

# 「FrontFlow/Red開発状況」

北海道大学機械研究科      大島伸行 教授  
電気通信大学                坪倉 誠 助教授  
アドバンスソフト第3技術部      張 会来



# ご紹介内容

---

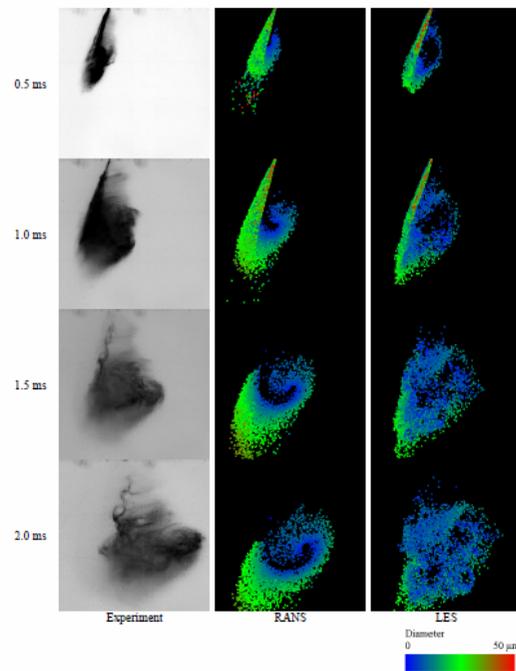
## 革新的基盤プロジェクトにおける

- 1 FrontFlow/red **開発実績（2006年度）**
- 2 FrontFlow/red **リリース計画**
- 3 FrontFlow/red **産業界実用例**
- 4 FrontFlow/red **大規模実証例**  
(電気通信大学 坪倉誠 助教授)

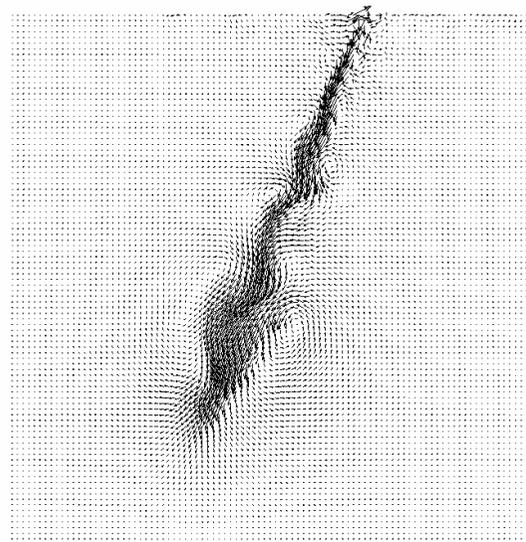
# 1 FrontFlow/red開発実績 ( 2006年度 )

## ■ 開発実績 ( その1 )

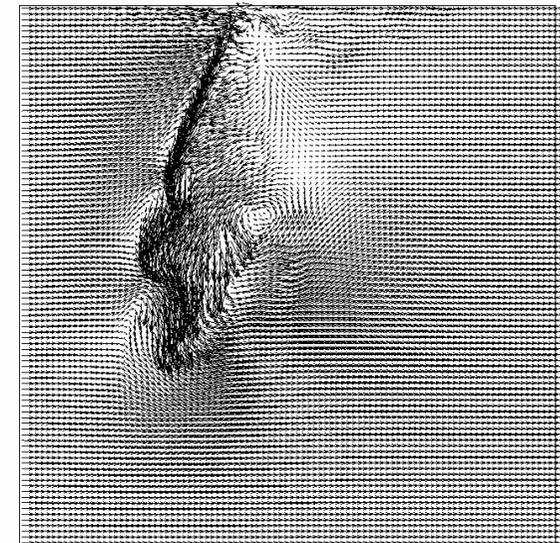
### ラグランジュ粒子追跡モジュール



直噴ガソリンエンジン用スリットノズルの噴霧流れ解析



横風なし  
TWO-WAYモデル、粒子と流れ場の相互作用

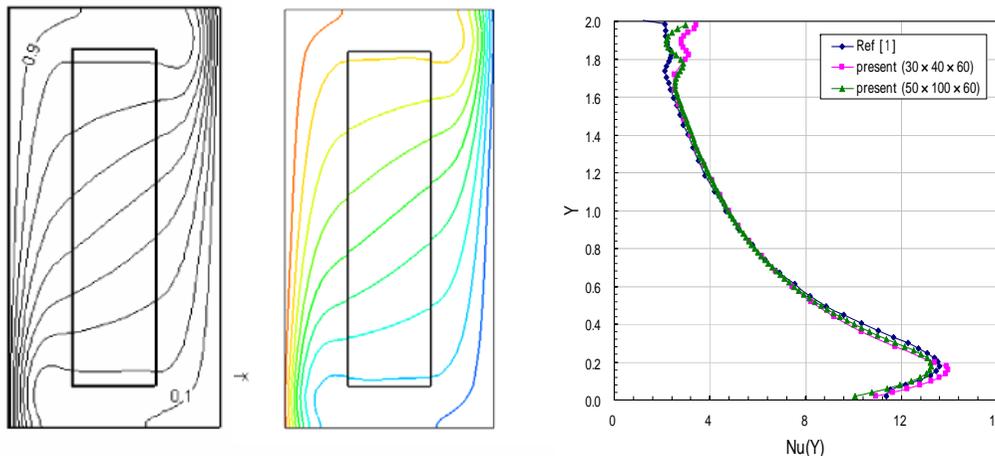


横風なし  
TWO-WAYモデル、粒子と流れ場の相互作用

# 1 FrontFlow/red 開発実績

## ■ 開発実績 (その2)

輻射モジュール: ゾーン法、モンテカルロ法、有限体積法



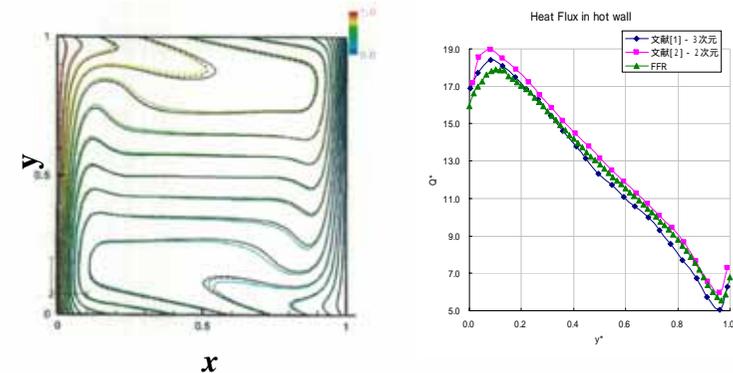
文献[1]

本計算

熱い壁面上でZ方向中央断面のNu分布図 ( $\theta = 0, R_k = 1$ )

[1] Bouali H., Mezrhaba A., Amaoui H., Bouzidi M. Radiation-Natural Convection Heat Transfer in an Inclined Rectangular

[2] Colomer G, Costa M, Consul R, Oliva A, Int. J. Heat Mass Transfer, 47, 257-269, 2004.



熱キャビテ輻射考慮する場合温度分布 (モンテカルロ法)

Z方向中央断面の温度分布図

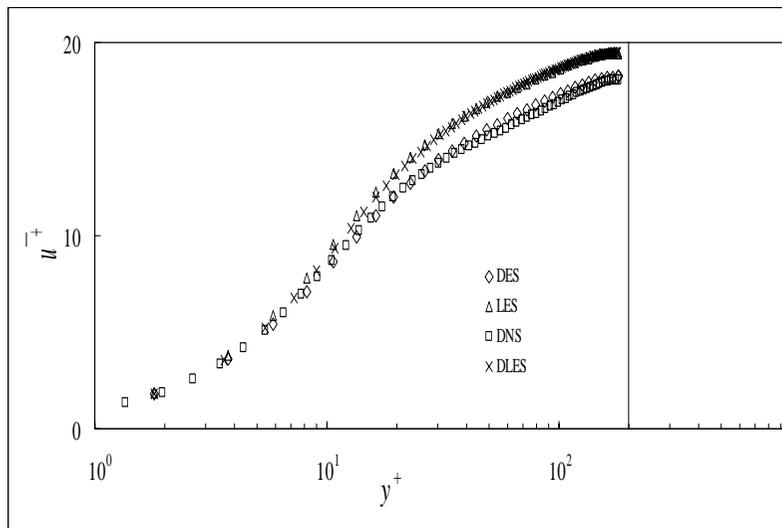
(文献[2]は黒色の実線、文献[3]は点線、本計算はカラーの線)

## 輻射-熱伝導 対流連成解析 (有限体積法)

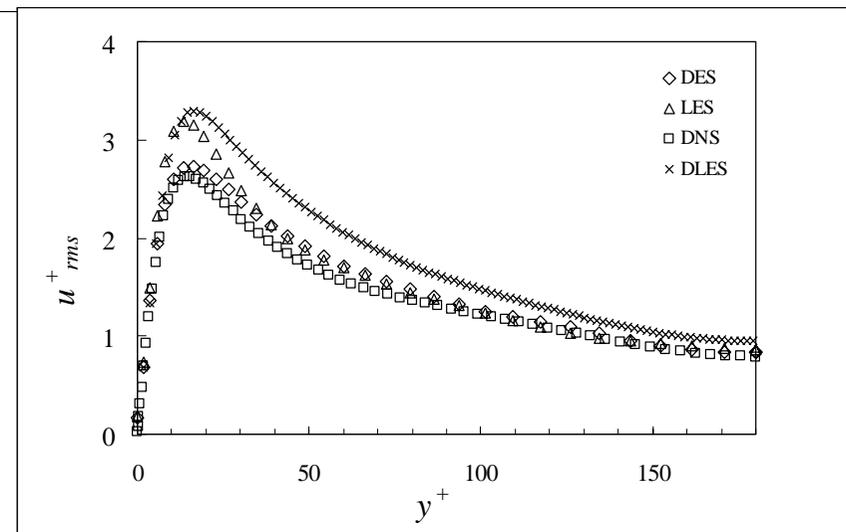
モデル図に示した密閉容器内、物体を放置し、周りは透明性ガスを充填している。左壁面で等温加熱し、右壁面で等温冷却されている。物体の熱伝導率、壁面の放射率および容器傾斜角を考慮し、輻射-熱伝導 熱対流の連成計算を行って、熱伝達効果を評価する。

# 1 FrontFlow/red開発実績

- 開発実績 (その3)
  - Dynamic SGSモデル
  - DES(Detached Eddy Simulation)



