

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例
- 開発ロードマップ

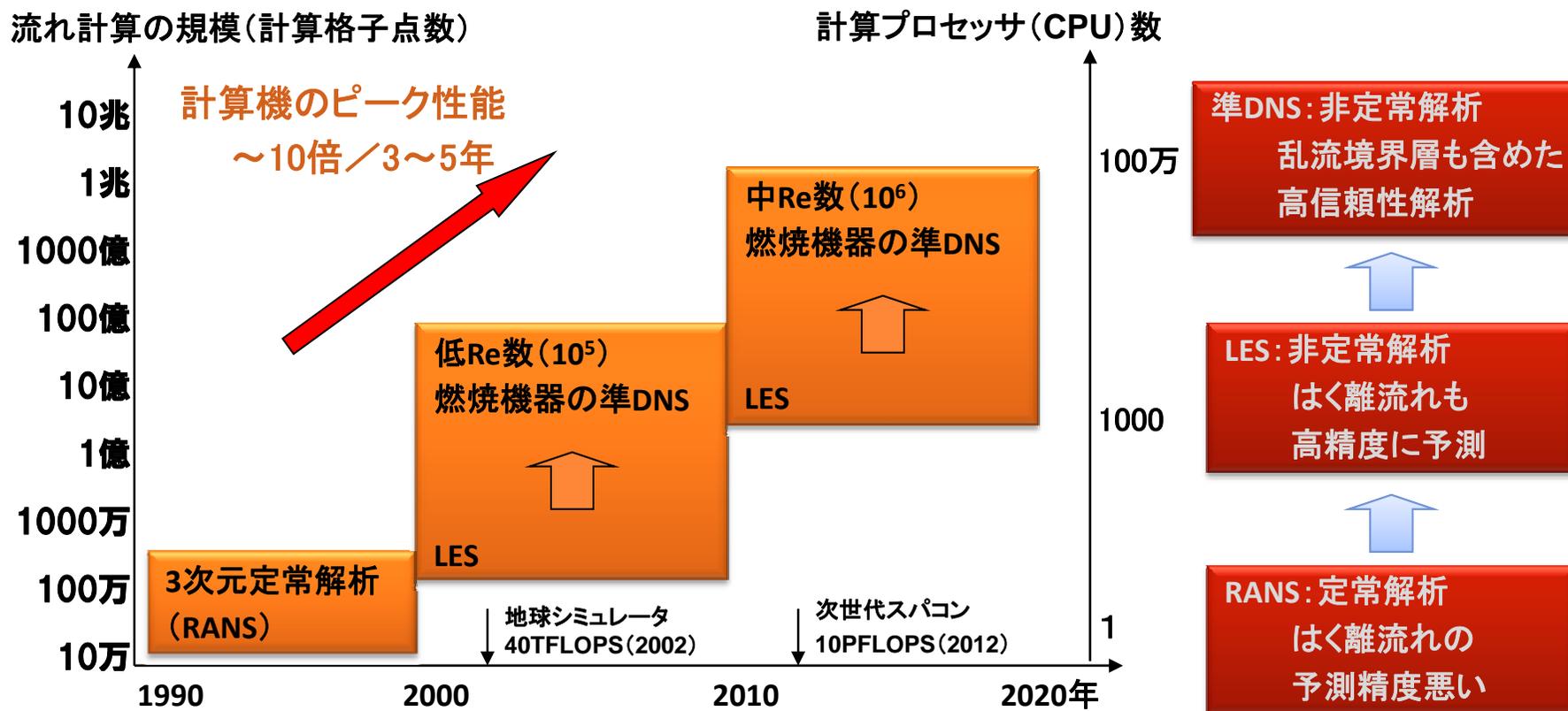
燃焼数値解析の応用分野

- 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

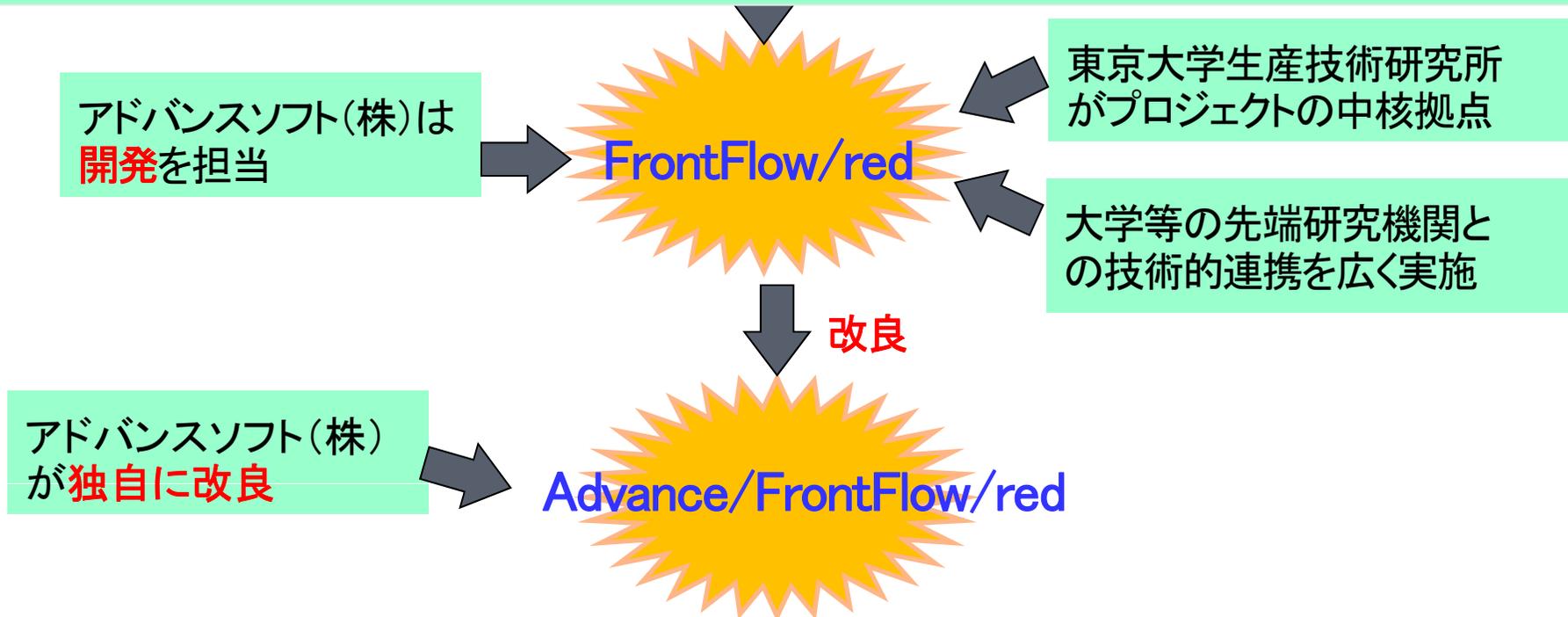


- ・ 燃烧/混相流/構造振動などの本格的マルチフィジクス連成解析も実現
- ・ 並列計算のパラダイムシフト
- ・ 超大規模データ処理方法の開発

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)



