

# スモルダリング燃焼におけるフィンガリング現象

## 池田研究室 4年

### 1. 研究背景と概要

スモルダリング燃焼とは、火炎を伴わずに広がる燃焼のことで燻然とも呼ばれる。スモルダリング燃焼の実験において、**燃焼が不均一に広がり、パターンを形成することが観測された**。発現したパターンは、人の指のような形をしていることから**フィンガリングパターン**と呼ばれている。スモルダリング燃焼のモデルを利用して、**数値計算によって、発現するフィンガリングパターンへのパラメータの影響について調べる**。



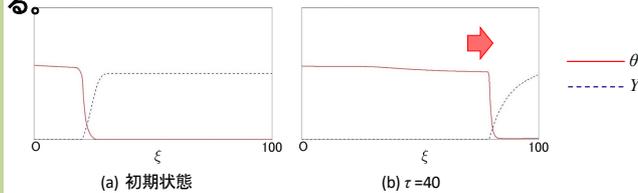
紙の燃焼実験で発現したフィンガリングパターン▲

### 目標

スモルダリング燃焼の数理モデルを用いて、**酸素の拡散係数がフィンガリングパターンに与える影響について調べる**。

### 3. 一次元の数値計算と燃焼面の広がり

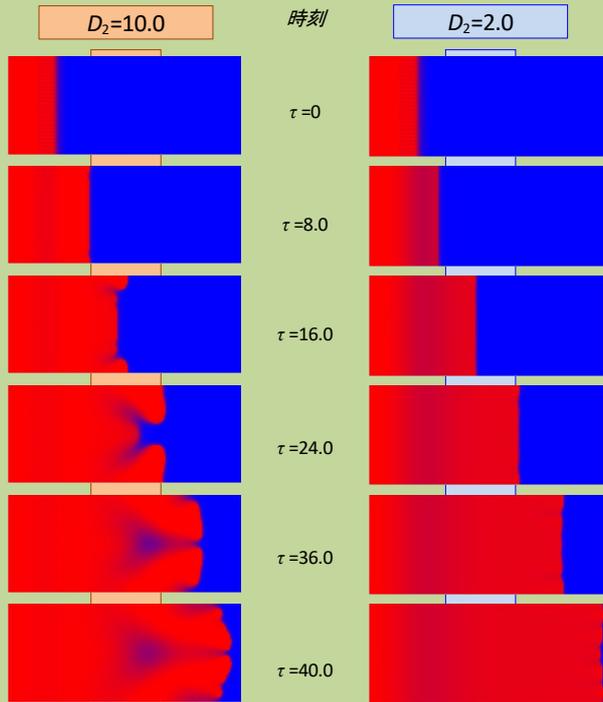
目標：1次元の場合で、**燃焼面がどのように変化するか調べる**。



- 結果
- $\theta$ の分布は $\xi > 0$ の方向に移動する様子が確認できた。
  - 燃焼面付近の $\theta$ の分布の形状は**ほぼ変化しない**ことが確認できた。

### 4. 二次元の数値計算と燃焼面の広がり

目標：**酸素の拡散係数 $D_2$ の値で燃焼面が変化するかを調べる**。



時間経過に伴って変化する $\theta$ の分布

### 結果

- $D_2=10.0, 2.0$ の場合、ともに**フィンガリングパターンが発現した**。
- $\tau=16.0$ に着目すると、 $D_2=10.0$ の場合はフィンガリングパターンが確認できるのに対し、 $D_2=2.0$ の場合は、フィンガリングパターンがほとんど確認できない。
- $\tau=40.0$ に着目すると、**燃焼面の形状が異なる**。

$D_2$ の変化によって**燃焼面のパターンが発現するタイミングとパターンの形状が変化する**。

### 2. 数理モデル

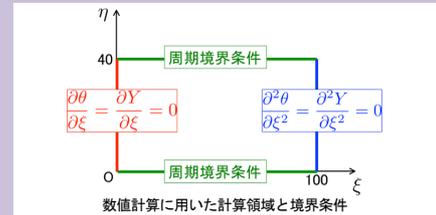
桑名・樺田(2013), 「微小重力環境下での薄い固体に沿ったスモルダリング燃焼のモデル化」

