

乱流促進体をもつチャンネル内乱流のビジュアルシミュレーション

Visual Simulation of Turbulent Flow in Two-Dimensional Channel with Turbulent Promoters

小 林 敏 雄*・佐 賀 徹 雄*・松 本 裕 昭*

Toshio KOBAYASHI, Tetsuo SAGA and Hiroaki MATSUMOTO

1. は じ め に

乱流の数値シミュレーションはその実用化に向けて精力的な研究が展開されている。しかし現状の数値シミュレーションには数多くの問題点が存在するため実験結果との対比が不可欠であり、このためばく大な数値シミュレーション結果を迅速にしかも適確に把握する方法が要求される。数値シミュレーションで得られた大量の計算データを効率よく認識するためには、これを時系列の画像として視覚的に表現するアニメーションが有効な手段である。このアニメーション化にあたっては計算データを画像データに効率よく変換し、記録・表示するための大がかりなシステムを必要とする。いまだ汎用化されていないこの専用アニメーション化システムを保有することは経済的な負担も大きい。そこで簡便にアニメーション化を行うために、大型計算機で行った計算結果をマイクロコンピュータを用いて瞬時の流れ場の画像として作成し、その画像を撮影してつなぎ合わせるシステムを構成した。本報ではこのアニメーションシステムを Large Eddy Simulation¹⁾ (以下 LES と略記する)で行ったステップを持つチャンネル内の乱流場に適用し、計算流れ場をタイムライン、ストリークラインおよび速度分布、乱れ分布、うず度分布等の時系列変化として表現することを試みている。

2. LES による数値計算

本システムで対象とした流れ場は図1に示すように、2枚の平行平板の一方の壁に流れ方向に無限長さの矩形柱が周期的に平行に配置されたものである²⁾。各部の寸法はチャンネル幅を l 、矩形柱の一片の長さを d 、そのピッチを p_i としたとき $p_i/d=5$ 、 $l/d=3.2$ で計算におけるレイノルズ数は $Re=1.1 \times 10^4$ である。計算対象としては図2に示すように、その一周期分を考え、この空間を X_1 方向に 40、 X_2 方向に 25、 X_3 方向に 9 の等間隔のメッシュに分割する。LES では各瞬間の各空間位置での流体粒子

の速度が計算される。このデータを基にして、タイムライン、ストリークラインなどを計算することができる。すなわち、ある時刻に図2の section 1 から 67 個のトレーサを同時に発生させてその時刻の速度で無次元計算時間刻み $\Delta t=0.001$ (本報では数値計算における時間刻みと一致させている) だけ移動させる。移動後の各トレーサの位置座標を、データセットに順次記録する。次にこの位置での速度を周囲の 4 計算格子からの線形補間値で推定し、その速度で Δt だけ移動させ、移動後のトレーサ位置座標を記録する。この操作を繰り返すことによって、ある時刻 ($T=0$) に発生させたトレーサの時刻 T における位置あるいは時刻 T までの軌跡が得られることになる。計算値の容量は、約 10 M バイトである。一方、主流の瞬間流速、瞬間乱れ、瞬間うず度の分布、等高線図なども LES 計算結果から容易に求めることができる。

