

---

各種オープンソースFEMコードによる周波数領域音響伝搬

解析精度のベンチマークテスト:

Code\_Aster・Elmer・OpenAcoustics

大嶋 拓也 (新潟大学)

石塚 崇 (清水建設技研)

鈴木 久晴 (日本エヴィクサー)

星 和磨 (日本大学)

第二回オープンソースCAEワークショップ 2009年11月7日

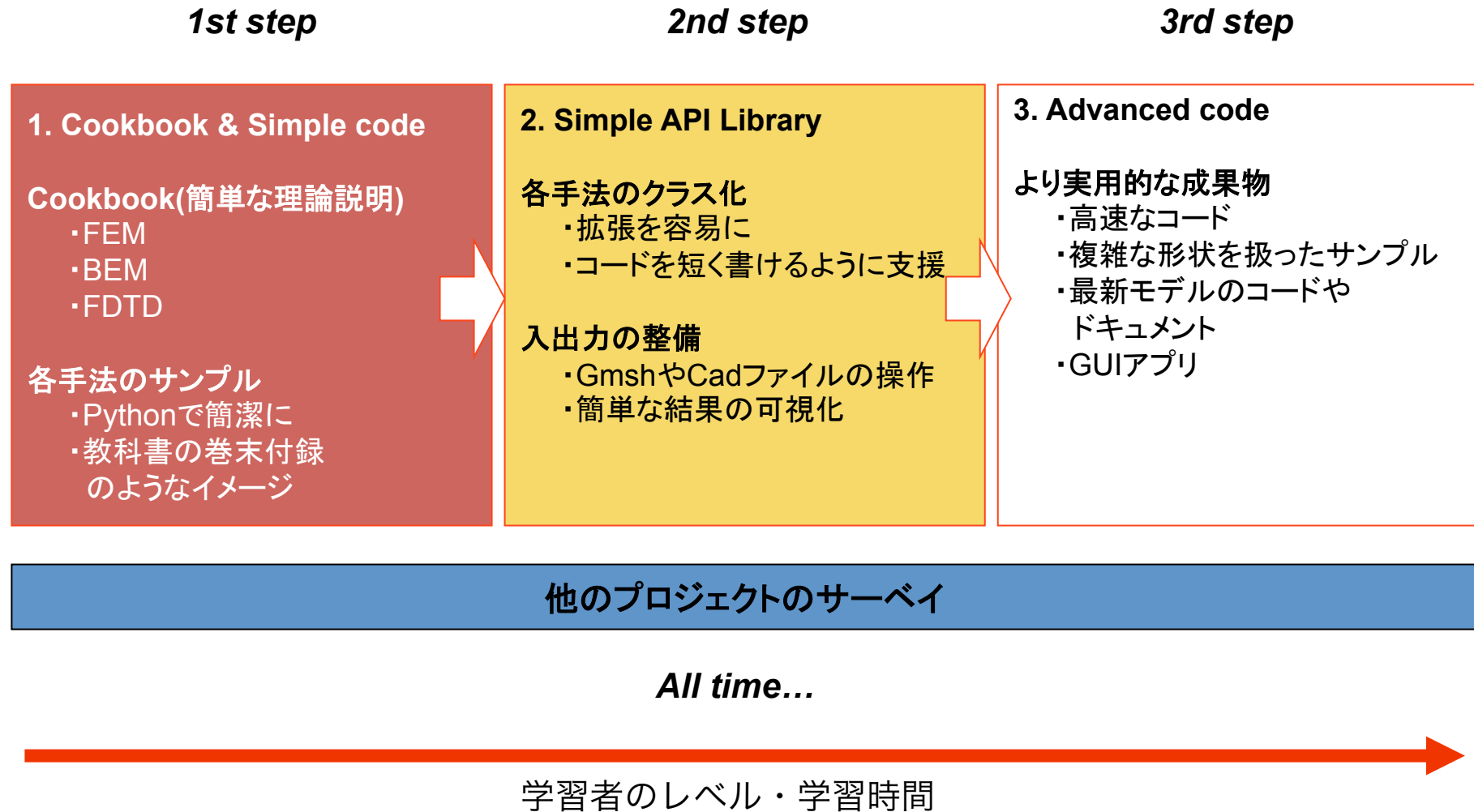
# はじめに (1)

## OpenAcousticsプロジェクト

- 建築音響数値解析の研究分野は、精力的かつ活発な領域
  - Ex. 音響数値解析小委員会
- 実務への適用は、やや遅れている印象  
(数値流体解析、構造解析といった他の数値解析分野と比べると)
  - 容易に利用可能な汎用コードが少ない
  - 初学者や数値計算と縁遠い環境の人に対する入門書が少ない
  - 実際的な問題の多くは、複雑で、コードの作成は比較的難しい(部材のモデル化など)
- 音響数値解析に関するコードをオープンソースソフトウェアとして公開
  - ドキュメント・チュートリアル・解析事例をWeb上に公開
  - 実際的な問題を解いた例についても充実を図る

**音響数値解析技術の実務への普及・初学者への教育に**

# はじめに (2)



# はじめに (3)

## OpenAcoustics Code-Surveyコンポーネント

- ▶ 既存のオープンソースコードの調査  
音響解析の有無、手法、開発規模、使い勝手 (GUI)
- ▶ 各コードの導入→例題計算までの手順を紹介、ドキュメントの翻訳
- ▶ 共通問題解析によるOpenAcousticsコードの解析精度検証  
→本プロジェクトの向上に活かす



