

燃焼分野における最先端シミュレーション技術活用 ワークショップ

プログラム

「ごあいさつ」

アドバンスソフト株式会社 常務取締役 第2事業部長 三橋 利玄

「液体ロケットエンジン燃焼器のシミュレーション研究」

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター

開発員 根岸 秀世 様

「ガラス溶融シミュレーション」

社団法人 ニューガラスフォーラム 川地 伸治 様

アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主事研究員 小笠原 章*

** 休憩 **

「自動車分野での応用例～レーザー着火～」

独立行政法人 産業技術総合研究所 新燃料自動車技術研究センター

計測評価チーム チーム長 古谷 博秀 様

アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主事研究員 塩谷 仁*

「アドバンスソフトにおける燃焼解析技術への取り組み」

アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主事研究員 大西 陽一

「ごあいさつ」

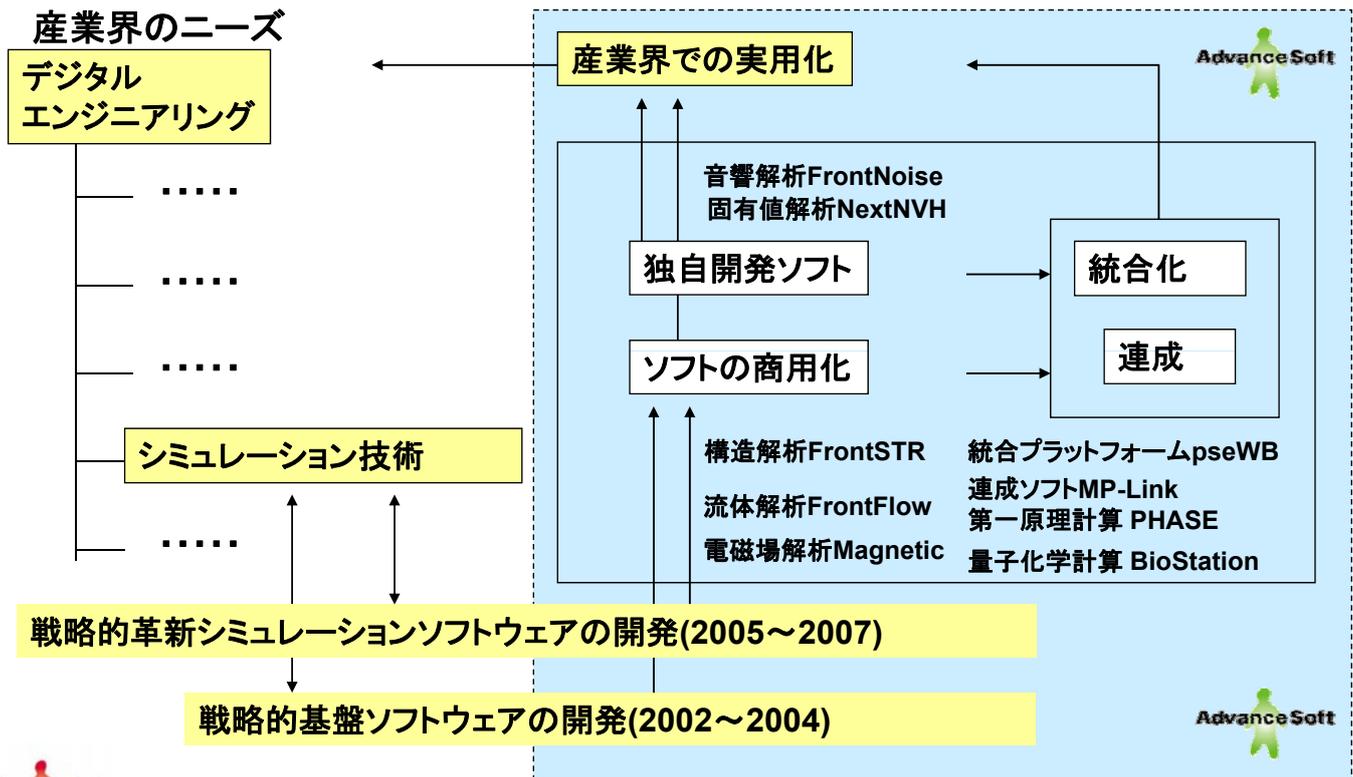
アドバンスソフト株式会社
常務取締役 第2 事業部長
三橋 利玄

アドバンスソフトのご紹介

アドバンスソフト株式会社
第2事業部 三橋 利玄

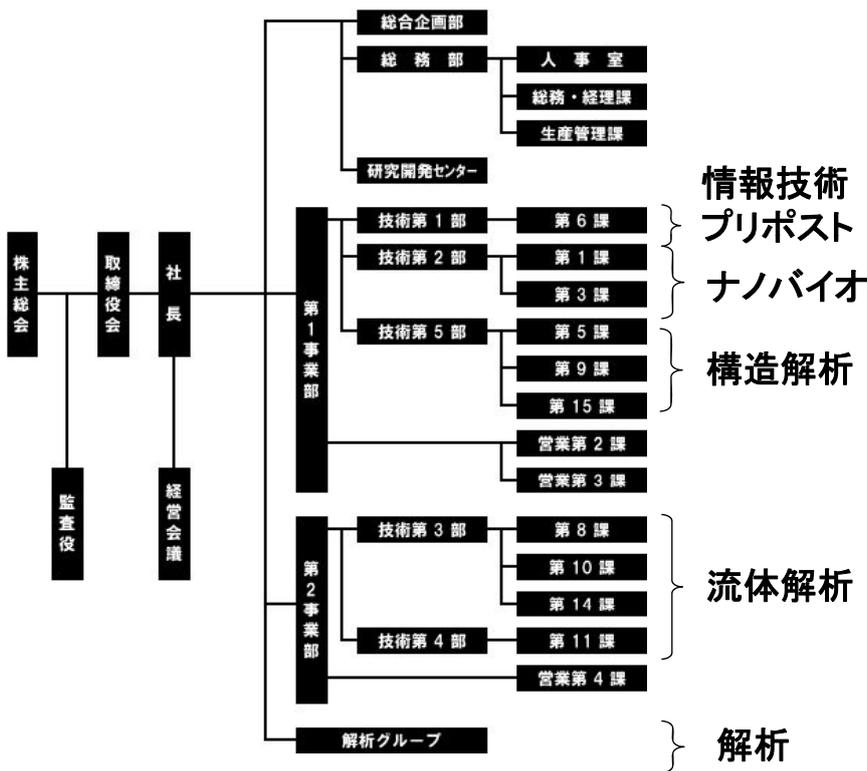


アドバンスソフトとは

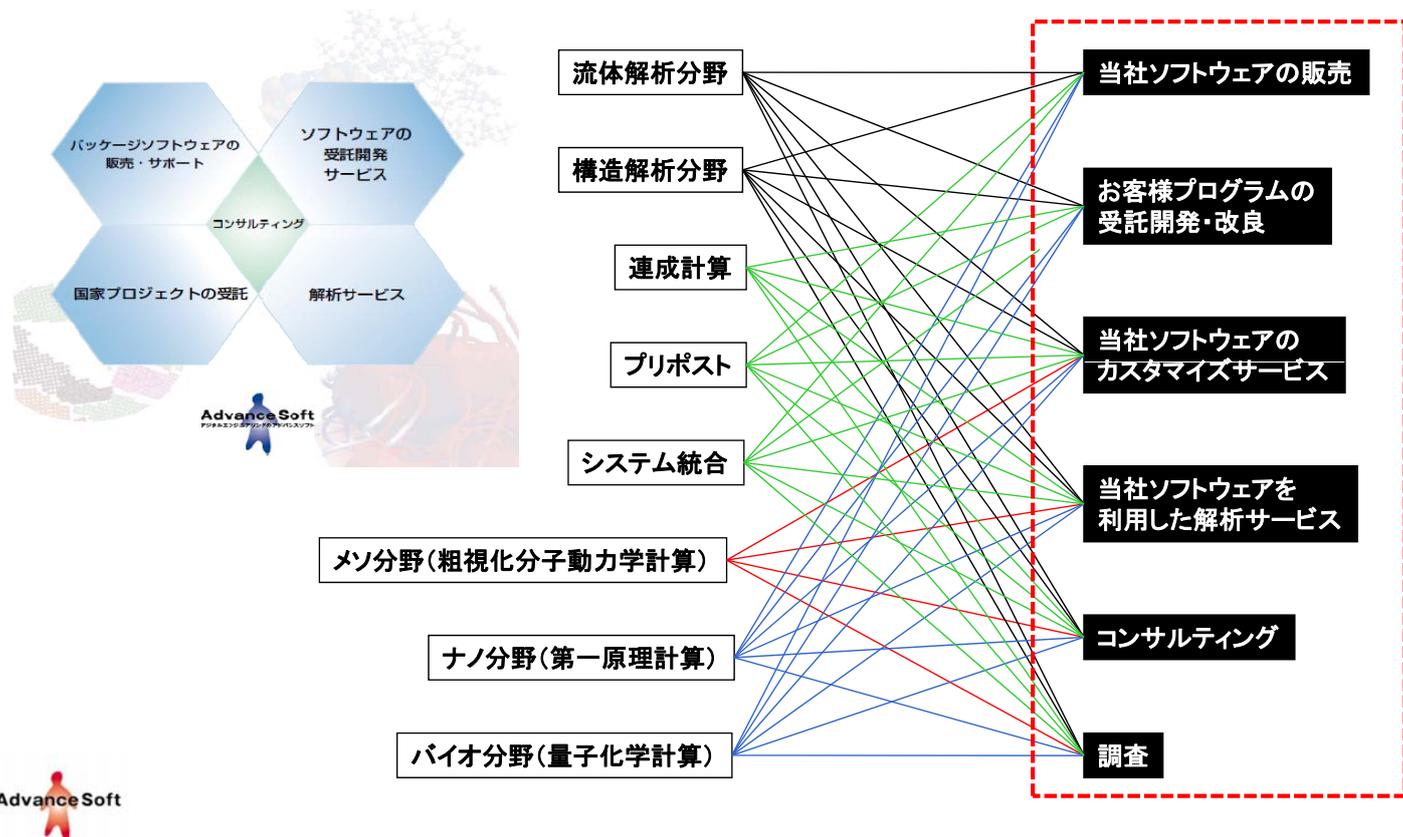


会社概要

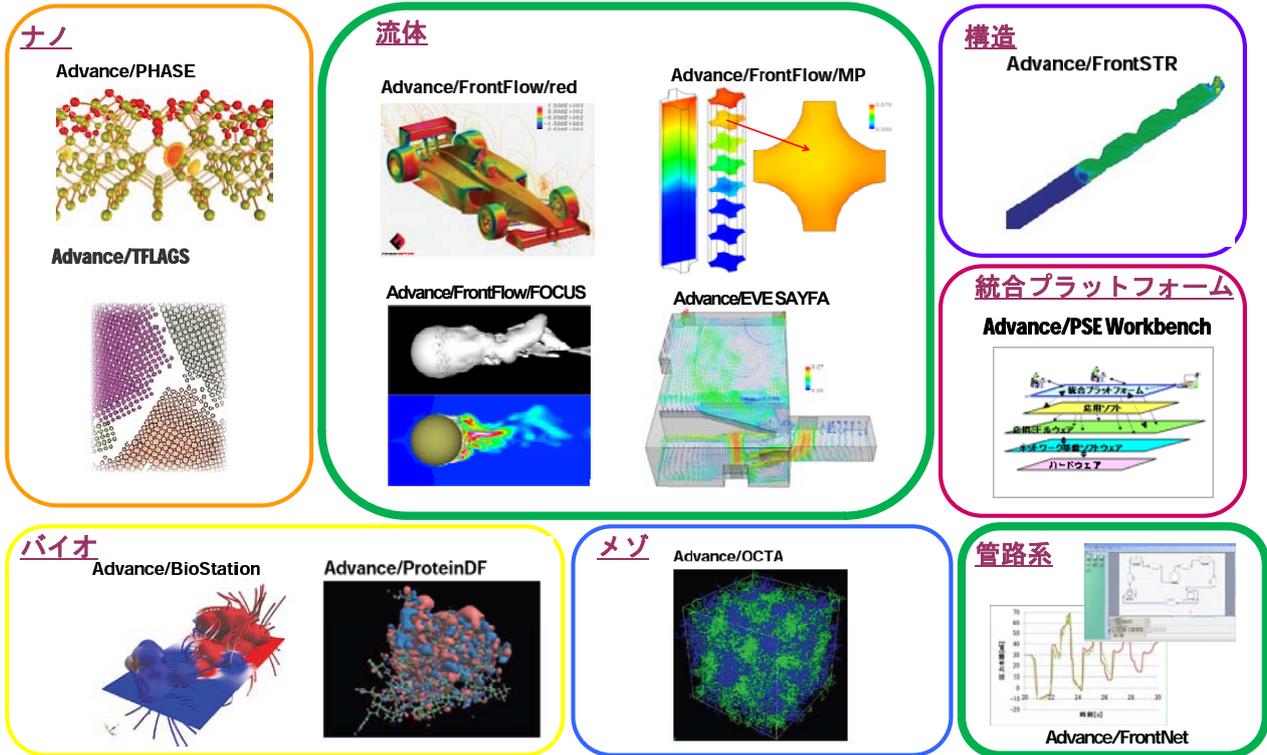
名称 アドバンスソフト株式会社
英文名 AdvanceSoft Corporation
本社 〒107 - 0052
 東京都港区赤坂1丁目9番20号
 第16興和ビル南館7階
 TEL: 03 - 5570 - 1680
 FAX: 03 - 5570 - 1684
設立 2002年(平成14年)4月24日
資本金 3,724万円
従業員数 90名(2009年4月1日現在)



アドバンスソフトの事業分野と事業内容



アドバントソフトのパッケージソフトウェア



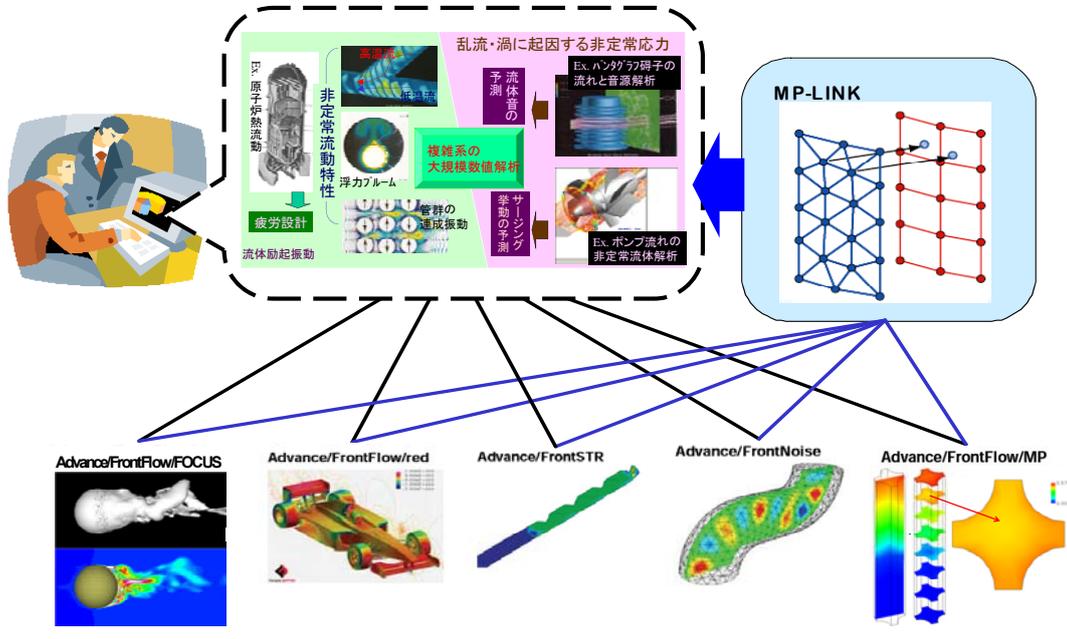
アドバントソフトのパッケージソフトウェア

ソフトウェア	解析内容
FrontFlow/red	汎用三次元流体解析ソフトウェア
FrontFlow/MP	三次元気液二相流解析ソフトウェア
FrontFlow/FOCUS	自動格子生成型構造格子系三次元流体解析ソフトウェア
EVE SAYFA	都市安全・環境シミュレータ
FrontNet	管路系一次元流体解析ソフトウェア
FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
FrontNoise	流体騒音解析ソフトウェア
PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
ProteinDF	大規模タンパク質の全電子計算ソフトウェア
BioStation	大規模タンパク質の量子化学計算解析ソフトウェア
DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
ADAP (REVOCAP)	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
PSE Workbench	統合プラットフォーム
OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ
TFLAGS	薄膜成長シミュレータ



アドバンスソフトのソフトウェアサービスの特徴

- ① 大規模・並列計算
- ② お客様のご要望によるカスタマイズ
- ③ 複数のソフトウェアによる大規模複合連成計算



7

アドバンスソフト流体解析サービス

◆流体解析用ソフトウェアの受託開発

お客様のニーズにあわせて、開発仕様の検討からプログラミング、検査検証を行い開発致します。

◆流体解析サービス

ご要望に応じて、当社の流体解析用ソフトウェアパッケージまたはお客様お持ちのソフトウェアを用いて、条件設定・解析・評価・検討を行い、報告書にまとめます。

◆流体解析用ソフトウェアのカスタマイズ

当社のソフトウェアパッケージを、お客様のニーズにあわせてカスタマイズ致します。また、お客様お持ちのソフトウェアに対してもカスタマイズ致します。

◆流体解析ソフトウェアパッケージの販売

当社のソフトウェアパッケージを販売いたします。

◆流体解析コンサルタント

流体解析に関する各種コンサルタントを承ります。

例：解析ノウハウの提供、物性データの調査検討、試験方法の調査提案など



8

アドバンスソフト流体解析サービスにおけるソフトウェア

アドバンスソフトの流体解析ソフトウェア

3次元流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/red
Advance/FrontFlow/MP(気液二相流)
Advance/FrontFlow/FS(自由表面流)

自動格子生成流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/FOCUS

管路系流体解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/Ω(液体)
Advance/FrontNet/Γ(気体)
Advance/FrontNet/TP(気液二相流)

専用流体解析ソフトウェア

Advance/EVE SAYFA (都市安全)
超音速二相流解析ソフトウェア
M-SphyR(生体血流)
塗布乾燥シミュレータ

他機関で開発され利用している流体解析ソフトウェア

原子力安全解析 RELAP5, TRAC, TRACE, COBRA
火災解析 FDS, CFAST
気象・大気拡散解析 RAMS, HYPACT

アドバンスソフトの3次元流体解析ソフトウェア

次世代汎用流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/red

燃焼、火災、異種気体混合、温度成層化、物質拡散、空力、騒音

次世代汎用流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/blue

流体機械、騒音

文部科学省ITプログラム「戦略的(革新的)基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトで開発がベース

アドバンスソフトの独自開発

気液二相流解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/MP

原子力・火力、ボイラー、蒸発器・凝縮器、化学プラント、気泡除去、焼入れ、沸騰・凝縮、気泡成長

ダム崩壊
スロッシング
凝縮水路流れ
津波現象

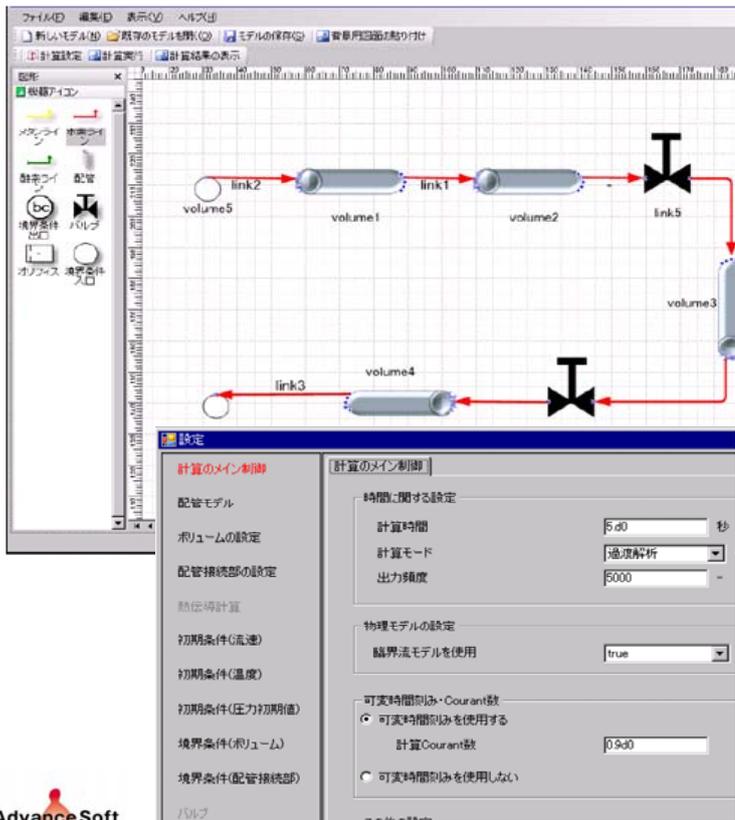
自由表面流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/FS

自由表面、界面追跡・捕獲、表面張力、毛細管現象、塗布プロセス

信頼性向上、使い勝手の向上、解析機能の強化、解析事例の充実

アドバンスソフトの管路系流体解析ソフトウェア



Advance/FrontNet/ Ω

液体管路系非定常解析ソフトウェア

温度変化の小さい液体管路の一次元流体解析

圧力サージ、水撃、液中分離

Advance/FrontNet/ Γ

ガス管路系非定常解析ソフトウェア

ガス管路の一次元流体解析

実在流体物性関数により液体および超臨界流体も取り扱える

(米国NIST提供の実在流体物性値関数を利用)