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

燃焼数値解析の基本(1)

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 [$\text{kg} / \text{m}^3 / \text{s}$]

燃焼数値解析の基本(2)

- **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

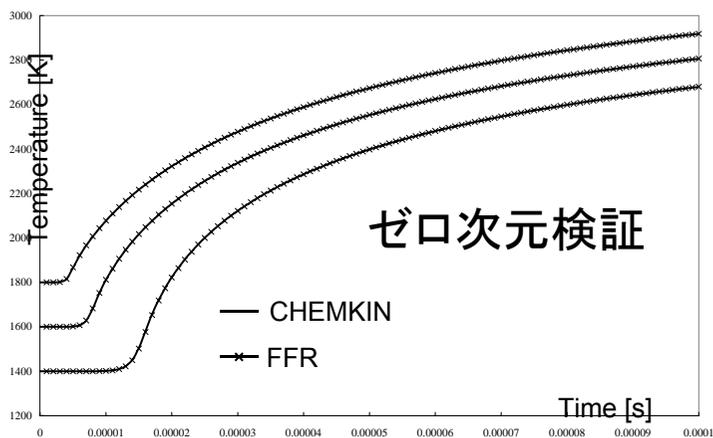
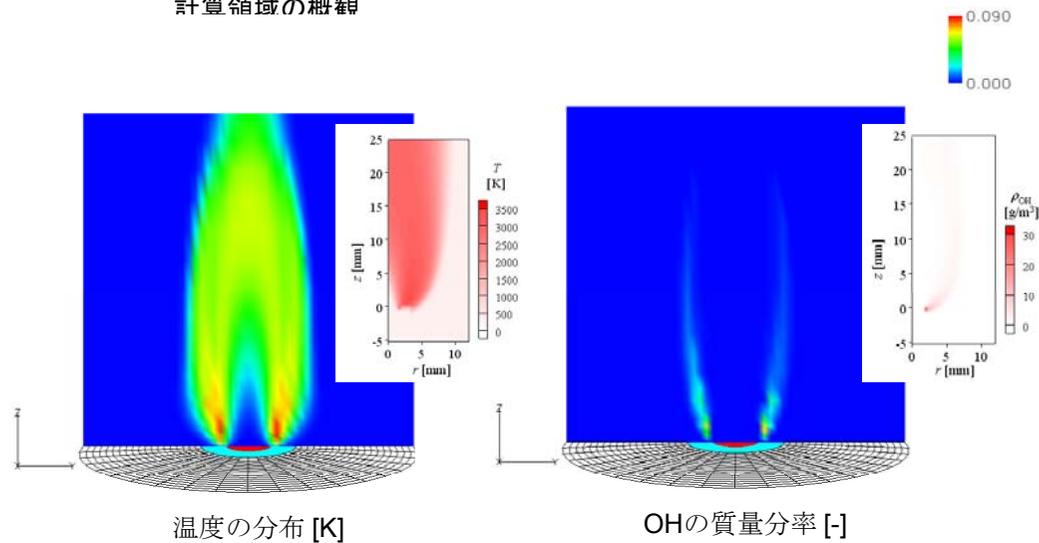
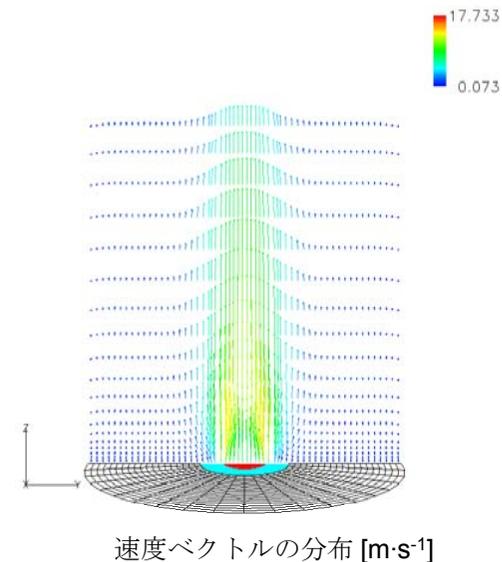
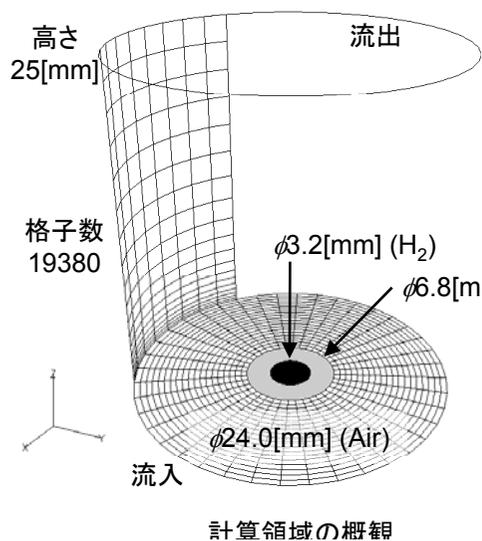
- **火炎のモデル化(Flameletモデル)、乱流燃焼モデル(渦消散モデル)の導入**