チャンネル平均速度



チャンネル速度乱流強度

# 1 FrontFlow/red開発実績

## ■ 開発実績(その4)

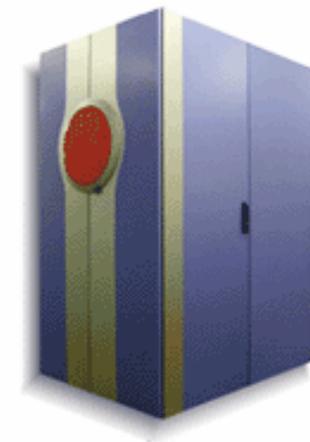
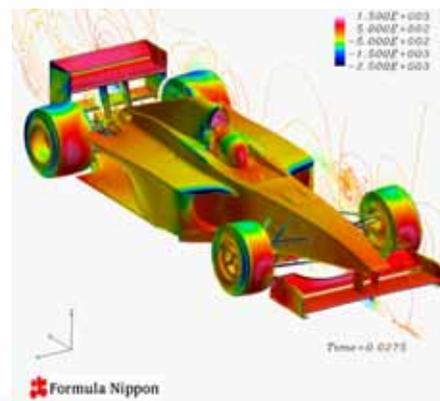
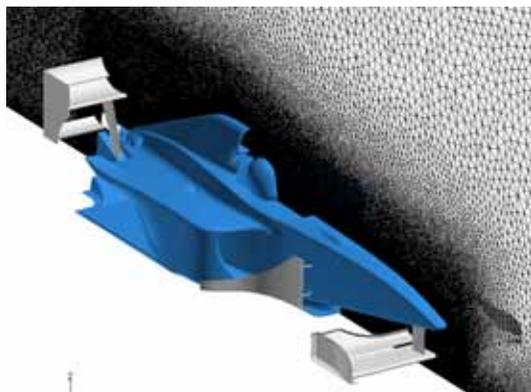
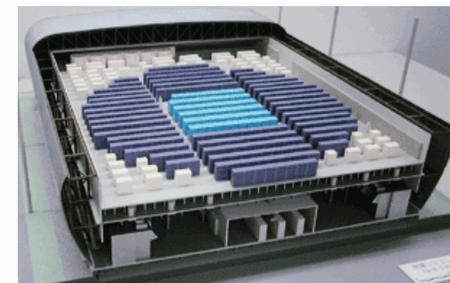
- 地球シミュレータを向けベクトル化チューニング(大規模)
  - 流れ場、温度場、化学種輸送、輻射モジュール

### • Calculation Computer Resource, Statistics

Hardware : Earth Simulator (SX-8)  
 nodes : 100(800CPU<sup>1</sup>ノード化率 96.40%、並列化率 99.88%)

### • Grids

type : tetrahedron  
 elements: 120million(117,060,909)

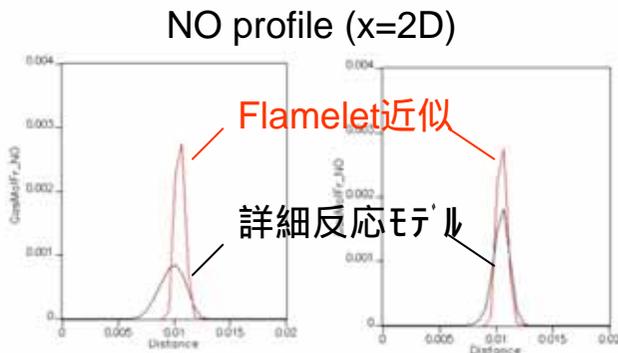
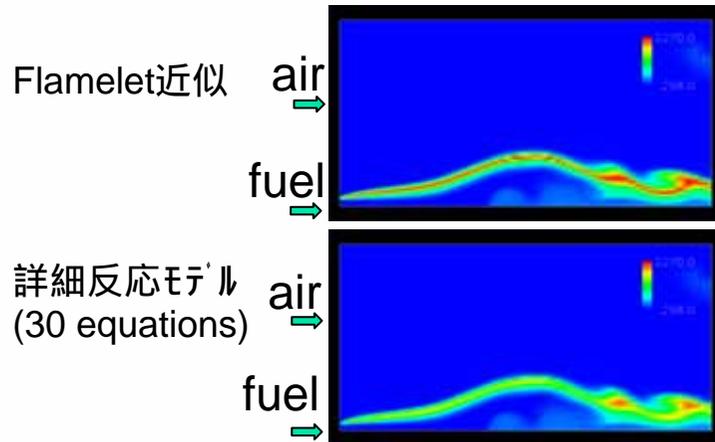


SX8ベクトル計算機

ご協力: (株)日本レースプロモーション、Lola Cars International Ltd.(英LOLA社)、(株)ルマン、(株)エムワイジー

# 1 FrontFlow/red 開発実績 (2006年度) - 応用技術 -

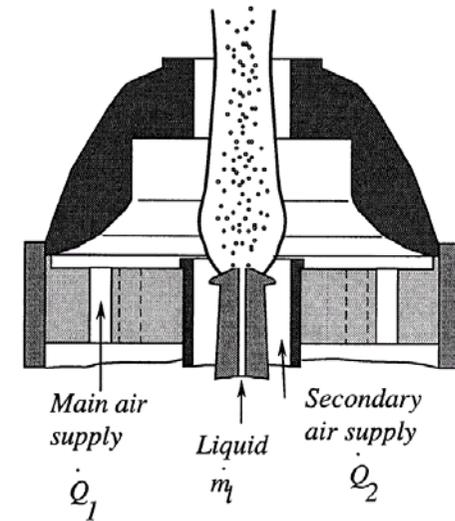
詳細素反応による炭化水素燃料の  
非定常火炎解析 (NO生成予測)



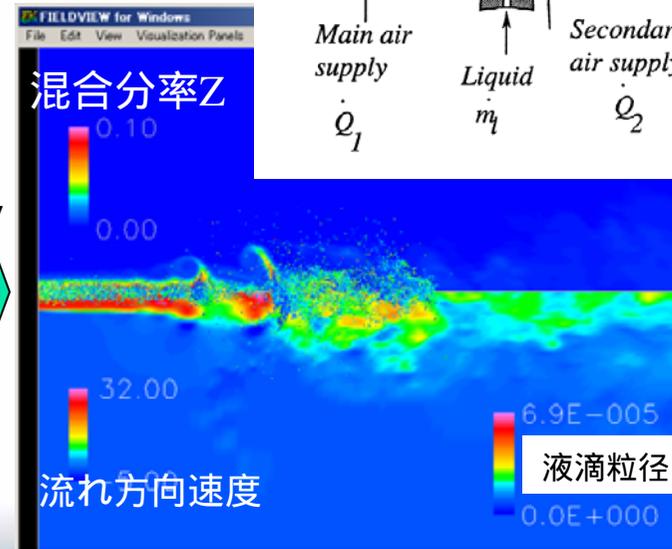
30equations 113equations

噴霧燃焼LES解析

Re=2500  
Ethanol



Spray



## 2 FrontFlow/redリリース計画

- 2007年6月公開版リリース新規機能
  - LES - FLAMLET 燃焼モデル
  - 粒子追跡モジュール
  - DES & Dynamic SGS モデル
  - 熱、化学種を含むベクトル化モジュール(地球シミュレータ)
  - 輻射モジュール

## 2 FrontFlow/redリリース計画(既存機能)

項目	Advance/FrontFlow/redの機能
解析機能	<p><b>基本機能：</b>            定常 / 非定常 / 非圧縮性 / 圧縮性 / 低Mach数近似 / 強制対流 / 自然対流 / 固体-流体間の熱伝導（固体内部の複数材質を含む） / 複数流体間の熱伝導</p> <p><b>乱流モデル：</b>            LES：標準Smagorinskyモデル / Dynamic SGSモデル / DESモデル / DNS /            RANS：高レイノルズ数標準 k- モデル / 低レイノルズ数 k- モデル / 高レイノルズ RNG k- モデル / 高レイノルズ CHEN k- モデル / 応力方程式モデル（RSM） / 渦粘性一定</p> <p><b>ガス燃焼・化学反応モデル：</b>            素反応（逆反応、圧力依存、第3体など含む、非整数化学量論係数、任意反応指数） / 渦消散 / 総括反応（スス生成含む） / ユーザー定義反応モデル</p> <p><b>熱物性：</b>            定圧比熱、エンタルピー、エントロピーと自由ギフトエネルギーの多項式表現（JANAFテーブルあるいはChemkinデータベースの係数入力と自動読込）</p> <p><b>輸送物性：</b>            SmookeとSutherlandモデル化した粘性係数 / 熱伝導率 / 拡散係数、</p>



## 2 FrontFlow/redリリース計画(既存機能)

項目	Advance/FrontFlow/redの機能
メッシュ形状	6面体(ヘキサ) / 4面体(テトラ) / 3角柱(プリズム) / 4角錐(ピラミッド) / これらメッシュの混合
メッシュ機能	マルチフレーム / スライディングメッシュ機能 / 不連続周期、不連続ドライバー、不連続スライディング界面、
離散化	有限体積法 / 節点中心法
アルゴリズム	SMAC法(Fractional-Step法) / SIMPLE法 / Rhie-Chow法による圧力振動の抑制 / Muzaferijaの手法による拡散項の精度向上
時間積分	Euler陽解法 / Euler陰解法 / 2次精度クランク・ニコルソン法 / 2次精度Adams-Bashforth法 / 3次精度Adams-Moulton法 / 4次精度ルンゲ・クッタ陽解法
移流項の離散化スキーム	1次精度風上差分 / 2次精度風上差分 / 2次精度風上差分+リミタ(TVD法) / 2次精度中心差分 / 3次精度風上差分+リミタ(TVD法) / 2次上流補間差分法(USI) / 中心差分と1次風上のブレンド法
行列解法	ICCG法(圧力のポアソン方程式) / Bi-CGSTAB法(圧力のポアソン方程式以外) / マトリクスのベクトル化
結果出力	全ての物理量 / 物理量選択可能アニメーション / 非定常統計量(全てスカラー量のRe応力) / 流体力6成分の時系列 / 任意点任意物理量の時系列



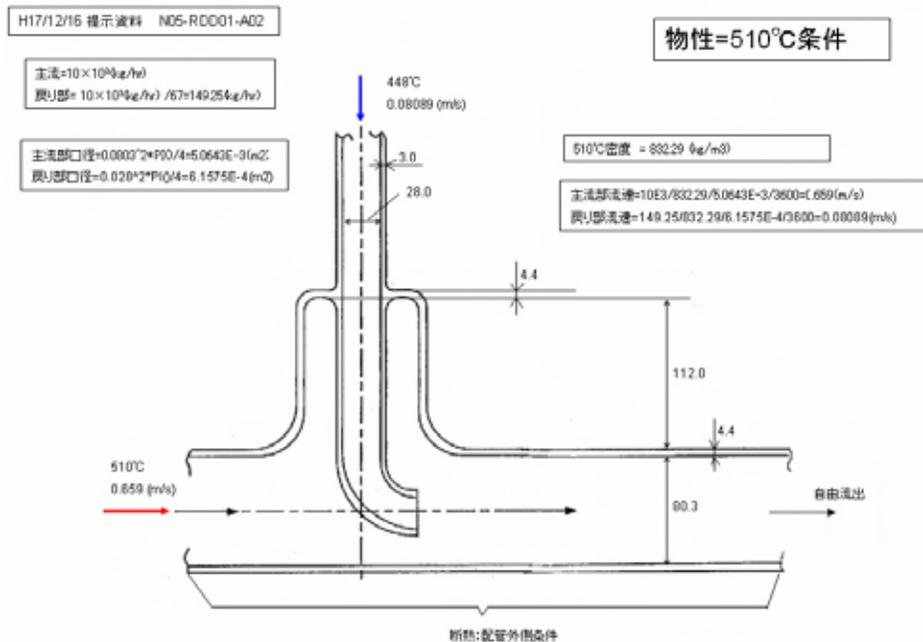
## 2 FrontFlow/redリリース計画(既存機能)

