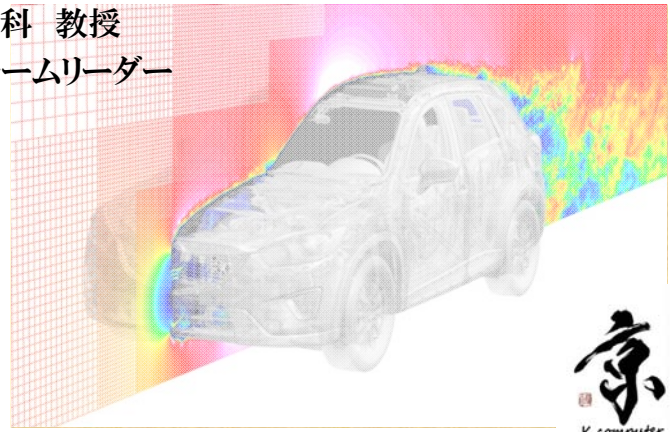


自動車開発を支える スーパーコンピュータ ～京が拓いた次世代の空力シミュレーション～

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仙台
～「京」からポスト「京」へ～
2016年3月19日(土) 15:15～15:45
仙台市情報・産業プラザ

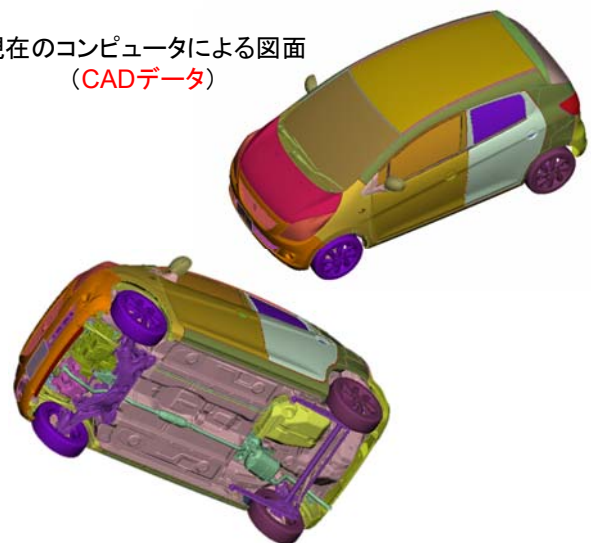


自動車開発で活躍するシミュレーション コンピュータ支援エンジニアリング(CAE)

- 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

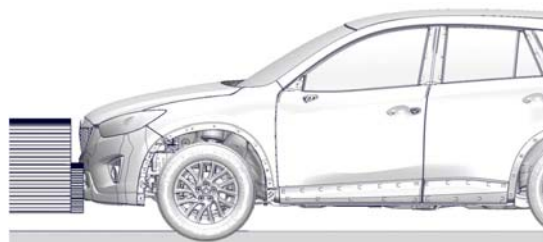
昔の手書きによる図面

現在のコンピュータによる図面
(CADデータ)



衝突安全性試験

- 試作車は一台2千万円(一車種で合計数十億円)、一回の衝突実験でパ
シミュレーションをすることで、試作車を作る費用を劇的に減らすことができる



左: JARI提供、右: マツダ(株)提供

エンジン燃焼実験

- エンジンの中で何が起きているのか、実験では観察が難しい
シミュレーションをすることで、エンジンの中の様子を理解することができる

右: マツダ(株)提供



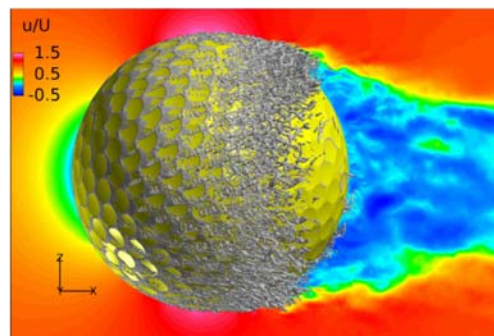
応用空気力学
ボールが空気から受ける力(空気力)

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



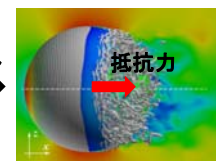
スパコンで調べたゴルフボールの周りの流れ(Li et al, 2015)
色はボール回りの流速、灰色は渦構造



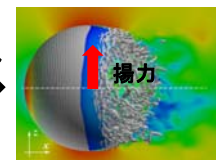
空気中をモノが動くと、空気から力を受ける

- 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)

空気の流れ



空気の流れ



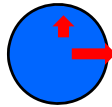
応用空気力学 空気力を利用する

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



プテルマンレースにおける事故

自動車だって空を飛ぶ？

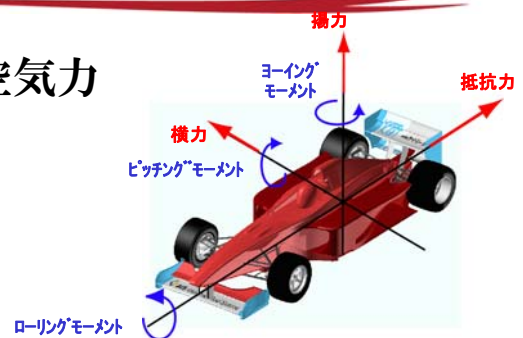
- 上手に利用しないと事故に…
 - 浮かすつもりはなくても条件が整えば1トン程度であれば簡単に浮いてしまう…



自動車の空力設計 自動車の空力設計とは？

6

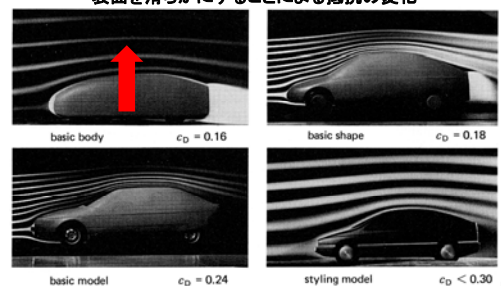
- 走行する自動車が空気から受ける力:空気力
- 空気力の分解:三つの力とモーメント
 - 抵抗力:燃費
 - 揚力(持ち上げる力):走行安定性
 - 横力:横風安定性・安全性



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



自動車の空力設計 自動車空力設計の難しさ

- Form **never** follows function?!
(Contrary to Louis H. Sullivan, 1856-1924)
 - デザイナー(form) vs. 空力エンジニア(function)
 - 性能を追求しすぎると、カッコ悪くなる?
 - 性能を追求する(冒険する)場合はうまく新コンセプトをマッチさせる



Jaguar E-type (1961): CD~0.4?



