

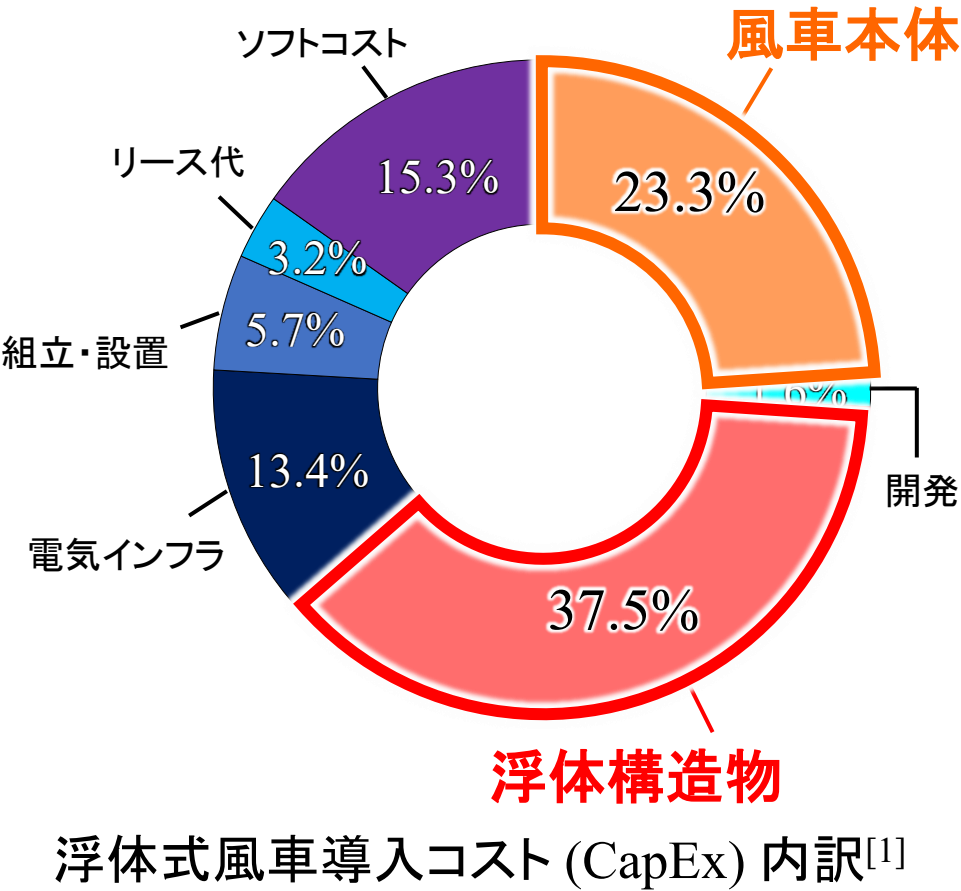
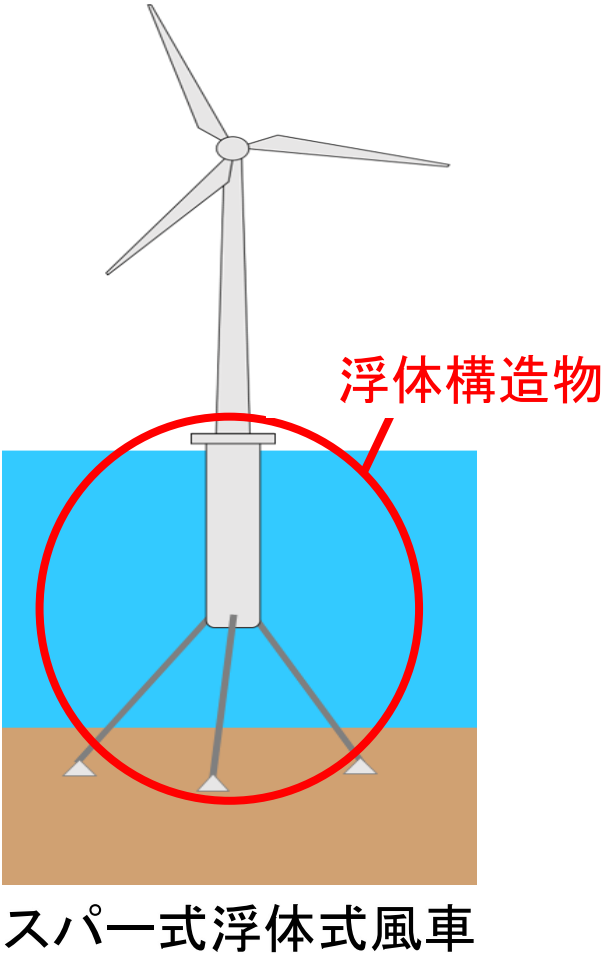
V 形垂直軸風車の翼端形状が 風車出力・荷重特性に与える影響

金沢大学 河野孝昭



本研究は競輪(2024年度JKA機械振興補助事業)の助成を受けて実施しました。

1. 研究背景·目的

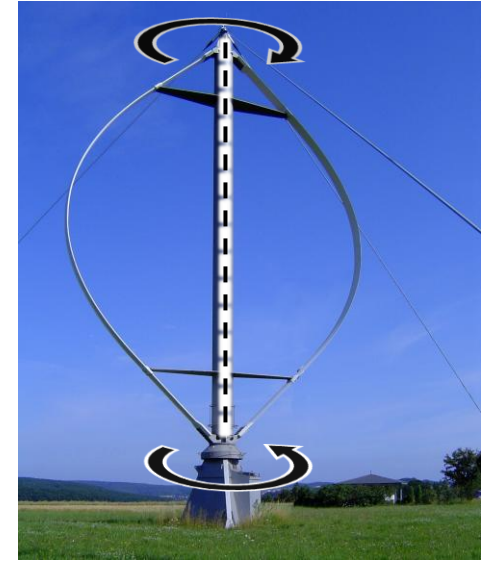


浮体式洋上風力発電の普及には、風車本体と浮体構造物のコストダウンが大きな課題

[1] Tyler Stehly and Patrick Duffy. 2022. 2021 Cost of Wind Energy Review. National Renewable Energy Laboratory. NREL/PR-5000-84774.



<https://ips-group.dk/markets/windmills/>

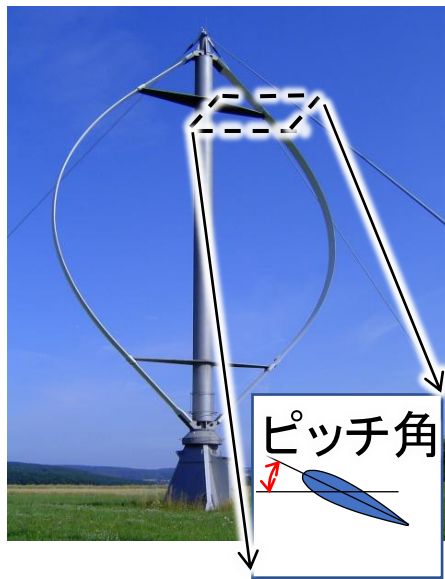


<https://en.wikipedia.org/wiki/Troposkein>

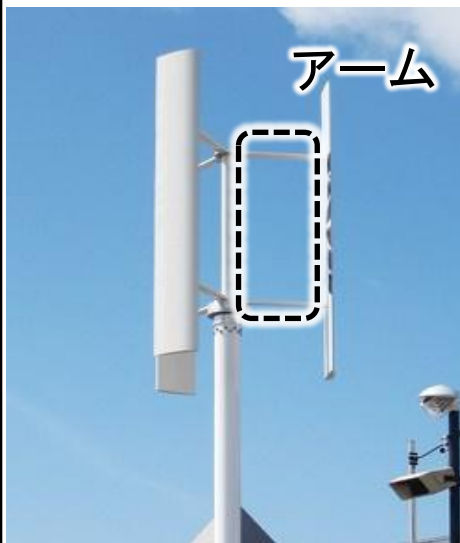
	水平軸風車	垂直軸風車
ロータ風荷重を受ける高さ	高い	低い
重心	高い	低い
設計転倒モーメント	大きい	小さくできる可能性

垂直軸風車は浮体構造物の低コスト化の面で有利

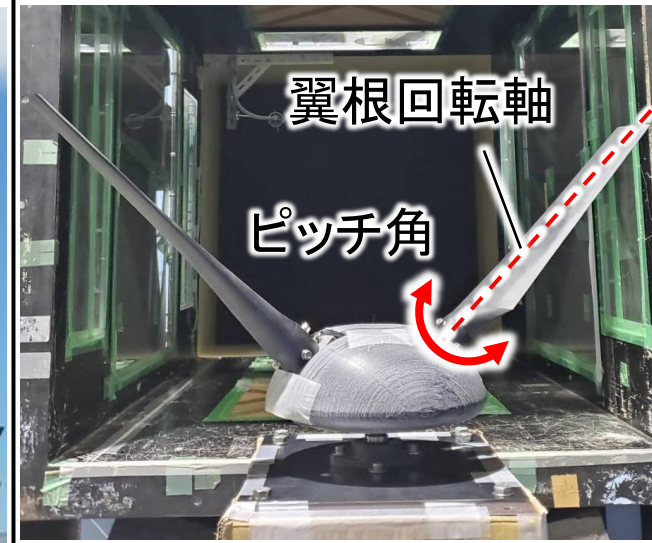
トロポスキン形



H形



V形



ピッチ角
制御

困難

比較的困難

容易

➡ 耐風設計
コスト低減

アーム
損失

比較的小さい

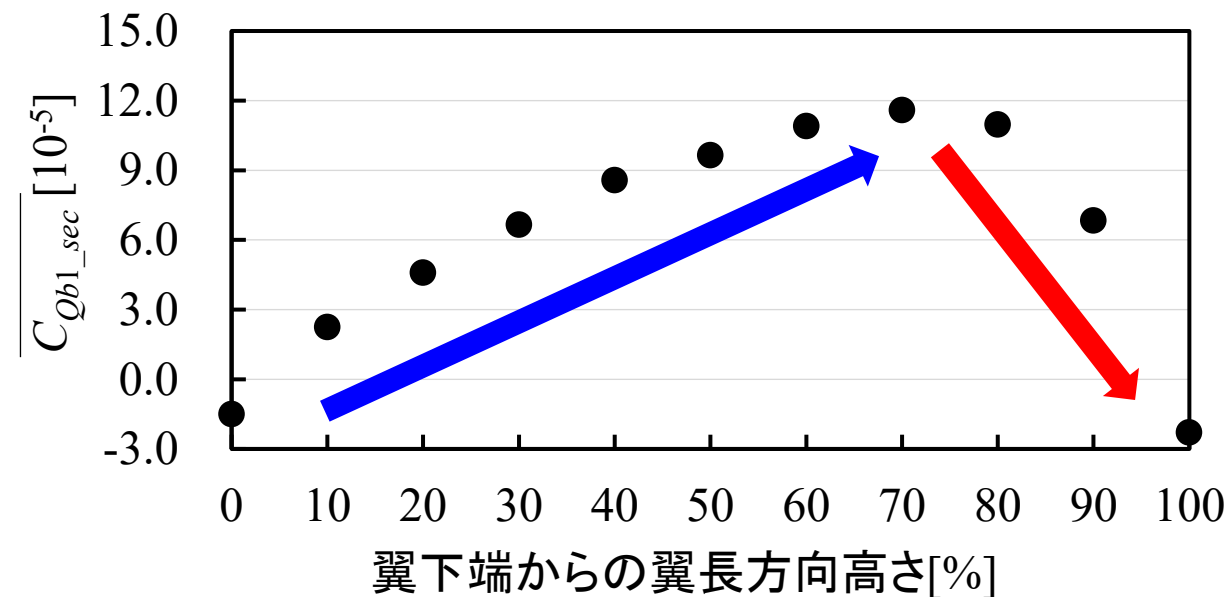
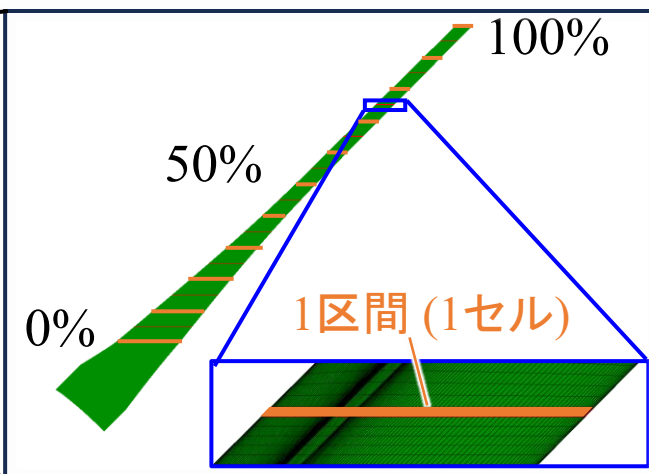
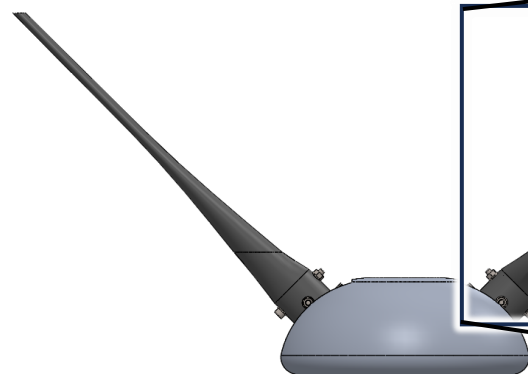
大きい

ない

➡ 出力効率
向上

V形垂直軸風車の特性はほとんど明らかにされていない。

● V-VAWT



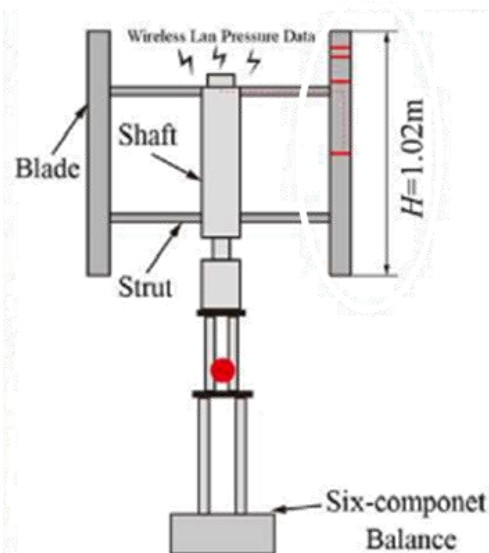
$$C_{Qb1_sec} = \frac{4Q_{b1_sec}}{\rho A U_{\infty}^2 D}$$

Q_{b1_sec} : 翼一枚の翼長方向1セル分の区間にかかるトルク[N・m]

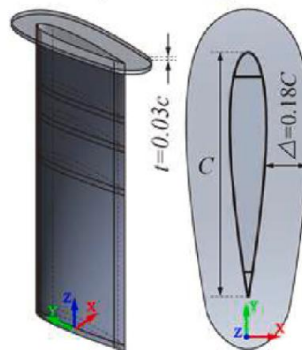
翼長70%高さより先端側で、翼の先端に近づくほど、トルク係数が低下

→ 出力向上のために、翼端損失の低減が必要

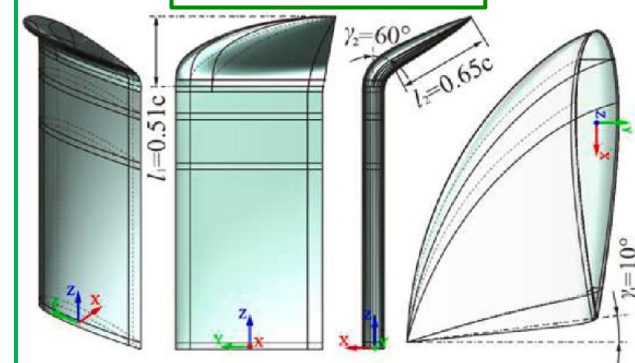
● H-VAWT^[3]



