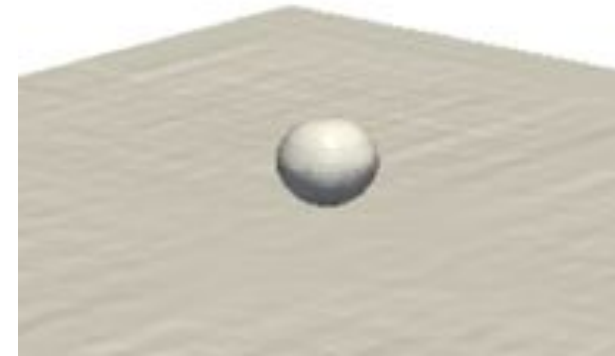
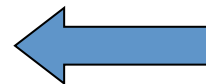

ミルククラウンを解析で実現する

～アダプティブメッシュ～

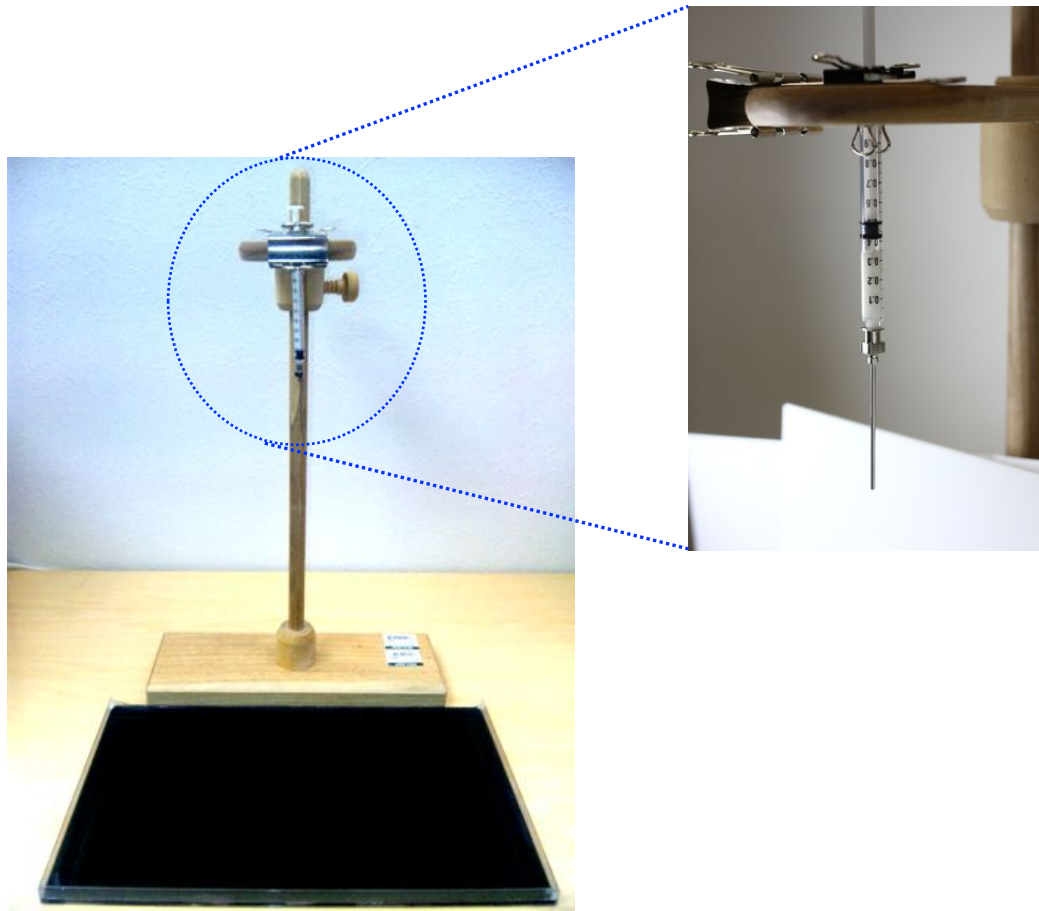
勉強会@関西幹事
富原 大介

目的

- (1) ミルククラウンの実験を行い、解析をするためのデータを集める
- (2) 基準となる実験結果に対して、解析で合わせこみを行う
- (3) 他の実験結果に関して、パラメータを変更した解析結果と一致するか確かめる



