前刷集(第4回), (1976), 47.
- (2) 堀内, 日本物理学会誌, 37(1982), 766.
- (3) P. Moin, J. Kim, J. Fluid Mech., 118(1982), 341.
- (4) 狩野, 小林, 石原, 機論, 50-449, (1984), 257.
- (5) 小林, 狩野, 石原, 機論, 流工流機講演会(1984年8月)発表予定.