

数值解析基礎

3. 拡散方程式（1次元）

3. Diffusion Equation (1-Dimensional)

コンテンツ

1

拡散方程式

2

有限体積法

3

境界条件

4

実装

コンテンツ

1

拡散方程式

2

有限体積法

3

境界条件

4

実装

1. 拡散方程式

拡散 (diffusion) : 物理量が空間で散らばり、広がること

1次元の場合

$$\frac{\partial C}{\partial t} = a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$k > 0$ は拡散定数とよばれる正の量で, より一般には

$$\frac{\partial C}{\partial t} = a \nabla^2 C$$

1. 拡散方程式

長さ L の一様な貯留層における圧力 $P(x, t)$ の時間変化を考える。

$$\phi c \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

ϕ : 岩石の空隙率

k : 岩石の浸透率

c : 圧縮性

μ : 流体の粘度

※この偏微分方程式は境界条件と初期条件を与えれば解ける。

初期条件

$P(x, 0)$ での圧力分布

境界条件

$P(0, 0)$ と $P(L, 0)$ での条件

コンテンツ

1

拡散方程式

2

有限体積法

3

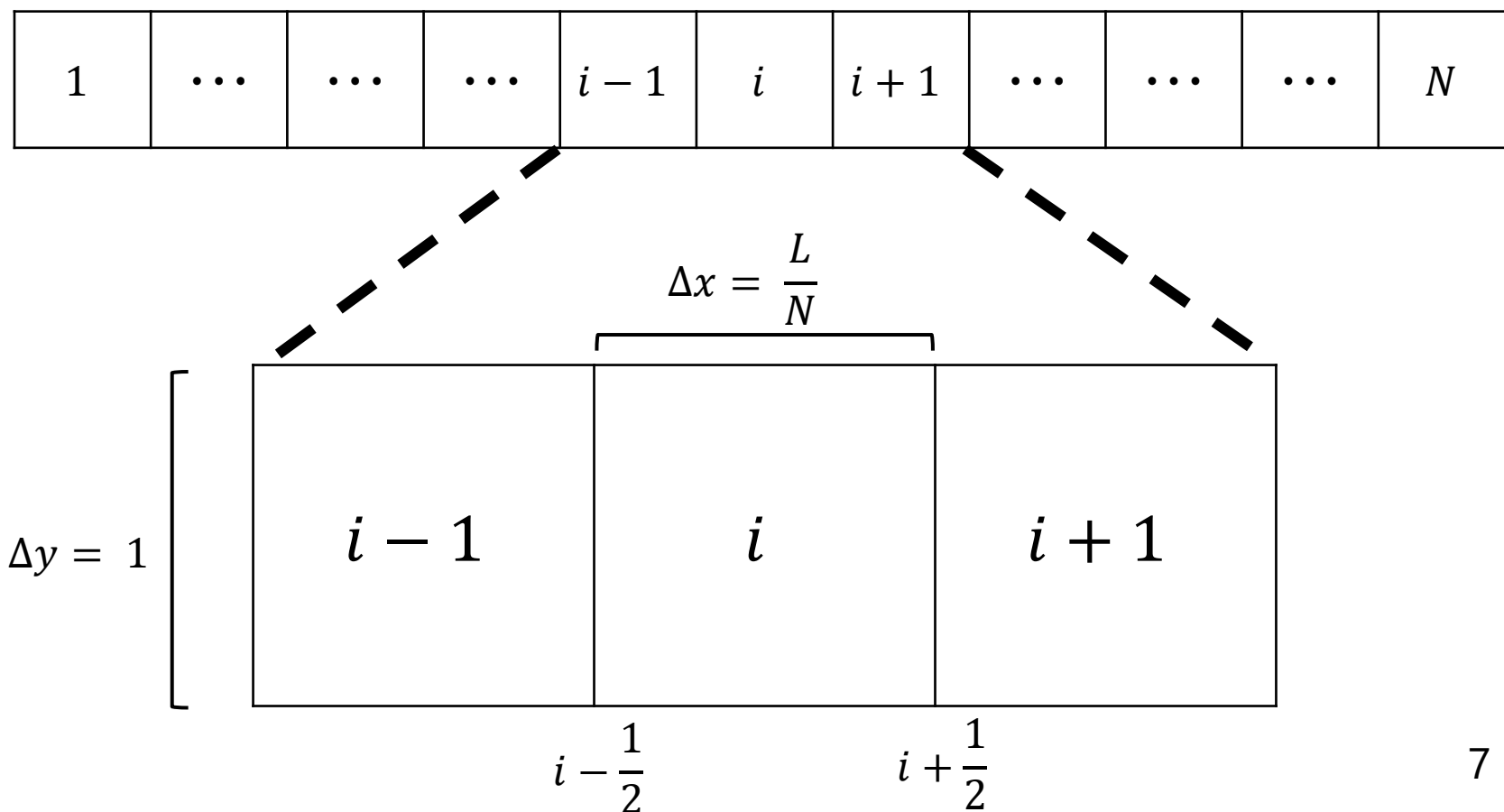
境界条件

4

実装

2.有限体積法 (**F**inite **V**olume **M**ethod)