Honda Insight 一代目(1999): CD~0.25



Toyota Prius三代目(2009): CD~0.25



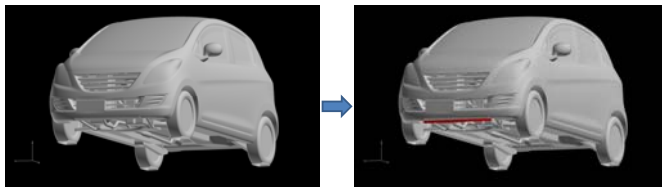
Mercedes CLA(2013): CD~0.23



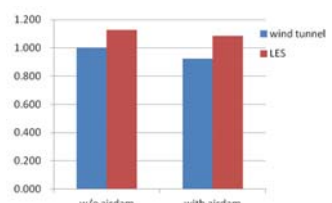
BMW i8(2014): CD~0.25

究極の空力設計

- デザイナーがどんな形を持ってきても、基本コンセプトを崩さずに空力性能を達成すること
- 流れのパッシブ制御



空気抵抗低減効果(Suzuki, 北大)



- 流れのアクティブ制御



自動車の空力設計 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

BMW風洞



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

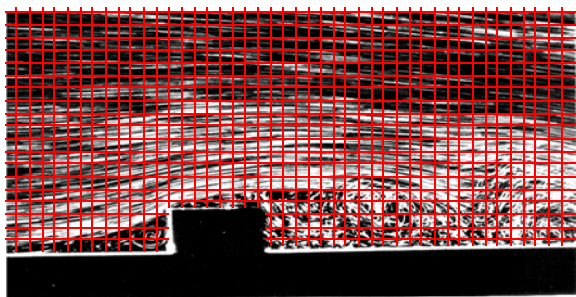


BMWトラックテスト

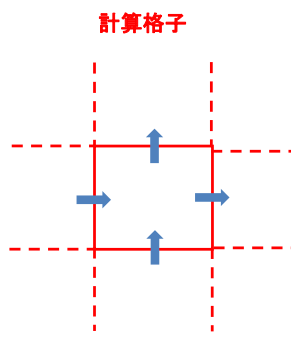
それぞれの道具を設計の各プロセスで上手に使いこなすことが大切!



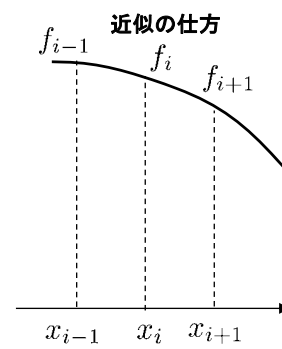
- 空気の運動を表す式(運動方程式)をコンピュータで解く
 - 空気の流れはある決まりに従って運動している
 - 地球や月が万有引力に従って運動しているのと同じことです
 - 運動方程式が解ければ、実際に実験しなくても流れの様子がわかる
 - 観察したい流れの空間をすきまなく要素(計算要素)に分割する
 - 分割した要素に対して運動方程式(偏微分方程式)を近似する
 - 近似した代数方程式(+ - × ÷)を流れ場全体で時空間的に解く



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



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



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



- 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

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

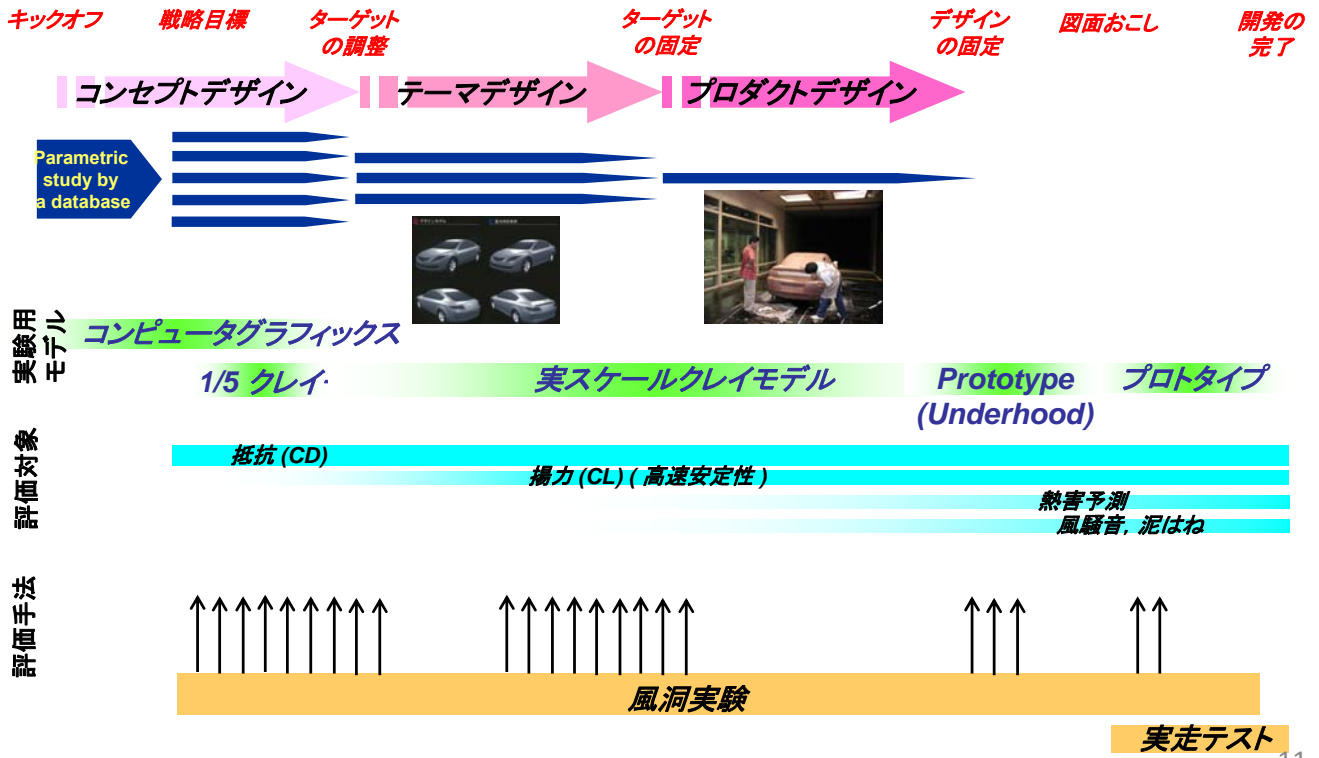
- 未知数がnの連立方程式(自動車解析の場合、一億以上)

