



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

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad T_{ii} = \rho u_i u_i + p_{ii} - c_0^2 \rho \delta_{ii}$$

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

・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

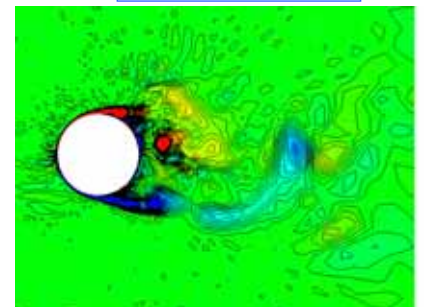
乱流渦のLES解析

剥離渦の分裂・合体

Lighthill式

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad T_{ij} = \rho u_i u_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij}$$

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

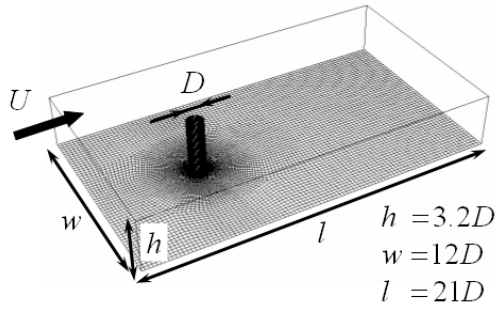


次のスライドで流体音評価事例を示します

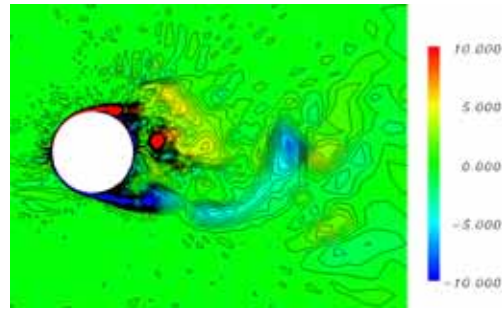
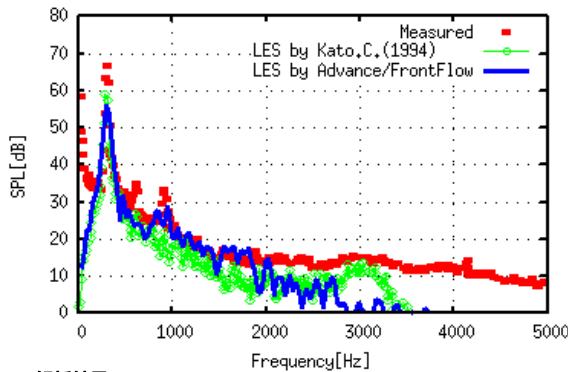


6

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

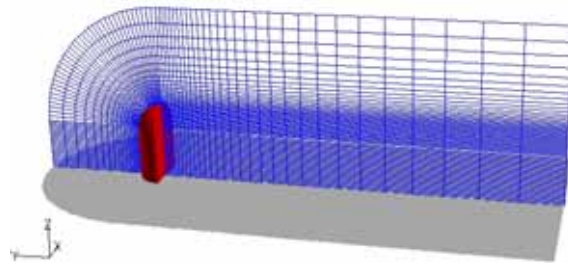
ハード・OS : IA32 PC (Linux)
CPU数 : 1 (Pentium4 2.4GHz)
計算時間 : 70,000ステップで 約162h



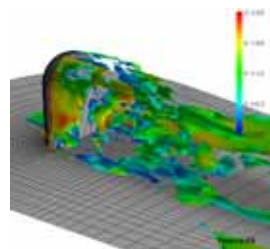
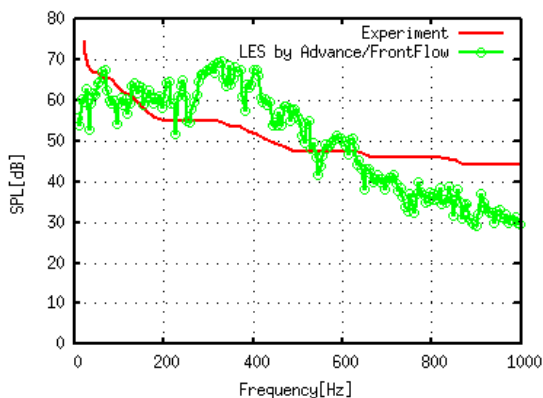
Advance/FrontFlow/redによる自動車ドアミラー周りの渦音源解析

