



自動車開発を支えるスーパーコンピュータ ～京がひらいた次世代の空力シミュレーション～

理化学研究所計算科学研究機構 チームリーダー

神戸大学大学院システム情報学研究科 教授

坪倉 誠

tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp

スパコンを知る集いin大分

～「京」からポスト「京」へ～

2018年2月10日(土) 15:15～15:55

大分市 コンパルホール

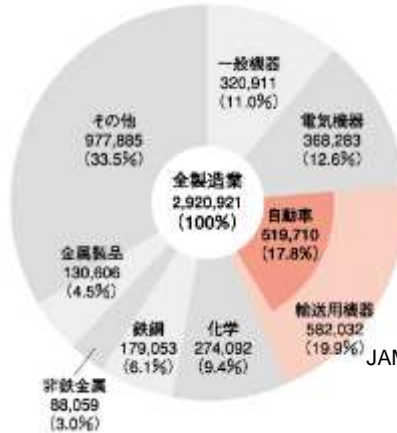


2013年の国内主要製造業の出荷額 単位:億円

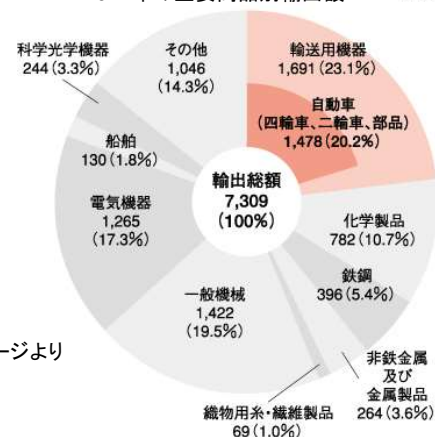
2014年の主要商品別輸出額 単位:百億円

我が国の基幹産業

- 自動車関連就業人口:**550万人、8.7%**
- 自動車工業の出荷額:**52兆円、18%**
- 自動車の輸出額:**15兆円、20%**

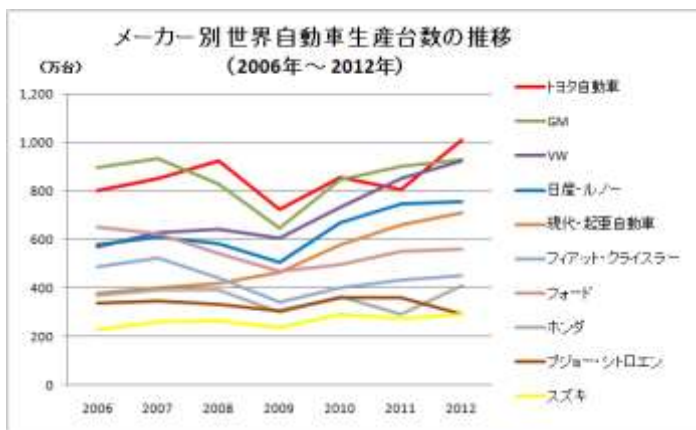


JAMAホームページより



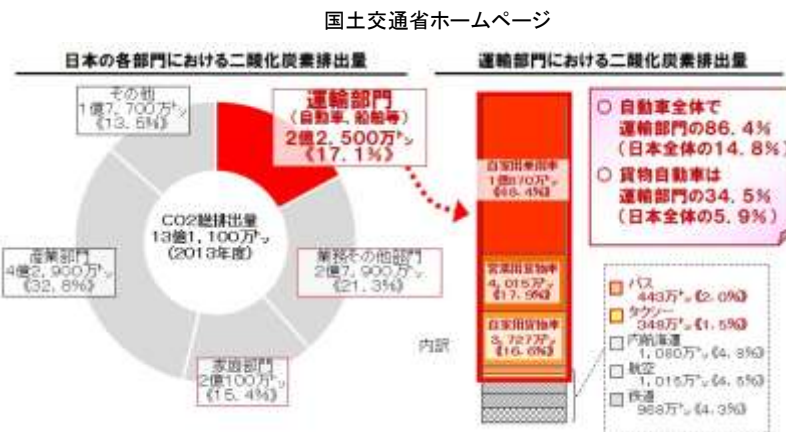
激しい国際競争

- **世界第三位**の生産台数(中、米、日、独、韓...)
- 日本車メーカーの生産量:**世界シェアの1/3**
- 国内生産:1000万台、海外生産:1700万台



