

連成解析の技術動向セミナー

2013年3月7日(木)開催
アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

本日のプログラム

14:00～14:05

主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介

14:05～14:30

連成解析について

- ・アドバンスソフトでの連成解析の実績紹介
- ・流体-音響連成、音響-構造連成の解析手法と解析事例

14:30～15:30

爆発シミュレーションの技術動向について

- ・爆発現象について
 - － 火薬と気相爆発の現象と相違点
 - － 爆轟現象と爆燃現象
- ・爆轟シミュレーションの解析手法と解析事例
- ・爆燃シミュレーションの解析手法と解析事例

15:30～16:00

高速流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/FOCUSを用いた連成解析について

- ・構造解析ソフトウェアとの連成手法の解説
- ・事例紹介

16:00～16:15

価格および関連サービス紹介、質疑応答



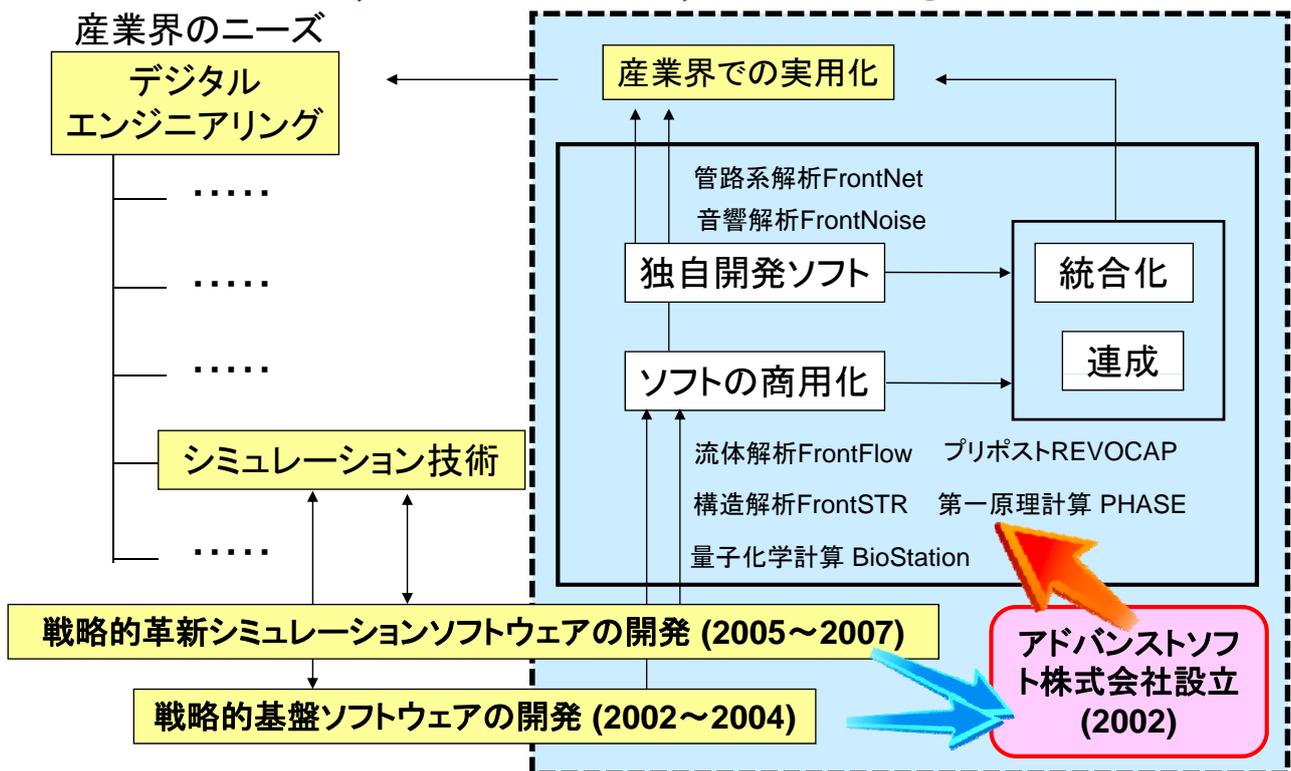
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved



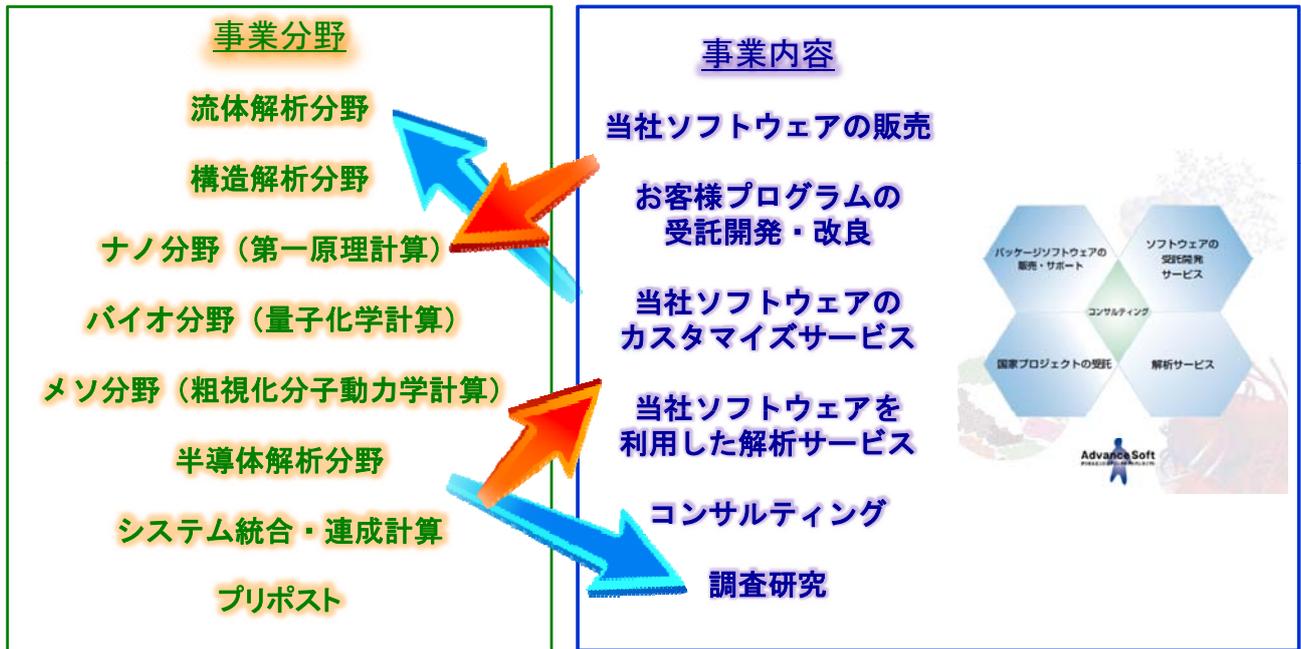
アドバンスソフト株式会社のご紹介

2013年3月7日(木)開催
連成解析の技術動向セミナー
アドバンスソフト株式会社

アドバンスソフトとは



アドバンスソフトの事業分野と事業内容



アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p> <p>Advance/TFLAGS</p>	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red</p> <p>Advance/FrontFlow/FOCUS</p> <p>Advance/FrontFlow/MP</p> <p>Advance/EVE SAYFA</p>	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p>
<p>バイオ</p> <p>Advance/BioStation</p> <p>Advance/ProteinDF</p>	<p>メソ</p> <p>Advance/OCTA</p>	<p>統合プラットフォーム</p> <p>Advance/PSE Workbench</p>
		<p>管路系</p> <p>Advance/FrontNet</p>

(注)図には主要なものを挙げている。詳細はwww.advancesoft.jp へ

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

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/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	都市安全・環境シミュレータ
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/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PSE Workbench	統合プラットフォーム
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/BioStation	大規模タンパク質の量子化学計算解析ソフトウェア
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げている。詳細はwww.advancesoft.jpへ



アドバンスソフトの連成解析用ソフトウェア

ソフトウェア	解析種類	特徴	適用
Advance/FrontFlow/red	流体解析	汎用の3次元流体解析ソフトウェア 乱流解析、燃焼解析、騒音解析、回転機械解析、自由液面解析、粒子追跡解析など幅広く対応	Advance/FrontSTRとの流体構造連成解析 Advance/FrontNoiseとの流体音響連成解析
Advance/FrontFlow/FOCUS	流体解析	超音速流等の高速流体解析、爆発解析に特化した3次元流体解析ソフトウェア	DYNA3D2000との爆発時の流体構造連成解析 Advance/FrontSTRとの流体構造連成解析
Advance/FrontSTR	構造解析	汎用の3次元構造解析ソフトウェア 部品アセンブリ機能・リファイナー機能を備えた大規模並列計算が特徴のひとつ、並列接触解析にも対応	Advance/FrontFlow/redとの流体構造連成解析 Advance/FrontNoiseとの構造音響連成解析
Advance/FrontNoise	音響解析	有限要素法による周波数領域での汎用の3次元音響解析ソフトウェア 大規模並列計算が特徴のひとつ	Advance/FrontSTRとの構造音響連成解析 Advance/FrontFlow/redとの流体音響連成解析
Advance/FrontNet/TP	流体解析	1次元気液二相流管路系過渡解析 独自の流体構造解析機能を装備	高圧容器配管破断時の流体構造連成解析
Advance/FrontNet/G	流体解析	1次元ガス管路系過渡解析 ガスの他、液体、超臨界流体も解析可能	Adventureとの管群構造体の流体構造連成による亀裂進展解析



facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

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



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



AdvanceSoft

連成解析について

2013年3月7日(木)開催
連成解析の技術動向セミナー
アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

13

目次

- 本資料(14:05～14:21)
 - 連成解析の実績概要
 - 連成解析に関するマッピングについて
 - 構造音響連成解析の紹介
 - 流体音響連成解析の紹介
- 流体関連の連成解析実績(14:21～14:28)
- その後(14:30～)
 - 引き続き流体解析連成事例を中心に



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

14

当社における連成解析の実績

- 当社では、構造解析、流体解析、音響解析のソフトウェアのソースコードをハンドリングできる技術を有しており、お客様の具体的な問題に対して連成解析の実績を積んできました。
 - 流体→構造; 流れによるプラント構造物の振動解析
 - 流体→音響; 流れにより発生した音源の音響解析
 - 構造→流体; 振動源の流体挙動への影響評価
 - 音響→構造; 音源の構造物強度への影響評価
 - 構造→音響; 構造物の振動に起因する音響解析
- 本資料では、構造および流体解析ソフトウェアの結果を音響解析ソフトウェアの音源として利用する構造音響および流体音響連成解析について説明します。

連成解析に利用する主なソフトウェア

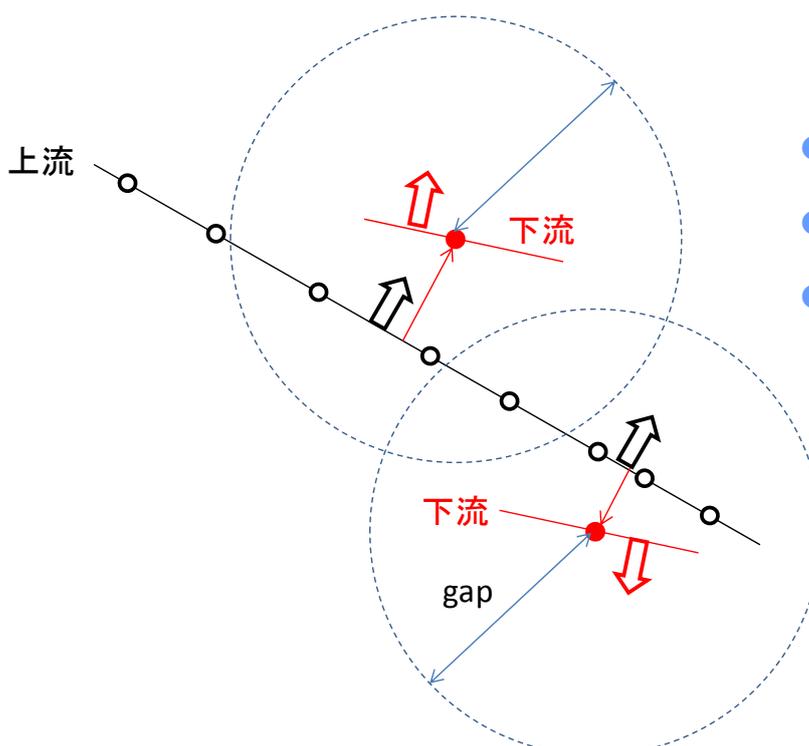
- 当社で開発・販売しているソフトウェア
 - 構造解析: Advance/FrontSTR
 - 流体解析: Advance/FrontFlow/red
 - 流体解析: Advance/FrontFlow/FOCUS
 - 音響解析: Advance/FrontNoise
 - その他、物理量のマッピングソフトを利用
- 共通する特徴
 - 大規模並列計算を得意とする
 - 1ライセンス1ジョブで並列数無制限



連成解析での物理量のやりとり

- 格子系から異なる格子系に物理量を補間して渡す(マッピングと呼んでいる)
- 面から面へのマッピング
 - 上流の面から下流の節点へのマッピング
 - ギャップの概念の利用
 - 法線方向を利用する/しないの選択可能
- 体積から体積へのマッピング
 - 上流の節点から下流の節点へのマッピング
 - 近接点探索、バケット法を利用
 - 数百万節点から数百万節点のマッピングで1時間程度で処理可能