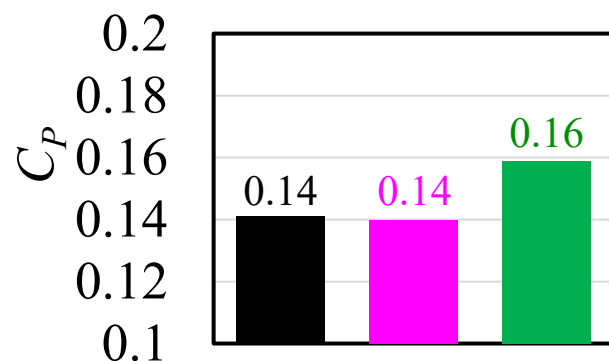
翼端板



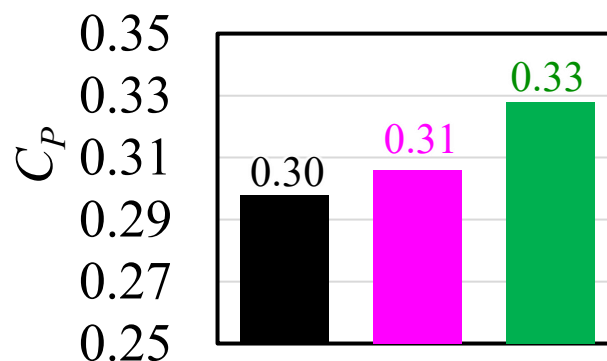
ウィングレット



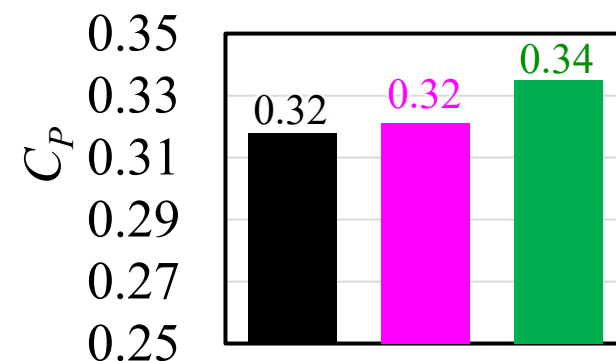
■	Baseline	■	翼端板	■	ウィングレット
---	----------	---	-----	---	---------



(a) $\lambda = 1.85$



(b) $\lambda = 2.29$



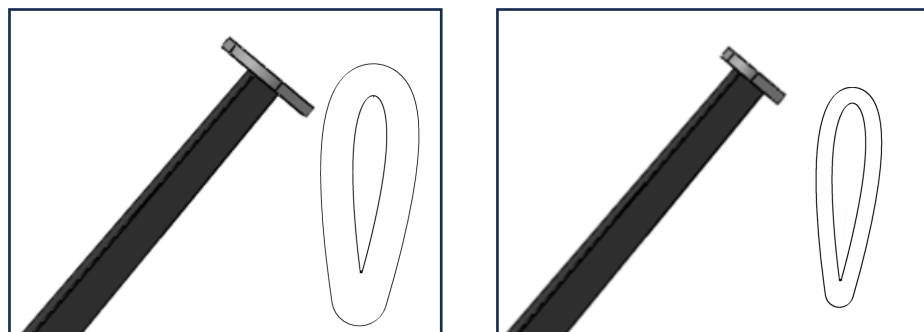
(c) $\lambda = 2.52$

翼先端に翼端板やウィングレットを付加することで、出力係数が増加

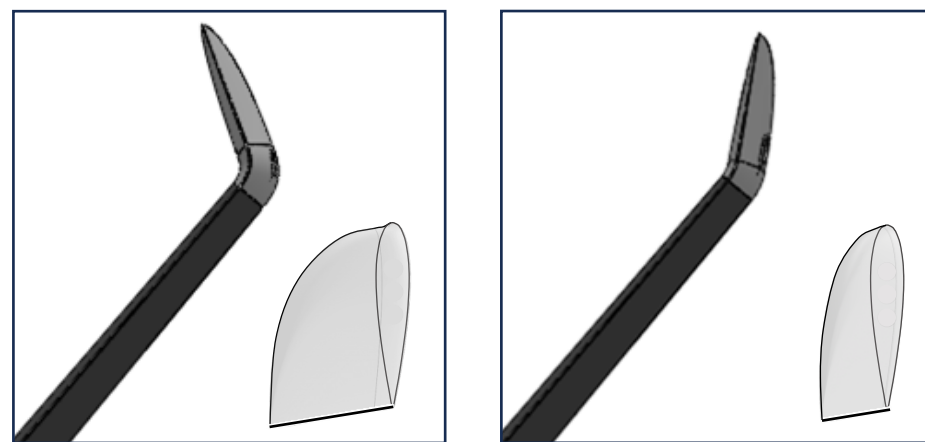
V形垂直軸風車の翼の翼端に翼端板やウィングレットを付加した場合に、翼端形状が風車出力特性に与える影響を調査

◆ 翼端形状

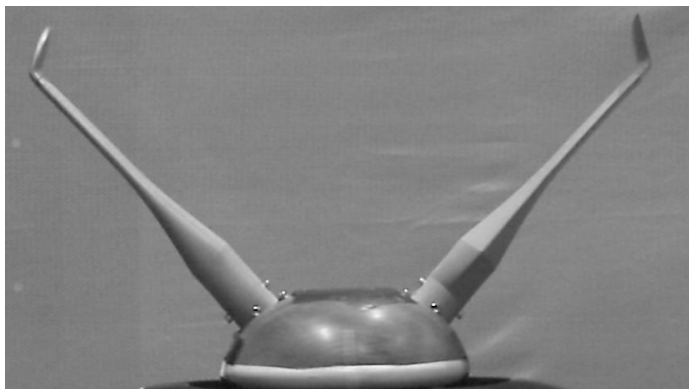
翼端板



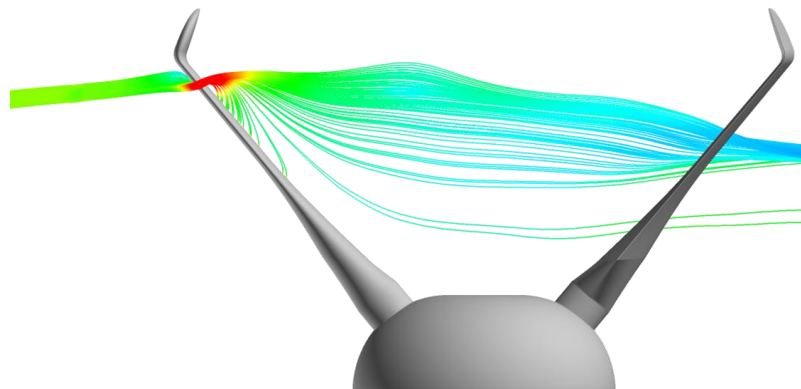
ウィングレット



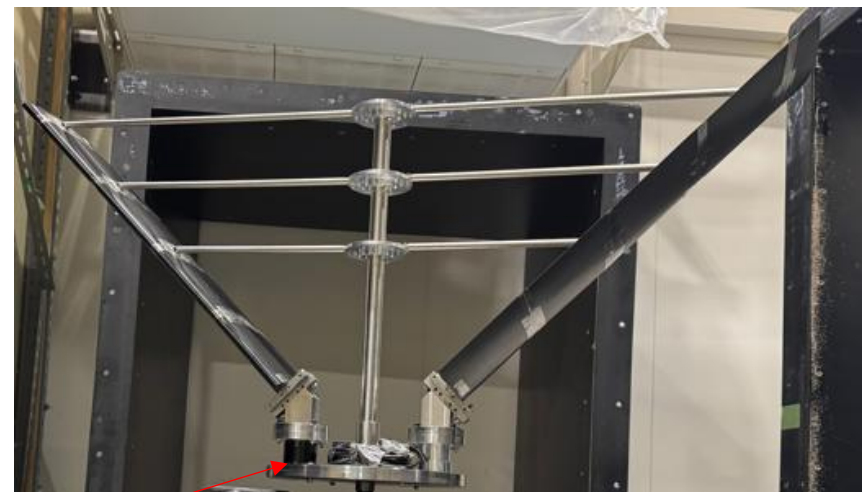
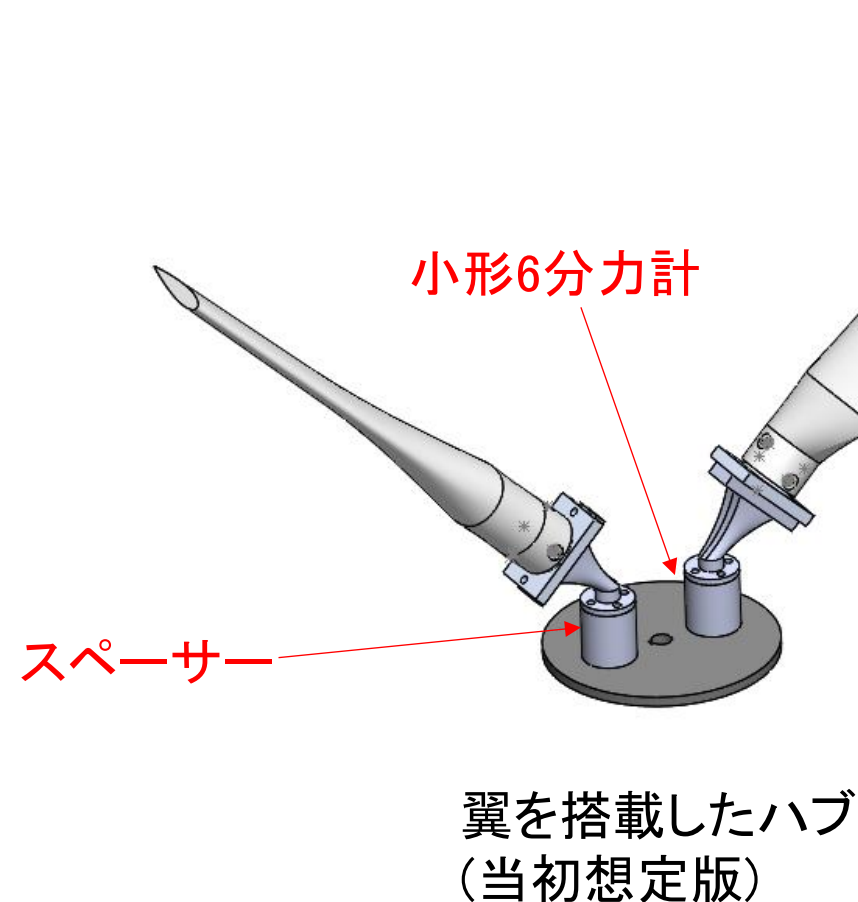
➤ 風洞実験



