

- The Future of Making Things ～ものづくりの未来～



Autodesk Simulation Day 2015

Autodesk CFD解析テクニック メッシュおよびソルバー設定

オートデスク株式会社

技術営業本部 シミュレーションスペシャリスト

梅山 隆



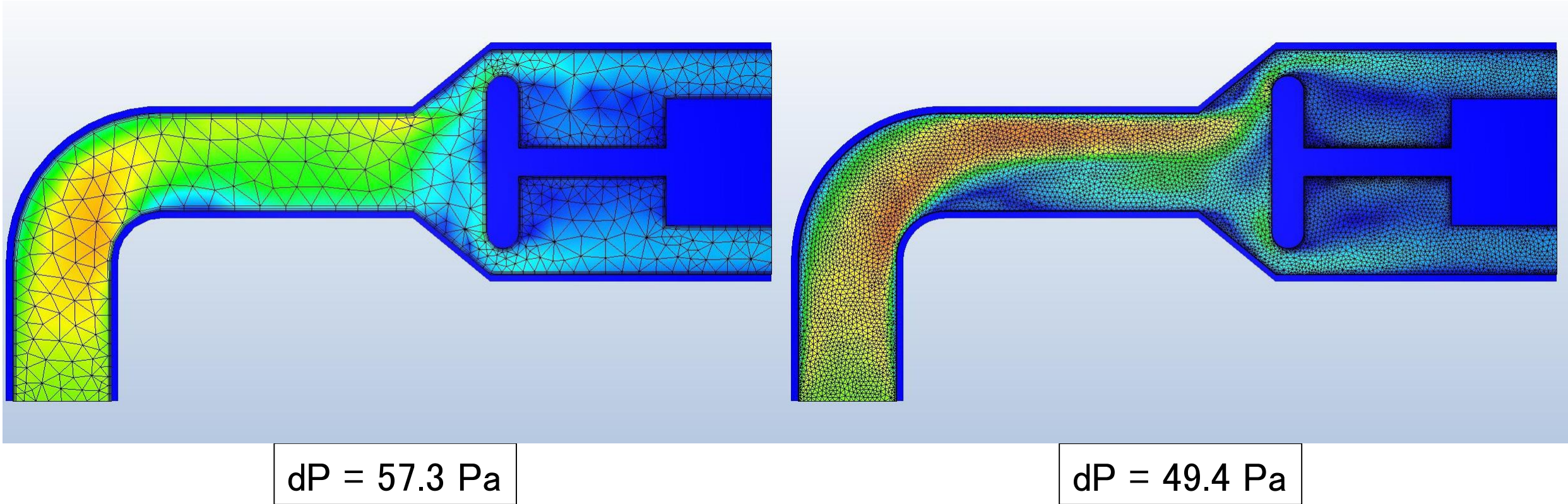
Agenda

- メッシュの要件
- ソルバーコントロール
- 質量保存とエネルギーバランス
- 参考.乱流モデル
- おまけ.Surface Wrap

メッシュの要件

よいメッシュとは?

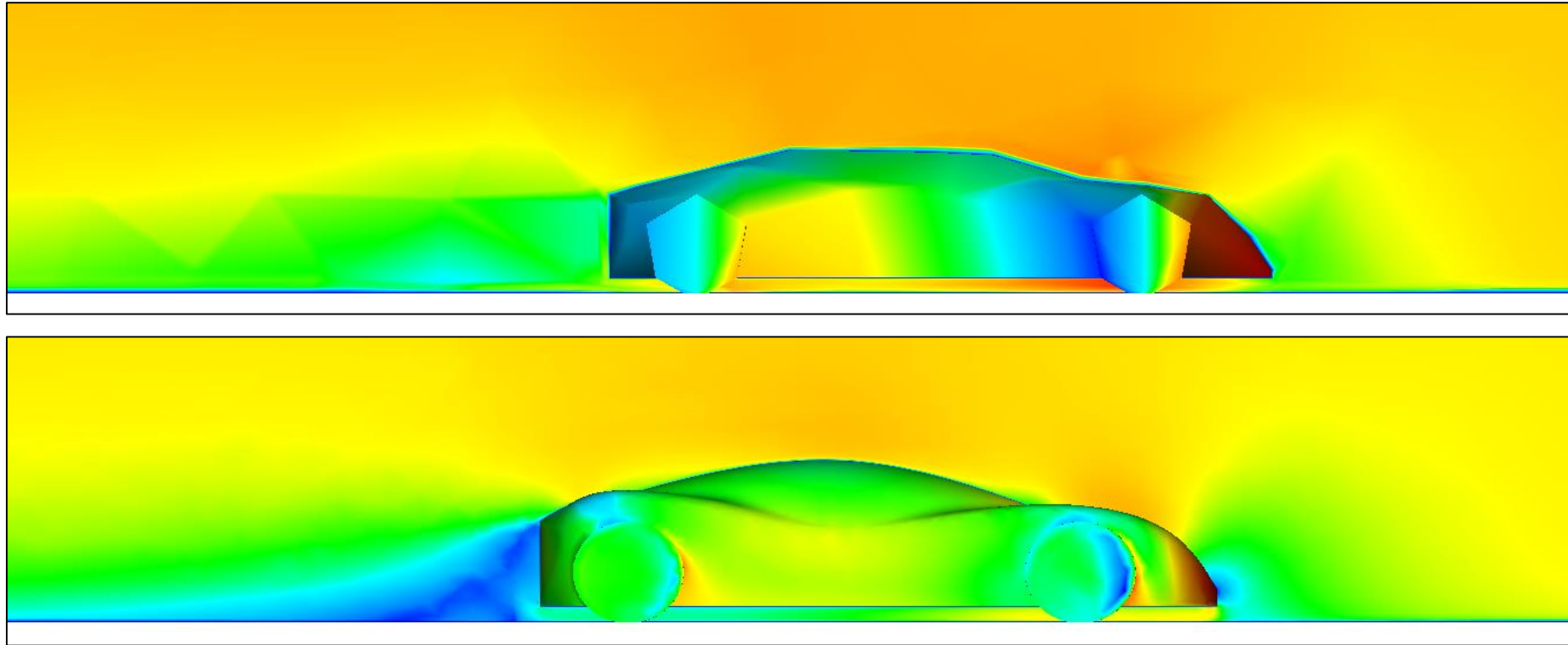
メッシュに依存しない結果となっていること



コーナー部の結果は明らかにメッシュ依存があります

形状を再現しているメッシュになっているか？

CADモデル形状を正しく再現するだけのメッシュ密度になっていますか？

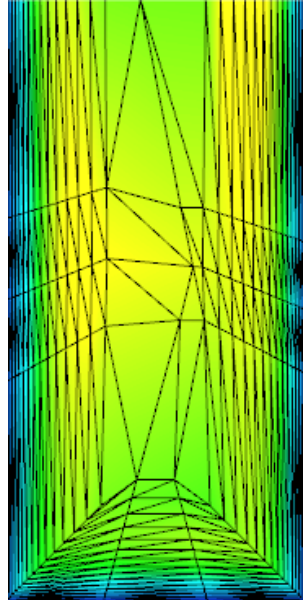


メッシュが粗すぎて実際の形状が再現できていない・・・
→メッシュの細分割が必要！

狭い流路のメッシュコントロール

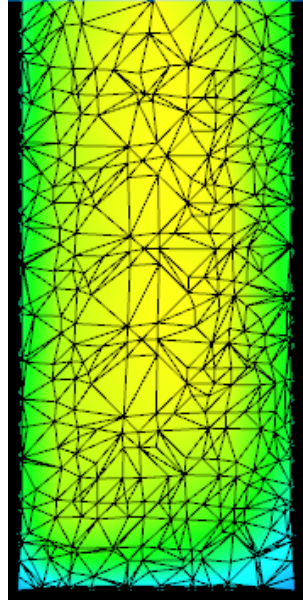
悪い例

境界層メッシュが四面体と比較し大きい

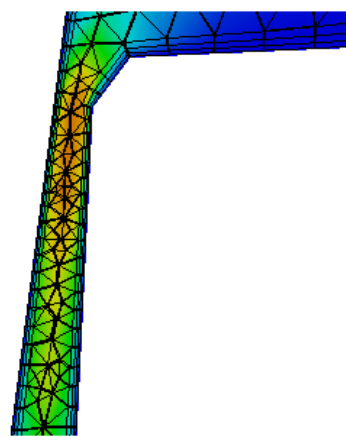


良い例

小さい境界層メッシュと隙間に十分なメッシュが存在

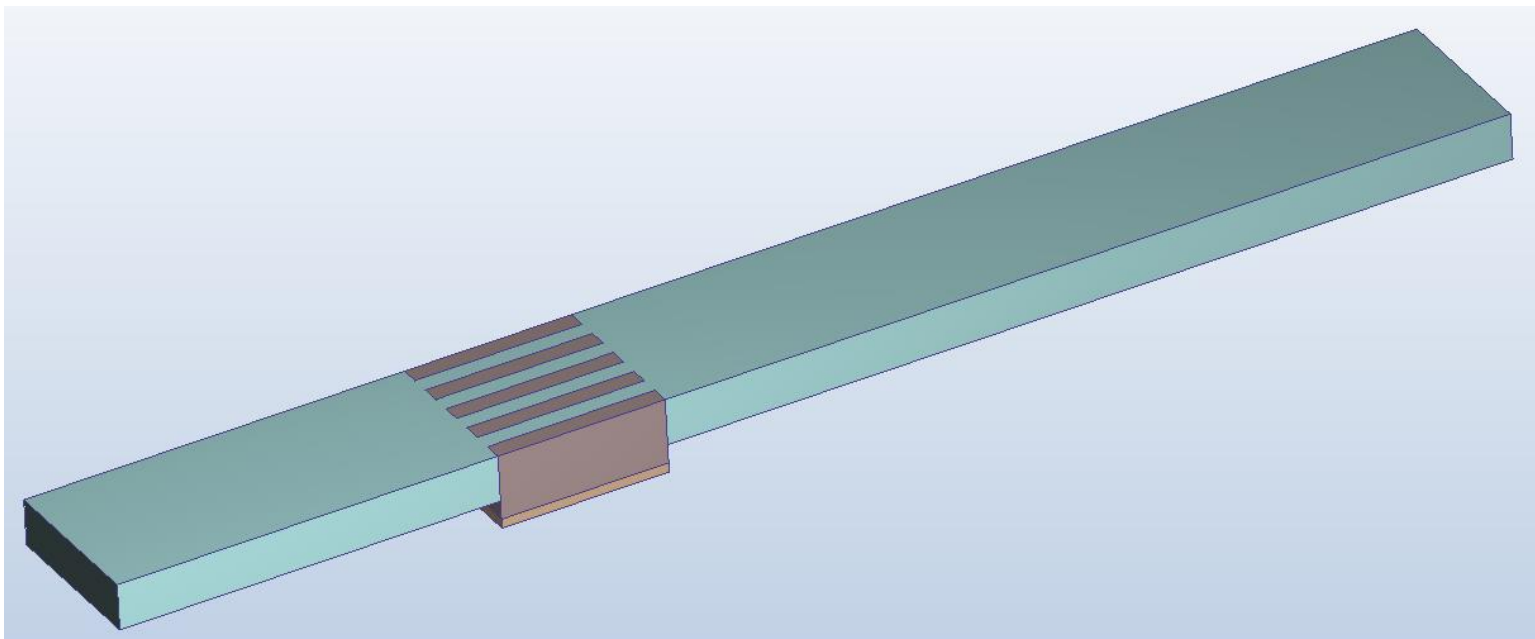


- サーフエス/ギャップ細分割を必要に応じて活用
- ギャップ細分割では流体領域で3層が一般的に良好
- 薄い固体層を考慮



ギャップ部のメッシュ

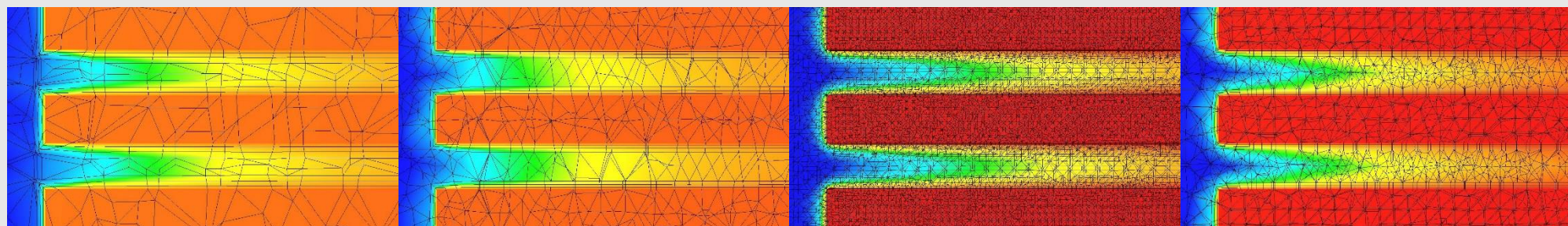
薄い部分の流れ、温度の勾配を再現するために考慮すべきポイントは？



ギャップ部のメッシュ

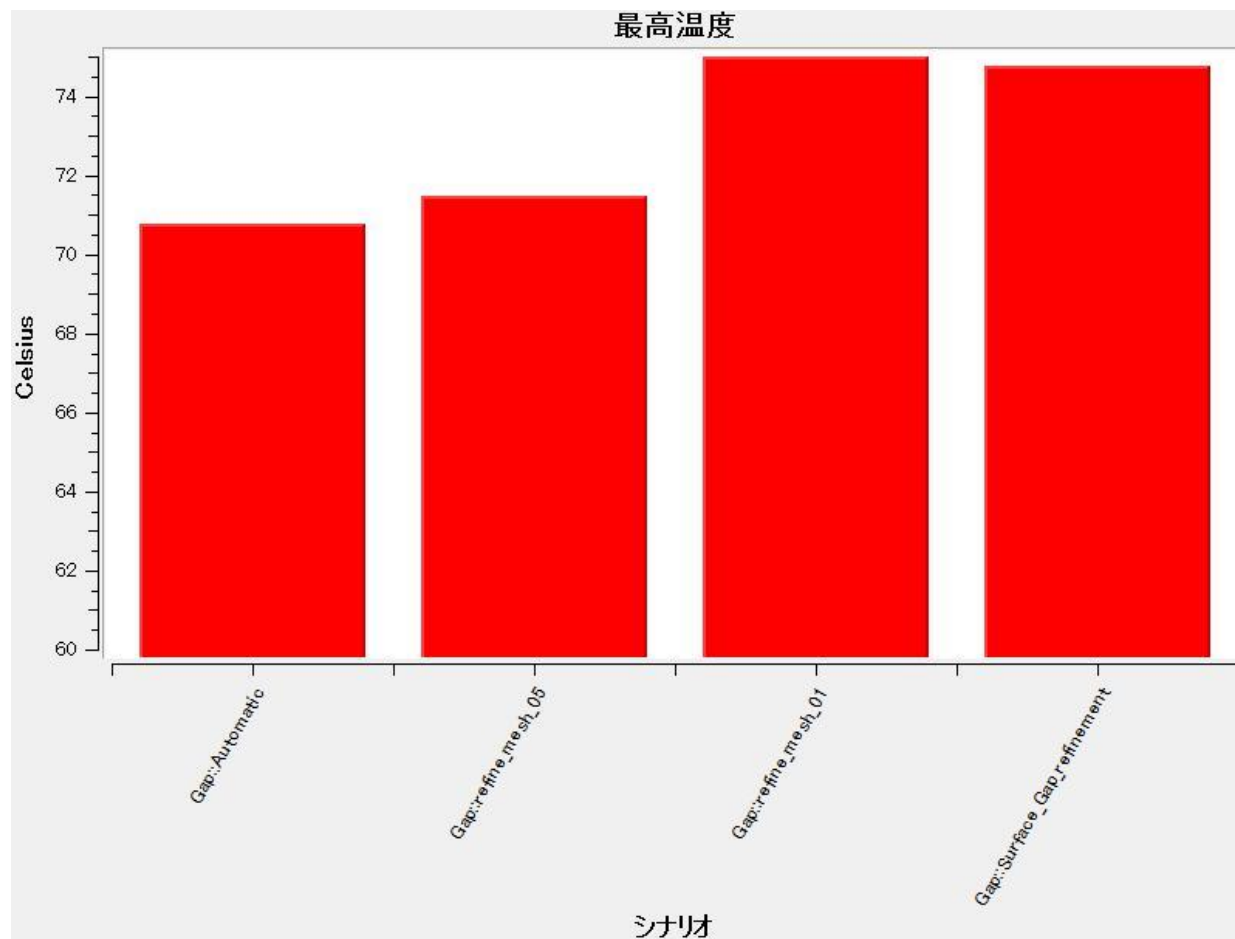
メッシュサイズの影響

メッシュ設定	オートメッシュサイズ	サイズ調整:0.5	サイズ調整:0.1	サーフェスおよびギャップ細分割
要素数(固体+流体)	11,795	48,114	3,264,273	185,479
必要メモリ	83MB	147MB	3514MB	320MB
解析時間	24sec	63sec	3,236sec	186sec
チップ最高温度	70.73°C	71.46°C	74.99°C	74.75°C