Advance/FrontNet/TP

気液二相流管路系非定常解析ソフトウェア

気体と液体の二相流管路の一次元流体解析

ドリフトフラックスに基づく気液二相流モデル

水、メタン、自然冷媒の物性値を装備

11

Advance Soft

「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」



12

「液体ロケットエンジン燃焼器の シミュレーション研究」

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
情報・計算工学センター 開発員
根岸 秀世 様

近年の液体ロケットエンジンは、大推力化に伴い 燃焼圧は 10 MPa を超え、燃焼温度も 3600 K 程度に達し、壁面熱流束は最高で 160 MW/m² に達するものまである。そのため、エンジンの寿命はほぼ燃焼器の熱環境で決まり、燃焼器の冷却はエンジンの主要設計課題の一つである。

また、今後の有人・再使用輸送を見据えた場合、エンジンの高信頼化・高寿命化が最重要課題の一つであり、高精度かつ高信頼な冷却性能予測手法が強く望まれている。

これまでの燃焼器冷却性能予測手法は、主に1次元解析に基づいており、燃焼試験とのコリレーションが必須であるため解析精度には限界があった。

また多数の燃焼試験を要することで、コスト面でも効率的ではなかった。そこで JAXA/情報・計算工学センターでは、エンジン冷却性能解析技術の高度化に関する研究を進めている。本研究では、CFD 技術を利用して、従来の1次元解析では適切に再現できなかった燃焼器内部の熱流動現象を直接的に扱うことで、解析精度を画期的に向上させ、高精度・高信頼な冷却性能解析技術の獲得を図るとともに、シミュレーション技術活用による試験回数削減で、エンジン開発コスト低減を目指している。

本講演では、液体ロケットエンジンについて紹介した後、燃焼器冷却性能解析で考慮すべき物理現象を紹介するとともに、最近の研究成果について紹介する。

キーワード: 液体ロケットエンジン、再生冷却、高圧燃焼、実在流体効果、熱-流体連成解析

原稿配布不可

「ガラス溶融シミュレーション」

社団法人 ニューガラスフォーラム
川地 伸治 様

アドバンスソフト株式会社
技術第3部 主事研究員
小笠原 章*

ガラスの製造プロセスでは、原料の加熱のために重油・天然ガスなど多くの燃料が使用されている。本講演では、省エネルギー化に資するシミュレーションを実施するために、燃焼現象を組み込んだ CFD の解析事例を紹介する。

キーワード: 渦消散モデル、対流・輻射熱伝達、熱連成解析、溶融炉

ガラス溶融シミュレーション

社団法人 ニューガラスフォーラム 川地 伸治 様
アドバンスソフト株式会社 小笠原 章



本講演内容

- (1) 社団法人 ニューガラスフォーラム様のご紹介
- (2) 本講演に関連するNEDO委託事業のご紹介
- (3) ガラス製造プロセスにおける燃焼現象の利用事例
- (4) 開発したシミュレーション・システムのご紹介
- (5) 溶解炉(シーメンズ炉)内における燃焼解析事例



(1) 社団法人 ニューガラスフォーラム様のご紹介



2

社団法人ニューガラスフォーラム様のご紹介(1)



Glass with Brilliant Future

New Glass Forum

<http://www.newglass.jp/>

ご展開事業(上記ウェブページより引用の上作成):

1. ニューガラスに関する産業および技術開発動向等の情報の収集及び提供
2. ニューガラスに関する講習会、講演会および研究会等の開催
3. ニューガラスに関する国際交流及び協力
4. ニューガラスに関する標準化・規格化の調査研究
 - (1) 国際ガラスデータベース"INTERGLAD"
5. ニューガラスに関する研究開発
 - (1) 三次元光デバイスプロジェクト(NEDO委託事業)



(2) 革新溶融プロジェクト(NEDO委託事業)

6. 前各号に掲げるもののほか、本会の目的を達成するために必要な事業



(1) GICFLOW研修会(GICFLOW: Glass Intelligent Cord/Glass Flow Simulator)

赤字: 本講演に関連する事業



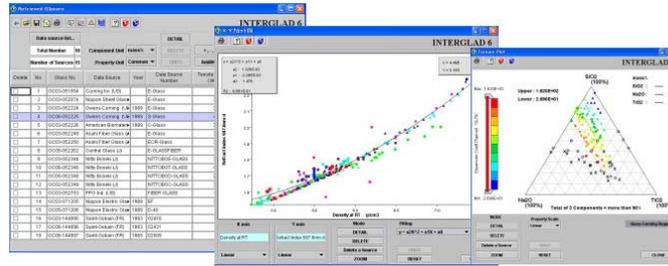
3

社団法人ニューガラスフォーラム様のご紹介(2)

本講演関連外のご展開事業(上記ウェブページより引用の上作成):

(1) 国際ガラスデータベース"INTERGLAD"

経済産業省 知的基盤整備事業(1998-2001年)、NEDO 知的基盤創成・利用促進研究開発(2002~2004年)

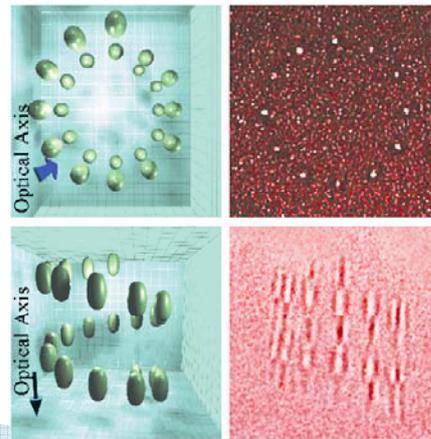
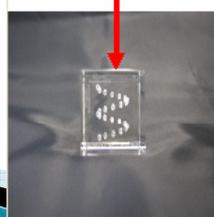


(2) 三次元光デバイスプロジェクト

経済産業省 <ナノテク・部材イノベーションプログラム>

NEDO 「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクト

フェムト秒レーザー照射



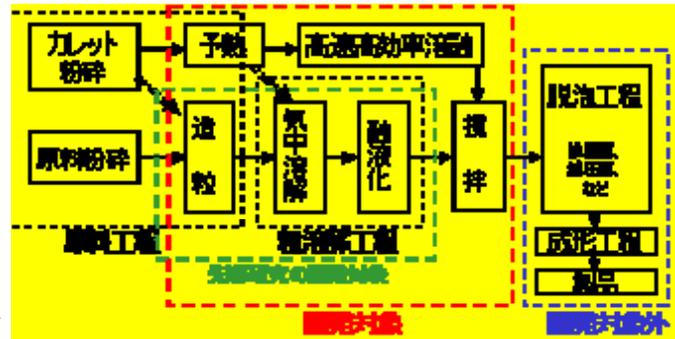
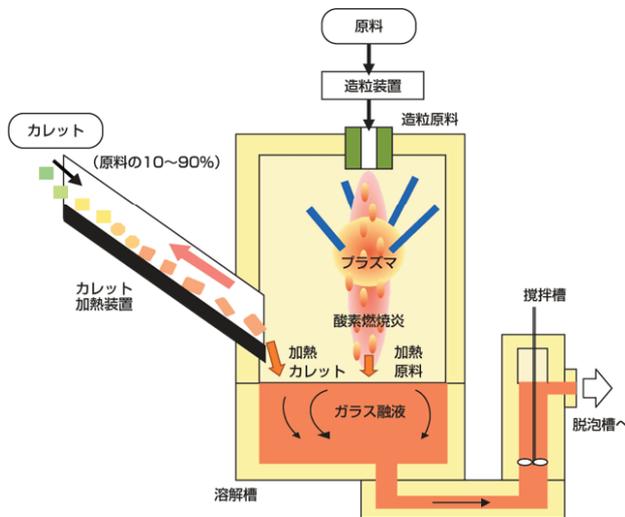
(2) 本講演に関連するNEDO委託事業のご紹介



本講演に関連するNEDO委託事業のご紹介(1)

NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術開発総合機構)委託事業:

1. 「直接ガラス化による革新的省エネルギーガラス溶解技術」(平成17年度～平成19年度)
2. 「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」(平成20年度～平成22年度)

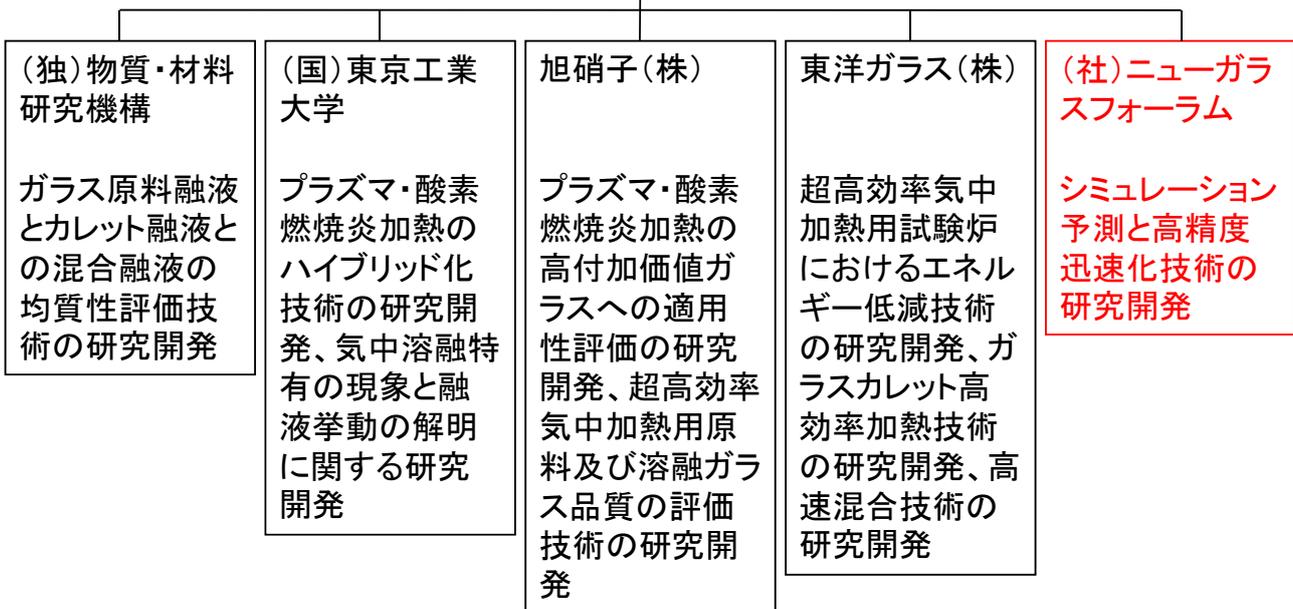


(社)ニューガラスフォーラム殿ウェブページ:
http://www.newglass.jp/other/other8_kakushin.html
 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構殿ウェブページ:
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p08019.html>
 より引用



本講演に関連するNEDO委託事業のご紹介(2)

NEDO技術開発機構



「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」(平成20年度～平成22年度)プロジェクト

構成組織図(赤枠は本講演に関連する開発項目)

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構殿ウェブページ:
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p08019.html>
 を参照に作成



(3) ガラス製造プロセスにおける燃焼現象の利用事例

ガラス製造プロセス～新規方式と現行方式



NEDO委託事業により研究開発中の新規方式

現行方式

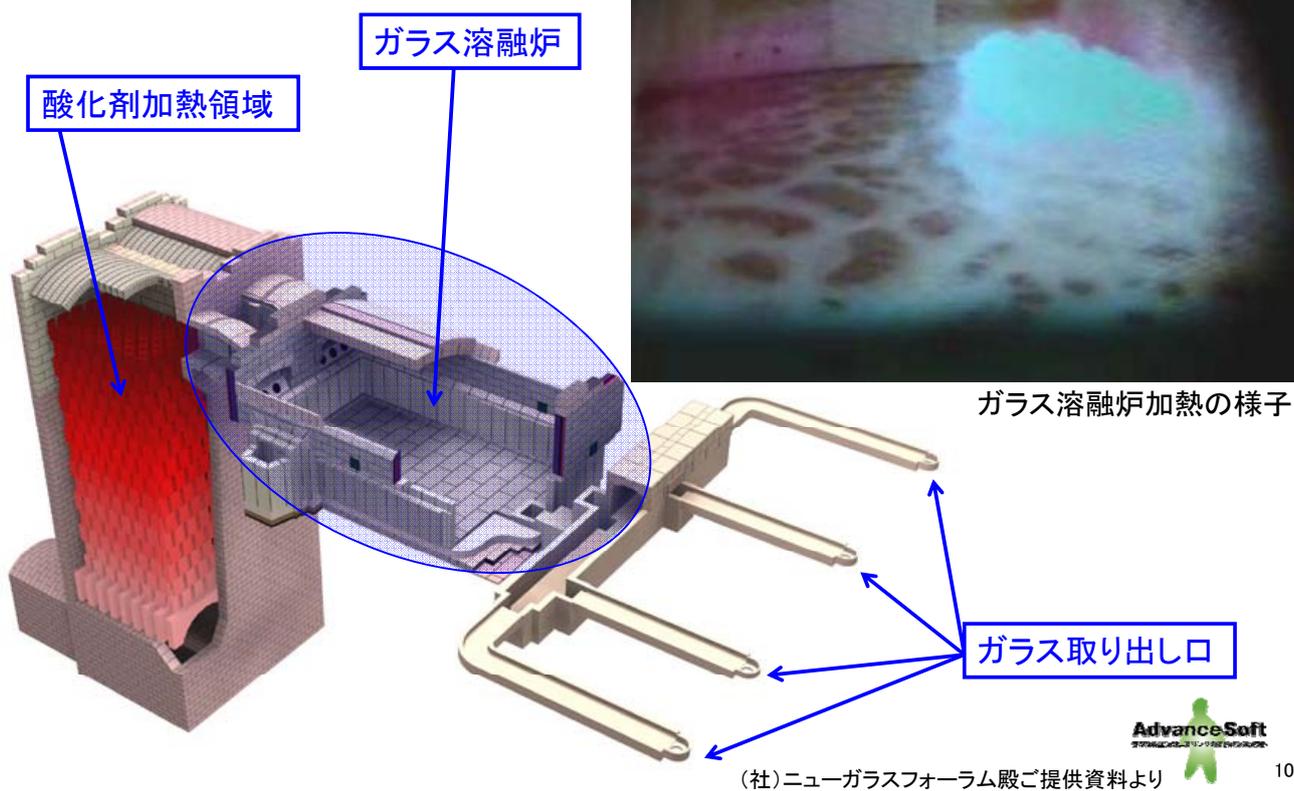
開発機能を現行方式に応用

GICFLOW研修会(GICFLOW: Glass Intelligent Cord/Glass Flow Simulator)

- ・ガラスメーカー、ガラス製品メーカーが参加
- ・3か月毎に開催
- ・各種プロセスのシミュレーション機能、GUI操作を研修

(社)ニューガラスフォーラム殿ウェブページ:
http://www.newglass.jp/other/other8_kakushin.html
 より引用および一部作成

現行方式のガラス製造プロセス



10

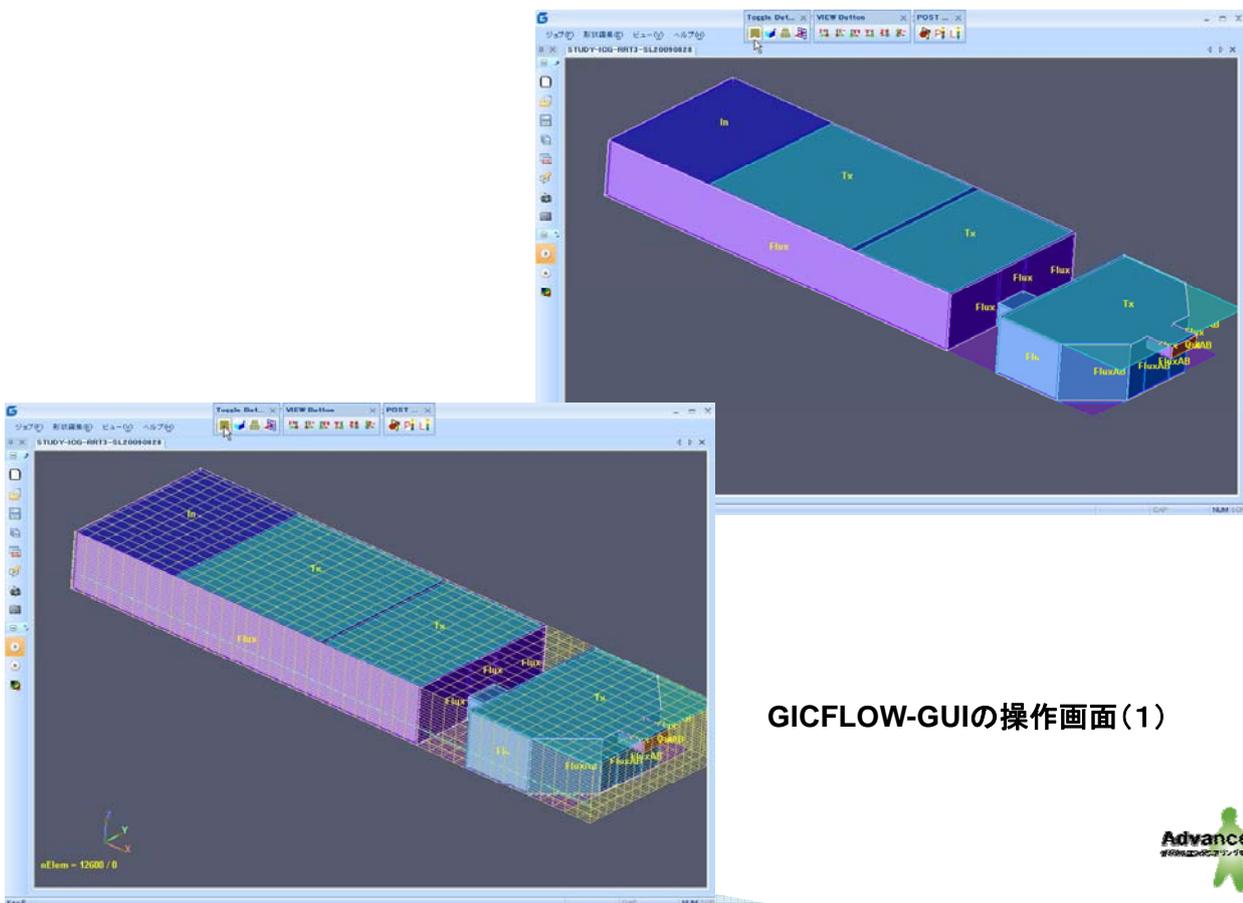
(4) 開発したシミュレーション・システムのご紹介

GICFLOWシステムの概要(1)



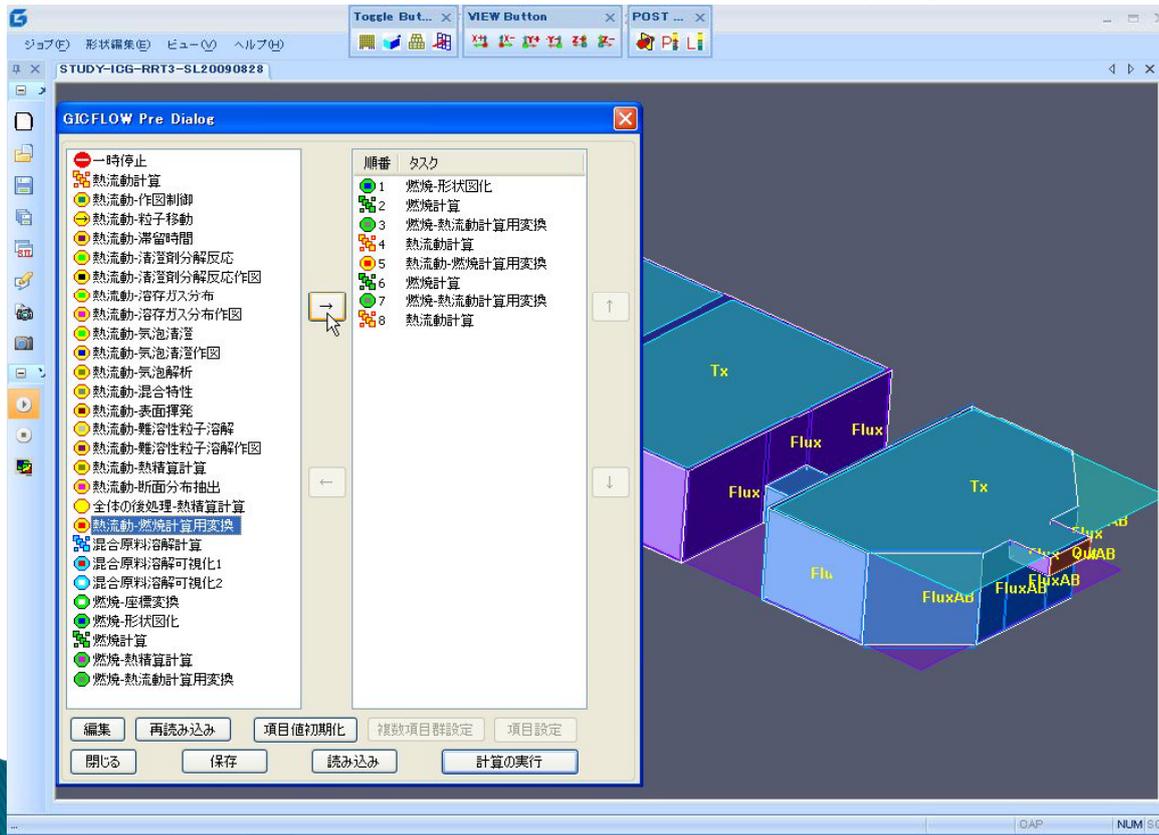
The image shows the startup screen of the GICFLOW GUI. At the top left is the logo for 'Glass with Brilliant future New Glass Forum'. To its right, the text 'Glass With Brilliant Future' is displayed. The word 'GICFLOW' is prominently featured in the center. Below this, there are three small images showing glass manufacturing processes. At the bottom, the copyright notice 'Copyright© 2008~2009, All Rights Reserved.' is visible on the left, and 'ニューガラスフォーラム' (New Glass Forum) is on the right. In the bottom right corner, there is a logo for 'AdvanceSoft' and the number '12'.

