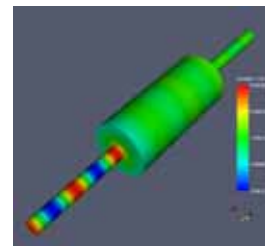
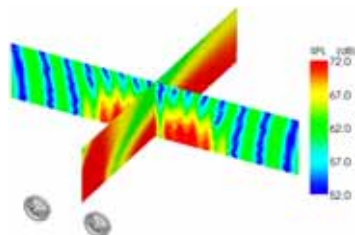


# アドバンスソフト技術セミナー 環境・騒音問題における 流体解析の現状と当社の取組み

2009  
11/19

## セミナー資料



### 開催案内

1. 日 時	2009年11月19日(木) 14:00~15:55
2. 会 場	トスラブ山王(山王健保会館 2F) A+B 会議室
3. テーマ	環境・騒音問題における流体解析の現状と当社の取組み
4. 定 員	80名
5. 参加費	無料

### プログラム

14:00~14:05	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社 常務取締役 三橋 利玄
14:05~14:30	アドバンスソフト株式会社のご紹介 アドバンスソフト株式会社 常務取締役 三橋 利玄
14:30~14:55	騒音問題への取り組み アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主事研究員 桑原 匠史
14:55~15:20	大気環境問題への取り組み アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主事研究員 國島 和
15:20~15:45	流体騒音等の問題に関連した流体解析の現状と当社の取り組み アドバンスソフト株式会社 技術第3部 主任研究員 中森 一郎
15:45~15:55	質疑応答

お問い合わせ:

アドバンスソフト株式会社 営業担当

Tel: 03-5570-1689 E-mail: office@advancesoft.jp URL: <http://www.advancesoft.jp>



## アドバンスソフト技術セミナー 環境・騒音問題における流体解析の現状と当社の取り組み

### 騒音問題への取り組み

アドバンスソフト株式会社  
技術第3部 主事研究員  
桑原 匠史

# 1.

## 騒音問題

- 1960年代に騒音が問題となり始める

音源は、工場、事業所、建設現場、自動車や航空機

- 多様な騒音発生源に対する規制

1967年 「公害対策基本法」

1968年 「騒音規正法」

1993年 「環境基本法」

- 日常生活における騒音の大別

1. 自動車 & オートバイによる騒音
2. 鉄道による騒音
3. 航空機による騒音

各々の分野で環境基準を  
満たす努力が日々行われ  
ている。

その他: 低周波音(1Hz ~ 100Hz)による騒音

送風機、風車、ボイラー、ポンプ等が音源で、睡眠不足やイライラといった  
心理的、生理的影響を及ぼす



# 自動車等に関する騒音規制

## ■ 自動車等のマフラー(消音器)に対する騒音対策の強化

平成20年12月26日公布

### 概要

- 騒音低減機構を容易に除去することができる構造の禁止
- 使用過程車及び並行輸入車等のマフラーに対する加速走行騒音防止性能の義務付け
- 交換用マフラー事前認証制度の創設  
性能等確認済みマーク



- 騒音試験法の一部見直し等



規制は厳しくなる方向にある



3

# 騒音の有効利用？

## ■ 高周波音(モスキート音)の利用

- 高周波数の音は、年齢とともに次第に聞き取りにくくなる。  
(概ね30歳以上になると聞こえなくなる)
- 聞こえる若者にとっては、耳障り。



17kHz程度の高周波の不快感(モスキート音)を流して、深夜の公園で若者達が集まり、騒ぐのを防ぐ。(5月より東京・足立区が実験を開始)効果は今のところ不明。。。。

ご自分の耳の若さ？を試されたい方は。。

可聴周波数域チェック

<http://masudayoshihiro.jp/software/mamimi.php>



4

# 音を使って酒造り

## ■ 超音波の利用

基本的には加湿器と同じ原理で、超音波を原酒に当てて出来る霧を集めてアルコール度を上げて(蒸留と同じ効果)お酒を造る。



霧造り生  
(株式会社本家松浦酒造場)



この技術は、色々な液体の蒸留に使える

例: バイオエタノールの精製

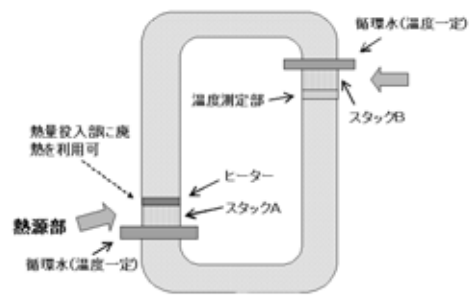
精製には蒸留技術が用いられ、蒸留塔の稼動には重油を燃焼しており、エネルギー効率的にはあまり良くなかったが、この技術を使えば、従来よりも効率良く精製が可能



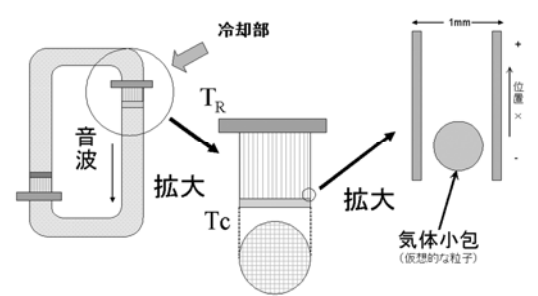
# 音で冷却？

## ■ 熱音響冷却

工場等の廃熱を用いて冷却を行うシステムで、最近、ニュースやサイエンス番組にて取り上げられ話題となっている。



システム概略図



冷却部拡大図

熱音響冷却システムの冷却部における作業流体とスタック間の熱交換についての数理モデル  
富樫藻萌子、坂本真一、近藤弘一(同志社大学)  
(応用力学研究所研究集会報告No.16ME-S1, Article No.31)

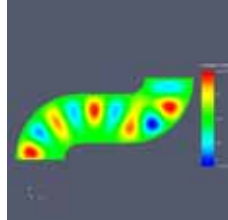


# アドバンスソフトの騒音問題への取り組み

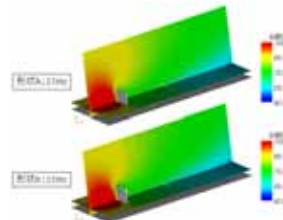
## ■ 大学との連携によるソフト(Advance/FrontNoise)開発

鳥取大学 西村研究室

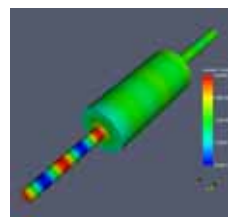
- ダクト内騒音調査



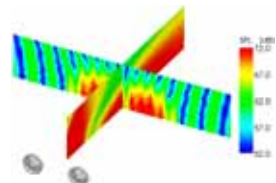
- 屋外の構造物形状が音の伝播に及ぼす影響調査



- 排気系音場予測



- 鉄道車輪騒音



日本機学会論文誌A, Vol.73, No.730, 2007.07



# マフラーの開発

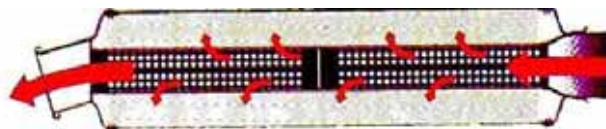
## ■ マフラーの構造

マフラーの内部構造は、その違いにより大きく二つに分けられる

- 多段膨張式



- ストレート排気式



特に、多段膨張式は複雑な内部構造をもち、各企業で長年蓄積されたノウハウを元に開発されているのが現状

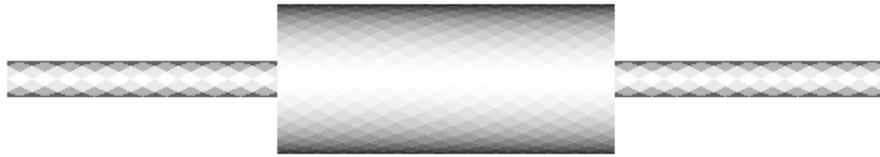


シミュレーションによる最適化設計が可能となれば、開発が格段に効率化されるはず。



# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ モデル1



図に示した簡易排気系モデルについて、Advance/FrontNoiseを用いて音響解析を行う。(6530節点)

### 計算条件

- 単純形状、内部に構造は持たない
- 音は、左側から入り、右側へ抜ける
- 内部に空気の流れはない

### 境界条件

入り口には音圧を与え、出口にはダクト開口端の放射インピーダンスを与える。

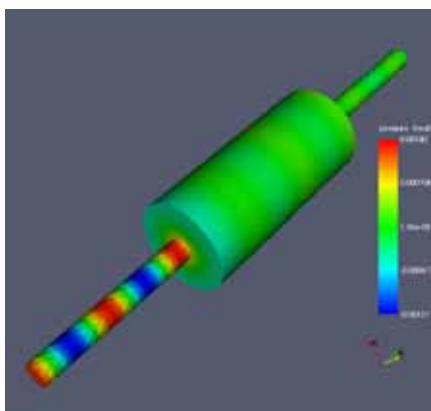
透過損失を用いて、性能評価を行う。



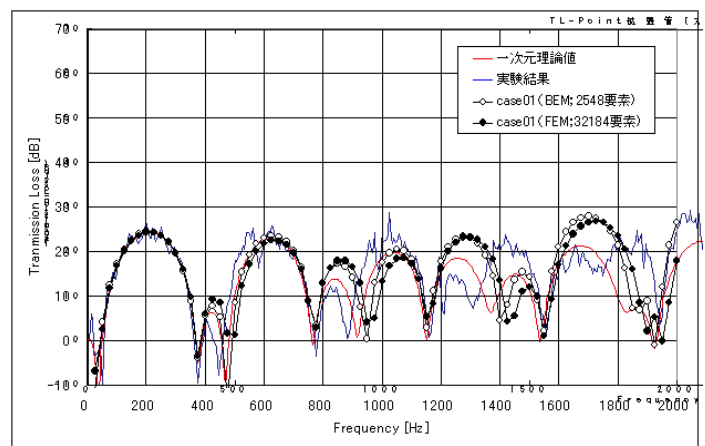
9

# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ 計算結果



2000Hzでの音圧分布



透過損失

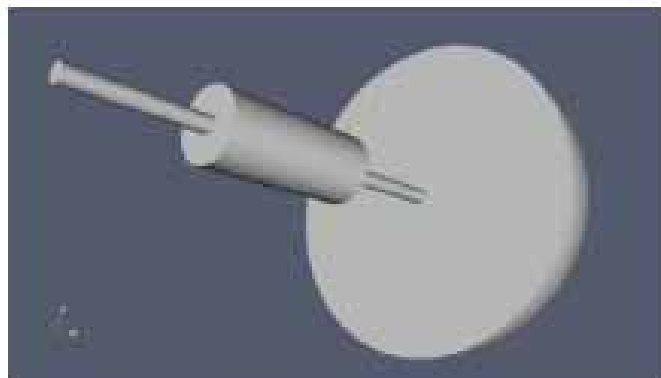
低周波数においては実験、理論、計算結果ともに良く合う結果が得られているが、高周波数において多少結果が異なる。  
(理論値との違いは一次元理論の限界からくると考えられる)



