

jh220042

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

青木 尊之 (東京工業大学)

概要

人の基本行動の一つであるランニングに対し、衣服を身に着け周囲の気流との相互作用まで考慮したシミュレーションを行うためのフレームワーク構築を目指す。第一段階として、ランニング動作をモーション・キャプチャで取得したデータでアバターを動かし、3次元時系列のポリゴン・モデルを生成した。格子ボルツマン法と埋め込み境界法を用いて空力解析を行った。また、衣服と体との相互作用シミュレーションを行う前段階として、布の巻き付いた円柱の空力解析を行った。布はバネと質点で構成されるモデルを用い、引っ張り、せん断、曲げのバネ定数を調節することで様々な特性の布に対応することができる。布が円柱に巻き付きはためくことで円柱が受ける抗力が大きく増加し変動する妥当な結果が得られた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

青木 尊之 (東工大): 研究総括およびフレームワーク全体構想と計算手法から GPU 実装に至る詳細な指示

小林 宏充 (慶應大): 乱流解析

渡辺 勢也 (九大): LBM コード開発

山辺 芳 (国立スポーツ科学センター):

スポーツ科学の観点からアドバイス

長谷川 雄太 (JAEA):

LBM コード・チューニング

Marlon Arce Acuna (東工大):

NV-Link 利用時の性能評価

Yos Sitompul Panagaman (東工大):

LBM 熱計算

Kai Yang (東工大):

連番 STL ファイルの読み込みと補間

Dawei Shen (東工大): 布のモデル検証

松下 真太郎 (東工大):

有限体積法による熱計算との比較

Tan Hong Guan (東工大):

人の運動形状モデルへの Direct 埋め込み境界法の適用

北川大敦 (東工大): 衣服パラメータの整理

三好 健斗 (東工大): データの可視化処理

イン イクイ (東工大): STL データの修正

玉置 優真 (東工大): Paraview 環境整備

山崎 旭 (東工大): 設定データの検証

LIAN Tongda (東工大): 物体の接触判定検証

藤城 直也 (東工大): 動画エンコーディング

2. 研究の目的と意義

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の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。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 に資すると言える。

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、それを纏わせる。人の様々な部分を動かす、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。本課題は単体プロセッサの性能が高く、少ない数のノードで高解像度計算が可能な GPU スパコン上で、人の動きと衣服と気流の連成シミュレーション・フレームワークを開発することを目的とする。

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おらず、衣服のデザインにおける新しい指針を示すことができる。衣服は機能性だけでなく多くの要素に基づいてデザインされるが、さらに研究が進み、全く新しい衣服の提案に発展する可能性がある。また、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、

スキーのジャンプ競技など、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大きな貢献も可能になる。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

本申請代表者はこれまで大規模計算（HPC 分野）で多くの実績があり、国内における GPU コンピューティングの流体計算への適用研究を牽引してきた。本年度の共同研究はヒューマンセントリックの空力と構造変形の連成シミュレーションであり、人の動きのデータ化、布のモデル化、流体構造連成の計算手法、GPU コンピューティングの実装・高速化及び乱流解析という学際的な内容となっているため、JHPCN の枠組みを使い、HPC 分野の研究者、乱流研究者及びスポーツ科学の研究者が連携することで初めて本研究課題を遂行することができる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規の課題なので、該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

5-1 計算手法と解析コード

本研究の計算には、これまでグループで開発してきた Cumulant 衝突項の格子ボルツマン法（LBM）を用いた CUDA で実装した空力解析コードを用いている。移動したり変形したりする物体（人や衣服）の近傍に高解像度格子を動的に割当てするために、8 分木構造の AMR 法（Adaptive Mesh Refinement）法を用いている。リーフには GPU 計算の Coalesced メモリアクセスが有効になるように $8 \times 8 \times 8$ のメッシュ・ブロックを割当てている。また、図 1 のように空間充填曲線（Morton 曲線）を用いた動的な計算格子の Partitioning を行っている。

