

建築数理工学

第14回 (2009年7月23日)

建築学コース2年次第1学期

担当: 大嶋拓也

本日の内容

- 残響室の音響解析(1)

frameJointほか、計4ケースの解析結果をもとに、以下を行い、Excelワークシートにレイアウトして提出せよ。

(1) 応力テンソル各成分(σ_{xx} 、 σ_{xy} 、 σ_{yy})の分布、および変位を各ケース間で比較し、それぞれの応力分布・変位の主な決定要因、および各ケース間の応力分布に違いが出る原因を考察せよ。必要な図も掲載すること。

(2) 接合部の補強プレートは必要か判断せよ。理由も記すこと。

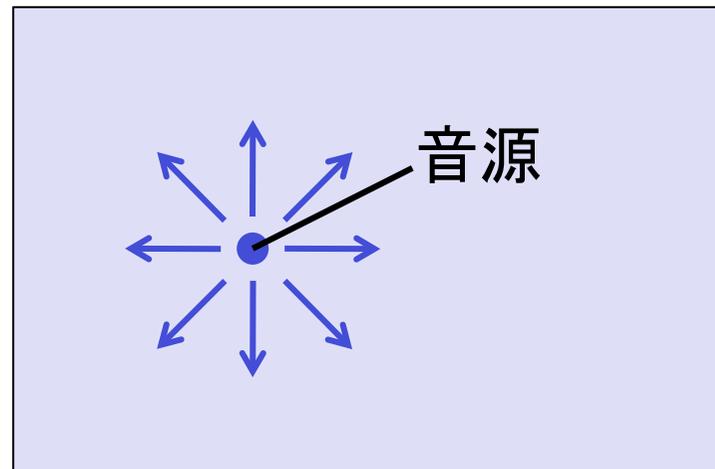
注意: 数値の単位、画像・表のキャプション、在籍番号・氏名などを必ず記載すること。

採点は考察に重点を置く。

締切: 16日(木) 23:55

- 解答要点→解答要点のPDFを参照
- 配点: 考察30点(標準20点)、許容応力度に基づいたプレートの必要性の判断10点、その他は概ね従来通り
- 地震応力の有無→応力各成分の分布はあまり変わらないが、絶対値は地震荷重が加わると大きくなる。地震荷重によって変位は大きくなる。
- プレートの有無→垂直応力は接合部周辺の分布が変化。せん断応力は分布が大きく変化、せん断応力最大値はプレート有の場合小さくなる。プレート有りの場合、プレートフランジのフレームへの接合部に応力集中、変位はやや小。
- せん断応力→垂直応力ではないので、「圧縮」「引張り」という言い方はしない。
- 「荷重」と「応力」を区別されたい。(前者は外部から加わる力、後者は内部に存在する単位面積あたりの力)

- 音響解析: ある点から出した音が、どのように空間内を伝わるかをシミュレートする



- 音響伝搬の基礎方程式(波動方程式)は、以下である。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c_0^2 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \cdots (1) \text{ : 拡散方程式の左辺が2階微分となっただけ}$$

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdots (2)$$

ただし、 t : 時刻[s]、 x, y, z : 空間座標[m]、 $\phi = \phi(x, y, z, t)$: 速度ポテンシャル[Pa·s]、 c_0 : 音速(343.7 m/s)、 $p = p(x, y, z, t)$: 音圧[Pa]、 ρ : 空気密度 (1.205 kg/m³)

- 離散化式→拡散方程式の左辺が2階中心差分になるだけなので、略。

- 音響解析の境界条件として最も一般的な方法は、「壁面に垂直に音が入射したとき、壁体が音響エネルギーが吸収する割合(吸音率 α)」を指定する方法である。
- $\alpha = 0$ で完全反射、 $\alpha = 1$ で完全吸音。
- 境界条件式は、以下のとおりである。

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -U \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad : \text{移流方程式} \\ U = \frac{z}{\rho} \quad \dots(3) \\ z = \rho c_0 \frac{2(1 + \sqrt{1 - \alpha}) - \alpha}{\alpha} \quad \dots(4) \end{array} \right.$$