## 既存のオープンソースコード

### ▶ 教育向け

- Lambda
- DeIFEM



### ▶ 大規模プロジェクト

- Elmer  Elmer
- Code\_Aster 
- OpenFOAM
- ESP-r

### ▶ 未調査

- OpenLB 
- FiPy

OpenAcoustics 2D/3D-FEM  
コードの精度検証

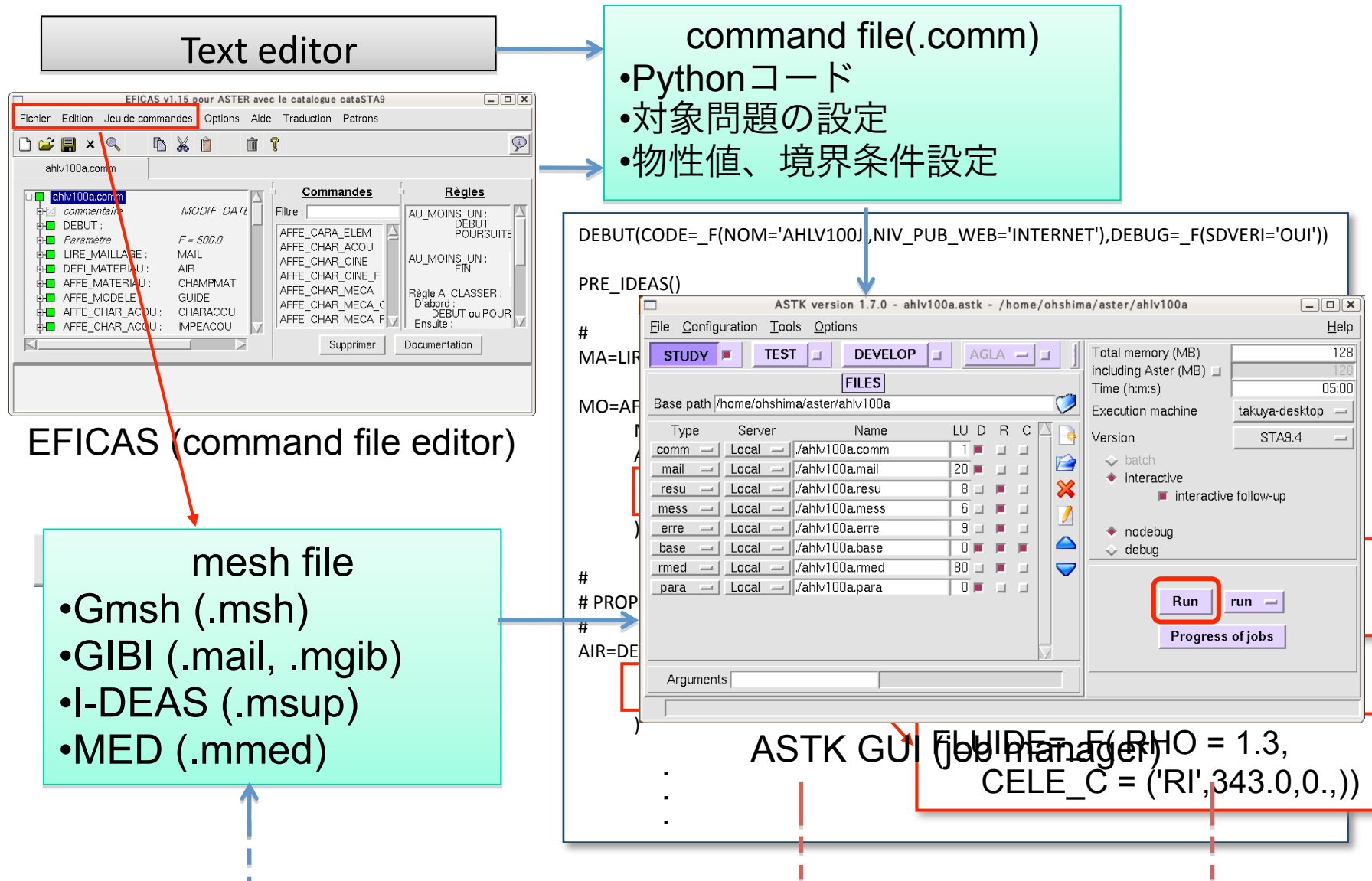


# Code\_Aster, Elmerの概要

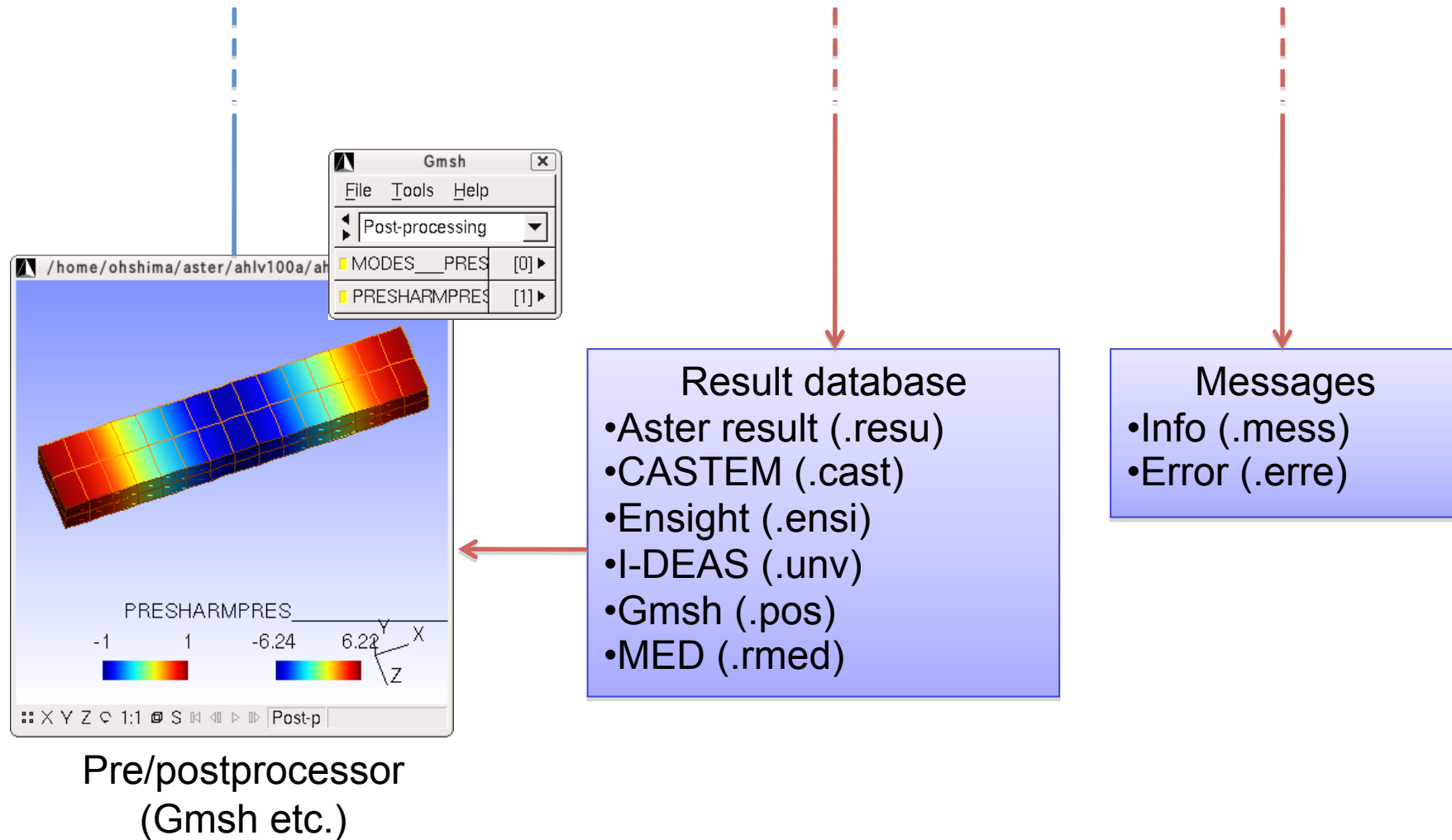
- ▶ 多機能（構造解析、CFD、etc.）かつ大規模（～100万行）なコード。
- ▶ 音響問題を標準で扱える。
- ▶ 国家プロジェクト相当の開発規模で、組織的かつ長期間の開発経緯を持つ。

	Code_Aster	Elmer
開発主体	フランス電力公社	フィンランド・CSC社
開発開始年	1989年	1995年
使用バージョン	9.4	5.4.1
ライセンス	GPL	
