

スーパーコンピュータが拓く 次世代の空力シミュレーション ～ゴルフボールから自動車、高層建物まで～

神戸大学大学院システム情報学研究科 教授
理化学研究所計算科学研究機構 チームリーダー
坪倉 誠
tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp

スパコンを知る集いin宇都宮
～「京」からポスト「京」へ～
2017年3月4日(土) 15:15～15:45
栃木県青年会館



• スポーツボールの不思議な挙動

1997年コンフェデ杯でのロベルトカル
ロスの伝説的フリーキック



R.A.ディッキー(トロント)のナックル
ボール

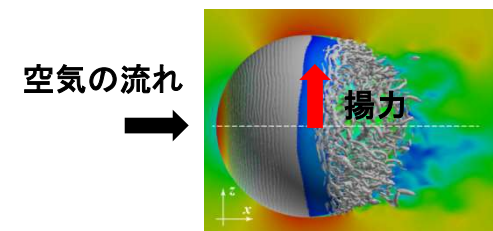
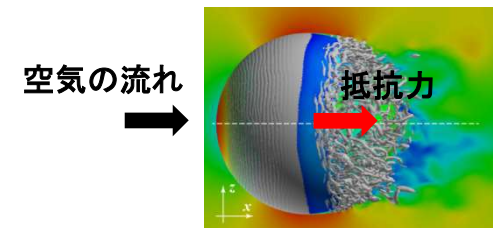


マスターズ7番ホールでのタイガー
ウッズの3Wティーショット



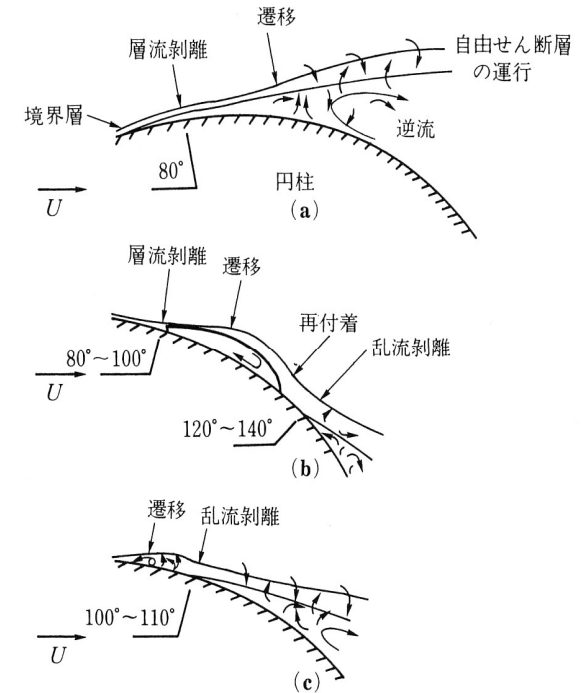
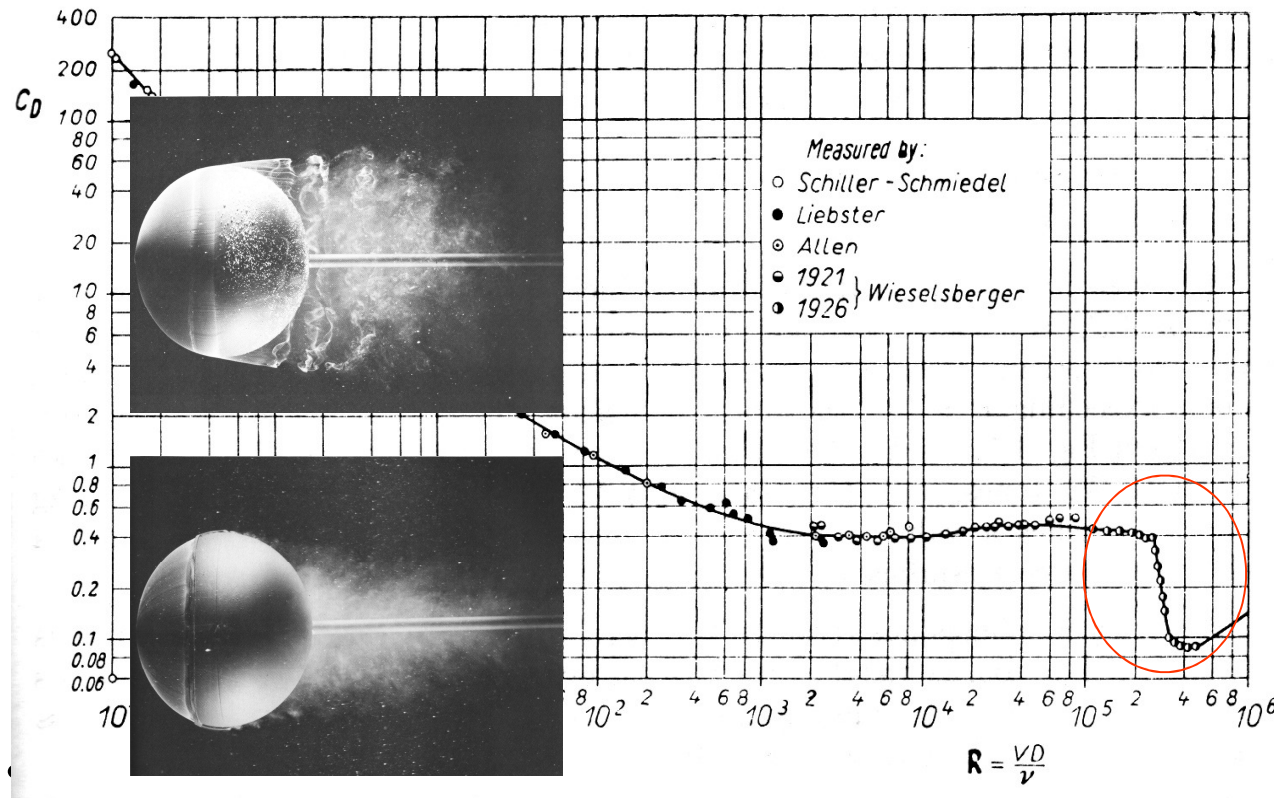
• 空気中をモノが動くと、空気から力を受ける

- 抵抗力: 空気の流れの方向に働く力
 - モノの運動を妨げようとする
- 揚力や横力: 空気の流れに直角に働く力
 - モノの運動の方向を変化させようとする
- 曲がるサッカーボールでは、回転により微妙な横力が発生している。メカニズムは今も研究中。