ただし、 U : 移流速度、 n : 境界面法線方向、 z : 壁材の垂直入射音響インピーダンス

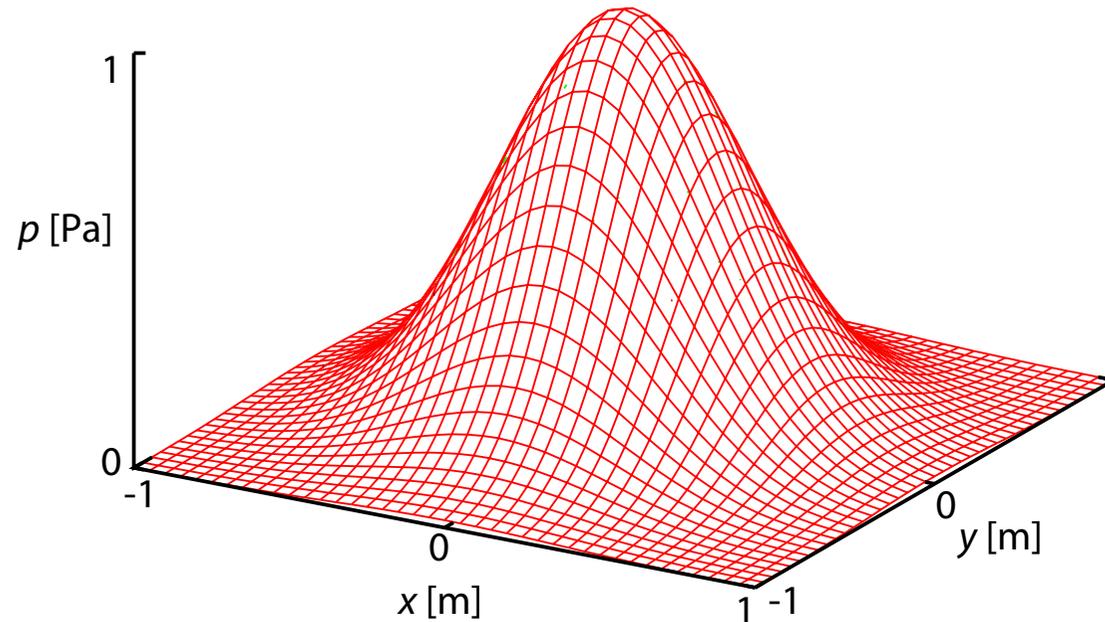
- 典型的な建築材料の吸音率
 - コンクリート: 0.01~0.04 (本ケースでは0.01)
 - ガラス: 0.02~0.15 (本ケースでは0.06)
- 具体的な境界条件の設定は、0¥phiファイルのconvectiveVelocityに、式(3)、式(4)によって α から計算した U の値を指定する。

```
opening
{
  type          convectiveOutlet;
  convectiveVelocity uniform 22220.6; ← $U$ の値を指定する
  writeValue    1;
  value         uniform 0;
}
```

- ここでは、時刻 $t = -\Delta t/2$ (Δt : 時間刻み)で、音源点 (x_s, y_s, z_s) からの距離 r に対し

$$p(x, y, z, -\Delta t/2) = e^{-4r^2}, \quad r = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \quad \dots (5)$$

の圧力分布となるよう、時刻 $t = -\Delta t$ における速度ポテンシャル ϕ を設定する。



- 式(2)を離散化して整理すると、 $\phi(x, y, z, -\Delta t) = -\frac{\Delta t}{\rho} p(x, y, z, -\Delta t/2)$ ($\phi(x, y, z, 0) = 0$)
- このとき、およそ波長1 m、すなわち343.7 Hz以下の周波数の音が含まれる。

- CFDと同様、音響解析でもクーラン条件によって Δt の値に制限がある。
- 3次元等間隔メッシュの場合、以下を満たすように Δt を決める。

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{3}c_0}$$

- 今回実施するケース(後述)ではセル幅が最小で0.1 mなので、それに合わせると

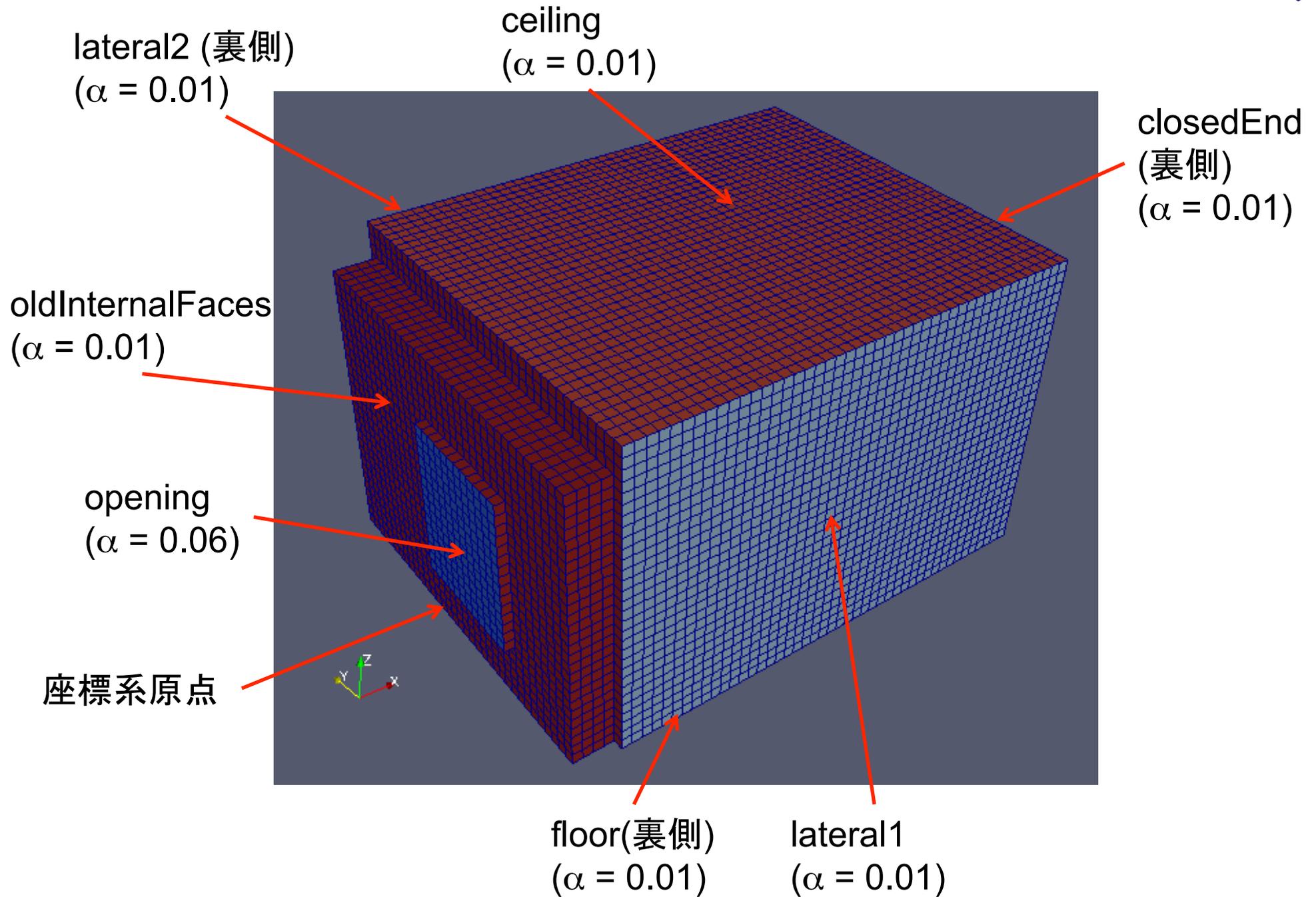
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{3}c_0} = \frac{0.1}{\sqrt{3} \times 343.7} = 1.67981 \times 10^{-4} \quad [\text{s}]$$