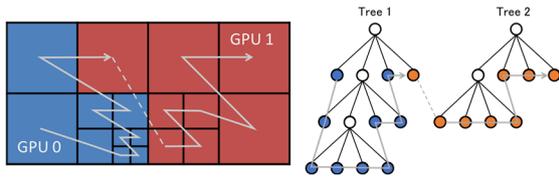


図 1 空間充填曲線を用いた領域分割

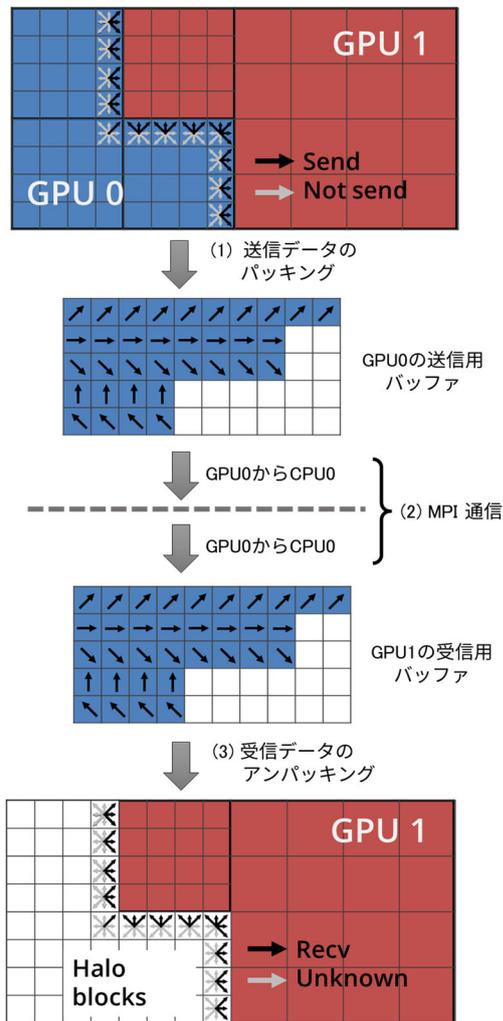


図 2 複雑な領域間通信

分割された領域間の通信は図 2 に示す通り複雑であり、大きなオーバーヘッドになる。通信量を削減するため、速度分布関数の 27 方向成分のうちの全てを送受信するのではなく、隣接アクセスの方向に応じて Streaming Step に必要な成分のみを選択的に送受信している。

5-2 人のランニングのデータ

モーション・キャプチャ装置を用いて実

際の人のランニング動作のデータを取得し、それに基づいてできるだけ人間の骨格と体形を再現するアバターを動かす、ポリゴンで表現する人の形状を図 3 のように時系列の連番 STL データとして生成した。身長を 180cm とし、総ポリゴン数は 71,410 個である。

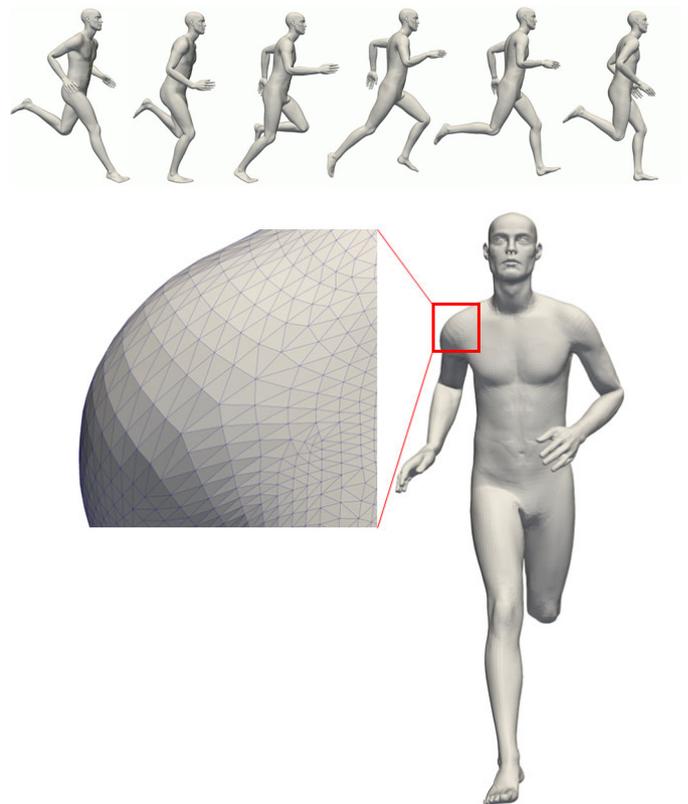


図 3 ランニング動作の時系列 STL データ

連番 STL データの時間間隔は格子ボルツマン法 (LBM) による空力解析の時間発展の Δt に比べて 2000 倍も長いので、LBM の各時刻でのランニング形状は前後の STL データから図 4 のように補間して求めている。時系列の各 STL モデルは同

