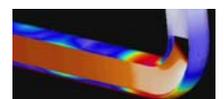


爆発統合解析のための Advance/FrontFlow/FOCUS ご紹介セミナー

2014年5月12日 (月曜日 14:00~)

プログラム

14:00~14:10 (10分)	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介	第1事業部長 原田 昌紀
14:10~14:40 (30分)	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事業部長 中森 一郎
14:40~15:10 (30分)	Advance/FrontFlow/FOCUS の爆轟解析と流体構造連成解析を含む新機能のご紹介	技術第2部 田中 洋一, 技術第4部 富塚 孝之
15:10~15:25 (15分)	(休憩)	
15:25~15:55 (30分)	Advance/FrontFlow/FOCUS の爆発現象に関連した解析事例のご紹介	技術第2部 田中 洋一, 技術第4部 富塚 孝之
15:55~16:15 (20分)	汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP のご紹介	技術第2部 副部長 徳永 健一
16:15~16:30 (15分)	価格および関連サービス紹介、質疑応答	営業部 営業第3課 課長 河口 洋子



アドバンスソフト株式会社のご紹介

第1事業部 原田 昌紀

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

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

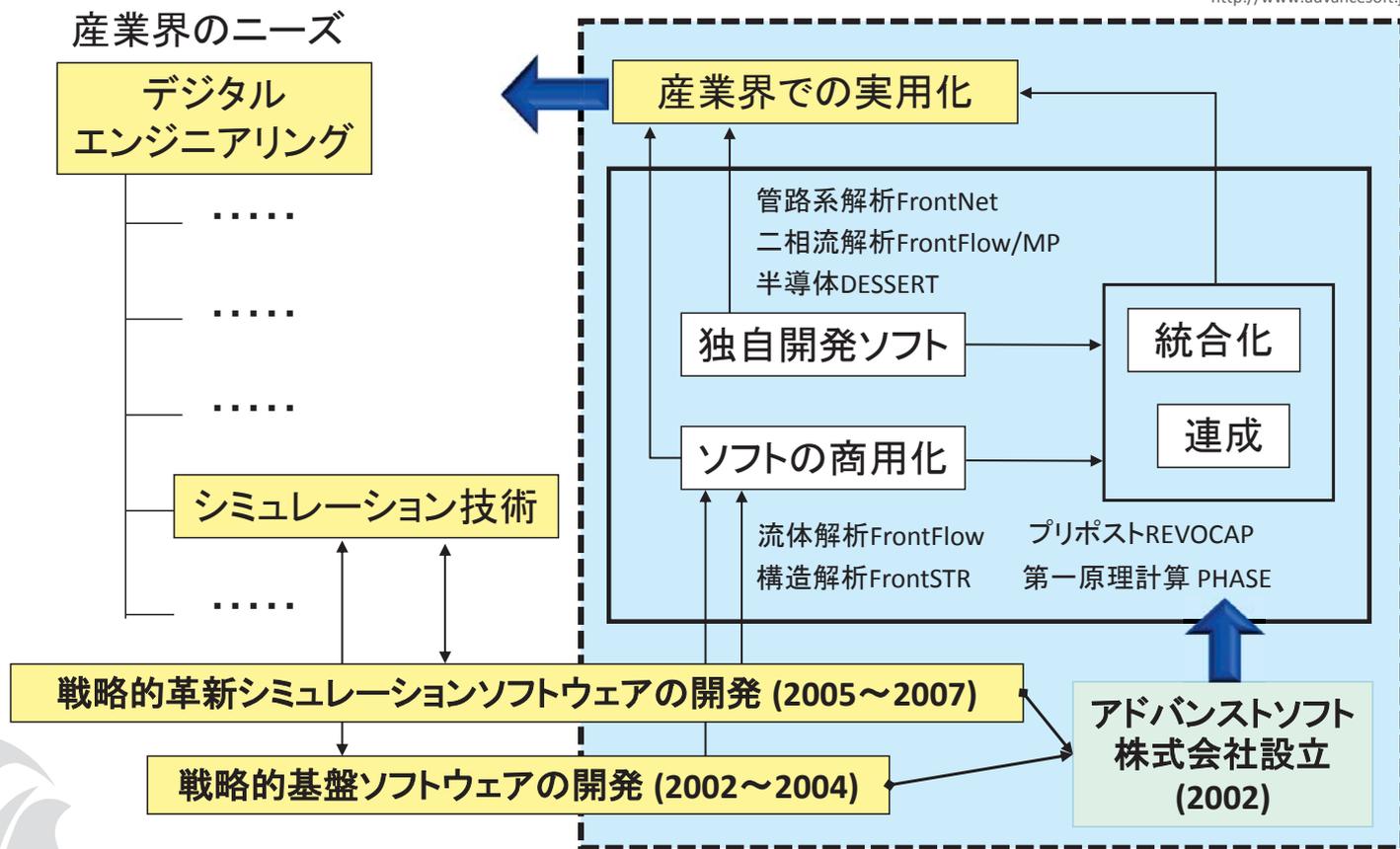
会社概要

名 称 アドバンスソフト株式会社 (英文社名 AdvanceSoft Corporation) 本 社 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台4-3 新お茶の水ビル17階 TEL: 03-6826-3970 FAX:03-5283-6580 設 立 2002年(平成14年)4月24日 資本金 3,724万円 社員数 74名(2014年5月12日現在)	事業部	部	業務概要
	第一事業部	事業部付	防災シミュレーション・連成システム開発など
		技術第1部	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域、半導体・T-CAD等に係る解析・開発など
		技術第2部	<ul style="list-style-type: none"> ・プリポスト、可視化システム、連成システム開発など ・J-PARCIに係わるプロジェクトの実施など ・構造解析エンジニアリングなど ・次世代TCADシステムの開発など
第二事業部	事業部付	二相流解析および原子力安全解析など	
	技術第3部	<ul style="list-style-type: none"> ・混相流に係わる次世代流体システム開発など ・乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など 	
	技術第4部	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス、液体パイプライン、農業用パイプライン、液体ロケットエンジン等の管路系流体解析・開発 ・火災・爆発に係わる防災リスク解析・開発など 	
	技術第5部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など	
—	総合企画部	<ul style="list-style-type: none"> ・コンサルティングサービスの提供など ・解析サービスの提供など 	
営業本部	営業部	お客様窓口	
東海事業所		お客様窓口	

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

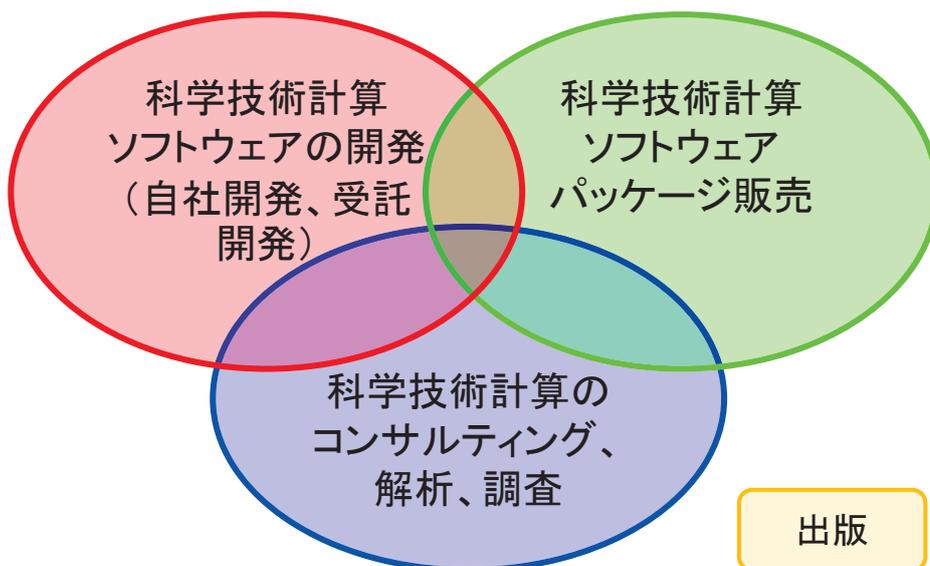
2

3

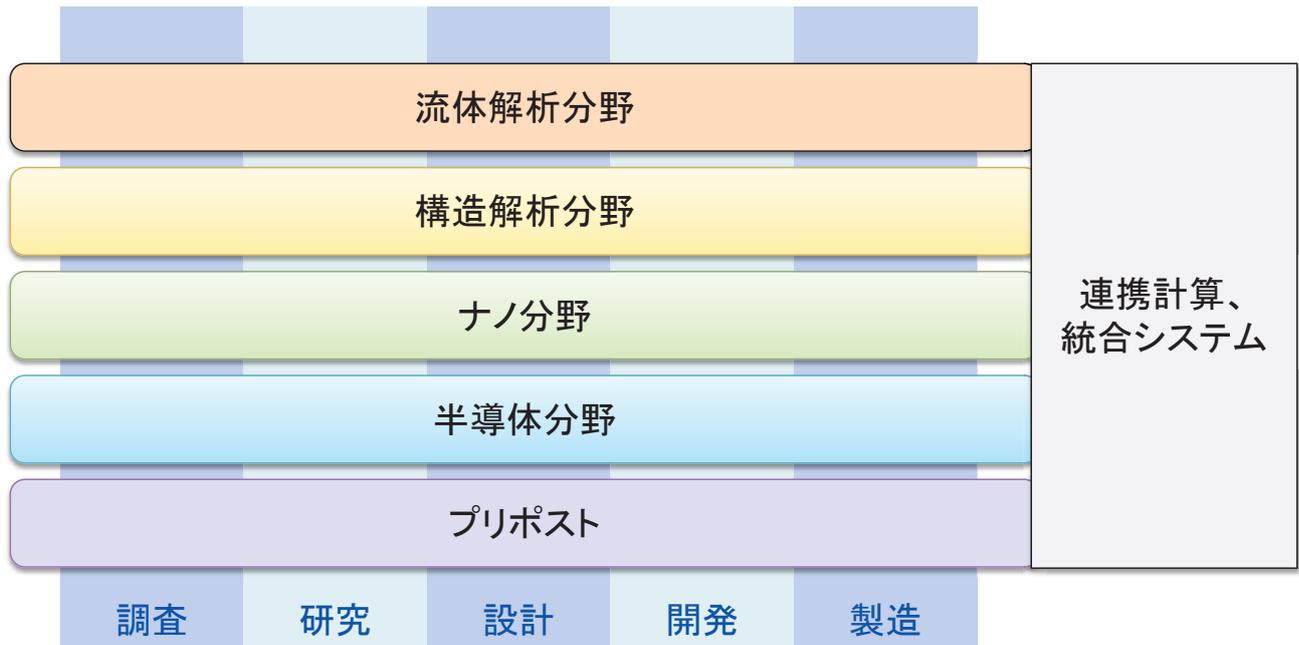


事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス

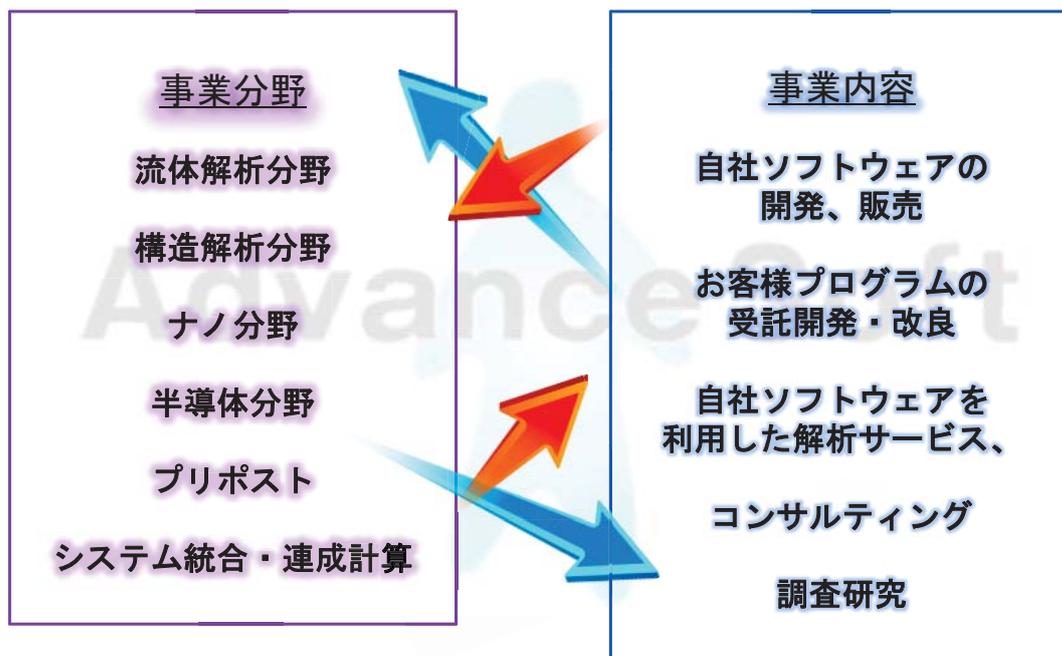


科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

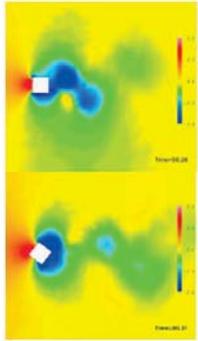
アドバンスソフトの事業分野と事業内容



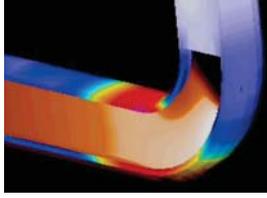
アドバンスソフトは、パッケージソフトウェアの販売、受託開発、
受託解析、コンサルティング等の多様なソリューションを通じて、
お客様の問題解決に即戦力として貢献します。

