

# OpenFOAMを利用した フローハンダ付け工程の シミュレーション

稲垣和倫(富山県立大学)  
中川慎二(富山県立大学)

# 目次

- 研究概要
- interFoam 毛細管例題
- 毛細管例題応用
- interFoamを用いたハンダ付けシミュレーション

# 研究概要

- 電子機器の部品実装には、ハンダ付けが用いられている。
  - ハンダ付け工程において不具合が生じることがある。

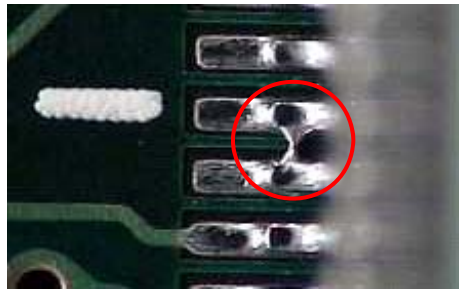
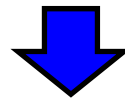


Fig. Bridge

## ブリッジ

ハンダの量が多く電気的なショート状態を引き起こす。

不具合を防止するための基板設計を試作・実験で行うには手間がかかる。



OpenFOAM (interFoam) を用いてハンダ付け工程をシミュレーションすることで、不具合を予測し、効率の良い基板設計を目指す。

# interFOAM

- VOF (Volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性, 等温二相流ソルバ.

$$\nabla \cdot V = 0$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho f + \underbrace{\sigma \kappa \nabla \gamma}_{\text{表面張力項}}$$

$t$ : 時間[s]

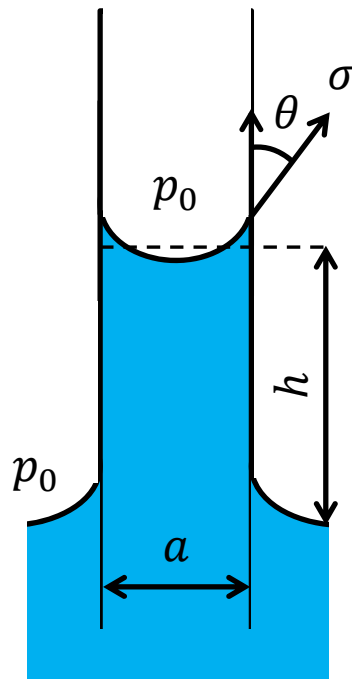
$V$ : 速度ベクトル[m/s]

$\tau$ : 応力テンソル

$f$ : 体積力による加速度[m/s<sup>2</sup>]

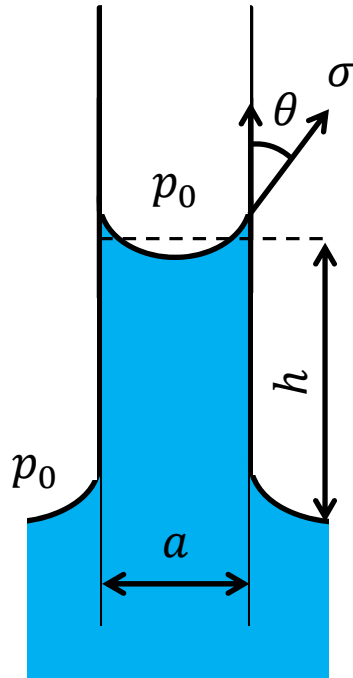
$\kappa$ : 界面曲率

$\sigma$ : 表面張力[N/m]



表面張力が働いていることを確認するため, interFoamの毛細管現象例題(2次元計算)を検証した.

# 毛細管現象理論値



$$2\sigma\cos\theta = \rho g h \times a$$

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho g \times a}$$

$\sigma$ : 表面張力 [N/m]

$\theta$ : 接触角[°]

$\rho$ : 密度(液体) [kg/m<sup>3</sup>]

