

オープンソースコードFDSによる 固体燃焼シミュレーション

鹿児島大学

: 錦 慎之助

富士ゼロックス(株) : 秀浦 勉、森 一浩、柴田 義麿、
藤本 良一、岡本 直樹

FDSとは

Fire Dynamics Simulator

「**火災**」を対象としたCFDソフト

米国立標準技術研究所（NIST）が中心となって開発

例えば、

建物火災、市街地火災、トンネル火災

石油タンク火災（プール火災）

噴霧燃焼

森林火災 W-FDS (Wildland-urban interface FDS)

FDS+Evac: 避難シミュレーションモジュール

などのシミュレーションができる。

本研究では、FDS Version 5.5.3 Revision No. 7031 を使用した。

これまでの計算例(錦)

月・火星の重力を考慮した有人宇宙船内の可燃性固体の燃焼
→PMMAの燃焼

狭窄空間での紙の燃え拡がり

ガス漏れ・拡散(メタン・水素・プロパン・二酸化炭素)

トンネル火災(臨界換気風速)

トンネル火災時のスプリンクラーによる煙の制御

固体燃焼の燃え移り現象

建物火災時の煙の流動

プール火災のウォーターミストによる火炎制御

FDSとは

基本は、LES (Large Eddy Simulation) による解析。
大きな領域 (建物火災など) を計算対象として開発されている。

流れ場：

低マッハ数近似を仮定した圧縮性のNavier-Stokes 方程式、
質量保存式、エネルギー保存式、化学種保存式を解く。
LESとDNSの選択が可能。開発者はLESに重点を置いている。

燃焼モデル：

Mixture Fraction Combustion Modelと Finite Rate Reaction
の選択が可能。ただし、Finite Rate Reaction はDNSのみ。

輻射の輸送方程式：

Non-scattering gray gasの輻射輸送方程式を有限体積法で解く。

粒子の移動 (水滴、燃料液滴) も計算できる：

スプリンクラー、液滴燃焼

FDSとは

ソースコードが公開されており、必要に応じて変更可能。
無料で利用可能(一部のサードパーティー製品を除く)

オフィシャルサイトは、NISTから
Google Code™ オープンソースデベロッパーサイトへ移動
<http://code.google.com/p/fds-smv/>

FDSとは

- 計算実行可ファイル FDS
- 可視化ソフト Smokeview
 - Windows, Mac OS , Linux[®] に対応。
 - 恐らく、計算はLinuxで、可視化はWindows上で行うのが、一番楽。
(Windows上で計算を行うことも可能)
- FDS and Smokeview Discussions
(Google Groups[™] ディスカッション フォーラム)
<https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!forum/fds-smv>
掲示板のようなもの、メーリングリスト、
一般的な質問等ができる・過去の質問を調べることができる。
- fds-smv (Google Code[™] オープンソースデベロッパーサイト)
<http://code.google.com/p/fds-smv/>
プログラムのダウンロード、開発履歴参照・バグの報告
ユーザーガイド等のダウンロード

• Windowsは、米国Microsoft Corporationの、米国、日本およびその他の国における登録商標または商標です。
• Mac OSはApple Inc.の商標です。
• Linux は、Linus Torvalds 氏の日本およびその他の国における登録商標または商標です。

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。

→共同研究の実施

固体燃焼の計算

固体表面を燃え拡がる現象：

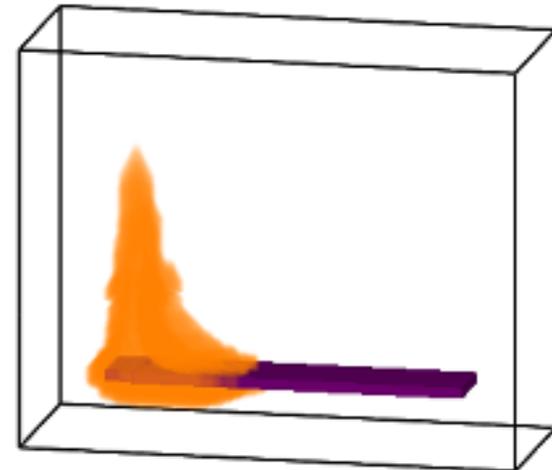
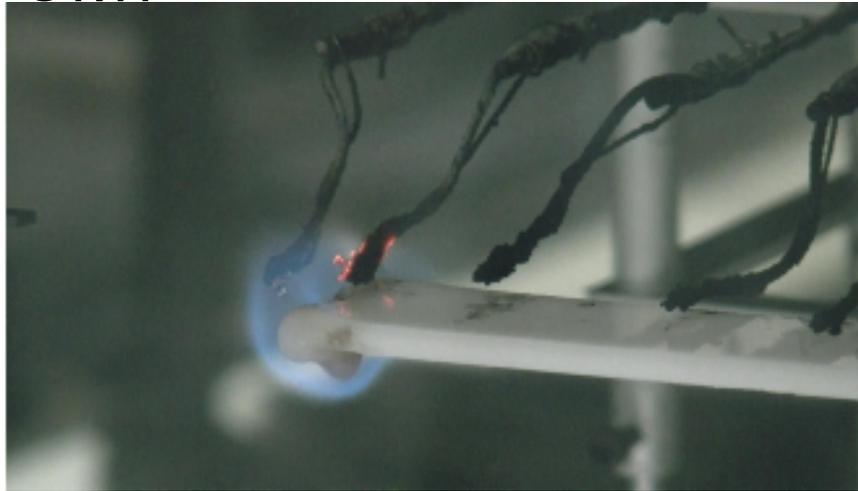
数値計算は、計算領域を離散化するので、
燃え拡がり現象は、計算格子間隔の影響を強く受ける。

本研究では、格子間隔1.5mmを基本としている。
(これ以上細かくすると計算コストが大きくなりすぎる)

狭い計算領域、および、詳細な計算格子間隔であるので
DNSにより計算を行った。

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

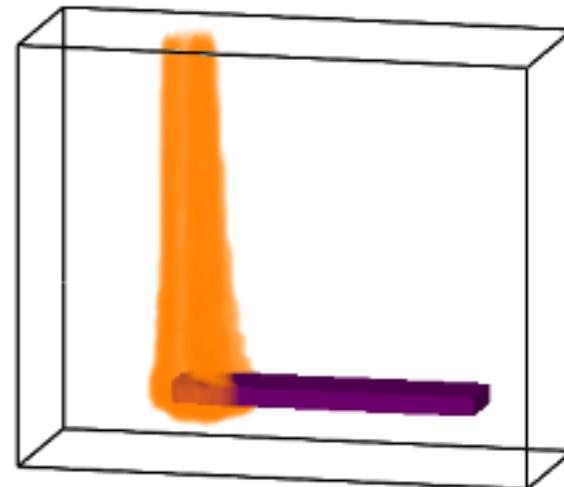
POM:



Frame: 90
Time: 90.0

>200 (kW/m³)

ABS:



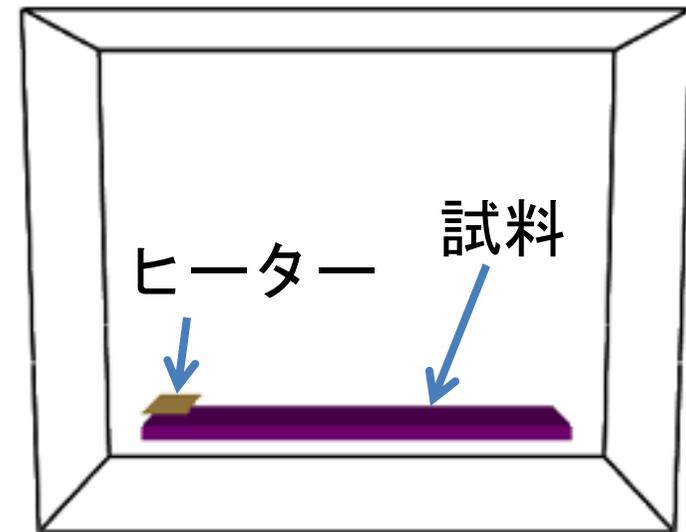
Time: 160.0

>200 (kW/m³)

