

スパコンを使った自動車空力設計と 新たな謎への挑戦

理化学研究所計算科学研究機構
複雑現象統一的解法研究チームリーダー
(北海道大学大学院工学研究院機械宇宙工学部門准教授)
坪倉 誠

内容

- ①自動車の空気力学
- ②スパコンによる空力解析の歴史と現状
- ③時間平均から時空間変動解析へ
- ④次世代の空力シミュレーション
- ⑤まとめ

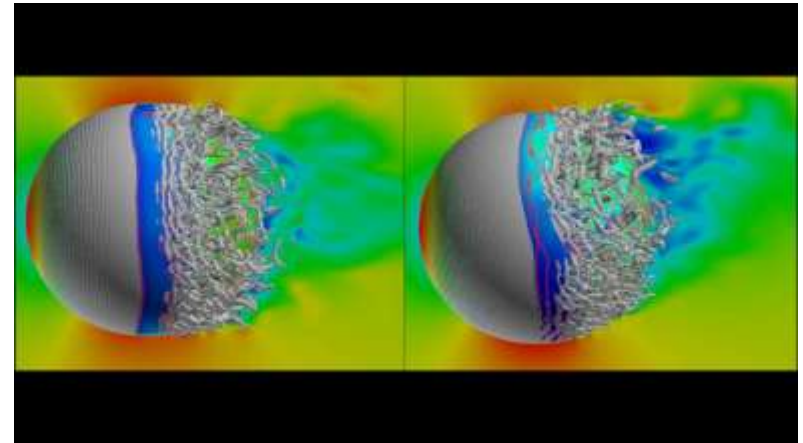
～①自動車の空気力学～

ボールが空気から受ける力(空気力)

◆ 曲がるサッカーボール

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

スパコンで調べたボールの周りの流れ(Muto et al, 2011)
左:回転なし、右:回転あり;色は流速と球表面圧力

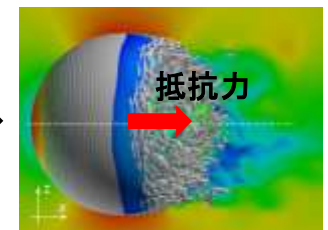


◆ 空気中をモノが動くと、空気から力を受ける

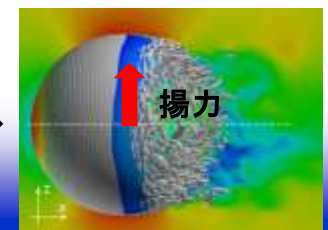
- 抵抗力: 空気の流れの方向に働く力
 - モノの運動を妨げようとする
- 揚力や横力: 空気の流れに直角に働く力
 - モノの運動の方向を変化させようとする
- 曲がるサッカーボールでは、回転により微妙な横力が発生している(メカニズムは今も研究中)



空気の流れ



空気の流れ



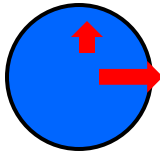
～①自動車の空気力学～ 空気力を利用する

A380初飛行(トゥールーズ, 2006)

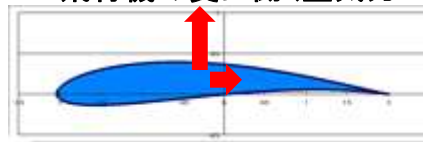
◆ 飛行機が空を飛ぶ

- 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



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...

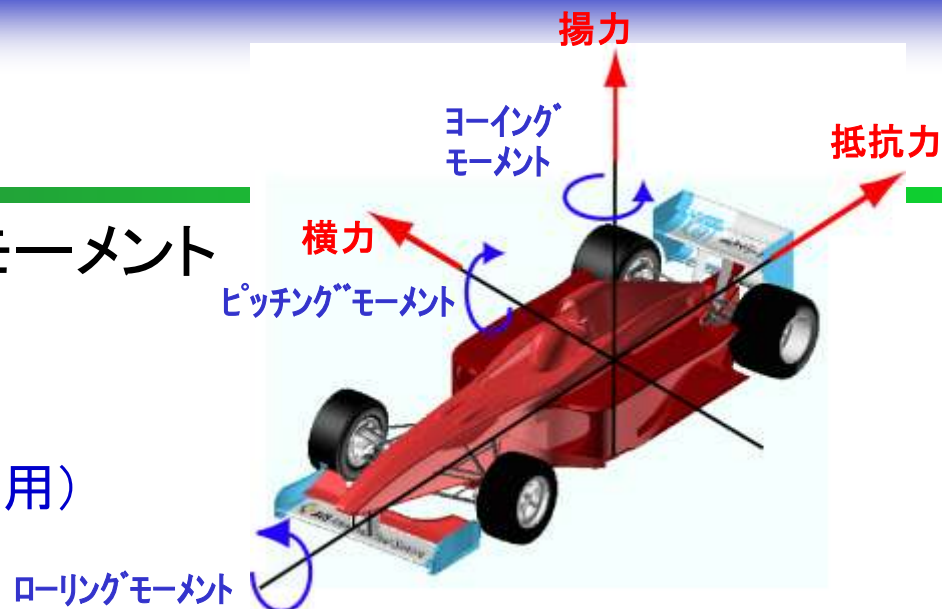
空気力を上手に利用して性能のいい車を作る!

～①自動車の空気力学～

自動車に作用する空気力

◆ 空気力の分解：三つの力とモーメント

- 抵抗力、揚力、横力
- モーメント
(軸に対して回転させる力の作用)



◆ 抵抗力

- 80km/hで空気抵抗が支配的 (50%)
 - ▶ ～40kg重(市販車100km/h)
 - ▶ ～250kg重(大型トラック100km/h)
- 低燃費(TNP)の実現の為に重要
 - ▶ 日本の二酸化炭素排出量の25%が車
 - ▶ 20%の抵抗低減でTNP10%向上

欧州車の空気抵抗の推移

自動車は抵抗力を減らすことが何より大切！ところが....

～①自動車の空気力学～

自動車に作用する空気力

◆ 揚力(持ち上げる力)

- 運転の安定性(グリップ)に影響
- 抵抗を下げようとするとう揚力が発生してしまう

燃費を下げ(抵抗), 安定性も確保(ダウンフォース)するのは難しい



あちらが立てばこちらが立たず...

表面を滑らかにすることによる抵抗の変化

◆ 横力

- 横風時の安全性
- 高速走行時の安定性

空気力を上手に利用するには精密な力の予測、計測が必要！

～①自動車の空気力学～

自動車の空気力を評価する方法(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



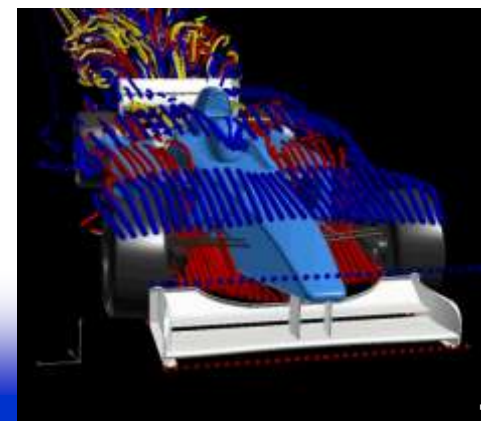
◆ 実走行計測

- 一番現実に近い
- 一番精度が悪い

◆ 空力シミュレーション

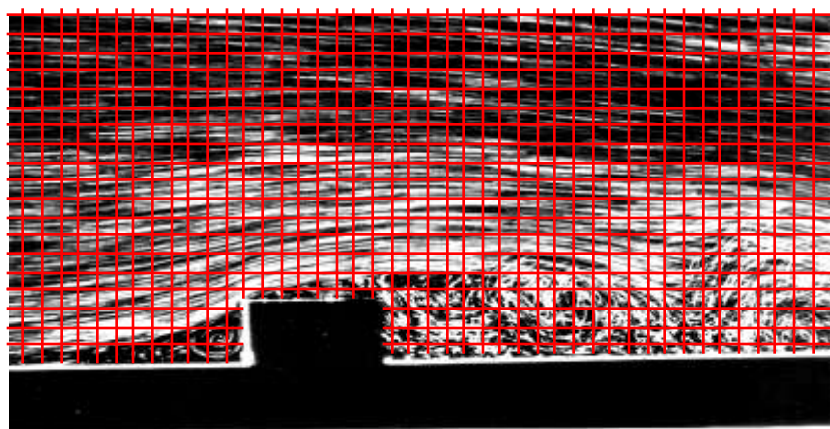
- 多数のテストを安価にたくさん実施できる
- 実際の車がなくてもテストが可能
- 使う物理モデルや計算手法により精度が悪くなる

