

大規模数値シミュレーションによる ものづくりの革新

東京大学生産技術研究所
革新的シミュレーション研究センター 加藤千幸



講演内容



- 今後の計算機の発達と数値シミュレーションの進展
- 大規模数値シミュレーションの実現のための工夫
- 大規模数値シミュレーションの産業応用事例
- 今後の展望と課題

今後の計算機の発達と数値シミュレーションの進展

4

スパコン京の登場とその後の進展

■ “K”-コンピュータ (2012年)

- 128 ギガ・フロップス CPU: 128ビット SIMD (2 GHz) × 8コア
- 8万 CPU, 64万コア, 10.51 ペタ・フロップス



■ FX100 (2015年)

- 1 テラ・フロップス CPU: 256ビット SIMD × 32コア

■ Intel Knights Landing (2016年)

- 3 テラ・フロップス CPU

5

2020年のスパコンと大規模計算の実用化の進展



- 1ラックの計算機
 - 4 テラ・フロップスのCPUを100台から200台搭載
 - 1ラックで京の1/20~1/10(1ペタ・フロップス程度)の計算能力を提供

- 1ペタ・フロップスの計算機の単価
 - 1億円程度と推定
 - 産業界でも京の1/10程度の計算の実用化が進展

6

数値シミュレーションの発展方向



- より大規模な解析の実現
 - 1兆格子点を用いた流体計算、など
 - さまざまな試作試験の完全な代替え
 - 現象の詳細メカニズムの解明

- より多くの解析ケースの同時実行
 - 1万ケースの流体計算によるターボ機械の最適化、など

- 連成解析の実用化が進展
 - 流体-構造連成解析
 - 流体音解析
 - 流体-構造-伝熱解析、他

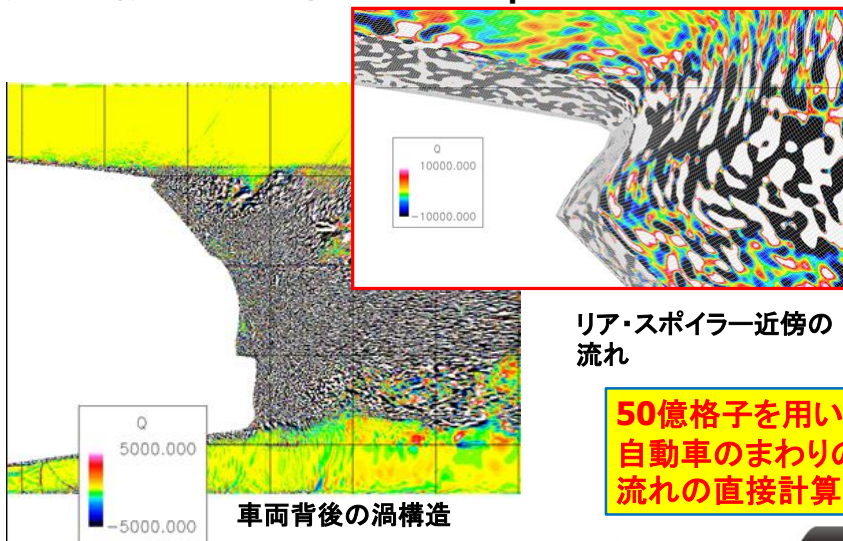
7

大規模数値シミュレーションの 実現のための工夫 (流体解析ソルバーの場合)

8

ソルバーの要件1

- 流れの微細な渦が解析可能 (10 μ mから1mm)

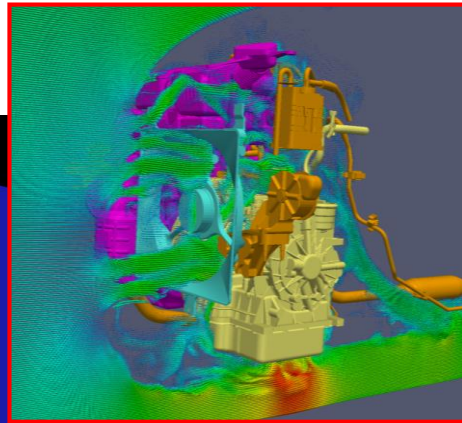
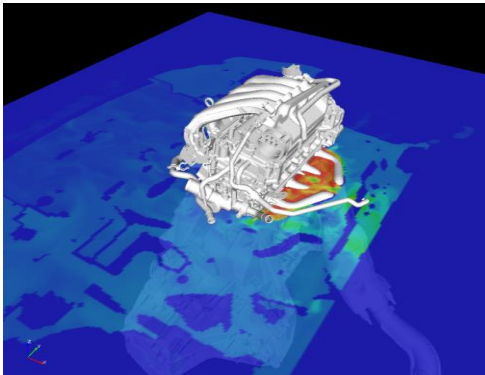


9

ソルバーの要件2



■ 実機の詳細形状をすべて再現



300億計算格子を用いた
エンジンルーム内の気流解析

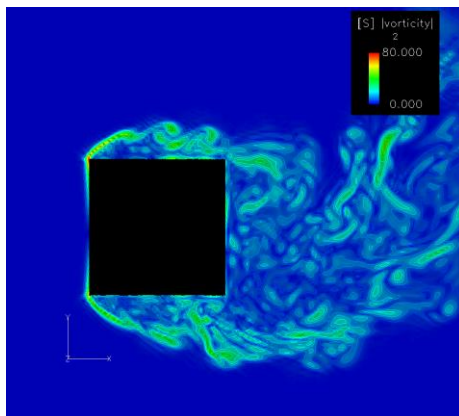
画像提供: 理化学研究所 小野謙二博士

10

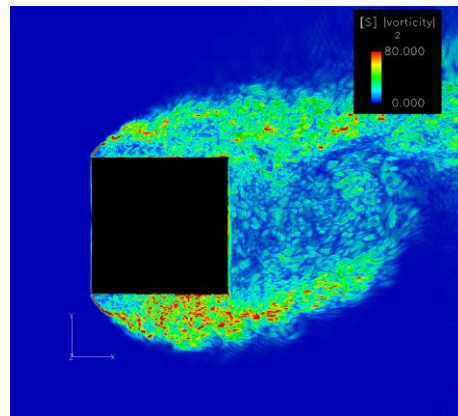
格子解像度と計算精度



■ 角柱まわりの流れの解析(主流方向速度分布の比較)



