

Advance/FrontFlow/FOCUS の火炎 モデル機能を中心とした概要のご紹介

第2事業部 中森 一郎

爆発統合解析のためのAdvance/FrontFlow/FOCUS ご紹介セミナー
2014年5月12日（月）
アドバンスソフト株式会社

資料内容

- 解析手法について
- 基本機能についての概要
 - 基本機能を用いた解析例
 - 火炎モデルについて
 - 高野モデル
 - 乱流火炎モデル
 - 爆轟モデル
 - 浮力乱流モデルについて
- 連成機能について
 - 連成機能の概要
 - 埋込み境界法を用いた解析例
 - 弾性体周りの爆風解析

Advance/FrontFlow/FOCUSの 基本機能の概要

■ 時間積分

- オイラー陰解法(LU-SGS陰解法)
- 2次または4次精度ルンゲ-クッタ陽解法

■ 対流項

- 種々の衝撃波捕獲スキーム
- 3次精度TVD補間

■ 燃焼モデル

- 火炎モデル
 - 層流火炎モデル
 - ✓ 高野モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 乱流燃焼速度モデル
 - ✓ 高野モデルからの拡張モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 爆轟波モデル
 - ✓ 1次元ZNDモデルと火炎モデルの統合化モデル

■ 乱流モデル

- 標準k-ε 2方程式をベースとした浮力乱流モデル(WETモデル)^[※]
- 標準k-ε 2方程式モデル
- Spalart-Allmaras 1方程式モデル

■ LES

- Smagorinskyモデル

[※] 村上ほか、「浮力を考慮した修正k-εモデルによるサーマルブリーユームのCFD解析」、生産研究、第50巻、第1号、pp. 27-30 (1998).

解析手法について(1)

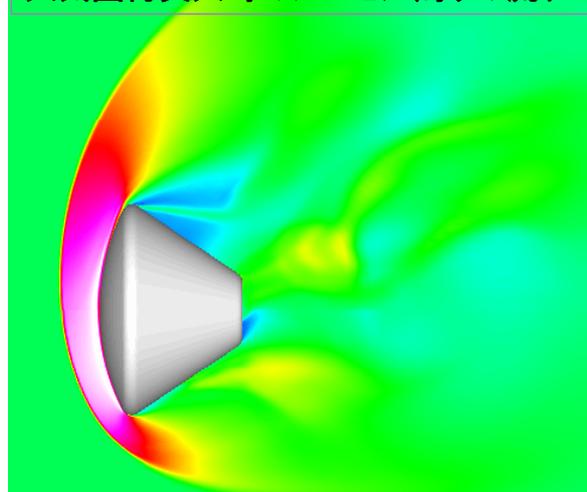
■ 有限体積法の採用

- 差分法に比べて汎用性に勝る
- 有限要素法に比べてメモリ使用量が少なく済む
- 積分型(強保存型)に基づいて離散化をするために保存性が良い
- 複雑形状に対応が容易

■ 密度ベースソルバーの採用

- 衝撃波や爆轟波などの不連続的な分布をシャープに安定に解くことが可能
 - 80年代後半に衝撃波捕獲法(TVD法など)の研究がほぼ完成→現在に至る
 - 主として宇宙航空産業において90年代にCFD手法が成熟

大気圏再突入時のカプセル周りの流れ



解析手法について(2)

- 本ソフトウェアで扱う流れの解析は、積分型で記述されたNavier-Stokes方程式に基づく

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dv + \int_S (E n_x + F n_y + G n_z) ds = \int_S (E_v n_x + F_v n_y + G_v n_z) ds + \int_V S dv$$

ここで Q は、既燃/未燃ガスを扱う簡易な火炎モデルの場合、

$$Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e, c)^t$$

層流火炎の場合→高野モデル[1]

乱流火炎の場合→フラクタルモデル[2]

他方、G方程式で火炎面を追跡しつつ水素、酸素、窒素、気相蒸気などを扱う場合、

$$Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e, G, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i)^t$$

層流火炎の場合→火炎速度をユーザー指定で代入するモデル

乱流火炎の場合→フラクタルモデル[2]

[1] 高野泰斉、火炎を伴う気流の差分計算モデル、日本航空宇宙学会誌、第36巻、第411号、pp. 186-191、(1988).