素反応の基本検証：水素バーナー AdvanceSoft

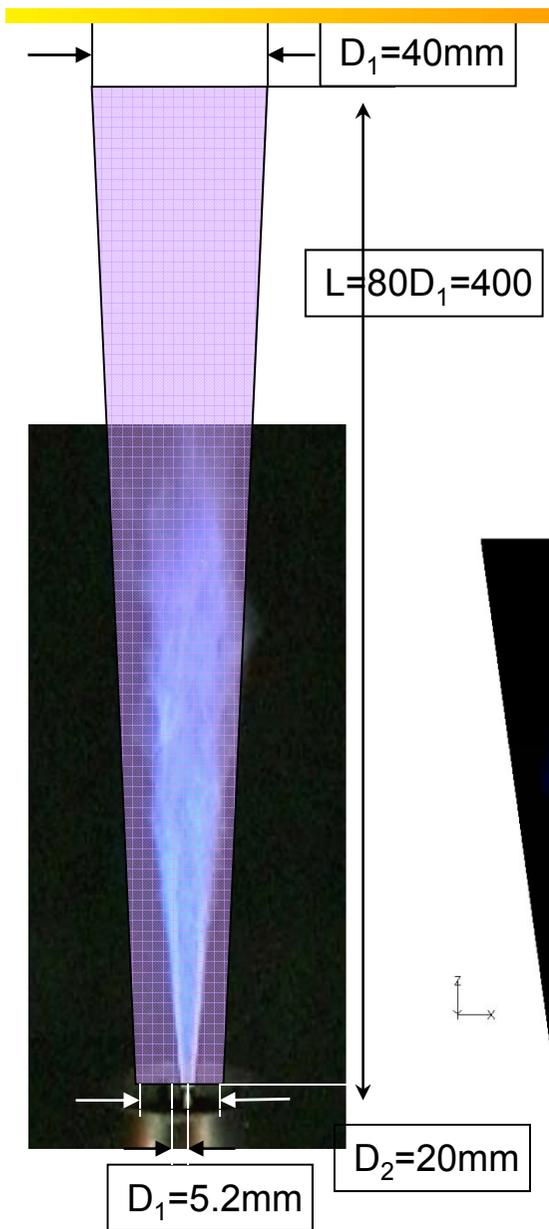


21個素反応式、9個化学種、逆反応、第3体参加

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



総括反応：拡散バーナー

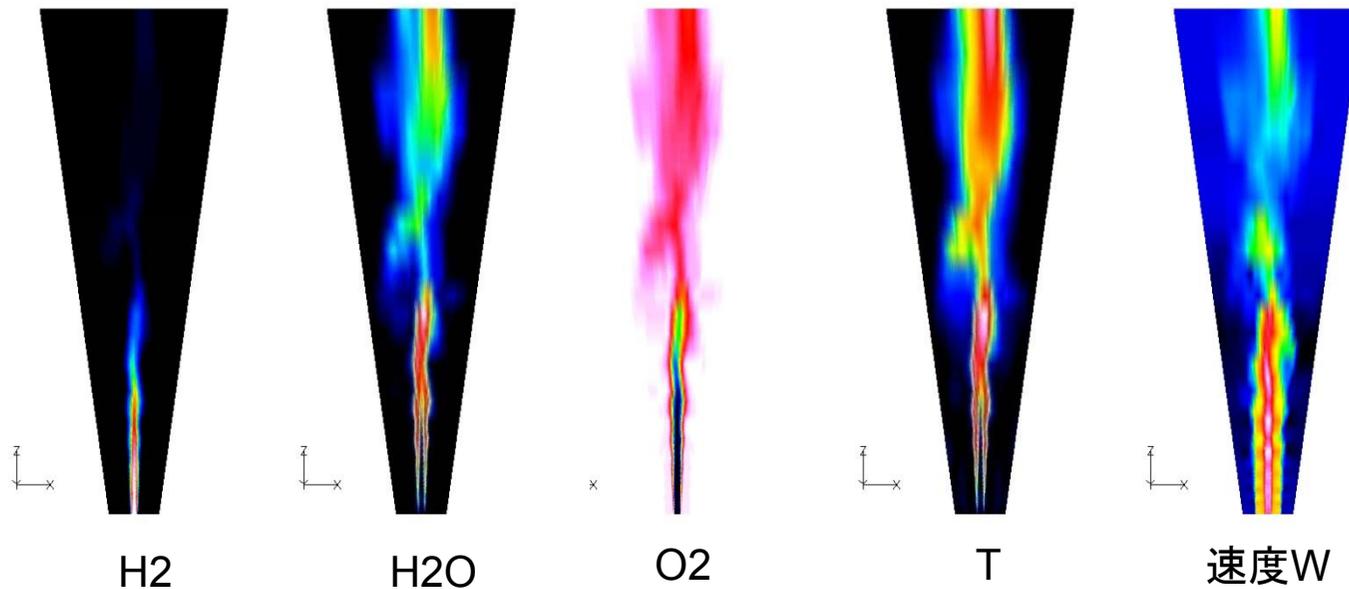


| | |
|------------------------------|--|
| Fuel | H ₂ :N ₂ =50:50 (vol.) |
| co-flow | Air |
| Diameter of fuel nozzle | 8mm |
| Bulk velocity at fuel nozzle | 34.5m/s |
| co-flow velocity | 0.2m/s |
| Reynolds number | 10000 |