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

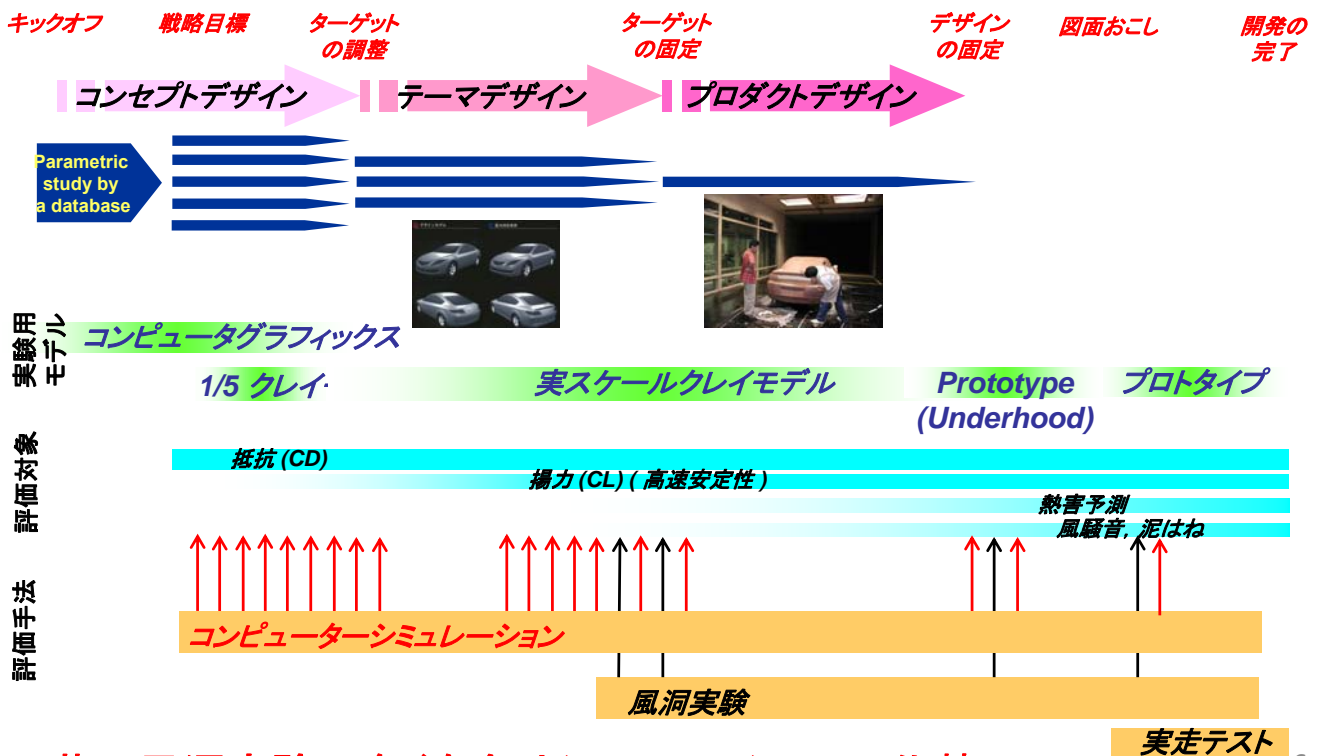
コンピュータでしかできません



自動車空カシミュレーション 昔の空力開発プロセス



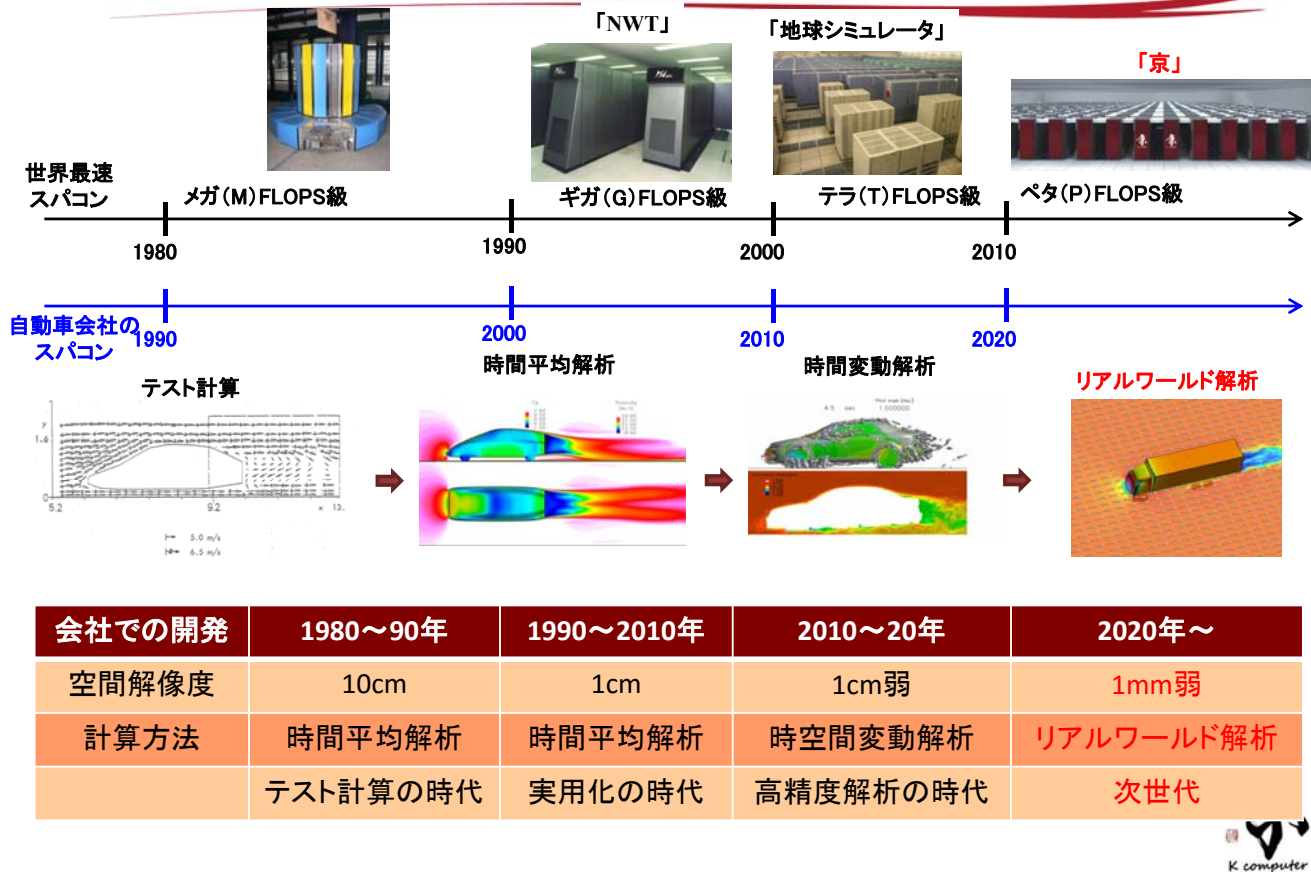
自動車空カシミュレーション 現在の空力開発プロセス



昔の風洞実験の多くを今はシミュレーションで代替！

自動車空力シミュレーション スパコン開発と自動車空力シミュレーションの歴史

13



自動車空力シミュレーション 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？

14

- 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！
 - 所詮は風洞実験の代わり…
 - 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)

- 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～)

14 members of industrial OEMs and suppliers

 BRIDGESTONE

 DAIHATSU

 DENSO

 SUBARU

 HINO

 HONDA

 NISSAN

 HINO

 SUZUKI

 MAZDA

 MITSUBISHI MOTORS

 FUSO

 Calsonic Kansei

