

# Advance/FrontFlow/redの最新事例

技術第3部 塩谷 仁

流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/red最新動向セミナー  
2014年1月30日（木）  
アドバンスソフト株式会社

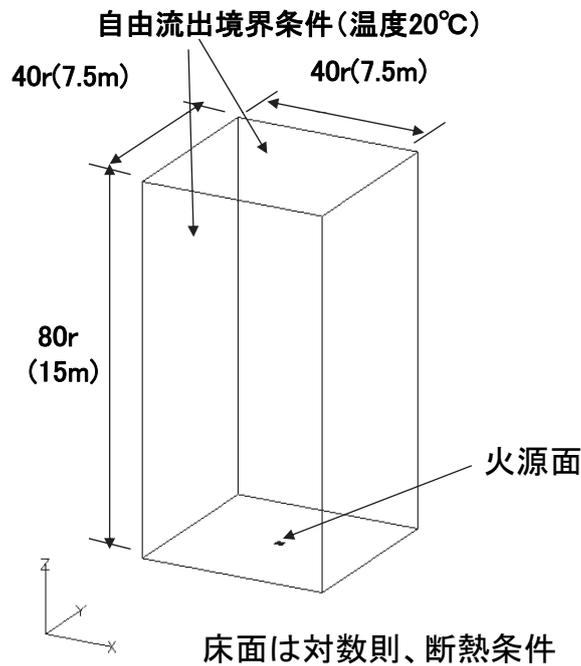
## 内容

- 自由ブルームの解析と検証
- 単一気泡形状解析
- モード解析を用いた流体-構造連成

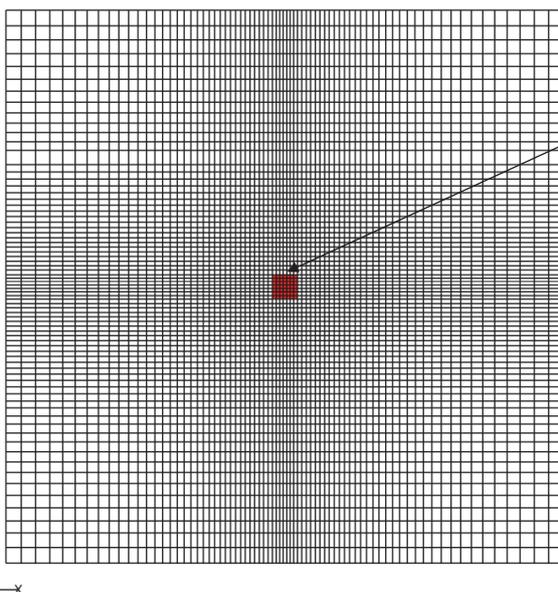
# 自由プルーム解析と検証

自由プルーム: 火災時の煙流動の基本特性を有するモデル

解析体系



## 解析格子(床面)



・火源

サイズ: 一辺  $L=33.23\text{cm}$  の正方形で近似  
 (半径  $r = 18.75\text{cm}$  の円と同じ面積)

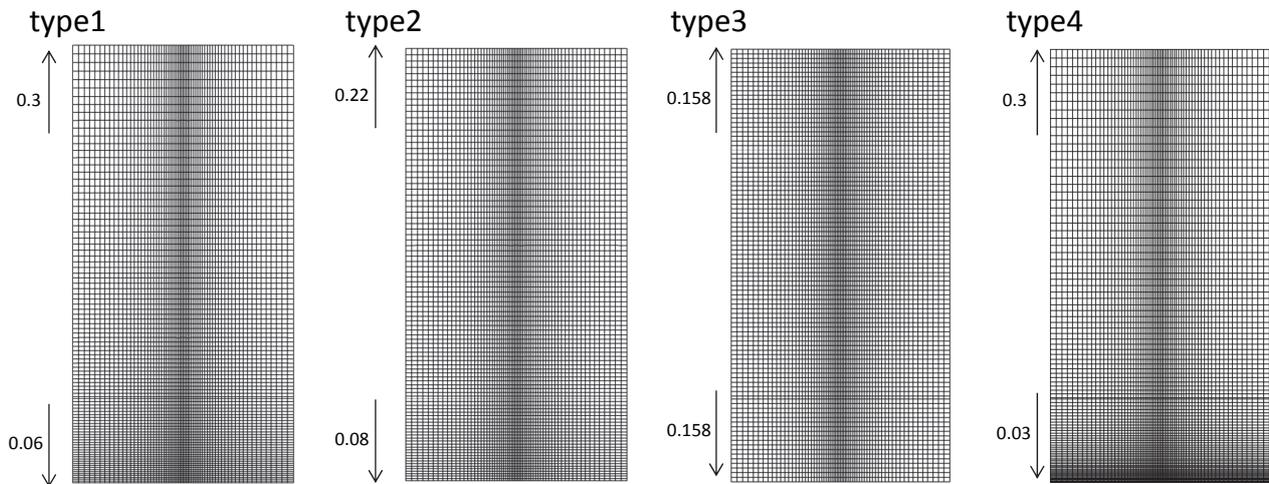
発熱速度:  $Q=2064\text{cal/s}=8637.8\text{W}$

火源面で  $Q$ =一定、周囲との温度差  $800^\circ\text{C}$  を仮定

鉛直方向速度  $w=Q/(\rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot L^2)$   
 $=0.0817\text{m/s}$  を仮定

床面は66×66分割

# 解析格子(高さ方向)

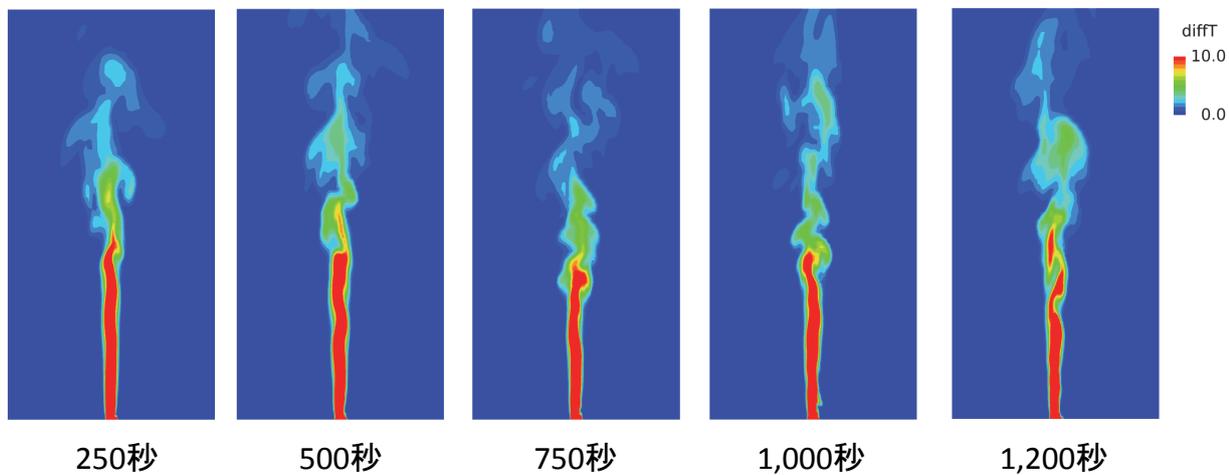


高さ方向は95分割

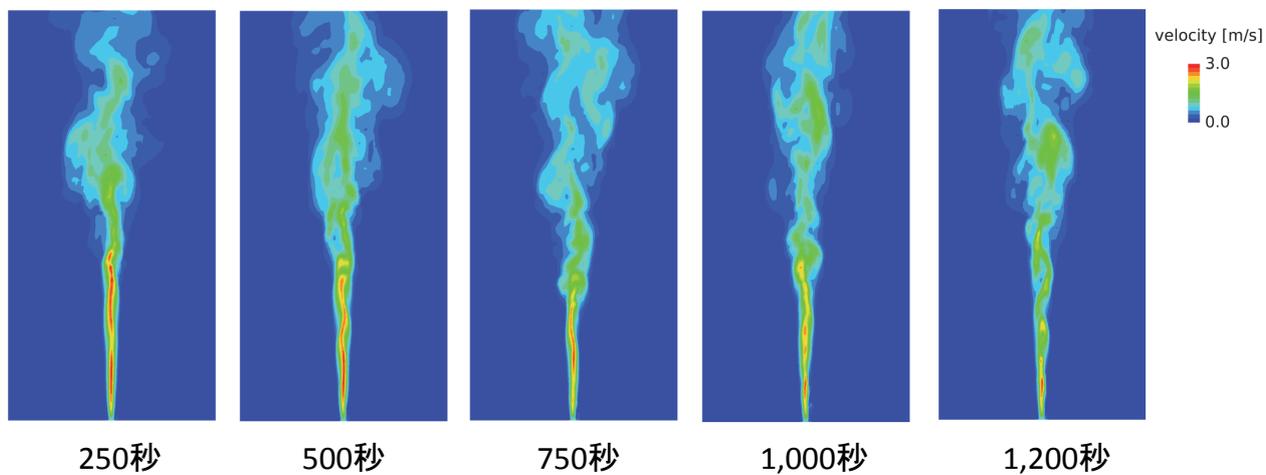
# 解析条件

項目	内容
支配方程式	圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	標準Smagorinskyモデル(Cs=0.2)
対流離散化	2次精度中心差分90%+ 1次精度風上差分10%
時間積分法	Crank-Nicolson法(運動方程式) Euler陰解法(エネルギー保存式)
時間刻み	0.05秒