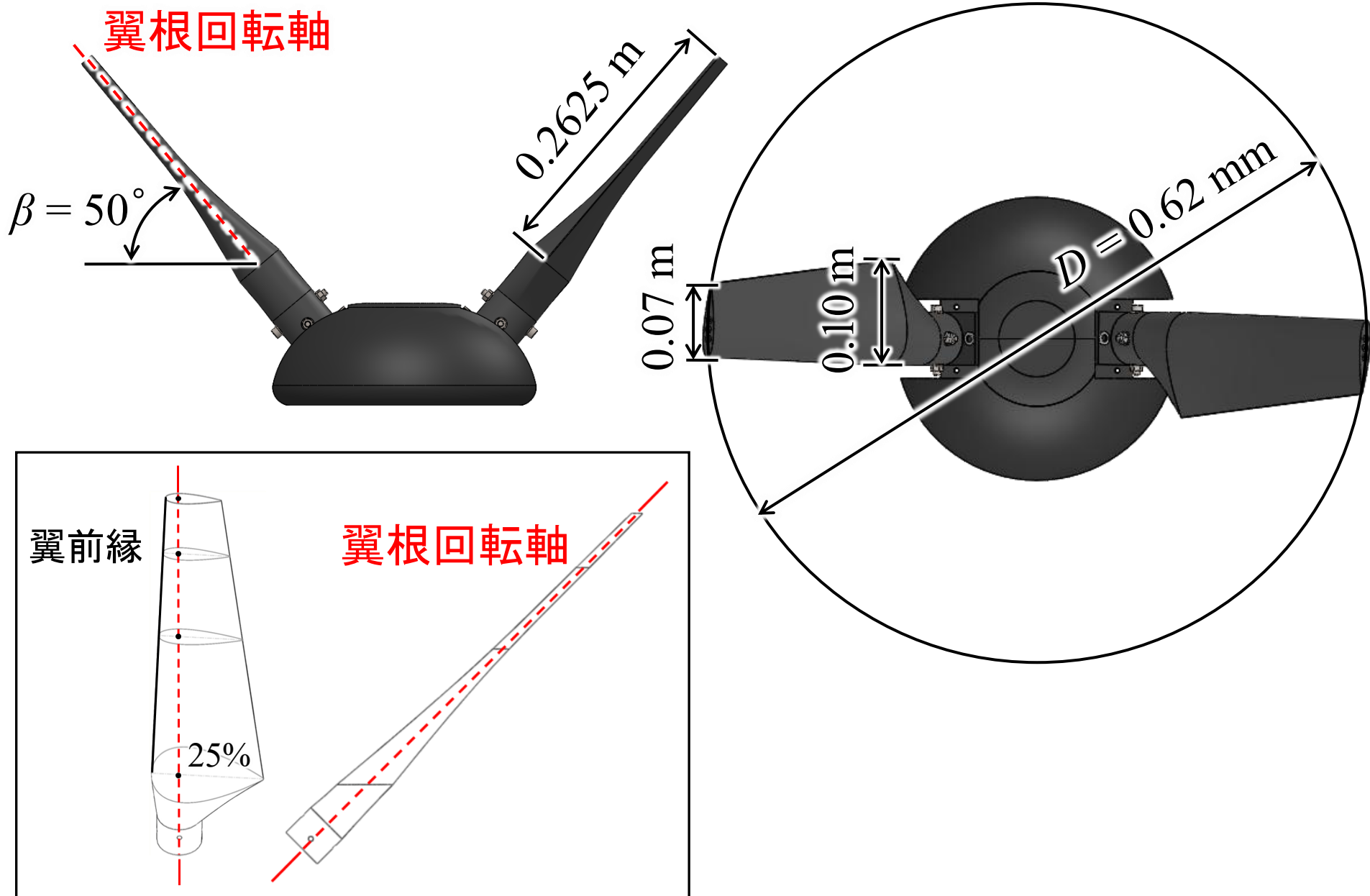
➤ 数値流体力学(CFD) 解析

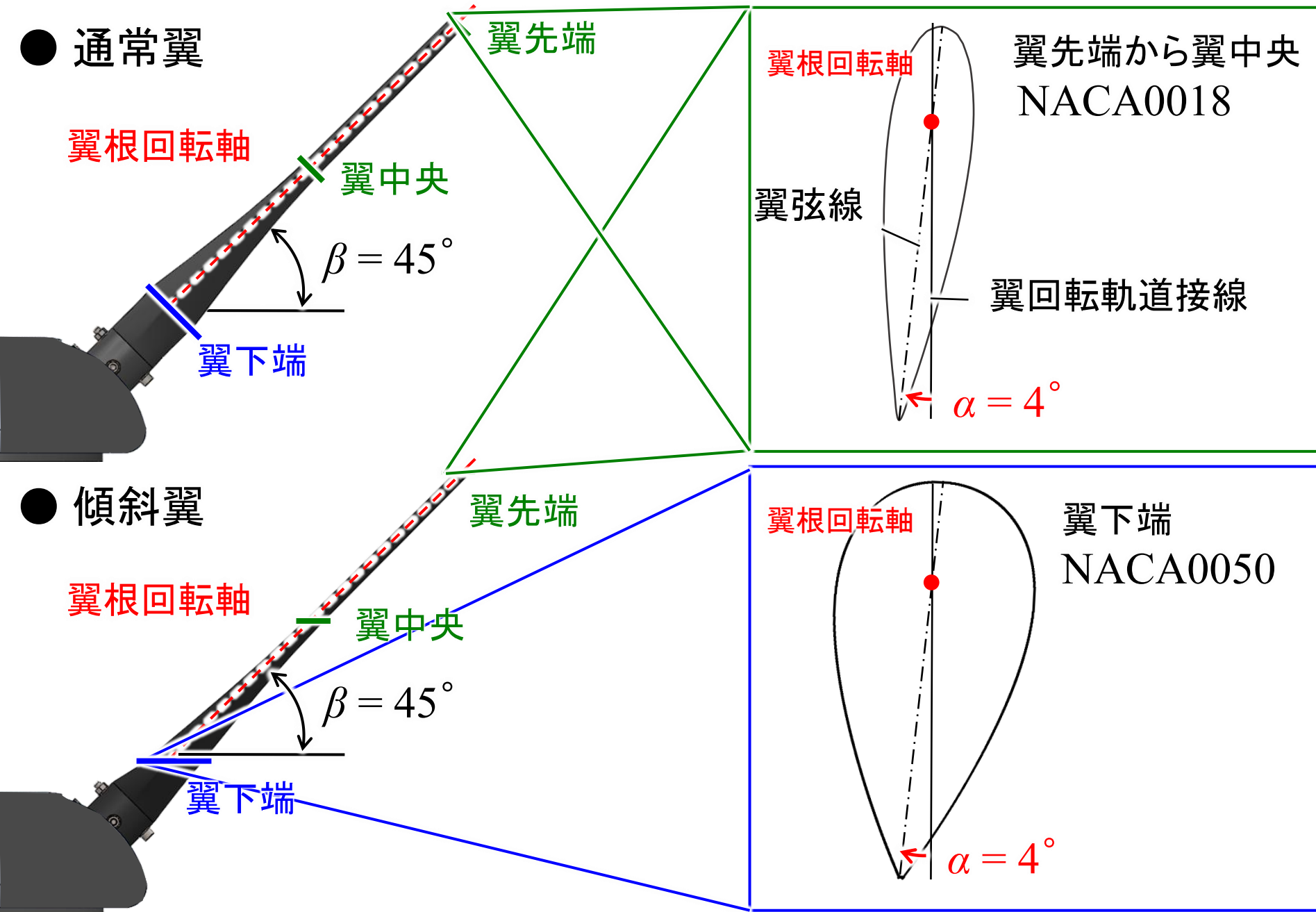


V形垂直軸風車の翼根部にかかる回転接線方向、ロータ半径方向、鉛直方向の荷重特性を調査



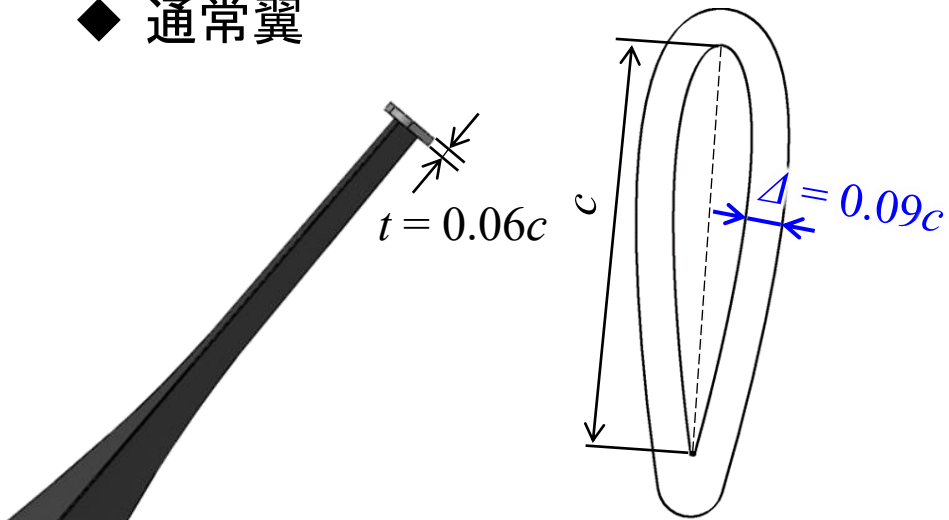
研究1



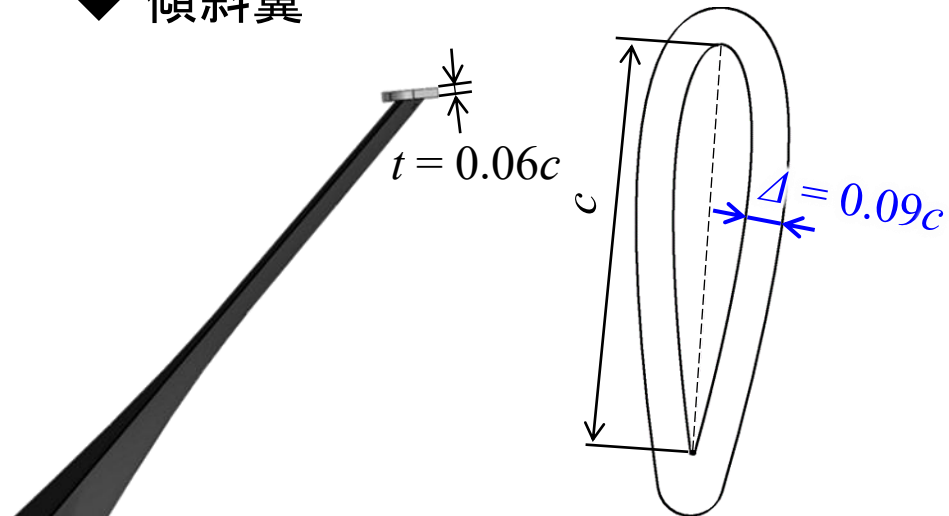


● EndPlate-0.09

◆ 通常翼

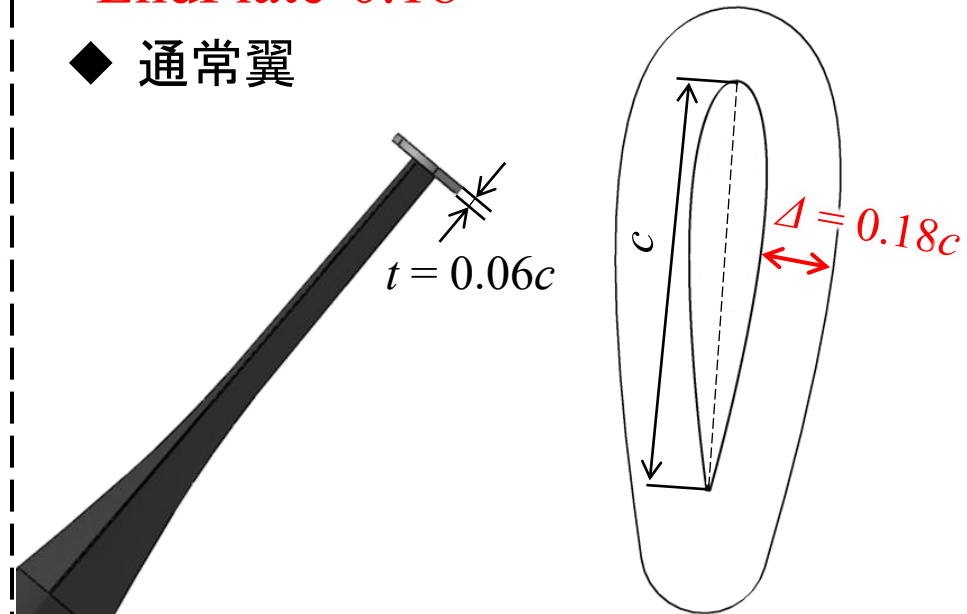


◆ 傾斜翼

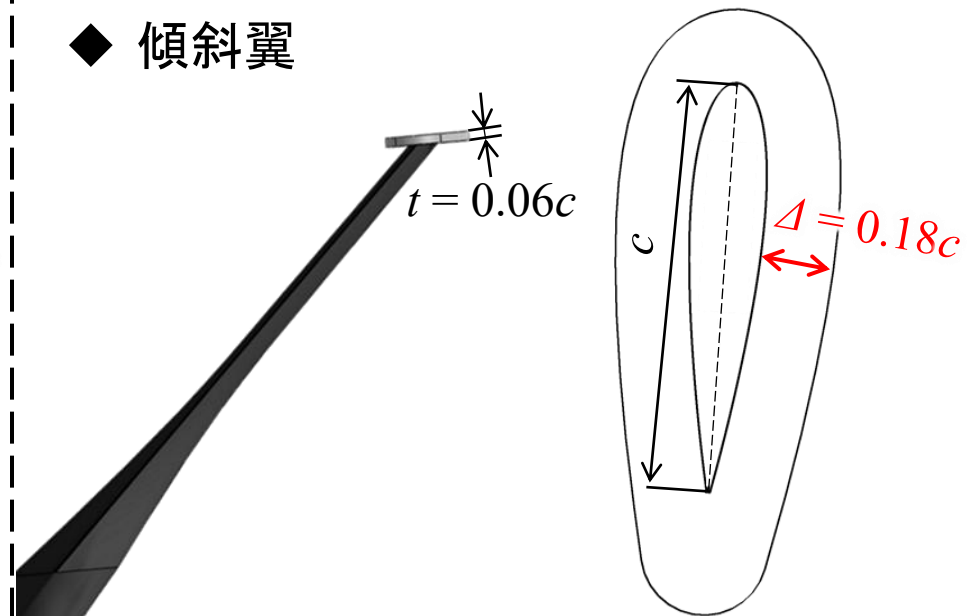


● EndPlate-0.18

◆ 通常翼

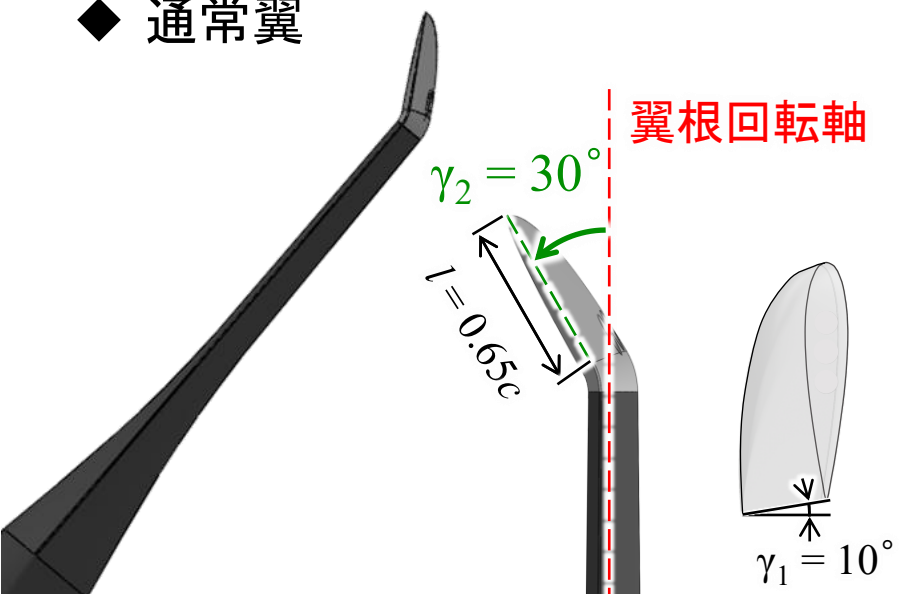


◆ 傾斜翼

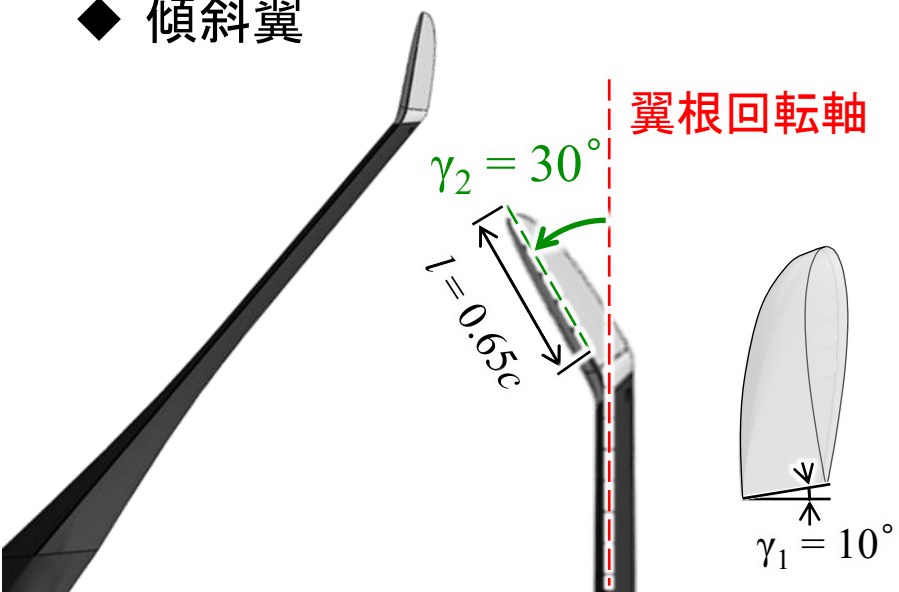


● Winglet-30

◆ 通常翼

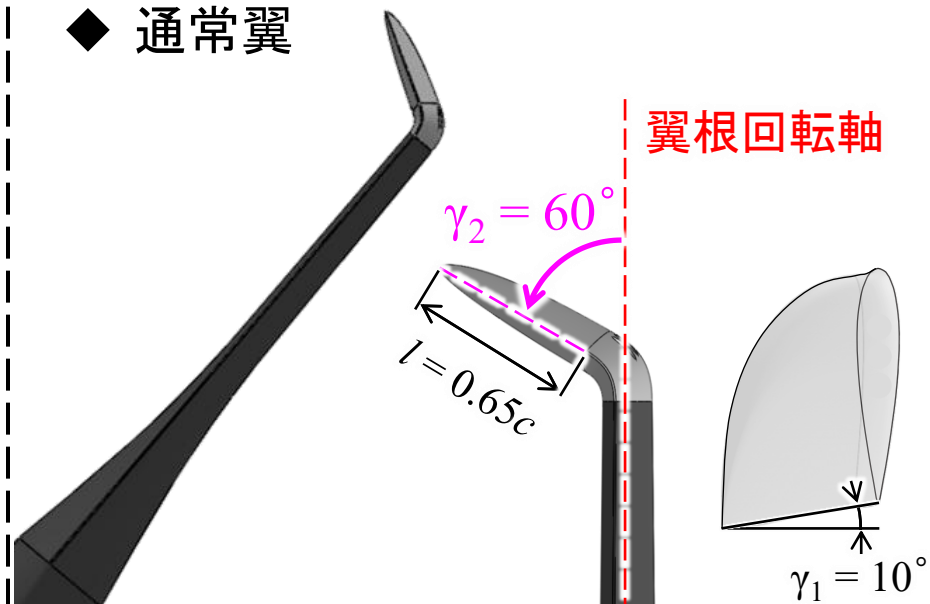


◆ 傾斜翼

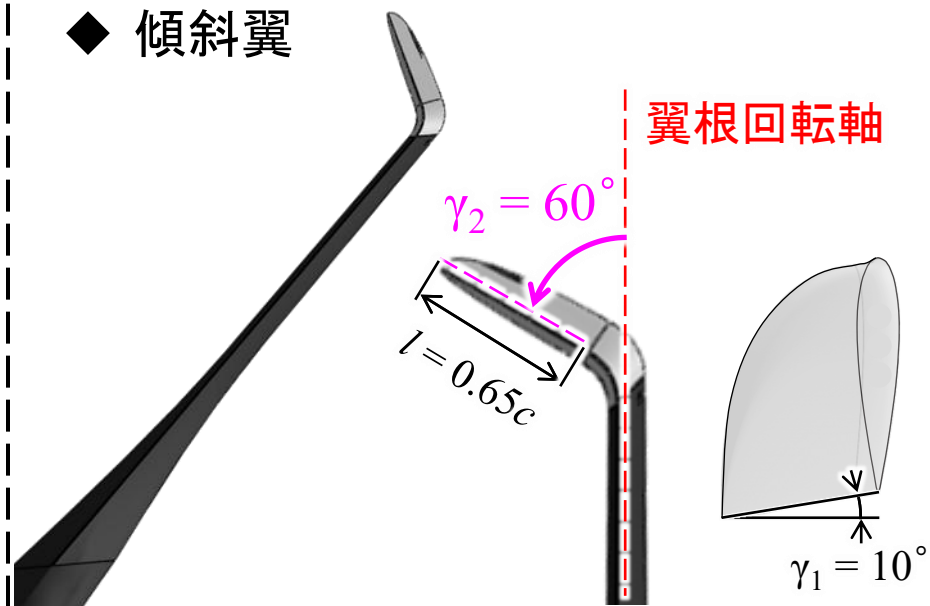


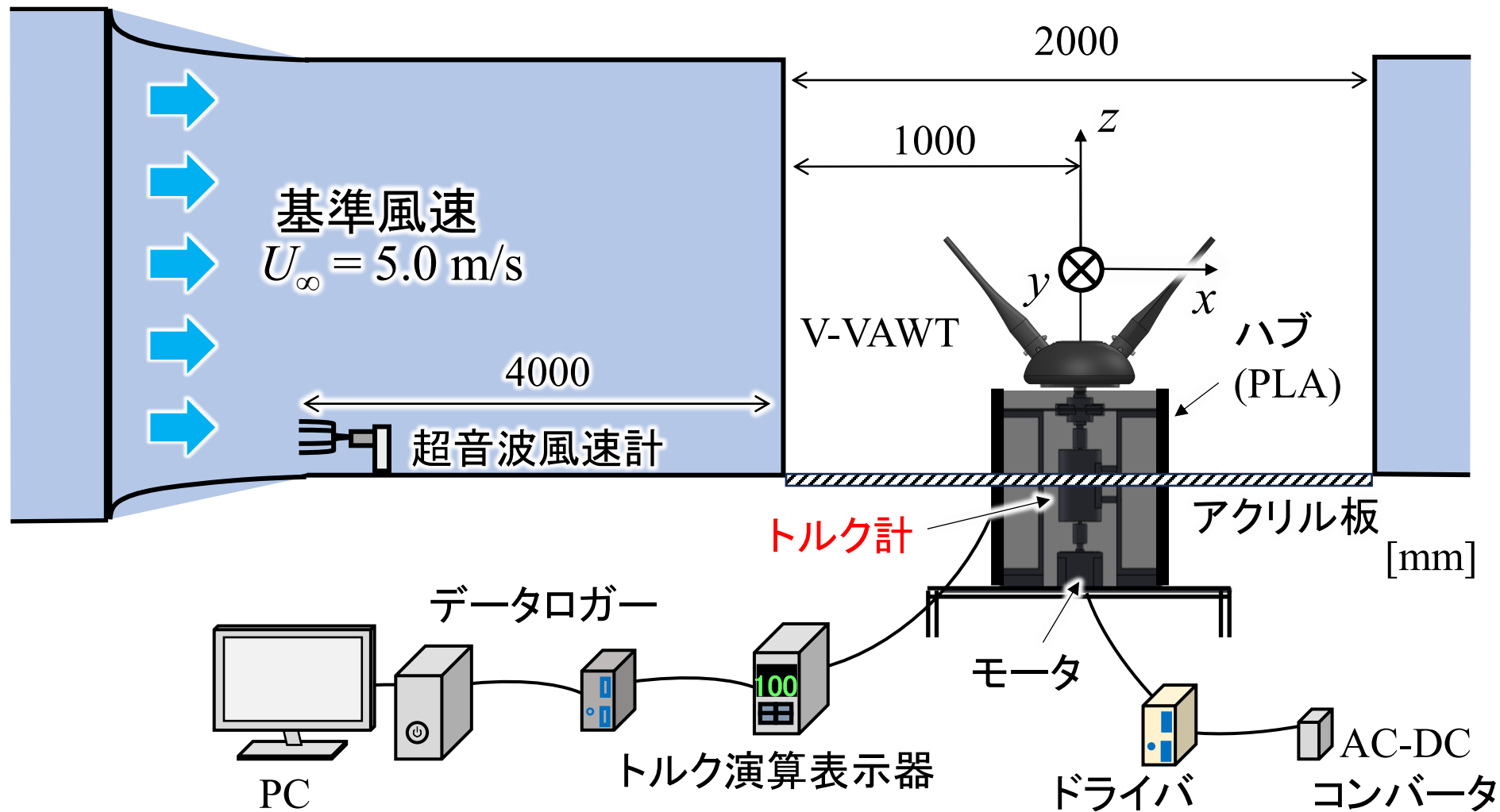
● Winglet-60

◆ 通常翼

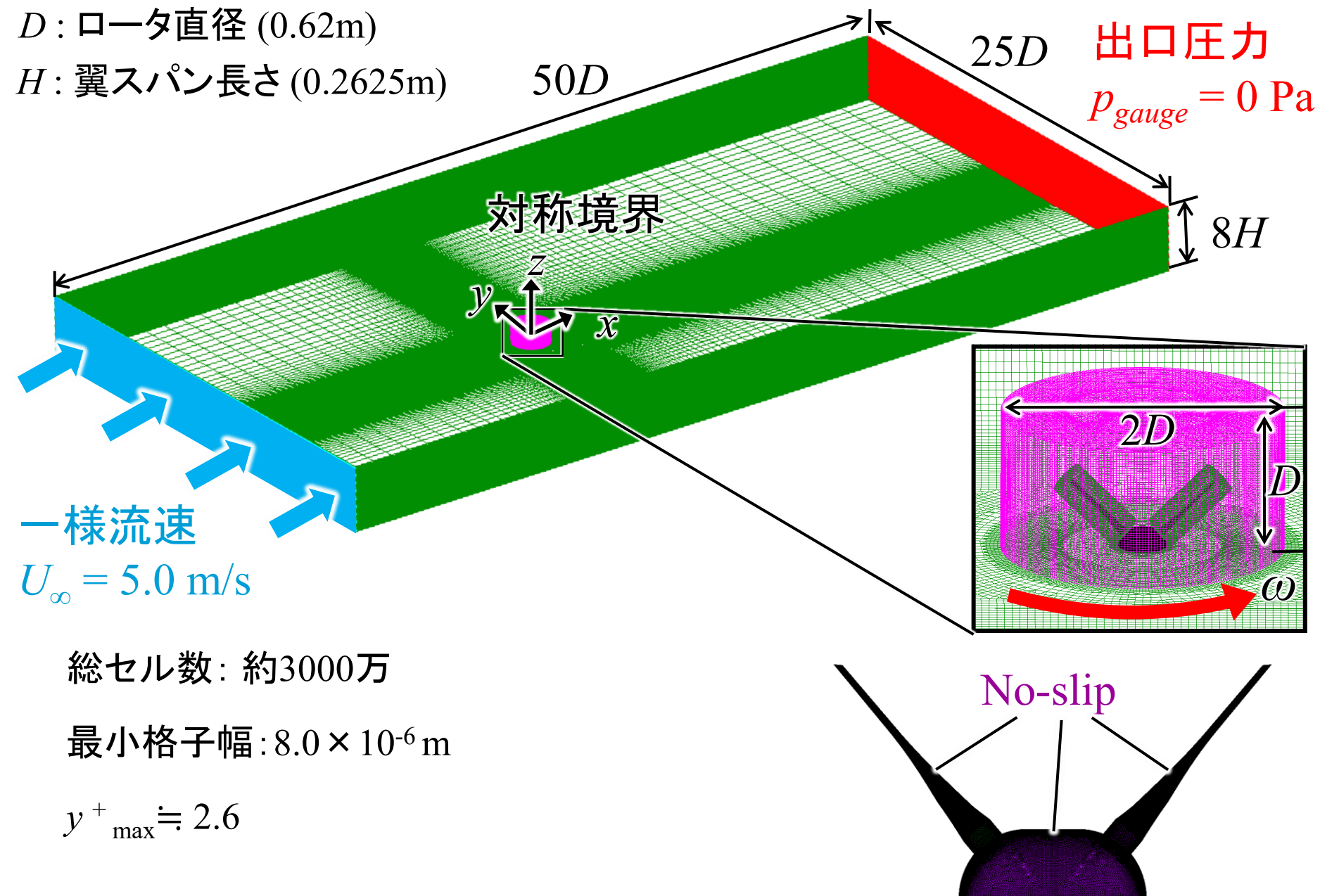


◆ 傾斜翼





サンプリング点数: 25,000 点 サンプリング周波数: 5 kHz
 測定回数: 角周速比 λ で 4 回 (λ 増加 : 2 回, λ 減少 : 2 回)