- ケースフォルダ: z:¥OpenFOAM¥potentialWaveFoam¥reverberationRoom
- 財団法人小林理学研究所音響試験棟 残響室
- 財団法人小林理学研究所: 民間では国内最大級の音響試験・研究機関

- フルに3次元のケース
- 非定常問題
- ➡ 計算が大変！ (=時間がかかる)
- CFD、構造解析、音響解析等の実務では、スーパーコンピュータ(計算専用のコンピュータ)を使って、丸一日かかることも珍しくない。
- ソフトウェア(今回は、可視化ソフトウェア)の使い方を、ある程度発見的に(教わらずに)マスターしてもらおう。

ケース概要(9): メッシュ形状・境界名



- 「スタート」→「すべてのプログラム」→「OpenFOAM」→「OpenFOAM Terminal」

```
cd OpenFOAM/potentialWaveFoam/reverberationRoom
```

reverberationRoomのケースフォルダへ移動する。

```
blockMesh . .
```

直方体のメッシュを生成する。

```
./removeCellBoxes.py
```

blockMeshで生成した直方体のメッシュに、カートリッジ周りの窪みをつける。

```
mv 0.000167981/polyMesh/* constant/polyMesh
```

removeCellBoxesで生成したメッシュが0.000167981フォルダに保存されるので、constantフォルダに移す(「mv」はmoveの略)。

```
rm -rf 0.000167981
```

0.000167981フォルダは不要なので消す(「rm」はremoveの略)。

- constant¥polyMesh¥boundaryファイル末尾を、以下のように変更する。

```
oldInternalFaces
{
  type empty; ←「empty」を「patch」に変更
  nFaces 1340;
  startFace 164790;
}
```

```
cp -a 0.org 0  
funkySetFields . . -time 0
```

0.orgフォルダの初期値ファイルを0フォルダにコピーし、初期値を設定する。

- ここではとりあえず、100分の1秒間の解析を行うこととし、system¥controlDictファイルは以下のようにになっている。

```
endTime 0.01;  
writeInterval 5;
```

```
potentialWaveFoam . .
```

解析を実行する。

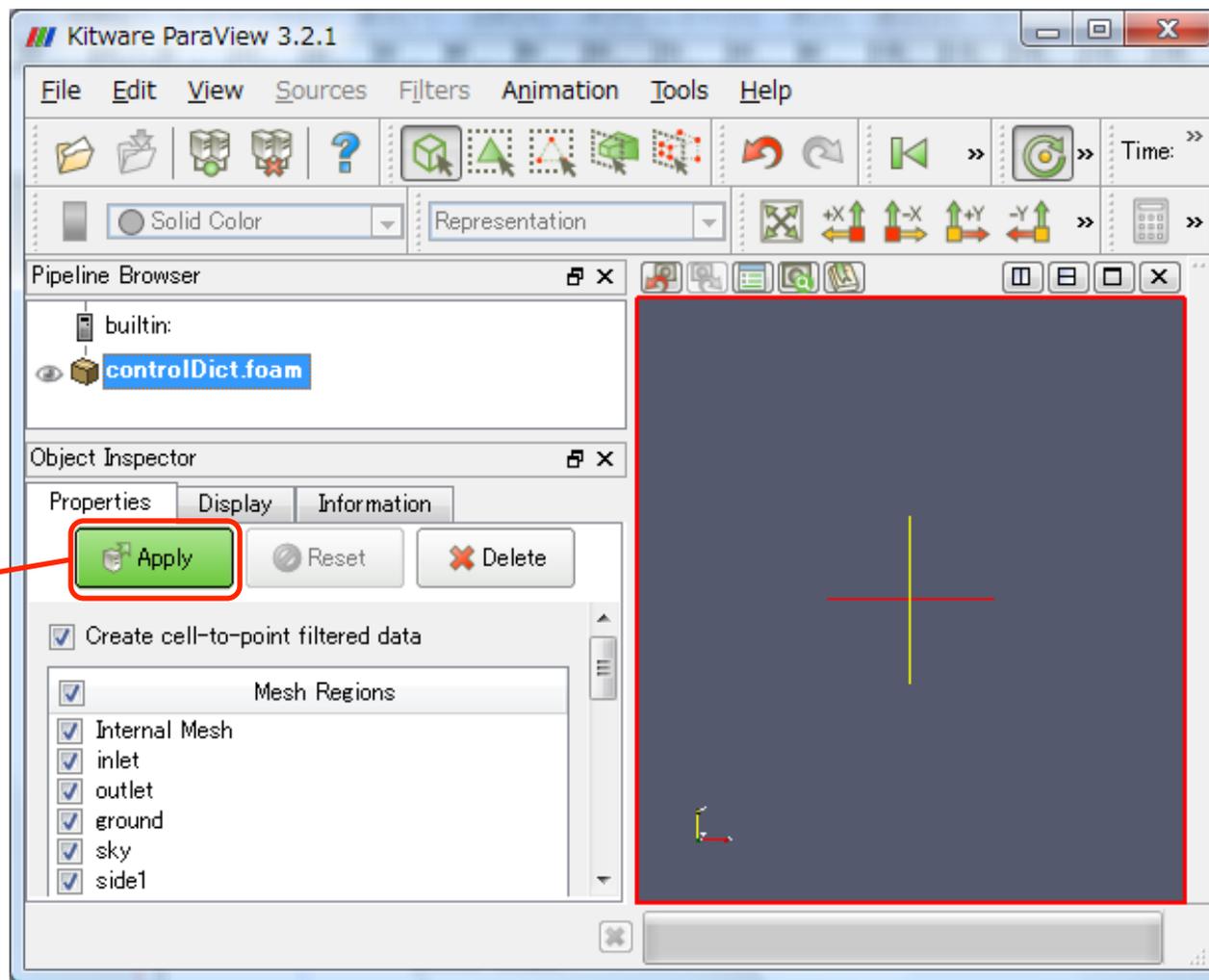
- 2次元問題では対象物体表面のカラー画像で結果を表現できたが、3次元では内部をどのように表現するかが問題。
- 今回は、gmsHfoamでなく、3次元領域の可視化に向けたparaFoamを使って可視化を行う。