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

試料は、細長い薄板で、
燃焼解析では、格子間隔を考慮して、
POM : 99 mm X 19.5 mm X 3 mm
ABS : 99 mm X 19.5 mm X 5 mm
とした。

試料左端の上側に、
長さ15 mm、幅19.5 mmの
ヒータを設置し、
1000℃で30秒間加熱し、
着火させる。



ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

z 方向

格子間隔=3mm→

2領域に分割(MPI) ⇕

格子間隔=1.5mm→

試料厚みは1格子

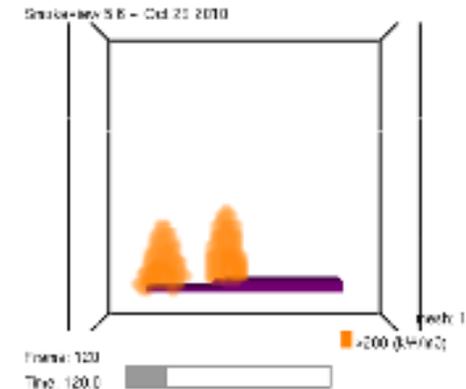
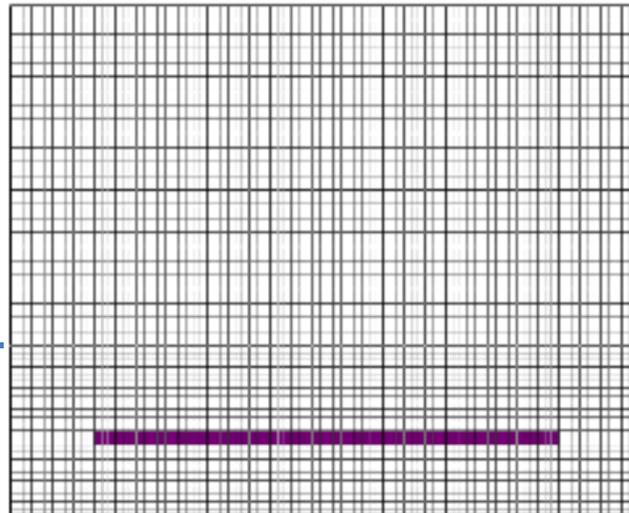
3mm (POM), 5mm (ABS)

x, y方向の格子間隔=1.5mm

計算領域

POM: 135mm x 52.5mm x 108mm

ABS: 135mm x 52.5mm x 110mm



試料厚みは1格子：

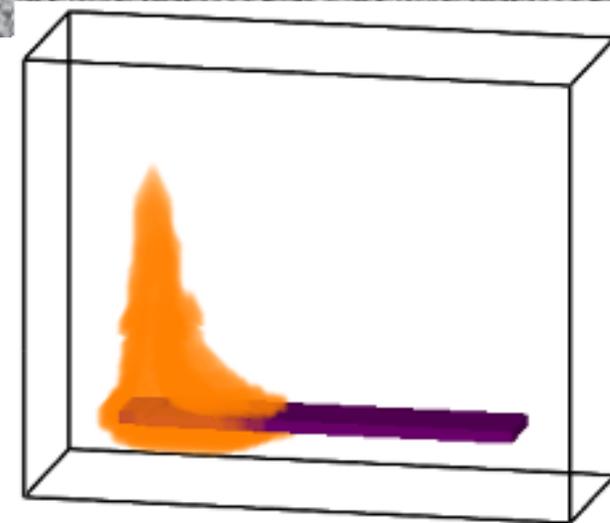
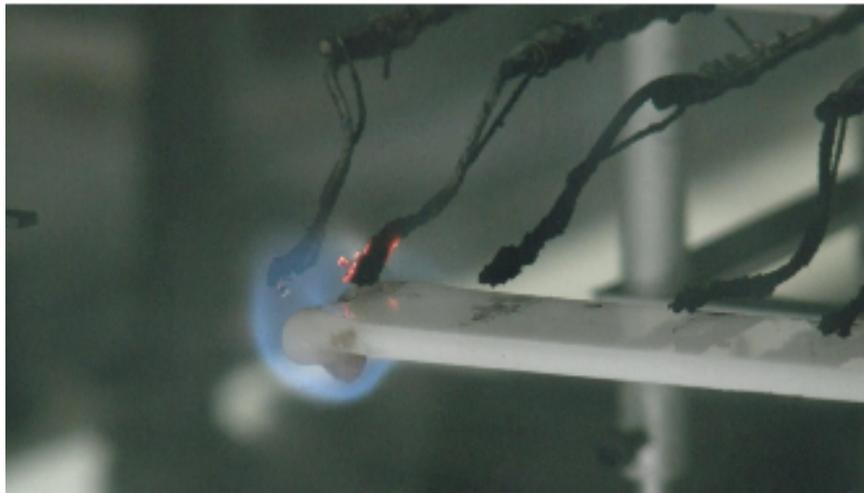
複数格子にすると右上図のように炎が複数に分かれる。固体内部の熱伝導は、法線方向1次元熱伝導を計算しているため。

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

物性値(一部)	POM	ABS
発熱量は、溶けて垂れ落ちることを考慮	10200.0(kJ/kg) 完全燃焼時の約60%	11200.0(kJ/kg) 完全燃焼時の約40%
ススの発割合(kg/kg)	0.00	0.15
比熱(kJ/kg/K)	1.47(100%) 値を下げると燃え広がりが速くなり過ぎるため、文献値データをそのまま使用。	0.584(40%) 燃え広がり速度を速くするために文献値より大幅に低い値を使用。 100%では消炎する。
気化熱(kJ/kg) 固体から可燃性ガスに変化する際に吸収する熱量	1720(100%) 値を下げると燃え広がりが速くなり過ぎるため、文献値データをそのまま使用。	273(20%) 燃え広がり速度を速くするために文献値より大幅に低い値を使用。

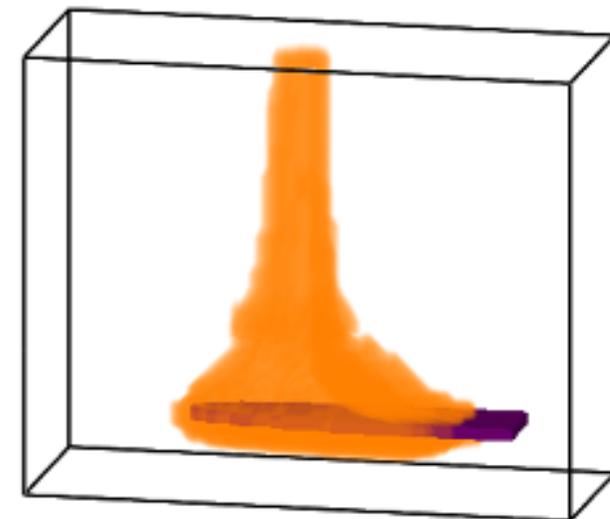
ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

POM:



Frame: 90
Time: 90.0

>200 (kW/m³)