空気を設計図の段階で評価できるので、
シミュレーションに対する期待が大きい！



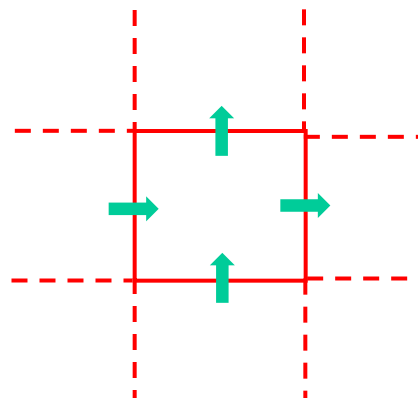
空力シミュレーション(1)

- ◆ 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わかる
 - 観察したい流れの空間を要素(計算格子)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



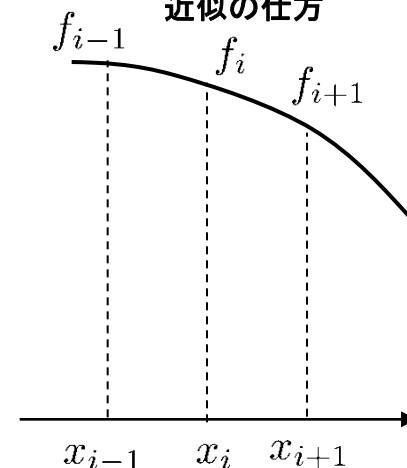
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

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

近似の仕方



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

空力シミュレーション(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、一億以上)

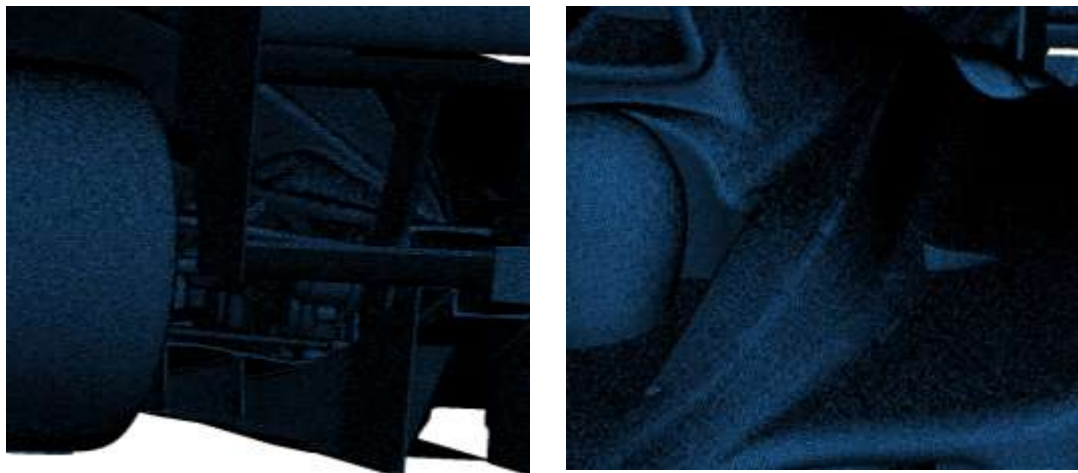
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + \cdots + a_{3n}x_n = b_3 \\ a_{41}x_1 + a_{42}x_2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

コンピュータでしかできません

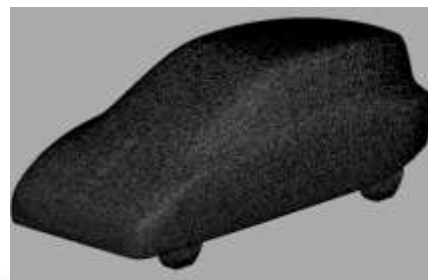
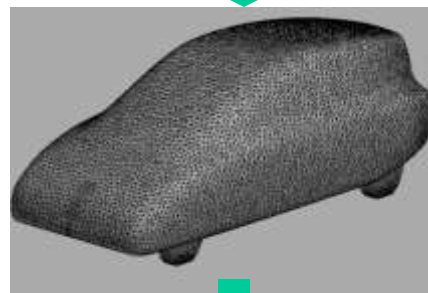
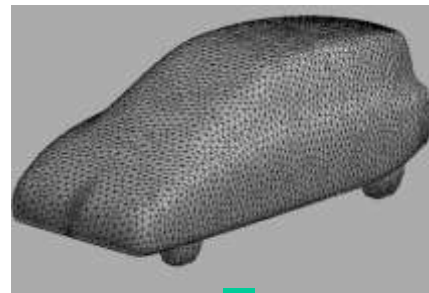
～①自動車の空気力学～ 空力シミュレーション(3)

◆ 現在用いられている典型的な自動車周りの要素(計算格子)

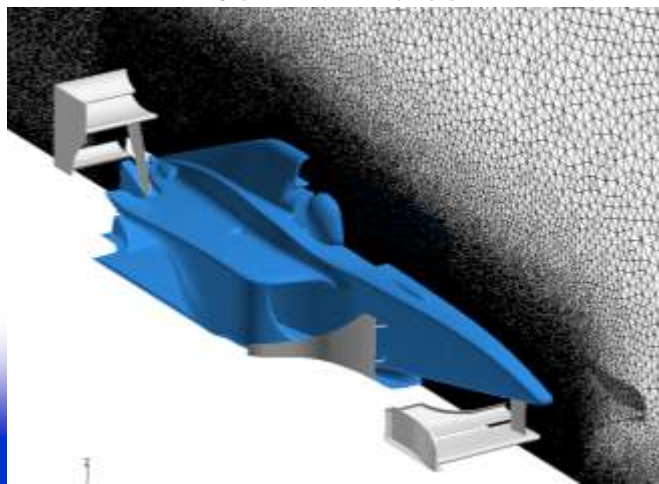
車体表面のポリゴン(三角形)分割



表面解像度の変化



空間のポリゴン分割



要素を細かくすればそれだけ計算の精度も形状の再現度もアップするが、より多くの計算機メモリと計算時間が必要になる

～①自動車の空気力学～

自動車空力シミュレーションの難しさ

- ◆ 形が複雑で流れがはがれやすい
 - 翼(流線形)と球(ずんぐり型)
 - 自動車はずんぐり型、力の予測が難しい
 - 形を再現するのに膨大な計算格子と手間
 - 車体は数メートル、**小さな部品は数ミリ**
- ◆ 流れ場に小さな渦がたくさん含まれている
 - 流れは乱流(最大渦は数メートル, **最小渦はサブミリメートル**)
 - 解像できない流体運動は平均してモデル化する

