

粘弾性被膜による流体制御の 数値シミュレーション



遠藤誉英・姫野龍太郎
生体力学シミュレーション特別研究ユニット

背景

Gray's paradox (1936)

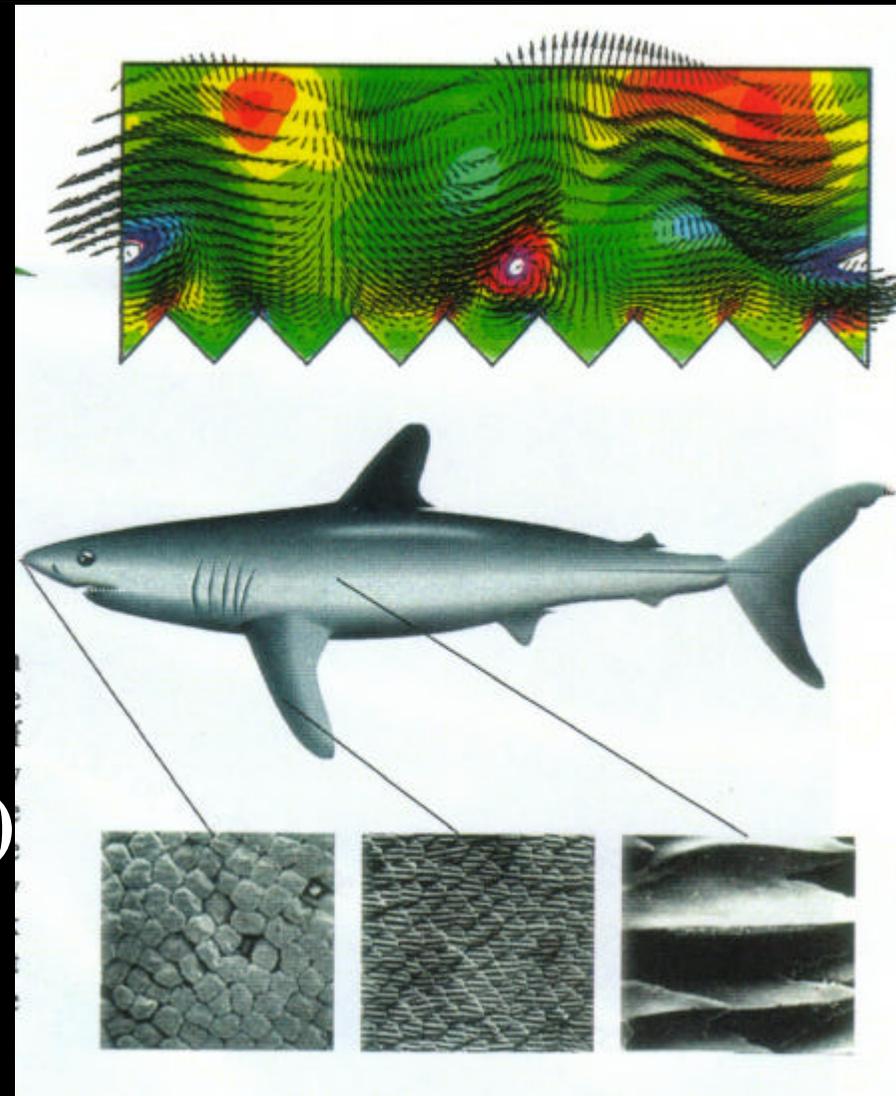
イルカは70 km/h
という高速で泳ぐ。

イルカの皮膚：粘弾性被膜

- 乱流摩擦抵抗低減効果
- 乱流遷移遅延効果

Cf. 鮫の鱗(Riblet surface)

- 硬い構造
- 特定のレイノルズ数に
- おいて8%の抵抗低減



Scientific American, Vol. 276-1, 62-68 1997

フレキシブルな流体制御デバイスとしての粘弾性被膜

•乱流遷移遅延効果

Orr-Sommerfeld Eq.

Bushnell, Hefner & Ash (1977)

Carpenter & Garrad (1985)

Riley, Gad-el-Hak & Metcalfe (1988)

•乱流摩擦抵抗低減効果

Kramer (1960)

Chu & Blick (1969)