流れ場	3次元 非定常 非圧縮 粘性 空気 (15°C)
支配方程式	フィルター操作を施した $\left\{ \begin{array}{l} \text{連続の式} \\ \text{Navier-Stokes 方程式} \end{array} \right.$
空間離散化	対流項: LUST 法 (中心差分: 風上差分 = 3 : 1) その他の項: 二次精度中心差分
時間離散化	二次精度陰解法
乱流モデル	LES モデル (SGS モデル: WALE モデル)
圧力速度連成法	PIMPLE 法
解析ソフト	OpenFOAM v2206
時間刻み幅	0.05° 回転
解析時間	6回転分
周速比	$\lambda = 3.6$

● 出力係数

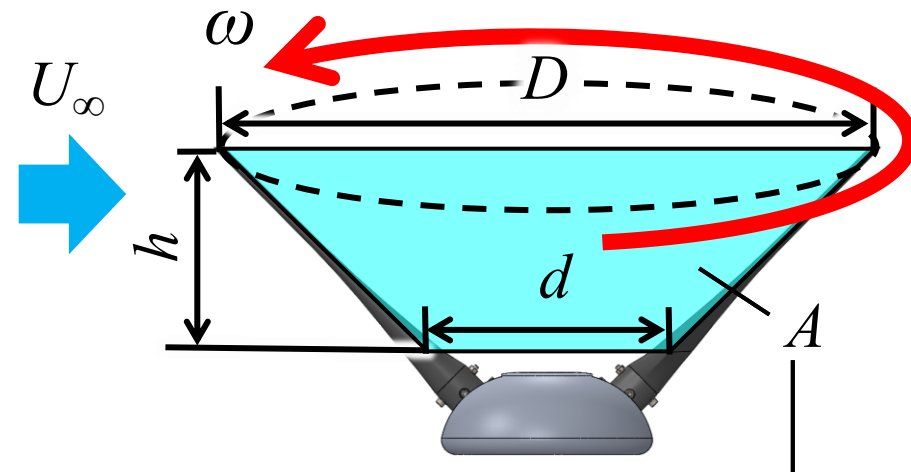
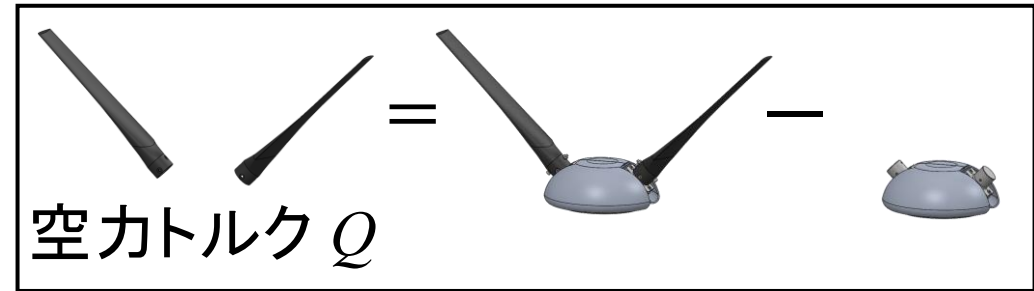
$$C_P = \frac{Q\omega}{0.5\rho AU_\infty^3}$$

・周速比

$$\lambda = \frac{0.5D\omega}{U_\infty}$$

● 翼一枚の空カトルク係数

$$C_{Qb1} = \frac{4Q_{b1}}{\rho AU_\infty^2 D}$$



$$A = \frac{(D+d)h}{2} = 0.090 \text{ m}^2$$

Q : 風車空カトルク [N・m]

ω : 角速度 [rad/s]

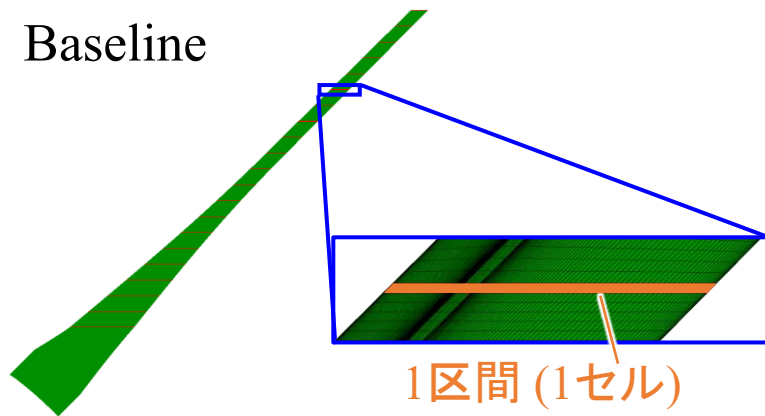
Q_{b1} : 翼一枚の空カトルク [N・m]

ρ : 空気密度 [kg/m³]