対応OS	Windows、Linux、Mac OS X	
解析手法	2D/3D FEM	2D/3D FEM/BEM
FEM要素形状	3、4角形、4,5,6面体	3、4角形、4,6面体 ピラミッド、プリズム
FEM要素次数	1次・2次	1次・2次・3次・p-element
境界条件	音響インピーダンス、 粒子速度、音圧、開 領域境界	音響インピーダンス、 音圧 (Dirichlet/Neumann) 周期条件
減衰媒質	Yes	
連成問題	Yes	
並列化	OpenMP、MPI	MPI
GUI	Yes	

# Code\_Aster : Usage

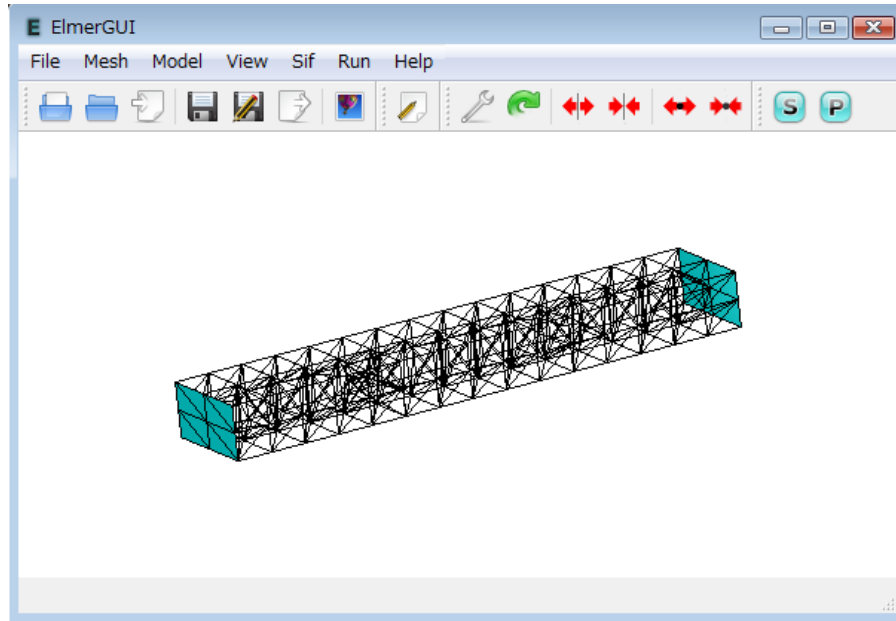


# Code\_Aster : Usage



# Elmer : Usage

ElmerGUI (front end, 2008~)



command file editor

ElmerGrid (mesh generator)

ElmerSolver (solver)

ElmerPost (postprocessor)