項目	Advance/FrontFlow/redの機能
乱流音	
並列計算	自動領域分割による並列計算、ベクトル化
メッシュ作成	Gridgen等の市販メッシャー
可視化	FIELDVIEW / AVS / MicroAVS / ParaVIEW
ユーザーサブルーチン	初期値 / 流入境界条件 / 壁面 / 質量・運動量・エネルギー・化学種・任意スカラー量のソース項 / 結果出力 / ガスフェーズ反応速度 / 表面熱分解と表面蒸発モデル
BC種類	出入り口：ドライバー、INLET、OUTLET、INJECTOR、静圧、総圧、 壁面：SPODING壁面法則、SLIP、NO-SLIP、熱伝導3種類境界条件、物質3種類境界条件 その他：対称BC境界、周期境界、スライディング境界、壁面反応境界、壁面熱分解境界 <b>構造連成ツール：固体セル/流体セルカプラ出力インターフェース</b>
特殊機能	Flamelet - LES燃焼モデル、粒子追跡法多相流、ふく射
動作環境	OS：IRIX64(Ver. 6.5) / RedHat Linux9 / SGI Advance Linux / Windows XP Professional / Windows2000 / SX-8等 詳細はお問い合わせ下さい。

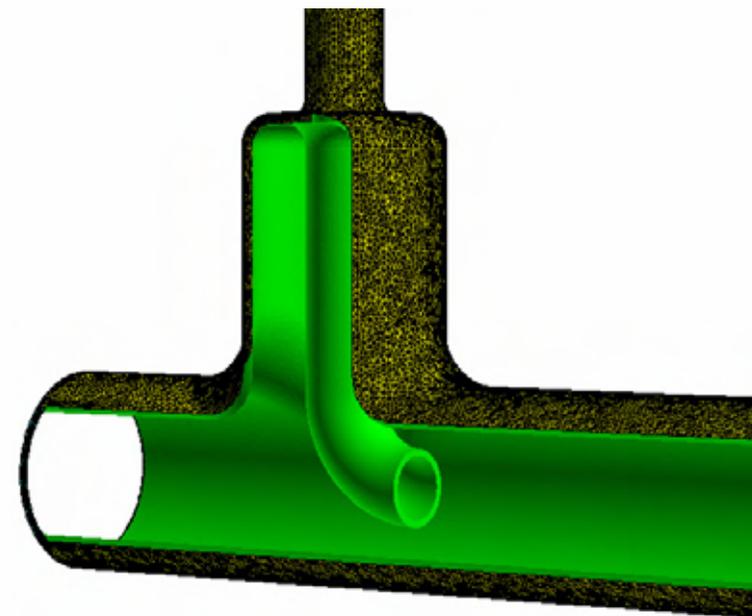


### 3 FrontFlow/red産業界実用例（その1）

- 名称：1次ナトリウム純化系配管混合部を対象として3次元熱解析
- 目的：高速増殖炉のレベル1 PSAにおいて、ナトリウム漏えい発生頻度を設定するためには、流体混合部の流体及び構造材の温度挙動を把握し、バウンダリ破損確率を評価する必要がある

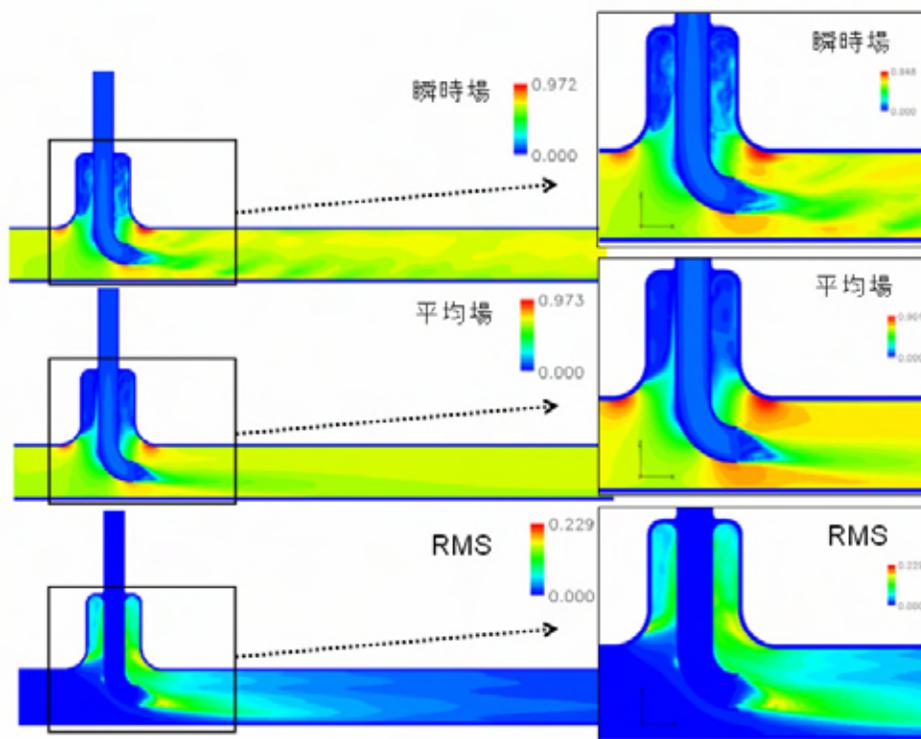


解析条件

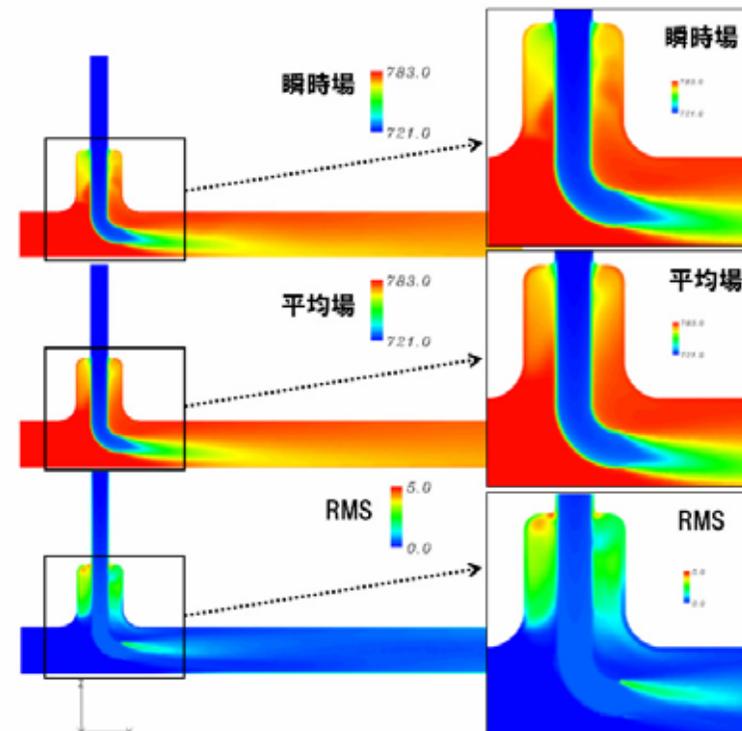


解析メッシュモデル

### 3 FrontFlow/red 産業界実用例 (その1)



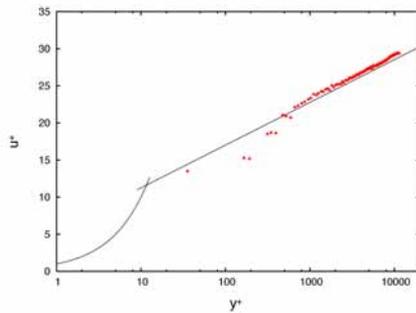
速度分布



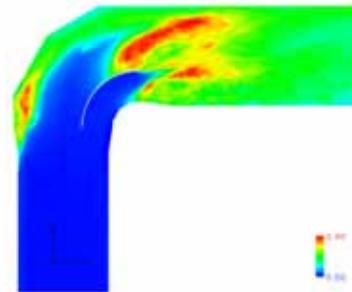
温度分布

### 3 FrontFlow/red 産業界実用例 (その2)

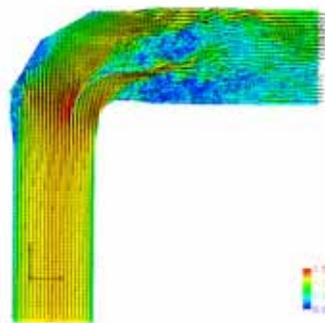
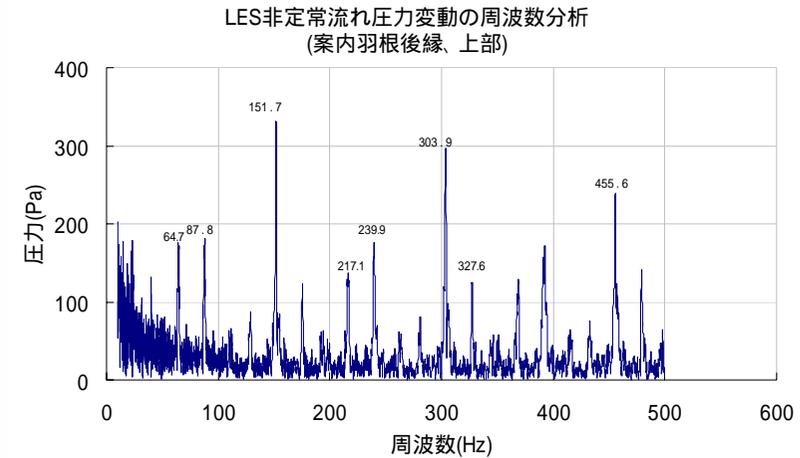
- 名称：案内羽根付き曲がり管における流体-構造連成解析
- 目的：案内板溶接部応力解析



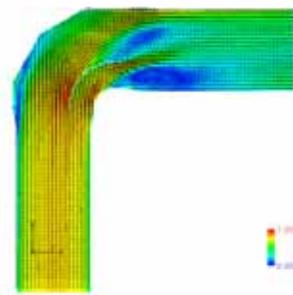
流入ドライバー平均速度



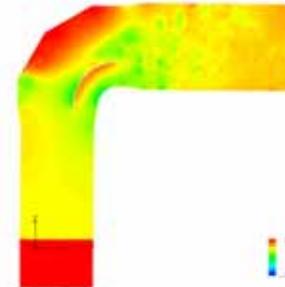
速度変動強度分布  
 $(v_{rms}^2 + w_{rms}^2)^{1/2} / W_0$