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = D_1 \Delta \theta + \frac{\beta^2}{2Le} Y \exp \left\{ -\frac{\beta(1-\theta)}{1-\gamma(1-\theta)} \right\} \quad \theta : \text{温度}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = D_2 \Delta Y - \frac{\beta^2}{2Le} Y \exp \left\{ -\frac{\beta(1-\theta)}{1-\gamma(1-\theta)} \right\} \quad Y : \text{酸素質量分率}$$

$Le$ : ルイス数  
 $\beta$ : Zel'dovich数  
 $\gamma$ : 温度パラメータ

境界条件については、先行研究と同じ条件で設定する。



先行研究<sup>1)</sup>では、パラメータ $\beta, \gamma, Le$ を変化させたときの燃焼面の変化について調べている。 $D_2=Le^2$ と定めており、酸素の拡散係数のみの影響を調べることができていない。本研究では、**酸素の拡散係数による影響を調べるために、 $D_2$ は $Le$ とは独立したパラメータとして導入する**。

<sup>1)</sup> 桑名・樺田・桑名(2016), 固体のスモルダリング燃焼特性に与える無次元パラメータの影響

### 5. 燃焼面の進行速度

目標： $D_2$ を変化させたときの**燃焼面の進行速度を調べる**。

2次元の燃焼面の進行速度については、平均速度と進行速度の2通りの値で評価した。

#### ◆平均速度

①  $\xi=50$ および $\xi=70$ の位置で、 $\theta$ が0.5に達した時刻の  $0 \leq \eta \leq 40$  すべての計算格子上で求め、それぞれ  $\tau_{\eta,50}, \tau_{\eta,70}$  とする。

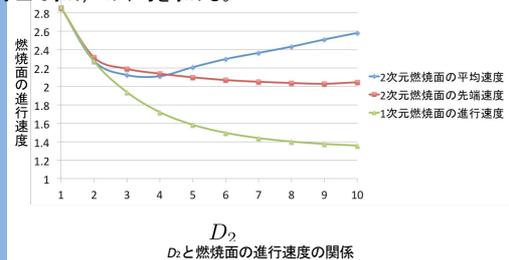
$$v_{\eta} = \frac{20}{\tau_{\eta,70} - \tau_{\eta,50}} \quad 0 \leq \eta \leq 40 \quad \text{のすべて}$$

#### ◆先端速度

①  $\xi=50$ および $\xi=70$ の、 $0 \leq \eta$ の計算格子上で、 $\theta$ が0.5に達した時刻の中で最も早いものをそれぞれ とする。  $\tau_{70}$

$$v_{\eta} = \frac{20}{\tau_{70} - \tau_{50}} \quad \text{を求め}$$

の計算格子上で求め、の平均を求め



$D_2$ と燃焼面の進行速度の関係

### 結果

- 1次元の燃焼面の進行速度は、 $D_2$ を増加させると単調減少する。また、進行速度の減少率が小さくなることで、**一定の値に近づいていく**。
- 2次元の燃焼面の先端速度は、**1次元の燃焼面の進行速度よりも大きな値に近づいていく**。
- 2次元の燃焼面の平均速度は減少から増加に転じている。
- $D_2$ が小さな値( $D_2=1.0, 2.0$ )の場合は1次元の進行速度、2次元の平均速度、2次元の先端速度が**ほぼ同じ値になっている**。

### 6. 結論

今回の研究においては、以下の結果を得ることができた。

- ① 2次元の数値計算で**フィンガリングパターンの発現を確認した**。
- ②  $D_2$ の変化で発現する**フィンガリングパターンの形状が変化した**。
- ③ 2次元の燃焼面の先端速度は、**1次元の進行速度よりも大きな値に近づくことが分かった**。
- ④  $D_2$ が小さな値の場合は、**1次元の進行速度と2次元の進行速度がほぼ同じ値になった**。

②の形状の変化については、 $\theta$ の分布の形状から判断しただけなので、今後は形状についても新しい指標を導入して検討したい。③については、1次元では酸素の拡散による影響が $\xi$ 方向のみに限られるが、2次元では $\xi$ 方向だけでなく $\eta$ 方向からも酸素の拡散が影響するため、2次元の方が速度が早くなったと考えられる。④については進行速度を計測した範囲では、1次元でも2次元でもフィンガリングがほとんど発現していなかった。つまり、フィンガリングの発現により進行速度に変化があるのではないかと考えられる。