- 変形壁面近傍の流れの計測が困難
- 粘弾性被膜の物性値が変化

目的

粘弾性被膜を境界にもつ流れの 数値シミュレーション

- 粘弾性被膜による流体制御効果の検証
 1. 圧力・摩擦抵抗
 2. 揚力、境界層の発達
- 流体制御に最適な粘弾性被膜の物性値の評価

微小変形する境界壁面と流れの連成解析



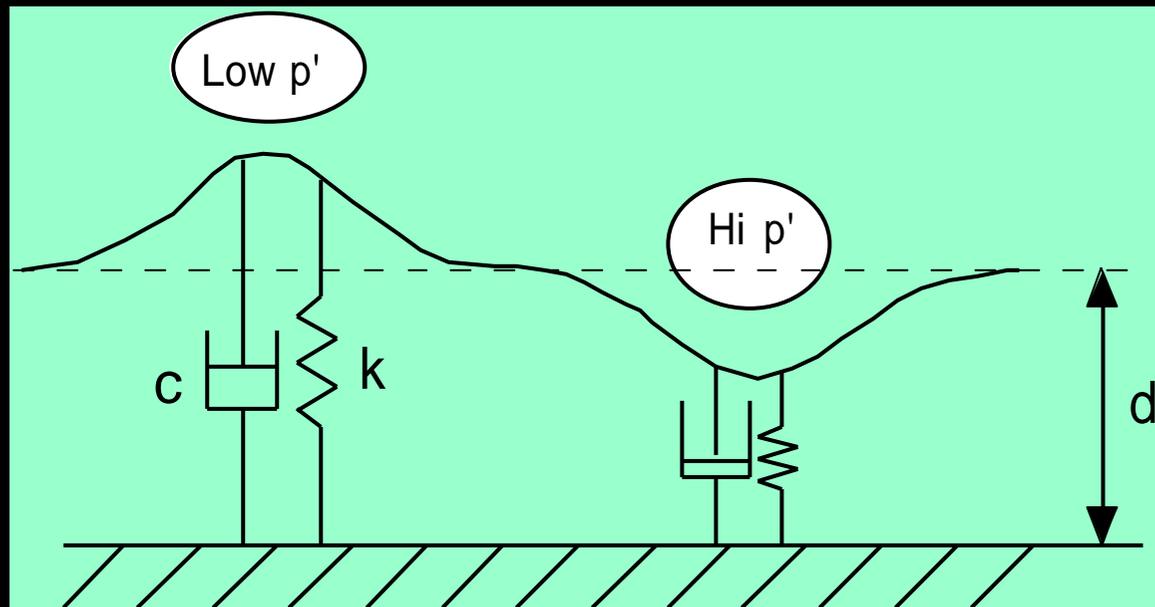
血管壁と血流などの生体流体への応用

DNS of turbulent channel flow with compliant walls

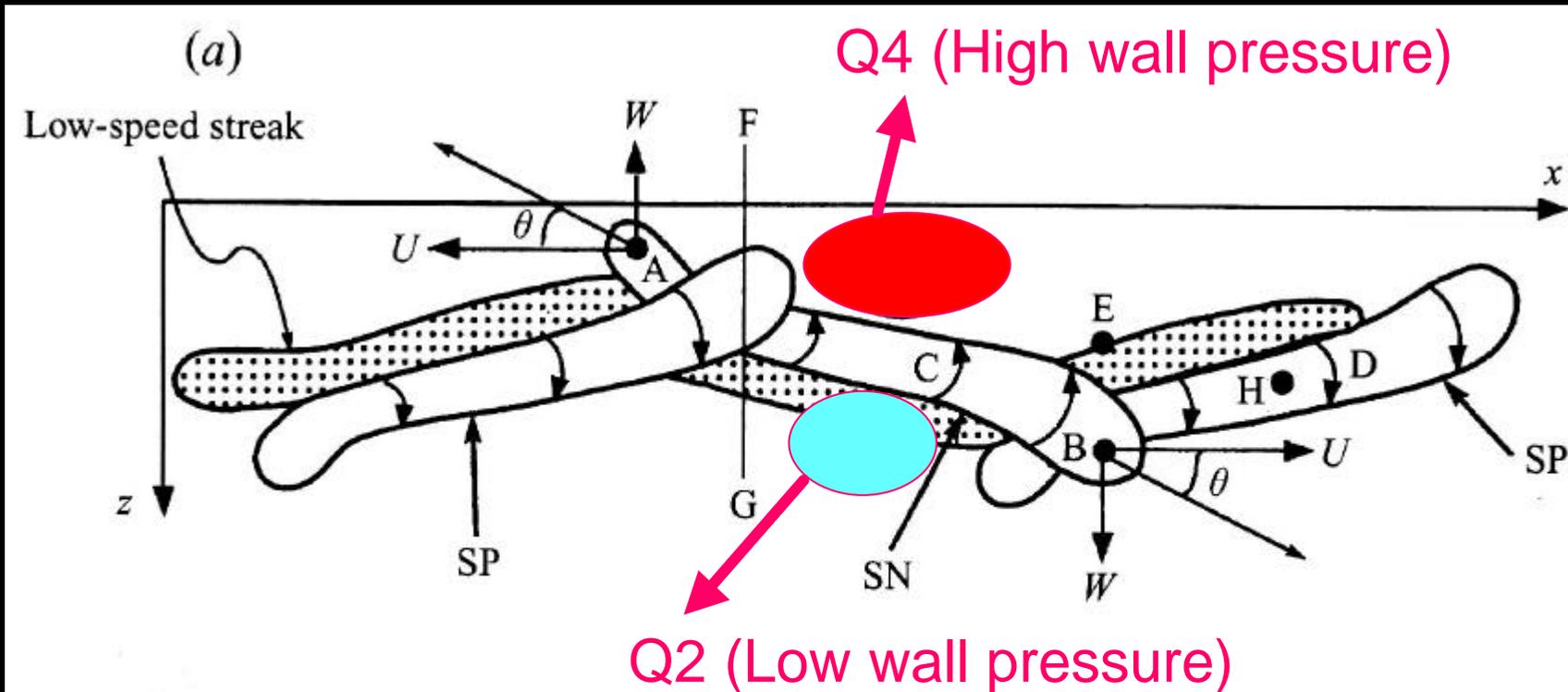
粘弾性被膜のモデリング

バネ・マス・ダンパ系

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + ky = \left(-p'_w + T_x \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + T_z \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) \Delta x \Delta z$$



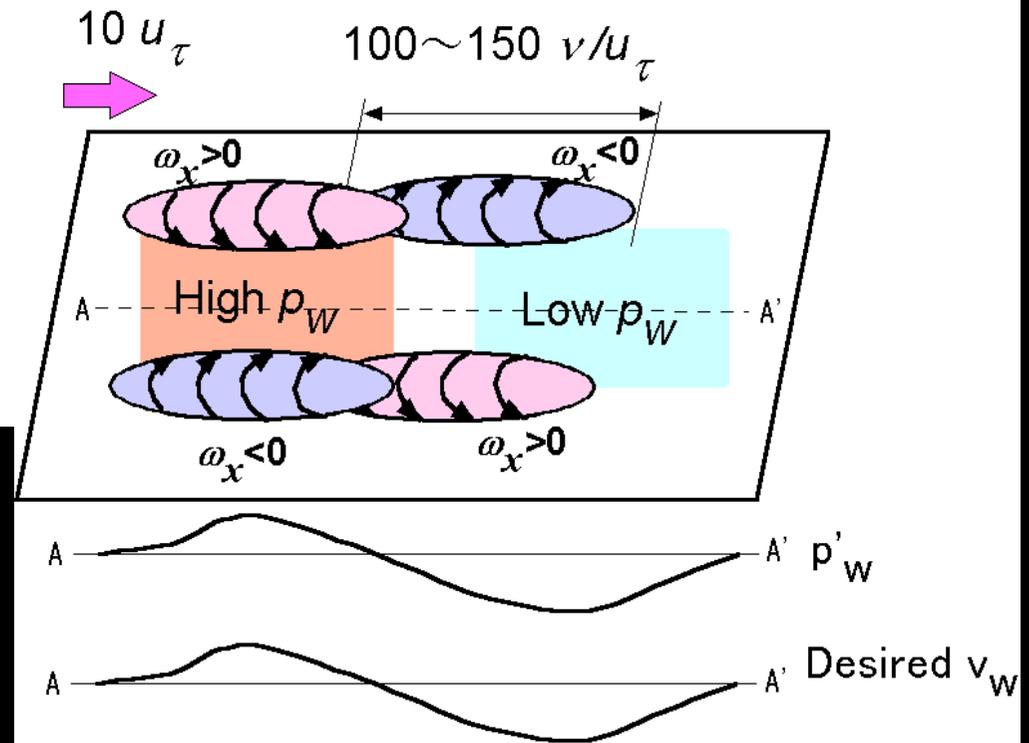
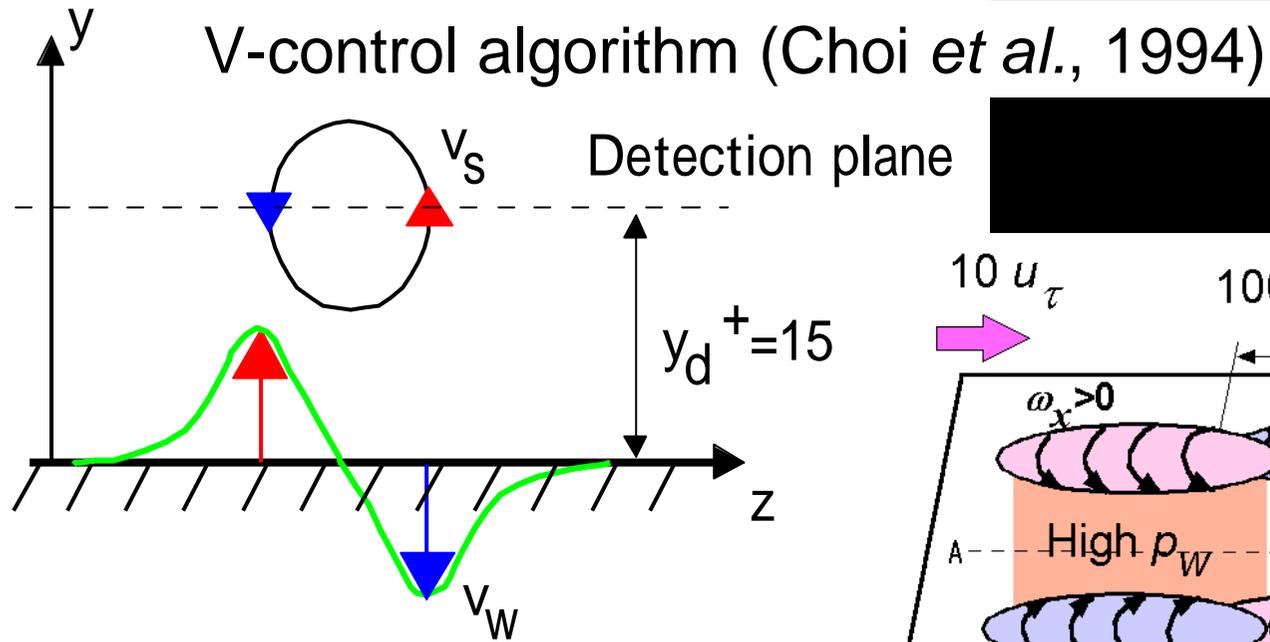
縦渦構造の再生成メカニズム