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

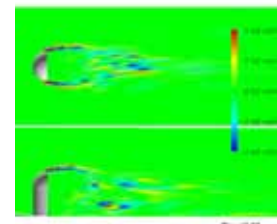


音圧スペクトル



Helicity密度等値面

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



Power II 音源項の強度

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

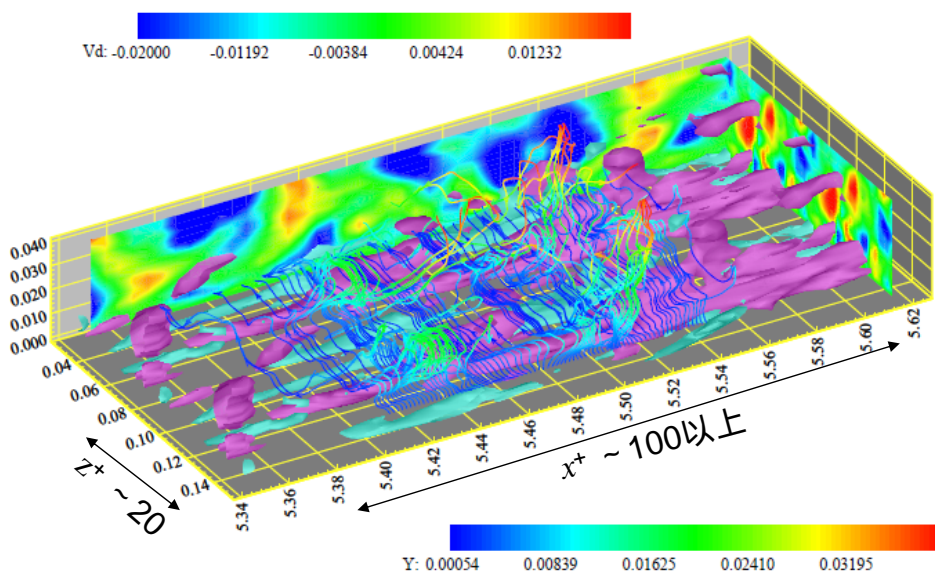
項目	Advance/FrontFlow/redの機能
時間積分法	Euler陽解法 / Euler陰解法 (LU-SGS法 / MFGS法/LU-ADI法) / 4次精度ルンゲ・クッタ陽解法
対流項の離散化スキーム	1次精度風上差分 / 2次精度風上差分 / 2次精度TVD法 / 2次精度中心差分 / 4次精度中心差分 / 5次精度コンパクト風上法
並列計算	領域分割法による並列計算