# 解析結果 (type1、温度分布)

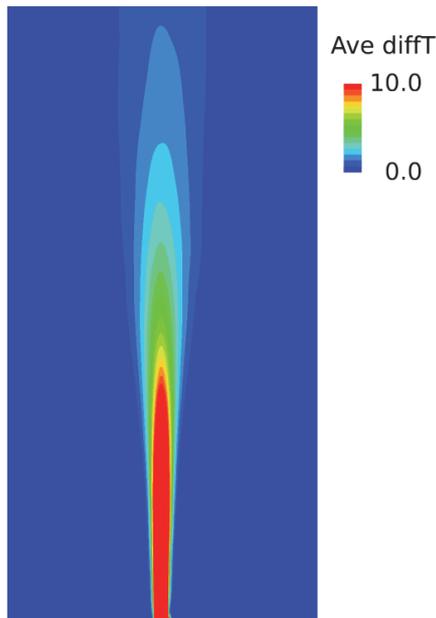


# 解析結果 (type1、速度分布)

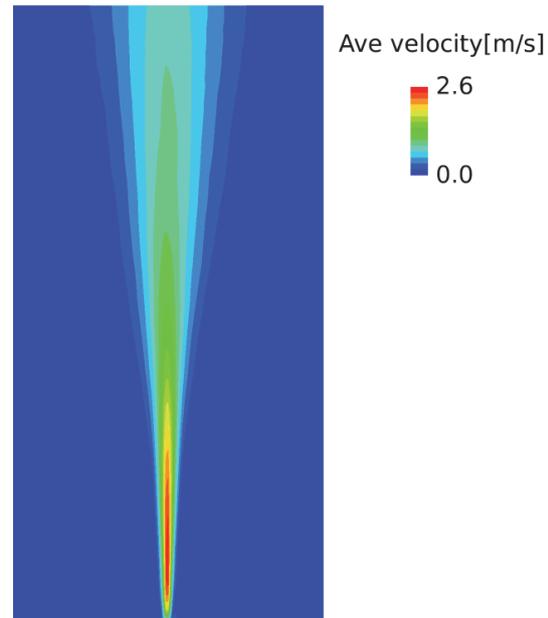


# 解析結果 (type1、平均値)

平均温度



平均速度



# 実験との比較

横井の実験式

温度

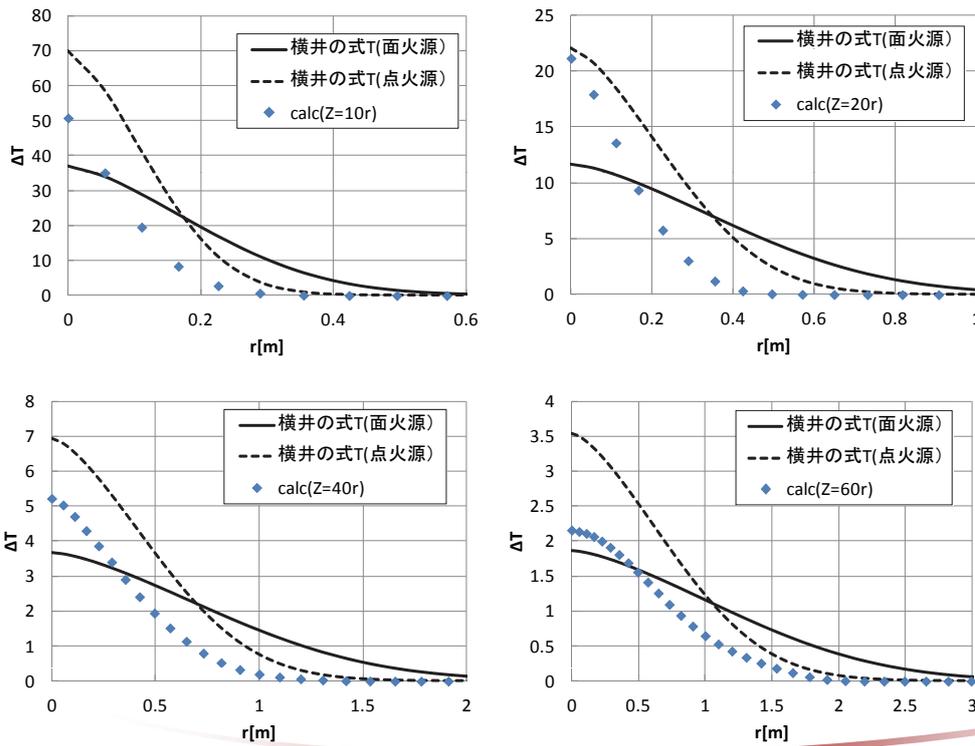
$$\Delta T = 0.423 \left[ \frac{T_0 Q^2}{C_p^2 \rho^2 g} \right]^{1/3} C^{-8/9} Z^{-5/3} \\ \times (1 + 0.9383 \zeta^{3/2} + 0.4002 \zeta^3 + 0.09398 \zeta^{9/2}) \\ \times \exp(-1.4617 \zeta^{3/2})$$

$C$  : 定数     $\zeta : r / (ZC^{2/3})$   
(面火源 :  $C^{2/3} = 0.1$ , 点火源 :  $C^{2/3} = 0.062$ )

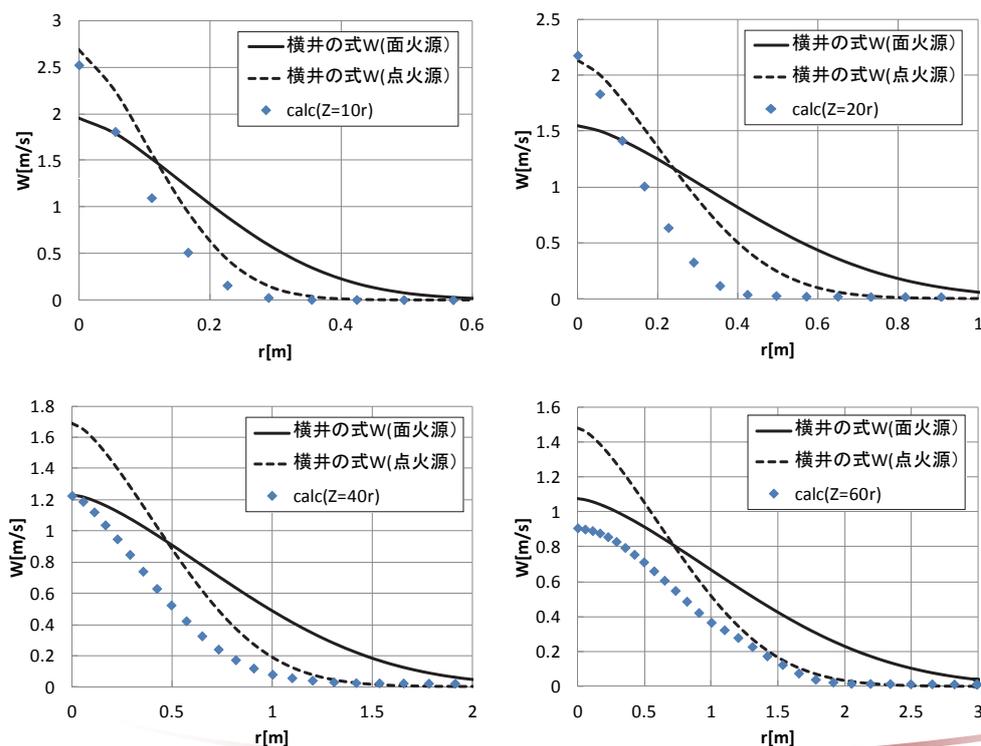
上昇気流の速度

$$w = 0.833 \left[ \frac{gQ}{C_p \rho T_0} \right]^{1/3} C^{-4/9} Z^{-1/3} \\ \times (1 + 0.9174 \zeta^{3/2} + 0.3990 \zeta^3 + 0.1077 \zeta^{9/2}) \\ \times \exp(-1.4617 \zeta^{3/2})$$