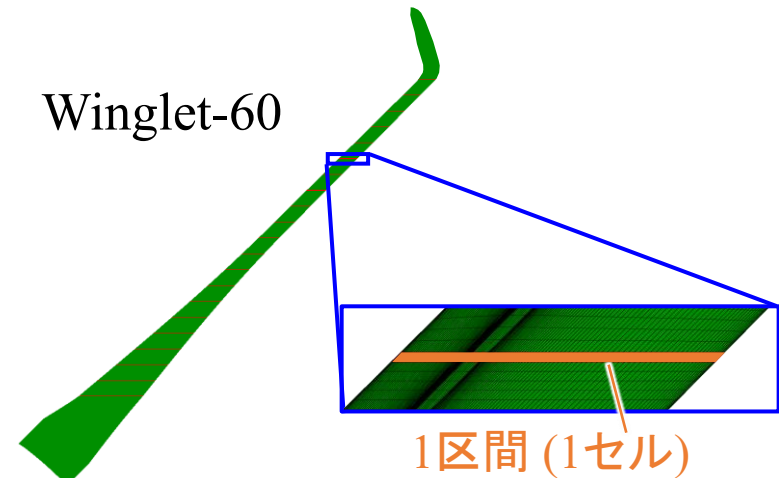
● 翼一枚の翼長方向1セル分の区間トルク係数

$$C_{Qb1_sec} = \frac{4Q_{b1_sec}}{\rho A U_{\infty}^2 D}$$

Baseline

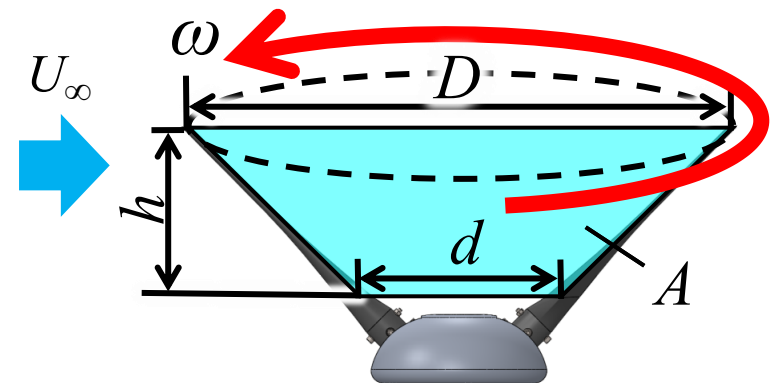


Winglet-60



● 圧力係数

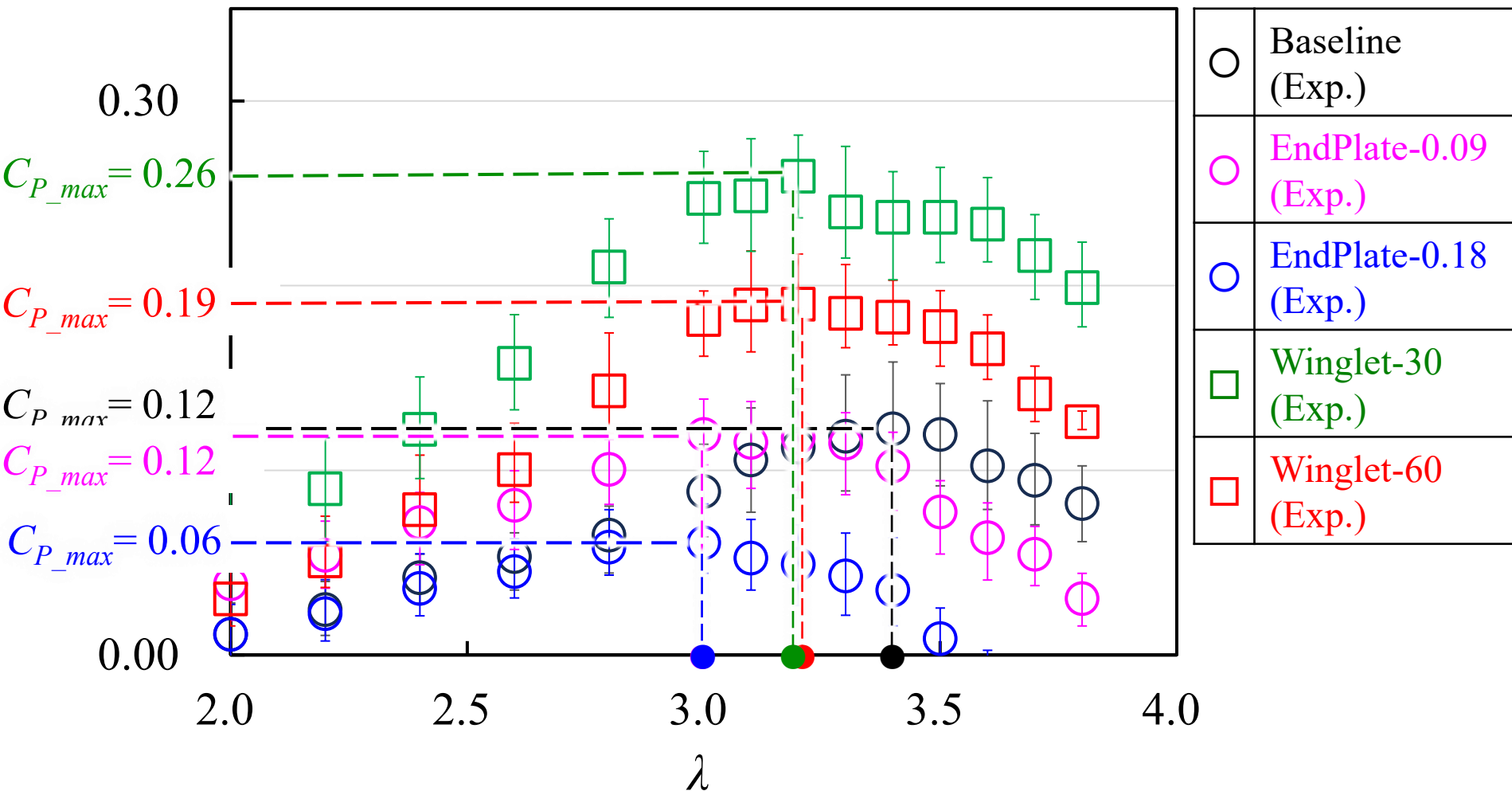
$$C_p = \frac{2p}{\rho U_{\infty}^2}$$



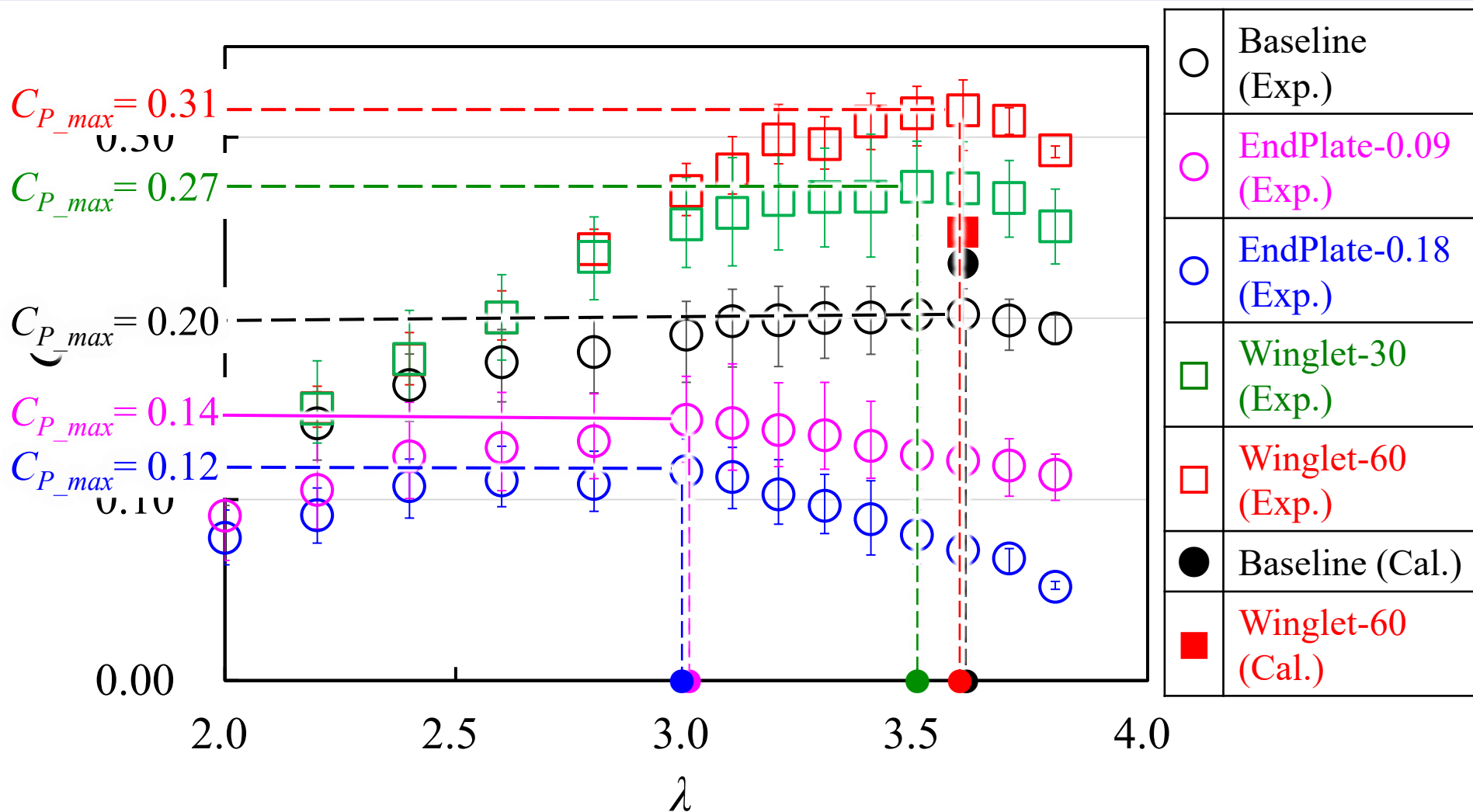
p : ゲージ圧 [Pa]

ρ : 空気密度 [kg/m^3]

Q_{b1_sec} : 翼一枚の翼長方向1セル分の区間にかかるトルク [$\text{N} \cdot \text{m}$]

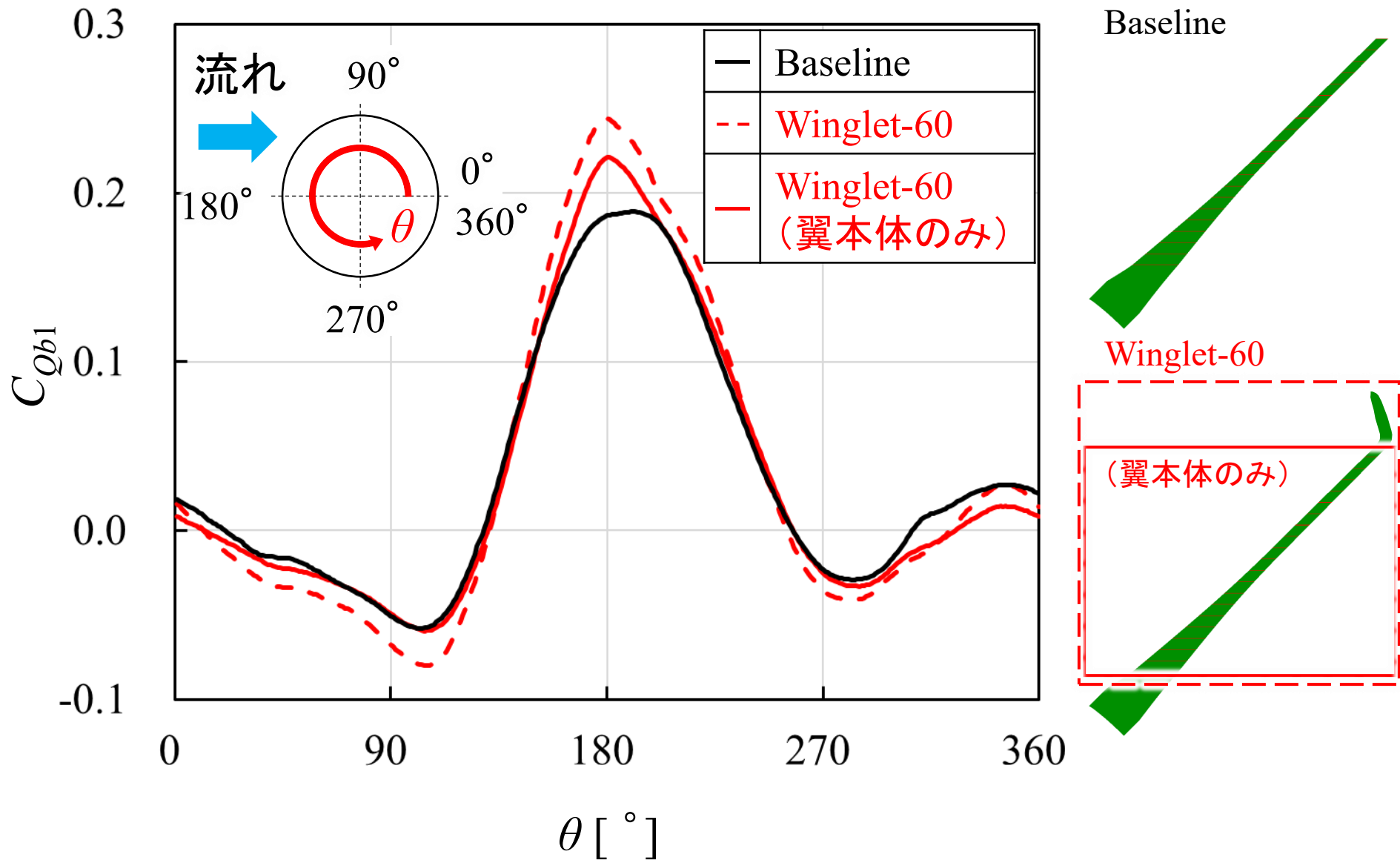


- 翼端板, ウィングレットを付加することで, 最適周速比が低下
- EndPlate-0.18を付加すると, C_{P_max} が大きく低下
- Winglet-30, Winglet-60 を付加すると, C_{P_max} が大きく増加



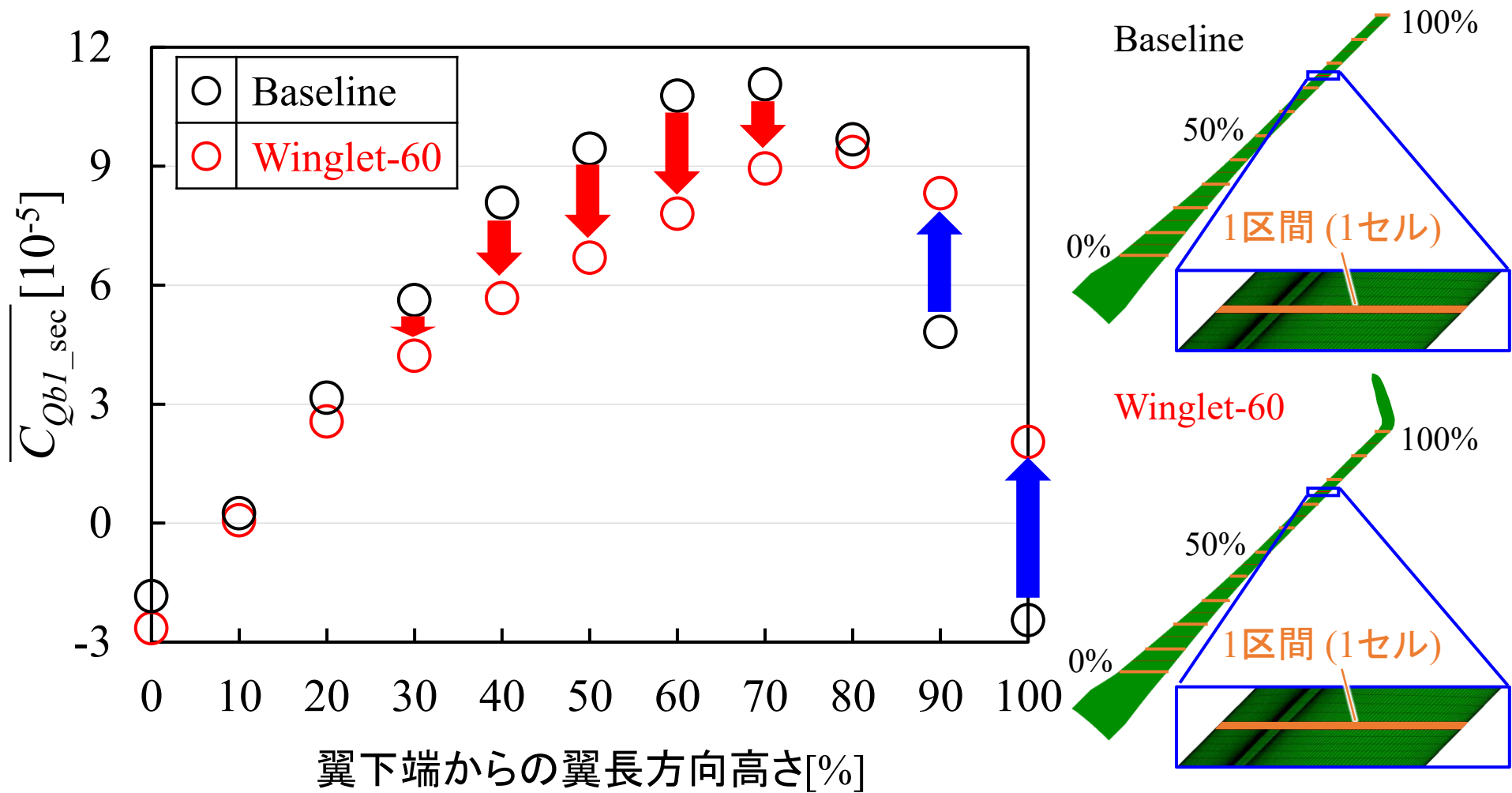
- 翼端板, ウィングレットを付加することで, 最適周速比が低下
- EndPlate-0.09, EndPlate-0.18 を付加すると, C_{P_max} が大きく低下
- Winglet-30, Winglet-60 を付加すると, C_{P_max} が大きく増加

翼一枚のトルク係数(C_{Qb1})とアジマス角の関係【CFD結果】₂₂



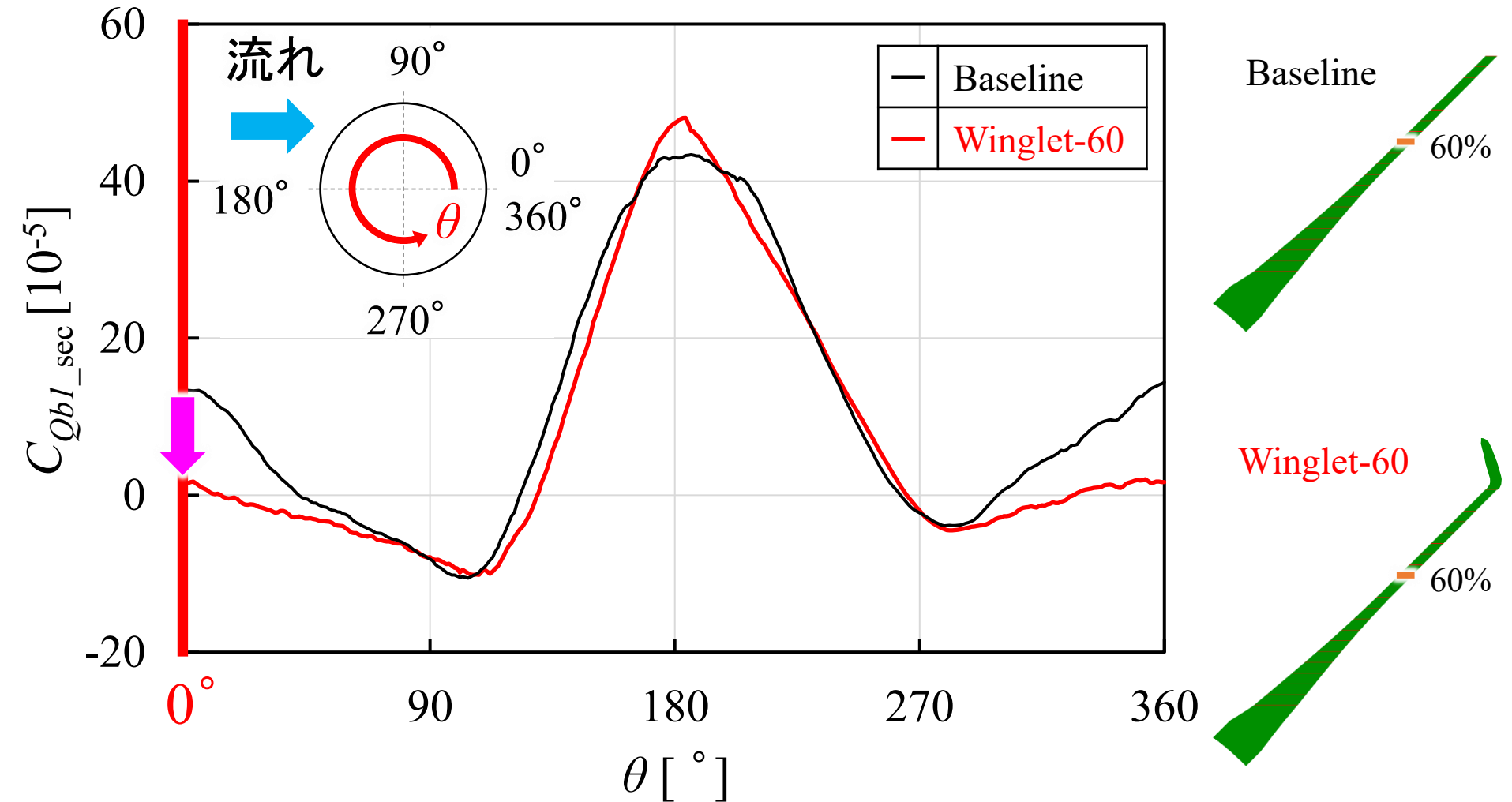
$\theta = 180^\circ$ 付近で, ウィングレットを付加することでトルク係数が顕著に増加