Jeong *et al.* (1997)

子渦は親渦の上流側に、逆の渦度を持って再生成される。

壁面変形速度と壁面圧力



p_w と v_w は同位相

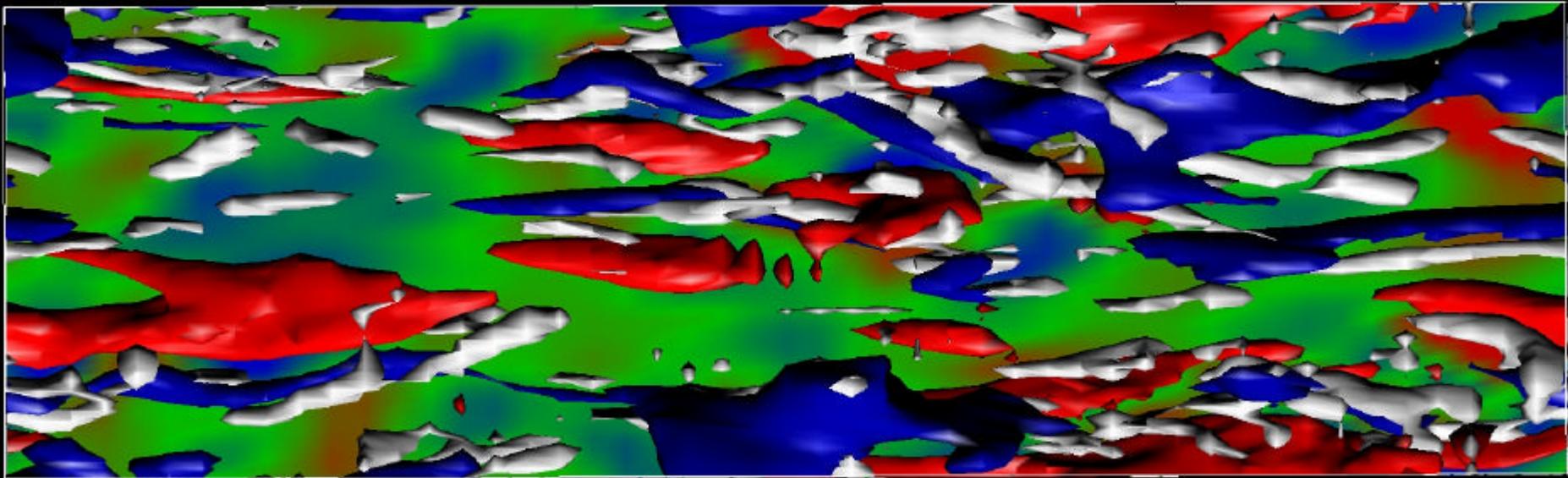
摩擦抵抗低減に最適な粘弾性被膜の物性値

粘弾性被膜を有する平行平板間乱流のDNS

$$Re_t = 150$$

瞬時場のトップビュー ($t = 4.86$)

4.86

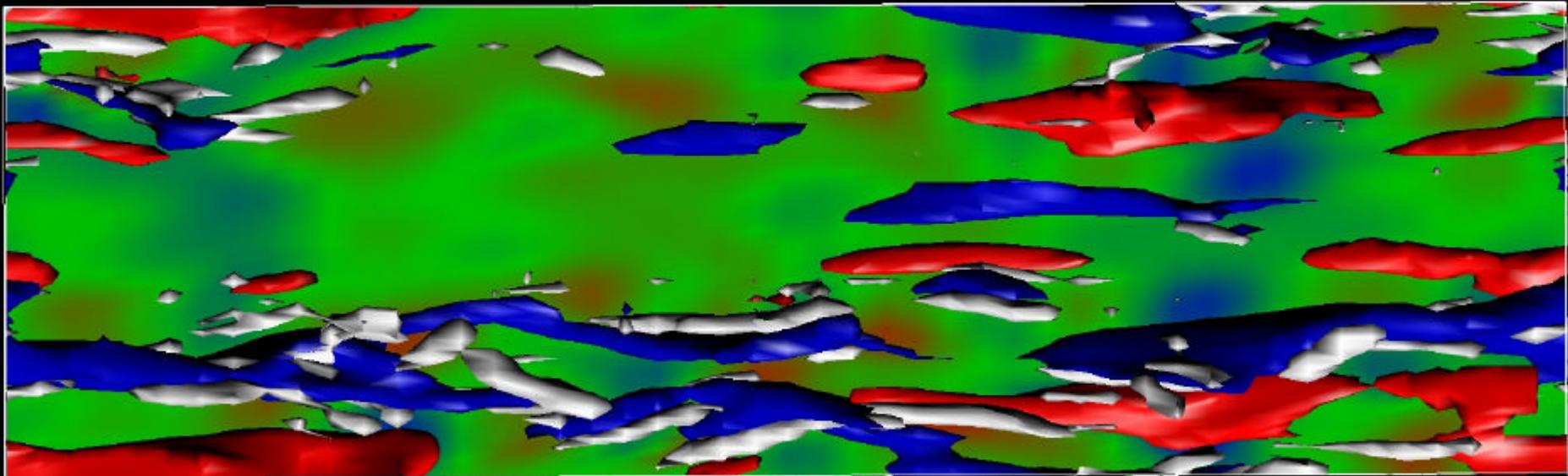


青：低速ストリーク
赤：高速ストリーク
白：渦構造

流れ：左から右
壁面の色：変形量

瞬時場のトップビュー ($t = 602.1$)

