

東京大学大学院新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻

2020 年度

修士論文

セミサブ型浮体の FIM におけるポンツーン影
響に関する数値的研究
(Numerical Study of the Effect of Pontoon on
Flow-Induced Motions of a Semi-Submersible
Platform)

2021 年 1 月 22 日 提出

指導教員 平林 紳一郎 准教授

李 智淵

目次

第1章	序論	5
1.1	研究背景	5
1.1.1	日本のエネルギー事情と再生可能エネルギー	5
1.1.2	風力発電	6
1.1.3	洋上風力発電	6
1.1.4	浮体式洋上風力発電	6
1.2	浮体式洋上風車の事業化における課題	7
1.2.1	発電コストの低減	7
1.2.2	流体力に起因する運動	7
1.3	渦励起運動	8
1.3.1	渦の生成	8
1.3.2	ストローハル数とレイノルズ数	9
1.3.3	ギャロッピングと渦に励起される流体现象	12
1.4	先行研究と研究目的	13
1.4.1	先行研究	13
1.4.2	研究目的	15
第2章	CFD 概要と支配方程式	16
2.1	CFD 概要	16
2.2	支配方程式	16
2.2.1	連続の式	17
2.2.2	運動量保存則	18
2.2.3	NS 方程式	19
2.3	OpenFOAM 概要	20
2.3.1	有限体積法	20
2.3.2	SIMPLE 法と PISO 法と PIMPLE 法	22
2.3.3	乱流モデル	27
第3章	単独角柱運動シミュレーション	31
3.1	計算条件	31
3.1.1	計算領域と境界条件	31
3.1.2	境界層解像度と格子	34
3.1.3	時間刻み	36
3.2	移動格子ソルバー	37
3.2.1	格子の変形	37

3.2.2	係留ばねの導入と運動の抑制	38
3.3	V&V	39
3.3.1	ASME のスタンダード	39
3.3.2	計算結果	42
3.3.3	GCI と実験結果との比較	49
第 4 章	複数角柱運動におけるポンツーン影響	53
4.1	ポンツーン材の配置	53
4.2	4 本の角柱カラムのみの運動シミュレーション	55
4.2.1	計算領域と境界条件と係留システム	55
4.2.2	境界層解像度と格子&時間刻み	58
4.2.3	計算結果	58
4.3	ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーション	66
4.3.1	計算領域と境界条件と係留システム	66
4.3.2	境界層解像度と格子&時間刻み	69
4.3.3	計算結果	70
4.4	ポンツーン材影響に関する考察	75
4.4.1	NoPT と P2-s と P4	75
4.4.2	NoPT と P2-fr	80
4.4.3	NoPT と P1-f と P1-r	83
第 5 章	結論と今後の課題	86
5.1	結論	86
5.2	今後の課題	86
	参考文献	87
	謝辞	89
	Appendix	90

図表目次

Figure 1.1 緯度帯ごとに平均した大気中の二酸化炭素濃度の変動[2].....	5
Figure 1.2 エネルギー自給率の変動[3].....	6
Figure 1.3 洋上風車の形態と水深の関係[5].....	7
Figure 1.4 流体要素の運動[6].....	8
Figure 1.5 カルマン渦列[7].....	9
Figure 1.6 物体周りの渦放出[8].....	10
Figure 1.7 円柱周りの圧力分布[9].....	11
Figure 1.8 物体から放出される渦[10].....	13
Figure 1.9 浮体構造物イメージ図[15].....	14
Figure 1.10 ポンツーン材が 2 枚の場合.....	14
Figure 1.11 ポンツーン材が 4 枚の場合[16].....	14
Figure 1.12 各 V_r における y 方向の振幅[16].....	15
Figure 2.1 流体力学の研究手段[18].....	16
Figure 2.2 微小領域における質量保存.....	17
Figure 2.3 微小領域におけるせん断応力図[19].....	18
Figure 2.4 微小領域における x 方向の力の釣り合い [19].....	18
Figure 2.5 セルのイメージ[20].....	20
Figure 2.6 SIMPLE 法のフローチャート.....	23
Figure 2.7 PISO 法のフローチャート.....	26
Figure 2.8 PIMPLE 法のフローチャート.....	26
Figure 2.9 エネルギースペクトル 21.....	27
Figure 2.10 LES モデル [22].....	29
Figure 2.11 DES モデル.....	29
Figure 3.1 単独角柱運動シミュレーションにおける計算領域.....	32
Figure 3.2 単独角柱運動シミュレーションにおける各境界面.....	33
Figure 3.3 壁関数.....	34
Figure 3.4 IDDES モデルにおけるスイッチ fd の分布($fd=0$ と RANS モデル、 $fd=1$ と LES モデル).....	35
Figure 3.5 格子拡張率(xy 平面).....	35
Figure 3.6 格子拡張率(xz 平面).....	35
Figure 3.7 格子変形範囲の設定.....	37
Figure 3.8 係留ばねの設置.....	38
Figure 3.9 単独角柱運動シミュレーションにおける計算コスト[Day].....	42
Figure 3.10 T1M1 における重心位置.....	43
Figure 3.11 T1M1 におけるヨー角度.....	43
Figure 3.12 における重心位置の軌跡.....	44
Figure 3.13 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布.....	46
Figure 3.14 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布.....	47
Figure 3.15 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布.....	48
Figure 3.16 各ケースにおける A_x/D	49
Figure 3.17 各ケースにおける A_y/D	50
Figure 3.18 各ケースにおける A_{yaw}	50
Figure 3.19 格子拡張率.....	52
Figure 4.1 カラムとポンツーン材のネーミング.....	53
Figure 4.2 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける計算領域.....	56
Figure 4.3 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける格子拡張率.....	56
Figure 4.4 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける係留システム.....	57
Figure 4.5 4 本角柱カラムの格子図.....	58
Figure 4.6 $T0y$ に関する計算結果.....	59

Figure 4.7 T_{0yaw} に関する計算結果	59
Figure 4.8 Ax/D について CFD と EFD[16]の比較	61
Figure 4.9 Ay/D について CFD と EFD[16]の比較	61
Figure 4.10 $Ayaw$ について CFD と EFD[16]の比較	62
Figure 4.11 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布	63
Figure 4.12 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布	64
Figure 4.13 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布	65
Figure 4.14 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける計算領域 ..	67
Figure 4.15 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける格子拡張率	67
Figure 4.16 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける係留システム	68
Figure 4.17 角柱カラムとポンツーン材の格子図	69
Figure 4.18 計算領域全体の格子俯瞰図	69
Figure 4.19 各ケースにおける Ax/D と Ay/D	72
Figure 4.20 各ケースにおける $Ayaw$	72
Figure 4.21 4本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値 ..	73
Figure 4.22 4つのポンツーン材が各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値	73
Figure 4.23 4本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値	74
Figure 4.24 4つのポンツーン材が各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値	74
Figure 4.25 Ay/D に関する CFD と EFD の結果[16]	75
Figure 4.26 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布 (a) NoPT, (b) P2-s	76
Figure 4.27 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布 (a) NoPT, (b) P2-s	77
Figure 4.28 SC3 と SC4 における $Fyrms$ の平均	78
Figure 4.29 ケース P2-s における各要素が受ける y 方向の力	78
Figure 4.30 ケース P2-s において平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t=105s$)	79
Figure 4.31 Ay/D に関する CFD と EFD の結果[16]	80
Figure 4.32 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布(a)NoPT, (b)P2-fr	81
Figure 4.33 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布(a)NoPT, (b)P2-fr	82
Figure 4.34 SC3 と SC4 における $Fyrms$ の平均	83
Figure 4.35 SC1 と SC2 における $Fyrms$ の平均	84
Figure 4.36 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布(a)NoPT, (b)P1-f, (c)P1-r	85

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 日本のエネルギー事情と再生可能エネルギー

東日本大震災後、日本においては原子力発電所が停止になった影響で化石燃料の消費が多くなるため温室効果ガスの排出量が増加している。この温室効果ガスが地球温暖化の原因となっていると予測されている。IPCC 第5次評価報告書(2014)では、このままでは2100年の平均気温は、温室効果ガスの排出量が最も多い、最悪のシナリオの場合には最大4.8°C上昇すると発表した。IPCC 第4次評価報告書によれば、温室効果ガス別の地球温暖化への寄与は、二酸化炭素76.7%、メタン14.3%、一酸化二窒素7.9%、オゾン層破壊物質でもあるフロン類(CFCs、HCFCs)1.1%、となっている。つまり、石油や石炭など化石燃料の燃焼などによって排出される二酸化炭素が最大の温暖化の原因と言える。この二酸化炭素濃度は、産業革命前1750年の280ppmから2013年には400ppmを超え、実に40%以上も増加しており、IPCCでは、大気中の二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素は、過去80万年間で前例のない水準まで増加していると報告している。こうした中、2016年に発効したパリ協定においては、(1)世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保ち、1.5°Cに抑える努力をすること、(2)そのため、できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21世紀後半には、温室効果ガス排出量と(森林などによる)吸収量のバランスをとることなどが合意されており、パリ協定のモメンタムの中で、温室効果ガスの排出量を削減していくことが必要である。[1]

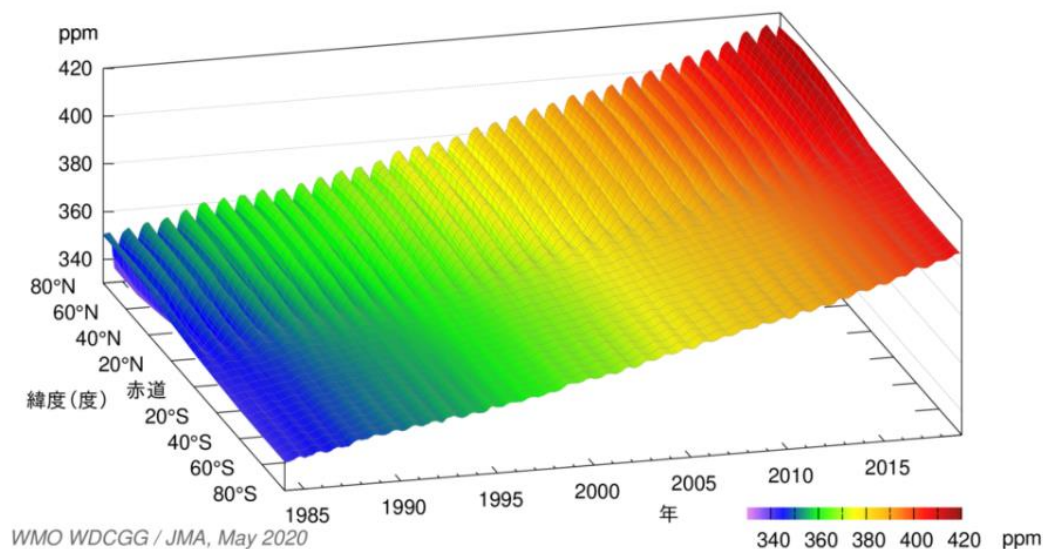


Figure 1.1 緯度帯ごとに平均した大気中の二酸化炭素濃度の変動[2]

また、日本はエネルギーの供給のうち、石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料が8割以上を占めており、そのほとんどを海外に依存している。特に東日本大震災後、エネルギー自給率は10%を下回っており、エネルギー安定供給の観点から、この改善を図っていくことが重要である。

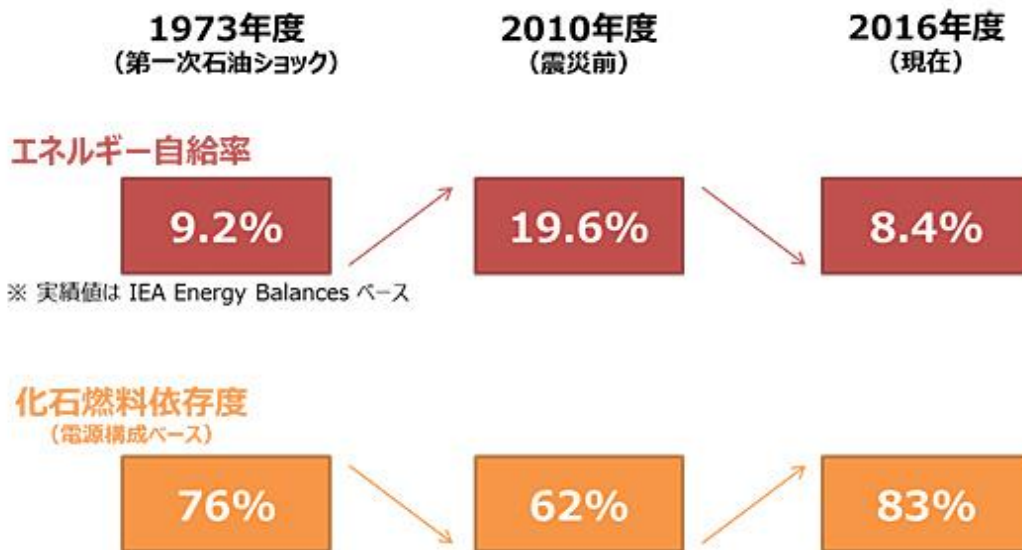


Figure 1.2 エネルギー自給率の変動[3]

こういった経緯を受け、現在、再生可能エネルギーが注目されてきている。再生可能エネルギーはエネルギー源として持続的に利用することができるものであり、温室効果ガスを排出しないことと日本国内で生産できることから、地球温暖化進行の緩和策とエネルギー自給率の改善に寄与できる手段であると考えられている。

1.1.2 風力発電

再生可能エネルギーの中で、特に風力エネルギーを利用する風力発電という発電方法が現在注目を集めている。それは、風力発電は、他の再生可能エネルギーを利用した発電方法に比べて比較的発電コストが低く、かつ導入ポテンシャルが高いからである。[4]

1.1.3 洋上風力発電

風力発電は陸上風力発電と洋上風力発電、2種類が挙げられる。その中で、良い風況を得るために、陸上よりも洋上のほうが好まれている。それは風力エネルギーは風速の3乗に比例して増大するため、経済性の向上には風況の良い場所の選定が必須であるからである。また、洋上風力発電は、陸上に比べて景観や騒音といった環境問題が少なく、設備を運搬するのに道路の制約を受けない等のメリットがある。それに加えて日本は広大な排他的経済水域を持っており、洋上風力発電の導入が適している。

1.1.4 浮体式洋上風力発電

洋上風力発電には海底に固定する“着底式洋上風車”と海上に浮かばせる“浮体式洋上風車”の2つのモデルがある。着底式洋上風車の適用水深は経済的な理由から40m程度までとされており、ヨーロッパの北海は遠浅な地形であるため、早くから導入が進められ、世界の洋上風車のうち9割以上がヨーロッパに設置されている。しかし、日本は岸から離れるにしたい急激に水深が増すという地理的な特徴があるため浮体式洋上風車が期待されている。Fig.1.3が洋上風車の形態と水深の関係を示している。

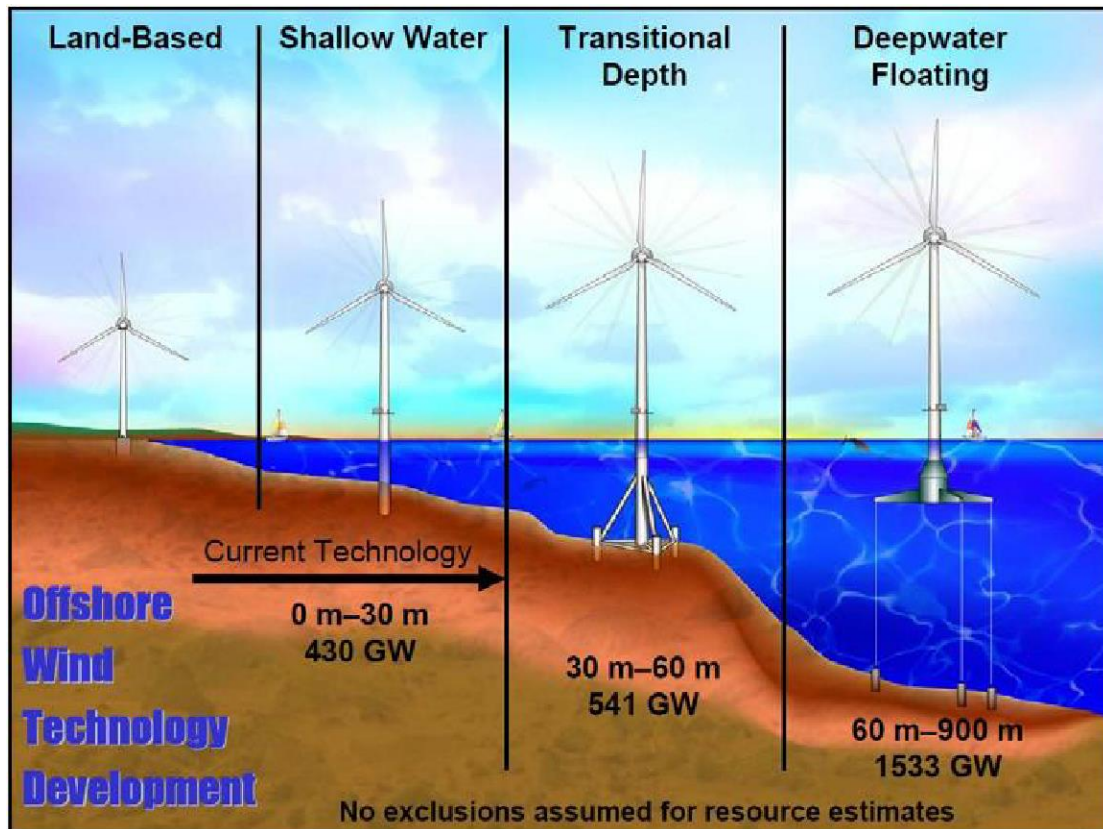


Figure 1.3 洋上風車の形態と水深の関係[5]

1.2 浮体式洋上風車の事業化における課題

1.2.1 発電コストの低減

風力発電は、他の再生可能エネルギーと比較して発電コストが低く、中長期的に大規模な導入が期待されているが、長期間、安定的に発電事業を行うためには、風車の信頼性のみならず、発電効率の向上やメンテナンスの高度化などの技術開発による一層の発電コストの低減が求められている。また、洋上風力発電の国内外の市場の拡大をにらんで、産業競争力の強化が重要な課題となっている。

1.2.2 流体力に起因する運動

浮体式洋上風車は風の影響と波、海流、潮流の影響を受け、複雑な挙動を示す。特に、海水に浸かる部分から、流れの影響で渦を放出するという現象がある。渦放出の周期と構造物の固有周期が同期する場合、浮体式洋上風車は大きく運動することがある。これは Vortex Induced Motion (VIM) 渦励起運動と呼ばれる流体现象であり、VIM が起こると風車の位置を保持するための係留索に繰返し応力を与えてしまい、係留索の寿命短縮が懸念される。そのため、メンテナンス費用の面から、VIM を抑えることでコストを低減することが図られる。

1.3 渦励起運動

1.3.1 渦の生成

一般的に言って流体の運動は、流れの中の流体微小部分が流れとともにどのような形状変化をするかによって Fig.1.4 に示したように伸縮運動、せん断運動、回転運動の3成分に分けられる。したがって、一般の流れでは、伸縮およびせん断の変形を重ねつつ移動し、さらに回転運動が加わって複雑な動きとなるが、流れにおける渦の生成はこの回転運動成分の存在に深く関係づけられている。

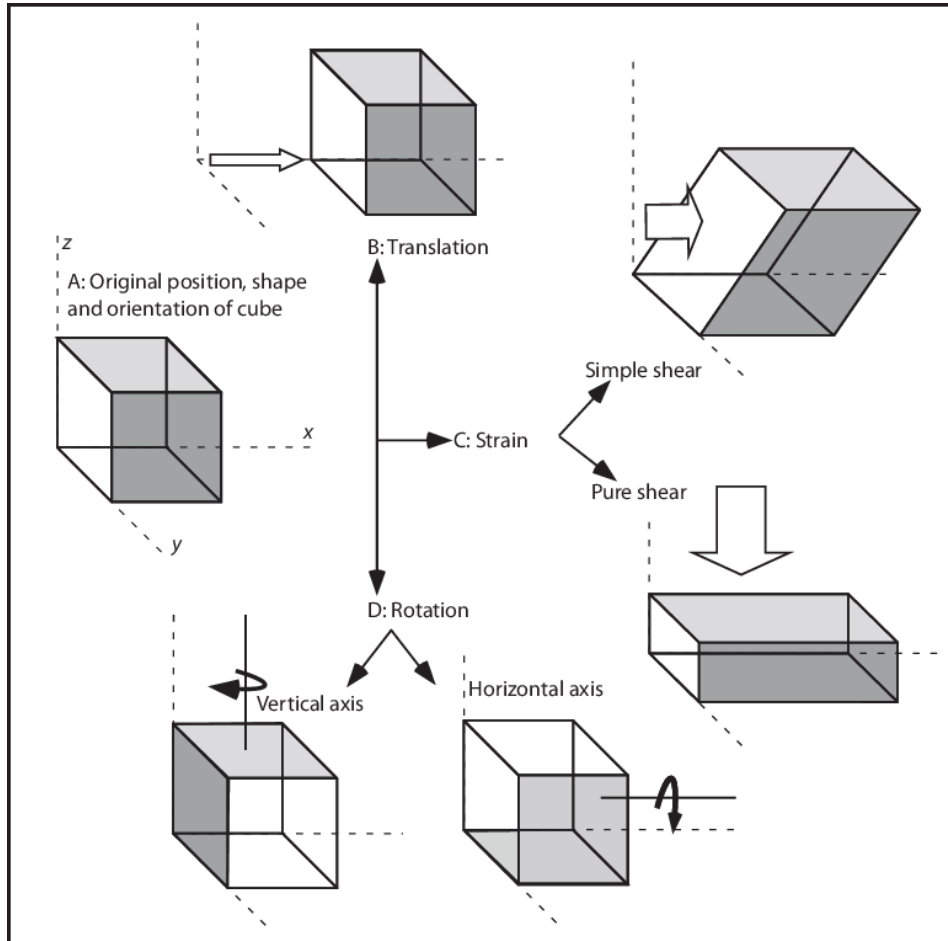


Figure 1.4 流体要素の運動[6]

流れの中の任意の位置における回転運動成分は、その位置での流速ベクトル \mathbf{V} の回転を求めることにより次式で表現される。

$$\boldsymbol{\omega} = \text{rot } \mathbf{V} \quad (1.1)$$

このように定義されたベクトル $\boldsymbol{\omega}$ は渦度と呼ばれ、その大きさと方向はそれぞれその位置にある流体微小部分の回転角速度の2倍の大きさおよび回転軸の方向を表している。実際の流れの中で、固体壁面付近で粘性の作用による速度勾配の大きい境界層と呼ばれる領域や、静止流体中の噴流のように速度差境界で粘性や乱流混合の作用による速度勾配の大きい自由せん層と呼ばれる領域では、回転軸の方向がそろった強い渦度が分布しておりこれらが流れ出してひとかたまりになると、もはや微小部分の回転ではなく、それらの集約した流体塊の回転運動すなわち渦の生成ということになる。

1.3.2 ストローハル数とレイノルズ数

カルマン渦列というのはよく知られている渦構造の一つであり、物体の後流に生じる流体の粘性の働きに基づく現象である。Fig.1.5 に示したように、流れの可視化実験によりこれを確かめることができる。

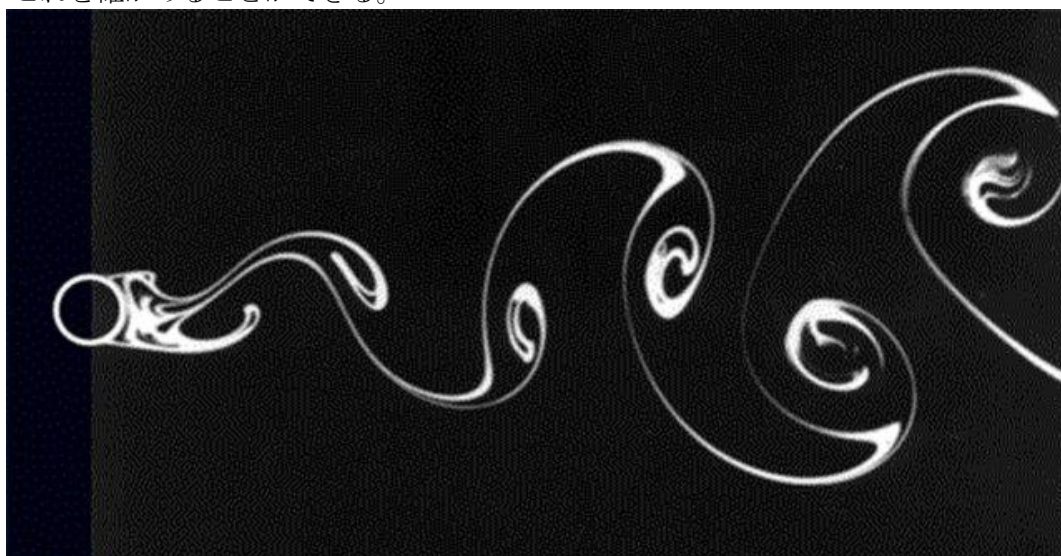


Figure 1.5 カルマン渦列[7]

このような渦列を生じる場合には物体から渦が交互に放出されるので、流場は上下非対称な非定常流となる。したがって、物体には上下振動を起こすような流体力が働くことになり、実際に強風時に電線等を振動させて鳴音の原因となる。このような音をエオルス音といい、一様流速を U 、円の直径を D 、音の高さを $f(\text{Hz})$ とすると、ストローハル数(St)と呼ばれる

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1.2)$$

がほぼ 0.2 となることが知られている。

また、カルマン渦列は流体の粘性の影響に基づいて起こり、流体の動粘性係数を ν とすると、レイノルズ数(Re)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1.3)$$

がほぼ 40 以上でカルマン渦列の現象が始まるとされている。 Re は慣性力と粘性力の比を表しており、流れの性質を決定する重要な無次元数の一つである。 Re の変化によって物体の後流に生じる渦放出の現象は大きく変わる。Fig.1.6 に示した通り、 Re が小さいとき ($Re < 5$) に、剥離が起こらずに流れ線は前後左右でほとんど対称になっている。 $5 < Re < 40$ の場合は、慣性力の影響が強まり、円柱の後方のよどみ点近くに剥離が現れ、流れと平行な円の中心を通る線に対し上下対称の双子渦が発生する。さらに、 $40 < Re < 150$ の場合は、剥離点は円柱の後面側の前方に移動し、後流側に渦が相互に周期的に放出され、流れは非定常流になる。渦の列は流れに垂直方向に広がり、層流が保たれる。このような渦の放出を後流渦といい、下流に規則正しく形成された 2 本の渦列をカルマン渦列という。 $150 < Re < 3.5 \times 10^5$ の場合では、流れは層流剥離し、渦列は乱流に遷移して発達する。レイノルズ数の増加とともに、剥離点は前方にさらに移動する。この領域では規則的な渦が形成される。 $3.5 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ は遷移領域で、流れは層流から乱流に移行し、渦列の幅も狭くなり、かつ渦の形成も弱くなる。さらに、レイノルズ数が 3.5×10^6 を超えると、流れは完全に乱流に移行する。剥離点は層流剥離に比べてかなり後方に移動し、死水領域が小さくなる。この現象は乱流剥離という。この場合、物体に働く圧力抵抗が小さくなるため、物体に働く圧力抵抗を減少する方法のひとつとして乱流促進装置等を利用することが考えられる。

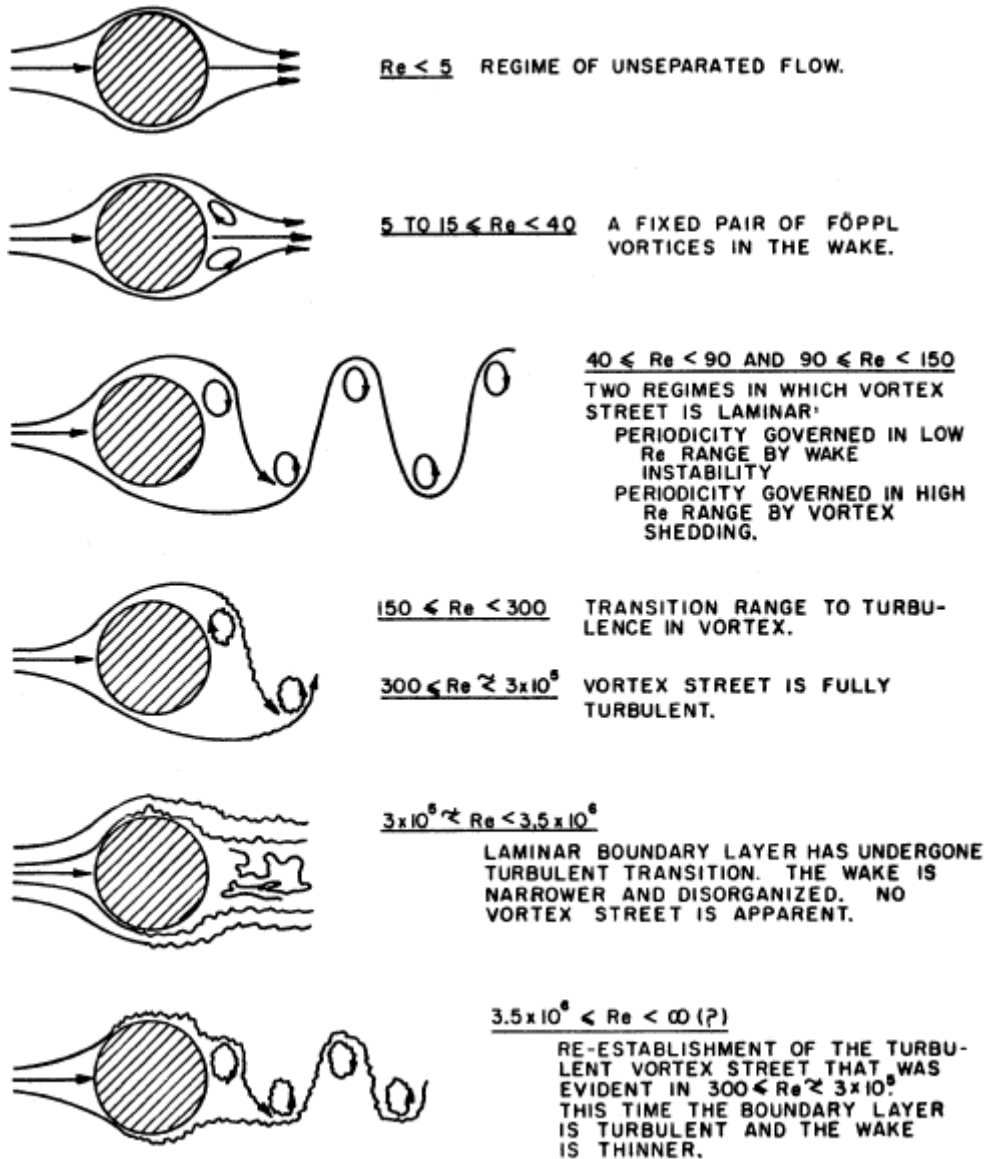


Figure 1.6 物体周りの渦放出[8]

前述したように、物体から渦が交互に放出されることにより、流場は上下非対称な非定常流となる。そのため、物体には上下振動を起こすような流体力が働くようになり、この流体力を揚力と呼ぶことがある。なお、後流の渦列は一様流と反対方向の流れも誘起するので、物体上の圧力分布は前後対称ではなくなり、前面と背面に大きな圧力差ができて物体に圧力抵抗が働く。本論文では、この二つの力を揚力と抗力と呼ぶことにする。

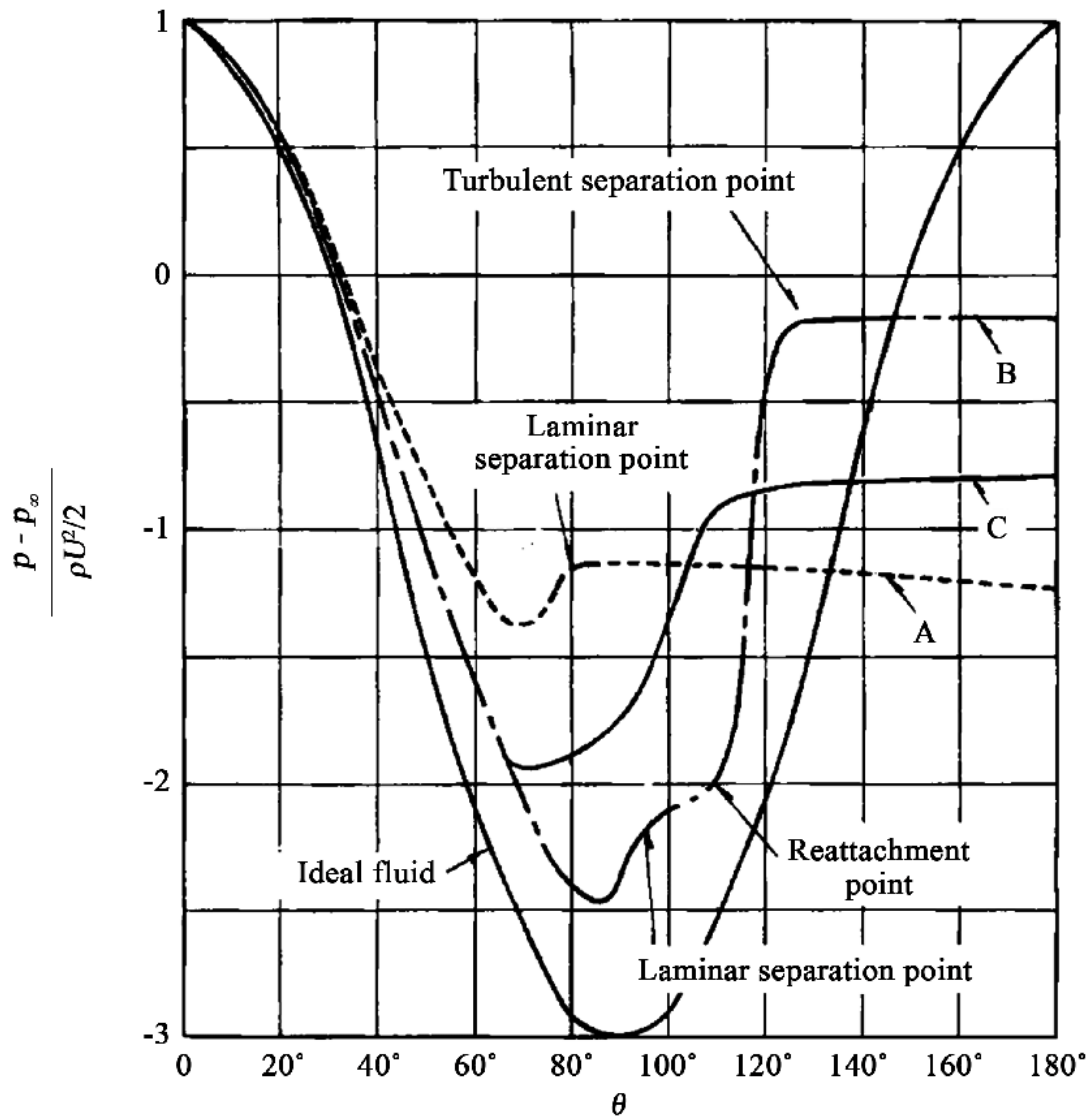


Figure 1.7 円柱周りの圧力分布[9]

抗力は一様流に平行な方向に働く力であるが揚力は一様流に垂直な方向に働く力である。式 1.4 に示したように抗力係数(C_d)と揚力係数(C_l)を用いてこの二つの力を無次元化することができる。

$$C_d = \frac{F_{Drag}}{\frac{1}{2}\rho DU^2} \quad C_l = \frac{F_{Lift}}{\frac{1}{2}\rho DU^2} \quad (1.4)$$

1.3.3 ギャロッピングと渦に励起される流体现象

前節で述べたように流れの中におかれた柱体などの剥離を伴う物体が、流れと直角方向に動いたとき、その運動を助長するような力流体が作用することがある。このとき物体には大きな振幅の自励振動が発生する。これをギャロッピングという。強風時に生じる電線の振動がこの現象に属する。

水中に置かれた海洋構造物にも似たような現象が起こる。それは、構造物に作用する流体力はカルマン渦が発生することにより周期的に変動し、この流体力の変動により構造物は振動する現象である。この渦の放出によって変動する圧力に励起される流体现象は渦励起振動(VIV, vortex-induced vibration)と呼ばれる。VIV は掘削ライザーや係留索などのアスペクト比が大きい、つまり細長い構造物に見られる現象である。構造物の長さが長くなることによりシステムの剛性が相対的に低くなり、固有振動数が低下する。これにより構造物から放出される渦の周波数が構造物の固有振動数に近づき、構造物の振動と渦の放出が共振し、流れと直行方向への構造物の振動振幅が増大する(ロックイン現象)。タコマナローズ橋での事故やライザー管の疲労破壊など、VIV は工学的な多岐の分野で確認され、代表的な流体関連振動問題として研究が進んでいる。

また、アスペクト比が比較的小さい構造物にも振動現象が現れる。この場合、VIVと同様の原因によって生じる現象であるが、渦励起運動(VIM, vortex-induced motion)と呼ぶ。一般的にVIMの方が長周期の運動となる。VIMで問題視されているのは振動する構造物自身ではなく、それに伴い係留索等の付随物が振動することである。浮体式洋上風車の設置に際し、浮体位置保持のための係留が用いられるが、風・海流・潮流の影響により係留索には常に張力が働いており、さらに波の影響により周期的に張力が生じる。その状態でVIMが生じた場合、係留索に更なる繰りかえし荷重が加わり、疲労により係留索の寿命が低下することが懸念されている。浮体式洋上風車の耐用年数は約20年と言われているが、コスト面等の制約から、その間の係留索交換は行われたいことが望ましい。したがって、耐用年数に耐えうる合理的な係留索および浮体を設計するため、VIMを正確に予測する手法が求められている。

1.4 先行研究と研究目的

1.4.1 先行研究

Kawamura et al. [10] は Aspect ratio 1 から 8 までの平板上円柱周りの流体計測を行ない、端部から Trailing vortex という渦の放出を実験で確認した。さらに、Fig.1.8 の示しているように、Aspect ratio の減少により Trailing vortex の影響が増し、一定より小さくなると、側面から放出された Karman vortex が Trailing vortex に支配され消失してしまうことも発見された。

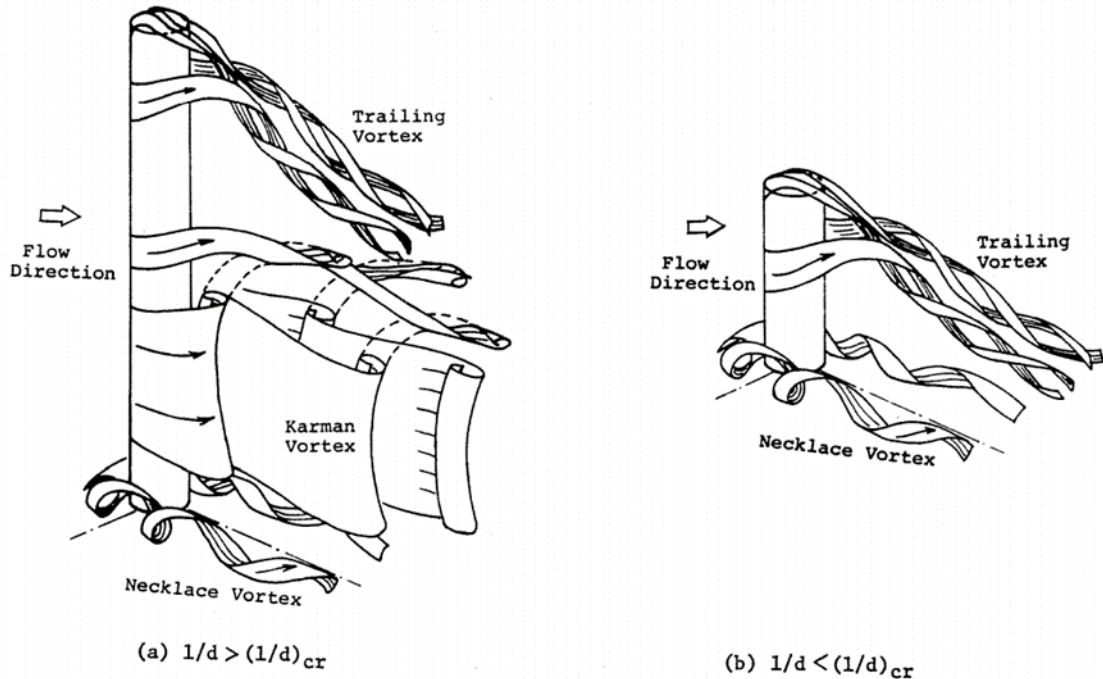


Figure 1.8 物体から放出される渦[10]

端部から流体力への影響として、Wang et al[11]と Rosetti. et al[12]が端部の存在によって抗力が低下したことを示した。Wang が平板上円柱周りの実験で、有限長さの円柱は $2D$ (無限長さ) に比べて、抗力係数 (C_d) が小さいことを発見した。さらに、Aspect ratio が小さくなるにつれて、抗力係数が小さくなることを指摘した。Rosetti. et al[12]の半没水円筒の実験からも端部の存在によって抗力が低下したことが発見されたため、VIM 現象においても抗力の減少が生じることが思われる。

複数カラムを有する浮体における VIM 現象について、藤原[13]は、セミサブ浮体の曳航実験を行なって、VIM 振幅に関してカラム間現象を確認した。さらに、カラム間距離が小さいときは単独カラムの VIM 振幅の概ね 60% になると述べていた。橋浦[14]は 4 本のカラムを正方形型に配置した浮体において、各カラムに作用する流体力と浮体の VIM 挙動の関連性に関して VIM 自由振動実験と CFD で解明を試みた。実験を通じて、後方カラムの平均抗力および揚力変動は前方に比べて抑制されていることやカラム間距離が短いと前方カラムの平均抗力が大きく出ているなどの干渉現象を確認した。

Zhang et al[15]は CFD 計算を用いてガスパラットフォームについて VIM を解析した。Fig.1.9 に示したように複数角柱カラム間にポンツーン材を加えた構造物が研究対象になっている。VIM が換算速度 7.0 から 14.0 までアスペクト比 1.44 という条件の下で起こったことを確認した。また、VIM 応答は主に入射角度が 15° 、 22.5° 、 45° の場合に現れる。

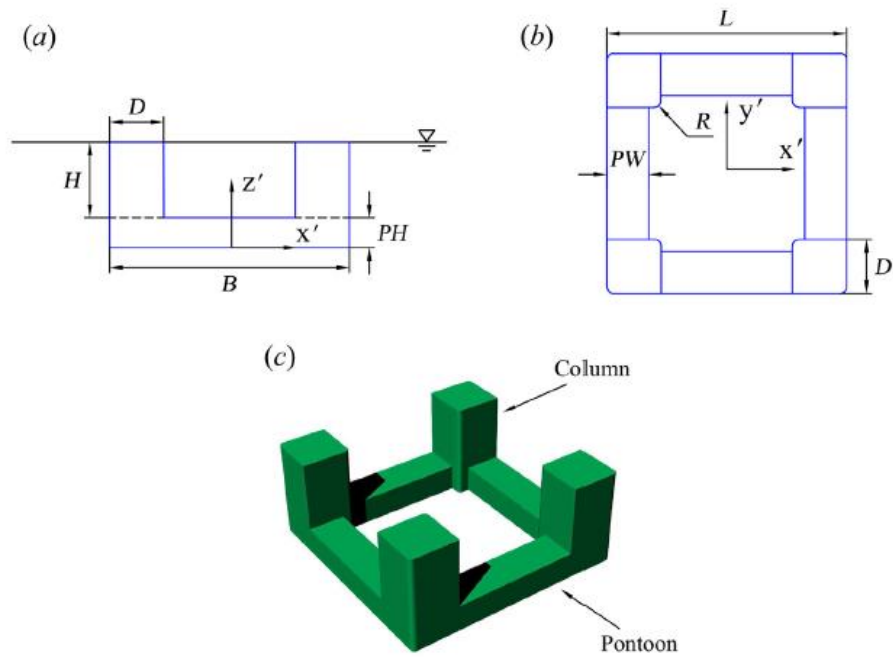


Figure 1.9 浮体構造物イメージ図[15]

Goncalves ら[16]は4本の角柱カラムを用いて、Fig.1.10 と Fig.1.11 のようにポンツーン材を2枚または4枚を加え、入射角度やポンツーン材の厚さを調整しつつ、構造物の応答について解析した。

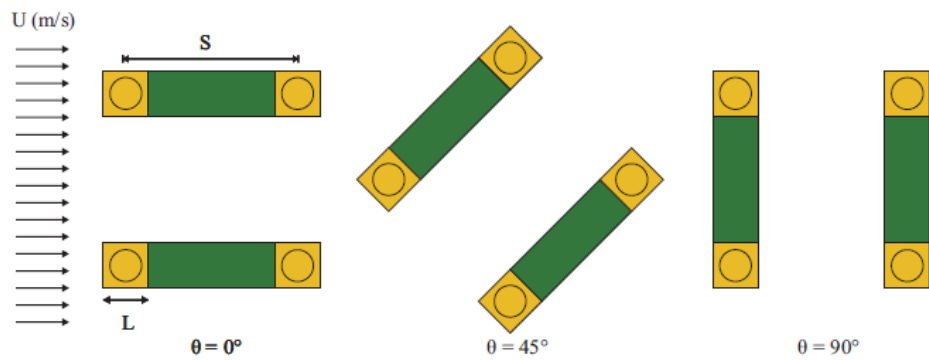


Figure 1.10 ポンツーン材が2枚の場合

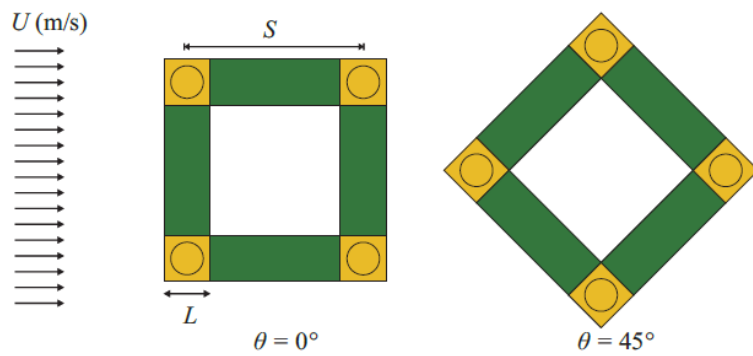


Figure 1.11 ポンツーン材が4枚の場合[16]

得られた結果の一つとして Fig.1.12 に示す。

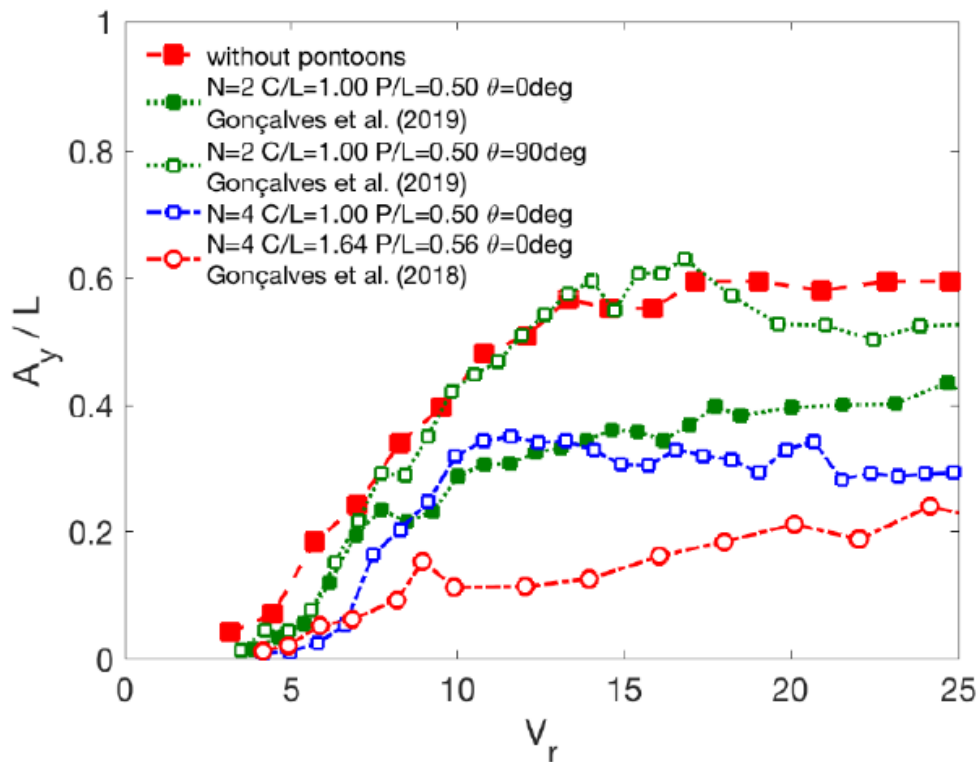


Figure 1.12 各 V_r における y 方向の振幅[16]

1.4.2 研究目的

前節で述べたように、複数角柱カラム間にポンツーン材を加えることによって、浮体構造物の動揺に変化があるものの、まだその理由をはっきりわからない。特に、Fig.1.12 に示したように、入射角度が 0° の場合、ポンツーン材 4 つとポンツーン材 2 つと換算速度 10 から 15 までの範囲でほとんど差がない。また、入射角度が 90° の場合、ポンツーン材 2 つとポンツーン材なしとも概ね同じような y 方向の振幅を示している。ここは大変興味深い内容であると考えられる。

本研究の目的は三次元的な流場情報が得られる数値計算を使用し、その情報を利用して各ポンツーン材が浮体構造物の動揺にどんな影響を与えているか考察することである。複数角柱カラム間にあるポンツーン材がどういう役割を果たすか調べることによって浮体構造物の動揺が収まるようなポンツーン材配置が考えられるようになる。

第2章 CFD 概要と支配方程式

2.1 CFD 概要

CFD(computational fluid dynamics)とは、数値流体力学と呼ばれる偏微分方程式の数値解法等を駆使して流体の運動に関する方程式をコンピュータで解くことによって流れを観察する数値解析・シミュレーション手法である。コンピュータの性能向上とともに飛躍的に発展し、航空機・自動車・鉄道車両・船舶・血流等の流体中を移動する機械および建築物の設計をするにあたって風洞実験に並ぶ重要な存在となっている。

CFD は、1970 年代終わりから始まったスーパーコンピュータ利用の急速な発展により、1980 年代に有用性が著しく高まり、「従来の実験流体力学と呼ばれる EFD(Experimental Fluid Dynamics)の多くが数値シミュレーションに置き換わる」ことが期待されるようになった。1980 年代はじめの LES(Large Eddy Simulation)計算に続いて、1987 年に Kim らの DNS(Direct Numerical Simulation)計算の論文が発表され、「CFD により乱流構造の詳細が解明される」実例として注目された。その後 1990 年代には CFD の信頼性がますます高まり、CFD による研究成果が続々と公表されるようになった。

2000 年代以降にはスーパーコンピュータの著しい進歩により CFD の有用性がますます高まり、実験と理論と並んで、CFD は流体力学の研究手段として確固たる地位を占めるようになっている。乱流を含めて数値解析によって十分な精度で解かれるようになり、CFD は現象解明に必要不可欠な研究手段となっている。また、CFD により、実験では見出せない新現象の発見も可能となってきた。さらに、工業製品の設計開発でも CFD が実用化され不可欠なものとなっている。[17]

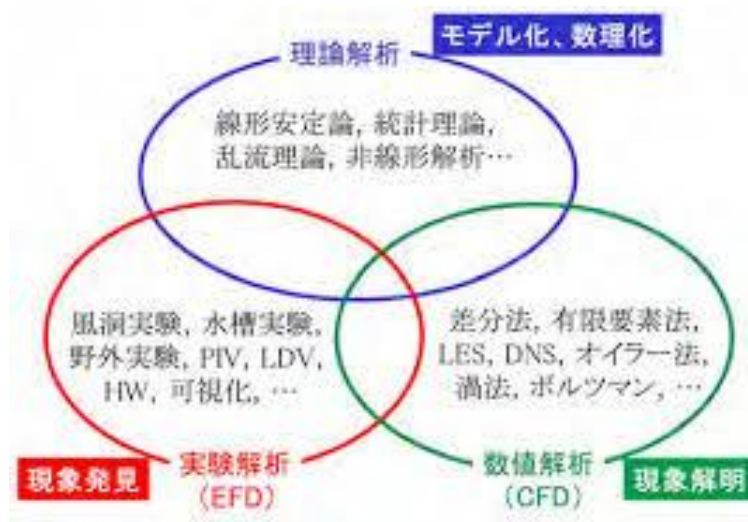


Figure 2.1 流体力学の研究手段[18]

2.2 支配方程式

非圧縮流の支配方程式は、質量の保存則である連続の式が1つと、 x 、 y 、 z 方向の運動量の保存則である NS 方程式が3つの、合計4つの式からなる。一方、未知数は x 、 y 、 z 三方向の速度 u 、 v 、 w と圧力 p の計4つであり、未知数の数が方程式の数と等しいので解くことができる。これらの方程式は CFD 計算の根本である。

2.2.1 連続の式

まず、質量の保存則である連続の式を説明する。

Fig.2.2に示すような2次元の流れの中にある微小な長さ Δx 、 Δy からなる矩形の領域を考える。この微小領域のことをセルとも呼ぶ。セルの中心での x 方向の速度を u とすると、 x 方向に距離 $\Delta x/2$ だけ離れた右側境界面における x 方向の速度は $u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ で与えられる。左側境界面での x 方向の速度は $u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ で与えられる。同様に、上下面での y 方向の速度は $v \pm \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}$ で与えられる。したがって、流体の密度を ρ とすると、単位時間に矩形セルに入る流量と出る流量が等しいという質量の保存則は次式で近似できる。

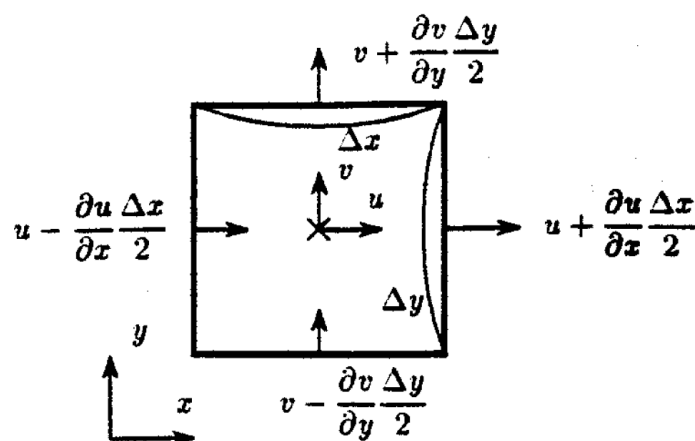


Figure 2.2 微小領域における質量保存

x 方向に関しては、

$$\left(\rho u - \frac{\partial \rho u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}\right) \Delta y - \left(\rho u + \frac{\partial \rho u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}\right) \Delta y = -\frac{\partial \rho u}{\partial x} \Delta x \Delta y \quad (2.1)$$

が成り立つ。

同様に、 y 方向についても、

$$\left(\rho v - \frac{\partial \rho v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}\right) \Delta x - \left(\rho v + \frac{\partial \rho v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}\right) \Delta x = -\frac{\partial \rho v}{\partial y} \Delta x \Delta y \quad (2.2)$$

が考えられる。

質量の変化量が 0 であることにより、

$$-\frac{\partial \rho u}{\partial x} \Delta x \Delta y - \frac{\partial \rho v}{\partial y} \Delta x \Delta y = 0 \quad (2.3)$$

がかけ、以下のように 2 次元の連続の式が得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

これは 3 次元の場合でも同様に導出することができ、式(1.9)に示すようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

2.2.2 運動量保存則

次に、運動量保存則より粘性流体の運動方程式を立ててみる。連続の式を導出する場合と同じように流体中の微小領域について考える。微小領域に働いている加速度及び微小領域の各面に働いている力を考慮し、力の釣り合いの式を求めればよい。完全流体の場合には微小領域の各面に等方的な圧力しか働かないのに対し、粘性流体の場合には各微小面に垂直応力およびせん断応力が働くことになるので、運動方程式は非常に複雑な形になる。

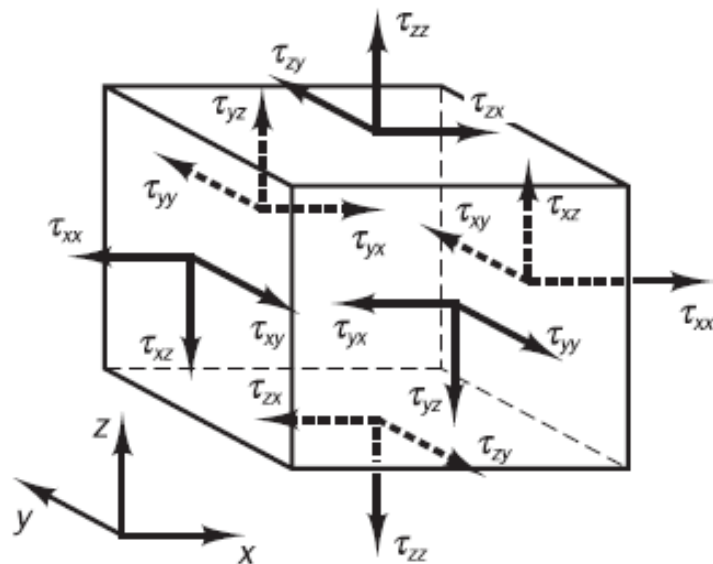


Figure 2.3 微小領域におけるせん断応力図[19]

Fig.2.3 に示したように、流体中の微小領域は粘性により、各面が応力を受ける。 τ_{ij} は i 方向の法線を持つ面において j 方向の粘性応力成分を表している。Fig.2.4 は x 方向における力を示している。では、 x 方向に関して、

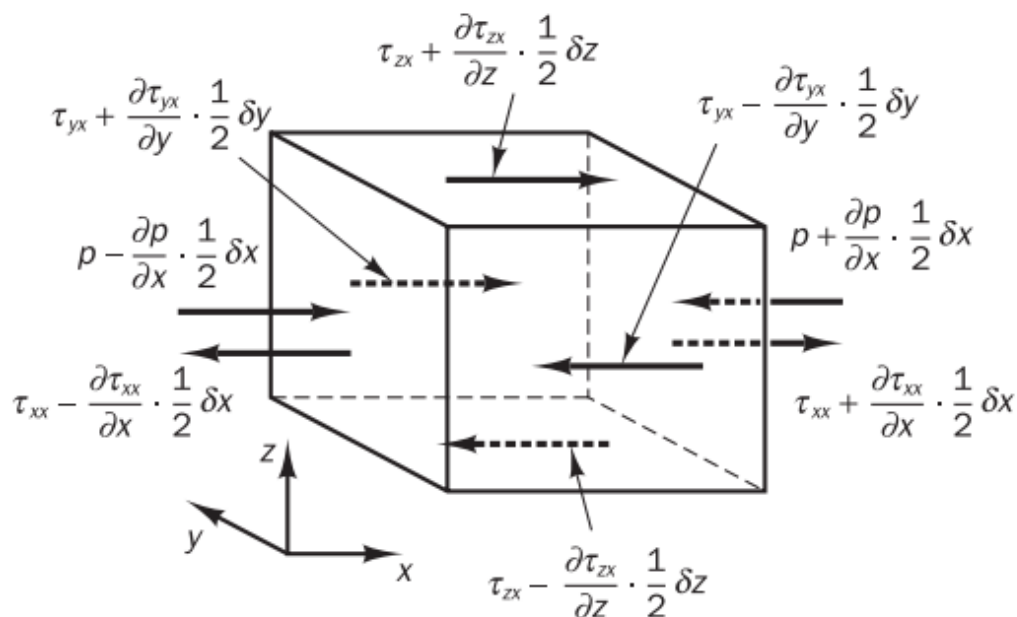


Figure 2.4 微小領域における x 方向の力の釣り合い [19]

$$\begin{aligned}
& \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\
& + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\
& = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z
\end{aligned} \tag{2.6}$$

式(2.6)が成り立つ。また、垂直応力も含めて考えると、

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \tag{2.8}$$

x 方向において運動量保存則より次式が求められる。

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + K_x \tag{2.9}$$

ただし、 K_x は体積力を表す。

同様に、y、z 方向についても

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + K_y \tag{2.10}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + K_z \tag{2.11}$$

式(2.10)と式(2.11)が成立する。

2.2.3 NS 方程式

ここまでは、連続の式 1 つと運動量保存則による運動方程式 3 つ、計 4 つの式が求めた。ただし、粘性応力 τ_{ij} はまだ明確に与えられていない。粘性が存在する場合には、ある面にかかる粘性応力は、そこでの速度勾配に比例する。したがって、

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
\tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
\tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
\tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
\tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

粘性応力は式 2.12 のようになる。ただし、 $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 。

連続の式(式 2.5)によれば、式 2.9、2.10、2.11 は

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \nabla u) + K_x \tag{2.13}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \nabla v) + K_y \tag{2.14}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \nabla w) + K_z \tag{2.15}$$

このようになる。

2.3 OpenFOAM 概要

OpenFOAM はオープンソースプログラムであり、流体・連続体シミュレーションの研究コード開発のプラットフォームとして、LES 乱流モデル、燃焼モデル、自由表面モデル、混相流モデルなどが多数組み込まれている。商用 CFD ソフトウェアとの大きな違いはオープンソースで提供されていることであり、新しい流体モデルの組み込み、専用アプリケーションの開発、プラットフォーム毎のチューニング、制御ソフトウェアなどの他のプログラムとの連携などが容易にできる環境が提供されている。

2.3.1 有限体積法

OpenFOAM では、偏微分方程式の離散化手法として有限体積法が用いられている。有限体積法はコントロールボリューム法とも呼ばれ、連続体の偏微分方程式を離散化して解く手法の一つである。連続体をコントロールボリュームあるいはセルとも呼ばれる多面体で分割し、方程式をセルの体積積分の形で表す。離散点をセルの中心に置き、セル内部の値をセル中心の値で代表させる。P は注目セルの中心の点、N は隣接セルの中心の点、f は注目セルと隣接セルが共有する面の中心の点である。それぞれの点の位置を $\mathbf{x}_P, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_f$ と表す。

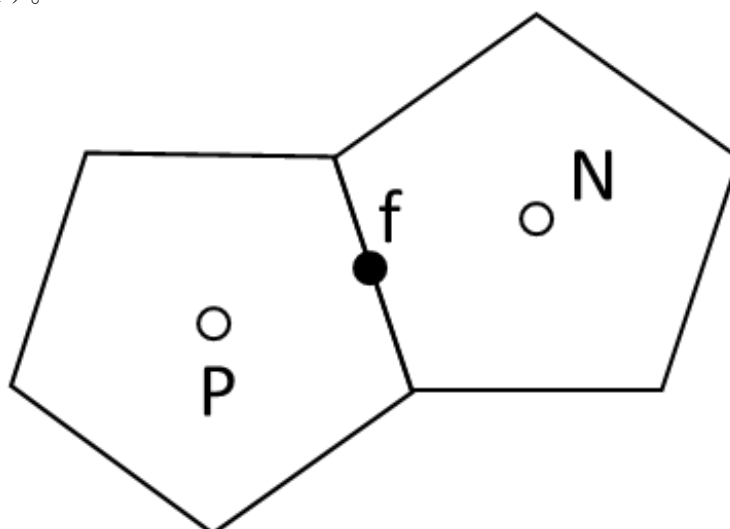


Figure 2.5 セルのイメージ[20]

次のような輸送方程式を考える。

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (k \nabla \phi) + S \quad (2.16)$$

ただし、 ρ は密度、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 k は拡散係数、 S はソース項である。これを有限体積法で離散化する。まず、方程式(2.16)をセルにおいて積分する。

$$\int \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dV = \int \nabla \cdot (k \nabla \phi) dV + \int S dV \quad (2.17)$$

これは次式のように書ける

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V_P + \int \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dV = \int \nabla \cdot (k \nabla \phi) dV + S V_P \quad (2.18)$$

ただし、 V_P は注目セルの体積である。

空間微分の離散化について考える。発散は、ガウスの発散定理により次のように表す。

$$\int \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) dV = \int (\phi \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} dS \approx \sum \phi_f \mathbf{u}_f \cdot \mathbf{S}_f \quad (2.19)$$

ただし、 \mathbf{n} は領域表面の法線ベクトルを表す。 \mathbf{S}_f はセルを構成するそれぞれの面について垂直で、それぞれの面積を大きさとして持つベクトル (面積ベクトル) である。ラプラシアンについても同様である。

$$\int \nabla \cdot (k \nabla \phi) dV = \int (k \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dS \approx \sum k_f (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{S}_f \quad (2.20)$$

勾配についても、同様の考え方で次のように表される。

$$\int \nabla \phi dV = \int \phi \mathbf{n} dS \approx \sum \phi_f \mathbf{S}_f \quad (2.21)$$

ここまで体積積分を和の形に変形できたが、 ϕ_f や $\nabla \phi$ といった面中心の値が未知である。それらの表し方で離散化の精度が決まる。これらの補間や離散化の方法のことを、補間スキーム (interpolation scheme) や離散化スキーム (discretization scheme) などという。 ϕ_f を次式で表す。

$$\phi_f = w \phi_P + (1 - w) \phi_N \quad (2.22)$$

ただし、 w は重みで、線形補間の場合では、 w は $N - f$ 間の距離と $P - N$ 間の距離の比で表される。

$$w = \frac{|\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_N|}{|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_P|} \quad (2.23)$$

面中心の勾配 $(\nabla \phi)_f$ については、 $(\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{S}_f$ の形で面の法線方向の勾配として離散化する。

$$(\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{S}_f = \frac{\phi_N - \phi_P}{|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_P|} |\mathbf{S}_f| \quad (2.24)$$

上述の方法で(2.18)の表す輸送方程式を離散化すると、次の形となる。

$$A_P \phi_P + \sum A_N \phi_N = b \quad (2.25)$$

ただし、 A_P 、 A_N は代数方程式の係数行列に相当し、 b は対数方程式の右辺に相当する。これをすべてのセルで合わせると、偏微分方程式をそれに対応する対数方程式に変更できる。

2.3.2 SIMPLE 法と PISO 法と PIMPLE 法

非圧縮性流体の支配方程式を次に示す。
運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \{ \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \} + \frac{1}{\rho} \mathbf{b} \quad (2.26)$$

連続の式

$$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.27)$$

ただし、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 p は圧力、 \mathbf{b} は体積力ベクトル、 ρ は密度、 μ は粘性係数である。上記の二つの支配方程式を連立させ解けば非圧縮流体の挙動がわかるが、連続の式に圧力の情報を陽に含まないため、これを解くために工夫が必要である。運動方程式を部分的に有限体積法で離散化すると、次のようになる。

$$A_P \mathbf{u}_P + \sum A_N \mathbf{u}_N = -\nabla p + \mathbf{s} \quad (2.28)$$

速度 \mathbf{u}_P を求める形に書くと、次のようになる。

$$\mathbf{u}_P = \frac{\mathbf{s} - \sum A_N \mathbf{u}_N}{A_P} - \frac{1}{A_P} \nabla p \quad (2.29)$$

これを連続の式に代入すると、

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_P = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{s} - \sum A_N \mathbf{u}_N}{A_P} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p \right) = 0 \quad (2.30)$$

さらに整理すると、

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{s} - \sum A_N \mathbf{u}_N}{A_P} \right) \quad (2.31)$$

式(2.31)と式(2.33)を解くことで非圧縮流体の挙動がわかる。以下ではこれを解くための三つのアルゴリズムを示す。

一つ目は SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)法である。SIMPLE法は速度 \mathbf{u} と圧力 p を反復計算で求める。反復計算におけるある時点の速度 \mathbf{u} と圧力 p を、式、のようにそれぞれ予測値 \mathbf{u}^*, p^* とその修正値 \mathbf{u}', p' の和で表す。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* + \mathbf{u}' \quad (2.32)$$

$$p = p^* + p' \quad (2.33)$$

反復計算の最終段階で予測値が真の解と一致した場合、あるいはその差が許容範囲内にある場合、修正値は0になる。式(2.32)と(2.33)を式(2.28)に代入すると、

$$A_P \mathbf{u}_P^* + \sum A_N \mathbf{u}_N^* = -\nabla p^* + \mathbf{s} - (A_P \mathbf{u}'_P + \sum A_N \mathbf{u}'_N + \nabla p') \quad (2.34)$$

が得られる。 $(A_P \mathbf{u}'_P + \sum A_N \mathbf{u}'_N + \nabla p')$ 項は最終的に0になるから、次の式が求められる

$$A_P \mathbf{u}_P^* + \sum A_N \mathbf{u}_N^* = -\nabla p^* + \mathbf{s} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{u}'_P = -\frac{\sum A_N \mathbf{u}'_N}{A_P} - \frac{1}{A_P} \nabla p' \quad (2.36)$$

そして、連続の式により、

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_p = \nabla \cdot \mathbf{u}_p^* + \nabla \cdot \mathbf{u}'_p = 0 \quad (2.37)$$

が得られる。さらに、式(2.36)を式(2.37)に代入すると、次の式が得られる。

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_p^* - \nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}'_N}{A_p} \right) \quad (2.38)$$

これで圧力の修正値を得る式が求められたが、右辺の第二項が未知である。速度の修正値は最終的に 0 になるから、右辺の第二項を無視する(この項を無視するという決定が“Semi-Implicit” という名前の由来である)。したがって次の 2 式が得られる。

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_p^* \quad (2.39)$$

$$\mathbf{u}'_p = -\frac{1}{A_p} \nabla p' \quad (2.40)$$

これで圧力と速度の修正値が得られる。

SIMPLE 法は次のようにまとめられる

- 1) 式(2.35)を解いて速度の予測値 \mathbf{u}^* を得る。圧力の予測値 p^* には前回の反復計算で得られた値を用いる。
- 2) 式(2.39)を解いて圧力の修正値 p' を得る。
- 3) 式(2.40)で速度の修正値 \mathbf{u}' を計算する。
- 4) 式(2.32)と式(2.33)で速度 \mathbf{u} と圧力 p を計算する。
- 5) 収束解が得られるまで上記の手順を繰り返す。

SIMPLE 法は次のフローチャートで表せる。

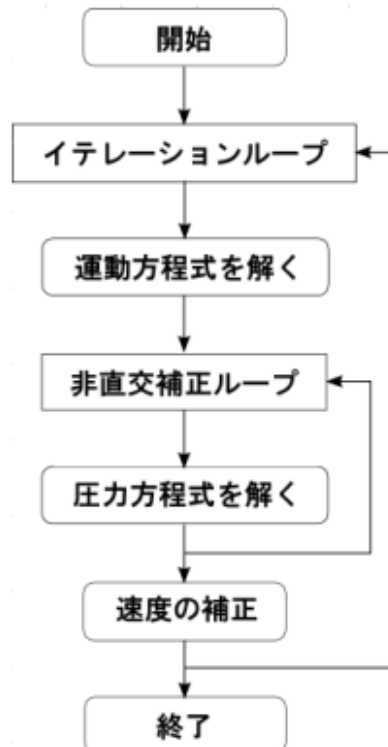


Figure 2.6 SIMPLE 法のフローチャート

二つ目は PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)法である。非定常解析に SIMPLE 法の反復計算を削減するため、PISO 法が開発された。

PISO 法も SIMPLE 法と同様に、速度と圧力を予測値と修正値で表すが、SIMPLE 法より一個修正値が多いである。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* + \mathbf{u}' + \mathbf{u}'' \quad (2.41)$$

$$p = p^* + p' + p'' \quad (2.42)$$

それぞれを 2 段階で表す。

$$\mathbf{u}^{**} = \mathbf{u}^* + \mathbf{u}' \quad (2.43)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{**} + \mathbf{u}'' \quad (2.44)$$

$$p^{**} = p^* + p' \quad (2.45)$$

$$p = p^{**} + p'' \quad (2.46)$$

上式を式(2.28)に代入すると

$$\begin{aligned} A_P \mathbf{u}_P^* + \sum A_N \mathbf{u}_N^* &= -\nabla p^* + \mathbf{s} \\ -\left(A_P \mathbf{u}_P' + \sum A_N \mathbf{u}_N' + \nabla p' + A_P \mathbf{u}_P'' + \sum A_N \mathbf{u}_N'' + \nabla p'' \right) \end{aligned} \quad (2.47)$$

式(2.47)は次のように分けられる

$$A_P \mathbf{u}_P^* + \sum A_N \mathbf{u}_N^* = -\nabla p^* + \mathbf{s} - \left(A_P \mathbf{u}_P' + \sum A_N \mathbf{u}_N' + \nabla p' \right) \quad (2.48)$$

$$A_P \mathbf{u}_P^{**} + \sum A_N \mathbf{u}_N^{**} = -\nabla p^{**} + \mathbf{s} - \left(A_P \mathbf{u}_P'' + \sum A_N \mathbf{u}_N'' + \nabla p'' \right) \quad (2.49)$$

項 $(A_P \mathbf{u}_P' + \sum A_N \mathbf{u}_N' + \nabla p')$ と $(A_P \mathbf{u}_P'' + \sum A_N \mathbf{u}_N'' + \nabla p'')$ 最終的に 0 になるから、次の式が得られる。

$$\mathbf{u}_P' = -\frac{\sum A_N \mathbf{u}_N'}{A_P} - \frac{1}{A_P} \nabla p' \quad (2.50)$$

$$\mathbf{u}_P'' = -\frac{\sum A_N \mathbf{u}_N''}{A_P} - \frac{1}{A_P} \nabla p'' \quad (2.51)$$

速度 $\mathbf{u}^{**}, \mathbf{u}$ ともに連続の式を満たすため、

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_P^* - \nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}_N'}{A_P} \right) \quad (2.52)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p'' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_P^{**} - \nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}_N''}{A_P} \right) \quad (2.53)$$

前の SIMPLE 法と同様に、ここでの右辺の第二項は、修正速度が最終的に 0 になるから、それを無視する。

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_P^* \quad (2.54)$$

$$\mathbf{u}_P' = -\frac{1}{A_P} \nabla p' \quad (2.55)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_P} \nabla p'' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_P^{**} \quad (2.56)$$

$$\mathbf{u}_P'' = -\frac{1}{A_P} \nabla p'' \quad (2.57)$$

\mathbf{u}^* だけは運動方程式を解いて求める。 \mathbf{u}^{**} については $\mathbf{u}^*, \mathbf{u}'$ から求める。式(2.43)を式

(2.56)に代入して、

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p'' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_p^{**} + \nabla \cdot \mathbf{u}'_p \quad (2.58)$$

そして、式(2.58)に式(2.50)を代入すると、

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p'' \right) = \nabla \cdot \mathbf{u}_p^* - \nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}'_N}{A_p} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p' \right) \quad (2.59)$$

式(2.54)により

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p'' \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}'_N}{A_p} \right) \quad (2.60)$$

SIMPLE 法と比較すると、SIMPLE 法では式(2.38)の $\nabla \cdot \left(\frac{\sum A_N \mathbf{u}'_N}{A_p} \right)$ 項を直接無視するのに対し、PISO 法ではそれを考慮するため、修正値の計算を 2 回に分けている。2 次修正値は無視するが、1 次修正値の項を無視するより誤差が小さいと考えられる。

同様に PISO 法は次のようにまとめられる

- 1) 式(2.35)を解いて速度の予測値 \mathbf{u}^* を得る。圧力の予測値 p^* には前回の反復計算で得られた値を用いる。
- 2) 式(2.54)を解くことで圧力の 1 次修正値 p' を得る。
- 3) 式(2.55) 解くことで速度の 1 次修正値 \mathbf{u}' を計算する。
- 4) 式(2.43) (2.45)より \mathbf{u}^{**}, p^{**} が得られる。
- 5) 式(2.56)を解くことで圧力の 2 次修正値 p'' を得る。
- 6) 式(2.57) を解くことで速度の 2 次修正値 \mathbf{u}'' を計算する。
- 7) 式(2.44) (2.46) より速度 \mathbf{u} と圧力 p を計算する。

PISO 法は次のフローチャートで表せる。

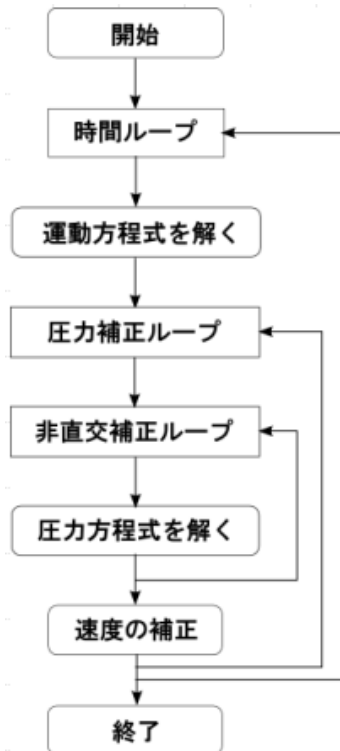


Figure 2.7 PISO 法のフローチャート

三つ目は PIMPLE 法である。OpenFOAM の非定常解析ソルバーでは PISO 法と SIMPLE 法を組み合わせた PIMPLE 法が用いられている。これは時間ステップの間に SIMPLE 法のループを入れたものである。比較的長い時間ステップ（クーラン数が大くなる）の計算に対して用いられる。

PIMPLE 法は次のフローチャートで表せる。

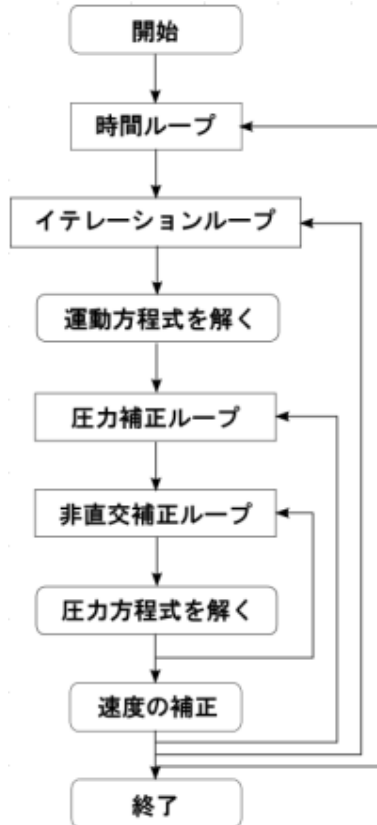


Figure 2.8 PIMPLE 法のフローチャート

2.3.3 乱流モデル

本研究でおこなった流体数値シミュレーションは Re 数範囲を実験に合わせており、 $O(10^5)$ のオーダーで計算を行った。その際、後述の通り直接数値計算では膨大な計算時間が必要である。その問題を解決するため、乱流モデルを用いた。

乱れエネルギーは様々な波数の乱れによって担われている。乱れエネルギーの源は平均的な流れが有する力学的エネルギーあるいは外界からの仕事であるが、それは平均速度勾配の作用などによってまず低波数 (大きなスケール) の乱れエネルギーに変換される。乱れに変換されたエネルギーは異なる波数間の非線形作用によって受け渡しが行われるが、それらは概して大きなスケールから小さなスケールへ向かう流れとなる。このような波数間で次々に受け渡しが起こる様子をエネルギー・カスケードとよぶ。カスケード過程における粘性散逸は小さく、最も小さなスケールで大半の散逸が生じる。

乱れた流れにおける、これら多数の波数成分を同時に扱うことは、その困難さゆえに流れ現象の本質を見えにくくする。各波数に対応する成分をモードとよぶことにすると、現象の理解にとって重要と思われるモードを抽出する際、スケールの大きいモードを優先し、それより小さなスケールのモードを前者へ与える影響として考慮するという手法がしばしば採用される。これを行う代表的方法として、後に述べる平均操作とフィルター操作がある。

乱流エネルギーをエネルギースペクトル関数 $E(k)$ で表すと (k : 波数)

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \int_0^\infty E(k) dk \quad (2.61)$$

ただし、 k は波数、 u' は平均流に対する流速の揺らぎである。一様等方性乱流での乱れの3次元エネルギースペクトルを Figure 2.9 に示す。

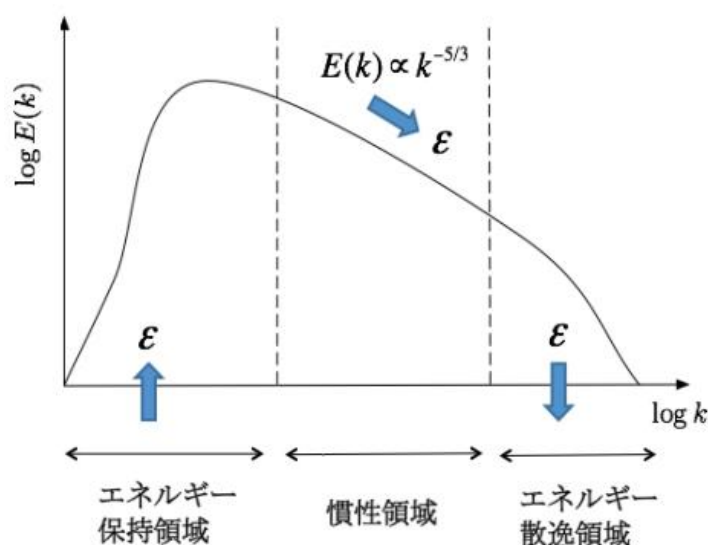


Figure 2.9 エネルギースペクトル 21

慣性領域において、 E は次元解析により波数 k とエネルギー散逸率 ϵ を用いて次のように定められる

$$E \sim \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.62)$$

また、小さなスケールにおいて、長さのスケール η は次元解析により動粘性係数 ν を用いて以下のように表せる。

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.63)$$

乱れの生成 ($= P_k$) と散逸 ($\cong \varepsilon$) が釣り合っているとき、散逸率は次のように見積もられる。

$$\varepsilon \cong P_k = -\overline{u'_i u'_i} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \cong \alpha U^2 \cdot \frac{U}{L} \quad (2.64)$$

ただし、 P_k は運動方程式から得られる乱れの生成項であり、 U, L はそれぞれ流れの巨視的な速度と寸法を示す。

よって、長さのスケール比は Re 数により以下の関係で表せる

$$\frac{\eta}{L} = \alpha \left(\frac{\nu}{LU}\right)^{\frac{3}{4}} = \alpha Re^{-\frac{3}{4}} \propto Re^{-\frac{3}{4}} \quad (2.65)$$

式(2.65)から、 Re 数の増加とともに、長さのスケール比が急激に小さくなることがわかる。すなわち、 η (コルモゴロフ・マイクロスケール) が小さくなり、乱流を表現するためにはより細かい解像度が必要となる。

3次元の乱流計算を仮定すると、格子間隔はコルモゴロフ・マイクロスケールの程度ほど小さく与えられ、計算領域は流れの巨視的な寸法よりも大きいことが求められる。結果として、必要な格子数は式(2.65)で与えられる数値の逆数の3乗程度 ($N \propto Re^{9/4}$) であり、 Re 数の増加とともに急激に増加する。現在、スーパーコンピュータを用いて Re 数が $O(10^4)$ のオーダーの直接数値シミュレーションが可能であるが、 Re 数が大幅に大きな計算は困難が大きい。

工学、自然科学を問わず、乱流を直接数値計算で研究するとき、上述の事情は大きな障害となる。この障害を緩和する手段として研究された方法が乱流モデリングであり、アンサンブル平均に基づくレイノルズ平均モデリング (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation model: RANS モデル) と、フィルター操作を用いるサブグリッドスケールモデリング (Large Eddy Simulation: LES モデル) の2つに大別される。前者では平均流速、平均温度などの流れ全体と直結する平均量が、後者では差分間隔より大きな空間スケールの運動全てが解析の対象となる。

RANS モデルは最も良く使われる乱流モデルの計算方法である。細かい渦運動まで知る必要がないときに、そこで流場において時間平均を取って計算するのは RANS モデルの本質である。時間で平均化すると非定常現象である渦管はならされて見えなくなる。そのため、相対的に粗いメッシュでも捉えられるから、計算コストを大幅に下げることが期待できる。

しかし、流れの性質として、平均場は乱れの影響を受けるので、その影響を加味する必要がある。RANS モデルではそれを渦粘性というモデルで反映する。流れの中の速度差によって流れが乱れ、流れの抵抗が増えた状態となる。この乱れによって流れに作用する抵抗力はレイノルズ応力と呼ばれる。これは流れ場を時間平均という粗視化をしたときに現れた仮想の力である。レイノルズ応力は速度差に比例するというモデルが用いられる。その比例係数は渦粘性係数と呼ばれる。なお、粘性力の比例係数である粘性係数は物質の種類に依存する物理量に対し、渦粘性係数は流れの状態に依存する物理量である。

RANS モデルは計算コストを下げるメリットがあるが、それによる解析精度の限界もある。その故、LES モデルへの期待が高まっている。

Fig.2.10 が示しているように、LES モデルではメッシュでとらえられる大きな渦は直接

計算し、メッシュで捉えられない小さな渦はモデルによって、その影響を加味して計算する。小さな渦の影響を模擬するモデルのことを **Subgrid scale(SGS)**と呼び、**SGS 応力**と言う仮想的な応力でモデル化する。大きな渦はすべて直接計算することから、モデルに頼る割合が小さく、**RANS** よりも汎用性の高い計算方法と言える。

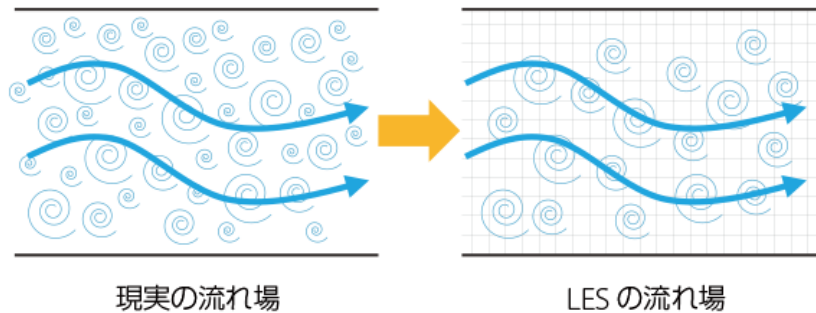


Figure 2.10 LES モデル [22]

RANS モデルと **LES** モデルはそれぞれのメリットとデメリットがあることは前で説明した。**RANS** モデルと **LES** モデルを組み合わせた「ハイブリッドモデル」が考案された。ハイブリッドモデルとは計算領域のある部分を **RANS** で計算し、残りの部分を **LES** で計算するというものである。これで、計算のコストも下げられるし、細かい渦も捉えられるようになった。この「ハイブリッドモデル」は **DES(Detached Eddy Simulation)**モデルといい、その考え方は Fig.2.11 の示しているようになっている。

DES モデルは下の式が定義している乱流スケールという渦の大きさを示す指標を使って、**RANS** モデルと **LES** モデルを切り替える。

$$L_t = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (2.66)$$

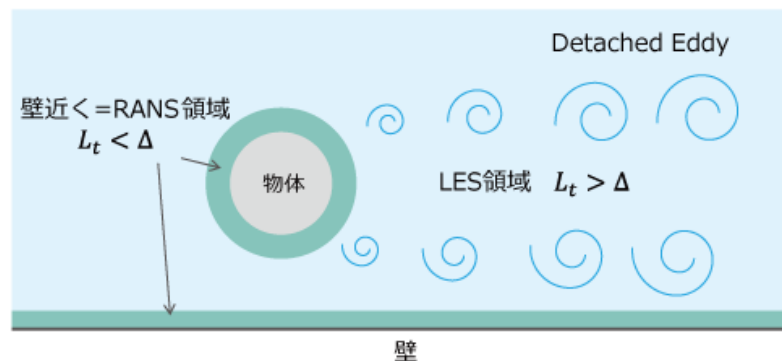


Figure 2.11 DES モデル

OpenFOAM では、**Spalart-Allmaras DES**、**Spalart-Allmaras DDES**、**Spalart-Allmaras IDDES**が存在する。**Spalart-Allmaras DES** モデルは1997年に **Spalart et al.**が **Spalart-Allmaras RANS** モデルをベースとして提唱したものである。以下 **SA** モデルについて説明する。

SA モデルは、渦動粘性係数 ν_t に関する移流拡散方程式に、乱流エネルギーの生成および消滅の効果を考慮した方程式を用い、時間方向に解く1方程式モデルである。

$$\begin{aligned} \partial_t \tilde{v} + u_j \partial_j \tilde{v} = c_{b1} (1 - f_{t2}) \tilde{S} \tilde{v} + \frac{1}{\sigma} [\partial_j \{ (\nu + \tilde{\nu}) \partial_j \tilde{v} \} + c_{b2} (\partial_j \tilde{v}) (\partial_j \tilde{v})] \\ - \left(c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right) \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2 \end{aligned} \quad (2.67)$$

右辺の各項は生成、拡散、破壊、乱流の遷移を表している。また

$$\begin{aligned} \nu_t &= \tilde{\nu} f_{v1} \\ \chi &= \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \\ \tilde{S} &= |\omega| + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \\ f_{v2} &= 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \end{aligned} \quad (2.68)$$

であり、 ω は渦度、 d は壁からの距離である。

SA モデルは抵抗予測の精度は良好であるが、遷移の対処に関しては、剥離を過大に予測する欠点があるが本研究の対象である角柱のような剥離点が明確な構造物においてはおおむね妥当な結果を与えられられる。

DES モデルでは、長さスケール d は次のように再定義される。

$$\begin{aligned} d_{DES} &\equiv \min(d_{RANS}, d_{LES}) \\ d_{RANS} &= d \\ d_{LES} &= C_{DES} \Delta_{max}, \Delta_{max} = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \end{aligned} \quad (2.69)$$

また、DDES モデルは DES モデルを改良したものである。DDES モデルでは、格子が境界層にあるかどうかを識別するために、流れ場に関連する関数が採用されている。それで境界層全体が RANS モデルによって解像されることが図られる。そのため、DDES モデルはあいまいな格子密度によって生じる良くない RANS モデルと LES モデルの分離を避けることができる。その流れ場に関する関数は次のようになる。

$$r_d \equiv \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \kappa^2 d^2}} \quad (2.70)$$

ここで、 r_d を使って関数 f_d を定義し、長さスケールを再定義する。その式は式(2.71)と式(2.72)になる。

$$f_d \equiv 1 - \tanh[(8r_d)^3] \quad (2.71)$$

$$d_{DDES} \equiv d - f_d \max(0, d - C_{DES} \Delta_{max}) \quad (2.72)$$

ここで、 f_d は RANS モデルと LES モデルを切り替えるスイッチになっており、 $f_d = 0$ の場合は RANS モデルに、 $f_d = 1$ の場合は LES モデルに切り替える。

IDDES モデルは、DDES モデルと WMLES モデルを組み合わせたハイブリッドモデルである。DDES モデルは紹介した通りになるが WMLES モデルは境界層での平均流速をより正確に予測することができるモデルである。IDDES モデルでは、もし流入乱流コンテンツがあれば、WMLES モデルがスイッチを入れられるが、そうではない場合は DDES モデルのままになる。本研究では、すべての数値シミュレーションにおいて IDDES モデルを使用しているが、流入乱流コンテンツがないため、実質 DDES モデルが適用されている。

第3章 単独角柱運動シミュレーション

本研究の目的は 4 本のカラム間におけるポンツーンが浮体の動揺にどういふふうに影響を与えているか考察することである。ただし、計算コストを含めて考えた各パラメータの決定が非常に重要であるので、最初からいきなり複数カラムでポンツーンありの数値シミュレーションは結果の信ぴょう性がなく、考察のしようがない。そのため、段階を経て数値計算を進めることが必要である。

本章は単独角柱を用いて数値計算をし、格子サイズや時間刻みの決定について説明する。

3.1 計算条件

まず、本数値シミュレーションにおいて設定した各パラメータを Table3.1 に示す。使用する角柱カラムは均一密度であり重心位置がカラムの中心にある。

Table3.1 パラメータ設定

Parameter		Value
Diameter	D	0.25[m]
Aspect ratio	Ar	1.5
Velocity	Vref	0.3[m/s]
Reynolds number	Re	75000
Incident angle	θ	0-deg
Turbulence model		IDDES
Yplus	y+	30
Solver		PISO
Time step	dt	0.002[s]

3.1.1 計算領域と境界条件

計算領域については、徐ら[23]は単独円柱を用いて数値シミュレーションをし適切な距離等を考察した。流入境界から構造物までは 20D、構造物から流出境界までは 40D が妥当だと考えられると述べてある。本数値シミュレーションはその値を参考にし、計算領域を Fig.3.1 のように設置した。また、幅と深さも先行研究[23]に合わせて設定した。

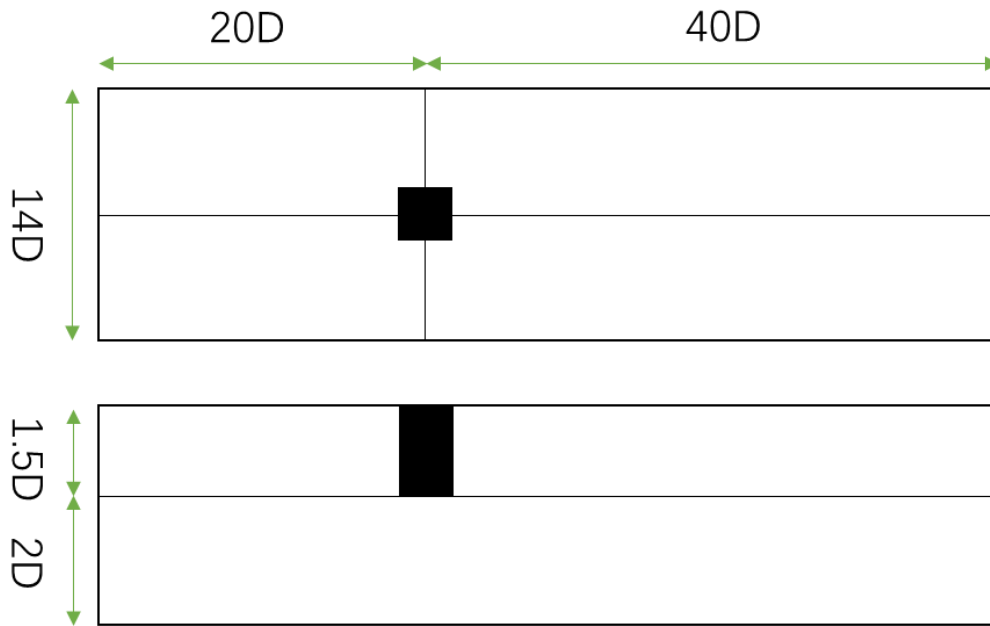


Figure 3.1 単独角柱運動シミュレーションにおける計算領域

境界条件については、Table3.2 のようになる。

Table3.2 境界条件

boundary	Pressure	Velocity
inlet	zero gradient	fixed value
outlet	fixed value	zero gradient
south	zero gradient	free slip
north	zero gradient	free slip
upper	zero gradient	free slip
bottom	zero gradient	free slip

各境界面の定義は Fig.3.2 に示す。

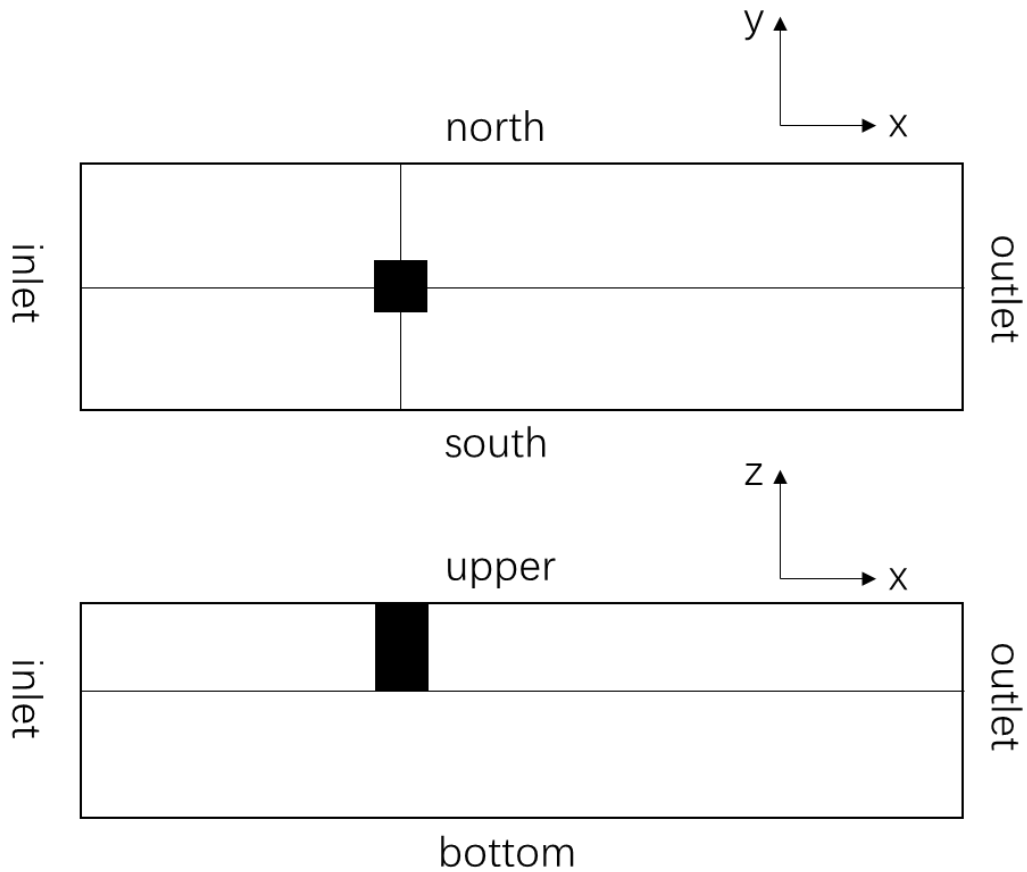


Figure 3.2 単独角柱運動シミュレーションにおける各境界面

fixed value は文字通り、固定されている値を意味する。zeroGradient は勾配が 0 ということの意味する。つまり、境界の値が計算領域の値で決まる。また、free slip というのは境界に垂直な方向の速度が 0 であり、境界に沿って自由に流れる境界条件である。自由表面の造波の影響は本研究の対象外であり、south、north、upper、bottom を free slip にしている。