[2] T. Tomizuka et al. , "A Study of Numerical Hazard Prediction Method of Gas Explosion", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 5176-5180, 2013.

解析手法について(3)

- 有限体積法は以下のNavier-Stokes方程式の積分型に立脚する

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dv + \sum_k [E(Q) - E_v(Q)] S_k = 0$$

- コントロールボリュームで空間を分割する

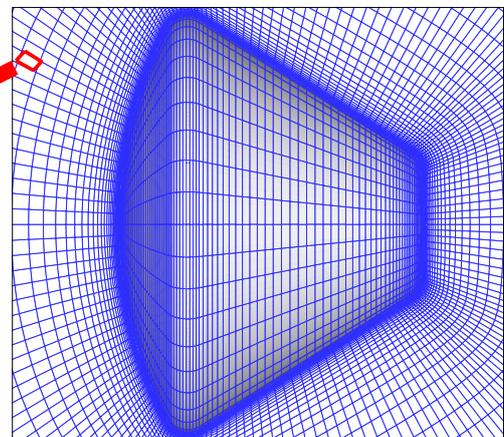
- 上式をコントロールボリュームで離散化

$$\left(\frac{V_i}{\Delta t} I + \sum_k A_i^+ s_k \right) \Delta Q_i + \sum_k A_i^- s_k \Delta Q_j = -R_i^n$$

- 離散式は、陽解法のとくにさらに単純になる

$$\frac{V_i}{\Delta t} \Delta Q_i = -R_i^n$$

Q は密度、運動量、エネルギーなどで構成される解ベクトル
赤い枠はコントロールボリュームの1つ
赤い線を過ぎる流束を求めて残差ベクトル R を構成する



- 残差ベクトル R_i^n を正確に評価することにより精度の高い数値解を得る

- コントロールボリュームを構造解析の物体表面が過ぎる場合→埋込み境界法

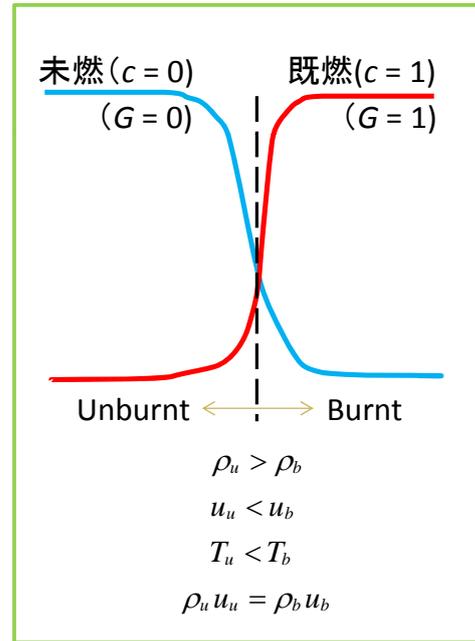
火炎の解析法について

■本ソフトウェアにおける火炎モデルでは、火炎面を不連続面として扱う手法を採用している
可燃性ガスが既燃か未燃かを区別するために
以下の既燃ガスの質量保存式を解く

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B$$

不燃性ガスを含む多成分ガス燃焼を扱う場合には
G 方程式を解く

$$\frac{\partial G}{\partial t} + u_j \frac{\partial G}{\partial x_j} = S_L |\nabla G|$$



予混合層流燃焼モデルについて

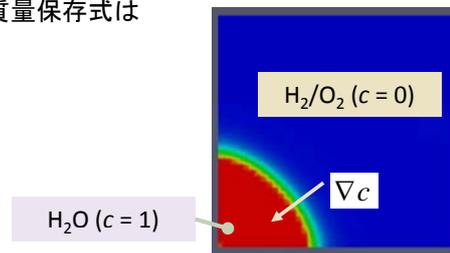
■本ソフトウェアで扱う層流火炎モデルは、以下に記述される高野モデルを用いている

既燃/未燃ガスを扱う簡易な火炎モデルの場合、既燃気体の質量保存式は

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B$$

$$\dot{\rho}_B = \rho S_L |\nabla c| \quad 0 \leq c < 1$$

$$\dot{\rho}_B = 0 \quad c \geq 1$$



火炎の進行速度 S_{L0} と、反応熱 E_t を伴うユゴニオの関係式から、 S_L の関数形は次式のように導出される[1]