球の空気抵抗

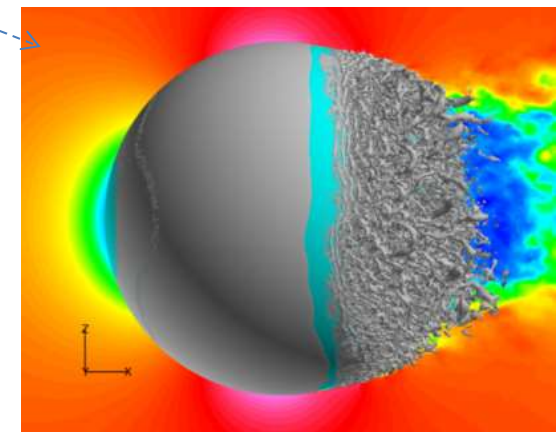
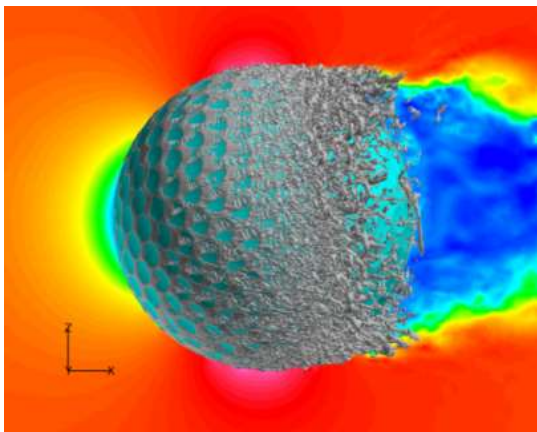
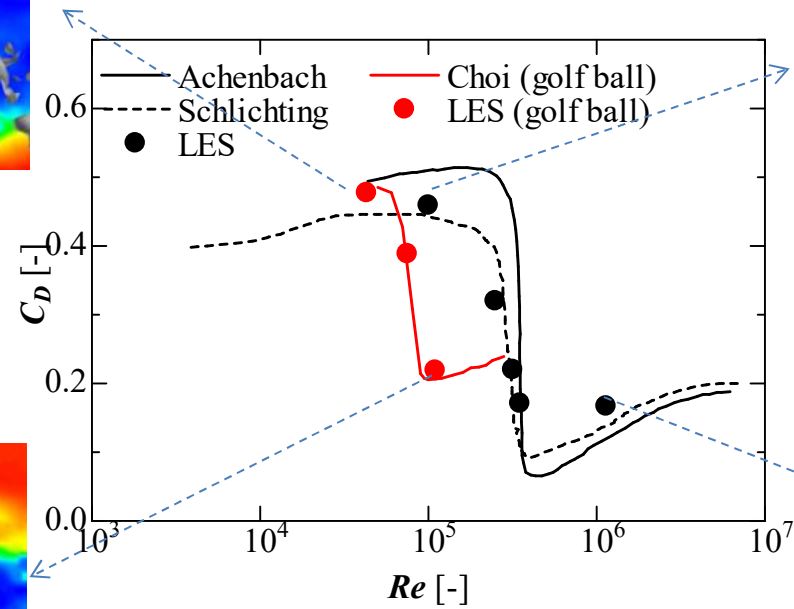
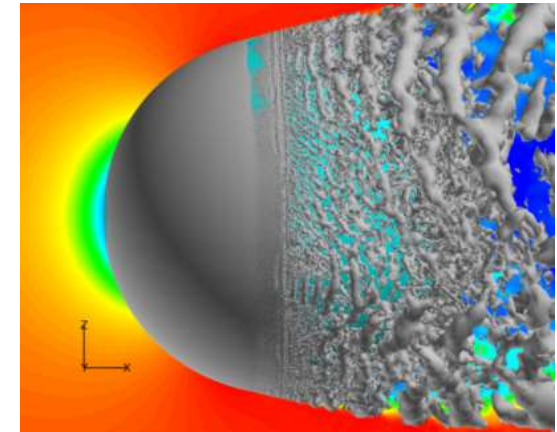
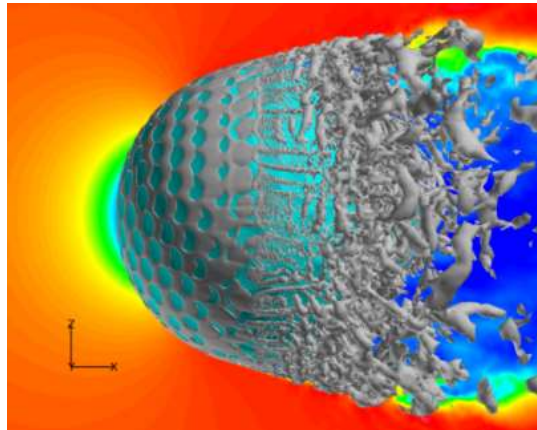
- ドラッグクライシス現象：スポーツボールに見られる空気抵抗の急激な変化
 - 境界層の剥離、再付着、乱流遷移が相互作用する複雑現象
 - CFDのベンチマーク→パンドラの箱



(構造物の耐風工学より)

ボール非回転時の風洞実験との比較

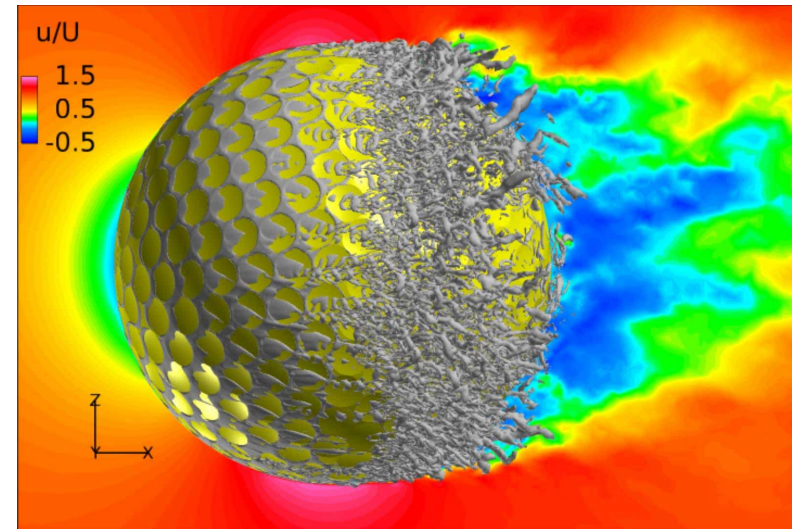
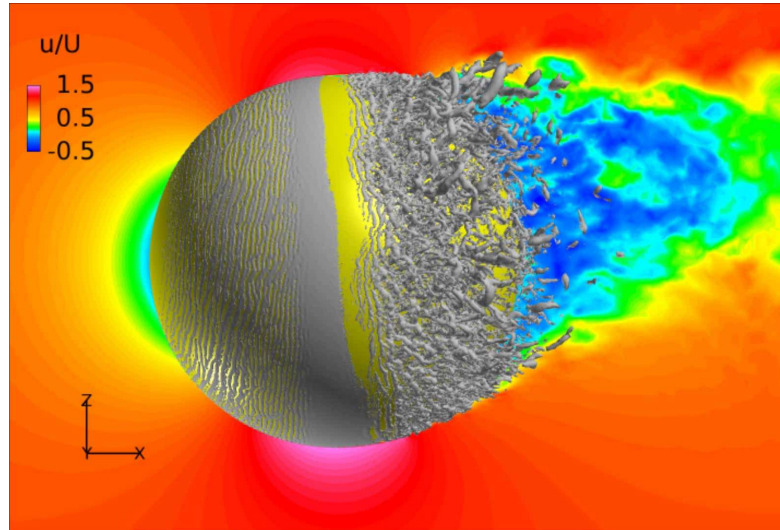
- 空気抵抗の風洞実験との比較