マッピングの主なアルゴリズム



- 上流・下流
- ギャップ
- 法線方向

構造音響連成解析

- 構造解析で求めることができた構造物表面の振動を周波数領域に変換し音響解析の音源とします。
- 一般には、構造解析領域の外側を音響解析の解析領域となります。
- 構造物中の透過音を求める機能は現在開発中です。

Advance/FrontNoiseでの境界条件の取り扱い

境界条件	$\alpha(x)$	$\beta(x)$	$f(x)$	備考
時系列圧力	$i\omega\rho$	0	$-p_i(x)$	流体音響連成
時系列速度	0	1	$v_i(x)$	構造音響連成
時系列変位・加速度	0	1	$-i\omega u_i(x) \text{ , } -\frac{1}{i\omega} a_i(x)$	構造音響連成
インピーダンス	$i\omega\rho$	$-Z$	0	壁面の境界
完全反射	0	1	0	デフォルト
完全吸収	$i\omega\rho$	ρc	0	pc境界

$$\alpha(x)\varphi(x) + \beta(x)\frac{\partial\varphi(x)}{\partial n} = f(x)$$

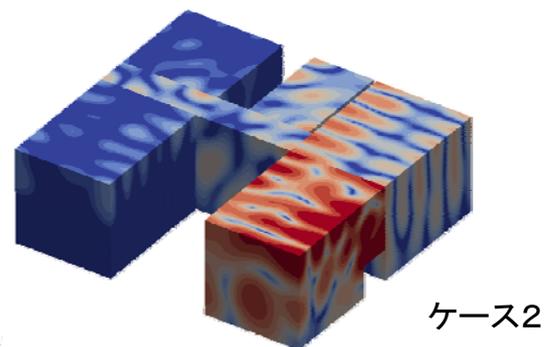
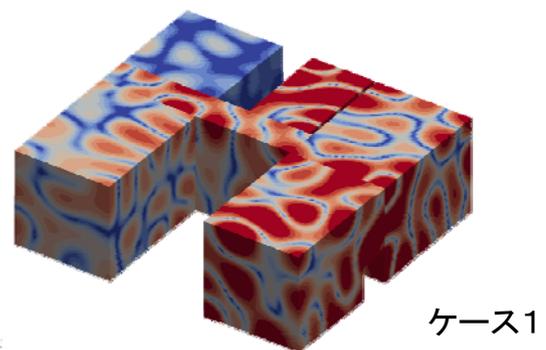
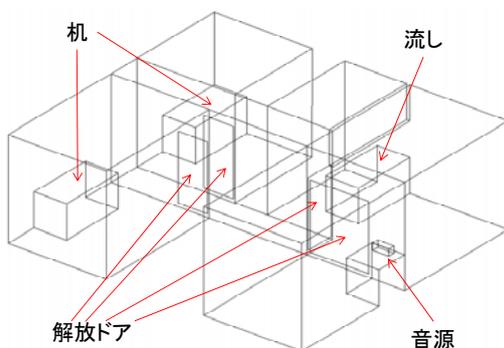
構造解析結果の音響解析への利用(含予定)

- i. 構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRの時系列ファイルを音源となる可能性のある場所から出力する。
- ii. 解析結果をフーリエ変換する。
- iii. 構造メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。
- iv. 係数を乗じて、境界条件を作成する。
- v. 音響解析を実施する。

上記項目のうち、iii)～v)はすでにリリース済である。ただし、i)とii)については未リリース。

構造解析結果を音源とした音響解析例

● 室内の音圧レベルの解析



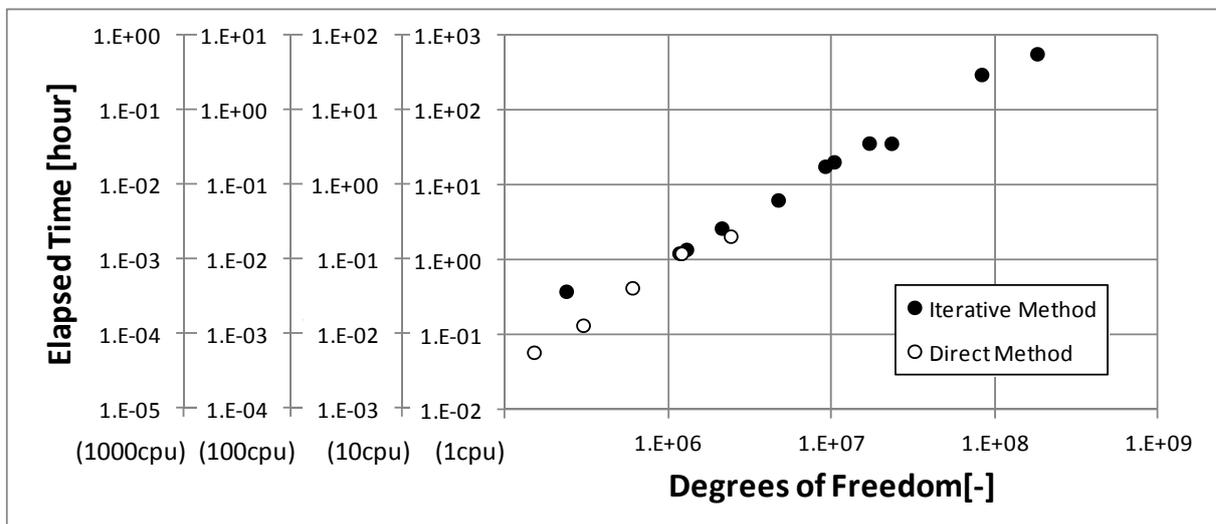
ケース名	音源	床	壁
ケース1	構造解析	完全反射	完全反射
ケース2	構造解析	完全吸収	完全反射

Advance/FrontSTRの特長

- 大規模並列計算が可能で、高い並列効率
→例えば、静解析1ステップの2億自由度を1000コアで30分
- 多くのCPU(コア)を利用しても、追加料金がかからないシンプルな価格体系
- 低価格で、必要な機能を提供
→例えば、接触解析、アセンブリ構造、リファイナーを装備
- 開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスを提供

Advance/FrontSTRによる高速な処理

- 1ライセンスで並列数無制限実行可能
- 高いスケーラビリティ



Advance/FrontNoiseの特長

- Advance/FrontNoise では、音源の位置と大きさ等を入力として、解析領域内の音圧レベルを求めます。数値解法には有限要素法を利用しています。要素は形状適合性の高い四面体要素を使用しています。
- Advance/FrontNoise の特長は、①大規模解析が可能、②低コストのソフトウェア、③メンテナンス体制です。大規模解析では、4億要素、7000万節点の解析実績があります。
- Advance/FrontNoiseでは、騒音・音響解析の最小限度必要なコア部分のみを安価で提供いたします。複数CPUでの稼働も同一料金です。さらに、自社開発ソフトのため十分なサポート体制がとれます。また、特定のニーズにカスタマイズが可能(別途料金)です。

Advance/FrontNoiseで可能な音響解析

- 音の伝播する領域、解析対象とする周波数を定めます。
- その領域を有限要素のメッシュを作成します。境界条件として、解析領域内の音源の周波数と強さを与えます。また、壁等には境界条件を与えます。
- 指定された周波数に対して、解析領域内すべての点における音響ポテンシャル(音圧、粒子速度)を求めることができます。
- 解析の後処理として、空間の音圧レベルや対象機器の透過損失等を求めることができます。
- 対象とする周波数の数だけ解析を行います。
- 一般的に音源が不明な場合には音響解析はできません。

流体音響連成解析

- 流体解析の結果から得られた二重極および四重極を音源として、音響解析を実施します。
- 一般に流体解析領域を含む大きな領域を音響解析の解析領域とします。
- 流体解析の時系列計算結果を利用するため、その中間結果ファイルが膨大な量となります。

Advance/FrontNoiseでの音源の取り扱い

音源	単独の音源	分布する音源
点音源	基礎方程式の右辺のソース項として与える。	同左
	音源条件として*.bcnファイル、*.bcqファイルとして与える。 【Ver.4.0以降】	同左
二重極音源	1点を指定することで、二重極音源の計算条件を設定する。	壁の境界条件として、取り扱う。圧力または粒子速度の境界条件として入力する。
	入力ファイルを変換するツールpsgenを提供する。 【Ver.4.0以降】	境界条件として*.bcsファイル、*.bcvファイルを与える。 【Ver.1.0以降】
四重極音源	1点を指定することで、四重極音源を計算条件を設定する。	空間に分布する音源として取り扱う。Lighthillテンソルの2階微分の音源を点音源として設定する。
	入力ファイルを変換するツールpsgenを提供する。 【Ver.4.0以降】	流速からLighthillテンソルの2階微分に変換し、*.bcnファイルと*.bcqファイルを作成するツールを提供。 【Ver.4.2以降】

流体解析結果の音響解析への利用(四重極)

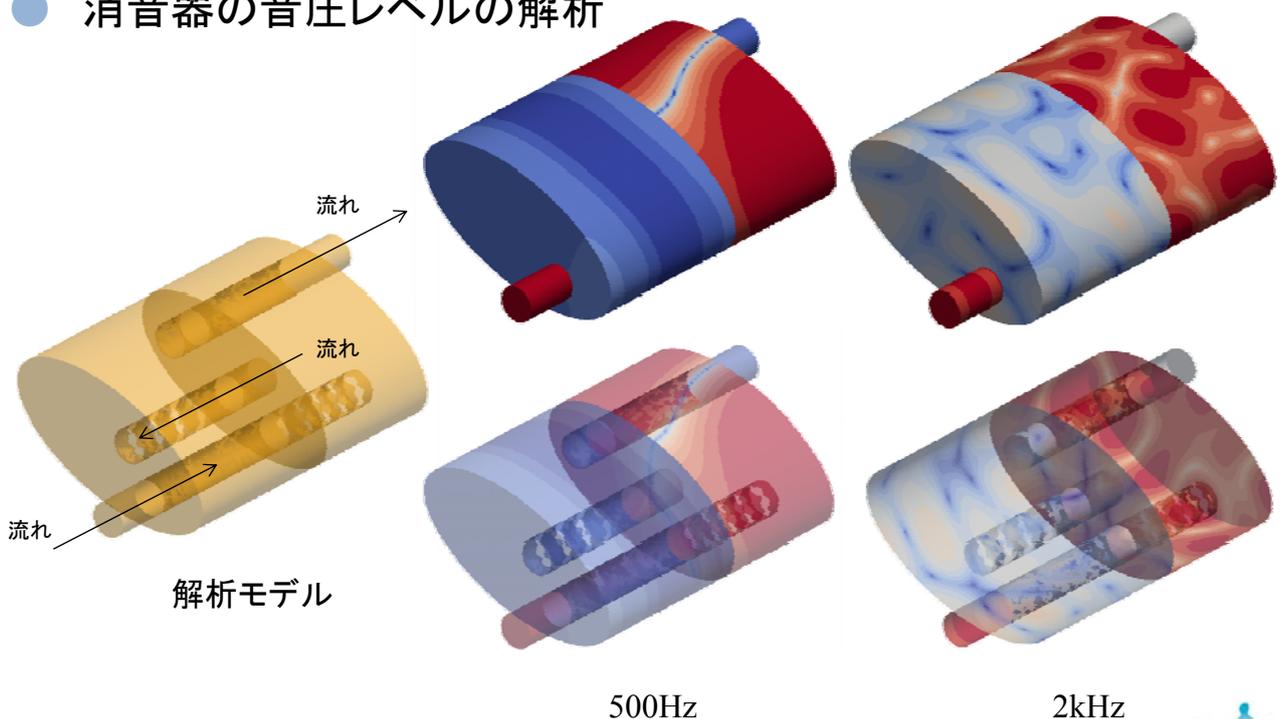
- i. 流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redの時系列ファイルを音源となる可能性のある場所では出力する。
- ii. 速度からLighthillの乱流応力テンソルを求める。 $T_{ij} = \rho v_i v_j$
- iii. 乱流応力テンソルの2階微分を求める。 $\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$
- iv. 乱流応力テンソルの2階微分をフーリエ変換する。
- v. 流体メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。
- vi. 係数に乗じて、基礎方程式の右辺に加える。

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

- vii. 音響解析を実施する。

流体解析結果を音源とした音響解析例

- 消音器の音圧レベルの解析



音響解析に関する連成解析のまとめ

- ハードウェアの性能向上により、構造および流体解析を利用した音源の解析が実用的になるにしたがい、そのポスト処理としての音響解析のニーズが増えてきた。
- 当社の音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoiseでは従来から取り組んできた音響の大規模解析の適用により、流体音響連成が可能となった。
- 構造および流体音響連成の実績を重ね、その解析手順を音響解析ソフトウェアのツールとして整備した。
- 今後とも、多様な解析ソフトウェアのソースコードをハンドリングできる当社の利点を生かして、ユーザ様からのニーズに応えた連成解析を実施していく予定である。

- 構造解析 : Advance/FrontSTR
- 流体解析 : Advance/FrontFlow/red
- 流体解析 : Advance/FrontFlow/FOCUS
- 音響解析 : Advance/FrontNoise