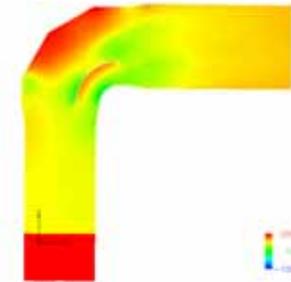
瞬時速度



平均速度



瞬時圧力

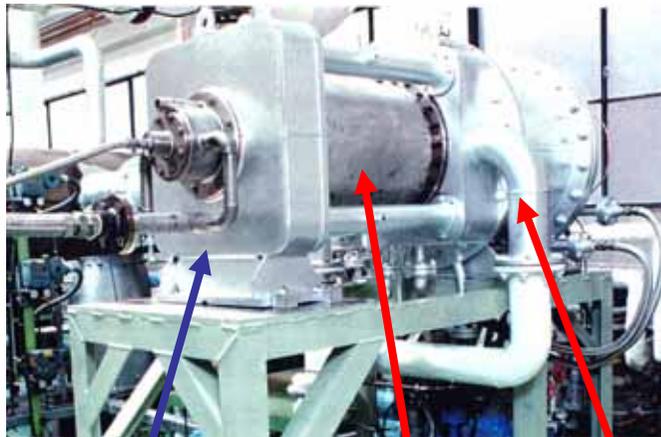


平均圧力

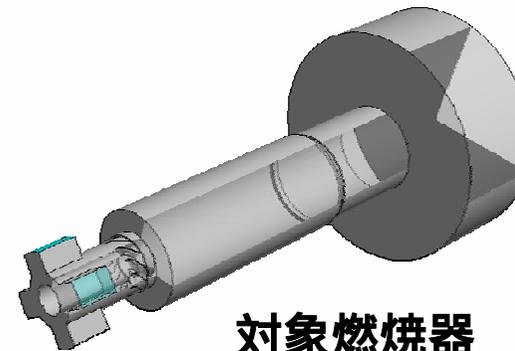
協力：株式会社電業社機械製作所 技術研究所

### 3 FrontFlow/red 産業界実用例 (その3)

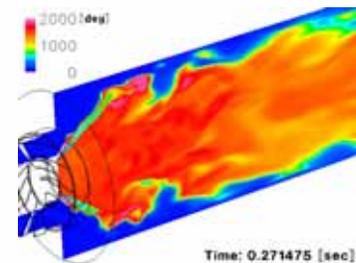
- 名称：ガスタービン燃焼器非定常解析
- 目的：乱流強度による燃焼効率への影響



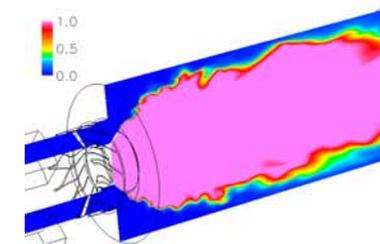
入口チャンバ 燃焼チャンバ 出口チャンバ  
燃焼試験用供試体



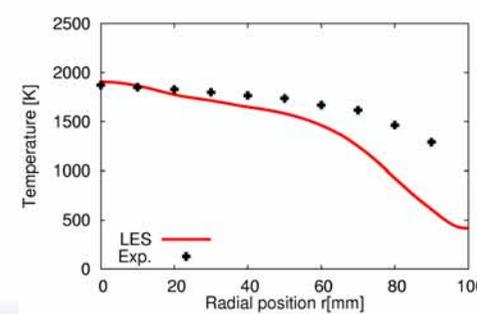
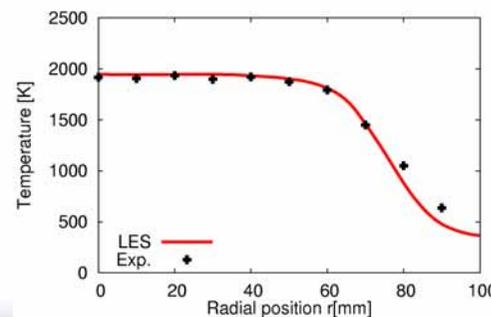
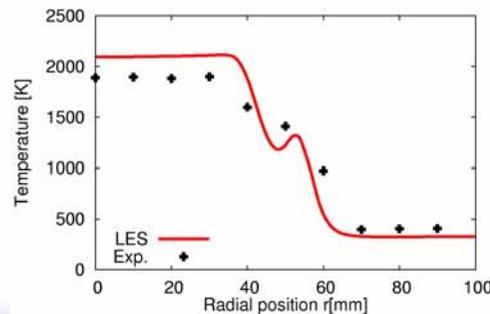
対象燃焼器



温度分布

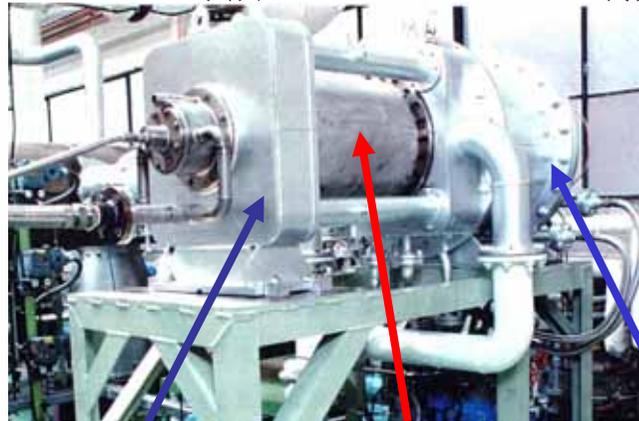


スカラGの分布

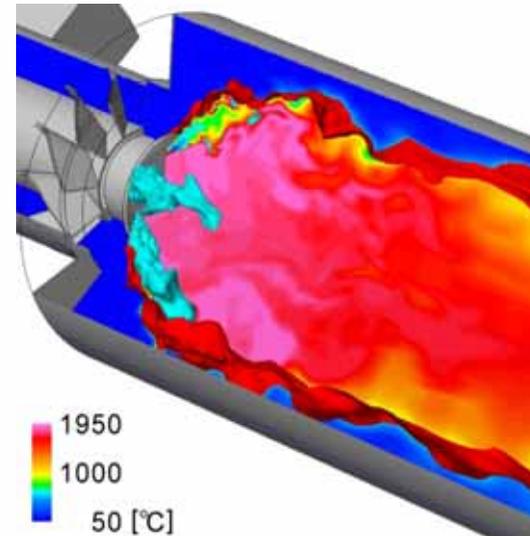


### 3 FrontFlow/red 産業界実用例(その3)

## 1700 級ガスタービン燃焼器設計のための乱流燃焼予測

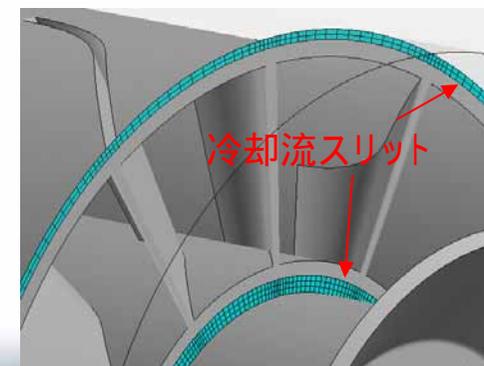
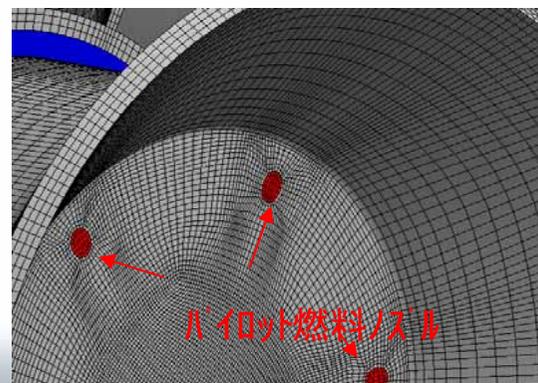
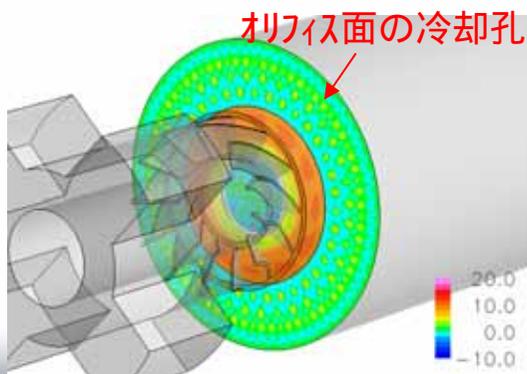


Inlet chamber      Combustion chamber      Outlet chamber  
Test-piece for reacting case



実機詳細形状を再現した  
 希薄予混合乱流火炎の  
 非定常挙動解析に成功

<等値面>  
 水色:パイロット火炎面  
 赤色:予混合火炎面  
 <子午線断面>  
 瞬時温度分布



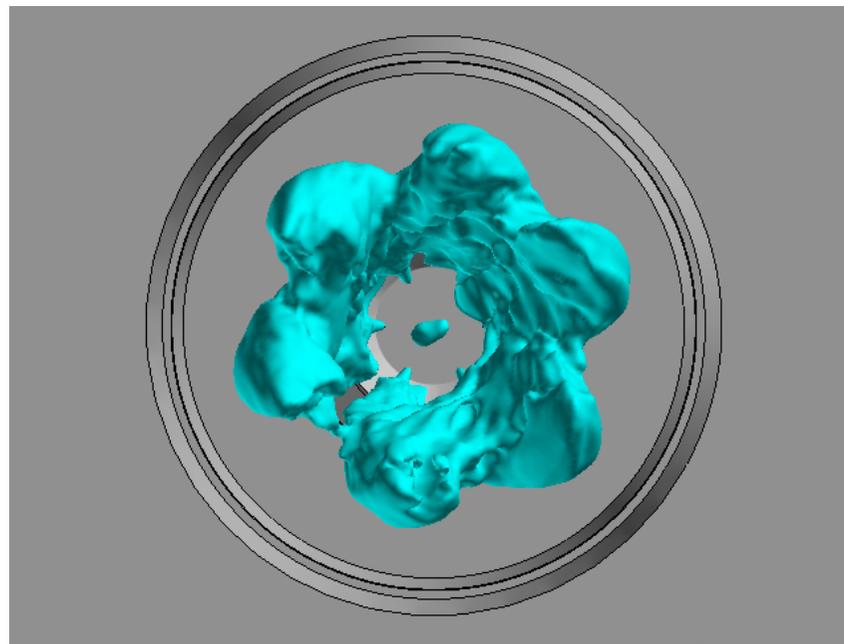
全要素数 : 3,742,368 (非構造型6面体)

### 3 FrontFlow/red 産業界実用例(その3)

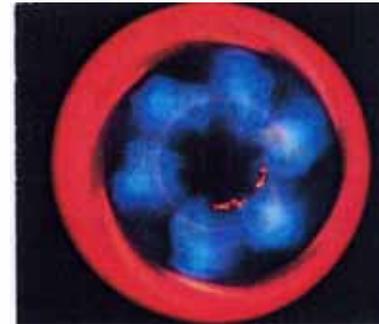
## Flame shapes (LES vs. Visualization)