3.1.2 境界層解像度と格子

数値シミュレーションにおいて乱流現象を再現するために、カラム回りの境界層を解像できるように、格子の検証が必要になってくる。カラム表面近くの領域を計算するためによく用いられるのは壁関数というものである。壁関数としてよく使われるのは対数則であり、対数則とは、Fig.3.3 に示したように壁からの距離と、そこでの流速の大きさを対数で表示したときに直線になる分布である。グラフにより、流れは粘性底層(Laminar sublayer)、遷移層(Buffer layer)、そして乱流領域(Turbulent layer)の三つの領域に分けられる。

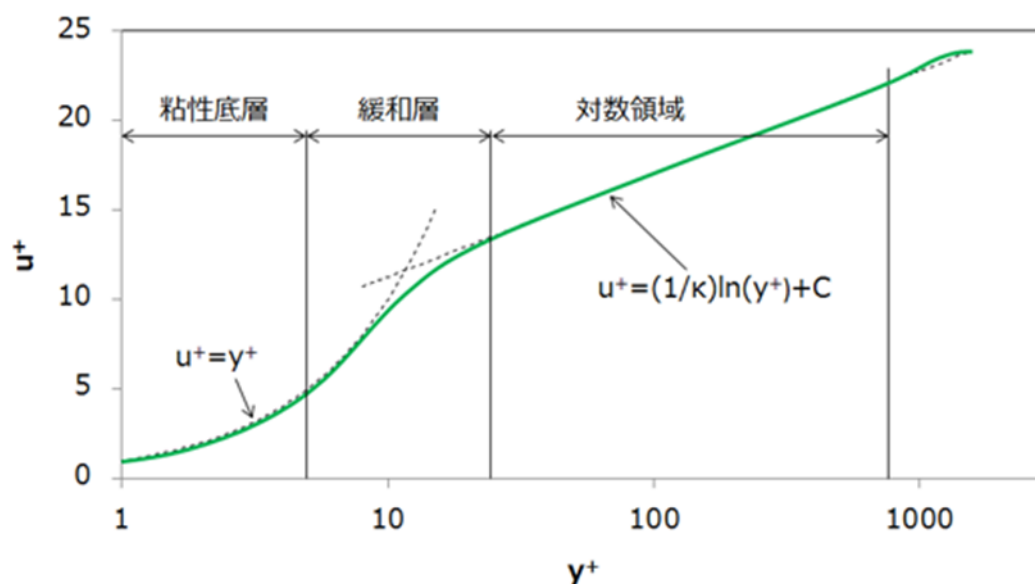


Figure 3.3 壁関数

それぞれの領域は次のように区別され、近似式が定義されている。

$$1. \text{粘性底層} : \quad 0 < y^+ < 5 \quad (3.1)$$

$$2. \text{遷移層} : \quad 5 < y^+ < 30 \quad (3.2)$$

$$3. \text{乱流領域} : \quad 30 < y^+ < 400 \quad (3.3)$$

ここで、壁面からの無次元距離 y^+ は次のように定義される。

$$y^+ = \frac{u^T}{\nu} y \quad (3.4)$$

u^T とは壁面摩擦速度で次のように定義される。

$$u^T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.5)$$

τ_w は壁面におけるせん断応力で、線形近似により次のように求められる。

$$\tau_w = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3.6)$$

本研究は前述した乱流モデル Spalart-Allmaras IDDES を使用している。カラム表面近く

では SA モデルを使って計算するため、計算コストが大幅に下がる。また、SA モデルは RANS の一種であり時間平均を取って計算するので相対的に粗いメッシュでも流体现象を再現することができる。そのため、 y^+ は 30 程度[24]にして対数則を使わせて計算を行う。Fig.3.4 に示したようにカラム近傍は RANS でそれ以外は LES という傾向がはっきり出ている。Fig.3.4 は式(2.71)に定義された乱流モデルを切り替えるスイッチである f_d の分布図である。

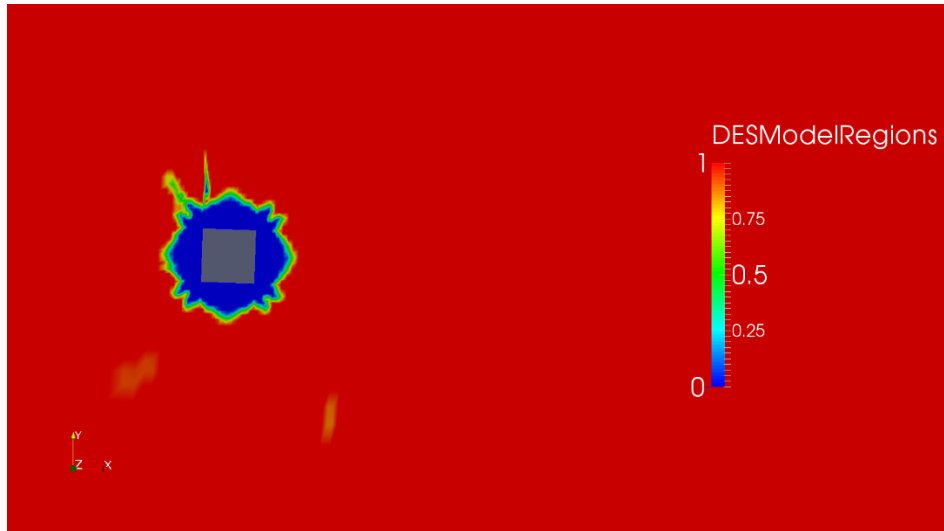


Figure 3.4 IDDES モデルにおけるスイッチ f_d の分布($f_d=0$ と RANS モデル、 $f_d=1$ と LES モデル)

具体的な格子の作成はまず Fig.3.5 に示したように inlet から角柱までの領域は上流側であるため計算結果にほとんど影響がないとみて格子拡張率を 1.2 にする。また、角柱の後ろに渦が放出されるので、等間隔領域を作りより精確に流体现象をとらえる。それから、等間隔領域から outlet までは角柱から離れているので、上流側と同様に格子拡張率を 1.2 にする。

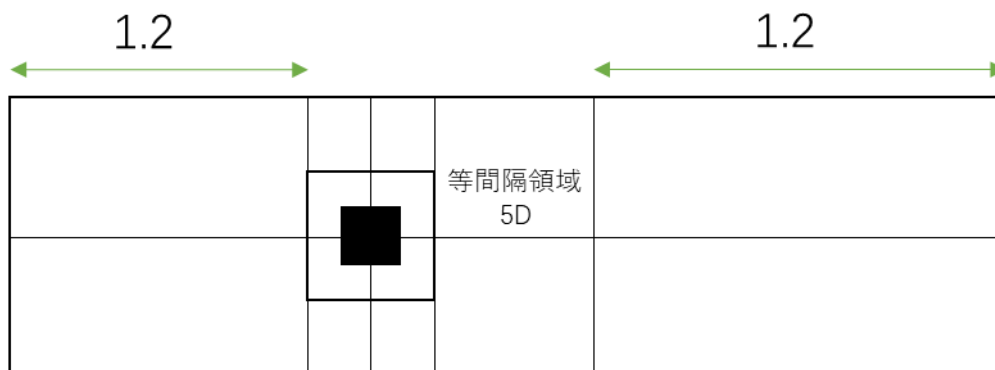


Figure 3.5 格子拡張率(xy 平面)

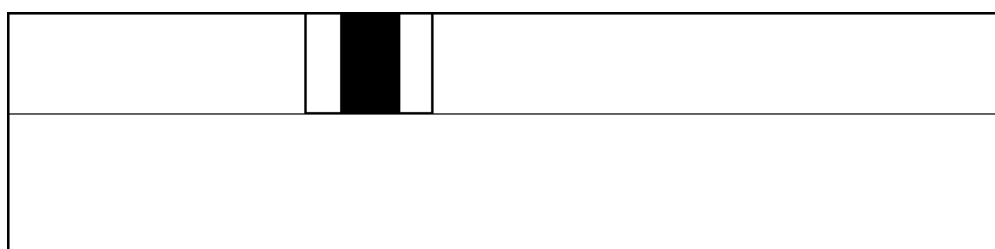


Figure 3.6 格子拡張率(xz 平面)

y 方向、z 方向及び境界層の格子拡張率は今回 V&V の検討範囲内になる。

3.1.3 時間刻み

時間刻みの検証を行なう前に、CFL 条件(Courant-Friedrichs-Lewy Condition)について説明する。それは CFD 計算において、「情報が伝播する速さ」を「実際の現象で波や物理量が伝播する速さ」よりも早くしなければならないという必要条件のことである。

CFD でナビエ-ストークス方程式を解く際に、用いる時間ステップ Δt の値がその時間の上限を超えると、計算上の情報伝達速度が実現象の速さに追従できずに数値発散が生じてしまい、物理的に意味のない解を得てしまう。その故に、格子のサイズを小さくすると、時間ステップもそれに応じて小さくする必要がある。

式を用いて説明すると、以下ようになる。実際の現象を特性速度が C の波動であるとする。この現象を次の移流方程式で記述される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

この式を時間ステップ幅 Δt 、格子幅 Δx として、時間微分に一次精度風上差分を用いて離散化すると、

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + C \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} = 0 \quad (3.8)$$

式を整理すると、

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{C\Delta t}{\Delta x} (u_i^n - u_{i-1}^n) \quad (3.9)$$

となる。この時、情報が伝播する速さは $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ で、実際の波の速さは C であるから

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} > C \quad (3.10)$$

が CFL 条件となる。ここから、クーラン数を以下のように定義して

$$Co = \frac{C\Delta t}{\Delta x} \quad (3.11)$$

つまり、CFL 条件はクーラン数が 1 より小さくなければならないということになる。CFL 条件が時間刻みの下限を制限している。計算精度と計算コストのバランスのいい時間刻みを決めるにはまだ検証を行なう必要がある。

3.2 移動格子ソルバー

3.2.1 格子の変形

本運動シミュレーションにおいて使用するソルバーは前述した PISO 法である。ただし、カラムの動揺を実現させるのは、PISO 法だけではできない。徐ら[23]は PISO 法のうえで計算領域全体の流体に加速度を加えて強制加振をシミュレーションした。それは確かに一つの手ではあるが、本研究では自由にカラムを運動させるのが目標であるため、応用するのは非常に難しいと思われる。

そこでもう一つの手法として OpenFOAM の移動格子ソルバーが挙げられる。移動格子ソルバーにおいて浮体の運動は格子の変形によって再現される。格子はトポロジック変化はなしで伸び縮みすることで変形し、それぞれの格子頂点の初期位置からのずれが `pointDisplacement` として出力される。格子の変形に関しては `dynamicMeshDict` ファイルによって指定される `inner distance` と `outer distance` によって格子が区域ごとに分けられ、それによって変形の仕方が異なる。

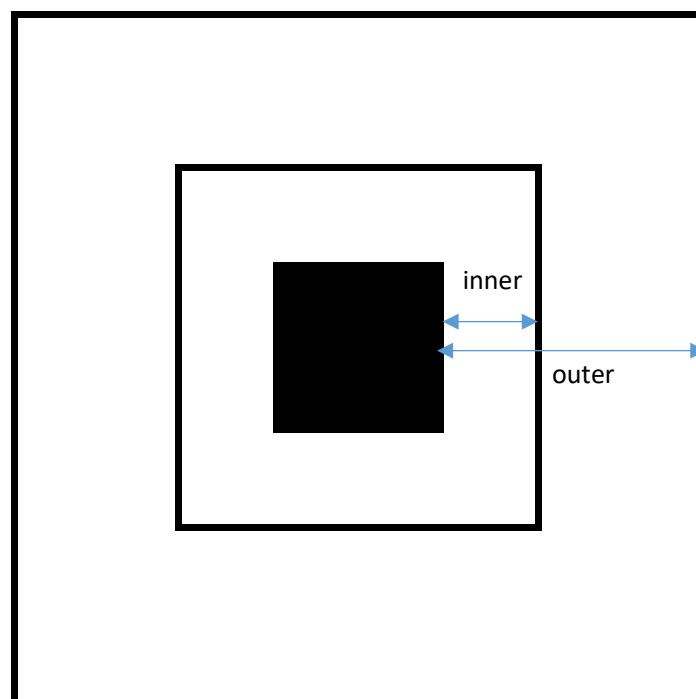


Figure 3.7 格子変形範囲の設定

`inner` の領域では格子は浮体と共に動き剛体的な動きをするのに対し、`outer` と `inner` の間の領域では、格子は浮体の動きに合わせて自由に伸び縮みできる。

OpenFOAM の中では移動格子ソルバーを組んだ非圧縮、非定常流れのソルバーは `pimpleDyMfoam` というのが存在し、PIMPLE 法と移動格子ソルバーを組み合わせたものである。PIMPLE 法は 2.3.2 節で紹介した通り、SIMPLE 法と PISO 法を組み合わせたものであるが、イテレーションループを 1 にすれば、実質 PISO 法と同じようなアルゴリズムになる。

3.2.2 係留ばねの導入と運動の抑制

カラムを自由に運動させるには、係留システムがないと、流れに流されて有意義なシミュレーションにならない。ここで、先行研究と同様に、係留ばねを導入する。係留ばねは線形ばねであり、Figure3.8 のように設置した。一様流は左から右へ流れていくとする。

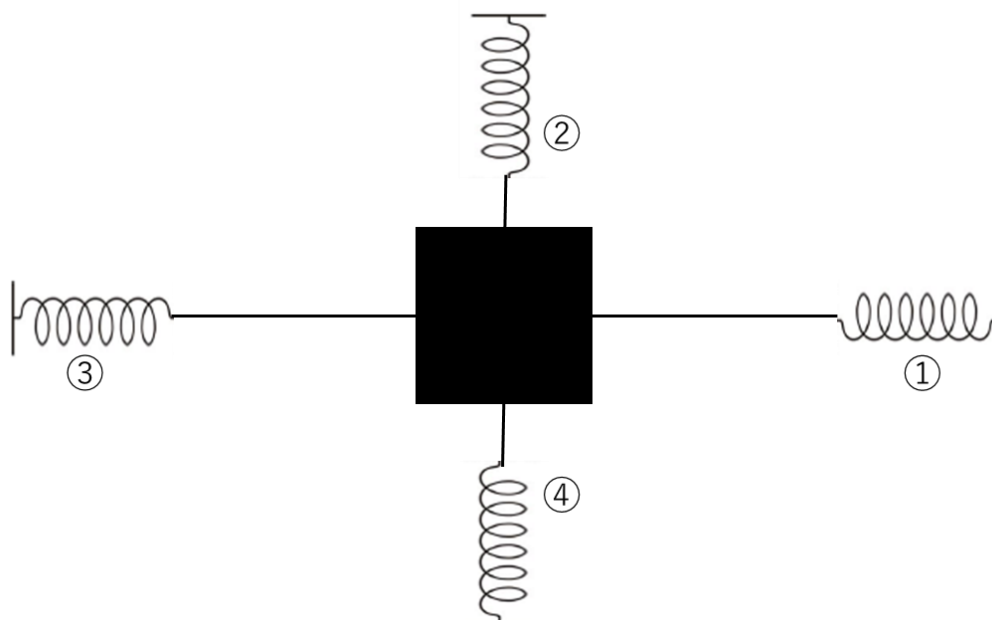


Figure 3.8 係留ばねの設置

また、各ばねのパラメータは Table3.3 のようになる。

Table3.3 係留ばねのパラメータ設定

	ばね①	ばね②	ばね③	ばね④
L0[mm]	200	225	200	225
Lcable[mm]	534	200	534	200
K[N/m]	7.44	9.20	7.44	9.20
Pretension[N]	7.63	4.80	7.63	4.80

ここで、L0 は自然長で、Lcable はカラムからばねまでのワイヤの長さである。また、K はばね定数である。

また、本研究はカラムの動揺について考察するのがメインであり V&V を行う際、抗力係数 Cd や揚力係数 Cl を特性量とせず x 方向や y 方向の変位に着目し検討する方針である。それを含めて考えて本運動シミュレーションは、Z 方向の運動について考慮しない。そのため、サージ、スウェー、ヨー3自由度のみの計算になる。

3.3 V&V

CFD 結果の評価に関し、二つの概念として、Validation と Verification がある。通称 CFD V&V である。それぞれ以下のように特徴づけられる。

- 1) Validation : 正しいモデルを解いているか。
- 2) Verification : モデルを正しく解いているか。

Validation における正しいモデルとは、乱流モデルのことだけを指すのではなく、現実世界の研究対象を相応しくモデル化しているかどうかのことである。例えば、非圧縮流体にしているのか、熱交換を無視して妥当なのかのことがあげられる。それに対し、Verification は採用したモデルの解が数値振動なしに正しく解かれているのかを意味する。離散化方程式で厳密に偏微分方程式の解を表現するのが困難であるが、得られた数値解の誤差範囲を何らかのスタンダードで考えることができる。それを求めるために、Table3.4 が示しているように、三つの格子と三つの時間刻みで計 9 ケースの計算を行なう。

Table3.4 格子拡張率 r と時間刻み dt

Name	Expansion ratio	Cell number	hi
M1	r=1.1	290000	1
M2	r=1.15	420000	2
M3	r=1.2	740000	3
Name	dt		
T1	0.001s		
T2	0.002s		
T3	0.004s		

3.3.1 ASME のスタンダード

ここではコードの Verification を行なわないが、計算の Verification を考察する。数値計算においては三種類の誤差が考えられる。それぞれ丸め誤差、累積誤差と離散化による誤差である。丸め誤差は変数を double precision にすることで無視できる。累積誤差は主に非線形項によって起こされているが、残差を 10^{-7} とすることで無視できる。残された離散化による誤差は格子の依存性を定量的に評価して考える必要がある。

流れの数値解の格子依存性を評価する指標として Grid Convergence Index(GCI)が Roache[25]により提案されている。これは、一般的な数値解析に対する Richardson Extrapolation を拡張したものである。

流れのある特性量 f の数値解が格子間隔 h について Taylor 展開可能であるとする。

$$f = f_0 + g_1 h + g_2 h^2 + g_3 h^3 + \dots \quad (3.7)$$

ここで、 f_0 は $h=0$ の場合の特性量の値である。2 次精度のスキームを考えて $g_1 = 0$ とし、2 種類の格子間隔 h_1 、 h_2 ($h_1 < h_2$) に対する数値解 f_1 、 f_2 の表式から f_0 を求めると次式が得られる。

$$f_0 = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^2 - 1} + O(h^3) \quad (3.8)$$

ここで r は 2 つの格子間隔の比である。

$$r = \frac{h_2}{h_1} \quad (3.9)$$

式(3.8)中の右辺第三項を無視して得られる f_0 の推定値は Richardson Extrapolation と呼ば

れる。

Roache は上の議論を一般的に p 次精度のスキームに拡張して次式を得、

$$f_0 = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} + O(h^{p+1}) \quad (3.10)$$

上式から得られる f_1 及び f_2 の相対誤差の推定値に安全係数 3 をかけた誤差の範囲を GCI_1 および GCI_2 として定義した(後者は式(3.10)を粗い格子系 h_2 の解 f_2 についてまとめることにより得られる)。

$$\begin{aligned} GCI_1 &= \frac{3|\varepsilon|}{r^p - 1} \\ GCI_2 &= \frac{3|\varepsilon|r^p}{r^p - 1} \\ \varepsilon &= \frac{f_2 - f_1}{f_1} \end{aligned} \quad (3.11)$$

GCI に関する大雑把な説明は以上のようになるが、具体的にどういうふうに GCI を求めるかはこれから紹介していく。

本研究では、The American Society of Mechanical Engineers(ASME)による V&V のスタンダード[26]を参考にし、 GCI を算出する。

- 1) 3.3 節で説明したようにまず格子拡張率 $r=1.1(h_1)$ 、 $r=1.15(h_2)$ 、 $r=1.2(h_3)$ この 3 つの場合に関してそれぞれ代表的な格子を選出し、格子サイズ h_1, h_2, h_3 の値を決める。

$$h = [(\Delta x_{max})(\Delta y_{max})(\Delta z_{max})]^{1/3} \quad (3.12)$$

- 2) h_1 と h_2 と h_3 の大小関係は $h_1 < h_2 < h_3$ のようになり、式(3.9)を用いて格子サイズの比を求める。ここでは、 h の値が 3 つあるため、 r はそれぞれ式(3.13)のようになる。

$$\begin{aligned} r_{21} &= \frac{h_2}{h_1} \\ r_{32} &= \frac{h_3}{h_2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

- 3) 次に、特性量(シミュレーションの結果) $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ を用いて式(3.14)のように差を求める。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{21} &= \varphi_2 - \varphi_1 \\ \varepsilon_{32} &= \varphi_3 - \varphi_2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

これで式(3.10)に示した指数 p を求めることができるようになる。 p は式(3.15)のように定義される。

$$p = \left[\frac{1}{\ln(r_{21})} \right] \left[\ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right] \quad (3.15)$$

ここで、

$$\begin{aligned} q(p) &= \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \\ s &= 1 * \text{sign} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \end{aligned}$$

のようになる。

- 4) 指数 p がわかったら特性量の外挿値を求める。

$$\varphi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \varphi_1 - \varphi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (3.16)$$

- 5) それから GCI を求めるために、近似による相対誤差 e_a^{21} を算出しておく。

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_1} \right| \quad (3.17)$$

式(3.17)で求めた近似による相対誤差 e_a^{21} は無次元数になる。

また、外挿値 φ_{ext}^{21} から推測される相対誤差 e_{ext}^{21} は式(3.18)のように求めることができる。

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\varphi_{ext}^{21} - \varphi_1}{\varphi_{ext}^{21}} \right| \quad (3.18)$$

- 6) 以上 GCI を求めるための各パラメータが揃い、式(3.19)を用いて GCI を算出する。

$$GCI = \frac{F_s * e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (3.19)$$

ここで F_s は安全係数を表す。前述したように安全係数は 3 である。ただし、安全係数 3 は、2 つの格子について考える場合によく使われる値であり、今回は格子が 3 つあるため、3 は不適切である。Roache によれば、格子が 3 つ以上ある場合、安全係数を 1.25 にするのがより良いという[18]。そのため、本研究では、安全係数を 1.25 にする。

3.3.2 計算結果

Table3.3 に示したように V&V を行うため、計 9 ケースの運動シミュレーションをした。計算結果について説明する。

まず計算コストに関しては、Table3.5 に示す。

Table3.5 単独角柱運動シミュレーションにおける計算コスト[Day]

	M1(r1=1.1)	M2(r2=1.15)	M3(r3=1.2)
T1(dt = 0.001s)	9.75	3	2.75
T2(dt = 0.002s)	5	2.25	1.25
T3(dt = 0.004s)	2.2	1.5	1

ここでは、T1 の 3 ケースについて、Fig.3.9 を見ればわかるように計算コストが高くなっている。

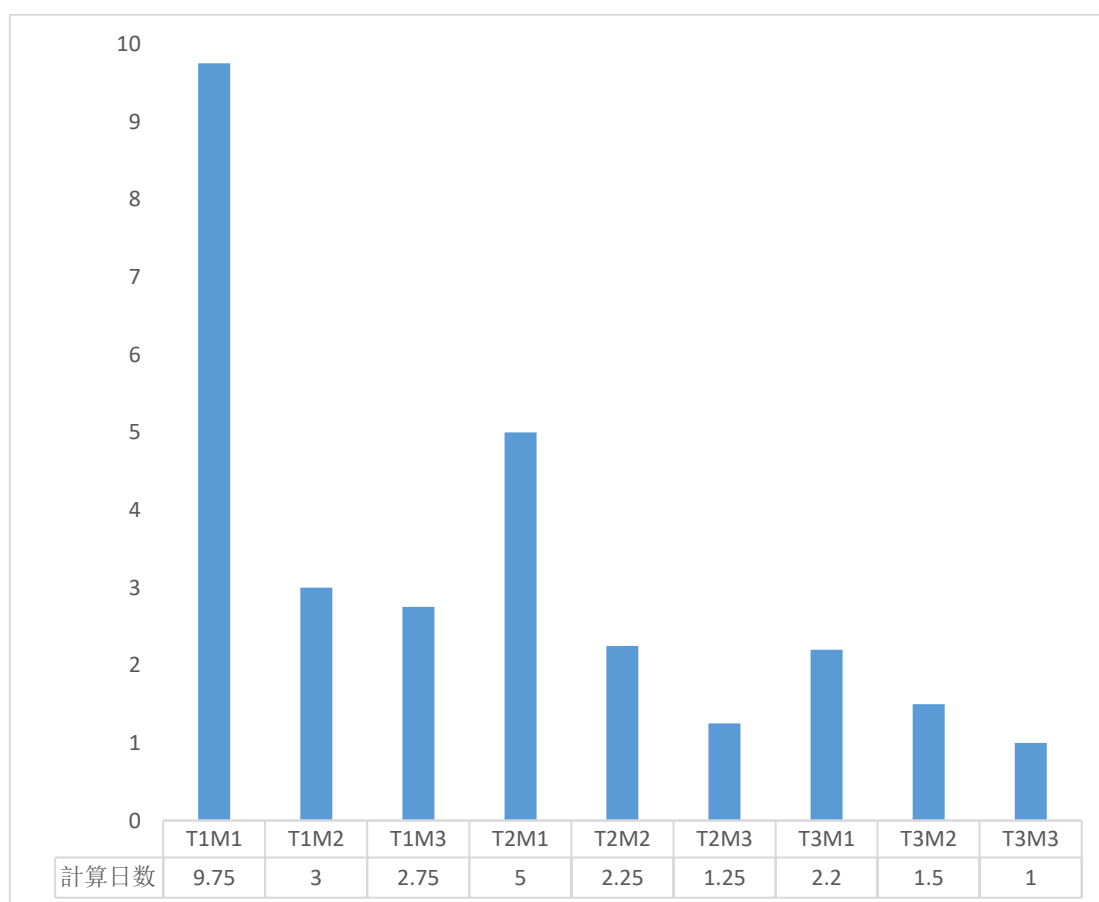


Figure 3.9 単独角柱運動シミュレーションにおける計算コスト[Day]

これから 4 本のカラムまで拡張してポンツーン材を加えることによって計算コストが急激に上昇することが考えられる。そのため、T1 の 3 ケース T1M1、T1M2、T1M3 について V&V を行って議論しその中のどれかを基準にして複数カラムのシミュレーションをするのは現実的ではない。

次は各ケースについて x 方向、y 方向の変位およびヨーの時系列データを示す。ただし、Appendix を参照すること。本文では、例として T1M1 だけ挙げて説明する。

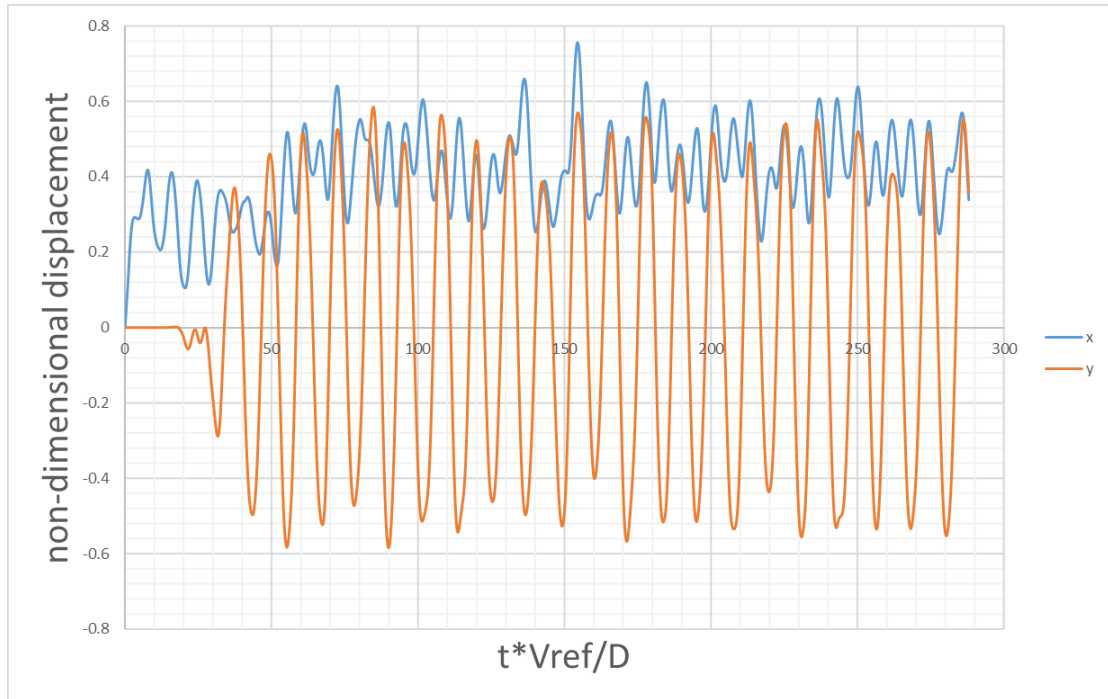


Figure 3.10 T1M1 における重心位置

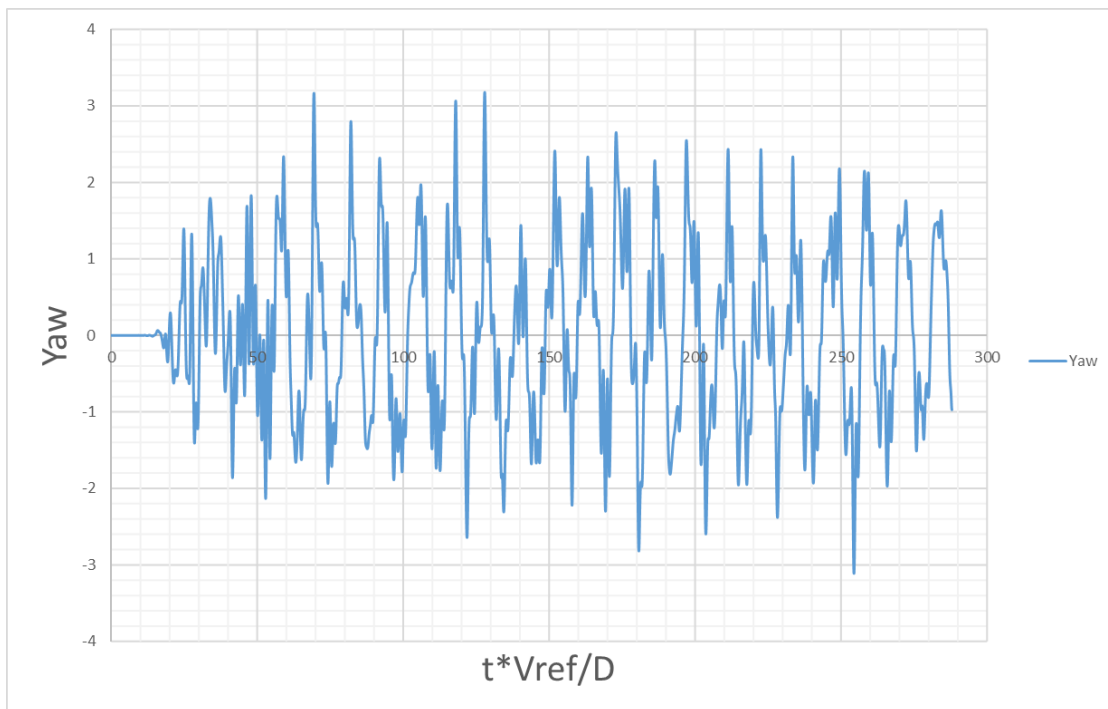


Figure 3.11 T1M1 におけるヨー角度

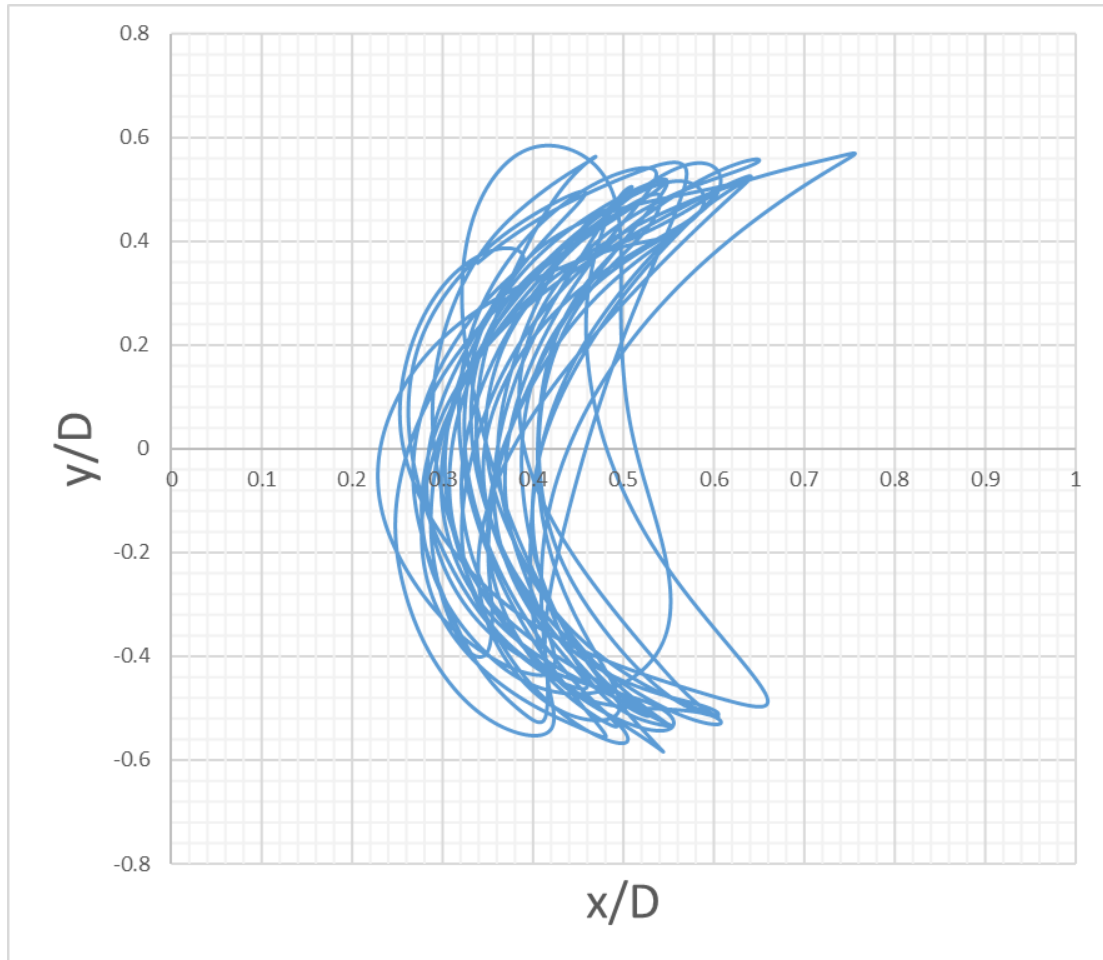


Figure 3.12 における重心位置の軌跡

Fig.3.10 に示したのは重心位置の x と y であり、横軸が時間の無次元数で縦軸が x と y の座標を代表長さ D で無次元化したものである。Fig.3.11 に示したのはヨー方向に運動したときの角度である。このグラフでは、横軸が Fig.3.10 と同じ時間の無次元数を表しており、縦軸が **degree** である。また、Fig.3.12 に示したのは重心位置の軌跡である。

これから Fig.3.10 を元に x 方向の変位の振幅と y 方向の振幅を求める。先行研究[16]と同じように平均値を引いて **RMS** の $\sqrt{2}$ 倍を振幅にする。また、より正確に振幅を求めるため、定常状態に入ってからデータのみに考える。例えば、T1M1 の場合、 $t^*V_{ref}/D=60$ から最後までデータを使用して振幅を算出した。各ケースについて求めた振幅は Table 3.6、3.7、3.8 のようになる。ヨー角度以外の値は代表長さ D で無次元化している。

Table3.6 x 方向の振幅 Ax/D

	M1(r1=1.1)	M2(r2=1.15)	M3(r3=1.2)
T1(dt = 0.001s)	0.141	0.138	0.140
T2(dt = 0.002s)	0.145	0.147	0.133
T3(dt = 0.004s)	0.125	0.140	0.136

Table3.7 y 方向の振幅 Ay/D

	M1(r1=1.1)	M2(r2=1.15)	M3(r3=1.2)
T1(dt = 0.001s)	0.538	0.549	0.559
T2(dt = 0.002s)	0.537	0.542	0.567
T3(dt = 0.004s)	0.548	0.556	0.562

Table3.8 ヨー方向角度の振幅 Ayaw

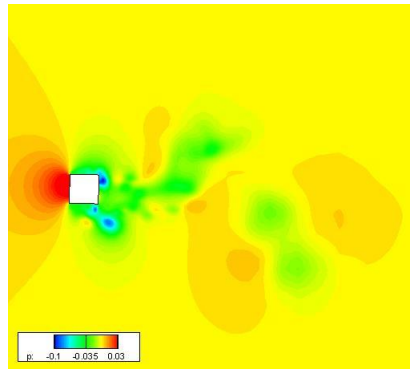
	M1(r1=1.1)	M2(r2=1.15)	M3(r3=1.2)
T1(dt = 0.001s)	1.67	1.74	1.71
T2(dt = 0.002s)	1.74	1.66	1.75
T3(dt = 0.004s)	1.64	1.73	1.78

次は可視化処理の結果について説明する。Fig.3.13 と Fig.3.14 と Fig.3.15 に示しているのは T2M2 のケースについて可視化処理をしたものである。T2M2 を選んだ理由は後述のように GCI を行った結果として最も妥当な格子間隔と時間刻みだからである。角柱の運動は周期性があるため、1 周期をピックアップして可視化処理の結果を考える。ここで、 $t = 0$ は角柱が y 方向に up-cross の 0 点になる時刻、 $t = \frac{1}{4}t_0$ は y 方向の振動の山を通る時刻、 $t = \frac{1}{2}t_0$ は山から 0 点に戻ってきた時刻、 $t = \frac{3}{4}t_0$ は y 方向の振動の谷を通る時刻である。

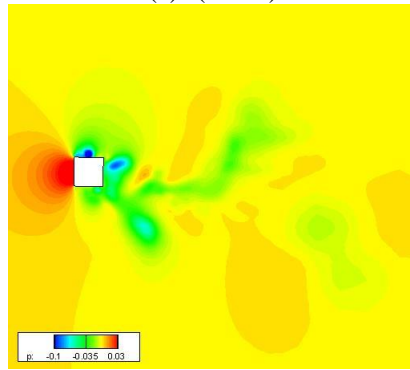
Fig.3.13 に示しているのは角柱の重心位置にある z 平面における圧力の分布である。 $t = 0$ のとき、角柱は y 軸方向に運動し、角柱の下方に圧力が低くなっており、角柱の運動を妨げるような力が働いていることがわかる。また、 $t = \frac{1}{4}t_0$ のとき、角柱は山を通り、y 軸方向に逆な方向に運動しようとしている。角柱の上方において圧力が低くなっており、角柱は運動する方向に逆な方向に圧力抵抗を受けることになる。 $t = \frac{1}{2}t_0$ と $t = \frac{3}{4}t_0$ においても、同じようなことが見て取れる。また、Fig.3.14 に示しているのは同平面における z 軸周りの渦度の分布である。流れは角柱の上流側の両端で剥離し、渦が放出されていることがわかる。角柱が運動しているため、放出された渦はその運動に応じた様子になっていることも見て取れる。

Fig.3.15 に示しているのは平面 $y=0$ における y 軸周りの渦度の分布である。渦が角柱の端部から放出されることが分かる。

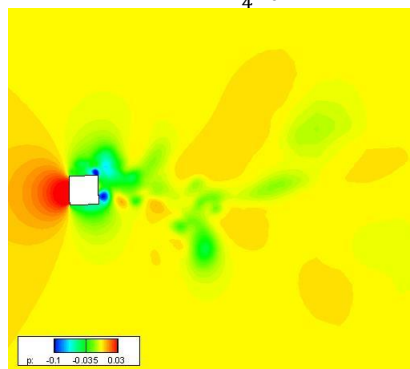
(ほかの断面における可視化処理の結果は Appendix を参照)



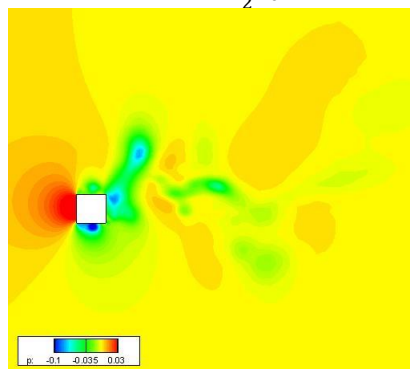
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4}t_0$)

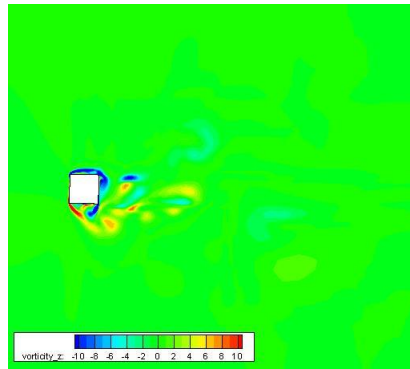


(c) ($t = \frac{1}{2}t_0$)

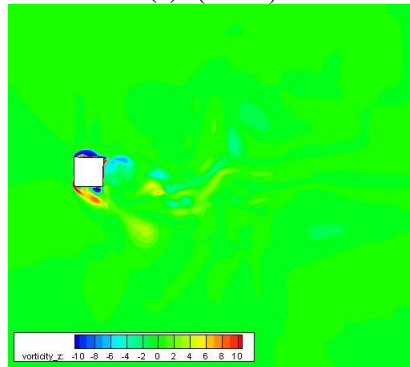


(d) ($t = \frac{3}{4}t_0$)

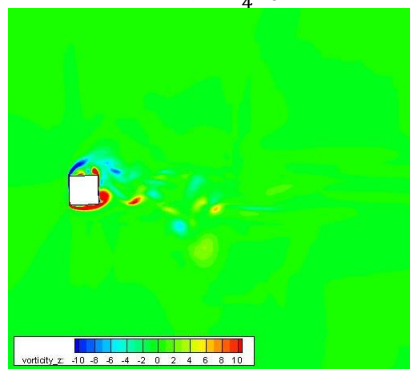
Figure 3.13 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布



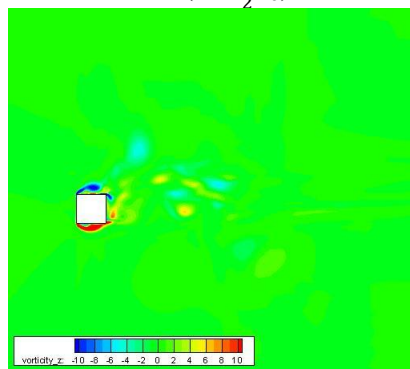
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4}t_0$)

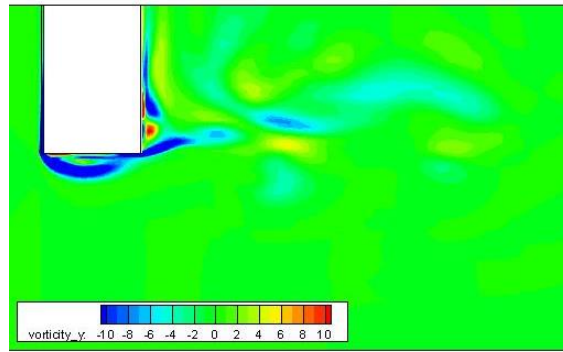


(c) ($t = \frac{1}{2}t_0$)

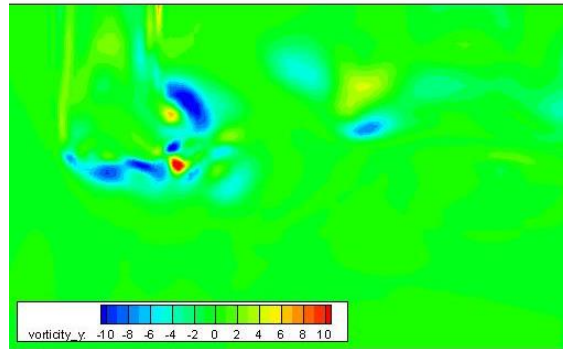


(d) ($t = \frac{3}{4}t_0$)

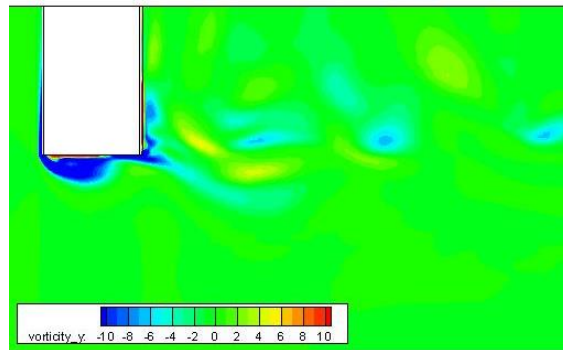
Figure 3.14 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布



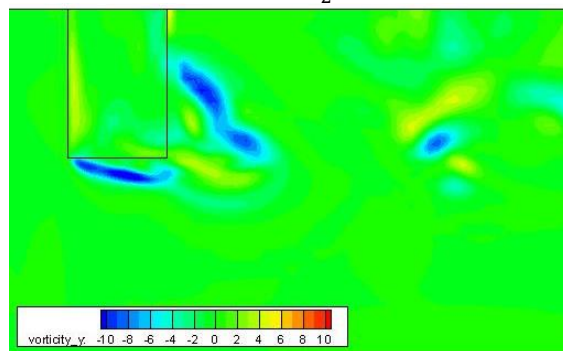
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4}t_0$)



(c) ($t = \frac{1}{2}t_0$)



(d) ($t = \frac{3}{4}t_0$)

Figure 3.15 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布

3.3.3 GCI と実験結果との比較

ここまでは、単独角柱運動シミュレーションの 9 ケースについて A_x/D 、 A_y/D 、 A_{yaw} が求まった。これから各値と先行研究[16]の実験結果と比較し、GCI を求めて格子と時刻刻みを決定する。

Fig.3.13、3.14、3.15 に示したように、 A_x/D 、 A_y/D および A_{yaw} は 9 ケース全体的に同じような値を示しており、実験結果と比較するだけで格子と時刻刻みを決めることはできない。そこで 3.3.1 節で述べたように、式(3.12)から式(3.19)までのように GCI を求め誤差範囲について考察する。VIM 解析において重要なパラメータとして y 方向の振幅 A_y/D が挙げられる。そのため、GCI を求める際、用いられる特性量 ϕ_k は A_y/D にする。これは先行研究[15]においても同じようなやり方を取っている。

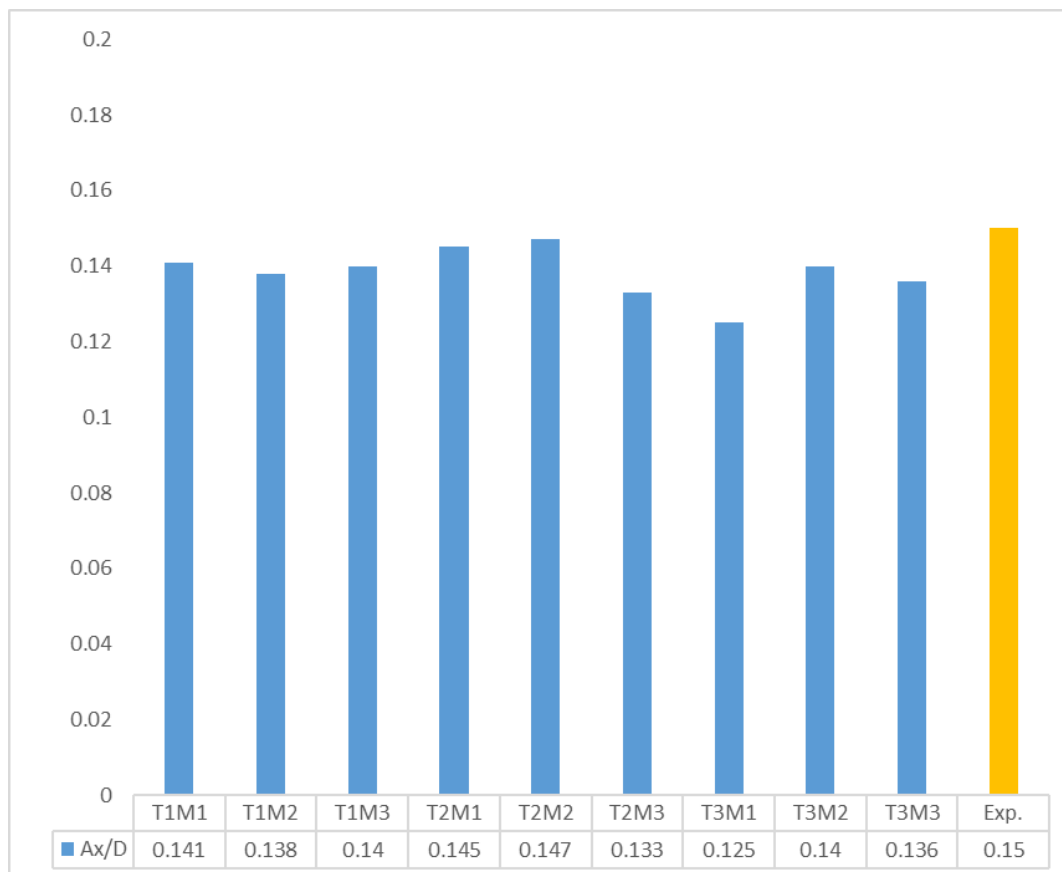


Figure 3.16 各ケースにおける A_x/D

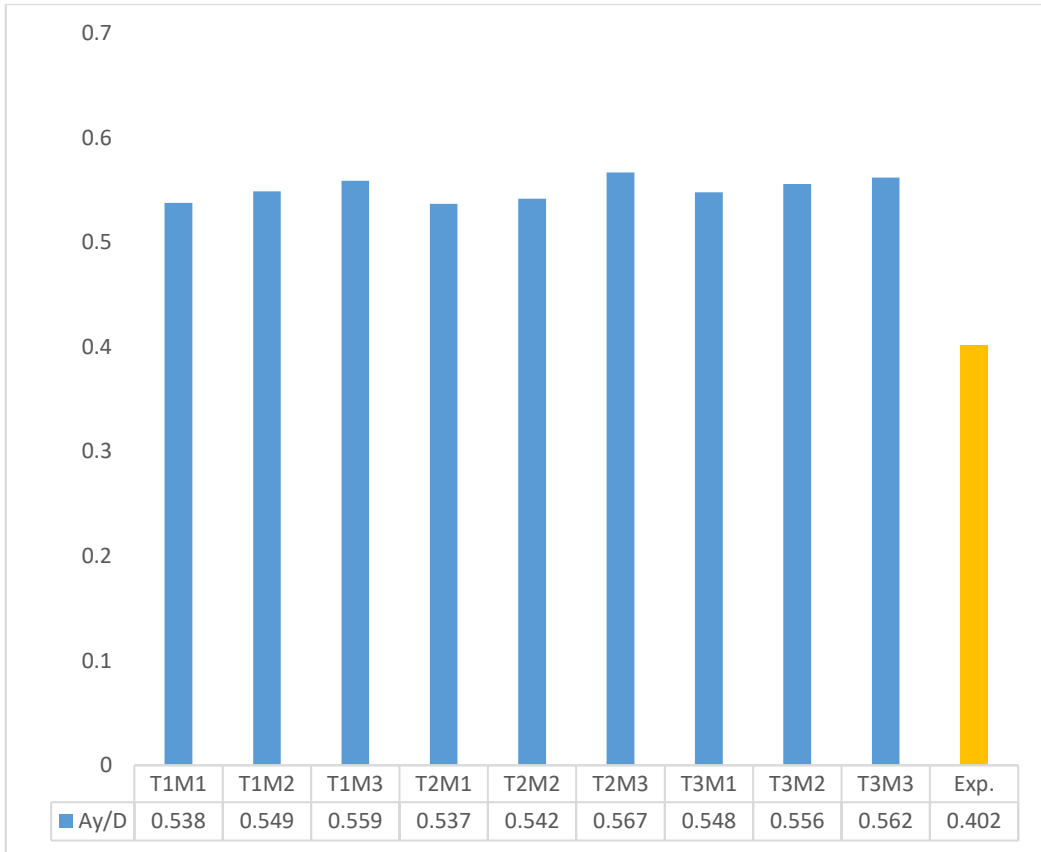


Figure 3.17 各ケースにおける Ay/D

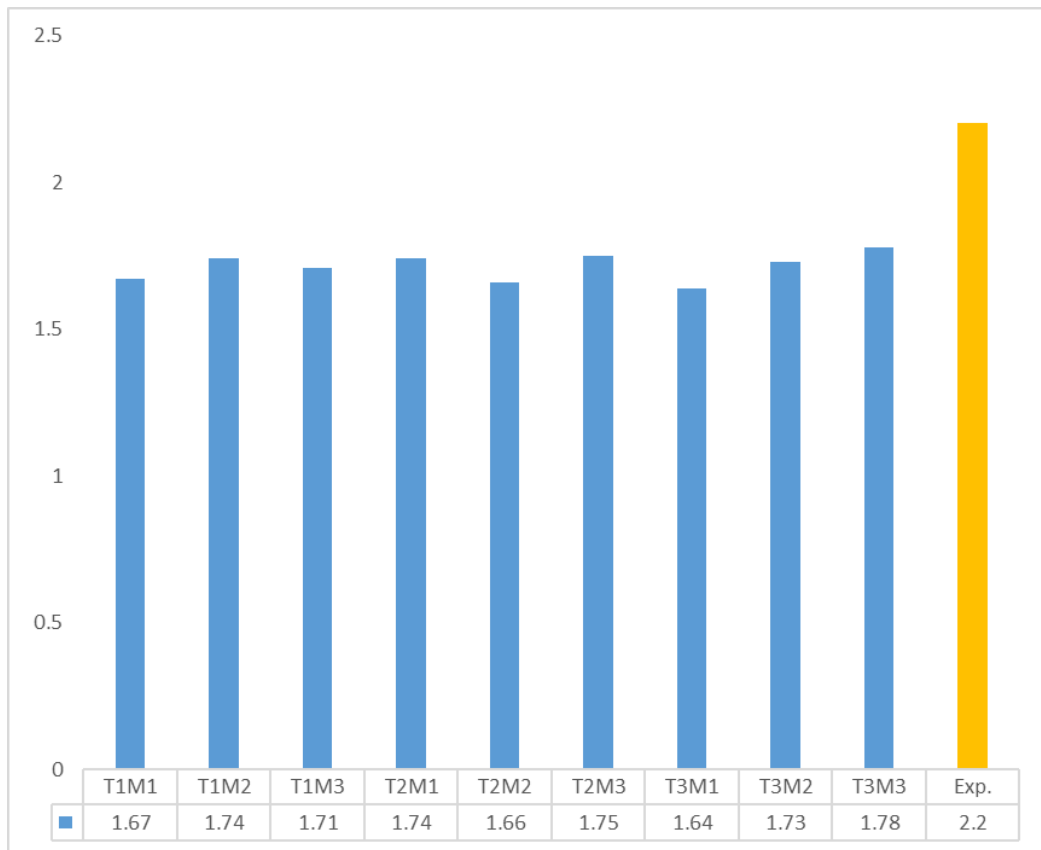


Figure 3.18 各ケースにおける Ayaw

また、各時間刻みにおける GCI の結果は Table3.9 のようになる。

Table3.9 各時間刻みにおける GCI

	T1(dt = 0.001s)	T2(dt = 0.002s)	T3(dt = 0.004s)
h_1	0.016	0.016	0.016
h_2	0.021	0.021	0.021
h_3	0.025	0.025	0.025
r_{21}	1.31	1.31	1.31
r_{32}	1.19	1.19	1.19
φ_1	0.538	0.537	0.548
φ_2	0.549	0.542	0.556
φ_3	0.559	0.567	0.562
ε_{21}	0.011	0.005	0.008
ε_{32}	0.01	0.025	0.006
p	1.59	9.95	0.705
φ_{ext}^{21}	0.518	0.537	0.510
e_a^{21}	0.02	0.00931	0.0146
e_{ext}^{21}	0.039	0.000667	0.0742
GCI	4.7%	0.8%	8.6%

これで各時間刻みにおける GCI が求まり、誤差範囲が分かるようになった。ただし、3.3.2 節で述べたように、T1 に関して計算コストが非常に高くなっているため、今回は参考用のデータとして載せるだけにする。残り T2 と T3 で、T2 の場合には真の CFD の結果は $\varphi_1 \pm 0.8\%$ の範囲内にあるのに対して、T3 は真の CFD の結果は $\varphi_1 \pm 8.6\%$ の範囲内にあると見て取れる。そのため、明らかに T2 の 3 ケースの結果が最も真の CFD の結果に近いといえる。

以上により、時間刻みを T2(dt=0.002s)にすると決めた。では、時間刻みを決めた後、M1、M2、M3 での格子にするか考える。T2 において各格子における Ay/D の値を Table3.10 に示す。

Table3.10 T2 において各格子における Ay/D

	M1(r1=1.1)	M2(r2=1.15)	M3(r3=1.2)	Exp.
T2(dt = 0.002s)	0.537	0.542	0.567	0.402

先述したように T2 において CFD 結果の真の値は $\varphi_1 \pm 0.8\%$ であり、つまり 0.5374 ± 0.0045 である。この真の値の範囲内であれば、格子の検証ができると考えられる。そうすると、T2M1 と T2M2、この 2 ケースにおいて計算結果が真の値の範囲内にあり、格子の検証ができたとわかる。ただし、Table3.5 に示したように、T2 の場合、M1 での計算コストは高くなっており、これからの複数角柱カラムの計算コストを考慮して格子 M1 は廃棄する。以降、格子を M2 にシミュレーションを行うと決めた。

しかし、先行研究[16]により y 方向の振幅 A_y/D について実験結果の不確かさが 10% であり、つまり、 0.402 ± 0.4 である。CFD 結果はどれもこの範囲内に入っていない。要するに、c。CFD の計算結果と EFD の結果とずれており、これは自由表面の影響を考慮しなかったことや運動を 3 自由度のみにしたことによるものだと考えられる。その影響が単独角柱の場合、非常に大きかったとわかる。そのため、Validation に関しては、次章で記述するように、4 本の角柱カラムを用いた数値シミュレーションを使用し行う。

格子と時間刻みの決定はこれで Verification ができたとし、格子拡張率について Fig.3.19 に示す。

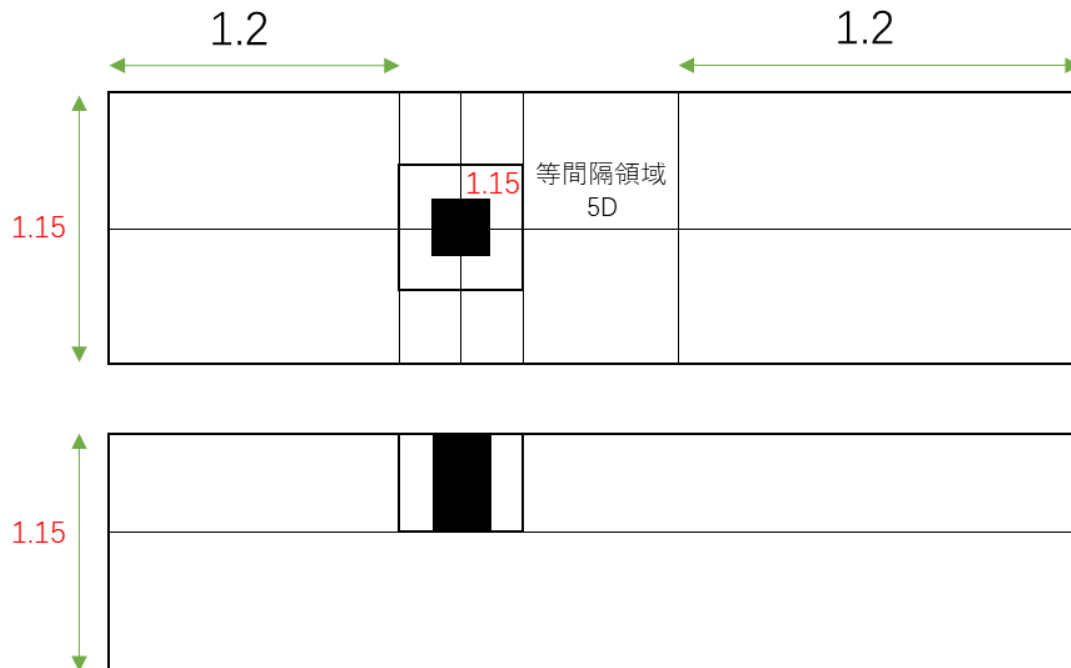


Figure 3.19 格子拡張率

第4章 複数角柱運動におけるポンツーン影響

前章では、単独角柱運動シミュレーションを計9ケースを行い、V&Vを行った。ただし、Verificationはできたが、Validationはできていない。そのため、本章ではまず4本の角柱カラムを用いて数値シミュレーションをし、Validationを行う。格子拡張率と時間刻みは前章で決めたT2M2を使用する。

4.1 ポンツーン材の配置

Validationを行った後、複数角柱カラム及びポンツーン材を加えた複数角柱カラムについて数値シミュレーションを行う。各ケースのポンツーン材の配置の仕方や各部分のネーミングについて説明する。

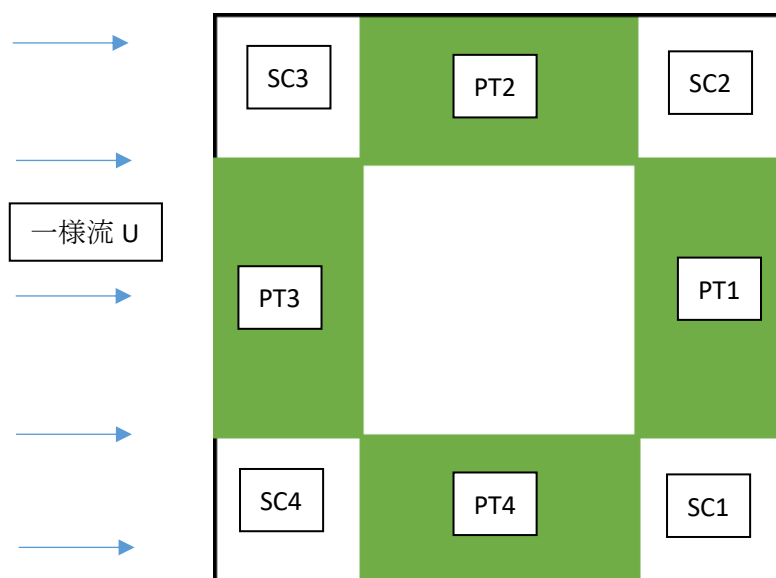
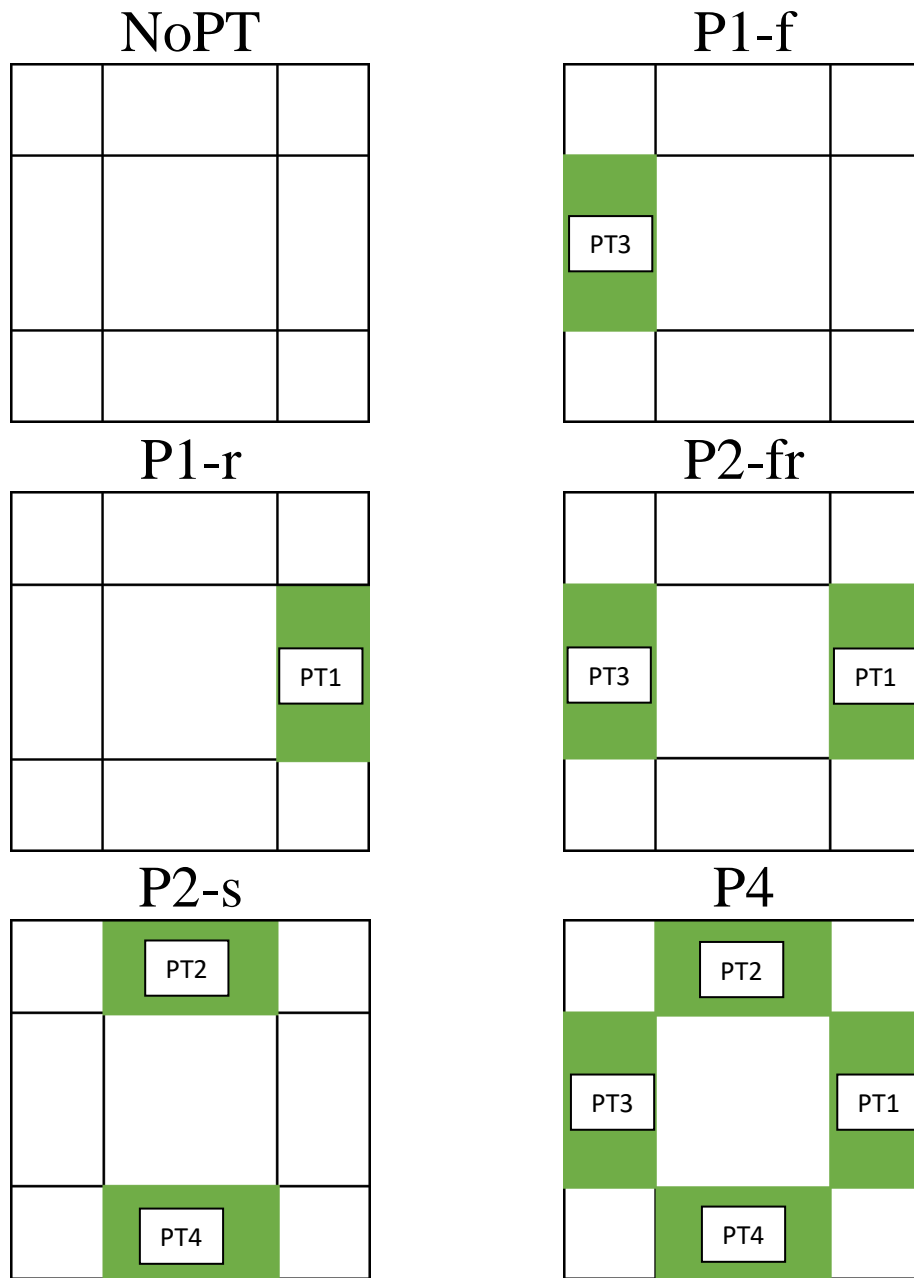


Figure 4.1 カラムとポンツーン材のネーミング

Fig.4.1 に示したように、緑色がカラム間にあるポンツーン材を意味する。一様流に平行な方向に配置されたポンツーン材はPT2、PT4と呼び、垂直な方向に配置されたのはPT1、PT3とネーミングする。ただし、PT3は上流側にあり、PT1は下流側にある。また、カラムに関しては、右下から反時計回りにSC1、SC2、SC3、SC4とネーミングする。SC3とSC4は上流側にあるカラムであり、SC1とSC2は下流側にあるカラムである。

また、各ポンツーン材が浮体構造物の動揺にどんな影響を与えているか考察するため、異なるポンツーン材配置をした計算ケースをTable4.1に示す。

Table4.1 異なるポンツーン材配置をした計算ケース



以上の各ケースにおいて、一様流は入射角度が 0 度で、左から右へ流れるとする。P1-f は上流側に PT3 だけ配置したケースに対し、P1-r は下流側に PT1 だけ配置したものである。また、P2-fr は上流側、下流側にそれぞれ PT3、PT1 を配置した計算ケースである。ほかにはポンツーン材 2 つある計算ケースは P2-s であり、一様流に水平な方向に両サイドにポンツーン材を配置した。残りはポンツーン材 4 つ配置した計算ケースとポンツーン材がない NoPT というような計算ケースになる。

このようにポンツーン材を配置した数値シミュレーションを行うことによって各ポンツーン材の役割について考察することができると考えられる。

4.2 4本の角柱カラムのみの運動シミュレーション

これからは、ポンツーン材を加えずに4本の角柱カラムのみについて数値シミュレーションを行い、Validationを行う。

4.2.1 計算領域と境界条件と係留システム

4本の角柱カラムの数値計算について説明する。

計算領域と境界条件は、基本的に単独角柱運動シミュレーションと同様に設定する。また、4本の角柱カラムのみの運動シミュレーションを行う目的が実験結果と比較して同じ傾向を示すかどうか見ることであるため、異なる換算流速の条件のもとで3ケースの計算を行うことになる。計算に関する各パラメータはTable4.2に示す。また、計算領域と境界条件はFig.4.2とTable4.3に示す。

Table4.2 パラメータ設定

Parameter		Value
Diameter	D	0.25[m]
Aspect ratio	Ar	1.5
Distance between columns	S/D	4
Cell number	N	2374880
Solver		pimpleDyMfoam
Turbulence model		IDDES
Degree of freedom		Surge, Sway, Yaw
incident angle	θ	0-deg
Time step	dt	0.002[s]

計算領域に関しては、inletから4本の角柱カラムの中心までが20Dで、中心からoutletまでが40Dである。また、幅が14Dであり、カラム間隔が前述したようにS/D=4である。単独角柱運動シミュレーションと違うのは複数カラムの場合、徐ら[23]は渦干渉が起こり、渦の放出が複雑になると主張したので、計算領域の設定を考える際、渦をより正確に解像するため、下流側の角柱カラムから等間隔領域10D程度に設定した。それからアスペクト比Arは単独角柱運動シミュレーションの場合と同様に1.5である。底面からbottomまでは2Dとする。

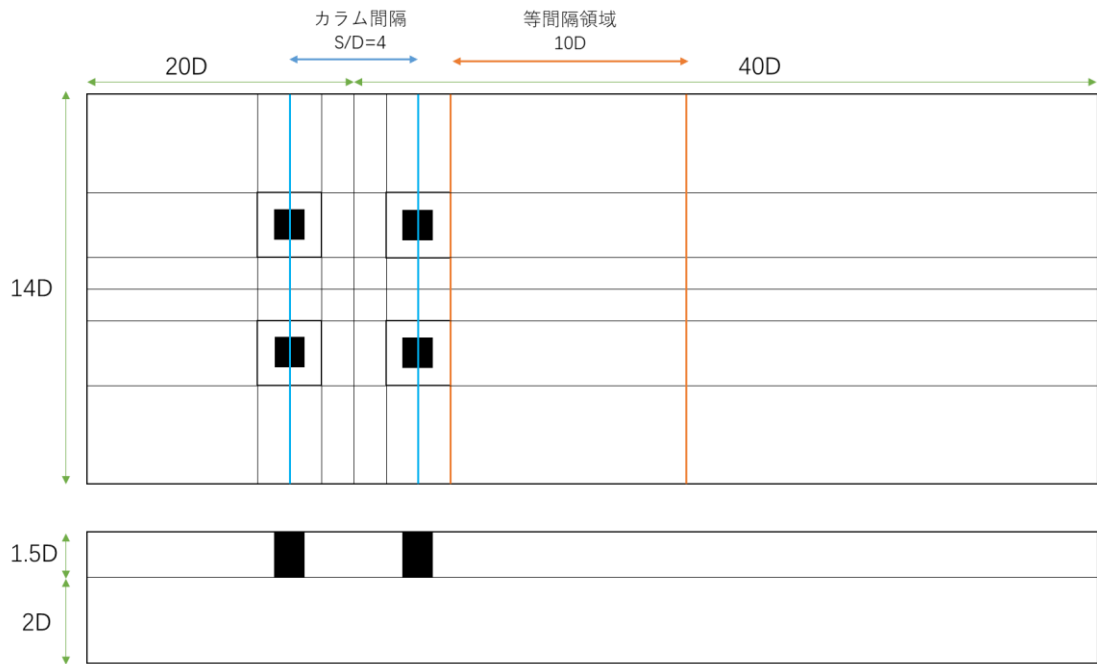


Figure 4.2 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける計算領域

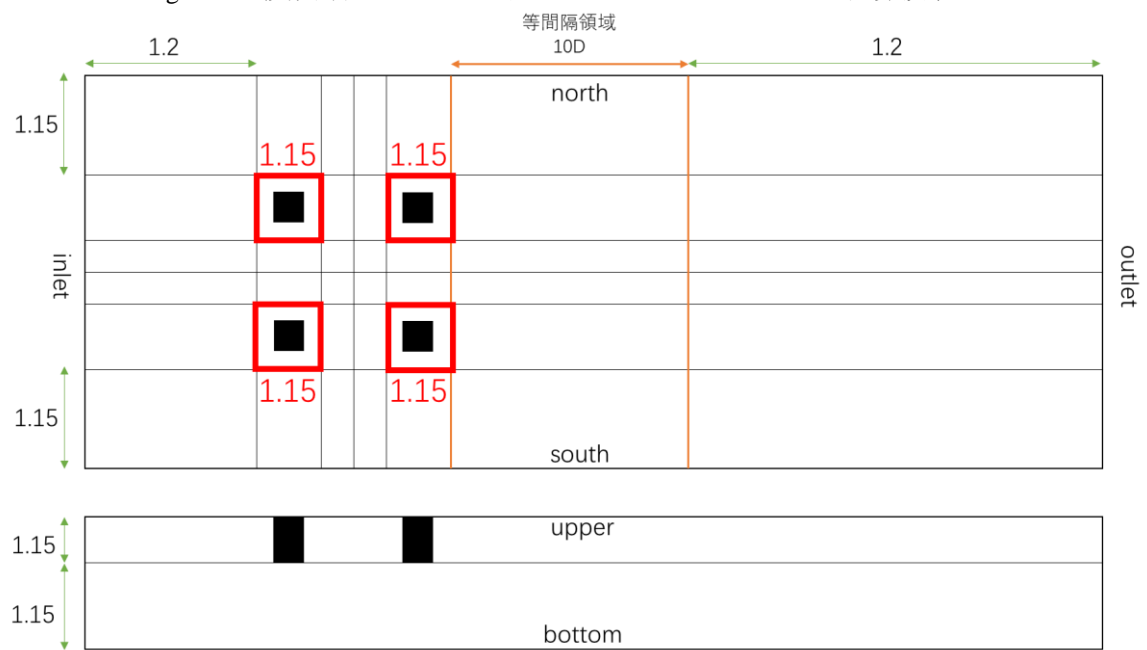


Figure 4.3 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける格子拡張率

Table4.3 境界条件

boundary	Pressure	Velocity
inlet	zero gradient	fixed value
outlet	fixed value	zero gradient
south	zero gradient	free slip
north	zero gradient	free slip
upper	zero gradient	free slip
bottom	zero gradient	free slip

また、係留システムに関しては、Fig.4.4 のようになる。ばねの設定は単独角柱運動シミュレーションの場合と同じである。

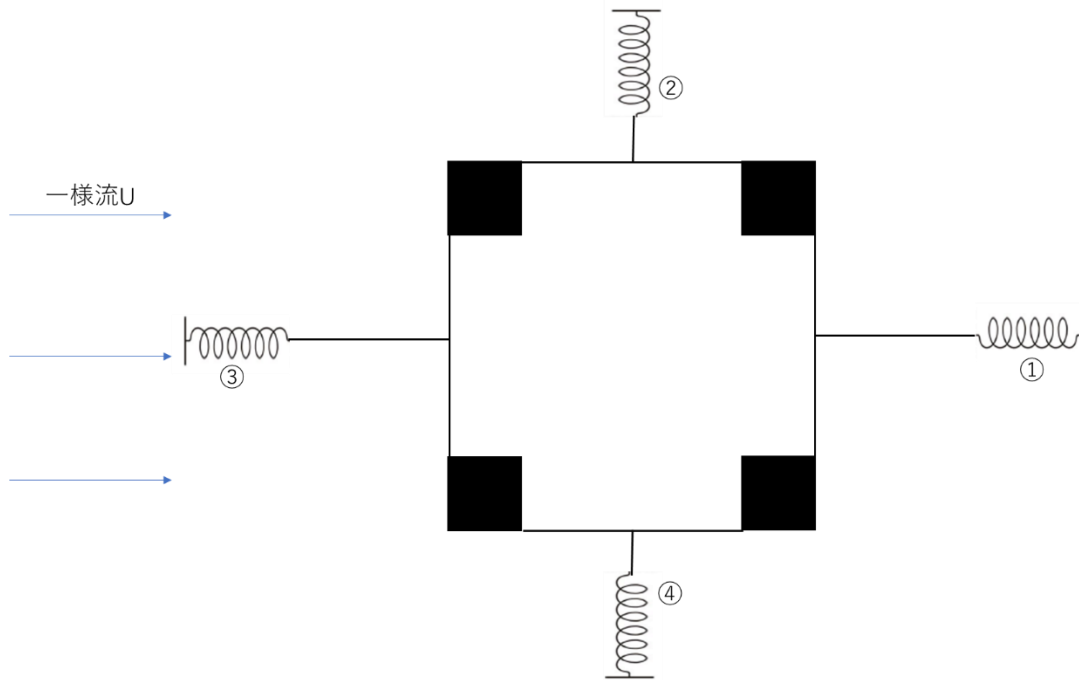


Figure 4.4 複数角柱カラムの運動シミュレーションにおける係留システム

各ばねのパラメータは Table4.4 に示す。

Table4.4 係留ばねのパラメータ設定

	ばね①	ばね②	ばね③	ばね④
L0[mm]	200	225	200	225
Lcable[mm]	534	200	534	200
K[N/m]	7.44	9.20	7.44	9.20
Pretension[N]	7.63	4.80	7.63	4.80

ここで、L0 は自然長で、Lcable はカラムからばねまでのワイヤの長さである。また、K はばね定数である。

4.2.2 境界層解像度と格子&時間刻み

境界層解像度は単独角柱運動シミュレーションの節で述べたように、乱流モデル IDDES モデルを使用するため、 y^+ は 30 程度にする。

また、格子拡張率と時間刻みは V&V を行った結果を用いて $r=1.15$ と $dt=0.002s$ に設定した。格子拡張率の詳細は前節の Fig.4.3 に示している。格子図は Fig.4.5 のようになる。

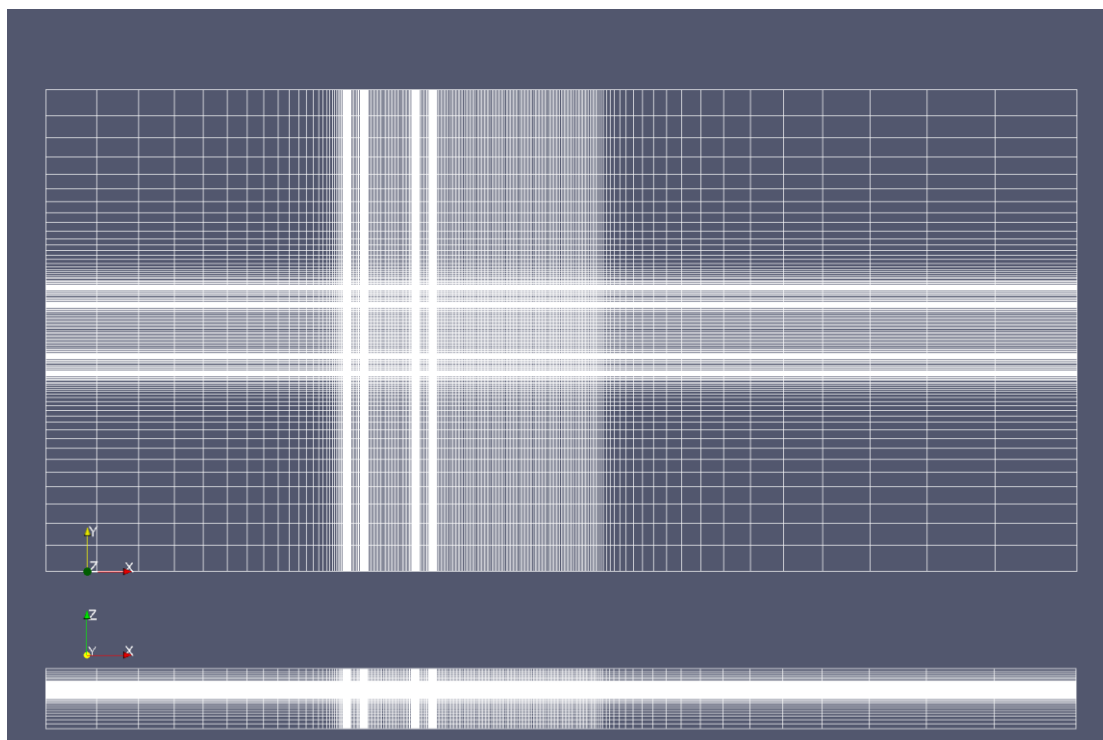


Figure 4.5 4 本角柱カラムの格子図

4.2.3 計算結果

これから異なる換算流速 V_r での計算結果を説明する。

まず換算流速 V_r について紹介する。換算流速 V_r は下式のように求める。

$$V_r = UT_0/D \quad (4.1)$$

ただし、 T_0 は浮体構造物の固有周期を意味する。換算流速 V_r を求める際、 y 方向の振幅に対する V_r について、 T_0 はスウェーをするときの固有周期であるが、 yaw に対する V_r について、 T_0 はヨーをするときの固有周期である。わかりやすく式を書き直すと、

$$\begin{aligned} V_{r-y} &= \frac{UT_{0y}}{D} \\ V_{r-yaw} &= \frac{UT_{0yaw}}{D} \end{aligned} \quad (4.2)$$

式(4.2)のようになる。ここで、 T_{0y} はスウェーをするときの固有周期であり、 T_{0yaw} はヨーをするときの固有周期である。

固有周期 T_{0y} の算出は数値シミュレーションを用いて、静水中で y 方向に初期加速度をかけて計算するのである。また、 T_{0yaw} は z 軸周りに初期トルクをかけて計算する。Fig.4.6 と Fig.4.7 にそれぞれに計算結果の時系列を示す。

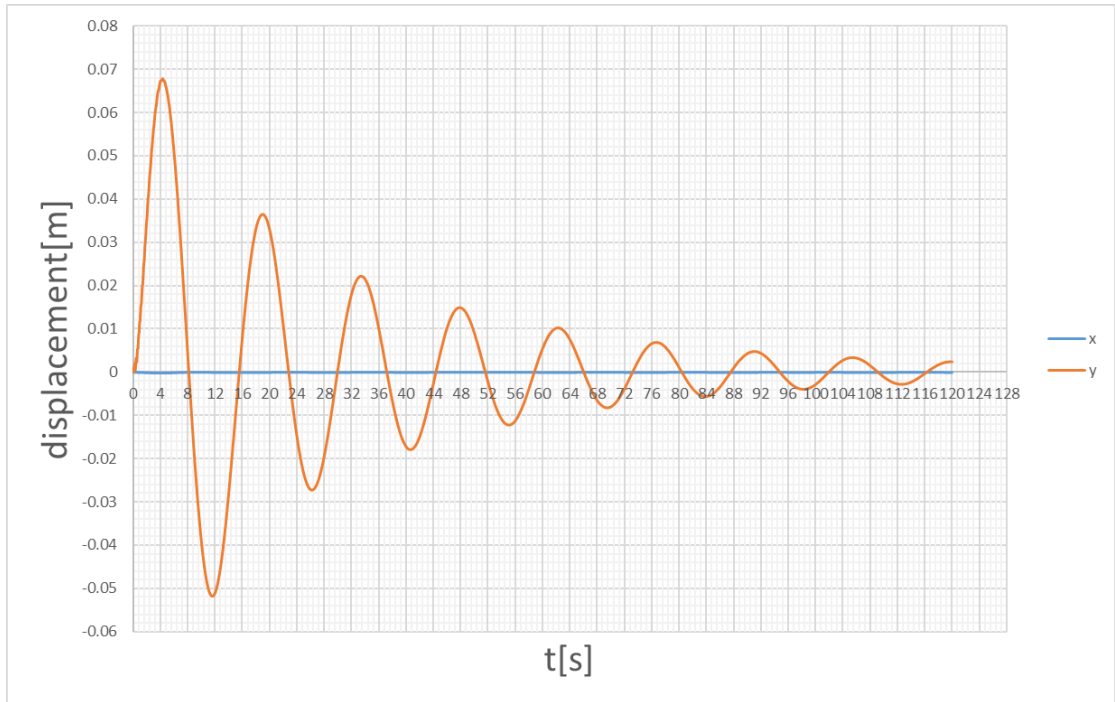


Figure 4.6 T_{0y} に関する計算結果

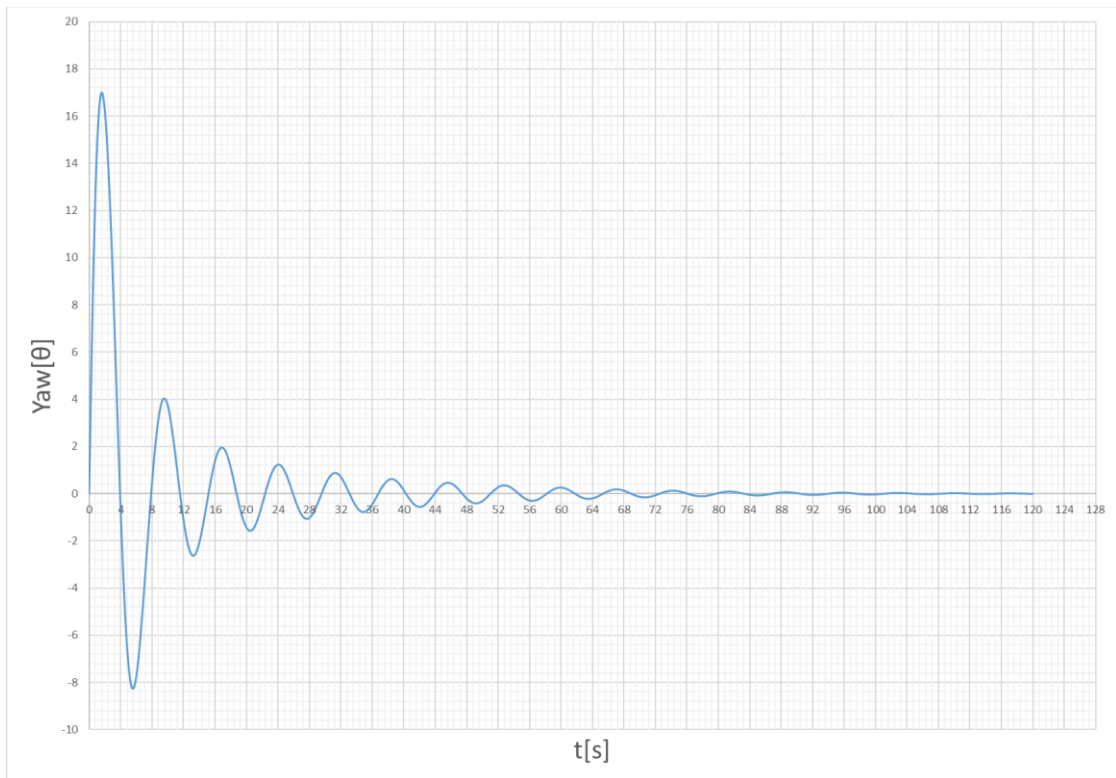


Figure 4.7 T_{0yaw} に関する計算結果

以上の Figure から算出した 4 本の角柱カラムからなる構造物について固有周期は

$$T_{0y} = 14.4s$$

$$T_{0yaw} = 7.2s$$

のようになる。これらは up-cross になる時刻を考えた結果になる。また、実験[16]では

$$T_{0y} = 14.4s$$

$$T_{0yaw} = 7.0s$$

となっている。ほとんど一致していることがわかる。

次は、一様流 U の速度を変え異なる換算流速 V_r の条件のもとで計 3 ケースの計算について結果の整理をする。Table4.5 に示したのは x 方向の振幅を無次元化したもの A_x/D 、y 方向の振幅を無次元化したもの A_y/D 、yaw の振幅 A_{yaw} である。

Table4.5 各ケースに関する CFD の結果

	① $V_{r-y} = 5.9$ $V_{r-yaw} = 4$	② $V_{r-y} = 10.4$ $V_{r-yaw} = 7.1$	③ $V_{r-y} = 19.8$ $V_{r-yaw} = 8.8$
Ax/D	0.034	0.070	0.153
Ay/D	0.151	0.476	0.692
Ayaw	0.701	2.88	3.71

また、先行研究[16]により実験結果を Table4.6 に示す。

Table4.6 各ケースに関する EFD 結果

	① $V_{r-y} = 5.9$ $V_{r-yaw} = 4$	② $V_{r-y} = 10.4$ $V_{r-yaw} = 7.1$	③ $V_{r-y} = 19.8$ $V_{r-yaw} = 8.8$
Ax/D	0.04	0.08	0.16
Ay/D	0.18	0.49	0.6
Ayaw	0.75	2.8	3.6

これらの結果を Fig.4.8、Fig.4.9、Fig.4.10 に示して比較する。特に本研究において重要なパラメータである A_y/D について実験結果の不確かさをエラーバーで示している。

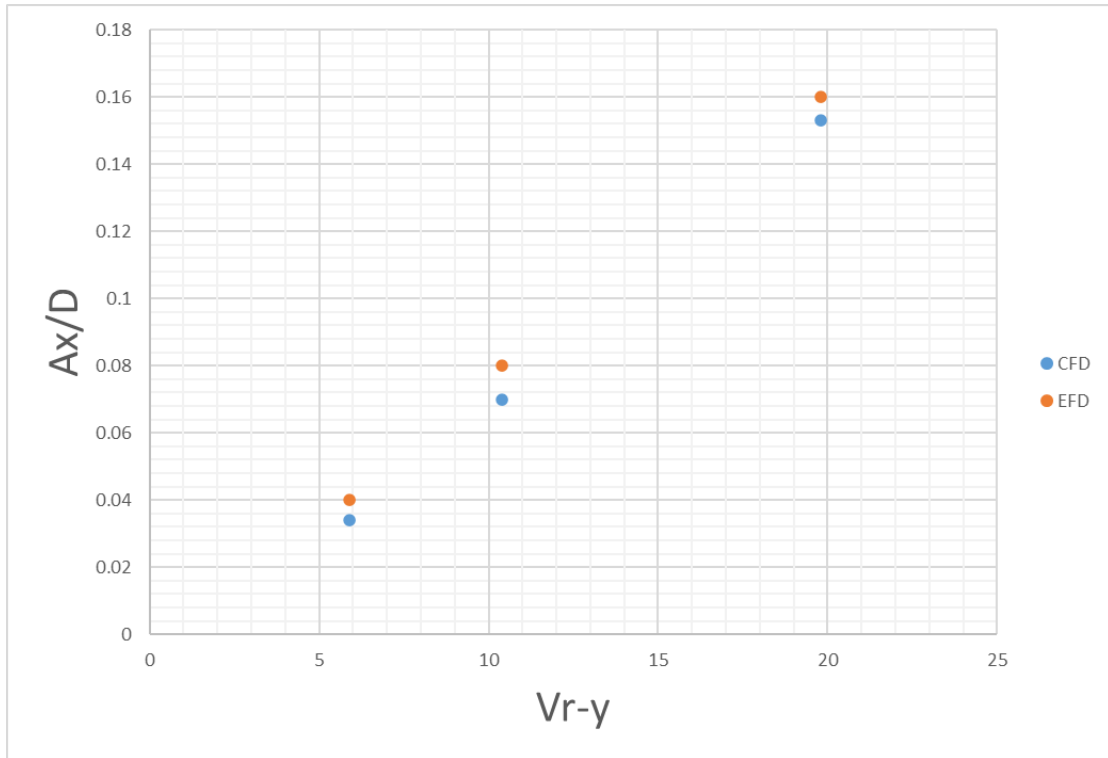


Figure 4.8 Ax/D について CFD と EFD[16]の比較

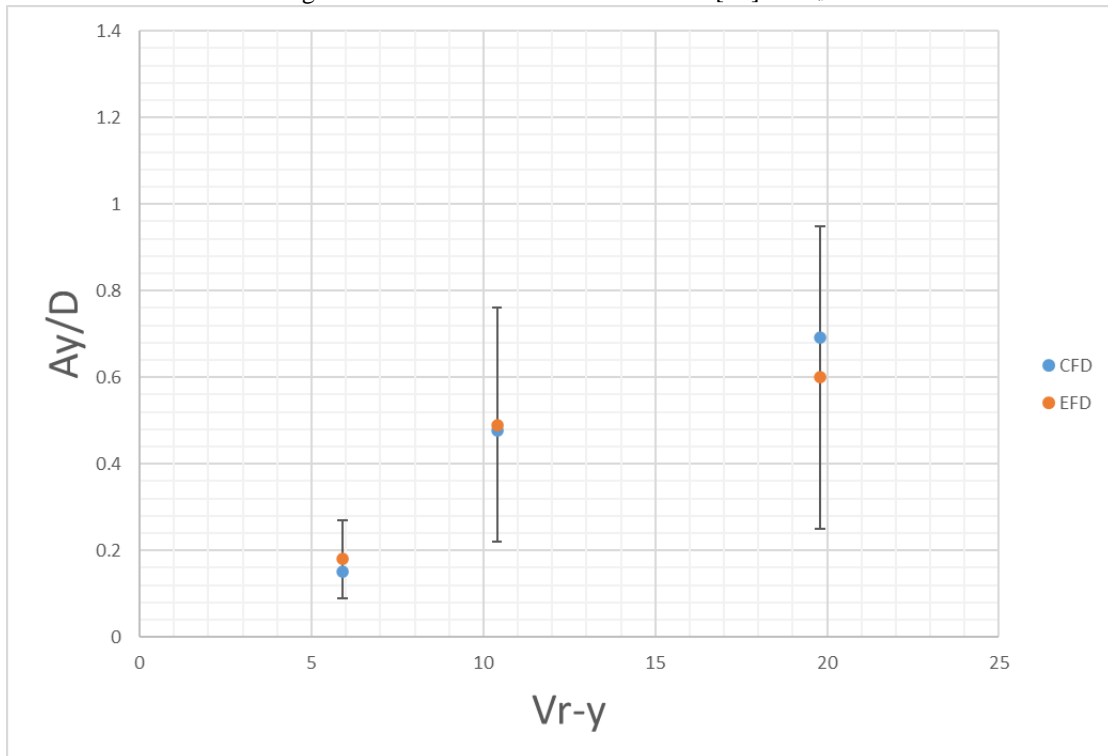


Figure 4.9 Ay/D について CFD と EFD[16]の比較

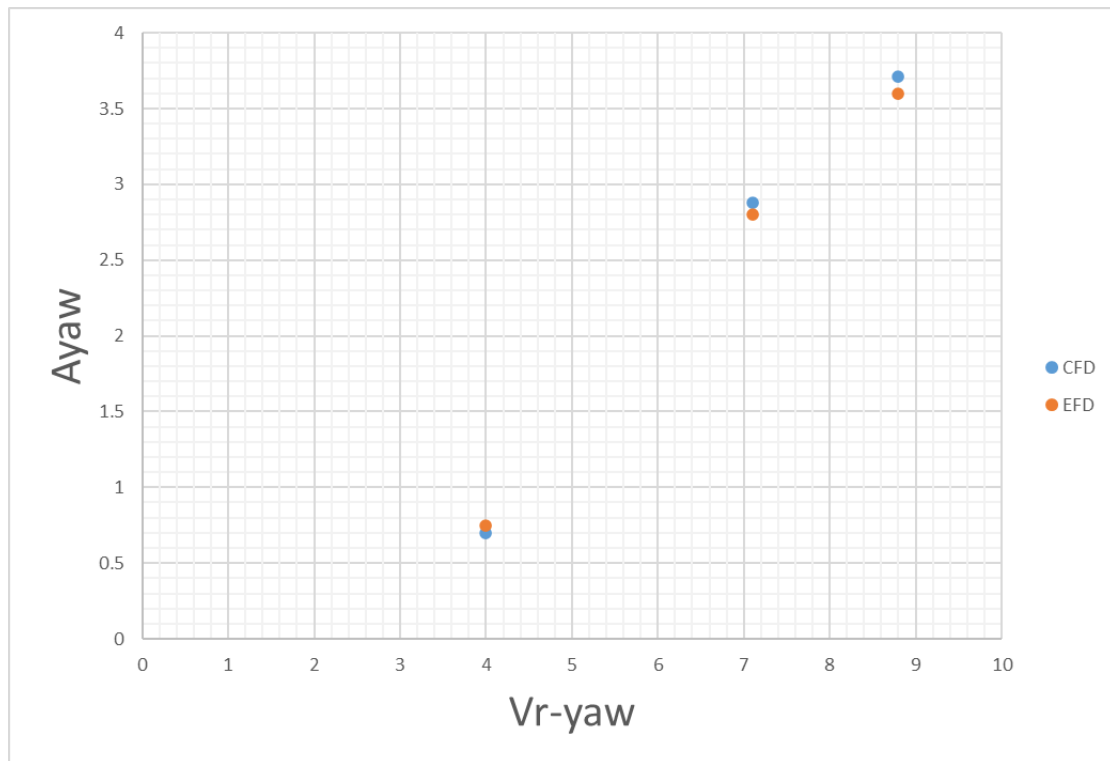


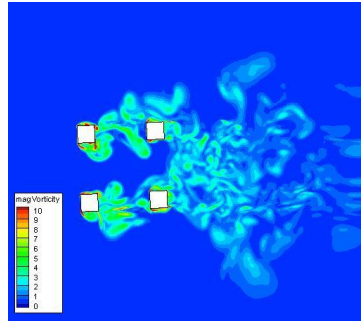
Figure 4.10 Ayaw について CFD と EFD[16]の比較

Ax/D について、数値シミュレーションの結果は実験結果よりは全体的に低くなっていることが見て取れる。それに対して、Ay/D は $V_{r-y} = 19.8$ において数値シミュレーションの結果は実験結果よりは 15% ほど低くなっているが $V_{r-y} = 5.9$ と $V_{r-y} = 10.4$ の場合には数値シミュレーションの結果は高くなっている。また、Ayaw について、3 ケースにおいて、角度の振幅が 4° 以下になっており、ヨーイングはほとんどしていないことが分かる。数値シミュレーションの結果に関して、Ax/D、Ay/D、Ayaw とともに実験結果と同じように換算流速が大きくなるにつれ、大きくなる傾向にあることがわかった。本研究において重要なパラメータ Ay/D についてももう少し考える。Fig.4.9 を見てわかるように、数値シミュレーションの結果は実験結果と差はあるが実験結果の不確かさの範囲内にある。これで T2M2 の時間刻みと格子に関して、Validation ができた。