paraFoam

paraFoamを実行する。

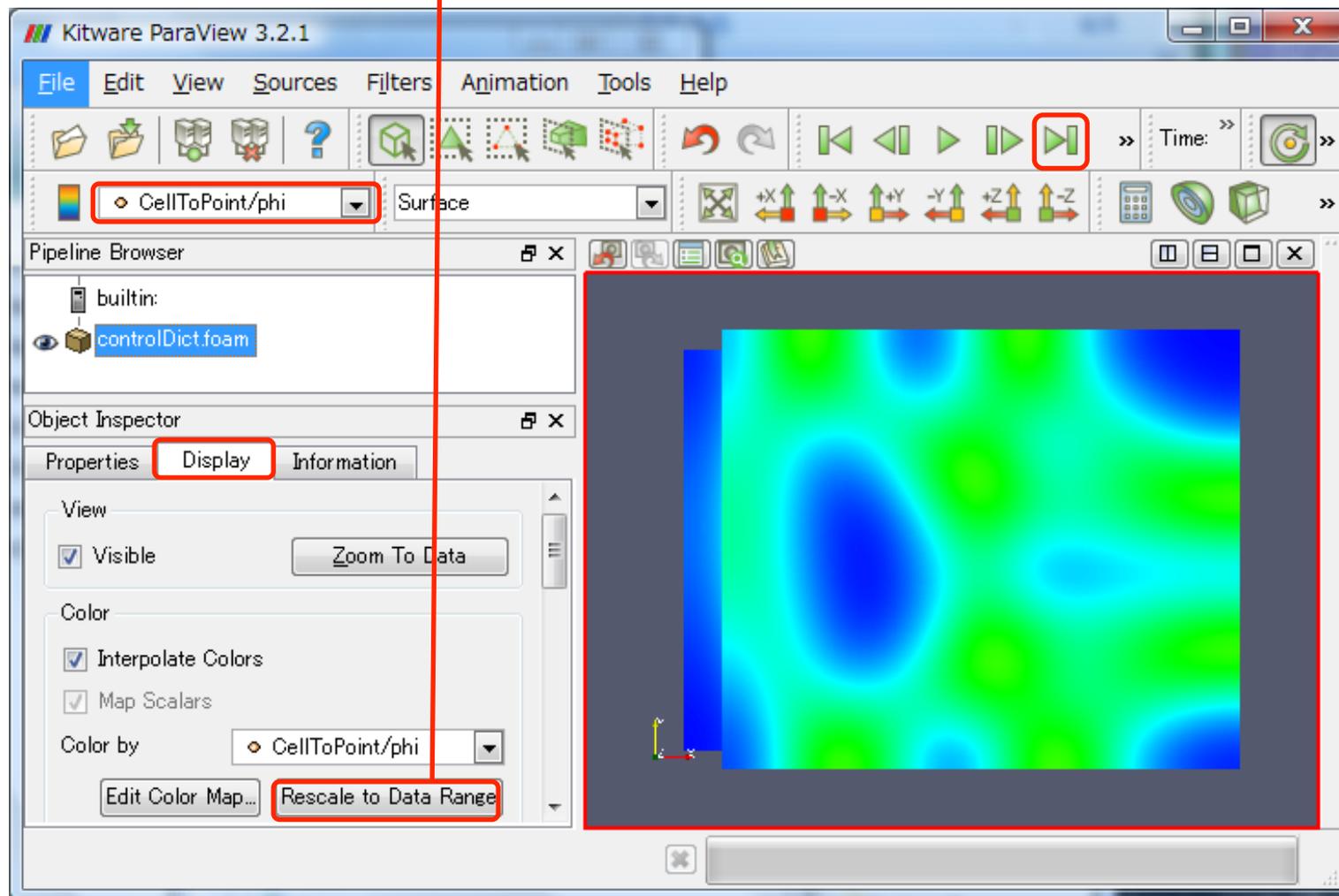
paraFoamの起動画面

クリックすると、データが読み込まれる



実行結果の可視化 (3)