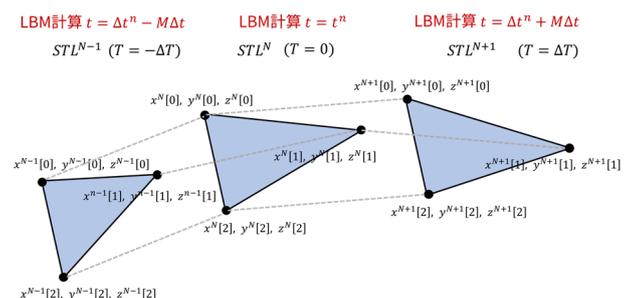


図 4 形状データの時間方向の補間

じポリゴン数を持ち、時系列変化についても各ポリゴンが一对一に対応している。

任意形状の移動物体と流体の相互作用は、図 5 のように Direct Forcing 型の埋め込み境界法を用いた。各ポリゴンにラグランジュ・マーカー粒子を置く必要がある。本計算は足の付け根の部分など、ポリゴンの時間的な変形が激しく、その置き方や粒子間隔の決め方で計算が不安定になる。そこで、ポリゴンを含む平面内に等間隔に粒子を配置し、ポリゴン内の粒子のみ採用するなどの方法をとった。

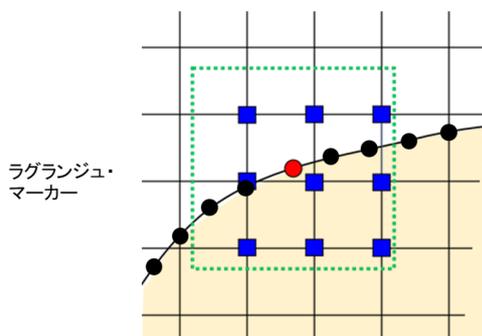


図 5 Direct Forcing 型の埋め込み境界法

5-3 計算条件

計算領域を 32.8m×16.4m×16.4m と設定し、その中を実際と同じようにランナーが

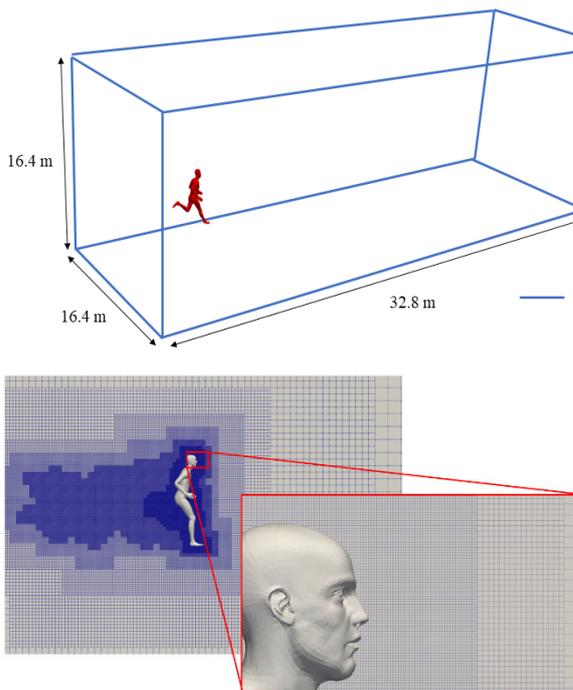


図 6 計算格子

速さ 10.5 m/sec、1 秒間に 4.28 ステップで走ることにした。代表長さを 1m とすると、レイノルズ数は 1.25×10^6 となる。流体は常温の空気とし、図 6 のように最細格子を 2mm まで細分化している。物体近傍だけでなく、後流の渦の強さに適合した細分化を行っている。