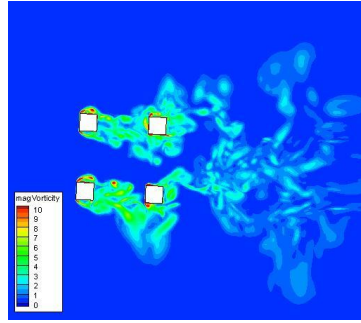
次は可視化処理の結果について説明する。Fig.4.11 と Fig.4.12 と Fig.4.13 に示しているのは $V_{r-y} = 10.4$ のケースについて可視化処理をしたものである。3.3.2 ですすでに述べたが、 $t = 0$ は角柱が y 方向に up-cross の 0 点になる時刻、 $t = \frac{1}{4}t_0$ は y 方向の振動の山を通る時刻、 $t = \frac{1}{2}t_0$ は山から 0 点に戻ってきた時刻、 $t = \frac{3}{4}t_0$ は y 方向の振動の谷を通る時刻である。

Fig.4.11 を見てわかるように、上流側にある角柱カラムから放出された渦が下流側にある角柱カラムにあたっている。そのため、下流側にある角柱カラムにおける圧力差が緩和され、圧力抵抗が上流側にある角柱カラムよりは小さくなっていることが考えられる。これは Fig.4.12 の圧力分布からも推測できる。また、Fig.4.13 から下流側にある角柱カラムの端部から放出される渦は上流側にある角柱カラムの端部から放出される渦よりは渦度が小さくなっていることが見て取れる。これは下流側にある角柱カラムにおける圧力の変動が小さいということを意味すると考えられる。

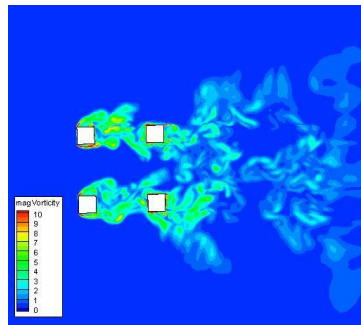
(ほかの断面における可視化処理の結果は Appendix を参照)



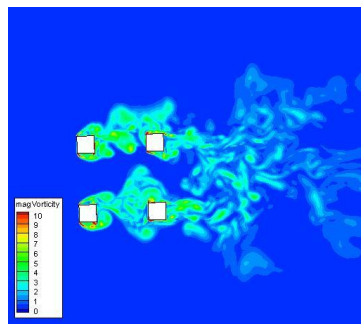
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4} t_0$)

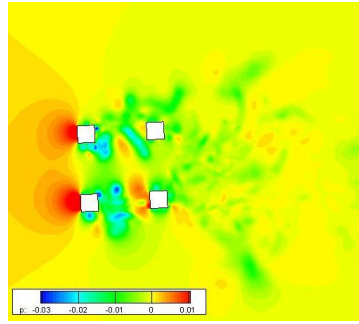


(c) ($t = \frac{1}{2} t_0$)

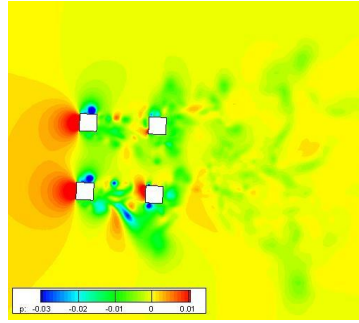


(d) ($t = \frac{3}{4} t_0$)

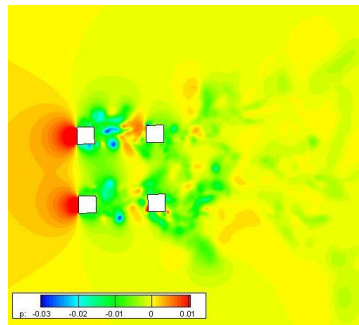
Figure 4.11 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布



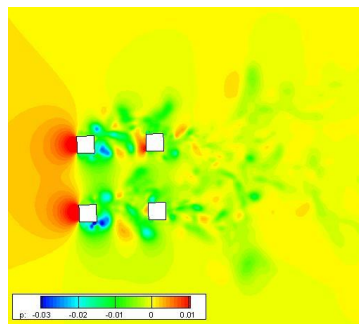
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4}t_0$)

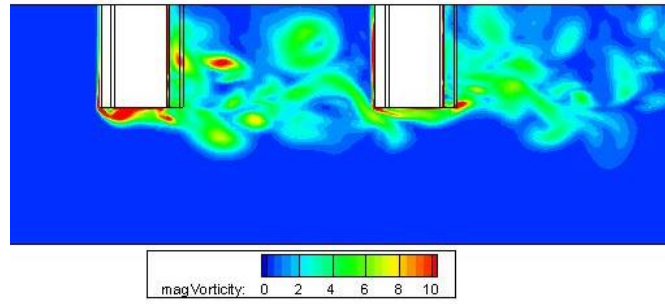


(c) ($t = \frac{1}{2}t_0$)

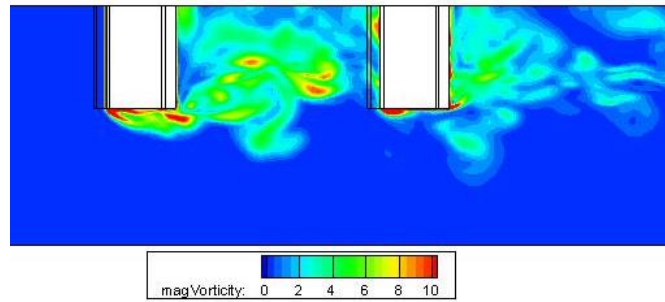


(d) ($t = \frac{3}{4}t_0$)

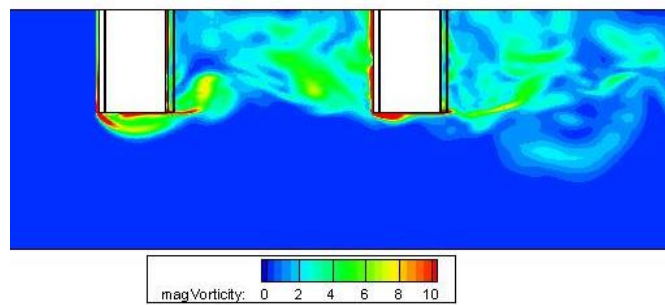
Figure 4.12 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布



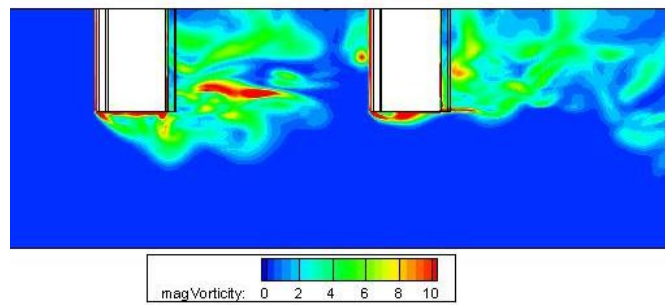
(a) ($t = 0$)



(b) ($t = \frac{1}{4}t_0$)



(c) ($t = \frac{1}{2}t_0$)



(d) ($t = \frac{3}{4}t_0$)

Figure 4.13 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布

4.3 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーション

ここまでは単独角柱運動シミュレーションで格子拡張率と時間刻みの Verification を行い、その後 4 本の角柱カラムについて運動シミュレーションをし、格子拡張率と時間刻みの Validation をした。以上により、T2M2 という時間刻み $dt=0.002s$ 、格子拡張率 $r=1.15$ の計算条件について、V&V を行い時間解像度と空間解像度を決定した。これからその格子拡張率と時間刻みを用いた 4 本の角柱カラムにポンツーン材を加えた運動シミュレーションは妥当な結果が得られると考えられる。

4.3.1 計算領域と境界条件と係留システム

4.1 節で述べたように、各ポンツーン材がどのように浮体構造物の動揺に影響を及ぼすか見るため、異なるポンツーン材の配置をした。4.2 節ですでに数値シミュレーションを行ったポンツーン材のないケースを入れて計 6 ケースについてこれから計算していく。

まずは計算条件について各パラメータの設定を Table4.7 に示す。

Table4.7 パラメータ設定

Parameter		Value
Diameter	D	0.25[m]
Aspect ratio	Ar	1.5
Distance between columns	S/D	4
Solver		pimpleDyMfoam
Turbulence model		IDDES
Degree of freedom		Surge, Sway, Yaw
Reduced velocity	Vr	10.4
Thickness of pontoon	P/D	0.5
incident angle	θ	0-deg

先行研究[16]により、換算流速 V_r が 10 以上になると異なるポンツーン材配置をした構造物の動揺は違いがはっきりわかってくる。ただし、 V_r が大きくなるにつれ、不確かさも大きくなることは 4.2 節でわかったので、 V_r の値は 10.4 にした。要するに、ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションは換算流速 V_r をピンポイントに絞って行う。また、先行研究[16]では、ポンツーン材の厚さを調整したケースがあるが、そうするとポンツーン材の役割を考察するのが難しくなるため、今回は固定して $P/D=0.5$ にする。ただし、 P はポンツーン材の厚さである。

計算領域と境界条件と係留システムは 4 本の角柱カラムのみの場合と同じように設定する。緑色になっている部分はポンツーン材を意味する。

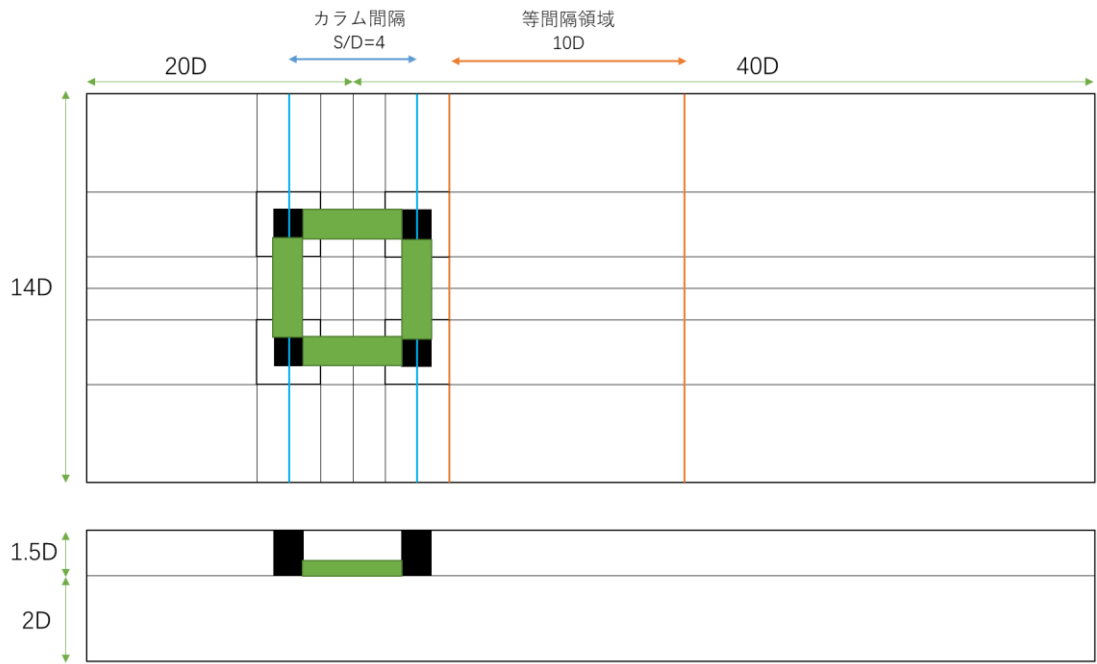


Figure 4.14 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける計算領域

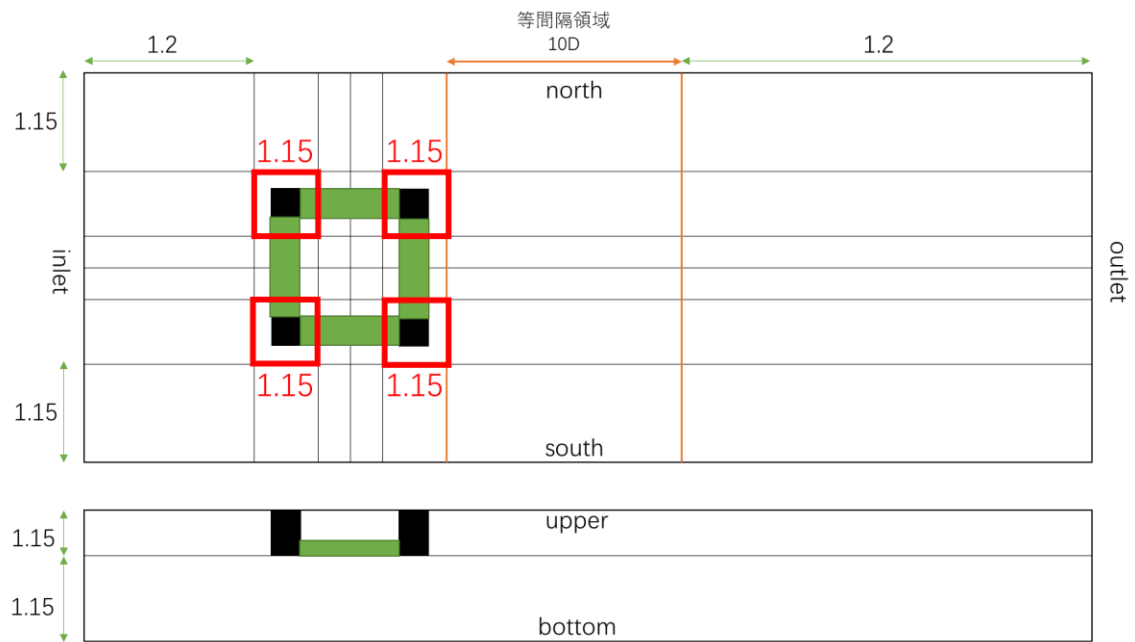


Figure 4.15 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける格子拡張率

Table4.8 境界条件

boundary	Pressure	Velocity
inlet	zero gradient	fixed value
outlet	fixed value	zero gradient
south	zero gradient	free slip
north	zero gradient	free slip
upper	zero gradient	free slip
bottom	zero gradient	free slip

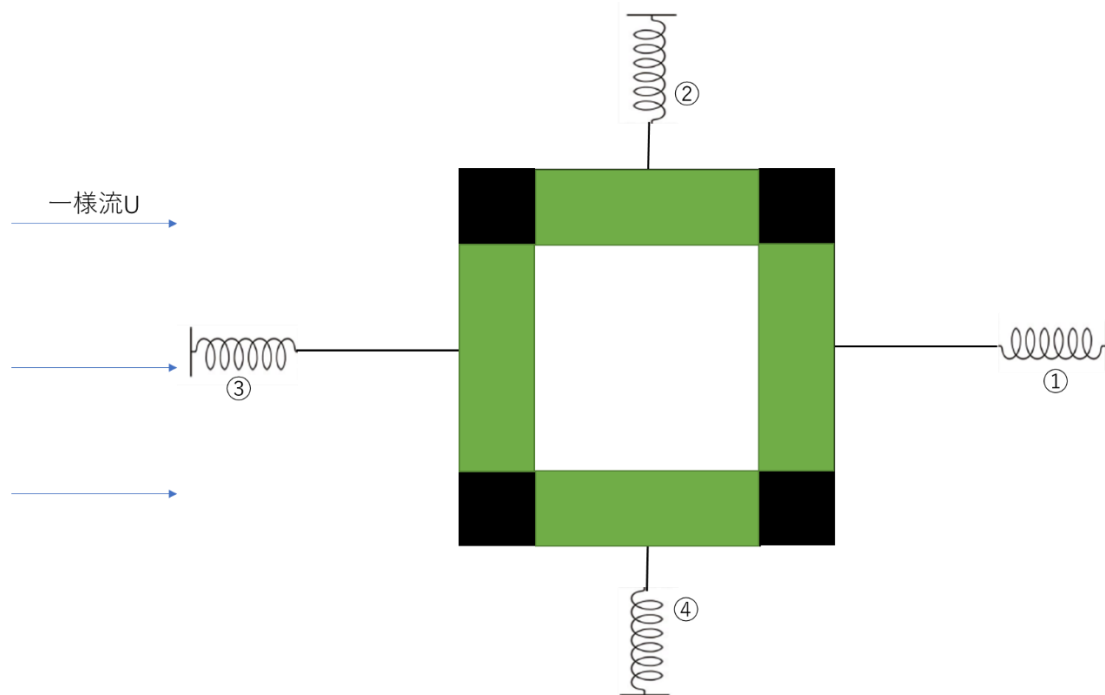


Figure 4.16 ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーションにおける係留システム

また、各ばねのパラメータは Table4.9 に示す。

Table4.9 係留ばねのパラメータ設定

	ばね①	ばね②	ばね③	ばね④
L0[mm]	200	225	200	225
Lcable[mm]	534	200	534	200
K[N/m]	7.44	9.20	7.44	9.20
Pretension[N]	7.63	4.80	7.63	4.80

ここで、L0 は自然長で、Lcable はカラムからばねまでのワイヤの長さである。また、K はばね定数である。

4.3.2 境界層解像度と格子&時間刻み

4本の角柱カラムのみの場合と同様に、乱流モデル IDDES モデルを使用するため、 y^+ は 30 程度にする。

また、格子拡張率と時間刻みは V&V を行った結果を用いて $r=1.15$ と $dt=0.002s$ に設定した。格子拡張率の詳細は前節の Fig.4.12 に示している。ただし、ポンツーン材を加えることによってポンツーン材について境界層の解像が必要になってくるので格子の数がちがうようになる。ここで、各ケースについて格子の数を示す。

Table4.10 異なるポンツーン材配置をした各ケースの格子数

	NoPT	P1-f	P1-r	P2-fr	P2-s	P4
Cell number	2374880	2349580	2349580	2324280	2324280	2273680

ポンツーン材を加えた場合の格子図は Fig.4.14 と Fig.4.15 に示す。

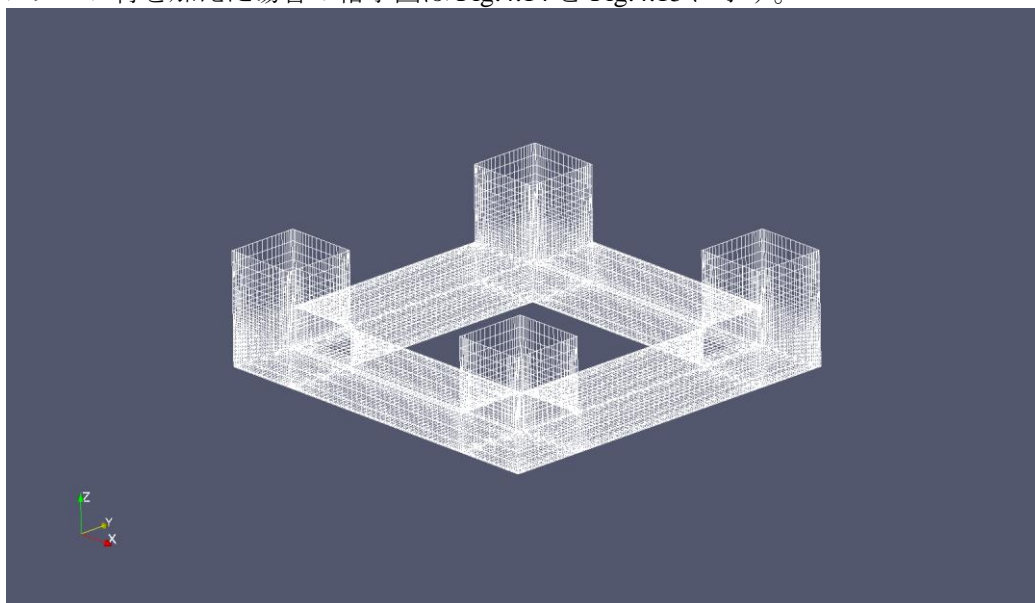


Figure 4.17 角柱カラムとポンツーン材の格子図

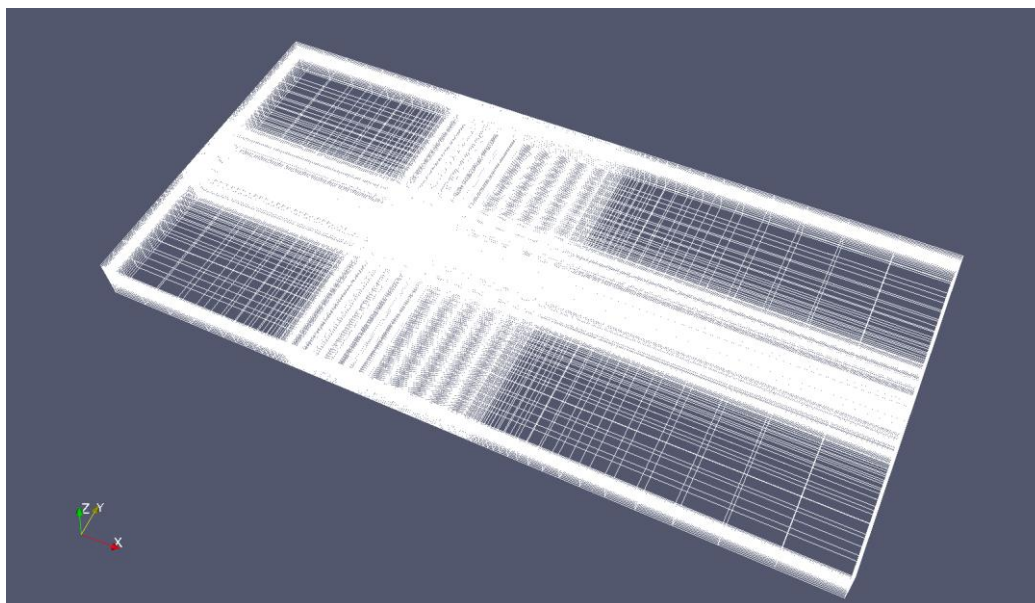


Figure 4.18 計算領域全体の格子俯瞰図

これらはケース P4 の場合、つまりポンツーン材 4 つを加えた時の格子図になる。

4.3.3 計算結果

これからポンツーン材を加えた各ケースの計算結果を説明する。

Table4.11 各ケースにおける振幅の計算結果

	NoPT	P1-f	P1-r	P2-fr	P2-s	P4
Ax/D	0.0700	0.0770	0.0548	0.0630	0.0517	0.0588
Ay/D	0.476	0.586	0.549	0.525	0.364	0.357
Ayaw	2.88	1.50	1.06	1.05	0.718	0.689

Table4.11 に示したのは各ケースにおける x 方向の振幅の無次元数 Ax/D と y 方向の振幅の無次元数 Ay/D とヨー方向の角度の振幅である。各ケースのポンツーン材の配置の仕方とネーミングの関係性はすでに 4.1 節で紹介した。(Table4.1 を参照)

Table4.12 各ケースにおける y 方向の振動周期と y 方向の固有周期

	NoPT	P1-f	P1-r	P2-fr	P2-s	P4
Ty[s]	19.34	18.64	18.59	18.33	17.47	17.40
T0y[s]	14.8	15.2	15.2	15.8	15.8	16.3

Table4.12 に示したのは各ケースにおける y 方向の振動周期と各ケースの構造物の固有周期である。ここで、Ty は y 方向の振動周期で T0y は固有周期を意味する。Ty は時系列のグラフから読み取ったものである。ただし、時系列のグラフは Appendix を参照。T0y は 4.2.3 節で説明したように静水中で y 方向に初期加速度をかけてシミュレーションをし、時系列のグラフから算出するものである。

次に示すのは各ケースにおいて各カラムと各ポンツーン材が受ける力である。

Table4.13 各ケースにおいて各要素が受ける圧力抵抗の x, y, z 成分の平均値

	NoPT	P1-f	P1-r	P2-fr	P2-s	P4
SC1Fx	0.878	0.715	1.103	0.701	0.704	0.591
SC1Fy	0.029	0.026	-0.329	-0.151	-0.014	-0.070
SC1Fz	-0.433	-0.345	-0.602	-0.399	-0.169	-0.220
SC2Fx	0.740	0.734	1.032	0.675	0.659	0.599
SC2Fy	0.023	0.026	0.326	0.194	0.008	0.084
SC2Fz	-0.366	-0.364	-0.584	-0.437	-0.155	-0.233
SC3Fx	1.456	1.671	1.524	1.696	1.304	1.497
SC3Fy	-0.029	0.362	0.060	0.438	-0.028	0.382
SC3Fz	-0.689	-0.738	-0.685	-0.706	-0.686	-0.713
SC4Fx	1.561	1.791	1.557	1.704	1.287	1.459
SC4Fy	-0.043	-0.465	-0.087	-0.414	-0.035	-0.313
SC4Fz	-0.690	-0.766	-0.698	-0.689	-0.693	-0.682
PT1Fx			1.444	0.813		0.805
PT1Fy			0.002	0.001		0.000
PT1Fz			0.260	-0.236		-0.280
PT2Fx					0.000	0.000
PT2Fy					0.067	0.021
PT2Fz					0.364	0.270
PT3Fx		1.866		1.820		1.726
PT3Fy		0.005		0.001		-0.001
PT3Fz		-0.164		0.000		0.245
PT4Fx					0.000	0.000
PT4Fy					-0.056	-0.024
PT4Fz					0.394	0.293

Table4.14 各ケースにおいて各要素が受ける圧力抵抗の x, y, z 成分の RMS

	NoPT	P1-f	P1-r	P2-fr	P2-s	P4
SC1Fx	0.208	0.300	0.337	0.275	0.178	0.182
SC1Fy	0.284	0.297	0.326	0.269	0.265	0.275
SC1Fz	0.114	0.131	0.149	0.159	0.036	0.075
SC2Fx	0.223	0.299	0.280	0.255	0.187	0.218
SC2Fy	0.324	0.304	0.349	0.290	0.317	0.349
SC2Fz	0.127	0.141	0.151	0.159	0.042	0.079
SC3Fx	0.198	0.227	0.251	0.245	0.183	0.259
SC3Fy	0.759	0.709	0.677	0.770	0.553	0.574
SC3Fz	0.114	0.232	0.073	0.205	0.078	0.154
SC4Fx	0.268	0.304	0.237	0.269	0.169	0.202
SC4Fy	0.530	0.750	0.566	0.742	0.556	0.470
SC4Fz	0.104	0.199	0.094	0.190	0.072	0.140
PT1Fx			0.167	0.210		0.207
PT1Fy			0.019	0.011		0.007
PT1Fz			0.750	0.813		0.832
PT2Fx					0.002	0.002
PT2Fy					0.276	0.245
PT2Fz					0.262	0.267
PT3Fx		0.170		0.136		0.099
PT3Fy		0.035		0.023		0.015
PT3Fz		0.708		0.697		0.648
PT4Fx					0.002	0.002
PT4Fy					0.306	0.279
PT4Fz					0.296	0.262

各要素のネーミングは 4.1 節で紹介した。(Fig.4.1 を参照)

Table4.13 に示したのは各ケースにおいて各要素が受ける粘性圧力抵抗について成分ごとの平均値で、値は式(1.4)を用いて無次元化されている。Table4.14 に示したのは各ケースにおいて各要素が受ける粘性圧力抵抗について成分ごとの RMS で、値も無次元値である。

以上の計算結果について整理すると、Fig.4.19~Fig.4.24 のようになる。Fig.4.19 に示したのは各ケースにおける A_x/D と A_y/D であるのに対し、Fig.4.20 は各ケースにおける A_{yaw} を示している。また、Fig.4.21 に示したのは 4 本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値である。それに対して、Fig.4.22 に示したのは 4 つのポンツーン材が各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値である。それから、Fig.4.23 は 4 本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値を示す。Fig.4.23 は 4 つのポンツーン材が各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値を示す。

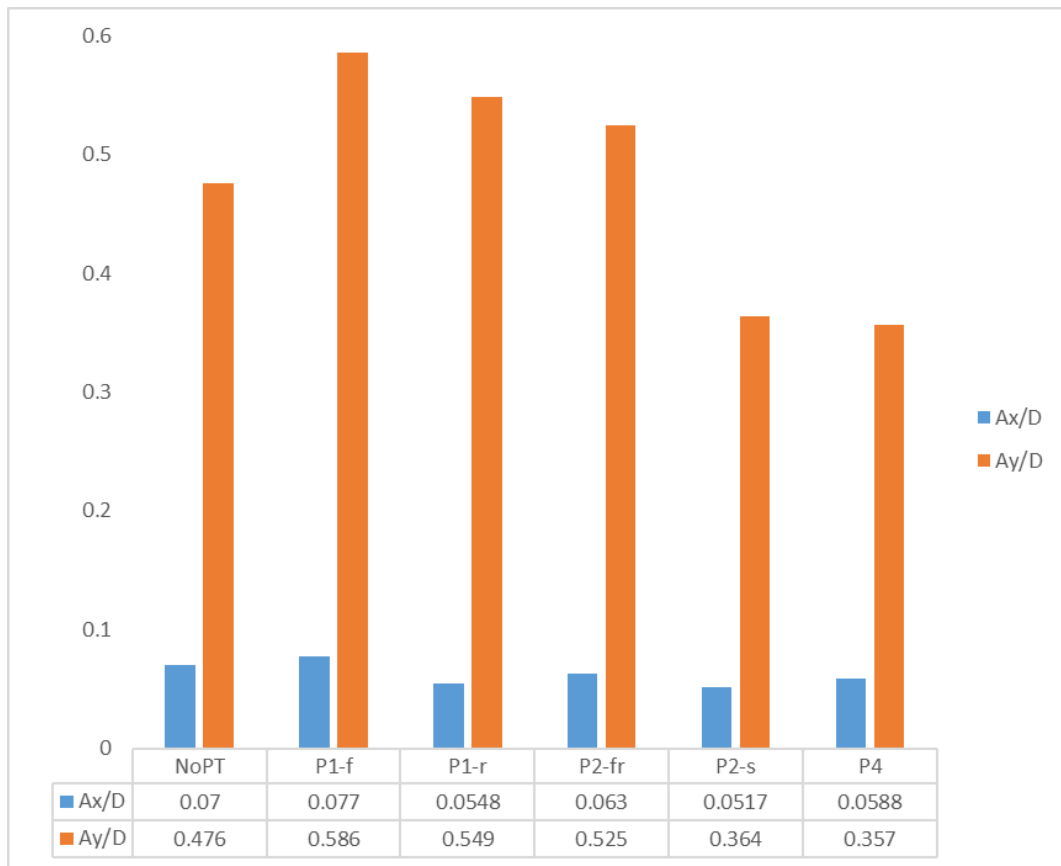


Figure 4.19 各ケースにおける Ax/D と Ay/D

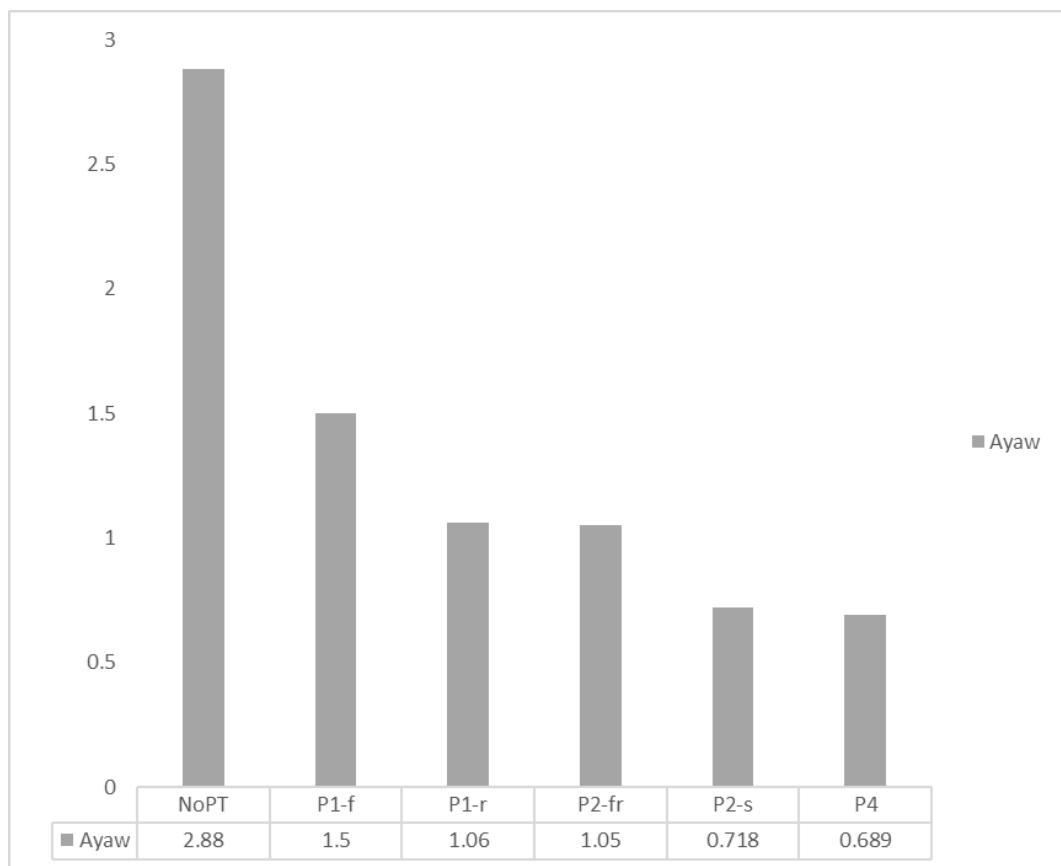


Figure 4.20 各ケースにおける Ayaw

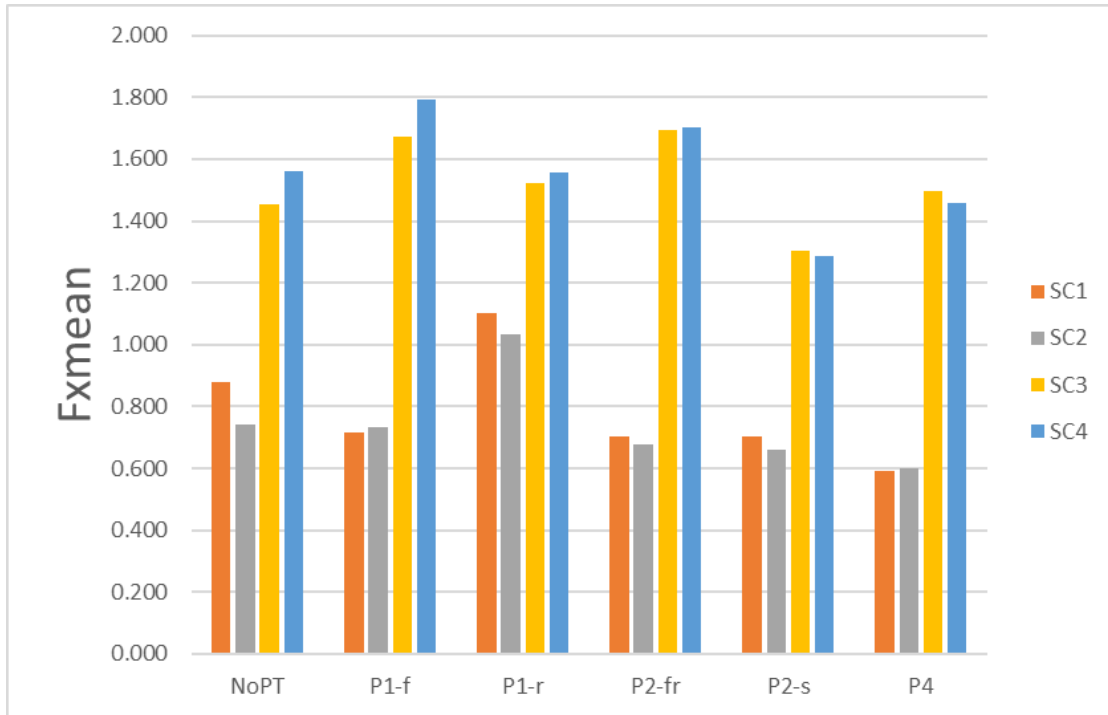


Figure 4.21 4本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値

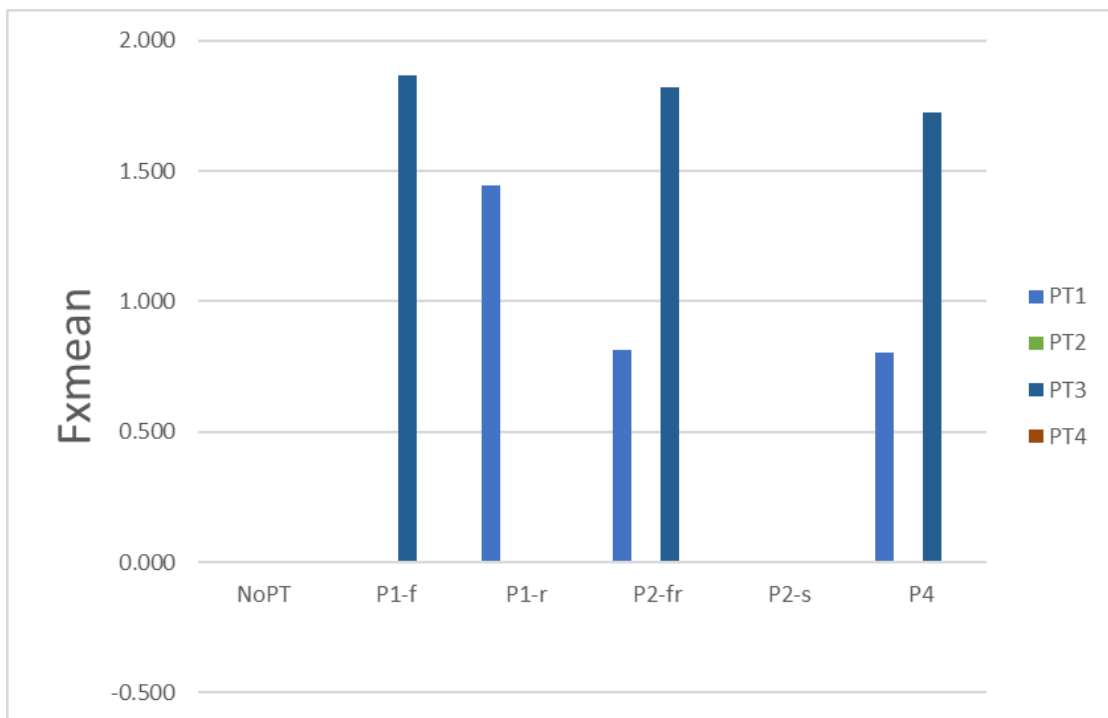


Figure 4.22 4つのポストテンション材が各ケースにおいて受ける x 方向に働く抗力の平均値

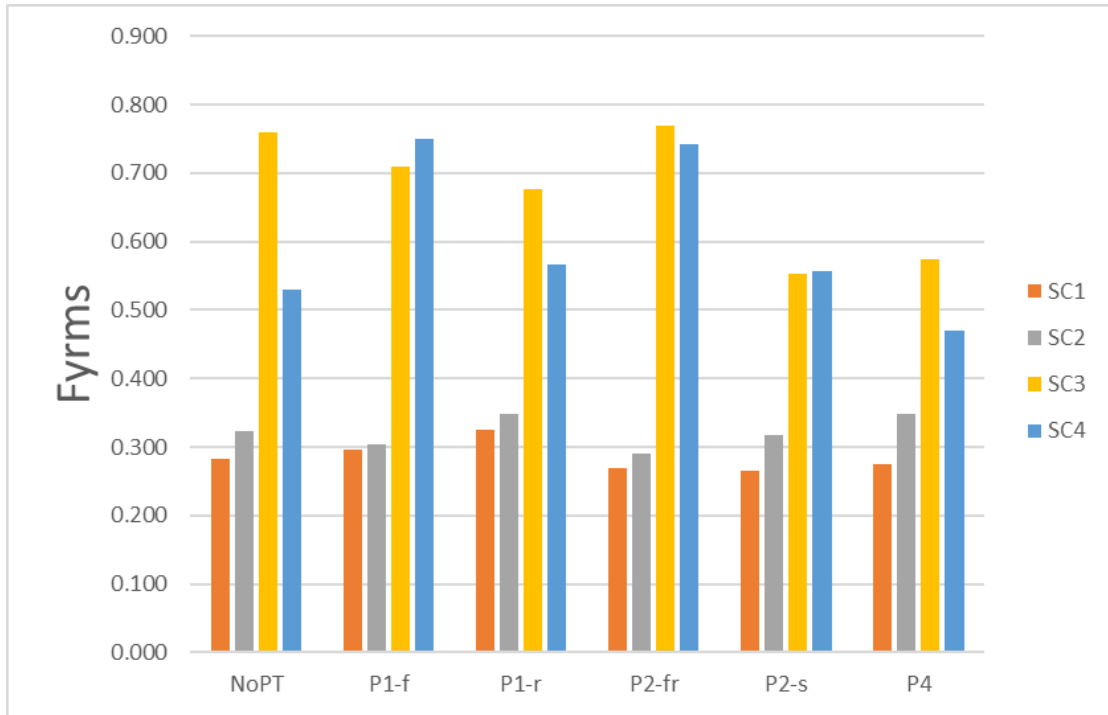


Figure 4.23 4本の角柱カラムが各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値

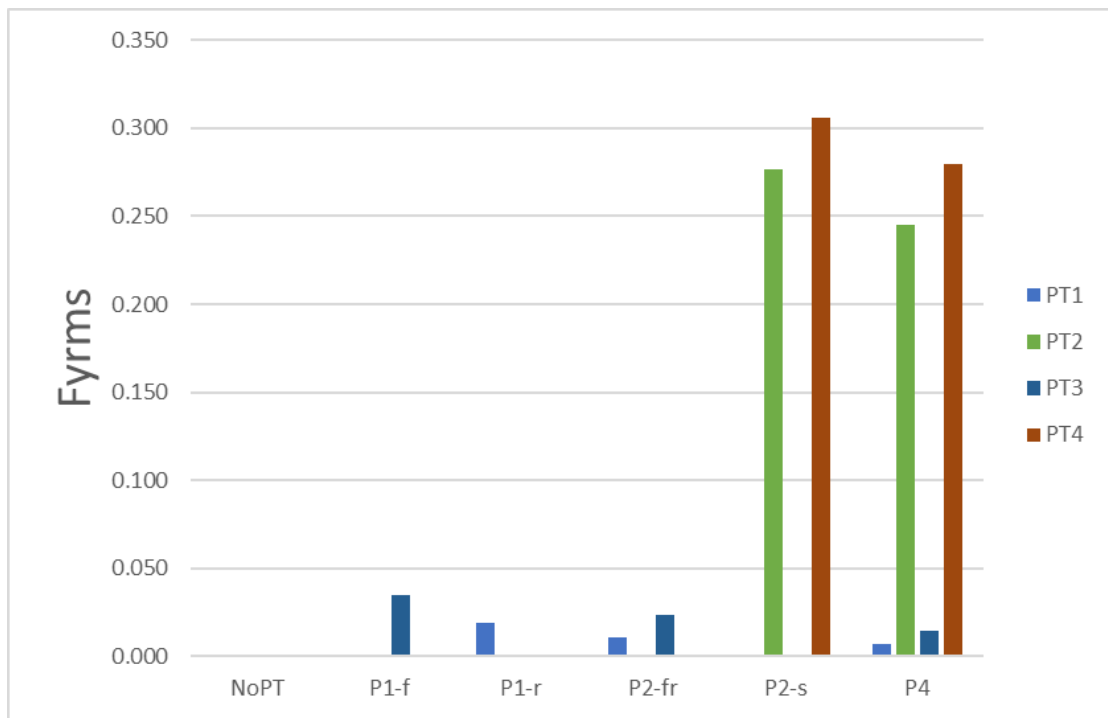


Figure 4.24 4つのポンツーン材が各ケースにおいて受ける y 方向に働く抗力の RMS の値

4.4 ポンツーン材影響に関する考察

これから計算結果を用いて各ポンツーン材が構造物の動揺にどのような影響を与えているかについて考察する。

4.4.1 NoPT と P2-s と P4

まずは NoPT、P2-s、P4 この3ケースについて議論する。Fig.4.19 を見てわかるように NoPT の場合より、P2-s と P4 の場合には、 A_y/D が低くなっている。つまり、一様流に水平な方向にポンツーン材(PT2 と PT4)を配置した場合と4本の角柱カラム間に4つのポンツーン材(PT1、PT2、PT3、PT4)を配置した場合は構造物において y 方向の振動がおさまることがわかった。この点に関しては、先行研究[16]の中でも確認されている。その実験結果を Fig.4.25 に示す。

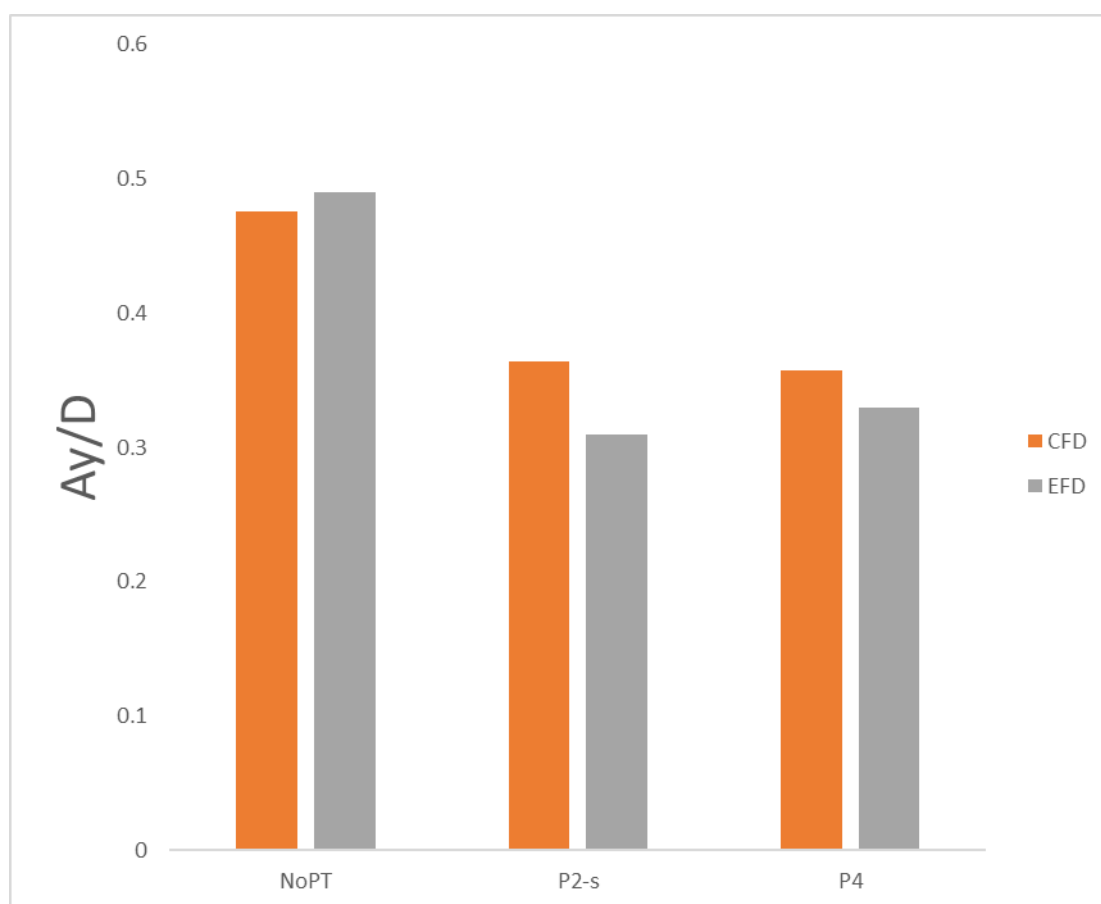
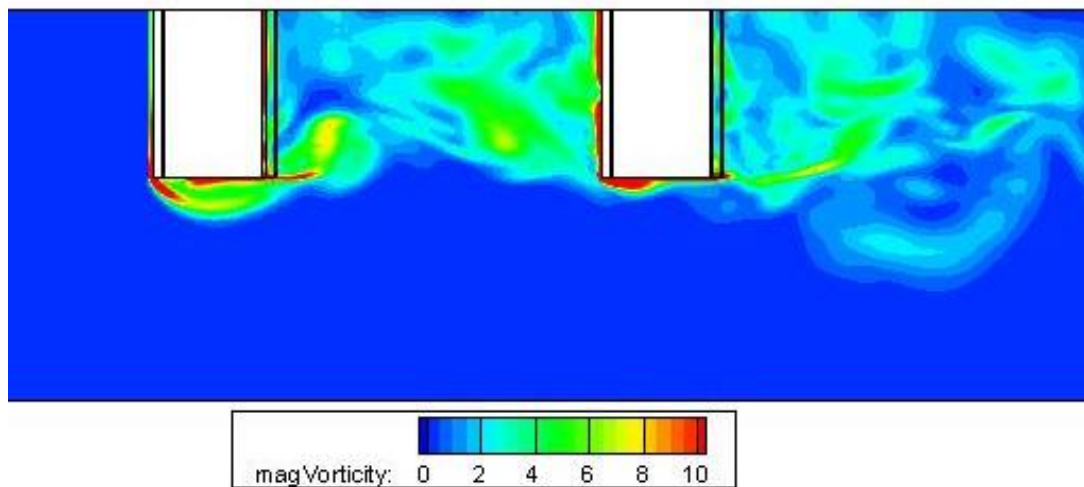


Figure 4.25 A_y/D に関する CFD と EFD の結果[16]

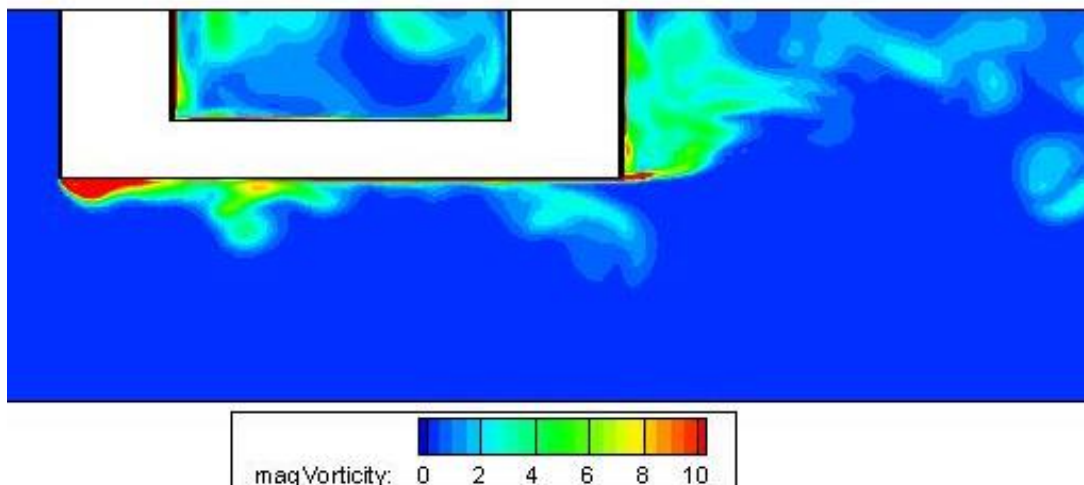
ここで、もう一つ注意したいのはケース P2-s と P4 で A_y/D は数値シミュレーションと実験においてそれぞれほとんど同じような値を示していることである。即ちポンツーン材 PT2 と PT4 が存在する場合、ポンツーン材 PT1 と PT3 は構造物における y 方向の運動に寄与していないということになる。この点について、Fig.4.24 のケース P4 のところに示されたデータを見てわかるようにポンツーン材 PT1 と PT3 は y 方向に働く力の RMS が非常に小さくなっているため、y 方向の運動に寄与していない。

次はなぜポンツーン材 PT2 と PT4 がある場合、構造物における y 方向の運動がおさまるか考える。ケース NoPT とケース P2-s について、同じタイミングで平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布を Fig.4.26 に示す。ケース P2-s においてポンツーン材 PT2 が上流側にある角柱カラム SC3 の端部から放出される渦を遮断しているとわかる。それに対してケー

ス NoPT の場合は上流側にある角柱カラム SC3 の端部から放出される渦が blow up し、SC3 の後方圧力場が変動しやすくなっていることが見て取れる。



(a)



(b)

Figure 4.26 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布 (a) NoPT, (b) P2-s
($t = \frac{1}{4} t_0$)

そのため、また同じタイミングで平面 $z=-0.3125$ における圧力の分布を Fig.4.27 に示し圧力場について考える。この平面はポンツーン材の中心を通る平面になる。ケース NoPT において上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 の後方に圧力が著しく低くなっているのに対し、ケース P2-s においてポンツーン材 PT2 と PT4 が SC3 と SC4 の端部から放出される渦を遮断しているため、SC3 と SC4 の周辺に関しては圧力の変動が小さいと考えられる。

したがって、ポンツーン材 PT2 と PT4 が存在することによって、上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 の端部から放出される渦が遮断される。そのため SC3 と SC4 はそれに起因する圧力の変動が小さくなるため y 方向に受ける力が小さくなることが考えられる。ゆえに、ポンツーン材 PT2 と PT4 がある場合、構造物における y 方向の運動がおさまると考える。

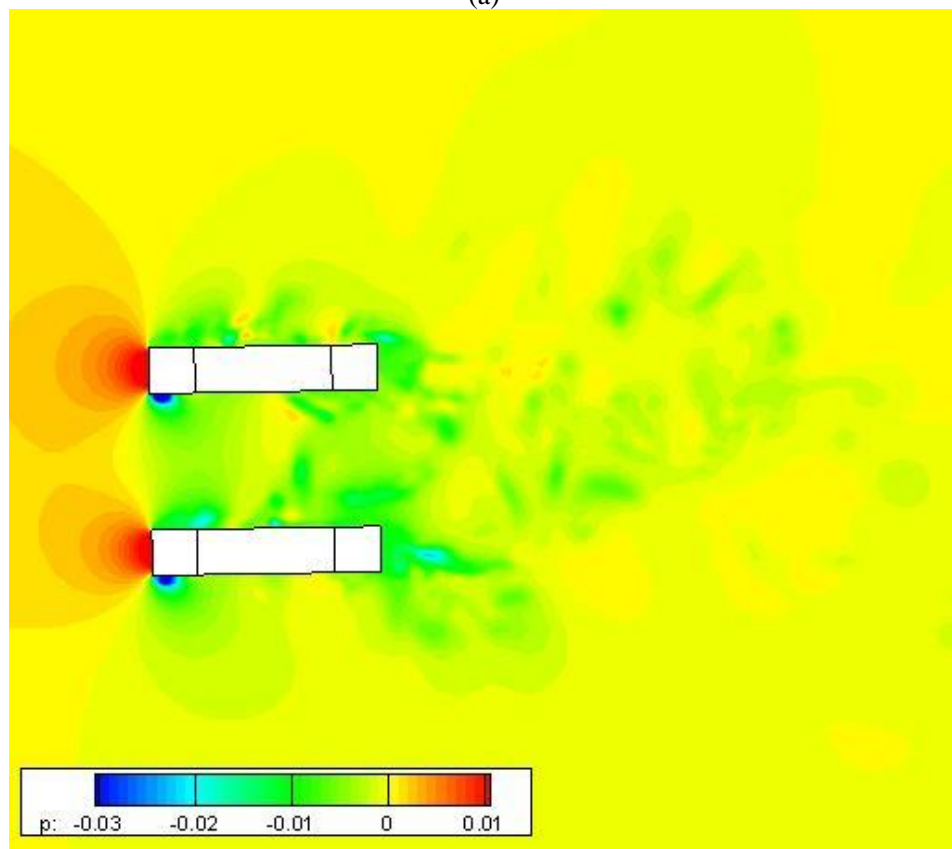
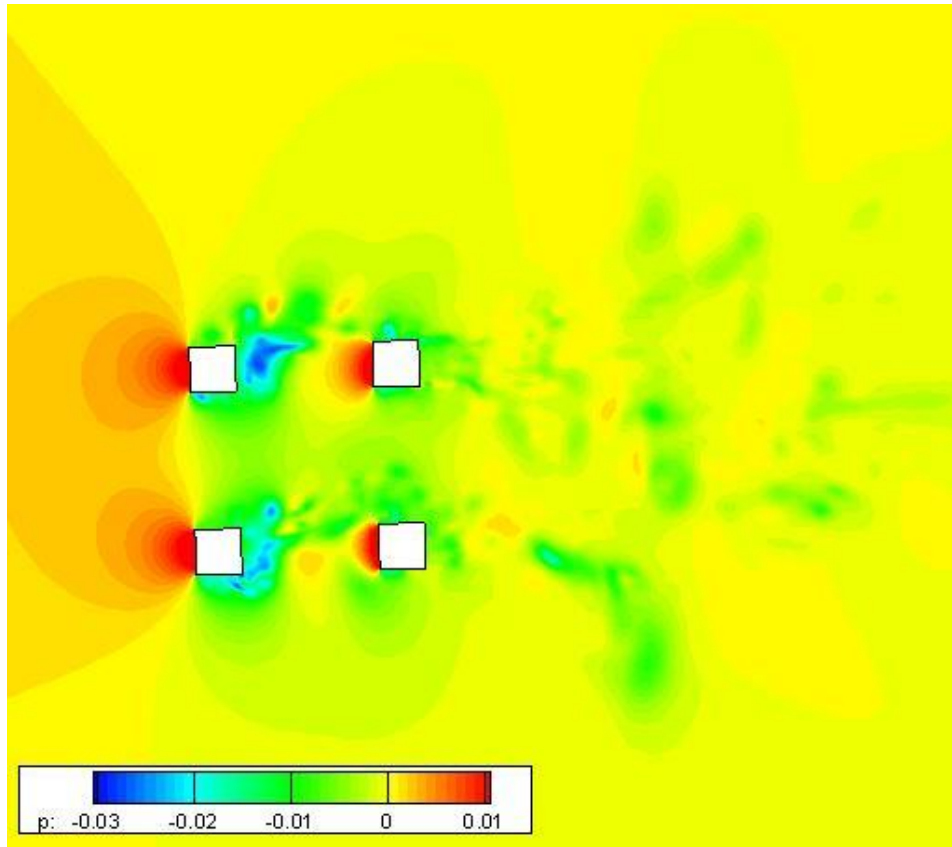


Figure 4.27 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布 (a) NoPT, (b) P2-s
 $(t = \frac{3}{4}t_0)$

以上の経緯を受け、上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 について y 方向に受ける力を考える。ケース NoPT、P2-s、P4 において、SC3 と SC4 における y 方向に受ける力の RMS は Fig.4.23 に示されている。この 3 ケースについて SC3 と SC4 における Fyrms の平均を取って Fig.4.28 に示す。

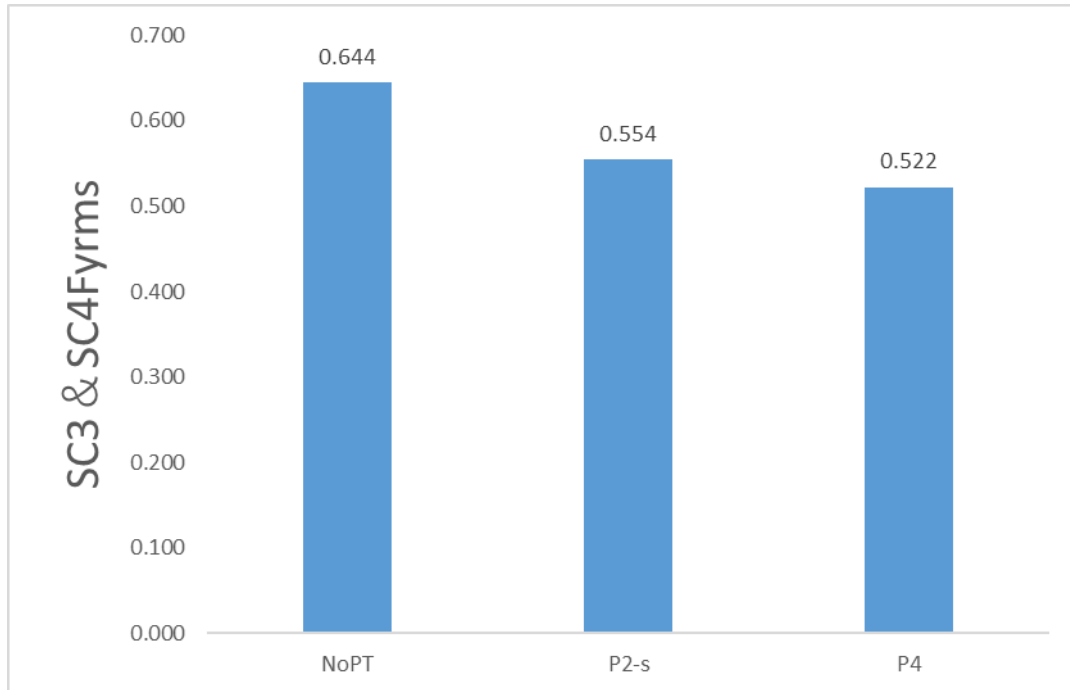


Figure 4.28 SC3 と SC4 における Fyrms の平均

確かに、Fig.4.28 を見てケース P2-s と P4 における SC3 と SC4 の平均値が NoPT の場合より低くなっているとわかるが、これだけが原因で A_y/D が小さくなるとは言えない。理由として、Fig.4.24 はケース P2-s と P4 においてポンツーン材 PT2 と PT4 も Fyrms を 0.25 ~ 0.30 程度有することを示しているからである。つまり、ポンツーン材 PT2 と PT4 も y 方向に力を受けているので、 A_y/D の減少に関しては、それを含めて考えないといけない。P2-s を例として各要素が y 方向に受ける力の時系列のグラフを Fig.4.29 に示す。

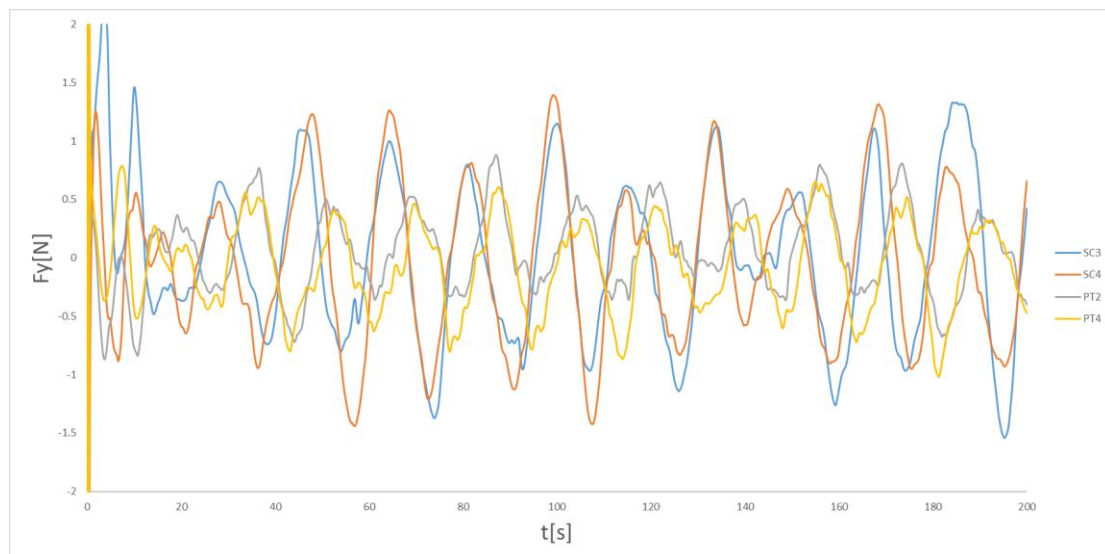


Figure 4.29 ケース P2-s における各要素が受ける y 方向の力

Fig.4.29 を見てわかるように、ポンツーン材 PT2 と PT4 における y 方向の力の位相と上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 における y 方向の力の位相とが約 90 度ずれており、構造物全体に働く力として一部が打ち消されたと考える。そのため A_y/D が小さくなっているという。可視化処理の結果を用いてその現象を確認すると、Fig.4.30 のようになる。

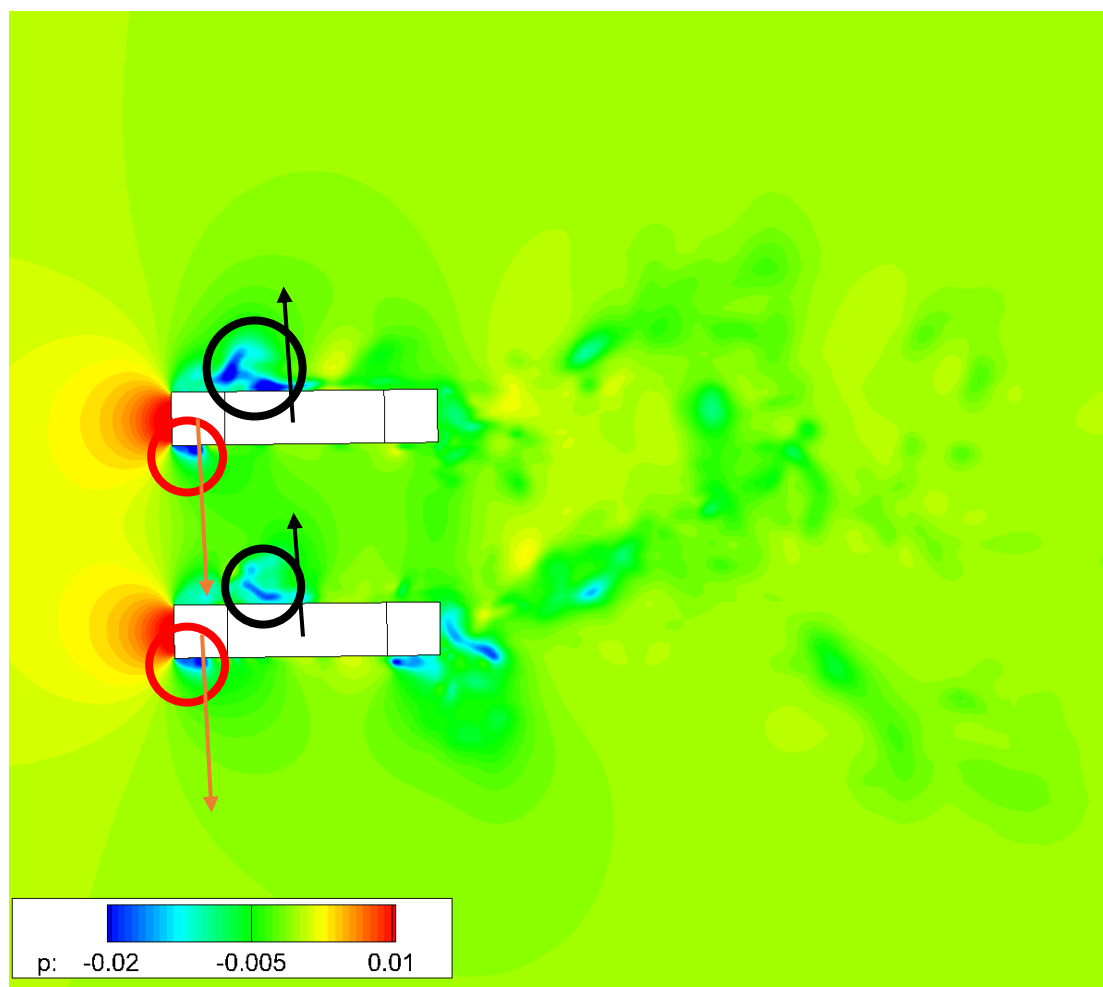


Figure 4.30 ケース P2-s において平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t=105s$)

Fig.4.30 に示したのは時刻 $t=105s$ にケース P2-s において平面 $z=-0.3125$ における圧力の分布図である。Fig.4.29 を見てわかるが時刻 $t=105s$ の際、ポンツーン材 PT2 と PT4 は y 軸方向に力を受けるが、上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 は y 軸のマイナス方向に力を受けている。これは Fig.4.30 に示された流場情報と一致している。Fig.4.30 のとき、構造物は下に向いて運動しており、上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 が受ける力をイメージ図として赤い矢印で表し、ポンツーン材 P2 と P4 が受ける力を黒い矢印で表すと、角柱カラムは起振力を提供し、ポンツーン材は減衰力を提供していることがわかる。

4.4.2 NoPT と P2-fr

次はケース NoPT と P2-fr について考察する。

数値シミュレーションの結果では、Fig.4.19 のように、ケース P2-fr における A_x/D は NoPT の場合より少し高くなっているが、実験結果では、同じような値を示している。その結果を Fig.4.31 に示す。

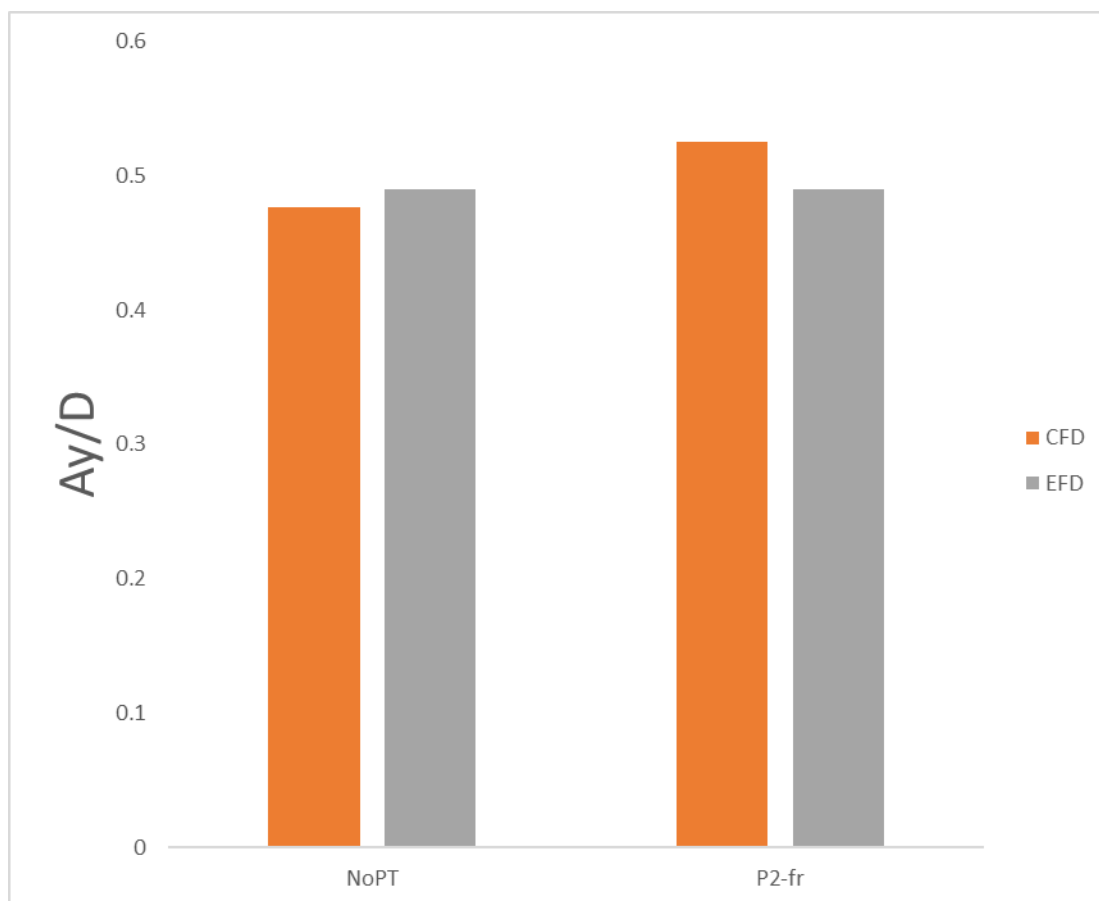


Figure 4.31 A_y/D に関する CFD と EFD の結果[16]

このような結果を受け、一様流に垂直な方向に配置をした 2 つのポンツーン材は構造物の y 方向の運動を抑えることができないと分かった。

可視化処理の結果を Fig.4.32 と Fig.4.33 に示す。

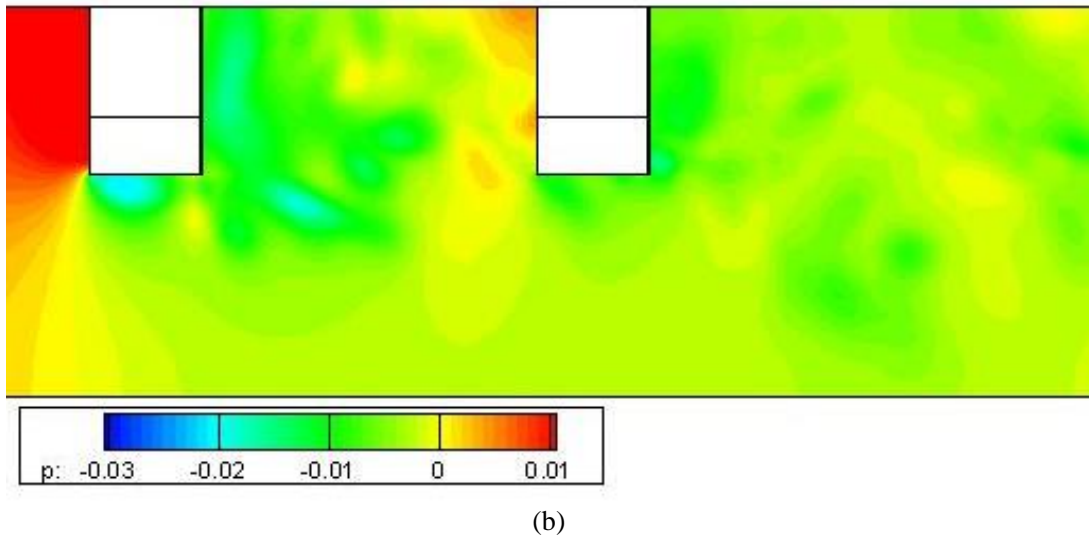
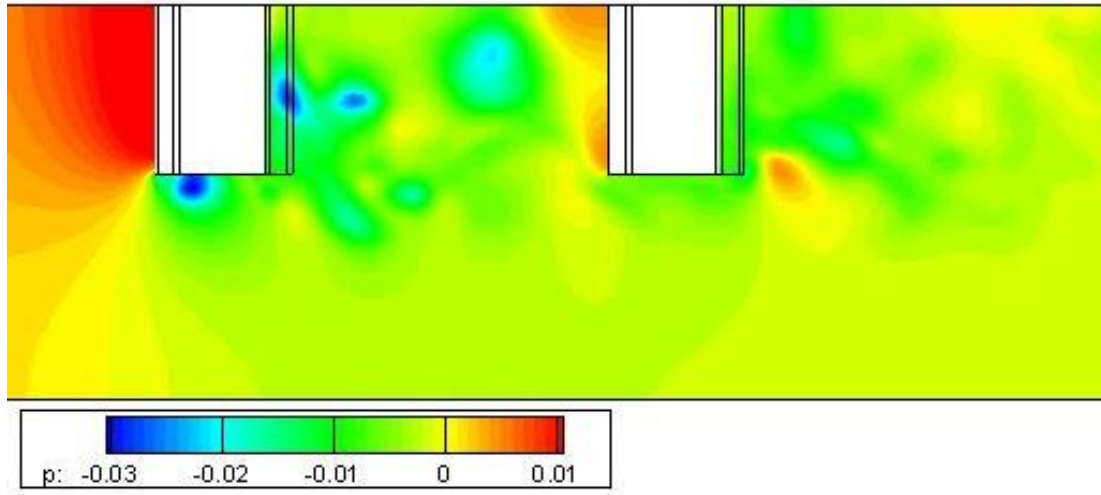
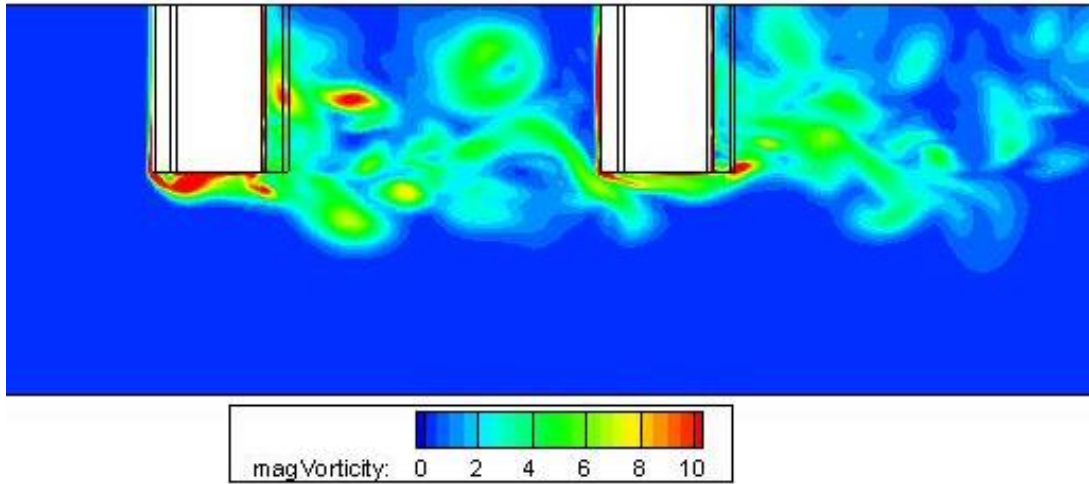
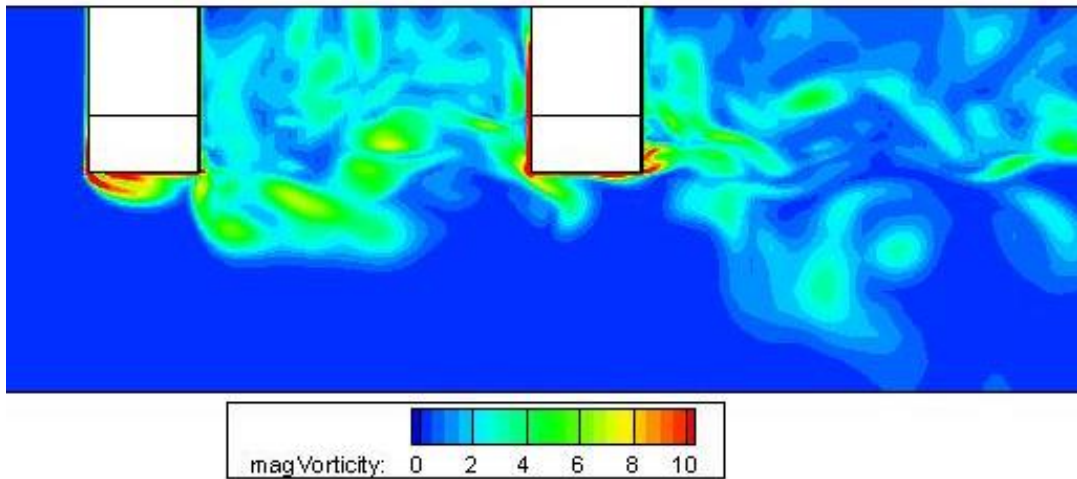


Figure 4.32 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布(a)NoPT, (b)P2-fr
($t = 0$)



(a)



(b)

Figure 4.33 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布(a)NoPT, (b)P2-fr

Fig.4.33 に示したように、ケース NoPT と P2-fr において、両ケースともに上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 の端部から渦が放出されている。ポンツーン材 PT1 と PT3 は角柱カラムの端部から放出される渦に影響を及ぼすことができない。そのため、Fig.4.32 に示した通り、角柱カラム SC3 と SC4 はおおむね同じような後方の圧力場を有する。

また、Fig.4.24 を見てわかるように、ケース P2-fr において、ポンツーン材 PT1 と PT3 はほとんど y 方向に力を受けていない。ゆえに、4.4.1 節で述べた力の打ち消しは考えにくい。NoPT と P2-fr の比較からは、浮体の前後に配置した PT1 と PT3 は流場や流体力に影響を及ぼしていないように見える。

4.4.3 NoPT と P1-f と P1-r

数値シミュレーションの結果では、ケース P1-f は最も大きい Ay/D を示している。そして P1-r ではその次に大きい Ay/D が得られている。ケース P1-f と P1-r について実験結果はない。

各ケースについて、上流側にある角柱カラム SC3 と SC4 における Fyrms の平均を Fig.4.34 に示す。下流側にある角柱カラム SC1 と SC2 における Fyrms の平均を Fig.4.35 に示す。

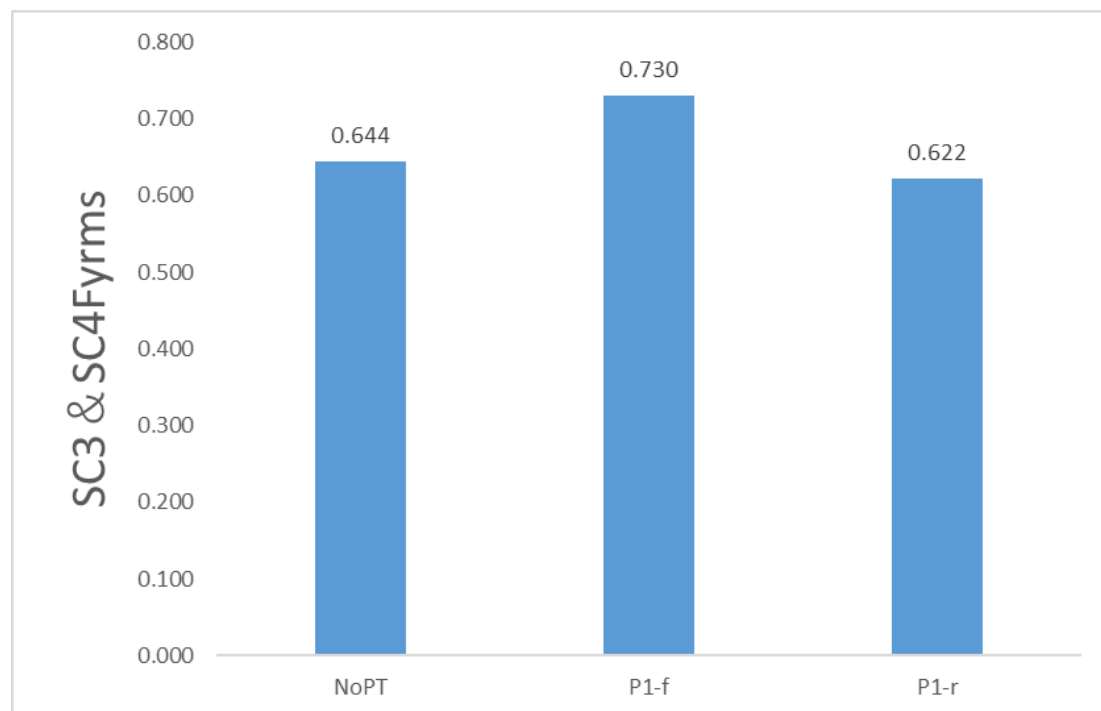


Figure 4.34 SC3 と SC4 における Fyrms の平均

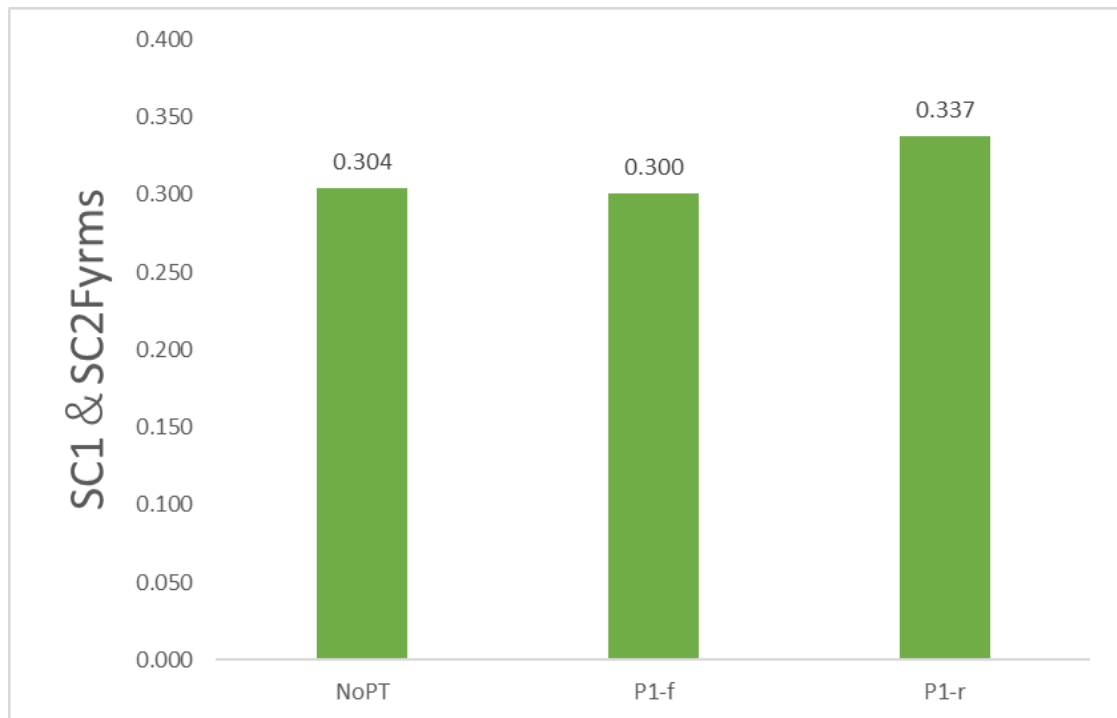
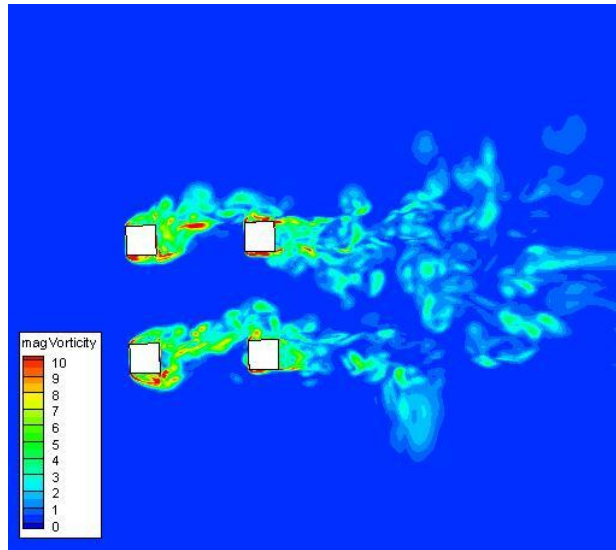


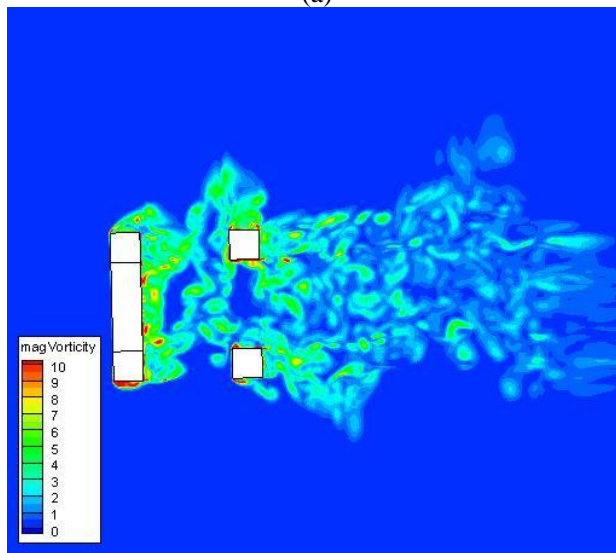
Figure 4.35 SC1 と SC2 における Fyrms の平均

ケース P1-f は角柱カラム SC3 と SC4 における Fyrms の平均が一番大きいのに対し、ケース P1-r は SC1 と SC2 における Fyrms の平均が一番大きい。つまり、ポンツーン材 PT1 と PT3 でどれか一つを配置した場合、そのポンツーン材に繋がる二つの角柱カラムはより大きな y 方向の力を受けることになる。

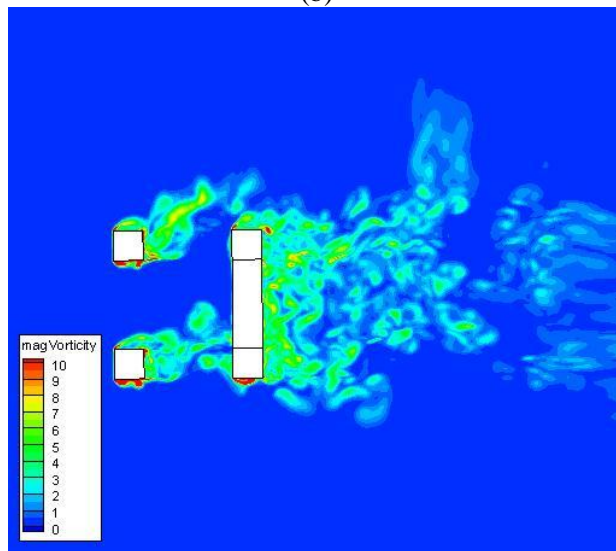
可視化処理の結果を Fig.4.36 に示す。ケース NoPT より P1-f と P1-r はポンツーン材を配置したことによってそのポンツーン材とつながっている 2 つの角柱カラムが一体化となり、渦放出の領域が顕著に広がっている。これは、ポンツーン材周りに y 方向の渦が発生しているためである。一体化となった角柱カラムはポンツーン材のある端部付近で部分的により大きな渦を放出し、y 方向に受ける力が大きくなったと考えられる。ただし、今回用いたポンツーン材はそれほど厚くはなく、その効果は限定的である。



(a)



(b)



(c)

Figure 4.36 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布(a)NoPT, (b)P1-f, (c)P1-r

第5章 結論と今後の課題

5.1 結論

4本の角柱カラムにポンツーン材を加えた数値シミュレーションを行った結果、以下のような結論が得られた。

一様流に垂直なポンツーン材について

- i. PT1とPT3のような一様流に垂直のポンツーン材は構造物における y 方向の運動を抑える働きを持っていない。
- ii. PT1とPT3でどれか一つ配置した場合、構造物はポンツーン材なしの場合よりも y 方向の振動振幅 Ay/D が大きくなる。原因はそのポンツーン材に繋がる二つの角柱カラムはより大きな y 方向の力を受けているからである。可視化処理の結果によりポンツーン材とつながっている2つの角柱カラムが一体化となり、端部付近で部分的に大きな渦の放出が見られた。そのため y 方向に受ける力が大きくなったと考えられる。

一様流に水平なポンツーン材について

- iii. PT2とPT4のような一様流に水平のポンツーン材は構造物における y 方向の運動を著しく抑えることができる。
- iv. PT2とPT4は、角柱カラムSC3とSC4の端部から放出される渦を遮断している。そのためSC3とSC4はそれに起因する圧力の変動が小さくなるため y 方向に受ける力が小さくなる。
- v. PT2とPT4における y 方向の力の位相と角柱カラムSC3とSC4における y 方向の力の位相とがずれており、構造物全体に働く力として一部が打ち消されている。そのためポンツーン材PT2とPT4を配置したケースにおいて y 方向の振動振幅 Ay/D が小さくなる。

また、PT1とPT3を両方加えた場合、構造物における y 方向の運動に全く影響を与えていないようであるが、PT1だけあるいはPT3だけ配置した場合はそうではないことが分かった。つまり、PT1とPT3を両方配置した場合には、2つのポンツーン材の効果が結果的に打ち消され、構造物の運動に影響を与えなくなったと考えられる。

5.2 今後の課題

本研究は、OpenFOAMを用いた数値シミュレーションを行った。ただし、自由表面の影響は考慮していない。もっと正確に実験実験現象を再現するには自由表面の影響を取り入れてシミュレーションを行なうのが必要である。

また、本研究ではすべての計算において、サージ、スウェー、ヨー自由度3つしかない。ロール、ピッチ、ヒープに関してそれらの運動に起因する影響は全部ない。より正確にシミュレーションを行うため、6自由度での計算が必要である。

それから、入射角度が 0° のみの場合について数値シミュレーションを行った。浮体構造物はVIMが起こらず、ギャロッピングを示した。先行研究[15][16]により入射角度が 15° 、 22.5° 、 45° の場合、特定な換算流速 V_r において浮体構造物はVIMが起こる。VIMが起こる際、ポンツーン材が浮体構造物の運動に与える影響はより顕著なものになると考えられる。そのため、入射角度を変えた数値シミュレーションを行うのが必要である。

参考文献

1. 全国地球温暖化防止活動推進センター JCCCA
https://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno02.html
2. 国土交通省 気象庁
https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
3. 経済産業省 資源エネルギー庁
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/outline/index.html
4. 平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書 第8章 推計結果のまとめと今後の課題
<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt8.pdf>
5. Mike Robinson, Walt Musial "Offshore wind technology"
<https://www.nrel.gov/docs/gen/fy07/40462.pdf>
6. Aviva J. Sussman, Emilio L. Pueyo, Clement G. Chase, Gautam Mitra "The impact of vertical-axis rotations on shortening estimates" 2012
7. M. van Dyke&S. Widnall "An Album of Fluid Motion" Journal of Applied Mechanics 50(2):475-, 1983
8. Lienhard, J, H, 1966, "Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data For Rigid circular Cylinders", Technical Extension Service, Bulletin 300, College Engineering, Washington State University.
9. Nakayama, Y. (1999) Introduction to Fluid Mechanics. Butterworth-Heinemann, Oxford, 152
10. Takao Kawamura, Munehiko Hiwada, Toshiharu Hibino, Ikuo Mabuchi , Masaya Kumada, Flow around a finite circular cylinder on a flat plate (Cylinder height greater than turbulent boundary layer thickness)," Bulletin of JSME, 1984.
11. H. Wang, Y.Zhou , J.Mi "Effects of aspect ratio on the drag of a wall-mounted finite length cylinder in subcritical and critical regimes" 2012
12. Guilherme F. Rosetti, Guilherme Vaz, Martin Hoekstra, Rodolfo T. Goncalves , Andre L.C. Fajarra, "CFD calculations for free-surface-piercing low aspect ratio circular cylinder with solution verification and comparison with experiments," OMAE,2013
13. 藤原敏文、二村正、下里耕平、et. al. "コラム間隔の異なるセミサブ浮体の VIM 試験と振幅評価" 日本船舶海洋工学会講演会論文集 (21) 、647-650、2015-11
14. 橋浦穰 "複数コラム型浮体における渦励起運動に対する浮体形状の影響に関する研究" 東京大学修士論文、2016
15. Xinshu Zhang, Xiaofeng Hu, Xingyu Song, Yunxiang You, "Numerical studies on vortex-induced motions of a multi-column deep-draft oil and gas exploration platform" 2017
16. Rodolfo T. Gonçalves, Hideyuki Suzuki, Shinichiro Hirabayashi, Leandro S. P. Silva, Matheus A. Marques, Chenling Tian, "Experimental study of the effect of the pontoon dimensions on the flow-induced motions (fim) of a semi-submersible platform with four square columns" 2020

17. 豊田国昭 日本流体力学会 ながれ 37(2018)61-68 第三章 実験流体力学と数値流体力学
18. 飯田明由: 空力騒音に関する研究－風洞実験と数値解析のどちらを信ずるべきか？－、EFD ワークショップ「EFD と CFD の得手不得手－EFD の立場から－」、日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集、(2017) W05300
19. Versteeg& Malalasekera "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method" 2007
20. 春日 悠 "非圧縮性流体計算の圧力-速度連成手法"
<http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/pressure-velocity.pdf>
21. 大宮司久明、三宅裕、吉澤徹、“乱流の数値流体力学－モデルと計算法”、東京大学出版会、1998
22. 伊丹 隆夫 "パッと知りたい！人と差がつく乱流と乱流モデル講座"
<https://www.cradle.co.jp/tec/column04/008.html>
23. 徐 瀟俊 “複数カラム浮体における渦励起運動のカラム間干渉に関する数値研究”東京大学修士論文、2018
24. YuichiTakahashi, Taro Imamura “Steady Flow Simulation using Immersed Boundary Method and Wall Function based on SA Turbulence model” 2013
25. P. J. Roache : Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, Trans. ASME, J. Fluids Eng. 116 (1994) 405–413.
26. ASME “Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer” ASME V&V 20-2009

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃より優しく丁寧にご指導いただく平林紳一郎先生に厚くお礼申し上げます。加えて沢山のご意見、ご支援をいただきました鈴木英之教授にお礼申し上げます。また、貴重な先行研究のデータを提供していただいた Gonçaves 氏にお礼申し上げます。

副指導教員の早稲田先生には、面談や中間発表などを通じて、研究の進捗状況や健康面等について聞いていただきました。ありがとうございます。

共に研究を励んできた牧村さん、高瀬さん、堀口さん、徐さん、坂田さん、豊田君、北野君、松下君、大久保君、山田君、今井君、何君に心より感謝申し上げます。

研究室の秘書の石渡様に大変お世話になりました。石渡様から差し入れ等をいただき、楽しみのある快適な研究室生活ができました。

平林先生に、ここ数年間混沌としたというような日々を過ごした私に、何度も打ち合わせの機会を設けていただきました。その諦めない雄姿に私は心底から感動しました。私は 6 年間進学塾で塾講師として授業をしており、システムは違うが学生の身であると同時に一介の教師の身でもあるので、学生にそのようなことをするのがいかに難しいことだろうかとても分かっています。本当にお世話になりました。ありがとうございます。感謝の言葉がいくつあっても足りません。平林先生は私にとって本当に良師益友のような大事な存在であると切実にそう思っています。他郷異国で学問を探究する私の背中を押してくださる平林先生にいつか機会がありましたら必ず恩返しをさせていただきます。

最後に、8 年間ずっとそばから離れない胡さんに感謝の意を表します。ともに笑い、ともに泣き、ともに元気に。

Appendix

1. Appendix a

Appendix a では、時系列のグラフを提示する。

Table a.1 目次

a.0.1~a.0.27	単独角柱運動シミュレーション
a.1.1~a.1.9	4角柱のみの運動シミュレーション
a.2.1~a.2.18	ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーション