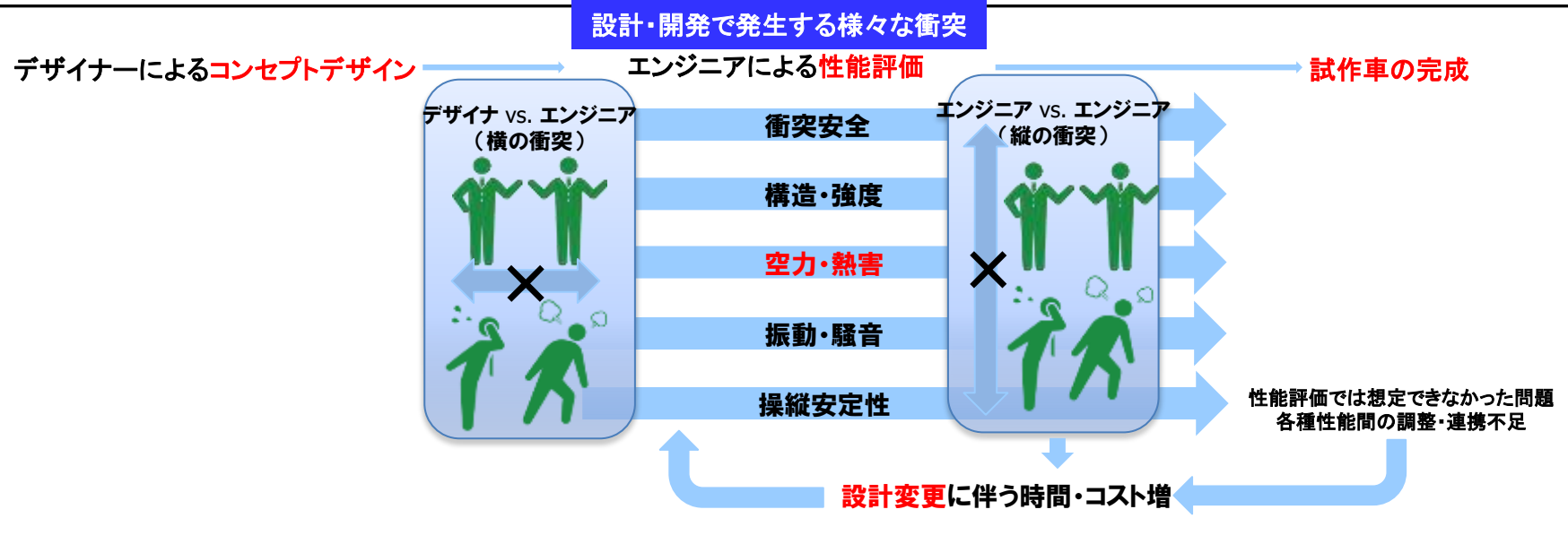
環境負荷低減の責任

- 日本のCO2排出の**15%**は自動車



自動車開発で活躍するシミュレーション

現在の自動車の作り方(設計・開発のプロセス)



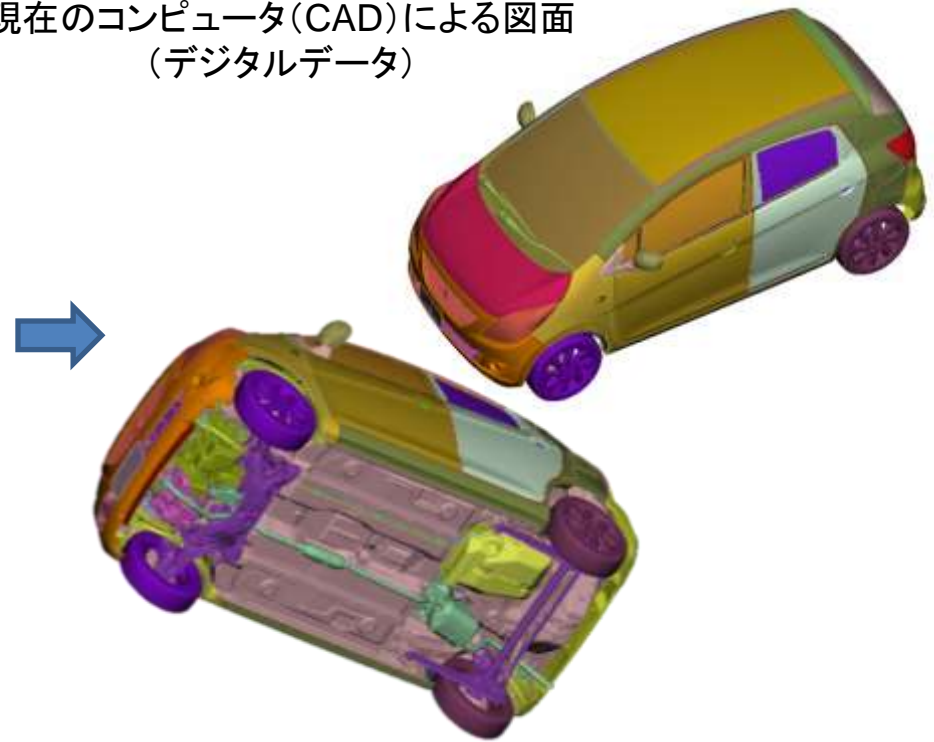
- **デザイナーとエンジニアの衝突**
 - デザイナーの提案通りでは性能を達成できない
 - 形を変更することにデザイナーは消極的
- **エンジニア同士の衝突**
 - それぞれの性能評価は別の人とする
 - 一方の性能を達成するために他の性能が犠牲になることがある
- **これらの衝突が、開発の時間やコストを増大させる**

