



# 北海道大学

## 自動車走行安定性に関連する非定常空気力について

2013年8月29日

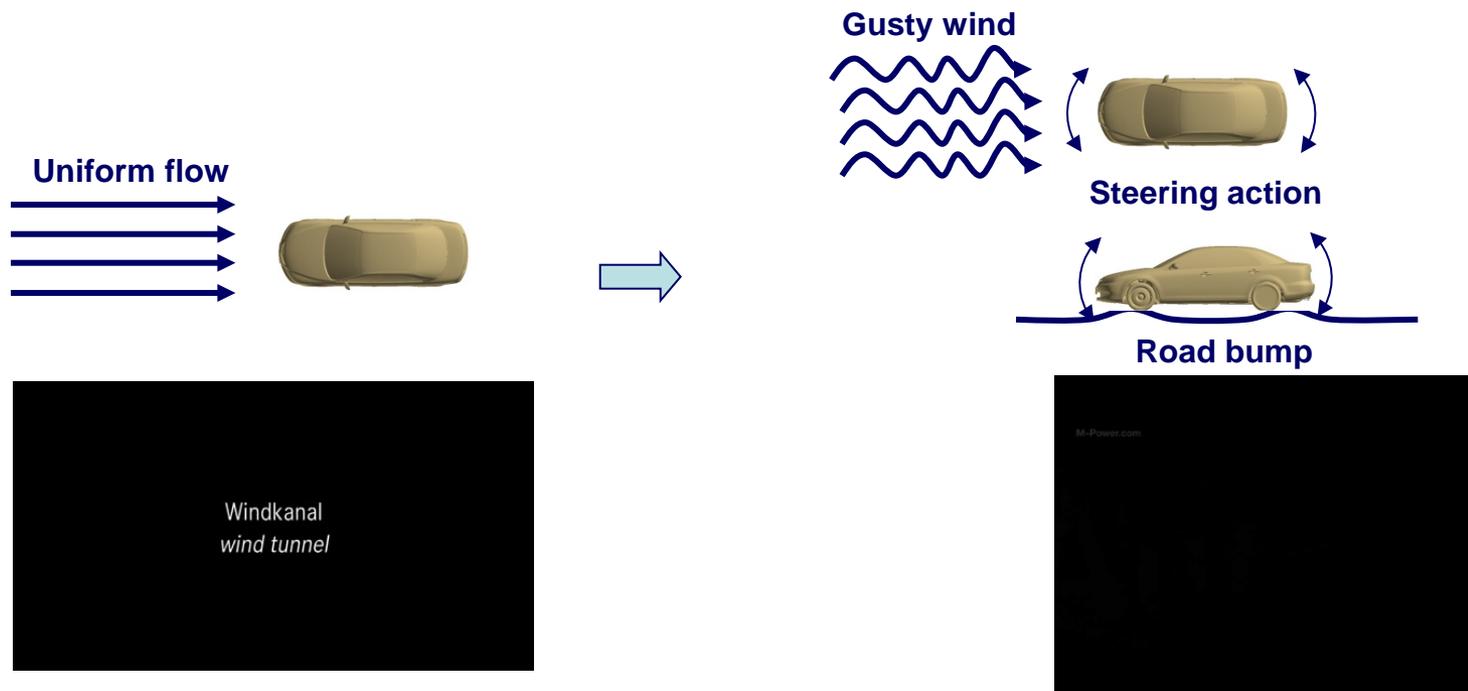
MSBS研究会 東北大学東京分室

北海道大学 大学院工学研究院 機械宇宙工学分野 准教授  
理化学研究所計算科学研究機構 チームリーダー

坪倉 誠

# 定常空力から非定常空力へ

- 風洞試験（定常RANSシミュレーション）とリアルワールドとのギャップ

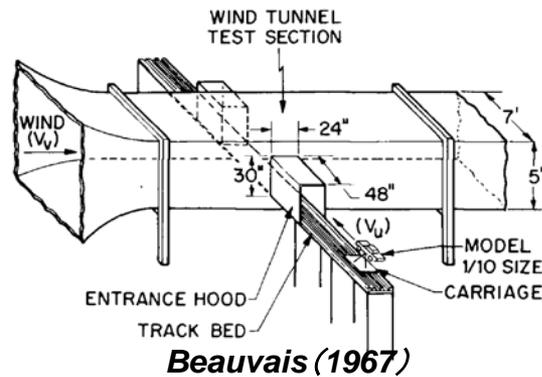


- 変動風がトータルとしての車体空気抵抗に与える影響は？
- 高速直進安定性, 操縦安定性に与える空気力の効果は？
- 突風に対する横風安定性は？

# 風洞実験による非定常空力評価の試み

- 変動風や車体運動を模擬した実験

横風突入の風洞実験



Durham大学の乱流変動発生装置



Pininfarinaの乱流発生風洞



RUAGの加振装置(ピッチ・ヒービング等)



BMWのヨー加振風洞



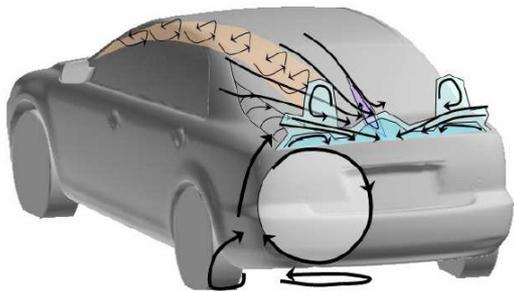
広島大学曳航水槽実験(中島)



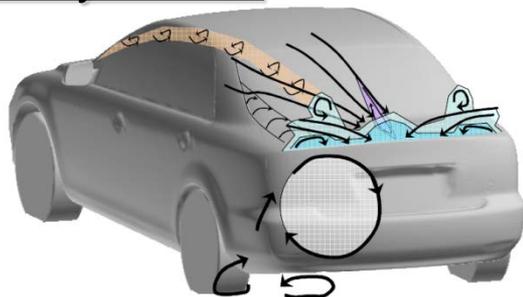
# 簡易モデルの開発

- ◆ Simplified based on the geometrical difference of the pillars

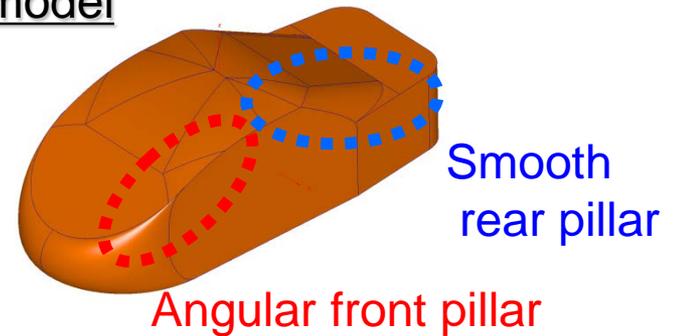
Low stability vehicle



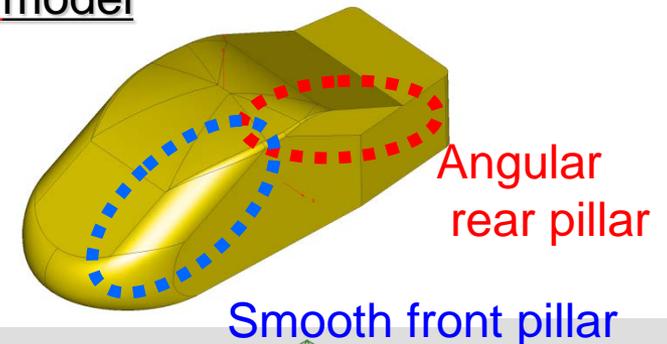
High stability vehicle



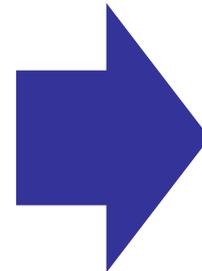
Unstable model



Stable model



Model Size (1/20 scale)  
210 (L) x 80 (W) x 65(H) [mm]



