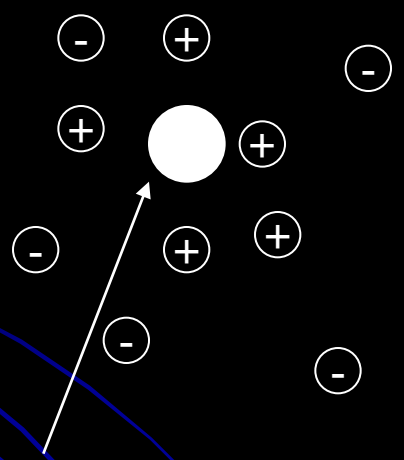
静電ソルバーelectrostaticFoamとチュートリアルchargedWireの紹介

発表者: K. M.

静電ソルバーelectrostaticFoam紹介

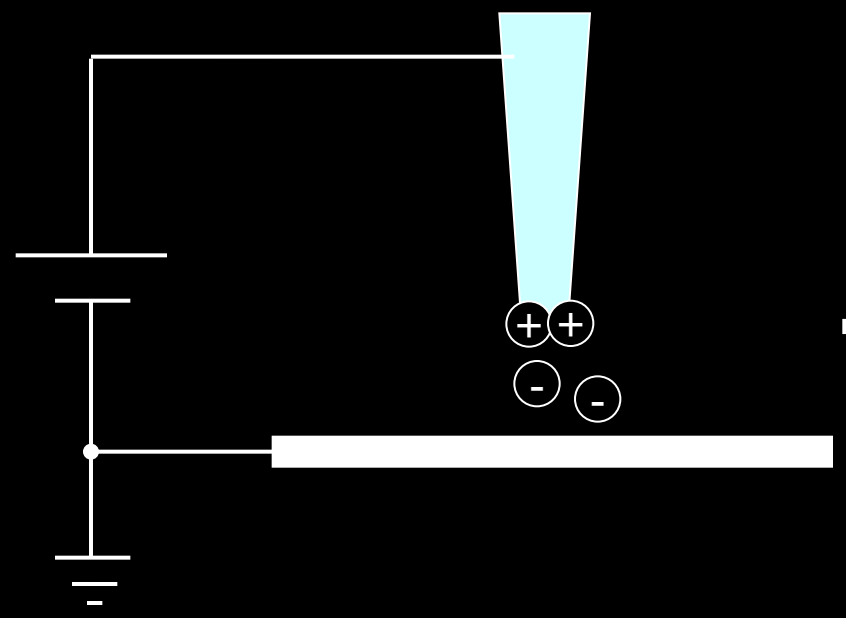
electrostaticFoam　静電ポテンシャルと電荷密度分布を計算するソルバー

高圧電線



電線

放電装置



電極

”ionic wind”で動画を検索すると関連する現象が見つかります。

electrostaticFoam 理論的背景

electrostaticFoamの基礎方程式

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

$$\mathbf{j} = \rho\left(-k \nabla \phi\right)$$

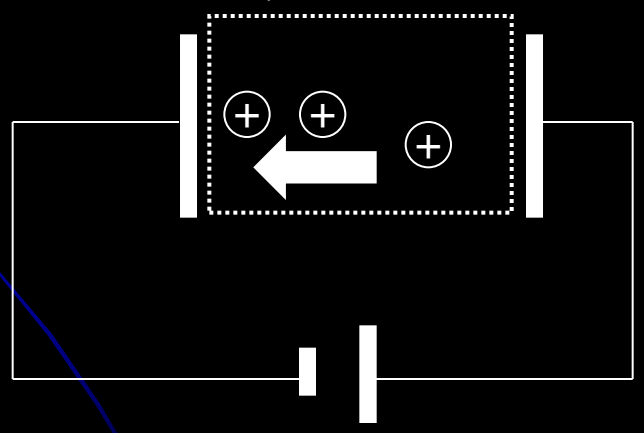
ϕ : 静電ポテンシャル

ρ : 電荷密度

ε_0 : 真空の誘電率

$\mathbf{j}$: イオンのドリフト電流

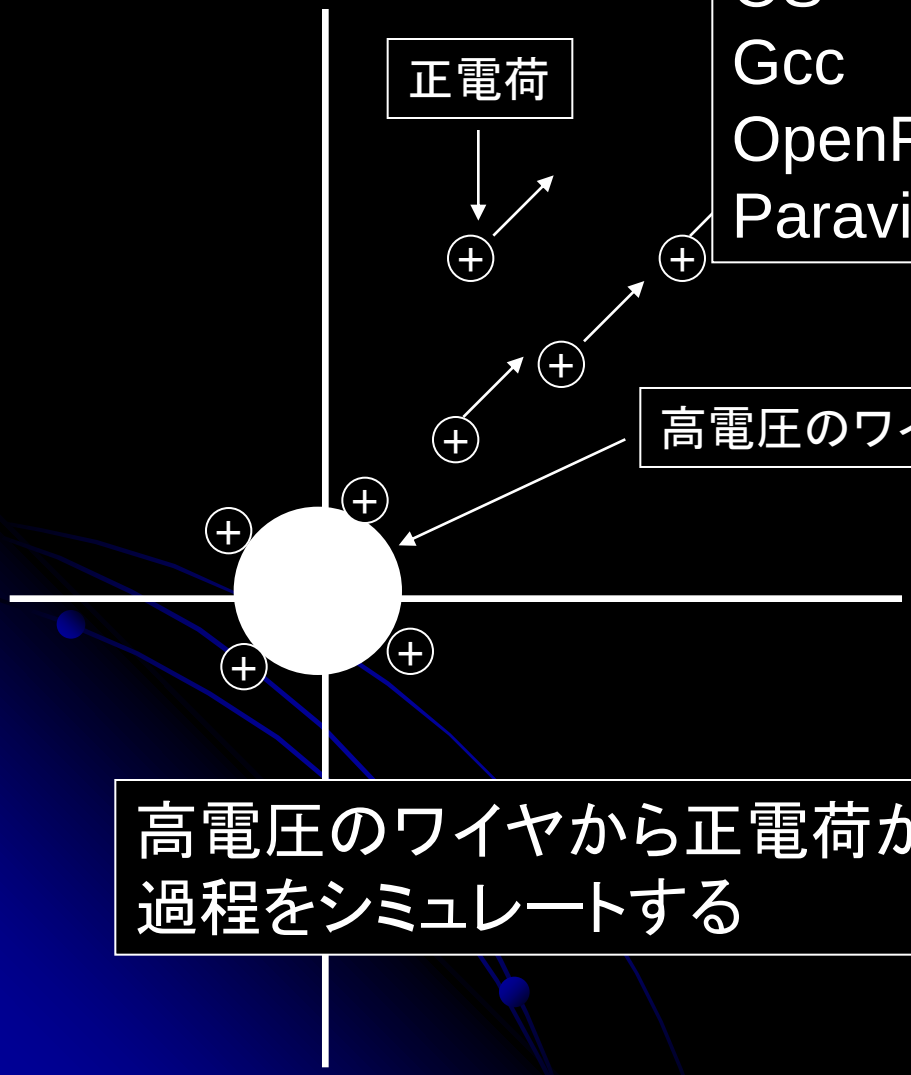
k : イオン移動度



強電界(DC)によって生じる大気放電を記述

チュートリアル事例:chargedWire

計算機環境
OS　　: CentOS 5.6 (32bit)
Gcc　　: ver.4.5.1(自力ビルド)
OpenFOAM: 1.7.1(ソースからビルド)
Paraview　: ver. 3.8.0(ソースからビルド)