各翼長方向高さの平均トルク係数($\overline{C_{Qbl_sec}}$) 【CFD結果】 23



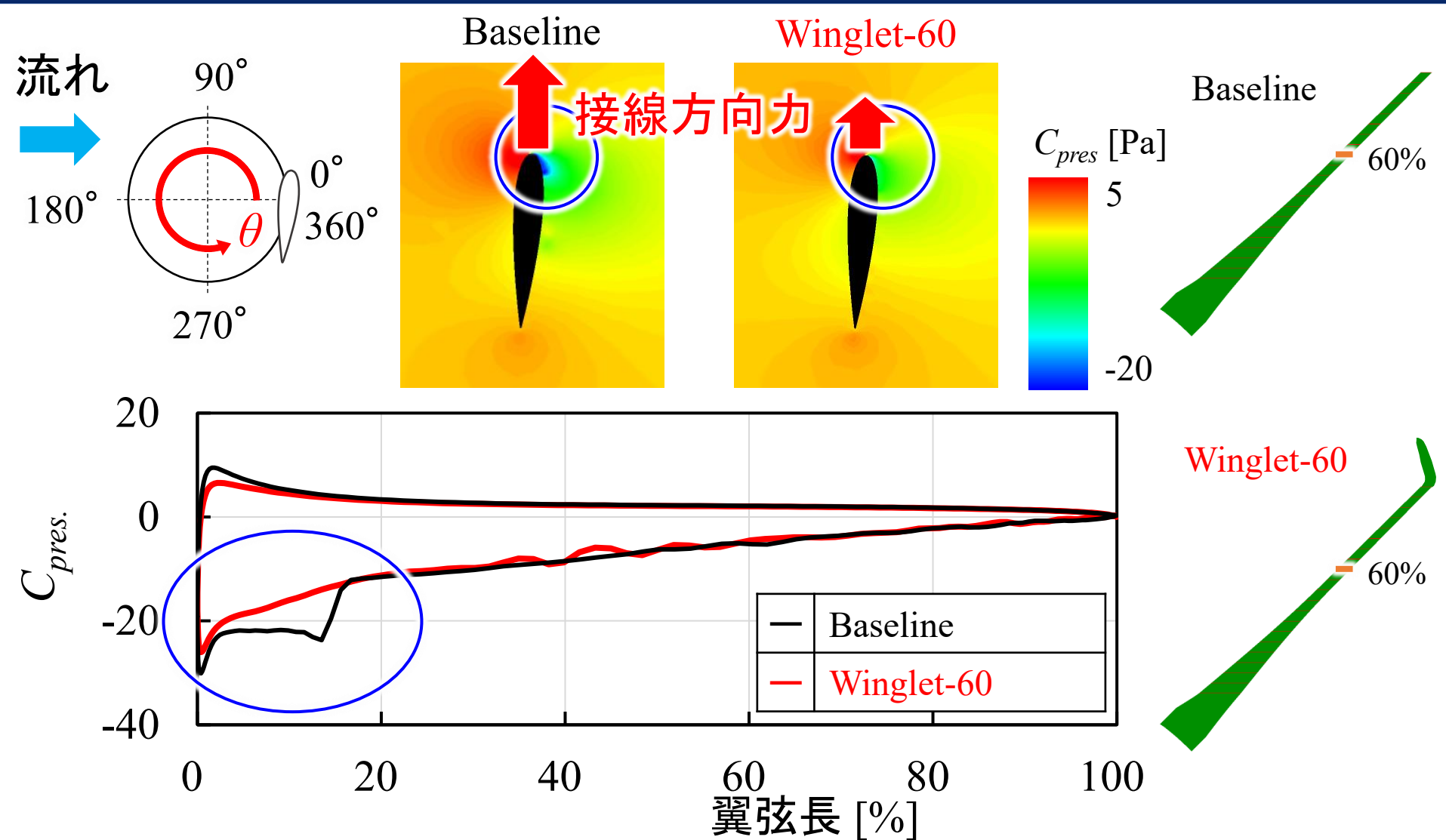
ウィングレットを付加することで、翼長0～80%高さで $\overline{C_{Qbl_sec}}$ が**低下**

ウィングレットを付加することで、翼長90%および100%高さで $\overline{C_{Qbl_sec}}$ が**増加**

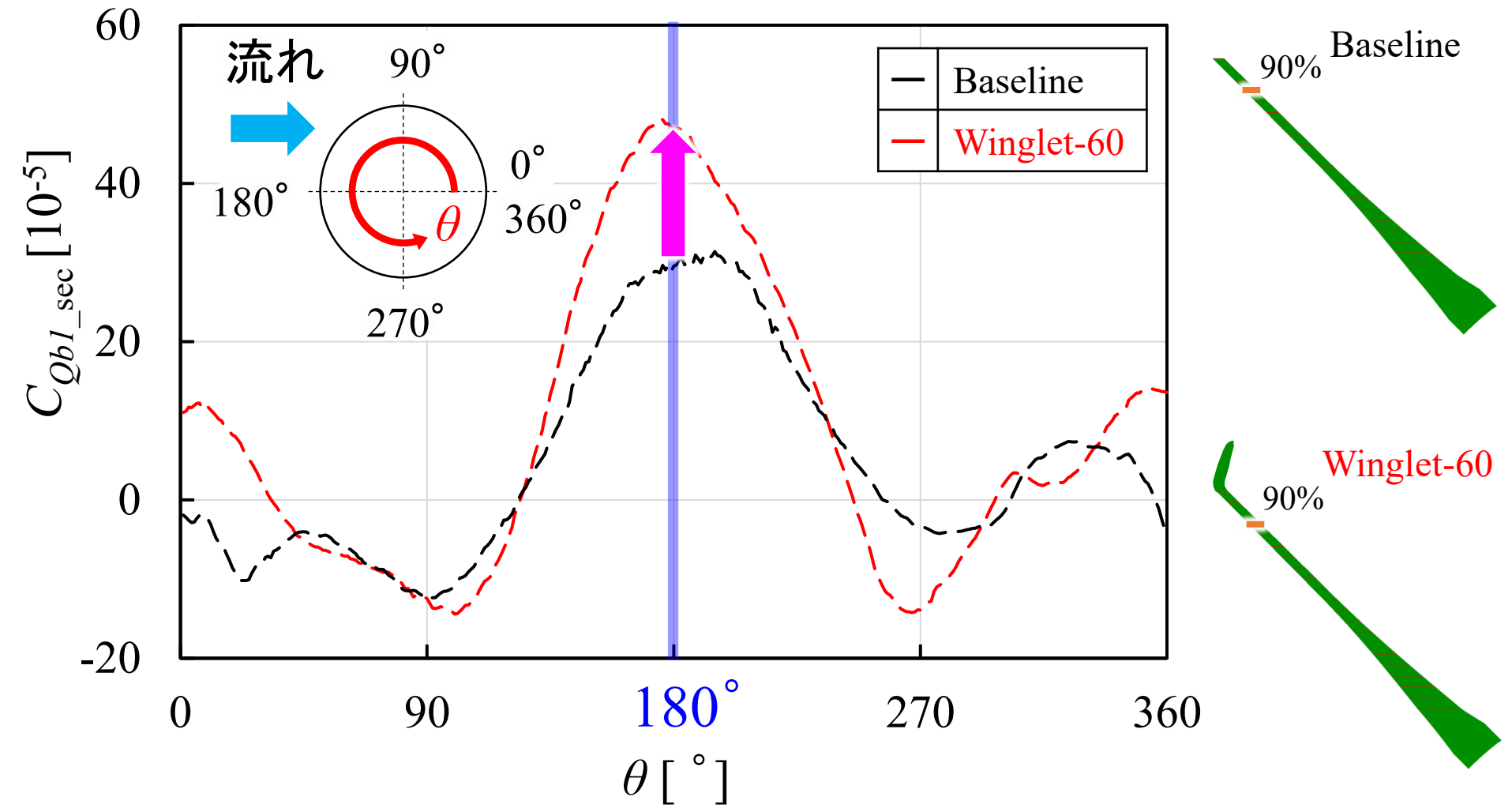


ウィングレットを付加することで, $\theta = 0^\circ \sim 70^\circ$, $300^\circ \sim 360^\circ$ 付近において

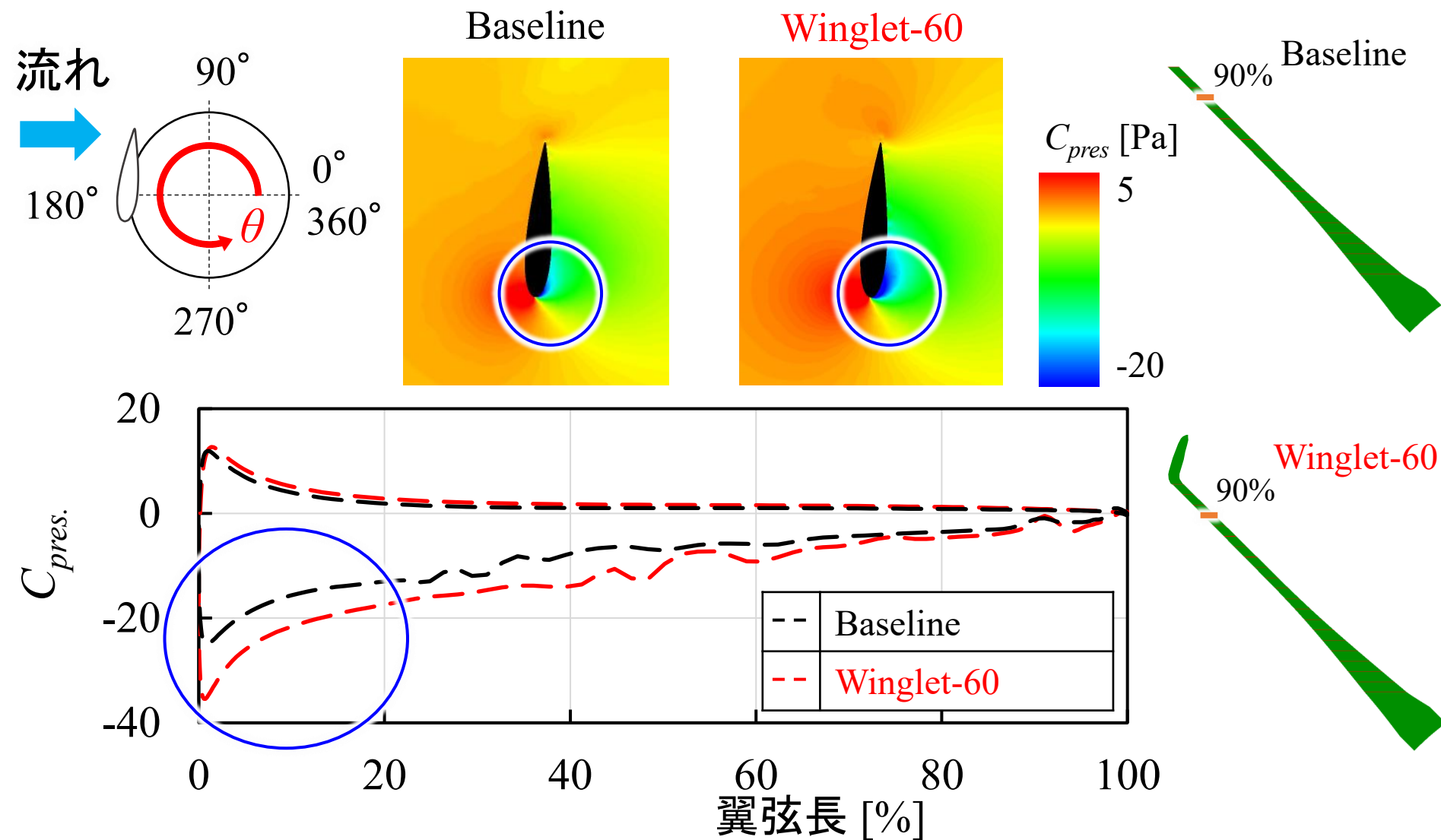
C_{Qbl_sec} が顕著に低下



ウィングレットを付加することで、翼前縁付近の**負圧の絶対値が低下**
→ 翼長60%高さにおいて、 $\theta = 0^\circ$ 付近で C_{Qbl_sec} が顕著に低下

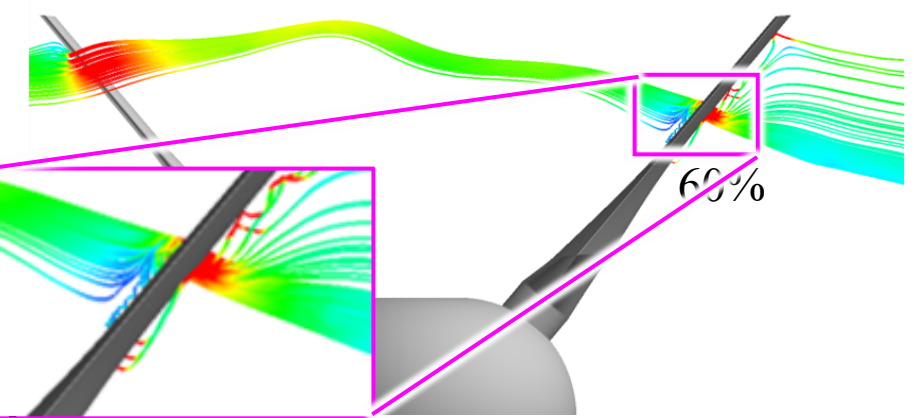
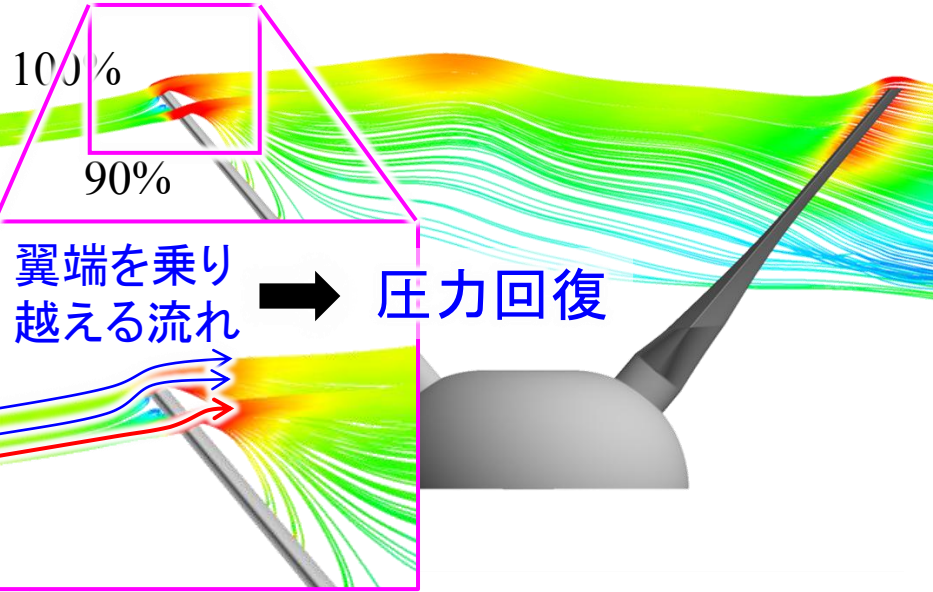
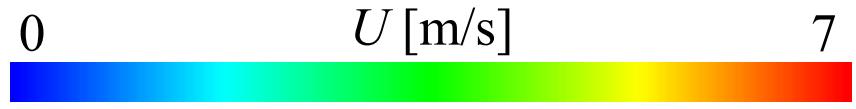


ウィングレットを付加することで, $\theta = 180^\circ$ 付近において C_{Qbl_sec} が **顕著に増加**

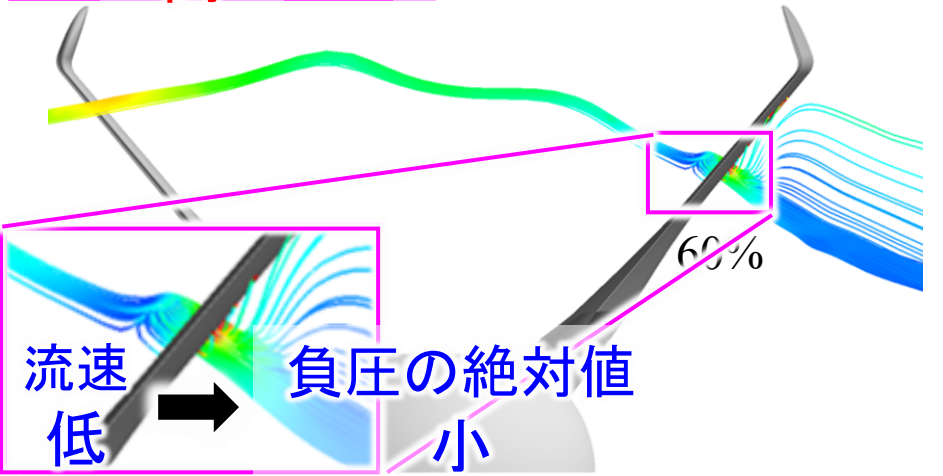
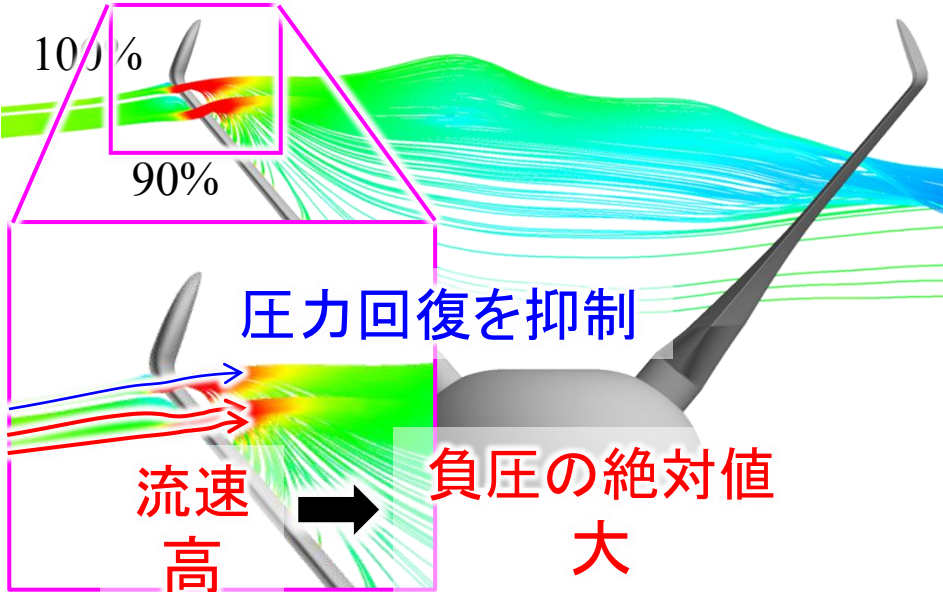
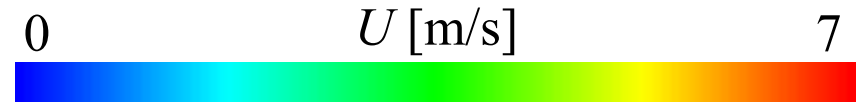