自動車開発で活躍するシミュレーション コンピュータ支援エンジニアリング (CAE)

- 自動車開発では数多くのシミュレーションが大活躍！
 - 設計図面のデジタル化(1990年代)をきっかけに発展
 - 自動車をより速く、安く作ることに大きく貢献

昔の手書きによる図面
(紙ベースのデータ)

現在のコンピュータ(CAD)による図面
(デジタルデータ)



日本の自動車会社は、積極的にCAEを導入することで、国際競争力を強化してきました。

- 衝突試験をシミュレーションに置き換えることで**莫大な費用を削減**
 - 試作車1台1~2千万円、100回の実験で20億円の費用



左: JARI提供、右: マツダ(株)提供

— ダミー人形からバーチャル人体モデルへ

トヨタが開発したTHUMS

全面衝突

歩行者障害

内臓損傷評価



- 実験では見えないエンジンの**中身を探る**
 - 効率的な燃焼のための、内部形状、タイミング、燃料混合を探る

マツダ(株)提供

流体の速度ベクトル

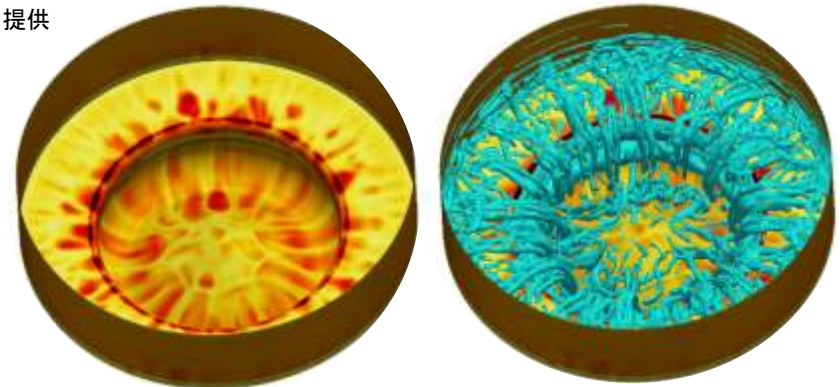
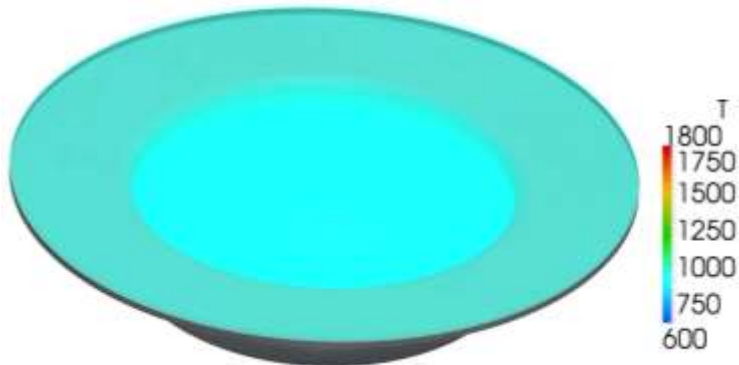
流体の温度



- スパコンによる最新
のシミュレーション

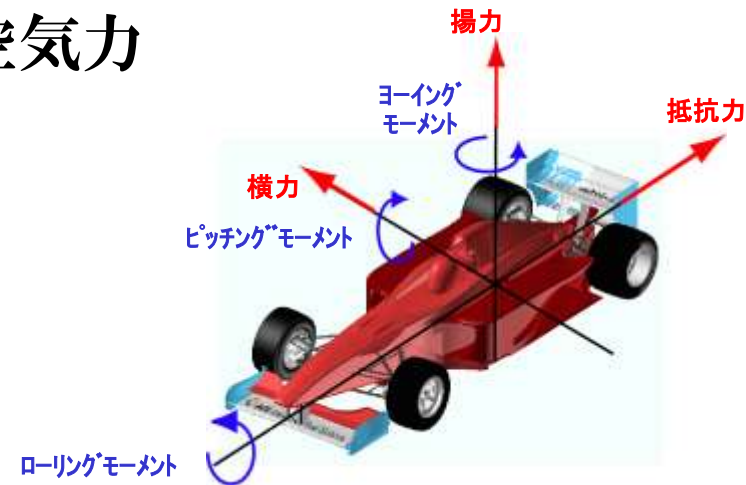
エンジン壁への熱損失(左)と渦構造(右)

堀司先生(2015)提供



本日の主役：自動車の空力設計とは？

- 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

• スポーツボールの不思議な挙動

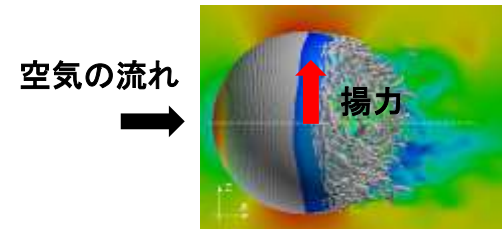
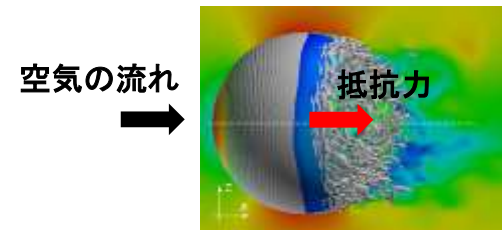
1997年コンフェデ杯でのロベルトカル
ロスの伝説的フリーキック