$$S_L = S_{L0} \left[\frac{\gamma S_{L0}^2}{a_0^2} + 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{S_{L0}^2}{a_0^2}\right)^2 - 2(\gamma^2 - 1) \frac{S_{L0}^2}{a_0^2} \frac{c E_t}{a_0^2}} \right] / \left[(\gamma + 1) \frac{S_{L0}^2}{a_0^2} \right]$$

a_0 とは未燃側の音速であり、 γ は比熱比である
 $\dot{\rho}_B$ と単位質量当たりの反応熱 E_t の積をエネルギー式のソース項として与える

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial(e + p)u_j}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B E_t$$

[1] “高野泰齊、火炎を伴う気流の差分計算モデル”、日本航空宇宙学会誌、第36巻、第411号、pp. 186-191、(1988).

予混合乱流燃焼モデルについて

■本ソフトウェアで扱う予混合乱流燃焼モデルは、以下に記述されるフラクタル火炎モデルを採用している

既燃/未燃ガスを扱う簡易な火炎モデルの場合、既燃気体の質量保存式は

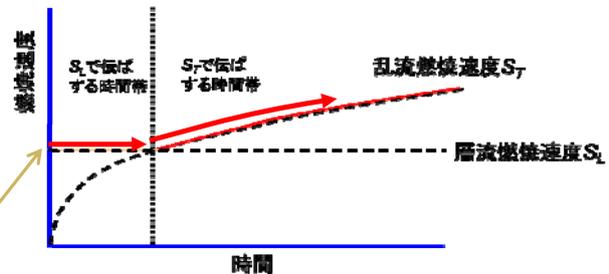
$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B$$

$$\dot{\rho}_B = \rho S_T |\nabla c| \quad 0 \leq c < 1$$

$$\dot{\rho}_B = 0 \quad c \geq 1$$

S_T は次式のようにモデル化されている[2]

$$S_T = \max \left\{ S_L, \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2} \right\}$$



ここで、 c_g はモデル定数、 ρ_u と ρ_b はそれぞれ未燃側の密度と既燃側の密度、 κ は熱伝導率、 t は着火時刻からの時間である

[2] T. Tomizuka et al., "A Study of Numerical Hazard Prediction Method of Gas Explosion", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 5176-5180, 2013.

G方程式を用いた火炎モデルについて

■本ソフトウェアで扱う火炎モデルは、高野モデルとは別にG方程式による多成分ガス燃焼モデルを装備している

支配方程式は以下の通りであり、Gの移流方程式と化学種の保存式を追加して解く。

$$\frac{\partial G}{\partial t} + u_j \frac{\partial G}{\partial x_j} = S_L |\nabla G|$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_{Bi}$$

例えば、以下の添字 i が蒸気ならば

$$\dot{\rho}_{Bi} = \rho_i S_L |\nabla G| \quad 0 \leq G < 1$$

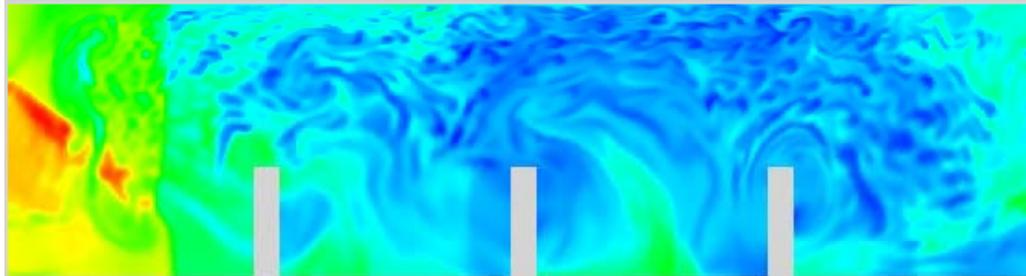
$$\dot{\rho}_{Bi} = 0 \quad G \geq 1$$

ここで、 i は化学種を表し(テンソル記号の添字 j とは区別してください)、水素分子、酸素分子、蒸気、窒素分子をここでは扱う[3] 生成(または消滅)による各種成分の反応熱によるエネルギー生成項をエネルギー方程式に加える

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)u_j}{\partial x_j} = (\dot{\rho}_B E_i)_i$$

[3] Williams, F. A., 1985, Turbulent Combustion. In the Mathematics of Combustion (ed. J. D. Buckmaster), pp. 197-1318, Society for Industrial & Applied Mathematics.