# 強制ピッチング運動加振

## Numerical wind-tunnel

- Reynolds number:  $2.3 \times 10^5$ 
  - Inlet Velocity : 16.7 m/s
- Computational Domain
  - 11.0L x 9.0W x 7.2H

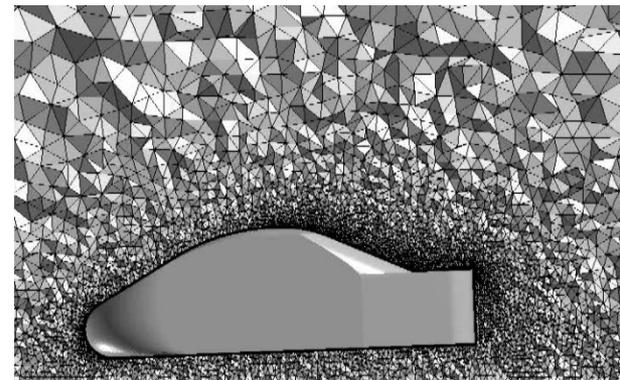
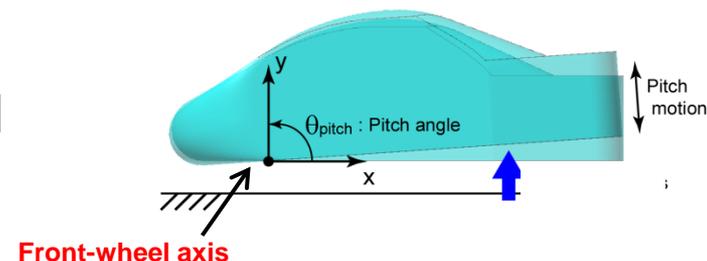
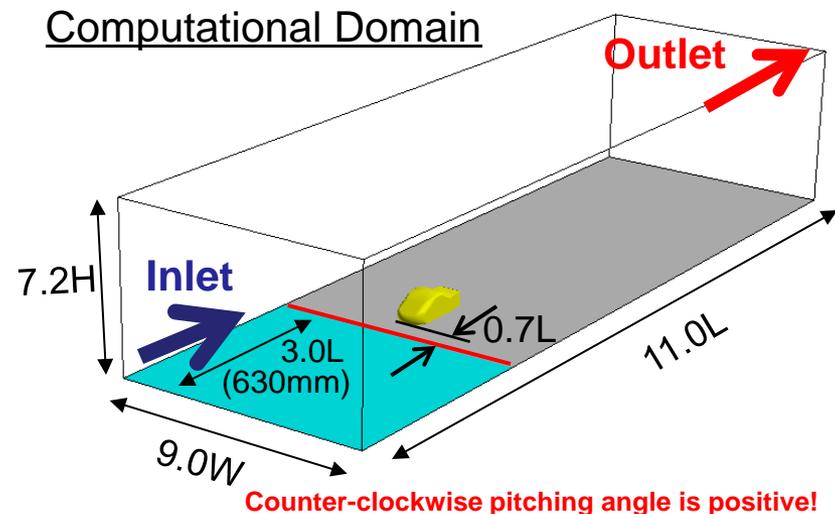
## Sinusoidal pitching oscillation

- Forced pitching motion as input, resulting pitching moment is investigated

$$\theta(t) = \theta_0 + \theta_1 \times \sin(2\pi ft)$$

- Origin  $\theta_0$  : 2.0[deg.]
- Amplitude  $\theta_1$  : 2.0 [deg.]
- Frequency  $f$  : **10** [Hz]
- Strouhal Number  $St = fL/U_0$  : 0.13

Corresponding to the real vehicle response.



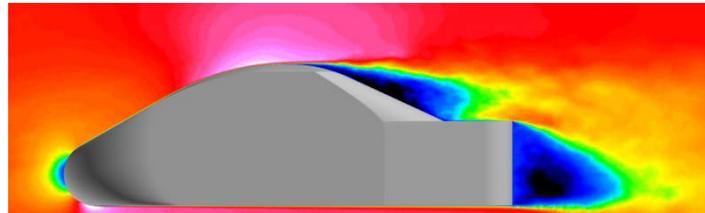
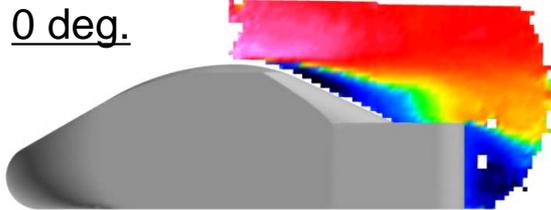
# 回流水槽実験による精度検証

- ◆ Velocity distribution above and behind the model
  - Comparison with water-tunnel measurements

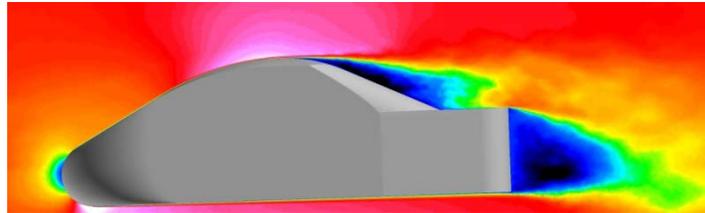
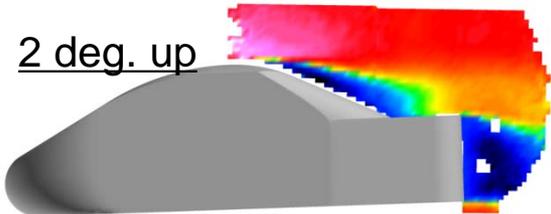
Exp.

LES

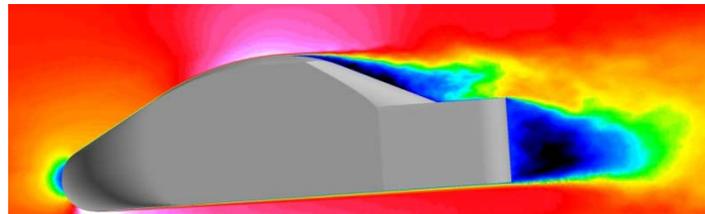
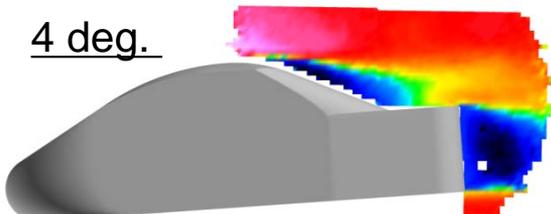
0 deg.



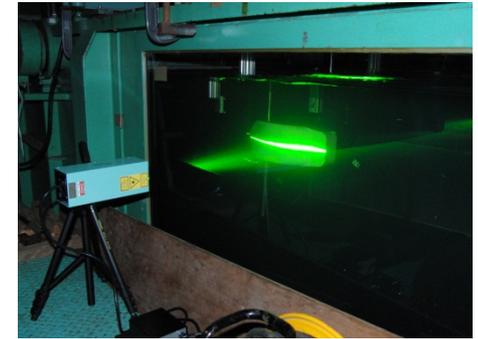
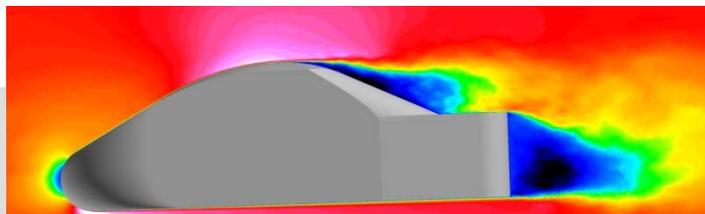
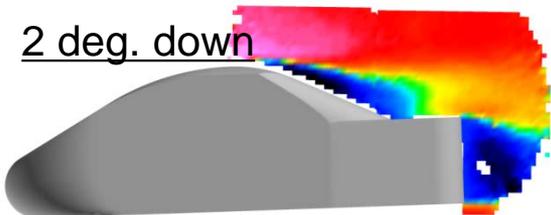
2 deg. up



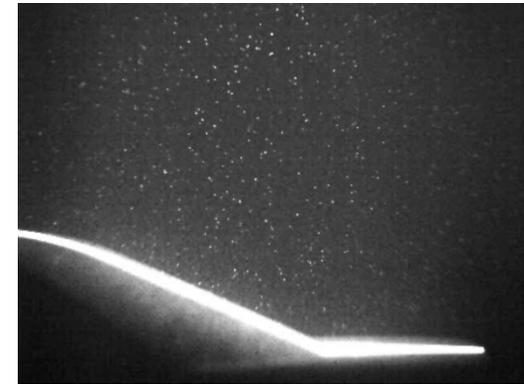
4 deg.