2,200万格子



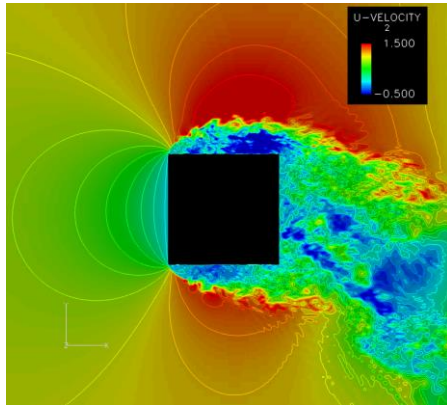
5,500万格子

11

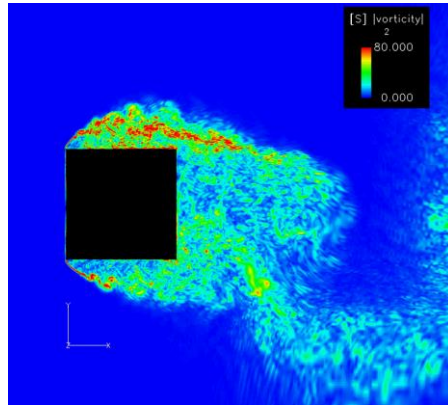
角柱まわりの流れの様子



■ 細密格子(5,500万格子)による計算結果



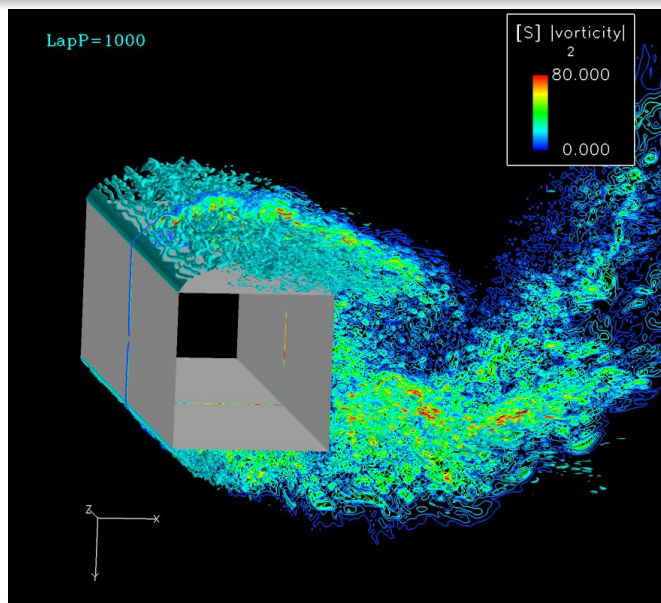
主流方向流速分布



主流方向渦度分布

12

細密格子で捉えられた微細な渦構造

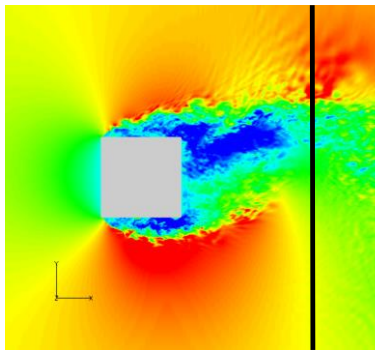


13

風洞実験結果との比較-1/2

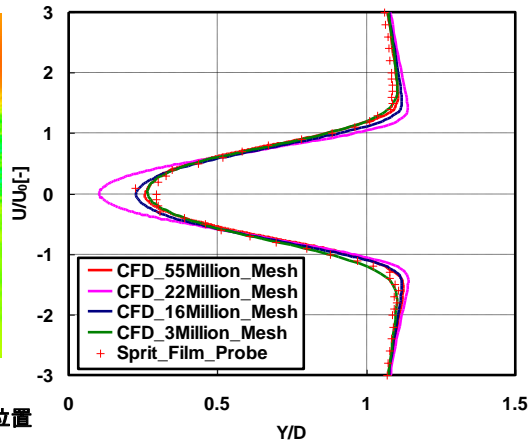


■ 後流の流速分布の比較



流速分布の比較位置

瞬時の流速分布

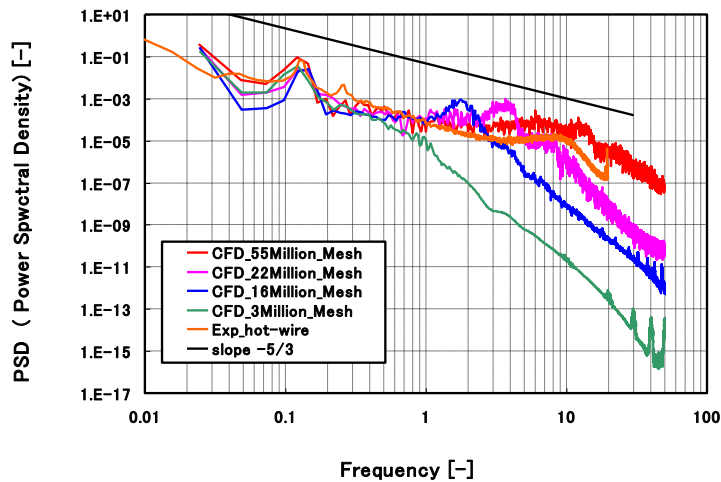


角柱後流1.5Dの位置における
流速分布の比較

流速変動スペクトルの比較-1/2



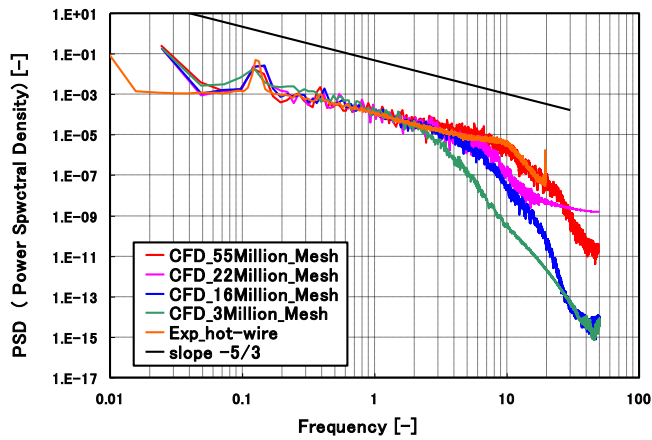
■ はく離直後の流線における変動スペクトル



流速変動スペクトルの比較-2/2



■ 完全に発達した後流における変動スペクトル(x=3D)

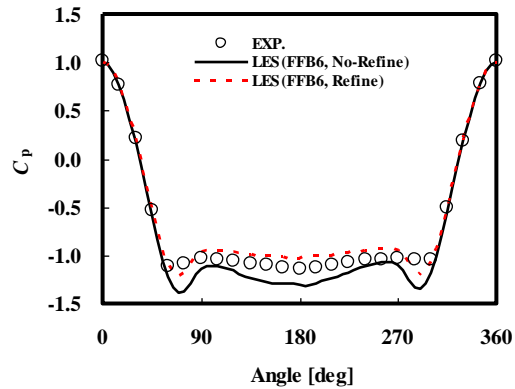
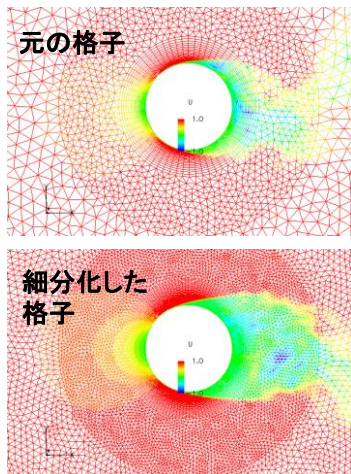


16

計算格子の自動細分化



■ レイノルズ数10万の円柱まわりの流れ解析例



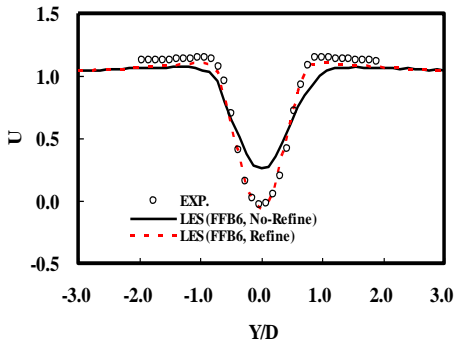
円柱まわりの圧力分布の比較

17

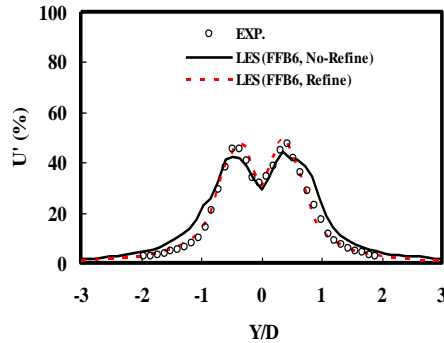
計算格子の自動細分化(続き)