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

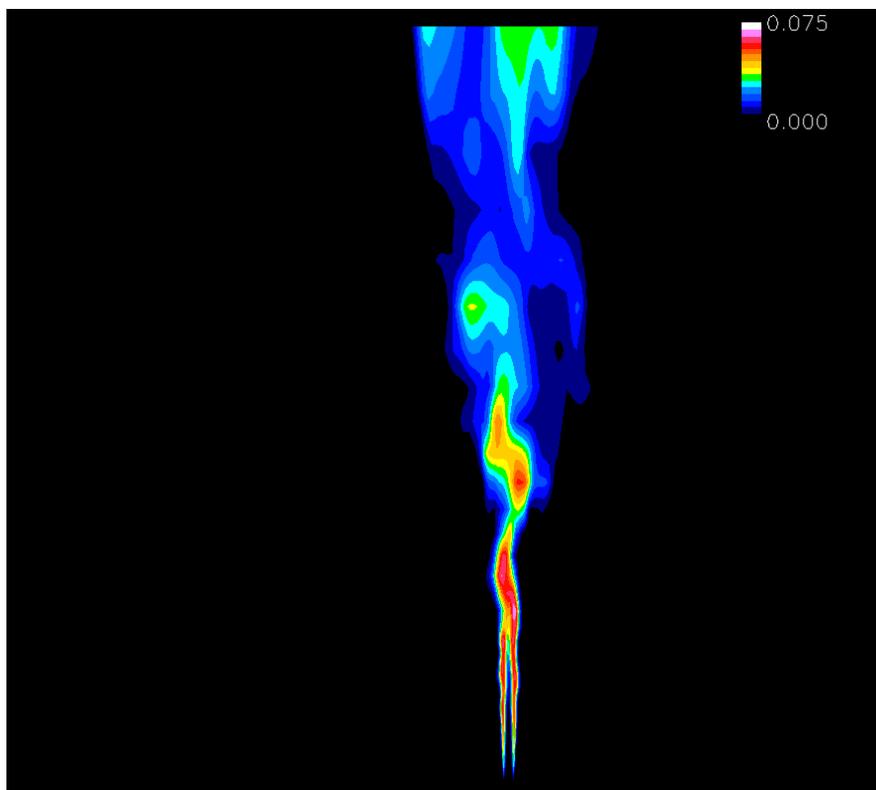
節点 : 62160

要素 : 59826

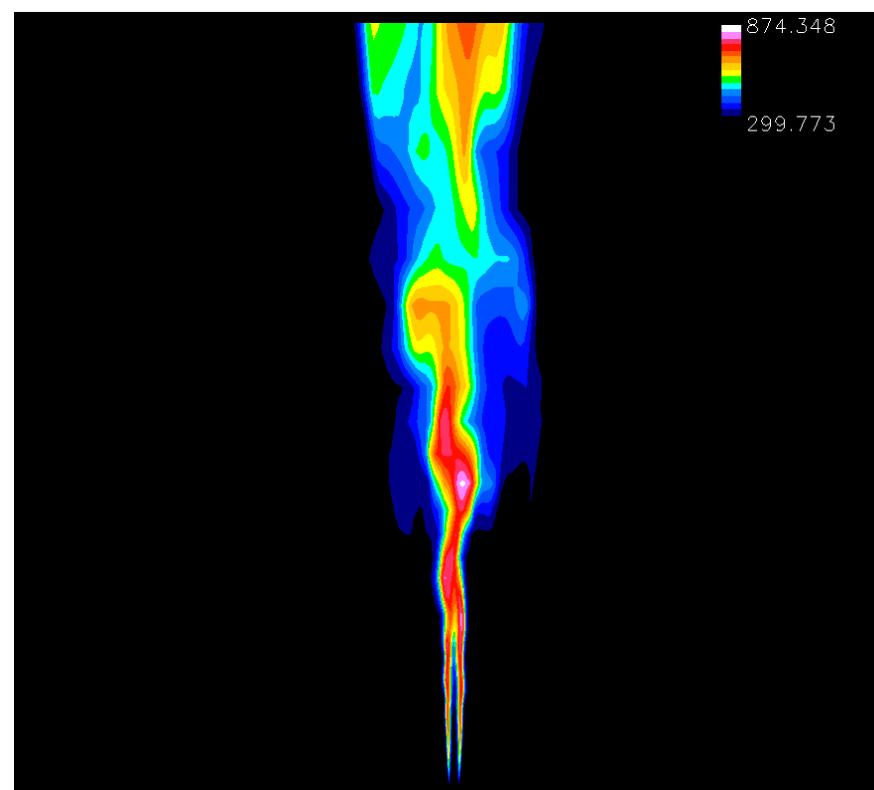


総括反応：拡散バーナー

反応速度式：
$$w = k \prod_i [X_i]^{cl}$$
$$k = AT^\alpha P^\beta \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$



H₂の分布

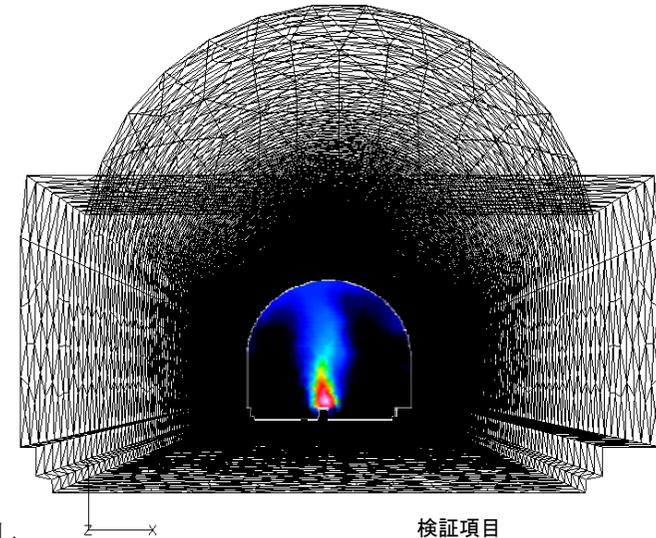
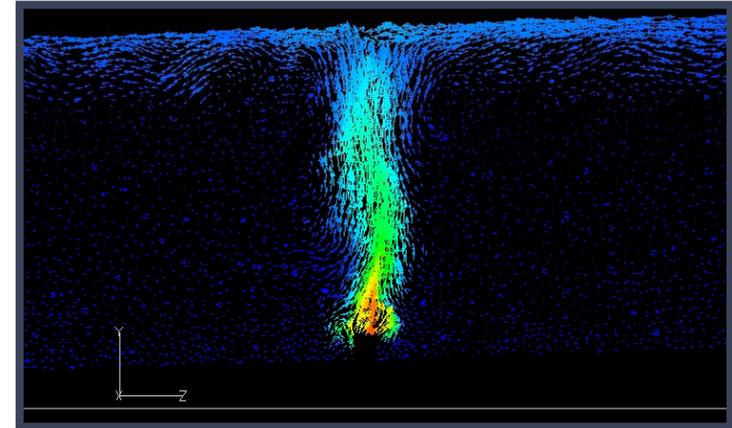
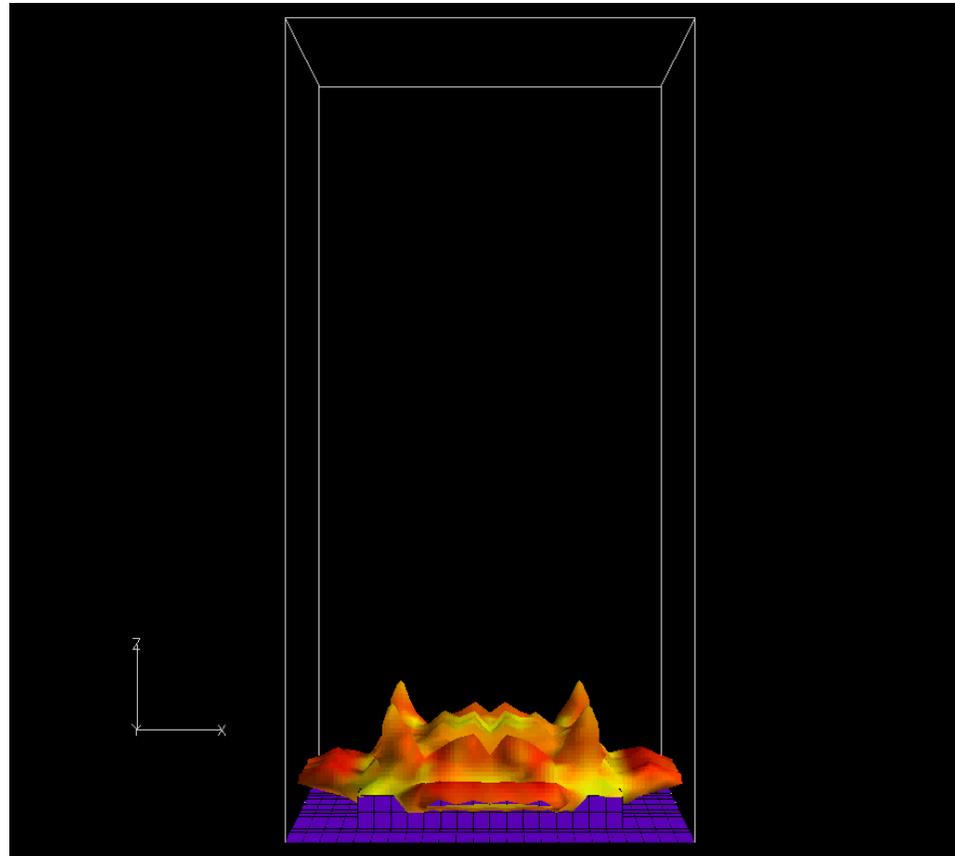