流体

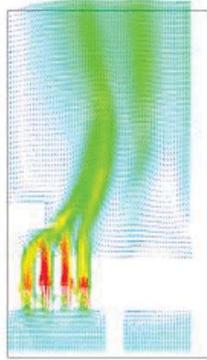
Advance/FrontFlow/red



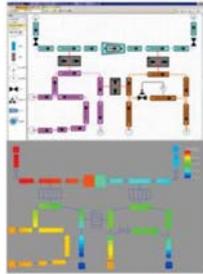
Advance/FrontFlow/FOCUS



Advance/FrontFlow/MP

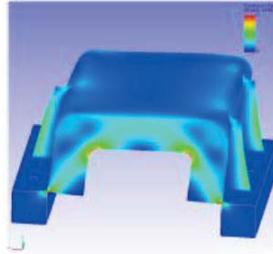


Advance/FrontNetシリーズ



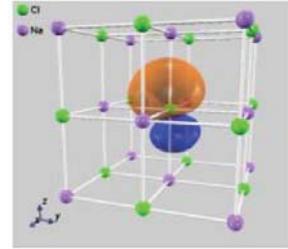
構造

Advance/FrontSTR



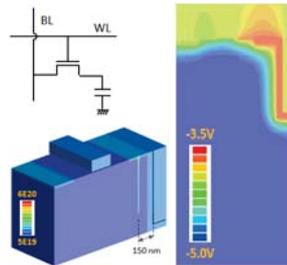
ナノ

Advance/PHASE



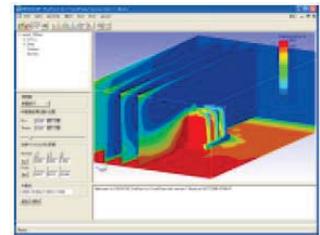
半導体

Advance/DESSERT



プリポスト

Advance/REVOCAP



※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

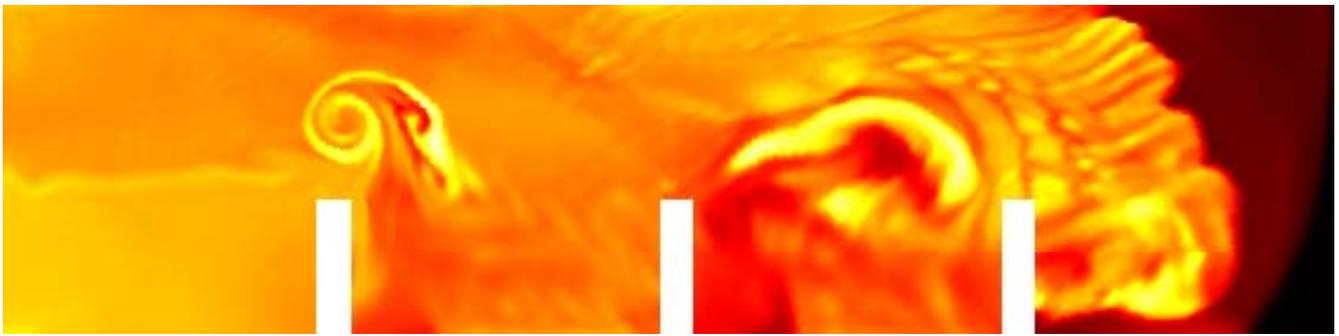
ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/PHASE	第一原理計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>





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

Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

資料内容


AdvanceSoft
<http://www.advancesoft.jp/>

- 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

Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

2

Advance/FrontFlow/FOCUSの 基本機能の概要

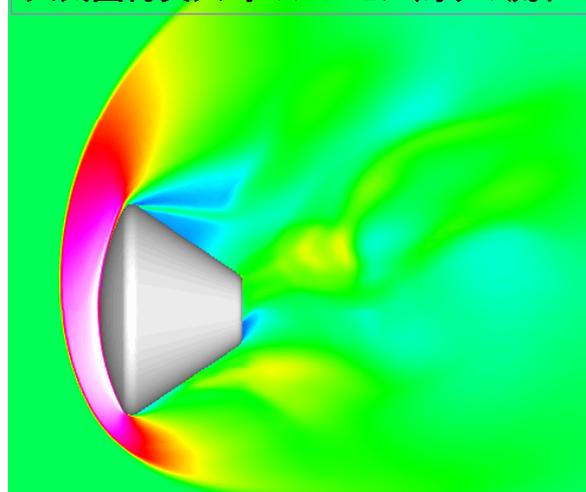
- 時間積分
 - オイラー陰解法(LU-SGS陰解法)
 - 2次または4次精度ルンゲ-クッタ陽解法
- 対流項
 - 種々の衝撃波捕獲スキーム
 - 3次精度TVD補間
- 燃焼モデル
 - 火炎モデル
 - 層流火炎モデル
 - ✓ 高野モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 乱流燃焼速度モデル
 - ✓ 高野モデルからの拡張モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 爆轟波モデル
 - ✓ 1次元ZNDモデルと火炎モデルの統合化モデル
- 乱流モデル
 - 標準k-ε 2方程式をベースとした浮力乱流モデル(WETモデル)^[※]
 - 標準k-ε 2方程式モデル
 - Spalart-Allmaras 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

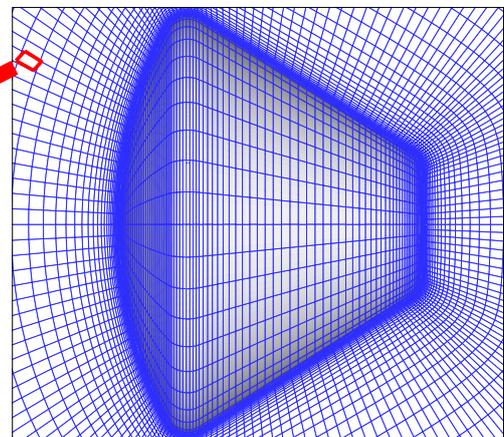
- 上式をコントロールボリュームで離散化

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

- 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

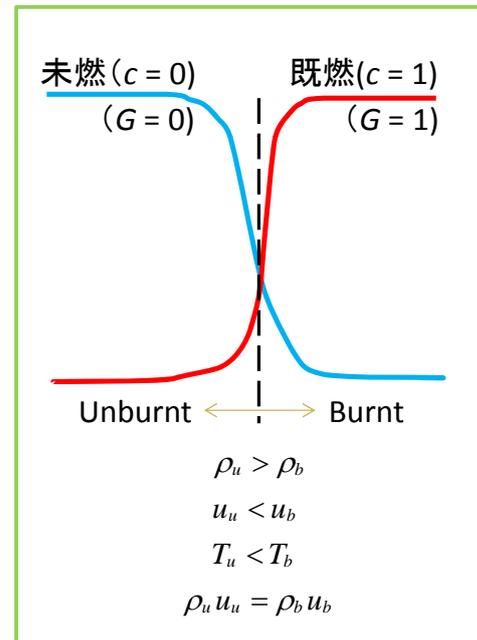
以下の既燃ガスの質量保存式を解く

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

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

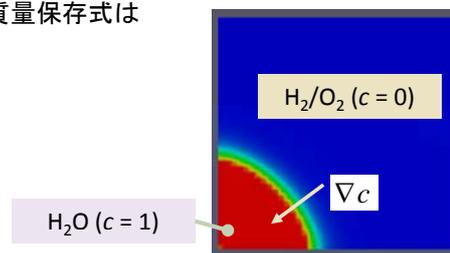
■本ソフトウェアで扱う層流火炎モデルは、以下に記述される高野モデルを用いている

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]

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

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

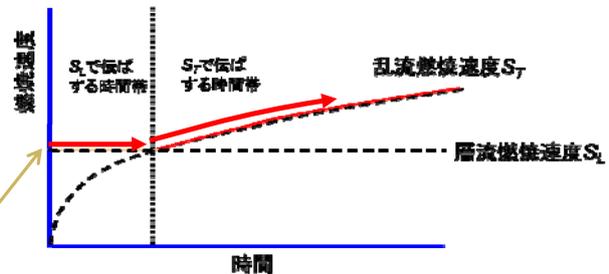
$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u_j)}{\partial x_j} = \dot{\rho}_B$$

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

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

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

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

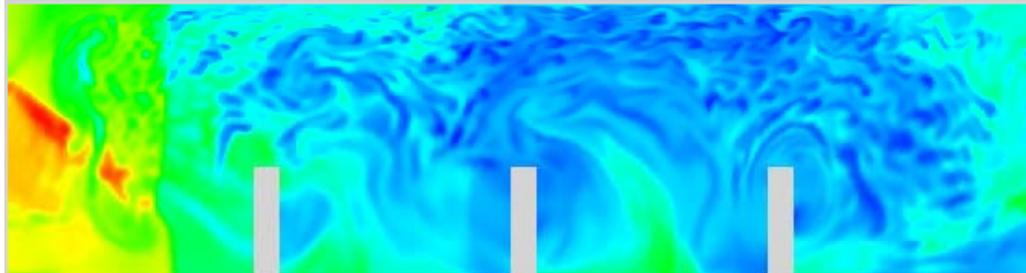
$$\dot{\rho}_{Bi} = 0 \quad G \geq 1$$

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

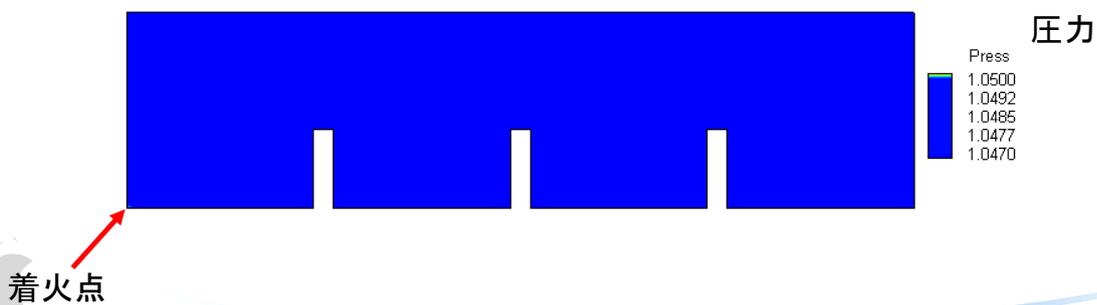
$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)u_j}{\partial x_j} = (\dot{\rho}_B E_i)_i$$

[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)



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

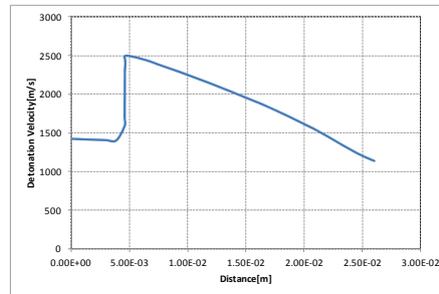
$$\rho \frac{du}{dz} + u \frac{d\rho}{dz} = 0$$

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

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

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

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

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

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

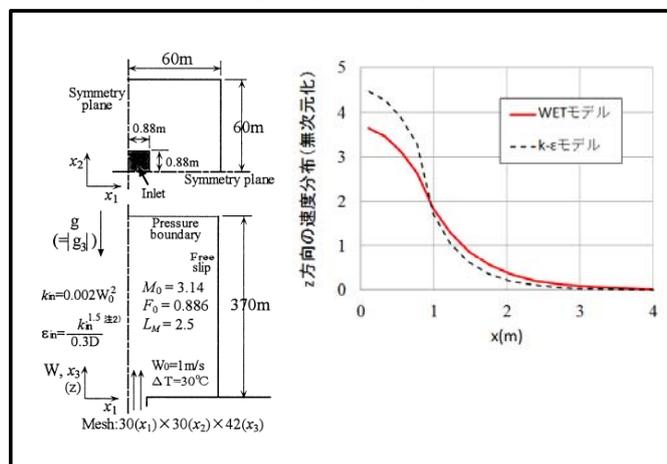
$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_\theta} \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x} \right\} - 2\overline{u_j \theta} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} - 2\varepsilon_\theta$$

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

■ 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

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

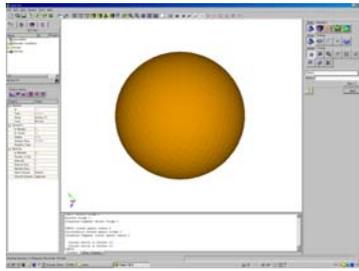
高圧流体で構造物が大きく変形する解析例



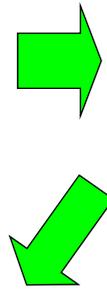
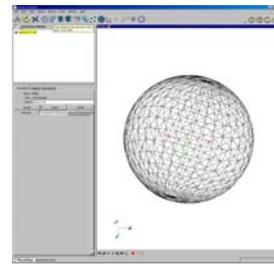
埋込み境界法の導入