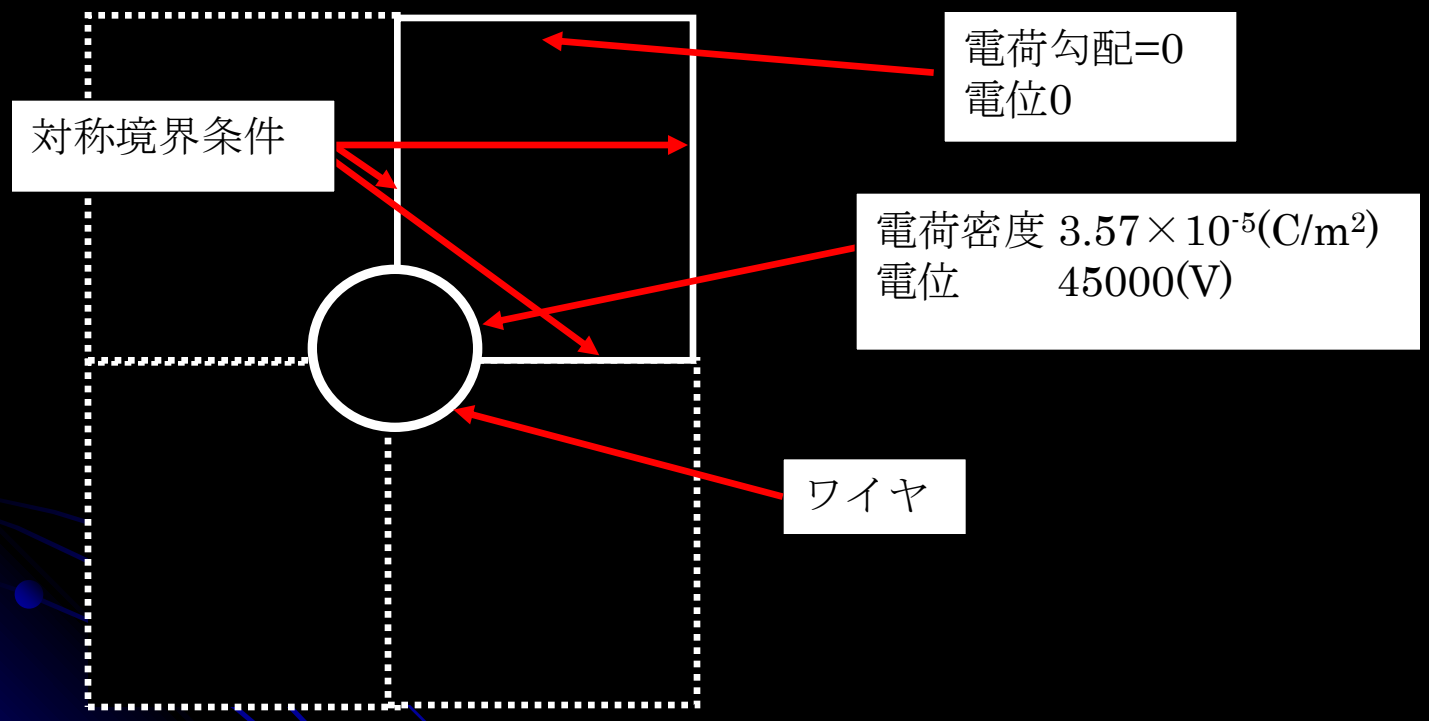


後のプログラム改造に備え、
ソースからのビルドを行います。

高電圧のワイヤから正電荷が移動する
過程をシミュレートする

モデル形状+境界条件

帯電ワイヤ ¼ モデル



ワイヤ表面から発生した正電荷が電極に流れていく事例

chargedWireのcontents

チュートリアルケースディレクトリへ移動

```
$cd tutorial/electromagnetism/electrostaticFoam/chargedWire
```

注意:$⇒bashを表している
(コマンドで打ち込まないこと!)

- cavity
  - system
    - controlDict
    - fvScheme
    - fvSolution
    - physicalProperty
  - constant
    - polyMesh
      - blockMeshDict

形状データ、メッシュデータ

  - 0
    - rho
    - phi

初期値、境界条件設定

ファイル名	内容
controlDict	初期時間、終時間の設定。ファイル出力設定
fvScheme	有限体積法における計算スキーム(微分演算子)の設定
fvSolution	有限体積法における解法スキーム(線形ソルバー、圧力解法など)
physicalProperties	移動度、誘電率を設定
blockMeshDict	形状データ、メッシュ作成方法を設定
rho	初期状態の電荷密度分布
phi	初期状態の静電ポテンシャル分布

解析手順

メッシュデータ生成(blockMesh)

↓

物初期条件、境界条件、計算設定

↓

計算実行(electrostaticFoam)

↓

計算結果可視化(Paraview使用)

メッシュデータ生成

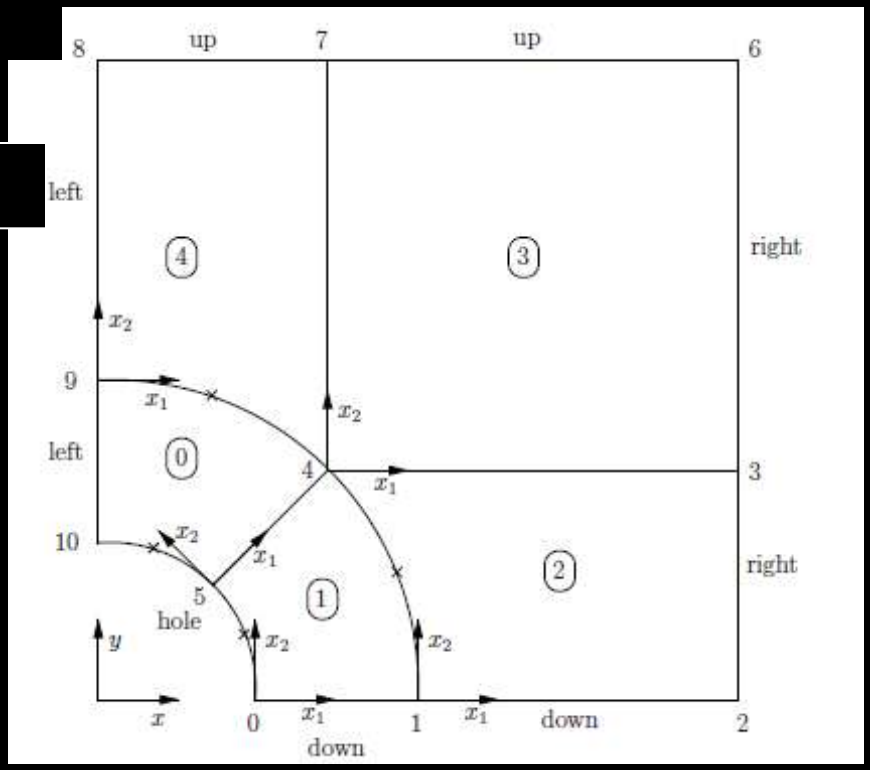
```
$blockMesh
```

メッシュはできたけど、、何をやったの?

メッシュデータ生成完了!

メッシュ作成ファイルblockMeshDictを見る

```
$less constant/polyMesh/blockMeshDict
```

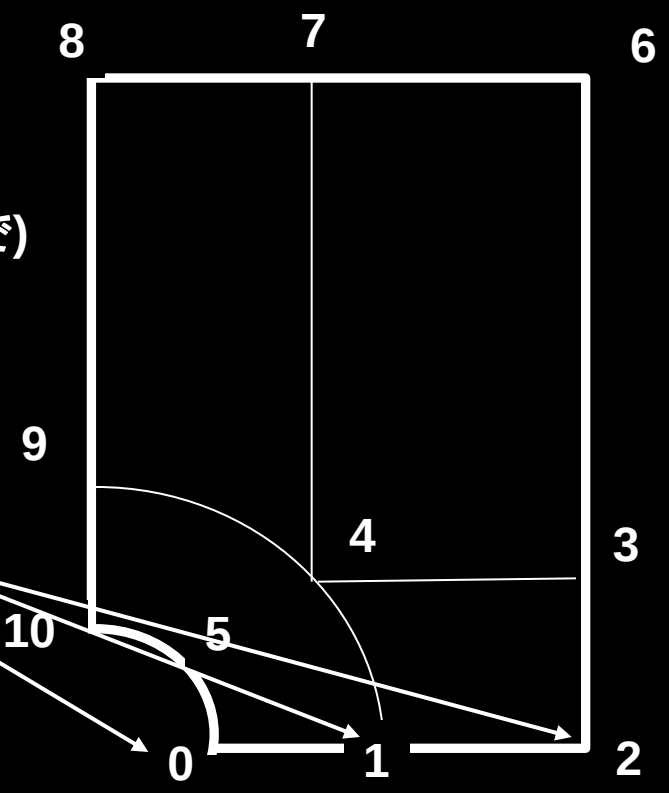


メッシュ生成設定ファイル(1)