- プリポスト : Advance/REVOCAP

連成解析事例

手法	適用分野	連成した解析	概要
一方向	原子力分野	流体解析→構造解析	流れによる配管の振動
	原子力分野	流体解析→構造解析	流れによる構造物の振動解析
	原子力分野	音響解析→構造解析	音響の構造物強度への影響評価
	原子力分野	構造解析→構造解析→流体解析	地震時の建物強度評価
	機械メーカー	流体解析→構造解析→音響解析	火力発電所ポンプの流れによる環境騒音
	機械メーカー	流体解析→構造解析	遠心圧縮器の流体力による応力解析
	機械メーカー	熱伝動解析→構造解析	ヒートシンクの応力解析
	鉄道分野	構造解析→音響解析	車輪の振動に起因する騒音解析
	鉄道分野	構造解析→き裂進展解析	繰り返し走行荷重によるレールの破壊解析
	自動車空力	流体解析→音響解析	流れによる騒音発生の解析
	自動車部品の振動	流体解析→構造解析	流れによる構造物の振動解析

連成解析事例

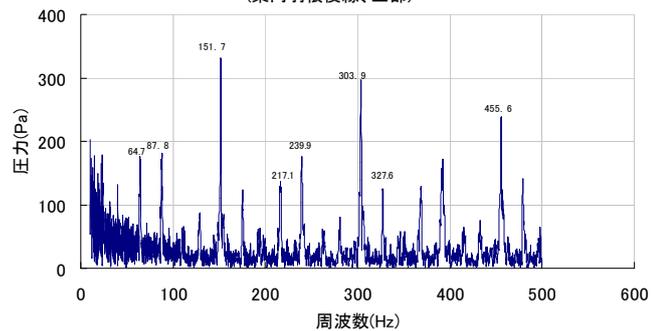
手法	適用分野	連成した解析	概要
一方向	電気メーカー	構造解析→半導体デバイス解析	熱応力の解析結果を半導体デバイス解析に適用
	電気メーカー	構造解析→半導体デバイス解析	熱応力の解析結果を半導体デバイス解析に適用
	精密機器メーカー	構造解析→流体解析	起振源の流体挙動への影響評価
	化学メーカー	分子動力学→構造解析	ミクロな相分離構造結果を利用した応力解析
双方向	機械(機器の設計)	流体解析⇔構造解析	超音速圧縮性流体と大変形構造解析
	機械(部品の設計)	流体解析⇔構造解析	表面を持つ流れと大変形構造解析
	精密機器メーカー	流体解析⇔構造解析	商用ソフトウェア同士の連成制御手法開発

弱連成;一方向 構造解析⇔流体解析

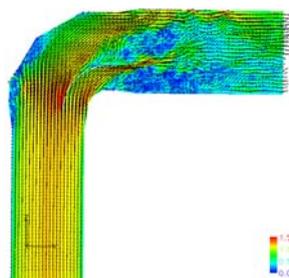
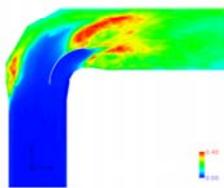
Advance/FrontFlow/redと Advance/FrontSTRを用いた解析

案内翼付き曲り配管の流体構造連成解析

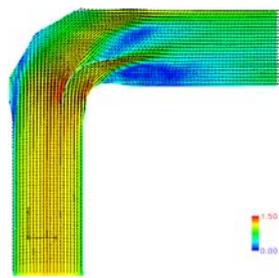
LES非定常流れ圧力変動の周波数分析
(案内羽根後縁、上部)



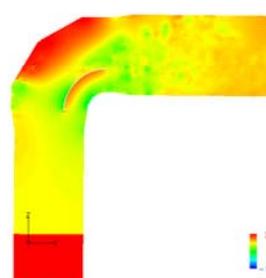
速度変動強度分布
 $(v_{rms}^2 + w_{rms}^2)^{1/2} / W_0$



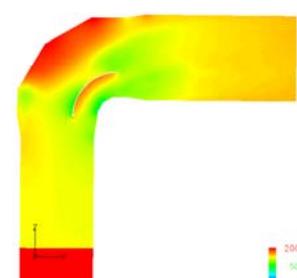
瞬時速度



平均速度



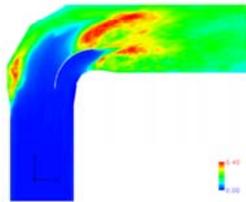
瞬時圧力



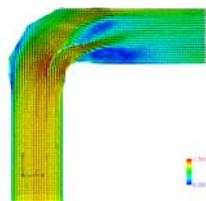
平均圧力

ご協力 : 株式会社電業社機械製作所 技術研究所

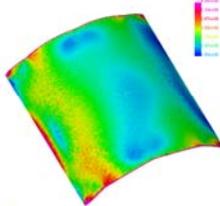
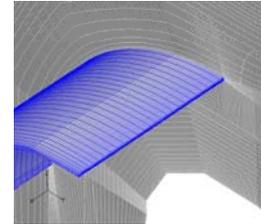
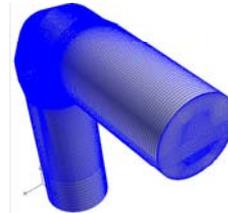
案内羽根付き曲がり管における流体-構造連成解析 (案内板溶接部応力解析)



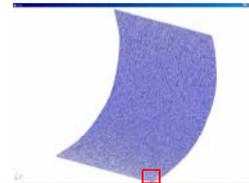
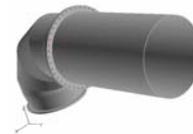
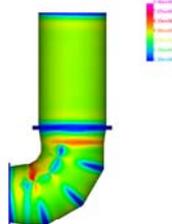
速度変動強度分布
 $(v_{rms}^2 + w_{rms}^2)^{1/2} / W_0$



平均速度

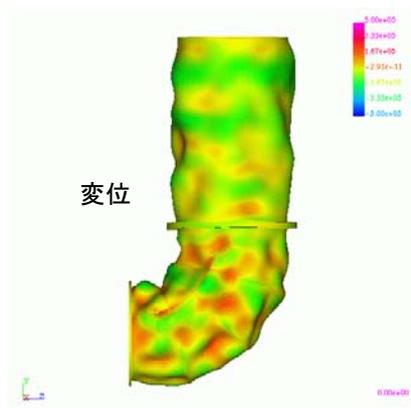


連成解析結果— 平均応力の分布



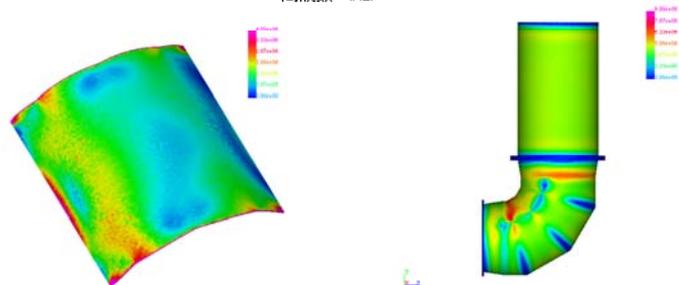
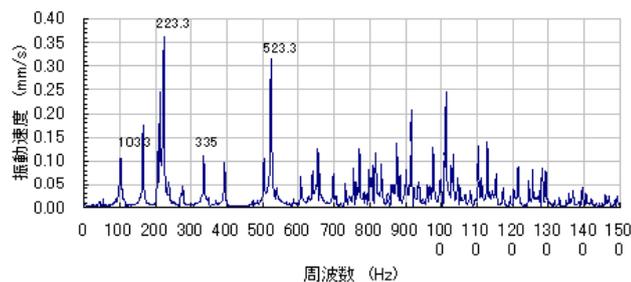
ご協力：株式会社電業社機械製作所 技術研究所

案内翼付き曲り配管の流体構造連成解析



変位

連成解析周波数分布 (粘性係数50、観測点2)



連成解析結果 平均応力の分布

解析時間設定:

- 流体解析側で圧力の出力
- 時間刻みは 5.0×10^{-7} [s]
- 1.0秒間の時系列を出力

構造解析ステップ数:

200万ステップ

統計量: 100万ステップが対象

計算時間: 約11時間

(SR11000・32CPU)

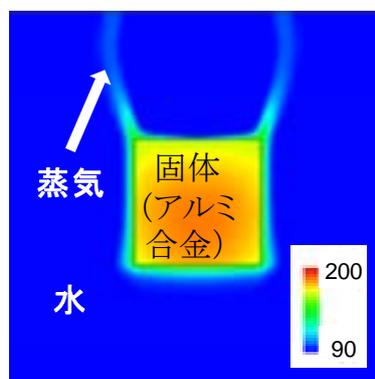
ご協力：株式会社電業社機械製作所 技術研究所

強連成; 双方向 構造解析(熱伝導解析) ⇔ 流体解析

Advance/FrontFlow/MPを用いた解析

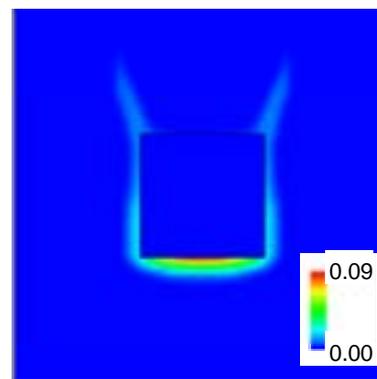
沸騰凝縮を伴う固体と流体の伝熱連成解析

固体と流体の
伝熱計算



固体と流体の温度分布(°C)

蒸気発生量と
熱移動の計算



気相体積の割合 (ボイド率)

弱連成; 一方向 流体解析 ⇔ 音場解析

(LES解析) (Lighthill-CurleまたはFWH)

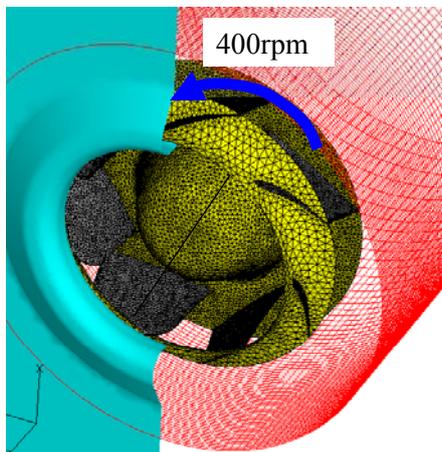
Advance/FrontFlow/redを用いた解析

ファンの騒音解析

[目的]

非定常な流体力、圧力変動、翼列干渉音、キャビティ音を評価する。

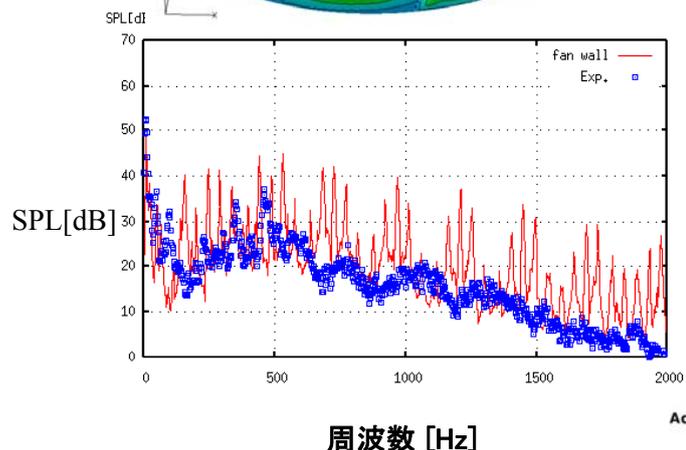
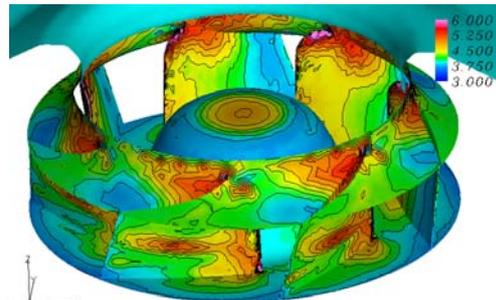
[解析対象]



Centrifugal Fan diameter :230mm

[解析結果]

変動圧力分布: P_{rms}





爆発シミュレーションの 技術動向について

2013年3月7日(木)開催
連成解析の技術動向セミナー
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved



45

Contents

1. 爆発現象について
 - 火薬と気相爆発の現象と相違点
 - 爆轟現象と爆燃現象
2. 爆轟シミュレーションの
解析手法と解析事例
3. 爆燃シミュレーションの
解析手法と解析事例

