

# 風にはためくハンガーにかかった 衣服の空力シミュレーション

## Aerodynamic Simulation of Wind-Fluttering Clothes on Hanger

TAN HONG GUAN<sup>1)</sup>, 青木尊之<sup>2)</sup>, 渡辺勢也<sup>3)</sup>, 岩田真明<sup>4)</sup>

Hong Guan Tan, Takayuki Aoki, Seiya Watanabe and Masaaki Iwata

1) 東京工業大学大学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1, E-mail: hgtan@sim.gsic.titech.ac.jp)

2) 東京工業大学 学術国際情報センター (E-mail: taoki@gsic.titech.ac.jp)

3) 九州大学 応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, E-mail: swatanabe@riam.kyushu-u.ac.jp)

4) 株式会社ゴールドウイン (〒932-0193 富山県小矢部市清沢210)

A simulation of fluid-structure interaction for fabric deformation and complex fluid flow has been computed and studied on multi-GPU of supercomputer. While there has been extensive research on the drag forces and fabric deformation caused by high Reynolds number flows on various objects, a cloth connected to object will experience different drag forces. Clothing, being a flexible structure, cannot be easily represented by structured grids, necessitating the use of unstructured grid models for deformation simulations. We perform fluid-structure interaction computation based on the direct-forcing immersed boundary method and cumulant lattice Boltzmann method. We utilize adaptive mesh refinement method in fluid computation in order to save computation memory and to compute effectively. In this study, we also utilize collision detection between fabric particles to simulate realistic clothing deformation.

**Key Words :** LBM, FSI, DEM, Clothing Deformation

### 1. はじめに

流体構造連成問題は工学的に非常に重要であり、多くの研究者たちによってそのメカニズムの解明が行われてきた。高レイノルズ数の流れが物体に働く抗力は従来から多くの研究があるが、布のような柔軟な構造物は空力と複雑な流体構造連成を行うため、物体に布が纏わることで物体の受ける抗力は大きく増大する。また、構造格子の布モデルで変形計算が行われているが、服は規則的な構造ではなく、非構造格子のモデルを用いて変形シミュレーションを行うことが必要となる。

格子ボルツマン法は弱圧縮性解法の一つであり、メモリアクセスの局所性が高く、完全陽解法であるため並列化・大規模化に適した計算手法である。本研究で用いる Cumulant 衝突項は乱流 Large Eddy Simulation (LES) に適した陰的渦粘性を導入するため、空力解析に多くの実績がある。また、物体をラグランジュ的な点群として扱う Direct-forcing 埋め込み境界法を導入した格子ボルツマン法 (IB-LBM) は、流体構造連成のシミュレーションに適している。Jiang らは体積力を反復的に計算する Multi direct-forcing 埋め込み境界法を用いた連成手法を提案している[1]。

本研究では Direct-forcing 埋め込み境界法型格子ボルツマン法を用いて、ハンガーにかかった衣服に対して数値シミュレーションによる空力特性を解析し、はためく衣服と高レイノルズ数の流れとの相互作用を明らかにすることを目的とする。物体や渦の近傍には高い格子解像

度が求められるため、格子細分化により高解像度格子を動的割当て、遠方では解像度を粗くする Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法を導入している[2]。これにより、省メモリかつ高効率に計算を行うことができる。また、実現象に近い計算結果を得るために Discrete Element Method (DEM) を用いて衣服の粒子同士の衝突判定を行う。

### 2. 計算手法

#### (1) 衣服の物理モデル

布モデルは非構造格子で構成されて、質点バネモデル (Mass-Spring Model) が用いられ、ポリゴンの頂点をそれぞれ布の質量が集中した質点群として近似し、質量の持たないバネで接続したものである。図 2.1 のように、Provot の手法[3]を参考し、質点間をつなぐバネは構造バネとせん断バネの 2 種類をまとめたものである。構造バネは、布としての形を維持しようとするバネである。せん断バネは、布をせん断方向に引っ張ろうとする力に対抗するバネである。

