平成３０年度　卒業論文

溺水シミュレータ DRUM：抗力の再現性の検証とエントラップメント事故への適用

Drowning human model DRUM: Accuracy of the drag force evaluation and application to entrapment accidents

---

指導教員　中村恭志　准教授

東京工業大学　工学部　土木・環境工学科

学籍番号　15_07764

鈴木　寛太郎

目次

ページ

第 1 章　序論 3

1.1　研究背景 3

1.2　既往研究 3

1.3　研究目的 4

参考文献 5

第 2 章　計算手法 6

2.1　気相・液相・固相の表現 7

2.2　流動計算 7

2.3　剛体の計算 8

2.3.1　流体が剛体に与える力　流体力 8

2.3.2　剛体の基礎方程式 8

参考文献 10

第 2 章図表集 11

第 3 章　DRUM による抗力検証計算 16

3.1　球体を用いた DRUM の抗力再現精度検証 16

3.1.1　レイノルズ数と抗力係数を用いた評価 16

3.1.2　レイノルズ数と抗力係数 16

3.1.3　シミュレーションの設定 17

3.1.3.1　設定 17

3.1.3.2　計算格子 17

3.1.3.3　球の表現 17

3.1.3.4　体積率の算出 17

3.2　自然現象によるレイノルズ数の範囲 18

3.3　流れの中の球体と現象 18

3.4　ボクセルに関する比較 19

3.4.1　検証結果 19

3.4.2　体積率の損失 19

3.4.3　提案手法 20

3.4.4　提案手法による欠損の改善 21

3.4.5　PIC 法による体積損失の試行実験 21

3.5　計算格子に関する比較 22

ページ
3.5.1　検証結果 22
3.5.2　計算格子による射影面積の過大評価 22
3.6 レイノルズ数別検証 24
参考文献 25
第 3 章図表集 26

第 4 章　エントラップメント事故への適用 43
4.1　計算条件とケース 43
4.2　計算結果 44
4.3　円柱群による近似的推定 44
4.3.1　円柱モデル 1：1 つの円柱 44
4.3.2　円柱モデル 2：体別円柱 45
参考文献 47
第 4 章図表集 48

第 5 章　結論 63

謝辞 64

第１章　序論

1.1　研究背景

近年，日本では局地的な豪雨，台風等による洪水や氾濫が全国的に頻発しており，2011年におきた東日本大震災においては巨大な津波による被害も受けるなど多くの水災害に見舞われている．日本の平野部は大きな河川の河口付近に広がり，そこに人口が多い都市部が形成されている．また，2,000m から 3,000m 級の山脈が列島の中央に配置しているため，多くの急勾配の河川を有している．河川の長さが短く流域面積が小さいこともあり，強い雨が降ると急激に河川が増水し洪水となる．このようなケースにより人口集中部に大きな被害をもたらす．また，南海トラフ地震等に伴う津波被害も危惧されている．近年の水害発生件数[1-1]でいえば全国の 1,741 市町村のうち(平成 27 年末)のうち，平成 18 年から平成 27 年までの 10 年間に一度も河川の氾濫などによる水害が起きていないのは，わずか 49 市町村であるという．また，警視庁[1-2]の報告によれば，平成 29 年の水難者数は全国で 1,614 人におよび，うち死者・行方不明者は海で 56.6 パーセント，次いで河川が 25.6 パーセントである． 2011 年の牡鹿半島の東南東 130 ㎞付近の三陸沖を震源として起こった東日本大震災は，東北及び北関東に甚大な被害を与え，1 万 5 千人余りの人命が失われた．その死者の 9 割以上が津波による溺死とされている．

水難事故の例として，海でいえば津波や離岸流，河川であればエディーライン下における水底への引き込み現象や，流れ中の障害物によって捕獲されてしまうエントラップメント現象などがあげられる．

いずれにおいても，水の流れの中に人が巻き込まれてしまう現象にあり，流れと人の相互作用を解き明かすことが求められる．流れと人との相互作用の解明は，水難事故に対する評価を可能にすると期待される．

1.2　既往研究

河川や海において危険とされるポイントやその要因についての報告は過去の事例をもとに経験的に収集されているものの実際にその危険性について定量的に評価をした実験はほとんどない．エントラップメントも危険な事例として報告はされているもののその現象に対する実験はされていない．

水災害といった分野とは別に人体と流れの関係をとらえる分野に，スポーツ工学の分野があげられる．中島ら[1-3]は人体水泳モデル Swimming hUman Model（SWUM）によっ

て水中における泳動作から，人体の推進速度を解析するモデルを開発した．人体はパーツごとに円柱のような形によって構成されているモデルである．しかし，このモデルにおける流体部の水は静水状態にあり，人体の動きも泳動を周期的に与えたものであった．

気相，液相，固相の三相のように物性の異なった物体が混在する系のシミュレーションは計算流体力学においてきわめて難しい課題とされてきた．そこで流体と剛体の相互作用を計算する手法として矢部らによって Constrained Interpolation Profile – Combined Unified Procedure (CIP-CUP) 法[1-4]が提案された．この手法は自由表面を伴う気体・液体・固体の三次元混相流解析手法である．

また，近年水難事故による溺水を防止するために水回りでの活動にはライフジャケットの着用が推奨されている．しかしながらライフジャケットの性能は静的水中における浮力による指標のみで，動的な流れの中での性能の評価というのはされていない．そこで中村ら[1-5]は 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，安嶋ら[1-6]とともに強い非定常流中における人体の挙動をとらえる例として，津波時でのライフジャケット着用の有用性検討のためのシミュレータ開発が行われてきた．

1.3　研究目的

以上のように，人体と流体の非定常流れ場における相互作用を用いた連成数値シミュレータの開発というのは，スポーツ工学分野に限らず水難事故における防災という観点で非常に重要な役割を担うと考えられる．中村ら[1-5]によって開発された人体相互作用シミュレータ DRowning hUman Model （DRUM）は津波に巻き込まれた場合の人体の挙動をよく再現しており，津波時におけるライフジャケットの有効性を検証するうえで期待される手法である．

しかしその反面，このモデルにおける定量的な力の再現性の検証というのは行われていない．そこで，この研究では DRUM を用いた定量的な流体力の再現精度について検証を行うことが目的となる．また，検証にはレイノルズ数を用いることになるが，自然現象中における人体との相互関係を考えてレイノルズ数は 1 万を超える高レイノルズ数を対象に考えるとする．

水難事故としてエントラップメントを例に，流れと人の相互作用について DRUM を用いてシミュレーションを行い考察をする．特にフットエントラップメントという流れの中で足が捕獲されてしまう現象について取り扱う．フットエントラップメントは河川を想定される事例でよくあげられる現象であるが，流れの中に障害物が多くなる津波においても想定できるとして今回取り扱った．

またエントラップメントを通して，DUMR による高度な数値シミュレーションによって解かれる複雑な人体と流体の相互作用の現象を簡易化して考えることができれば，なおよいと考えられる．そこで人体と流れの相互作用を簡易モデルにおいても再現可能かどうかについても検討する．

本論分の構成では第 1 章では序論として実験の背景，既往研究，目的を述べた．次に第 2 章においては DRUM に用いられる数値計算手法の解説を行う．第 3 章では DRUM の流体力の定量的な評価のための理論式の確認及び検証における結果と考察を行い，改善点を考える．第 4 章では DRUM を用いてエントラップメントを取扱い，流れと人体の相互作用について考察をする．さらにその結果を人体を円柱と見立てた場合の抗力と比較することで，流れと人体の相互作用の簡易的な算出が可能かどうか考察をする．第 5 章では結論として，第 3 章と第 4 章のまとめと今後の課題について述べる．

参考文献

[1-1] 消防庁国民保護・防災部参事官，平成 29 年度救助技術の高度化等検討会報告書　洪水・津波災害に伴う水案救助活動について，p16，2018

[1-2] 警視庁，平成 29 年における水難の概要，p1，2018

[1-3] 中島求，佐藤憲，三浦康郁：全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルの開発，日本機械学會論文集．B 編，Vol. 71，pp. 1361-1369，2005.

[1-4] Takashi Yabe，Pei-Yuan Wang: Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid，Journal of The Physical Society of Japan，Vol.60，No.7，pp.2105-2108，1991.

[1-5] 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－pp601-606,2017

[1-6] 安嶋大稀：津波に対する救命胴衣の有効性評価に向けた人体－流体連成数値シミュレータの開発，2018，（未公刊）

第２章　シミュレーションモデルに用いられる計算手法と検証のための理論

本研究にて用いられる DRUM（DRowning hUman Model）は自由水面を伴う気体, 液体, 固体の三次元混相流解析手法の CIP-CUP 法 [2-1]よって構成された解析モデルである. 固体である人体は剛体として扱われる．CIP-CUP 法の特徴としては，**図 2-1** の概念図のように計算格子上の流体部分の計算と固体の部分の計算を連成させて行い，格子上では気体，液体，固体を評価するために固体と気体の体積率という概念を用いて解析を行う．流体部分には基礎法的式として運動方程式となるナビエ・ストークス式，質量の保存則，エネルギー保存則を解く．流体の基礎方程式は時間分割法によって移流項と非移流項に分け移流項を CIP 法で，非移流項を差分法にて計算する．また，空気の体積率ϕは移流方程式に従い CIP 法を用いて解かれる. 剛体はニュートンの運動方程式およびオイラーの回転の運動方程式に従って，差分法により時間分割計算を行う.

2.1　気相・液相・固相の表現

CIP-CUP 法では，気体，液体，固体の三次元混相流を格子上で扱うために，該当格子内を占める物質の体積占有率(カラーファンクション）を変数として導入する．固体の体積率をϕ_sとし空気の体積率をϕで表す．ここで，ϕ_sというのは該当格子の占める体積ΔVに対しての固体が占める体積の比率であり，体積率ϕは剛体以外の体積$(1-\phi_s)\Delta V$に対して気体が占める体積の比率を表している(**図 2-2**).

剛体はボクセルという小さな立体の集合体として表現され，作成された剛体を計算格子のある空間に配置することで，格子内での体積率ϕ_sを算出する．この体積率をもとに流動中の力が算出される(**図 2-3**).

格子において密度ρ，音速C，動粘性係数 ν は上記の体積率を用いて重みづけをした平均値として算出される．すなわち

$$\rho = (1-\phi_s)\phi + \rho_{air}(1-\phi_s)(1-\phi)\rho_{water} + \phi_s\rho_{solid} \tag{2.1}$$

$$C = (1-\phi_s)\phi + C_{air}(1-\phi_s)(1-\phi)C_{water} + \phi_s C_{solid} \tag{2.2}$$

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

と表せる．ここで動粘性係数の平均としては，本来であれば剛体の表面の粗さなども考慮する必要があるが，固体における動粘性係数というものは定義が明らかでないことから動粘性係数の平均値としては流体のみの重みづけによるものとする．

また，自由表面は周辺の格子よりϕを補完し，$\phi = 0.5$となる面とした．さらに，その水面の位置変動は各格子でのϕの移流として

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

を解くことによって追跡される．ただしD/Dtは実質微分を表し，流速$\boldsymbol{u}$によって評価する．

2.2　流動計算

計算格子上の解析には，流速$\boldsymbol{u} = (u_x, u_y, u_z)$，圧力$p$，体積率を用いて平均化された$\rho$，音速$C$を用いて以下の基礎方程式に従い計算する．

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

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla\cdot\boldsymbol{u}) \tag{2.6}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = -C^2\rho(\nabla\cdot\boldsymbol{u}) \tag{2.7}$$

$\boldsymbol{g}$は重力加速度，D/Dtは実質微分を表し，流速$\boldsymbol{u}$によって評価する．時間分割法に従い，式(2.4)~(2.7)を移流，粘性，圧力の物理過程ごとに分割して計算を行う．

移流項

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

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = 0 \tag{2.5a}$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{2.6a}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = 0 \tag{2.7a}$$

粘性項

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = \nu\nabla^2\boldsymbol{u} - \boldsymbol{g} \tag{2.5b}$$

圧力項

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p \tag{2.5c}$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla\cdot\boldsymbol{u}) \tag{2.6c}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = -C^2\rho(\nabla\cdot\boldsymbol{u}) \tag{2.7c}$$

粘性項を解くにあたって用いる流速$\boldsymbol{u}^{**}$は，移流項を解いた段階での流速$\boldsymbol{u}^{*}$と剛体の運動の速度である$\boldsymbol{u_s}$を用いて流速を以下のように修正し考慮する．

$$\boldsymbol{u}^{**} = (1-\phi_s)\boldsymbol{u}^{*} + \phi_s\boldsymbol{u_s} \tag{2.8}$$

これはノンスリップ条件を課していることを意味する．ただし剛体の内部の速度$\boldsymbol{u_s}$は運動方程式を解いて求められた並進速度$\boldsymbol{v_s}$，角速度$\boldsymbol{\omega_s}$により

$$\boldsymbol{u_s} = \boldsymbol{v_s} + \boldsymbol{\omega_s}\times\boldsymbol{r_{GP}} \tag{2.9}$$

と表される．ただし，$\boldsymbol{r_{GP}}$は剛体重心からある格子点 P への相対座標，ΔVは計算格子体積を表す．

2. 3　剛体の計算

2.3.1　流体が剛体に与える力　流体力

剛体は流体の基礎方程式によって求められる圧力要素と粘性要素の力を外力として受ける．流体から受ける力$\boldsymbol{F_{fluid}}$，力のモーメント$\boldsymbol{T_{fluid}}$は剛体の存在する全領域での圧力と粘性の体積力を固体の体積率ϕ_sで重みづけしてすべての計算格子で足し合わせることで

$$\boldsymbol{F_{fluid}} = \sum_{\text{全格子点}} (\boldsymbol{\nabla} p + \boldsymbol{\tau})\phi_s \Delta V \tag{2.10}$$

$$\boldsymbol{T_{fluid}} = \sum_{\text{全格子点}} \boldsymbol{r_{GP}} \times (\boldsymbol{\nabla} p + \boldsymbol{\tau})\phi_s \Delta V \tag{2.11}$$

として算出される．ここで$\boldsymbol{\tau}$は粘性力$\boldsymbol{\tau} = \rho\nu\nabla^2\boldsymbol{u}$であり，$\nu$は水の粘性係数である．

2.3.2　剛体の基礎方程式

剛体は並進運動を Newton の運動方程式，回転運動を Euler の運動方程式に従い解かれる. 人体のように腕や頭などの複数のパーツがつながることで**図 2-5** のように接続部から力とトルクが作用する．　各体節における方程式は

$$M_s \dot{\boldsymbol{v}}_s = \boldsymbol{F_{fluid}} + \sum_{j\ on\ s} \boldsymbol{F_{s|j}} - M_s \boldsymbol{g} \tag{2.12}$$

$$\boldsymbol{I_s}\dot{\boldsymbol{\omega}}_s + \boldsymbol{\omega}_s \times \boldsymbol{I_s}\,\boldsymbol{\omega}_s = \boldsymbol{T_{fluid}} + \sum_{j\ on\ s} (\boldsymbol{r_{sj}} \times \boldsymbol{F_{s|j}} + \boldsymbol{T_{s|j}}) \tag{2.13}$$

として表され，式(2.12)は静止系，式(2.13)は体節 s の慣性主軸系から眺めたものである．M_s，$\boldsymbol{I_s}$をそれぞれ体節 s の質量，主観性モーメントとして，$\boldsymbol{F_{s|j}}$，$\boldsymbol{T_{s|j}}$は体節 s が間接 j より受ける力とトルクを表している．$\boldsymbol{r_{sj}}$は体節 s の重心$\boldsymbol{r_G}$に対する変位ベクトルである．ここで，$\dot{a} = da/dt$ を表し，aを時間微分したという意味である．

人体は**図 2-6** に示すように 10 の体節とそれをつなぎ合わせる 9 つの関節からなっており，関節においては, **図 2-7** のように 3 方向の各方向において可動域を設定し実際の人間のように関節間稼働に制限を設けている(**表 2-6**)[2-2]．この制限を超えるような場合に，制限域に戻るような復元力を与えることによって関節によって各体節を結ばれた人体はその体節がバラバラにならないための制約として，式(2.14)における連結方程式が与えられる．

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_{G1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{s1} \times \boldsymbol{r}_{s1j} + \boldsymbol{\omega}_{s1} \times \boldsymbol{\omega}_{s1} \times \boldsymbol{r}_{s1j} = \ddot{\boldsymbol{r}}_{G2} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{s2} \times \boldsymbol{r}_{s2j} + \boldsymbol{\omega}_{s2} \times \boldsymbol{\omega}_{s2} \times \boldsymbol{r}_{s2j} \tag{2.14}$$

式(2.14)は**図 2-4** のように体節s_1と体節s_2が間接jによってつながっている場合を考えることで導かれる．式(2.15)は静止系において二体節から表される間接の位置が等しいことを表す.

$$\boldsymbol{r}_{G1} + \boldsymbol{r}_{s1j} = \boldsymbol{r}_{G2} + \boldsymbol{r}_{s2j} \tag{2.15}$$

ここで，$\boldsymbol{r}_{G1}$，$\boldsymbol{r}_{G2}$は静止系の原点から見た位置ベクトルであり，$\boldsymbol{r}_{s1j}$，$\boldsymbol{r}_{s2j}$はそれぞれの体節の重心から関節までの変位ベクトルである．さらに，両体節から表される関節の初期位

置が等しいという条件の下，式(2.15)を時間微分して

$$\dot{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{G1}} + \boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{s1}} \times \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s1j}} = \dot{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{G2}} + \boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{s2}} \times \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s2j}} \tag{2.16}$$

を得られ，初期速度も等しいという条件下でさらに時間微分をとることで式(2.14)の連結方程式を得る．

第 2 章まとめ

I. DRUM に採用されている CIP-CUP 法についての計算の扱われ方と流れを説明した．
II. 流動計算における計算手法を説明した．
III. 剛体の計算に必要な二つの要素，流体力及び関節による力について説明した．

参考文献

[2-1] Takashi Yabe，Pei-Yuan Wang: Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid，Journal of The Physical Society of Japan，Vol.60，No.7，pp.2105-2108，1991.