貯留層を N 個の検査体積 (**C**ontrol **V**olume) に分割する。

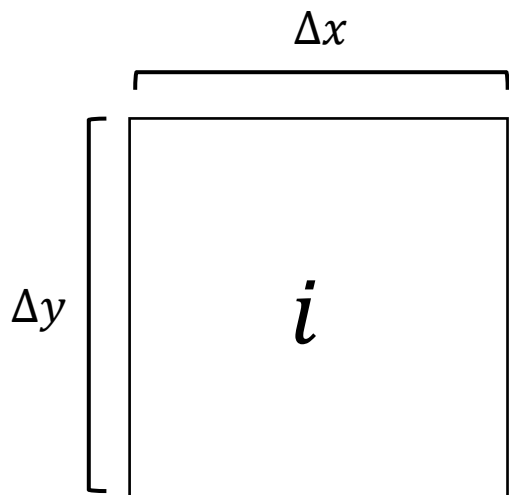


2. 有限体積法（時間項の積分）

$$\phi c \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

検査体積 i で、拡散方程式の左辺 $\phi c \frac{\partial P}{\partial t}$ を面積分

$$\iint \phi c \frac{\partial P}{\partial t} dx dy \cong \phi c \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} \Delta x \Delta y$$



$$= \phi c \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} \Delta x \Delta y$$

2. 有限体積法（空間項の積分）

$$\phi c \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

検査体積 i で、拡散方程式の右辺 $\frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$ を積分すると、**発散定理**より、

$$\iint_{CV_i} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} dx dy = \int_{\partial CV_i} \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} d\vec{r}$$