ブラフボディ周りの流れと乱流

自動車を解くには膨大な計算要素が必要で、高性能なコンピューター(スパコン)が不可欠になります！

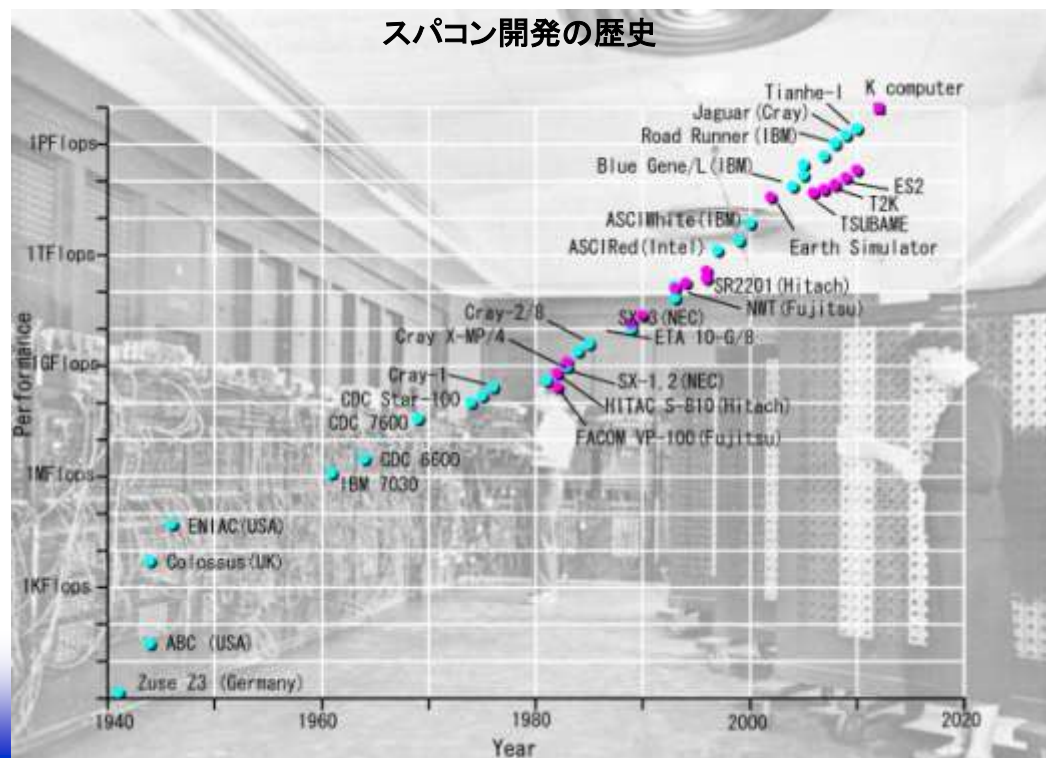
～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～

スパコン開発の歴史と自動車空力シミュレーション

◆ 自動車空力シミュレーションを行うためには？

- 膨大な計算資源が必要
 - ▶ ハードウェアとしてスパコンが不可欠
- 複雑な形状や乱流を扱う特別な手法が必要
 - ▶ 高性能なソフトウェアが必要

スパコンの歴史は自動車空力シミュレーションの歴史



～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～

第1世代の空力解析 1970年代～80年代中頃

- ◆ 解像度30センチ・時間平均シミュレーション
(要素分割数: 数千～数万点)

車体周りの計算要素(上:3D, 下:2D)

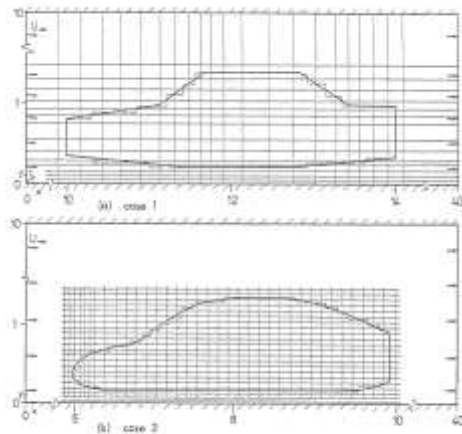
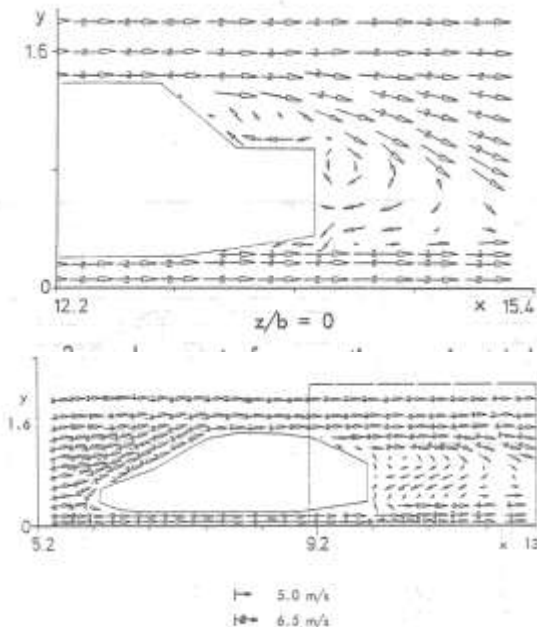
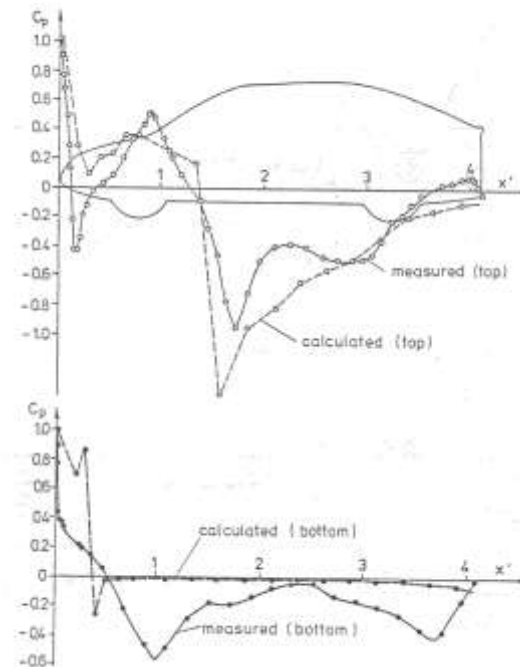


Fig. 1: Body shapes and their approximations
(all distances in meters)

車体周りの速度ベクトル



表面圧力の分布



Demuren & Rodi, 1985

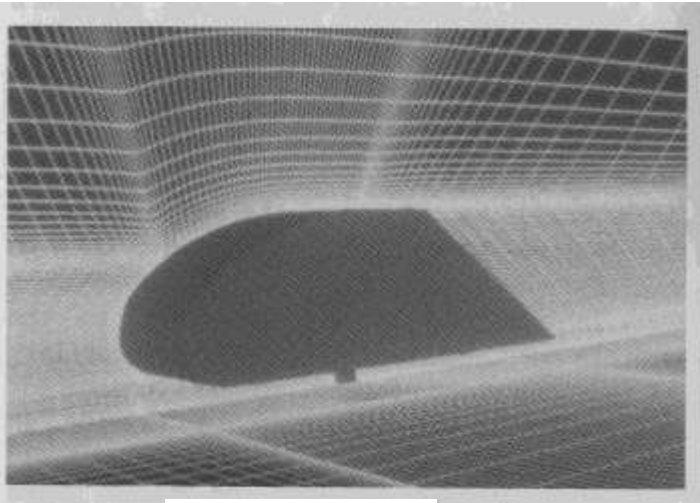
使用計算機: UNIVAC1100/61(1979年)
要素数:
3D: 45x26x17=2万点 (160k words)
2D: 75x39=3千点 (90k words)

