令和２年度

学士論文

流水内を避難する人体が受ける流体力の数値解析

指導教員

中村 恭志 准教授

東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

17B00834

有澤 一毅

目 次

第 1 章　はじめに **3**

1.1　研究背景 3

1.2　既往研究 3

1.3　研究目的 4

第 2 章　DRUM の計算手法 **5**

2.1　DRUM の概要 5

2.2　流れ場の計算手法 5

2.2.1　体積分率 5

2.2.2　基礎方程式 6

2.3　人体運動の計算手法 7

2.3.1　人体の形状 7

2.3.2　基礎方程式 7

2.3.3　流体が人体に及ぼす力 8

2.3.4　関節が人体に及ぼす力 8

2.3.5　人体運動が流れ場に及ぼす変化 8

第 3 章　モーションキャプチャの手法 **9**

3.1　骨格・歩行動作について 9

3.2　モーションキャプチャの概要 9

3.3　骨格の補正 10

3.4　歩行動作の変換 14

3.5　本章の図表のまとめ 17

第 4 章　計算結果 **26**

4.1　計算条件 26

4.2　計算結果 26

4.2.1　平滑化 26

4.2.2 結果 26
4.2.3 抗力の計算 27
4.2.4 姿勢による抗力の変化 27
4.2.5 流速による抗力への影響 29
4.3 まとめ 29
4.4 本章の図表のまとめ 31

第 5 章 おわりに **47**
5.1 研究全体のまとめ 47
5.2 今後の課題 47
5.3 謝辞 48

第1章　はじめに

1.1　研究背景

近年，日本においては台風や大雨による洪水，浸水被害などが絶えず起きている．令和元年における水難事故の発生件数は約 1300 件，水難者は約 1500 人，うち死者・行方不明者は約 700 人まで上る．[1]

特に台風による被害は甚大なものになるケースが多く，令和元年度台風 19 号における死者は約 100 人，住家被害は全壊約 3000 棟，半壊約 25000 棟と算出されている．[2] また台風に伴う増水で取り残され，水中を歩行しなければならないこともある．多くの既往研究で水路の中で被験者に静止してもらい実験を行い被験者にヒアリングした結果をまとめ危険性などを算出しているが，水路内を歩行し，人体にかかる力を動的に解析する手法は提示されていない．

台風を始めとする水難被害の防災において，その避難経路などを設計する上で，水路を歩く人体にかかる流体力を算出することは非常に有効な手法であると考える．この流体力の計算には，数値解析が有効であると考える．

1.2　既往研究

河川や海においての水難事故の危険性やその要因についての報告は，過去の事例を基に収集されているものの，危険性について定量的に評価した実験やシミュレーションの例は少ない．

須賀ら [3][4] は被験者を水路に立たせ，水中の歩行速度の測定や，歩行時の流水に対する感じ方などをヒアリングし，年齢・身長と流速の関係性を調べ，安全に避難できる領域を求めた．しかしこれらは人体が立位で静止している状態での実験であるため，歩行の一連の動作に関する流体力の動的な評価はしていない．

また中村ら [5] は流体と剛体との相互作用を計算する手法である CIP-CUP 法を用いた溺水数値解析シミュレーションモデルを開発し，水難事故における救命胴衣の有効性などを評価している．この中村らの数値モデルは，流れによって剛体にかかる非定常な力が計算できる．このモデルを用いることで，水路における流体 (水) と剛体 (人体) の相互作用などを検討できる可能性がある．

1.3　研究目的

以上のように，水路内を歩行する人体にかかる流体力をシミュレーションによって算出することは，水難事故に対する防災という観点から非常に重要な役割を担うと考えられる．そしてこの研究により避難路の設計やより安全な歩行の仕方などを検討できる可能性があると考えられる．

またこの研究により，水路内の歩行時に人体にかかる抗力だけではなく，モーションキャプチャデータを用いて，運動する人体にかかる様々な力を数値計算で算出する手法を提示できる可能性がある．

本研究では細く，浅い水路内を人が歩行することを想定する．台風や大雨などから避難する際には，膝上程度の水に浸かった状態で歩行しなければならない状態に陥る可能性がある．そのような状況で人体が受ける流体力について考察する．

第2章　DRUMの計算手法

2.1　DRUMの概要

本研究では気相，液相，固相の三相という物性の異なった物体が混在する系を想定する．．本研究にて用いられる DRUM(DRowning hUman Model) は，自由水面を伴うような気体，液体，固体の三次元混相流解析手法の CIP-CUP 法によって構成された解析モデルであり，固体である人体は，各剛体体節を関節で接続する剛体リンクモデルに基づいて計算される．

図 3.1 に DRUM の計算手順を示す．図のように DRUM では人体運動の計算と流れ場の計算をそれぞれ別に行い，その相互作用を考慮する．

流れ場の計算は気相，液相，固相の三相に対して，ナビエ・ストークス方程式，連続の式，エネルギー方程式を基礎方程式とし，CIP-CUP 法を用いて解かれる．

一方人体運動の計算は流体や関節より作用するトルクを加味しながら決定される．

2.2　流れ場の計算手法

2.2.1　体積分率

CIP-CUP 法では固体・液体 (水)・気体 (空気) の三次元混相流を格子上で扱うため，新たな変数として剛体の体節 s の体積分率 ϕs および空気の体積分率 ϕ を導入する．ただし ϕs は当該格子の体積に対して体節の占める体積比率，ϕ は当該格子からすべての体節を除いた領域に対して空気の占める体積比率である．各格子において密度 ρ，音速 c，分子動粘性 νmol の各物性値は，上記の ϕs および ϕ を用いた重みづけ平均の値として表される．ただし νmol は格子中の水と空気のみによる重みづけ平均の値をとる．すなわち

$$\rho = (1 - \sum_{s\,\text{in mesh}} \phi_s)\phi\rho_{air} + (1 - \sum_{s\,\text{in mesh}} \phi_s)(1-\phi)\rho_{water} + \sum_{s\,in\,mesh} \phi_s\rho_s \tag{2.1}$$

$$c = (1 - \sum_{s\,\text{in mesh}} \phi_s)\phi c_{air} + (1 - \sum_{s\,\text{in mesh}} \phi_s)(1-\phi)c_{water} + \sum_{s\,in\,mesh} \phi_s c_s \tag{2.2}$$

$$\nu_{\text{mol}} = \phi\nu_{\text{mol|air}} + (1-\phi)\nu_{\text{mol|water}} \tag{2.3}$$

と表される．また自由水面の位置変動は各格子での移流方程式

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \tag{2.4}$$

を解くことで追跡することができる．

2.2.2 基礎方程式

CIP-CUP 法では固体・液体・気体の各層に対し以下の基礎方程式を適用する．すなわち流れ場計算の基礎方程式である流速 $\boldsymbol{u} = (u_x, u_y, u_z)$，密度 ρ，圧力 p の輸送方程式は，重力加速度を $\boldsymbol{g}$ として以下のように表される．

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 u - g \tag{2.5}$$

$$\frac{D\rho_l}{Dt} = -(\nabla \dot{u}) \, (l = \text{air,water}) \tag{2.6}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = c\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{2.7}$$

これらの基礎方程式は，移流項・粘性項・圧力項に分けられ，以下のように順次計算される．

移流項

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \tag{2.8}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = 0 \tag{2.9}$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{2.10}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = 0 \tag{2.11}$$

粘性項

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = \nu\nabla^2\boldsymbol{u} - \boldsymbol{g} \tag{2.12}$$

圧力項

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p \tag{2.13}$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -(\nabla \cdot \boldsymbol{u}) \tag{2.14}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = -c^2\rho(\nabla \cdot \boldsymbol{u}) \tag{2.15}$$

2.3 人体運動の計算手法

2.3.1 人体の形状

全身の 3 次元形状は，産業技術総合研究所の「AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003」[5](男性，23 歳，身長 1.68m，体重 61.4kg，データ ID:F020) より取得され，これをボクセル (5mm 角，総ボクセル数 481,827) を用いて表現されている．通常 DRUM で用いられる人体データの体節は図 3.2 のようになる．同図では 10 体節，9 関節であるが，本研究では歩行動作を滑らかに再現するために，体節をさらに分けて考える．体節への分け方は後述の 3.4 で言及する．

2.3.2 基礎方程式

$$M_s\dot{\boldsymbol{v}}_s = \boldsymbol{F}_{s|\mathrm{fluid}} + \sum_{j\,\mathrm{on}\,s} \boldsymbol{F}_{s|j} - M_s\boldsymbol{g} \tag{2.16}$$

$$I_s\dot{\boldsymbol{\omega}}_s + \boldsymbol{\omega} \times I_s\boldsymbol{\omega}_s = \boldsymbol{T}_{s|\mathrm{fluid}} + \sum_{j\,\mathrm{on}\,s} (\boldsymbol{r}_{sj} \times \boldsymbol{F}_{s|j} + \boldsymbol{T}_{s|j}) \tag{2.17}$$

ここで式 (2.16) は静止系から，式 (2.17) は体節 s 上の慣性系を観測の原点としている．M_s, I_s はそれぞれ体節 s の質量，主慣性モーメントであり，$\boldsymbol{v}_s, \boldsymbol{\omega}_s$ はそれぞれ体節 s における並進速度ベクトル，回転速度ベクトルである．$\boldsymbol{F}_{s|\mathrm{fluid}}$, $\boldsymbol{T}_{s|\mathrm{fluid}}$ はそれぞれ体節 s が流体から受ける力，トルクであり，$\boldsymbol{F}_{s|j}$, $\boldsymbol{T}_{s|j}$ はそれぞれ体節 s が関節 j から受ける力，トルクである．$\boldsymbol{r}_{sj}$ は体節 s の重心から関節 j への変位ベクトルである．$\boldsymbol{F}_{s|\mathrm{fluid}}$, $\boldsymbol{T}_{s|\mathrm{fluid}}, \boldsymbol{F}_{s|j}$, $\boldsymbol{T}_{s|j}$ は後述される手法でそれぞれ求められる．

2.3.3 流体が人体に及ぼす力

式 (2.16)，(2.17) 中の $\boldsymbol{F}_{s|\mathrm{fluid}}$ は，圧力 ∇p 粘性摩擦力 $\tau = \rho\nu\nabla^2 u$ を用いて以下のように求められる．

$$\boldsymbol{F}_{s|\mathrm{fluid}} = \sum_{\mathrm{meshes}} (\nabla p + \tau)\phi_s \Delta \boldsymbol{V} \tag{2.18}$$

$$\boldsymbol{T}_{s|\mathrm{fluid}} = \sum_{\mathrm{meshes}} (\boldsymbol{r}_{s\mathrm{P}} \times (\nabla p + \tau))\phi_s \Delta \boldsymbol{V} \tag{2.19}$$

ここで $\sum_{\mathrm{meshes}}$ は体節 s が含まれるすべての格子にわたる総和を表し，$\phi s \nabla v$ は各格子に含まれる体節 s の体積であり，$\boldsymbol{r}_{s\mathrm{P}}$ は s の重心から各格子中心への変位ベクトルである．

2.3.4 関節が人体に及ぼす力

各体節は接している関節から，並進 3 方向および回転 3 方向に設定された可動域に基づく復元力を与えられる．$\boldsymbol{F}_{s|j}$, $\boldsymbol{T}_{s|j}$ はこの復元力の結果として計算される．並進 3 方向に関しては体節同士の関 節による接続を表すため，可動域は 0 として復元力を定める．一方回転 3 方向に関してはある程度の自由度が認められるため，体節同士のなす角 (関節角) をオイラー角の 3 方向について想定する．

2.3.5 人体運動が流れ場に及ぼす変化

各格子内の人体の各体節が流れ場に及ぼす流速の変化は，体積分率を考慮した該当体節の速度と該当体節が運動する直前の流速との重みづけ平均で表される．当該格子中の体節 s の速度 $\boldsymbol{u}_s$ は，s の並進速度 $\boldsymbol{v}_s$，角速度 $\boldsymbol{\omega}_s$，s の重心から当該格子の中心への変位ベクトル $\boldsymbol{r}_{s\mathrm{P}}$ を用いて，

$$\boldsymbol{u}_s = \boldsymbol{v}_s + \boldsymbol{\omega}_s \times \boldsymbol{r}_{s\mathrm{P}} \tag{2.20}$$

と表されるとすると，体節の運動直後の流速 $\boldsymbol{u}^{(n)}$ は，直前の流速 $\boldsymbol{u}^{(n-1)}$ に対し

$$\boldsymbol{u}^{(u)} = (1 - \sum_{s\,\mathrm{in\,mesh}} \phi_s)\boldsymbol{u}^{(n-1)} + \sum_{s\,\mathrm{in\,mesh}} \phi_s \boldsymbol{u}_s \tag{2.21}$$

のように表される．ここで ϕ_s は当該格子内における体節 s の体積分率であり，$\sum_{s\,\mathrm{in\,mesh}}$ は当該格子が含む全体節の総和を表す．

第3章　モーションキャプチャの手法

3.1　骨格・歩行動作について

モーションキャプチャは，現実において人体や動物などの動きを 3 次元的に記録し，デジタルデータにする技術である．これを用いることで，将来的に老若男女や動作など，様々な状況下における力の動的な解析ができると考えられる．

本研究では，DRUM で歩行動作を考慮したシミュレーションを行う上で，カーネギーメロン大学 (CMU) が web 上で配布しているモーションキャプチャデータの中から，水中での歩行の様子を再現するのにふさわしいと考えられるデータを入手し用いた ([7] よりファイル'06_01.bvh' を用いた).

