

京で目指す 自動車の次世代空力シミュレーション

北海道大学大学院工学研究院機械宇宙工学分野
准教授 坪倉 誠



京速コンピュータ「京」を知る集い in 福岡
2011年12月17日



- ①自動車空力解析について
- ②スパコンによる空力解析の歴史と現状
- ③定常空力から非定常空力へ
- ④空力シミュレータの概要
- ⑤次世代空力解析

～①自動車空力解析について～ 自動車に作用する空気力



- ◆ 三つの力と三つのモーメント
 - 空力係数

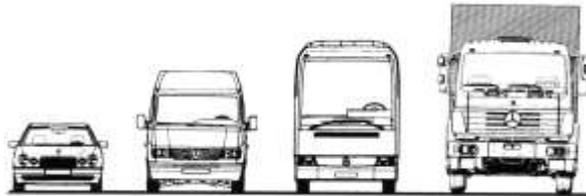
$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_L$$

$$F_S = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_S$$

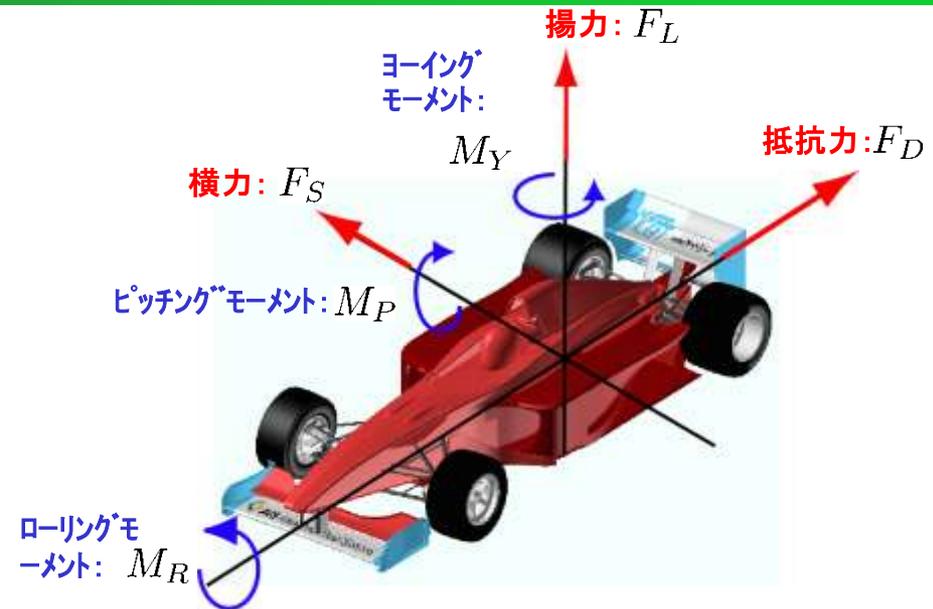
$$M_Y = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot W \cdot C_{YM}$$

A : 前面投影面積、 W : ホイールベース、 V : 車速



断面積 A 大 →

空気力は車速の二乗で作用する！



～①自動車空力解析について～ 抵抗力和揚力



◆ 空気抵抗

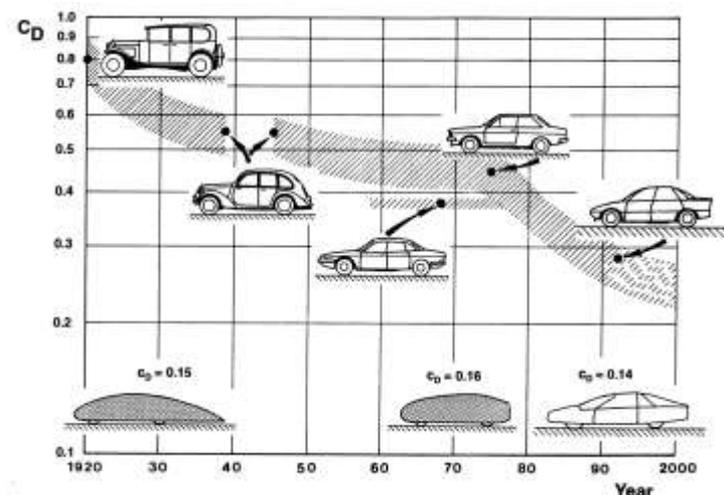
- 80km/hで空気抵抗が支配的 (50%)
 - ▶ ～250kg重 (大型トラック100km/h)
 - ▶ ～35kg重 (市販車100km/h)
- 燃費に直結
 - ▶ 日本のCO2排出の25%が車
 - ▶ 空気抵抗1割減でCO2が2～3g/km 減
 - ✓ 20km/Lの低燃費車, 60km/h走行時

◆ 揚力 (ダウンフォース)

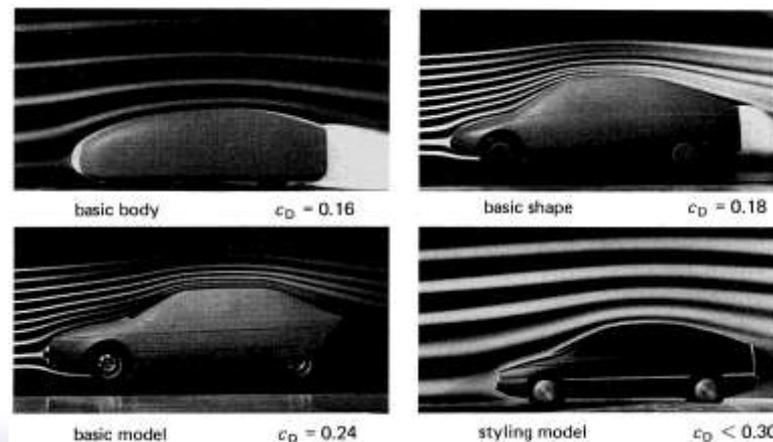
- 操縦安定性 (グリップ) に影響
- 揚力を抑えつつ抵抗も抑えるのは難しい

快適性 (A) を確保しつつ燃費を下げ (CD), 安定性も確保 (CL) する必要がある!

最適化の必要性



欧州車のCD値の推移



翼型に近付ければ抵抗値は下がるが、揚力が発生するとともに投影面積も低下する

～①自動車空力解析について～ 空気力の評価方法



◆ 風洞実験

- 高い計測精度
- 高価な建設, 維持, 人件費

◆ 実走行計測

- 実走行状態を再現
- 開発へのフィードバックが困難
- 大きな計測誤差

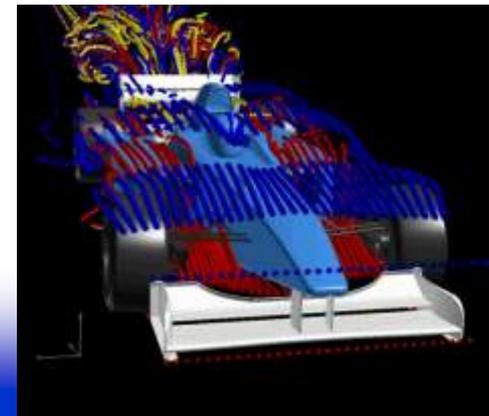
◆ コンピュータシミュレーション

- 風洞実験に変わる手法として
2000年頃より本格導入
- 多数のテストを安価に実施(開発初期に有利)
- 導入する物理モデルや手法により精度で劣る

BMW風洞



日本自動車研究所



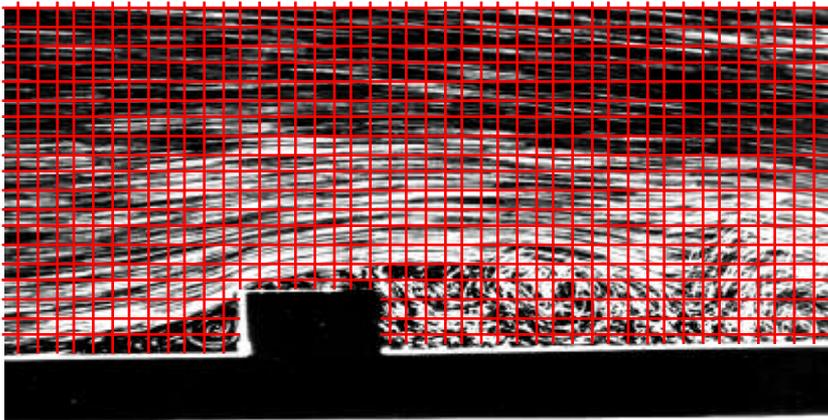
増加する空力開発の重要性



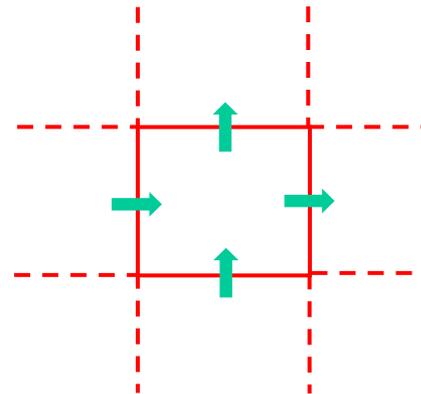
- ◆ 燃費の向上とCO2削減
 - より低いCd値(低空気抵抗)のニーズ
 - 車両の軽量化に伴う空気問題の顕在化(空気の影響を受けやすい)
 - ハイブリッド・電気自動車等の新たなパワートレインシステムへの対応
 - ◆ 多様化, 複雑化する空力問題への対応
 - Cd値の低減と, Cl値の低減, 横風安定性, 熱害対策といった相反する設計案件への対応
 - 車両運動, 熱害, 空力騒音等の連成問題の解決
- ↓
- ◆ 風洞設備の新設(ヨーロッパが先行, 日本も追従)
 - ムービングベルト, 環境風洞, 加振機
 - ◆ シミュレーションへの期待
 - 工数の短縮, コストの削減



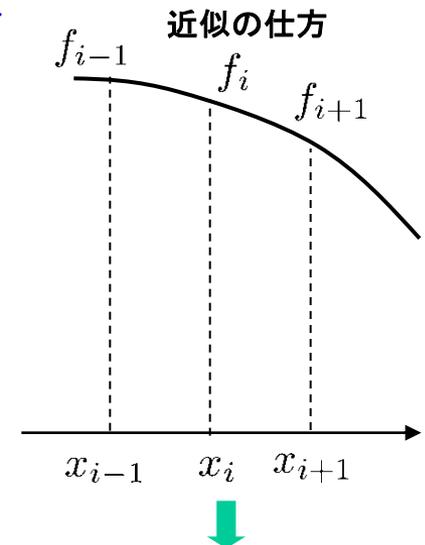
- ◆ 流体の運動方程式をコンピュータを用いて解く
 - 流れ場を時空間的な**計算格子**に分割する
 - 分割した格子に対して運動方程式を**代数方程式**で近似する
 - 近似した代数方程式を流れ場全体で時空間的に解く



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

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

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



$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = f(u_{i+1}^n, u_i^n, u_{i-1}^n) \dots$$

未知数が数千万～数億の連立方程式を解く!

