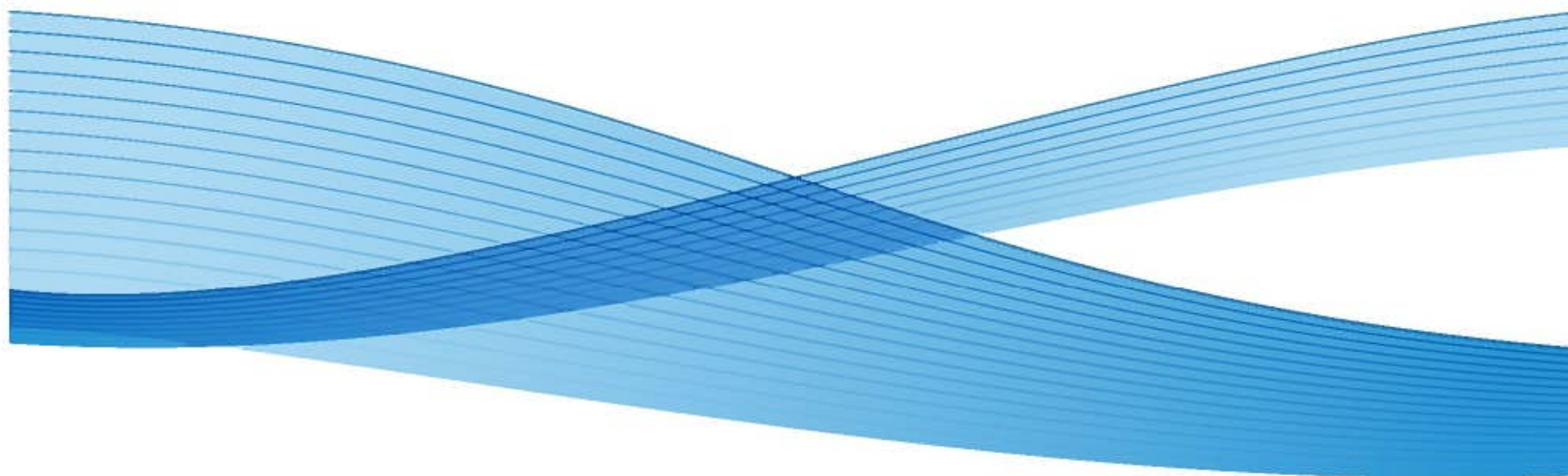


オープンソースコード FDS Ver.6 による 小型樹脂部品の延焼シミュレーション

2013年12月6日 OpenCAE Symposium 2013



富士ゼロックス(株)：森 一浩 秀浦 勉 柴田 義麿 岡本 直樹
鹿児島大学大学院理工学研究科機械工学専攻：錦 慎之助

0.1. 本研究の目的

固体燃焼のメカニズム究明のために、POMとABSの固体燃焼の数値シミュレーションを実行し、実験との比較検討を行った。

背景：

- ✓ 富士ゼロックスは、商品安全の観点から発火現象のメカニズム究明に役立つ技術として燃焼シミュレーション技術の獲得を目指した。
- ✓ 以前、錦は月・火星の重力を考慮した有人宇宙船内の可燃性固体（PMMA）の燃焼シミュレーションをFDSで行った。

→共同研究により、Workshop 2013（本年6月）において製品の開発ツールとなりうるか検討するために、FDSを用いて樹脂単一燃焼の数値シミュレーションを実行し、実験との比較検討を報告した。その後、小型樹脂部品の延焼シミュレーションを実行したので、その結果を本Symposiumで報告する。

0.2. 発表内容目次

目次

1. 小型樹脂部品延焼解析概要
2. 温度の時間変化（実験との比較）
3. 樹脂部品間距離依存性
4. 上部開口率依存性
5. ダクト長さ依存性（煙突効果）
6. まとめ

1. 小型樹脂部品延焼解析概要

1.1. 燃烧解析技術獲得の進捗

発火発煙事故解析/事故撲滅に向けた活動の中で、燃烧数値解析は未然防止のため必要な技術であり、早期の獲得を目指してきた。

2011年～2012年

その中で、鹿児島大錦研究室との共同研究により、FDSを使った小型樹脂部品（POMギア）燃烧の基本モデルを構築した。その後、2011年に単体燃烧、2012年に複数部品への延焼のモデル構築したが、技術的な課題が残った。

2013年

今年度は、これまで構築した開空間延焼解析モデルに改良を加え、残課題を解決すべく、延焼モデルの構築に取り組んだ。

1.2. 小型樹脂部品延焼解析モデル

層流/ FDS Ver.5

まわりは開放空間

燃焼熱 60%, 輻射損失45%

解析の対象はギア(POM)



乱流 (LES) / FDS Ver.6

まわりは閉空間 (上下部一部開放)

燃焼熱 60%, 輻射損失45%

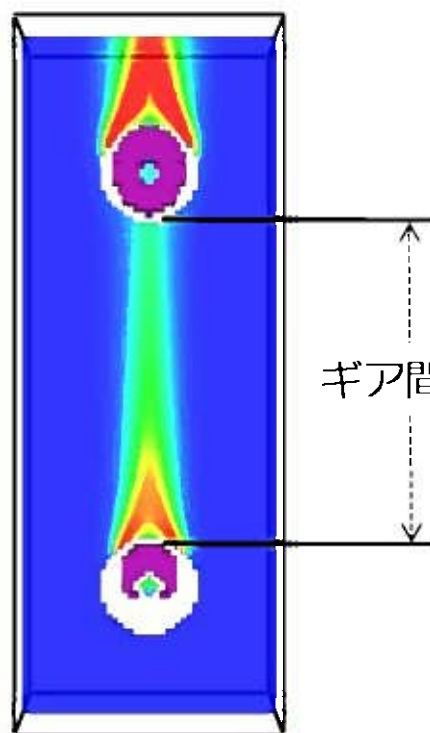
ダクト長さ440 & 590mm

開空間モデルの課題：

- ・ ギア間距離に関係なく延焼
- ・ 境界条件が不定.

FDS Ver.5の課題：

- ・ LESで温度上昇少ない
(10mm以上のメッシュサイズに適合)



ギア間距離

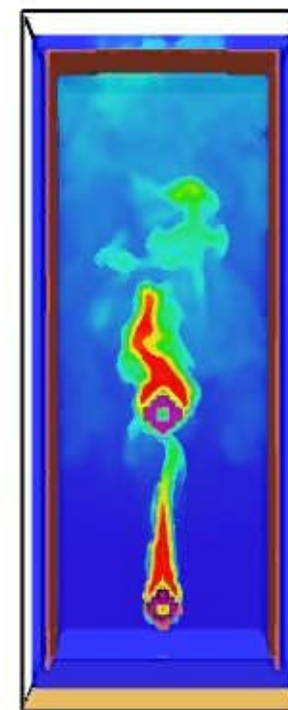
開空間モデル

18.4万要素

下方ギアをHeaterで
800℃30秒間加熱

ギア間距離を変えて上部
ギアへの燃焼を調べる.

閉空間モデルではダクト
上部開口率も変えて上部
ギアへの延焼を調べる



閉空間モデル

103.2万&136万要素

1.3. 小型樹脂部品延焼解析モデル

	開空間延焼モデル	閉空間延焼モデル
境界	開空間	閉空間
Ver. Num	FDS 5	FDS 6
流れ（モデル）	層流	乱流（LES）
燃焼対象	POMギア(φ30×10mm)	POMギア(φ30×10mm)
解析モデル幅	72 mm	200 mm
解析モデル奥行き	45 mm	150 mm
解析モデル高さ	192 mm	500 mm, 750 mm
メッシュ幅	1.5 mm	2.5 mm
要素数	18.4万	103.2万, 136万
計算時間	1日	15日

450×450×300mm³の小型プリンターをメッシュ幅2.5mmでモデル作成すると、
180×180×120＝388.8万要素（約3倍）となる。

1.4. 方程式系

質量保存

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

運動量保存

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i + f_i, \quad (2)$$

化学種保存

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Y_l u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\rho D)_l}{\partial x_j} \frac{\partial Y_l}{\partial x_j} + \dot{W}_l^m, \quad (3)$$

エネルギー保存

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h u_j)}{\partial x_j} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}^m - \frac{\partial q_r}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_l h_l (\rho D)_l \frac{\partial Y_l}{\partial x_j}, \quad (4)$$

状態方程式

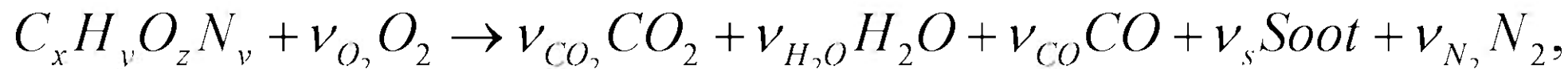
$$p = \rho R T, \quad (5)$$



FDSで数値的に時間発展させて解き、
流れ場や温度 & 気体濃度分布を決定。

1.5. 燃焼モデル（混合分率モデル）

反応は次のような



でおこることを仮定する。このときCOとすすの生成量に加えて、燃料の化学組成式とすす中の水素の体積分率のみ決める必要がある。FDSは乱流解析では、混合分率を用いた簡略化を行うことにより、微分方程式の数を減じて代数方程式と連立させて解く。反応素過程をモデル化せずに燃料ガスと酸素が混合したら反応が終了することを仮定しているので、実用的な計算時間で解ける。

1.6. POM物性値と反応パラメータ

燃焼対象 POMギア 直径30mm, 厚さ10mm

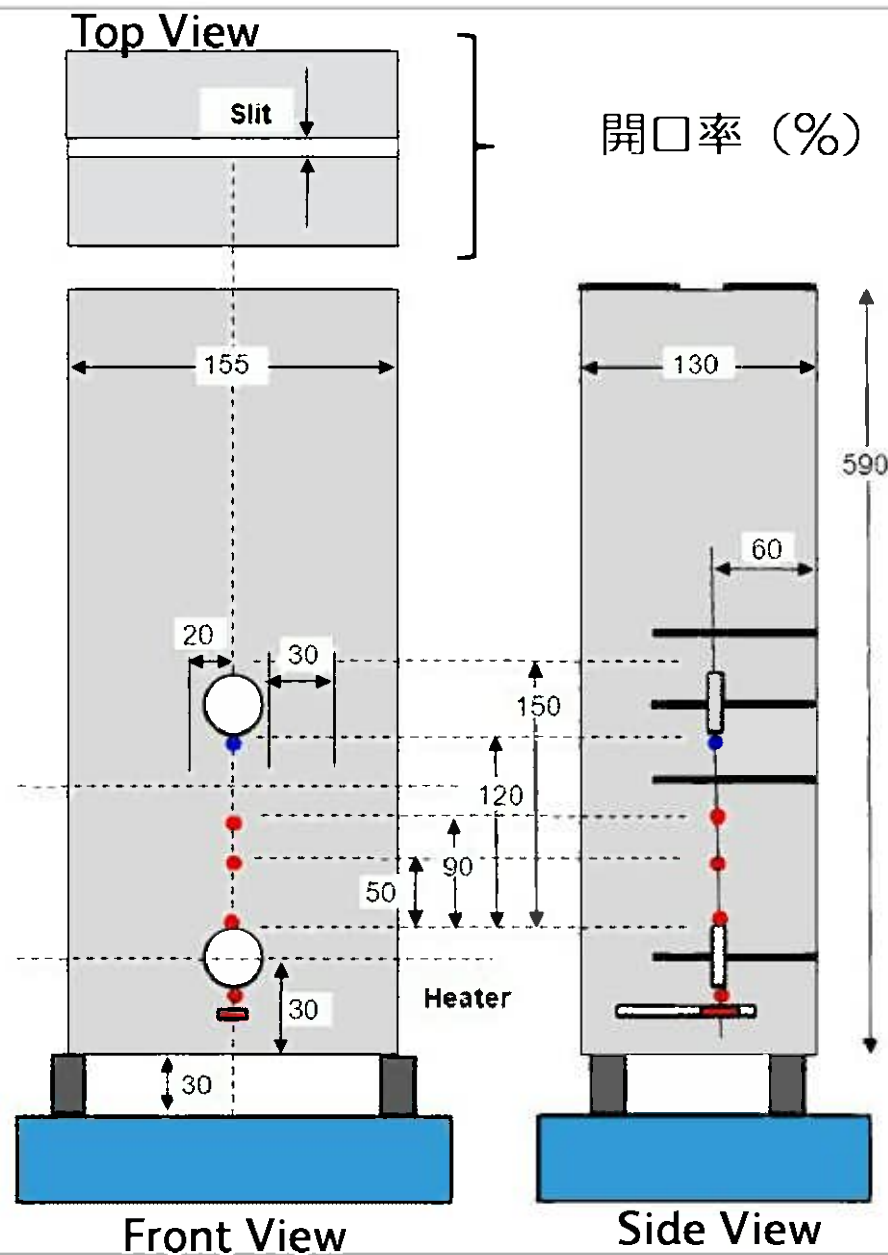
POMの物性値は下記の値を利用

POM 物性値と反応パラメータ

&REAC IDの設定	POM	&MATL IDの設定	POM
原子数	C = 1.0 H = 2.0 O = 1.0 N = 0.0	比熱SPECIFIC_HEAT (kJ/kg/K)	1.47 (100%)
ススの発生割合 SOOT_YIELD (kg/kg)	0.00	熱伝導率CONDUCTIVITY (W/m/K)	0.25
発熱量 HEAT_OF_COMBUSTION (kJ/kg)	10200.0 カロリーメータ— 17000の60%	密度(kg/m ³)	310.2
		Pre-exponential factors A (1/s)	1.957E+11
		Activation energies E (kJ/kmol)	118000
		気化熱HEAT_OF_REACTION (kJ/kg)	1720 (100%)