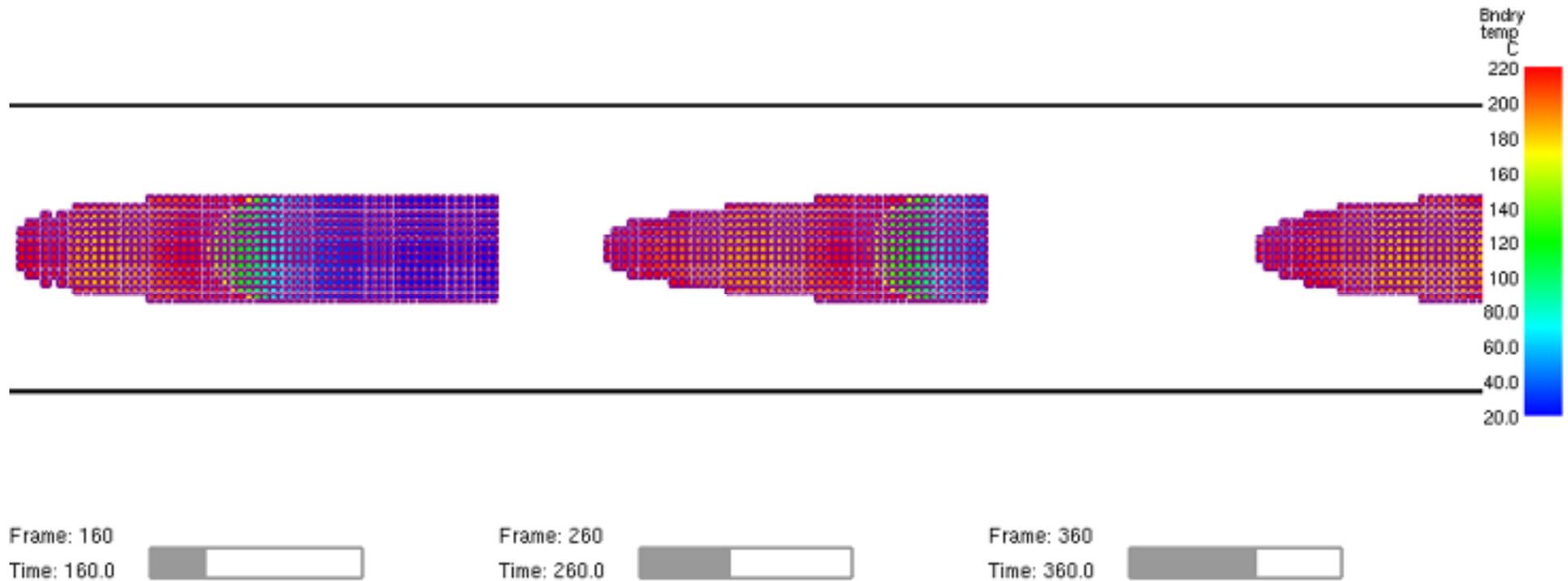
Frame: 235
Time: 235.0

>200 (kW/m³)

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

POM:

試料表面温度（上から見た図）



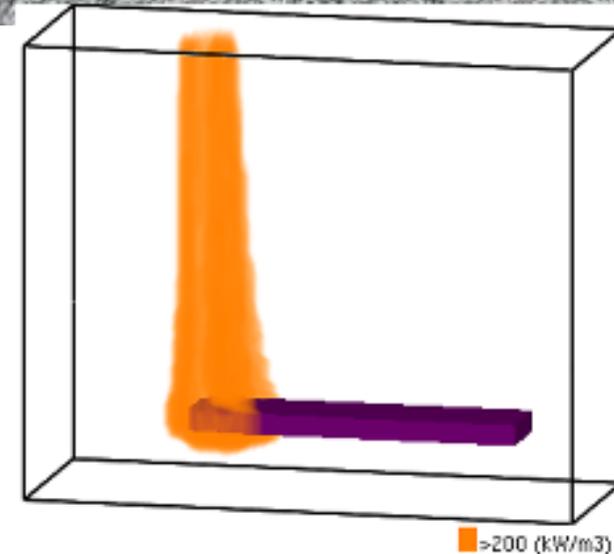
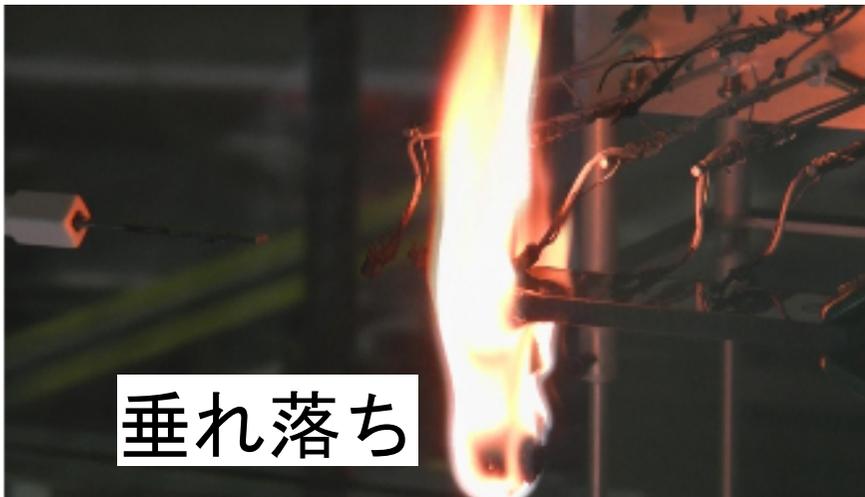
ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

POM	燃え広がり速度
実験データ	0.28 mm/s
解析データ	0.32 mm/s

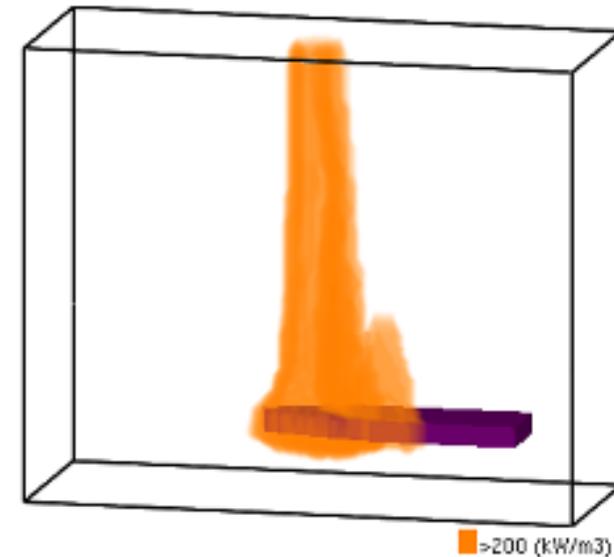
POM 温度比較	高さ約0mm	高さ約30mm	高さ約50mm
実験データ	1011°C	552°C	419°C
解析データ	956°C	998°C	912°C

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

ABS:



Time: 160.0

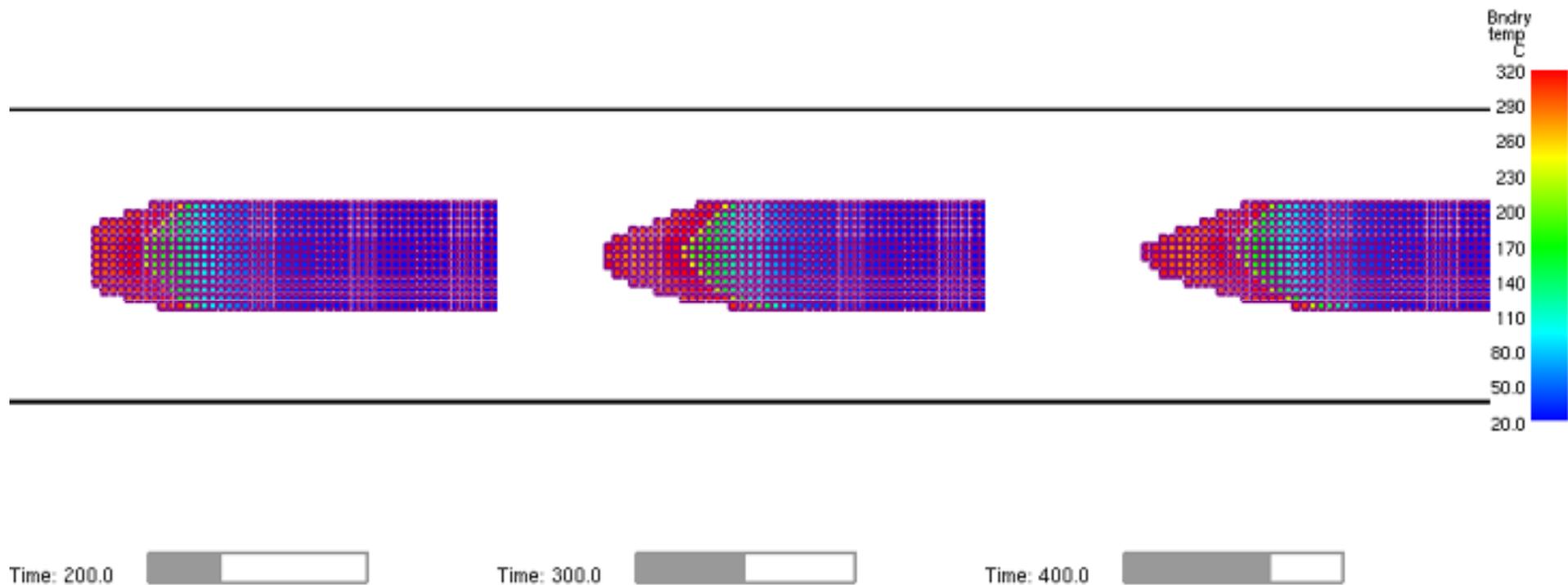


Time: 416.0

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

ABS:

試料表面温度（上から見た図）



ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

ABS	燃え拡がり速度
実験データ	0.34 mm/s
解析データ	0.11 mm/s

ABS 温度比較	高さ約0mm	高さ約30mm	高さ約50mm
実験データ	777°C	640°C	413°C
解析データ	750°C	636°C	531°C

ケース① 棒状の板を燃え広がる火炎

まとめ:

燃え拡がりの様子を計算することはできた。

板近傍の温度が、実験と計算でほぼ同じような値となった。

しかし、実験と計算では以下の異なる様子が見られた。

- ・燃え拡がり速度の違い

 - POM: 計算の方が15%程度速い

 - ABS: 実験の方が3倍程度速い

- ・計算では試料上方の温度が高い

 - 実験では上方に行くにつれて温度が急激に低下しているが、計算では低下していない。特にPOMの場合。

課題

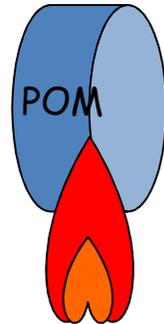
- ・垂れ落ちのモデル化をどうするか？

ケース② 単一ギア燃焼

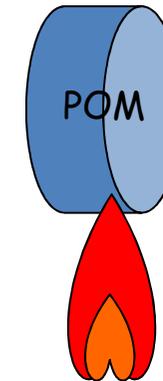
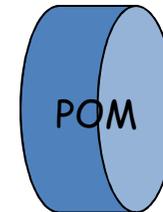
ギアの燃焼シミュレーション

→実物のギア（厚さ・直径・材質）を対象とする

- ・ギア単体の場合



- ・離れた2つのギアの一方に着火した場合の延焼

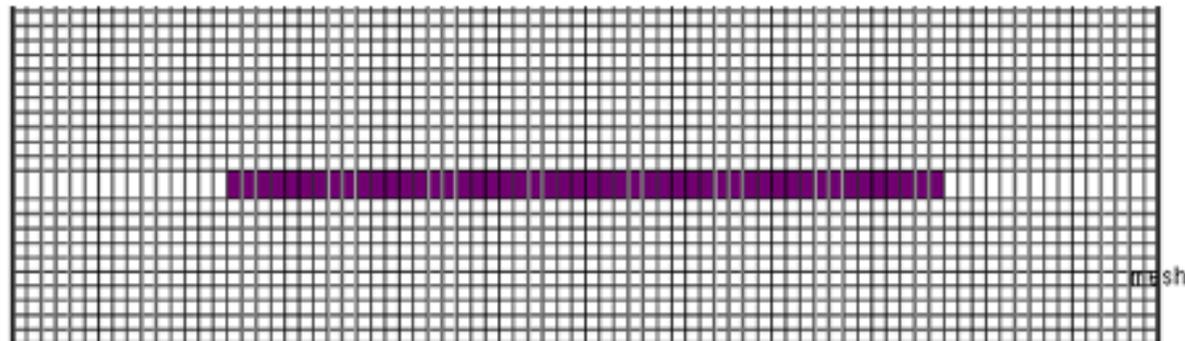


ケース② 単一ギア燃焼

厚さ方向に1格子とした場合、
厚さ数ミリのギアの計算に不向き
→ 格子間隔が粗すぎる

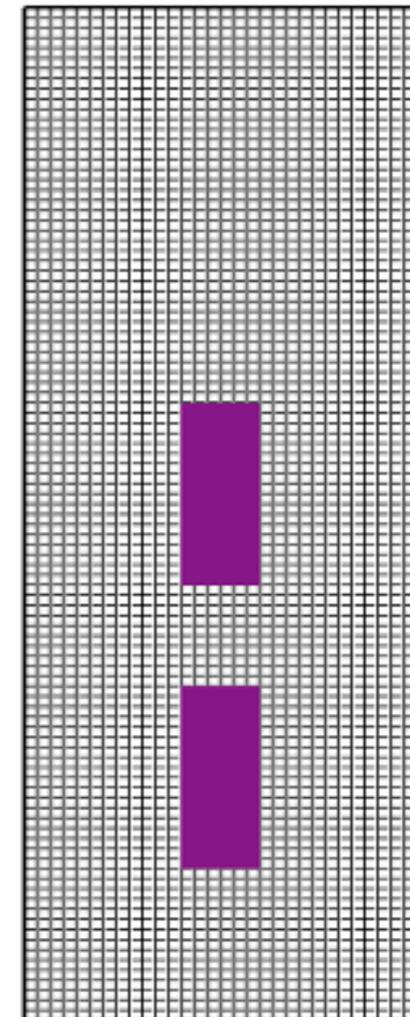
ギアのサイズ： 直径27mm、厚さ9mm

平板



ギア

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

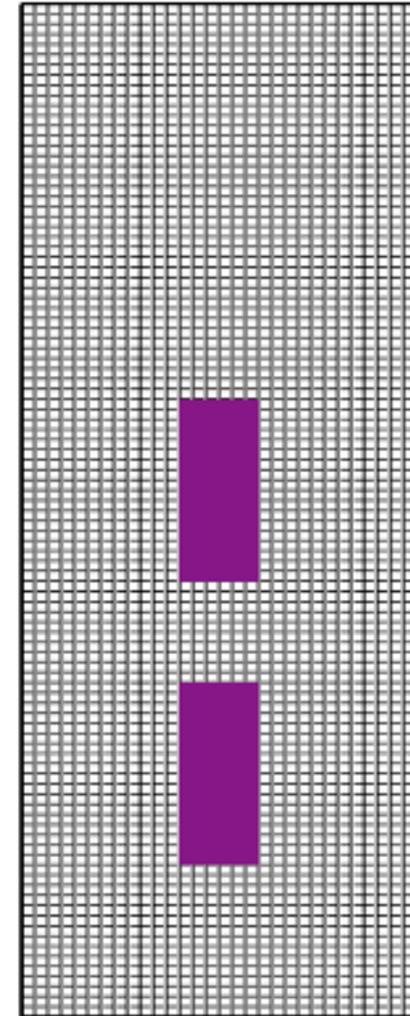


ケース② 単一ギア燃焼

FDSのデフォルトでは、
熱分解して固体が消失する場合、
右図のような格子分割が行われる。

固体内部の温度は初期条件で、一定値が
設定される（通常は 20°C ）。

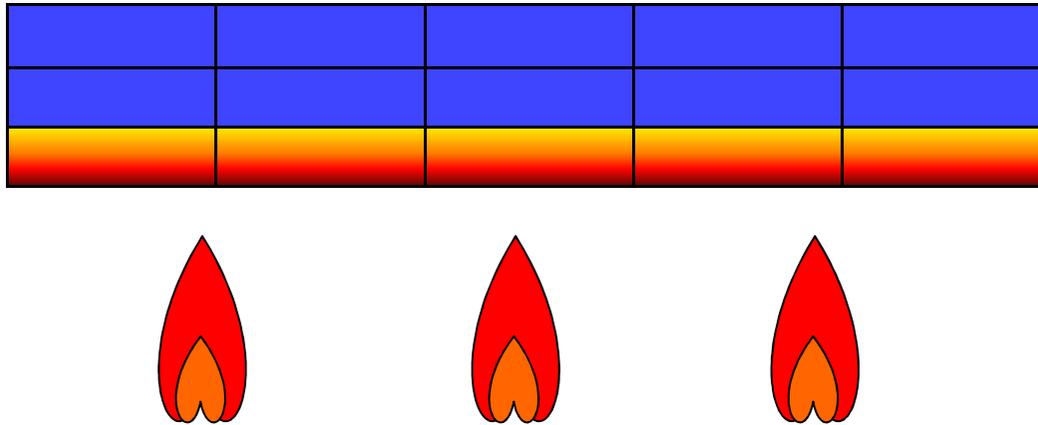
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