blockMeshDict

…省略…
convertToMeters 1;
vertices
(
(0.001 0 0)
(0.038 0 0)
(0.076 0 0)
(0.076 0.02687 0)
(0.02687 0.02687 0)
(0.0007071 0.0007071 0)
(0.076 0.114 0)
(0.02687 0.114 0)
(0 0.114 0)
(0 0.038 0)
(0 0.001 0)
(0.001 0 0.5)
(0.038 0 0.5)
(0.076 0 0.5)
(0.076 0.02687 0.5)
(0.02687 0.02687 0.5)

頂点の設定(0 – 21番まで)



奥方向(z方向)にも押し出されている。
0の奥⇒11
1の奥⇒12
…

メッシュ生成設定ファイル(2)

blockMeshDict つづき

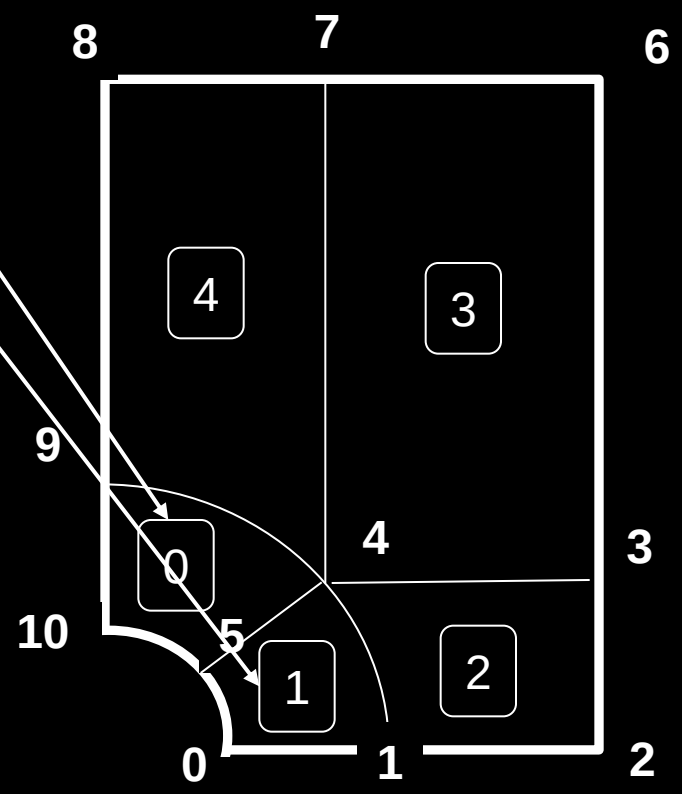
```
blocks
(
    hex (5 4 9 10 16 15 20 21) (60 30 1) simpleGrading (5 1 1)
    hex (0 1 4 5 11 12 15 16) (60 30 1) simpleGrading (5 1 1)
    hex (1 2 3 4 12 13 14 15) (50 30 1) simpleGrading (1 1 1)
    hex (4 3 6 7 15 14 17 18) (50 50 1) simpleGrading (1 1 1)
    hex (9 4 7 8 20 15 18 19) (30 50 1) simpleGrading (1 1 1)
);
```

block(0-4まで)の設定

```
edges
(
    arc 0 5 (0.00092387 0.00038268 0)
    arc 5 10 (0.00038268 0.00092387 0)
    arc 1 4 (0.0351074 0.0145419 0)
    arc 4 9 (0.0145419 0.0351074 0)
    arc 11 16 (0.00092387 0.00038268 0.5)
    arc 16 21 (0.00038268 0.00092387 0.5)
    arc 12 15 (0.0351074 0.0145419 0.5)
    arc 15 20 (0.0145419 0.0351074 0.5)
);
```

edgeの設定(arc=円弧)

２点+1点(座標指定)

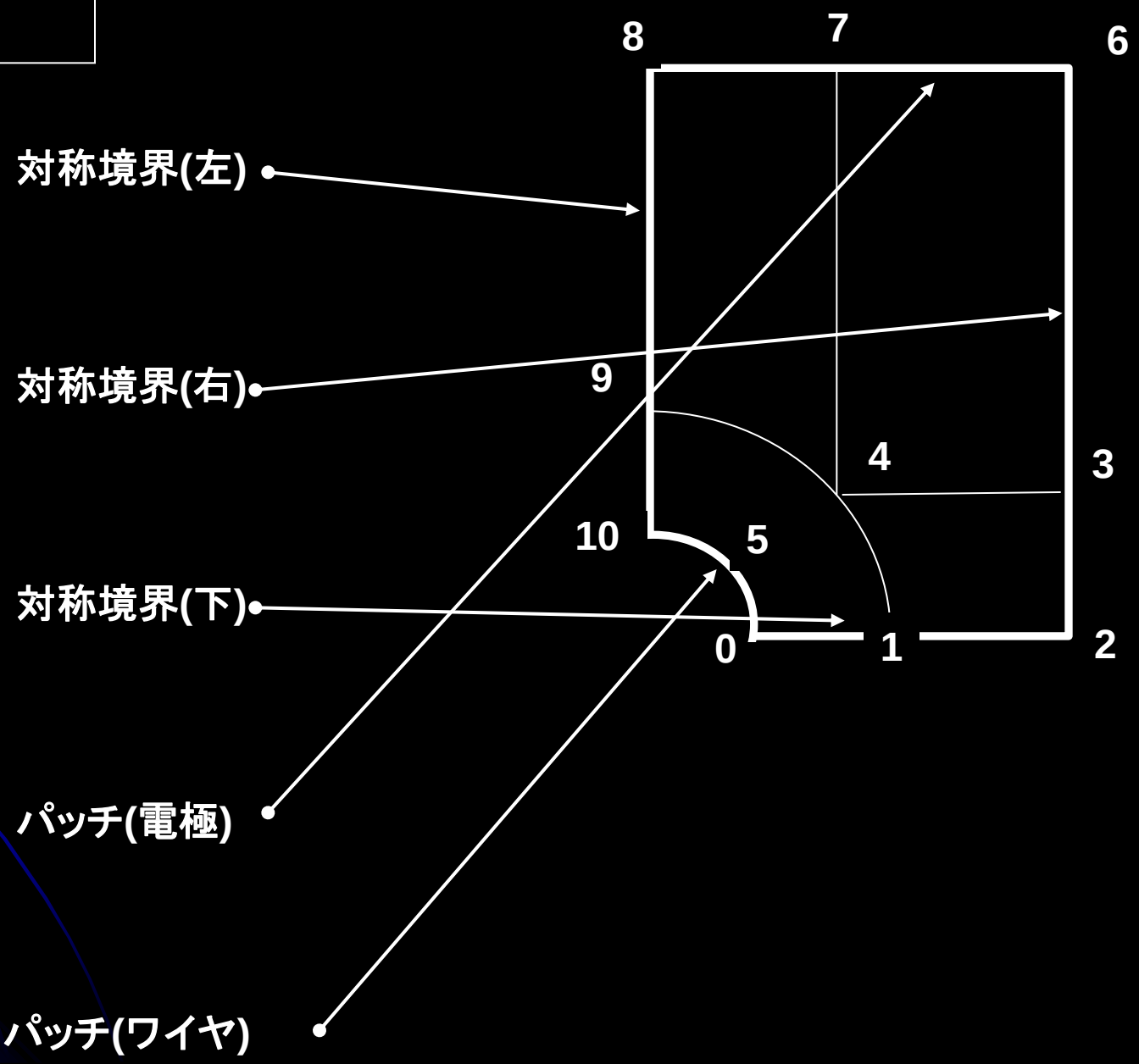



```
patches
(
```

メッシュ生成設定ファイル(3)

blockMeshDict つづき

```
patches
(
    symmetryPlane left
    (
        (8 9 20 19)
        (9 10 21 20)
    )
    symmetryPlane right
    (
        (2 3 14 13)
        (3 6 17 14)
    )
    symmetryPlane down
    (
        (0 1 12 11)
        (1 2 13 12)
    )
    patch up
    (
        (7 8 19 18)
        (6 7 18 17)
    )
    patch hole
```