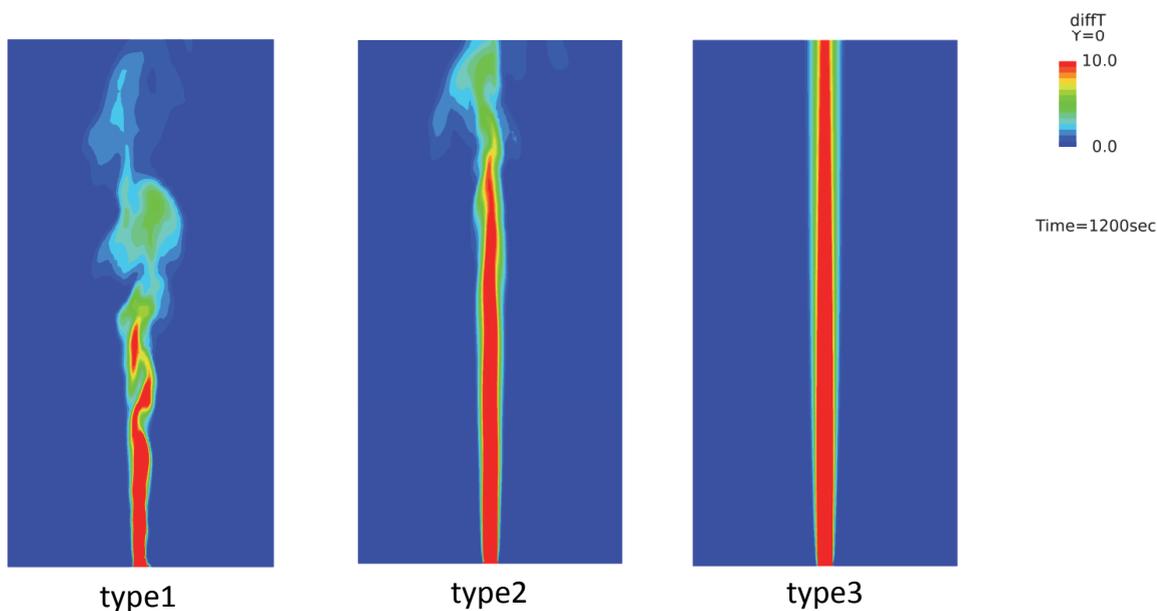
# 実験式との比較(温度分布)



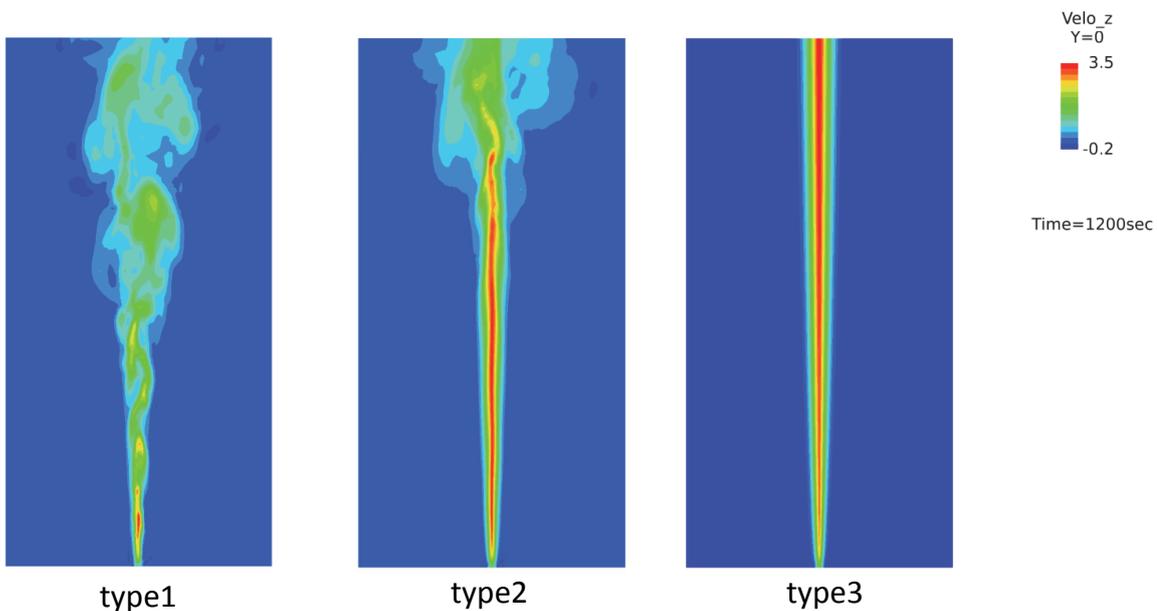
# 実験式との比較(速度分布)



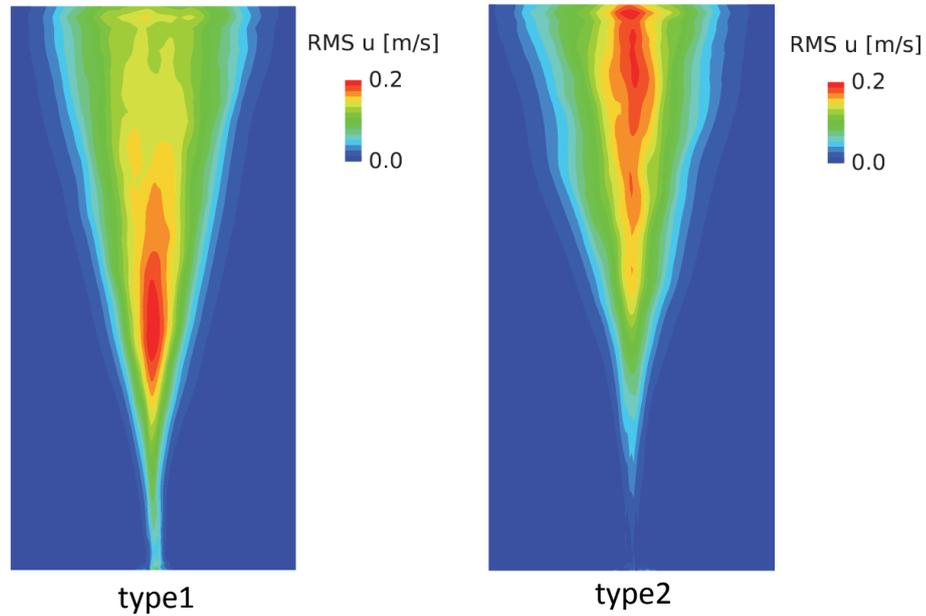
# 格子解像度の影響(温度分布)



