



# Fluid Flow in COMSOL Multiphysics®

Mats Nigam

COMSOL

## Fluid Flow Equations

流体流れ方程式

- Navier–Stokes, continuity, and equation of state

ナビエ-ストークス式、連続式、状態方程式

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) \right] + \mathbf{F}$$
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$
$$\rho = \rho(p, T)$$

- Estimate the Reynolds number using characteristic scales:  $L$ ,  $U$ , fluid quantities:  $\rho$ ,  $\mu$

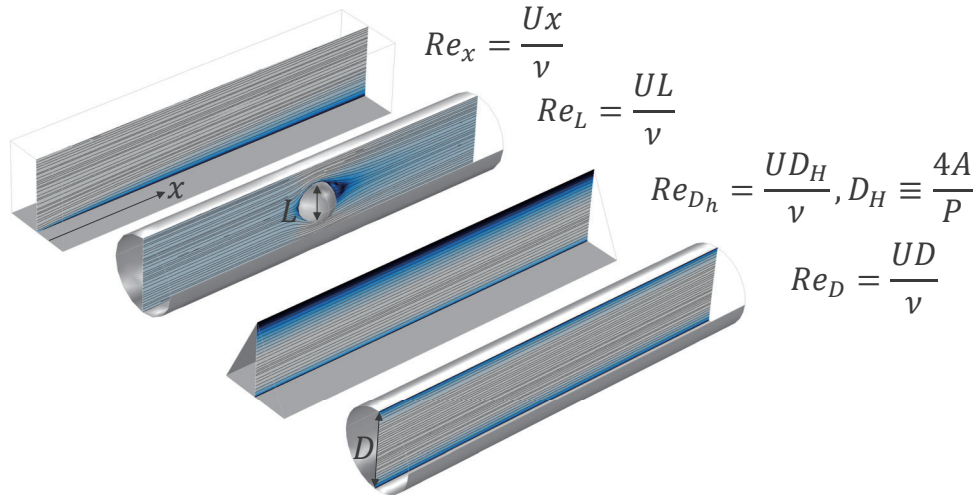
特性スケール:  $L, U$  および 流体の物理量:  $\rho, \mu$  を用いてのレイノルズ数の評価

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \sim \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}}$$

COMSOL

# Reynolds Number Examples

レイノルズ数の例



COMSOL

# Determining the Flow Regime, Re

レイノルズ数による流れの形態

- At low  $Re$  ( $\ll 1$ ): creeping (Stokes) flow クリープ(ストークス)流れ
  - Viscous forces tend to damp out all flow disturbances 粘性力はすべての流れの乱れを減衰させる傾向にある
  - Reversible smooth flow pattern 可逆かつ滑らかな流れのパターン
- At intermediate  $Re$  ( $\sim 1 - 2000$ ): laminar flow 層流
  - Inertial forces become increasingly important 慣性力が重要さを増す
  - Viscous forces are confined to boundary layers, shear layers, and wakes 粘性力は境界層、せん断層、および伴流に限定される
  - Regular, smooth flow pattern 正則で滑らかな流れのパターン
- At high  $Re$  ( $> 4000$ ): turbulent flow 乱流
  - Flow disturbances grow by nonlinear interactions producing a cascade of eddies (vortices)
  - Viscous damping is active everywhere but only has a significant effect on the smallest eddies
  - Disordered (chaotic) flow pattern
    - 渦のカスケードを生成する非線形相互作用によって流れの乱れが成長する
    - 粘性減衰はどこでも有効だが、最小の渦に対してのみ効果大
    - 乱れた(カオス的な)流れパターン

COMSOL

# Determining the Flow Regime, Ma

マッハ数による流れの形態

- The Mach number is defined as:

マッハ数の定義

$$Ma = \frac{|u|}{a} = \frac{\text{flow speed}}{\text{speed of sound}}, \quad a^2 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$$

- For  $Ma = 0$ : formally incompressible flow **形式上は非圧縮性流れ**
  - Speed of sound is infinite (hypothetical case), instantaneous spread of pressure disturbances
- For  $0 < Ma < 0.3$ : weakly compressible flow **弱圧縮性流れ**
  - Density changes due to pressure by max. 5% **圧力によっての生じる密度変化は最大5%**
  - Density changes can also occur due to the dependency on temperature **温度によっても密度変化が発生する**
- For  $Ma > 0.3$ : compressible flow **圧縮性流れ**
  - Thermodynamic effects not negligible **熱力学効果が無視できなくなる**
  - Transonic, supersonic flow with shock waves **衝撃波を伴う遷音速、超音速流**

# Choosing the Right Interface

正しいインターフェースの選択

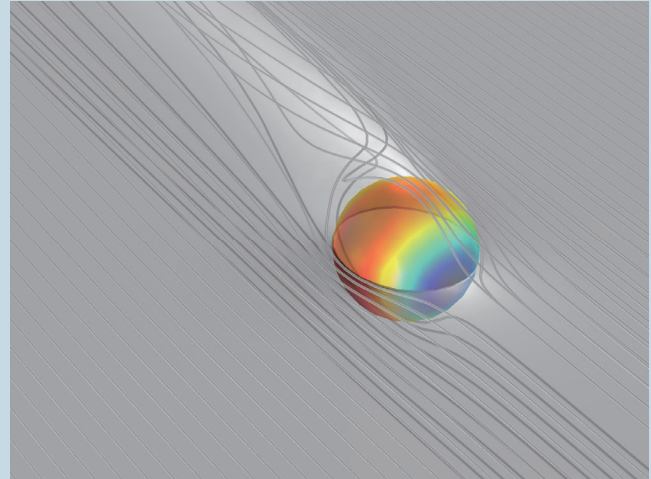
	Fluid Flow	
単相流	Single-Phase Flow	$Ma < 0.3$
クリープ流れ	Creeping Flow (spf)	$Re \ll 1$
層流	Laminar Flow (spf)	$Re \sim 1 - 2000$
乱流	Turbulent Flow	$Re > 4000$
ラージエディシミュレーション	Large Eddy Simulation	$Re > 2000$
回転機械(流体流れ)	Rotating Machinery, Fluid Flow	
粘弾性流れ	Viscoelastic Flow (vef)	
薄膜流	Thin-Film Flow	
多相流	Multiphase Flow	
多孔質媒体内流と地下水流	Porous Media and Subsurface Flow	
非等温流れ	Nonisothermal Flow	
高マッハ数流れ	High Mach Number Flow	$Ma > 0.3$
高マッハ数流れ(層流)	High Mach Number Flow, Laminar (hmnf)	$Re < 2000$
圧縮性オイラー方程式	Compressible Euler Equations (cee)	$Re \rightarrow \infty$
乱流	Turbulent Flow	$Re > 4000$

## Agenda

- Overview of the CFD capabilities in COMSOL COMSOLのCFD機能の概要
  - Single-phase flow 単相流
  - Thin-film\* and porous media flow 薄膜と多孔質媒体内流れ
  - Multiphase flow 多相流
  - Nonisothermal flow and conjugate heat transfer 非等温流れ、共役伝熱
  - High Mach number flow 高マッハ数流れ
  - Reacting Flow 反応流
- Which turbulence model is right for your application 用途に適した乱流モデルはどれか

\* Laminar flow only 層流に限る

COMSOL

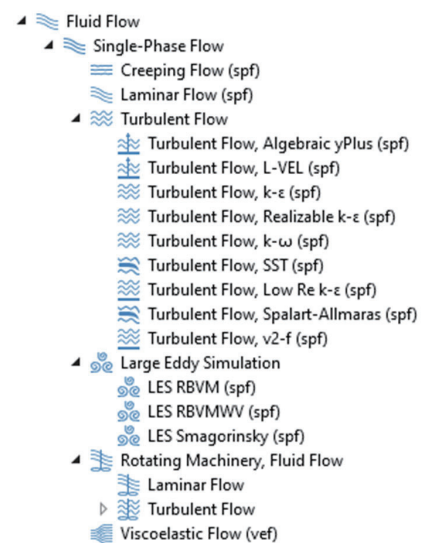


Spinning soccer ball

## Single-Phase Flow

単相流

- Creeping flow also called Stokes flow クリープ(ストークス)流れ
- Laminar flow 層流
  - Newtonian and non-Newtonian flow ニュートン流、非ニュートン流
- Turbulent flow 乱流
  - 2 algebraic models 2つの代数的な2つのモデル
  - 7 transport-equation models 7つの輸送方程式モデル
- Large eddy simulation (LES) ラージエディシミュレーション
  - 3 variational multi-scale models 3つの変分マルチスケールモデル
- Rotating machinery 回転機械
  - Laminar and turbulent flow 層流、乱流
- Viscoelastic flow 粘弾性流れ



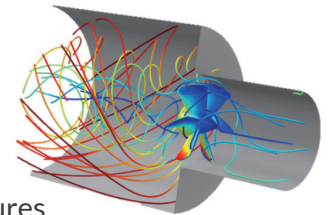
The Single-Phase Flow user interfaces as displayed in the Physics list in the CFD Module.

COMSOL

# General functionality for laminar and turbulent (RANS) flow

層流、乱流 (RANS) に関する一般的機能

- Swirl flow 旋回流
  - Includes the out-of-plane velocity component for axisymmetric flows  
軸対称流の面外速度成分を考慮
- Enable porous media domains\* 多孔質媒体領域の有効化
  - Model porous media flow or coupled free and porous media flow  
多孔質媒体流れまたは非多孔質媒体流れと、多孔質媒体の連成流のモデル化
- Include gravity on flow domains and the option to use the reduced pressure  
流れ領域に対する重力、減圧を使用するオプションを含む
  - Also applies to LES ラージエディシミュレーションにも適用可能
- Specific boundary conditions 特定の境界条件
  - Fully developed inflow and outflow conditions 完全成長流れの流入、流出条件
  - Assembly boundaries for geometries consisting of several parts
  - Wall conditions on internal shells for simulating thin immersed structures
  - Screen condition for simulating thin perforated plates and wire gauzes  
- 複数のパーツで構成されるジオメトリのアセンブリ境界  
- 薄い浸漬構造をシミュレートするための内部シェルの壁条件  
- 穿孔されたプレートと金網をシミュレートするためのスクリーン条件



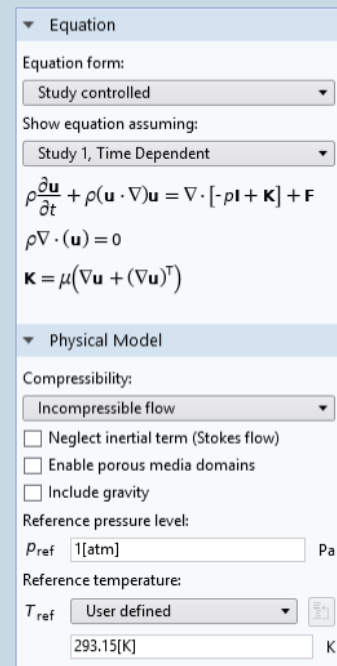
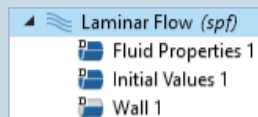
Streamlines in an HVAC duct

\* Laminar Flow and Algebraic  $\gamma$ Plus or LVEL turbulence models  
層流および代数 $\gamma$ PlusまたはLVEL乱流モデル



## Laminar Flow (spf) 層流

- Solves Navier–Stokes and continuity equations ナビエ-ストークス式と連続式の求解
  - Stationary or time dependent 定常、時間依存
  - Incompressible, weakly compressible, or compressible flow ( $Ma < 0.3$ ) 非圧縮性、弱圧縮性、圧縮性流れ (マッハ数<0.3)
- Neglect inertial term for  $Re \ll 1$  レイノルズ数が1よりはるかに小さい場合は慣性項を無視
- Enable porous media domains 多孔質媒体ドメインの有効化
- Include gravity 重力を考慮
- Define reference pressure level and reference temperature 基準圧力レベルと基準温度の定義 (default: 1[atm], 293.15[K])