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



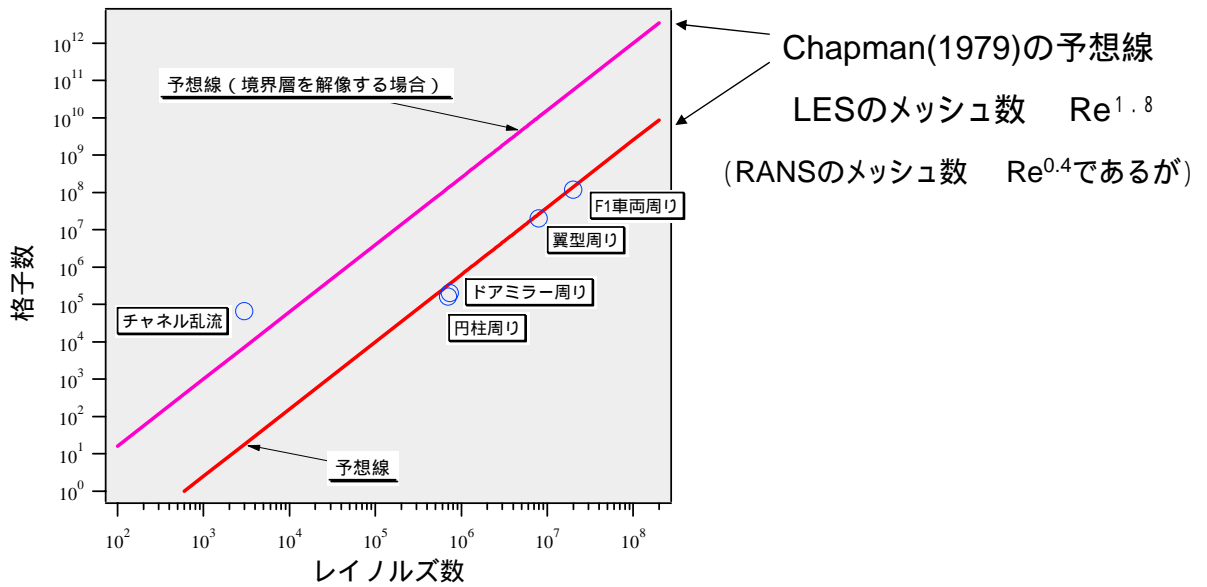
$x=10$ mm
 $y=0.1$ mm
 $z=2$ mm



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

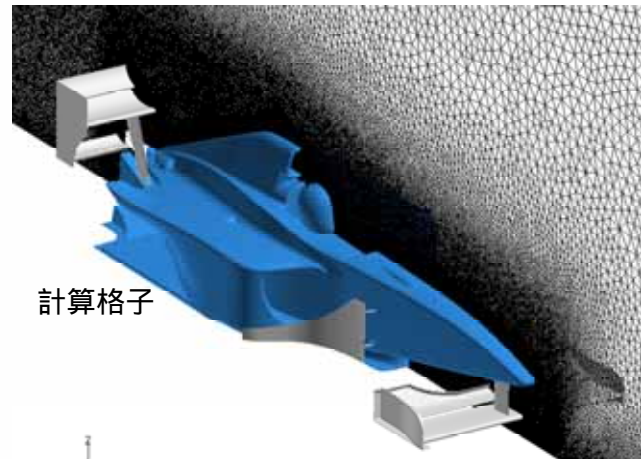
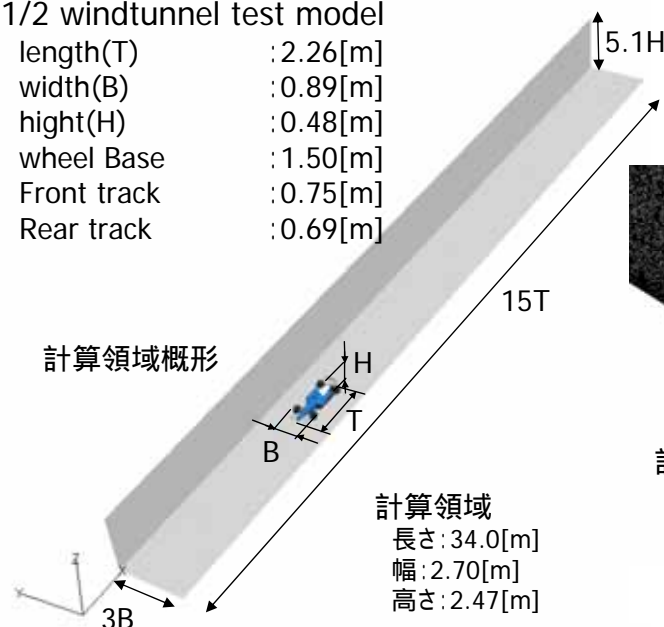
LOLA B03/51