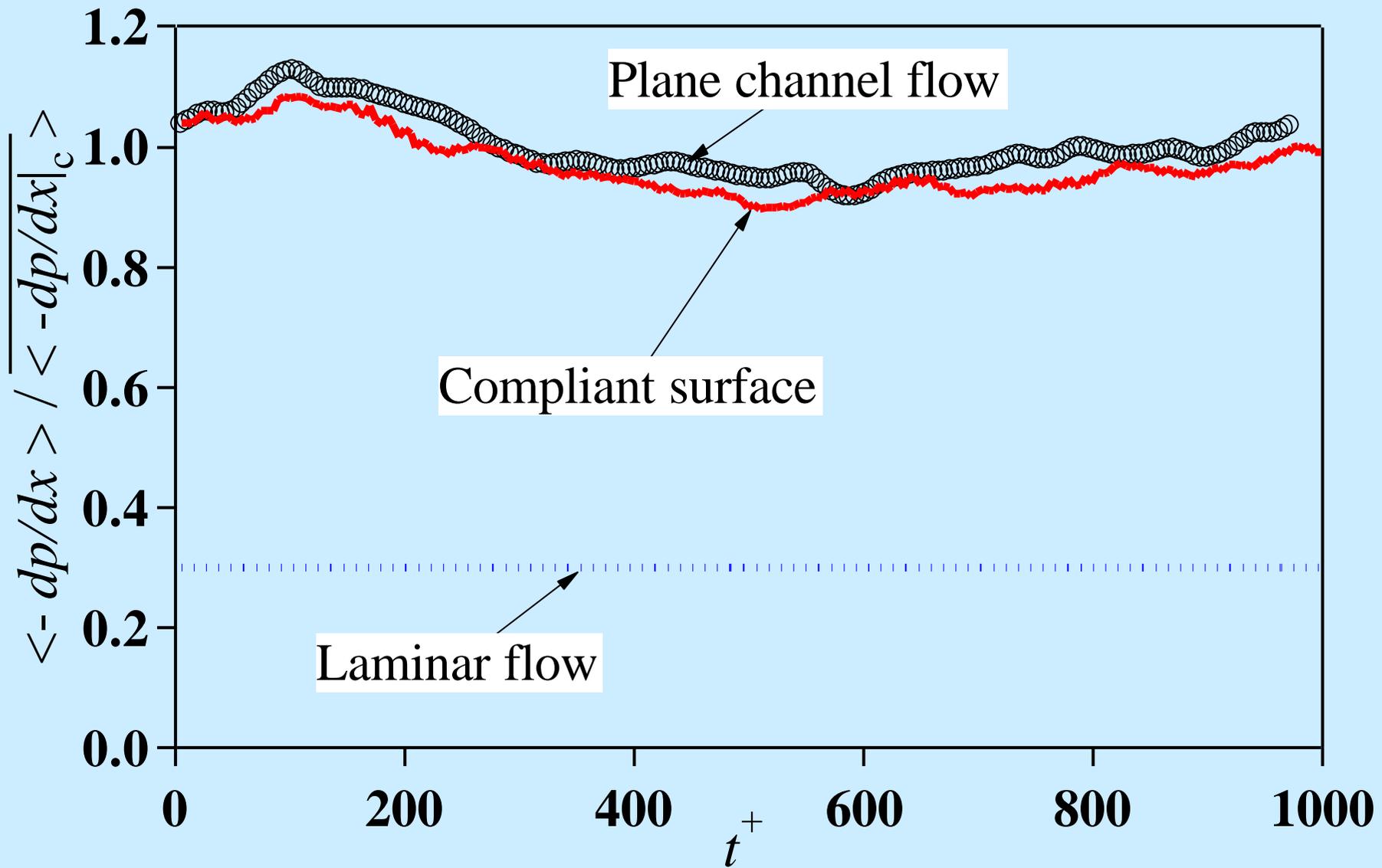
602.10



青：低速ストリーク
赤：高速ストリーク
白：渦構造

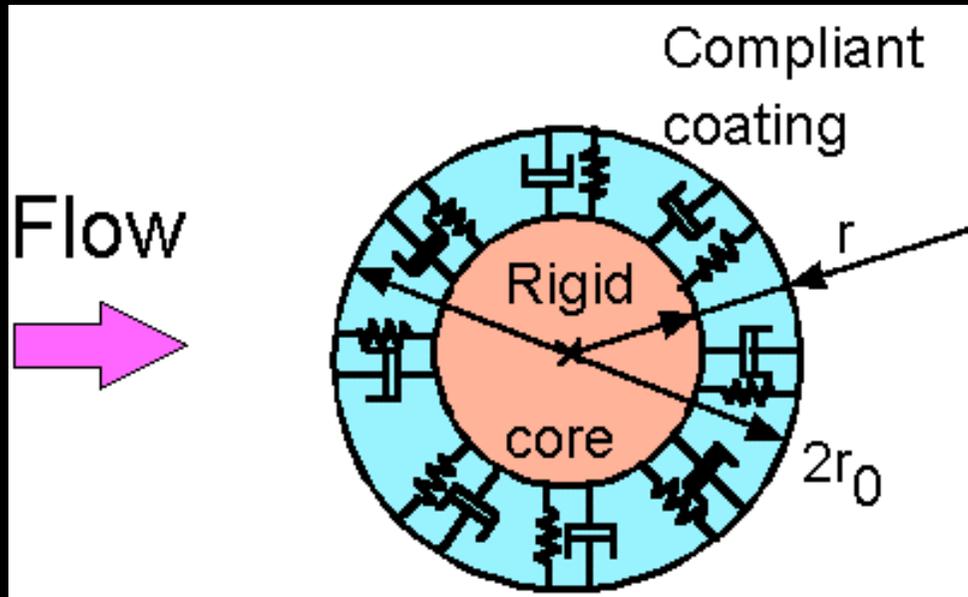
流れ：左から右
壁面の色：変形量

平均圧力勾配（= 摩擦抵抗）の時間変化



DNS of Flow across a compliant cylinder

粘弾性被膜を有する円柱のモデリング

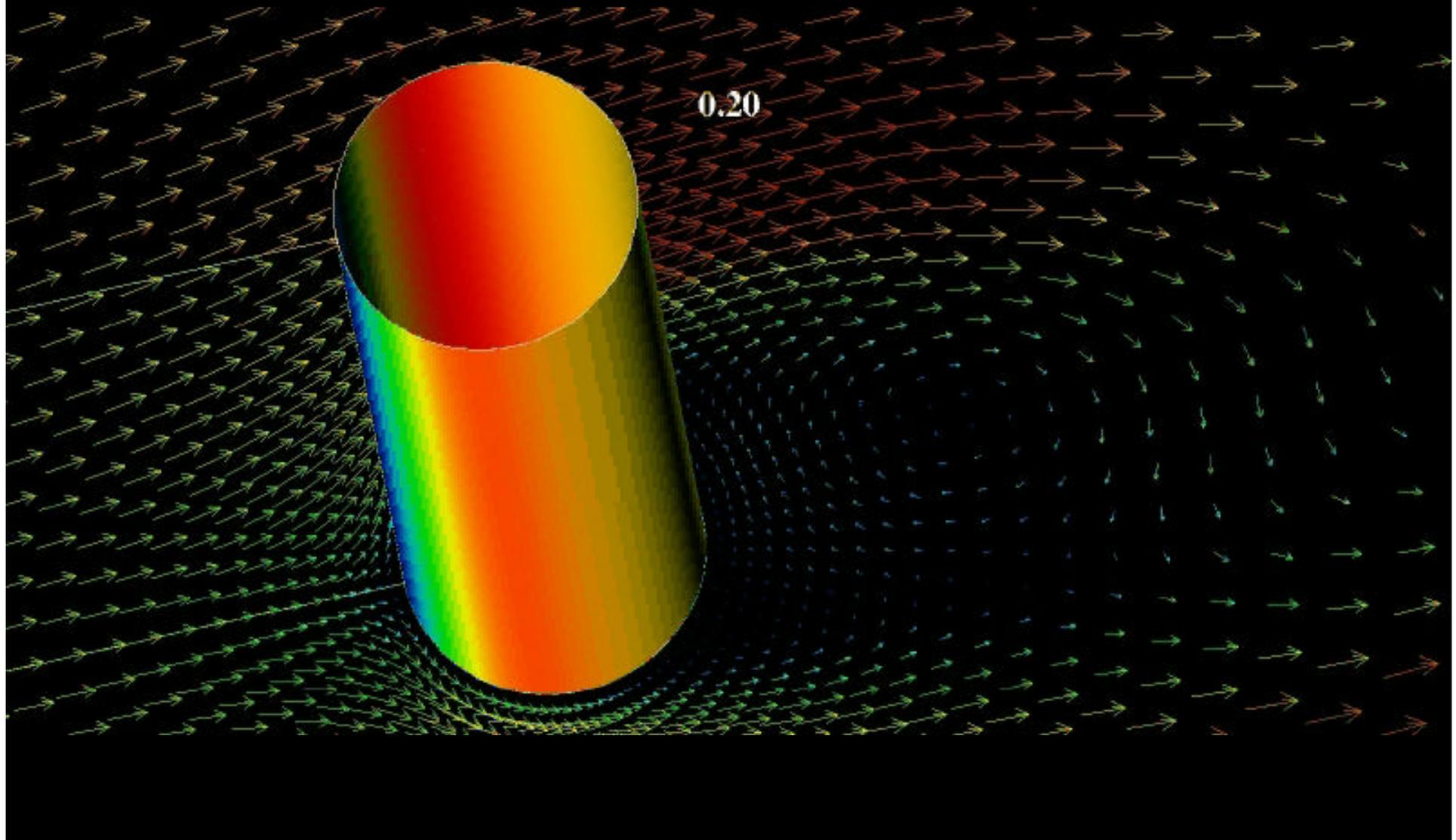


$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + 2z_0 \frac{\partial r}{\partial t} + w_0^2 \left(r - \frac{1}{2} \right) = (P_h - \tilde{P}_h)$$