0. 単独角柱運動シミュレーション

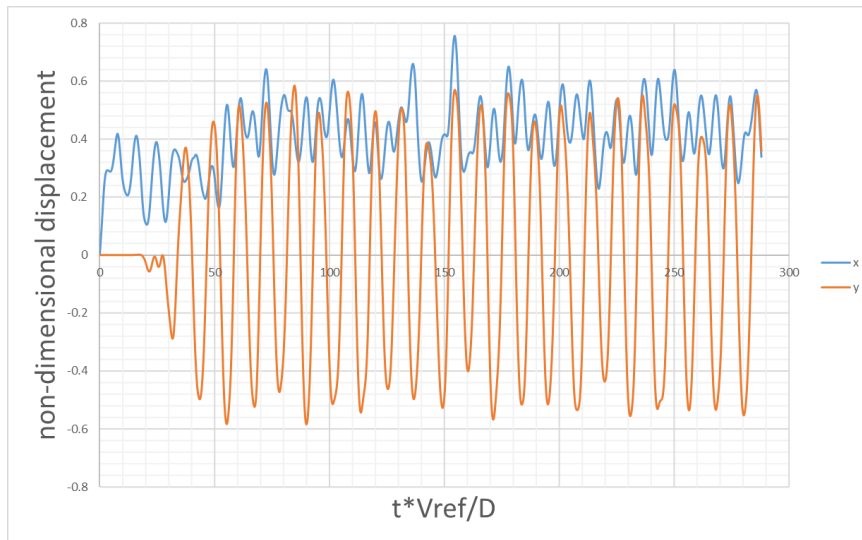


Figure a.0.1 T1M1 における重心位置

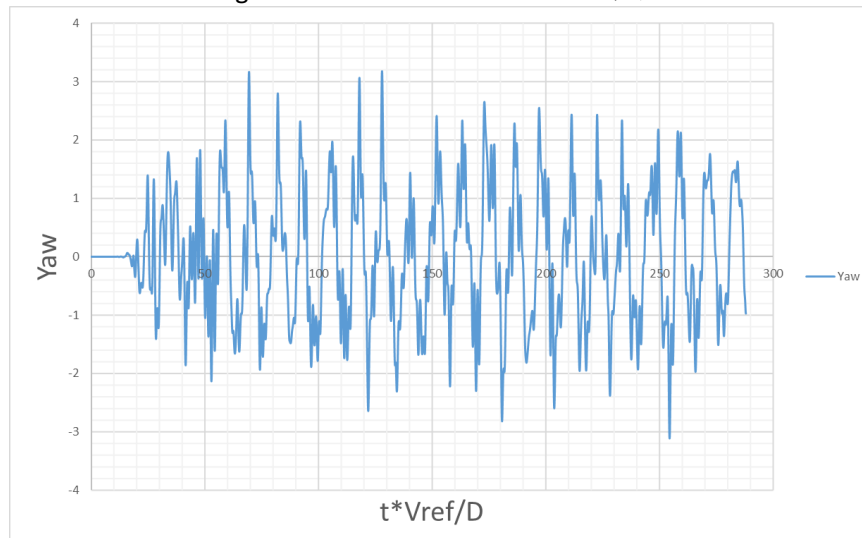


Figure a.0.2 T1M1 におけるヨー角度

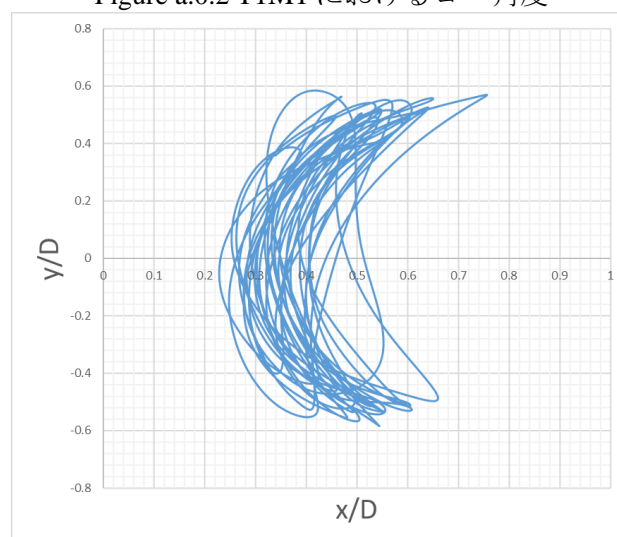


Figure a.0.3 T1M1 における重心位置の軌跡

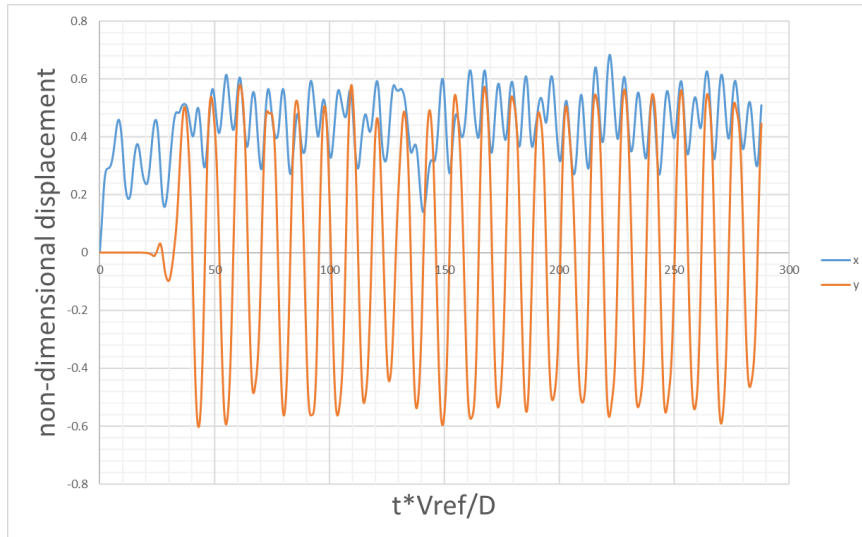


Figure a.0.4 T1M2 における重心位置

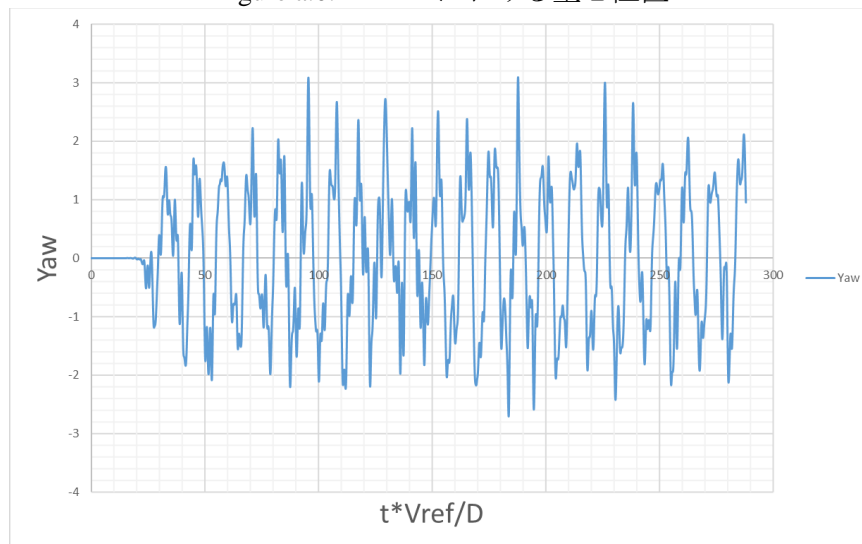


Figure a.0.5 T1M2 におけるヨー角度

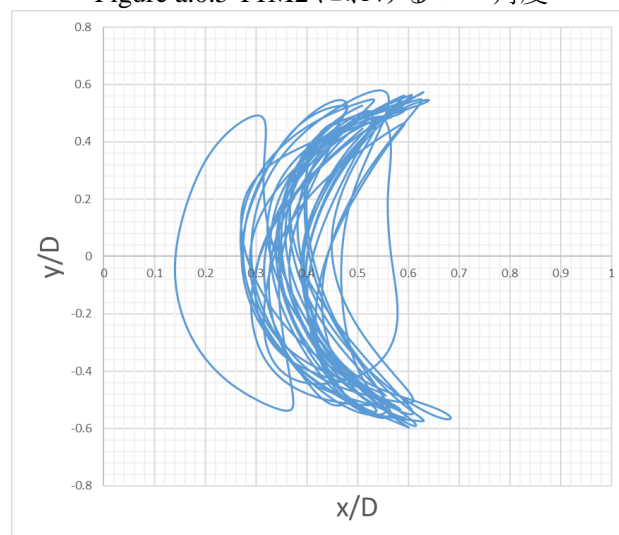


Figure a.0.6 T1M2 における重心位置の軌跡

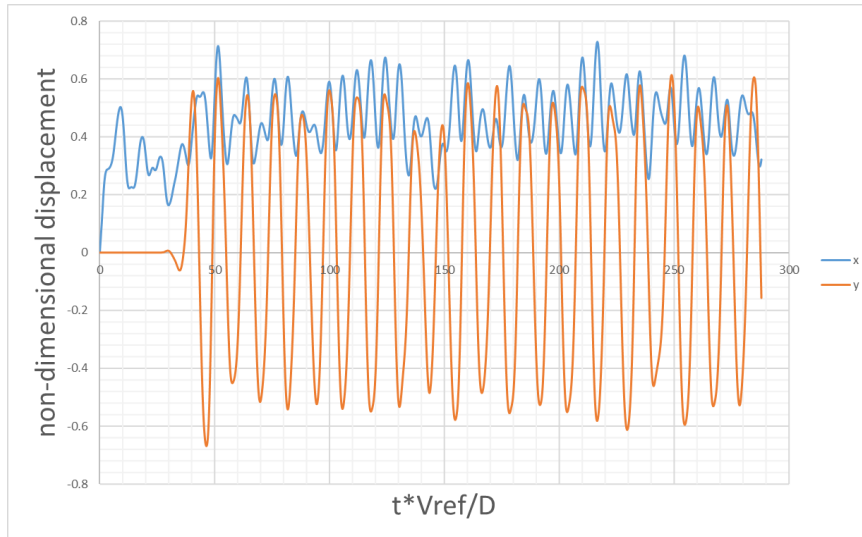


Figure a.0.7 T1M3 における重心位置

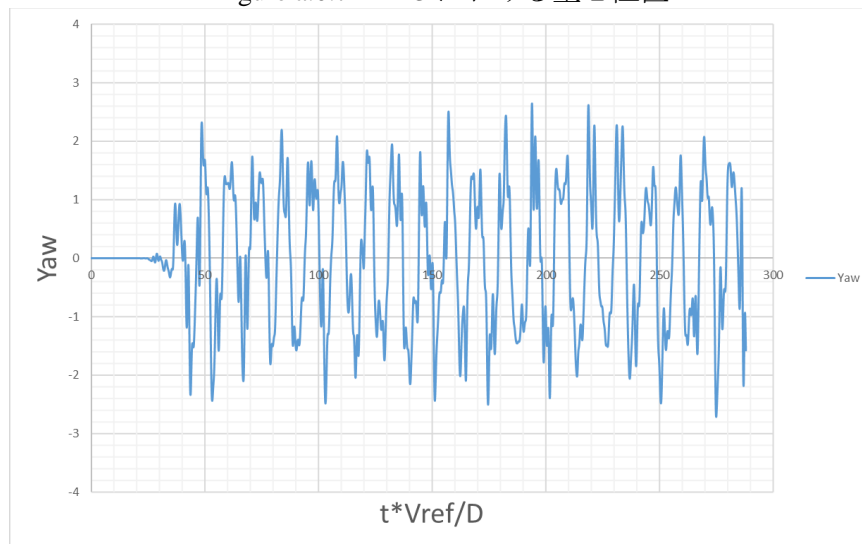


Figure a.0.8 T1M3 におけるヨー角度

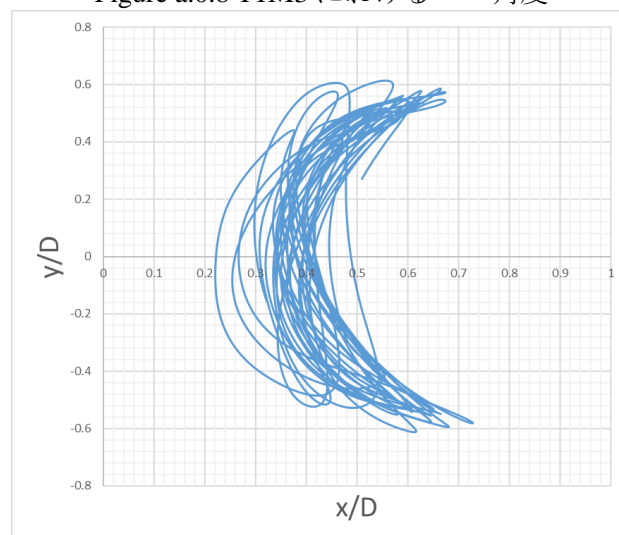


Figure a.0.9 T1M3 における重心位置の軌跡

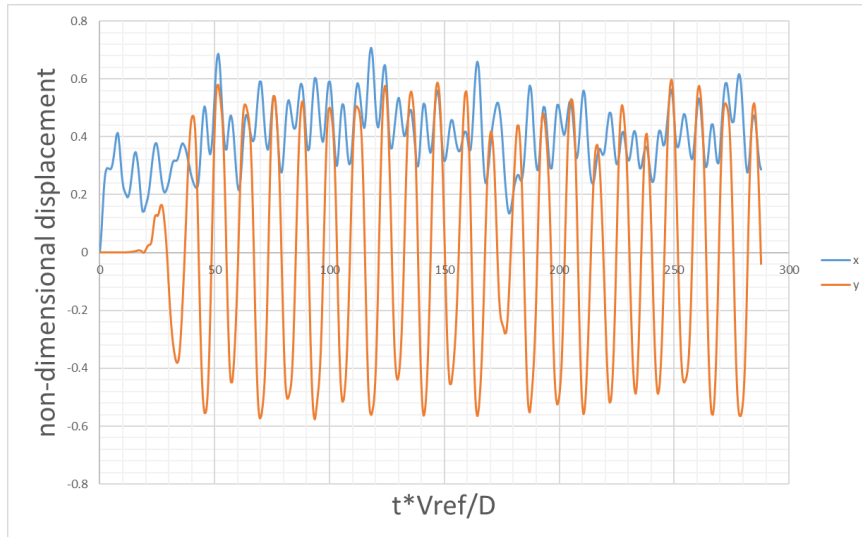


Figure a.0.10 T2M1 における重心位置

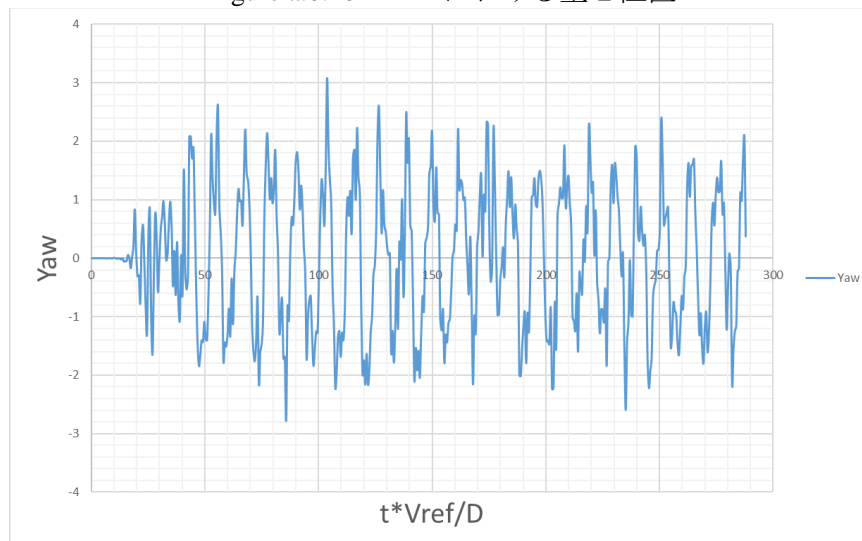


Figure a.0.11 T2M1 におけるヨー角度

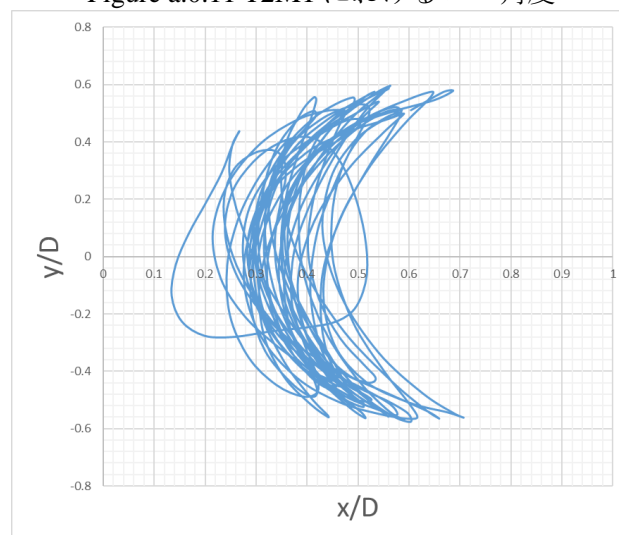


Figure a.0.12 T2M1 における重心位置の軌跡

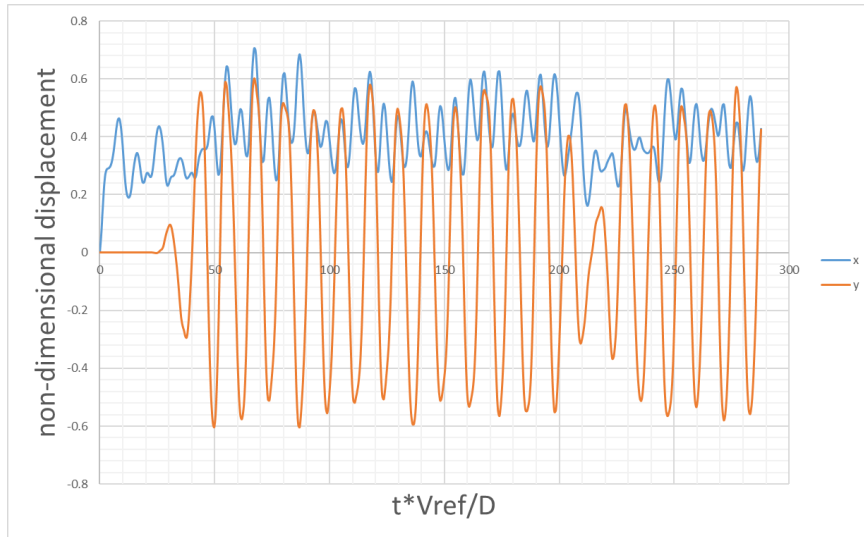


Figure a.0.13 T2M2 における重心位置

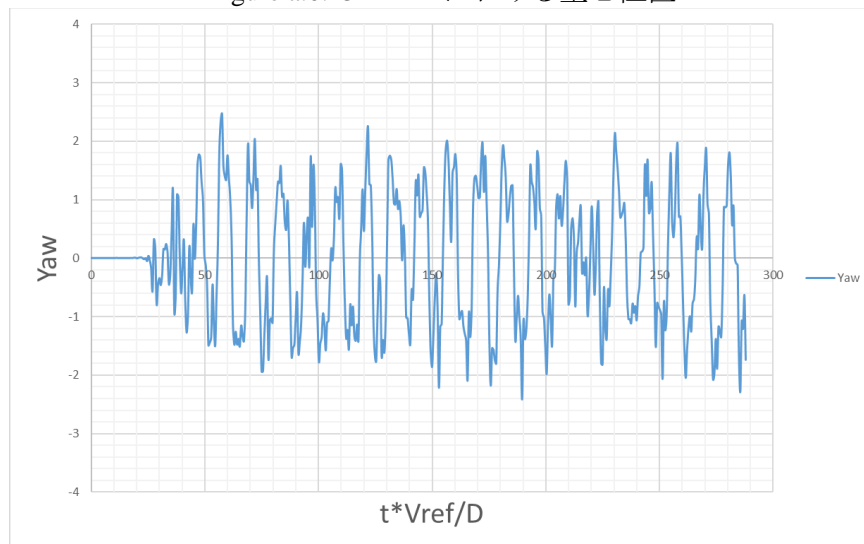


Figure a.0.14 T2M2 におけるヨー角度

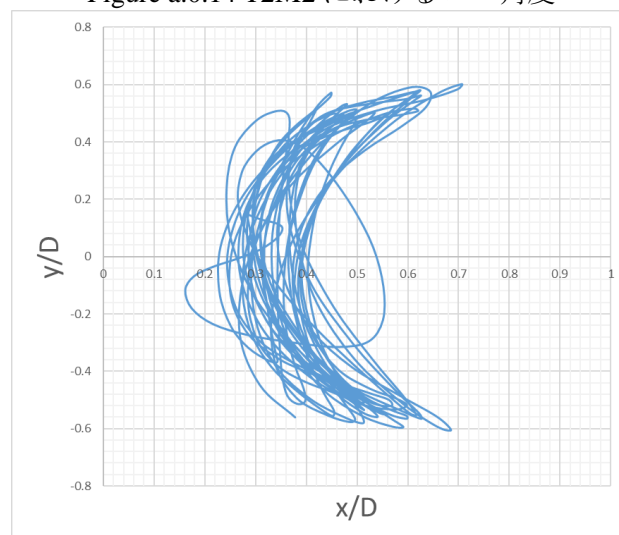


Figure a.0.15 T2M2 における重心位置の軌跡

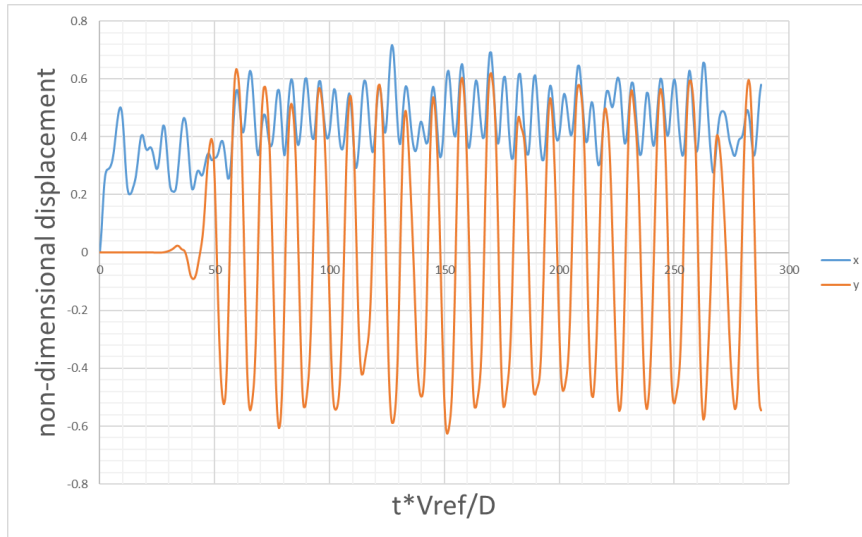


Figure a.0.16 T2M3における重心位置

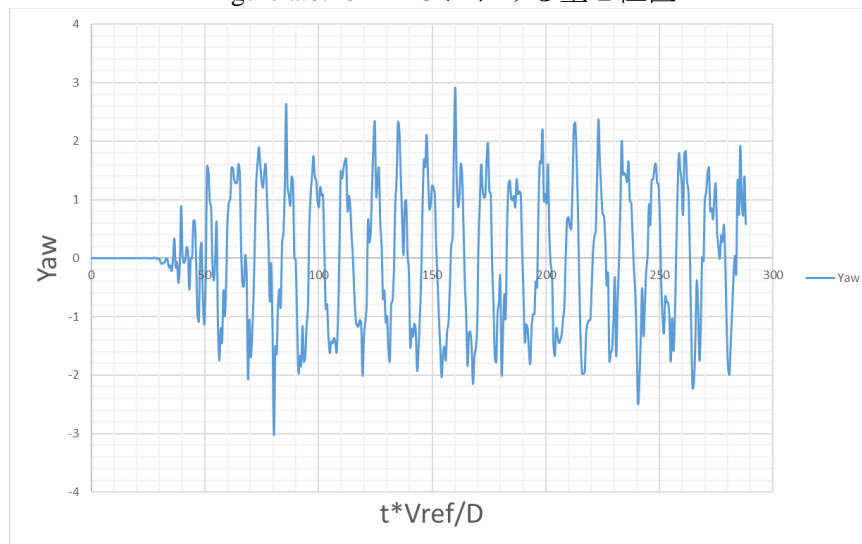


Figure a.0.17 T2M3におけるヨー角度

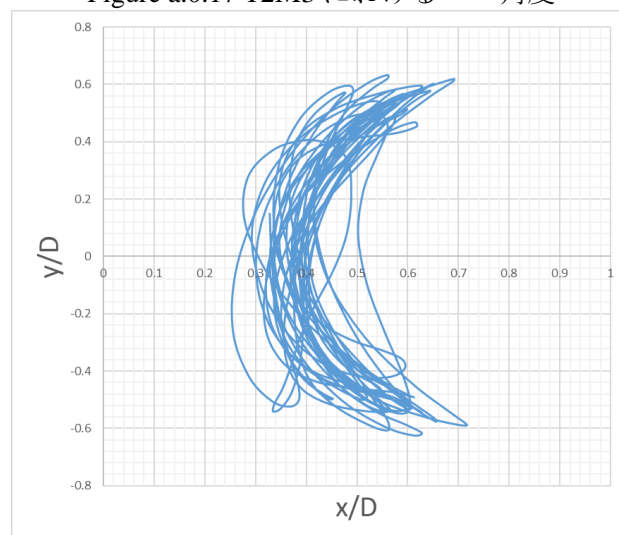


Figure a.0.18 T2M3における重心位置の軌跡

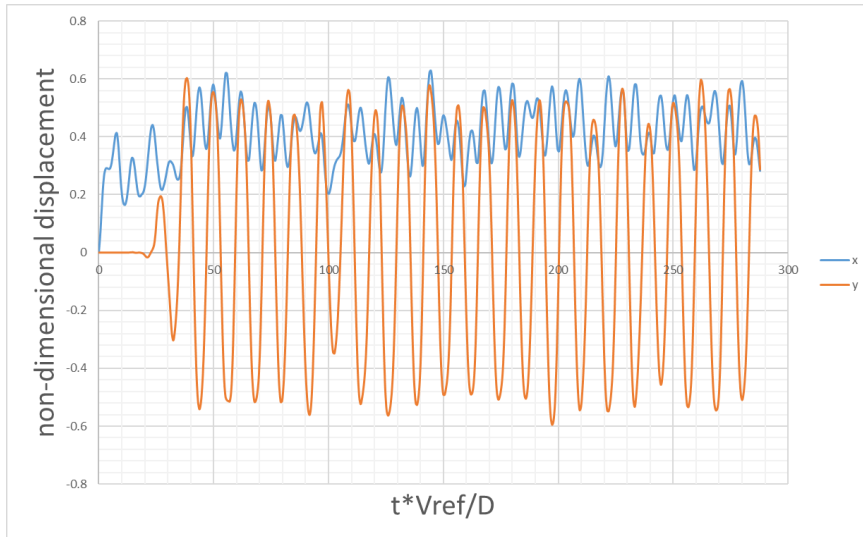


Figure a.0.19 T3M1 における重心位置

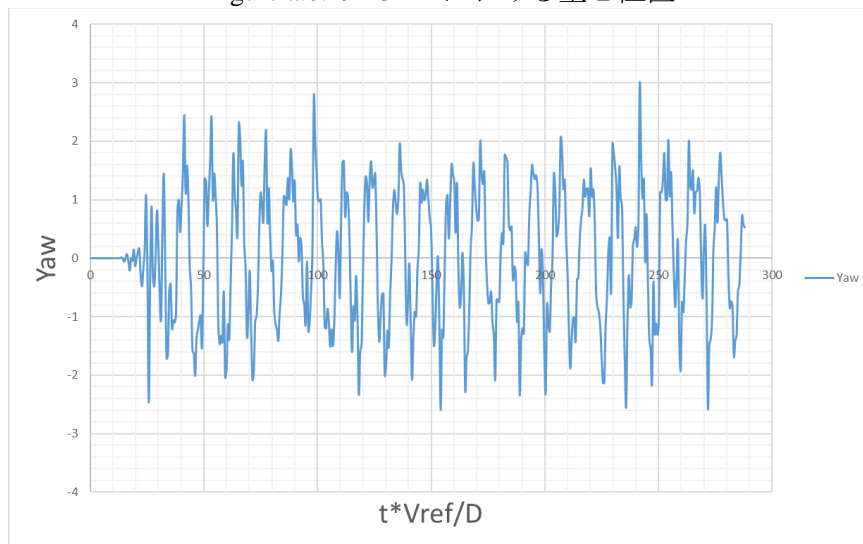


Figure a.0.20 T3M1 におけるヨー角度

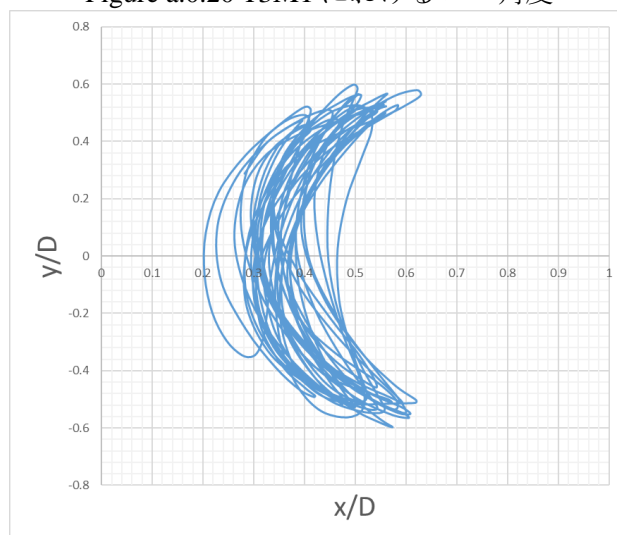


Figure a.0.21 T3M1 における重心位置の軌跡

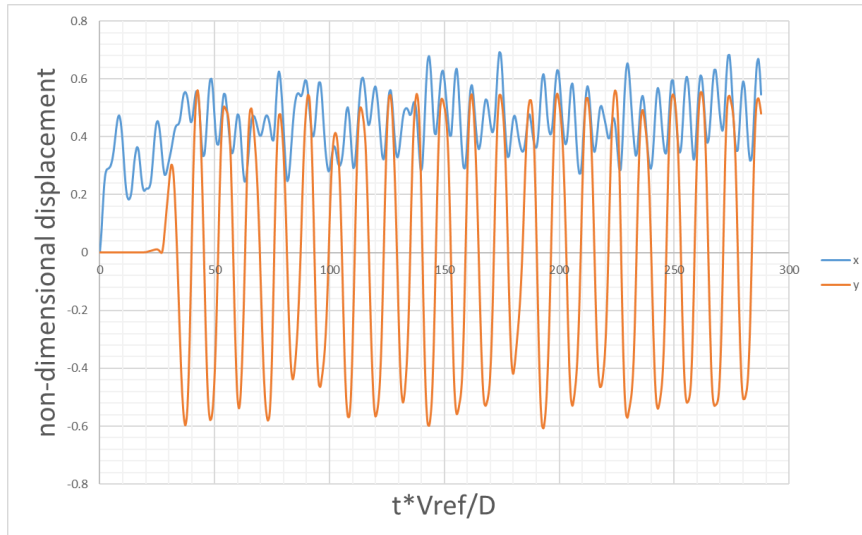


Figure a.0.22 T3M2 における重心位置

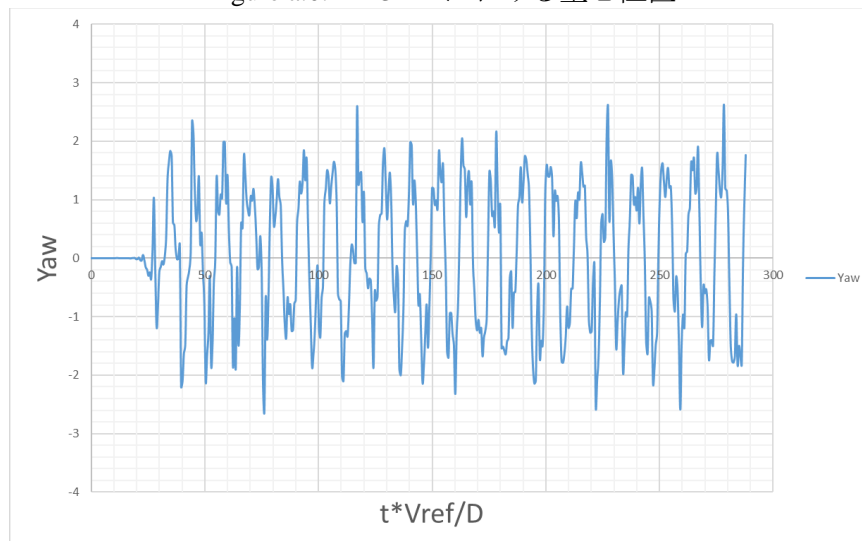


Figure a.0.23 T3M2 におけるヨー角度

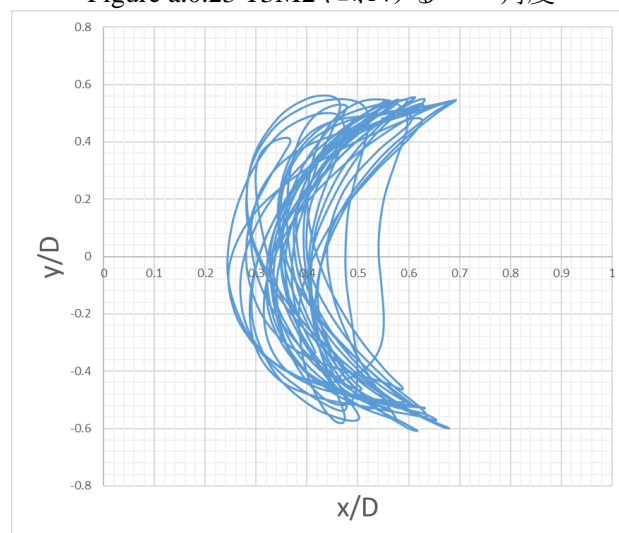


Figure a.0.24 T3M2 における重心位置の軌跡

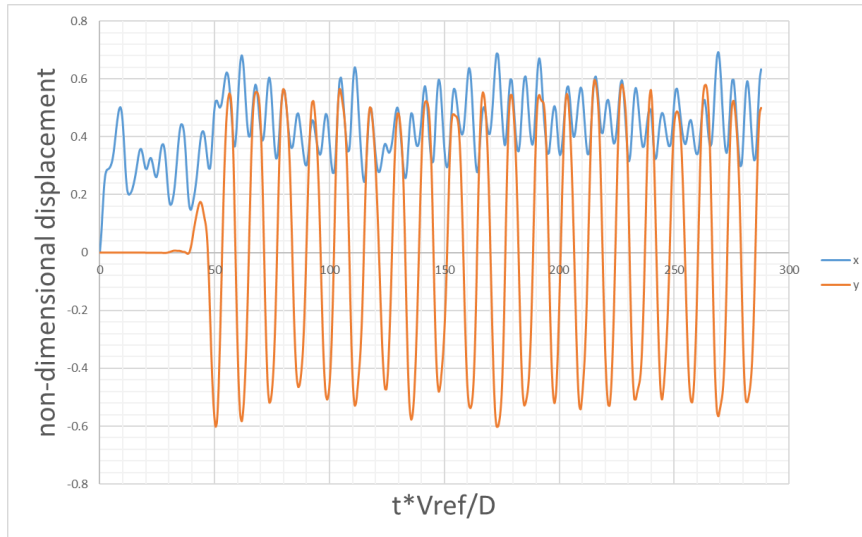


Figure a.0.25 T3M3における重心位置

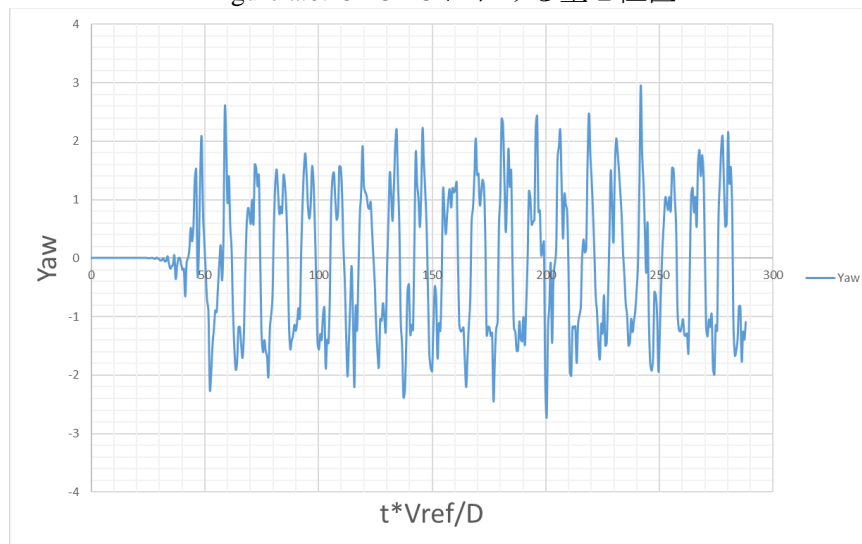


Figure a.0.26 T3M3におけるヨー角度

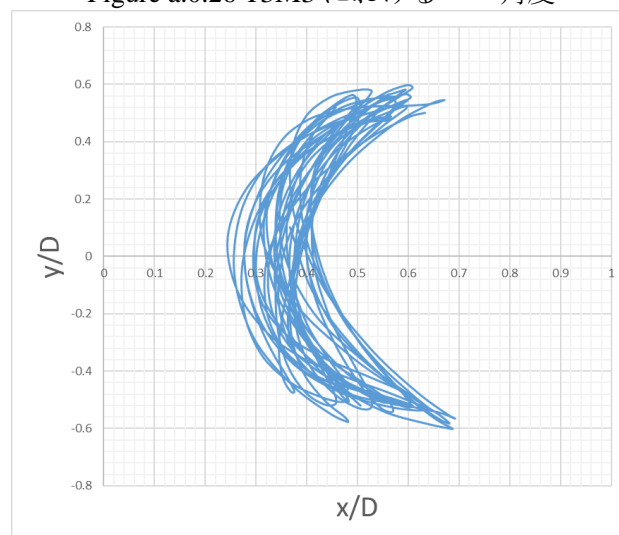


Figure a.0.27 T3M3における重心位置の軌跡

1.4 角柱のみの運動シミュレーション

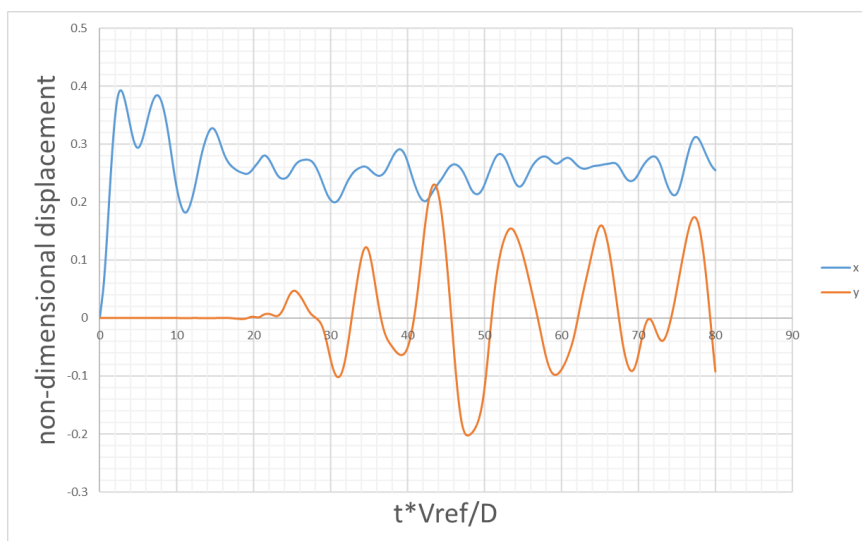


Figure a.1.1 Vr-y=5.9 の場合における重心位置

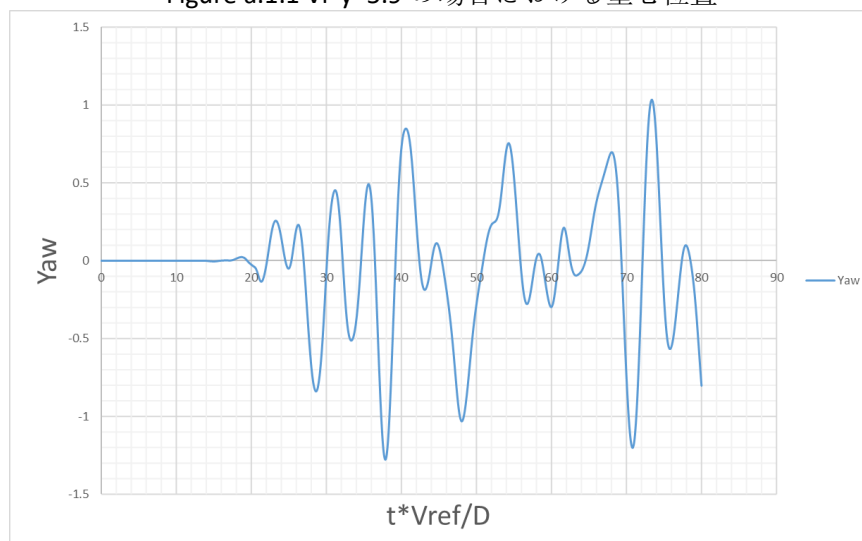


Figure a.1.2 Vr-y=5.9 の場合におけるヨー角度

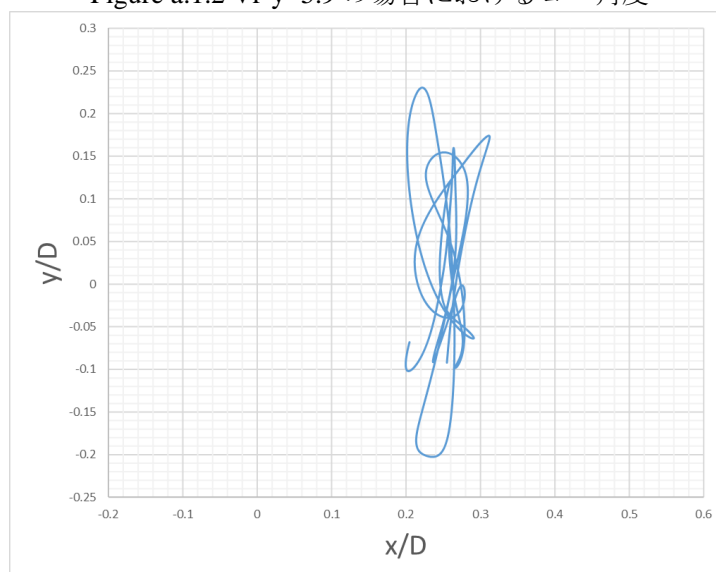


Figure a.1.3 Vr-y=5.9 における重心位置の軌跡

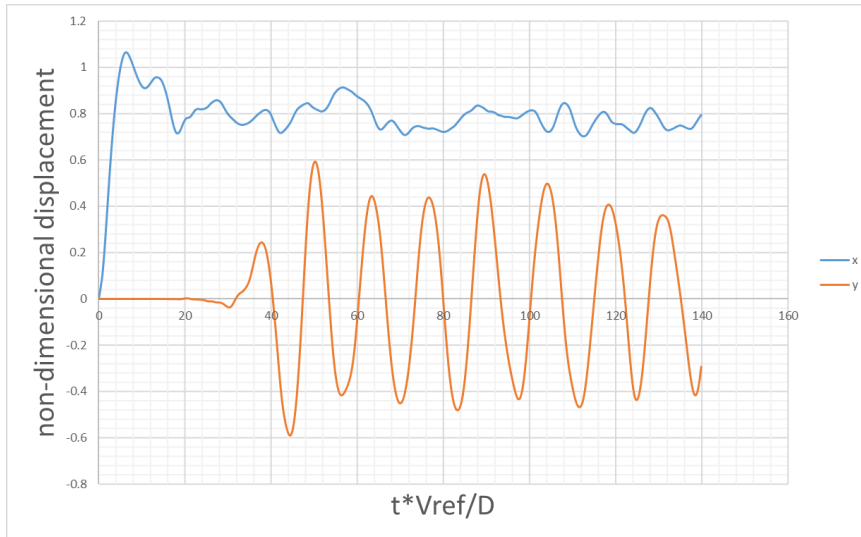


Figure a.1.4 $V_{r-y}=10.4$ の場合における重心位置

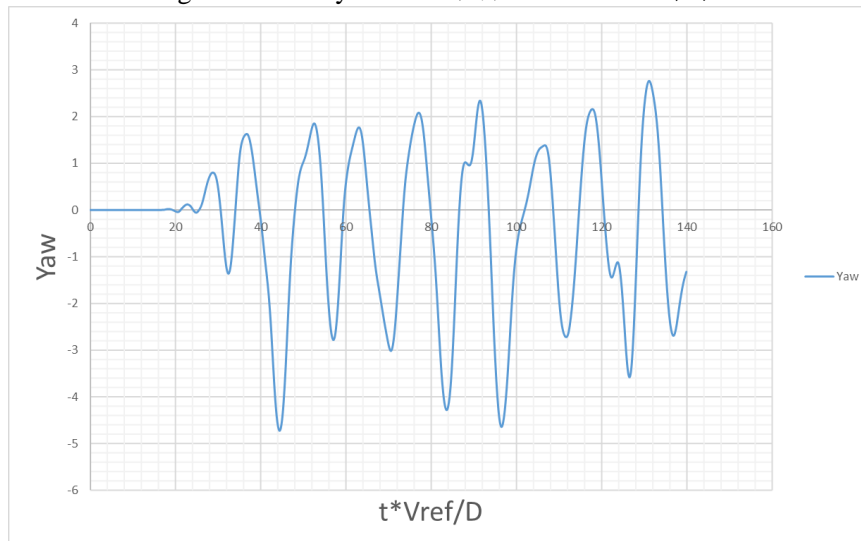


Figure a.1.5 $V_{r-y}=10.4$ の場合におけるヨー角度

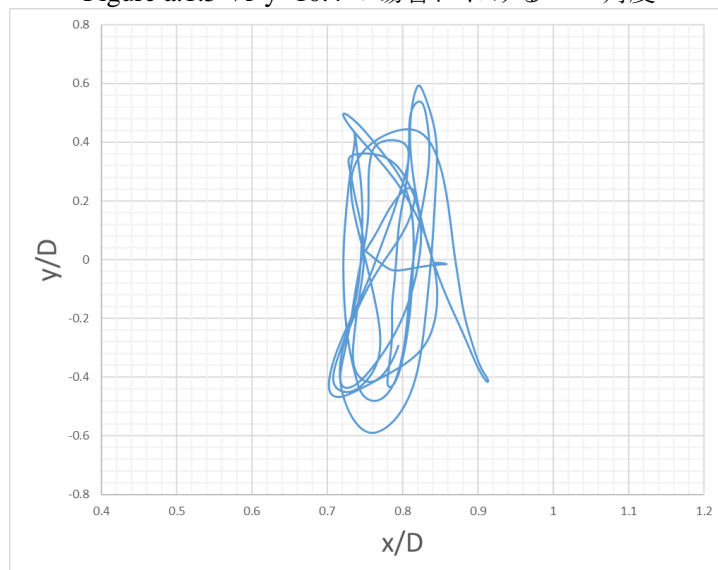


Figure a.1.6 $V_{r-y}=10.4$ における重心位置の軌跡

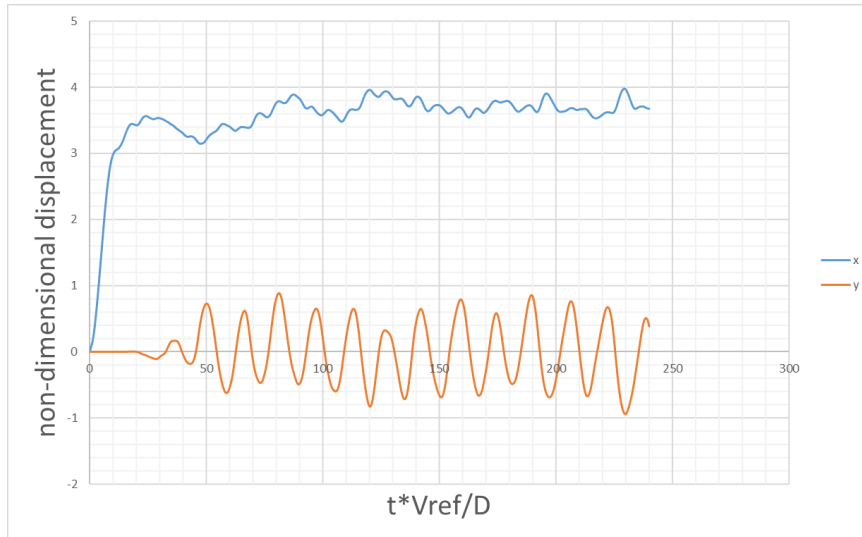


Figure a.1.7 $Vr-y=19.8$ の場合における重心位置

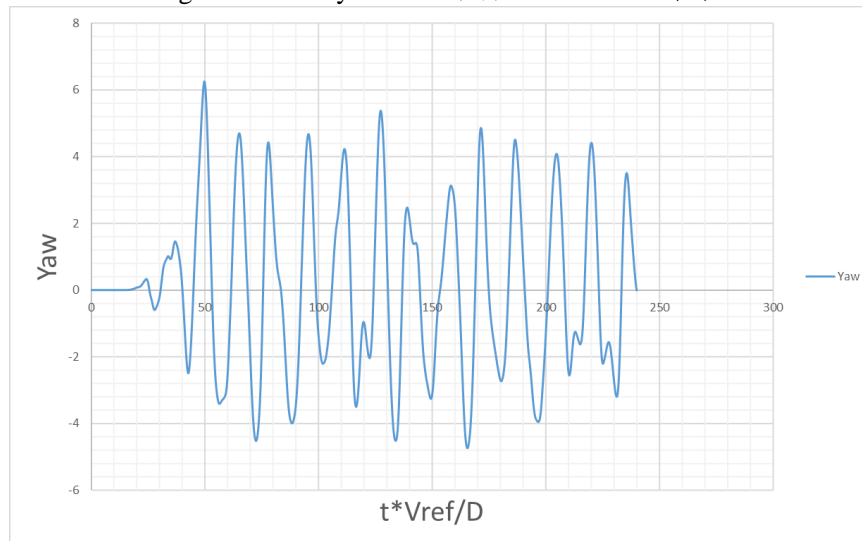


Figure a.1.8 $Vr-y=19.8$ の場合におけるヨー角度

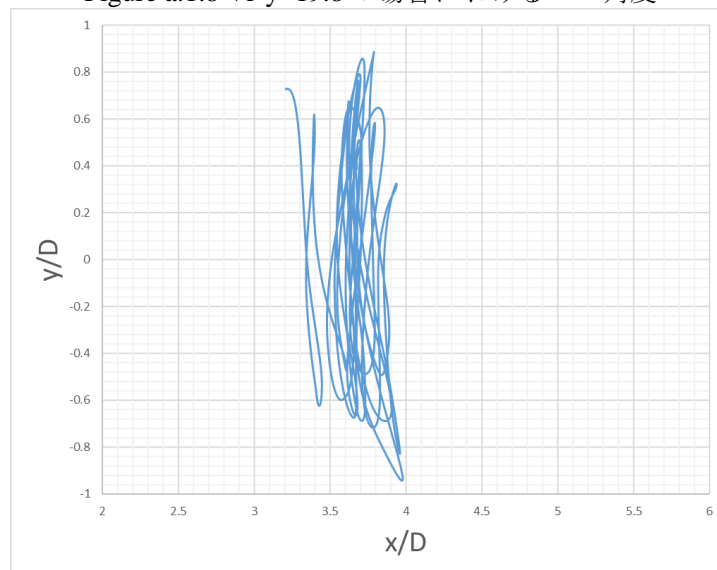


Figure a.1.9 $Vr-y=19.8$ における重心位置の軌跡

2. ポンツーン材を加えた場合の運動シミュレーション

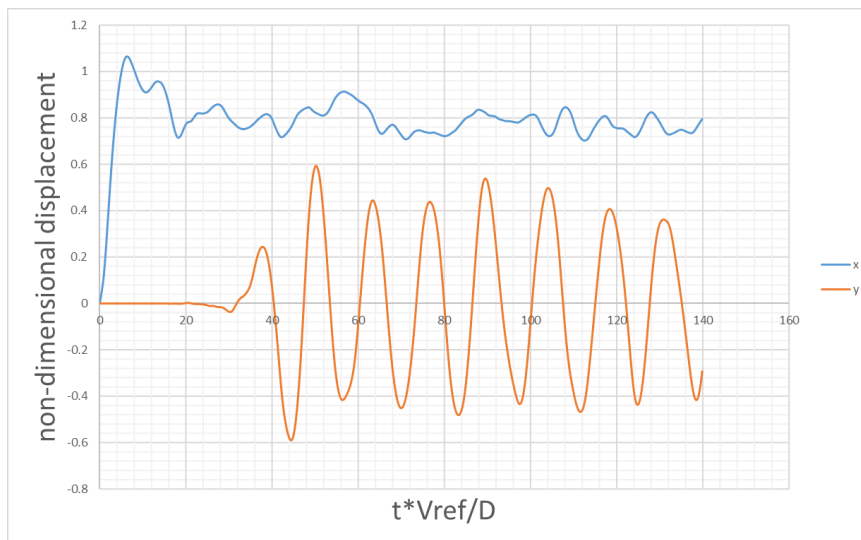


Figure a.2.1 NoPT における重心位置

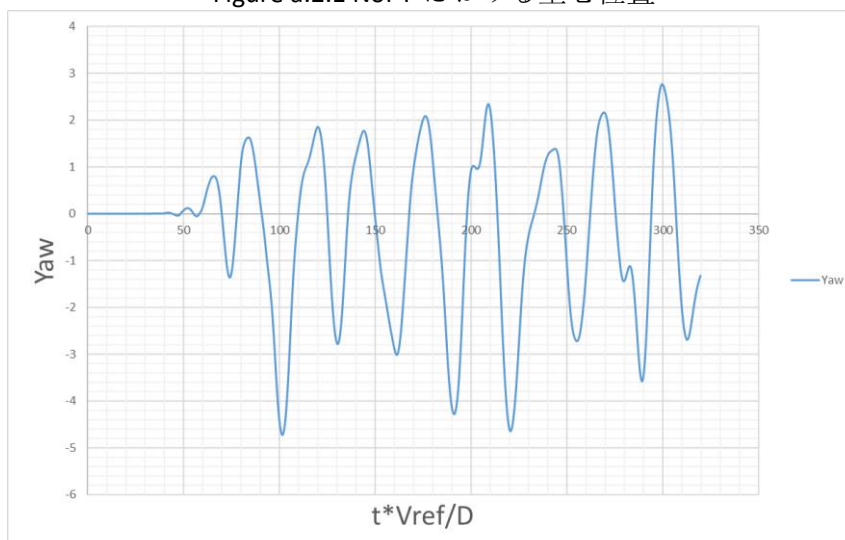


Figure a.2.2 NoPT におけるヨー角度

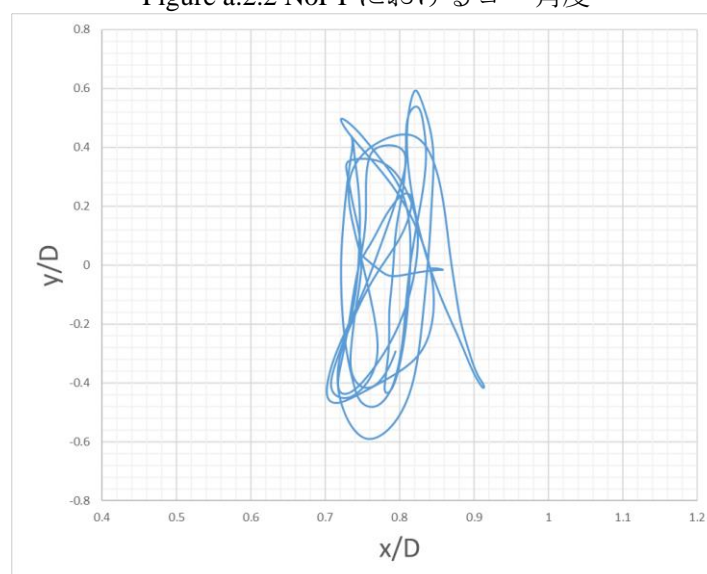


Figure a.2.3 NoPT における重心位置の軌跡

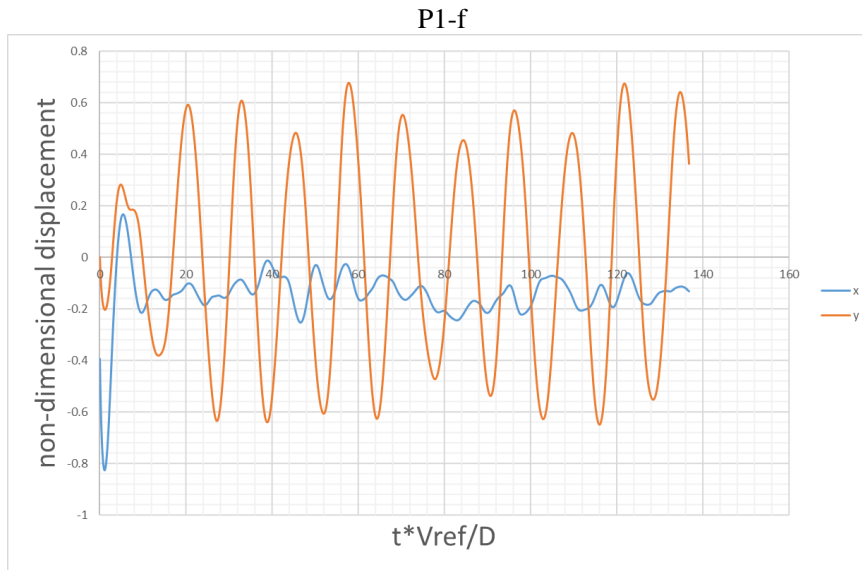


Figure a.2.4 P1-fにおける重心位置

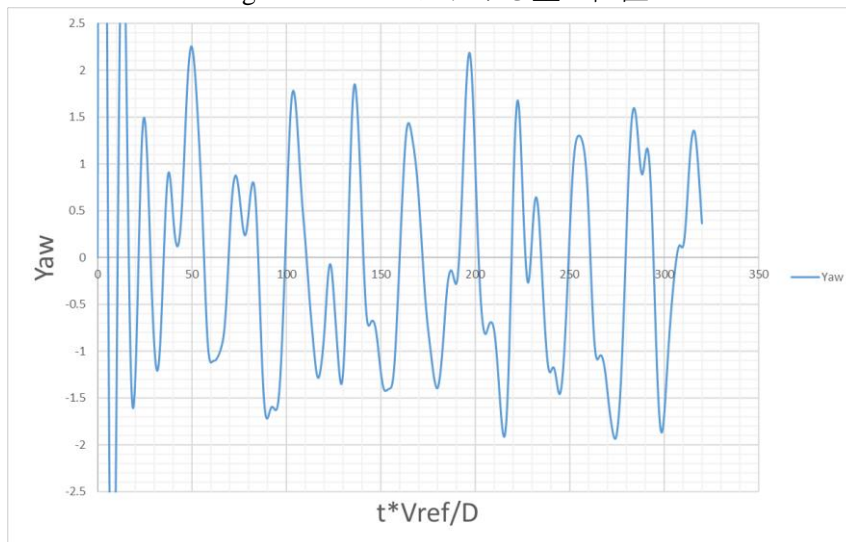


Figure a.2.5 P1-fにおけるヨー角度

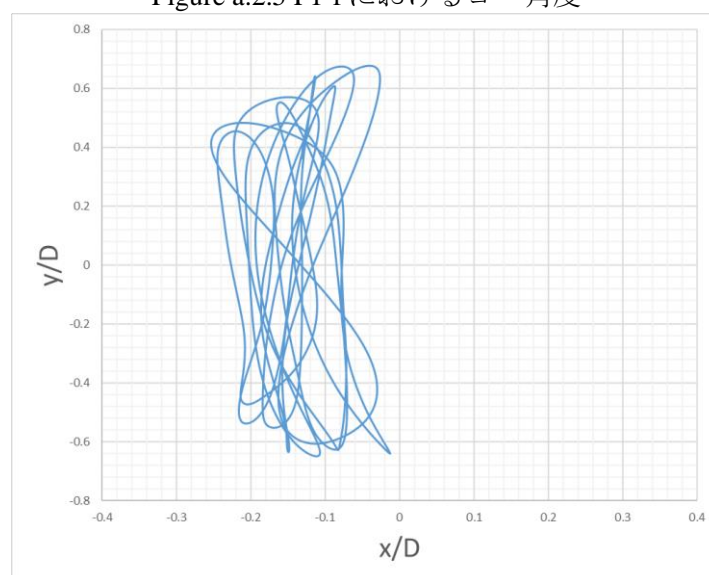


Figure a.2.6 P1-fにおける重心位置の軌跡

P1-r

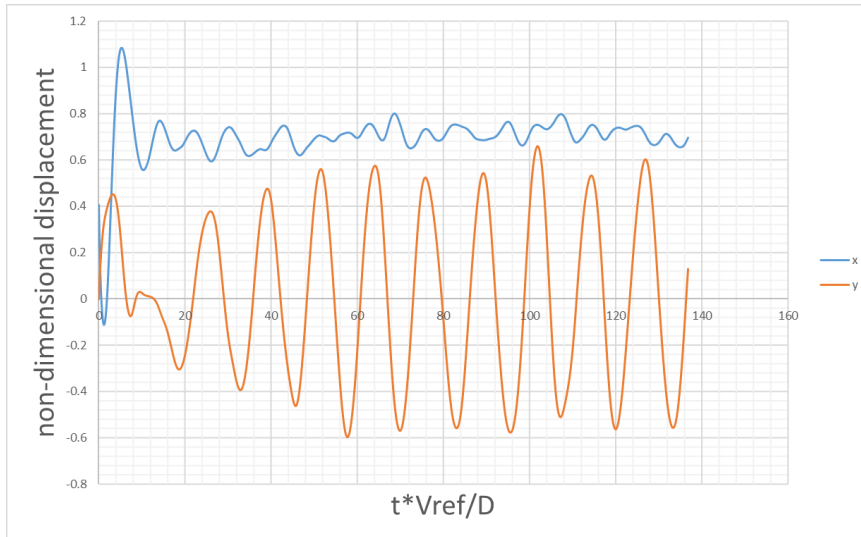


Figure a.2.7 P1-rにおける重心位置

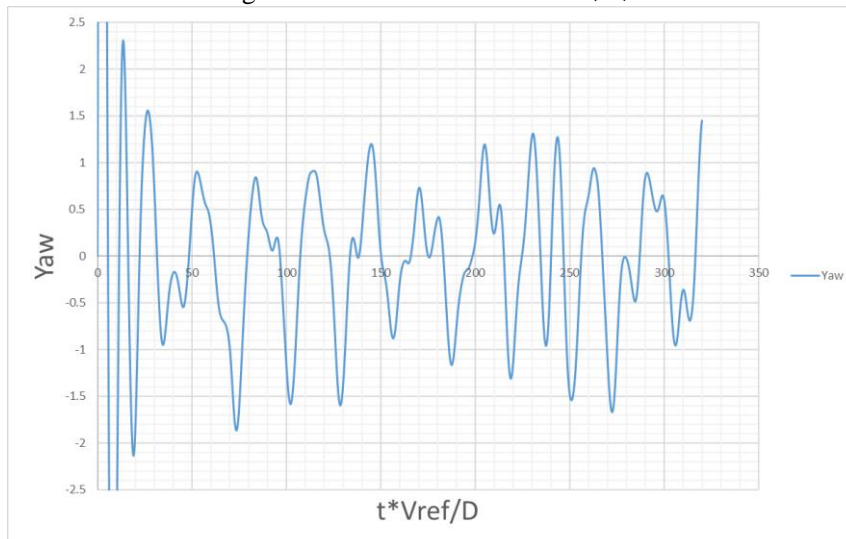


Figure a.2.8 P1-rにおけるヨー角度

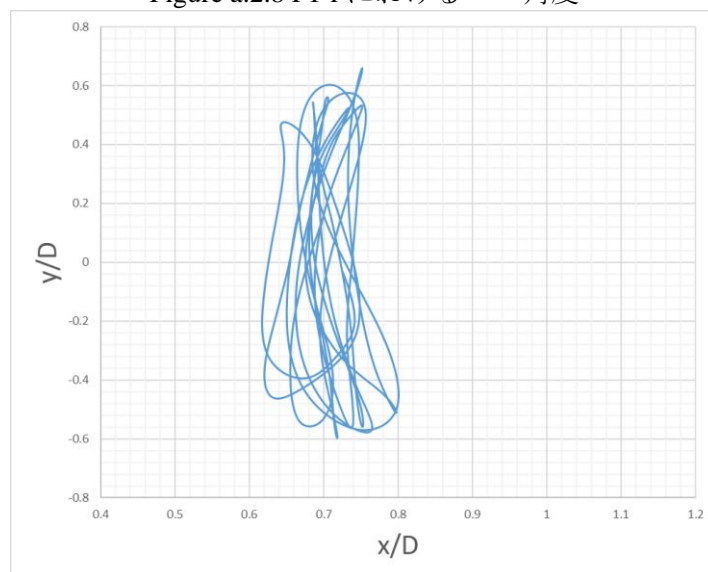


Figure a.2.9 P1-rにおける重心位置の軌跡
P2-fr

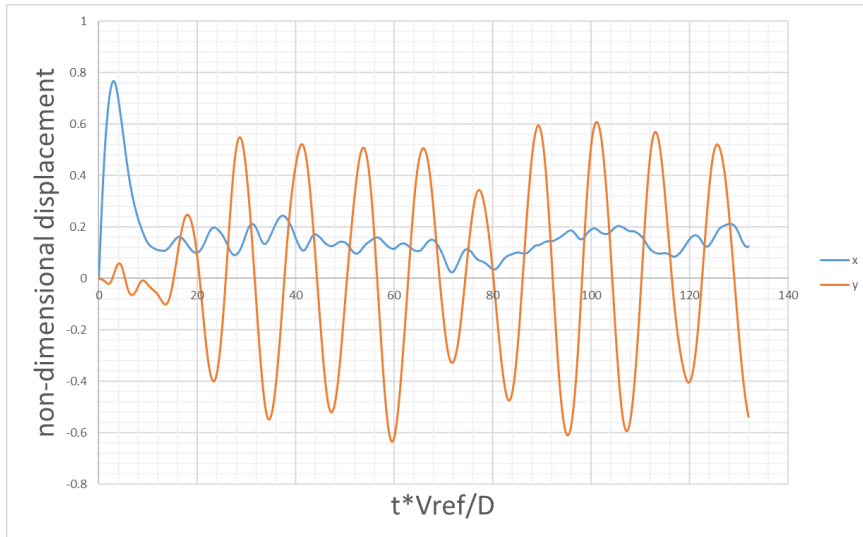


Figure a.2.10 P2-fr における重心位置

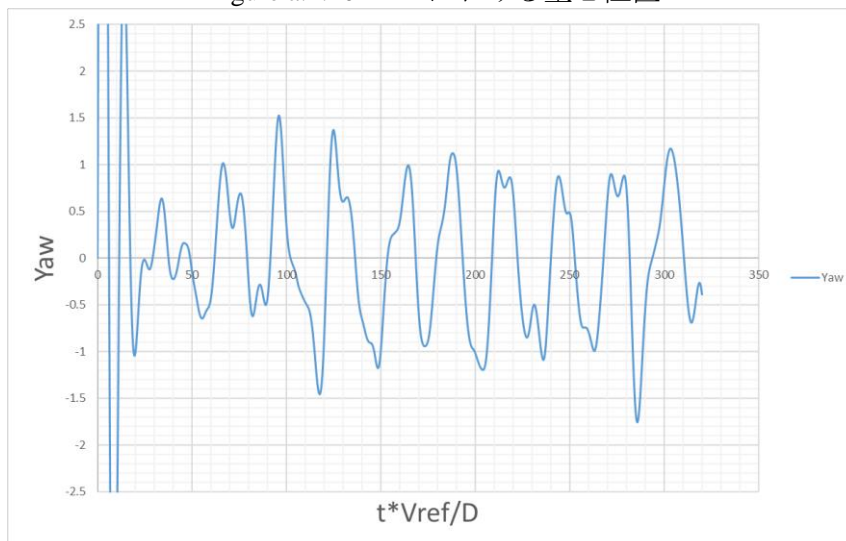


Figure a.2.11 P2-fr におけるヨー角度

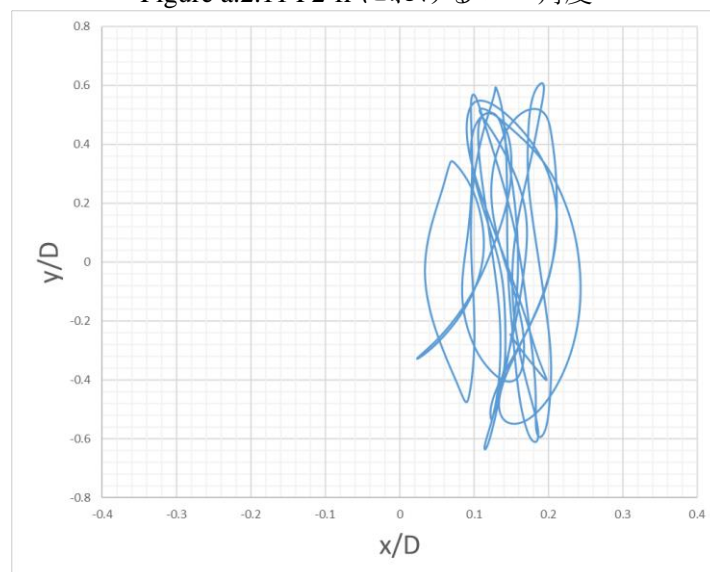


Figure a.2.12 P2-fr における重心位置の軌跡
P2-s

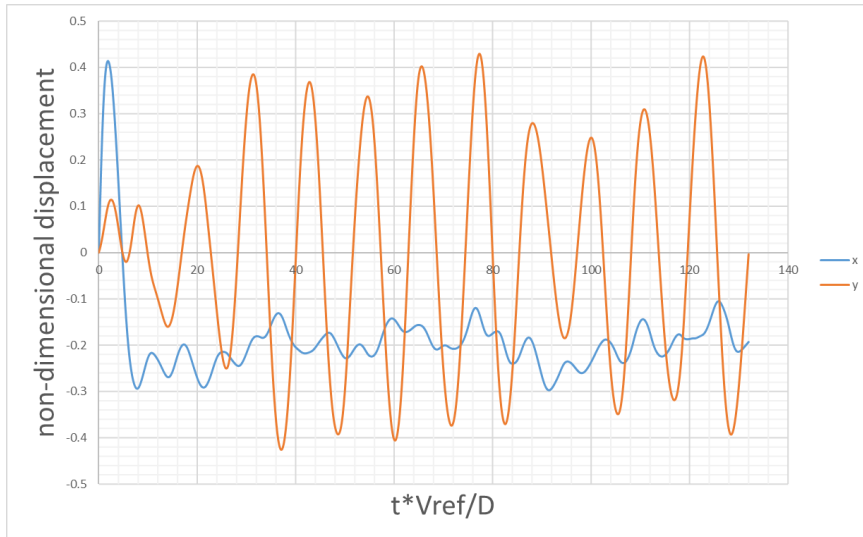


Figure a.2.13 P2-s における重心位置

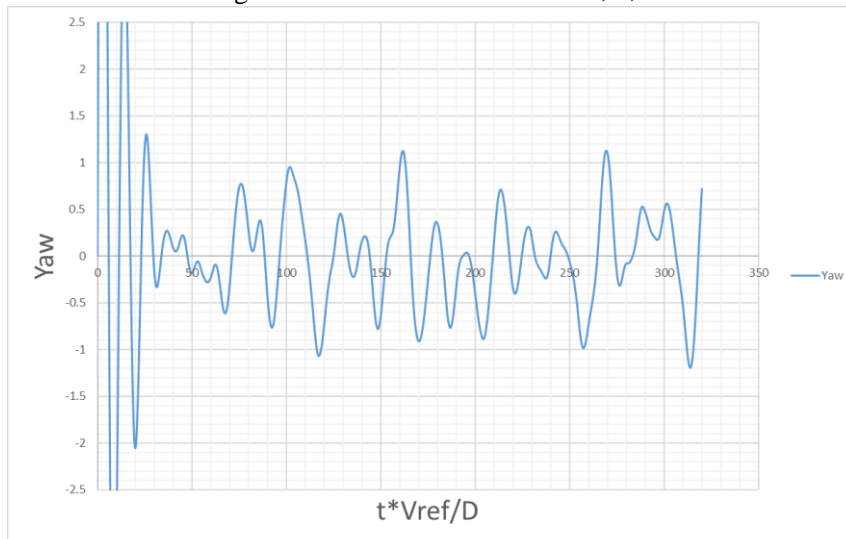


Figure a.2.14 P2-s におけるヨー角度

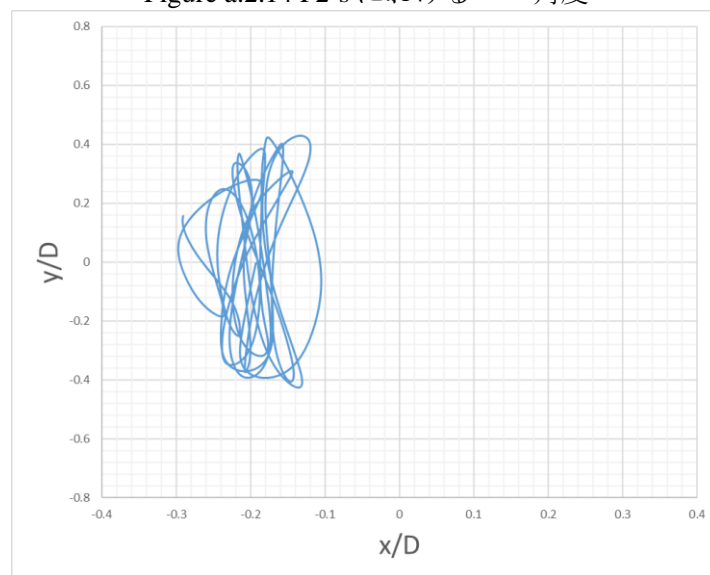


Figure a.2.15 P2-s における重心位置の軌跡
P4

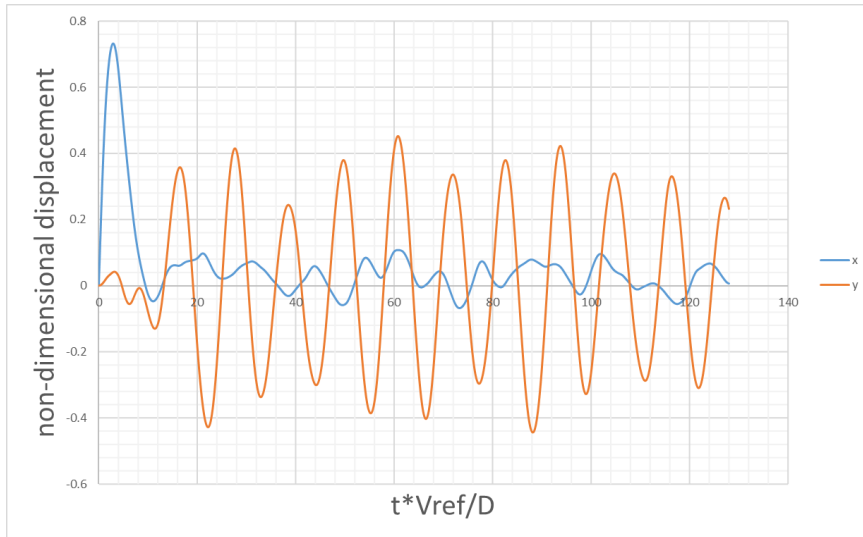


Figure a.2.16 P4 における重心位置

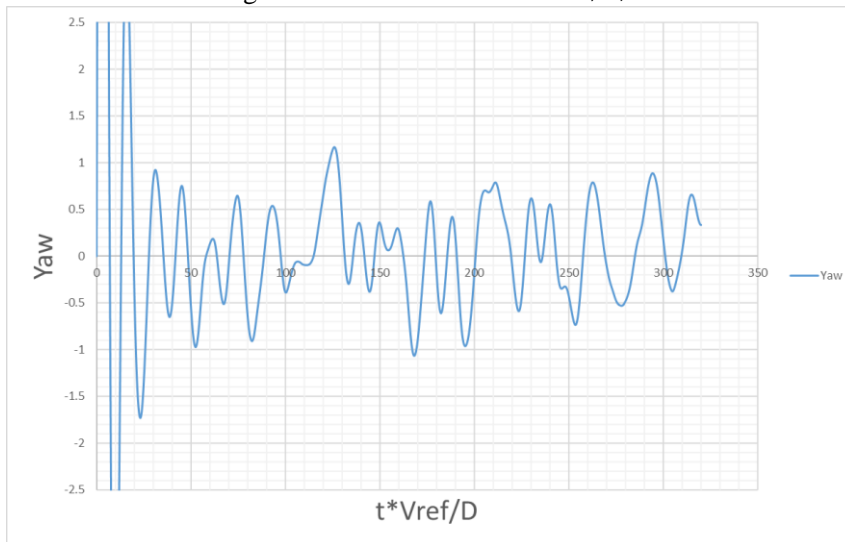


Figure a.2.17 P4 におけるヨー角度

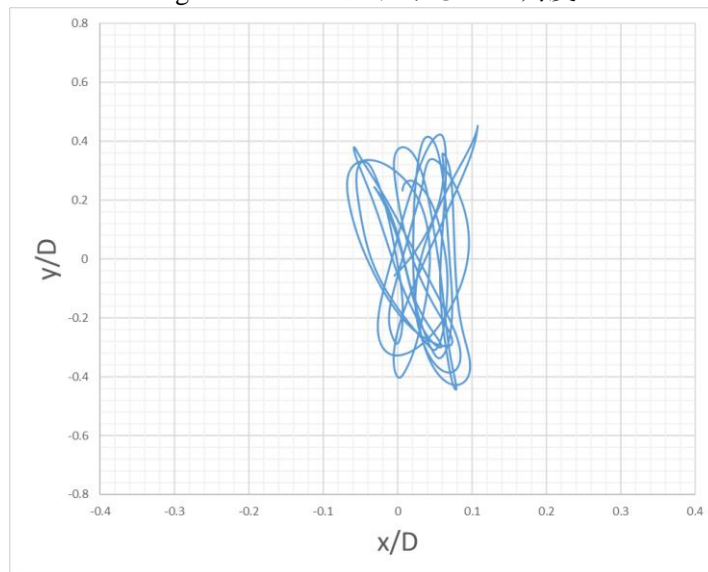


Figure a.2.18 P4 における重心位置の軌跡

2. Appendix b

Appendix b では、可視化処理を行った結果を提示する。

Table b.1 目次

b.0.1~b.0.100	ケース T2M2 の運動シミュレーション
b.1.1~b.1.120	V _r =10.4 ケース NoPT
b.2.1~b.2.120	V _r =10.4 ケース P1-f
b.3.1~b.3.120	V _r =10.4 ケース P1-r
b.4.1~b.4.120	V _r =10.4 ケース P2-fr
b.5.1~b.5.120	V _r =10.4 ケース P2-s
b.6.1~b.6.120	V _r =10.4 ケース P4

0. ケース T2M2 の運動シミュレーション

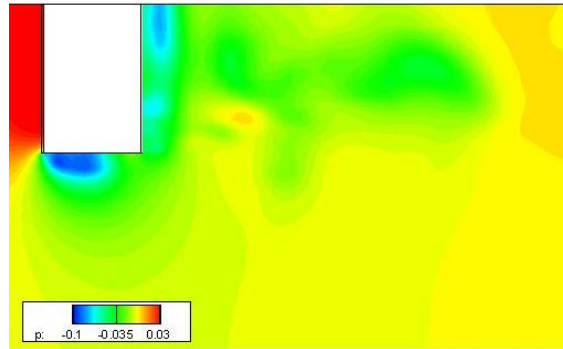


Figure b.0.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

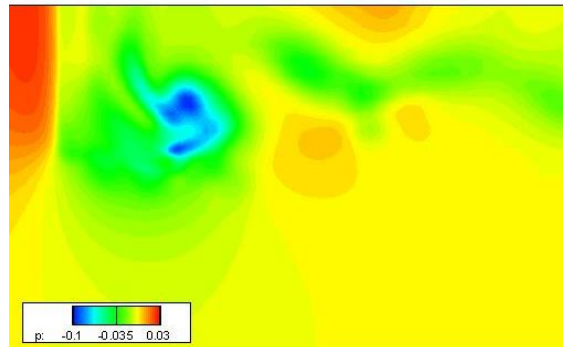


Figure b.0.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

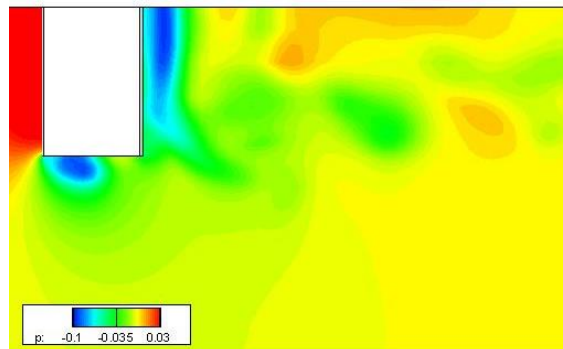


Figure b.0.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

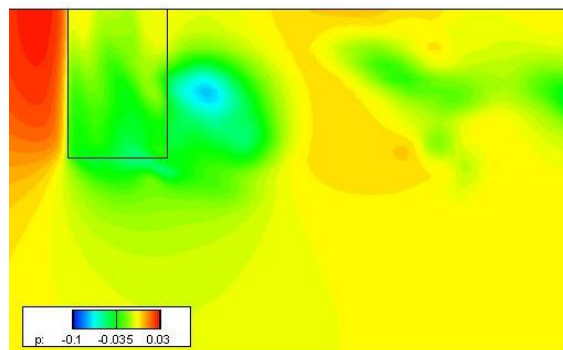


Figure b.0.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

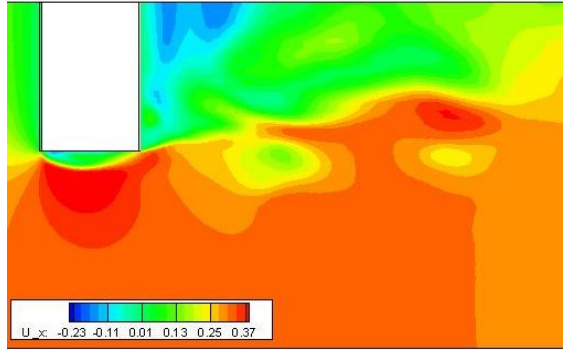


Figure b.0.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

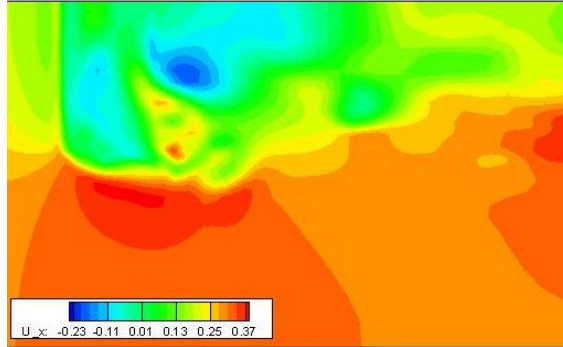


Figure b.0.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

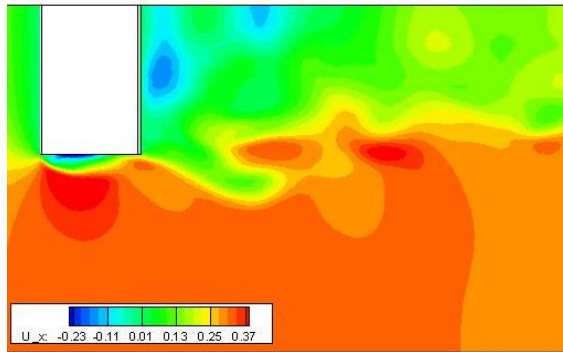


Figure b.0.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

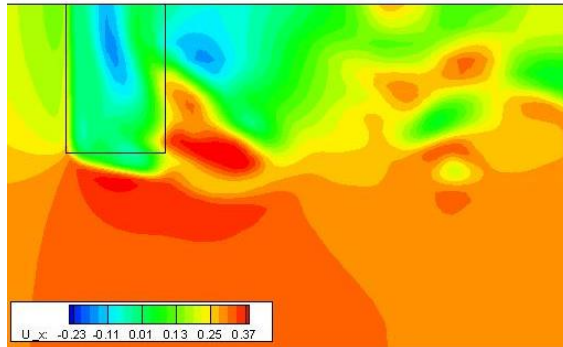


Figure b.0.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

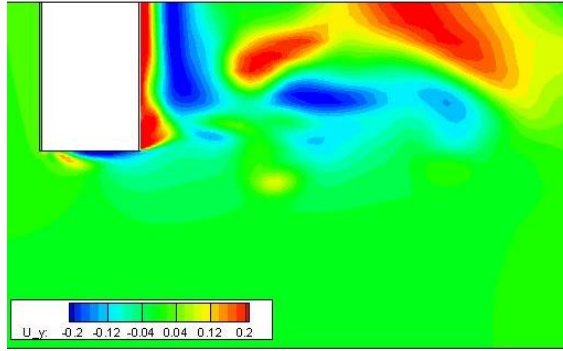


Figure b.0.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

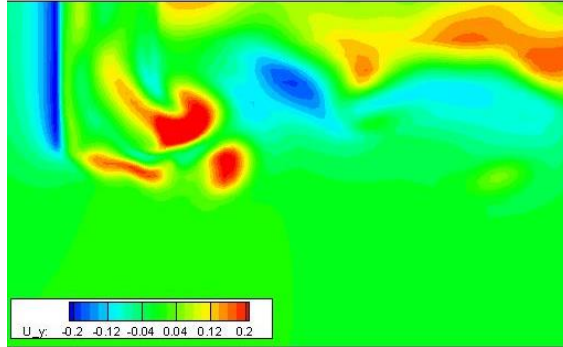


Figure b.0.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

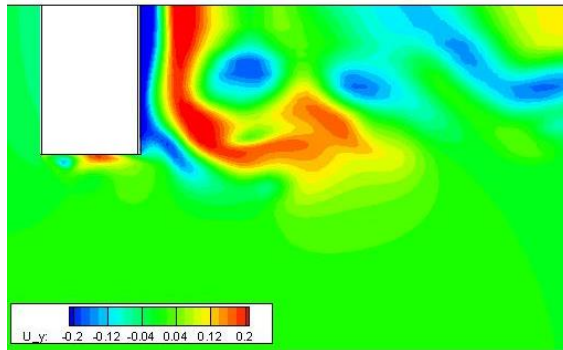


Figure b.0.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

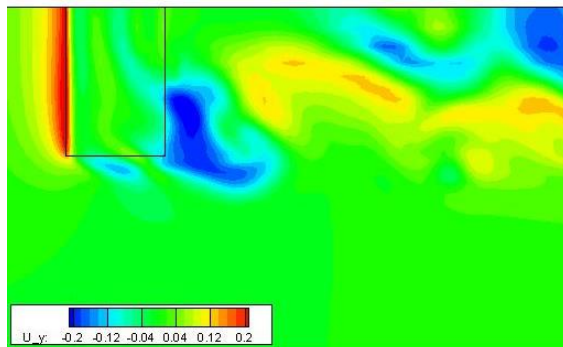


Figure b.0.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

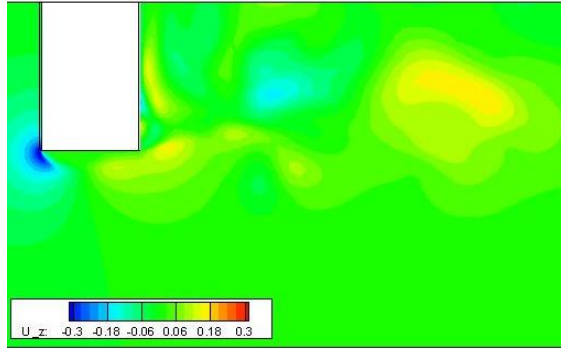


Figure b.0.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

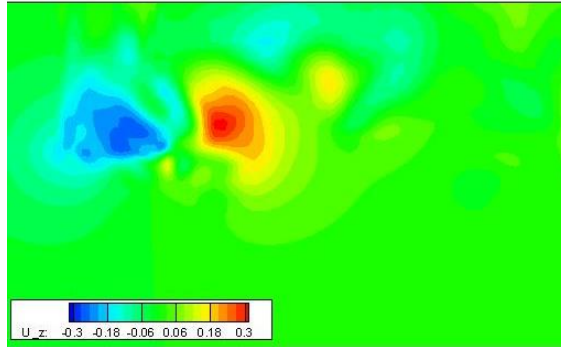


Figure b.0.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

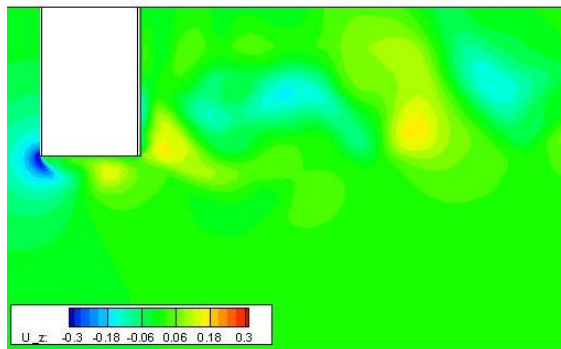


Figure b.0.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

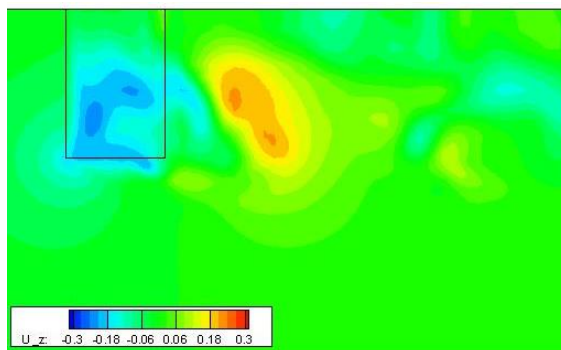


Figure b.0.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

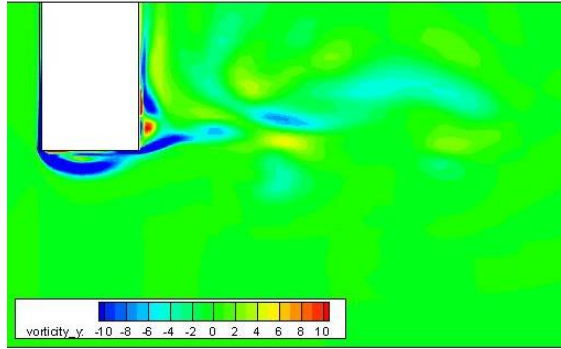


Figure b.0.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

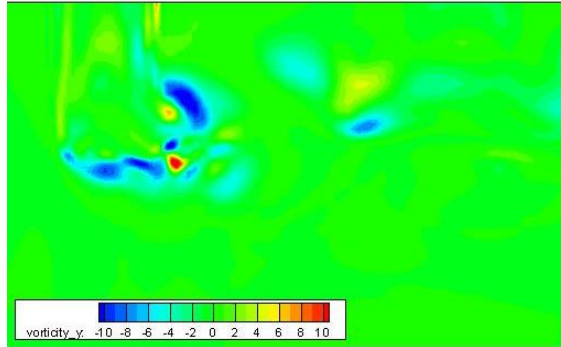


Figure b.0.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

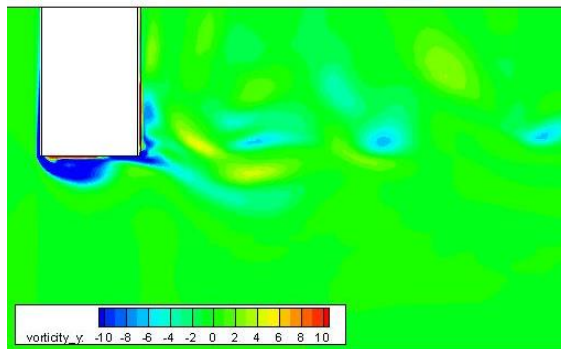


Figure b.0.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

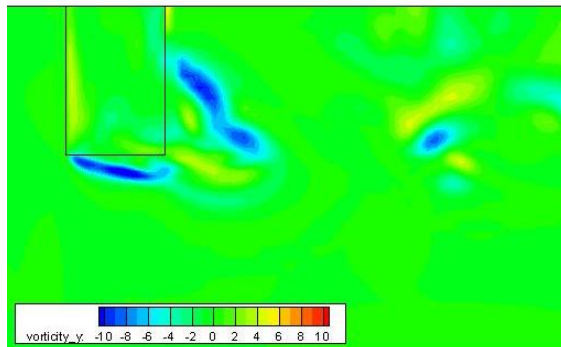


Figure b.0.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

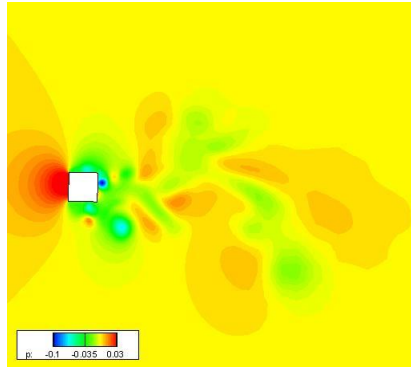


Figure b.0.21 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

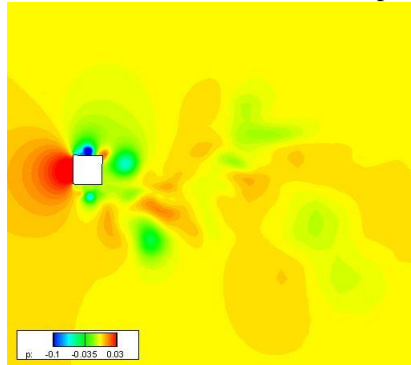


Figure b.0.22 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

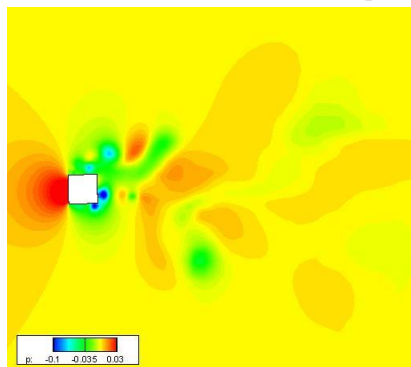


Figure b.0.23 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

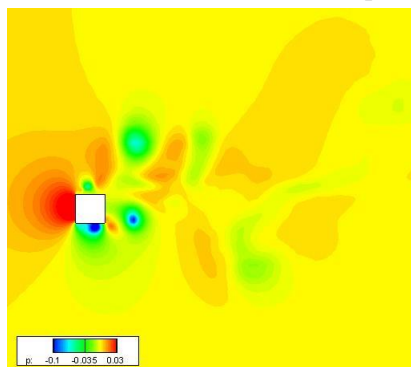


Figure b.0.24 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

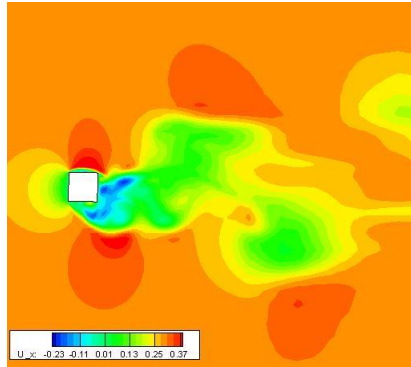


Figure b.0.25 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

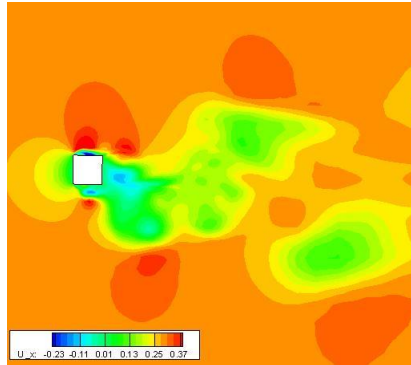


Figure b.0.26 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

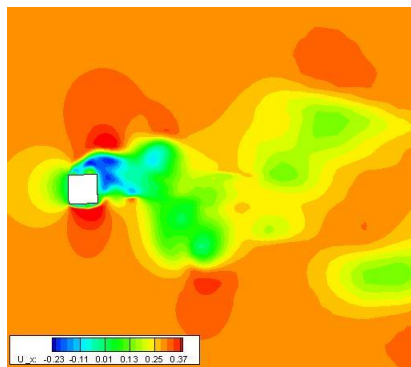


Figure b.0.27 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

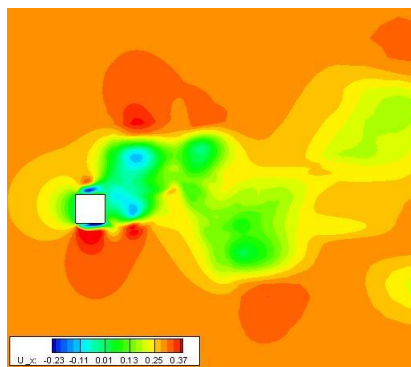


Figure b.0.28 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

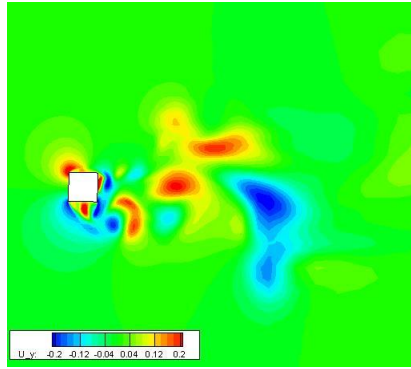


Figure b.0.29 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

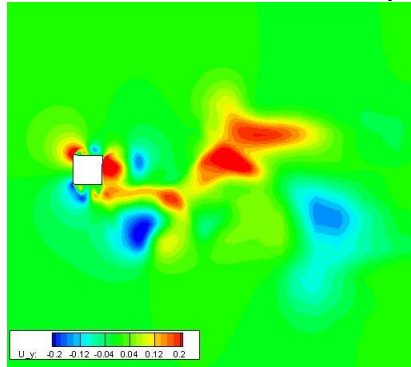


Figure b.0.30 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

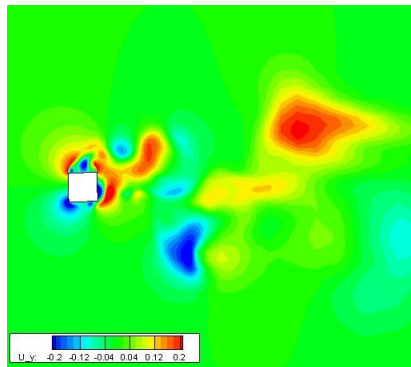


Figure b.0.31 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

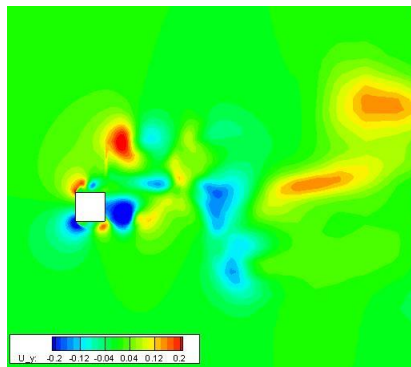


Figure b.0.32 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

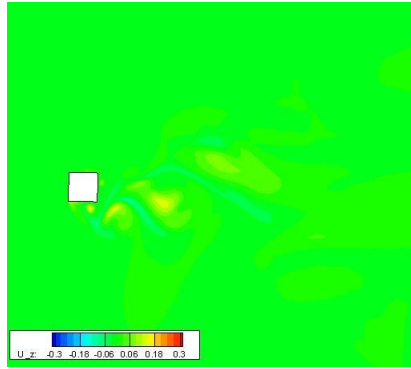


Figure b.0.33 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

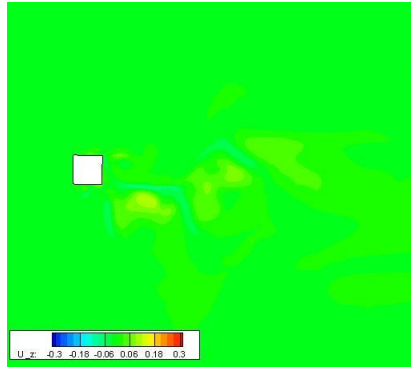


Figure b.0.34 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

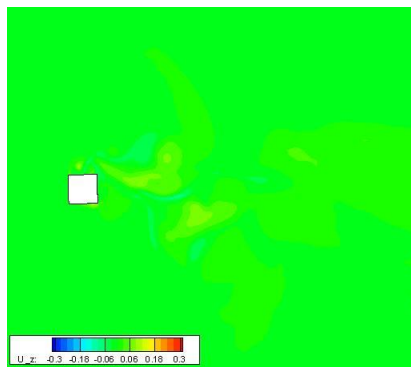


Figure b.0.35 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

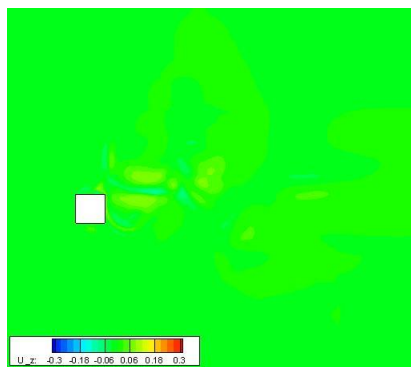


Figure b.0.36 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

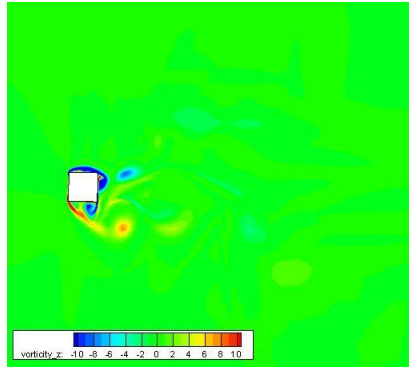


Figure b.0.37 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

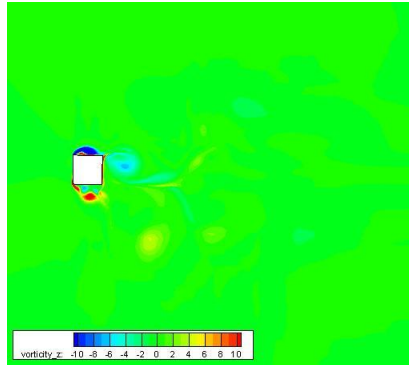


Figure b.0.38 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

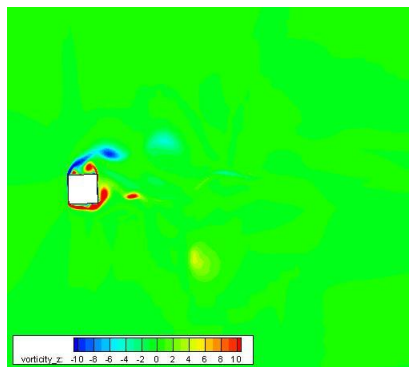


Figure b.0.39 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

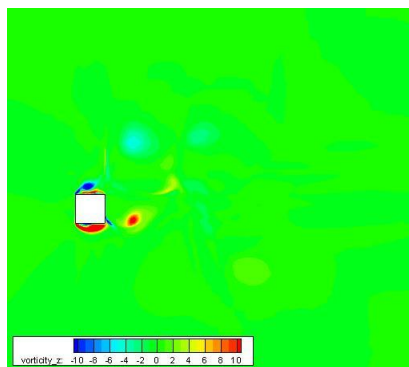


Figure b.0.40 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

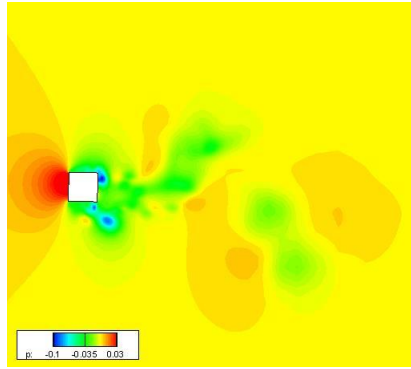


Figure b.0.41 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布($t = 0$)