入力物理パラメーターの確認

コマンド　$ less constant/physicalProperties

physicalProperties　　イオン移動度k、真空誘電率ε0を設定

```
…省略…
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
epsilon0        epsilon0 [ -1 -3 4 0 0 2 0 ] 8.85419e-12;
k               k [ -1 0 2 0 0 1 0 ] 0.00016;
// ************************************************************************************ //
```

[ ] 内の数字は単位

No.	物理量	SI 単位
1	質量	キログラム(kg)
2	長さ	メートル(m)
3	時間	秒(s)
4	温度	ケルビン(K)
5	物質量	モル(mol)
6	電流	アンペア(A)
7	光度	カンデラ(cd)

$$\varepsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} [kg^{-1} m^{-3} s^4 A^2]$$

$$k = 1.6 \times 10^{-4} [kg^{-1} s^2 A]$$

境界条件+初期条件確認

境界条件ファイルは
0/phi (静電ポテンシャル)
0/rho (電荷密度)

コマンド

```
$less 0/phi
$less 0/rho
```

境界条件を確認

静電ポテンシャルの境界条件

0/phi

```
dimensions      [1 2 -3 0 0 -1 0];
internalField   uniform 0;
boundaryField
{
   left
   {
      type          symmetryPlane;
   }
   right
   {
      type          symmetryPlane;
   }
   down
   {
      type          symmetryPlane;
   }
   up
   {
      type          fixedValue;
      value          uniform 0;
   }
   hole
   {
      type          fixedValue;
      value          uniform 45000;
   }

   defaultFaces
   {
    type          empty;
```

静電ポテンシャルのSI単位

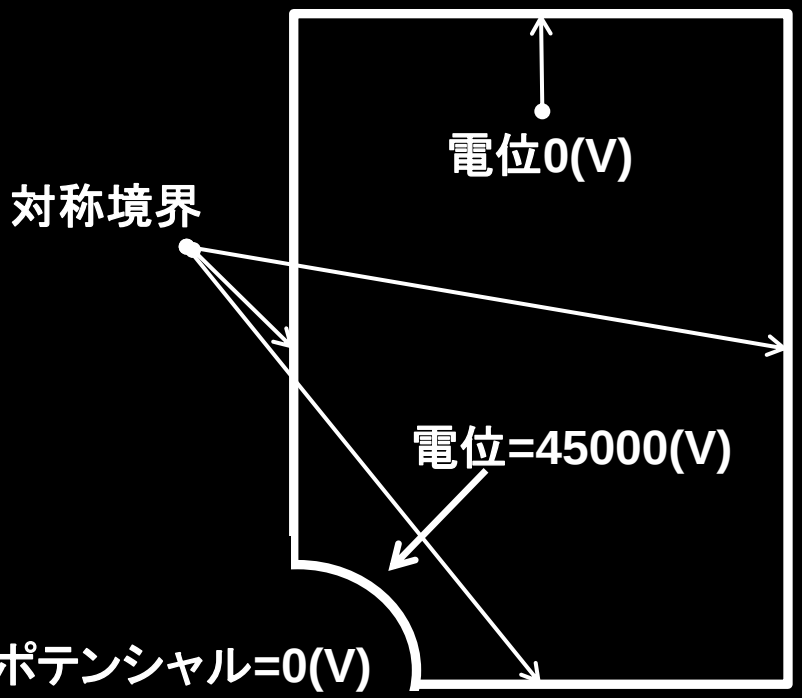
対称境界(左面)

対称境界(右面)

対称境界(下面)

電極:静電ポテンシャル=0(V)

ワイヤ表面:静電ポテンシャル=45000(V)



電荷密度の境界条件

0/rho

```
dimensions      [0 -3 1 0 0 1 0];
internalField   uniform 0;
boundaryField
{
    left
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    right
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    down
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    up
    {
        type          zeroGradient;
    }
    hole
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform 3.57e-05;
    }
    defaultFaces
    {
        type          empty;
    }
}
```

電荷密度のSI単位

対称境界(左面)

対称境界(右面)

対称境界(下面)

電極:勾配0
(電荷が降り積もらない)

ワイヤ表面:電荷密度3.57e-5

計算設定確認

コマンド　$less system/controlDict

system/controlDict

詳細は、OpenFOAMユーザーガイド
4.3 時間とデータの入出力制御
を参照のこと

```
…
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *

application     electrostaticFoam;
startFrom       startTime;
startTime       0;
stopAt          endTime;
endTime         0.02;
deltaT          5e-05;
writeControl    timeStep;
writeInterval   100;
purgeWrite      0;
writeFormat     ascii;
writePrecision  6;
writeCompression uncompressed;
timeFormat      general;
timePrecision   6;
runTimeModifiable yes;
```

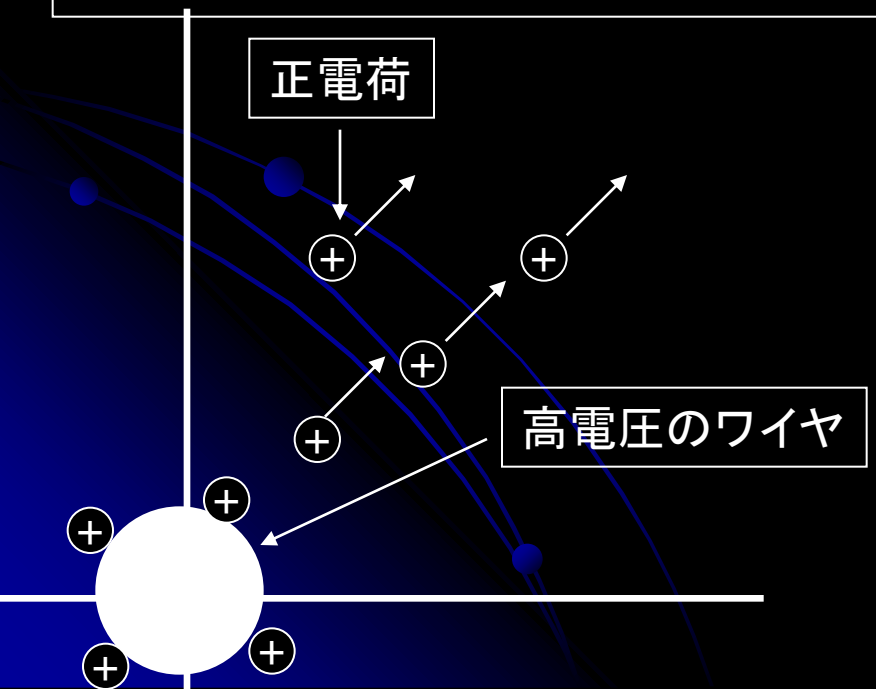
- 使用ソルバー
- 計算開始時間=startTime　ex. latestTimeなど(最新時間)
- startTime=0
- 計算終了時刻=endTime
- endTime=0
- 時間刻みΔt
- 計算結果書き出しコントロール=　指定ステップ数毎
- 指定ステップ数=100
- >1 で出力する時間ディレクトリ数の周期を指定。
- 出力形式:ascii, binaryなどあり。BinaryはOS依存だが、容量減
- 出力の数値精度　1e-6まで
- ファイル圧縮有無
- 時間ディレクトリ名のフォーマット。General, fixed, scientificが選択可能
- 時間ディレクトリ名の小数点以下の桁数を指定
- Yesなら時間ステップの最初にcontrolDictを再度読み込み