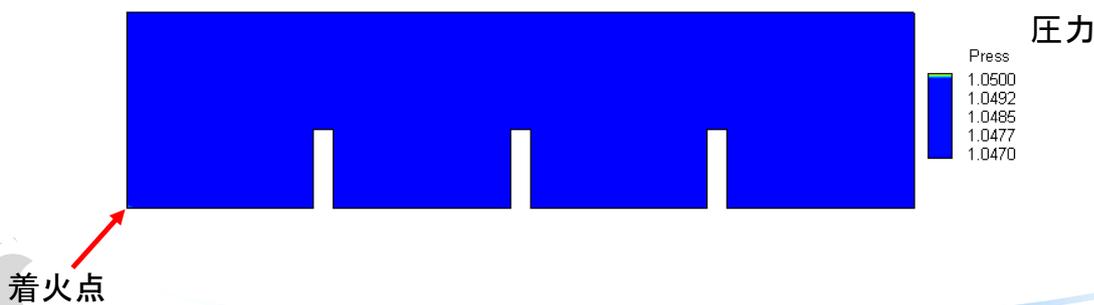
火炎の伝播解析の例



火炎の伝播の解析例 (アニメーション)



着火点



着火点



燃焼場での爆轟モデルについて

■本ソフトウェアで扱う爆轟モデルは、1次元のZND理論を基に燃焼面の伝播速度を決定している
ZND理論で用いられる支配方程式は以下の通りであり、密度 ρ 、爆轟波の伝播方向の速度 u 、圧力 p 、温度 T 、ならびに単位質量当たりの生成エネルギー Q について流れ場と関連付けてこれらを解く

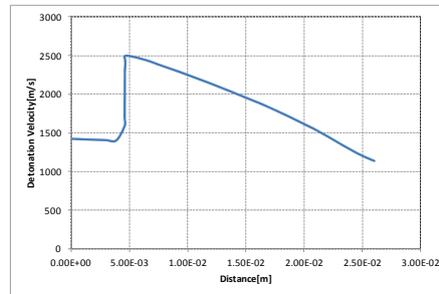
$$\rho \frac{du}{dz} + u \frac{d\rho}{dz} = 0$$

$$\frac{dp}{dz} + \rho u \frac{du}{dz} = 0$$

$$u \frac{du}{dz} + C_p \frac{dT}{dz} - \frac{dQ}{dz} = 0$$

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\rho M^2}{M^2 - 1} (\gamma - 1) \frac{dQ}{dz}$$

爆轟速度の計算例



得られた爆轟速度を火炎の伝播速度として3次元計算の中で使用する

[3] Williams, F. A., 1985, Turbulent Combustion. In the Mathematics of Combustion (ed. J. D. Buckmaster), pp. 197-1318, Society for Industrial & Applied Mathematics.

燃焼場での浮力乱流モデルについて

■本ソフトウェアで扱う浮力乱流モデルは、k-εモデルをベースとしたWETモデル^[※]を実装している

支配方程式は以下の通りであり、乱流エネルギー k と

乱流エネルギー散逸率 ε にくわえ、温度バリエーション $\overline{\theta^2}$ を解く

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + P_k + G_k - \varepsilon$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$$

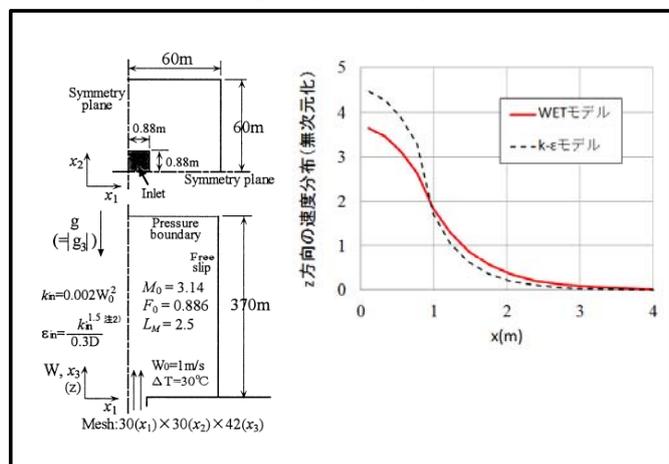
$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_\theta} \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x} \right\} - 2\overline{u_j \theta} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} - 2\varepsilon_\theta$$

ここで G_k は浮力による生成項であり、次式で与えられる

$$G_k = -\overline{u_i \theta} g_i \beta$$

検証計算の例

(諸設定は文献^[※]に拠る)



[※] 村上ほか、「浮力を考慮した修正k-εモデルによるサーマルブリュームのCFD解析」、生産研究、第50巻、第1号、pp. 27-30 (1998).

