

デジタルエンジニアリング演習 流体CAE演習(1)

2018年9月28日(金)

担当:

泉聡志, 杵淵郁也, 長藤圭介, 波田野明日可, 井ノ上泰輝,
吉本勇太, 高本聡, 石川明克, 中根茂, 諸山稔員, 市川保正

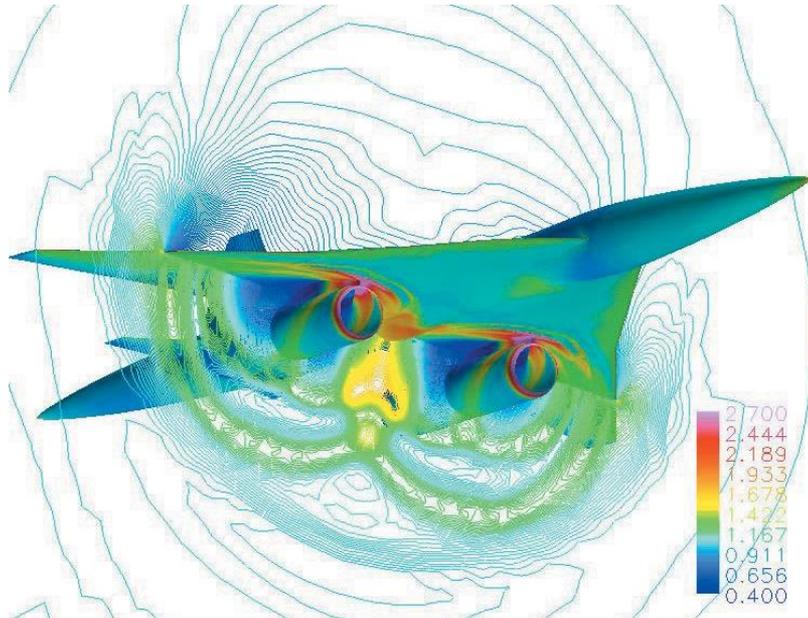
13:00～13:30 教職員・TA紹介, 流体CAE演習全体説明

13:30～16:40 各自自習

- 15:00頃 迎角 10° の計算結果チェック
- ～16:40 10° 以外の迎角2種類の結果チェック

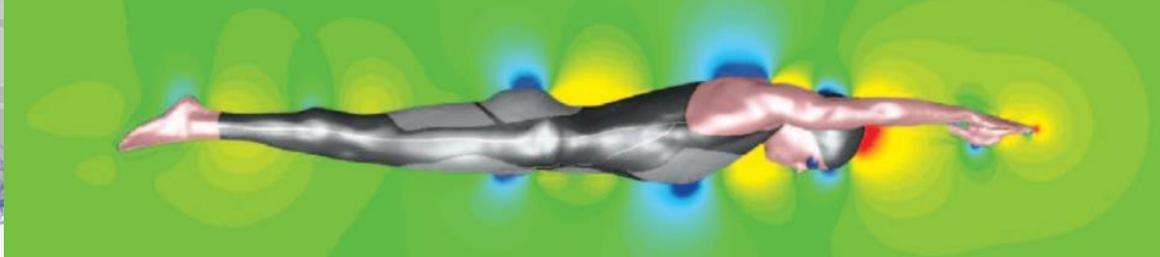
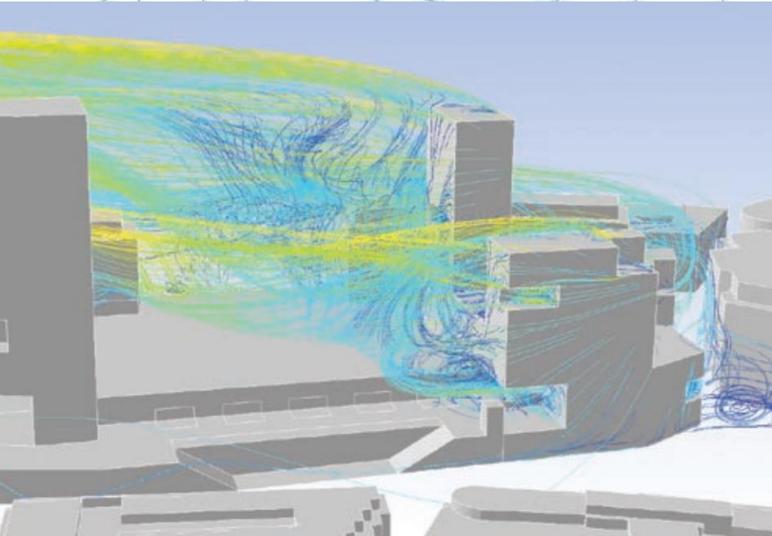
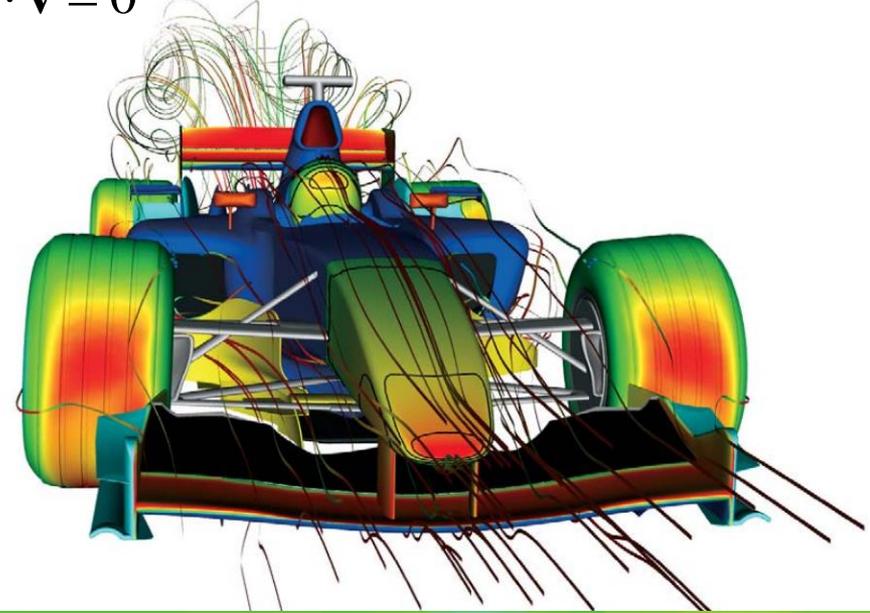
10/3 (水) までに, この結果をレポートにして提出(詳細はp.44)

CFD = Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)

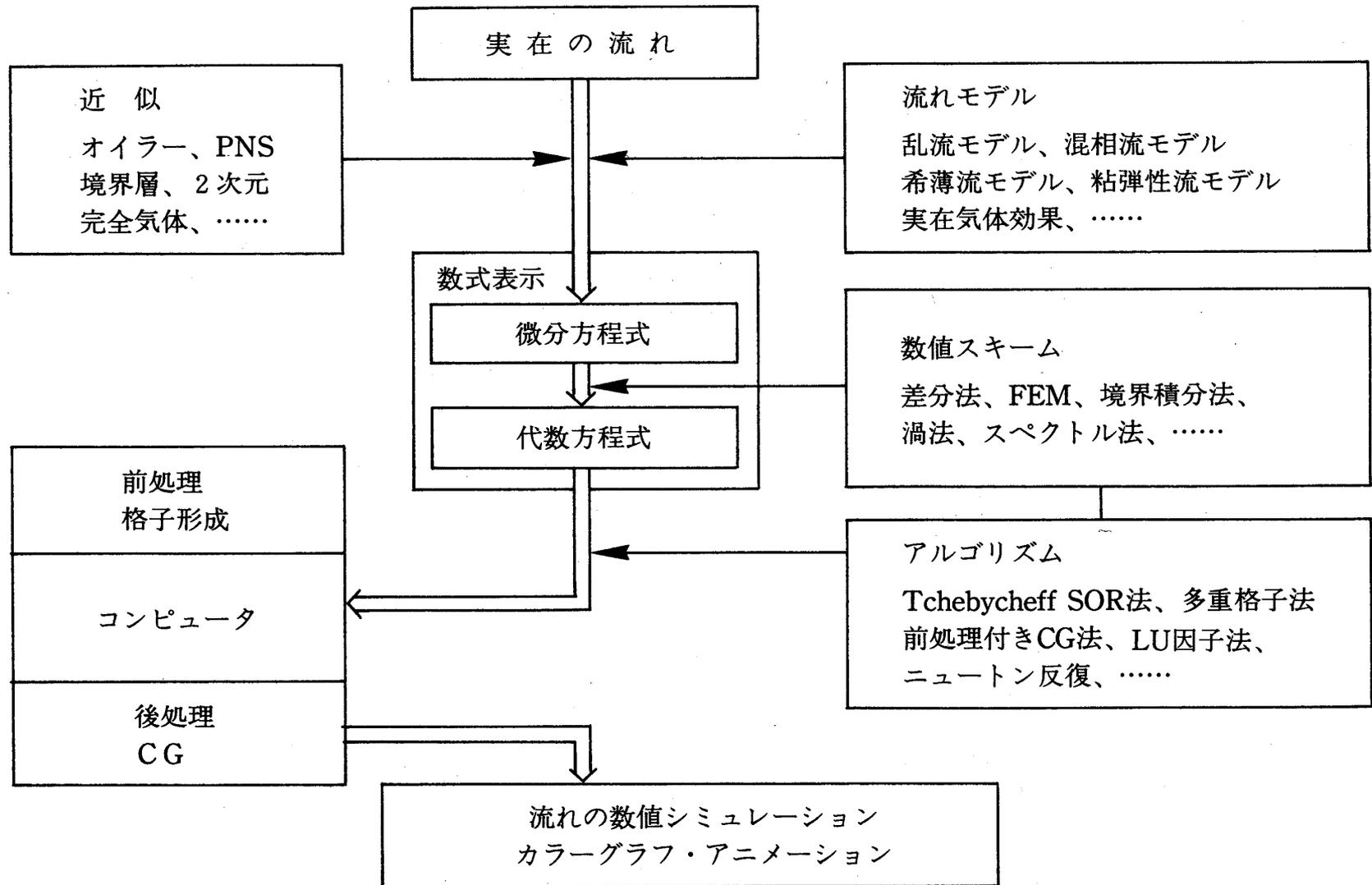


$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$



流れの数値シミュレーション



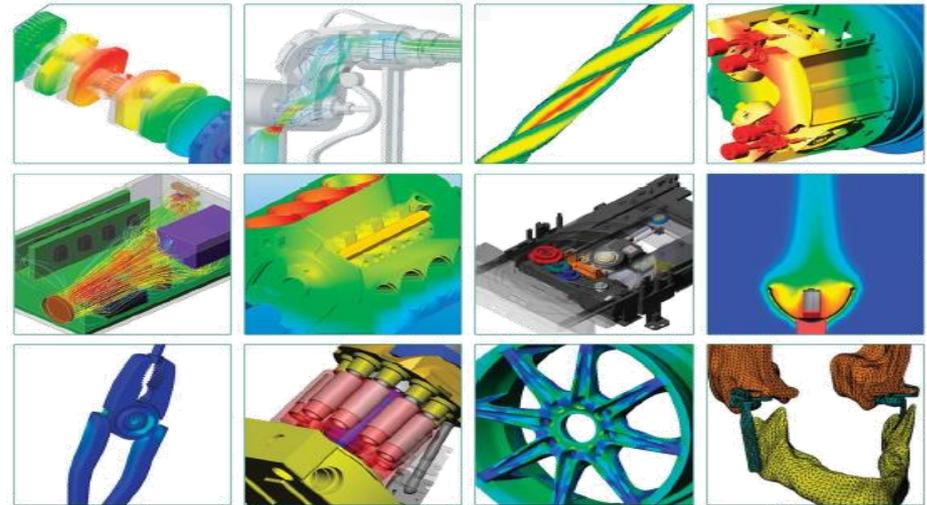
Solidworks Flow Simulation

流体解析・熱伝導解析ソフトウェア

 **SOLIDWORKS**

- ▶ 流体解析ソフトウェアのひとつ
- ▶ CADソフトSolidworksと統合
- ▶ 有限差分法ベース
- ▶ 様々な物理現象を取り扱う

ex) 乱流、熱伝導、非ニュートン性、亜音速・超音速、回転機械

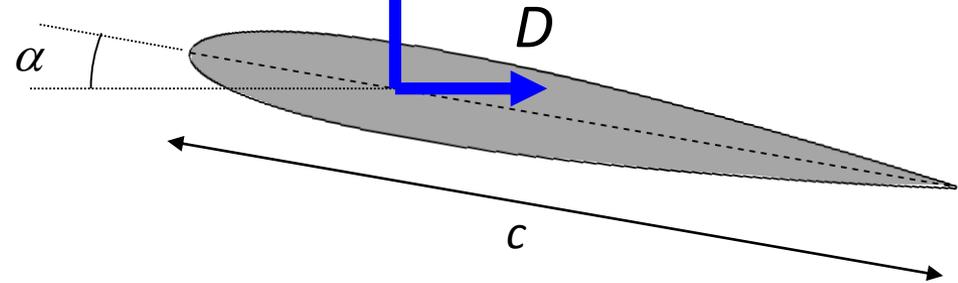
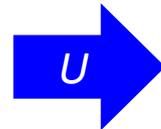


▶ 適用例

航空機の翼周りの流れ、石油プラットフォーム、血流、半導体製造、クリーンルームの設計、排熱設計、排水処理プラントの設計

■計算条件

流体	空気
	密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
	粘度 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
流速	$U = 43.82 \text{ m/s}$
翼型	NACA0012
翼弦長	$c = 2 \text{ m}$
迎角	α



■課題

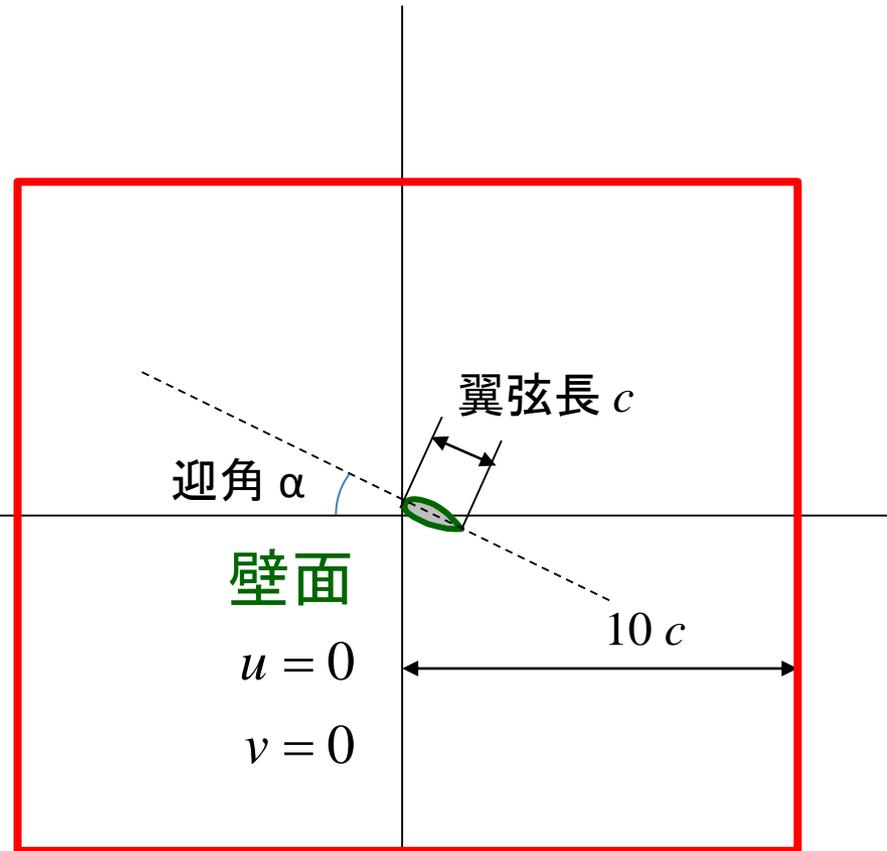
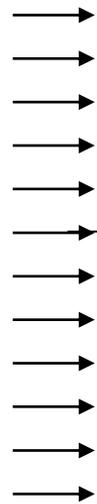
- ① SolidWorksの操作方法を確認する
- ② 翼周りの流れの様子を可視化して確認する
 - 圧力分布はどのようになっているか？
 - 流線はどのようになっているか？ 圧力分布との関係は？
 - 境界層内の速度分布はどのようになっているか？
- ③ 揚力係数 c_l 、抗力係数 c_d を求め、実験値と比較する
 - どの程度、実験(p.8)を再現できるのか？ 合わない理由は何か？

一様流

$$u = u_{\infty} = U_{\infty}$$

$$v = v_{\infty} = 0$$

$$p = p_{\infty}$$



【迎角の取り扱い方】

翼型を傾ける

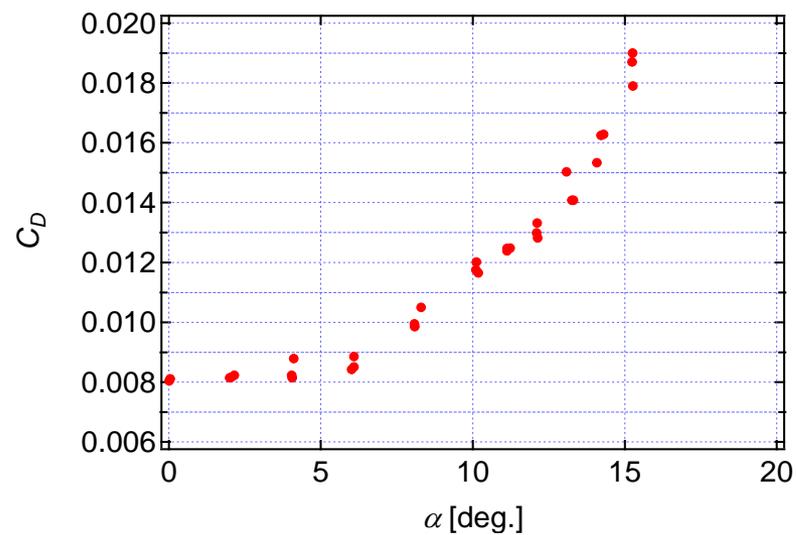
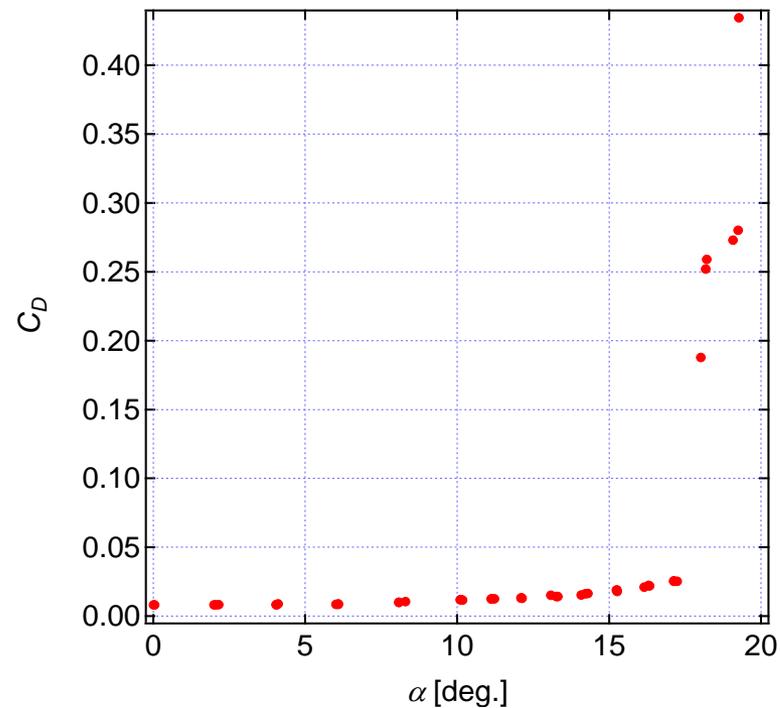
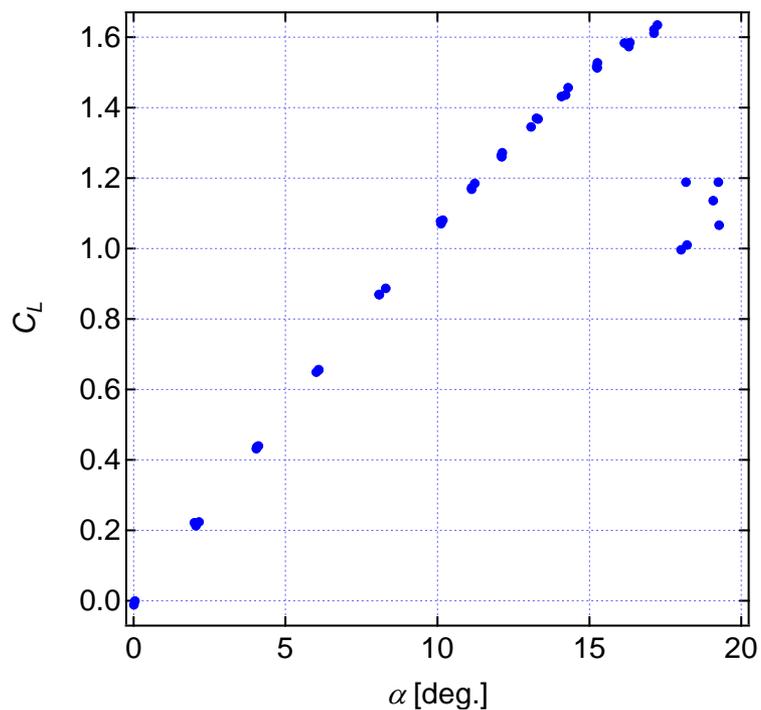
計算領域をなるべく大きくとる
(無限遠方を近似的に再現する)

NACA0012翼型の風洞実験データ

Data from Ladson, NASA TM 4074, 1988

$Re = 6 \times 10^6$

$M = 0.15$



■揚力係数 $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$

L 揚力

■抗力係数 $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$

D 抗力

■圧力係数 $C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2}$

ρ 流体の密度

μ 流体の粘度

U 主流の流速

p_∞ 主流の圧力

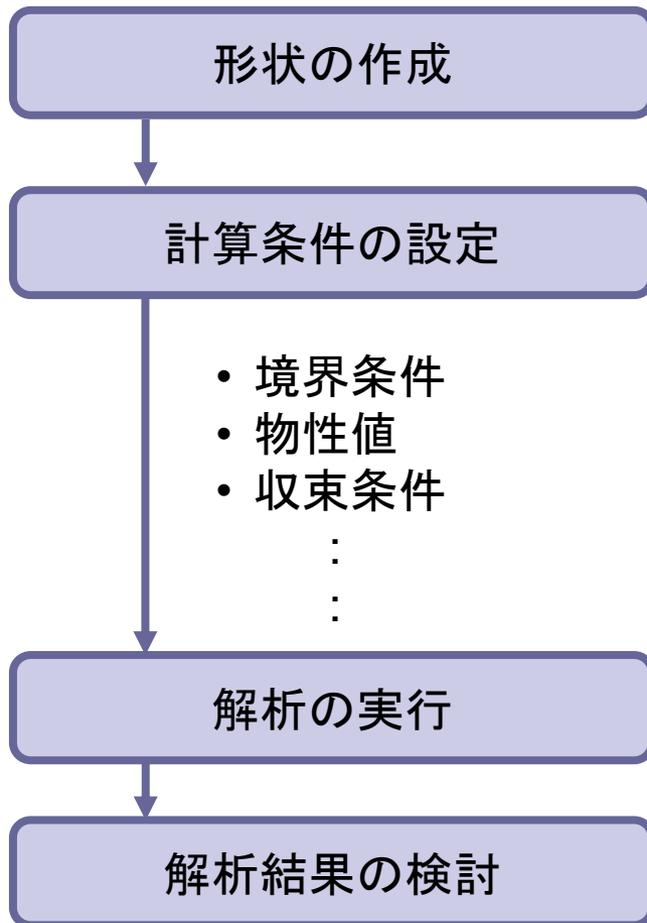
p 圧力(任意の地点)

A 翼面積

c 代表長さ(翼弦長)

■レイノルズ数 $Re = \frac{\rho U c}{\mu}$

解析手順



今回の演習では
一般的な翼型を基に作成する。

下準備

1. 席が決まったら、Windowsを起動し、ログインする。
2. 以下のフォルダが存在する場合には、中身を全部削除しておく。
(以降の作業でトラブルの原因になるので)

C:¥SolidWorks

3. 以下のフォルダを作成する。
C:¥SolidWorks¥step1¥arg10



→迎角を変えた場合は、別フォルダを作ること。(arg20など)

※PやOドライブにファイルを置いて計算すると処理が遅くなる.必ずCドライブで計算.