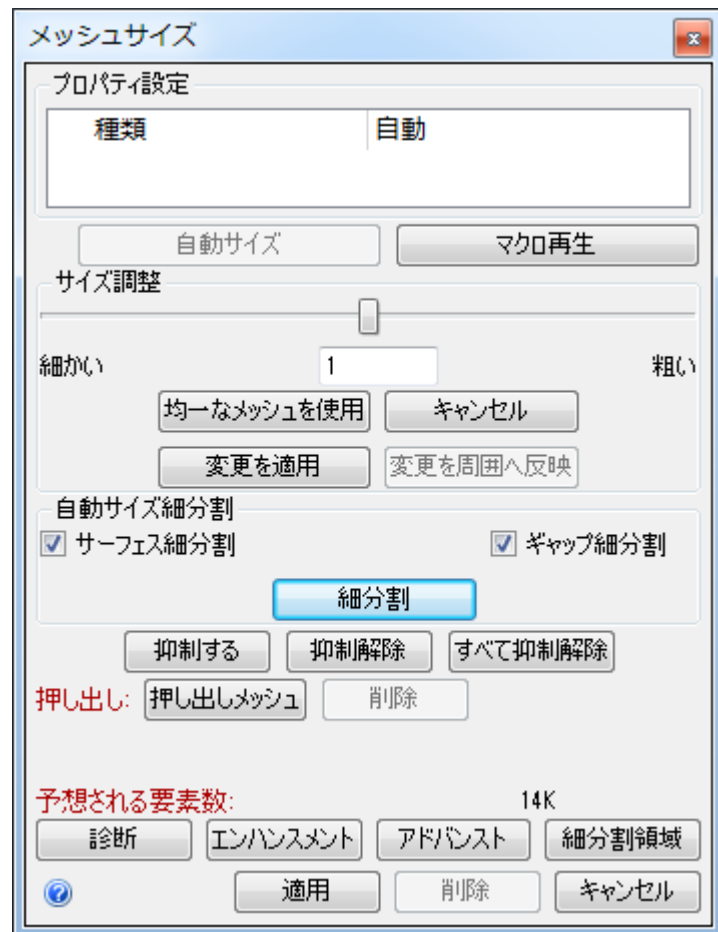
ギャップ部のメッシュ

メッシュサイズの影響

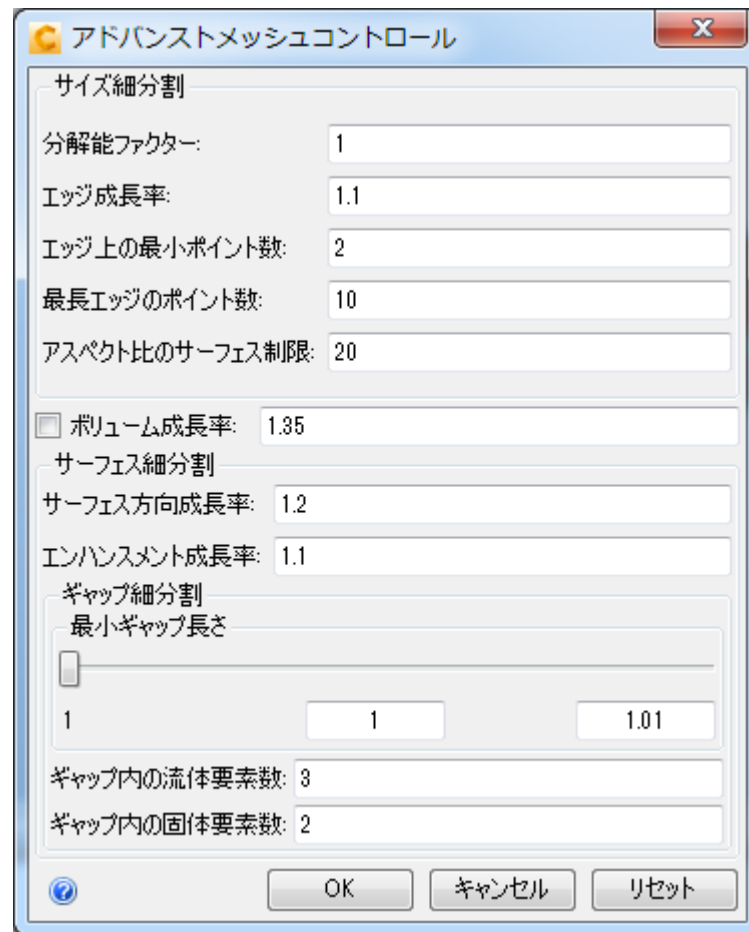


ギャップ部のメッシュ

サーフェスおよびギャップの細分割をON



ギャップ内の流体要素を3以上に

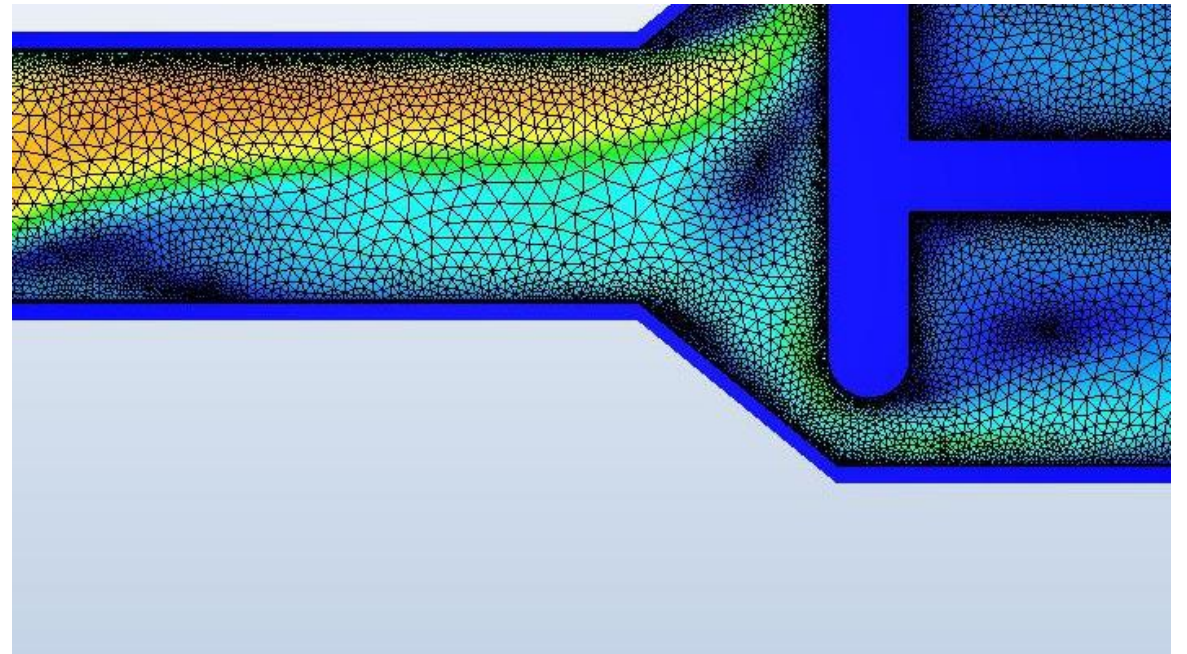
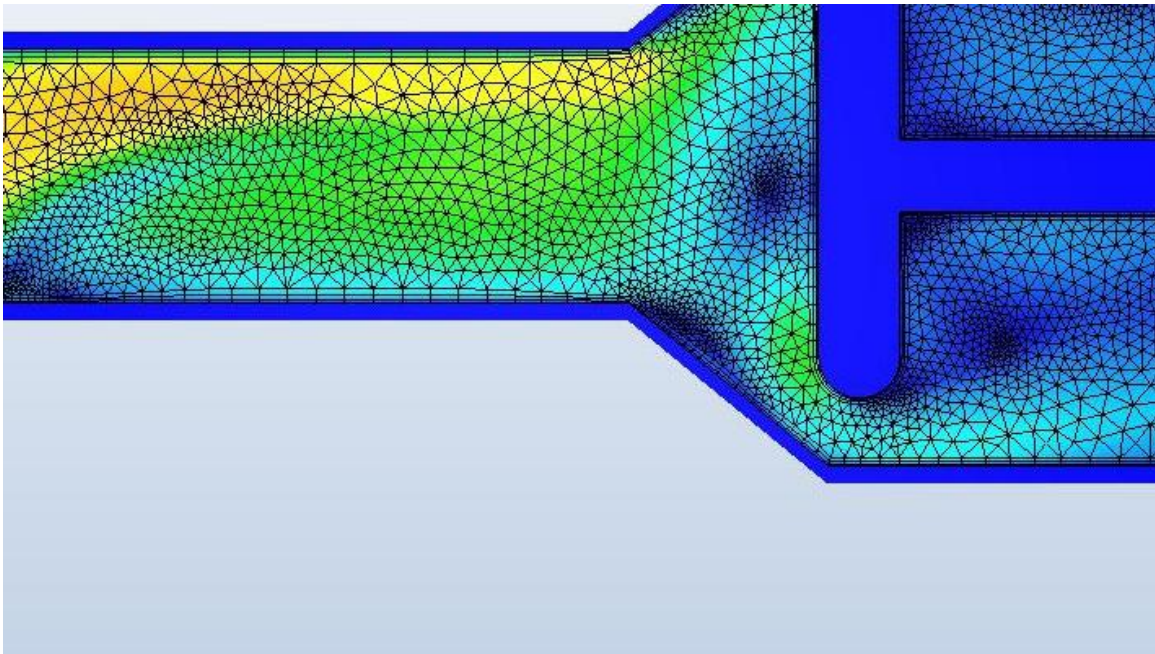


メッシュ依存性の簡単な検討方法

- 自動メッシュサイズで解析し、重要な結果をサマリー値としてピックアップ
- シナリオを複製し、すべての部品を0.7の細分割で解析実行
- デシジョンセンターで結果を比較
- 結果の数値の差が5%以下:メッシュ設定に依存していないと考えられる
- 差が大きい場合:更に0.7の細分割で解析を繰り返し結果を比較

アダプティブメッシュの利用

- ・自動メッシュサイズに基づいてアダプティブメッシュをすることも可能ですが、前述の方法でメッシュサイズを設定してからアダプティブメッシュを行うと、よりメッシュを絞り込むことができるようになります



メッシュ作成についてのポイント-まとめおよび追加情報

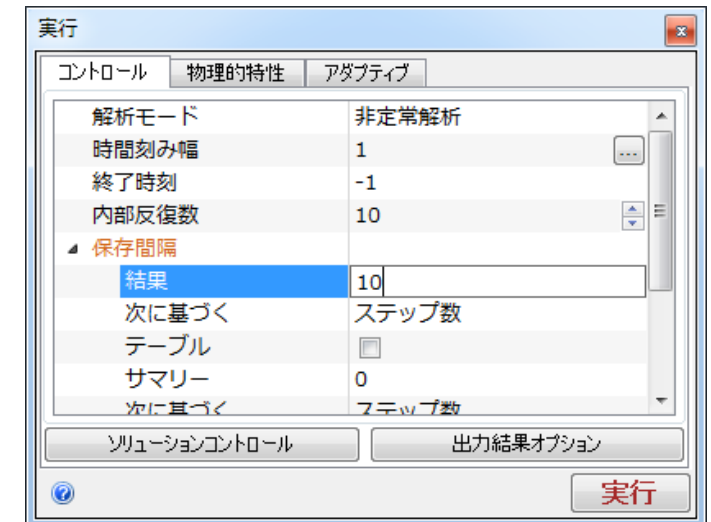
- ・形状を再現するのに十分なメッシュサイズを
 - ・隙間や流路は少なくとも4～5要素を確保
理想的には各隙間は壁面からの流れの勾配が表現できるだけの要素が必要
メッシュエンハンスメントの利用も有効
 - ・サーフェス細分割、ギャップ細分割を有効に
サーフェス細分割はエッジ上だけではなくサーフェス上もコントロールします
ギャップ細分割は3層が精度と解析時間のバランスがよいと考えられます
 - ・メッシュ依存性の確認
 - ・ファンやブロウ、抵抗には均一なメッシュで肉厚方向に4～5要素を確保
- ※他にボリューム成長率の設定もメッシュ制御には有効です

ソルバーコントロール

ソルバーコントロール

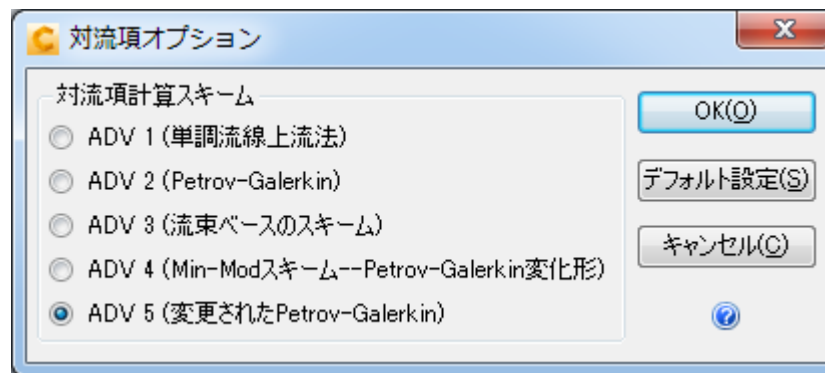
- ・定常解析では途中の結果を保存する必要はありません
- ・非定常解析での途中結果保存は40～50程度がよいでしょう。
保存ステップ数が多い場合、十分なメモリ容量が無いと
ソフトウェアの反応が遅くなる原因(結果が戻ってこないなど)になります

※参考:[失われた結果の復活方法](#)



ソルバーコントロール-ソリューションコントロール

- 対流項計算スキームADV5は多くの場合よい結果が得られます
ただし、以下の場合にはADV1を使用します。
サーフェス抵抗を利用
自由表面解析

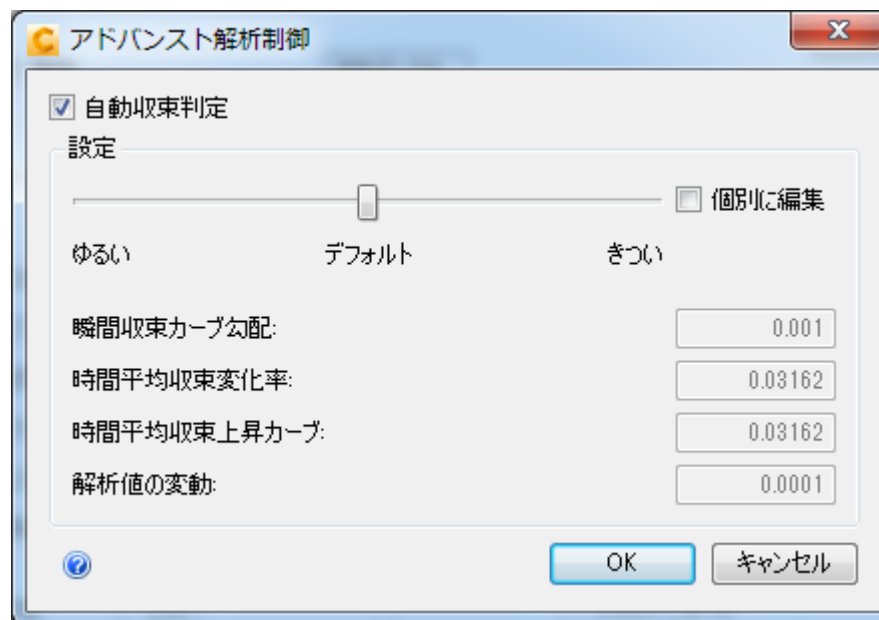
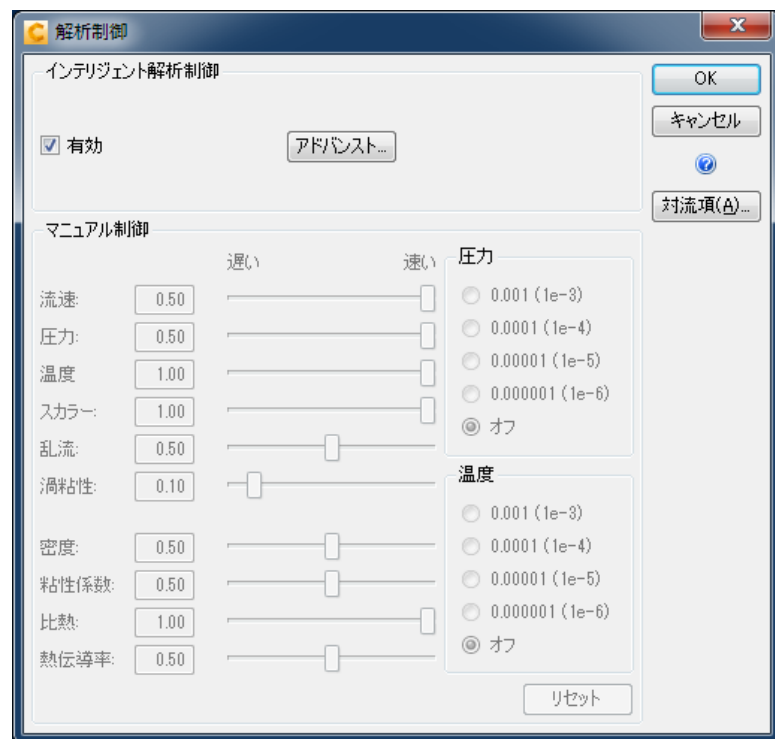


ソルバーコントロール-ソリューションコントロール

・収束条件の調整

減少させると解析時間は長くなりますが、一般的には精度が向上します
(ただし、十分に細かいメッシュが必要)