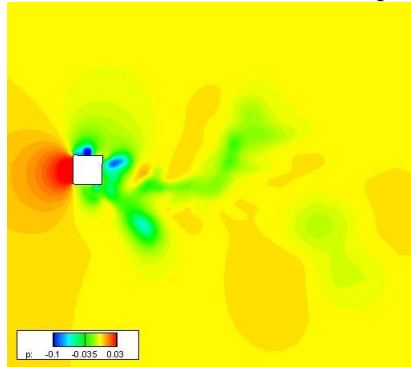


Figure b.0.42 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

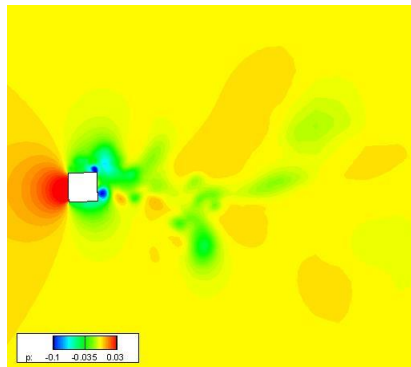


Figure b.0.43 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

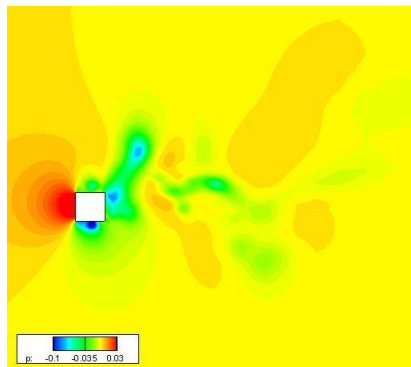


Figure b.0.44 平面 $z=-0.1875$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

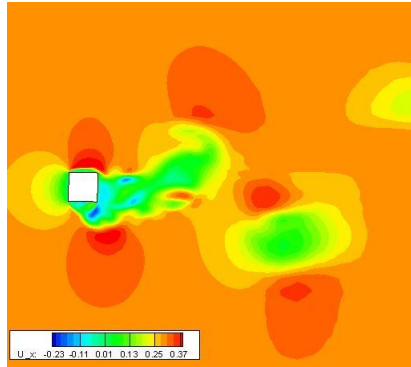


Figure b.0.45 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

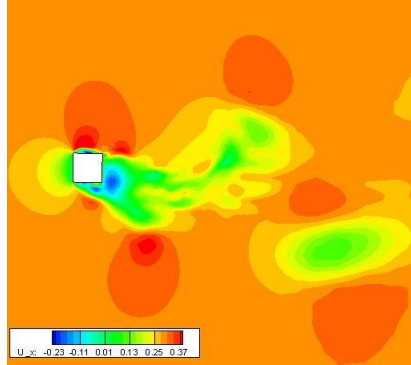


Figure b.0.46 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

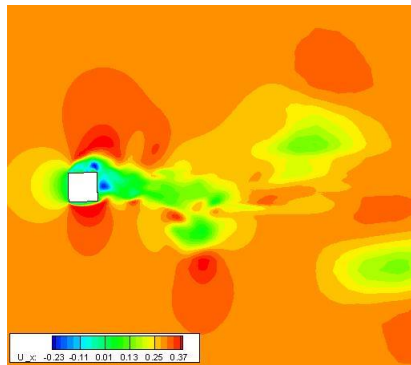


Figure b.0.47 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

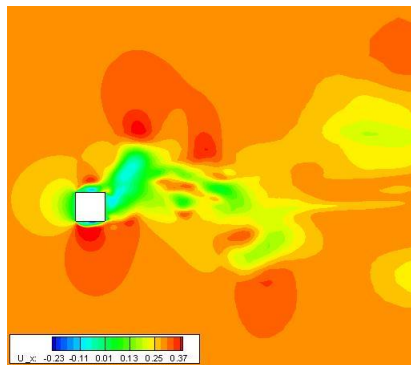


Figure b.0.48 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

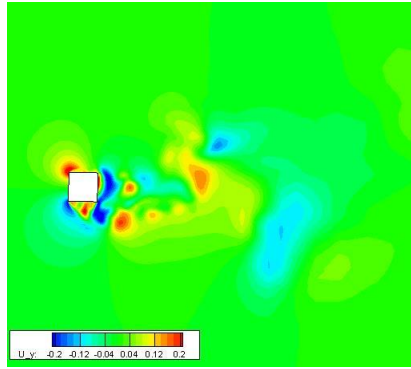


Figure b.0.49 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

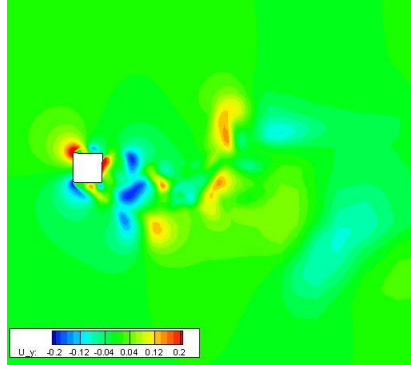


Figure b.0.50 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

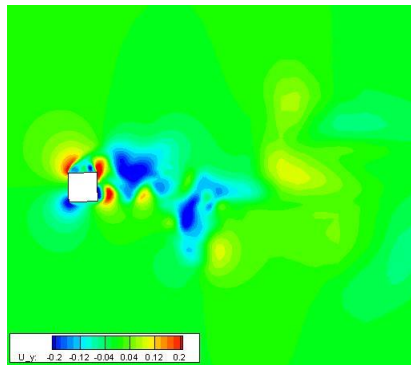


Figure b.0.51 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

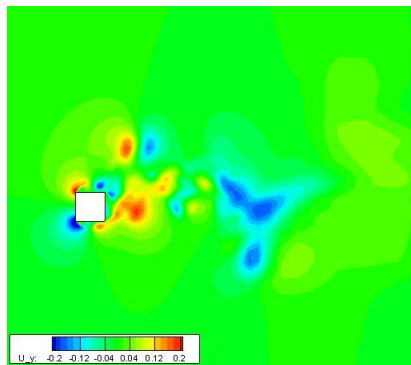


Figure b.0.52 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

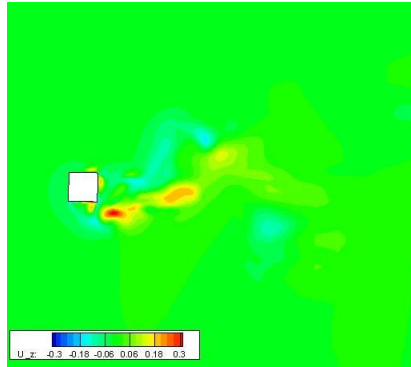


Figure b.0.53 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

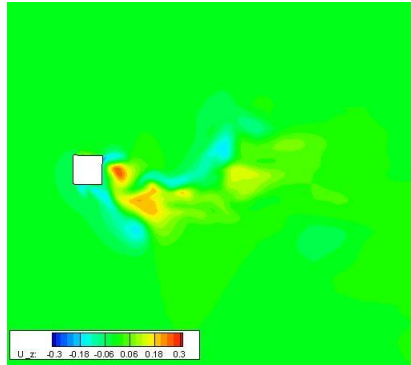


Figure b.0.54 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

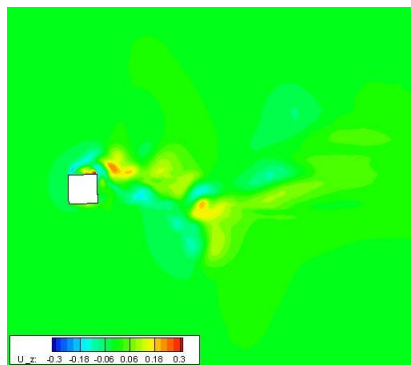


Figure b.0.55 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

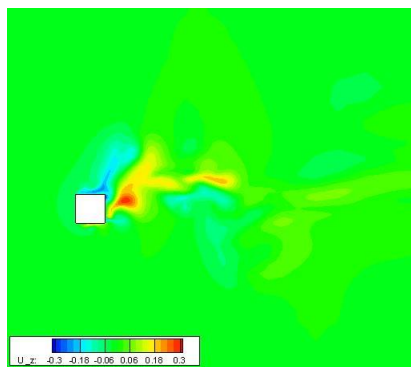


Figure b.0.56 平面 $z=-0.1875$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

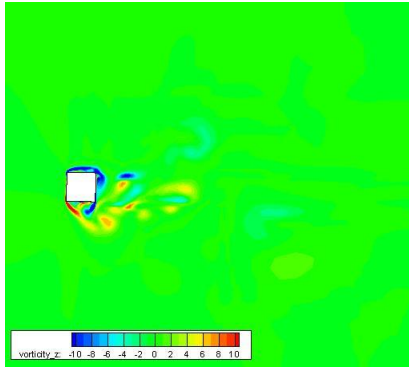


Figure b.0.57 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

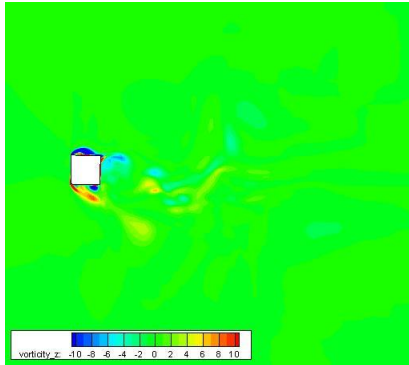


Figure b.0.58 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

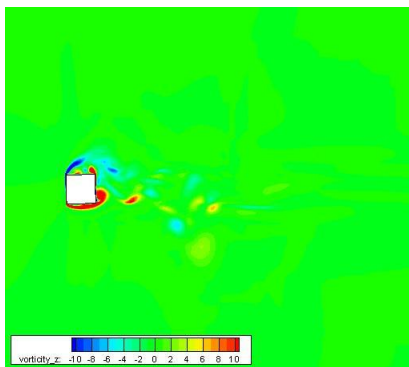


Figure b.0.59 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

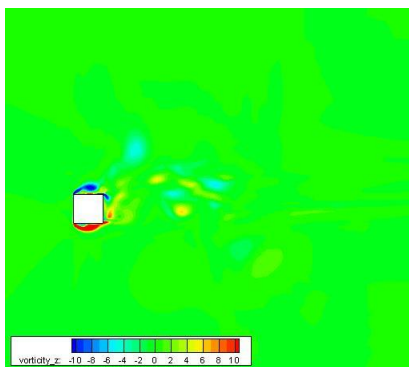


Figure b.0.60 平面 $z=-0.1875$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

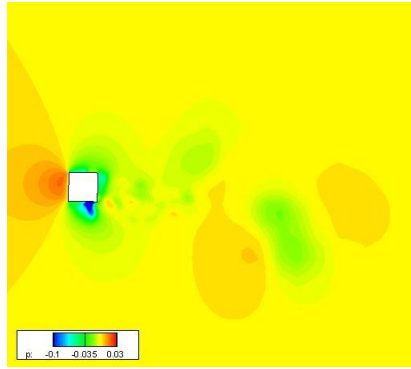


Figure b.0.61 平面 $z=-0.37$ における圧力 p の分布($t = 0$)

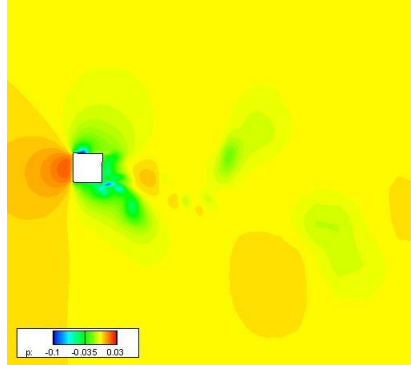


Figure b.0.62 平面 $z=-0.37$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

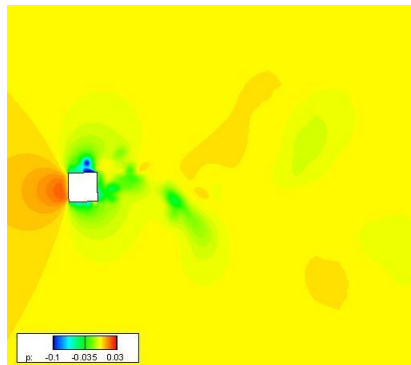


Figure b.0.63 平面 $z=-0.37$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

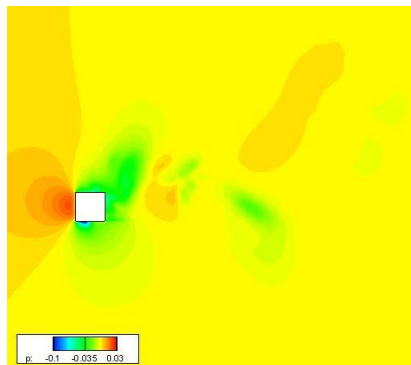


Figure b.0.64 平面 $z=-0.37$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

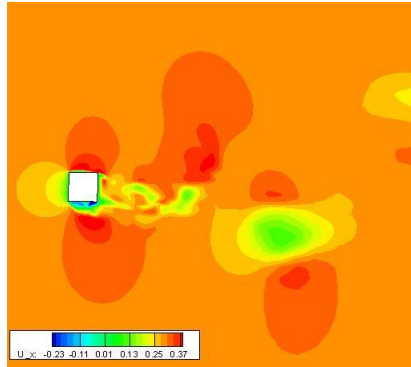


Figure b.0.65 平面 $z=-0.37$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

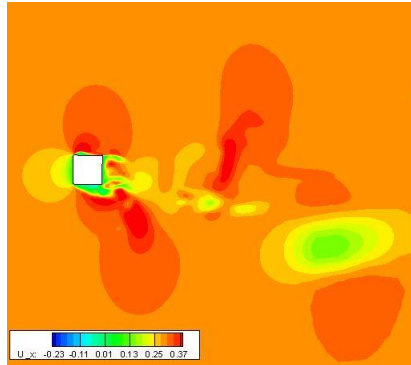


Figure b.0.66 平面 $z=-0.37$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

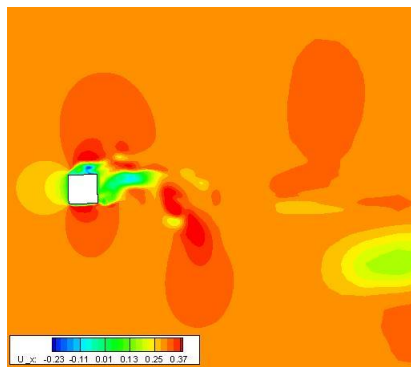


Figure b.0.67 平面 $z=-0.37$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

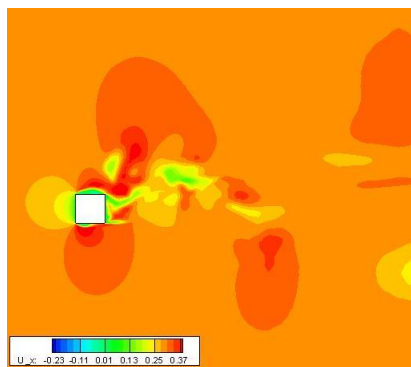


Figure b.0.68 平面 $z=-0.37$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

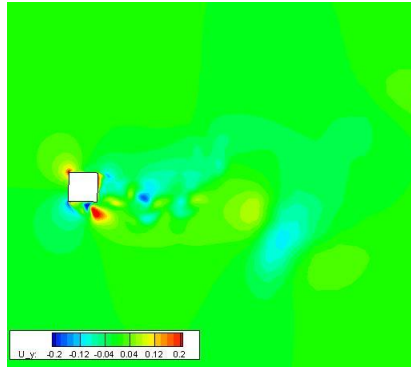


Figure b.0.69 平面 $z=-0.37$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

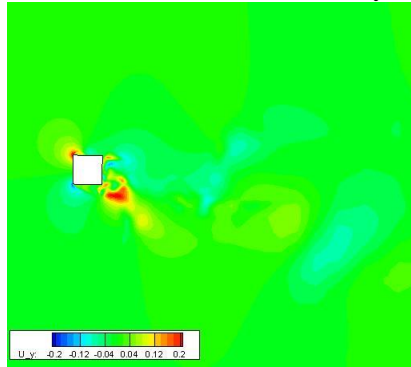


Figure b.0.70 平面 $z=-0.37$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

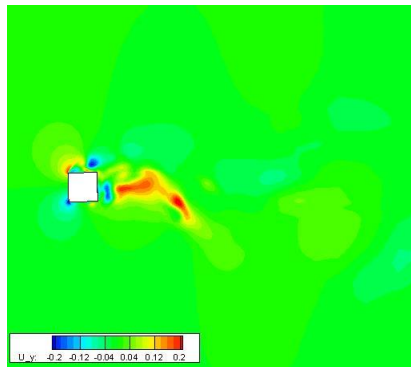


Figure b.0.71 平面 $z=-0.37$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

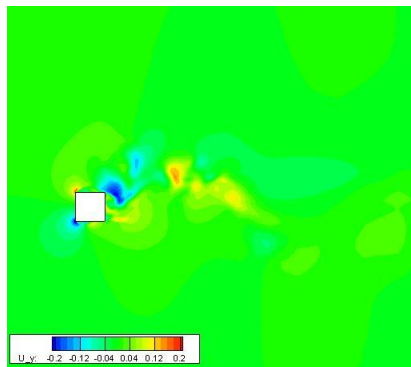


Figure b.0.72 平面 $z=-0.37$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

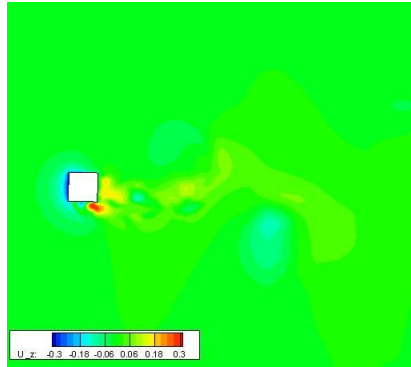


Figure b.0.73 平面 $z=-0.37$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

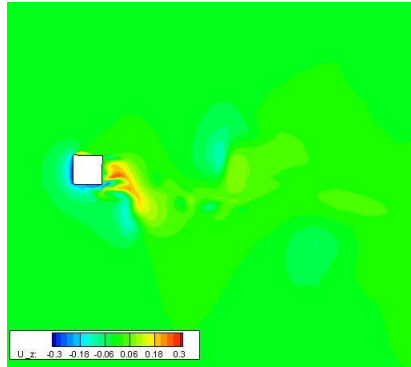


Figure b.0.74 平面 $z=-0.37$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

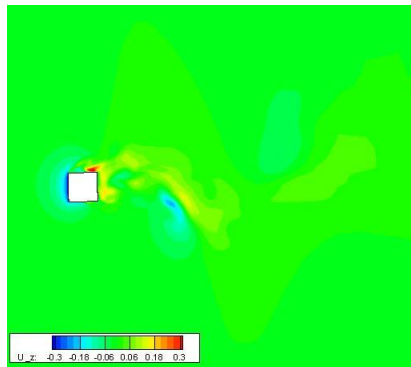


Figure b.0.75 平面 $z=-0.37$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

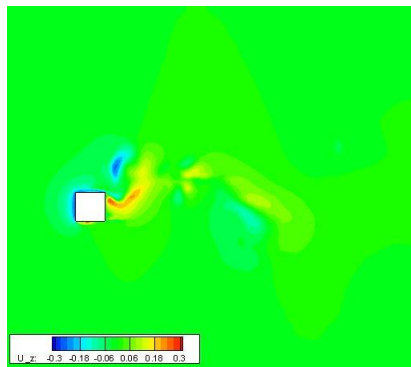


Figure b.0.76 平面 $z=-0.37$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

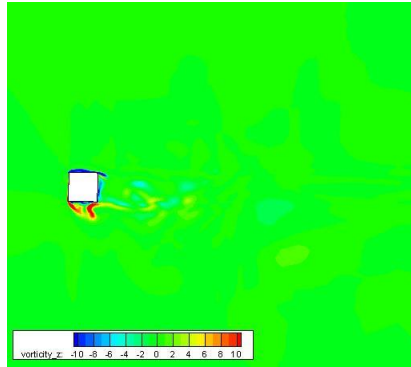


Figure b.0.77 平面 $z=-0.37$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

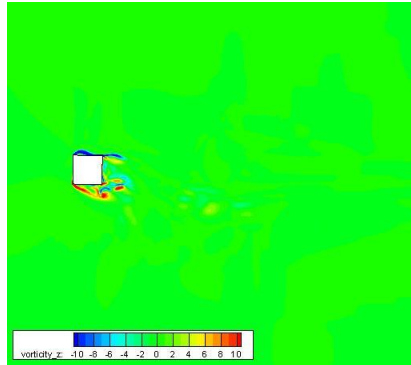


Figure b.0.78 平面 $z=-0.37$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

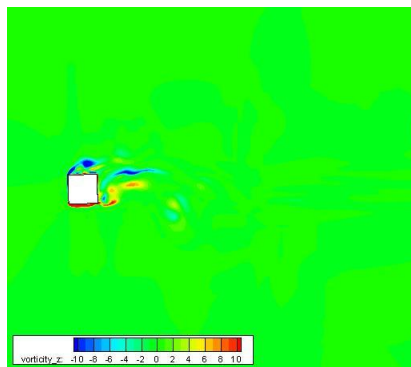


Figure b.0.79 平面 $z=-0.37$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

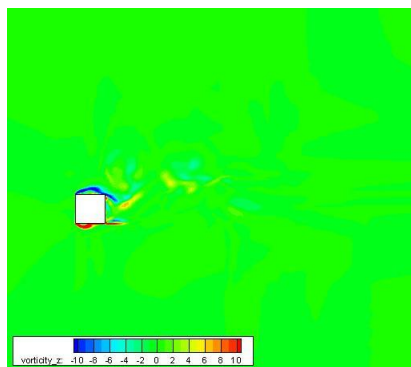


Figure b.0.80 平面 $z=-0.37$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

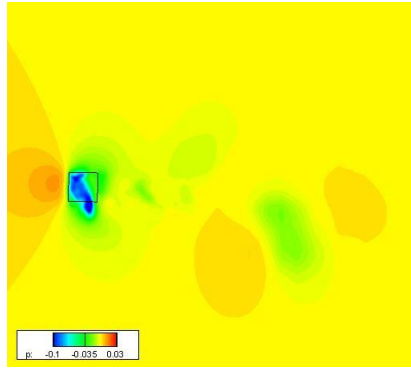


Figure b.0.81 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

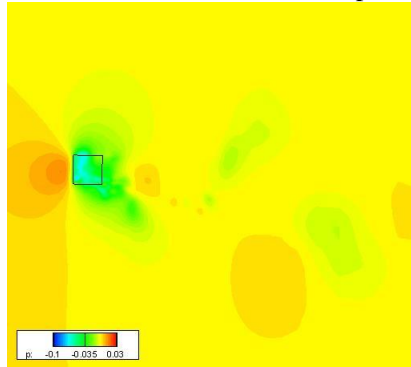


Figure b.0.82 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

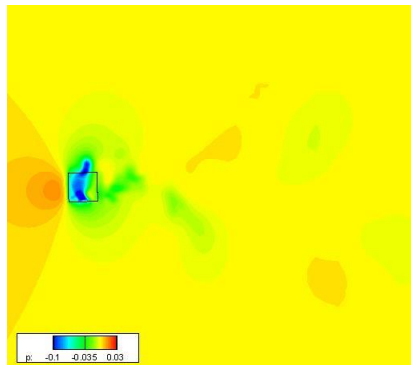


Figure b.0.83 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

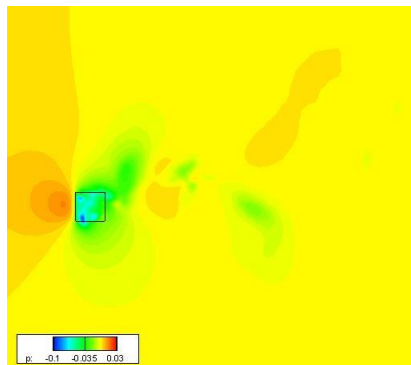


Figure b.0.84 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

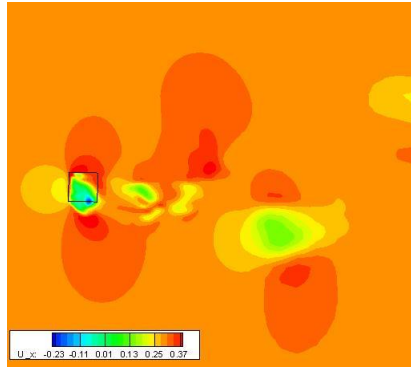


Figure b.0.85 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

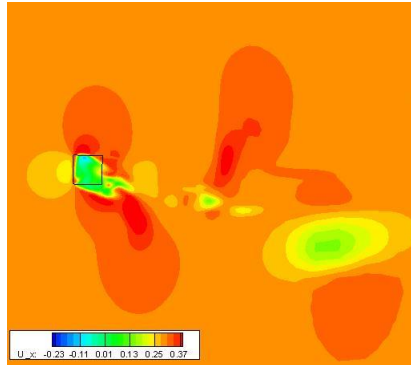


Figure b.0.86 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

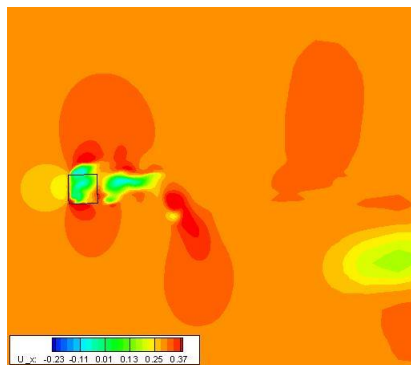


Figure b.0.87 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

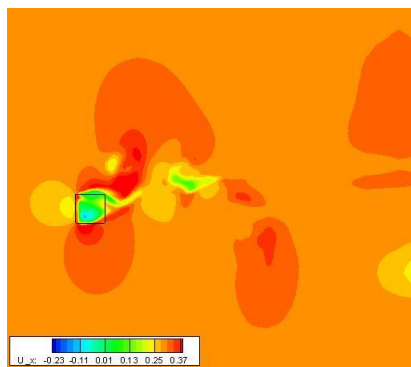


Figure b.0.88 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

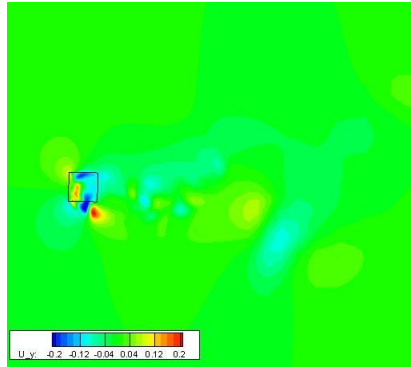


Figure b.0.89 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

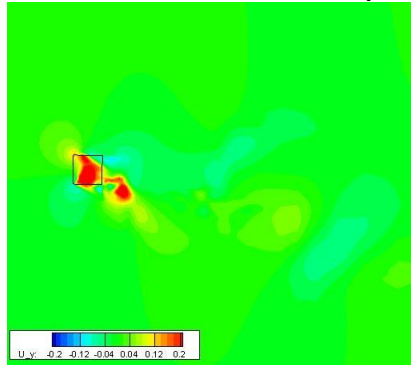


Figure b.0.90 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

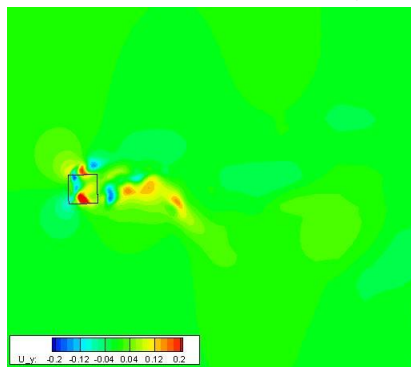


Figure b.0.91 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

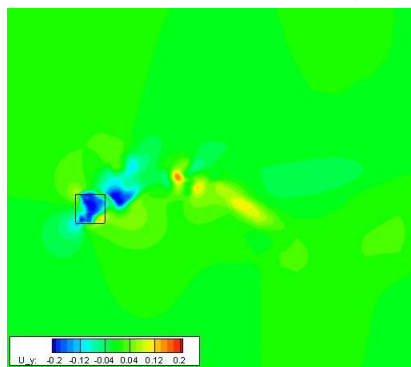


Figure b.0.92 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

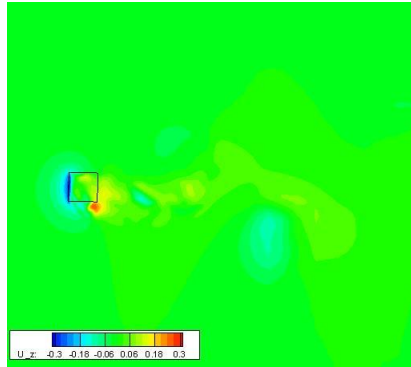


Figure b.0.93 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

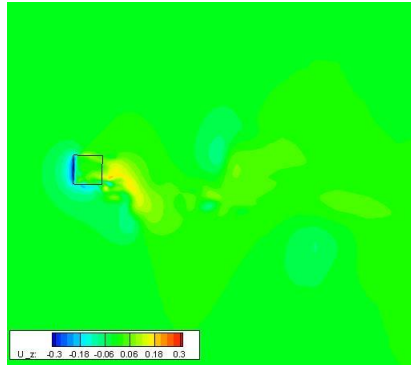


Figure b.0.94 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

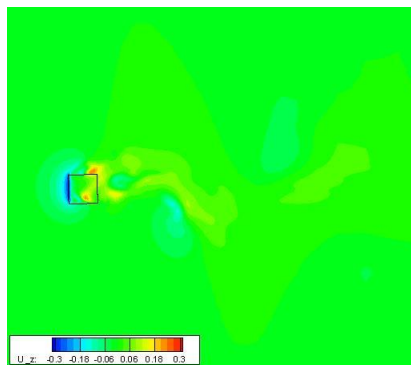


Figure b.0.95 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

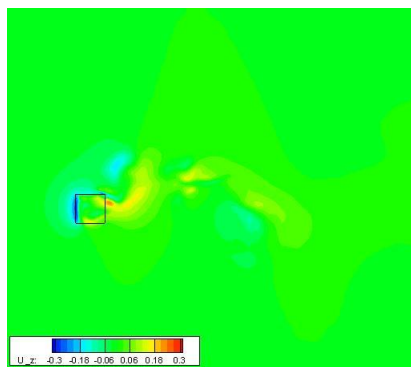


Figure b.0.96 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

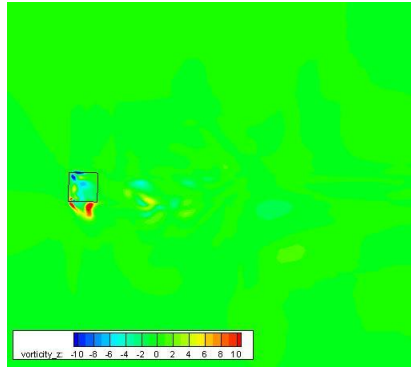


Figure b.0.97 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

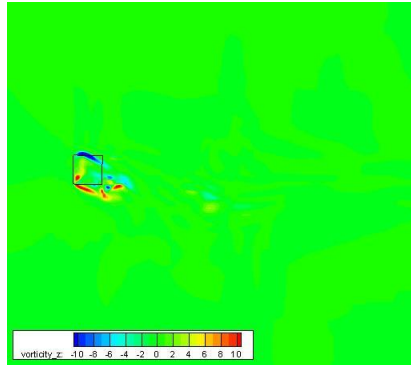


Figure b.0.98 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

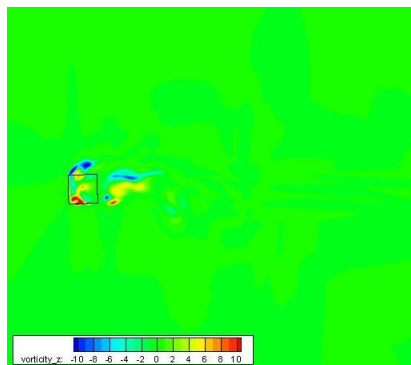


Figure b.0.99 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

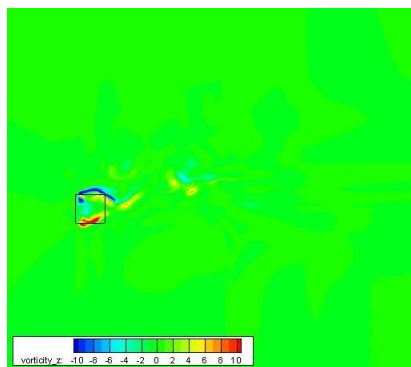


Figure b.0.100 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

1. $Vr=10.4$ ケース NoPT

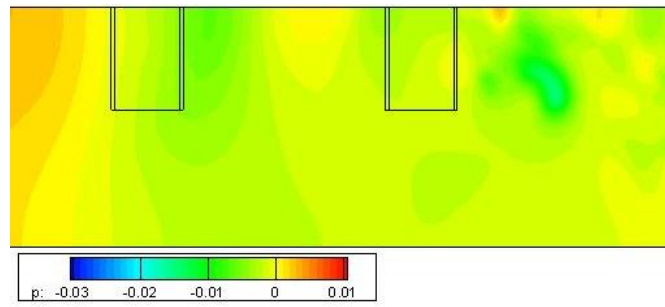


Figure b.1.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

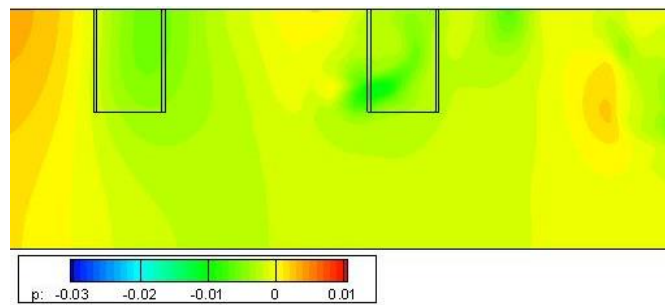


Figure b.1.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

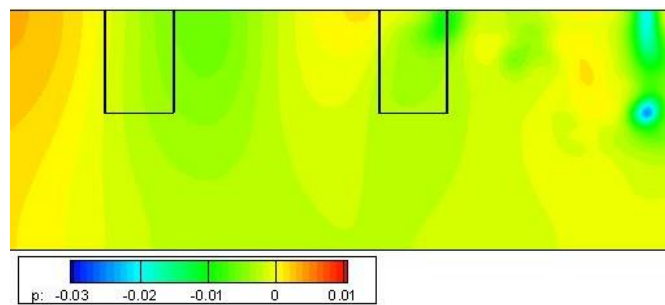


Figure b.1.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

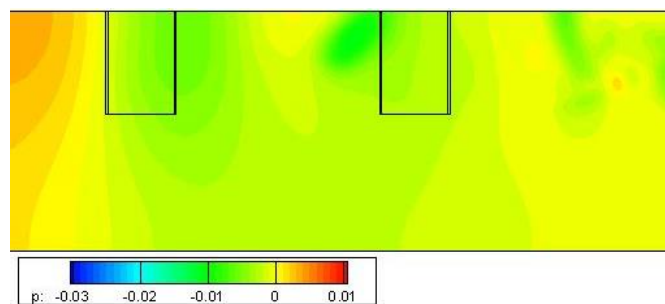


Figure b.1.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

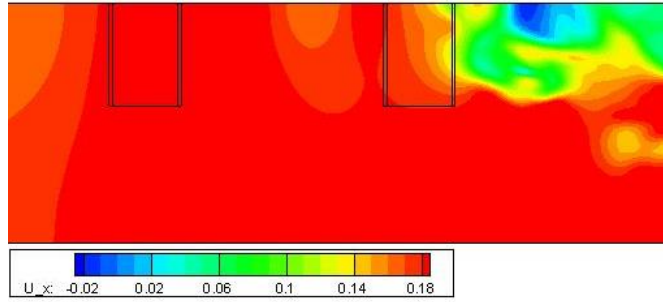


Figure b.1.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

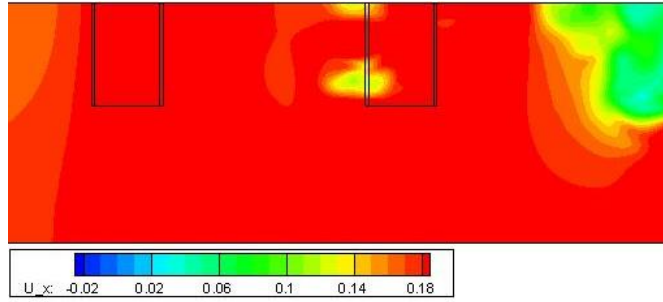


Figure b.1.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

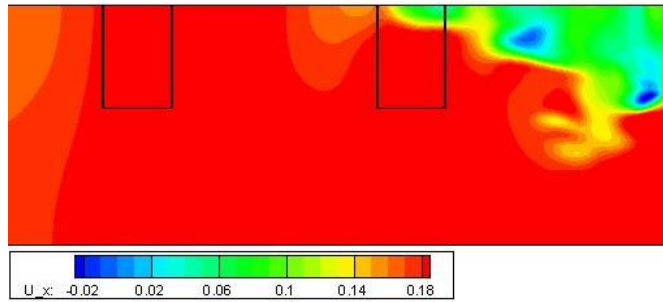


Figure b.1.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

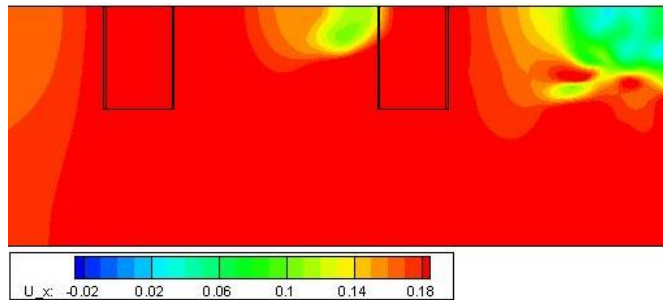


Figure b.1.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

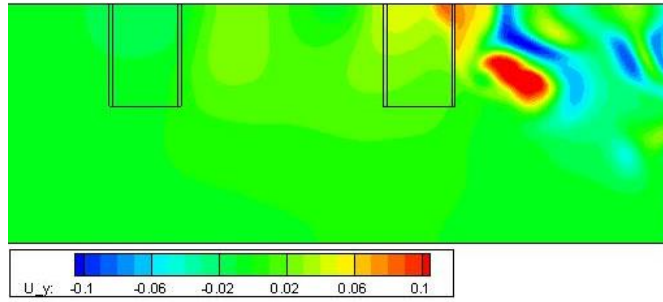


Figure b.1.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

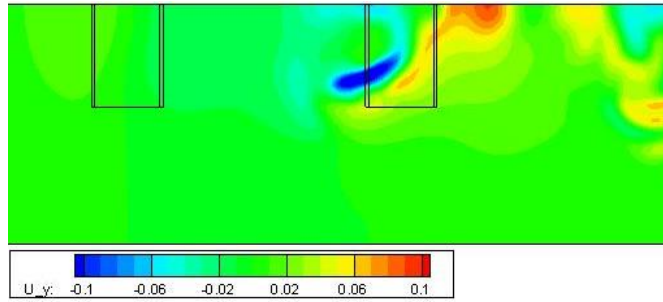


Figure b.1.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

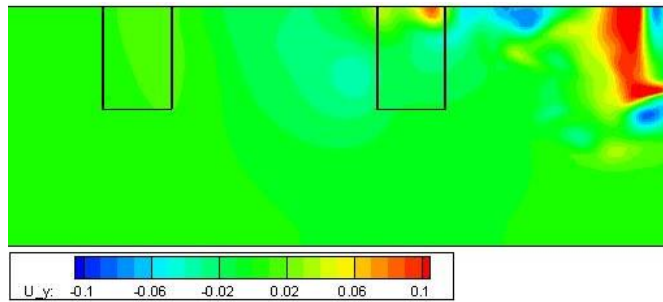


Figure b.1.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

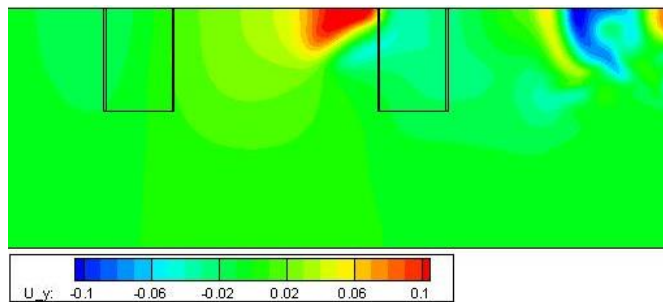


Figure b.1.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

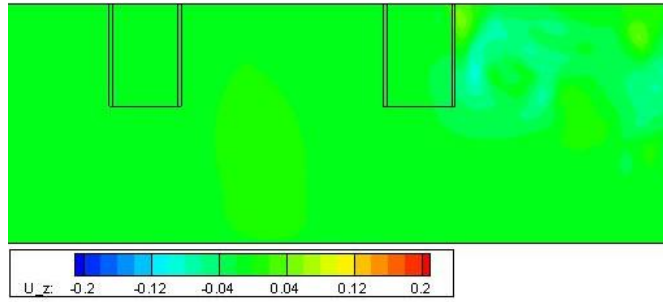


Figure b.1.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

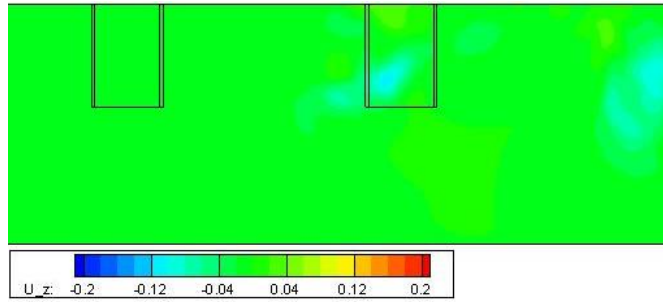


Figure b.1.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

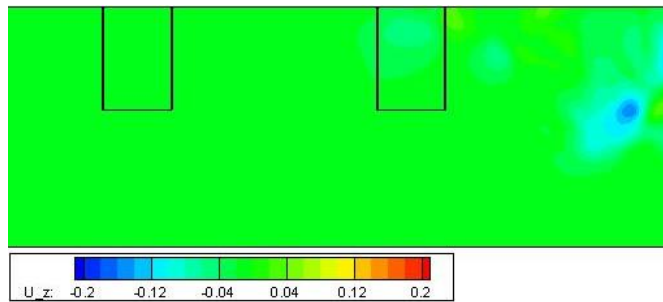


Figure b.1.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

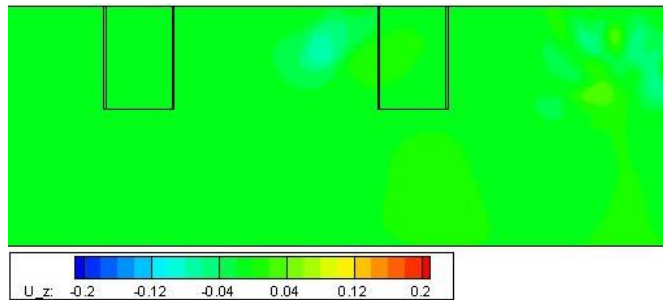


Figure b.1.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

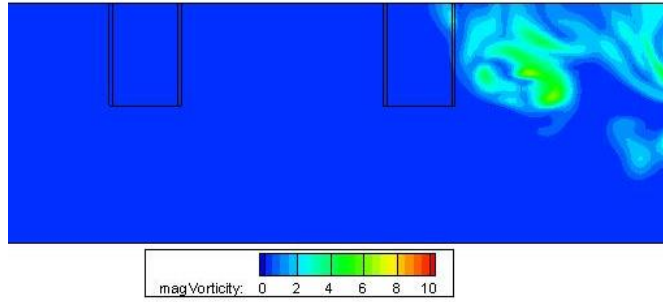


Figure b.1.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

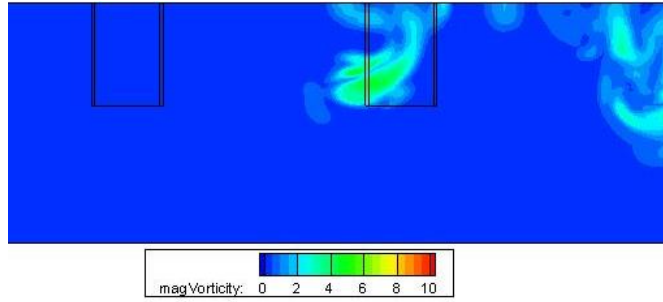


Figure b.1.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

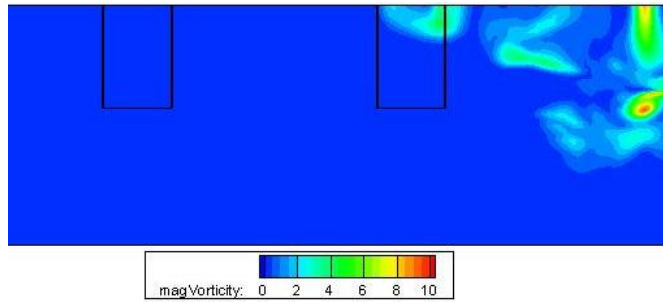


Figure b.1.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

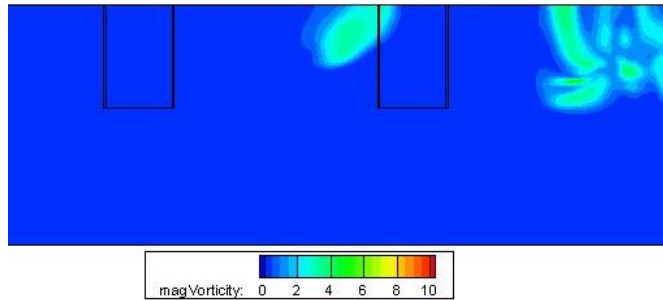


Figure b.1.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

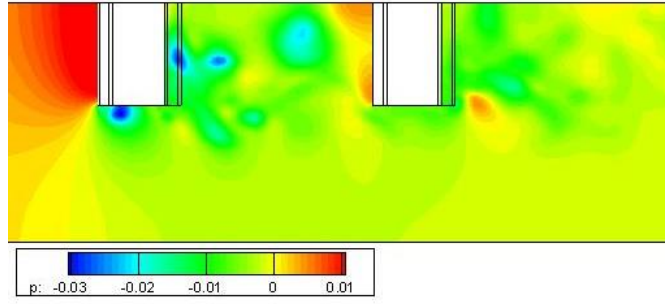


Figure b.1.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

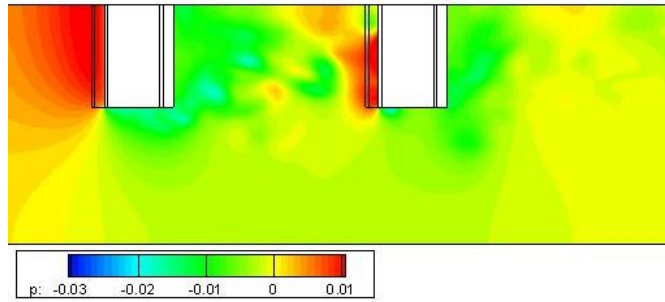


Figure b.1.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

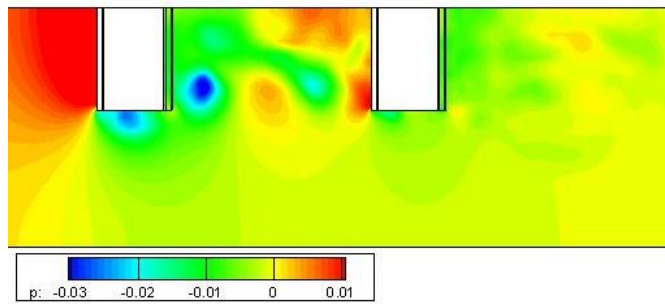


Figure b.1.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

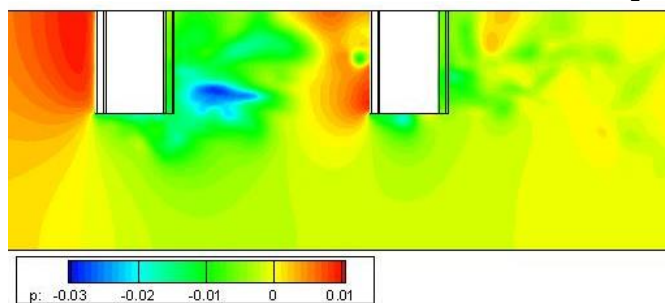


Figure b.1.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

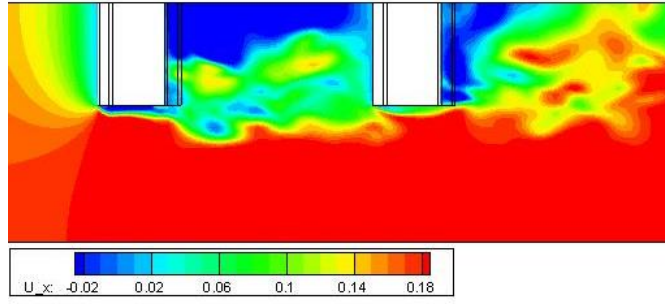


Figure b.1.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

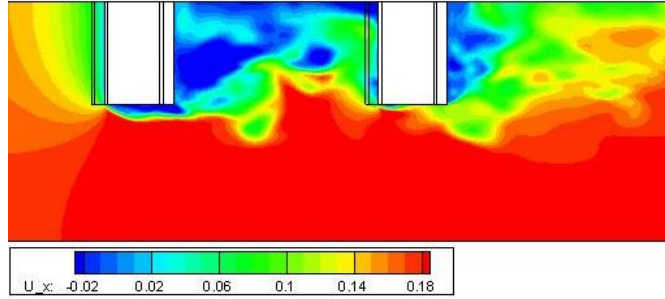


Figure b.1.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

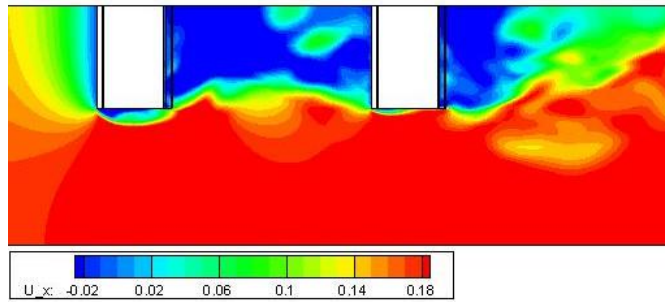


Figure b.1.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

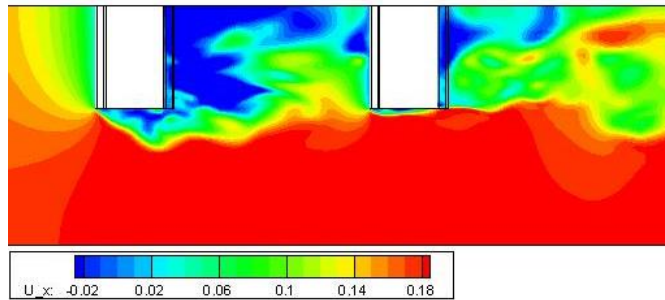


Figure b.1.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

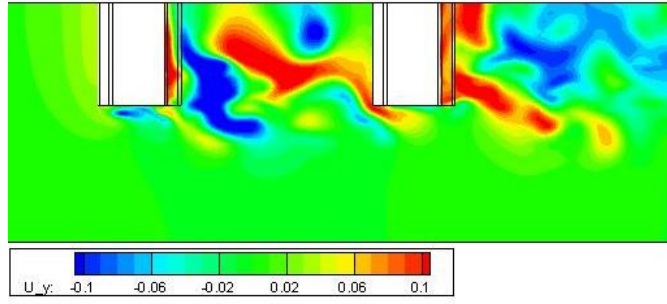


Figure b.1.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

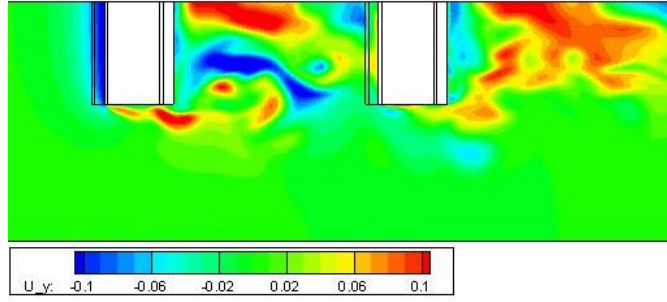


Figure b.1.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

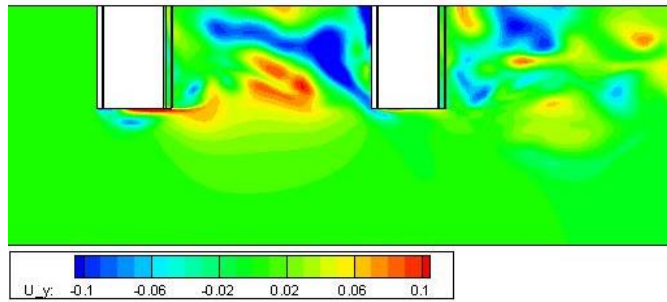


Figure b.1.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

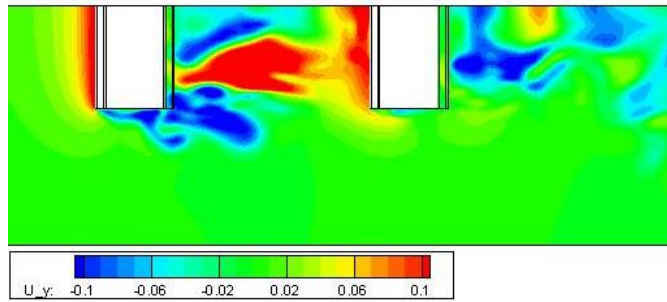


Figure b.1.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

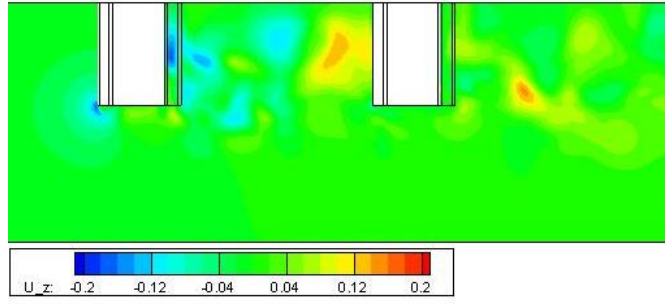


Figure b.1.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

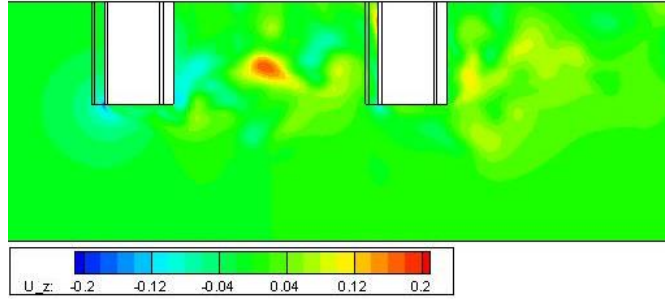


Figure b.1.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

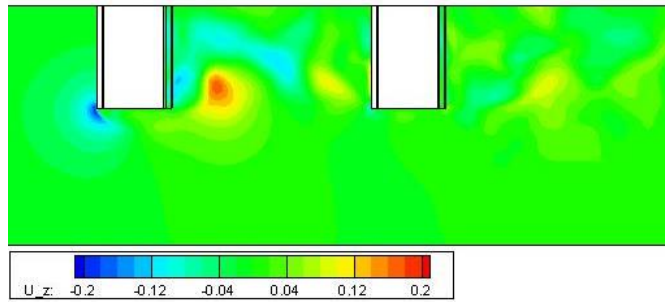


Figure b.1.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

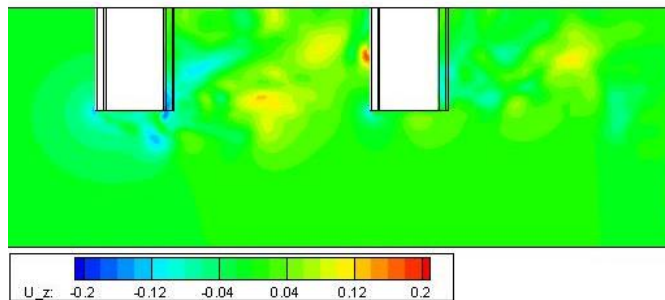


Figure b.1.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

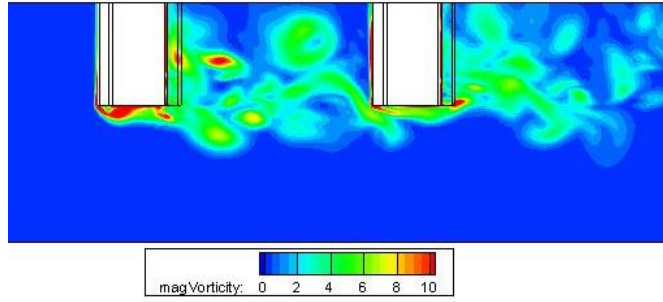


Figure b.1.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

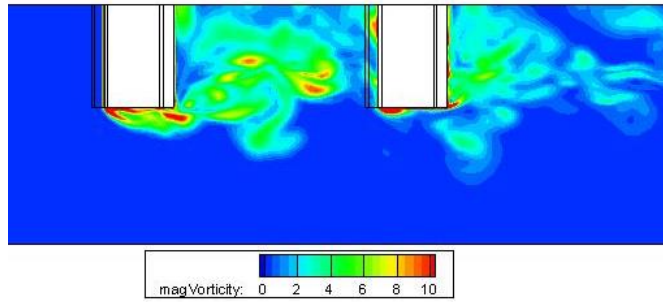


Figure b.1.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

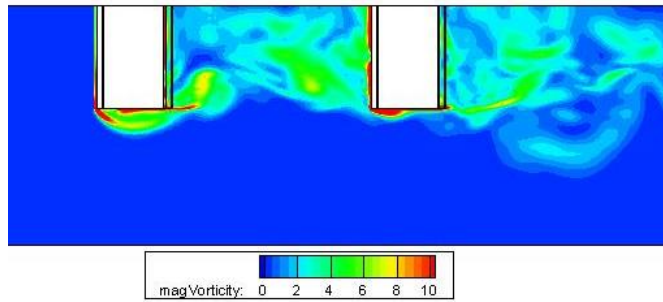


Figure b.1.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

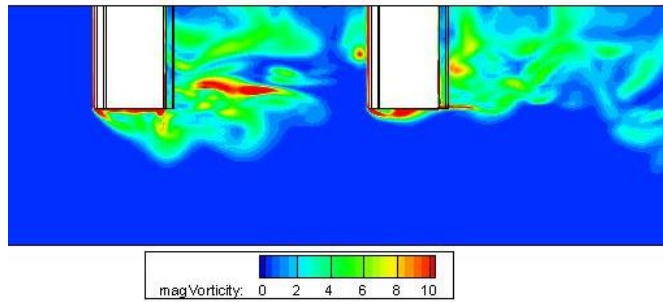


Figure b.1.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

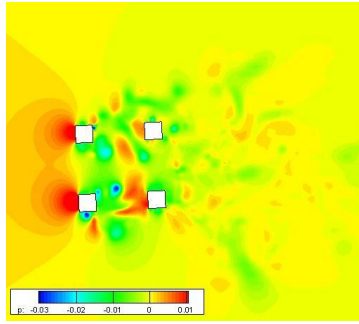


Figure b.1.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

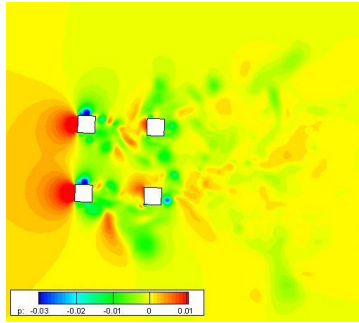


Figure b.1.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

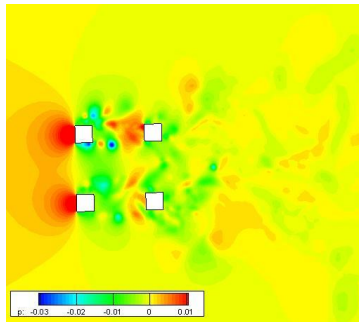


Figure b.1.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

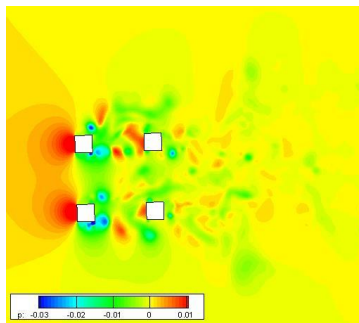


Figure b.1.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

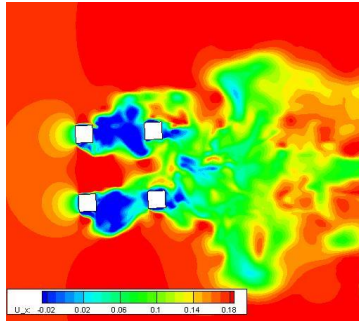


Figure b.1.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

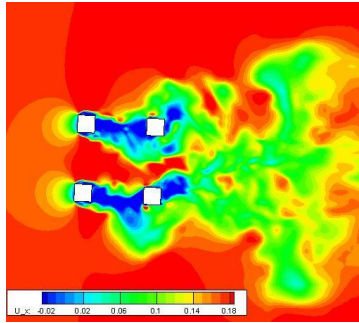


Figure b.1.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

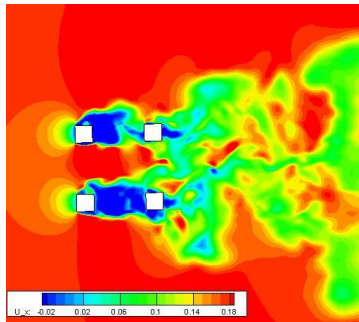


Figure b.1.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

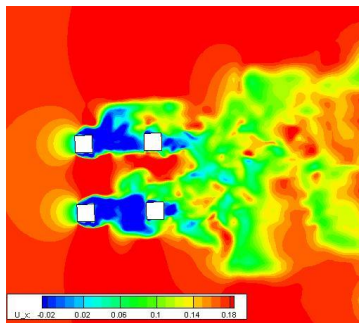


Figure b.1.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

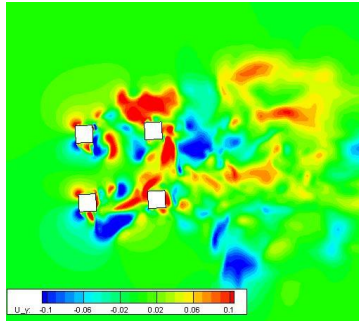


Figure b.1.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

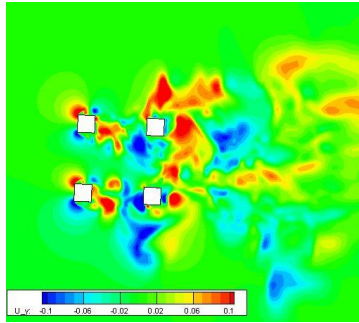


Figure b.1.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

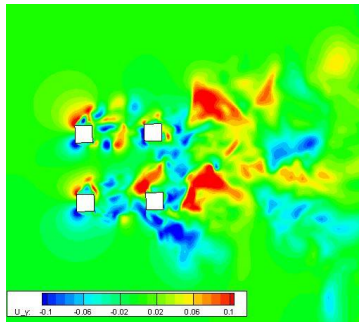


Figure b.1.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

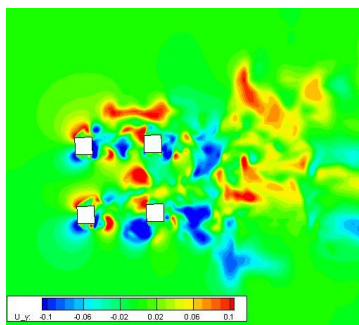


Figure b.1.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

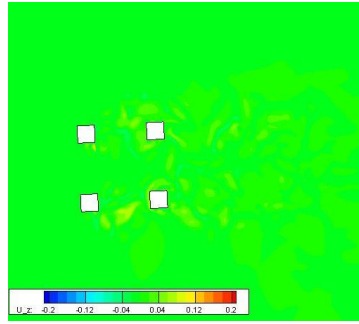


Figure b.1.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

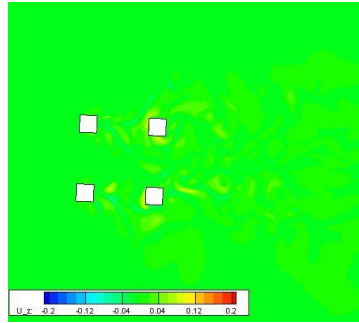


Figure b.1.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

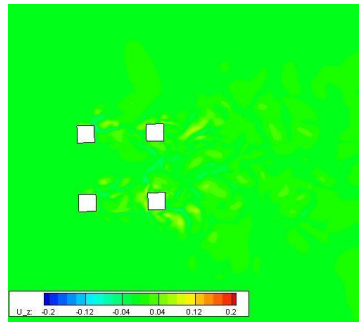


Figure b.1.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

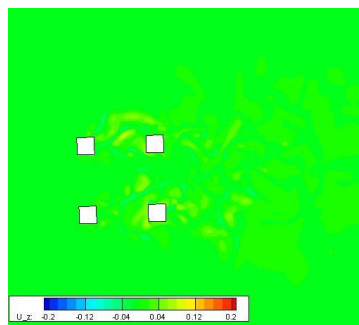


Figure b.1.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

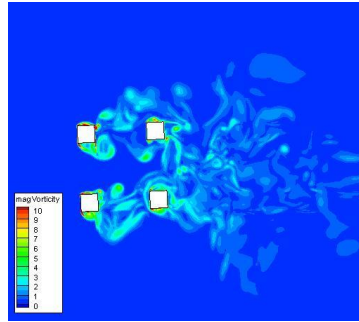


Figure b.1.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

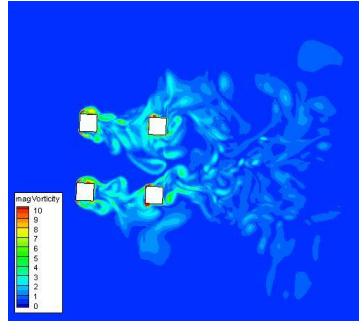


Figure b.1.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

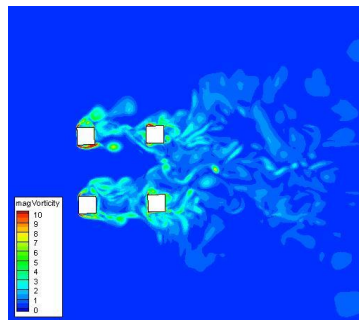


Figure b.1.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

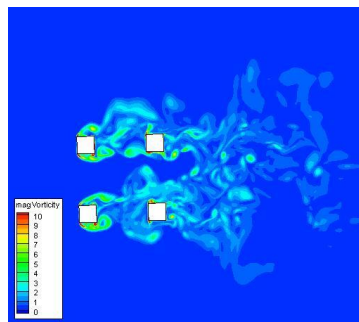


Figure b.1.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

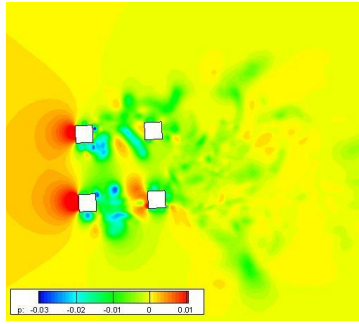


Figure b.1.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

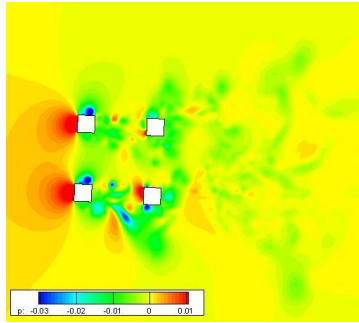


Figure b.1.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

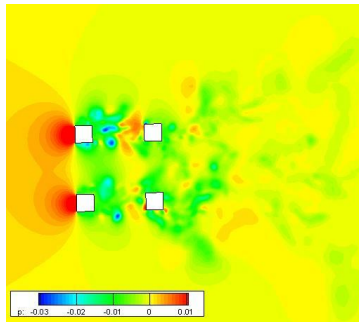


Figure b.1.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

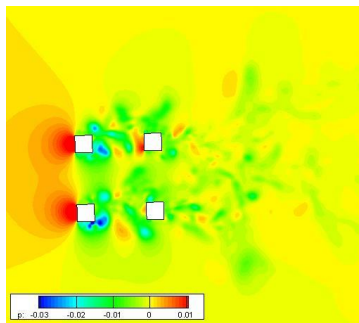


Figure b.1.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

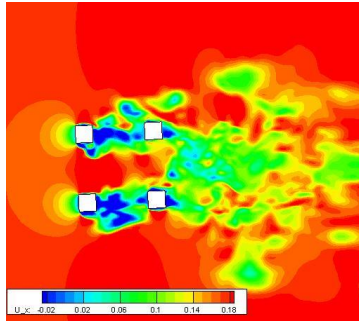


Figure b.1.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

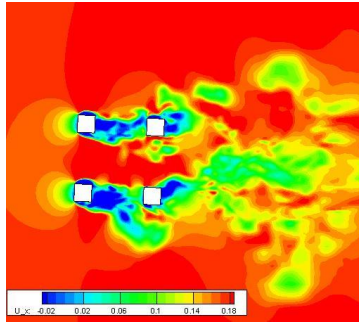


Figure b.1.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

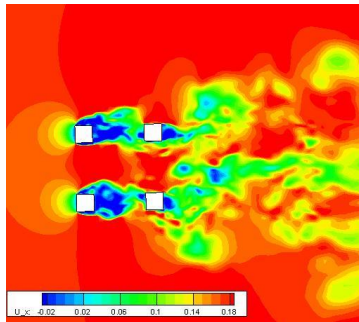


Figure b.1.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

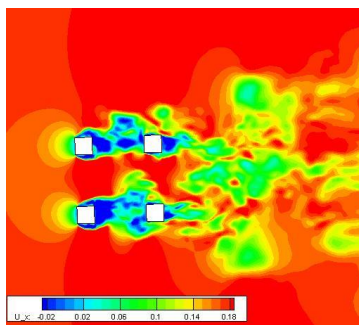


Figure b.1.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

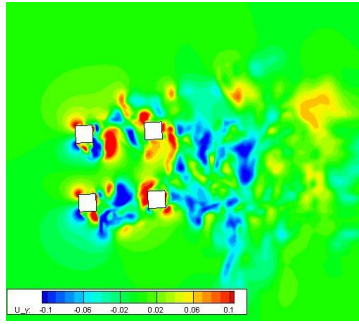


Figure b.1.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

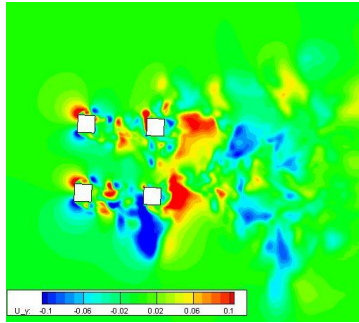


Figure b.1.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

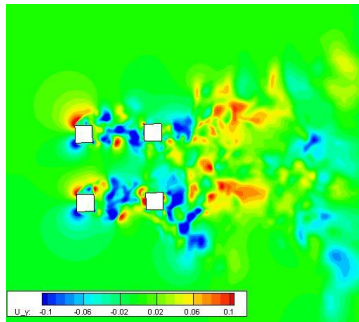


Figure b.1.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

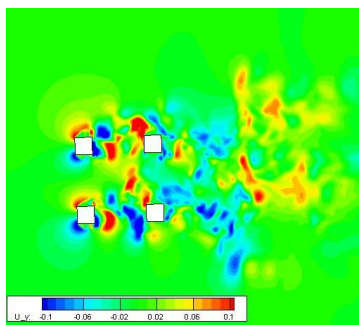


Figure b.1.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

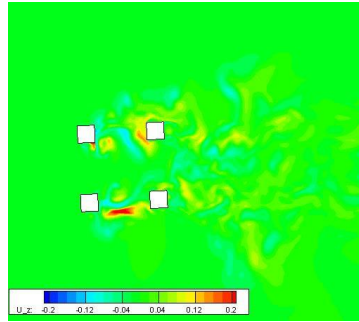


Figure b.1.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

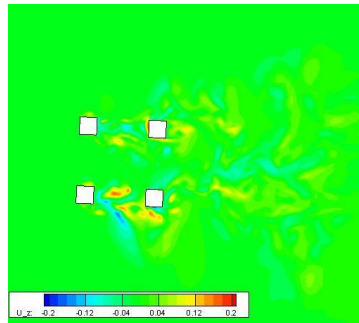


Figure b.1.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

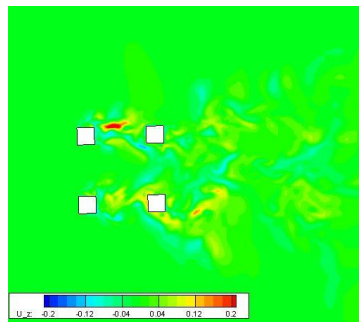


Figure b.1.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

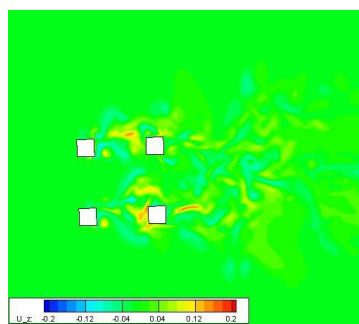


Figure b.1.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

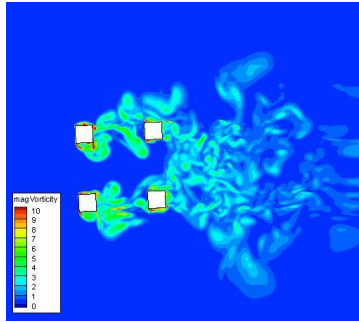


Figure b.1.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

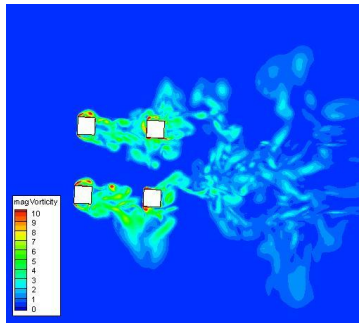


Figure b.1.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

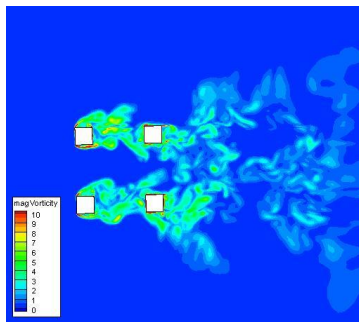


Figure b.1.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

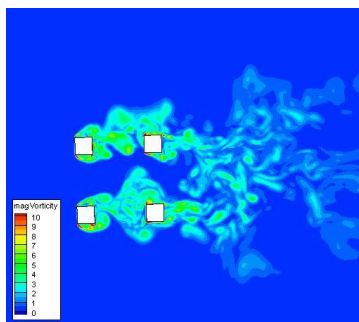


Figure b.1.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

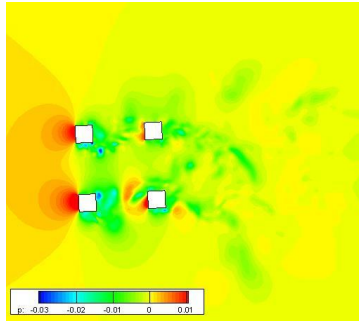


Figure b.1.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

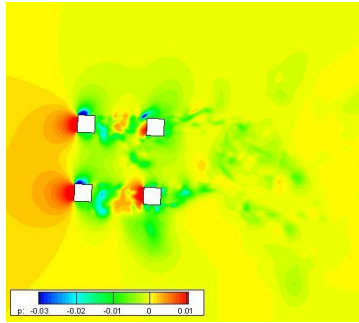


Figure b.1.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

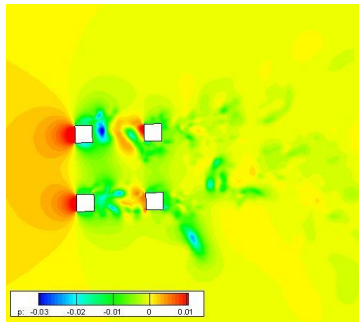


Figure b.1.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

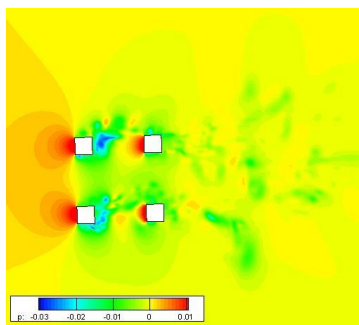


Figure b.1.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

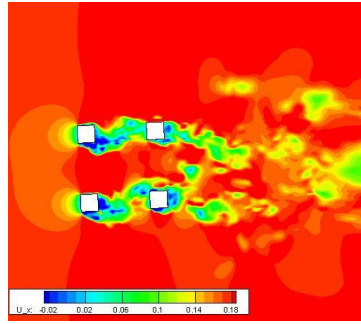


Figure b.1.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

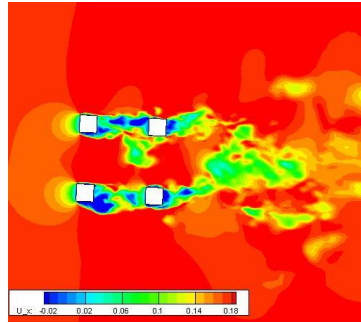


Figure b.1.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

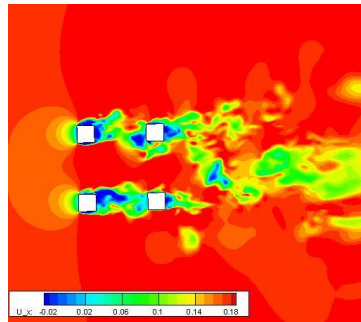


Figure b.1.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

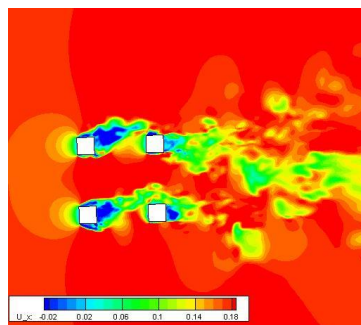


Figure b.1.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

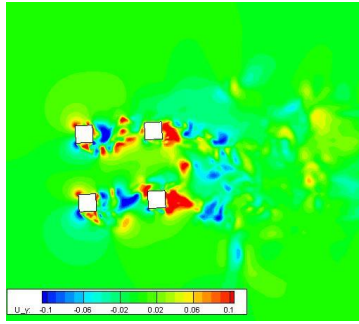


Figure b.1.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

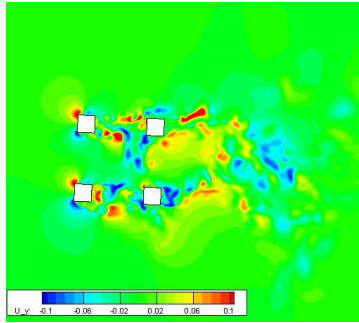


Figure b.1.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

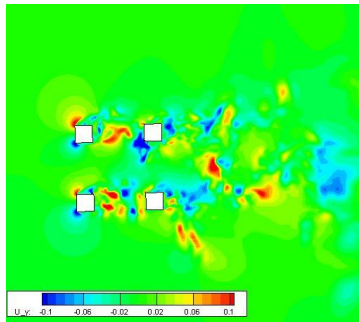


Figure b.1.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

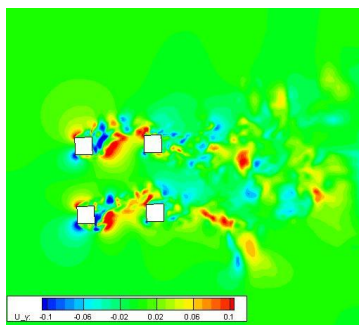


Figure b.1.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

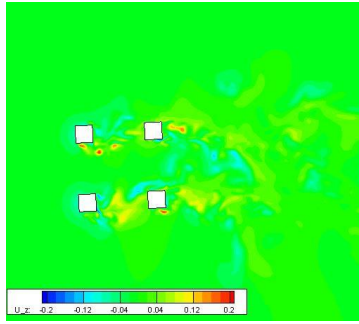


Figure b.1.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

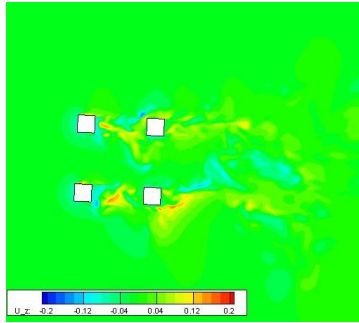


Figure b.1.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

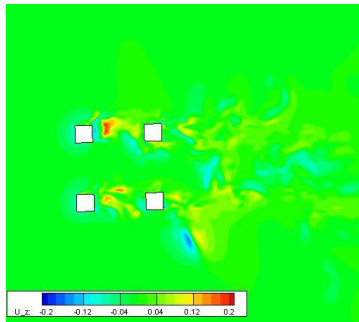


Figure b.1.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

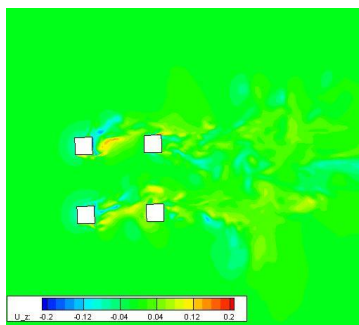


Figure b.1.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

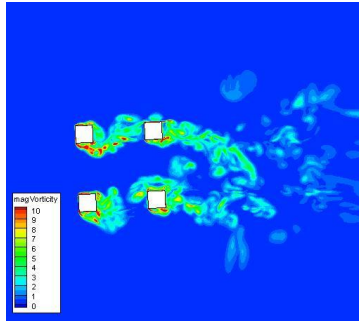


Figure b.1.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

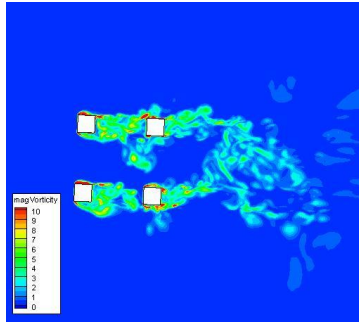


Figure b.1.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

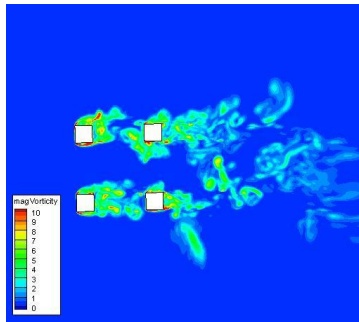


Figure b.1.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

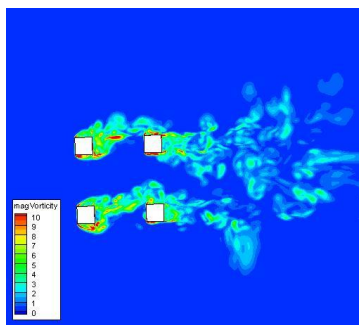


Figure b.1.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

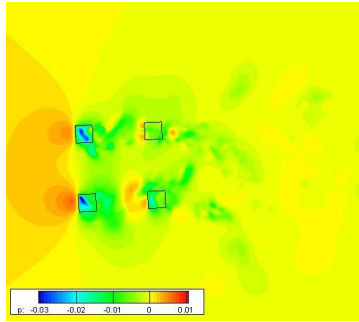


Figure b.1.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

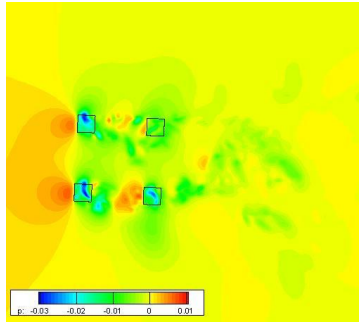


Figure b.1.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

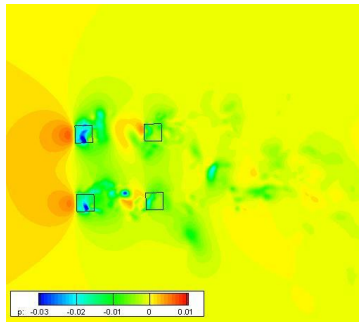


Figure b.1.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

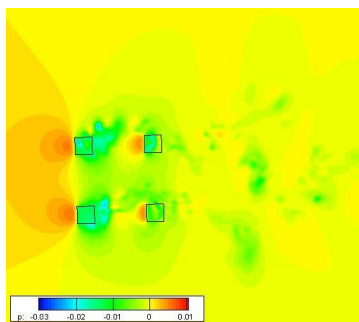


Figure b.1.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

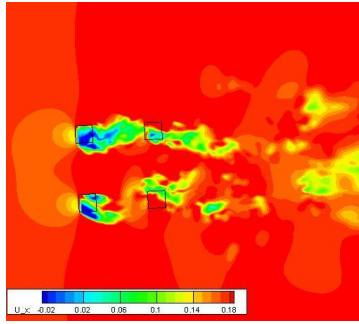


Figure b.1.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

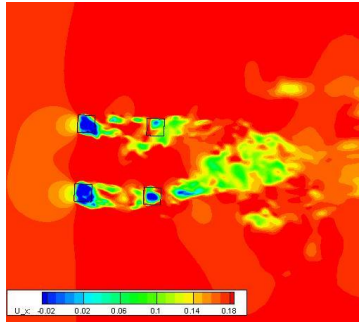


Figure b.1.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

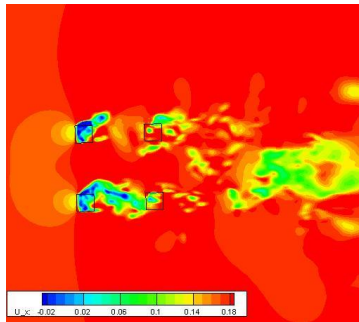


Figure b.1.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

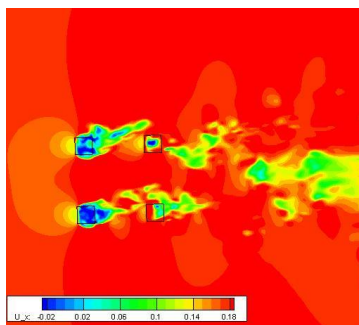


Figure b.1.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

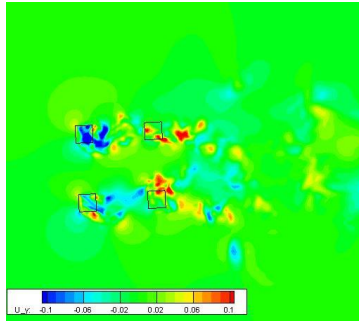


Figure b.1.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

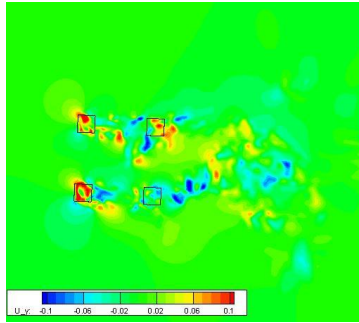


Figure b.1.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

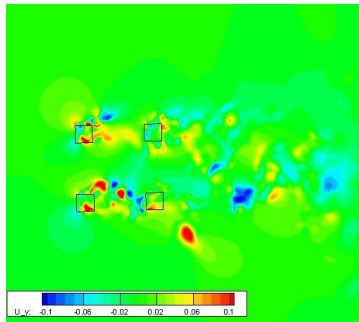


Figure b.1.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

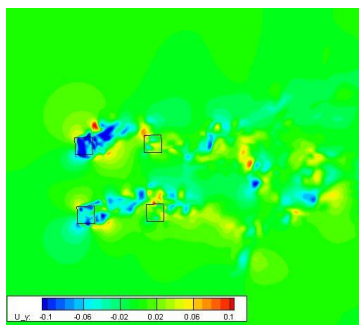


Figure b.1.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

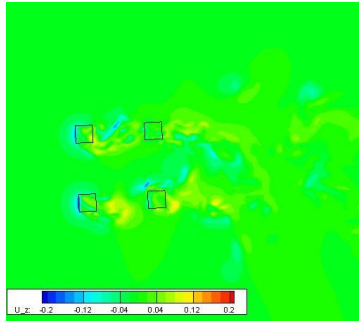


Figure b.1.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

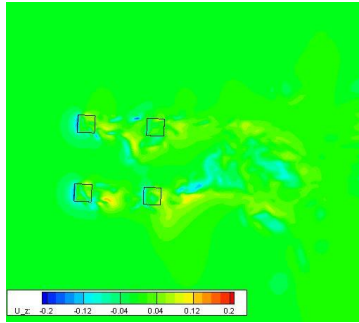


Figure b.1.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

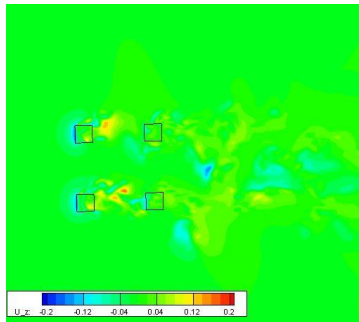


Figure b.1.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

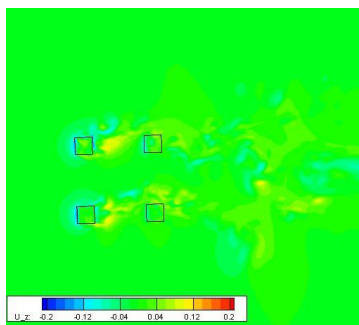


Figure b.1.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

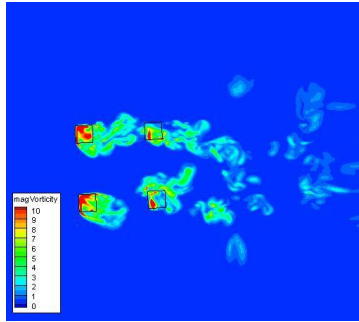


Figure b.1.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

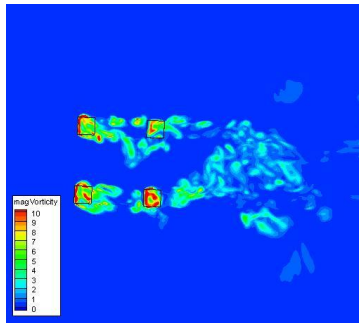


Figure b.1.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

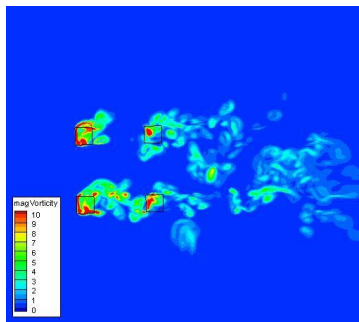


Figure b.1.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

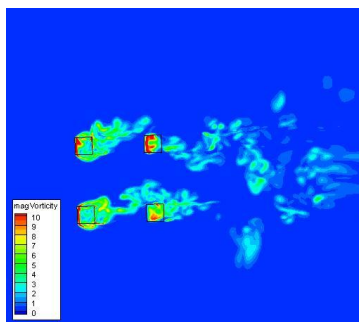


Figure b.1.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

2. Vr=10.4 ケース P1-f

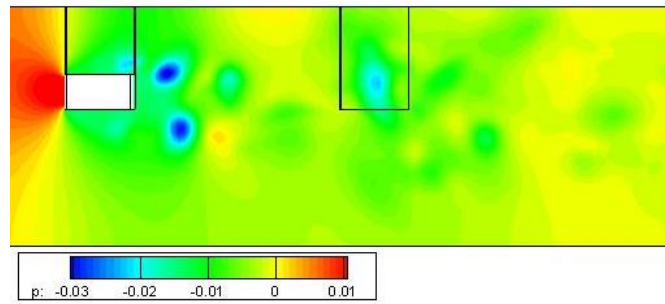


Figure b.2.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t=0$)