10

# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ モデル2 (境界依存性の検証)



基本的には、モデル1と同じモデルを用いる。モデル1との違いは、図に示したような出口部分に半球の空間を加え、その表面上で無反射境界条件を適用する。(253880節点)

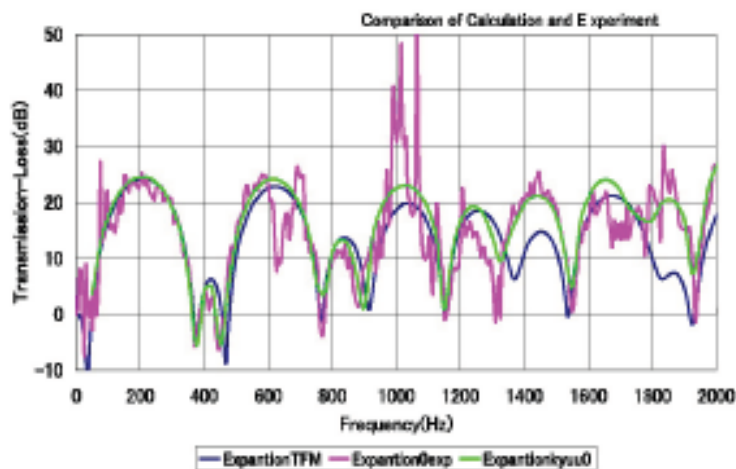
モデル2の作成と計算は鳥取大学西村研究室によるものです。



11

# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ 計算結果



青線: 一次元理論値  
赤線: 実験値  
緑: 計算結果

透過損失

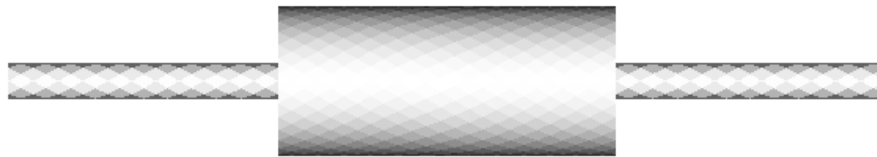
実験結果と計算結果が非常によく一致する結果が得られた



12

# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ モデル3 (空気の流れの影響調査)



モデル1と形状は同じだが、内部の空気の流れの影響を考慮した計算を行う。  
(音響計算格子: 6530節点、流体計算格子: 134855節点)

計算条件(モデル1との違い)

- 内部に空気の流れあり
- 空気の流れ場は、流体計算を別途行いその結果を取り込んで計算を行う  
(流体計算は鳥取大学 西村研究室にて行う)

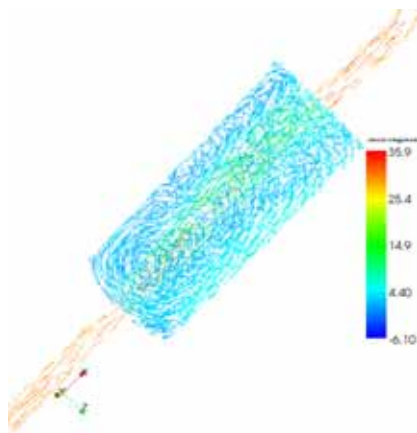
境界条件はモデル1と同じものを用いる。



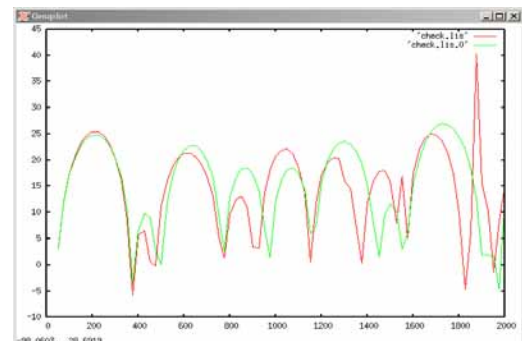
13

# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ 計算結果



流体計算により得られた流れ場



透過損失(緑:流れなし、赤:流れあり)

空気の流れがある場合、流れが無い場合に比べて、透過損失のピークが高周波数領域で低周波数側へシフトする。

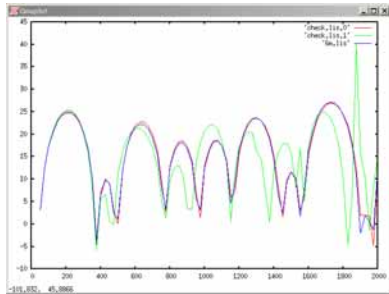


14

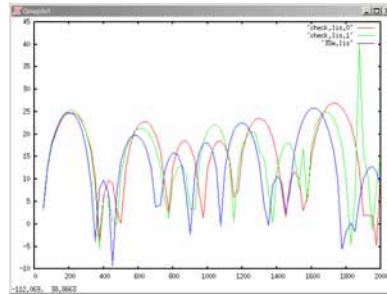
# 簡易排気系の数値シミュレーション

## ■ 簡易流れ場モデルによる透過損失比較

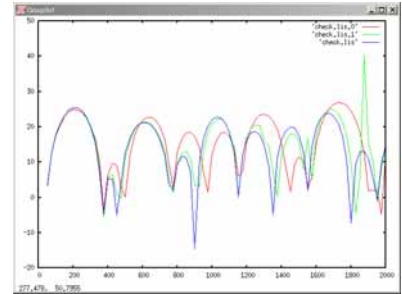
- モデル3-1: 一様速度場6[m/s]
- モデル3-2: 一様速度場35[m/s]
- モデル3-3: 非一様速度場(中心程速い)



モデル3-1



モデル3-2



モデル3-3

(緑:流体計算の流れ場あり、赤:流れ場なし、青:簡易流れ場)

モデル3-3の結果が、流体の流れ場ありの場合の透過損失とよく合う。



内部に形成される渦よりも、中心程速い非一様速度場の影響が強い

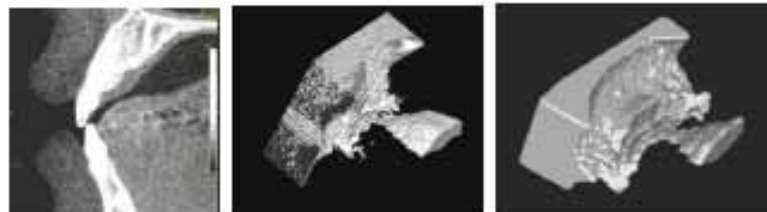


# 渦音に関する研究

- 流れの乱れにより形成される渦から発生する騒音(渦音)を音響解析により予測し、抑えることになれば環境対策となる。

弊社では、実際に環境対策問題として渦音を扱った経験はまだ無いが、次の経験を応用して対応可能と考えている。

大阪大学(野崎一徳先生)との共同研究(LES解析を用いた歯茎摩擦音の計算)



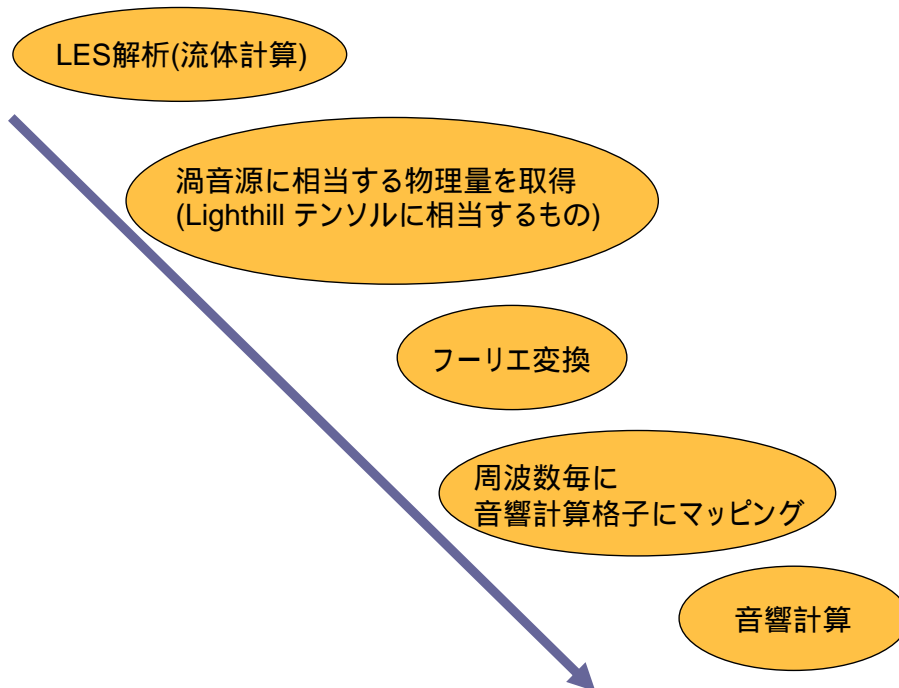
摩擦音発生時の口腔内の形状データの取得

(第21回数値流体力学シンポジウムB2-5 野崎、玉川、下條より)