収束に達する前に解析終了しないように収束回数を多くします



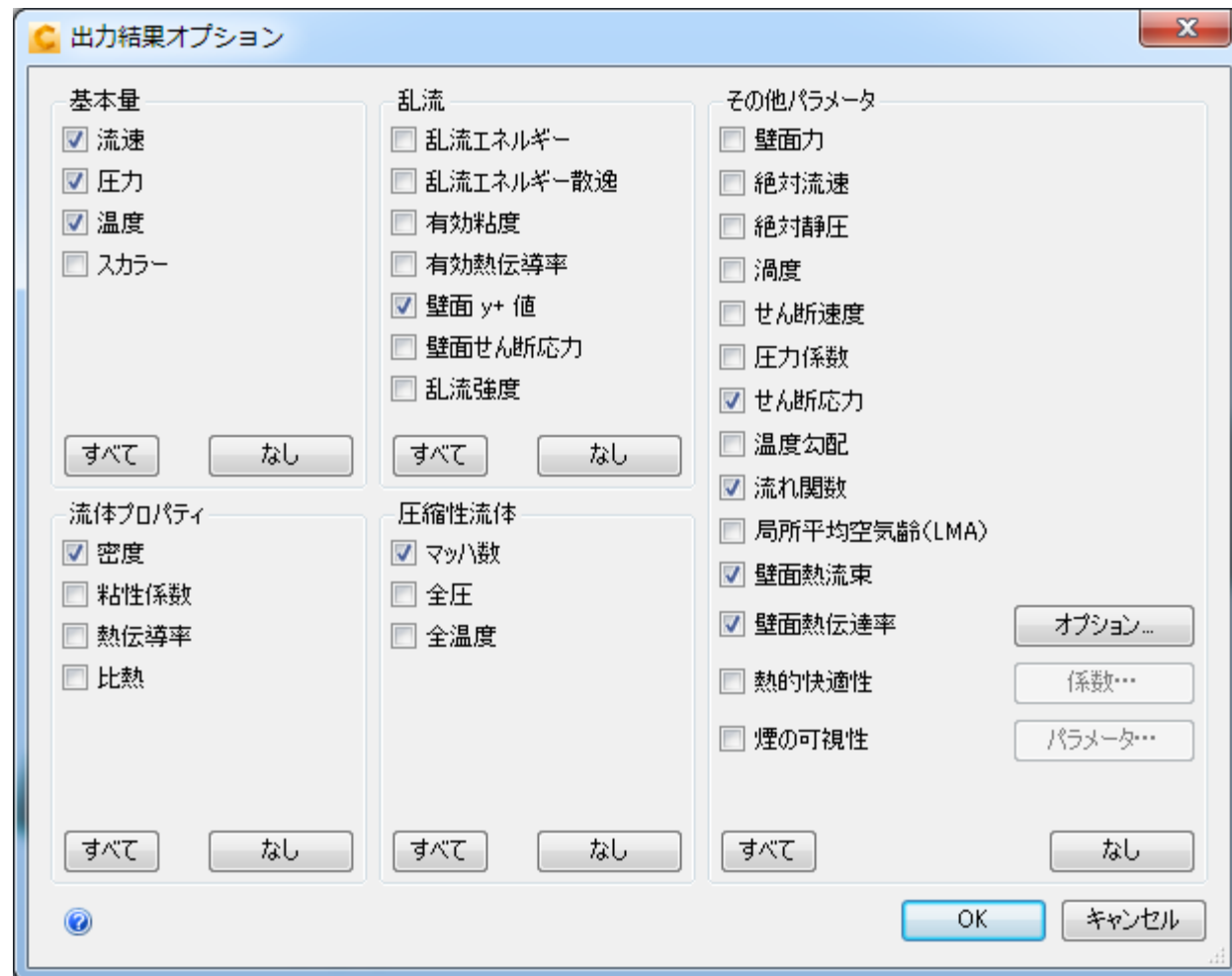
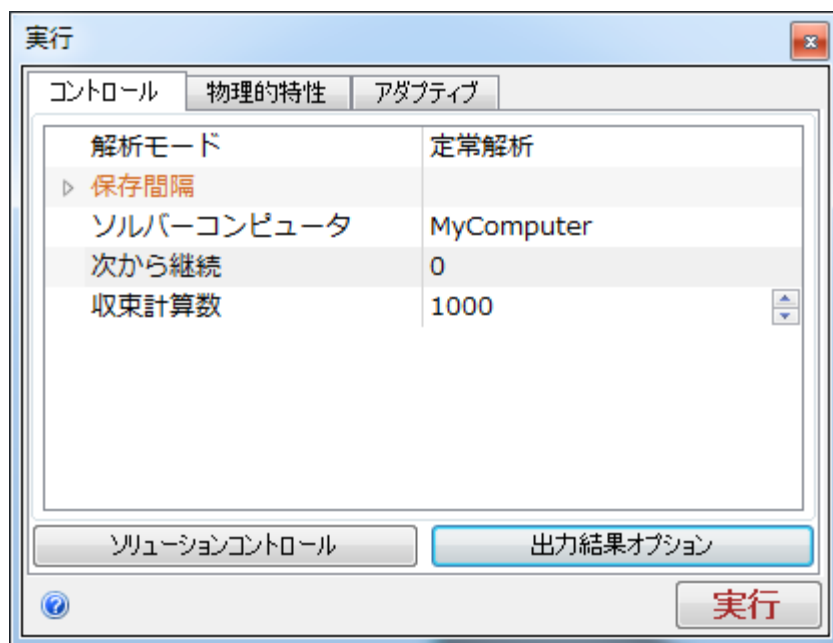
ソルバーコントロール-出力結果オプション

- 既定では無効になっている以下の結果の利用方法

壁面 y^+ 値

マッハ数

流れ関数



ソルバーコントロール-出力結果オプション

・壁面Y+値

選択した乱流モデルに応じた適切な境界メッシュを作成することが重要です

SST k- ω : $y^+ < 1$ k- ϵ : $35 < y^+ < 300$

y^+ を低くするにはメッシュエンハンスメントを変更することが簡単です

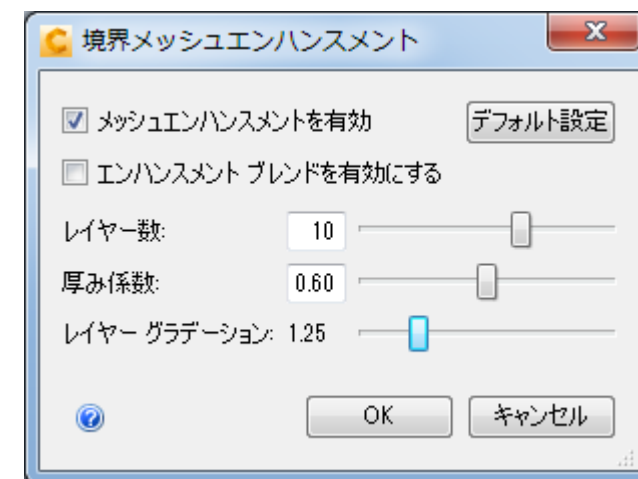
・マッハ数

マッハ数 < 0.3 : 非圧縮性流体として解析可能

$0.3 \leq$ マッハ数 < 0.8 : 亜音速圧縮性流体

マッハ数 ≥ 0.8 : 圧縮性流体

衝撃波が発生し始めます



ソルバーコントロール-出力結果オプション

・節点でのアスペクト比(NAR:Nodal Aspect Ratio)

流れ関数を有効にします

メッシュ品質のよい指標になります

理想的にはほとんどのNARが100~150

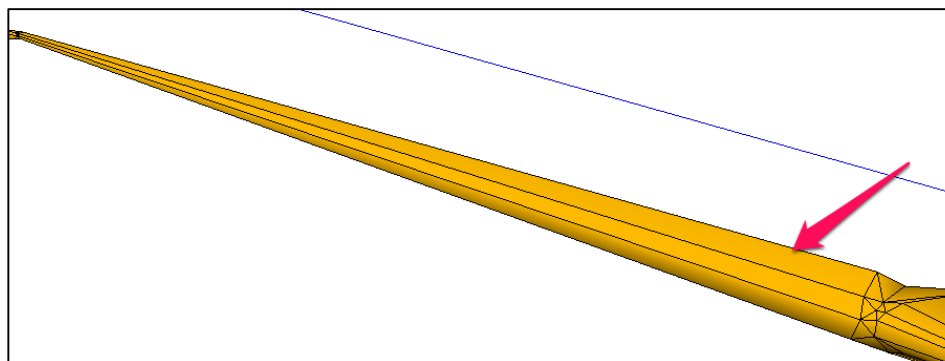
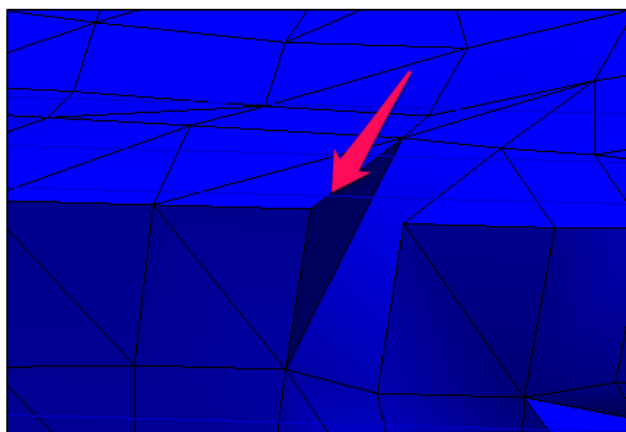
低いNAR(~1)では、メモリ使用量が少なくなります

NAR=1→1GB/1Mメッシュのメモリ使用量

多くの場合約2.5GB/1Mメッシュ

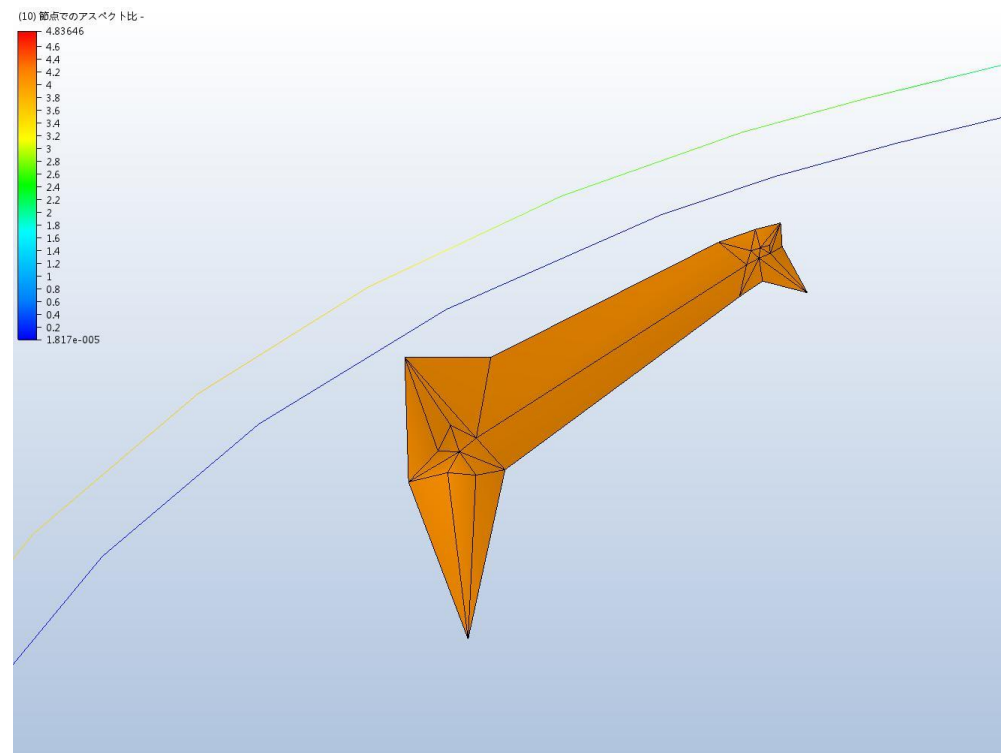
※特に重要な領域でなければ0.5M程度のNARは許容されます

ただし、解析時間は若干伸びます



ソルバーコントロール-出力結果オプション

- ・節点でのアスペクト比(NAR:Nodal Aspect Ratio):続き
NARはボリウムメッシュ作成/最適化失敗時の
問題位置を特定するために活用可能です
- ※小さい隙間や角度のある部分に
境界層メッシュを作成する際に
メッシュ作成が失敗することが多い



ソルバーコントロール-出力結果オプション

- ・問題箇所の確認方法

メッシュエンハンスメントを無効化

メッシュ作成

等値面結果でNARを表示(高いNARが問題の箇所)

CADに戻って修正

※細分割によっても問題解決可能ですが、
CADを修正する時間よりも解析時間が長くなることが多いです
※高NARは必要メモリ容量と解析時間を増大させます

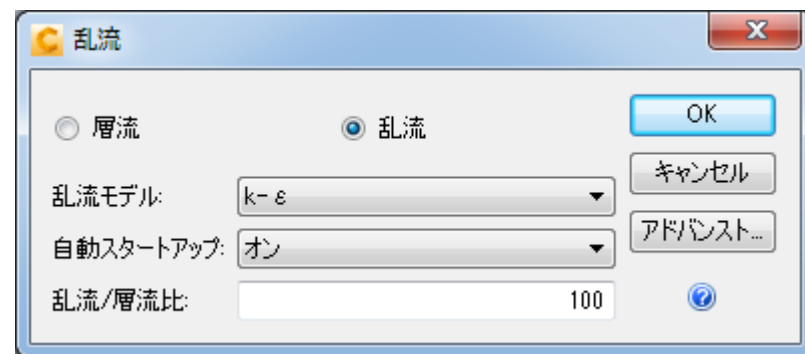
物理特性-乱流モデル

- ・多くのアプリケーションに適した乱流モデルがあります

k- ϵ : 多くの解析に適用可能です(デフォルト)

SSTk- ω : 外部空気力学
内部圧力損失、壁面での温度勾配の予測が難しい時

混合長モデル: 自然対流
※短い解析時間で高精度の結果が得られる場合があります



物理特性-乱流モデル

インテリジェント壁定式化

SSTk- ω : 自動的に有効

k- ϵ : 精細メッシュ時に有効にします
Y+が35以下の場合にもY+の影響が除去されます

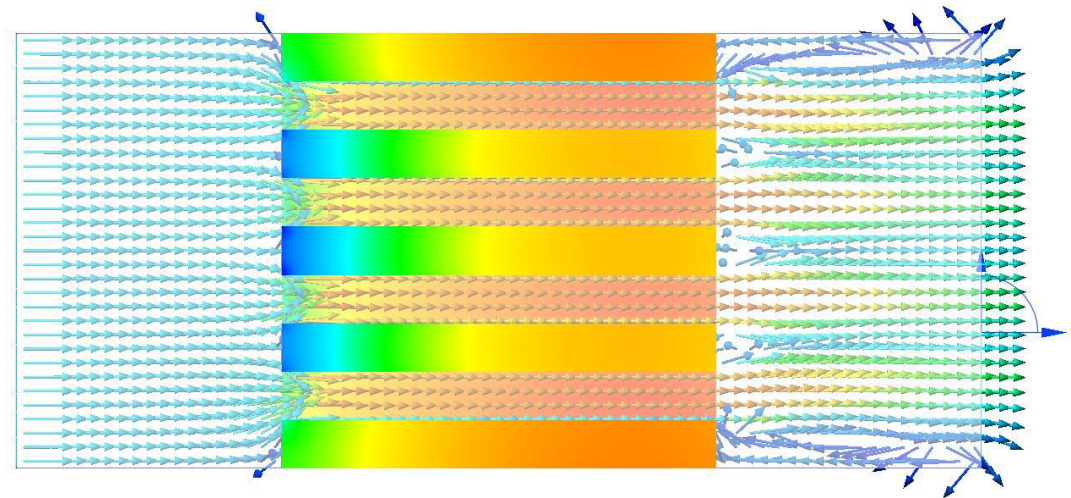
パラメータ	値	パラメータ	値
長さスケール:	0	CMu:	0.09
壁面パラメータ:	5.5	CE1:	1.44
乱流強度:	0.05	CE2:	1.92
Van Driest定数:	26	RNGベータ:	0.015
Kappa:	0.4	RNG Eta:	4.38
<input checked="" type="checkbox"/> インテリジェント壁の定式化		RNG CE0:	1.42
SST k- ω			
非近接場 TKE:	0.01		
非近接場 ω :	2		

質量保存 と エネルギーバランス

質量保存

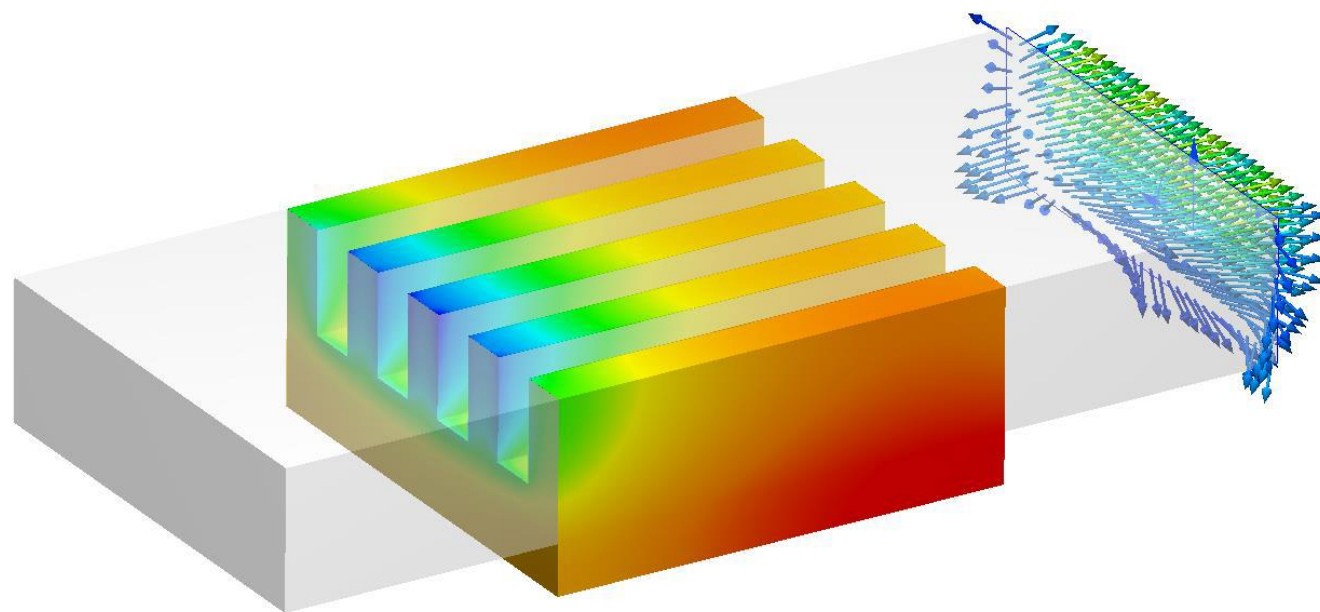
流入と流出状況を確認!