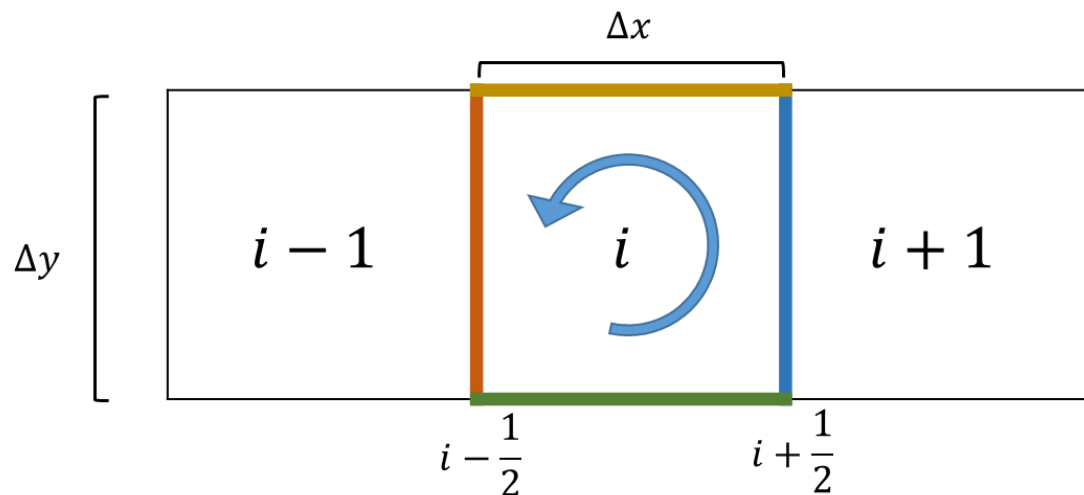
検査体積での面積分



境界での線積分

2.有限体積法（境界での線積分）

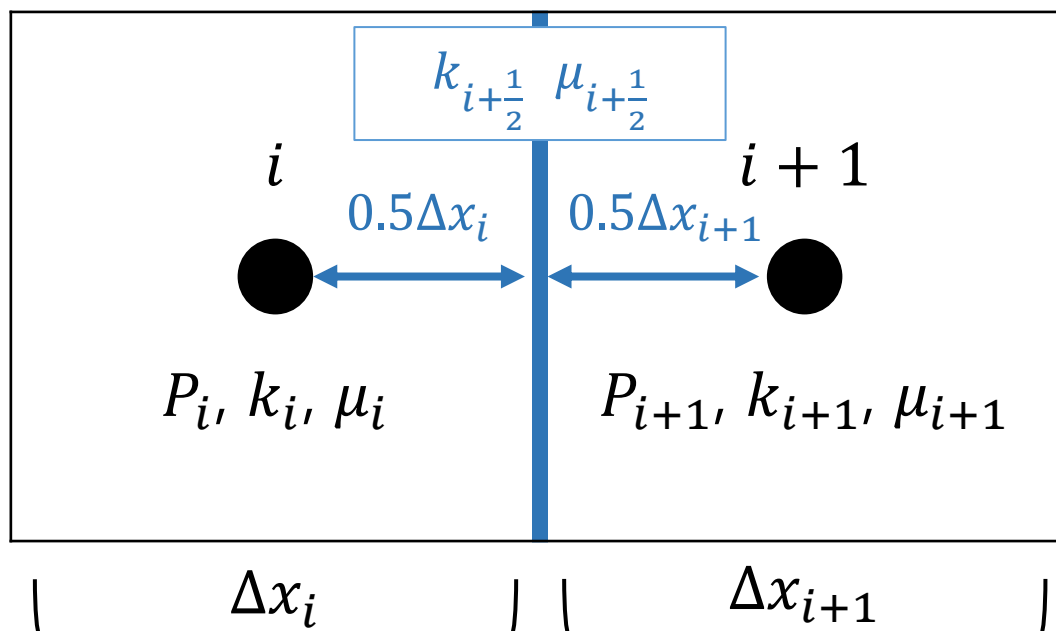
$$\int_{\partial CV_i} \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} d\vec{r}$$



$$= 0 \times \Delta x + \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}_{i+\frac{1}{2}} \times \Delta y + 0 \times (-\Delta x) + \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}_{i-\frac{1}{2}} \times (-\Delta y)$$

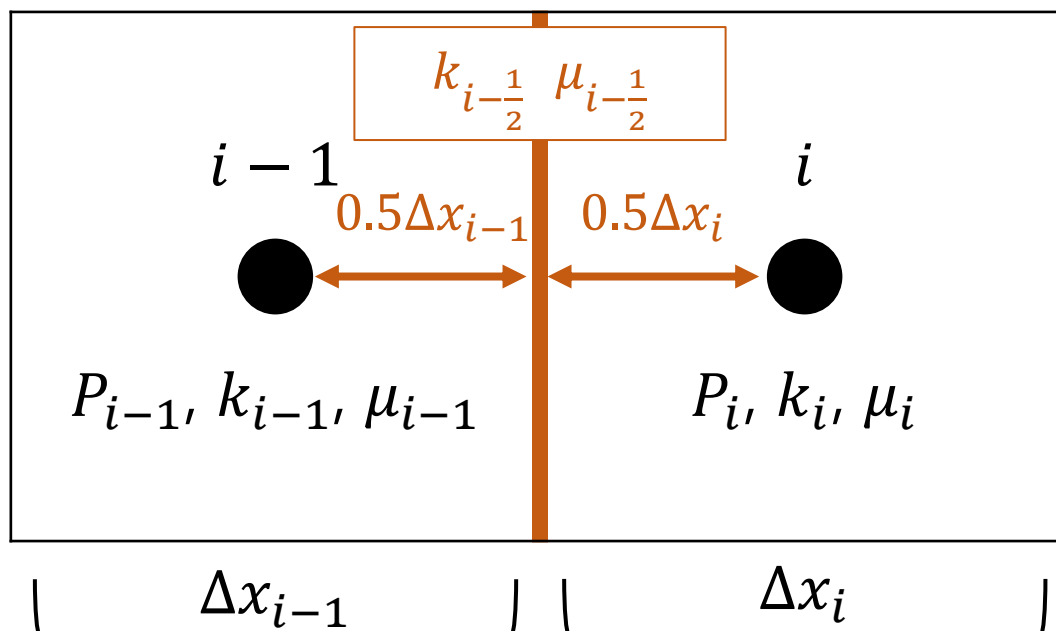
2.有限体積法（境界での線積分）

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \bigg|_{i+\frac{1}{2}} \times \Delta y = \frac{k}{\mu} \bigg|_{i+\frac{1}{2}} \frac{P_{i+1} - P_i}{0.5(\Delta x_{i+1} + \Delta x_i)} \Delta y$$