埋込み境界法での形状取り込みから 流れの計算まで

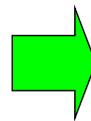
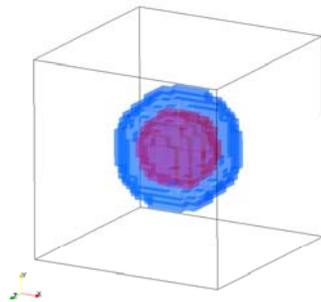
①形状の作成



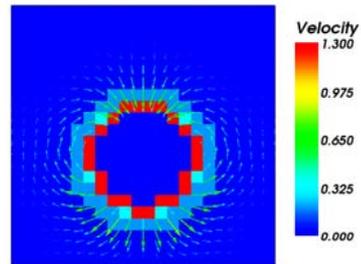
②stl形式データの作成



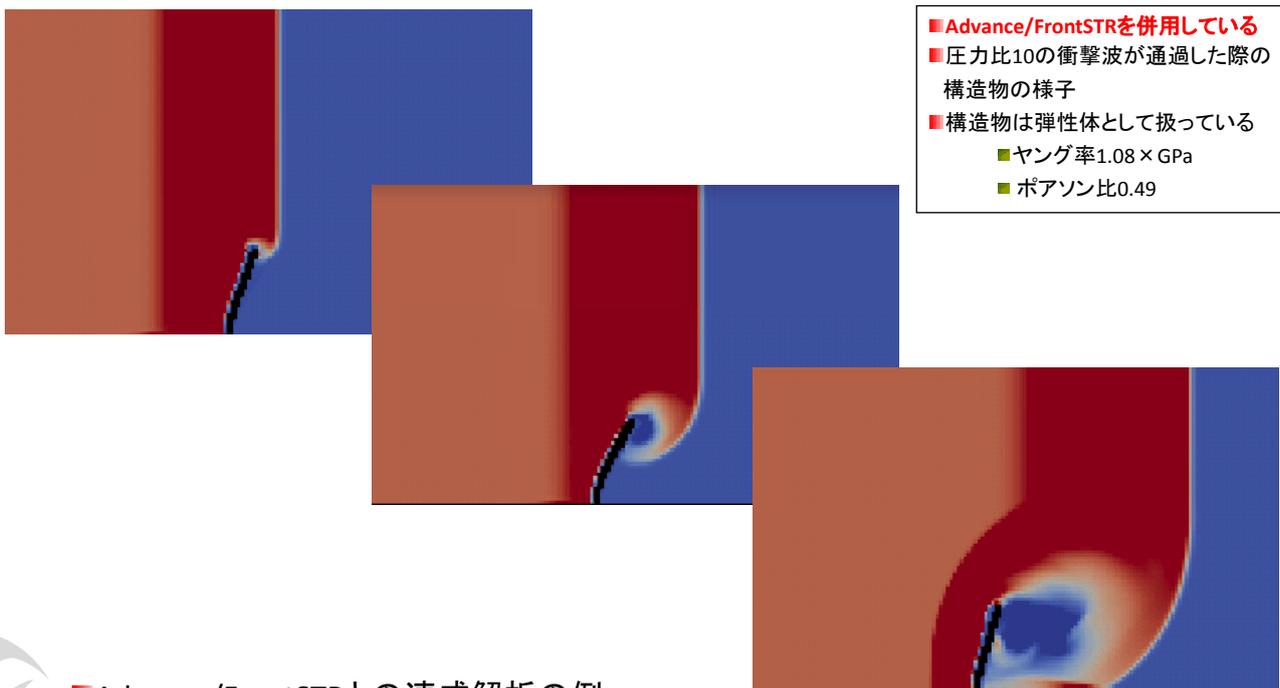
③ソルバ内で形状を自動認識



④流れ解析を開始

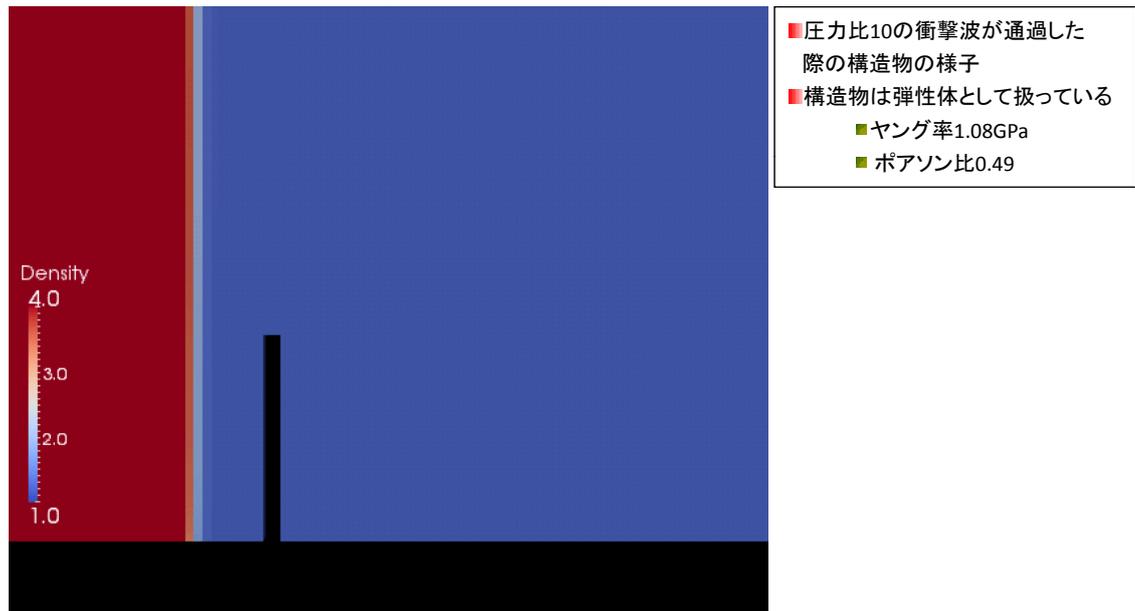


大変形を伴う連成解析 (衝撃波で部材が折れ曲がる様子)



■ 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

Advance/FrontFlow/FOCUSの爆轟解析と 流体構造連成解析を含む新機能のご紹介

技術第4部 富塚 孝之

技術第2部 田中 洋一

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

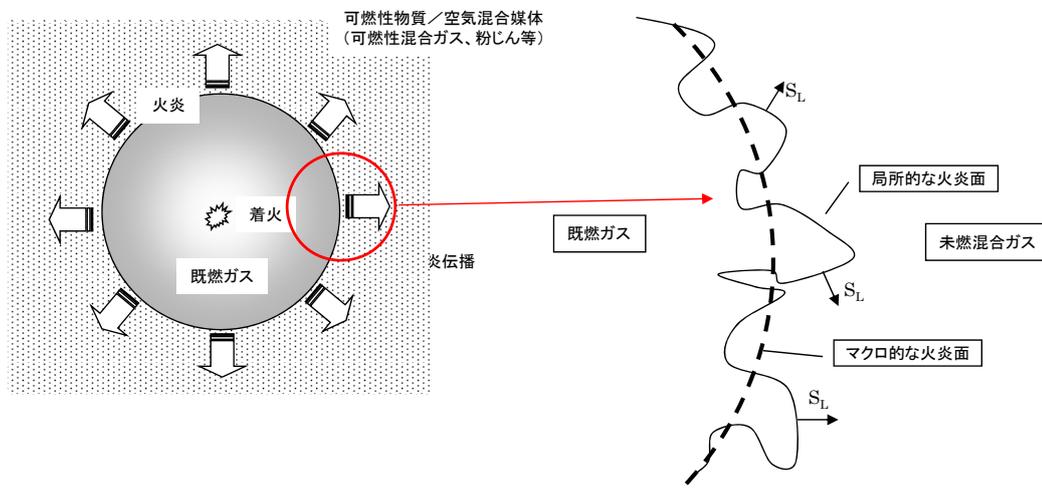
発表内容

- FOCUSにおける爆発（燃焼）現象に対する解析機能
- FOCUSを用いた流体-構造連成解析機能

爆発(燃焼)現象に対する解析機能

解析対象

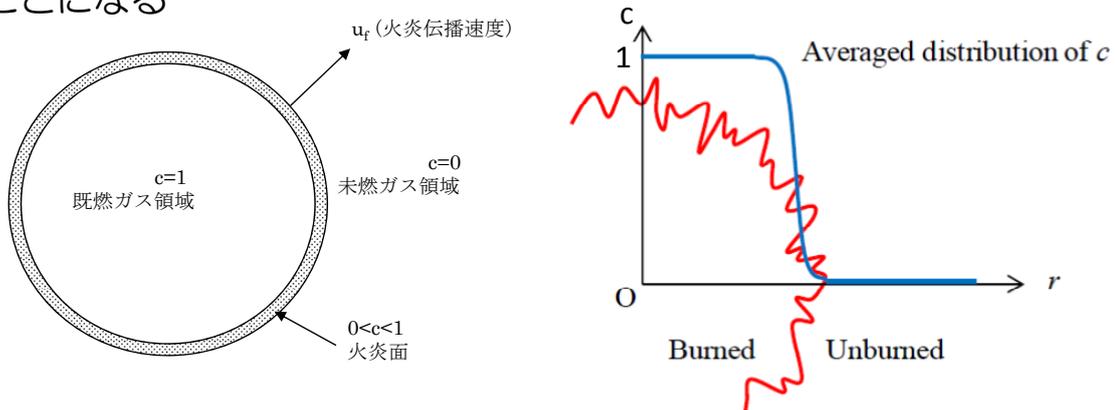
- 可燃性ガスの予混合燃焼



火炎面は伝播と共に乱れ始め、火炎面積が増大→燃焼速度の増大

火炎伝播モデル

- 反応進行度モデル
- Zimontらによる反応進行度モデルは反応進行度 c を導入することにより火炎面の存在確率密度を考え、 c の輸送方程式を解くものである
- c は0で未燃、1で既燃状態であり火炎面は $0 < c < 1$ の領域に存在することになる



反応進行度モデル概念図

Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

※富塚、清水、桑名、土橋、越、数値シミュレーションによるDMEの予混合火炎伝ば機構の解明、第47回燃焼シンポジウム、2009年 5

火炎伝播モデル／乱流燃焼モデル

- 反応進行度モデル
 - 反応進行度の輸送方程式

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

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

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

u : 流速
 ρ : 未燃ガス密度
 S_T : 乱流燃焼速度

反応進行度モデルにおける生成項に乱流燃焼速度を導入

Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

6

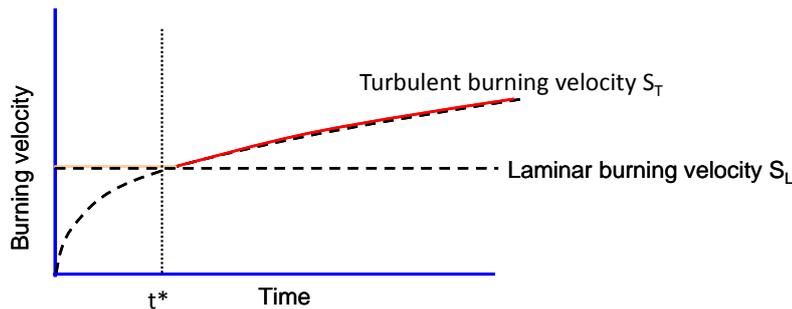
乱流燃焼モデル

- フラクタル火炎伝ばモデル

- フラクタル理論と実験データに基づいて火炎の加速をモデル化

$$\rho S = \rho S_T \nabla c \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_T = S_L & : t < t^* \\ S_T = \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2}{\sqrt{K}} t^{1/2} & : t \geq t^* \end{array} \right.$$

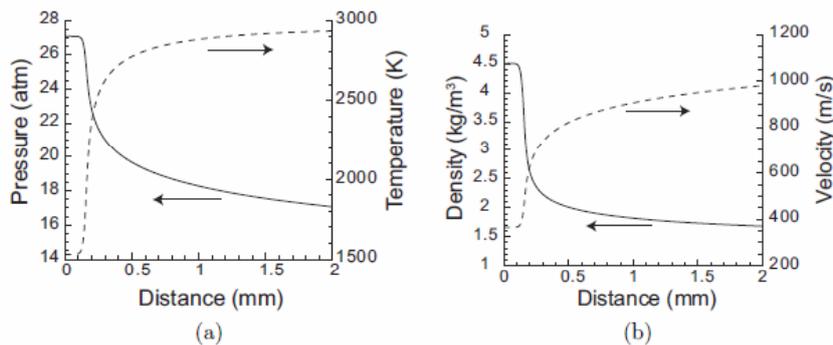
S_L : 層流燃焼速度
 S_T : 乱流燃焼速度
 ρ_u : 未燃ガス密度
 ρ_b : 既燃ガス密度
 c_g : モデル定数



※Tomizuka T, Kuwana K, Shimizu K, Mogi T, Dobashi R, Koshi M. Estimation of turbulent flame speed during DME/air premixed gaseous explosions. J Loss Prevent Proc Ind 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.09.004>.