[2-2] 中村隆一，斎藤宏，長崎浩:基礎運動学第 6 版，医歯薬出版，2016

第 2 章　図表集

2.1　気相・液相・固相の表現

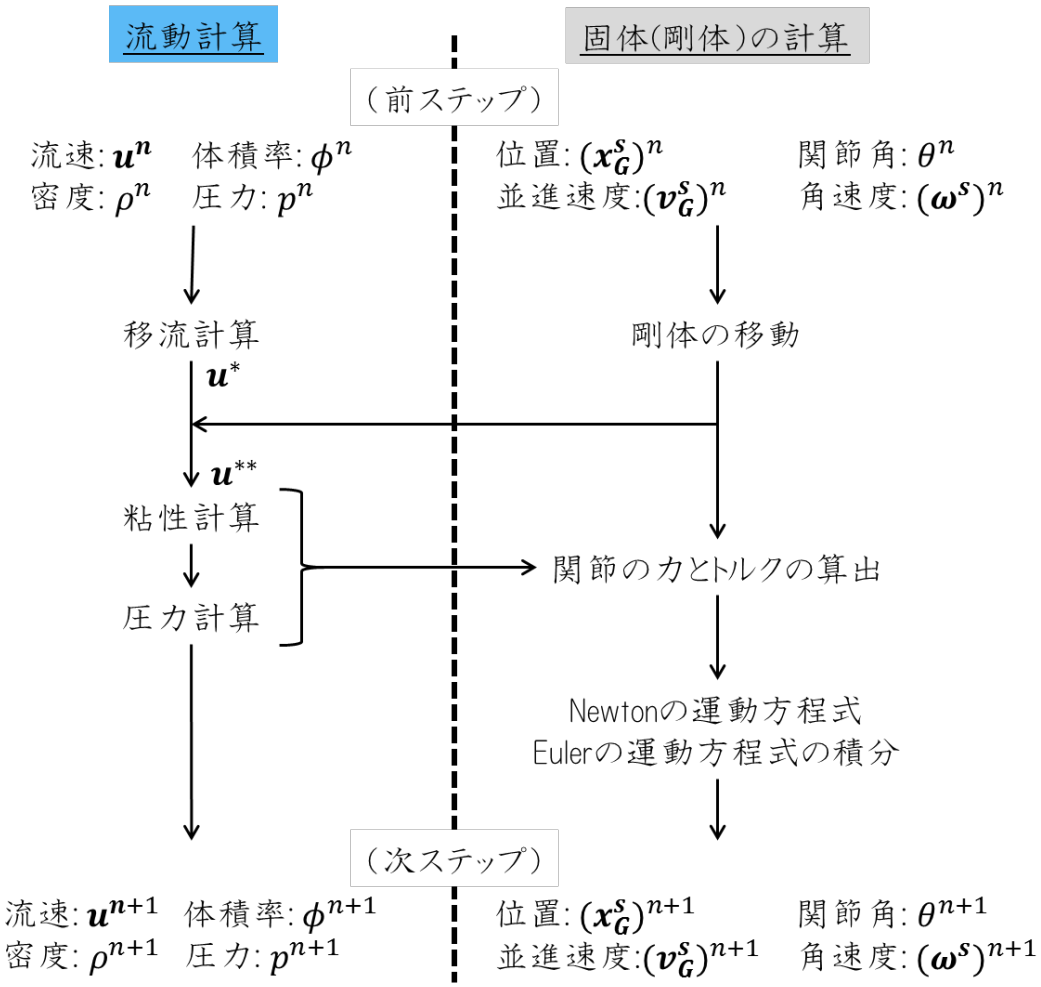


図 2-1　CIP-CUP 法による流動計算と固体の運動計算の計算手順

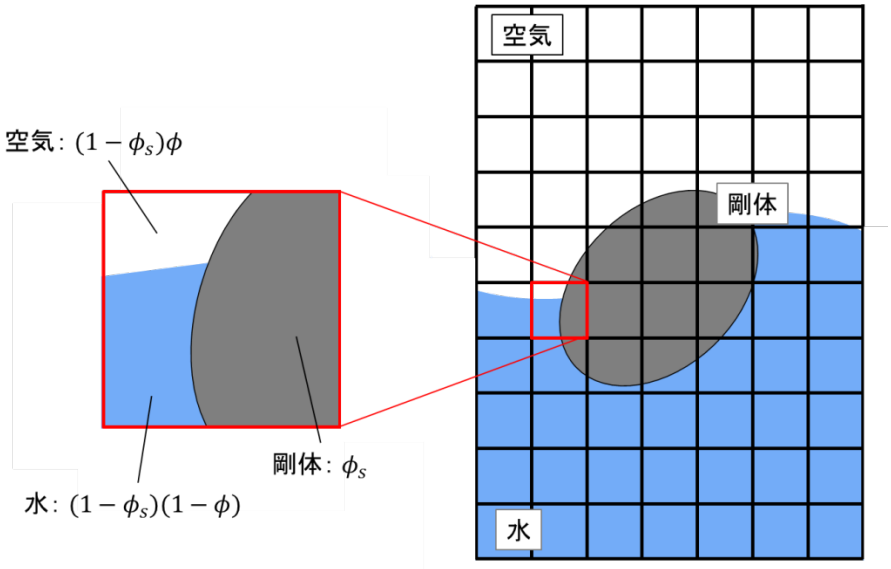


図 2-2　体積率による三相の評価

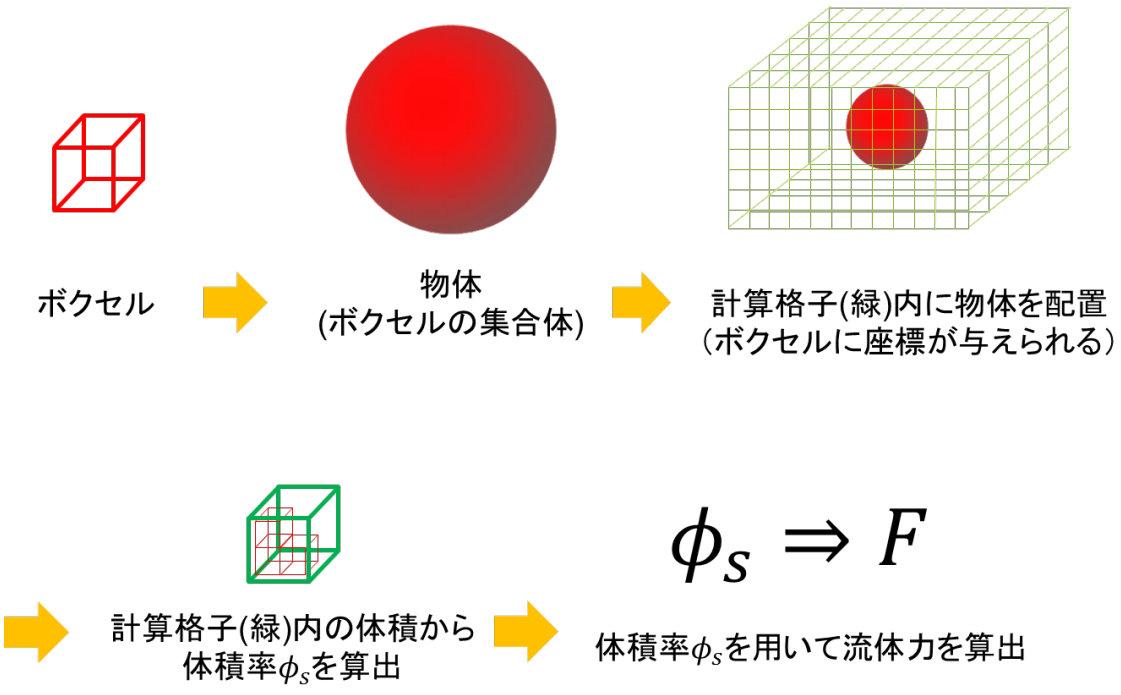


図 2-3　物体の作成から力を算出するまでの流れ

2. 3　剛体の計算

2.3.2　剛体の基礎方程式

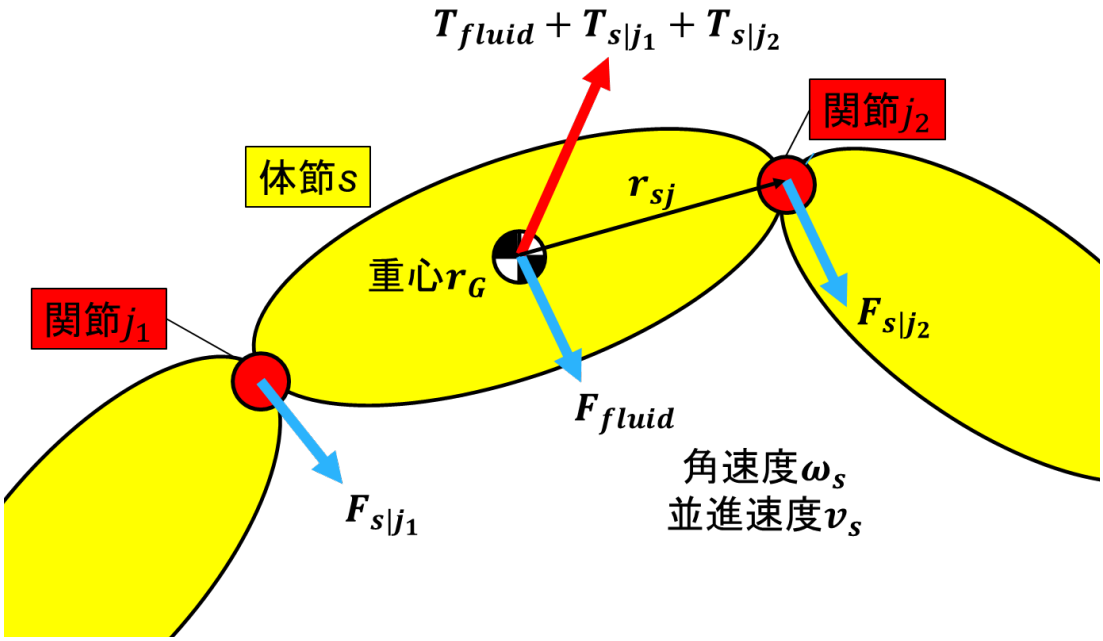


図 2-4　剛体部位の受ける力とトルク

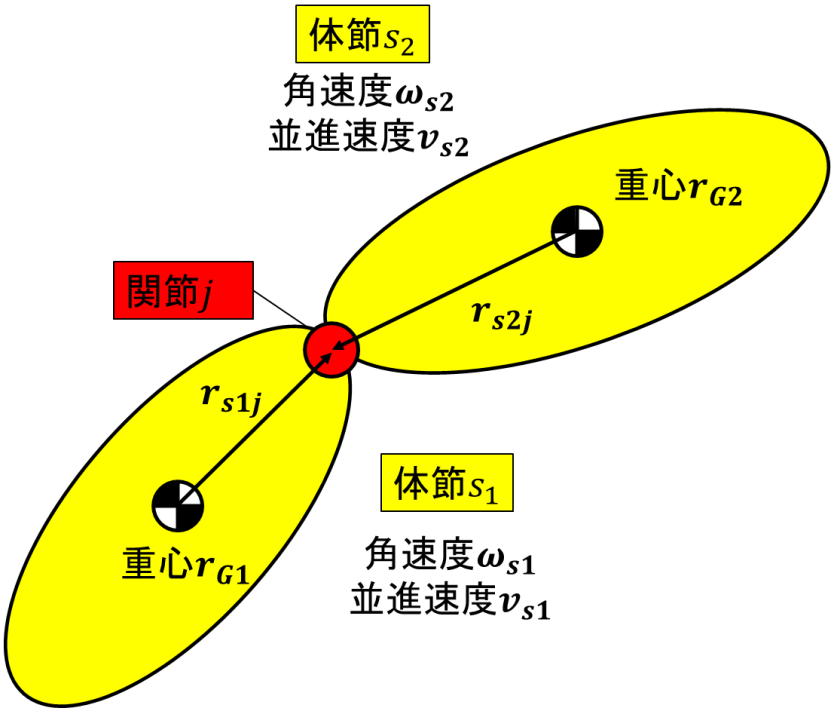


図 2-5　関節で連結された二剛体

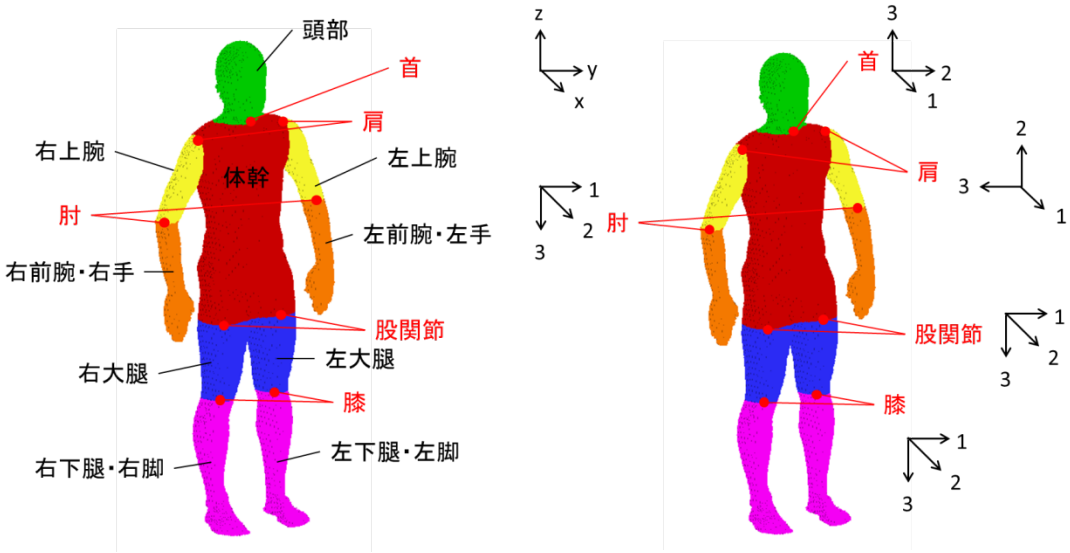


図 2-6　人体形状(右)と関節の回転軸となる体節上に固定された座標系(左)

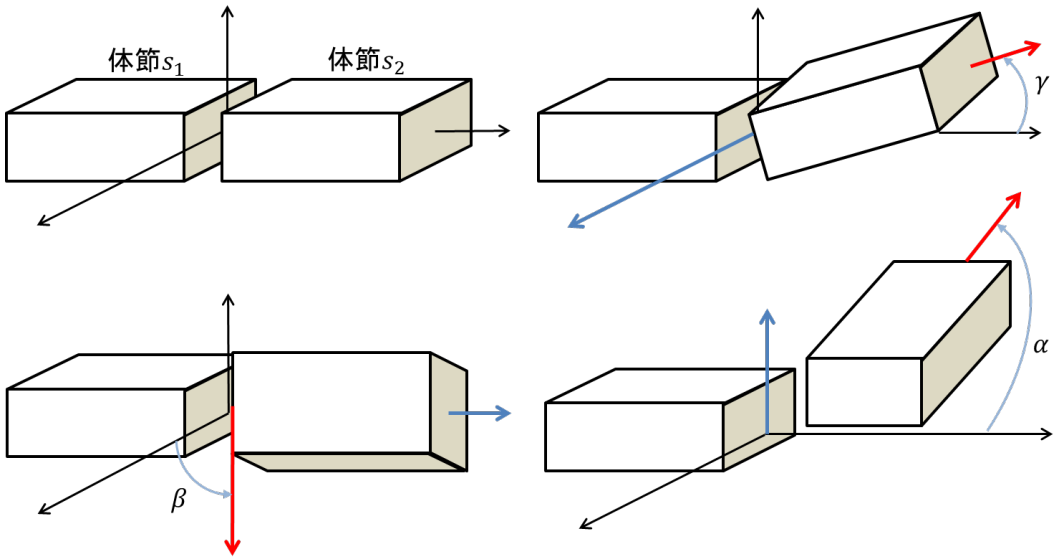


図 2-7　3 軸それぞれの回転方向における関節角の表現(回転軸:青)

表 2-6　関節可動域の参考値[2-2]

関節	軸	方向	名称	参考値 [deg]	関節	軸	方向	名称	参考値 [deg]
首	1	正	右側屈	50	右股関節	1	正	伸展	15
		負	左側屈	-50			負	屈曲	-125
	2	正	前屈	60		2	正	内転	20
		負	後屈	-50			負	外転	-45
	3	正	左回旋	60		3	正	外旋	45
		負	右回旋	-60			負	内旋	-45
右肩	1	正	内転	0	左股関節	1	正	伸展	15
		負	外転	-180			負	屈曲	-125
	2	正	内旋	80		2	正	外転	45
		負	外旋	-60			負	内転	-20
	3	正	前方挙上	180		3	正	内旋	45
		負	後方挙上	-50			負	外旋	-45
左肩	1	正	外転	180	右膝	1	正	屈曲	130
		負	内転	0			負	伸展	0
	2	正	外旋	60		2	正	-	0
		負	内旋	-80			負	-	0
	3	正	前方挙上	180		3	正	-	0
		負	後方挙上	-50			負	-	0
右肘	1	正	伸展	5	左膝	1	正	屈曲	130
		負	屈曲	-145			負	伸展	0
	2	正	-	0		2	正	-	0
		負	-	0			負	-	0
	3	正	回内	90		3	正	-	0
		負	回外	-90			負	-	0
左肘	1	正	屈曲	5					
		負	伸展	-145					
	2	正	-	0					
		負	-	0					
	3	正	回内	90					
		負	回外	-90					

第３章　DRUM による抗力検証計算

本章では，DRUM から得た抗力から抗力係数を算出し，既知のレイノルズ数とC_D値との関係からその結果を比較する．第一にパラメータとしてボクセルサイズに注目し，第二に計算格子に注目し最後にレイノルズ数ごとに注目する．

3.1　球体を用いた DRUM の抗力の再現精度検証

本検証では流れの中の対象物体を人間ではなく一つの球体に置き換えてシミュレーションを行う．

3.1.1　レイノルズ数と抗力係数を用いた評価

本検証では評価のためにレイノルズ数と抗力係数を扱う．レイノルズ数は流れの様子を流速と流れの場を特徴づける代表の長さ，および流体の動粘性係数にて表した無次元量であり，抗力係数は物体の形状とレイノルズ数によって異なるものである．

今回取り扱う球における抗力係数とレイノルズ数の関係は多くの先人たちによって実験的に得られてきた[3-1]．本検証実験では球におけるイノルズ数と抵抗係数の関係図として**図 3-1**[3-2]からデータを取得した．取得したデータは**表 3-1** に掲載する．

3.1.2　レイノルズ数と抗力係数

本検証においてレイノルズ数Reは代表長さとして球体の直径d，動粘性係数をν，流速Uを用いて

$$Re = \frac{dU}{\nu} \tag{2.17}$$

と表される無次元量である．また，一様流れにおかれて固定された物体の抗力Dは主流速Uの二乗に比例して

$$D = \frac{1}{2} C_D A \rho U^2 \tag{2.18}$$

と表現される[3-2]．この抗力Dに値するのがDRUMによる計算においてはまさしく式(2.10)によって算出されるものである．C_Dを抗力係数，Aを主流方向の物体の射影面積，ρを流体の密度とする．式(3.2)から抗力係数C_Dを求める形に書き換えれば式(3.3)となる．

$$C_D = \frac{2D}{A\rho U^2} \tag{2.19}$$

これにより，DRUM によって得られる抗力係数とレイノルズ数の関係が**図 3-1** における関係性を再現しているかの検証を行う．

3.1.3　シミュレーションの設定

3.1.3.1　設定

球体を一様流の中に固定したものを取り扱う（**図 3-2**）．X 方向に 13[m]，Y 方向，Z 方向に4[m] × 4[m]の正方形の面を持つ直方体中に水を満たし一方向(**図 3-2** 右図左側)から一定流速の流入がある境界条件を与える．初期状態はすでに場に流速が存在している状態から，境界条件によって流入が続けられる．球は流入側から，3.25[m] の位置に中心を固定する．抗力計算に影響しないように後流側には十分な長さを確保した．この検証では空気は存在しないので空気の体積率は$\phi = 0$として扱われる．また，式(2.12)によって与えられる Z 方向における重力成分は考えないとする．

3.1.3.2　計算格子

計算格子は不等間隔格子を用いている(**図 3-3**)．球の周辺は格子が密になるようにし，物体から離れた場所では格子幅を大きくして計算の負荷を減らしている．また，球周辺の最も密に計算格子が置かれているところでは，格子の三方向においてすべて同じ長さの辺をもった立方体となっている．以下，格子サイズとは球周辺に用いられた最も密な計算格子の一辺を指すこととする．

3.1.3.3　球の表現

DRUM では物体はすべてボクセルといわれる立方体の集合体で表現される．今回の球として表される物体はボクセルの中心座標が球の中に入っているかどうかの判定で作られたものである(**図 3-4**)．以下ボクセルサイズとはボクセルの一辺の長さを指すこととする．

3.1.3.3　体積率の算出

体積率は該当格子の占める体積ΔVに対しての格子内の固体が占める体積の比率であり，式(3.4)となる．

$$\phi_s = \frac{\left(\text{計算格子中のボクセル総数}\right) \times \Delta V_{\text{ボクセル}}}{\Delta V_{\text{計算格子}}} \tag{2.20}$$

ただし，ボクセルはその中心座標が存在する格子中に認識される．

3.2　自然現象によるレイノルズ数の範囲

DRUM は人体が自然災害である津波に巻き込まれた時の挙動をシミュレーションするモデルとして作成された．そこで人間が自然界のある流速においてどれほどのレイノルズ数に位置するのかを考えることは本検証において重要なことである．そこでいくつかの流速の状況として河川の平常時(0.2[m/s])，洪水時(3.0[m/s])，津波(2.0~10[m/s])で範囲を考えてみた．また流れの中での人体のレイノルズ数を考える場合，代表長さとしては腕や胴体などの各パーツによって変わってくる．人間の代表長さの範囲は最小径を下腿最小幅，最大径を大転子間幅として独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)が公表している数値人体データベース[3-3]をもとにてその値を得た(**表 3-2**)．動粘性係数は真水を用いて$\nu = 1.01 \times 10^{-6}$とした．なお河川の平常時，洪水時は国土交通省による水文水質データベース[3-4]を用いて多摩川の石原観測点における流量，水位と google earth より読み取った川幅から算出した結果を参考にした．平常時は 2016 年 2 月のデータをもとに，洪水時は 2015 年の台風 18 号での最高水位時のデータをもとに算出した．また，津波の流速は 2011 年におこった東日本大震災時の釜石市における津波のデータを参考にした．以上の参考データより，自然現象における人体のレイノルズ数の範囲を**表 3-3** および**図 3-5** に示す．**図 3-5** に示される通り，河川（平常）であればレイノルズ数 1 万から 6 万ほどをしめし，洪水や津波などの比較的早い流速を持つ現象では，球の関係性から言えば乱流境界層によって抵抗が大きく下がるレイノルズ数 3 万ほどのところをまたいでいることがわかる．

3.3　流れの中の球体と現象

球体を設定場においた時の X 方向の力，つまり抗力を**図 3-6** に示し，流れの様子について X 方向の流速と圧力ついて結果を**図 3-7**，**図 3-8** として掲載する．この節で取り扱う流れ場の観察をするケースでの条件は，のちのボクセルサイズを変化させる場合と計算格子を変化させる両検証において取り扱ういわば基準となるケースである．ボクセルサイズは 5[mm]，格子サイズは 25[mm]で，ボクセルによって作成される球は直径が 500[mm]である．レイノルズ数は 5 万で，主流速は 0.1[m/s]である．

流れのある場に時刻 t=0[s]に球体が急に現れるような設定のため，初期は不安定な状態である．そこで**図 3-6** の時間による抗力変化より，大まかに安定し始めた時刻 t=120[s]以降について，流速と圧力の状況を掲載した．**図 3-7** のように球体の前方では流速が低下し，球の直後には流れが逆方向になる．また球の後方では流速は複雑に低下している．**図 3-8** では球体の前方の圧力が高まり物体の後ろにおいて圧力の低下がみられる．この圧力差が抗力を算出する際の圧力勾配になり圧力項を算出するということである．また流入が開始されてからは球後方に，時刻 t=180[s]に顕著にみられるような局所的な負圧が，発生と消滅を繰り返していた．発生場所は球の上部と下部の X 方向延長あたりであった．

以上の状態より，球は流れによって流れに対して前面で圧力が上昇し，流速が低下する．また，流速の複雑な変化から，後流は乱れており局所的な負圧より，渦が生じていること

がわかる．このケースにおける 5 万のレイノルズ数では，円柱や球体における鈍い物体後流にはカルマン渦が発生するはずであるので，このシミュレーションにおいて物体と流れにおける現象をよく表現しているといえる．しかし，定量的な評価としては以下に続く抗力を用いて，DRUM の再現性について検討することとする．

3.4　ボクセルに関する比較

本説での検証ではボクセルサイズを 2.5[mm], 5.0[mm], 10.0[mm], 20.0[mm], 25.0[mm] の 5 種類用いて行った(**図 3-9**)．実験の設定は 3.1.3.1 で示した通りである．ボクセルサイズ以外に, レイノルズ数 5 万(主流速 0.1[m/s], 直径 500[mm], 動粘性係数$1.01 \times 10^{-6}[s/m^2]$), 格子サイズは 25[mm]，流体の密度$\rho = 1.0 \times 10^3[kg/m^3]$ として同じ条件である．レイノルズ数は前節 2.3 にて参考範囲として求めた自然現象における河川（平常時）を想定して採用した．

3.4.1　検証結果

ボクセルごとの流れにおいて, おおよそ 3.3 に見られるような渦や非定常な流速の乱れの現象が起こっていた．抗力はおおよそ t=100[s]以降において安定しているので，それ以降での平均を用いることにした．それより，時間平均の抗力を用いてボクセルサイズの 5 パターンの抗力係数とレイノルズ数との関係を**図 3-13，図 3-14，表 3-4** に示す．ここで，レイノルズ数 5 万での抗力係数C_Dの値としては既知のその点での実験値のデータが得られなかったので，Engineering Fluid Mechanics[3-5] に記載の値を参考に$C_D = 0.47(\text{at Re} = 50{,}000)$とした．

3.4.2　体積率の損失

図 3-14 では 0.47 よりも大きい側と小さい側に結果が分かれた. 言い換えれば大きい側に出たものは安全側，小さい側に出たものは非安全側である．このように結果が 2 分化されたことについて考えてみるとその要因には体積率により体積欠損が起こっていることが分かった．**図 3-15** に示されるコンターによる表現は主流速方向に沿って球の真ん中で切断した断面であり，体積率を表している．**図 3-15** からわかるようにボクセルサイズ 2.5[mm], 5.0[mm]，25[mm]は球体内が固体で満たされている(コンターが赤)のに対し，ボクセルサイズ 10[mm]と 20[mm]では，球の内部が固体で満たされておらず，体積率が 1 を下回る部分があることが分かる．本来であれば，球体の中はすべて均質な物体でボクセルによって形成されているのであるから，すべてのボクセルサイズ 2.5[mm]，5[mm]，25[mm]のように球体の内部は体積率$\phi_s = 1.0$示す必要がある. しかし, ボクセルサイズ 10[mm]と 20[mm]はそのようになっていない．これには，この DRUM 内にて採用されている PIC(Particle in cell)法原因であることが分かった．この PIC 法というのは，空間に配置されたボクセルを

計算格子点がどのように読み込むかという手法である．ボクセルの位置情報はボクセルの中心とされ，ボクセルの密度や大きさの情報はこの中心の座標が属する計算格子内に格納される．この時，読み込まれたボクセルの数から，体積率ϕ_sを式(3.4)により算出する．しかし，この手法では体積率を 1.0 で打ち止めされるので，1.0 を超えた場合，つまりその意味は計算格子の体積よりもボクセルによる総体積のほうが大きい場合，ボクセルの総体積は計算格子の体積へと修正されてしまう．ここで体積率が本来よりも小さく見積もられる為体積が減少してしまう．ではそもそもなぜボクセルの総体積が計算格子の体積より大きくなることがあるのかについてであるが，これはボクセルが計算格子に対してはみだすことなく配置することができない場合に発生する(**図 3-16**)ことが分かった. **図 3-16** でいえば，ピンクの網掛け部分はボクセルが所属する格子の隣の格子内にある部分であるが，網掛け部分はいわば切り捨てとして修正される．故に隣の格子は$\phi_s < 1$を示し**図 3-15** の格子サイズ 10[mm]，20[mm]のように固体で内部が満たされていない状態が出来上がる．抗力係数は前章 2.3.1 剛体の運動で取り扱ったように，式（2.10）を用いて式（3.3）により算出される. ここで, 体積率に損失が起これば, 式 (2.10) より, 抗力は過小評価され, 結果式 (3.3) で抗力係数も過小評価される．故に**図 3-14** に見られたように，ボクセルサイズ 10[mm]，20[mm]はほかの損失がないボクセルサイズのパターンよりも抗力係数が下がっていると考えられる.

