

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 29 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760142

研究課題名（和文）乱流非定常現象解明のための渦変形モデルの構築とその応用

研究課題名（英文）Vortex Deformation Model and its Application for Investigation of Turbulence Phenomena

研究代表者

福田 紘大 (KOTA FUKUDA)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：60401684

研究成果の概要（和文）：メッシュフリー型の乱流シミュレーション手法(Fukuda & Kamemoto, 2005, 2006)を様々な乱流場に適用し、その検証と手法のさらなる改良を行うことで、乱流場における渦構造の生成から消散に至る一連の素過程を直接的に解析することが可能な手法へと発展させた。検証解析の結果、従来手法に比べ、より微細な渦構造の相互作用が解像可能となっただけでなく、解析精度が向上することが確認された。さらに、Graphic Processing Units (GPU)による高速化に成功した。この結果、渦要素再配置モデルおよび渦要素消去モデルを導入したメッシュフリー型の乱流解析手法の有効性が確認された。

研究成果の概要（英文）：A grid-free vortex method was developed and applied to turbulent flows in order to validate and improve the scheme. The spatial resolution was successfully improved for high strain regions. The calculation was accelerated by using Graphics processing Units (GPUs). From the results, it was confirmed that the unsteady feature of the turbulent flows and the development were successfully captured. Furthermore, comparisons of the calculated mean velocity and the calculated rms value of the velocity fluctuation with experimental data showed that the method provided an accurate velocity profile.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流、数値流体力学、流体工学、渦流れ、非定常現象

## 1. 研究開始当初の背景

乱流解析においては、渦度場の非定常な変化を精度良く解析することが重要となる。境界型の数値解析手法である渦法においては、

流れ場に分布する渦度の連続的な分布を離散渦要素で離散化し、その時間的な変化をラグランジュ的に解析するため、渦度場の生成から成長、消散の過程を模擬することが可能

である。また、渦法においては、離散渦要素スケールをコルモゴロフスケール以下の微小渦構造の変形を捉えられるように小さくとれば、乱流の直接解析が可能となる。しかしながら、高レイノルズ数における乱流場のように非定常性が強く、局所的に速度ひずみの大きさが異なる流れ場においては、空間解像度を維持するために要求される渦要素スケールは場および時間において同一ではないため、流れ場全体でコルモゴロフスケールの渦構造まで解像度を維持するためには、非常に微細な渦要素を多数導入することが必要となり、計算負荷の増大を引き起こす。このことから工学的な応用においては、渦要素スケールを大きめにとり解析を行うことになる。この場合、渦要素スケール以下の構造の変形は表現することができず、速度ひずみの大きな領域では、空間解像度が低下する。一方、Biot-Savart法に基づくGrid-free型の渦法においては、流れ場に格子を設けないため、渦要素のスケールを局所的に変化させることが可能である。福田ら(2004)は、離散渦要素の時間的な変形を考慮し、局所的な速度変動が大きな領域においては、渦要素をより小さなスケールの要素で再配置することで空間解像度を維持する渦要素再配置モデルを提案し、一対の渦輪の相互干渉流れの解析を行い、乱流エネルギースペクトルおよびフローパターンについて既存の実験データと詳細な比較を行った結果、渦輪のつなぎ換え現象が的確に再現できるだけでなく、妥当なエネルギースペクトル分布を表すことができることを確認している。

## 2. 研究の目的

メッシュフリー型の乱流シミュレーション手法は、一対の渦輪の相互干渉流れ解析においては、渦輪の合体に伴う渦度の伸張と急激な乱流化現象、さらには、それに伴うエネルギーのカスケードメカニズムが的確に捉えられることが既に確認されており、乱流解析手法としての有効性が示されているが、乱流場における渦構造の生成から消散に至る一連の素過程を直接的に解析することが可能な手法として確立するためには、様々な乱流場について検証を行っておく必要がある。そこで、本研究では、様々な乱流場に適用し、手法の検証とさらなる改良を行うことで、乱流場における渦構造の生成から消散に至る一連の素過程を直接的に解析することが可能な手法へと発展させた。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまでに開発を行ってきたメッシュフリー型の乱流シミュレーション手法を用いて検証解析を行うことで、手法の改良と乱流の素過程を直接的に解析するこ