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved



46

爆発現象について

-火薬と気相爆発の現象と相違点

火薬による爆発

火薬とは・・・

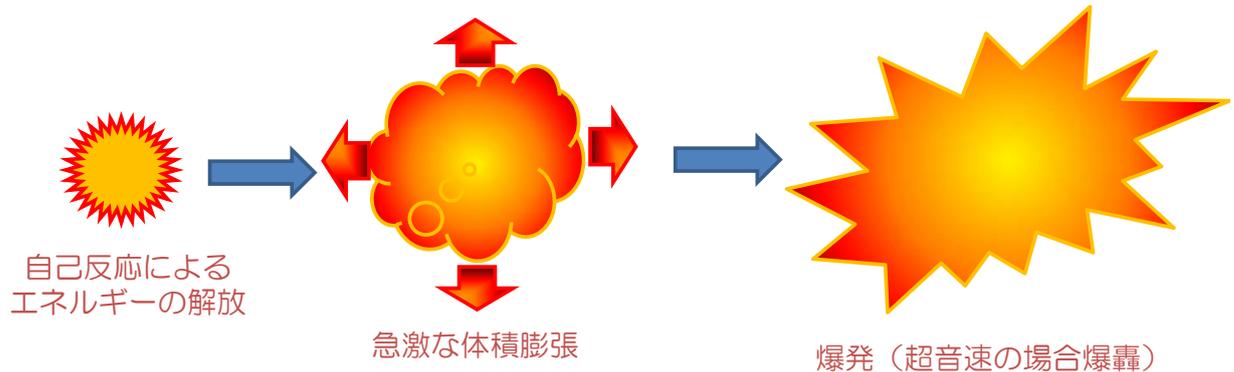
□火薬類取締法の分類

- 火薬：推進的爆発の用途に使用され、爆燃を生じ、音速以下の速度で伝播する急速燃焼をする。黒色火薬、無煙火薬、コンポジット推進薬、コンクリート破碎薬などがあり、銃砲の推進薬やロケット推進薬として使用される。
- 爆薬：発破など、破壊的用途に使用するもので爆轟（detonation）を生じ、超音速で爆薬内を衝撃波が伝播し、破壊力は極めて大きい。
- 火工品：火薬または爆薬を利用して、爆発反応の生起、伝達等の目的に適合するものをいい、工業雷管、電気雷管、砲爆弾、導火線、伝爆線、コンクリート破碎器、煙火等がある。

火薬による爆発

特徴

- 熱や衝撃などにより急激な燃焼反応をおこす
- 空気中の酸素を必要としない(酸化剤が含まれている)
- 自己反応性物質は外部の酸素を必要としないため、二酸化炭素消火器のような酸素遮断による消火が不可能



火薬による爆発

□火薬

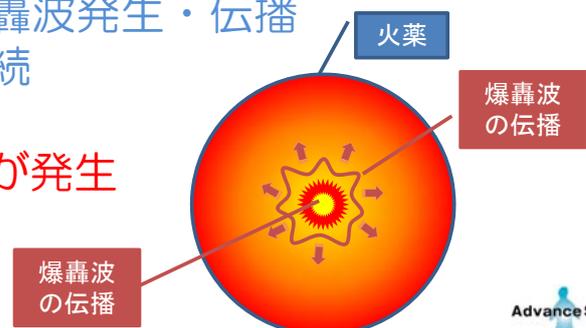
- 加熱より火薬がガス化
- ガスが燃焼
- 燃焼熱により内部を加熱し、ガス化を促進する

➤ 燃焼速度は音速を超えず、衝撃波は発生しない

□爆薬

- 加熱や衝撃により反応→爆轟波発生・伝播
- 爆轟による火薬の反応が継続

➤ 衝撃波をともなう爆発が発生



気相爆発

気相爆発とは

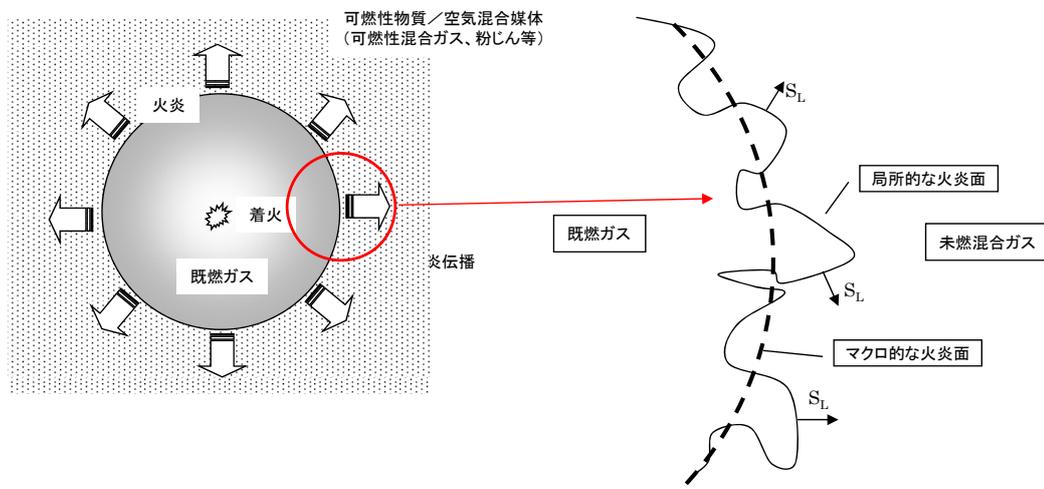
□ 気相（燃焼の直前の形態が気体）における燃焼現象

- ガス爆発
- 噴霧爆発
 - ガソリンなどの可燃性液体の噴霧されたものによる燃焼爆発
- 粉塵爆発
 - 炭の粉、小麦粉、鉄粉などの浮遊粉塵の燃焼爆発

□ 燃焼の起こるときの周囲の条件や粉じんの性質などにより、火炎が伝播するだけで燃焼が終わるか、圧力上昇を伴う爆発を起こすかが異なる

予混合燃焼

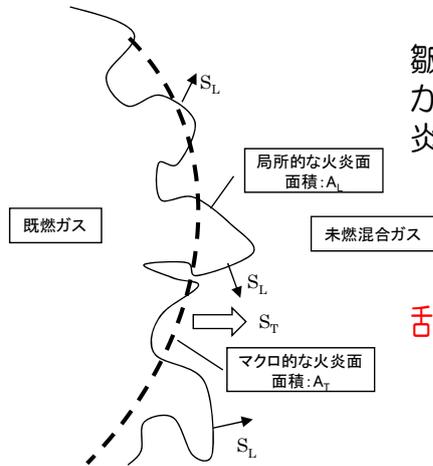
可燃性ガスの爆発現象ー➔予混合燃焼



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

乱流燃焼

空気と可燃性ガスの混合状態（予混合気体）中での火炎は初期において層流燃焼速度で進行するが、**いくつかの乱れの要因**から火炎面形状に凹凸が発生する



皺状層流火炎モデルによると層流火炎面群（面積 A_L ）が層流燃焼速度 S_L で伝播するが、マクロ的には乱流火炎伝播面（面積 A_T ）が乱流燃焼速度 S_T で伝播する

$$A_L \cdot S_L = A_T \cdot S_T$$

乱流燃焼速度 S_T は皺の増加とともに加速する

※富塚、数値シミュレーションによる可燃性ガスの爆発危険性解析、博士論文、東京大学

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

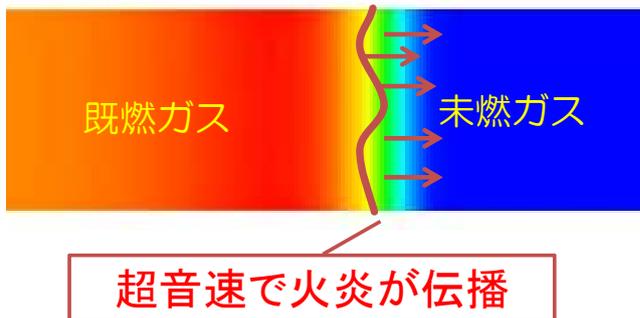
爆発現象について

—爆轟現象と爆燃現象

爆轟 — Detonation —

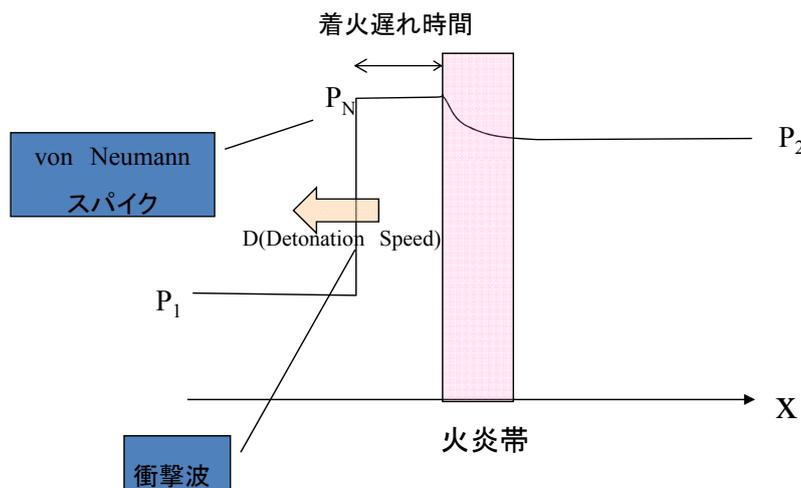
爆轟とは

- 高速で起こる燃焼からエネルギーを供給されつつ、
超高速で伝播する衝撃波
- 爆轟は、細長い管のような空間では起こりやすく、
球や立方体などの形状の空間では起こりにくい
- 爆風圧による破壊力が大きい



水素爆轟による配管破断
JAERI-Tech 2001-094(2001年12月)、P.14

爆轟 — Detonation —

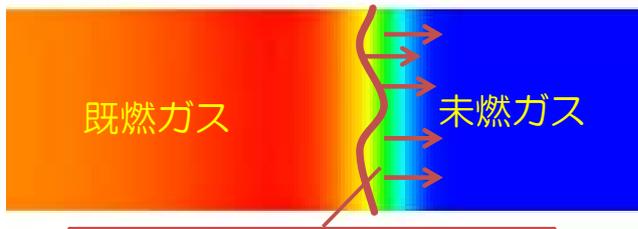


デトネーション波は衝撃波が先行し、これにより高温、高圧状態を火炎帯の初期条件を形成する (von Neumann スパイク)
Reyleig線、Hugoniot曲線、等エントロピー線 ($P/\rho r = \text{一定}$) の3線が接する点は C-J (Chapman-Jouguet) 点と呼ばれ最も安定した定常Detonationが実現→C-J速度

爆燃 — Deflagration —

爆燃とは

- 燃烧速度が音速よりも遅い爆発現象
- 空気と可燃性ガスが混合している中を音速未満の速度で燃烧が広がっていく
- 例：球状や広い空間でのメタン、プロパンやガソリン蒸気による爆発



火炎の伝播速度が音速を超えない



DME 爆発実験
※AIST Today 2004.1 Vol.4 No.1

爆轟シミュレーション

—解析手法と解析事例

一次元計算 (ZND理論)

ZND理論による数値計算

$$\frac{d(\rho u)}{dz} = 0$$

— 質量保存則

$$\frac{d}{dz}(p + \rho u^2) = \frac{4\sigma}{d} \equiv f$$

— 運動量保存則

$$\rho u \frac{d}{dz} \left(h + \frac{u^2}{2} \right) = \frac{4\sigma}{d} D - \frac{4\theta}{d} \equiv g$$

— エネルギー保存則

$$\sigma = \xi \rho (D - u)^2 / 2,$$

$$\theta = \frac{1}{2} \xi \rho (D - u) \left[c_p (T - T_0) + \frac{(D - u)^2}{2} \right]$$

熱及び摩擦損失

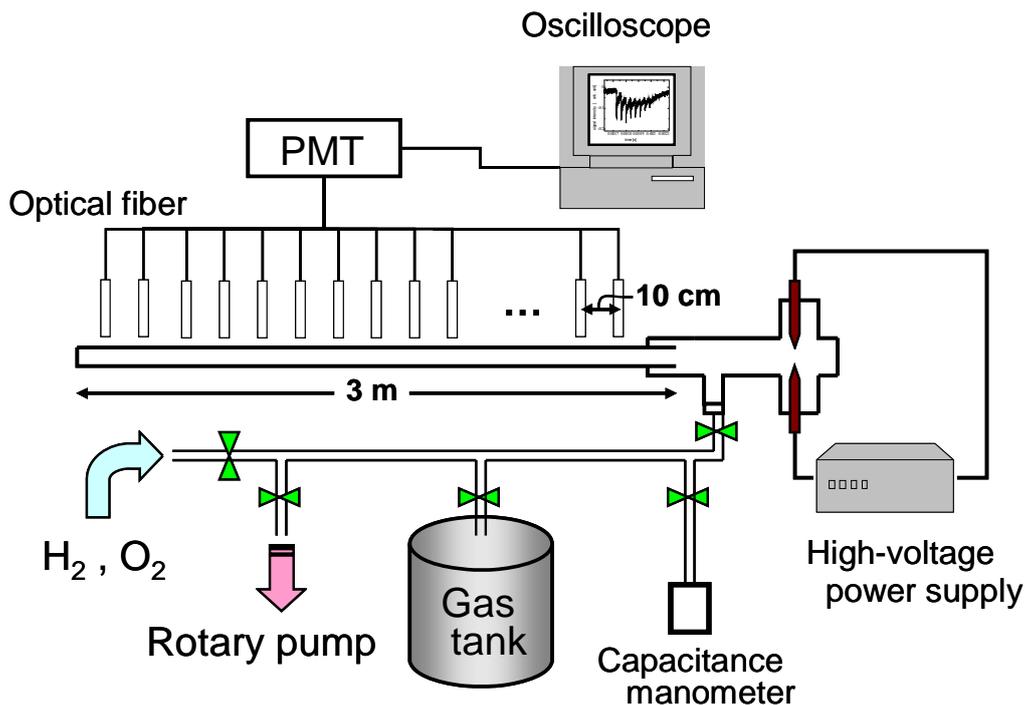
$$\xi = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$$

D:爆轟速度 u:流速 ρ:密度 d:反応管の直径
 σ:反応器壁との外部摩擦と粘性による内部摩擦による損失項
 θ:熱伝導による損失項 ξ: Blasius の摩擦係数