ただしこのモーションキャプチャデータの人体骨格は，本シミュレーションで想定している日本人の骨格データと大きな乖離があり，また動作についても DRUM の入力データとは形式が異なるため，骨格の補正と動作のデータ形式の変換が必要である．

3.2　モーションキャプチャの概要

モーションキャプチャーのデータは，大きく分けて骨格を記述する部分と，動作を記述する部分の 2 つから成る．

骨格を記述する部分では，関節にあたるジョイントの名称と，各ジョイントを結ぶ骨にあたるオフセットの 3 次元座標から定義される．中心となるジョイントは ROOT Hips と呼ばれ，原点からの座標が定義される．ROOT Hips 以外のジョイントは親となるジョイントと，そこからのオフセットが定義され，骨格が形成される．各ジョイントの名称は図 3.3 に示す．ただしオフセットのノルムが 0 であるジョイントは親のジョイントに重なっているため，名称を親のジョイントの括弧内に含めて表記している．

動作を記述する部分では，各時刻における ROOT Hips の 3 次元座標と ROOT Hips を含む全てのジョイントの親を基準とするオイラー回転角で定義されている．また ROOT Hips は原点を親としている．

3.3 骨格の補正

カーネギーメロン大学が配布しているモーションキャプチャーデータは，アメリカ人の平均的な体型をもとに作られているため，これを日本人の平均的な体型に補正する必要がある．補正の基準となる骨格のデータは．DRUM で用いている日本人の体型データを，モーションキャプチャのデータ形式と合致するように体節を分解したものを使用する．腰回りと胸周りについては，各オフセットについて単純にノルムを揃えるだけでは，体型が一般的な成人男性にふさわしくないため，これらの部位だけは別の補正手法を用いる．補正するカーネギーメロン大学のモーションキャプチャのオフセットを $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C} \ldots$ のように，対応する補正の基準となるデータのオフセットを $\boldsymbol{A'}, \boldsymbol{B'}, \boldsymbol{C'} \ldots$ のように表現する．

以下に示す手法で骨格の補正を行う．

(i) 腰回りの補正

腰周りについては，図 3.4 のようにモーションキャプチャーの ROOT Hips の座標と，ROOT Hips を始点としそれぞれ LeftUpLeg，RightUpLeg，Spine を終点とする 3 つのベクトルの倍率を変数とし，DRUM の対応するベクトルとの残差の 2 乗和が最小になるように決定する．

すなわち

$$I \equiv |\boldsymbol{A'} - (\boldsymbol{X} + \alpha \boldsymbol{A})|^2 + |\boldsymbol{B'} - (\boldsymbol{X} + \beta \boldsymbol{B})|^2 + |\boldsymbol{C'} - (\boldsymbol{X} + \gamma \boldsymbol{C})|^2 \tag{3.1}$$

で定義される残差の 2 乗和 I を最小にする $\alpha \boldsymbol{A}$，$\beta \boldsymbol{B}$，$\gamma \boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{X} = (x, y, z)$ を求める．

このような 6 変数 $\alpha, \beta, \gamma, \boldsymbol{X} = (x, y, z)$ が満たすべき必要十分条件は

$$\frac{\partial I}{\partial \alpha} = 0 \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial I}{\partial \beta} = 0 \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial I}{\partial \gamma} = 0 \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = 0 \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial I}{\partial y} = 0 \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = 0 \tag{3.7}$$

であり，これらを解くと

$$\alpha A + A_x x + A_y y + A_z z = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{A'} \tag{3.8}$$

$$\beta B + B_x x + B_y y + B_z z = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{B'} \tag{3.9}$$

$$\delta C + C_x x + C_y y + C_z z = \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{C'} \tag{3.10}$$

$$\alpha A_x + \beta B_x + \gamma C_x + 3x = A'_x + B'_x + C'_x \tag{3.11}$$

$$\alpha A_y + \beta B_y + \gamma C_y + 3y = A'_y + B'_y + C'_y \tag{3.12}$$

$$\alpha A_z + \beta B_z + \gamma C_z + 3z = A'_z + B'_z + C'_z \tag{3.13}$$

となる．

ここで，$i = x, y, z$ に対して

$$a_{ij} \equiv -(\frac{A_i A_j}{|A|^2} + \frac{B_i B_j}{|B|^2} + \frac{C_i C_j}{|C|^2}) + 3\delta_{ij} \tag{3.14}$$

$$b_i \equiv (\boldsymbol{A'_i} + \boldsymbol{B'_i} + \boldsymbol{C'_i}) - (A_i \frac{\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{A'}}{|\boldsymbol{A}|^2} + B_i \frac{\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{B'}}{|\boldsymbol{B}|^2} + C_i \frac{\boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{C'}}{|\boldsymbol{C}|^2}) \tag{3.15}$$

という 2 つの変数を設定する．ただし δ_{ij} は

$$\delta_{ij} \ = \ \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \tag{3.16}$$

を満たす．これらの変数を用いて x, y, z の満たす条件を記述すると，

$$a_{xx} x + a_{xy} y + a_{xz} z = b_x \tag{3.17}$$

$$a_{yx} x + a_{yy} y + a_{yz} z = b_y \tag{3.18}$$

$$a_{zx} x + a_{xy} y + a_{zz} z = b_z \tag{3.19}$$

となる．また

$$A = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

とすると，式 (3.17)，(3.18)，(3.19) から x, y, z は

$$x = \frac{1}{|A|}\begin{vmatrix} b_x & a_{xy} & a_{xz} \\ b_y & a_{yy} & a_{yz} \\ b_z & a_{zy} & a_{zz} \end{vmatrix} \tag{3.21}$$

$$y = \frac{1}{|A|}\begin{vmatrix} a_{xx} & b_x & a_{xz} \\ a_{yx} & b_y & a_{yz} \\ a_{zx} & b_z & a_{zz} \end{vmatrix} \tag{3.22}$$

$$z = \frac{1}{|A|}\begin{vmatrix} a_{xx} & a_{xy} & b_x \\ a_{yx} & a_{yy} & b_y \\ a_{zx} & a_{zy} & b_z \end{vmatrix} \tag{3.23}$$

と求まる．これを用いて，α, β, γ は

$$\alpha = \frac{1}{|\boldsymbol{A}|^2}(\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{A'} - A_x x - A_y y - A_z z) \tag{3.24}$$

$$\beta = \frac{1}{|\boldsymbol{B}|^2}(\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{B'} - B_x x - B_y y - A_z z) \tag{3.25}$$

$$\gamma = \frac{1}{|\boldsymbol{C}|^2}(\boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{C'} - C_x x - C_y y - C_z z) \tag{3.26}$$

と表現される．

式 (3.21) から (3.26) までで得られた 6 変数 $\alpha, \beta, \gamma, \boldsymbol{X} = (x, y, z)$ について数値計算を行うと，

$$\alpha = 0.04943676626531887 \tag{3.27}$$

$$\beta = 0.04843476544731706 \tag{3.28}$$

$$\gamma = 0.06116202871478441 \tag{3.29}$$

$$\boldsymbol{X} = (-0.0021254039293238203, -0.013926594847613128, -0.007974284232834262) \tag{3.30}$$

と求められ，$\boldsymbol{X}$ を補正後の ROOT の座標，$\alpha\boldsymbol{A}$，$\beta\boldsymbol{B}$，$\gamma\boldsymbol{C}$ を補正後のオフセットとする．

(ii) 胸周りの補正

胸周りについては，図 3.5 のように，Spine を始点として，LeftArm，Neck1，RightArm までの各点をそれぞれ終点とするようなベクトルをモーションキャプチャーデータと DRUM の両方について考え，この 2 つの残差の 2 乗和が最小になるような倍率 α，β，γ，δ を決定する．

すなわち

$$\boldsymbol{I} \equiv |\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{B'} - (\alpha\boldsymbol{A} + \beta\boldsymbol{B})|^2 + |\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{C'} - (\alpha\boldsymbol{A} + \beta\boldsymbol{C})|^2 + |\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{D'} - (\alpha\boldsymbol{A} + \gamma\boldsymbol{D})|^2 \tag{3.31}$$

で定義される残差の 2 乗和 I を最小にする α，β，γ，δ を求める．

このような 4 変数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ が満たすべき必要十分条件は,

$$\frac{\partial I}{\partial \alpha} = 0 \tag{3.32}$$

$$\frac{\partial I}{\partial \beta} = 0 \tag{3.33}$$

$$\frac{\partial I}{\partial \gamma} = 0 \tag{3.34}$$

$$\frac{\partial I}{\partial \delta} = 0 \tag{3.35}$$

である．式 (3.33) について解くと,

$$2\beta|\boldsymbol{B}|^2 - 2(\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{B'} - \alpha\boldsymbol{A}) \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{3.36}$$

となり，β は α を用いて,

$$\beta = \frac{(\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{B'} - \alpha\boldsymbol{A}) \cdot \boldsymbol{B}}{|\boldsymbol{B}|^2} \tag{3.37}$$

と表現される．対称性より γ, δ についても α を用いて,

$$\gamma = \frac{(\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{C'} - \alpha\boldsymbol{A}) \cdot \boldsymbol{C}}{|\boldsymbol{C}|^2} \tag{3.38}$$

$$\delta = \frac{(\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{D'} - \alpha\boldsymbol{A}) \cdot \boldsymbol{D}}{|\boldsymbol{D}|^2} \tag{3.39}$$

と表現される．一方，式 (3.32) について解くと,

$$6\alpha|\boldsymbol{A}|^2 - 2\boldsymbol{A} \cdot \{(\boldsymbol{B'} - \beta B) + (\boldsymbol{C'} - \gamma\boldsymbol{C}) + (\boldsymbol{D'} - \delta\boldsymbol{D})\} = 0 \tag{3.40}$$

となるため，α は β, γ, δ を用いて,

$$\frac{\partial I}{\partial \alpha} = 0 \Longleftrightarrow \alpha = \frac{1}{3|\boldsymbol{A}|^2}\boldsymbol{A}\{3\boldsymbol{A'} + (\boldsymbol{B'} + \beta\boldsymbol{B}) + (\boldsymbol{C'} + \gamma\boldsymbol{C}) + (\boldsymbol{D'} + \delta\boldsymbol{D})\} \tag{3.41}$$

と表現される．ここに式 (3.37)，(3.38)，(3.39) で得た β, γ, δ を代入して,

$$\alpha = \boldsymbol{A} \cdot \left[3\boldsymbol{A'} + \boldsymbol{B'} - \left\{\frac{(\boldsymbol{B'} + \boldsymbol{A'}) \cdot \boldsymbol{B}}{|\boldsymbol{B}|^2}\right\}\boldsymbol{B} + \boldsymbol{C'} - \left\{\frac{(\boldsymbol{C'} + \boldsymbol{A'}) \cdot \boldsymbol{C}}{|\boldsymbol{C}|^2}\right\}\boldsymbol{C} + \boldsymbol{D'} - \left\{\frac{(\boldsymbol{D'} + \boldsymbol{A'}) \cdot \boldsymbol{D}}{|\boldsymbol{D}|^2}\right\}\boldsymbol{D}\right] \tag{3.42}$$

を得る．

式 (**??**)，(3.38)，(3.39)，(3.42) で得られた 4 変数 $\alpha, \beta, \gamma, \gamma$ について数値計算を行うと,

$$\alpha = 0.15639067764730494 \tag{3.43}$$

$$\beta = 0.054266085988505505 \tag{3.44}$$

$$\gamma = 0.09855112017253802 \tag{3.45}$$

$$\delta = 0.048206703597116596 \tag{3.46}$$

と求められ，$\alpha\boldsymbol{A}$，$\beta\boldsymbol{B}$，$\gamma\boldsymbol{C}$，$\delta\boldsymbol{D}$ を補正後のオフセットとする．

(iii) その他のオフセット補正

胸周りと腰回り以外のオフセットについては，モーションキャプチャのオフセットを，対応する DRUM のオフセットの長さに揃える．すなわちモーションキャプチャのオフセットを $\boldsymbol{A}$，対応する DRUM のオフセットを $\boldsymbol{A'}$ とすると，

$$|\boldsymbol{A'}| = \alpha|\boldsymbol{A}| \tag{3.47}$$

となるような倍率 α を各オフセットについて求め，$\alpha\boldsymbol{A}$ を補正後のオフセットとする．

(iv) まとめ

モーションキャプチャーの補正前の骨格を図 3.6，補正後の骨格を図 3.7，補正する基準となる骨格を図 3.8 に示す．また各オフセットの倍率は表 3.1 に示す．

3.4　歩行動作の変換

モーションキャプチャのソースファイルに記述されている動作は，先述の通り各時刻における ROOT Hips の 3 次元座標と ROOT Hips を含む全てのジョイントの親を基準とするオイラー回転角で定義されている．

一方 DRUM では時刻 t における DRUM のレストポジションからの各体節の重心の，以下の (ア)，(イ) を入力データとする．

(ア) レストポジションを原点とした 3 次元座標 $\boldsymbol{G'}^t$

(イ) レストポジションで該当重心に載せられた 3 つの単位ベクトル
$\boldsymbol{e_1} = (1,0,0)$, $\boldsymbol{e_2} = (0,1,0)$, $\boldsymbol{e_3} = (0,0,1)$
の回転後のベクトル $\boldsymbol{e_1}'^t$, $\boldsymbol{e_2}'^t$, $\boldsymbol{e_3}'^t$

そのためモーションキャプチャの動作を DRUM に入力できる形に変換する必要がある．以下の手順 (Step) で，歩行動作の変換を行う．

Step1 オイラー回転角の変換

オイラー回転角で表された各ジョイントの回転から，各時刻における各ジョイントの座標を求める．時刻 t における各ジョイントの座標は，そのジョイントのオフセットに対し，ROOT Hips から数えて連結された自身の親までの全てのジョイントの時刻 t における回転行列を，ROOT Hips のものから順に乗じていき，ROOT Hips の座標を加えることで求められる．

例えば ROOT Hips から数えて 4 番目にあるジョイントのオフセットを $\boldsymbol{A}$ とすると，そのジョイントの時刻 t における座標 $\boldsymbol{J}^t$ は各ジョイントの回転行列を $R_0^t, R_1^t, \ldots$，ROOT Hips の座標を $\boldsymbol{J}_0^t(x, y, z)$ とすると，

$$\boldsymbol{J} = R_2^t R_1^t R_0^t \boldsymbol{A} + \boldsymbol{J}_0^t(x, y, z) \tag{3.48}$$

と表現できる．これを各ジョイントに繰り返し行い，各時刻における各ジョイントの 3 次元座標を求める．

Step2 各体節の対応

モーションキャプチャの体節データと，DRUM の体節データでは異なる分け方をしているため，図 3.9 のようにモーションキャプチャの体節を DRUM の体節の分割の仕方に置き換える．

モーションキャプチャのオフセットには，ノルムが 0 であるジョイントがいくつか存在し，それらのオフセットは前後どちらかのオフセットに組み込み 1 つの体節とすることで，DRUM の体節に対応させることができる．

また腰回りと胸周りにおいては，3.3 にて最小二乗法を用いて骨格の補正を行った際に，一つのまとまりと考えたオフセットがそのまま DRUM の Hip，Chest 部分となる．

Step3 DRUM 入力データの作成

3.3 と同様に Hip と Chest，それ以外とでは，入力データの求め方が異なるため以下の手法を取る．

(i) Hip と Chest 以外の体節

Hip と Chest 以外の体節については，各体節の親のジョイントを中心とし，体節の，DRUM のレストポジションからモーションキャプチャへの回転ベクトルを求めることで，入力データを求め

ることができる．時刻 t における，該当体節の親からの回転行列を R^t，親ジョイントの座標を $\boldsymbol{J}^t$，親ジョイントからの重心の位置座標を $\boldsymbol{r}^t$ とすると，(ア)，(イ) は，

$$\boldsymbol{G'}^t = \boldsymbol{J}^t + R^t\boldsymbol{r}^t \tag{3.49}$$

$$\boldsymbol{e_1}'^t = R^t(\boldsymbol{r}^t + \boldsymbol{e_1}) - R^t\boldsymbol{r}^t \tag{3.50}$$

$$\boldsymbol{e_2}'^t = R^t(\boldsymbol{r}^t + \boldsymbol{e_2}) - R^t\boldsymbol{r}^t \tag{3.51}$$

$$\boldsymbol{e_3}'^t = R^t(\boldsymbol{r}^t + \boldsymbol{e_3}) - R^t\boldsymbol{r}^t \tag{3.52}$$

と求められる．

(ii) Hip と Chest

Hip と Chest については，複数のオフセットが組み合わさっている体節であり，他の体節とは異なる方法で回転角を求める必要がある．

まず時刻 t における回転の法線ベクトルと回転角の 3 つの自由度 R^t, θ^t, ϕ^t を，それぞれ以下の範囲で 100 分割し，101^3 の回転の組み合わせを用意する．

$$R^t \in [0, \pi] \tag{3.53}$$

$$\theta^t \in [0, \pi] \tag{3.54}$$

$$\phi^t \in [0, 2\pi] \tag{3.55}$$

次に DRUM のレストポジションにおける，Hip は Root を，Chest は Spine を中心として，それぞれ用意した回転の組み合わせを全て計算し，モーションキャプチャと DRUM の対応する各ジョイントの座標の残差の二乗和が最も小さい組み合わせを，その時刻における回転とし，入力データを得る．

Hip は Root を，Chest は Spine をそれぞれその体節の重心位置としており，上で得られた各時刻の回転ベクトルをかけ合わせたデータを (ア)，(イ) とする．