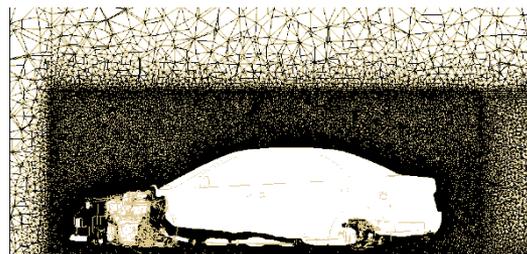
自動車空力シミュレーションの難しさ



- ◆ 最小の運動スケールまで解くことは不可能
 - 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モデル化



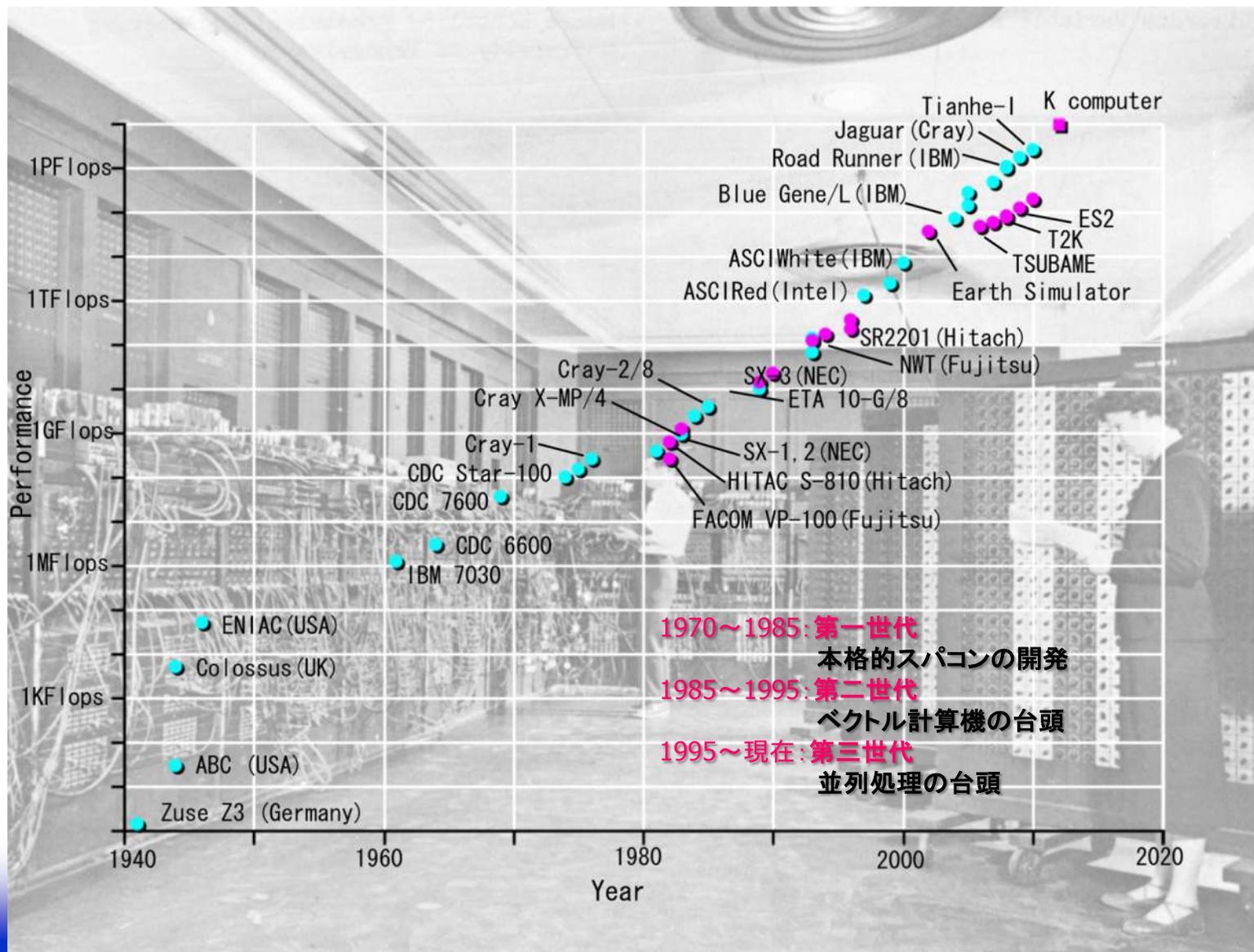
- ◆ 複雑な形状
 - 形状を再現できるような工夫が必要
 - 計算格子を作るのに大きな手間



- ◆ 設計・開発に使うには1週間以内に結果が必要
 - 格子作成に2日, 計算に1日, 結果評価に1日

～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



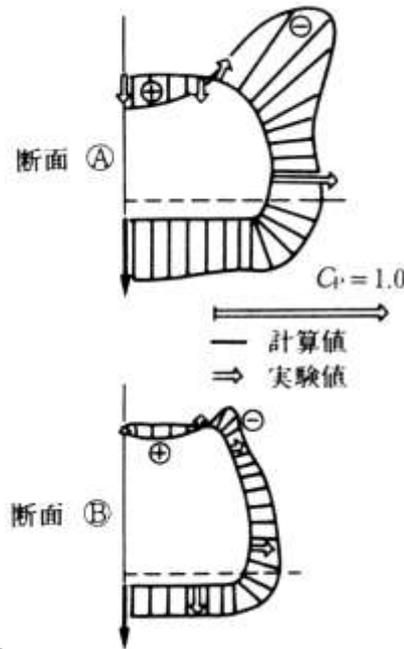
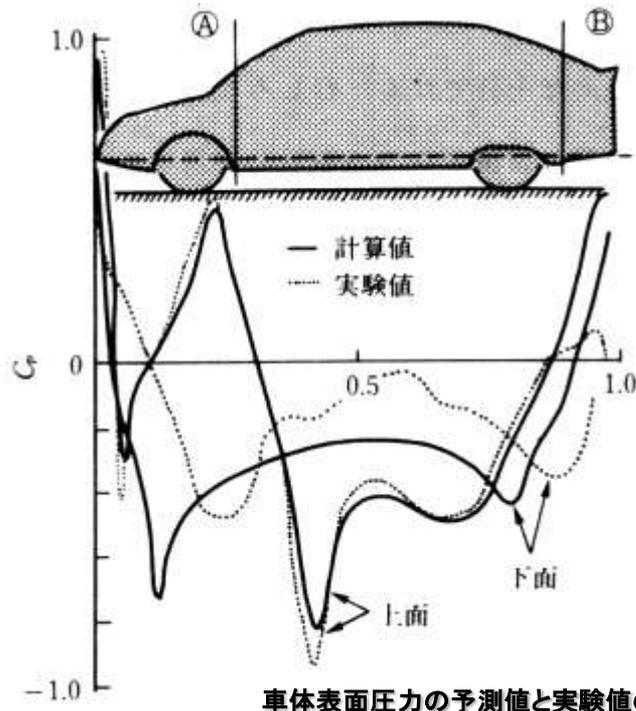
～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～ 黎明期の空力解析



◆ ポテンシャル流れ解析(パネル法)

- ・非圧縮非粘性渦なし流れ(ポテンシャル流れ)を仮定
- ・車体表面をパネル分割
- ・車体後流形状を可視化により求め、これを車体隣接仮想物体として取り扱う。

Buchheim et al., 1984



- ・流れの剥離が小さい車両前方上面では比較的良好な結果
- ・車体下部や後流は×
(空力抵抗予測は×)

～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～1985年

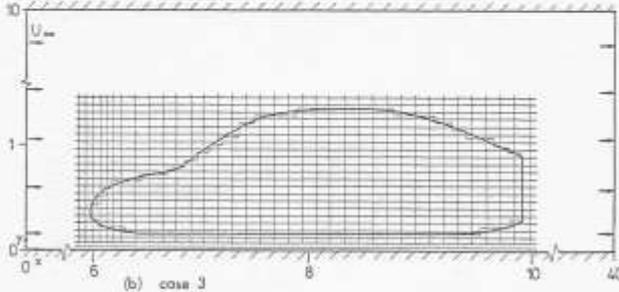
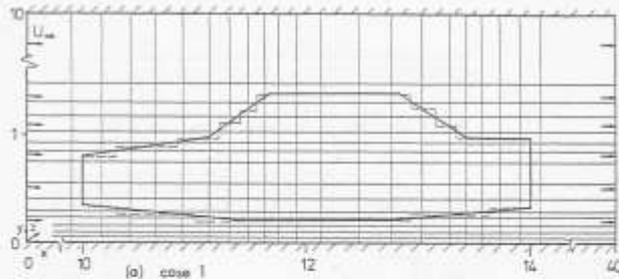