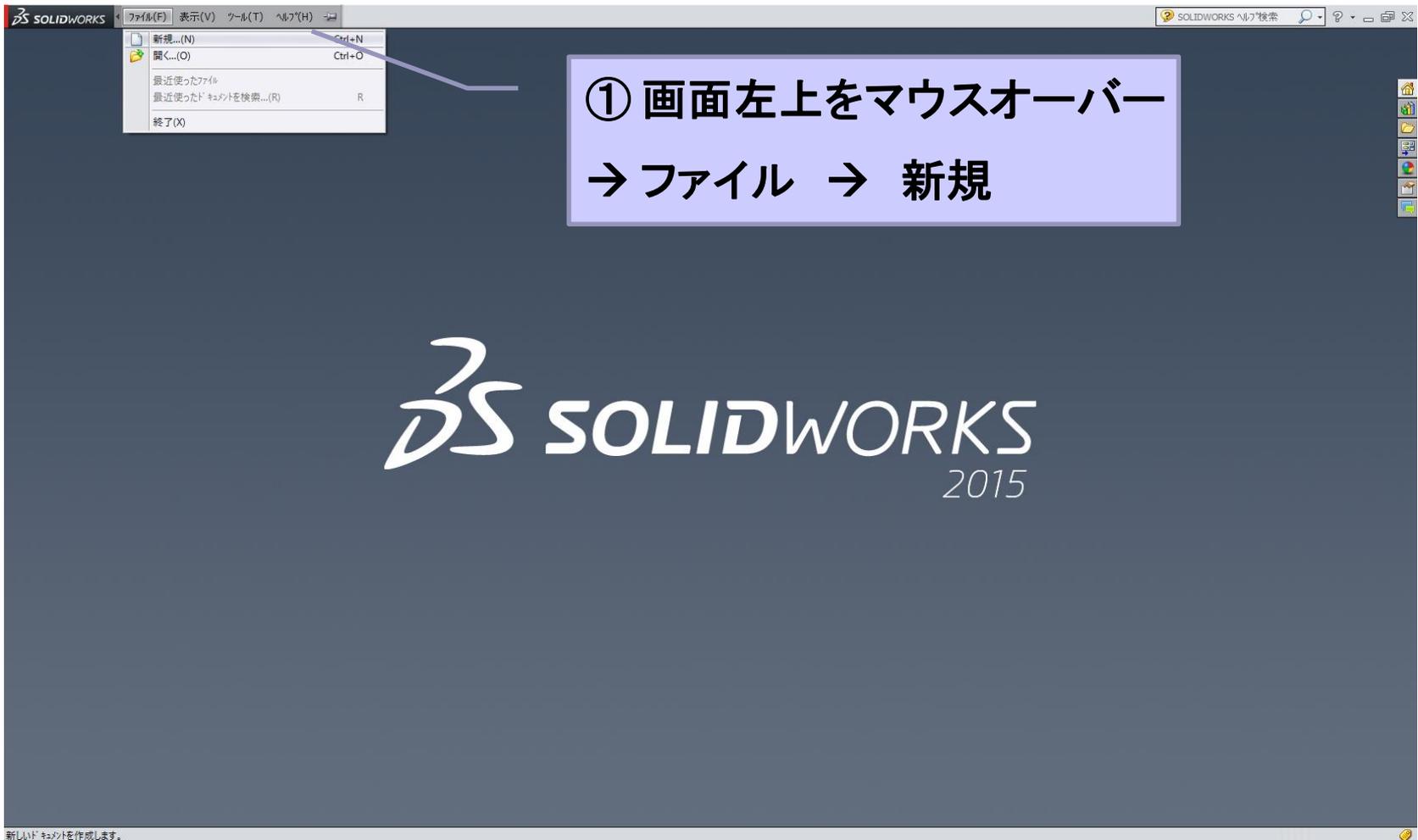
4. 次に下記のHP, スケジュール表内よりnaca0012.txtをダウンロードし、さきほど作成した C:¥SolidWorks¥step1 に置く。

http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/lecture_4.html

本ウェブページから資料やファイルを随時ダウンロードするので、ブラウザのお気に入りにリンクしておくとい。

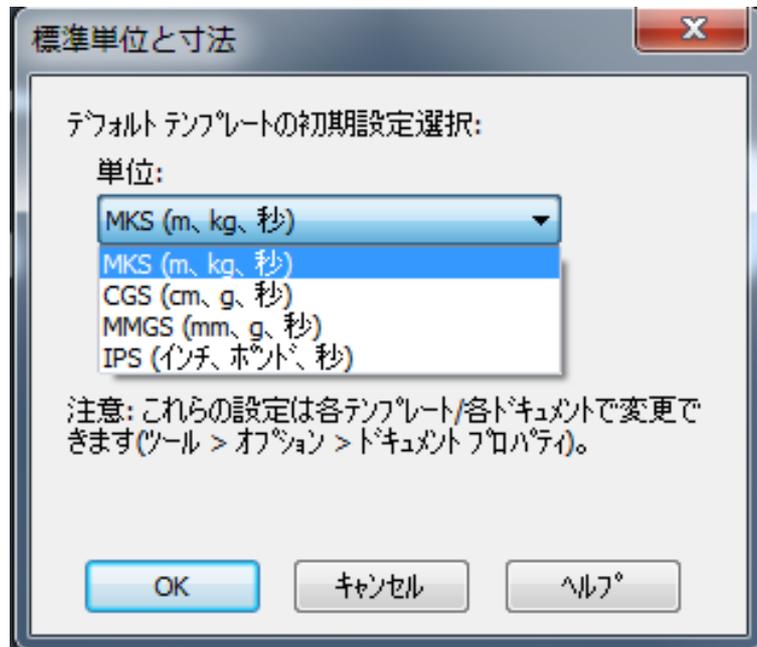
Solid Works の立ち上げ

スタート→すべてのプログラム(すべてのアプリ) → SolidWorks2015
→ SolidWorks 2015 x64 Edition

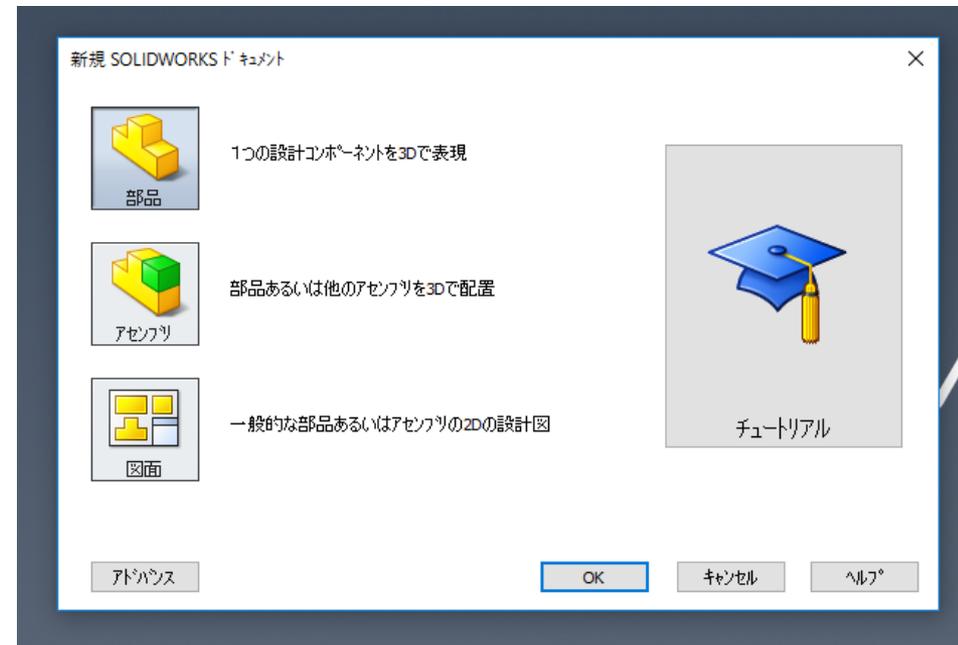


Solid Works の立ち上げ

② 下記画面が出たら
単位系を MKS (m, kg, 秒) に設定
→ OK



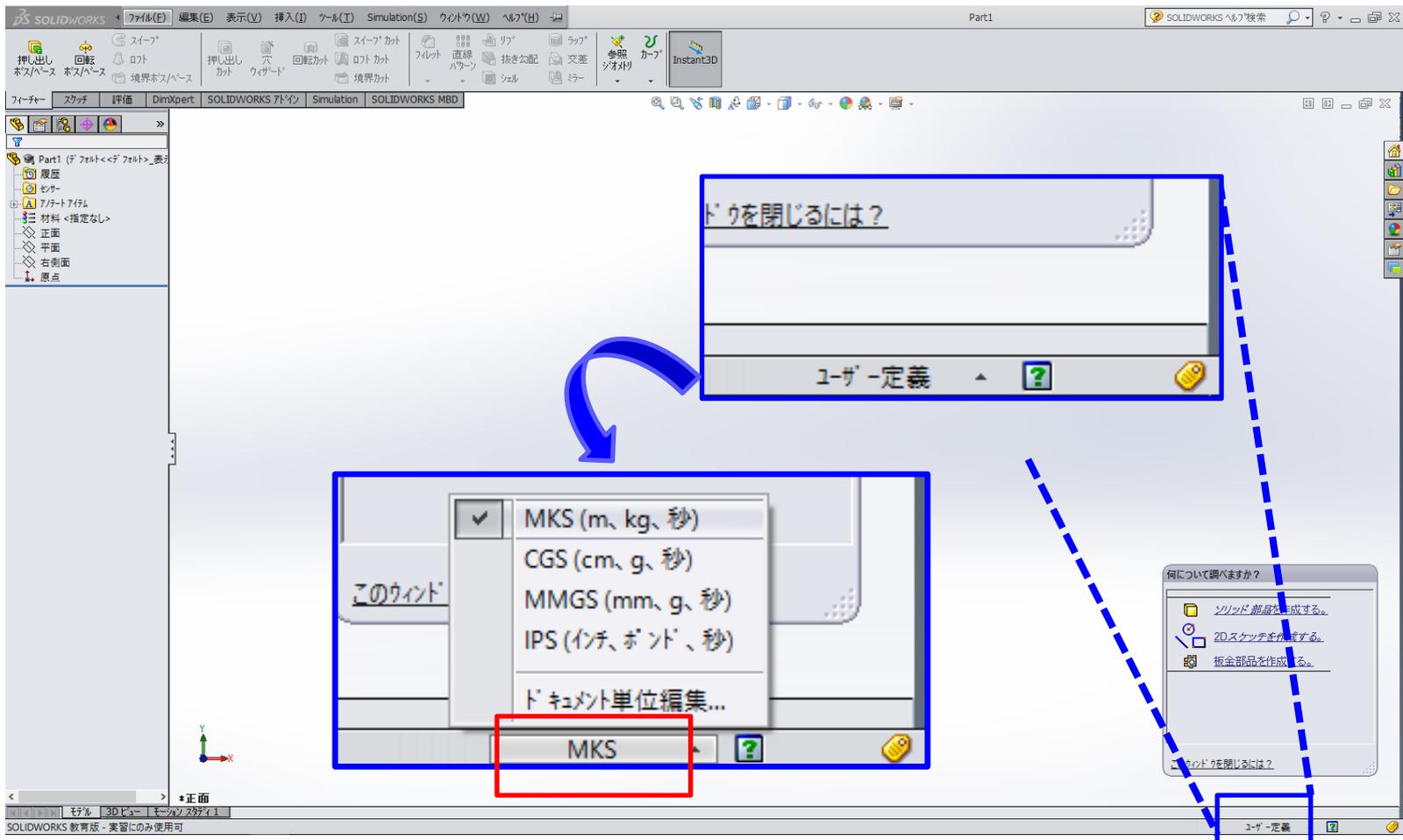
③ 「部品」が選択されていることを
確認 → OK



この画面が出てこない場合はそのまま次へ.

Solid Works の立ち上げ

画面右下の表示を確認, MKSとなっていなければ
クリックしてMKSに修正



翼の座標点の読み込み

フィーチャータブ → カーブ → 座標点カーブ

The screenshot displays the SolidWorks software interface. The 'Feature Tree' on the left shows a part named 'Part1'. The 'Feature' tab is selected, and the 'Curve' tool is highlighted in the ribbon. A red box highlights the 'Curve' icon in the ribbon, and a blue box highlights the 'Coordinate Point Curve' option in the dropdown menu. A red box also highlights the 'Coordinate Point Curve' option in the expanded menu. A small dialog box titled '何について調べますか?' (What do you want to search for?) is visible in the bottom right corner, with options for 'ソリッド 部品を作成する。' (Solid part creation), '2D スケッチを作成する。' (2D sketch creation), and '板金部品を作成する。' (Sheet metal part creation).

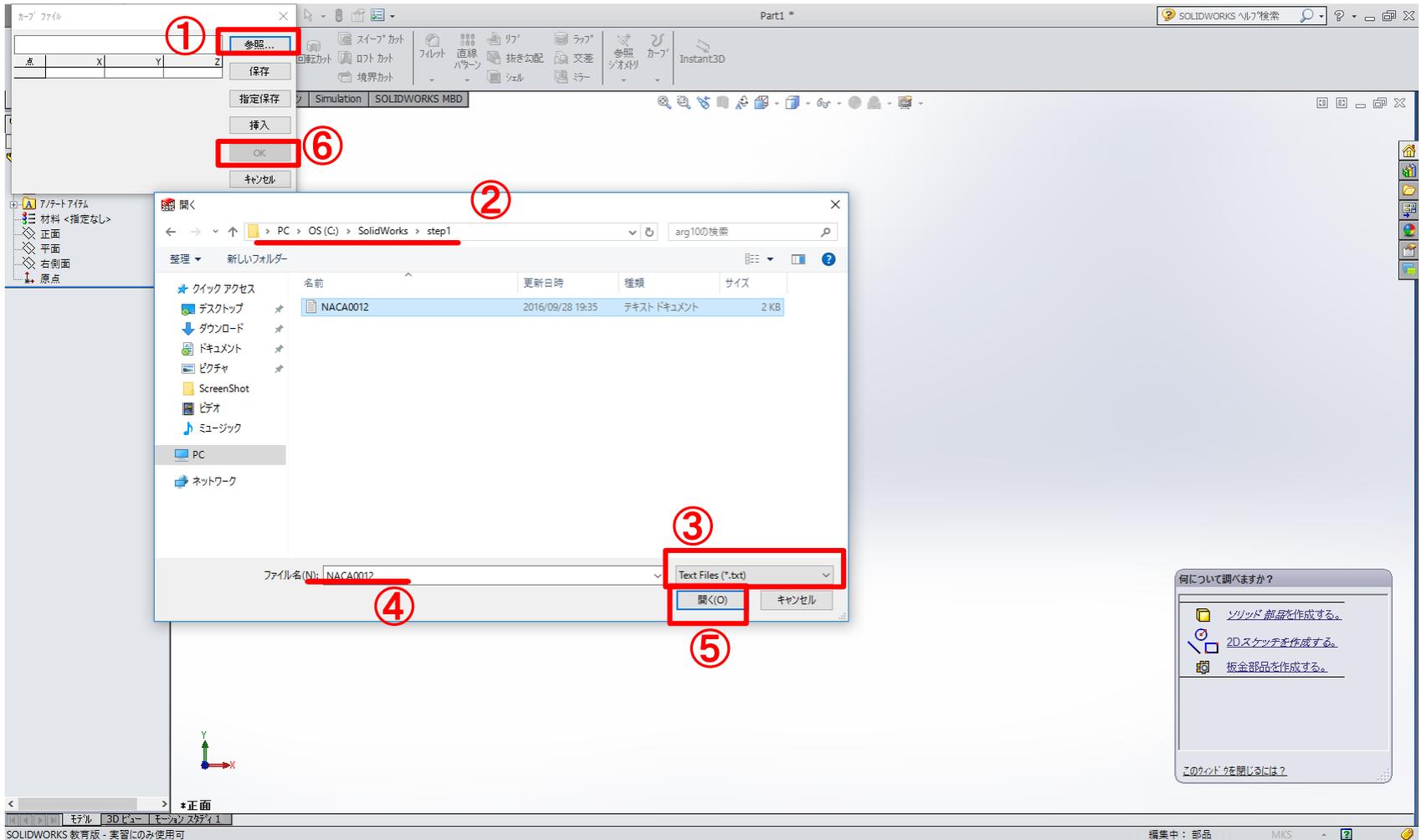
カーブ
座標点カーブ
ヘリカルとスパイラル

ソリッド 部品を作成する。
2D スケッチを作成する。
板金部品を作成する。

何について調べますか?
このカテゴリを調べるには?