ウィングレットを付加することで、翼前縁付近の**負圧の絶対値が顕著に増加**
→ 翼長90%高さにおいて、 $\theta = 180^\circ$ 付近で C_{Qbl_sec} が顕著に増加

Baseline



Winglet-60



➤ 翼端板の影響

- 翼端板を付加することで、最適周速比が低下
- 翼端板を付加することで、最大出力係数が低下

➤ ウィングレットの影響

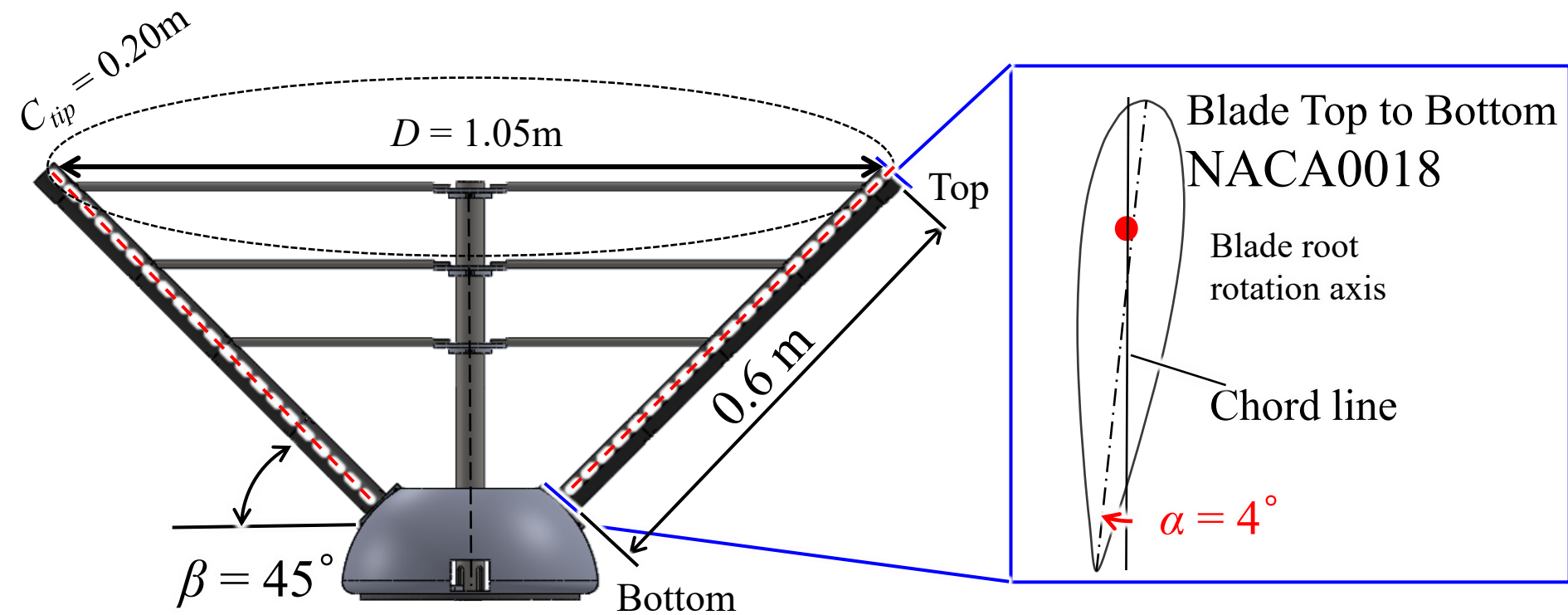
- ウィングレットを付加することで、最適周速比が低下
- ウィングレットを付加することで、最大出力係数が増加
- 翼一枚のトルク係数は、ウィングレットを付加することで、最風上のアジマス角で顕著に増加