※ 密度を22%に減じることでたれ落ちを考慮。

1.7. ギア延焼実験の構成



測定装置

2. 温度の時間変化（実験との比較） -ギア間距離120mmケース-

2.1.1. 上部ギアへの延焼結果（実験との比較）

解析（ダクト長さ590mm）

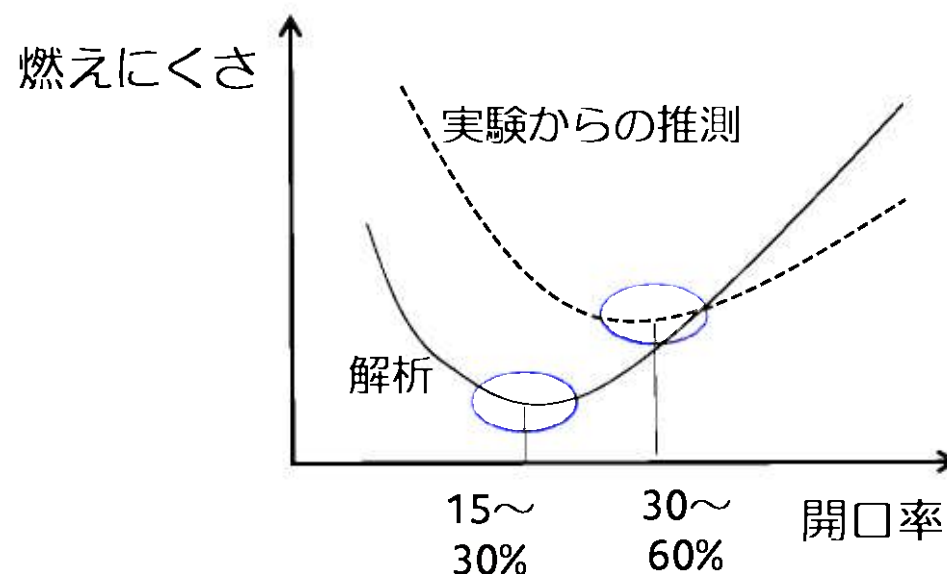
開口率 ギア間距離	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
30mm	—	—	—	—	—	○
60mm	—	—	—	—	○	×
90mm	—	○	—	○	×	×
120mm	○	○	○	○	×	—
150mm	×	×	—	×	—	—

実験（ダクト長さ590mm）

開口率 ギア間距離	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
90mm	×	—	—	—	—	○
120mm	—	×	×	○	○	×
150mm	—	—	—	×	×	—

○：上部ギア燃焼
 ×：上部ギア非燃焼
 —：未実施

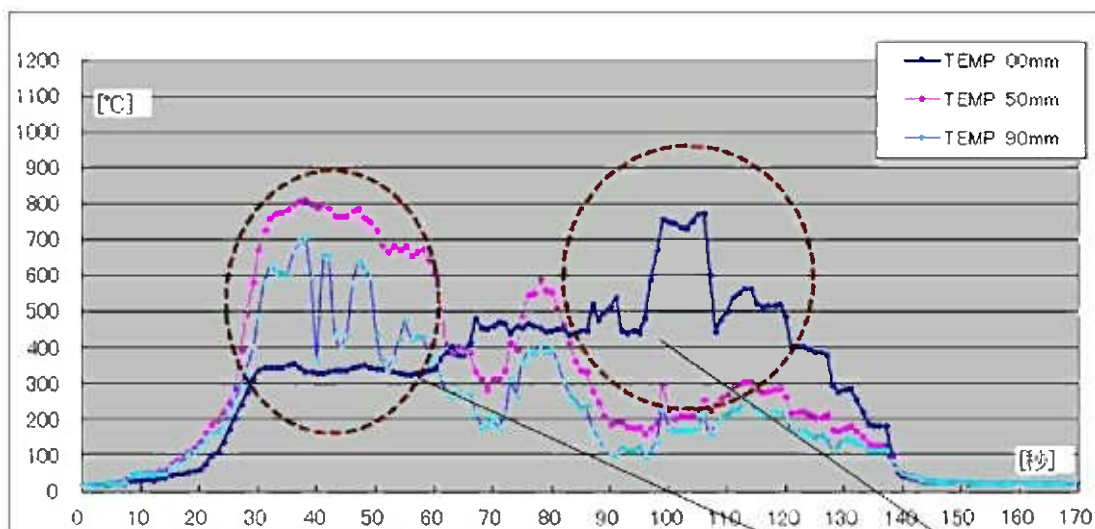
2.1.2. 上部ギアへの延焼結果（実験との比較）



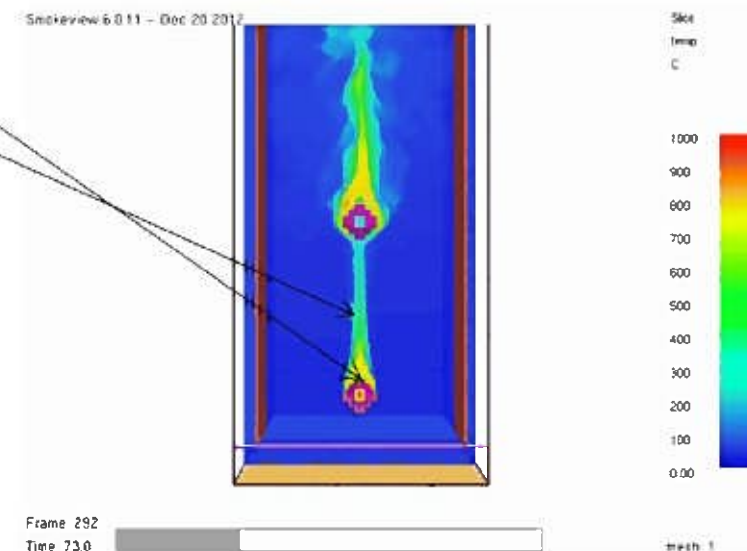
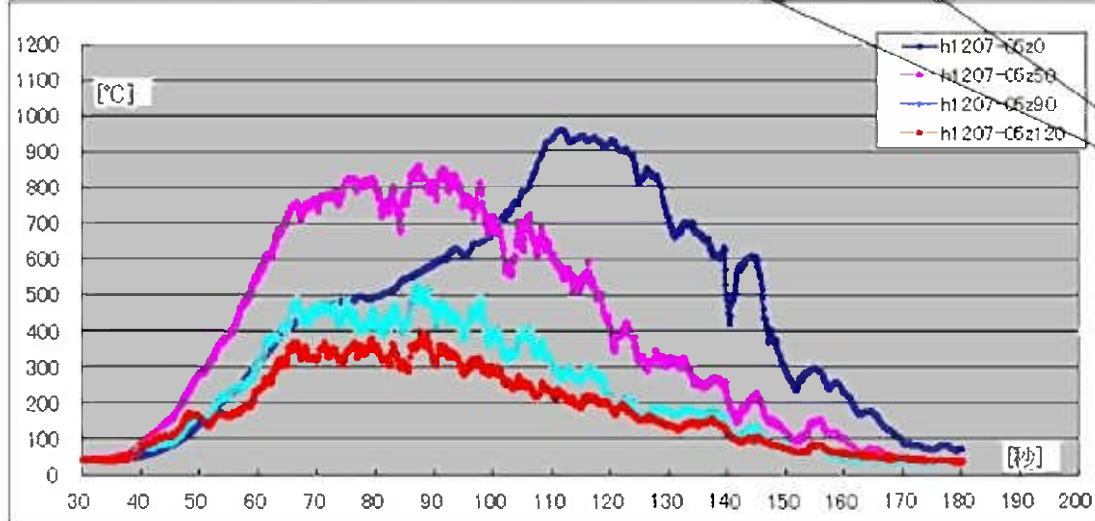
- 燃えにくさと開口率の関係を定性的に示した.
- 実験は必要なケースを全て行っていないので、推測して記載.
- 開口率が小さい場合（解析）については、4章で説明.

2.2.1. 温度の時間変化（開口率5%）

解析



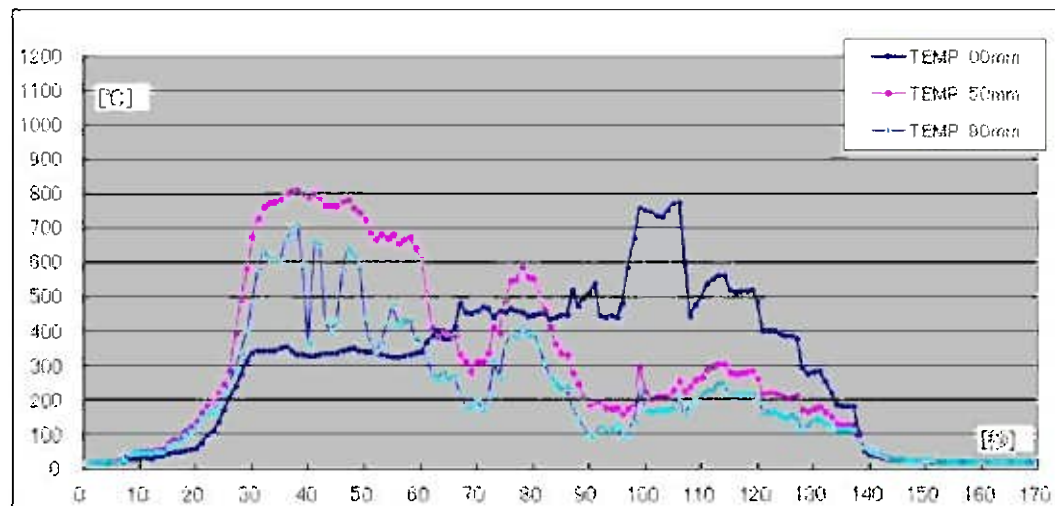
実験



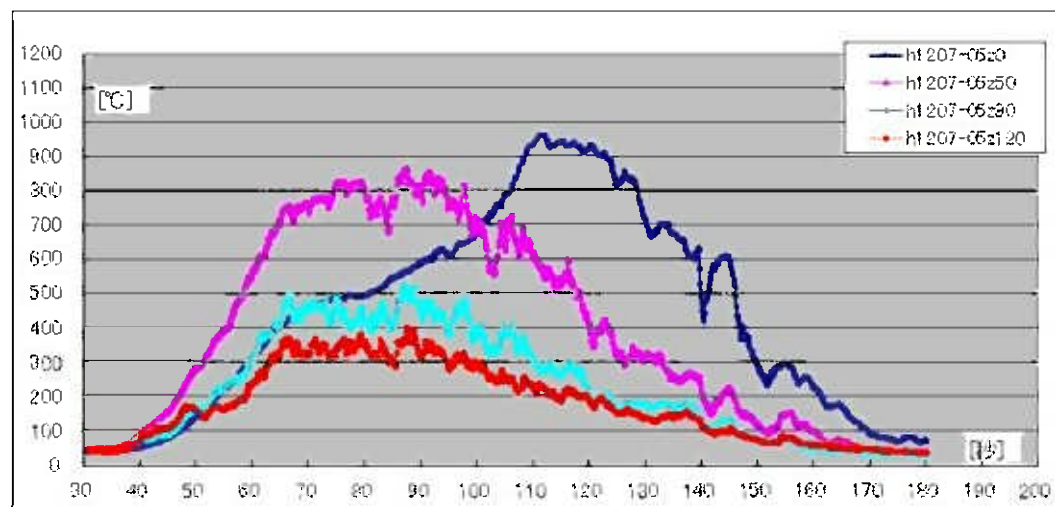
下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.2.2. 温度の時間変化（開口率5%）

