

---

# **OpenFOAMとFDSのお話**

## **-OpenFOAM勉強会 for beginner-**

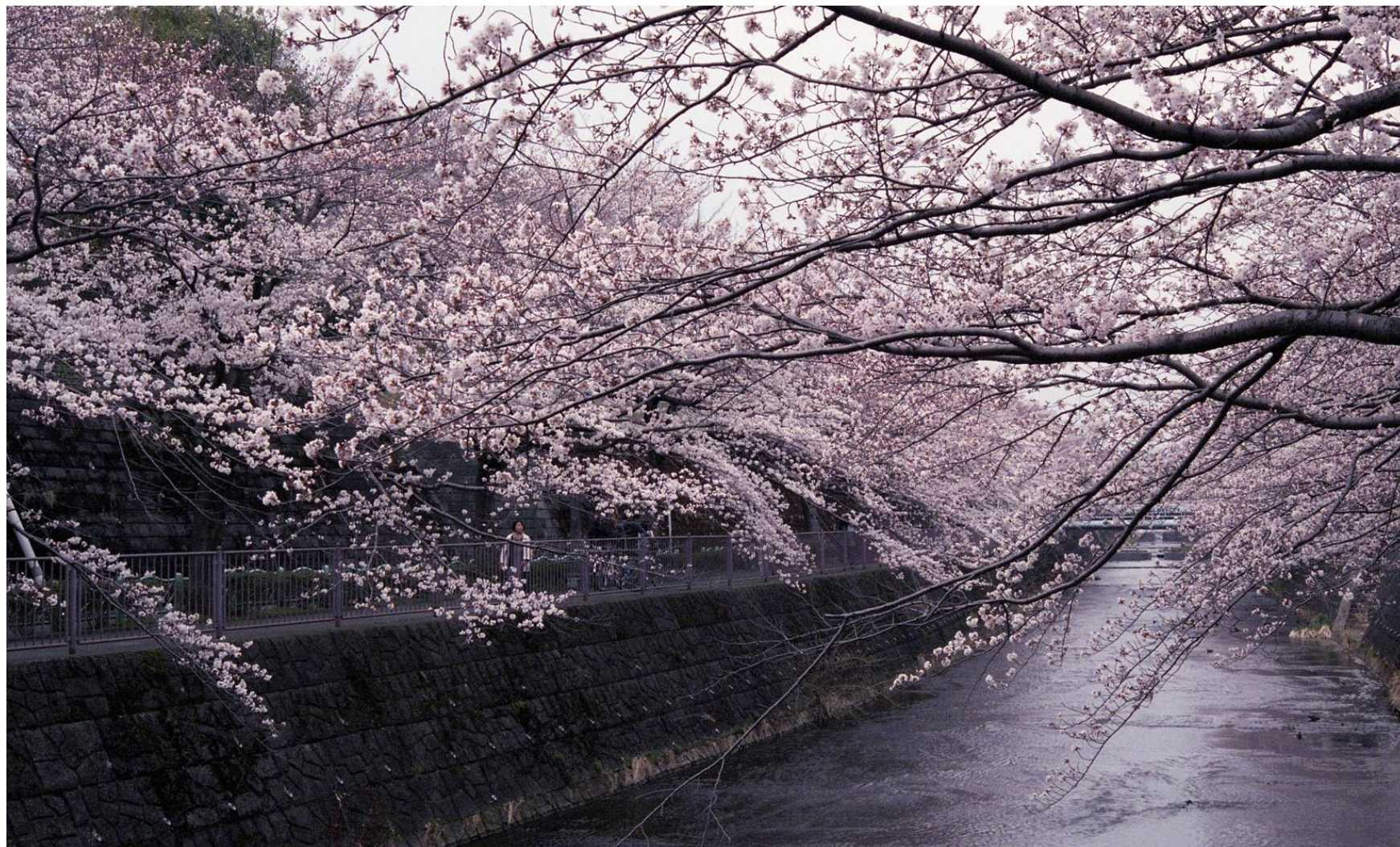
**2013.04.14**

**KMori**

---

# 0. 今月の一枚

---



恩田川(横浜市緑区长津田付近)

---



# 1.1. Thermal Inertia (熱慣性)

---

密度 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>], 比熱 $c$ [J/kgK], 熱伝導率 $k$ [W/mK]により温度伝導度 $\alpha$ [m<sup>2</sup>/s]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} [m^2 / s],$$

は定義される. また, 熱慣性は,  $k^2/\alpha = k\rho c$  [W<sup>2</sup>s/m<sup>4</sup>K<sup>2</sup>]で, (半無限の)固体表面における温度上昇の割合に関係するものである. これは, 熱慣性の単位の逆数

$$\frac{m^4 K^2}{W^2 s} = \frac{\frac{m^4 K^2}{W^2}}{s} = \frac{\frac{K^2}{W^2 / m^4}}{s} = \frac{\left(\frac{K}{W / m^2}\right)^2}{s}$$

をとることにより理解できる. 熱慣性が小さい場合, 温度は速く伝わり温度上昇の時間に対する割合は大きい.



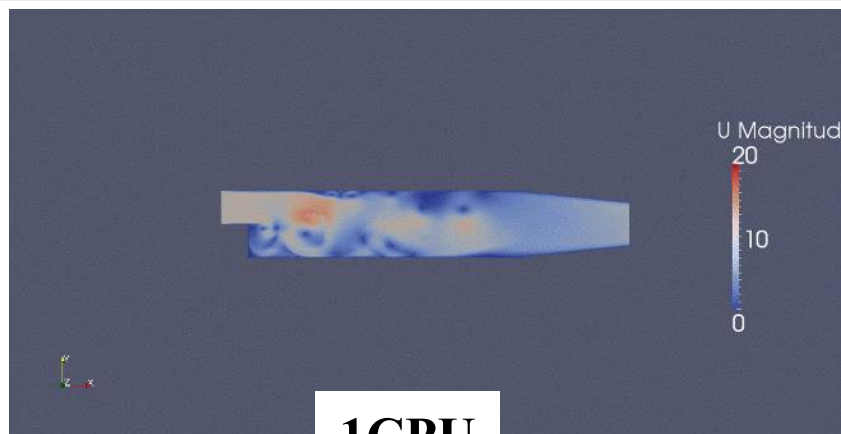
熱慣性 値大: 表面温度上昇小, 値小: 表面温度上昇大

---

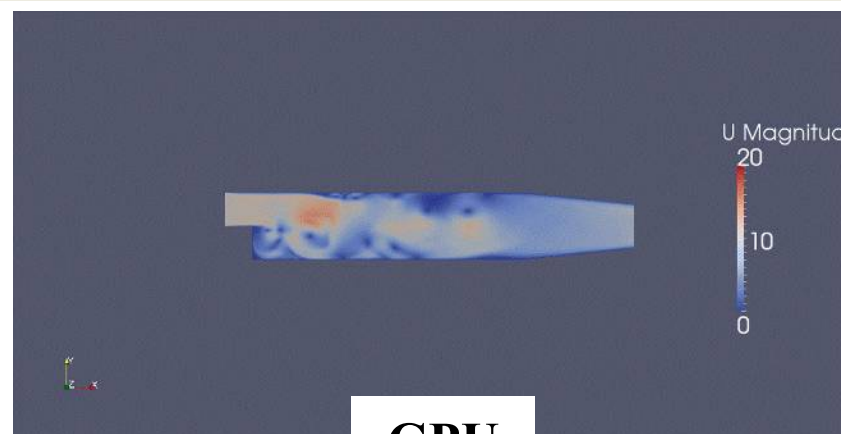
## 1.2. Thermal Inertia (熱慣性)

物質	$k$ [W/mK]	$C$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$k\rho c$ [W <sup>2</sup> s/m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> ]
銅	387	380	8940	$1.14 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^9$
鋼(mild)	45.8	460	7850	$1.26 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^8$
ブリキ(共通)	0.69	840	1600	$5.2 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^5$
コンクリート	0.8-1.4	880	1900-2300	$5.7 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^6$
ガラス(板)	0.76	840	2700	$3.3 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^6$
Gypsum plaster	0.48	840	1440	$4.1 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^5$
PMMA	0.19	1420	1190	$1.1 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^5$
Oak	0.17	2380	800	$8.9 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^5$
Yellow pine	0.14	2850	640	$8.3 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^5$
アスベスト	0.15	1050	577	$2.5 \times 10^{-7}$	$9.1 \times 10^4$
Fibre断熱材	0.041	2090	229	$8.6 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^4$
ポリウレタン	0.034	1400	20	$1.2 \times 10^{-6}$	$9.5 \times 10^2$
空気	0.026	1040	1.1	$2.2 \times 10^{-5}$	(29.744)

## 2. GPU



1CPU



GPU

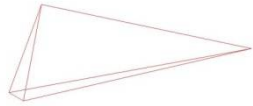
	モデル要素数	Xeon X5690 3.47GHz Quadro 4000 256コア	Core i7 X980 3.33GHZ GeForce GTX 460 336コア
GPU	1.2万	2788s	2311s
1 CPU	1.2万	GPUが遅い 1065s	1098s
GPU	120万	822s	683s
1 CPU	120万	GPUが10倍高速 8884s	6768s

\*二方向要素数10倍(全体で100倍要素)モデル, 100ステップ解析.

\*\*二方向要素数20倍(全体で400倍要素)モデル, GPU解析不能.

\*\*\*GPUメモリーはともに2GB.

### 3. 最大Skewness (テトラ)



**F14:0.876**

**OF2.1.0:1.126**



**F14:0.900**

**OFGPU02:1.31**



**F14:0.9552**

**OF2.1.0:2.025**

最大Skewness 値比較

Model	OpenFOAM	FLUENT
Sphere-01	0.713	0.754
Sphere-02	0.807 (1.526) *	0.762
Sphere-03	0.893 (1.373) *	0.764
<hr/>		
Duct-01	1.126	0.876
CC	1.244	0.879
Duct-02	1.31	0.900
Duct-03	0.915	0.941
<hr/>		
Pr	1.551	0.9497
-	2.025	0.9552
-	0.626***	0.995**

\*()内はポリヘドラメッシュ, \*\*FLUENTは最大値 1.

\*\*\*最大アスペクト比 1408.

■ Skewness はメッシュ品質に重要な指標.

■ 1以下であれば良い. 2.0以下にはしたい.