爆轟シミュレーション

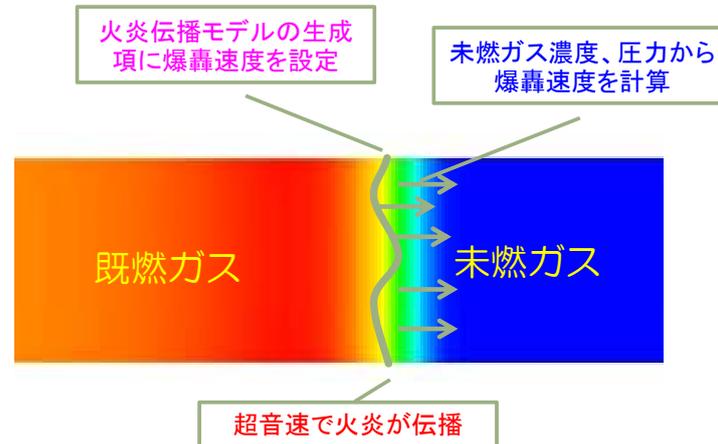
- Zel'dovich (1940), von Neumann (1942), Doering (1943)によって、平面デトネーションの定常一次元構造をモデル化
- 伝播速度を予測するための現実的な手段



ZNDモデルによる水素-空気デトネーションの一次元構造計算例

爆轟シミュレーション

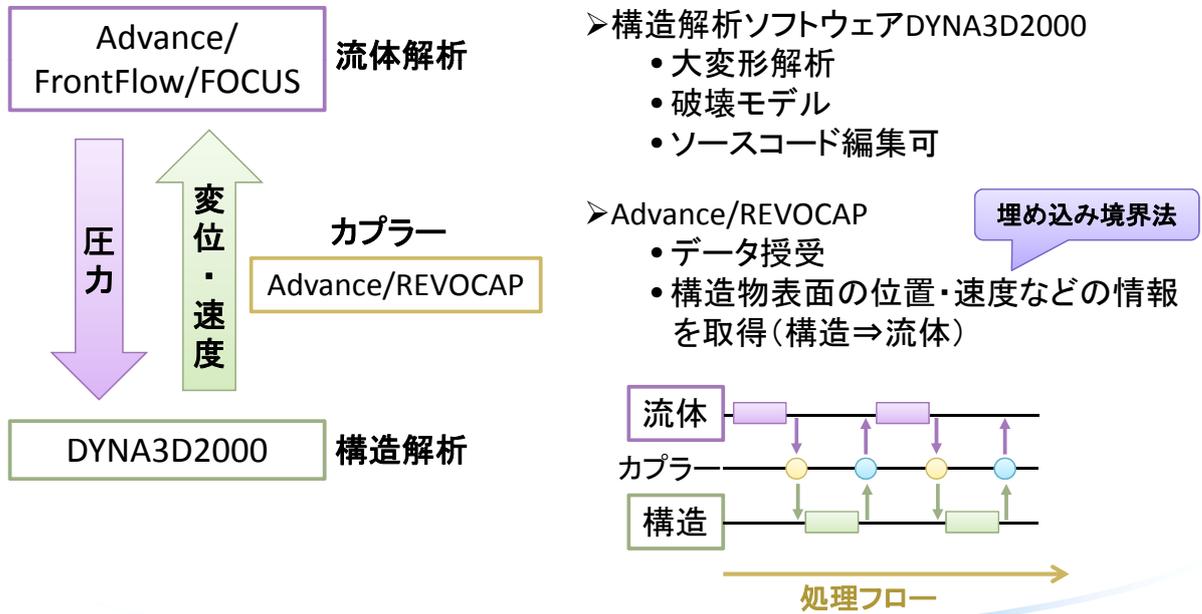
- 未燃ガスの状態(濃度、圧力)からZNDモデルで爆轟速度を計算
- 火炎伝播モデルの生成項(s_T)に爆轟速度を設定
- 火炎が爆轟速度で伝播



流体-構造連成解析機能

流体-構造連成解析機能

Advance/FrontFlow/FOCUS ⇔ DYNA3D2000による連成解析

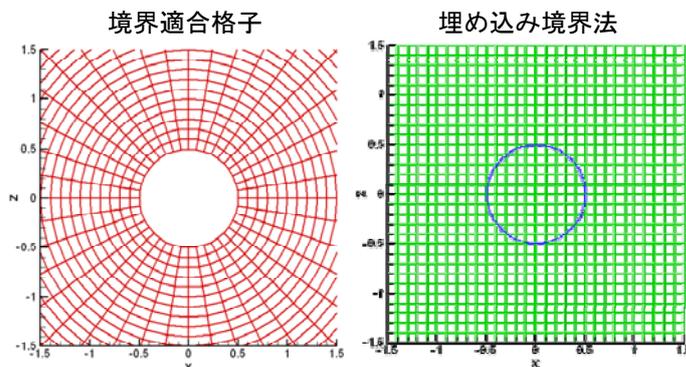


埋め込み境界法 (Immersed Boundary法)

- 複雑な形状に対する格子生成の困難をスキップ
 - 格子生成時間の大幅短縮
- 大変形と移動を伴う形状の扱いが可能

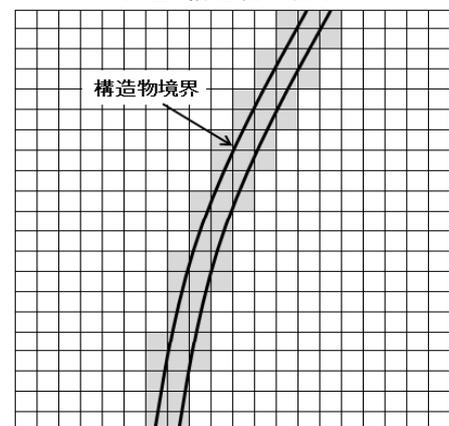
FOCUS
直交格子法 & 埋め込み境界法

物体境界の認識の違い



- 境界適合格子の場合は物体に沿う格子を用いる
- 埋め込み境界法では物体境界が流体計算の格子へ埋め込められる

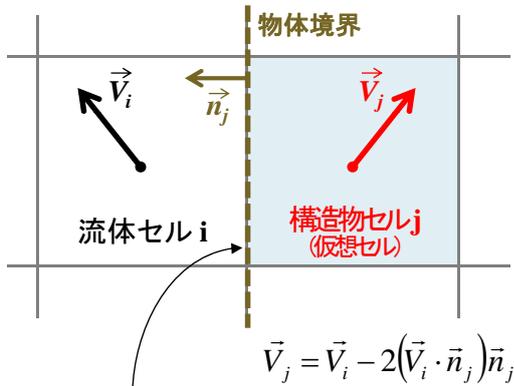
埋め込み境界法での境界壁のイメージ
(灰色: 構造物の格子)



REVOCAP
構造物の格子を判定

埋め込み境界法における物体境界の設定

セル境界と物体境界が一致する場合

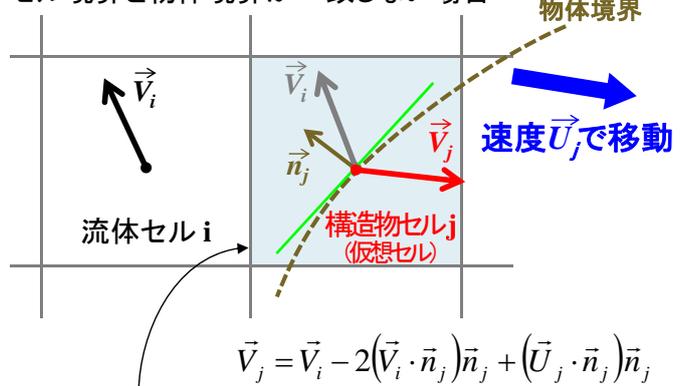


数値流束: $F = f(Q_i, Q_j)$

解ベクトル Q_i, Q_j
速度ベクトル、密度、エネルギー、圧力
 \vec{v}_i, \vec{v}_j

埋め込み境界法

セル境界と物体境界が一致しない場合



数値流束: $F = f(Q_i, Q_j)$

物体の移動速度

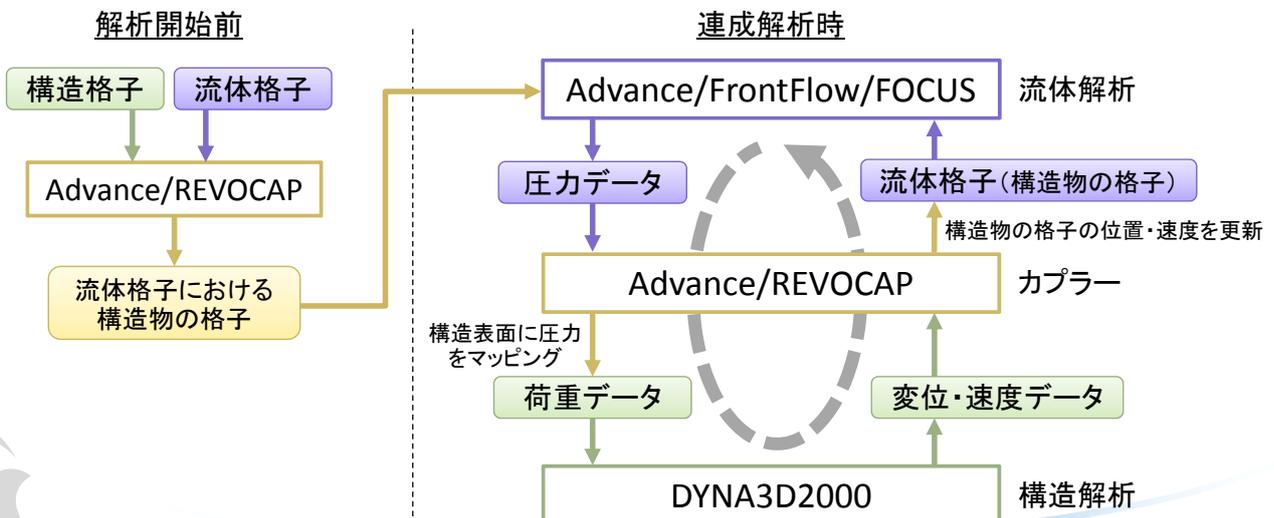
数値流束を介して、物体境界の形状を計算に取り入れる

越智 章生、他 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 59 No. 684 pp. 7-15 (2011).

REVOCAP
構造物セルにおける法線ベクトル・移動速度

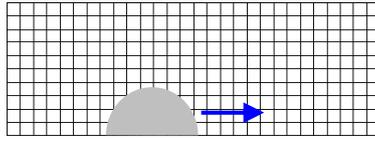
流体-構造連成解析の流れ

- 解析開始前に構造格子、流体格子の位置情報をREVOCAPが読み込み、流体格子における構造物の格子を抽出する。
- 流体解析を行い、構造表面の圧力をREVOCAPが荷重に変換し、DYNA3D2000に与えて構造解析を行う。
- 変形した構造物の情報から、流体格子における構造物の格子の位置・速度を更新する。

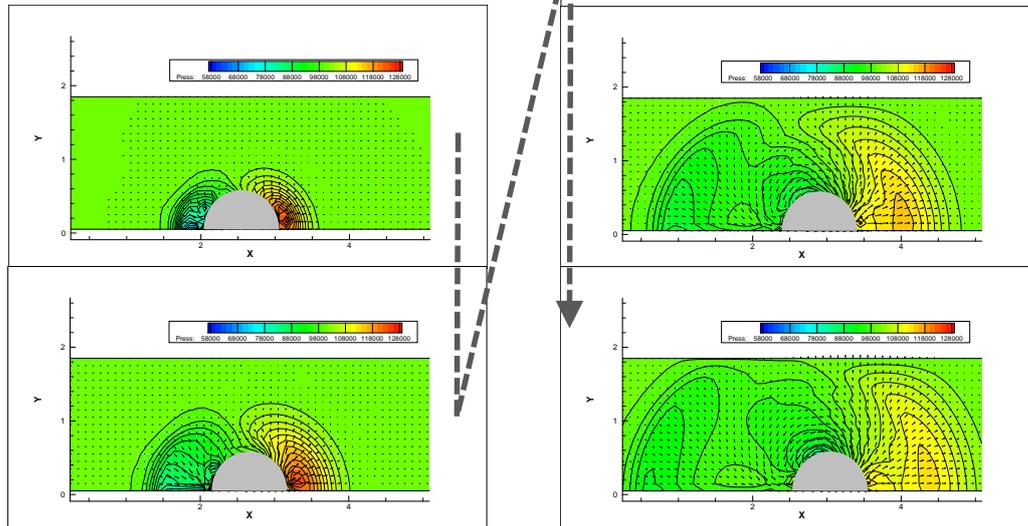


例. 移動する半円柱周りの流れ

半円柱(灰色部分)の移動速度: 100m/s



圧力分布(圧力等高線)



Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

15

まとめ

- 爆発(燃烧)解析機能
 - 火炎伝播モデル
 - 乱流燃烧速度モデル
 - 爆轟評価モデル

- 流体-構造連成解析機能
 - FOCUS-DYNA3D2000による連成解析機能
 - 連成解析における埋め込み境界法

Copyright ©2013-2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

16

Advance/FrontFlow/FOCUSの爆発現象に 関連した解析事例のご紹介

技術第4部 富塚 孝之

技術第2部 田中 洋一

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



発表内容

- 爆発現象に対する解析の背景・現状
- 配管内での爆発現象に対する流体-構造連成の解析事例



爆発現象に対する解析の背景・現状

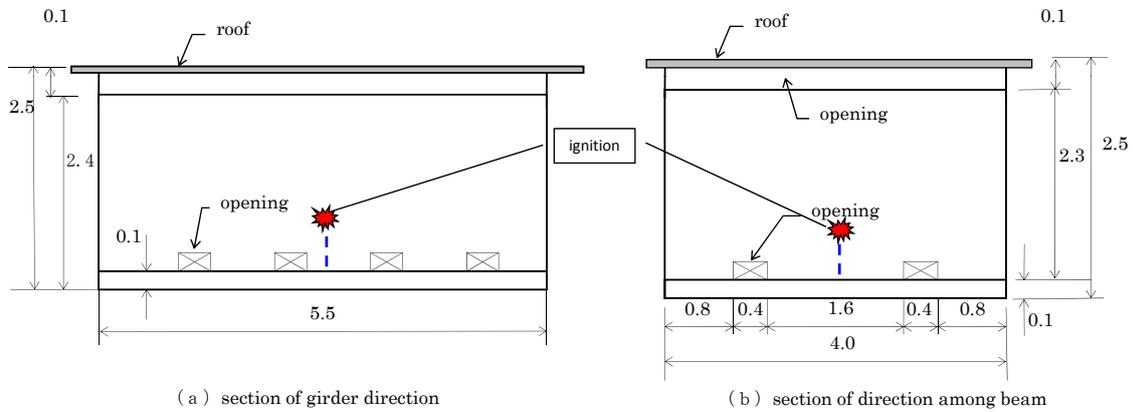
爆発シミュレーションの必要性

- 爆発危険性評価の必要性
 - ①施設の設計前に爆発危険性予測により設計指針を立てる
 - ↓
 - ②設計指針を基に施設の設計をおこなう
 - ↓
 - ③設計結果に対して再度爆発危険予測を実施し、安全性の確認をおこなう
 - ↓
 - ④安全上の問題点が新たに見つかった場合、再度設計に反映または防爆対策を検討

- 安全管理上、爆発危険性評価が必須→予測手法の確立

既往のシミュレーション(爆燃)

LPG容器置き場爆発実験



LPG容器置き場内爆発実験

壁面:コンクリートブロック、屋根:スレートのLPG容器置き場内にLPGを注入
室内中央、高さ50cmの点で着火・燃焼

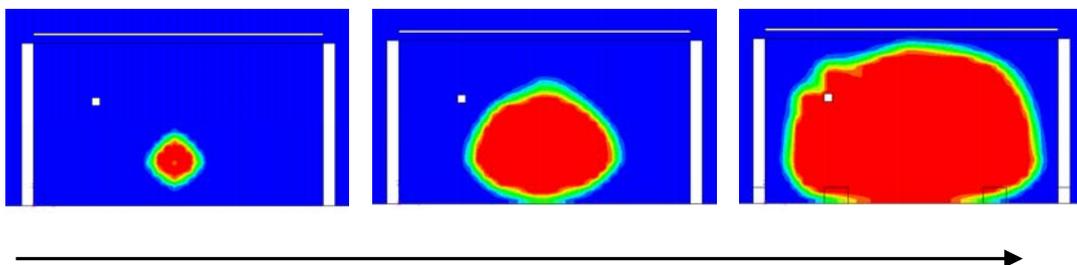
※高橋, 富塚, 永野, 高桑, 武井, 越, 土橋, 山鹿, 難波, 「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

5

既往のシミュレーション(爆燃)

火炎伝播計算例



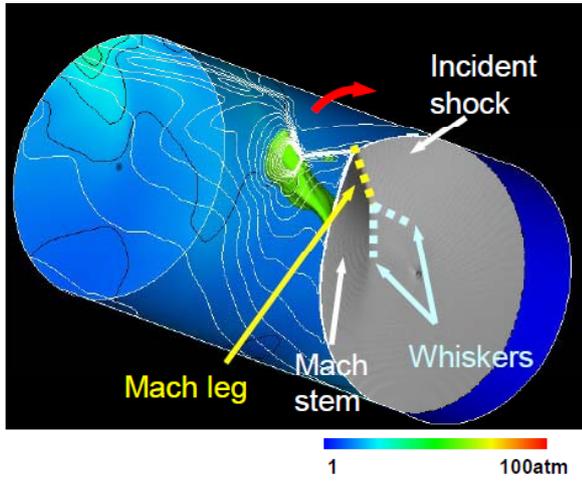
※高橋, 富塚, 永野, 高桑, 武井, 越, 土橋, 山鹿, 難波, 「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

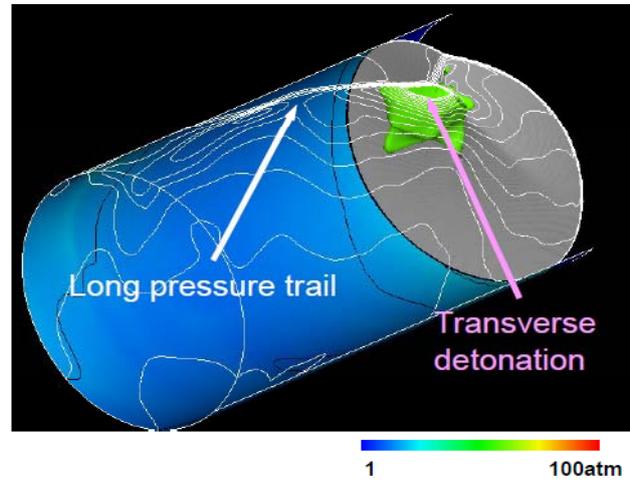
6

既往のシミュレーション(爆轟)

3次元爆轟シミュレーション



(a) 前方視



(b) 後方視

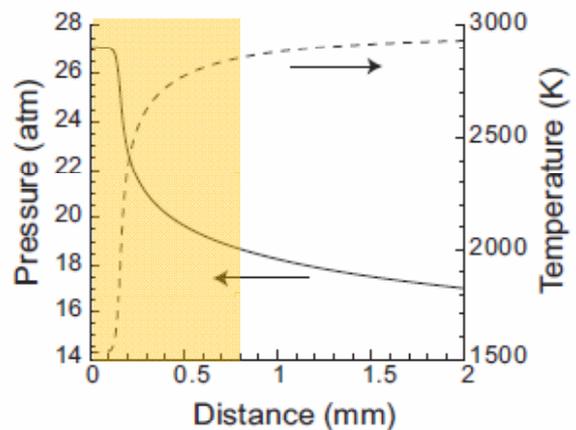
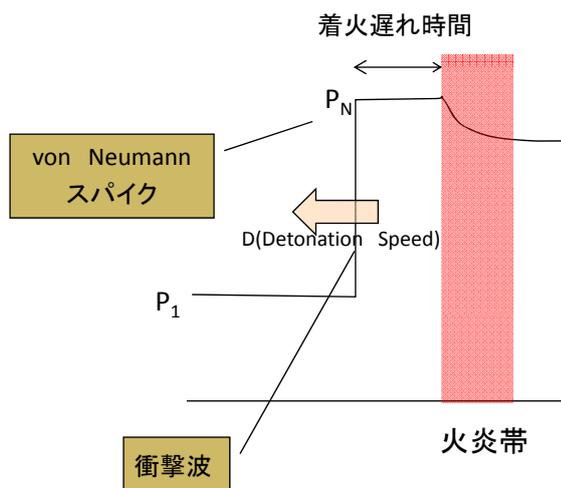
円管内を伝播するスピンドトネーション圧力分布

※坪井伸幸、林光一、3次元爆轟現象の数値解析、ながれ26(2007)183-192

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

7

火炎構造(爆轟の場合)



火炎構造の解析には
ミクロンオーダーの解像度が必要

ZNDモデルによる水素-空気 detonation の一次元構造計算例

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

8

爆発シミュレーションの課題

- 実験
 - 人体や周辺施設の危険性
 - 膨大なコスト
- 既往の数値シミュレーション
 - 現状の数値モデルで燃焼問題に対応するには膨大な計算格子数と計算機資源が必要
 - 解析スケール: 現象のスケールが 10^0m 以上に対し、計算格子幅は 10^{-6}m オーダーが必要
- 実用的なスケール($10^0\sim\text{m}$)の爆発評価のための火炎伝ばモデルが必須

配管内での爆発現象に対する 流体-構造連成の解析事例

配管の破断事故

浜岡原発における配管の破断事故(2001年)



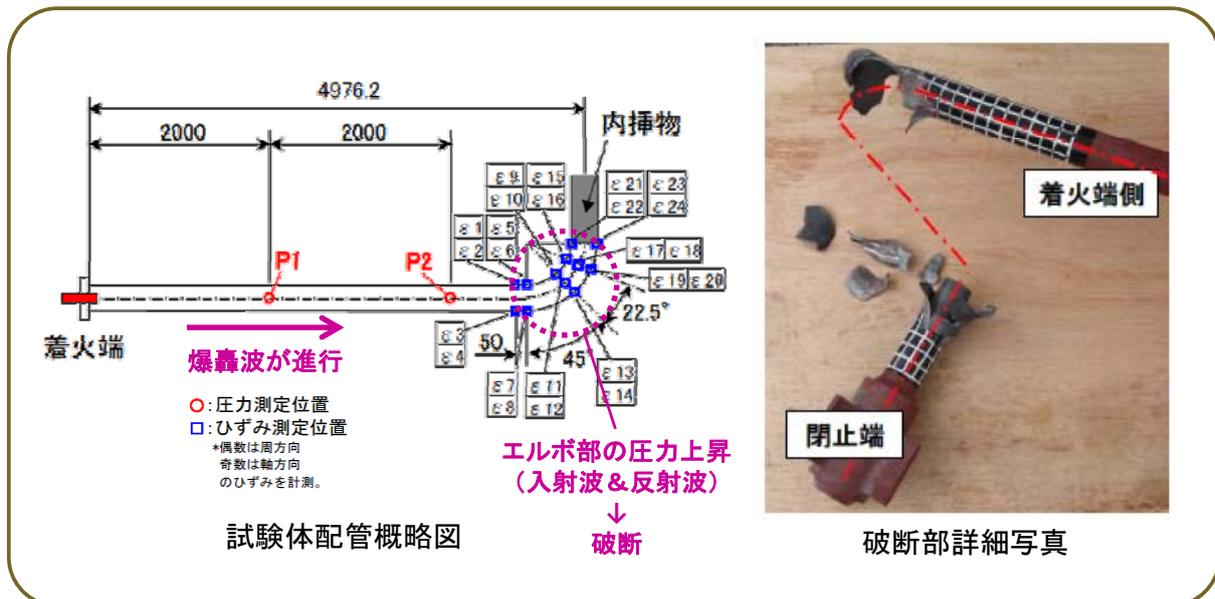
配管にたまっていた水素に着火
↓
爆轟波による破断と推定

水素爆発による配管破断 JAERI-Tech 2001-094 (2001年12月)、P.15

爆轟波による配管破断過程の解析が必要

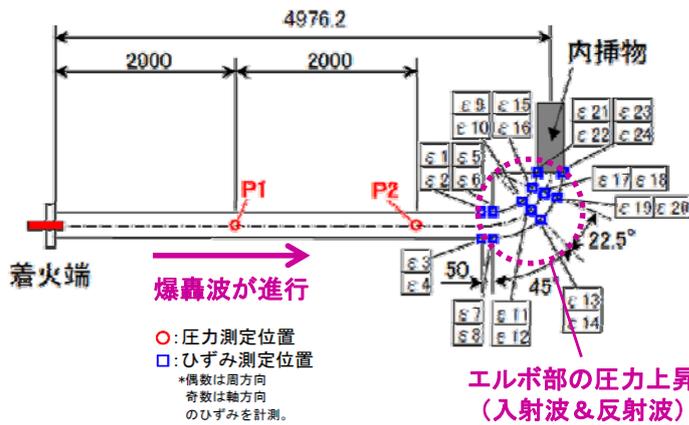
配管の破断試験

爆轟波による配管の破断試験 (一般社団法人 日本原子力技術協会)



BWR(沸騰水型原子炉)配管における混合ガス(水素・酸素)の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン(第3版)

配管の破断試験に対する連成解析



FOCUS-DYNA3D2000による
連成解析を実施

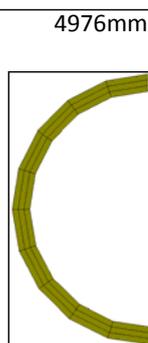
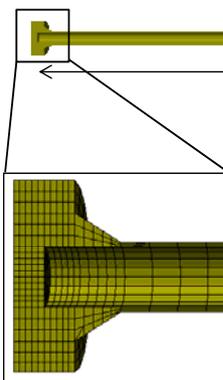
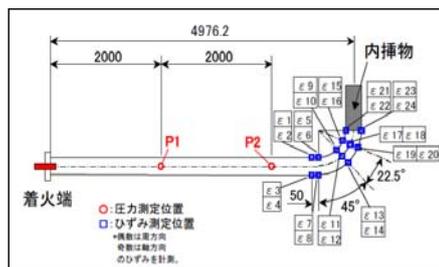
エルボ部の圧力上昇
(入射波&反射波)

- 弾塑性材料(破壊オプションなし)を用いた連成解析
 - 配管内の爆轟波(圧力分布) ← 破断試験の結果と比較
 - 配管の変形
- 破壊オプションを適用し、配管に生じた穴から流体が噴出する様子を再現