とが可能な手法として確立するためのモデルの提案を行った。本章では、その手法の概要について述べる。

基礎式は、非圧縮流れ Navier-Stokes 方程式の回転から得られる渦度輸送方程式(1)と発散より得られる圧力ポアソン方程式(2)である。

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (1)$$

$$\nabla^2 P = -\rho \text{div}(\mathbf{u} \cdot \text{grad} \mathbf{u}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ 、 $\boldsymbol{\omega}$ は速度ベクトルおよび渦度ベクトルを示し、 $\boldsymbol{\omega}$ は、 $\boldsymbol{\omega} = \text{rot } \mathbf{u}$ と定義される。渦法においては、流れ場の時間発展は、渦度領域を離散化した渦要素の運動と要素の持つ強度の時間発展により表現される。圧力場は、渦度場および速度場から従属的に求めることができる。

任意位置における速度は、以下に示す一般化された Biot-Savart の式を用いて求めることができる(Wu and Thompson, 1973)。

$$\mathbf{u} = \int_V \boldsymbol{\omega}_i \times \nabla_i G dV + \int_S [(\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{u}_j) \cdot \nabla_j G - (\mathbf{n}_j \times \mathbf{u}_j) \times \nabla_j G] ds \quad (3)$$

ここで、添字  $i$  は流れ場における変数および微分、積分値を示し、添字  $j$  は境界面上における諸量を示す。 $\mathbf{n}$  は境界面上における法線方向単位ベクトルである。 $G$  は、スカラーラプラス方程式の基本解であり、3次元流れ場においては、以下のように表わすことができる。

$$G = \frac{1}{4\pi|r-r_i|} \quad \text{or} \quad G = \frac{1}{4\pi|r-r_j|} \quad (4)$$

渦度場および境界形状により決められる速度ポテンシャルの勾配から任意の位置における速度は一意に決定される。離散渦要素としては、stickモデルを用いて流れ場を離散化している。また、渦要素は、渦核半径 $\delta$ を標準偏差とするGaussian分布の渦度分布を有するものとする。渦要素が持つ渦強度の時間変化は、(1)式の右辺第一項(移流項)と右辺第二項(粘性項)をtime splitting的に分離して考慮し、粘性項は、Leonardにより提案されたcore spreading法(Leonard, 1980)により考慮する。一方、移流項は、一般化されたBiot-Savartの式より求めた速度場の微分値より求める。また、渦要素の移動は、3次精度のAdams-Bashforth法を適用する。

内部流れ解析においては、磯らにより提案された渦法と直接境界要素法のハイブリッド手法(Iso and Kamemoto, 2008)を適用している。境界条件としては、入口境界には、速度流入境界条件として一定速度分布を与え、出口境界には、自由流出境界条件を与え

た。また、壁面境界においては、法線方向速度がゼロとなるようにしている。さらに、壁面境界での Non-slip 条件および渦要素の流れ場への導入に関しては、小島らにより提案された手法(Ojima and Kamemoto, 2000)を適用する。この手法では、壁面近傍の速度分布より壁面上の速度勾配を求め、non-slip 条件を満足するように、一定渦度の渦パネルを壁面上の渦層内に設置する。渦要素の導入は、この薄い渦層内の渦度の移流と拡散を計算ステップごとに逐次計算することにより、渦層から流出する渦度を渦要素として流れ場に導入する。

一方、渦要素が渦度ベクトル方向へ急激な引き伸ばしを受ける場合には、その渦度は増加する。特に、壁面近傍では、速度勾配が大きく急激な伸張が起こる。このような領域では、渦要素間の相対距離が大きくなるため、空間解像度が悪化する。そこで、本研究では、渦度ベクトル方向への急激な引き伸ばしに対する渦要素再配置モデルを適用する。この手法においては、渦要素の変形量を各計算ステップごとに見積もり、その変形量に応じて、渦要素を再配置する。再配置される渦要素数  $n$  は、以下の式で決定される。

$$n = \text{floor} \left( \frac{l_t}{C \cdot 2\delta_t} \right) \quad (5)$$

ここで、 $l_t$  は時刻  $t$  における渦要素の長さ、 $\delta_t$  は渦核半径を示す。係数  $C$  は、再配置の精度を決定する指標であり、係数  $C$  が小さくなるにつれて、より小規模な渦要素で再配置されるため、空間解像度は高くなる。逆に、 $C$  の値が大きくなるにつれて空間解像度は悪くなり、再配置を行わない場合の解析に近づいていくことになる。再配置前後で総渦強度は保存され、再配置される要素に等しく配分される。このような局所的な渦要素再配置モデルを用いることで、速度変動が大きな領域においては、渦要素がより小スケールの渦要素へと再配置されるため、空間解像度を維持することが可能となる。また、局所的な速度変動に応じて渦要素スケールが決定されるため、速度変動の大きな領域にのみ小スケールの渦要素が導入され、効率の良い解析が可能となる。

