

II-206 三次元離散渦法による乱流混合層中の組織渦構造の数値シミュレーション

東京工業大学 学生員 小川 隆申
 東京工業大学 正 員 日野 幹雄
 東京工業大学 福西 祐

1. はしがき

近年、乱流中に秩序だった流れのパターンが存在することが確認され、これは組織的構造または組織渦などと呼ばれている。混合層においても流れのスパン方向に軸を持つ二次元的な大規模渦構造の存在が可視化によって確かめられ、これを Roller 構造と呼んでいる。さらに、最近では Roller 構造の間に流下方向に軸を持つ縦渦が可視化などによってみつかっており、この縦渦構造が乱れの生成、及び拡散において重要な役割を果たしていると考えられている。そして、その縦渦構造は Roller 構造の間に存在する Saddle Point において渦が引き伸ばされることによって形成されると推測されているが詳細は明らかでない。そこで本研究において三次元離散渦法を用いて三次元的混合層を時間発展させ、縦渦の形成過程をシミュレートした。さらに、この三次元構造が物質の拡散性に与える影響を評価する目的で二次元離散渦法による二次元的混合層についても計算し、比較を行った。

2. 計算方法、及び計算結果

まず、二次元離散渦法による二次元的混合層の時間発展を計算する。初期において 400 個の渦点を X 方向に乱数を用いて一様分布、Y 方向には $Y = 0.0$ を中心に Gauss 分布させた。(図 1. [a]) 但し、座標軸は流下方向に X 軸、横断方向に Y 軸とする。また、個々の渦点に与える循環はすべて等しく $\Gamma = 2.5 \times 10^{-2}$ とした。これを、X 方向に周期長 $L = 21.4$ の周期境界条件を課し、Y 方向には無限領域として、時間幅 $t = 54.8$ で時間発展させた。なお、諸量は以下の量で無次元化している。長さ: δ (渦層の平均厚さ)、時間: δ^2 / Γ 、速度: Γ / δ 、渦度: Γ / δ^2 。 $t = 712.4, 1424.8$ における結果が図 1. [b], [c] であり、 $X = 14.4$ において Roller 構造の発達する様子がみられる。

次に、三次元離散渦法による計算について述べる。普通の三次元離散渦法では流れの中の渦度分布を、流れの中に端点を持たない渦糸の集合として渦度場を発展させていたが、この方法では実際の流れの中で起こり得る渦のつなぎ替えを実現するには計算上困難を伴う。そこで、本研究では渦度場を円柱状のセグメントに分割し、そのセグメントの集合として渦度場を表現する Vorton Model の概念を導入し計算を行った。このセグメントをここでは特に Vortex Segment と呼び、その両端の座標を r_1 、 r_2 、半径 R 、循環 Γ で個々のセグメントは規定される。(図 2) ここで、流れの中に N 個のセグメントが存在すれば、それらによって形成される速度場 $u(x)$ は、次式のようになる。

$$u(x) = - \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \int_{S_i} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}') \times \mathbf{S}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}'|^3} dS$$

(但し、 $\int_{S_i}$ はセグメント i の端点 r_2 から端点 r_1 まで積分することを表す。)

これより、セグメントの両端に他のセグメントにより誘導される速度 u_1 、 u_2 を求め一次の Euler 法によってセグメントの両端をそれぞれ移動させ渦度場を発展させる。こうすることによって、渦の両端に速度差がある場合に渦が引

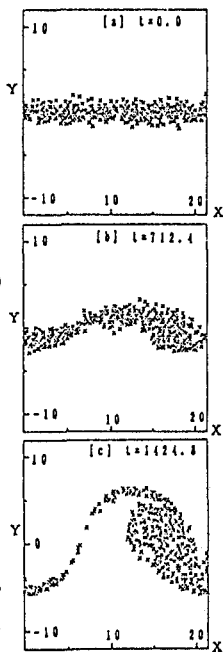


図 1: 二次元的混合層の時間発展

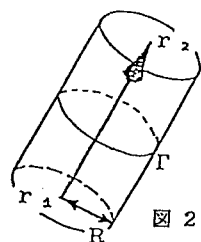


図 2

Vortex Segment

き伸ばされるというプロセスは自動的に表現される。また、引き伸ばされたセグメントは近似度を保つため、ある一定の長さには達した時点で、その中点で分割され、長さが半分で、循環、及び、方向の等しい2つのセグメントに置き換えられる。