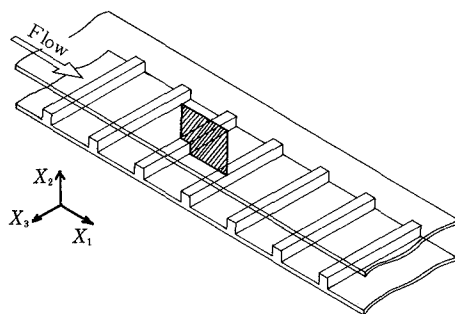


図1 モデル流路

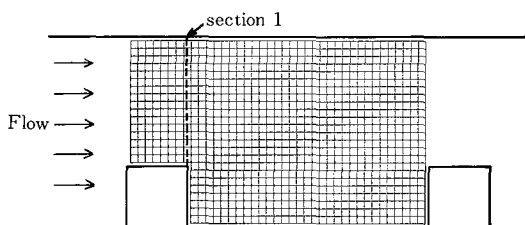


図2 計算領域と格子分割

* 東京大学生産技術研究所 第2部

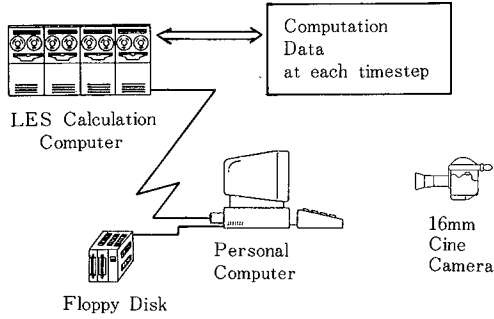


図3 アニメーションシステム

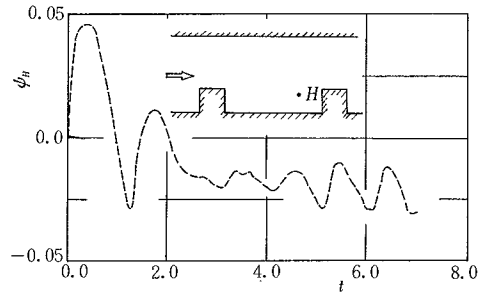


図4 流れ関数の時間変化

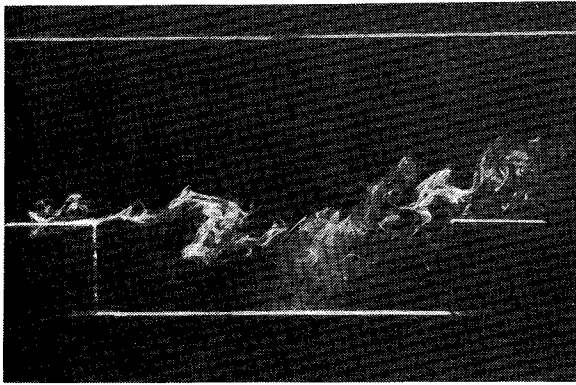
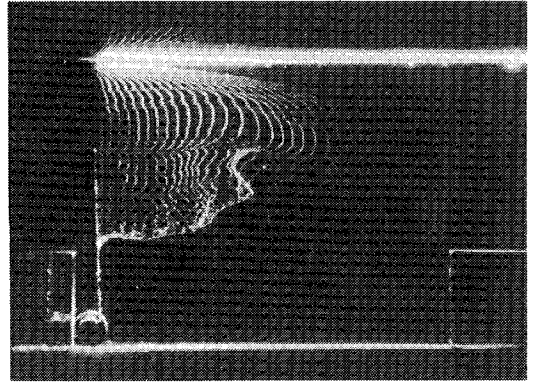
(a) 流跡 (染料注入法, $Re=1.2 \times 10^4$)(b) 時間線 (水素気泡法, $Re=3.7 \times 10^3$)

図5 流れ場の可視化実験例

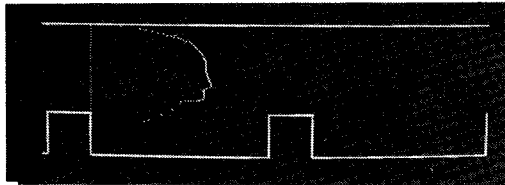
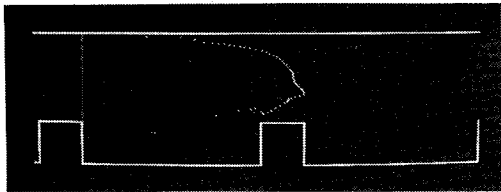
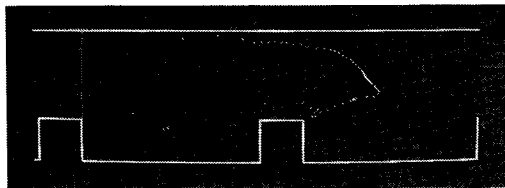
(a) $T=0.25$ (b) $T=0.40$ (c) $T=0.60$

図6 単一タイムラインの時間変化

これらの計算値はデータセットに保存される。

3. システム概要

システムの概略を図3に示す。システムは乱流計算を行う大型計算機(HITAC S810/20)とその結果を一時保存するデータセットおよび計算結果から画像を作成、表示するパーソナルコンピュータ(PC9801)とで構成され、両者は専用の通信回線で接続されている。大量の計算データを取り扱うため大型計算機をオンラインで使用することは難しく、計算結果は大型計算機側のデータセットに一時保存する。次に大型計算機とパーソナルコンピュータの通信回線を開き上記の計算結果をパーソナルコンピュータの8インチフロッピーディスクに取り込む³⁾。この計算データをパーソナルコンピュータで画像化し、各時刻における流れ場の画像としてCRT上に表示する⁴⁾。表示された画像は16mm撮影機によりコマ撮りされる。これにより時々刻々と変化する計算流れ場をつなぎ合わせる事ができ、アニメーション化が可能になる。