 TOYOTA

 YOKOHAMA

7 academic members

 北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

 KOBE
UNIVERSITY

 豊橋技術科学大学
TOYOHASHI
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

 RIKEN

 東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

 東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



 HIROSHIMA UNIVERSITY

「京」コンピュータが実現した次世代空力シミュレーション

8

- 「京」コンピュータは会社の汎用スパコンの千倍速い
- いままでとは違う次世代の空力シミュレーション

(1) 超高解像度渦シミュレーション

- 風洞では観察が難しい三次元的な渦と、自動車との関係が観察できる
- 何故そうなるのか？どうすればそうなるのか？理屈がわかるようになる！
- より性能の高い車の開発が可能になる

(2) リアルワールド(実際の走行状態を再現した)シミュレーション

- 風洞では再現が難しい突風や追い越し、急ハンドル時の車の運動が再現できる
- より安全で安定性の高い車の開発が可能になる

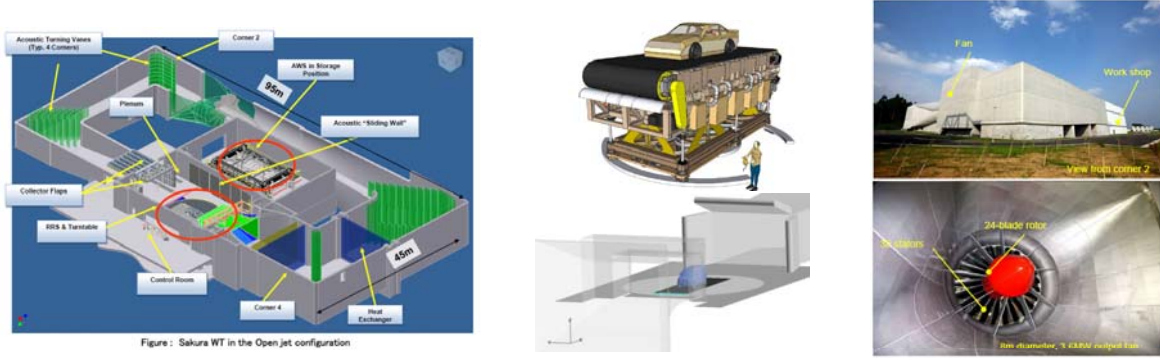


- ものづくりの「プロセス」そのものを変えることができる(プロセスイノベーション)