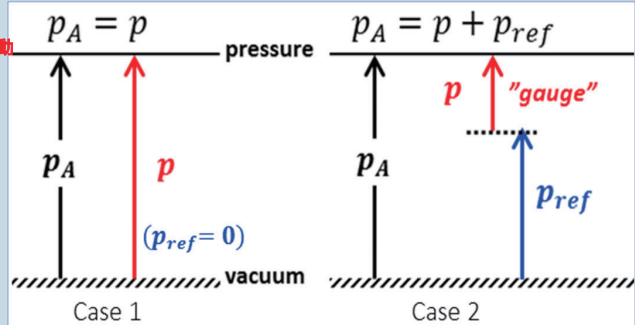


Laminar Flow node and Settings window



## About Fluid Pressure 流体圧力

- Fluid velocity is driven by pressure gradients ("differences") 圧力勾配(圧力差)による流体速度の駆動
- Absolute pressure needed for material property evaluation; e.g.,  $\rho(p_A, T)$  材料特性の評価に必要な絶対圧力
- Generally two ways to calculate the pressure: 一般的な圧力計算の2つの方法
  - Case 1:  $\Delta p \sim p_A \rightarrow$  set  $p_{ref} = 0$  and solve for the absolute pressure directly  $p_A = p$
  - Case 2:  $\Delta p \ll p_A \rightarrow$  set  $p_{ref}$  close to typical system pressure level and solve for the (small) gauge pressure only  $p_A = p_{ref} + p$
- Why is it important?  $\rightarrow$  solver stability & convergence ソルバーの安定さと収束性のために重要



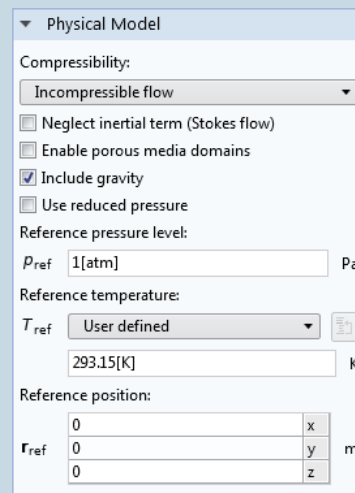
- ケース1: 大気圧に近いとき、Pref=0として解く

- ケース2: 大気圧よりはるかに小さい圧力差のとき、Prefを解析対象の圧力に近い値を設定し、ゲージ圧を解く

## Gravity Property 重力特性

- Includes a volume force on all domains, 全ての領域について体積力を考慮  

$$\mathbf{F} = \rho \mathbf{g}$$
- Option to use reduced pressure for incompressible flow 非圧縮性の流れに減圧を使用するオプション
- Boussinesq approximation available for nonisothermal flow 非等温流にブシネスク近似を適用可能

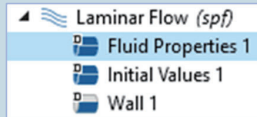


Lock-release gravity current

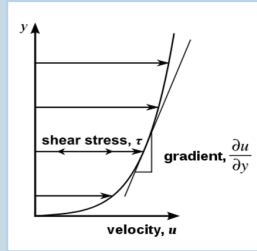
# Fluid Properties

流体特性

- Density 密度
  - From material 材料ライブラリから取得
  - User defined ユーザー定義
- Constitutive relation 構成関係
  - Newtonian ニュートン流体
    - Dynamic viscosity 粘性係数
  - Inelastic non-Newtonian 非弾性ニュートン流体
    - Inelastic model 非弾性モデル



$$\tau = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$



Fluid Properties

Density:  $\rho$  From material

Constitutive relation: Inelastic non-Newtonian

Inelastic model: Bingham-Papanastasiou

$$\mu = \mu_p + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m_p \dot{\gamma})]$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2 \mathbf{S} : \mathbf{S}}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]$$

Plastic viscosity:  $\mu_p$  0 Pa·s

Yield stress:  $\tau_y$  0 N/m<sup>2</sup>

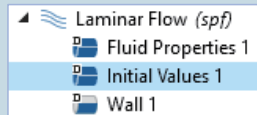
Model parameter:  $m_p$  0 s

Newtonian and non-Newtonian constitutive relations

# Initial Values

初期値

- Stationary 定常
  - Initial values = numerical initial guess 数値推測のための初期値
  - No physical meaning but numerical (starting point for iterations) 物理的な意味を伴わないが数値計算(反復の開始点)に必要
  - Boundary conditions do not have to be consistent with initial values 境界条件と初期値の一貫性の必要なし



Initial Values

Velocity field:

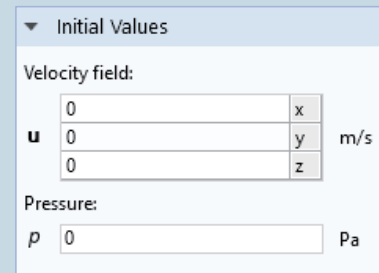
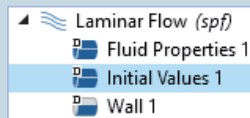
u_init	x	m/s
v_init	y	
w_init	z	

Pressure:  $\rho$  p\_init Pa

Initial Values node and Settings window

## Initial Values 初期値

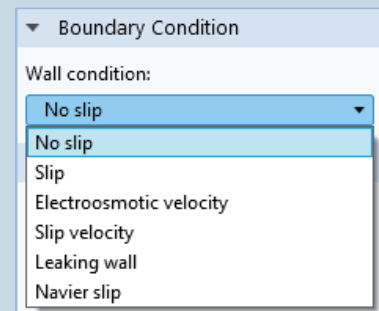
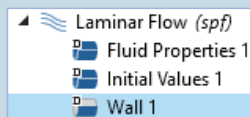
- Time dependent 時間依存
  - Initial values = physical initial condition 物理的な初期条件としての初期値
  - Physical solution (velocity & pressure field) of a time-dependent problem at initial time  $t_0$  初期時刻 $t_0$ での時間依存問題の物理的解(速度と圧力場)
  - All boundary conditions must be consistent with initial condition (at  $t_0$ )  $t_0$ において全ての境界条件は初期条件と一致する必要あり
    - Use a converged stationary solution as initial condition for the time-dependent study 時間依存スタディの初期条件としての収束定常解の使用
    - Alternatively, use the trivial initial condition (zero velocity & pressure) and ramp up the (Dirichlet) boundary conditions または自明な初期条件(速度と圧力がゼロ)を使用しての、(ディリクレ)境界条件の増加



Initial Values node and Settings window

## Wall 壁

- Wall conditions: 壁条件
  - No slip すべりなし
  - Slip すべり
  - Electroosmotic velocity (M. F.) 電気浸透速度
  - Slip velocity (M. F.) すべり速度
  - Leaking wall リーキング壁
  - Navier slip ナビエすべり
- Wall movement can be picked up automatically when a moving frame is defined in the model or set manually 壁運動は、運動系がモデルで定義されている場合、または手動で設定されている場合、自動的に取得



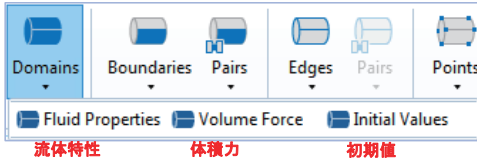
Wall node and Settings window



# Physics Features for Laminar Flow

層流に関する物理フィーチャー

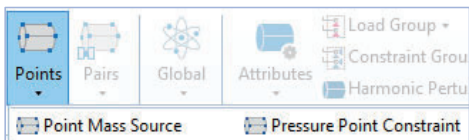
## Domain conditions ドメイン条件



## Edge conditions エッジ条件

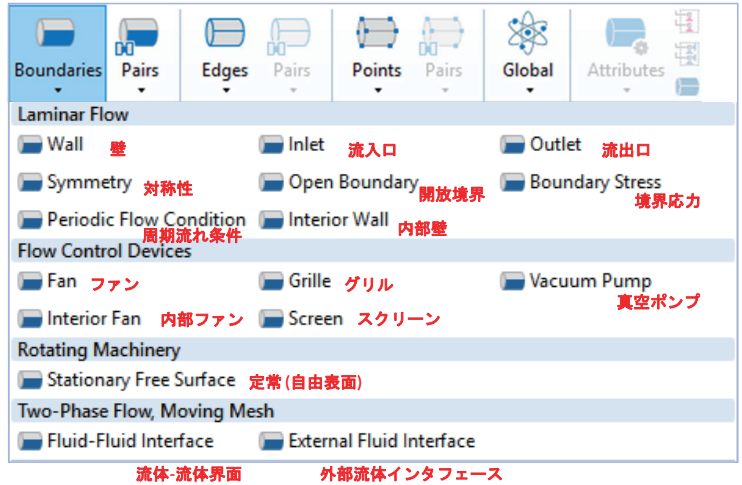


## Point conditions ポイント条件



COMSOL ポイント質量ソース 圧力ポイント拘束

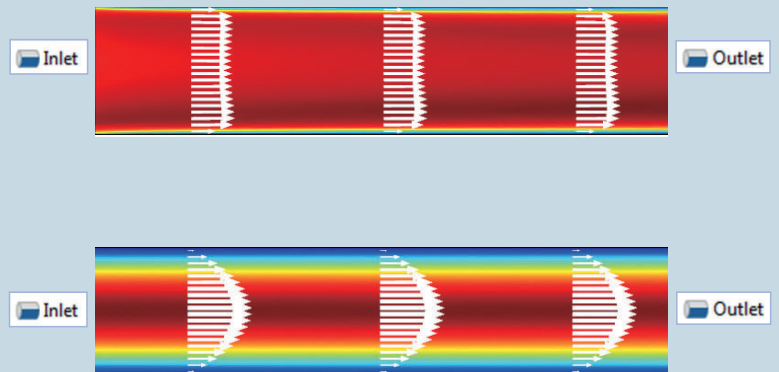
## Boundary conditions 境界条件



# Combinations of Inlet/Outlet BCs

流入口、流出口境界条件の組み合わせ

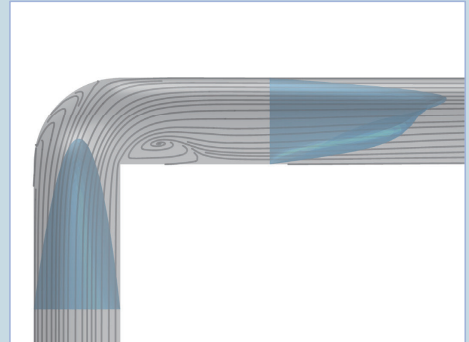
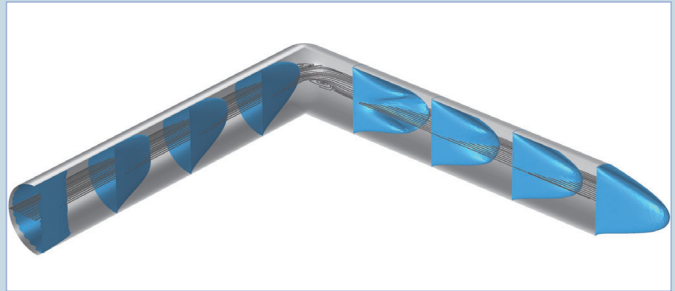
- Well posed 好ましい設定
  - Velocity in – pressure out  
速度流入の圧力流出
  - Pressure in – velocity out  
圧力流入の速度流出
- Slightly “harder” for the solver ソルバーにとって少し厳しい設定
  - Pressure in – pressure out  
圧力流入の圧力流出
- Ill posed 好ましくない設定
  - Velocity in – velocity out (+ pressure level)  
速度流入の速度流出 (圧力レベル追加)



2D channel flow with prescribed uniform and parabolic inlet profiles

## Location of Outlet Boundary 流出口境界の位置

- Selecting appropriate outlet conditions is not a trivial task
  - If there is something "interesting" happening near an outflow boundary (e.g., wakes, recirculations), extend the computational domain to include this phenomenon
- 適切な境界条件の選択は単純な作業ではない
- 流出境界付近で何か「興味深い」ことが起きている場合（後流、再循環など）、計算領域を拡張してこの現象を考慮する