GICFLOWシステムの概要(2)



The image displays two screenshots of the GICFLOW GUI. The top screenshot shows a 3D model of a glass furnace with various components labeled 'In', 'Tx', and 'Flux'. The bottom screenshot shows a similar 3D model but with a mesh overlay, indicating a simulation setup. The text 'nElem = 12000 / 0' is visible in the bottom left corner of the lower screenshot. The text 'GICFLOW-GUIの操作画面(1)' is centered below the screenshots. In the bottom right corner, there is a logo for 'AdvanceSoft' and the number '13'.

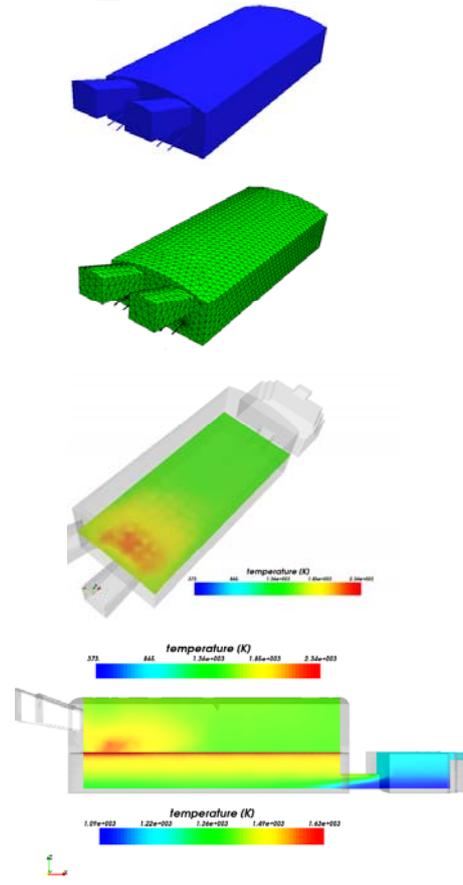
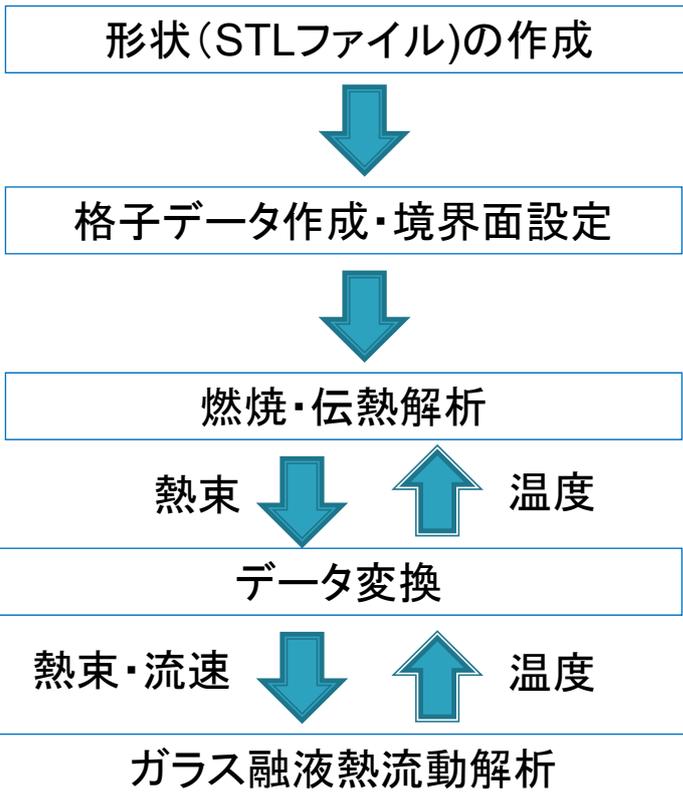
GICFLOWシステムの概要(3)



GICFLOW-GUIの操作画面(2)



本件における解析プロセス



(5) 溶解炉(シーメンス炉)内における燃焼解析事例

本件における燃焼および伝熱連成解析の概要

- ・ バーナーからの燃料・酸化剤の流入・燃焼を含む溶融炉全体の加熱効果を計算
- ・ 非構造格子の採用によりバーナー(マイクロ構造)を含む炉内のマクロ形状を再現
- ・ バーナーからの燃料の燃焼および発生熱による対流・輻射の伝熱を計算
- ・ ガラス融液面を境界とする熱連成解析により溶融ガラス熱対流に対するバーナーの加熱効果を計算

渦消散モデル

- ・燃料ガス塊と酸化剤ガス塊が崩壊し分子スケールの混合⇒燃焼
- ・反応速度は乱れの渦が微小な渦に崩壊する消散速度に比例
- ・一段不可逆反応(燃料+酸化剤→生成物)

燃料の平均質量消滅速度

$$|\bar{\dot{\omega}}_f| = C_{R1} \left(\frac{\rho \varepsilon}{k} \right) \min \left(Y_f, \frac{Y_O}{r}, C_{R2} \frac{Y_P}{1+r} \right)$$

Y_f, Y_O, Y_P : 燃料、酸化剤、生成物の質量分率, ρ : 混合気の密度[kg·m⁻³]
 k : 乱流エネルギー[m²·s⁻²], ε : 乱流エネルギー散逸率[m²·s⁻³]
 r : 燃焼に必要な理論酸素量, $C_{R1}=4.0$, $C_{R2}=2.0$ (モデル定数)

酸化剤と生成物の質量生成(消滅)速度

$$\bar{\dot{\omega}}_O = - \frac{M_O \nu_O}{M_f \nu_f} |\bar{\dot{\omega}}_f|$$

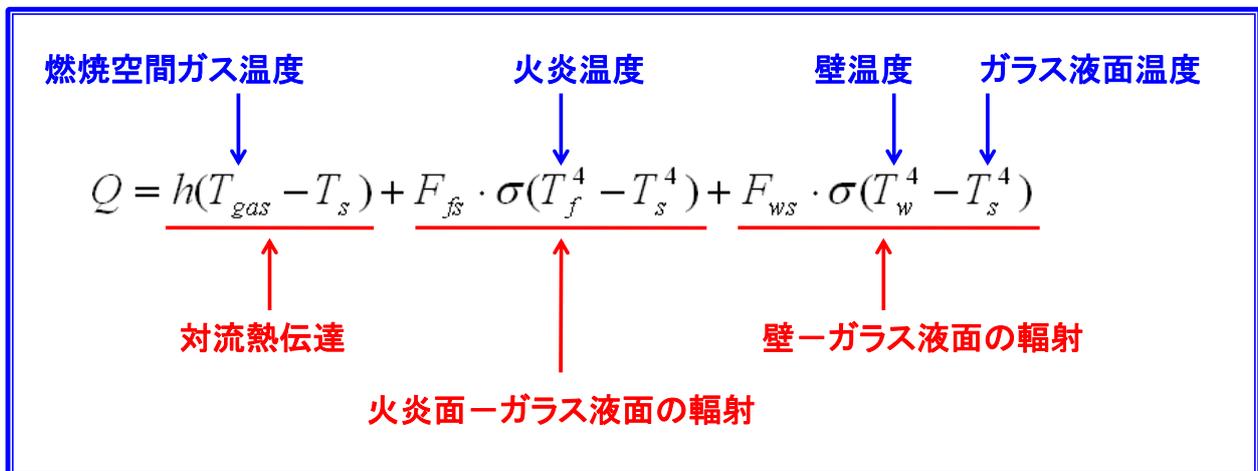
$$\bar{\dot{\omega}}_P = \frac{M_P \nu_P}{M_f \nu_f} |\bar{\dot{\omega}}_f|$$

ν : 化学量論係数



伝熱モデル

ガラス液面への伝熱量

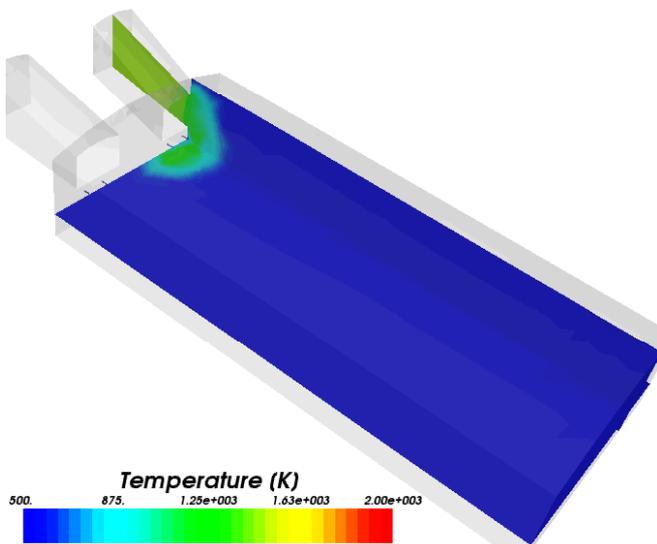


モデルの概要(解析条件)

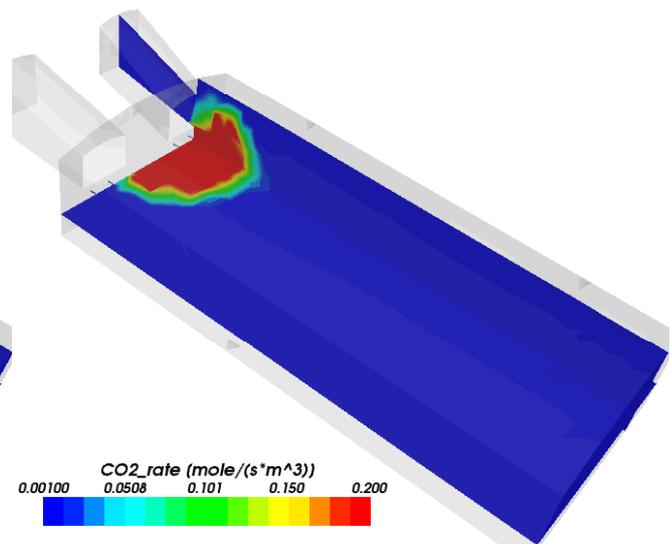
- ・ 溶解槽: 幅3 m、長さ7 m、深さ1 m
- ・ 引上量: 17.5 t/d
- ・ 燃焼室高さ(ガラス融液面から天井最頂部まで): 1.5 m
- ・ 天然ガス(CH₄と仮定)の単位発熱量: 5.0×10^7 J/kg
- ・ 炉内への導入温度: 100°C
- ・ 燃料使用量: 0.02565 kg/s
- ・ 燃焼空気の予熱温度: 1200°C
- ・ 燃焼空気量: 0.4492 kg/s
- ・ 過剰空気率: 5%
- ・ 環境温度: 30°C
- ・ 耐火物構成
天井 = 珪石レンガ(SD-1) 350mm厚 + 保温レンガ 200mm厚(B-1)
炉壁 = AZSレンガ(MONO-CS3) 150mm厚
+ ジルコンレンガ(ZIREX-B) 230mm厚
+ 保温レンガ(C-1) 115mm厚
- ・ 耐火物の放射率: 0.85
- ・ 燃焼交換の影響は、左右の燃焼を計算し熱束を平均化する
- ・ バーナー: 各ポートにつき2本(断面寸法: 19 x 19 mm)
- ・ バーナー取付け角度: 8°
- ・ 燃料吹込み速度: 68 m/s



解析結果(1)



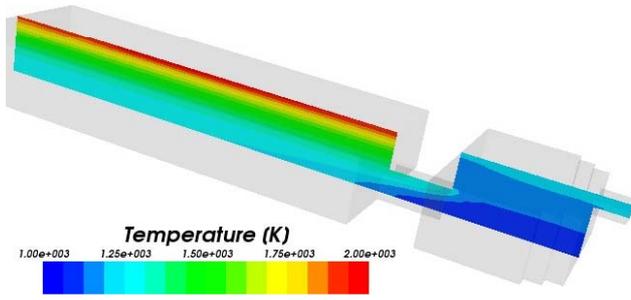
ガス領域温度分布(動画)



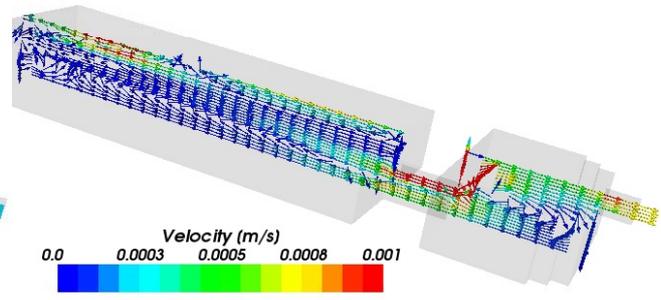
ガス領域CO₂生成速度分布(動画)



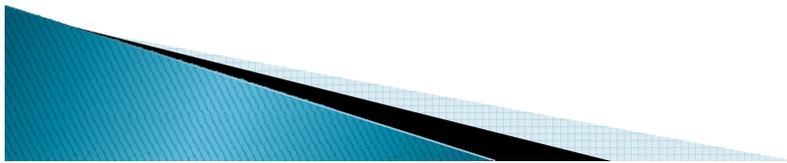
解析結果(2)



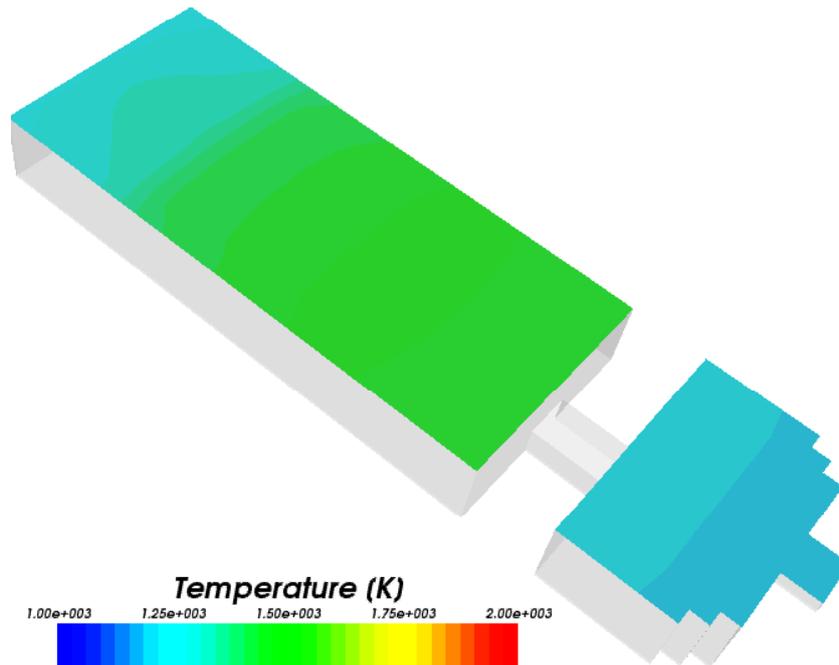
ガラス液領域温度分布



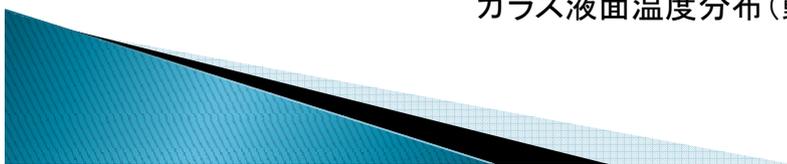
ガラス液領域速度分布



解析結果(3)



ガラス液面温度分布(動画)



附録：本プロジェクトにおける シミュレーション・システム開発の展望

- (1) 電磁流体ソルバによる電気加熱の解析機能
 - (2) 粒子追跡ソルバによる重油液滴燃焼の解析機能
 - (3) 溶融・凝固モデルによる溶融炉壁侵食の解析機能
 - (4) AMR法による詳細攪拌効率の解析機能
 - (5) 実炉情報を入力とするリアルタイムシミュレーション機能
- 等を実装することにより、製造プロセスのエネルギー効率化を実現するシミュレーション・システムとする。



「自動車分野での応用例～レーザー着火～」

独立行政法人 産業技術総合研究所

新燃料自動車技術研究センター

計測評価チーム チーム長

古谷 博秀 様

アドバンスソフト株式会社

技術第3部 主事研究員

塩谷 仁*

レーザーによる着火はガスエンジンの高効率、低 NO_x を達成するための着火制御技術として注目されている。本講演では、レーザー着火技術の概要と着火時の燃焼及び流動についての解析事例を紹介する。

キーワード: ガスエンジン、ガスブレイクダウン着火、予混合燃焼

自動車分野での応用例 ～レーザ着火～

独立行政法人産業技術総合研究所
新燃料自動車技術研究センター
計測評価チーム
チーム長 古谷 博秀様
アドバンスソフト株式会社
塩谷 仁

TOPICS

- ・はじめに
- ・レーザ着火技術の概要
- ・レーザ着火の数値解析

TOPICS

- ・はじめに
- ・レーザ着火技術の概要
- ・レーザ着火の数値解析

はじめに

レーザ着火

レーザエネルギーによって活性化学種またはプラズマを発生させて燃焼反応を活性化し、着火する技術

→ガソリンエンジン、ガスエンジンに利用

エンジンにおける着火手法

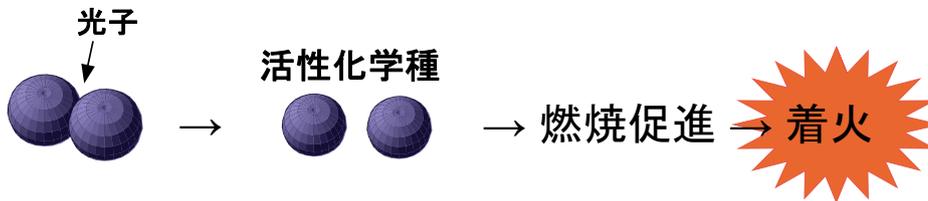
スパークプラグ: 電氣的に火花を発生させて着火

マイクロパイロット: パイロット火炎により着火

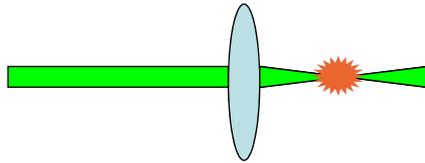
光による着火制御技術

光による着火手法

- ・ 一光子過程で生成される活性化学種による着火法



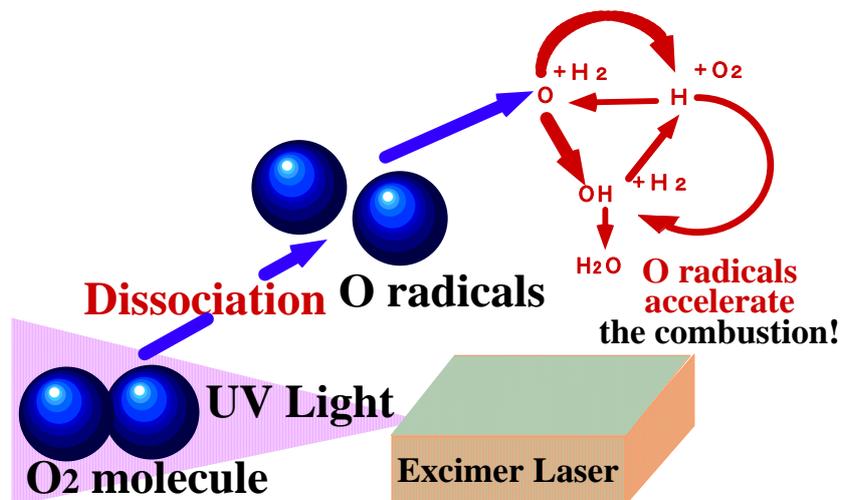
- ・ ブレイクダウン法



混合気 → 電界破壊 → プラズマ → 着火

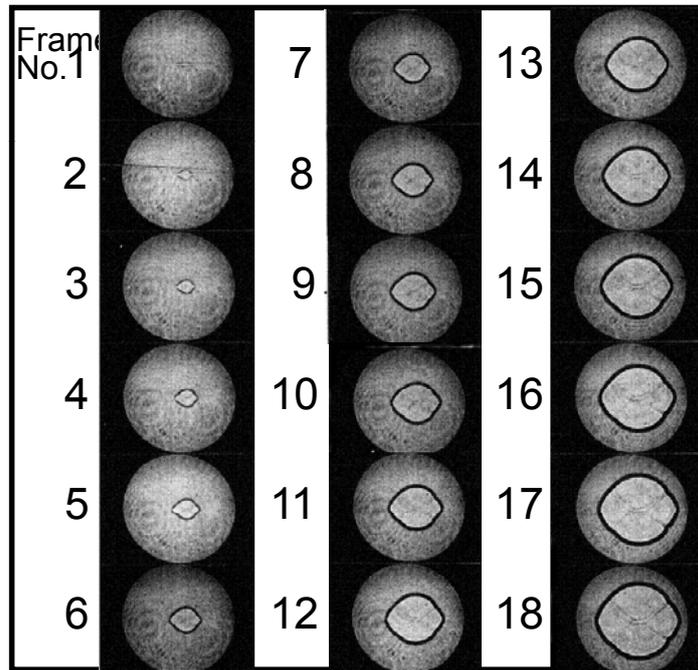
7

一光子過程により生成される活性化学種による着火



8

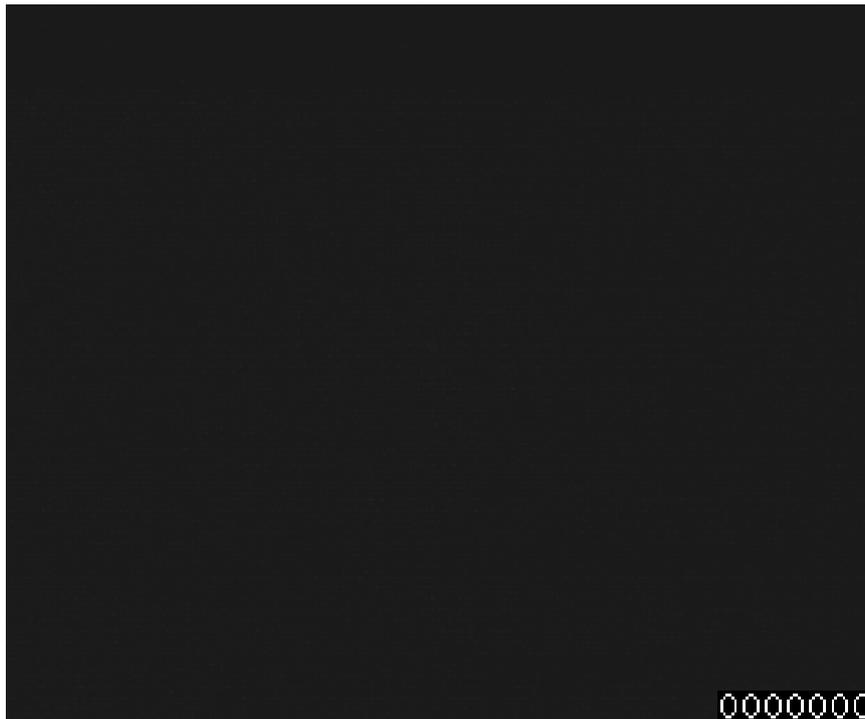
エキシマレーザーによる着火と 火炎伝播の様子



H₂:20%, O₂:10%, Ar:70% ($\phi=1.0$) Initial gas pressure:0.08MPa
 Frame speed:10000 f/s Laser power 286mJ