3.4.3　提案手法

体積率の損失を起こさないために，空間に配置されたボクセルを格子点がどのように読み込むかというのが重要になってくる．PIC 法のほかには類似の手法として CIC(Cloud in Cell)法というものがあるが，計算格子の領域の境界で PIC 法同様に体積損失が起こる.

体積損失をなくす，もしくは少なくするための方法としてボクセルサイズを小さくするというのが一つの解決策となる．しかし，ボクセルを小さくしていけば，物体を作成するのに必要な総ボクセル数は当然増加しメモリの使用量も大きくなる．すなわち計算に時間がかかることになる．実際，筆者の今回検証に使った計算機において，ボクセルサイズを 1.25[mm]まで小さくしたが，swap が起こり計算時間が格段に遅くなった.

次に，ボクセルを計算格子に沿って分割してしまえば体積損失はゼロにすることができる．当然計算格子とボクセルの位置，それぞれの辺の長さがわかれば幾何学的にボクセルを計算格子に沿って切り取ることが可能である．しかし，物体が回転を伴った場合などでは角度情報も必要になり，ボクセル体積を切り出す計算そのものに負荷がかかってしまう.

そこで体積損失を軽減するものとして，メモリ消費量を抑えつつ計算不可も少ない方法を提案する．初期配置の際のボクセルの大きさを最初から小さくするのではなく，配置されたものを計算格子に読み込ませる時だけいくつかに分割し，仮想的にボクセルを小さくするというものである（**図 3-17**）．この提案手法とボクセルを最初から小さくする手法の大きな差がある．それは一時的にボクセルを分割するため単に初期からボクセルを小さくし

て配置したものと，分割された仮想ボクセルサイズが同じだとしてもメモリの使用容量が提案手法の方が少なくてすむということである．今回実験に用いた直径 500[mm]の球においてメモリの負荷を考えてみる．ボクセルサイズ 2.5[mm]と 10[mm]で球を作成した場合，それぞれ，約 420 万個と 6 万 5 千個のボクセルが使用される．ボクセル 1 つには位置情報として x 座標，y 座標，z 座標，及び密度の 4 情報が与えられた場合，double 型変数であれば 1 変数が 8 バイトの消費で，ボクセル一つ当たり 32 バイトが使用される，つまり球を作成するにあたって，ボクセルサイズ 2.5[mm]は 10[mm]の約 65 倍，2 メガバイトほど多くメモリを使っていることになる．そこで，次に分割のための計算の負荷についてであるが，オリジナルの PIC 法から提案手法ではループ計算を追加して若干の計算負荷を与えることになった．しかし，ボクセルサイズ 10[mm]を 4 分割して仮想のボクセルサイズを 2.5[mm]にして計算したところ，1 ステップ分の計算時間は初期状態が 2.5[mm]のボクセルサイズにおける計算時間にそん色なく，むしろ若干早く計算することができた．

また，忘れてはならないのが球形を表現する配置である．当然最初からボクセルサイズが小さければボクセルでの球の表現はより球形に近づくため，たとえ計算上でボクセルサイズが同じになったとしても，球の形状は提案手法の方が荒くなる．したがって，ボクセルの初期サイズとその後の分割数には適当な関係が必要になる．

3.4.4　提案手法による欠損の改善

体積率欠損の改善のために新たな方法を提案した．そこで体積損失が起こっているボクセルサイズ 10[mm]と 20[mm]について提案手法を適用した．その結果を分割数による抗力係数の関係によって**図 3-18，図 3-19** 及びデータを**表 3-5** に示す．ただし，ボクセルの一辺は分割数で等分されている．結果は分割数を増やせばボクセルサイズ 10[mm]であれば抗力係数は 0.525 ほどに，ボクセルサイズ 20[mm]であれば抗力係数は 0.55 ほどに近づいていることがわかる．ただし，注目するべきはボクセルサイズ 10[mm]の 3 分割をしたときに破分割数 2 の時に比べていったん 0.525 から離れたように見える．このように抵抗係数が単純にどこかに収束していくわけではないことについて思考実験において確認を行った．

3.4.5　PIC 法による体積損失の思考実験

PIC 法による体積損失を一次元で検証した．100 格子点を数直線上に用意し，計算格子幅 dxとして，数直線上に隙間なく線分dx_vを並べていく．ただし，位置情報は線分の中央とした．PIC 法に従って格子点に線分の情報を格納し，式(3.4)に従って体積率を与えれば，この場合式(3.5)となる．線分dx_vと計算格子幅dxとの比 r を以下の式(3.6)とし，体積損失を式(3.7)で定義した．

$$\phi_s = \frac{\left(\text{計算格子中の線分総数}\right) \times \mathrm{dx_v}}{\mathrm{dx}} \tag{2.21}$$

$$r = \frac{dx_v}{dx} \tag{2.22}$$

$$\mathrm{Loss} = \frac{V_i - V_e}{V_i} \tag{2.23}$$

V_i: $\sum_{全て線分}(dx_v)$

V_e: $\sum_{全ての計算格子}(dx) \times \phi_s$

rとLossの関係を**図 3-20** に示す.

図 3-20 を見れば体積損失はrが小さくなれば概して小さくなることがわかるが, 極所的に体積損失が 0 となるrが存在する．損失が 0 になるところは分数でいえば一分の整数になっている点であり，その意味はボクセルが一つの計算格子にはみ出ることなく収納されている場合である．3.4 節で扱うボクセルサイズ 2.5[mm],5.0[mm],25[mm]というのは偶然にもrがそれぞれ1/10，1/5，1/1であり, 計算格子にボクセルがはみ出ることなく収まることができる数字であったということである.

つまり提案手法によって分割数を多くすれば，概して体積率の損失は軽減することができるが，決して分割数が多ければ損失率が線形的に小さくなると言うことではないことに注意されたい.

分割手法を取り入れて損失がなくなった場合での結果を**図 3-21**，**表 3-6** に掲載する．以前として理想値には及ばないが，欠損による非安全側へ転じることに関しては改善がなされた．依然残る理想値との差について次節にて格子サイズの観点で取り扱いたいとおもう.

3.5　計算格子に関する比較

本節では格子サイズの変化による抗力係数の変化を取り扱う．格子サイズは 20[mm]，25[mm]，50[mm]，80[mm]，100[mm]の 5 種類を用いて行った(**図 3-22**)．格子サイズ以外にはレイノルズ数 5 万(主流速 0.1[m/s],直径 500[mm],動粘性係数$1.01 \times 10^{-6}[s/m^2]$)，ボクセルサイズは 5.0[mm]，流体の密度$\rho = 1.0 \times 10^3[kg/m^3]$ として同じ条件である．ただし，この 5 パターンにおいては体積損失が起こらない計算格子のサイズを恣意的に使用している.

3.5.1　検証結果

選出した 5 パターンの格子サイズにおける抗力係数の関係を**図 3-26，図 3-27，表 3-7** に示す.

3.5.2 計算格子による射影面積の過大評価

3.5.1 の抗力係数の結果では, 今ここで理想としている抵抗係数の値 0.47 に依然差が残る. その要因として，この DRUM に用いられる CIP-CUP 法特有の固体と流体とを取り扱う過程に原因があると考えられる. 流動計算をする過程で**図 2-1** のように, ある時刻での流速u^n

というのは移流計算u^*を得て,さらに固体の体積率を用いてノンスリップ条件を与えることでu^{**}を得る．ここで，ノンスリップ条件以外の課程で流速が大きく変化しない場合，本検証では剛体は動いていないので式(2.8)におけるv_sは 0 となり(式(3.8))，

$$\boldsymbol{u}^{**} = (1 - \phi_s)\boldsymbol{u}^* \tag{2.24}$$

流速は時間ステップを追うごとに小さくなり，流速の過小評価につながると考えられる．これはつまり逆に言えば，格子内の剛体の体積率が大きくなったとも考えられる．そこで力を考えるうえで，式(2.10)を書き換えれば，ΔV = ΔxΔAより式(3.9)となる．

$$\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{fluid}} = \sum_{\text{全格子点}} (\boldsymbol{\nabla} p + \boldsymbol{\tau})\phi_s \Delta x \Delta A \tag{2.25}$$

このように算出されるとき，射影面積は体積率によって重みづけられるため本来ならば時間的変化はない．しかし流速が時間ステップごとに過小評価されることによって，意味合いでは体積率が上がった様なふるまいをする．ゆえに，射影面積は**図 3-27** における理想の射影面積よりも大きくなっているとも考えられる．実際，**図 3-28** のように，格子幅が大きければ大きいほど剛体が存在していると認識している格子はボクセルによる球の射影面積よりも広域にあり，この剛体を認識している格子内で流速が低下し，意味合い上体積率が上がっているような振る舞いをすれば剛体の射影面積は大きく見積もられることになる．しかし，抗力係数は式(3.3)によって求められるが，その式中のAというのは**図 3-27** における理想の射影面積A_iが用いられている．ゆえに，格子幅スケールにおける射影面積，つまり剛体が少しでも入っている$\phi_s \neq 0$の格子による射影面積A_eを用いて

$$C_D' = \frac{2D}{A_e \rho U^2} \tag{2.26}$$

と式(3.10)によって算出し直してみる．A_eを用いて算出した結果を**図 3-29** 及び**表 3-8** にしめす.

結果を見ると，格子サイズが 80[mm]と 100[mm]のものに対しては，格子幅スケールでの影面積A_eでの換算では，抗力係数は大きく低下してしまい射影面積を格子スケールA_eとしてしまうのは問題であるといえる．しかし，格子サイズが 20[mm]，25[mm]，50[mm]においてはおおよそ 0.47 に近づき，誤差も 3 パーセントほどにとどまるので格子スケールの射影面積を用いて算出しても問題はないと考える．今回の実験における対象物体である球の直径 500[mm]に対して計算格子が 20[mm]，25[mm]，50[mm]である 10 分の 1 以下の場合であれば格子スケールでの射影面積による換算も可能であり，たとえ換算しないで理想の射影面積を用いても安全側に 8 パーセントほどの誤差で与えられるためその再現性と精度に問題ないと考えられる．しかし，格子サイズが 80[mm]，100[mm]の球の直径に対して 10 分の 1 より大きい場合は，理想の射影面積又は格子スケールの射影面積を用いたとしても誤差は安全側でも非安全側でもおおむね 20 パーセント台を示す．つまり，実現象上の安全面を考えて再現精度を保つためには球でいえば直径といった対象物体の代表的なスケールに対して,格子サイズを少なくとも 10 分の 1 以下に設定する必要があると考えられる．

3.6　レイノルズ数別検証

最後に DRUM の定量的再現精度の評価において，レイノルズ数別にて検証を行った．レイノルズ数を表す要素として，主流速，代表長さ，動粘性係数があるが今回は主流速を変化させることでレイノルズ数を変化させた．代表長さである直径は 500[mm]，動粘性係数は1.01×10^{-6}[s/m^2]として，ボクセルサイズと格子サイズはそれぞれ，体積損失及び計算格子スケールにおける誤差が小さい 5[mm]，25[mm]を用いた．

レイノルズ数別の抗力係数との関係を**図 3-30** 及び**表 3-9** に示す．球体におけるレイノルズ数ごとの抗力係数の概形は大まかに再現ができていると考えられる．ただし，レイノルズ数 30 万以降における剥離現象が後退する乱流境界層の影響というのが再現されていないことが分かった．そのため乱流境界層における影響を考慮するためのモデルを導入する必要があることが課題としてあげられる．3.2 節にて取り扱ったように，人体と自然現象におけるレイノルズ数の範囲というのは，1 万から 100 万程度であると考えられる．この球における流体の場合には抗力係数は 30 万ほどで低下するが，人体という特殊な形状下において抗力係数が乱流境界層の影響のように急激に低下するかどうかというのはわからない．ただし，安嶋氏による津波の水路実験と DRUM を用いたシミュレーション比較 [3-6]では人体及び流体の挙動というのは水路実験とシミュレーションにおいて良好に再現されていることが分かっている．また，例えばライフジャケットの安全面を考える場合であれば，抗力が，たとえ流れが速くなった場合に低下するとしてもライフジャケットの性能としては，高流速のみならず抗力低下がみられる流速よりも小さな流速においても想定する必要がある．このようにライフジャケットには一番安全な，つまり一番大きな抗力を参考にする必要があると考えられるので自然現象におけるライフジャケット着用の有用性を測る指標としては大きな問題にはならないと考えられる．

第 3 章　まとめ

I. DRUM の再現性を定量的に評価するため，レイノルズ数と抗力係数の関係を用いることを提案し，その関係性を確認した．
II. 自然現象における人体とレイノルズ数の関係を，河川の平常時，洪水時，津波の例を取り上げて算出し確認した．
III. DRUM によって表現される流体と固体との間での現象について触れ，その相互作用によって起こる現象の再現性について確認した．ここでは定量的な評価には至っていない．
IV. 定量的な評価のためボクセルサイズ別の検証を行った．ここで，PIC 法における体積損失が抗力の低下を引き起こしていることを指摘した．ボクセルサイズは格子サイズに対して小さいことが望ましいが，メモリの容量と計算時間を考えて一時的にボクセルを小さく分割する新手法を提案した．
V. 定量的な評価のため格子サイズ別の検証を行った．流体中の剛体のスケールに合わせ

て計算格子のサイズを与える必要があることが分かった．格子サイズは物体の代表的な長さの 10 分の 1 以下であれば十分であるといえる．

VI. 定量的な評価のためレイノルズ数別の検証を行った．球体でいえば乱流境界層における効果によって抗力が急激に低下する影響が再現できていないことがわかった．乱流境界層を再現できるモデルを取り入れることが課題となる．しかし，人体における形状では良好な再現性を示している過去の事例がある．またたとえばライフジャケットの有用性を考えるうえであれば安全面においては問題はないと考えられる．

参考文献

[4-1] Phillip P. Brown, Desmond F. Lawler: Sphere drag and settling velocity revisited, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING March 2003, pp222-223 2003

[4-2] Dr.Hermann SchLiching: Boundary Layer Theory, p.16, Pergamon Press 1955

[4-3] 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

[4-4] 国土交通省，水文水質データベース，http://www1.river.go.jp/ ,（アクセス日 2019 年 1 月 11 日）

[4-5] Alan Mironer: Engineering Fluid Mechanics, McGraw-Hill Book Company, p280, 1979

[4-6] 安嶋大稀：津波に対する救命胴衣の有効性評価に向けた人体－流体連成数値シミュレータの開発，2018,（未公刊）

第 3 章　図表集

3.1　球体を用いた DRUM の抗力の検証計算

3.1.1　レイノルズ数と抗力係数を用いた評価

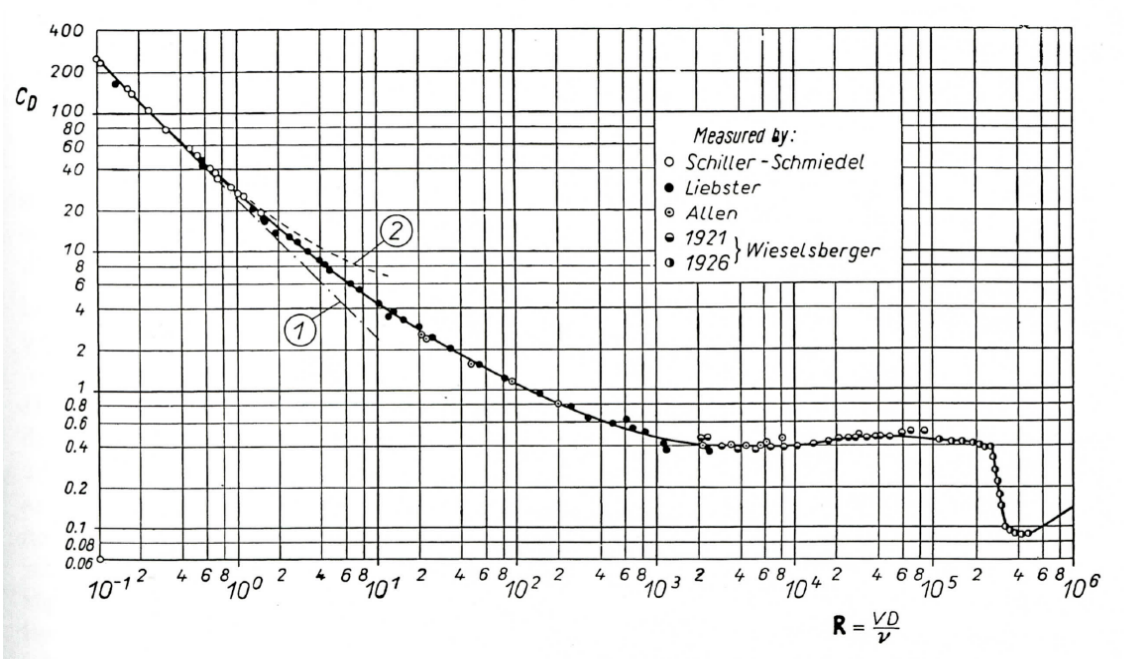


図 3-1　球体におけるレイノルズ数と抗力係数の関係図

表 3-1 読み取ったレイノルズ数と抗力係数

Re	0.0936	0.379	0.952	3.79	9.68	39.2
C_D	251	60.8	26.4	8.35	4.21	1.77
Re	98.4	196	601	1020	2030	8070
C_D	1.11	0.792	0.513	0.448	0.399	0.391
Re	10000	20300	39800	60100	98400	190000
C_D	0.397	0.446	0.468	0.46	0.437	0.415
Re	268000	327000	385000	462000	527000	1000000
C_D	0.388	0.108	0.0942	0.0911	0.0942	0.138

3.1.3　シミュレーションの設定

3.1.3.1　設定

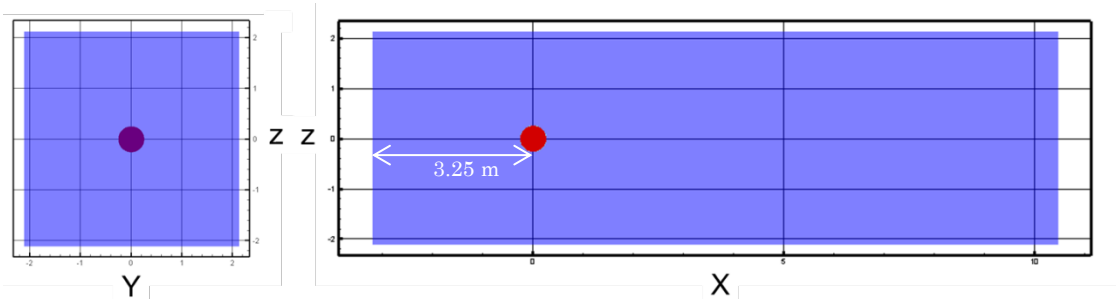


図 3-2　流れのシミュレーションのイメージ図　(青部:水)

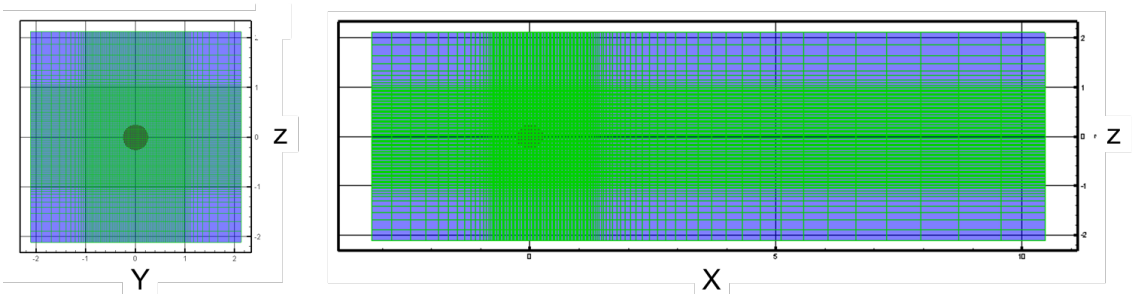


図 3-3　不等間隔格子(緑線)

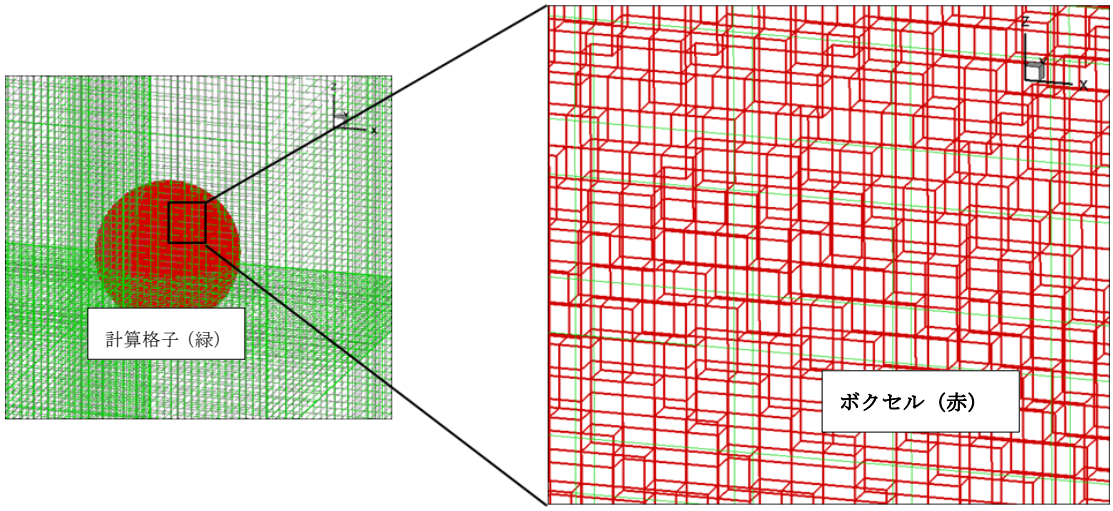


図 3-4　計算格子と球体

3.2　自然現象によるレイノルズ数の範囲

表 3-2　人体の最大幅と最小幅

	大転子間幅 [mm]	下腿最小幅 [mm]
男女平均	325.3	54.1

表 3-3　自然現象により人体のレイノルズ数の範囲

	河川（平常）	河川（洪水）	津波
流速[m/s]	0.2	3.0	2.0~8.0
最小レイノルズ数	1.07×10^4	1.61×10^5	1.07×10^5
最大レイノルズ数	6.44×10^4	9.66×10^5	2.58×10^6