- スーパーコンピューティングシミュレーションを使えば、風洞実験ではできない観察や評価が可能になる

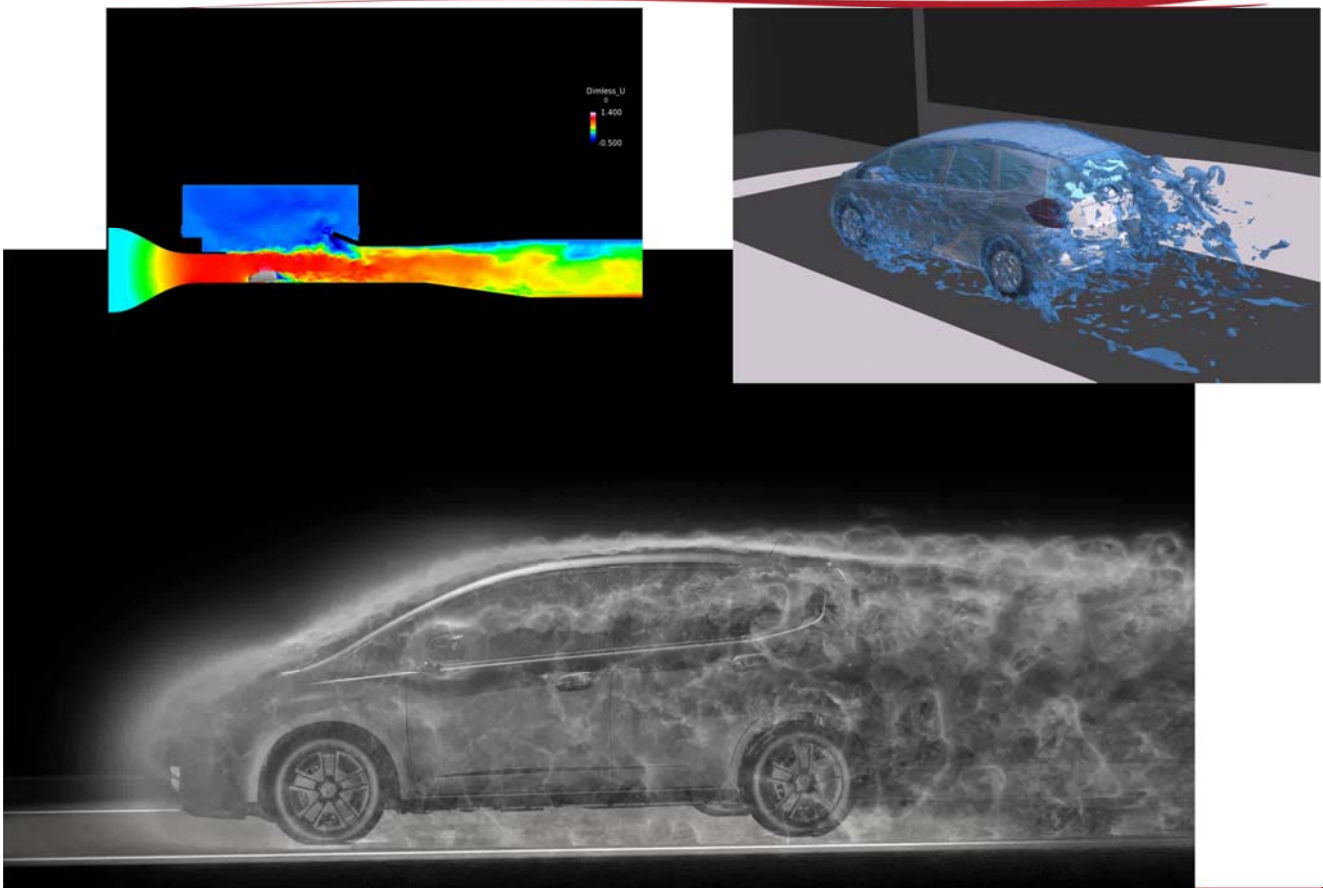
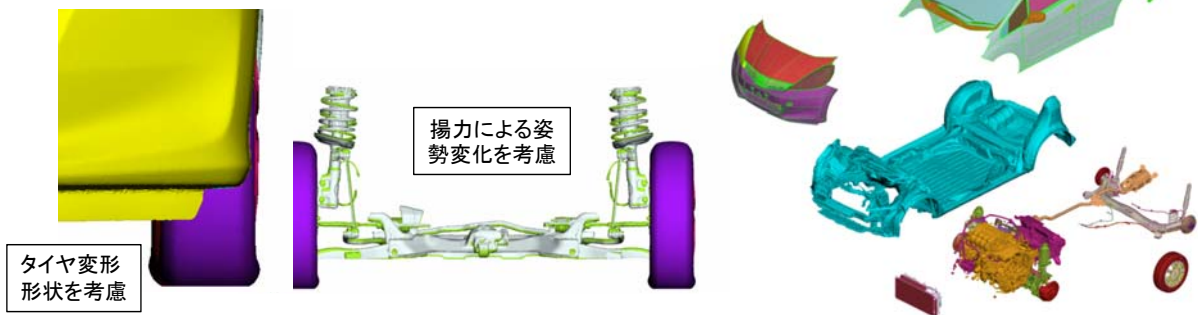
風洞実験の代わりではなく、実験ではできないことが鍵！

- ホンダ実車風洞(栃木県さくら市)を「京」上に構築(60億非構造セル)



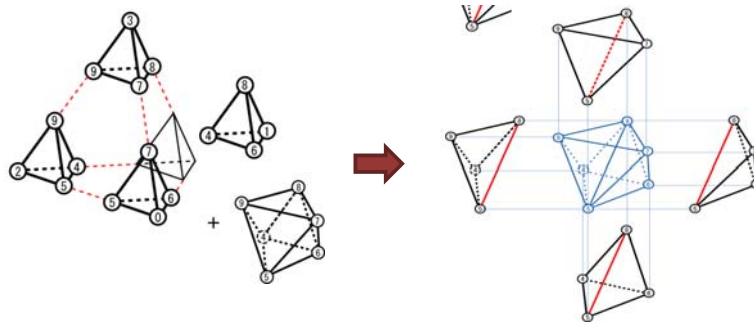
—ムービングベルトを装備した最新型実車風洞(世界トップクラスの性能)