温度の分布

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

◆ $C_3H_8 + O_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + SOOT + CO$

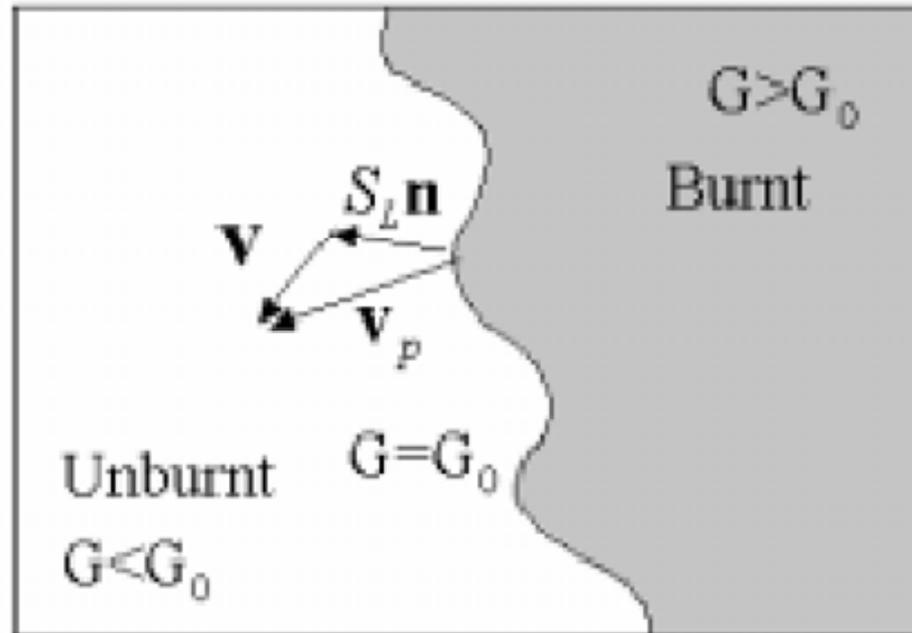
検証項目

- 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) すずの生成
- 5) マルチ燃料の解析

12

火炎のモデル化 Flemaletモデル AdvanceSoft

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

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

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