■ レイノルズ数100,000の円柱まわりの流れ解析例

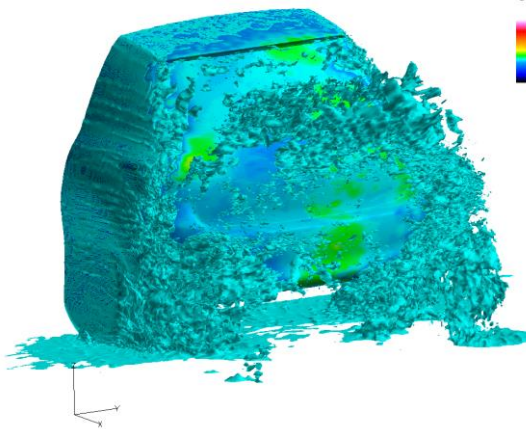


時間平均流速分布の比較



乱れ速度分布の比較

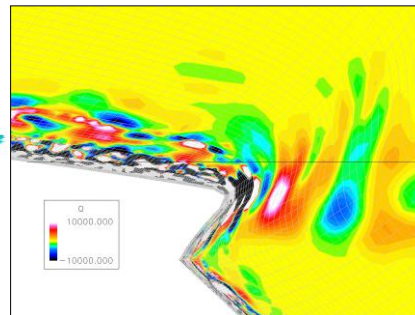
格子の自動細分化機能を利用した解析例



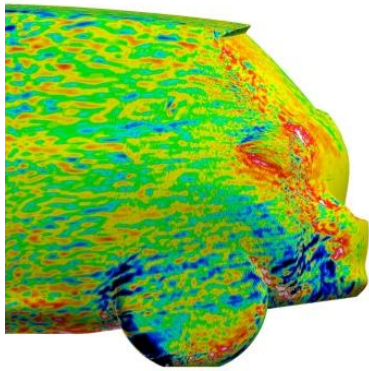
車両表面の境界層と後流の解析結果



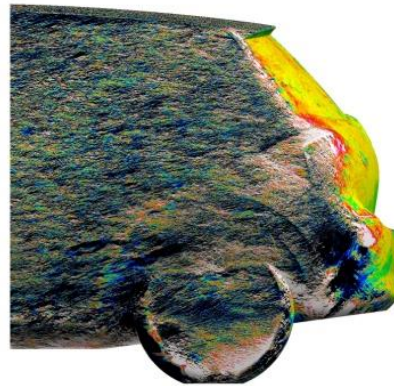
壁面近傍の微細渦の解析結果



格子細分化の効果



5,000万格子



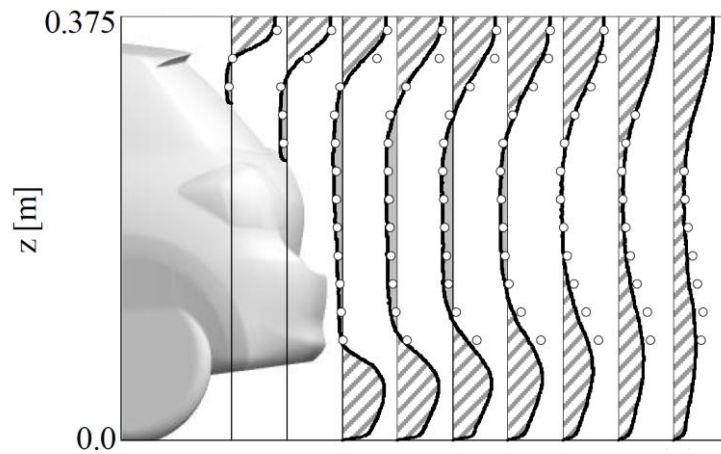
30億格子

20

自動車後流の風洞実験値との比較



○ Experiment
— Calculation

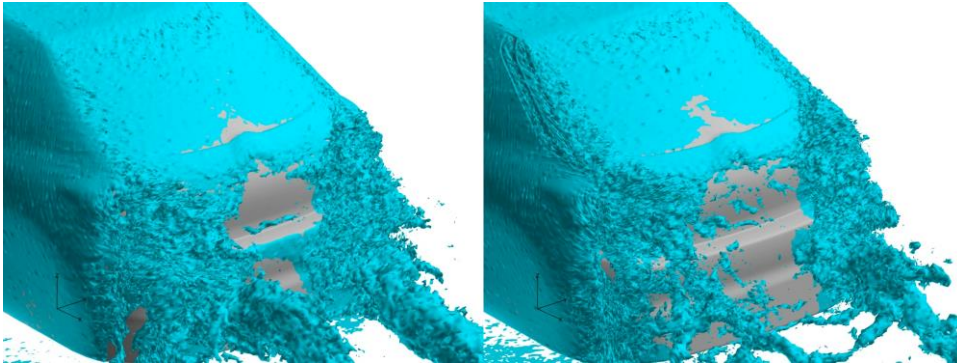


21

格子自動細分化の利用例



- 車両の空力開発など多くの分野に適用中



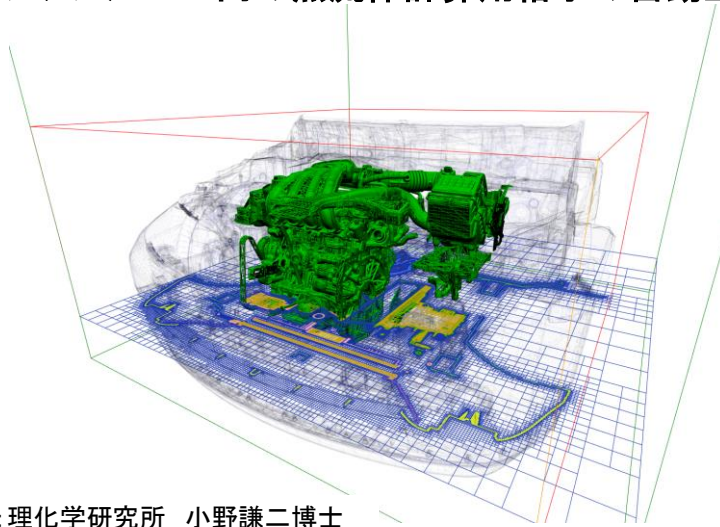
トヨタ自動車-東京大学の共同研究

22

直交格子を利用した自動格子生成



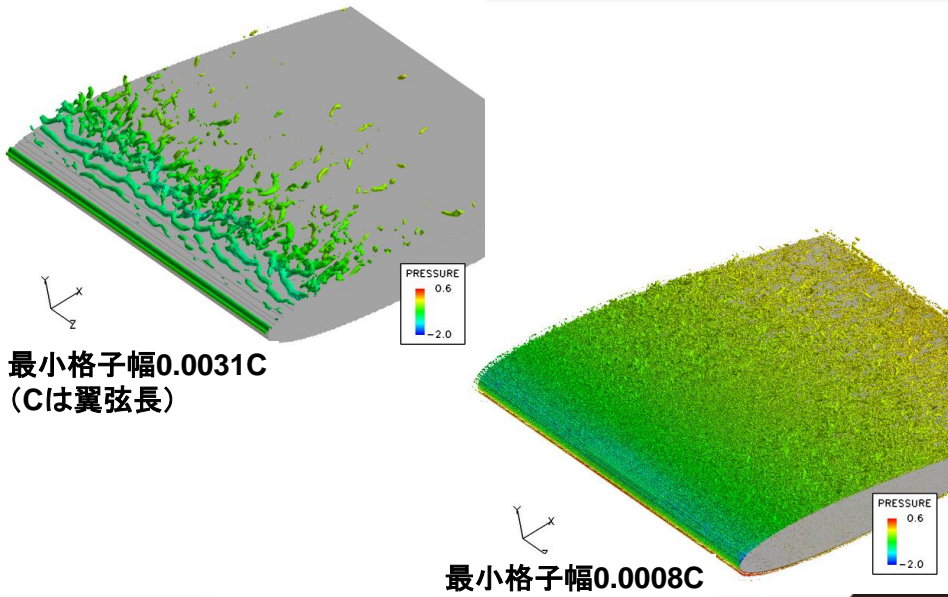
- エンジンルーム内の熱流体計算用格子の自動生成



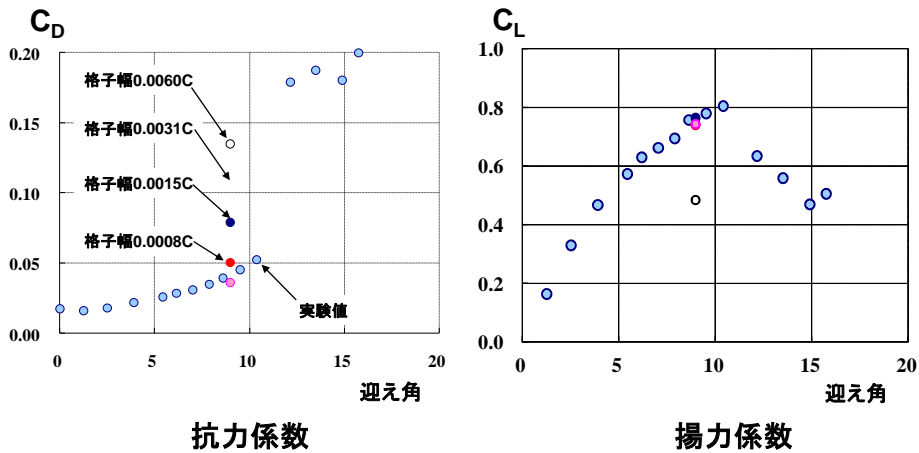
画像提供: 理化学研究所 小野謙二博士

23

直交格子を利用した翼まわりの流れの解析例



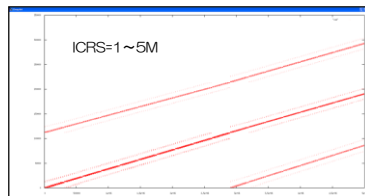
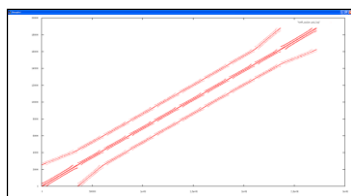
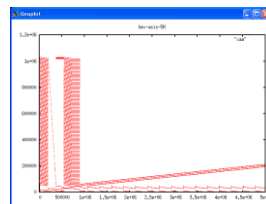
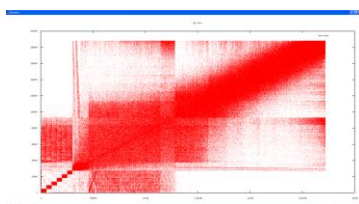
翼に働く流体力の実験値との比較



ソルバーの高速化のための工夫-1/3



■ データの並び替えによる転送効率の向上



4面体メッシュの例

6面体メッシュの例

協力: 理化学研究所 計算科学研究機構

ソルバーの高速化のための工夫-2/3



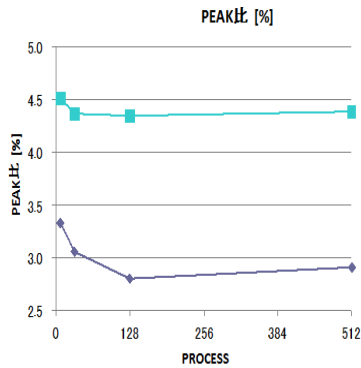
■ 主要計算ルーチン的高速化の効果

	Hexahedral element	Tetrahedral element
Original (1core)	5.9%	2.4%
Full unroll (1core)	10.8%	4.2%
Full unroll (8core)	5.4%	3.0%
Full unroll + Reordering (1core)	10.2%	10.2%
Full unroll + Reordering (8core)	8.1%	7.7%

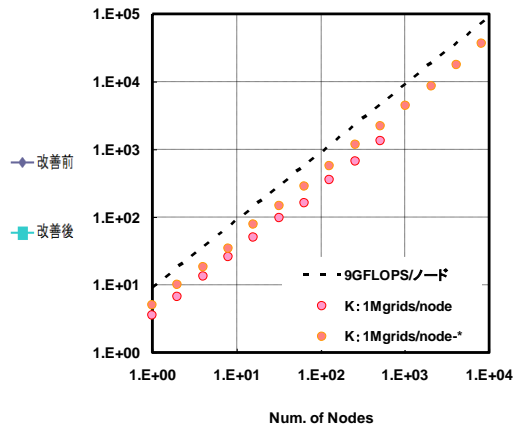
ソルバーの高速化のための工夫-3/3



■ ソルバーの全体性能の計測例



ピーク性能に対する性能比



並列計算による速度向上

28



大規模数値シミュレーションの 産業応用事例

29

曳航水槽試験の代替えを目指した 大規模流体計算

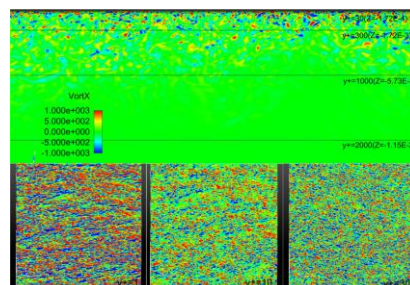
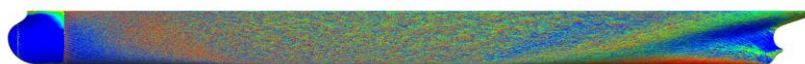
(格子点数:約320億点)