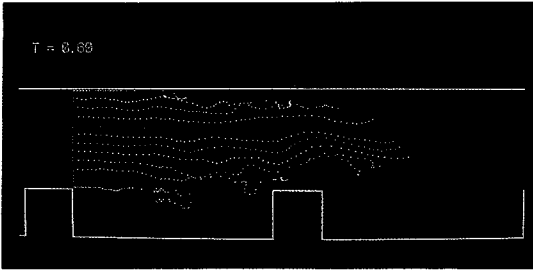


図 7 ストリークライン ($T=0.6$)

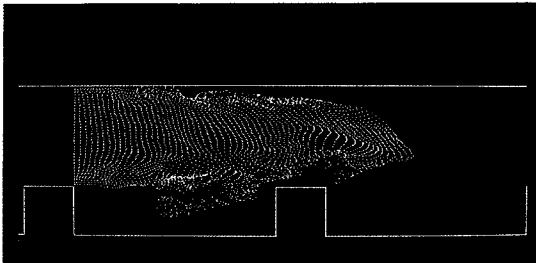
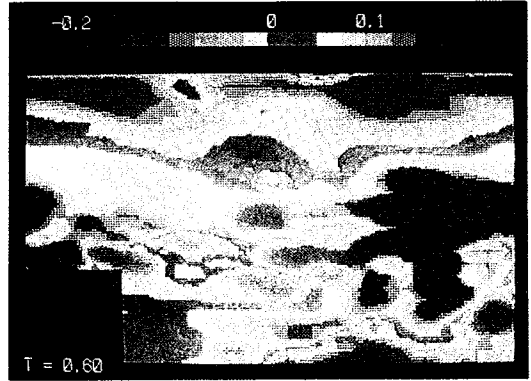
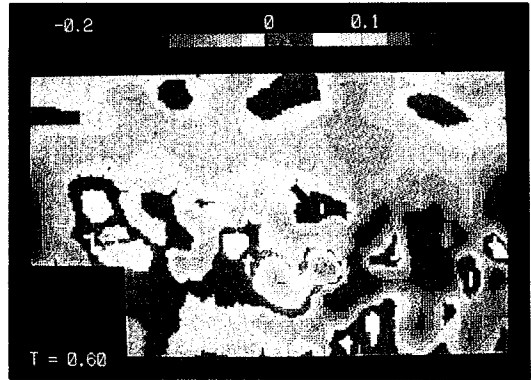


図 8 タイムライン ($T=0.6$)

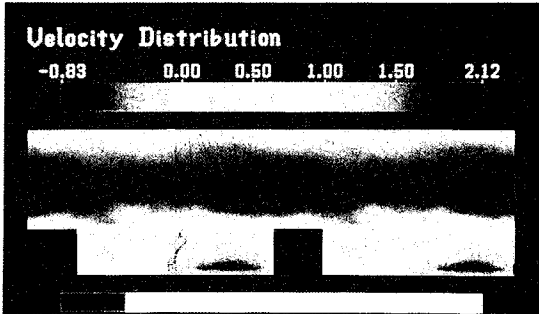


(a) X_1 方向

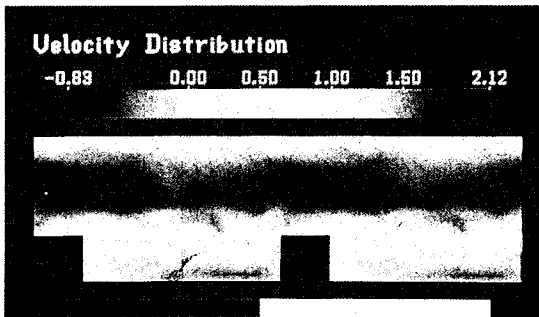


(b) X_2 方向

図 11 瞬間乱れ分布 ($T=0.6$)



(a) $T=0.179$



(b) $T=0.539$

図 10 瞬間主流速度分布とタイムラインの重ね合わせ

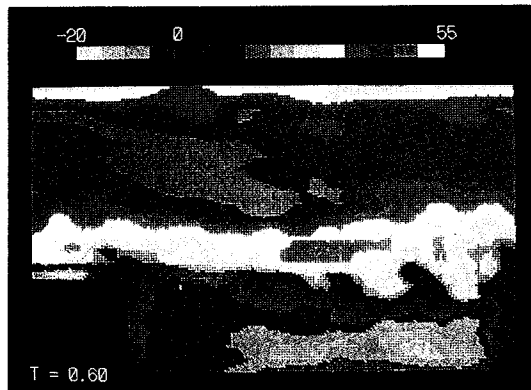


図 12 瞬間うず度分布 ($T=0.6$)