- ・バルク計算結果
- ・サマリーファイル
- ・ベクトル結果
- ・粒子追跡



質量保存

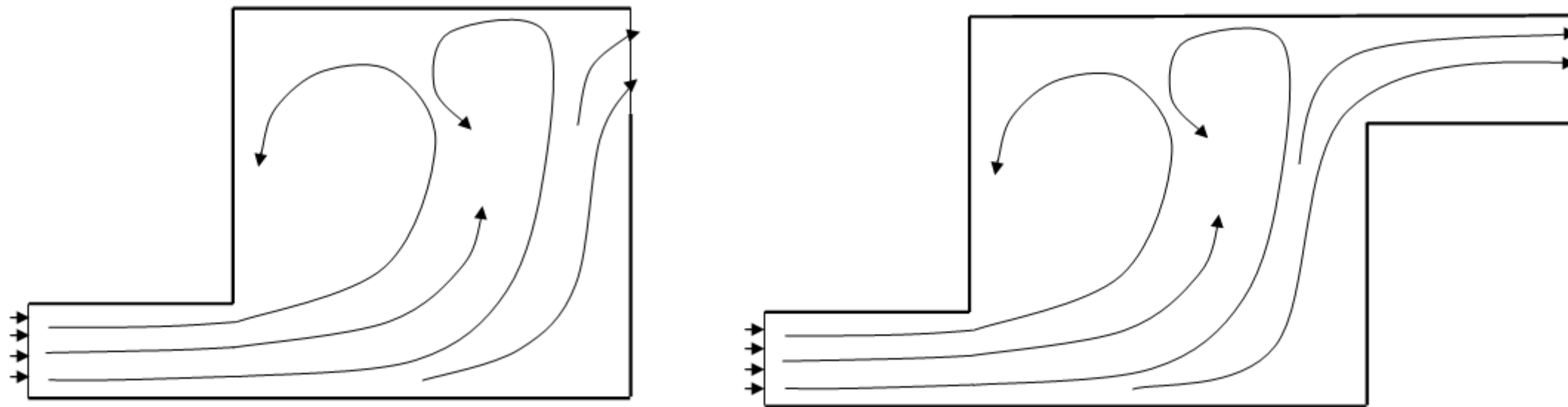
流出口で再循環が発生していないか？



質量保存

流出口で再循環が発生していないか？

→流出境界条件($P=0$)までの距離が短すぎます。



→おおよそ流出口直径/幅の10倍流出口を延長します。

この延長により、流出境界条件に達する前に循環が終了します。

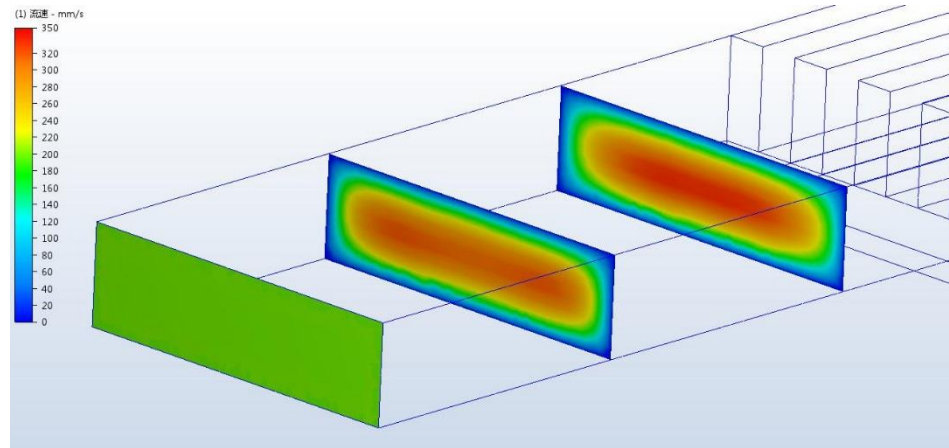
質量保存

併せて流入口も延長する場合があります

おおよそ流入口直径/幅の5倍流入口を延長します

この延長により、調査したい部分に到達する前に

流れが発達することができます

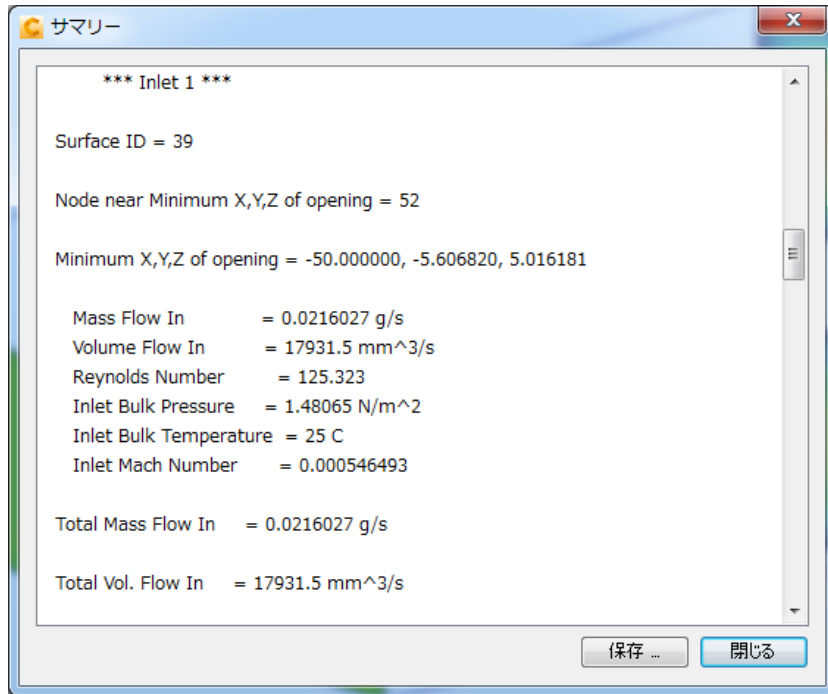
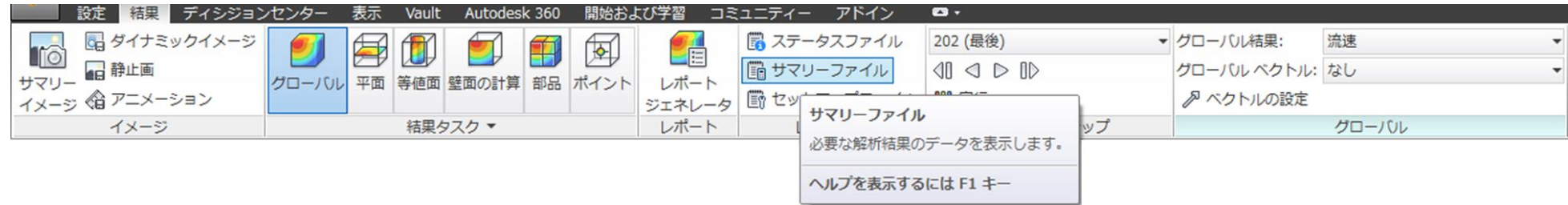


この延長が無い場合、良い結果が得られない場合があります

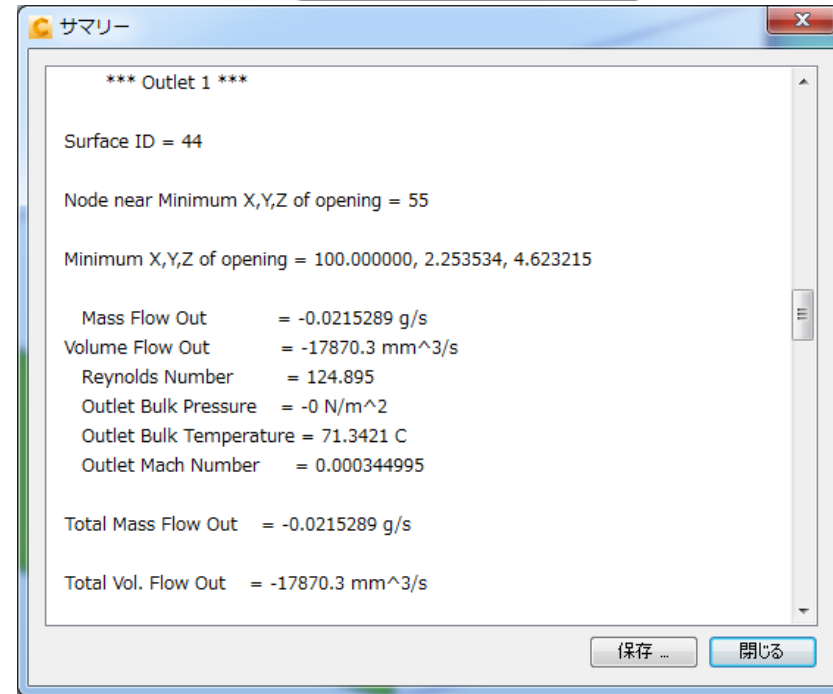
内部領域への流入部分(ダクトやポンプなど)を省略しているなど・・・

質量保存

サマリーファイル



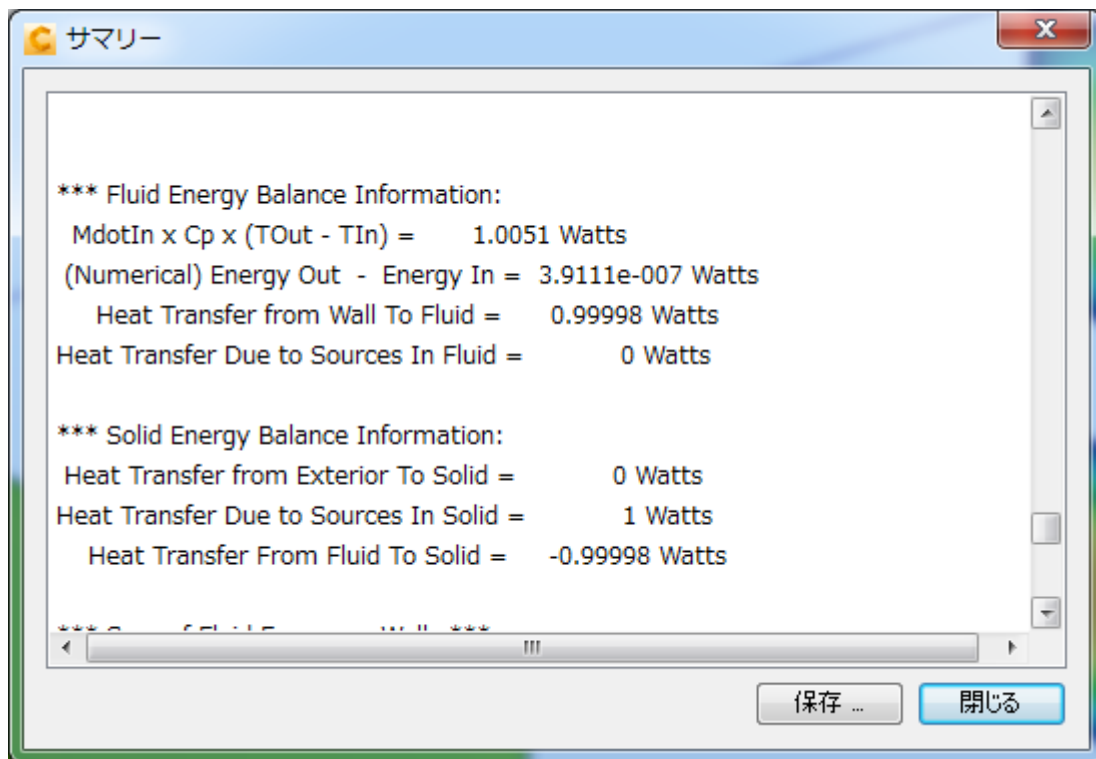
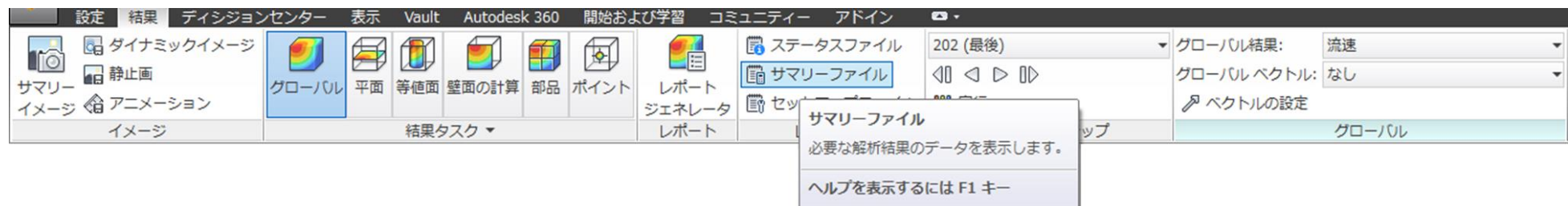
流入



流出

エネルギーバランス

サマリーファイル

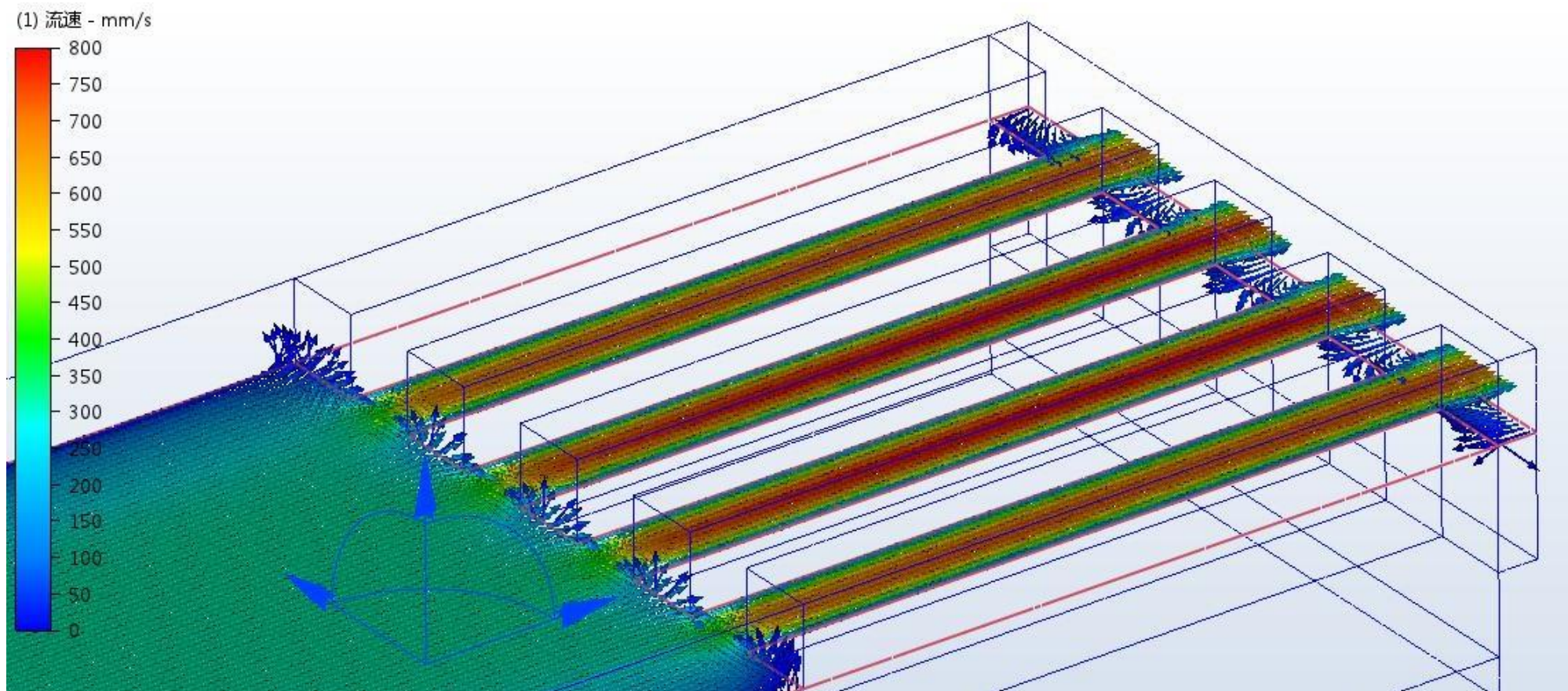


流出-流入のエネルギー差

固体からの熱移動量

質量保存およびエネルギーバランス

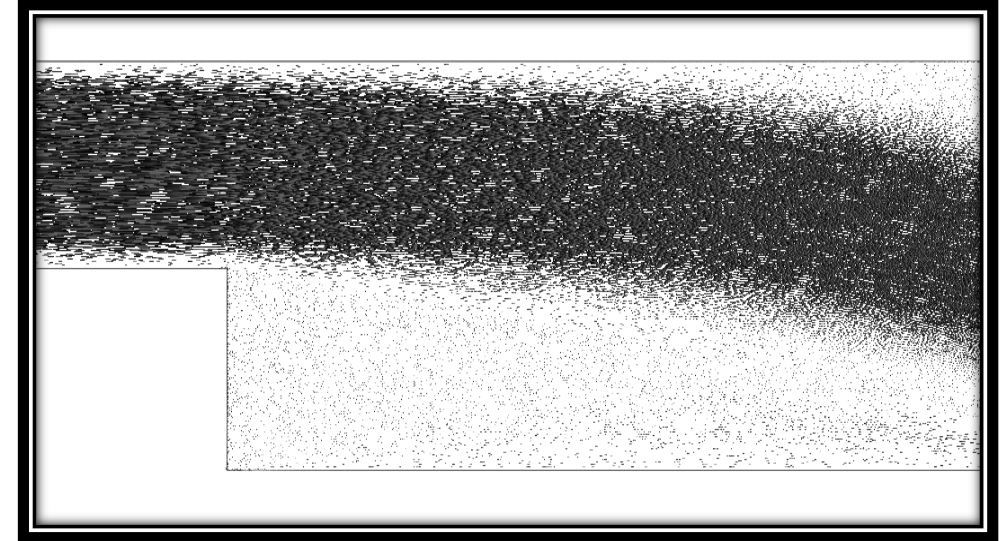
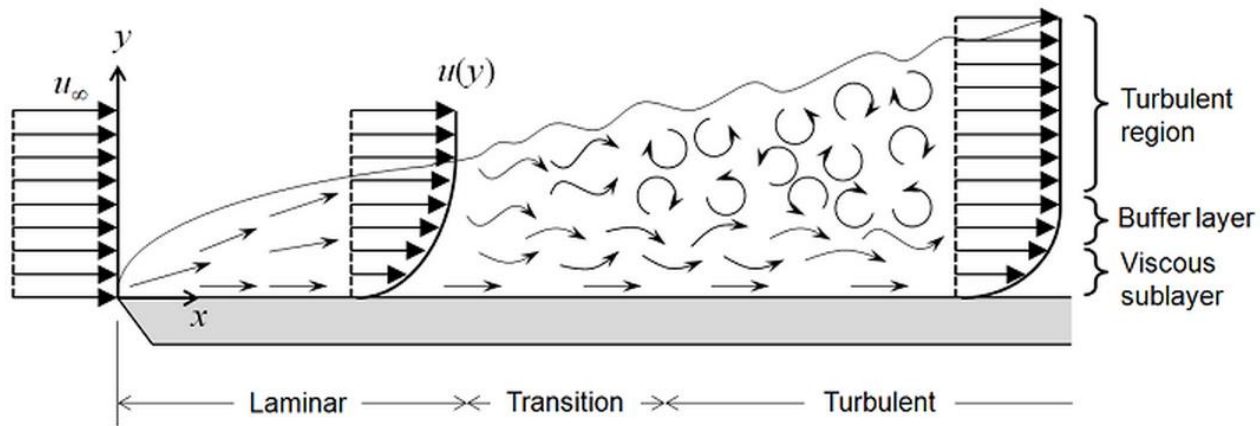
流出口が短いと・・・流出口から逆流発生→精度低下の原因