協力: (一財)日本造船技術センター

30

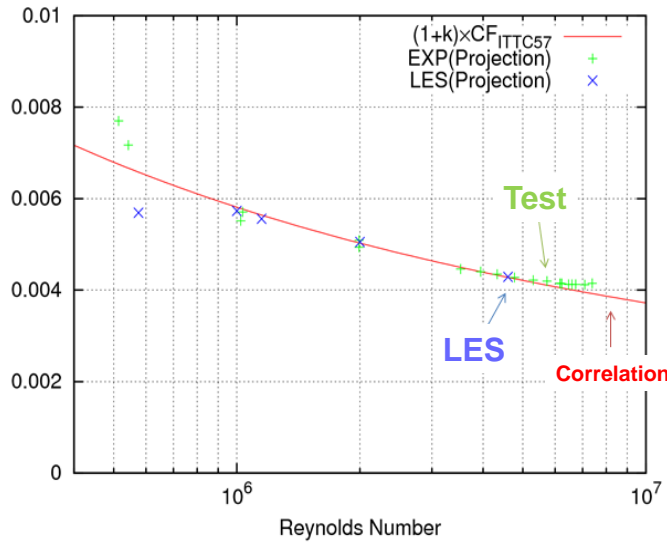
船体まわりの乱流境界層の直接計算

- 320億格子を用いた大規模計算により微細な乱流渦を完全に解像



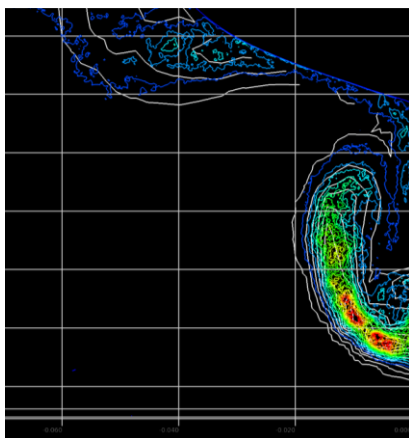
31

実験に対して1%以内の誤差で推進抵抗を予測

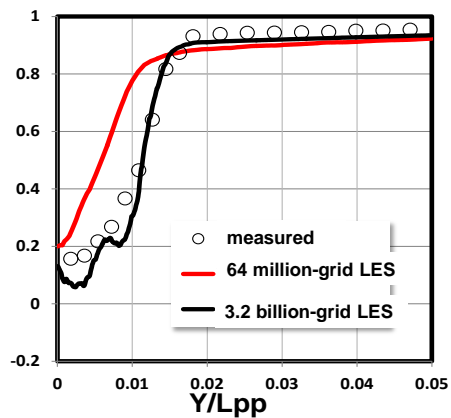


32

プロペラ面における流速分布の比較



プロペラ面における流れ速度の比較



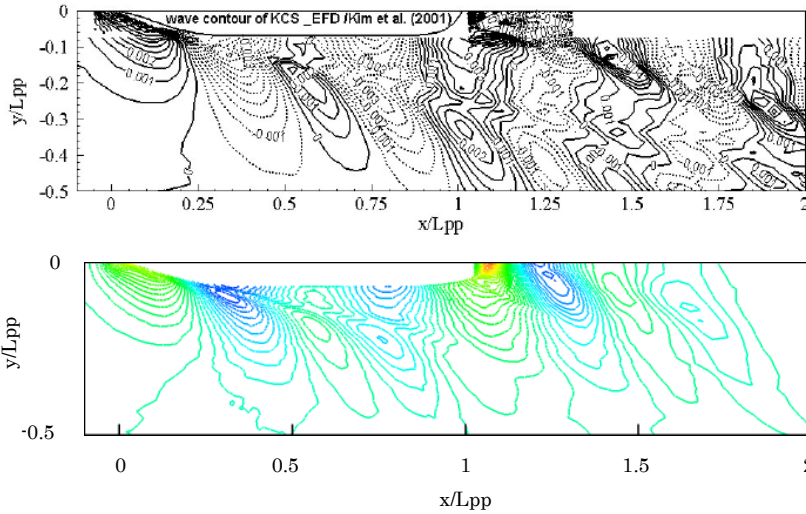
プロペラ軸上の流速分布の比較

33

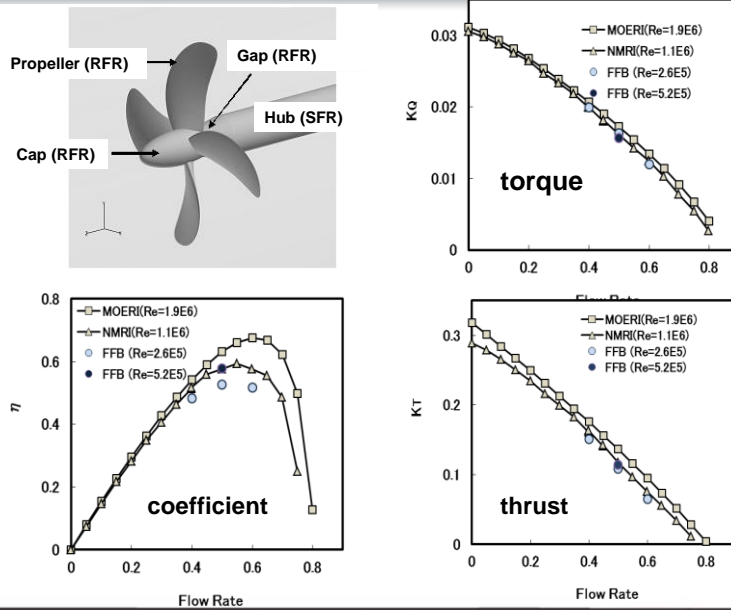
自由表面の解析結果



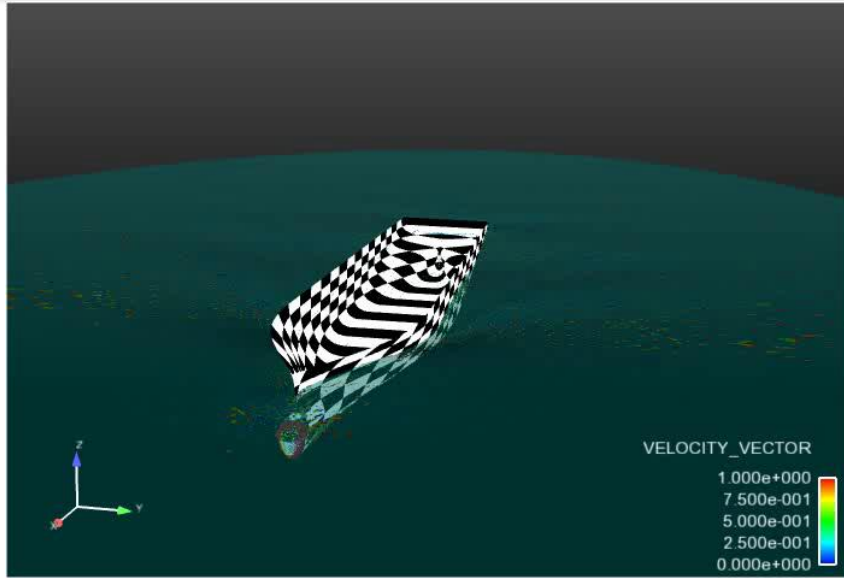
■ 船体まわりの波高の比較(上:計測、下:計算)