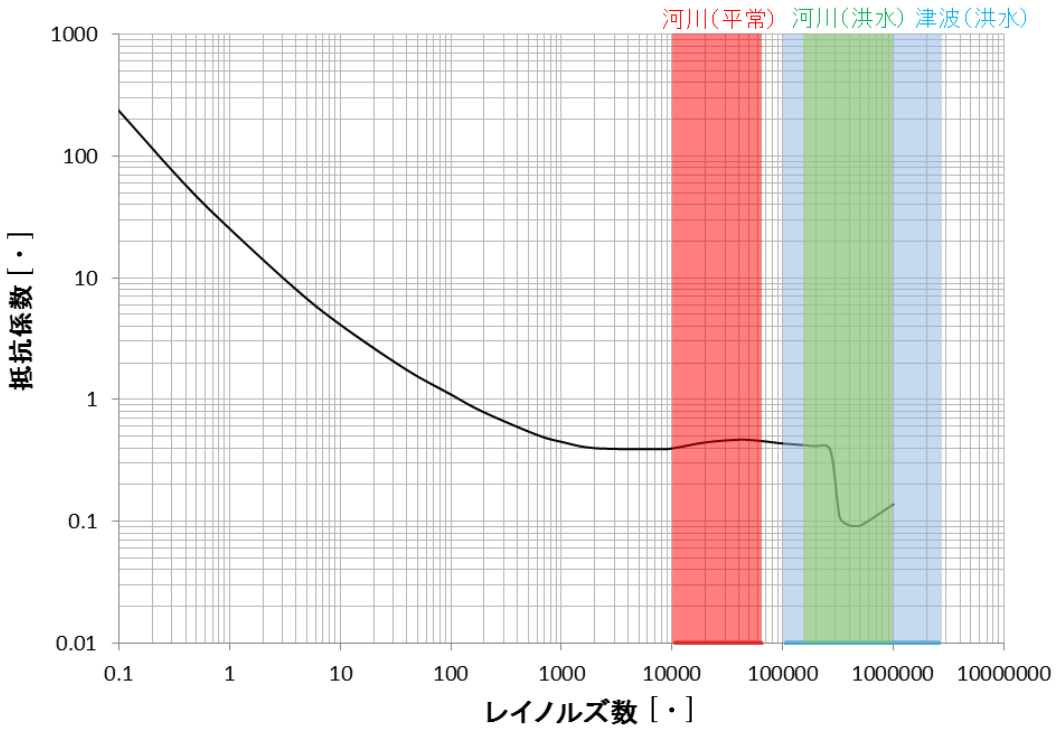


図 3-5　自然現象により人体のレイノルズ数の範囲

3.3　流れの中の球体と現象

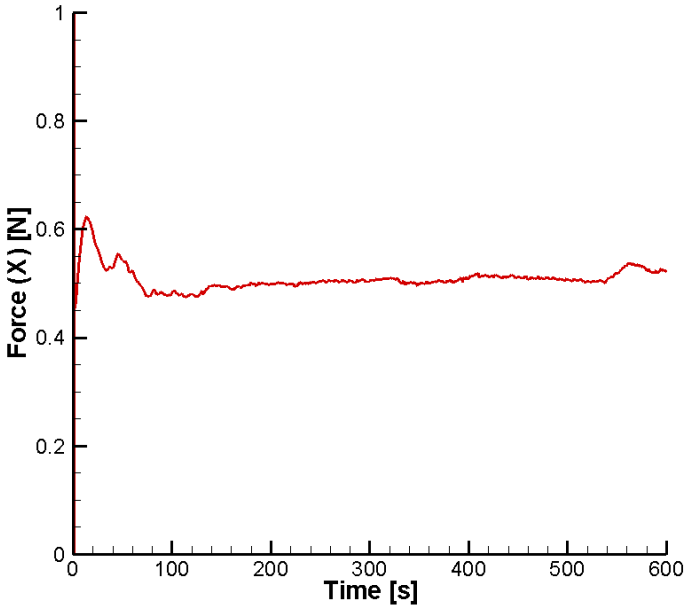


図 3-6　抗力の時間変化

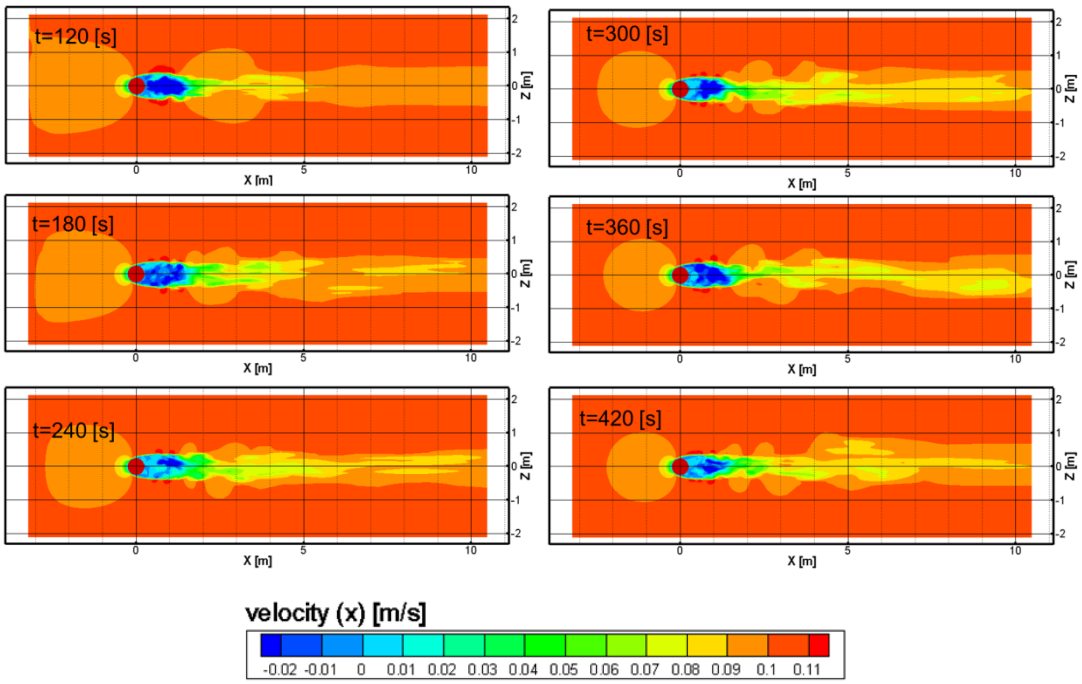


図 3-7　流れの中の球と X 方向の流速

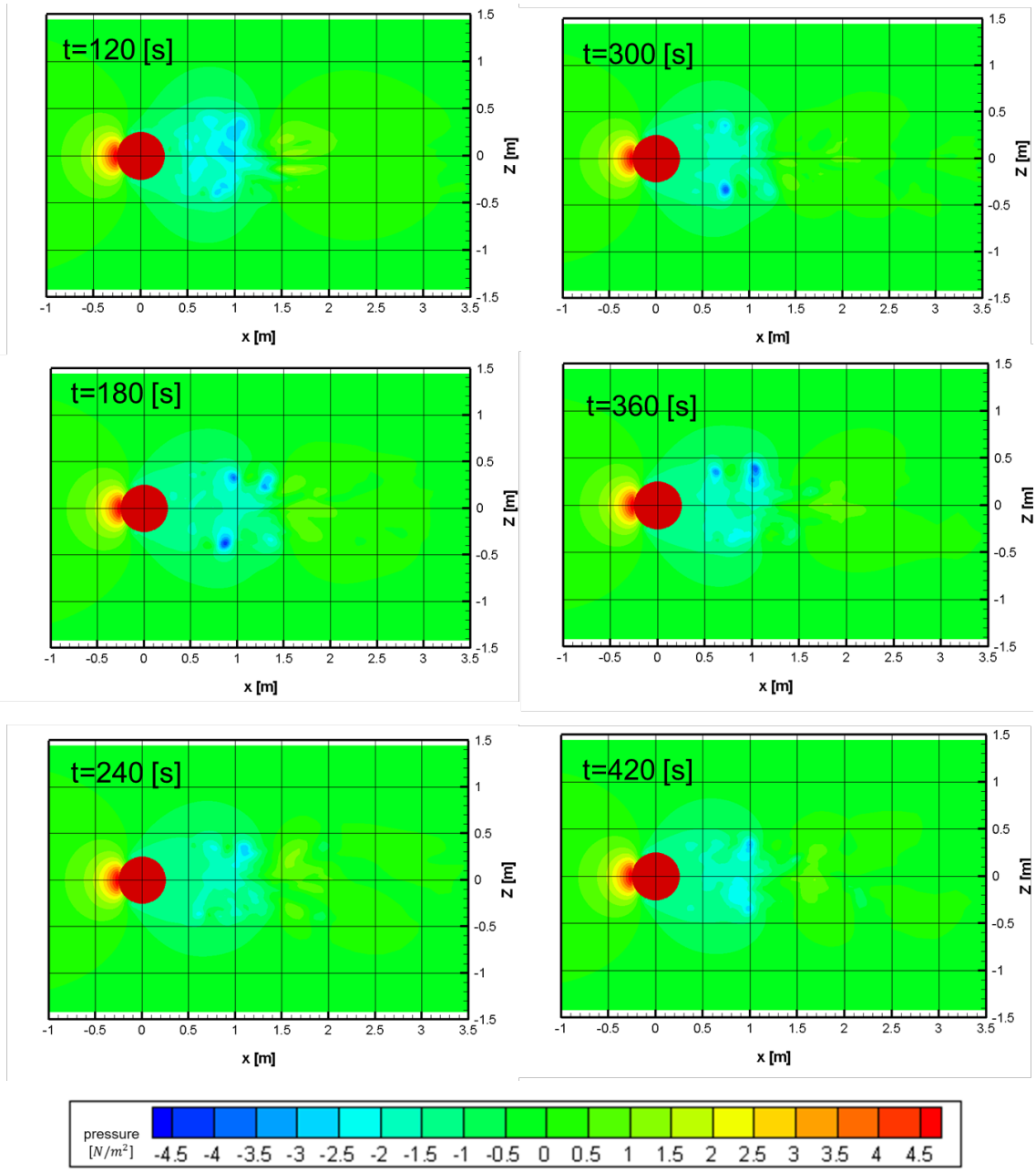


図 3-8　流れの中の球と圧力

3.4　ボクセルに関する比較

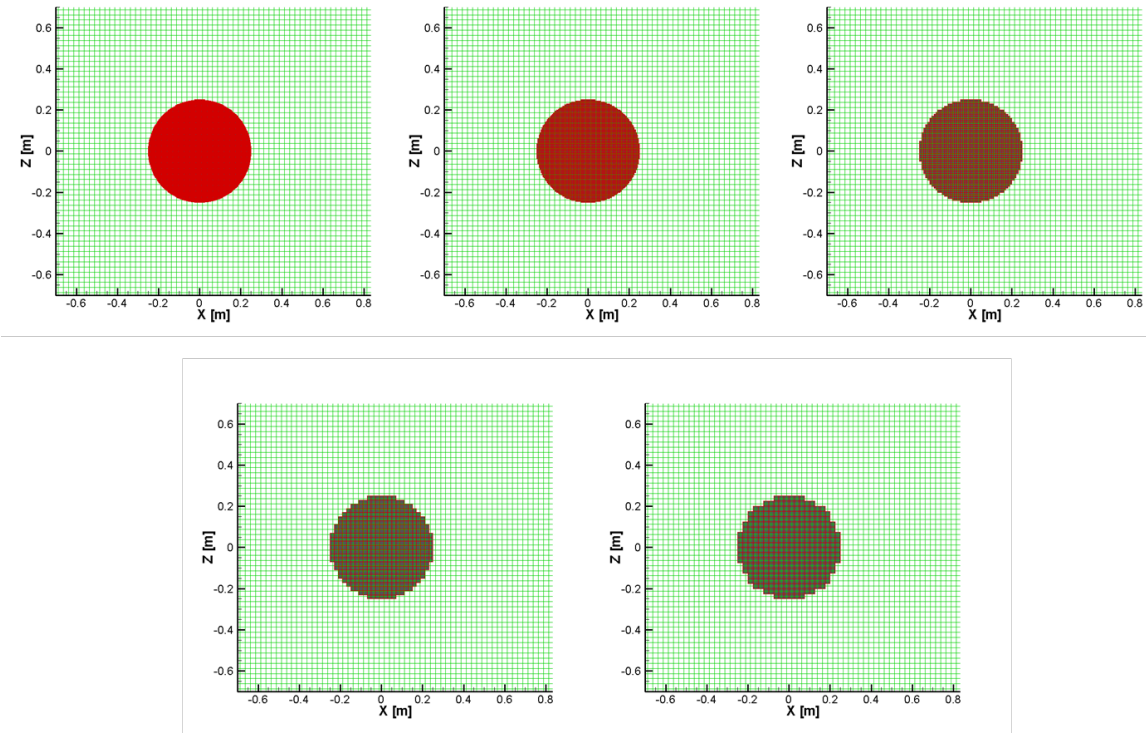


図 3-9　ボクセルによる球(ボクセル:赤枠の灰色　計算格子：緑)

(上段左：2.5[mm]，中央：5.0[mm]，右：10.0[mm]，下段左：20.0[mm]，右 25.0[mm])

3.4.1　検証結果

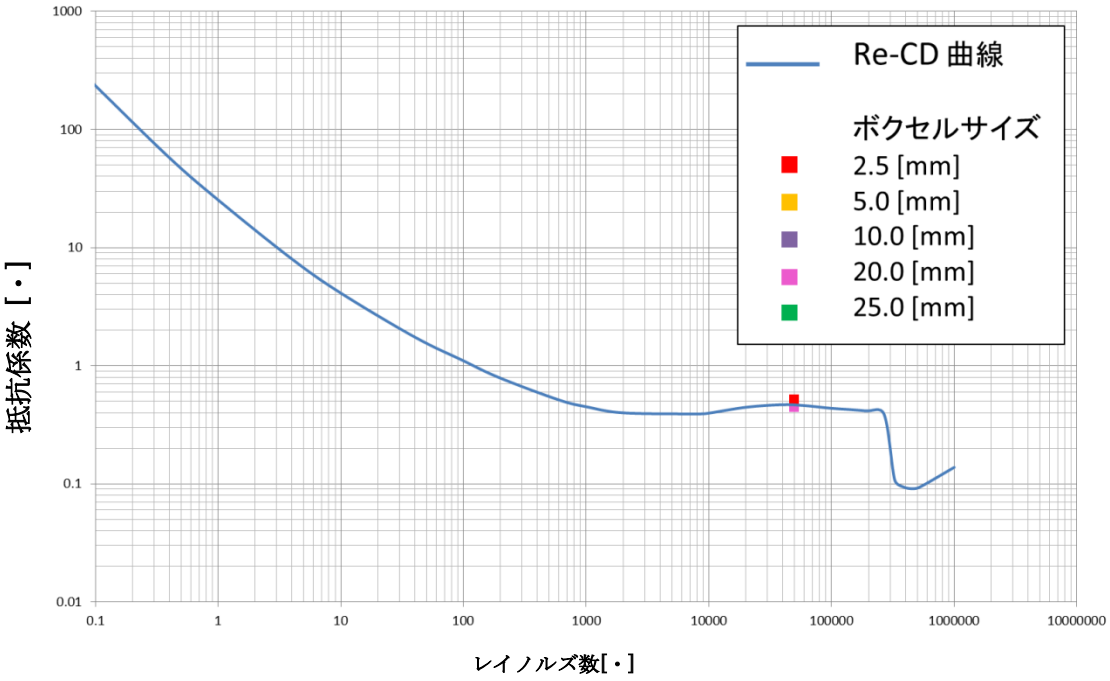


図 3-13　ボクセルごとの抗力係数結果(全体図)

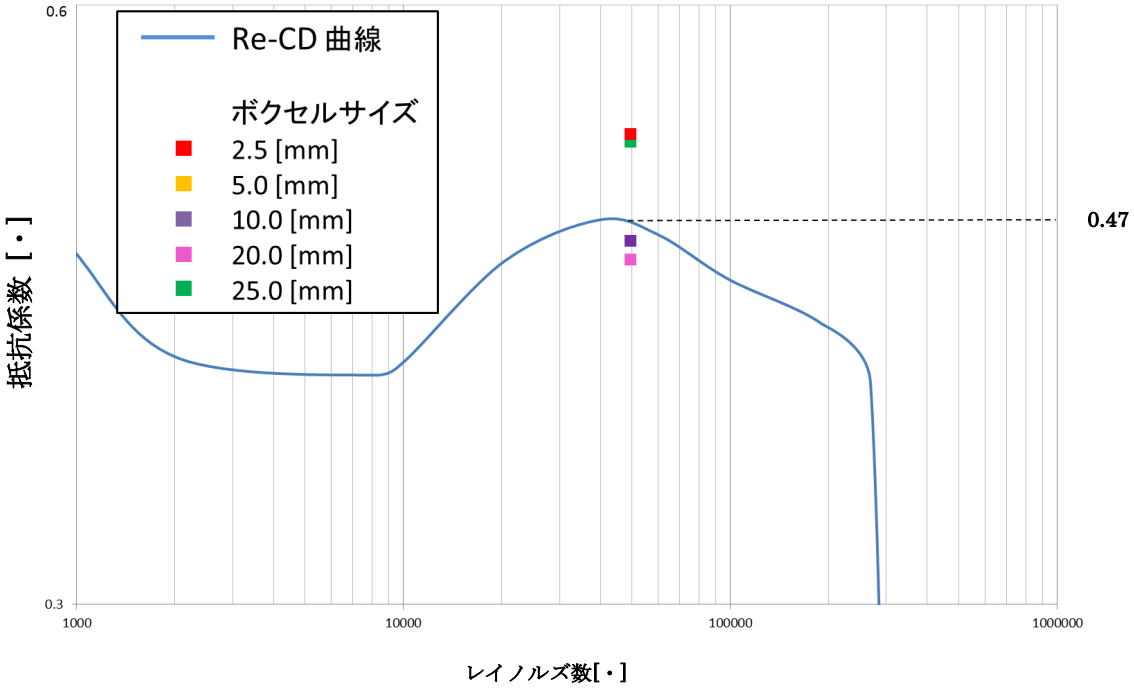


図 3-14　ボクセルごとの抗力係数結果(拡大図)

表 3-4　ボクセルサイズ変化による抗力係数

ボクセルサイズ [mm]	2.5	5.0	10.0	20.0	25.0
C_D	0.519	0.515	0.457	0.447	0.512

3.4.2　体積率の損失

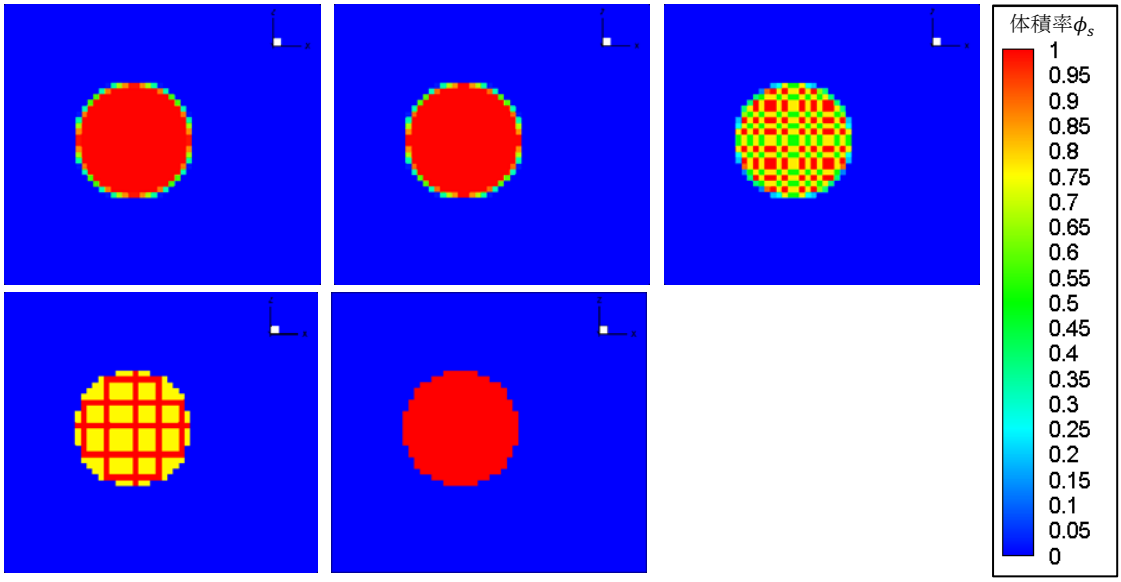


図 3-15　ボクセルごとの体積率

(上段左：2.5[mm]，中央：5.0[mm]，右：10.0[mm]，下段左：20.0[mm]，中央 25.0[mm])

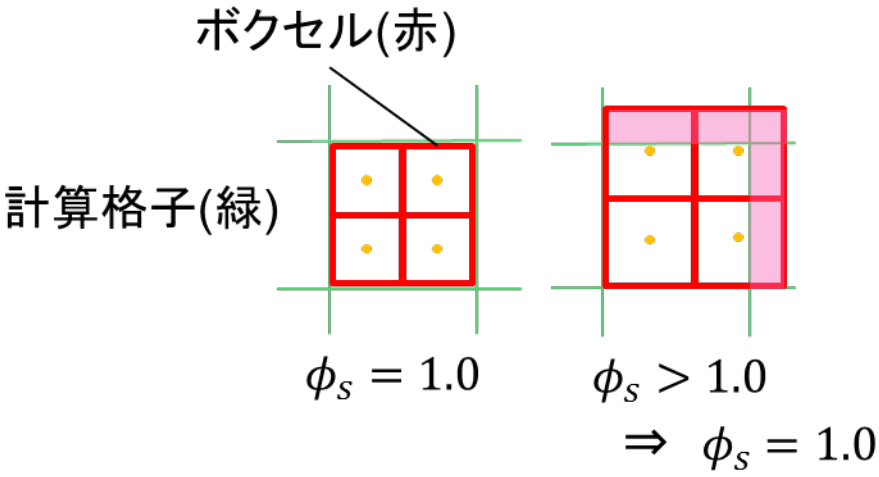


図 3-16　体積率の損失のイメージ

(赤:ボクセル，黄色点:ボクセル中心，緑：計算格子)