上記の渦要素再配置モデルでは、引き伸ばし効果が大きい要素は、全て再配置されるため、局所的な変動が大きい領域においては渦要素が微小となり解析負荷が増大する。しかしながら、実際の乱流場では、渦構造同士が相互作用することで、より小さな渦が生成されるが、最終的には、kolmogorov スケールにおいて粘性によりエネルギーを失う。つまり、解析においても kolmogorov スケール以下の渦構造を解像する必要はなく、解析における最小渦要素スケールを設定することで、解析

を効率化できると考えられる。本研究では、渦要素消去モデルを適用した。Biot-Savart 法においては、任意の位置  $\mathbf{r}$  における速度は、渦要素からの誘起速度の和として計算される。つまり、任意の位置  $\mathbf{r}$  における速度勾配もまた、渦要素からの誘起速度の勾配の和として計算することができる。速度勾配から求めたひずみ速度テンソル  $S_{jk}$  を用いると、乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  は、以下のように求めることができる。

$$\varepsilon = 2\nu S_{jk} S_{jk} \quad (6)$$

本研究では、局所エネルギー散逸率が、 $\varepsilon \geq 300\nu^3$  の場合に渦要素を消去するとして解析を行った。

#### 4. 研究成果

本研究では、Durst らおよび Toondera らにより行われた円管乱流に関する実験データ(Durst et al., 1995, Toondera et al., 1997)と解析結果を比較することで、手法の検証を行った。解析条件は実験と同様な条件となるように設定した。バルク速度および円管直径に基づくレイノルズ数は、 $Re = U_b D / \nu = 10,000$  であり、摩擦速度および円管直径で換算した場合のレイノルズ数は、 $Re_\tau = U_\tau D / \nu = 620$  である。円管長さは、直径に対して  $L = 20D$  とした。円管は、Fig.1 に示すように、1,600 個の表面三角形格子を用いて表現している。時間刻みは、 $tU_b/D = 0.01$  とした。壁面近傍に設置した線形渦パネルの高さは、 $h/D = 0.001$  とした。本研究では、境界層の発達を解析するため、周期境界条件は用いず、入口境界に速度流入境界条件として一定速度分布を与え、出口境界には、自由流出境界条件を与えた。渦要素の再配置における係数  $C$  は、2.0 および 4.0 の二通りの解析を実施し、渦要素再配置モデルの有効性を検証する。さらに、局所的なエネルギー散逸率を見積もり、その値に応じて渦要素を消去する手法(Fukuda and Kamemoto, 2005)を導入し、その効果についても検討を行った。

Fig.2 は、 $C = 2.0$  の条件で解析した、円管の長さ方向中間部付近の渦要素分布を示しており、流れが層流から乱流へと遷移していく様子が捉えられている。また、 $C = 4.0$  の結果を示した Fig.3 に比べ、速度ひずみが大きな領域により小さい要素が導入されており、空間解像度が高くなっていることが確認できる。Fig.4 は、 $C = 2.0$  の条件で解析された平均流速分布の解析値を示している。図から、解析結果と実験データに良好な一致が見られることが確認できる。一方、 $C = 4.0$  の結果を示した Fig.5 においては、壁面からの距離が大きくなるにつれて、実験値との差異が大きくなっており、壁面近傍での空間解像度が十分ではないため、乱流境界層における渦構造の混合作用が再現されず、速度が上昇しているこ

とが伺える。さらに、流れ方向の速度変動量を示した、Fig.6 および Fig.7 においても、 $C=2.0$  の条件においては、ピーク値が  $Y^+$  の大きな方向に若干移動している様子が捉えられているが、実験値と近い値を示しているのに対して、 $C=4.0$  の結果では、差異が大きくなっている。さらに、渦要素消去モデルの導入により解析精度を維持したまま、計算負荷が低減できることも確認した。

この結果から、今回の解析で用いた表面格子の解像度は、円管内部流れにおける乱流境界層の解像には、十分なものではないと考えられるが、渦要素再配置モデルを導入し、係数  $C$  を小さく設定した場合には、速度ひずみが大きな領域における空間解像度が高められた結果、実験値に近い値を示すことが可能となったと考えられる。

さらに、本研究では、解析時間を低減するため、Graphics Processing Unit (GPU) による高速化も実施し、倍精度で CPU 演算 (Intel Xeon X5550 を使用) に比べ約 20 倍 (NVIDIA Tesla C1060 を使用) の高速化に成功している。また、局所的な速度変動に応じて、時間ステップを変化させる手法を導入した場合においても、従来よりも短い解析時間で、精度を維持した解析が可能となることが確認された。