# 4.1. 球をすぎる流れ



Simulation of Flow Past a Sphere using the Fluent Code

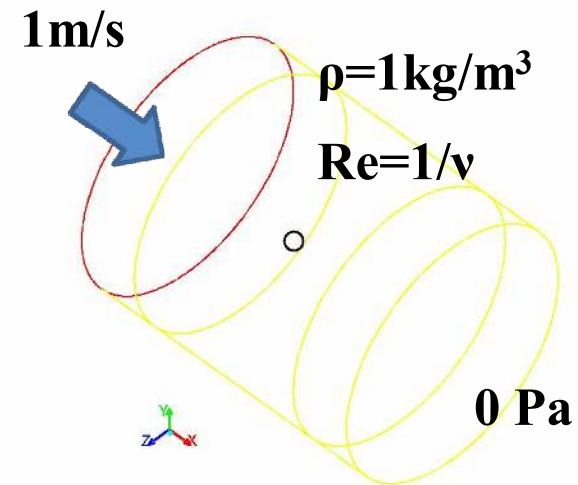
*D.A. Jones and D.B. Clarke*

Maritime Platforms Division  
Defence Science and Technology Organisation

DSTO-TR-2232

オーストラリア防衛科学技術研究所  
レポート

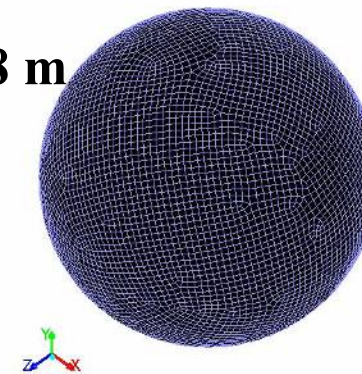
$Re = \begin{cases} 100 & \text{層流(定常)} \\ 300, 500 & \text{層流(非定常)} \\ 10^4, (10^6) & \text{乱流} \end{cases}$



解析モデル

球半径 0.5m

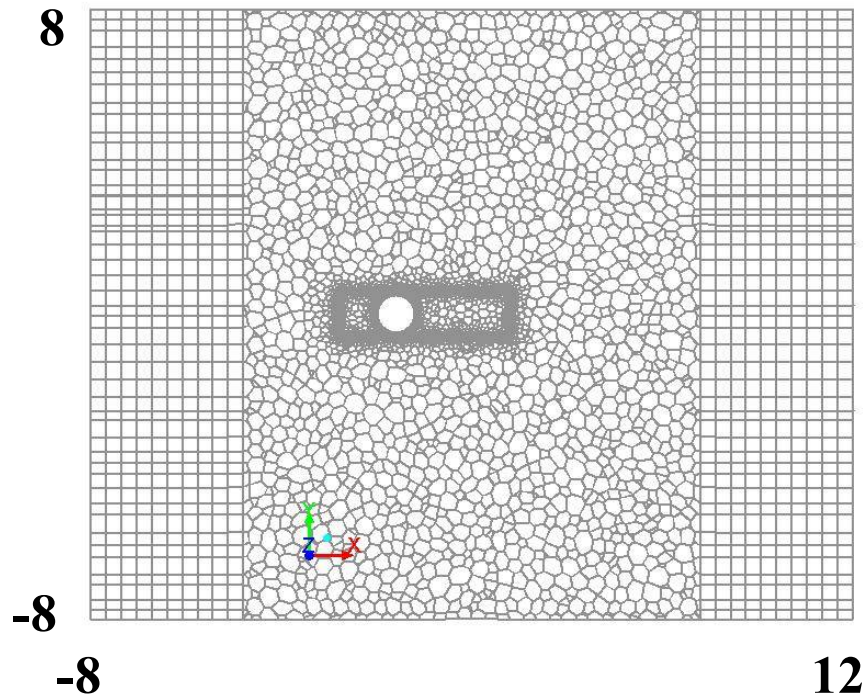
円筒半径 8 m



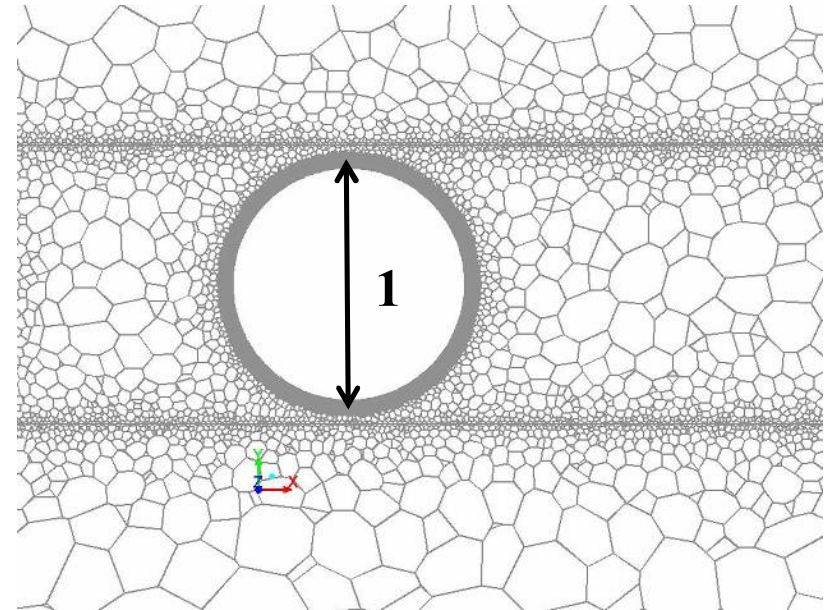
球表面(0.02m)

## 4.2. 球をすぎる流れ

725473 ポリヘドラ要素 Skew 1.397



解析メッシュ1



解析メッシュ1(拡大図)

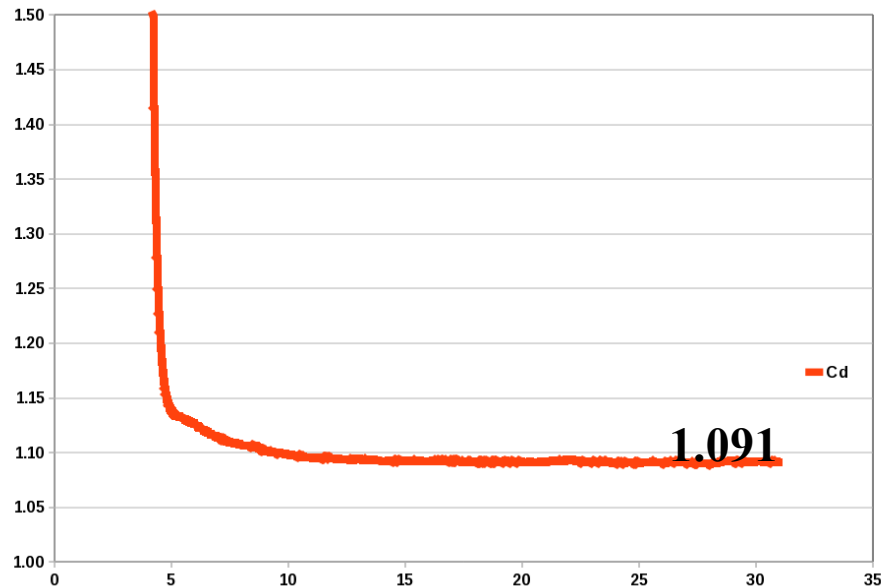
965120ヘキサ要素(FL)

球近傍で細分割



## 4.3. 球をすぎる流れ (Re=100)

$C_d=1.087$  (FL), 1.087~1.096 (C/E)



OpenFOAM2.1.0 による  $C_D$  値

\*29万テトラ要素だと27.6s時点でほぼ定常  
 $C_d=1.22345$  (誤差12.3%)

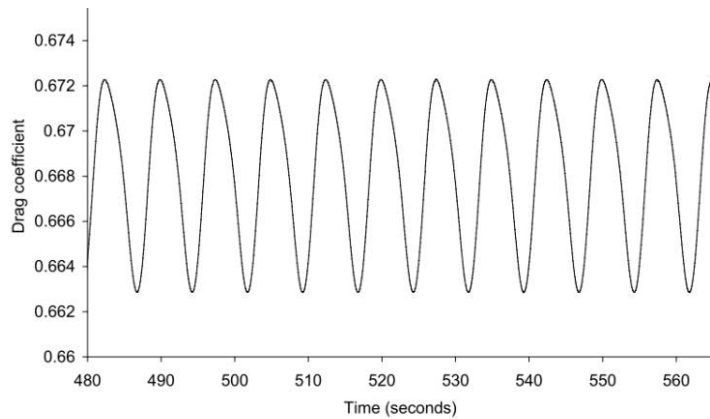
```
forces
{
    type    forceCoeffs;
    functionObjectLibs ( "libforces.so" );
    outputControl timeStep;
    outputInterval 1;

    patches ( "wall_sphere" );
    pName    p;
    UName    U;
    rhoName  rhoInf; // Indicates incompressible
    log      true;
    rhoInf   1;      // Redundant for incompressible
    liftDir  (0 1 0);
    dragDir  (1 0 0);
    CofR     (0 -0.5 0); // Axle midpoint on ground
    pitchAxis (0 0 1);
    magUInf  1;
    lRef     1;      // Wheelbase length
    Aref     0.7854; // Estimated
}
```

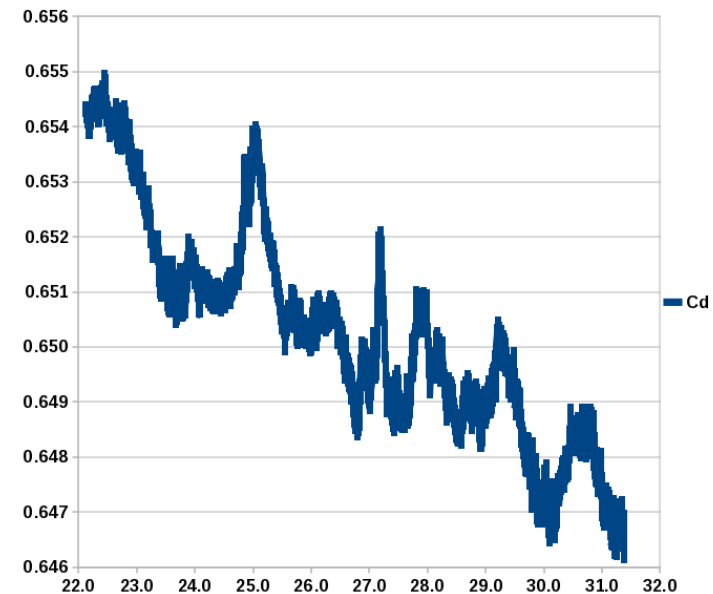
$C_d$  値等プリントのための入力

## 4.4.1. 球をすぎる流れ (Re=300, メッシュ1)

$C_d=0.661$  (FL),  $0.656\sim0.671$  (C/E)



FLUENTによる $C_d$  値



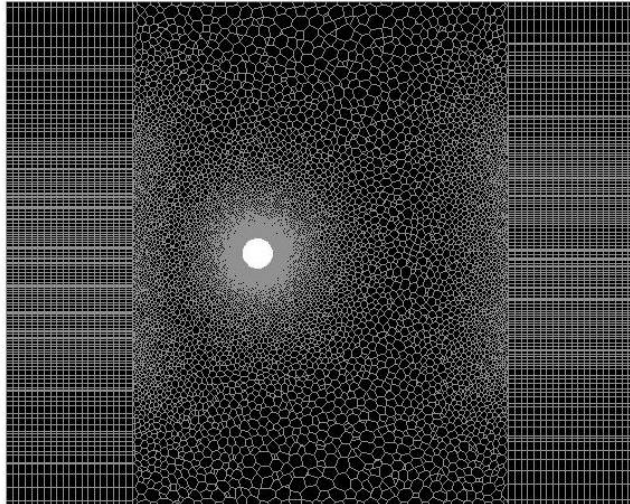
OpenFOAM2.1.0 による $C_d$  値

### メッシュ1

- 3秒程度の周期.
- 非定常な振動はあらわれなかった.
- 並列解析できなかった.