※G.L. Agafonov, S. M. Frolov, 1994, 30(1), 91-100

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

円管内爆轟波伝播実験



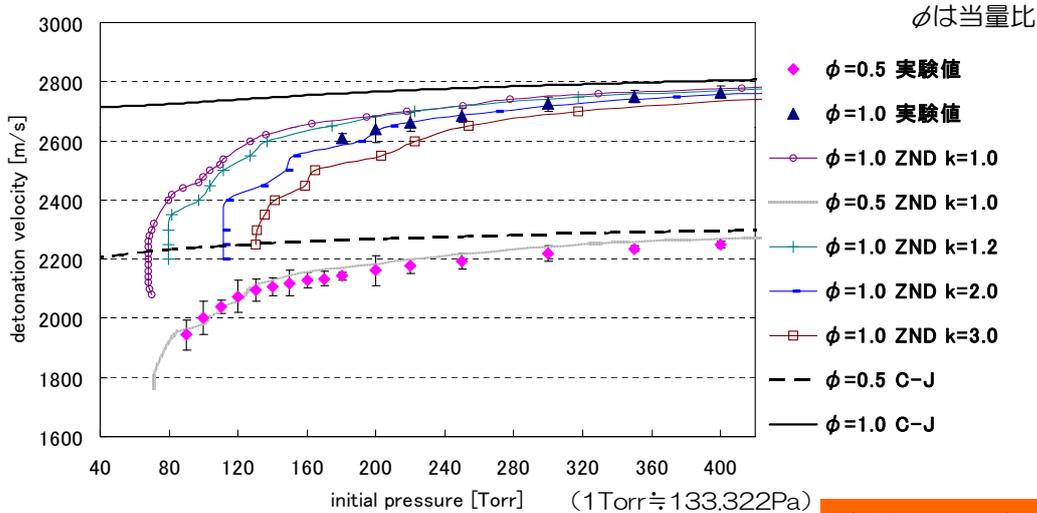
※深尾将士他, H2/O2燃料のデトネーションの伝播限界の測定, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, 2006

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

一次元爆轟シミュレーション

～ガラス管内爆轟実験とシミュレーションの比較～

ξ を定数倍し($\xi' = k\xi$),摩擦係数を補正することで損失項を再評価.



C-J速度理論計算値が実験値より大きく見積もられる

管壁による損失
(摩擦・熱)の影響

※深尾将士他, H2/O2燃料のデトネーションの伝播限界の測定, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, 2006年

2次元基礎方程式

圧縮性Euler方程式 (連続の式, 運動量の保存式, エネルギー保存式に加えて各化学種の保存式を考慮したもの)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial F_d}{\partial x} + \frac{\partial G_d}{\partial y} + S$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \\ \rho_i \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \\ \rho_i u \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho_i v \end{pmatrix}$$

$$F_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q_x \\ \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \end{pmatrix} \quad G_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q_y \\ \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_i \end{pmatrix}$$

※清水博志, 坪井伸幸, 林光一, 水素/空気デトネーションにおける詳細化学反応が与える影響, 第14回数値流体シンポジウム 2000

計算スキーム

EULER方程式には以下のような計算スキームが用いられる

時間スキーム

- 一般的には陽解法が用いられる。陽解法としては、時間分割法もしくはルンゲクッタ法などがある。
- 陰解法の場合は、離散誤差による位相のずれを内部反復により補う方法もあるが、数値粘性の影響が大きくセル構造が出にくい。

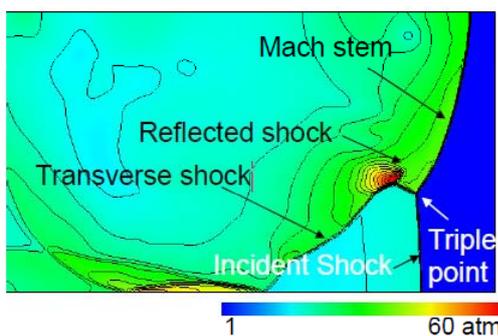
空間スキーム

- 物理量が空間的に急激に変化するので、Harten-YeeのTVD法に代表されるような対流項スキームが良く用いられる。

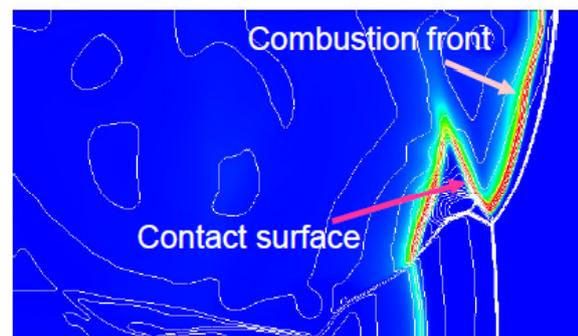
※富塚、毛利、吉田、越、気相デトネーション限界の数値シミュレーション、水素の燃焼と爆発のワークショップ、東京大学
2007.6.30

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

2次元爆轟シミュレーション



(a) 圧力分布



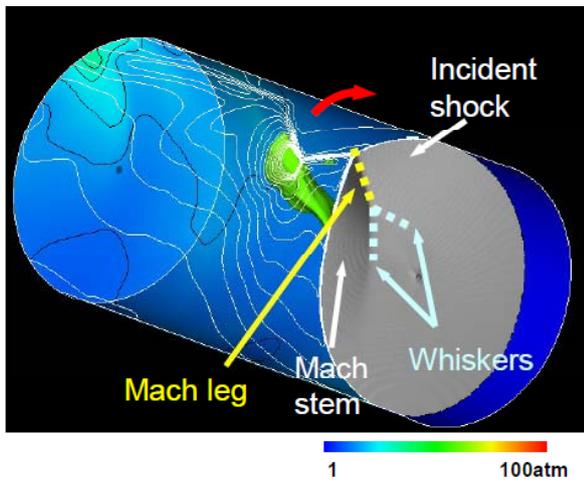
(b) heat release(color) と密度分布 (white) を重ねて書いた分布

対流項スキーム：Harten-Yee, non-MUSCL modified flux type TVD scheme
時間スキーム：Semi-implicit technique

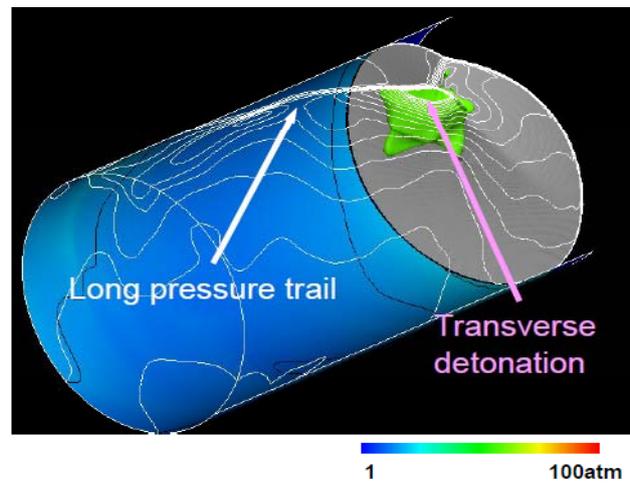
※坪井伸幸、林光一、3次元爆轟現象の数値解析、ながれ26(2007)183-192

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

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 ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

爆燃シミュレーション

-解析手法と解析事例

予混合燃焼シミュレーション

- 質量保存式

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot \rho\mathbf{v} = 0$$

- 運動量保存式

$$\partial\rho\mathbf{v}/\partial t + \nabla \cdot \rho\mathbf{v}\mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma + \rho\mathbf{g}$$

- エネルギー保存式

$$\partial\rho E/\partial t + \nabla \cdot (\rho E + p)\mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{q} + m_0 E_f \dot{\rho}_B$$

- 状態方程式

$$p = \rho RT$$

- 乱流モデルに標準k-ε2方程式モデルを採用

予混合燃焼シミュレーション

- 未燃ガス質量保存式

$$\partial\rho m/\partial t + \nabla \cdot \rho m\mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{F} - m_0 \dot{\rho}_B$$

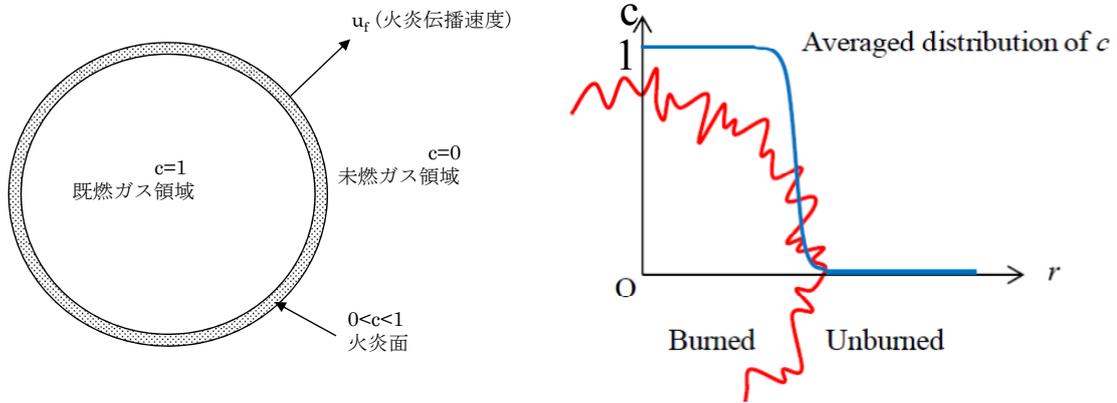
- 既燃ガス質量保存式

$$\partial\rho c/\partial t + \nabla \cdot \rho c\mathbf{v} = \dot{\rho}_B$$

不均一濃度
を考慮

乱流燃焼モデルー反応進行度モデル

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

※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

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度

反応進行度の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla(\rho v c) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{Sc} \nabla c \right) + \rho S$$

$$\rho S = \rho_u S_T \nabla c$$



- ∇ : 流速
- μ_t : 渦粘性係数
- Sc : 乱流シュミット数
- S : 反応進行度による生成項
- ρ_u : 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

※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

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度モデル 例-1

乱流燃焼速度式

$$S_T = S_l \left\{ 1 + k_1 (u'/S_l)^n \right\}$$

k_1, n : モデル定数
 u' : 乱流強度

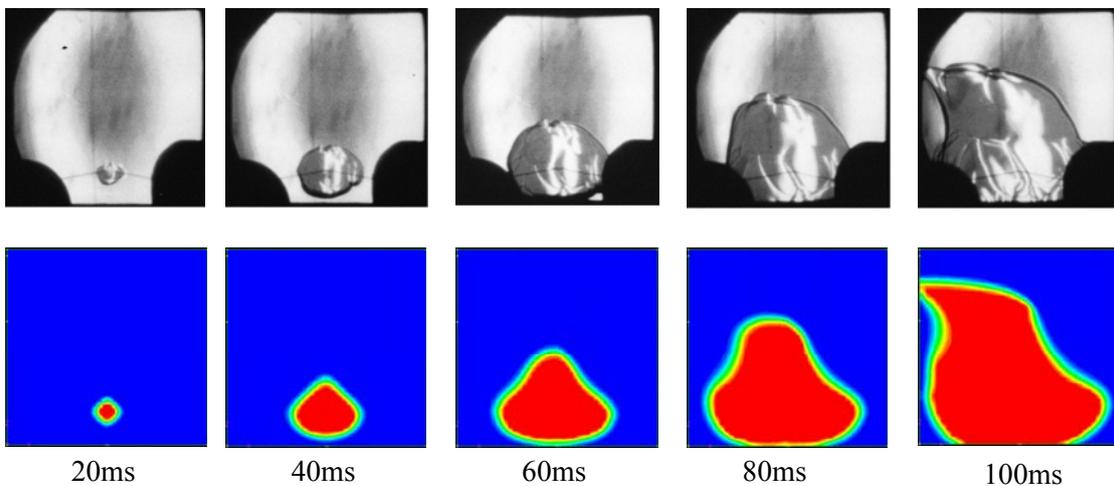
乱流燃焼速度 S_T は
 乱流強度を用いることで
 乱流の生成のみ考慮

乱流強度 u' は乱流エネルギー k を用いて

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

※U.Bielert, M.Klug, and G.Adomeit: "Application of Front Tracking Techniques to the Turbulent Combustion Processes in a Single Stroke Device", COMBUSTION AND FLAME 106,pp.11-28 (1996).