翼の座標点の読み込み

カーブファイルウィンドウが表示 → ①参照 → ②NACA0012.txtを保存したフォルダを選択 → ③ファイル形式(*.txt)を選択 → ④NACA0012.txtを選択 → ⑤開く → ⑥OK



物体の作成

- ①正面 → ②スケッチ  → ③エンティティ変換  →
 → ④カーブを選択  → ⑤OK  → ⑥スケッチ終了 

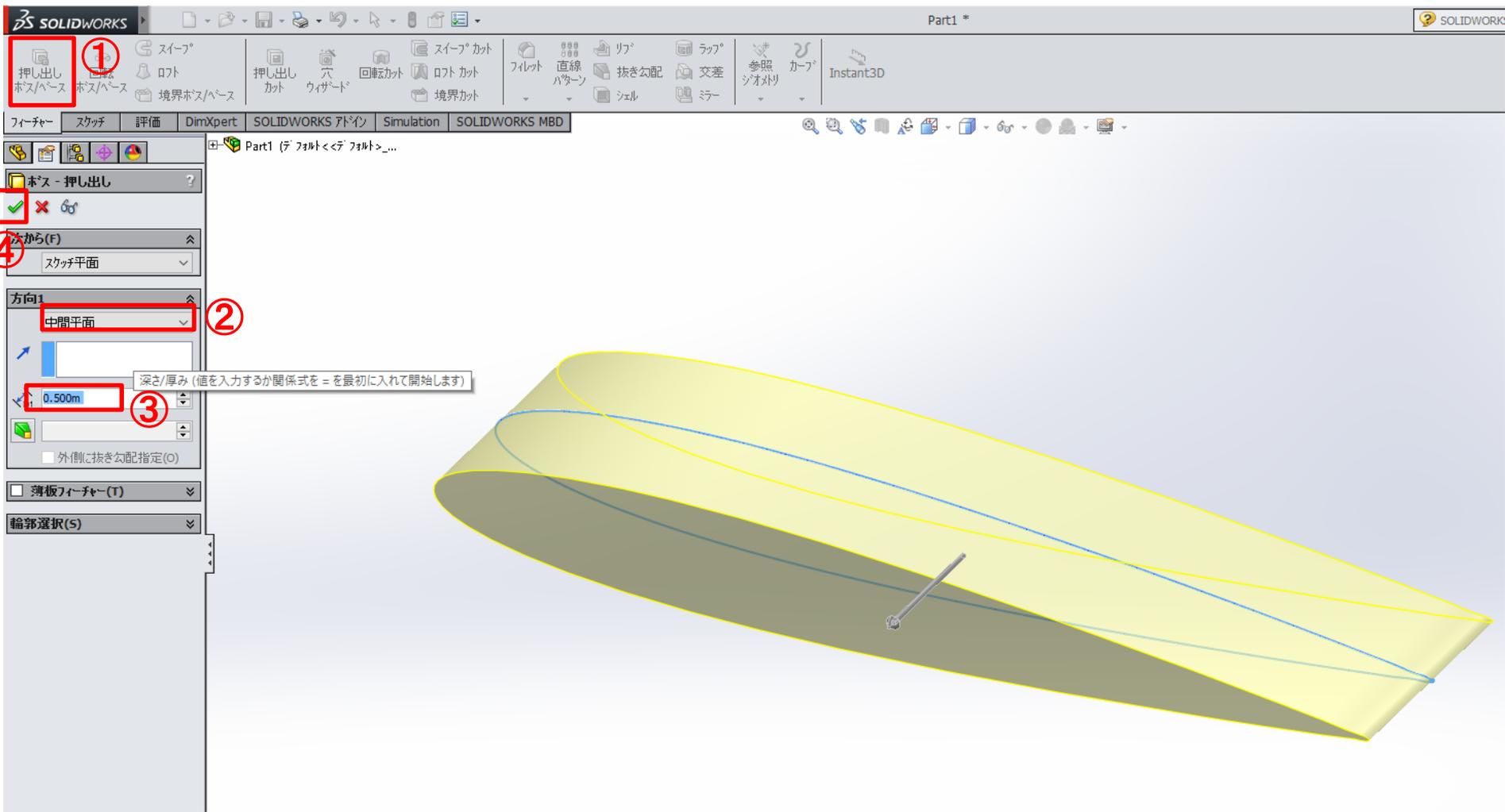
The screenshot illustrates the SolidWorks interface during the creation of a curve. The task pane on the left shows the 'Part1' tree with the 'Front' plane selected (1). The ribbon at the top has the 'Sketch' tab active, with the 'Sketch' button highlighted (2). The 'Entity Change' dialog is open, showing the 'Entity Change' button highlighted (3) and the 'Curve' button highlighted (4). The 'OK' button in the dialog is highlighted (5). The main drawing area shows a blue curve being created on the 'Front' plane, with the 'Curve' button highlighted (4). The 'Sketch End' button on the ribbon is highlighted (6).

物体の作成

18

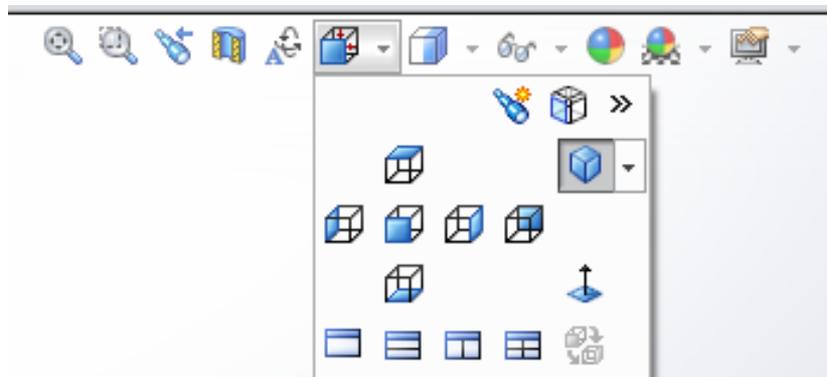
①フィーチャータブ 押し出し → ② 中間平面を選択 → ③ 厚さ 0.5m → ④ OK

方向1タブで

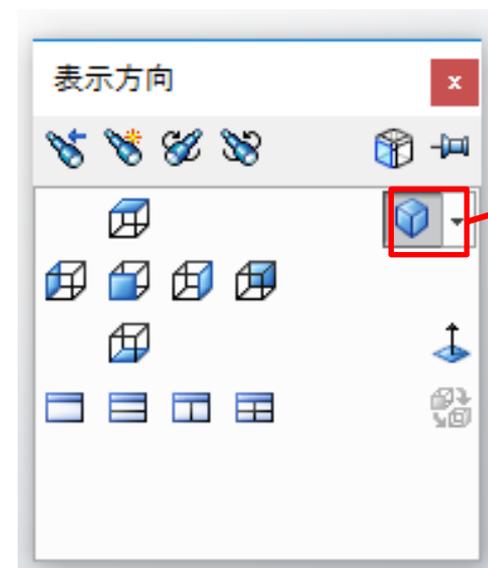


操作法1: 表示方向の変更方法

- スクロールボタンでドラッグ
- 画面上の  ボタンより変更

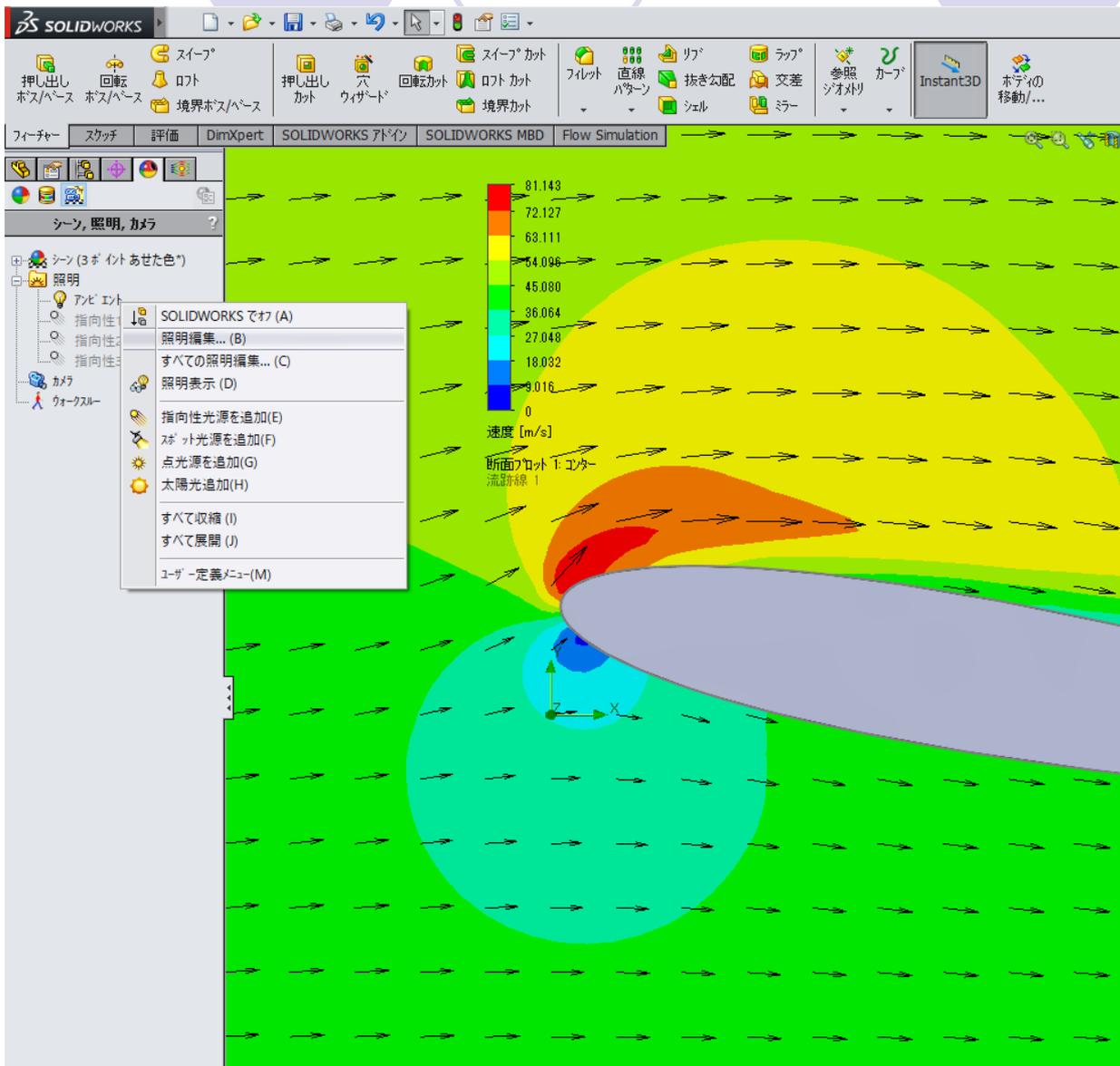
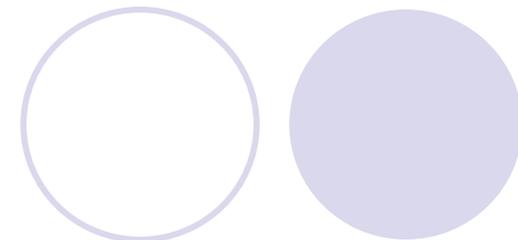


- スペースキーを押す
(英字入力に限る)



等角
投影

操作法3: 明るさの調整



DisplayManager
> シーン/照明/カメラ表示
> 照明 > アンビエント

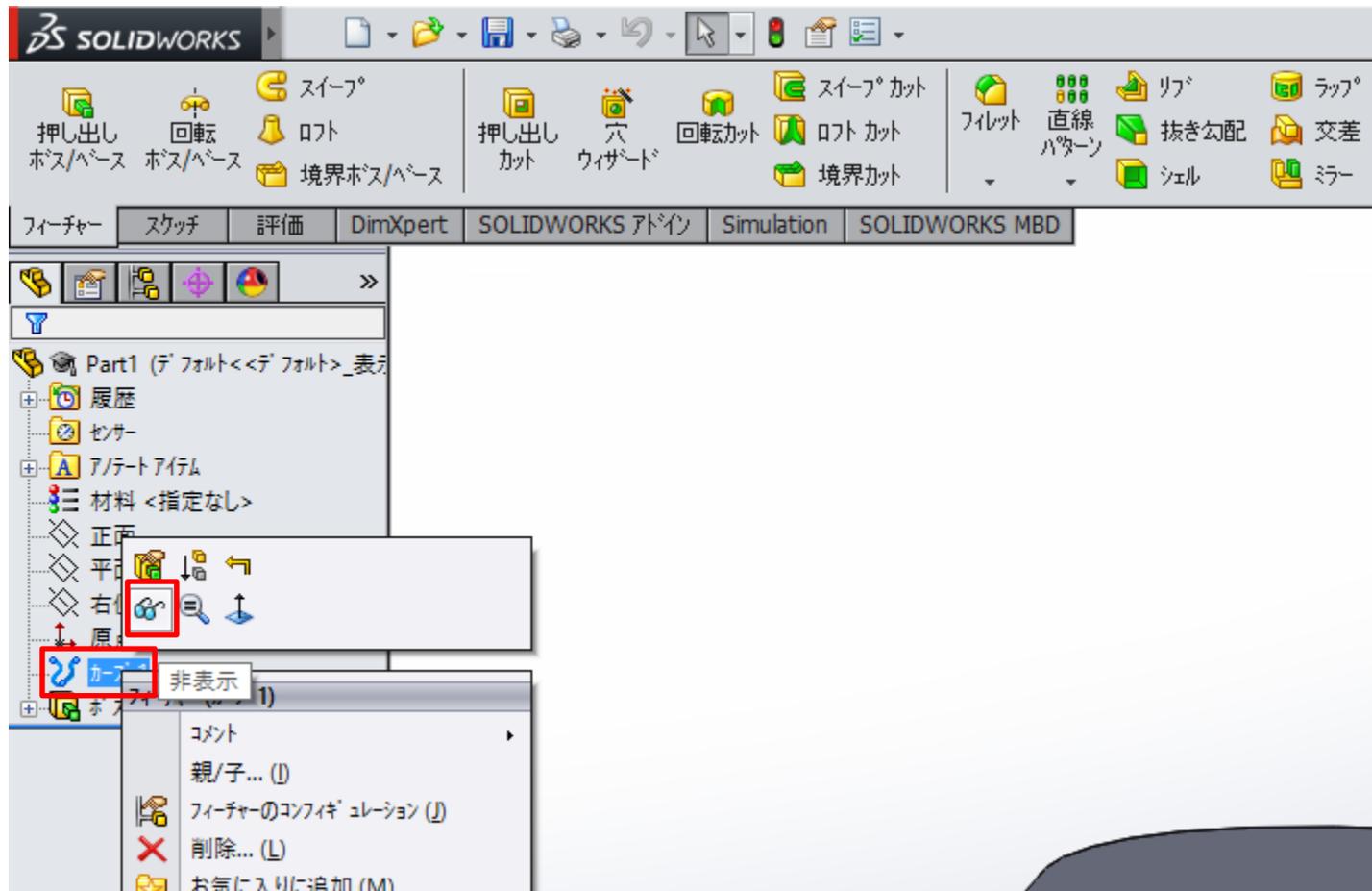
を右クリックし, 「照明編集」
を選択

「アンビエント」の数値を
1に変更すると, コンターを
明るくできる

OK  をクリック

カーブの非表示

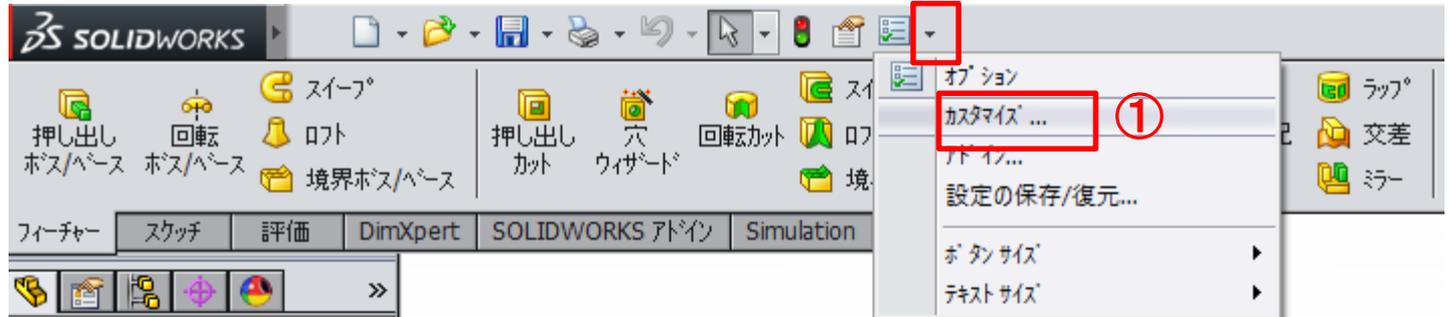
カーブを右クリック → 眼鏡マーク  をクリック
→ カーブの表示/非表示が切り替わる



物体の回転の準備

(フィーチャータブに ボディの移動/コピー  があれば飛ばす)

①カスタマイズ



②ショートカットバー

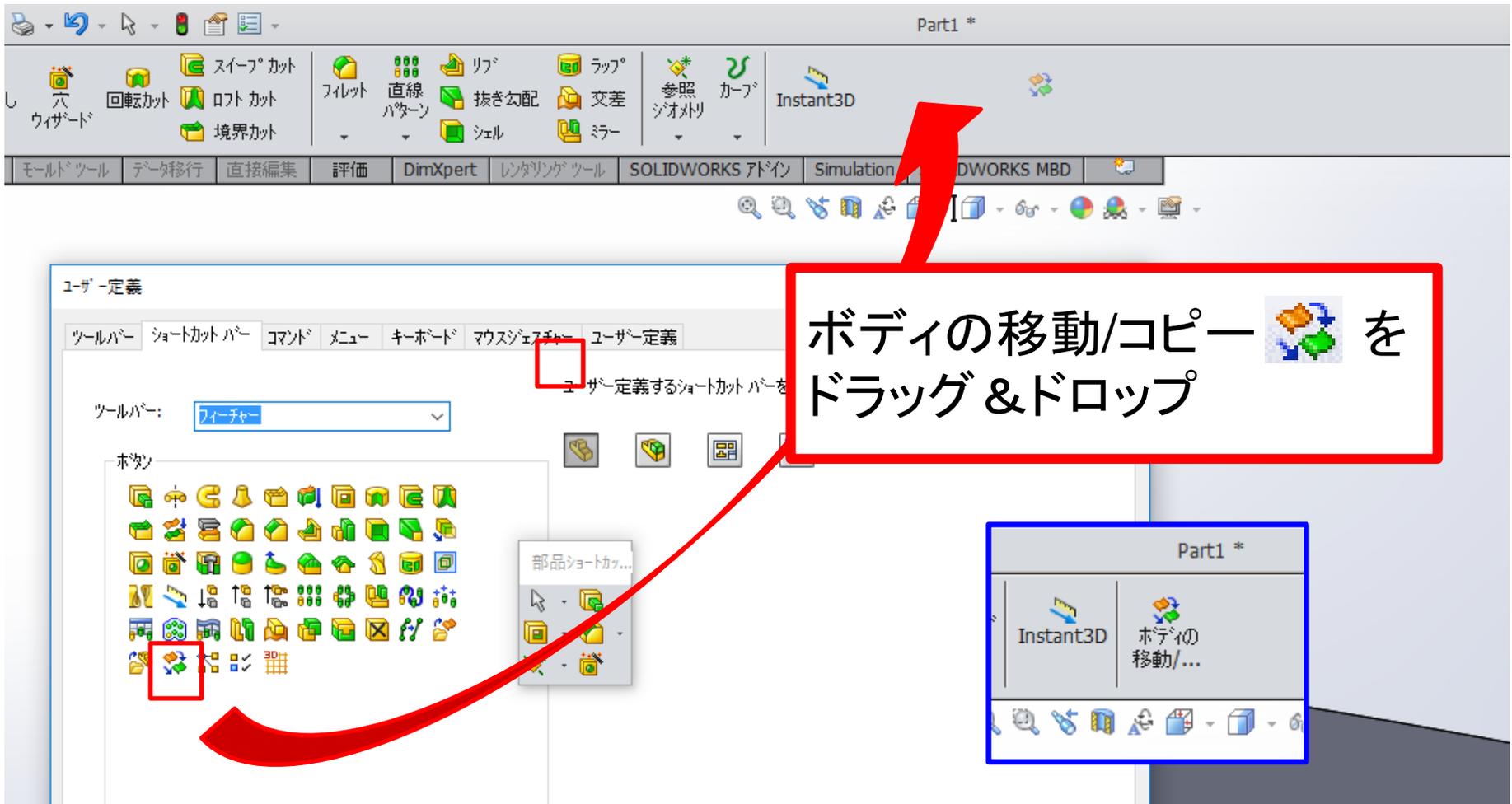
③ツールバーでフィーチャーを選択

④ボディの移動/コピー
をドラッグ&ドロップ (次ページ参照)

⑤OK

物体の回転の準備

(フィーチャータブに ボディの移動/コピー  があれば飛ばす)



The screenshot shows the SolidWorks software interface. The main window displays the 'Part1 *' model. The 'Feature Tree' on the left shows the 'Move/Copy' feature tab selected. A red arrow points from the 'Move/Copy' icon in the Feature Tree to the 'Move/Copy' icon in the main window's toolbar. A red box highlights the 'Move/Copy' icon in the toolbar, and a red arrow points from this box to a text box that says 'ボディの移動/コピー  をドラッグ & ドロップ' (Drag & Drop 'Move/Copy' Body). Another red arrow points from the text box to the 'Move/Copy' icon in the Feature Tree.

ユーザー定義

ツールバー: フィーチャー

ボディ

部品ショートカット...

Part1 *

Instant3D

ボディの移動/...