実験装置



実験費用一覧

撮影用三脚	34,931
カメラ用タイマー	8,908
照明×2	5,988

化学実験器具	5,817
その他	4,079

ハイスピードカメラ	
レンタル代	8,430
延滞料金	3,372

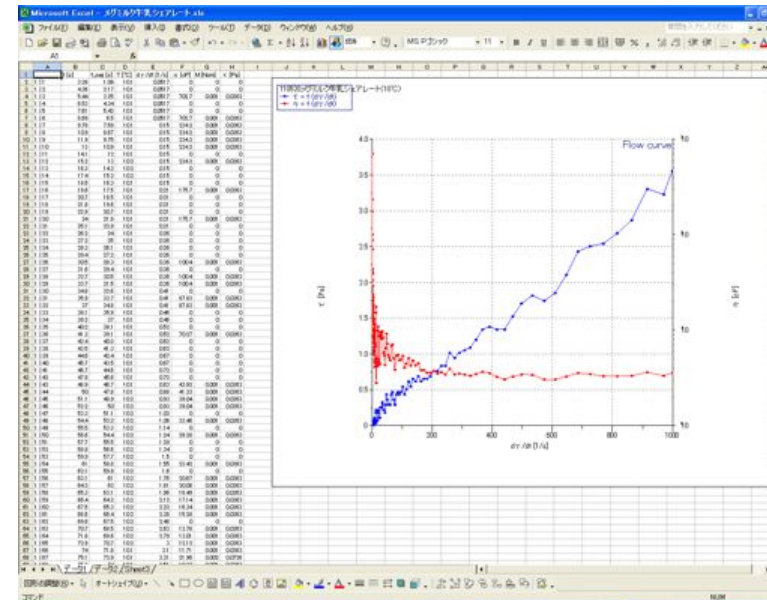
合計(円)	71,525
-------	--------

牛乳



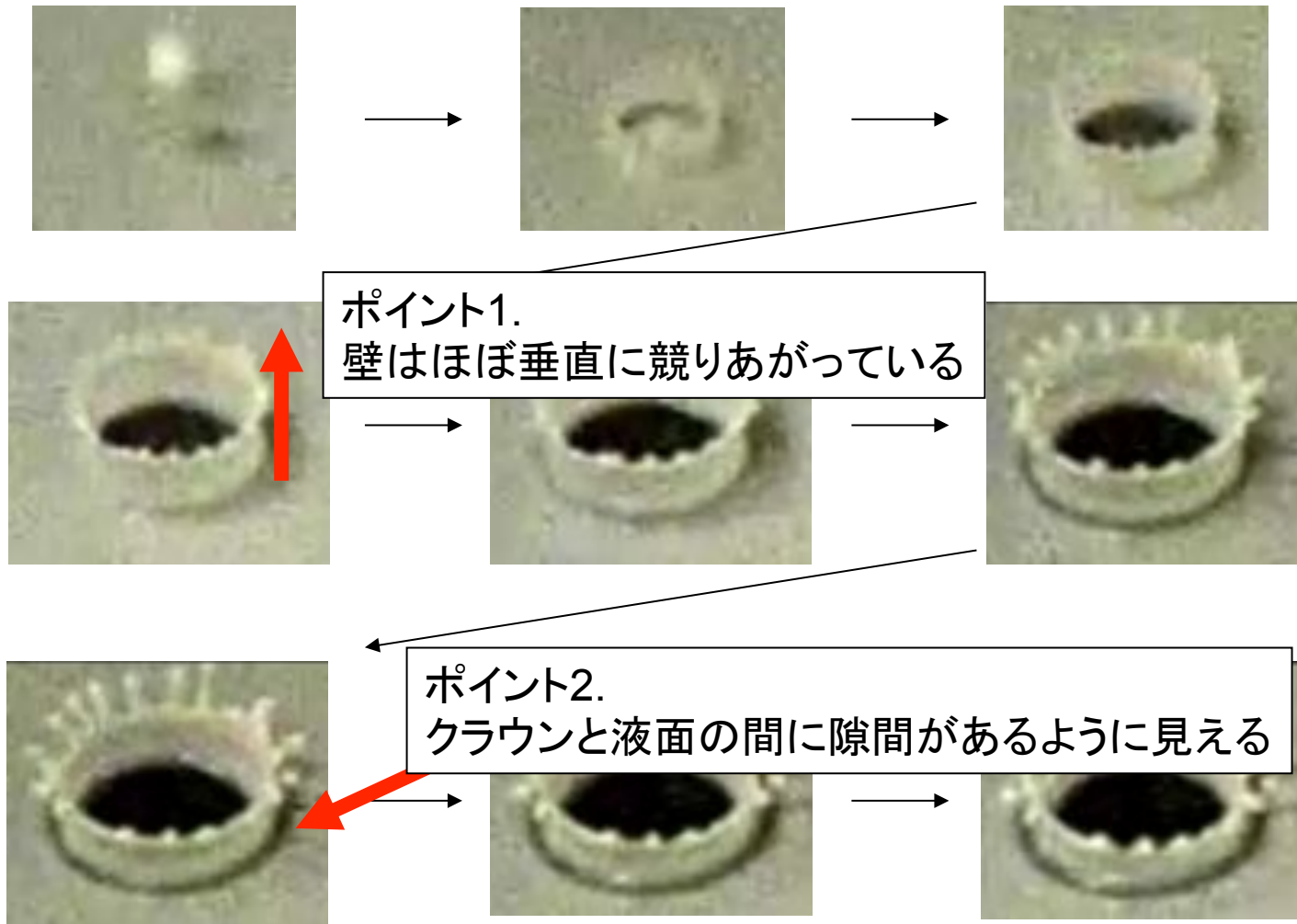
雪印のカスタマーセンターに
メグミルクの物性値を問い合わせたところ、
なんとわざわざ実験したデータを送ってくれました。

ありがとうございました。
牛乳はメグミルクが一番おいしいです！

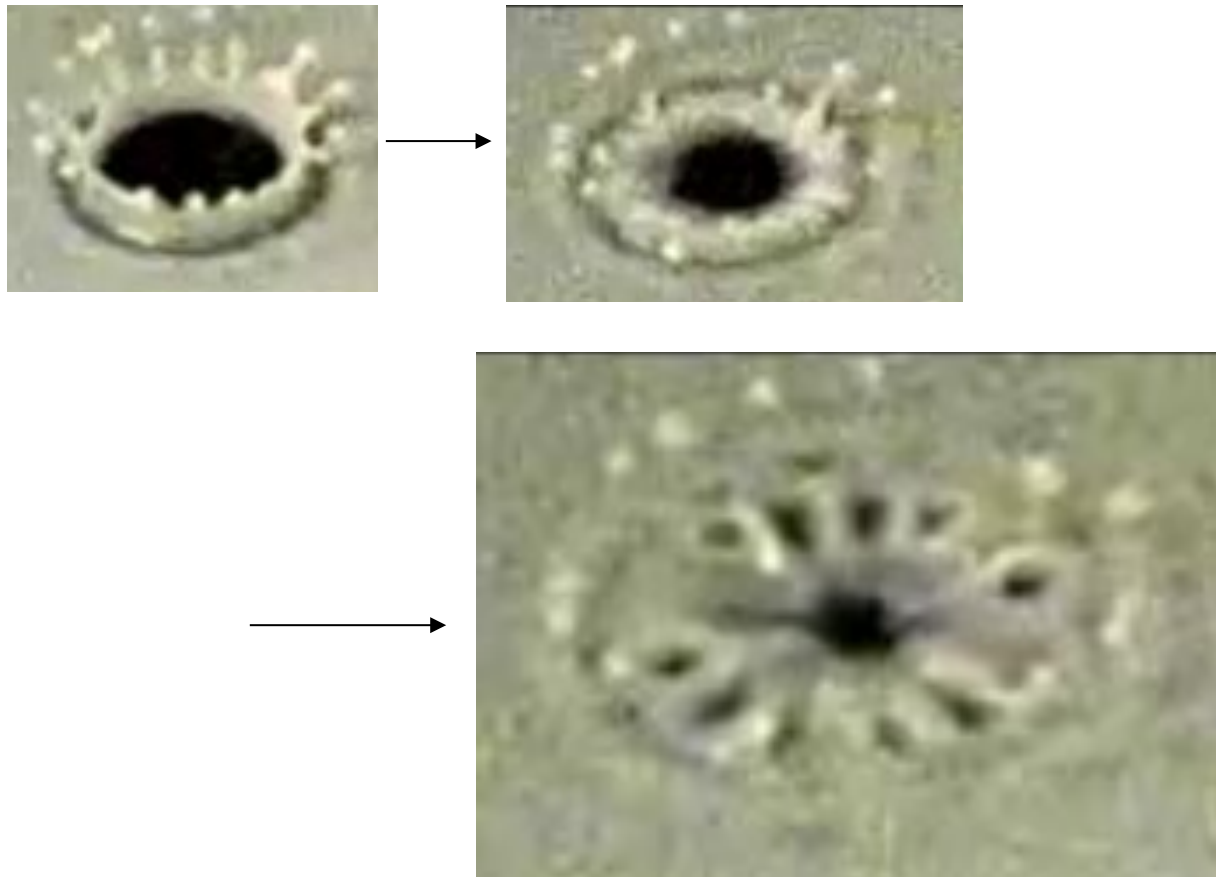


送ってくれたエクセル

ミルククラウンが形成されていく様子(基準ケース)