ケース② 単一ギア燃焼

FDSのデフォルト：

外部から加熱されると表面のセルのみ温度上昇する。

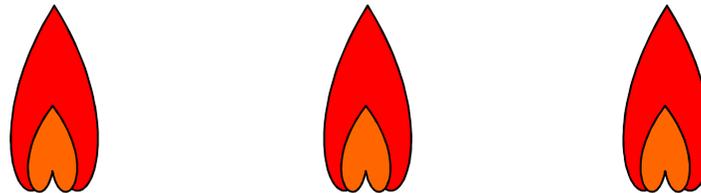
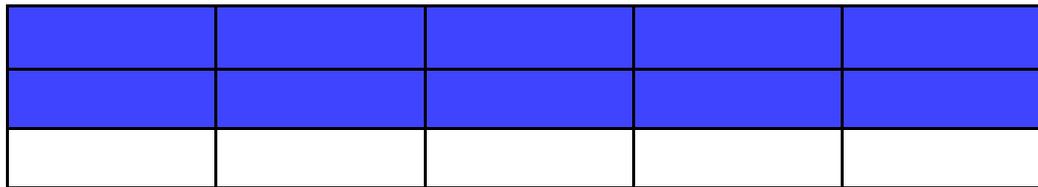


このとき、表面のセルの内部は法線方向に格子分割され、1次元の熱伝導方程式を解いて、温度を計算している。

ケース② 単一ギア燃焼

FDSのデフォルト：

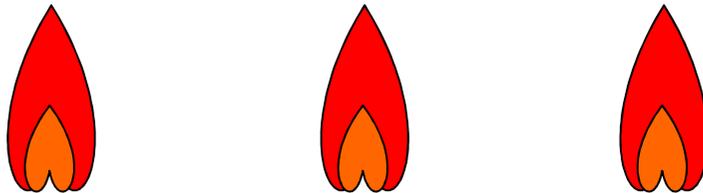
表面のセルが消失した時、新しい表面のセルの内部温度は初期設定温度（通常20°C）となる。



ケース② 単一ギア燃焼

FDSのデフォルト：

その後、次第に温度が上昇する。

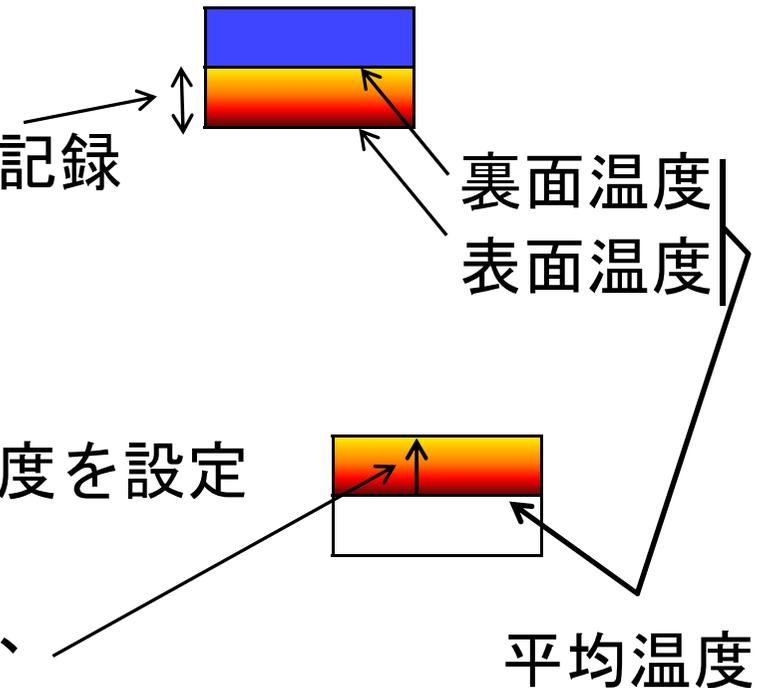


ケース② 単一ギア燃焼

プログラム改良

- 1, 表面のセルが消失する直前に,
セル表面と裏面の温度, 厚さを記録
(厚さは薄くなっている)

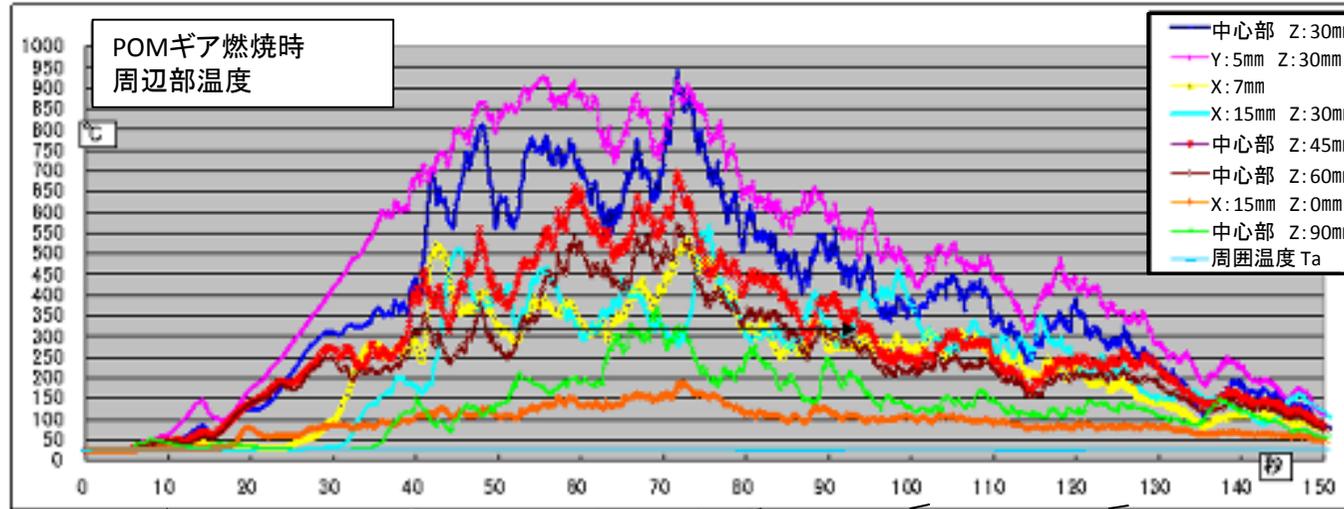
- 2, 新しいセルの表面温度
⇒古いセル表面・裏面の平均温度を設定
新しいセルの内部温度
⇒古いセルの表面裏面の温度差、
厚さから勾配を計算して設定。