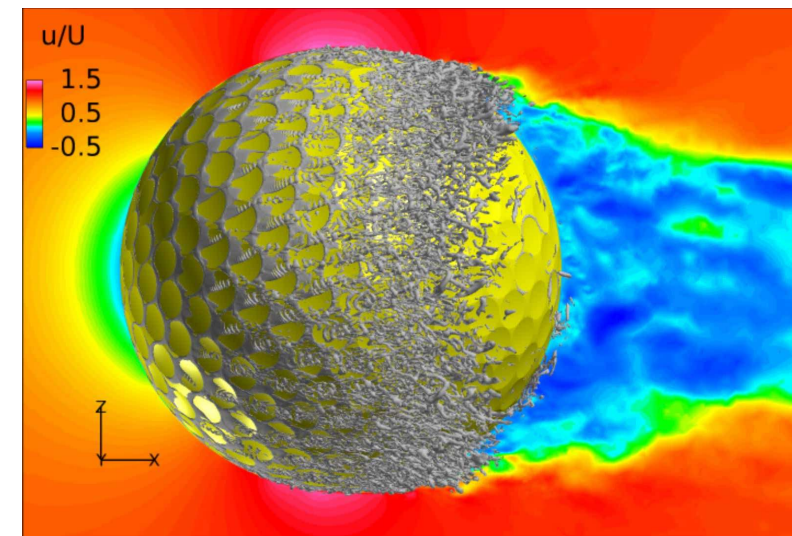
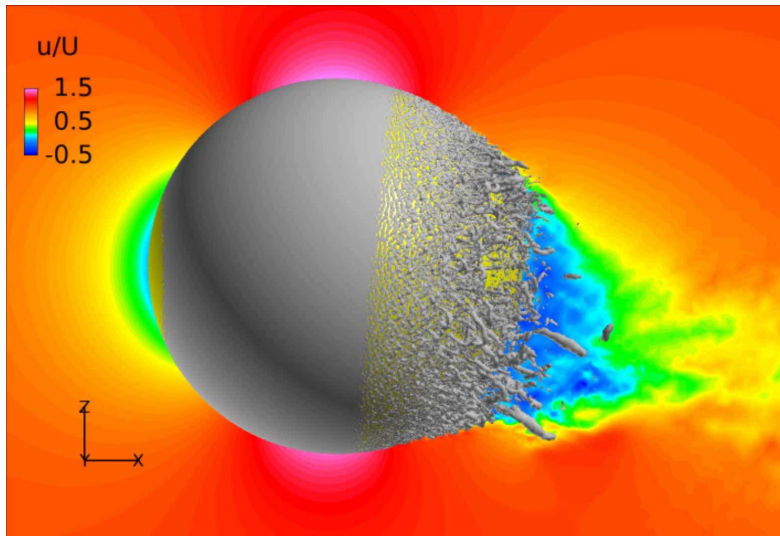
Muto et al., Phys. Fluids (2012)
Li et al., Flow, Trub., Comb.(2015)

ボール回転時(時計回り)の流れの様子

- ボールの飛行速度が遅い場合



- ボールの飛行速度が速い場合

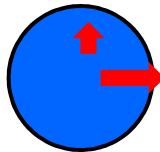


- 飛行機が空を飛ぶ

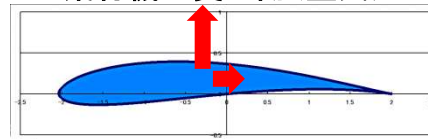
- 翼に働く揚力を上手に利用

- 世界最大の旅客機エアバスA380
 - 全長:73m, 全幅:79.8m, 最大離陸重量580トン
 - うまく設計すれば600トンの巨体を浮かせる事だってできる

ボールに働く空気力



飛行機の翼に働く空気力



A380初飛行(トゥールーズ, 2006)



プチルマンレースにおける事故



- 自動車だって空を飛ぶ？

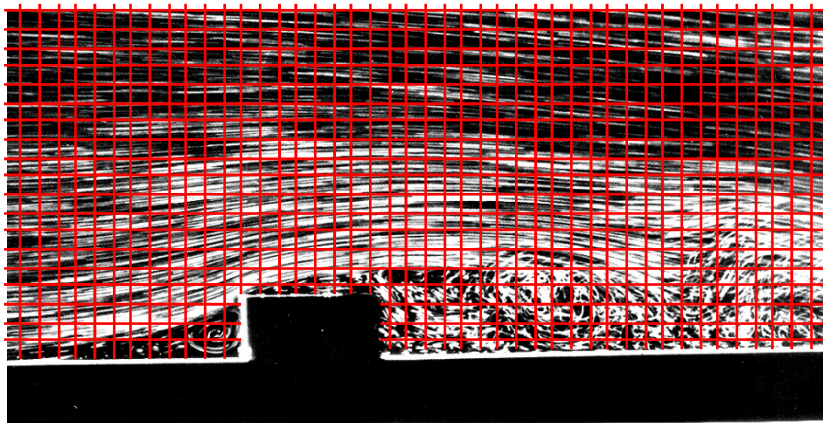
- 上手に利用しないと事故に...

- 浮かすつもりはなくても条件が整えば1トン程度であれば簡単に浮いてしまう...

空気力を上手に利用して性能のいい車を作ることが空力開発の大きな目標！

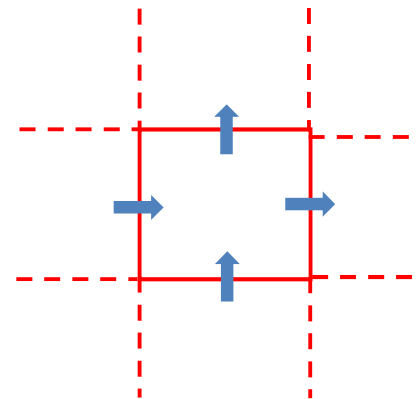
空力シミュレーションとは？ (1)

- 空気の運動を表す式(運動方程式)をコンピュータで解く
 - 空気の流れはある決まりに従って運動している
 - 地球や月が万有引力に従って運動しているのと同じことです
 - 運動方程式が解ければ、実際に実験しなくても流れの様子ができる
 - 観察したい流れの空間を**すきまなく要素(計算要素)に分割する**
 - 分割した要素に対して運動方程式(偏微分方程式)を近似する
 - 近似した代数方程式(+ - × ÷)を流れ場全体で時空間的に解く

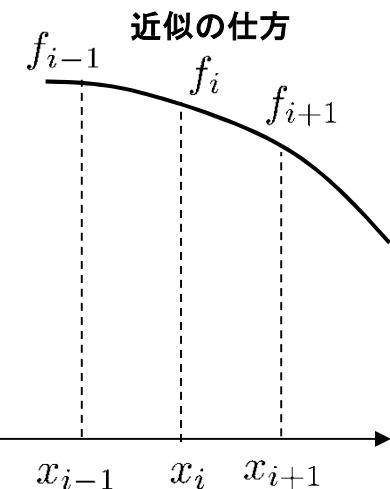


$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

計算格子



格子を出入りする質量, 運動量, エネルギーに関する式を立てる



$$\frac{\partial f}{\partial x} \sim \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}$$

京 computer

空力シミュレーションとは？ (2)

- 未知数が数千万～数億の連立方程式を解く
 - 未知数が二つの連立方程式

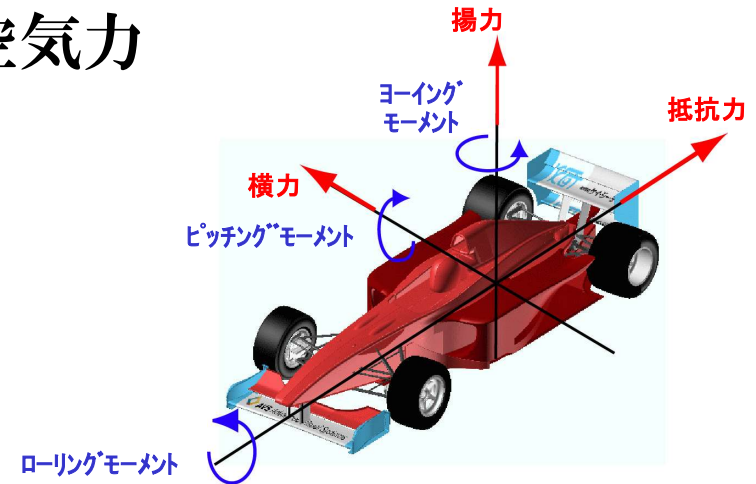
$$\begin{cases} 3x + 2y = 5 \\ 2x - y = 1 \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 未知数がnの連立方程式(自動車解析の場合、数十億～数百億以上)