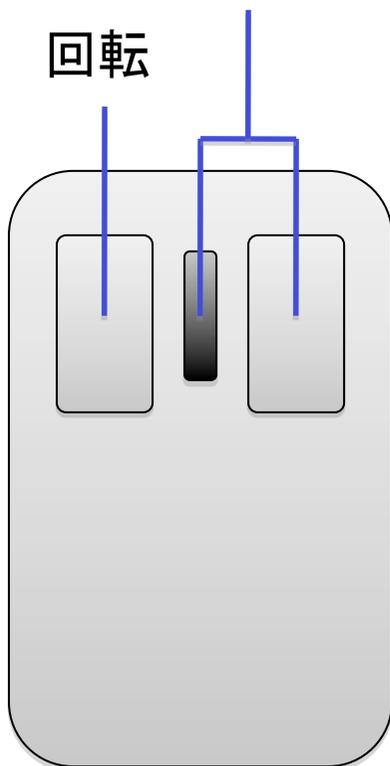
gmsHfoamと異なり、カラーマッピング(色と値の対応付け)が手動なので、一旦最後のコマまで送り、カラーレンジを合わせる。



paraFoamのマウス操作

ドラッグ

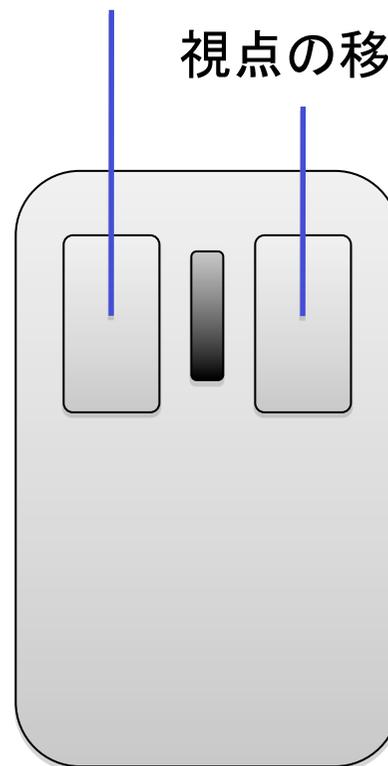
拡大・縮小(右ボタンは縦にドラッグ)



[SHIFT] + ドラッグ

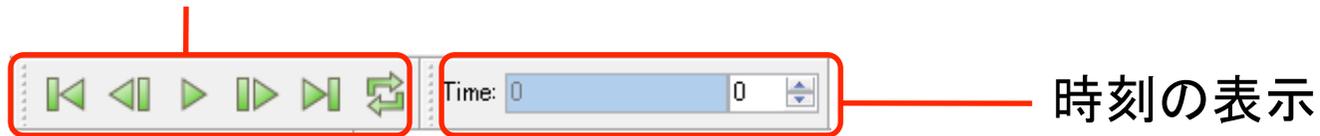
画面垂直軸に対し回転

視点の移動



paraFoamツールバーの基本的な操作

gmshFoamのアニメーションボタンと同様



凡例の表示 表示する変数の選択(「 ϕ 」を選択する)



実行結果の可視化 (6)