◆ 定常乱流解析(k-εモデル) (要素分割数:数千～数万点)

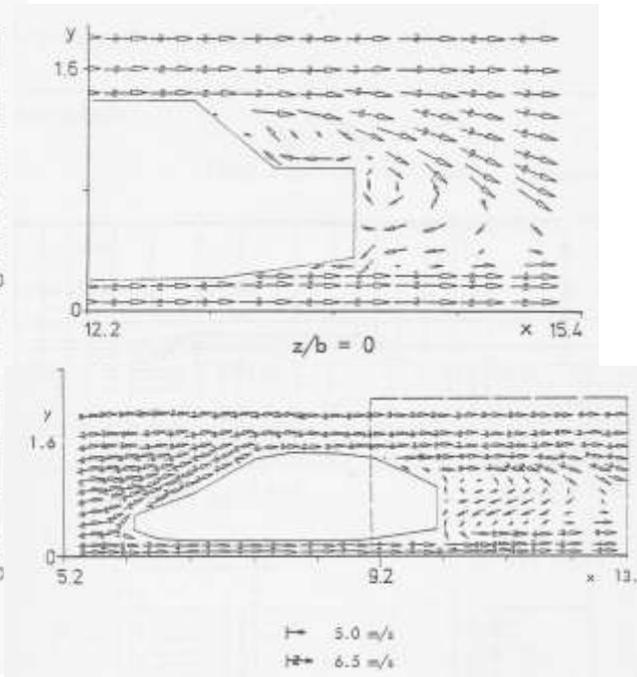
・車両空カシミュレーションのテスト段階

1982年 国際会議「車両設計におよぼす空気力学の影響」(ロンドン)

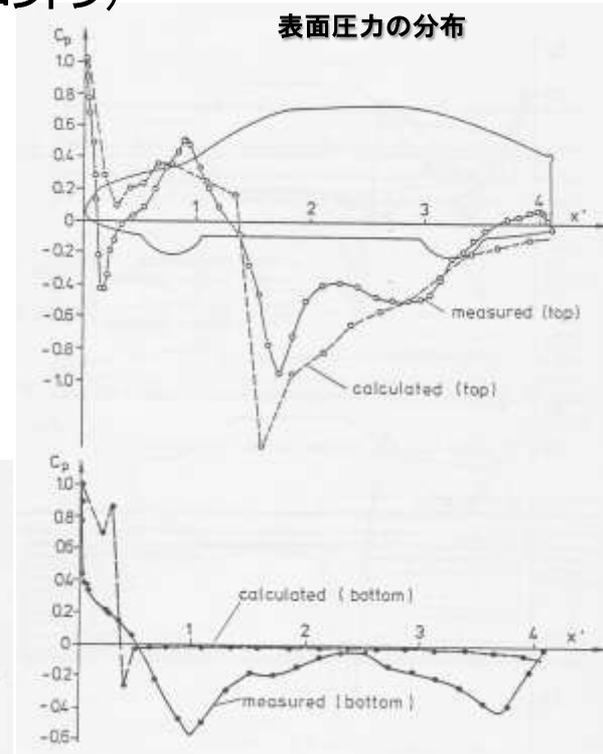
1982年 国際会議「車両空気力学」(フォルクスワーゲン)



車体周りの計算要素(上:3D,下:2D)



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

要素数:

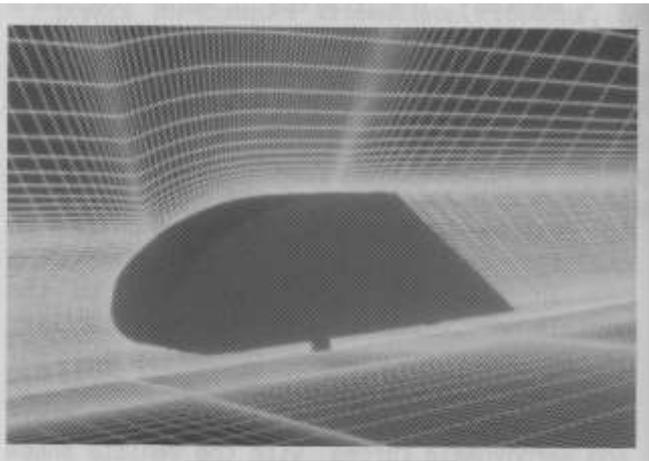
3D: 45x26x17=2万点 (160k words)

2D: 75x39=3千点 (90k words)

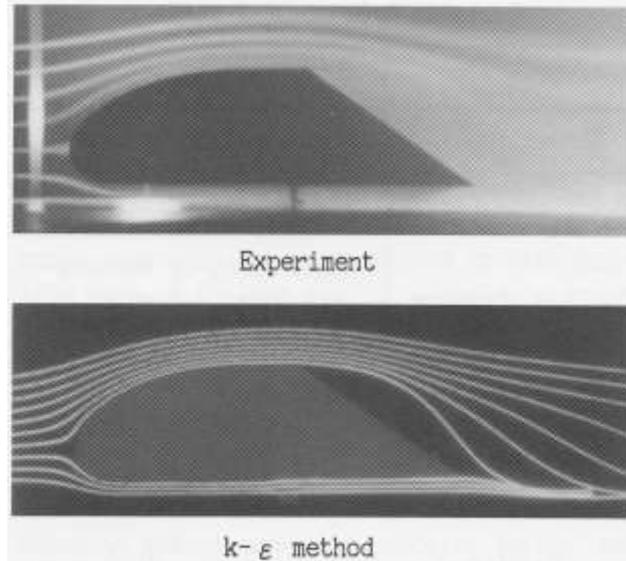


◆ 定常乱流解析(k-εモデル) (要素数:数十万点)

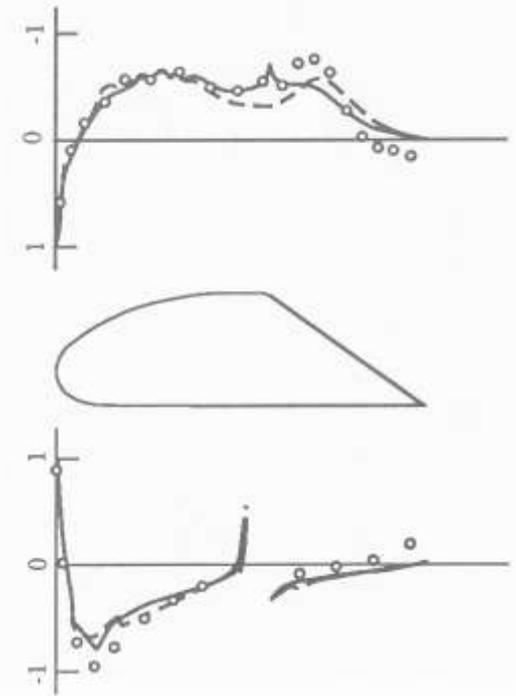
・境界適合座標(数学的に曲線座標を用いる)による格子作成



車体周りの計算要素



車体周りの流線



表面圧力の分布

Yamada & Ito, 1993

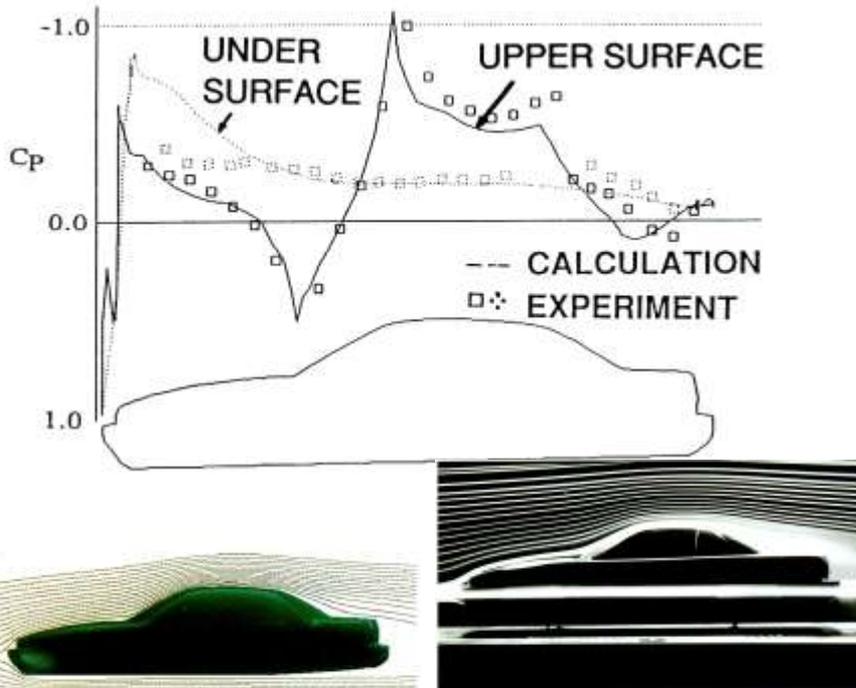
- ・車体表面圧力分布を含む流れ場の定性的把握が可能に。
- ・エンジンルームや詳細床下形状の再現はまだまだ困難
- ・数値粘性効果による解の悪化(乱流性情の把握は困難)