#### (2) Adaptive Mesh Refinement 法

高い格子解像度が必要な領域は物体や渦近傍であり、全計算領域に対して高解像度の格子を割り当てる計算は非効率的である。AMR 法を採用することにより、計算メモリが有効的に活用され、計算効率が上がる。

本稿では、図 2.2 に示したような木構造アルゴリズムに従う AMR 法を使用する。格子間隔を 1/2, 1/4, 1/8 … と再帰的に分割することにより、任意の局所空間に任意の格子解像度を割り当てる。流体計算が行われるのは末

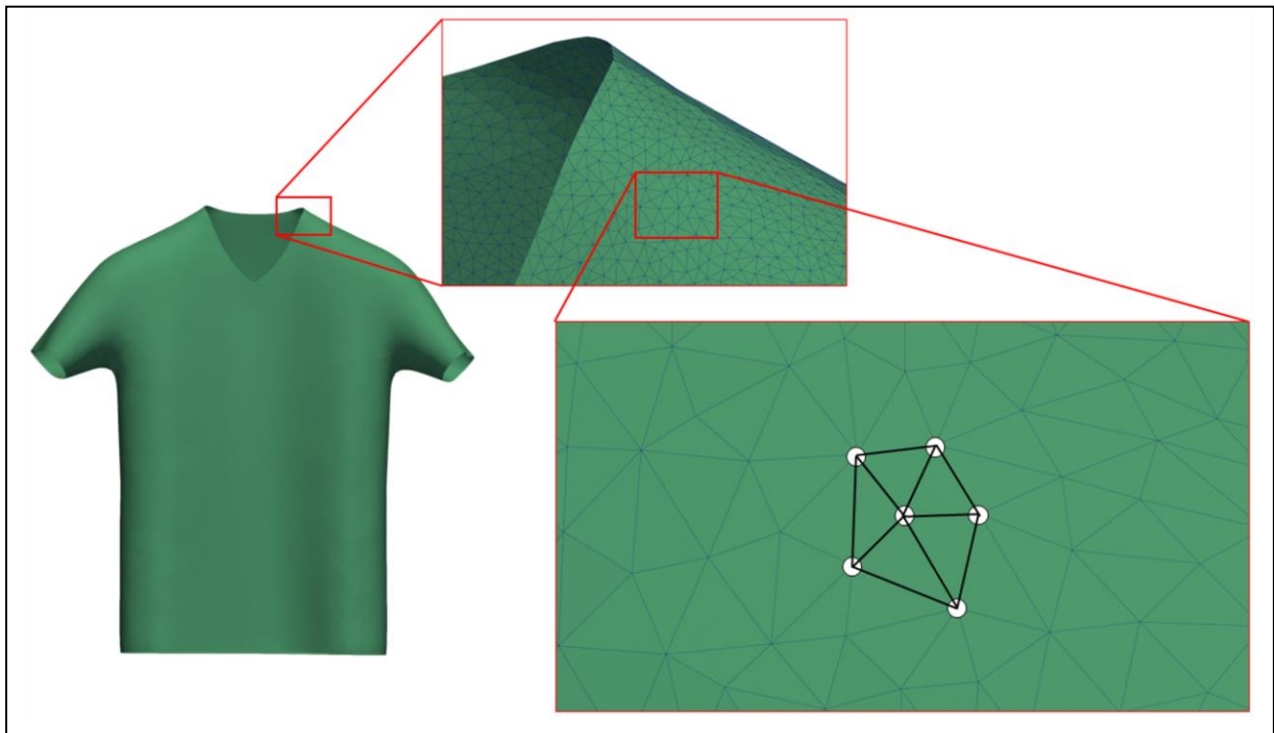


図-2.1 衣服を構成する非構造格子の物理モデル

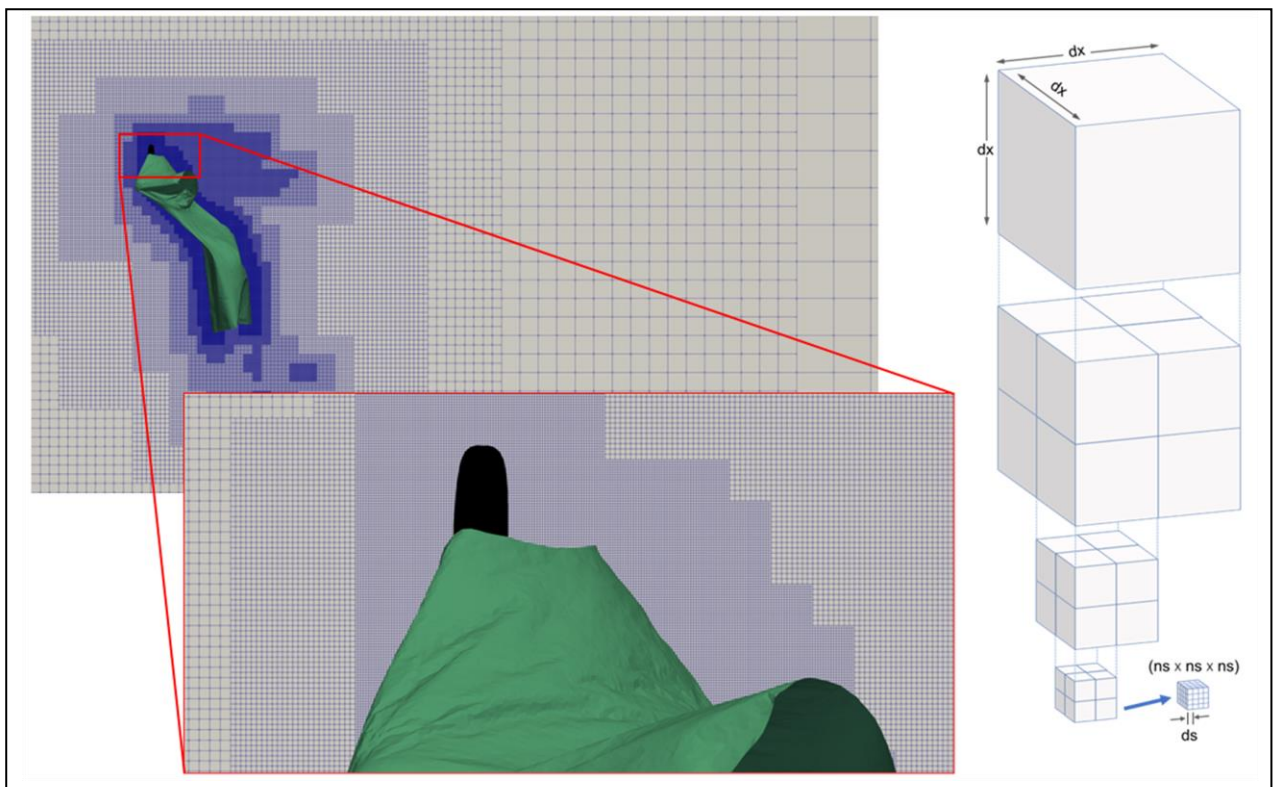


図-2.2 AMR 法の導入による計算領域の分割

端のリーフと呼ばれる部分で、三次元の場合には 1 つのリーフに対応する領域が細分化されると、8 つのリーフが生成される八分木のデータ構造になる。また、複数台の GPU で効率よく計算を行うため、空間充填曲線を用いて計算領域を一次元空間にマッピングし、各 GPU で計算するリーフ数が同程度になるよう曲線を切断することで、三次元的に計算領域を動的に分割している。

### (3) Direct-forcing 埋め込み境界法

Direct-forcing 埋め込み境界法は直交座標系で複雑形状物体を扱う際に有効な手法であり、物体を構成するラグランジュ的なマーカーに対し、non-slip 条件を満たすような体積力を計算し、周囲の流体に分散させて、物体と流体の相互作用を表現する。本稿では体積力の計算を反復的に行うことで non-slip 条件を精度良く満たすことができる Multi direct-forcing method (MDFM) を採用した。ラグランジャンマーカーは 3D モデルポリゴン平面上に等間隔に設置する。