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。



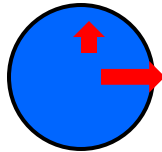
飛行機が空を飛ぶ

A380初飛行(トゥールーズ, 2006)

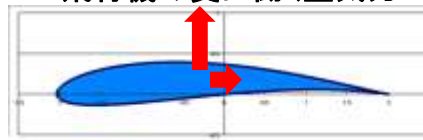
– 翼に働く揚力を上手に利用

- 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



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！

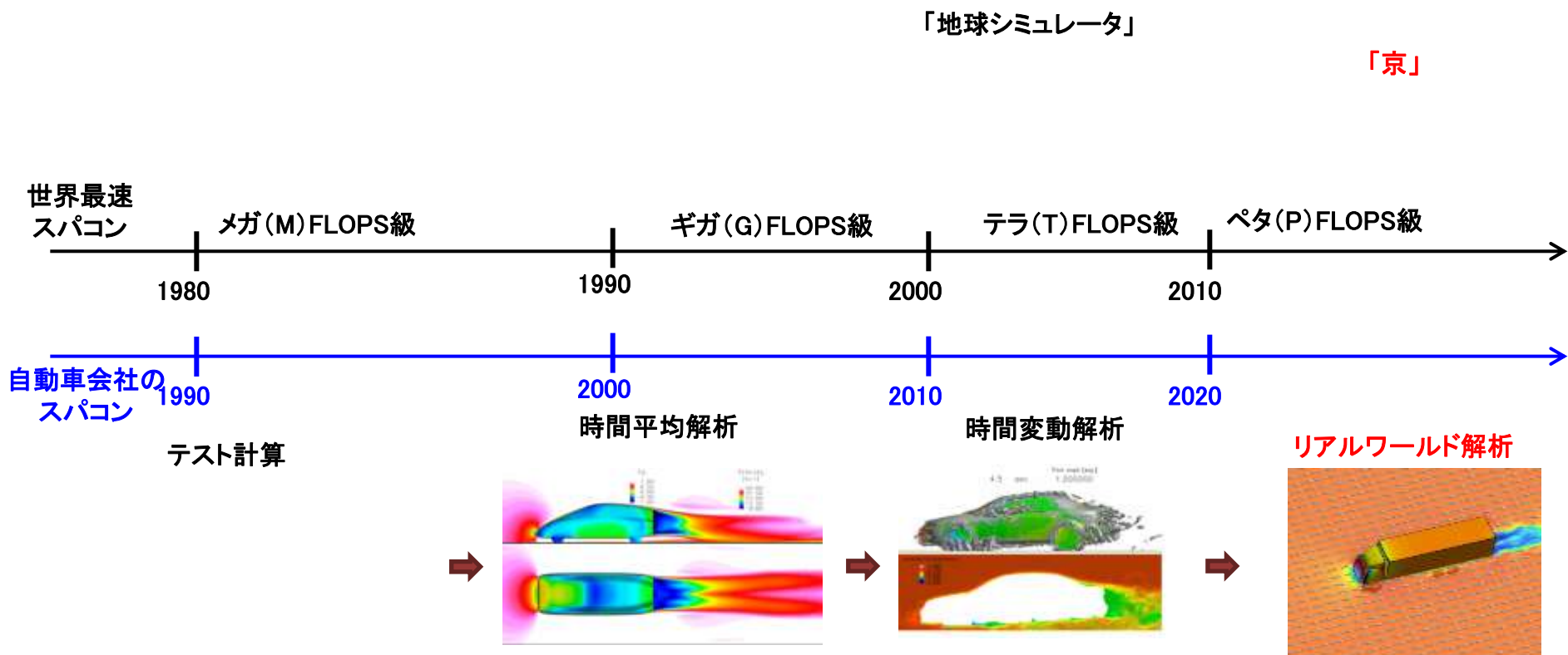
空気力を計測する方法(道具)

- 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
 - 設計開発の最後の最後でしか行えない
- 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