使用計算機: VP-2200 (2.5Gflops)
節点数: 101x81x87=70万点



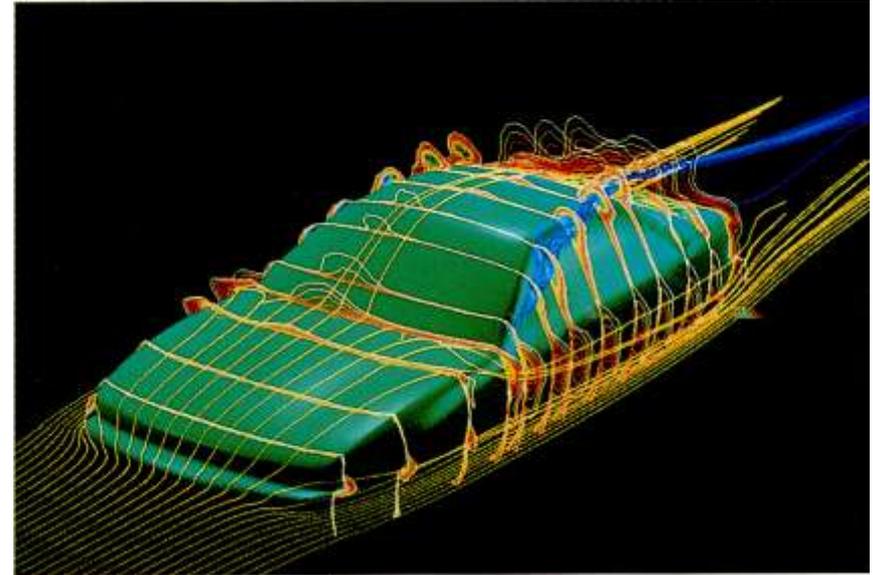
◆ 簡易非定常乱流解析(要素数:数十万点)

・風上法による**擬似直接計算**



計算結果

実験結果



Himeno et al., 1990

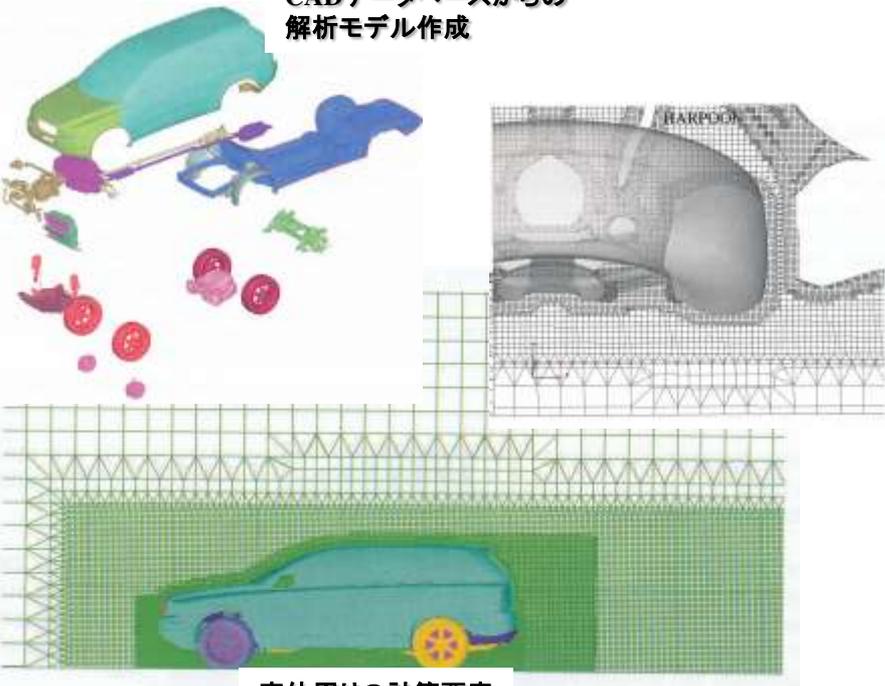
使用計算機: Cray X-MP
VP200, S820
節点数: 112x73x56=50万点

～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(1995年～)

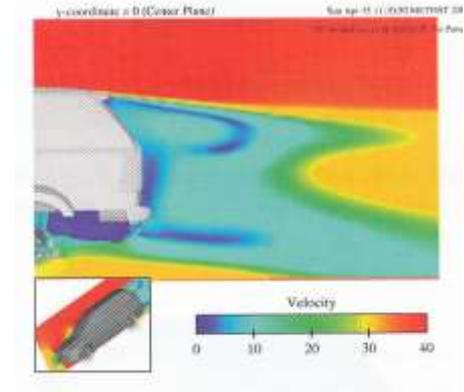
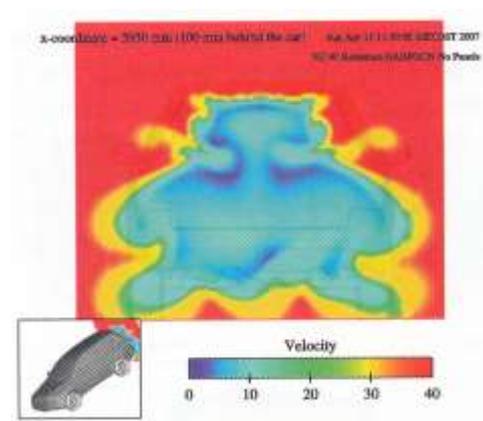
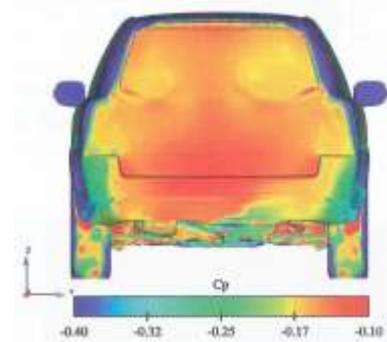


- ◆ 詳細車体まわりの定常乱流解析(k-εモデル) (要素数:数千万点)
 - ・市販ソフトウェアによるVolvo設計プロセスの紹介

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



- ・設計プロセスにおける実用化を実現
- ・エンジンルームや詳細床下形状を再現
- ・定常解析が主流(CD, CLの評価)

使用計算機:Linux cluster(32CPUs)
AMD Opteron
節点数:約3000万点
解析時間:36時間



- ◆ 製品開発プロセスをより速くより安く
 - 風洞実験の多くをシミュレーションに置き換えられる
 - 実験用の試作品作成費用を抑えることができる
- ◆ 設計・開発プロセスへのシミュレーション(CAE)の積極導入
 - ものづくり**基盤技術**としてここ20年で大きく普及(既に無くてはならない技術)
 - 日本車は諸外国に対してより速いスパンで新車を開発(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！**
 - 所詮は実験の代替技術
 - 普及車(アジア市場への対応): 開発経験が浅い韓国では積極的にシミュレーション技術を導入(ここ数年の品質向上は目覚ましい)
 - 高級車(欧米市場への対応): 膨大な経験を有する欧州車が一日の長

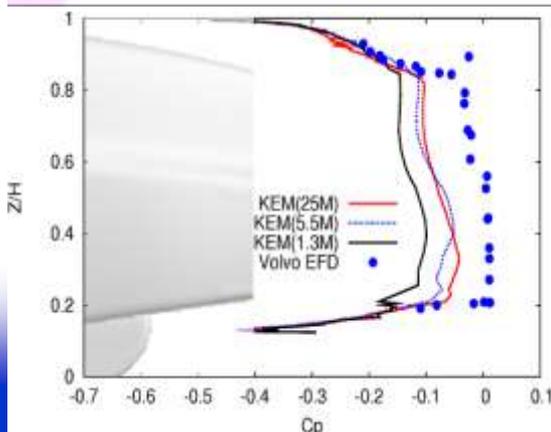
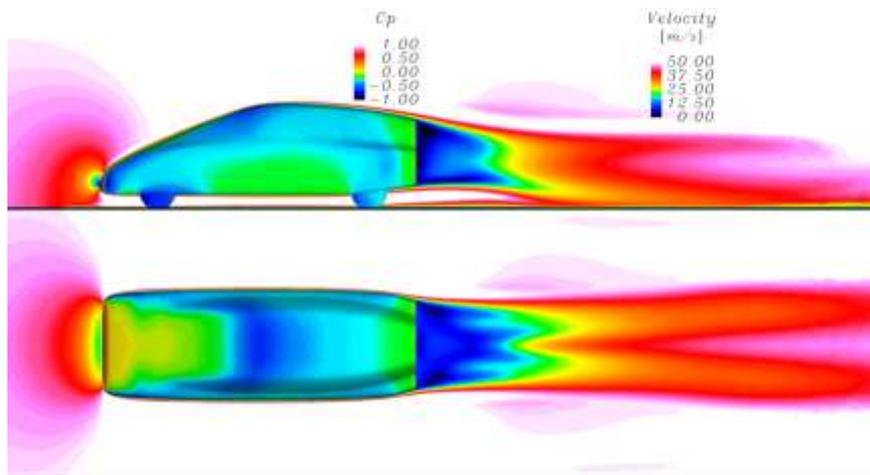
～②スパコンによる空力解析の歴史と現状～

現行シミュレーションとこれからのシミュレーション



現行の時間平均流体シミュレーション

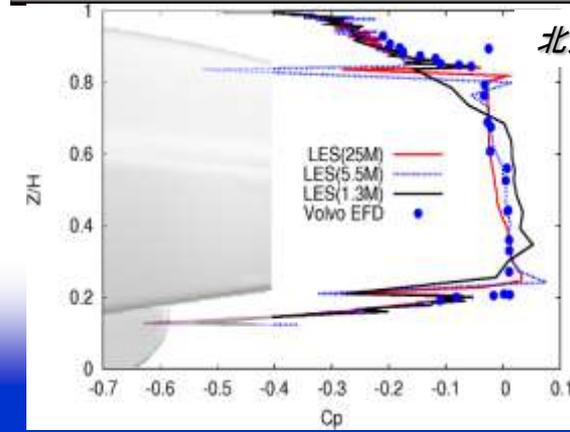
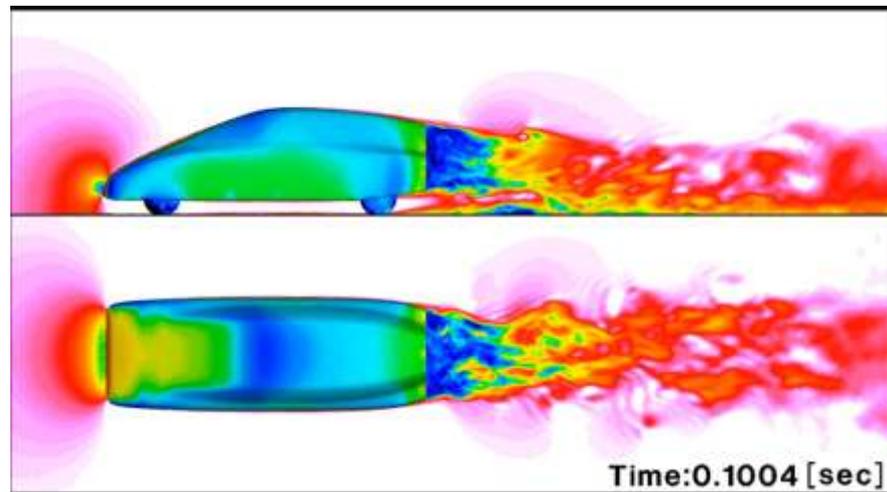
比較的安価に速く結果(抵抗値、揚力値)を得ることができる
流れ場を平均化してしまってしまうので、物理現象の解明には不向き
流れの非定常現象の評価には使えない