プロペラ単独試験との比較

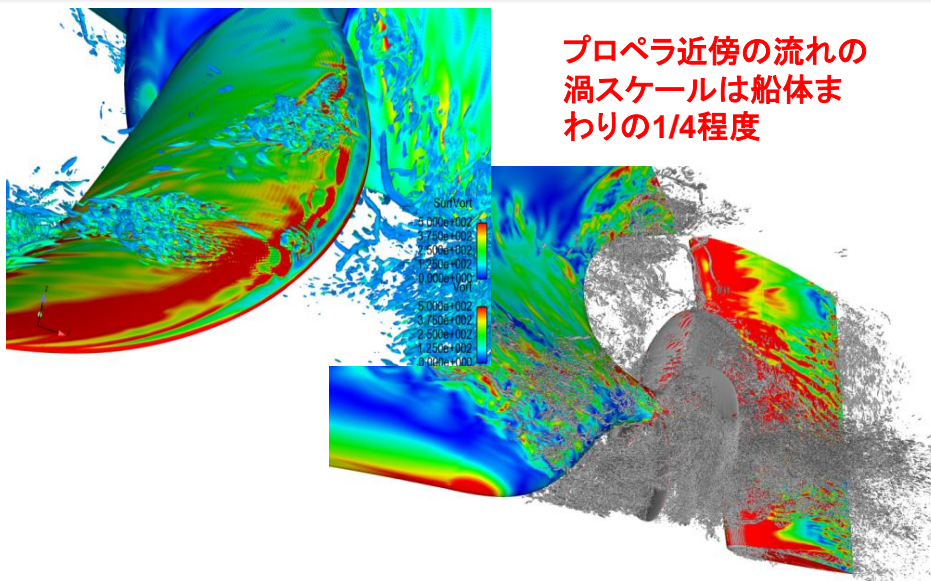


自由表面と乱流境界層の同時計算



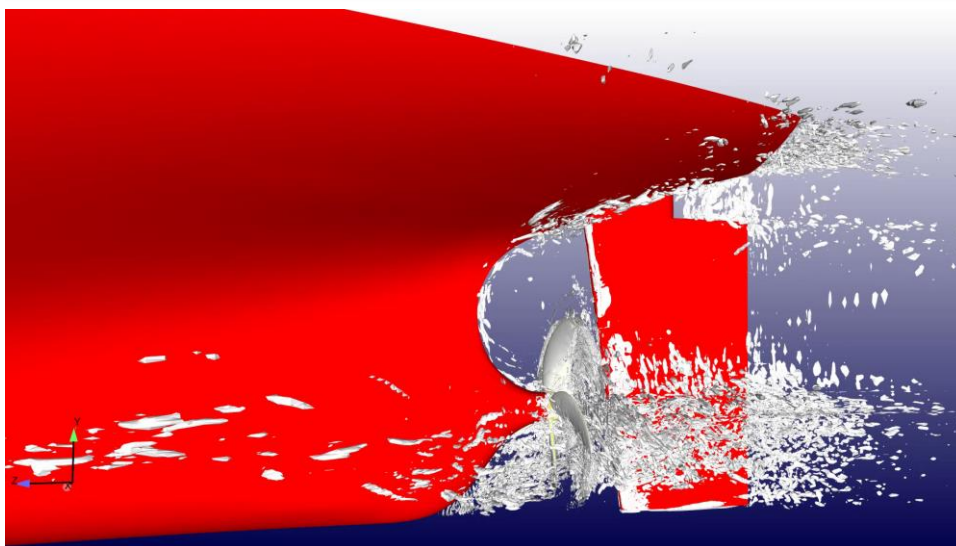
36

船体とプロペラの同時計算



37

船体の影響を受けるプロペラまわりの の流れの計算結果



38

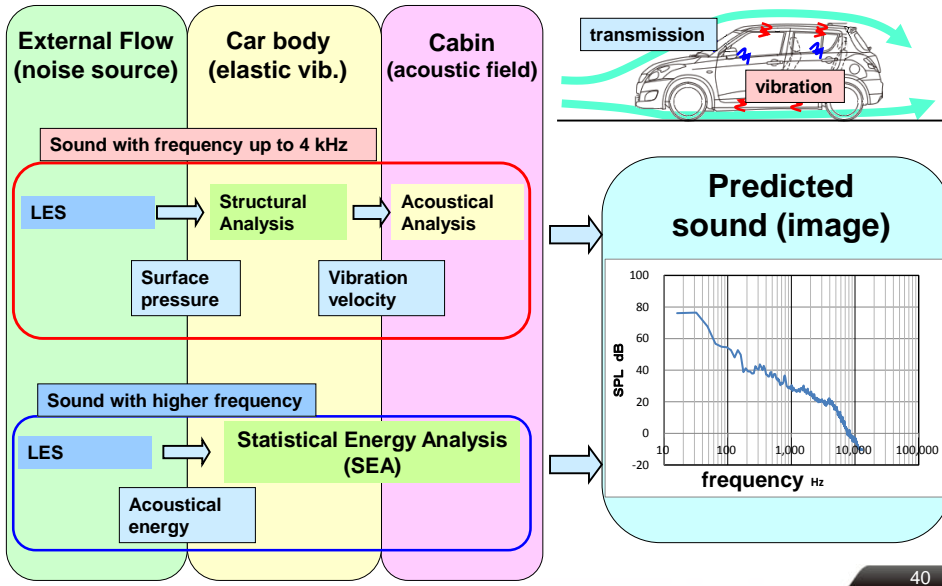


試作レスを目指した車内騒音の予測

協力: スズキ株式会社

39

流体・構造振動・音響一方向連成解析



40

騒音を計測した車両(MRワゴン)



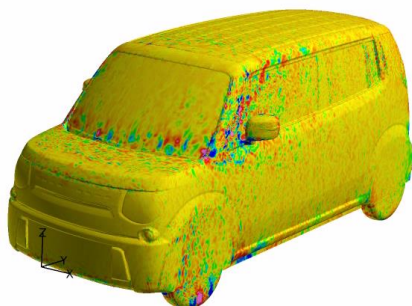
■ 内装材をすべて撤去して騒音計測



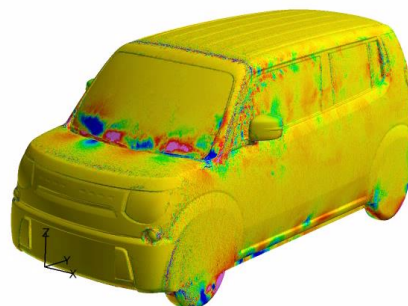
車両まわりの流体解析結果-1/4



■ 車両表面の渦度分布の比較



8,000万格子



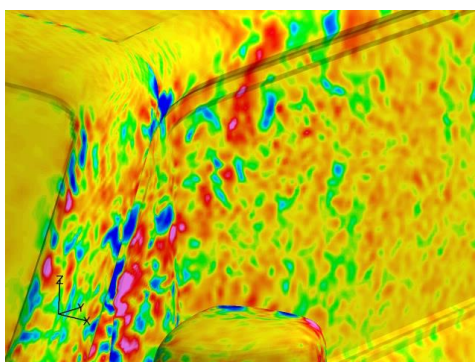
50億格子

42

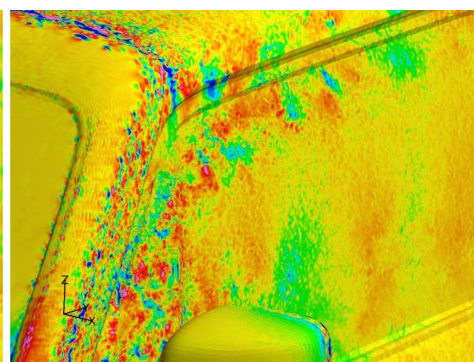
車両まわりの流体解析結果-2/4



■ 車両表面の渦度分布の比較



8,000万格子



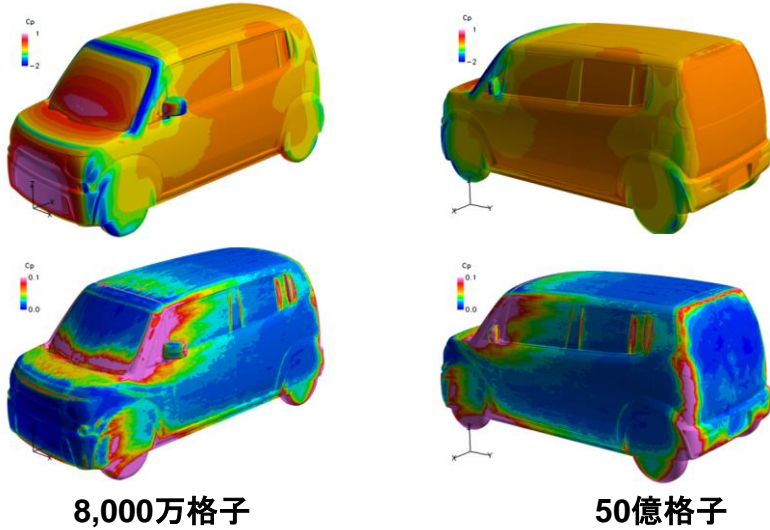
50億格子

43

車両まわりの流体解析結果-3/4



■ 車両表面の圧力分布の比較(上:時間平均、下:変動)

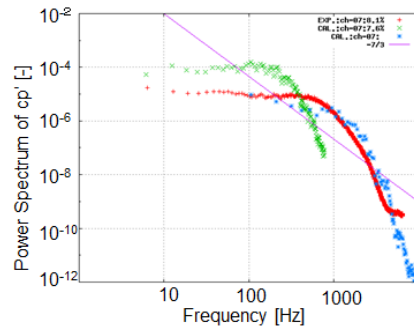
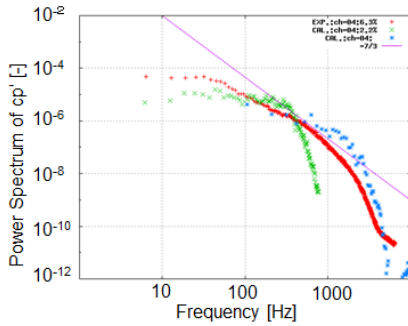