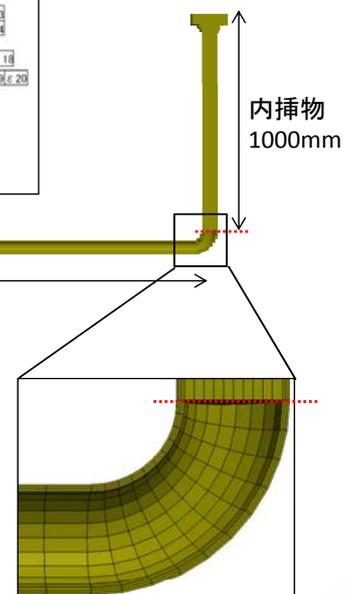
解析モデル

構造解析(DYNA3D2000)

節点数:15978
要素数:11680



配管断面
配管厚み4mm
配管内径52mm



解析モデル

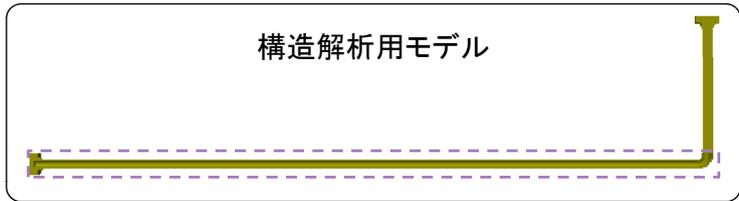
流体解析 (FOCUS)

直交格子法 & 埋め込み境界法

格子幅: 4mm

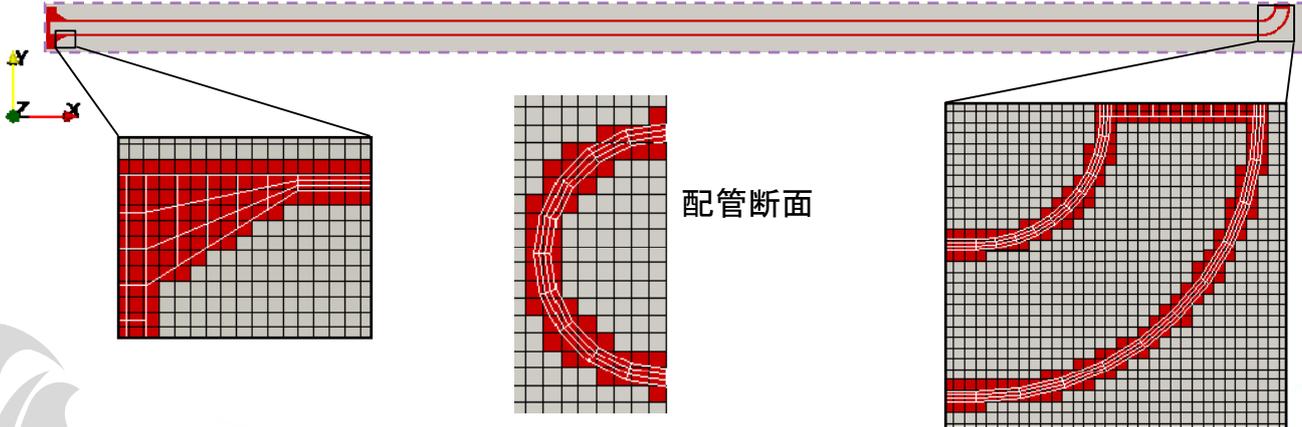
■ 格子: 構造物と認識された格子

白線: 構造解析用モデル



構造解析用モデル

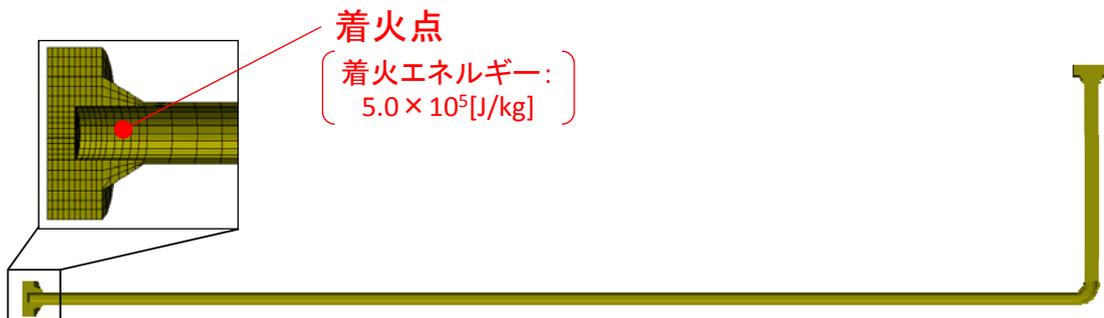
格子数: 1276(x方向) × 50(y方向) × 15(z方向) = 957,000



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

15

解析条件



[流体解析]

初期圧力: 3.5 [MPa]

初期温度: 15 [°C]

時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]

時間積分法: ルンゲクッタ陽解法

[構造解析]

配管の物性: 弾塑性材料

ヤング率: 206 [GPa]、ポアソン比: 0.29 (弾性域)

降伏応力: 300 [MPa]

時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]

時間積分法: 陽解法

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

16

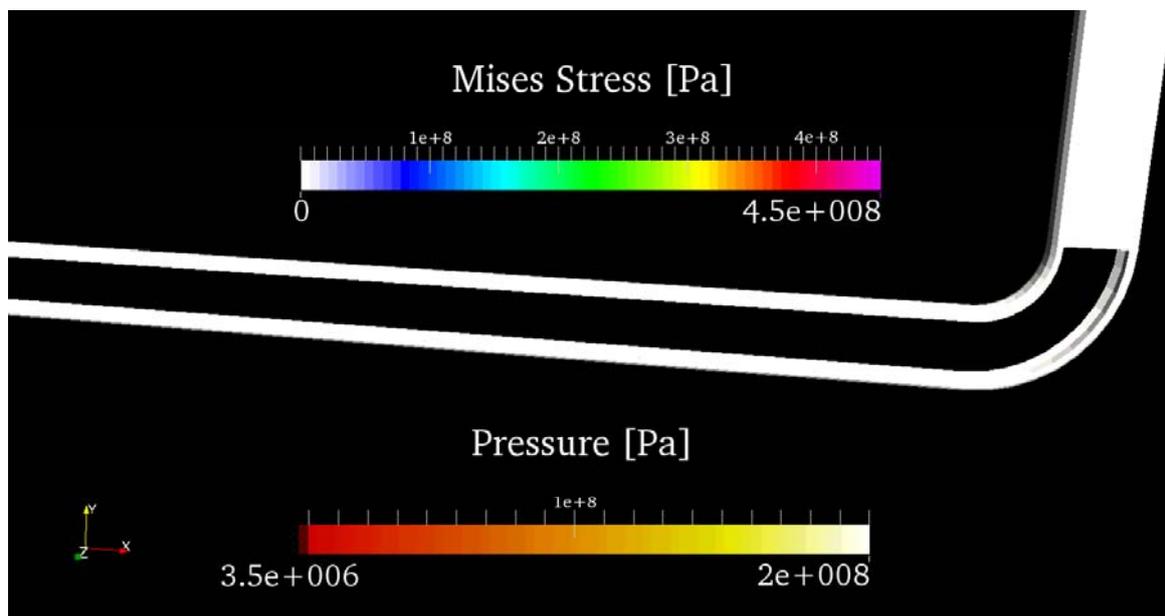
解析結果

弾塑性材料(破壊オプションなし)を用いた連成解析



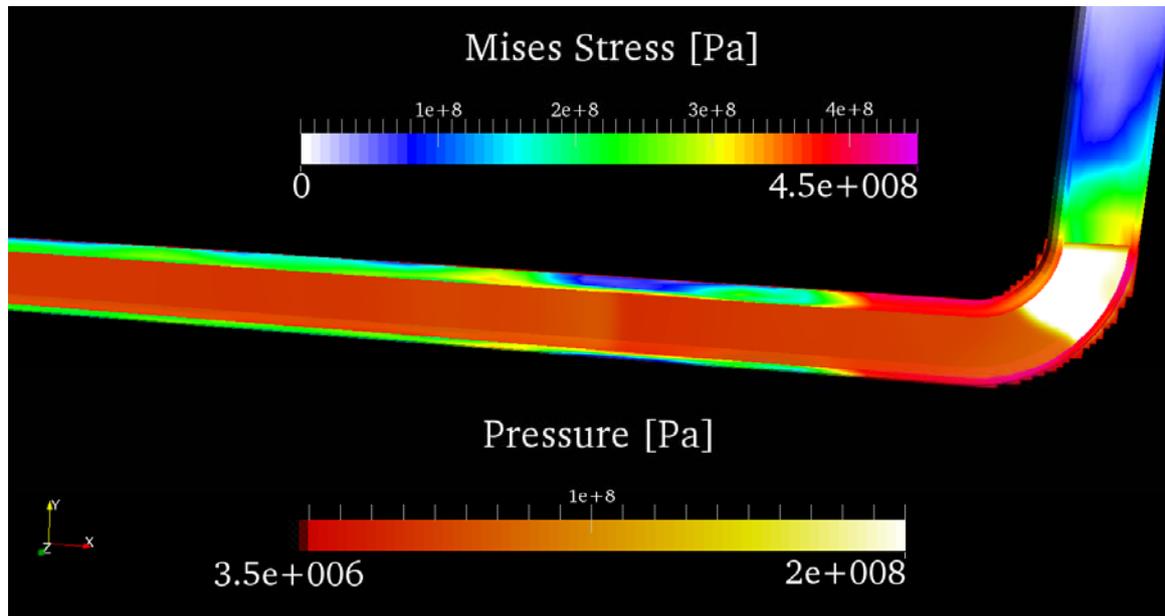
解析結果

アニメーション:配管内圧力、配管ミーゼス応力 (配管の変形なし)



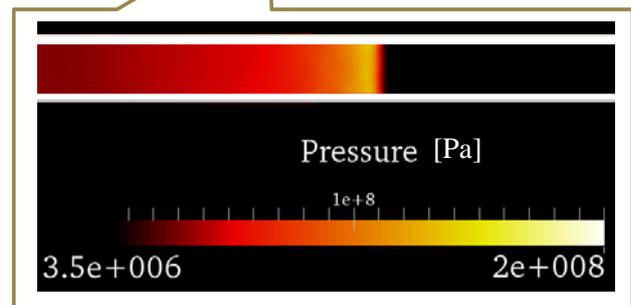
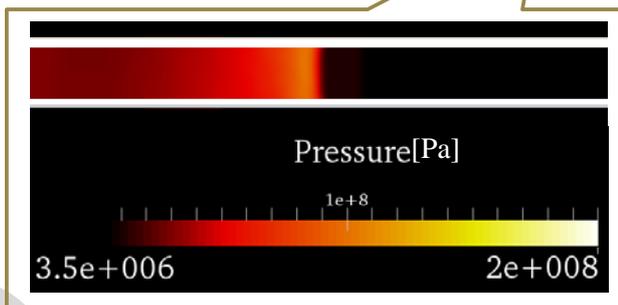
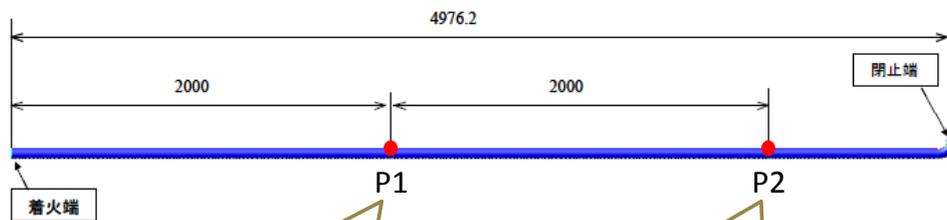
解析結果