車体後端中央断面での表面圧力分布の実験地(EFD)との比較

これからの時空間変動シミュレーション

性能の高い計算機が必要
流れ場の時空間渦構造が得られるので物理現象の解明に向く
非定常現象を扱うことができる



北海道大学・広島大学提供

～②スパコンによる空力解析の歴史～

地球シミュレータによる大規模解析(2005年)



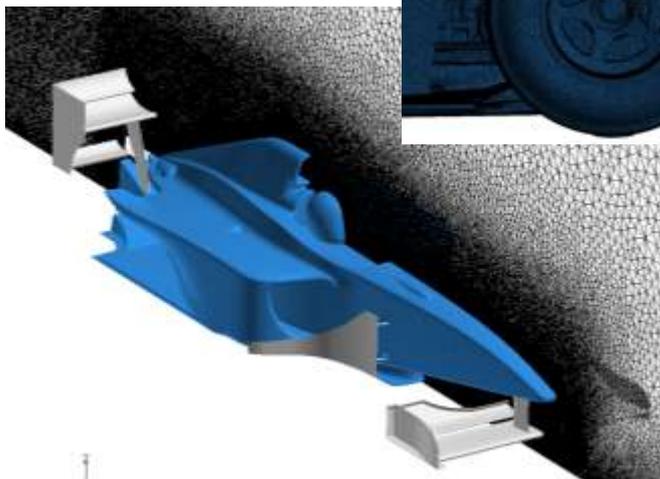
◆ 1億2千万要素規模非定常乱流解析

- ハードウェア:地球シミュレータ(当時世界最速)
- ソフトウェア:FrontFlow/red(地球シミュレータに最適化)

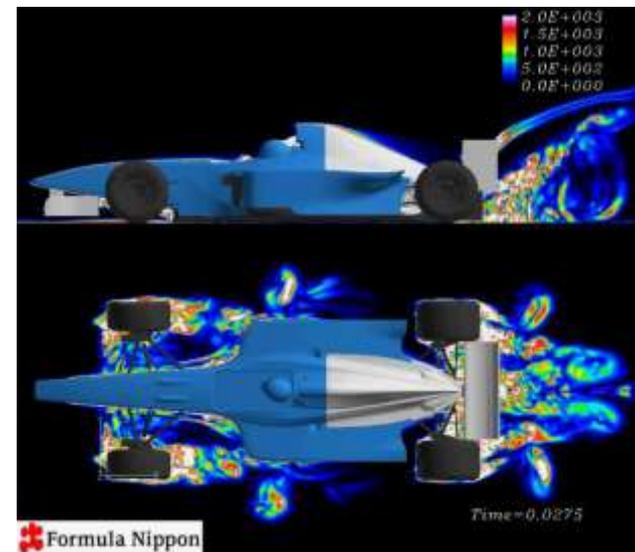
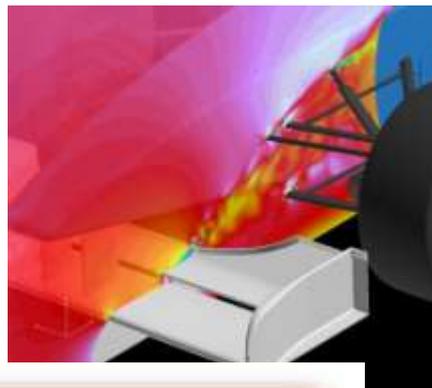


Tsubokura et al., 2007

車体周りの計算要素



フロントウイングから発生する微小渦構造



・超大規模並列解析による億要素規模非定常乱流シミュレーションの実現

・非定常乱流シミュレーションの自動車空力設計への適用への期待

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

定常空力から非定常空力へ



◆ 既存の評価手法の限界と新たな手法の必要性

● 風洞実験計測と実走行環境とのギャップ

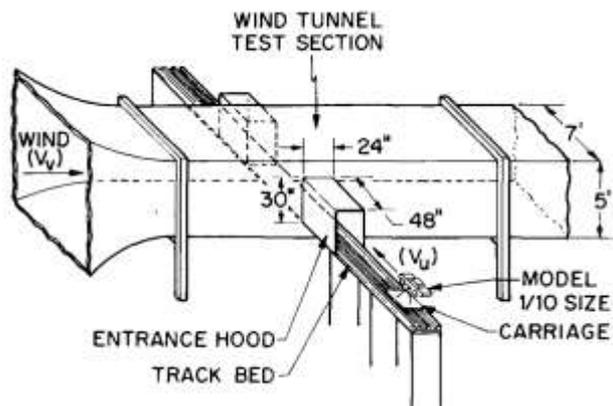
- ▶ *Cooper and Watkins. SAE 2007-01-1236~7*



- ▶ 変動風の定常空気力係数への影響
 - ✓ *Wordley and Saunders, SAE 2008-01-0475*
 - ✓ *Bischof, SAE 2009-01-0005*
- ▶ ガスト風と横風安定性
 - ✓ *Mayer et al., SAE 2007-01-1548*
- ▶ 車体ピッチ・ヨー運動に対する走行安定性
 - ✓ *Aschwanden and Müller, SAE 2008-01-0657*
 - ✓ *Okada et al., SAE 2009-01-0004*

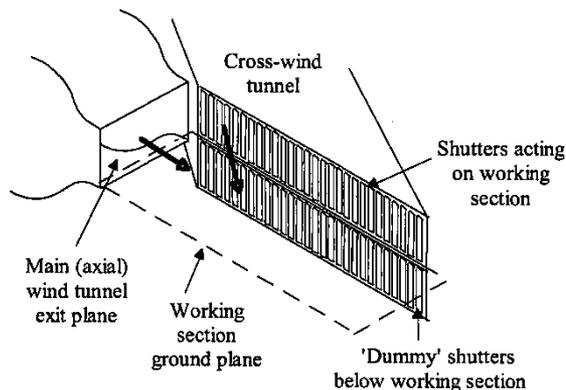
◆ 過去の研究事例

突風発生装置(1)



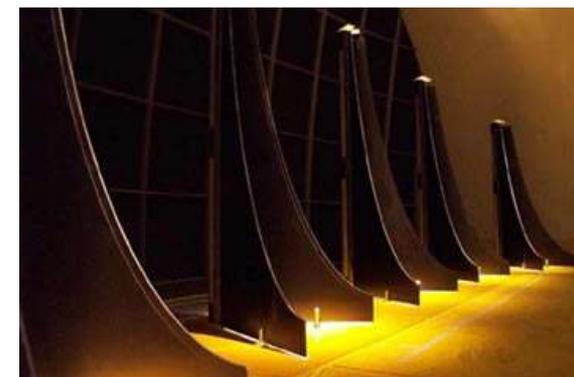
Beauvais (1967)

突風発生装置(2)



Dominy and Ryan (1999)

乱流発生装置



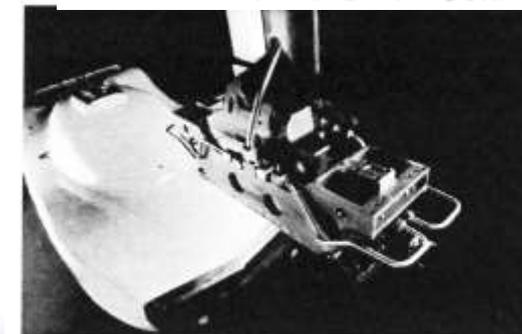
Cogotti (2003)

- 困難な非定常空気力の計測
- セットアップの複雑さ, 困難さ
- 設計段階初期での利用に限界



CFDを利用した予測システムへの期待
(風洞ができないことにCFDを活用する)

マニピュレータによるピッチ変化



Aschwarden & Muller (2008)

次世代非定常空力シミュレータ



- ◆ 非定常空力のための次世代空力シミュレータの開発
 - スパコンを利用したHigh-Performance Computing
 - Large-Eddy Simulationによる非定常乱流シミュレーション
 - 移動境界手法の導入による車両運動（ピッチ、ヨー、ロール）と気流連成シミュレーション
 - ガスト気流変動の再現
- FrontFlow/red(FFR)-Aero
 - ▶ 文科省ITプログラム:FSIS & RSS21(東大生研)
 - ▶ NEDO産業技術研究助成プロジェクト(2007年～2011年)による車両空力版