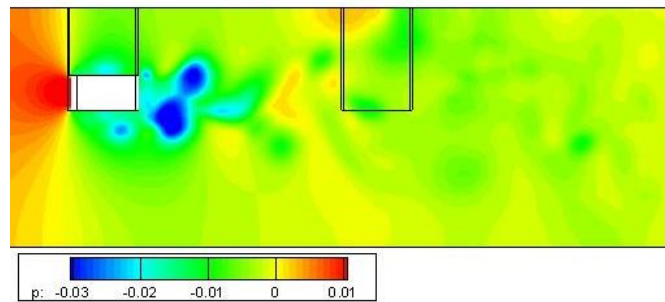


Figure b.2.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

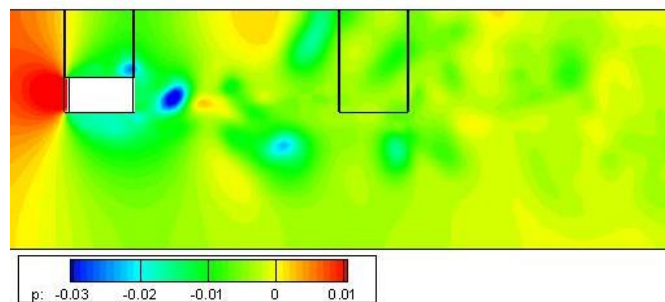


Figure b.2.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

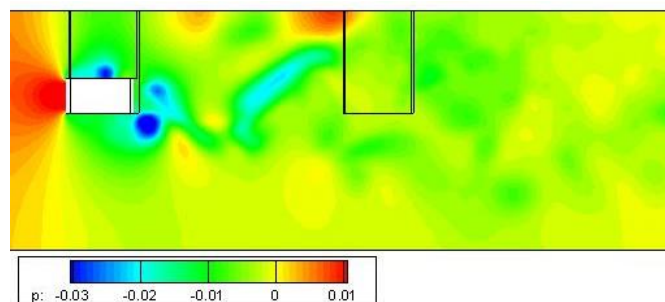


Figure b.2.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

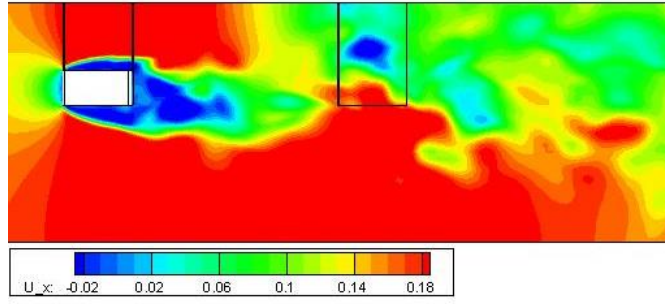


Figure b.2.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

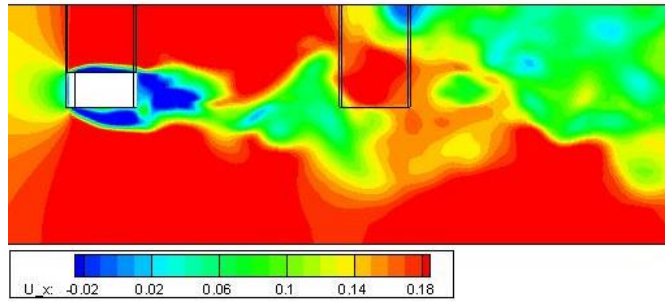


Figure b.2.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

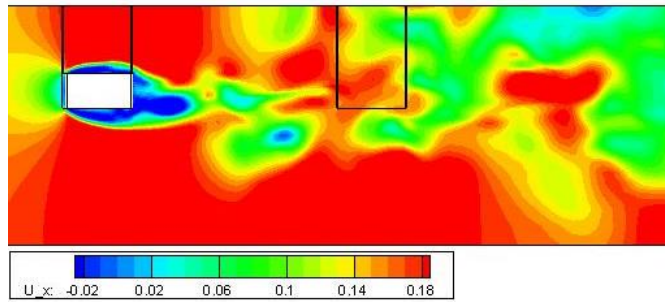


Figure b.2.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

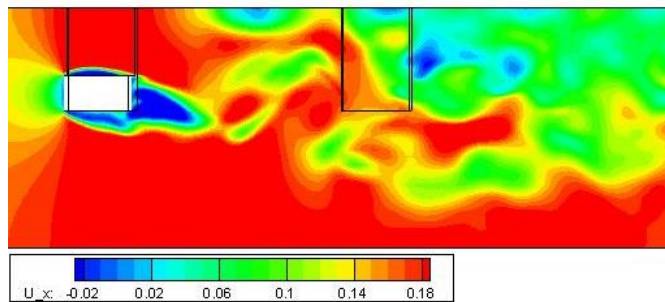


Figure b.2.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

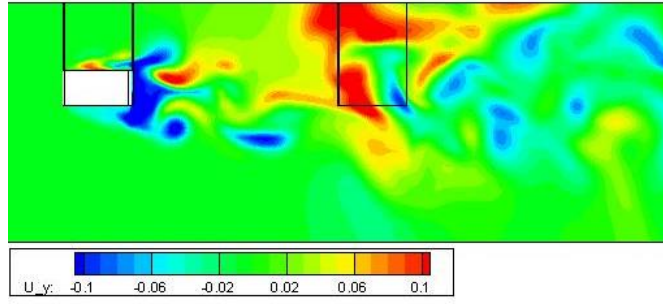


Figure b.2.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

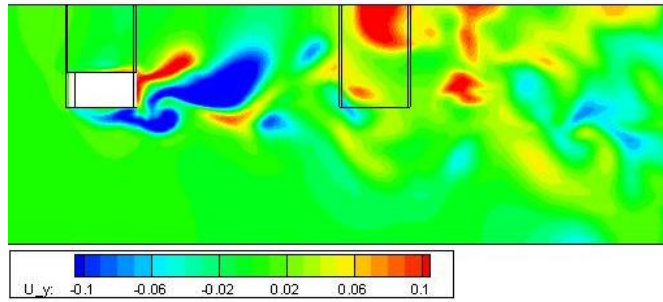


Figure b.2.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

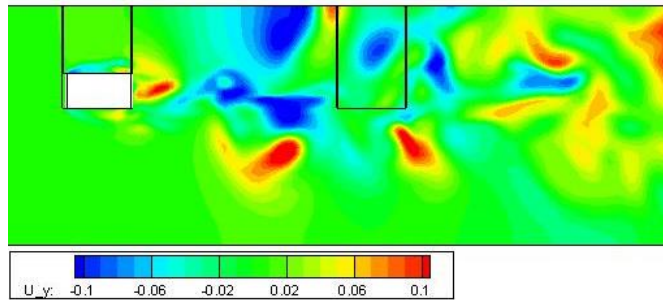


Figure b.2.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

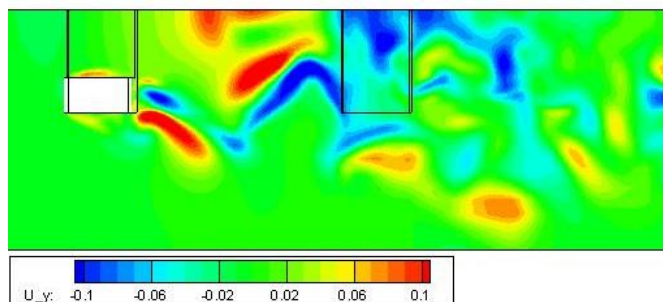


Figure b.2.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

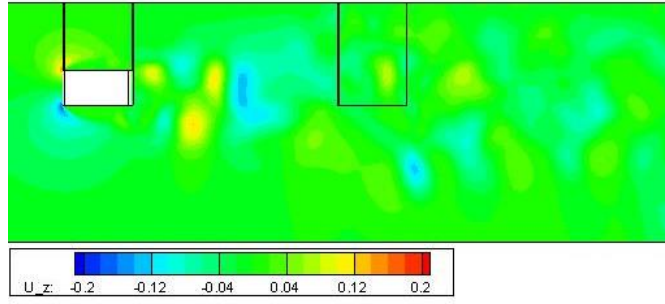


Figure b.2.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

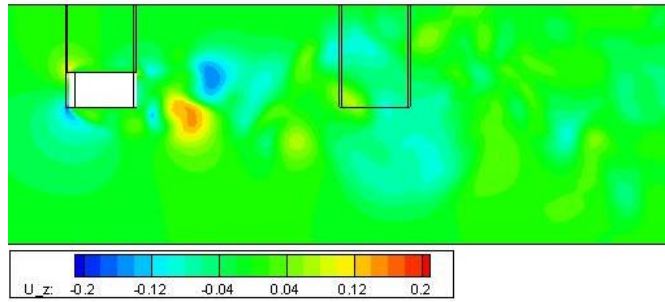


Figure b.2.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

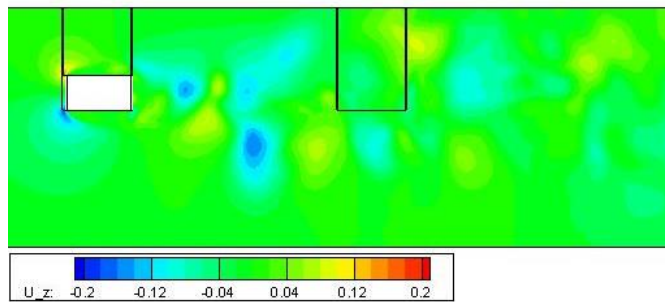


Figure b.2.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

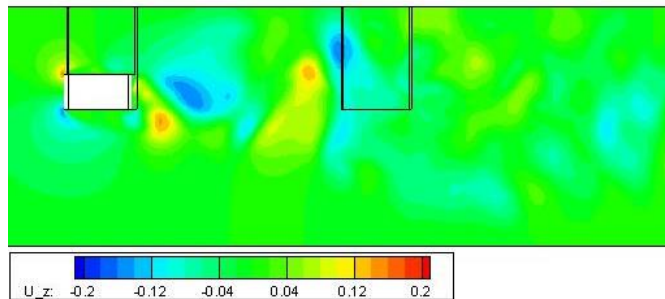


Figure b.2.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

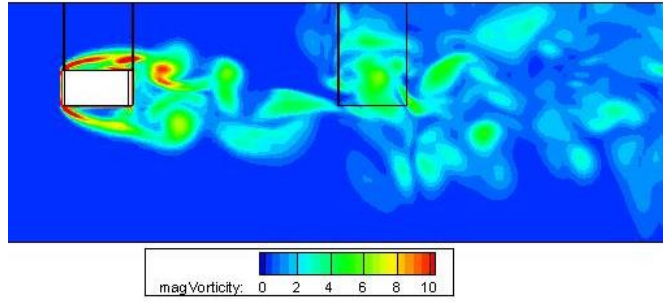


Figure b.2.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

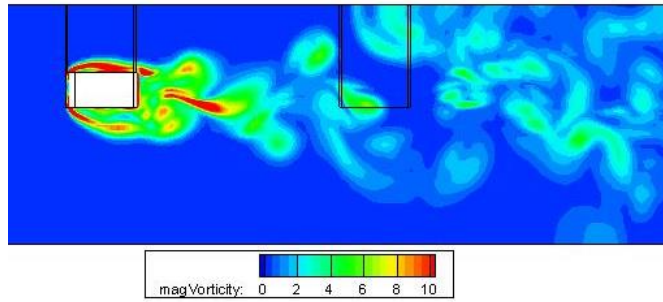


Figure b.2.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

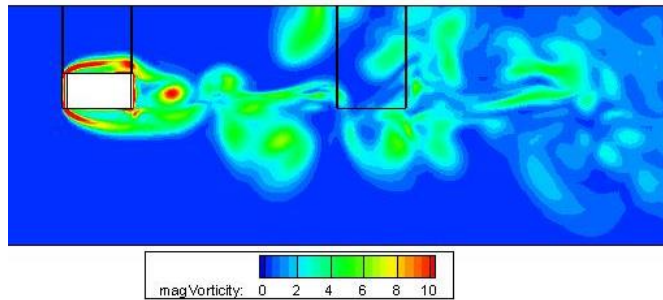


Figure b.2.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

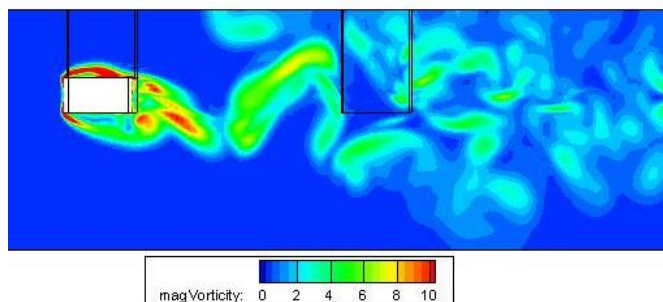


Figure b.2.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

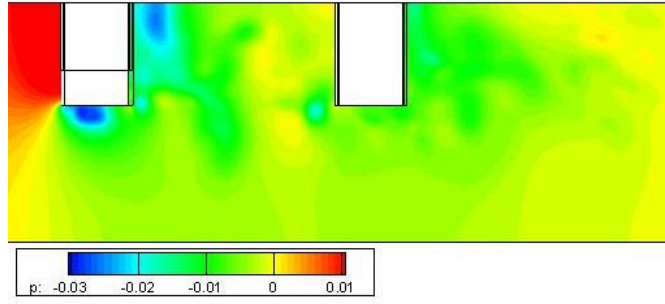


Figure b.2.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

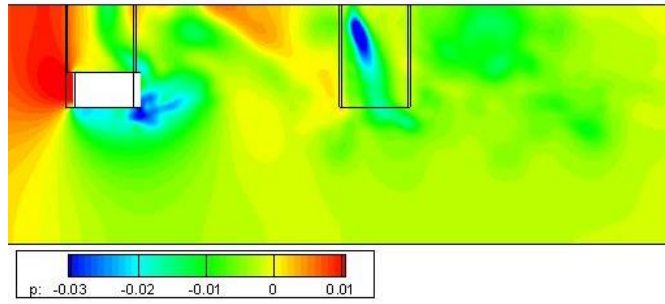


Figure b.2.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

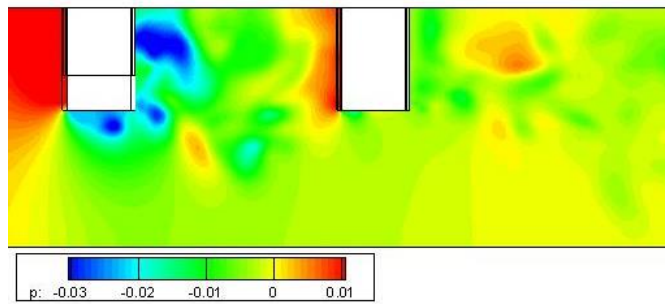


Figure b.2.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

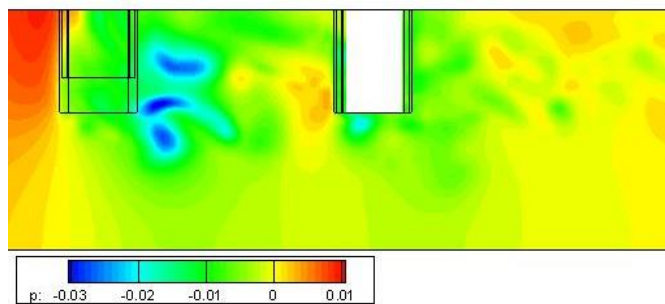


Figure b.2.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

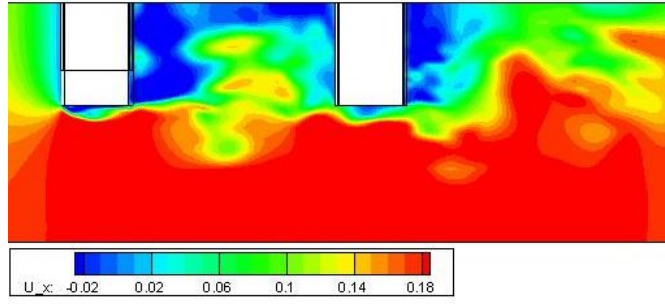


Figure b.2.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

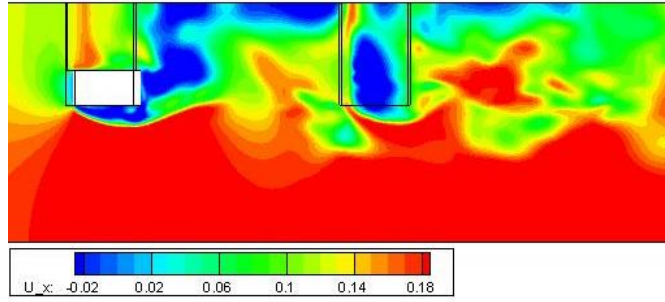


Figure b.2.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

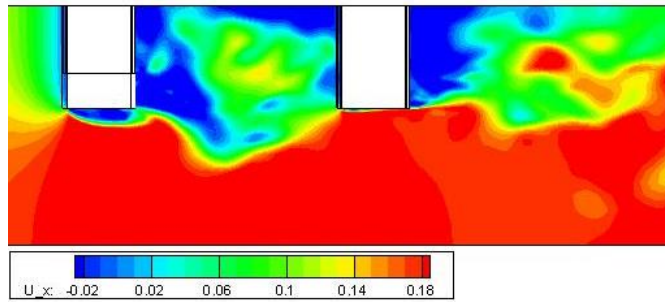


Figure b.2.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

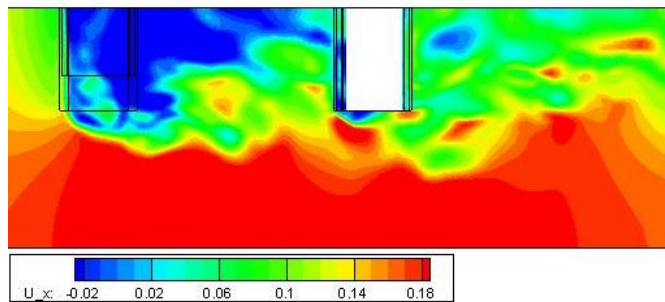


Figure b.2.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

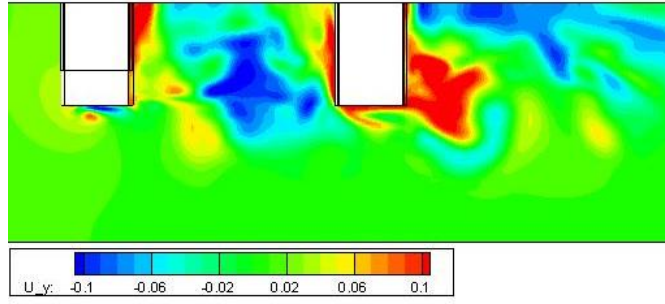


Figure b.2.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

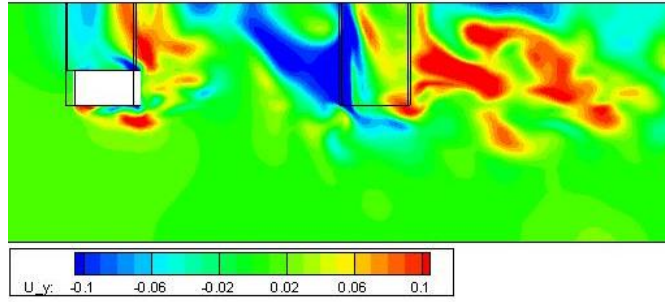


Figure b.2.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

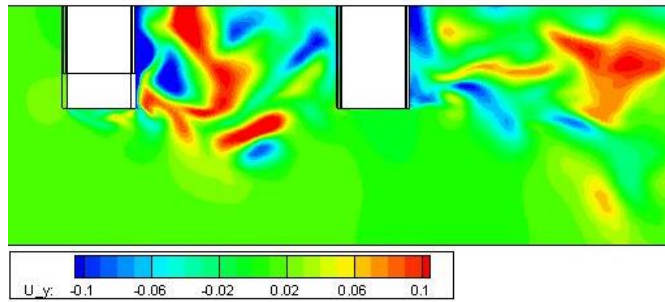


Figure b.2.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

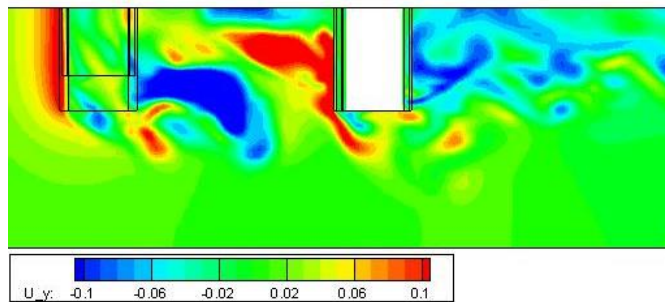


Figure b.2.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

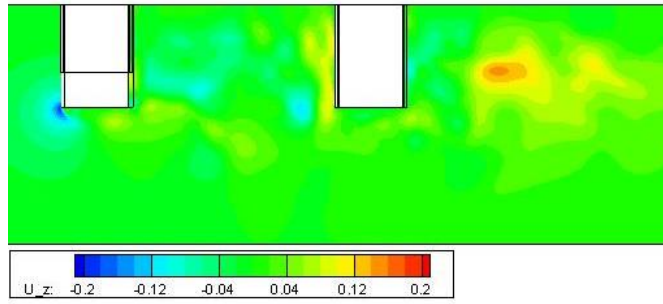


Figure b.2.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

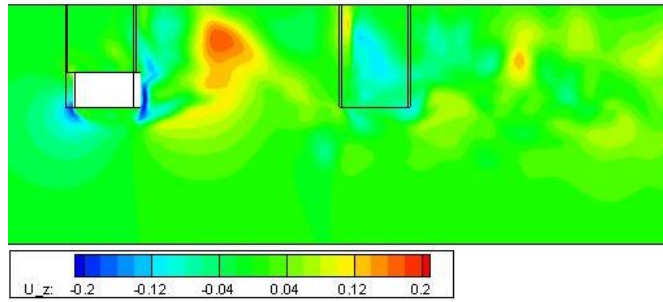


Figure b.2.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

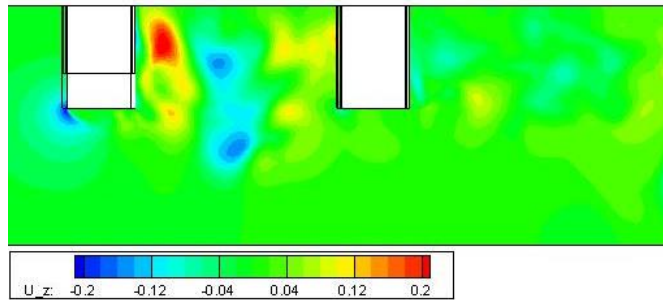


Figure b.2.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

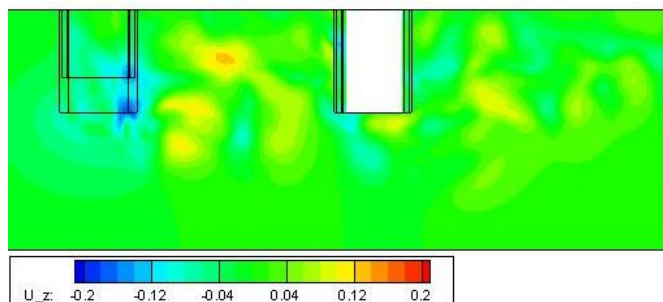


Figure b.2.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

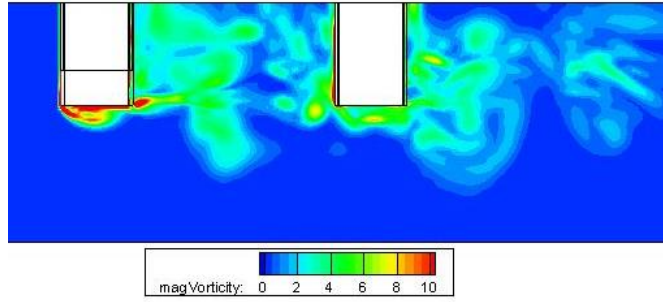


Figure b.2.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

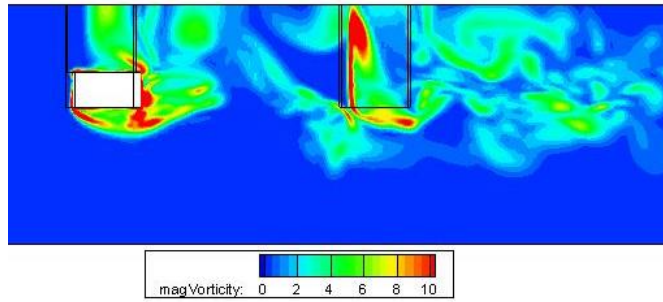


Figure b.2.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

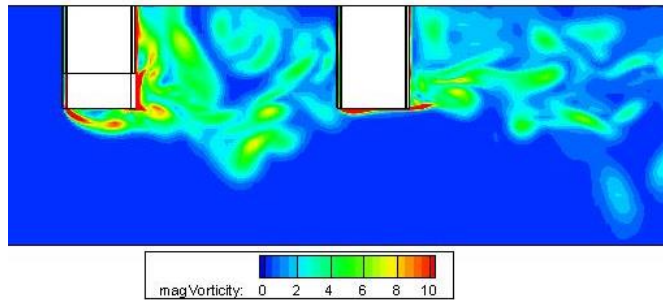


Figure b.2.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

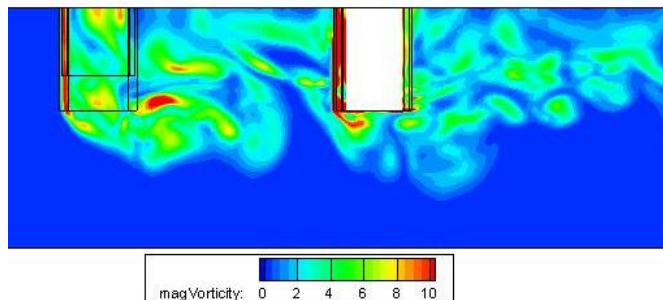


Figure b.2.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

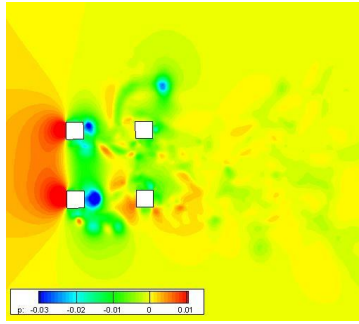


Figure b.2.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

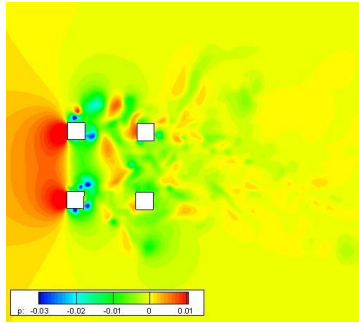


Figure b.2.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

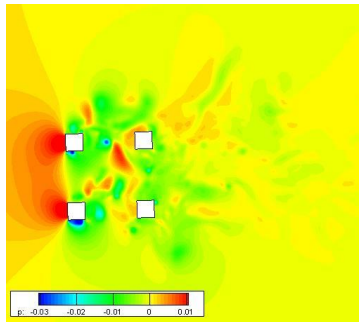


Figure b.2.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

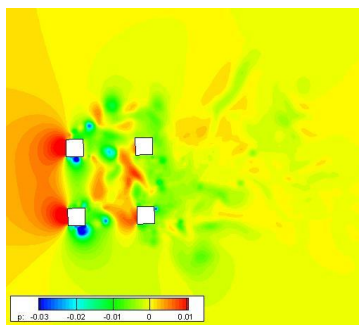


Figure b.2.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

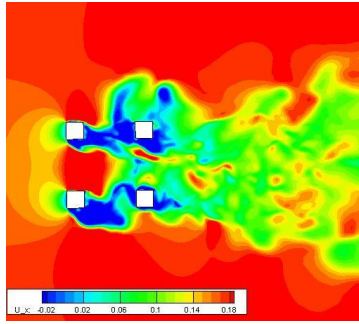


Figure b.2.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

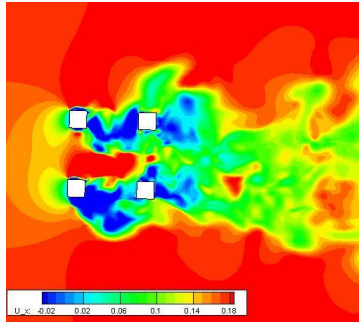


Figure b.2.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

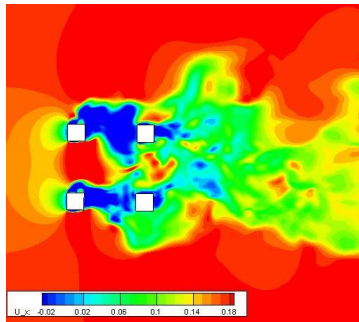


Figure b.2.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

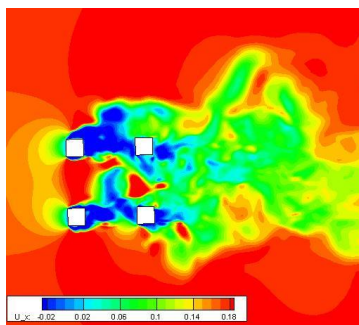


Figure b.2.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

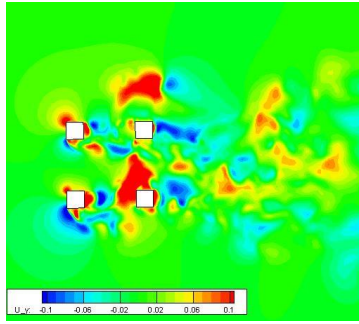


Figure b.2.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

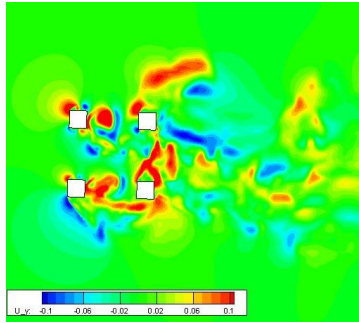


Figure b.2.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

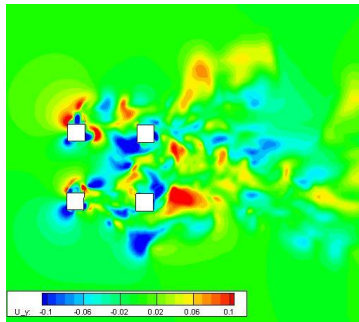


Figure b.2.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

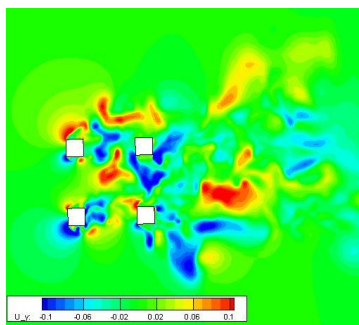


Figure b.2.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

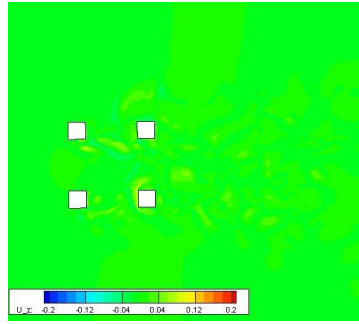


Figure b.2.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

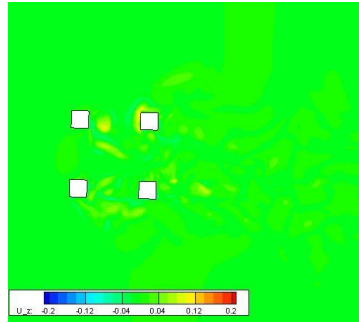


Figure b.2.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

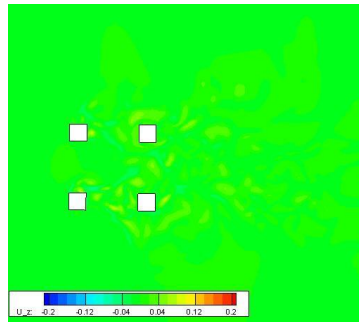


Figure b.2.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

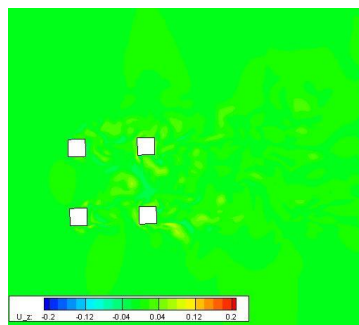


Figure b.2.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

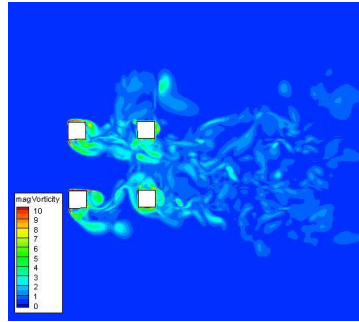


Figure b.2.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

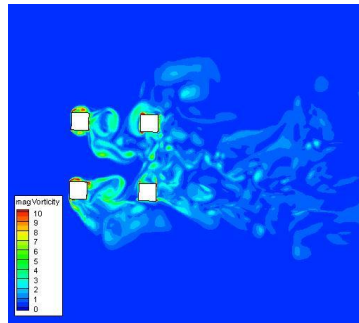


Figure b.2.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

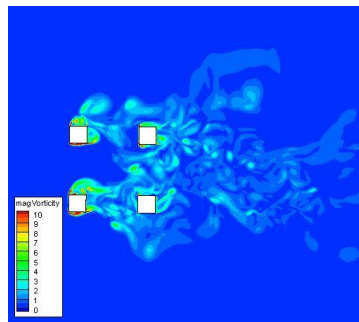


Figure b.2.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

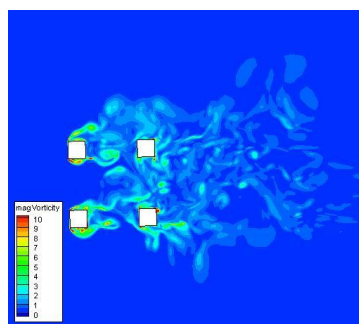


Figure b.2.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

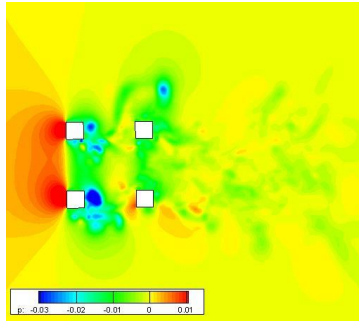


Figure b.2.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

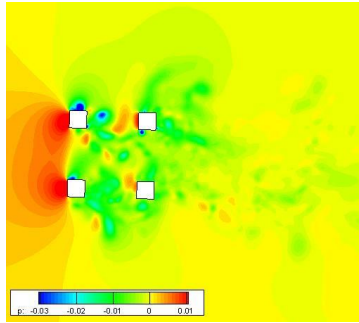


Figure b.2.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

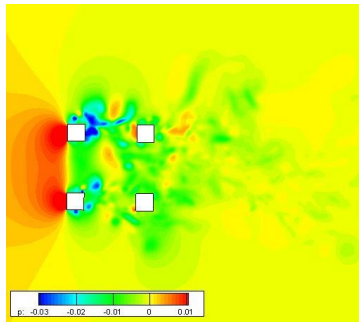


Figure b.2.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

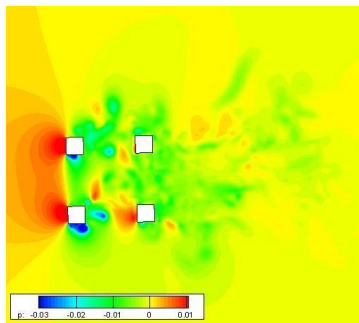


Figure b.2.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

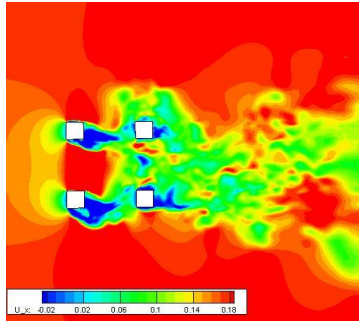


Figure b.2.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

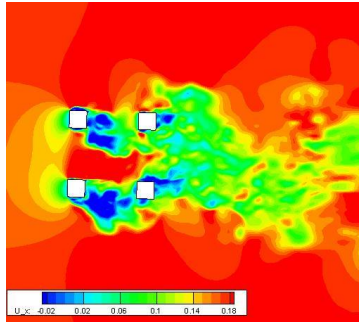


Figure b.2.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

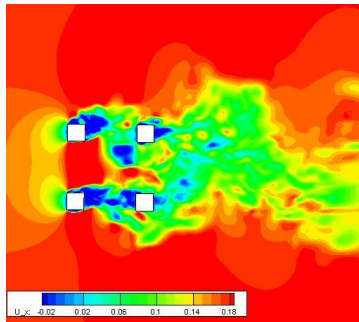


Figure b.2.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

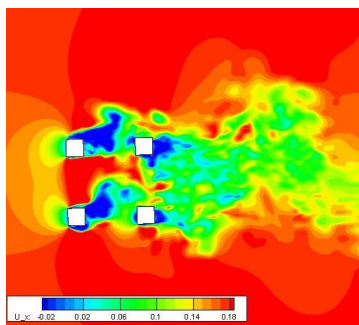


Figure b.2.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

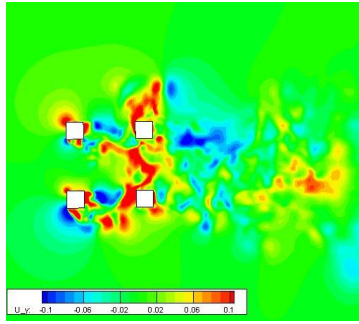


Figure b.2.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

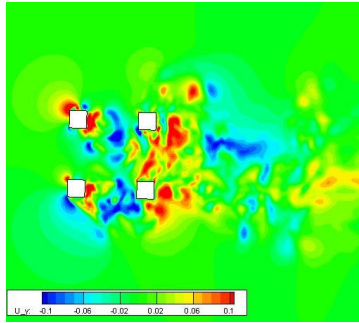


Figure b.2.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

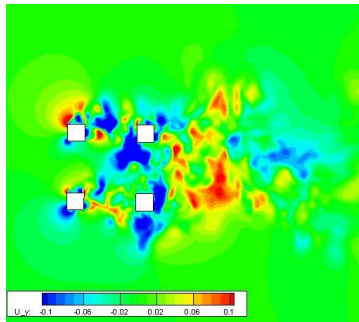


Figure b.2.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

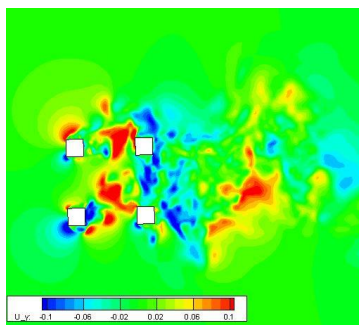


Figure b.2.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

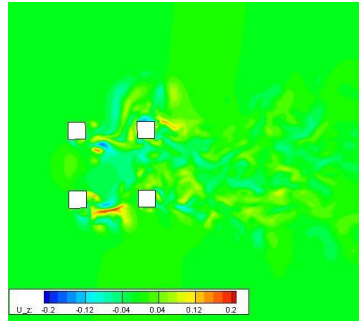


Figure b.2.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

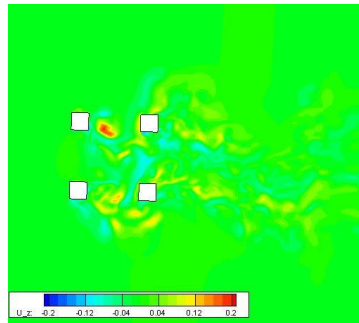


Figure b.2.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

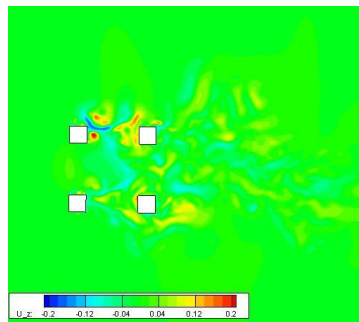


Figure b.2.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

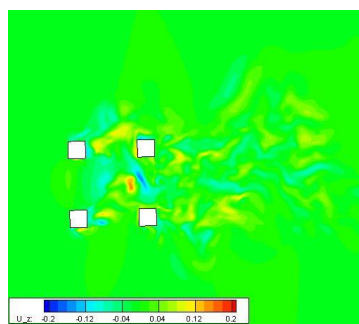


Figure b.2.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

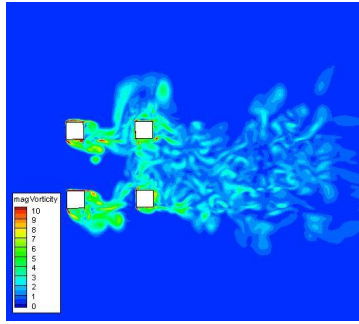


Figure b.2.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

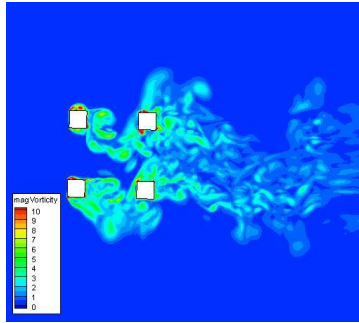


Figure b.2.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

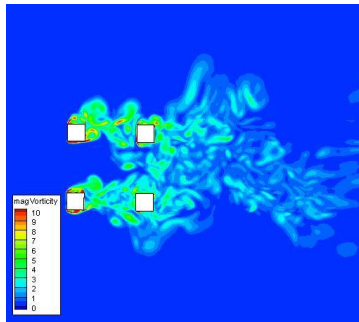


Figure b.2.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

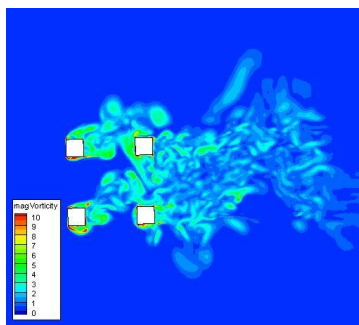


Figure b.2.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

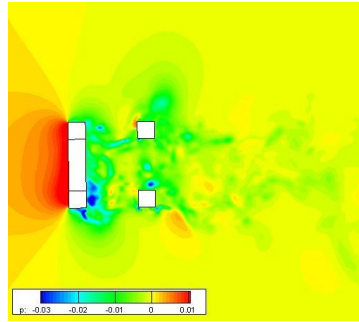


Figure b.2.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

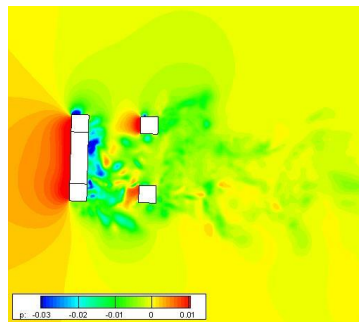


Figure b.2.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

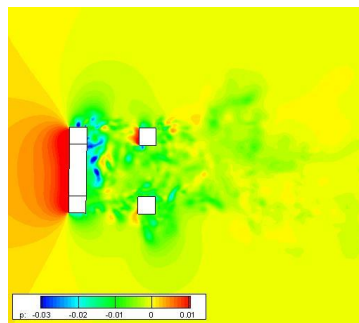


Figure b.2.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

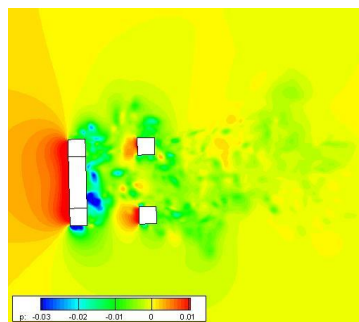


Figure b.2.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

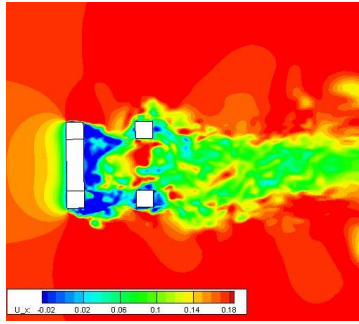


Figure b.2.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

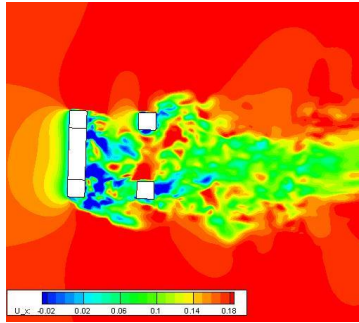


Figure b.2.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

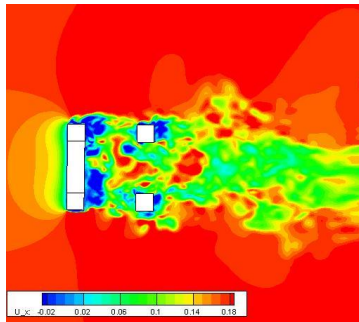


Figure b.2.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

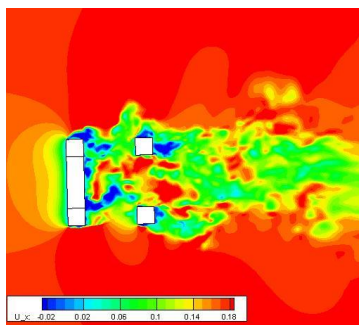


Figure b.2.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

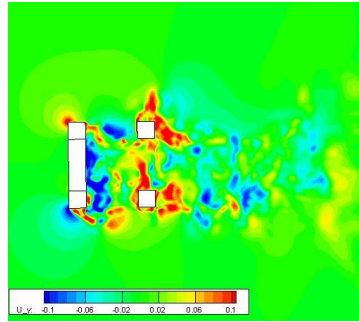


Figure b.2.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

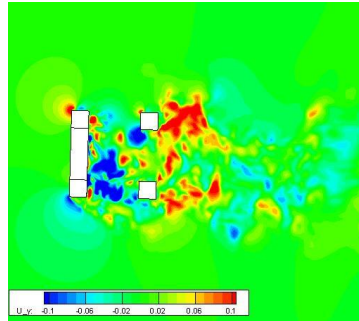


Figure b.2.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

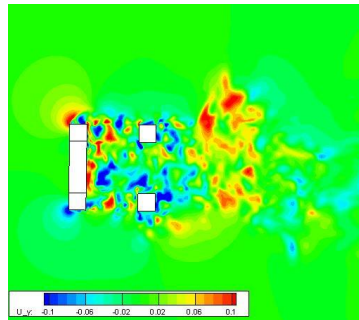


Figure b.2.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

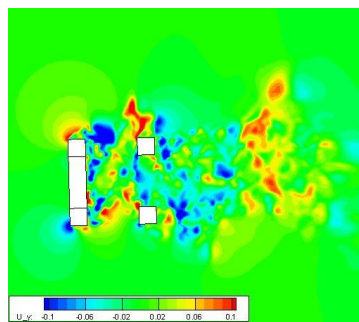


Figure b.2.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

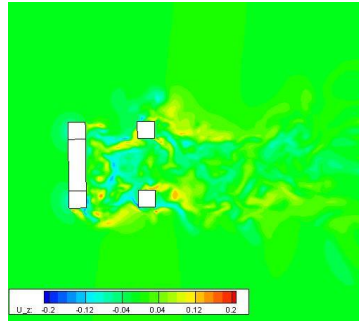


Figure b.2.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

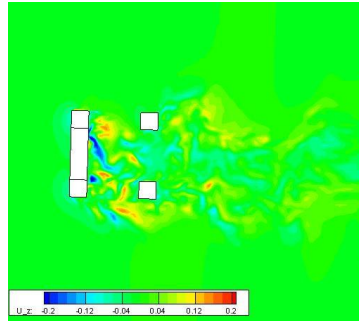


Figure b.2.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

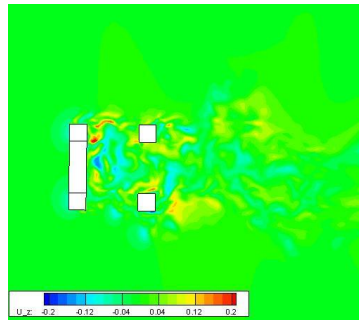


Figure b.2.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

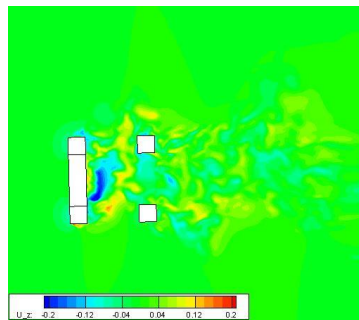


Figure b.2.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

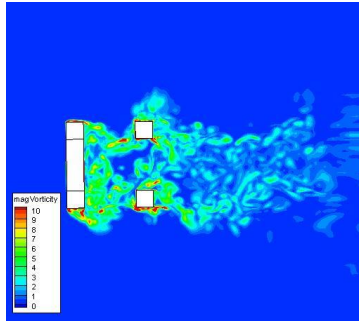


Figure b.2.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

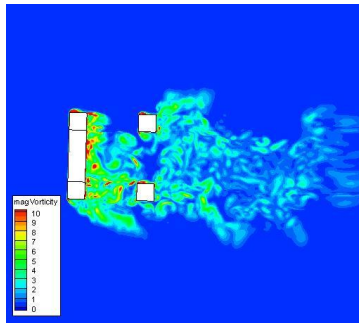


Figure b.2.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

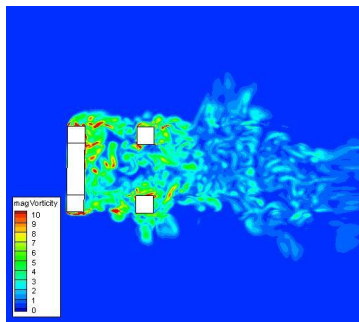


Figure b.2.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

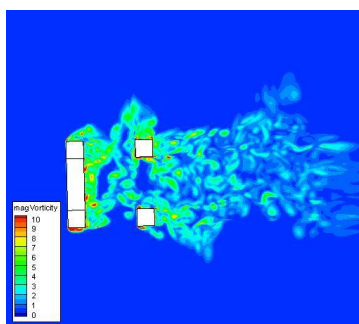


Figure b.2.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

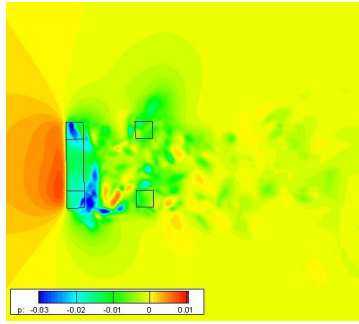


Figure b.2.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

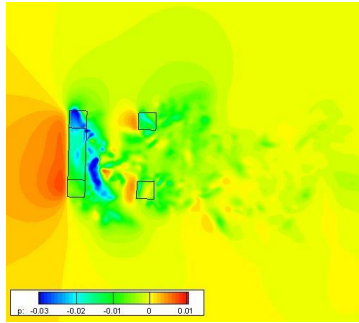


Figure b.2.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

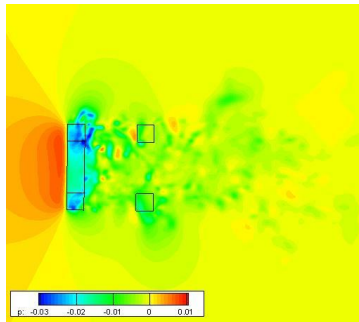


Figure b.2.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

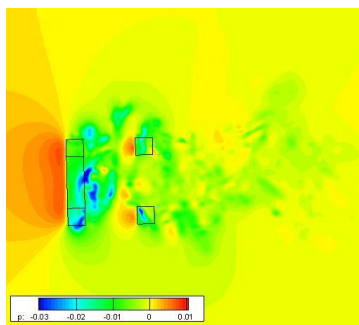


Figure b.2.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

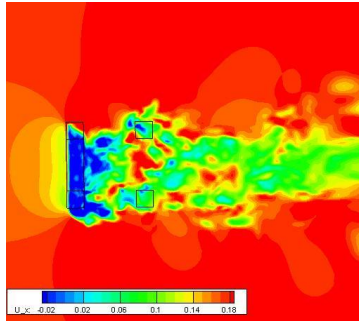


Figure b.2.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

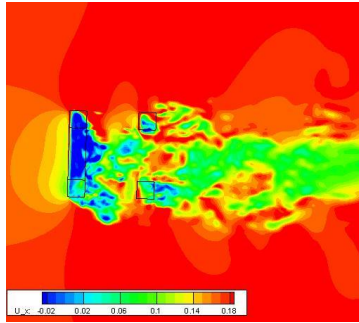


Figure b.2.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

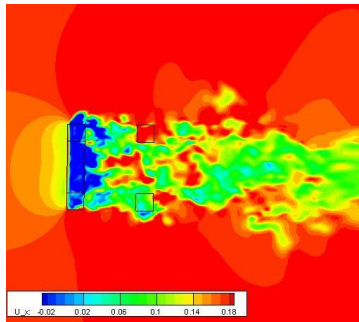


Figure b.2.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

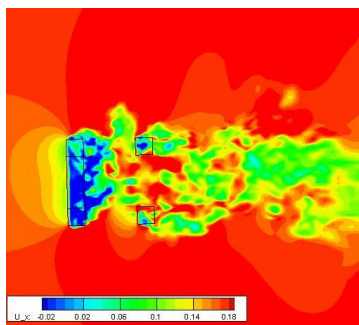


Figure b.2.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

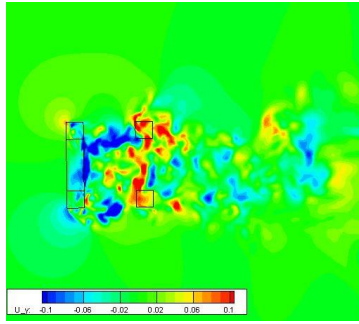


Figure b.2.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

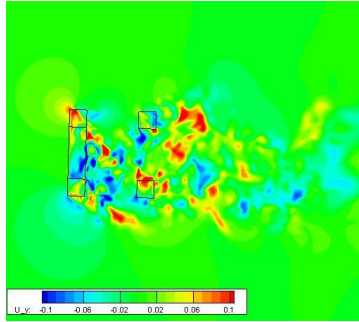


Figure b.2.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

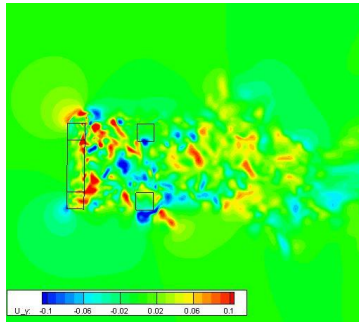


Figure b.2.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

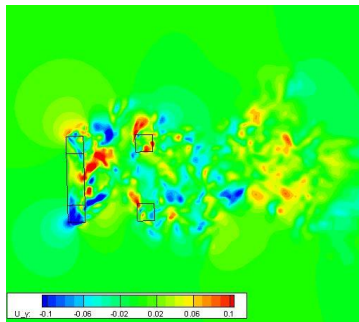


Figure b.2.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

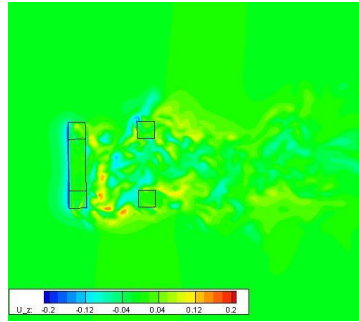


Figure b.2.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

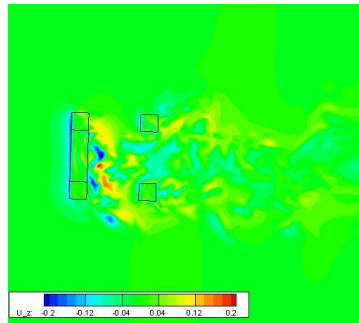


Figure b.2.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

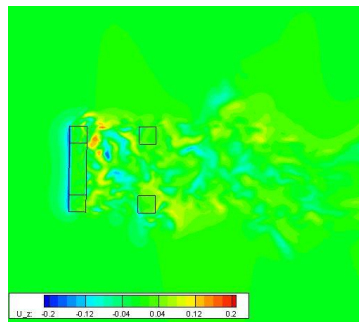


Figure b.2.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

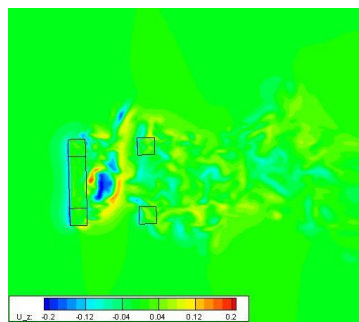


Figure b.2.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

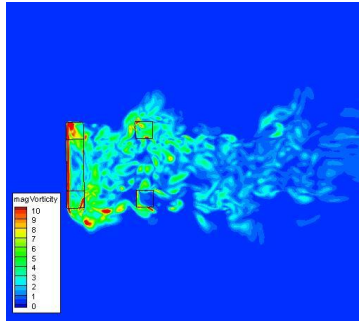


Figure b.2.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

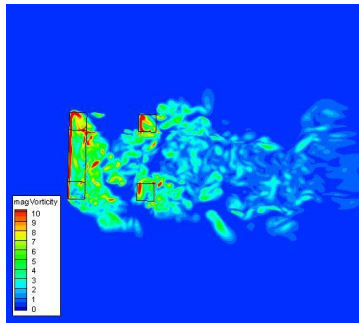


Figure b.2.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

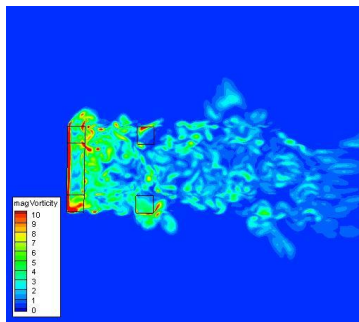


Figure b.2.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

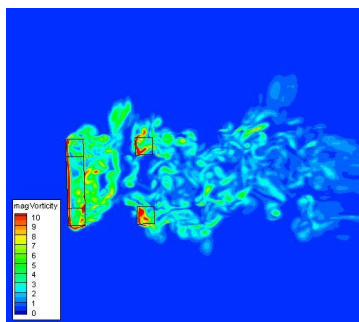


Figure b.2.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

3. $V_r=10.4$ ケース P1-r

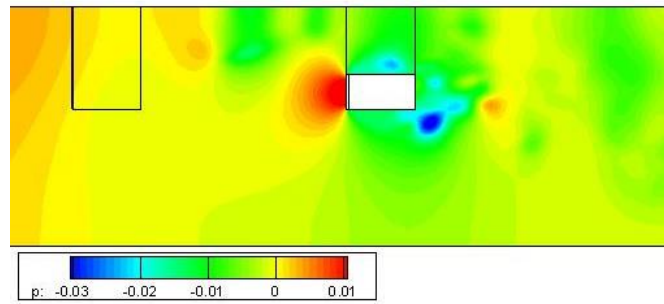


Figure b.3.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

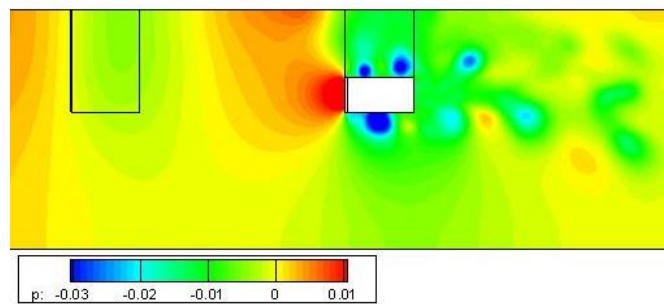


Figure b.3.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

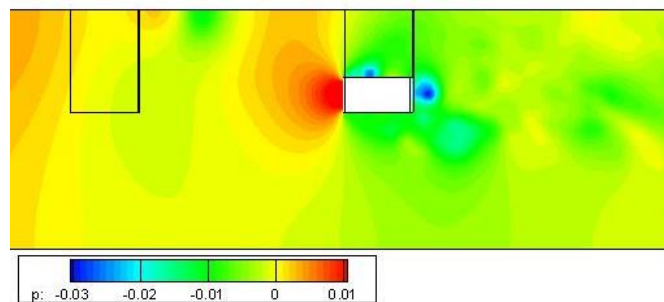


Figure b.3.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

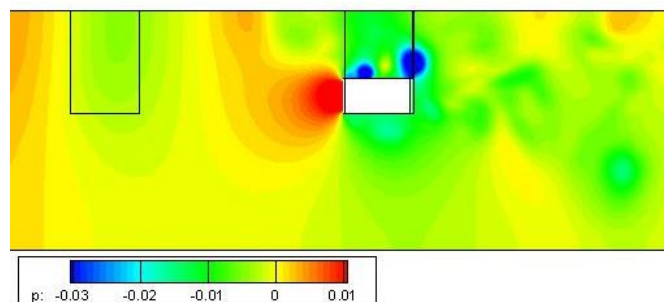


Figure b.3.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

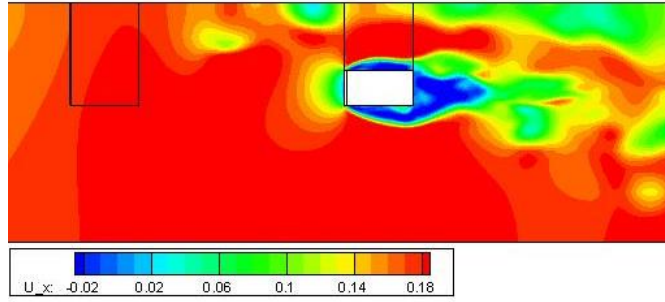


Figure b.3.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

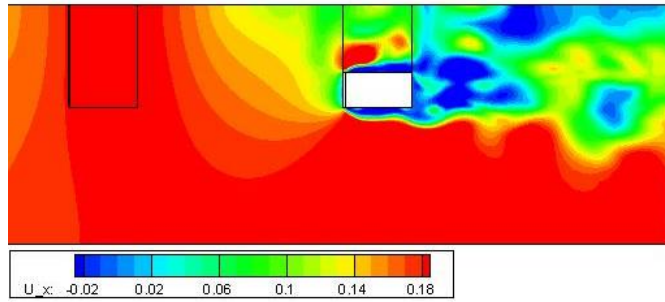


Figure b.3.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

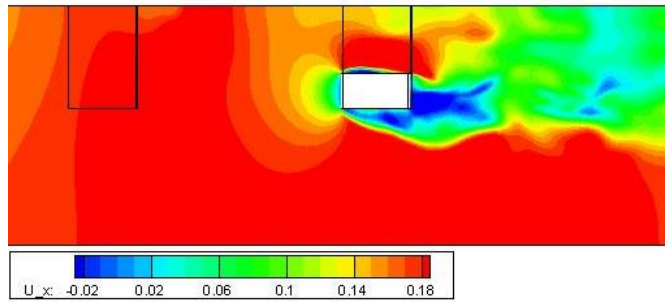


Figure b.3.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

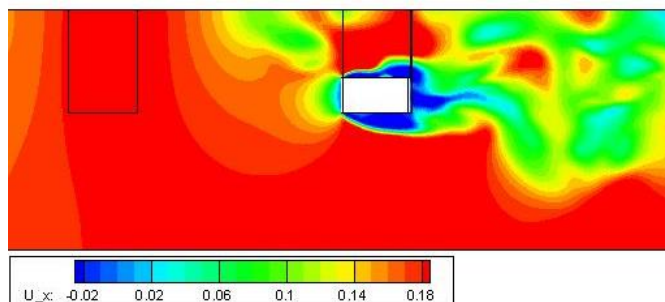


Figure b.3.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

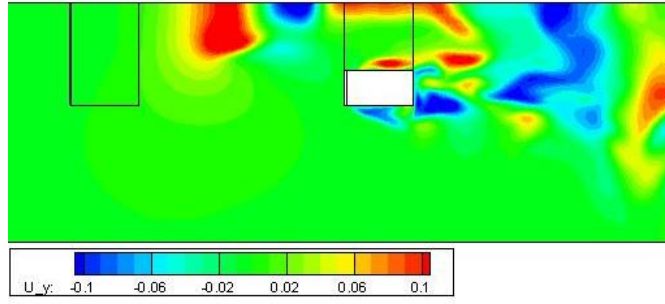


Figure b.3.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

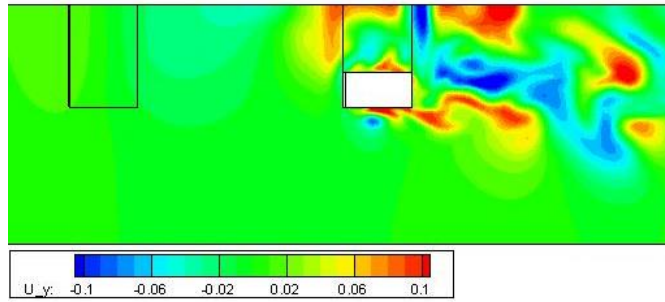


Figure b.3.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

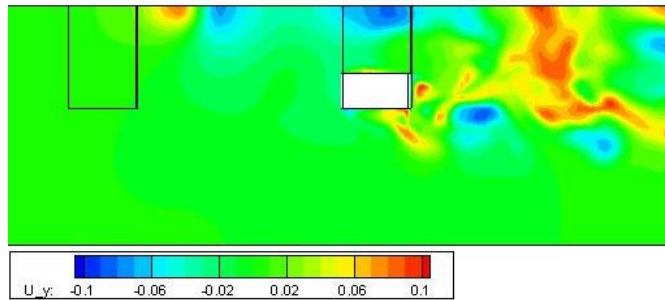


Figure b.3.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

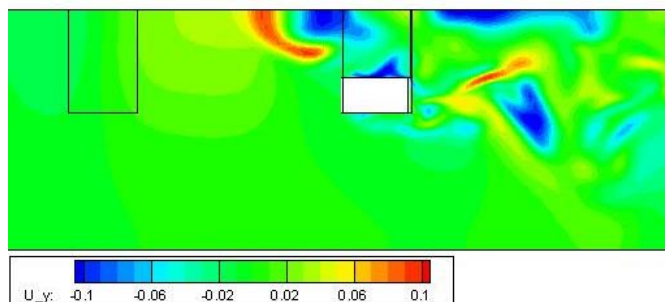


Figure b.3.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

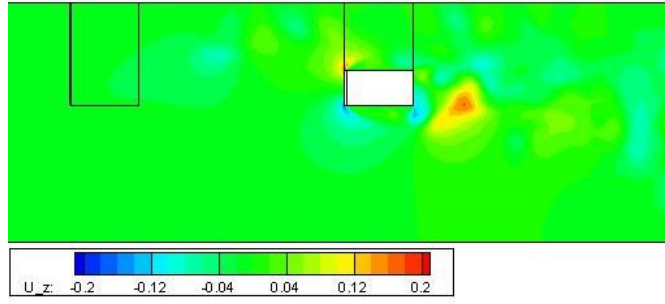


Figure b.3.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

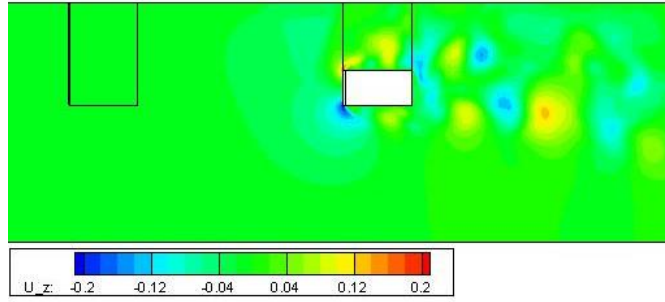


Figure b.3.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

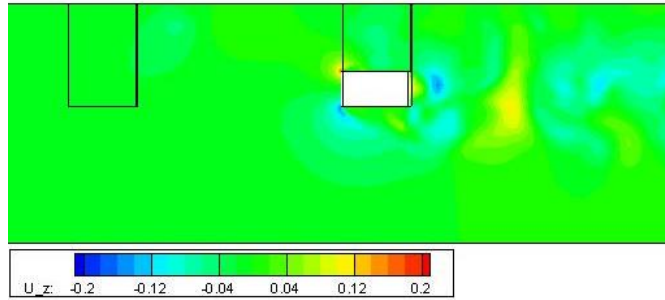


Figure b.3.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

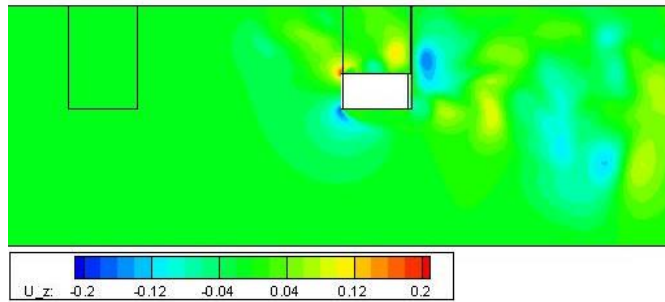


Figure b.3.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

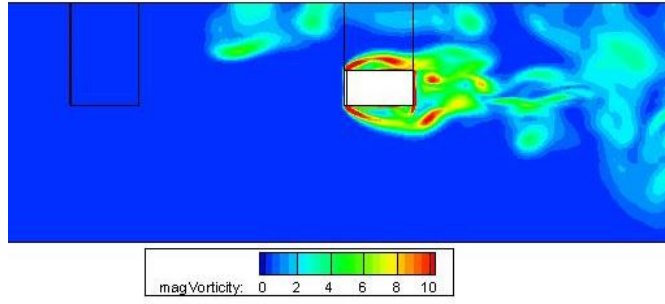


Figure b.3.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

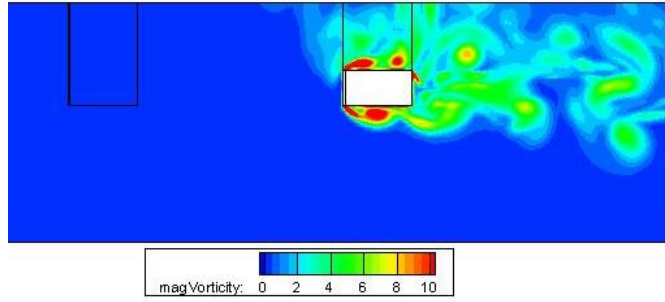


Figure b.3.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

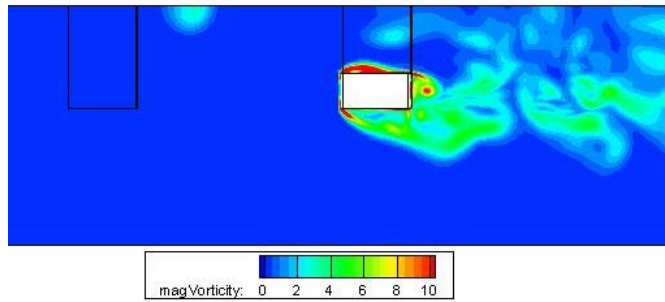


Figure b.3.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

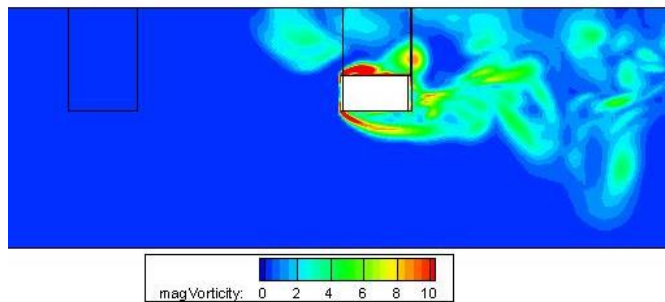


Figure b.3.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

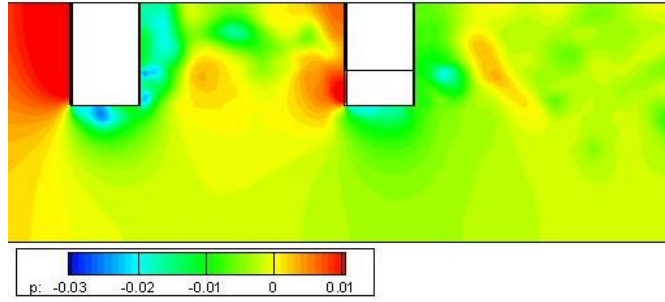


Figure b.3.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

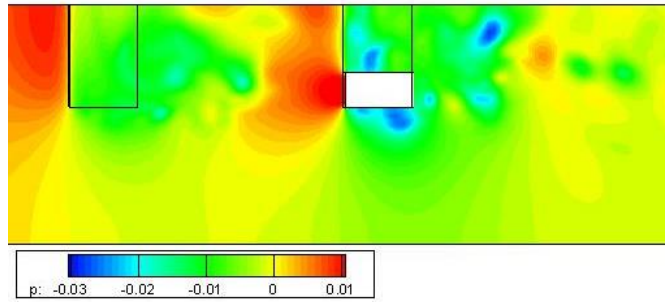


Figure b.3.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

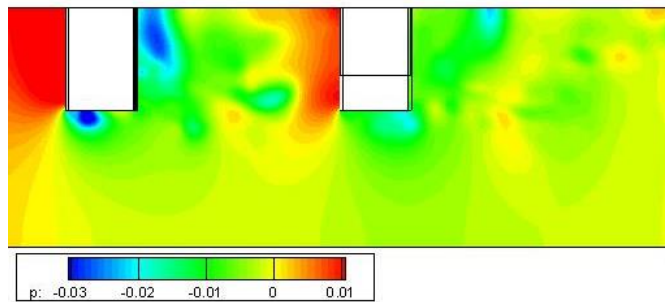


Figure b.3.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

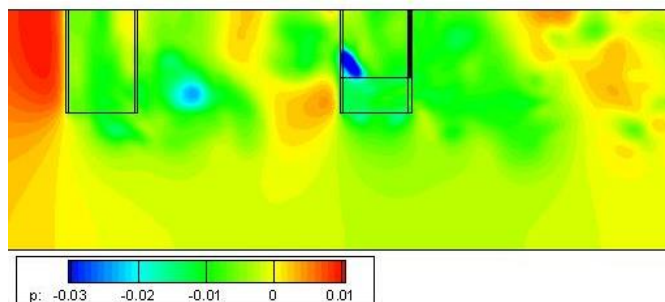


Figure b.3.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

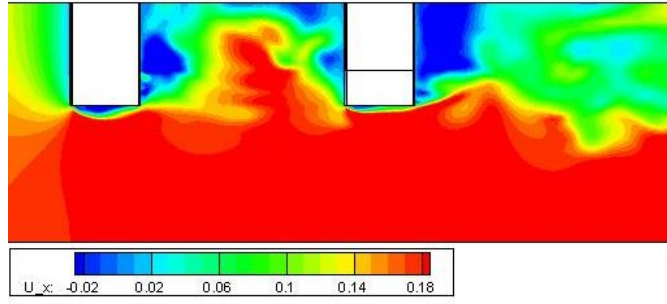


Figure b.3.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

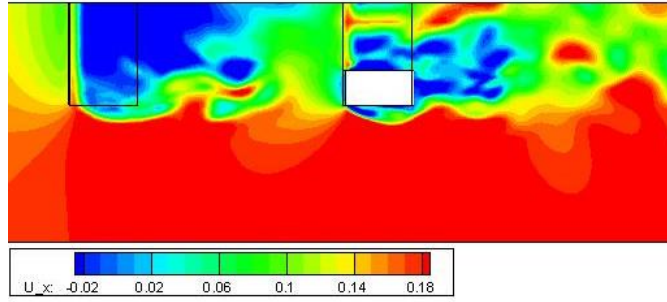


Figure b.3.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

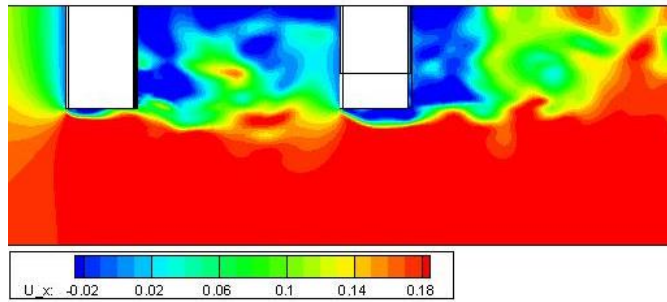


Figure b.3.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

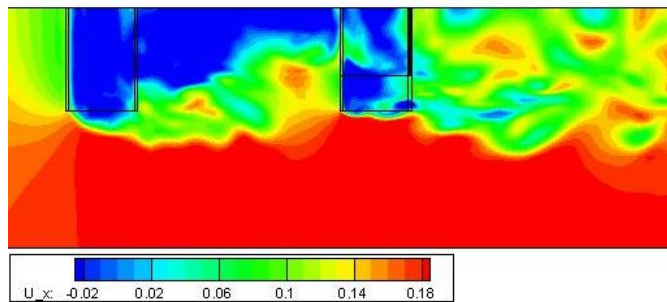


Figure b.3.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

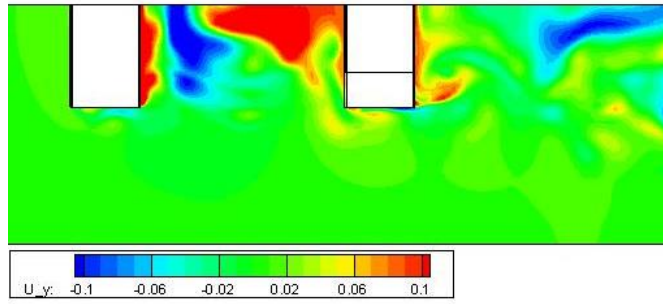


Figure b.3.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

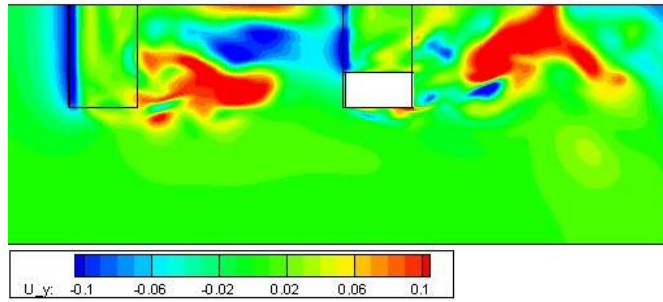


Figure b.3.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

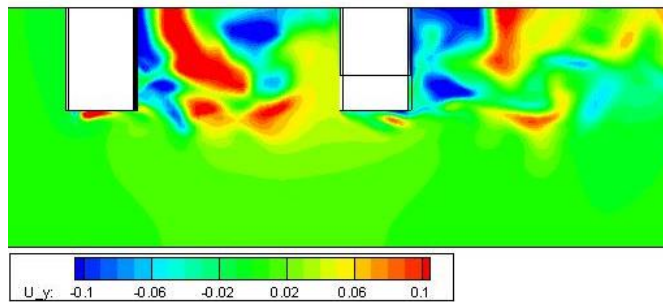


Figure b.3.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

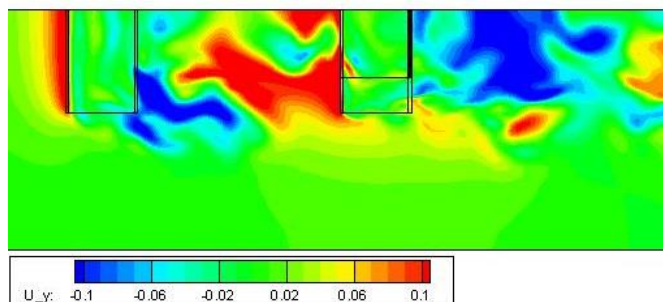


Figure b.3.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

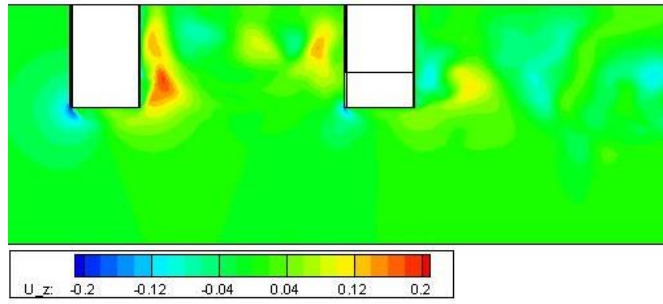


Figure b.3.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

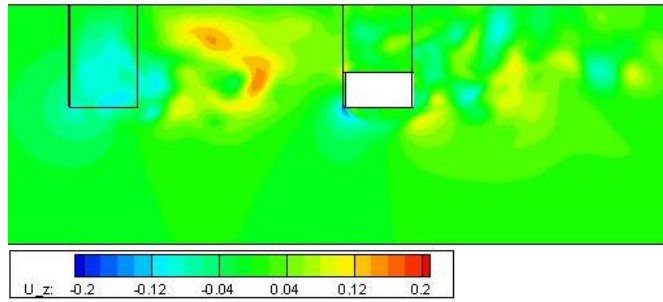


Figure b.3.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

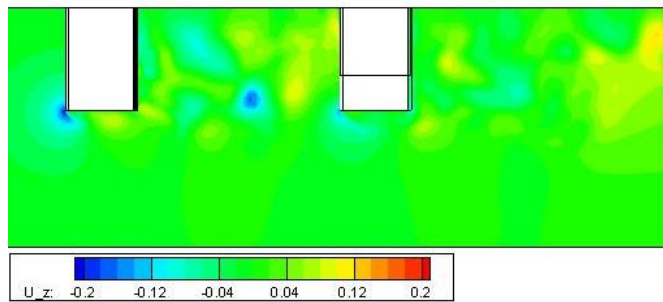


Figure b.3.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

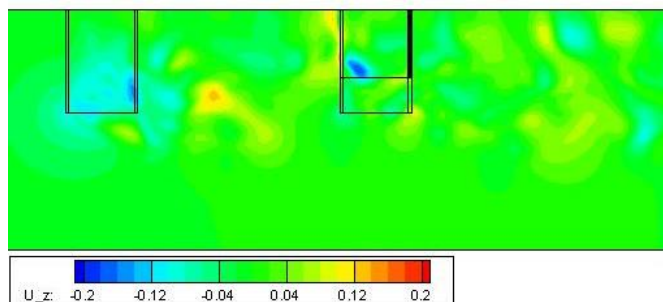


Figure b.3.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

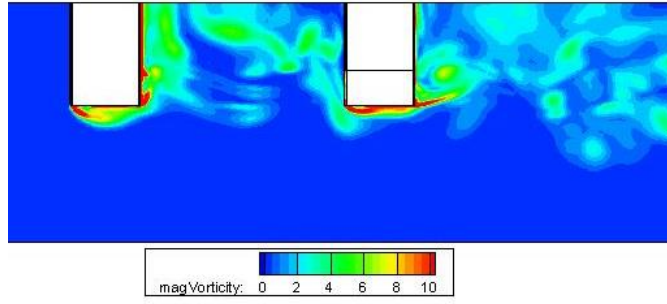


Figure b.3.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

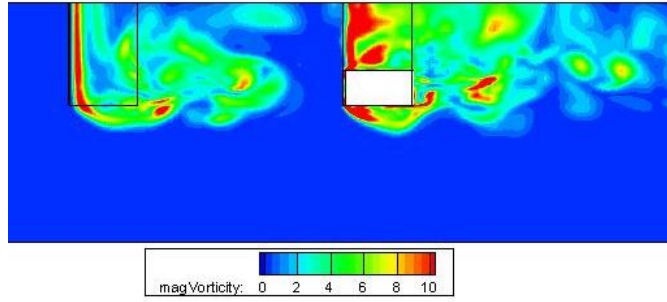


Figure b.3.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

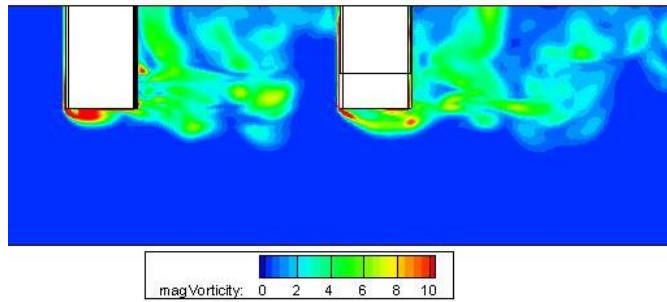


Figure b.3.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

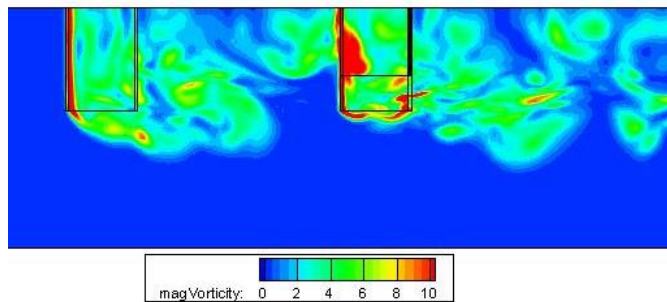


Figure b.3.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

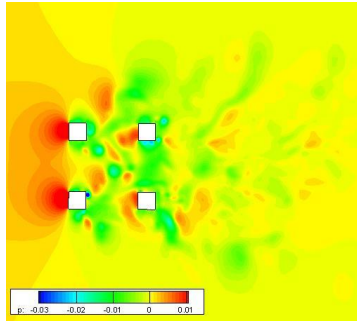


Figure b.3.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

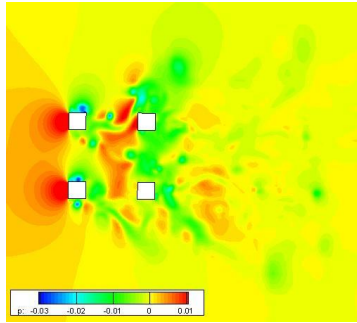


Figure b.3.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

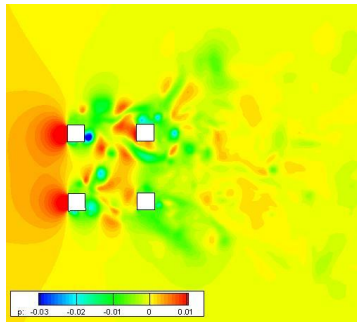


Figure b.3.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

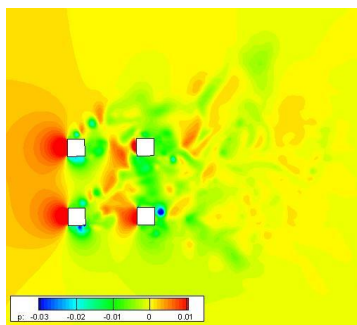


Figure b.3.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

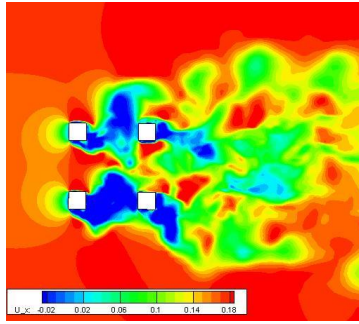


Figure b.3.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

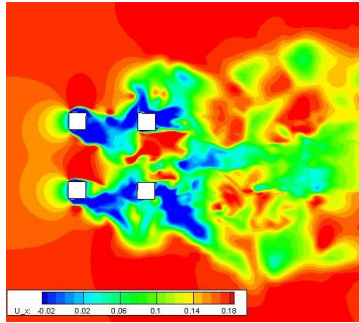


Figure b.3.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

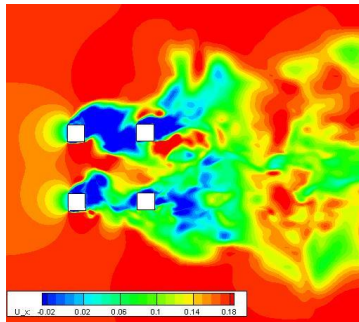


Figure b.3.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

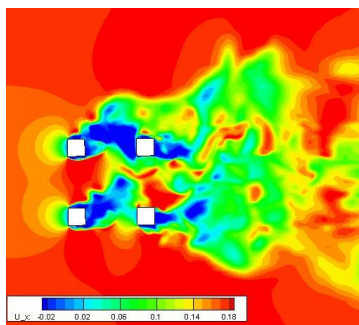


Figure b.3.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

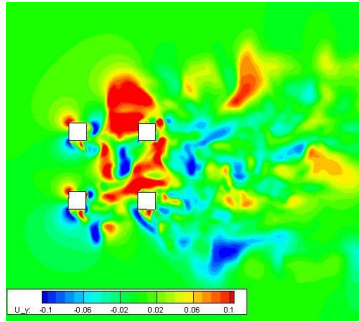


Figure b.3.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

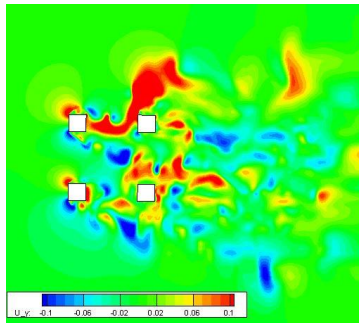


Figure b.3.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

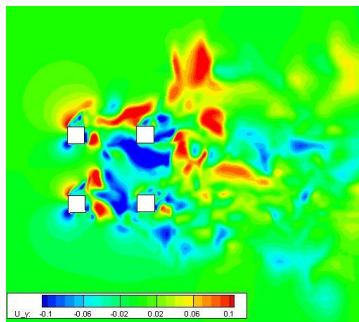


Figure b.3.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

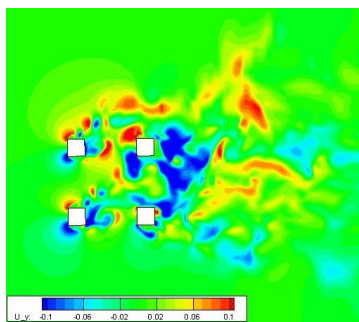


Figure b.3.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

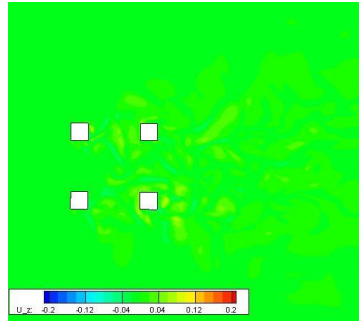


Figure b.3.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

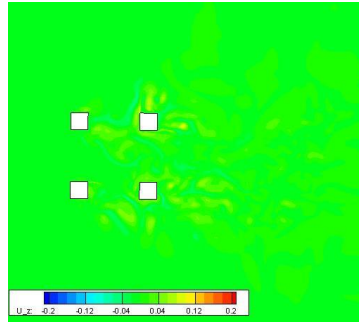


Figure b.3.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

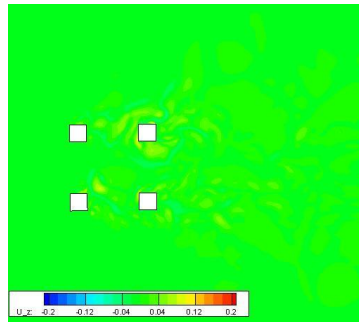


Figure b.3.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

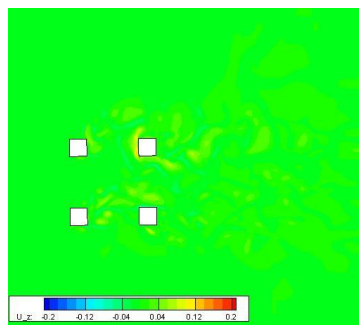


Figure b.3.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

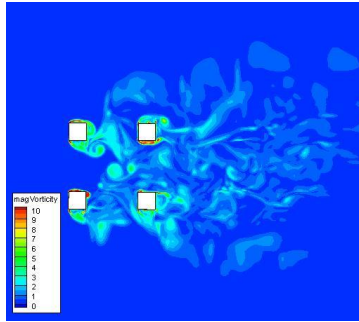


Figure b.3.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

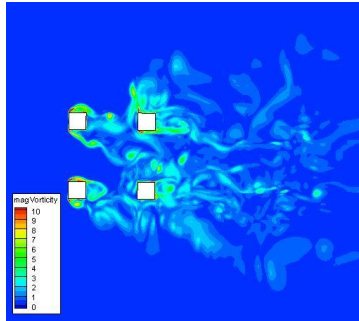


Figure b.3.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

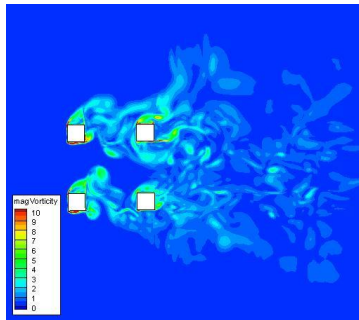


Figure b.3.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

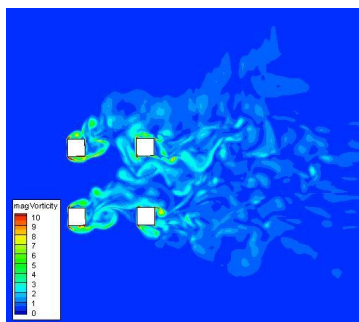


Figure b.3.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

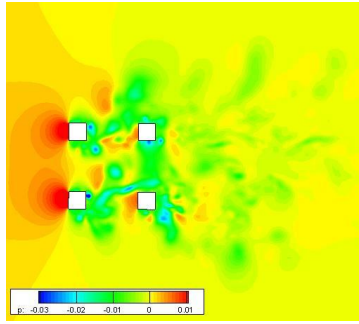


Figure b.3.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

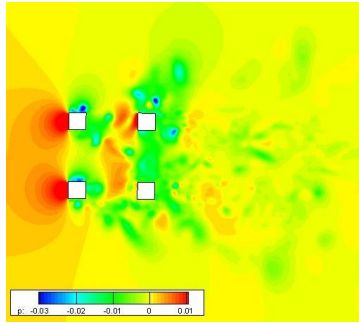


Figure b.3.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

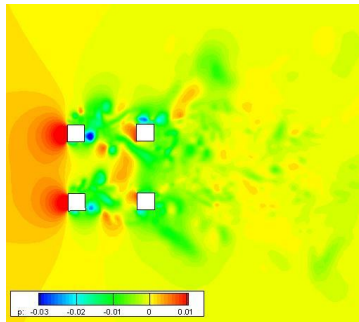


Figure b.3.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

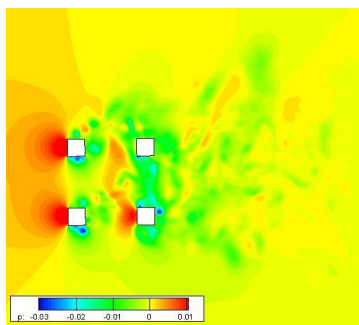


Figure b.3.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

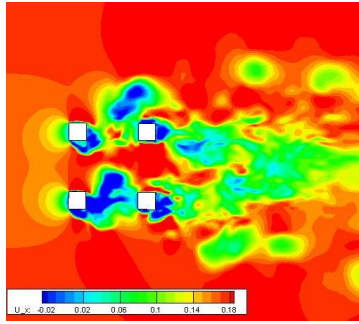


Figure b.3.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

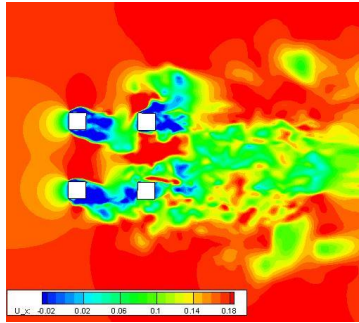


Figure b.3.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

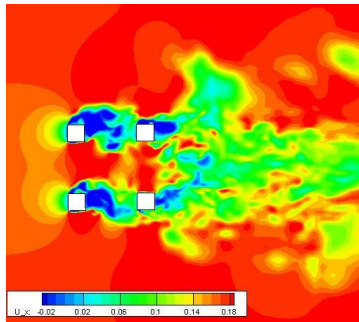


Figure b.3.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

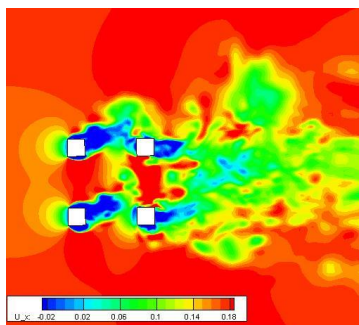


Figure b.3.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

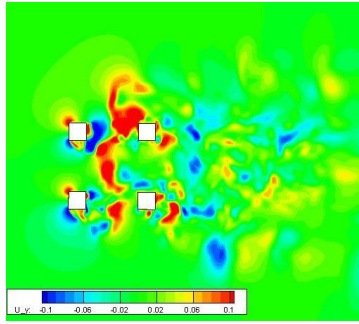


Figure b.3.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

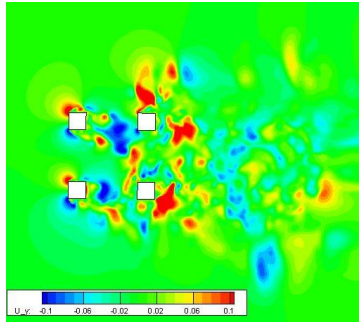


Figure b.3.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

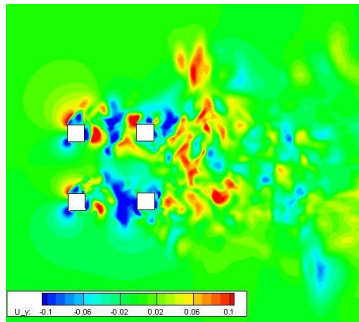


Figure b.3.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

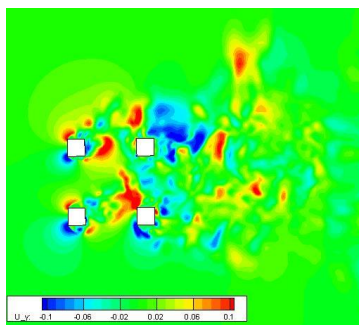


Figure b.3.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

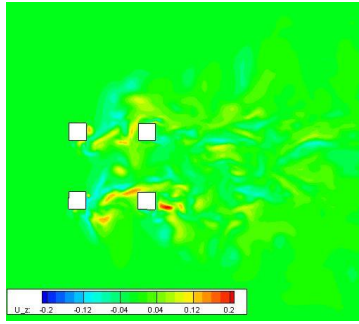


Figure b.3.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

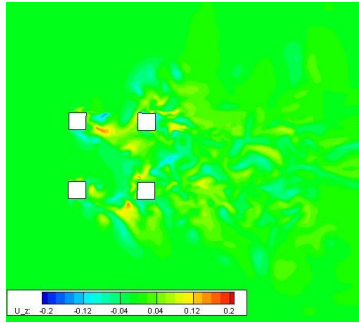


Figure b.3.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

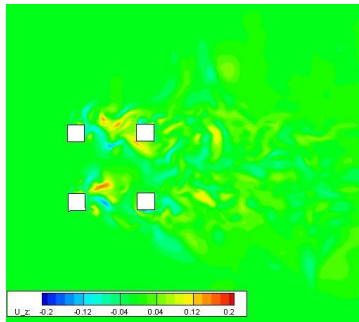


Figure b.3.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

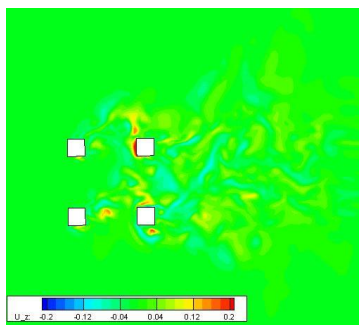


Figure b.3.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

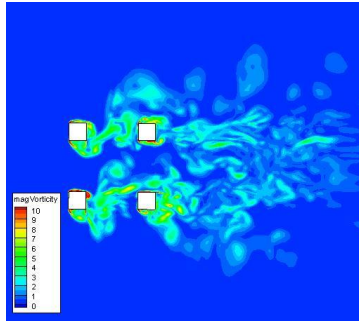


Figure b.3.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

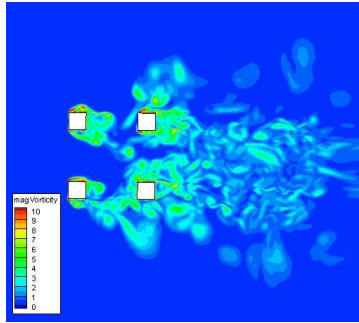


Figure b.3.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

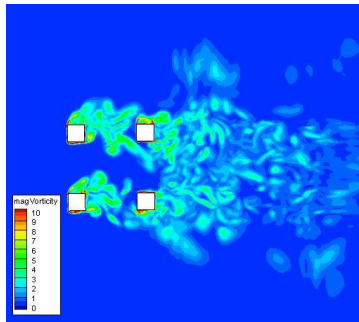


Figure b.3.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

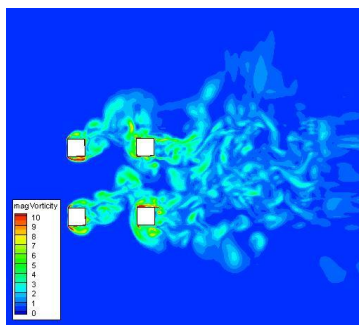


Figure b.3.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

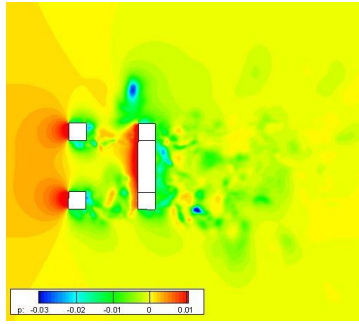


Figure b.3.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

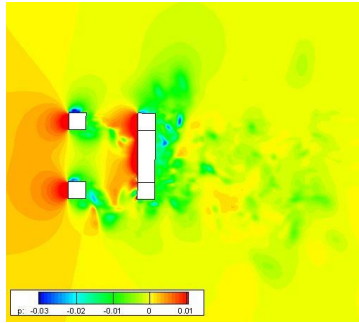


Figure b.3.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

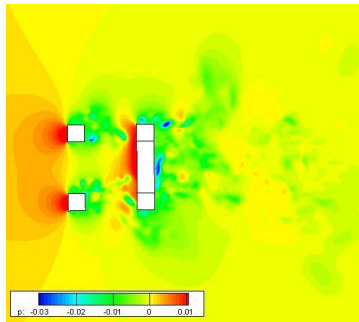


Figure b.3.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