- Case A

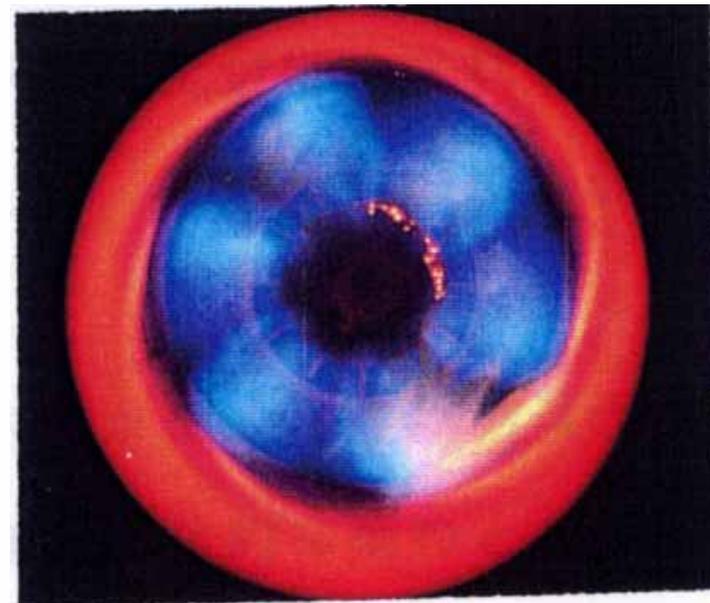
Time-averaged iso-surface  $\xi$



Averaged time: 1/30[sec]



Shutter speed:  
 1/125[sec]

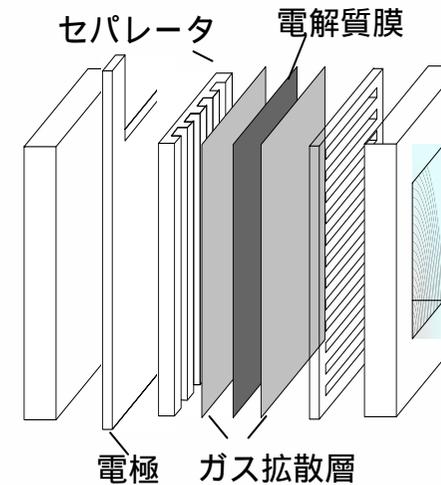
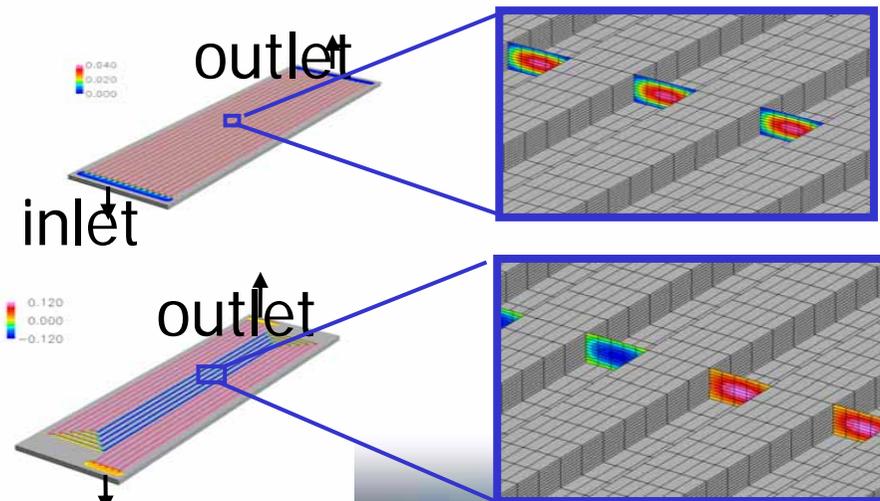
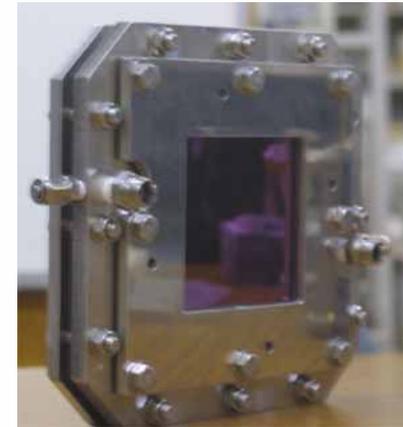
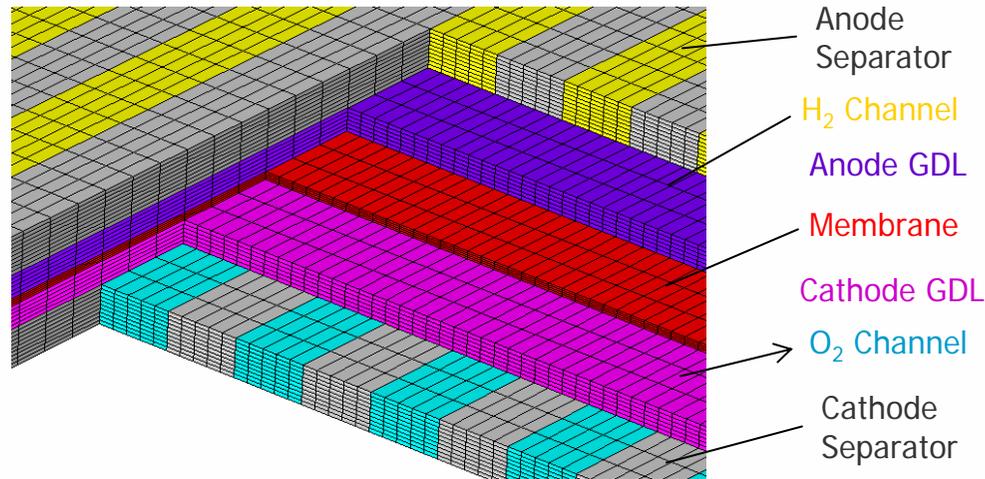


Shutter speed: 1/30[sec]



### 3 FrontFlow/red 産業界実用例 (その4)

#### ■ PEFC 燃料電池の開発



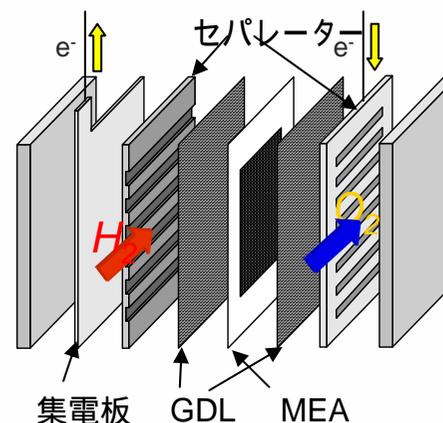
(北大:大島、近久ら) 18

### 3 FrontFlow/red 産業界実用例(その4) つづき

#### FrontFlowによる燃料電池シミュレータ開発

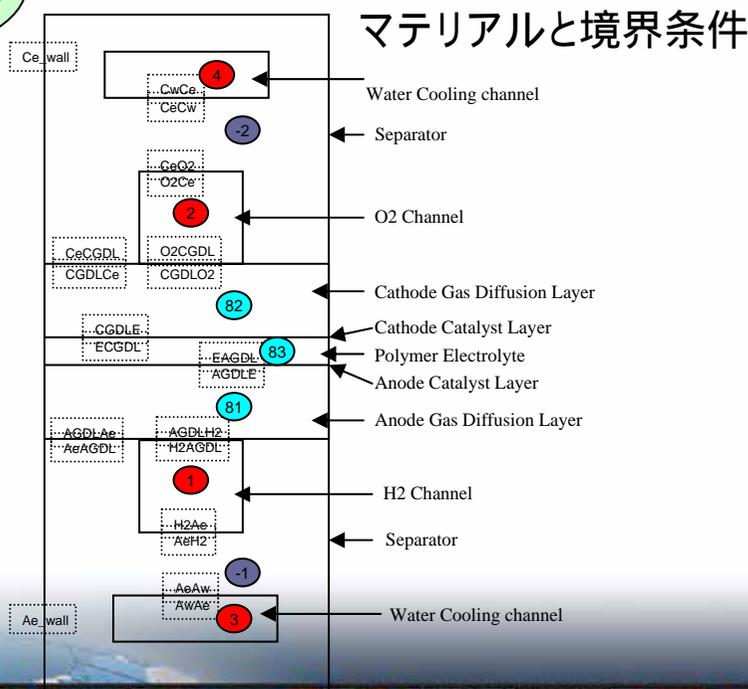
##### FrontFlow+

- 気・液・固体場を含む電場・イオン場のポテンシャル解析
- 触媒層の化学反応、物質交換の解析
- GDL内の物質の移動解析
- (+ 電解質内の物質、イオン分子、電子の移動解析)
- 多孔質内の水分子の凝縮・蒸発モデル



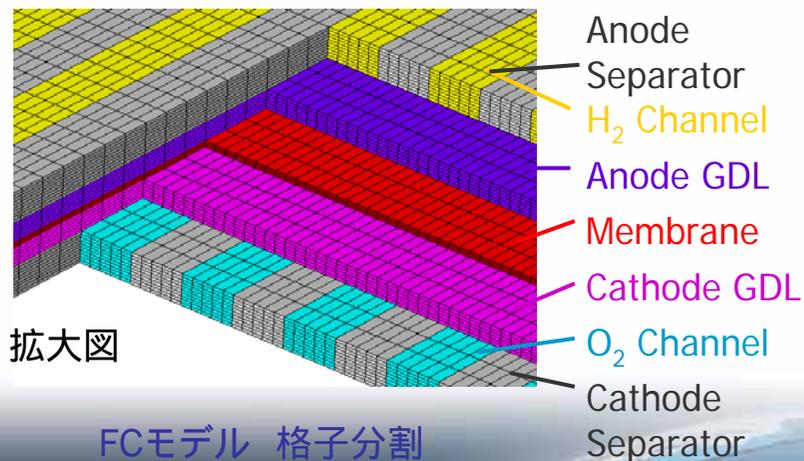
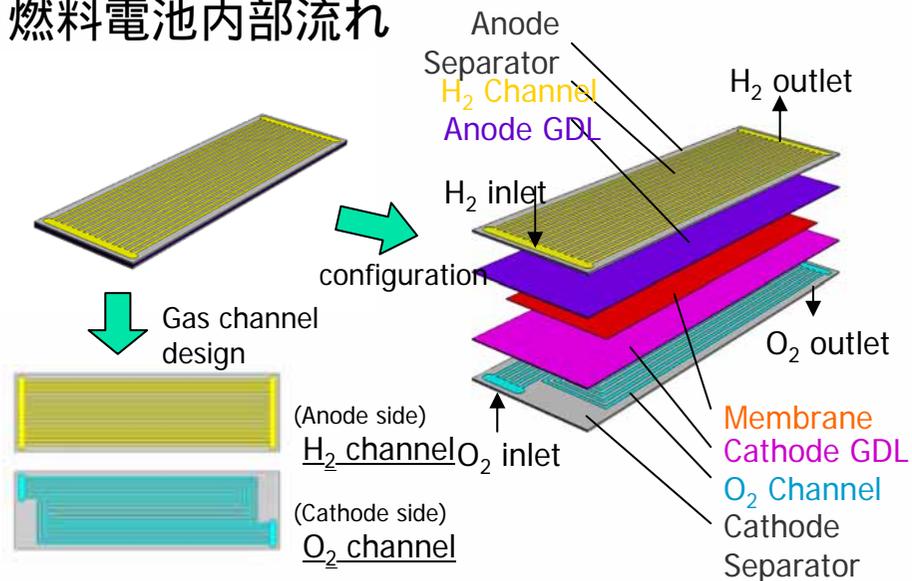
PEFCの  
基本構造