2 deg. down



PIV measurement



Particle Image



# 空力ダンピング評価

- Estimation of the aerodynamic damping from the measured pitch moment
  - Decomposition of the aerodynamic moment into four components.

$$M_{pitch} = C_0 + C_1\theta + \underbrace{C_2\dot{\theta}}_{\text{Contribution of damping}} + C_3\ddot{\theta}$$

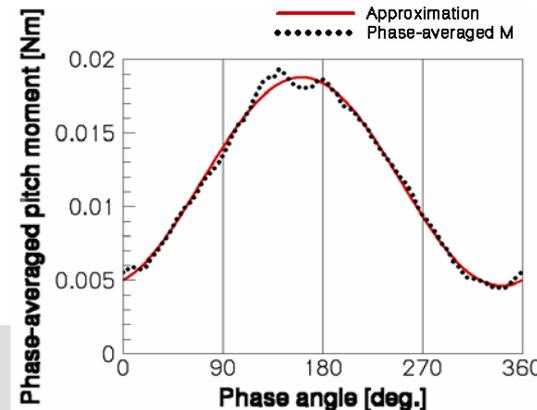
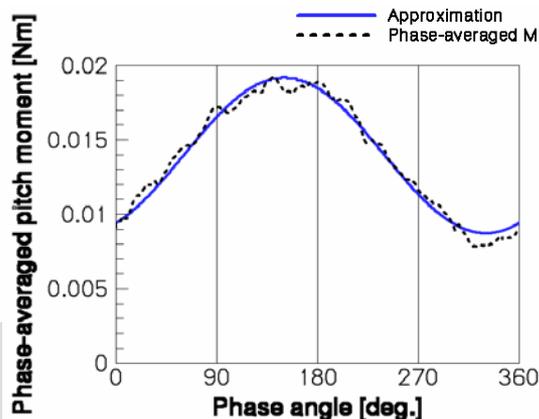
- Sinusoidal pitching angle imposed.

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 \sin 2\pi ft$$

- Coefficients estimated by the least-square method.

$$M_{pitch} = \underbrace{C_{stat}}_{\text{Steady}} + \underbrace{C_{sin}}_{\text{Quasi-Steady (Spring) + Additional Mass}} \sin 2\pi ft + \underbrace{C_{cos}}_{\text{Damping (proportional to the angular velocity)}} \cos 2\pi ft$$

Negative: damping



# 車体各部分のダンピングへの寄与

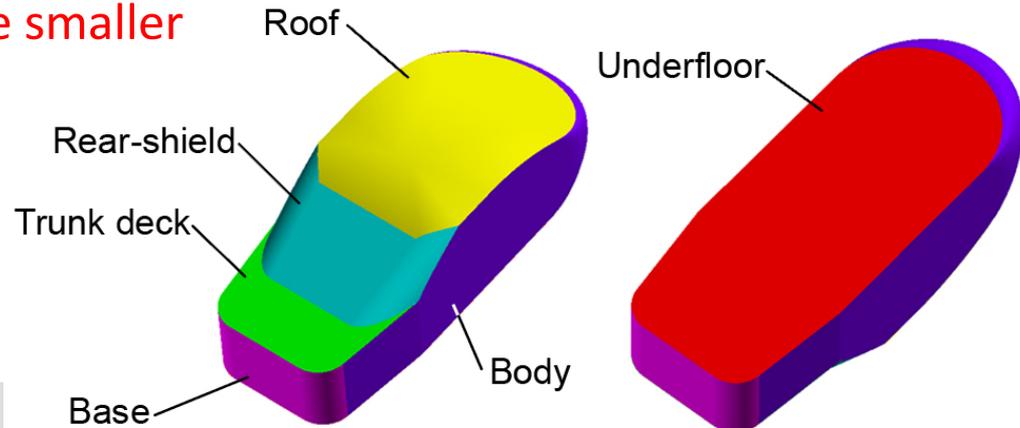
12% difference

132% difference

Part	Unstable Model			Stable Model		
	<i>Cstat</i>	<i>Csin</i>	<i>Ccos</i> (damping)	<i>Cstat</i>	<i>Csin</i>	<i>Ccos</i> (damping)
Underfloor	$-26.02 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	$-3.62 \times 10^{-3}$	$-24.18 \times 10^{-3}$	$2.63 \times 10^{-3}$	$-4.06 \times 10^{-3}$
Trunk deck	$-2.26 \times 10^{-3}$	$-0.14 \times 10^{-3}$	$-0.24 \times 10^{-3}$	$-5.21 \times 10^{-3}$	$-0.61 \times 10^{-3}$	$-1.17 \times 10^{-3}$
Rear-shield	$12.01 \times 10^{-3}$	$-0.86 \times 10^{-3}$	$-0.041 \times 10^{-3}$	$5.36 \times 10^{-3}$	$0.30 \times 10^{-3}$	$-0.83 \times 10^{-3}$
Roof	$29.63 \times 10^{-3}$	$-0.53 \times 10^{-3}$	$-0.77 \times 10^{-3}$	$32.32 \times 10^{-3}$	$-1.32 \times 10^{-3}$	$-0.71 \times 10^{-3}$
Base	$-1.35 \times 10^{-3}$	$0.17 \times 10^{-3}$	$0.019 \times 10^{-3}$	$-1.25 \times 10^{-3}$	$0.14 \times 10^{-3}$	$0.015 \times 10^{-3}$
Body	$1.94 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-3}$	$0.044 \times 10^{-3}$	$4.66 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$0.053 \times 10^{-3}$
<b>Overall</b>	<b><math>13.94 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2.59 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>-4.53 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>11.70 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2.33 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>-6.69 \times 10^{-3}</math></b>

One to two order of magnitude smaller

Trunk deck → Primarily factor contributing to different pitching stability characteristic between models



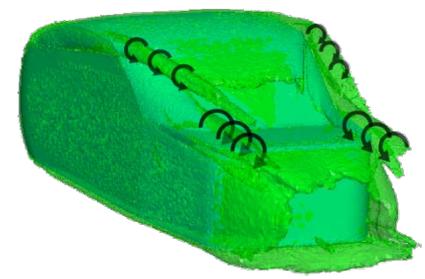
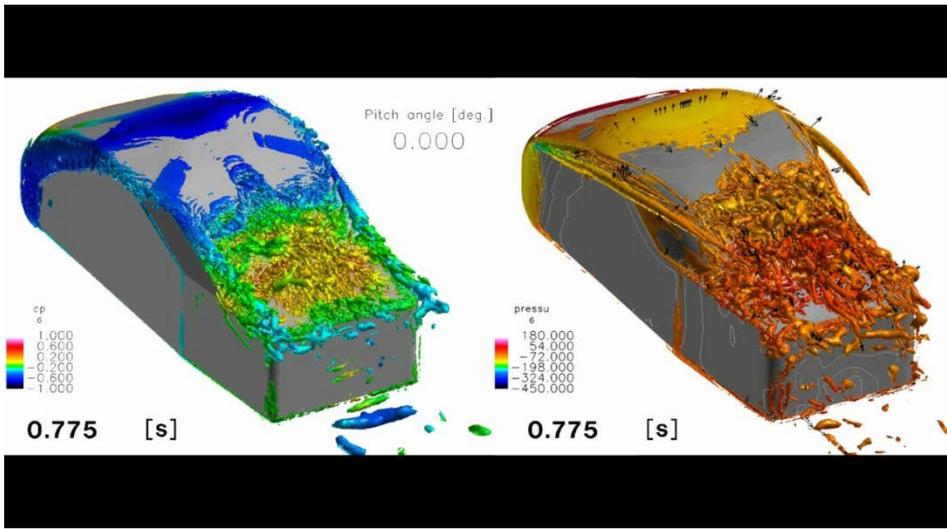