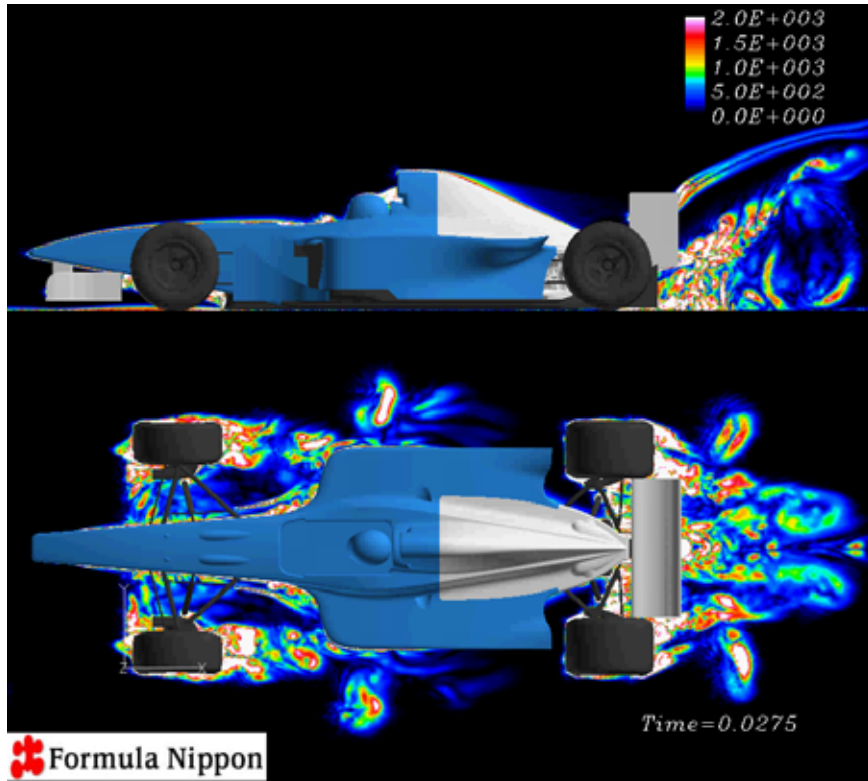
1/2 windtunnel test model

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

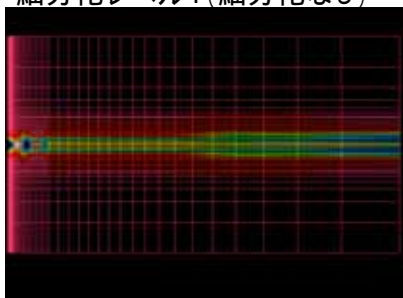


18

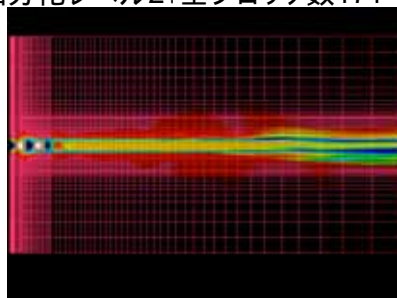
Adaptive Mesh Refinement (AMR) によるアプローチ例

(噴出マッハ数 $M=1.6$)

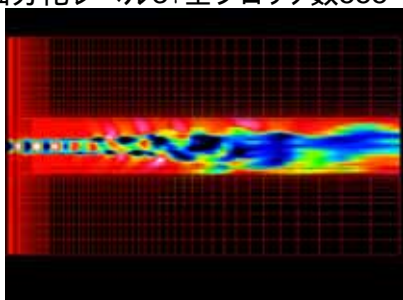
細分化レベル1(細分化なし)