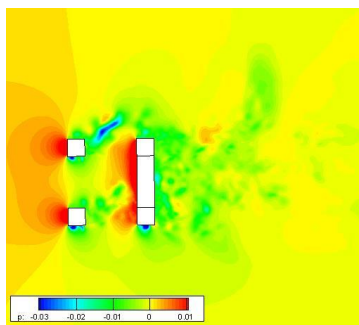


Figure b.3.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

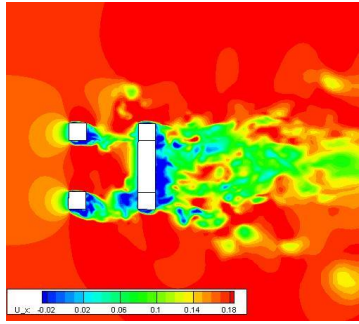


Figure b.3.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

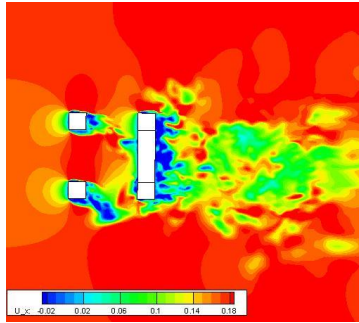


Figure b.3.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

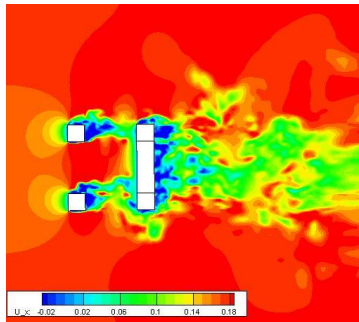


Figure b.3.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

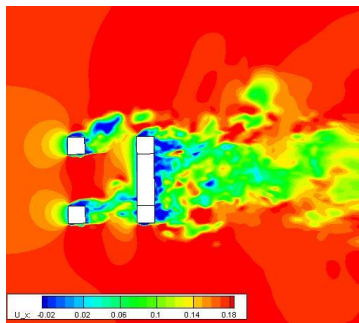


Figure b.3.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

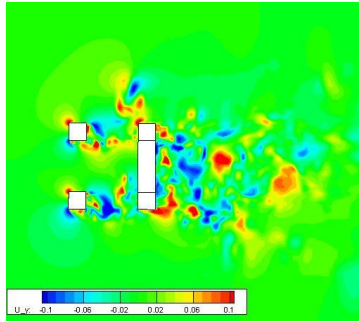


Figure b.3.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

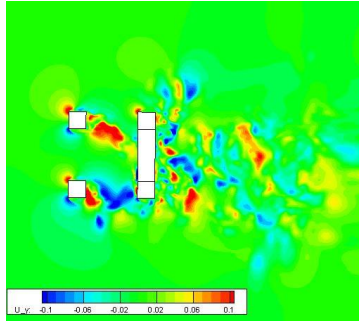


Figure b.3.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

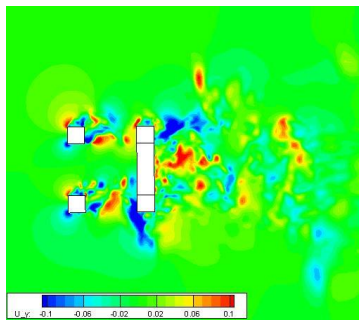


Figure b.3.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

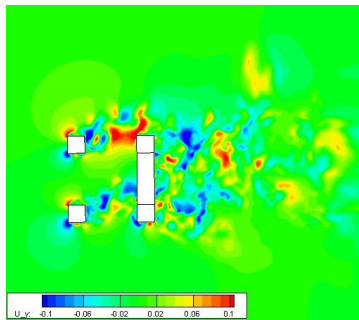


Figure b.3.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

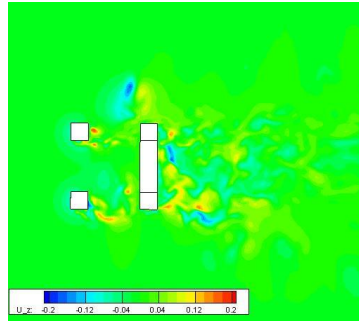


Figure b.3.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

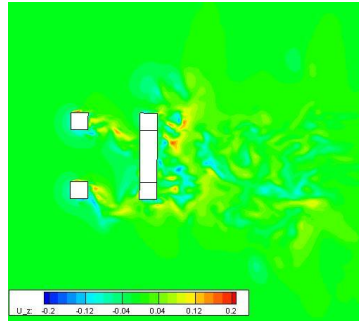


Figure b.3.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

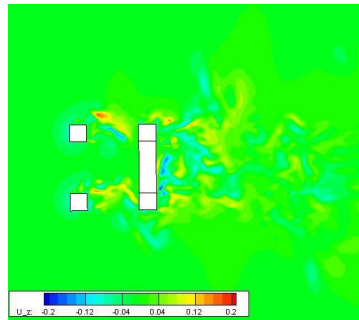


Figure b.3.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

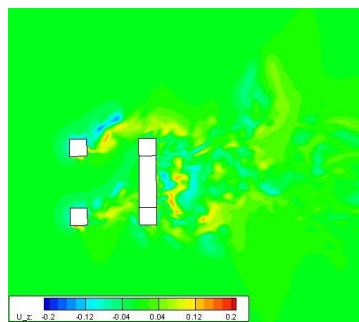


Figure b.3.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

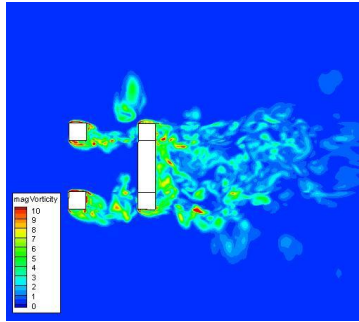


Figure b.3.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

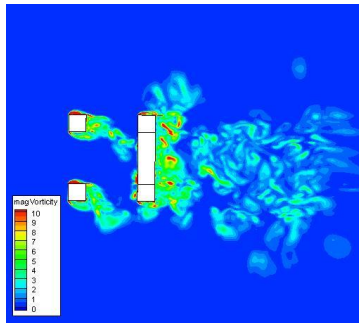


Figure b.3.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

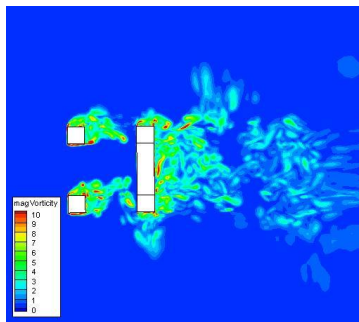


Figure b.3.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

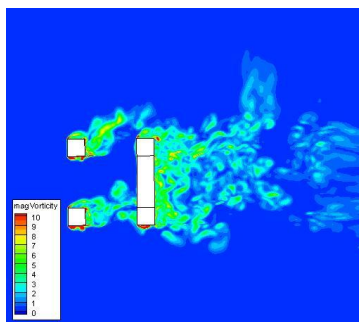


Figure b.3.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

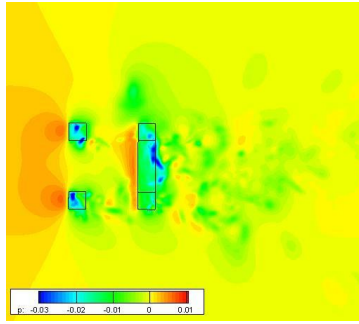


Figure b.3.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

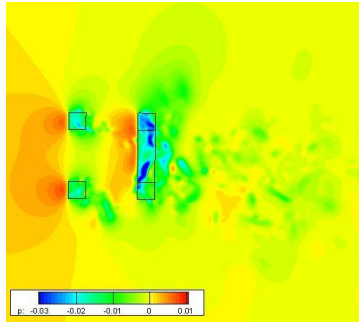


Figure b.3.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

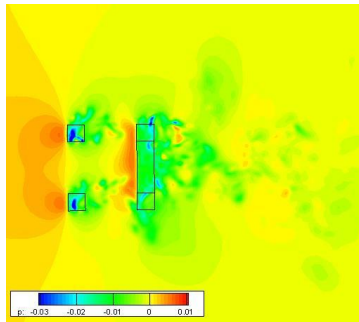


Figure b.3.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

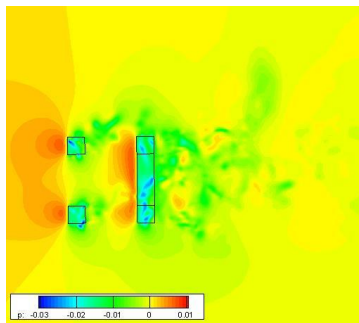


Figure b.3.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

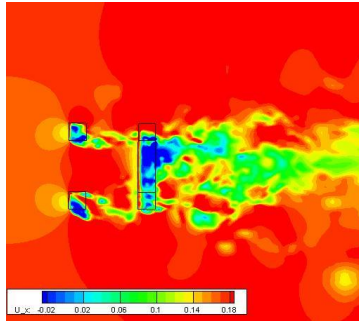


Figure b.3.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

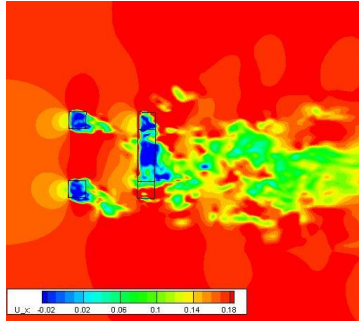


Figure b.3.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

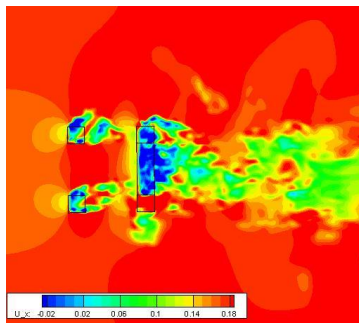


Figure b.3.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

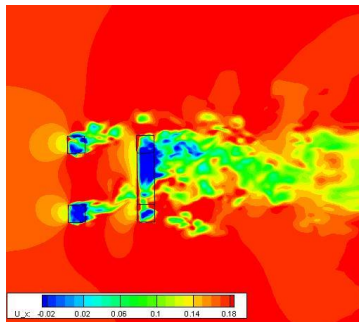


Figure b.3.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

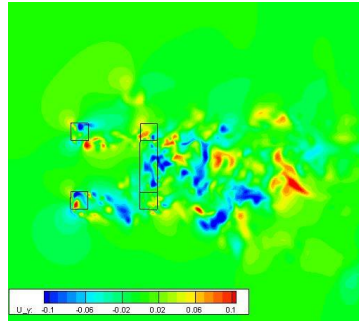


Figure b.3.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

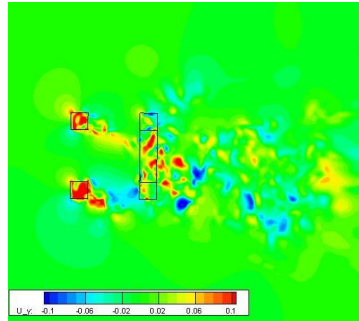


Figure b.3.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

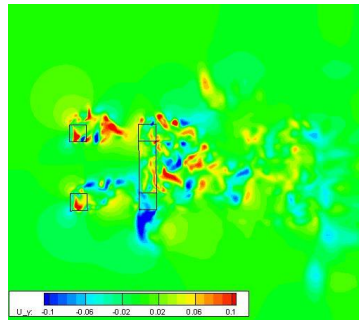


Figure b.3.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

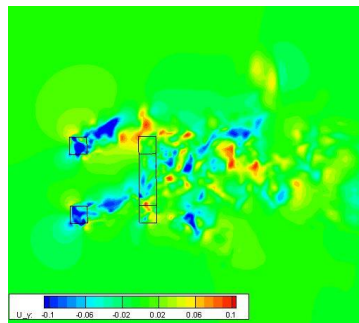


Figure b.3.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

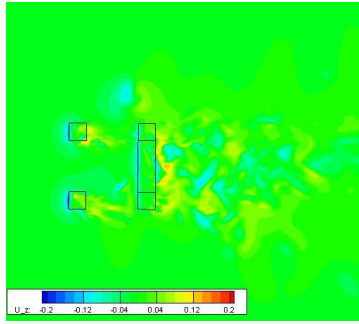


Figure b.3.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

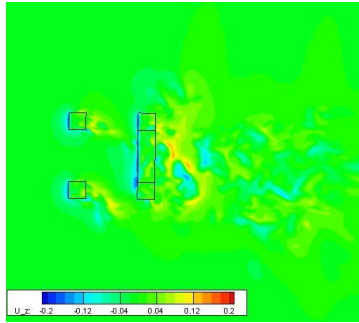


Figure b.3.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

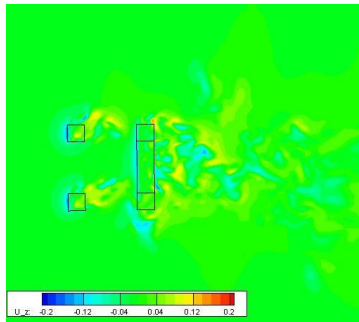


Figure b.3.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

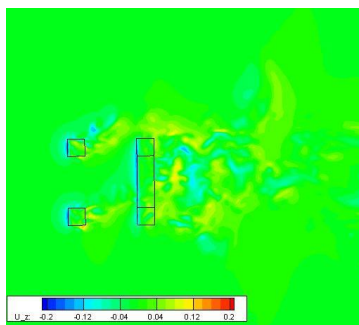


Figure b.3.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

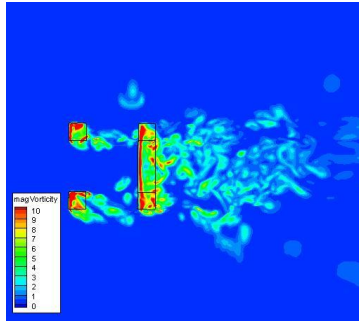


Figure b.3.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

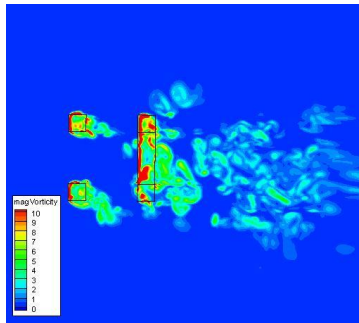


Figure b.3.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

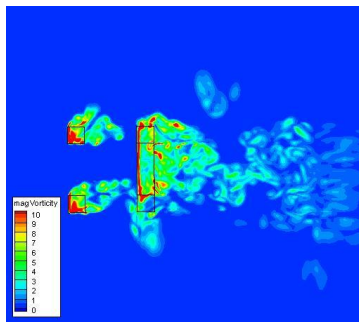


Figure b.3.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

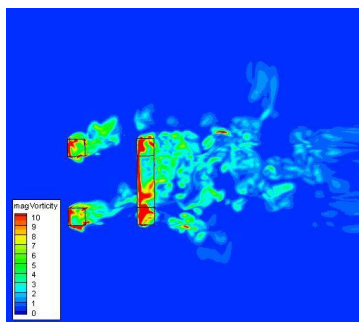


Figure b.3.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

4. $Vr=10.4$ ケース P2-fr

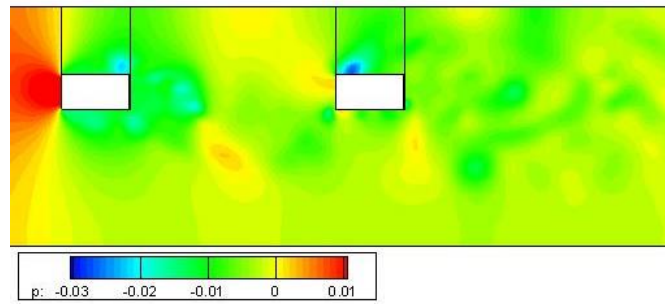


Figure b.4.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

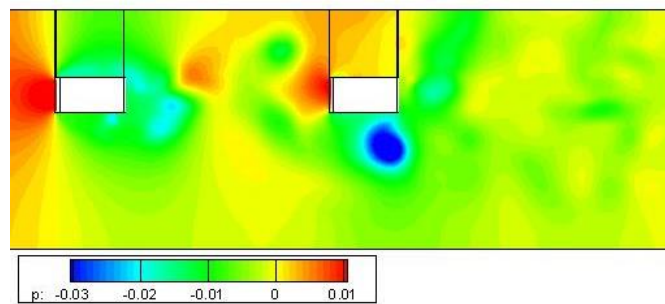


Figure b.4.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

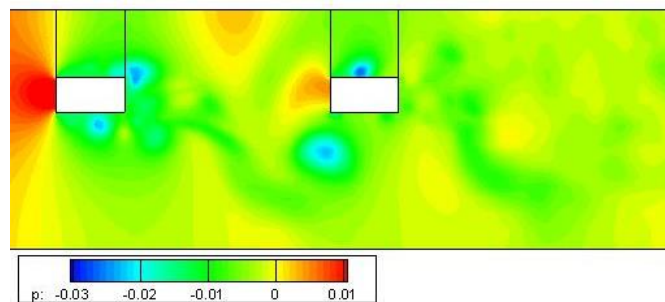


Figure b.4.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

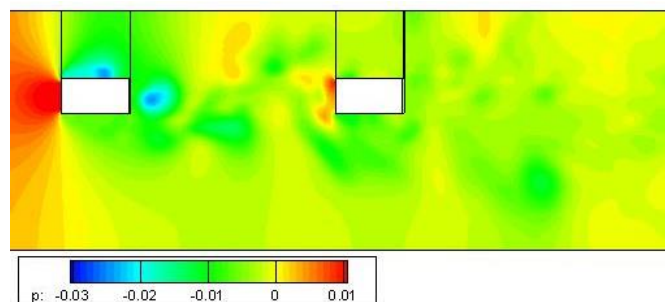


Figure b.4.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

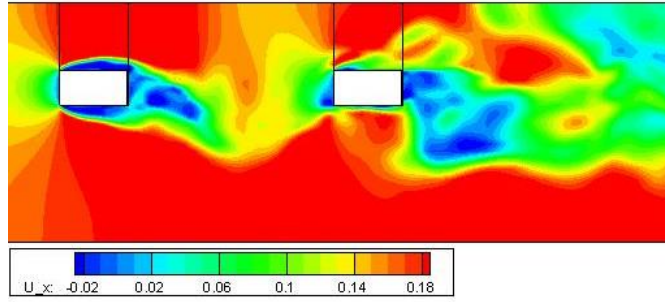


Figure b.4.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

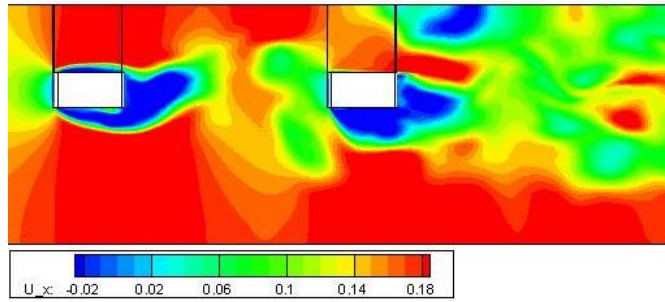


Figure b.4.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

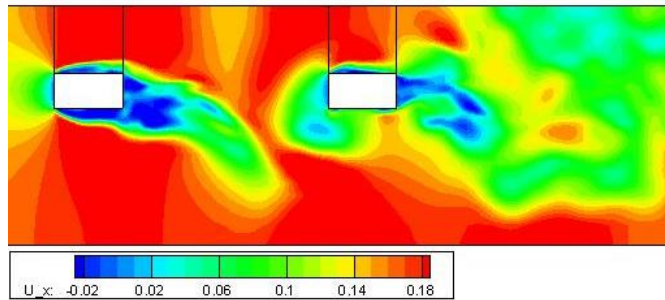


Figure b.4.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

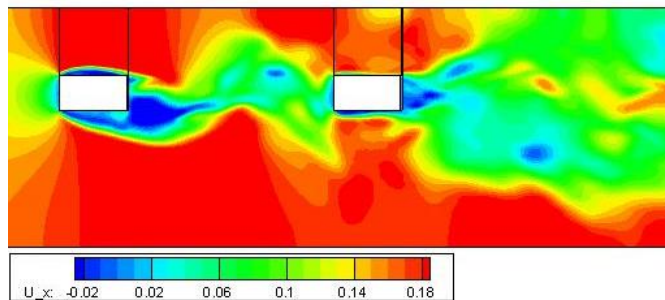


Figure b.4.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

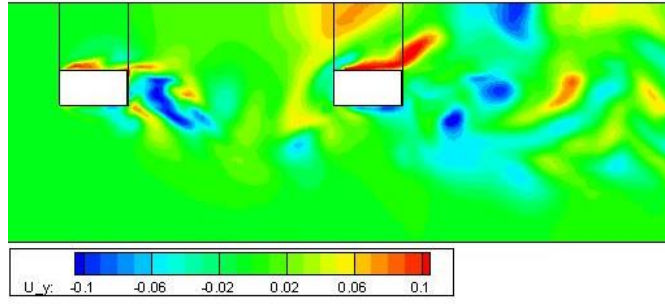


Figure b.4.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

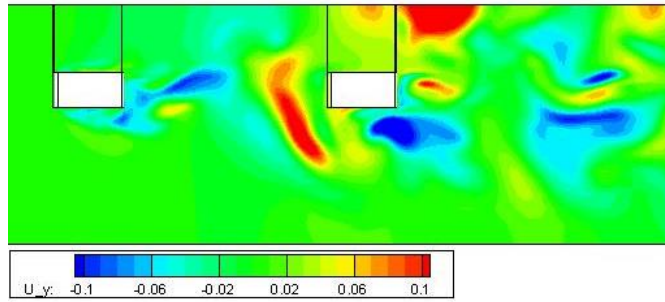


Figure b.4.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

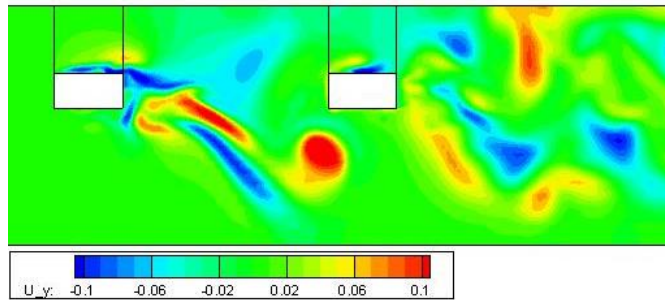


Figure b.4.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

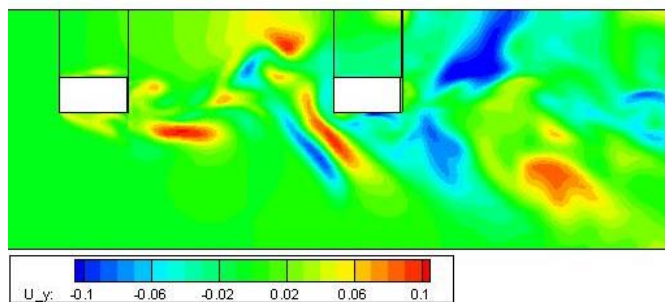


Figure b.4.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

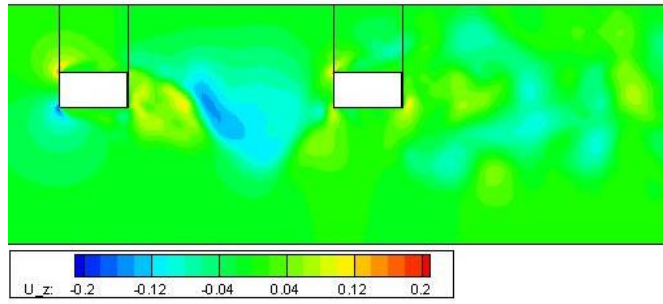


Figure b.4.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

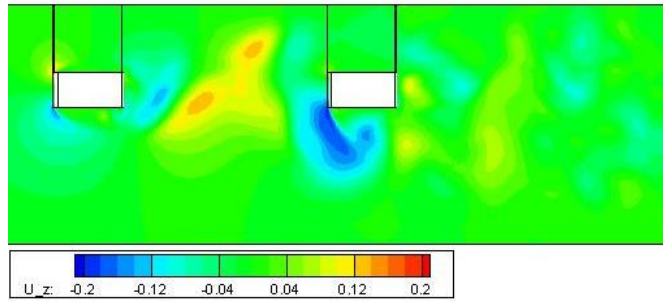


Figure b.4.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

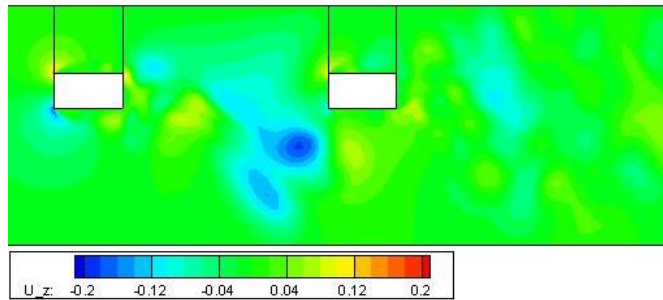


Figure b.4.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

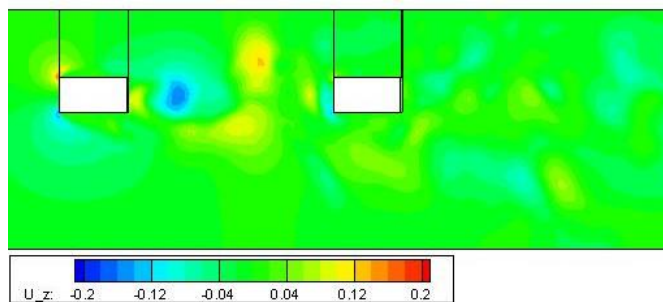


Figure b.4.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

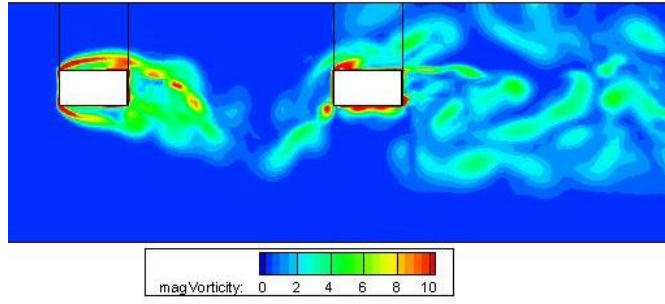


Figure b.4.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

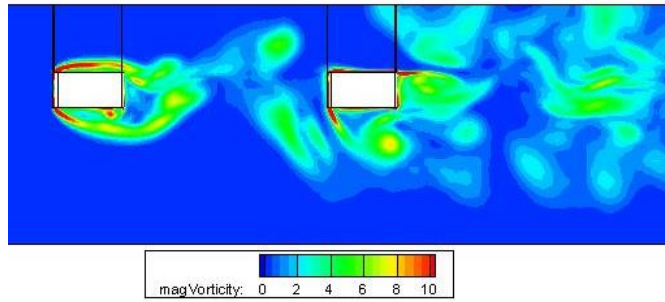


Figure b.4.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

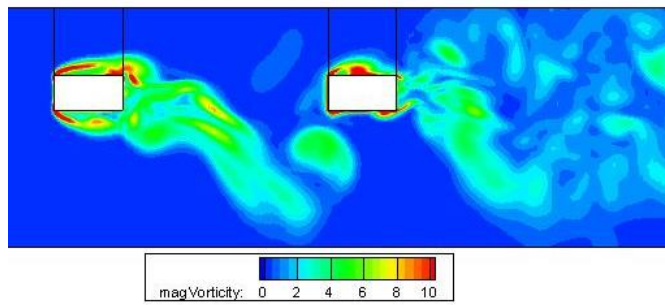


Figure b.4.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

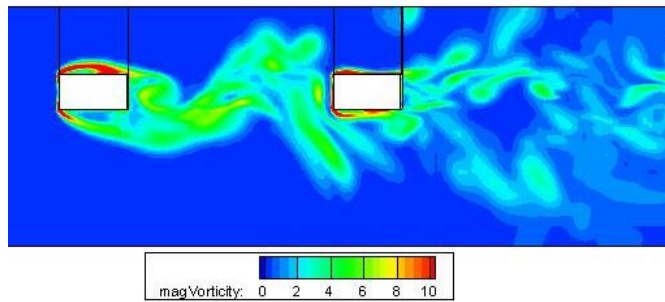


Figure b.4.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

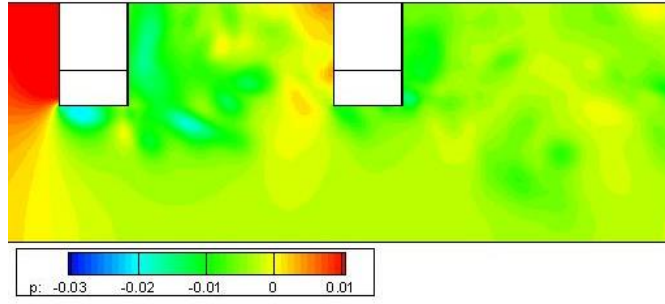


Figure b.4.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

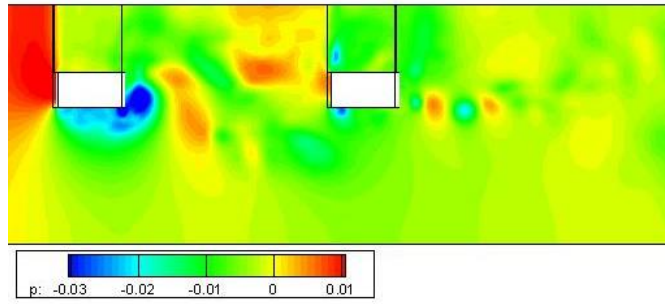


Figure b.4.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

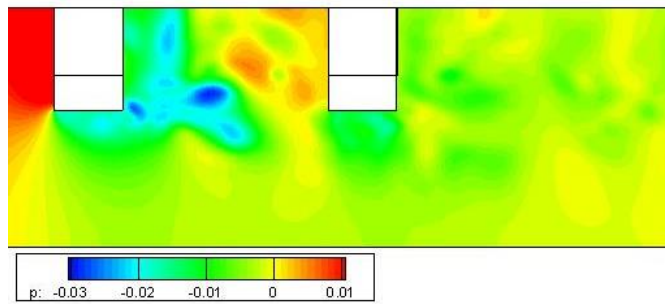


Figure b.4.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

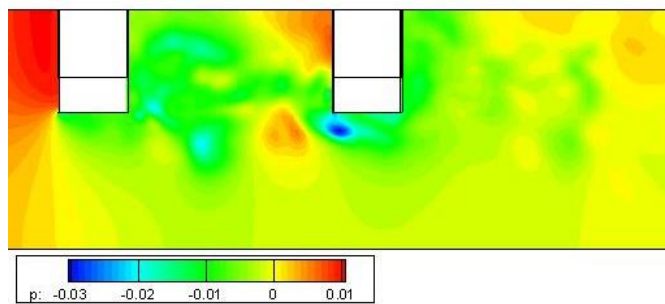


Figure b.4.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

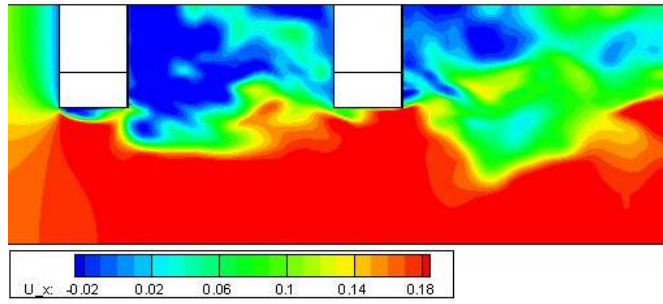


Figure b.4.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

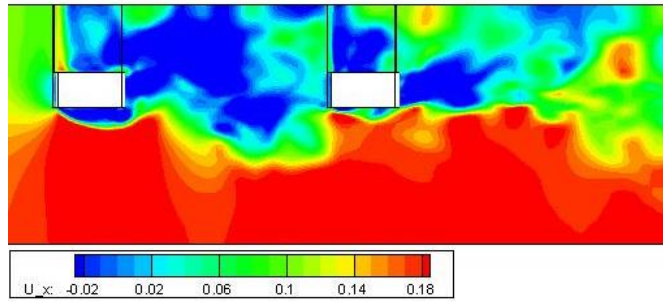


Figure b.4.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

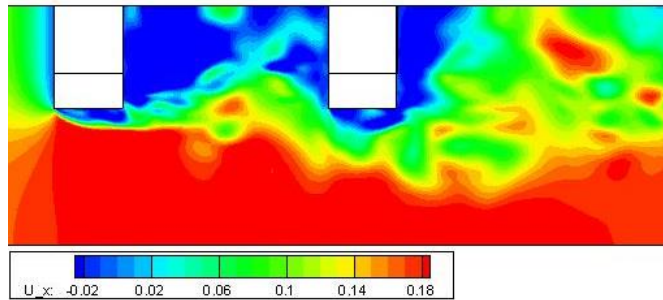


Figure b.4.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

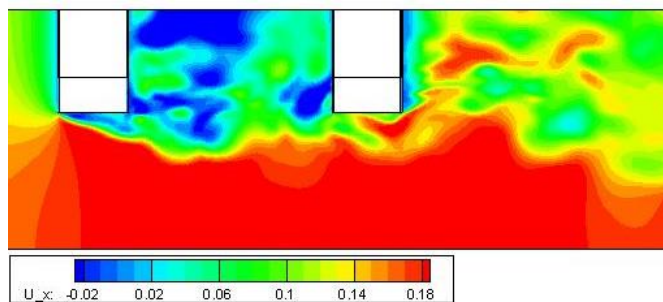


Figure b.4.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

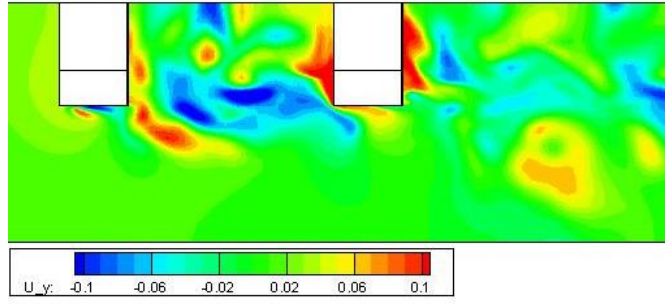


Figure b.4.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

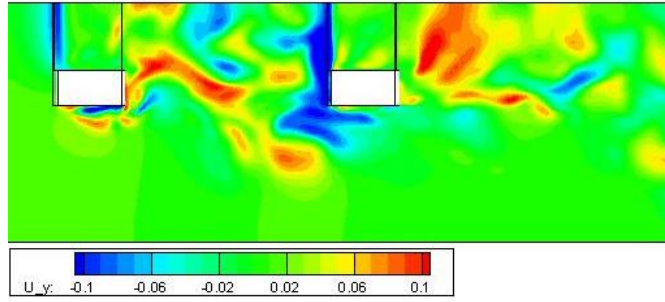


Figure b.4.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

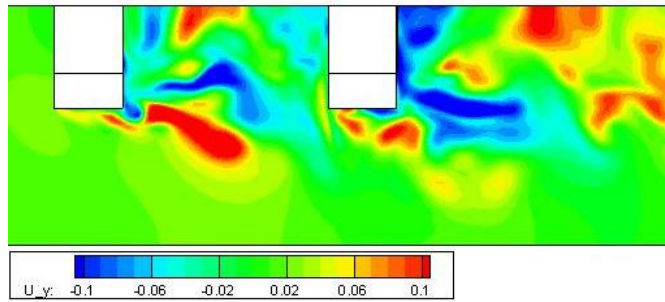


Figure b.4.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

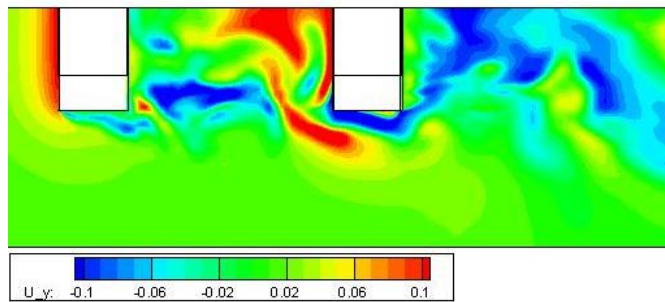


Figure b.4.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

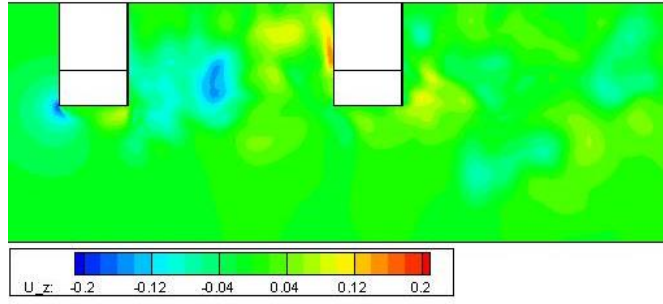


Figure b.4.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

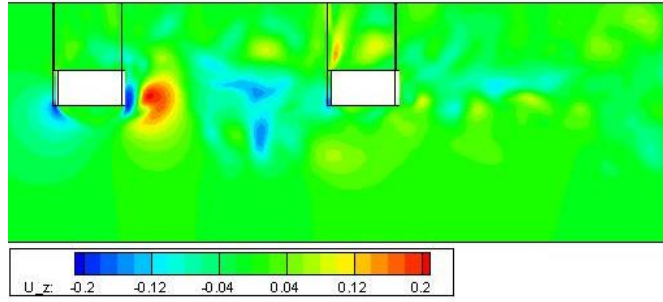


Figure b.4.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

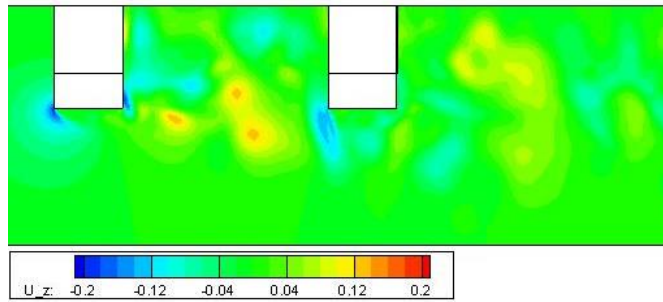


Figure b.4.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

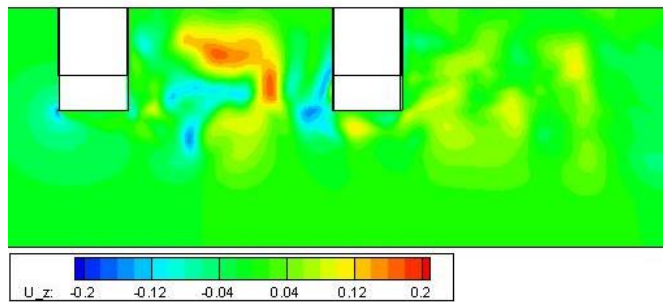


Figure b.4.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

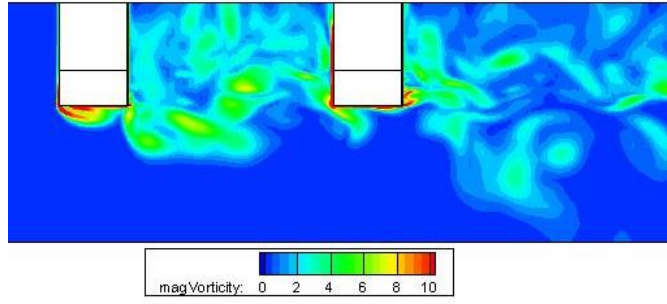


Figure b.4.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

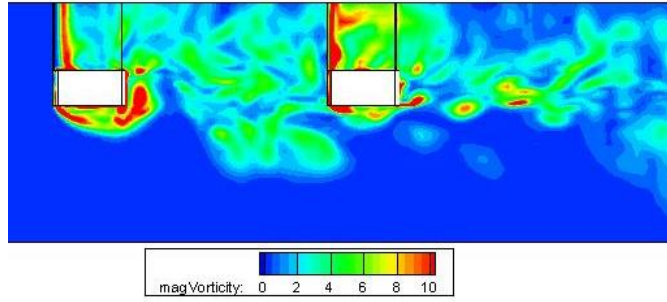


Figure b.4.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

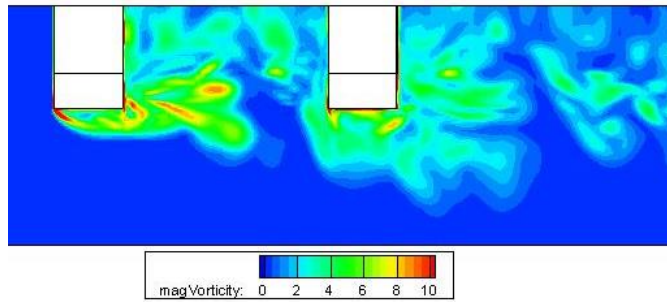


Figure b.4.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

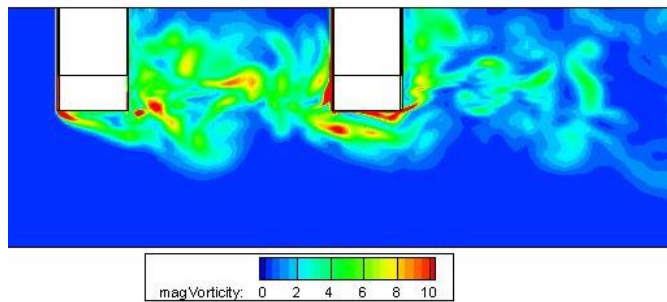


Figure b.4.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

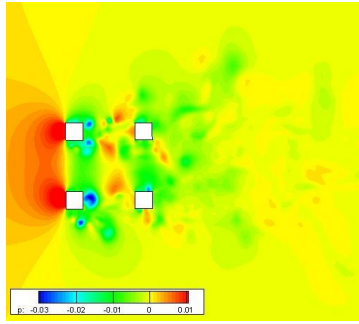


Figure b.4.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

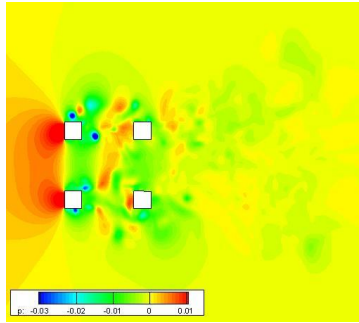


Figure b.4.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

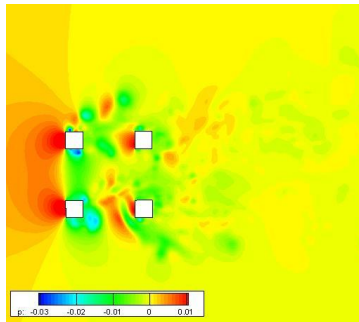


Figure b.4.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

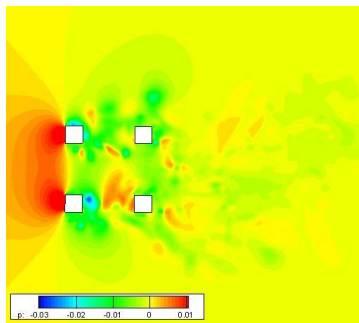


Figure b.4.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

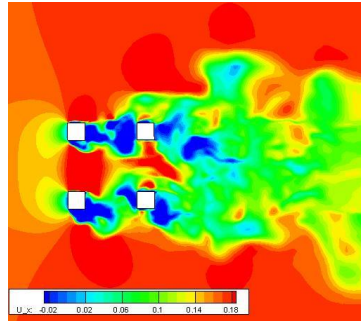


Figure b.4.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

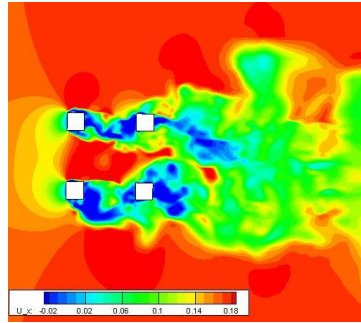


Figure b.4.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

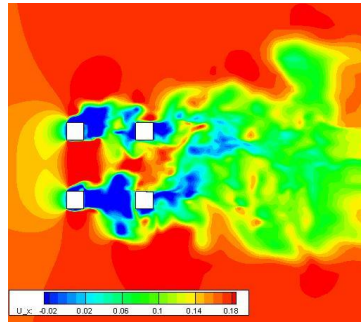


Figure b.4.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

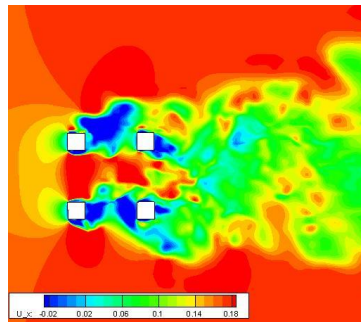


Figure b.4.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

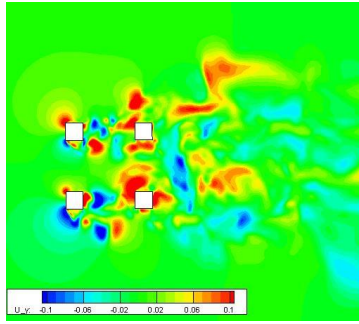


Figure b.4.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

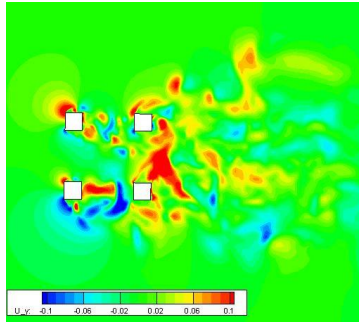


Figure b.4.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

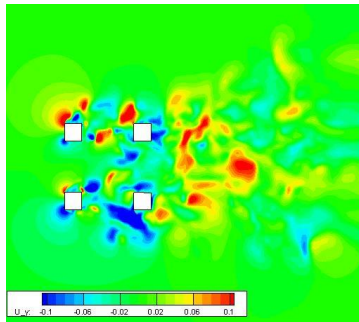


Figure b.4.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

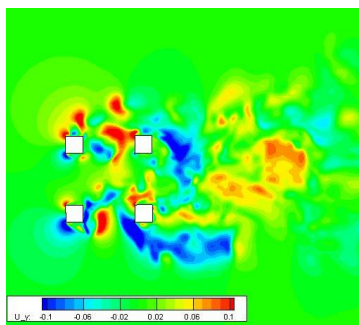


Figure b.4.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

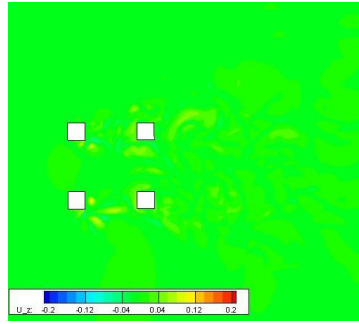


Figure b.4.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

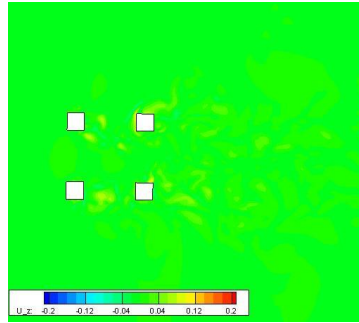


Figure b.4.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

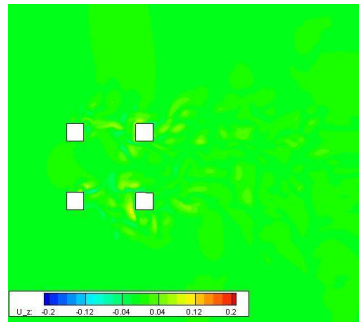


Figure b.4.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

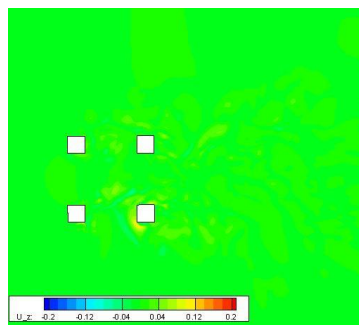


Figure b.4.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

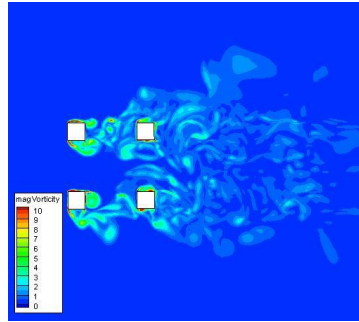


Figure b.4.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

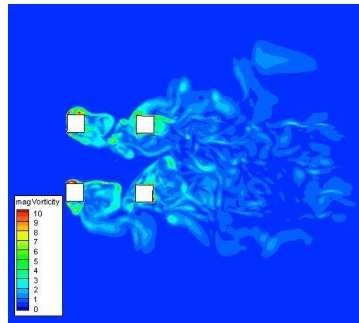


Figure b.4.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

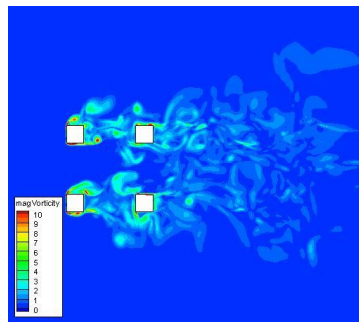


Figure b.4.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

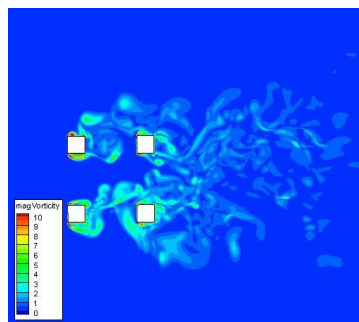


Figure b.4.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

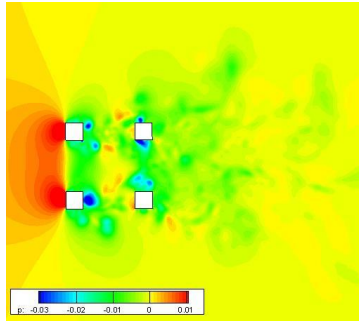


Figure b.4.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

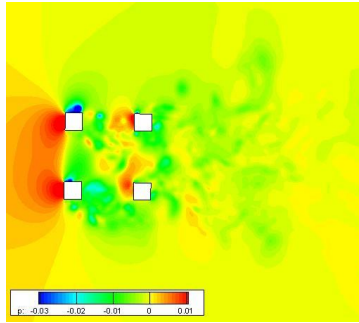


Figure b.4.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

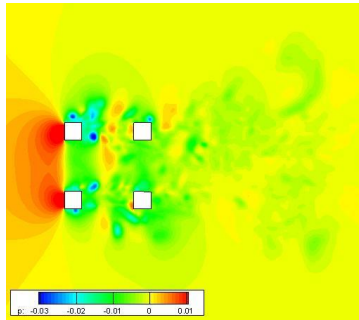


Figure b.4.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

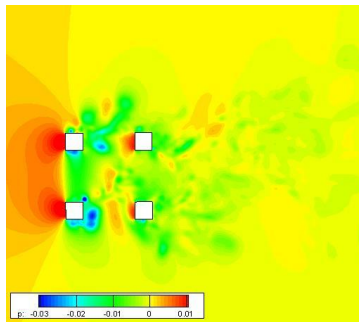


Figure b.4.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

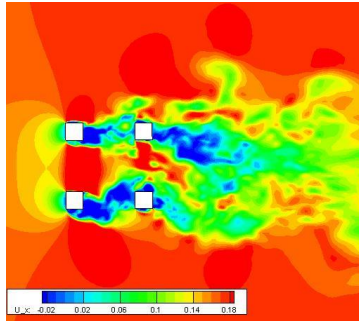


Figure b.4.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

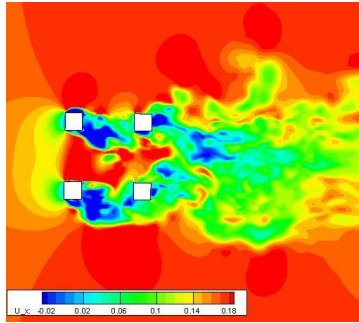


Figure b.4.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

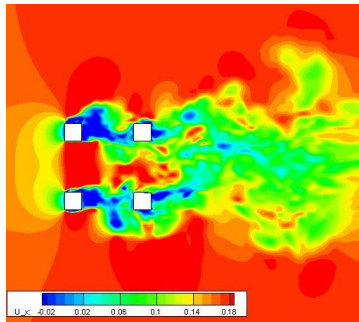


Figure b.4.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

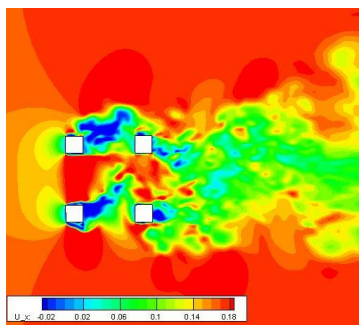


Figure b.4.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

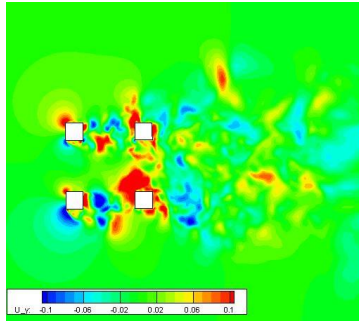


Figure b.4.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

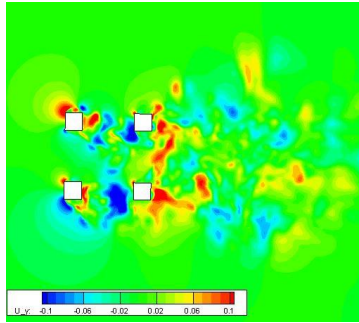


Figure b.4.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

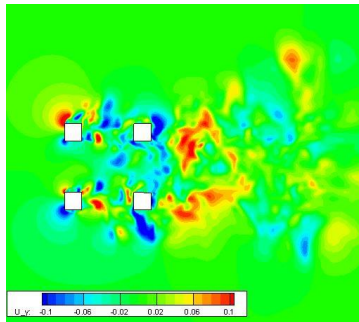


Figure b.4.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

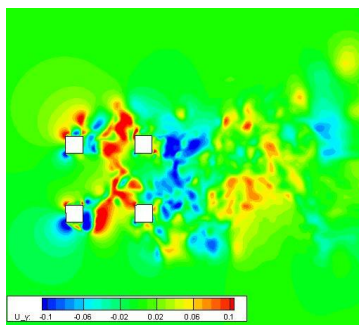


Figure b.4.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

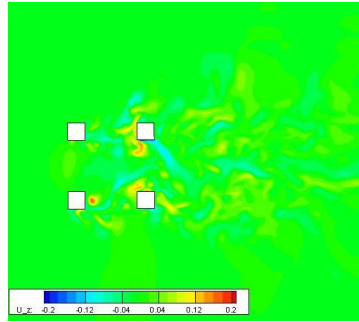


Figure b.4.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

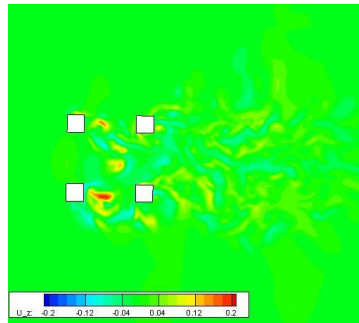


Figure b.4.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

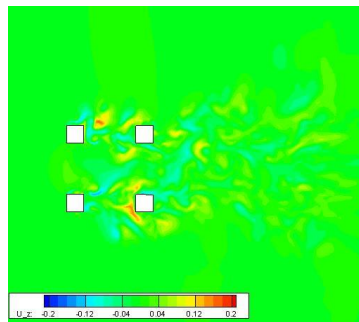


Figure b.4.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

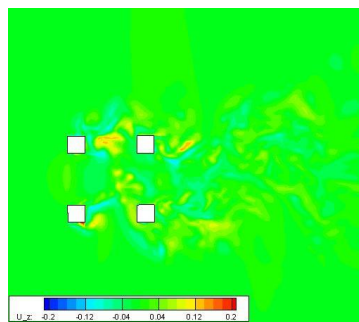


Figure b.4.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

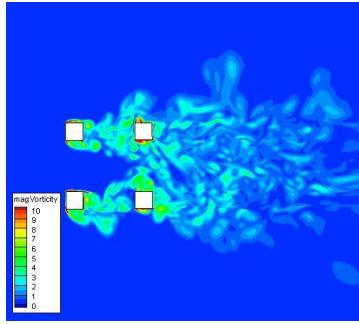


Figure b.4.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

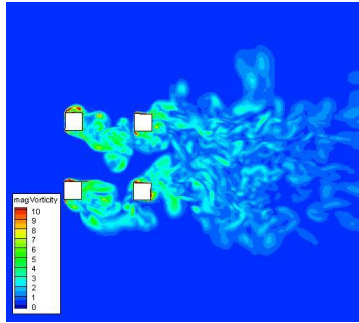


Figure b.4.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

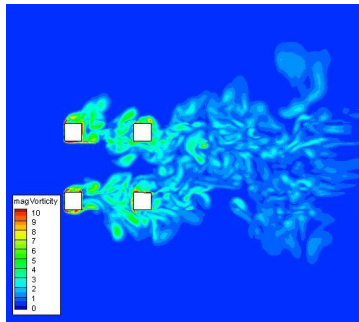


Figure b.4.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

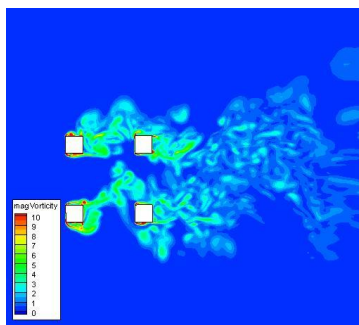


Figure b.4.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

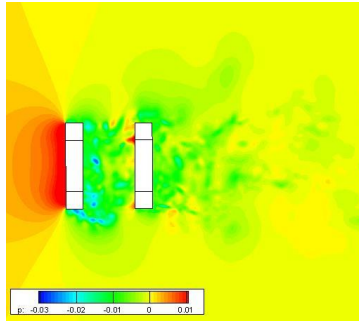


Figure b.4.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

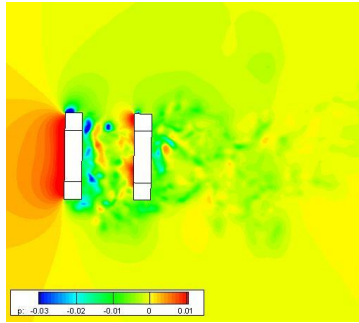


Figure b.4.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

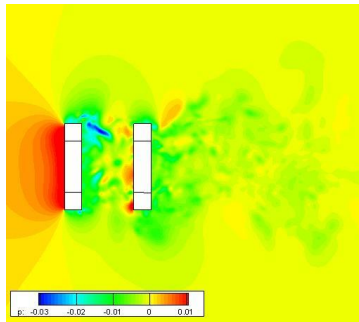


Figure b.4.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

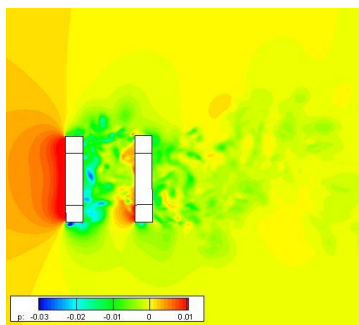


Figure b.4.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

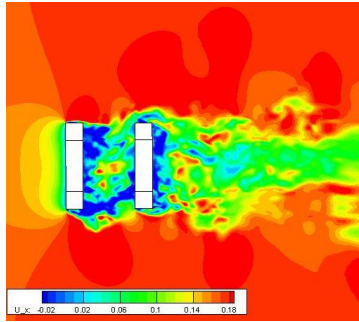


Figure b.4.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

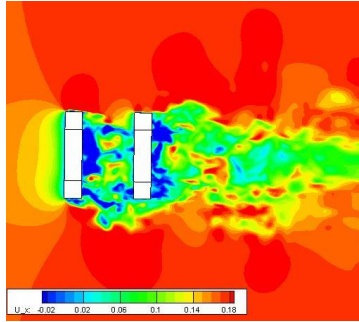


Figure b.4.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

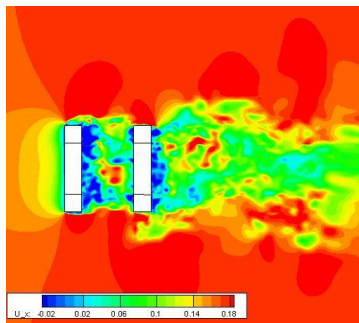


Figure b.4.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

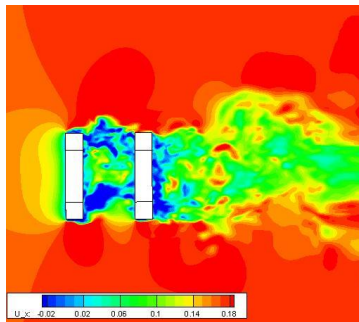


Figure b.4.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

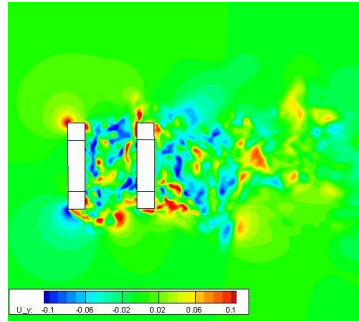


Figure b.4.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

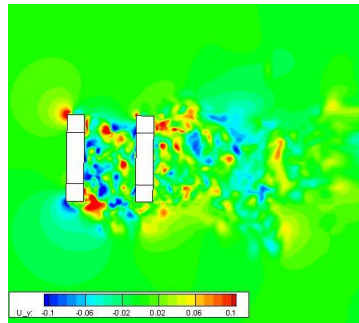


Figure b.4.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

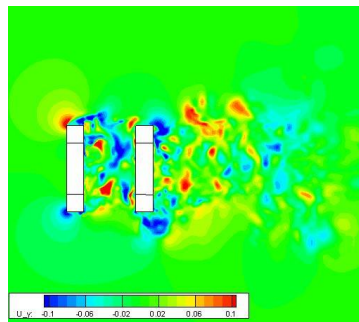


Figure b.4.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

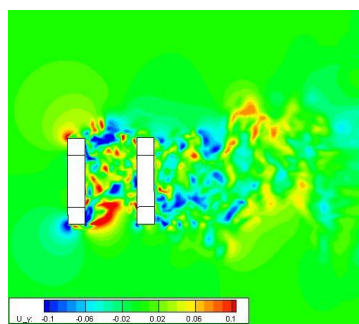


Figure b.4.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

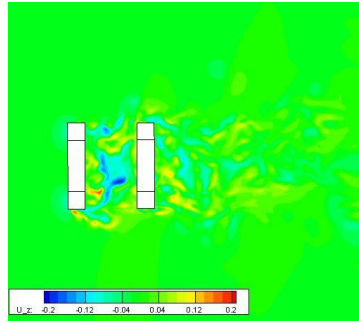


Figure b.4.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

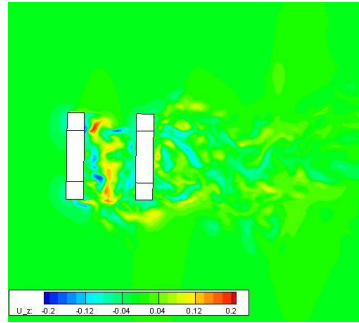


Figure b.4.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

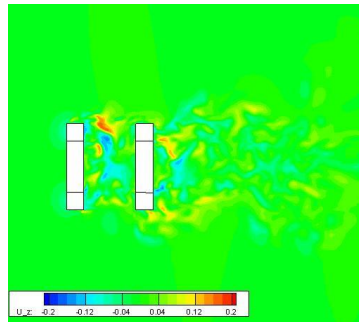


Figure b.4.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

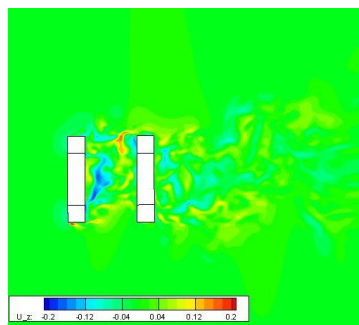


Figure b.4.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

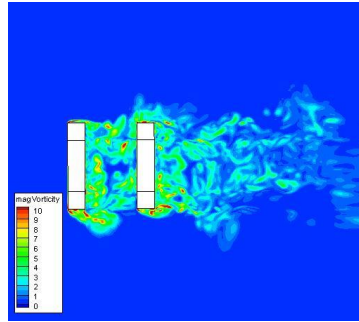


Figure b.4.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

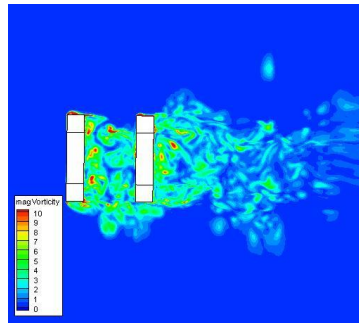


Figure b.4.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

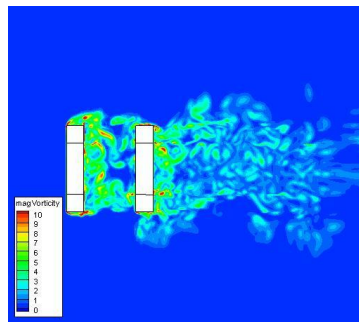


Figure b.4.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

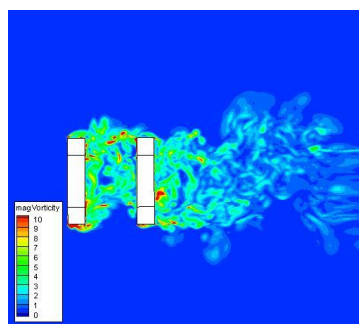


Figure b.4.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

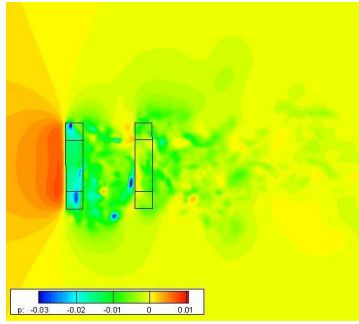


Figure b.4.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

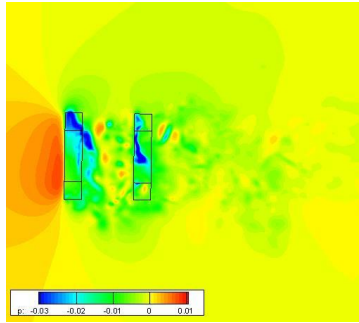


Figure b.4.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

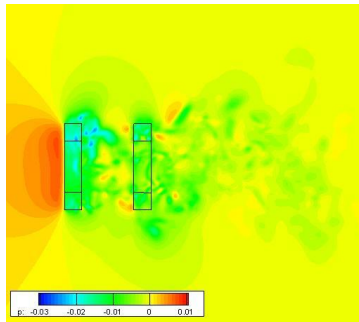


Figure b.4.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

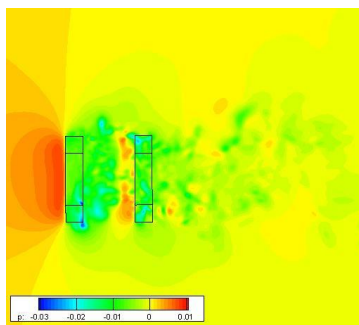


Figure b.4.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

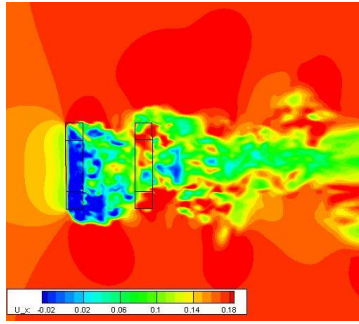


Figure b.4.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

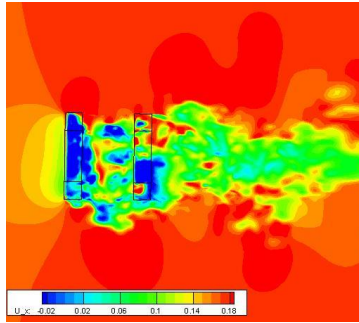


Figure b.4.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

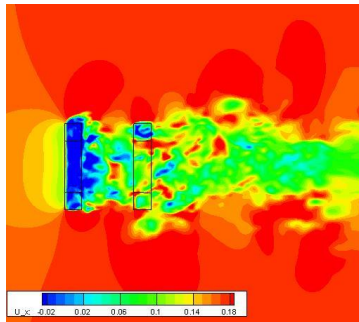


Figure b.4.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

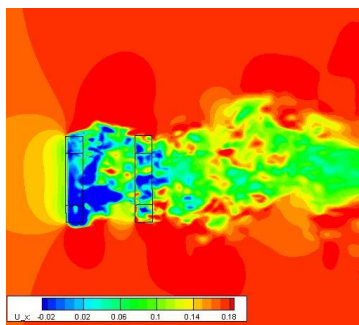


Figure b.4.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

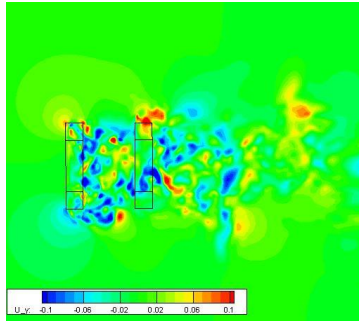


Figure b.4.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

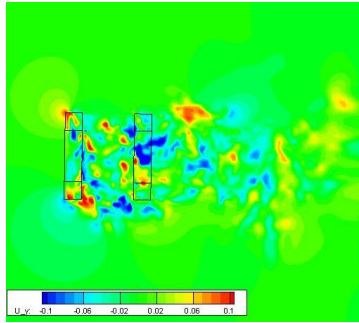


Figure b.4.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

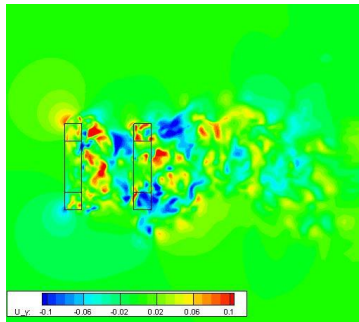


Figure b.4.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

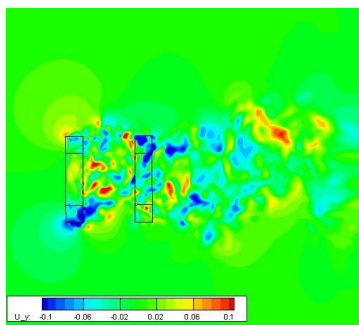


Figure b.4.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

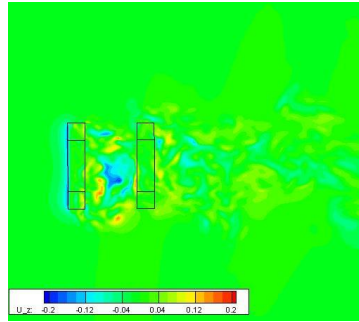


Figure b.4.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

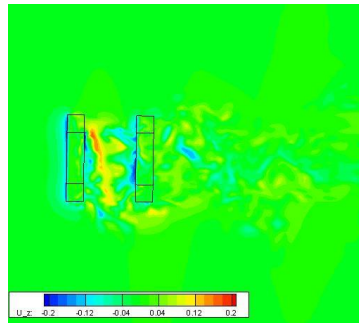


Figure b.4.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

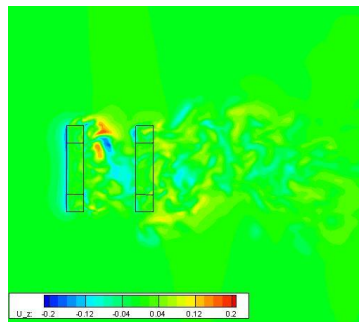


Figure b.4.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

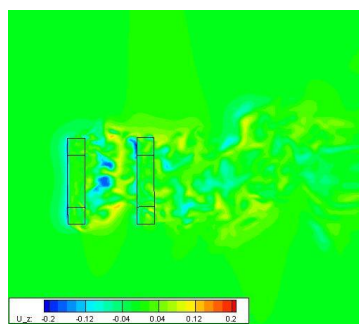


Figure b.4.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

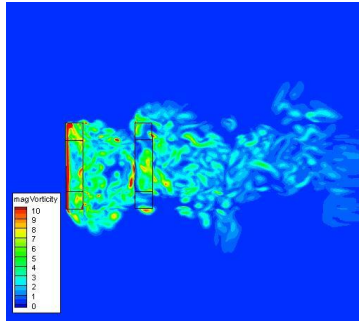


Figure b.4.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

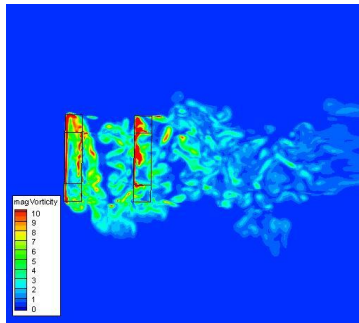


Figure b.4.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

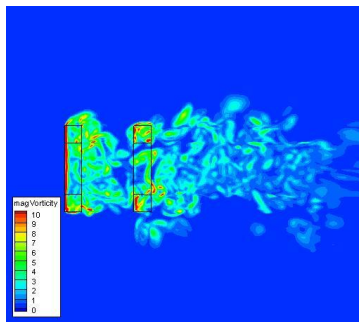


Figure b.4.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

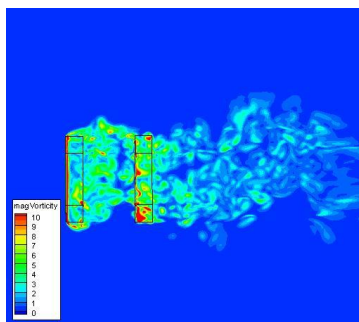


Figure b.4.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

5. $Vr=10.4$ ケース P2-s

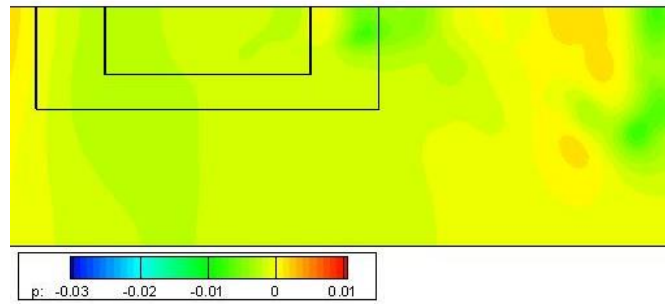


Figure b.5.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

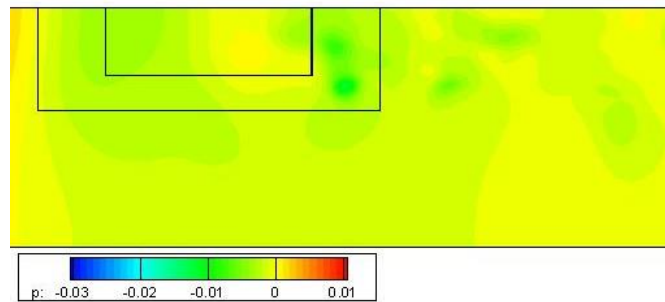


Figure b.5.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

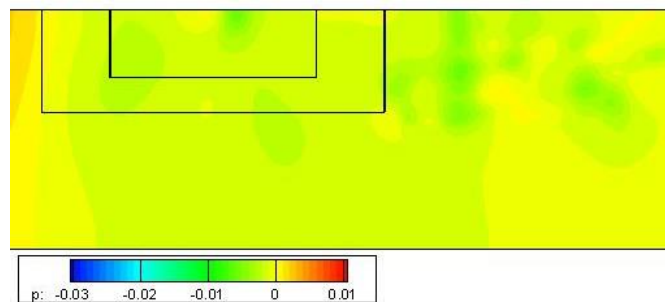


Figure b.5.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

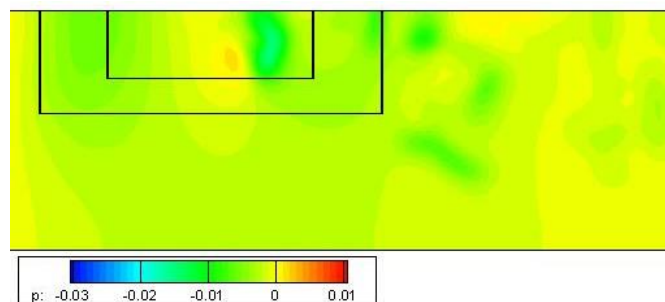


Figure b.5.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

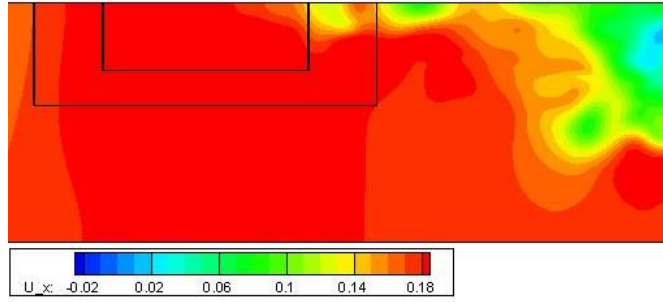


Figure b.5.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

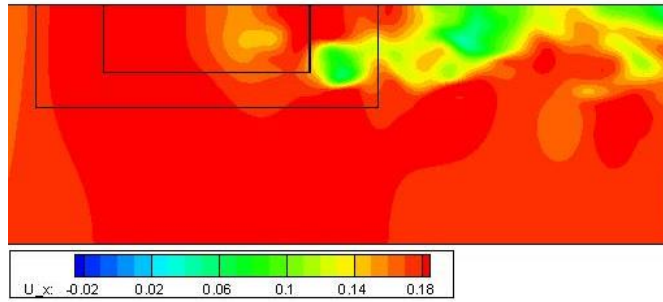


Figure b.5.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

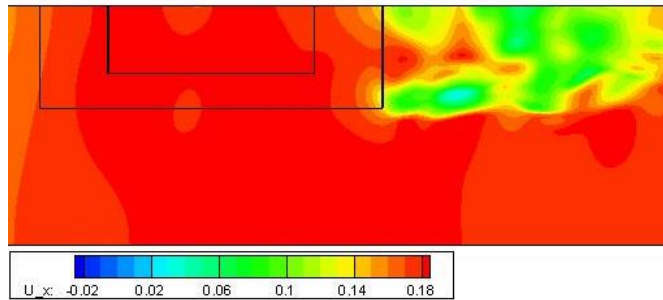


Figure b.5.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

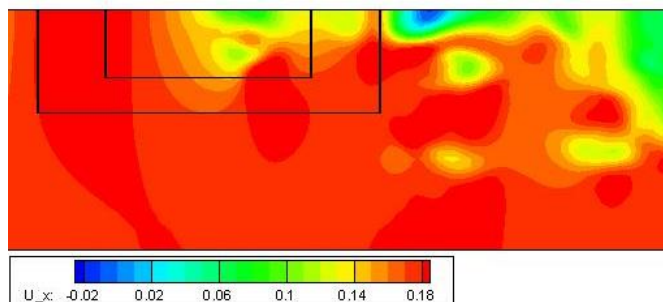


Figure b.5.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

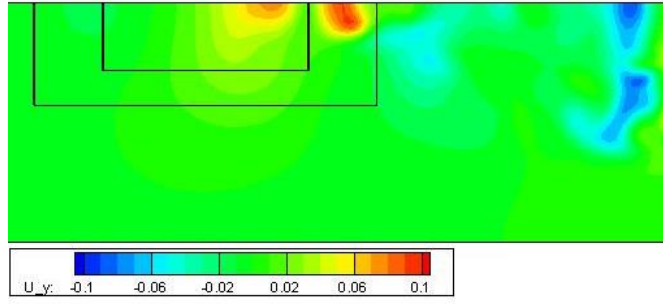


Figure b.5.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

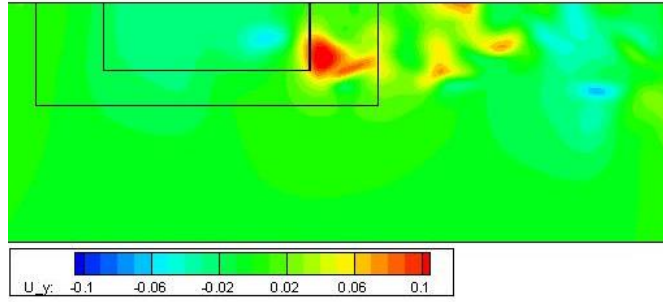


Figure b.5.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

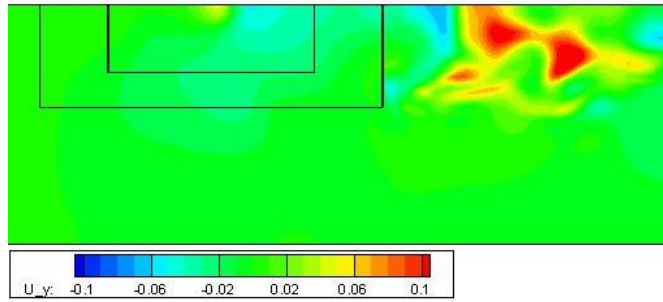


Figure b.5.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

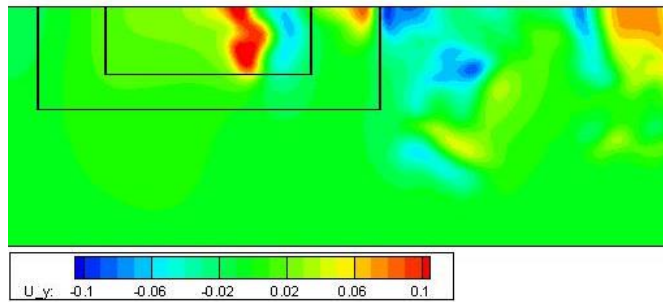


Figure b.5.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

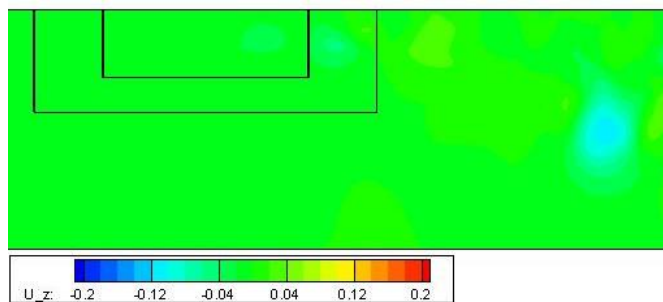


Figure b.5.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

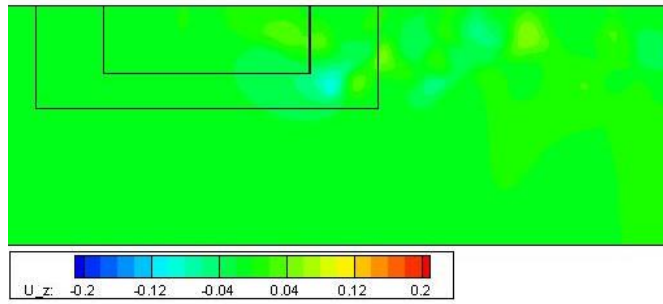


Figure b.5.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

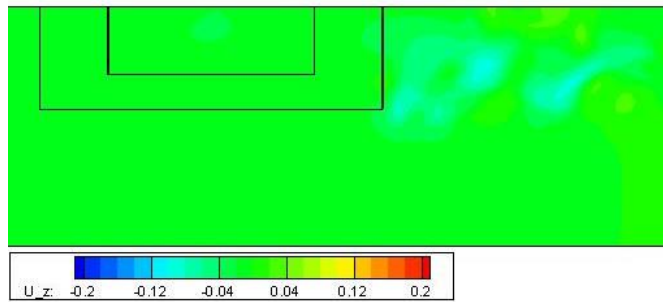


Figure b.5.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

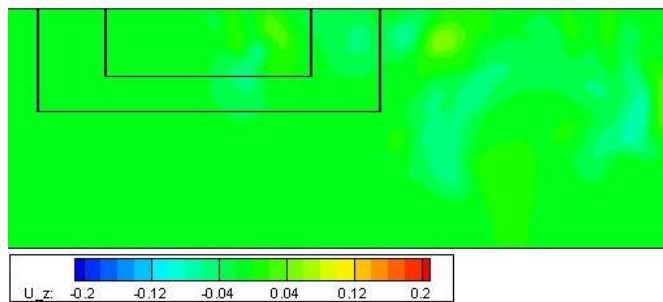


Figure b.5.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

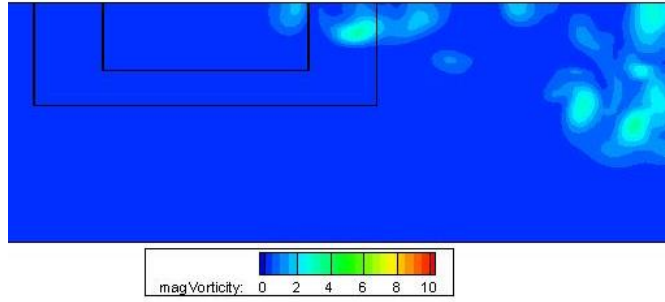


Figure b.5.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

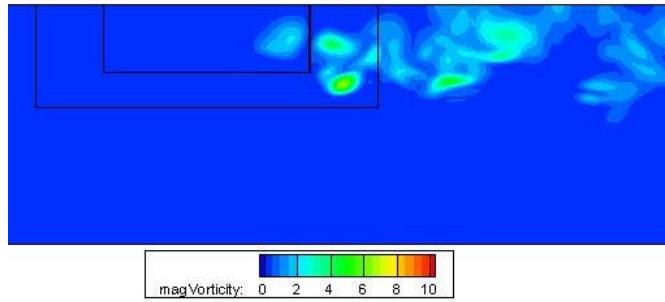


Figure b.5.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

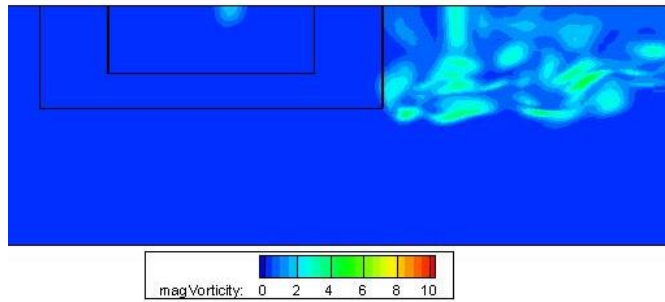


Figure b.5.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

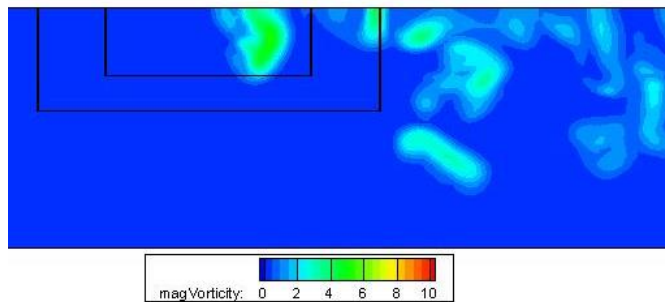


Figure b.5.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

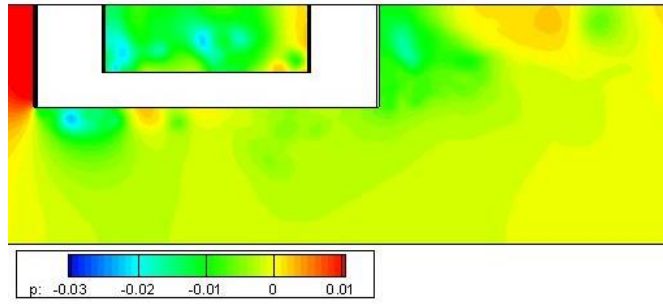


Figure b.5.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

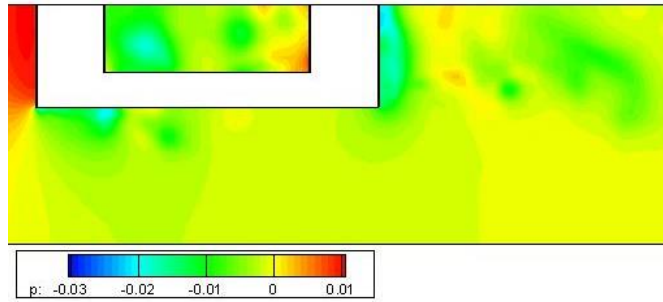


Figure b.5.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

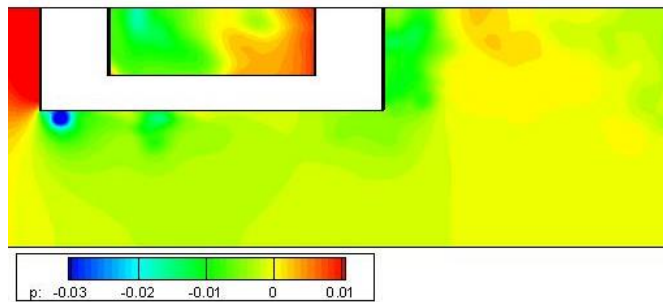


Figure b.5.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

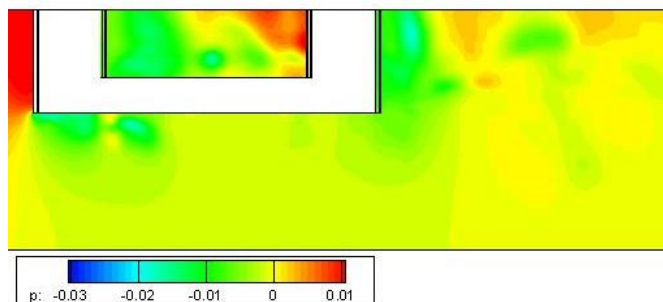


Figure b.5.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

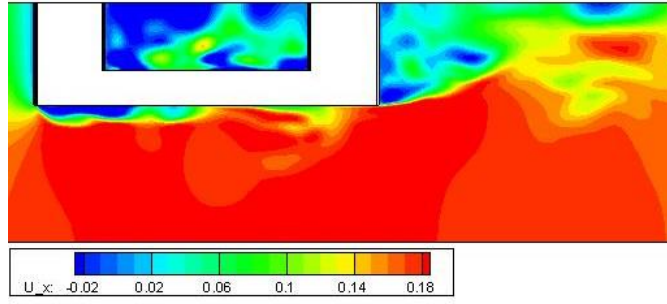


Figure b.5.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

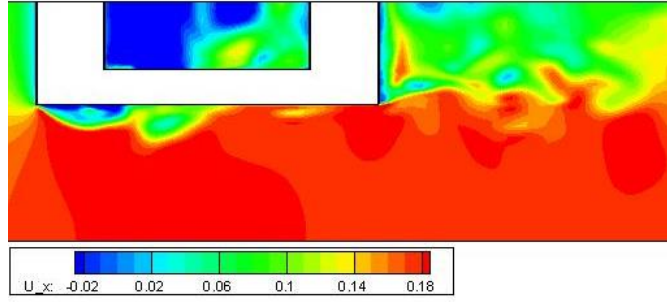


Figure b.5.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

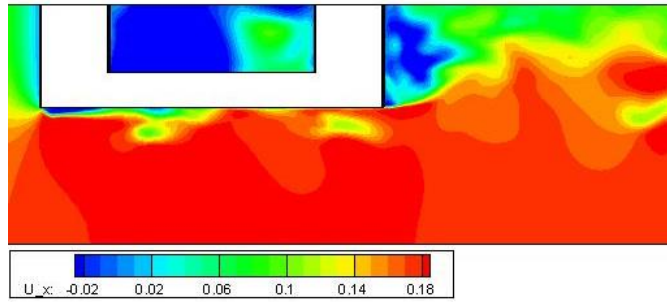


Figure b.5.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

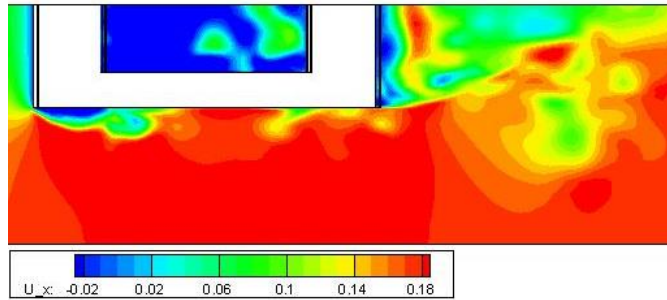


Figure b.5.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

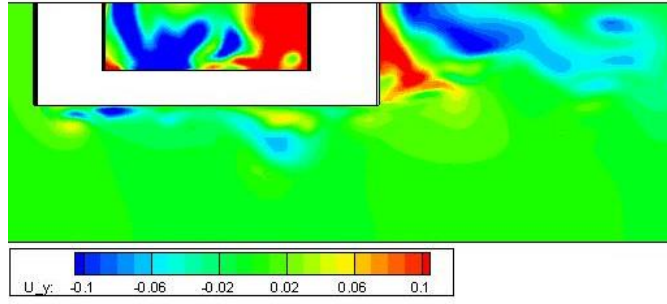


Figure b.5.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

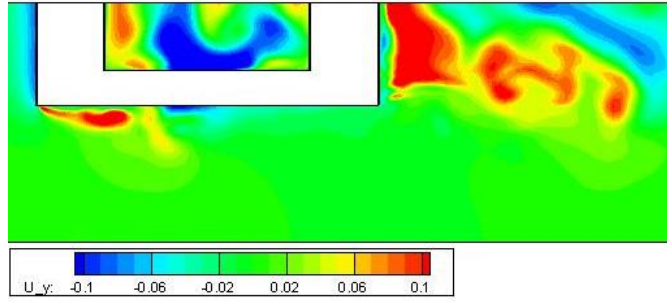


Figure b.5.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

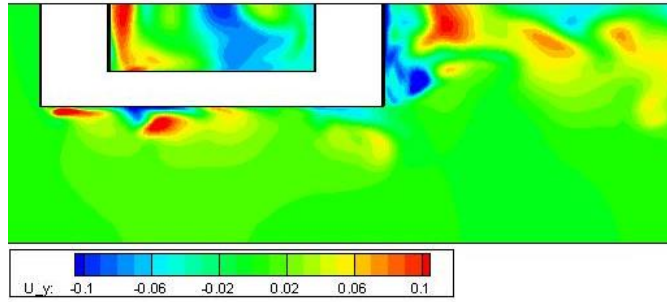


Figure b.5.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

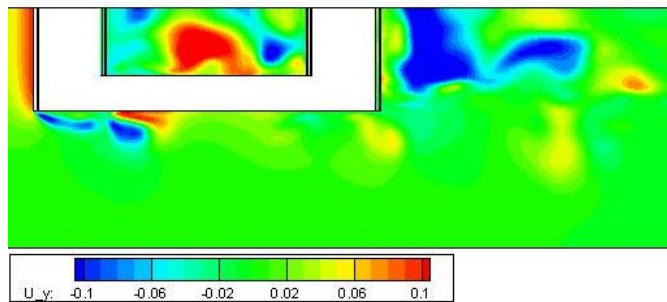


Figure b.5.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

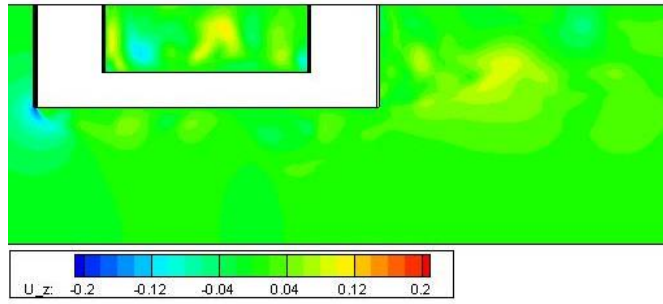


Figure b.5.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

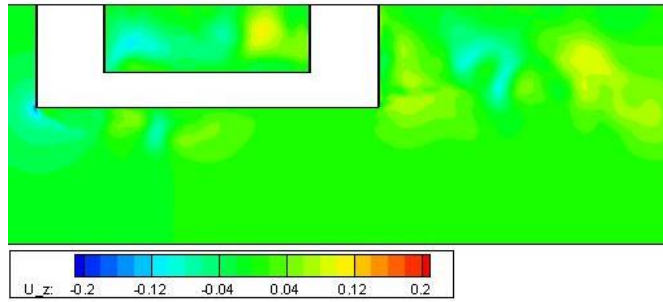


Figure b.5.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

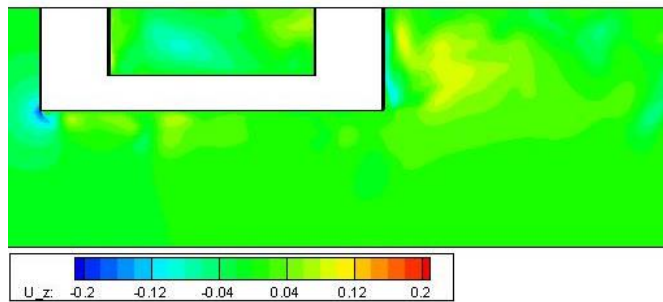


Figure b.5.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

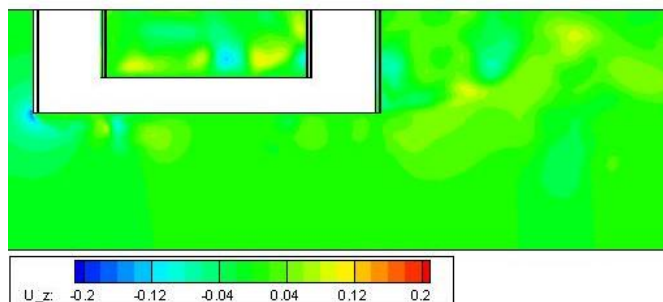


Figure b.5.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

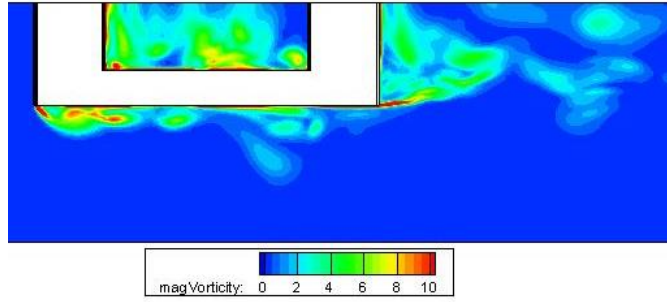


Figure b.5.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

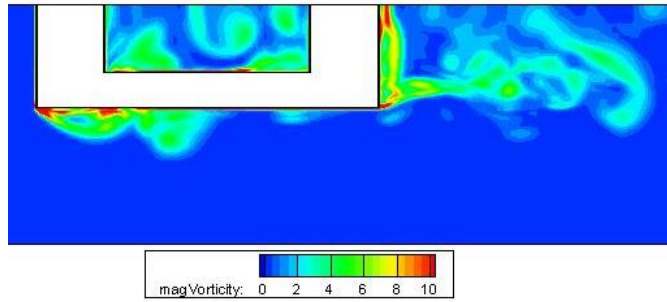


Figure b.5.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

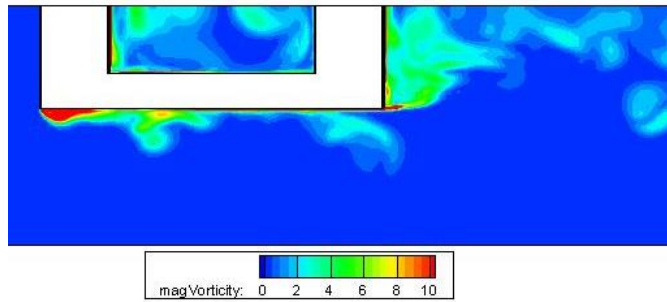


Figure b.5.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

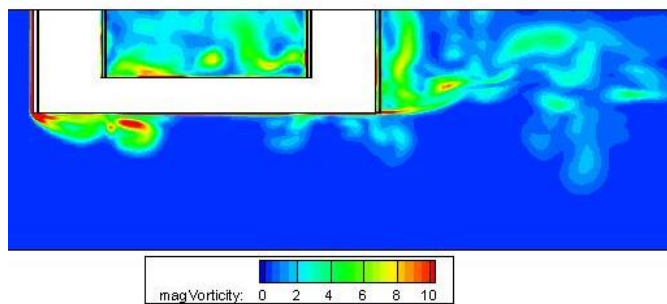


Figure b.5.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

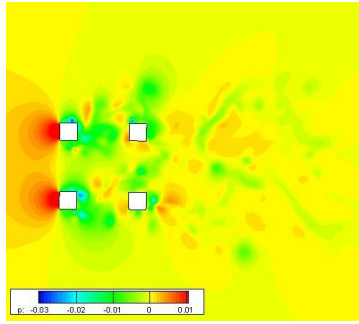


Figure b.5.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

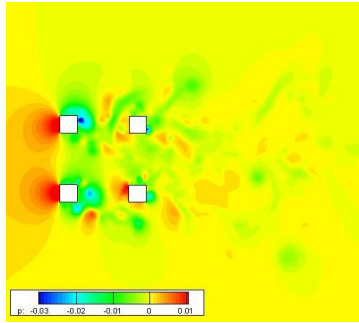


Figure b.5.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

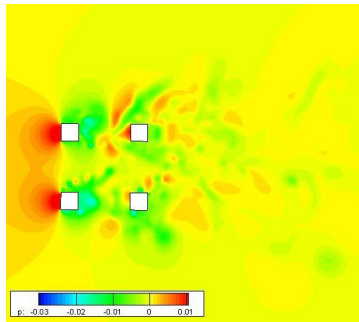


Figure b.5.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

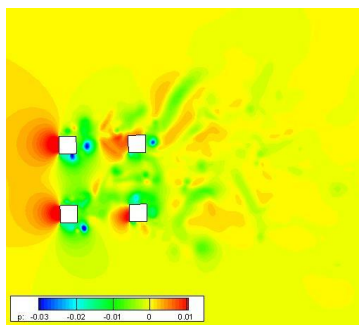


Figure b.5.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

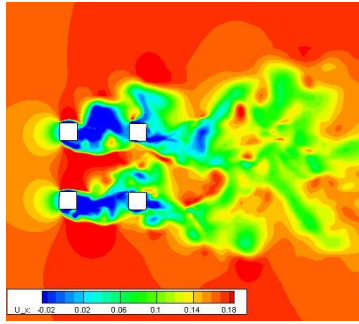


Figure b.5.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