ボディの移動/コピー  をドラッグ & ドロップ

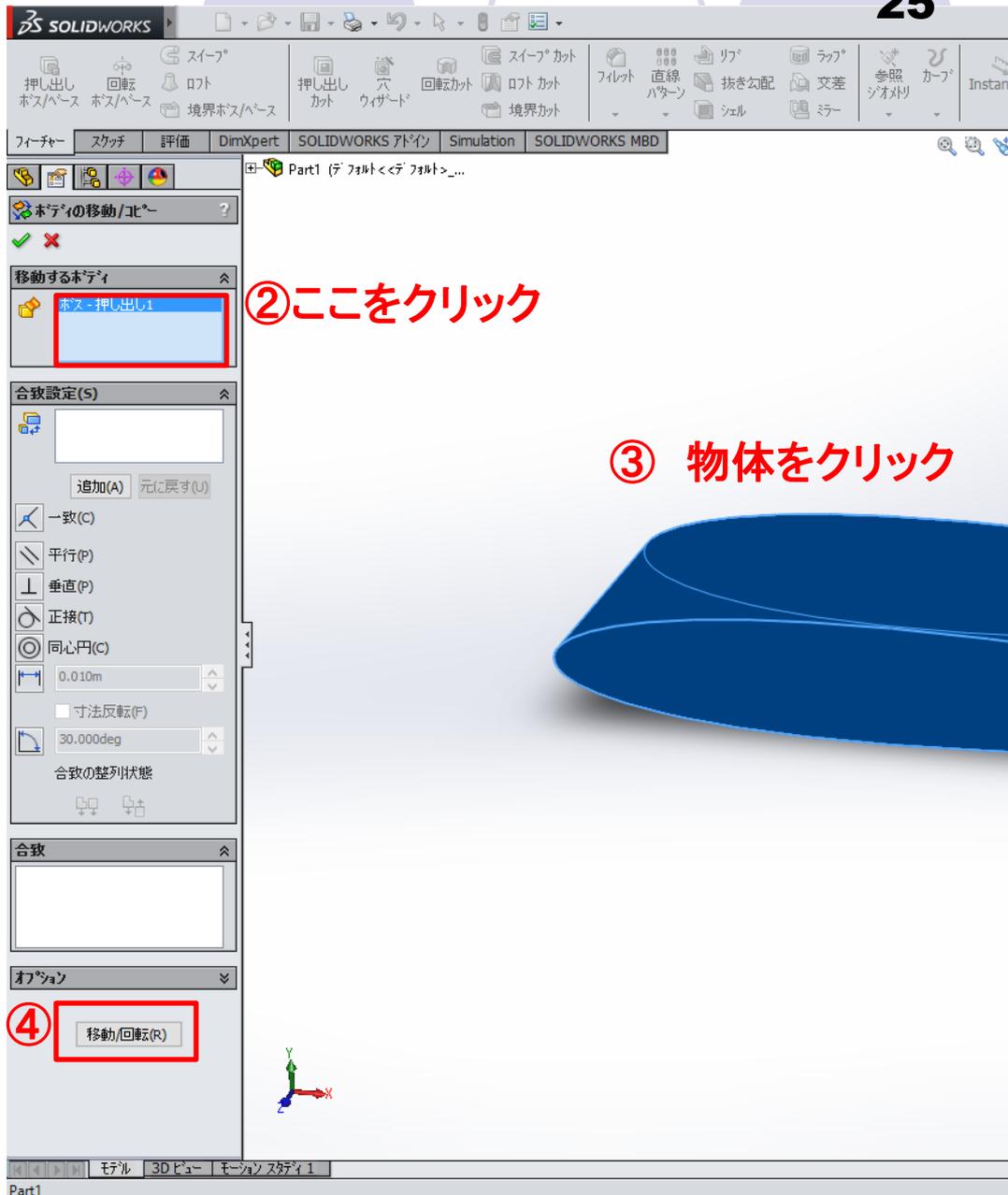
物体の回転

①ボディの移動/コピー 

②移動するボディをクリック

③作成した翼を選択

④移動/回転 をクリック



②ここをクリック

③物体をクリック

④移動/回転(R)

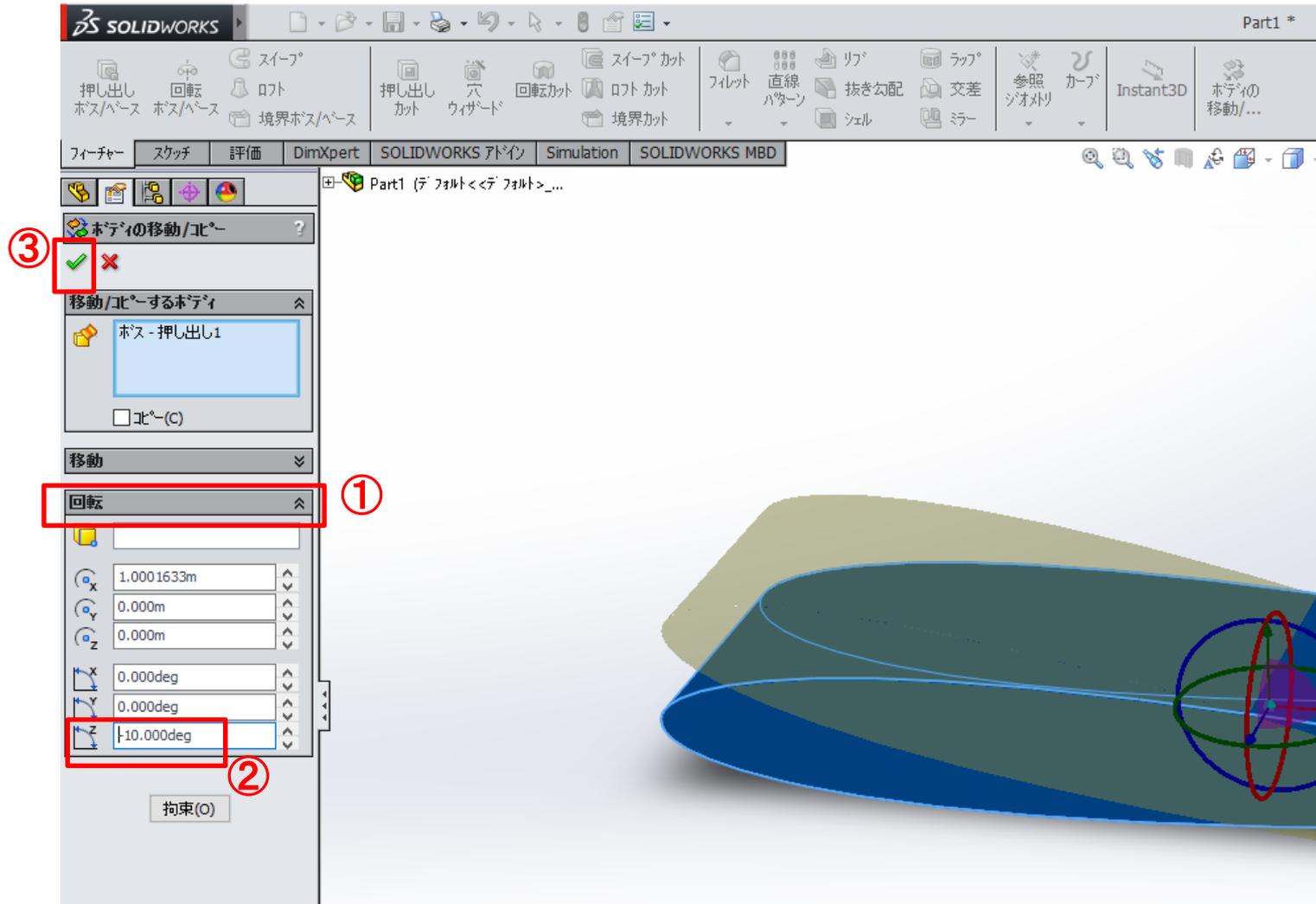
物体の回転

① 回転タブ



② Z軸回転に
[-10.00 deg]
を入力

③ OK

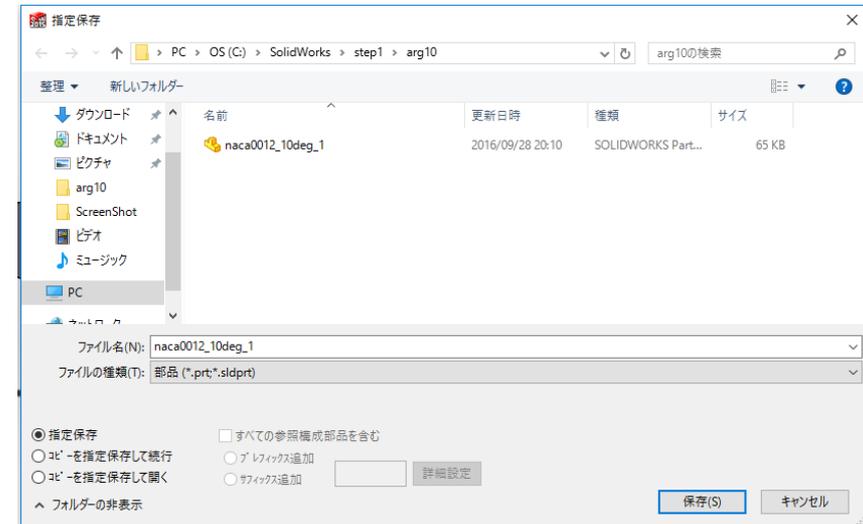
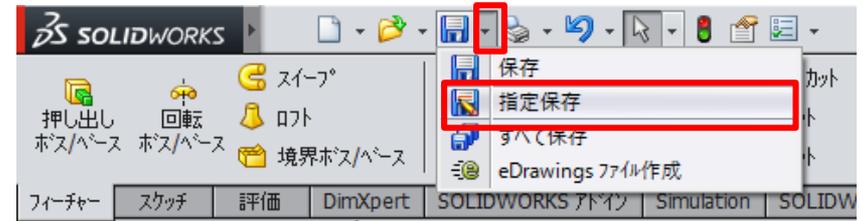
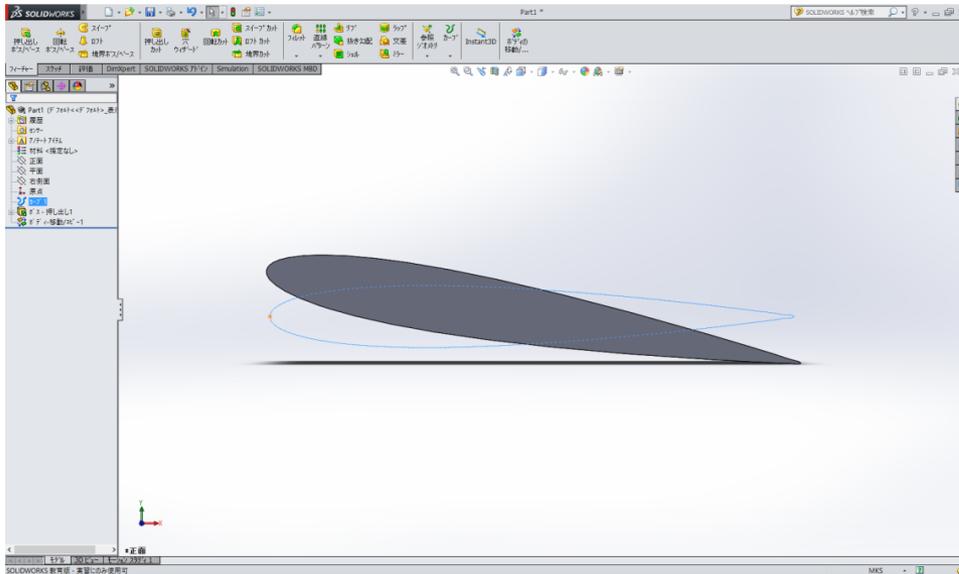


保存

物体が目的の迎角に回転されたことを確認し、保存する

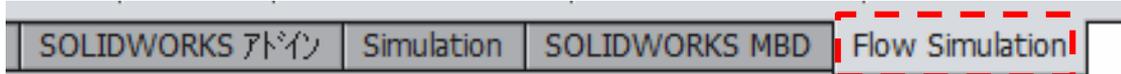
指定保存→ファイル名をつけてC:¥SolidWorks¥step1¥arg10
に.SLDPRT形式で保存

※ 下図はカーブを再表示・正面方向表示
しています

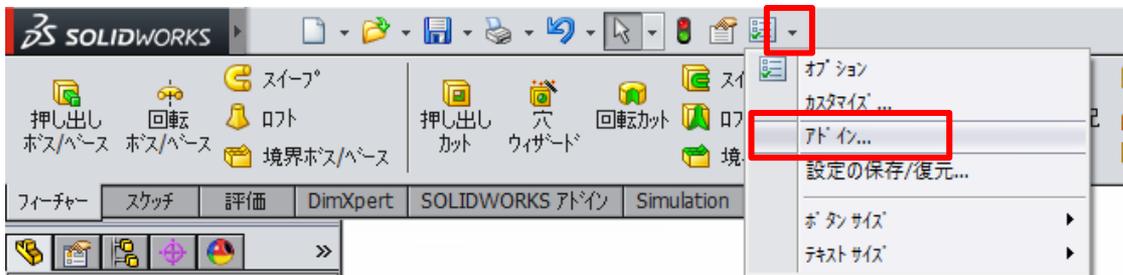


シミュレーションの準備

既にFlow Simulationのタブがあればとばす

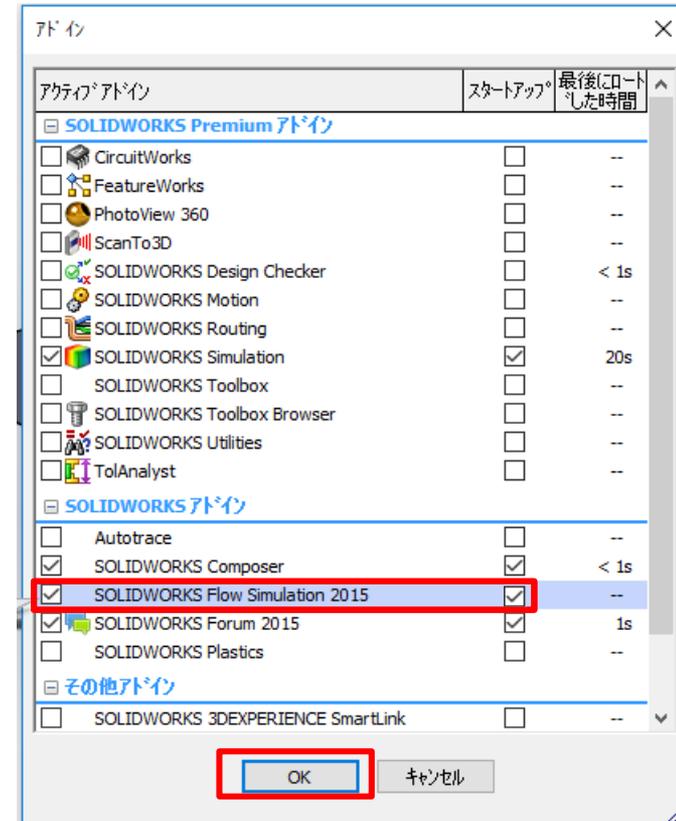


アドインをクリック



SolidWorks Flow Simulation 2015 の
アクティブアドイン, スタートアップに
チェック

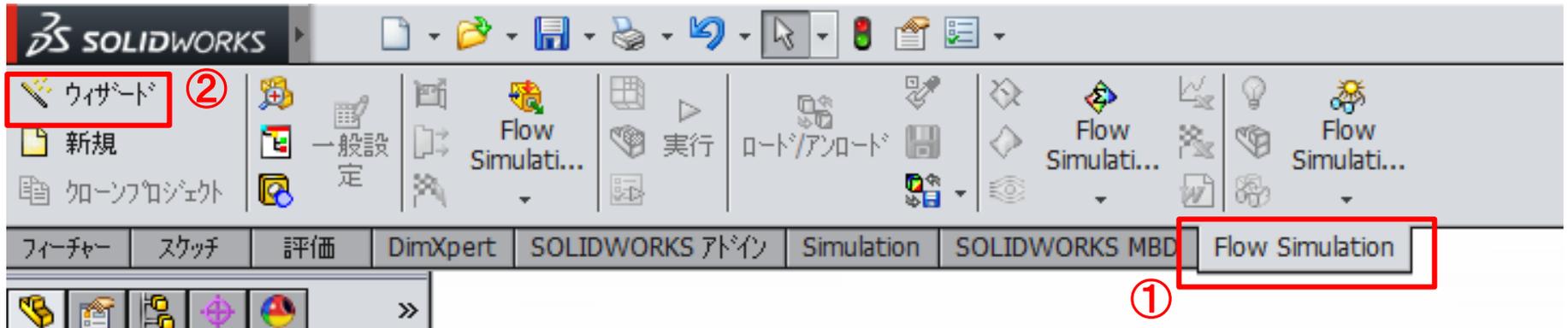
→OK



シミュレーションの開始

29

- ① Flow Simulation タブを選択
- ② ウィザードをクリック

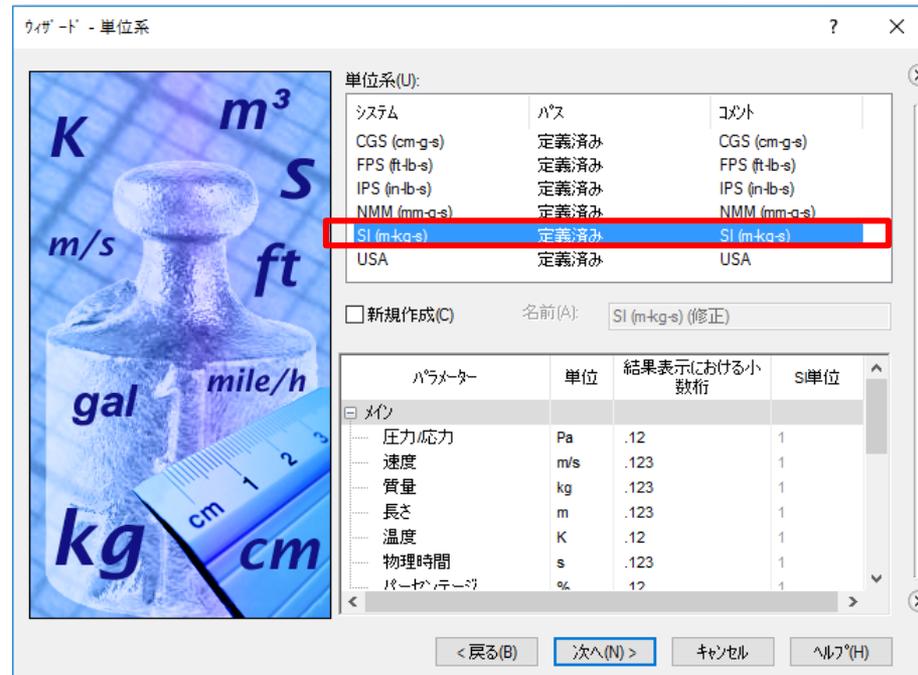
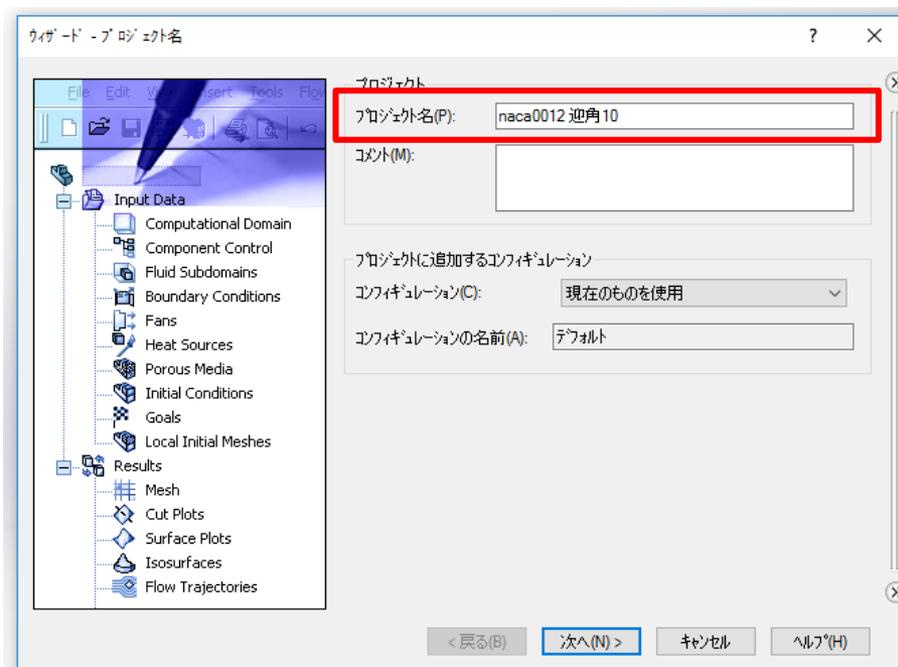