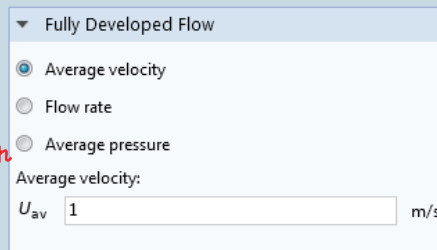


Flow in a semicircular pipe with a 90-degree bend

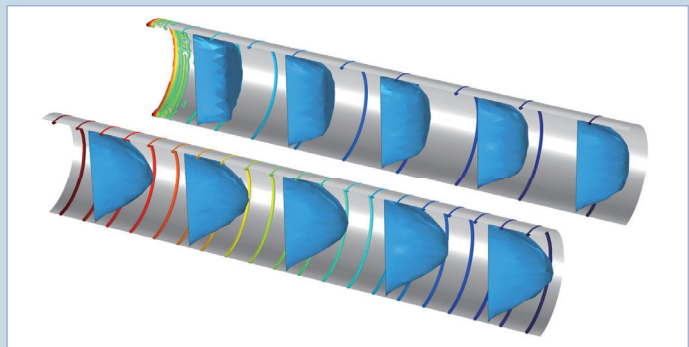
## Fully Developed Flow 完全発達流れ

- Available option for the *Inlet* and *Outlet* BCs 流入口、流出口境界条件で利用可能なオプション
- Equations for fully developed flow in a pipe with the same cross section as the inlet/outlet are coupled to the degrees of freedom (DOFs) at the boundary and solved together with the domain DOFs

流入口/流出口と同じ断面積のパイプ内の完全発達流れの方程式は、境界の自由度 (DOF) にカップリングされ、ドメインDOFとともに求解される



$$L_E = 0.05D_H \left( \frac{UD_H}{\nu} \right)$$

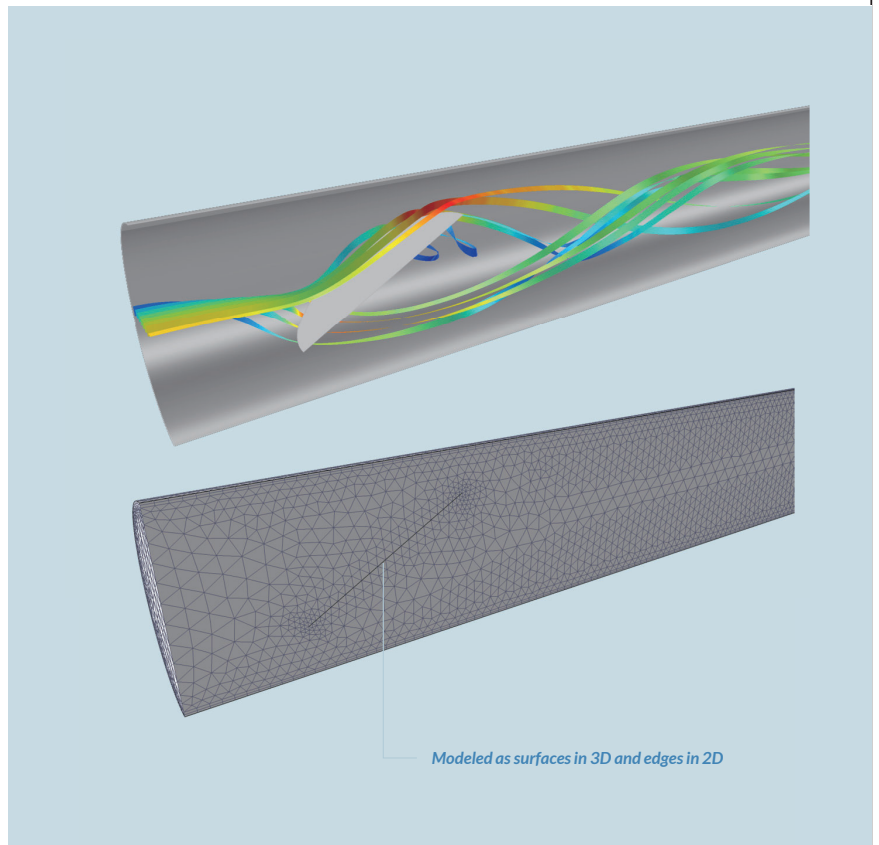


Flow in a semicircular pipe with and without the Fully Developed Flow option

## Interior Wall 内部壁

- Avoid meshing of thin structures by using interior boundaries 内部境界を使用しての薄い構造のメッシュを回避
- Slip, no slip, moving wall すべり、すべりなし、壁運動
- Allows discontinuities (velocity, pressure) across the boundary 境界を越えた不連続性（速度、圧力）を許す

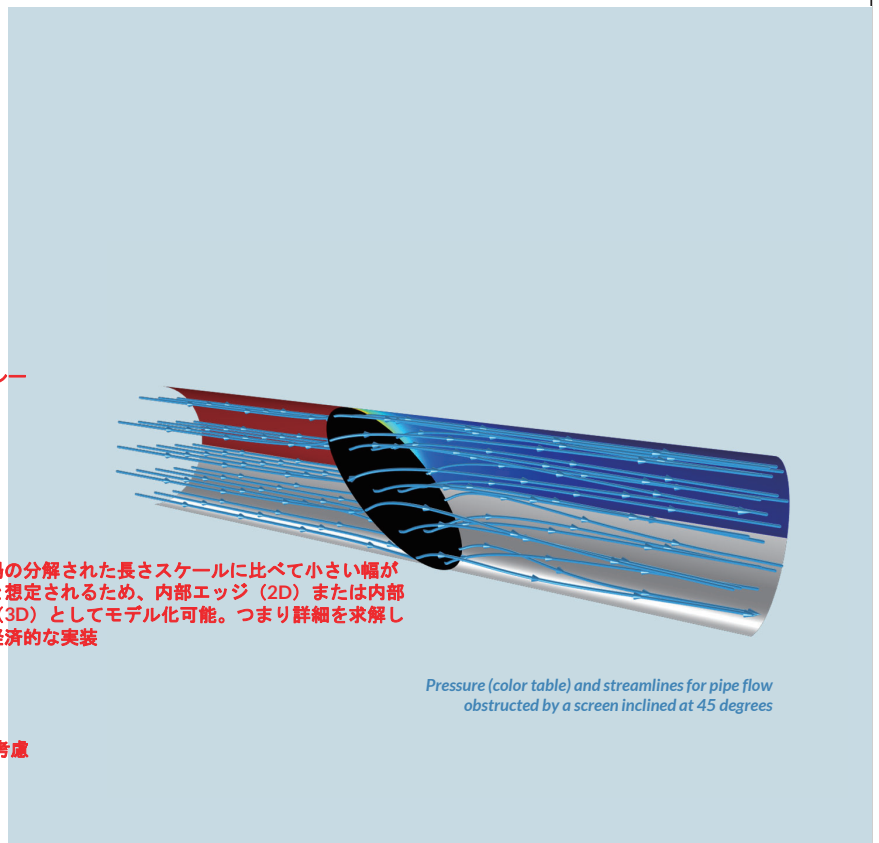
COMSOL



## Screen スクリーン

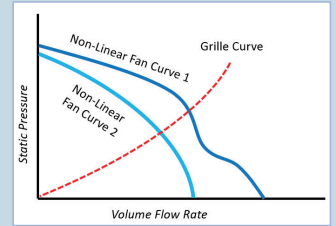
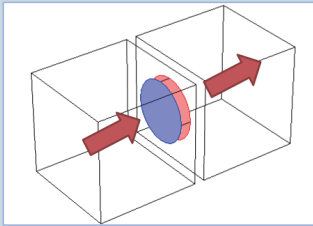
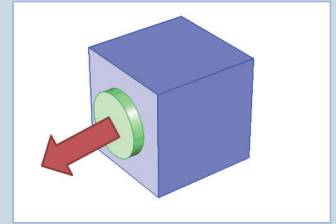
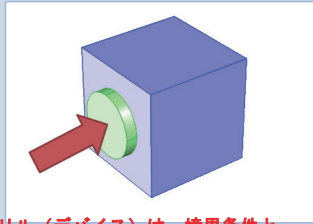
- “Screen” refers to a barrier with distributed perforations such as a wire gauze, grille, or perforated plate スクリーンとは、金網、グリル、穿孔されたプレートなどの穿孔が分散した障壁のこと
- Assumed to have a width, which is small compared to the resolved length scales of the flow field and can thus be modeled as an interior edge (2D) or interior surface (3D) – economic implementation without resolving details 流れ場の分解された長さスケールに比べて小さい幅があると想定されるため、内部エッジ（2D）または内部表面（3D）としてモデル化可能。つまり詳細を求解しない経済的な実装
- Common correlations for resistance and refraction coefficients are included 抵抗係数と屈折係数の一般的な相関関係を考慮

COMSOL



## Fan, Interior Fan, Grille, Vacuum Pump

- Fans, vacuum pumps, or grilles (devices) can be represented using lumped curves implemented as boundary conditions. ファン、真空ポンプ、またはグリル（デバイス）は、境界条件として実装された集中曲線を使用して表現可能
- These simplifications also imply some assumptions. In particular, it is assumed that a given boundary can only be either an inlet or an outlet. Such a boundary should not be a mix of inlets/outlets, nor switch between them during a simulation. これらの単純化は条件：特に与えられた境界は流入口か流出口のいずれかのみであると想定。そのような境界は、流入口/流出口の混合であってはならず、シミュレーション中にそれらの切り替えは不可
- Manufacturers usually provide curves that describe the static pressure as a function of flow rate for a fan. 製造業者は通常、静圧をファンの流量の関数として表す曲線を提供する

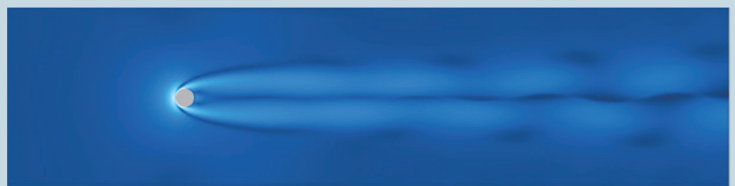
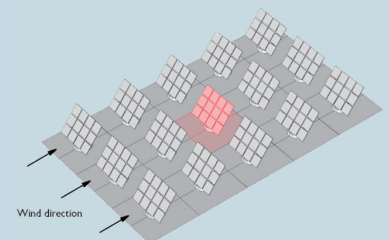
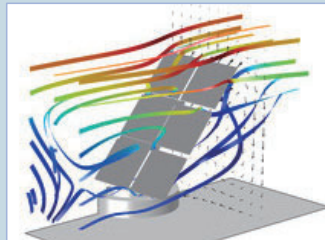
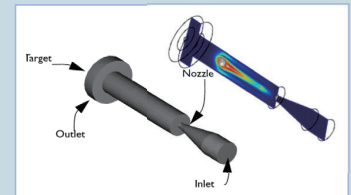
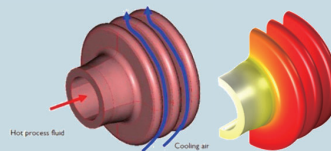


Define the flow direction on exterior and interior boundaries, and fan curve (or similar)

## Symmetry, Axisymmetry, and Periodicity

対称性、軸対称、周期性

- Great potential to reduce memory requirement & computational time → efficiency! メモリ要件と計算時間を削減できるファクター。非常に効率的
- Physics, materials, and geometry must obey symmetry, axisymmetry, and periodicity フィジックス、材料、ジオメトリが対称/軸対称/周期的であることが必要



Geometry and boundary conditions are symmetric with respect to midplane but instabilities may occur

## Pressure Point Constraint

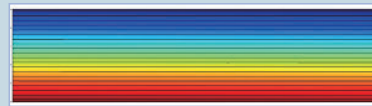
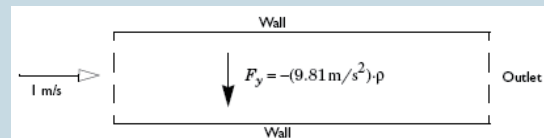
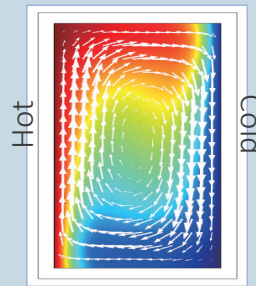
圧力ポイント拘束

- If system pressure level is not uniquely determined by a boundary condition (e.g., cavity surrounded by walls), it must be set in some other using a pressure point constraint.
- When gravity is included in the model, the outlet often cannot be described by a uniform pressure. In such cases, use the *Compensate for hydrostatic pressure* option.