9

Single photon ignition

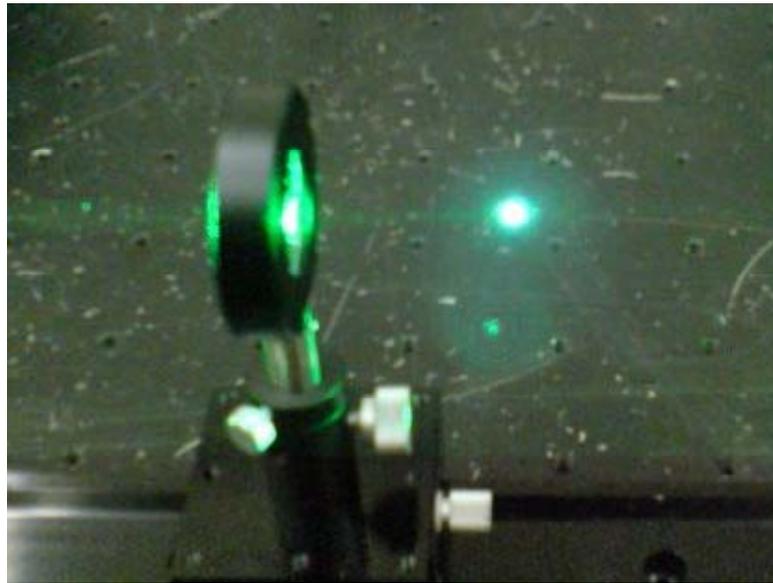


0000000



10

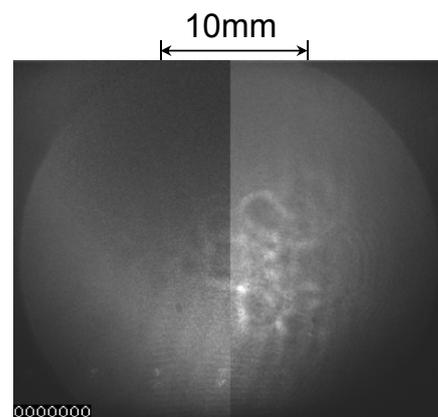
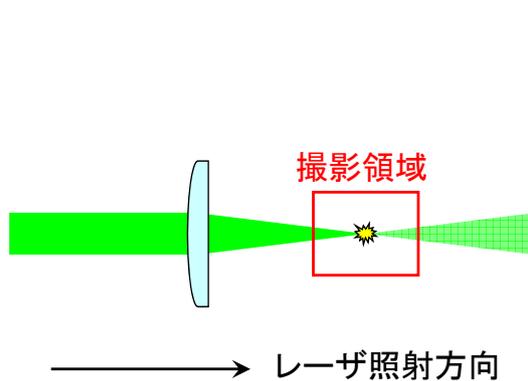
ガスブレイクダウンの様子



ガスブレイクダウンの閾値(一般的に):
大気中では 10^{12} W/cm²

11

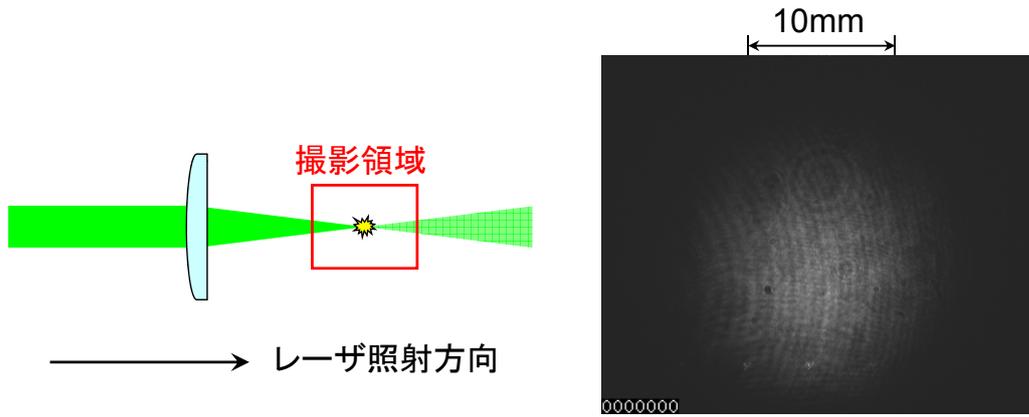
衝撃波伝播過程



(撮影条件: SPEED=1Mfps(1us),
EXPOSE=1/2, GAIN=x2
レーザー出力: 44mJ)

12

プラズマ発達過程



(撮影条件: SPEED=63kfps(16us),
EXPOSE=1/4, GAIN=x2
レーザー出力:43mJ)

13

従来のプラグよりもレーザー着火では希薄側での着火性能が良い。
> 希薄限界が広がり、効率向上と低NOx化の同時実現の可能性がある。

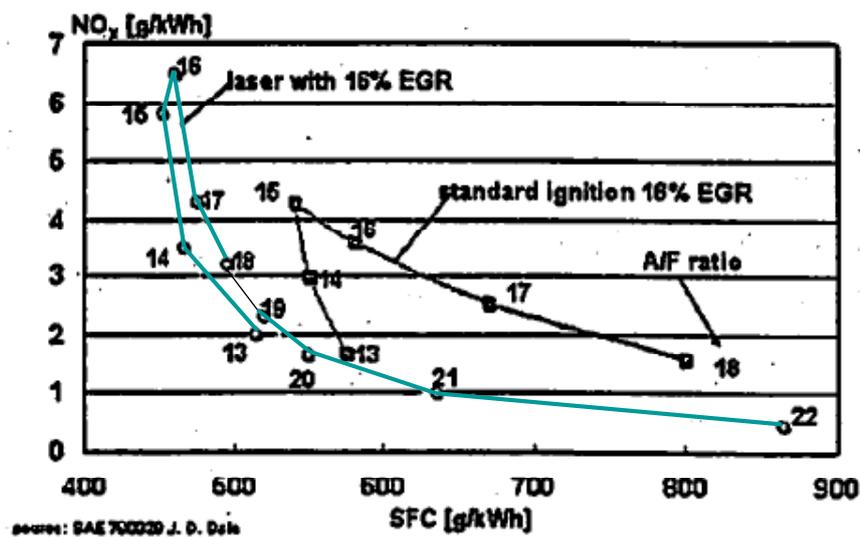
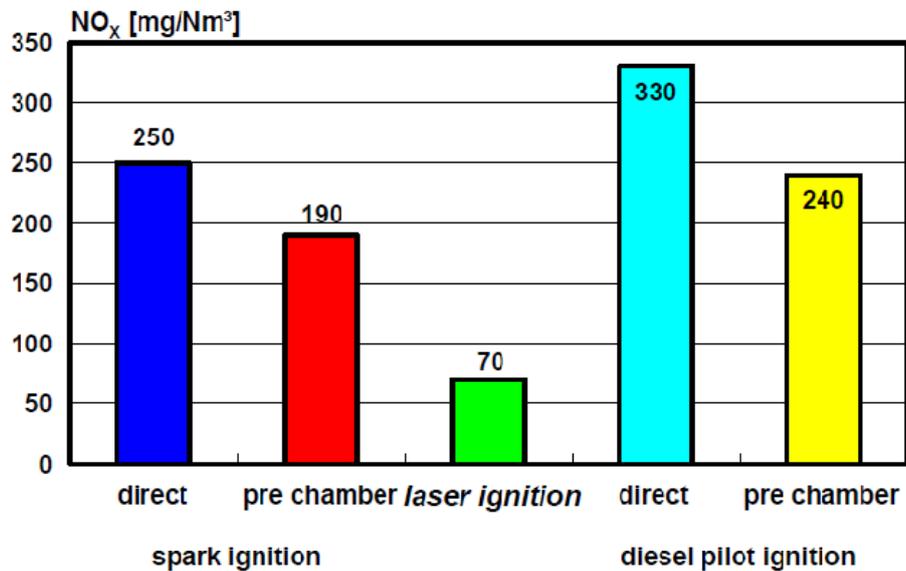


Figure 16: Historical results of Dr. Dale in 1978

14

レーザー着火のメリット

Potentials NO_x-Emissions



11

GE Jenbacher
Dr. Günther Herdin
22.03.2015

GE imagination at work



15

Breakdown ignition

$\phi:0.7$ Laser power:6mJ
T=798K P=3.05MPa 200 μ s/flame

Nd-YAG laser

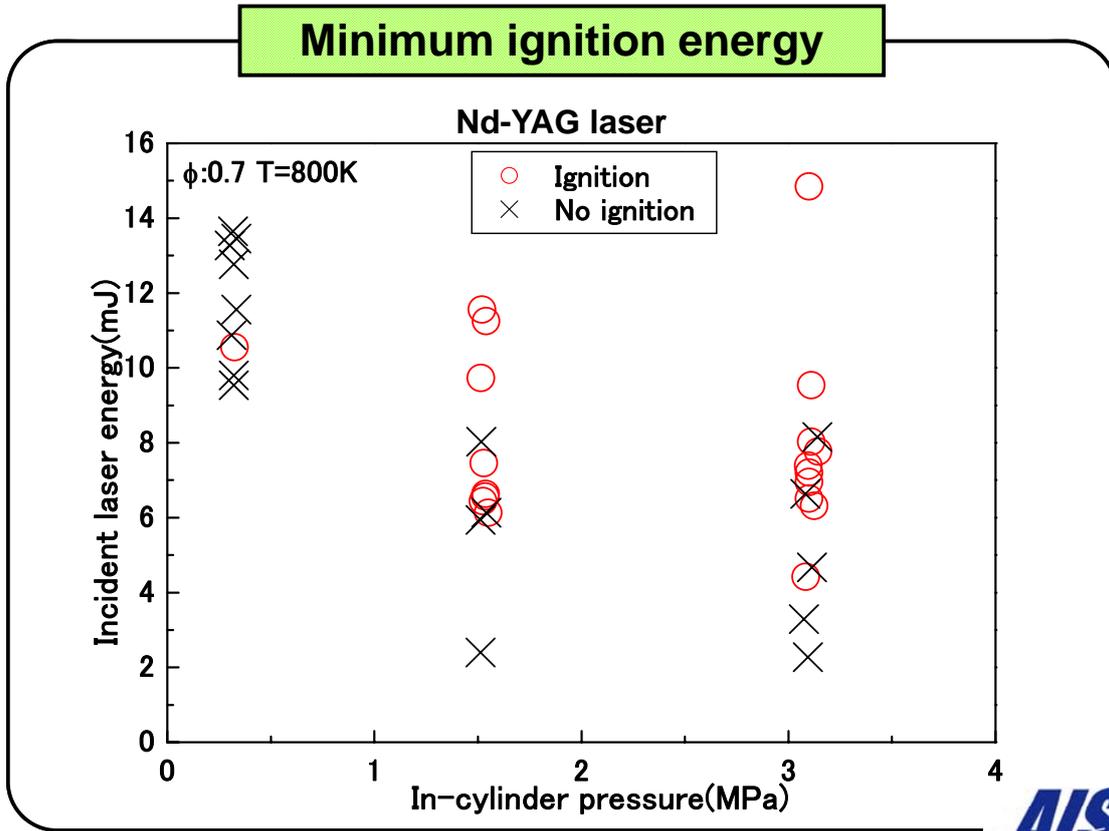
0000000

21_08_50_Avi



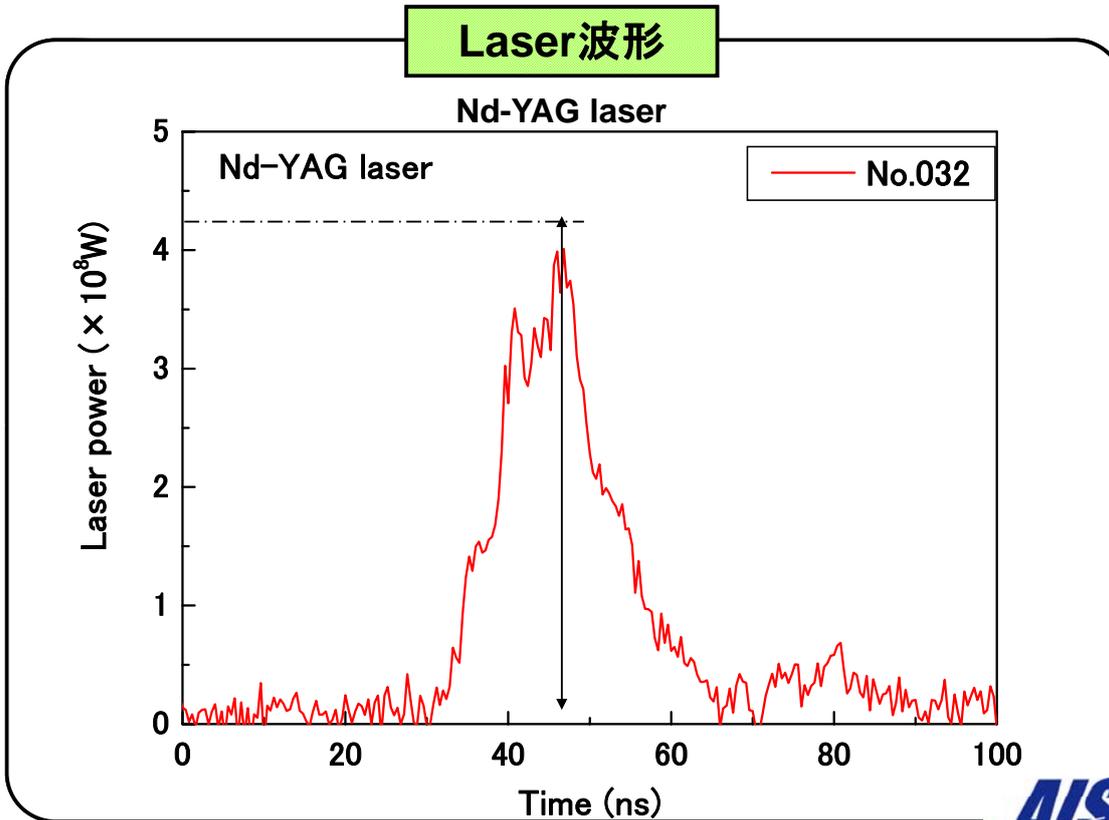
16

Minimum ignition energy



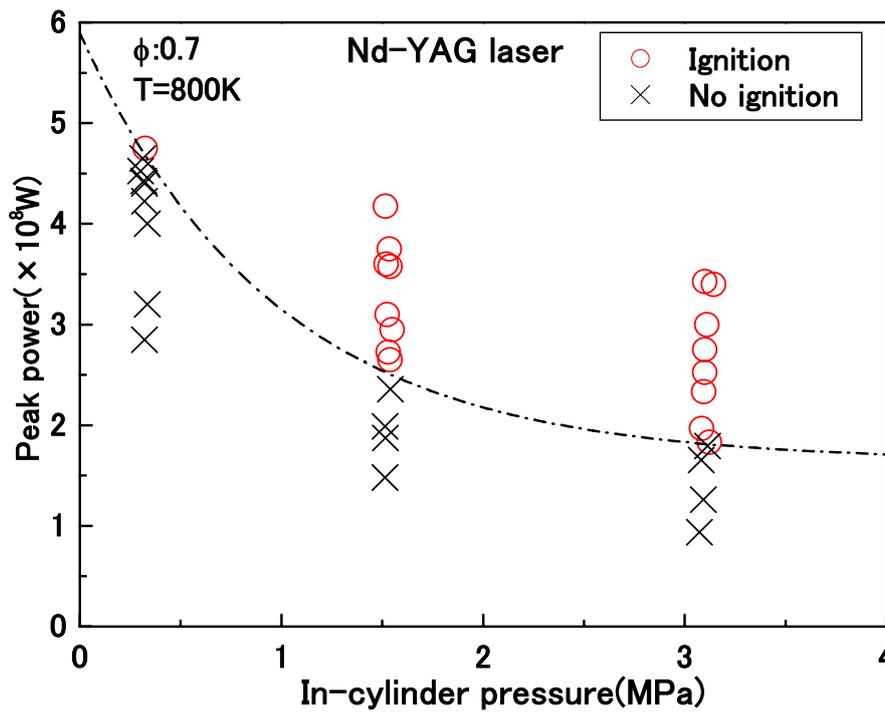
17

Laser波形



18

peak power



19

TOPICS

- ・はじめに
- ・レーザ着火技術の概要
- ・レーザ着火の数値解析

20

解析の目的

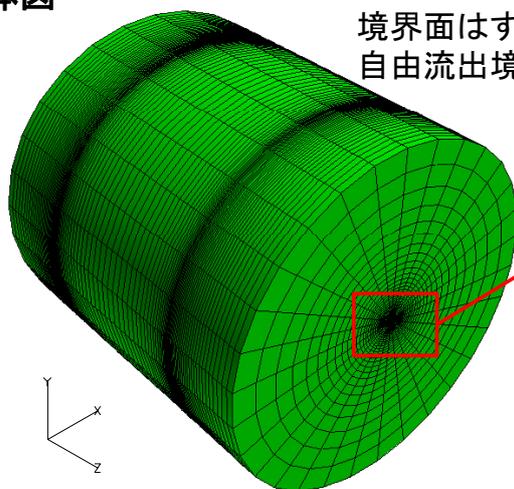
ガスブレイクダウン発生時には着火点付近に流れが形成され渦輪を伴う特徴的な着火核が形成される。本解析では、ブレイクダウン着火時の化学反応と流動のシミュレーションを行い、着火核の形成過程について解析する

21

計算格子

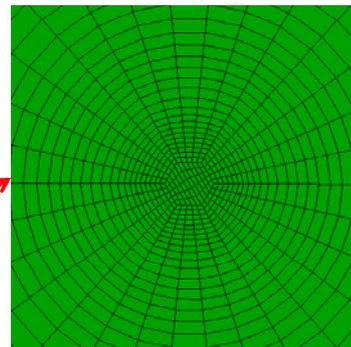
計算領域: 円筒形(直径2mm、高さ2mm)

全体図

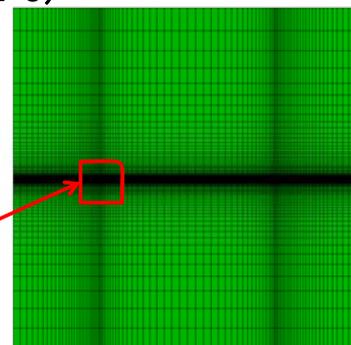


境界面はすべて
自由流出境界

中心部拡大図



断面図(x=0)



最小格子幅 5 μ m

	総数
節点	169,941
要素	166,320

22

計算条件

計算条件

項目	設定
乱流モデル	LES(標準スマゴリンスキーモデル)
時間積分法	Adams-moultons法
離散化手法	2次精度中心差分+10%一次精度風上差分

初期条件

項目	設定
成分	CH ₄ /Air予混合気(当量比0.7)
圧力	1.0atm
温度	300K
流速	0m/s(静止流体)

化学種 6成分(CH₄、O₂、N₂、CO、CO₂、H₂O)

燃焼反応式 CH₄+3/2O₂→CO+2H₂O
CO+1/2O₂→CO₂

23

計算条件

時間刻み

step	時間刻み [s]
1~600	1.0 × 10 ⁻¹¹
600~3,000	5.0 × 10 ⁻¹¹
3,000~5,800	1.0 × 10 ⁻¹⁰

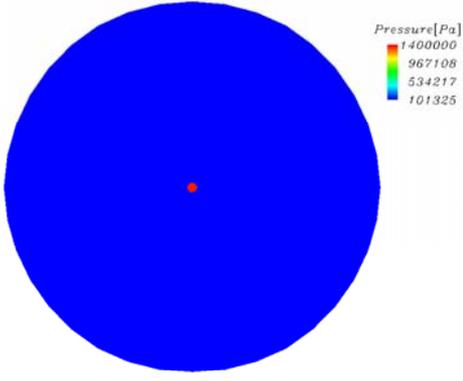
レーザ入力条件

項目	設定
直径	50μm
長さ	1.0mm
出力	4.96 × 10 ¹⁵ W
吸収率	50%
パルス幅	6ns

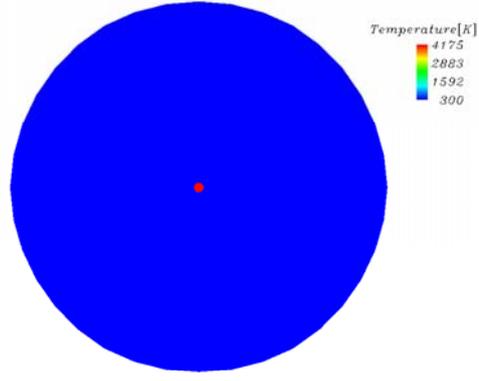
24

計算結果(圧力、温度、密度、CO濃度の時間変化、z=0断面)