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！

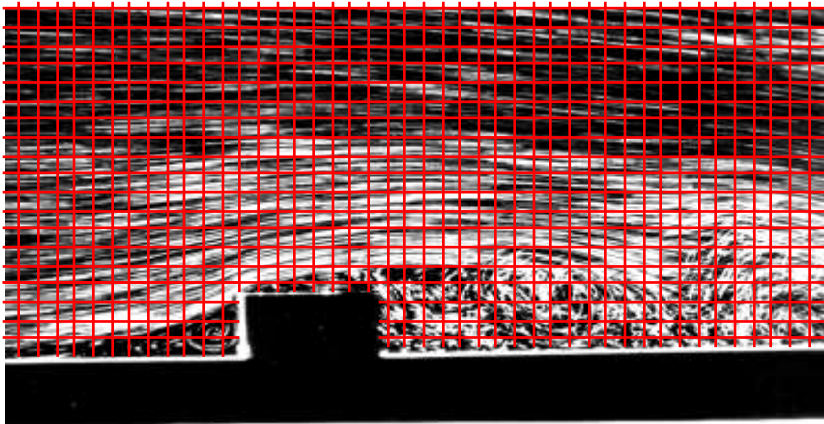
スパコン開発と自動車空力シミュレーションの歴史

- 世界最速スパコンの性能は、10年程度で自動車会社が使えるようになる
- 「京」スパコンを使えば、「自動車ものづくり」の未来を見ることができる



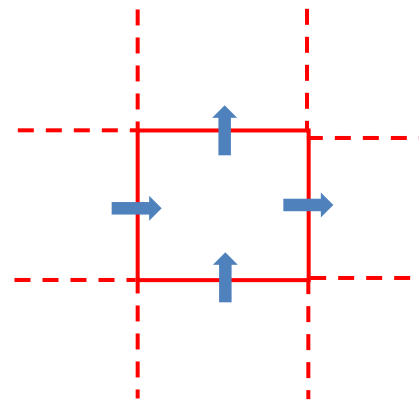
自動車空力シミュレーション 空力シミュレーションとは？(1)

- 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

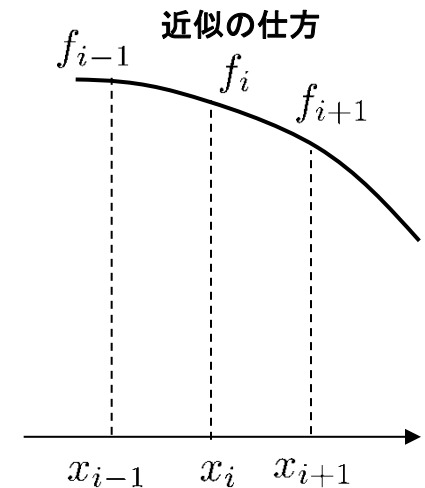


$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

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



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

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

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

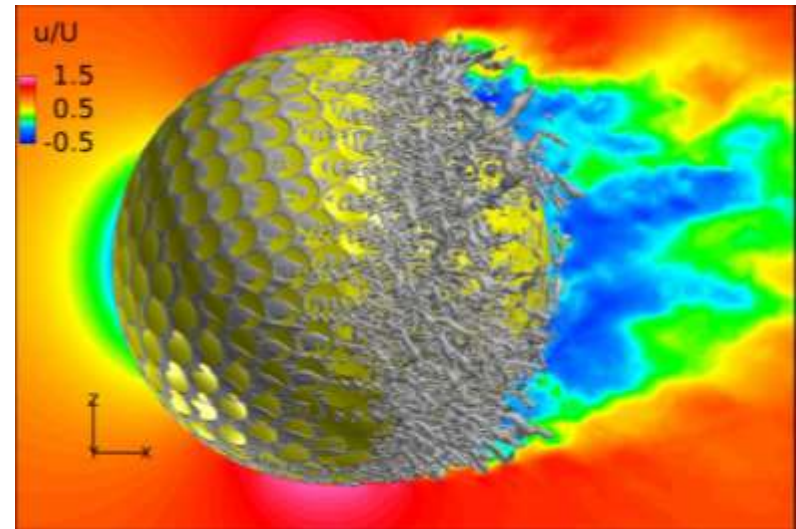
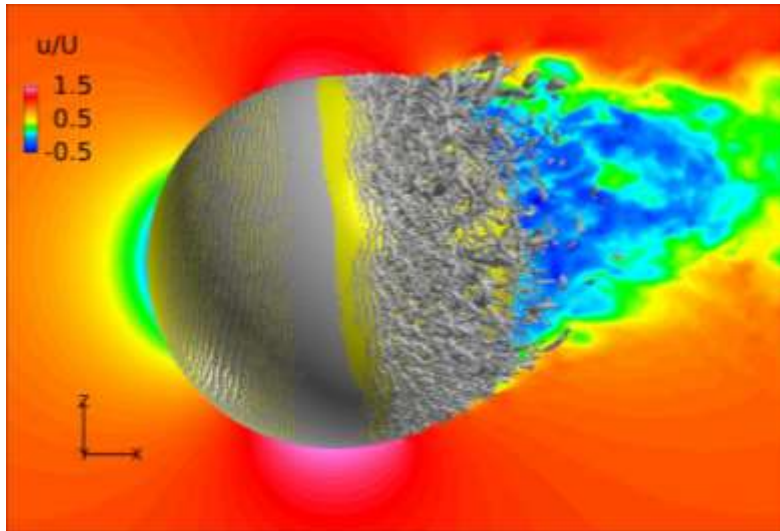
- 未知数がnの連立方程式(自動車解析の場合、数十億～数百億以上)