ウィザードを用いた設定

30

プロジェクト名を適当につけ、
次へ

単位系 SI(m-kg-s)を選択し、
次へ

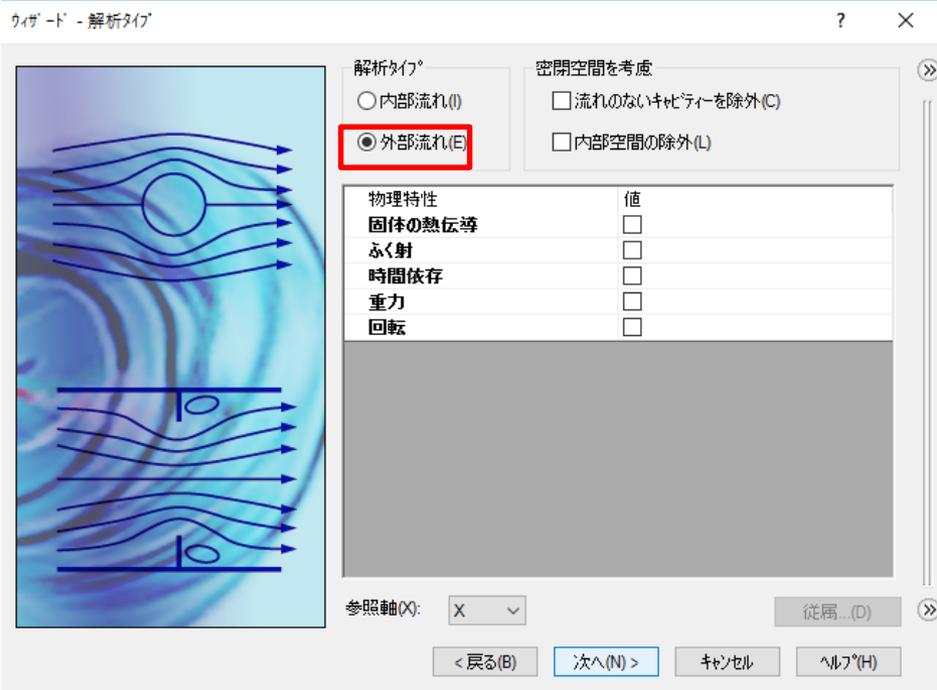


ウィザードを用いた設定

31

解析タイプ
外部流れを選択
次へ

デフォルト流体
気体→空気→追加
流れタイプ→乱流のみ に変更
次へ



ウィザードを用いた設定

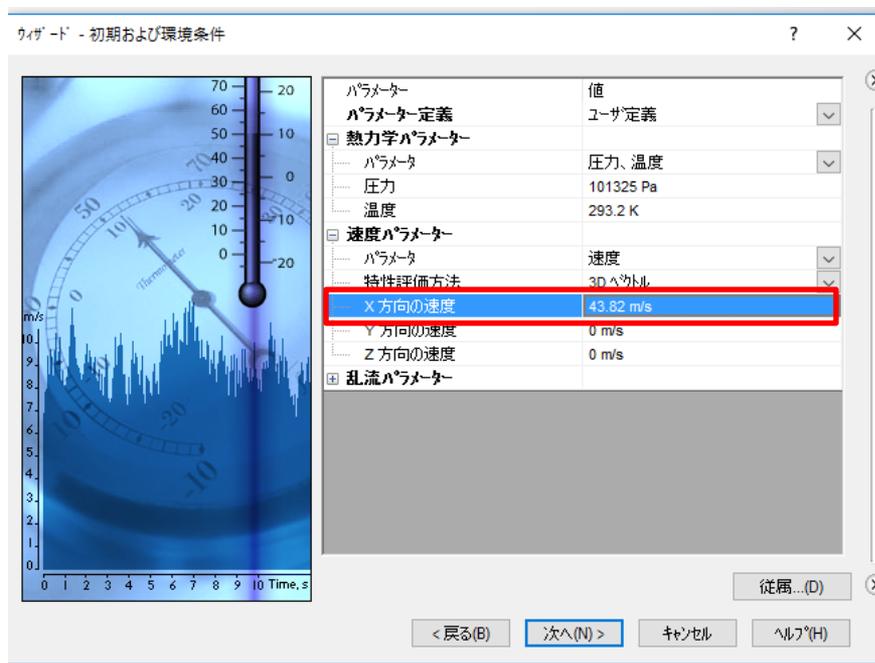
32

壁面条件

特に変更せず，次へ

初期及び環境条件

X方向の速度に [43.82]
と入力し， 次へ



ウィザードを用いた設定

33

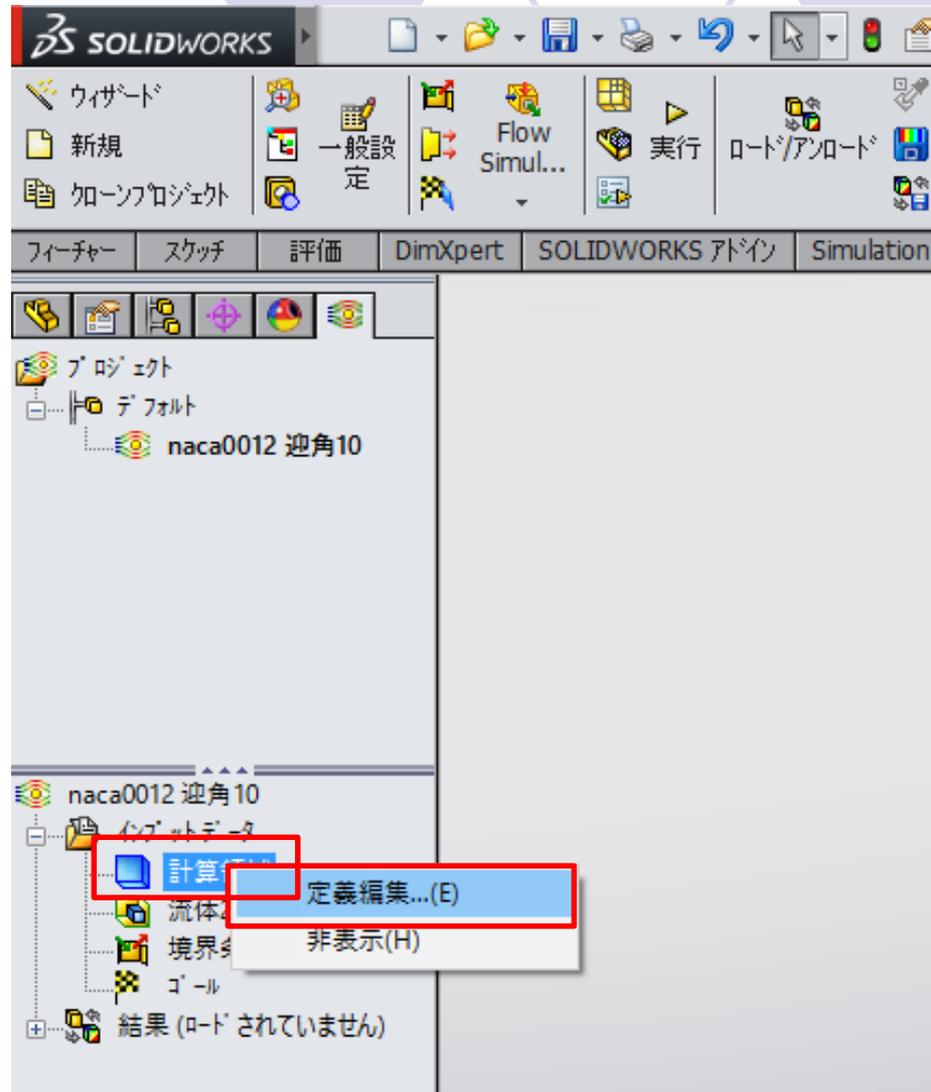
結果と形状レゾリューション

結果レゾリューション のスライダーを 6 に移動し， 終了



計算領域の設定

計算領域を右クリック
→ 定義編集

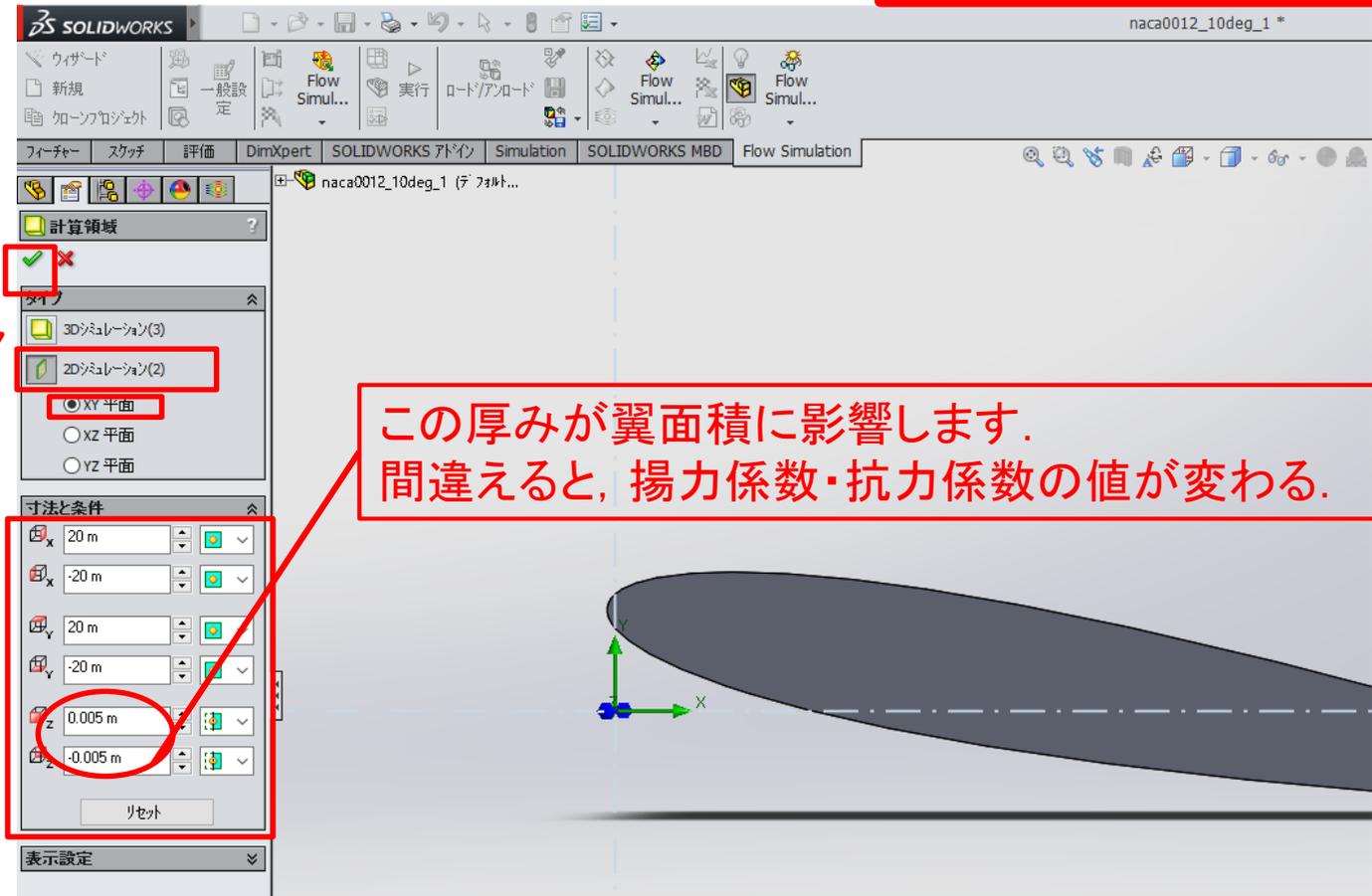


計算領域の設定

タイプの「2Dシミュレーション」を選択 → 「XY平面」

→ 寸法と条件 x: -20 ~ 20 m, y: -20 ~ 20 m, z: -0.005 ~ 0.005 m

→ OK 



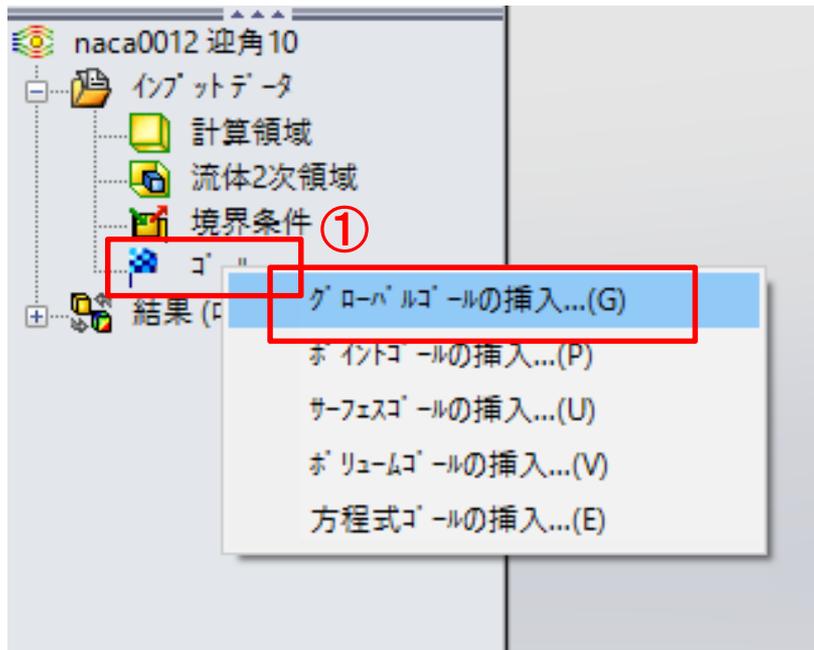
3Dを選択するとメッシュ数が多くなりすぎて計算時にクラッシュ！

この厚みが翼面積に影響します。
間違えると、揚力係数・抗力係数の値が変わる。

※10度の計算が終わった後に迎角を変えて計算する際は、計算領域がリセットされるので、忘れずに再度設定する

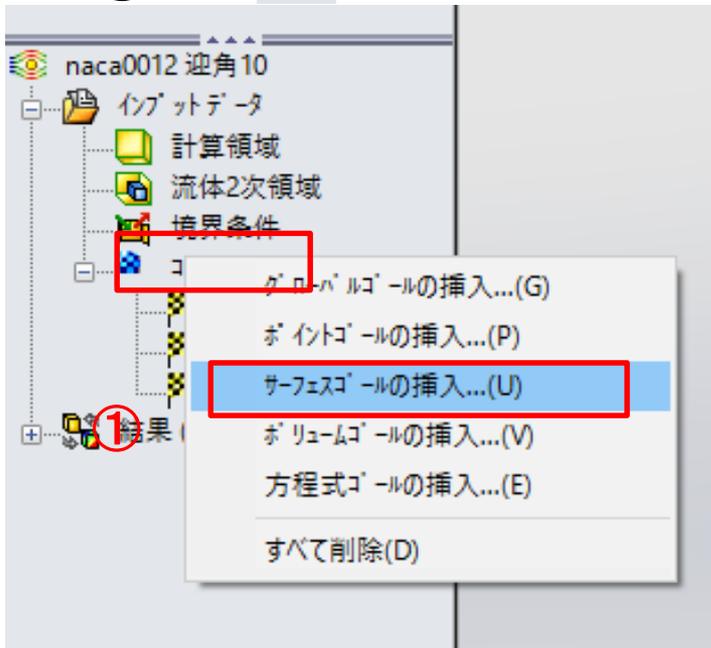
出力と収束条件の設定

- ① ゴールを右クリック → グローバルゴールの挿入
- ② 静圧・速度(X)・速度(Y)の
平均値にチェック
- ③ OK 



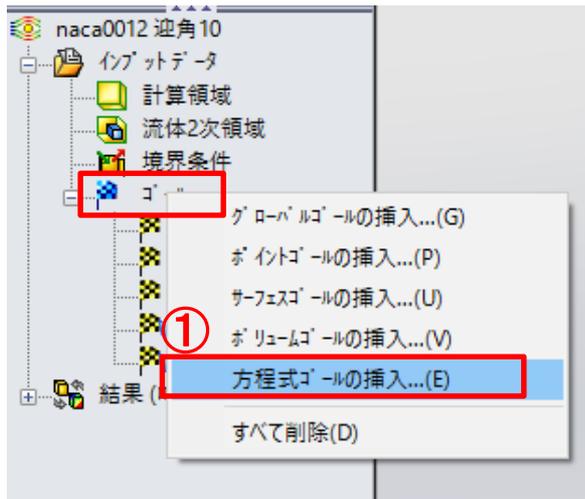
出力と収束条件の設定

- ① ゴールを右クリック → サーフェスゴールの挿入
- ② 面選択画面のハイライト確認
- ③ サーフェス選択
- ④ 力(X)・力(Y)の平均値にチェック
- ⑤ OK 



出力と収束条件の設定

- ①ゴールを右クリック → 方程式ゴールの挿入
- ②式欄でカーソル点滅でSG力 (Y) 1をクリック → 式に表示される
- ③揚力係数を求める式を入力
- ④「単位なし」を選択
- ⑤名前を「揚力係数」と入力
- ⑥OK  (単位なしの右の方)
- ⑦同様にもう1つ方程式ゴールを挿入して抗力係数も設定