$g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

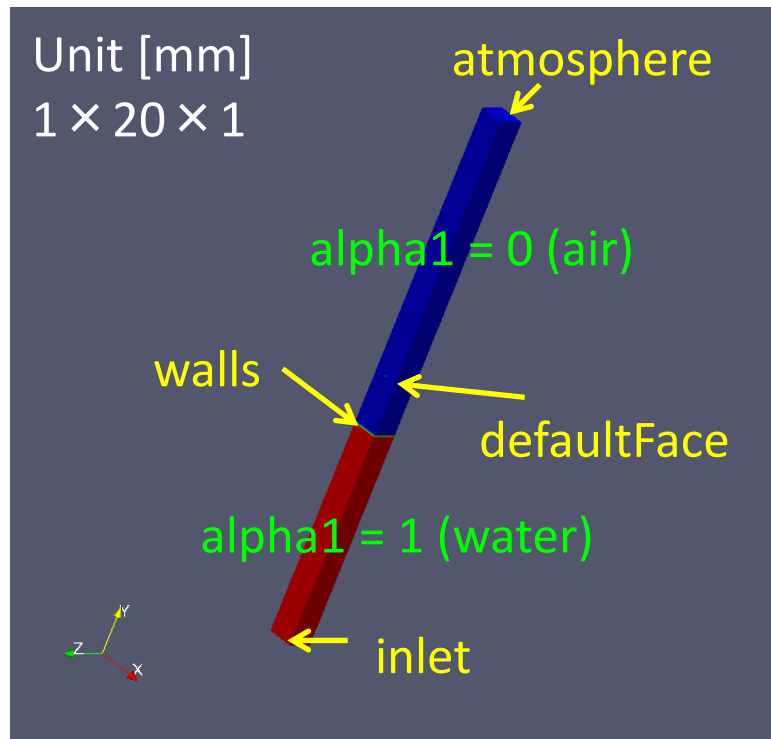
$a$ : 管幅 [m]

液面上昇量は液体の物性値によって決まる.

# interFoam 毛細管現象例題

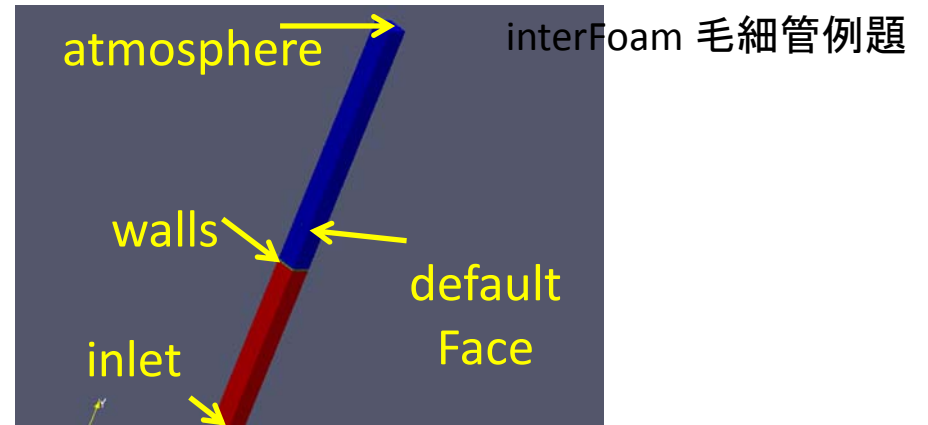
tutorials/multiphase/interFoam/laminar/capillaryRise

- 毛細管現象チュートリアル (2次元計算)
  - 定常, 2相流, VOF法, 等温・非圧縮, 界面張力



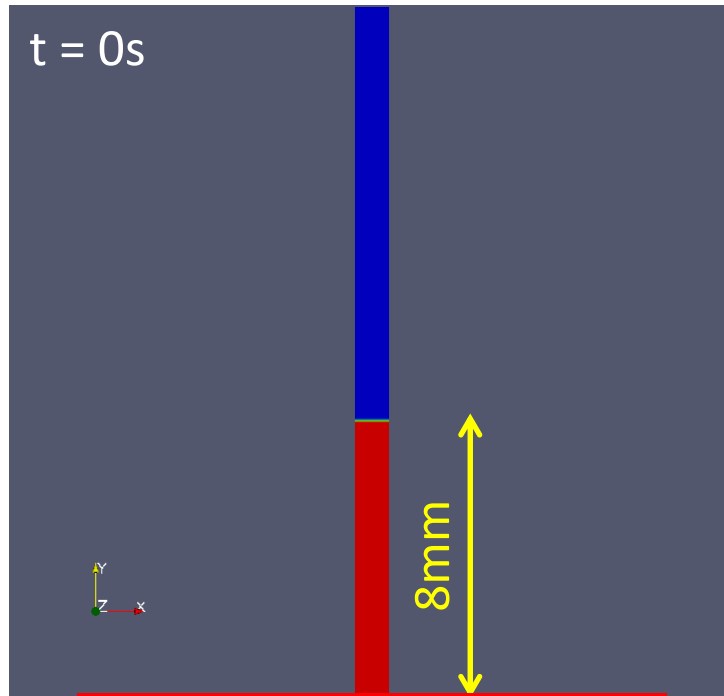
	Water	Air
Nu	1e-6 m <sup>2</sup> /s	1.48e-5 m <sup>2</sup> /s
rho	1000 kg/m <sup>3</sup>	1 kg/m <sup>3</sup>
Sigma	0.0707106 N/m	

