第 14 回数値流体力学シンポジウム
E09-4

三次元渦法による乱流解析（粘性散逸に関する検討）

Turbulent Flow Analysis by a Three Dimensional Vortex Method (Estimation of the Dissipation Rate)

○ 戸塚 義孝, 慶大院, 〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail：d996208@msr.st.keio.ac.jp
小尾 晋之介, 慶大理工, 〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail：obsn@mech.keio.ac.jp
Yoshitaka TOTSUKA, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., Yokohama 223-8522, JAPAN
Shinnosuke OBI, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., Yokohama 223-8522, JAPAN

For the validation of turbulent flow simulation, quantitative estimation of turbulence statitics is of primary importance. Our interest is to analyze the turbulent flow based on a vortex method. To simulate the vorticity field such as the homogeneous isotropic turbulence serves a challenging issue for vortex method, and we have explored the extensive potential of the vortex method. Thus we studied a direct numerical simulation of decaying homogeneous isotropic turbulence by using a three dimensional vortex method. The results are compared with an existing DNS Database. A parallel, adaptive, multipole method is applied to the three-dimensional vortex method for the efficiency improvement of the calculation . The parallelization is accomplished by a PC cluster machine with PVM library.

1. 緒 言

本研究の目的は、渦法により乱流の直接数値シミュレーションを行い、エネルギー散逸率や乱流エネルギーなどの乱流統計量について定量的な検証を行うことにある。本研究は、減衰一様等方性乱流の流れ場について、三次元渦法による直接数値シミュレーションを行い、得られた種々の乱流統計量についてスペクトル法による DNS Database(1) と定量的な比較を行った。離散的な渦要素により流れ場を表わす渦法では、今回計算を行った一様等方性乱流のような大小さまざまな渦が密に充填された流れ場は、不得意な分野であることが予想されるが、渦法による乱流の数値シミュレーションのより広い範囲の流れ場に対する可能性を探るために本研究ではこの課題に取り組んだ。

また N^2 乗スキームである渦法の計算負荷を低減するために、並列化 (2)、FMM アルゴリズムによる高速化 (3) を三次元渦法解析に適用した。

2. 支配方程式

本研究では Vortex Blob による渦法を用いており、渦要素の速度、渦強度を、

$$\frac{dx_i}{dt} = \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x_i}, t) \tag{1}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega_i}}{dt} = [\boldsymbol{\nabla u}(\boldsymbol{x_i}, t)\boldsymbol{\omega_i}] + \nu\Delta\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x_i}) \tag{2}$$

$$\nu\Delta\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x_i}) = \nu\delta^{-2}\sum_j(\boldsymbol{\omega_j} - \boldsymbol{\omega_i})dv_j\eta_\delta(\boldsymbol{x_i} - \boldsymbol{x_j}) \tag{3}$$

と表わし、それぞれの式を各時刻において計算する (4)。

3. 計算条件

スペクトル法による DNSDatabase の計算条件にあわせて、流れ場を設定した。以下に概要を記す。

計算対象とする領域は、x, y, z 方向に長さ 2π とし、３方向に周期境界条件を与えた。

また初期条件として

$$E(k) = 0.038k^4\exp(-0.140k^2),\ k \leq 8 \tag{4}$$

で表される一様等方性乱流の減衰終期における 3 次元エネルギースペクトルを与えている。

ここで変動速度の RMS 値を代表速度、2π を代表長さとしたレイノルズ数は Re=309 である。

また初期条件における渦要素数は約 33,000 であり、渦要素の伸張に応じて渦要素を分裂し小スケールの渦要素を生成した。時間ステップ巾は Δt=0.005 とした。

また乱流統計量を計算するために、渦要素に加えて、計算領域に等間隔においた $N = 32^3$ 個の格子点上での物理量の計算を行った。

4. 初期条件についての検討

スペクトル法におけるエネルギースペクトル分布の初期条件に可能な限り一致させることが望ましいが、微妙な釣り合いのもとでたまたまエネルギースペクトルの分布が一致するような渦要素の初期条件を求めることが、目的ではない。一方、完全にランダムに渦要素の物理量を与えると、得るべきエネルギースペクトルとは、程遠い分布となるので、ある程度人工的な要素を導入しなければならない。