参考.乱流モデル

乱流とは・・・

流体の不安定な動き



流体解析で使用される乱流モデル

- 流れ平均場モデル (Reynolds Averaged Navier–Stokes:RANS)
- サブグリッドスケールモデル (Large Eddy Simulation:LES)
- ハイブリッド(流れ平均場+サブグリッドスケール)モデル (Detached Eddy Simulation:DES)
- 直接数値解法 (Direct Numerical Simulation:DNS)

▪ 壁関数

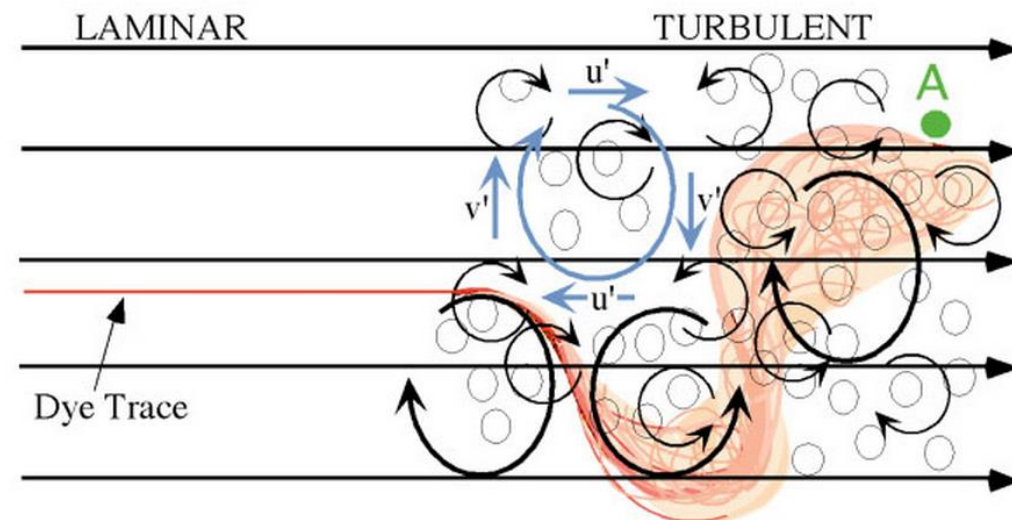
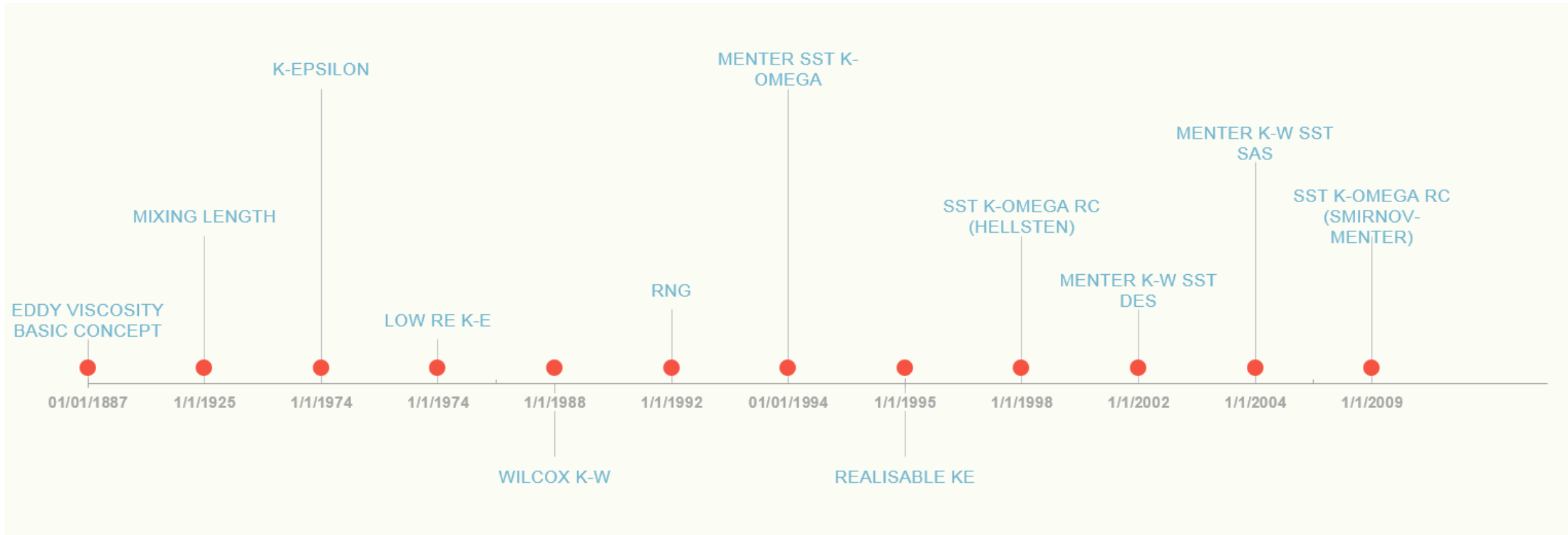


Image Courtesy dspace.mit.edu

乱流モデル研究の時系列



SST k- ω

- SST(Shear Stress Transport) k- ω はk- ε とk- ω のハイブリッド乱流モデルです
- 壁近傍ではk- ω で解き、サブレイヤーの粘性の解析を可能とします
- 壁から離れるとk- ε に移行します

▪ 壁の考慮事項

y⁺: 100まで許容、理想的には2以下、目標値は0.3

10~100で非常に安定

高いy⁺の時には壁関数を使用し、低い場合には直接計算

利点 幅広い流れに対して安定 正確な剥離の予測、ともに発生する逆圧力勾配
正確な高プラントル数(液体)の壁への熱流束予測

欠点 高精細の境界レイヤーメッシュ(10~15)が必要
高曲率の再現性に乏しい

SST $k-\omega$ RC(Hellsten)

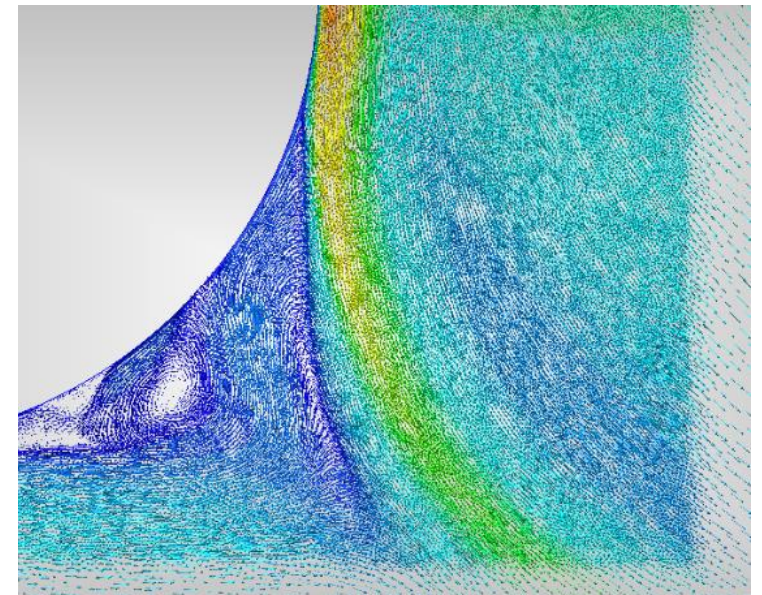
- ・不安定乱流構造

利点 SST $k-\omega$ の利点に加え
サイクロンにおいて良い圧力予測

欠点 SST $k-\omega$ と同じく高精細の境界レイヤーメッシュ(10~15)が必要
サイクロンにおいてほどほどの流れプロファイルの精度

適用:コアンダ効果

- ・・・噴流が近傍の表面に引き寄せられる現象



SST $k-\omega$ RC(Smirnov-Menter)

- SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ に回転および曲率の補正を加えたモデル
Hellstenよりも複雑な数学的改良がされている

利点 SST $k-\omega$ の利点に加え

サイクロンにおいてHellstenと同等の圧力損失予測

サイクロンにおいてHellstenよりもよい流れプロファイルの精度

欠点 SST $k-\omega$ と同じく高精細の境界レイヤーメッシュ(10~15)が必要

SST k- ω SAS

- Scale Adaptive Simulation(SAS)
- 不安定領域での乱流構造の方程式を解析
- 定常/非定常解析に使用可能(非定常解析に使用することを推奨)
- 不安定領域をLESの様な挙動で構造を解く

利点 最新の解析乱流モデル技術

乱流構造を必要とする時最も合理的な選択肢

同等の解析精度においてDESよりもメッシュ依存性が小さい

欠点 ここまでに紹介した他の乱流モデルよりも非常に計算コストが高い

最高精度の結果を得るためには高精細な境界層メッシュが必要

乱流構造のアニメーションはできない

非定常解析に有効だが長い解析時間が必要

SST k- ω DES

- Detached Eddy Simulation(DES)
- 不安定領域での乱流構造の方程式を解析
- URANS(非定常) SST k- ω とLES(Large Eddy Simulation)のハイブリッド
- 壁近傍ではUnsteady RANSを使用
- 大規模な乱流スケールが支配的な乱流コア領域でLESを使用

利点 剥離と高レイノルズ外部空気力学において最高の精度
完全LESよりも効率的

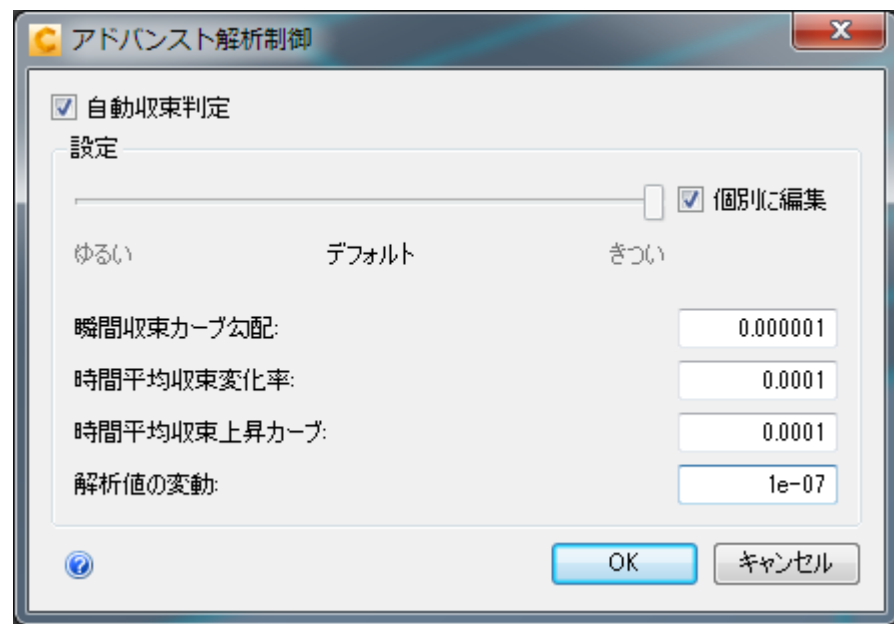
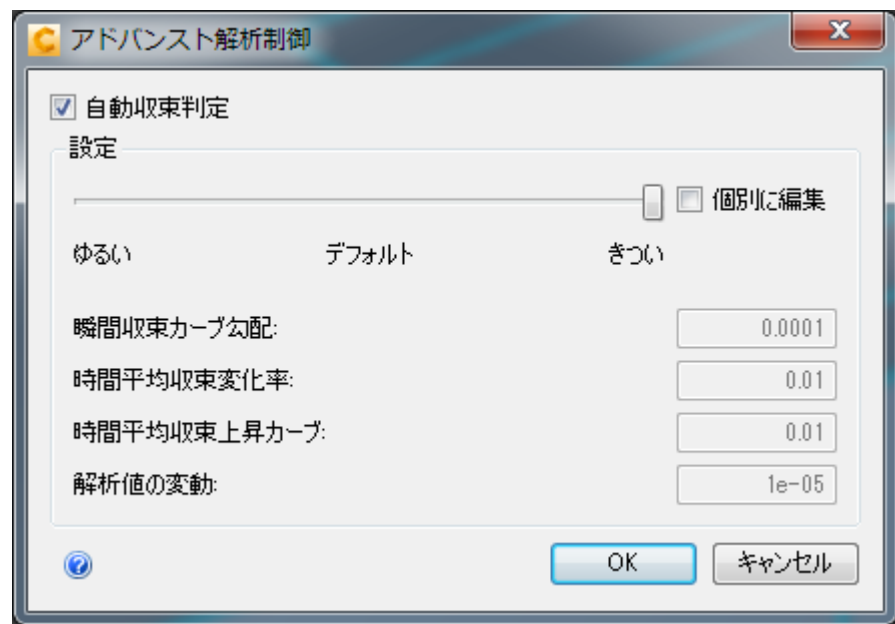
欠点 SST SASよりもさらに計算コストが高い
よりよい結果を得るためには均一でなめらかなメッシュ分布が必要
メッシュサイズに高い依存性
主に学術用途

外部空気力学

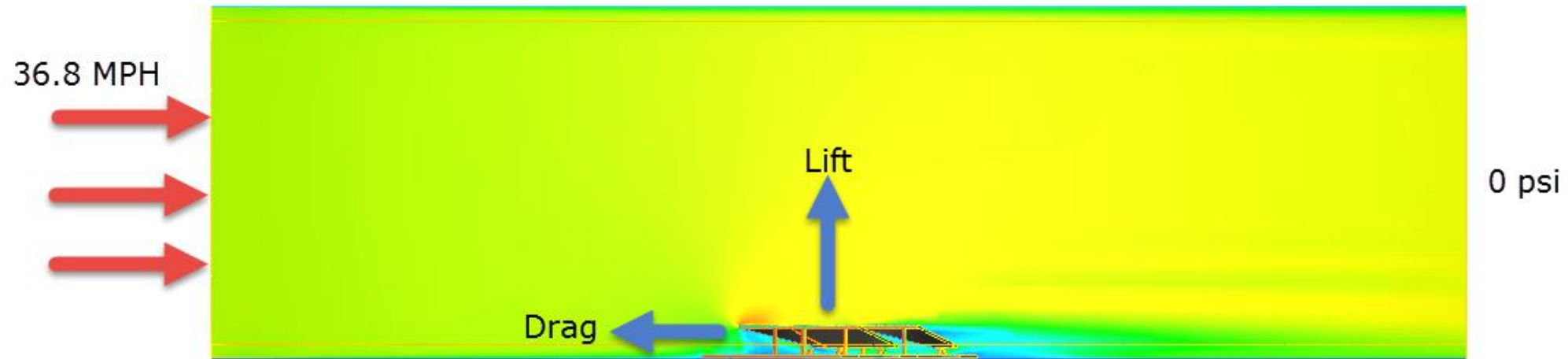
	コアンダ効果	複雑な乱流構造	ストローハル数
乱流モデル	SST k- ω RC(Hellsten)	SST k- ω SAS	SST k- ω SAS/DES
メッシュ要件	10-30層 厚み係数:1 エンハンスメントブレンド有効 フラグ設定(オプション): mesh_enhance_thick :100-600 mesh_boundarylayer_blend :1	コアンダ効果と同様のメッシュ フラグ設定(推奨): mesh_boundarylayer_blend :1	複雑な乱流構造と同様のメッシュ 渦の発生領域を均一のメッシュに
ソルバー設定	収束判定: 個別に編集(次ページ参照)	フラグ設定(必須): sst_new_iwf :1 定常解析 収束判定: 個別に編集(次ページ参照) 非定常解析 非常に小さい時間ステップ	フラグ設定(必須): sst_new_iwf :1 非定常解析 1サイクル当り100時間ステップで開始