三次元的混合層は、初期において 400個のセグメントを X方向、及び Z方向（流れのスパン方向）に乱数を用いて一様分布、Y方向には Gauss分布させ、その方向は Z軸に一致、循環は総循環が二次元のそれと等しくなるように $\Gamma = 1.67 \times 10^{-2}$ とした。（図3, [a]）

こうすることによって三次元的擾乱を含む渦層が得られる。これに X、及び Z方向に周期境界長 $L = 21.4$ の周期境界条件を課し、それ以外は二次元の場合と同じ条件下で時間発展させた。そのうち $t = 712.4, 1424.8$ における結果を図4, [b], [c]に示す。X-Y平面図を見る限りでは $X = 14.4$ において Roller構造の発達が見られ二次元の計算結果と同じように見える。しかし、これを X-Z平面内で見ると、 $t = 712.4$ において三次元的な乱れが既に生じており $t = 1424.8$ においてはそれが Roller構造の間で引き伸ばされて $X = 0.0 \sim 12.0$ 付近で縦渦構造を形成しているのがわかる。

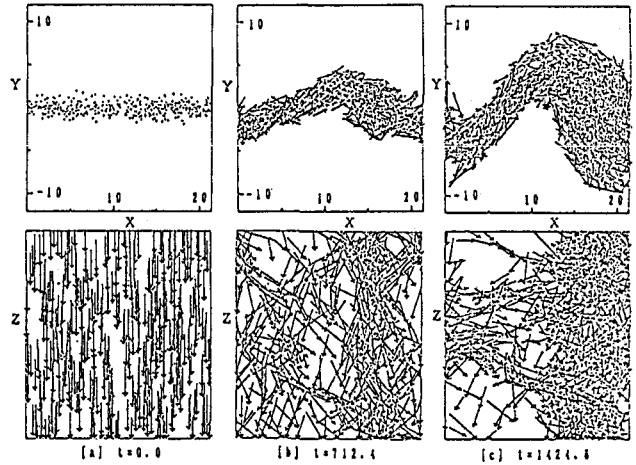


図2：三次元的混合層の時間発展
上段～ X-Y平面図
下段～ X-Z平面図

次に、混合層において渦の三次元性が物質の拡散に与える影響を見るため二次元、及び三次元的混合層中に、2000個のトレーサーを X、Z方向に一様分布、Y方向には渦層の中心 ($Y = 0.0$) より下側に Gauss分布させ、その動きを追った。 $t = 0.0, 712.4, 1424.8$ における X-Y平面図が図4である。これを見ると、二次元混合層では $t = 1424.8$ においてもトレーサーの上面がはっきり識別できるほどであり、三次元的混合層中のトレーサーの動きと比較すると、三次元的混合層においては二次元の場合に比較して明かに物質拡散が大きく、渦の三次元性によって高い拡散能が得られることがわかる。これは、混合層における縦渦の役割重要性を示すもので、混合層による拡散などを論じる際に、三次元的な構造を考慮に入れる必要があることを示している。

3. 結論

三次元離散渦法、特に今回は Vortex Segment Modelを用いて三次元混合層をシミュレートすることができ、また、縦渦が Roller構造の間で渦が引き伸ばされることによって形成されることが確かめられた。更に、その縦渦の存在による三次元性が、高い拡散能をもたらすことが明かとなった。

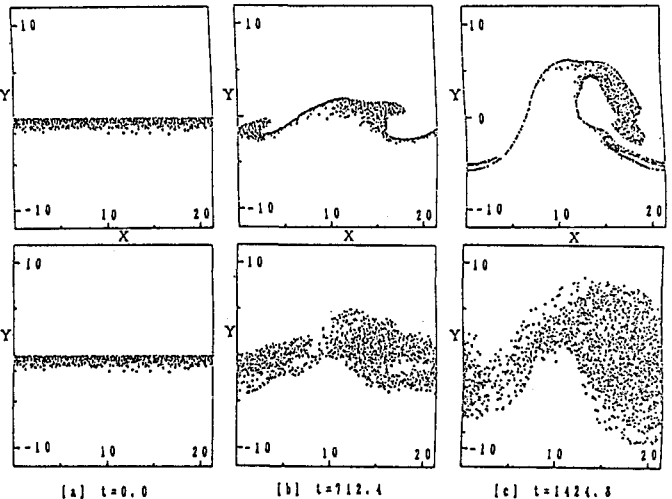


図3：上段～二次元混合層中のトレーサーの動き
下段～三次元混合層中のトレーサーの動き