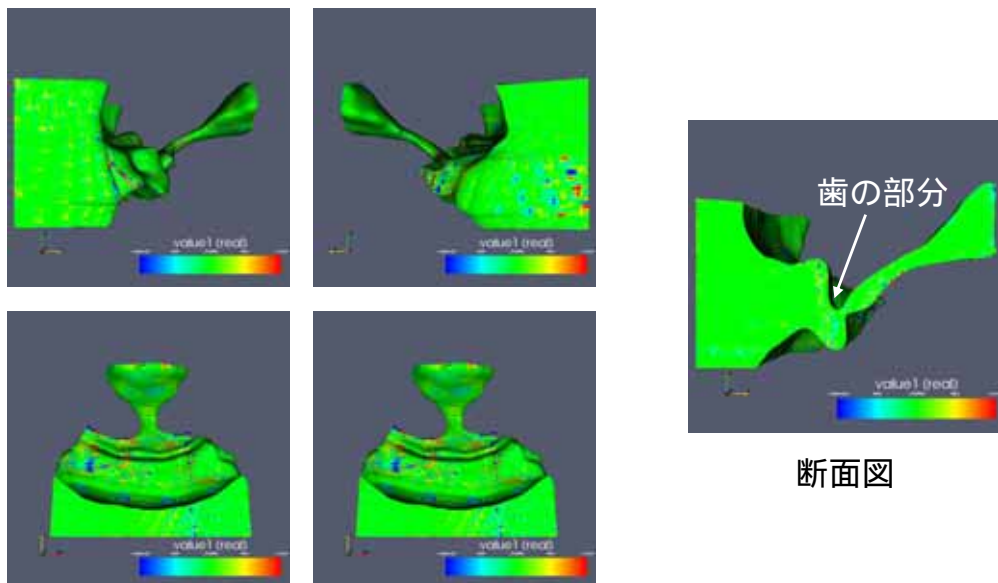
# 渦音に関する研究

- 渦音源取得と音響計算までの手順



# 渦音に関する研究

- 音響格子への音源マッピング

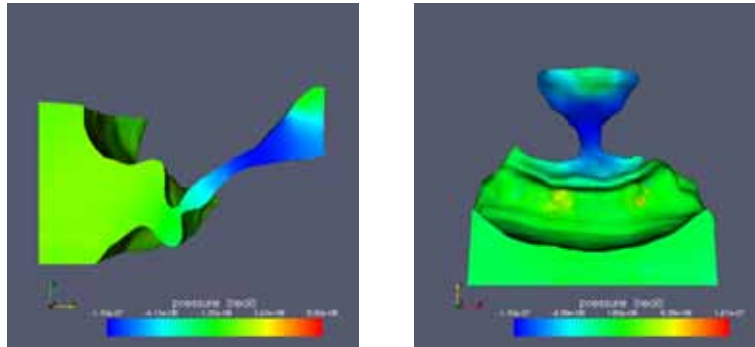


赤や青色部分が渦音源を示します。  
断面図を見ると、口腔内よりも歯の近傍に音源が多く存在することが判ります。



# 渦音に関する研究

- マッピングされた音源を用いた音響計算結果@6250Hz



音圧分布

口腔内部に音圧の低い領域が形成される。  
結果の詳細解析については、これから行っていく予定。



## まとめ

- 簡単な排気系モデルを用いて音響解析を行い、理論値や実験値とよく合う結果を得た。
- 本ソフトウェアを使うことにより、様々な排気系モデルをテストすることが可能となり、環境に易しい排気系の設計が可能となる。
- 流体ソフトとの連成計算により、より現実に近い状況における排気系の性能テストが可能である。
- 渦音の計算が可能となり、流れの乱れによる騒音予測が可能となっている。





アドバンスソフト技術セミナー  
環境・騒音問題における流体解析の現状と当社の取り組み

大気環境問題への取り組み

アドバンスソフト株式会社  
技術第3部 主事研究員  
國島 和

2.

主な環境流体解析

	地球規模	領域・地域規模	局所規模
方程式系	静力学モデル	静力学モデル 非静力学モデル	3次元ナビエ・ストークス方程式 乱流モデル
大気環境	気候モデル (海洋との連成) 気象モデル 大気拡散	都市気候 気象モデル 台風 局地豪雨 大気拡散 風況解析	建物周辺流れ 屋内環境 人体周辺の流れ 風力発電機器の効率設計
海洋環境	気候モデル (大気との連成) 上・中層モデル	海流・潮汐流 閉鎖性湾内の富栄養化・貧酸素化 海浜変形 津波解析 拡散	港内構造物回りの洗掘 津波対策構造物等の強度設計 プラント取排水口位置
陸水環境		河川流・洪水 湖・ダム湖の富栄養化・貧酸素化 地下水取水による地盤沈下 地下水汚染	破堤後の洪水 エアレーション機器の配置 ダム取放水設計 濁水解析



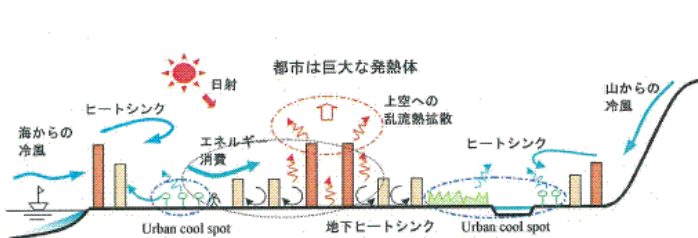
# 時間・空間スケールと現象 (大気の場合)

時間スケール		月	日	時	分	秒
空間スケール	総観規模 100km ~ 10,000km以上	エルニーニョ、 ラニーニャ、 潮汐波				
	中規模 10km ~ 100km	低気圧、 高気圧		海陸風 集中豪雨 山岳波		
	小規模 10km以下			都市効果 晴天乱流	竜巻 積乱雲 つむじ風	プリューム 乱流

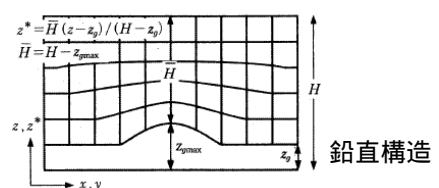
(厳密な定義は存在しない)



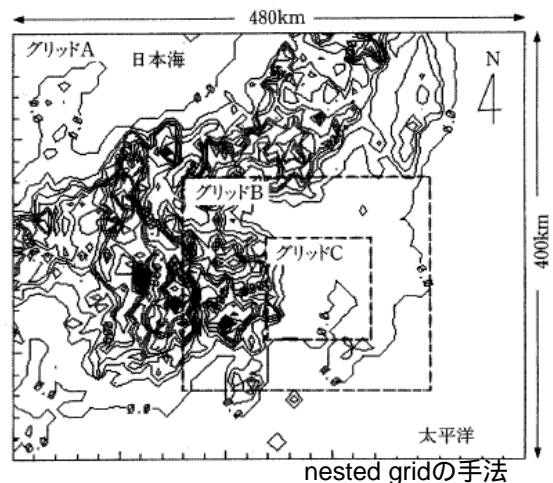
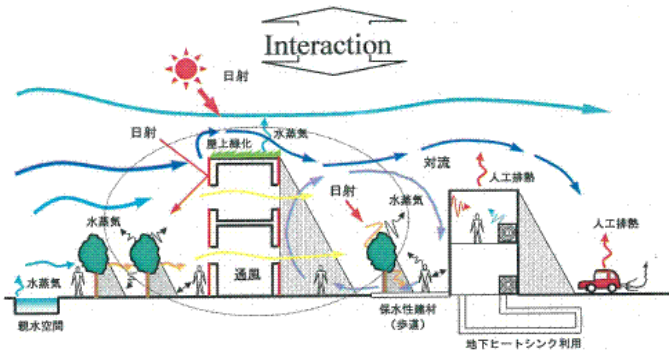
## (例) 都市気候解析の概念



(1) 都市スケール解析



鉛直構造

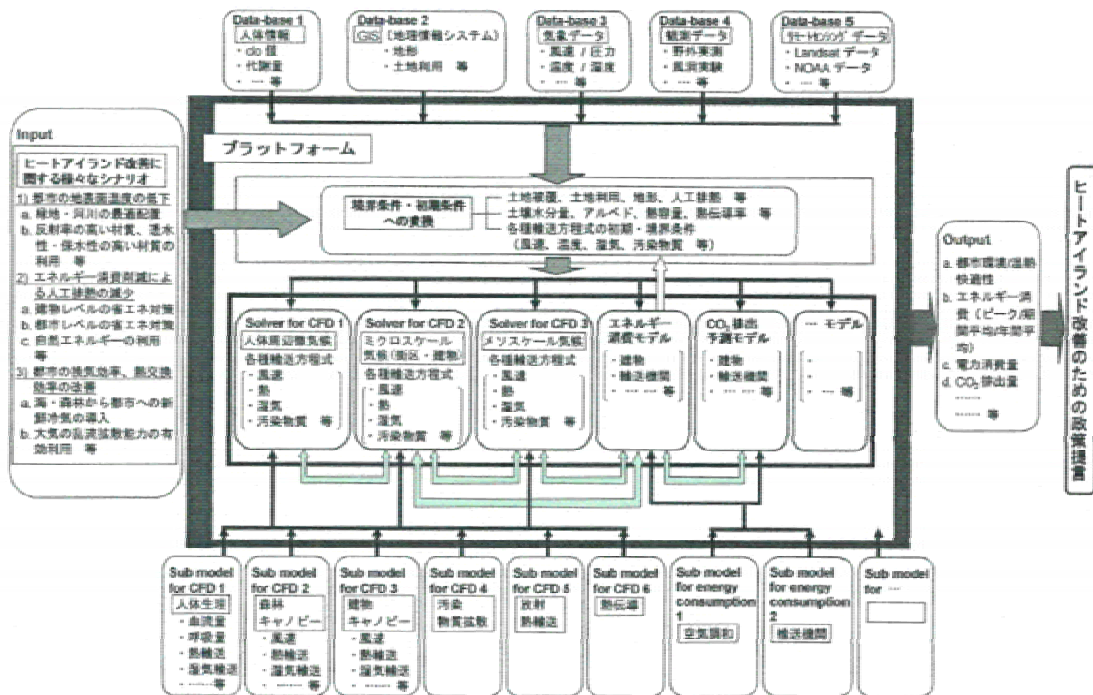


nested gridの手法



(村上周三 建築・都市の環境工学 東京大学出版会より抜粋して作成)