収束判定

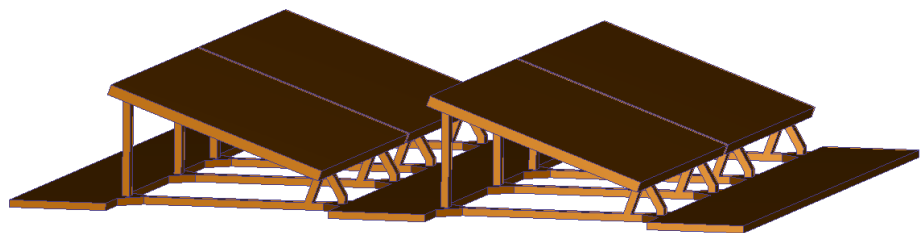
「きつい」設定のさらに二桁小さく設定



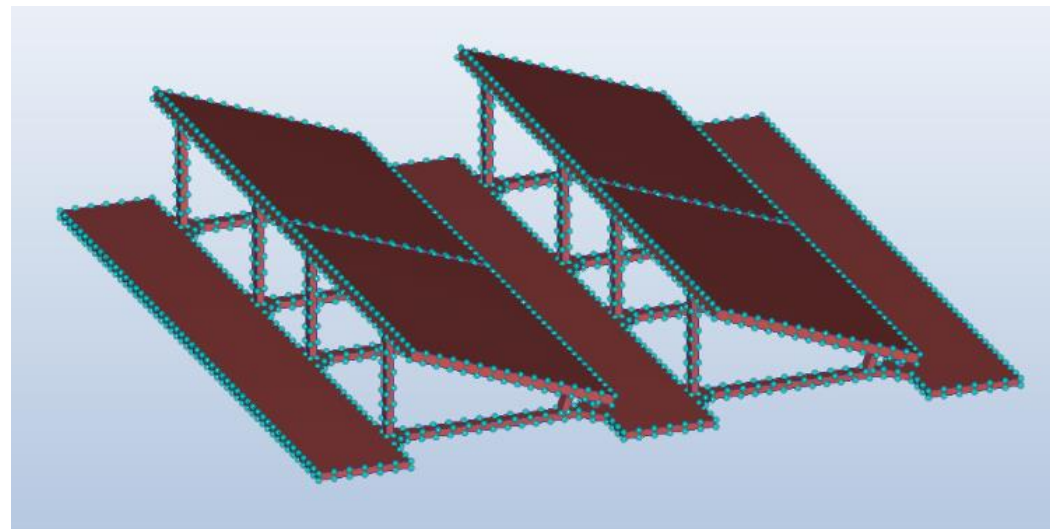
事例:2X2ソーラーパネル周囲の流れ



事例:2X2ソーラーパネル周囲の流れ



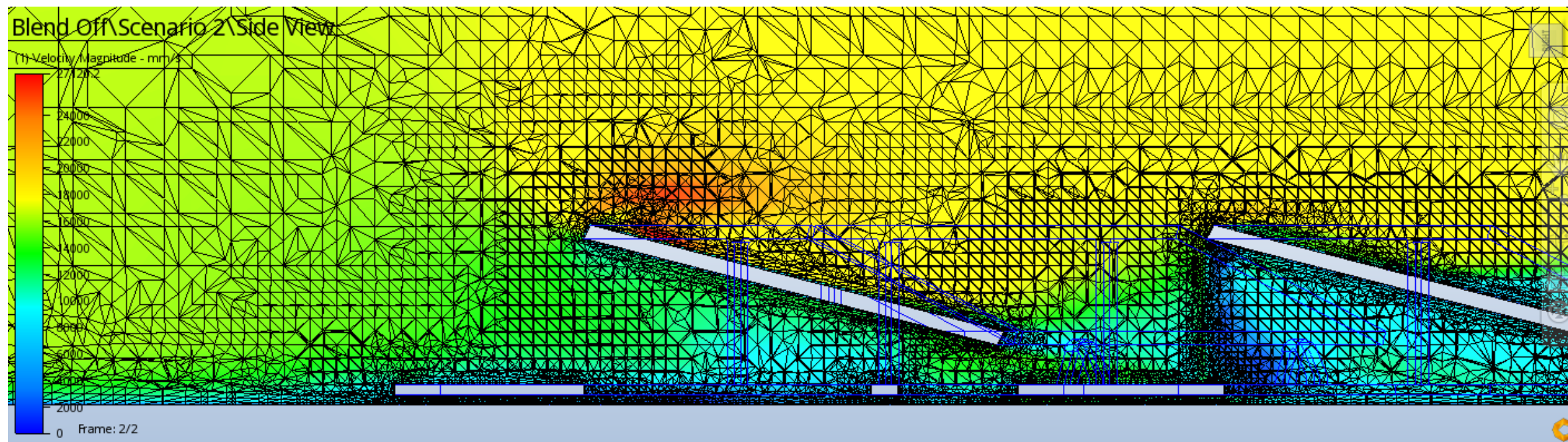
パネルサイズ:10"×10"
設置角度:20°



表面:2mm
アダプティブメッシュ

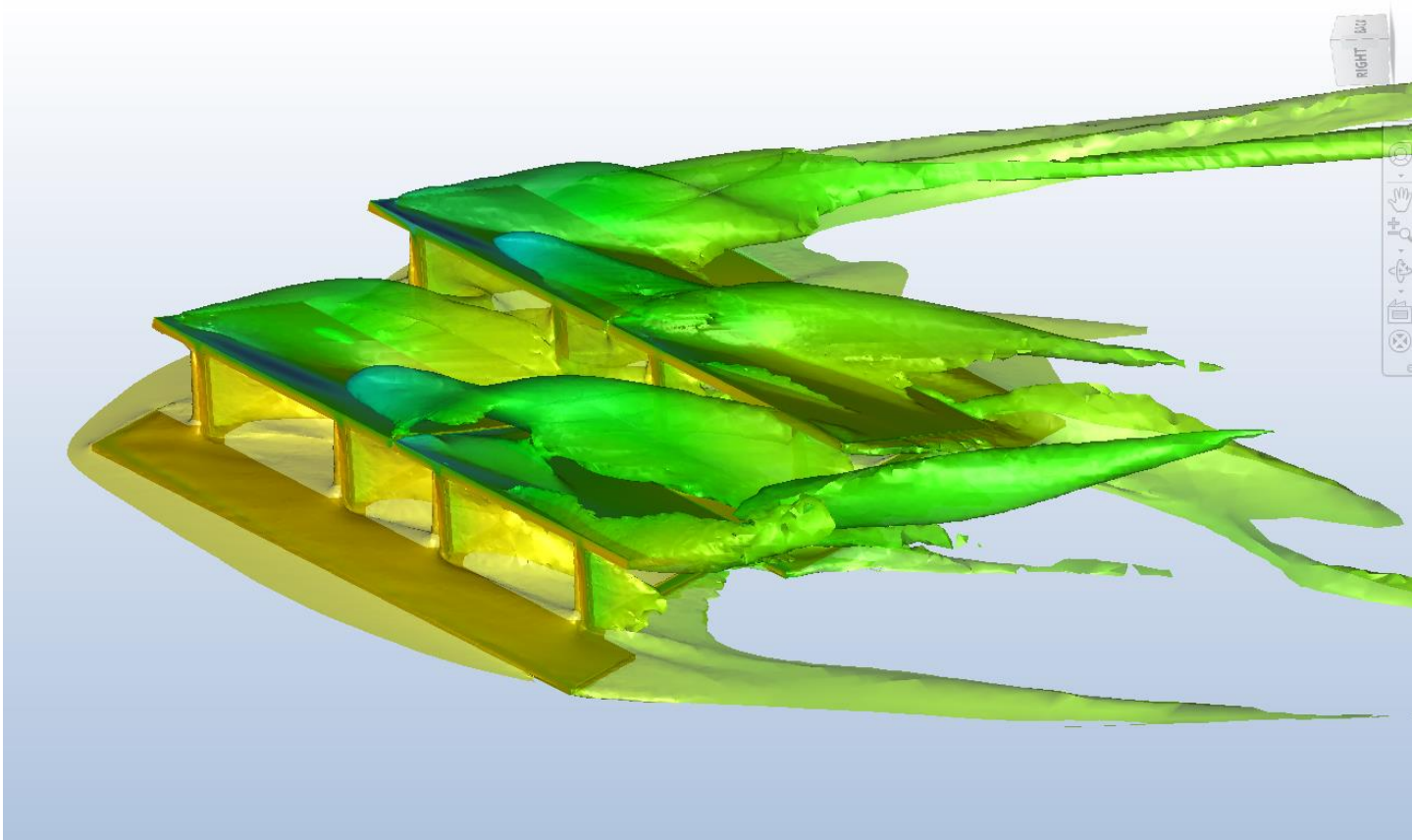
事例:2X2ソーラーパネル周囲の流れ

アダプティブメッシュ 最終メッシュ形状



事例:2X2ソーラーパネル周囲の流れ

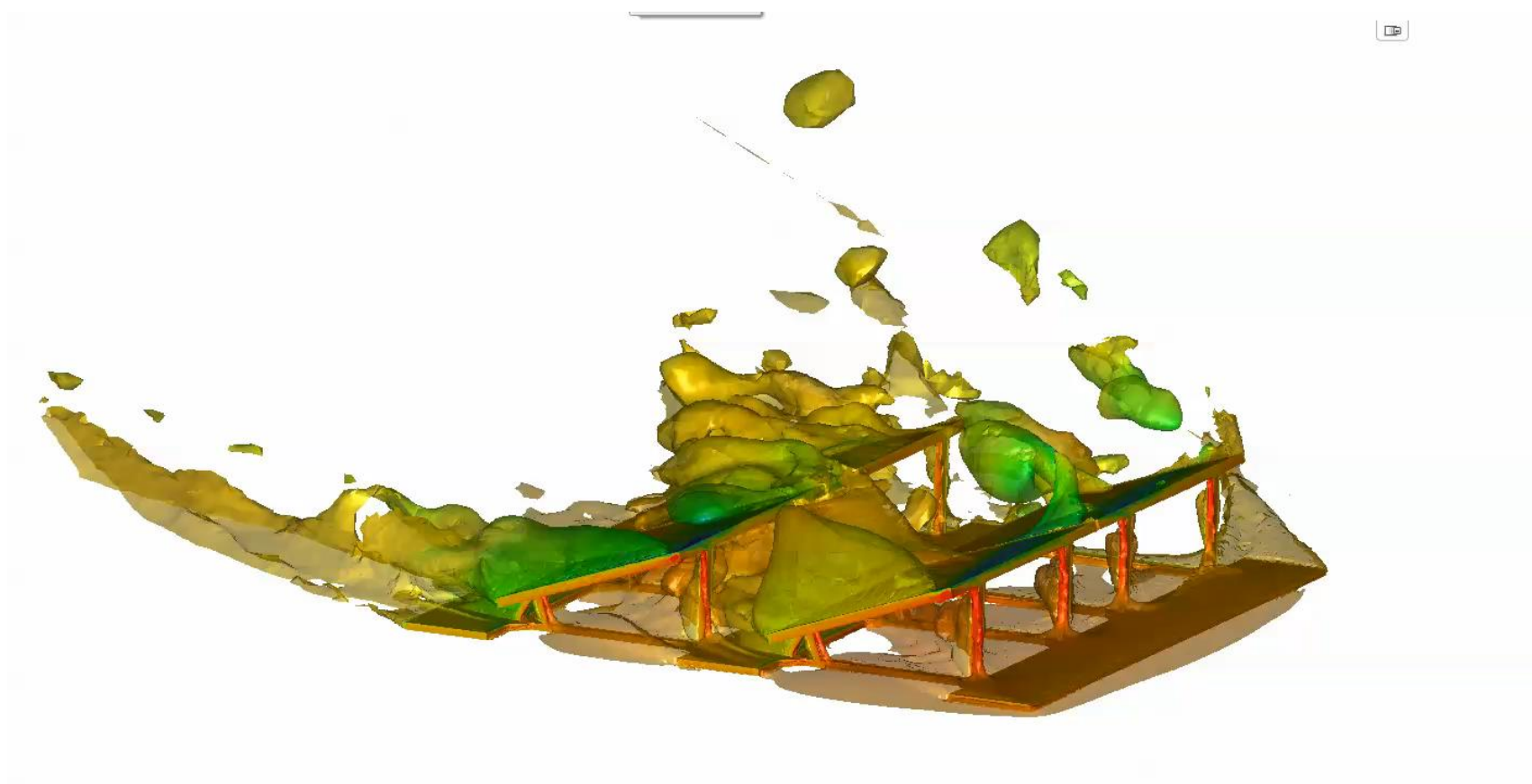
コアンダ効果:等値面結果(20MPH)



事例:2X2ソーラーパネル周囲の流れ

複雑な乱流構造:等値面結果(20MPH)

非定常解析:1e-5sec



Frame: 4/11

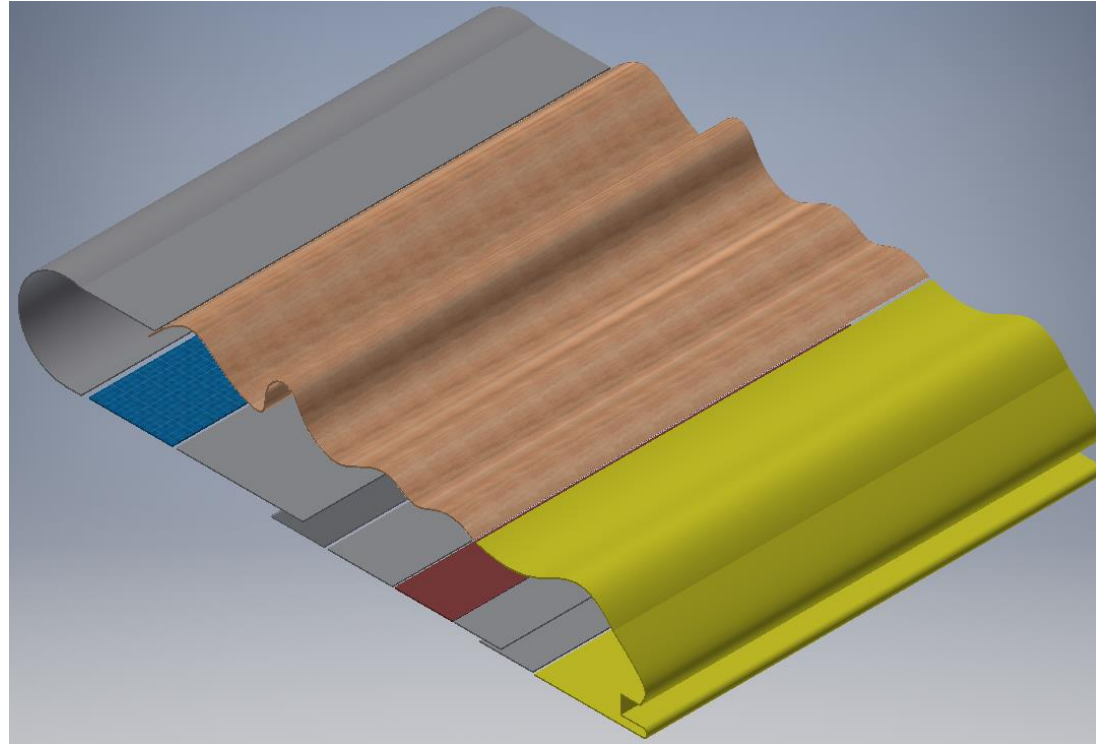
まとめ

- 良いメッシュを得るためにはメッシュツールを活用します。
特に薄い隙間の部分には、
サーフェス細分割とギャップ細分割機能が有効です。
- Ver.2013で追加された対流項スキームADV5は、
多くのアプリケーションに対して有効です。
- 質量保存とエネルギーバランスを保つためには、
流出口の形状が重要です。
- 外部空気力学の現象を再現するためには、
適切な乱流モデルとメッシュ制御が重要です。

おまけ.Surface Wrap

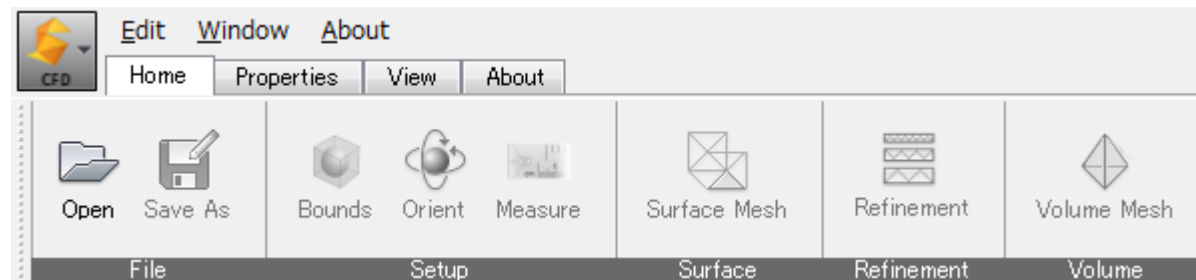
Surface Wrap

- ・CADモデルに隙間があるなど、そのままでは解析できないモデルを自動的に隙間を埋めてメッシュを作成する機能

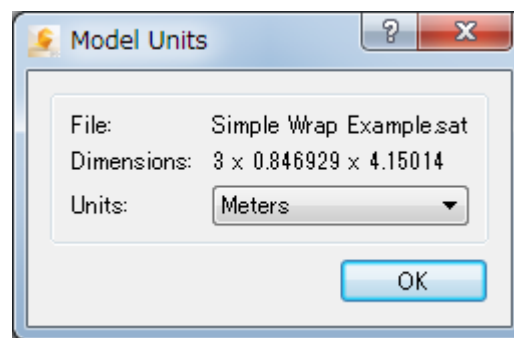


モデルの読み込み

- [Home]タブ:[Open]

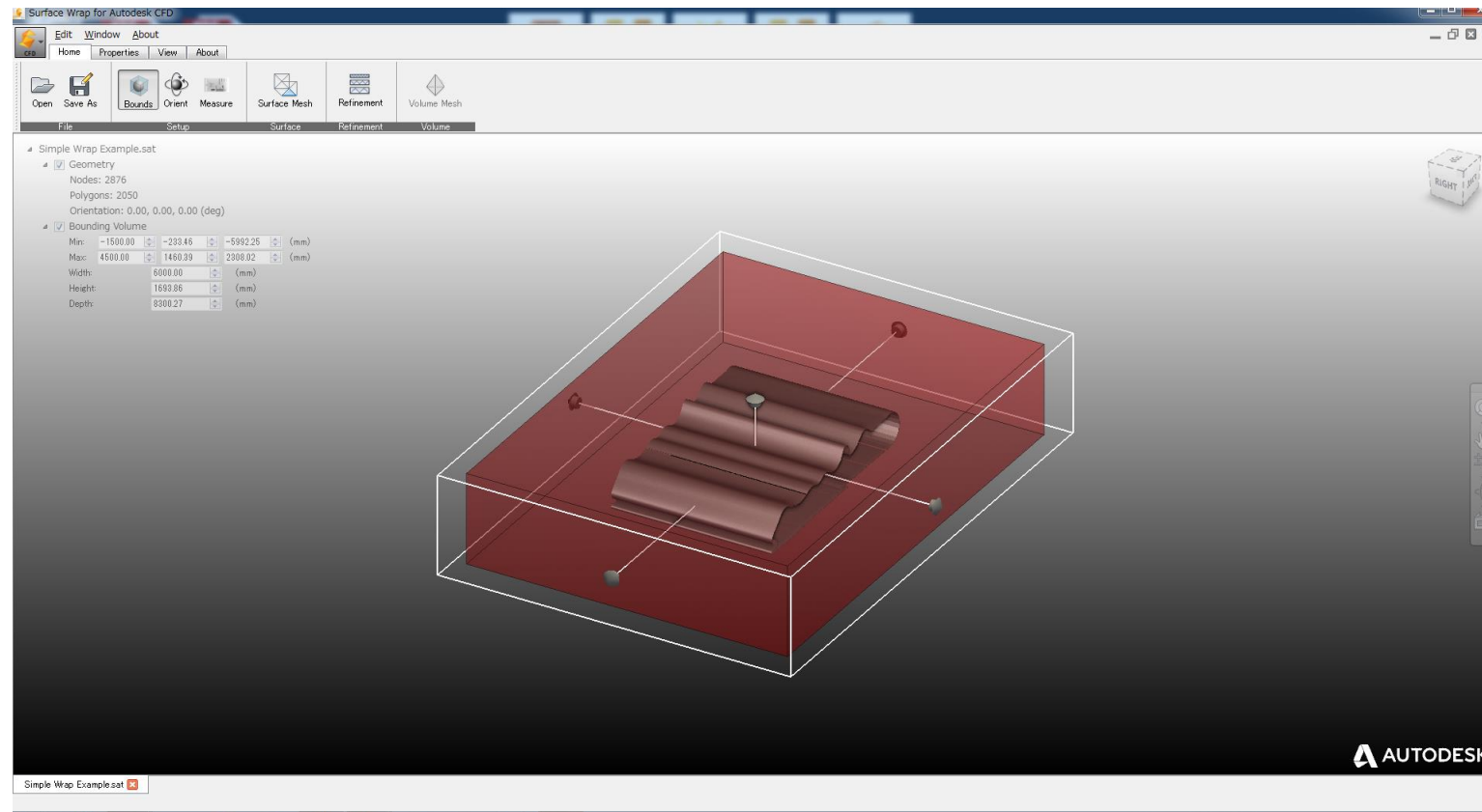
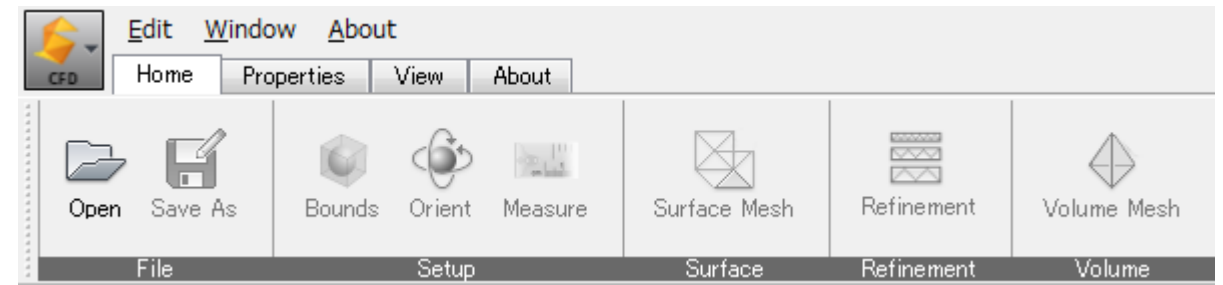