面積Aは、
翼弦長 × 解析域の奥行き

式

$$[SG力 (Y) 1] / (0.5 * 1.225 * 43.82^2 * 2 * 0.01)$$

揚力係数 単位なし

②表示される

③ 揚力係数の式を入力
スライド6, 9を参照

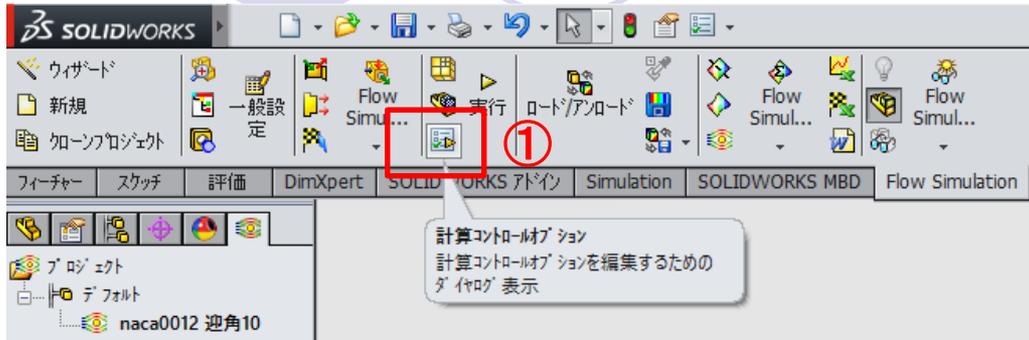
⑤入力

④

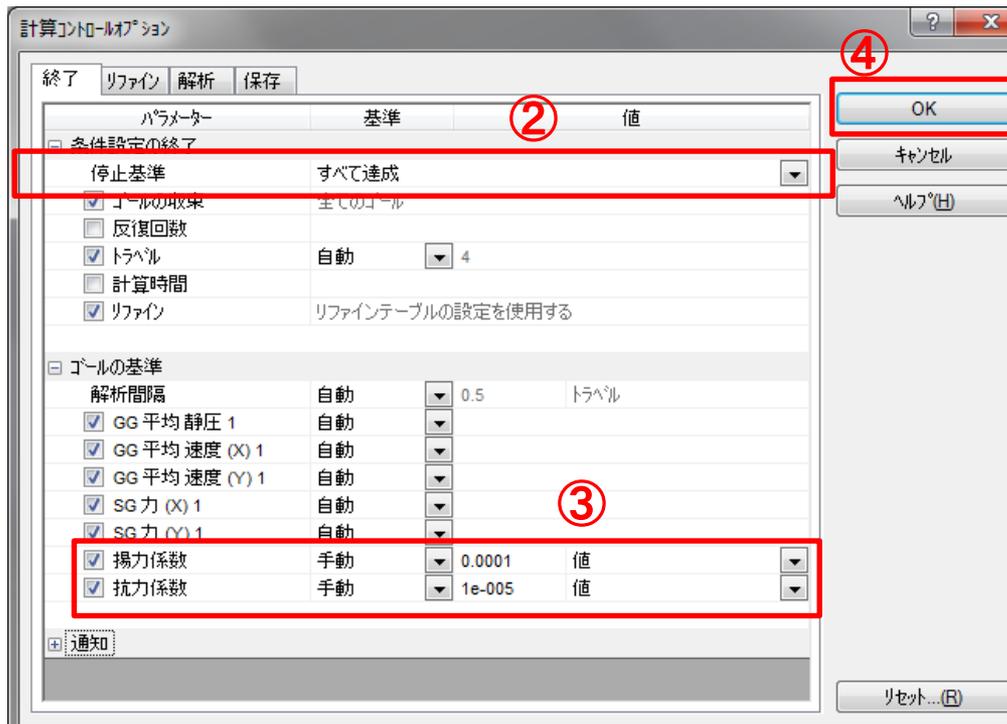
②クリック

計算終了条件の設定

39



① 計算コントロールオプション
下のウィンドウ出現



② 条件設定の終了
停止基準[すべて達成]に変更

③ 揚力係数・抗力係数のゴールの基準

- ・「自動」から「手動」に変更
- ・適切な値を入力
例：揚力係数 $1e-4$
抗力係数 $1e-5$

④ OK

解析実行

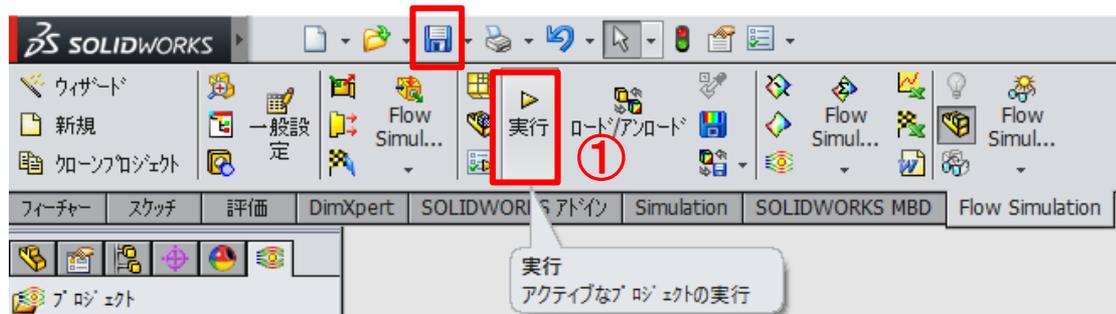
40

※実行前にファイルを保存しておくとい

①実行

→ ② 計算実行の新規計算

→ ③ 実行

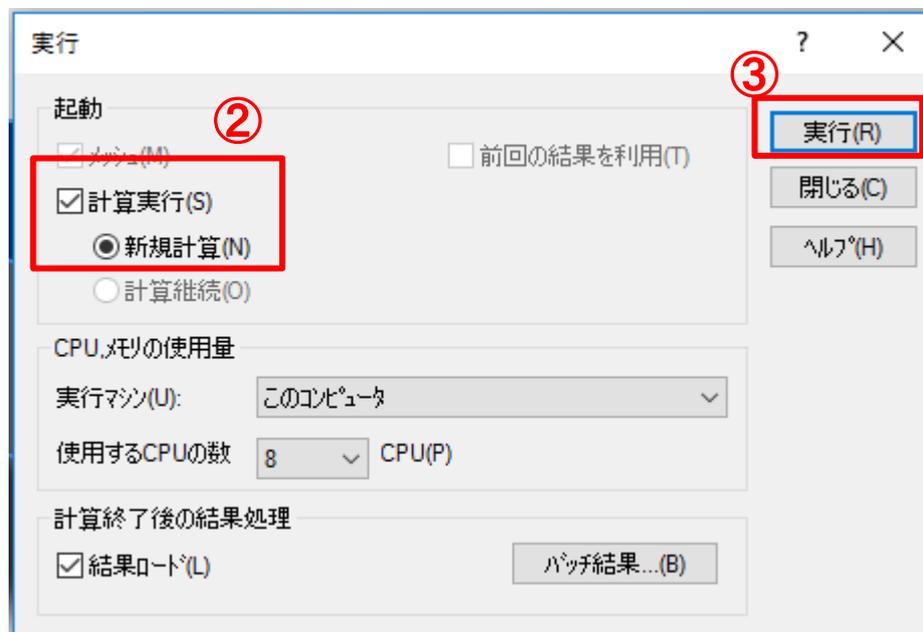


解析の注意点

- 揚力係数 C_L , 抗力係数 C_D の値が収束しているか？
- 流れ場を可視化してみて, 妥当な結果になっているか？

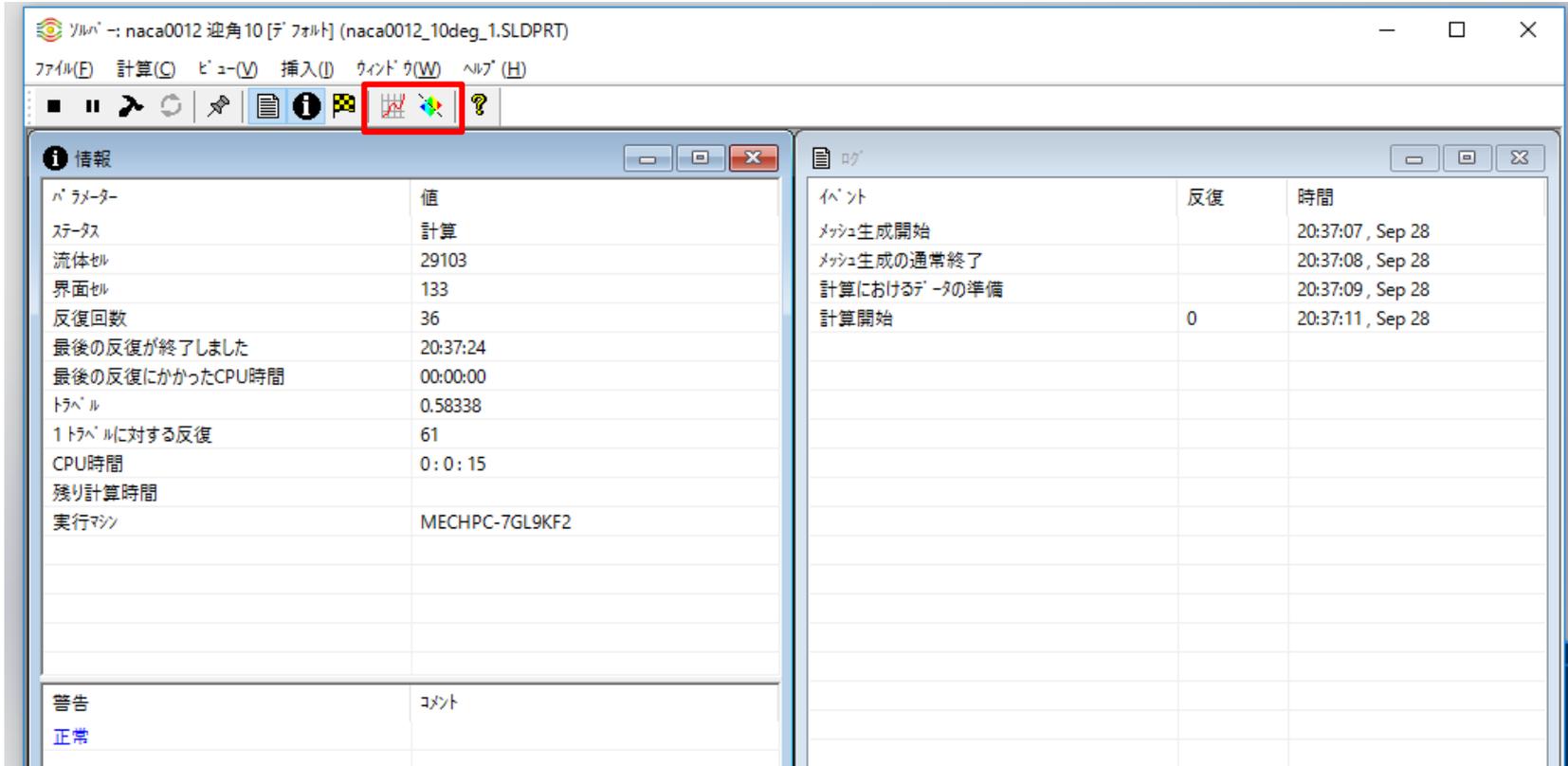
を確認し,

反復計算が足りない場合には, さらに追加で計算させる. また, 計算が十分に収束したのであれば, 途中で計算を中断しても良い.



解析画面の見方

計算実行で下画面がポップアップ



情報

パラメータ	値
ステータス	計算
流体セル	29103
界面セル	133
反復回数	36
最後の反復が終了しました	20:37:24
最後の反復にかかったCPU時間	00:00:00
トラベル	0.58338
1トラベルに対する反復	61
CPU時間	0:0:15
残り計算時間	
実行マシン	MECHPC-7GL9KF2

警告
正常

ログ

イベント	反復	時間
メッシュ生成開始		20:37:07, Sep 28
メッシュ生成の通常終了		20:37:08, Sep 28
計算におけるデータの準備		20:37:09, Sep 28
計算開始	0	20:37:11, Sep 28



グローバルプロット

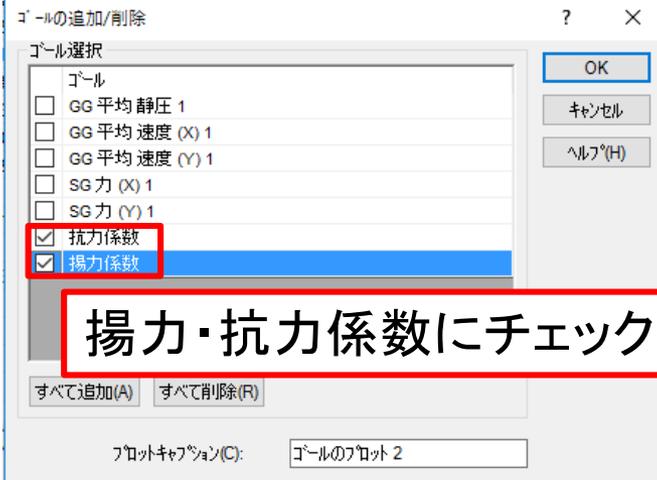


プレビュー挿入

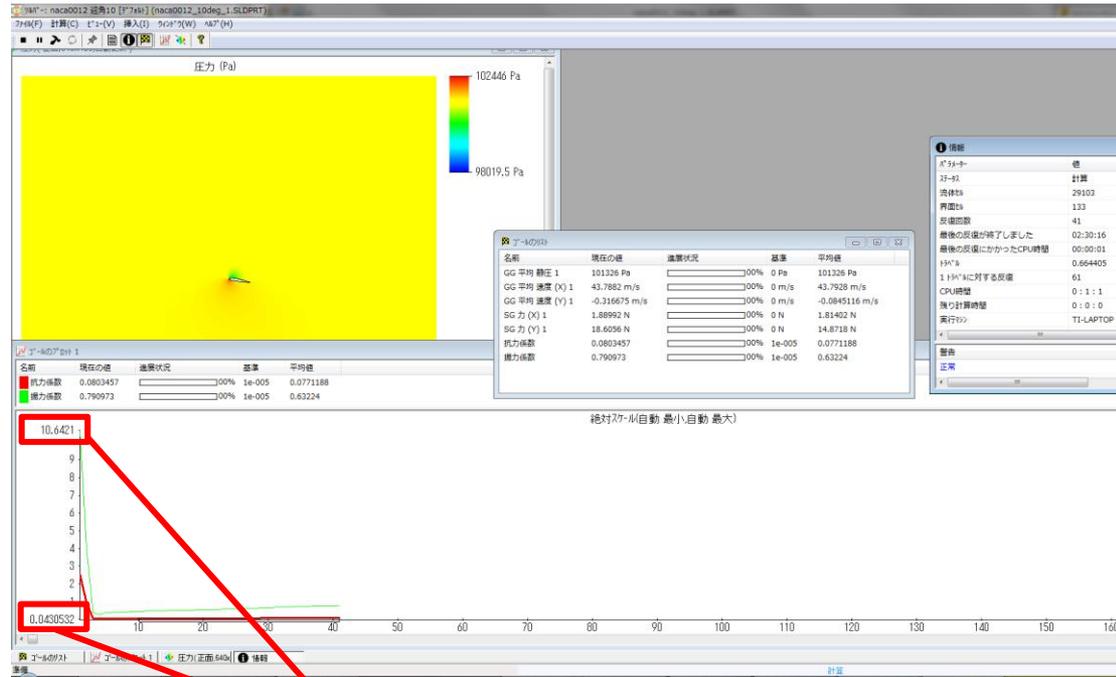
クリックすると解析途中の値をモニターできる(次ページ)

解析画面の見方

グローバルプロット



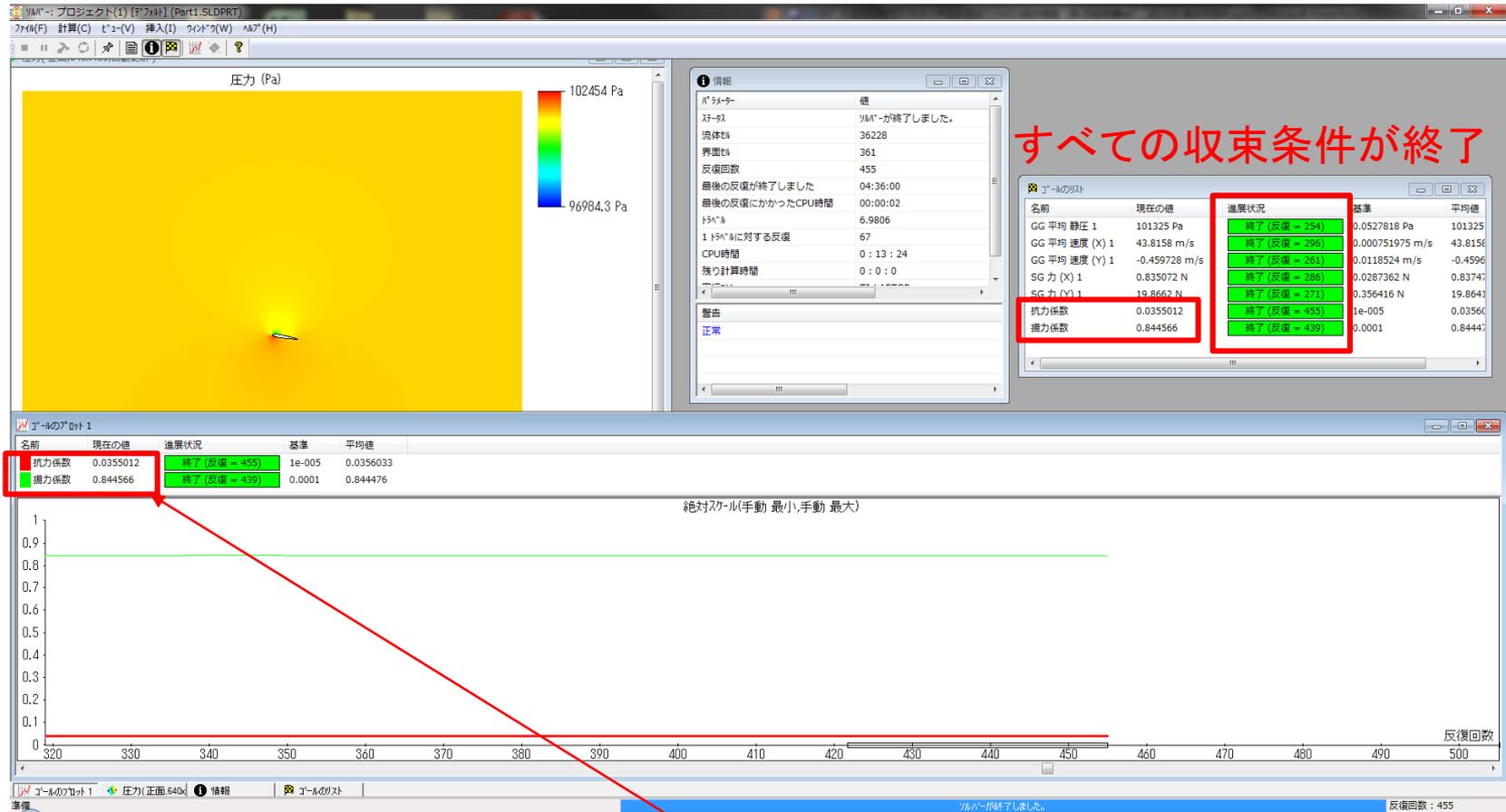
解析途中の値をモニターすることが出来る



プレビュー挿入



解析終了の画面

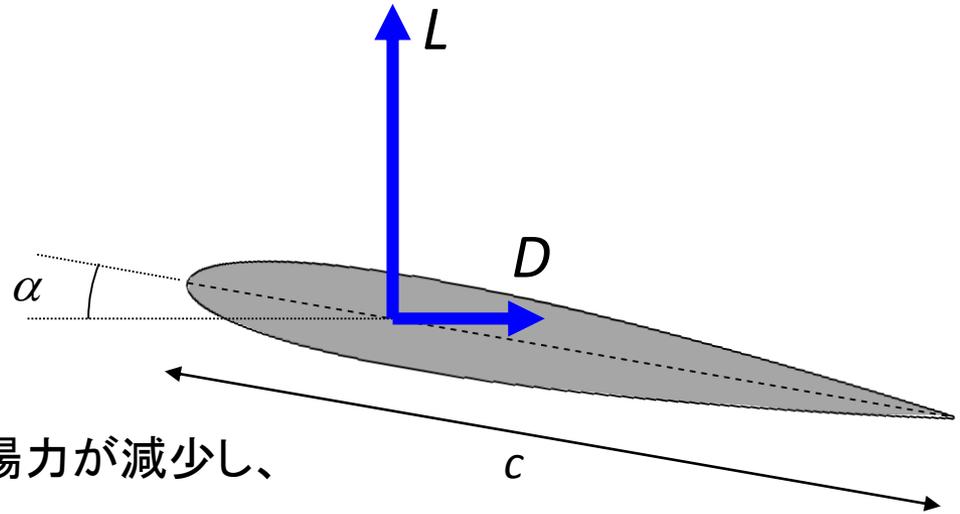
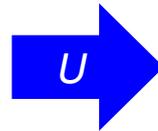


計算が終了したら、まず揚力係数と抗力係数の値をp.45に記入する。
次に、解析結果を可視化・保存する(p.46以降)。
その後、異なる迎角での計算を行う(p.61)。

■計算条件

レポート課題

流体	空気
	密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
	粘度 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
流速	$U = 43.82 \text{ m/s}$
翼型	NACA0012
翼弦長	$c = 2 \text{ m}$
迎角	$\alpha = 0 \sim 20^\circ$



■課題

迎角を大きくしていくと、ある角度で急激に揚力が減少し、抗力が増加する。この現象を**失速**という。

- 各自、迎角を3種類計算し、以下の①～⑧についてレポートにする。
- 揚力係数と抗力係数の計算値(①)をグラフにせよ。p.8の実験値(②)と計算値を比較せよ。
- 失速する前と失速した後の流れに関して、解析結果を可視化(圧力コンター(③), 流速ベクトル(④), 流跡線(⑤), 圧力/せん断応力のXYプロット(⑥))して比較せよ。
- また、エクセル上で、翼表面における圧力/せん断応力を、揚力/抗力成分に分解(⑦)してプロットせよ。(エクセル上で、それらを周積分し、 L, D がSolid Worksのそれと合致しているかも確認。)
- これらの分布から、失速により揚力が減少し、抗力が増加する理由を説明せよ(⑧)。

各自、提出期限: 10月3日(水) 23:59 提出先: report-ryutai@photon.t.u-tokyo.ac.jp

PDFファイルを添付してメールで提出 (ファイルサイズ:なるべく5MB以下)

ファイル名: [班番号2桁]班_[学生証番号8桁]_[氏名].pdf (例) 01班_03999999_山田太郎.pdf

本日の課題 (レポート課題の一部)

(チェック項目: ①~⑥ p.44に相当)

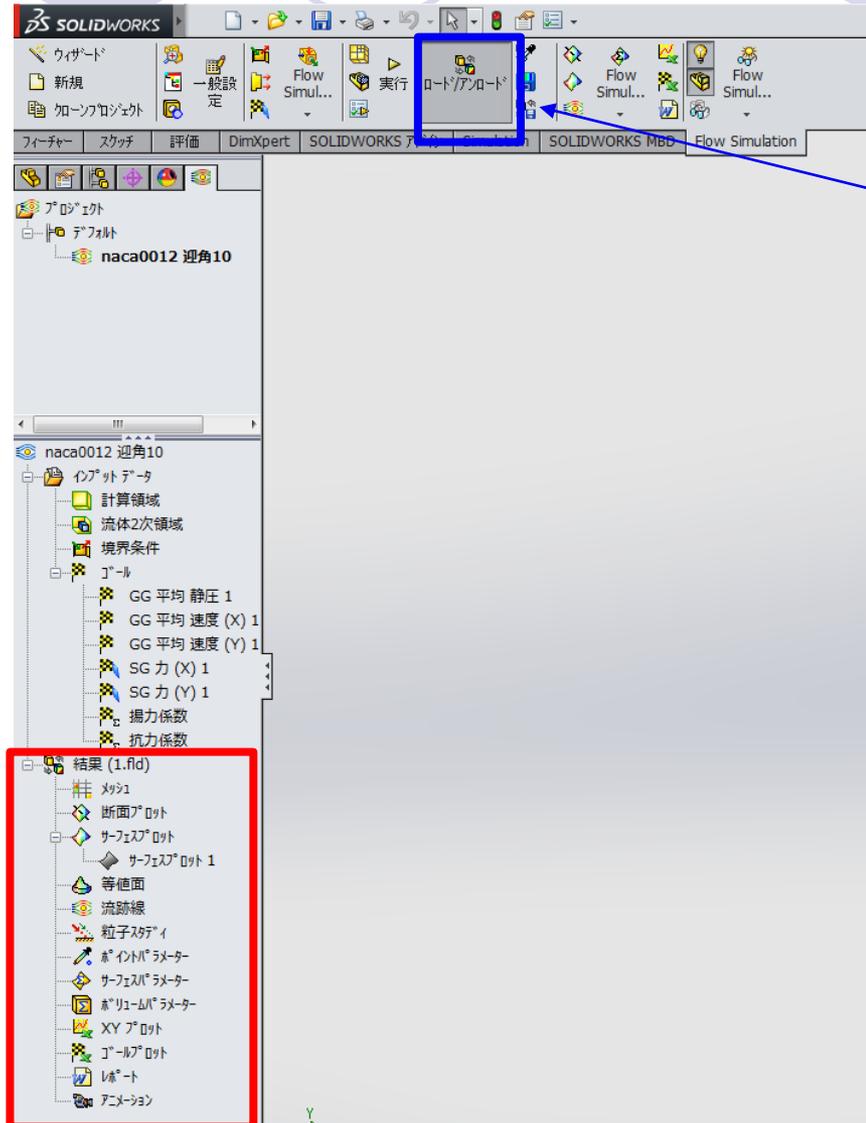
- 迎角を3通り変化させて計算を行い、計算結果 (揚力係数 C_L , 抗力係数 C_D) (①) を記入する。p.8から実験値を読み取る (②)。
- それぞれの迎角について、**流れ場の可視化結果 (③~⑥) のスクリーンショット**を保存する。
- TAに計算値とスクリーンショットを見せて、流れ場がどのようになっているか説明する。

迎角 α	揚力係数 C_L		抗力係数 C_D		③圧力コ ンター	④流速ベ クトル	⑤流跡 線	⑥圧力 /せん 断応力 プロット
	①計算値	②実験値 <small>(p.8から読み取る)</small>	①計算値	②実験値 <small>(p.8から読み取る)</small>				
10°					スクリー ン ショット☑	スクリー ン ショット☑	スクリー ン ショット☑	スクリー ン ショット☑

☞ここまです
で
チェック

☞ここまです
でき
たらチェック後
解散

計算終了後：計算結果のロード



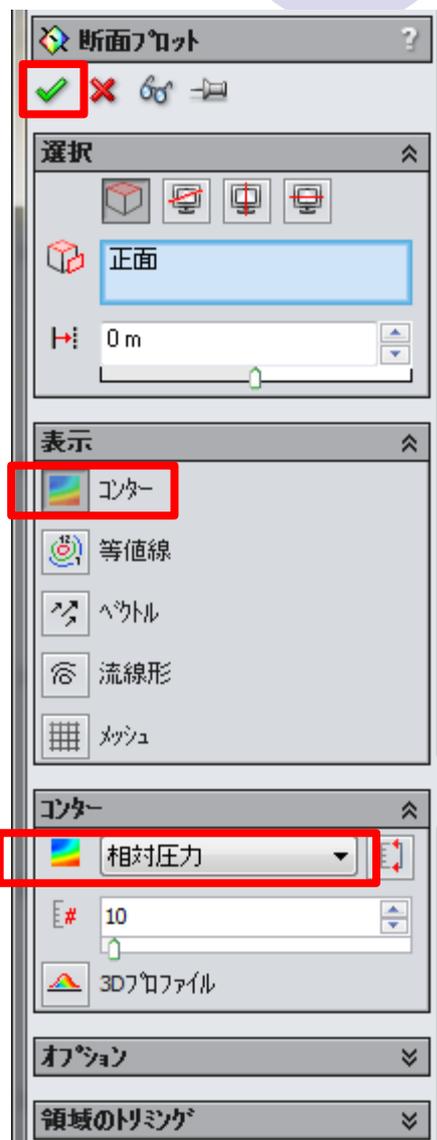
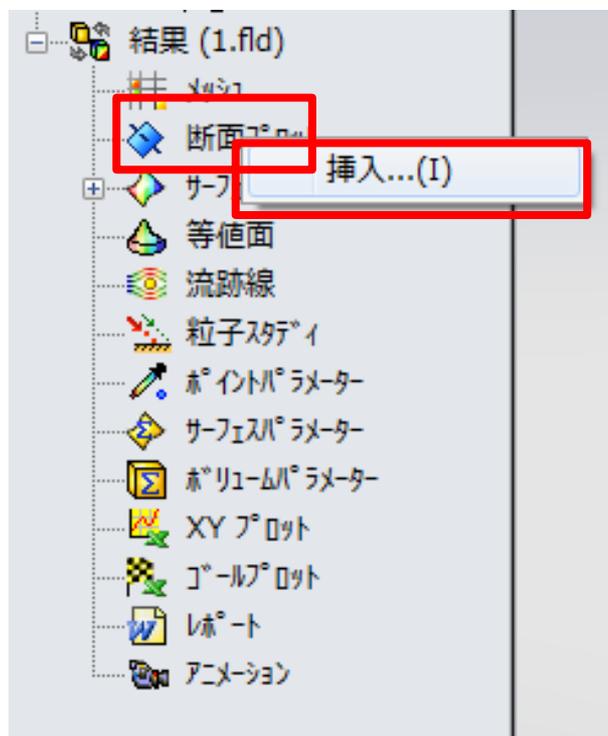
自動で結果がロードされない場合、
又は過去の計算結果が見たい場合、
ロード/アンロード ボタン をクリック