# ヒートアイランド現象の解析と対策技術の 総合的評価のためのプラットフォーム



(村上周三 建築・都市の環境工学 東京大学出版会より抜粋)



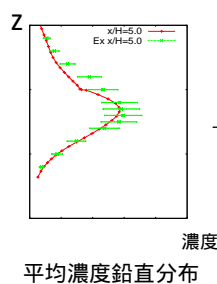
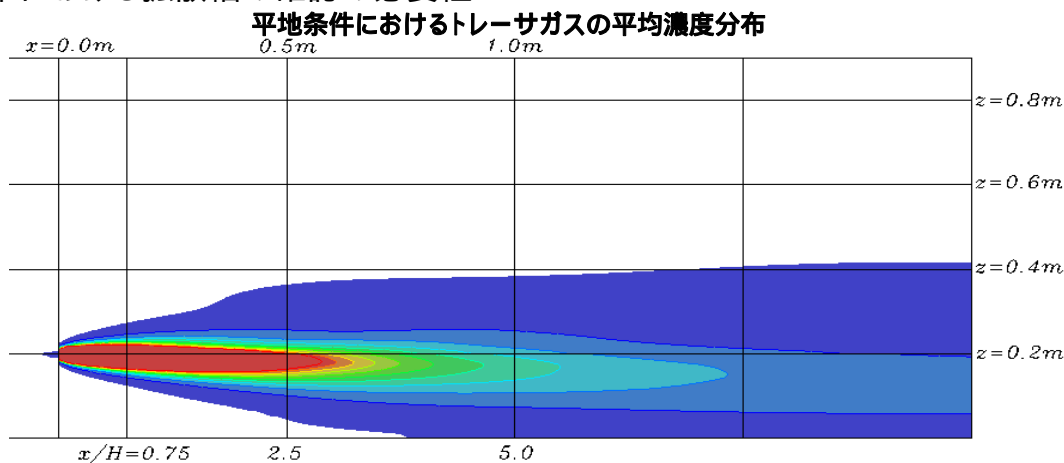
## 弊社の取り組み領域

	地球規模	領域・地域規模	局所規模
大気環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>温室効果ガス吸収・放出量推定システム (輸送モデル:セミラグランジャン) (逆問題モデル:ベイズ法)</li> <li>現在の観測から過去の吸収・放出量を推定する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>被曝評価手法の整備</li> <li>気流/拡散コードによる野外試験解析</li> <li>RAMS/HYPACTによる火山ガス拡散解析</li> <li>気象モデルにより風況を再現し、それを拡散モデルへの入力として、粒子拡散を求める。</li> <li>RAMS・・・領域気象モデル レイノルズ平均プリミティブ方程式系 非静力学モデル 準圧縮 非弾性近似 ブジネスク近似</li> <li>HYPACT・・・拡散モデル オイラー型・ラグランジュ型のハイブリッド</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LESによる風環境評価・大気拡散</li> <li>FFRによる大気拡散の計算精度の確認</li> </ul> <p>(手法詳細については講演3)</p>

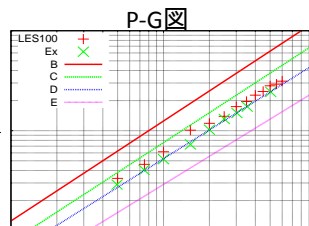


# FFRによる大気拡散の計算精度の確認

平地条件下における拡散幅の確認の必要性



拡散幅を見積もり、比較



B: 不安定大気拡散幅  
C: 弱不安定大気拡散幅  
D: 中立大気拡散幅  
E: 弱安定大気拡散幅

平地条件、中立大気条件の大気拡散幅

+ : 計算結果

x : 土木学会論文集No.706/VII-23,41-49,2002.5

「単独建屋後流におけるトレーサガス濃度変動に関する研究」  
の実験結果

7



・大気拡散実験を実行可能

## 被曝評価手法の整備

### ■ H17; 被ばく評価手法の整備

目的; 平地での大気安定度中立における気象指針とシミュレーションによる拡散結果の比較

実施内容

- RAMS/HYPACTの整備とシミュレーションの実施
- 気象指針とシミュレーションの地表濃度分布比較による手法の検討

### ■ H18気流 / 拡散コードによる野外試験解析

目的; 地形データを利用した大気安定度中立における現地試験とシミュレーションによる拡散結果の比較

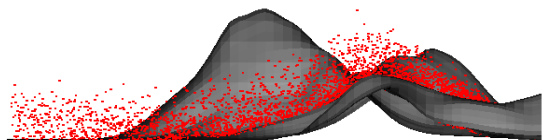
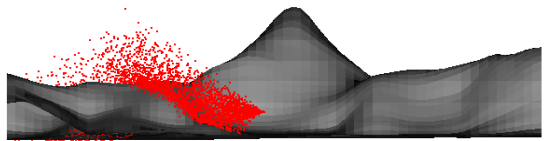
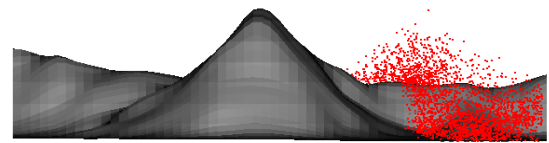
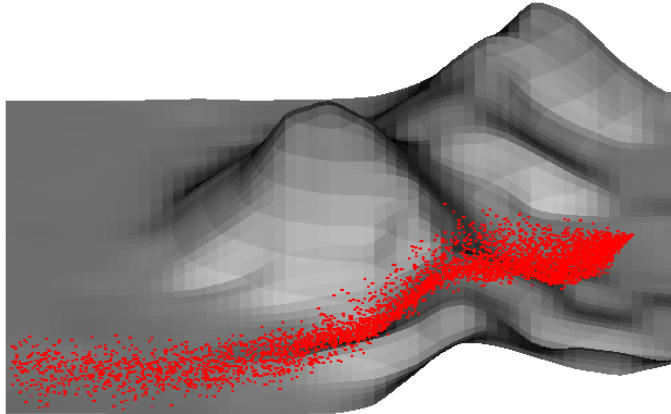
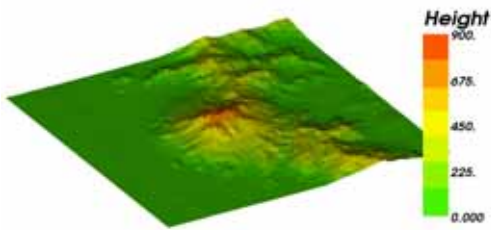
実施内容

- データ作成(気象・地形等)とシミュレーションの実施
- 狭域野外拡散試験・風洞実験とシミュレーションの地表濃度分布比較
- シミュレーションによる有効放出高さや風洞有効高さとの比較



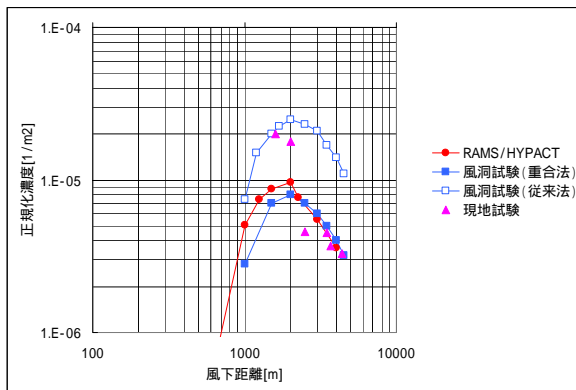
8

# 地形データを利用した大気安定度中立における現地試験とRAMS/HYPACTによる拡散解析シミュレーションとの比較

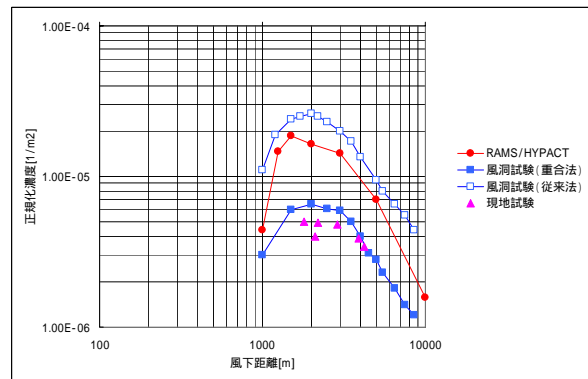


# 地形データを利用した大気安定度中立における現地試験とRAMS/HYPACTによる拡散解析シミュレーションとの比較

項目	ケース1	ケース2
数値有効高さ (RAMS/HYPACT)	基本拡散式	D型80m
	風洞平地(重合法)	90m
	風洞平地(従来法)	110m
風洞有効高さ(重合法)	95m	100m
風洞有効高さ(従来法)	100m	90m
現地試験	D型70m	D型90m