- 160km/hテスト走行時の車体姿勢を考慮



• 格子トポロジーを変えずに格子を自動細分化

- 数千万要素格子から、自動で超大規模格子を作成
- 要素形状スムージング機能を搭載
 - テトラ格子の場合、各要素の中央に現れる細分化格子の品質維持が課題

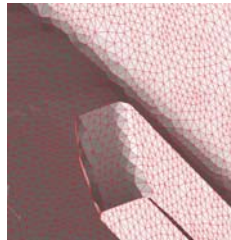
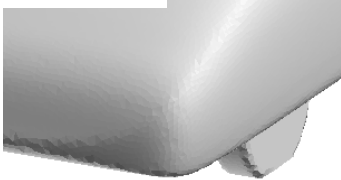


• Laplacianスムージング

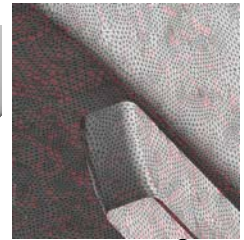
Laplacian smoother: $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$

- オリジナルデータへのマッピング機能搭載

4mm 表面格子



1mm 表面格子

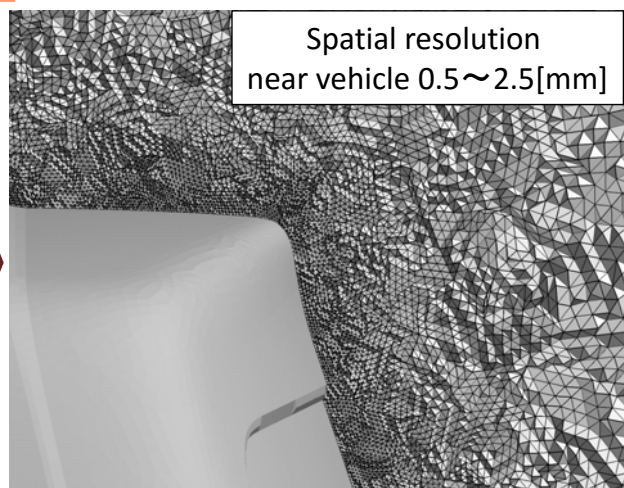
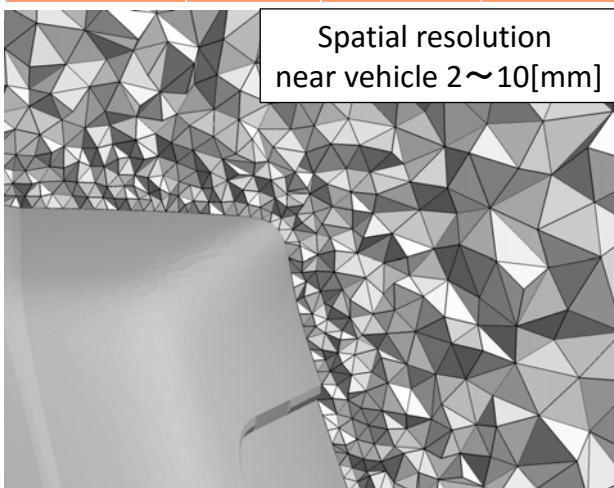
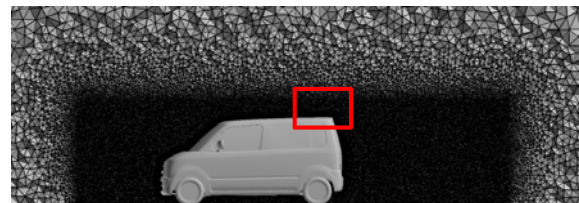


K computer



- 3500万要素フルテトラ格子をもとに二度の自動細分化で23億要素格子を作成
 - リファインにかかる時間(2段階目:30分@[京])
 - 4秒/step using 4096 nodes

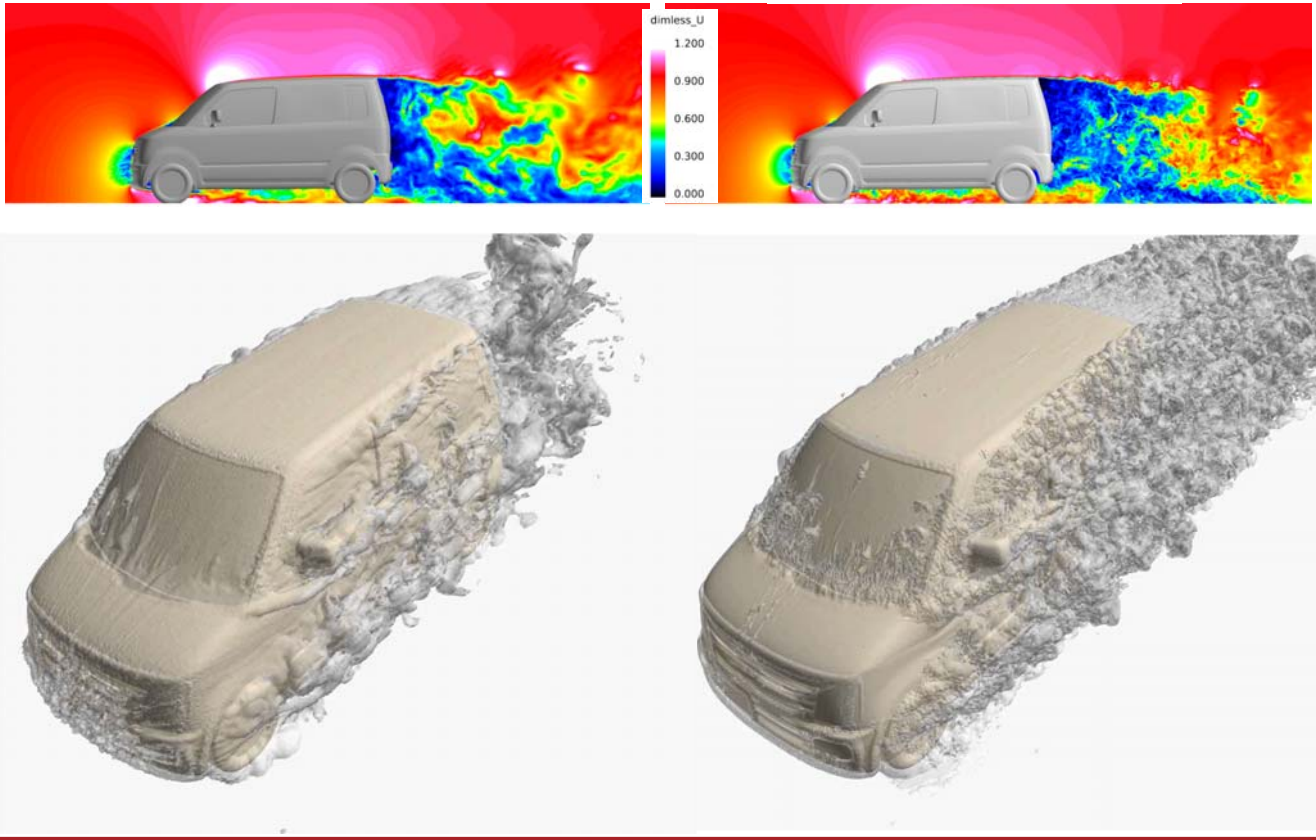
	総要素数	表面解像度	格子作成時間
フルテトラ (オリジナル)	3500万	2~10mm	2~3 hours
フルテトラ (細分化後)	23億	0.5~2.5mm	2~3 hours