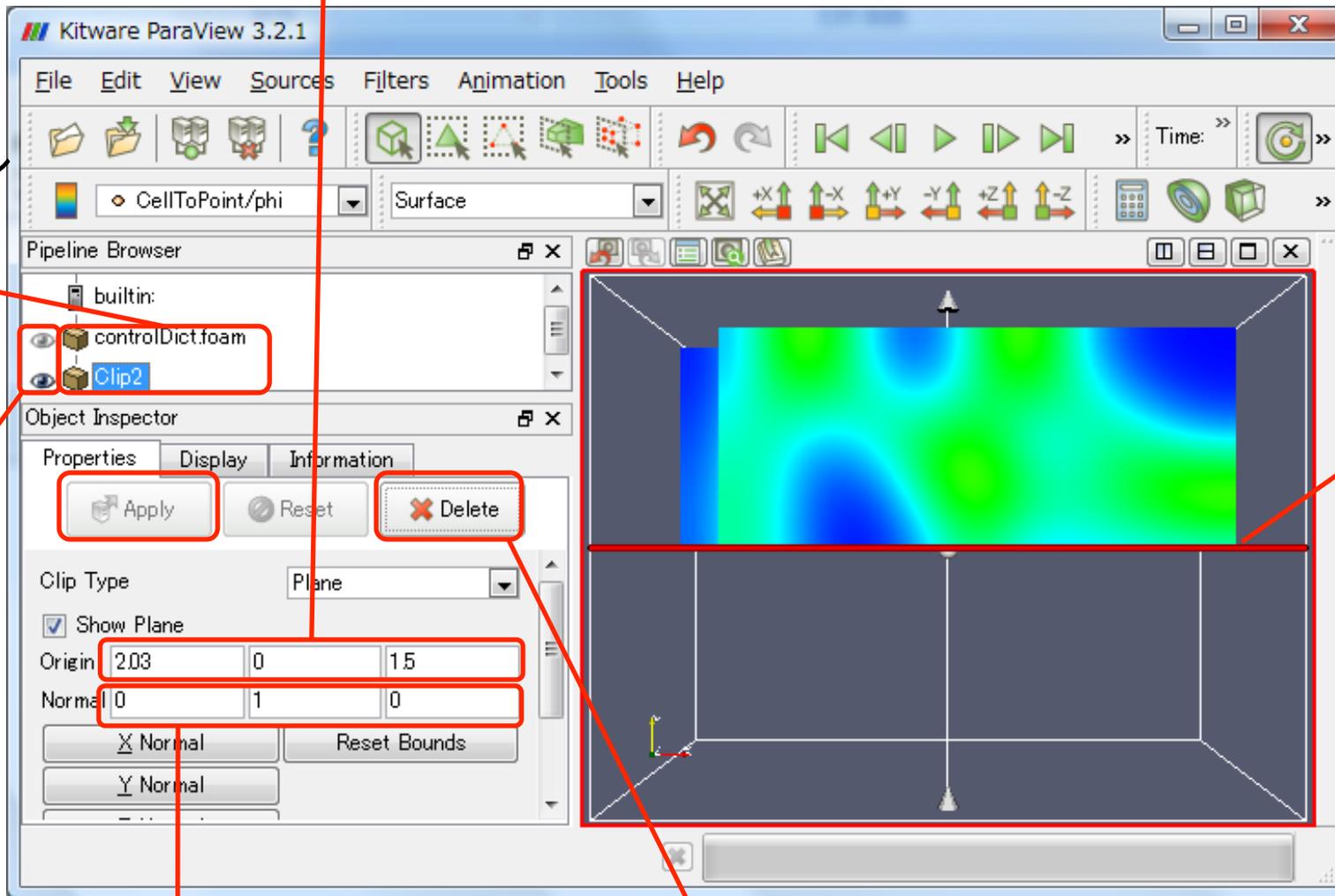


Clipフィルタ: gmsHfoamのClipping Planesと同様

データに
対して適
用されて
いるフィル
タの順
(パイプ
ライン)