小規模爆発実験比較解析結果

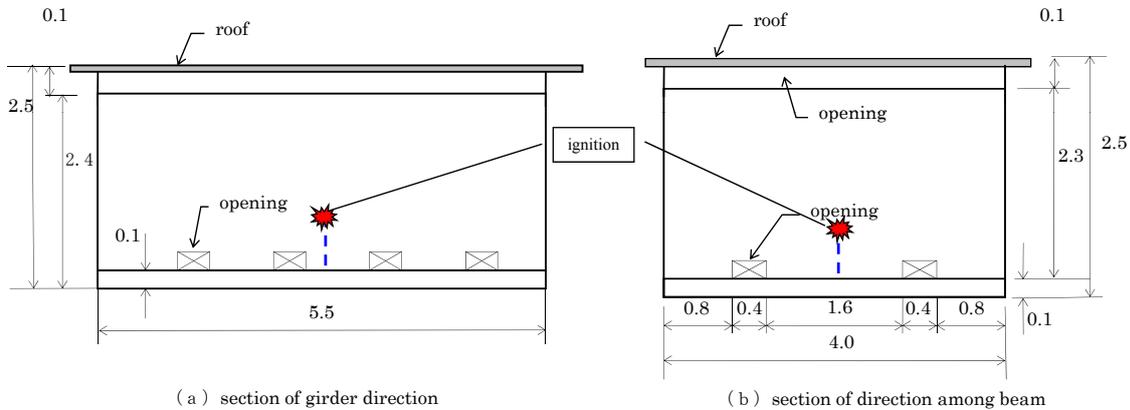


実験結果と計算結果の比較
 (上段: 実験結果[シュリーレン写真]、下段: 計算結果[反応進行度])

※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)

大規模爆発実験比較解析結果

LPG容器置き場爆発実験



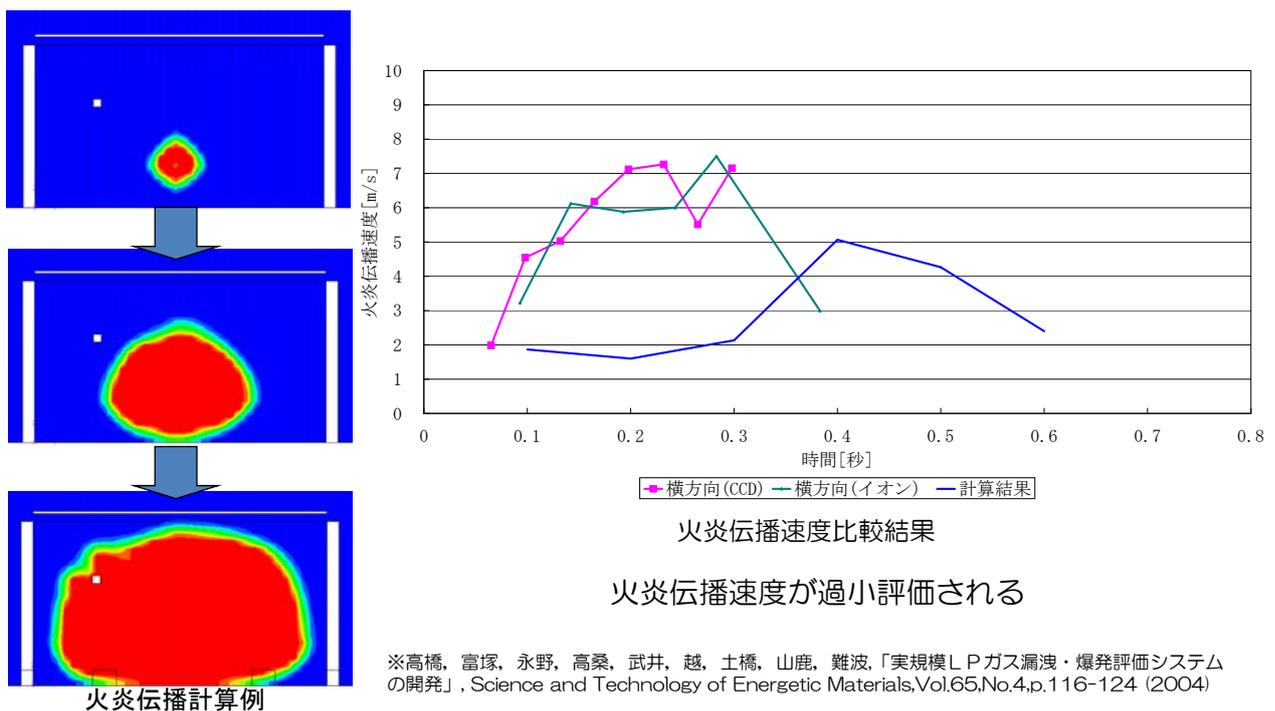
LPG容器置き場内爆発実験

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 ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

大規模爆発実験比較解析結果



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度モデル 例-2

爆発実験データとフラクタル理論から乱流燃焼速度式を構築
(自発的な火炎の乱れを考慮)

$$R = R_1 + At^{3/2} \quad \text{火炎半径}$$



漸近解析により導出

$$R = R^* + c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2 (t - t^*)^{3/2}}{\sqrt{\kappa}}$$



火炎伝播速度式の導出

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

ε: 膨張率
κ: 熱拡散率
c_g: モデル定数
ρ_u, ρ_b: 未燃・既燃ガスの密度
S_L: 層流燃焼速度

※ Yu. A. Gostintsev, et. al., 'Self-Similar Propagation of a Free Turbulent Flame in Mixed Gas Mixtures', Combust. Explosions and Shock Waves, 24, 563(1988)

乱流燃焼速度モデル 例-2

乱流燃焼速度S_Tと火炎伝ば速度 dR/dt

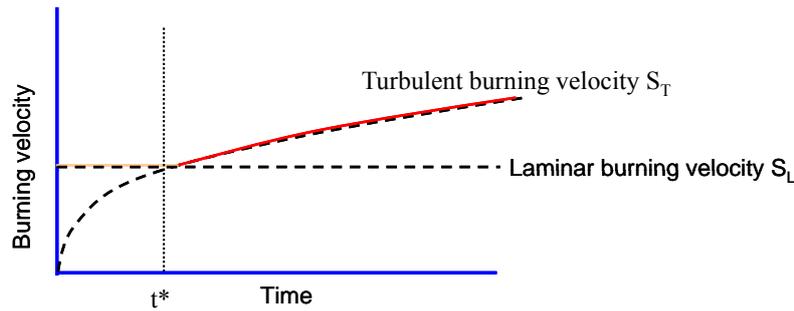
$$\frac{\partial R}{\partial t} = \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) S_T$$



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

※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>.

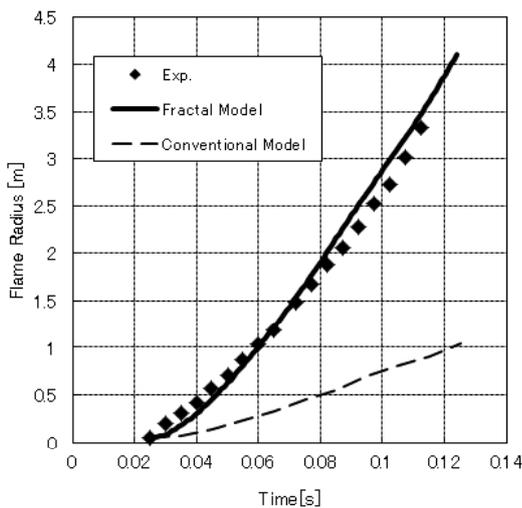
乱流燃焼速度モデル 例-2



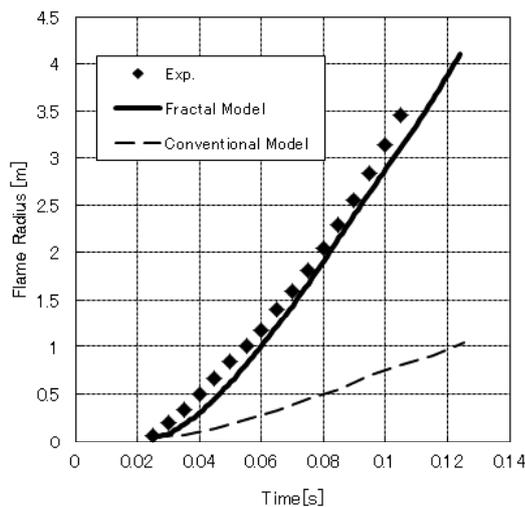
$$\rho S = \rho_u U_T \nabla c \begin{cases} U_T = S_L & : t < t^* \\ U_T = \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2}{\sqrt{K}} t^{1/2} & : t \geq t^* \end{cases}$$

※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>.

水素-空気大規模爆発解析～比較解析結果



初期水素濃度：30.7[vol%]



初期水素濃度：41.0[vol%]

火炎半径経時変化

※Tomizuka T, et al, A study of numerical hazard prediction method of gas explosion, International Journal of Hydrogen Energy (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.029>

高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUSを用いた 連成解析について

2013年3月7日(木)開催
連成解析の技術動向セミナー
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- 基本機能についての概要
 - 基本機能を用いた解析例
 - 高速流れ(圧縮性流れ)の解析例
 - 火炎伝播を伴う流れの解析例
 - 圧力波の伝播の解析例

- 連成機能についての概要
 - 埋込み境界法の実装法についてのご紹介
 - 埋込み境界法を用いた解析例
 - 剛体周りの爆風解析
 - 弾性体の振動を伴う爆風解析

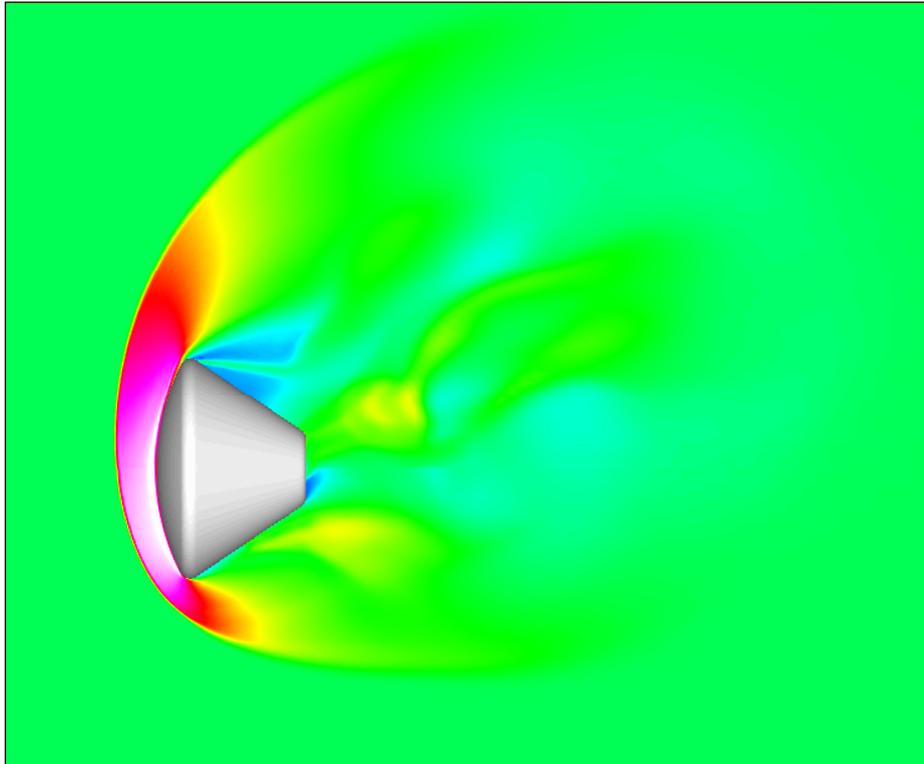
Advance/FrontFlow/FOCUSの基本機能の概要

- 時間積分
 - オイラー陰解法(LU-SGS陰解法、LU-ADI陰解法)
 - 2次または4次精度ルンゲ-クッタ陽解法
- 移流項
 - 種々の衝撃波捕獲スキーム
 - 3次精度TVD補間
 - 5次精度WENO補間
- 燃焼モデル
 - 火炎モデル
 - 層流火炎モデル(高野モデル)
 - 乱流燃焼速度モデル
- RANS
 - Baldwin-Lomax 0方程式モデル
 - Spalart-Allmaras 1方程式モデル
 - 標準k-ε 2方程式モデル
- LES
 - Smagorinskyモデル
 - Dynamic Smagorinskyモデル
 - DES

基本機能を用いた解析例

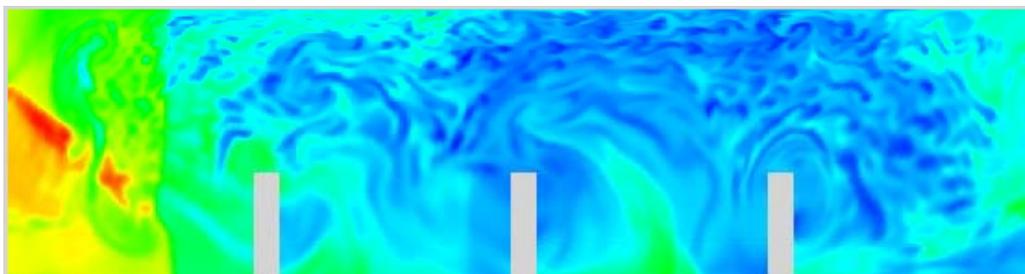
- ① 速い流れの解析例
- ② 火炎の伝播の解析例
- ③ 爆轟に起因する圧力波の解析例

速い流れの解析

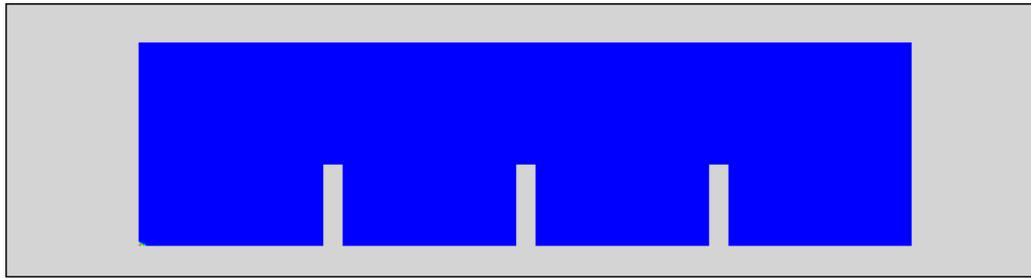


温度分布
(マッハ数 $M=3$ 、レイノルズ数 $Re=4 \times 10^6$ 、迎角 $\alpha=20^\circ$)
形状については次のURLを参照下さい <http://www.astronautix.com/craft/orioncm.htm>
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