計算実行

打ち込むコマンド

```
$electrostaticFoam
…
Create time
…
END
```

静電解析ソルバ起動



$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

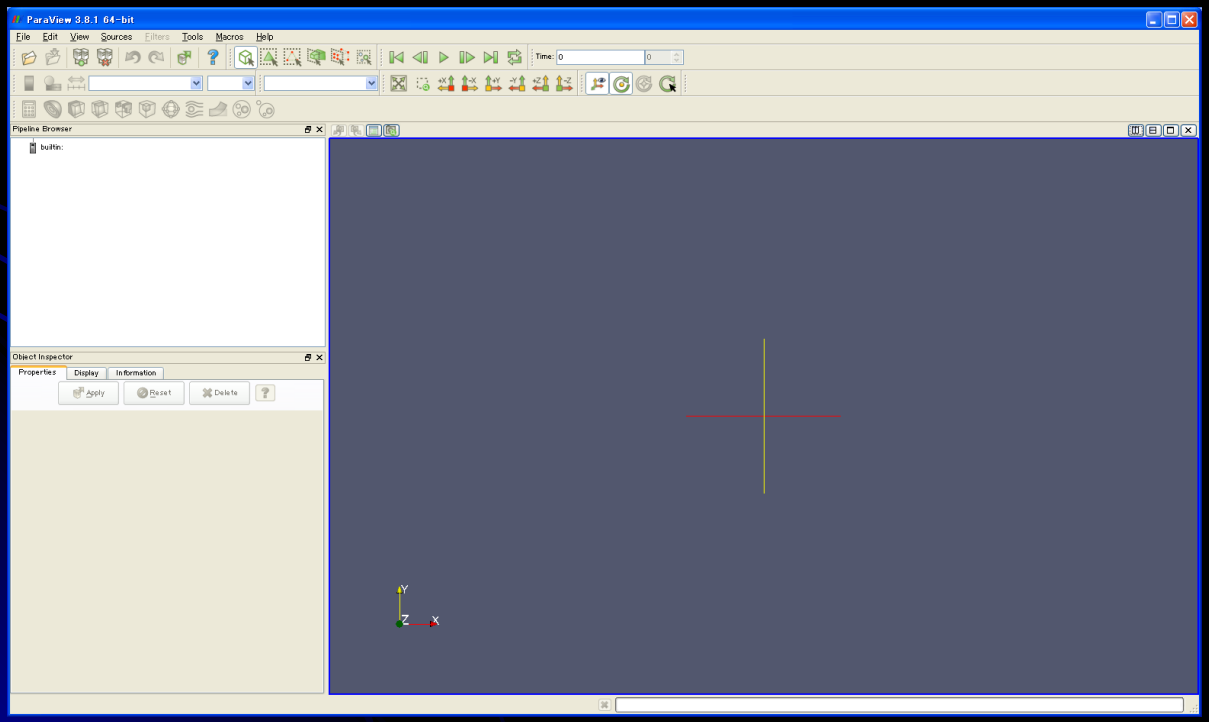
$$\mathbf{j} = \rho\left(-k \nabla \phi\right)$$

計算結果可視化(1)