切断面上の点(面上ならどこでも良い)を入力

切断前後
の画像
ON/OFF
切替



切断面で
切断され
ている

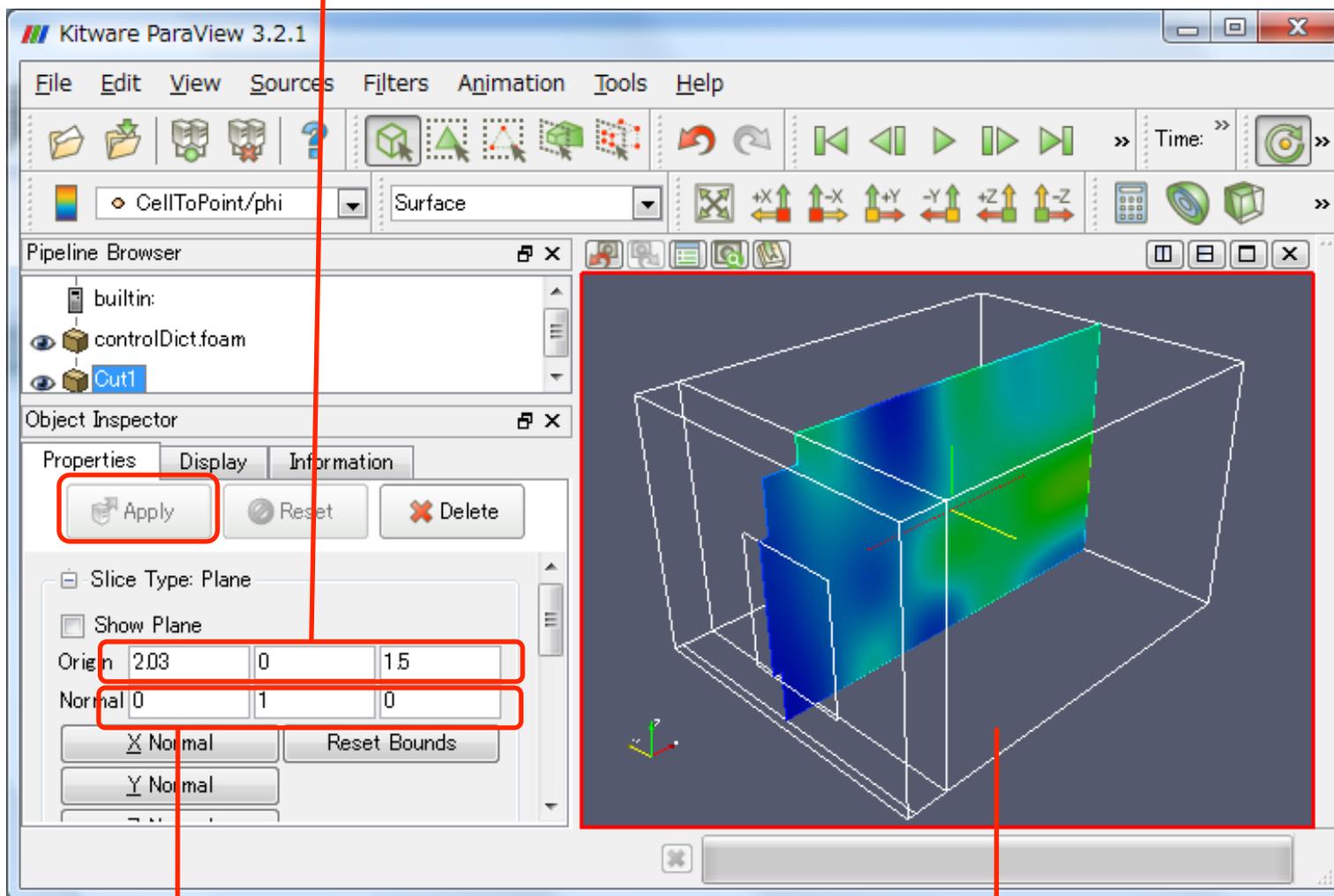
切断面の法線ベクトルを入力

フィルタの削除には、Deleteをクリック



Sliceフィルタ: Clipの切断面だけを残す

切断面上の点(面上ならどこでも良い)を入力



切断面の法線ベクトルを入力

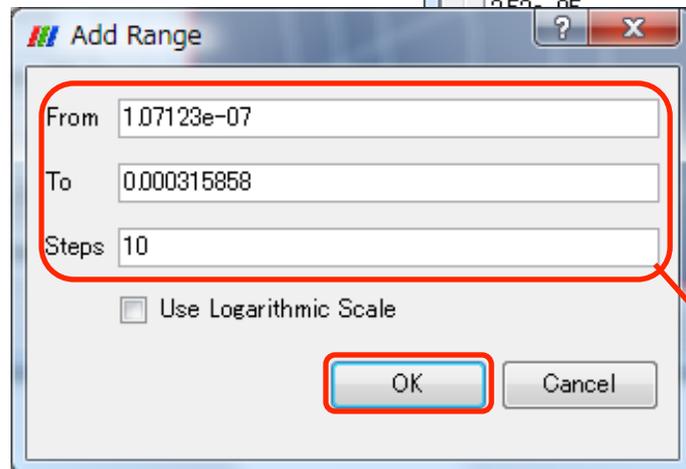
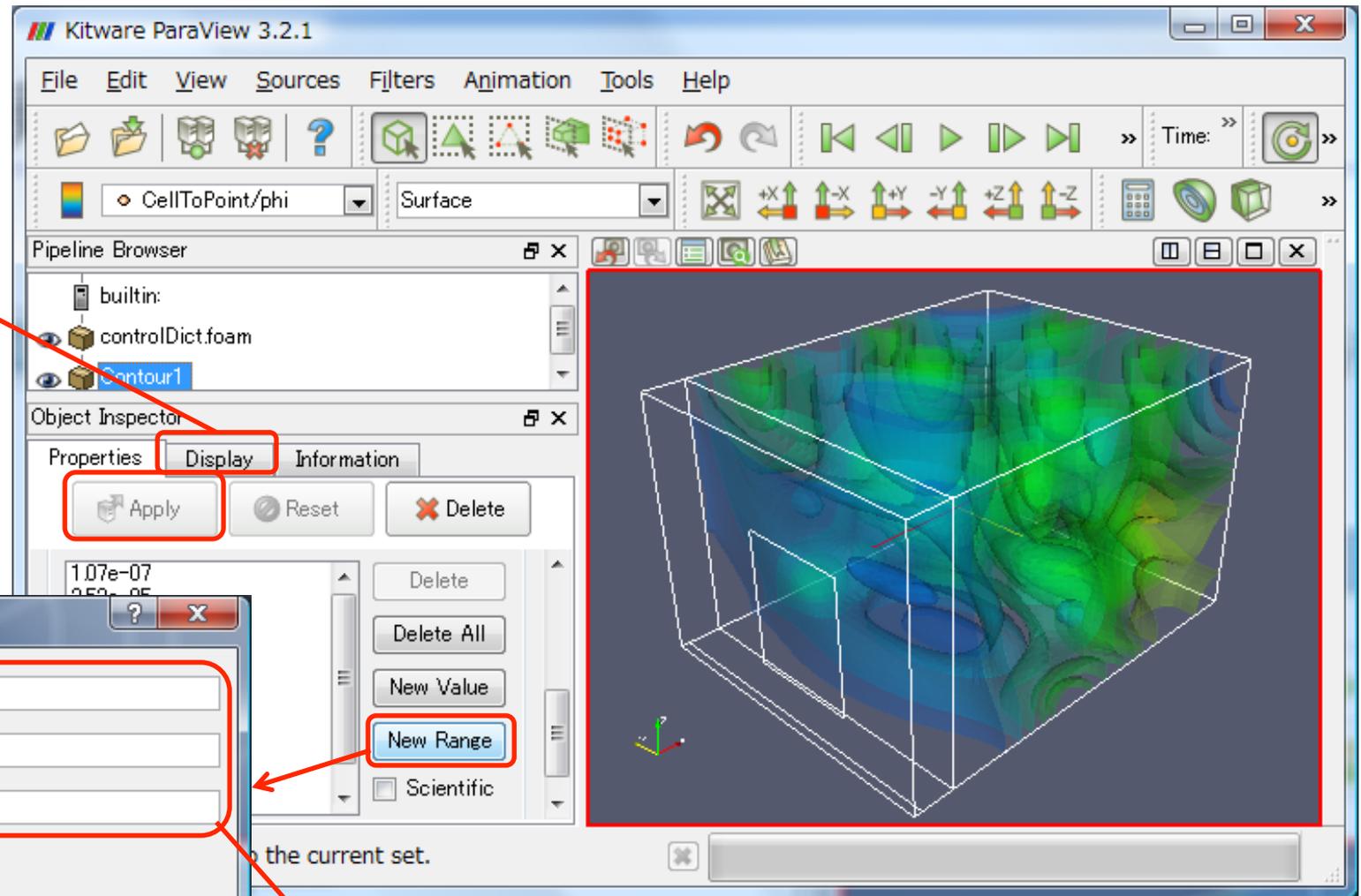
(室全体もOutline表示)

実行結果の可視化 (8)