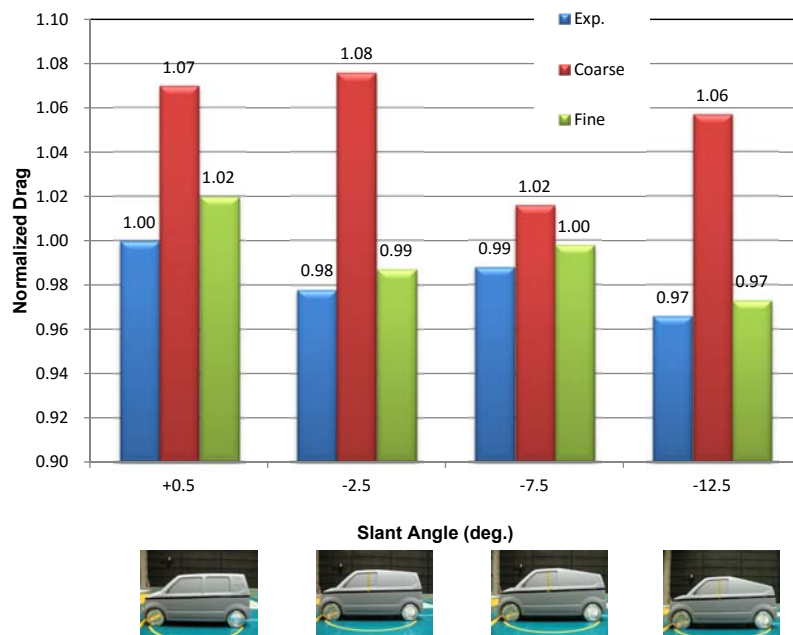
次世代自動車空力シミュレーション 大規模空力解析による高精度予測(2)

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)



次世代自動車空力シミュレーション 大規模空力解析による高精度予測(3)



- 3500万(2mm)から23億(0.5mm)に解像度を高めることで、**全てのケースで風洞計測値に対して2%以内の誤差で抵抗予測を実現**
- 屋根後ろ部分の形状変化に対する空気抵抗変化を再現

風洞試験とリアルワールドとのギャップ

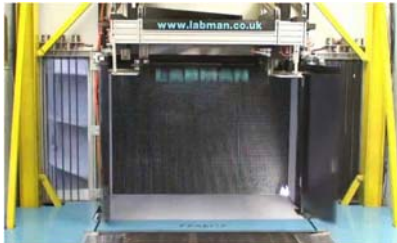


- 風洞実験は理想的すぎる？
- 風が車の走行に与える影響は？ドライバーの運転の影響は？
- 特にヨーロッパ車はこのような高速走行安定性に優れている。

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



K computer



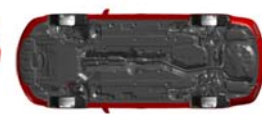
高速蛇行運動時の安定性

- 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

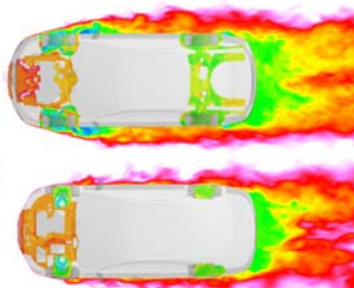
基準車両

基準車両の各所に空力パーツを付加

改良車両



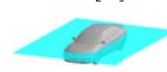
Total Pressure Coefficient
-1 0 1



Z=0.6[m]

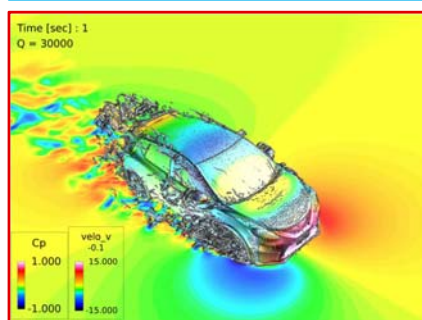
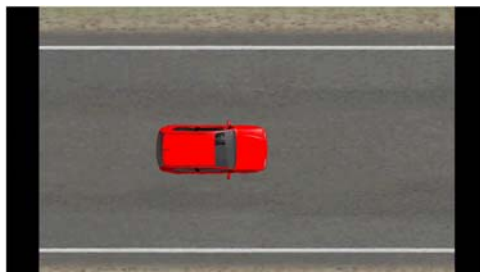
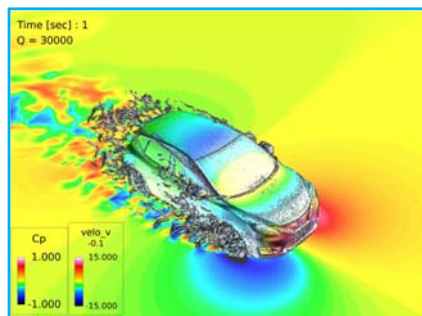