## 4.4.2. 球をすぎる流れ (Re=300, メッシュ2)

1340734ポリヘドラ要素 Skew 1.709

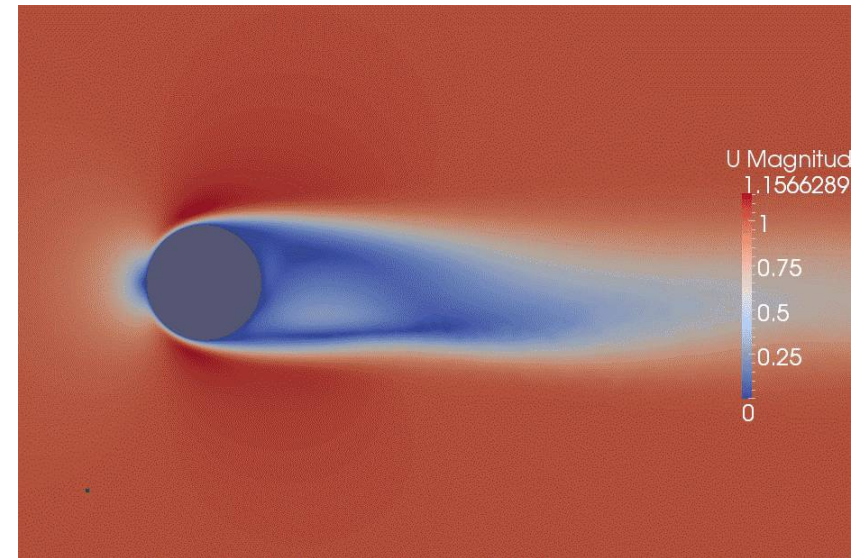


解析メッシュ2

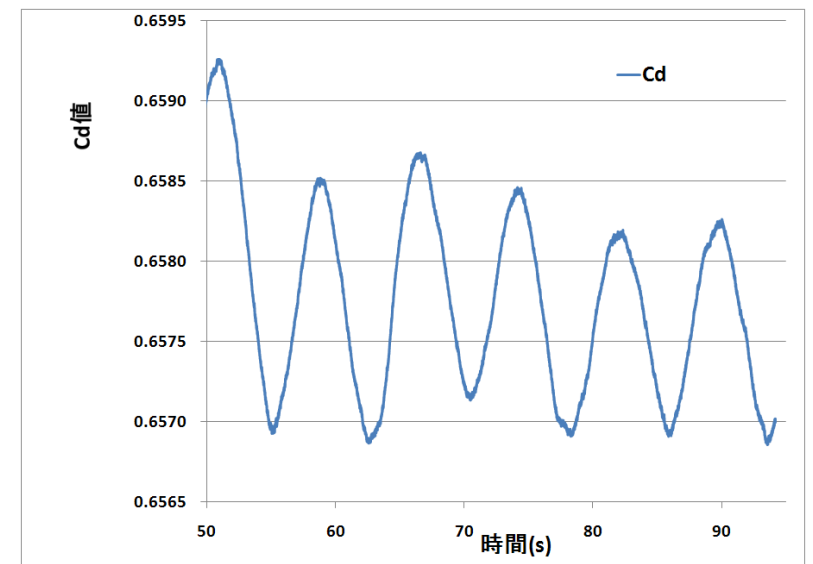
$C_d$  値および周期の比較

	平均	振幅	周期T*
OF	0.658	0.0009	8.19
FL	0.661	0.004	7.52

\*St数(周期Tの逆数)は 0.134,0.133

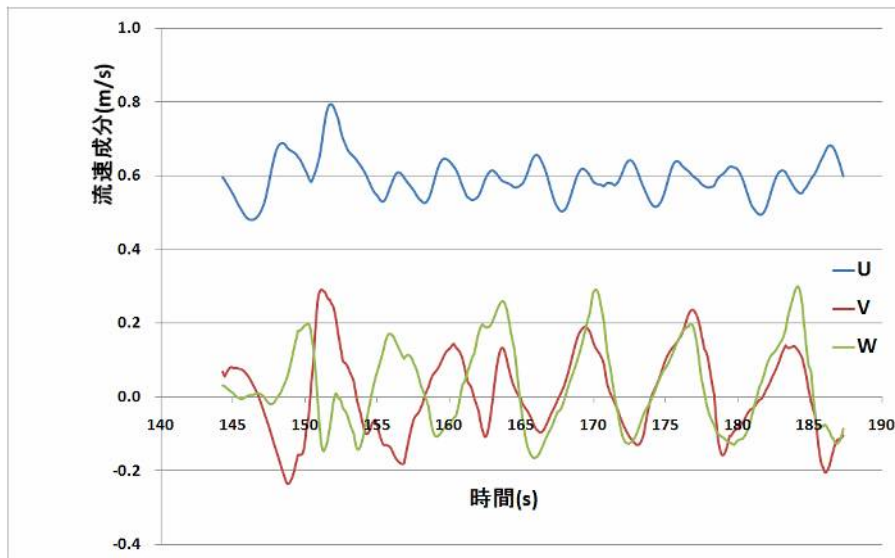


流速コンターの時間変化-Side View-

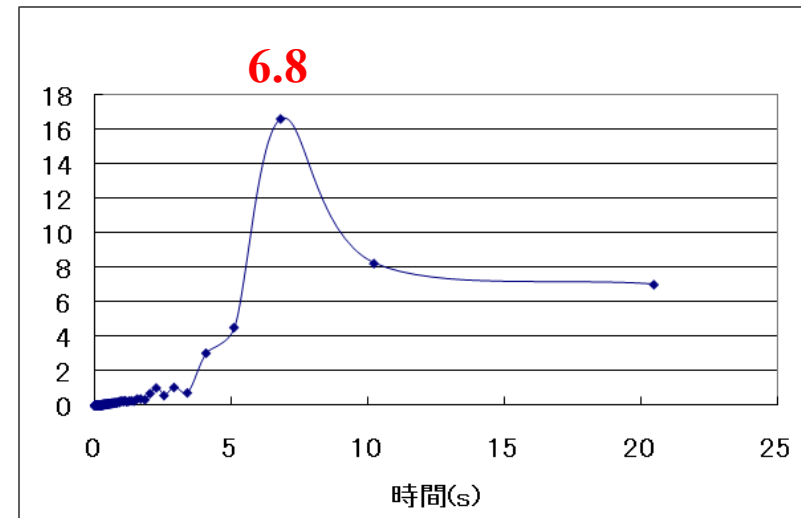


OpenFOAM2.1.0 による  $C_d$  値

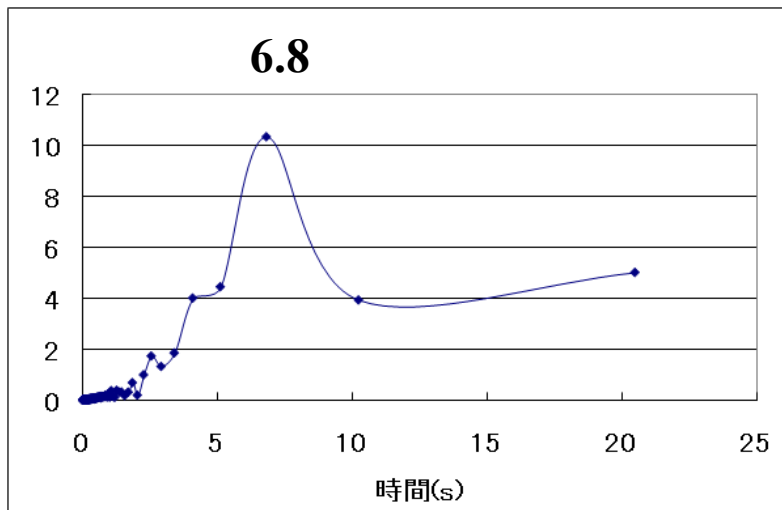
### 4.4.3. 球をすぎる流れ (Re=300, メッシュ2)