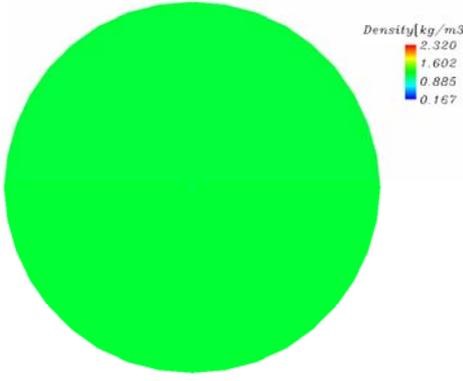
圧力



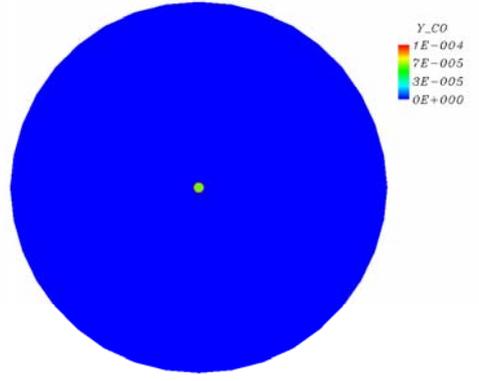
温度



密度

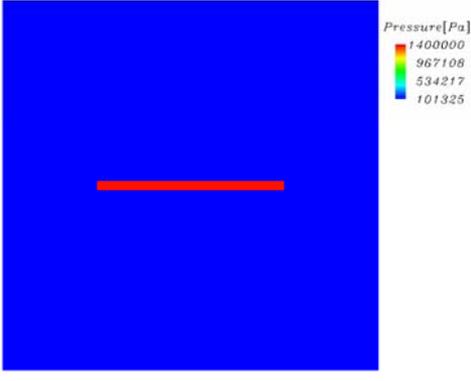


CO

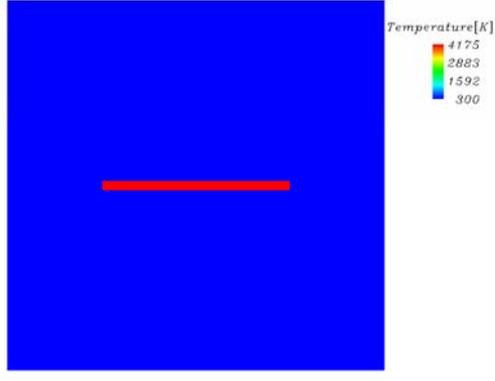


計算結果(圧力、温度、密度、CO濃度の時間変化、x=0断面)

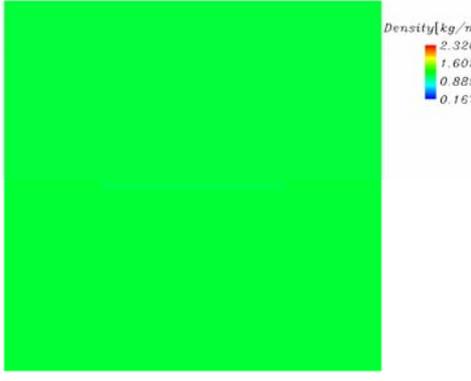
圧力



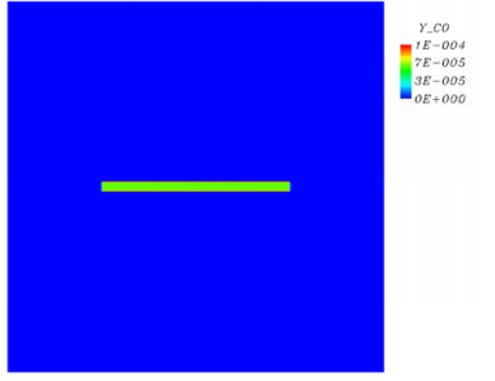
温度



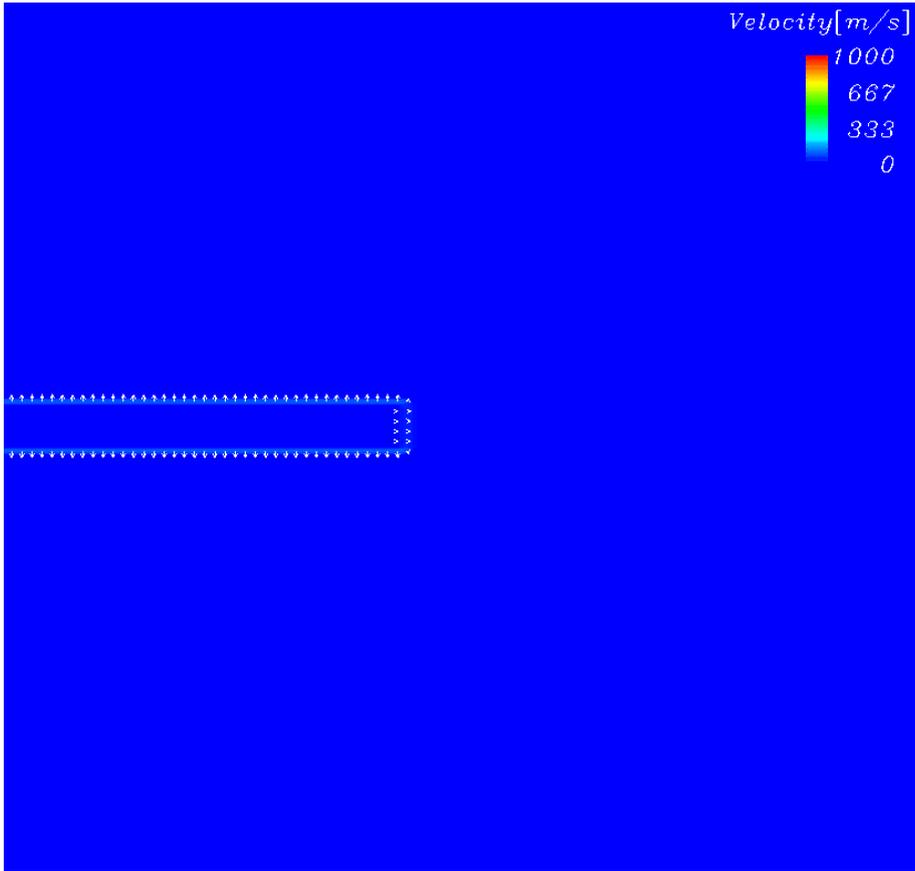
密度



CO

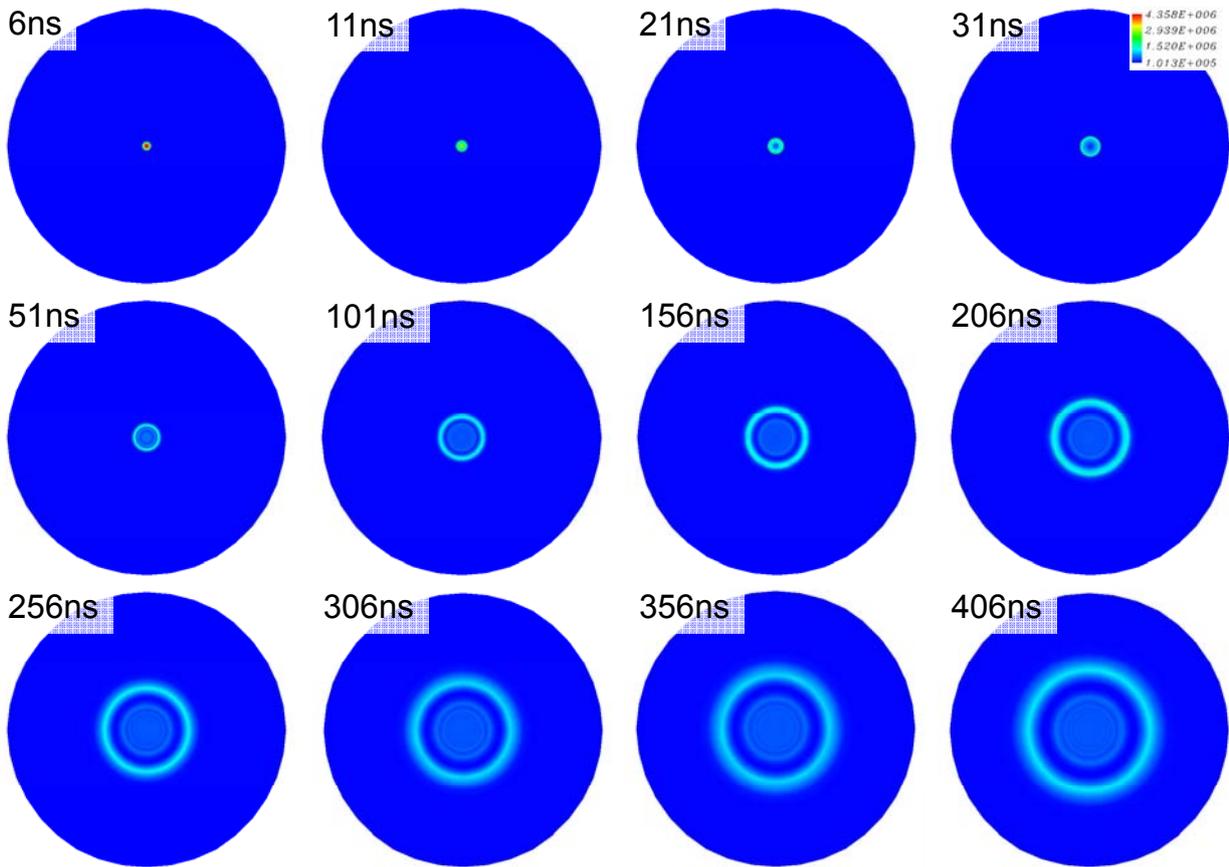


計算結果(速度ベクトル分布の時間変化)



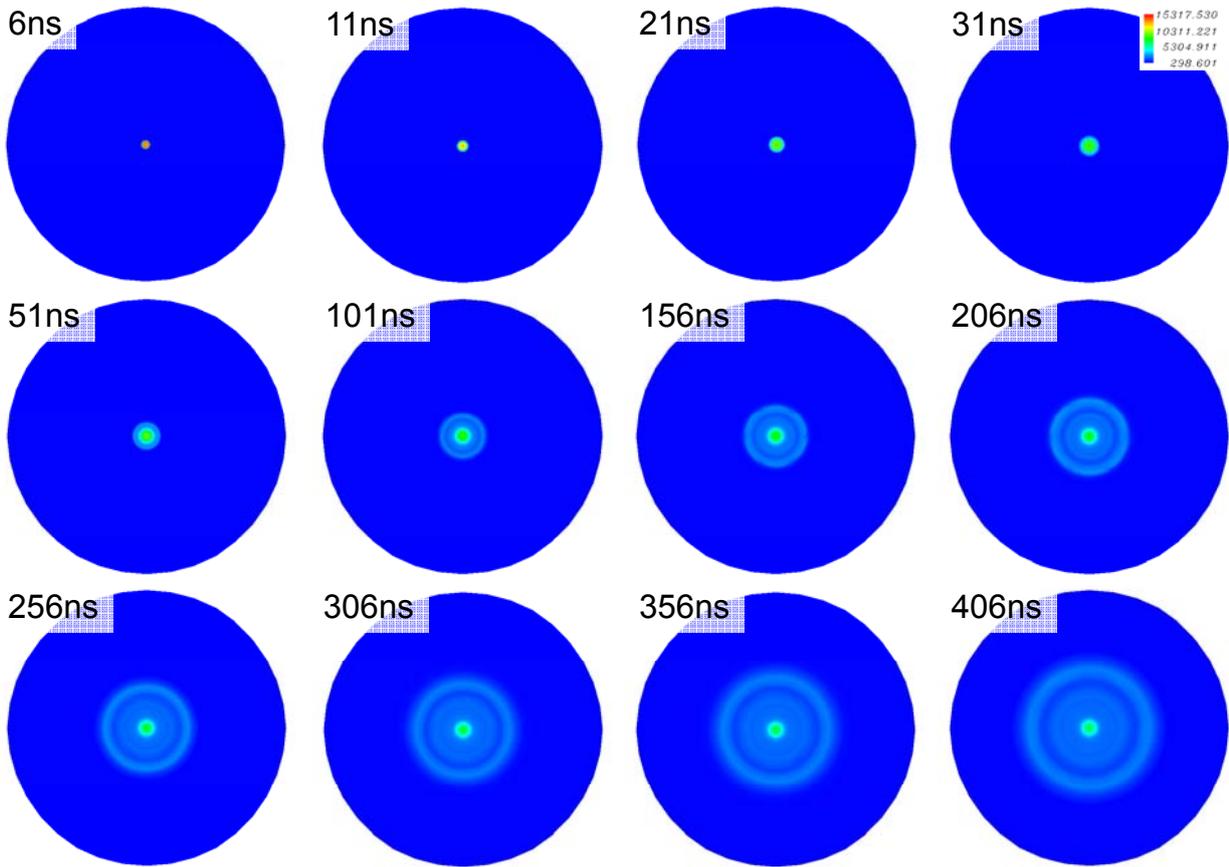
27

圧力(z=0断面)



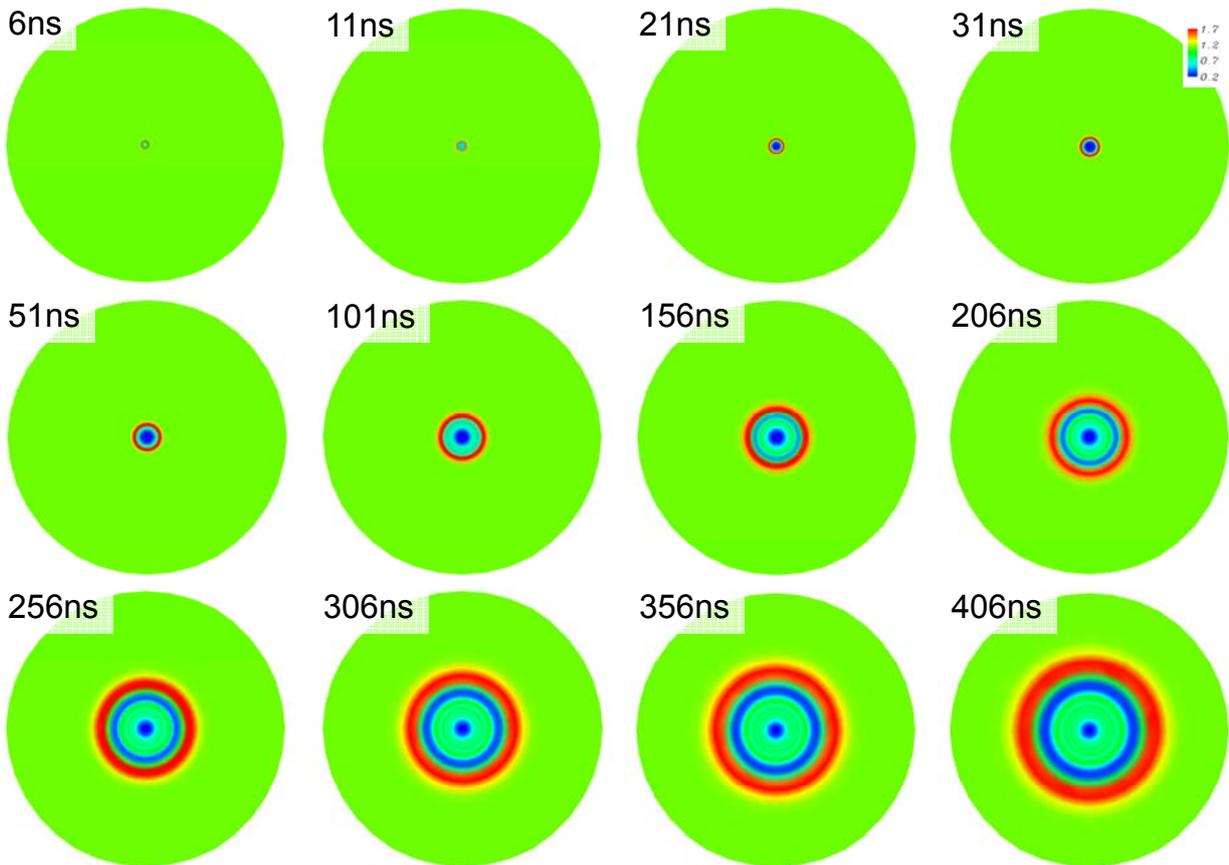
28

温度 (z=0断面)



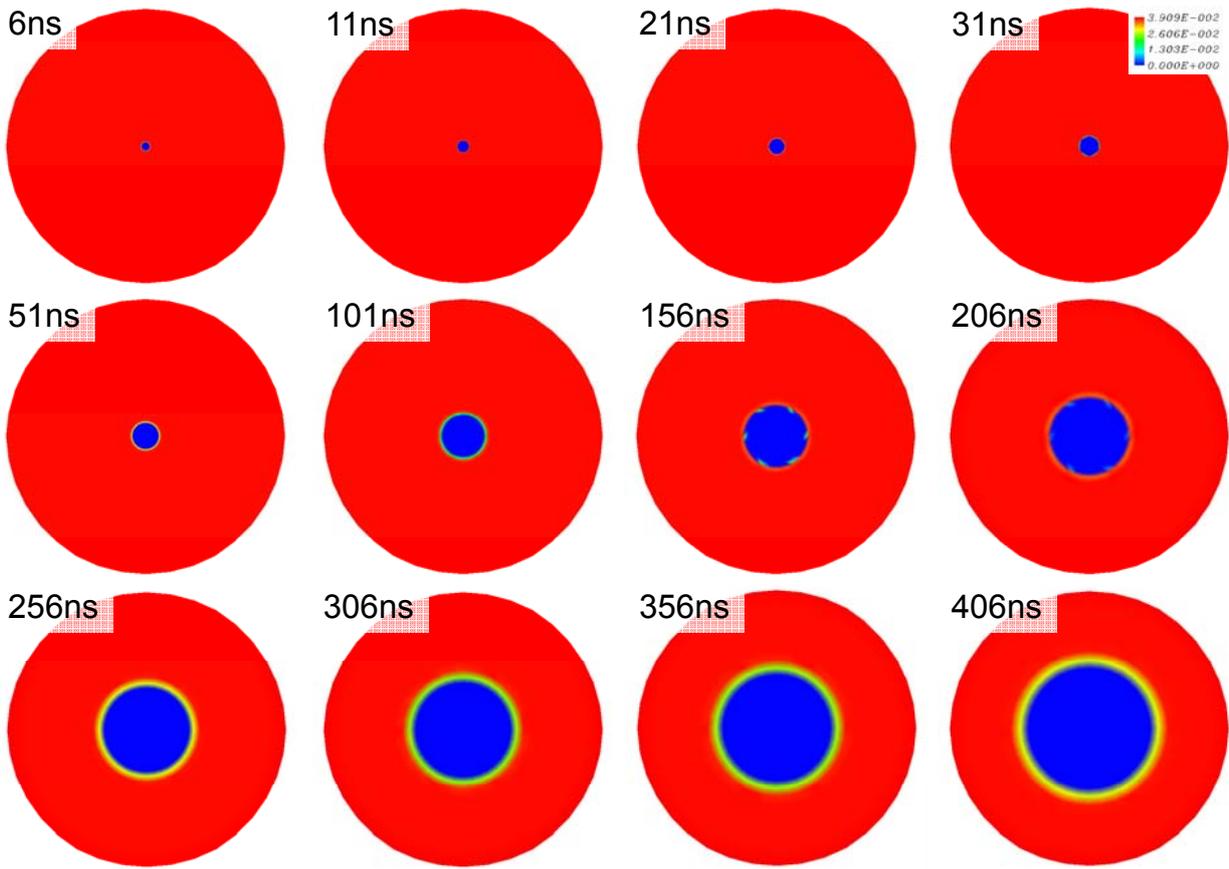
29

密度 (z=0断面)