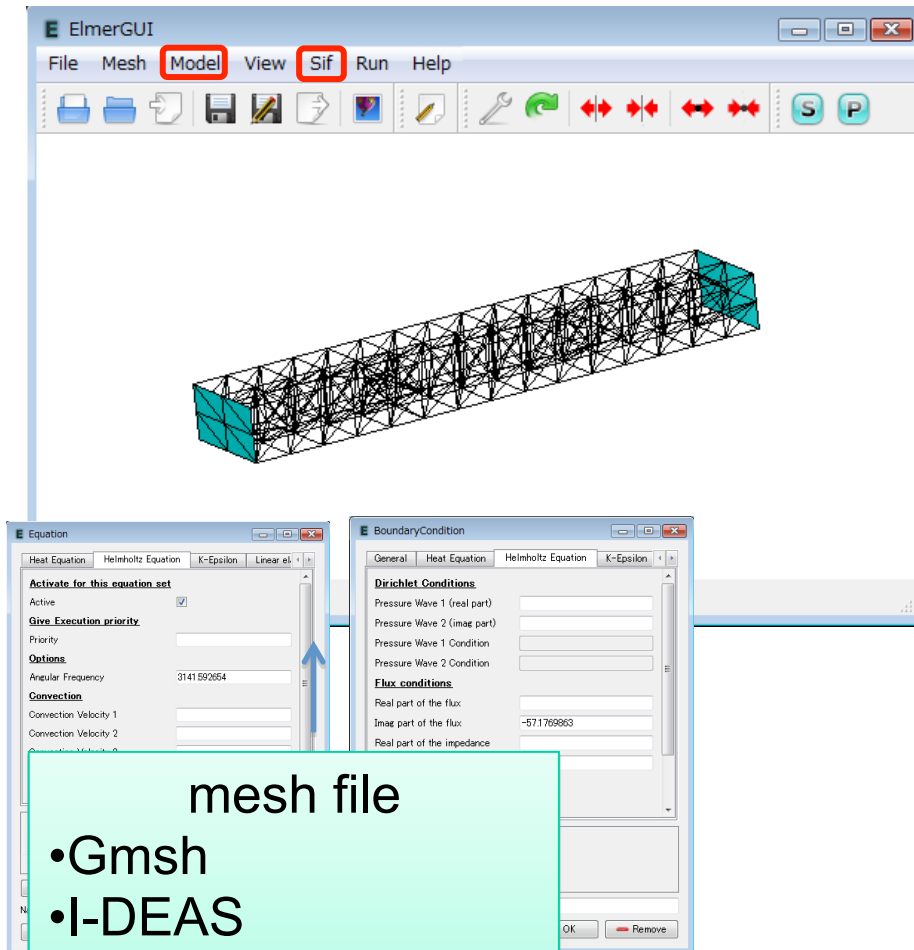
mesh file

- Gmsh
- I-DEAS
- Elmer native
- etc...



# Elmer : Usage

ElmerGUI (front end, 2008~)

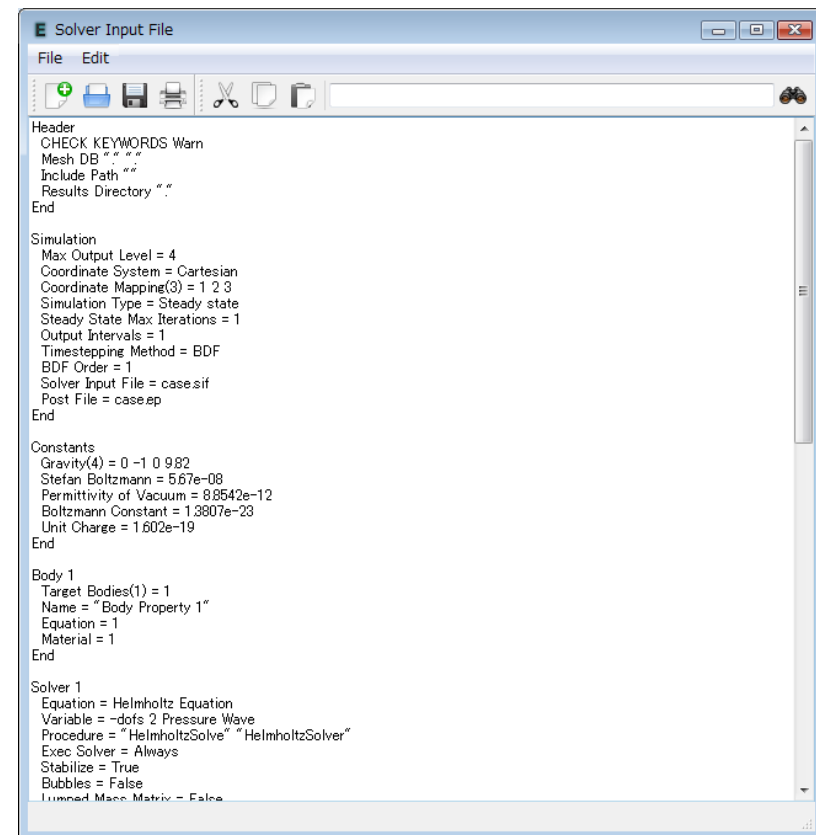


mesh file

- Gmsh
- I-DEAS
- Elmer native
- etc...