～③定常空力から非定常空力へ～

スーパーコンピューティング(京)で何が変わるのか？



- ◆ 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)
 - この50年は風洞実験を中心とした設計プロセスで商品を開発(シミュレーションは風洞実験の代替なので、今まではこのプロセス自身は変わらなかった)
 - スーパーコンピューティングシミュレーションを利用すれば、風洞実験の代替手法から、**風洞実験ではできない安全性・安定性の評価が可能になる**
- ↓
- ◆ 超高解像度シミュレーション
 - 物理現象を支配する流れ現象まで空間解像度をあげることで、**なぜそうなるのか？どうすればそうできるのか？**に答えることができるようになる(経験不足を理屈で補う)
 - ◆ リアルワールドシミュレーション
 - 高速走行時の突風や追い越し時の急ハンドル操作時の複雑で時々刻々と変化する現象を再現することができ、**安全性・安定性に大きく寄与できる**
 - ◆ 多目的最適化シミュレーション
 - 数千、数万のシミュレーションを同時に行うことで、実験では到底不可能な短時間で設計最適化が可能となる
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. より安価で性能の高い自動車の開発が可能となる
 3. 日本のメーカーの国際競争力が強化される

～④空カシミュレータの概要～ 数値解析手法 (1)



◆ 支配方程式

- 空間平均操作された非圧縮性流体連続の式とN-S方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{S}_{ij}$$

- 標準スマゴリンスキーモデル

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad C_s = 0.15$$

- 壁面減衰関数

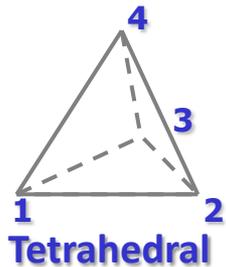
$$f_s = 1 - \exp \frac{-y^+}{25} : \text{Wall damping function (Van-driest)}$$

～④空カシミュレータの概要～ 数値解析手法 (2)

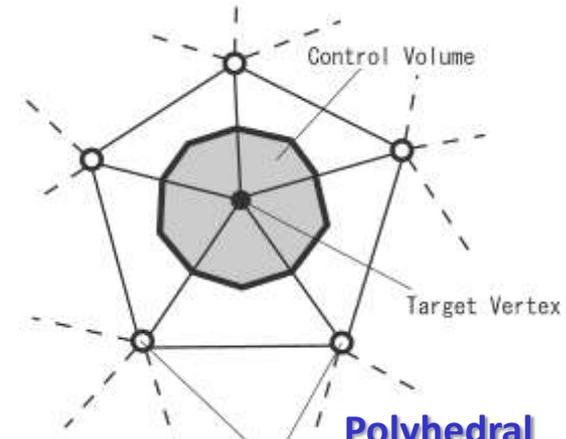
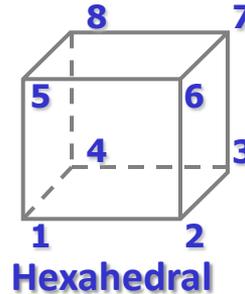
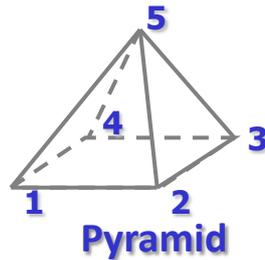
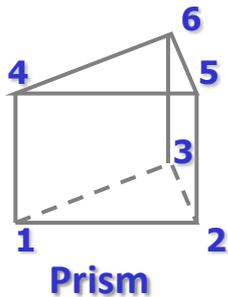


◆ 非構造有限体積法

● 節点中心法



Original Elements



Polyhedral Finite Volume

空間離散化: 二次精度中心差分法

対流項: 二次中心差分が中心. ただし三次風上, 一次風上を格子性状に応じて適宜ブレンド.

時間進行法: 3次Adams-Moulton

圧力と速度のカップリング: フラクショナルステップ (SMAC)

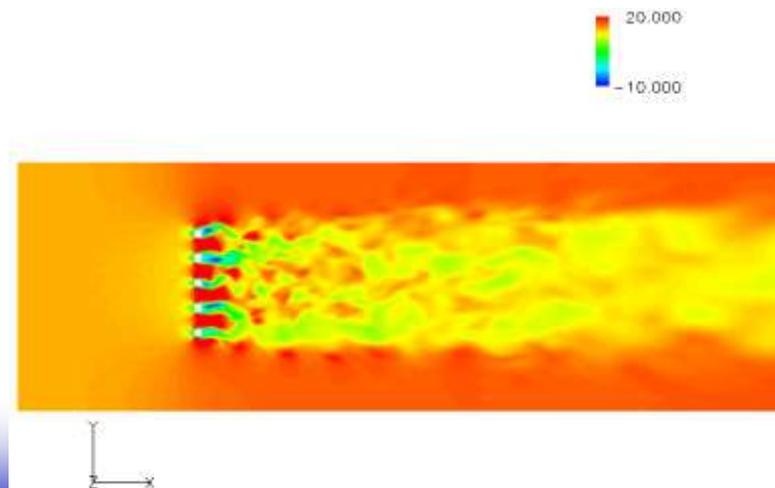
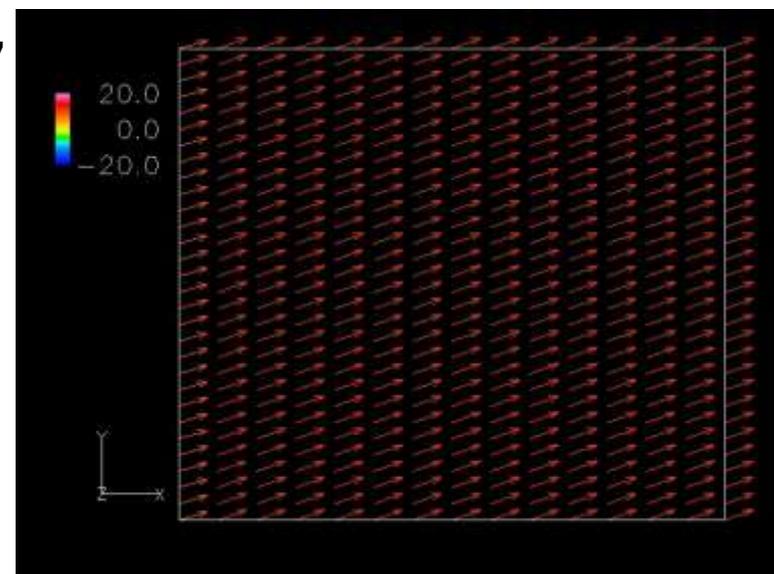
圧力ポアソン: 不完全コワレフスキー分解共役勾配法 (ICCG)