系の圧力レベルが境界条件（壁に囲まれた空洞など）によって一意に決定されない場合、圧力ポイント拘束を使用して他の場所に設定する必要があります。

モデルに重力が含まれている場合、出口は均一な圧力で表現できないことがある。そのような場合は、静水圧の補正オプションを使用

Set  $p$  at this point



COMSOL

## Rotating Machinery

回転機械

- Laminar and turbulent 層流、乱流
- Sliding mesh スライディングメッシュ
  - Accurate time-dependent simulations 正確な時間依存シミュレーション
- Frozen rotor 凍結ローター
  - Fast, stationary approximations 迅速な定常近似
  - Can provide starting conditions for a sliding mesh simulation スライディングメッシュシミュレーションの開始条件の提供が可能
  - Stationary free surface postprocessing feature 定常自由表面ポスト処理フィーチャー
- Interior wall conditions 内部壁条件
  - Simulate infinitely thin blades and baffles 無限に薄いブレードとバフルのシミュレーション



Continuous-stirred tank reactor

COMSOL

## Rotating Machinery: ALE

回転機械 (ALE法)

Sliding mesh:

スライディングメッシュ

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial T} + \left( \mathbf{u} - \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial T} \right) \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

$$\frac{\partial}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{\Omega} \times, \quad \mathbf{u} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}, \quad \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial T} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x} \Rightarrow$$

$$\rho \left( \left( \frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{\Omega} \times \right) (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) + (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) \cdot \nabla (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \Rightarrow$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) + \frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} \times \mathbf{x} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

COMSOL

## Rotating Machinery: ALE

回転機械 (ALE法)

Frozen rotor:

凍結ローター

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial T} + \left( \mathbf{u} - \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial T} \right) \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial T} \stackrel{\text{def}}{=} \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}, \quad \mathbf{u} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}, \quad \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial T} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x} \Rightarrow$$

$$\rho \left( \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) + (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) \cdot \nabla (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \Rightarrow$$

$$\rho \left( \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

— Set:  $T \equiv 0$

Tは常時ゼロ

COMSOL

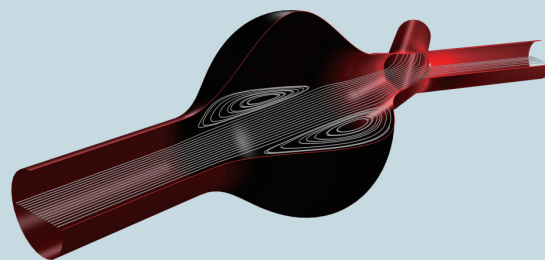
## Viscoelastic Flow 粘弾性流れ

- Adds additional elastic stress to momentum equation 弾性応力を運動量方程式に追加

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \mathbf{T}_e] + \mathbf{F}$$

- Predefined material models 事前定義された材料モデル

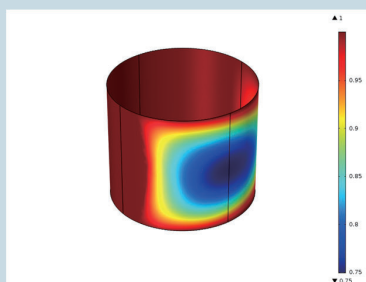
- Oldroyd-B オールドロイドB
- Giesekus ギーセクス
- FENE-P



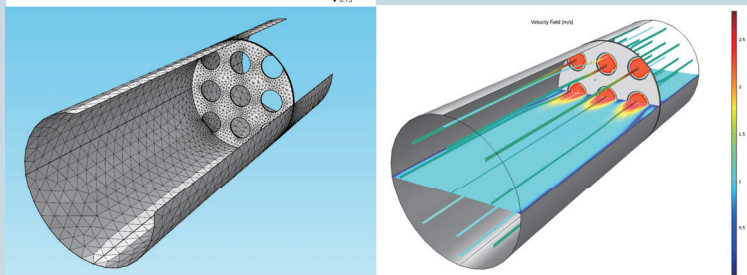
Viscoelastic flow: Blood flow in an abdominal aortic aneurysm. The colormap displays the total wall stress. A brighter red color indicates a larger stress.

## Thin-Film and Porous Media Flow 薄膜と多孔質媒体内流れ

- Thin-film flow 薄膜流
  - For lubrication and flow in narrow structures, which are modeled as 3D shells 3Dシェルとしてモデル化された狭い構造での潤滑と流れ用
  - Supports gaseous cavitation 気体キャビテーションをサポート
- Porous media flow 多孔質媒体内流れ
  - Laminar or turbulent free-flow coupled to porous media flow including Forchheimer drag (high interstitial velocities)
  - Darcy's law and Brinkman equations with isotropic/anisotropic permeability tensor
  - Multiphase flow in porous with capillary pressure and relative permeability (predefined models for 2 phases)



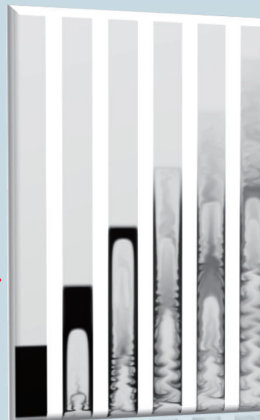
Mass fraction for cavitating flow in a journal bearing modeled using the Thin-Film Flow, Shell interface



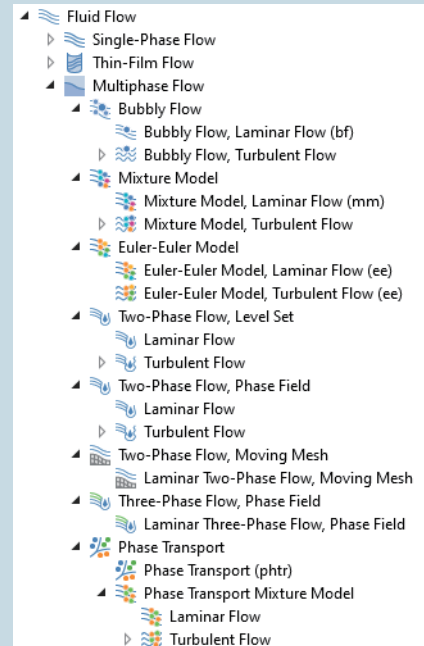
A porous filter supported by a perforated plate and immersed in turbulent pipe flow is modeled using the Free and Porous Media Flow interface

## Multiphase Flow 多相流

- Disperse flows 分散流
  - Bubbly Flow 気泡流れ
  - Mixture Model 混合相モデル
  - Euler-Euler Model オイラー-オイラーモデル
  - Phase Transport, Mixture Model 相輸送混合モデル
- Separated flows 分離流
  - Two-Phase Flow, Level Set
  - Two-Phase Flow, Phase Field
  - Two-Phase Flow, Moving Mesh
  - Three-Phase Flow, Phase Field
    - 2相流 (レベルセット)
    - 2相流 (フェーズフィールド)
    - 2相流 (移動メッシュ)
    - 3相流 (フェーズフィールド)



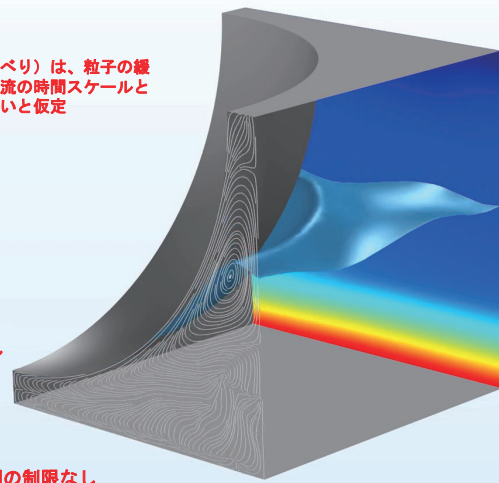
Start-up of a fluidized bed modeled using the Euler-Euler Model interface



## Multiphase Flow – Disperse Flows

多相流 (分散流)

- Bubbly Flow & Mixture Model 気泡流れ、混合相モデル
  - Relative motion (slip) assumes that the particle relaxation time is small compared to the time scale of the mean flow 相対運動 (すべり) は、粒子の緩和時間が平均流の時間スケールと比較して小さいと仮定
  - Bubble-induced turbulence 気泡によって誘導された乱流
  - Mass transfer between phases 相間の質量輸送
  - Spherical and non-spherical particles 球状/非球状粒子
  - Compatible with all RANS turbulence models 全てのRANS乱流モデルに対応
  - Phase transport mixture model for arbitrary number of phases 任意の数の相の相輸送混合モデル
- Euler-Euler Flow オイラー-オイラー流れ
  - General two-phase flow 一般的な2相流
  - No restriction on particle relaxation time 粒子緩和時間の制限なし
  - Spherical and non-spherical particles 球状/非球状粒子
  - Mixture or phase-specific k-ε turbulence model 混合/位相固有のk-ε乱流モデル



Enhanced sedimentation of dispersed particles below a curved boundary. Simulated with the Mixture Model, k-ε interface.

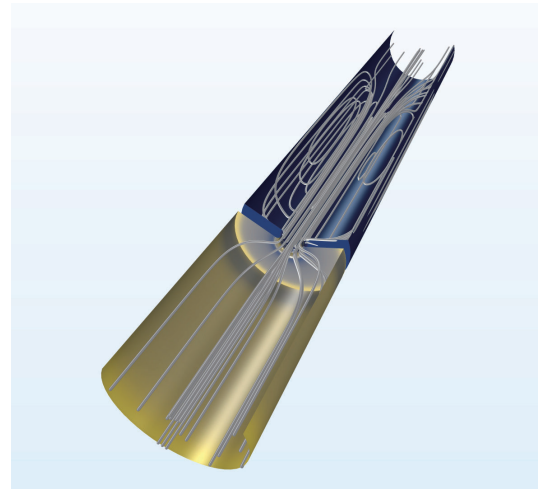


# Multiphase Flow – Phase Transport, Mixture Model

多相流 (相輸送混合モデル)

- Multiphysics coupling between Single-Phase Flow and Phase Transport 単相流と相輸送間の連成
- Able to model multiple dispersed phases 複数の分散相をモデリング可能
- Simplified mixture model - neglects additional stresses due to relative motion between phases.

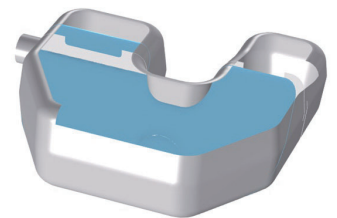
単純化された混合モデル - 相間の相対運動による追加応力を無視



# Multiphase Flow – Separated Flows

多相流 (分離流)

- Tracks the exact surface location using the level set or phase field models, or by using a moving mesh interface レベルセットモデル、フェーズフィールドモデル、移動メッシュインタフェースを使用して、正確な表面位置を追跡
- Accurate modeling of surface-tension effects. Includes a surface-tension coefficient library 表面張力係数ライブラリが含まれ、表面張力効果の正確なモデリングが可能
- Can be combined with any turbulence model\* あらゆる乱流モデルとの組み合わせが可能
- Three-phase flow can be simulated using a ternary phase-field formulation 3相流は、3成分のフェーズフィールド定式化を使用してシミュレート可能



Sloshing in a fuel tank



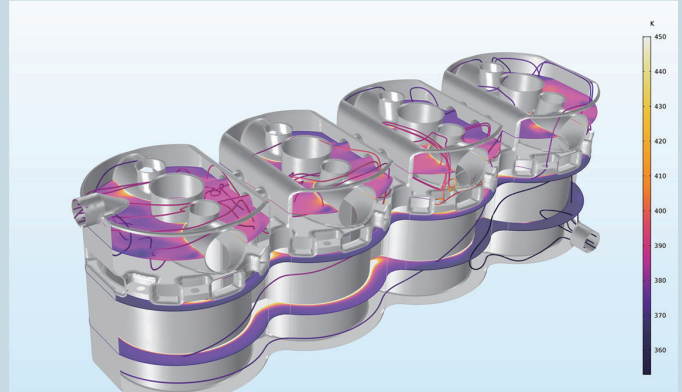
Gas bubble rising from a dense liquid up into a light liquid in a three-phase flow, phase-field simulation