3.5　本章の図表のまとめ

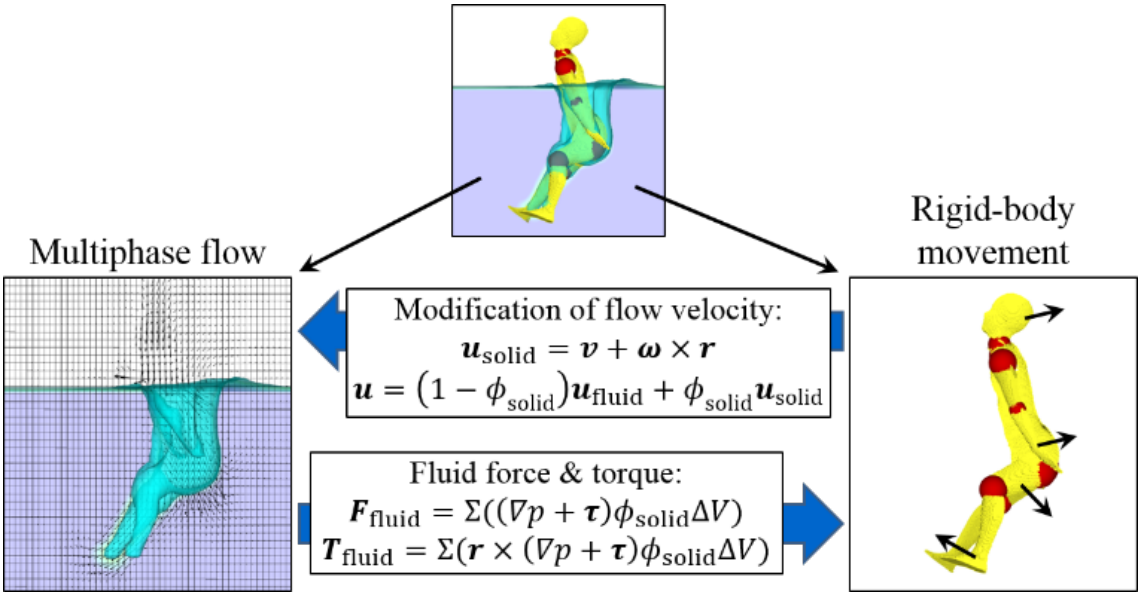


図 3.1: 計算手順

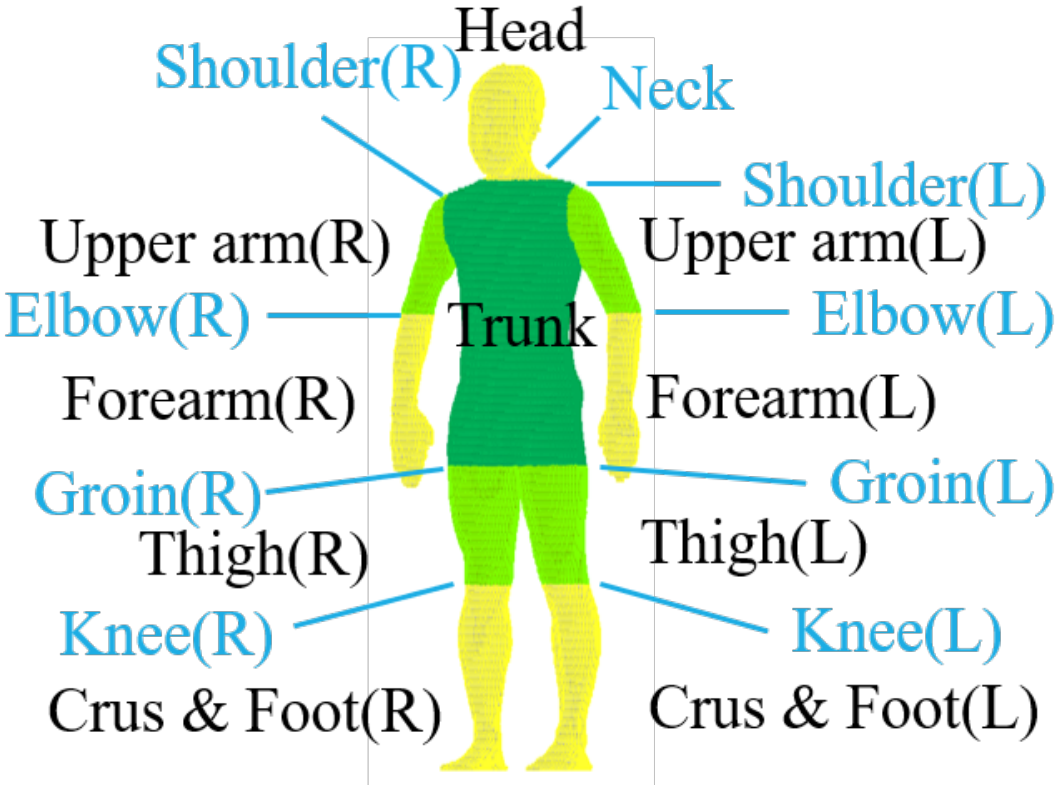


図 3.2: 人体モデルを構成する剛体部位 (黒字) および関節 (青字)

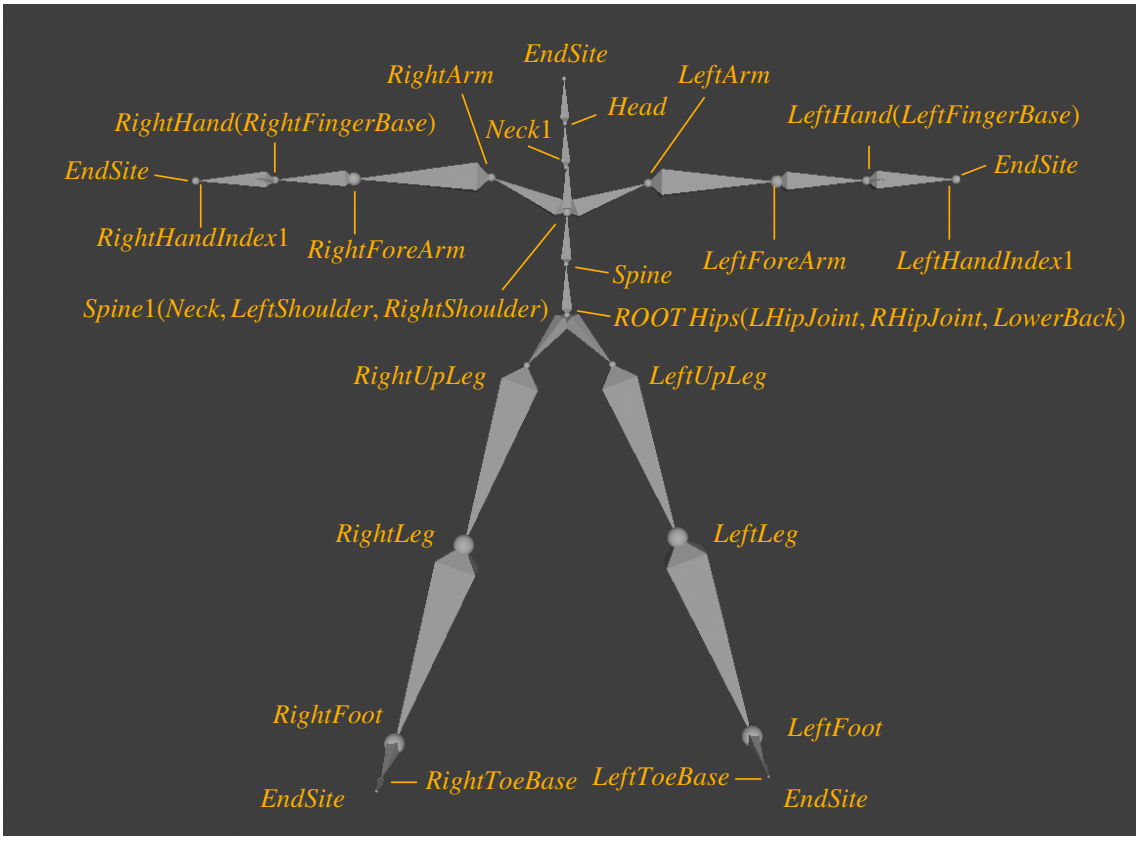


図 3.3: モーションキャプチャのジョイントと名称

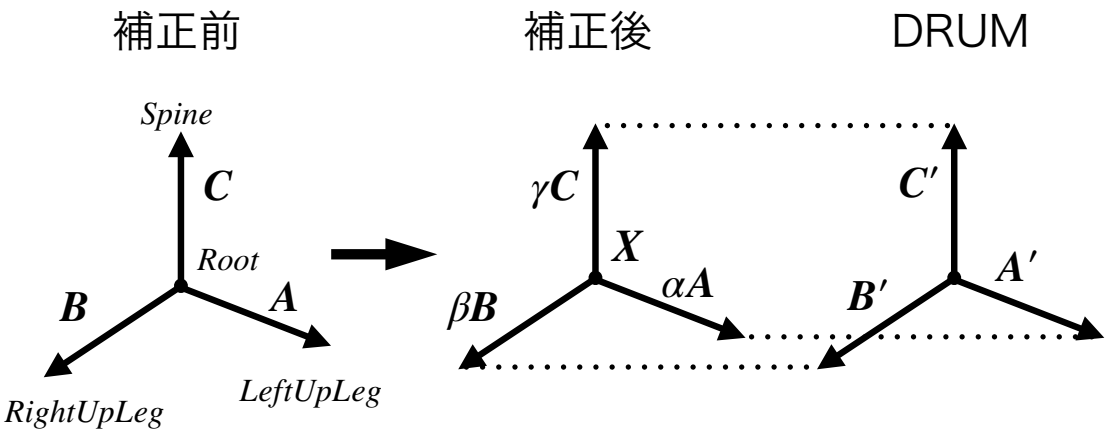


図 3.4: 腰回りの補正の模式図

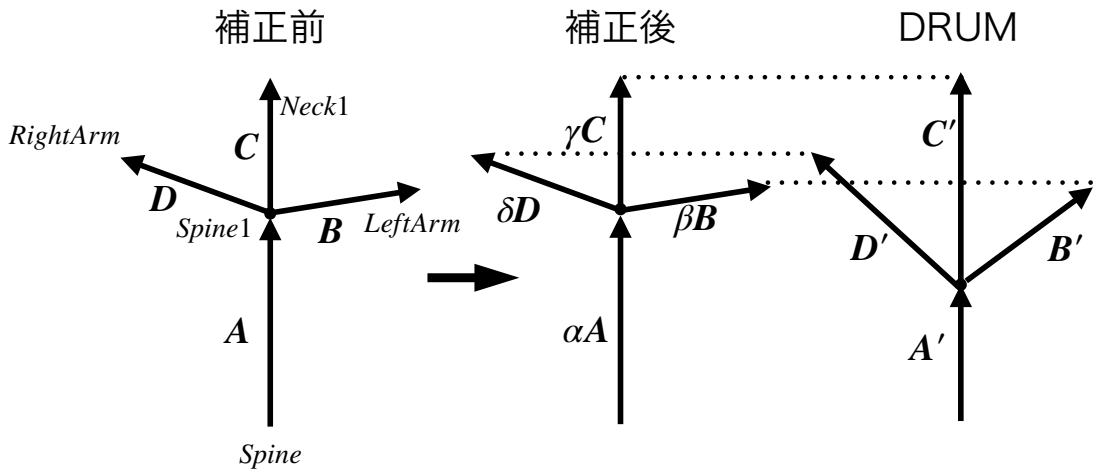


図 3.5: 胸周りの補正の模式図

表 3.1: CMU と DRUM のオフセット

		CMU			DRUM			
系統	JOINT	x(m)	y(m)	z(m)	x(m)	y(m)	z(m)	倍率
左足	ROOT Hips	0	0	0	0	0	0	-
	LHipJoint	0	0	0	0	0	0	-
	LeftUpLeg	1.7324	-1.89999	0.57994	0.08694411	-0.110834	0.0007075	0.0494367
	LeftLeg	2.43106	-6.6793	0	0.020027	-0.282899	-0.03363	0.00161439
	LeftFoot	2.78854	-7.66147	0	0.001073	-0.38	-0.01914	0.0021778
	LeftToeBase	0.17314	-0.47571	2.01064	0.009	-0.0575	0.157	0.00652165
	End Site	0	0	1.04147	0	0	0.032	0.00094407
右足	ROOT Hips							
	RHipJoint	0	0	0	0	0	0	-
	RightUpLeg	-1.57078	-1.89998	0.57994	-0.0813559	-0.110834	-0.0044125	0.0484347
	RightLeg	-2.50166	-6.87326	0	-0.01779	-0.282899	-0.02515	0.00151366
	RightFoot	-2.77304	-7.61886	0	-0.00881	-0.38	-0.0225	0.00220552
	RightToeBase	-0.23513	-0.64602	2.11039	-0.015	-0.0575	0.155	0.00559362
	End Site	0	0	1.10597	0	0	0.034	0.00094509
背骨	ROOT Hips							
	LowerBack	0	0	0	0	0	0	-
	Spine	-0.00908	2.00015	-0.35323	-0.0029559	0.116267	0.0149375	0.0611620
	Spine1	0.05647	2.02258	0.0427	0.00226134	0.23415	-0.0058248	0.1563906
	Neck	0	0	0	0	0	0	-
	Neck1	-0.02074	1.73711	0.13117	-0.0022613	0.25385	0.0178248	0.0985511
	Head	-0.02359	1.73615	-0.2432	0	0	0	0
	End Site	-0.00579	1.75982	-0.09688	0	0.242	0.018	0.01895708
左腕	Spine1							
	LeftShoulder	0	0	0	0	0	0	-
	LeftArm	3.20537	1.11432	-0.2768	0.15773866	0.14755	0.0073248	0.0542660
	LeftForeArm	5.05923	0	0	0.1102	-0.2417	-0.0229	0.0027773
	LeftHand	3.51996	0	0	0.0148	-0.22	0.0543	0.00416199
	LeftFingerBase	0	0	0	0	0	0	-
	LeftHandIndex1	0.65238	0	0	-0.0132	-0.105	-0.0209	0.02734036
	End Site	0.52596	0	0	0	-0.065	0	0.01527289
右腕	Spine1							
	RightShoulder	0	0	0	0	0	0	-
	RightArm	-2.96983	1.42602	-0.37449	-0.1622613	0.14755	0.0073248	0.0482067
	RightForeArm	-5.40867	0	0	-0.10419	-0.2417	-0.02878	0.00239637
	RightHand	-3.12964	0	0	-0.00881	-0.22	0.06228	0.00534541
	RightFingerBase	0	0	0	0	0	0	-
	RightHandIndex1	-0.83271	0	0	0.01	-0.1	-0.0002	0.01456584
	End Site	-0.67135	0	0	0	-0.07	0	0.01087172