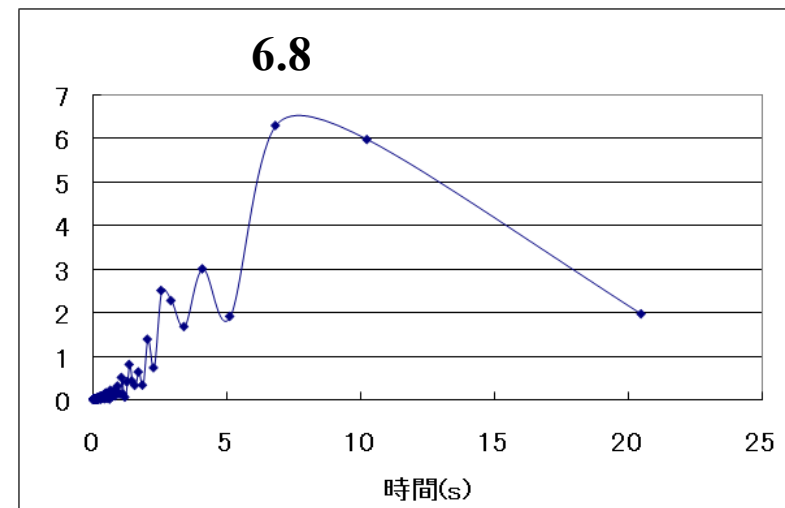
流速各成分の時間変動-位置(3.5 0 0)-



OpenFOAM2.1.0による流速x成分のFFT結果



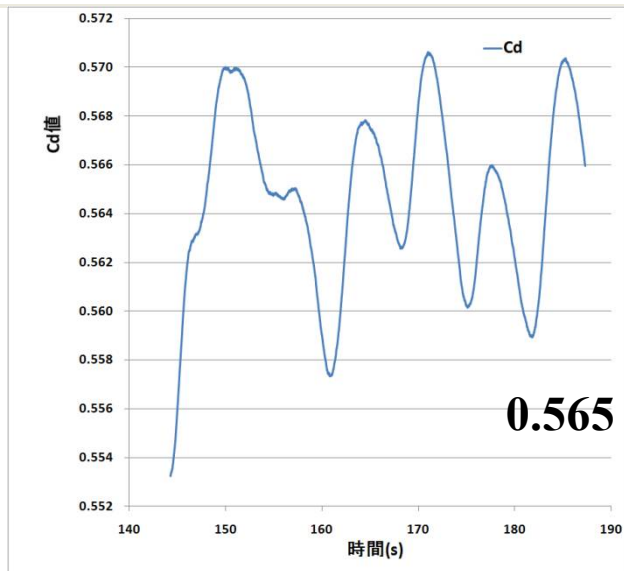
OpenFOAM2.1.0による流速y成分のFFT結果



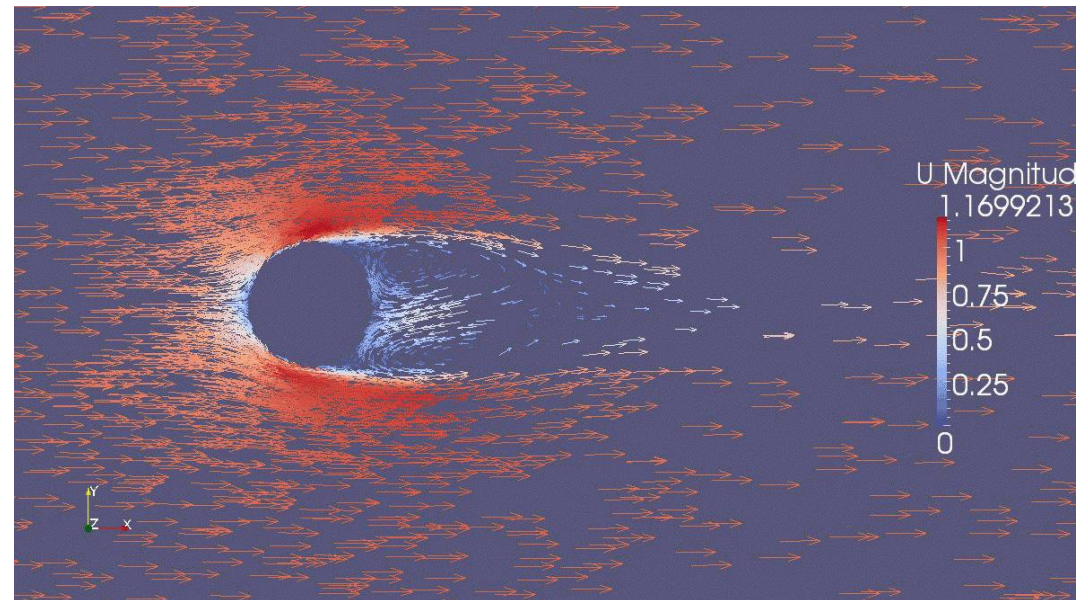
OpenFOAM2.1.0による流速z成分のFFT結果



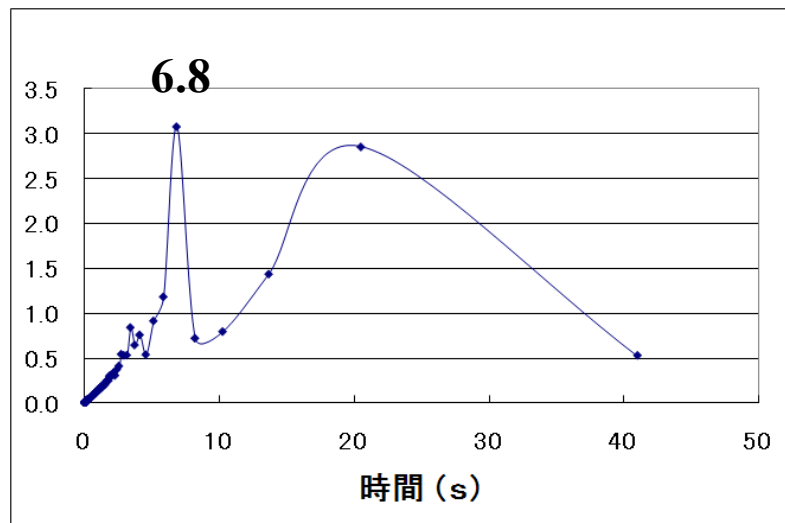
## 4.5.1. 球をすぎる流れ (Re=500, メッシュ2)



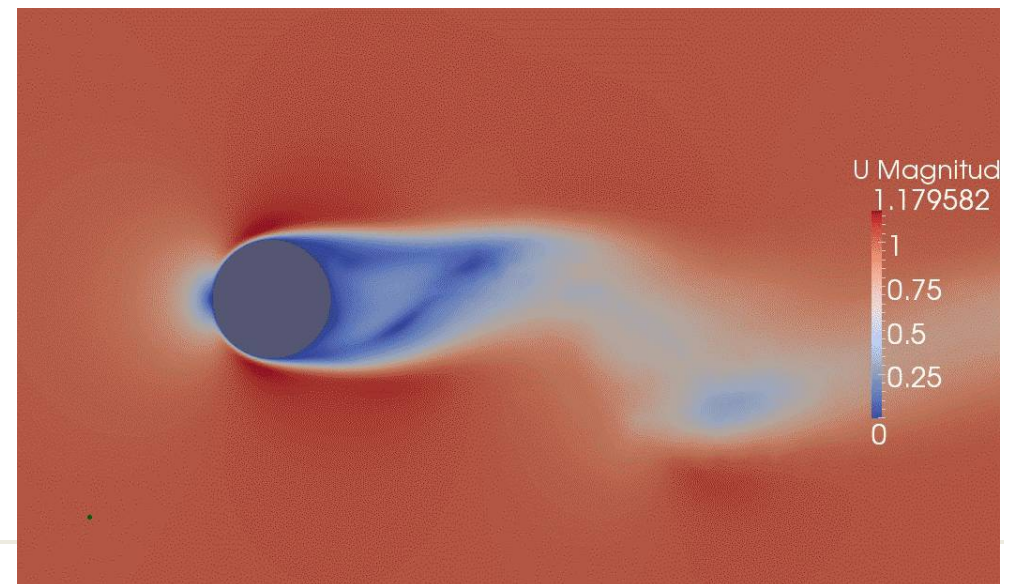
OpenFOAM2.1.1による $C_d$ 値



速度ベクトルの時間変化-Side View-

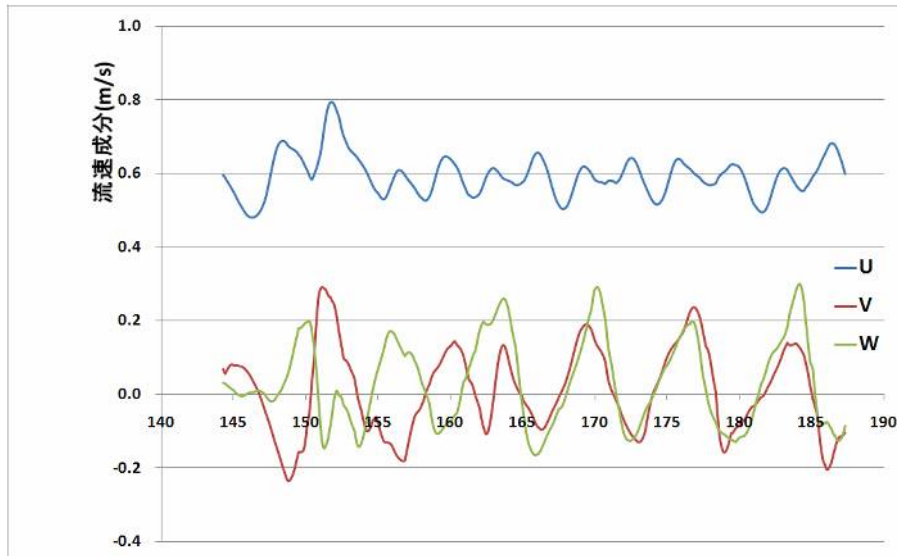


OpenFOAM2.1.1による $C_d$ 値のFFT結果

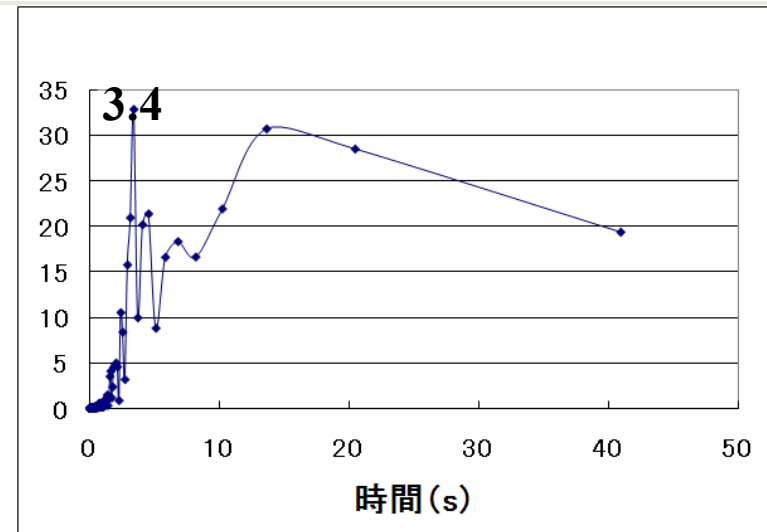


速度コンターの時間変化-Side View-

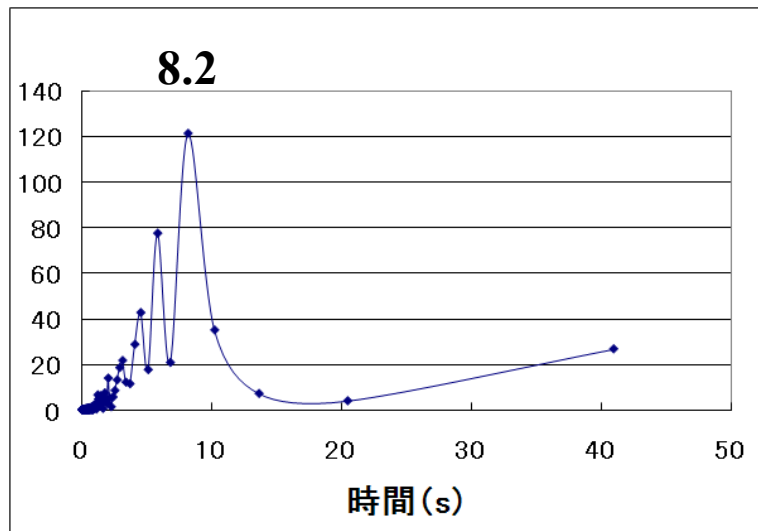
## 4.5.2. 球をすぎる流れ (Re=500, メッシュ2)