自動で
結果が
ロード
される

計算結果の可視化: 圧力コンター(③)

47

① 断面プロットを
右クリック→挿入

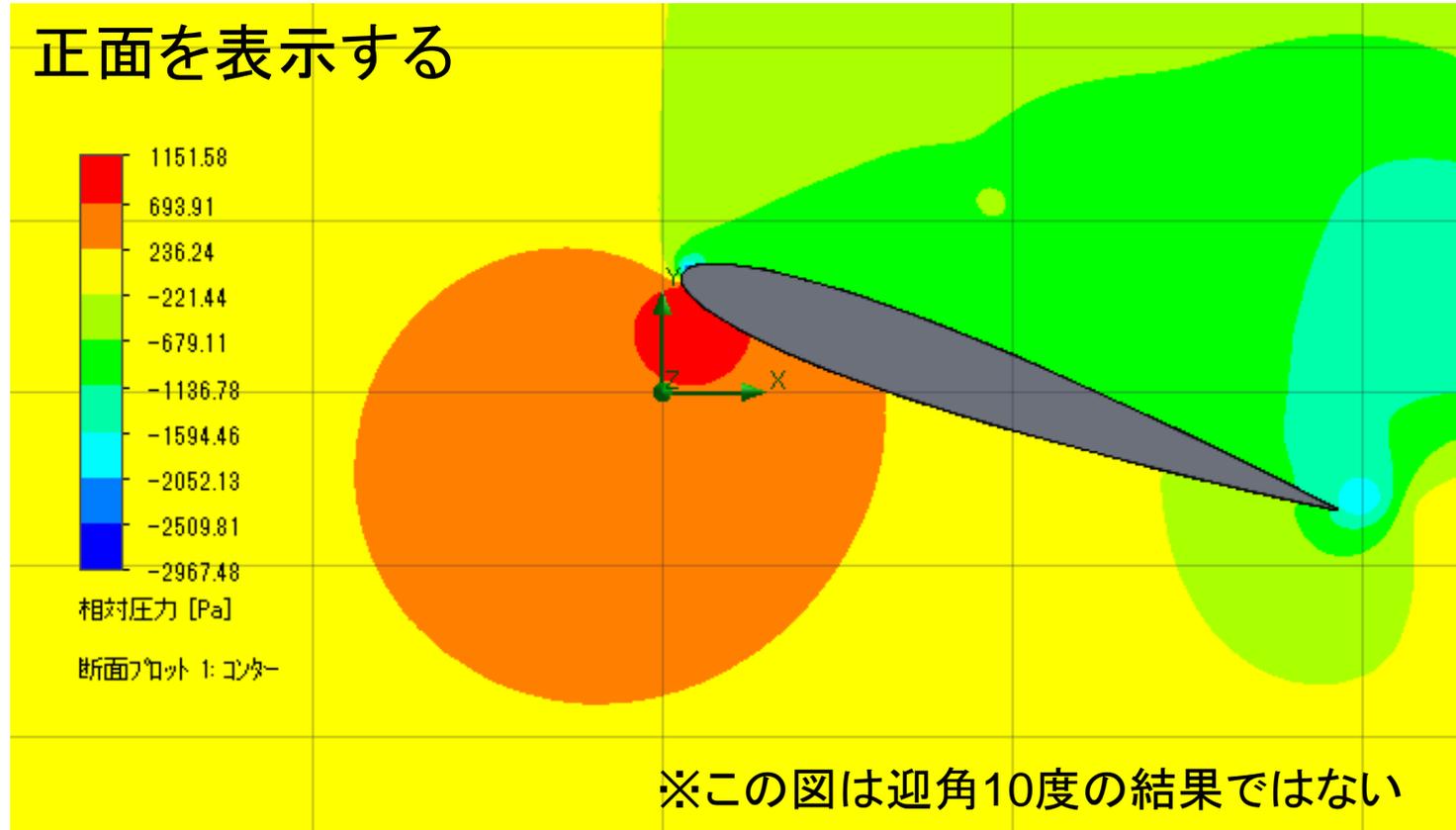


④ OK

② コンター
クリック

③ タブから
相対圧力を選択

計算結果の可視化：圧力コンター(③)



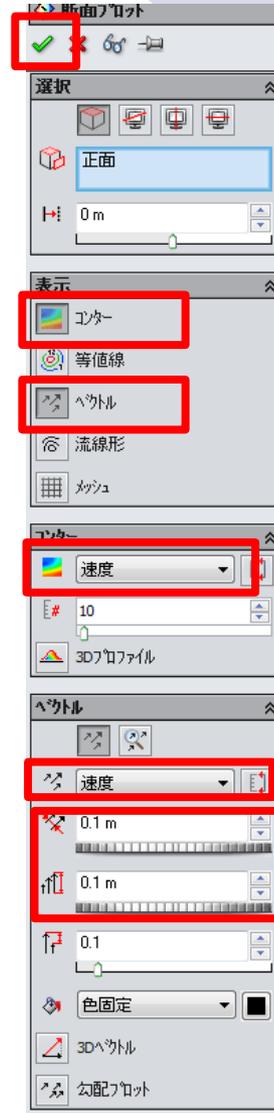
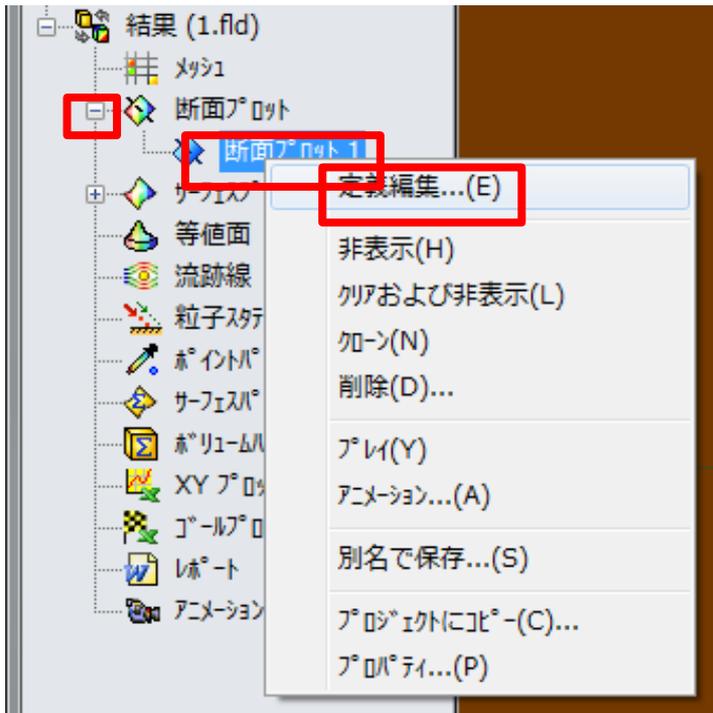
スクリーンショットを保存

例：キーボードのPrint Screenキーを押し、Windowsアクセサリのペイントを開き、貼り付けし、名前をつけて保存

計算結果の可視化：流速ベクトル(④)

49

① 断面プロット1を右クリックし、定義編集（又は新たに挿入）



⑤ OK ※PCへの負荷が大きくクラッシュしやすい
事前にファイルを保存

② コンターとベクトルをクリック

③ タブ2ヶ所で速度を選択

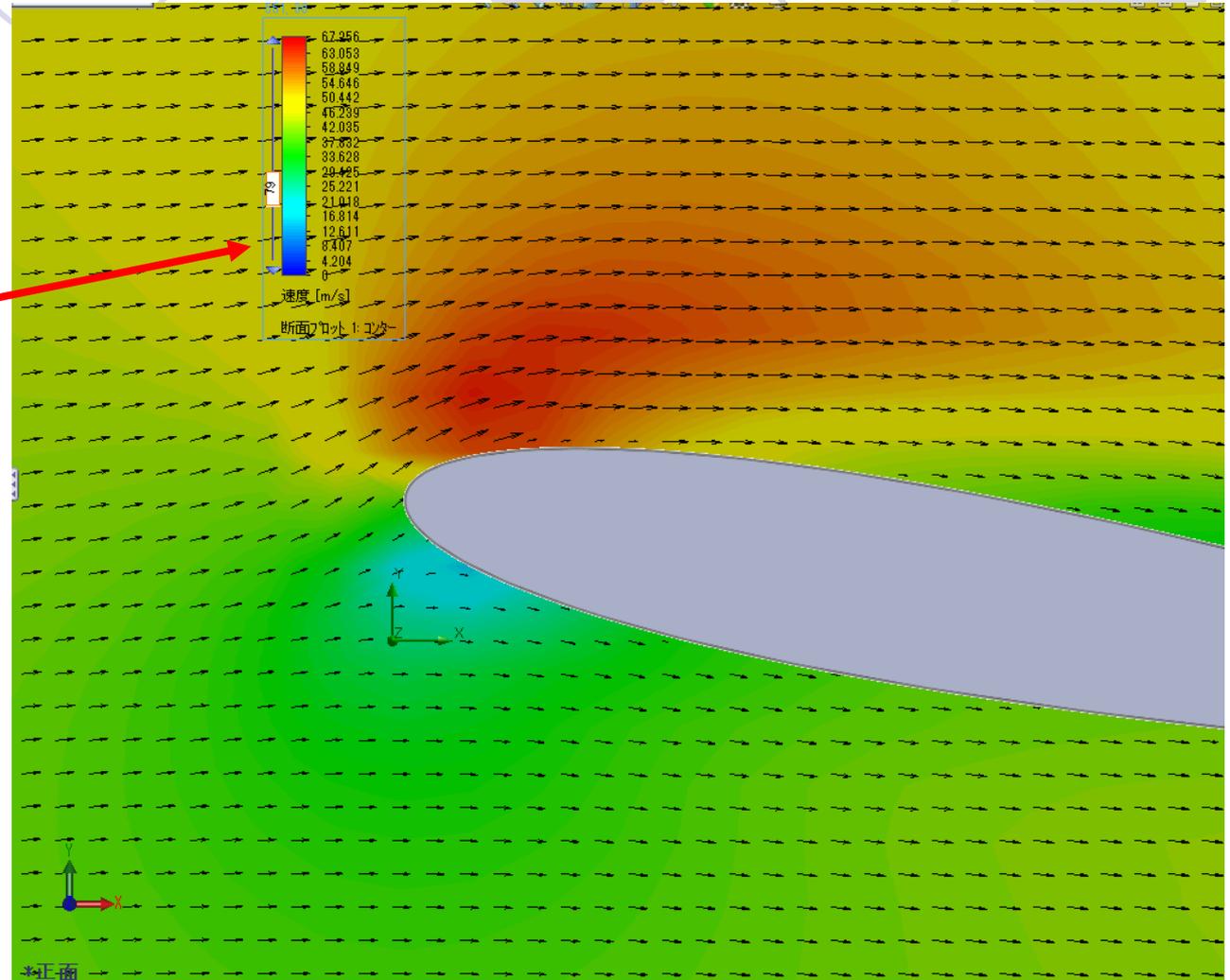
④ 間隔・サイズを指定
例えば0.1mにする

※間隔の数値が小さいと(0.04mのままだと) PC負荷が大きくクラッシュしやすい

計算結果の可視化：流速ベクトル(④)

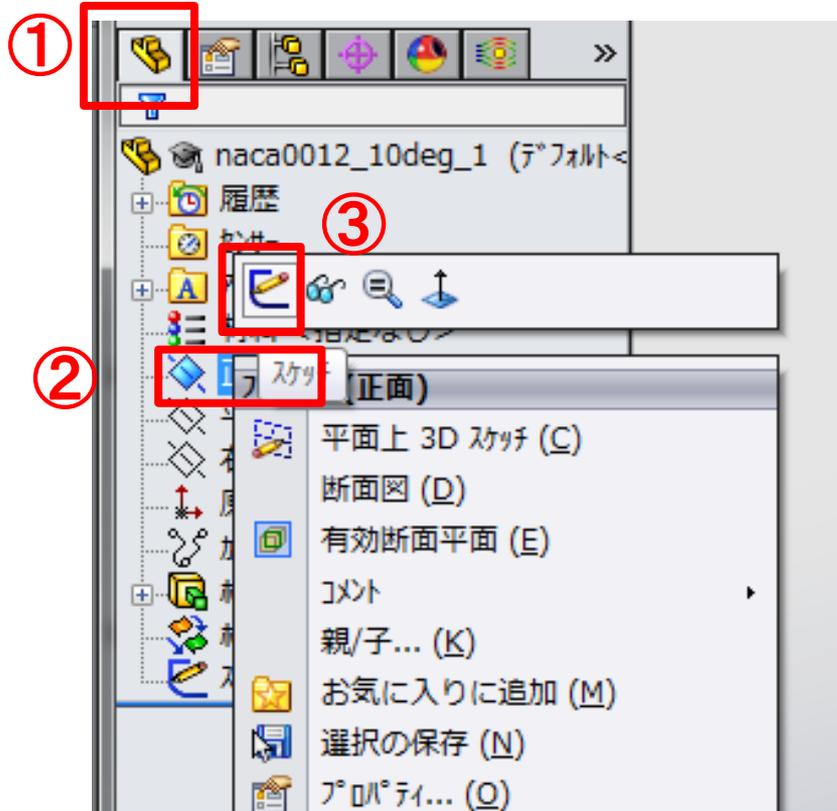
スケールバーの左側に
マウスを持っていくと、
バーのドラッグで色分
割数を変えられる