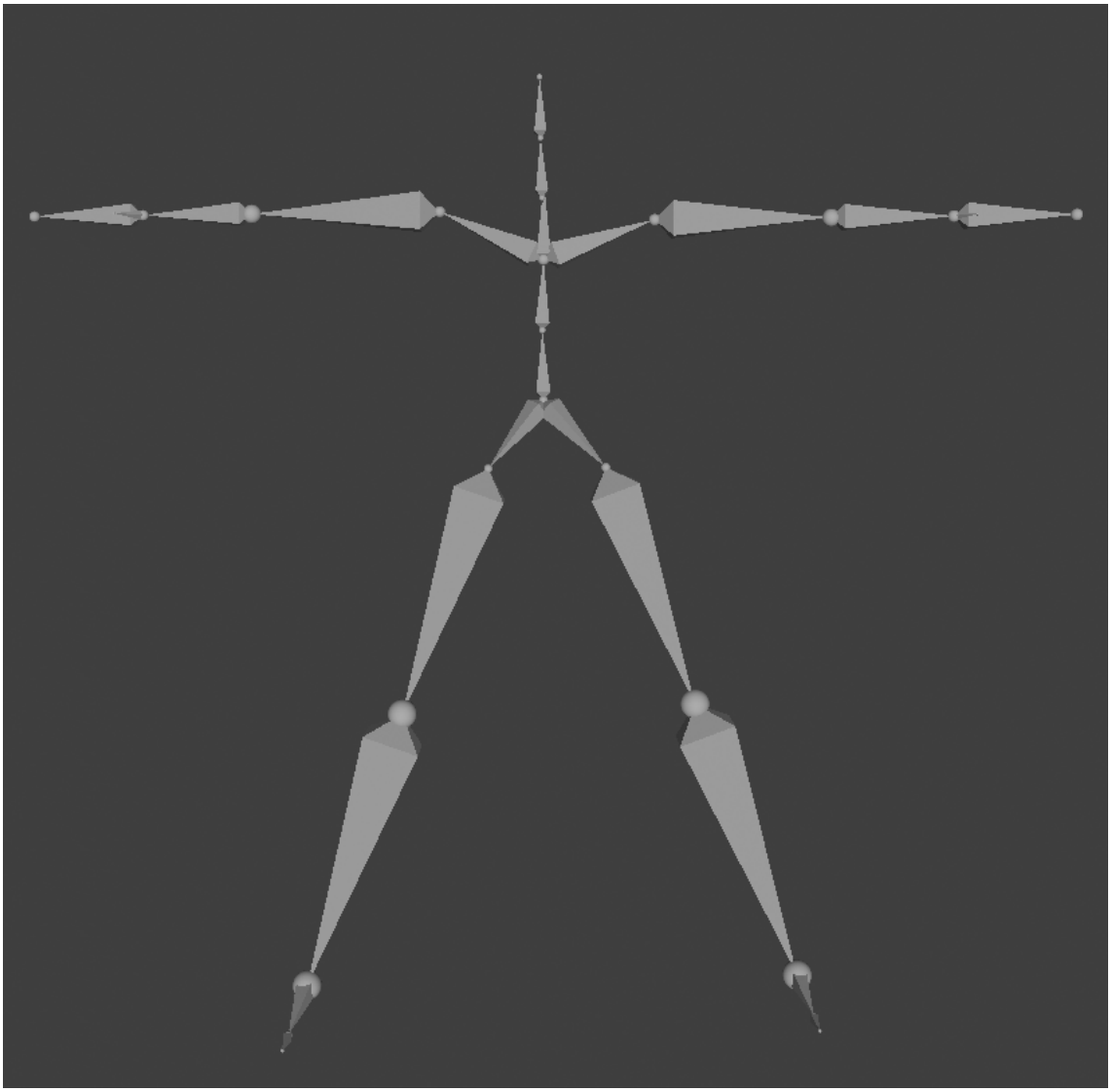


図 3.6: 補正前のモーションキャプチャーの骨格

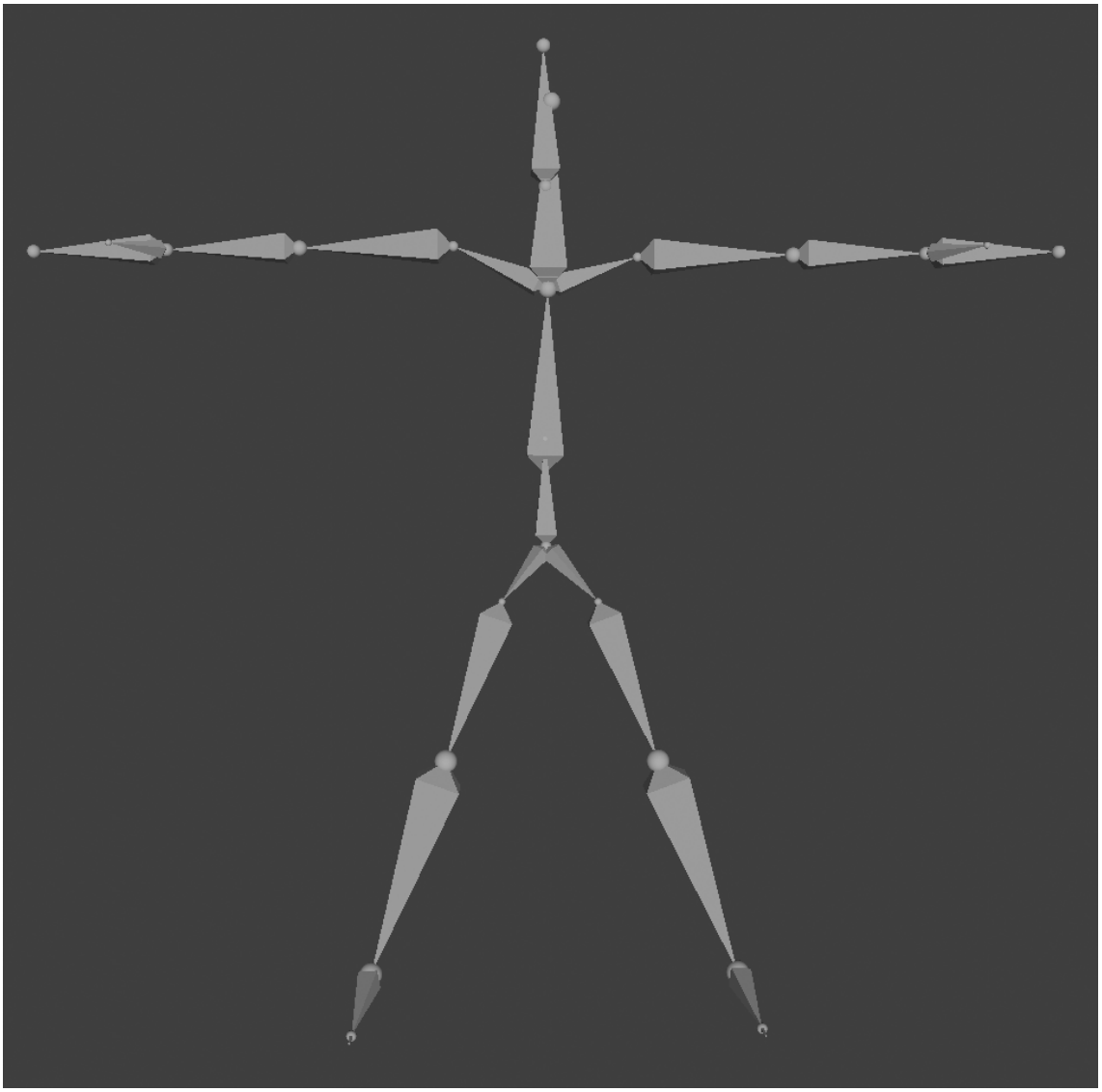


図 3.7: 補正後のモーションキャプチャーの骨格

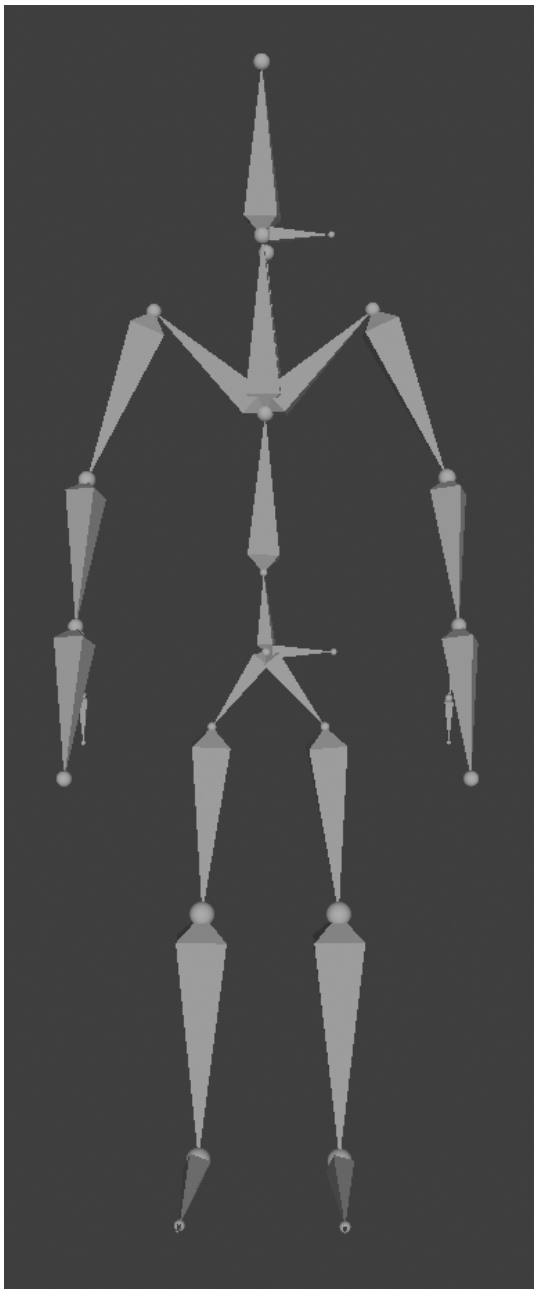


図 3.8: 補正の基準となるモーションキャプチャーの骨格

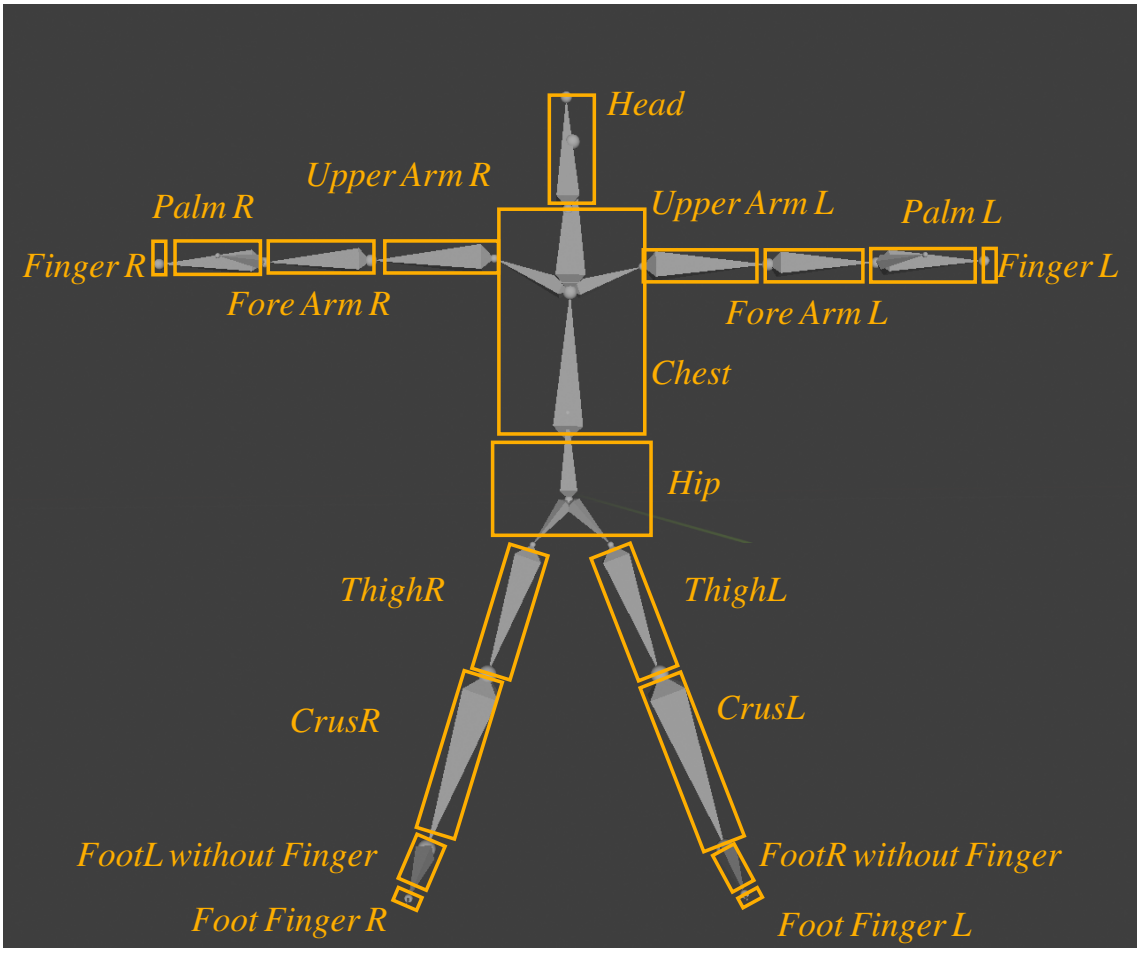


図 3.9: モーションキャプチャーと DRUM の体節の対応

第4章　計算結果

4.1　計算条件

計算対象となる水路の領域は奥行き 5m，幅 2m，高さ 2m の直方体とし，人が歩く向きを x 軸，水平手前向きを y 軸，鉛直上向きを z 軸の正の方向となるよう三次元直交座標軸を定める．ただし水路自体は人が歩く方向である x 軸は正負どちらの向きにも無限に続くものとしており，流体についての計算もそのように行われる．また人体の歩行動作は常に一定で，流体の影響は受けないものとしているため，床との摩擦なども考慮しない．

本研究で想定するのは人が水難事故で避難する様子であり，初期条件として水深を 0.4m とし，流速を 0m/s(静水時) から 5m/s まで 0.5m/s 刻みで変化させ，全部で 11 の場合を計算した．

4.2　計算結果

4.2.1　平滑化

モーションキャプチャーの歩行データは 1 フレーム 0.00833s であり，DRUM で計算する際に微小な時間で急激に変位のずれが発生するため，抗力のグラフが滑らかでないものになってしまう．この問題を解消するために，全ての条件において，歩行のデータをモーションキャプチャーから DRUM のデータに変換する際に，前後 5 フレームずつで平滑化を行った．また抗力についても，前後 0.0025s ずつで平滑化を行うことで，抗力が時間に応じて滑らかに変化するグラフを得た．

4.2.2　結果

シミュレーションの結果得られた，全身・左右の足が受ける抗力の平均値，最大値及び，両足以外の部位が受ける抗力の平均値を流速ごとにまとめると表 4.1 と図 4.1 のようになった．ただし力は水路の後方 (x 軸負) を正としている．

また平均値，最大値を考えた区間は，歩行の 1 周期のうち，後述する足の重なりが起きなかった区間 T_1, T_2, T_3 のうちであり，時間にすると $t_0 = 0.900595$s から $t_3 = 1.500271$ までの間である．

ここでは全身が受ける力の平均値，最大値をそれぞれ $\mathrm{Body}_{\mathrm{average}}, \mathrm{Body}_{\mathrm{max}}$，左足が受ける抗力の平均値，最大値をそれぞれ $\mathrm{L}_{\mathrm{average}}, \mathrm{L}_{\mathrm{max}}$，右足が受ける抗力の平均値，最大値をそれぞれ $\mathrm{R}_{\mathrm{average}}, \mathrm{R}_{\mathrm{max}}$ としている．

4.2.3 抗力の計算

レイノルズ数 R_e が小さい時，物体の抗力係数を C_d，流れに対する物体の断面積を A，流体の密度を ρ，流体の速度を u，流体が流れる向きと逆向きの物体の速度を v とすると，流体を移動する物体が流体から受ける抗力 D は，以下で表される．

$$D = \frac{C_d \rho A (u+v)^2}{2} \tag{4.1}$$

このシミュレーションでは片足を半径5cm, 高さ 40cm の円柱とみなし, 流体の密度 $\rho = 1000\mathrm{kg/m}^3$, 抗力係数 C_d を 1.2 とする．DRUM の計算から得られた，左右の足それぞれと，体全体が受ける抗力，足が静止しているとした場合 ($v = 0$) と，各時刻の足の速度を考慮した場合で，式 (4.1) から得られる抗力それぞれを加えて図にまとめる．