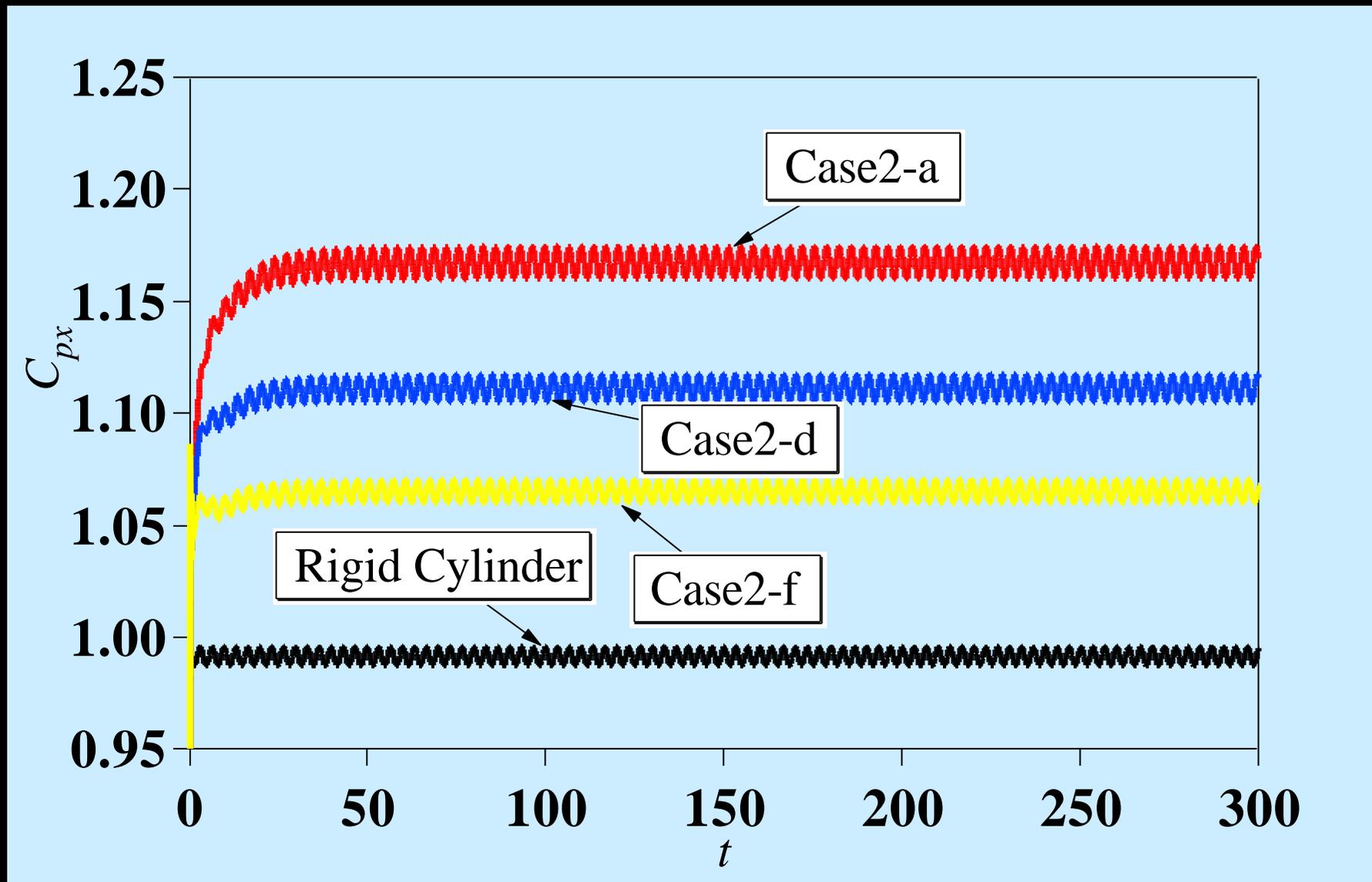
円柱表面の格子点は半径方向にのみ移動可能であると仮定

	z	w_0
<i>Case1</i>	0.08	1
<i>Case2-a</i>	0.00	5
<i>Case2-b</i>	0.01	5
<i>Case2-c</i>	0.04	5
<i>Case2-d</i>	0.08	5
<i>Case2-e</i>	0.16	5
<i>Case2-f</i>	0.24	5
<i>Case2-g</i>	1.0	5
<i>Case2-h</i>	3.0	5
<i>Case2-i</i>	5.0	5
<i>Case2-j</i>	7.0	5
<i>Case3-a</i>	0.08	10
<i>Case3-b</i>	0.16	10
<i>Case3-c</i>	0.24	10