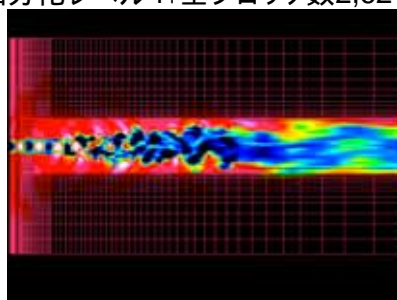
細分化レベル2:全ブロック数171



細分化レベル3:全ブロック数555

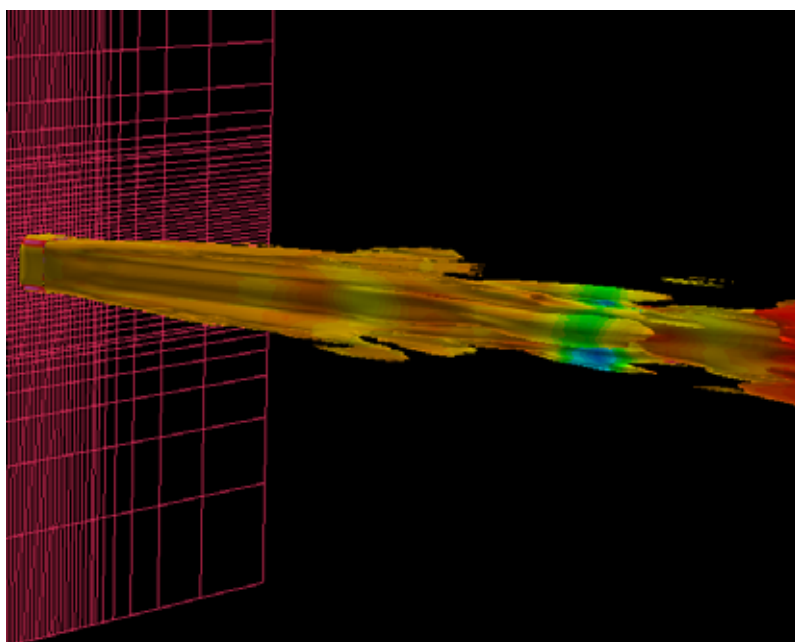


細分化レベル4:全ブロック数2,621

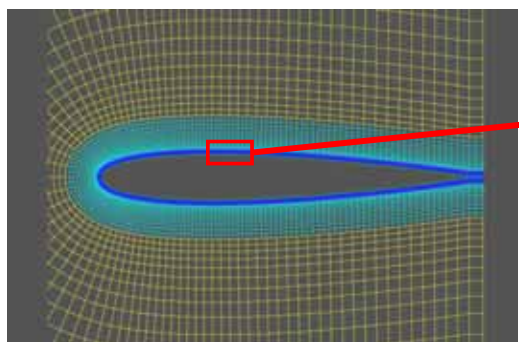


Advance/FrontFlow/FOCUSによる超音速ジェット解析例 (Adaptive Mesh Refinementの適用)

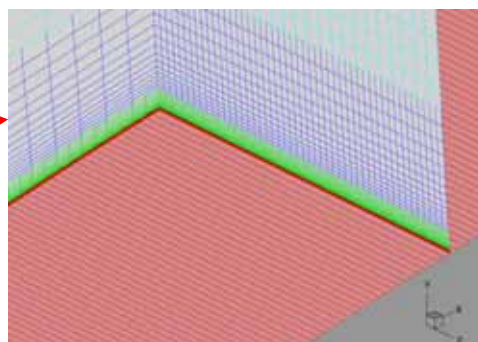
(噴出マッハ数 $M=1.6$)