流速ごとの，抗力を時間追跡したグラフは図 4.2 から図**??**のようになった．力が正であれば，水路の前方に抗力を受けており，負であれば後方に抗力を受けていることになる．

ここでは全身，左足，右足が受ける抗力をそれぞれ Body，Left Leg，Right Leg で表し，足の速度を 0 としたときの (4.1) から得られる抗力を D_0，各時刻における左足，右足それぞれの速度を考慮し式 (4.1) から得られる抗力をそれぞれ D_L, D_R で表している．

また 0.05s 以前は人体が静止している状態から急激に速度を持ち動き始め，負の抗力がとても大きくなってしまうためグラフに省略している．

4.2.4 姿勢による抗力の変化

ここで流速を 1.0m/s としたときの抗力の時間変化を考える．歩行する人体の姿勢において，右足を上げ始めてから，次に右足を上げ始める瞬間までを歩行の 1 周期とし，その 1 周期を図 4.13 に示すように T_1 から T_4 まで 4 つの区間に分けて考察する．

区間 T_1 において

この区間は，図 4.15 の矢印のように右足が地面を蹴り始める瞬間である．右足が上がるにつれて右足の抗力が増加する一方，軸足となる左足の抗力は，足の速度を 0 としたときの理論値に近くなっていることが読み取れる．一方右足は実測値が理論値を大きく下回っている．これは式 (4.1)

において，片足が半径 0.05m，高さ 0.4m の円柱とみなし，面積および抗力係数をどの時刻においても一定の数値と定めているからである．足の一部が水面から出たり，足の向きが斜めになったりすると，流体がぶつかる x 軸方向への足の断面積は小さくなるため，抗力は小さくなる．それによりこの誤差が生じていると考えられる．

区間 T_2 において

この区間は，図 4.17 のように，上がっている右足がまだ左足の後方から前方に移動するフェーズである．このフェーズでは左足の抗力において，実測値が理論値を上回っており，より強い力を後ろ向きに受けている．あまり動きがない左足の抗力は，式 (4.1) での計算上変化はないはずである．しかしながら左足の抗力が，理論値を超えている原因としては，右足が前に動くにつれて周りの流体が巻き込まれて，左足の前面に押し返すように流れが発生しているという事象が考えられる．

区間 T_3 において

この区間は，図 4.19 のように，右足が着地し始め，左足が上がり始めるまでのフェーズである．両足ともに，実測値が理論値よりも 30N ほど下回っているが，他のフェーズに比べると実測値と理論値が似た曲線を描いていることがわかる．

区間 T_4 において

この区間は，図 4.21 のように，左足が上がり始めてから着地するまでのフェーズである．赤い曲線が示す右足の抗力が x 軸正方向に大きな力を受けていることが読み取れる．問題点として図 4.24 のように，左足が右足と重なってしまい，正しい圧力が測定できていない．正に大きく触れる原因は，動く左足に巻き込まれて発生した水流に右足の裏側を押されて，x 軸の正の向きに抗力を受けているという理由が考えられる．一方左足が負の方向に大きな力を受けていることも読み取れる．

1 周期のまとめ

T_2 での左足を除き，全ての時間で実測値が理論値よりも小さくなることが分かった．この原因として，1 つは前述の通り式 (4.1) において，片足の面積および抗力係数をどの時刻においても一定の数値と定めているからである．2 つめの理由として，両足の相互作用が考えられる．片足の動きに巻き込まれた流体が，もう片方の足の裏側を押すような作用を施し，実測値が小さくなると考えられる．

4.2.5　流速による抗力への影響

1 周期に 1 度右足の実測値が水路前向きに大きくなってしまう現象が，他の流速の場合にも見られた．また実測値において，流速 2m/s を超えると，両足以外にかかる力が大きくなることが読み取れる．これは図 4.25 のように，体に押し寄せた水が上半身に打ち付け，両足以外の部位においても大きな抗力を受けているからであると考えられる．しかしそれ以外の区間では，どの流速でも両足それぞれの実測値は，D_0 よりは大きく，D_L, D_R よりは小さくなることが読み取れる．

ここで図**??**で示した流速と抗力の平均値，最大値を両対数グラフに変換したグラフを図に示す．また式 (4.1) に比例定数 k を乗じた以下の抗力

$$D = k\frac{C_d \rho A(u+v)^2}{2} \tag{4.2}$$

を考える．先述の前提と同様に，片足を半径 5cm，高さ 40cm の円柱とみなし，流体の密度 $\rho = 1000\mathrm{kg/m}^3$，抗力係数 C_d を 1.2 とする．また足が静止している状態を基準とし，足の速度を $v = 0$ とすると，この D は v の 2 次関数となり，両対数グラフ上では直線となる．

このとき k をそれぞれ 1.0,2.0,3.0,4.0 としたときの，D の値を表す直線も共に示すと，図 4.26 のようになる．もし実測値が $k = 1.0$ の直線と重なれば，$C_d = 1.2, v = 0$ としたときの理論値と実測値が一致するということである．

同図から，流速が大きい領域では，両足それぞれの抗力の平均値は，$v = 0$ としたときの直線に近似できることが読み取れる．また流速が大きい領域では，比例定数を大きくすると，全身が受ける抗力が直線に近似できることも読み取れる．

また足の速度 v を $v = 0.827\mathrm{m/s}$ で常に一定としたときの, 式 (4.1) から得られる抗力の折れ線を図 4.27 に示す．こちらは $v = 0\mathrm{m/s}$ とした場合と比べ，両足それぞれの最大値に近くなることが分かり，これらの直線近似の精度が高くなることが読み取れる．ただし流速の低い領域では，両足の抗力の平均値を直線近似することは難しいことも読み取れる．

4.3　まとめ

シミュレーションの結果分かったことをまとめると以下のようになる．

- 足が重なってしまった区間を除いては，全体として両足がそれぞれ流体から受ける抗力は，D_0 よりは大きく，D_L, D_R よりは小さくなる
- 流速が大きくなるほど，両足以外が受ける抗力が増加する
- また両足の相互作用などにより，実測値が D_L, D_R と異なる曲線を描く区間が存在する

- 流速の大きい領域では，両足それぞれの抗力は 2 次曲線近似ができる可能性がある
- 流速の小さい領域では，足の速度 v を考慮したときの方が直線近似の精度が高くなる

4.4　本章の図表のまとめ

	流速 (m/s)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
平均 (N)	全身	32.0	79.2	99.5	148.9	232.6	368.6	569.3	860.6	1193.1	1503.9	1862.4
	左足	3.6	23.2	32.3	56.9	93.7	143.5	203.8	279.7	354.2	413.0	486.0
	右足	27.3	54.2	65.3	90.0	131.3	191.0	262.2	343.8	416.4	481.7	570.5
	足以外	1.0	1.8	1.9	1.9	7.7	34.1	103.4	237.1	422.5	609.1	805.9
最大 (N)	全身	70.3	151.3	177.7	248.8	456.8	747.4	1227.7	1755.8	2211.0	2903.8	2862.5
	左足	16.0	44.9	62.6	103.5	180.3	261.0	410.3	481.3	543.0	668.3	614.1
	右足	55.4	101.7	117.0	158.0	257.9	349.9	463.6	537.8	524.8	549.5	687.7