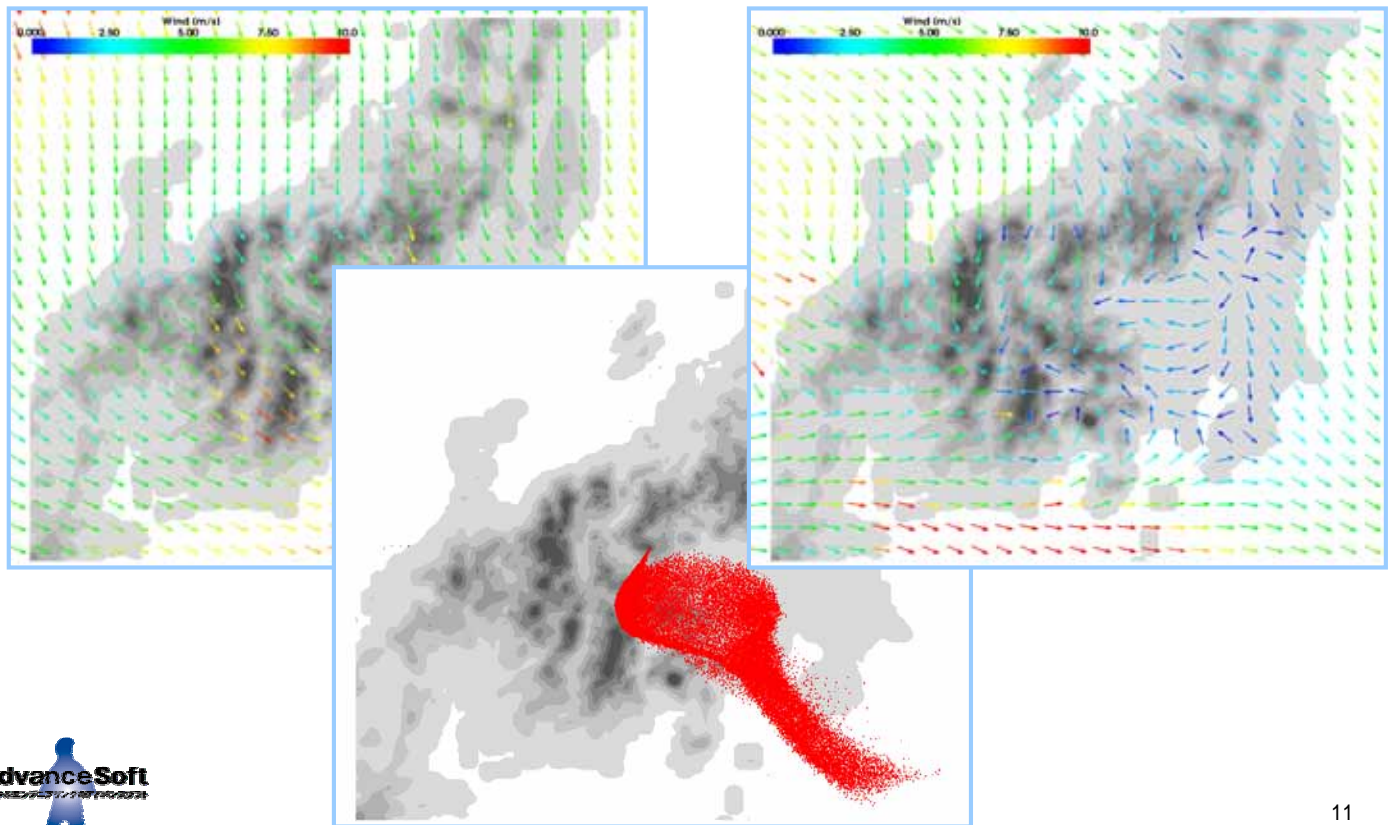
ケース1の風下軸上濃度と風洞試験との比較



ケース2の風下軸上濃度と風洞試験との比較



# RAMS/HYPACTによる火山ガス拡散解析例



11

## まとめ

- 主な環境流体解析とスケール
- FFRによる大気拡散の計算精度の確認
- RAMS/HYPACTによる拡散解析
  - 被曝評価手法の整備
  - 火山ガスの拡散



12



## アドバンスソフト技術セミナー 環境・騒音問題における流体解析の現状と当社の取組み

流体騒音等の問題に関連した流体解析の現状と当社の取組み

アドバンスソフト株式会社  
技術第3部 主任研究員  
中森 一郎

# 3.

### 発表内容

- ✚ 乱流に起因する騒音
- ✚ 直接解法と分離解法
- ✚ これまでの渦音源の解析事例
- ✚ 乱流場をLESで解像するための格子の見積もり
- ✚ 乱流解析のための種々の取組み
  - ✓ 大規模流体解析
  - ✓ Embedded Mesh Refinement
  - ✓ Adaptive Mesh Refinement
  - ✓ LES DES
- ✚ まとめ



# 乱流に起因する騒音

## 乱流騒音

- ・上流乱れや偏流による騒音  
回転領域に乱れを持った流体が流入することで、物体壁面に揚力変動が生じるために起こる騒音
- ・壁面はく離騒音  
物体壁面からの流れのはく離に起因した揚力変動による騒音
- ・渦放出騒音  
物体後縁近傍や端面からはく離した放出渦に起因した揚力変動による騒音
- ・境界層騒音  
乱流境界層内の圧力変動に起因した騒音。流速の8乗に比例
- ・後縁通過騒音  
境界層内の乱れが物体後縁を通過する時に発生する騒音



3

# 流体音の解析法

## ✓直接解法 DNS (Direct Numerical Simulation)

- ・圧縮性Navier-Stokes方程式の非定常計算
  - ・NS式、連続式、エネルギー方程式の解から音成分を抽出
  - ・発生した音は流れ場に影響
  - ・流れと音波の長さ・変動強度のスケールは大きく異なるため、  
実用形状の計算は困難
- レイノルズ数がかなり低いものしか実現が困難**

## ✓分離解法

- ・スケールの異なる問題を個別に解く  
->流れ場を計算した後、音場を解析
- ・流れが低速の場合 ( $M < 0.3$ 程度)、音が流れ場に与える影響を無視



4

# 分離解法

- ・LES (Large Eddy Simulation) + Lighthill音響アナロジ  
Lighthill-Curle  
Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H)

Lighthill式

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$T_{ii} = \rho u_i u_i + p_{ii} - c_0^2 \rho \delta_{ii}$$

$$p_{ij} = p \delta_{ij} + \mu \left\{ - \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right\}$$

・音源解析と伝播解析の組み合わせ  
LES (Large Eddy Simulation) による乱流場

Lighthill音響アナロジ + 散乱音の表面積分近似

- ・LES + FEM (Boundary Element Method)  
Front/Noise  
SYSNOISE  
ACTRAN
- ・RANS (Raynolds Averaged Navier-Stokes) + LEE (Linearized Euler Equation)
- ・etc.



流体解析

音響解析

5

# 流体音の解析

流体音の評価

Lighthillテンソル構築

乱流渦のLES解析

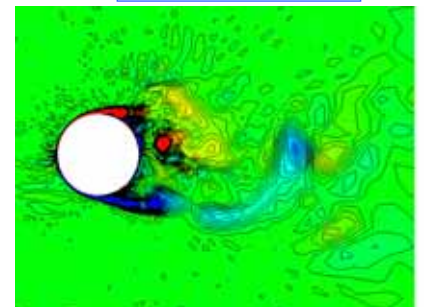
剥離渦の分裂・合体

Lighthill式

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij}$$

$$p_{ij} = p \delta_{ij} + \mu \left\{ - \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right\}$$

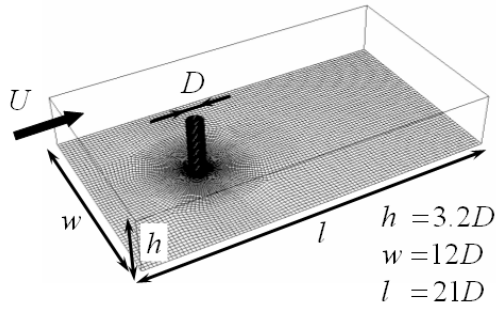


次のスライドで流体音評価事例を示します

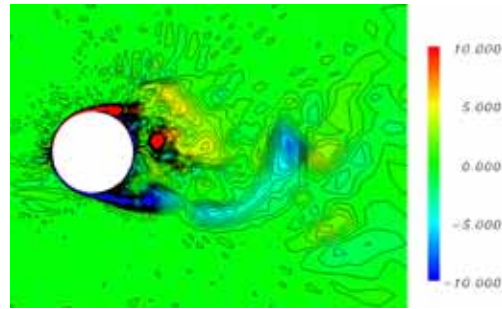
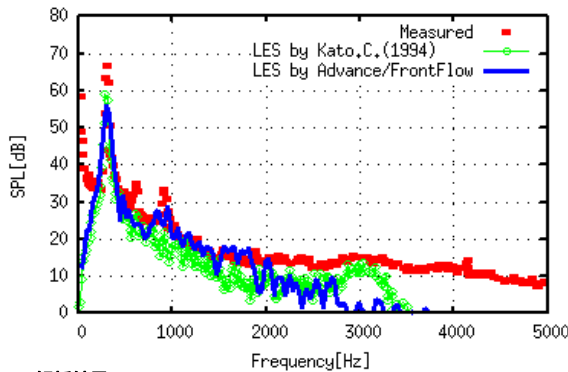


6

# Advance/FrontFlow/redによる円柱周りの渦音源解析



節点数	159,040
要素数	146,025
計算領域	21D × 12D × 3.2D
壁面近傍格子幅	0.005D
スパン方向分割	15層



## 解析結果

総解析時間 : 3.5E+02 [s] (70,000ステップ)  
最大Courant数(瞬時値) : 0.2720

## 計算端末

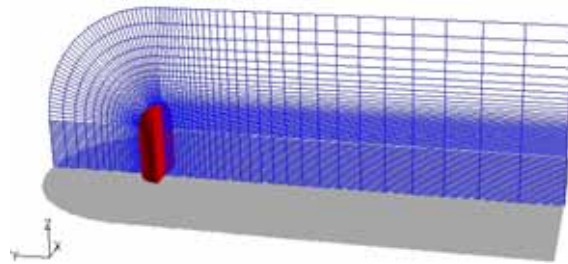
ハード・OS : IA32 PC (Linux)  
CPU数 : 1 (Pentium4 2.4GHz)  
計算時間 : 70,000ステップで 約162h



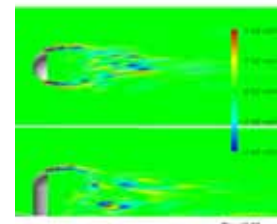
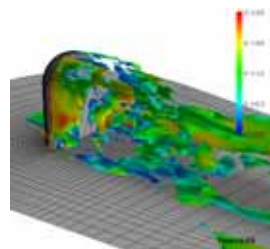
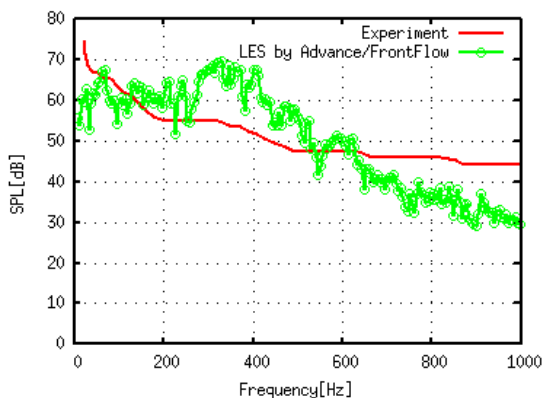
# Advance/FrontFlow/redによる自動車ドアミラー周りの渦音源解析