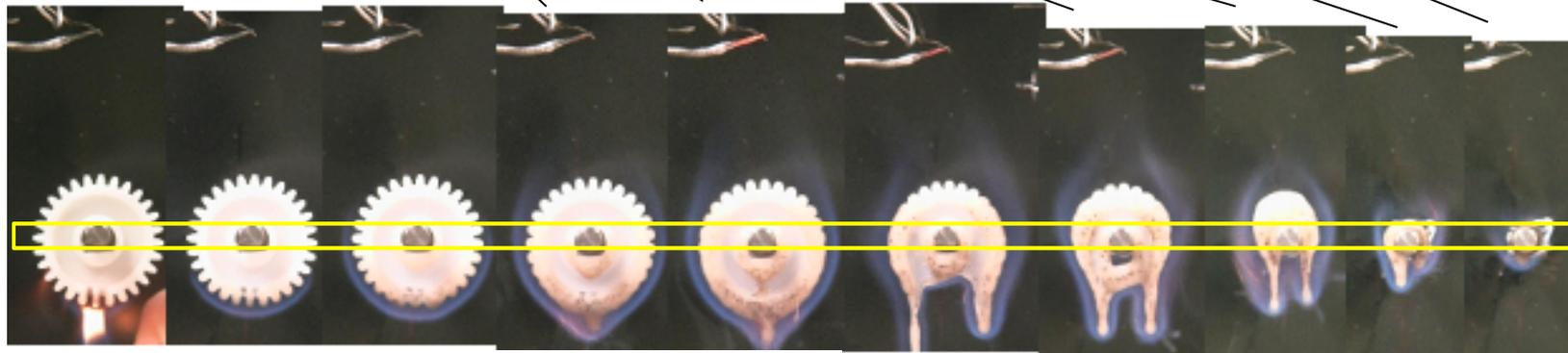
FDSの wall.f90 が対象

ケース② 単一ギア燃焼

単一ギア燃焼



130秒過ぎで
消失



ケース② 単一ギア燃焼

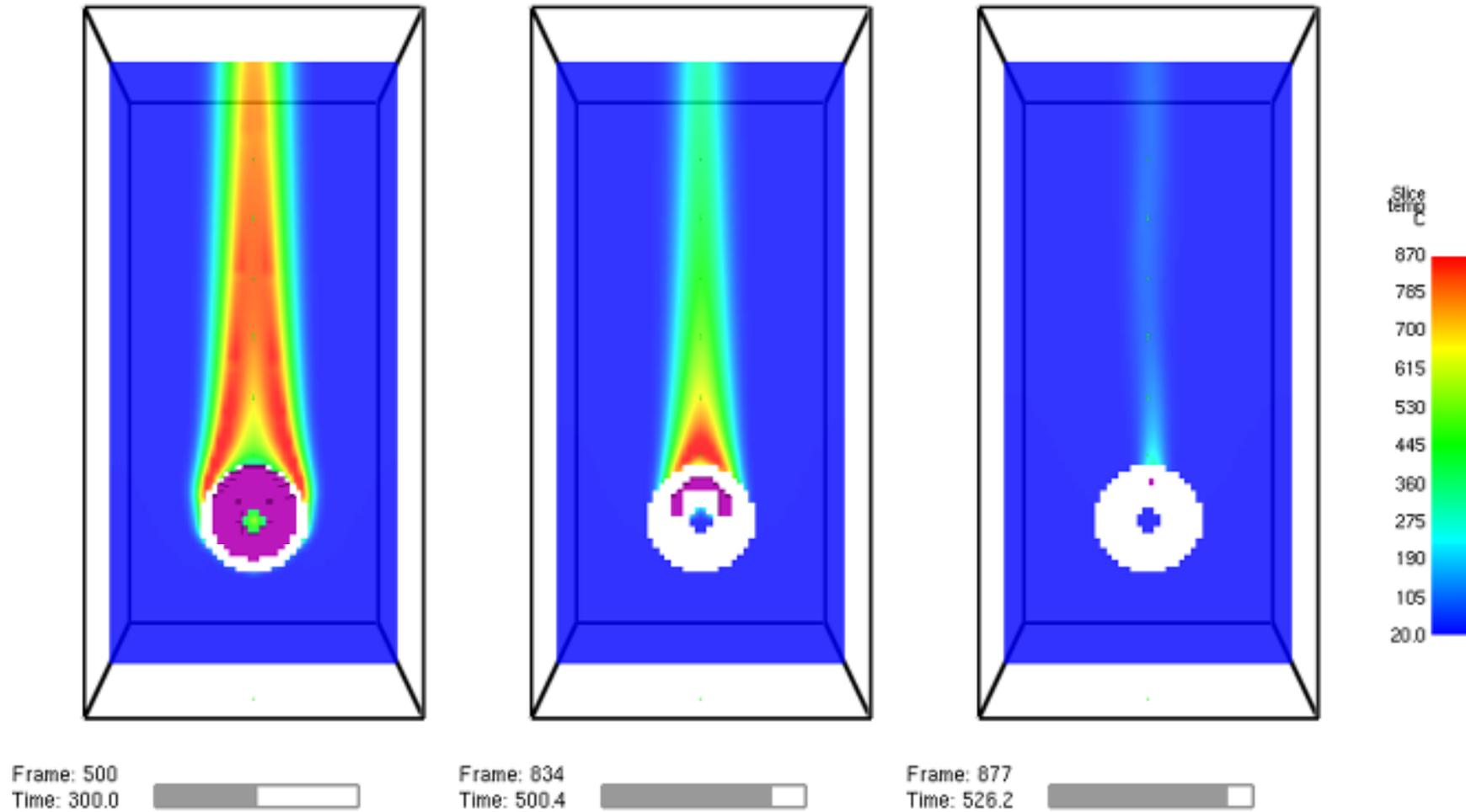
単一ギア燃焼

シミュレーション POMギア 直径27mm、厚さ9mm

POMの物性値:

&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 カロリーメーター 17000の60%	密度(kg/m ³)	1410
		A(Pre-exponential factors 1/s)	1.957E+11
		E(Activation energies kJ/kmol)	118000
		気化熱 HEAT_OF_REACTION(kJ/kg)	1720 (100%)

ケース② 単一ギア燃焼



計算領域: 72mm x 45mm x 150mm

ケース② 単一ギア燃焼

消失時間:

実験 約130秒

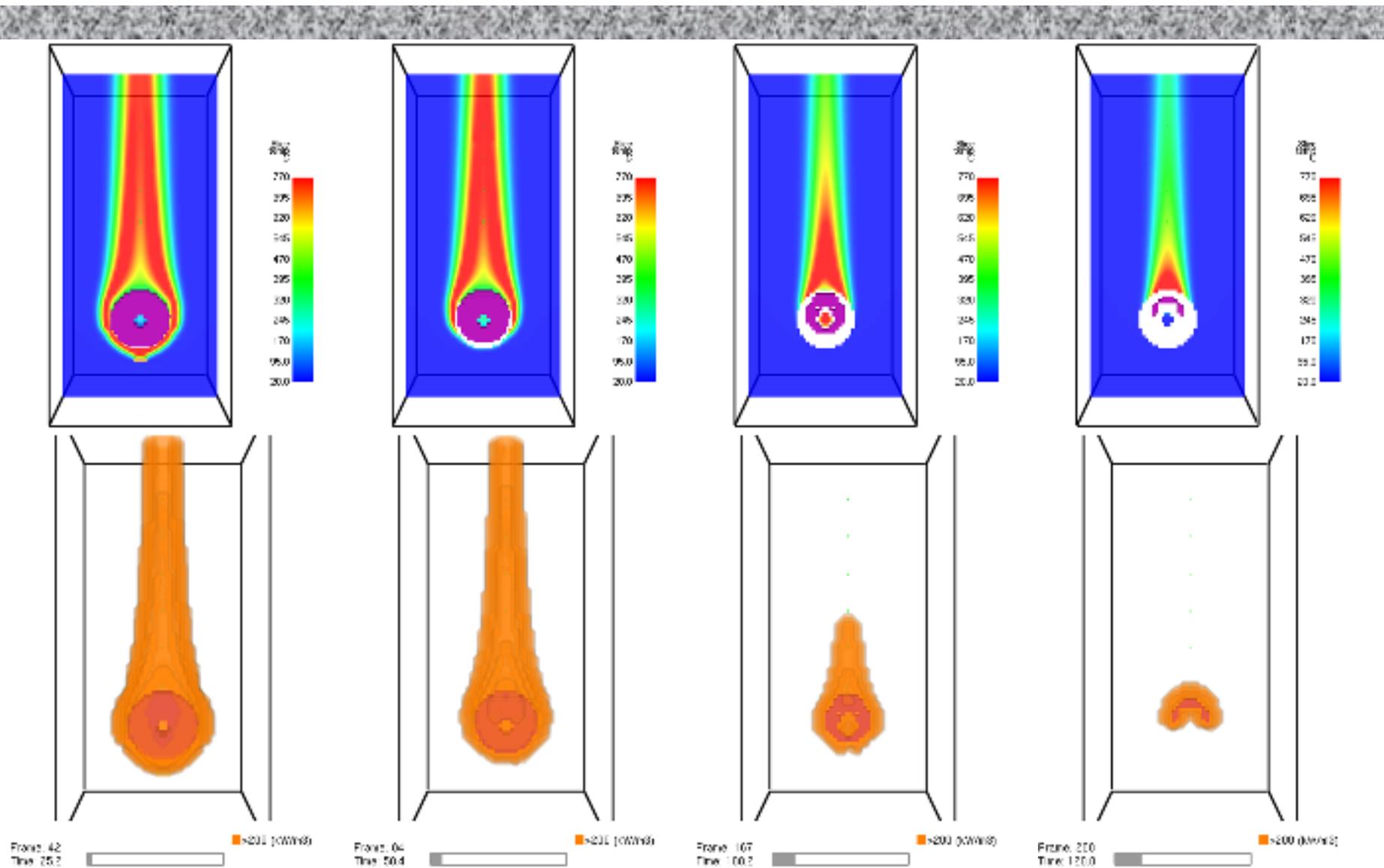
計算 約520秒

大きな差を解決するために、
POMの密度を下げて、シミュレーションを実行。

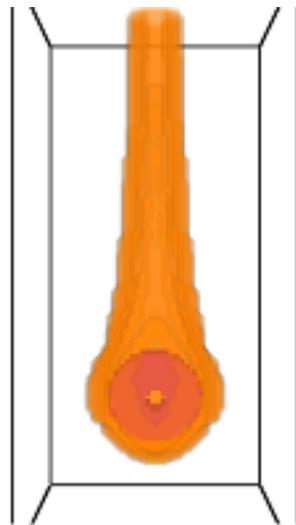
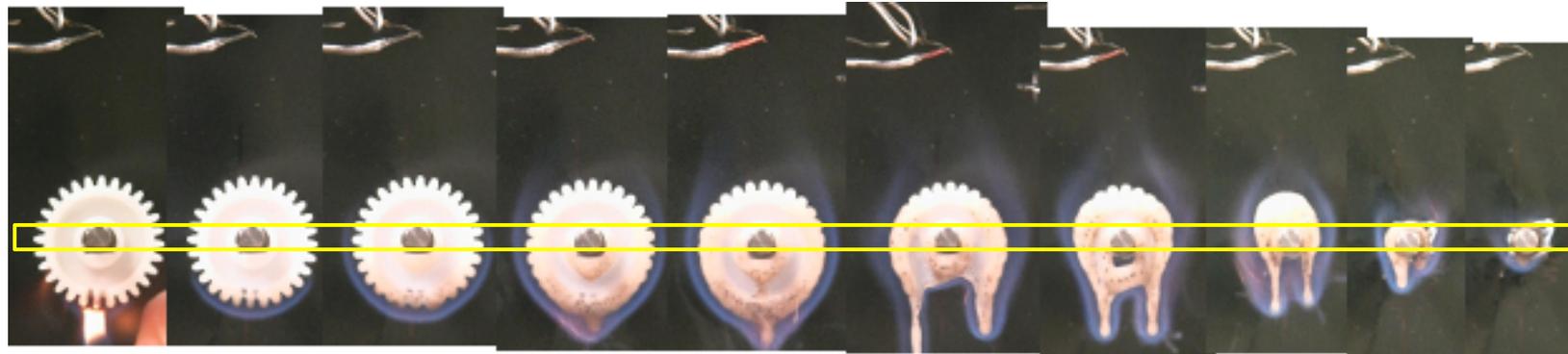
→垂れ落ちによる可燃固体の減少をモデル化

⇒密度を22%としたとき消失時間が実験に近くなった。

ケース② 単一ギア燃焼

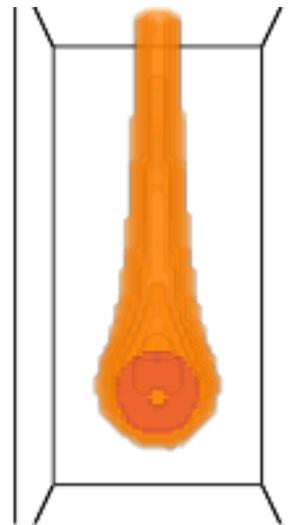


ケース② 単一ギア燃焼



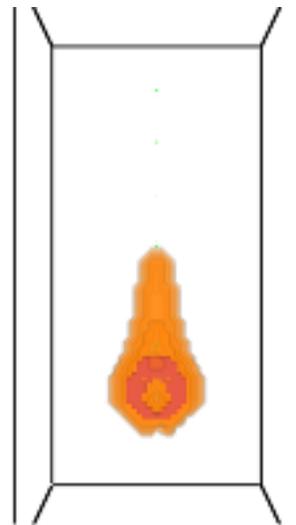
Frame: 12
Time: 25.2

201 (K)



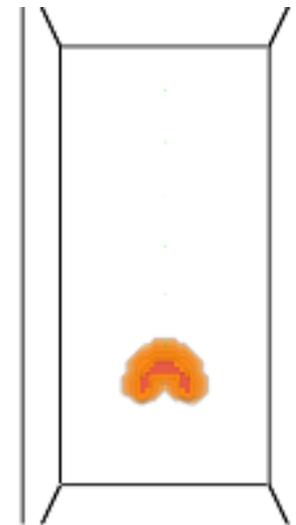
Frame: 51
Time: 50.4

201 (K)



Frame: 187
Time: 100.2

200 (K)



Frame: 200
Time: 120.0

200 (K)