- ・複雑な自動車形状は扱えない
- ・実験とも全然合わない....
- ・使い物にならない！

～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～

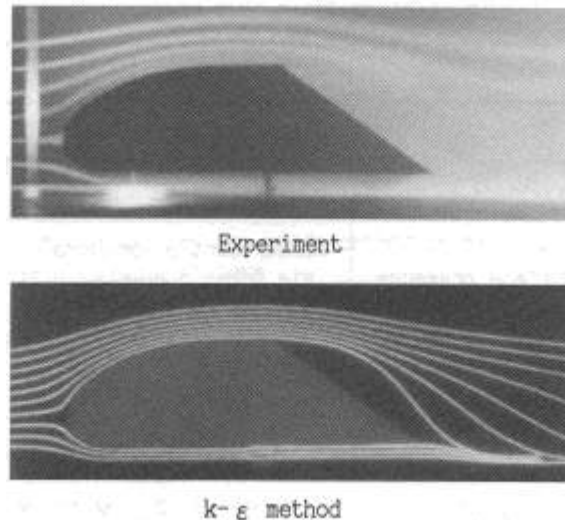
第2世代の空力解析 80年代中頃～90年代中頃

- ◆ 解像度数センチ・時間平均シミュレーション
(要素数: 数十万点)



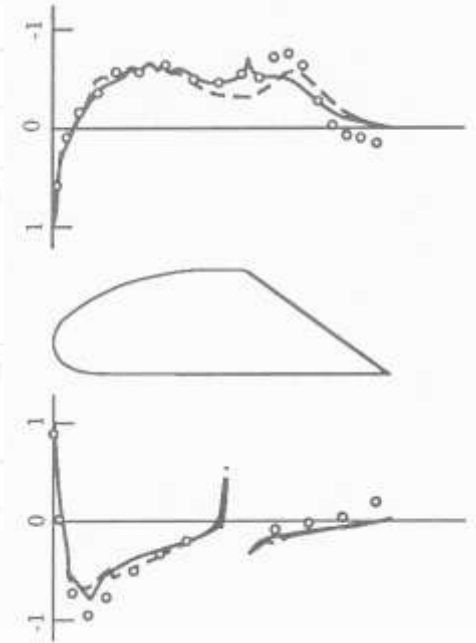
車体周りの計算要素

Yamada & Ito, 1993



車体周りの流線

表面圧力の分布



使用計算機: VP-2200 (2.5Gflops)
(1990年頃)
節点数: $101 \times 81 \times 87 = 70$ 万点

- ・複雑な自動車形状は扱えない
- ・ただし実験とは随分と合ってきた！
- ・ようやく希望が見えた

～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～

第3世代の空力解析(90年代中頃～現在)

◆ 解像度数ミリ・時間平均シミュレーション（要素数:数千万点）

CADデータベースからの
解析モデル作成

車体周りの計算要素

使用計算機:Linux cluster(32CPUs)

AMD Opteron

節点数:約3000万点

解析時間:36時間

- ・複雑な自動車形状を扱えるようになった
- ・実験との一致も5%以内であう
- ・実際の開発で使えるようになった

～③時間平均から時空間変動解析へ～

シミュレーションで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

↓

 - ものづくり基盤技術としてここ20年で大きく普及（既になくってはならない技術）
 - 日本車は外国に対してより速く新車を開発できるようになった（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...
 - 安価で高い経済性が要求される大衆車では、開発経験が浅いアジア勢が日本以上に積極的にシミュレーション技術を導入
（使う道具が同じになれば、やがてはおいつかれてしまう）
 - 乗り心地等が重要な高級車では、膨大な経験を有する欧州車が一日の長
（経験を理屈で補わない限り、追いつけない）

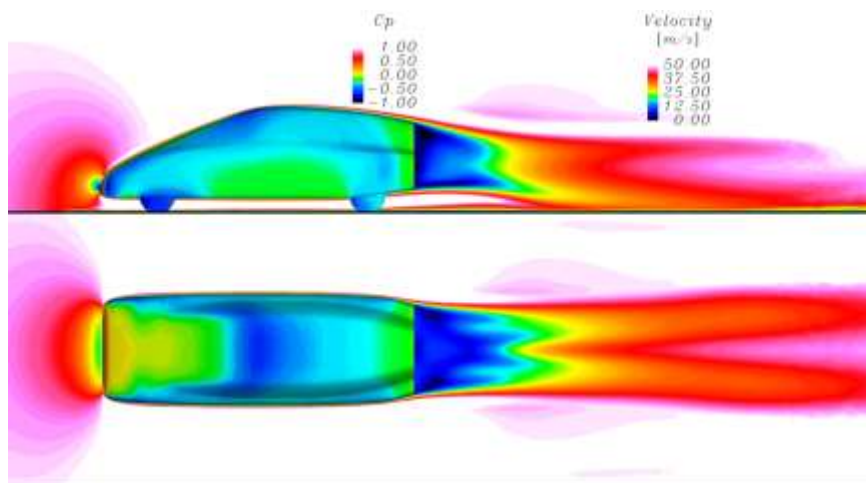
～③時間平均から時空間変動解析へ～

今までのシミュレーションとこれからのシミュレーション

今使われている 時間平均シミュレーション

利点: より安く速くに大きく貢献

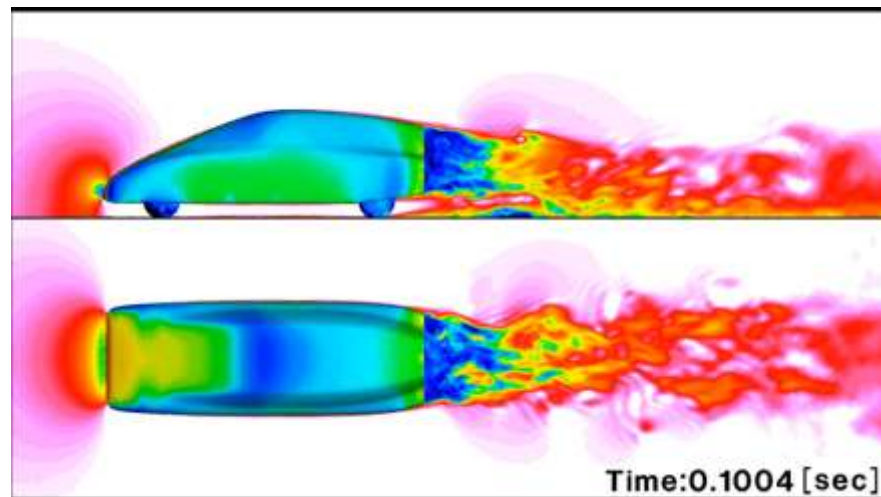
欠点: 空気力はわかるけれど、渦は見えないので、何故、そうなるかの説明は難しい...



