

jh220042

青木尊之 (東京工業大学 学術国際情報センター)

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



研究背景と目的

人間の基本的な活動における「衣服と気流と運動の相互作用」を明らかにする。衣服は外気温に対して人の体温を保つ機能をもつ生活用品として必須であるが、人の様々な部分が動くことにより衣服と体表面の間にできる空間の気流により熱と水蒸気（湿度）が輸送される。また、衣服は容易に変形するため、外部の気流と衣服の相互作用も人間行動に影響する。人は多くの可動部を持ち、その動きと内外の気流に応じて衣服は変形する。衣服には様々な素材の生地があり、それをモデル化した布でできたパーツをつなぎ合わせ、衣服のモデルを作成し、それを纏らせる。人の様々な部分を動かして、それに伴う衣服と気流の相互作用シミュレーションを行う。さらに体表面と気流の熱交換と水蒸気の輸送を加えた流体構造連成シミュレーションのフレームワークを構築する。研究の進展に応じて、重ね着に対してもシミュレーションが可能になることを目指す。また、スポーツにおいては、人がさらに激しく動くために衣服の内部と外部の気流が乱流となり、高解像度計算が必要となる。

本研究は、衣服という最も基本的な生活用品に対し、人の動きに対する機能を明らかにするためのヒューマンセントリックな気流と構造変形の連成シミュレーション・フレームワークの構築であり、Society 5.0に資する研究課題と言える。

研究計画

東京大学情報基盤センターの NVIDIA A100 を搭載するGPU スパコンWisteria-A を利用する。流体構造連成問題は、流体側にとっては固体の移動境界を含む流れの問題であり、固体側にとっては流体から受ける力（主に圧力）による構造変形の問題である。本研究課題には、布という固体と人間という固体の2種類が含まれるが、人間の動きは与えられるものと仮定し、それにより布は伸びたり折れ曲がったりシワができることで体表面と布の間の空間の形状が大きく変化する。今年度は、気流により変形するのは布のみとする。流体のLES (Large-Eddy Simulation) 計算は高精度で乱流計算が可能なCumulant衝突モデルに基づいた格子ボルツマン法を用いる。Octreeアルゴリズムに基づき、固体表面近傍及び乱流強度の高い領域に高解像度格子を動的に配置する。また、複数GPUで計算するために、空間充填曲線を用いた動的領域分割を行う。

(1) 固体のモデル化の検証

- 変形（動く）人体のモデル化（時系列ポリゴン（STLデータ））
- 布のモデル化（バネ・質点モデル）
- 衣服のモデル化（平面状の布の連結：衣服としての特性の表現）