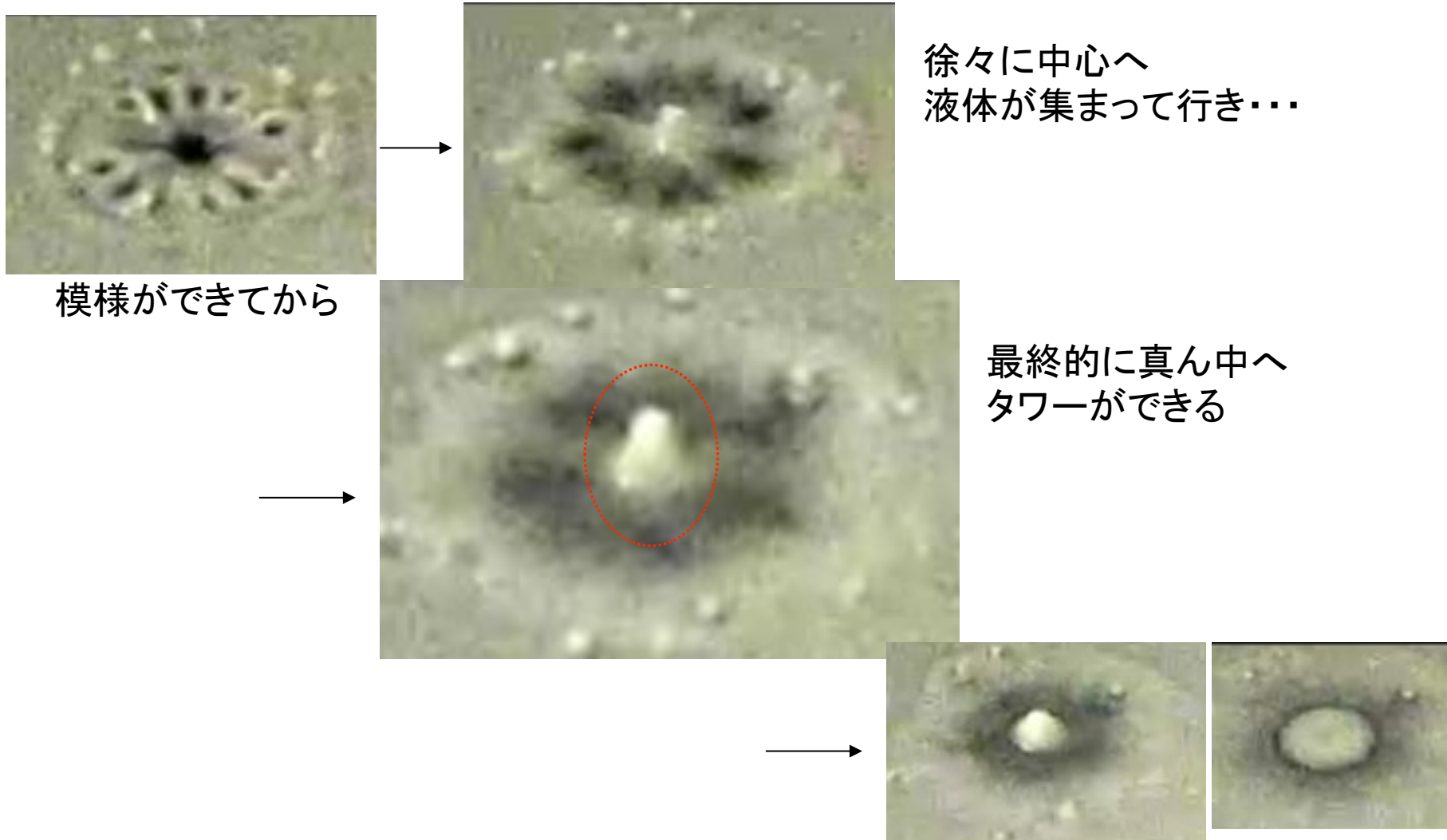


ミルククラウンがくずれていく様子(1)



液面に規則的な模様が形成される

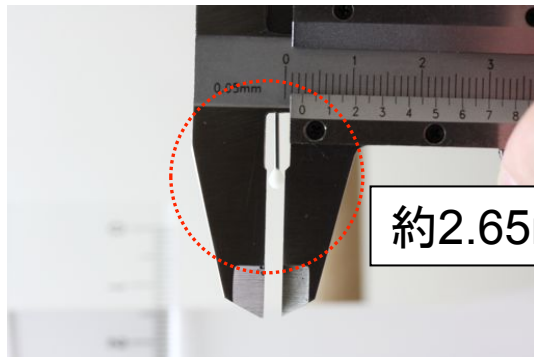
ミルククラウンがくずれていく様子(2)



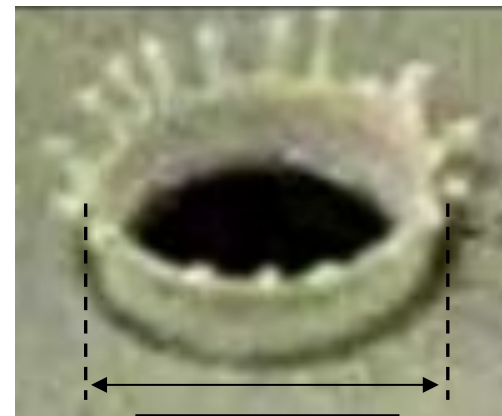
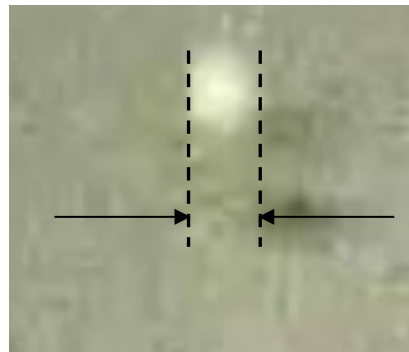
実験でのポイント

- ① クラウンの壁はほぼ垂直に競りあがっている
- ② クラウンは周りの液体とは分離しているように見える
(すきまがある)
- ③ クラウンが崩れたあと、液面に規則的な文様が形成される
- ④ 最後に、牛乳は周りの液体に反発して中央に集まりタワーを形成する

ミルククラウンの大きさ(基準ケース)

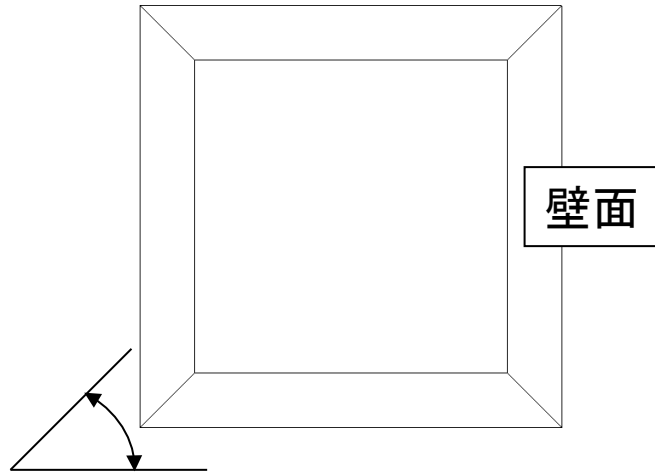


7.68 cm 8.62 cm 0.94 cm
14.64 cm 19.43 cm 4.79 cm



解析

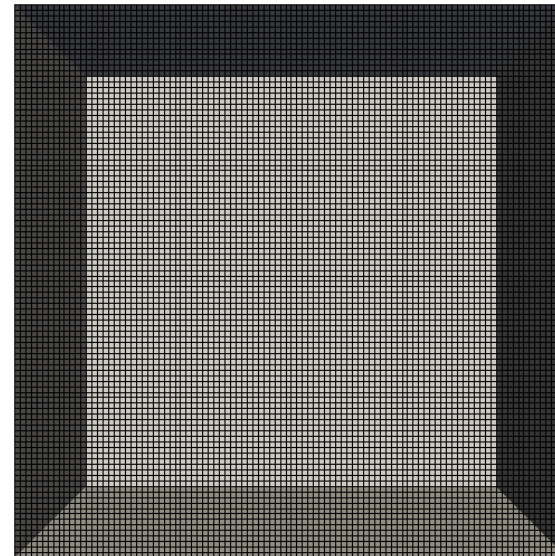
上面(自由流入流出条件)