表 4.1: 各流速と抗力の平均・最大値

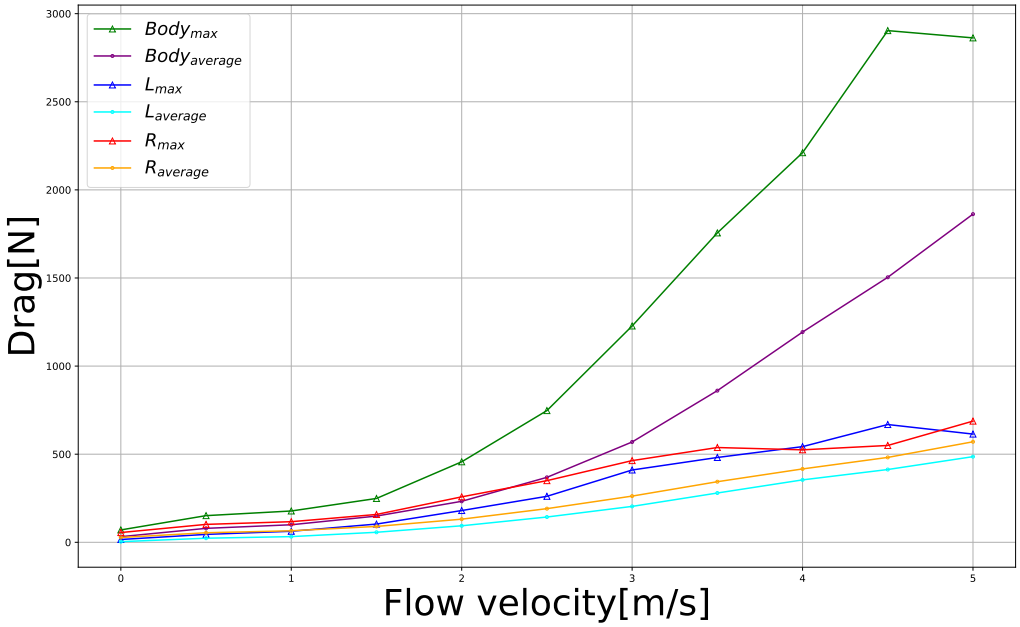


図 4.1: 各流速と抗力の平均・最大値の折れ線グラフ

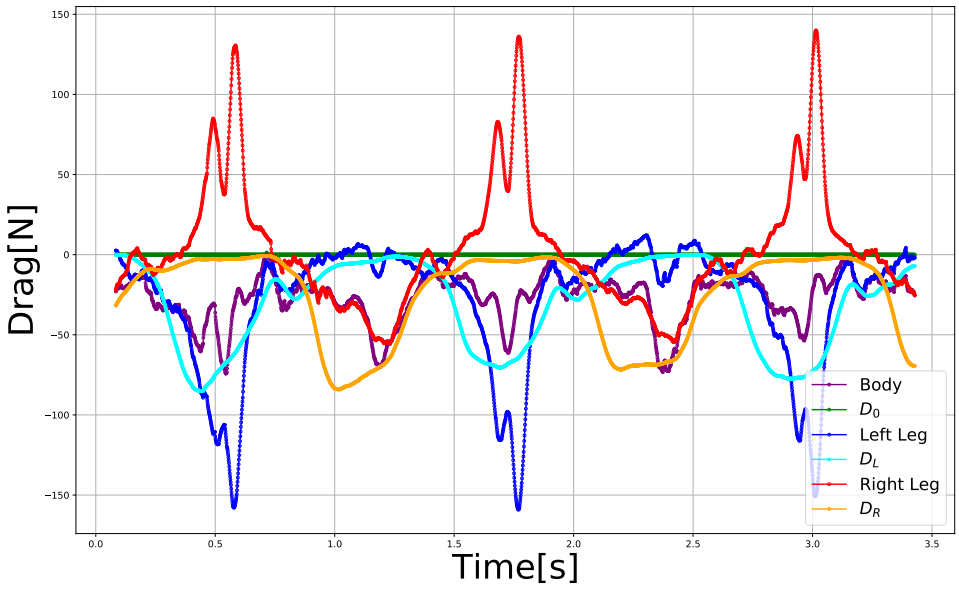


図 4.2: 流速 $u = 0.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

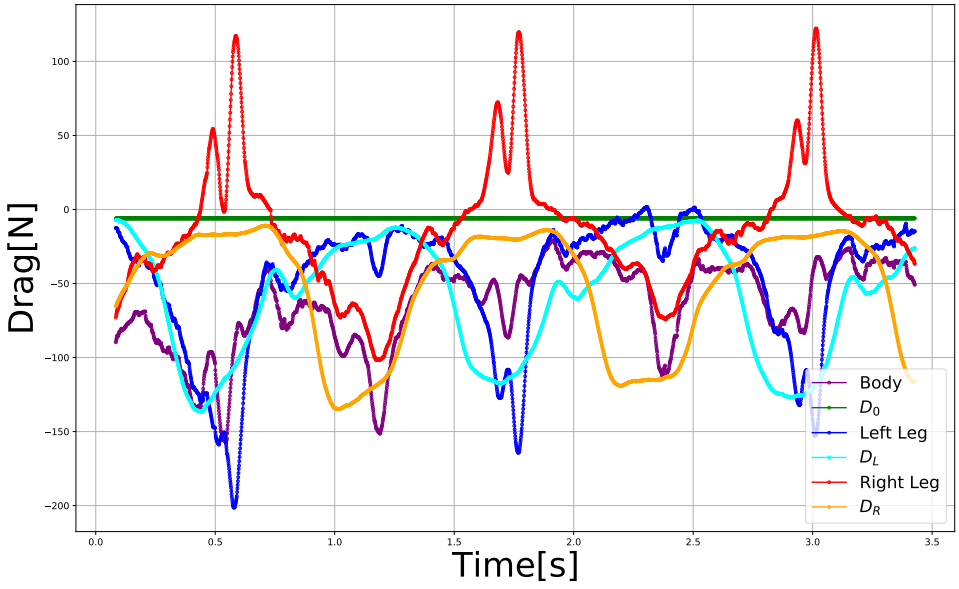


図 4.3: 流速 $u = 0.5\mathrm{m/s}$ のときの抗力

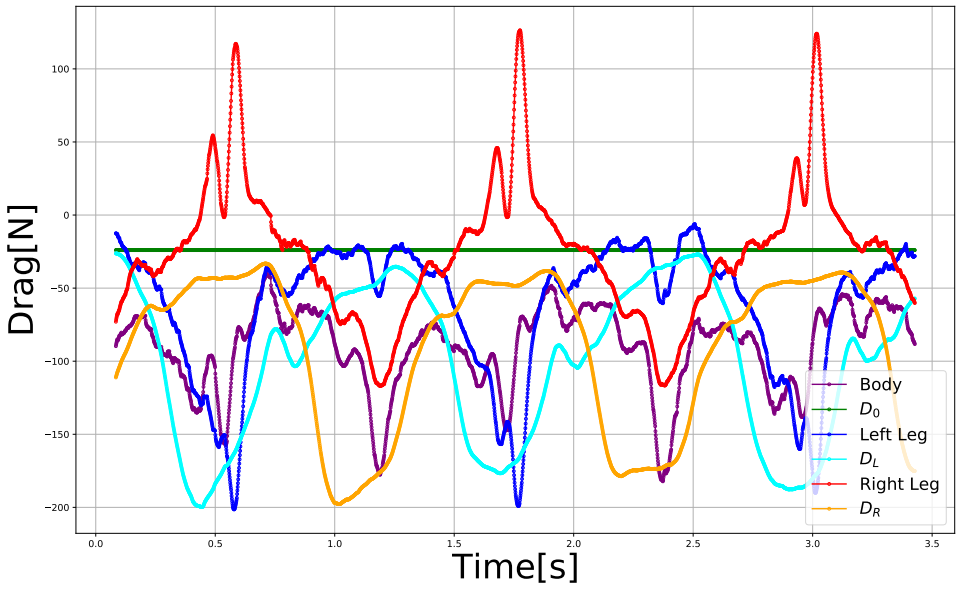


図 4.4: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

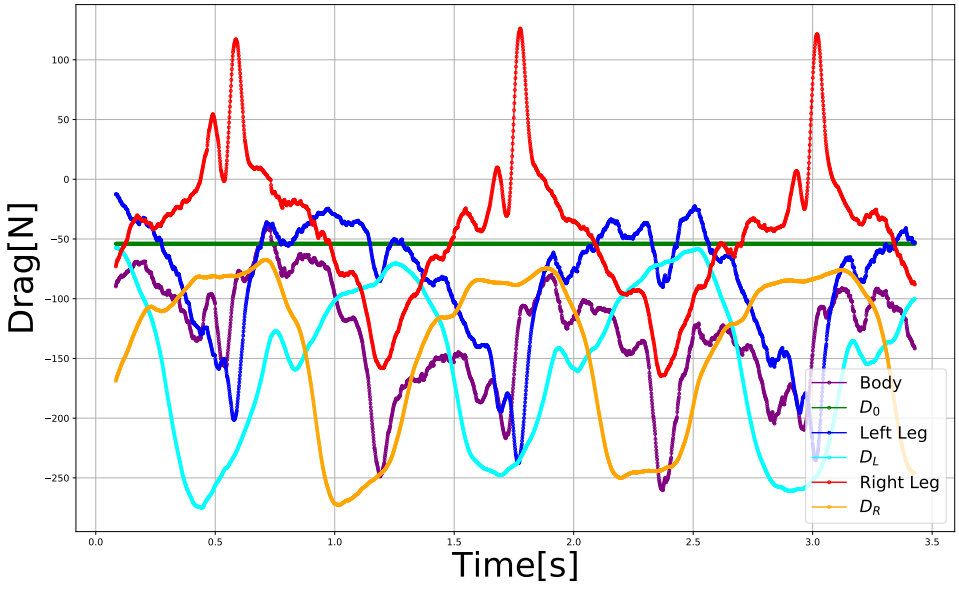


図 4.5: 流速 $u = 1.5\mathrm{m/s}$ のときの抗力

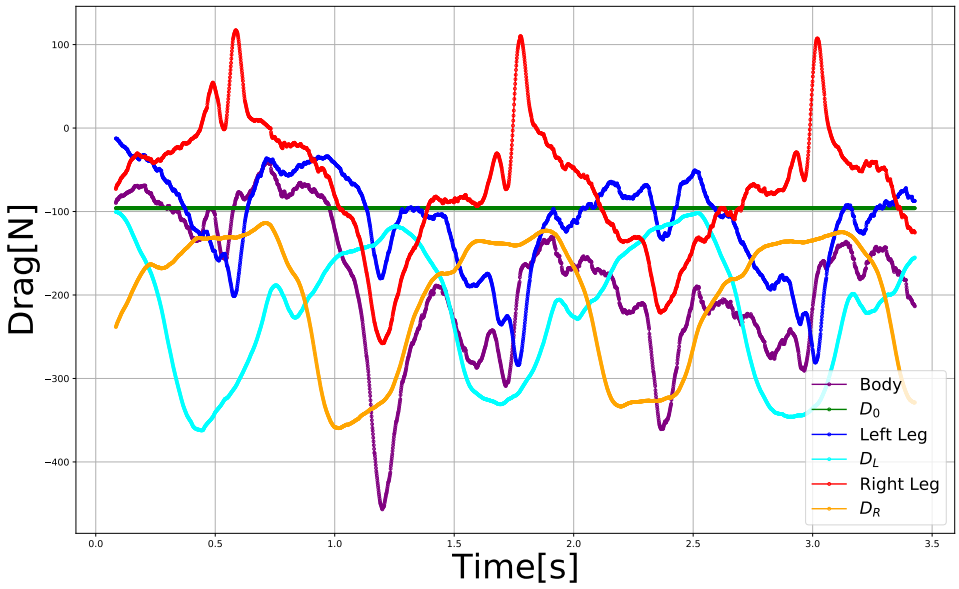


図 4.6: 流速 $u = 2.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

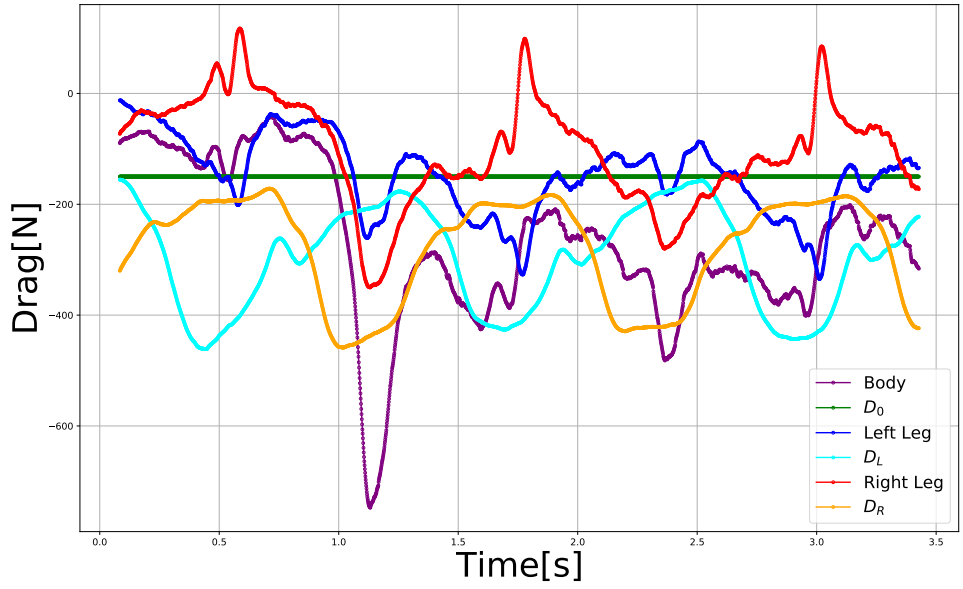


図 4.7: 流速 $u = 2.5\mathrm{m/s}$ のときの抗力

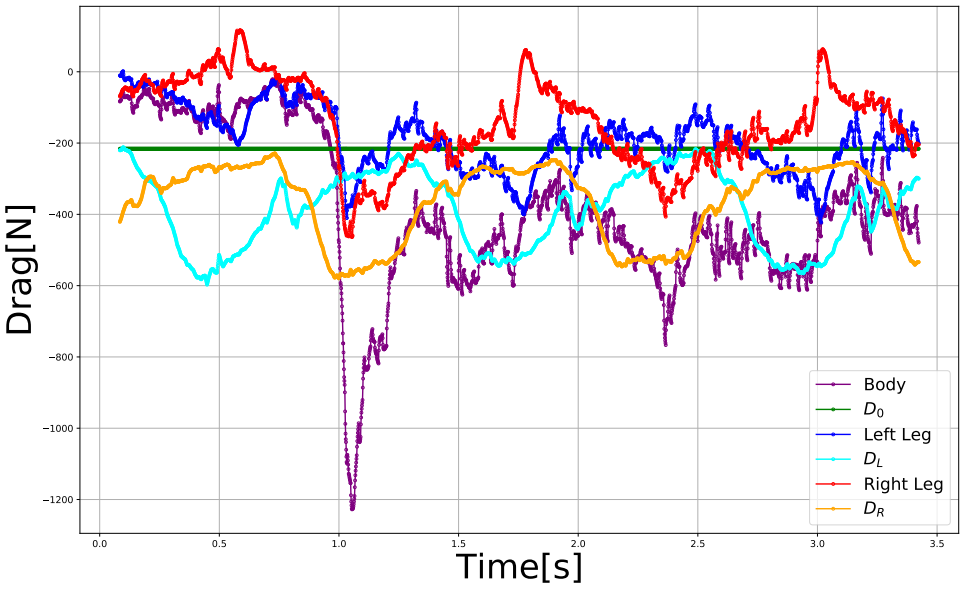


図 4.8: 流速 $u = 3.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

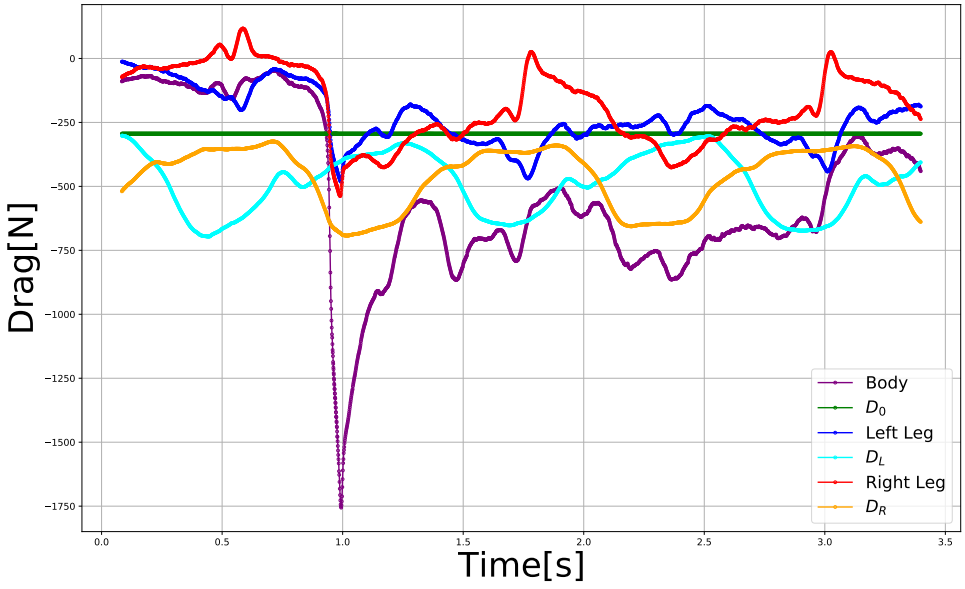


図 4.9: 流速 $u = 3.5\mathrm{m/s}$ のときの抗力

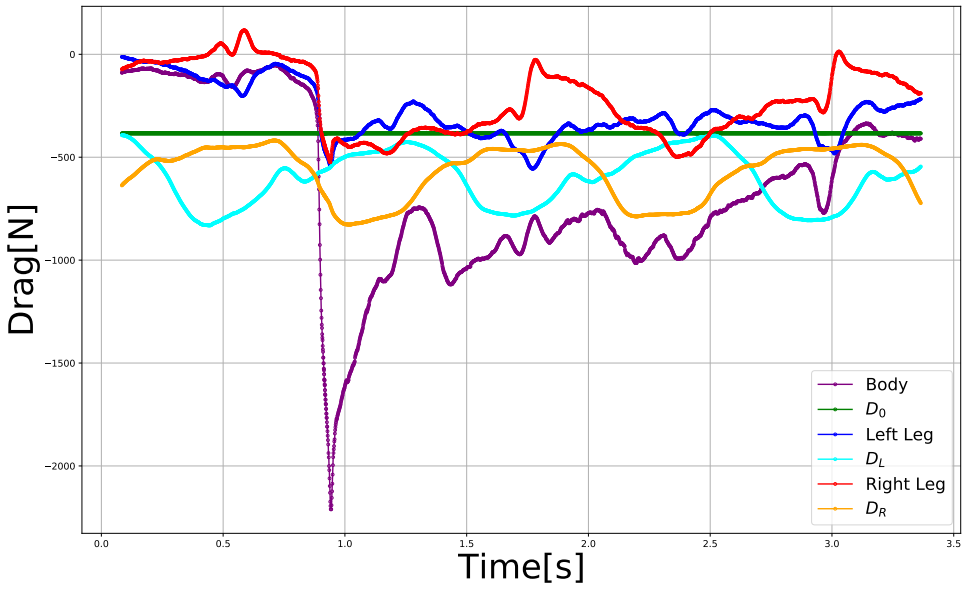


図 4.10: 流速 $u = 4.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

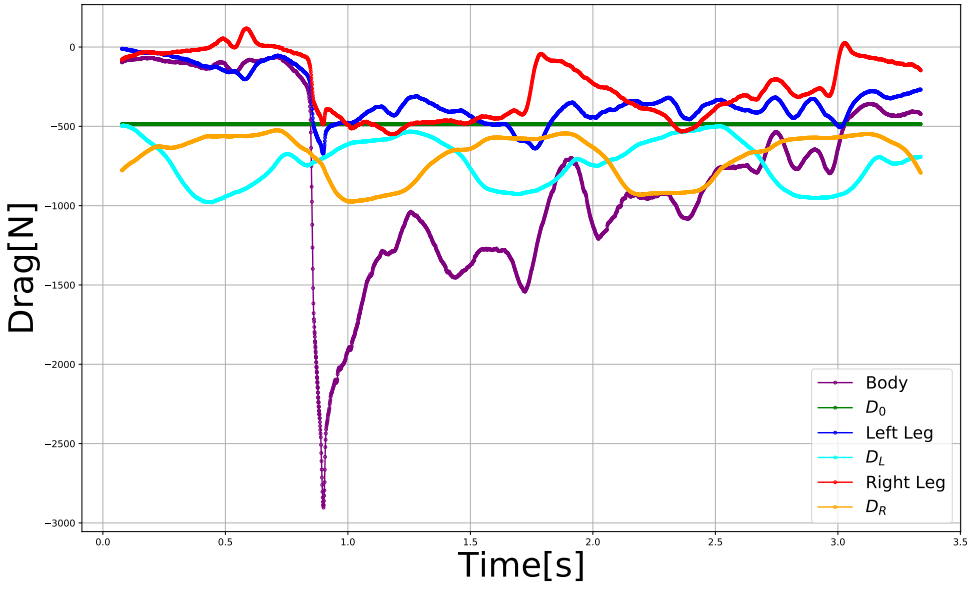


図 4.11: 流速 $u = 4.5\mathrm{m/s}$ のときの抗力