車両まわりの流体解析結果-4/4



■ 車両表面の圧力変動スペクトルの比較

● スペクトルの評価点



+ 実験

x 6,400万格子

* 50億格子

— -7/3 power law

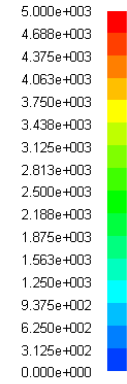
ボディの振動解析結果-1/2



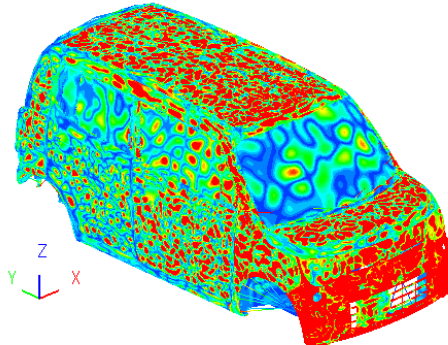
■ 車両表面の加速度分布(瞬時値)

Analysis: Dynamic, Results: Step, Solver: ADVCSolver 4.11-alpha
 Model size: 2472712 nodes, 2453336 elements
 Variable: Acceleration[norm], Time step: 0/100
 Process Name = PROCESS1001 Process Number = 1001
 Time = 1.0000000e+007

[mm/s²], Rainbow[16]