(2) 布が巻き付いた円柱と風の連成シミュレーション

- 布がたなびくことによる円柱にかかる抗力増加の確認

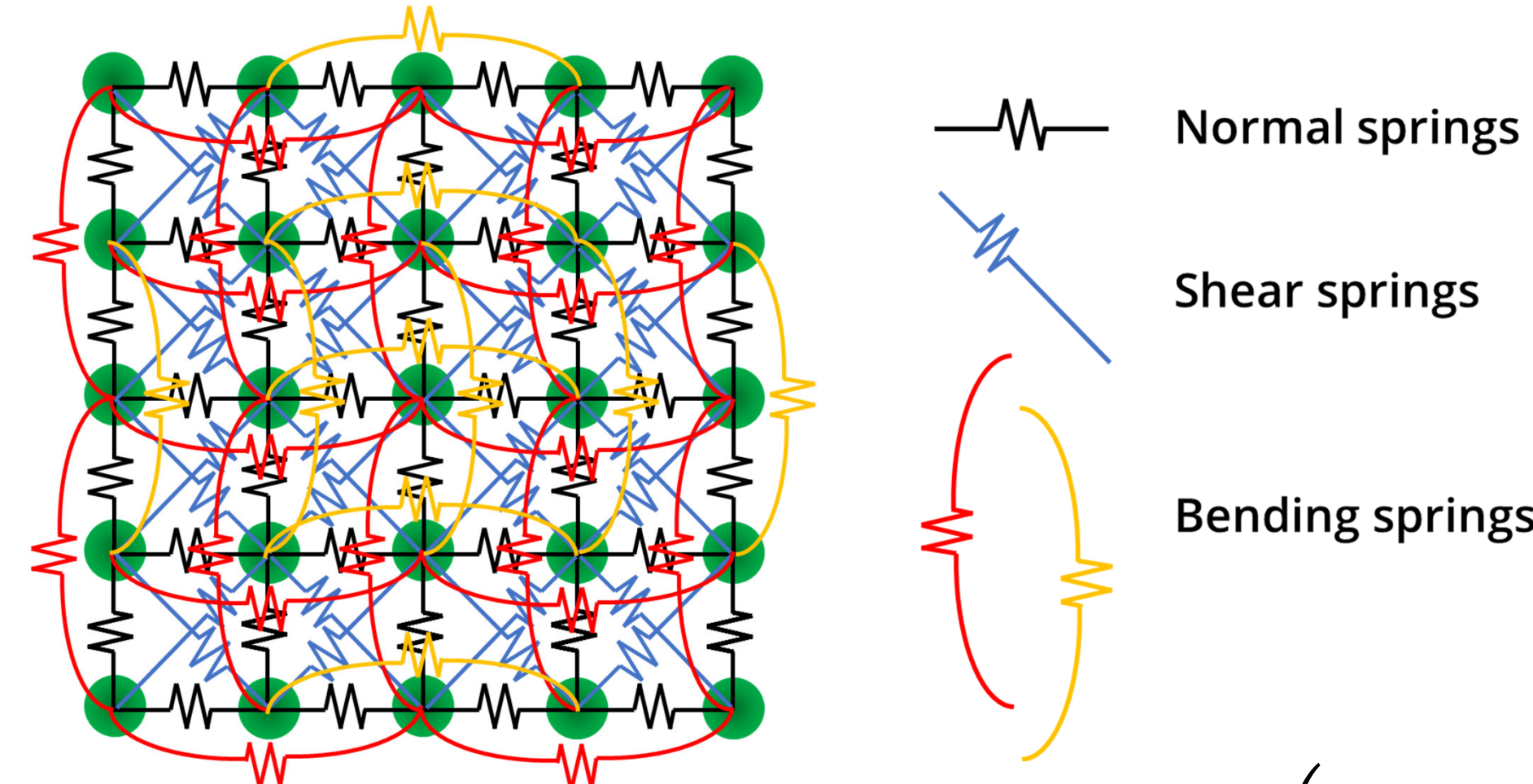
(3) 気流と布と体の運動の連成シミュレーション

- 様々な衣服を着てランニングした際の衣服内部に入り込む気流及び人が風から受ける抗力の評価。多様な生地の衣服と衣服形状に対する内部の気流の詳細な可視化。

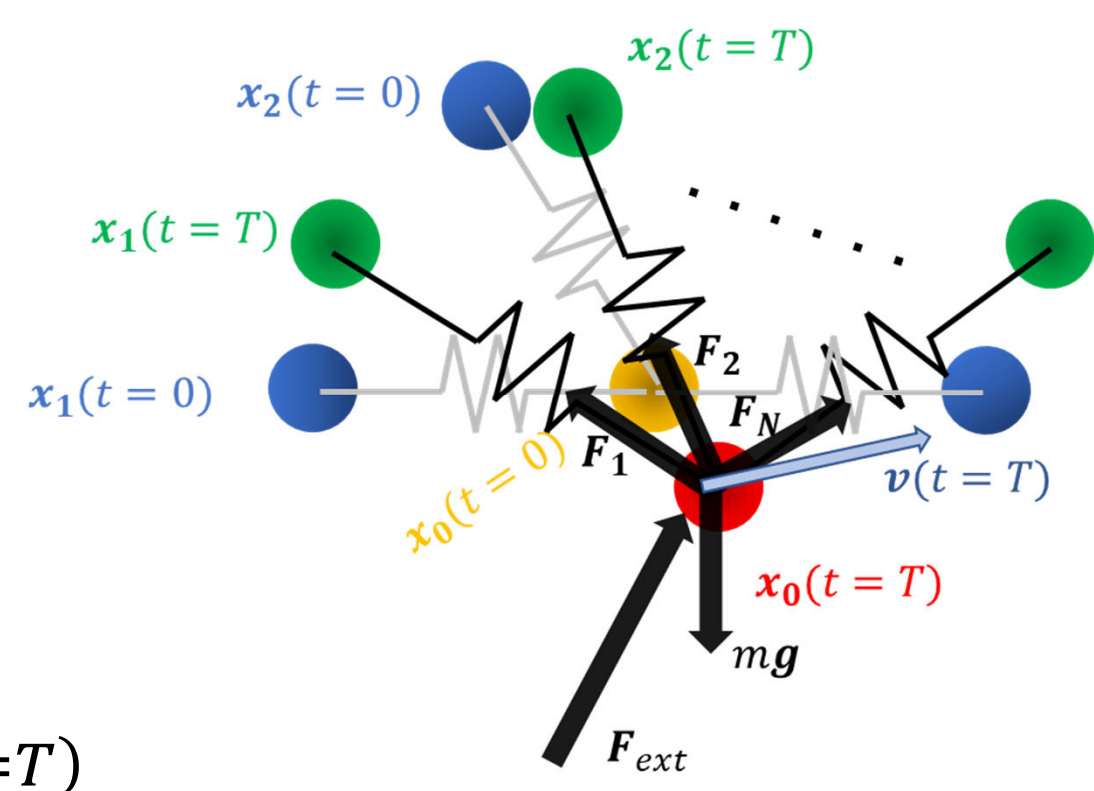
(4) 熱および水蒸気輸送の考慮