## 解析条件

計算領域: 10.5D × 5D × 3.5D  
Re数: 7.4E+05  
乱流モデル: 標準Smagorinskyモデル  
計算格子  
節点数: 202,050 / 要素数: 191,520  
壁面近傍格子幅: 0.03D



## 音圧スペクトル



Helicity密度等値面

Power II 音源項の強度

$$H' = (\nabla \times \vec{u}) \cdot \frac{\vec{u}}{|\vec{u}|}$$

Siebert et al., 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Seattle WA, May 10-12, AIAA paper, 99, 1895 (1999)



## Advance/FrontFlow/redの機能

項目	Advance/FrontFlow/redの機能
アルゴリズム	SMAC法 / SIMPLE法 / Rhie-Chow補間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
時間積分法	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次精度中心差分および3次精度風上と1次精度風上のブレンド法
行列解法	ICCG法 / Bi-CGSTAB法
並列計算	領域分割法による並列計算



## Advance/FrontFlow/FOCUS (開発中) の機能

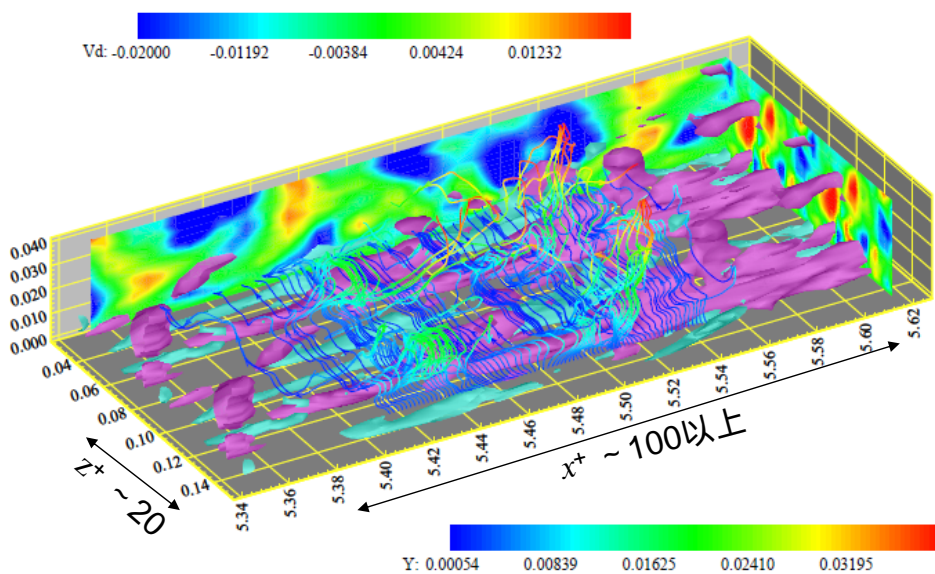
項目	Advance/FrontFlow/redの機能
時間積分法	Euler陽解法 / Euler陰解法 ( LU-SGS法 / MFGS法/LU-ADI法 ) / 4次精度ルンゲ・クッタ陽解法
対流項の離散化スキーム	1次精度風上差分 / 2次精度風上差分 / 2次精度TVD法 / 2次精度中心差分 / 4次精度中心差分 / 5次精度コンパクト風上法
並列計算	領域分割法による並列計算



# 乱流場をLESで解像するには どのくらいのメッシュが必要か



## Advance/FrontFlow/FOCUSによる乱流境界層の解析例



時速100km  
 代表長さ10cm  
 $Re=3 \times 10^5$   
 大渦構造は  
 $x^+ \sim 500$      $x$  50mm  
 $y^+ = 1$          $y$  0.1mm  
 $z^+ = 100$        $z$  10mm



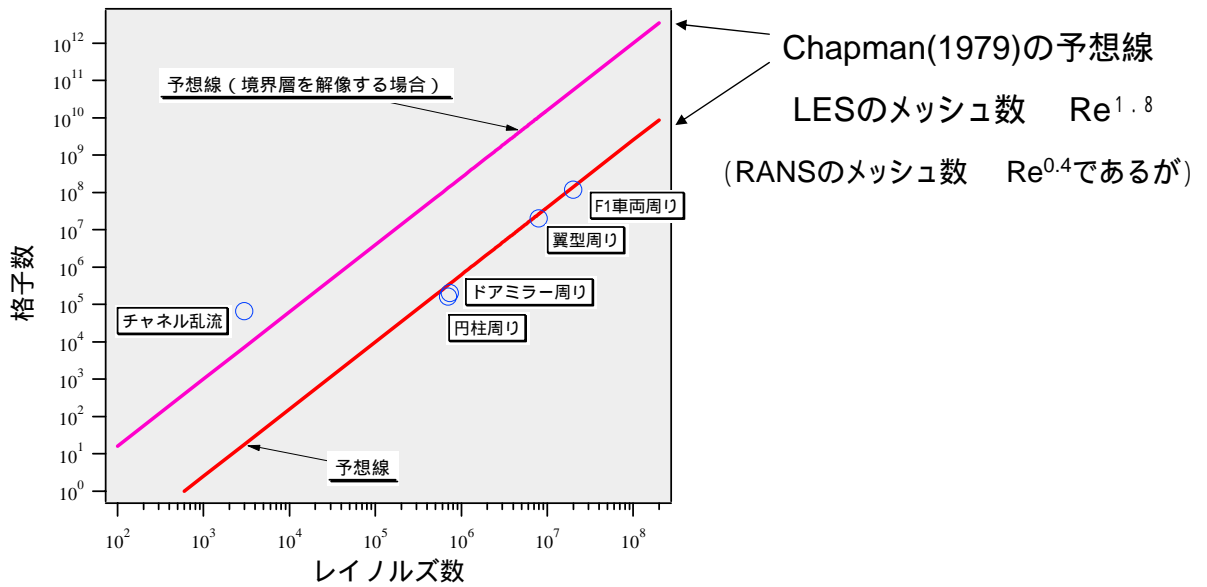
$x=10\text{mm}$   
 $y=0.1\text{mm}$   
 $z=2\text{mm}$



要素数は数千万規模の格子



# Re数とLES用の計算メッシュの予測



13

## 対処法

非構造格子でメモリの許容の限り解像する  
局所毎に必要なだけメッシュ解像度を向上させる  
境界層の解像は別途の手段で回避する



14

# 非構造格子でメモリの許容の限り解像する



## FrontFlow/redによる車体空力:フォーミュラーカーの大規模解析

### 計算領域、計算格子条件

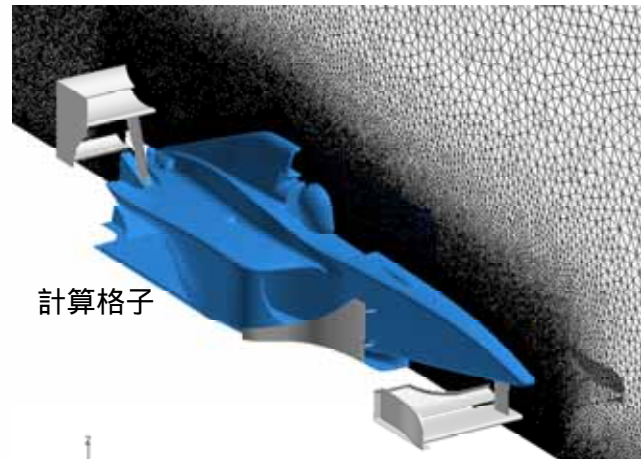
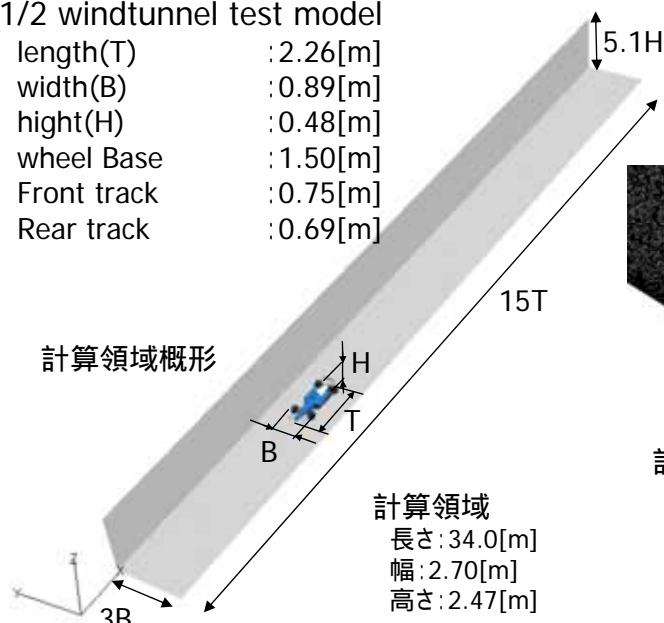
#### LOLA B03/51