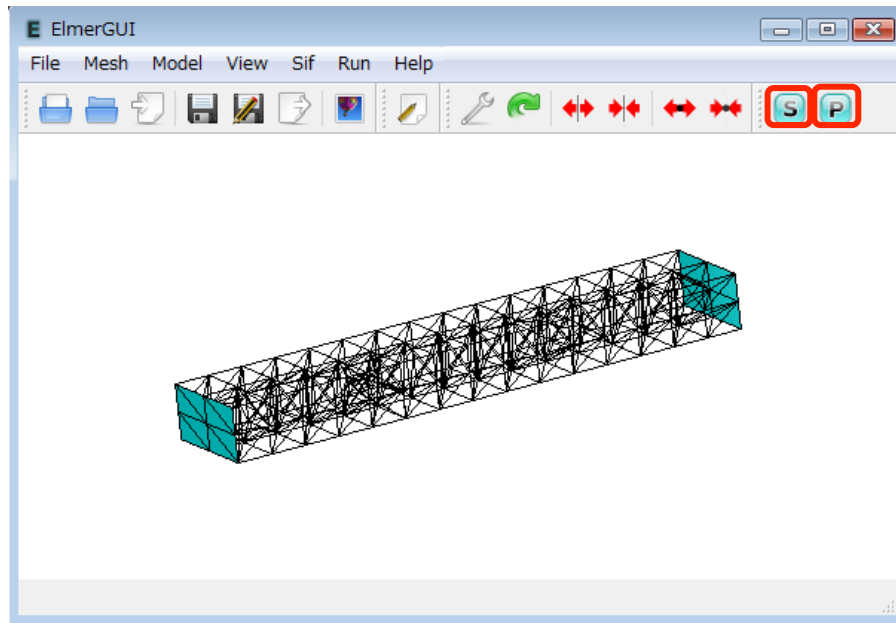
条件の設定

command file (.sif)の生成、修正



# Elmer : Usage

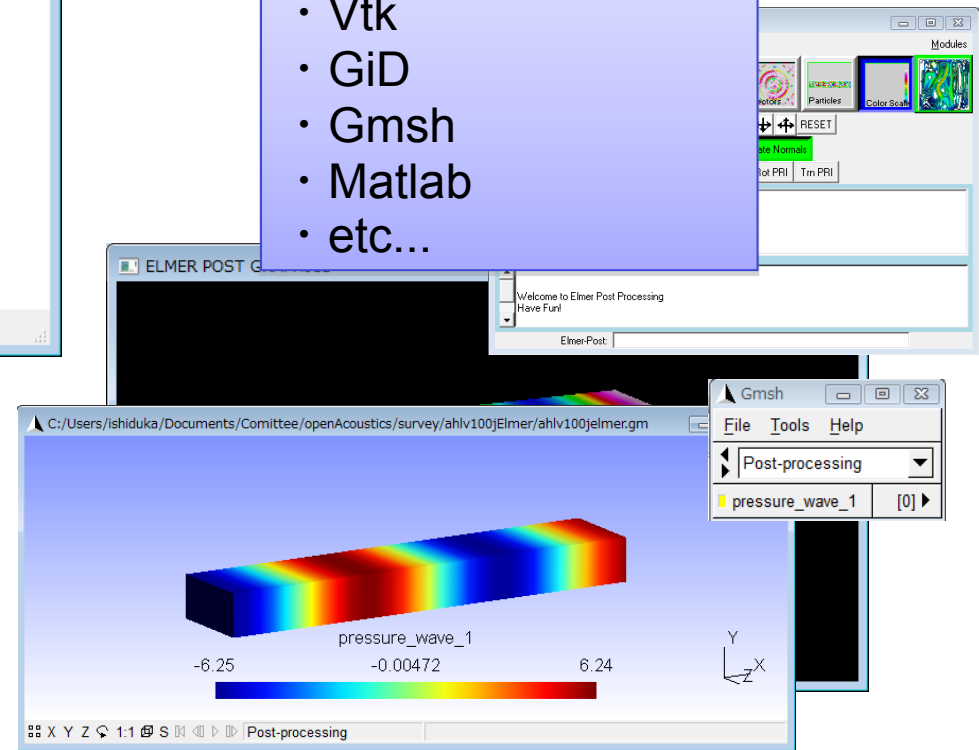
ElmerGUI (front end, 2008~)



Elmer → ElmerSolver log

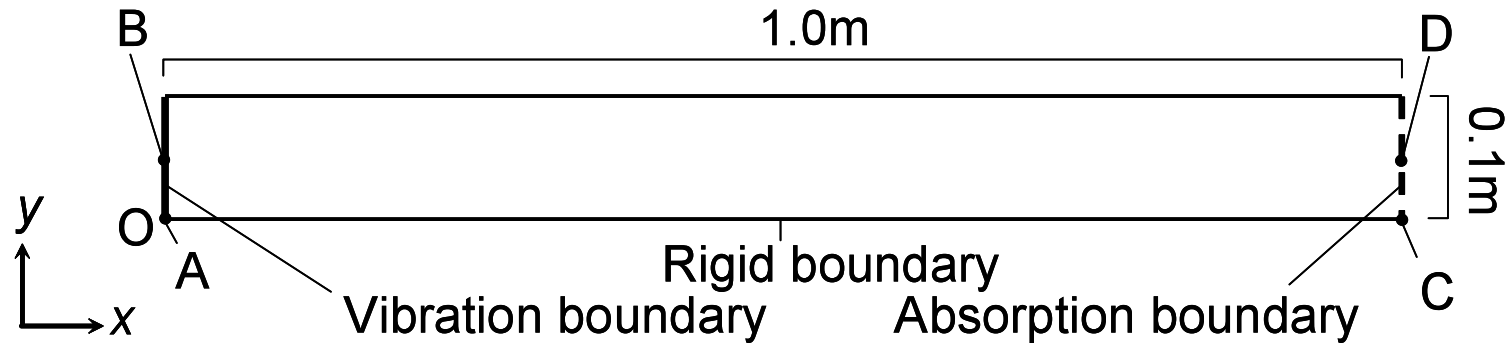
Elmer → Result database

- ElmerPost
- Vtk
- GiD
- Gmsh
- Matlab
- etc...



External pre/postprocessor (gmsch etc...)