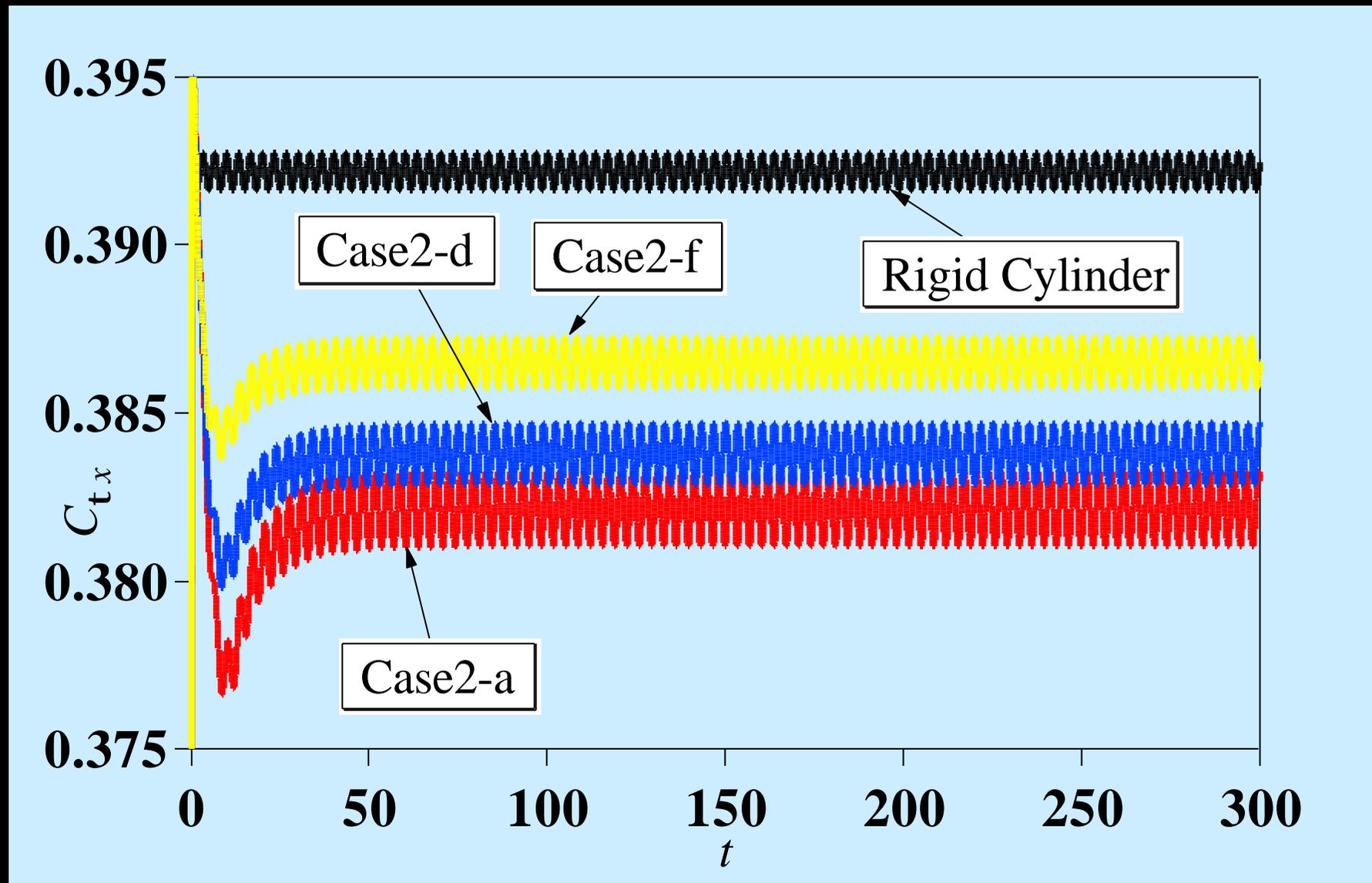
粘弾性円柱と周囲の流れ場 (Case 2-d, $Re=80$)