3.4.3　提案手法

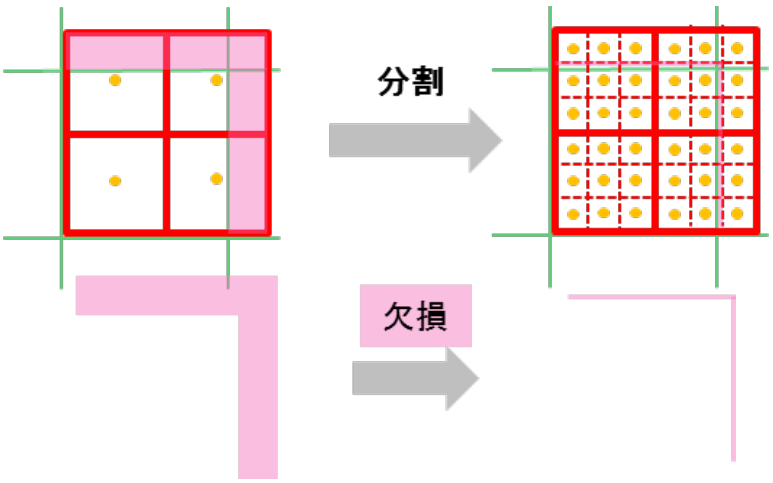


図 3-17　提案手法のイメージ図
(赤:ボクセル，黄色点:ボクセル中心，緑：計算格子)

3.4.4　提案手法による欠損の改善

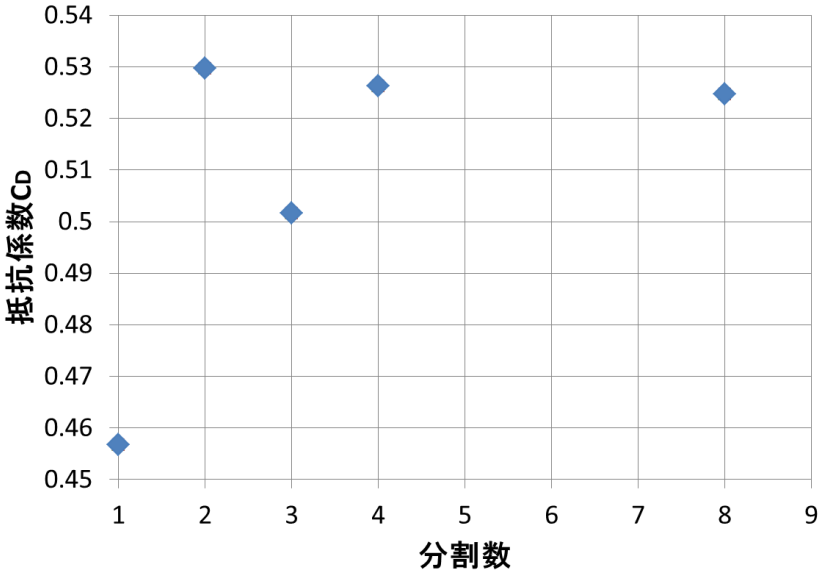


図 3-18　分割数と抗力係数　(ボクセルサイズ 10[mm])

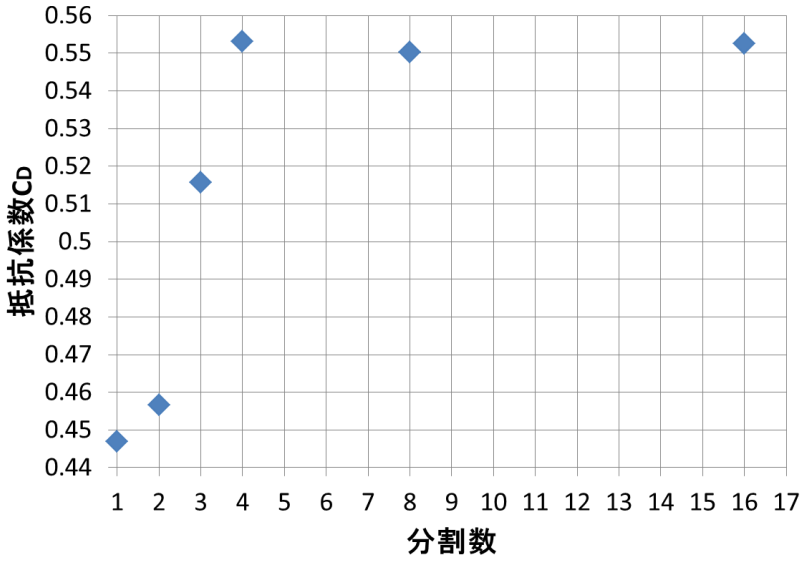


図 3-19　分割数と抗力係数　(ボクセルサイズ 20[mm])

表 3-5　分割数別抗力係数

分割数		1	2	3	4	8	16
ボクセルサイズ	10 [mm]	0.457	0.530	0.502	0.526	0.525	
	20 [mm]	0.447	0.506	0.457	0.553	0.550	0.553

3.4.5　PIC 法による体積損失の試行実験

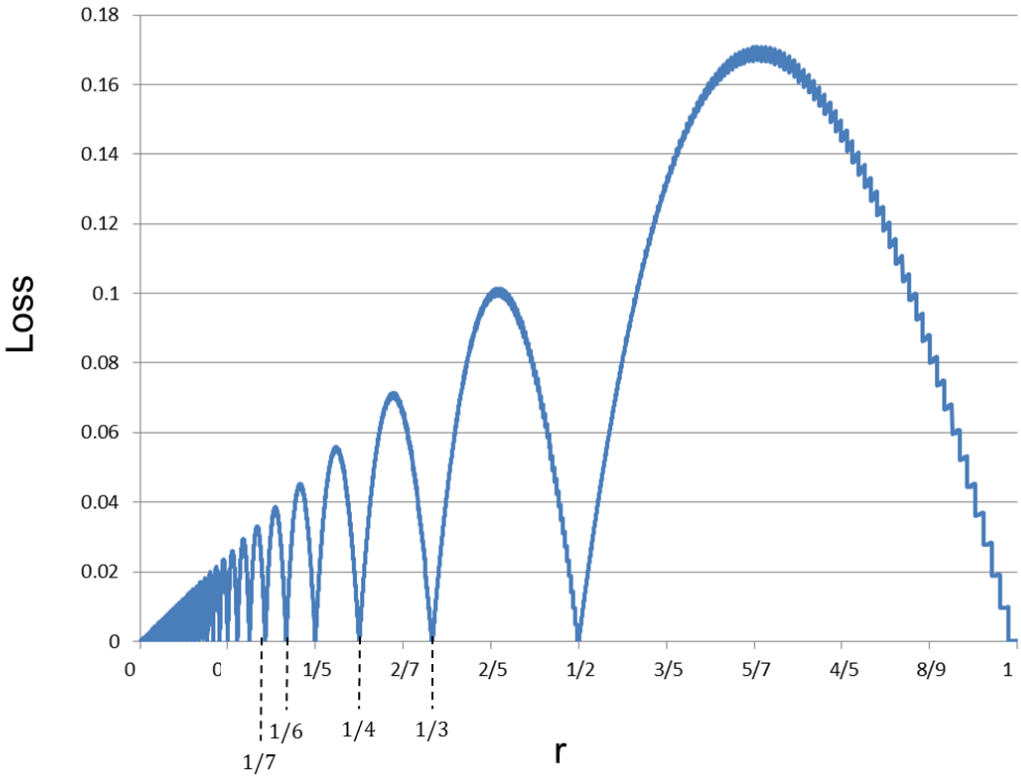


図 3-20　体積損失の一例

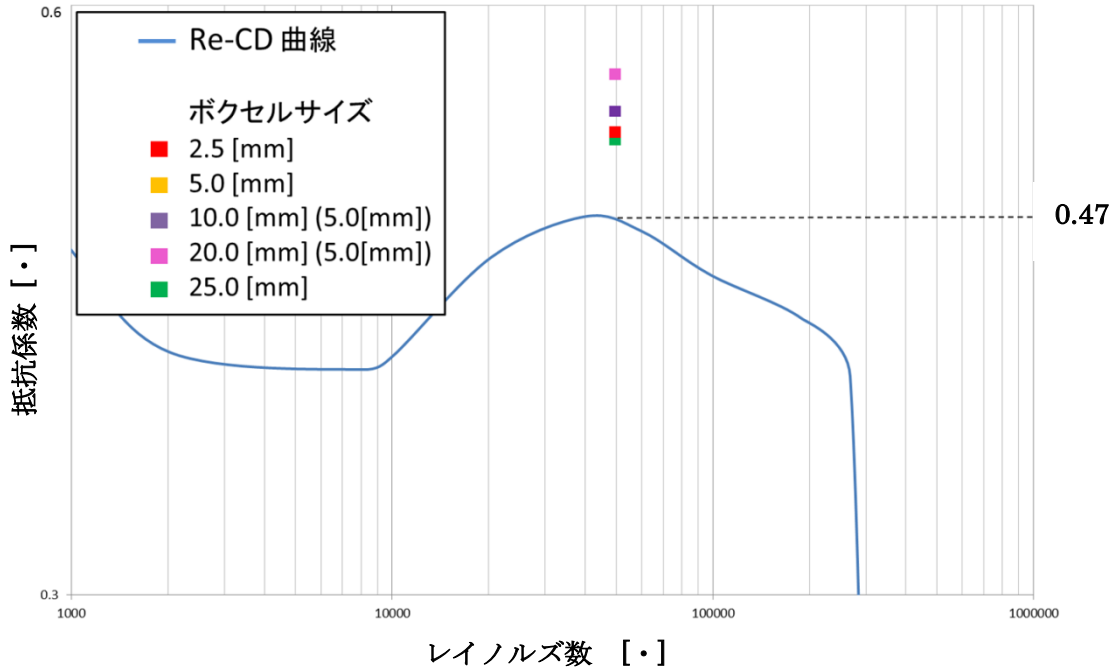


図 3-21　ボクセルごとの抗力係数結果 （体積率欠損なし）

表 3-6　ボクセルサイズ変化による抗力係数（欠損なし）

ボクセルサイズ [mm]	2.5	5.0	10.0	20.0	25.0
C_D	0.519	0.515	0.530	0.553	0.512

3.5　計算格子に関する比較

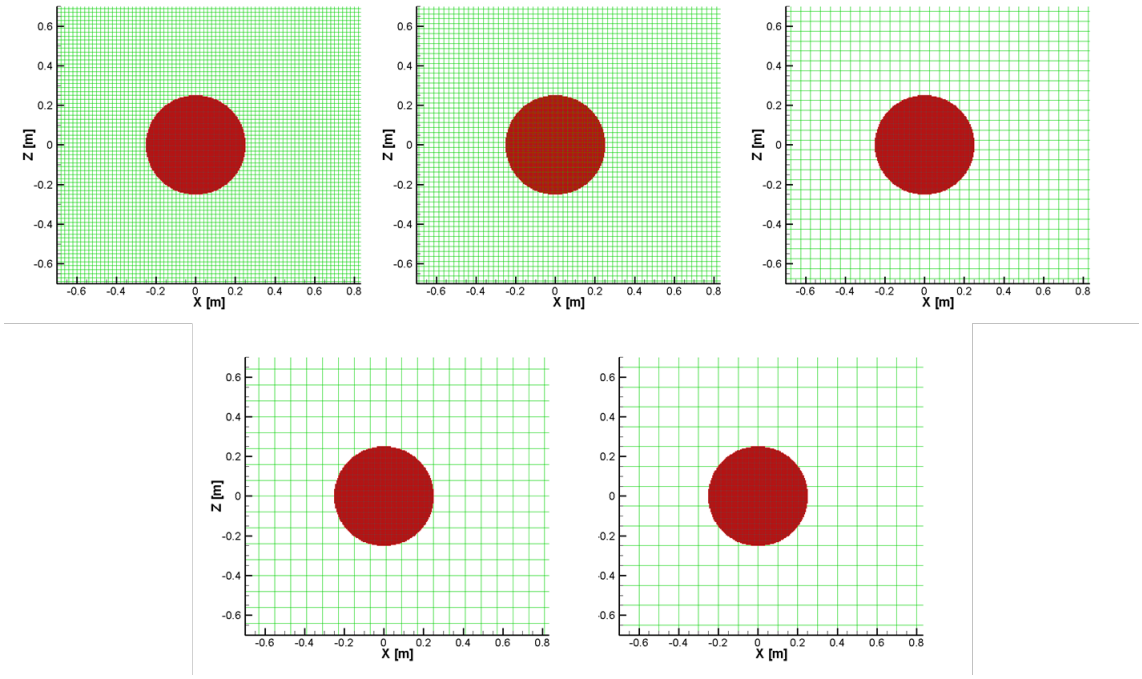


図 3-22 計算格子別の球

(上段左：20[mm]，中央：25[mm]，右：50[mm]，下段左：80.0[mm]，右 100.0[mm])

3.2.1 格子サイズ別による抗力係数

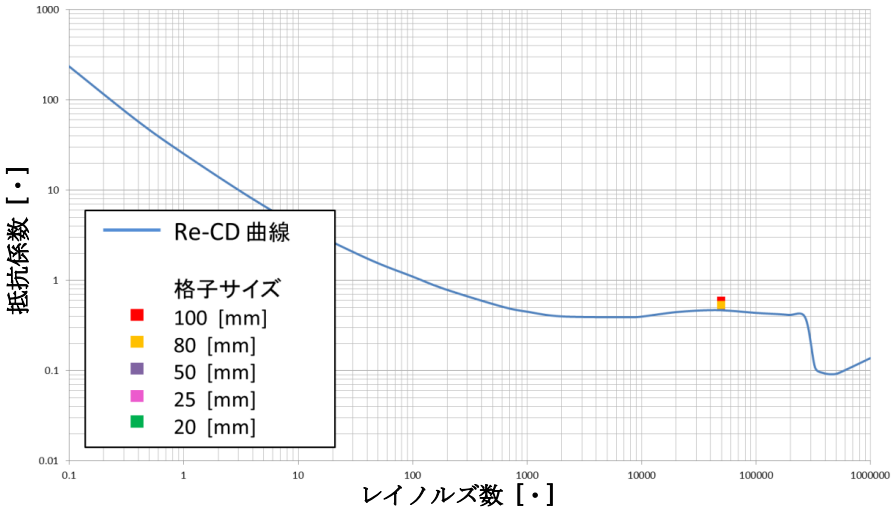


図 3-26　格子サイズ別抵抗係数(全体図)

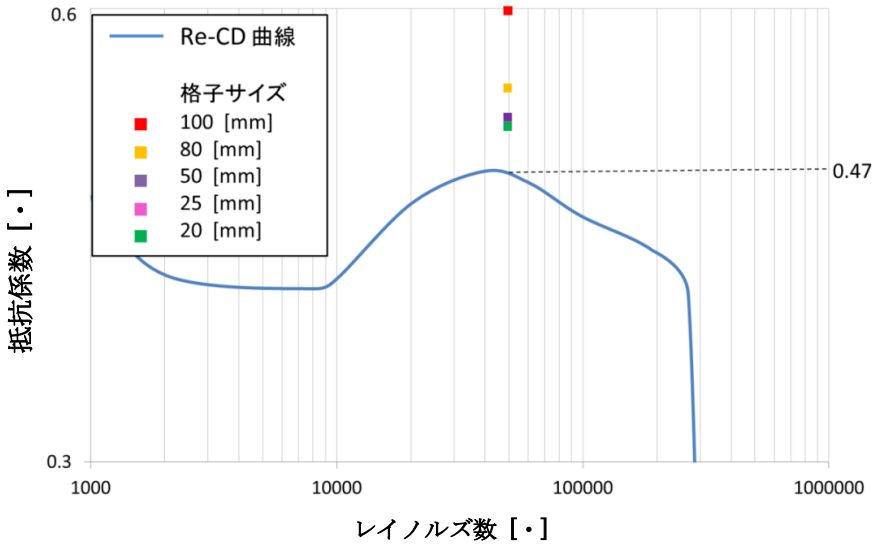


図 3-26　格子サイズ別抵抗係数(拡大図)

表 3-7　格子サイズ変化による抗力係数（欠損なし）

格子サイズ [mm]	20	25	50	80	100
C_D	0.501	0.506	0.508	0.532	0.598
誤差 $(0.47 - C_D)/0.47$	-0.066	-0.077	-0.081	-0.132	-0.272

3.5.2 計算格子による射影面積の過大評価

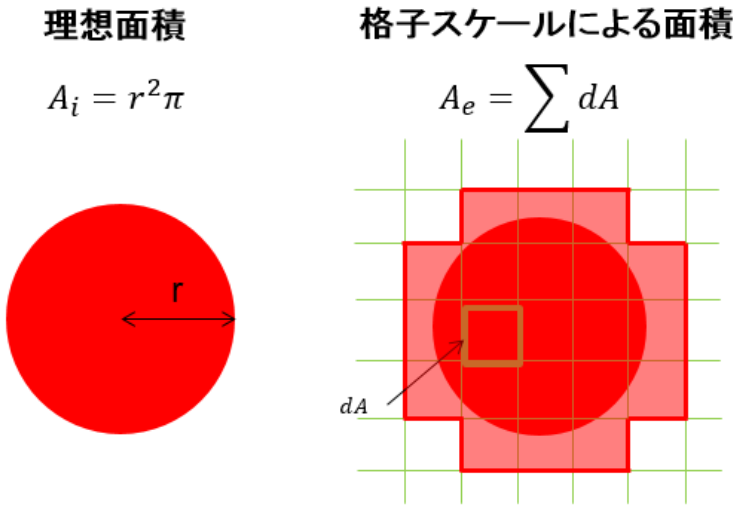


図 3-27　射影面積の理想面積と格子スケールによる面積の違い

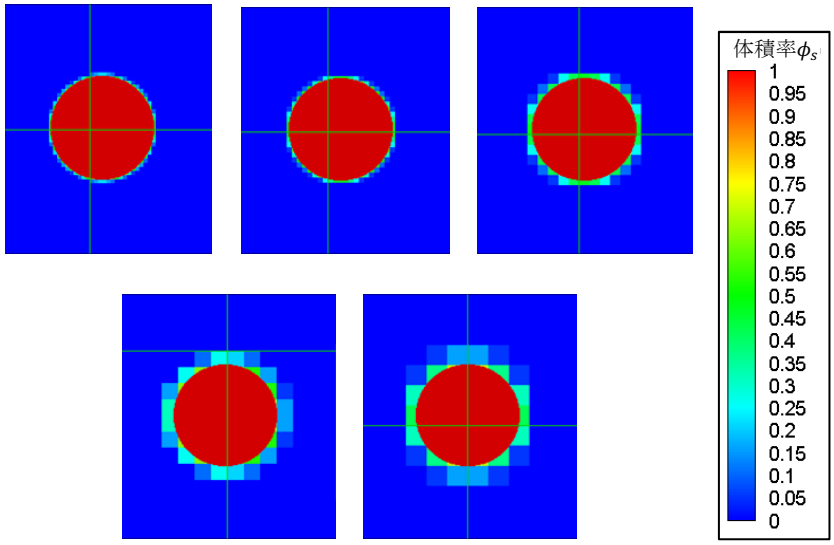


図 3-28　球の射影面積域(赤)と体積率の関係

(上段左から格子サイズ　20[mm] 25[mm] 50[mm]　下段左から 80[mm] 100[mm])

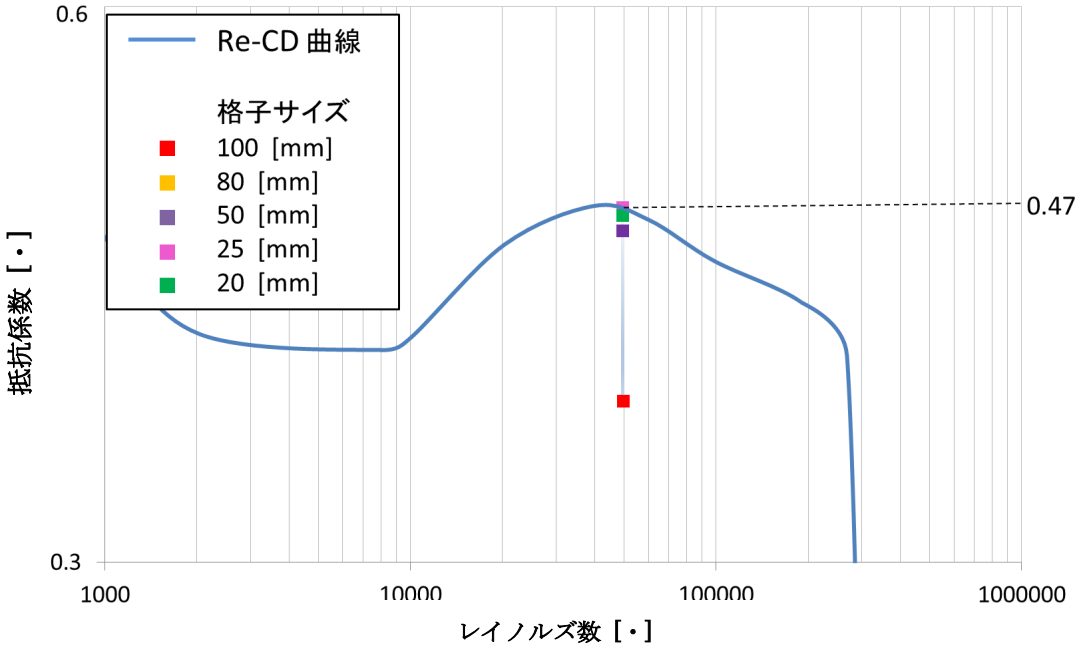


図 3-29　格子スケールの射影面積を用いた抗力係数

表 3-8　格子スケールの射影面積を用いた抗力係数

格子サイズ [mm]	20	25	50	80	100
C_D	0.462	0.467	0.454	0.362	0.367
誤差 $(0.47 - C_D)/0.47$	0.017	0.006	0.034	0.223	0.219