- 有限体積法で熱輸送方程式を計算し、体表面温度と衣服内部に入り込む気流の温度や保温効果の評価。水蒸気の輸送も検証。

布のモデル化：バネ・質点モデル

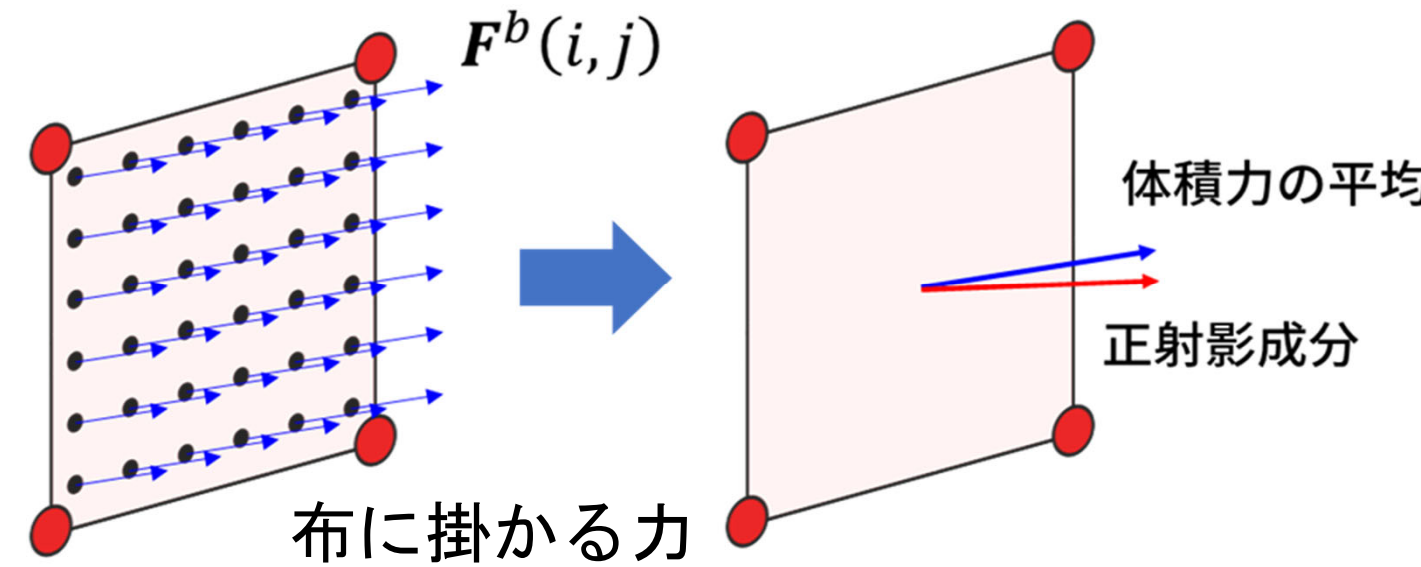
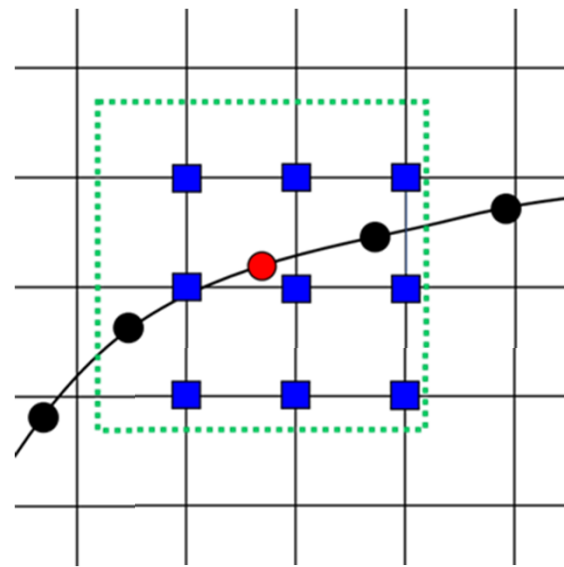


$$F_i = k(|x_i - x_0|_{(t=0)} - |x_i - x_0|_{(t=T)}) \left(\frac{x_i - x_0}{|x_i - x_0|} \right)_{(t=T)}$$