#### FrontFlow for PEFC

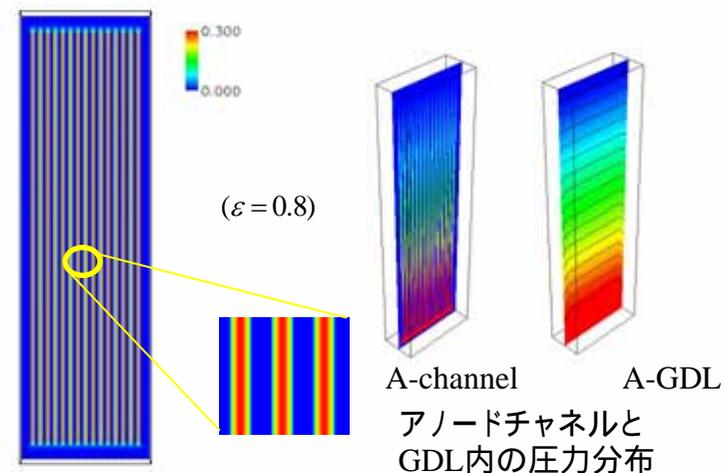


### 3 FrontFlow/red 産業界実用例(その4) つづき

#### 燃料電池内部流れ



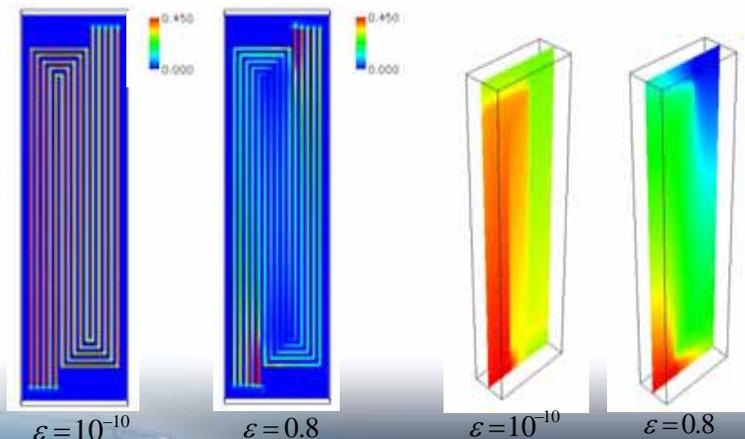
#### アノード流路内の流速・圧力およびGDL内の圧力



チャンネル内流速分布

#### カソード流路の流速分布

#### カソードGDL内圧力分布



## 4 FrontFlow/red **大規模実証例**

# 「FrontFlow/Redによる大規模車両空力解析」

---

電気通信大学

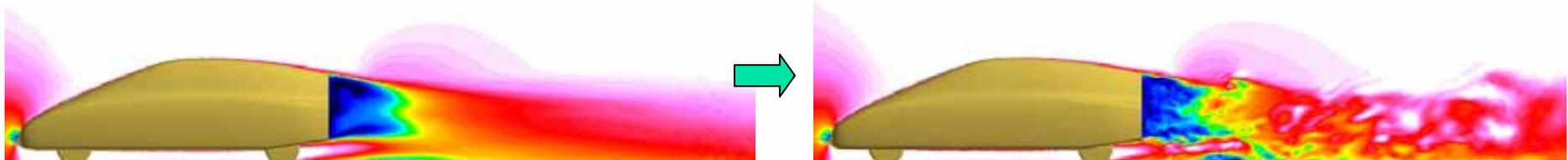
坪倉 誠 助教授

# 定常空力から非定常空力へ

- **意義** ~ 自動車空力設計現場におけるパラダイムシフトの実現 ~
  - **現状**: PCクラスタークラスによる**数百万要素規模定常(レイルス平均)乱流シミュレーション**
    - そこそこの精度でそこそこの役立っている。  
「風洞実験」の付随的役割(最後はやはり「風洞実験」)。
  - **目標**: **億要素規模非定常(LES)乱流解析の実現**
    - 急な横風や姿勢変化、路面凹凸、追い越し等に伴う**非定常空力評価**  
「風洞実験」が担うことのできない**真の空力予測手法**としてのLESの地位の確立  
現状では想定しなかった**非定常空力特性に基づく新たな空力設計指針の提案**

定常RANS

非定常LES



# 億要素LESによる大規模空力解析の実現

## ■ 地球シミュレータ共同利用プロジェクト

- H17「戦略的基盤ソフトウェアの開発」
- H18「戦略的革新シミュレーションソフトウェアの研究開発」

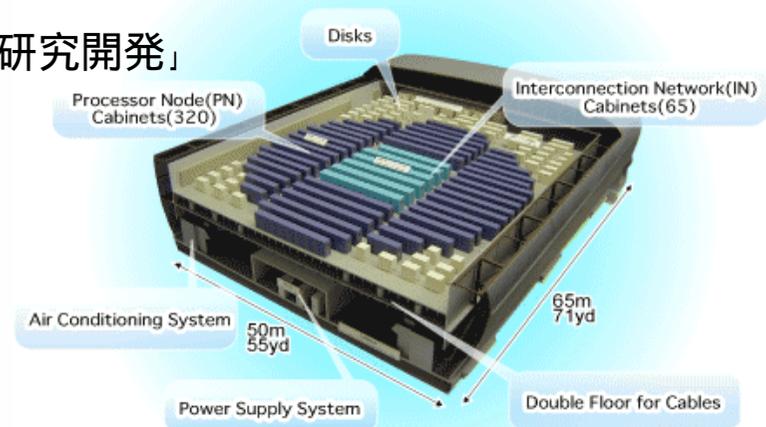
- **フォーミュラカーの非定常空力評価**
- 流体騒音解析
- 大規模産業機械の高精度構造解析
- タンパク質の大規模電子状態解析
- ナノテクノロジー

### ■ チームメンバー

- 大島伸行(北大) 山本誠(東理大) 中島卓司(広大)
- 鬼頭幸三(東大) 朴炳湖(電通大)
- 張会来(アドバンス) 大西慶治(アドバンス) 畝村毅(アドバンス)

### ■ 連携

- 日本レースプロモーション、ルマン、エムワイジー、LOLA



# ASMOモデルによる大規模LESの有用性(1)

## ■ LESとRANSの比較と格子依存性の検討

### ■ 計算条件

- 主流速度: 50.0[m/s]
- 解析領域: 12.2x2.2x1.1[m]

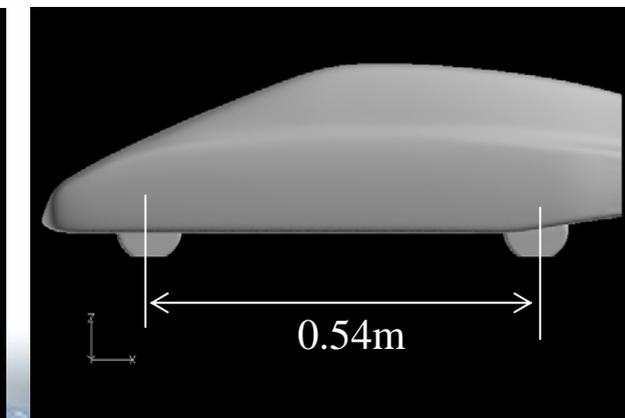
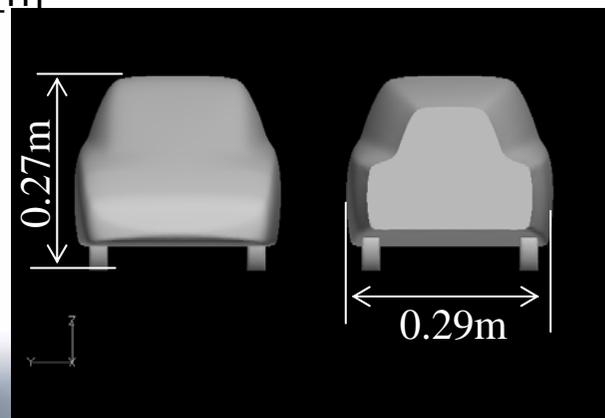
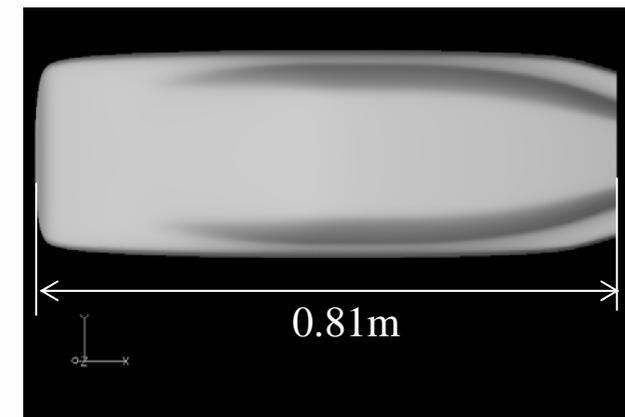
### ■ 解析規模

- 形状: tetrahedron
- メッシュ数: 25million, 5.5million, 1.3million
- 節点数: 4,112,568

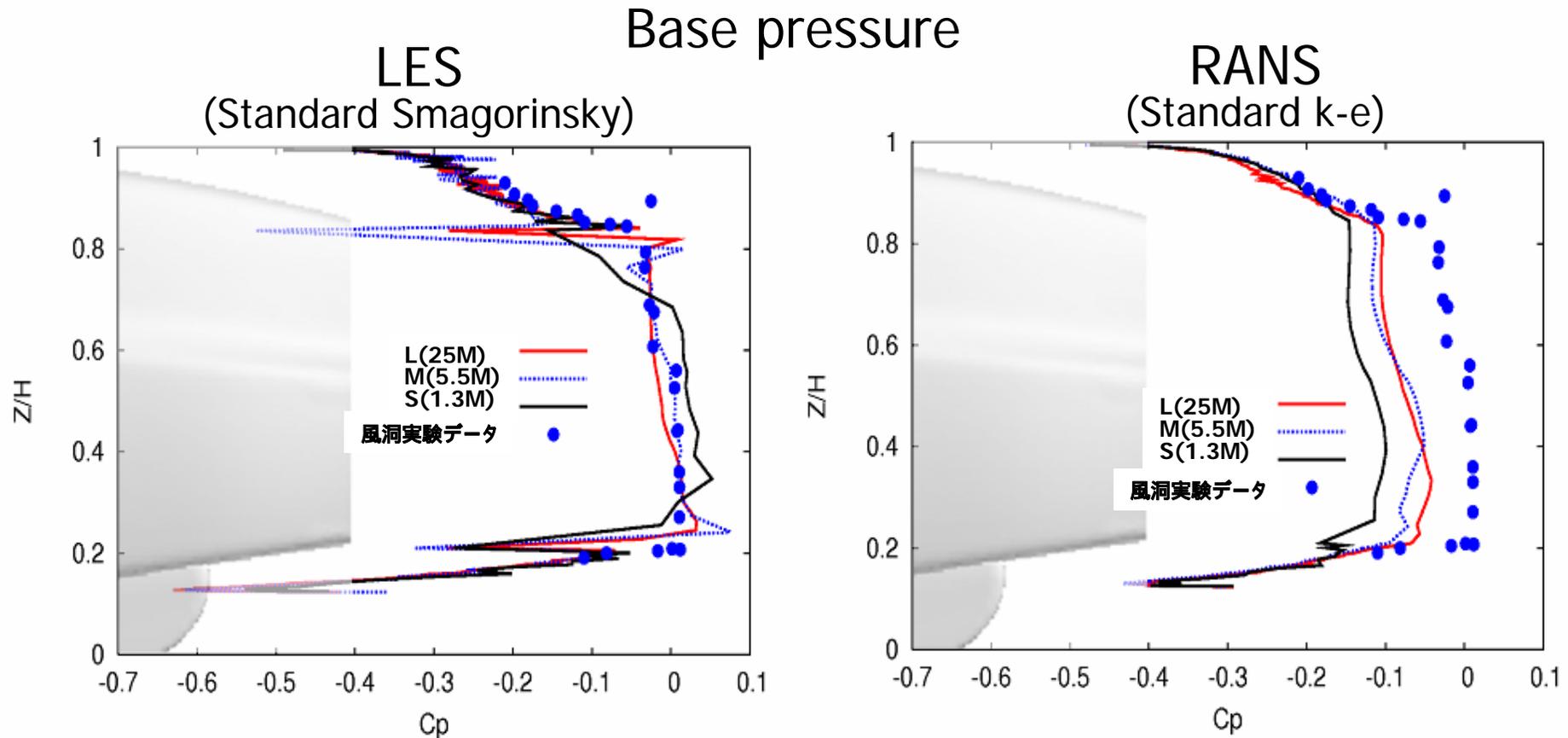
### ■ 計算リソース

- 計算ノード数 : 32(256CPU)
- メモリサイズ : 150GB
- 計算時間: 35.6[h]