# 空力ダンピングのメカニズム

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

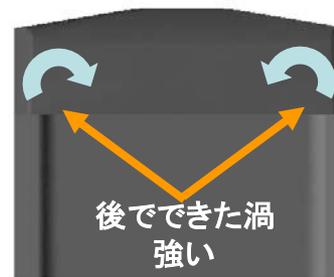
不安定モデル



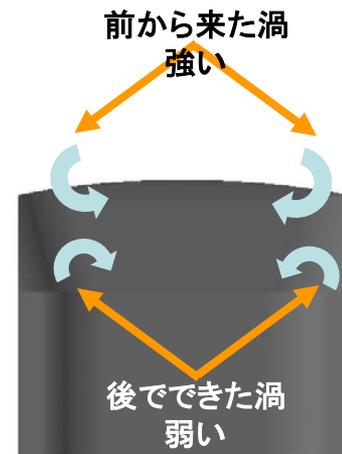
0度



0度



後でできた渦 強い



後でできた渦 弱い

車の後からみたトランクの上の渦の様子



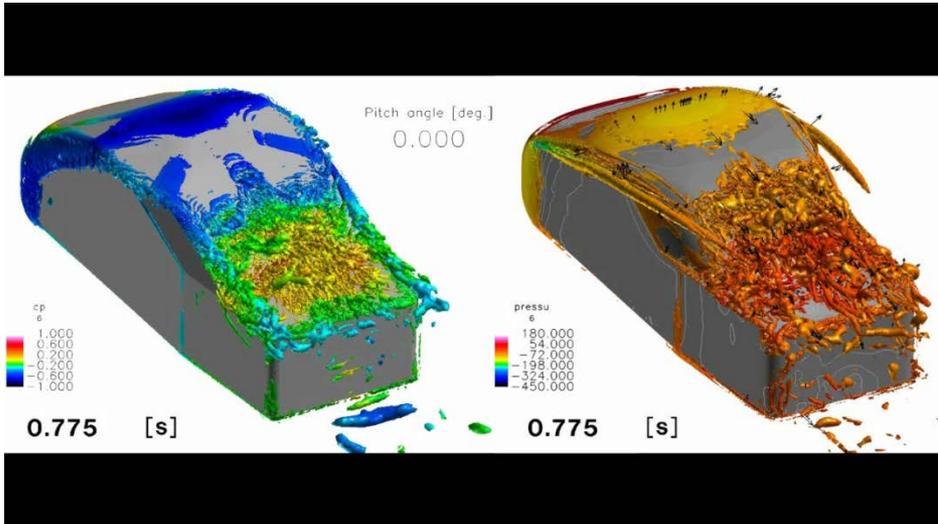


# 空力ダンピングのメカニズム

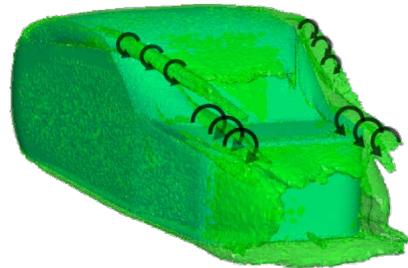
Cheng et al., 2010, 2011

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

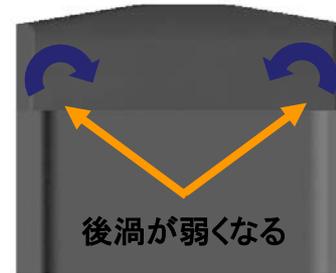


前と後ろから発生する渦が影響し合う

安定モデル



0→2度

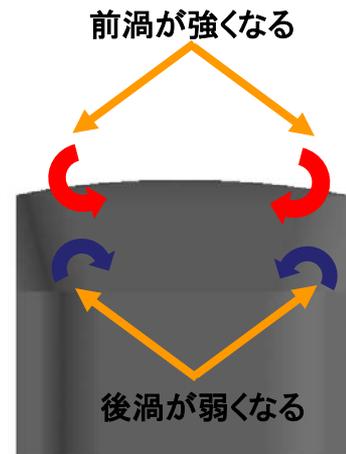


後渦が弱くなる

不安定モデル



0→2度



前渦が強くなる

後渦が弱くなる



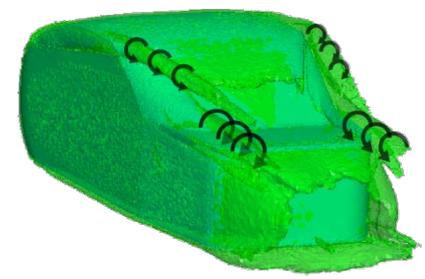
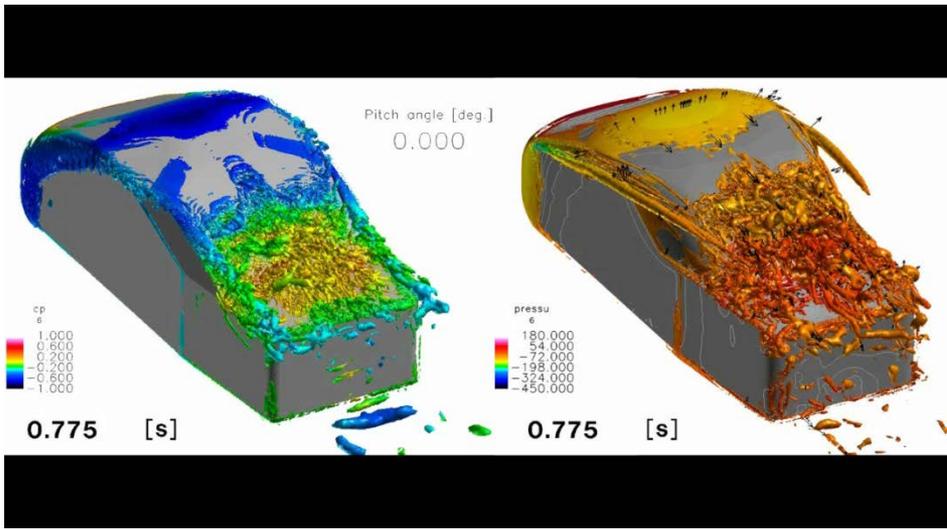


# 空力ダンピングのメカニズム

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

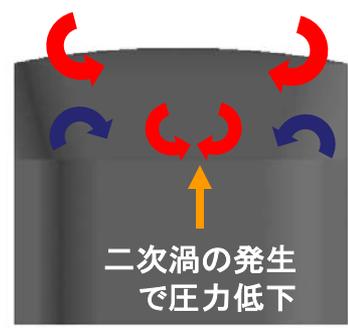
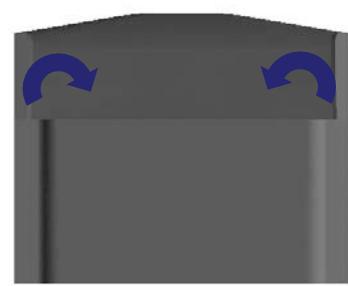
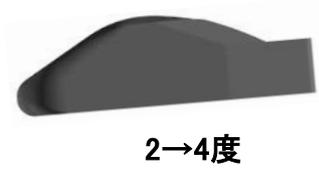
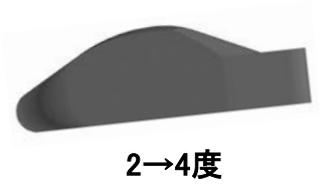


