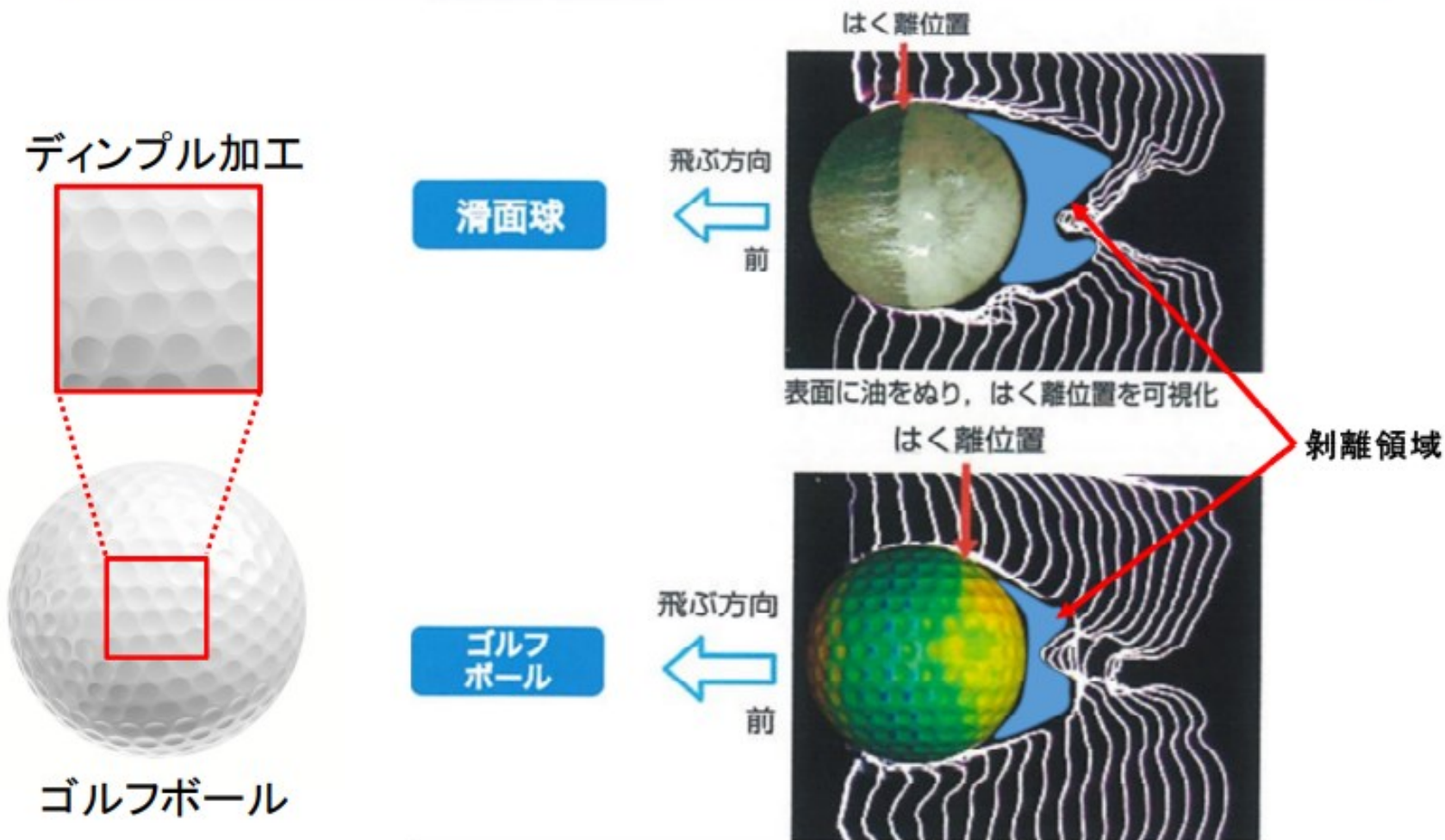


# 【剥離の抑制例：ゴルフボールの周囲の流れ(\*)】

ディンプル加工による乱流効果の促進で境界層内への運動エネルギー注入



(\*) [https://www.tsukuba.ac.jp/community/studentskagakunome/shyo\\_list/2014/jrhs8.pdf](https://www.tsukuba.ac.jp/community/studentskagakunome/shyo_list/2014/jrhs8.pdf)