1/5 wind tunnel model



## ASMOモデルによる大規模LESの有用性(2)



- LES: ベース圧を良好に再現。
- RANS: 空間解像度に従う収束解が風洞データに一致しない(25M)。

# 本年度の課題 ~ 定常空力評価から非定常空力評価へ ~

- (a) フォーミュラカー実走行時の再現による解析の高精度化
  - 車輪回転、車両・地面の相対速度の考慮による高精度化
  - 風洞実験値との定常空力(揚力・抗力)の定量的比較
  
- (b) 車両非定常挙動に影響を与える車両周り非定常渦構造解析
  - 実験データが豊富な産業界との連携(市販四輪車、レース二輪車)
  - 非構造空力解析の産業界への展開
  
- (c) 動的姿勢変化に対応したソフトの改良
  - スライディングメッシュ機構の導入とESでの最適化
  - 車両ヨー角の動的変化に伴う非定常空力変化の解析

# (a)億要素フォーミュラカー空力の定量的解析(1)

- LOLA B03/51 : 1/2 windtunnel test model

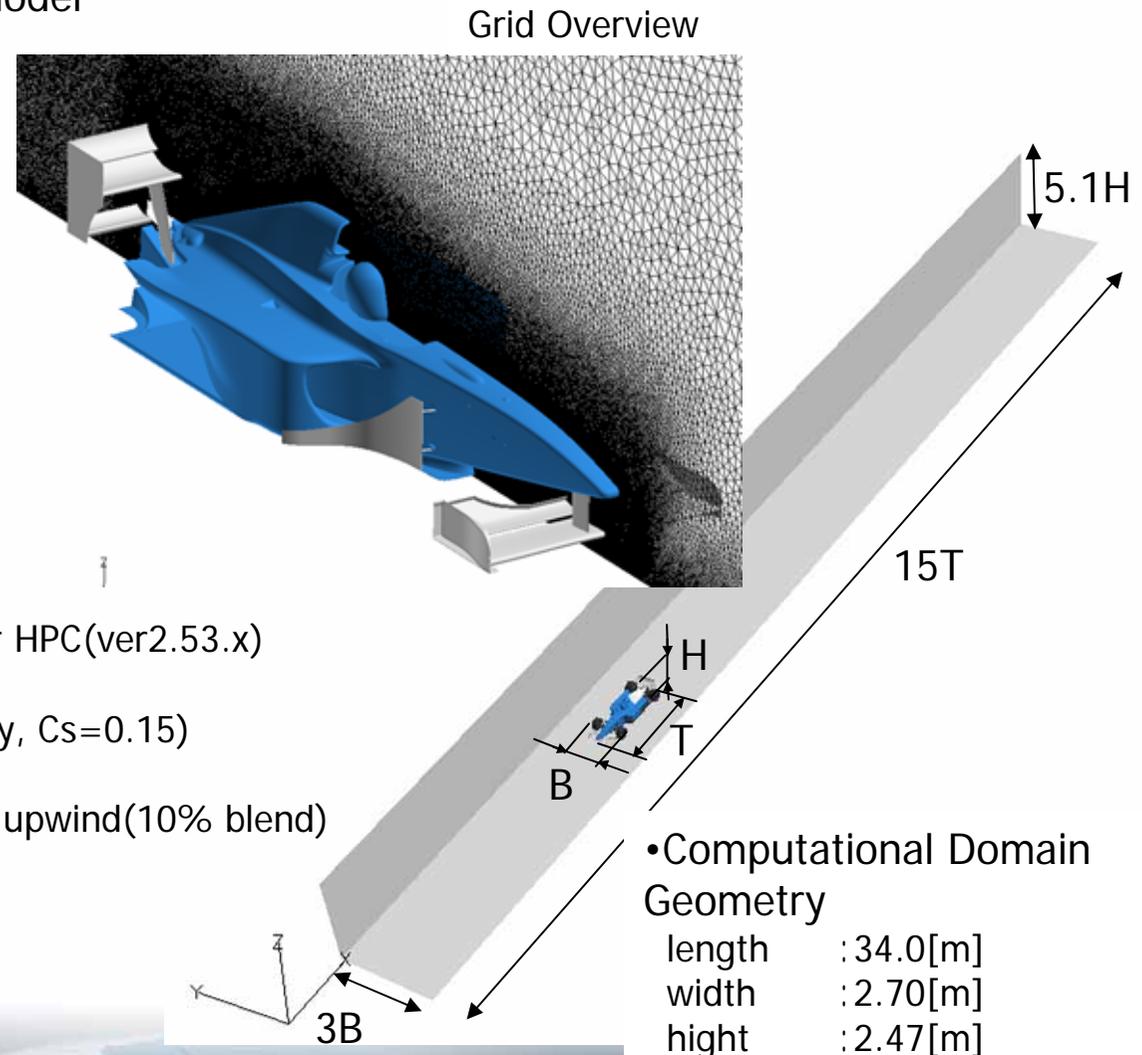
length(T)	: 2.26[m]
width(B)	: 0.89[m]
hight(H)	: 0.48[m]
wheel Base	: 1.50[m]
Front track	: 0.75[m]
Rear track	: 0.69[m]

- Grids

type	: tetrahedron
elements	: 120million(117,060,909)

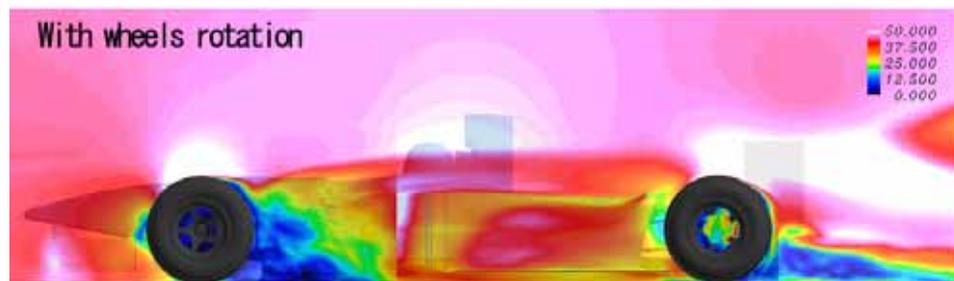
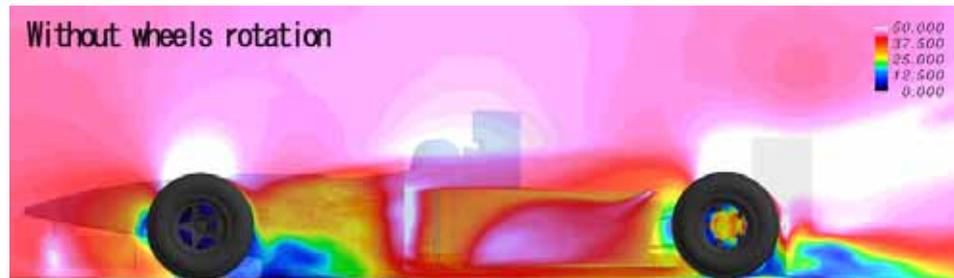
- Conditions

software	: FrontFlowRed for HPC(ver2.53.x)
mean flow velocity	: 45.0[m/s]
turbulence model	: LES (Smagorinsky, Cs=0.15)
convective discretization scheme :	
	2nd order central + 1st order upwind(10% blend)
wall boundary	: log-law



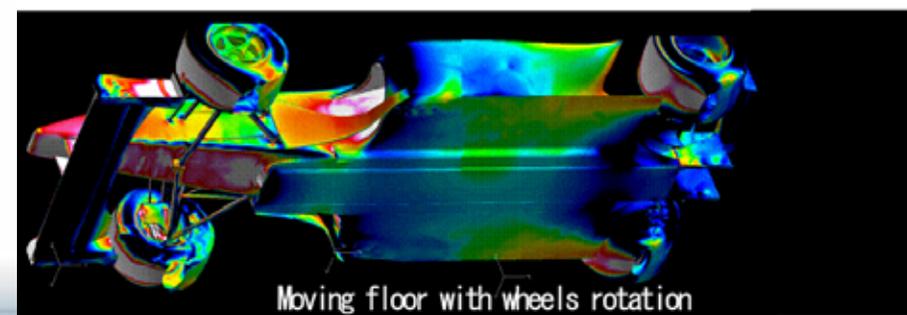
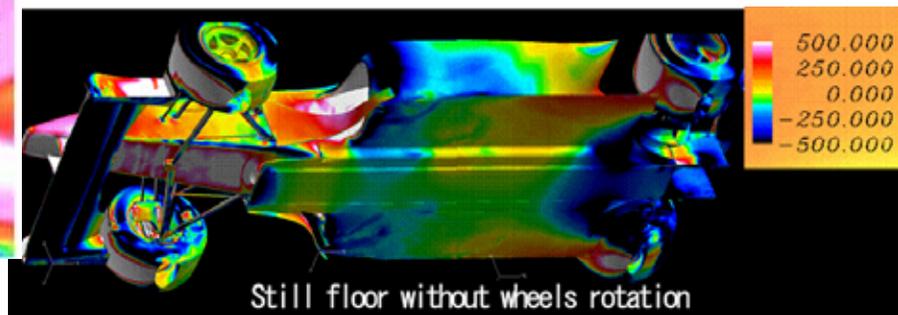
# (a) 億要素フォーミュラカー空力の定量的解析 (2)