このような観点から渦要素の位置については、流れ場を等分割した点を中心として、一様乱数によるばらつきを与えた。

さらに渦要素の渦強度には、渦要素位置における渦度をそのまま与え、全運動エネルギーが一致するように渦強度に一律に係数を乗じた。

ここで渦度場は、エネルギースペクトルから求まる波数成分を振幅、一様乱数を位相とする三角関数によって表した。

5. 計算結果

図 1、図 2、図 3 は、渦要素数を $N = 16^3$、24^3、32^3 と変化させた時の初期条件における 3 次元エネルギースペクトル分布を表したものである。

得られた結果をみると、本数値解析においては、境界の不連続性に起因する $k > 8$ における波数成分がみられるが、初期条件として導入する渦要素数を増加するにつれて、スペクトル法における初期条件の曲線に近づいていることがわかる。

ここで本数値解析においては、スペクトル法によるエネルギースペクトルの初期条件 $k \leq 8$ に近づけるため、波数空間におけるフーリエ成分に規則性を持たせている。

したがって解像度が不足していると、高波数のスペクトルが一致しなくなり、図 4、図 5(いずれも渦要素数 $N = 8^3$) に示すような大きな管状の渦構造をもつ流れ場を解析していることに相当する。

これに対して図 6、図 7(渦要素数 $N = 32^3$) では、渦要素のコアサイズを大きく超えるような渦構造は見られ

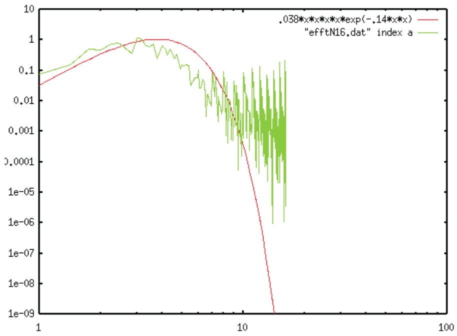

Fig. 1 Energy Spectrum ($N = 16^3$)

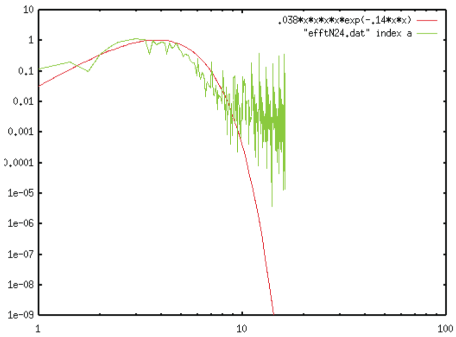

Fig. 2 Energy Spectrum ($N = 24^3$)

ず、ランダムな渦度場が初期条件として与えられている事がわかる。

図 8、図 9、図 10(渦要素数 $N = 12^3$) は、時間ステップ幅による無次元時間 t=0,150,400 における渦度場を表したものである。時間発展とともに渦度場が全体的に減衰していく一方で、渦度の大きな領域が集中していく様子がみられた。

6. 結 言

初期条件において、導入する渦要素数を増加するほどより高い波数側まで渦法によるエネルギースペクトル分布が、スペクトル法による分布に近づいていく傾向がみられた。

参考文献

1) T., Miyauchi and T. Ishizu, WWW ERCOFTAC Database.
2) 戸塚, 小尾, 第 13 回数値流体シンポ (1999), p. 229.
3) 戸塚, 小尾, 第 11 回計算流体シンポ (2000), p. 569.
4) G.Winkelmans and A.Leonard, J.Comp.Phys., 109 (1993),247.

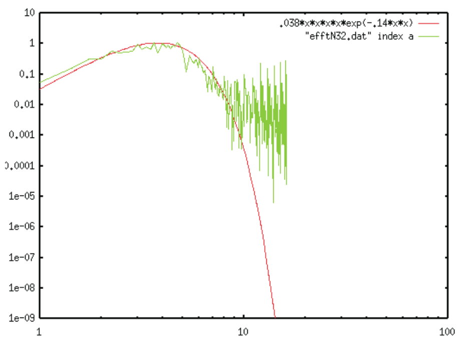

Fig. 3 Energy Spectrum ($N = 32^3$)

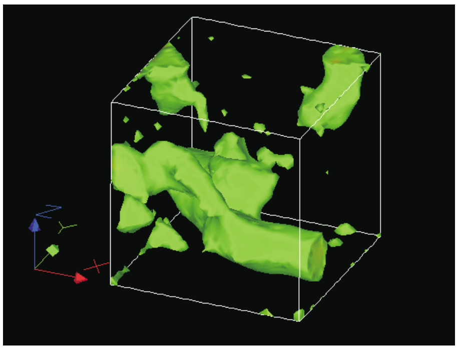

Fig. 4 Isosurface of vorticity,$|\omega| \; / \; |\omega|_{max.} > 0.4$ ($N = 8^3$)