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + \cdots + a_{3n}x_n = b_3 \\ a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 + \cdots + a_{4n}x_n = b_4 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + a_{n4}x_4 + a_{n5}x_5 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

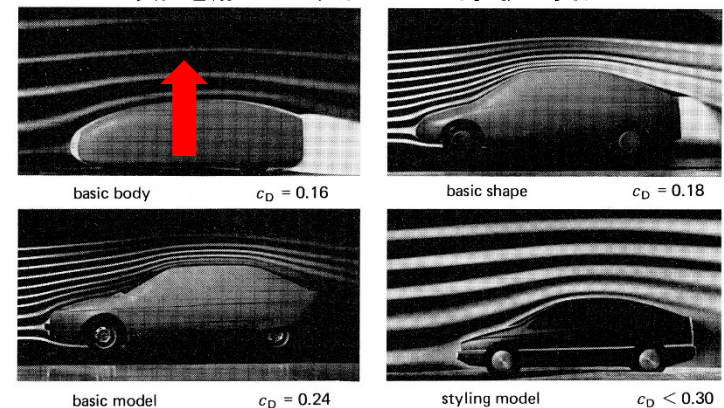
コンピュータでしかできません

- 走行する自動車が空気から受ける力：空気力
- 空気力の分解：三つの力とモーメント
 - 抵抗力：燃費
 - 揚力(持ち上げる力)：走行安定性
 - 横力：横風安定性・安全性



- 自動車の周りの空気の流れに関する設計
 - エンジンの冷却：耐久性
 - 車室内の熱環境, 空力騒音：快適性
 - ワイパー：視認安全性
 - 泥はね、着雪：特殊環境対応

表面を滑らかにすることによる抵抗の変化



燃費, 運動性能, 冷却性能等をバランス良く設計するのは大変難しいです

空気力を計測する方法(道具)

- 風洞実験

- 一番精度が高い
- 高価な建設, 電気代
- 実際の走行状態とは違う

- 実走行計測

- 一番現実に近い
- 一番精度が悪い

- 空力シミュレーション

- 多数のテストを安価にたくさん実施できる
- 実際の車がなくてもテストが可能
- 解像度が悪いと精度が悪くなる

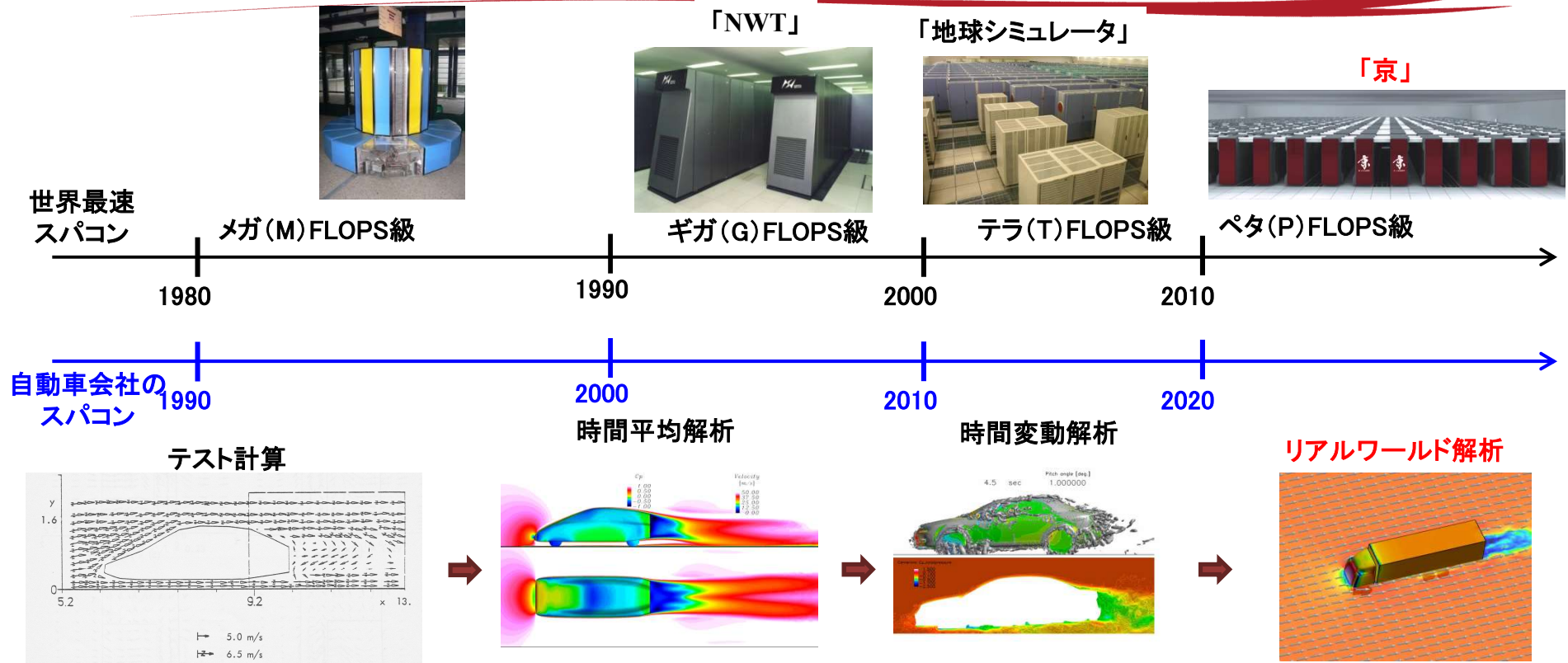
BMW風洞



BMWトラックテスト

それぞれの道具を設計の各プロセスで上手に使いこなすことが大切！

スパコン開発と自動車空力シミュレーションの歴史



会社での開発	1980～90年	1990～2010年	2010～20年	2020年～
空間解像度	10cm	1cm	1cm弱	1mm弱
計算方法	時間平均解析	時間平均解析	時空間変動解析	リアルワールド解析
	テスト計算の時代	実用化の時代	高精度解析の時代	次世代

自動車空力コンソーシアム

- HPCによる自動車用次世代空力・熱設計システムの研究開発(2012年～16年)