- [Model Unit]ダイアログ:[OK]をクリック



モデルのセットアップ

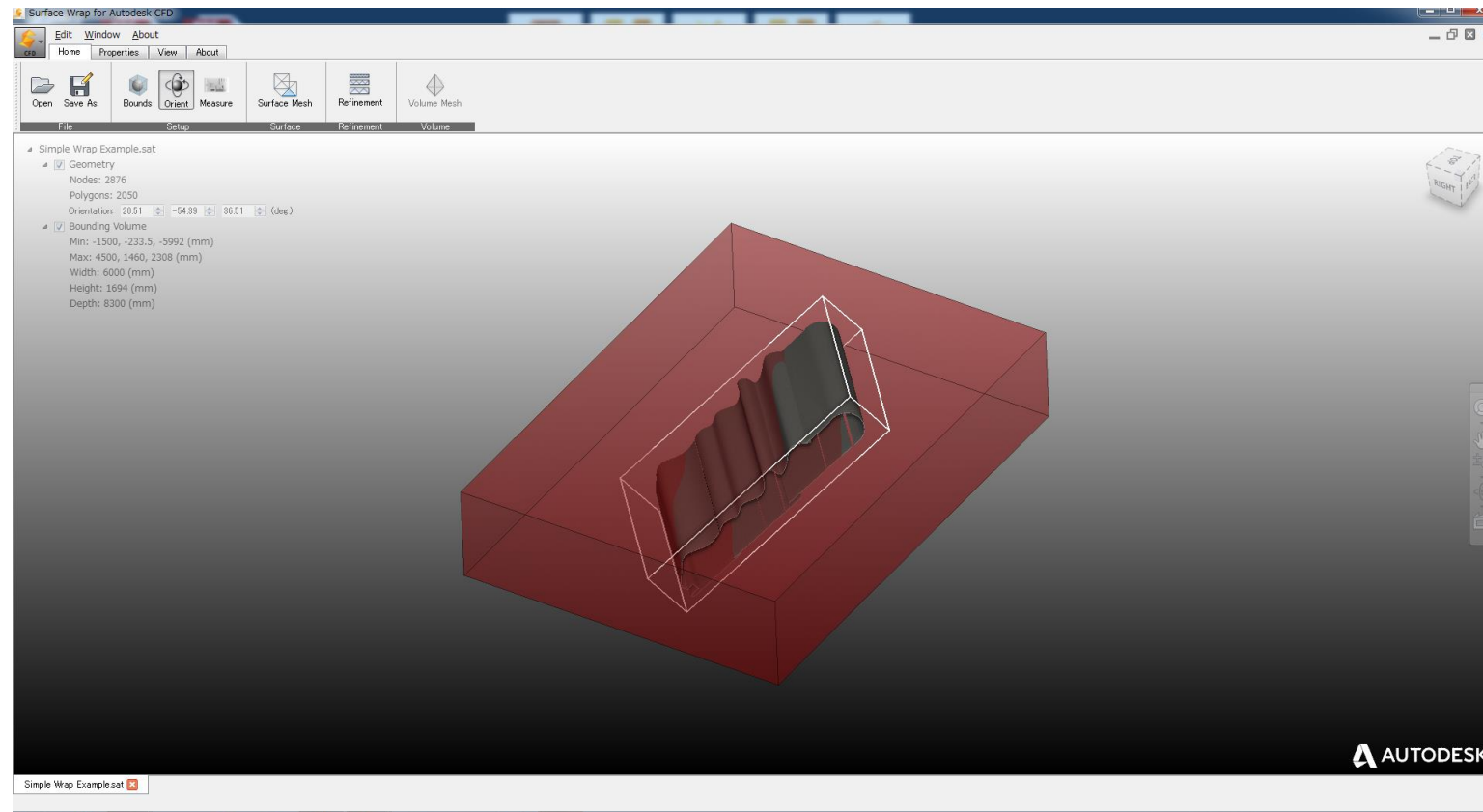
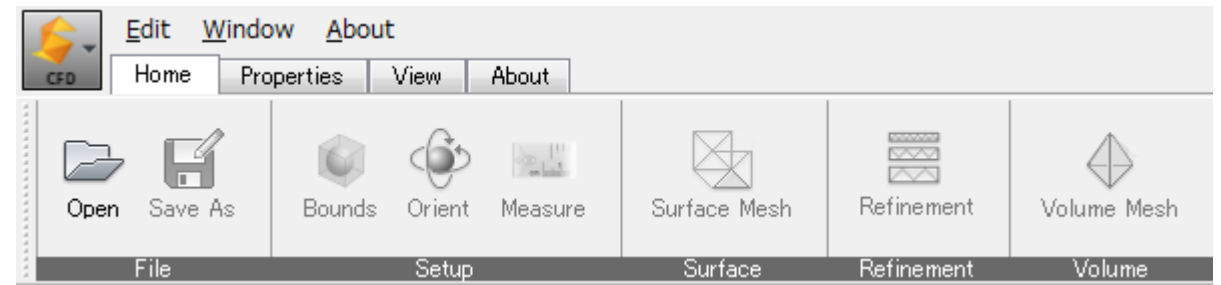
- 外部境界サイズ変更
[Home]タブ:[Setup]:[Bounds]



モデルのセットアップ

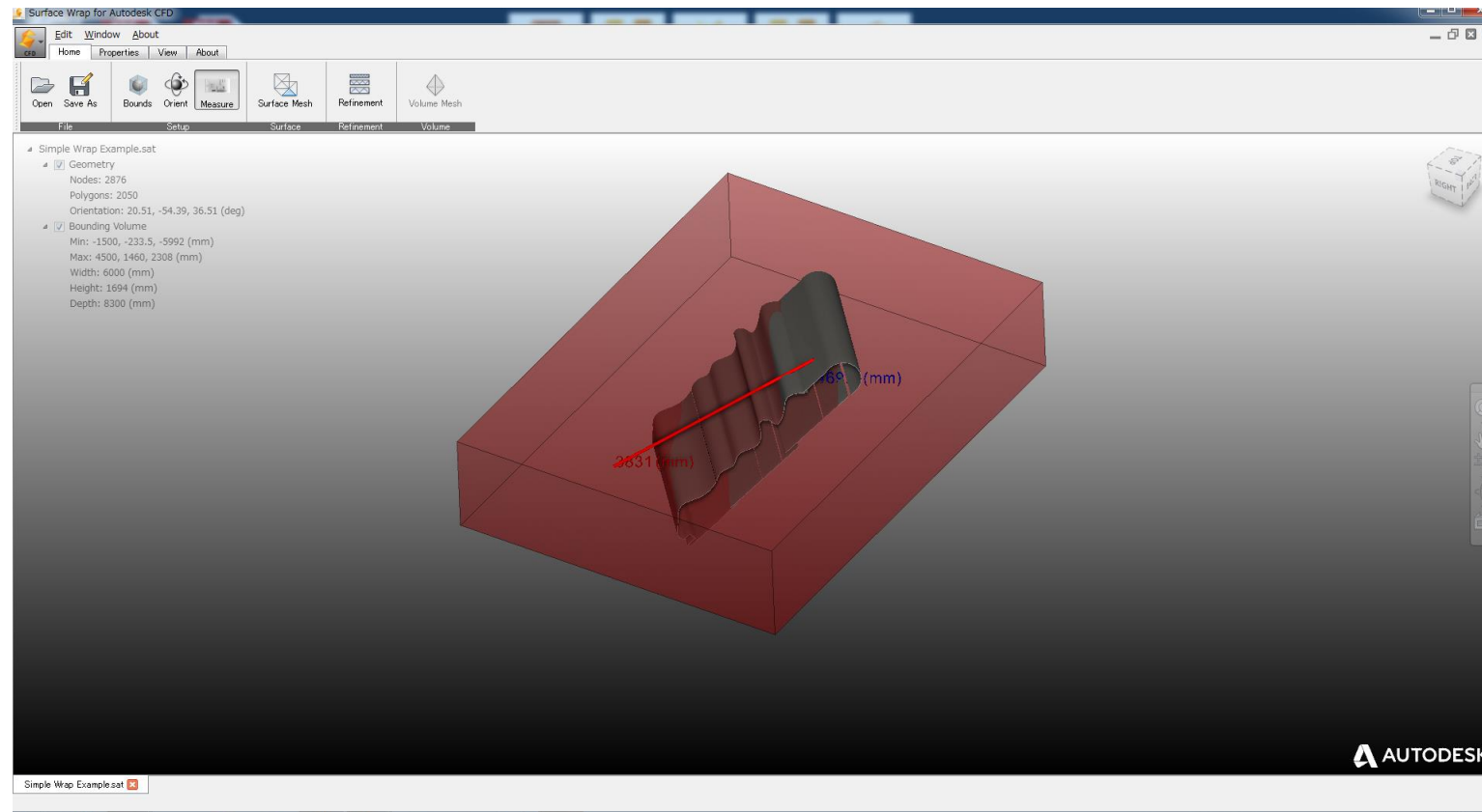
- ・モデル回転

[Home]タブ:[Setup]:[Orient]

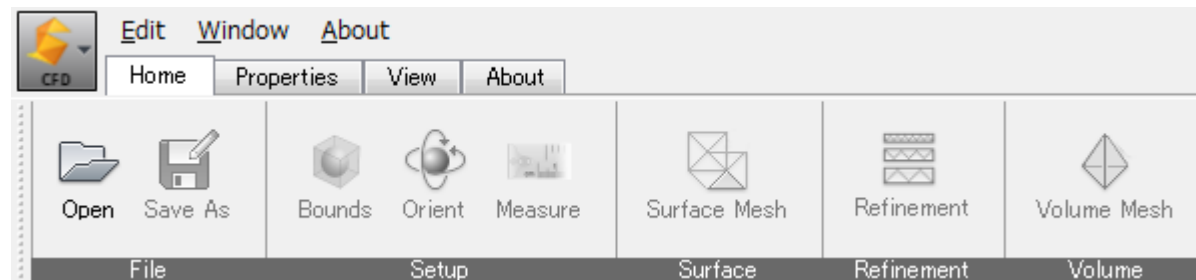


モデルのセットアップ

- ・測定(外部境界からの距離)
[Home]タブ:[Setup]:[Measure]



表面メッシュの作成



[Home]タブ:[Surface]:[Surface Mesh]

Surface mesh sizing proximity threshold

設定値以下の位相的に隣接しない要素をリファイン

Model surface automatic repair precision(500~10000の値)

小さい数値は低精度:大きなギャップを修正し、小さいフィーチャ、面を削除

大きい数値は高精度:小さなギャップのみ修正し、小さいフィーチャ、面を残す

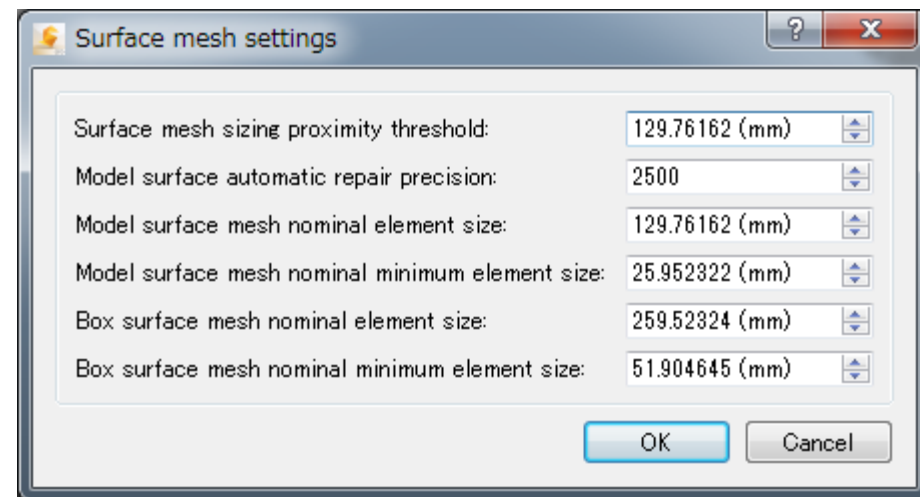
Model surface mesh nominal element size

公称要素サイズ

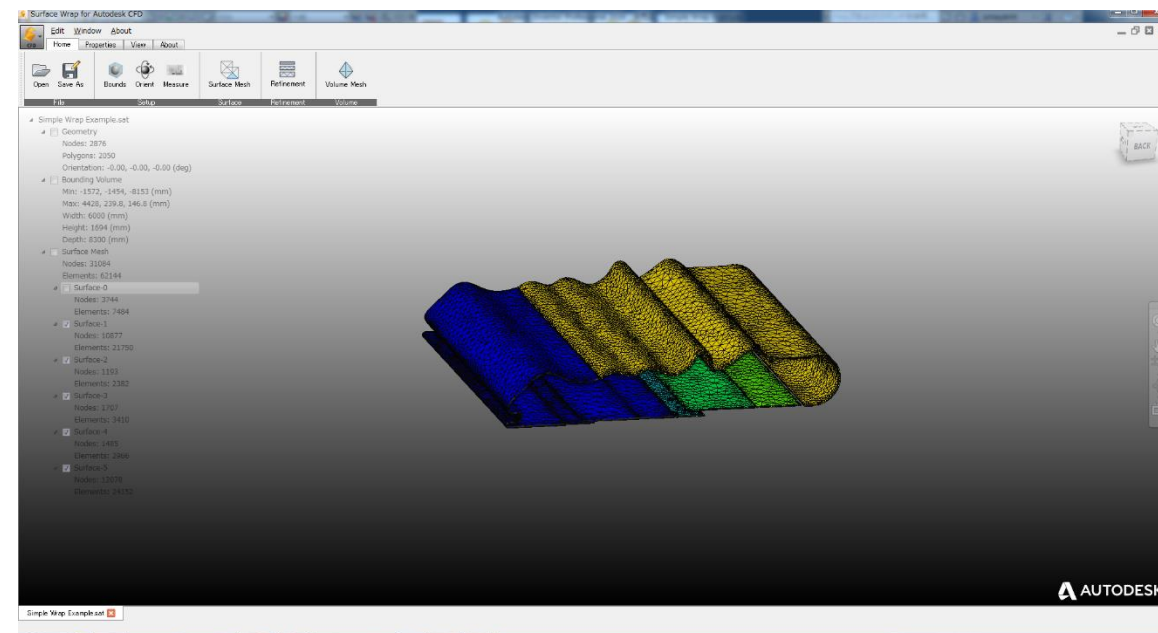
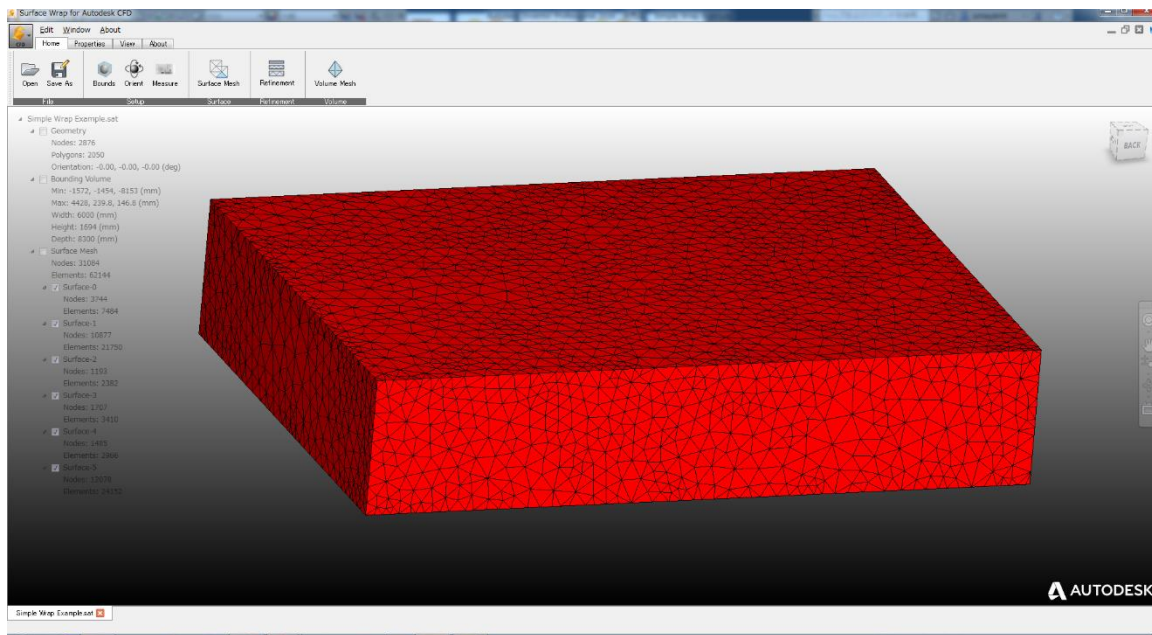
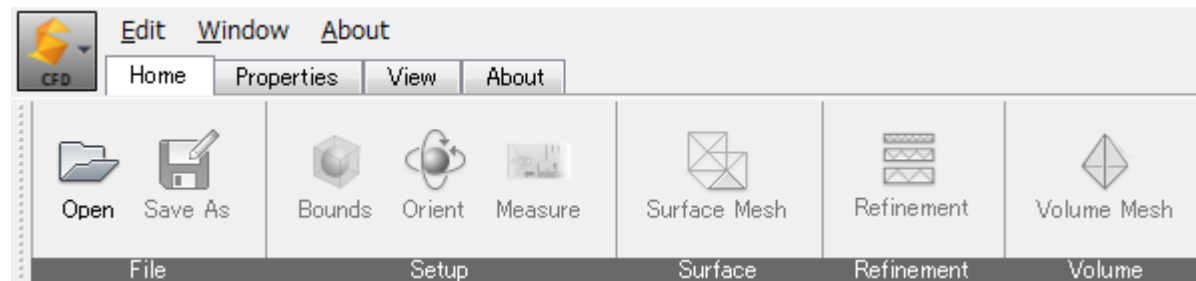
Model surface mesh nominal minimum element size