# 格子解像度の影響(速度分布)



# 格子解像度の影響(速度変動)

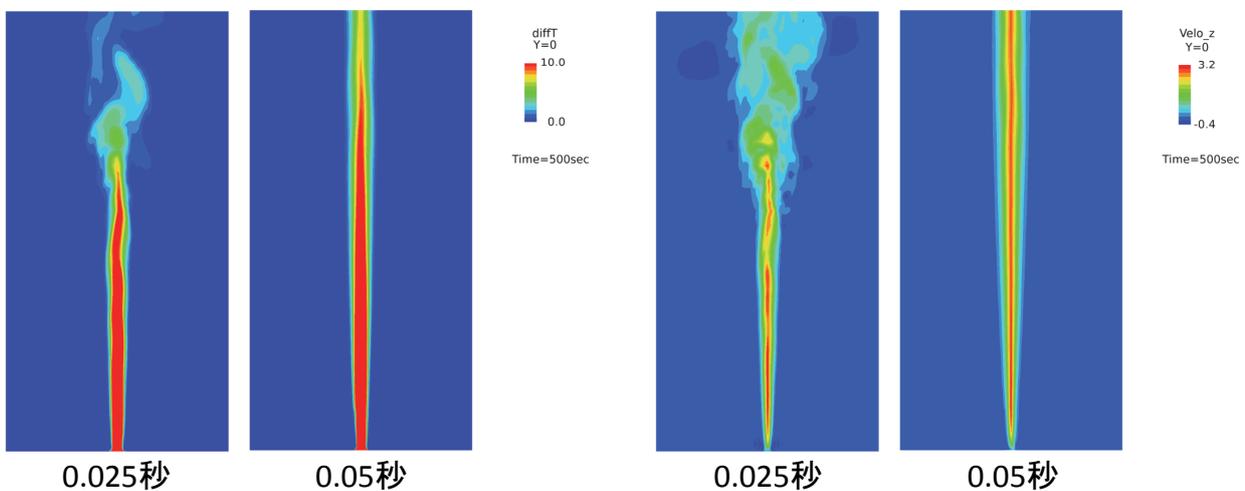


# 時間刻みの影響

type4の格子で時間刻み0.025秒(クーラン数1.1)と0.05秒(クーラン数2.5)を比較

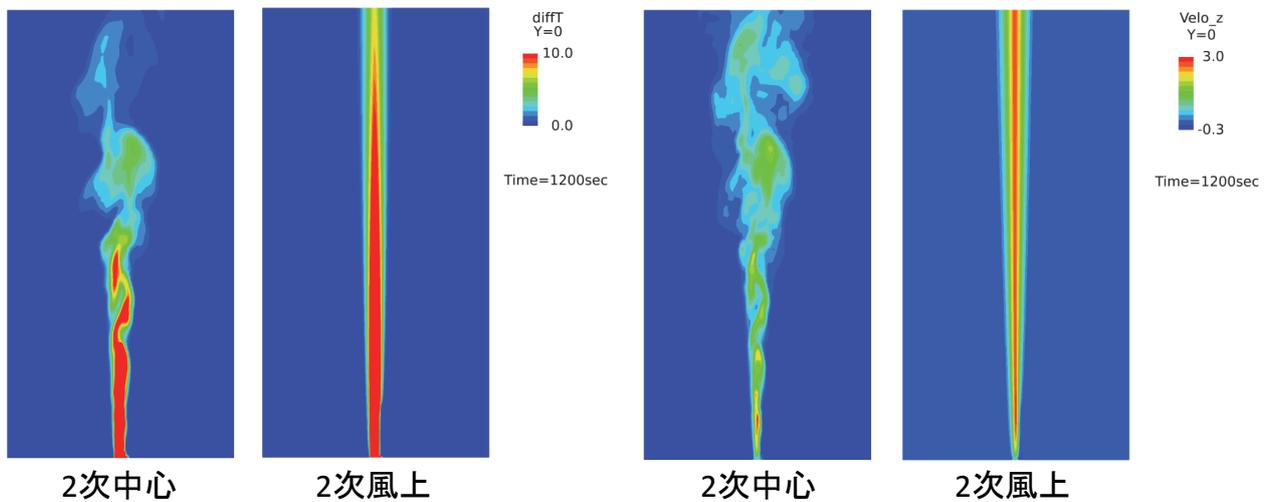
温度分布

速度分布

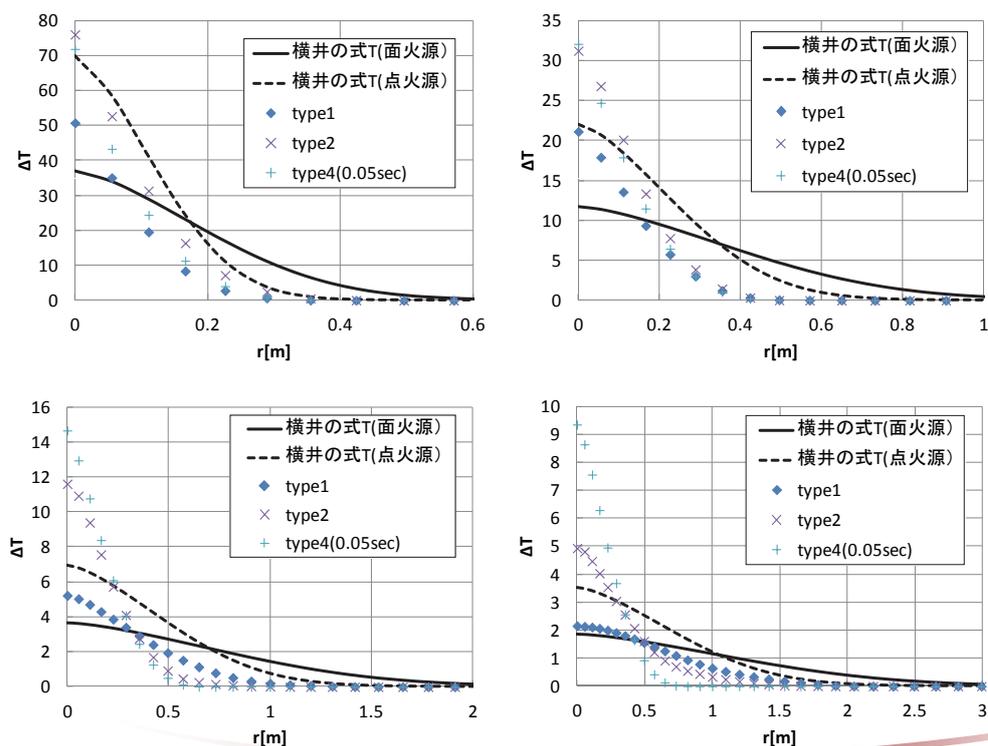


# 空間離散化の影響

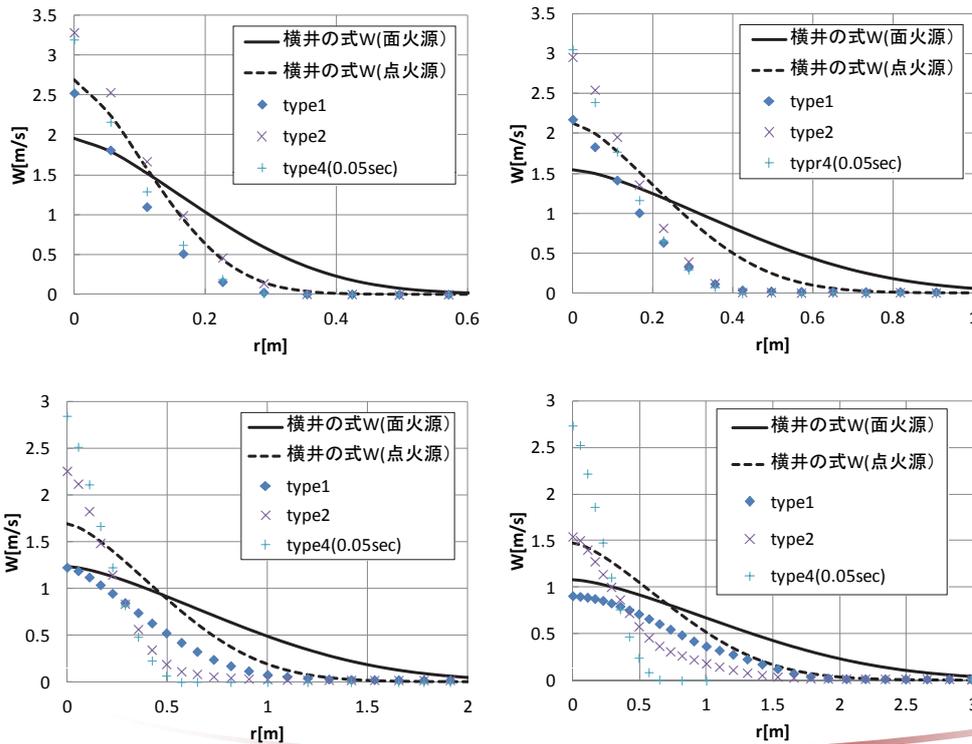
2次精度中心差分90%+1次精度風上差分10%と2次精度風上差分を比較



# 実験式との比較(温度分布)



# 実験式との比較(速度分布)



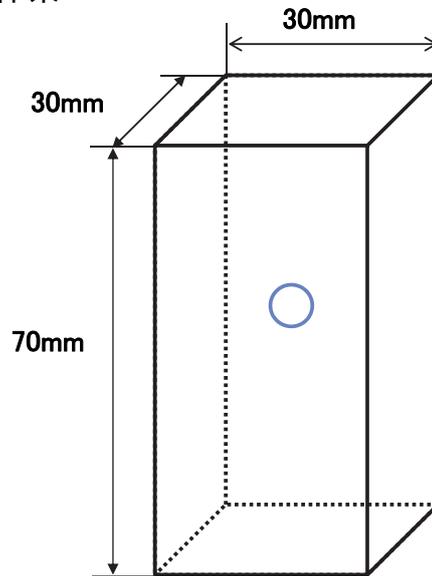
# 自由プルーム解析のまとめ

- LESによる解析で自由プルームの実験式を概ね再現できることを確認した。
- 格子依存性については、吹き出し口近傍の解像度が重要であることが分かった。
- 時間刻みについては格子解像度に併せてクーラン数1程度を確保することが重要であることが分かった。
- 空間離散化手法に関しては、風上差分法では自由プルームの挙動の再現ができず、中心差分法を用いる必要がある。

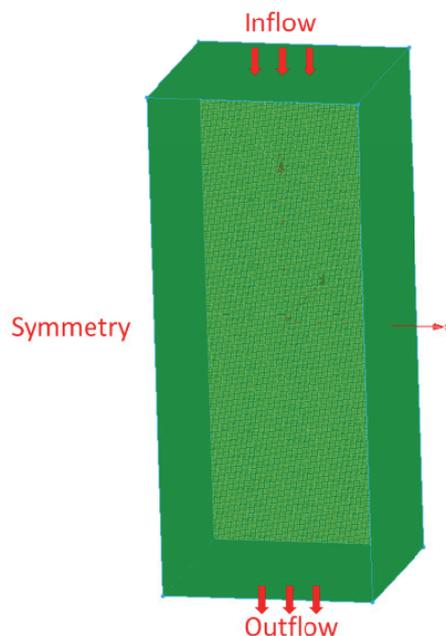
# 単一気泡形状解析

単一気泡の浮上過程における形状および流れの挙動を解析する

解析体系



# 解析格子



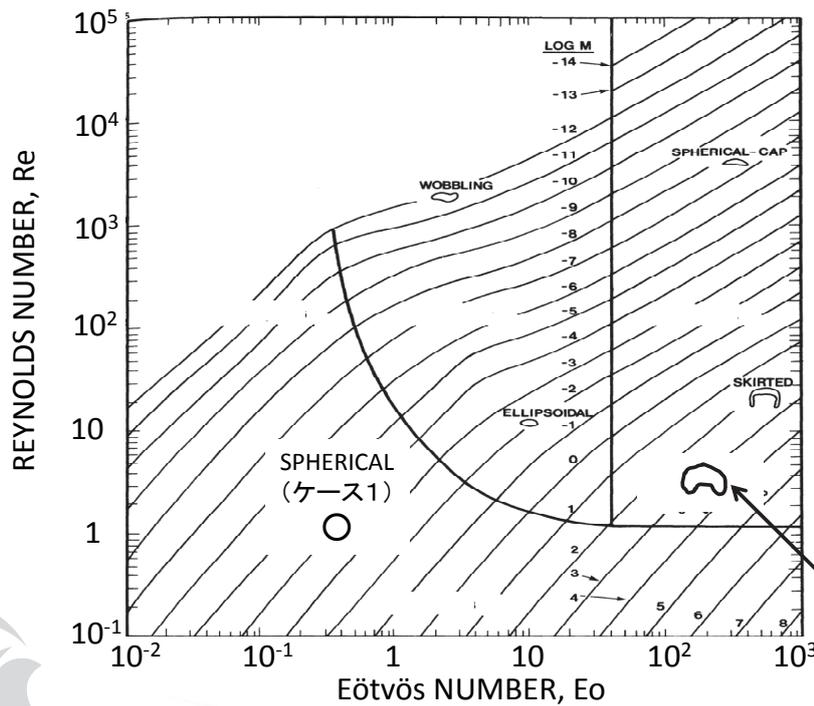
格子幅 0.25mm  
(120 × 120 × 280分割)