14 members of industrial OEMs and suppliers

 **BRIDGESTONE**

 **DAIHATSU**

DENSO

 **SUBARU**



HONDA

NISSAN

HINO

 **SUZUKI**




MITSUBISHI MOTORS


FUSO


Calsonic Kansei

TOYOTA

 **YOKOHAMA**

7 academic members

 北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY




RIKEN

 東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

 東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO


豊橋技術科学大学
TOYOHASHI
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

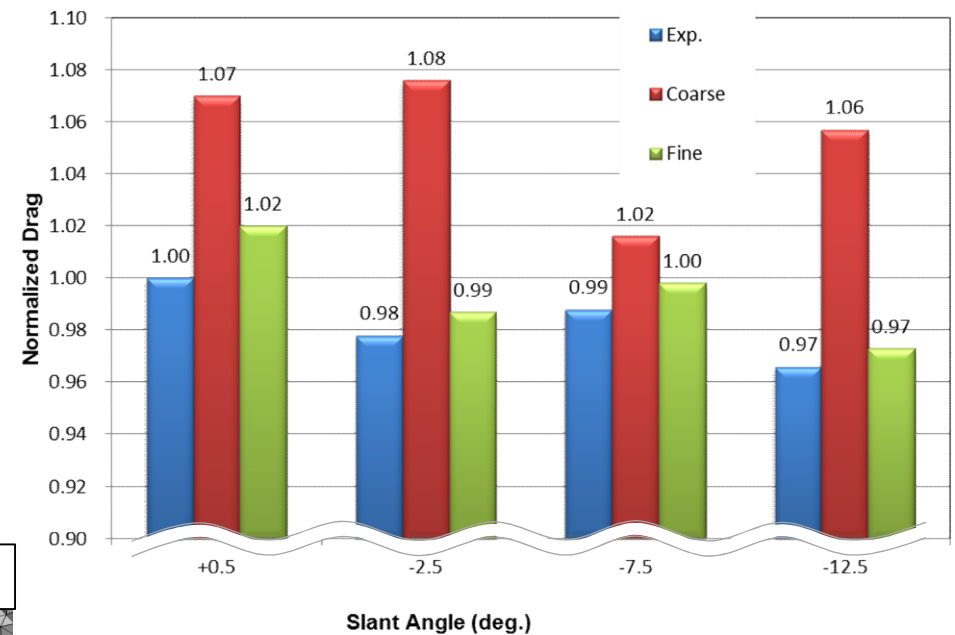
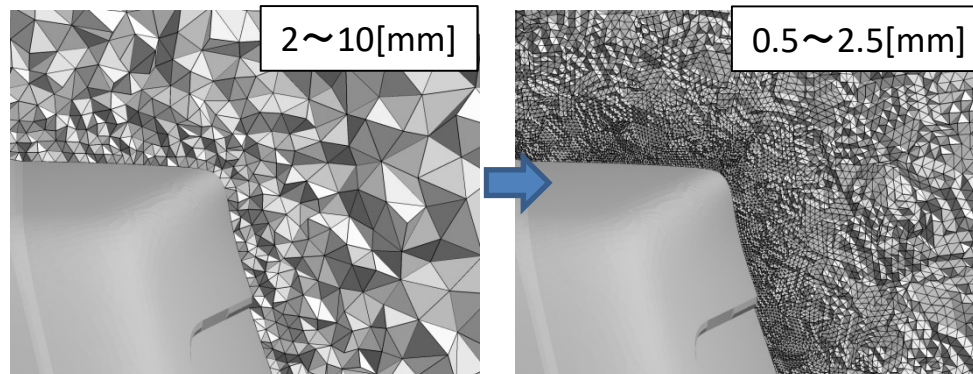
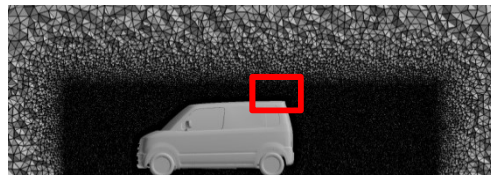
 HIROSHIMA UNIVERSITY

大規模空力解析による高精度空力予測(1)



- 3500万要素の汎用スパコンと23億要素「京」スパコンの比較
 - どの程度の解像度で風洞実験に匹敵する精度が得られるのか？
 - 車体形状の変化に伴う抵抗の微妙な変化を捉えられることができるか？

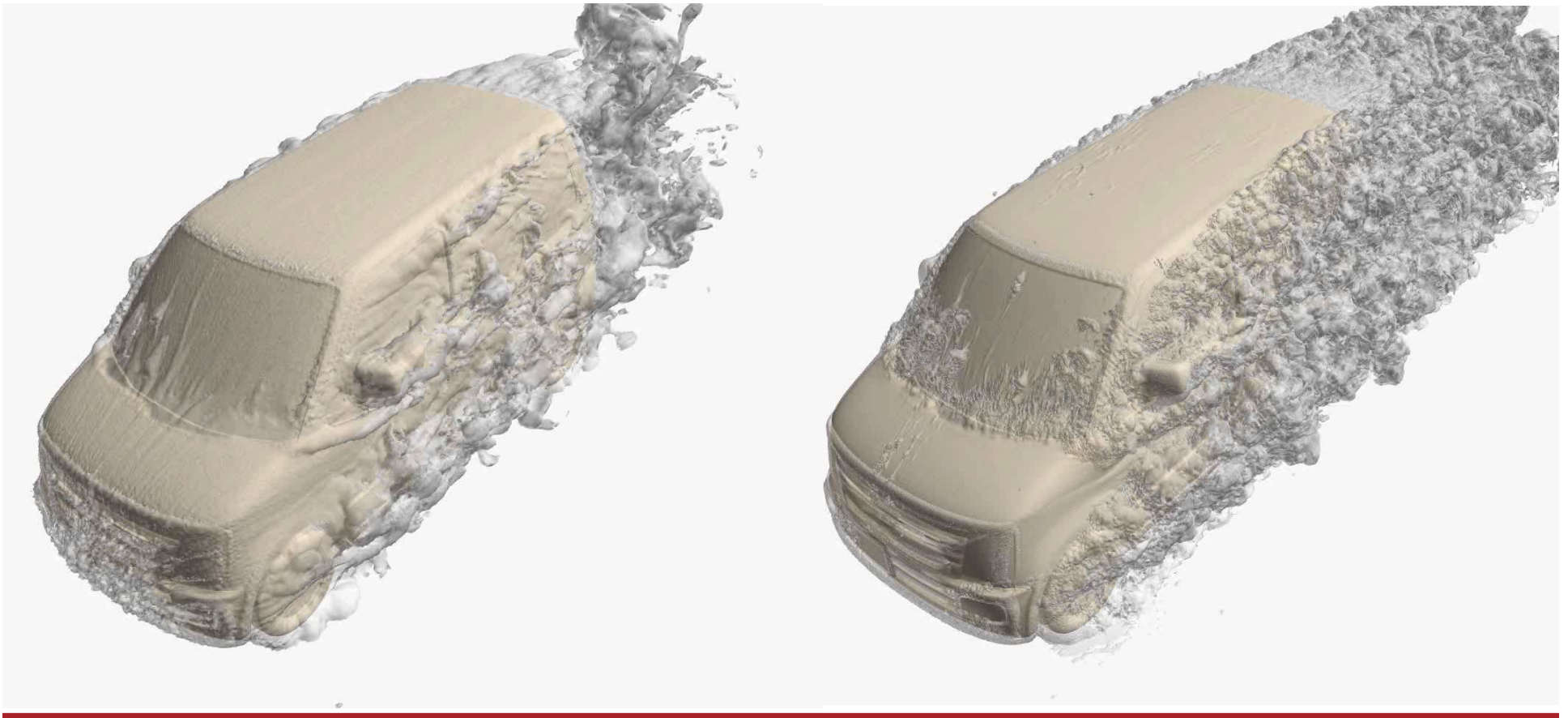
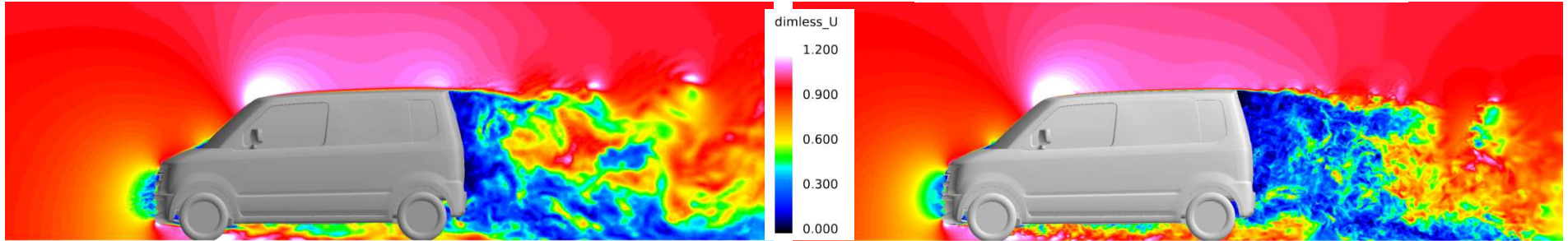
	総要素数	表面解像度
フルテトラ (オリジナル)	3500万	2~10mm
フルテトラ (細分化後)	23億	0.5~2.5mm