これからの 時空間変動シミュレーション

利点: 流れ場の時空間渦構造が得られるので、より現実的な走行状態を再現できる

欠点: 今まで以上に高性能のスパコンが必要



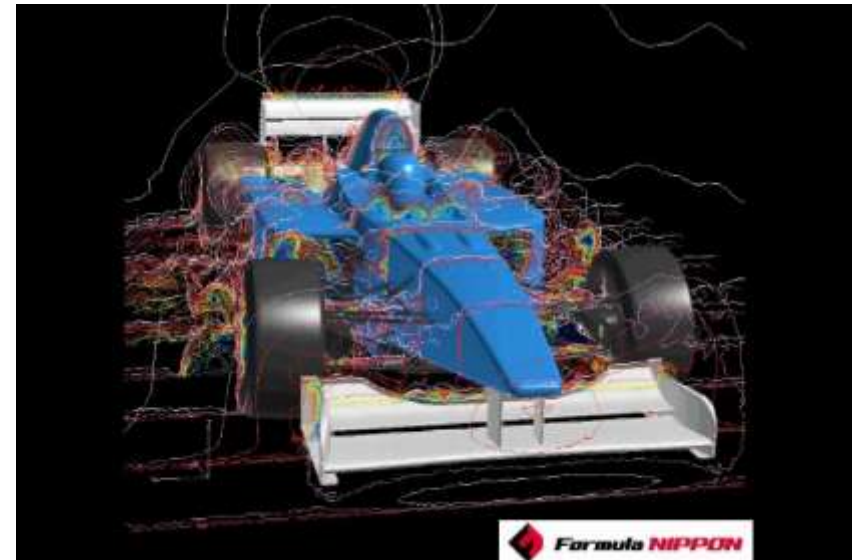
車体表面の圧力と車体周りの空気の色で表現

～③時間平均から時空間変動解析へ～

地球シミュレータを用いた挑戦(2005年)

- ◆ 解像度数ミリ・時空間変動解析
 - ハードウェア:地球シミュレータ(当時世界最速)
 - サイエンスで用いられていた手法をエンジニアリングに
 - 世界最大規模の非定常自動車空力解析

Tsubokura et al., 2007



使用計算機:Earth Simulator
(100Nodes/800CPUs
要素数:1億2000万点(500GBメモリ)
解析時間:120時間

～④次世代の空力シミュレーション～

スーパーコンピューティング(京)で何が変わるのか？

◆ 「京」を使えば10年先(次世代)の未来が見れる

● 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！**
(**ロベカルのフリーキックが何故、あんなに曲がるのか？**)
- ▶ 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
- ▶ 自動車の設計図段階での評価ができる(簡単に設計図を変更できる)
- ▶ 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**