5-4 計算結果

東京大学情報基盤センター Wisteria/BDEC-01 スーパーコンピュータシステム Aquarius の 1 ノード NVIDIA A100 8GPU を用いて物理時間 1.0sec を計算するために 37.2 時間を要した。図 7 に流速のプロファイルを示す。ランナーが走り去った後

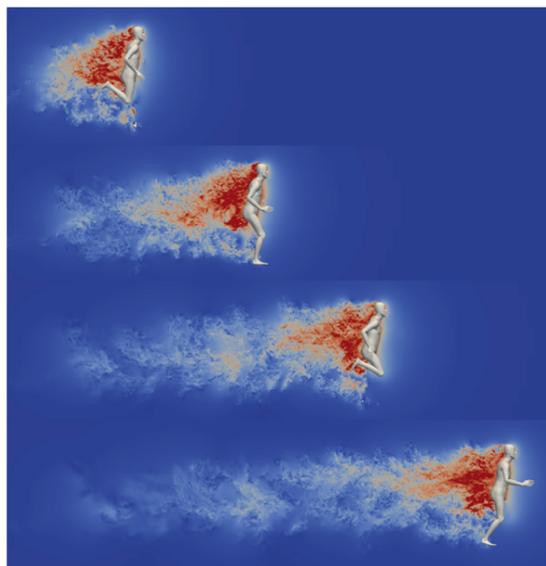


図 7 ランニング動作による流速の変化

の後流領域が加速されていることが分かる。また、図 8 にはランナーの激しい動作とともに後流の渦が揺動していることが分かる。

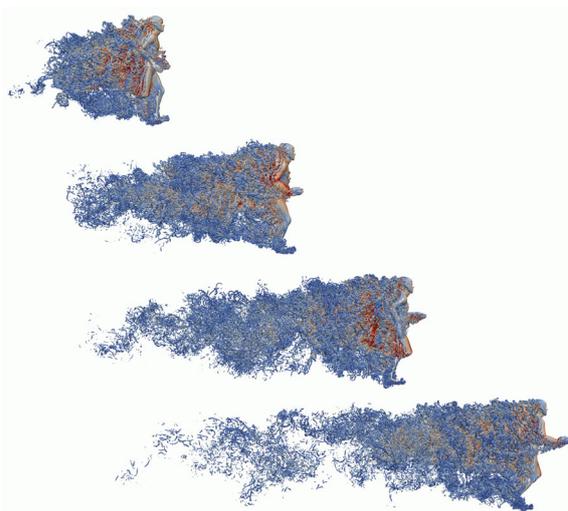


図 8 ランニング動作による渦の発生

図 9 はランナーの体の表面の圧力分布を示す。前面は空気からの強い抗力を受け、体の様々な場所の受ける圧力がランニング・ポーズと共に明らかになった。背面は境界層剥離による渦放出で負の圧力になっていることが分かる。