後から発生する渦が強い

前と後ろから発生する渦が影響し合う

安定モデル

不安定モデル



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！



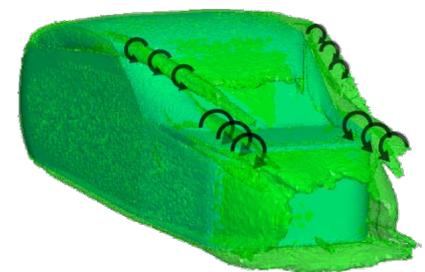
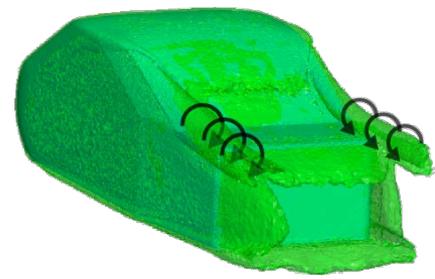
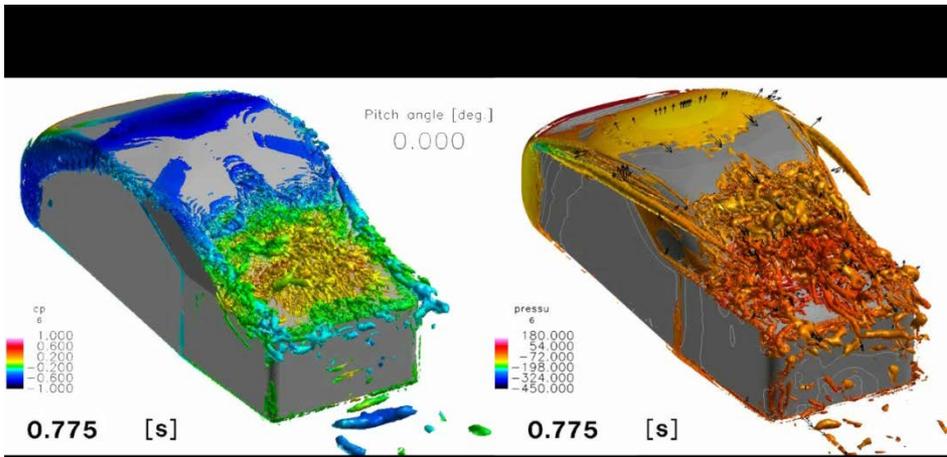


# 空力ダンピングのメカニズム

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

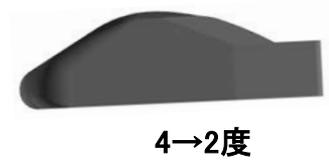


後から発生する渦が強い

前と後ろから発生する渦が影響し合う

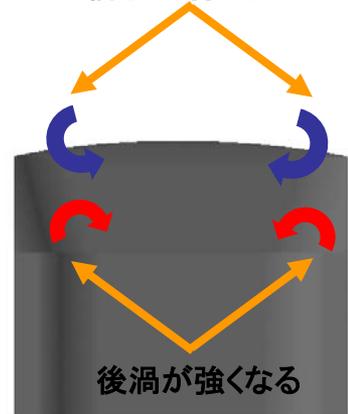
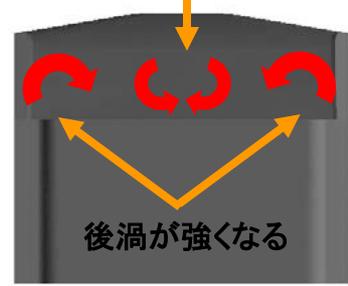
安定モデル

不安定モデル



二次渦の発生  
で圧力低下

前渦が弱くなる

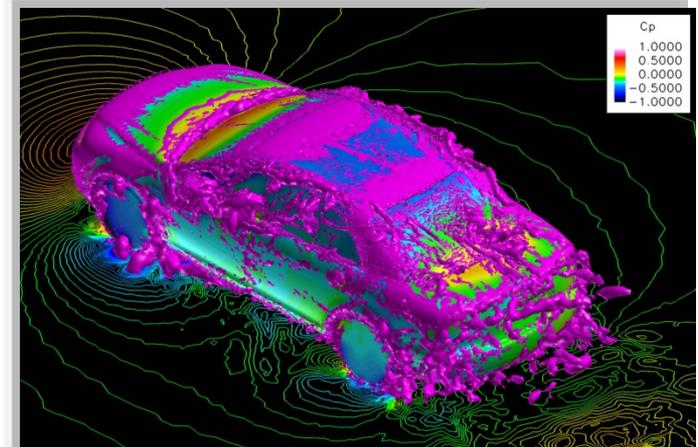
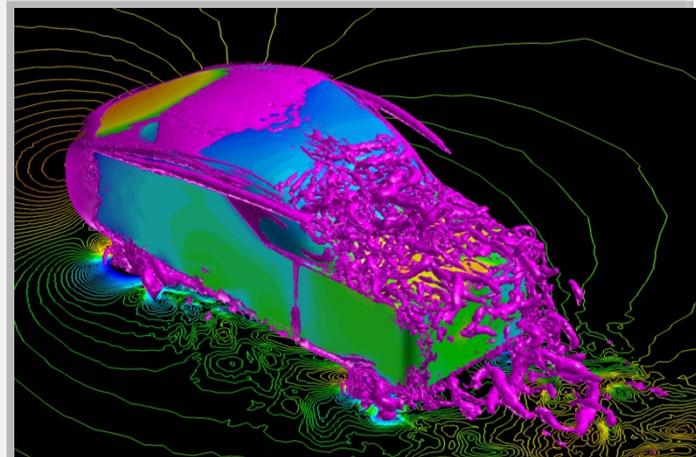


お尻を下げてい  
る途中で  
トランクデッキの  
圧力が下がる

渦が尻振り運動を邪  
魔する！

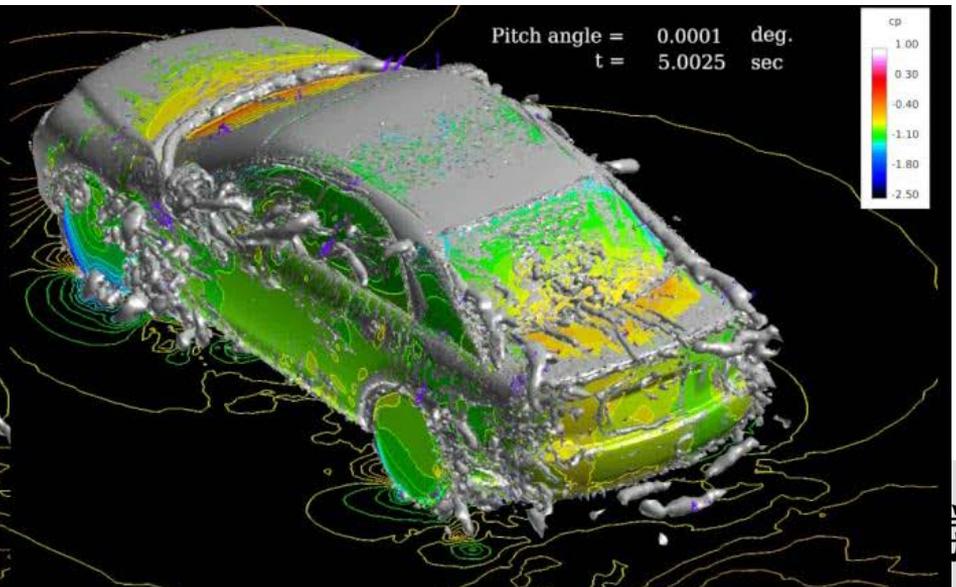
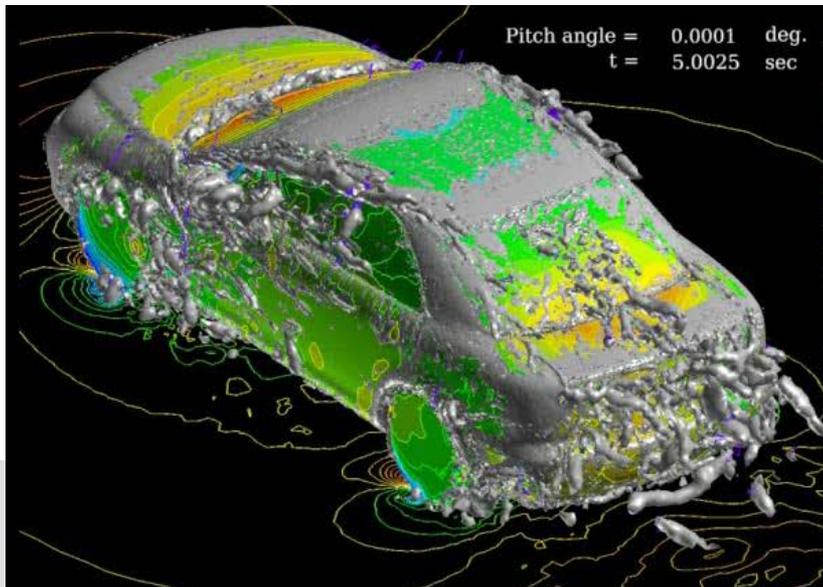