大規模空力解析による高精度空力予測(2)

汎用スパコン(3500万要素テトラ)

「京」スパコン(23億要素テトラ)



デジタルオンロードテストの実現

- 風洞試験とリアルワールドとのギャップ



- 風洞実験は理想的すぎる？
- 風が車の走行に与える影響は？ドライバーの運転の影響は？
- 特にヨーロッパ車はこのような高速走行安定性に優れている。

- 変動風や車体運動を模擬した実験

- 研究レベルでは可能でも、実際の設計開発で使うのは難しい

Durham大学の乱流変動発生装置



BMWのヨー加振風洞



広島大学曳航水槽実験



高速走行時の安定性の解明

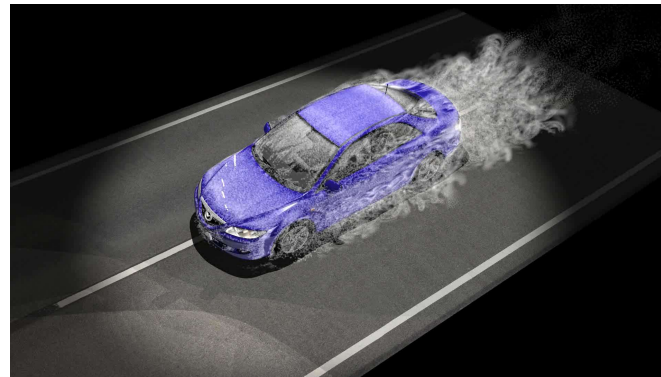
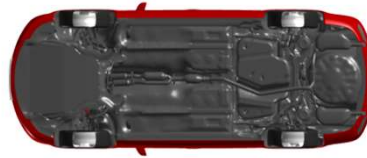


- 高速走行で蛇行運動した際に安定な車(欧州車)と不安定な車がある
 - サスペンションシステムのみでなく、空気力学的な影響があることが最近の研究でわかってきた
 - テストドライバー官能試験で優位な差が確認されている車両でテスト

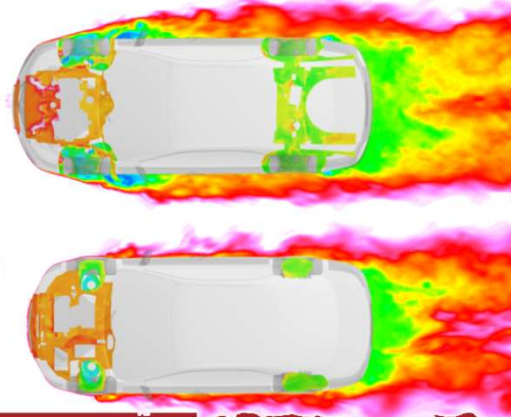
基準車両

基準車両の各所に
空力パーツを付加

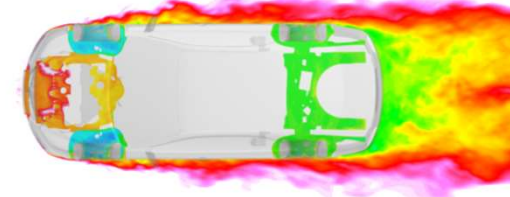
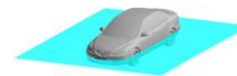
改良車両



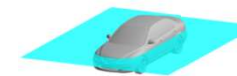
Total Pressure Coefficient
-1 0 1



Z=0.6[m]



Z=0.9[m]

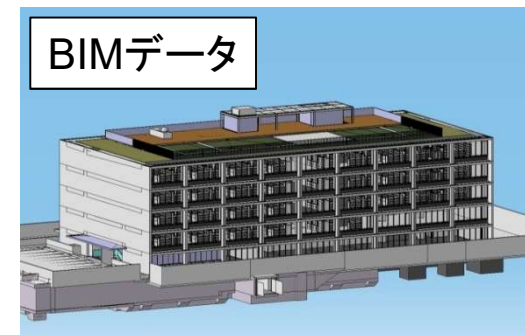
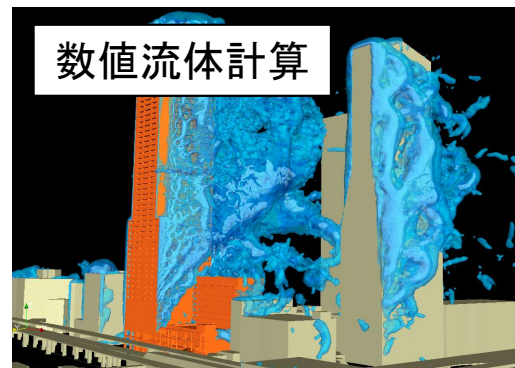


建築CFDコンソーシアムの活動概要

- **背景**

- (1) 風洞を主体とした**建築基準法**に基づく建築物の耐風設計・評価方法に対するシミュレーションへの期待
- (2) 三次元デジタルモデリングとシミュレーションを連動させた新たな設計プロセスへの展開

- **目的** 数値流体シミュレーション(CFD)を用いた建築物の耐風設計手法を確立し、その知見を参画者で共有する。
さらに各社共通の課題となる**認証制度・法改正**に取り組む。



建築CFDコンソーシアム



国立研究開発法人
建築研究所
Building Research Institute



大林組



大成建設



竹中工務店



前田建設



日建設計



建築CFDコンソーシアム成果の一例

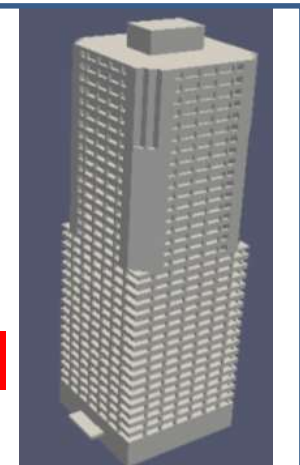
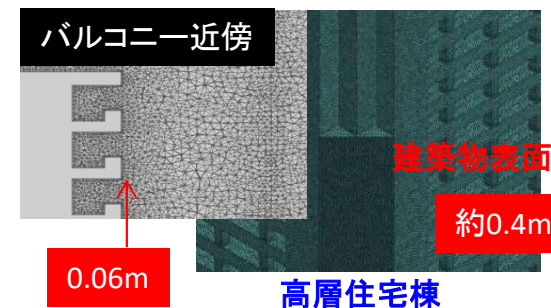
- 風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討
(平成27-28年度 国土交通省建築基準整備促進事業)
- **目的** 大臣認証による高層建築物等の性能評価において、新たにシミュレーションを用いるためのガイドラインの策定
- **実施内容**
平成27年度: 詳細な建物形状を再現した風洞実験と京スパコンによる大規模計算によるチャンピオンデータの取得
平成28年度: 風洞実験とチャンピオンデータを用いた汎用シミュレーションの適用範囲検討