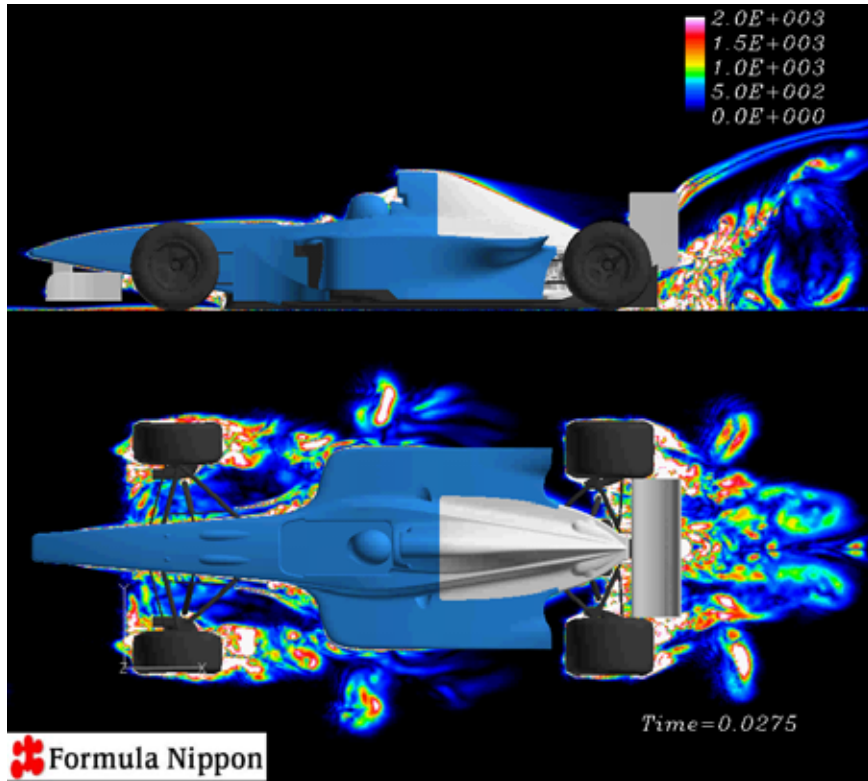
1/2 windtunnel test model

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

### 計算格子

メッシュ形状: テトラ  
節点数: 20,957,323  
要素数: 117,060,909





17

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、坪倉誠先生(北海道大学)との共同研究による

## 局所毎に必要なだけメッシュ解像度を向上させる

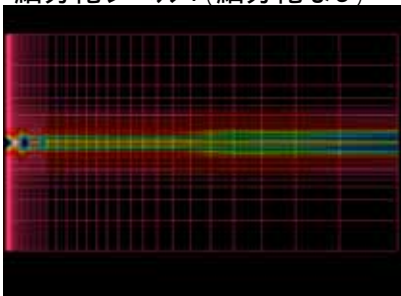


18

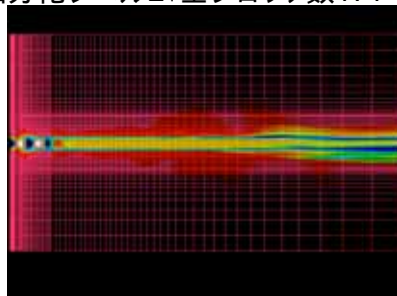
## Adaptive Mesh Refinement (AMR) によるアプローチ例

(噴出マッハ数 $M=1.6$ )

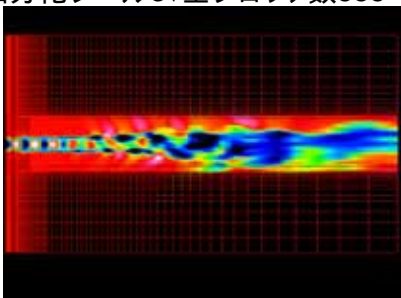
細分化レベル1(細分化なし)



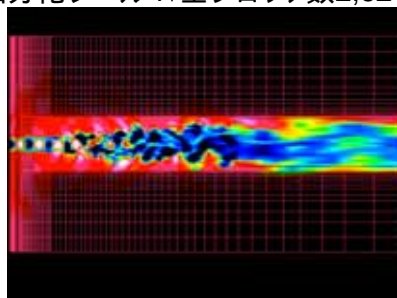
細分化レベル2:全ブロック数171



細分化レベル3:全ブロック数555

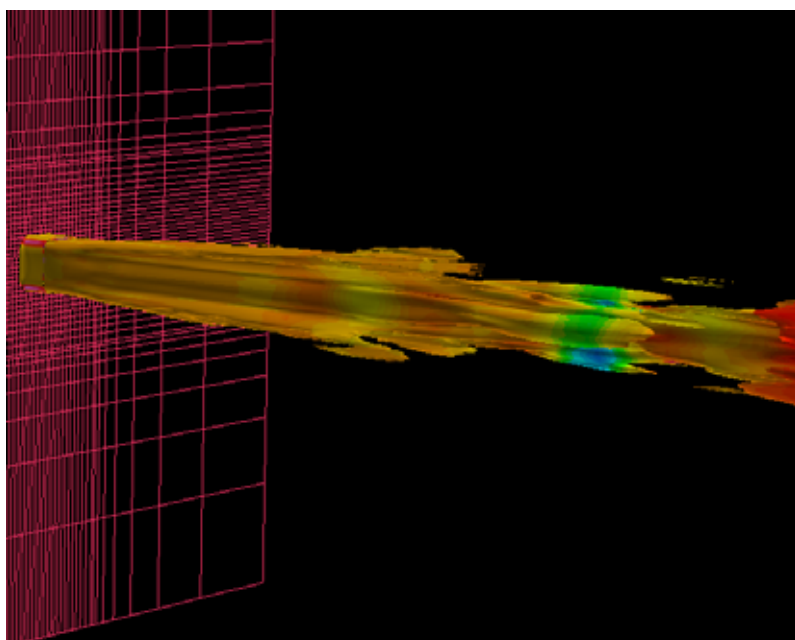


細分化レベル4:全ブロック数2,621

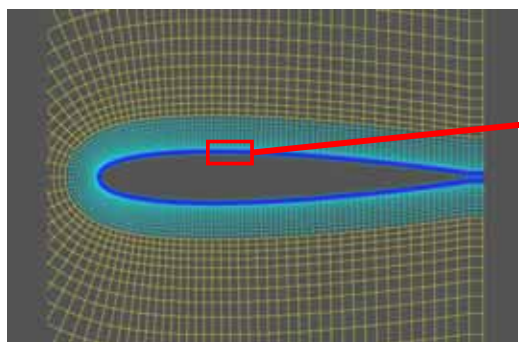


## Advance/FrontFlow/FOCUSによる超音速ジェット解析例 (Adaptive Mesh Refinementの適用)

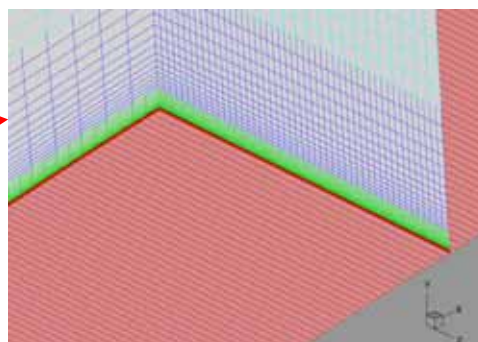
(噴出マッハ数 $M=1.6$ )



## Embedded Mesh Refinementのアプローチ例



側面図



壁面近傍の様子

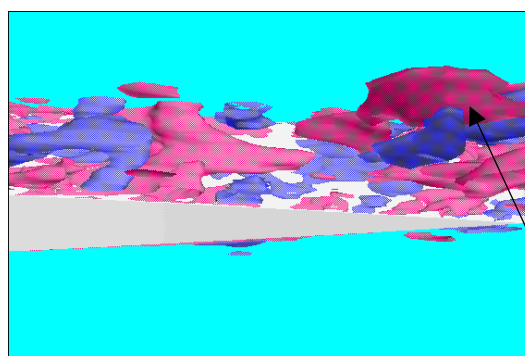
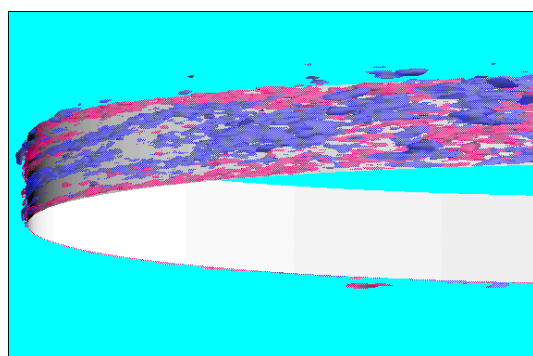
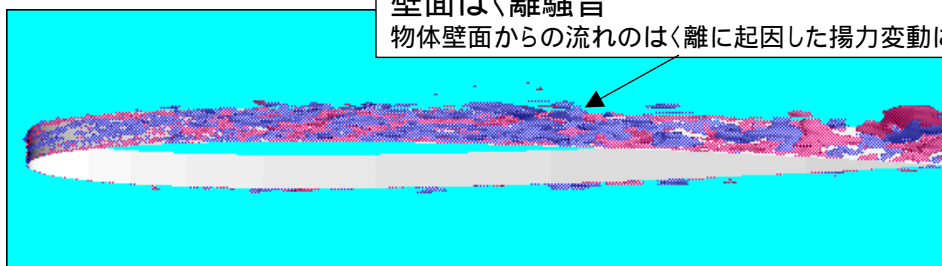
$Re = 9 \times 10^6$ の2次元的な乱流に対して粘性底層まで解像するには数億点必要だが、この手法で1千万要素程度まで節減できる



21

## Advance/FrontFlow/FOCUSによる翼周りの乱流解析 ( $Re = 9 \times 10^6$ )

壁面はく離騒音  
物体壁面からの流れのはく離に起因した揚力変動による騒音

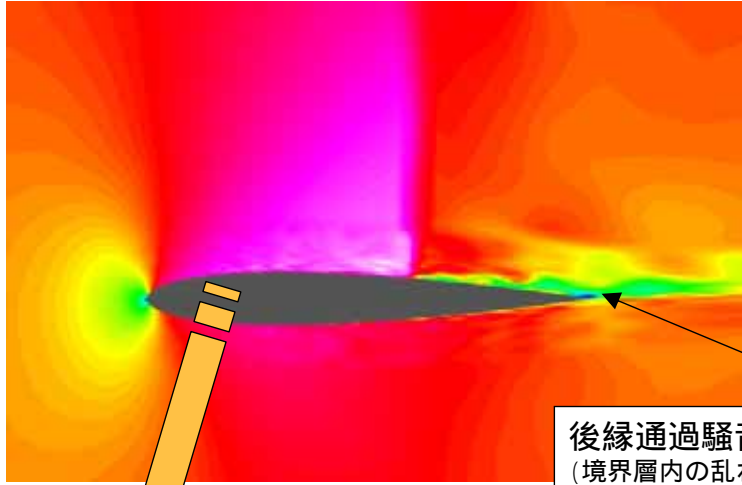


渦放出騒音源の渦

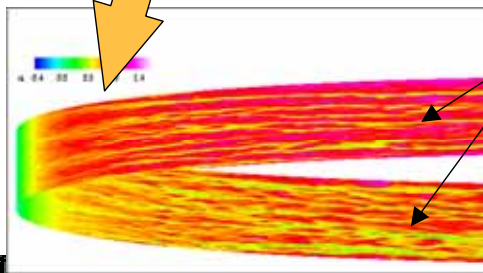


22

# Advance/FrontFlow/FOCUSによる翼周りの乱流解析 ( $Re = 9 \times 10^6$ )



後縁通過騒音源  
(境界層内の乱れが物体後縁を通過する時に発生する騒音)