$b$  番目のマーカー  $\mathbf{X}_b$  に対し、マーカー上での流速  $\mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t)$  は式 (2.1) のように表される。

$$\mathbf{u}^{(m)}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \frac{\Delta t}{2\rho} \mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t)$$

$$\mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t) = \sum_{\mathbf{x}} \mathbf{u}^{(m)}(\mathbf{x}, t) D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b) \Delta x^3 \quad (2.1)$$

ここで、 $m$  を反復計算のステップ数、 $\rho$  と  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  を格子ボルツマン法で計算される密度および流速、 $\mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t)$  を前ステップの格子点での体積力とする。 $D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b)$  は重み関数で、離散化されたディラックのデルタ関数  $\delta r$  が用いられる。マーカー上での体積力は式 (2.2) のように計算されて、式 (2.3) のように重み関数を用いてマーカーから流体へ体積力の分散を行う。

$$\mathbf{F}_b^{(m)} = 2\rho_0 \frac{\mathbf{U}^d - \mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{f}^{(m)}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t) + \sum_b \mathbf{F}_b^{(m)} D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b) \Delta V_b \quad (2.3)$$

ここで、 $\mathbf{U}^d$  を境界の速度、 $\rho_0$  を初期状態の流体の密度、 $\Delta V_b$  はマーカーの検査体積とする。

## 3. 計算条件

### (1) 流体の条件設定

計算領域は  $16.4 \text{ m} \times 8.2 \text{ m} \times 8.2 \text{ m}$ 、格子幅は物体近傍で  $1.0 \text{ mm}$ 、遠方  $128.0 \text{ mm}$  とする。境界条件について、前方および四方の壁に流入境界条件、後方の壁に流出境界条件を適用した。流体は常温の空気を想定し、初期状態での密度  $\rho_f$  を  $1.205 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度  $\nu$  を  $1.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  とする。流入流速  $U_{\text{in}}$  は一様流で計算を行う。

### (2) 物体及び布モデルの計算条件

本研究に使用されるハンガーは図 3.1 のような形状を持ち、サイズが最大  $0.432 \text{ m} \times 0.153 \text{ m}$  とする。衣服

は非構造格子のモデルで構成され、質量は  $0.2 \text{ kg}$  とし、サイズは最大  $0.71 \text{ m} \times 0.72 \text{ m}$  とする。質点バネモデルにおける構造バネ及びせん断バネは同じばね係数を持つことにし、 $2000 \text{ N/m}$  とする。

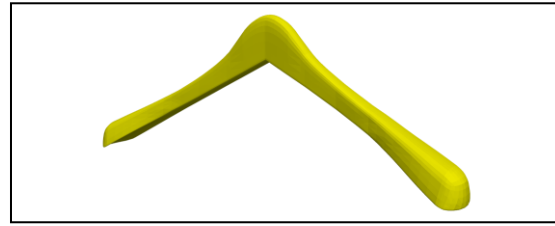


図-3.1 ハンガーの形状

## 4. 計算結果

### (1) 服の自由落下の計算

ハンガーを固定して、衣服の襟をハンガーより上に置かせ、重力を働かせる計算を行った。計算には 8 台の GPU (NVIDIA Tesla V100) を使用した。物理時間を  $4.451 \text{ s}$  進めるのに、19 時間ほどの計算時間を要した。

図 4.1 に示したように、衣服は重力により落下し、ハンガーに掛かることになった。

### (2) 風にはためくハンガーにかかった衣服の計算

固定されているハンガーにかかった衣服に対し、前方から  $3.0 \text{ m/s}$  の一様流で計算を行った。レイノルズ数  $Re$  は  $1.4087 \times 10^5$  となる。計算には 8 台の GPU (NVIDIA Tesla V100) を使用した。物理時間を  $4.267 \text{ s}$  進めるのに、24.9 時間ほどの計算時間を要した。