このように、本研究を通して構築された乱流渦構造の変形、消散を模擬したモデルを導入したメッシュフリー型の乱流シミュレーション手法は、渦構造の変形に基づき局所的な離散スケールが自動的に調整されるため、速度ひずみが大きな領域においては、高い空間解像度が実現でき、高精度な解析が可能となる。また、GPU の利用や局所的に時間ステップを変化させる手法の導入により、解析時間を低減できるだけでなく、許容歪み量を設定することで解析前に空間解像度を定量的に規定することが可能なことから、概念設計から詳細な流体特性の把握に至る様々な規模の解析を選択的に行う必要のある実際の設計・開発においては、有効な手法となると考えられる。



Fig. 1 Surface triangles.



Fig. 2 Vortex element distribution at the half length of the pipe. ( $C=2.0$ , color: vorticity strength)



Fig. 3 Vortex element distribution at the half length of the pipe. ( $C=4.0$ , color: vorticity strength)

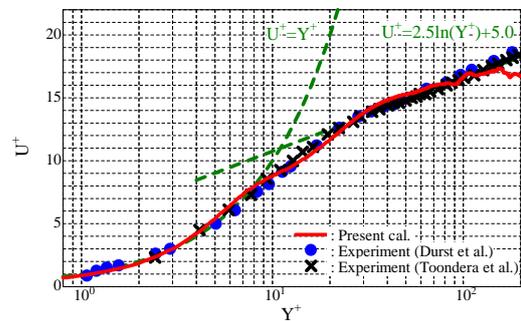


Fig. 4 Mean velocity profile. ( $C=2.0$ )

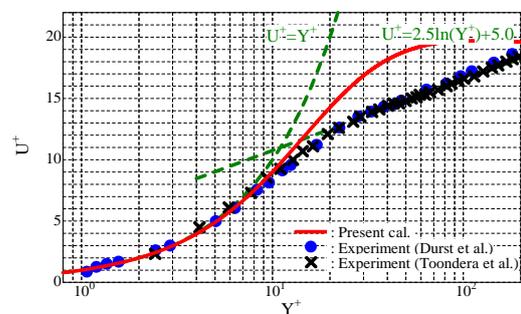


Fig. 5 Mean velocity profile. ( $C=4.0$ )

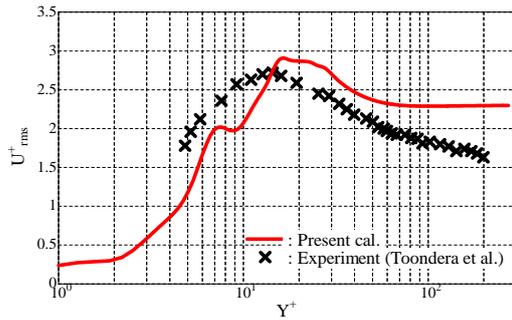


Fig. 6 RMS value of axial velocity fluctuation.  
( $C=2.0$ )

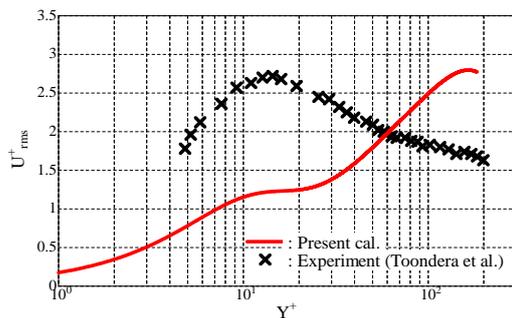


Fig. 7 RMS value of axial velocity fluctuation.  
( $C=4.0$ )

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① Kota Fukuda, Grid-Free Simulation of Turbulent Pipe Flow using a GPU-Accelerated Vortex Method, Proc. of the 7th International Conference on Flow Dynamics, GS-1-33, 2010年11月2日, 仙台.
- ② Kota Fukuda, Numerical Simulation of Turbulent Internal Flows by a Grid-Free Vortex Method, Proc. of 5th International Conference of Vortex Flows and Vortex Models, P43, 2010年11月9日, イタリア, ナポリ.
- ③ 福田紘大, 渦法による円管内乱流の数値解析, 第24回数値流体力学シンポジウム, F2-4, 2010年12月20日, 東京.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 紘大 (KOTA FUKUDA)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：60401684