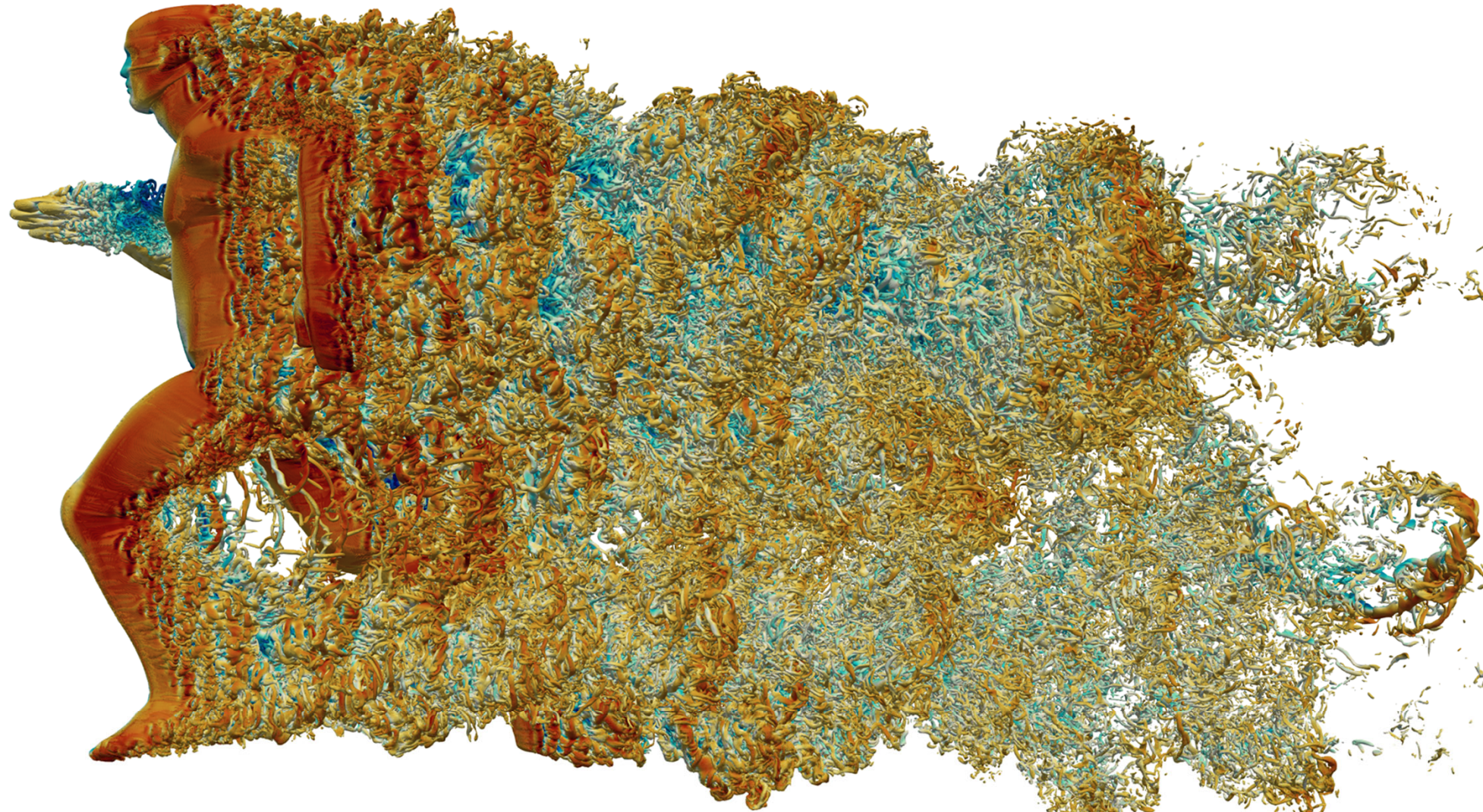
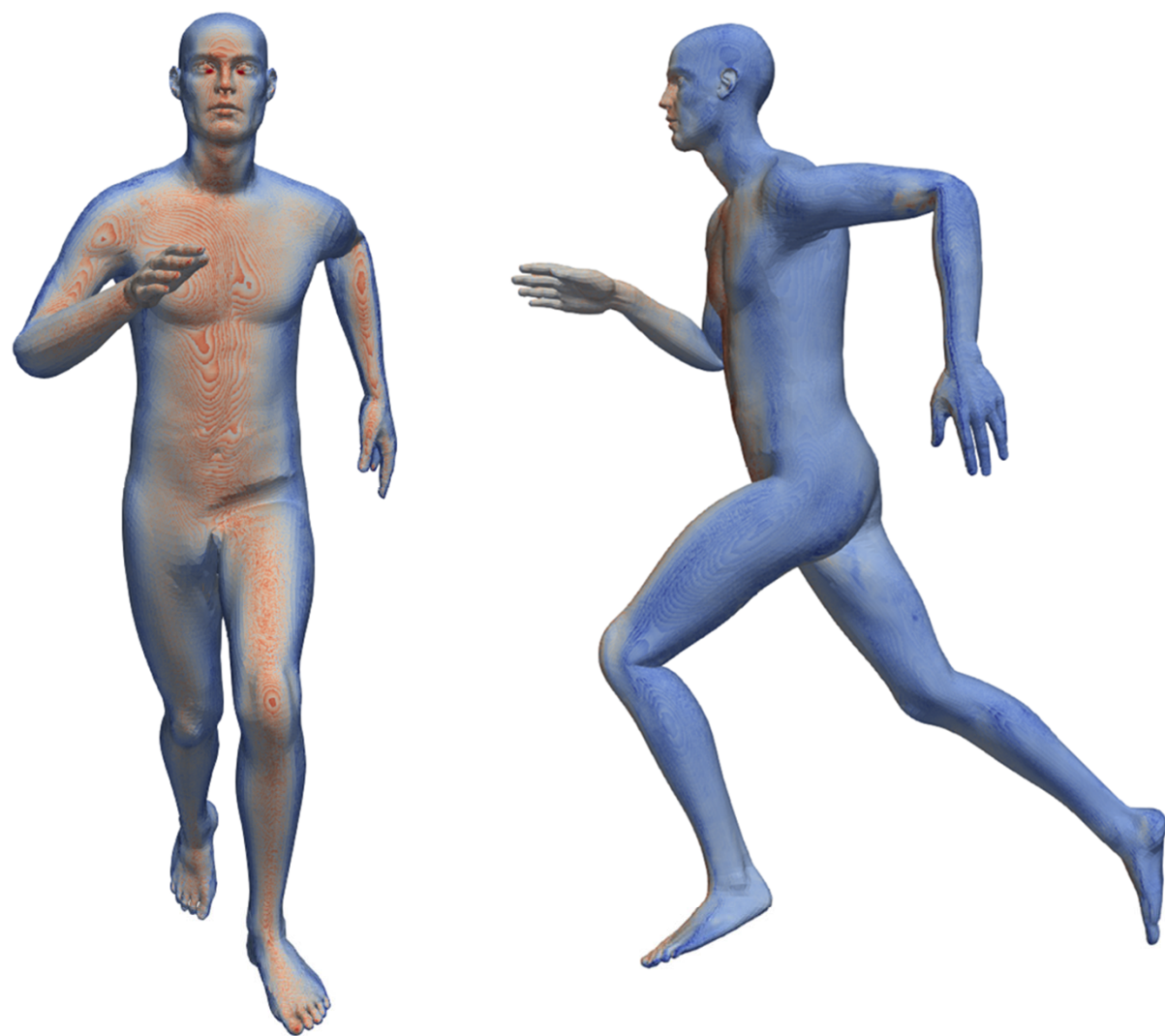
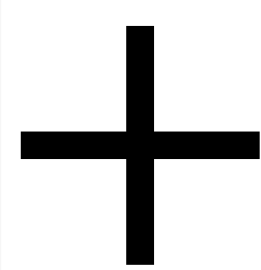