～④次世代の空力シミュレーション～ 高速走行安定性に優れた自動車開発

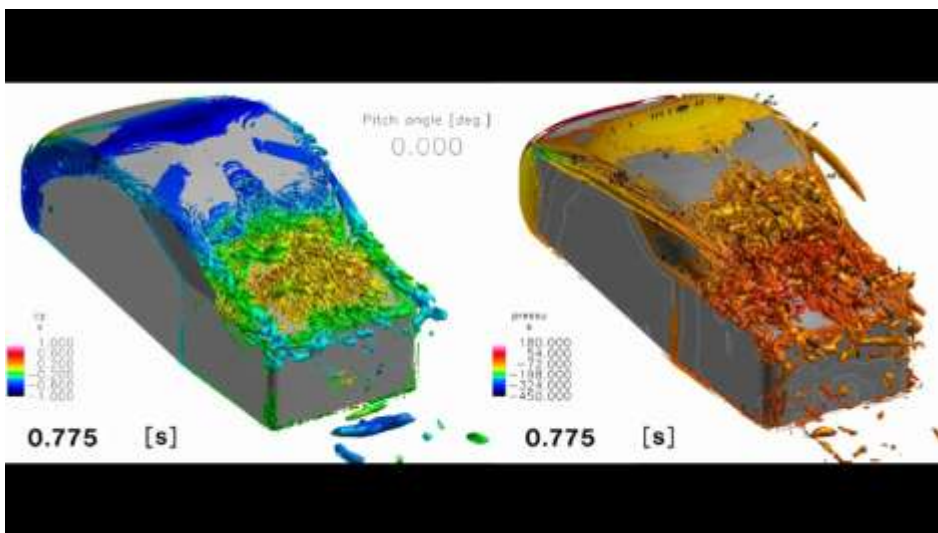


◆ モデルを使ったピッチ運動(尻振り)解析

Cheng et al., 2010, 2011

Type Bを模擬した安定モデル

Type Aを模擬した不安定モデル



後から発生する渦が強い



前と後ろから発生する渦が影響し合う

安定モデル

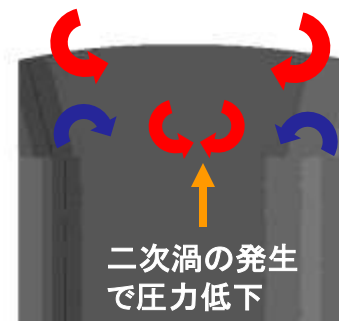


2→4度

不安定モデル



2→4度



二次渦の発生
で圧力低下

お尻を上げている途
中でトランクデッキの
圧力が下がる

渦が尻振り運動を助
ける！

～④次世代の空力シミュレーション～ 高速走行安定性に優れた自動車開発

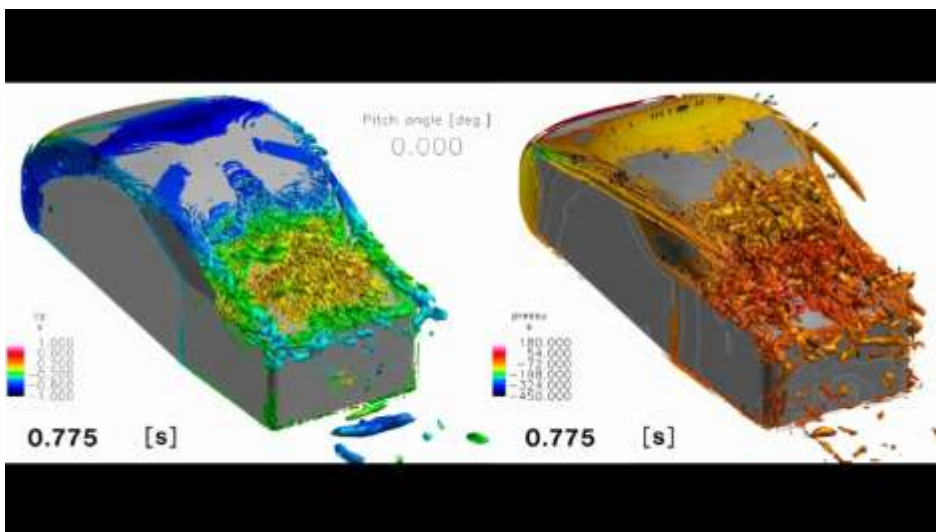


◆ モデルを使ったピッチ運動(尻振り)解析

Cheng et al., 2010, 2011

Type Bを模擬した安定モデル

Type Aを模擬した不安定モデル



後から発生する渦が強い



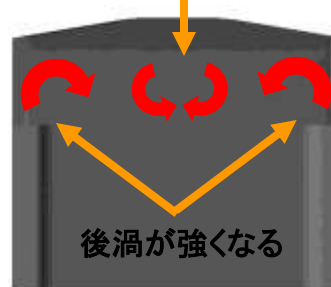
前と後ろから発生する渦が影響し合う

安定モデル



4→2度

二次渦の発生
で圧力低下



後渦が強くなる

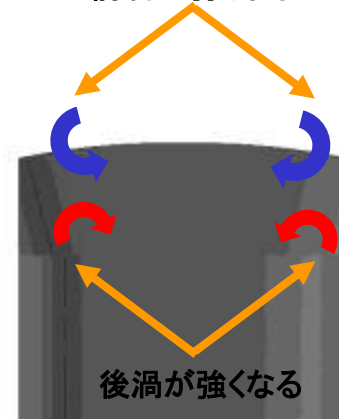
お尻を下げている途
中でトランクデッキの
圧力が下がる

不安定モデル



4→2度

前渦が弱くなる



後渦が強くなる

渦が尻振り運動を邪
魔する！

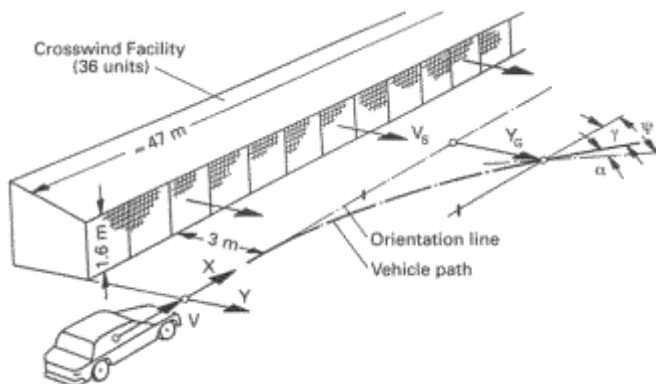
～④次世代の空力シミュレーション～ 横風安定性に優れた自動車開発



- ◆ 突風にあおられた自動車にかかる非定常な空気力を調べ、安定性を評価する

Tsubokura et al., 2011

従来の実走行テスト



シミュレーションによる評価



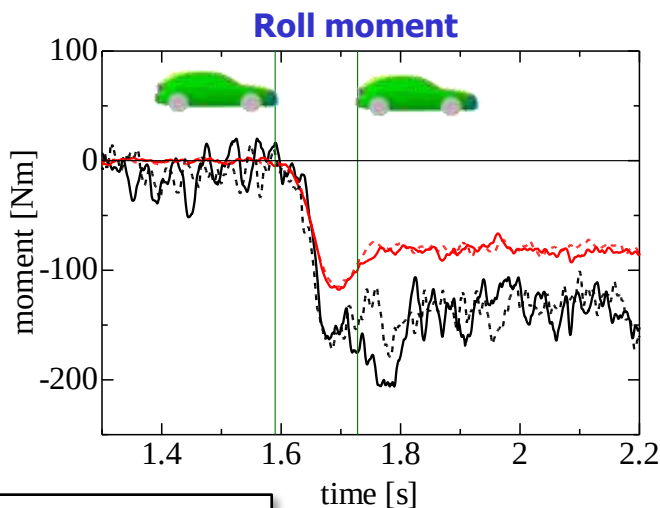
テストコース脇に巨大なファンを並べて突風を作る

車が出来上がってからでないと評価できない……

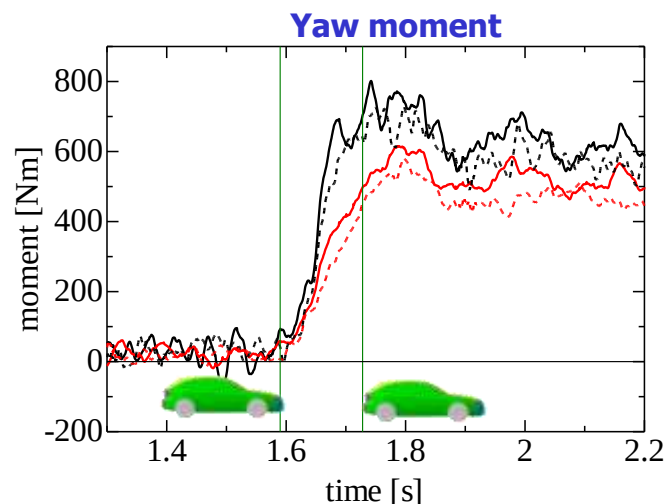
- ◆ 床下形状の差によって、横風時に作用する空気力に大きな変化！

Tsubokura et al., 2011

床下が平らな場合



床下がでこぼこしている場合

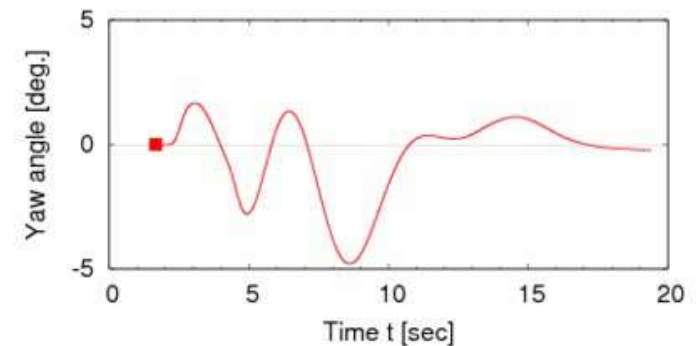
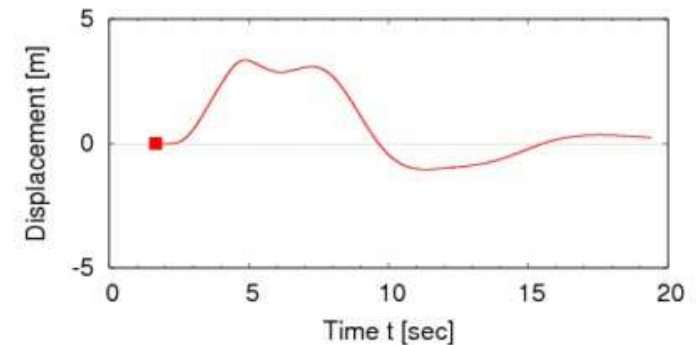
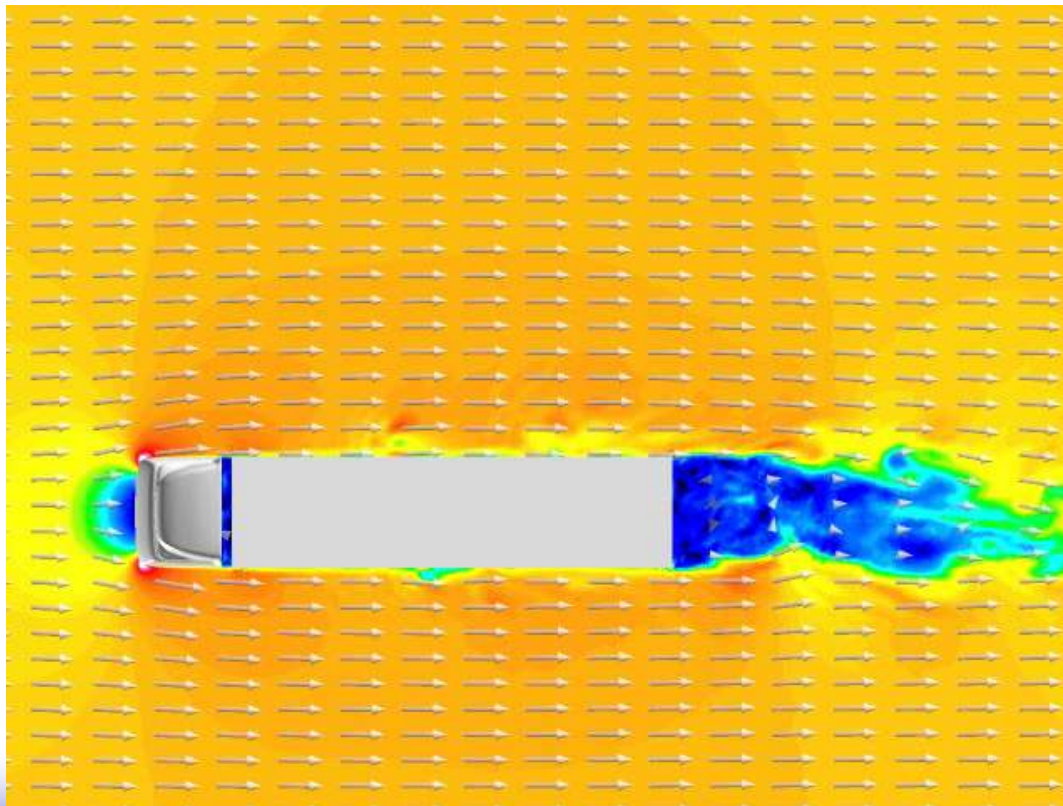