解析



実験



下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

■ 延焼（解析）
未燃（実験）

■ 温度上昇の傾向は合致。

（50,90mmが先行、遅れて0mm）

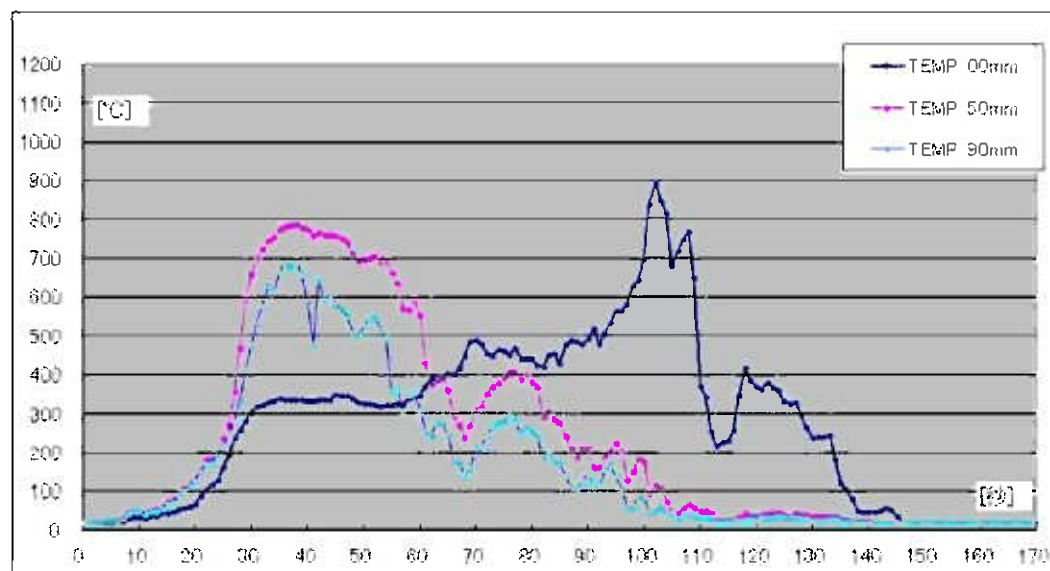
■ 最高温度は100～200℃解析が低い。

■ 初期の温度上昇率が異なる。
（実験は90mm以上が遅れて緩やかに上昇）

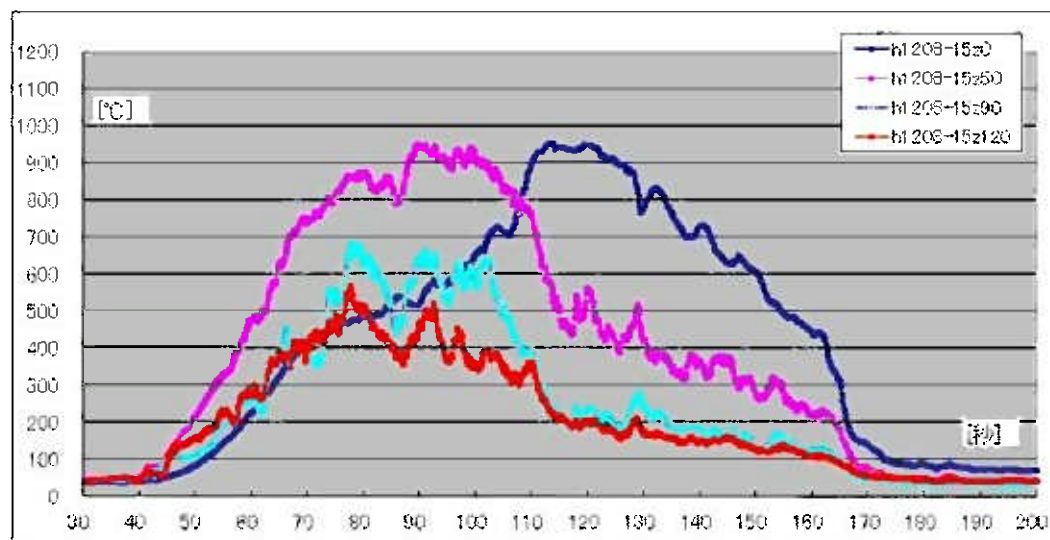
■ 90mm地点で500℃、120mm地点で350℃までしか上昇せず、解析よりも低温である（実験）

2.2.3. 温度の時間変化（開口率15%）

解析



実験

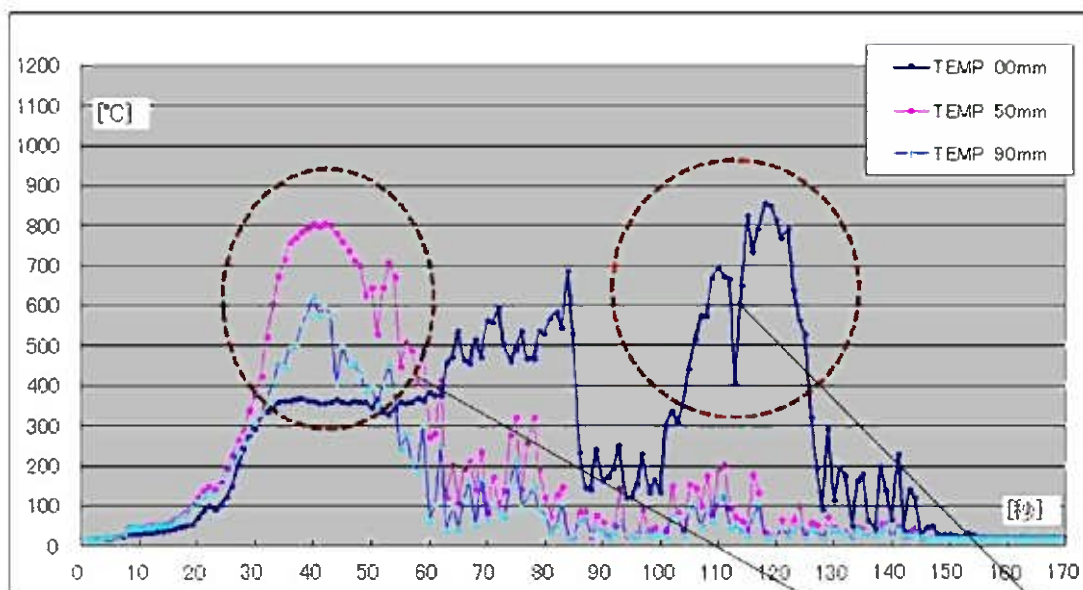


- 延焼（解析）
未燃（実験）
- 温度上昇の傾向は合致。
（50,90mmが先行、遅れて0mm）
- 最高温度は約150°C解析が低い。
- 初期の温度上昇率が異なる。
（実験は90mm以上が遅れて緩やかに上昇）
- 90mm地点で700°C、120mm地点で500°Cまでしか上昇していない（実験）

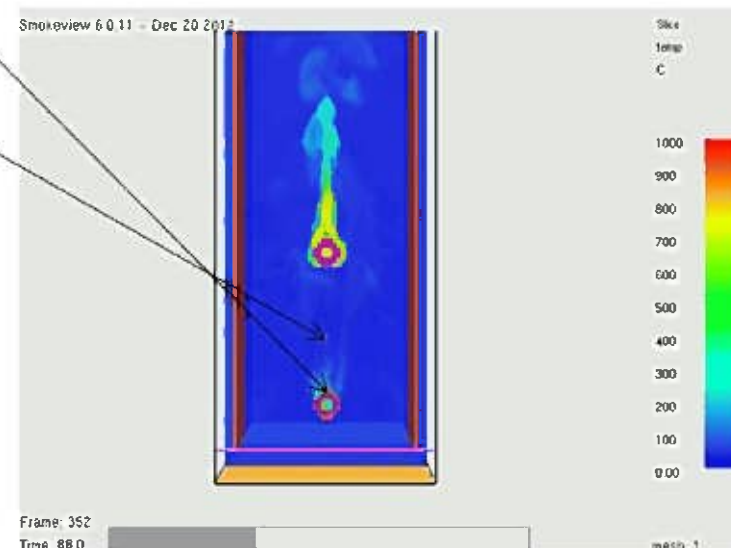
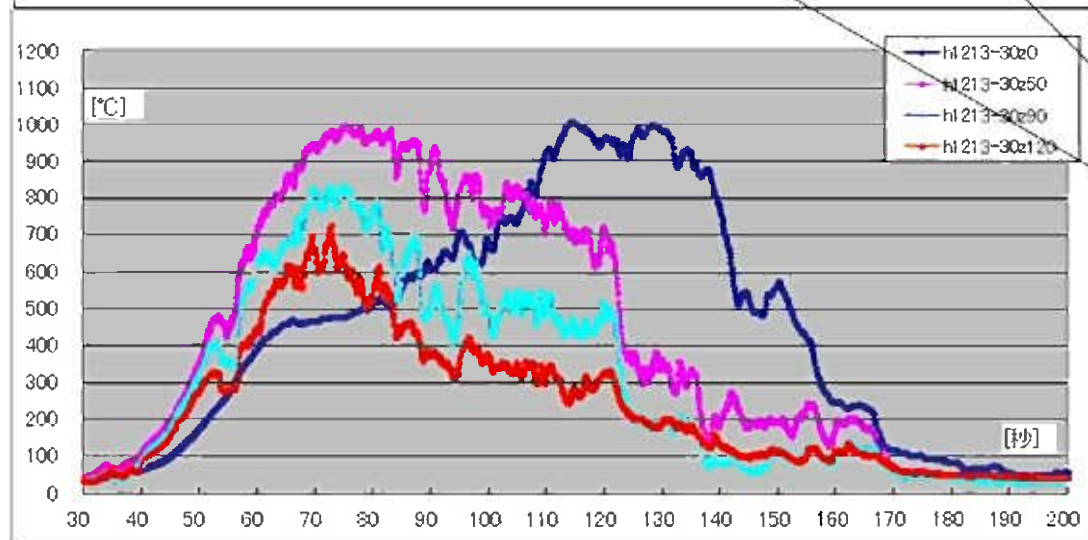
下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.2.4. 温度の時間変化（開口率30%）