90°対称

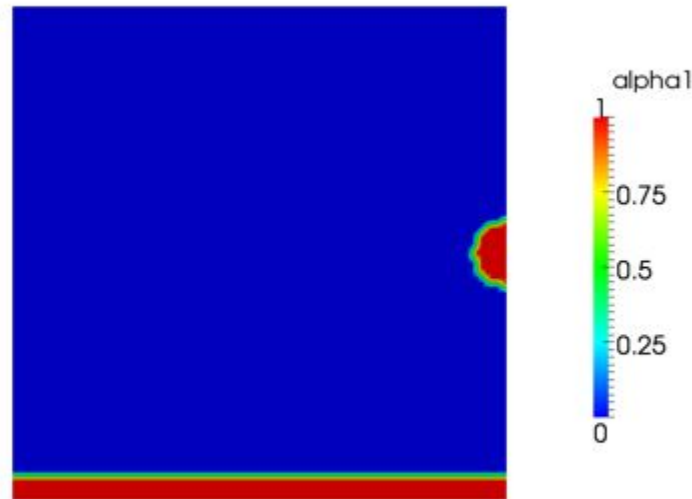
90度対称条件
外側、下面は壁面(すべりなし)条件
上面は自由流入流出条件

2cm立方体
xyz100分割(1メッシュあたり0.2mm)
1,000,000要素

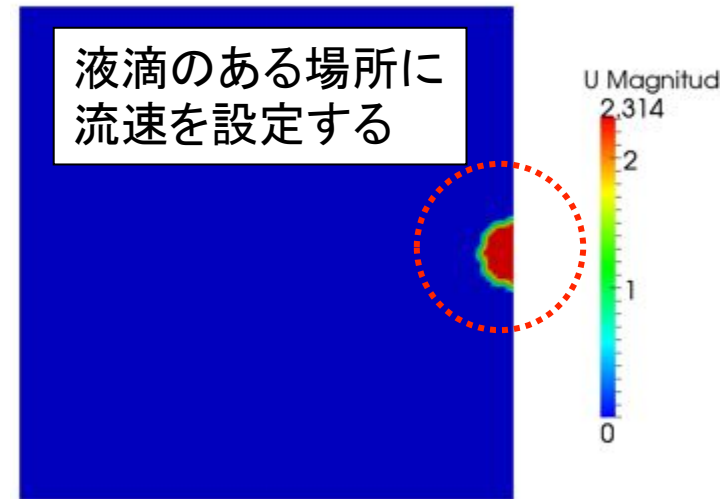


解析水準

気液界面(初期条件)



流速(初期条件)



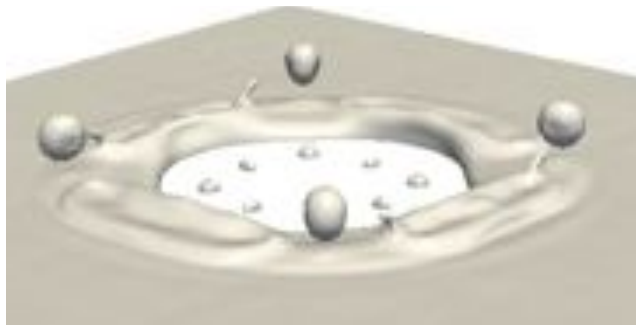
水面へ落ちる直前の液滴の落下速度を理論値から計算し、液滴にその速度を設定することで初期条件とした。

解析水準

番号	初速度 [m/s]	(高さ換算 [mm])	液滴直径 [mm]	液深 [mm]	動粘性係数 [m ² /s]	密度[kg/ m ³]	表面張力 [N/m]	備考
a-001	2.314	40.00	2.65	1	3.385E-06	1031	0.05	
a-002	2.314	40.00	2.65	0.5	3.385E-06	1031	0.05	
a-003	2.314	40.00	2.65	0.25	3.385E-06	1031	0.05	

クーラン数		液相		気相	
maxCo	maxAlphaCo	動粘性係数 [m ² /s]	密度[kg/ m ³]	動粘性係数 [m ² /s]	密度[kg/m ³]
0.3	0.3	3.385E-06	1031	1.512E-05	1.205

液深0.5mm詳細



水玉らしきものはできている



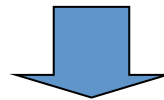
ここまでのまとめ

液深1.0mmと0.5mmを比べると、
1.0mmには水玉がなく、0.5mmには水玉(らしきもの)があり
液深による違いを再現できている、と言えなくもない？

ただし、クラウン崩壊時に生じるタワーは再現できていない
垂直に壁面が上昇する様子も捉えきれしていない

メッシュ数が足りていない！

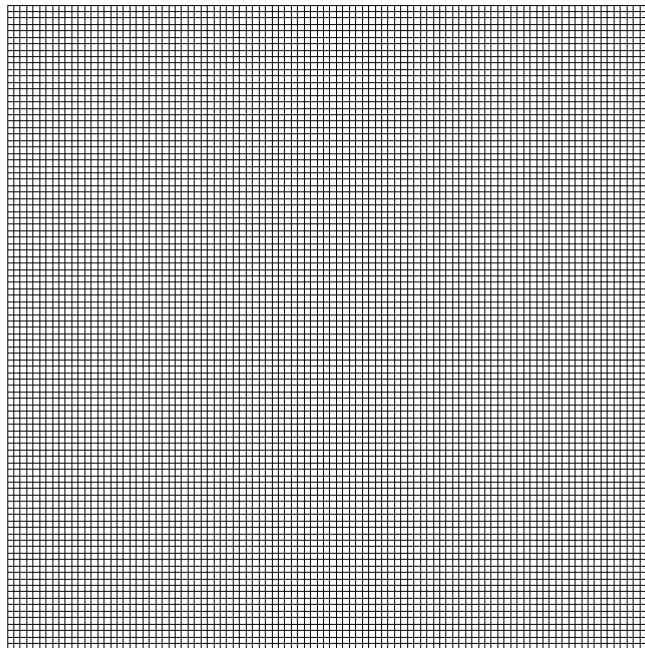
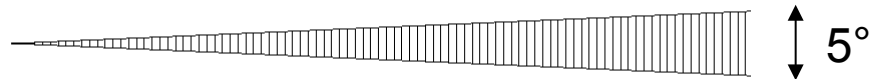
さらに、現象は円筒座標系に沿って生じていると考えられるが、
メッシュを直交座標系に沿って切っているため、
メッシュに影響されて解析結果に不具合が生じているように見える