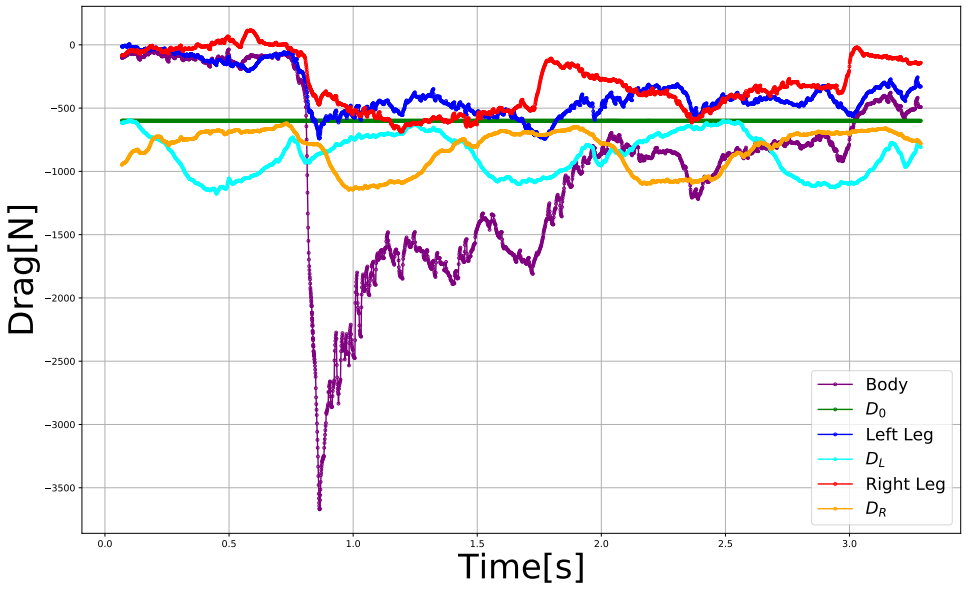


図 4.12: 流速 $u = 5.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力

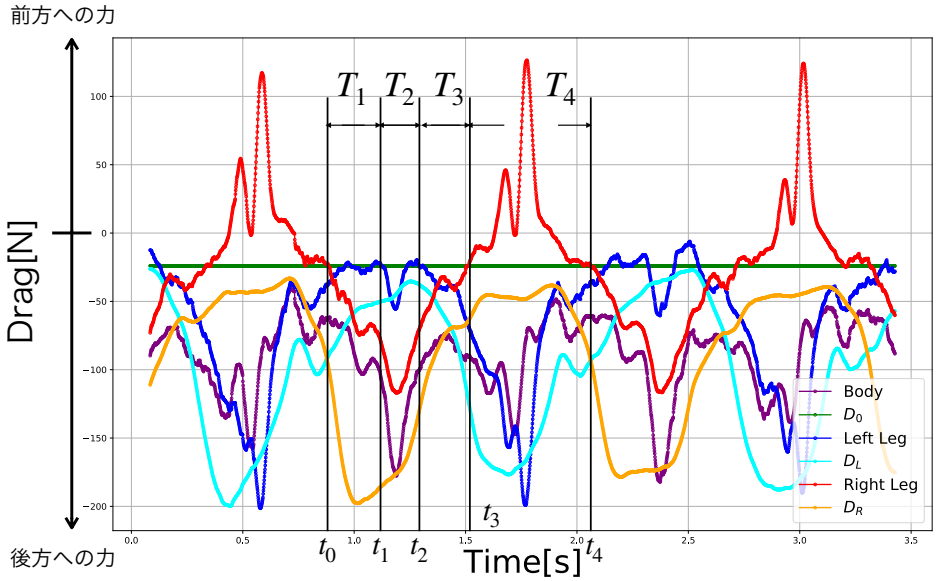


図 4.13: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}$ のときの抗力と歩行の周期

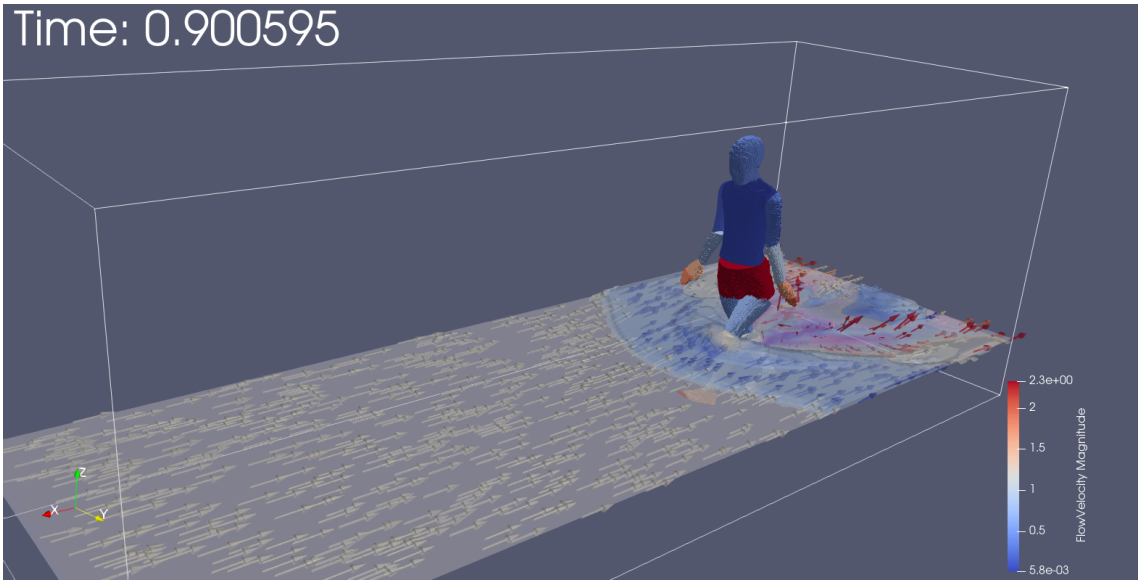


図 4.14: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_0$ の様子

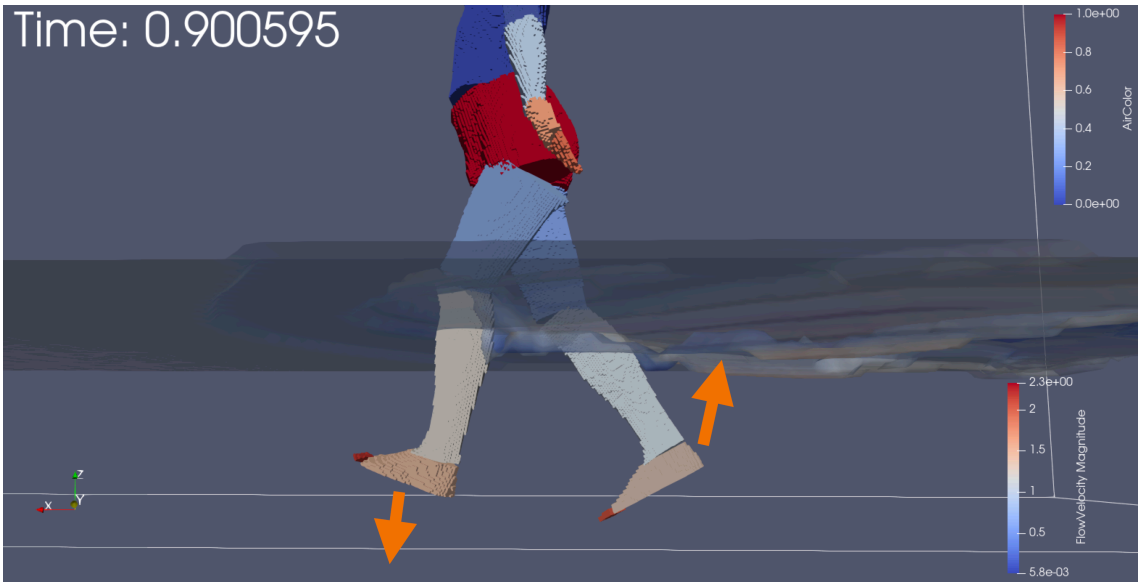


図 4.15: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_0$ の様子 (横)

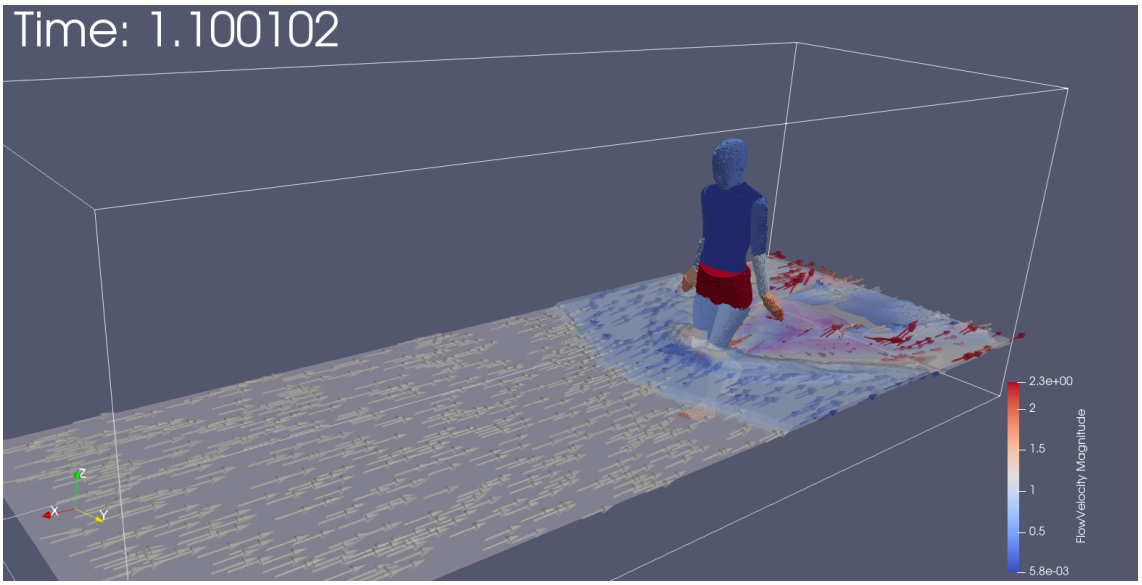


図 4.16: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_1$ の様子

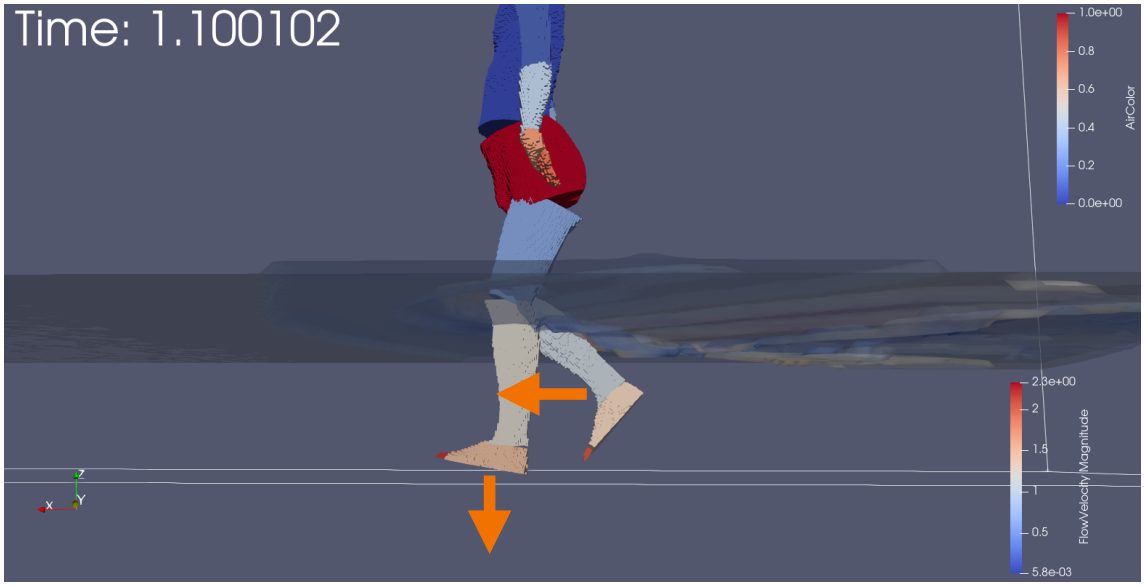


図 4.17: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_1$ の様子 (横)

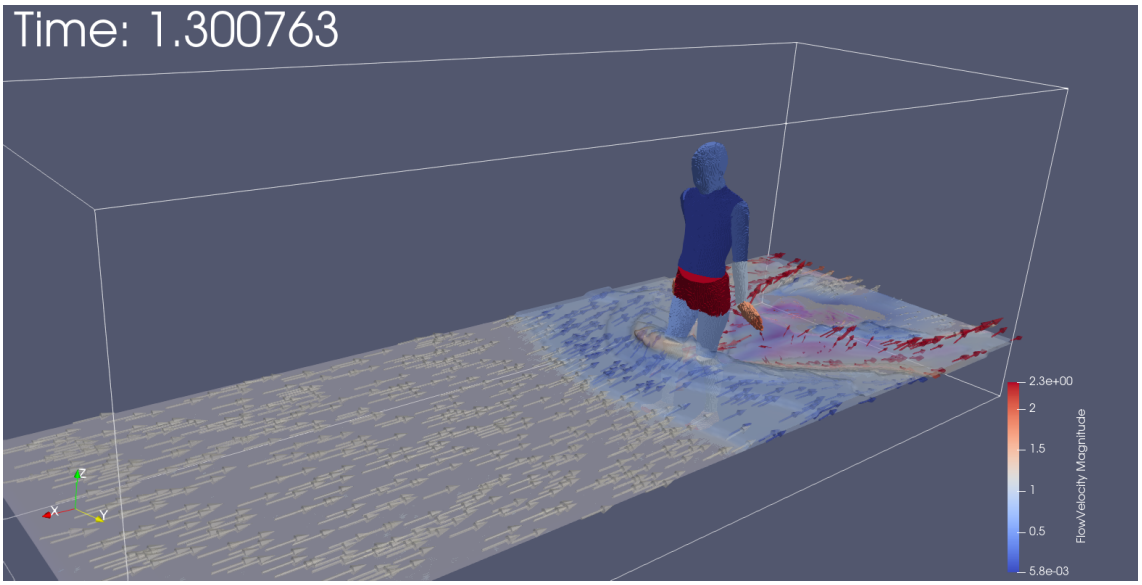


図 4.18: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_2$ の様子



図 4.19: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_2$ の様子 (横)

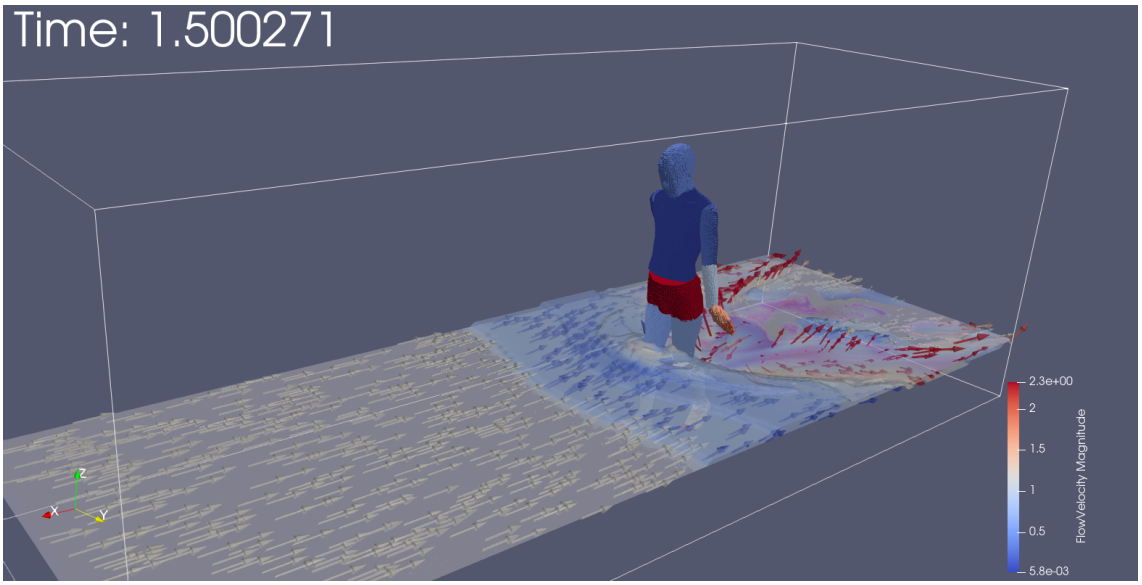


図 4.20: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_3$ の様子

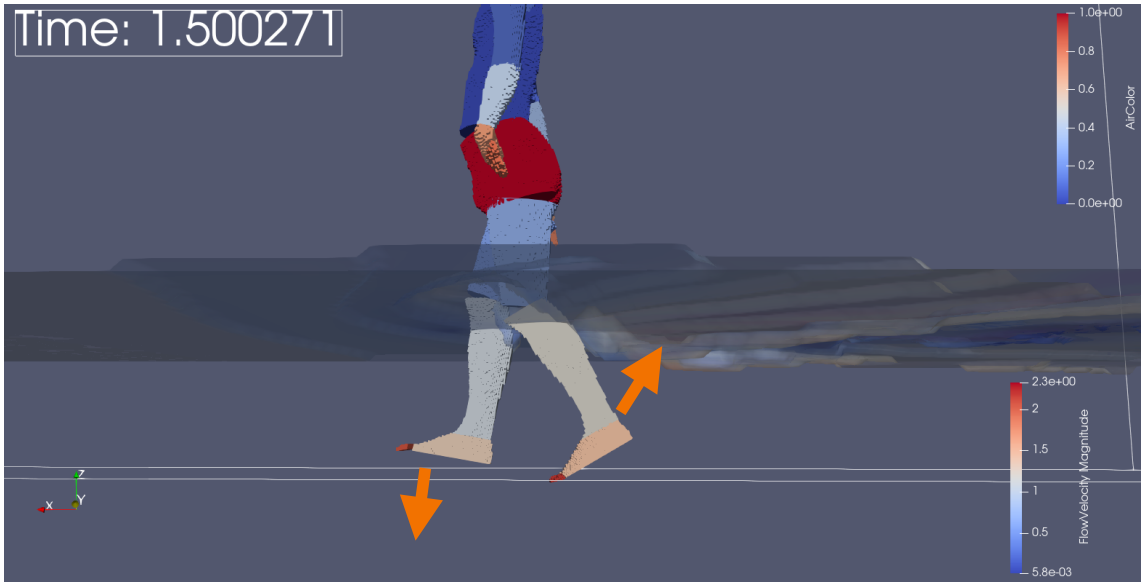


図 4.21: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_3$ の様子 (横)