\*Two-phase flow only  
2相流に限る

# Nonisothermal Flow and Conjugate Heat Transfer

非等温流と共役伝熱

- Heat transfer in fluids and solids 流体/固体の熱伝達
- Laminar and turbulent flow 層流/乱流
- Incompressible – Boussinesq approximation, weakly compressible or compressible 非圧縮性 (ブシネスク近似) / 弱圧縮性/圧縮性
- Engineering correlations for convective heat transfer 対流熱伝達の工学的相関
- Porous media domains 多孔質媒体ドメイン
- Thermal wall functions when using the k-epsilon, Realizable k-epsilon or k-omega turbulence models k-ε/Realizable k-ε/k-ω乱流モデルを使用する際の熱壁関数
- Turbulent Prandtl number models 乱流プラントル数モデル

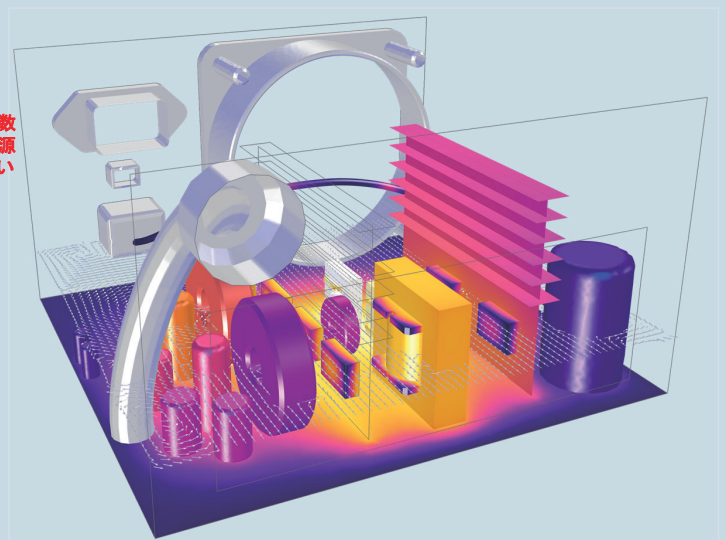


Conjugate heat transfer in the cooling of an engine block

# Conjugate Heat Transfer Example

共役熱伝達の例

- The model examines the air cooling of a power supply unit (PSU) with multiple electronics components acting as heat sources 熱源として機能する複数の電子部品を備えた電源装置 (PSU) の空冷度合いのモデル
- Avoid damaging components by excessively high temperatures 過度の高温による部品の損傷の回避
- Extracting fan and a perforated grille cause an airflow in the enclosure ファンおよび穿孔されたグリルを引き出すことによる、密閉内での気流の発生
- Fins are used to improve cooling efficiency 冷却効率を改善するためのフィンの使用



Cooling of a power supply unit

# Conjugate Heat Transfer Example

共役熱伝達の例

Fluid flow described by Navier–Stokes in air in the compartment

区画内の空気中のナビエ-ストークスによって記述される流体の流れ

Heat transfer by conduction and advection in air

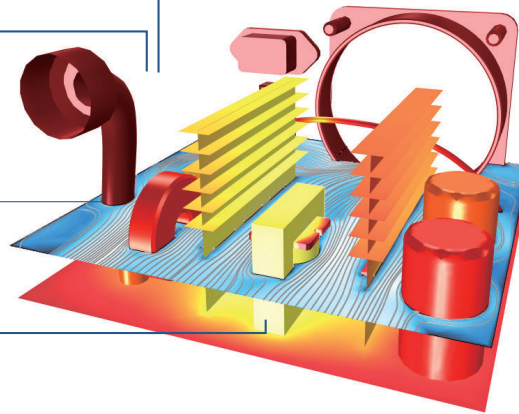
空気中の伝導と移流による熱伝達

Continuity in heat flux and temperature at solid-air interfaces

固体-空気界面での熱流束と温度の連続性

Heat transfer by conduction in the solid parts

固体部品の伝導による熱伝達



COMSOL

# High Mach Number Flow

高マッハ数流れ

## ▪ Laminar and turbulent viscous flow

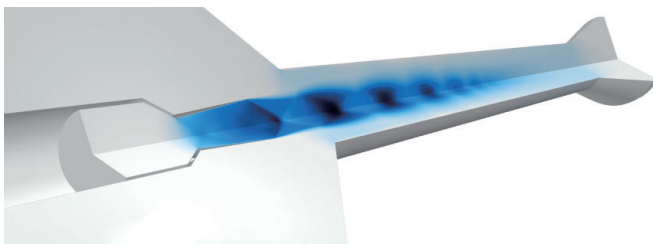
層流/乱流の粘性流れ

- k-ε and Spalart–Allmaras turbulence model k-εとSpalart-Allmaras乱流モデル
- Fully compressible flow for all Mach numbers 全てのマッハ数での完全圧縮性流れ
- Viscosity and conductivity can be determined from Sutherland's law サザーランドの法則から決定される粘度と導電率

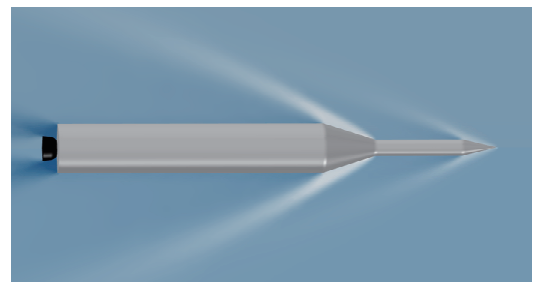
## ▪ Compressible Euler Equations interface

圧縮性オイラー方程式インタフェース

- Based on the discontinuous Galerkin method 不連続ガラーキン法を基とする
- WENO with positivity preserving limiter available 正値性を有する流束制限付きWENO



Shock-diamond pattern for turbulent flow in a supersonic ejector



Density variations around a rocket at supersonic speed

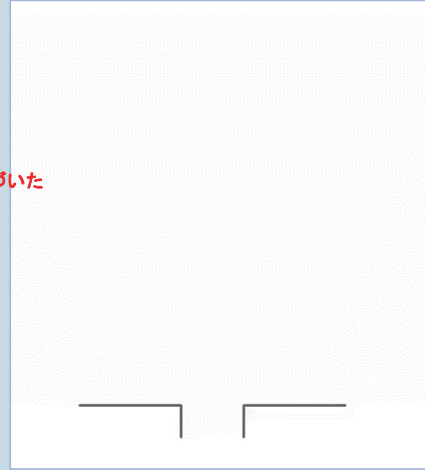
COMSOL

## High Mach Number vs. Nonisothermal Flow

高マッハ数流れと非等温流れの比較

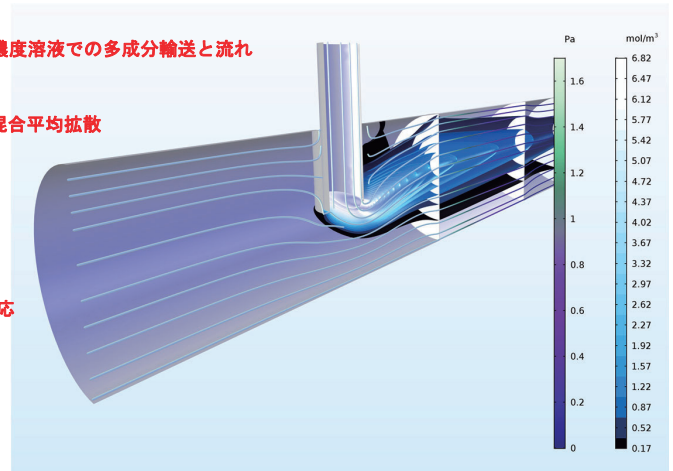
Both interfaces solve the same equations for ideal gases, but: 両方のインターフェースとも理想気体の同じ方程式を解く。ただし、

- High Mach Number Flow 高マッハ数流れ
  - Has characteristics based boundary conditions for inflow and outflow boundaries 流入境界/流出境界の特性に基づいた境界条件をもつ
  - Has consistent stabilization methods specifically suited for transonic and supersonic flow 遷音速/超音速流に特化した、一貫した安定化手法をもつ
- Nonisothermal Flow 非等温流れ
  - Has more turbulence models 多くの乱流モデルをもつ
  - Can handle general material models 一般的な材料モデルの取り扱いが可能



## Reacting Flow 反応流

- Multicomponent transport and flow in diluted and concentrated solutions 希釈種/高濃度溶液での多成分輸送と流れ
  - Fickian and mixture-averaged diffusion フィックおよび混合平均拡散
  - Migration of charged species in electric fields 電場中の荷電化学種の移動
  - Mass transport in free and porous media flow 自由流れ/多孔質媒体流れでの質量輸送
  - Turbulent mixing and reactions 乱流混合と反応
  - Stefan velocities on boundaries with reactions 反応を伴う境界上のステファン速度
  - Concentration-dependent density and viscosity in flow description 流れ記述における濃度依存の密度と粘度

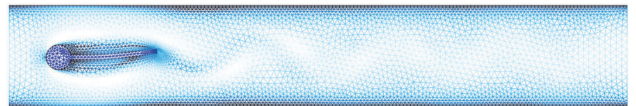


Reacting flow in a tubular reactor

# Fluid Structure Interactions (with MEMS or Structural Mechanics Modules)

MEMSモジュール/構造力学モジュールを用いた流体-構造相互作用 (FSI)

- Based on the ALE moving mesh technology in COMSOL COMSOLのALE移動メッシュ機能を基とする
- Fully bidirectional coupling between fluid and structure 流体と構造の間の完全な双方向連成
  - Viscous, pressure, and inertial fluid forces on the structure 構造物にかかる粘性、圧力、慣性流体力
  - Momentum transfer back to fluid 流体への運動量移動
- Small and large deformations 小さい変形/大きい変形
- Highly accurate fluid load computation (weak constraints) 高精度の流体負荷計算 (弱拘束)
- Predefined physics interface makes it easy to build models rapidly – no manual interfacing between different solvers



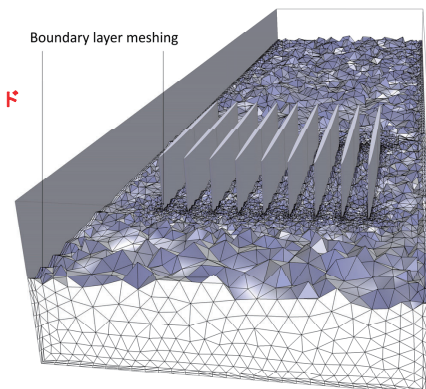
Benchmark model for fluid-structure interaction

事前提義された物理インタフェースによる、モデルの迅速な構築の容易さ - 異なるソルバー間の設定は不要

# General Capabilities in the CFD Module

CFDモジュールの一般的機能

- Robustness, performance, and accuracy 堅牢性、パフォーマンス、精度
- Solvers ソルバー
  - Automatic solver suggestions ソルバーの自動的な提案
  - Algebraic and geometric multigrid 代数的/幾何学的なマルチグリッド
  - Pseudo time stepping 擬似時間ステップ
  - Cluster computing クラスタ計算
- State of the art FEM for CFD CFDの最先端FEM
  - Stabilization techniques 安定化手法
  - Discontinuous Galerkin for sliding meshes スライディングメッシュ用の不連続ガラーキン法
- Meshing メッシュ
  - Physics-controlled mesh フィジックス制御メッシュ
  - Boundary layer mesh 境界層メッシュ
  - Mesh control entities for advanced meshing より高度なメッシングのためのメッシュ制御エンティティ



Automatic boundary layer meshing

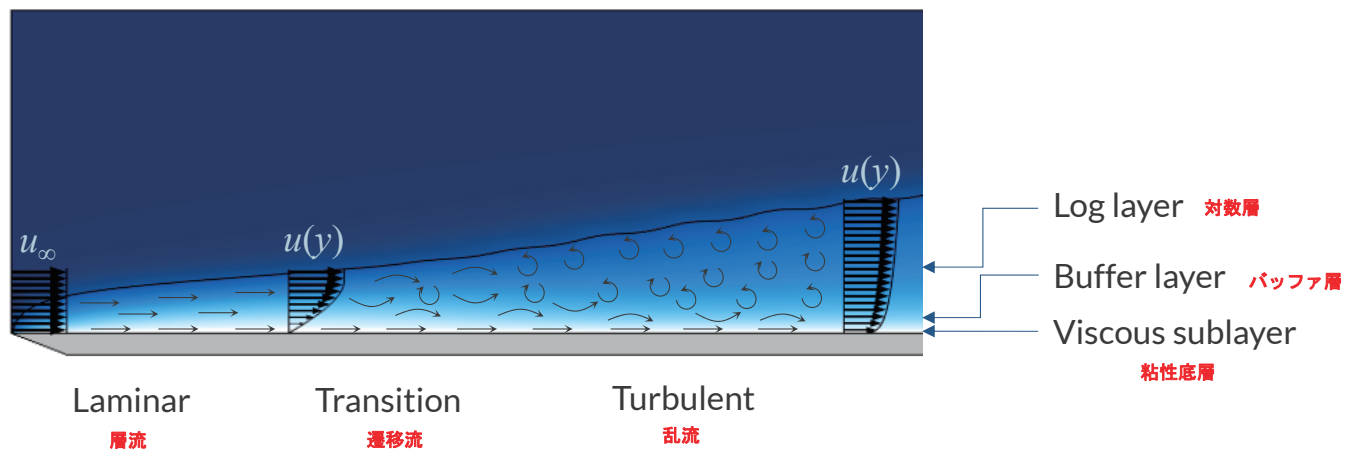
# Which turbulence model is right for your application?