3.6　レイノルズ数別検証

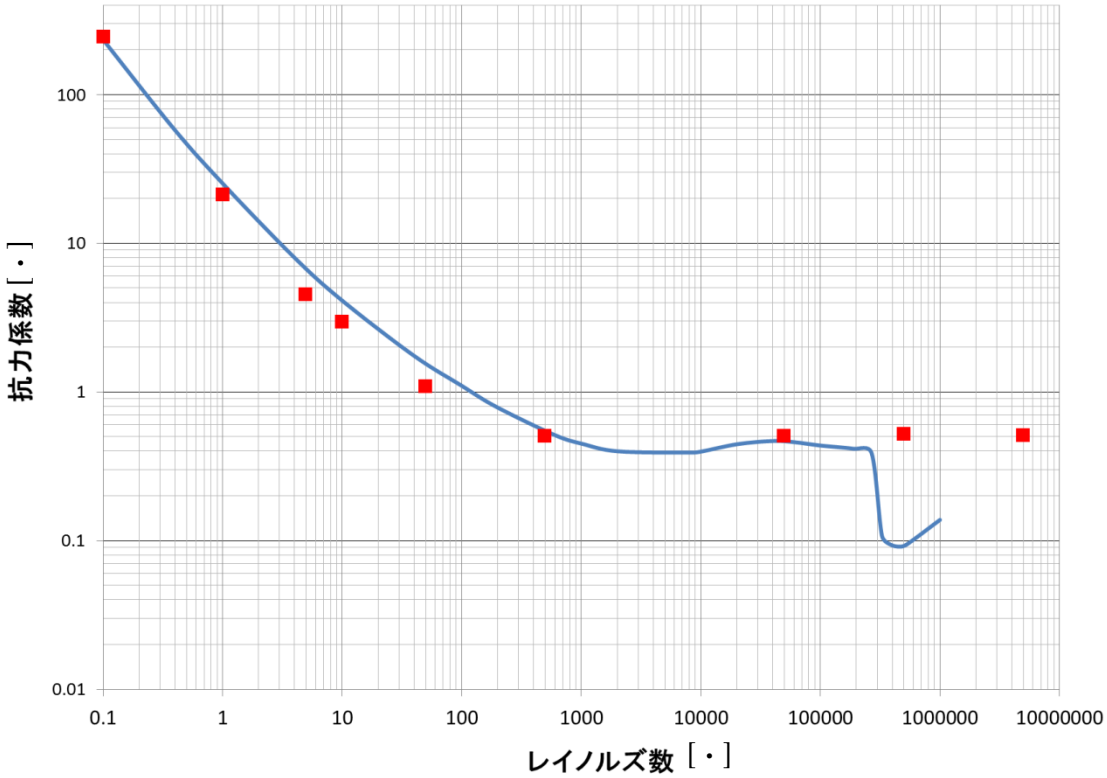


図 3-30　レイノルズ数別抗力係数

表 3-9　レイノルズ数別抗力係数

Re	0.1	1.0	5.0	10	50
C_D	245	21.2	4.53	2.97	1.10
Re	5.0×10^2	5.0×10^4	5.0×10^5	5.0×10^6	
C_D	0.509	0.506	0.521	0.510	

第 4 章　エントラップメント事故への適用

本章では第 3 章で検証した DRUM の再現性における注意点を考慮しつつ, 流れと人の相互作用をシミュレーションによってとらえることで水難事故の一例を取り上げる．エントラップメント現象における危険性と現象の考察，及び高度なシミュレーションモデルから，簡易的なモデルを採用しその差異を通して簡易モデルの有用性について考える．

4.1　計算条件とケース

今回のフットエントラップメントでは**図 2-5** における人体形状を用いた(身長 168[cm],体重 61.40[kg])．人体の体節ごとの諸要素を**表 4-1** にしめす．人体にはライフジャケットを着用したという想定で，ライフジャケット分の浮力を与えたのと同等の密度を体幹部に与えた．本実験ではライフジャケット分の力は 70[N] を与えている．初期状態としては**図 4-1** に示すように，水路の中に人体の足がすでに捕獲され，仰向けで水底に横たわっている状況を与えている．流れは足側から頭側へと流れ，水深は，立ち上がれば十分に呼吸ができ，水底に座った場合にぎりぎり水面に口が出せないような座高を想定して 70[cm]に設定した．

人体を形成するためのボクセルサイズには 1 辺が 5[mm]の立方体を用い，また計算中には新手法としてボクセルを分割する手法を取り入れてさらに 2 分割してある．計算格子には人体周りの細密な領域において x 方向，y 方向，z 方向の格子幅を 40[mm]，40[mm]，50[mm]に設定してある．この格子幅だと人体の幅や厚みに対しては若干粗いが，3 章で検討したように，粗い場合でも安全側に算出されることから計算時間を考慮してここではこの格子幅を用いることにした．

人体が拘束される場合，脚は拘束具と接触するために当然接触力を受ける．そこで DEM 法という手法を用いて，人体の脚部と拘束具の表面に弾性球と弾性板をそれぞれ与え，その反力を接触力として与えている．

今回，この設定場においてまず溺水につながる致命的な状況である水面に顔面が浮上しない流速を探った. 取り扱った流速としては 0.0[m/s], 0.5[m/s], 0.7[m/s], 0.8[m/s], 0.9[m/s], 1.0[m/s], 2.0[m/s]の 7 とおりである. 流速 0.0[m/s]についてはライフジャケットを着用すれば静的状況下であれば水面に浮上することを確認するためのものであり，簡易モデルとして流れの中の円柱モデルを考えた場合にはこの流速は適用しないとする．なお計算が開始される時刻 t=0 [s]における人体の配置を**図 4-2** に示す．動粘性係数は$1.01 \times 10^{-6}[\mathrm{s}/m^2]$, 水の密度$\rho_w = 9.98 \times 10^3[kg/m^3]$とする．

4.2　計算結果

7 つの流速における人体の挙動を**図 4-3** にまとめて掲載する．また，人体にかかわる力には，重力，X，Y，Z の 3 方向における総圧の圧力差による力，粘性力，拘束されている足が受ける接触力がある．その総力を**図 4-4** に示す．流速 2.0[m/s] において，力の時間変化が他とは違い大きく振動しているが，これは拘束部に与えられる反発力により撃力が生じ，繰り返しバウンドしているような状態であるためと考えられる．流速 0.0，2.0[m/s]を除いて，流速について言えば，だいたい 4 秒ほどで力のつり合い状態に近づき，**図 4-3** にみられるように各方向の総力は 0 に近づく． 4 秒までの挙動としては，まずライフジャケットの浮力を与えた胴体が浮上してゆき，遅れて胴体に腕が惹かれるような形で水底から，上腕から下腕にかけて離れていく．下腕は上昇するにつれて後方に流されている．検証前の想定では，腕は万歳の状態で後方に流れていくかと考えられたが，先に体が浮上して人体に付随して腕が上昇する流れの中で，肩の関節域の制限から万歳の姿勢ではなく折れ曲がって流れの中に固定されてしまっている．t=10[s]において，0.9[m/s]で顔面が水面から出ていないので，このシミュレーションにおける溺水を引き起こす流速は 0.9[m/s]であった．t=10[s]における人体拘束具からの起き上がりの角度は流速が早ければ小さいということが分かり流速によって体が押さえつけられるというエントラップメント現象をよく表現している． また，流れがなければ十分に生存可能といえるような水深状況においても，足が水底に捕獲されてしまえば十分に溺水の危険性があることが示唆される．ましてや今回のシミュレーションにおいてはライフジャケットの着用をしており，エントラップメント現象がもたらす危険性を確認できた．

4.3　円柱群による近似的推定

DRUM による高度なシミュレータを用いれば，非定常な流れの中で人体の動きをとらえることができる．しかしながら，災害における危険予測をするために，高度なシミュレータを用いるよりも簡易的なモデルを用いて評価が可能であればなおよいと考えられる．そこで，流れと人体の相互作用について，エントラップメント現象に簡易モデルを導入し，DRUM による人間のモデルと対比してみる．具体的には人体を円柱と見立て，DRUM による人間モデルの場合と力の違いを検討する． 今回水難事故における危険性について考えることが前提となるので，水面への浮上が重要となる鉛直方向についての力に着目をすることにする．物体に働く流体からの力は非静水圧と粘性によるものである．しかし，**表 4-2** に掲載する通り t=10[s]における粘性力と非静水圧による力のシミュレーション結果では粘性分が圧力分に対して極端に小さいため粘性力はほとんど抗力として寄与していないことがわかる．

4.3.1　円柱モデル 1：1 つの円柱

DRUM によって得られたエントラップ中の状況から人体が一つの円柱であると見立て，

実験値として与えられる円柱の揚力係数[4-1]を用いて鉛直方向の力を算出する．この揚力係数はレイノルズ数が 20 万から 36 万で与えられるため円柱モデルに対してのレイノルズ数よりも高い範囲であるが，高レイノルズ数では抗力係数に大きな範囲がないということを参考に今回は式(4-1)を適用した．DRUM に使用した人体モデルより体積と身長から円柱の直径を算出し，拘束具と人体のなす角度を t=10[s]における状態から取得した(**図 4-5**)．正確にいえば XZ 平面における拘束具の中心座標と，胴体の重心座標をもとに角度を算出した．

揚力係数を用いて揚力を求める式(4-2)から鉛直方向の力を算出した．

$$C_L = 1.1 \sin^2 \alpha \cos \alpha \tag{4-1}$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \tag{4-2}$$

C_Lは揚力係数であり，ρは水の密度，Aは円柱の射影面積である．ただし，円柱の射影面積は円柱の高さと直径の積で表されるもを指し角度によって変化しない．これにより算出した鉛直方向の力及び諸要素を**表 4-3** にまとめる．また**図 4-6** に DRUM の人間モデルと円柱モデルの力まとめて示す．

図 4-6 によれば円柱モデルは 0.5[m/s]を除いて，人間モデルよりも大きく抗力を算出しているのがわかる．それはおおよそ人間モデルよりも 1.6 から 2 倍ほどの大きさを示している．ライフジャケットなどの追加浮力を考える場合，鉛直下向きの力を大きく見積もる分には安全側であるので，危険度合を考えるうえでは問題ないと考えられるが，やはり過度な安全というのもコスト面などを考えて，一概に問題ないというわけではない．

4.3.2　円柱モデル 2：体のパーツ別円柱

前節を通して，全体を円柱に見立てるのではなく体ごとに，頭，胴体，腕，足を違う径における円柱とすることでより人体形状に近づくのではないかと考えた．そこで，体を円柱群として，総力を算出することにした．角度において，腕などは胴体とは違う挙動をしているので本来の場合胴体座標から導き出した角度は適用されないが，ここでは簡単のため角度はすべてのパーツで同一であるとした．

図 2-5 に示される人体形状においては上腕と下腕，上足と下足において，それぞれ腕と足として同一に扱った．人体モデルをパーツごとに円柱に換算した場合の諸要素を**表 4-4** に示す．これによりパーツごとの鉛直方向の力を算出して総力を得たものを**図 4-7** に掲載する．結果はすべて人間モデルより抗力は鉛直下向きに大きくなった．また一つの円柱モデルよりも 2 倍から 3 倍以上の抗力を算出している．一部の要因としてはパーツに分けることでより人体に近づくように思えたが，角度は同一であるということから，揚力係数が一つのケースでパーツごとに変わらないため算出結果に寄与するのは力を算出する際の総射影面積が影響してくる．体をパーツごとに円柱にした場合とそうでない場合の総射影面積はパーツごとの方が一つの円柱とした場合の 1.36 倍になっている．故に，総面積が大きくなるので総力は増加してしまう．

体のパーツごとに円柱で力を算出したものと，人間モデルのパーツごとで比較した場合に差異があるか考える．**図 4-8** に人間モデルと円柱モデルの体のパーツ別の抗力を掲載する．結果円柱のモデルでは DRUM の算出した力と整合しないことが多く有用性は低いといえる．腕はほぼ流れに対して垂直になっているので多くが鉛直方向の力を示さない．また，掌の角度によっても揚力の向きが変わるなど円柱として人体パーツを表現できていない部分の影響も考えられる．さらに，頭では，あごに流れがぶつかり下向きに力が働く反面，後頭部が流れによって押し上げられるなどの効果も考えられ，形状による複数の効果を加味できていない．脚も比較的円柱に近いがつま先部分に当たる流れの影響も考えられる．このように円柱形状では考慮されない効果などが多くみられた．

しかし，体のパーツ別に注目したことでいくつか力のかかる過程を考察することができた．特に注目すべきは胴体である．胴体には鉛直下向きの力ではなく鉛直上向きの力がかかっていることが分かった．流れに押し込まれるので体は下方向に押し付けられる力が働くと考えられたが，この結果はとても興味深い．**図 4-9** にみられるように胴体にぶつかった流れが脇腹を沿うように別れ，腕にぶつかり下方に流れる．その流れが水底に当たり胴体の背中に巻き上がるようにぶつかっていることが分かる．ほかの体の部位や水底などの考慮が円柱のモデルではなされていないのでこのように力の方向及び大きさに差異が出てしまった．ここで，腕の姿勢について考えてみれば，腕によって流れが下方向に誘導され，背中側で流れが巻き上がるようにして胴体を押し上げる効果があると考えられるが，腕に流れ方向の抗力がかかり，拘束部からのトルクを受け下降方向への力も生まれるはずである．腕が万歳になる場合であれば腕の抗力が減り，トルクによる下降方向への力が減ると考えられる．しかし，その場合胴体の巻き上げの効果は減ると考えられる．または，背中が押し上げられるような流れは腕に関係ないのであれば，万歳状態の方が浮上できる可能性も考えられる．腕の状態による違いについて更なる検討が必要であると考えられる．

このように，形状依存による効果と姿勢による体のパーツの位置関係による効果というのが考えられる．円柱モデルを考えるうえでは，実験的にさまざまな簡易的形状の抗力係数や揚力係数を流れに対する角度で算出しデータを取得する必要がある．しかし，姿勢のような体節の位置関係が相関するような影響を考えるとそこには課題も残る．

今回の円柱モデルでは，大きく鉛直下向きの力を換算してしまい，安全面を考えれば問題はないものの，今回の円柱モデルのように簡易モデルはもちろん決していつも安全側に結果を出力するとは限らない．今回は簡易モデルによって力を精確に算出するには至らなかったが，簡易モデルを用いて水の流れと人体の力及び挙動を評価することができれば，頻繁に津波や洪水に見舞われるに日本においては大きな利益を与えることになるだろう．

第 4 章　まとめ

VII. 経験則にのみ危険視されている水難事故の例としてエントラップメントを取り扱った．DRUM によってエントラップメントのシミュレーションを行い，流れの中での人体の挙動について考察をした．

VIII.　DRUM のような高度なシミュレーションモデルに代替する簡易なモデルが有用であれば，水難事故をとらえるうえでも有益なことである．そこで，流れと人との相互作用を円柱モデルを用いて再現できるかということで DRUM による力と比較検討した．結果，今回採用した円柱を用いた簡易モデルは力を精確に算出することができなかった．

参考文献

[4-1]　社団法人日本機械学会: 機械工学便覧, p.A5-106,　社団法人日本機械学会 1955

第 4 章　図表集

4.1　設定

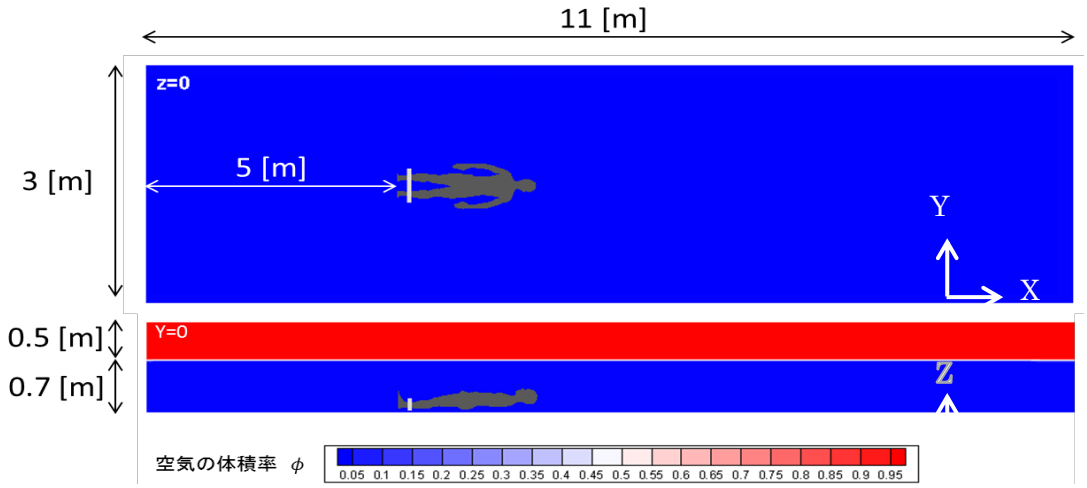


図 4-1　流れ場の設定

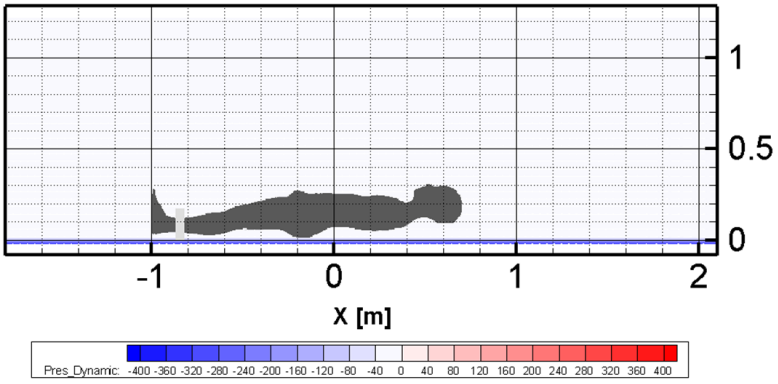


図 4-2　初期状態

表 4-1　体節の諸要素　※LJ：ライフジャケット

体節	体積	密度	重量	体節	体積	密度	重量
	m^3	kg/m^3	kg		m^3	kg/m^3	kg
胴体	0.0325	893	33.12	右上足	0.00498	1044	5.200
(LJ 部)	0.0205	1019	20.95	左上足	0.00478	1044	4.988
(非 LJ 部)	0.0120	678.5	8.153	右下腕	0.00124	1098	1.364
右上腕	0.00162	1056	1.713	左下腕	0.00117	1098	1.284
左上腕	0.00148	1056	1.560	右下足	0.00364	1085	3.956
頭部	0.00523	1070	5.598	左下足	0.00352	1085	3.8140

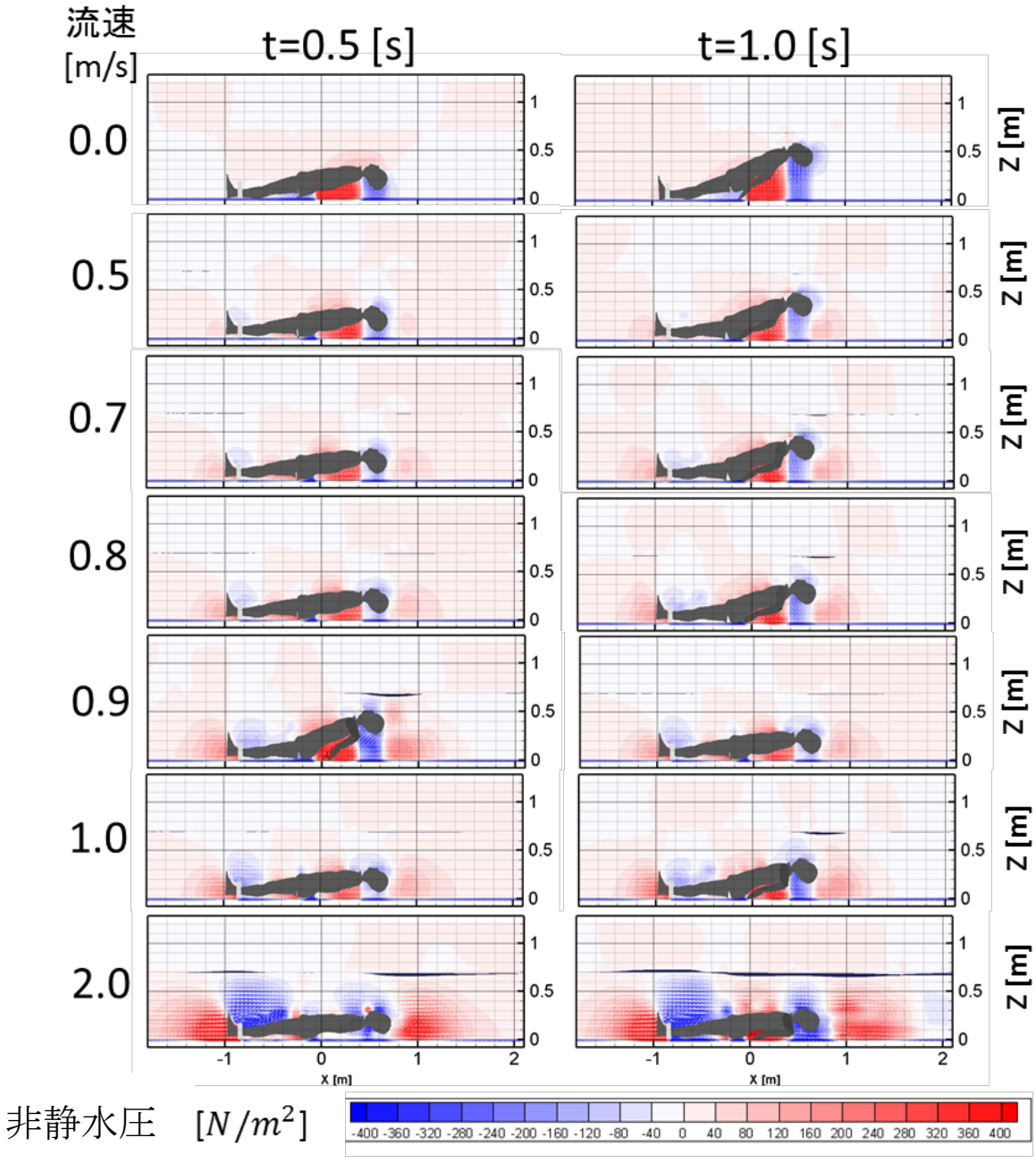


図 4-3　流速別フットエントラップメント(t=0.5, 1.0 [s])