Embedded Mesh Refinementのアプローチ例



側面図



壁面近傍の様子

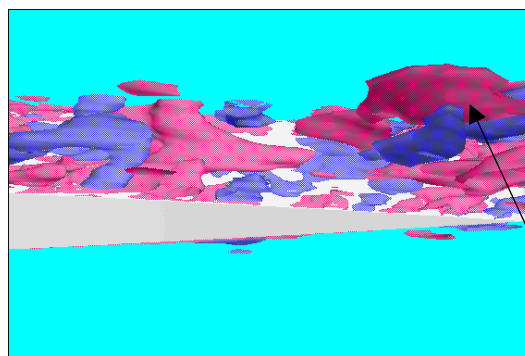
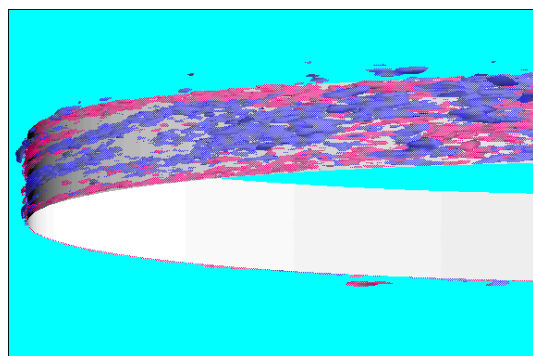
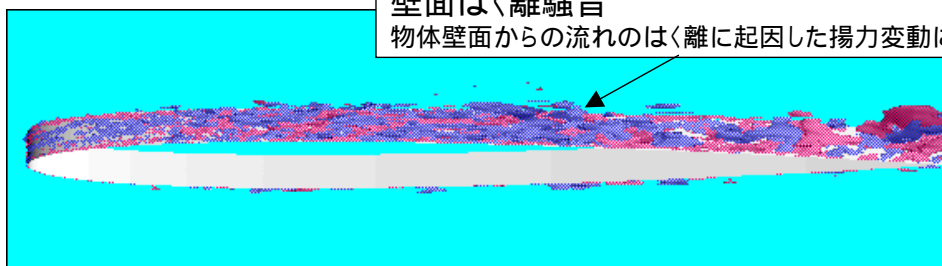
$Re = 9 \times 10^6$ の2次元的な乱流に対して粘性底層まで解像するには数億点必要だが、この手法で1千万要素程度まで節減できる