Advance/FrontFlow/FOCUSの連成機能の概要

■ 直交格子ソルバー機能

- 流体の計算格子は立方体または直方体形状のみを使用
 - 物体表面の座標を取り込むためのメモリーを大幅に削減
- Immersed boundary法(埋込み境界法)を採用
- 移動壁境界も可能

■ 流体構造連成機能

- 構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRと連成解析が可能
- 構造解析ソフトウェアDyna3D2000と連成解析が可能
 - ▶ 連成解析の実施には当社の汎用プリポストプロセッサAdvance/REVOCAPを別途使用します

埋込み境界法について

■ 背景

■ 複雑な形状部品が高密度に充填された内部構造への対応

⊕ ディスク装置内部などの複雑な内部構造

- 形状を簡素化して対応
- 全体解析を諦めて大事な箇所を抜き出して解析
 - ⇒ 全体を解析することによって初めてわかる事象の把握が不可能

埋込み境界法において形状を認識させた例



形状データは下記URLから入手
http://www.turbosquid.com

■ 大変形と移動を伴う形状への対応

⊕ 高圧流体で大きく変形または破裂する部材

- ⇒ 移動格子、重合格子、ALEでは難易度が高い

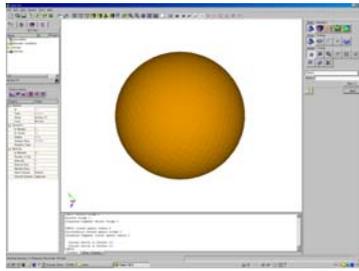
高圧流体で構造物が大きく変形する解析例



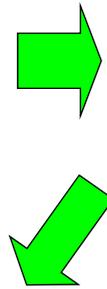
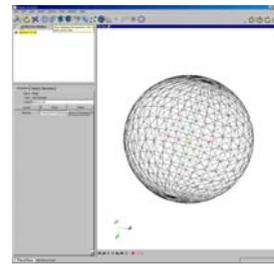
埋込み境界法の導入

埋込み境界法での形状取り込みから 流れの計算まで

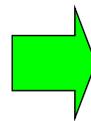
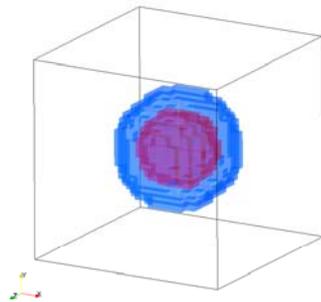
①形状の作成