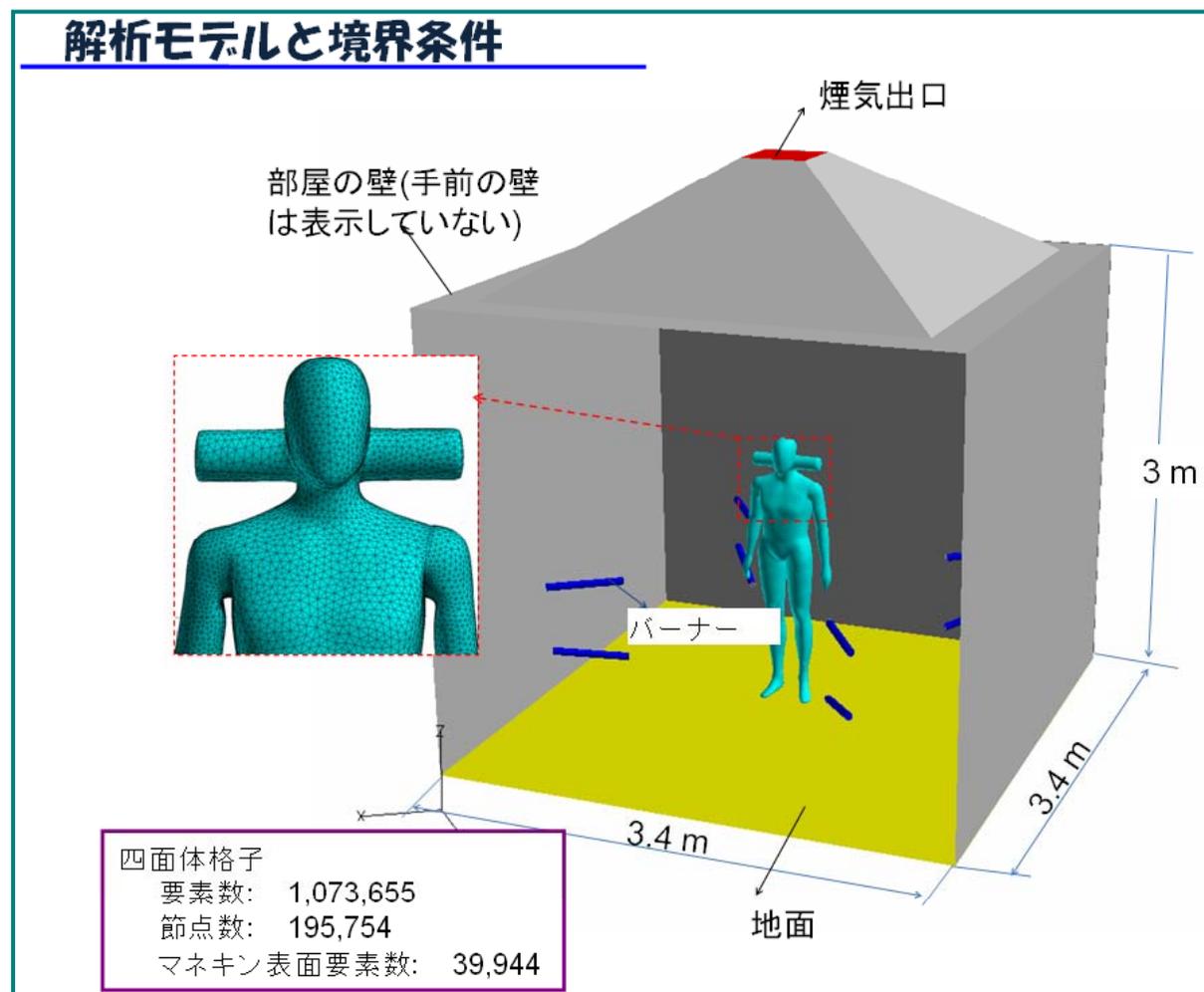
微粉炭燃焼炉内の非定常燃焼解析

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

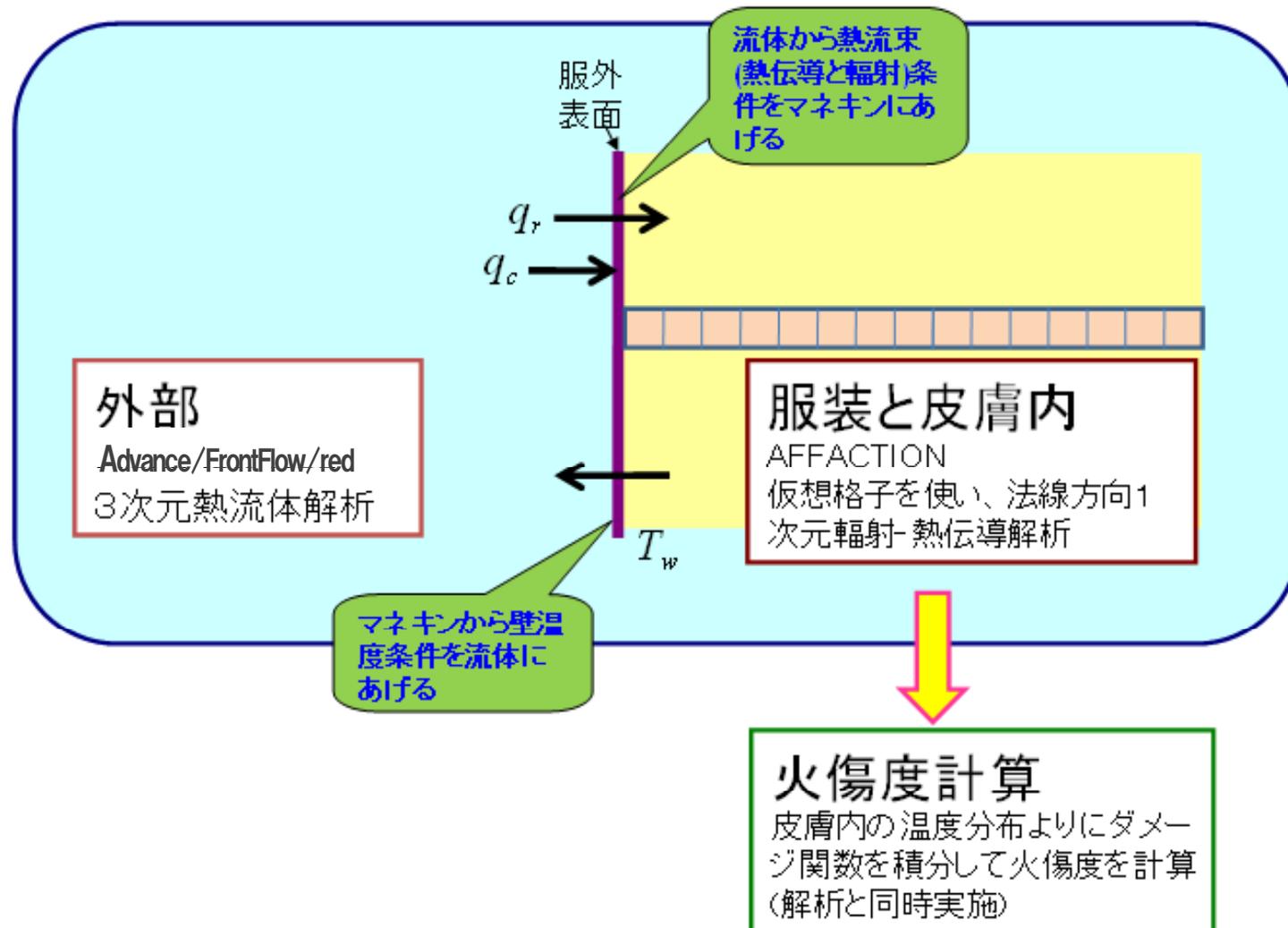
■ 3次元燃焼解析

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



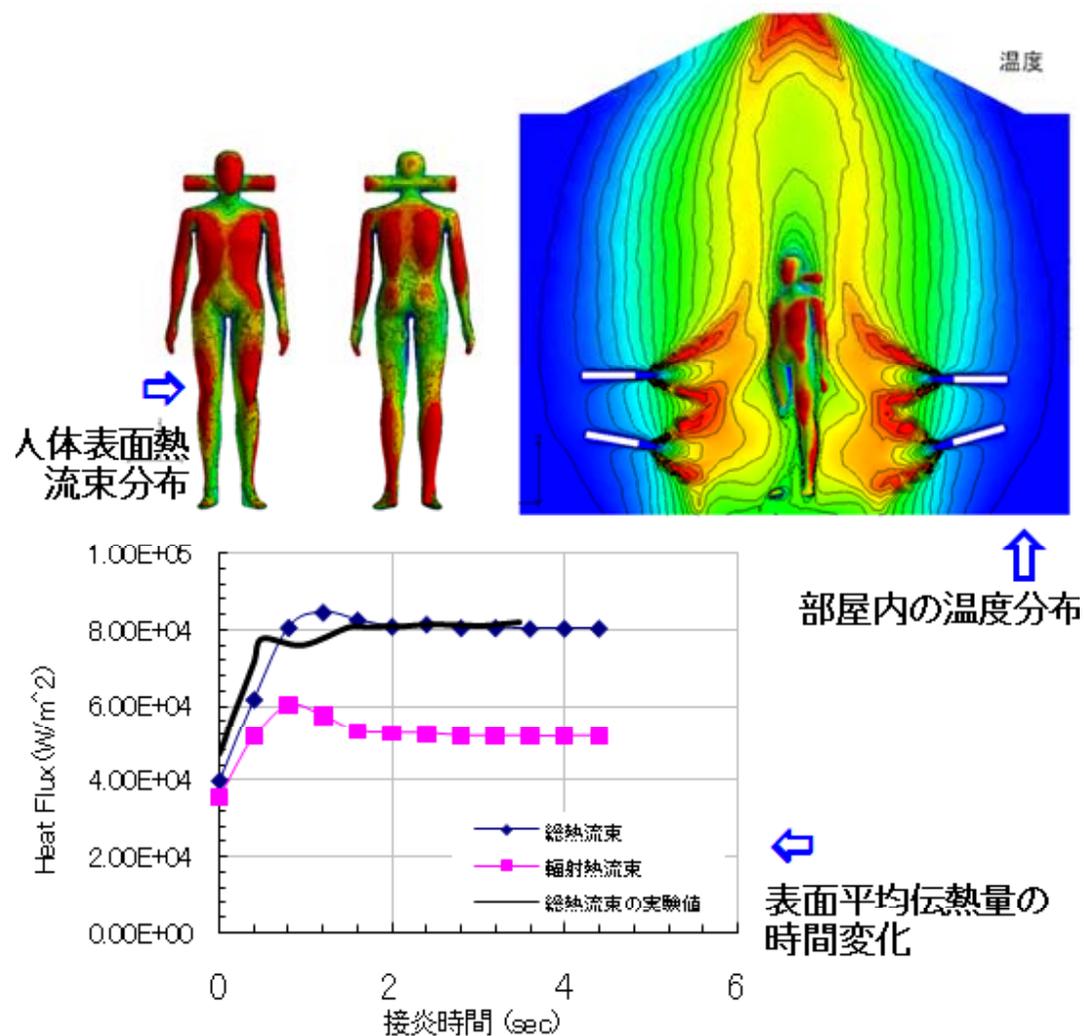
輻射解析の事例

■ 目的 防火服の耐熱性能の予測



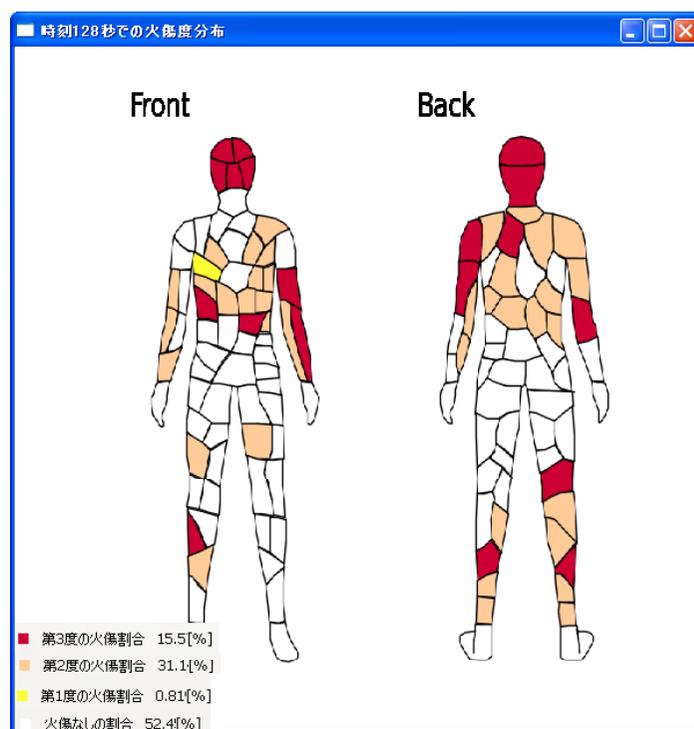
輻射解析の事例

■ 表面平均伝流束の解析結果と実験結果の比較

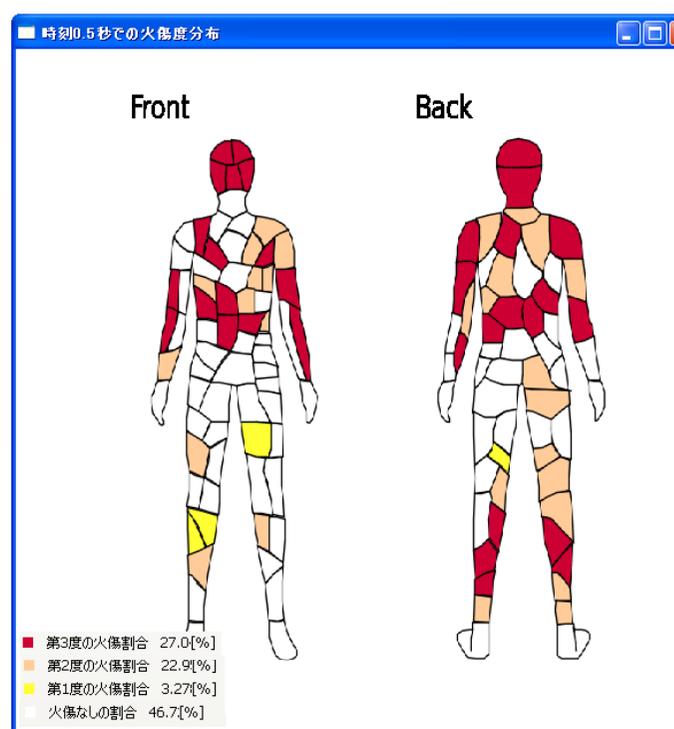


■ 火傷度の解析結果と実験結果の比較

解析結果



実験結果