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

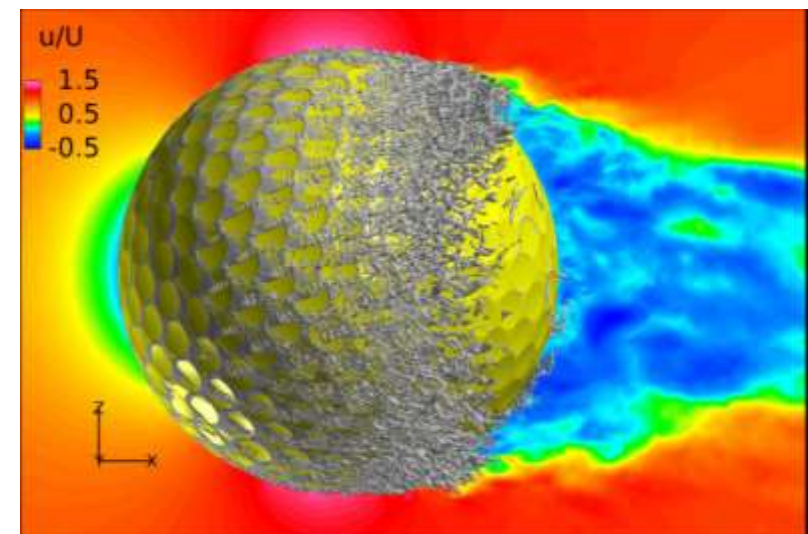
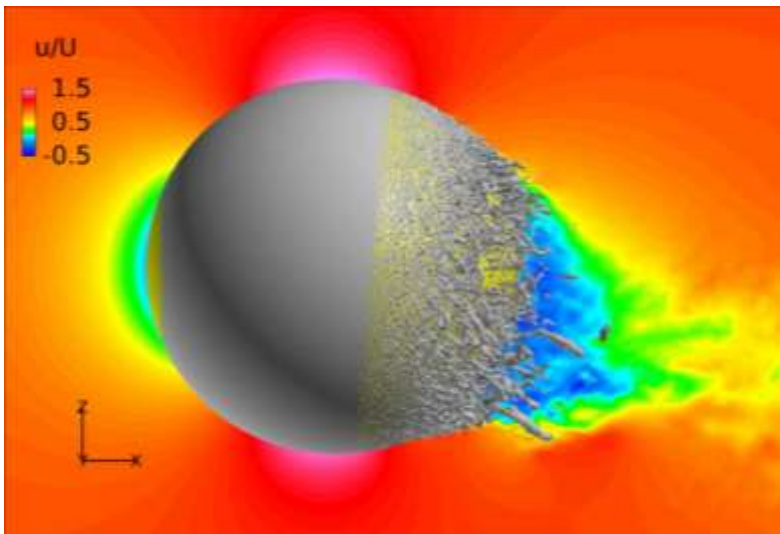
コンピュータでしかできません

スパコンが明らかにしたゴルフボールの秘密

- 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



シミュレーションで、自動車ものづくりの何が変わったか？

- 製品の開発をより速くより安く進められるようになった
 - 風洞実験の多くをシミュレーションに置き換えて、費用、時間を節約

↓

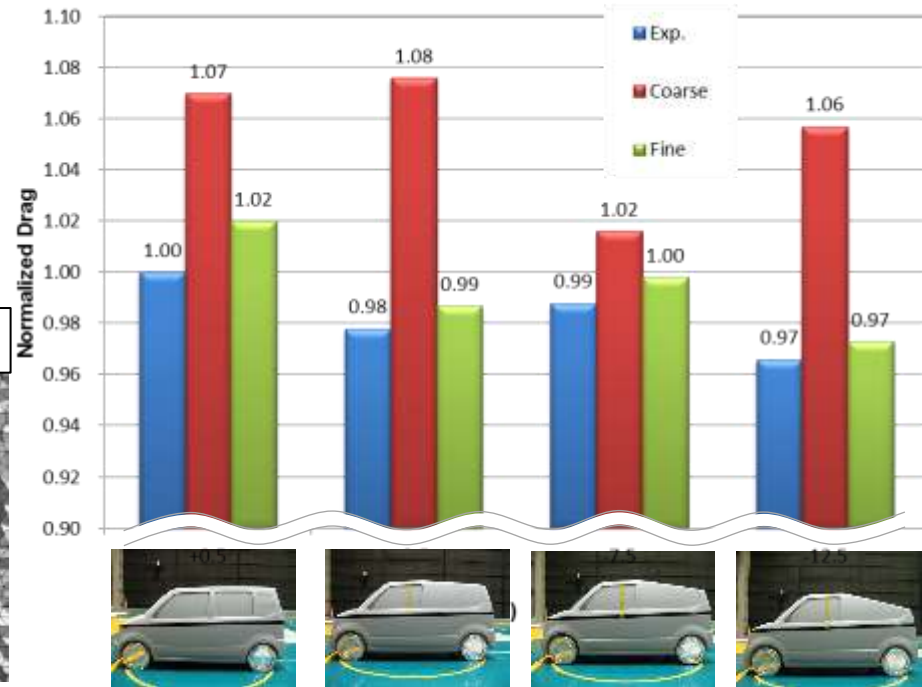
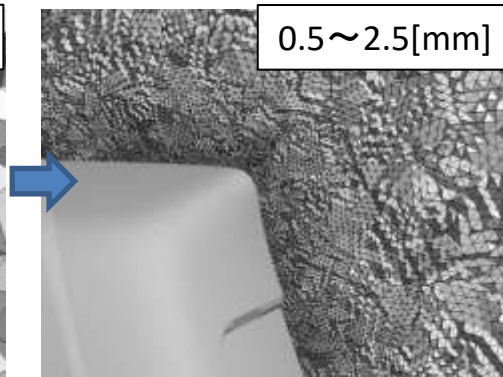
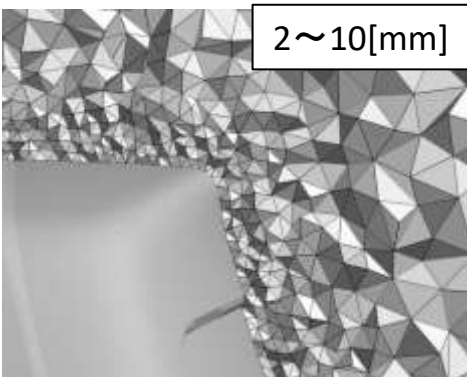
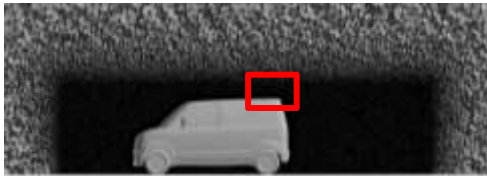
 - ここ20年で大きく普及（既に無くてはならない基盤技術）
 - 日本車は外国に対してより速く新車を開発している（1年程度速い）