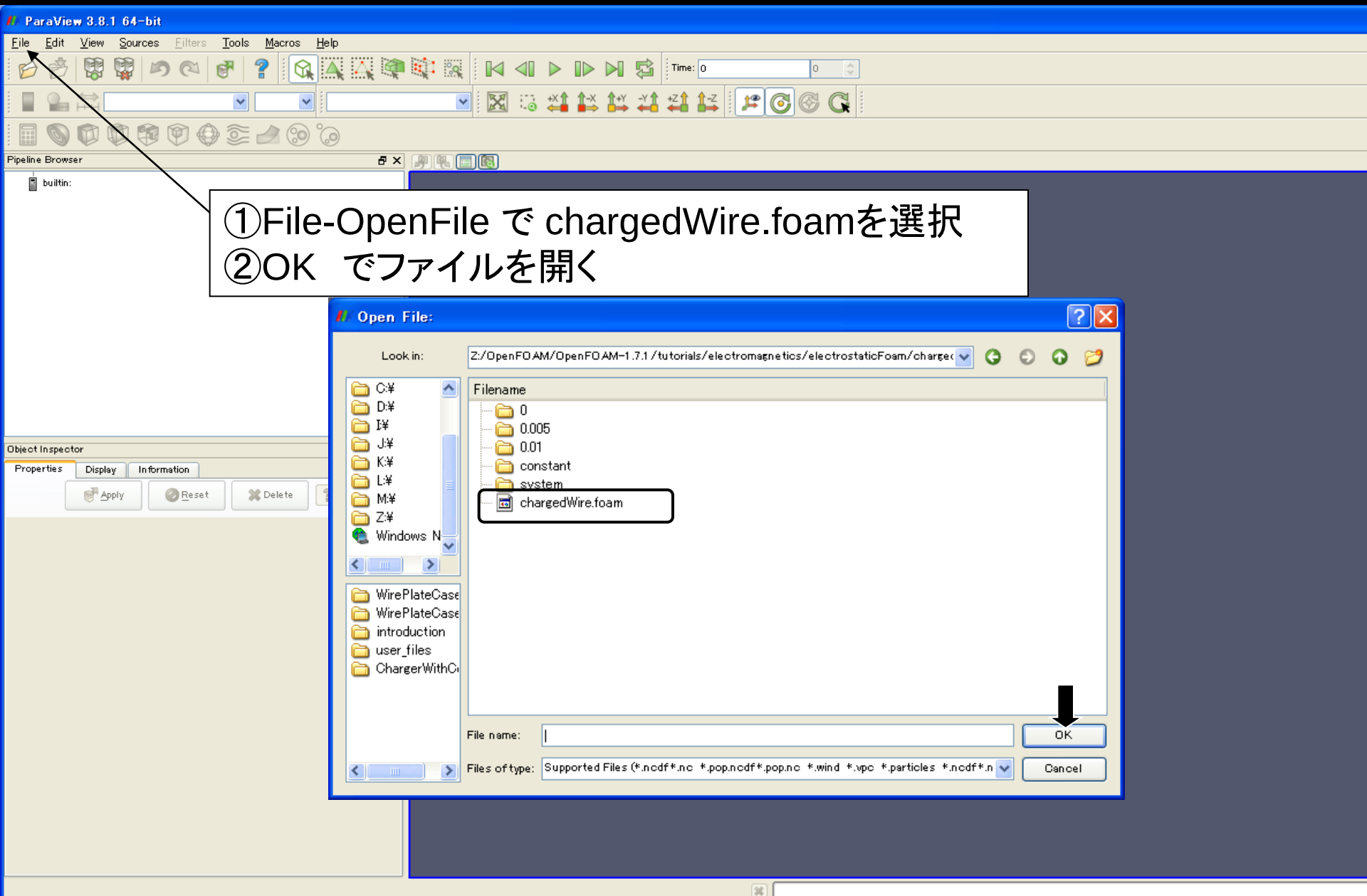
打ち込むコマンド

$touch chargedWire.foam ← Paraview用ファイル作成

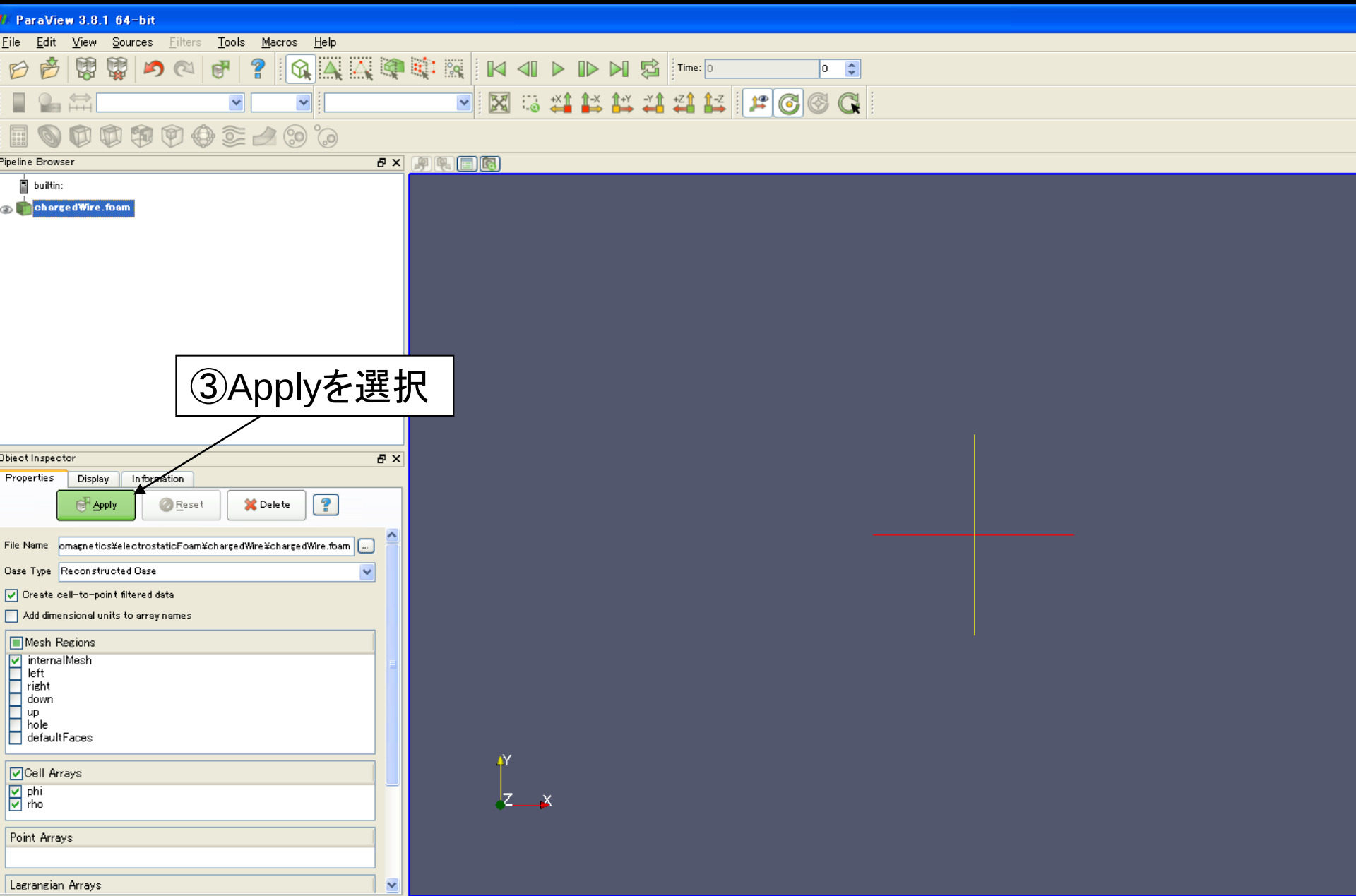
$paraview & ← Paraview起動



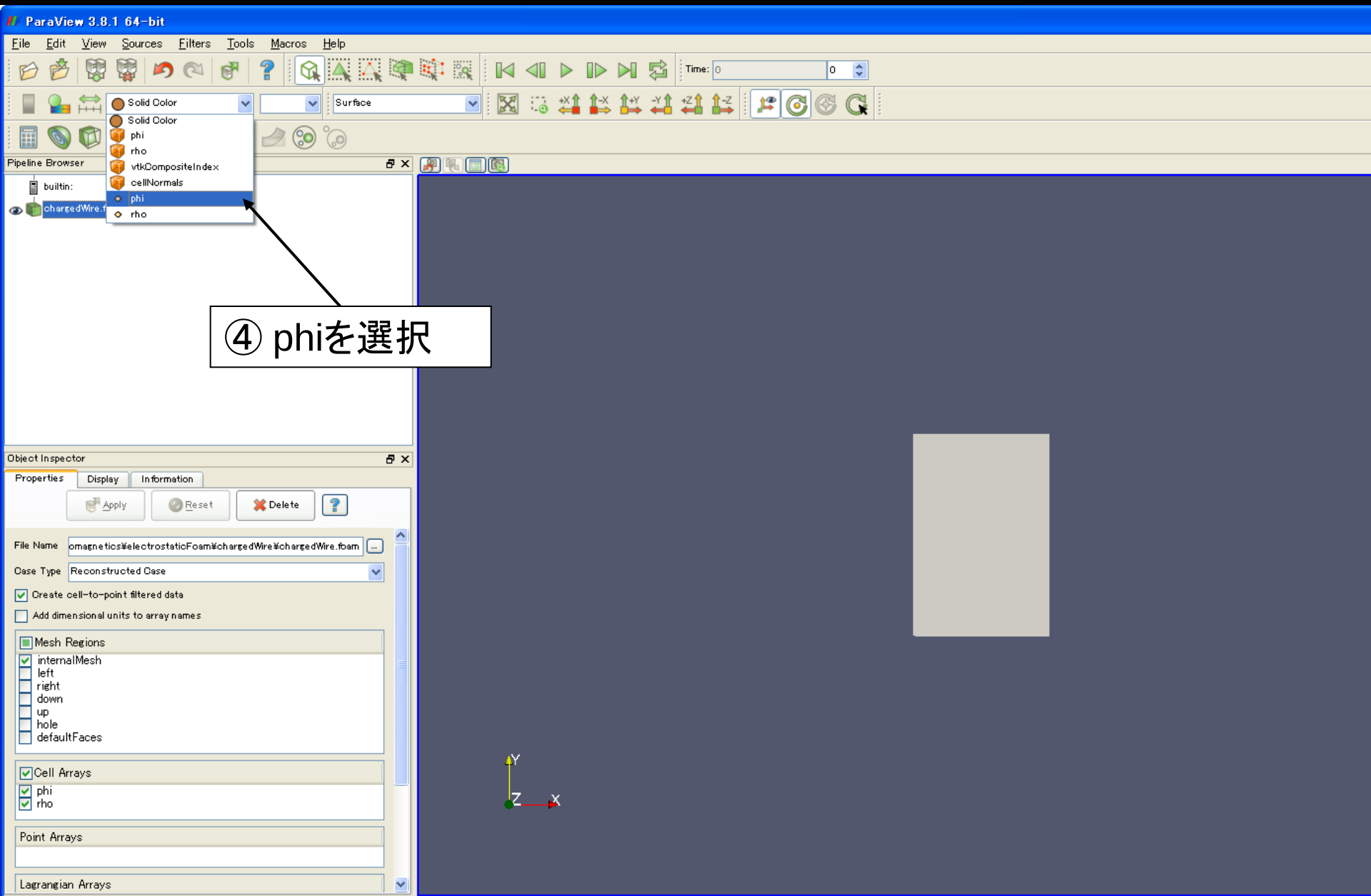
計算結果可視化(2)


ParaView 3.8.1 64-bit
File Edit View Sources Filters Tools Macros Help
Time: 0
Pipeline Browser
builtin:
Object Inspector
Properties Display Information
Apply Reset Delete
①File-OpenFile で chargedWire.foamを選択
②OK でファイルを開く
Open File:
Look in: Z:/OpenFOAM/OpenFOAM-1.7.1/tutorials/electromagnetics/electrostaticFoam/charge
C:¥
D:¥
I:¥
J:¥
K:¥
L:¥
M:¥
Z:¥
Windows N
WirePlateCase
WirePlateCase
introduction
user_files
ChargerWithC
Filename
0
0.005
0.01
constant
system
chargedWire.foam
File name:
OK
Files of type: Supported Files (*.ncdf *.nc *.pop.ncdf *.pop.nc *.wind *.vpc *.particles *.ncdf *.n
Cancel