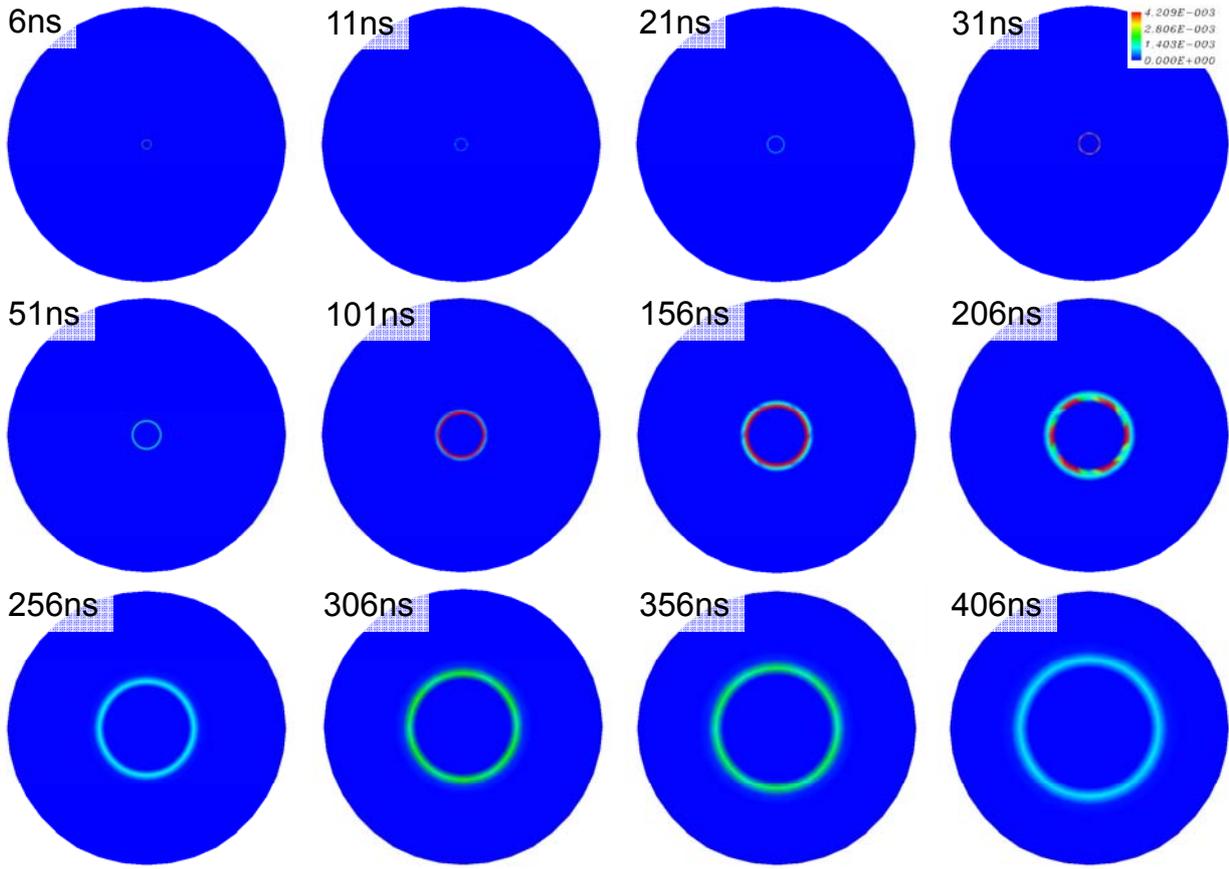


30

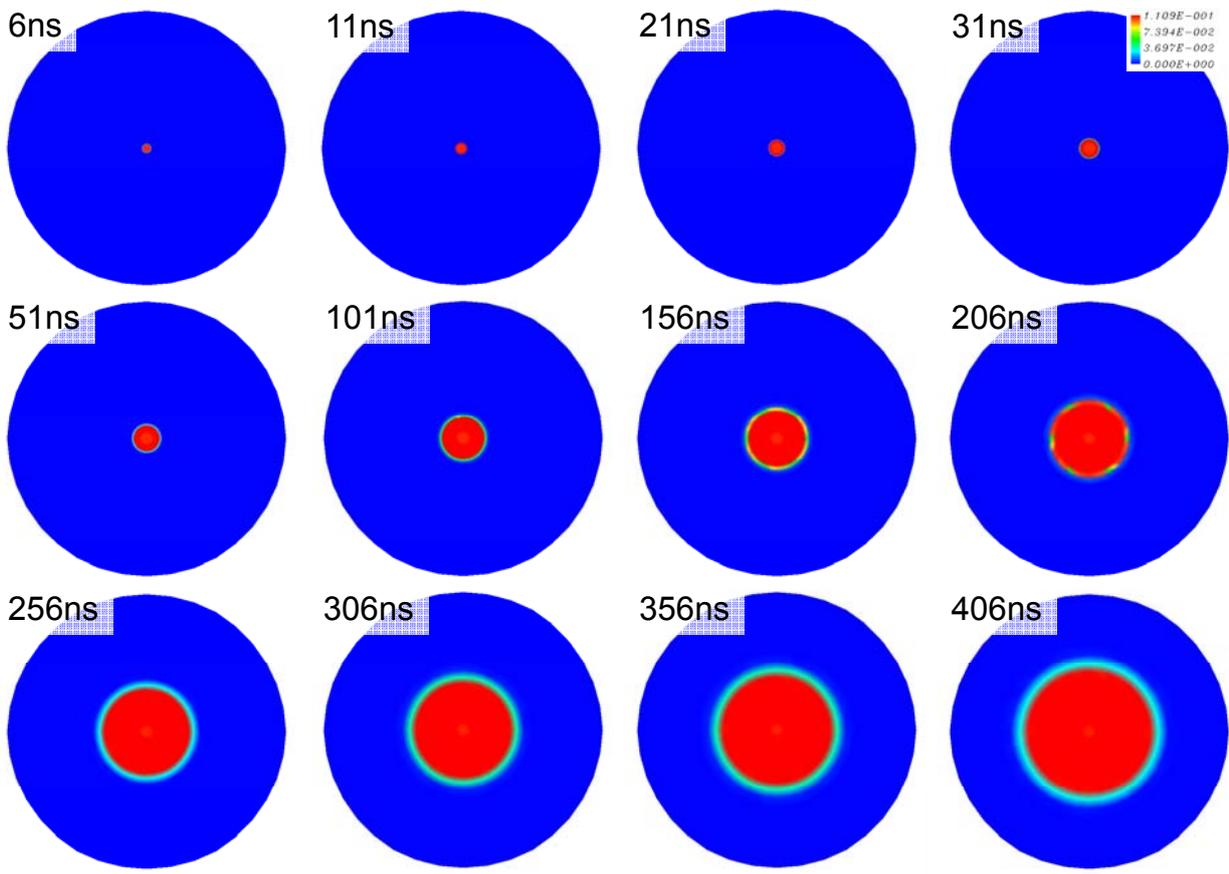
CH4質量分率(z=0断面)



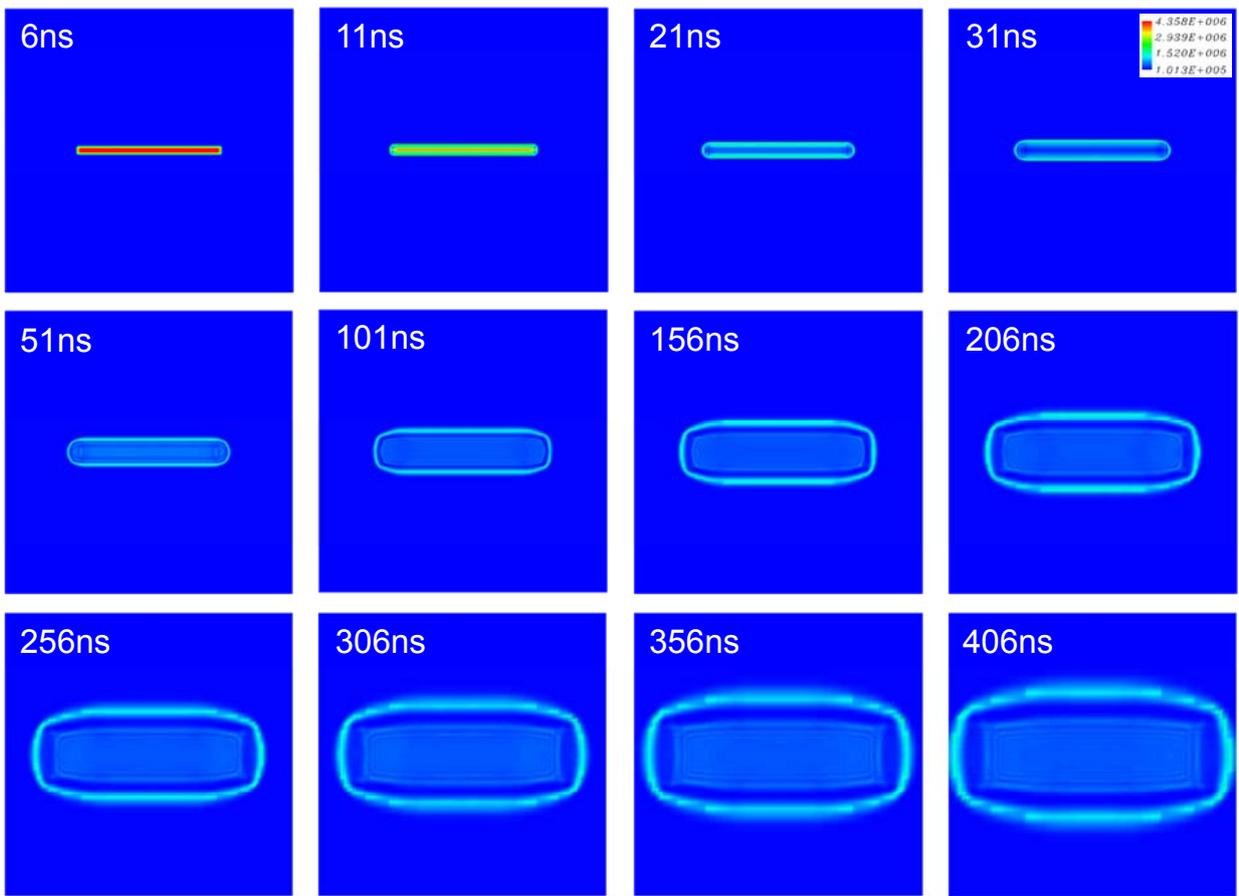
CO質量分率(z=0断面)



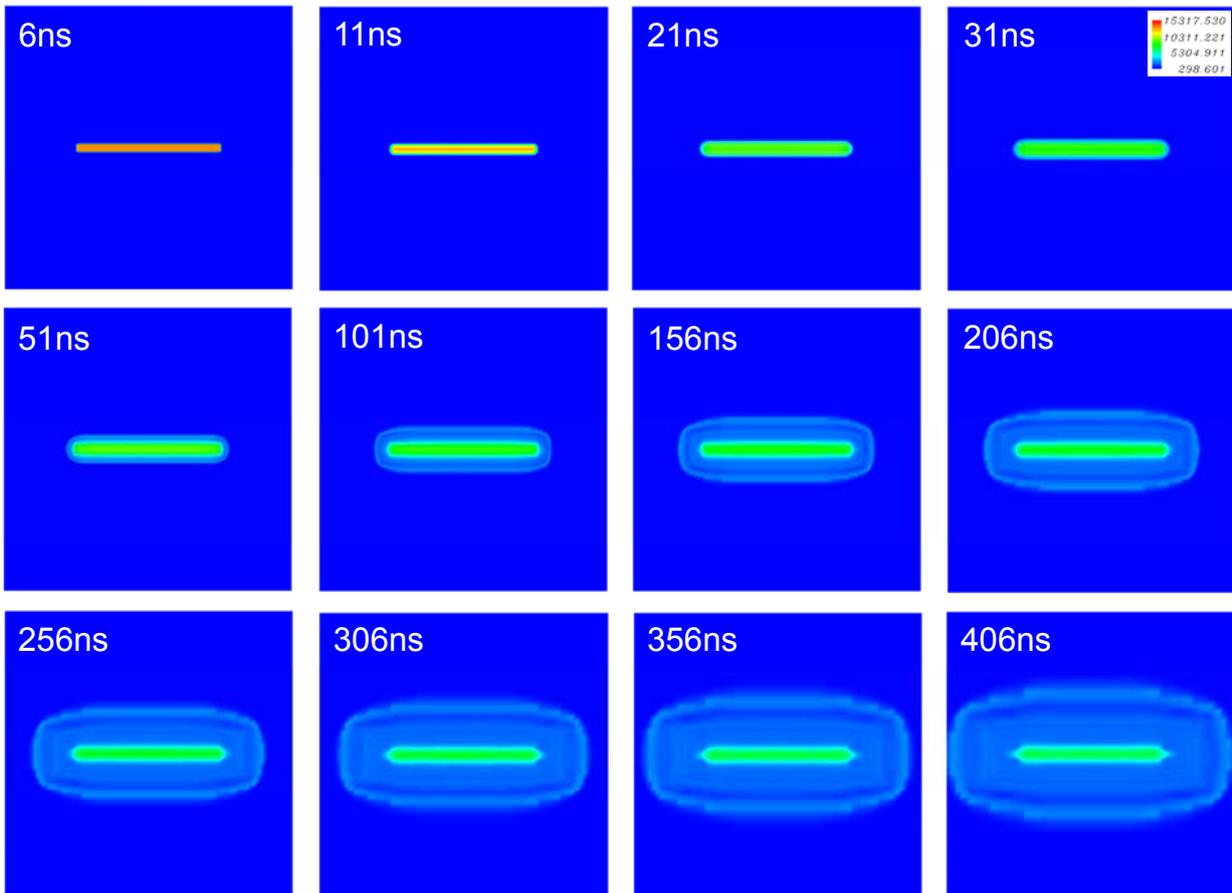
CO2質量分率(z=0断面)



圧力(x=0断面)

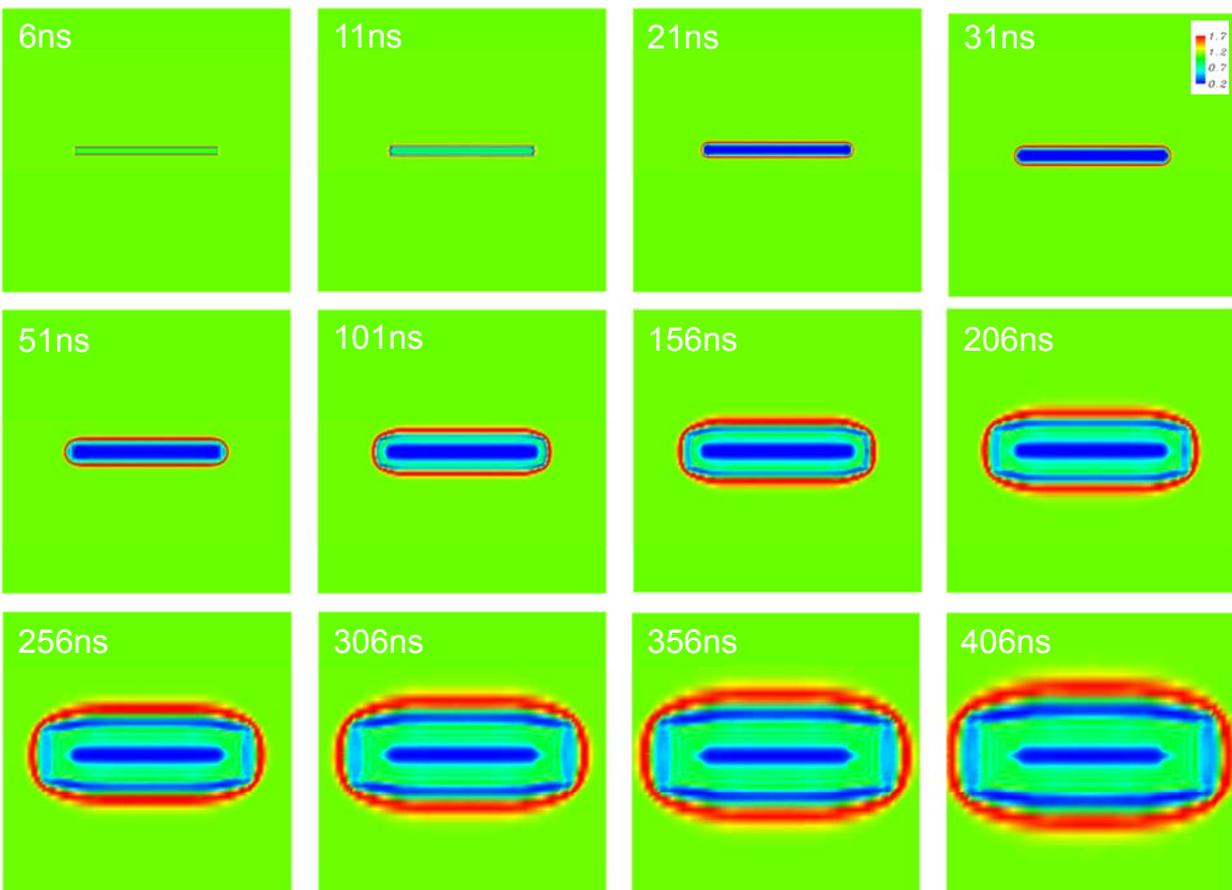


温度(x=0断面)



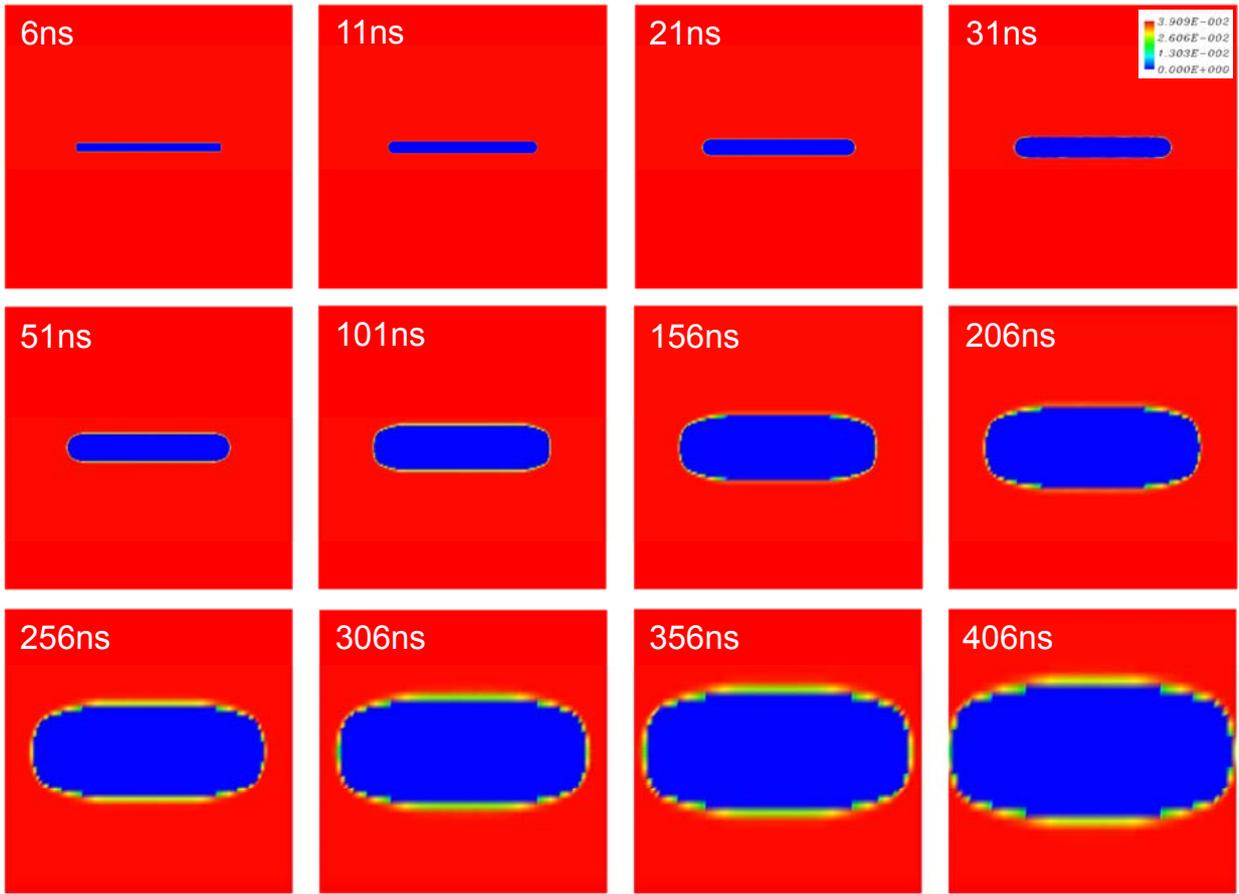
35

密度(x=0断面)



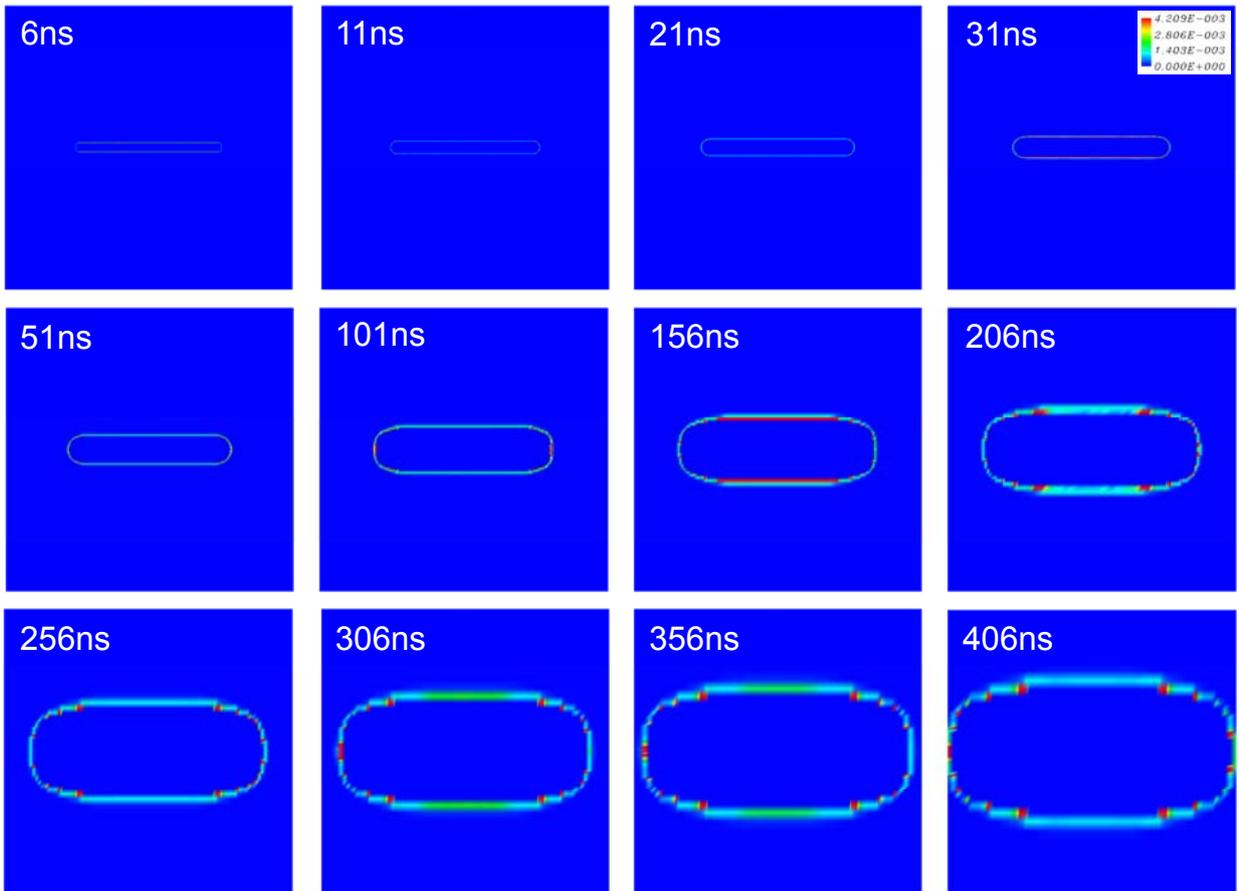
36

CH4質量分率(x=0断面)