流体構造連成

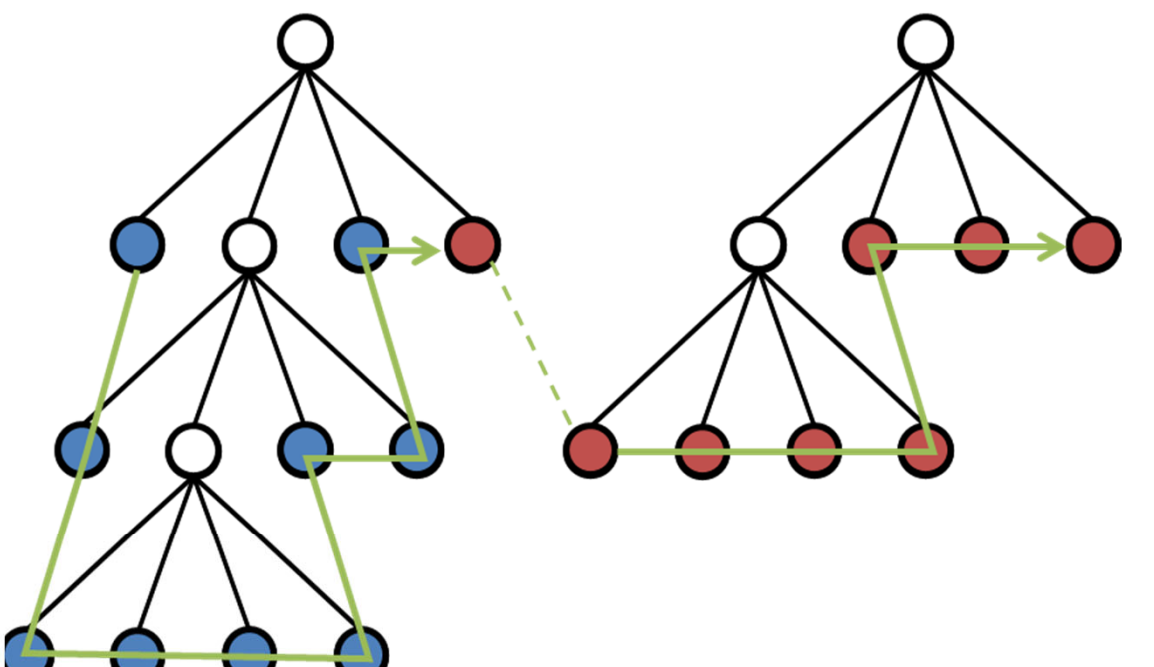
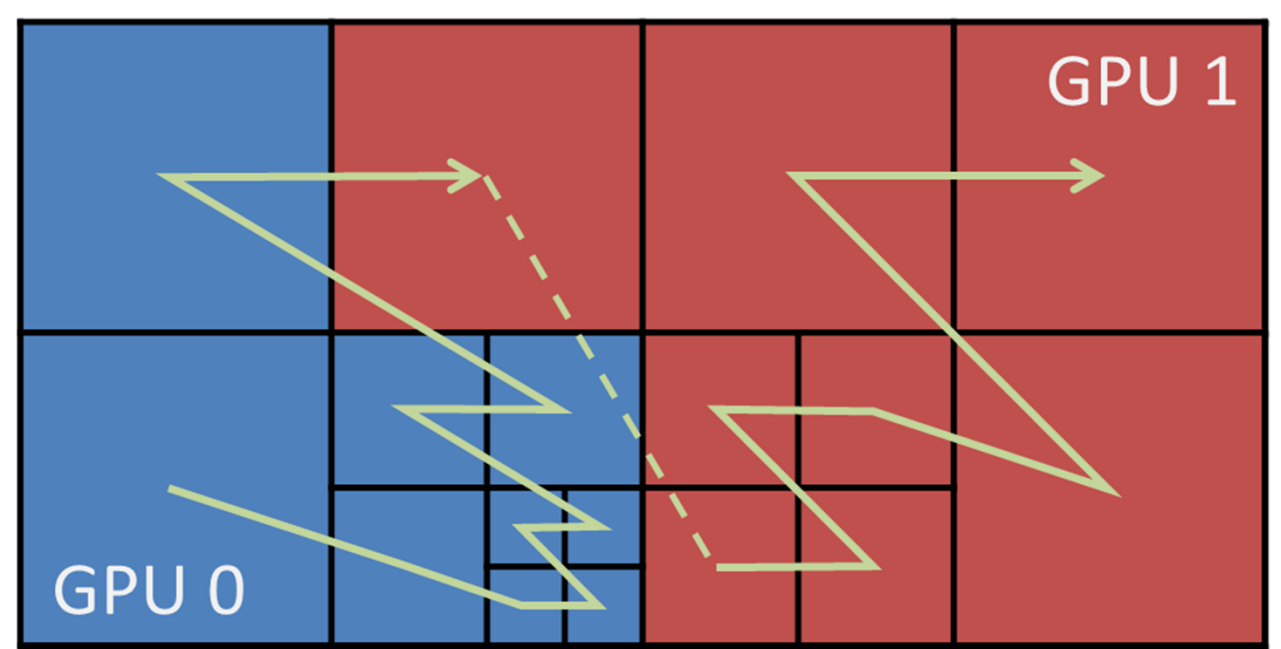
流体側は移動境界問題となり、Direct Forcing Immersed Boundary 法