解析



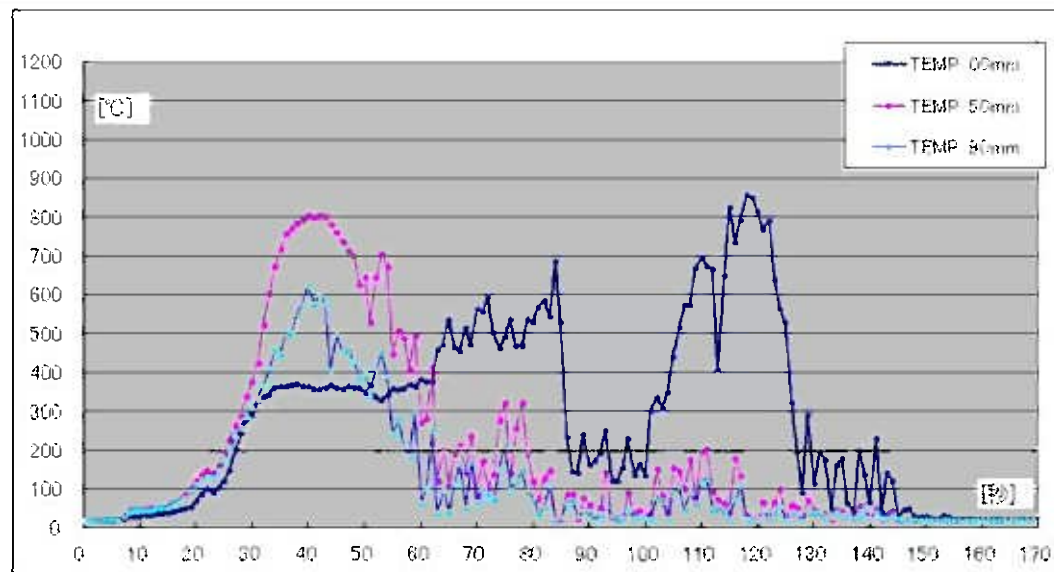
実験



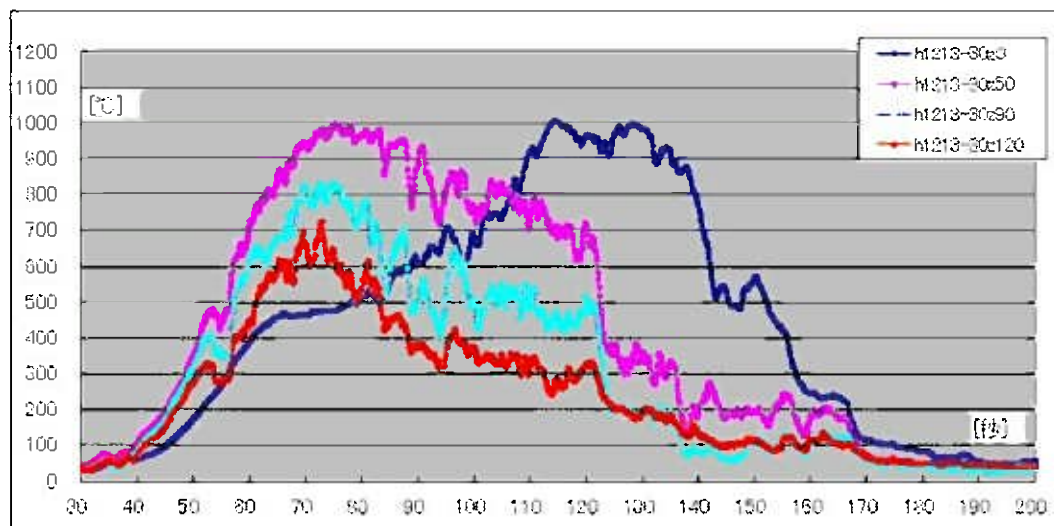
下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.2.5. 温度の時間変化（開口率30%）

解析



実験

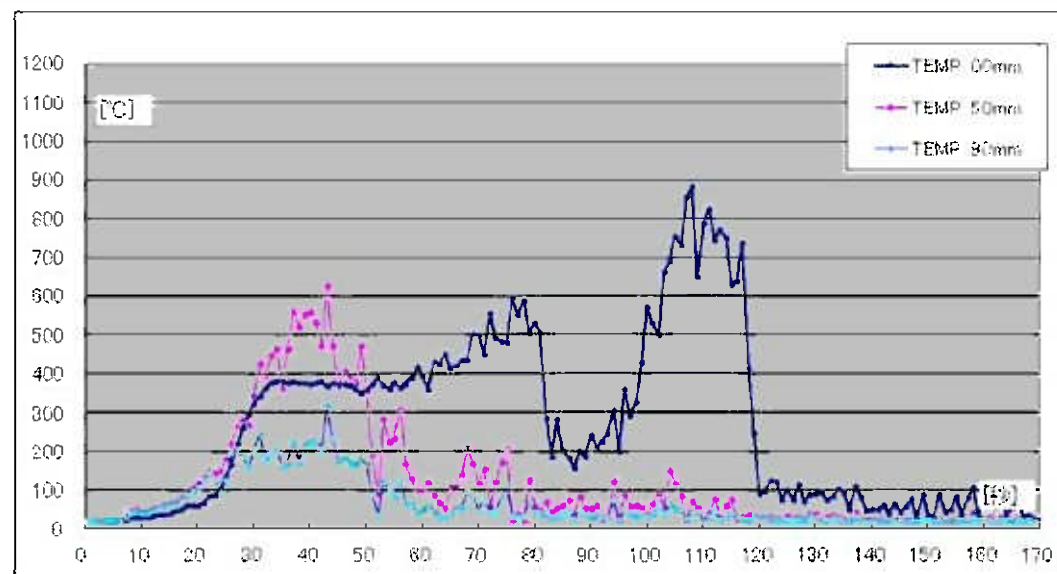


- 延焼（解析 & 実験）
- 温度上昇の傾向は合致。（50,90mmが先行、遅れて0mm）
- 最高温度は約200°C解析が低い。
- 50,90mm地点で40秒以降温度が低下（解析）。
- 初期の温度上昇が50～120mmまで差が無く上昇（実験）
- 90mm地点で800°C、120mm地点で700°Cを超えるまで上昇（実験）

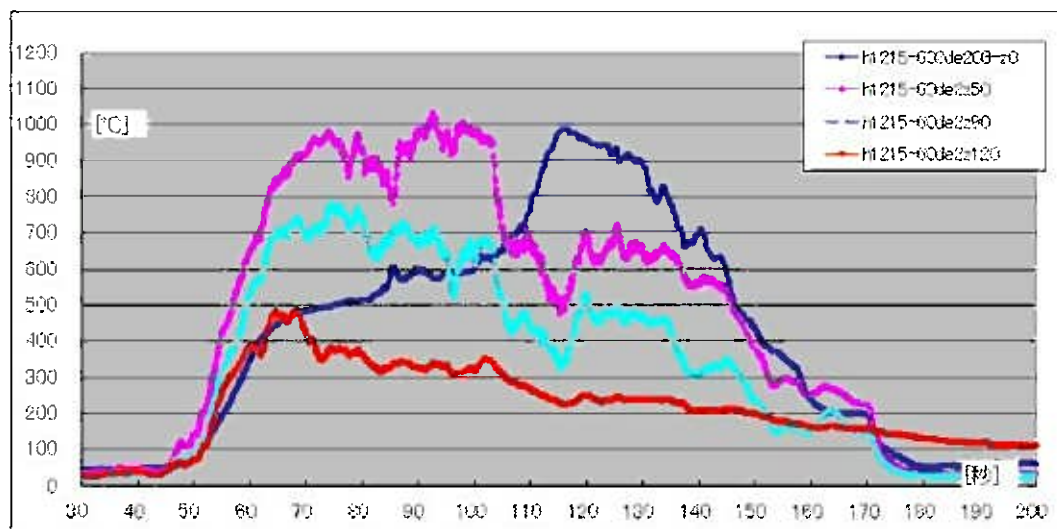
下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.2.6. 温度の時間変化（開口率60%）

解析



実験



■ 未燃（解析）
延焼（実験）

■ 温度上昇の傾向は合致。
（50,90mmが先行、遅れて0mm）

■ 最高温度は100～400°C解析
が低い。

■ 50,90mm地点で40秒以降温度
が急に低下（解析）。

■ 初期の温度上昇で、50～120
mmまで差が無く上昇(実験)。

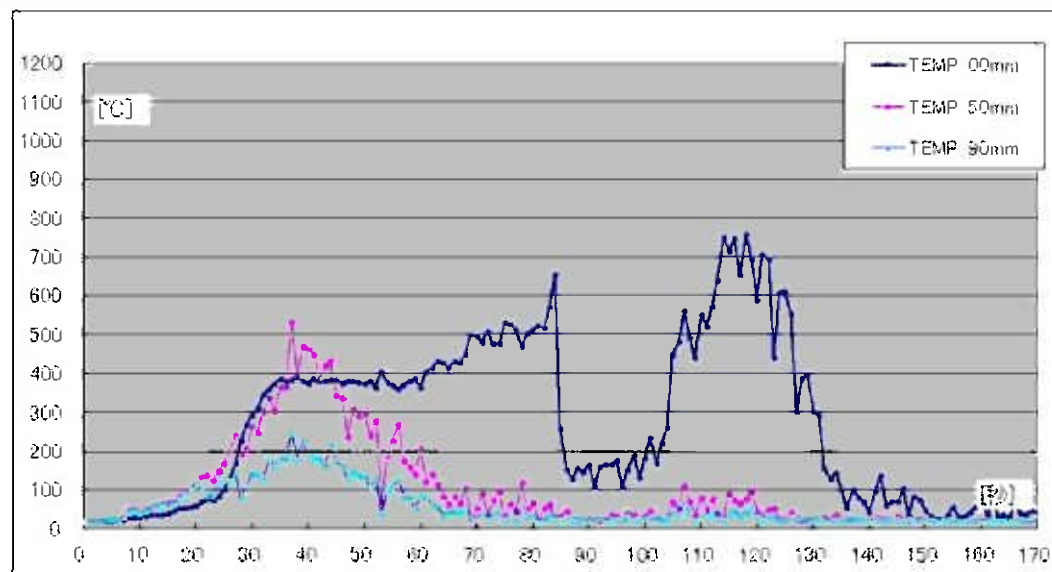
■ 90mm地点で800°Cまで上昇、
120mm地点は測定失敗か？
（実験）

90mm地点の温度が300°Cまでし
か上昇せず(解析)。

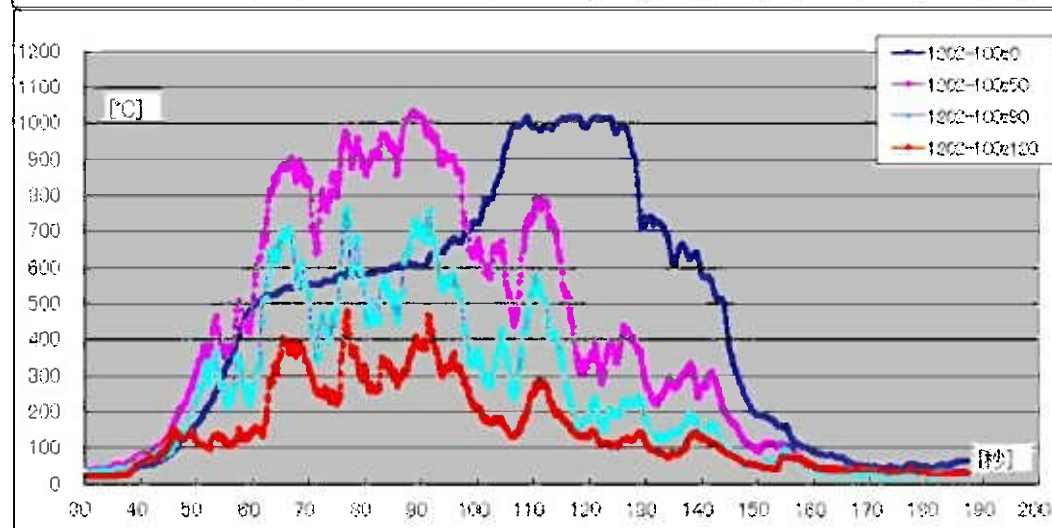
下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.2.7. 温度の時間変化（開口率100%）

解析



実験



- 未燃（解析 & 実験）
- 最高温度は300～500℃解析が低い。
- 50, 90mm地点で40 秒以降温度が急に低下（解析）。
- 初期の温度上昇率が異なる。
- 90mm地点で 700℃以上、120 mm地点で450℃に上昇も、不安定で大きく変動（実験）。90mm地点の温度が250℃までしか上昇していない(解析)。

下方ギア頂点（0mm），上方50mm，90mmでの温度比較

2.3. 温度の時間変化(実験との比較)まとめ

- 温度変化の傾向はほぼ合致。(50,90mmが先行, 遅れて0mm)
- 最高温度は全てのケースで100~200℃解析が低い.
- 実験では開口率が大きくなると温度が上昇する傾向にあるが, 解析では逆になる。(開口率30%以降温度低下)
- 解析では開口率が大きくなると, 温度が大きく変動する. 実験でも100%の開口率の時には温度が大きく変動する.