— Flat TOTAL Rugged TOTAL
— Flat UPPER Rugged UPPER

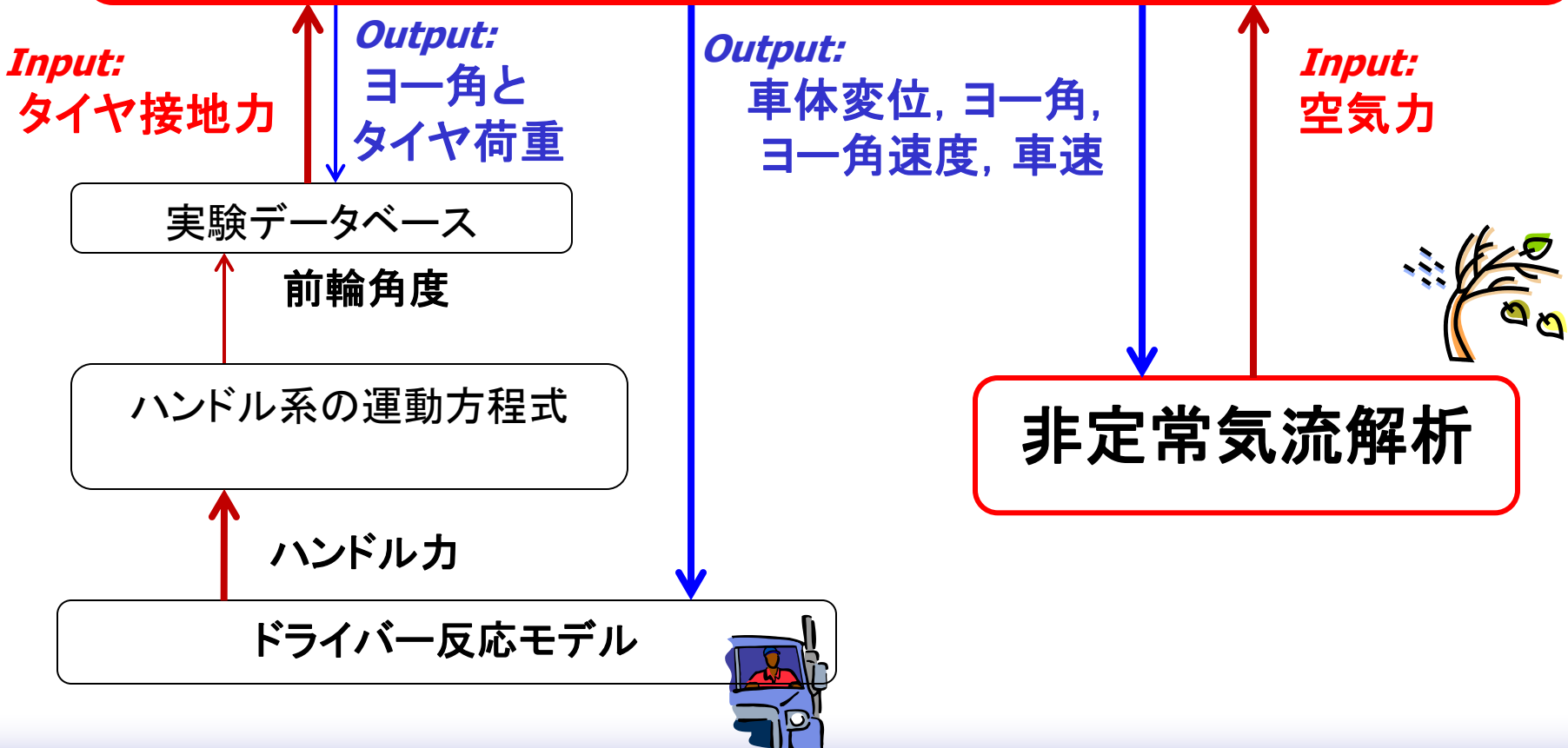
- ◆ 横風にあおられた際の自動車の運動挙動を解析することで、より安全な自動車の開発に役立てる。