旗の激しいはためきのシミュレーション (2020)



空間充填曲線に基づいた動的領域分割



研究の意義

人の動きを考慮した衣服内部の気流を予測するシミュレーションは今までに行われていない。人が激しく動くスポーツにおいては、スポーツウェアの機能は動き易さだけでなく、衣服の内部の気流も非常に重要であり、これが明らかになることでスポーツウェアは大きく進化できる。一方、スキージャンプ競技など、外部の気流によりたなびくウェアは抗力を大幅に増加させるため、その効果を定量的に示すことができればスポーツ競技への貢献も可能になる。



研究グループ

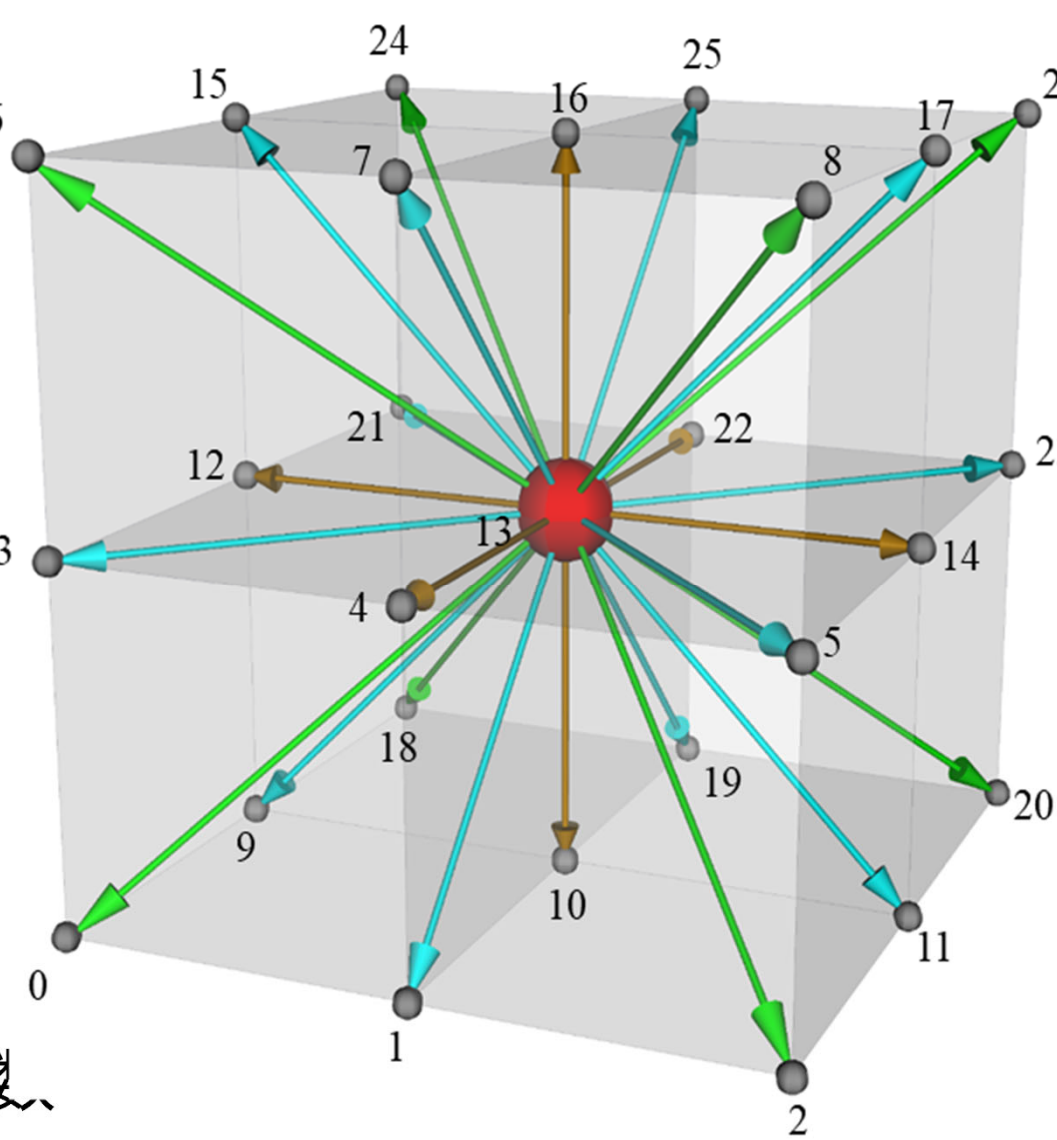
代表者	青木 尊之	(東京工業大学)
副代表者	小林 宏充	(慶應義塾大学)
共同研究者	渡辺 勢也	(九州大学)
共同研究者	山辺 芳	(国立スポーツ科学センター)
共同研究者	長谷川 雄太	(日本原子力研究開発機構)
共同研究者	Yos Sitompul	(東京工業大学)
共同研究者	Kai Yang	(東京工業大学)
共同研究者	Shen Dawei	(東京工業大学)
共同研究者	インイクイ	(東京工業大学)
共同研究者	松下 真太郎	(東京工業大学)
共同研究者	LIAN Tongda	(東京工業大学)
共同研究者	玉置 優真	(東京工業大学)
共同研究者	北川大敦	(東京工業大学)
共同研究者	三好 健斗	(東京工業大学)
共同研究者	山崎 旭	(東京工業大学)