## 【CFDによる流れの剥離現象の解析(最適乱流モデルの選択)】

### 流れの基礎方程式(層流)

$$\text{連続の式: } \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$\text{運動方程式: } \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

4個の未知数 ( $p, u_1, u_2, u_3$ ) は4個の方程式で解が求まる。

### 乱流の基礎方程式(RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation)

乱流物理量の不規則変動を時間平均して表した方程式。

$$u = \bar{u} + u', \quad \bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad \bar{u}' = 0 \quad (u: \text{流速の瞬間値}, \bar{u}: \text{時間平均値}, u': \text{変動値})$$

これらの関係式を層流の基礎方程式に代入し、整理すると以下の方程式を得る。

$$\text{連続の式: } \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{運動方程式: } \rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j}$$

新たに出現したレイノルズ応力項

レイノルズ応力項を形成する速度変動成分  $u_i' u_j'$  が新たに加わるため、方程式は閉じた系にならず解が得られない。解を得るためには、速度変動成分の性質を表す何らかの物理モデル(方程式)を作る必要がある。

# k-εモデルとk-ωモデル

## (1) k-εモデル

- 乱流構造の等方性仮定

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

- k (乱流エネルギー) と ε (乱流エネルギー散逸率) による乱流構造のモデル化

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = -C_{\varepsilon 1} \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$\tau_{ij}$ : レイノルズ応力  
 $\mu_t$ : 渦粘性係数  
 $\delta_{ij}$ : クロネッカーのデルタ  
 $k$ : 乱流エネルギー  
 $\varepsilon$ : 乱流エネルギー散逸率  
 $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ : モデル定数