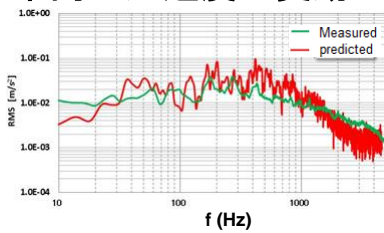
Max: 1.636e+005
 Min: 0.000e+000



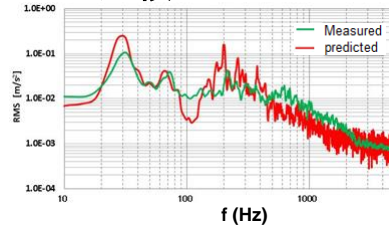
ボディの振動解析結果-2/2



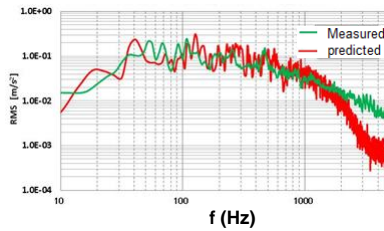
■ 車両の加速度の変動スペクトルの比較



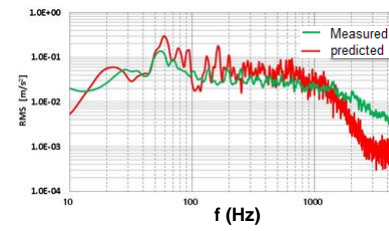
フロントガラス



車両後方のパネル

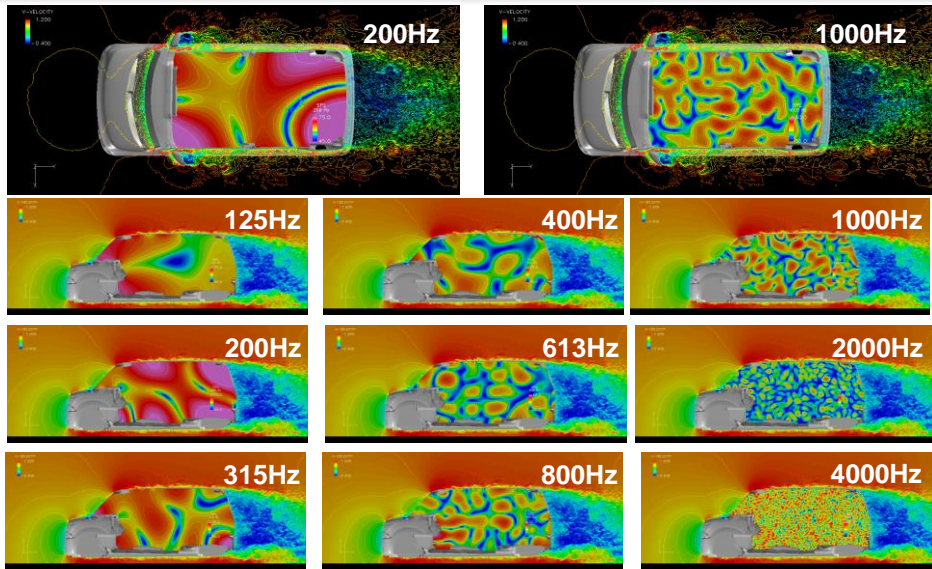


車両前方のパネル



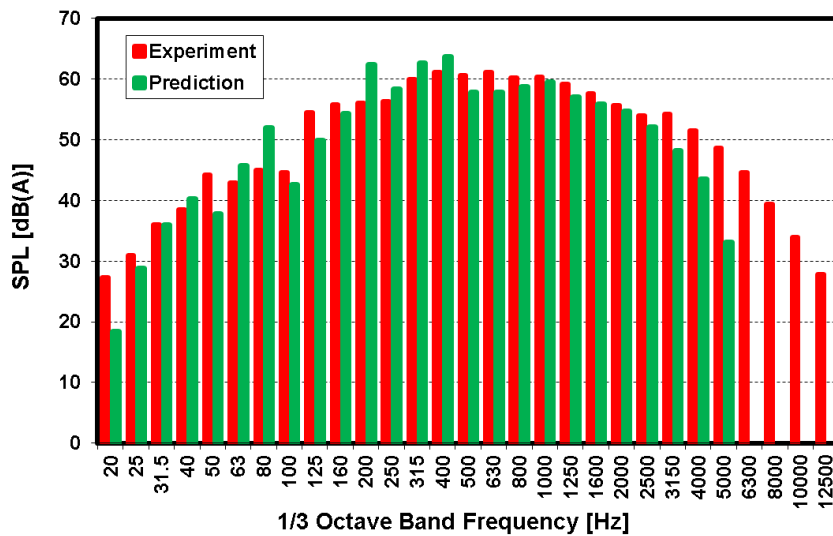
車両側方のパネル

車両内部の音響解析結果



48

運転席における音圧レベルの比較

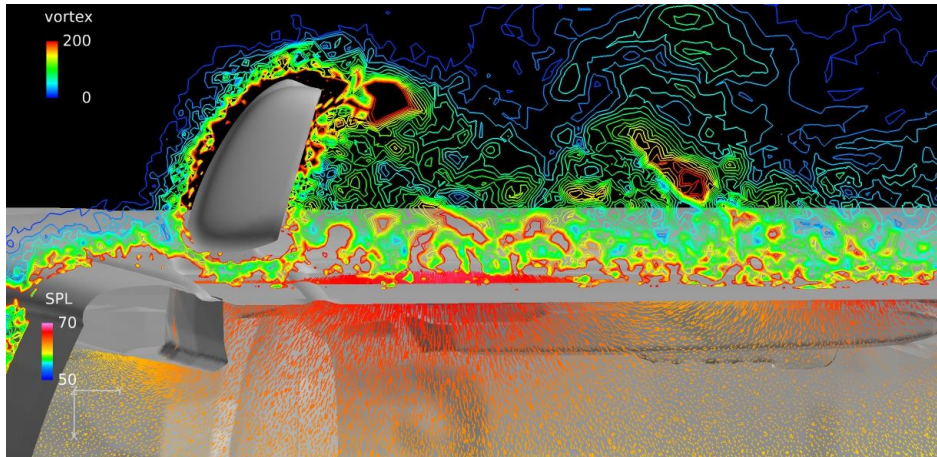


49

音源と音の伝播経路の解析



■ ドアミラーから発生する流体騒音の振動・音響伝播



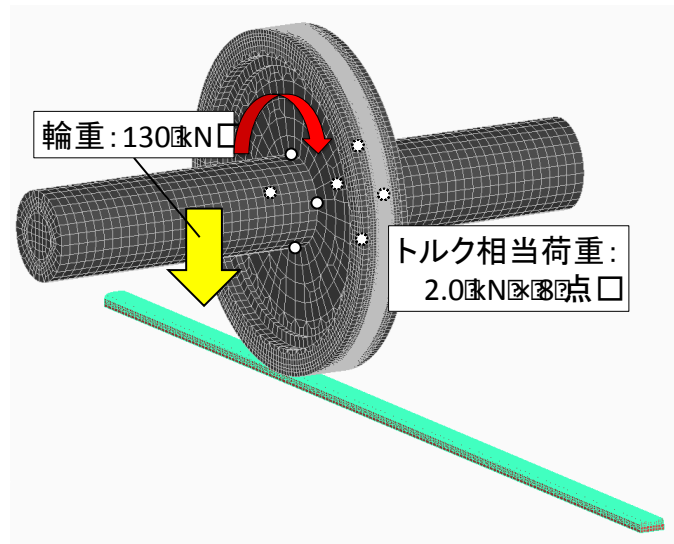
50

大規模動的接触解析による車輪・レールの劣化・損傷メカニズムの解明

データ提供: 東京大学奥田洋司研究室
(公財)鉄道総合技術研究所
国立研究開発法人 海洋研究開発機構