ケース② 単一ギア燃焼

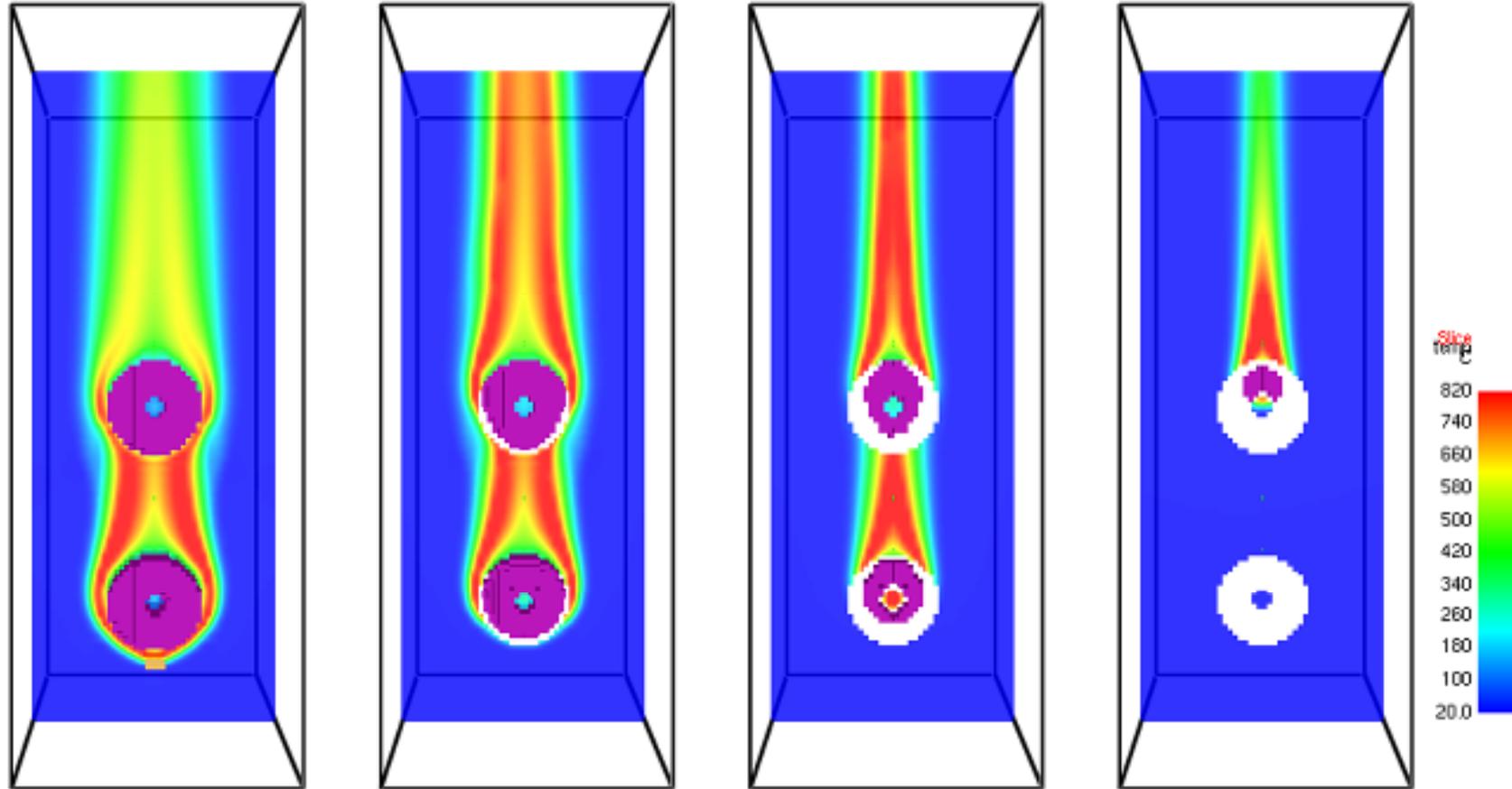
ギアの消失時間は、実験とシミュレーションで、同程度にすることは出来た。

ギア上約30mmの温度は、実験、シミュレーションともに、約700°Cである。

単一ギアは、シミュレーションが実験をおおよそ再現できている。

ケース③ 下のギアからの燃え移り

ギア間隔30mmの場合：延焼



Frame: 25
Time: 15.0

Frame: 84
Time: 50.4

Frame: 167
Time: 100.2

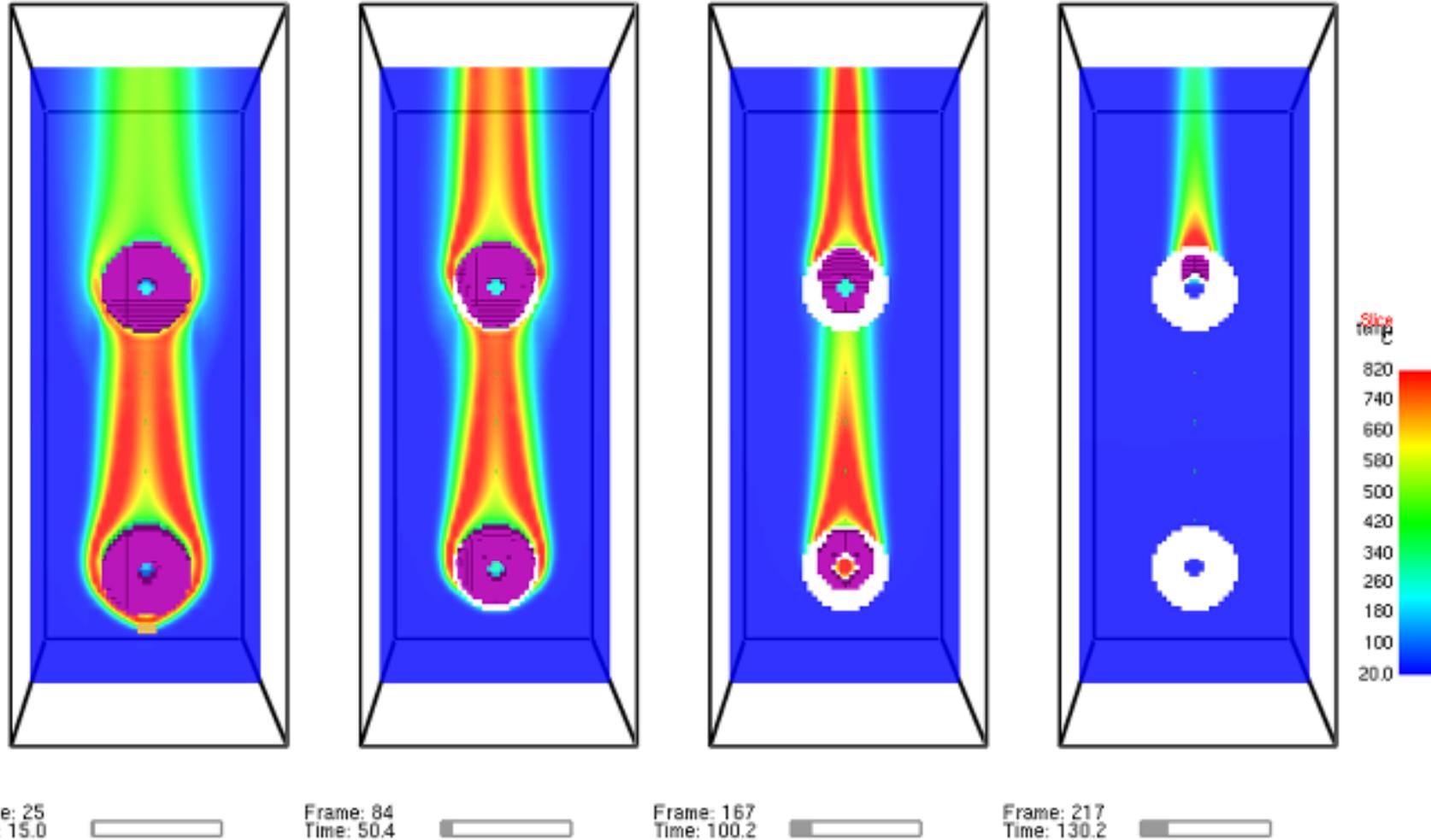
Frame: 217
Time: 130.2

計算領域：72mm x 45mm x 192mm

ケース③ 下のギアからの燃え移り

ギア間隔60mmの場合：延焼

実験では燃え移らない



計算領域：72mm x 45mm x 192mm

ケース③ 下のギアからの燃え移り

燃え移るという現象はシミュレーションできた。

しかし、ギア間隔が広くても、燃え移ってしまう。

⇒ 実験結果とは、明らかに異なる結果になった。

改善を検討したが、現時点では、
実験を再現することはできていない。

まとめ

FDSは建物火災など、比較的大きなスケールの計算領域をLESで計算することを念頭に開発されているが、本研究では、比較的、狭い計算領域における固体燃焼の数値シミュレーションを、DNSにより実行した。一般的に良く使用されるPOMとABSの燃焼を計算対象とし、実験との比較検討を行った。

✓ 細長い平板の燃え拡がりシミュレーション

✓ 単一ギアの燃焼のシミュレーション

に関しては、比較的良く、実験を再現できていると考えられるが、

✓ 上下に離れたギアの延焼シミュレーション

では、実験では間隔を広げると延焼しない様子を、現時点では、シミュレーションで再現できていない。