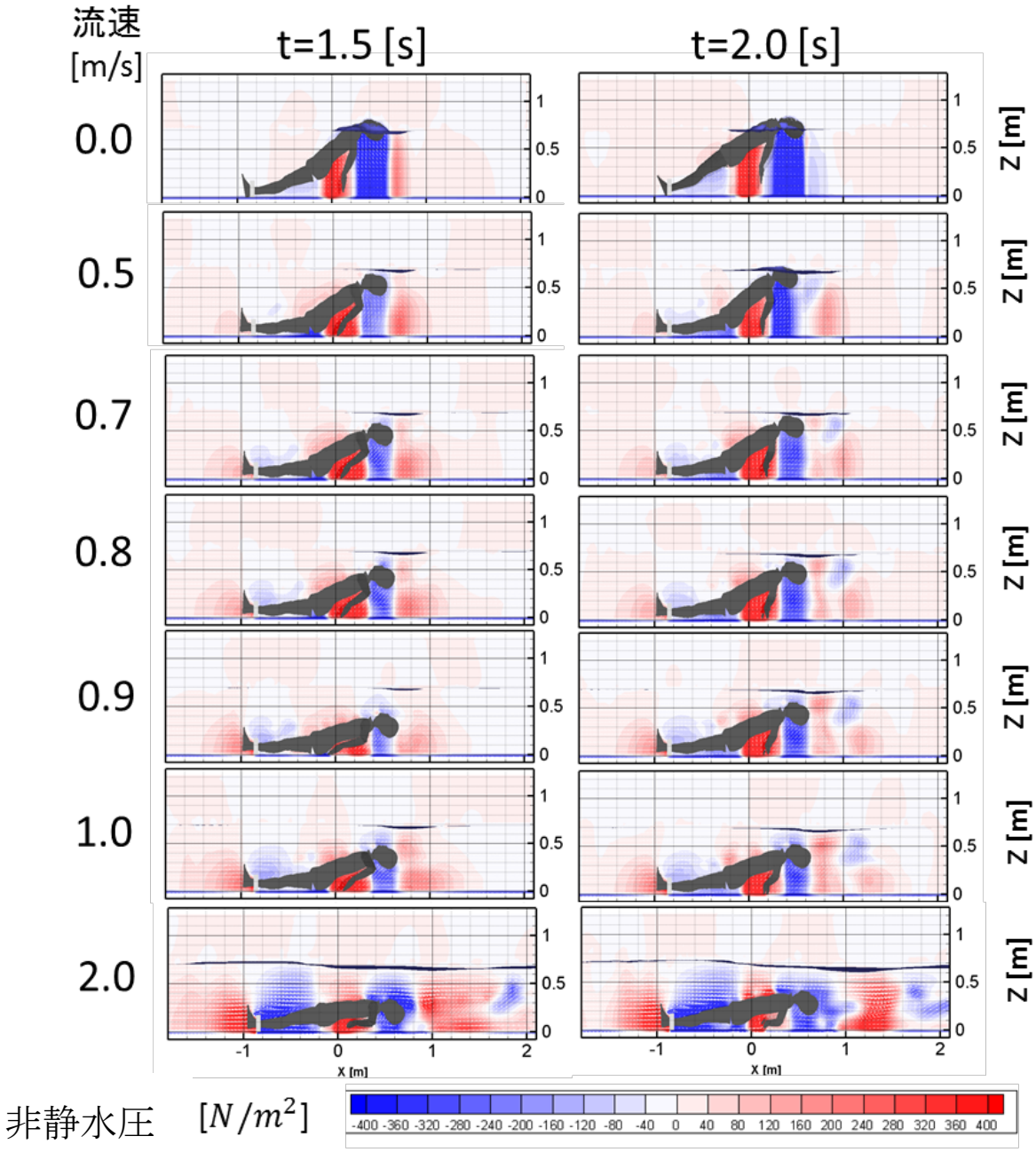


図 4-3　流速別フットエントラップメント(t=1.5, 2.0 [s])

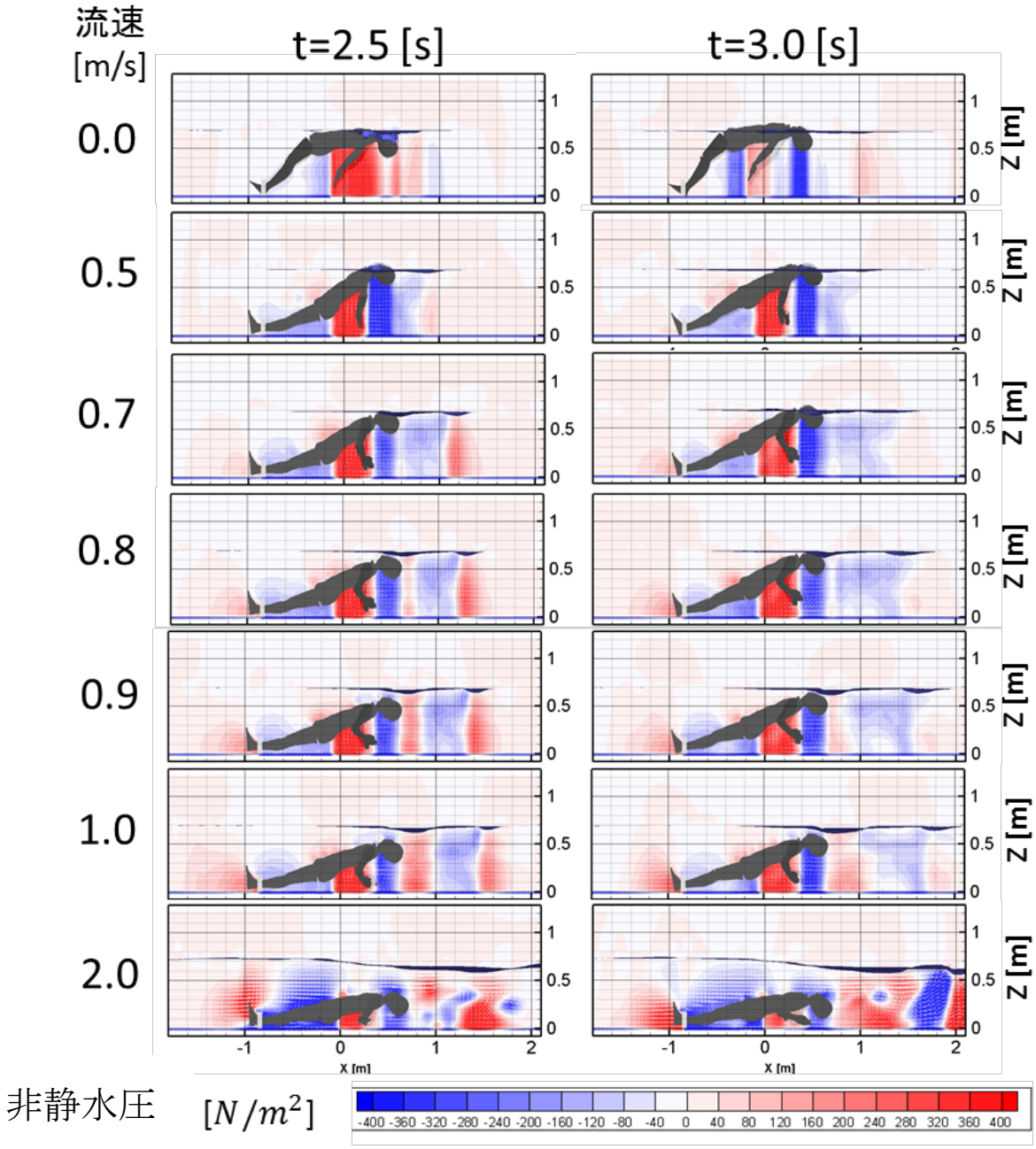


図 4-3　流速別フットエントラップメント(t=2.5, 3.0 [s])

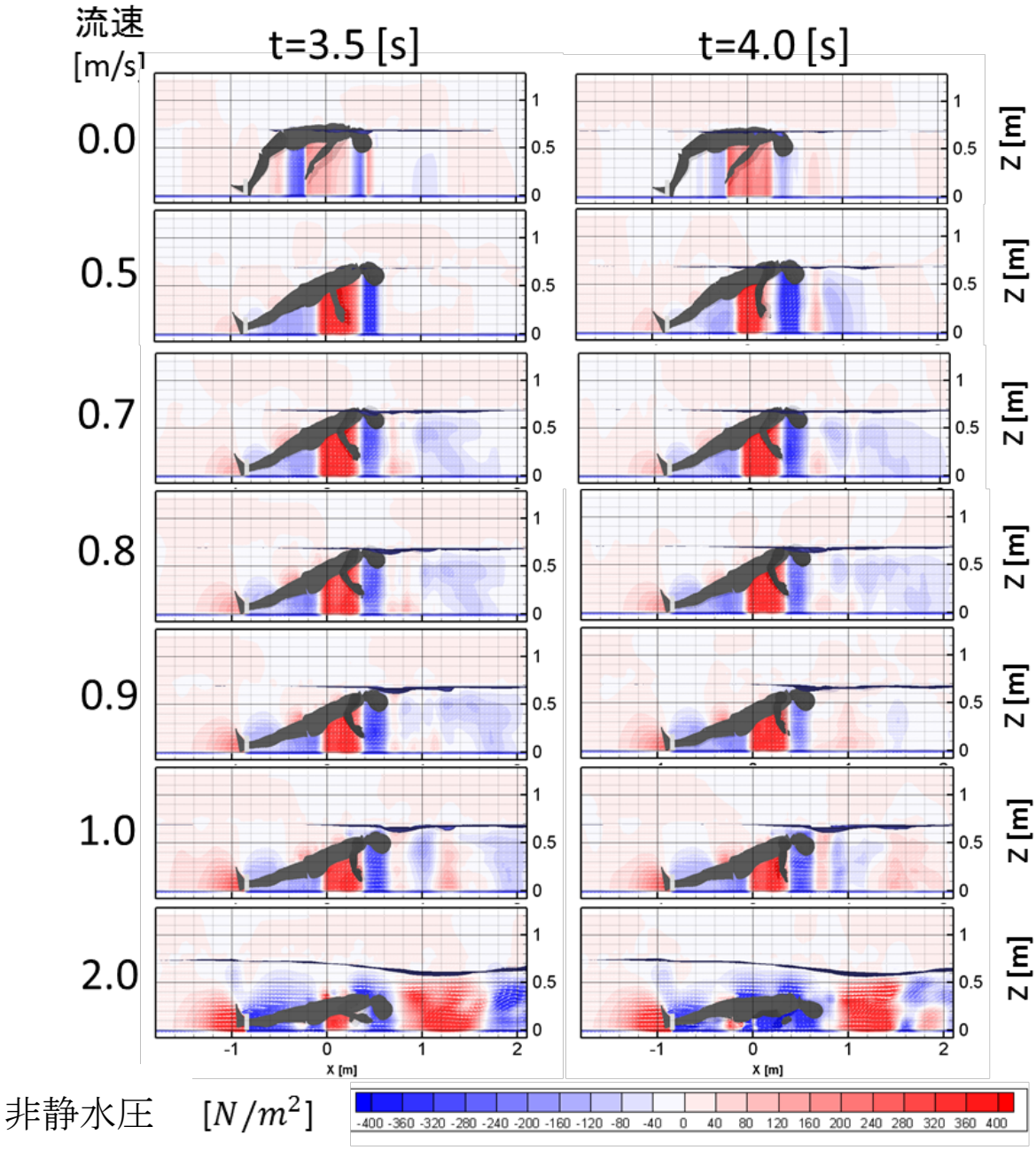


図 4-3　流速別フットエントラップメント(t=3.5, 4.0 [s])

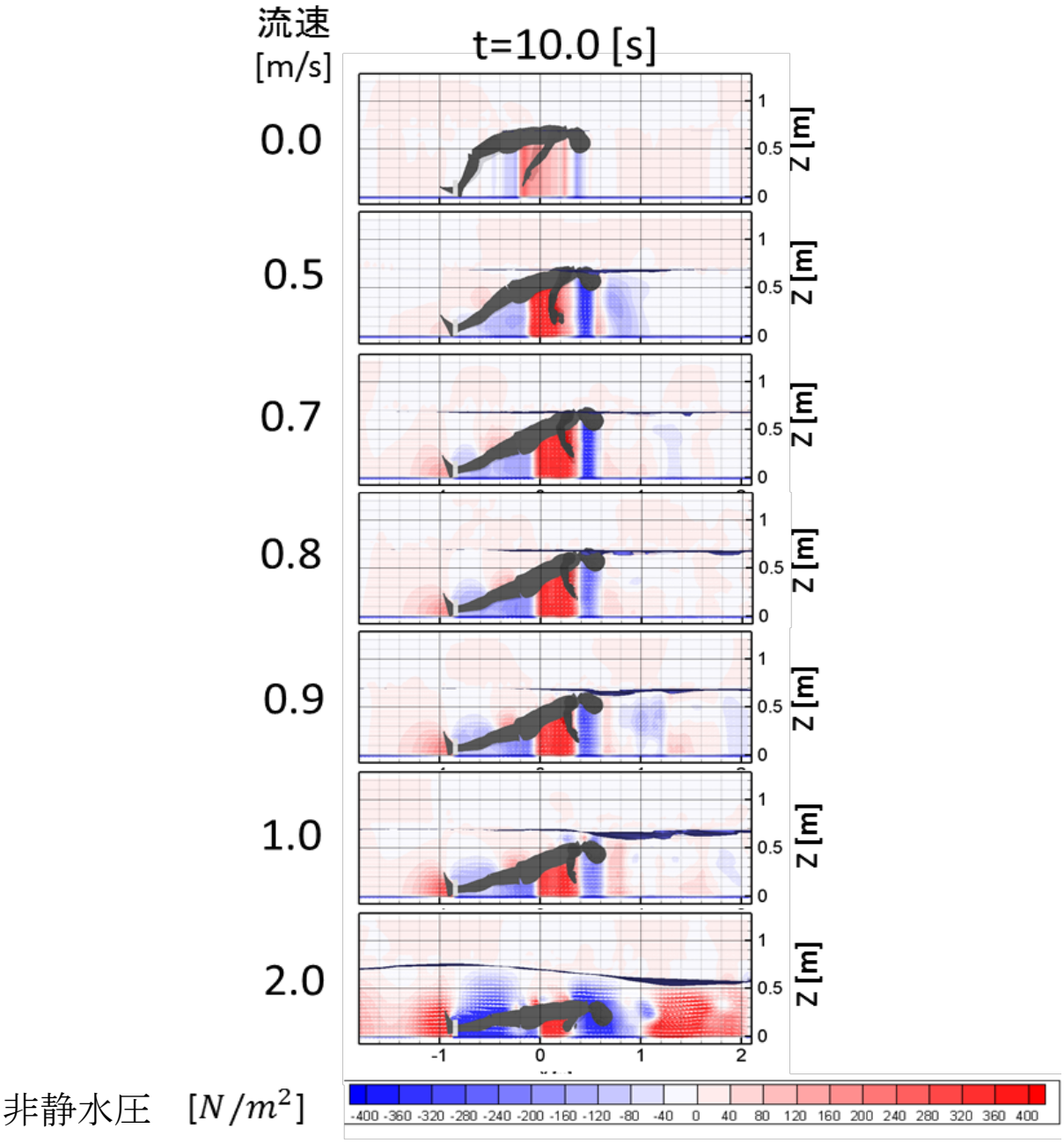


図 4-3　流速別フットエントラップメント(t=10.0 [s])

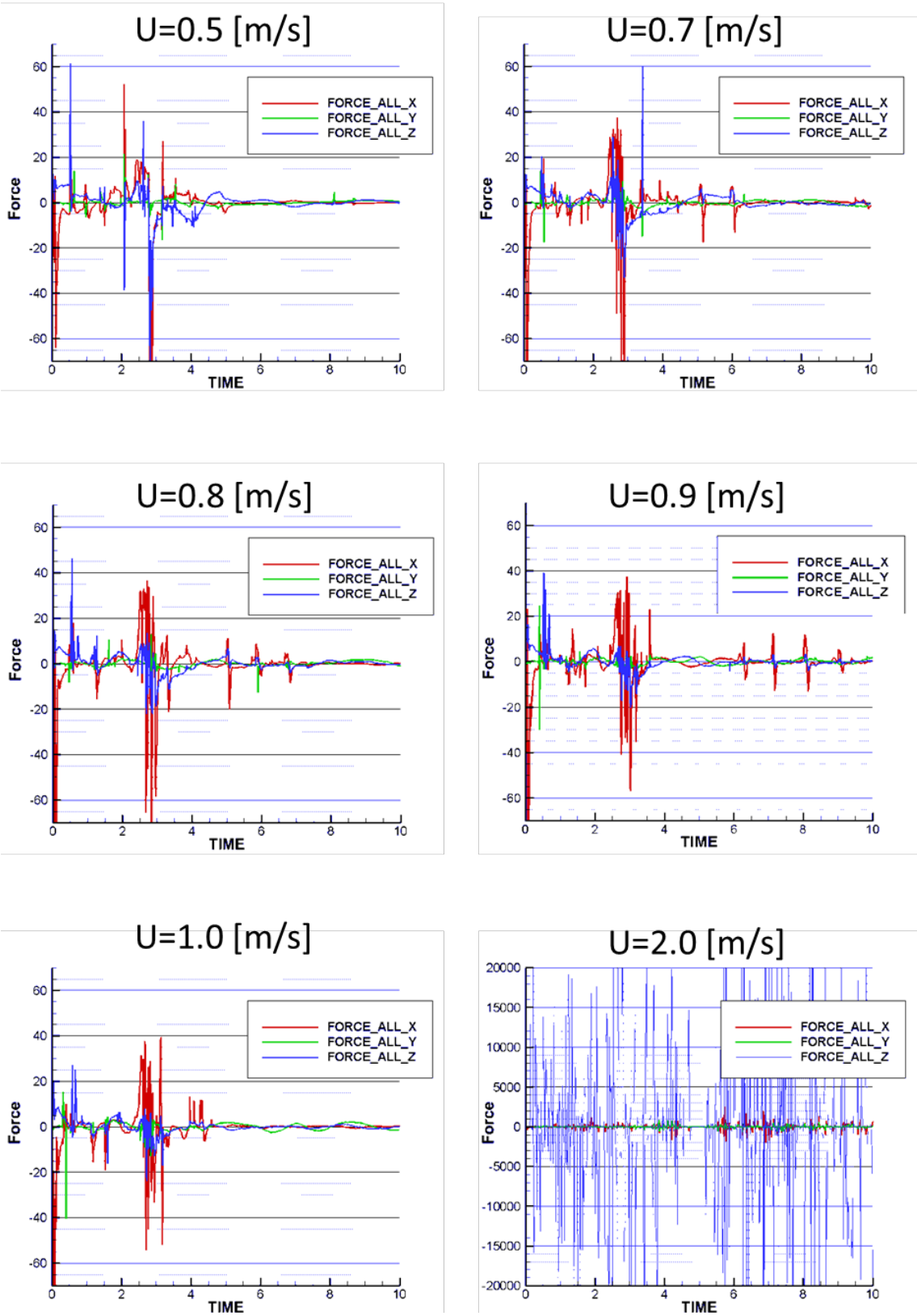


図 4-4 流速別人体にかかる三方向の総力(縦軸単位:[N] 横軸単位[s])

4.3　円柱モデルの導入

表 4-2　t=10[s]における鉛直方向の抗力(鉛直上向きを正)

流速［m/s］	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0　※
粘性力　［N］	-0.0042	0.0042	-0.0034	-0.0009	-0.0010	-00385
動圧による力　［N］	-15.37	-11.87	-12.01	-10.19	-11.46	-5.940

※撃力による不安定状態より t=8.0[s]から t=10.0[s]での時間平均を用いている.

4.3.1　円柱モデル 1：1 つの円柱

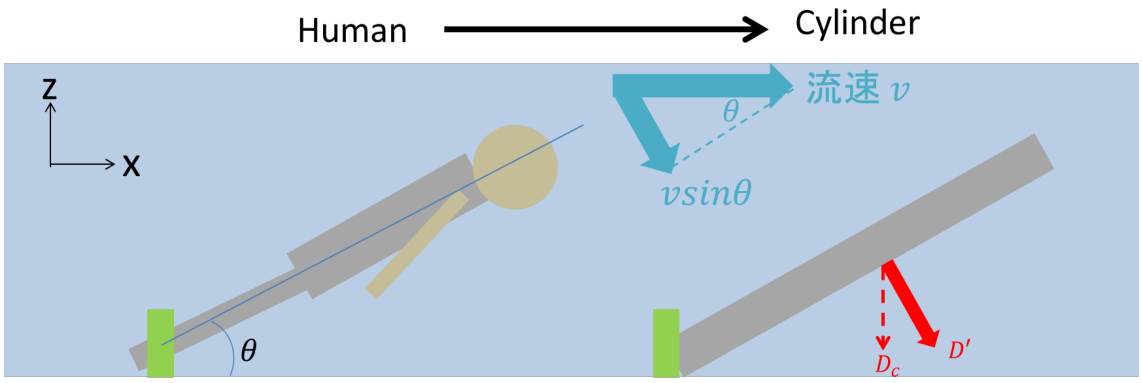


図 4-5　人間モデルから円柱モデル

表 4-3　円柱モデルの鉛直方向の力及び諸要素

流速［m/s］	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0
角度［°］	29.7	26.4	22.9	19.5	16.6	9.29
身長［m］	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
円柱直径［m］	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
鉛直方向の力※［N］	-10.23	-16.68	-17.11	-16.38	-15.07	-19.73

※ 鉛直上向きを正

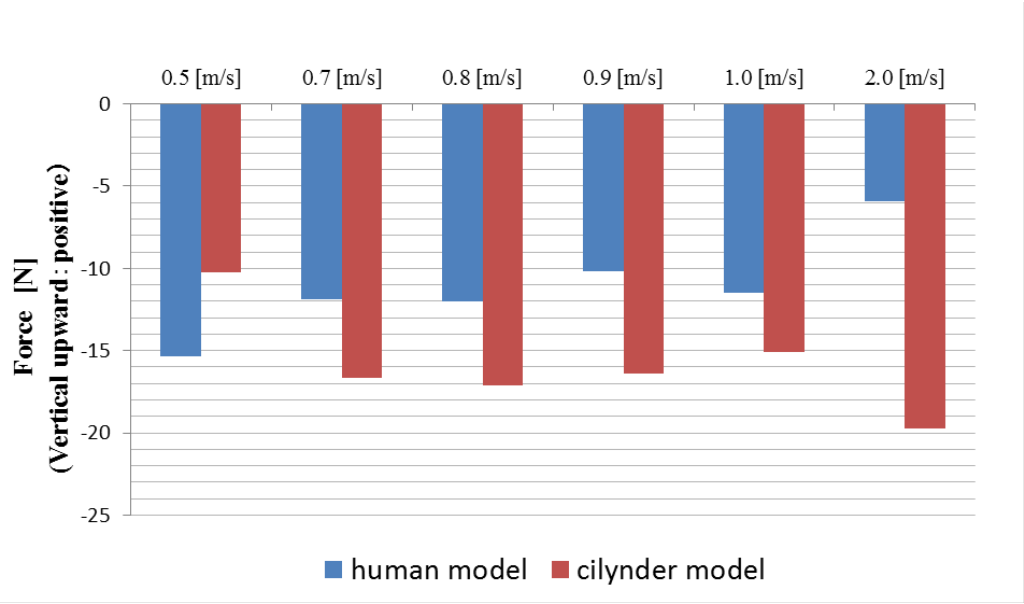


図 4-6　人間モデルの非静水圧による力と円柱モデル力

4.3.2　円柱モデル 2：体別円柱

表 4-4　体のパーツ別人間モデルの円柱モデル換算

人間モデル		円柱モデル			
	長さ		直径	密度	射影面積
	[m]		[m]	[g/m^3]	[m^2]
頸椎長-股下高	0.689	胴体	0.245	893.4	0.169
身長-頸椎高	0.254	頭	0.162	1070	0.0411
上肢長	0.733	腕	0.069	1074	0.0507
股下高	0.738	足	0.121	1061	0.0891