用途に応じた乱流モデルの選択方法

COMSOL

## Laminar, Transitional, and Turbulent Flow

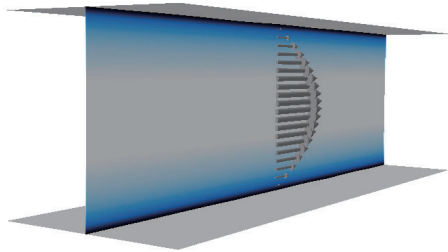
層流/遷移流/乱流



COMSOL

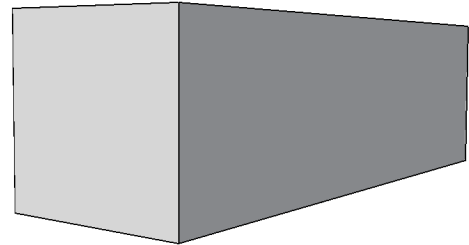
# Laminar Flow: Resolution

層流の解像度



Low-Re channel flow

低レイノルズ数チャネル流れ

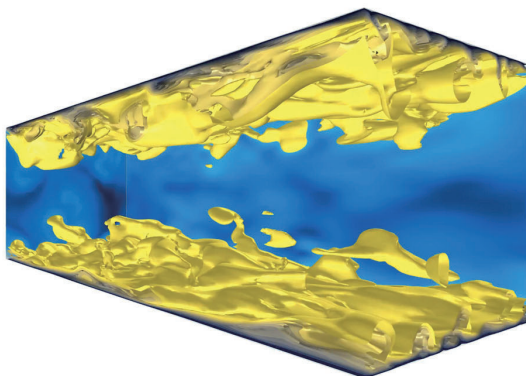


One single 2<sup>nd</sup>-order element

1つの2次要素

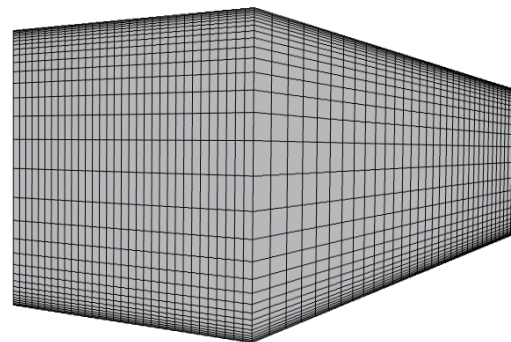
# Turbulent Flow (LES): Resolution

乱流 (LES) の解像度



High-Re channel flow

高レイノルズ数チャネル流れ



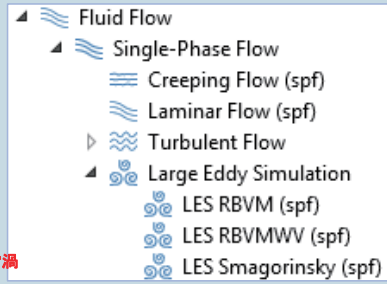
32x32x32 2<sup>nd</sup>-order elements

32x32x32 2次要素

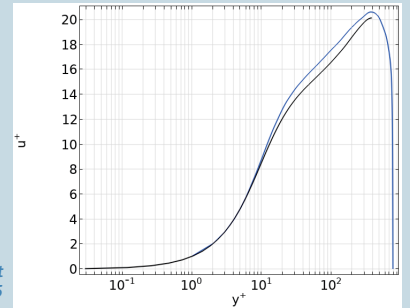
# Large Eddy Simulation

ラージエディシミュレーション

- The larger three-dimensional, unsteady eddies are resolved, whereas the effect of the smaller eddies is modeled  
メッシュサイズより大きい3D非定常渦は求解されるが、小さい渦の効果はモデル化される
- Simulations must be three-dimensional and time dependent  
シミュレーションは3Dの時間依存で解く必要あり
- Accurate but expensive (computationally)  
精度は良いが計算コストが高い
- The three current interfaces are based on variational multiscale methods  
現在の3つのインターフェースは、変分法のマルチスケール手法を基とする



LES interfaces



Turbulent channel flow at a turbulent Reynolds number of 395

# LES Modeling

ラージエディシミュレーション(LES)のモデリング

Decompose velocity and pressure fields into resolved and unresolved scales,

$$\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}', P = p + p' \quad \text{速度と圧力場を解像スケールと未解像スケールに分解}$$

and use inner-product space  $(\mathbf{v}, q)$  to filter out unresolved scales,

内積空間  $(\mathbf{v}, q)$  を使用して未解像スケールを除外

$$\left( \mathbf{v}, \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)_{\Omega} - (\nabla \cdot \mathbf{v}, p)_{\Omega} + (\nabla \mathbf{v} : \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T])_{\Omega} + (\nabla \cdot \mathbf{u}, q)_{\Omega} - (\mathbf{v}, \mathbf{f})_{\partial \Omega} =$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{v}, p')_{\Omega} + (\nabla q, \mathbf{u}')_{\Omega} + (\nabla \mathbf{v}, \rho \{ \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}' + \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}' \})_{\Omega}$$

残差ベースの変分マルチスケール (RBVM)

- Residual-based variational multiscale (RBVM),  $\mathbf{u}' = -\tau_m \mathbf{res}_m$ ,  $p' = -\tau_c \mathbf{res}_c$
- RBVM with viscosity (RBVMWV), add  $(\nabla \mathbf{v} : \rho \tilde{c} |\mathbf{u}'| h [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T])_{\Omega}$   
粘性を考慮したRBVMに  $(\nabla \mathbf{v} : \rho \tilde{c} |\mathbf{u}'| h [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T])_{\Omega}$  を加算
- Smagorinsky, replace  $(\nabla \mathbf{v}, \rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}')_{\Omega}$  by  $(\nabla \mathbf{v} : 2\rho C_s |S| h^2 [S - \bar{S}])_{\Omega}$   
スマンゴリスキーモデルにより、 $(\nabla \mathbf{v}, \rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}')_{\Omega}$  を  $(\nabla \mathbf{v} : 2\rho C_s |S| h^2 [S - \bar{S}])_{\Omega}$  で置換する



## Live Demo – LES of Channel Flow at $Re_T = 395$

シミュレーションの実演(レイノルズ数395でのチャネル流れのLES)

- Use LES to resolve the large scales of a complex turbulent flow field in a simple geometry LESを使用して単純なジオメトリで複雑な大規模乱流場の解像

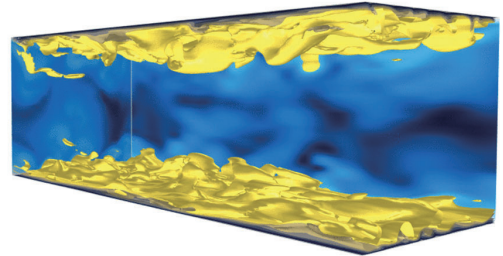
- Domain ドメイン

- Bounded by walls at  $y = \pm 1[m]$  壁の境界条件
- Periodic in  $x \in [0, 2\pi][m]$ ,  $z \in [0, 2\pi/3][m]$  周期条件

- Scale NS-eqn with  $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ , and  $l_y = 1[m]$   
ナビエ-ストークス方程式をこの条件でスケール化

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \frac{1}{Re_T} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \hat{x}$$

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



- In COMSOL

$$\rho = 1[kg/m^3], \mu = \frac{1}{Re_T} [Pa \cdot s], \mathbf{F} = \hat{x} [N/m^3]$$

COMSOL

このスライドと次のスライドで、COMSOL Multiphysics を使った実演を行う

## Live Demo – LES of Channel Flow at $Re_T = 395$

シミュレーションの実演(レイノルズ数395でのチャネル流れのLES)

- Spatial resolution – viscous wall units

$$\Delta x^+ \triangleq \frac{u_\tau \Delta x}{\nu} \quad \text{空間分解能: 粘性壁ユニット}$$

- Actual (Recommended) 実際(推奨)

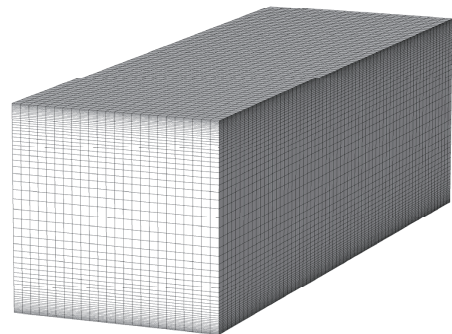
$$\Delta x^+ = 39(30), \Delta y_w^+ = 1(1), \Delta z^+ = 13(10)$$

- Temporal resolution – CFL condition

$$\frac{\Delta t \|\mathbf{u}\|^2}{|\mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{x}|} < 1 \quad \text{時間分解能: CFL条件}$$

- Actual (CFL) 実際(CFL)

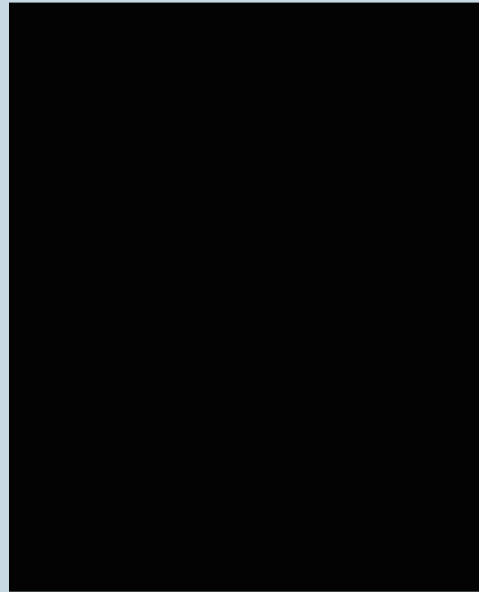
$$\Delta t = 2.5 \cdot 10^{-3} [s] \quad (5 \cdot 10^{-3} [s])$$



COMSOL

## Nonisothermal flow, LES interface 非等温流 (LESインタフェース)

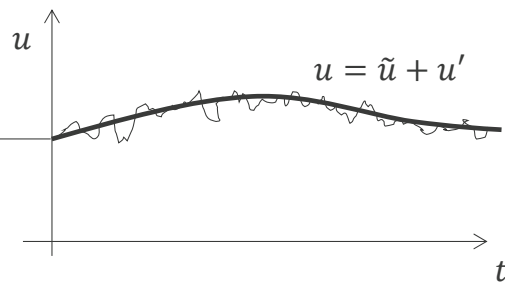
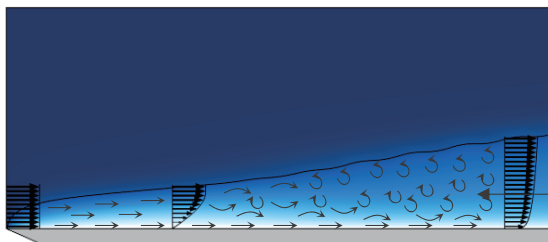
- Introduces buoyancy effects in incompressible flow using the Boussinesq approximation ブシネスク近似を用いて非圧縮性の流れに浮力効果を導入
- Unresolved small-scale turbulent heat flux modeled using the variational multiscale method 変分マルチスケール法を使用して、サブグリッドスケールの小規模乱流熱流束をモデル化した
  - RBVM
  - RBVMWV
  - Smagorinsky