k と ε に関する  
輸送方程式

## (2) k-ωモデル

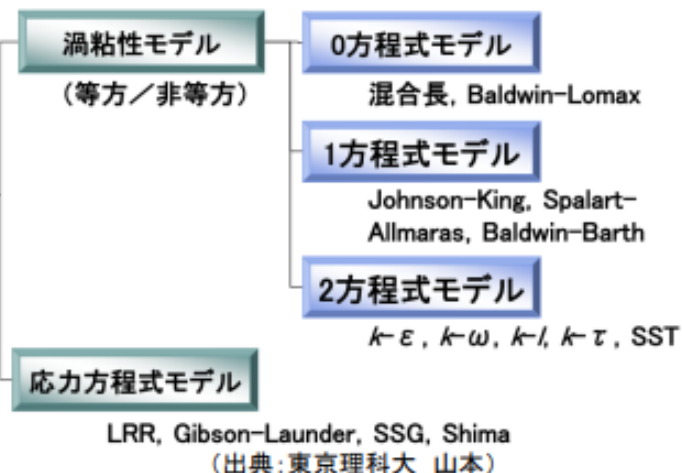
- 乱流構造をk (乱流エネルギー) と ω (渦度) によりモデル化

$$\omega = \varepsilon / k$$

k-εモデルとk-ωモデルは相互に導出可能な方程式であるが結果は異なる。k-εモデルに比べ、剥離現象の予測精度が良い。

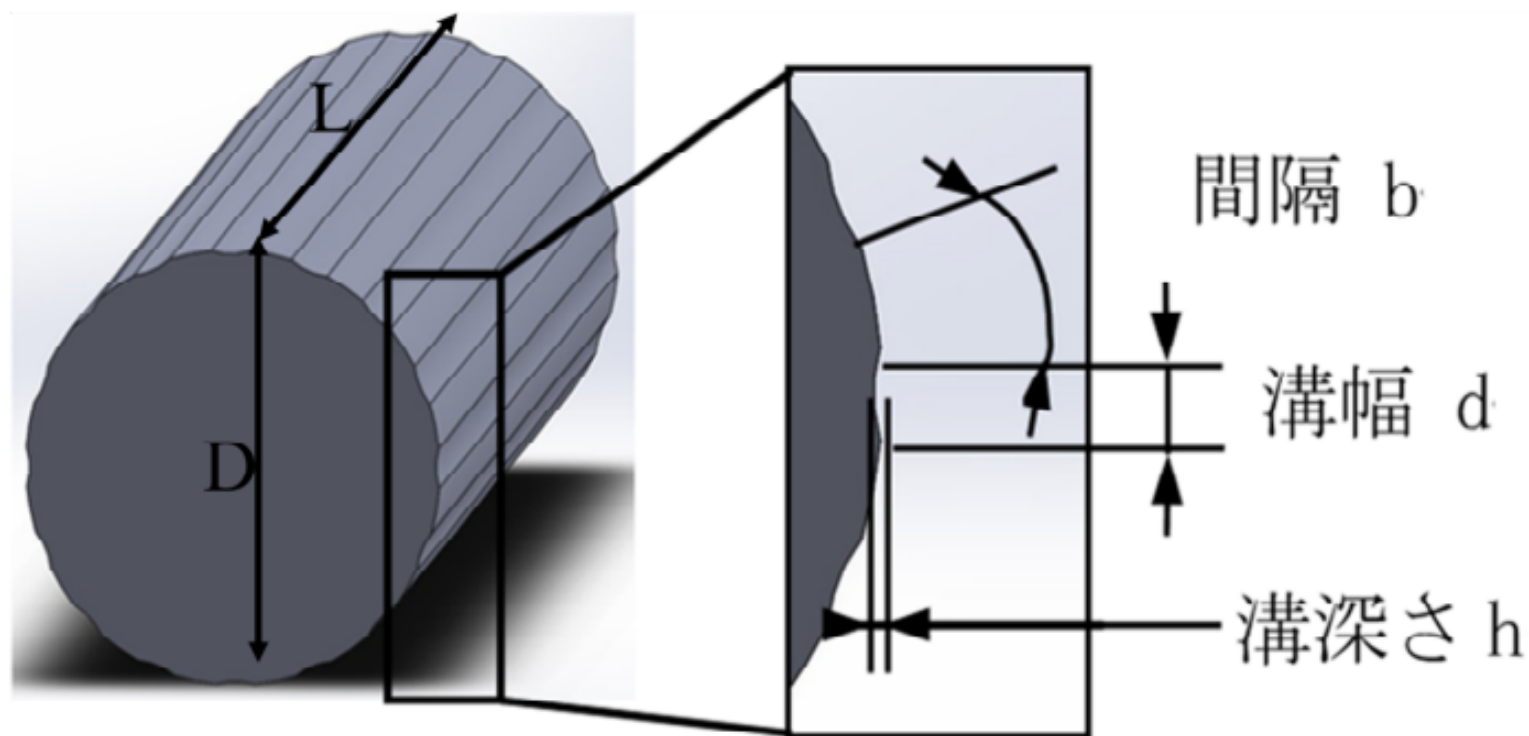
代表的な  
乱流モデル  
(RANS)

RANSモデル



## 【2次元モデルを用いた(表面乱流促進効果)最適表面加工形状の探求】

ゴルフボールのような3次元モデルを用いた剥離現象の高精度解析は、多大な計算時間を要するため効率的ではない。下図に示すような円柱表面に多数の浅い溝加工を施した2次元モデルを用いることにより、短時間で最適な溝加工形状の探求が可能となる。