気泡径  
ケース1 : 5mm  
ケース2 : 10mm

境界条件  
Inflow : 気泡の浮上終端速度  
ケース1 : 0.02[m/s]  
ケース2 : 0.16[m/s]

気泡を上昇させる代わりに周囲流体  
に気泡浮上の終端速度を与える

# 気泡形状



パラメータ	ケース1	ケース2
Eo	0.4	200
logM	-4.0	3.0
気泡径de[mm]	5.0	10.0
液体密度	800	2000
表面張力	0.1	0.01
気泡形状	球形	きのこ形

Eötvös Nummer

$$E_o = \frac{gd_e^2(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}$$

Morton Nummer

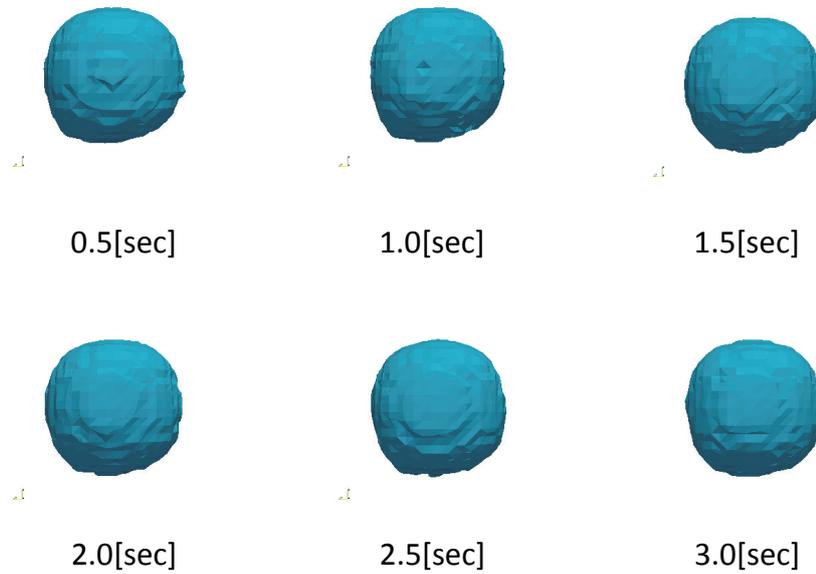
$$M = \frac{g\mu_l^4(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2\sigma^3}$$

DIMPLED  
ELLIPSOIDAL-CAP  
(ケース2)

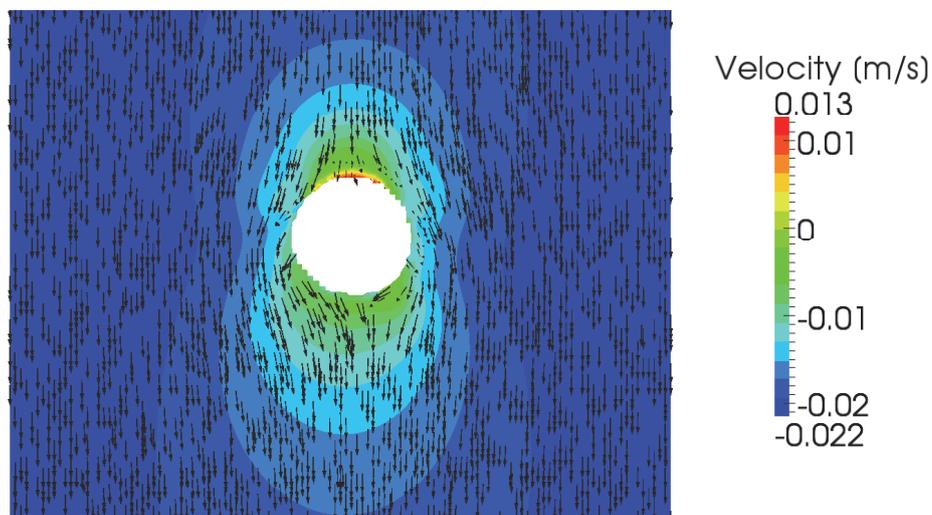
# 解析条件

項目	内容
支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	なし
対流離散化	2次精度風上差分
時間積分法	Euler陰解法
界面追跡	VOF(CICSAM)法
時間刻み	ケース1:1.0ms、ケース2:0.4ms

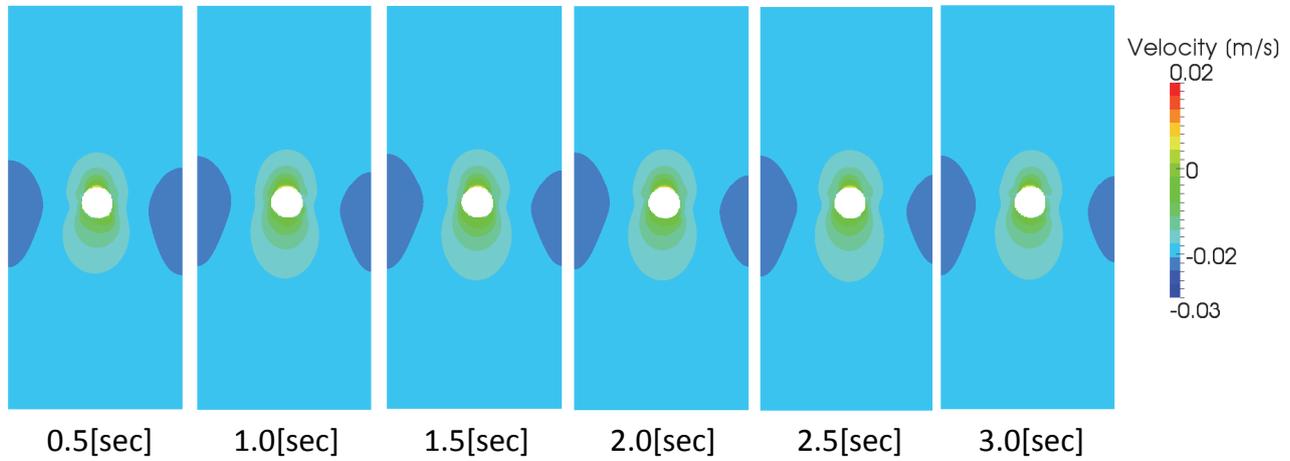
# 解析結果(ケース1、気泡形状)



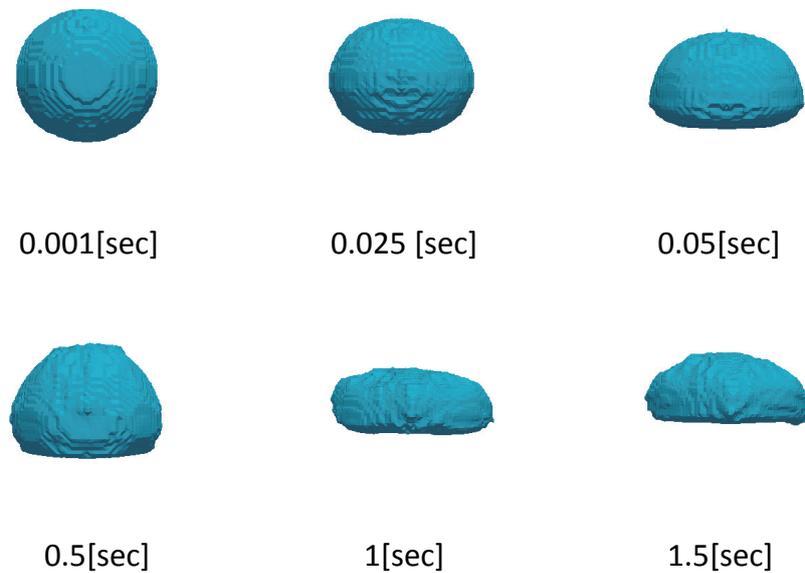
# 気泡周辺の世界速度分布(ケース1)