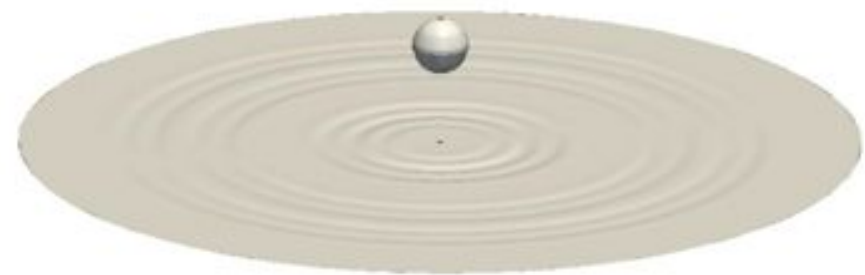
とりあえず、「クラウン」を作るのは次回しにして、
2次元軸対象モデルで解析を行う

2次元軸対象モデル

周期対称条件(2次元近似)

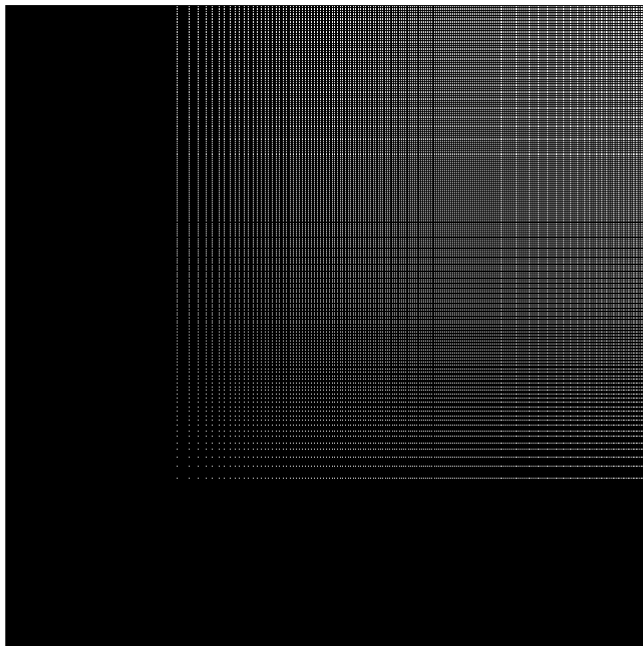
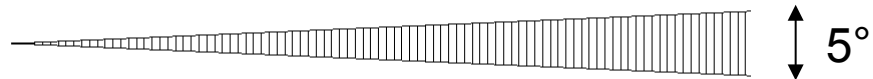


まずは軸対象モデルにした影響をみるため
100×100メッシュ(3次元モデルと同じ)で
解析を試みた。
(メッシュ数1/100)



2次元軸対象モデル(500×500メッシュ)

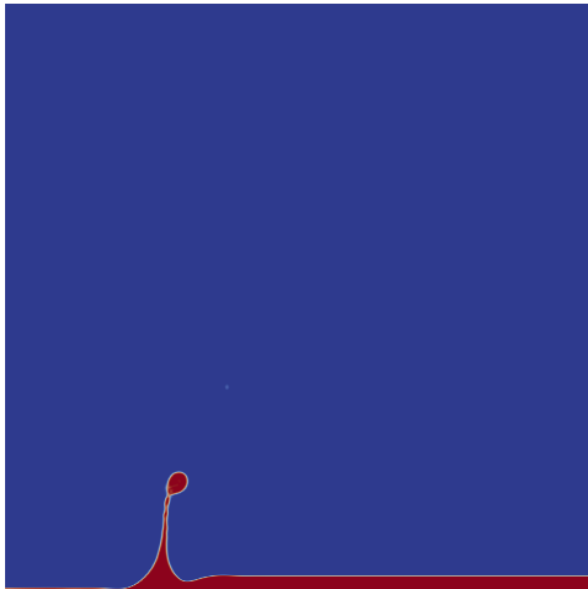
周期対称条件(2次元近似)



メッシュを縦横5倍(500×500)にして
解析を実施(1要素あたり0.04mm以下)

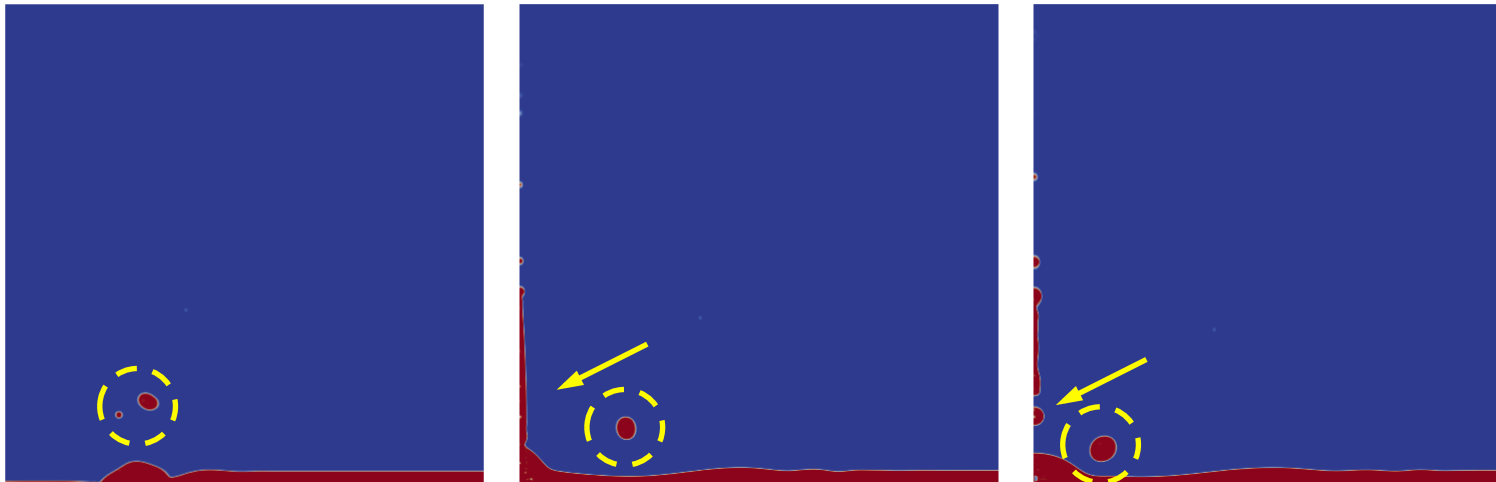


2次元軸対象モデルまとめ_1



- ① メッシュを細かくすることで、クラウンの壁はほぼ垂直になった
- ② クラウンと周りの液体との隙間(くぼみ)らしきものも確認することができた

2次元軸対象モデルまとめ_2



- ① クラウンの水 droplet が下に落ちていかず、中央に引き寄せられる
- ② クラウンの水 droplet が落下する前に、すでに液体が中央に戻ってきている

軸対称のため、水滴は輪と考えられる。

→輪が表面張力でまとまろうとする力が働くために中央へ引き寄せられる???

落下が遅い(または戻るのが早い)のは計算がうまくいっていないから???