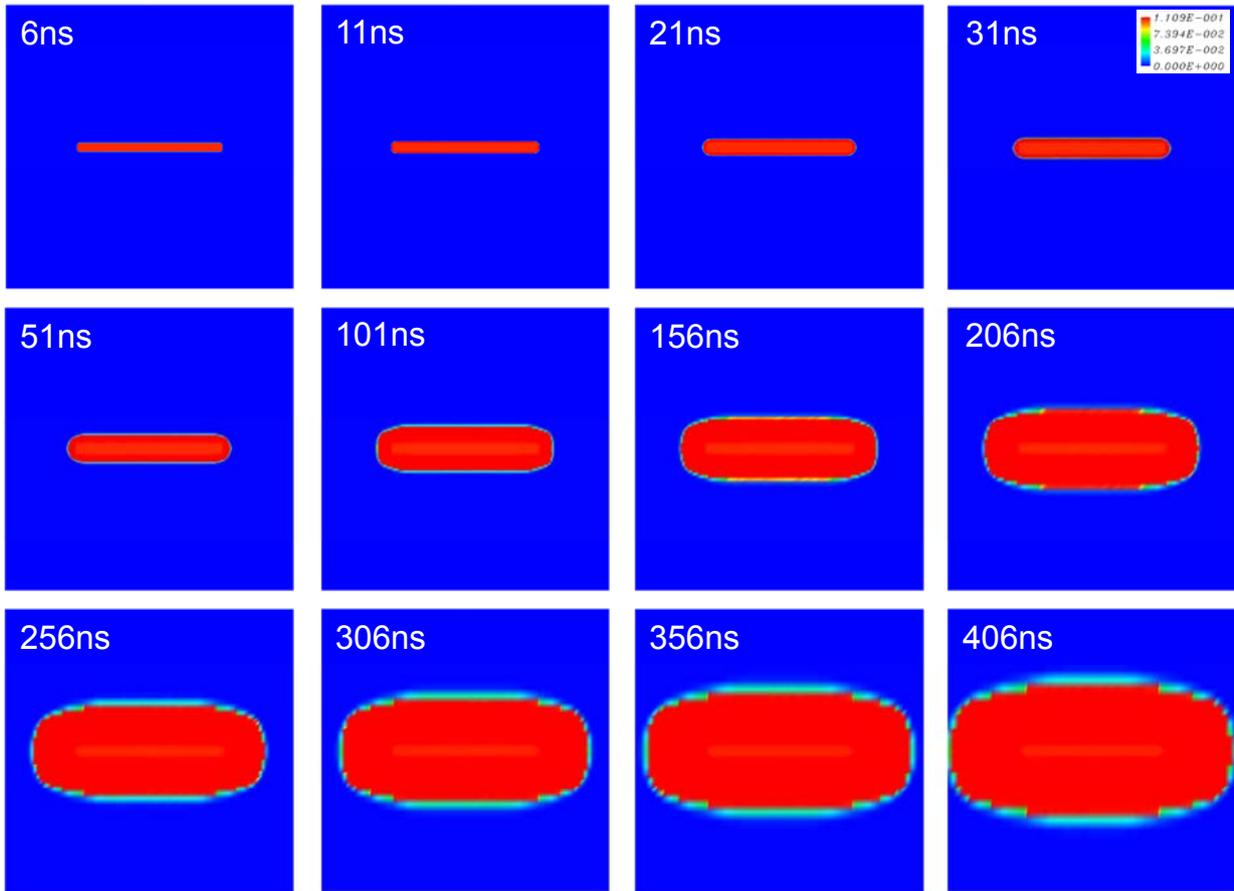
37

CO質量分率(x=0断面)



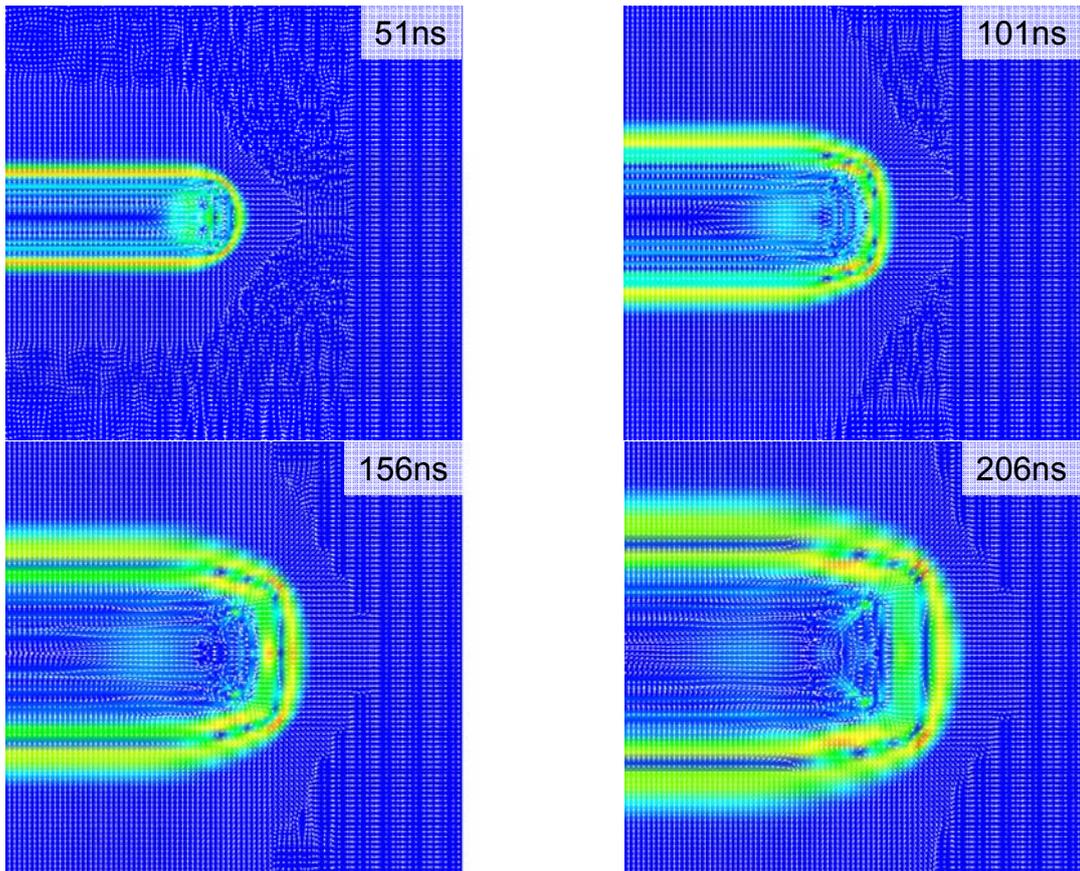
38

CO2質量分率(x=0断面)



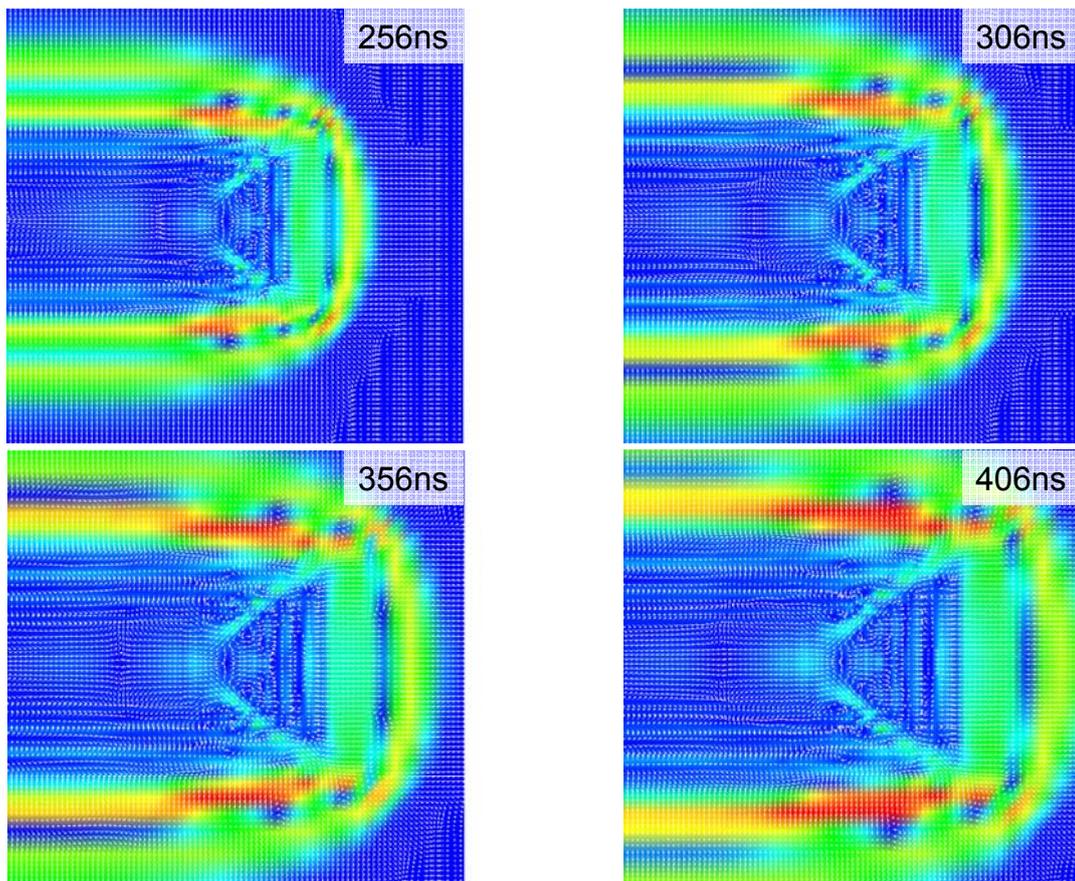
39

速度ベクトル分布(x=0断面)



40

速度ベクトル分布(x=0断面)



41

まとめ

- ガスブレイクダウンを利用したレーザ着火手法は高圧、希薄燃焼への適用性があり、着火制御によるエンジン効率の向上につながると考えられる
- レーザに相当する高エネルギーを与えた際の数値解析を行い、化学反応、流動の計算が可能であることを確認した
- エネルギー分布を与えた解析等を行うことにより実験で見られた流動を再現することで、ガスブレイクダウンによる着火現象の詳細解析が可能と考えられる。さらに、着火位置の影響調査などの応用解析に発展させることでエンジン高効率化の指針を得ることが期待できる

42

「アドバンスソフトにおける燃焼解析技術への取り組み」

アドバンスソフト株式会社

技術第3部 主事研究員

大西 陽一

アドバンスソフトでは、燃焼機器から都市火災まで様々なスケールの燃焼問題を対象に解析を行っています。本講演では、Advance/FrontFlow/red を用いた適用事例、開発ロードマップを紹介します。

キーワード: LES、大規模解析(並列計算)、燃焼モデル各種、粒子追跡法

アドバンスソフト社における 燃焼問題への取り組み

2009年10月5日

アドバンスソフト株式会社

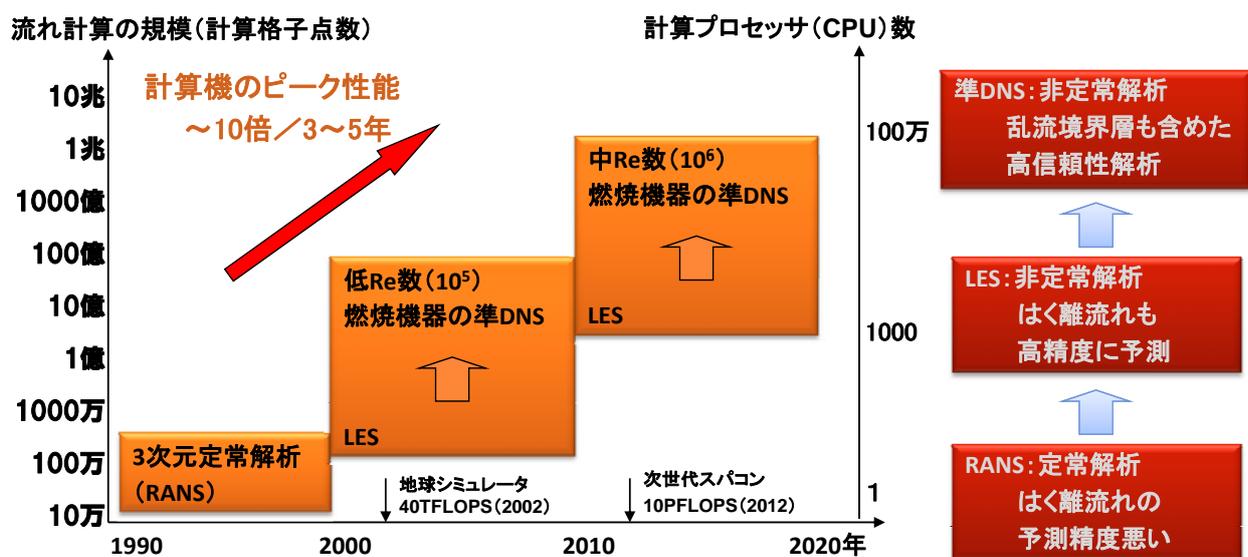
内容

-
- 燃焼解析ソフトの紹介
 - 燃焼解析機能の紹介
 - 燃焼分野への適用事
 - 開発ロードマップ

- 火炉
- ガスタービン
- ロケットエンジン
- 自動車エンジン

乱流の数値解析の動向と将来展望

- 5～10年後には予測精度が飛躍的に向上

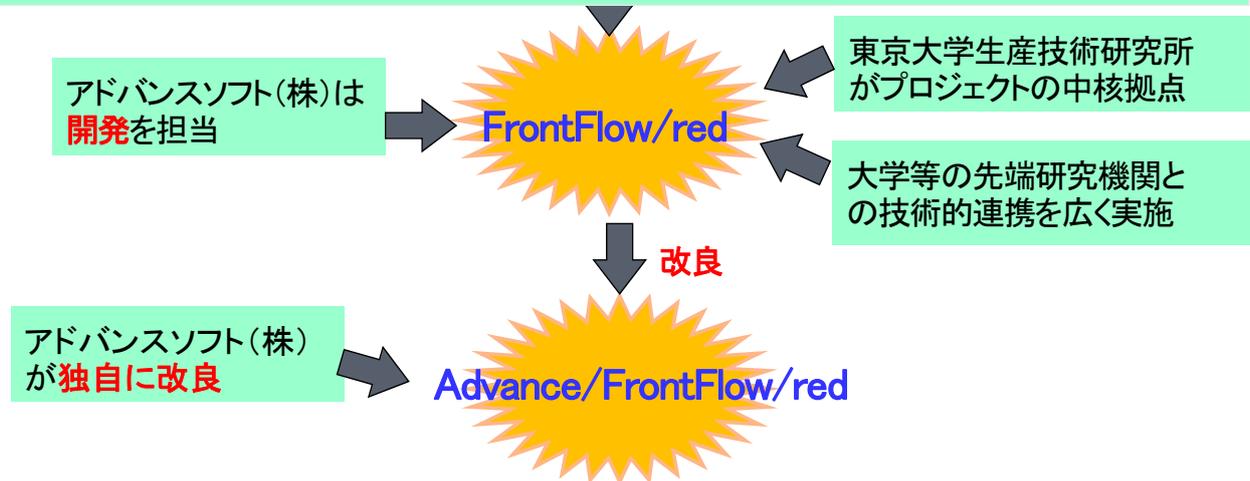


- ・ 燃焼/混相流/構造振動などの本格的マルチフィジクス連成解析も実現
- ・ 並列計算のパラダイムシフト
- ・ 超大規模データ処理方法の開発

Advance/FrontFlow/redの開発経緯

● 文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクト(2002年度～2004年度)

● 文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト(2005年度～2007年度)



5

Advance/FrontFlow/redの特徴

- **ラージ・エディ・シミュレーション(LES)による乱流解析精度を追及**
 - 空力、燃焼、火災、物質拡散、異なる気体の混合、騒音などの非定常乱流解析
- **超並列化・ベクトル化による大規模解析**
 - (例)800CPU(地球シミュレーター)でベクトル化率96.40%、並列化率99.88%
- **k-εモデル、モンテカルロ法(輻射)、燃焼、表面反応、粒子追跡、騒音、キャビテーションなどに対応**
- **カスタマイズ**
 - 国産ソフトウェアであり、お客様のニーズに合わせてカスタマイズしたソフトウェアをご提供

6

化学反応を伴う流れ

化学種の保存方程式

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \dot{w}_i - \nabla \cdot (\rho Y_i \vec{V}_i)$$

ρ : 密度 [kg/m^3]

Y : 化学種モル分率 [-]

u : 速度 [m/s]

V : 化学種拡散速度 [m/s]

w : 化学種生成項 [$kg/m^3/s$]

7

■ 詳細反応モデル

反応式の数が多い 水素反応 数10式 炭素反応 数百式
→ 反応硬直性、計算負荷大

■ 反応機構の単純化(総括反応モデル)

反応式の数が少ない → 実用向き

■ 火炎のモデル化(Flameletモデル)、乱流燃焼モデル(渦消散モデル)の導入

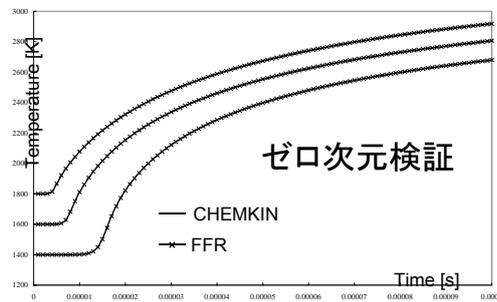
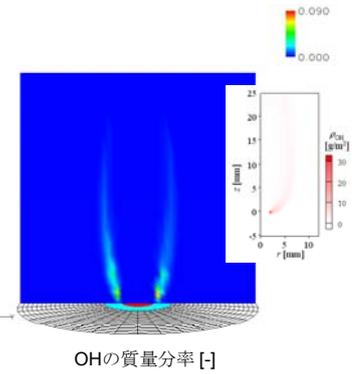
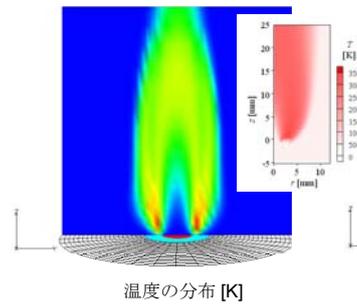
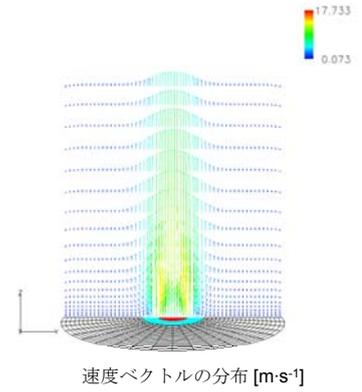
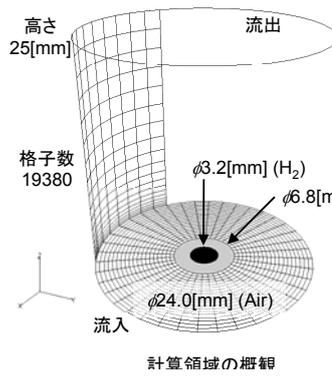
8