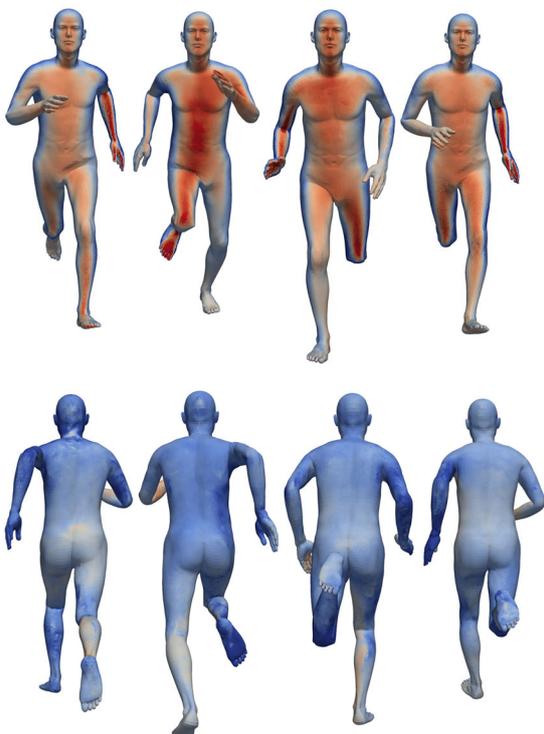


図 9 体の表面の圧力分布

図 10 はランナーの体表面での圧力を積分し、抗力（係数）を求めた。ランナーの動作周期に応じて抗力が時間変化すること

が分かり、抗力のピークとランナーのポーズの関係が明らかになった。

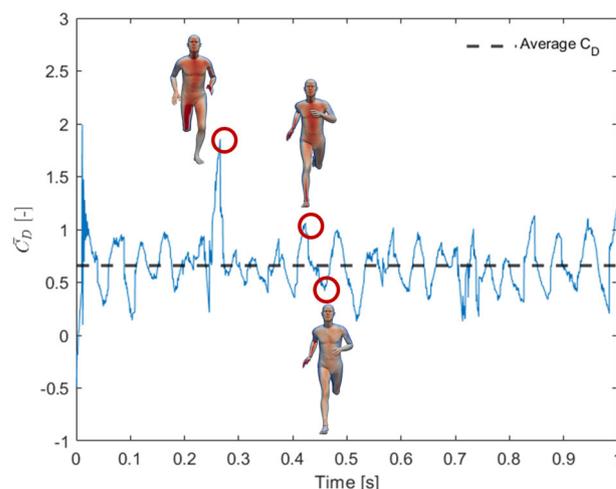


図 10 ランナーが受ける抗力の時間変化

ランニングの平均的な抗力係数の実測値が 0.82~0.91 という結果が報告されていて、本計算のランニング動作の 1 周期の抗力係数の時間平均値 0.66 は低い値になっている。格子解像度は最細格子間隔を 1mm で計算した結果と比較して、大きな違いはなかった。計算に用いたモデルが比較的滑らかであり、抗力係数が低く出ていると推察している。

5-5 布が巻き付いた円柱の計算

衣服を身に付けたランニングを計算する前に、検証のため布が巻き付いた円柱の計算を行った。布は 2 次元の質点と連結バネで構成したモデルを用いた。引っ張り、せん断、曲げに対するバネを設定している。布の特性試験も同様の評価項目があるため、これらのバネ定数および減衰係数を調整することで様々な布に対応することができる。

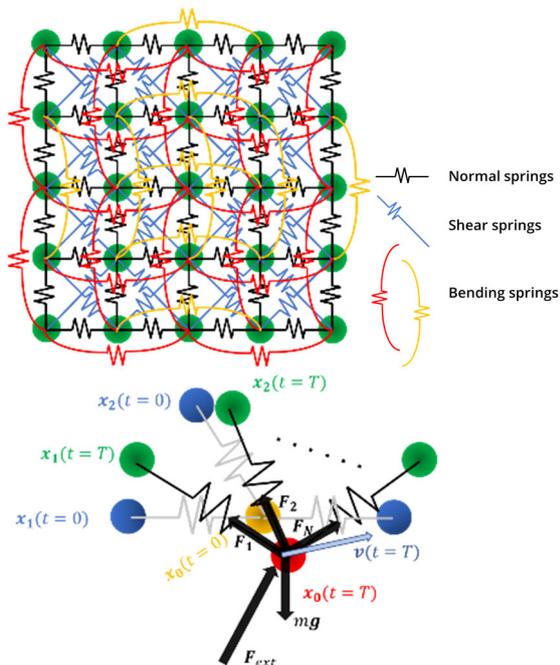


図 11 質点とバネによる布のモデル化

円柱のサイズは直径 2cm、長さ 150cm とした。布のサイズは 20cm×20cm とし、200×200 個の質点で構成されている。円柱の前面に布を配置し、速さ 10.5m/sec の風を当て、吹き飛ばされて円柱に巻き付くところから計算を開始した。円柱に巻き付いた布ははためきながら重力で落下する様子が図 12 から分かる。



図 12(1) 円柱に巻き付く布の計算



図 12(2) 円柱に巻き付く布の計算

図 13 に速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示す。布はためきにより後端からの大量の渦が放出され、揺動していることが分かる。