# 実車への適用



**Unstable model**

**Stable model**

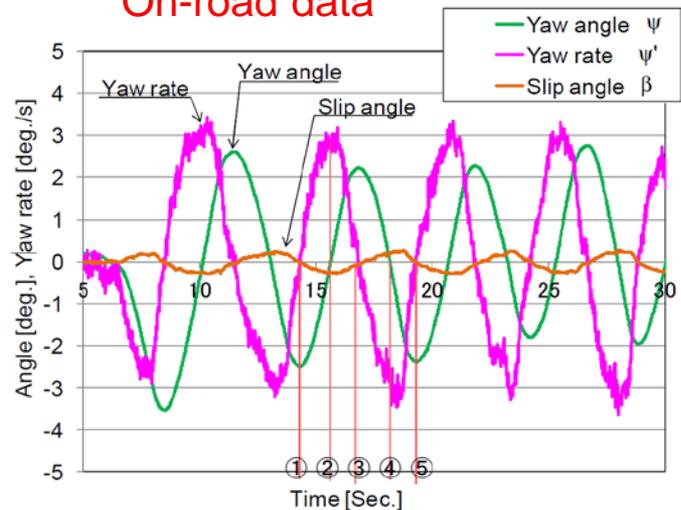




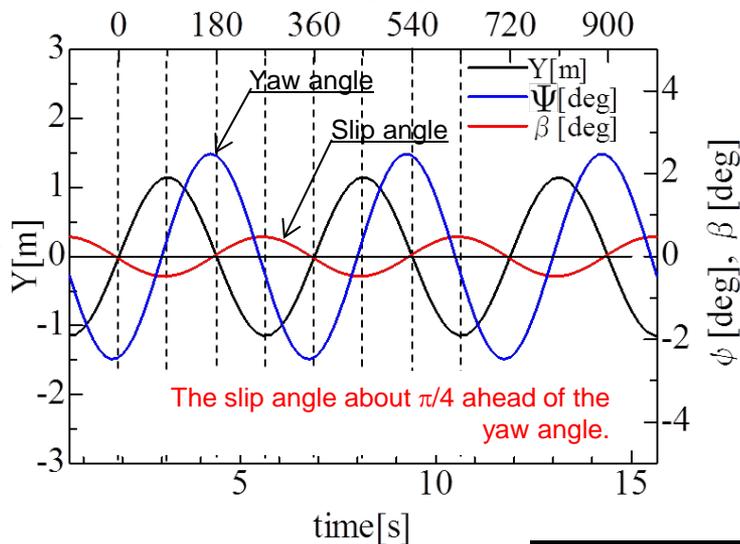
# 蛇行運動時の空力特性に関する研究

- Dynamic yawing motion based on the slip angle

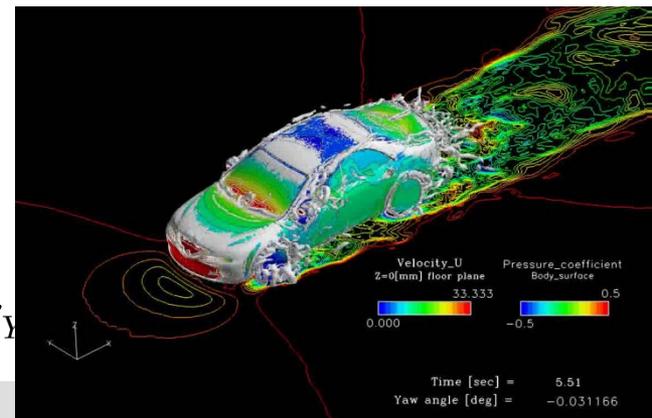
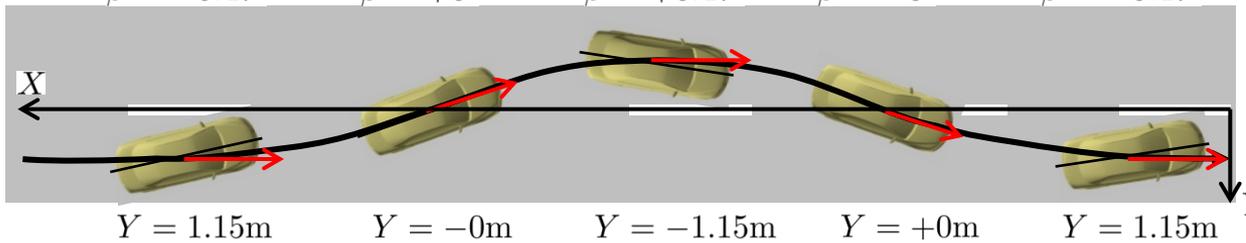
On-road data



CFD model phase[deg]



$\phi = 90^\circ$	$\phi = 180^\circ$	$\phi = 270^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$
$\beta = -0.47^\circ$	$\beta = +0^\circ$	$\beta = +0.47^\circ$	$\beta = -0^\circ$	$\beta = -0.47^\circ$



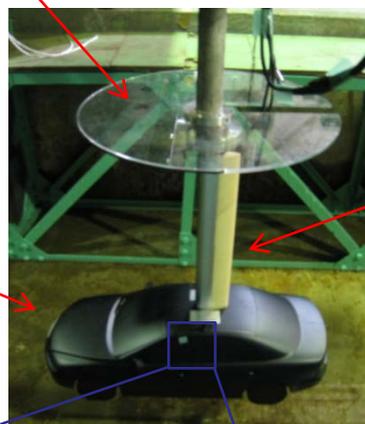


# 曳航水槽を用いた検証

– 曳航水槽試験装置を用いて可動床上で車両模型を曳航

模型形状(1/5スケール模型)

Wave-suppressor-plate



strut

model



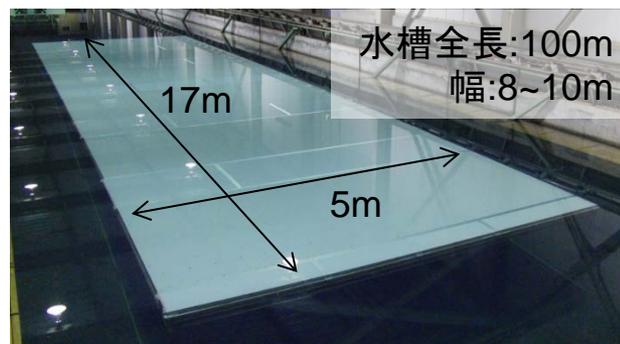
全高278mm

全幅278mm

全長933mm



Dynamometer



昇降式可動床



実験の様子(水中カメラより)

# 計測対象運動条件とそのパラメータ

想定蛇行運動に含まれる運動要素(旋回運動、横すべり運動)が生じる流体力を調査する.