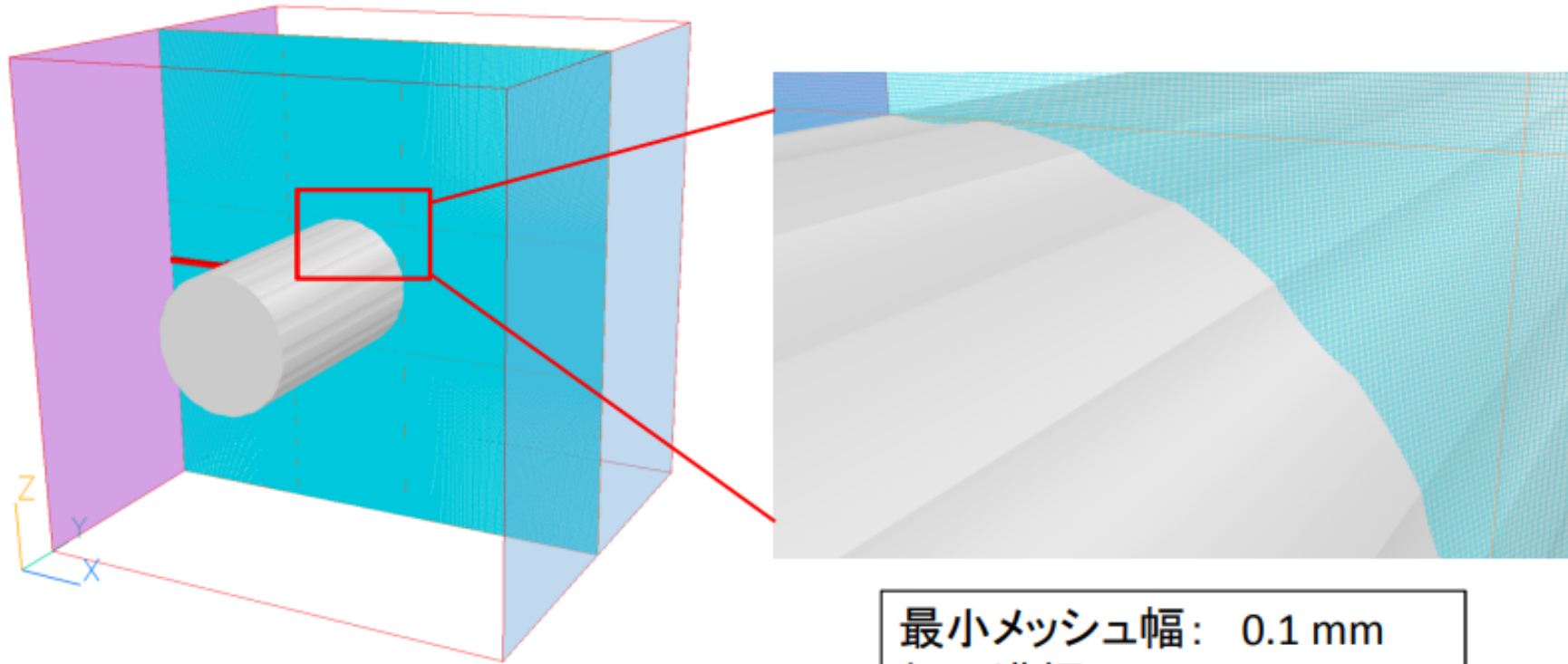


円柱直径  $D = 42.67\text{mm}$  円柱長さ  $L = 150\text{mm}$

## 【2次元格子による解析空間の設定】

### 2次元モデルによる短時間高精度計算

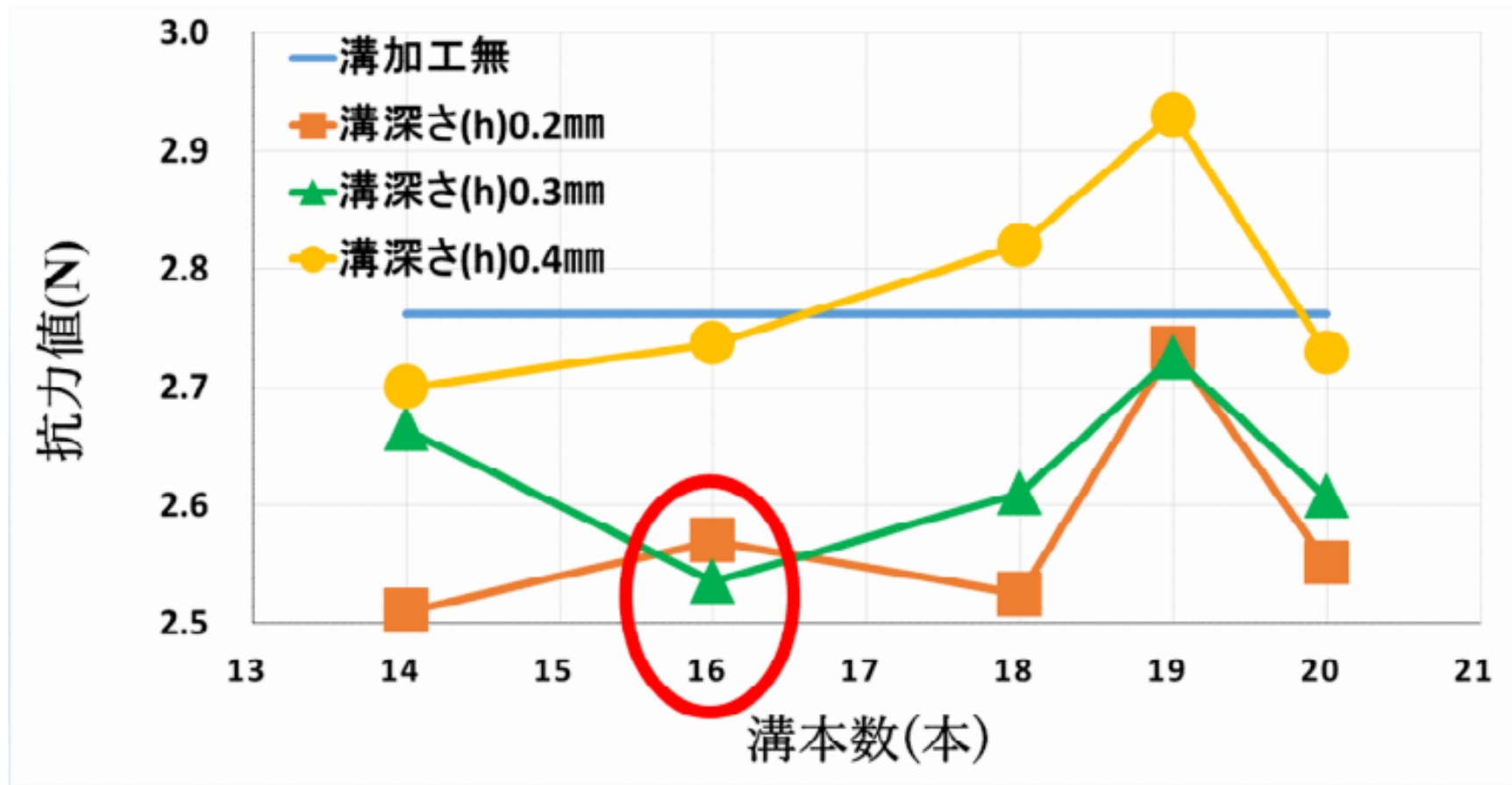
(最適化条件の追求のような計算水準の多い場合には、非常に有効)



【超高精細2次元格子構造】

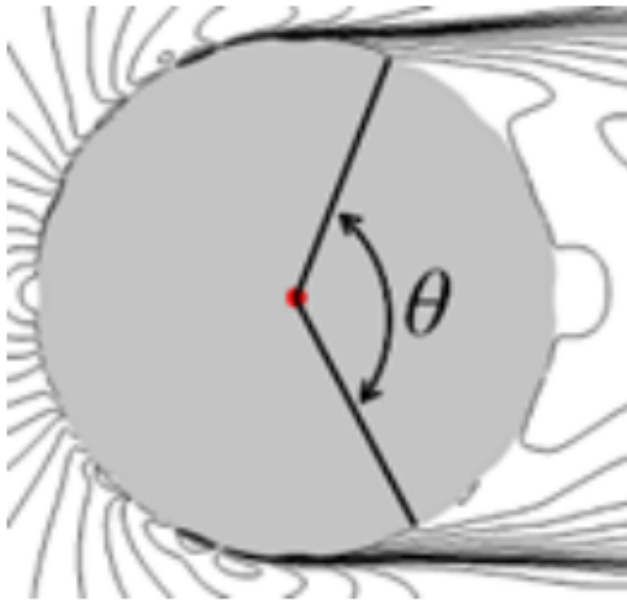
最小メッシュ幅: 0.1 mm  
加工溝幅: 4 mm  
加工溝深さ: 0.3 mm  
使用乱流モデル:  $k-\omega$  SST

## 【円柱モデルに作用する抗力のCFD解析結果】



# 【溝加工による剥離領域の低減効果】

## 溝深さと剥離領域範囲の関係



円柱溝深さ (mm)	剥離範囲 $\theta$ (deg)
$h=0.0$	132
$h=0.2$	126
$h=0.3$	122

【溝幅 4mm, 溝間隔 4.38mm】

【剥離領域の角度 $\theta$ による定義】