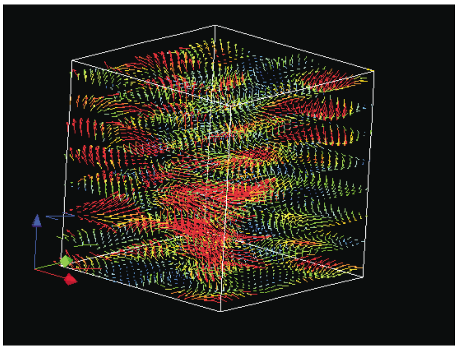

Fig. 5 Vorticity vector diagram($N = 8^3$)

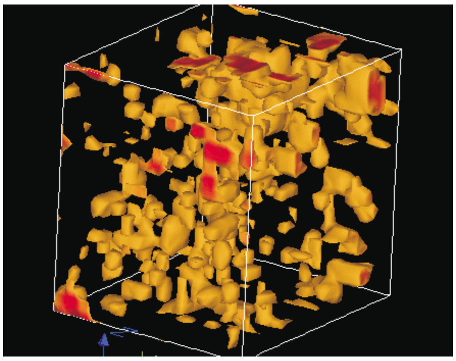

Fig. 6 Isosurface of vorticity,$|\omega| \; / \; |\omega|_{max.} > 0.4$ ($N = 32^3$)

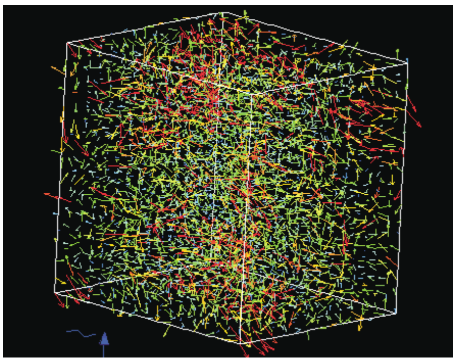

Fig. 7 Vorticity vector diagram($N = 32^3$)

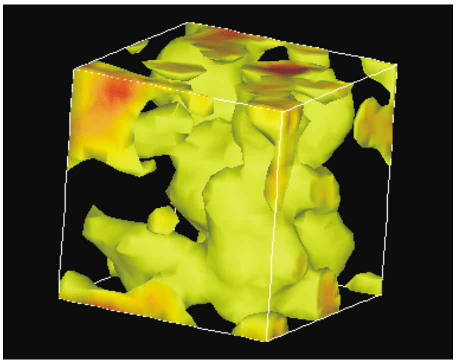

Fig. 8 Isosurface of vorticity,$|\omega| \, / \, |\omega|_{max.} > 0.4$
$(t = 0, N = 12^3)$

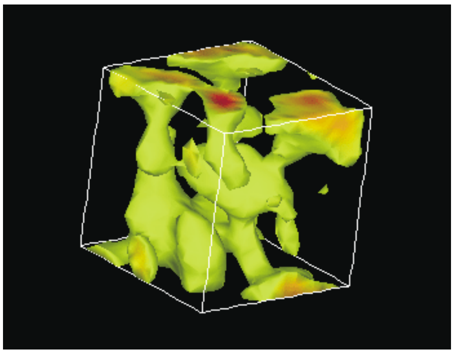

Fig. 9 Isosurface of vorticity,$|\omega| \, / \, |\omega|_{max.} > 0.4$
$(t = 150, N = 12^3)$

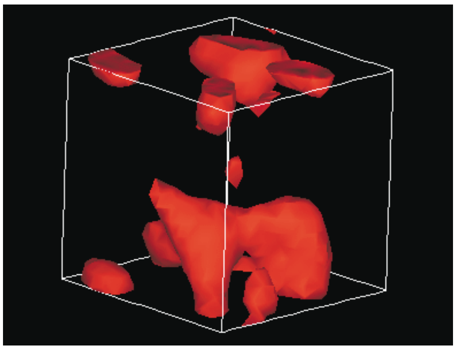

Fig. 10 Isosurface of vorticity,$|\omega| \, / \, |\omega|_{max.} > 0.4$
$(t = 400, N = 12^3)$