2.有限体積法（境界での線積分）

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \bigg|_{i-\frac{1}{2}} \times (-\Delta y) = \frac{k}{\mu} \bigg|_{i-\frac{1}{2}} \frac{P_i - P_{i-1}}{0.5(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} (-\Delta y)$$



2.有限体積法（境界での線積分）

| | |
|---|-------------------------|
| $k_{i+\frac{1}{2}}$ $k_{i-\frac{1}{2}}$ | k_i と k_{i+1} の調和平均 |
| $\mu_{i+\frac{1}{2}}$ $\mu_{i-\frac{1}{2}}$ | 液相の場合は一定としてOK |

Pythonの場合

```
>>> a=1;b=0;
```

```
>>> 2/(1/a + 1/b)
```

```
Traceback (most recent call last):  
File "<stdin>", line 1, in <module>  
ZeroDivisionError: division by zero
```

```
from scipy.stats import hmean
```

がおすすめ

MATLABの場合

```
>> a = 1; b = 0;
```

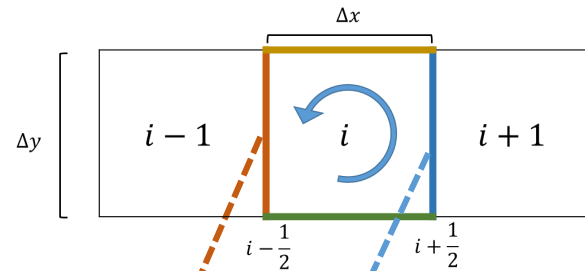
```
>> 2/(1/a + 1/b)
```

```
ans = 0
```

以降、 $\frac{k}{\mu} = \lambda$ とする

2. 有限体積法（漸化式）

$$\phi c \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$



$$\phi c \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_i = \lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{P_{i+1} - P_i}{0.5(\Delta x_{i+1} + \Delta x_i)} \Delta y_i - \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{P_i - P_{i-1}}{0.5(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \Delta y_i$$

【仮定】

- 貯留層を等分しているので $\Delta x_i = \Delta x_{i-1} = \Delta x_{i+1}$
- 貯留層の厚さは1とする（ $\Delta y_i = 1$ ）
- 右辺の圧力はすべて P^n

漸化式を P_i^{n+1} について整理しよう！

2. 有限体積法（漸化式）

$$P_i^{n+1} =$$

解答

ただし、 $\alpha = \frac{\Delta t}{\phi c}$ 、 $\lambda_w = \lambda_{i-\frac{1}{2}}$ 、 $\lambda_e = \lambda_{i+\frac{1}{2}}$

コンテンツ

1

拡散方程式

2

有限体積法

3

境界条件

4

実装

3. 境界条件

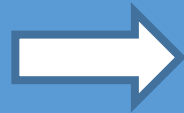
両端の検査体積では何が起こるのか?

| | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-------|
| 0 | 1 | ... | ... | $i-1$ | i | $i+1$ | ... | ... | N | $N+1$ |
|---|---|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-------|

$$\text{CV\#1} \quad P_1^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e P_2^n + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_1^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w P_0^n$$

$$\text{CV\#N} \quad P_N^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e P_{N+1}^n + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_N^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w P_{N-1}^n$$