3. 樹脂部品間距離依存性

	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
30mm						○
60mm					○	×
90mm		○		○	×	×
120mm	○	○	○	○	×	
150mm	×	×		×		

3.1. 距離の違いによる温度分布時間変化

ダクト長さ440mm

下のギアからの火炎が
上のギアに燃え移る



下のギアからの火炎が小さくなった
とき、上のギアが着火する。

燃え方が異なる



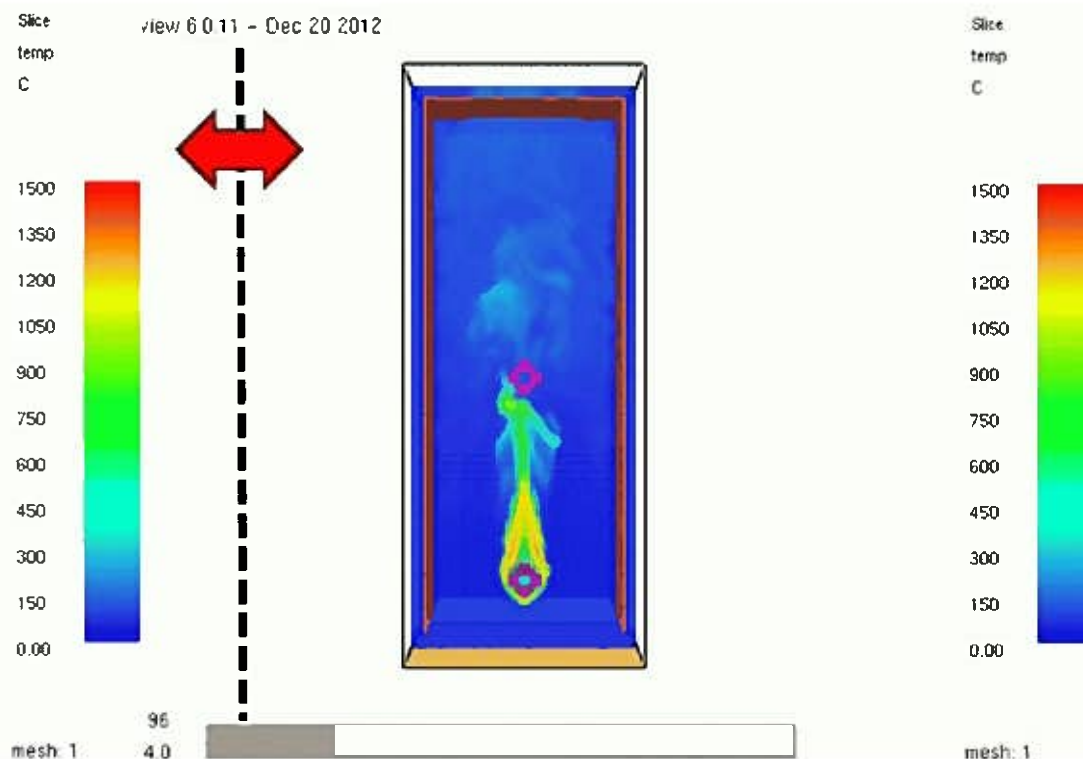
Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 96
Time: 24.0

ギア間距離 120mm

view 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 96
Time: 4.0

ギア間距離 150mm

3.2. 燃料ガス濃度分布時間変化

- 下部ギアが燃焼して生成した燃料ガスが上部ギア下側にたまり、それが発火しているよう（ギア間距離120mm）。
- 上部ギア熱分解による燃料ガスがメイン（ギア間距離150mm）。

燃え方が異なる

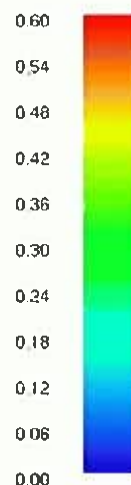
Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 124
Time: 31.0

ギア間距離 120mm

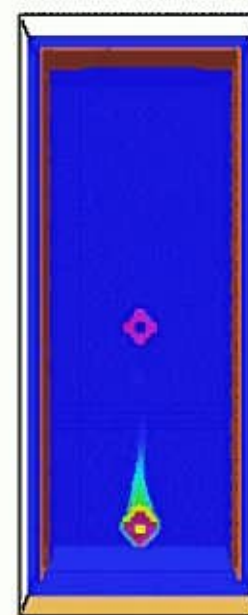
Slice
X_SPEC_1
mol/mol



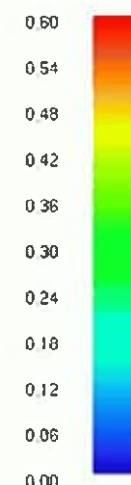
mesh: 1

Frame: 124
Time: 31.0

Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012



Slice
X_SPEC_1
mol/mol



mesh: 1

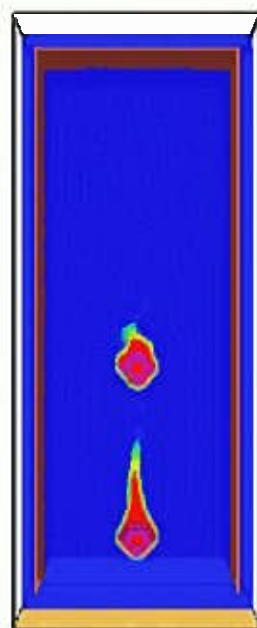
ギア間距離 150mm

3.3. 燃料ガス濃度分布時間変化

- 下部ギアが燃焼して生成した燃料ガスが上部ギア下側にたまって、濃度上昇したとき燃える（ギア間距離120mm）。
- 上部ギア下側で燃料ガス濃度は小さい（ギア間距離150mm）。