風洞実験概要



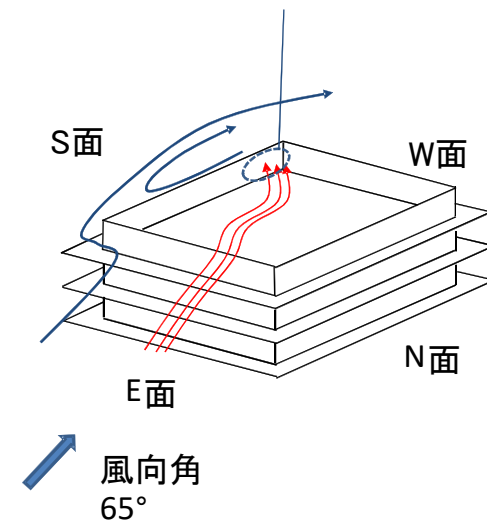
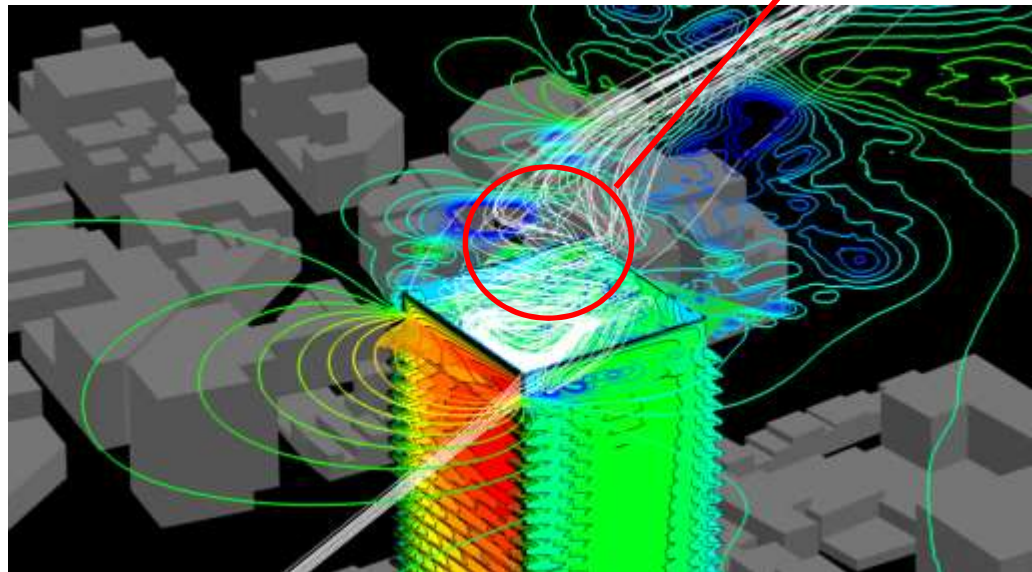
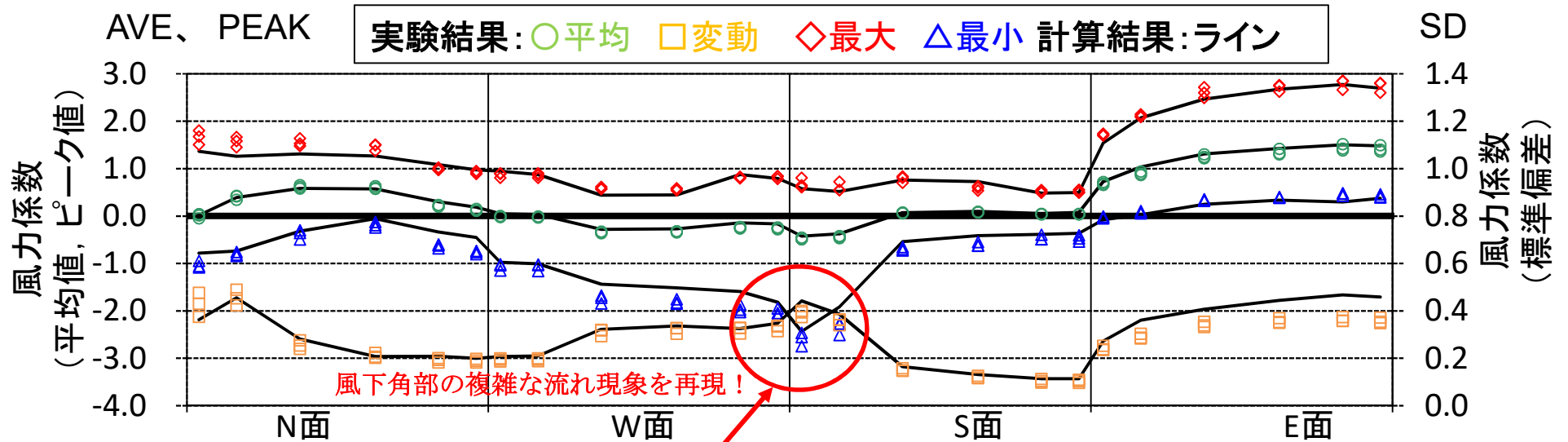
多点同時風圧計測(風圧模型)

シミュレーション概要



建築CFDコンソーシアム成果の一例

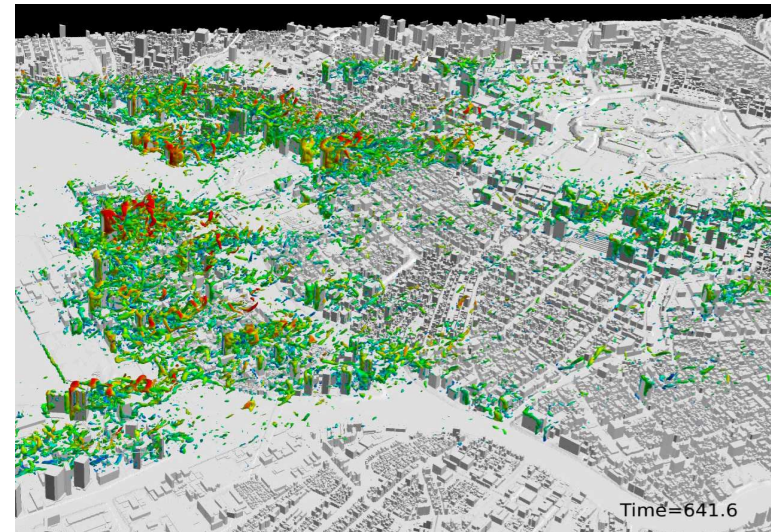
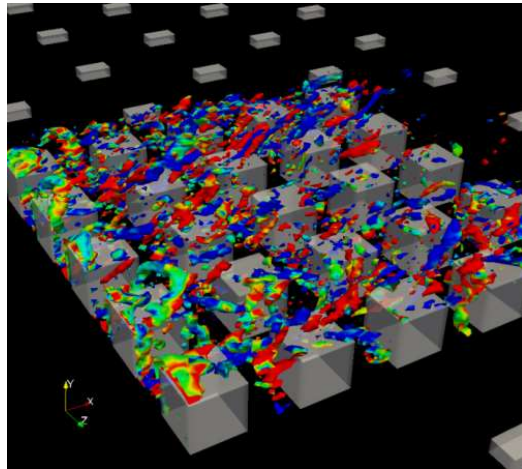
- 京スパコンを用いた大規模シミュレーションにより、風洞実験に匹敵する予測精度を実証(建物周り風圧分布)！