# 境界条件

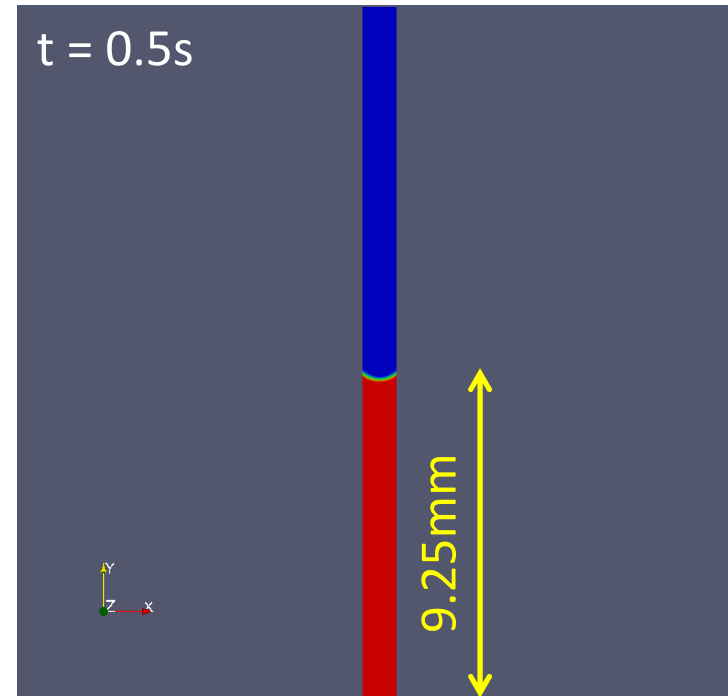


	boundary	alpha1	p_rho	U
inlet	patch	inletOutlet value uniform 1 inlet value uniform1	fixedValue uniform 0	pressureInlet OutletVelocity uniform ( 0 0 0 )
atmosphere	patch	zeroGradient	fixedValue uniform 0	pressureInlet OutletVelocity uniform ( 0 0 0 )
walls	wall	constantalphacontactangle theta0 45 limit gradient value uniform 0	fixedFluxPressure adjoint no	fixedValue uniform ( 0 0 0 )
defaultFace	empty	empty	empty	empty

# 解析結果



管外液面

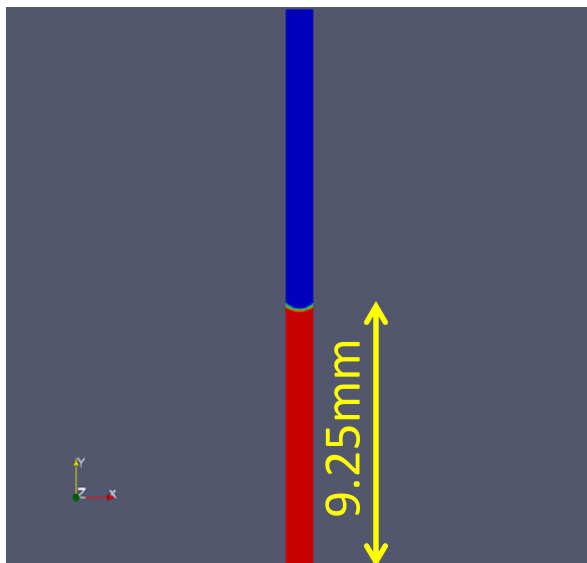


➤ 液面高さ9.25mm



# 解析結果 (メッシュサイズ変更)

	Case1	Case2 (Original)	Case3	Case4
Mesh Size [mm]	0.025 × 0.025	0.05 × 0.05	0.1 × 0.1	0.2 × 0.2
液面高さ [mm]	9.11	9.25	9.48	9.73
理論値 [mm]	9.99 (下式より)			
誤差 [mm]	-0.88	-0.74	-0.51	-0.26
誤差 [%]	8.8	7.4	5.1	2.6



$$2\sigma \cos\theta = \rho g h \times a$$

$$2\sigma \cos 45^\circ = \rho g h \times 1 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{2\sigma \cos 45^\circ}{\rho g \times 0.001} \\
 &= \frac{2 \times 0.0707106 \times \cos 45^\circ}{1000 \times 10 \times 0.001} \\
 &= 9.99 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