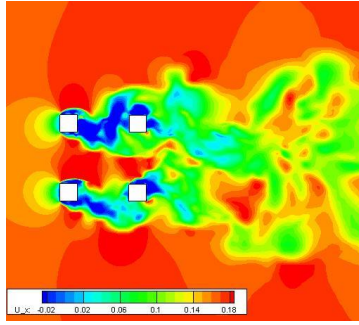


Figure b.5.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

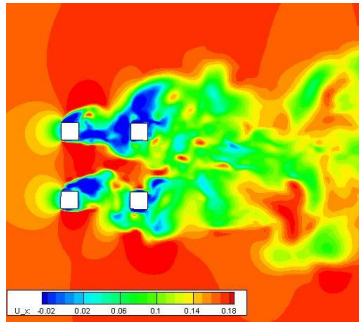


Figure b.5.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

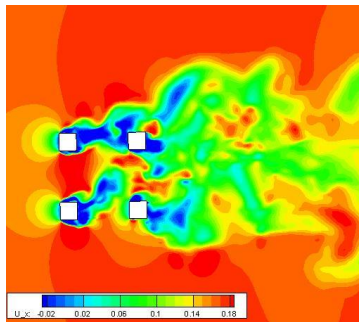


Figure b.5.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

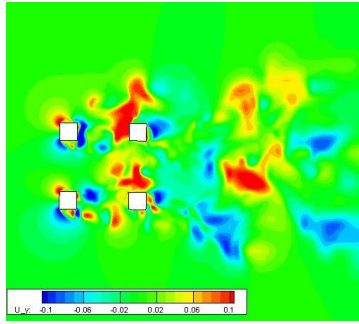


Figure b.5.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

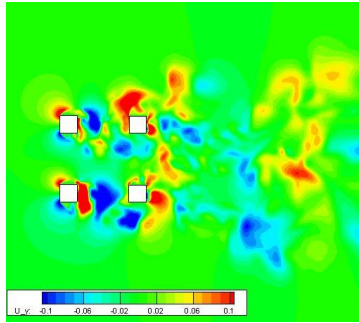


Figure b.5.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

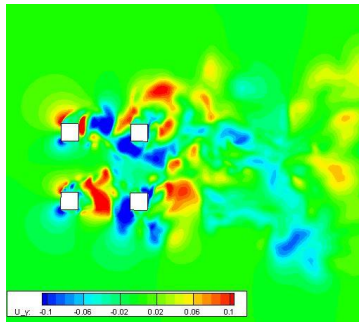


Figure b.5.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

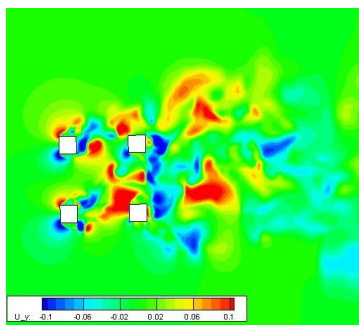


Figure b.5.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

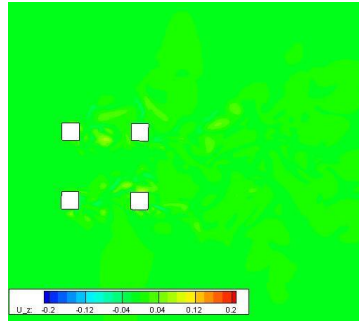


Figure b.5.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

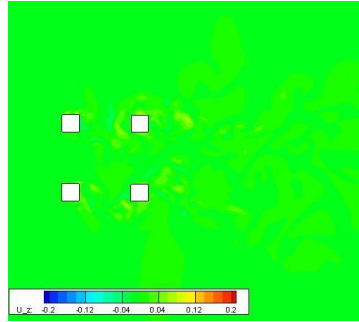


Figure b.5.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

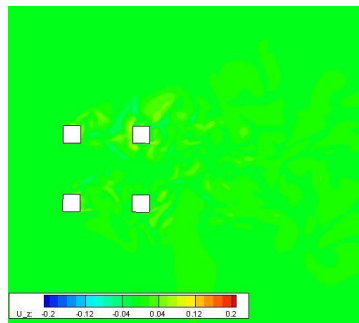


Figure b.5.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

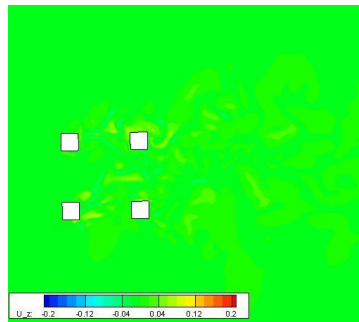


Figure b.5.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

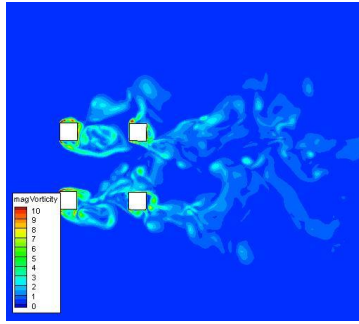


Figure b.5.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

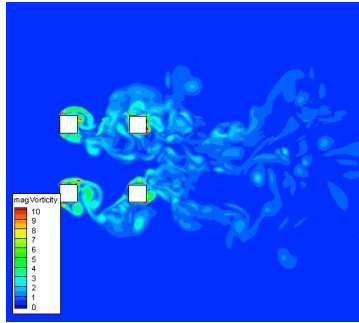


Figure b.5.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

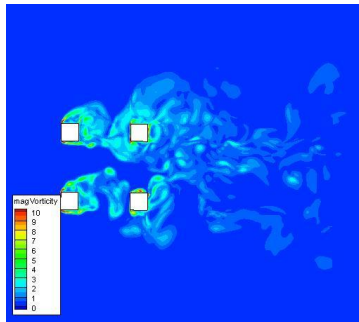


Figure b.5.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

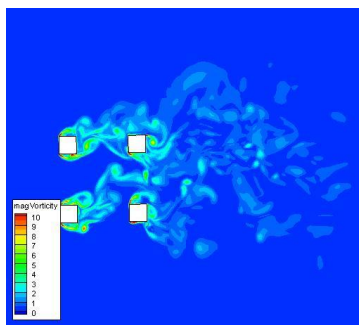


Figure b.5.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

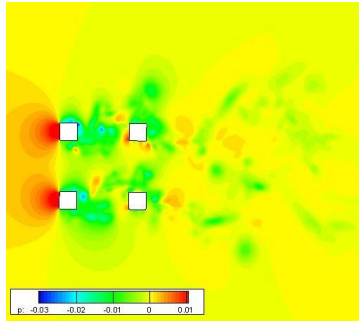


Figure b.5.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

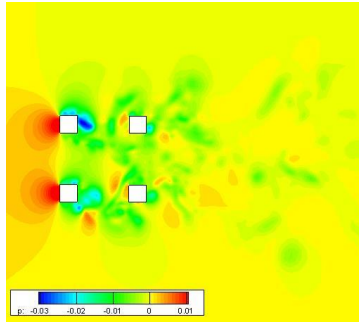


Figure b.5.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

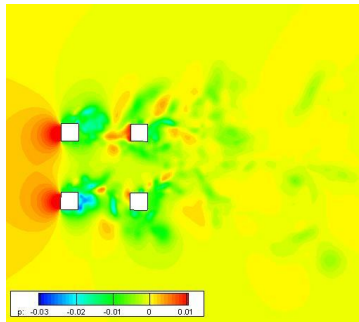


Figure b.5.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

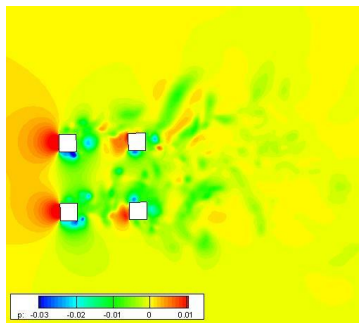


Figure b.5.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

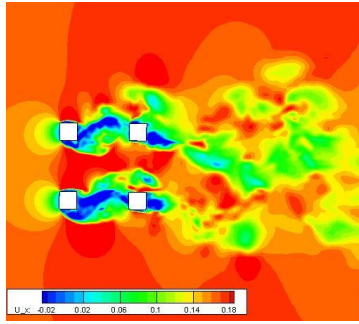


Figure b.5.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

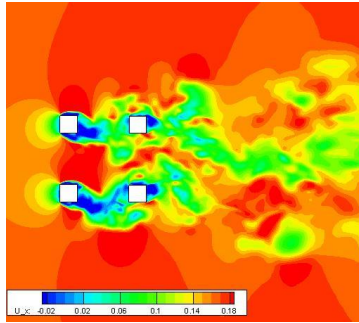


Figure b.5.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

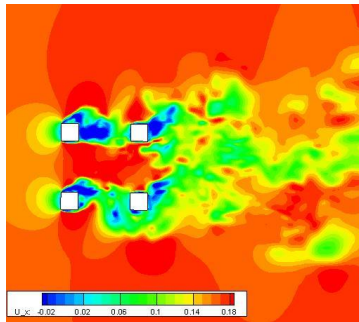


Figure b.5.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

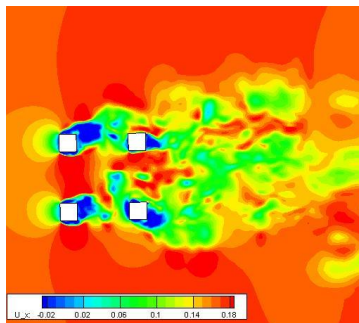


Figure b.5.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

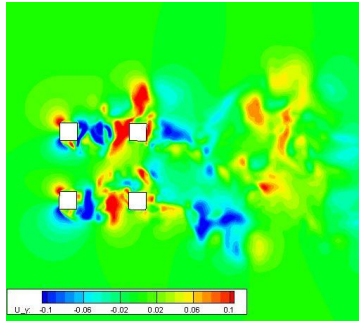


Figure b.5.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

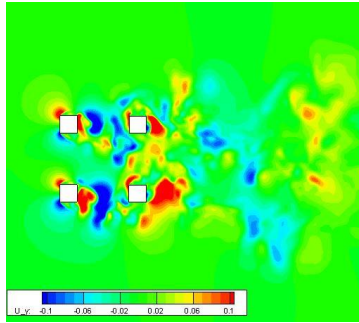


Figure b.5.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

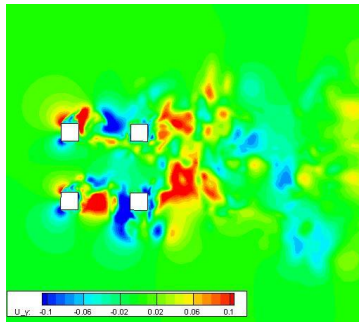


Figure b.5.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

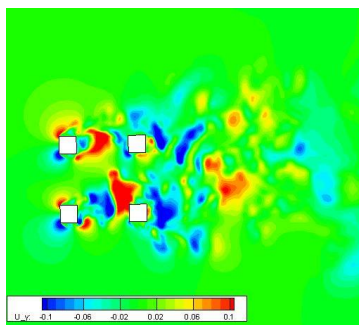


Figure b.5.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

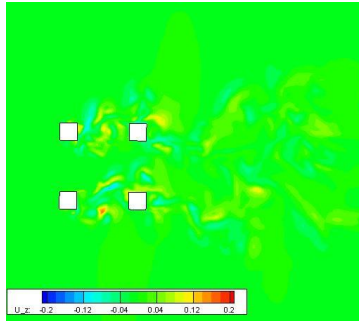


Figure b.5.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

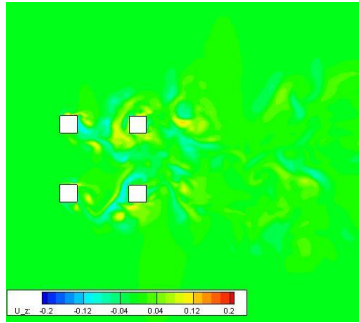


Figure b.5.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

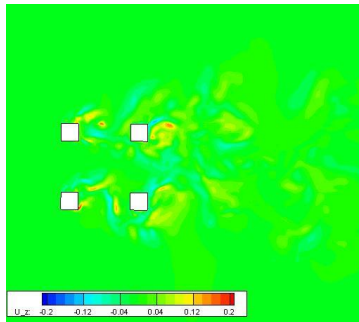


Figure b.5.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

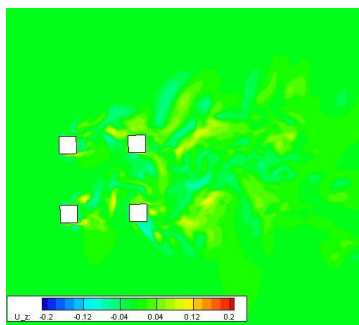


Figure b.5.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

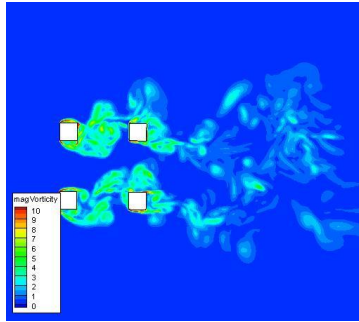


Figure b.5.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

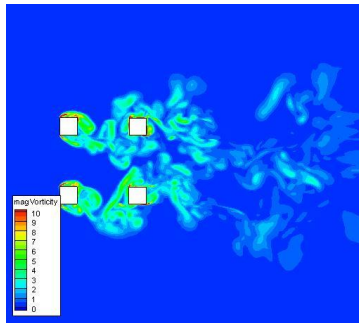


Figure b.5.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

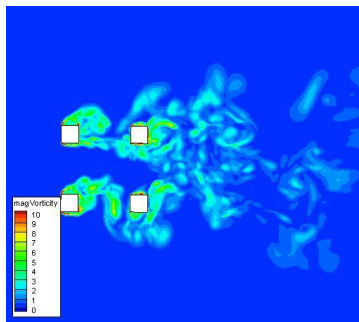


Figure b.5.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

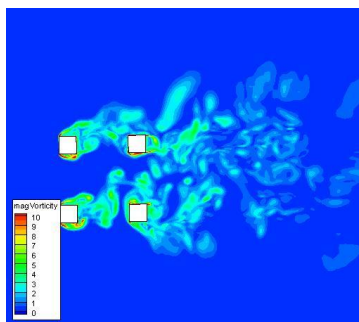


Figure b.5.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

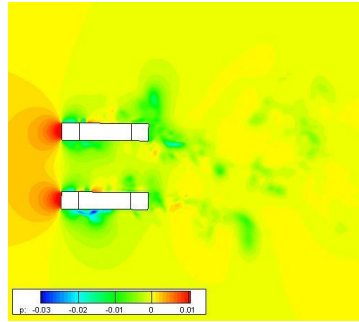


Figure b.5.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

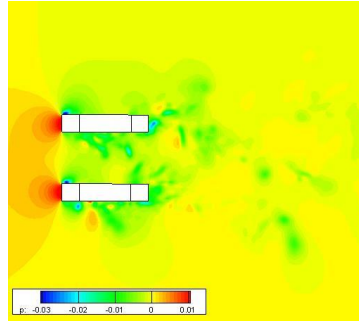


Figure b.5.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

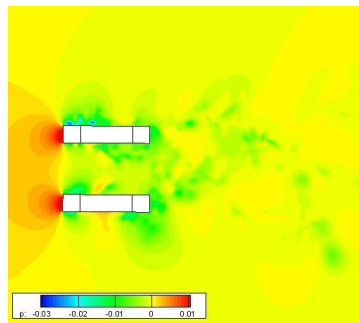


Figure b.5.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

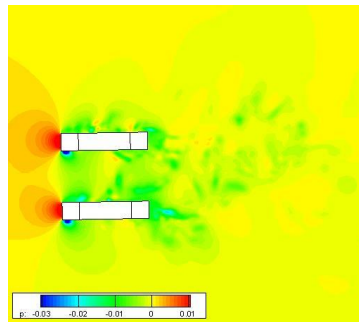


Figure b.5.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

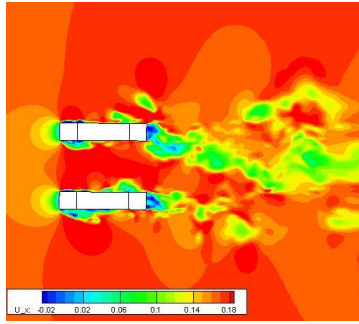


Figure b.5.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

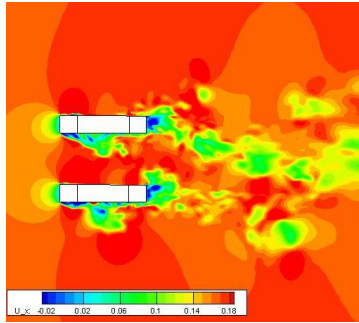


Figure b.5.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

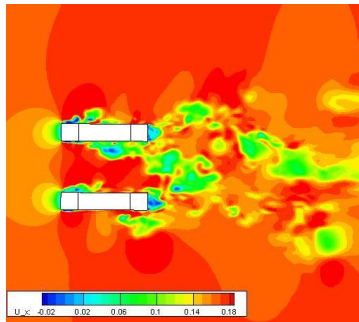


Figure b.5.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

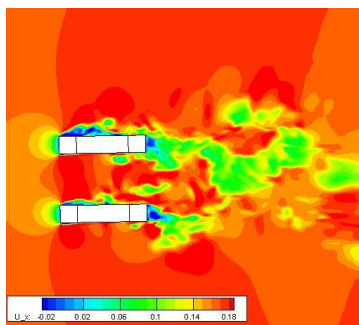


Figure b.5.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

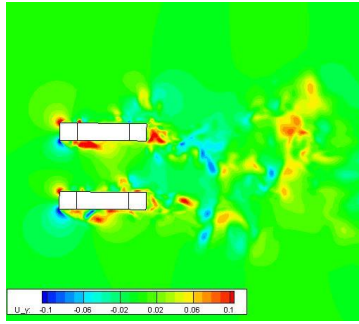


Figure b.5.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

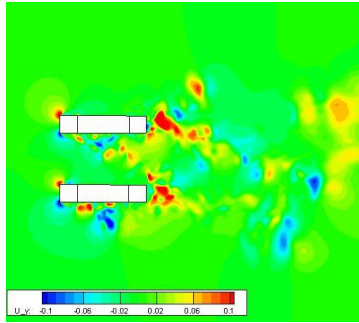


Figure b.5.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

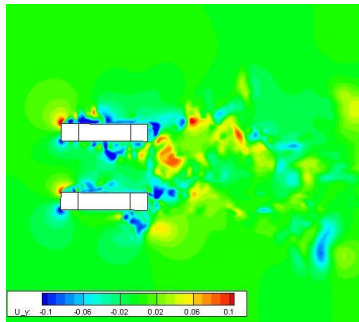


Figure b.5.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

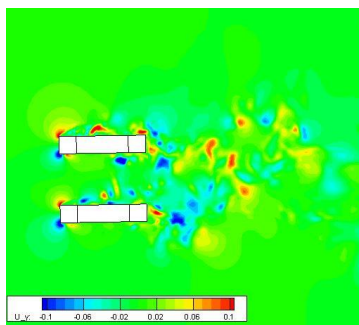


Figure b.5.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

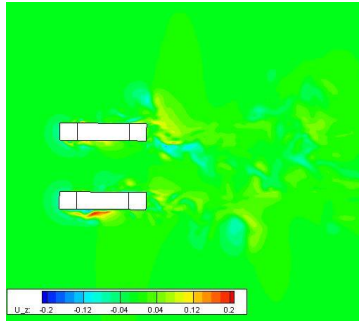


Figure b.5.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

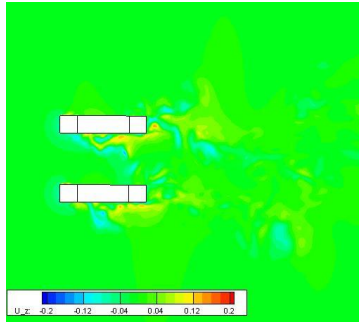


Figure b.5.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

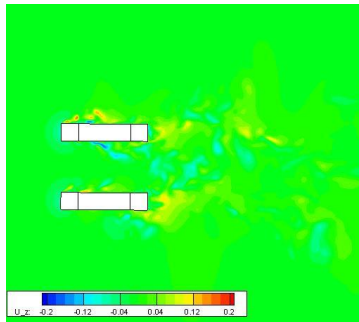


Figure b.5.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

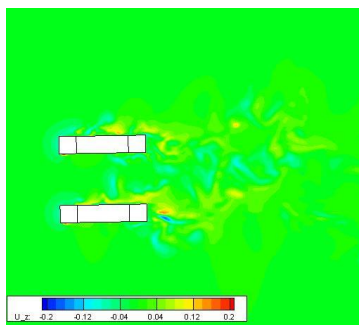


Figure b.5.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

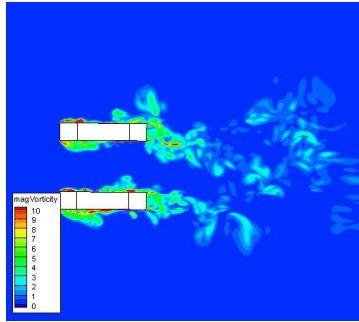


Figure b.5.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

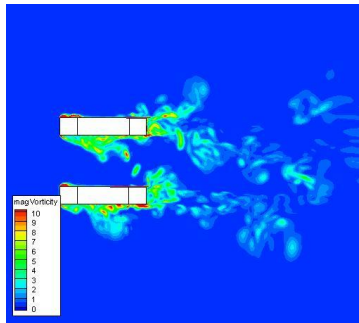


Figure b.5.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

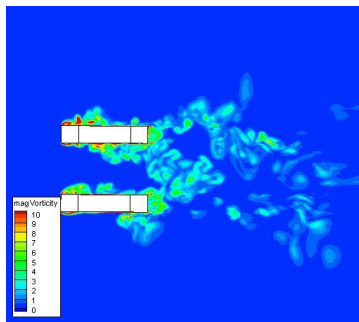


Figure b.5.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

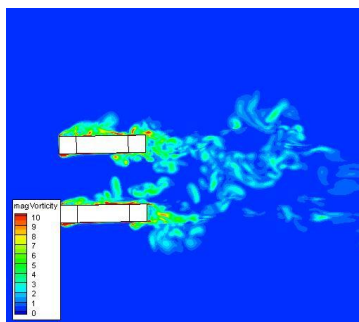


Figure b.5.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

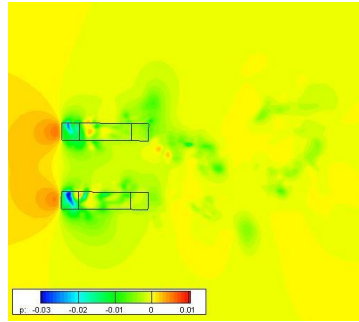


Figure b.5.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

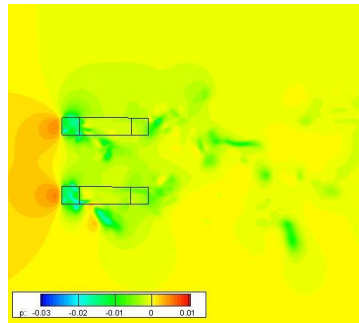


Figure b.5.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

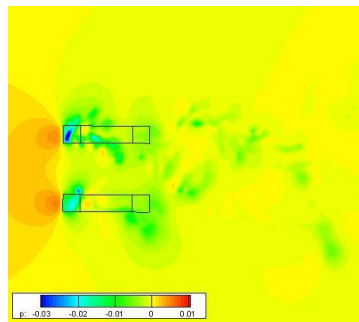


Figure b.5.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

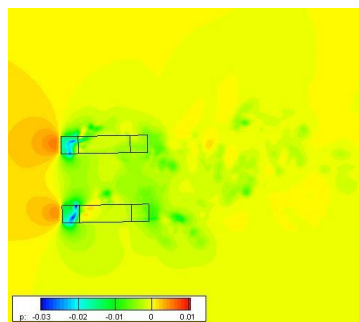


Figure b.5.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

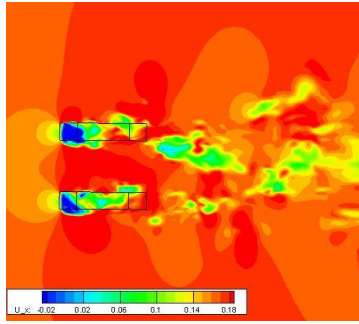


Figure b.5.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

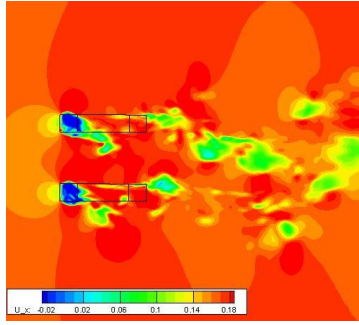


Figure b.5.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

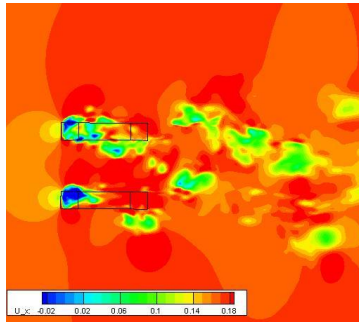


Figure b.5.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

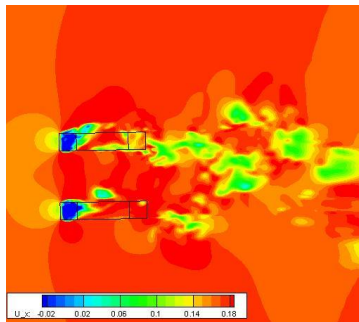


Figure b.5.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

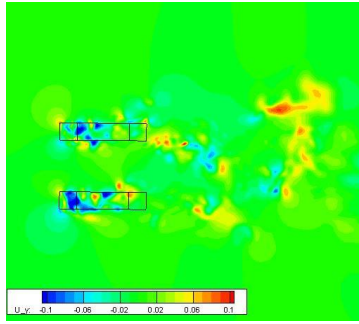


Figure b.5.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

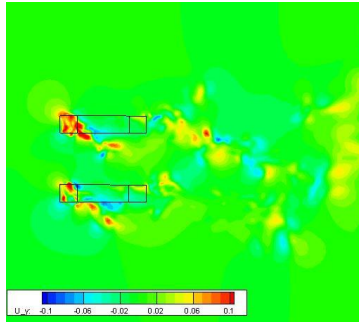


Figure b.5.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

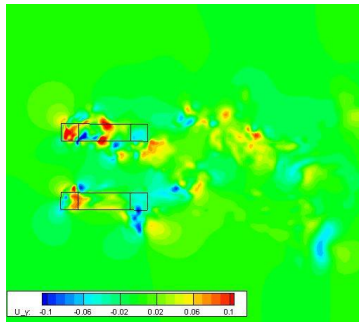


Figure b.5.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

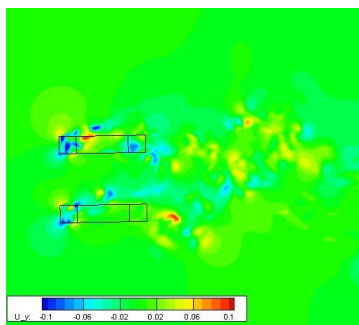


Figure b.5.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

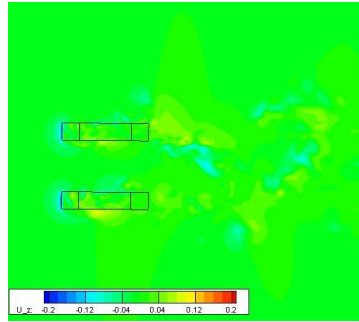


Figure b.5.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

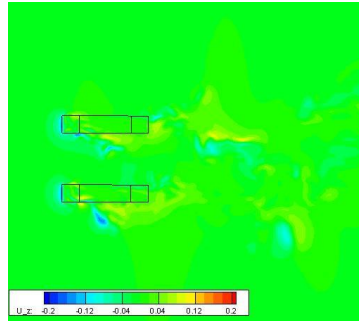


Figure b.5.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

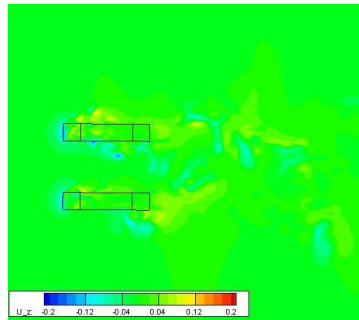


Figure b.5.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

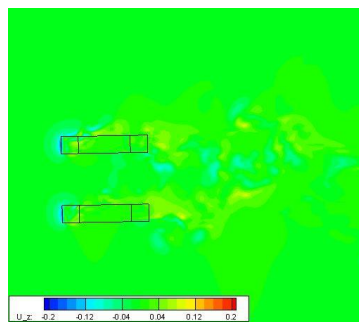


Figure b.5.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

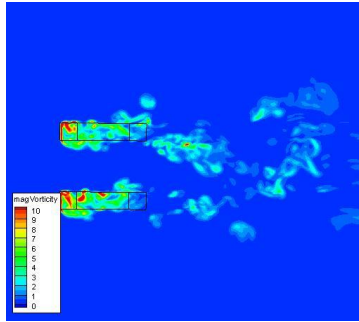


Figure b.5.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

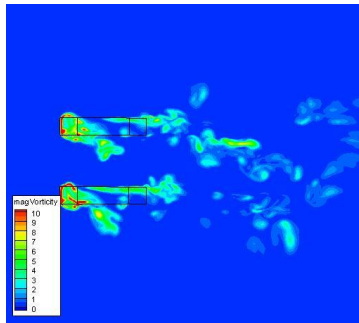


Figure b.5.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

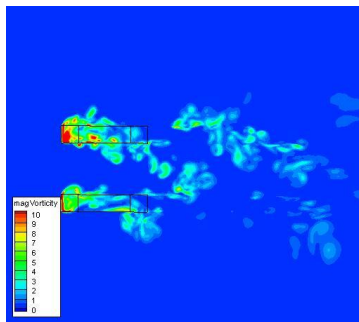


Figure b.5.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

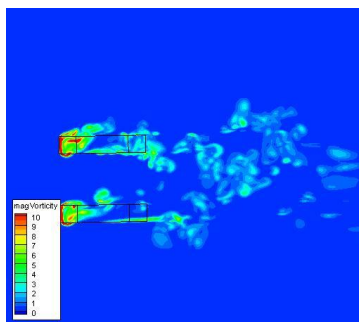


Figure b.5.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

6. $Vr=10.4$ ケース P4

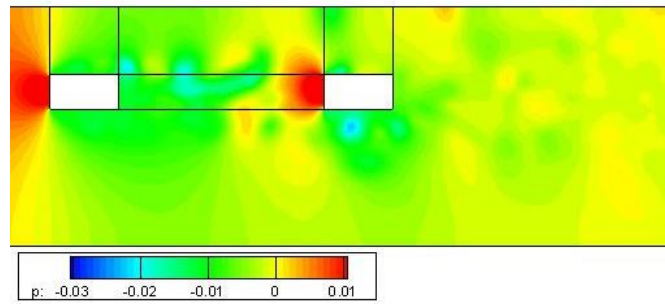


Figure b.6.1 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = 0$)

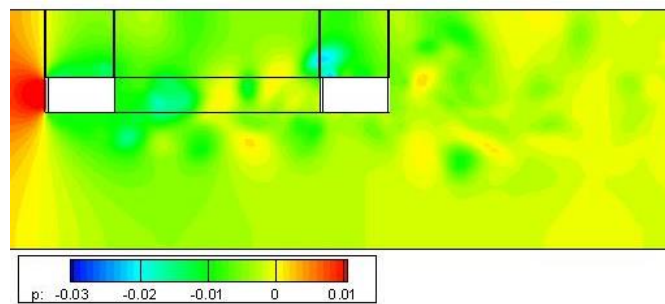


Figure b.6.2 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

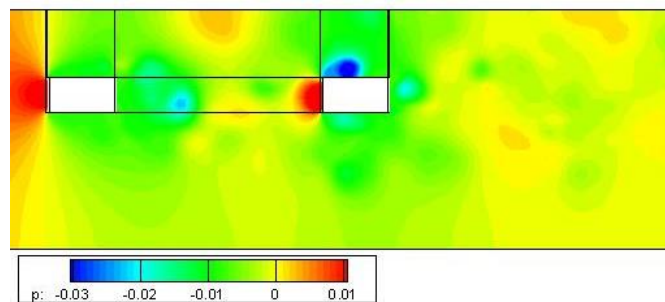


Figure b.6.3 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

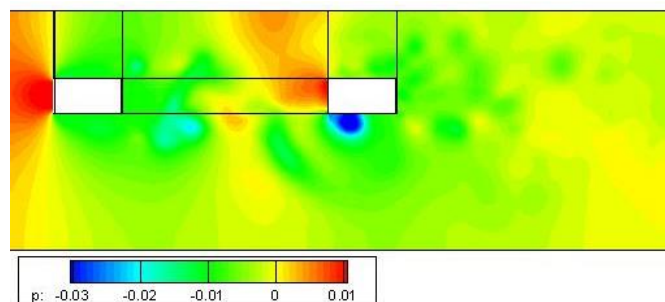


Figure b.6.4 平面 $y=0$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

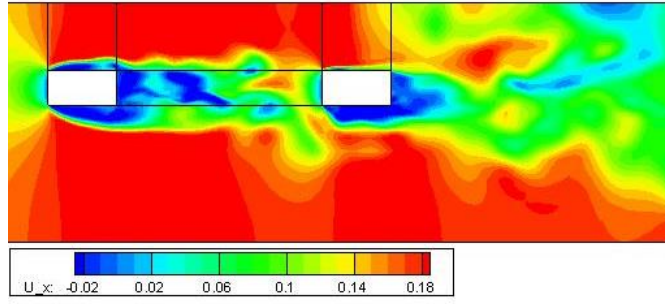


Figure b.6.5 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

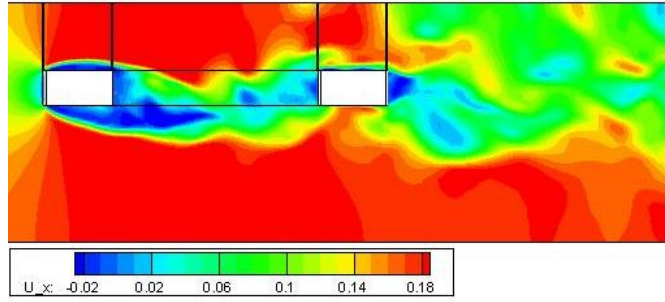


Figure b.6.6 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

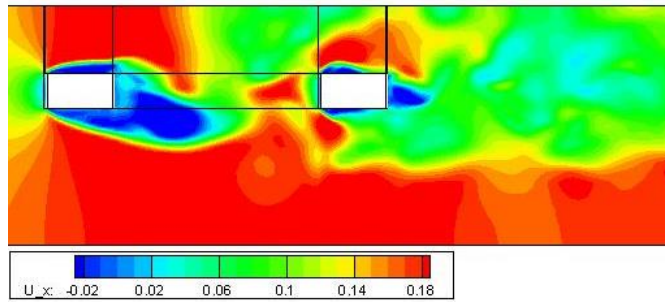


Figure b.6.7 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

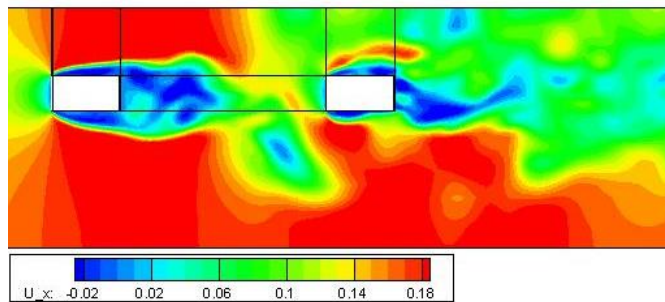


Figure b.6.8 平面 $y=0$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

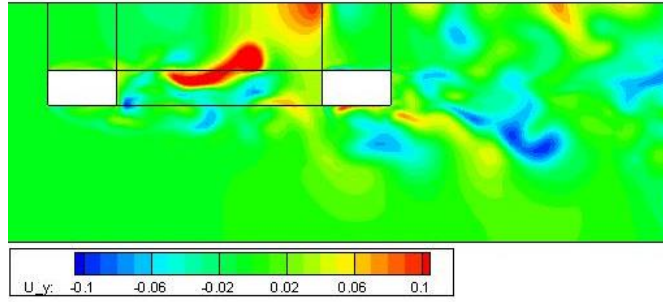


Figure b.6.9 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

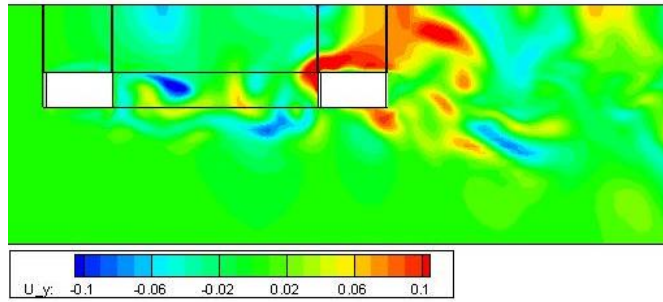


Figure b.6.10 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

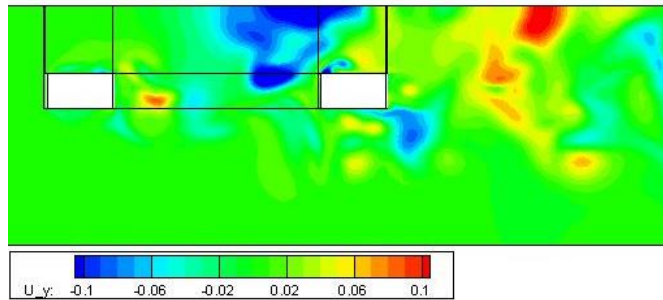


Figure b.6.11 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

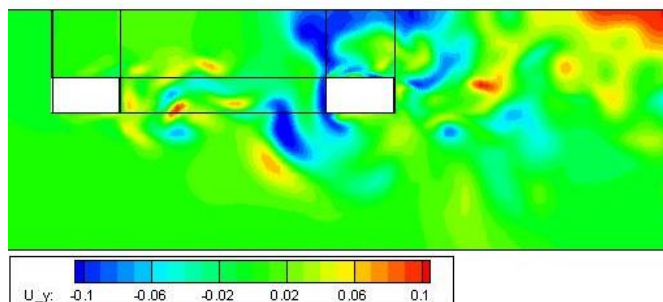


Figure b.6.12 平面 $y=0$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

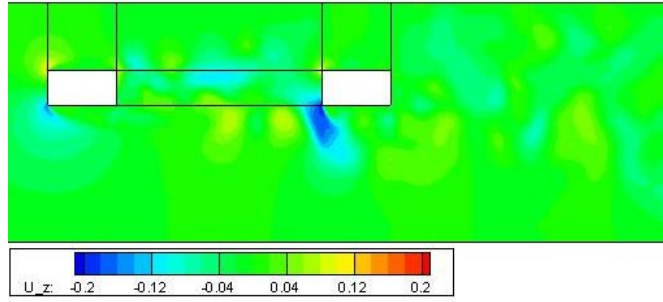


Figure b.6.13 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

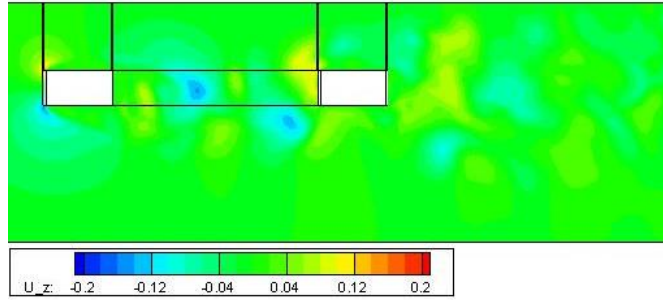


Figure b.6.14 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

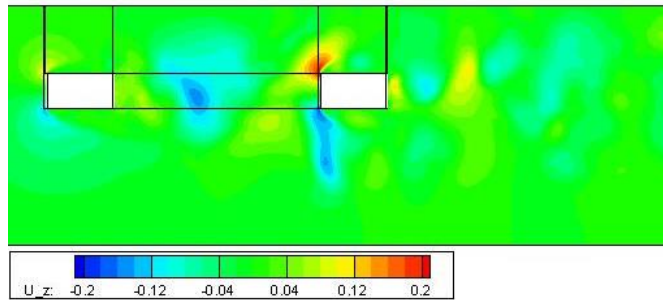


Figure b.6.15 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

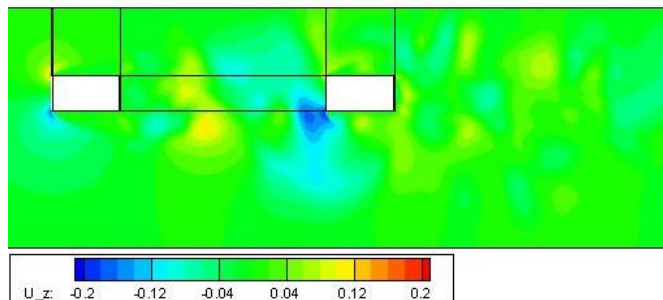


Figure b.6.16 平面 $y=0$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

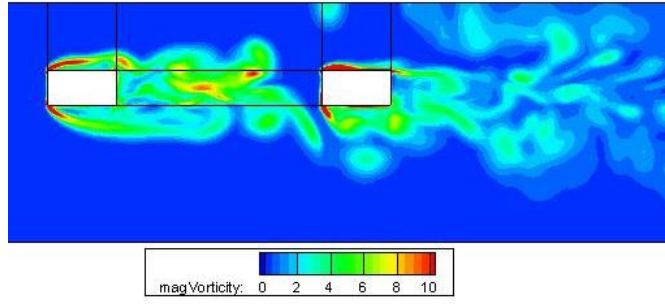


Figure b.6.17 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

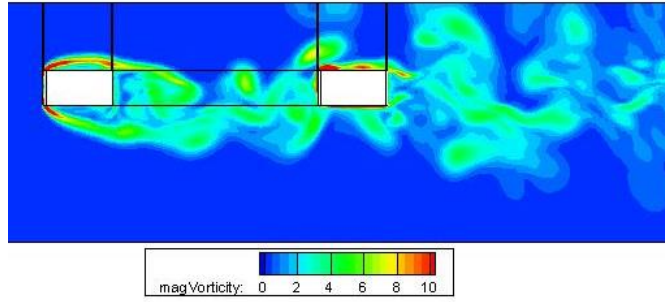


Figure b.6.18 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

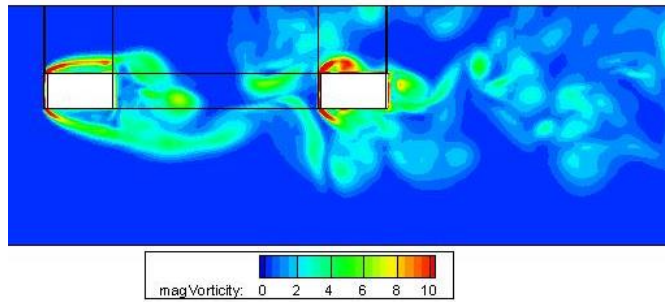


Figure b.6.19 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

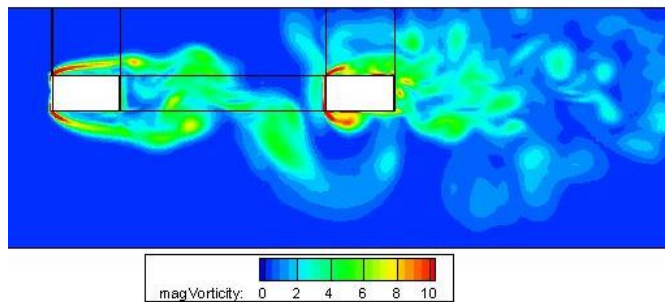


Figure b.6.20 平面 $y=0$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

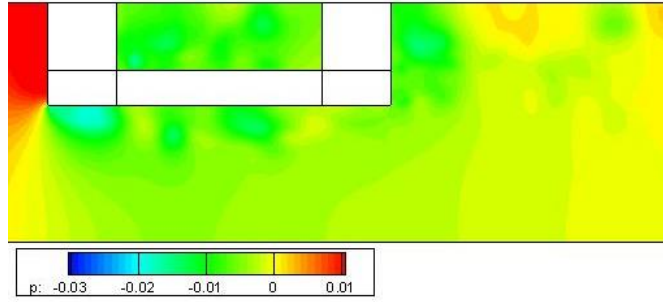


Figure b.6.21 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = 0$)

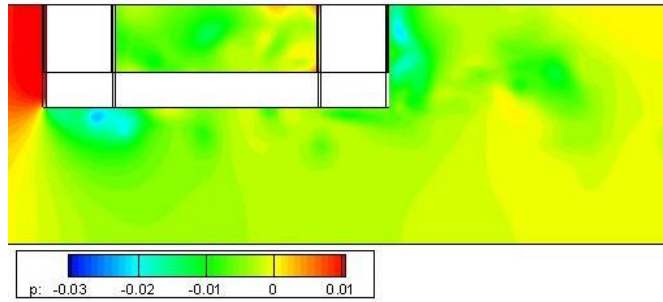


Figure b.6.22 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

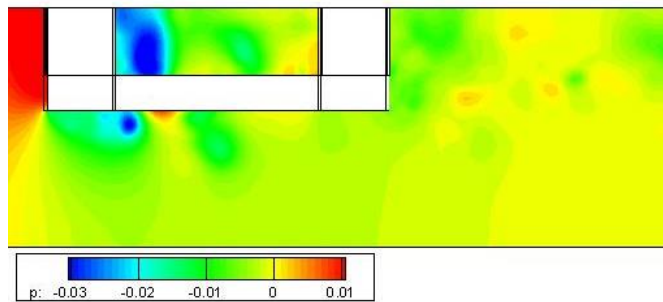


Figure b.6.23 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

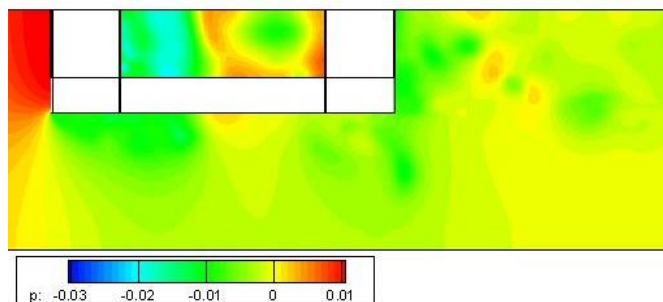


Figure b.6.24 平面 $y=0.5$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

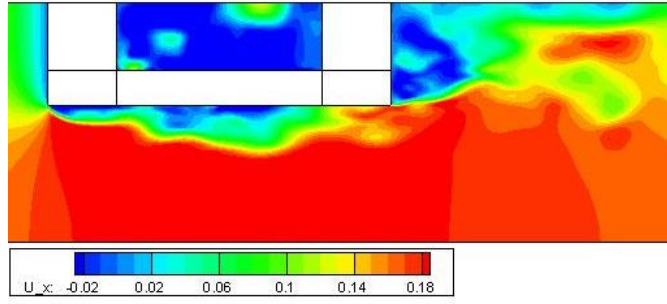


Figure b.6.25 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

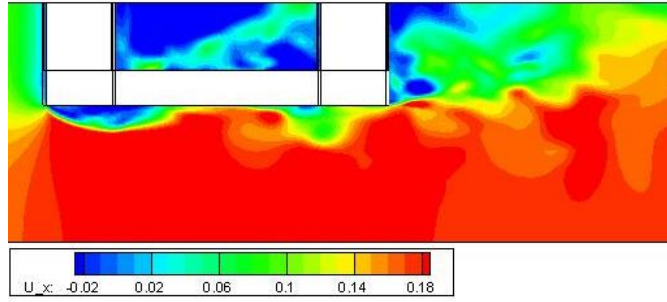


Figure b.6.26 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

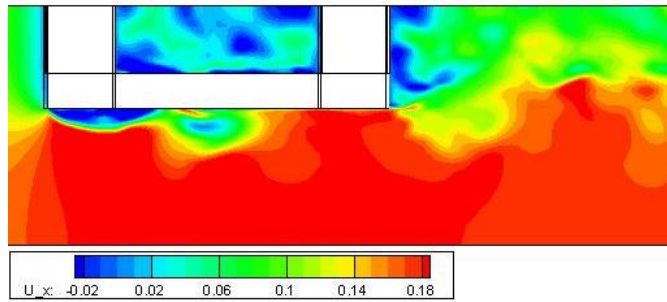


Figure b.6.27 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

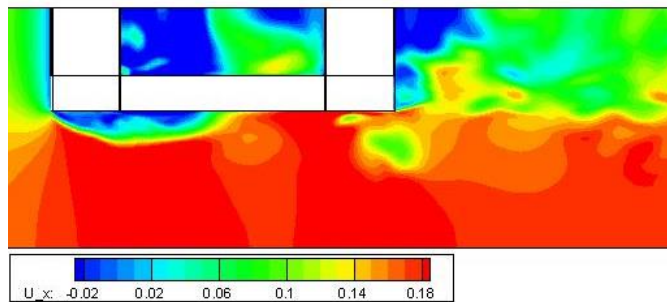


Figure b.6.28 平面 $y=0.5$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

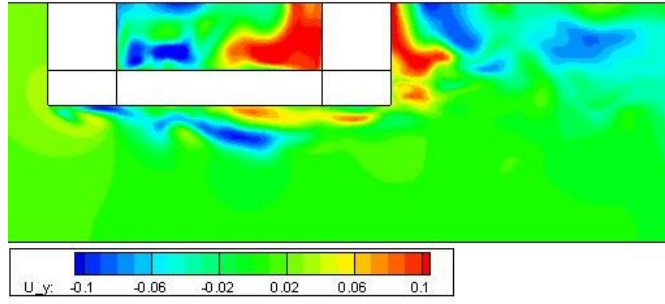


Figure b.6.29 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

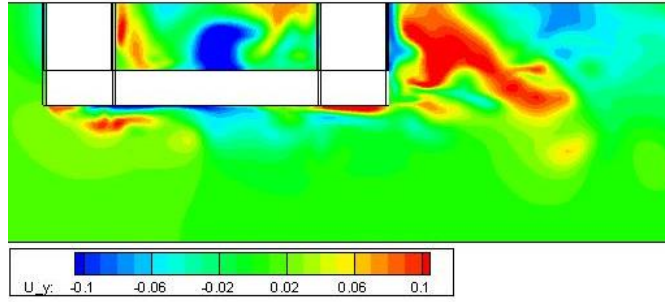


Figure b.6.30 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

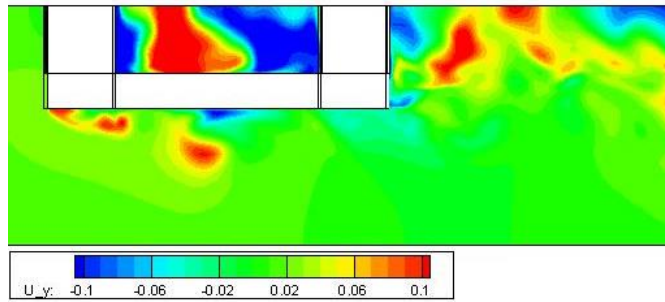


Figure b.6.31 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

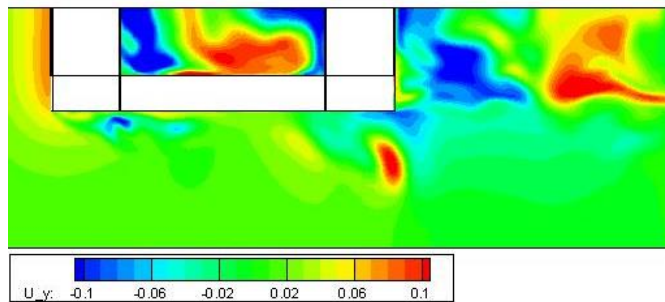


Figure b.6.32 平面 $y=0.5$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

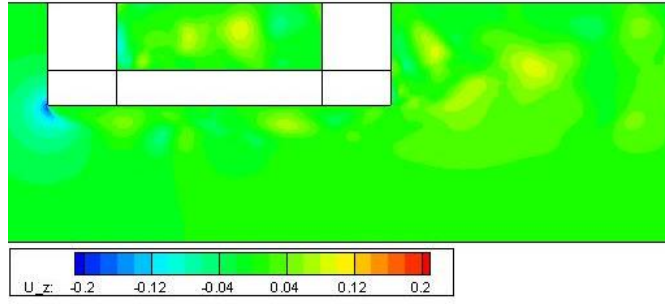


Figure b.6.33 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

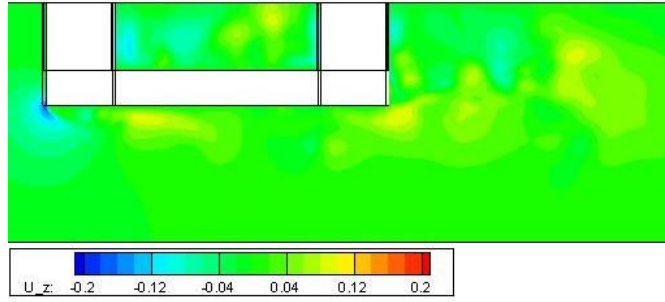


Figure b.6.34 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4} t_0$)

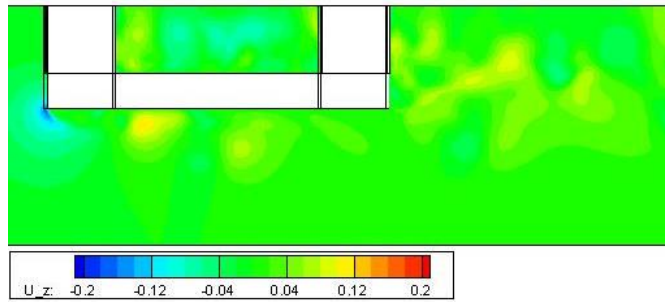


Figure b.6.35 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2} t_0$)

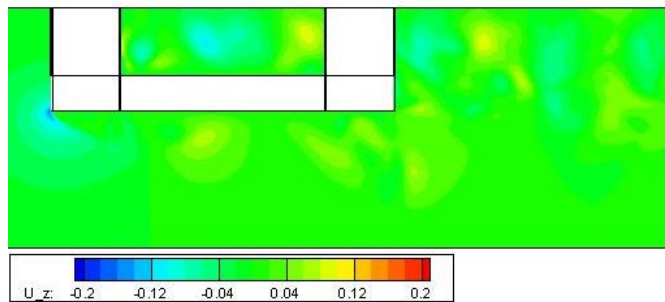


Figure b.6.36 平面 $y=0.5$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4} t_0$)

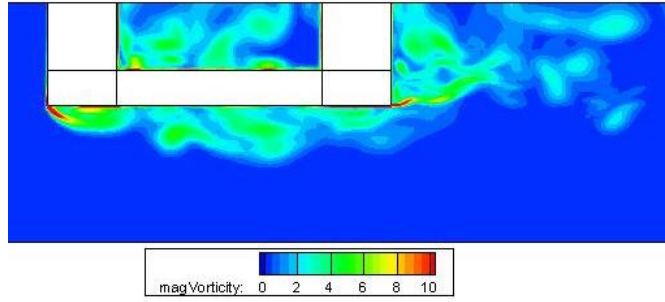


Figure b.6.37 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

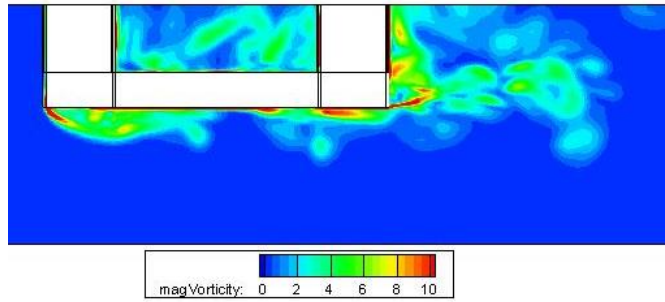


Figure b.6.38 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

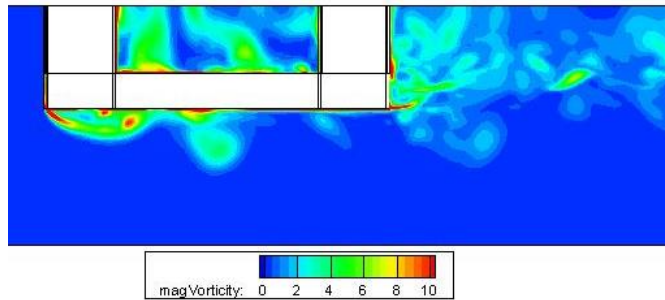


Figure b.6.39 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

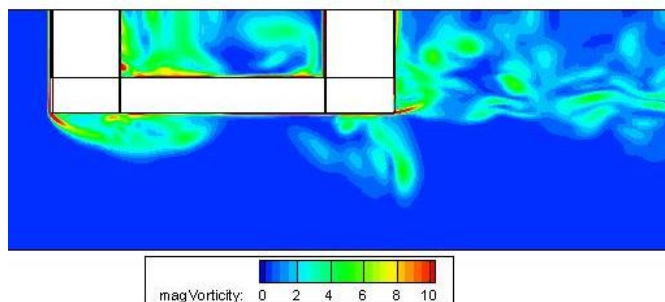


Figure b.6.40 平面 $y=0.5$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

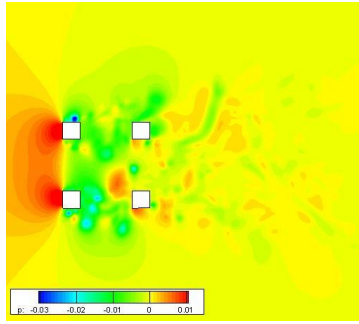


Figure b.6.41 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = 0$)

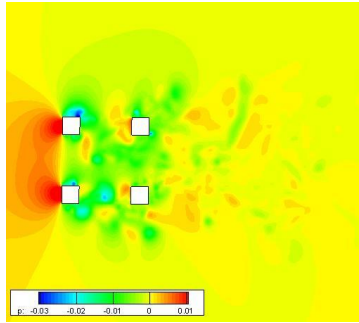


Figure b.6.42 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

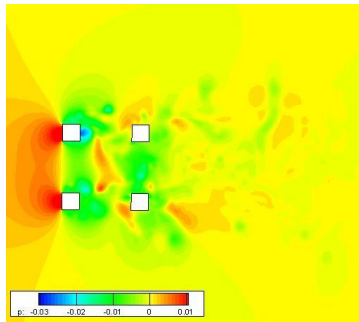


Figure b.6.43 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

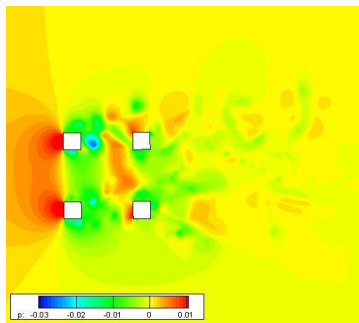


Figure b.6.44 平面 $z=-0.0025$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

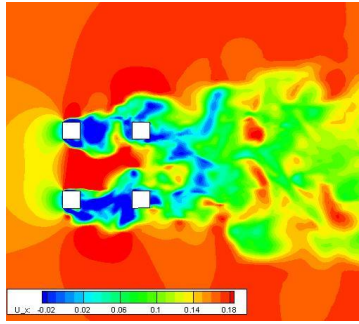


Figure b.6.45 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

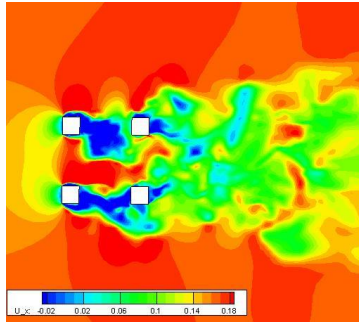


Figure b.6.46 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

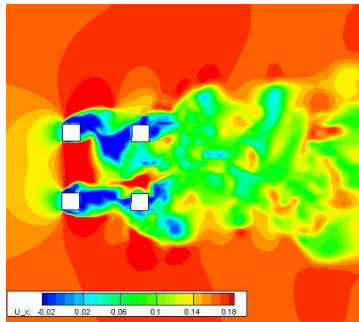


Figure b.6.47 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

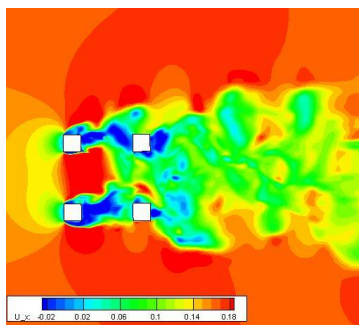


Figure b.6.48 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

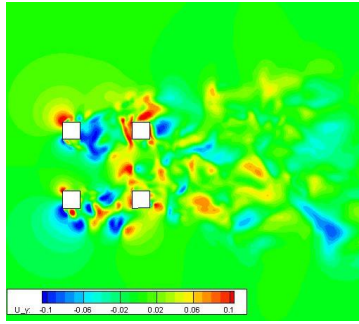


Figure b.6.49 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

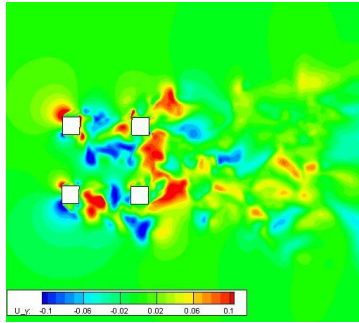


Figure b.6.50 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

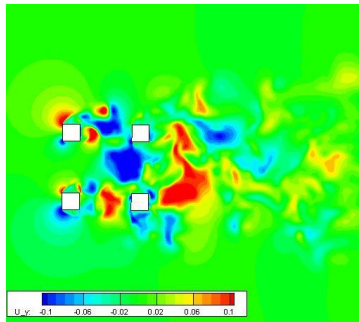


Figure b.6.51 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

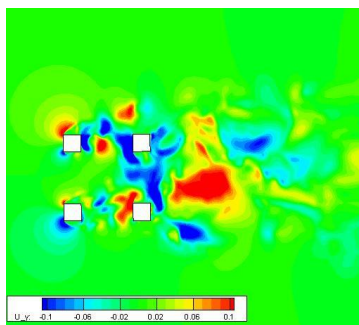


Figure b.6.52 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

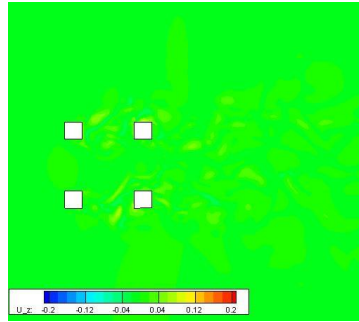


Figure b.6.53 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

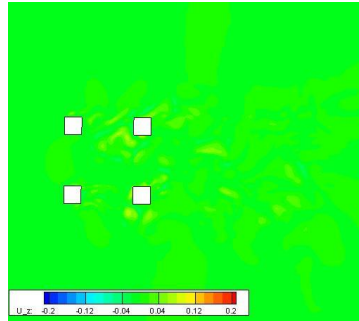


Figure b.6.54 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

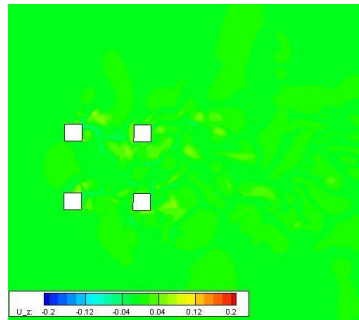


Figure b.6.55 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

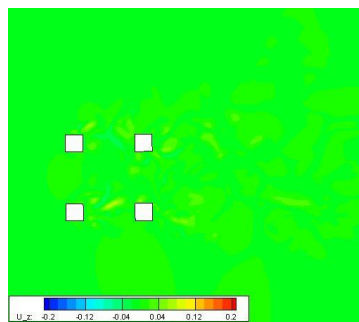


Figure b.6.56 平面 $z=-0.0025$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

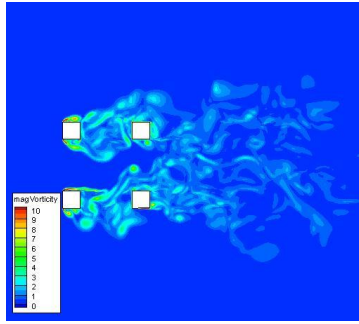


Figure b.6.57 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

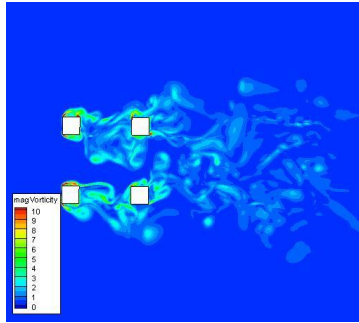


Figure b.6.58 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

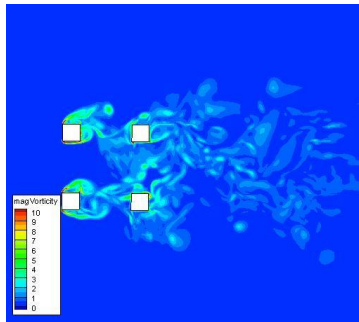


Figure b.6.59 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

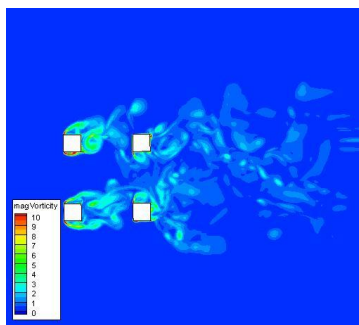


Figure b.6.60 平面 $z=-0.0025$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

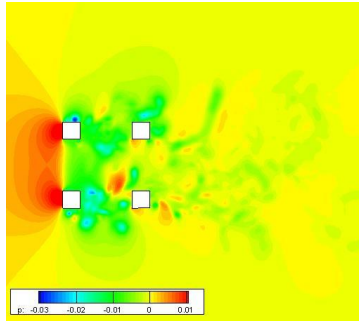


Figure b.6.61 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

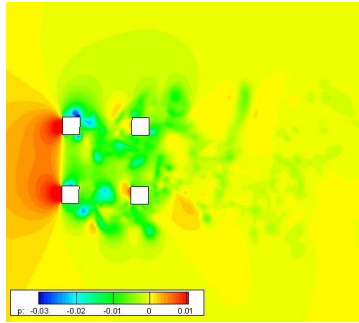


Figure b.6.62 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

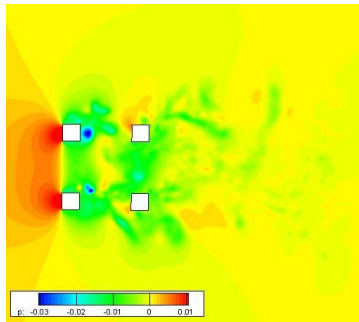


Figure b.6.63 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

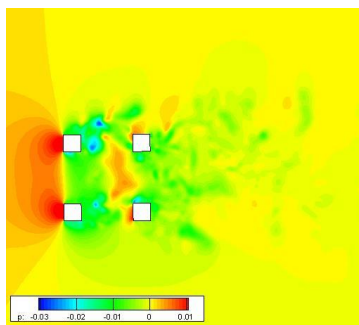


Figure b.6.64 平面 $z=-0.125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

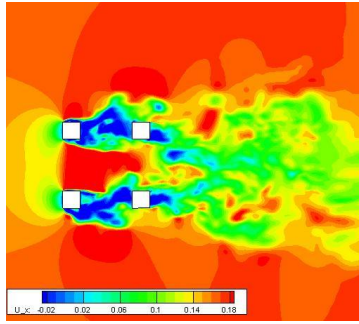


Figure b.6.65 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

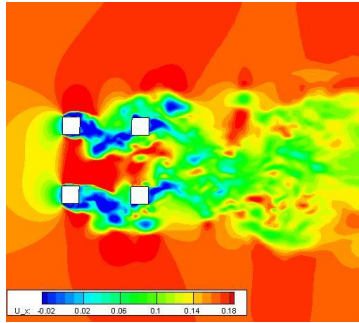


Figure b.6.66 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

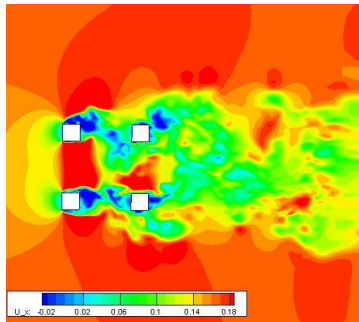


Figure b.6.67 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

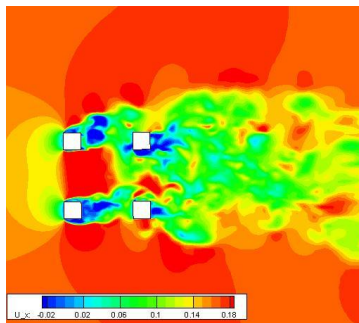


Figure b.6.68 平面 $z=-0.125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

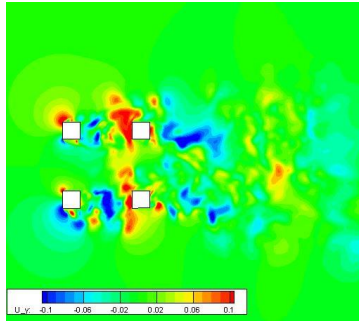


Figure b.6.69 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

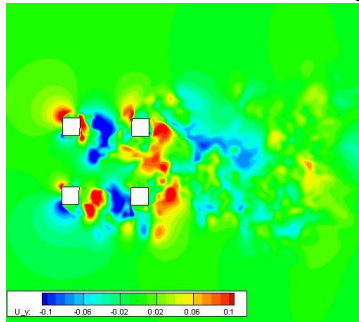


Figure b.6.70 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

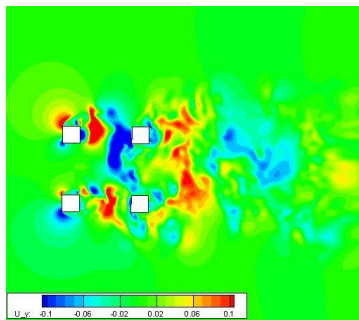


Figure b.6.71 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

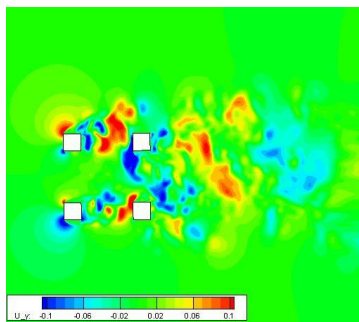


Figure b.6.72 平面 $z=-0.125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

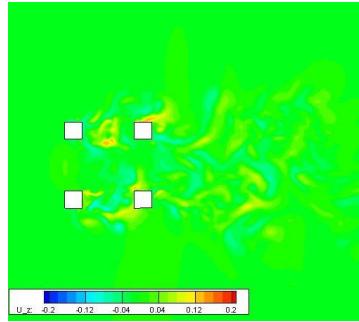


Figure b.6.73 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

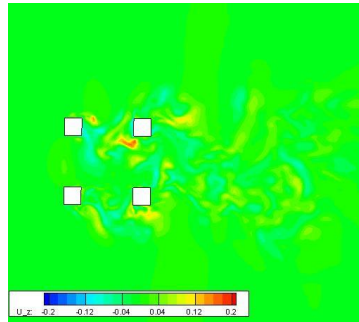


Figure b.6.74 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

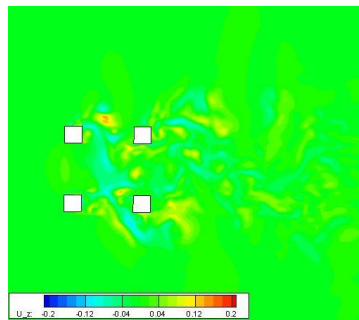


Figure b.6.75 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

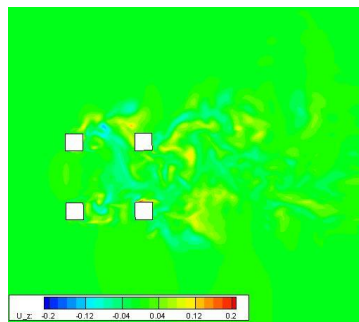


Figure b.6.76 平面 $z=-0.125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

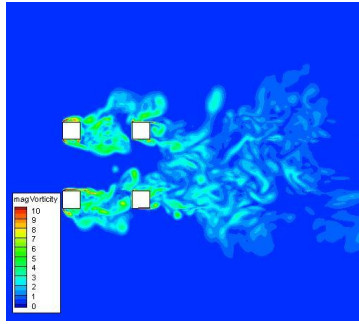


Figure b.6.77 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

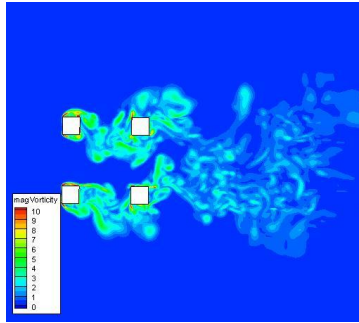


Figure b.6.78 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

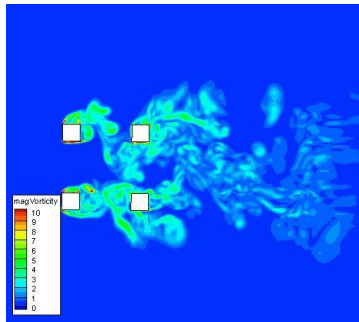


Figure b.6.79 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

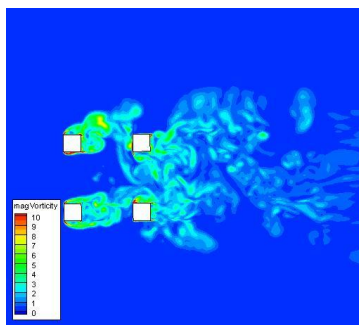


Figure b.6.80 平面 $z=-0.125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

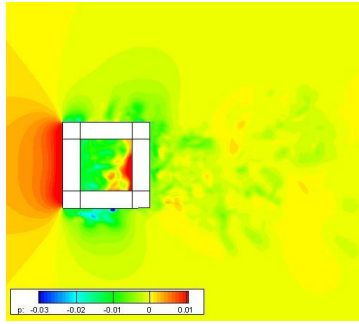


Figure b.6.81 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = 0$)

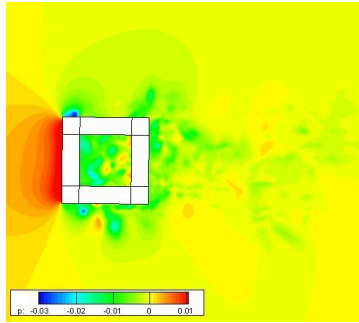


Figure b.6.82 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

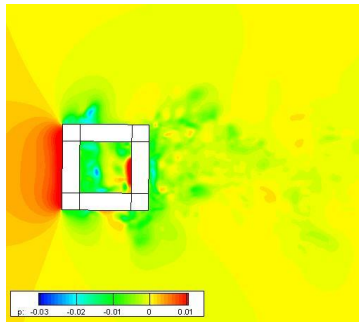


Figure b.6.83 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

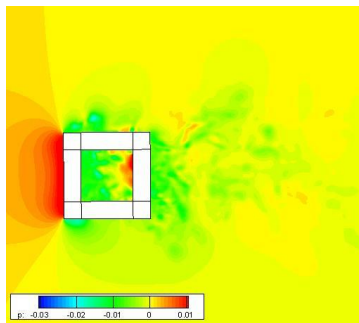


Figure b.6.84 平面 $z=-0.3125$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

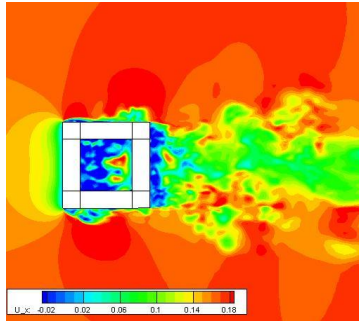


Figure b.6.85 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

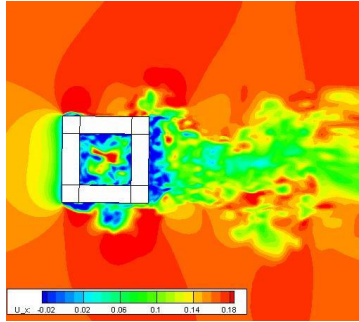


Figure b.6.86 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

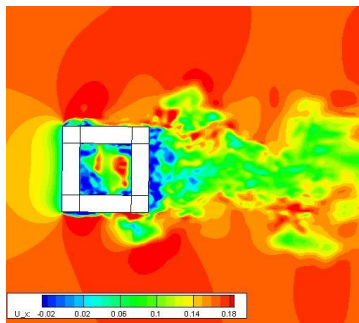


Figure b.6.87 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

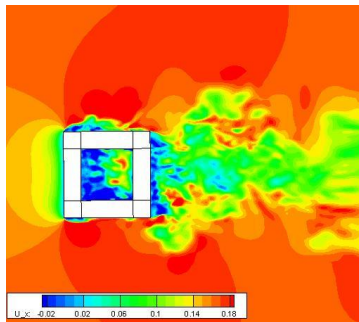


Figure b.6.88 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

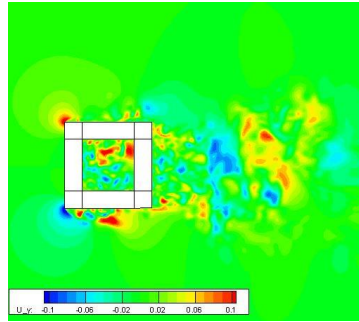


Figure b.6.89 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

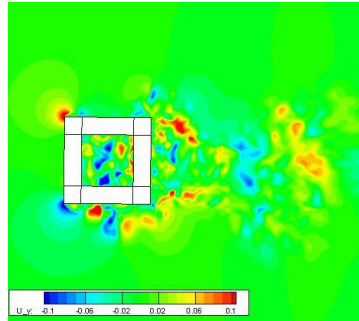


Figure b.6.90 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

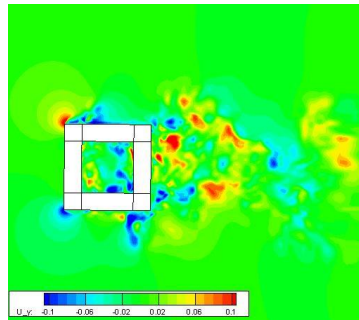


Figure b.6.91 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

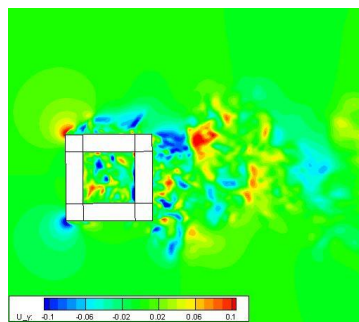


Figure b.6.92 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

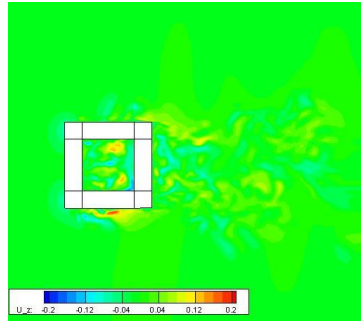


Figure b.6.93 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

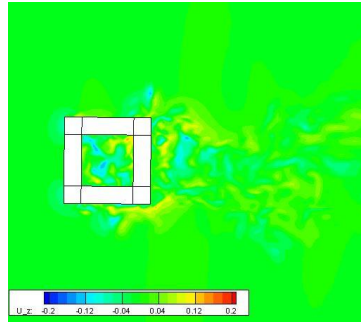


Figure b.6.94 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

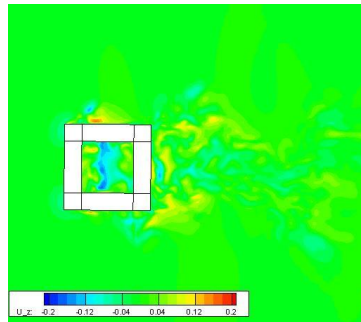


Figure b.6.95 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

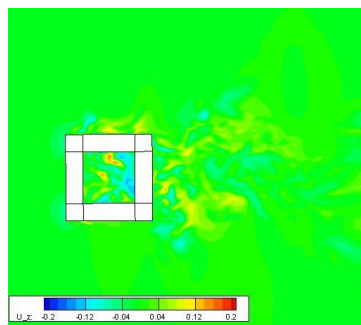


Figure b.6.96 平面 $z=-0.3125$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

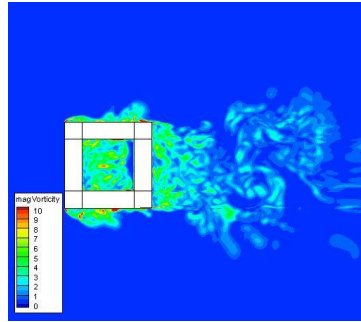


Figure b.6.97 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

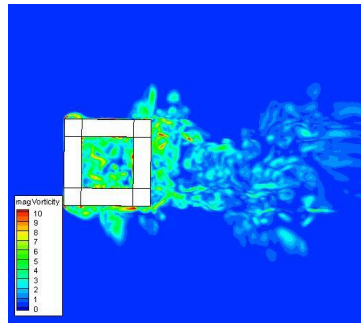


Figure b.6.98 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

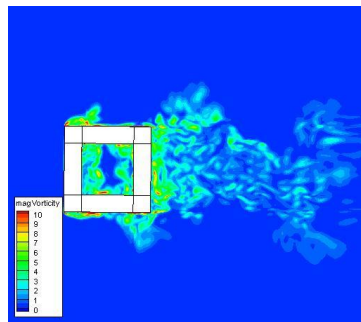


Figure b.6.99 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

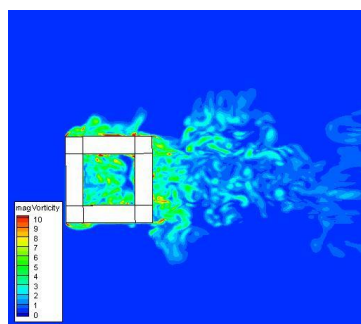


Figure b.6.100 平面 $z=-0.3125$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

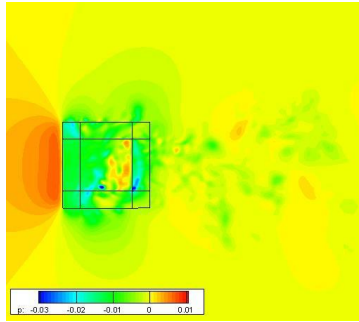


Figure b.6.101 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = 0$)

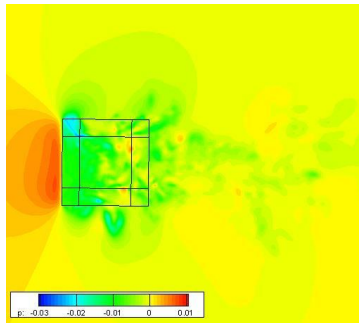


Figure b.6.102 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

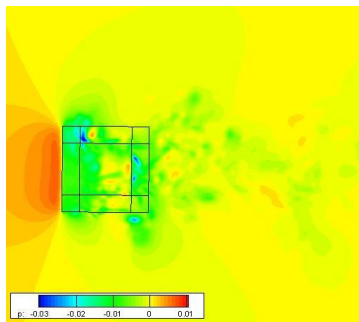


Figure b.6.103 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

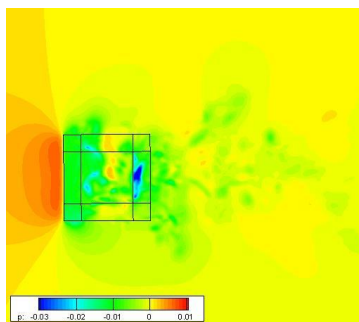


Figure b.6.104 平面 $z=-0.4$ における圧力 p の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

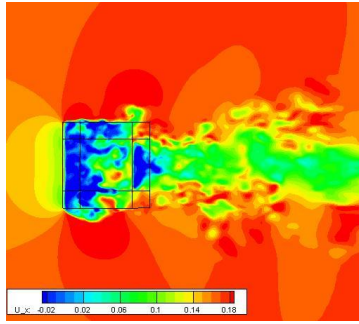


Figure b.6.105 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = 0$)

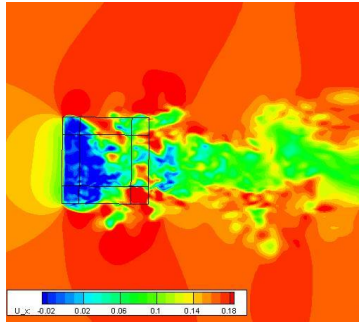


Figure b.6.106 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

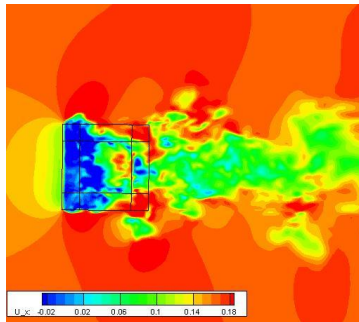


Figure b.6.107 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

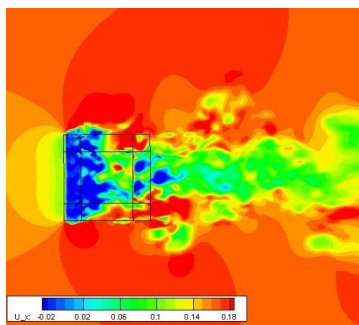


Figure b.6.108 平面 $z=-0.4$ における速度 U_x の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

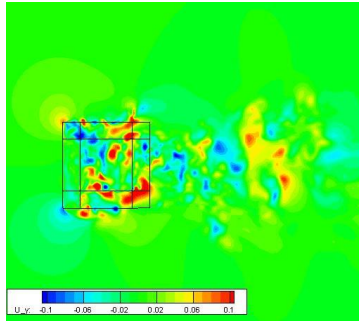


Figure b.6.109 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = 0$)

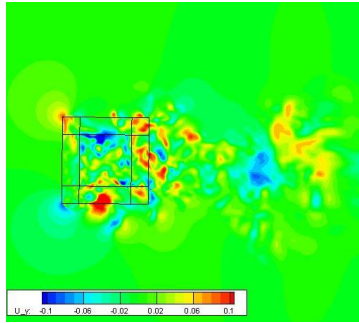


Figure b.6.110 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

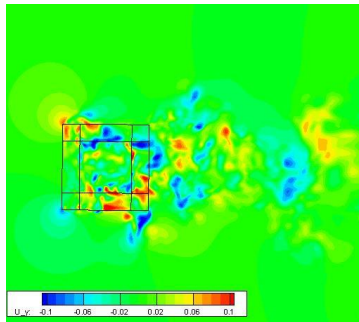


Figure b.6.111 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

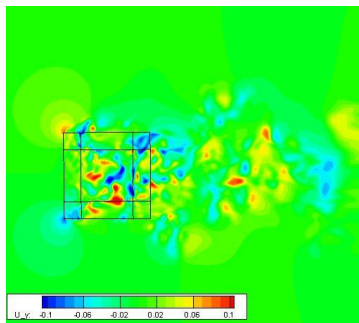


Figure b.6.112 平面 $z=-0.4$ における速度 U_y の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

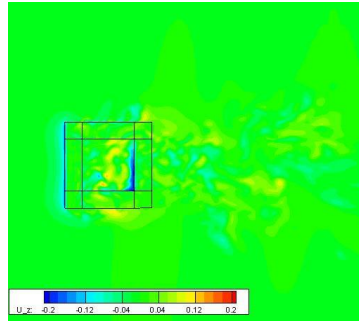


Figure b.6.113 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = 0$)

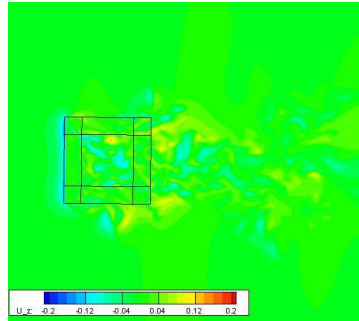


Figure b.6.114 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

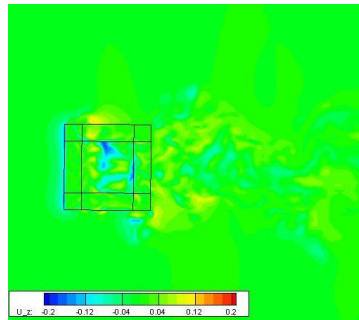


Figure b.6.115 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

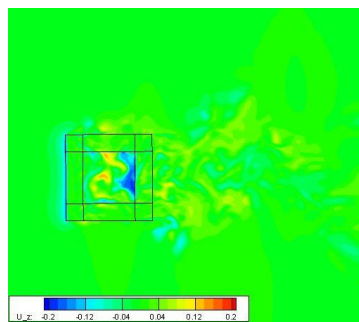


Figure b.6.116 平面 $z=-0.4$ における速度 U_z の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)

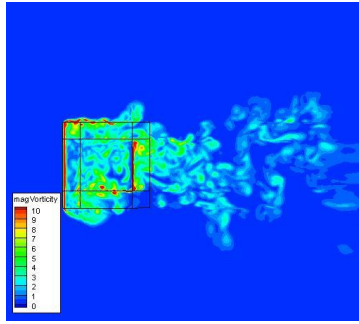


Figure b.6.117 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = 0$)

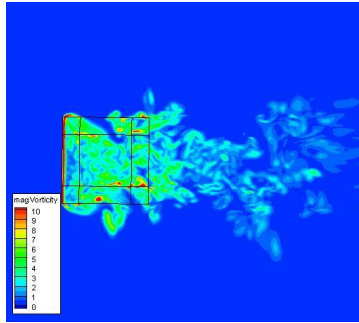


Figure b.6.118 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{4}t_0$)

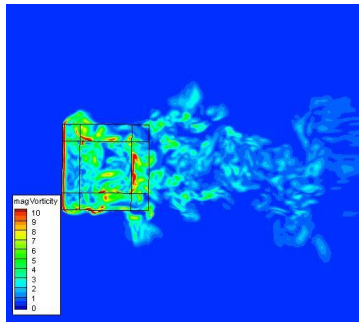


Figure b.6.119 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{1}{2}t_0$)

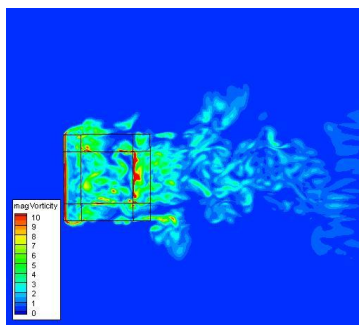


Figure b.6.120 平面 $z=-0.4$ における渦度 ω の分布($t = \frac{3}{4}t_0$)