Passive-particle tracing in nonisothermal LES

## RANS Turbulence Modeling

RANS乱流モデリング



- Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) models predict the time-averaged or ensemble-averaged solution of flow that is fully in the turbulent regime レイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) モデルによる、完全な乱流状態にある流れの時間平均解/アンサンブル平均解の予測
- RANS gives *approximate* solutions on desk-top workstation class computers RANSによる、デスクトップワークステーションクラスのコンピューターでの近似解の提供

# Turbulent Viscosity

乱流粘性

RANS turbulence models are derived using Favre averaging,

Favre平均を使用して導出される乱流粘性

$$\bar{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \left[ \bar{\mu} \left( \nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right) - \overline{\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'} \right] + \bar{\mathbf{F}}$$

with a Boussinesq hypothesis for the turbulent viscosity

乱流粘性のブシネスク仮説を利用した結果

$$-\overline{\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'} = \mu_T \left( \nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right) - \underbrace{\frac{2}{3} \bar{\rho} k \mathbf{I}}$$

when applicable

適用可能な場合

# Heat Transfer in Turbulent Flow

乱流での熱伝達

- Standard conduction-convection 標準的 伝導-対流

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q$$

- But,

- Additional mixing due to turbulent eddies: しかし、乱流による混合を考慮する

$$k_{\text{effective}} = (k + k_T) \quad k_T = \frac{C_p \mu_T}{\text{Pr}_T}$$

- Watch out for symbols:  $k$  is molecular,  $k_T$  is turbulent

$k$ は分子、 $k_T$ は乱流

# Mass Diffusion in Turbulent Flow

乱流による質量拡散

- Standard convection-convection 標準的 伝導-対流

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) + \mathbf{u} \cdot \nabla c = R$$

- But,
  - Additional mixing due to turbulent eddies: しかし、乱流による混合を考慮する

$$D_{effective} = (D + D_T) \quad D_T = \frac{\mu_T}{\rho Sc_T}$$

- Watch out for symbols:  $D$  is molecular,  $D_T$  is turbulent

$k$ は分子、 $k_T$ は乱流

# RANS models

RANSのモデル

- Turbulent flow 乱流
  - Algebraic yPlus model 代数的yPlusモデル
  - L-VEL model
  - k-ε model
  - Realizable k-ε model
  - k-ω model
  - SST model
  - Low Re k-ε model 低レイノルズ数k-εモデル
  - Spalart-Allmaras model
  - v2-f model

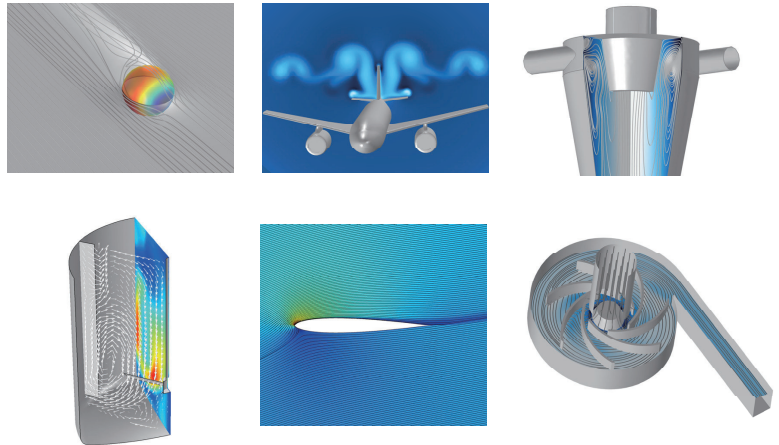
- Fluid Flow
  - Single-Phase Flow
    - Creeping Flow (spf)
    - Laminar Flow (spf)
    - Turbulent Flow
      - Turbulent Flow, Algebraic yPlus (spf)
      - Turbulent Flow, L-VEL (spf)
      - Turbulent Flow, k-ε (spf)
      - Turbulent Flow, Realizable k-ε (spf)
      - Turbulent Flow, k-ω (spf)
      - Turbulent Flow, SST (spf)
      - Turbulent Flow, Low Re k-ε (spf)
      - Turbulent Flow, Spalart-Allmaras (spf)
      - Turbulent Flow, v2-f (spf)

## Computational Cost for Turbulence Models

乱流モデルの計算コスト

- Algebraic  $y^+$ Plus and L-VEL  
代数的 $y^+$ Plus/L-VEL
- Spalart-Allmaras
- k-epsilon
- k-omega, SST and low Re k-epsilon  
低レイノルズ数k- $\epsilon$
- Realizable k-epsilon
- $v^2$ -f

Increasing cost  
コスト増大



## Algebraic Turbulence Models

代数的乱流モデル

- Algebraic turbulence models are faster and more robust but, generally less accurate than transport-equation turbulence models  
代数的乱流モデルは高速で堅牢である反面、一般的に輸送方程式乱流モデルよりも精度が低い
- Reynolds number based on local velocity magnitude and wall distance  
局所速度の大きさと壁距離に基づくレイノルズ数

$$Re = \frac{\bar{\rho} U y}{\bar{\mu}} = \frac{U}{u_\tau} \frac{\bar{\rho} u_\tau y}{\bar{\mu}} = u^+ y^+, \quad \bar{\mu} + \mu_T = \frac{\bar{\mu}}{\partial u^+ / \partial y^+}$$

- Algebraic  $y^+$ Plus model prescribes  $u^+(y^+)$  from an extension of the logarithmic wall law and solves for  $y^+$   
代数的 $y^+$ Plusモデルは、対数的な壁の法則の拡張から $u^+(y^+)$ を規定し、 $y^+$ を解く
- L-VEL model prescribes  $y^+(u^+)$  from a different extension of the logarithmic wall law and solves for  $u^+$   
L-VELモデルは、対数的な壁の法則の異なる拡張から $u^+(y^+)$ を規定し、 $y^+$ を解く
  - NOTE: No turbulent transport  $\longrightarrow$  no wake interference and no in/outflow of turbulence  
乱流輸送なし 後流干渉なし、乱流の流入/流出なし

## Transport-Equation Turbulence Models (2-Eqn.)

輸送方程式乱流モデル(2方程式モデル)

Transport-equation turbulence models solve for the transport of turbulence quantities.

輸送方程式乱流モデルは、乱流量の輸送を解く

- k-epsilon: Transport equations for  $k$  and  $\epsilon$ . General purpose model with wall functions for smooth and rough walls.  $k$ - $\epsilon$ :  $k$ および $\epsilon$ の輸送方程式。滑らかで粗い壁向けの壁関数を備えた汎用モデル
- Realizable k-epsilon: Realizability constraints are built into the model parameters. Realizable k- $\epsilon$ : Realizability拘束は、モデルパラメーターに組み込まれている
- k-omega: Transport equations for  $k$  and  $\omega$ . More accurate than the k-epsilon model close to walls and in recirculation regions. Wall functions for smooth and rough walls but can also resolve the flow close to walls.  $k$ - $\omega$ :  $k$ および $\omega$ の輸送方程式。壁に近い再循環領域のk- $\epsilon$ モデルよりも正確。壁が滑らかで粗い場合に機能するが、壁近傍の流れも求解する
- SST: Combines the k-omega model close to walls with the k-epsilon model in the outer flow region. Can resolve the wall layer. SST: 壁に近いk- $\omega$ モデルと外側の流れ領域のk- $\epsilon$ モデルを組み合わせる。壁レイヤーを求解する
- Low Re k-epsilon: Wall resolved k-epsilon model. 低レイノルズ数k- $\epsilon$ : 壁解像k- $\epsilon$ モデル

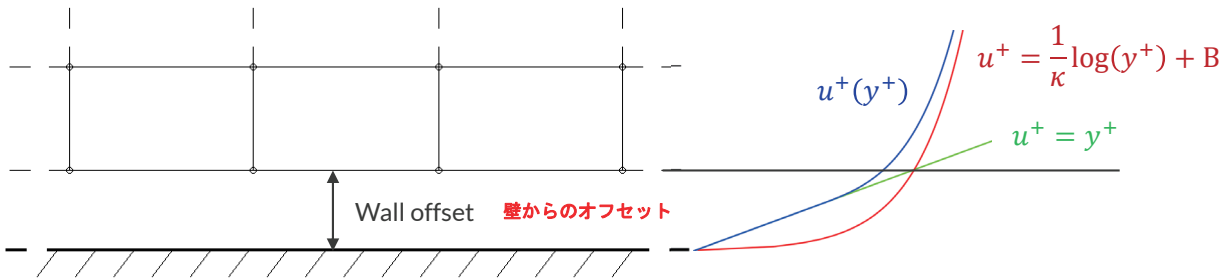
## Transport-Equation Turbulence Models (1 and 3 Eqn.)

輸送方程式乱流モデル(1方程式/3方程式モデル)

- Spalart-Allmaras: Transport equation for  $\tilde{\nu}_T$ . Wall resolved turbulence model developed for aerodynamic applications. Spalart-Allmaras:  $\tilde{\nu}_T$ の輸送方程式。空力用途向けに開発された壁解像乱流モデル
- $\nu^2$ -f: An extended low-Re k- $\epsilon$  model. In addition to  $k$  and  $\epsilon$ , it also solves for the wall normal fluctuations ( $\nu^2$ ) and an elliptic relaxation function (f). Good predictive capabilities for flow over curved surfaces. Can resolve the wall layer.  $\nu^2$ -f: 拡張された低レイノルズ数k- $\epsilon$ モデル。kと $\epsilon$ に加えて壁の法線変動 ( $\nu^2$ ) と楕円緩和関数 (f) も計算。曲面上の流れに対する優れた予測機能。壁レイヤーを求解可能

# Wall Treatment

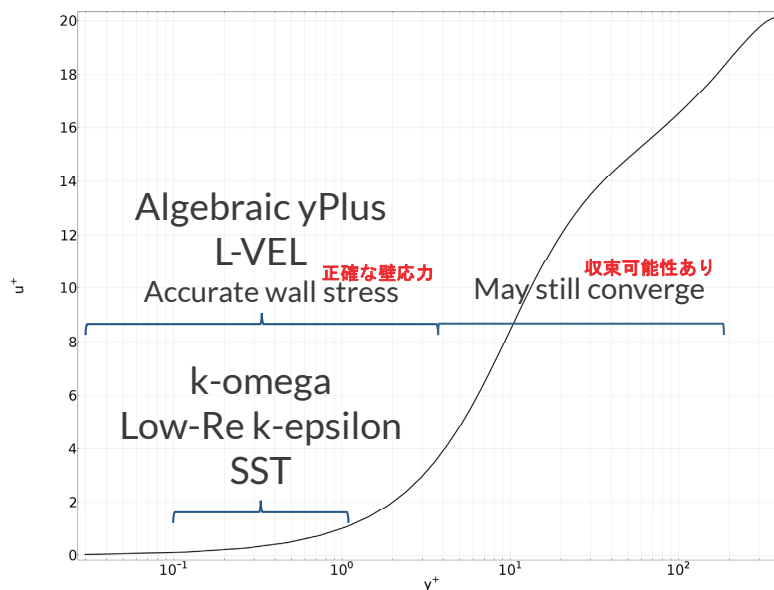
壁処理



- Wall functions: A wall offset is applied. The computational domain always start in the log-layer. **壁関数**: 壁オフセットが適用される。計算ドメインは常に対数層で始まる
- Low-Reynolds-number treatment: The viscous sublayer must be resolved. **低レイノルズ数処理**: 粘性底層を解像する必要がある
- Automatic wall treatment: A wall offset is applied. The computational domain can start anywhere in the boundary layer. **自動壁処理**: 壁オフセットが適用される。計算ドメインは境界層のどこからでも開始可能