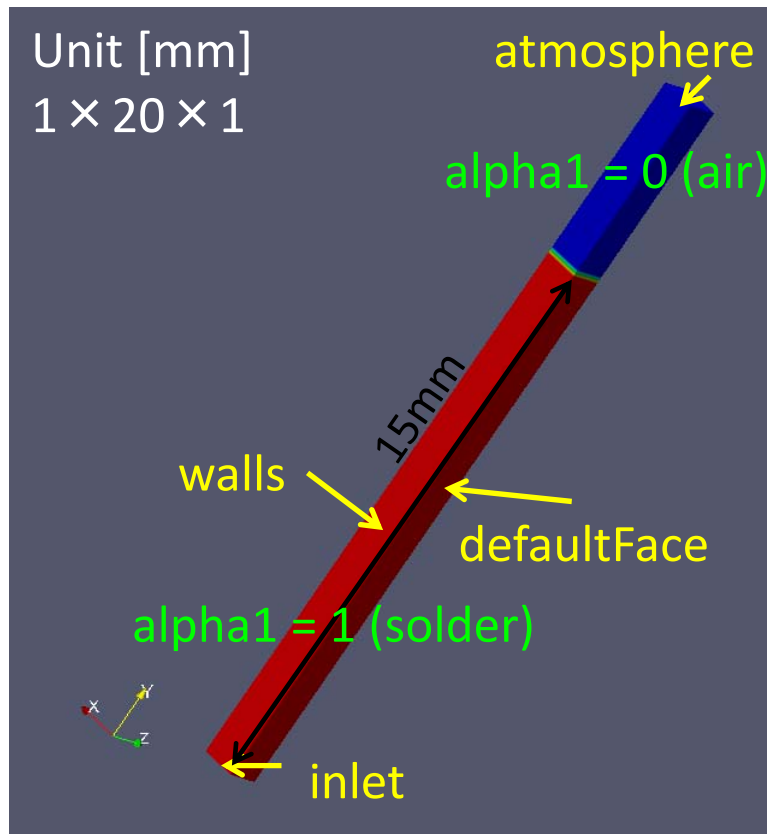
# 解析結果(接触角変更)

	CaseA	CaseB	CaseC (Case3)	CaseD	CaseE
Mesh Size [mm]	0.1 × 0.1				
contactangle [°]	15	30	45	60	75
液面高さ [mm]	12.7	11.3	9.48	6.85	3.58
理論値 [mm]	13.7	12.2	9.99	7.07	3.66
誤差 [mm]	-1.00	-0.90	-0.51	-0.22	-0.08
誤差 [%]	7.3	7.3	5.1	3.1	2.2

- ✓ 接触角の違いにより液面上昇値が変化する.
- ✓ 誤差は10%以内.