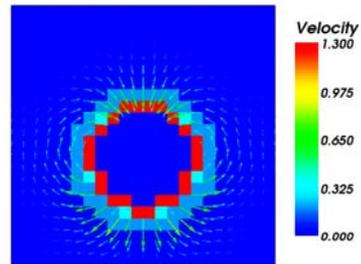
②stl形式データの作成



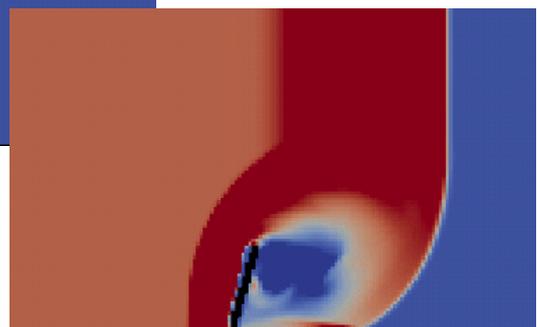
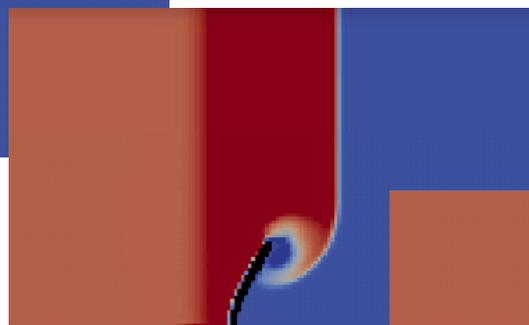
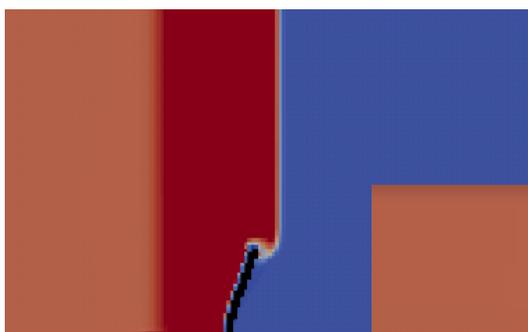
③ソルバ内で形状を自動認識



④流れ解析を開始



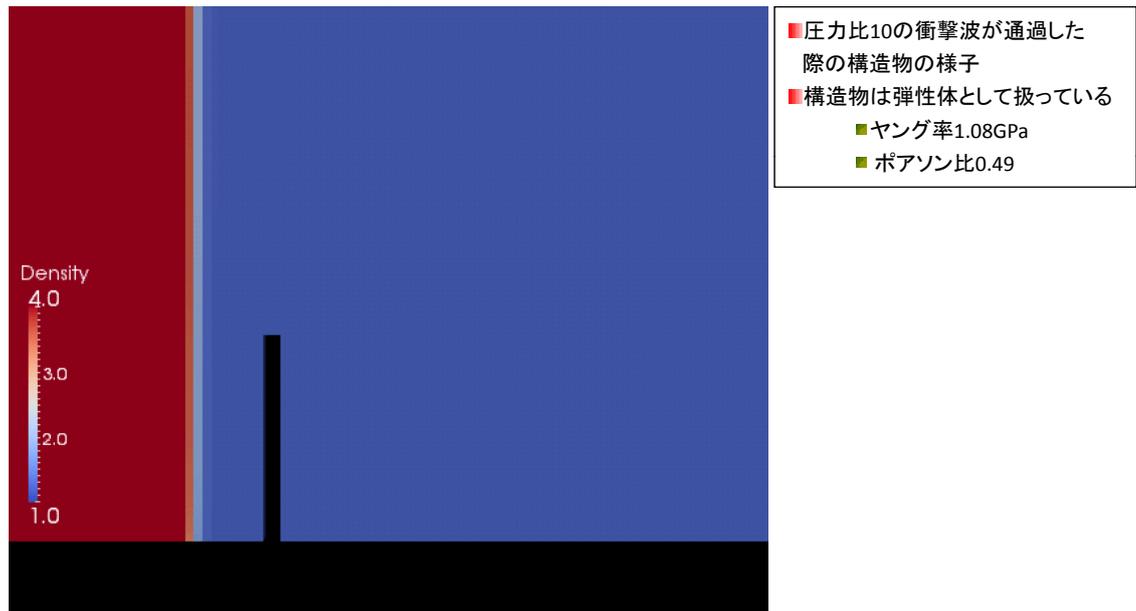
大変形を伴う連成解析 (衝撃波で部材が折れ曲がる様子)



- Advance/FrontSTRを併用している
- 圧力比10の衝撃波が通過した際の構造物の様子
- 構造物は弾性体として扱っている
 - ヤング率1.08 × GPa
 - ポアソン比0.49

■ Advance/FrontSTRとの連成解析の例

大変形を伴う連成解析 (アニメーション)



■ Advance/FrontSTRとの連成解析の例

Advance/FrontFlow/FOCUS の火炎モデル機能を 中心とした概要のご紹介についてのまとめ

- 解析手法について
- 基本機能についての概要
 - 基本機能を用いた解析例
 - 火炎モデルについて
 - 高野モデル
 - 乱流火炎モデル
 - G方程式を用いたモデルについて
 - 爆轟モデル
 - 浮力乱流モデルについて
- 連成機能について
 - 連成機能の概要
 - 埋込み境界法を用いた解析例
 - 弾性体周りの爆風解析