Contourフィルタ: 等値面(isosurface)を作成する

Contourを実行後、Display → Opacityで0.2~0.5程度の値を入ると、半透明の等値面になる



From - Toの値の間を、等値面でSteps分割する

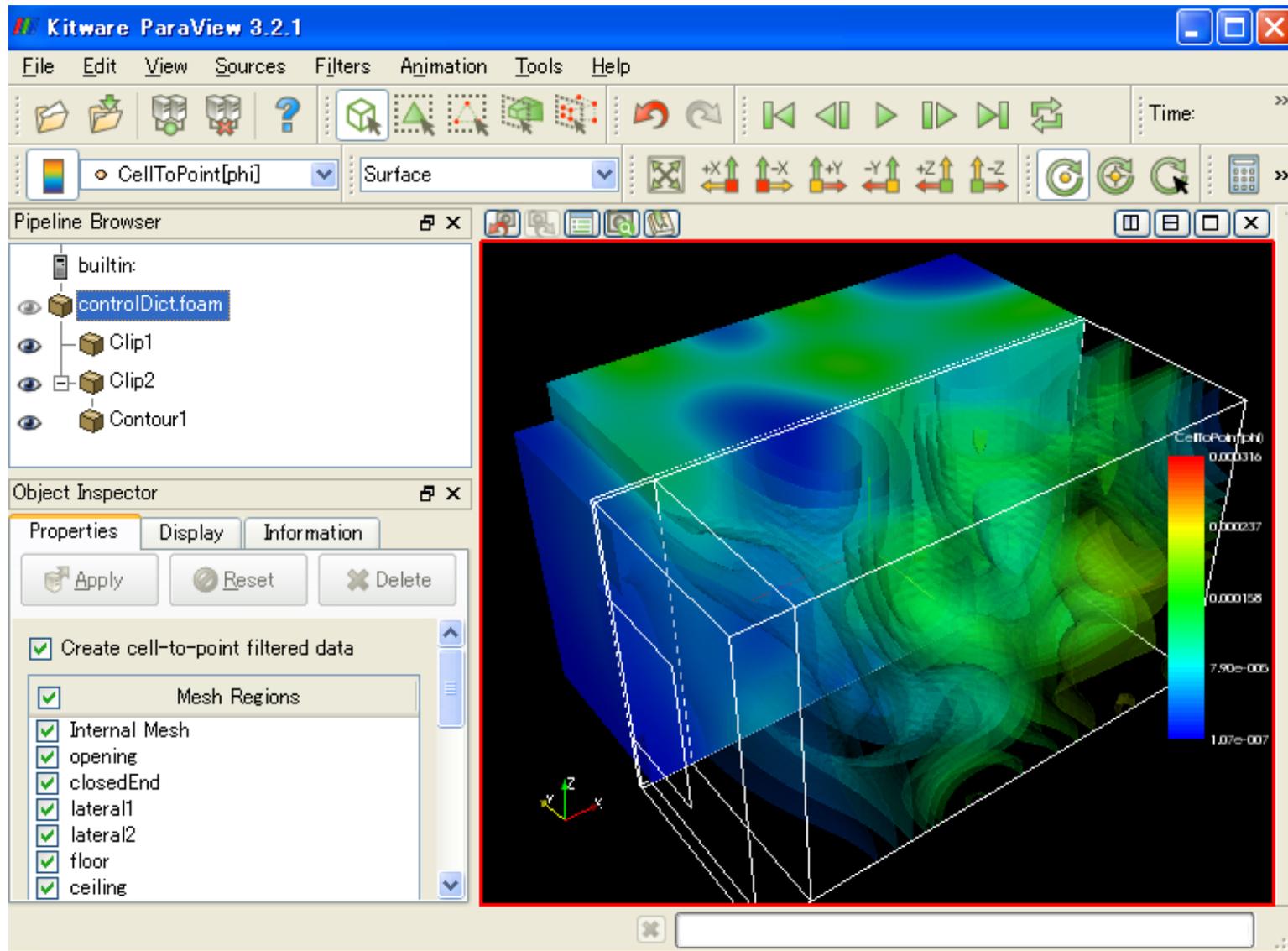
作成した画像の保存

- 画像の保存には、「Files」メニュー→「Save Screenshot」を選択する。
- 全時刻ステップの画像を連続的に保存するには、「Files」→「Save Animation」を選択する。

フィルタの組合せ

- 同じフィルタを複数使用することも、フィルタを適用した結果に対し、さらにフィルタを適用することも可能 (例: Clipフィルタの適用結果に対し、さらにContourフィルタを適用)。
- フィルタが適用されている順は、画面左上のPipeline Browserで確認することができる。

- フィルタの組合せ例(画面奥側と手前側で、別の表現)



残響室の音響伝搬問題について、以下の解析と課題を行え。

- (1) 時刻0.01秒までの音響伝搬の様子を判りやすく可視化し、4～6枚の連続した画像で表現せよ。
- (2) 残響時間が1秒～2秒となるよう壁面の吸音率を設定し、時刻1秒以上の解析と可聴化を行え。吸音率の設定と可聴化した音データをExcelワークシートに添付せよ。[方法](#)は次回に説明する。
- (3) 簡単に考察を書け。(例: 前回講義で聴いた音との比較、友人と異なる設定で可聴化した場合は、その比較等)

注意: 数値の単位、画像・表のキャプション、在籍番号・氏名などを必ず記載すること。

・音データの添付: 「挿入」→「オブジェクト...」→「ファイルから」→「参照...」

・(2)ではデータの書き出し間隔を長くしないと、ディスクが溢れるので注意せよ。

・計算の待ち時間にwebの閲覧は構わないが、動画サイトは不可！！

締切: 8月10日(月) 23:55

- 上手く走っていたシミュレーションが突然止まった場合は、ディスクの容量が一杯になったことが考えられる。
- 一旦、不要なファイルや不要なシミュレーション結果を消去して容量を空け、再度解析を実施されたい。