図 4.2 は衣服の変形を示している。ハンガーにかかった衣服は風により吹き上げ、しばらく経つと力が釣り合った状態になった。

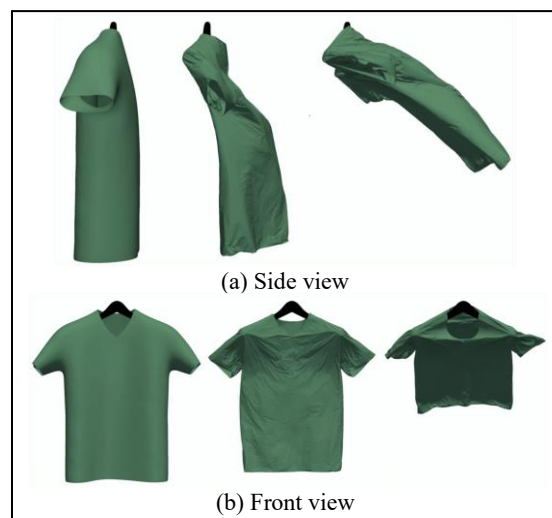


図-4.2 5.0 m/s 風における衣服の変形

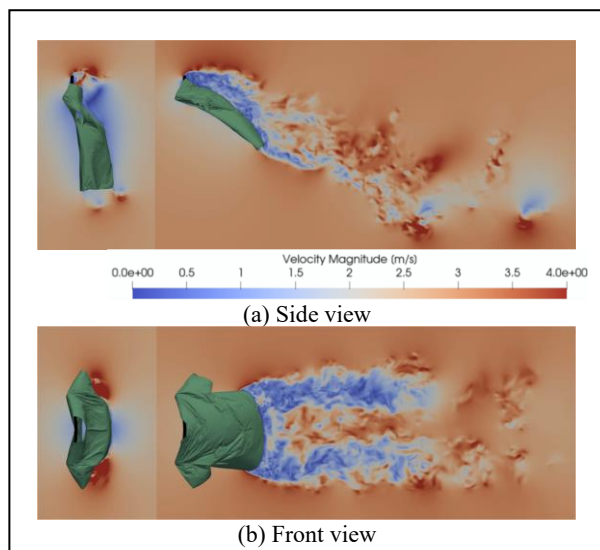


図-4.3 ハンガーにかかった衣服周りの流速分布  
図 4.3 は流速分布を示している。流れにはダウンウォ

ッシュが見られ、一様流が変形した衣服の形状に沿って下に流れていくことが見られる。図 4.4 と図 4.5 はそれぞれハンガーにかかった衣服周り及び後流域における渦構造の側面と平面を示している。力が釣り合った状態の際に、後流域において衣服の両幅から内側に巻いていく渦流が見られ、翼端渦に似た特徴的な縦渦が見られる。この縦渦がダウンウォッシュになる一因であることが言える。

## 5. まとめ

AMR 法を導入したキュムラント格子ボルツマン法によるハンガーにかかった衣服の流体構造連成シミュレーションを実施した。衣服の変形は後流渦に影響されることが得られた。流体は変形した衣服の形状に沿って流れていき、ダウンウォッシュが見られた。衣服のような規則的な構造ではないものは、非構造格子の布モデルを用いて変形シミュレーションを行うことができた。