アダプティブメッシュの検討

3次元モデルでメッシュ数をさらに増やすために、
アダプティブメッシュを検討する。(最初の90度モデルで100万要素)

アダプティブメッシュとは・・・

解適合格子法。計算結果を元に格子点分布(メッシュ分割)を
最適化しながら計算する方法。

r法やh法、p法などがあるが、今回問題とするのは局所的に
メッシュ数を追加・削除するh法。

OpenFoamでは移動とトポロジ変化を伴う有限体積メッシュのための
ライブラリとして「dynamicFvMesh」が用意されており、
ソルバ名に「Dy」とついているものは最初から利用することができる。

interFoam(VOF法ソルバ) → interDyFoam(VOF法+dynamicFvMesh)

今回はdynamicFvMeshの機能の一つである、
「dynamicRefineFvMesh」を設定する。

dynamicMeshDictの設定

constantディレクトリにdynamicMeshDictを設置して以下の項目を設定する。
(interDyFoamのチュートリアルから元をコピーする)

```
// How often to refine
refineInterval 1;

// Field to be refinement on
field alpha1;

// Refine field inbetween lower..upper
lowerRefineLevel 0.001;
upperRefineLevel 0.999;

// If value < unrefineLevel unrefine
unrefineLevel 10;

// Have slower than 2:1 refinement
nBufferLayers 1;

// Refine cells only up to maxRefinement levels
maxRefinement 1;//2;

// Stop refinement if maxCells reached
maxCells 2225000;//nCells=222500

// Flux field and corresponding velocity field. Fluxes
on changed

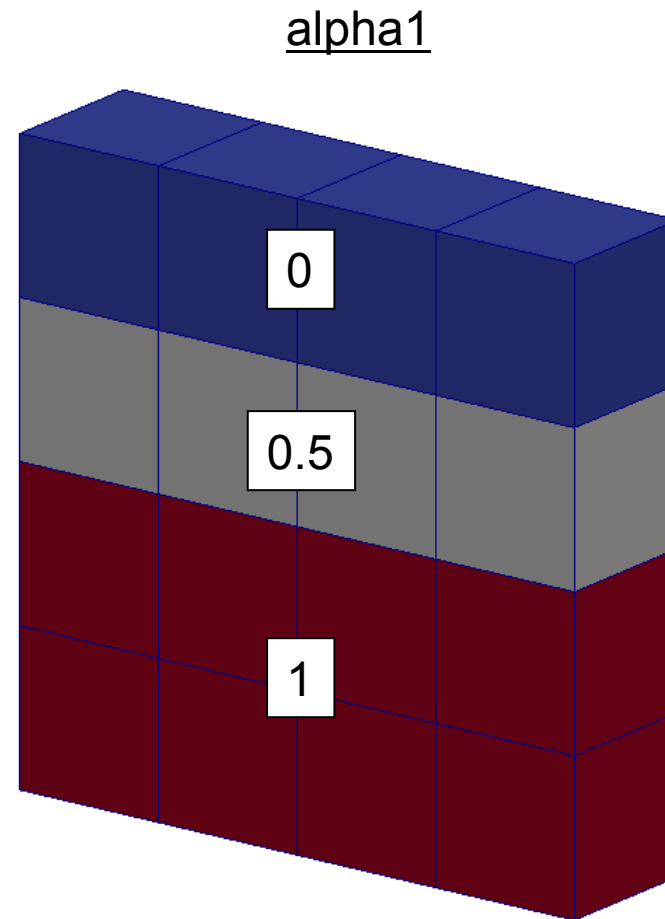
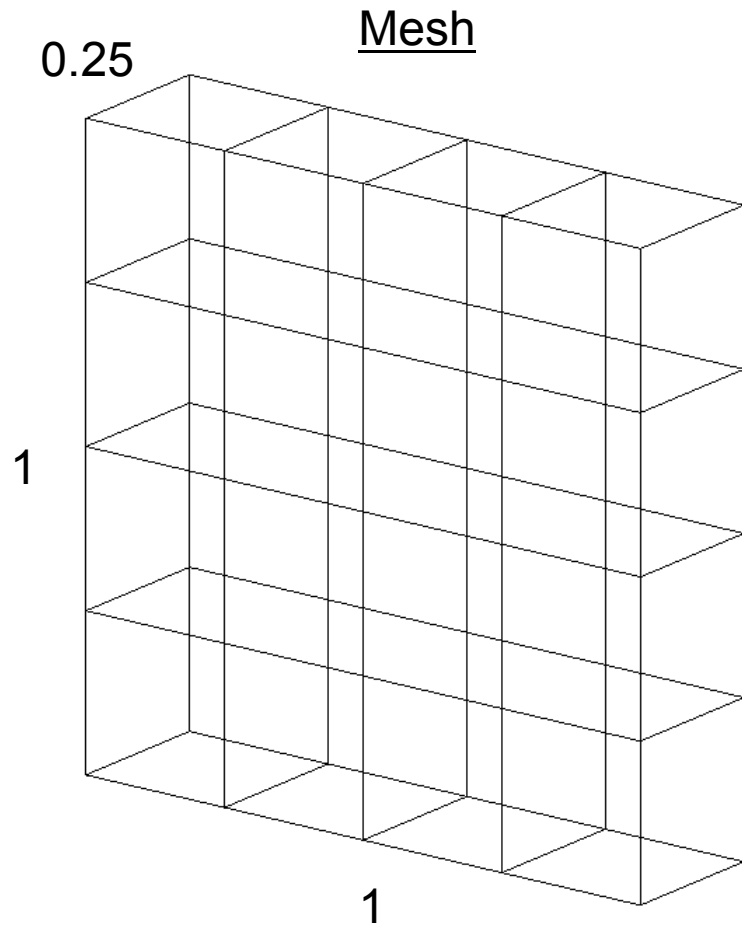
// faces get recalculated by interpolating the
velocity.
correctFluxes
(
    (
        phi
        U
    )
);

// Write the refinement level as a volScalarField
dumpLevel true;
```

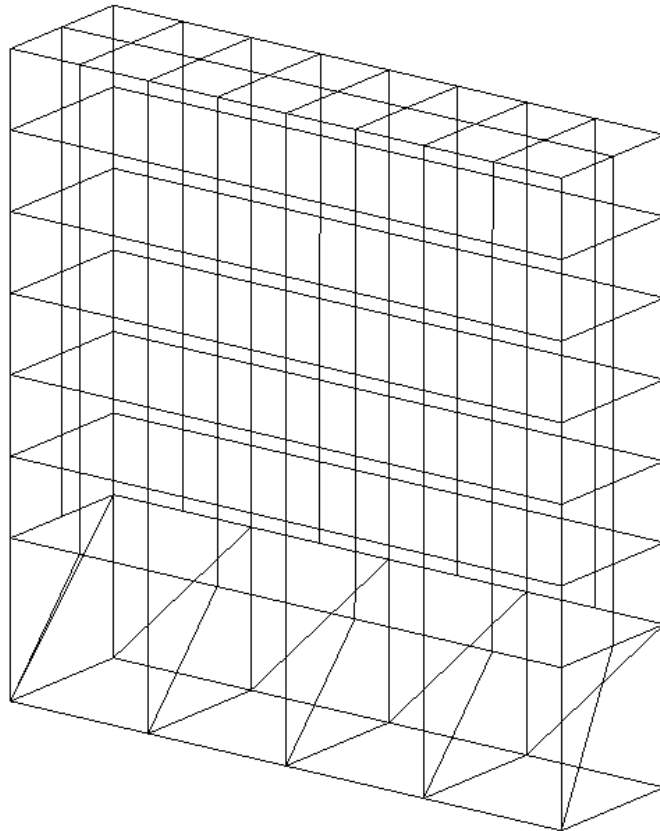
現段階でわかっているできないこと

- ・ヘキサ(6面体)しか対応していない
→プリズム(三角柱)やテトラ(四面体)はNG
- ・「empty」パッチに対応していない。
→2次元近似は「empty」の代わりに「symmetryPlane」を用いるしかない