## 2次元ベンチマーク問題



- 本音響問題の解析解は、音圧 $p$ について ( $j$ : 虚数単位)

$$p(x) = -\rho_0 c_0 V_n \exp\left(-\frac{2j\pi f x}{c_0}\right)$$

- この解を参照解として使用

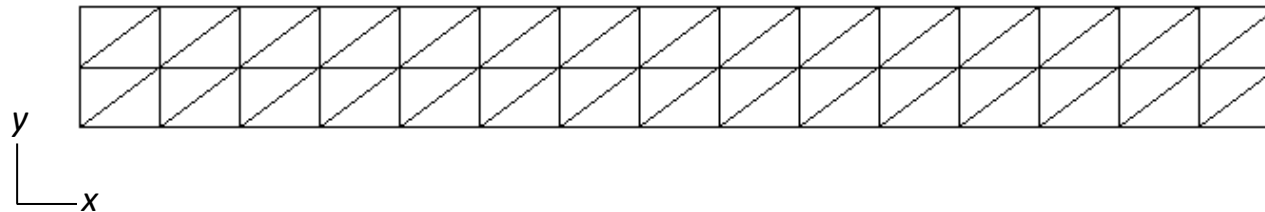
# メッシュ

---

a) First order



b) Second order



Meshes

- Code\_Asterサンプルケースのメッシュデータを使用
- a)1次要素: 3節点三角形要素 (240要素、155節点)
- b)2次要素: 6節点三角形要素 (60要素、155節点)

## 2次元問題解析結果：参照点音圧、1次要素

Pressure (in [Pa]) at the reference points computed by first order elements.

Point	A		B		C		D	
	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.
Analytical	-6.2426	0	-6.2426	0	6.0237	1.6387	6.0237	1.6387
Code_ Aster	-6.1950	$-1.5674 \times 10^{-2}$	-6.2444	$5.7609 \times 10^{-3}$	5.9655	2.0110	5.9199	1.9838
Error [%]	0.803		0.097		6.036		5.774	
Elmer	-6.1957	$-1.5128 \times 10^{-3}$	-6.2470	$1.4776 \times 10^{-2}$	6.0155	1.8628	5.9669	1.8418
Error [%]	0.751		0.247		3.592		3.378	
Open Acoustics	-6.1957	$-1.5129 \times 10^{-3}$	-6.2470	$1.4776 \times 10^{-2}$	6.0155	1.8628	5.9669	1.8418
Error [%]	0.751		0.247		3.592		3.378	

- Error: 複素振幅誤差、赤字: 誤差最大、青字: 誤差最小
- Elmerが良い結果、OpenAcousticsもほぼ同等

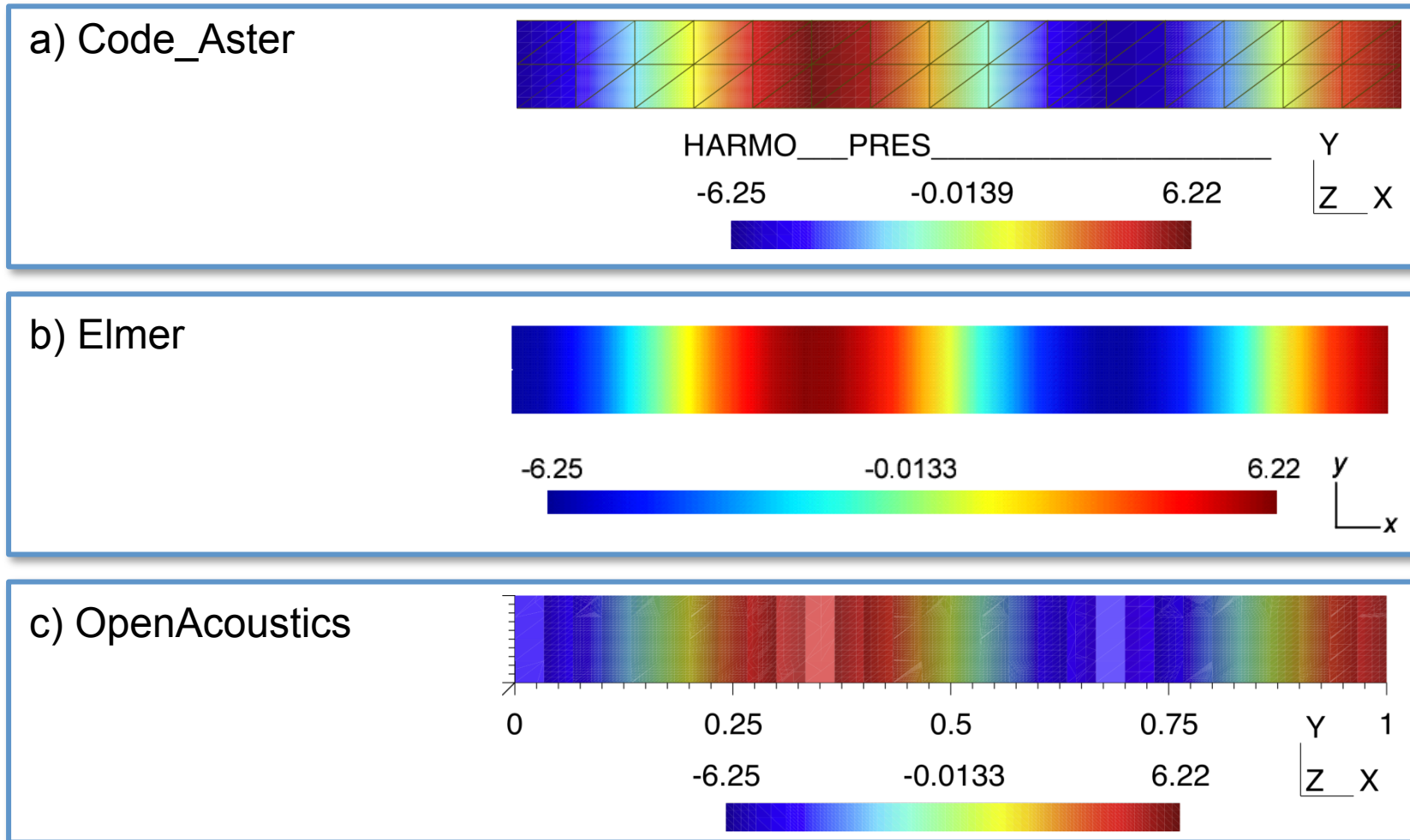
## 2次元問題解析結果：参照点音圧、2次要素

Pressure (in [Pa]) at the reference points computed by second order elements.