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

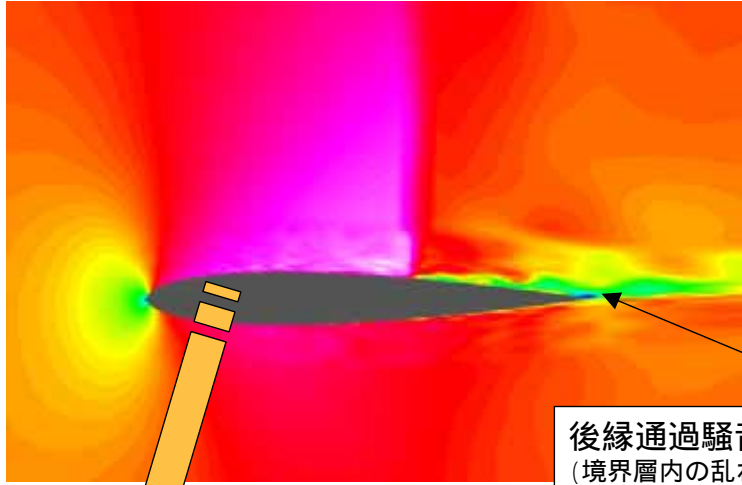


渦放出騒音源の渦

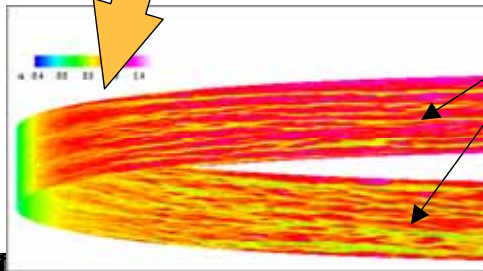


22

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

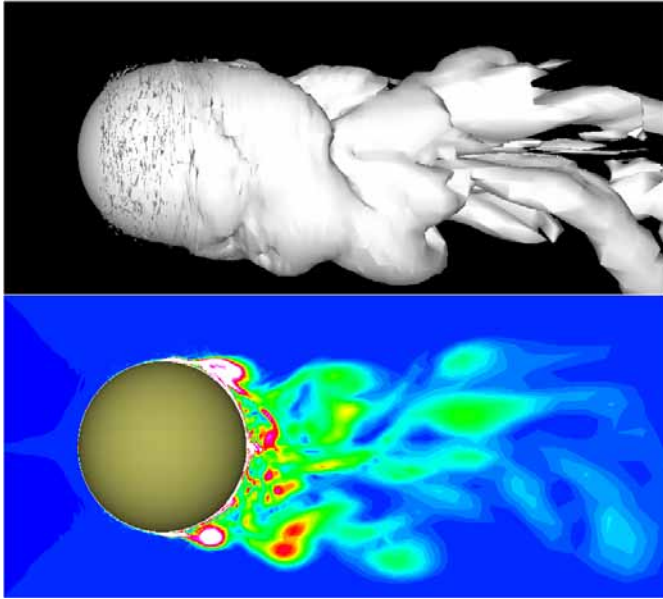
メモリの大幅な節約



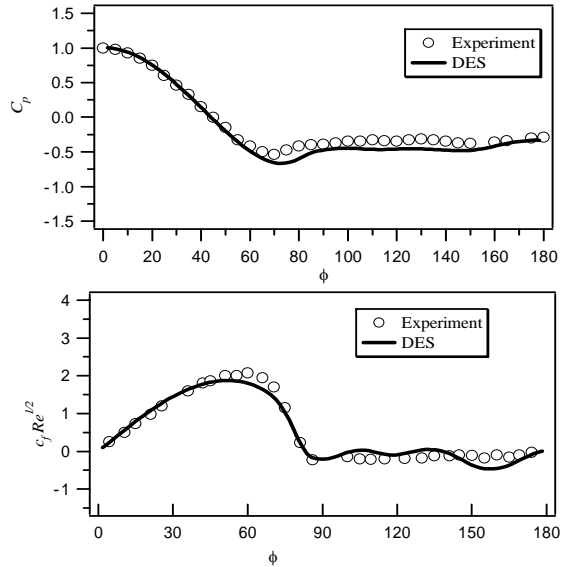
24

Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りのDES解析

層流剥離の場合 ($Re = 1.6 \times 10^5$)

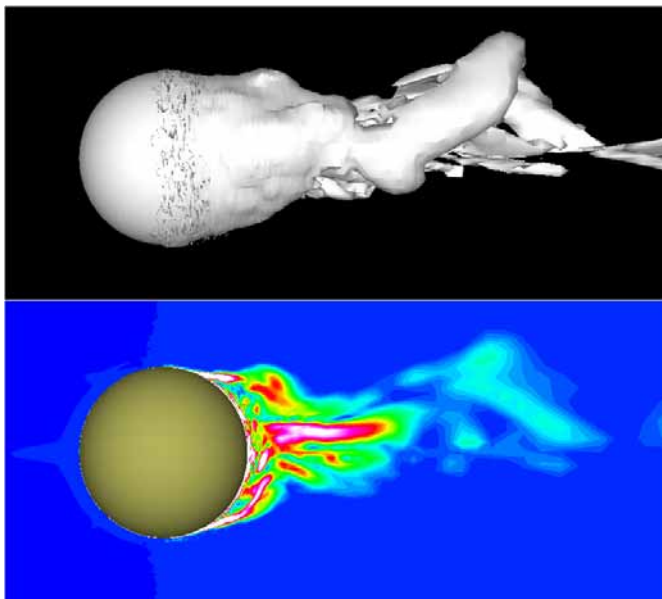


- 壁近傍はRANS、壁遠方はLES
- $100 \times 140 \times 40$ (56万要素)
- 粘性底層まで解像するLESメッシュの場合630万要素必要
- LESメッシュに比べて
メッシュが約10倍節約、時間刻みが倍以上とれる
計算時間がLESに比べて20分の1で済む