Nakashima et al., 2011

- 突風にあおられた際のトラックの運動挙動

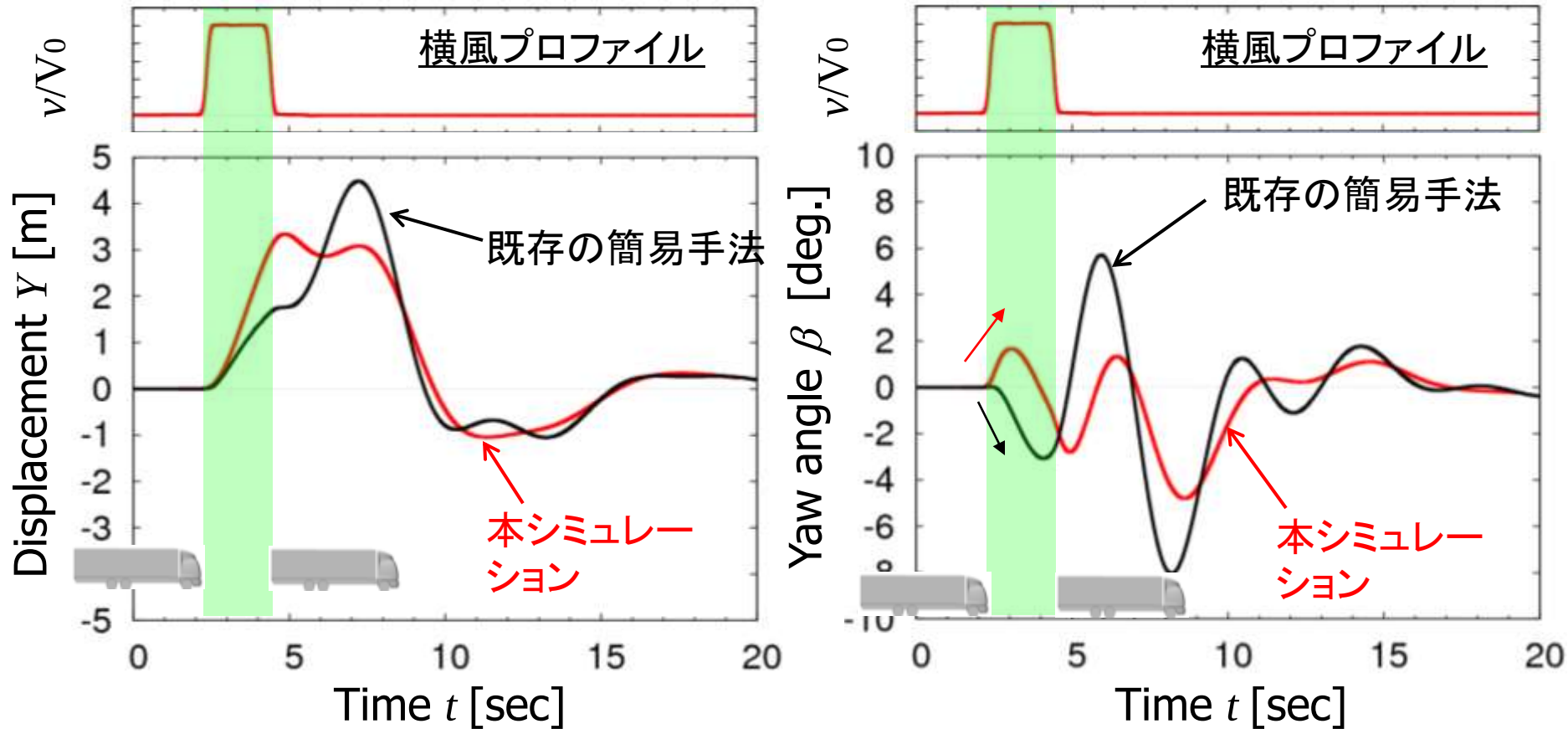


自動車の運動方程式





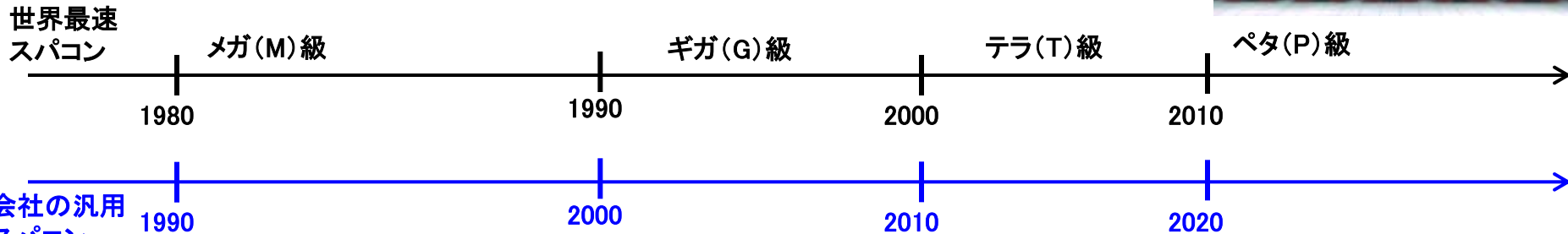
◆ 既存の解析(準定常解析)との比較



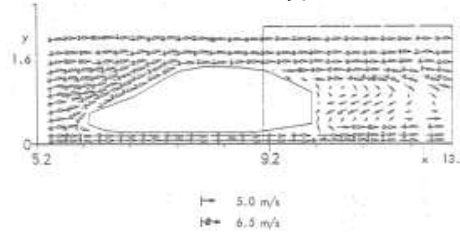
今までの簡易な解析手法と、次世代空力シミュレーションで大きな差。今までの方法では十分に運動を再現できないことがわかった！

まとめ(1)

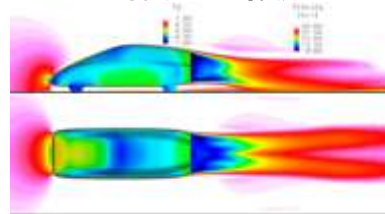
「京」



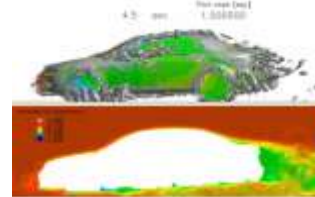
テスト計算



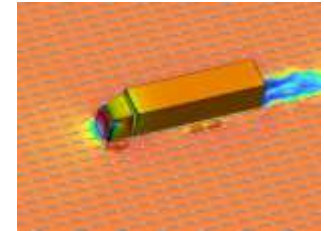
時間平均解析



時間変動解析



リアルワールド解析

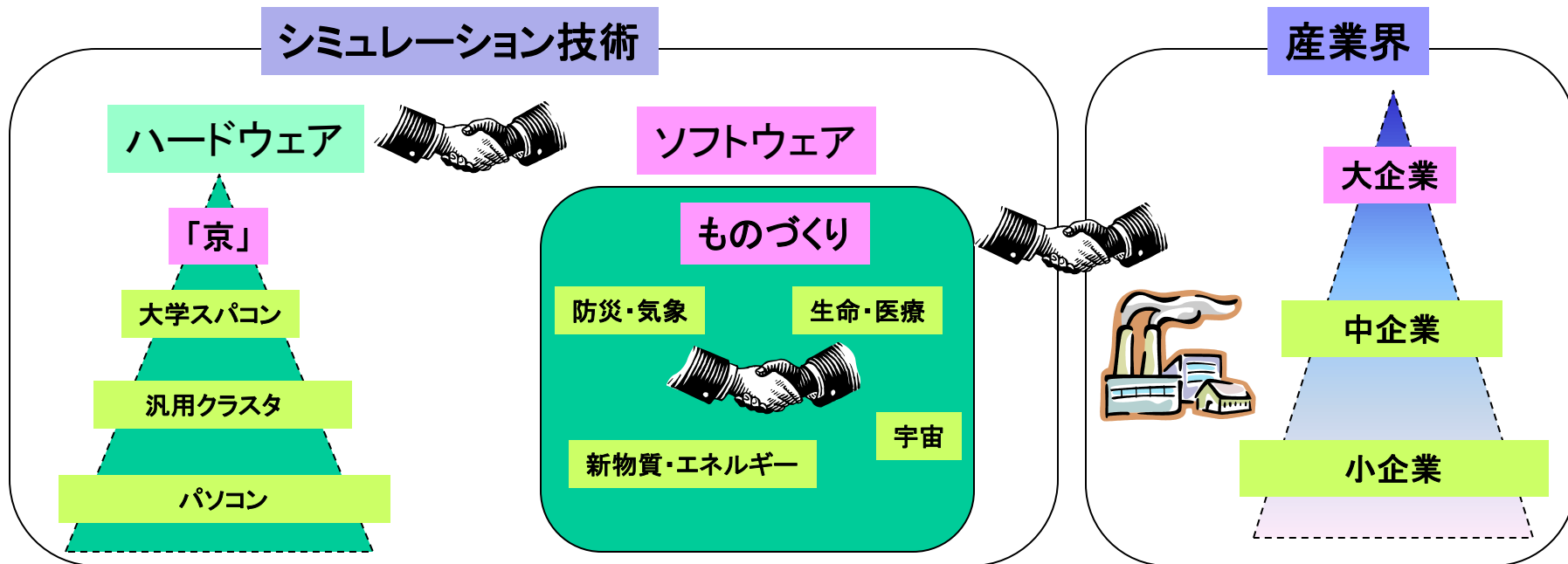


自動車空力シミュレーションの歴史

- ◆ 最速スパコンは未来が見れる道具
- ◆ 風洞の補完的役割から風洞ではできない解析へ！
 - 30年続いた設計プロセスを、スパコンで改革して、革新的自動車を実現しよう

まとめ(2)

- ◆ ものづくりシミュレーション発展のための三つの協力体制
 - ソフトウェアを作っている他分野の研究者との連携
 - ハードウェアを作っている研究者との連携
 - 産業界との連携



1. 他国では実現していない**スーパーコンピューティングによる基盤設計システム**が実現する
2. より安価で短期間に、**性能の高い製品**の開発が可能となる
3. 日本のものづくりの国際競争力が強化され、豊かな生活が実現する