矢印の間隔・サイズ
は断面プロットの定義
編集より変更できる



スクリーンショットを保存
その後、断面プロット1を右クリックして非表示にしておく

計算結果の可視化：流跡線の表示(5)⁵¹



流跡線の表示のため、
スケッチを作成

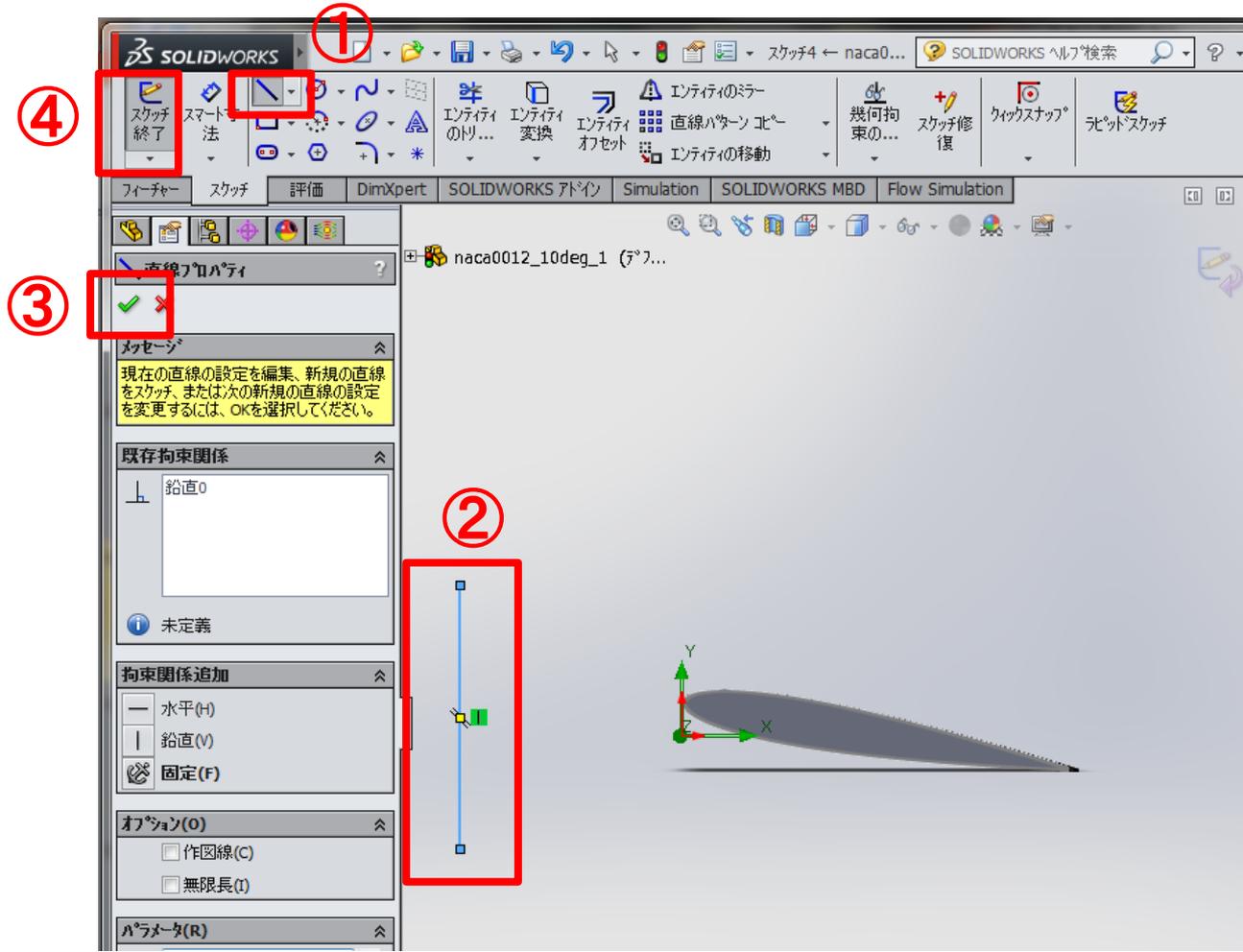
① Feature Manager クリック

② 正面を右クリック

③ スケッチをクリック

計算結果の可視化：流跡線の表示(5)⁵²

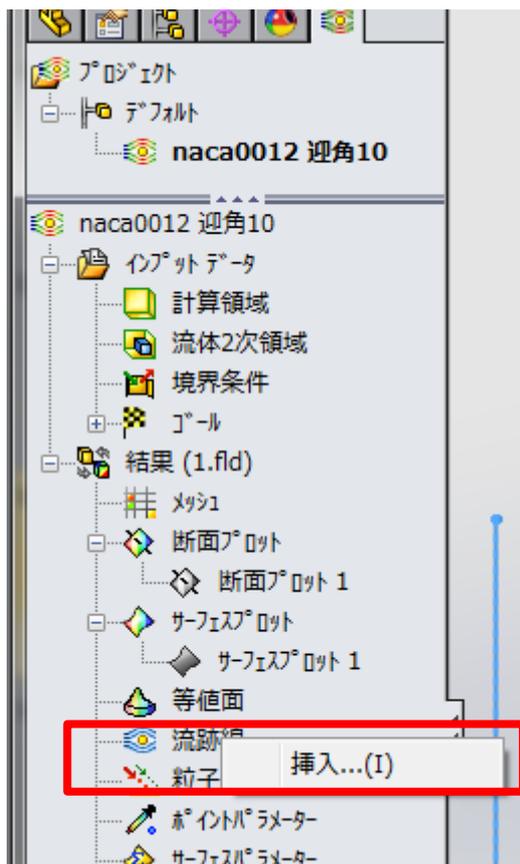
- ①直線 → ②流れの少し上流に直線を描画
- ③OK → ④スケッチ終了



計算結果の可視化：流跡線の表示(5)⁵³

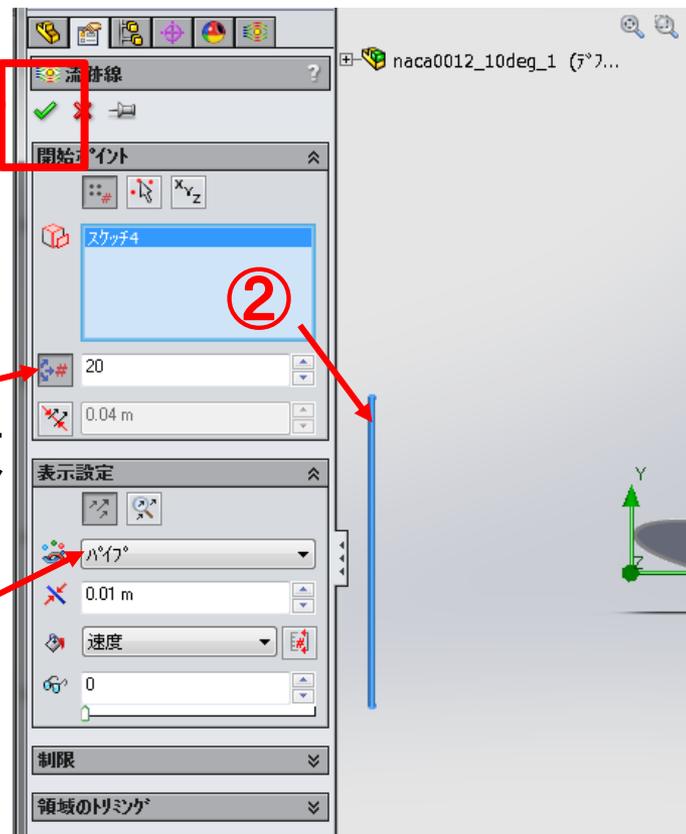
- ① 流跡線 挿入
- ② 作成したスケッチを選択
- ③ OK

前ページでスケッチ終了していないと、選択できない



流跡線の本数を指定

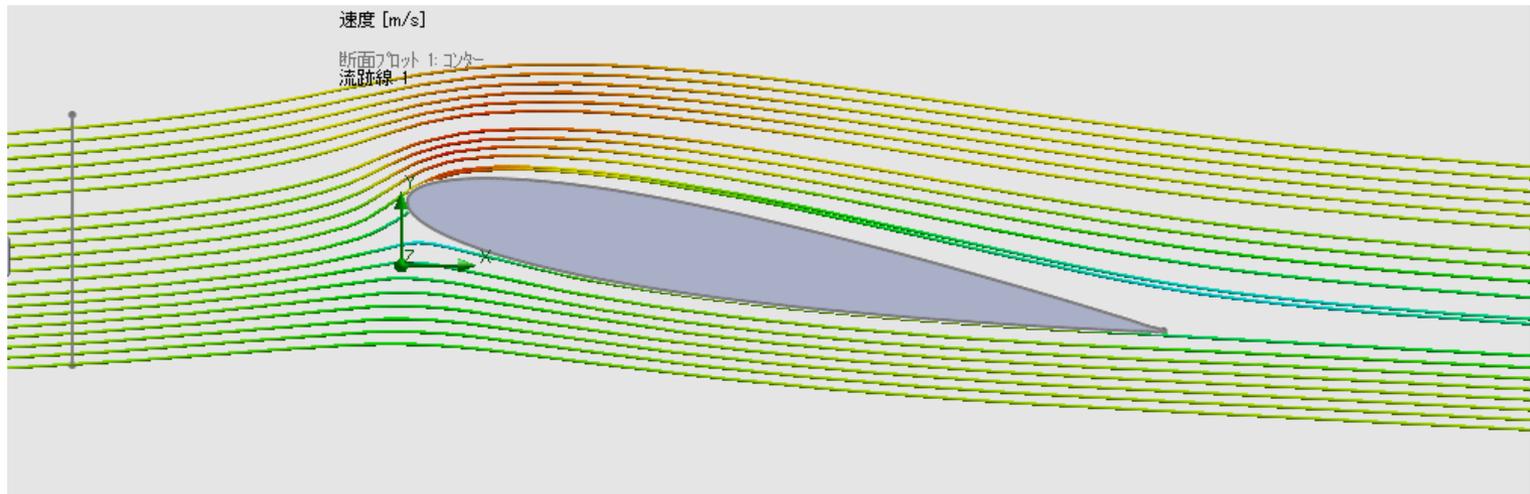
ラインの種類変更



計算結果の可視化：流跡線の表示(⑤)⁵⁴

描いた線分を通る流跡線の表示

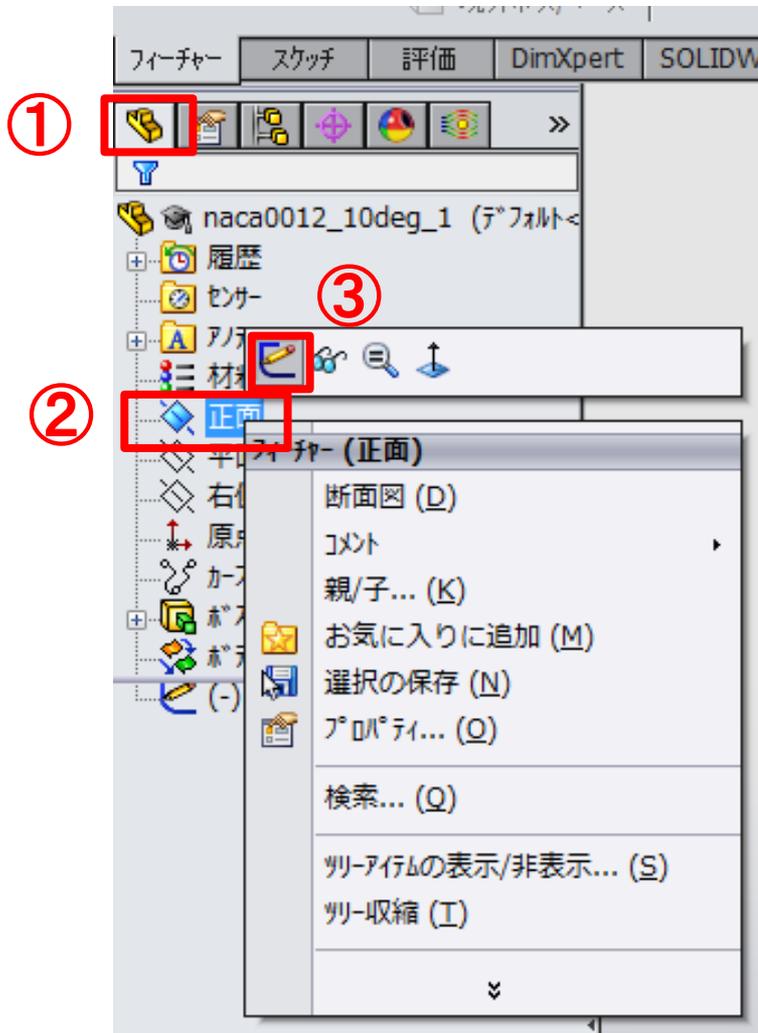
流跡線の定義編集で本数・太さ・色などを調整，また線分スケッチの編集などを用いて見やすいよう工夫する。



スクリーンショットを保存

計算結果の可視化: XYプロット(⑥)

ライン上のプロットのために, スケッチ挿入

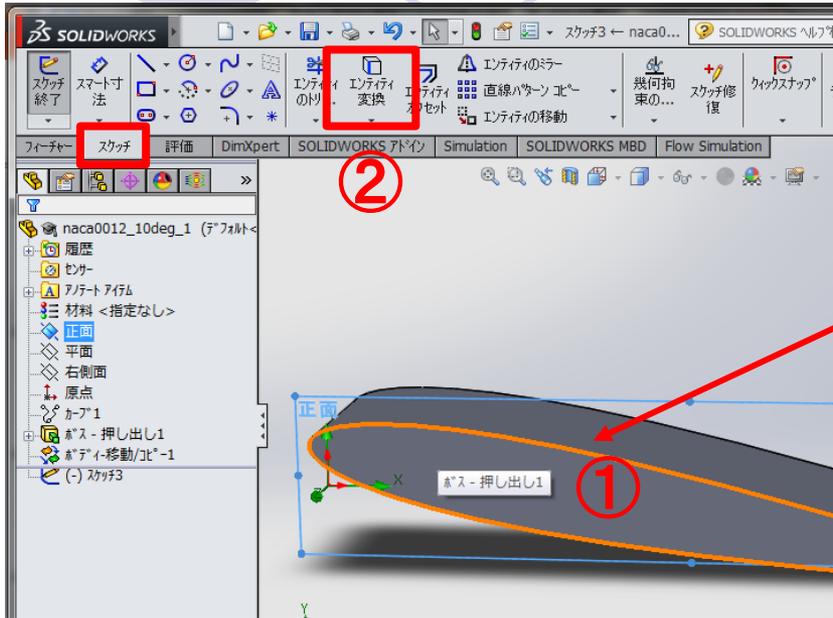


① Feature Manager クリック

② 正面を右クリック

③ スケッチをクリック

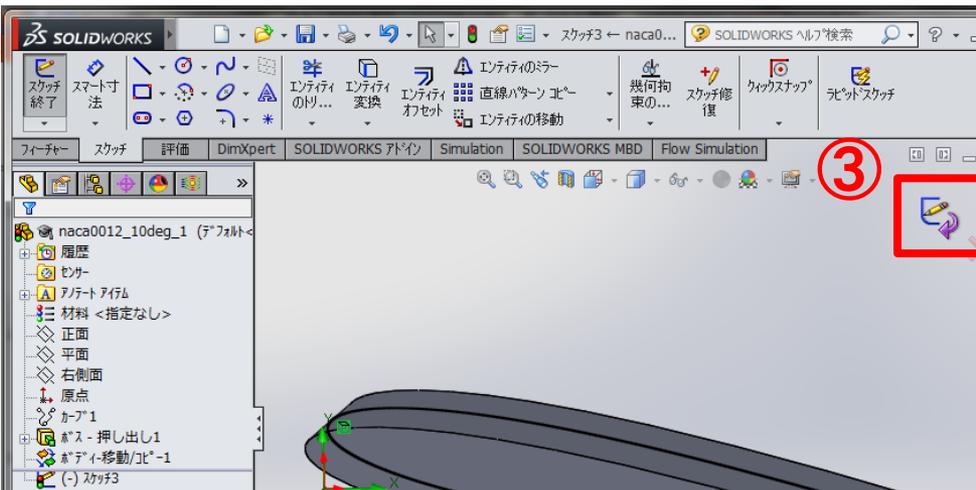
計算結果の可視化:XYプロット(⑥)



①エッジを選択

②エンティティ変換

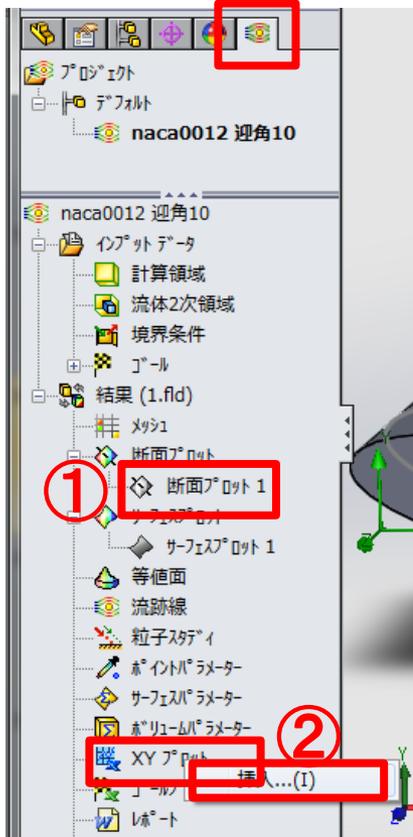
③スケッチ終了



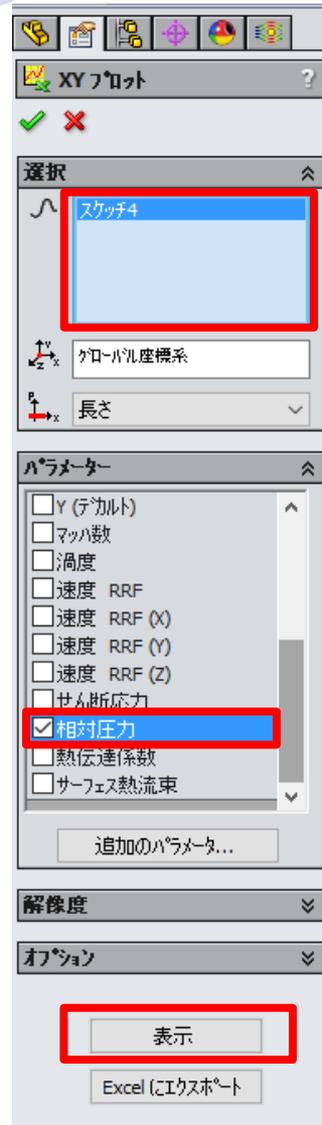
計算結果の可視化: XYプロット(⑥)

①断面プロット

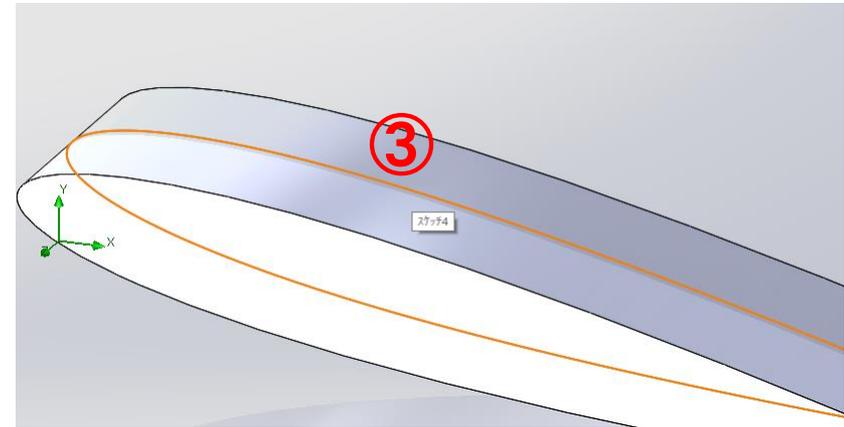
表示されたままなら非表示
に変わる



②XYプロット挿入



③作成したスケッチを選択



④相対圧力を選択

⑤表示

計算結果の可視化:XYプロット(⑥)

① 追加のパラメータ

② 「モデル形状 > X, Y」
「ロード > せん断応力 (X, Y)」
にチェック → OK

③ X, Y, せん断応力 (X, Y) にチェック

④ 解像度タブ, アイコン(均等に分布した出力ポイント)をクリック, 500を入力

⑤ Excelにエクスポート

⑥ OK

① 追加のパラメータ

② 「モデル形状 > X, Y」
「ロード > せん断応力 (X, Y)」
にチェック → OK

③ X, Y, せん断応力 (X, Y) にチェック

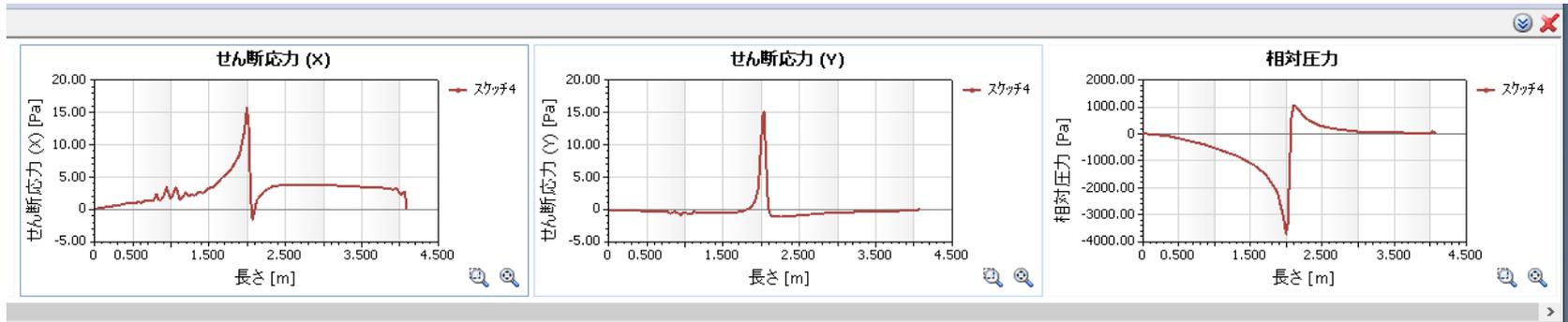
④ 解像度タブ, アイコン(均等に分布した出力ポイント)をクリック, 500を入力

⑤ Excelにエクスポート

⑥ OK

計算結果の可視化:XYプロット(⑥)

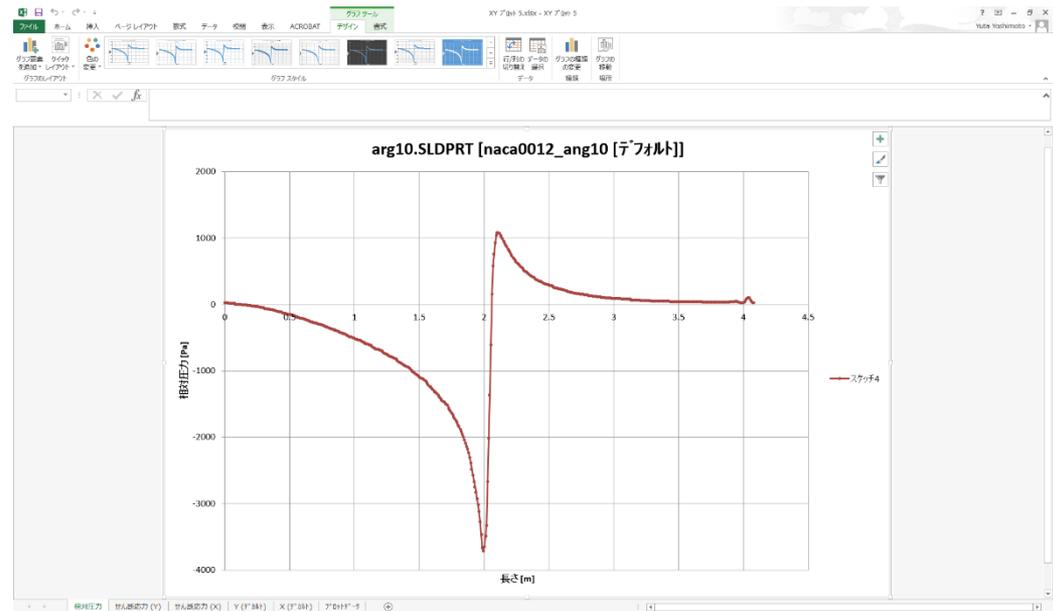
表示の場合 (グラフ上で右クリックから保存できる)



Excelエクスポート の場合

各タブにグラフとプロットデータが
得られる

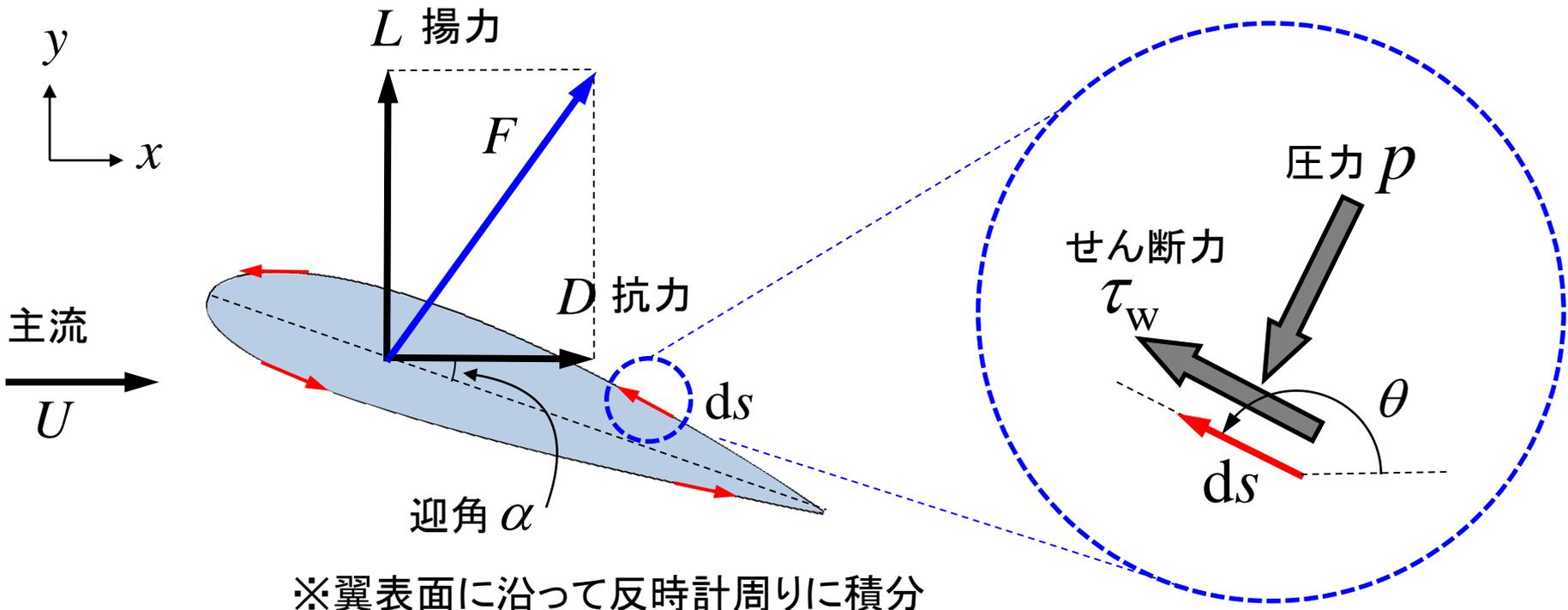
※ 相対圧力は, 翼表面を押し
方向が正として出力される



圧力・せん断力分布と物体に働く力の関係(⑦)

$$D = -\oint p \sin \theta ds + \oint \tau_w \cos \theta ds = -\oint p dy + \oint \tau_{wx} ds$$

$$L = \oint p \cos \theta ds + \oint \tau_w \sin \theta ds = \oint p dx + \oint \tau_{wy} ds$$



※翼表面に沿って反時計周りに積分

レポート作成時にエクセルで計算する

異なる角度を解析する際の注意！！！！

- 計算を始める前に、**新しいフォルダを作成**し、新しいフォルダに名前をつけて保存する。
 - 名前だけを変えた場合は、結果が上書きされてしまうので注意。
 - 計算を実行する時点で上書きが始まるので、**「計算をする前に」**新しいものを保存すること
 - 計算領域は再設定が必要
 - コンフィギュレーションを用いると、より便利に条件の異なる解析が出来る。知りたい人はチュートリアル、テクニカルレファレンスなど参照のこと。

※班内でファイルを共有する際は、Oドライブの下記フォルダを使用できる
O:¥DE2018¥a01 (01部分は班番号)

スケジュール(前半, Group b)

			内容	場所	備考
9/28	金	1	流体講義1(各自)	2-13B	→10/3(水)×切レポート(各自)
10/1	月	2	流体講義2+設計(グループ)	2-13B	
10/4	木	3	振動講義1(各自)	2-13B	→10/10(水)×切レポート(各自)
10/5	金	4	流体設計 +CAM,加工機,加振機の見学	2-13B 8-0068	最初の20分:レポートF/B
10/11	木	5	流体設計 流体中間試問15分×16組 →翼の加工,計測	2-13B 8-0029	試問までにチェックリストを記入 流体OK班から翼の加工へ
10/12	金	6	流体設計+翼の加工,計測	2-13B 8-0029	
10/15	月	7	流体設計+翼の加工,計測 (2つ目) 振動講評	2-13B 8-0029	
10/19	金	8	流体計測+発表会	2-13B 8-0029	アピールシート提出 →11/2(金)×切 計測結果レポート(各自)