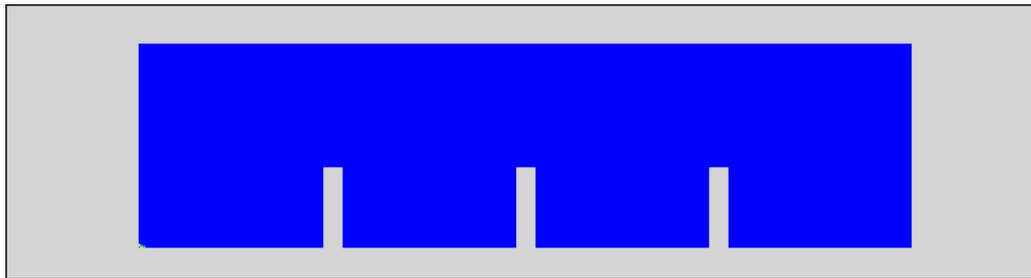
火炎の伝播の解析例



火炎の伝播の解析例 (アニメーション)



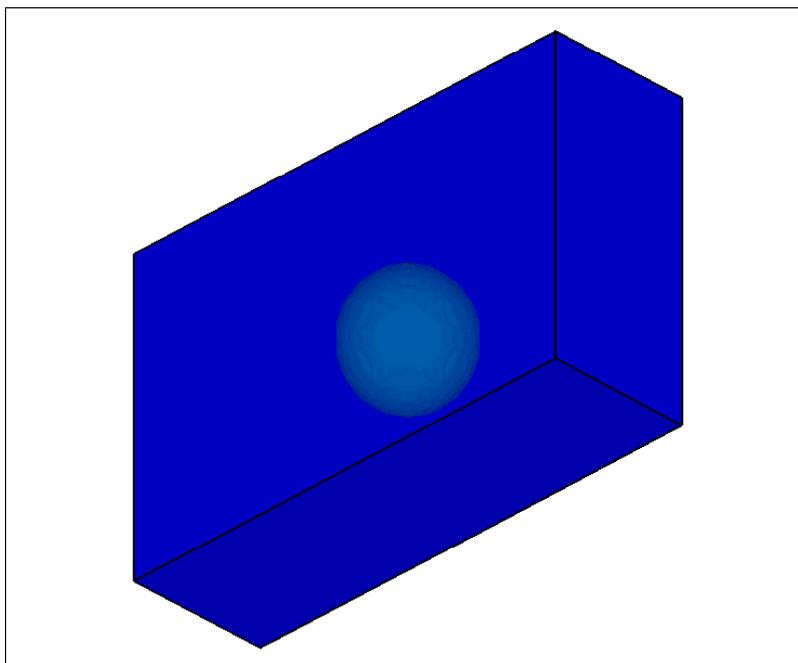
温度



圧力

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

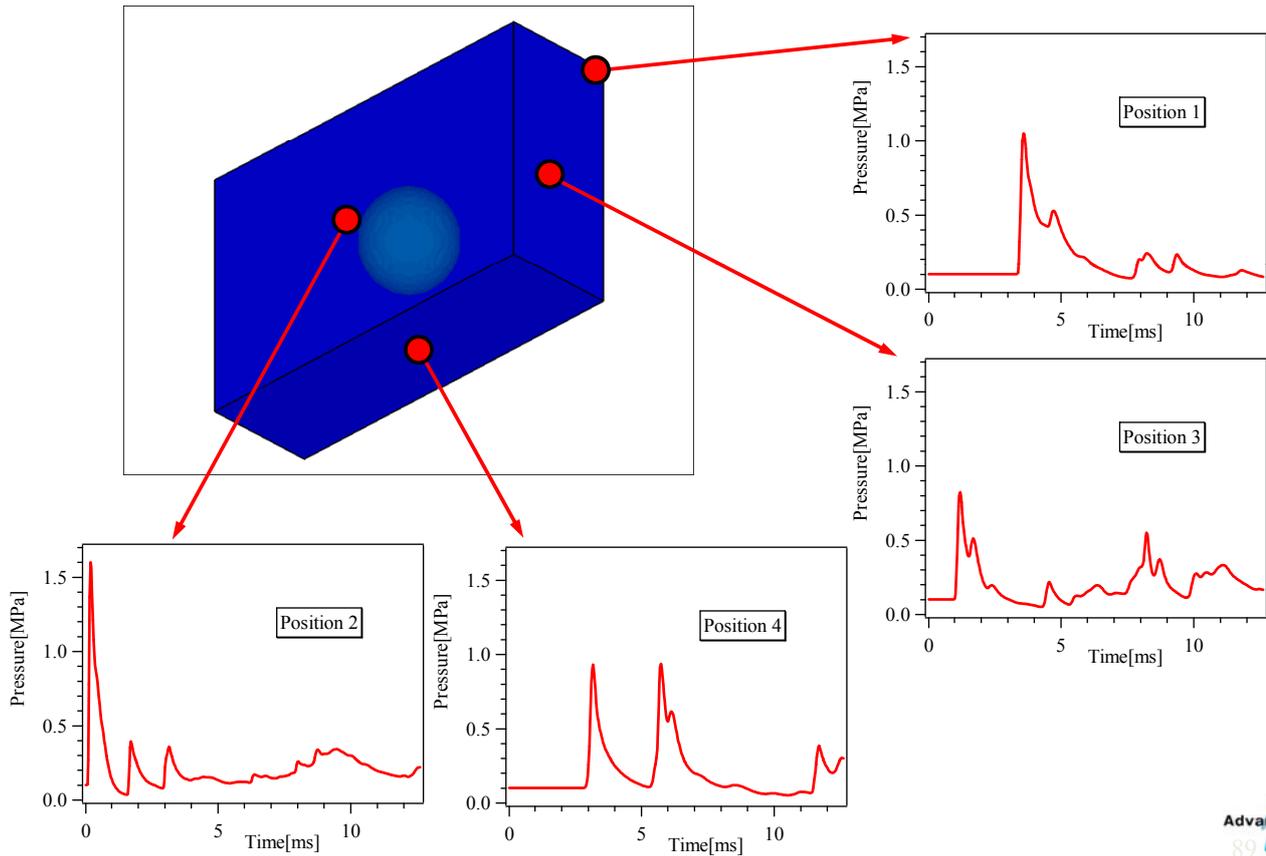
爆轟による圧力変化の解析 (アニメーション)



- 爆発による高圧の状態を想定
- 高圧状態が半径0.6mの球状に分布
- 球の表面近傍で約1MPa
- 格子数は144万要素
- 5m × 1.5m × 3mの密閉容器内を想定

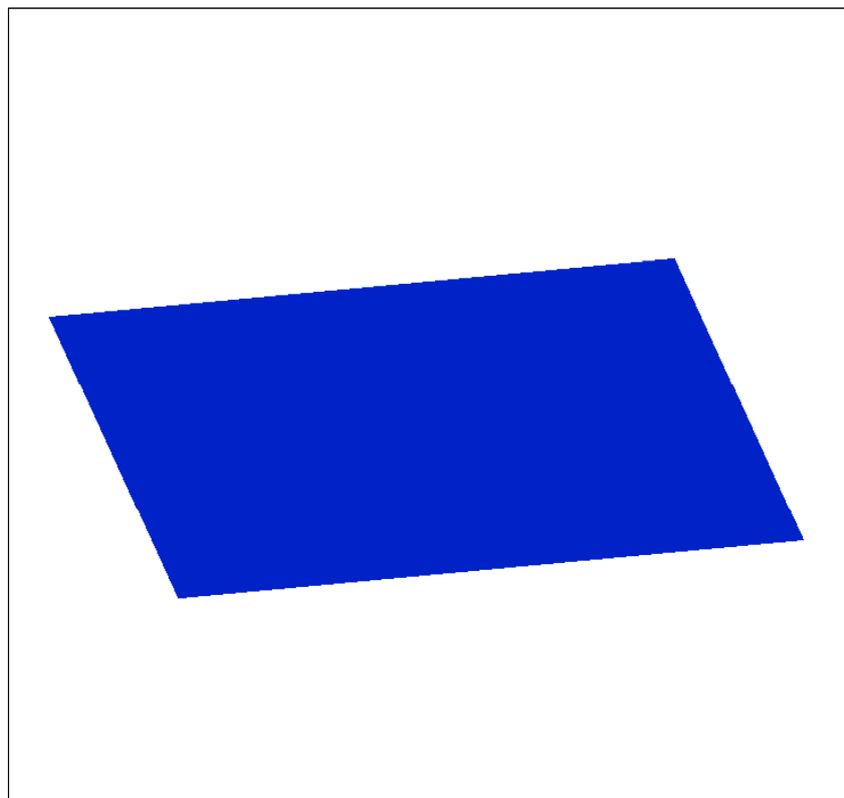
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

爆轟による圧力変化の解析



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

爆轟の圧力変化によって生じる応力歪の可視化



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

Advance/FrontFlow/FOCUSの連成機能の概要

- 直交格子ソルバー機能
 - Immersed boundary法(埋込み境界法)
 - 移動壁境界
- 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との併用実績あり

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
 - ✦ 液体を弾き飛ばして進むタイヤ
 - ✦ 高圧流体の駆動で変形する部材 → 移動格子、重合格子では難易度が高い

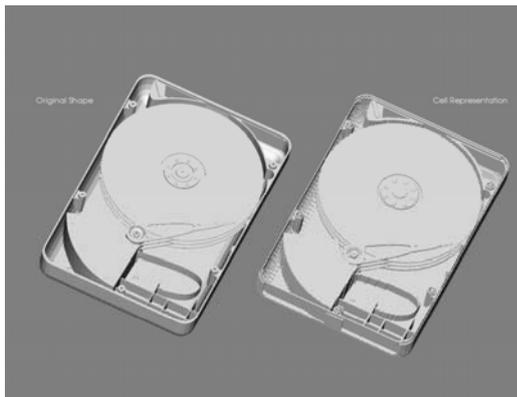
埋込み境界法の導入

埋込み境界法について

■ 直交格子法と埋込み境界法の導入

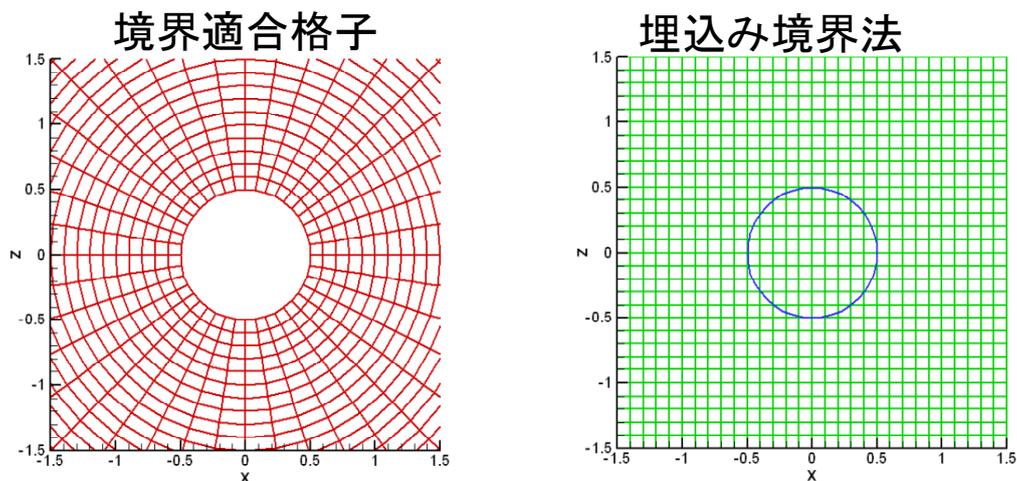
- 複雑な形状部品の周囲の扱いを軽減
- 大変形と移動を伴う形状の扱いが可能

※CADデータ準備の段階から流体計算の開始までの期間が短い



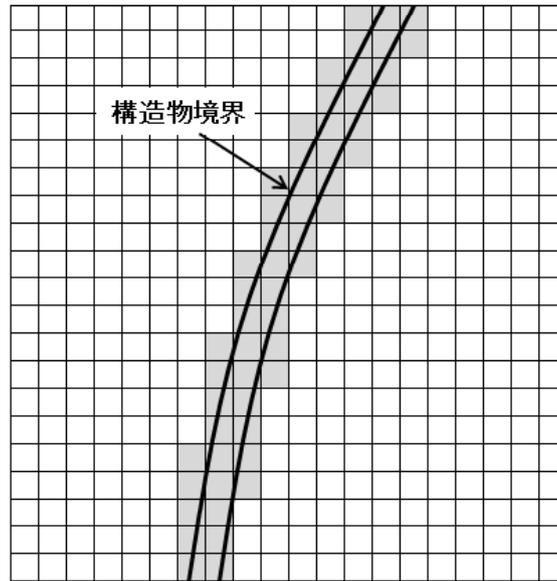
ポリゴンデータを流体格子の中で形状認識させた例
形状データは下記URLを参照下さい
<http://www.turbosquid.com>

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
- 埋込み境界法 (Immersed Boundary法、IB法) では物体境界が流体計算の格子へ埋め込められる