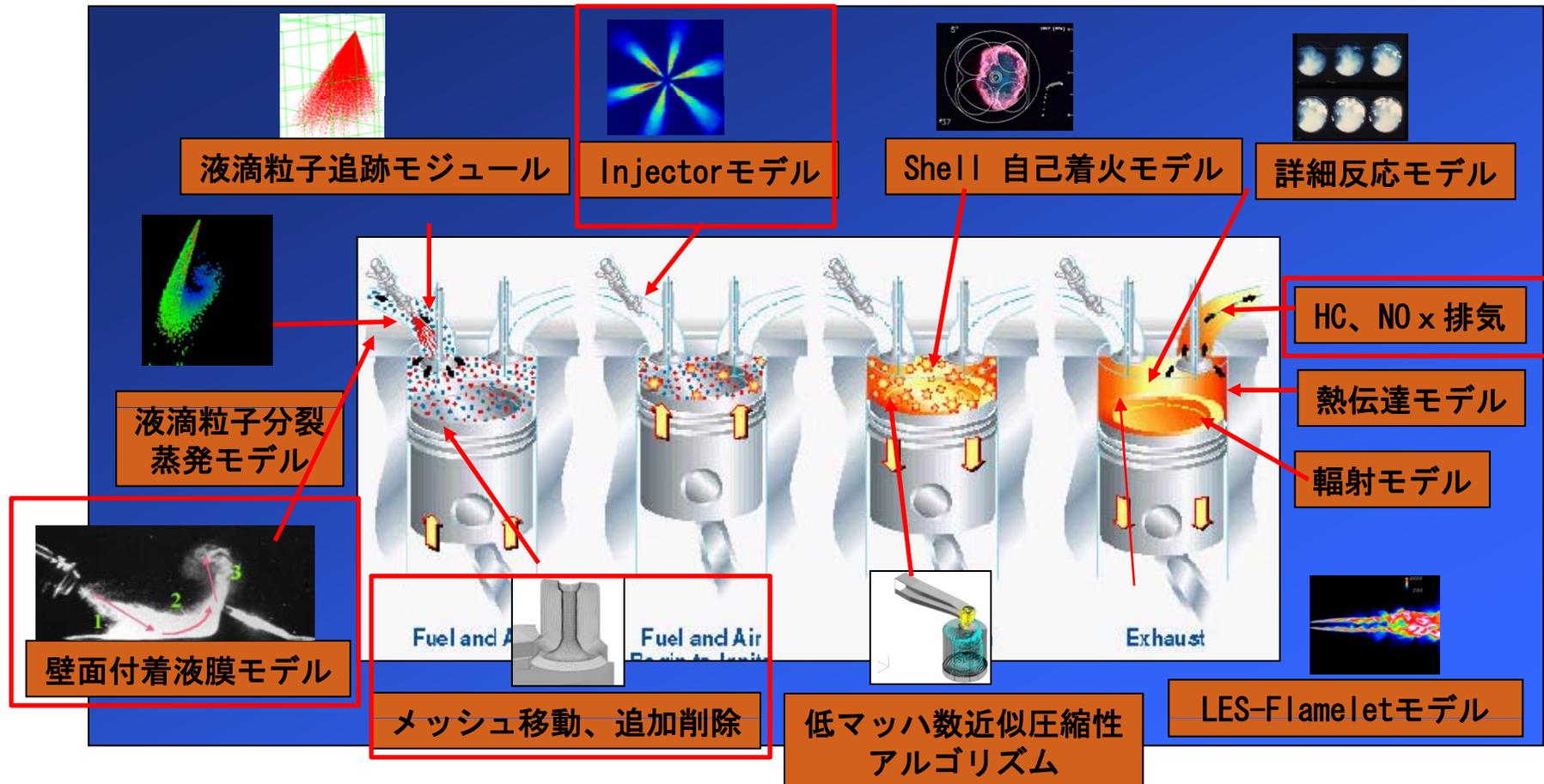
122センサーの位置当たりの火傷度分布（着衣状態）
（接炎時間8秒、放置時間120秒後）

- ・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。

Advance/FrontFlow/red 開発計画

| 大項目 | 中項目 | 2009年度 | | 2010年度 | | | | 2011年度 | | | | |
|---------|---------------------|--------|---|--------|---|--|--|--------|--|--|--|--|
| | | 済 | | | | | | | | | | |
| LESモデル | DESモデル | 済 | | | | | | | | | | |
| | k- ω モデル | 済 | | | | | | | | | | |
| RANSモデル | SSTモデル | 済 | | | | | | | | | | |
| | ISAT機能 (燃焼計算高速化) | | | → | | | | | | | | |
| 燃焼関係 | NO _x モデル | | | → | | | | | | | | |
| | Sootモデル | | | | → | | | | | | | |
| | 分裂モデル | | → | | | | | | | | | |
| 粒子追跡法 | 液膜モデル | | | → | | | | | | | | |
| | 重合格子 | | → | | | | | | | | | |
| 格子機能強化 | 解適合格子 | | | → | | | | | | | | |
| | AMG | | → | | | | | | | | | |
| 高速化 | ノード内自動並列化 | | → | | | | | | | | | |

エンジンフルサイクルシミュレーション



: 開発予定項目

AdvanceSoft

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」