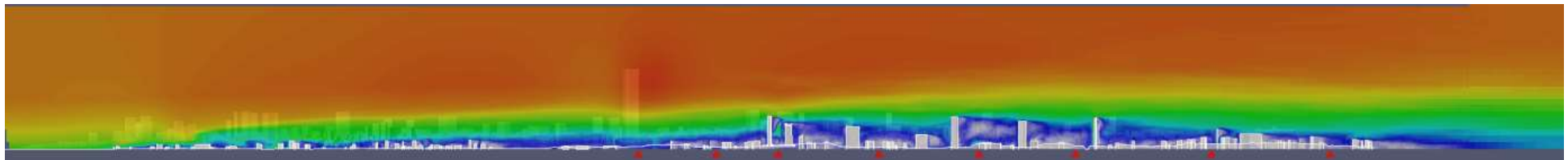
東京都まるごと解析による詳細風況予測

- 都市域建築物に対する耐風設計への展開

- 対象建物の形状を詳細に再現すると共に、周辺に実在する建物群も再現し、建物に作用する風荷重を評価
- 建物付属物(ベランダ、ファサード等)を再現することで、安全性のみならず将来的には快適性や機能性も評価

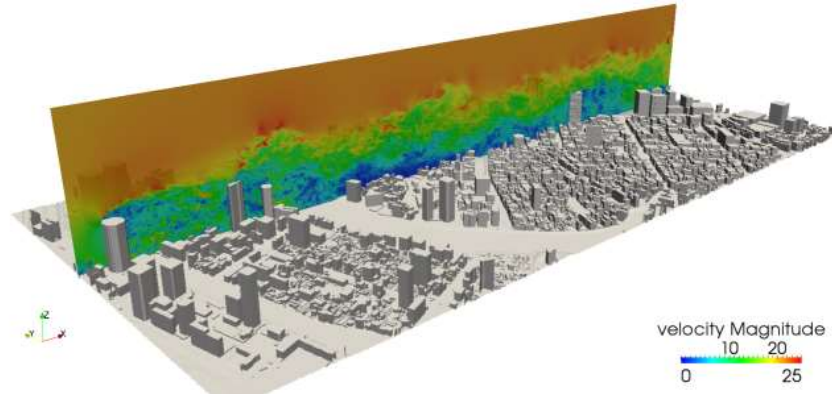


- 実在都市域で発達する乱流境界層(7km×2km、1m解像度)

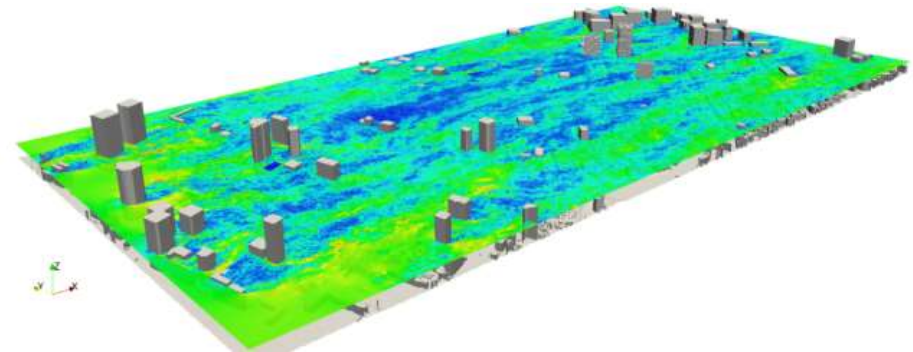


東京都まるごと解析による詳細風況予測

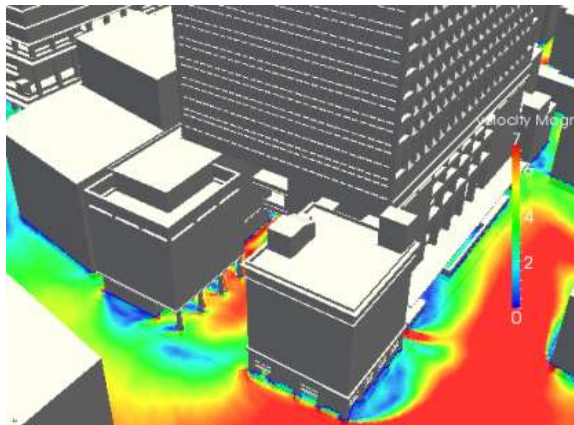
- 狭領域(3km×1.5km、解像度0.5m)解析の結果



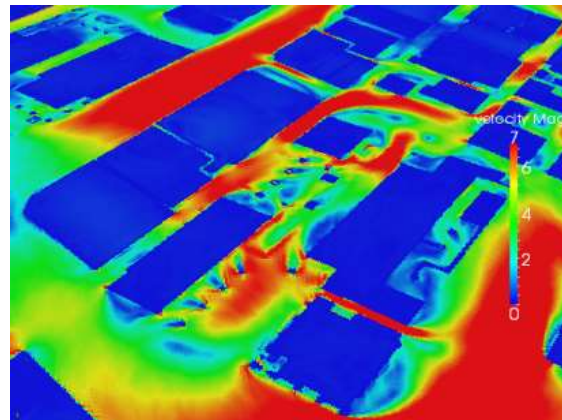
(1) 瞬時速度分布の垂直断面



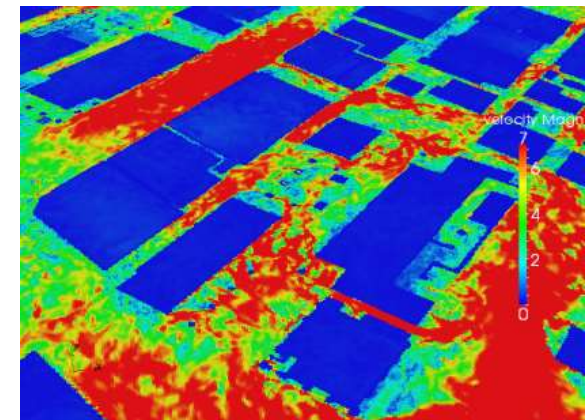
(2) 瞬時速度分布の水平断面



時間平均速度場

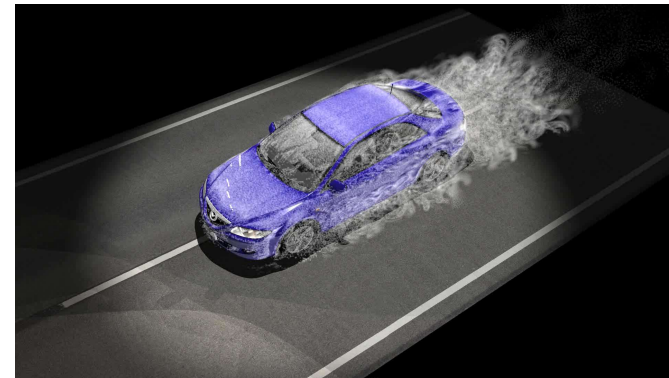


ターゲット建物のピロティ周辺の様子



瞬時速度場

- 「京」を使って10年先(次世代)の未来を予想できた
- 風洞実験の完全置き換え、さらには風洞を超える新たな計測技術
を確立



- もっとスピードを上げたい → **リアルタイムシミュレーションの実現**
 - 現在は数秒間の気流を再現するのに一週間以上かかる
- もっとたくさん調べたい → **最適化シミュレーションの実現**
 - 形を最適化して空力性能をもっと良くしたい(開発では数十~数百ケース)
- もっと他部署と連携したい → **プロセス統合シミュレーションの実現**
 - 空力の他、衝突や振動等、他の設計プロセスのシミュレーションとの連携