爆轟波がエルボ部に達した時の配管内圧力、配管ミーゼス応力（配管の変形なし）



解析結果

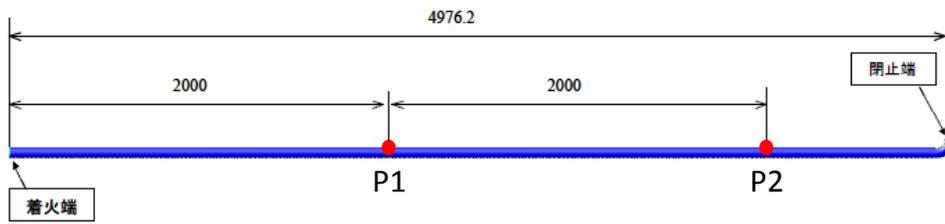
点P1,P2を爆轟波が通過時の圧力分布



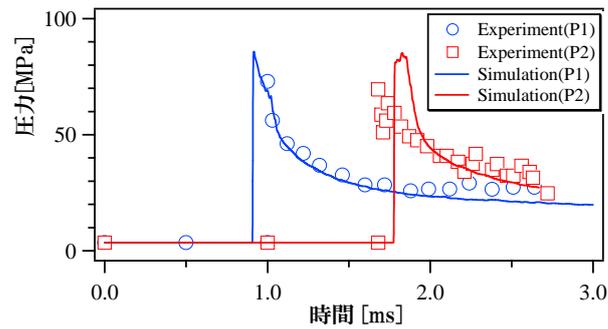
爆轟波の前後の圧力比は20~30

解析結果

点P1,P2における圧力値の時間変化

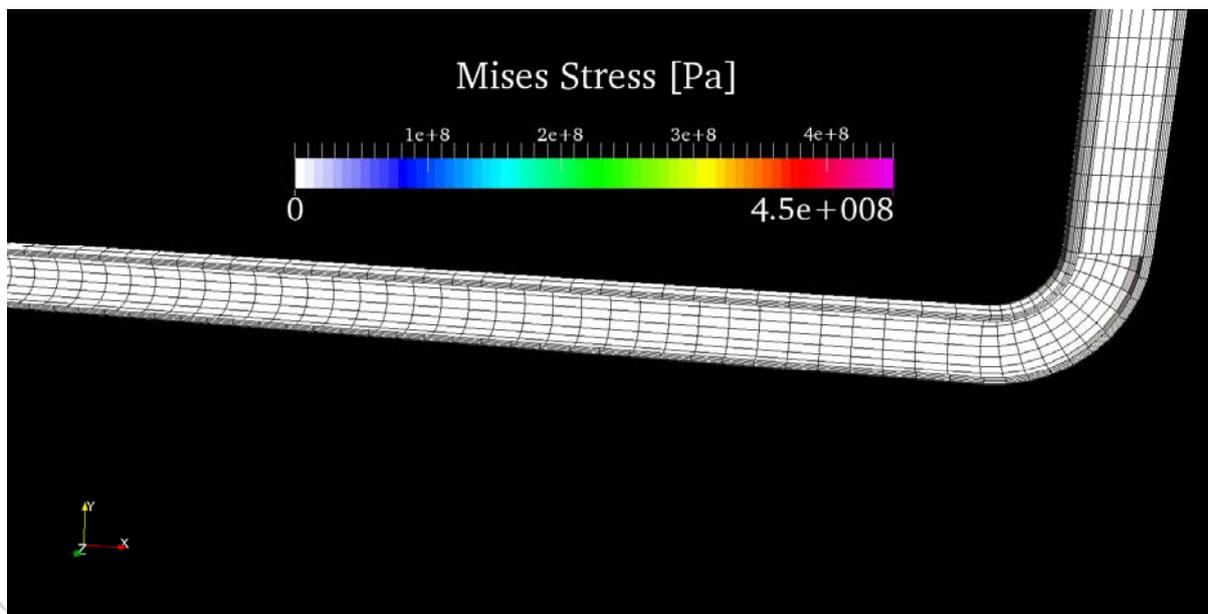


実験値との比較



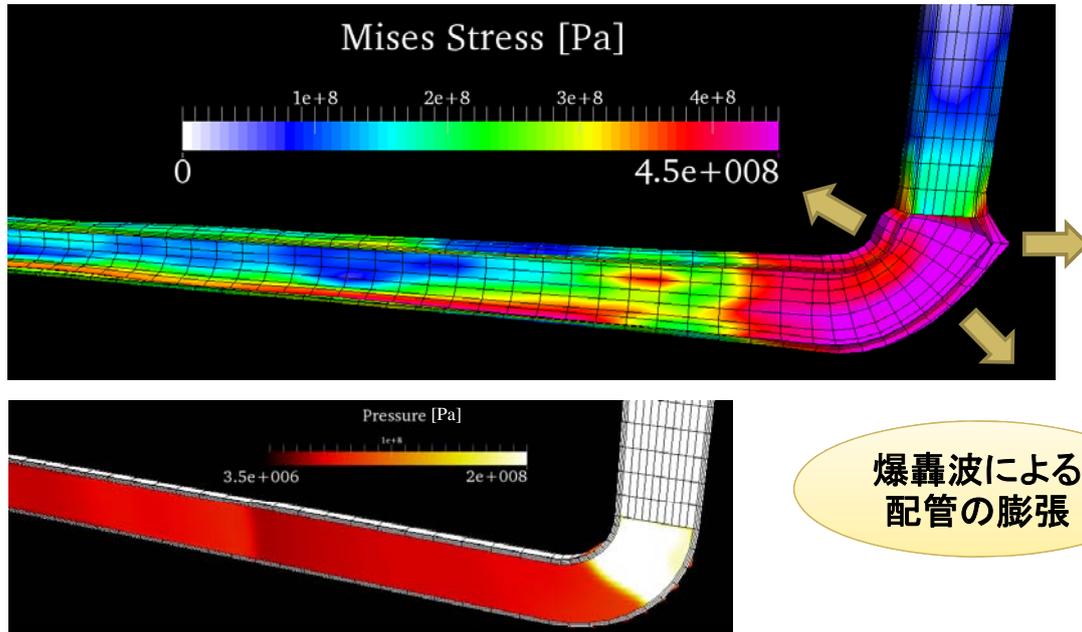
解析結果

アニメーション: 配管ミーゼス応力、配管変形(変形倍率5倍)



解析結果

爆轟波がエルボ部に達した時の配管ミーゼス応力、配管変形(変形倍率5倍)

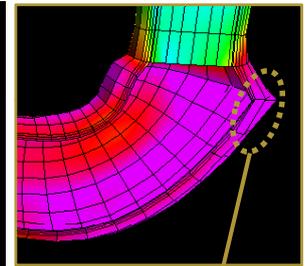
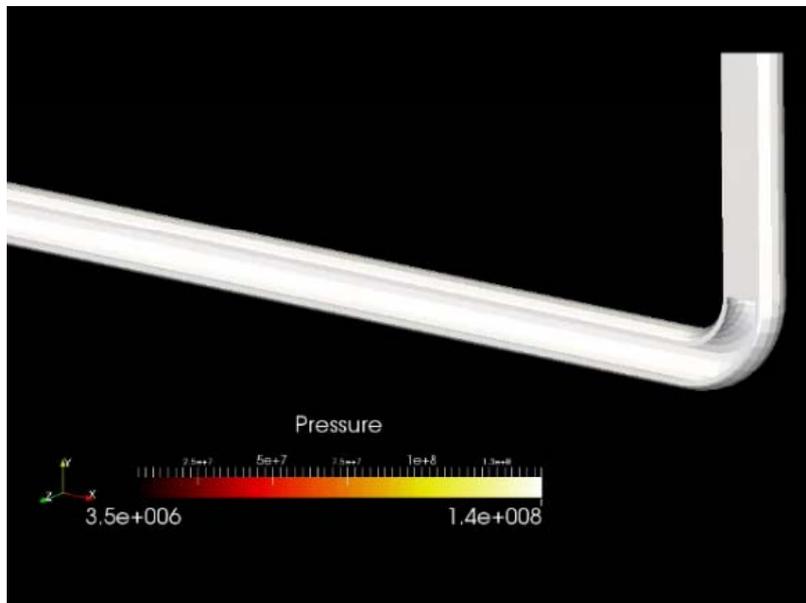


解析結果

破壊オプションを適用し、配管に生じた穴から流体が噴出する様子を再現

解析結果

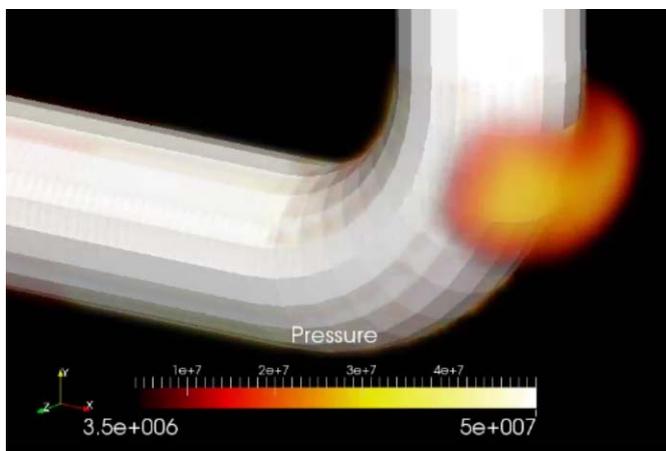
アニメーション: DYNA3D2000の破壊オプションを用いて配管を破壊し、破壊して生じた穴から流体が噴出する様子を再現



破壊箇所

解析結果

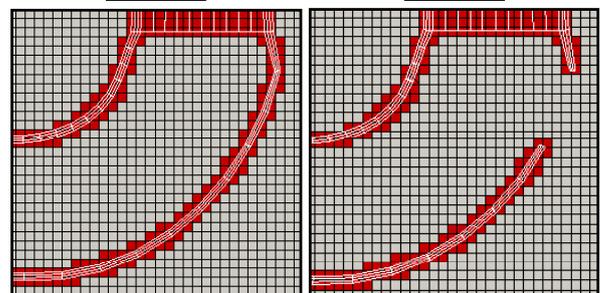
配管内の流体が噴出する様子
(配管に穴が生じた直後)



エルボ付近の構造解析モデル(白線)と流体格子

破壊前

破壊後



■ 格子: 構造物と認識された格子

破壊オプション(DYNA3D2000)と埋め込み境界法(FOCUS)の組み合わせにより、穴開き後も流体計算が可能

まとめ

- 配管内での爆発現象に対する流体-構造連成の解析事例
 - FOCUS-DYNA3D2000による連成解析機能を用いて、配管内部で生じる爆轟波の圧力分布、配管の変形を解析
 - DYNA3D2000の破壊オプションを用いて、配管からの流体噴出の様子を再現



Advance/FrontFlow/FOCUS の プリポストプロセッサ・カプラ Advance/REVOCAPのご紹介

技術第2部 徳永 健一

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

- Advance/REVOCAPの概要
 - Advance/REVOCAPとは
 - 開発経緯
 - 設定手順
- 操作方法
 - 形状の読み込み
 - 計算格子の設定
 - 解析条件の設定
 - 解析モデルの出力と計算の実行
 - 計算結果の可視化
- カプラ機能について
 - REVOCAPカプラ機能について
 - 双方向弱連成解析の方法
 - カプラモジュールの機能

Advance/REVOCAPの概要

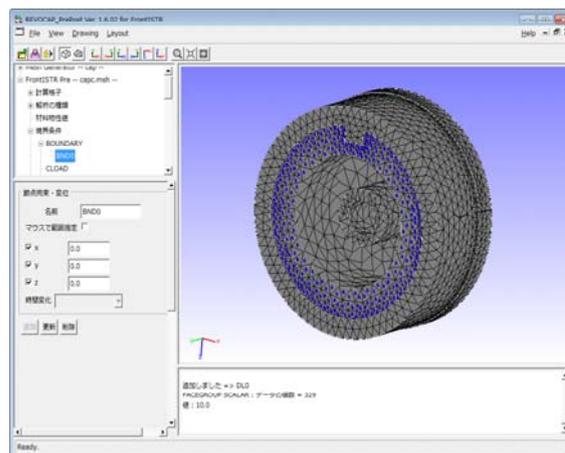
Advance/REVOCAPとは

有限要素法、有限体積法を用いた構造解析ソフト及び流体解析ソフトのための汎用プリポストプロセッサです。

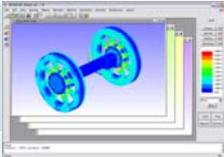
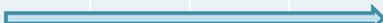
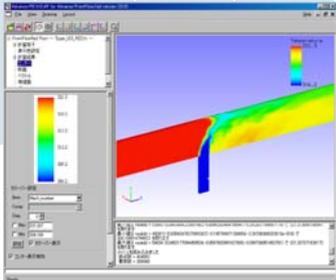
特にAdvance/FrontFlow/redとAdvance/FrontSTRの専用入力GUIを備え、解析者の手間を削減します。

その他、Advance/FrontFlow/MP、Advance/FrontFlow/FOCUSおよびAdvance/FrontNoiseに対応しています。

文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトで開発された、連成解析用のプリポストプロセッサ REVOCAP_Visual、および文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」で開発されたREVOCAP_PrePostをアドバンスソフトが機能を拡張して商品化したものです。



Advance/REVOCAPの開発経緯

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
革新PJ REVOCAP_Mesh REVOCAP_Visual	 連成解析用プレポストプロセッサ										
イノベーションPJ REVOCAP_PrePost	 大規模アセンブリ構造対応プレポストプロセッサ										
アドバンス版 Advance/REVOCAP					△ 7月 v2.0 FFr版	△ 7月 v2.2 FSTR版	△ 8月 v2.3 FFr版 FSTR版	△ 7月 V3.0 FFr版 FSTR版	△ 12月 V3.1 FSTR版 シェル	△ 2月 V3.2 FFr版 FOCUS版 Noise版	

設定手順

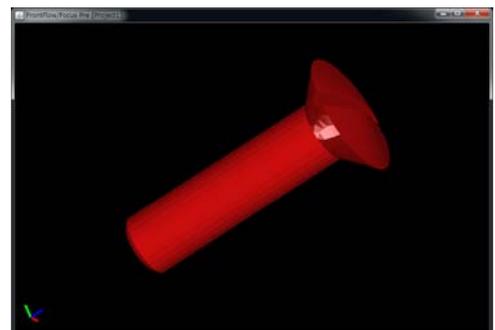
プリポスト	形状の読込	計算格子の設定 ・格子分割数 <small>構造物が流体領域に含まれること</small> ・流体領域 <small>形状で囲まれる領域のどちら側が流体かどうかを指定する</small>	解析条件の設定 ・境界条件 ・時間積分手法 ・乱流モデル ・着火領域 ・火炎モデルなど	FrontFlow/FOCUSの実行	結果の可視化
データフロー	形状データ	計算格子	解析モデル		計算結果
ファイル	STLファイル⇒プリポスト		プリポスト⇒計算制御ファイル		計算結果⇒プリポスト