圧力抵抗係数の時間変化

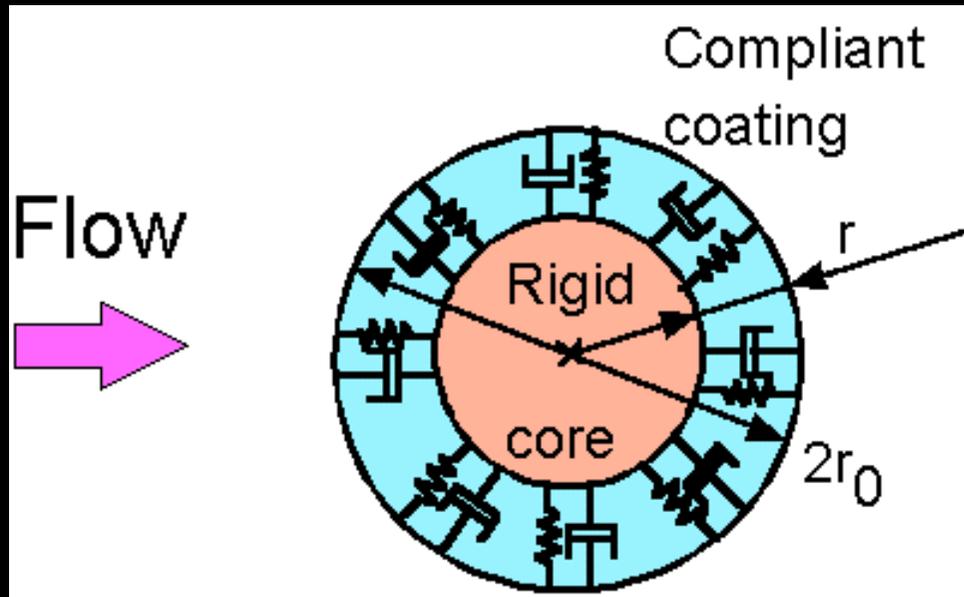


摩擦抵抗係数の時間変化



DNS of Flow across a compliant sphere

粘弾性球のモデリング

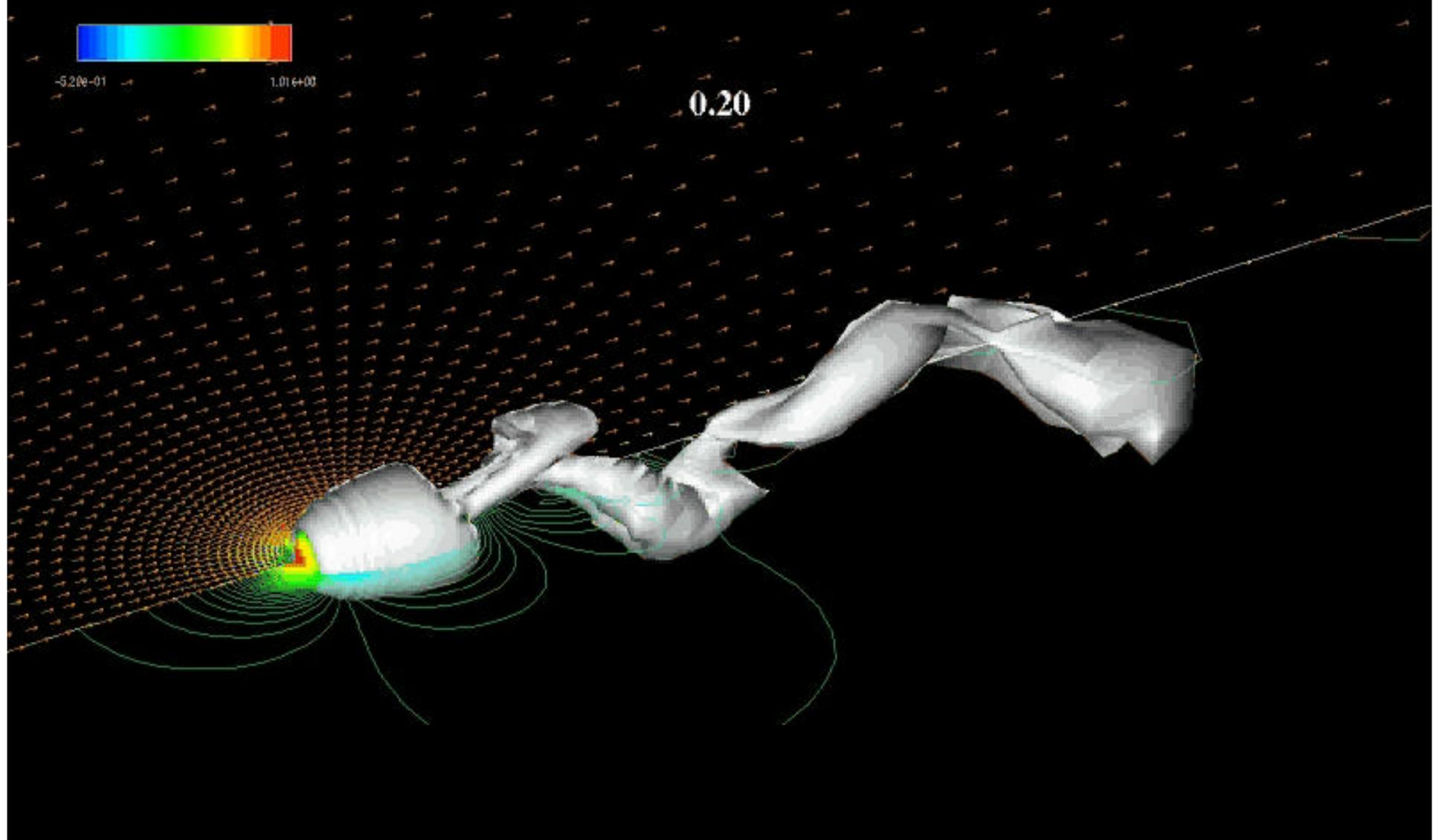


	α	w_0
<i>Case 1</i>	0.08	1
<i>Case 2</i>	0.04	5
<i>Case 3</i>	0.04	2

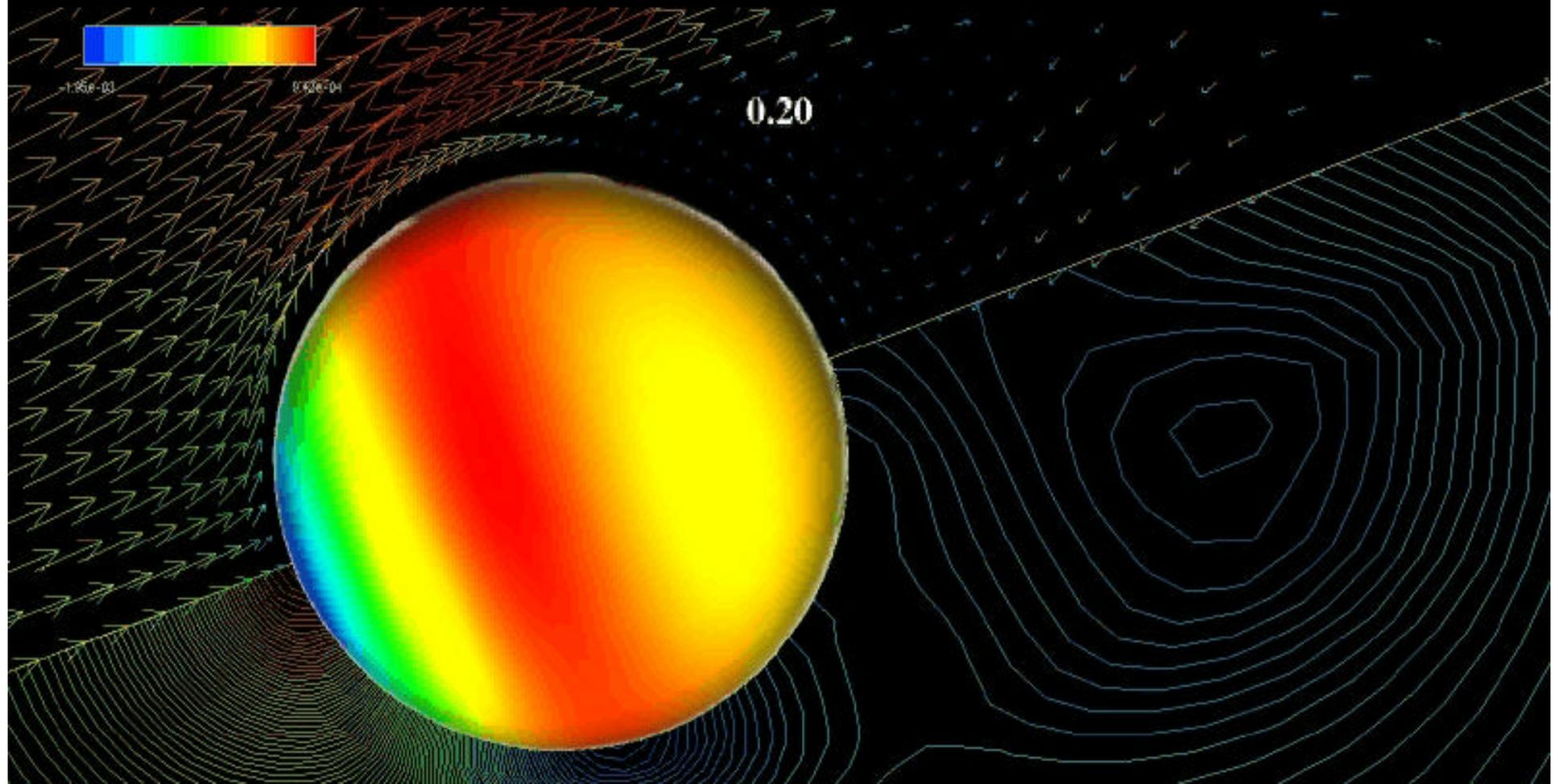
$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + 2\alpha_0 \frac{\partial r}{\partial t} + w_0^2 \left(r - \frac{1}{2} \right) = (P_h - \tilde{P}_h)$$

球表面上の格子点は半径方向にのみ移動可能と仮定する

非変形の球周囲の流れ場 : $Re=400$ (White : $\Pi=-0.01$)