## – 定常旋回運動

- 無次元ヨーレート  $r'$ :

– 0,  $\pm 0.0075$ ,  $\pm 0.015$ ,  $\pm 0.03$

## – 定常すべり運動

- 無次元すべり速度  $v'$ :

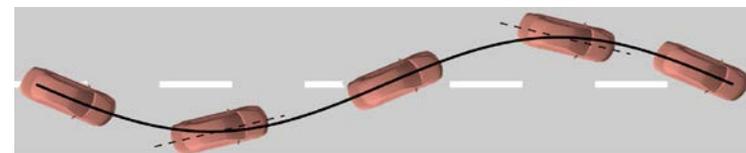
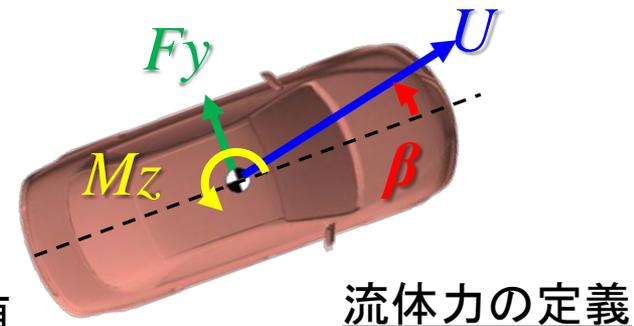
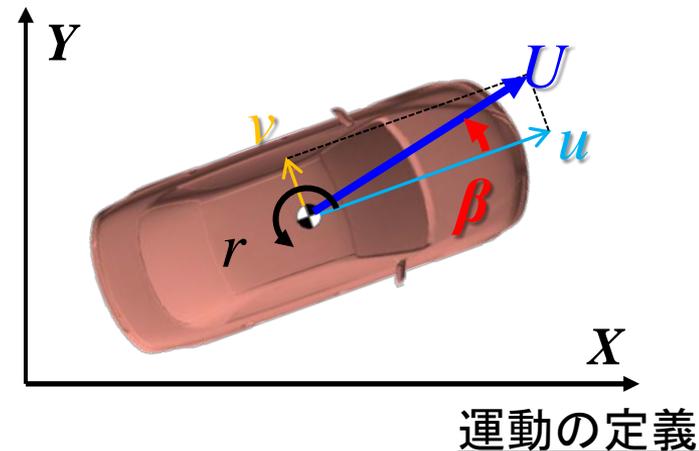
– 0,  $\pm 0.0087$ ,  $\pm 0.0175$

## – 両運動の重ね合わせ条件でも計測を実施

- 計35条件(7×5条件)で計測を実施

(参考) 想定する実車蛇行走行におけるパラメータの値

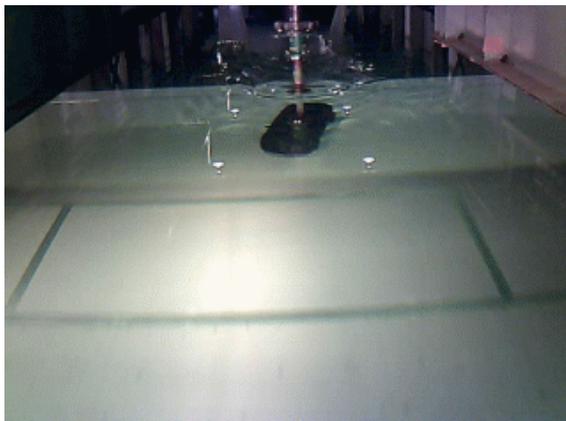
- 無次元ヨーレート片振幅:  $r_A' = 0.0076$
- 無次元すべり速度片振幅:  $v_A' = 0.0042$
- なお、両者は同位相(同符号)で変動する.



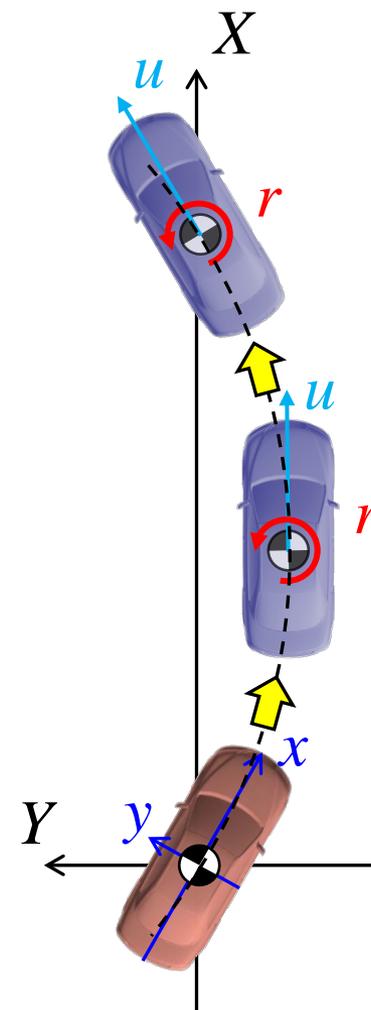
# CMT試験 旋回運動に伴い生じる流体力の計測

車両に定常ヨーレート  $r$  での旋回運動を与える  
CMT(Circular Motion Test) 試験

- 無次元ヨーレート  $r'$  :  
 $\pm 0.0075, \pm 0.015, \pm 0.030, \pm 0.12$ 
  - 旋回半径  $R$  : 124, 62, 31, 7.8 [m] (@1/5スケール)

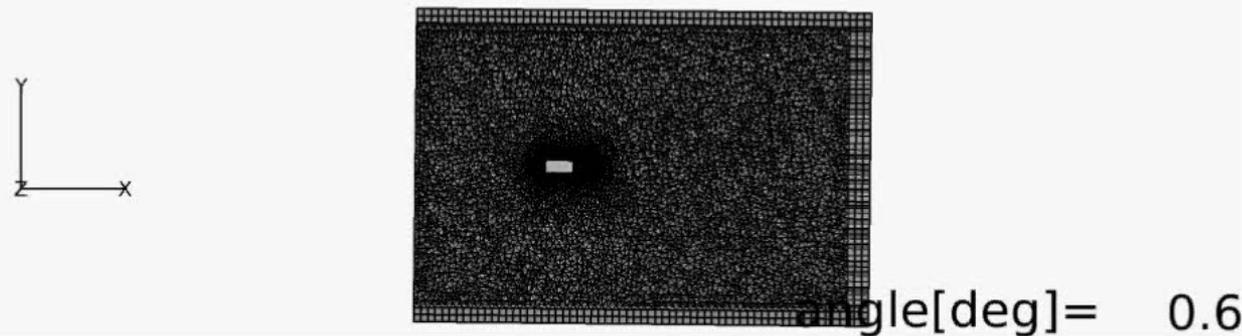
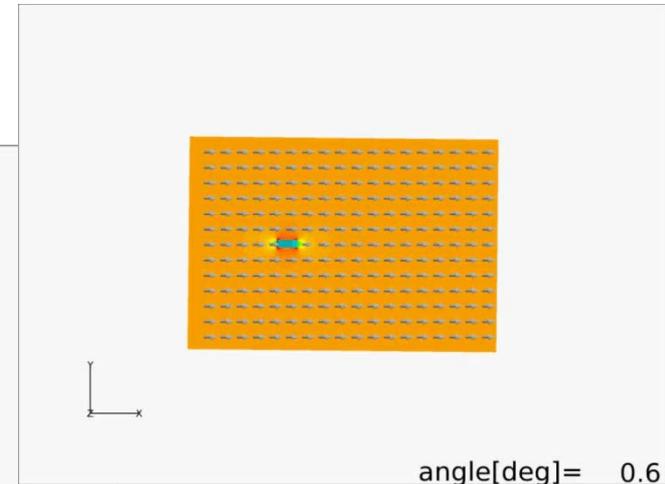


実験の様子



# シミュレーションの実施

- ALE法(ヨ一自転) + 非慣性系(重心旋回)