↓
- いまのシミュレーションでは製品開発ツールとして限界がある！
 - 所詮は風洞実験の手助け…（主役は風洞）
 - 安価な大衆車では、開発経験が浅いアジア勢が積極的にシミュレーション技術を活用
 - （使う道具が同じになれば、やがてはおいつかれてしまう）
 - 性能が重要な高級車では、膨大な経験を有する欧米車が一日の長
 - （経験を理屈で補わない限り、追いつけない）

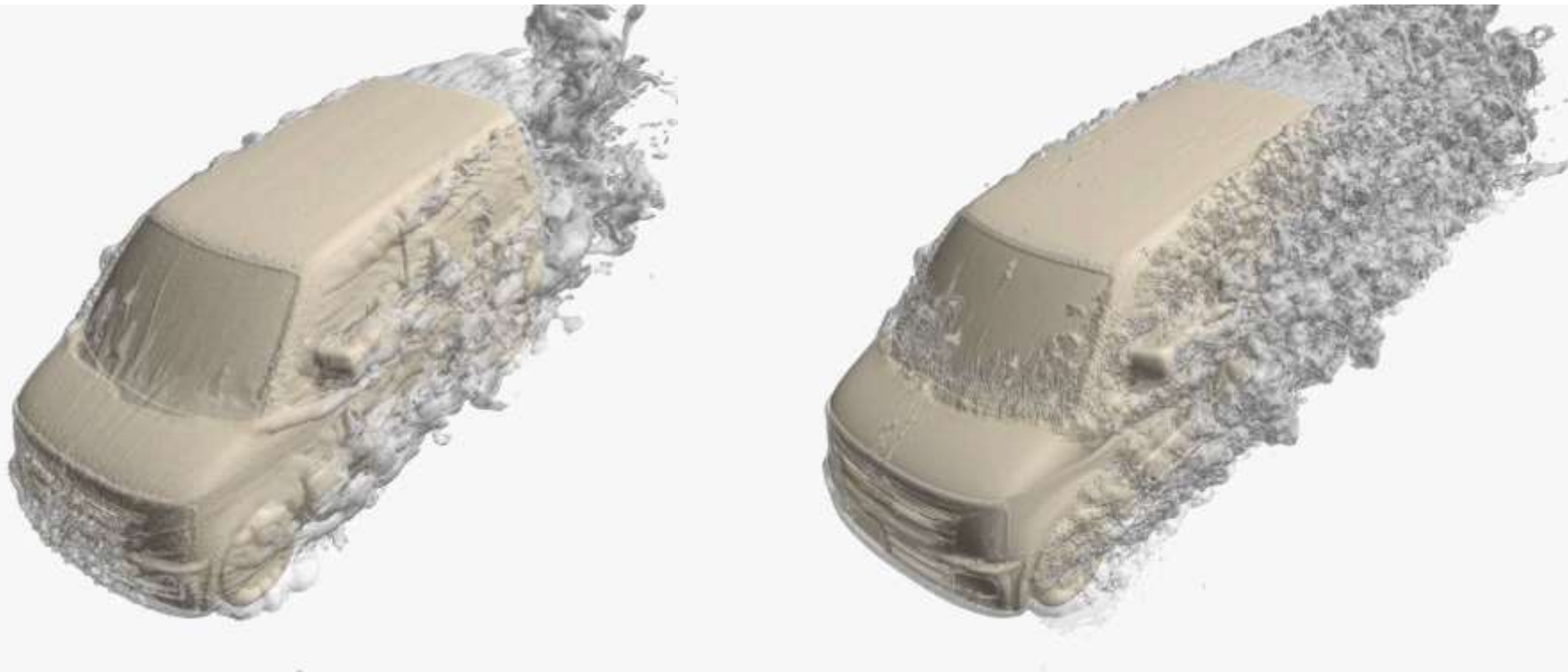
「京」スパコンによる大規模空力解析による高精度空力予測



- 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？



「京」スパコンによる大規模空力解析による高精度空力予測



「京」スパコンによる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

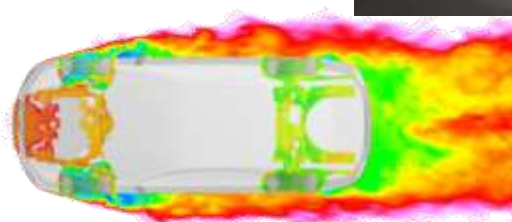
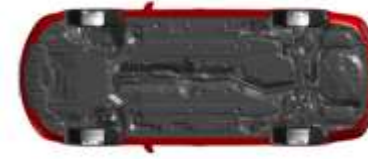


- 高速走行で蛇行運動した際に安定な車(欧州車)と不安定な車がある