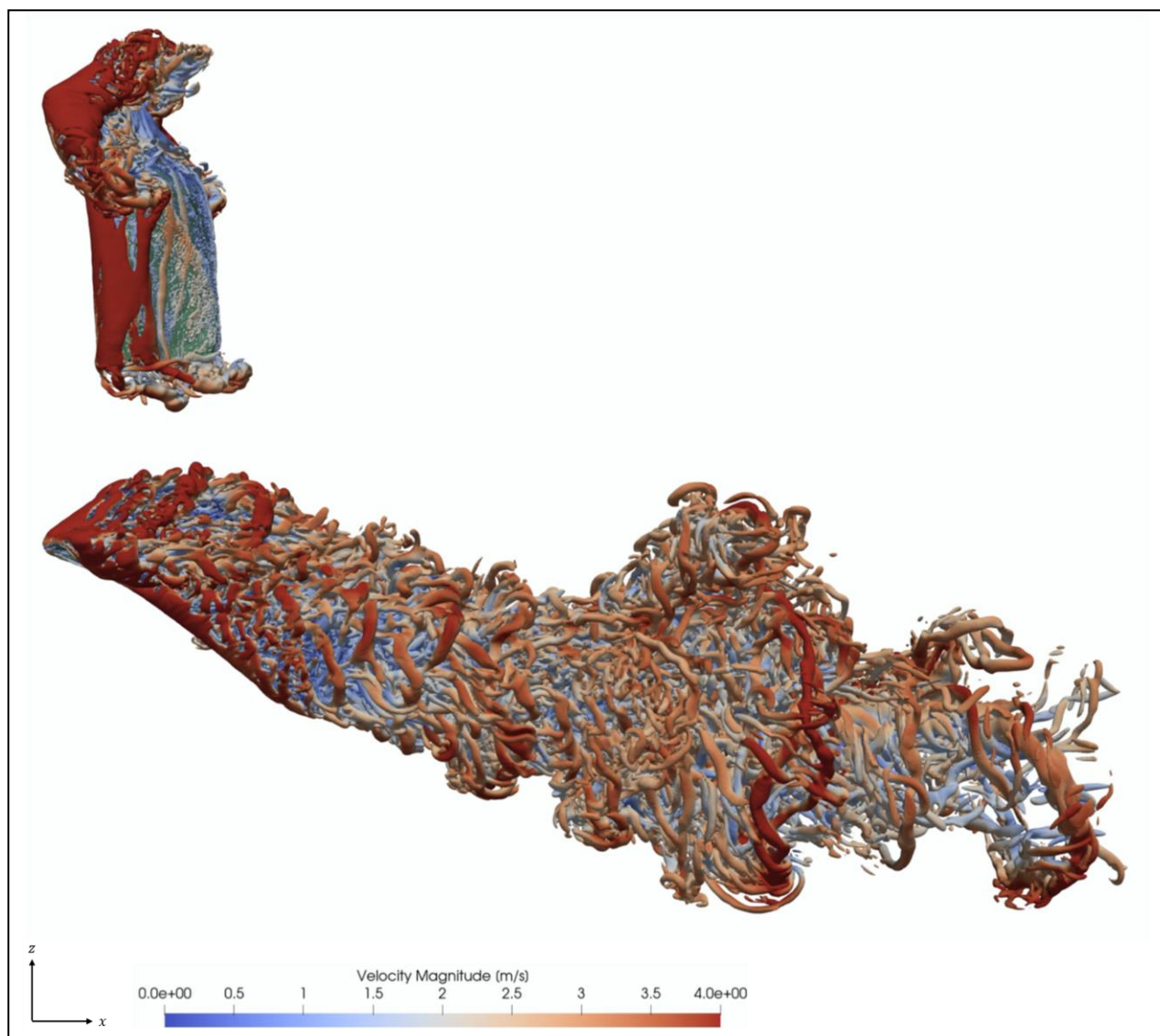


図-4.4 ハンガーにかかった衣服周り及び後流域における渦構造の側面

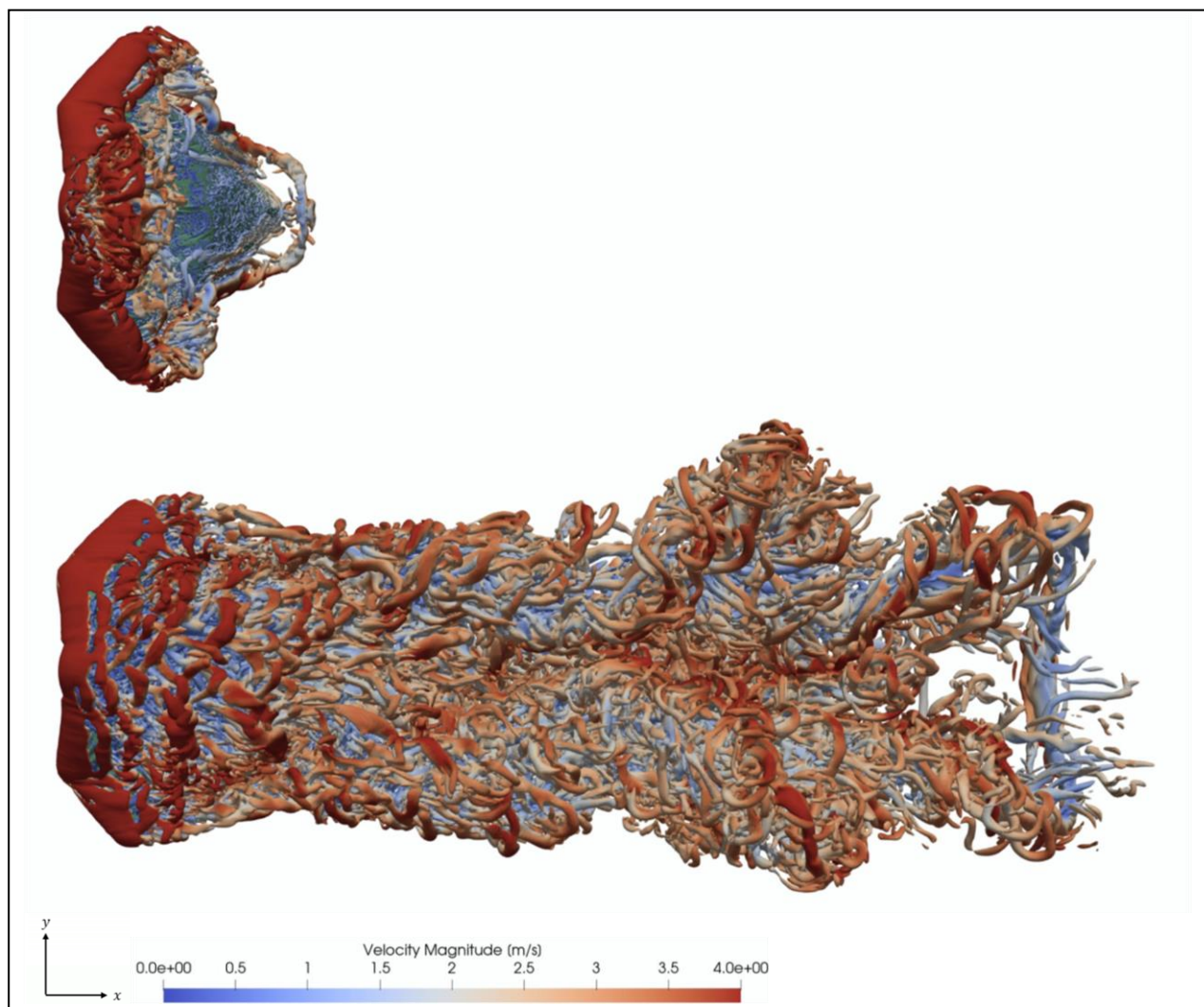


図-4.5 ハンガーにかかった衣服周り及び後流域における渦構造の平面

#### 謝辞

本研究は、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）の一般課題 hp230065「革新的スポーツ空力解析」として進めた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(S) 課題番号 19H05613 および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）の共同研究課題 jh22042「人と衣服と気流の連成相互作用シミュレーション・フレームワークの構築」から一部支援を頂いた。本研究の計算には、名古屋大学・情報基盤センター「不老」Type-II サブシステムを利用させて頂いた。

#### 参考文献

- [1] Jiang, F. et al.: A gpu-accelerated fluid-structure-interaction solver developed by coupling finite element and lattice Boltzmann methods, *Computer Physics Communications*, Vol.259, pp.107661, 2021.
- [2] 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太: 動的AMR法を導入した格子ボルツマン法の複数GPUによる大規模計算,

計算力学講演会講演論文集, Vol.31, pp.214, 2018.

- [3] Provot, X.: Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour, *Proceedings of Graphics Interface '95*, pp.147-154, 1995.