# 例題応用(各種条件)

## ➤ 水→溶融ハンダ

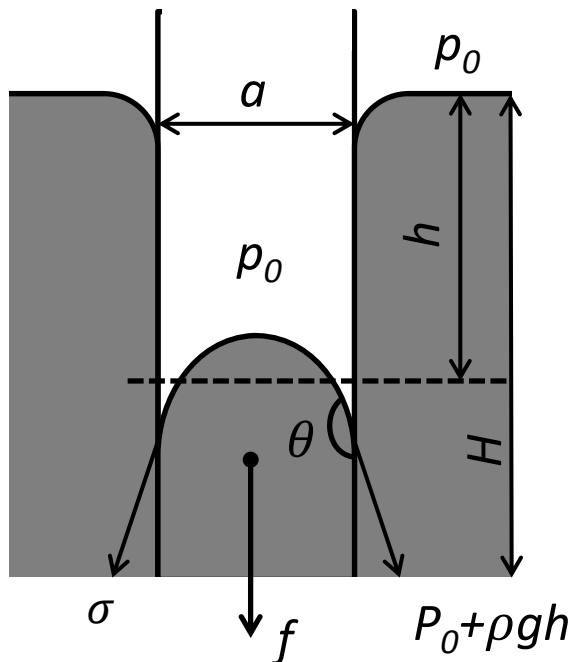
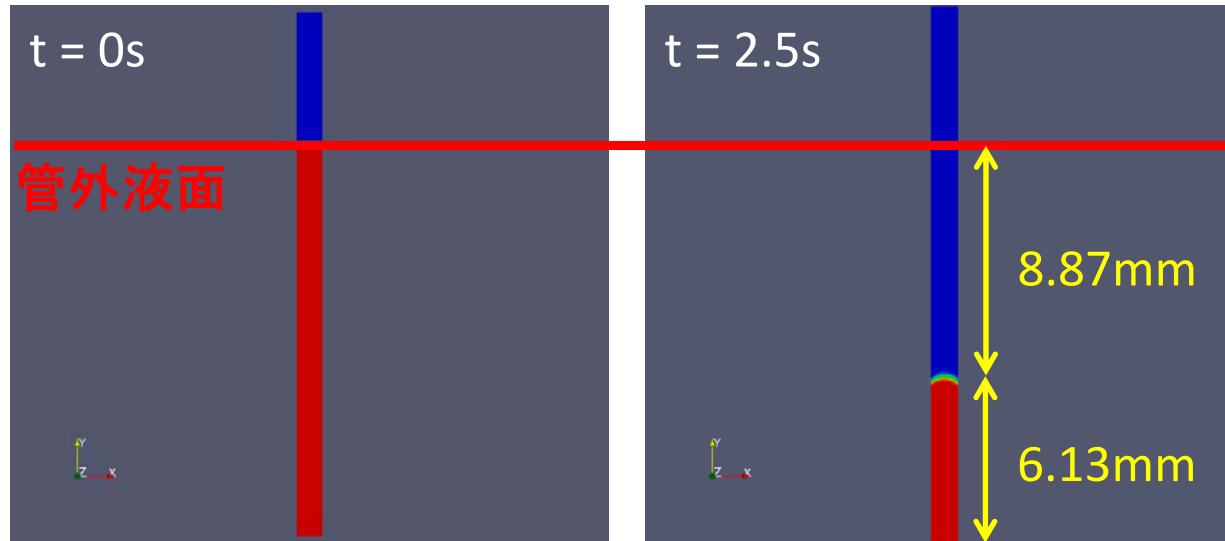


	alpha1	p_rho
inlet	inletOutlet Value uniform 1 Inlet value uniform1	fixedValue uniform 1110
atmosphere	zeroGradient	fixedValue uniform 0
walls	constantalphacontact angle Theta0 135 Limit gradient Value uniform 0	fixedFluxPress ure adjoint no

$$\begin{aligned}
 (\text{inlet\_p\_rho}) &= \rho gh \\
 &= 7400 \times 10 \times 0.015 \\
 &= 1100 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

	Solder	Air
Nu	2.703e-7m <sup>2</sup> /s	1.48e-5m <sup>2</sup> /s
rho	7400kg/m <sup>3</sup>	1kg/m <sup>3</sup>
Sigma	0.49	

# 解析結果



$$2\sigma\cos\theta + \rho g(H - h)a = \rho gHa$$

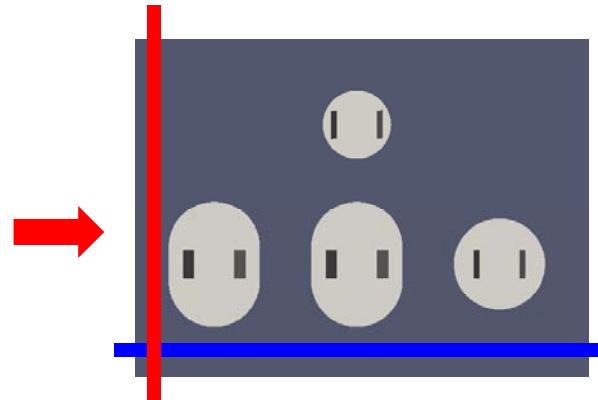
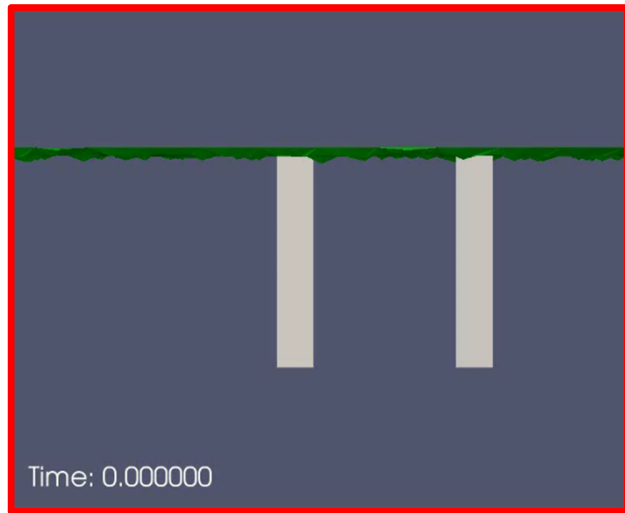
$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho g \times a} = \frac{2 \times 0.49 \times \cos 135^\circ}{1000 \times 10 \times 0.001} = 9.36\text{mm}$$