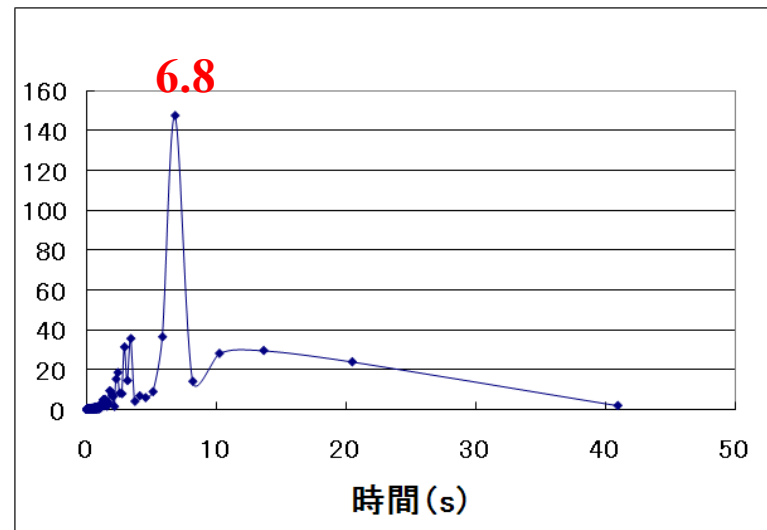
流速各成分の時間変動-位置(3.5 0 0)-



OpenFOAM2.1.1による流速x成分のFFT結果



OpenFOAM2.1.1による流速y成分のFFT結果

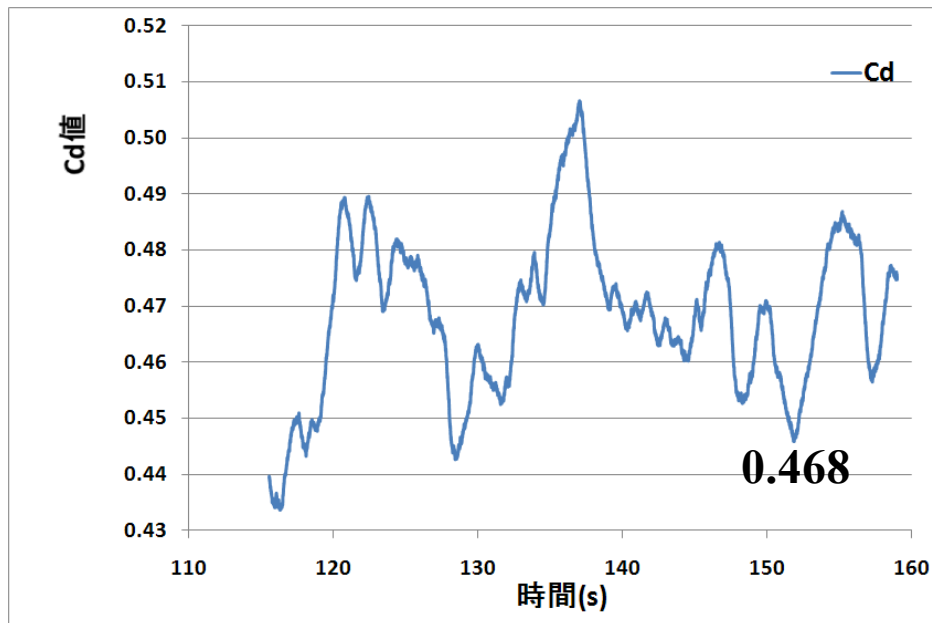


OpenFOAM2.1.1による流速z成分のFFT結果

## 4.6.1. 球をすぎる流れ ( $Re=10^4$ , メッシュ2)

$C_d=0.387$  (FL),  $0.393 \sim 0.438$  (C/E)

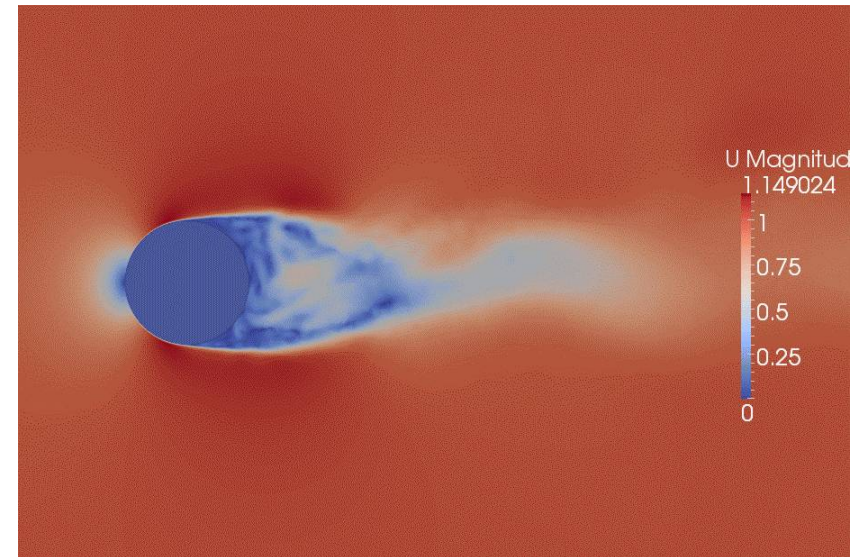
Splart-Allmarasモデル (DES)



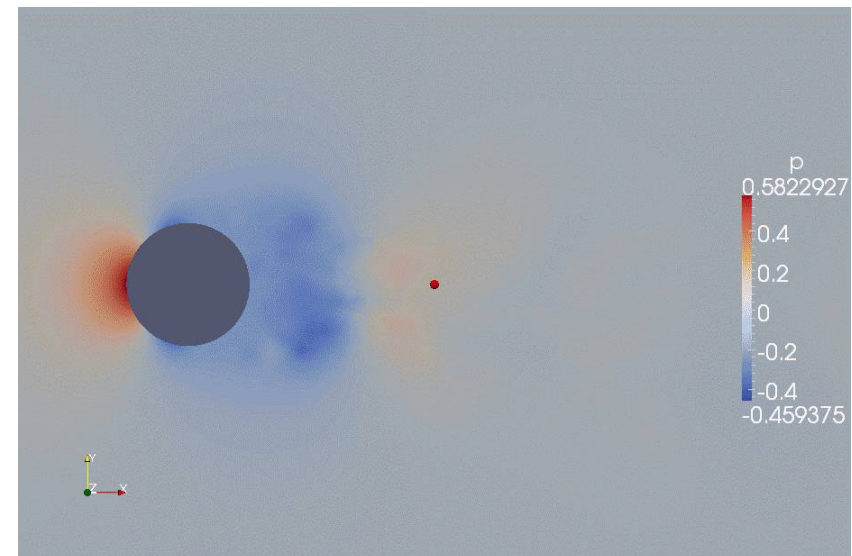
OpenFOAM2.1.0 による  $C_d$  値

時間刻み 0.0005秒 (Xeon X5690)

4並列で1サイクル9秒



流速コンターの時間変化-Side View-



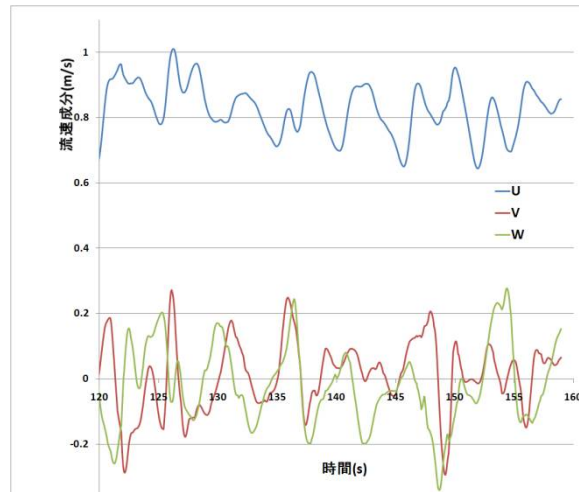
圧力コンターの時間変化-Side View-



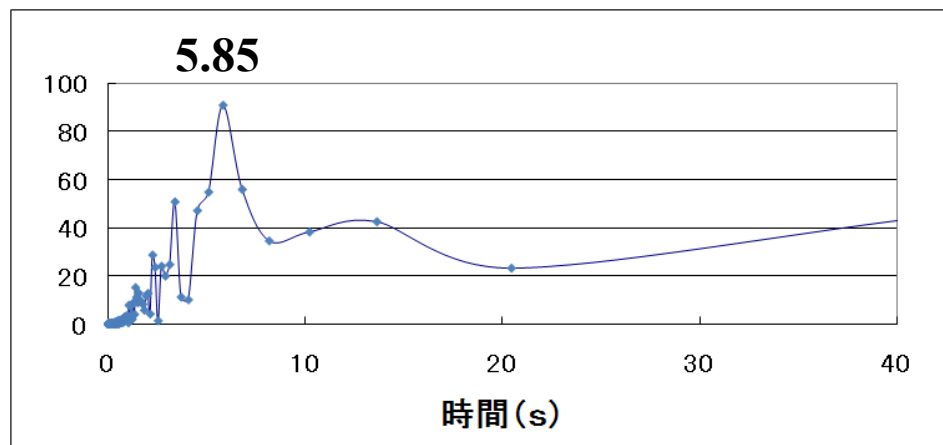
## 4.6.2. 球をすぎる流れ ( $Re=10^4$ , メッシュ2)

$C_d=0.387$  (FL),  $0.393 \sim 0.438$  (C/E)

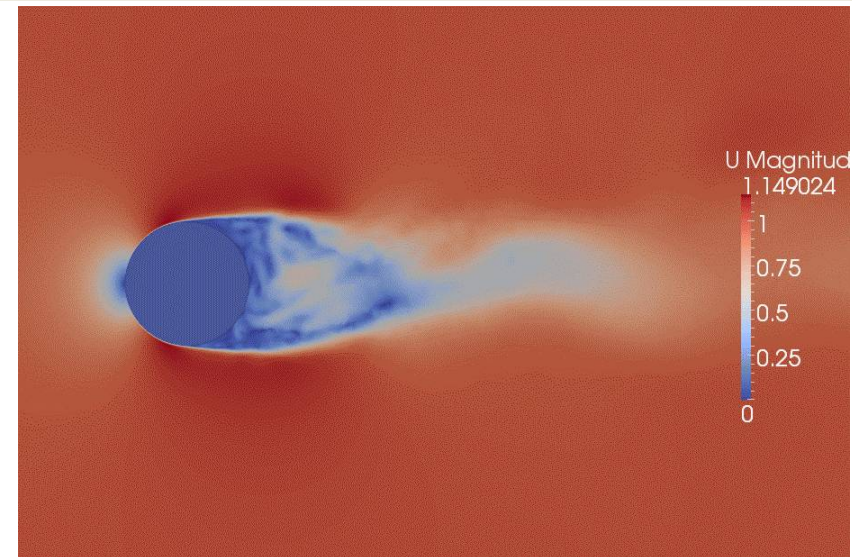
Splart-Allmarasモデル (LES)