※Advance/FrontFlow/FOCUSは埋め込み境界法で構造物を認識するため、メッシュ生成は不要です。

操作方法

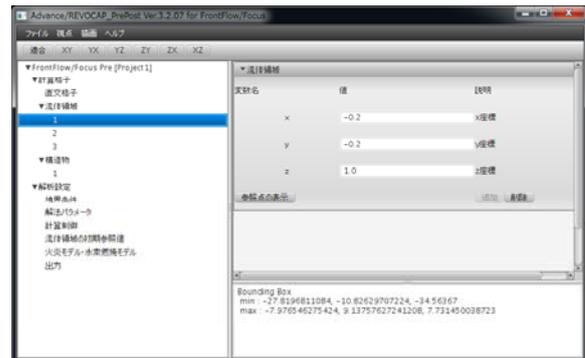
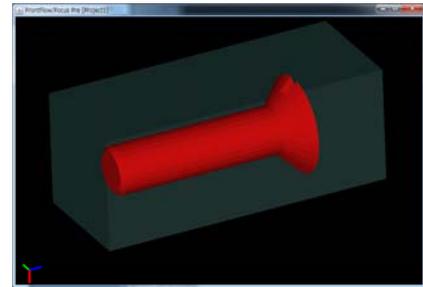
形状の読み込み

- Advance/REVOCAP for FrontFlow/FOCUSを起動すると、パラメータ設定用のGUI画面と、3Dモデル表示用の画面が表示されます。
- 構造物を読み込むと、3Dモデル表示用の画面に描画されます。マウスでの回転、移動、拡大等が可能です。



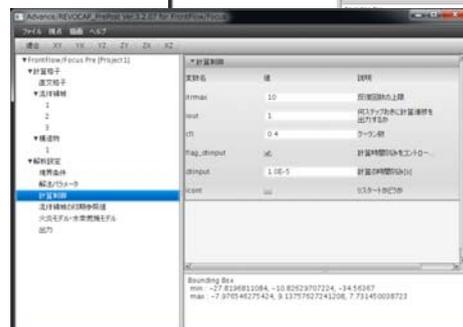
計算格子の設定

- 各座標方向の分割数、メッシュ幅等を与えて計算領域を指定します。
- 構造物と計算領域の位置を3D画面で確認しながら行うことができます。
- 形状で囲まれる領域のどちらが流体領域かを指定します。



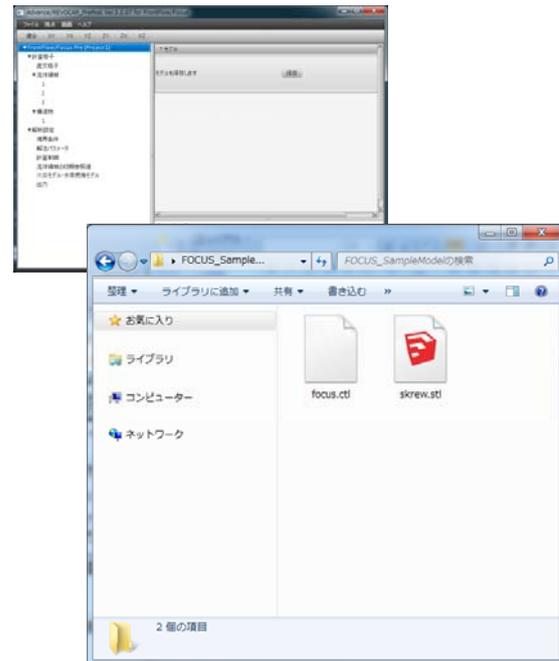
解析条件の設定

- 境界条件を計算格子の境界面それぞれについて与えます。
- 時間積分、風上スキーム、乱流モデルについての設定を行います。
- 反復回数、時間刻み、結果出力間隔など計算制御のためのパラメータを設定します。
- 温度、圧力の初期参照値を設定します。
- 火炎モデルのパラメータを設定します。



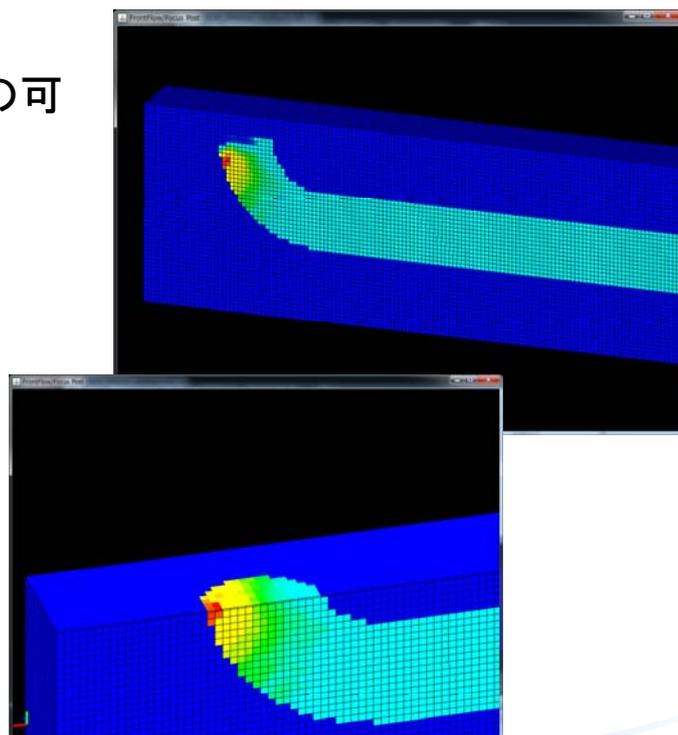
解析モデルの出力と計算の実行

- 条件の設定が完了したら、解析モデルを出力します。
- 解析モデルは計算制御ファイルと構造物の形状ファイルからなります。
- Advance/FrontFlow/FOCUSを計算する環境(並列計算サーバ等)にコピーして、計算を実行します。



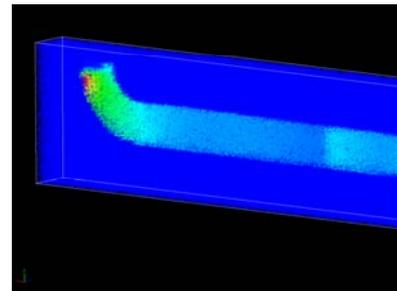
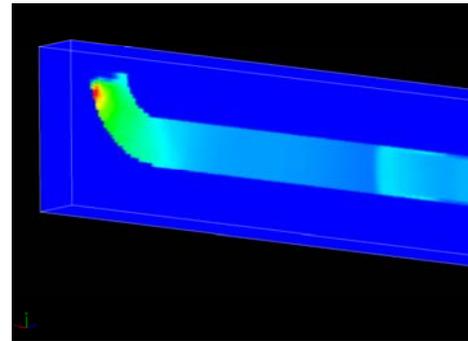
計算結果の可視化

- 一般的な流体解析結果の可視化表示が可能です。
 - コンター表示
 - 断面図
 - ベクトル図



新規可視化機能：ボリュームレンダリング

- 従来多くの可視化ソフトでなされてきた空間の物理量の分布を不透明度で表すものとは別の方法です。
- 連続体を不透明で自己発光する粒子群で表現します（PBVR）。
 - ポリゴンではなくて、点を描画します。描画点の個数は制御可能であるため、大規模なモデルの可視化手法として有効です。

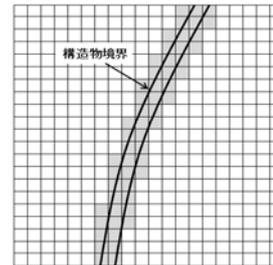


カプラ機能について



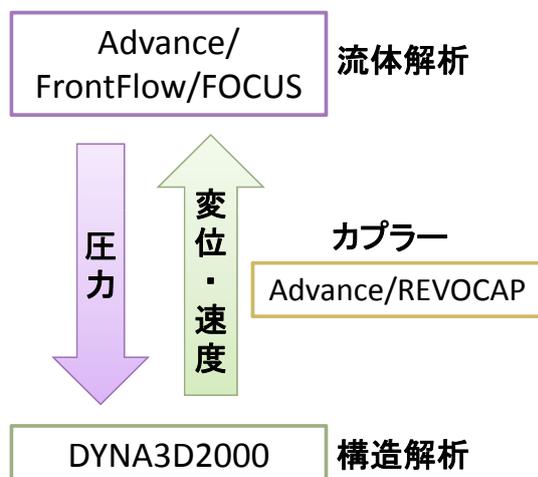
REVOCAPカプラ機能について

- REVOCAP_PrePostにおけるメッシュの形状処理、補間機能を連成解析用のライブラリとして整備したものです。
- Advance/FrontFlow/FOCUSのような構造格子的な解析ソフトウェアとAdvance/FrontSTRのような有限要素法メッシュの解析ソフトウェアの連成が可能です。
- Advance/FrontFlow/FOCUSの構造物の認識のためにも使われています。



•Advance/FrontFlow/FOCUSにはあらかじめ組み込まれているため、別途の費用は不要です。

双方向弱連成の方法

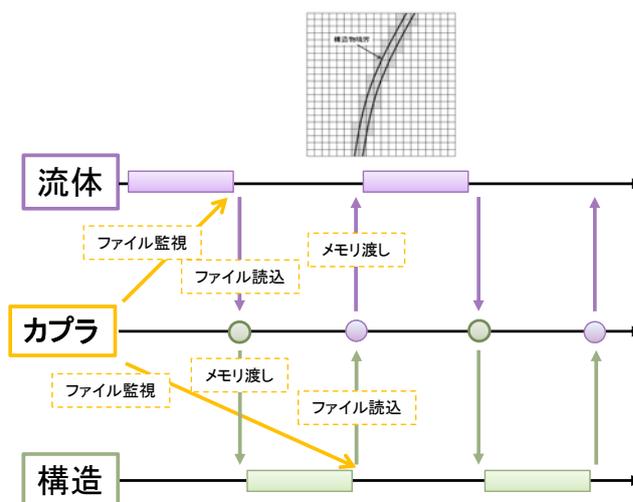


- 構造解析、流体解析がそれぞれ別の解析ソフトウェアからなる場合の双方向連成を可能にします。
- カプラが物理量をそれぞれの解析ソフトウェア間で受け渡します。
 - 流体解析⇒構造解析
 - 圧力
 - 構造解析⇒流体解析
 - 変位
 - 速度
- これらを毎ステップやり取りしながら解析を進めます。
 - 物理量のデータ読み込み、変換、補間などを行うモジュール=カプラです。

カプラモジュールの機能(1)

- 物理量のデータ変換、補間機能をライブラリとして提供します。
 - 構造解析、流体解析とも同一のモジュールを組み込みます。
- 物理量の受け渡しはファイルシステムを経由します。
 - (長所) 所定の形式のファイルを出力するものならどんな解析ソフトウェアとも連成できます。
 - (長所) ダミーのファイルを用意しておくことで、片方だけの解析テストも容易に実行できます。
 - (短所) ファイル入出力に時間を要します。⇒一般に解析時間と比較すれば微小です。
 - (短所) 物理量の受け渡しのためファイルシステムがあふれてしまう可能性があります。⇒不要になったファイルは削除する機能が装備されています。

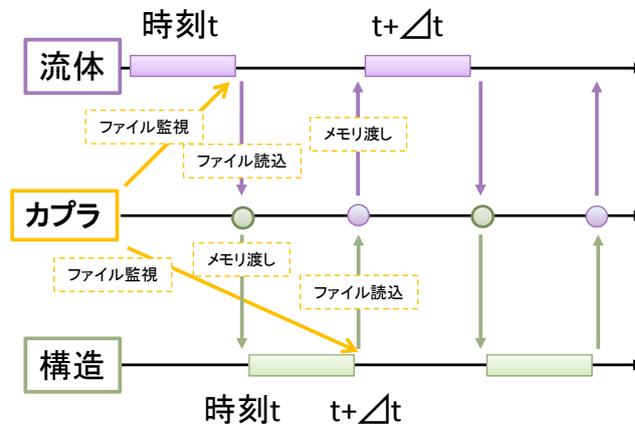
カプラモジュールの機能(2)



構造解析ソフトウェアに組み込まれたカプラモジュールが流体解析の結果を読み込んで圧力境界条件(分布荷重)をメモリ渡しします。

処理フロー

カプラモジュールの機能(3)



構造解析ソフトウェアで時刻を Δt 進める(非定常計算) \Rightarrow カプラで時刻補正なし
構造解析ソフトウェアで時刻を進めない(定常計算) \Rightarrow カプラで時刻補正あり(予測子)

まとめ

- プリポスト Advance/REVOCAP for FrontFlow/FOCUS
 - アドバンスソフトの汎用プリポストプロセッサのラインアップの一つです。
 - 構造物を考慮して流体計算領域を設定することができます。
 - 解析モデルの作成から計算結果の可視化まで行うことができます。
- カプラ
 - プリポストの形状処理部分を連成解析用にモジュール化したものです。
 - 双方向の弱連成解析を実現します。

ご清聴ありがとうございました



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。