存在しない値を参照



両端の検査体積には
特別な条件が必要

3. 境界条件

境界条件では**存在しない値をどう決めるか**がポイント

3-1

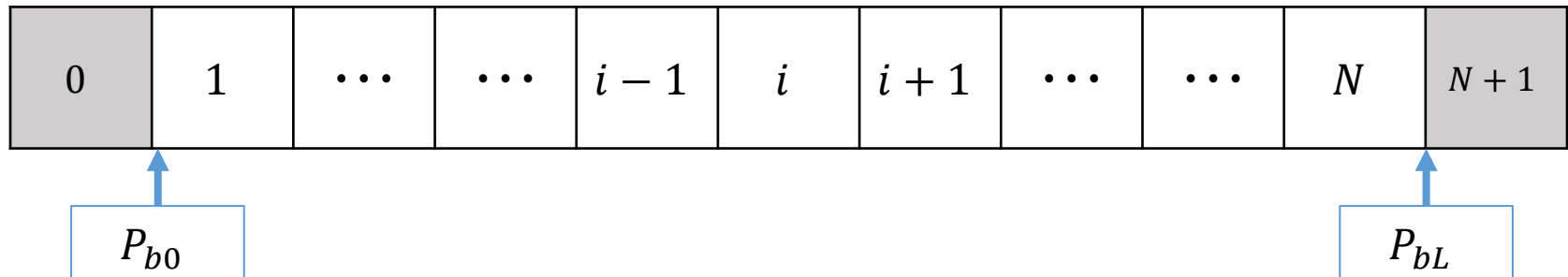
境界値を直接決める

3-2

境界値の勾配を決める

3-1

境界値を直接決める



境界での圧力値を P_{b0} , P_{bL} とする(物性値は等しいと仮定)。このとき、

$$P_{b0} = \frac{P_1 + P_0}{2} \quad \Rightarrow \quad P_0 = 2P_{b0} - P_1$$
$$P_{bL} = \frac{P_{N+1} + P_N}{2} \quad \Rightarrow \quad P_{N+1} = 2P_{bL} - P_N$$

3-1

境界値を直接決める

$P_0 \cdot P_{N+1}$ の値は次のように置換できる

$$P_1^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e P_2^n + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_1^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w (2P_{b0} - P_1)$$

$$P_N^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e (2P_{bL} - P_N) + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_N^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w P_{N-1}^n$$

境界値を直接決める：ディクレ条件

3-2

境界との勾配を決める

P_0 と P_1 間の $\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_{i+\frac{1}{2}}}$ の値を決める。この境界で一番多いのは

勾配を 0 にする境界条件

$$\begin{aligned}\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_{1-\frac{1}{2}}} &= \frac{k}{\mu} \frac{P_1 - P_0}{0.5(\Delta x_1 + \Delta x_0)} = 0 \\ &= P_1 - P_0 = 0 \\ &\Leftrightarrow P_1 = P_0\end{aligned}$$

境界との勾配を決める：ノイマン条件

3-2

境界との勾配を決める

境界で $\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} = 0$ の時、 $P_1 = P_0$ また $P_{N+1} = P_N$ だから

$$P_1^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e P_2^n + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_1^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w P_1$$

$$P_N^{n+1} = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e P_N + \left(1 - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_e - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w\right) P_N^n + \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} \lambda_w P_{N-1}^n$$

コンテンツ

1

拡散方程式

2

有限体積法

3

境界条件

4

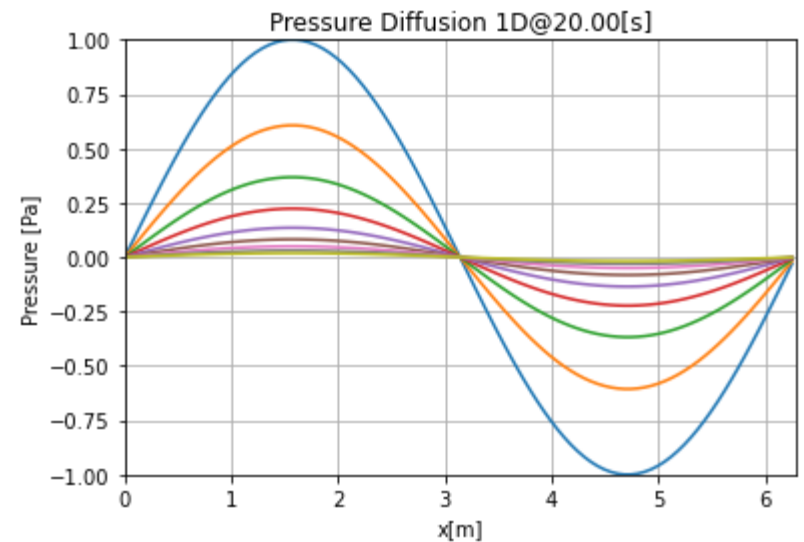
実装

4. 実装

```
while 無限ループ:
    for 両端を除くcv:
        # 係数 (A, B, C) の決定
        # A =
        # B =
        # C =
        # P_new =
    if 境界条件@x = 0:
        # ディレクレ条件
        # ノイマン条件

    if 境界条件@x = L:
        # ディレクレ条件
        # ノイマン条件

    # 値のアップデート
    # P_old = P_new
    # t = t + dt
    if t >= tmax:
        whileループを抜ける。
```



このようなグラフが表示されれば成功

5. 補足

- 陽解法の解の安定条件は？
- 2つの境界条件の物理的な意味は？
- スライド #14 ~ #15の過程で、右辺の圧力を P^{n+1} とするとどうなる？また、それらの関係式はどう解く？
→Hint : 陰解法, Implicit Method