Z=0.9[m]

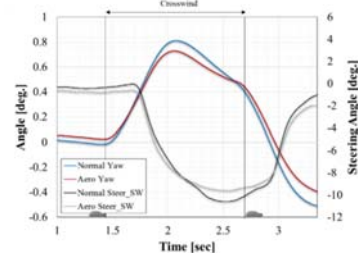


• 横風突風遭遇時の安全性解析

- 自動車の運動、自動車の回りの流れ、ドライバーの反応をすべて組み込んだシミュレーション
- 横風時に遭遇した際、ドライバーがどのように反応し、自動車がどのように動くかが予測できる
- 青(オリジナル)と赤(改善モデル)で比較、改善モデルはハンドル操作量が少ないことがわかる



ドライバーのハンドル操作の比較
(青:オリジナル、赤:改善)



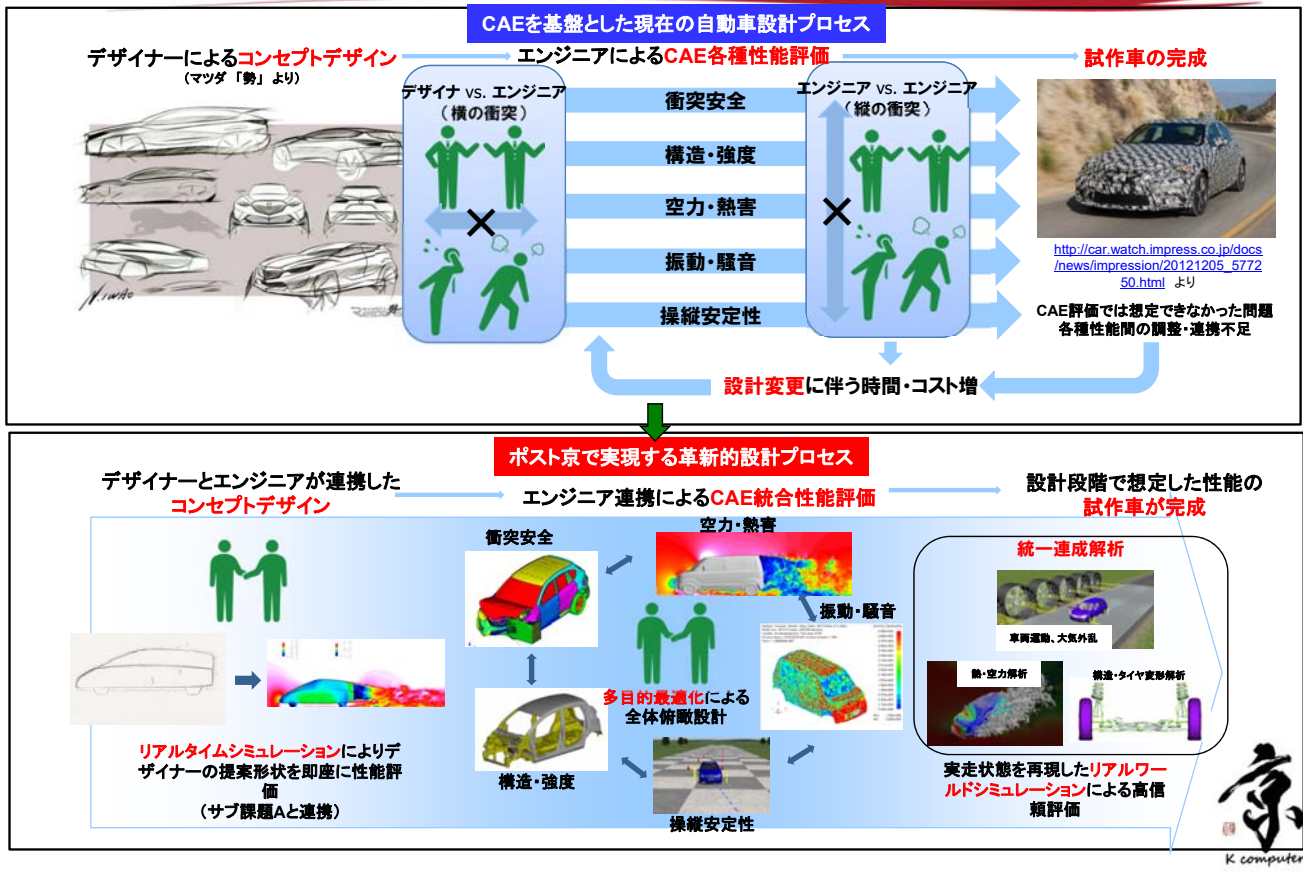
「京」でできたこと、まだできないこと

- 「京」を使って10年先(次世代)の未来を予想できた
 - 今から10年程度で、低価格化で「京」クラスのスパコンが民間会社に
- 風洞実験の「模倣」から風洞を超える新たな計測技術として
 - (1) 超高解像度渦シミュレーション
 - (2) リアルワールド(実際の走行状態を再現した)シミュレーション



- 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)
- もっと他の部署と連携したい → **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





謝辞

理研AICS複雑現象統一的解法研究チーム



北大計算流体工学研究室応用空力チーム



HPCI自動車コンソーシアム



- 東大生研 加藤千幸先生、革新的シミュレーション研究センターの皆さん
- 北大 大島伸行先生
- 広大 中島卓司先生、空力チームの皆さん
- 理研 小野謙二先生、理研スタッフの皆さん
- 山梨大学 岡澤重信先生
- (株)数値フローデザインの皆さん
- ここでは紹介できなかった連携企業の皆さん