# Resolution for Low-Re Wall Treatment

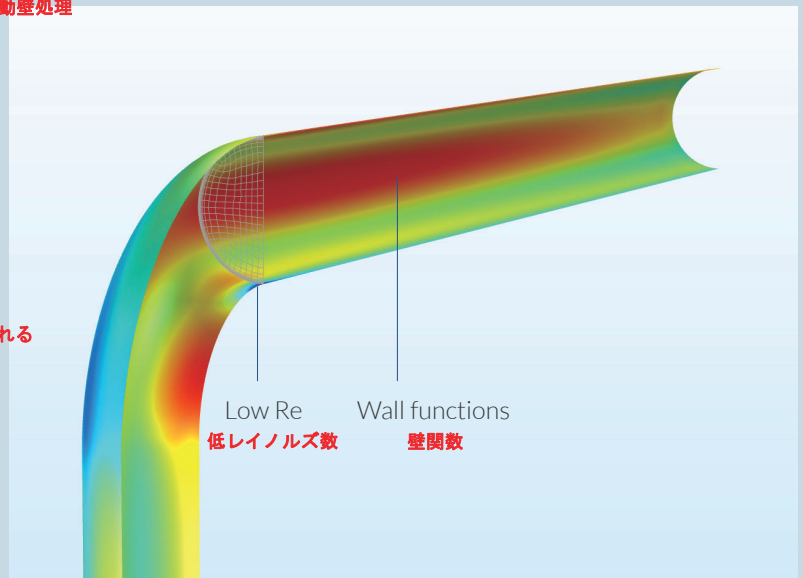
レイノルズ数の壁処理の解像度



## Automatic Wall Treatment for Turbulence Models

乱流モデルにおける自動壁処理

- Switches between a low Re and wall functions **低レイノルズ数と壁関数の間のスイッチ**
- Provides the accuracy allowed by your mesh resolution **十分な解像度のメッシュを張ることで良い精度が得られる**
- Inherits the robustness that is provided by wall functions **壁関数によって提供される堅牢性を継承**



Flow in a pipe elbow simulated with the *k- $\omega$*  model

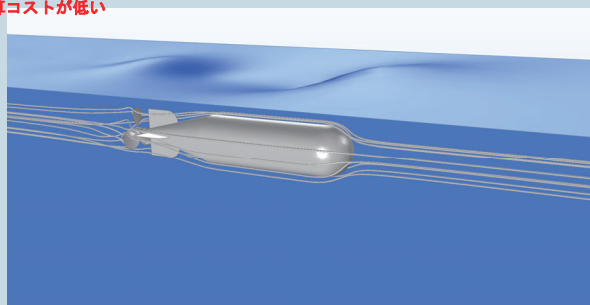
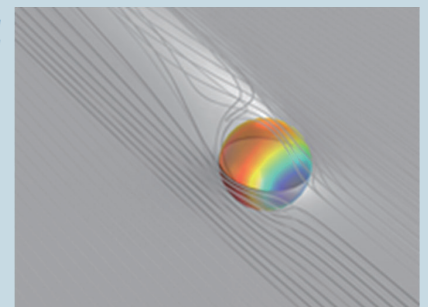
## Algebraic Turbulence Models

代数的乱流モデル

- Algebraic *yPlus* model prescribes  $u^+(y^+)$  **代数的yPlusモデルによる $u^+(y^+)$ の規定**
- L-VEL model prescribes  $y^+(u^+)$  **L-VELモデルによる $y^+(u^+)$ の規定**
- Advantages: **長所**
  - Robust and computationally cheap **堅牢で計算コストが低い**
  - Resolve wall layer **壁レイヤーを解像可能**
  - No boundary conditions are needed
    - easily coupled to porous domains **境界条件が不要で多孔質ドメインとのカップリングが容易**
- Disadvantages: **短所**
  - Less accurate **精度が比較的低い**
  - No turbulent transport, hence no wake interference, no inflow and outflow of turbulence

乱流輸送がないため、後流干渉、乱流の流入/流出がない

Flow around a spinning soccer ball simulated with the Algebraic *yPlus* model



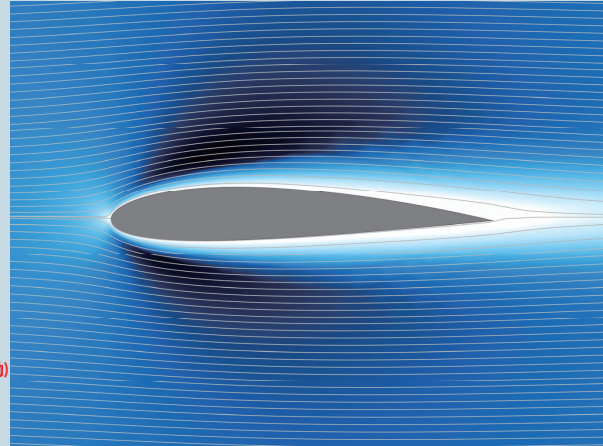
Flow around a torpedo simulated with the Algebraic *yPlus* model



# Spalart-Allmaras Turbulence Model

Spalart-Allmaras乱流モデル

- The Spalart-Allmaras model was developed for aerodynamic applications
  - Spalart-Allmarasモデルは空力用途向けに開発された
- Advantages: **長所**
  - Stable, easy to get the model to solve
    - 安定性に優れ、モデルの求解が容易
  - Uses less memory than Low Re k-ε and SST
    - 低レイノルズ数k-ε/SSTより使用RAM容量が小さい
  - Automatic wall treatment, possible to accurately compute: lift, drag, heat and mass transfer
    - 壁処理が自動。正確な計算が可能(揚力/抗力/熱/物質移動)
- Disadvantages: **短所**
  - Does not accurately compute flow fields which exhibit: separated flow or decaying turbulence
    - 分離流/減衰する乱流の流れ場の計算が必ずしも正確ではない



Flow around a NACA airfoil simulated with the Spalart-Allmaras model

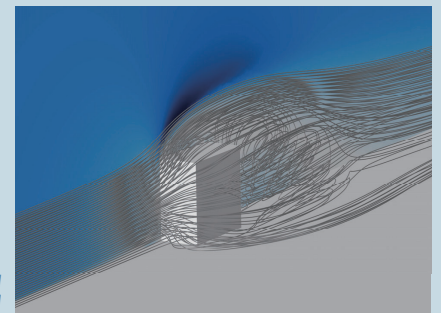
# ε-Based Turbulence Models

εに基づく乱流モデル

- k-epsilon: popular in industrial applications
  - k-ε: 産業用アプリケーションにおいてポピュラー
- Realizable k-epsilon
- Low-Re - has automatic wall treatment
  - 低レイノルズ数: 自動壁処理
- Advantages: **長所**
  - Stable, easy to get the model to solve
    - 安定性に優れ、モデルの求解が容易
  - Can use a coarser mesh near the wall
    - 壁の近傍でも、より粗いメッシュの作成が可能
  - Performs well for external flow problems, complex geometries
    - 外部の流れの問題や複雑なジオメトリに対してうまく機能する
- Disadvantages: **短所**
  - k-ε and Realizable k-ε use wall function approximation: solution at wall is less accurate: lift, drag, heat & mass transfer
    - k-εおよびRealizable k-εは壁関数近似を使用: 壁での解の正確性の低さ(揚力/抗力/熱/物質移動)
  - Does not accurately compute flow fields which exhibit: adverse pressure gradients, strong curvature of the flow, jets (standard k-ε)
    - 逆圧力勾配/流れの強い曲率/ジェット(標準k-ε)の流れ場の計算が必ずしも正確ではない

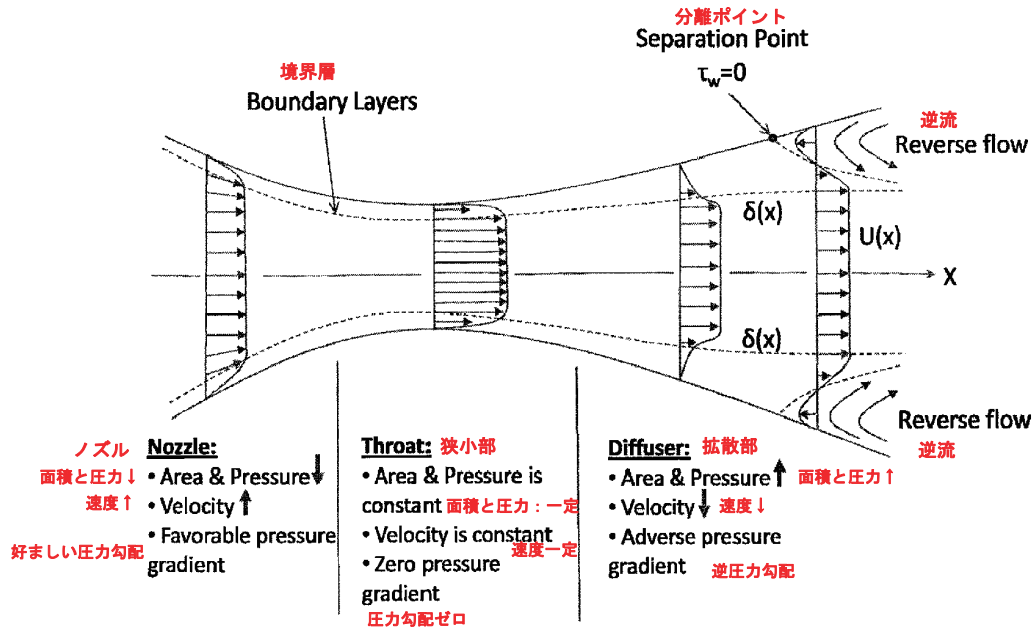


Flow around an airplane simulated with the k-ε model



Flow around a cube simulated with the Low Re k-ε model

# Adverse Pressure Gradient 逆圧力勾配の図示

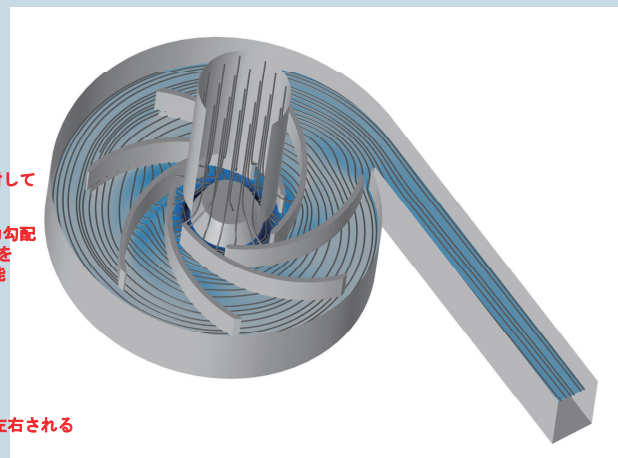


COMSOL

# $\omega$ -Based Turbulence Models $\epsilon$ に基づく乱流モデル

- k-omega model
- SST model: combines k- $\omega$  near walls with k- $\epsilon$  in bulk SSTモデル: 壁近傍のk- $\omega$ とバルクのk- $\epsilon$ の組み合わせ
- Advantages: 長所
  - Performs well for internal flow problems 内部流れの問題に対してうまく機能する
  - Can more accurately compute flow fields which exhibit: curvature, separated flow, adverse pressure gradients, jets 曲率/分離流/逆圧力勾配/ジェットの流れ場をより正確に計算可能
  - Low-Re, automatic (and wall functions for k- $\omega$ ) wall treatment 低レイノルズ数での自動 (およびk- $\omega$ の壁関数) 壁処理
- Disadvantages: 短所
  - Sensitive to free stream values of  $\omega$  for external flows 外部流れの $\omega$ の自由ストリーム値によって結果が左右される
  - Difficult to get convergence: more nonlinear than standard k- $\epsilon$

収束が困難: 標準k- $\epsilon$ より非線形



Flow in a centrifugal pump simulated with the k- $\omega$  model

COMSOL

## v2-f Turbulence Model

v2-f乱流モデル

- Extension of the k-ε model, which, in addition, solves for the wall-normal turbulence velocity fluctuations
  - k-εモデルの拡張。  
壁法線の乱流速度変動をも求解可能。
- Advantages 長所
  - Captures turbulence anisotropy 乱流異方向性をキャプチャ可能
  - Applies elliptic relaxation to account for differences in near-wall and bulk flows 壁近傍の流れとバルク流れの違いを考慮するため楕円形緩和を適用
- Disadvantage 短所
  - Increased computational cost due to additional equations 方程式を追加することで計算コストが増大



Flow in a hydrocyclone simulated with the v2-f model

## Automatic Translation Between Turbulence Models

乱流モデル間の自動変換

- Successful strategy: 好ましい手法
  - Start with a simple and robust model 簡易で堅牢なモデルから始める
  - Migrate to a more accurate and maybe more sensitive and expensive model より正確で感度が良いと予想される高度なモデルに移行する
  - Current solution used automatically as initial guess 初期段階での推測として現在の解を自動的に使用する