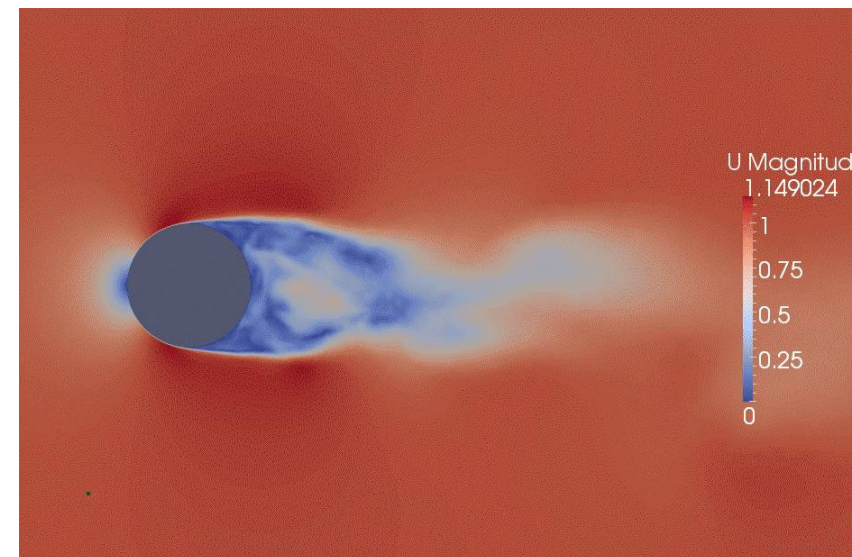
流速各成分の時間変動-位置(3.5 0 0)-



OpenFOAM2.1.0による流速z成分のFFT結果



流速コンターの時間変化-Side View-



流速コンターの時間変化-Top View-



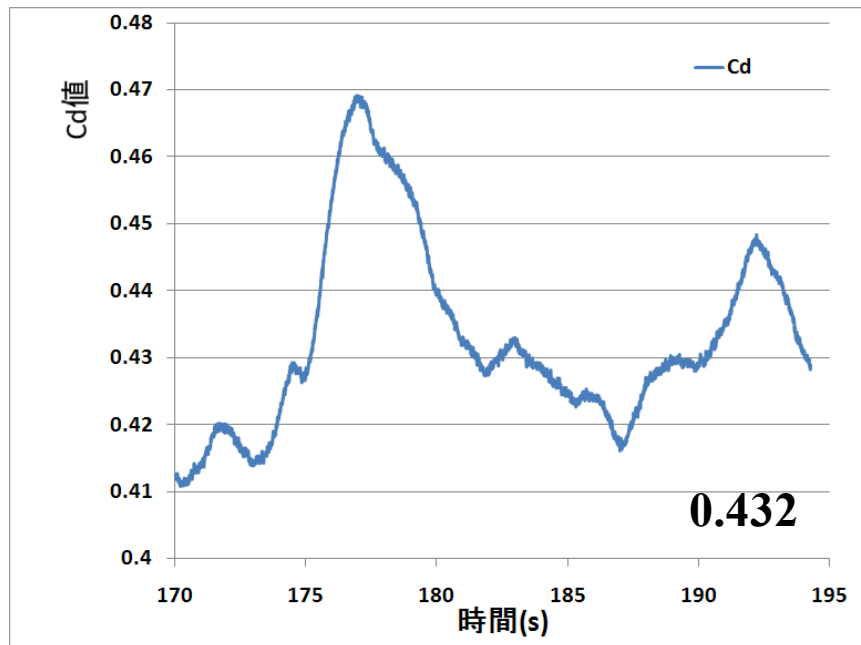
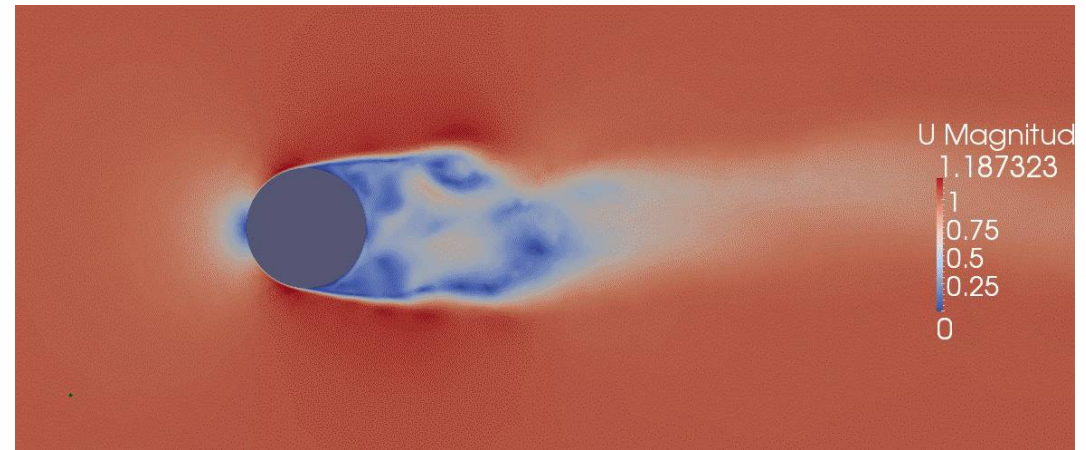
## 4.6.3. 球をすぎる流れ ( $Re=10^4$ , メッシュ2)

$C_d=0.387(F)$ ,  $0.393\sim 0.438(C/E)$

oneEqEddyモデル (LES)

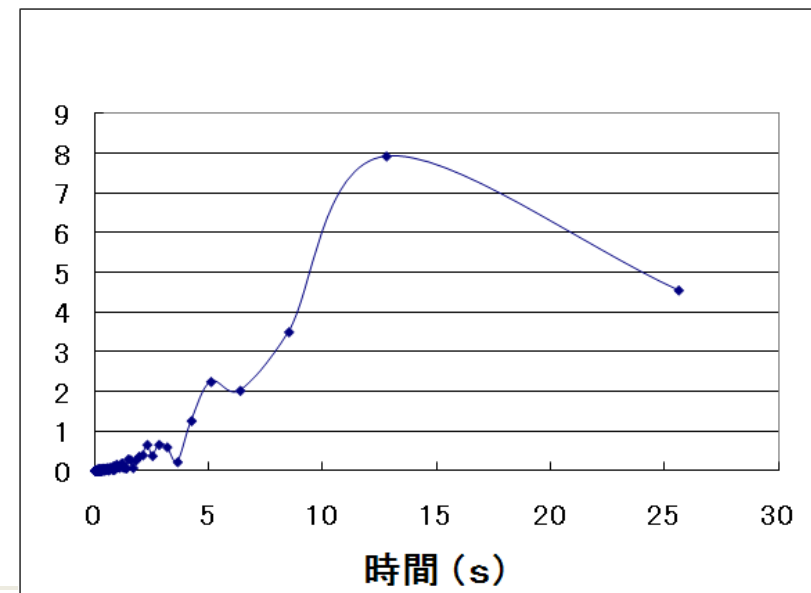
時間刻み 0.0005秒 (Core i7)