流体計算

単相の空力解析で複雑形状の流れに対して安定・高精度計算可能・Cumulant 衝突項のLBM (格子ボルツマン)法 (D3Q27モデル)

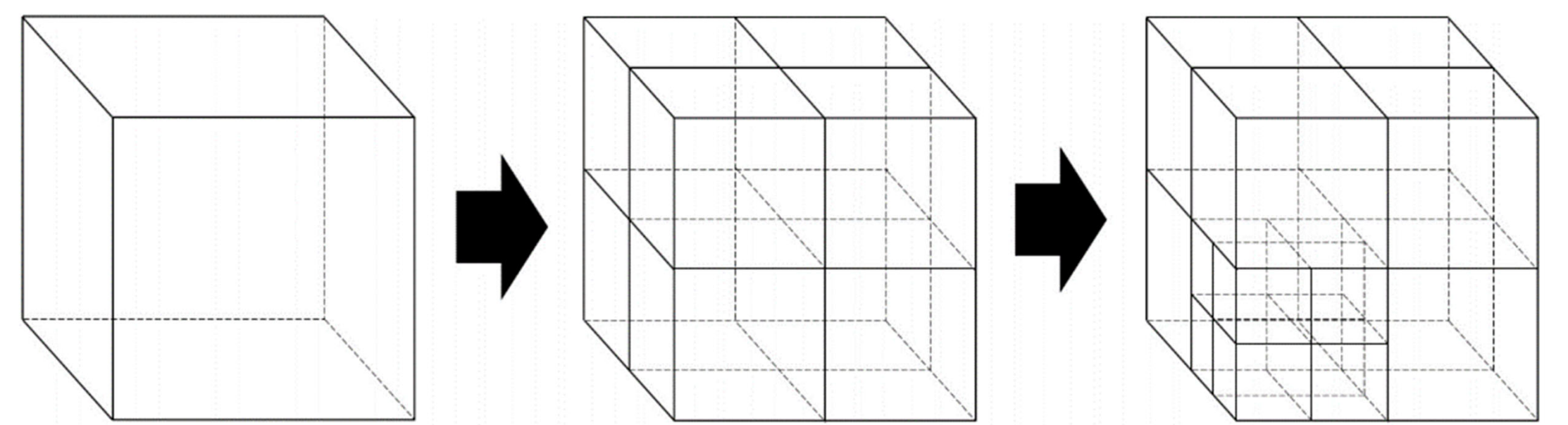
f : 速度分布関数
 ijk : 速度分布関数の方向
 ξ_{ijk} : 速度分布関数の速度
 τ : 緩和係数
 f^{eq} : 局所平衡状態の分布関数

$$f_{ijk}(x + \xi_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = \frac{1}{\tau} f_{ijk}^{eq}(x, y, z, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_{ijk}(x, y, z, t)$$



Octree-based AMR 法

物体表面近傍に高解像度格子を動的に割当て、効率的に高精度計算を実行する。



リーフの増減に対し、cudaMalloc() を頻繁に使えないため、各GPUでlocalにmemory poolを用意して管理