アダプティブメッシュ例題



アダプティブメッシュ例題



分割 (Refine) された領域

paraviewの表示がおかしい？

アダプティブメッシュ例題

note "nPoints:199 nCells:100 nFaces:381 nInternalFaces:231";

points					faces			owner		cellLevel		refinementHistory ※108=(最終セル数100)-(Lv. 0のセル数4)+(Lv. 1のセル数12)			
number	points			pointLevel	number	faces	owner	number	cellLevel	number	visibleCells	number	splitCells		
計199	x	y	z		計381			計100		計100		計108			
0	0	0	0	0	5(1 6 16 62 11)	0	0	0	0	0	-1	0	1	0(0)	
1	0.25	0	0	0	14(10 71 144 72)	0	1	0	1	0	-1	1	-1	8(0 2 3 4 5 6 7 8)	
2	0.5	0	0	0	24(11 62 144 71)	0	2	0	2	0	-1	2	1	0(0)	
3	0.75	0	0	0	34(15 72 144 82)	0	3	0	3	0	-1	3	1	0(0)	
4	1	0	0	0	44(16 82 144 62)	0	4	1	4	1	0	4	0	4(1 0)	
5	0	0.25	0	0	55(2 7 17 63 12)	1	5	1	5	1	9	5	1	0(0)	
6	0.25	0.25	0	0	64(11 74 145 62)	1	6	1	6	1	18	6	1	8(0)	
7	0.5	0.25	0	0	74(12 63 145 74)	1	7	1	7	1	27	7	1	0(-1と表記される)	
8	0.75	0.25	0	0	84(16 62 145 84)	1	8	1	8	1	36	8	1	0(0)	
9	1	0.25	0	0	94(17 84 145 63)	1	9	1	9	1	45	9	1	0(0)	
10	0	0	0.25	0	105(3 8 18 64 13)	2	10	1	10	1	54	10	-1	8(9 11 12 13 14 15 16 17)	
11	0.25	0	0.25	0	114(12 76 146 63)	2	11	1	11	1	63	11		この数字はsplitCellsの連番号	
12	0.5	0	0.25	0	124(13 64 146 76)	2	12	1	12	1	72	12			
13	0.75	0	0.25	0	134(17 63 146 86)	2	13	1	13	1	81	13			
14	1	0	0.25	0	144(18 86 146 64)	2	14	1	14	1	90	14			
15	0	0.25	0.25	0	154(13 78 147 64)	3	15	1	15	1	99	15			
16	0.25	0.25	0.25	0	164(14 80 147 78)	3	16	1	16	1	2	16			
17	0.5	0.25	0.25	0	174(18 64 147 88)	3	17	1	17	1	3	17			
18	0.75	0.25	0.25	0	184(19 88 147 80)	3	18	1	18	1	4	18			
19	1	0.25	0.25	0	194(165 71 144 50)	4	19	1	19	1	5	19	-1	8(18 20 21 22 23 24 25 26)	
20	0	0	0.5	0	204(144 72 177 50)	4	20	1	20	1	6	20			
21	0.25	0	0.5	0	214(177 73 165 50)	4	21	1	21	1	7	21			
22	0.5	0	0.5	0	224(11 75 148 62)	5	22	1	22	1	8	22			
23	0.75	0	0.5	0	234(168 74 145 51)	5	23	1	23	1	11	23			
24	1	0	0.5	0	244(145 62 148 51)	5	24	1	24	1	12	24			
25	0	0.25	0.5	0	254(148 75 168 51)	5	25	1	25	1	13	25			
26	0.25	0.25	0.5	0	264(12 77 150 63)	6	26	1	26	1	14	26			
27	0.5	0.25	0.5	0	274(171 76 146 52)	6	27	1	27	1	15	27			
28	0.75	0.25	0.5	0	284(146 63 150 52)	6	28	1	28	1	16	28	-1	8(27 29 30 31 32 33 34 35)	
29	1	0.25	0.5	0	294(150 77 171 52)	6	29	1	29	1	17	29			
30	0	0	0.75	0	304(13 79 152 64)	7	30	1	30	1	20	30			
31	0.25	0	0.75	0	314(174 78 147 53)	7	31	1	31	1	21	31			
32	0.5	0	0.75	0	324(147 64 152 53)	7	32	1	32	1	22	32			
33	0.75	0	0.75	0	334(152 79 174 53)	7	33	1	33	1	23	33			
34	1	0	0.75	0	344(20 92 149 91)	8	34	1	34	1	24	34			
35	0	0.25	0.75	0	354(166 91 149 54)	8	35	1	35	1	25	35			
36	0.25	0.25	0.75	0	364(149 92 178 54)	8	36	1	36	1	26	36			
37	0.5	0.25	0.75	0	374(178 93 166 54)	8	37	1	37	1	29	37	-1	8(36 38 39 40 41 42 43 44)	
38	0.75	0.25	0.75	0	384(21 65 151 94)	9	38	1	38	1	30	38			
39	1	0.25	0.75	0	394(21 95 155 65)	9	39	1	39	1	31	39			
40	0	0	1	0	404(169 94 151 55)	9	40	1	40	1	32	40			
41	0.25	0	1	0	414(151 65 155 55)	9	41	1	41	1	33	41			
42	0.5	0	1	0	424(155 95 169 55)	9	42	1	42	1	34	42			
43	0.75	0	1	0	434(22 66 153 96)	10	43	1	43	1	35	43			
44	1	0	1	0	444(22 97 157 66)	10	44	1	44	1	38	44			
45	0	0.25	1	0	454(172 96 153 56)	10	45	1	45	1	39	45			
46	0.25	0.25	1	0	464(153 66 157 56)	10	46	1	46	1	40	46	-1	8(45 47 48 49 50 51 52 53)	
47	0.5	0.25	1	0	474(157 97 172 56)	10	47	1	47	1	41	47			
48	0.75	0.25	1	0	484(23 67 154 98)	11	48	1	48	1	42	48			
49	1	0.25	1	0	494(23 99 159 67)	11	49	1	49	1	43	49			

この行の番号は visibleCellsでは欠番となる

この数字はsplitCellsの連番号

ネジのpoint

アダプティブメッシュ例題

facesにおいてpointを5つ持つfaceが定義されているセル

owner	faces	number
0	5(1 6 16 62 11)	0
0	4(10 71 144 72)	1
0	4(11 62 144 71)	2
0	4(15 72 144 82)	3
0	4(16 82 144 62)	4
0	5(0 1 11 71 10)	5
0	5(0 10 72 15 5)	6
0	5(5 15 82 16 6)	7
0	4(0 5 6 1)	8
owner	faces	number
1	5(2 7 17 63 12)	0
1	4(11 74 145 62)	1
1	4(12 63 145 74)	2
1	4(16 62 145 84)	3
1	4(17 84 145 63)	4
1	5(1 2 12 74 11)	5
1	5(6 16 84 17 7)	6
1	4(1 6 7 2)	7
owner	faces	number
2	5(3 8 18 64 13)	0
2	4(12 76 146 63)	1
2	4(13 64 146 76)	2
2	4(17 63 146 86)	3
2	4(18 86 146 64)	4
2	5(2 3 13 76 12)	5
2	5(7 17 86 18 8)	6
2	4(2 7 8 3)	7
owner	faces	number
3	4(13 78 147 64)	0
3	4(14 80 147 78)	1
3	4(18 64 147 88)	2
3	4(19 88 147 80)	3
3	5(3 4 14 78 13)	4
3	5(4 9 19 80 14)	5
3	5(8 18 88 19 9)	6
3	4(3 8 9 4)	7