境界層騒音源  
(流速の8乗に比例)

粘性底層まで解像するメッシュの場合、  
90%以上の要素数が境界層に費やされている！

境界層音源を特定するのは非常に高価

23



## 乱流境界層の解像は別途の手段で回避する

Detached Eddy Simulationもしくはハイブリッドモデル

物体近傍はRANSモード、それ以外はLESモード

物体近傍の微細な乱流構造は省略

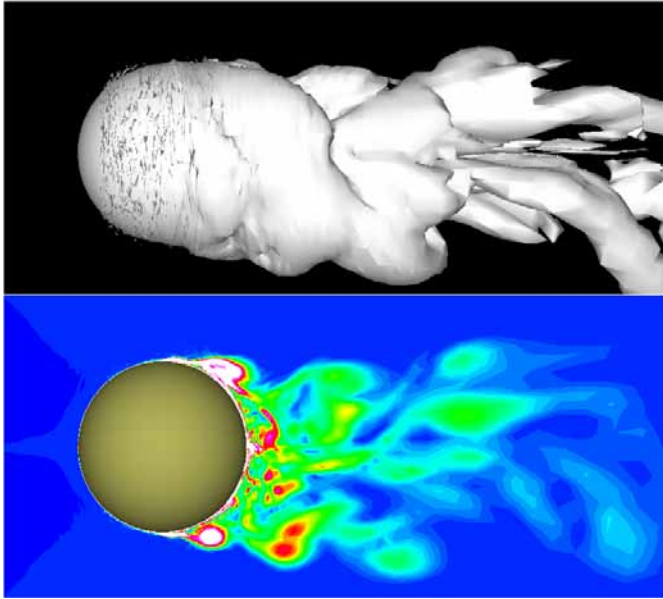
メモリの大幅な節約



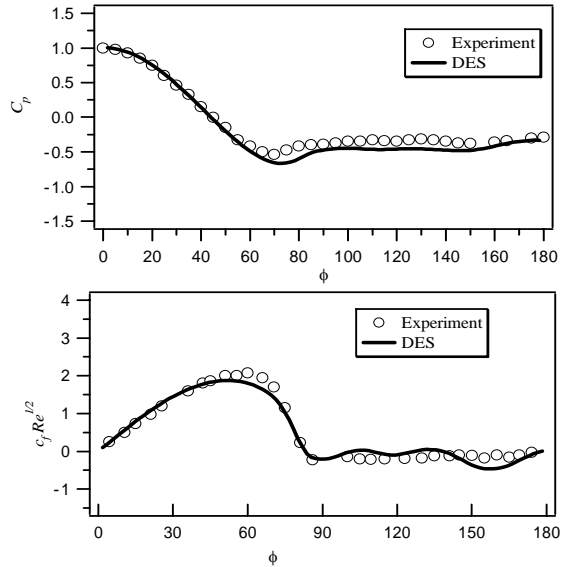
24

# Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りのDES解析

層流剥離の場合 ( $Re = 1.6 \times 10^5$ )

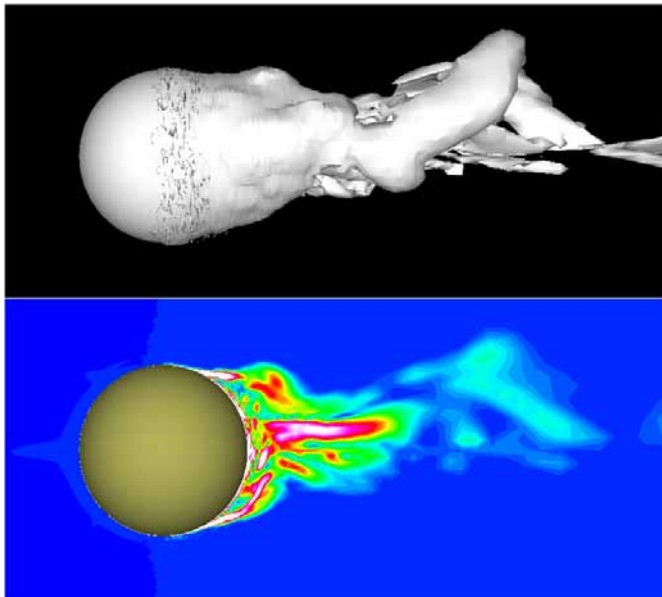


- 壁近傍はRANS、壁遠方はLES
- $100 \times 140 \times 40$  (56万要素)
- 粘性底層まで解像するLESメッシュの場合630万要素必要
- LESメッシュに比べて  
メッシュが約10倍節約、時間刻みが倍以上とれる  
計算時間がLESに比べて20分の1で済む

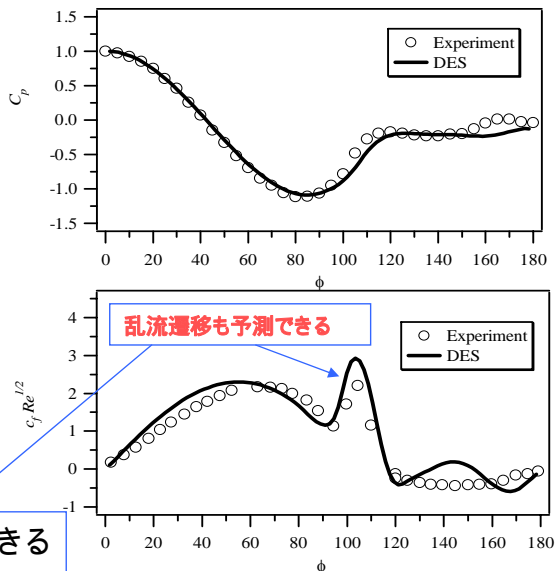


# Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りのDES解析

乱流剥離の場合 ( $Re = 1.1 \times 10^6$ )



- $100 \times 140 \times 40$  (56万要素)
- 壁近傍まで解像するLESメッシュの場合2億9千万要素必要!
- LES同様に剥離渦の詳細な追跡が可能
- 乱流剥離の再現が可能
- LESメッシュに比べて  
メッシュが約500倍節約、時間刻みが10倍程度以上とれる  
計算時間がLESに比べて5000分の1で済む

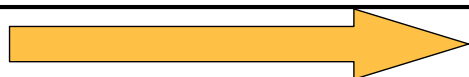


渦放出音のスケール効果の影響を予測できる  
(対数則速度境界条件では達成できない)



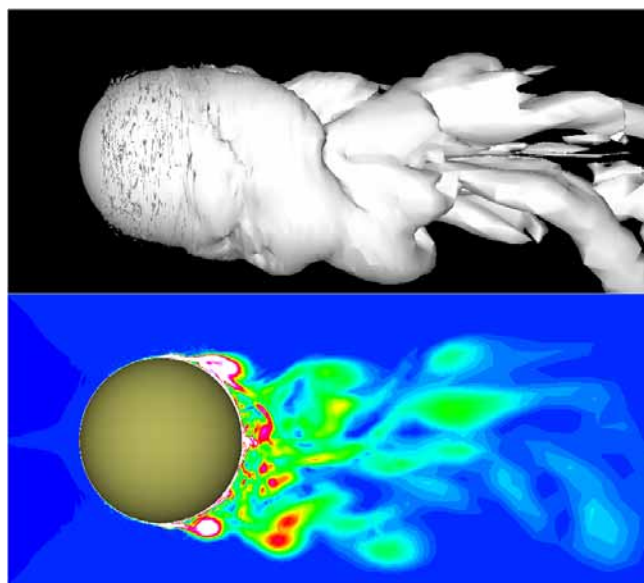
## Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りの乱流解析

$Re = 1.6 \times 10^5$

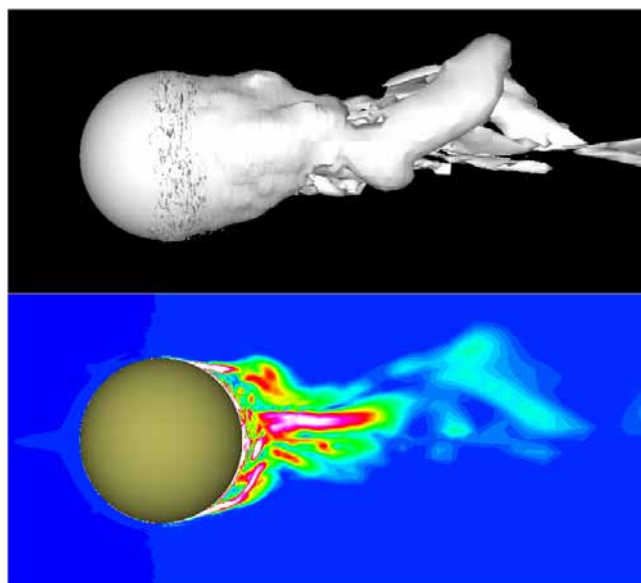


$Re = 1.1 \times 10^6$

スケール効果による乱流渦構造の変化 音源渦の周波数特性の変化



St~0.19のモードが支配的



St~1.3のモードが支配的



## まとめ

- 流体音源の種類について述べた
- 流体音の予測法として分離解法と事例を紹介した
- 流体音源となる乱流渦を解析するための手法を紹介した
  - 大規模並列環境による乱流解析事例の紹介
    - 地球シミュレータを用いた車体回りの乱流渦解析事例の紹介
  - メッシュ分割法による格子要素の節減
    - Adaptive Mesh Refinement
    - Embedded Mesh Refinement
  - Detached Eddy Simulationによるアプローチ
    - 計算時間の短縮とメモリの節減
    - 乱流遷移を扱えることによるスケール効果の取り込み
    - 剥離渦放出音の特性変化



# 今後の課題

---

時系列を含む巨大なデータの後処理(データ処理)  
可視化のための高速データ処理  
多彩な時空間スケールからの設計情報の抽出