翼端板

ウィングレット



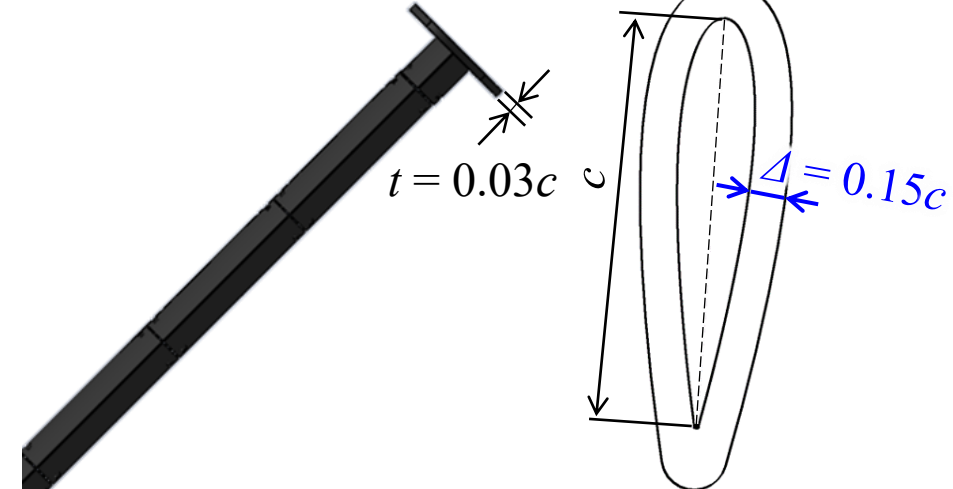
研究2



● Baseline



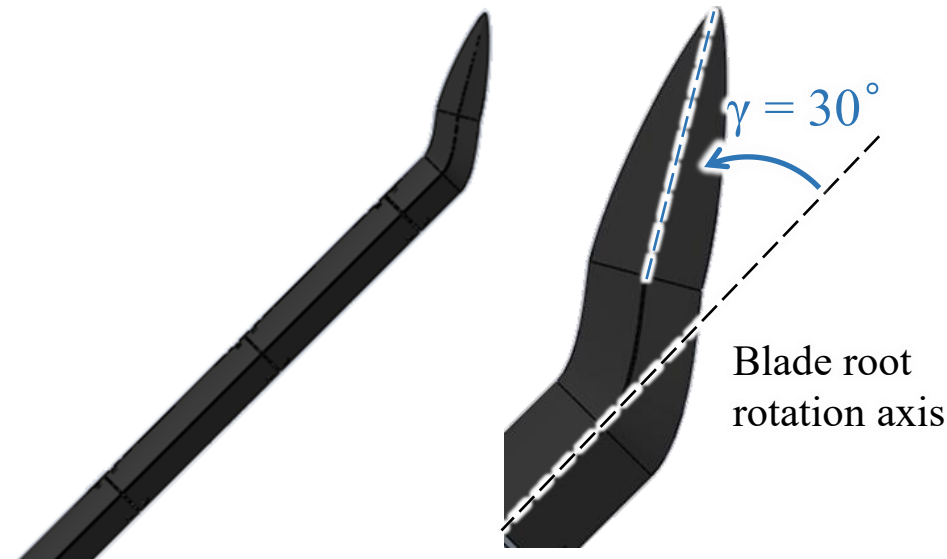
● EndPlate-0.15

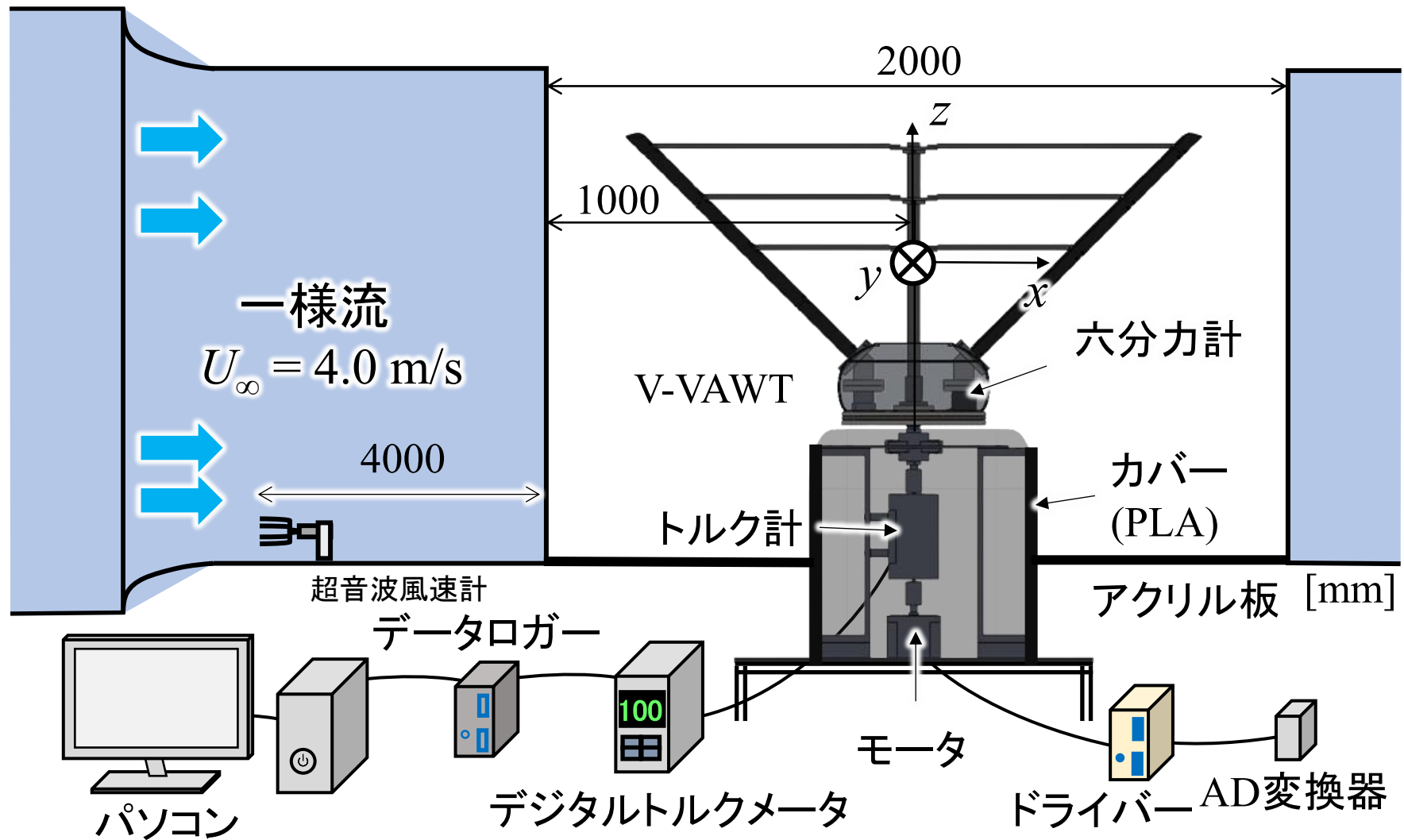


● Winglet-0

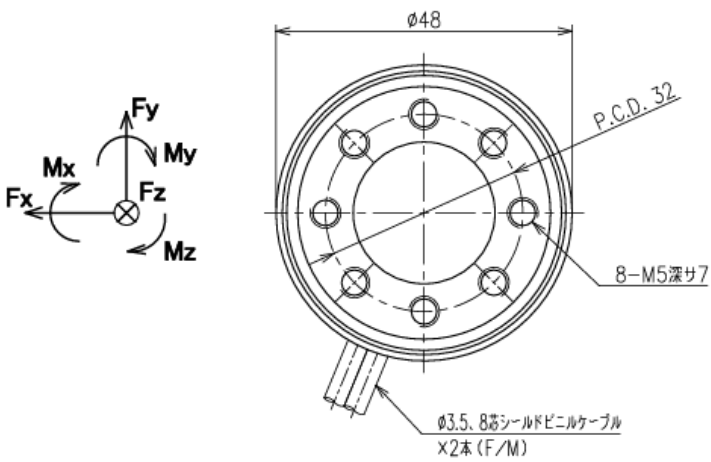


● Winglet-30

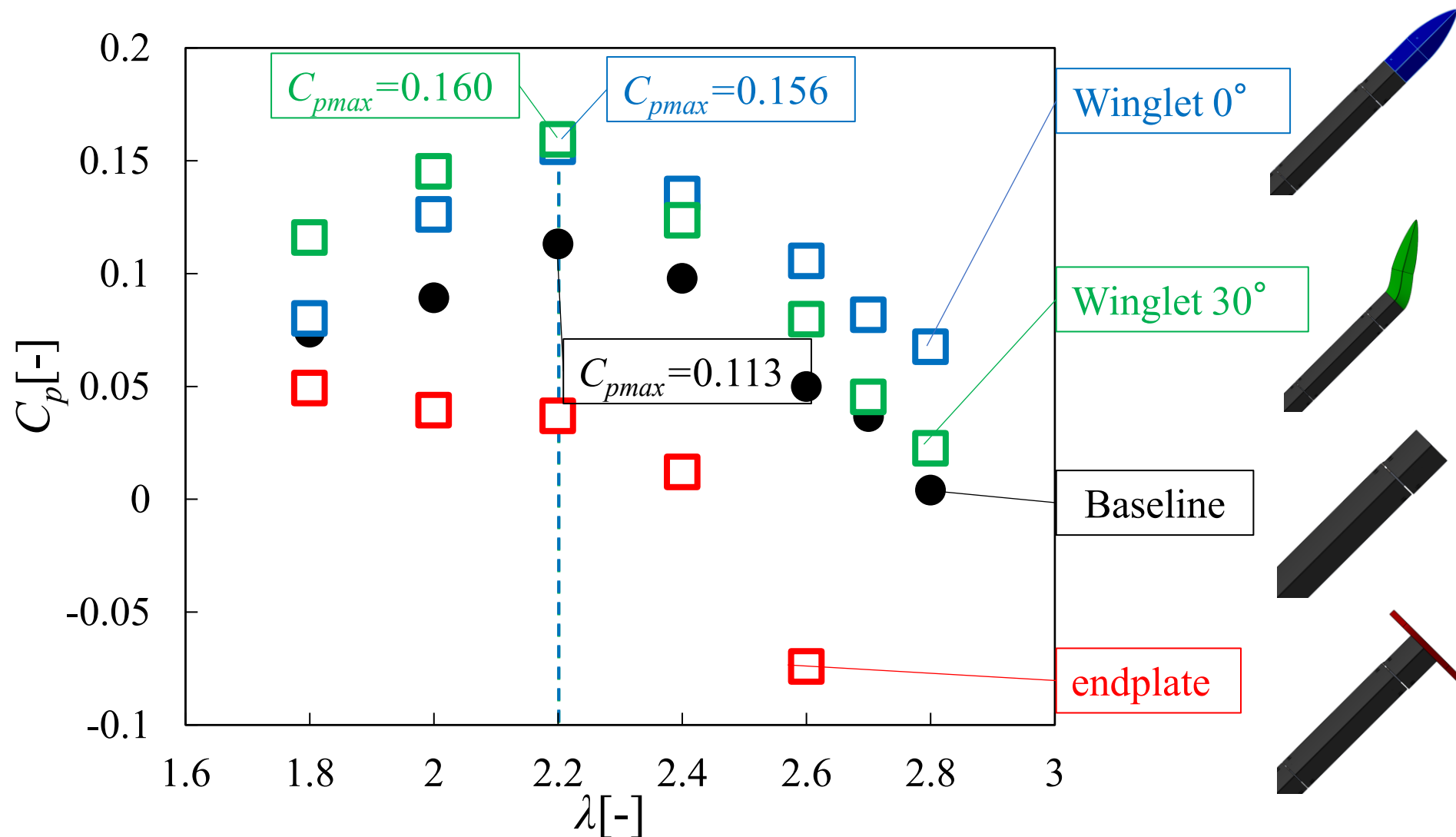




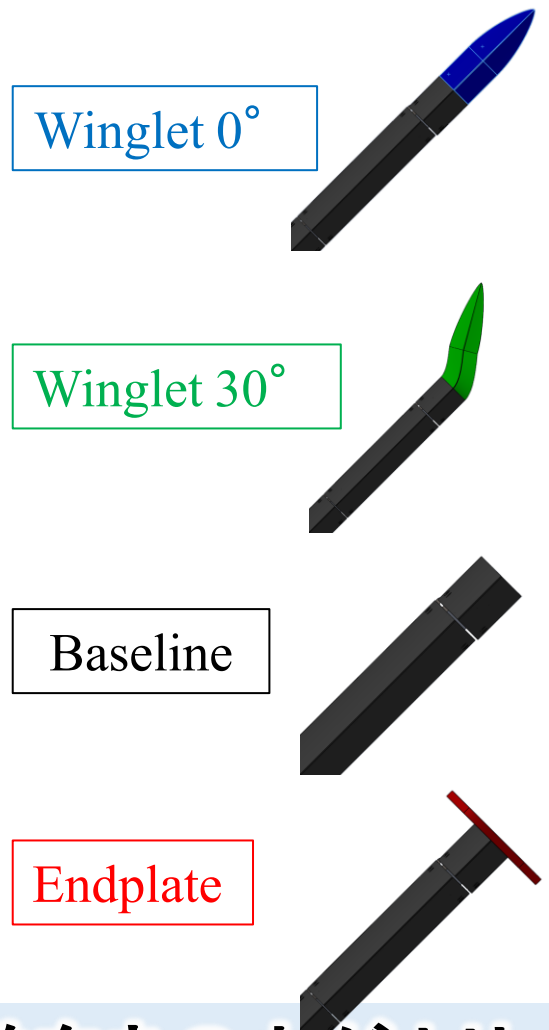
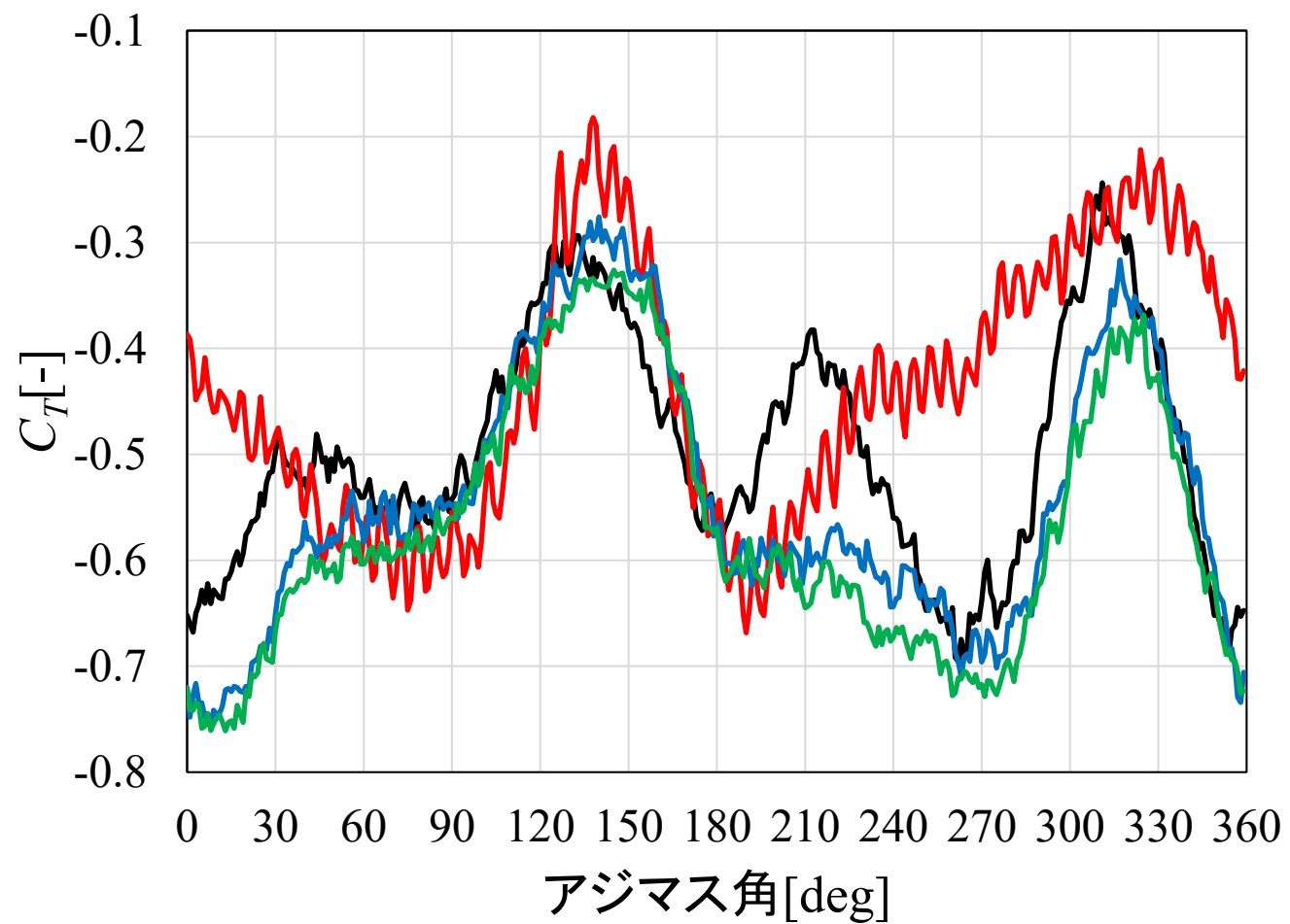
【荷重測定】 回数 : 2 (up : 1, down : 1)
 サンプルング点数 : 5,000 サンプルング周波数: 1 kHz



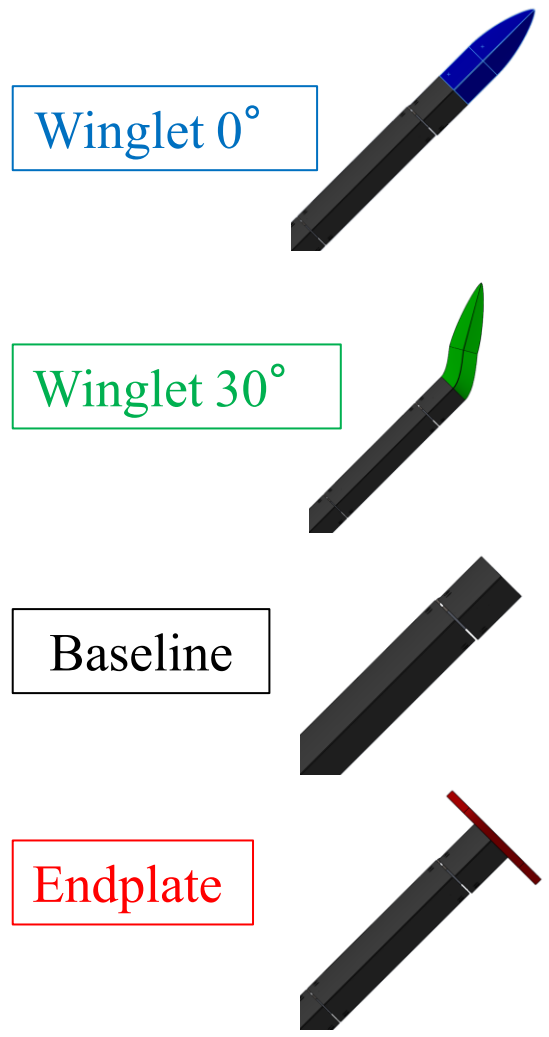
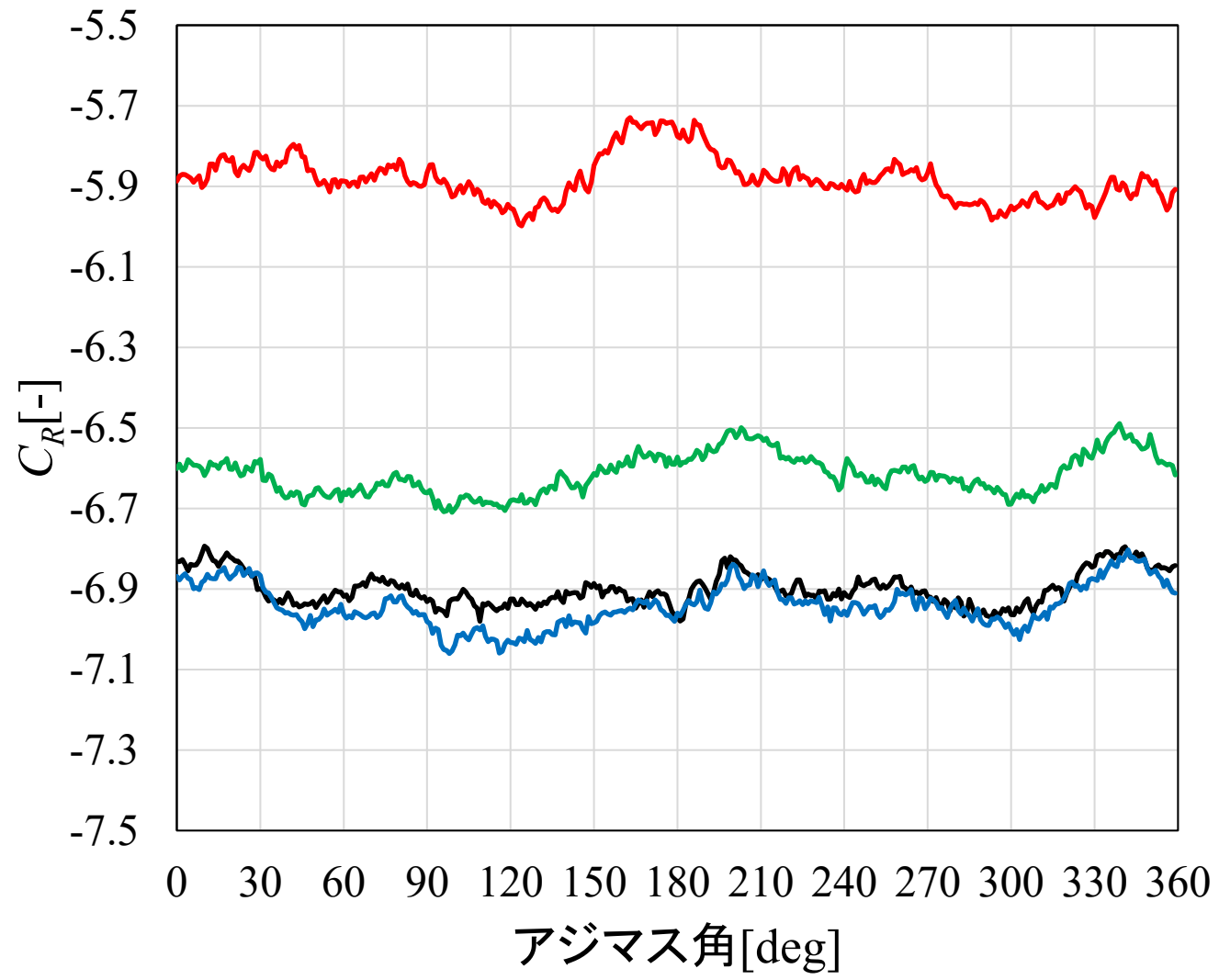
品名	6分力ロードセル
型式	TL6F04-5KN
定格容量	
Fx, Fy	±2500kN
Fz	+5000N
Mx, My	±70N・m
Mz	±70N・m
定格出力	
Fx, Fy	±2.0mV/V (±4000με) 程度
Fz	±0.9mV/V (±1800με) 程度
Mx, My	±1.2mV/V (±2400με) 程度
Mz	±2.0mV/V (±4000με) 程度
許容過負荷	130%



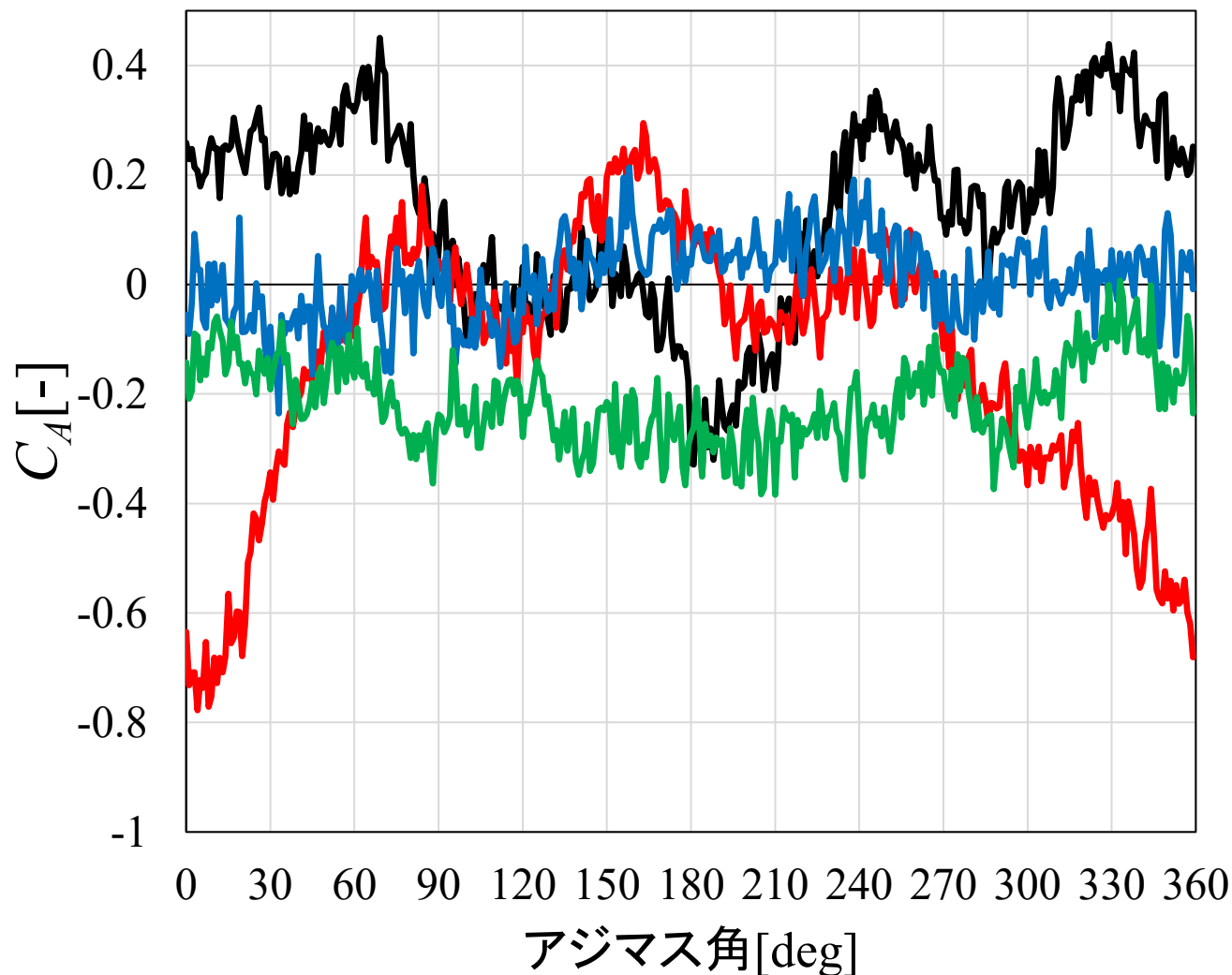
Baselineと比べて、**Winglet**を付加することで
最大出力係数が増加



Wingletを付加すると、翼の進行方向とは逆向きの力がより大きくかかり、**Endplate**を付加すると、翼の進行方向とは逆向きの力が低減



Endplateの場合，半径方向の荷重が低下



Winglet 0°

Winglet 30°

Baseline

Endplate

Wingletを付加することで鉛直上向きが増加する傾向

➤ 翼端板の影響

- 翼の進行方向と逆向きの力が低減
- 半径方向の荷重が低減

➤ ウィングレットの影響

- 翼の進行方向の力がより増加
- 鉛直上向きが増加

※翼端に何も付加しない状態で、翼根部に翼進行方向と逆向きの荷重がかかっていることから、アームに翼進行方向の荷重がかかていると考えられる。

※アームが無い状態では、風車回転中に翼進行方向に荷重がかかることを確認している。

ご清聴ありがとうございました.