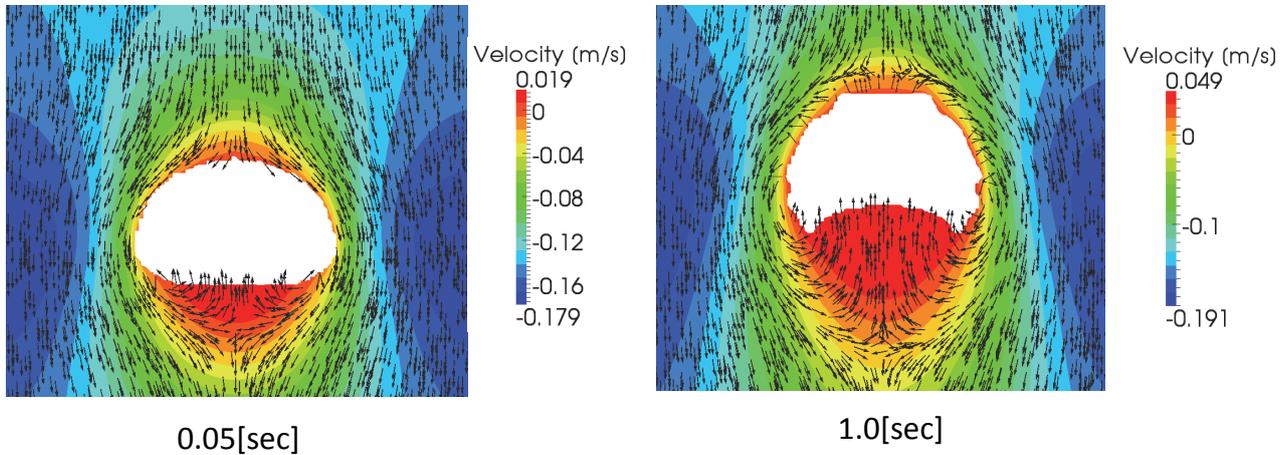
# 気泡位置の履歴(ケース1)



# 解析結果(ケース2、気泡形状)



# 気泡周辺の流れ速度分布(ケース2)



# 計算安定化条件

クーラン条件

$$c = \frac{u\Delta t}{\Delta x} < 1$$

Brackbillの条件 : 表面張力波が違う方向から一つの格子に伝わらない条件

$$\frac{c_\phi \Delta t}{\Delta x} < \frac{1}{2}$$

$$c_\phi = \sqrt{\frac{2\sigma k}{\langle \rho \rangle}}$$

$$\Delta t < \sqrt{\frac{\langle \rho \rangle (\Delta x)^3}{2\pi\sigma}}$$

$c_\phi$  : 表面張力波位相速度

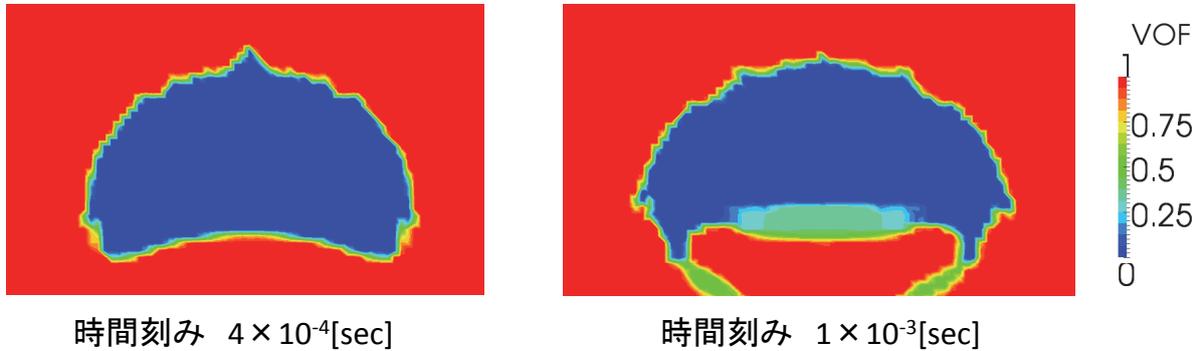
$k$  : 波数

$\langle \rho \rangle$  : 平均密度

	ケース1	ケース2
時間刻み[sec]	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-4}$
クーラン数	0.08	0.256
Brackbillの条件[sec]	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$

# 時間刻みの影響(ケース2)

VOF値分布(0.05[sec])



# 単一気泡形状解析のまとめ

- VOF法を用いた単一気泡の解析により、浮上時の気泡形状や終端速度について妥当な結果が得られることを確認した。
- VOF法における計算安定には、通常のクーラン条件ではなく、Brackbillの条件を基に時間刻みを設定することが必要となる。
- 時間刻みの制約、界面の滑らかさの改善などが今後の課題としてあげられる。

# 流体-構造連成解析

Advance/FrontFlow/Red ⇔ Advance/FrontSTRによる流体-構造連成解析の手法

## 1. 流体解析プログラム、構造解析プログラムの同時実行による連成解析

### - 概要

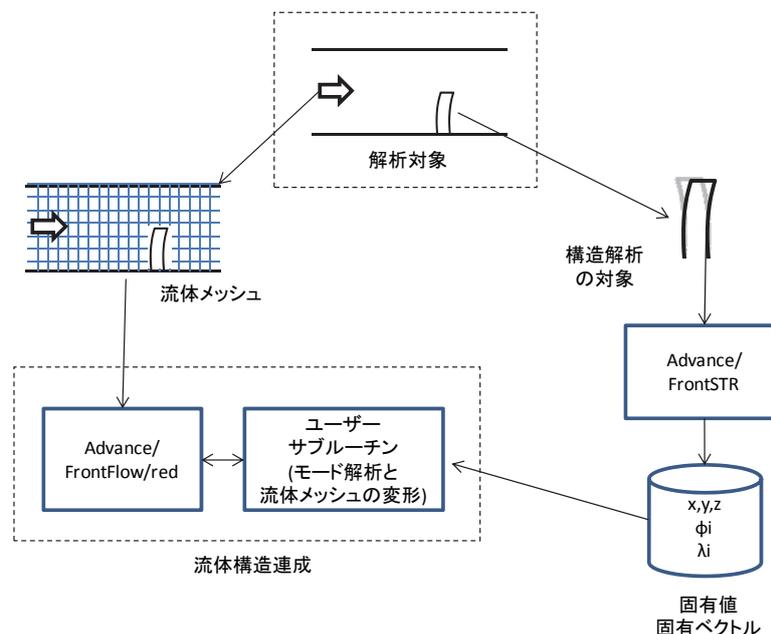
- 流体解析から得られた構造表面の流体力データを構造解析プログラムに受け渡し、構造解析を実施する。その結果得られた構造物の変形量を流体プログラムに受け渡し、変形量を基にメッシュを更新する。
- 流体解析プログラム、構造解析プログラムの全ての機能が利用でき、幅広い問題に対して適用できる。
- プログラム全体の仕組みが複雑となり、また、流体、構造解析のそれぞれに対する知識、技術が必要となる。

## 2. 構造のモード解析を用いた流体-構造連成解析

### - 概要

- 構造解析部分のみで固有値解析を行い、固有値・固有ベクトルをあらかじめ算出しておく。これを流体ソルバに入力する。
- モード解析部分をモジュールとして分離し、流体ソルバに組込む
- 流体解析を行い、構造表面の圧力データから、構造解析用の荷重を算出する。
- 組込まれたモジュールでモード解析を行い変形量を得る
- メッシュを更新する
- 適用範囲は線形弾性の範囲に限られるが、手軽に実行できる。

# モード解析を用いた連成解析の流れ



# 構造のモード解析

弾性体の運動方程式

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad f(t): \text{外力 (流体解析の表面力データ)}$$

固有方程式

$$([K] - \lambda [M])\{\phi\} = 0$$

変位ベクトル

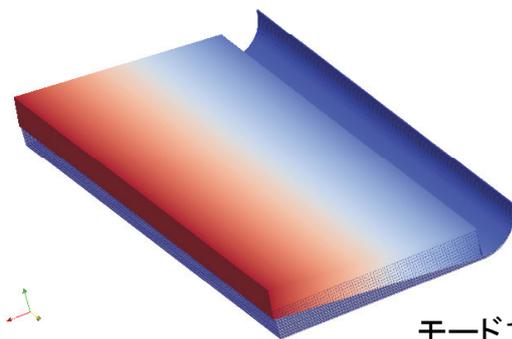
$$\{x(t)\} = \sum_i \alpha_i(t) \{\phi_i\}$$

各モードの振幅 $\alpha_j$ の微分方程式

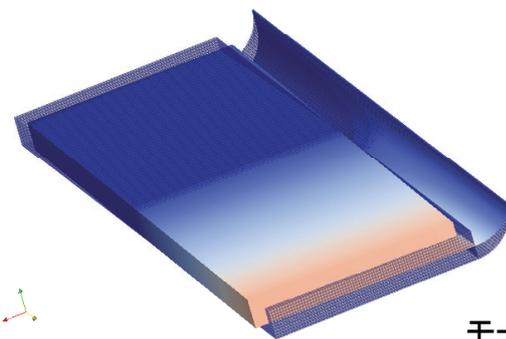
$$\ddot{\alpha}_j(t) + \lambda_j \alpha_j(t) = \{\phi_j\}^T \{f(t)\}$$