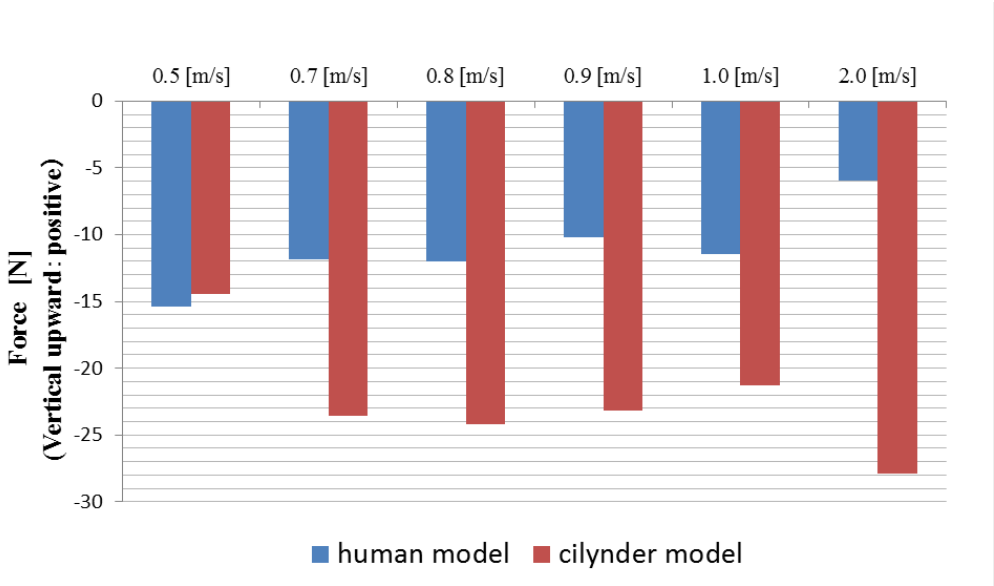


図 4-7　人間モデルの非静水圧による力と円柱パーツモデルの抗力

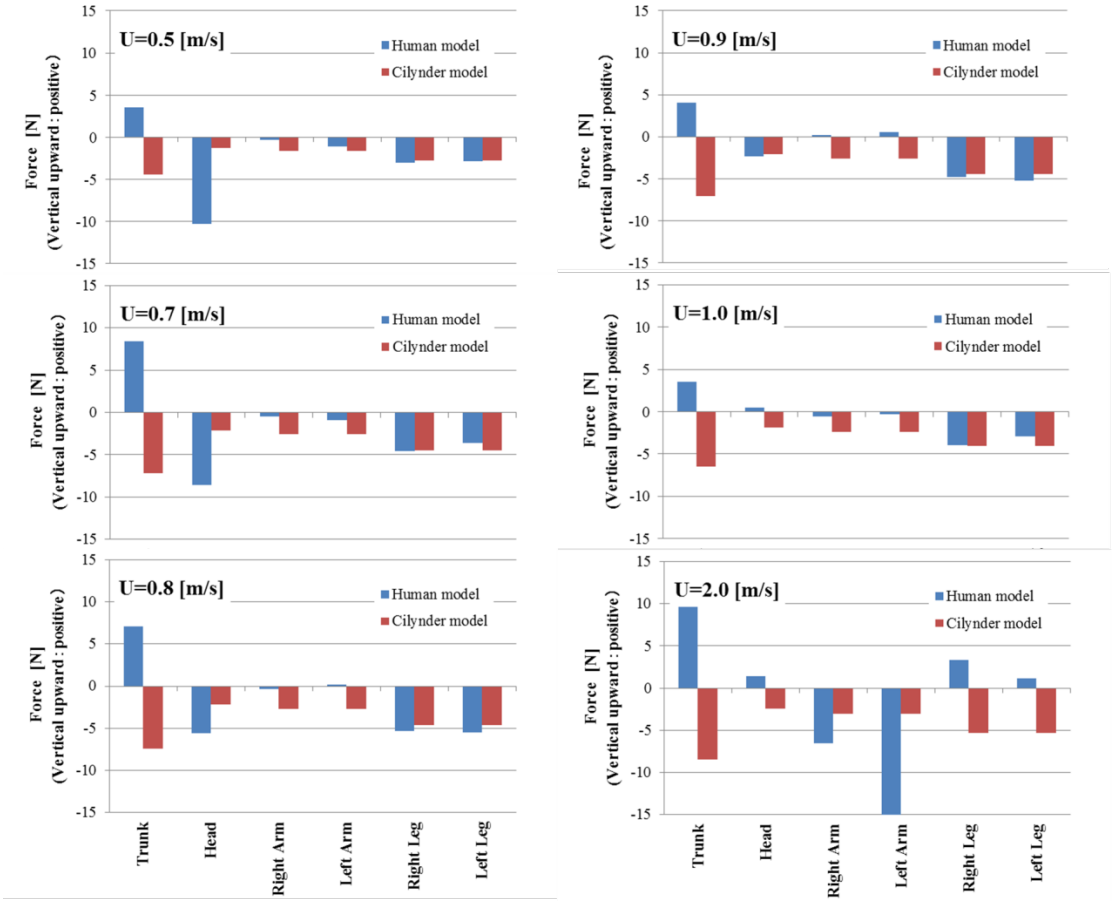


図 4-8　体のパーツ別抗力　(青:人間モデル　赤：円柱モデル)

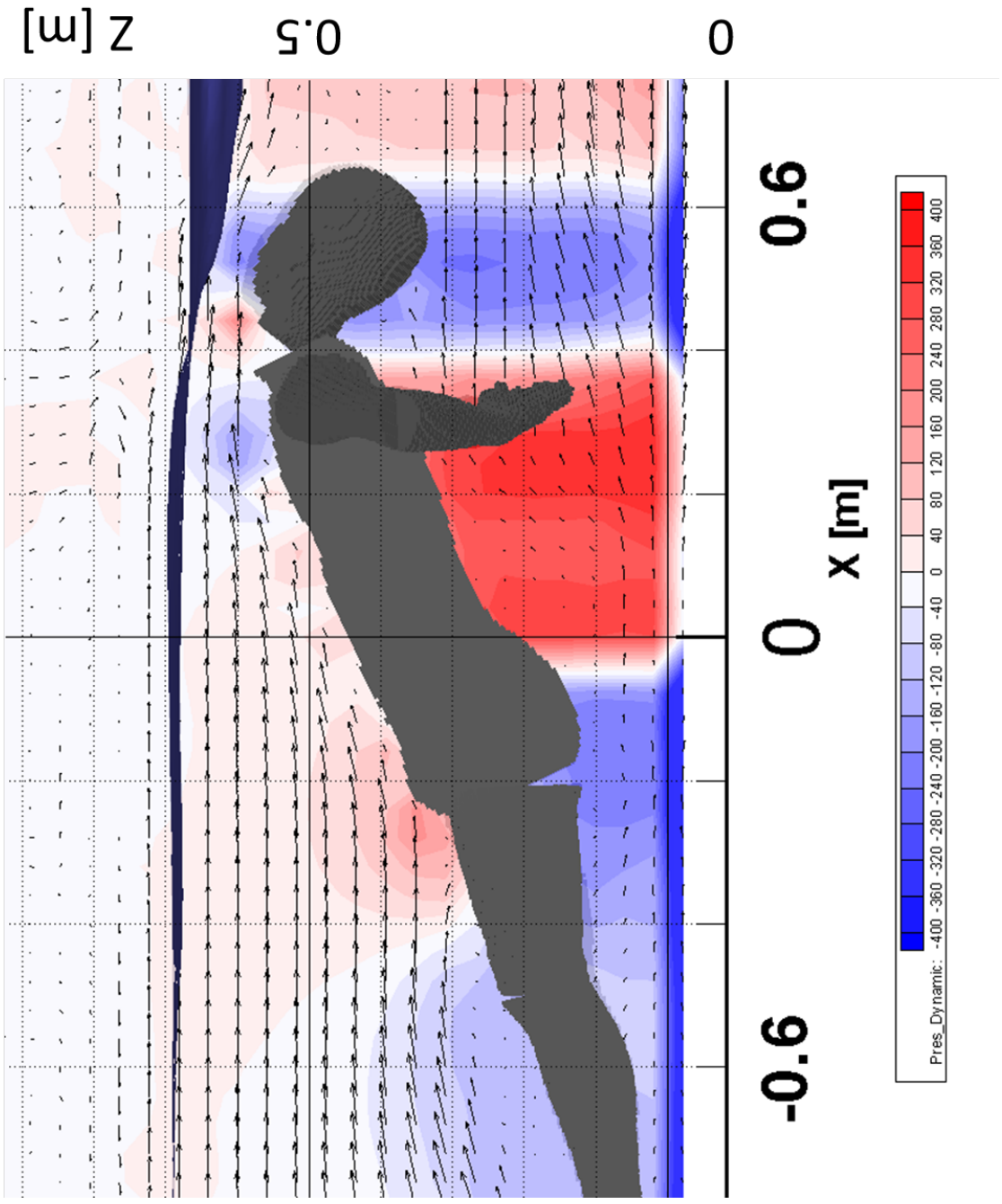


図 4-9　時刻 t=10[s]での流速 1.0[m/s]　(y=0)

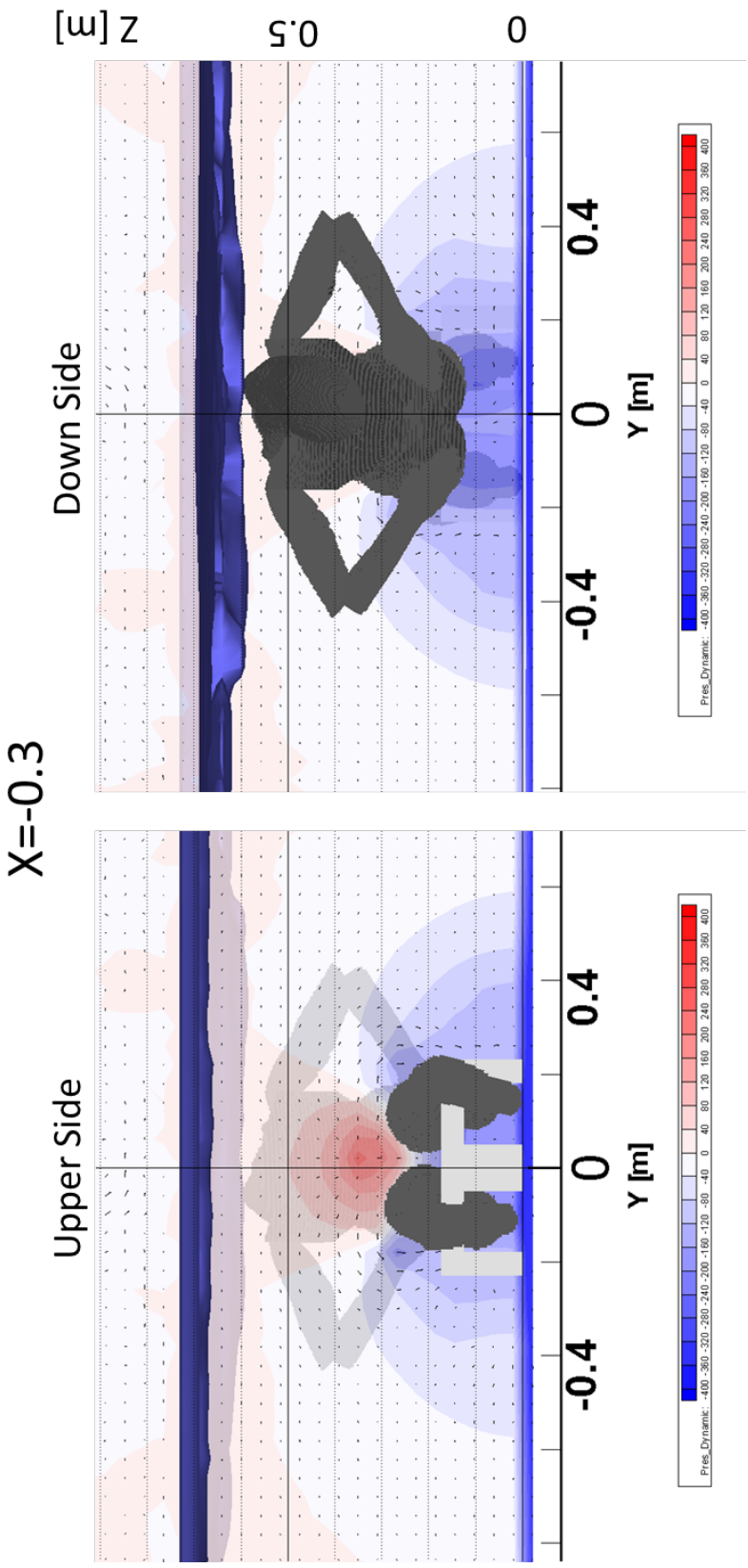


図 4-9　時刻 t=10[s]での流速 1.0[m/s]　(x=-0.3)

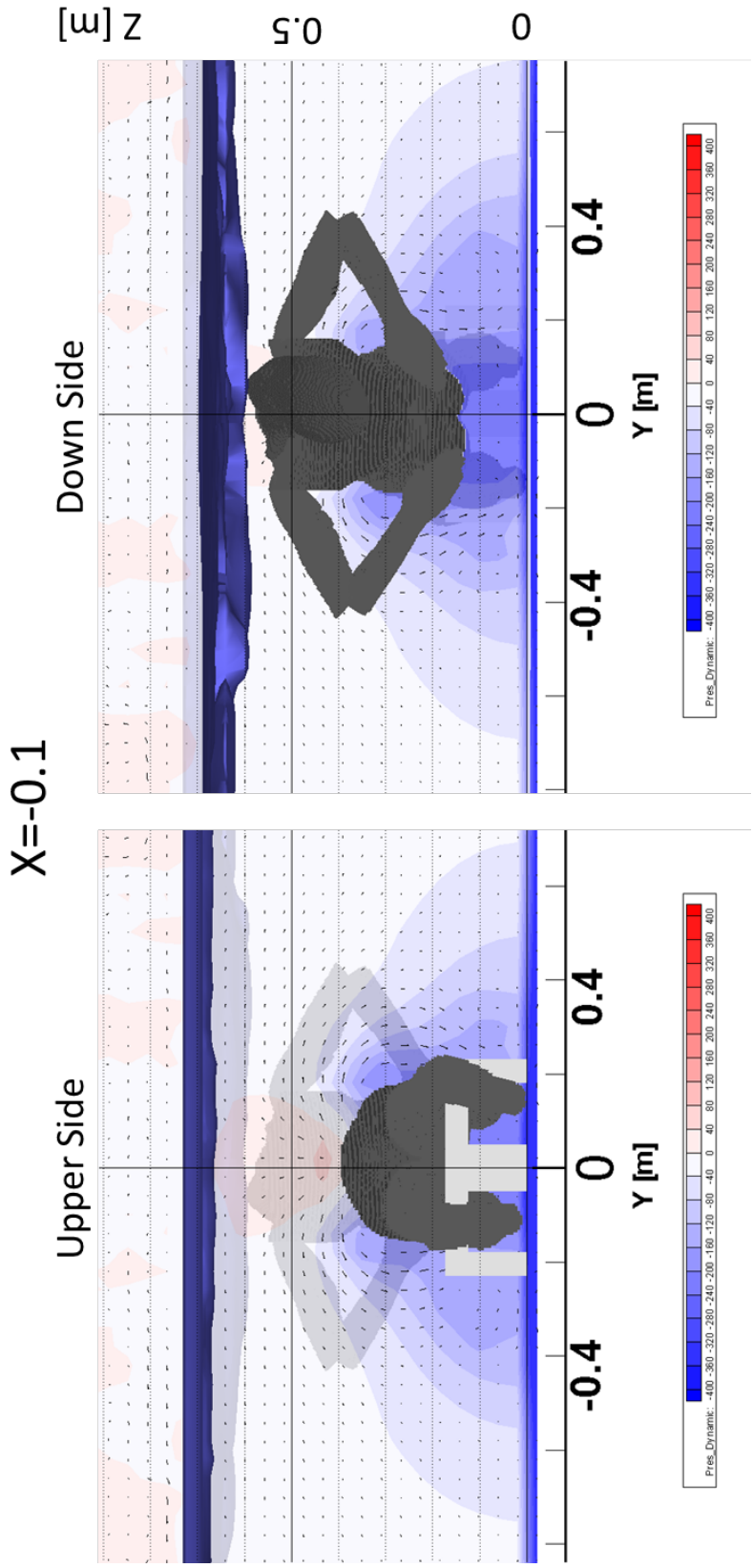


図 4-9　時刻 t=10[s]での流速 1.0[m/s]　(x=-0.1)

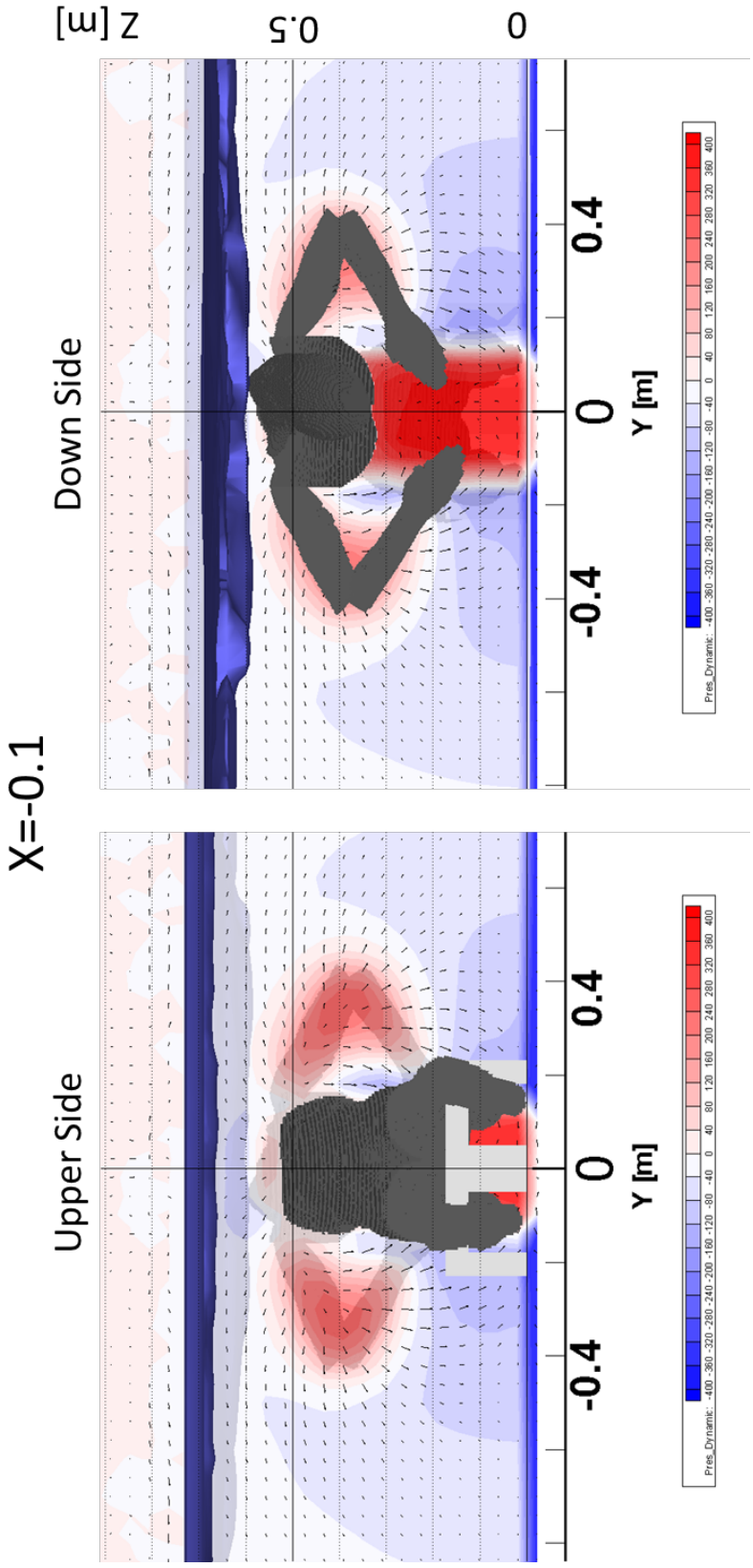


図 4-9　時刻 t=10[s]での流速 1.0[m/s]　(x=2.0)

第 5 章　結論

(1)　結論

さまざまな水害に見舞われる日本において，過去の事例から経験的に学んできた水難事故につながる事象をシミュレーションにおいて再現可能であれば，その危険性を評価することができる．そのため，人が流れに巻き込まれた挙動をとらえた DRUM というシミュレーションが開発され，ライフジャケット等の有効性の評価につながっている．本研究では，DRUM の再現性について定量的に評価求めるために検証を行い以下のような知見をえた．

I. DRUM によって表される剛体は，体積損失を起こすことがある．体積損失は抗力の低下をもたらす．体積損失の影響を少なくさせるためには，ボクセルを計算格子の 10 分の 1 以下にすることで体積率の損失を軽減することができる．さらに，提案したボクセルを分割する手法を併用することが望ましい．
II. 計算格子は剛体に対して小さくする必要がある．指標として計算格子幅が剛体の長さの 10 分の 1 以下であれば十分であると考えられる．
III. DRUM は乱流境界層の発達による抗力低下の現象を表現できていない．しかしながら抗力は安全側に出力する．
IV. DRUM は上記の注意点を加味すれば十分な再現性を持っていると考えられる．

次に，流れと人との相互作用を考えるため，DRUM を用いて過去に実験例がない水難事故についてシミュレーションを行った．

V. エントラップメントは十分に立って呼吸が可能な水深だとしても，足の捕捉という付加要素だけで十分に溺水の危険性を示した．
VI. 円柱を用いた簡易モデルを導入したが，流れの中の人の受ける力を精確に算出することはできなかった．
VII. 簡易モデルと比較することで DRUM のような高度な数値シミュレーションの必要性も示唆され，また DRUM の有用性も確認された．

(2) 今後の課題

まずDRUMについて，乱流境界層の発達による抗力低下要素をモデルに取り入れる必要があると考えられる．また，計算格子を小さくすれば力の再現性は確保されるが，固体の形状上，局所的には精度が保証される領域を外れる場合も考えられる．しかしながら一番小さな固体の部位にあわせて計算を行うのは効率的ではない．この点が今後の課題となるだろう．

また，流れと人とをとらえるためにはDRUMのような高度なシミュレーションモデルが必要になる．しかし，流れと人の複雑な現象を簡易化したモデルで十分に評価可能であれば水災害の多い我が国にとって大きな寄与をすることになるであろうと考える．

謝辞

本論文の作成に当たり終始お世話になった指導教員である中村先生に，深く感謝いたします．高度で複雑な現象をわかりやすく説明していただき，的確な助言とご指導をしてくださいました．また生活面や将来についてもアドバイスをいただき，さまざまな面で大変お世話になりました．中村恭志研究室では本論文の執筆にさまざまな助言や手助けをしてくださいました安嶋さんはじめ，多くの質問や相談に答えてくれた竹村さんや荒木さん，データの提供をしてくださいました榊さん，木内豪研究室の諸先輩がたにも研究室生活における知識や技巧を教えてくださり，多くの面でお世話になったことをここに感謝の意を示します．

最後に日頃より今日にいたるまで生活面，経済面で多くの援助をしてくださり，支えてくれた家族のみなさま，特に最後まで応援してくださいました祖父に感謝したいと思います．