- 実車走行時の再現による解析の高精度化



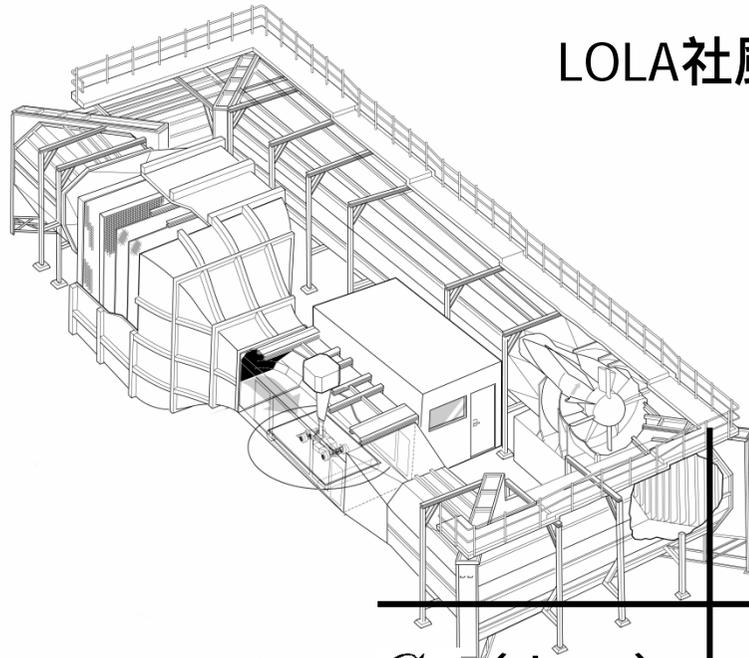
タイヤ回転の影響

## 床・車両相対速度の影響



# (a)億要素フォーミュラカー空力の定量的解析 (3)

LOLA社風洞データとの比較

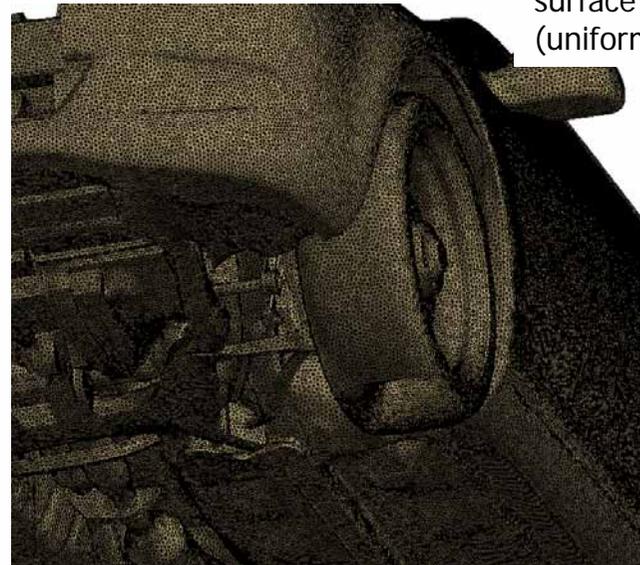
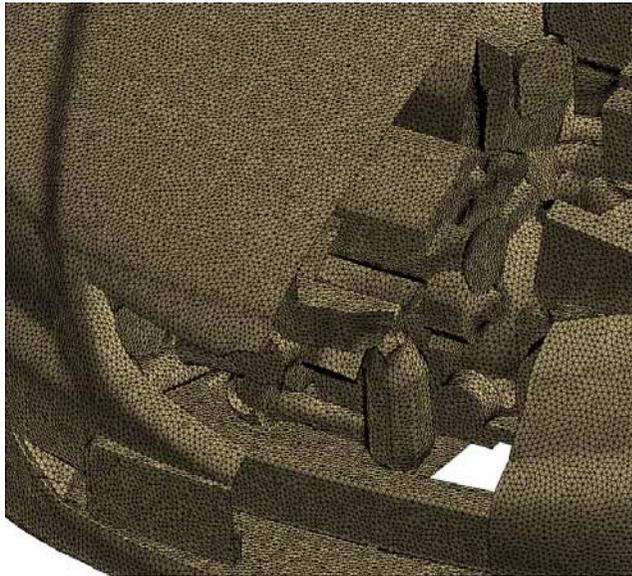


	HPC-LES (present CFD)	Wind tunnel (LOLA Ltd.)
$C_D$ (drag) (Incl. wheels)	1.00	0.91
$C_L$ (lift) (Excl. wheels)	-1.95	-1.93 (High down-force condition)

**数%の誤差で定常空力評価を実現！**

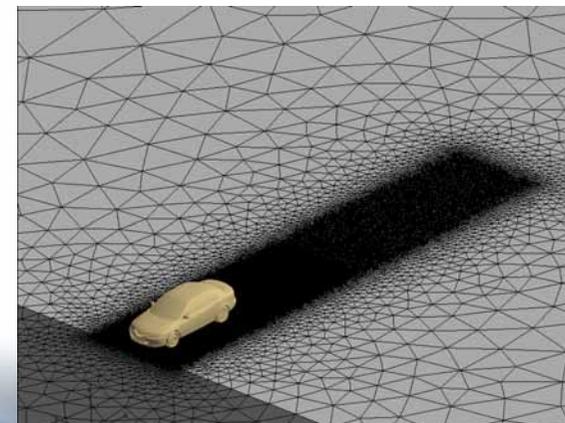
## (b)車両周り非定常渦構造解析(1)

- 市販四輪 (Mazda, Atenza): 1/1 scale model



surface resolution 12 [mm] ~  
 (uniformly redefined)

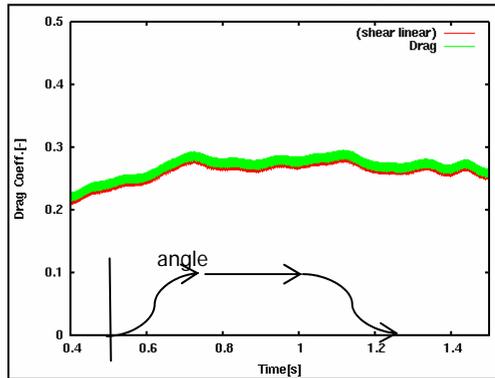
- Grids  
 type : tetrahedron  
 elements: 37,870,527



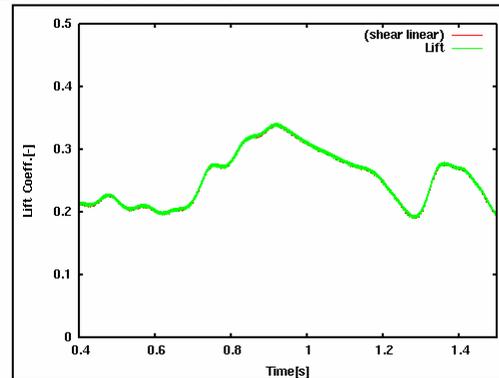
## (c)動的姿勢変化への対応

- スライディングメッシュ機構の導入

ヨー角変化に伴う空力の時系列変化



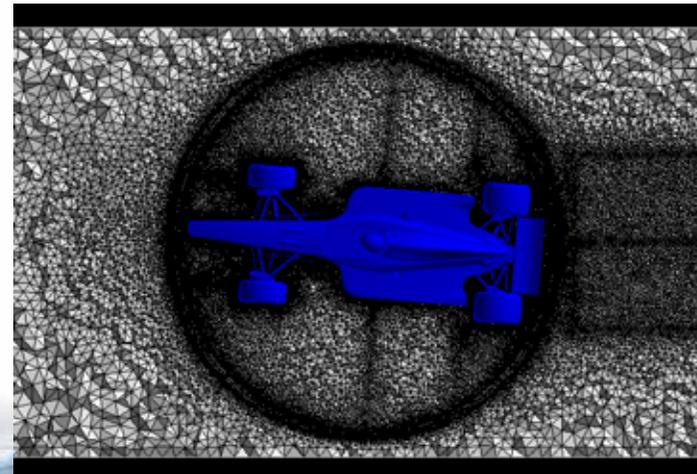
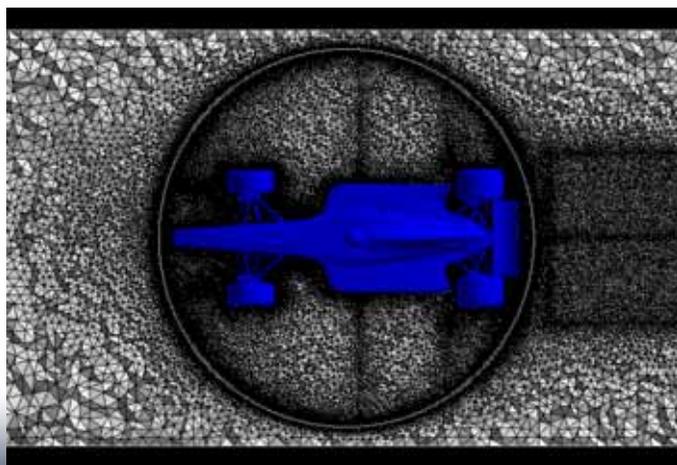
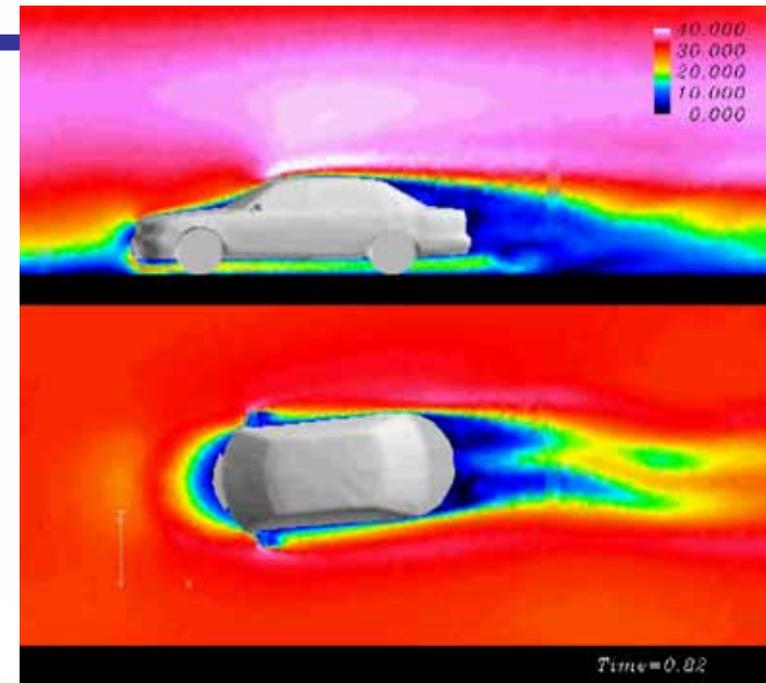
drag



lift

- フォーミュラ解析

(Animation)



## 成果と今後の展望

- FrontFlow/Redによる億要素規模車両空力解析の実現。
- 車両定常走行時を想定したフォーミュラカーの大規模LES解析において、風洞実験データに対して数%の誤差で定常空力を予測。
- 非定常空力評価への展開を目指し、車両周りに発生する非定常渦のLESによる再現性を、市販四輪、レース用二輪車を対象に検討。
- 解析プログラムに車両姿勢変化を扱えるスライディングメッシュ機構を導入し、ヨー角変化に伴う非定常空力を評価。



車両姿勢変化に伴う非定常空力評価と、車両空力連成解析へ