この微分方程式を解いて節点ごとの各モードの振幅を求め、変位を算出する  
→変位を基にAFFrのALE法によりメッシュ変形処理を行い、流体解析を行う

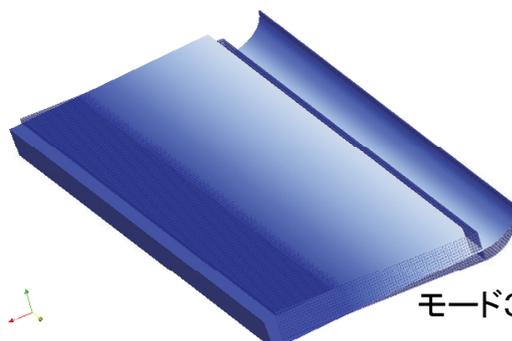
# 構造解析で得られた固有モード図



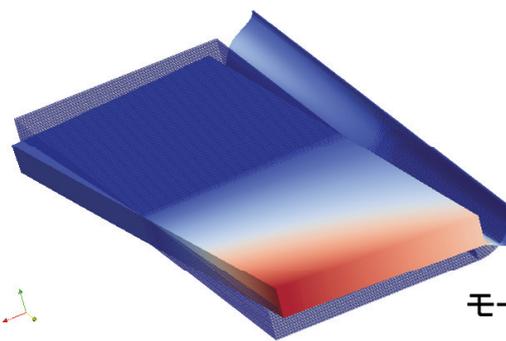
モード1



モード2

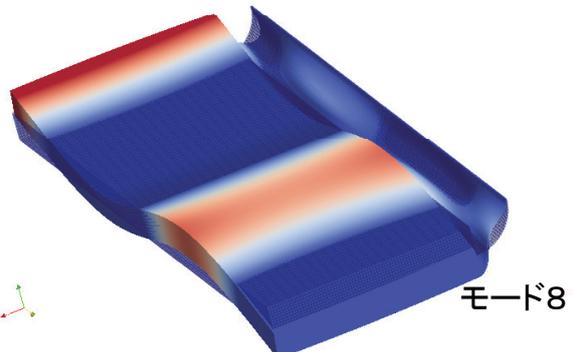
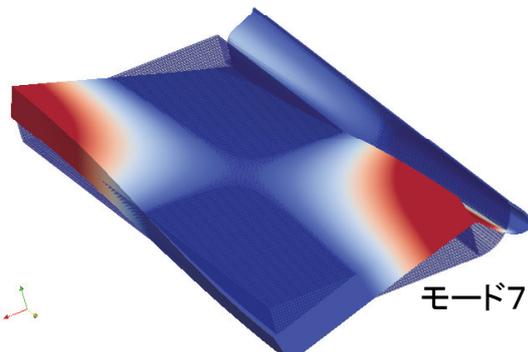
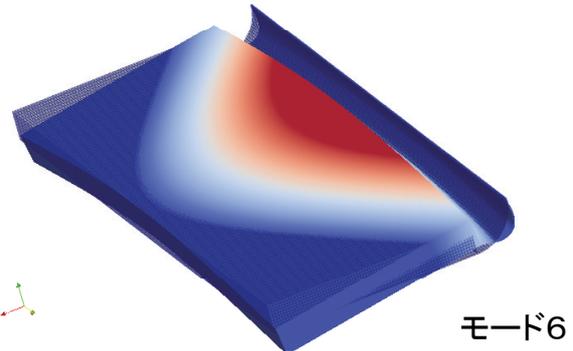
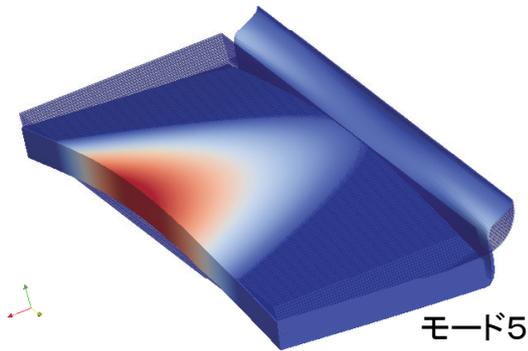


モード3

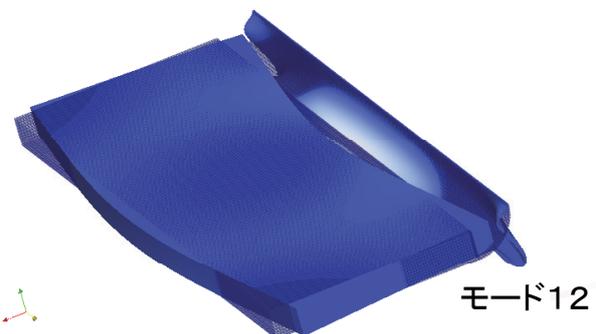
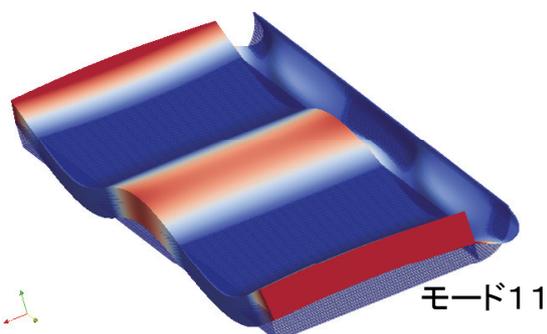
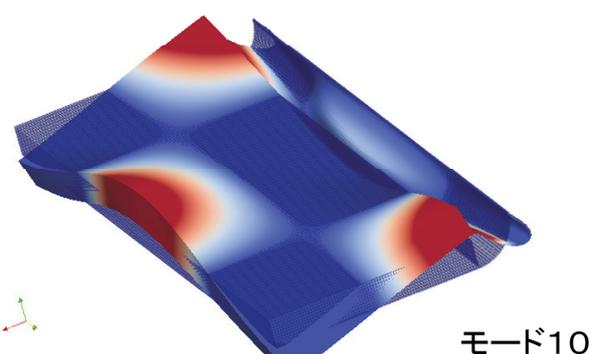
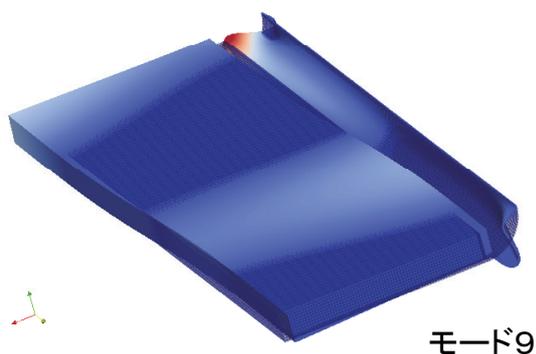


モード4

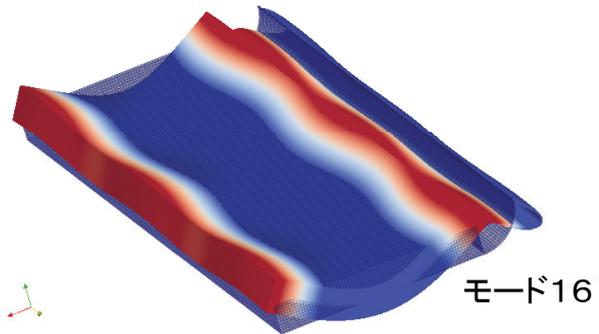
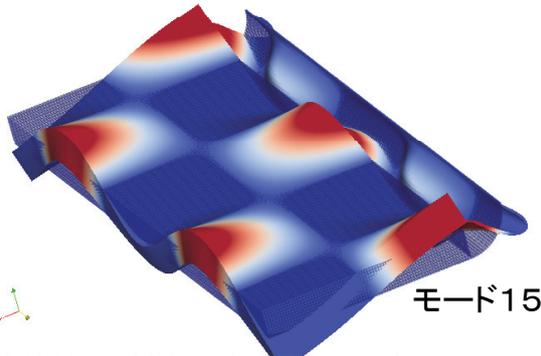
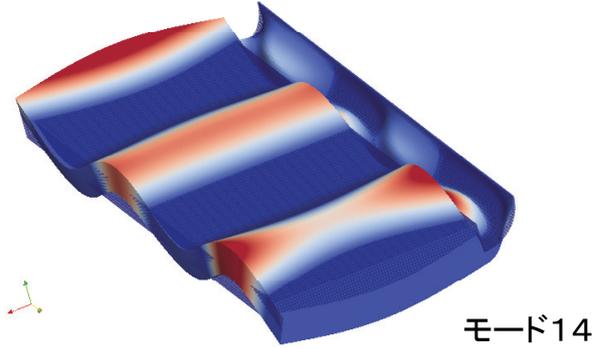
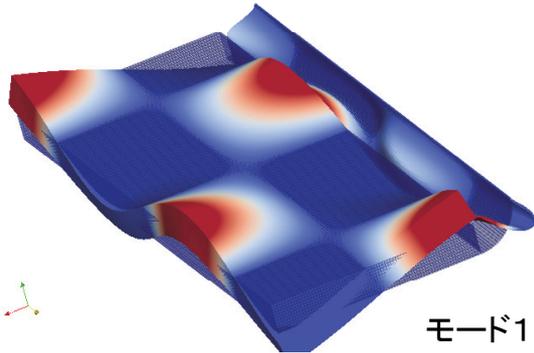
# 構造解析で得られた固有モード図