変動風の再現



- ◆ 予め横風風速の分布を仮定して、解析領域に与える方法
 - 低周波数の変動風や突風の再現

- ◆ 乱れ促進体による乱流生成
 - 高周波数の乱流変動の再現

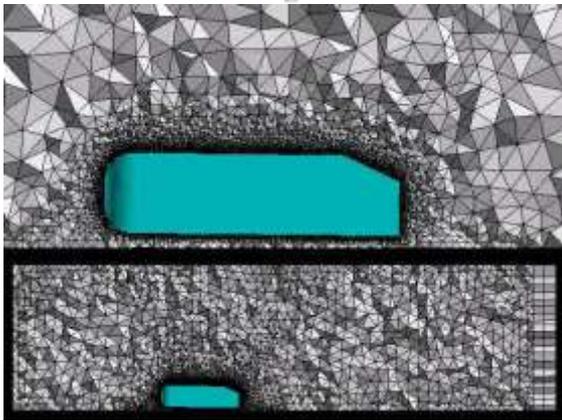


～④空カシミュレータの概要～ 車体運動の追従

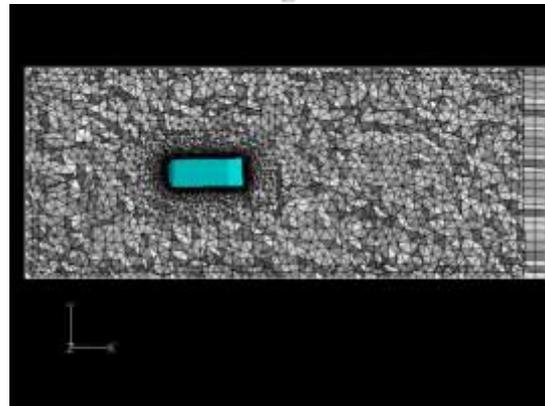


- ◆ Arbitrary Lagrangean-Eulerian Method (ALE)
 - ◆ 車体の回転運動の再現

Pitching Motion



Yawing Motion

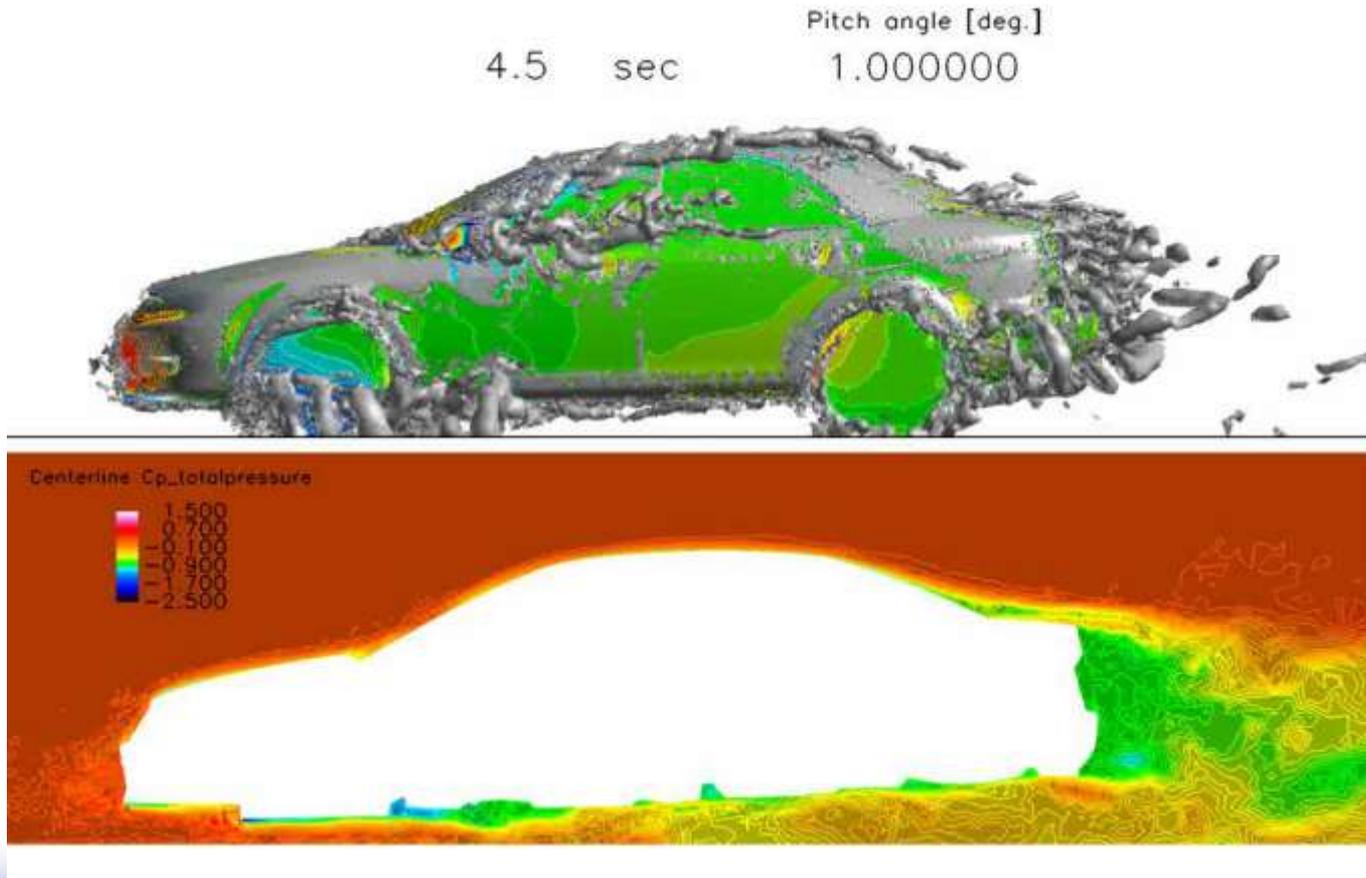


Rolling Motion

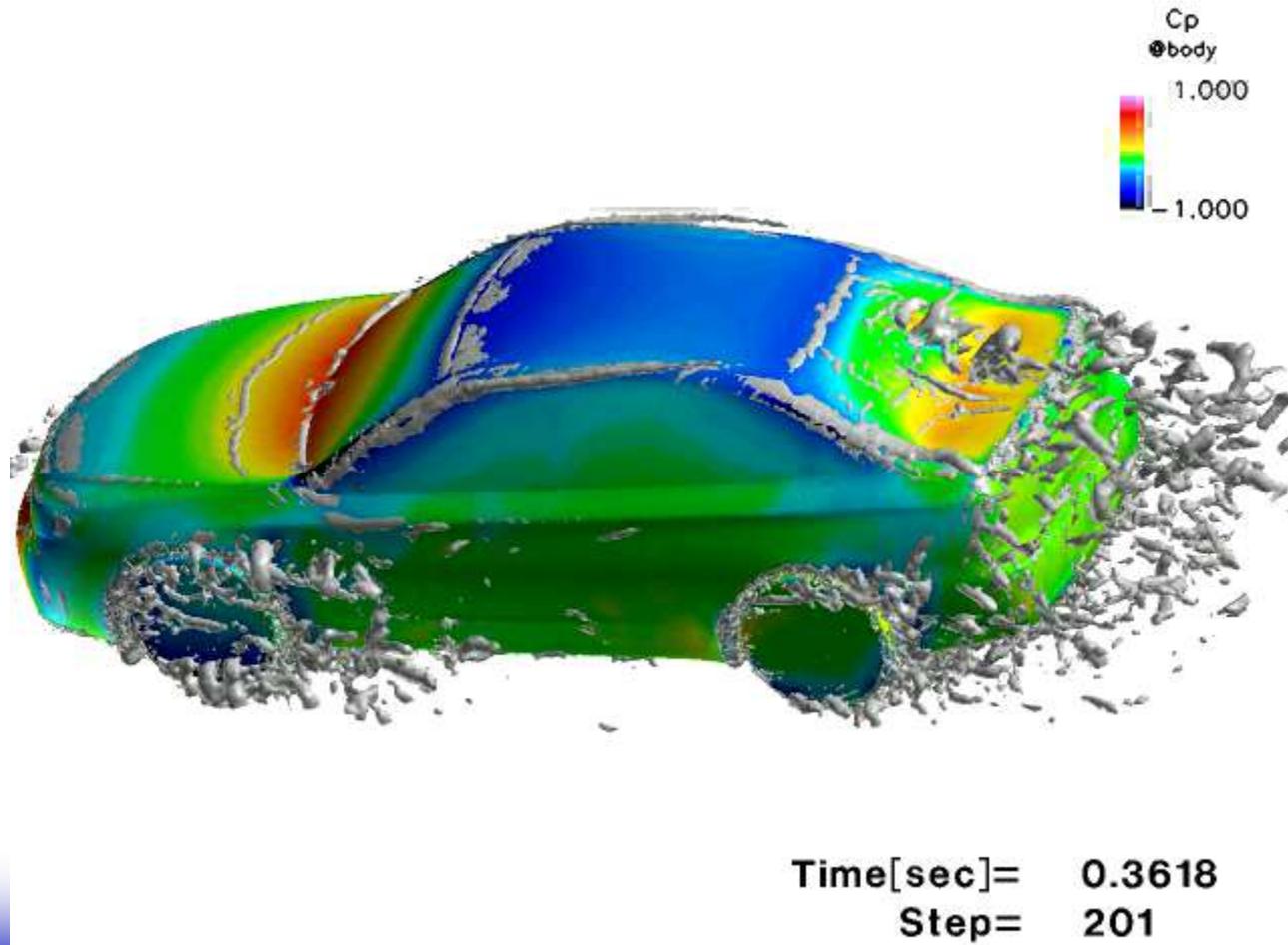


- ◆ 非慣性系運動方程式
 - ◆ 車体の並進運動の再現

- ◆ 車体回り微細渦の時空間構造を解明することで、空気抵抗に寄与する渦をみつけ、その渦を制御することで、抵抗を減らすことができるようになる。



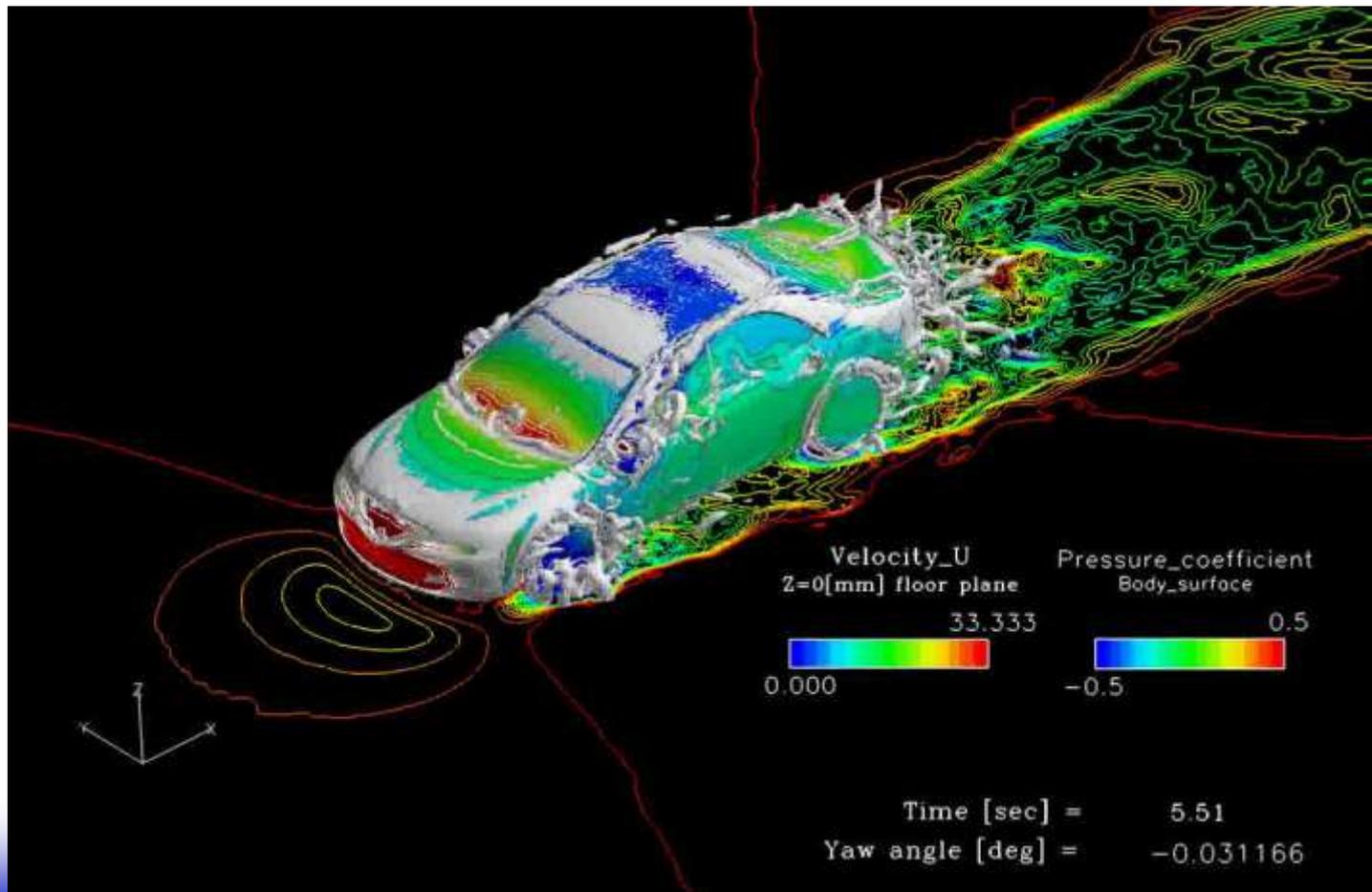
- ◆ 突風にあおられた自動車にかかる非定常な空気力を評価し、高速走行に安定、横風に対してより安全な自動車の開発に役立てる