燃え方が異なる

Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012

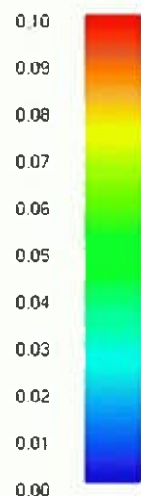


Frame 134
Time: 33.5

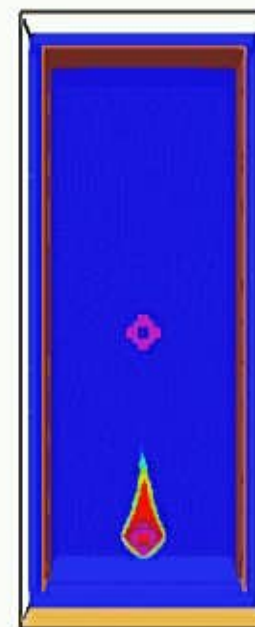
ギア間距離 120mm

Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012

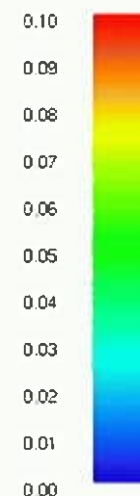
Slice
X_SPEC_1
mol/mol



mesh: 1
Time: 33.5



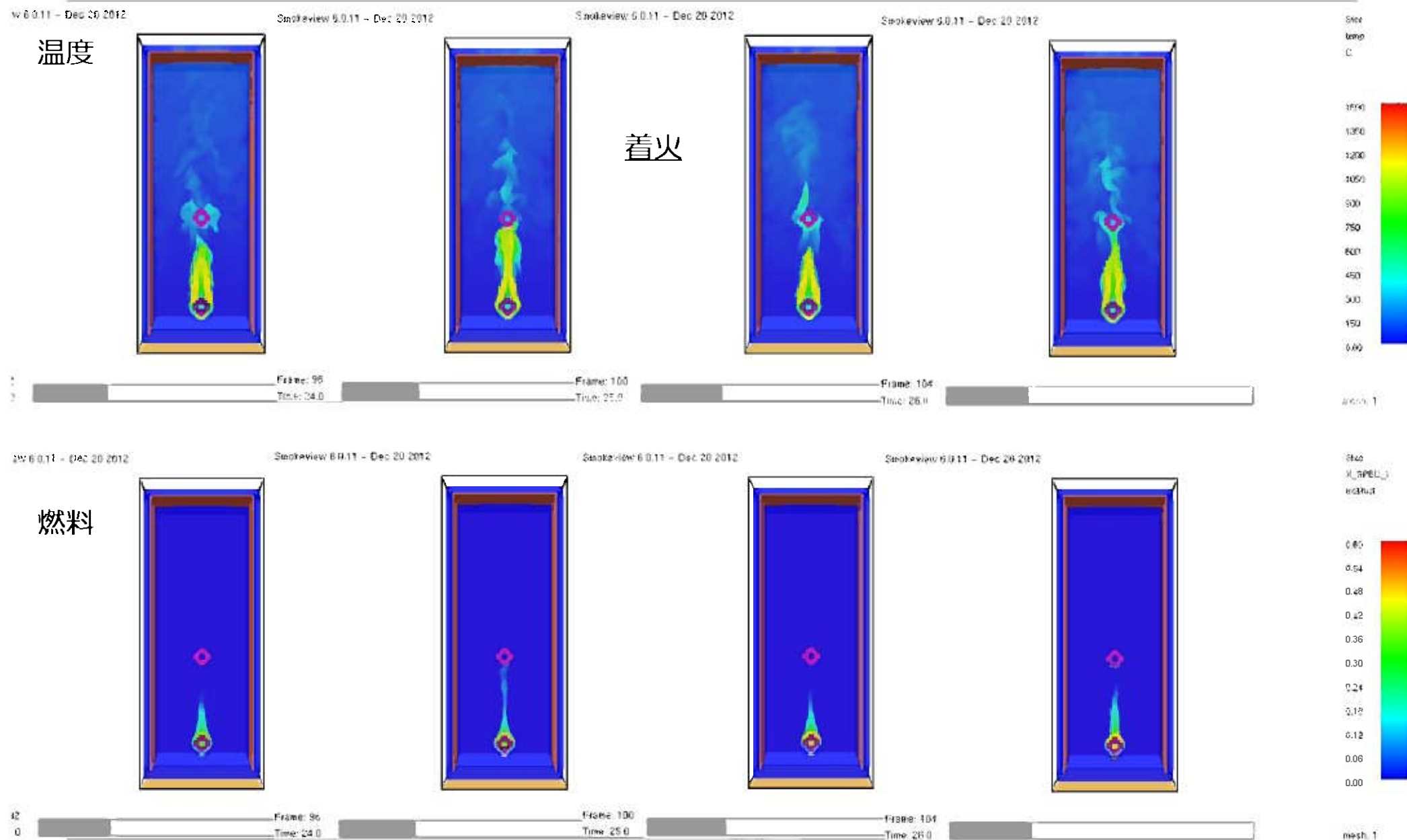
Slice
X_SPEC_1
mol/mol



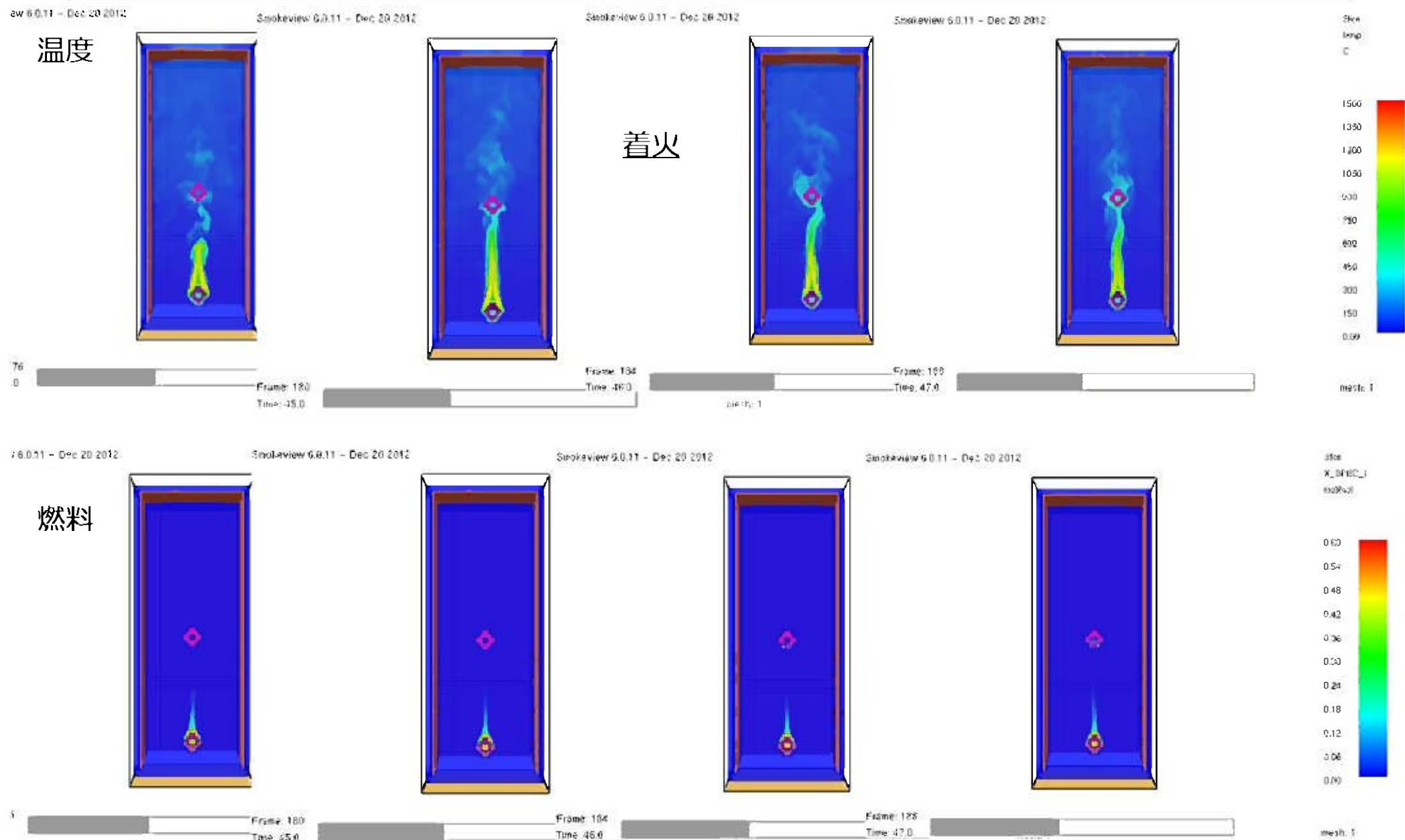
mesh: 1

ギア間距離 150mm

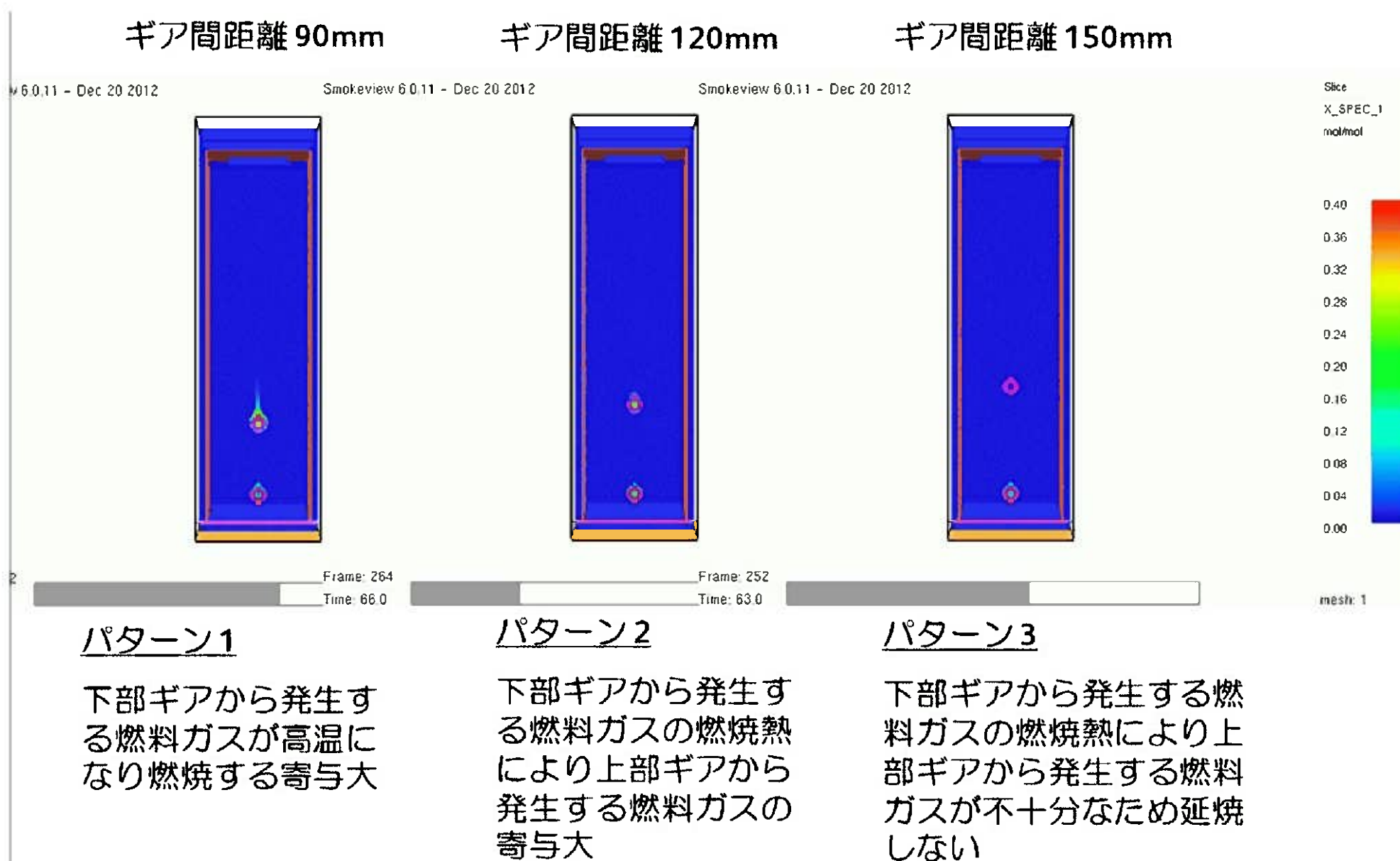
3.4. ギア間120mmケース-パターン 1-



3.5. ギア間150mmケース-パターン2-



3.6.1. まとめ-燃料ガス濃度コンター（30%， 590mm）



3.6.2.ギア間距離まとめ

1. 下部ギア消失&上部ギア未燃を初めて再現できた。
2. 下部ギアの燃焼熱により，上部ギアから熱分解して生成した燃料ガスの発火により，上部ギアは燃焼すると推測。



距離が近い場合

下部ギアから生成した燃料ガスが上部ギア下側付近にたまる。
ギア間距離が近い場合，拡散して燃料ガス濃度が低下しないので，それが発火して上部ギアが延焼する。

距離が遠い場合

距離が広がると，上部ギア下側にたまる燃料ガス濃度は低下するが，上部ギアが高温にさらされることによりそれ自身から燃料ガスが発生し燃焼する。

さらに距離が広がると上部ギアは延焼しない。

4. 開口率依存性

	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
30mm						○
60mm					○	×
90mm		○		○	×	×
120mm	○	○	○	○	×	
150mm	×	×		×		

4.1. 温度分布時間変化の開口率依存性

■ ダクト長さ440mm

■ 輻射損失率 0.45 ■ 燃焼熱 60%

■ ギア間距離120mm ■ 開口率 1.25%, 5%, 15%, 30%.

燃えにくそう。



温度

最大値 1075℃

最大値 1139℃

最大値 1006℃

最大値 1021℃

燃えにくそう。



Smokeyview 6.0.11 - Dec 20 2012

Smokeyview 6.0.11 - Dec 20 2012

Smokeyview 6.0.11 - Dec 20 2012

Smokeyview 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 226
Time: 56.5

Frame: 226
Time: 56.5

Frame: 226
Time: 56.5

Frame: 226
Time: 56.5

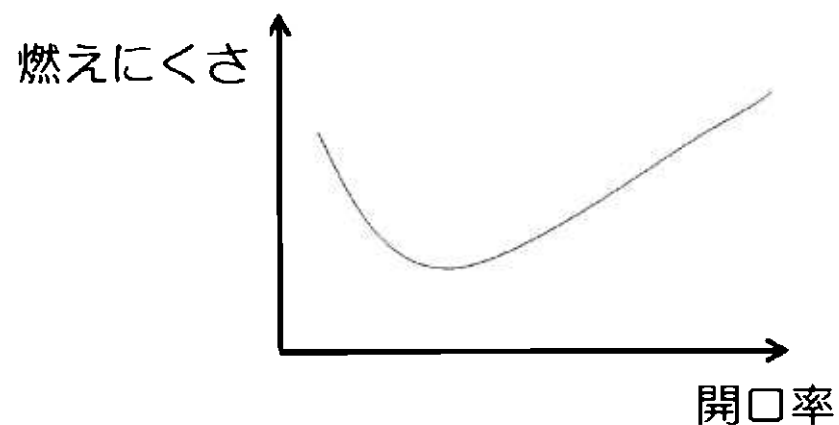
開口率1.25%

開口率5%

開口率15%

開口率30%

4.2. 温度分布時間変化（250秒まで）



250秒で消失せず

170秒で消失

158秒で消失

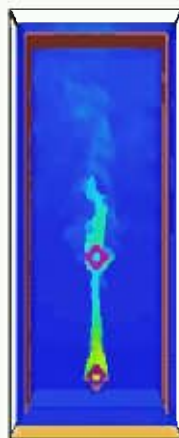
Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 244
Time: 61.0