素反応の基本検証：水素バーナー AdvanceSoft



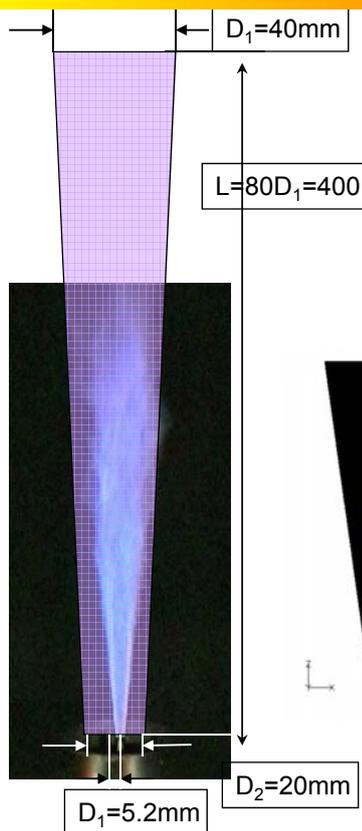
21個素反応式、9個化学種、逆反応、第3体参加

k_p	Reaction	A_p	B_p	E_p
1	$H+O_2 \rightleftharpoons OH+O$	$2.00 \cdot 10^{14}$	0.0	70.30
2	$H_2+O \rightleftharpoons OH+H$	$1.80 \cdot 10^{10}$	1.0	36.93
3	$H_2O+O \rightleftharpoons OH+OH$	$5.90 \cdot 10^5$	1.3	71.25
4	$H_2+OH \rightleftharpoons H_2O+H$	$1.17 \cdot 10^9$	1.3	15.17
5	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$	$2.30 \cdot 10^{15}$	-0.8	0.00
6	$H+HO_2 \rightleftharpoons OH+OH$	$1.50 \cdot 10^{14}$	0.0	4.20
7	$H+HO_2 \rightleftharpoons H_2+O_2$	$2.50 \cdot 10^{13}$	0.0	2.93
8	$OH+HO_2 \rightleftharpoons H_2O+O_2$	$2.00 \cdot 10^{13}$	0.0	4.18
9	$H+H+M \rightleftharpoons H_2+M$	$1.80 \cdot 10^{15}$	-1.0	0.00
10	$H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$	$2.20 \cdot 10^{22}$	-2.0	0.00
11	$HO_2+HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2+O_2$	$2.00 \cdot 10^{12}$	0.0	0.00
12	$H_2O_2+M \rightleftharpoons OH+OH+M$	$1.30 \cdot 10^{17}$	0.0	190.38
13	$H_2O_2+OH \rightleftharpoons H_2O+HO_2$	$1.60 \cdot 10^{13}$	0.0	7.53
14	$O+HO_2 \rightleftharpoons OH+O_2$	$2.00 \cdot 10^{13}$	0.0	0.00
15	$H+HO_2 \rightleftharpoons O+H_2O$	$5.00 \cdot 10^{12}$	0.0	5.90
16	$H+O+M \rightleftharpoons OH+M$	$6.20 \cdot 10^{16}$	-0.6	0.00
17	$O+O+M \rightleftharpoons O_2+M$	$6.17 \cdot 10^{15}$	-0.5	0.00
18	$H_2O_2+H \rightleftharpoons H_2O+OH$	$1.00 \cdot 10^{13}$	0.0	15.02
19	$H_2O_2+H \rightleftharpoons HO_2+H_2$	$4.79 \cdot 10^{13}$	0.0	33.26
20	$O+OH+M \rightleftharpoons HO_2+M$	$1.00 \cdot 10^{16}$	0.0	0.00
21	$H_2+O_2 \rightleftharpoons OH+OH$	$1.70 \cdot 10^{13}$	0.0	200.00



9

総括反応：拡散バーナー

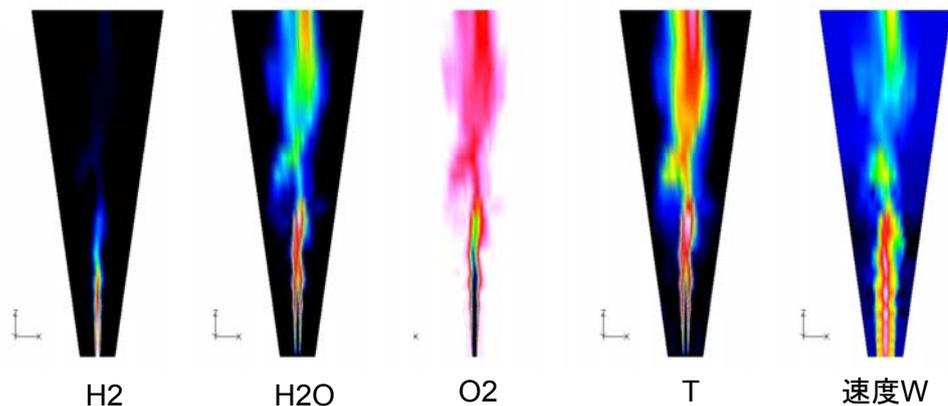


Fuel	$H_2:N_2=50:50$ (vol.)
co-flow	Air
Diameter of fuel nozzle	8mm
Bulk velocity at fuel nozzle	34.5m/s
co-flow velocity	0.2m/s
Reynolds number	10000

Hydrogen Jet flame
M. M. Tacke, H3 Flame Database (1998)

節点: 62160

要素: 59826

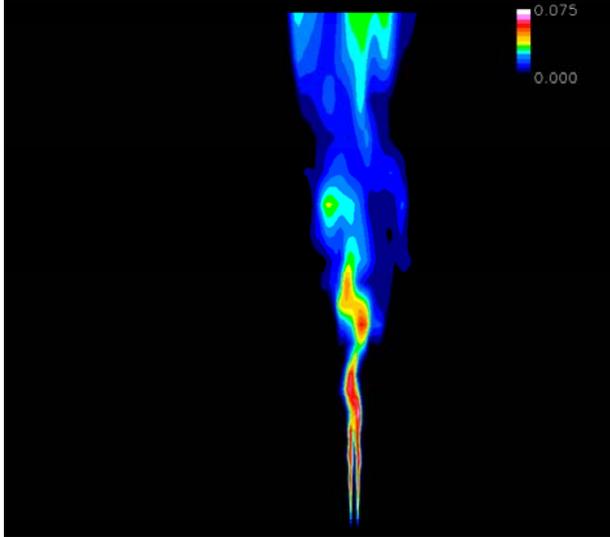


10

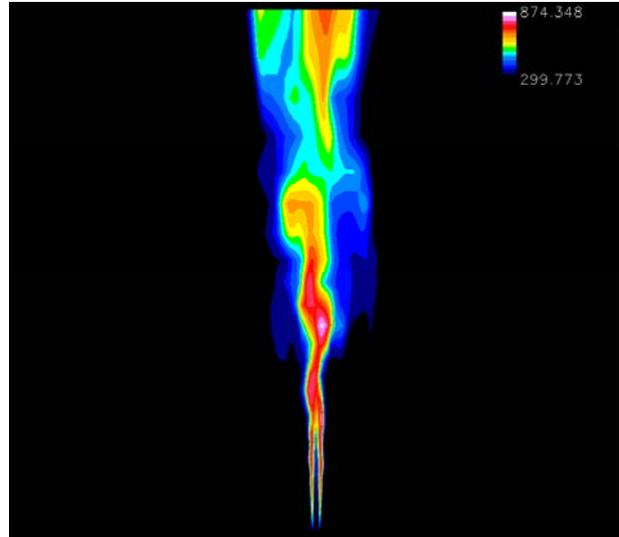
総括反応：拡散バーナー

反応速度式：
$$w = k \prod_i [X_i]^{c_i}$$

$$k = AT^\alpha P^\beta \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$



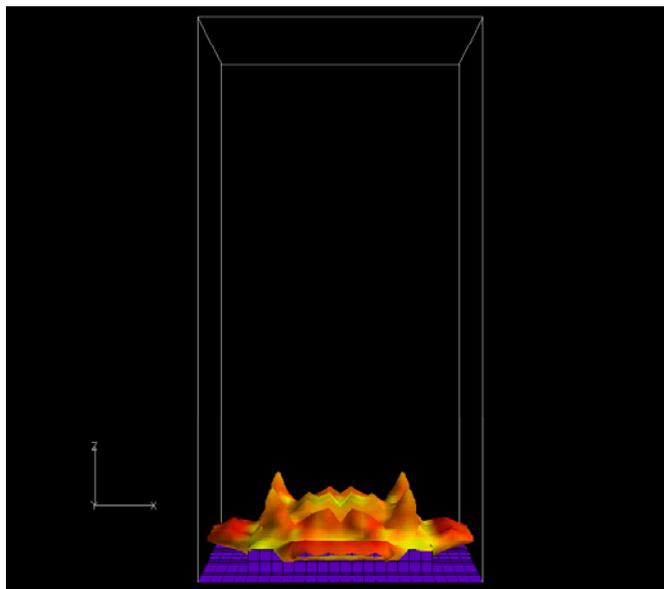
H₂の分布



温度の分布

火災機能（熱分解）：プール火災

■ LESと総括反応モデルによる燃焼解析



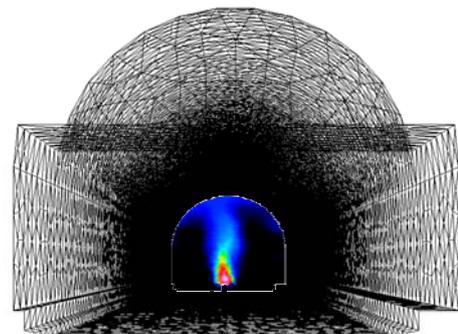
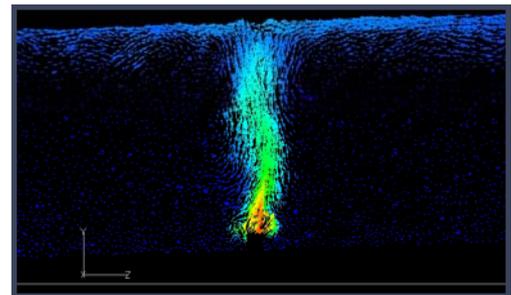
◆ 3万ヘキサメッシュ

◆ プロパン (C₃H₈) を燃料として蒸発、燃焼

◆ 総括反応モデル

◆ 固体の熱分解モデル

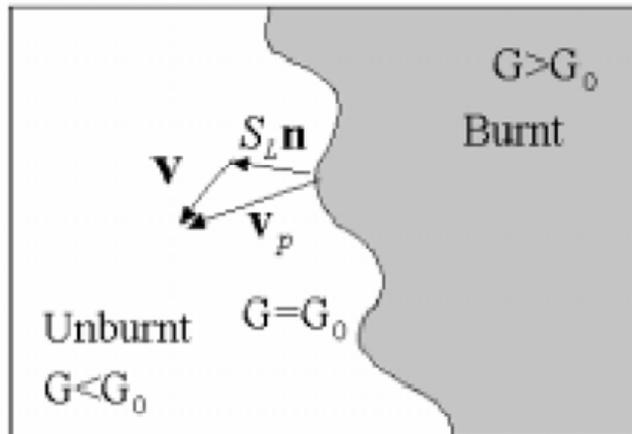
◆ C₃H₈+O₂→H₂O+CO₂+SOOT+CO



検証項目

- 1) 総括反応ルーチン
- 2) 熱分解境界条件 (蒸発も)
- 3) 特集BC: OPEN-AIR境界
- 4)すすの生成
- 5) マルチ燃料の解析

予混合火炎



反応速度は火炎面の移動速度に等しい

予混合火炎面の移動方程式

$$\frac{\partial \rho G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} G) = \rho S_L |\nabla G|$$

13

バーナー燃焼解析の事例

液滴とガスの二相流解析の事例

直噴ガソリンエンジン用スプライトの噴霧流れ解析

- ・オイラー・ラグランジュ2相モデル
- ・粒子と流れ場の相互作用

微粉炭燃焼解析の事例

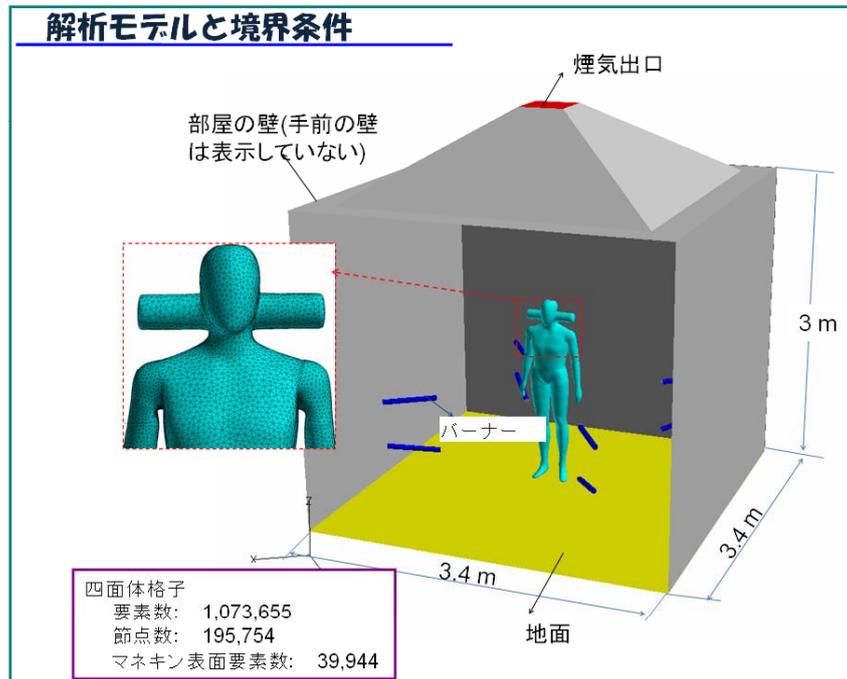
微粉炭燃焼炉内の非定常燃焼解析

揮発分質量分率とガス温度の解析結果

速度分布の解析結果と実験結果の比較

■ 3次元燃焼解析

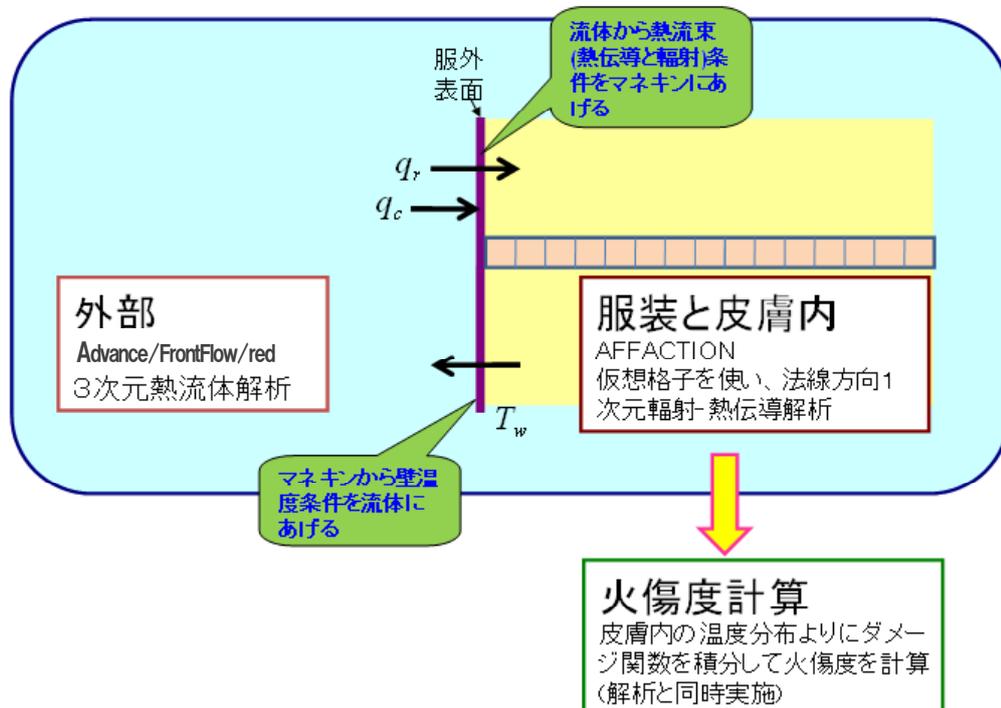
乱流 k-εモデル
 燃焼 渦消散モデル
 輻射 DOM
 格子 非構造格子



15

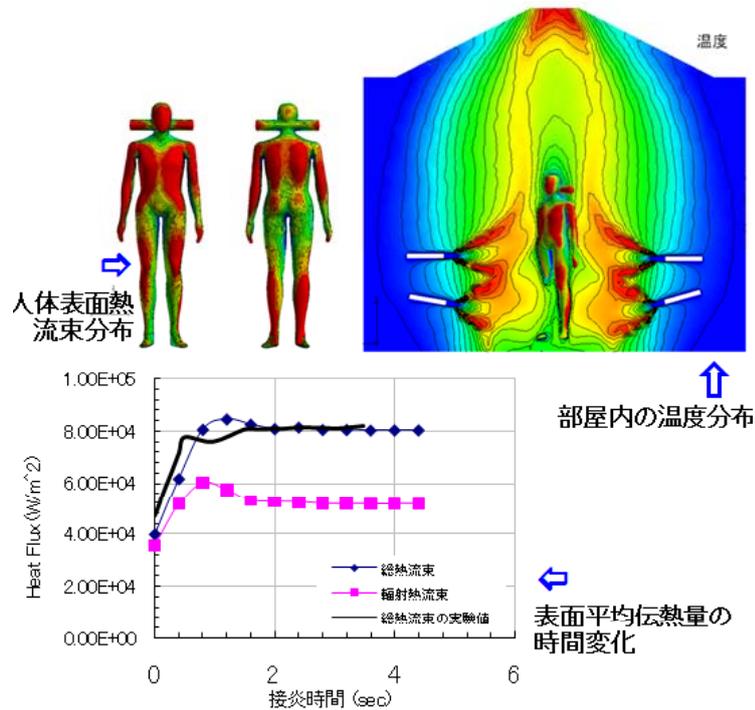
輻射解析の事例

■ 目的 防火服の耐熱性能の予測



16

■ 表面平均伝流束の解析結果と実験結果の比較



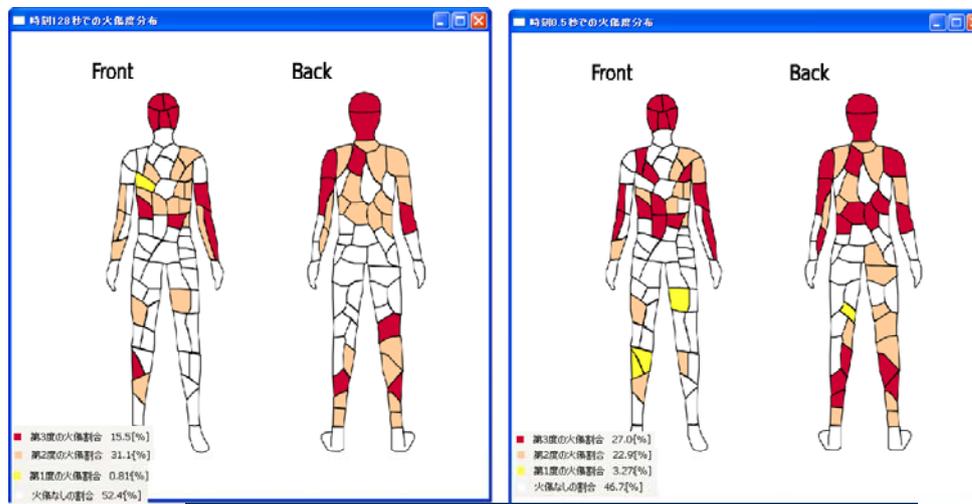
17

輻射解析の事例

■ 火傷度の解析結果と実験結果の比較

解析結果

実験結果



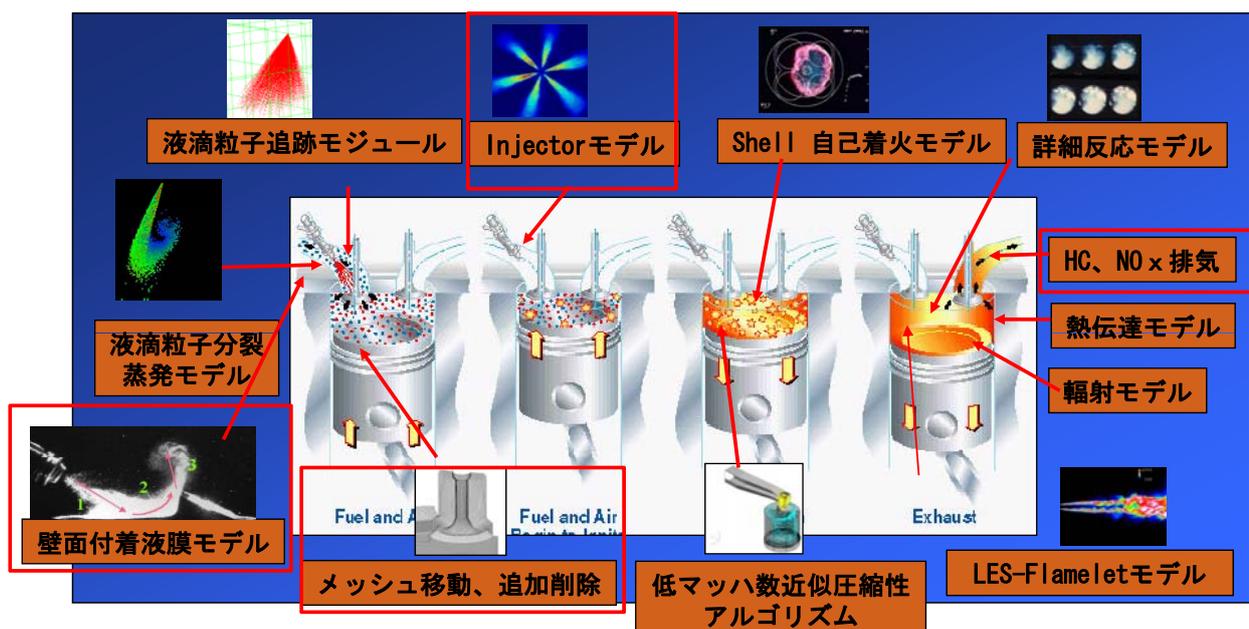
122センサーの位置当たりの火傷度分布 (着衣状態)
(接炎時間8秒、放置時間120秒後)

- ・マネキン火傷実験の解析を通して予測精度を検証した。
- ・実験で得られない知見を得ることができた。

18

大項目	中項目	2009年度	2010年度	2011年度
LESモデル	DESモデル	済		
RANSモデル	k- ω モデル	済		
	SSTモデル	済		
燃焼関係	ISAT機能 (燃焼計算高速化)		→	
	NOxモデル		→	
	Sootモデル			→
粒子追跡法	分裂モデル	→		
	液膜モデル		→	
格子機能強化	重合格子	→		
	解適合格子			→
高速化	AMG	→		
	ノード内自動並列化	→	→	

19



20



お問い合わせ先:

TEL:03-5570-1689 FAX:03-5570-1684

E-mail:office@advancesoft.jp

「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」