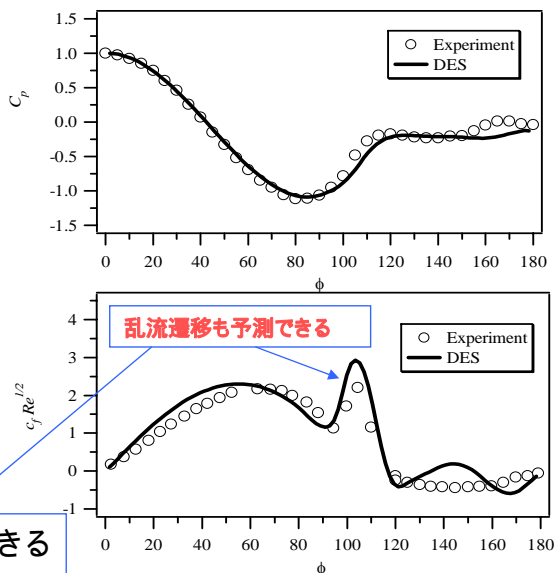


Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りのDES解析

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

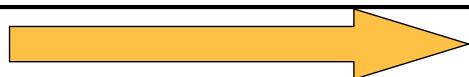


渦放出音のスケール効果の影響を予測できる
(対数則速度境界条件では達成できない)



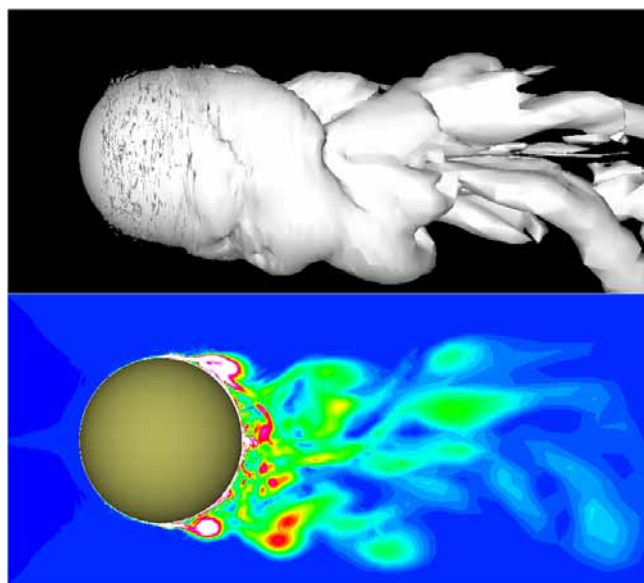
Advance/FrontFlow/FOCUSによる球周りの乱流解析

$Re = 1.6 \times 10^5$

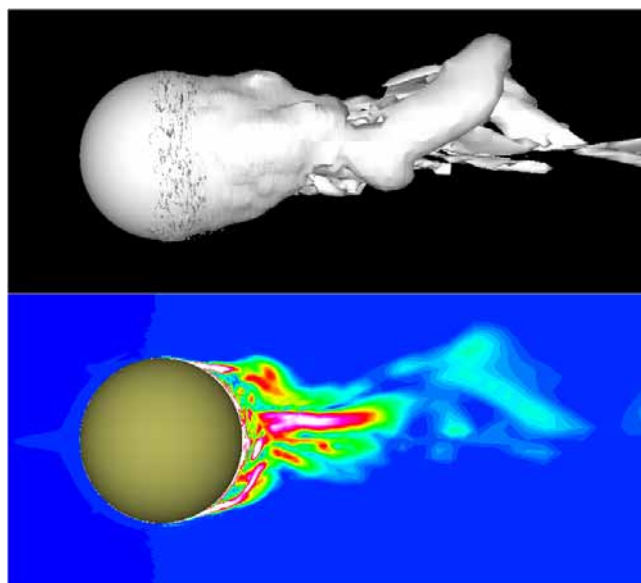


$Re = 1.1 \times 10^6$

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