埋込み境界法での境界壁のイメージ



物体境界の取り扱い

流束の出入り面

流体計算でのセル境界

正確な物体壁面

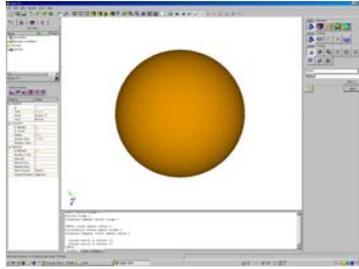
滑り条件の場合
 $\vec{V}_j = \vec{V}_i - (\vec{V}_i \cdot \vec{n}_j) \vec{n}_j$

非滑り条件の場合
 $\vec{V}_j = \vec{V}_i - (\vec{V}_i \cdot \vec{n}_j) \vec{n}_j - (\vec{V}_i \cdot \vec{t}_j) \vec{t}_j - (\vec{V}_i \cdot \vec{s}_j) \vec{s}_j$

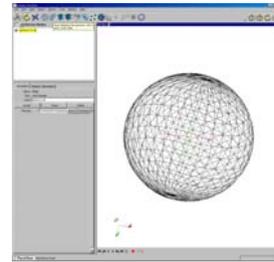
$\rho_j = \rho_i$	密度
$(\rho u)_j = (\rho V_x)_i$	運動量(x方向)
$(\rho v)_j = (\rho V_y)_i$	運動量(y方向)
$(\rho w)_j = (\rho V_z)_i$	運動量(z方向)
$e_j = e_i$	エネルギー

埋込み境界法での形状取り込みから 流れの計算まで

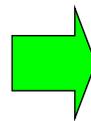
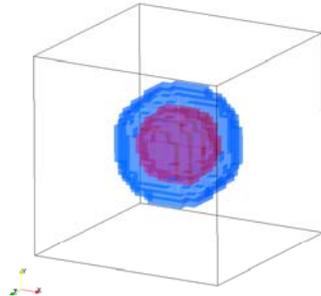
①形状の作成



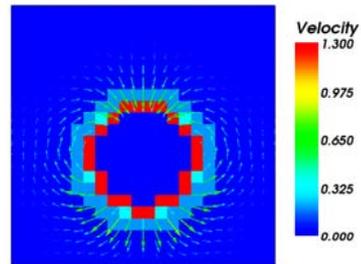
②stl形式データの作成



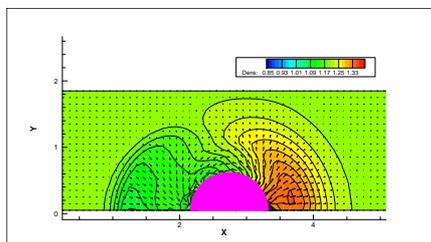
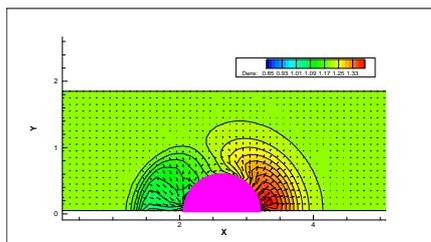
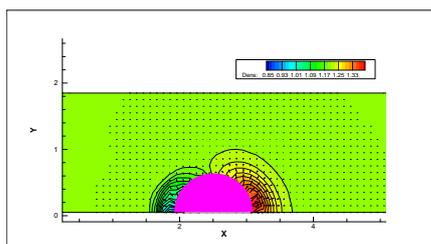
③ソルバ内で形状を自動認識



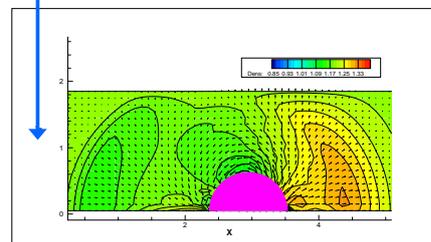
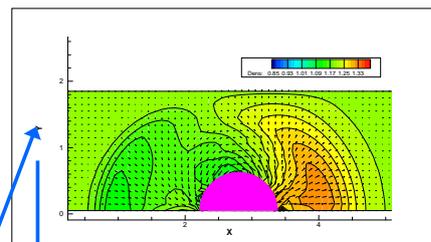
④流れ解析を開始



移動物体の取り扱いの例



移動速度100m/s

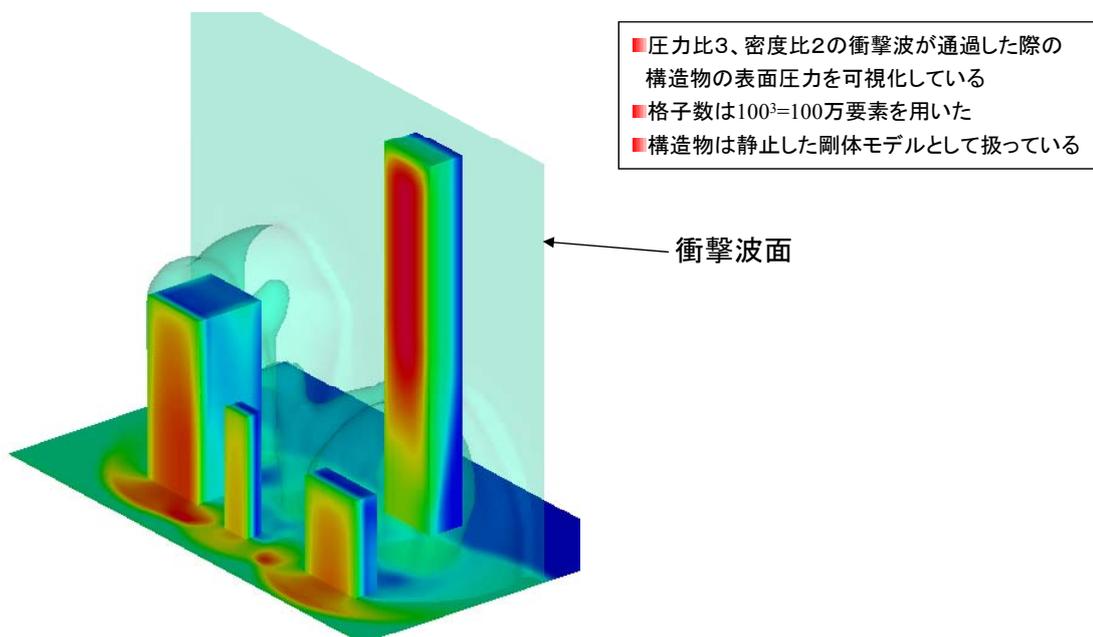


埋込み境界を用いた解析例

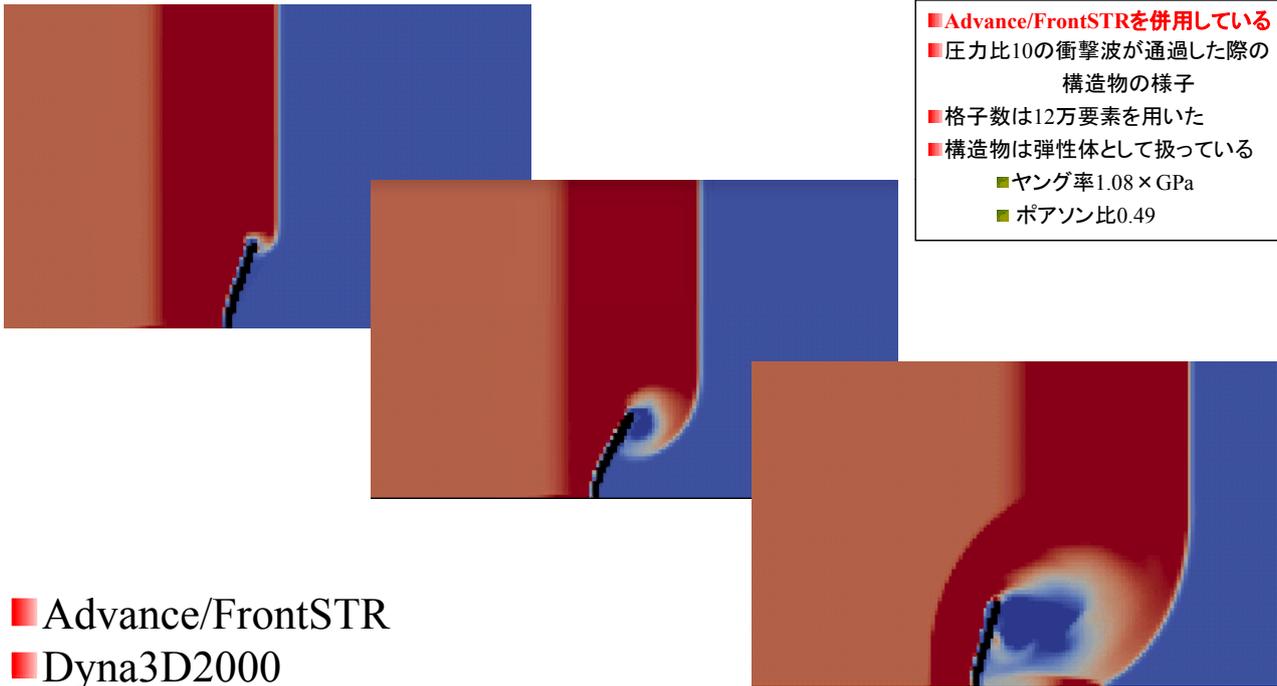
① 爆風解析

② 大変形を伴う連成解析

爆風解析 (埋込み境界を用いた流体解析)



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
- 格子数は12万要素を用いた
- 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

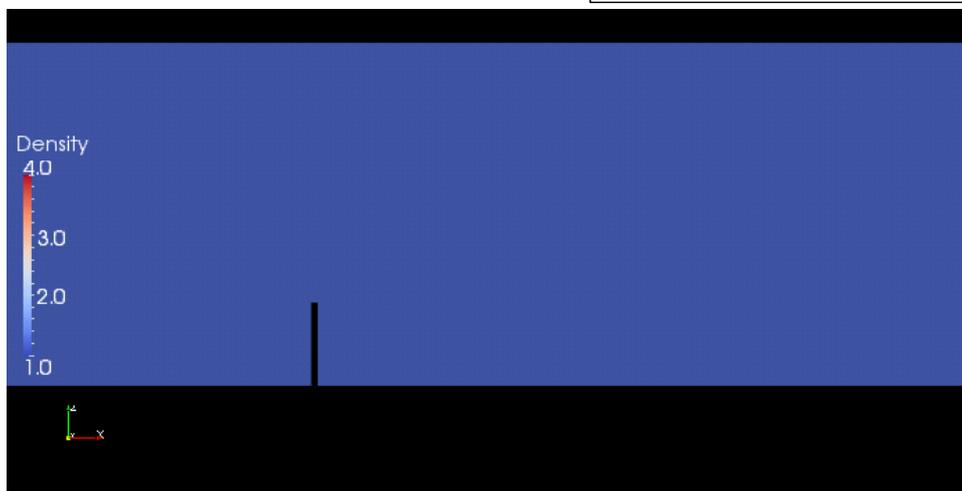
■ Advance/FrontSTR
■ Dyna3D2000

これらの構造解析ソフトウェアとの併用が可能

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

大変形を伴う連成解析 (アニメーション)

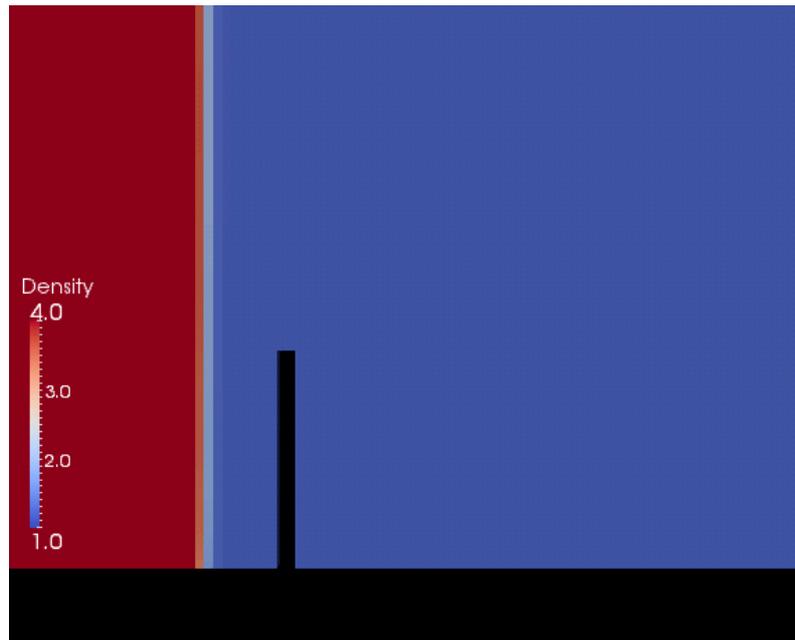
- 圧力比10の衝撃波が通過した際の構造物の様子
- 格子数は12万要素を用いた
- 構造物は弾性体として扱っている



※構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRとの連成解析例

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

大変形を伴う連成解析 (アニメーション、拡大版)



※構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRとの連成解析例

高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUSを用いた 連成解析についてのまとめ

- 基本機能についての概要
- 基本機能を用いた解析例
 - 高速流れ(圧縮性流れ)の解析例
 - 火炎伝播を伴う流れの解析例
 - 圧力波の伝播の解析例
- 連成機能についての概要
- 埋込み境界法の実装法についてのご紹介
- 埋込み境界法を用いた解析例
 - 剛体周りの爆風解析
 - 弾性体の振動を伴う爆風解析