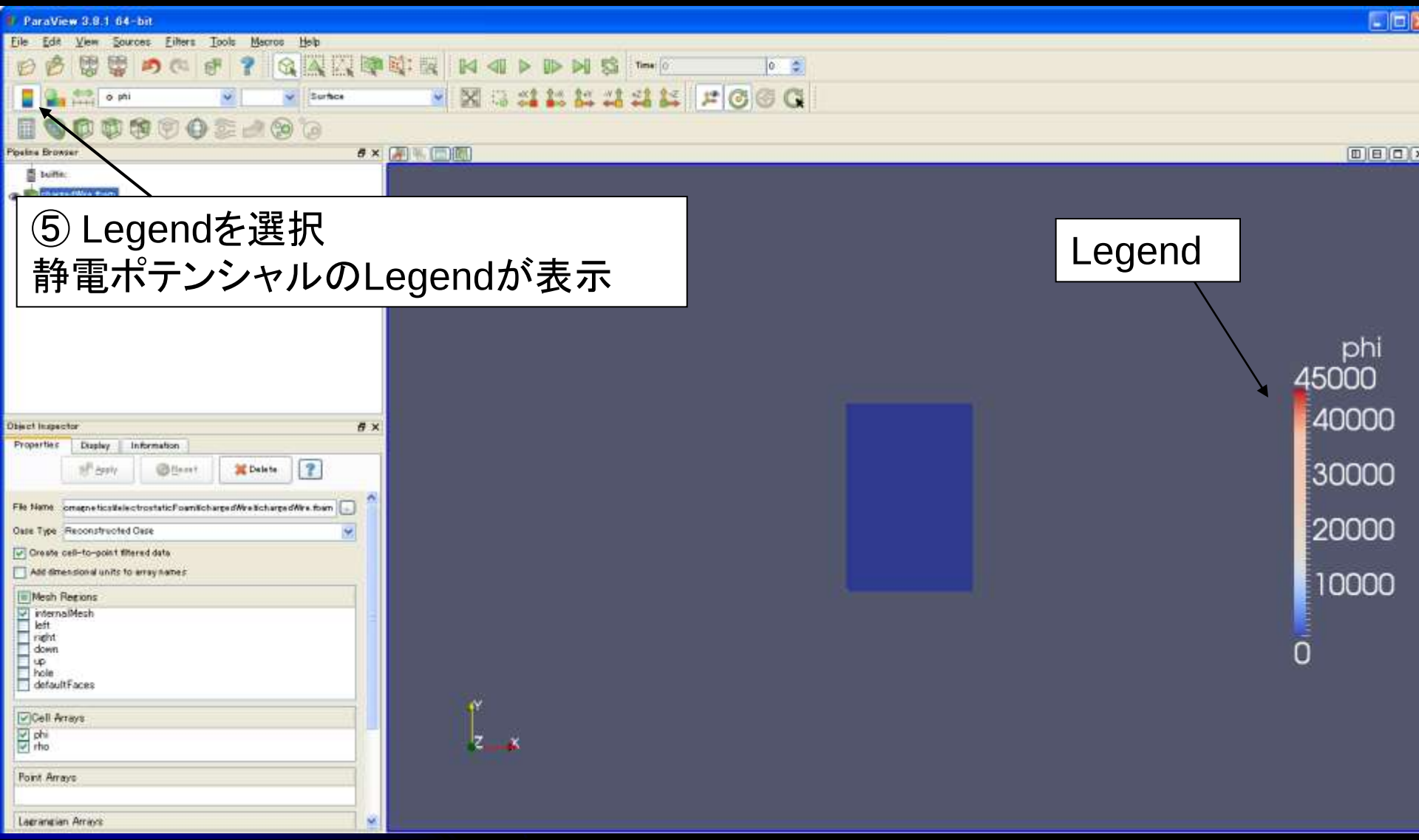
計算結果可視化(3)


ParaView 3.8.1 64-bit
File Edit View Sources Filters Tools Macros Help
Time: 0
Pipeline Browser
builtin:
chargedWire.foam
③Applyを選択
Object Inspector
Properties Display Information
Apply Reset Delete
File Name omagnetics¥electrostaticFoam¥chargedWire¥chargedWire.foam
Case Type Reconstructed Case
Create cell-to-point filtered data
Add dimensional units to array names
Mesh Regions
internalMesh
left
right
down
up
hole
defaultFaces
Cell Arrays
phi
rho
Point Arrays
Lagrangian Arrays
Y
Z
X

計算結果可視化(4)


ParaView 3.8.1 64-bit
File Edit View Sources Filters Tools Macros Help
Time: 0
Solid Color
Surface
Solid Color
phi
rho
vtkCompositeIndex
cellNormals
phi
rho
Pipeline Browser
builtin:
chargedWire.f
④ phiを選択
Object Inspector
Properties Display Information
Apply Reset Delete
File Name omagnetics¥electrostaticFoam¥chargedWire¥chargedWire.foam
Case Type Reconstructed Case
Create cell-to-point filtered data
Add dimensional units to array names
Mesh Regions
internalMesh
left
right
down
up
hole
defaultFaces
Cell Arrays
phi
rho
Point Arrays
Lagrangian Arrays
Y
Z
X

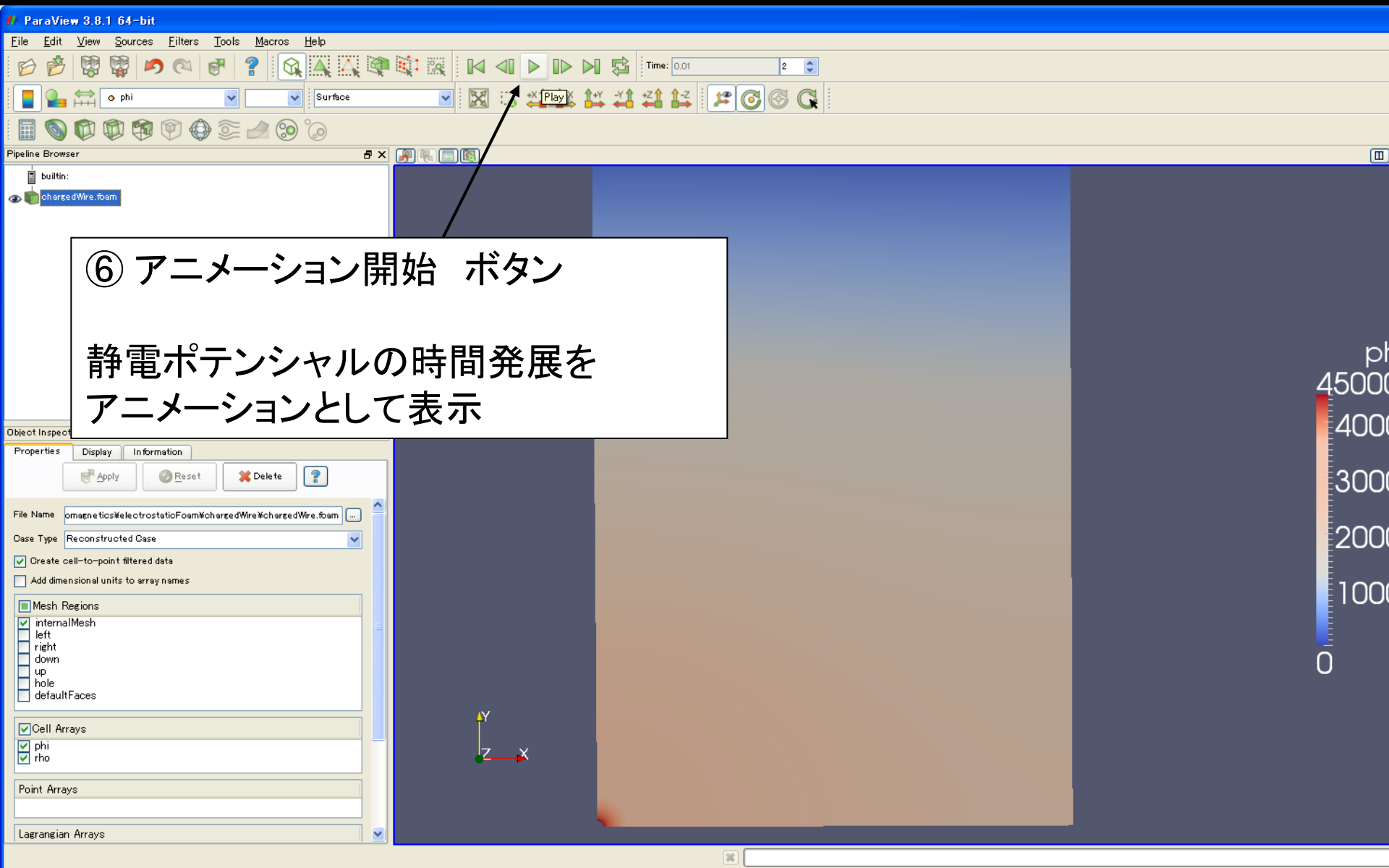
計算結果可視化(5)