※cells No. 0だけownerであるface数がひとつ多いのは、隣のNo. 1以降は自身のセルの面をneighbourとして明け渡しているため。

Cells No. 0 詳細				
No. 0	x	y	z	
1	0.25	0	0	
6	0.25	0.25	0	
16	0.25	0.25	0.25	
62	0.25	0.125	0.25	
11	0.25	0	0.25	
No. 1	x	y	z	
10	0	0	0.25	
71	0.125	0	0.25	
144	0.125	0.125	0.25	
72	0	0.125	0.25	
No. 2	x	y	z	
11	0.25	0	0.25	
62	0.25	0.125	0.25	
144	0.125	0.125	0.25	
71	0.125	0	0.25	
No. 3	x	y	z	
15	0	0.25	0.25	
72	0	0.125	0.25	
144	0.125	0.125	0.25	
82	0.125	0.25	0.25	
No. 4	x	y	z	
16	0.25	0.25	0.25	
82	0.125	0.25	0.25	
144	0.125	0.125	0.25	
62	0.25	0.125	0.25	
No. 5	x	y	z	
0	0	0	0	
1	0.25	0	0	
11	0.25	0	0.25	
71	0.125	0	0.25	
10	0	0	0.25	
No. 6	x	y	z	
0	0	0	0	
10	0	0	0.25	
72	0	0.125	0.25	
15	0	0.25	0.25	
5	0	0.25	0	
No. 7	x	y	z	
5	0	0.25	0	
15	0	0.25	0.25	
82	0.125	0.25	0.25	
16	0.25	0.25	0.25	
6	0.25	0.25	0	
No. 8	x	y	z	
0	0	0	0	
5	0	0.25	0	
6	0.25	0.25	0	
1	0.25	0	0	

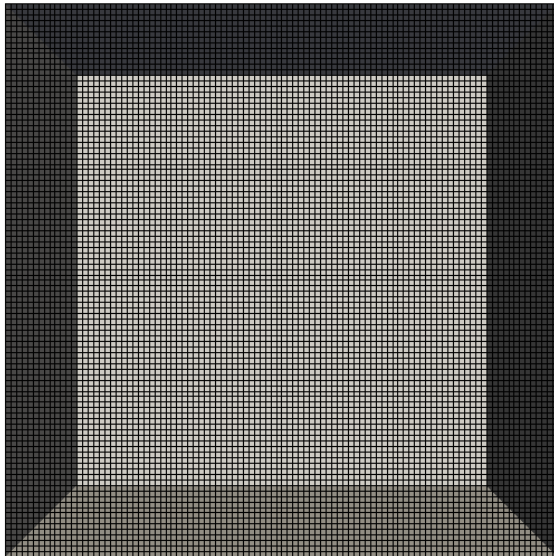
cells No. 0 詳細図



Cells No. 0の上面はおそらく何らかの平均操作で4面の値を1面の値に変換している。

→dynamicRefineFvMeshを調べる必要あり。(それともinterDyFoamか?)

アダプティブメッシュ実践



90度対称条件
外側、下面は壁面(すべりなし)条件
上面は自由流入流出条件

2cm立方体
xyz100分割(1メッシュあたり0.2mm)
1,000,000要素

interDyFoamを用いて

maxRefinementを「1」にして実行

その他検証中の事項

界面張力について

界面張力とは・・・

液相-気相間や液相-固体間、または異なる液相-液相間などで、エネルギーを最小に保とうとするために働く力のこと。

表面張力 (OpenFoamではtransportProperties内でsigmaとして設定) は界面張力の内、液相-気相間のものを差す。

→雨粒が球状になる力

ミルククラウンの現象内においてはもうひとつ、
ミルクと底面における「液相-固体」間の界面張力を考慮する必要がある？

→OpenFoamではどう設定するのか？

界面張力の設定方法

OpenFoamにおいてinterFoamおよびinterDyFoamでは、境界条件の1つとして「alphaContactAngle」が3種類用意されている

*---constantAlphaContactAngle---

```

type      constantAlphaContactAngle;
theta0    45;/ Equilibrium contact angle
value     unuform 0;
limit     none;gradient;alpha; or zeroGradient;
    
```

*---dynamicAlphaContactAngle---

```

type      dynamicAlphaContactAngle;
theta0    45;/ Equilibrium contact angle
uTheta    0; / Dynamic contact angle velocity scale
thetaA    45;/ Limiting advancing contact angle
thetaR    45;/ Limiting reeeding contact angle
value     unuform 0;
limit     none;gradient;alpha; or zeroGradient;
    
```

*---timeVaryingAlphaContactAngle---

```

/ Equilibrium contact angle control parameters /
type      timeVaryingAlphaContactAngle;
t0        ;
thetaT0   ;
te        ;
thetaTe   ;
value     unuform 0;
limit     none;gradient;alpha; or zeroGradient;
    
```

界面張力の設定方法

constantAlphaContactAngle



$\theta_0 = 60^\circ$



$\theta_0 = 30^\circ$



$\theta_0 = 10^\circ$



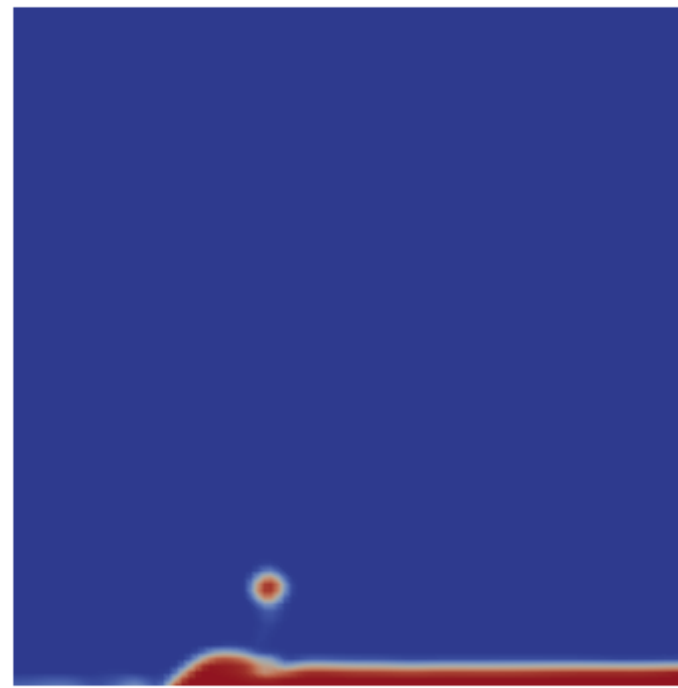
$\theta_0 = 0^\circ$

界面張力の設定方法

constantAlphaContactAngle



theta0 = 45°



constantAlphaContactAngleなし