6並列で1サイクル4秒



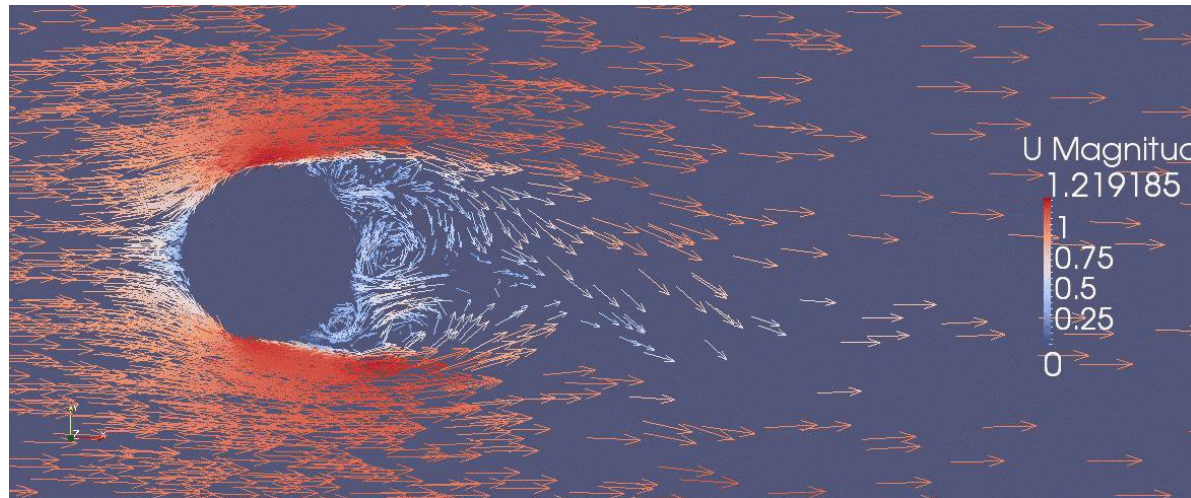
OpenFOAM2.1.1 による  $C_d$  値

流速コンターの時間変化-Side View-

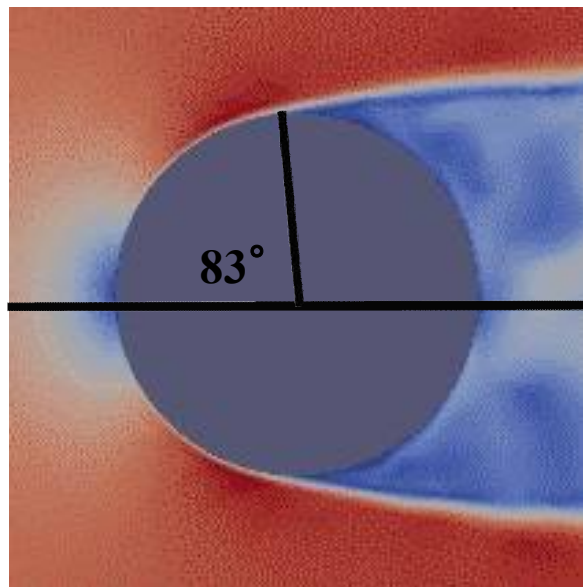


OpenFOAM2.1.1による  $C_d$  値のFFT結果

## 4.6.4. 球をすぎる流れ ( $Re=10^4$ , メッシュ2)



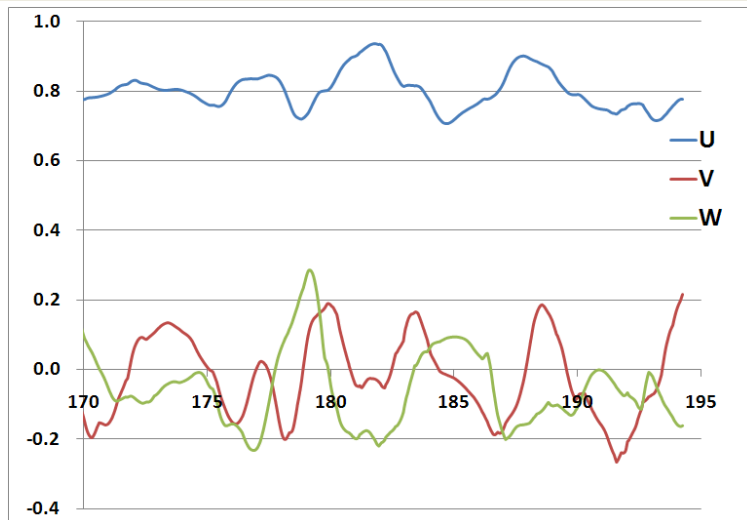
速度ベクトルの時間変化-Side View-



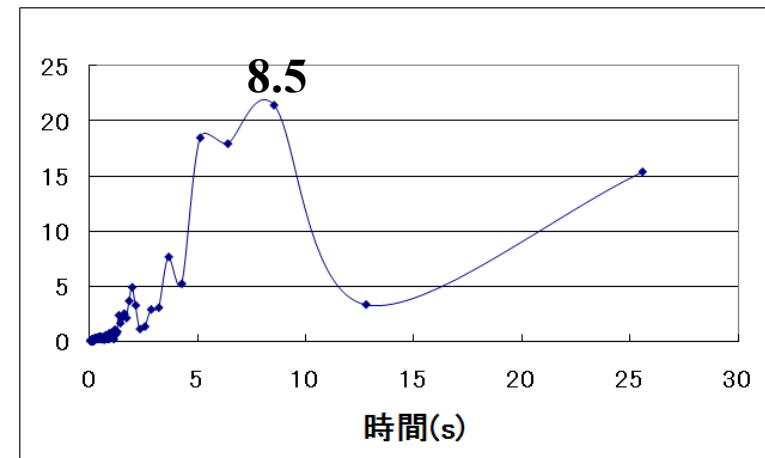
- 左図に示した剥離角は精度の良いものではありません.
- 4/14 勉強会にて, Sさんから”wallShearStress”を教えてくださいました(まだ, トライできてません).

■  $Re=10^4$  ( oneEqEddy )

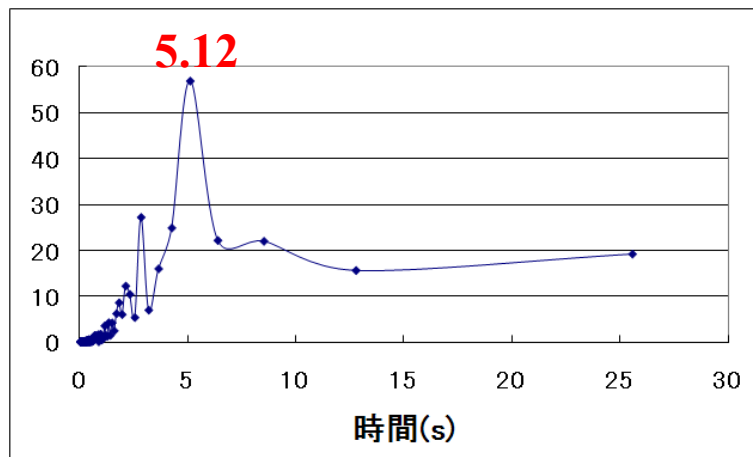
## 4.6.5. 球をすぎる流れ ( $Re=10^4$ , メッシュ2)



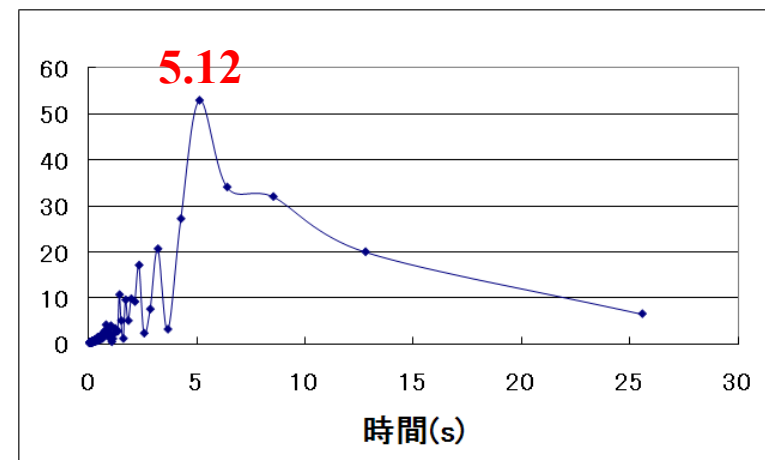
流速各成分の時間変動-位置(3.5 0 0)-



OpenFOAM2.1.1による流速x成分のFFT結果



OpenFOAM2.1.1による流速y成分のFFT結果

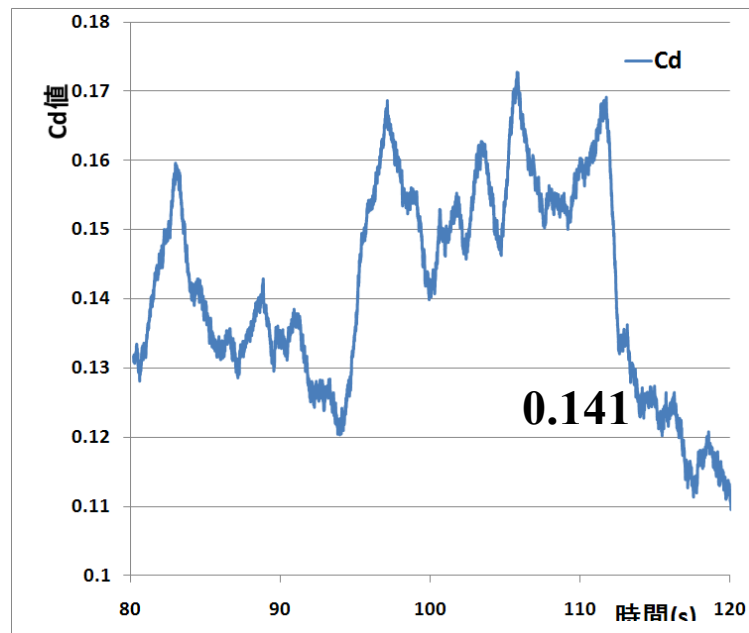


OpenFOAM2.1.1による流速z成分のFFT結果

## 4.7.1. 球をすぎる流れ ( $Re=10^6$ , メッシュ2)

$C_d=0.104$  (F),  $0.08 \sim 0.142$  (C/E)

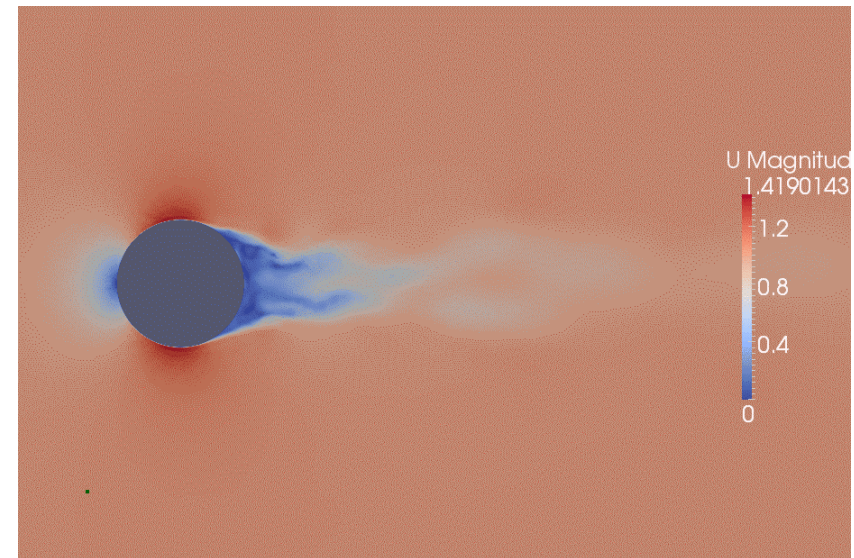
Splart-Allmarasモデル (LES)



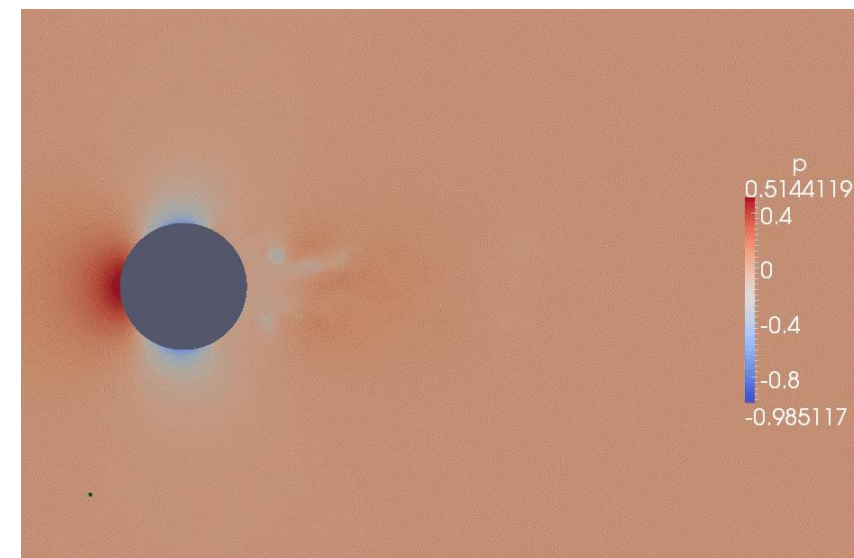
OpenFOAM2.1.0 による  $C_d$  値

時間刻み 0.0004秒 (Xeon X5690)