⑤ Legendを選択
静電ポテンシャルのLegendが表示

Legend

計算結果可視化(6)



⑥ アニメーション開始　ボタン

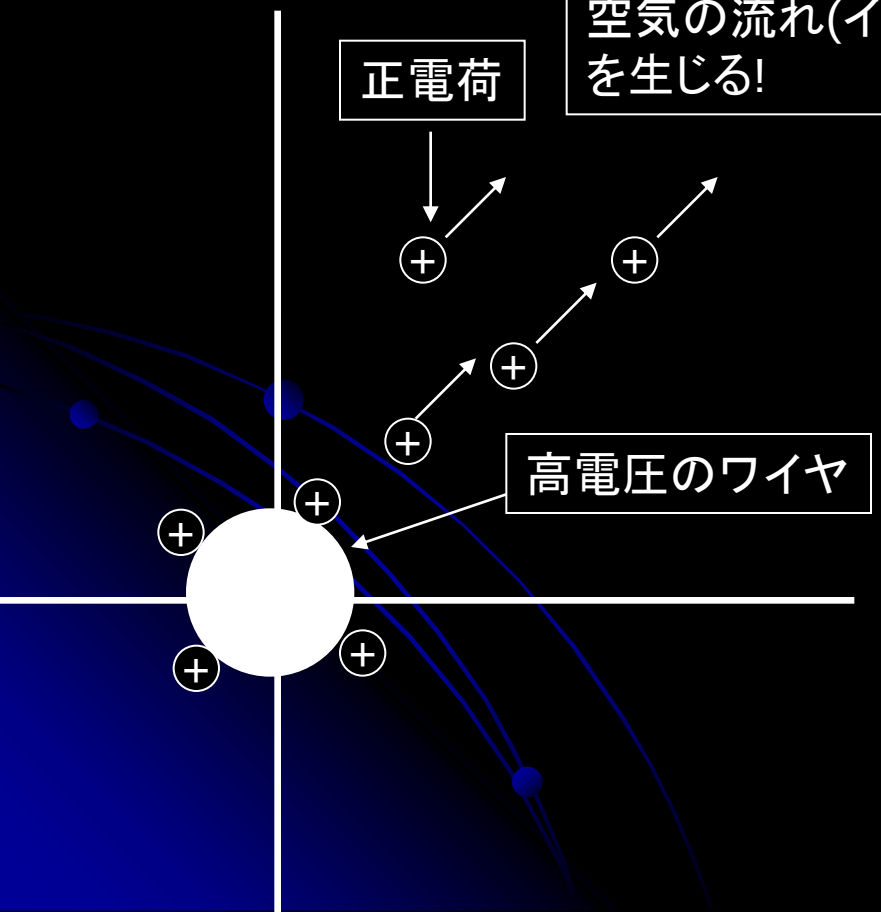
静電ポテンシャルの時間発展を
アニメーションとして表示

次回予告

イオン風の記述

gccビルド,OpenFOAM,Paraviewのビルド他

放電時に起きる現象



荷電粒子の流れが空気の流れ(イオン風)を生じる!

荷電粒子は、電場+空気流れで輸送される

本来は、電気流体力学で記述される現象

電気流体力学の基礎方程式

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\rho\mathbf{U} - k\rho\nabla\phi\right) = 0$$

$$\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U}\cdot\nabla\mathbf{U} = -\frac{1}{\rho_{air}}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{U} + \frac{\rho}{\rho_{air}}\nabla\phi$$

$$\nabla\cdot\mathbf{U} = 0$$

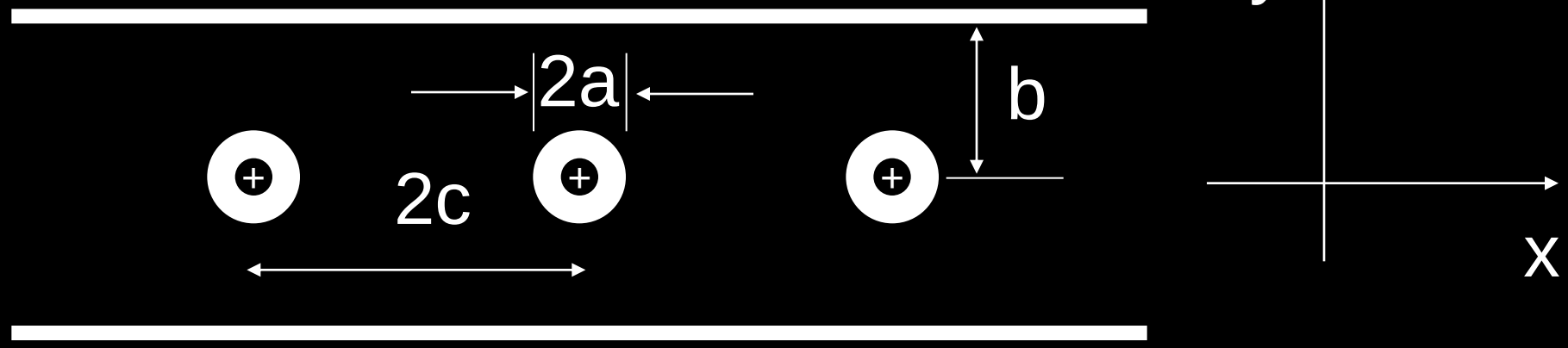
参考資料

C. Junhong, “**DIRECT CURRENT CORONA-ENHANCED CHEMICAL REACTIONS**," *PhD. Thesis*(2002).

P. Cooperman, "A Theory for Space-Charge-Limited Current with Application to Electrical Precipitation," *Trans. Amer. Inst. Elec. Eng. Part 1* **79**, 47-50 (1960).

Appendix A: 計算結果妥当性検討

Coopermanのモデル(近似的解析解)



$$\phi(\mathbf{r}) = -\frac{V_0}{\log\left(\frac{d}{a}\right)} \log\left[k_1^{1/2} \left| sn\left(\frac{K_1 Z}{c}, k_1\right) \right| \right] + \frac{\log\left(\frac{d}{a}\right) I}{2\pi\varepsilon_0 k V} \left(b^2 - y^2\right)$$

$sn(x)$: *Jacobian eliptic function first kind*

$$q_1 = e^{-2\pi b/c}$$

$$k_1 = \left[\frac{2 q_1^{1/4} \sum_{n=1}^{\infty} q_1^{n(n-1)}}{1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} q_1^{n^2}} \right]^2$$

$$K_1 = \int_0^{\pi/2} \left(1 - k_1^2 \sin^2 \varphi\right) d\varphi$$

$$d = \frac{c}{k_1^{1/2}} K_1$$