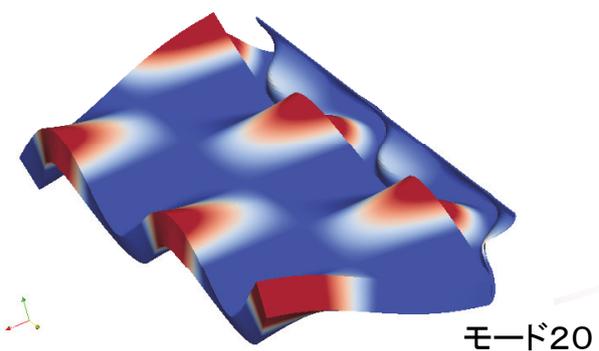
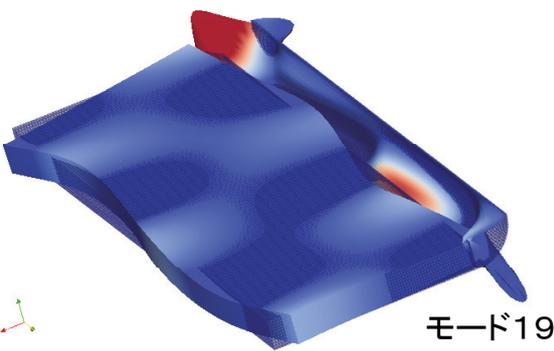
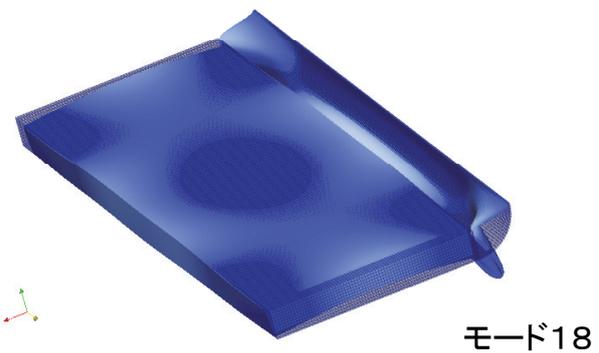
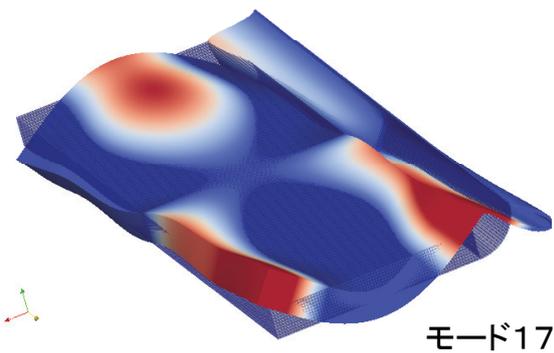
# 構造解析で得られた固有モード図



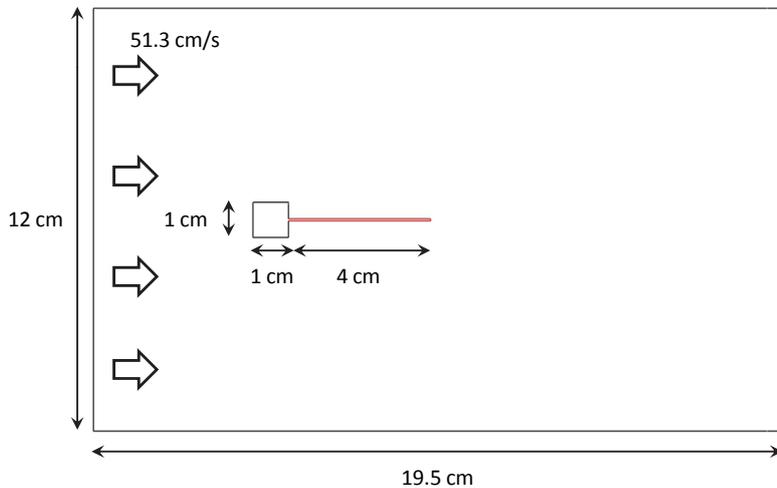
# 構造解析で得られた固有モード図



# 構造解析で得られた固有モード図



# 構造のモード解析



流体物性  
密度 1.18[kg/m<sup>3</sup>]  
粘性係数 1.82[Pa·s]

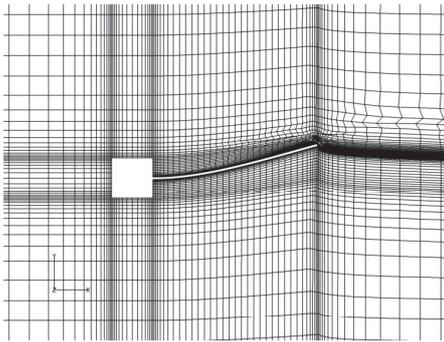
構造物物性  
密度 100[kg/m<sup>3</sup>]  
ヤング率 0.25[MPa]  
ポアソン比 0.35

# 解析条件

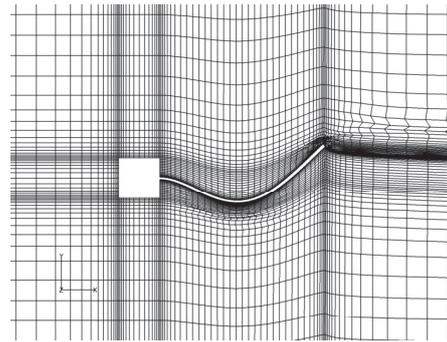
項目	内容
支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	なし
対流離散化	3次精度風上差分
時間積分法	Euler陰解法
時間刻み	0.01秒

# モード解析結果

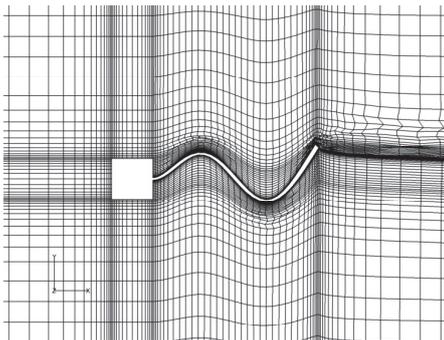
モード1



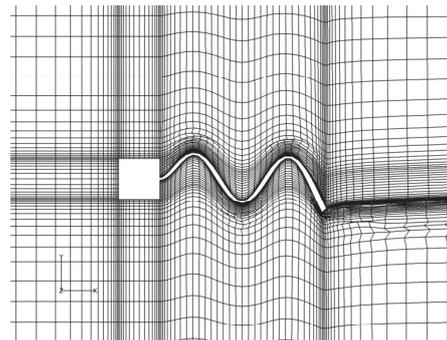
モード2



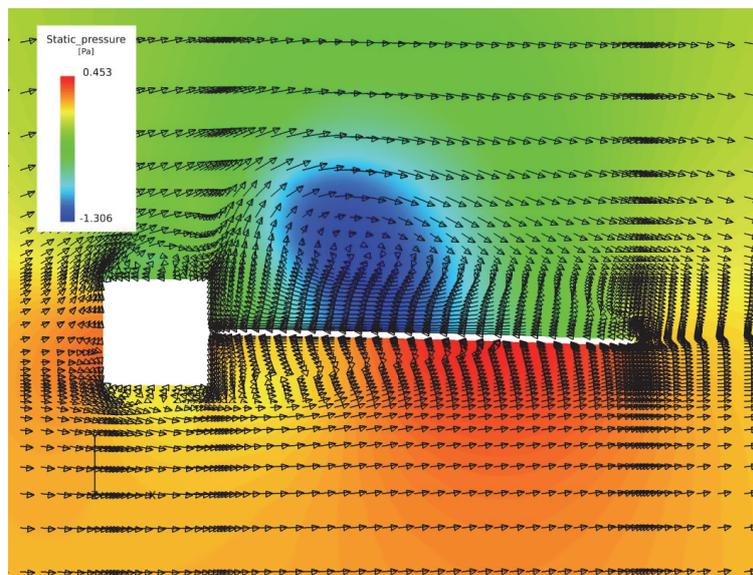
モード3



モード4



# 流体-構造連成解析結果



# 流体-構造連成解析のまとめ

- 構造のモード解析を用いた、流体-構造連成手法を用い、弾性体の振動を伴う流動の解析を実施した。
- ALE法を使用する際のメッシュ移動について、現状は個別の問題に対してユーザーサブルーチンで記述する必要があり、汎用的な移動処理ルーチンを確立することが今後の課題である。