研 究 速 報

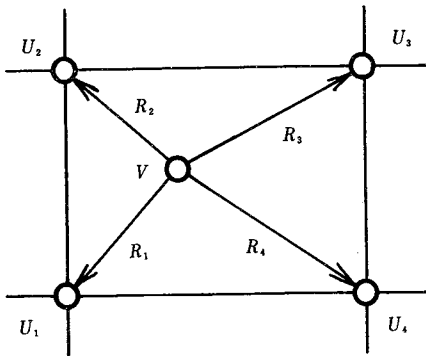


図 9 カラー画像構成のための補間法

4. アニメーション画像の表示

対象としている流れ場はステップ背後において大規模なうずが周期的に発達、離脱を繰り返していることが数値計算と実験により確認されている⁵⁾。図 4 に LES により計算されたステップ背後の特定点 H における流れ関数 ϕ_H の時間変化を示す。図 5(a) に染料注入法による流跡写真を、(b) に水素気泡法による可視化写真結果を一例として示す。このような流れ場の時系列変化を数値シミュレーション結果のアニメーション化により表示した。

4.1 ストリークライン、タイムライン

図 6 に section 1 の 67 点から同時にトレーサを時間線として発生させたときの時系列変化を $T=0.25, 0.4, 0.6$ について示す。ここに T は、流れ場が数値計算において定常になった後のある時点を起点 ($T=0$) としている。

図 7 に無次元時間 $T=0.6$ のストリークラインを示す。ストリークラインは section 1 から同一時刻に発生させたトレーサについて、 X_2 座標の小さいものから 6 個おきのデータを用い、黄、赤、青、紫、白、緑、の順で色分けして表示する。

図 8 は時間線を時間間隔 $10 \Delta t$ で連続的に発生させ、時刻 $T=0.6$ で表示したものである。ストリークライン、タイムラインのアニメーションにはステップ上面からの離れに伴って生じる乱流混合層の変化の過程がよく表現されている。

4.2 瞬間速度、瞬間乱れ、瞬間うず度

LES による数値シミュレーションの特徴は同一時刻の流れ場全体の様子を詳細に記述できることである。これは計測などの手段によっては得にくく、数値シミュレーションの利点として挙げられる。この特徴をアニメー

ション画像に適用し、流体量を色情報に対応させて流れ場全体の時系列変化の表示を行った。

瞬間速度、瞬間乱れ、瞬間うず度の計算値を連続的にあるいは 15 階調に分割し色別に表示する。計算値は 40×25 の空間座標について与えられているが、これだけで画像を作成したのでは粗いものとなる。そこで空間座標を X_1 方向、 X_2 方向にそれぞれさらに細分割する。本報では X_1 方向、 X_2 方向に、ともに 5 分割する。細分化にあたっては、図 9 に示すように隣り合う計算値間 (たとえば U_1 と U_2) については、その 2 つの計算値の線形補間値をとる。その他の点では近傍に存在する与えられた 4 個の計算値との距離を R_1, R_2, R_3, R_4 として次式により求めている。

$$V = \sum_{i=1}^4 \frac{U_i}{R_i} / \sum_{i=1}^4 \frac{1}{R_i}$$

図 10(a) に $T=0.179$, (b) に 0.539 の瞬間主流速度分布とタイムラインの重ね合せ、図 11(a) に $T=0.6$ の X_1 方向瞬間乱れ分布、(b) に X_2 方向瞬間乱れ分布を、図 12 に $T=0.6$ の瞬間うず度分布をそれぞれ示す。ここで、うず度は次式により求められている。

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

5. あとがき

LES により計算された各時刻ごとのデータを用い、数値シミュレーション結果のアニメーション化を行った。これにより数値流れ場の時系列変化を効率よく理解しやすい形で表現することができた。

この種のシステムは、将来の数値シミュレーション風洞システムの一部として重要性が増すものと思われる。

なお、今回のアニメーション化の作業にあたり三菱総合研究所情報処理部三輪建夫氏、神崎 毅氏および本所狩野正徳氏、瀬川茂樹技官、倉科満寿夫技官の協力を得た。ここに感謝の意を表す。(1985 年 11 月 1 日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林, 乱流の数値シミュレーション—数値風洞への夢, 機械学会誌, 88, 799 (1985.6), 101
- 2) 狩野, 小林, 石原, 佐賀, 乱流促進体をもつ二次元チャンネル内の乱流予測に関する研究 第 2 報, 機械学会論文集 B, 51, 464 (1985.4), 1165
- 3) 浅野ほか 3 名, PC-9801 システム解析(上下), アスキー出版局
- 4) 櫛ほか 2 名, PC-9801 ガイドブック, アスキー出版局
- 5) 狩野, 小林, 生産研究, 乱流促進体まわりの数値予測に関する研究 第 8 報, 36, 12 (1984.12), 524