最小要素サイズ

Box:Bounding Boxの要素サイズ

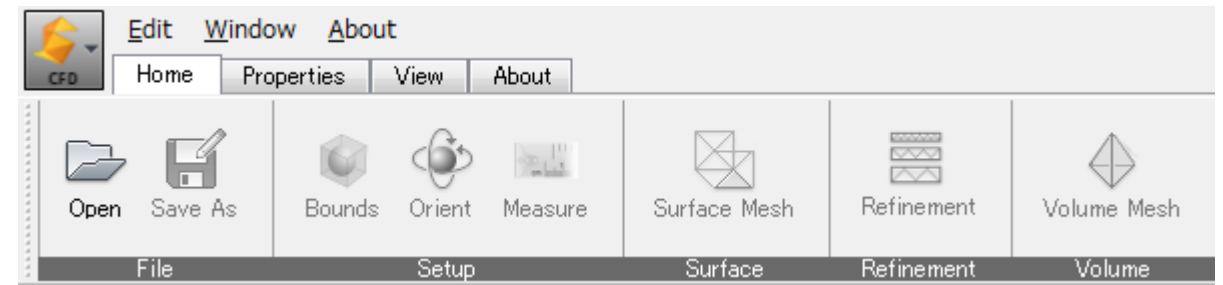
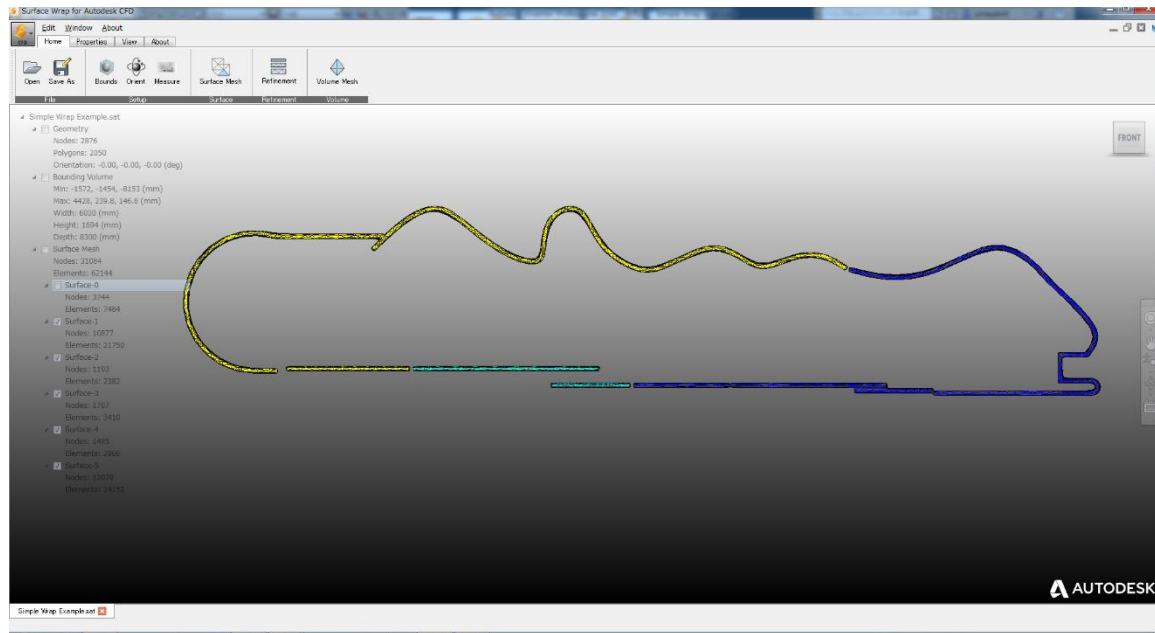


表面メッシュの作成

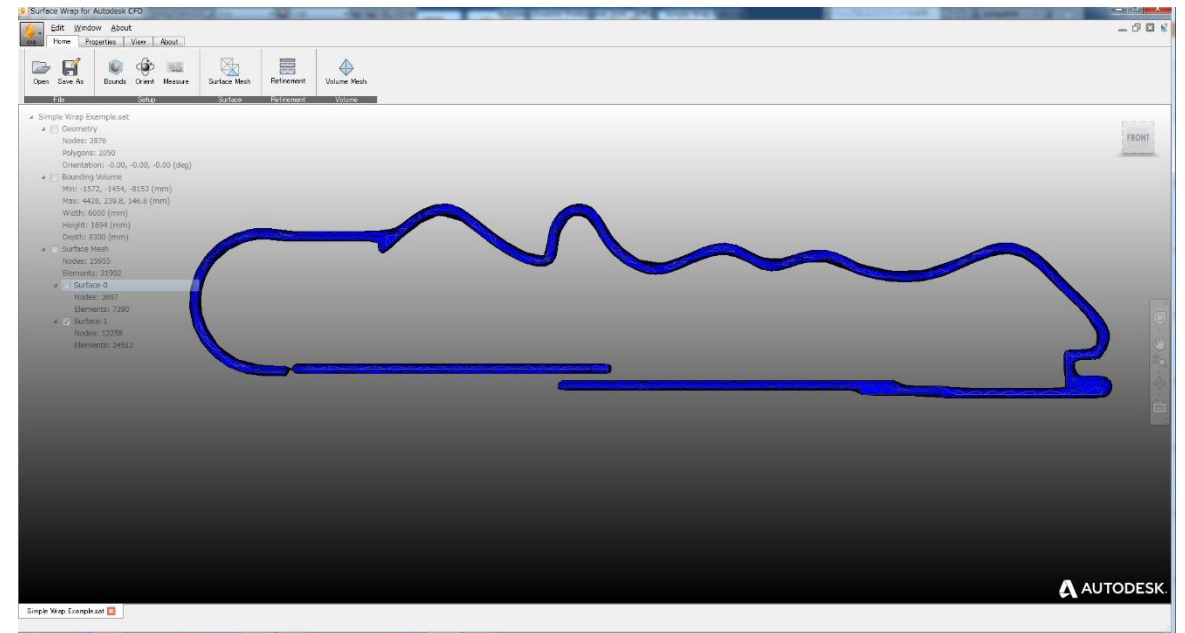


表面メッシュの作成

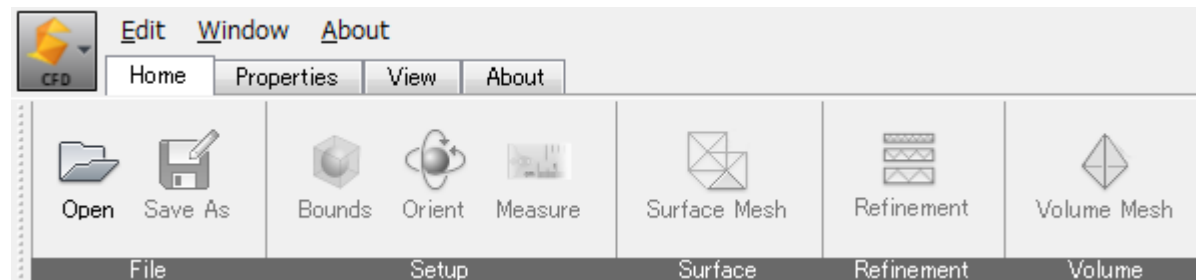
Model surface automatic repair precision
2500



Model surface automatic repair precision
500



体積メッシュの作成



[Home]タブ:[Volume]:[Volume Mesh]

Volume mesh nominal element size

公称要素サイズ

Volume Mesh global gradation rate (0~1)

粗いメッシュから細かいメッシュへの遷移

Boundary layer number of layers

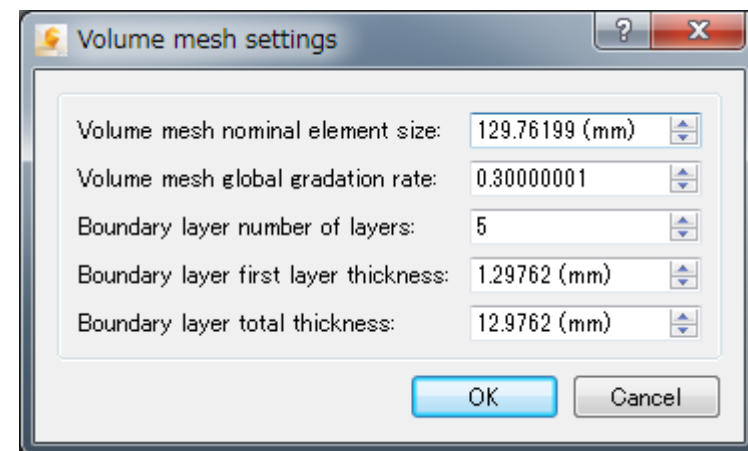
モデル表面の外側に作成する境界層のレイヤー数

Boundary layer first layer thickness

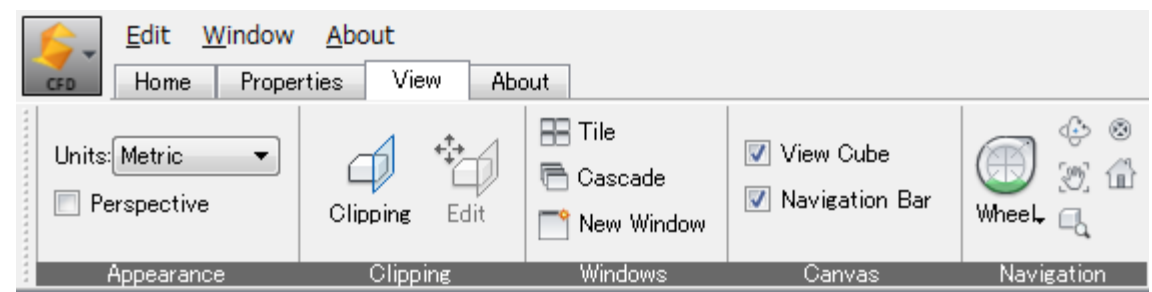
モデル表面に一番近いレイヤーの厚み

Boundary layer total thickness

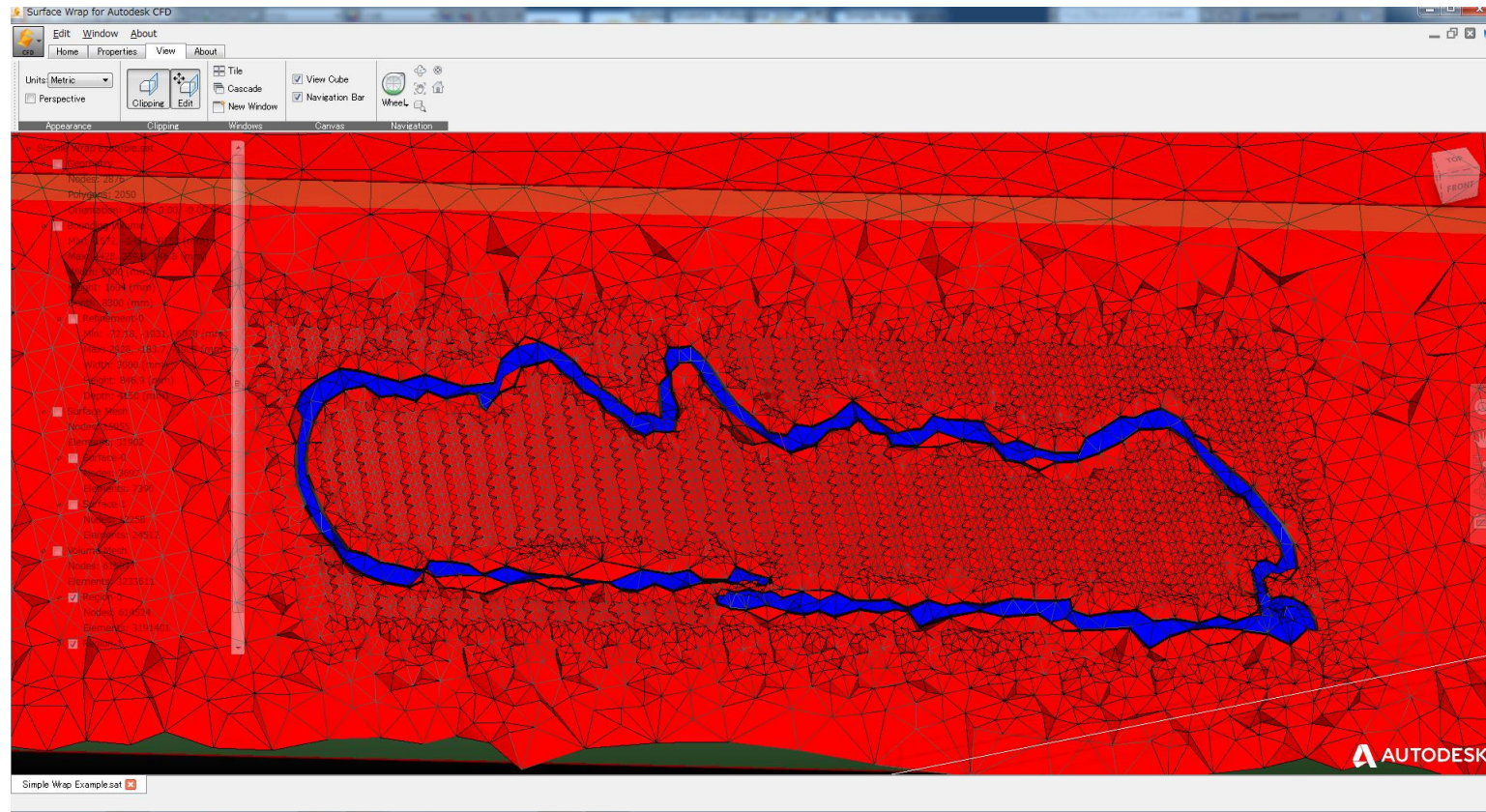
モデル表面の外側に作成する境界層厚み



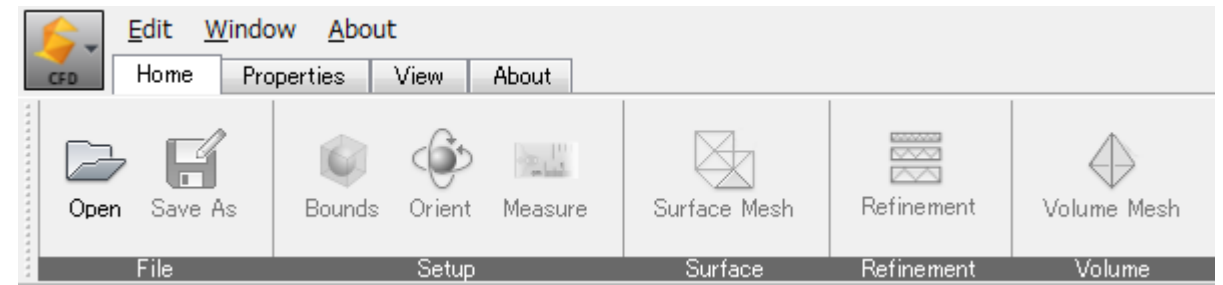
メッシュの確認



[View]タブ:[Clipping]:[Clipping]



メッシュの出力



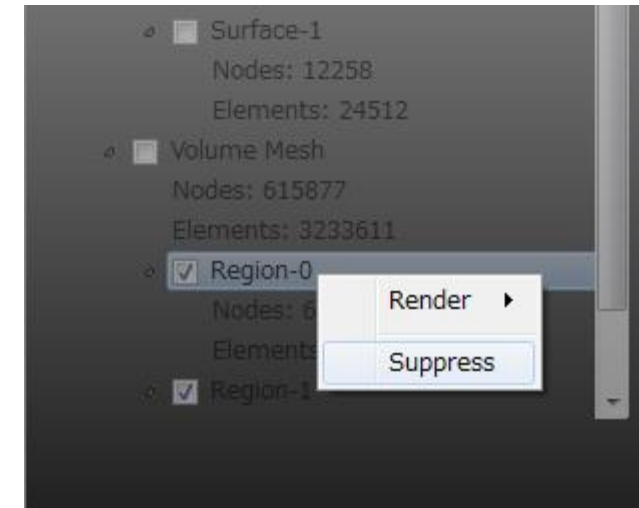
[Home]タブ:[File]:[Save As]

Surface Wrap File形式(.cfdw)・・・Surface Wrap専用ファイル形式
作業途中などを保存

Nastran File形式(.nas)・・・CFD用に出力する際に使用

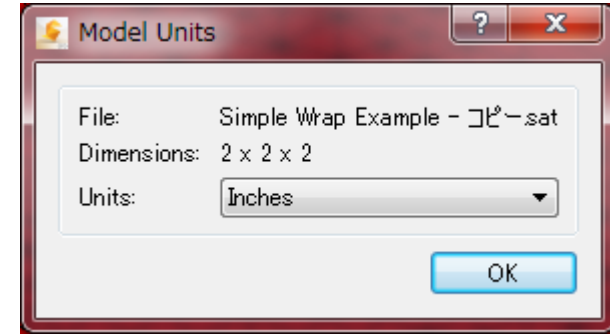
ツリー上のVolume mesh以下のRegionで
右クリック→Suppress

不要のメッシュを抑制します



Surface Wrap使用時の注意点

ファイル名/パスに2バイト文字があると読み込めません
Dimensionsが2x2x2、UnitsがInchesと表示されます



Undo/Redoがありません
必要に応じてSurface Wrap File形式で保存します

ファイルを閉じるときに保存警告なしにファイルが閉じられます



Autodesk and the Autodesk logo are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., and/or its subsidiaries and/or affiliates in the USA and/or other countries. All other brand names, product names, or trademarks belong to their respective holders. Autodesk reserves the right to alter product and services offerings, and specifications and pricing at any time without notice, and is not responsible for typographical or graphical errors that may appear in this document.