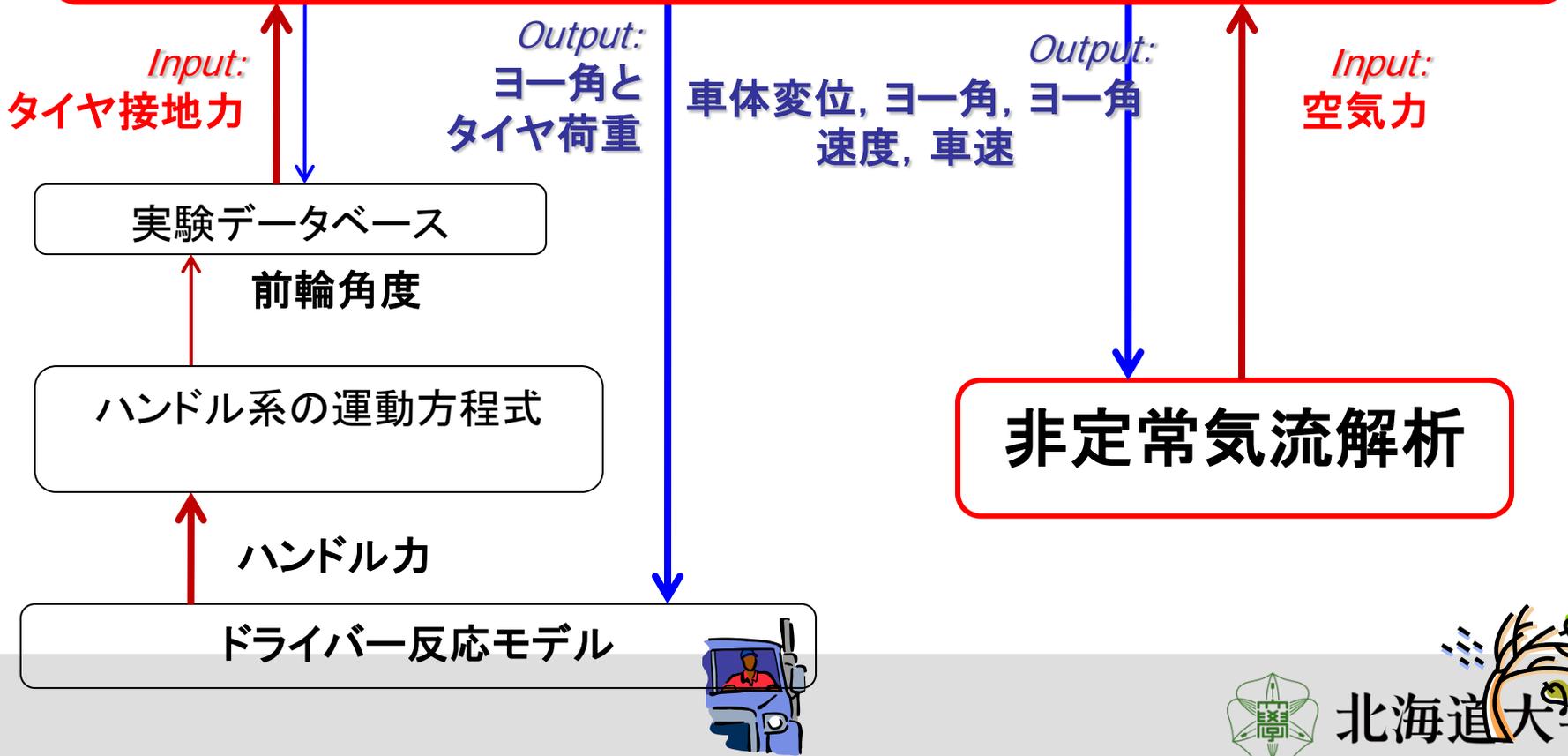
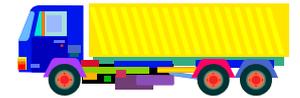


# 車両運動・ドライバーの反応との連成解析

Nakashima et al., Computers&Fluids (2013)

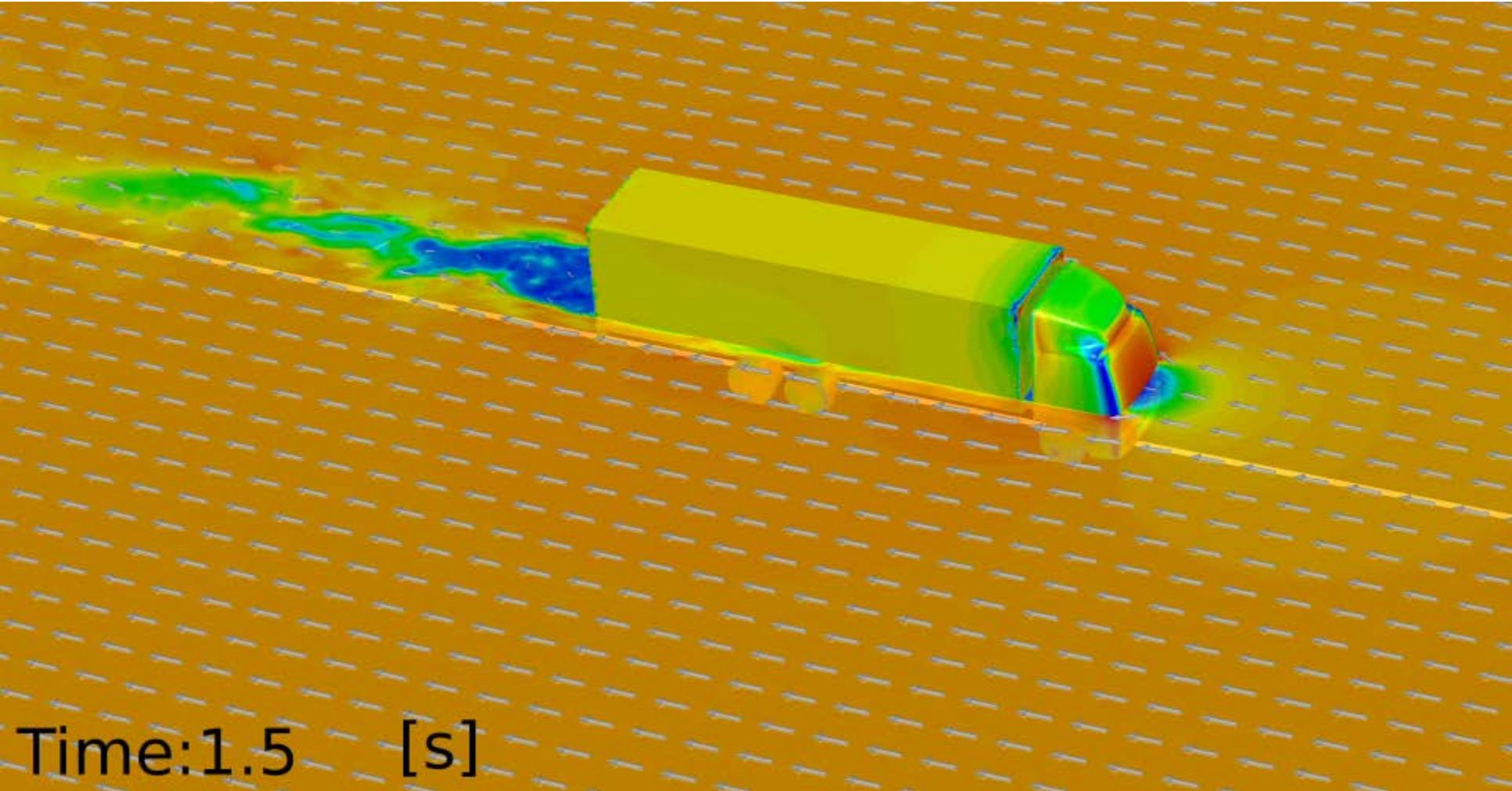
- 車両運動連成解析システムの概要

## 自動車の運動方程式



## 突風にあおられたトラックの運動解析

## 表面圧力と車体周りの速度ベクトル



## まとめ

- 路面からの外乱による加振（ピッチング，ヒービング，ローリング等）に対しては強制加振による空力ダンピング効果の評価が有効
- 操舵時の複雑な運動（ヨーイング，ローリング）についても微係数法的な評価方法（単純運動の重ね合わせ）で「ある程度」はできそう
- ただし突風や急なハンドル操作時には空力応答が非線形になる（微係数法の限界）.
- 車体の運動挙動がわかればそれでいいのか？
  - 本当に欲しい「操安評価」や「感応評価」では，車体姿勢のみでなく操舵力（タイヤ接地力→操舵系→ドライバー）も含めた評価が必要.