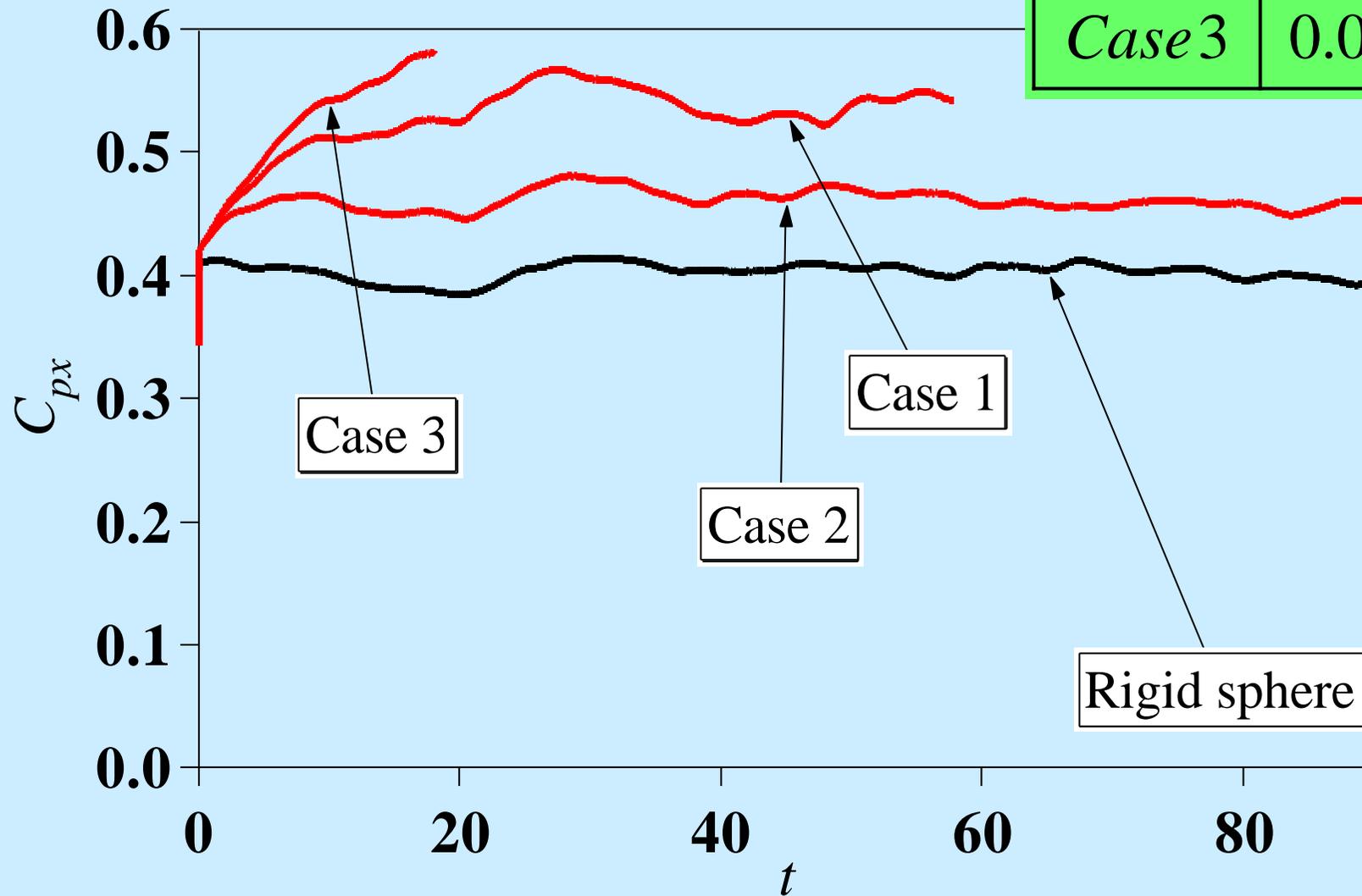


粘弾性球周囲の流れ場



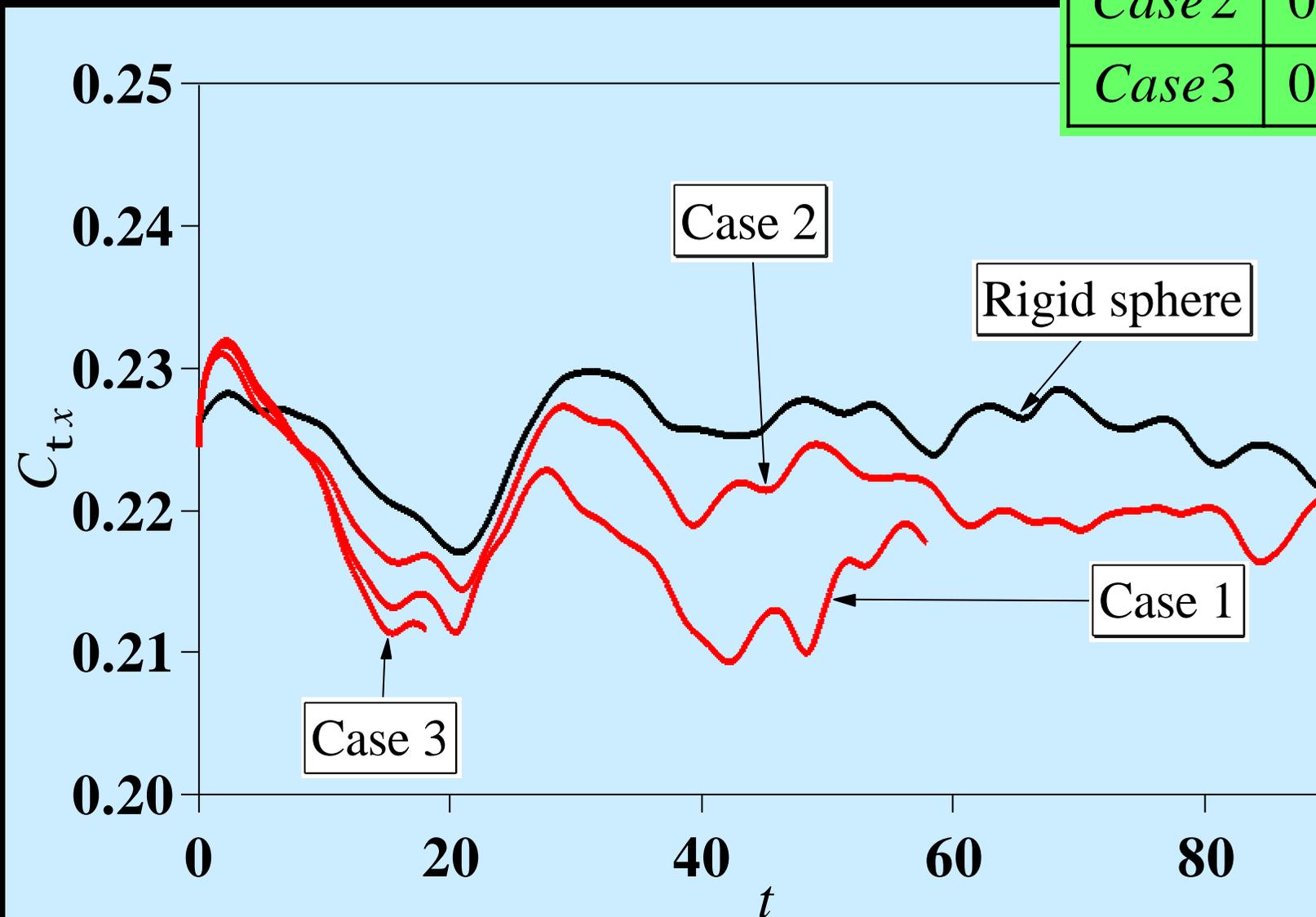
圧力抵抗係数の時間変化

	X	W_0
<i>Case 1</i>	0.08	1
<i>Case 2</i>	0.04	5
<i>Case 3</i>	0.04	2



摩擦抵抗係数の時間変化

	x	w_0
Case1	0.08	1
Case2	0.04	5
Case3	0.04	2



結論

粘弾性被膜を有する

平行平板間乱流の直接数値シミュレーション

円柱・球周囲の流れの数値シミュレーション

物性値を適当に選択することによって
乱流摩擦抵抗低減が可能

圧力抵抗は増大するものの、
摩擦抵抗を減少させることが可能

大型船舶や航空機などへの流体制御デバイス
としての応用可能性を示した。

A photograph of a dolphin in the ocean with its mouth open, showing its teeth. The water is a vibrant turquoise color. A white rectangular box with a red border is overlaid on the left side of the image, containing the text "Thank you!!!".

Thank you!!!