誤差 5.2%

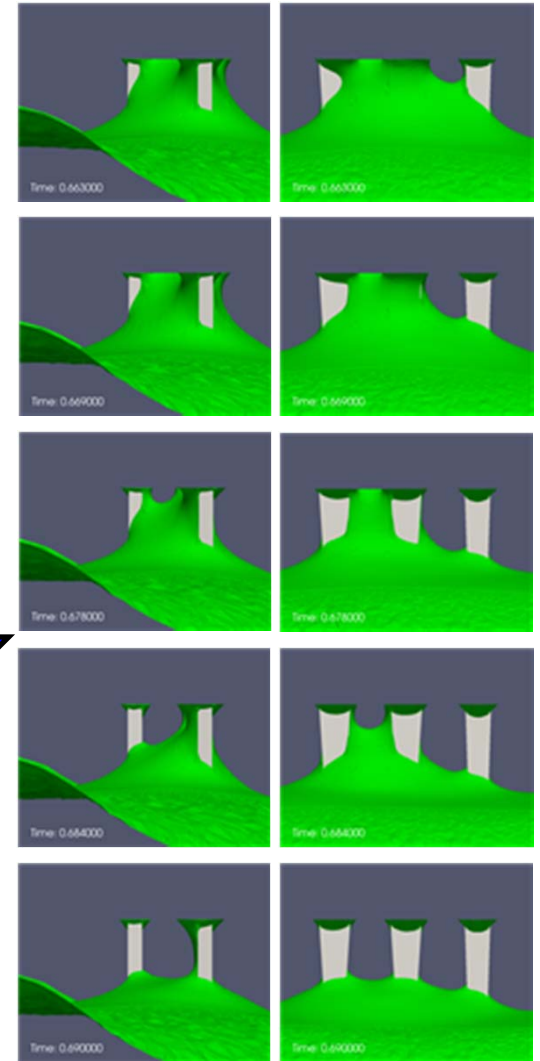
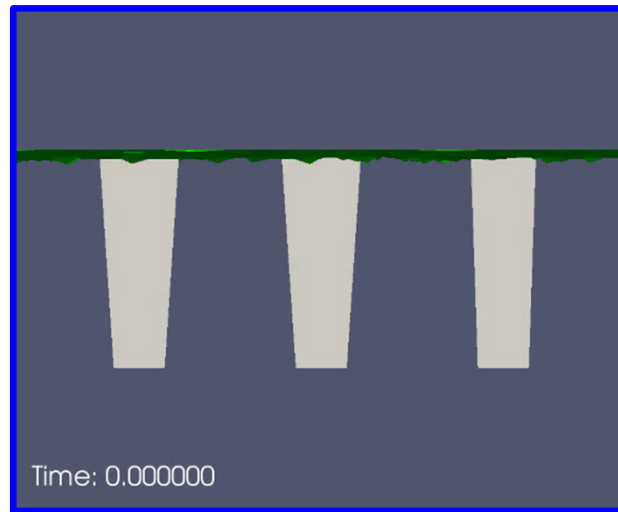
## まとめ(毛細管現象)

- interFoamで表面張力を加味した計算ができる.
- 接触角の違いにより管内液面上昇量が変化する.
- 毛細管現象解析における理論値との誤差は10%程度である.
- 液体に溶解ハンダを用いた解析も可能.

# ハンダ液面の変形 $X = 1.2 \text{ mm}$ , $W = 20 \text{ mm/s}$



Model of lands and wires



Time

Shape of solder surface