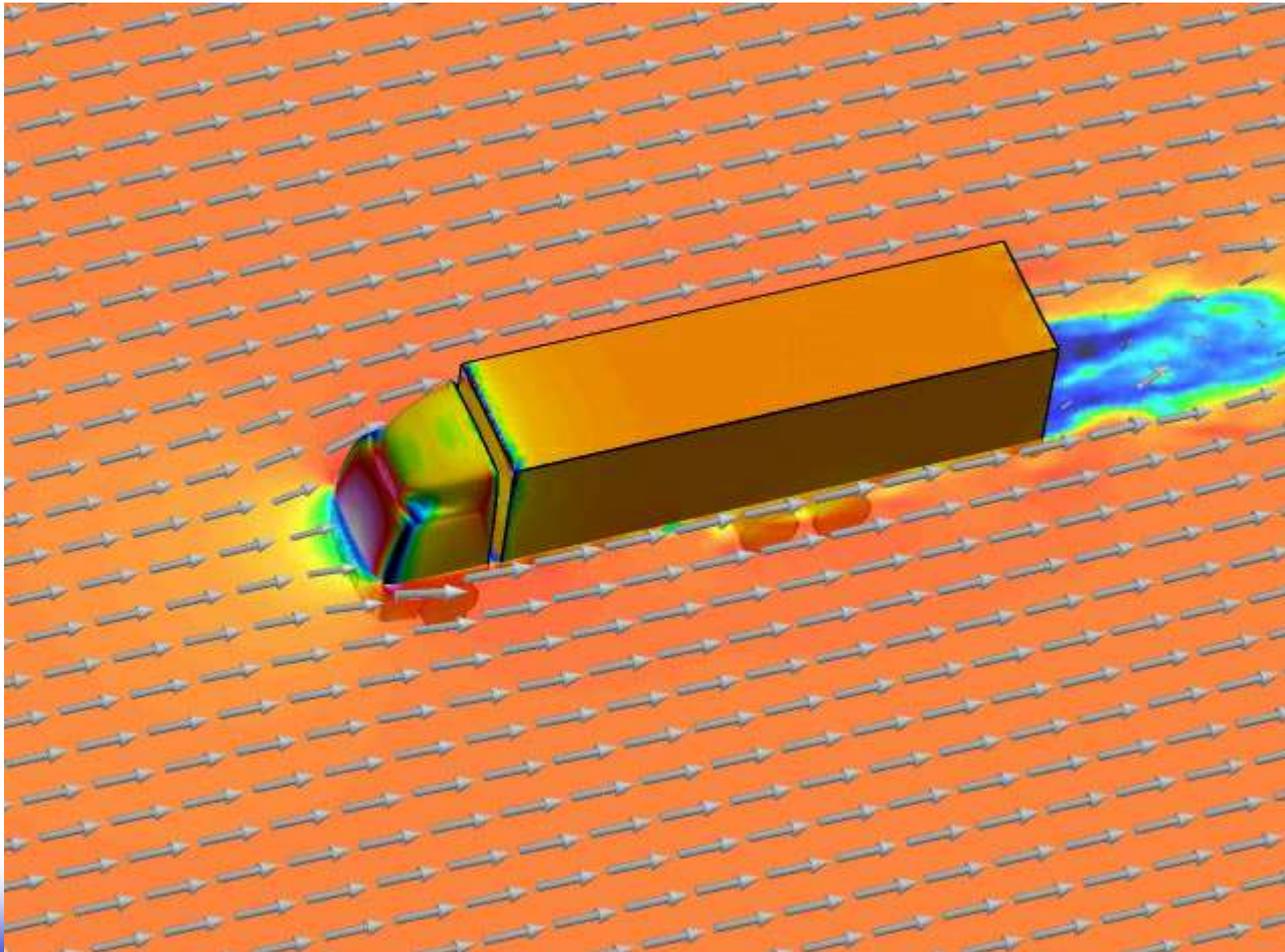
～⑤次世代空力解析～ リアルワールドシミュレーション



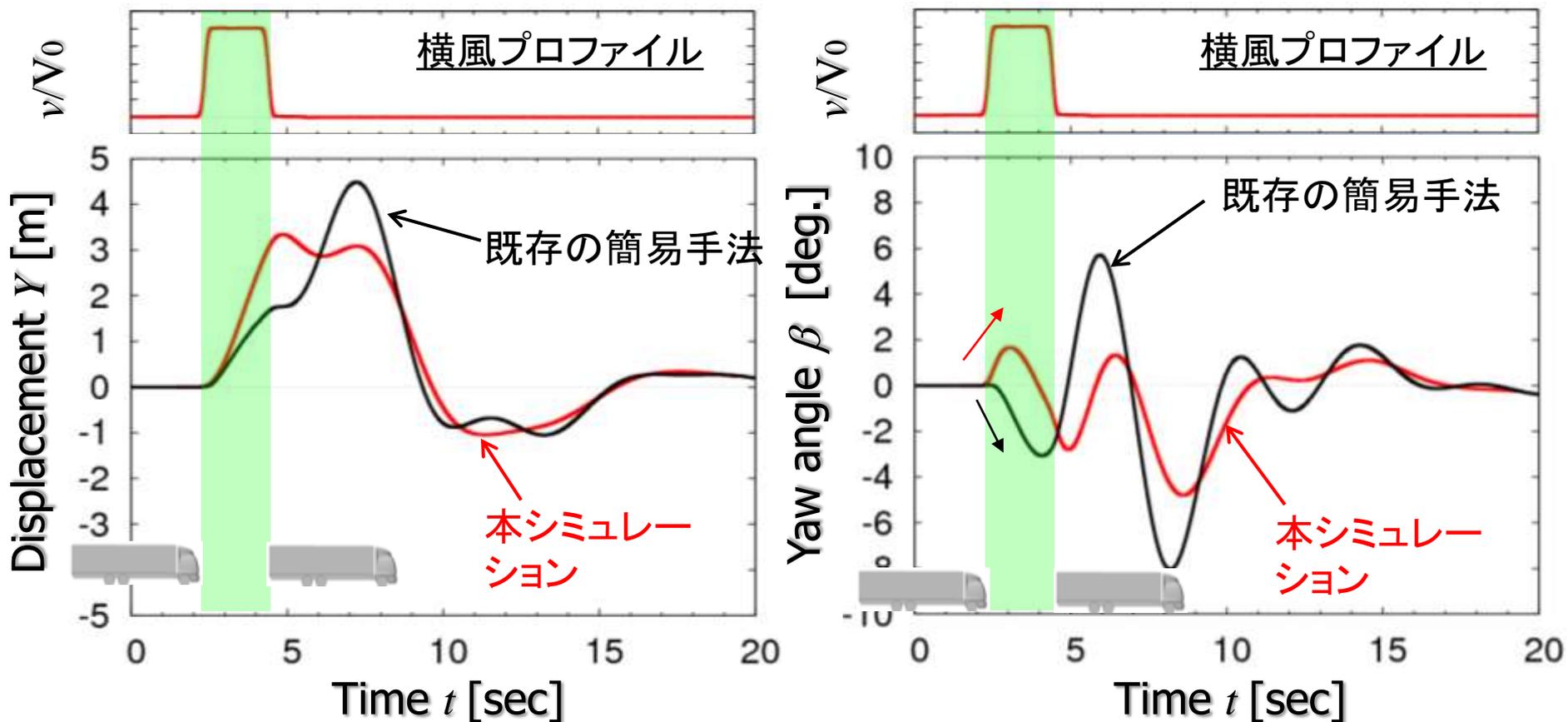
- ◆ 高速走行時のハンドル操作に対する安定性を空気力学的な観点から評価し、より高品質の自動車開発に役立てる



- ◆ 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。



◆ 既存の解析(準定常解析)との比較



既存の解析手法と大きな差！連成解析による新たな評価手法が必要。

まとめ



- ◆ 自動車用次世代空力解析の実現に向けて
 - 風洞の補完的役割から風洞ではできない解析へ！
 - ▶ 50年続いた風洞計測を基盤とした空力設計プロセスの改革の必要性
 - ▶ 革新的な空力性能自動車の実現
 - まだまだ計算機パワーが足りない
- ◆ 次世代スパコン「京」で実現できる次世代空力開発
 - HPCI戦略プログラム第4分野「次世代ものづくり」
 - ▶ 自動車用次世代空力・熱設計システムの開発



・開発プロセスの短縮化・コスト削減



・物理的メカニズム解明による製品性能の抜本的改善
・新たな評価基準の導入によるより安全な自動車の開発

謝辞



- ◆ 次世代自動車用空力シミュレータに関して
 - 広島大学助教 中島卓司
 - 鬼頭幸三技術事務所 鬼頭幸三
 - 日本自動車研究所所長 小林敏雄
 - NEDO産業技術研究助成(2007年～2011年)
- ◆ 次世代自動車用空力シミュレータに関して
 - HPCI戦略プログラム第4分野「次世代ものづくり」
- ◆ シミュレータの実用化に関して
 - いすゞ中央研究所
 - スズキ株式会社
 - 富士重工業株式会社
 - マツダ株式会社
 - 株式会社日本レースプロモーション
 - 株式会社数値フローデザイン