開口率1.25%

Smokeview 6.0.11 - Dec 20 2012



Frame: 244
Time: 61.0

開口率5%

Smokeview 6.0.11 - Dec 23 2012

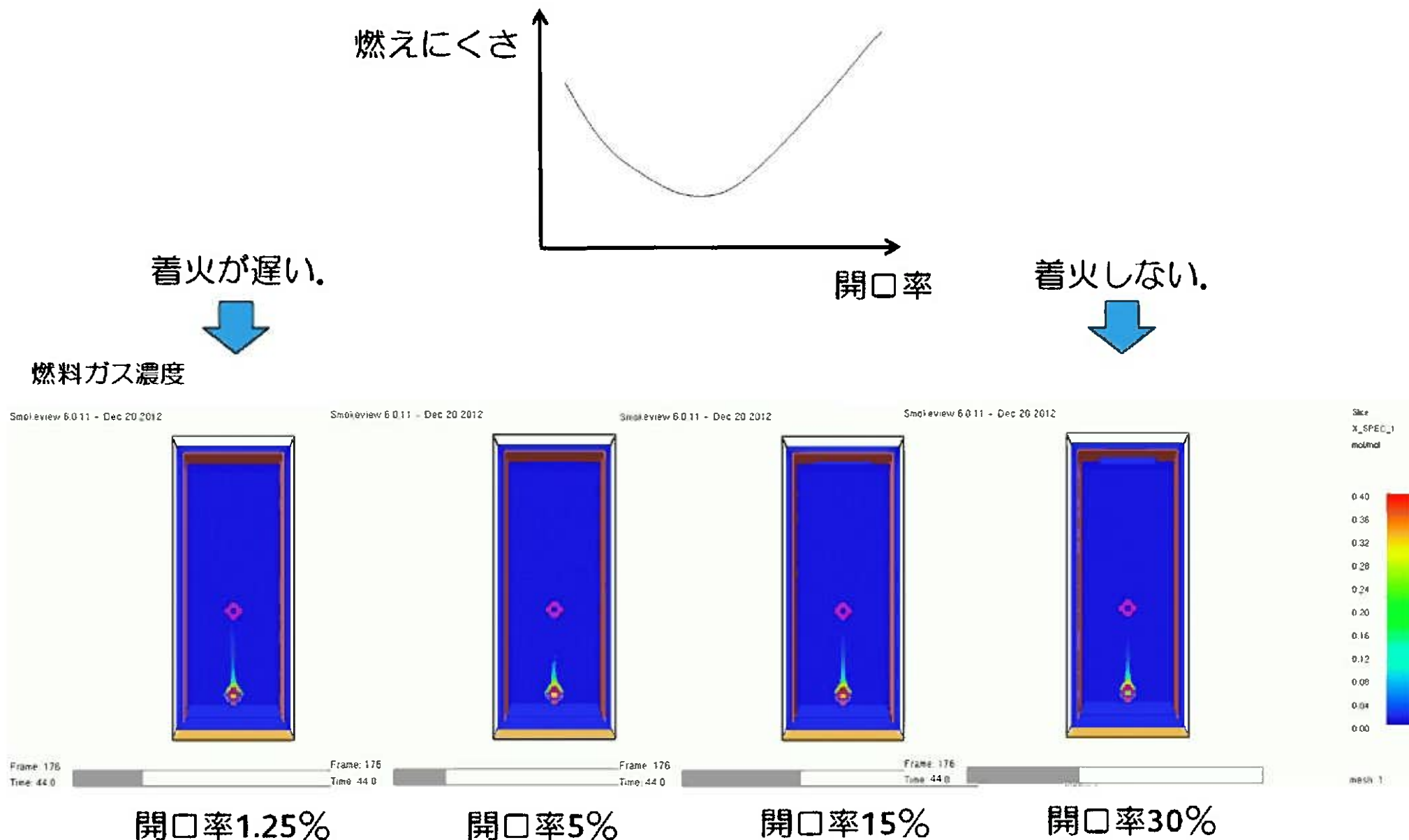


Frame: 244
Time: 61.0

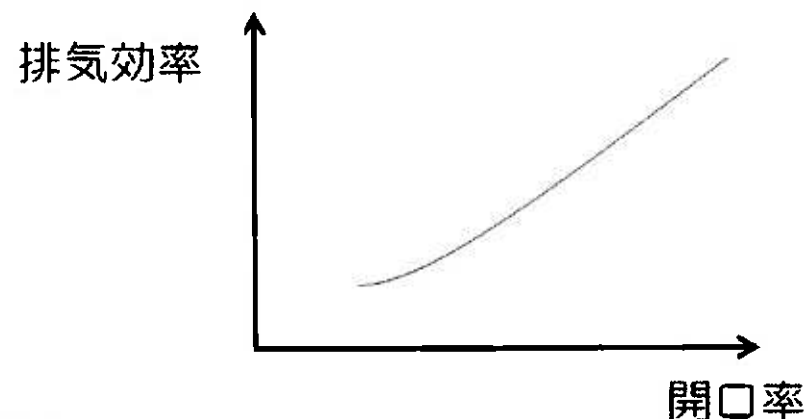
開口率15%



4.3. 燃料ガス濃度分布時間変化の開口率依存性



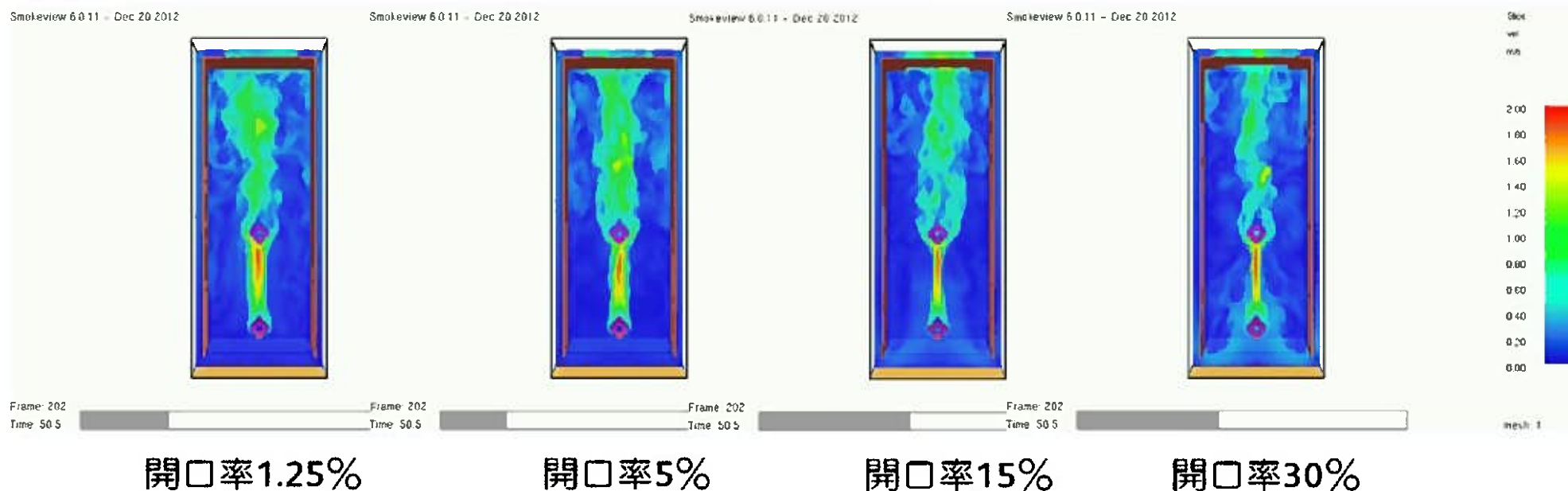
4.4. 流速分布時間変化の開口率依存性



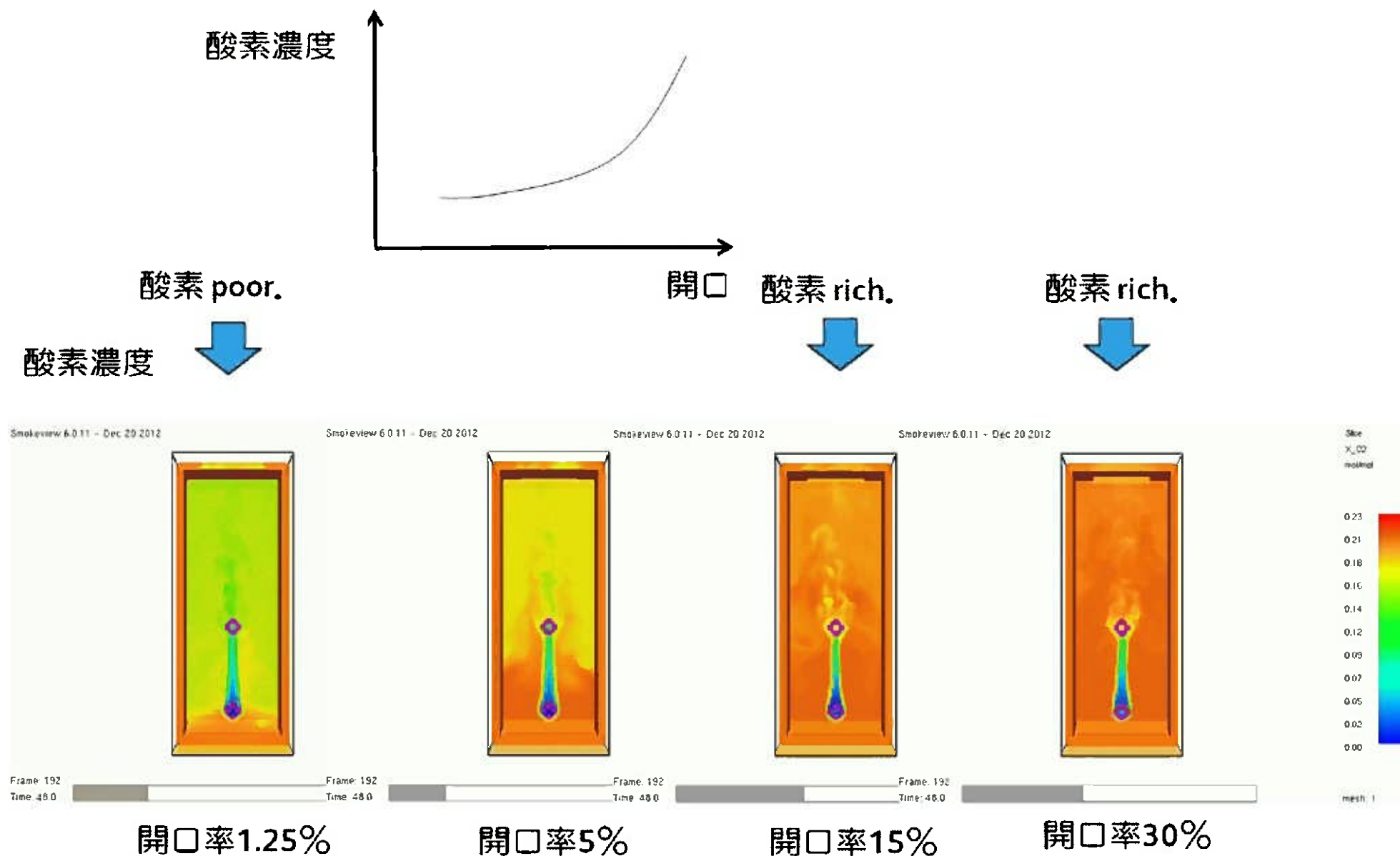
強い下降流（よどみ）。

空気が効率良く循環。

流速

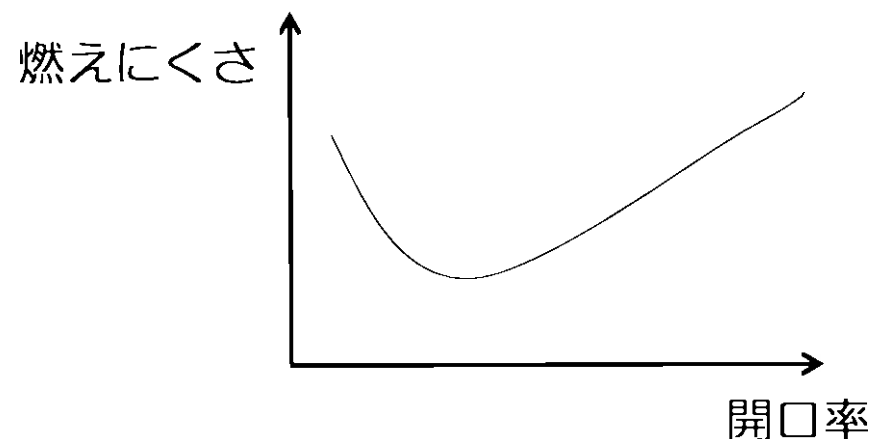


4.5. 酸素ガス濃度分布時間変化の開口率依存性



4.6. 開口率まとめ

- 開口率以外の条件を固定して，上部開口率の固体燃焼に与える影響を把握した。
- 上部開口率1.25%ケースでは，以下のことがわかった。
 - ・ 着火が一番遅い.
 - ・ 酸素濃度 poor.
 - ・ 下降流が強い.
- 上部開口率30%ケースでは，流れによる熱輸送が大きくなりその結果上部ギアが燃焼しない。
- 上部開口率の違いにより，上昇流が受ける抵抗が変わるので，固体近傍の熱伝達&物質拡散が影響を受けた。



5. ダクト長さ依存性（煙突効果）

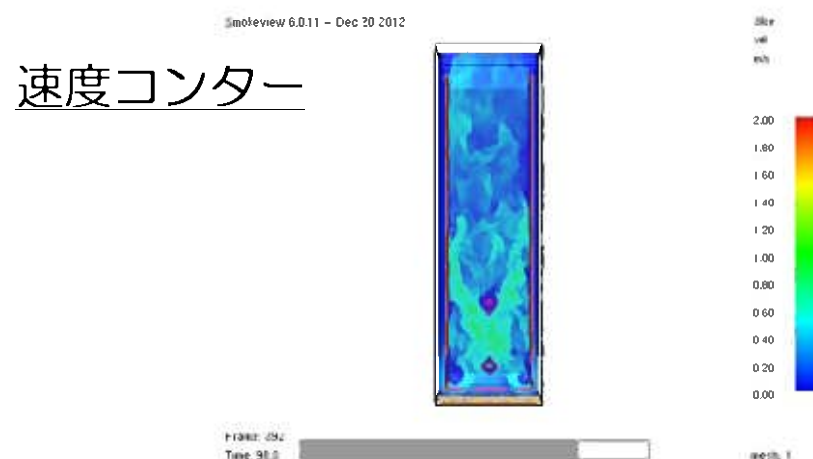
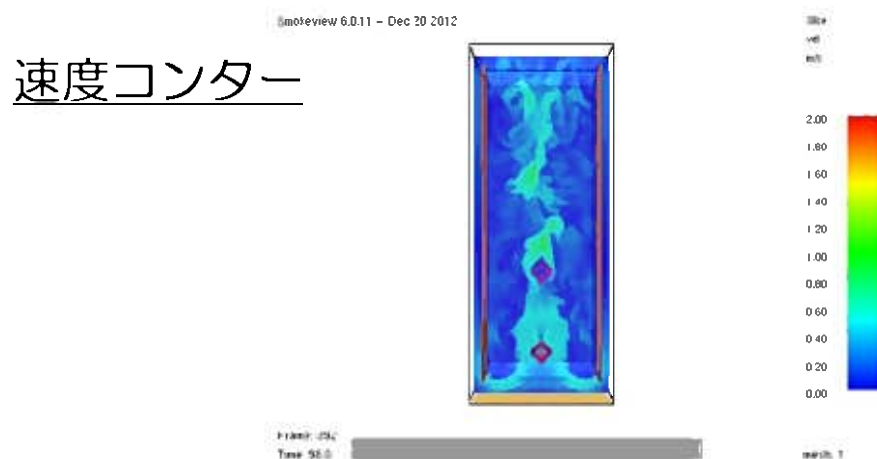
5.1. 煙突効果