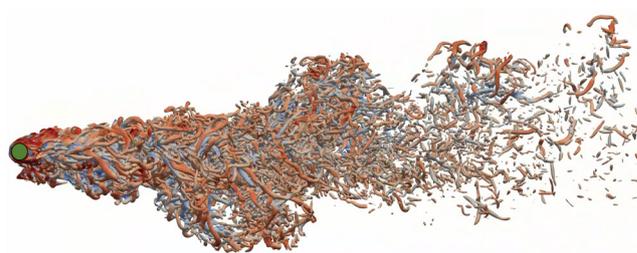


図 13 布はためきによる後端からの渦放出

次に、ほぼ同様の計算であるが、円柱の直径を 3cm、長さ 40cm、布のサイズを 40cm×20cm とし、流速 16.0m/sec の風を当てる計算を行った。図 14 は円柱の抗力係数の時間変化である。布が円柱に巻き付く際に一度布から円柱に大きな圧力が加わり、その後は巻き付いた布のはためきに応じて布に加わる引っ張り応力が円柱に伝わり、布がない時に比べて 2 倍近い抗力を受けるときもあることが明らかになった。

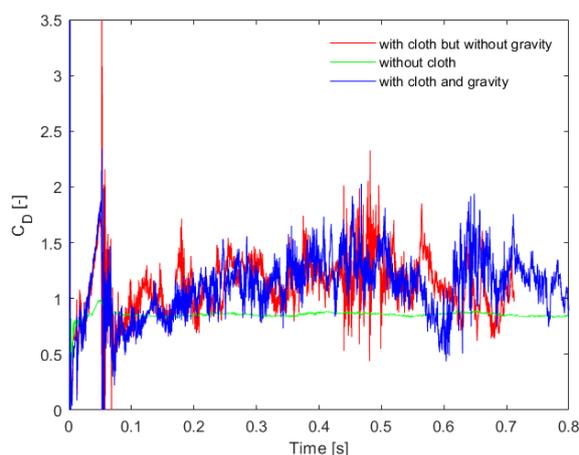


図 14 布の巻き付いた円柱の抗力の時間変化

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

2022 年度の研究計画としては、衣服を身につけてランニングするシミュレーションの実現までのフレームワークを開発する予定であった。Immersed Boundary 法で、激しく変形するポリゴン上にラグランジュ・マーカーを配置し、安定的に計算することによりかなりの時間を要した。また、バネ質点連結でモデル化された布を人の形状モデルに纏わせることが容易ではないことが判明した。そこで、アパレル CAD ツールである「CLO 3D」などのソフトウェアを用い、ハンガーに T シャツを掛ける単純な計算を進めている。その状態に風を当て、ハンガーとともに T シャツがはたためくシミュレーションを行う。次に、静止した立位状態に体と接しないように衣服を配置し、そこからランニング形状に運動させることで布に適切なストレスがかかる状態を作成する予定である。その状態からランニング動作を開始し、体の運動により衣服が受けるストレスと風から受ける力を総合して計算できるように進める予定である。

研究計画を遂行してゆく過程で、開発・検証項目が大幅に増え、当初の研究計画をとっても 1 年間で完了できるものではないことが明らかになった。そこで、2023 年度は計算規模も大きくなるため、HPCI 課題の方に移行し、

さらに発展的研究として継続することにした。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

なし

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

なし

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [1] Takayuki Aoki: Enhanced-scale using AMR-based simulation for multiphase flows and fluid-structure interactions, HPC Asia Workshop 3: Multi-scale, Multi-physics and Coupled Problems on highly parallel systems (MMCP), Singapore, February 28, 2023

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [1] TAN HONG GUAN, 青木尊之, 岩田真明, 渡辺 勢也: 人のランニング動作の空力解析, 第 36 回数値流体力学シンポジウム, 2022 年 12 月 16 日
- [2] 青木尊之: 格子ボルツマン法による混相流・流体構造連成シミュレーション, 日本応用数理・ものづくり研究会, 2022 年 12 月 12 日
- [3] TAN HONG GUAN, 青木尊之, 岩田真明, 渡辺 勢也: 人のランニング動作の空力解析, 第 55 回流体力学講演会/第 41 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2023 年 7 月 12 日

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)

なし