 - サスペンションシステムのみでなく、空気力学的な影響があることが最近の研究でわかってきた
 - テストドライバー試験で優位な差が確認されている車両でテスト

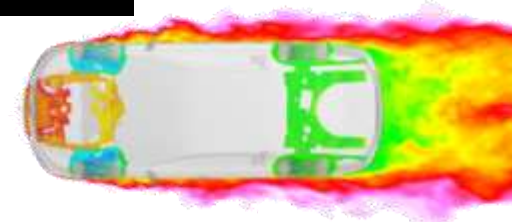
基準車両

基準車両の各所に
空力パーツを付加

改良車両



Z=0.6[m]



Z=0.9[m]



Total Pressure Coefficient



「京」でできたこと, 「ポスト京」でめざすこと

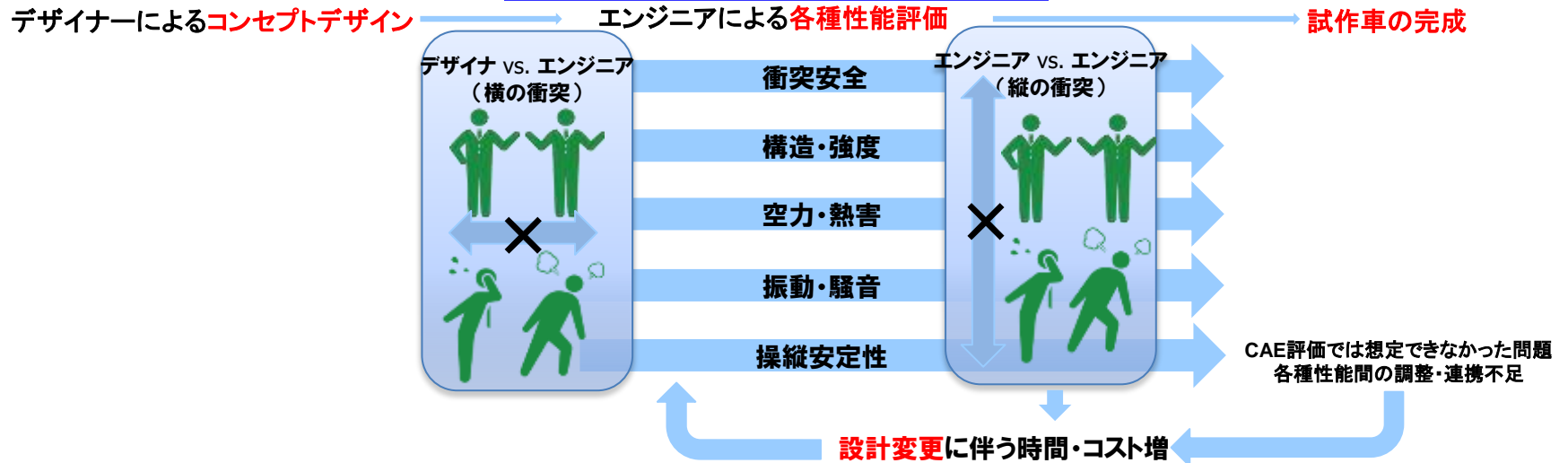
- 「京」はものづくりの未来予想図！10年後の、スパコンを使った未来のものづくりを、を予想することができる
- 風洞実験をシミュレーションに完全置き換え、さらには風洞を超える新たな安全性評価が可能に



- 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

ポスト京が実現する次世代の自動車の作り方

CAEを基盤とした現在の自動車設計プロセス



ポスト京で実現する革新的設計プロセス