Point	A		B		C		D	
	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.
Analytical	-6.2426	0	-6.2426	0	6.0237	1.6387	6.0237	1.6387
Code_ Aster	-6.2473	-1.0496 $\times 10^{-2}$	-6.2436	2.9216 $\times 10^{-3}$	6.0190	1.6517	6.0231	1.6446
Error [%]	0.184		0.050		0.221		0.094	
Elmer	-6.2456	-9.1524 $\times 10^{-3}$	-6.2431	2.0285 $\times 10^{-3}$	6.0203	1.6487	6.0233	1.6420
Error [%]	0.154		0.033		0.169		0.053	
Open Acoustics	-6.2456	-9.1524 $\times 10^{-3}$	-6.2431	2.0285 $\times 10^{-3}$	6.0203	1.6487	6.0233	1.6420
Error [%]	0.154		0.033		0.169		0.053	

- Error: 複素振幅誤差、赤字: 誤差最大、青字: 誤差最小
- ElmerとOpenAcousticsが一致して良い結果

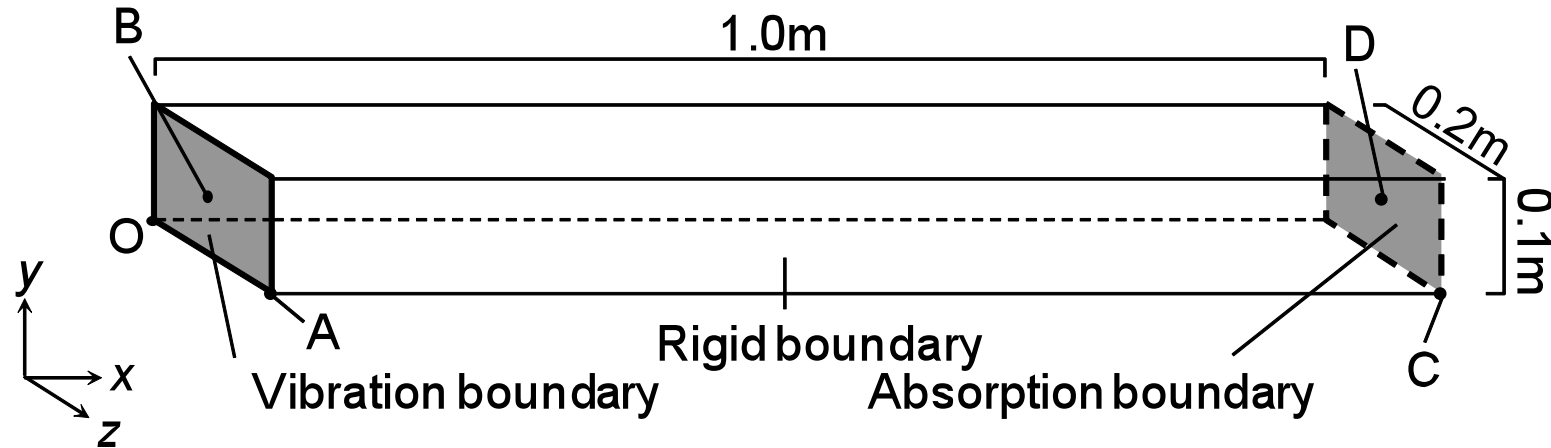
## 2次元問題解析結果：音圧分布（実部）、2次要素



Real part distributions of pressure (in [Pa]).

- いずれも概ね同一の分布

### 3次元ベンチマーク問題

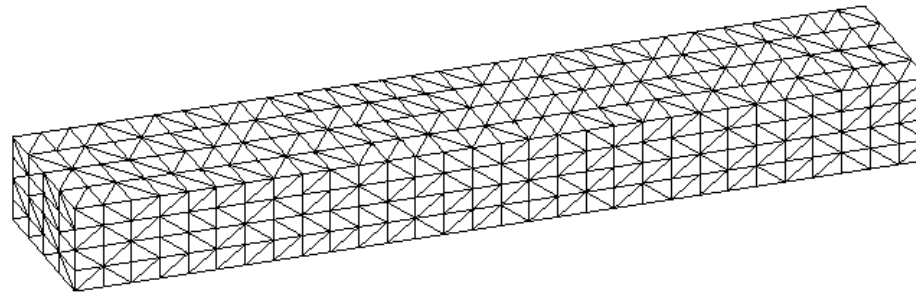


- Code\_Asterのサンプルケース “AHLV100”
- 幅0.2 m、高さ0.1m、長さ1 mの音響管、
- 左端=振動境界(音源)、右端=吸音境界
- 参照点: A~Dの4点
- 空気密度 $r_0 = 1.3 \text{ kg/m}^3$ 、音速 $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 、振動境界速度 $V_n = 0.014 \text{ m/s}$ 、  
解析周波数 $f = 500 \text{ Hz}$ 、吸音境界音響インピーダンス $Z = r_0 c_0 = 445.9 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

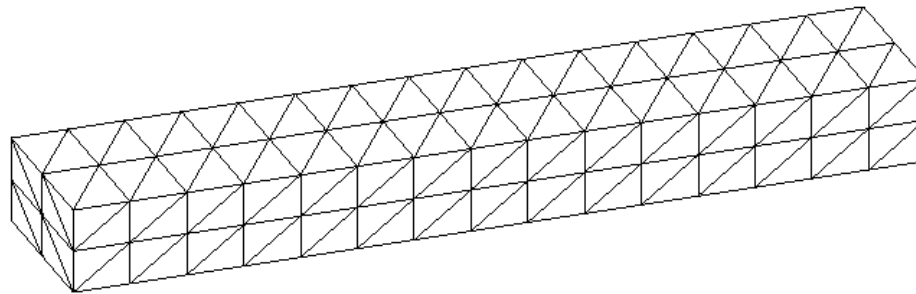


# メッシュ

a) First order



b) Second order



Meshes



- Code\_Asterサンプルケースのメッシュデータを使用
- a)1次要素: 4節点四面体要素 (2180要素、685節点)
- b)2次要素: 10節点四面体要素 (421要素、870節点)

### 3次元問題解析結果：参照点音圧、1次要素

Pressure (in [Pa]) at the reference points computed by first order elements.