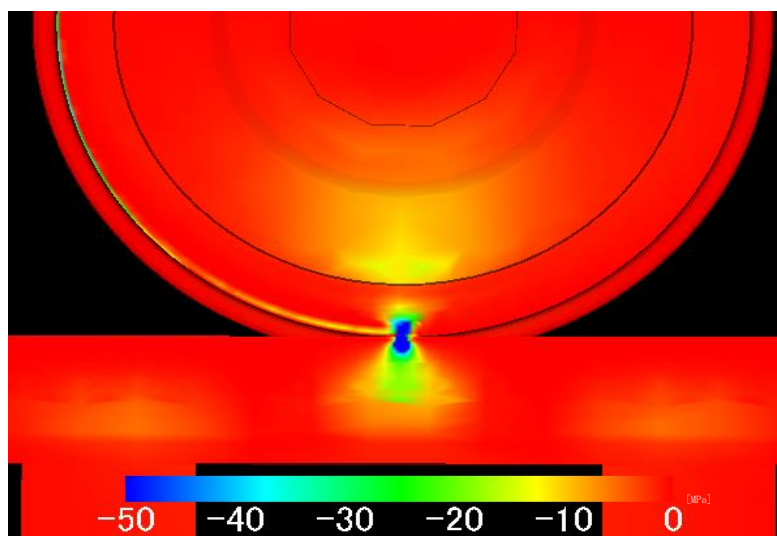
51

1車輪とレールの解析モデル



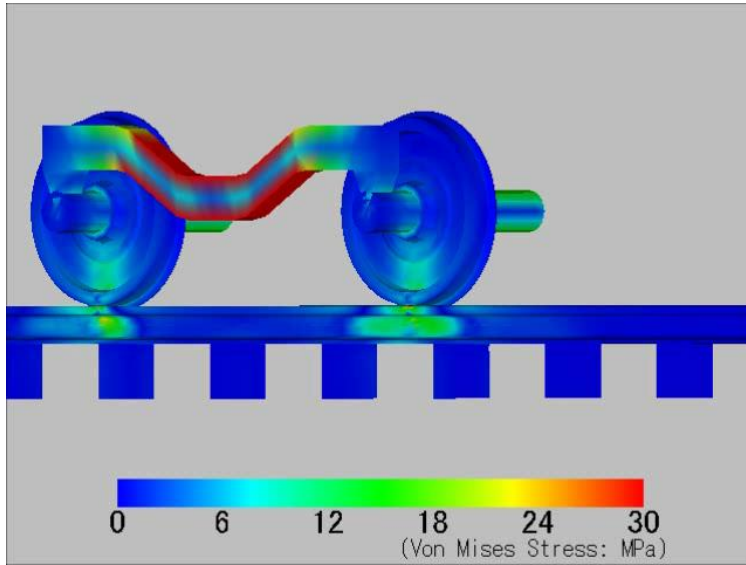
52

コンタクトパッチ近傍の応力解析結果



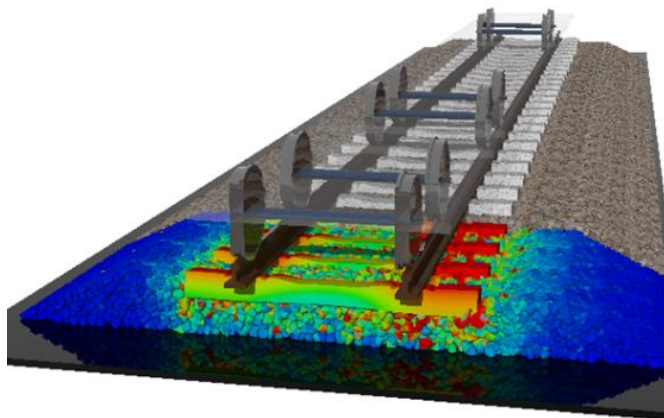
53

車輪の運動に伴う応力の時間変動



54

実車走行荷重によるバラスト内の振動伝播解析



鉄道総研と海洋研究開発機構との共同研究

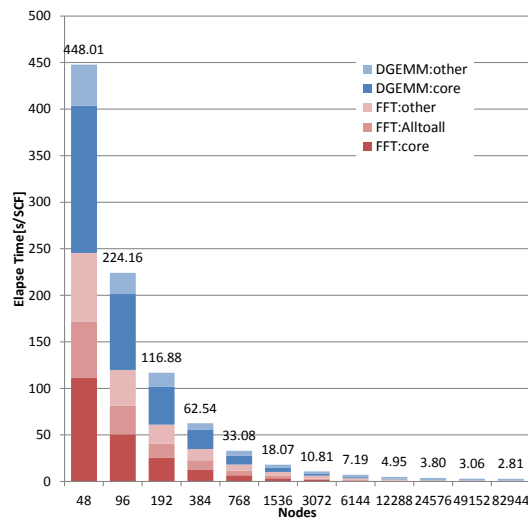
55

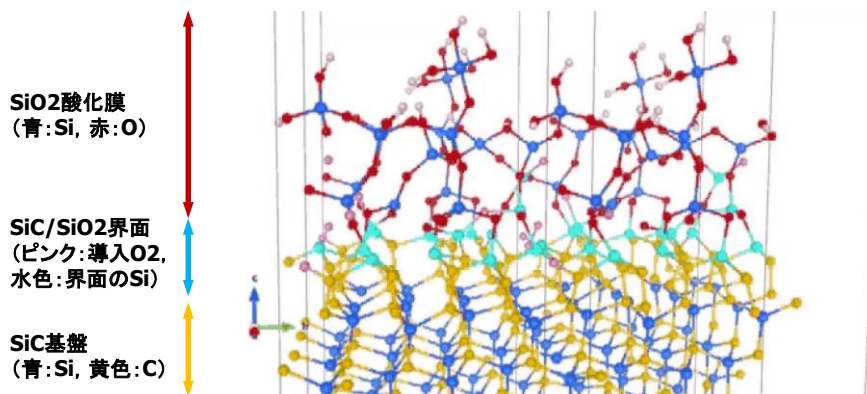
新たな材料開発のための第一原理 分子動力学解析

データ提供: 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
(株)東芝研究開発センター

第一原理分子動力学解析を実現するための 計算の高速化

■ 並列計算によるPHASE/0の計算時間の短縮





今後の展望と課題

今後の展望と実用化のための課題



■ 2020年の展望

- 世界最大のスパコンの性能→1エクサ・フロップス級(京の100倍)
- 産業界で利用されるスパコン→京と同程度
- 数百億格子を流体計算、数億自由度の構造解析、その連成解析の実用化が進展

■ 実用化のための課題

- 格子生成の自動化
- 解析精度の保証
- 人材の育成