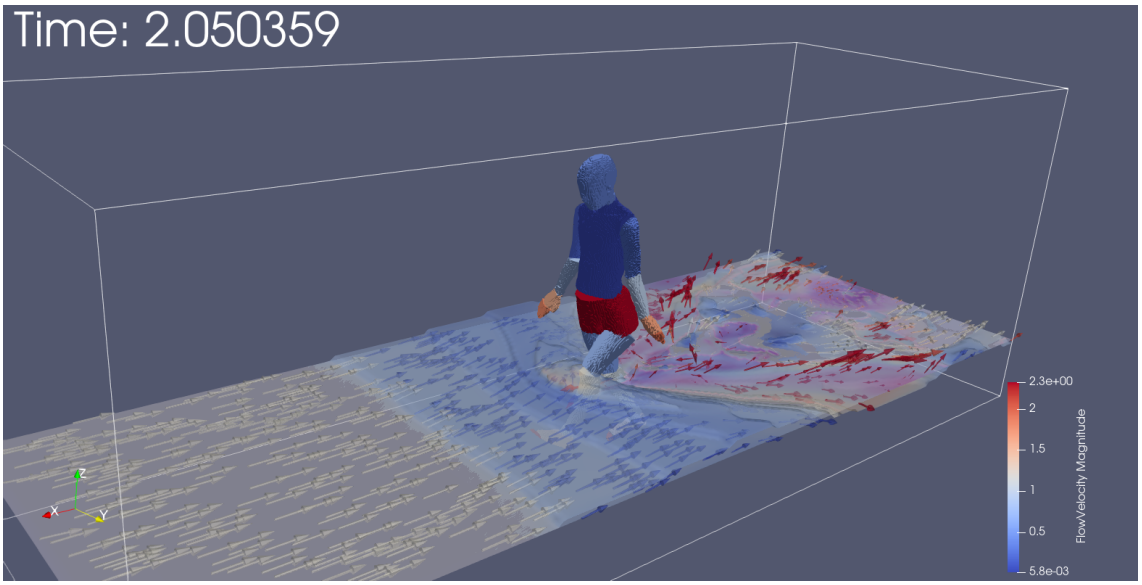


図 4.22: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_4$ の様子



図 4.23: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}, t = t_4$ の様子 (横)

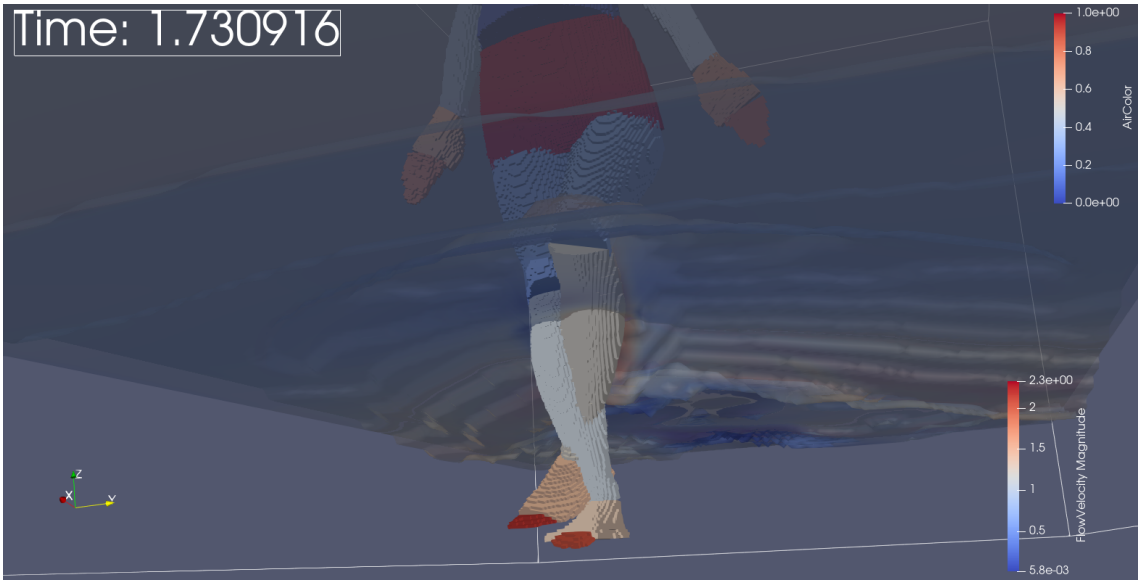


図 4.24: 流速 $u = 1.0\mathrm{m/s}$, 足が重なっている様子

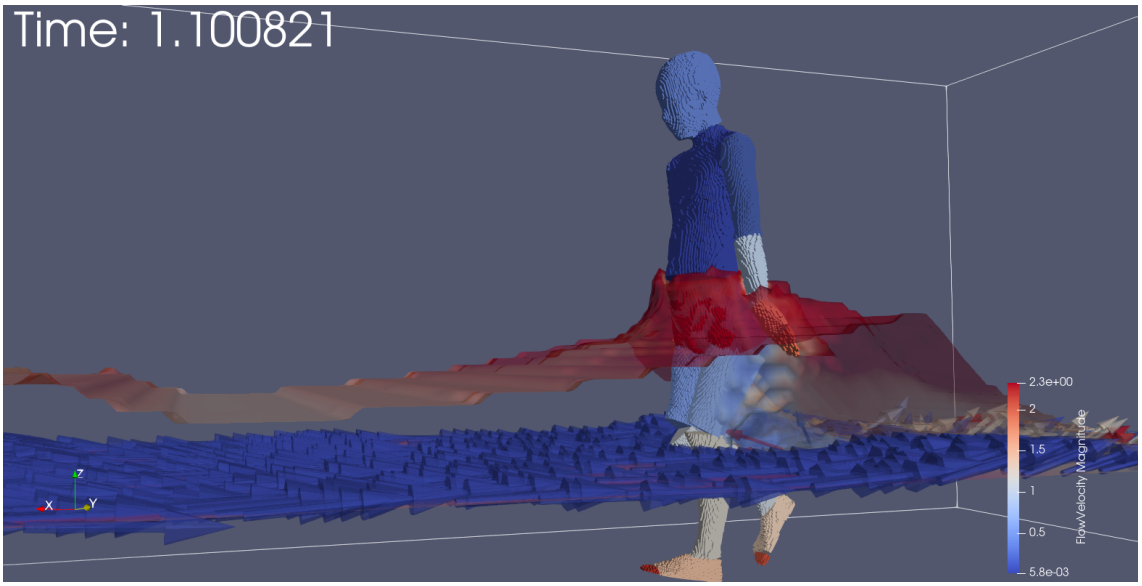


図 4.25: 流速 $u = 3.0\mathrm{m/s}$, 波が打ち付ける様子

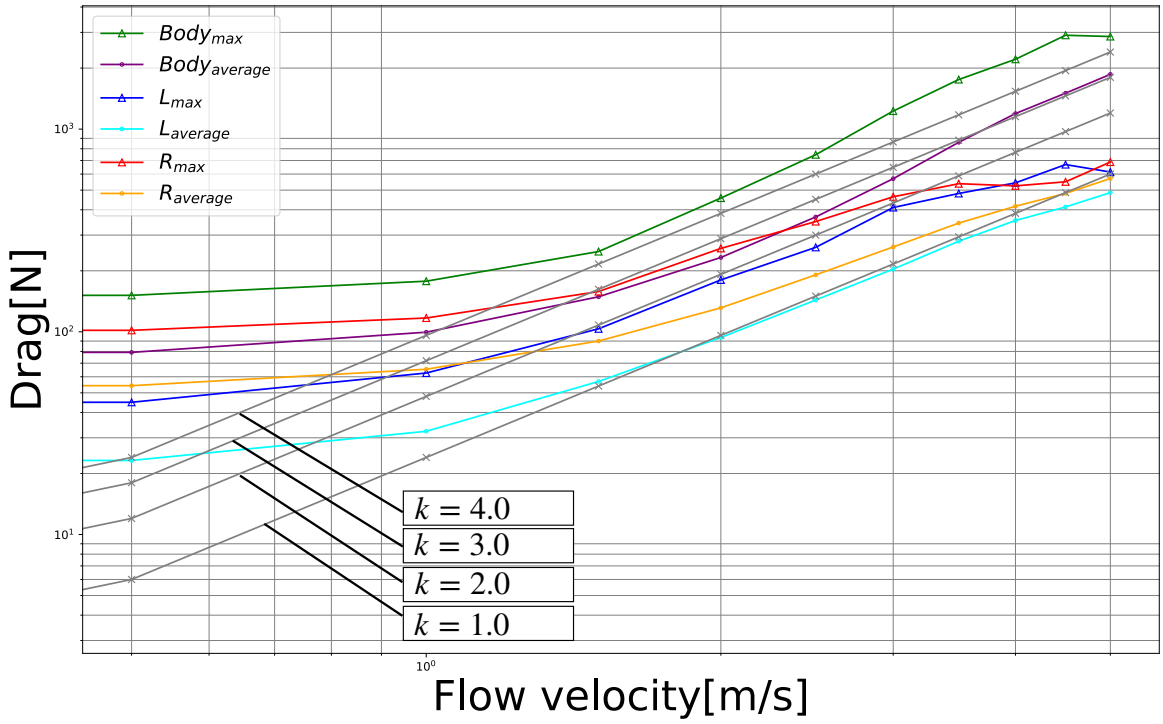


図 4.26: $v = 0$ としたときの各流速と抗力の平均・最大値の両対数グラフ

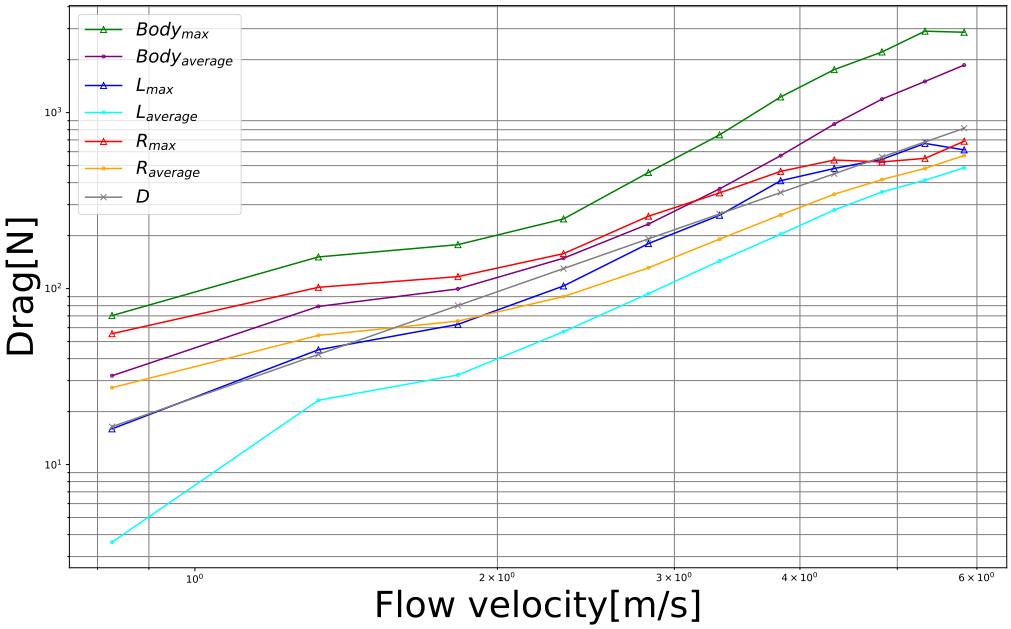


図 4.27: $v = 0.827\mathrm{m/s}$ としたときの各流速と抗力の平均・最大値の両対数グラフ

第5章　おわりに

5.1　研究全体のまとめ

我が国日本では，近年水難事故が相次いでいる．そのため安全な避難路の設計基準や，避難における有効な人体の姿勢などを研究することは非常に有意義である．しかし，水路を歩く人体に対する抗力の動的な解析を行った研究は少なかった．本研究では以上の背景に鑑み，細い水路を歩く人体にかかる抗力の動的解析を数値計算を用いることにより行った．その結果以下のような知見を得た．

- 流水歩行時，軸足の裏側にはもう片方の足が巻き込む水による流体力が発生することが分かった．
- 流速一定下という条件において，各足が受ける抗力が歩行の 1 周期でどのように変化するのかが分かった．
- 水路内を歩行する人体が受ける抗力を正確に算出するには，足の水流に対する断面積 A や抗力係数 C_d を時間追跡しなければならないことが分かった．
- 流体力の数値解析には，モーションキャプチャの人体モーションを用いることは有効であるが，抗力の解析には平滑化が必要であることが分かった．

5.2　今後の課題

本研究でシミュレートしたのは，狭い水路を人が歩行するときに受ける力というものだった．身長，骨格，体重といった人体の条件，水深や水路の幅といった水路の条件の検討が単純なものになっているため，今後パラメータを増やしていけば，避難水路の設計や，身長，体重別の危険指標などを提案できる可能性がある．歩行動作についても，一部両足が重なってしまっている箇所が見られたため，改善の必要がある．

また歩行の一連の動作はすべて一定の動作をするものとして扱ったが，流速が大きくなるにつれて，人が水路を歩行するのは困難になり，滑ったり転倒したりする可能性があるため，より現実的

な状況を仮定するには抗力に応じて人体が動くようなシミュレーションをする必要があるだろう．加えて今回用いた手法を応用すれば，歩行だけでなく，様々な動作について，流体から受ける力を測定できるであろう．

5.3 謝辞

本研究に際して，指導教官である中村恭志准教授には終始多大なるご指導を賜りました．新型コロナウイルス感染拡大の影響により研究が滞る中，研究の着想，論文の執筆のみならず生活面においても終始助言をいただきました．深く感謝を申し上げます．

また中村恭志研究室と木内豪研究室による合同ゼミでは，様々な角度から助言をいただきました．両研究室の方々に感謝いたします．

参考文献

[1] 警察庁生活安全局生活安全企画課:令和元年における水難の概況，警察庁，2020

[2] 令和元年台風第 19 号等に係る被害状況等について，首相官邸，非常災害対策本部，2019

[3] 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，高木茂知，浜口憲一郎，陳志軒:避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，Vol.38，1994

[4] 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，浜口憲一郎，陳志軒:水害時の安全避難行動 (水中歩行) に関する検討，水工学論文集，Vol.39，1995

[5] 中村恭志，安嶋大稀，相澤敦武，井上徹教:人体流動連成解析に基づく溺水数値解析シミュレーションモデルの開発，水工学論文集 JSCE61 - pp.601-606，2017

[6] 河内まき子，持丸正明:AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003，産業技術総合研究所 H18PRO-503，2006

[7] http://mocap.cs.cmu.edu/(2021 年 2 月 4 日現在)