6並列で1サイクル8秒



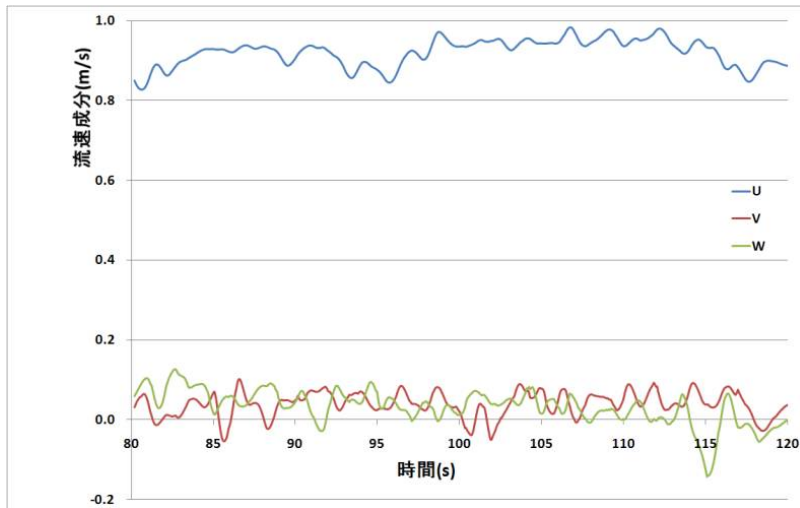
流速コンターの時間変化-Side View-



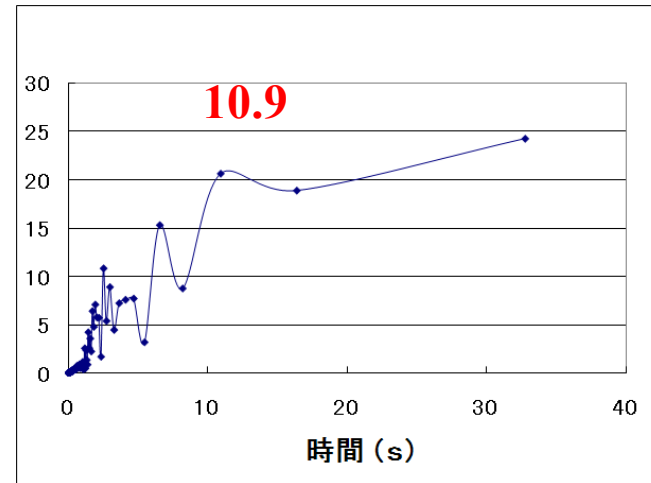
圧力コンターの時間変化-Side View-



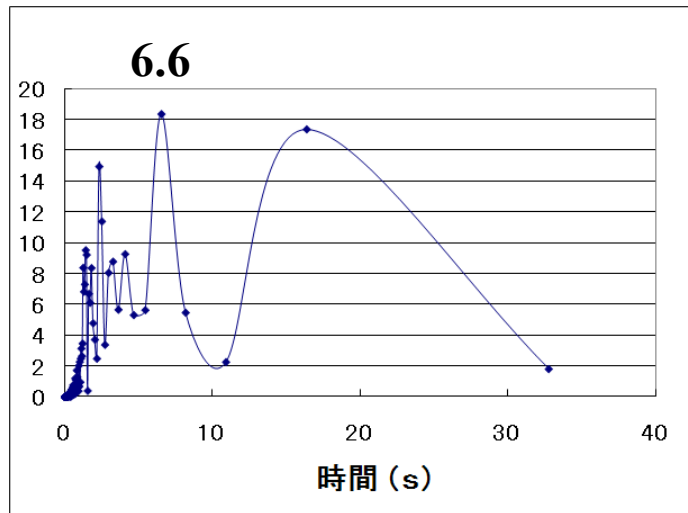
## 4.7.2. 球をすぎる流れ (Re=10<sup>6</sup>, メッシュ2)



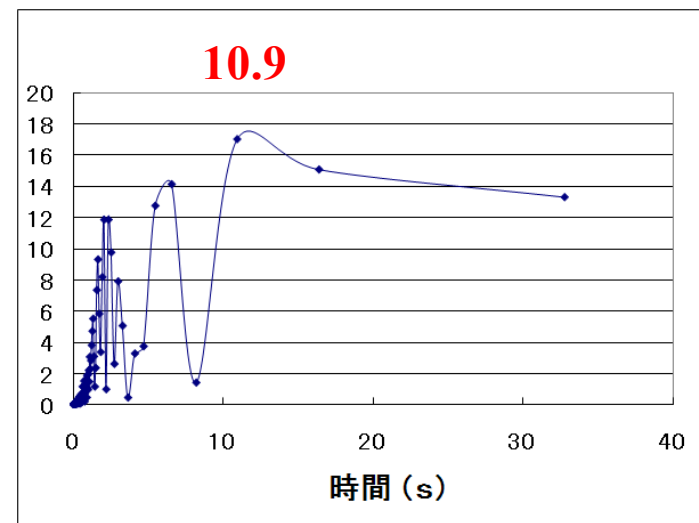
流速各成分の時間変動-位置(3.5 0 0)-



OpenFOAM2.1.0による流速x成分のFFT結果



OpenFOAM2.1.0による流速y成分のFFT結果



OpenFOAM2.1.0による流速z成分のFFT結果

## 4.8.1. $C_d$ 値と振動周期 $T$ のまとめ-球をすぎる流れ-

OpenFOAM2.1.x による  $C_d$  値および周期  $T$  の比較.

$Re$	$C_d(OF)^{*1}$	$C_d(FL)^{*2}$	$C_d(C/E)^{*3}$	$T(OF)$	$T(FL)^{*2}$	$T(C/E)^{*3}$
100	1.091	1.087	1.087-1.096	-	-	-
300	0.658	0.661	0.656-0.671	8.19	7.52	7.30-7.46
500	0.565	—	—	3.4,8.2,6.8(u, v, w)	—	5.98
$10^4$	0.457 <sup>*4</sup>	0.387	0.393-0.438	5.12(u, v), 5.85(w)	5.236	5.128-5.525
	0.432 <sup>*5</sup>	0.444 <sup>*6</sup>	↑	8.5(u), 5.12(v, w)	↑	↑
$10^6$	0.141 <sup>*4</sup>	0.104	0.080-0.142	10.6,6.6,10.6(u,v,w)	20.84	0.77-20

### 注

\*1 OpenFOAMによる解析値.  $Re=100$ 以外は平均値.

\*2 FLUENTによる解析値.

\*3 C/E: 他文献による解析値あるいは実験値.

\*4 Spalart-AllmarasDDESモデル, \*5 oneEqEddyモデル.

\*6 Utah州立大学による解析値.

## 4.8.2. $C_d$ 値と振動周期 $T$ のまとめ-球をすぎる流れ-

OpenFOAM2.1.x による  $C_d$  値および周期  $T$  の比較.

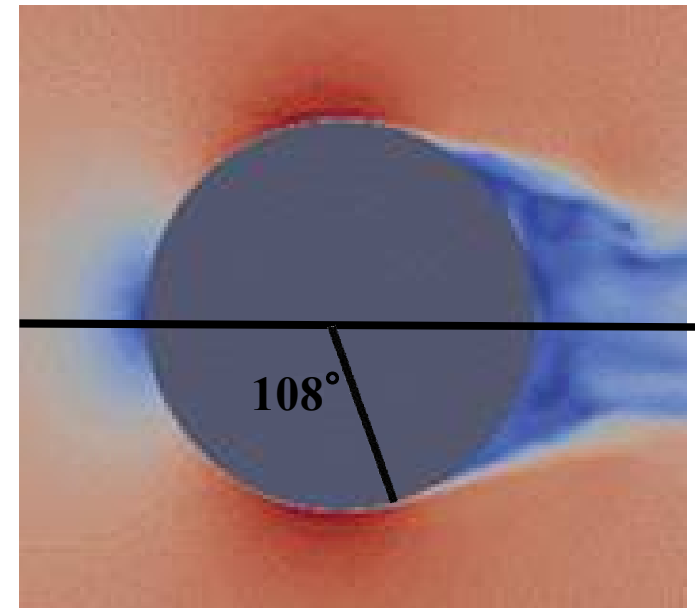
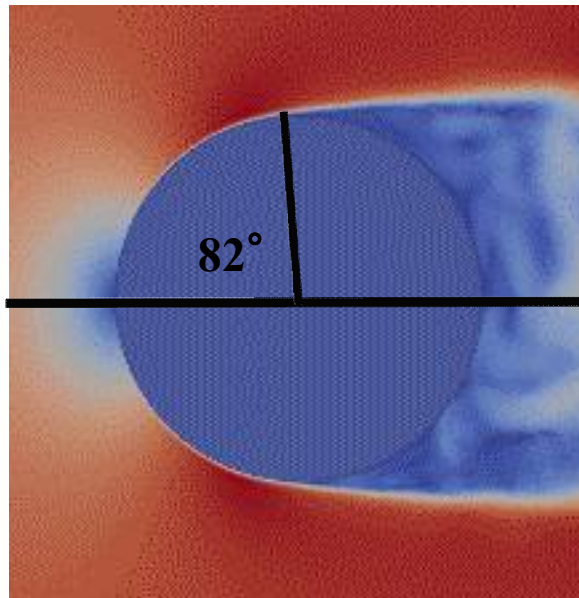
$Re$	$C_d(OF)^{*1}$	$C_d(FL)^{*2}$	$C_d(C/E)^{*3}$	$T(OF)$	$T(FL)^{*2}$	$T(C/E)^{*3}$
100	1.091	1.087	1.087-1.096	-	-	-
300	0.658	0.661	0.656-0.671	8.19	7.52	7.30-7.46
500	0.565	—	—	3.4,8.2,6.8(u, v, w)	—	5.98
10 <sup>4</sup>	0.457 <sup>*4</sup>	0.387	0.393-0.438	5.12(u, v), 5.85(w)	5.236	5.128-5.525
	0.432 <sup>*5</sup>	0.444 <sup>*6</sup>	↑	8.5(u), 5.12(v, w)	↑	↑
10 <sup>6</sup>	0.141 <sup>*4</sup>	0.104	0.080-0.142	10.6,6.6,10.6(u,v,w)	20.84	0.77-20

- $Re=100$ , 粗いメッシュであるが  $C_d$  値は良く一致した.
- $Re=300$ , 50秒間の解析で振幅は小さいが周期は良く一致した.
- $Re=500$ , wakeは生じており実測と一致した. 周期は実測より大きめであった.
- $Re=10^4$ , 流速z成分が実測と良く一致した (Spalart-AllmarasDDESモデル).
- $Re=10^4$ , 流速y&z成分が実測と良く一致した (oneEqEddyモデル).
- $Re=10^6$ ,  $C_d$  値は実測の範囲内である (Spalart-AllmarasDDESモデル).

### 4.8.3. 剥離角度 $\theta$ のまとめ-球をすぎる流れ-

OpenFOAM2.1.x による剥離角度 $\theta$ の比較.

$Re$	乱流モデル	$\theta$ (OF) <sup>*1</sup>	$\theta$ (FL) <sup>*2</sup>	$\theta$ (C/E) <sup>*3</sup>
$10^4$	Spalart-AllmarasDDES	$82^\circ$	$88.0 \pm 1^\circ$	$85.0 \pm 1^\circ, 86.5 \pm 1^\circ$
	oneEqEddy	$83^\circ$	↑	↑
$10^6$	Spalart-AllmarasDDES	$108^\circ$	$121.0 \pm 2^\circ$	$100^\circ, 115^\circ, 120^\circ, 120.0 \pm 2^\circ$



■  $Re=10^4$  (Spalart-AllmarasDDES)

■  $Re=10^6$  (Spalart-AllmarasDDES)