■ 外気より高温の空気があると両方の密度差に比例して暖かい空気が上昇する現象を煙突効果（Stack Effect）といい，ダクト全体の長ささと内外空気の密度の差との積

$$\Delta p_h = h(\rho_o - \rho_i),$$

が煙突効果の駆動力である。

- ダクトが長い方が駆動力大で吸いこむ空気量が多い。
- 固体燃焼では密度一定でないので，定量的なことは言えない。



5.2. 上部ギアへの延焼結果（ダクト長さ比較）

解析（ダクト長さ440mm）

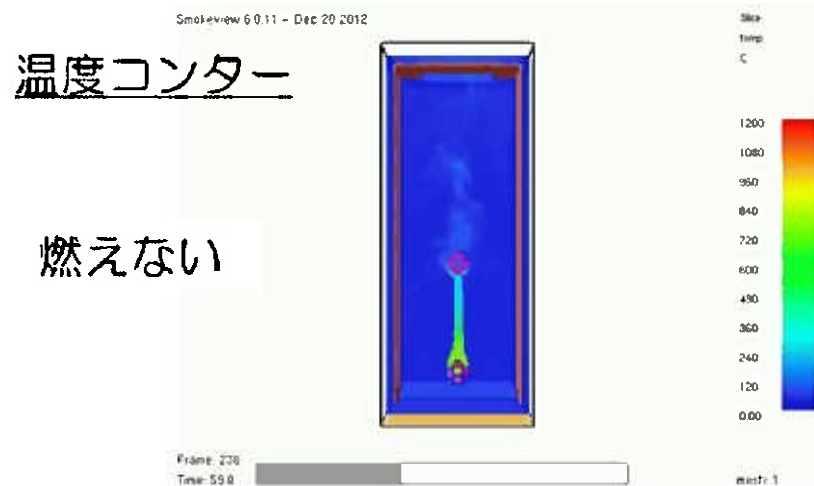
	1.25%	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
90mm	—	—	—	—	○	—	○
120mm	○	○	○	○	×	—	×
150mm	×	—	×	×	×	—	—

解析（ダクト長さ590mm）

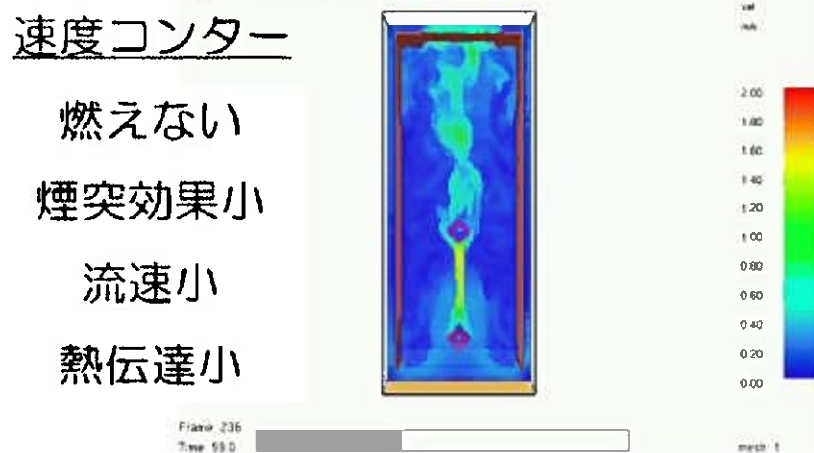
	1.25%	2.5%	5%	15%	30%	60%	100%
30mm	—	—	—	—	—	—	○
60mm	—	—	—	—	—	○	×
90mm	—	—	○	—	○	×	×
120mm	—	○	○	○	○	×	—
150mm	—	×	×	—	×	—	—

○：上部ギア燃焼
×：上部ギア非燃焼
—：未実施

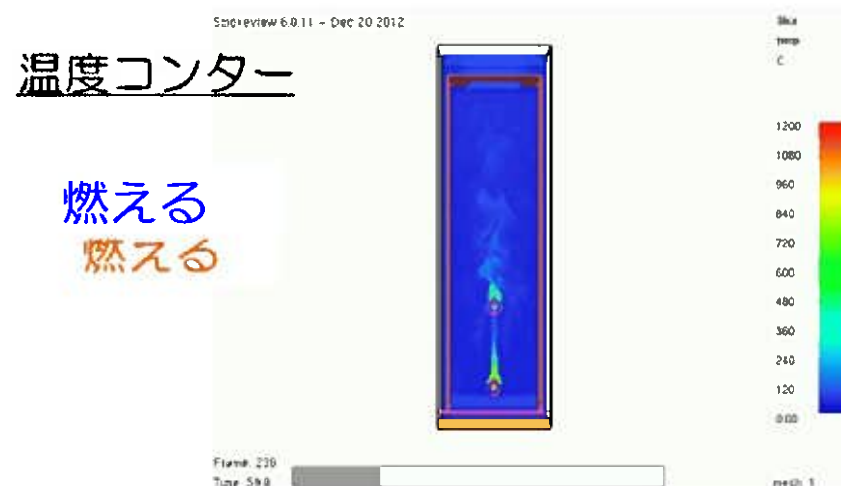
5.3. 煙突効果による結果の違い（30%， 120mm）



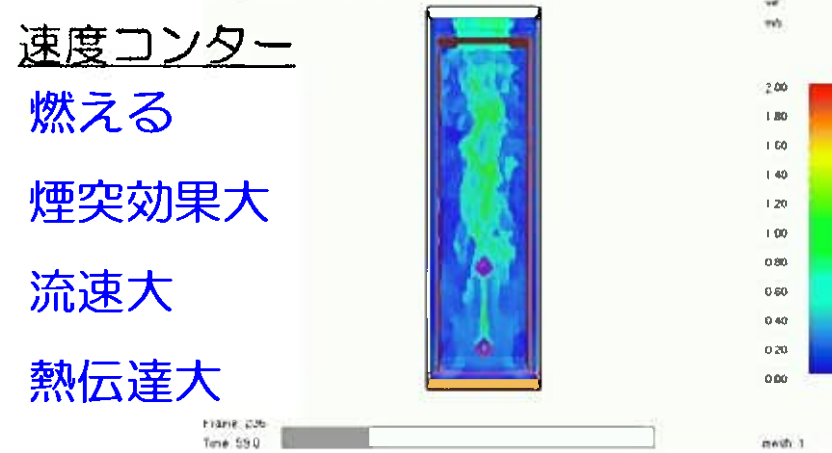
ダクト長さ440mm



ダクト長さ440mm



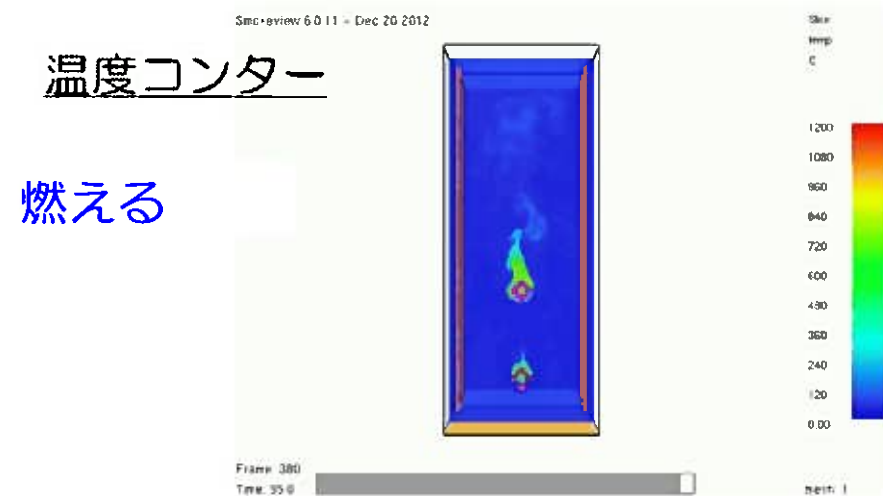
ダクト長さ590mm



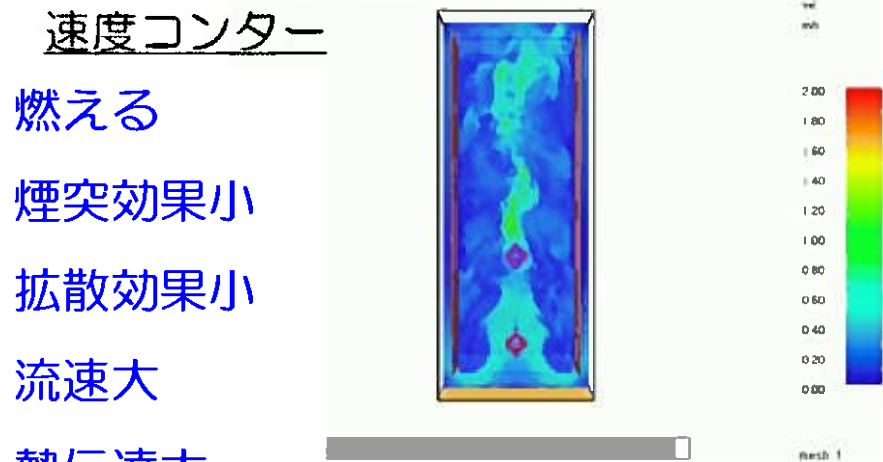
ダクト長さ590mm

■ 結果の違いは煙突効果の特性（流速の違い）で説明できる。

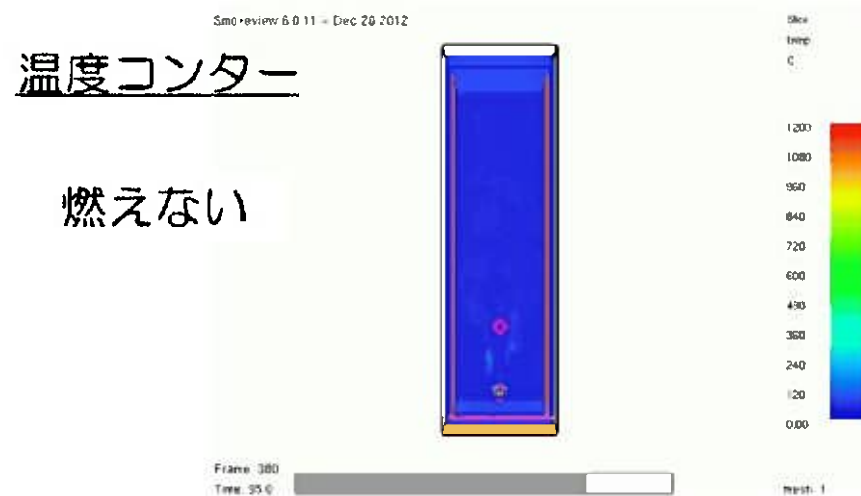
5.4. 煙突効果による結果の違い（100%， 90mm）



ダクト長さ440mm



ダクト長さ440mm



ダクト長さ590mm



ダクト長さ590mm

■ 結果の違いは煙突効果の特性（流速の違い）で説明できる。



6. まとめ

6.1. まとめ（解析結果）

■ 温度時間変化と開口率の関係（実験との比較）：

- ・ 開口率が大きいときと小さい時，解析と実験で逆.
- ・ 解析では開口率60%以上（590mmダクト）だと，温度低下が著しい.
→ 空気の流入量が大きいと推察される.
- ・ 実験では120mm のときに開口率が低いと延焼しない場合が多いが，解析では30%以下の開口率では延焼.

■ 距離依存性：

上部ギアへの延焼は、下部ギア燃焼により発生する高濃度の燃焼ガスによる場合と，下部ギア燃焼熱による上部ギア熱分解生成した燃料ガスの発火による．距離が遠くなるとこれらが発生しなくなる．

■ 開口率依存性：

- ・ 開口率30%以上のケースでは，流れによる熱輸送が大きくなりその結果上部ギアが燃焼しない．（ギア間距離120mmのケース）
- ・ 開口率の違いにより，上昇流が受ける抵抗が変わるので，固体近傍の熱伝達&物質拡散が影響を受ける．

■ 煙突効果：

ダクト長の違いによる解析結果の違い（延焼/未燃）は煙突効果の特性（流速の違い）で説明できる．

6.2. まとめ（解析技術）

<成果>

- メッシュ幅2.5mmのモデルにLESが適用できた.
 - ・ Ver.5では温度が500℃までしか上昇しない。（メッシュ幅10mm以上対象）
 - ・ 10mm オーダーの小型部品の燃焼にFDSが適用可能なことを示せた。
- LES適用すること，閉空間にすることで，
 - ・ 上部ギアが延焼しない現象を再現できた。
 - ・ ギア間温度の時間変化の傾向が合致し，ギア間距離が異なる場合の延焼現象を再現できた。
- 解析結果はギア間距離の依存性など流体力学，伝熱工学で説明可能。

<課題>

- 解析時間が1日から，15日に増加した。
 - ・ 熱分解を考慮するとMPI並列ができない（固体のところで，領域分割できない）。
- 小型プリンターの燃焼解析に40日強必要で現実的でない。