Point	A		B		C		D	
	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.
Analytical	-6.2426	0	-6.2426	0	6.0237	1.6387	6.0237	1.6387
Code_Aster	-6.2321	$3.4220 \times 10^{-2}$	-6.1797	$3.0002 \times 10^{-2}$	5.8478	1.8750	5.9706	1.9224
Error [%]	0.167		1.006		1.627		0.478	
Elmer	-6.2321	$3.4220 \times 10^{-2}$	-6.2831	$3.1025 \times 10^{-2}$	5.8478	1.8750	5.9706	1.9224
Error [%]	0.167		0.650		1.627		0.478	
Open Acoustics	-6.2321	$3.4220 \times 10^{-2}$	-6.2831	$3.1025 \times 10^{-2}$	5.8478	1.8750	5.9706	1.9224
Error [%]	0.167		0.650		1.627		0.478	

- Error: 複素振幅誤差、赤字: 誤差最大、青字: 誤差最小
- Elmer、OpenAcousticsが一致して良い結果

### 3次元問題解析結果：参照点音圧、2次要素

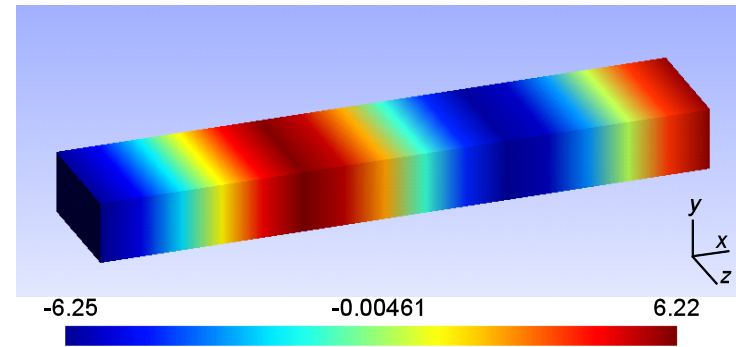
Pressure (in [Pa]) at the reference points computed by second order elements.

Point	A		B		C		D	
	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.	Real	Imag.
Analytical	-6.2426	0	-6.2426	0	6.0237	1.6387	6.0237	1.6387
Code_Aster	-6.2483	$-1.6024 \times 10^{-2}$	-6.2465	$-1.2210 \times 10^{-2}$	6.0201	1.6491	6.0286	1.6322
Error [%]	0.092		0.063		0.012		0.048	
Elmer	-6.2484	$-1.6002 \times 10^{-2}$	-6.2466	$-1.2291 \times 10^{-2}$	6.0198	1.6492	6.0286	1.6420
Error [%]	0.093		0.064		0.016		0.090	
Open Acoustics	-6.2483	$-1.6024 \times 10^{-2}$	-6.2465	$-1.2210 \times 10^{-2}$	6.0201	1.6491	6.0284	1.6319
Error [%]	0.092		0.063		0.012		0.048	

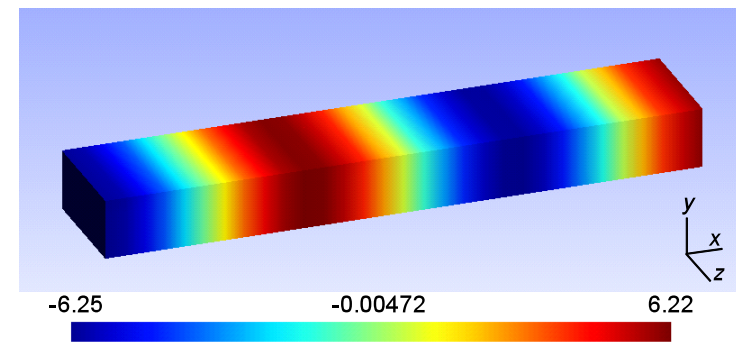
- Error: 複素振幅誤差、赤字: 誤差最大、青字: 誤差最小
- Code\_AsterとOpenAcousticsが一致して良い結果

# 3次元問題解析結果：音圧分布（実部）、2次要素

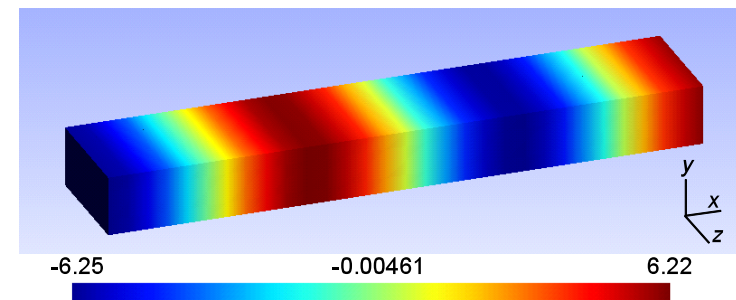
a) Code\_Aster



b) Elmer



c) OpenAcoustics



Real part distributions  
of pressure (in [Pa]).

- いずれも概ね同一の分布

## まとめ

---

- ▶ survey コンポーネントからCode\_Aster, Elmerのsurvey結果を紹介
- ▶ 2次元／3次元音響管問題を  
Code\_Aster、Elmer、OpenAcoustics-FEMで解析
- ▶ 三角形（2次元） 又は四面体（3次元） 1次要素および2次要素を対象
- ▶ 2次元問題はOpenAcousticsの解析精度はElmerと同等、  
Code\_Asterよりやや良好、
- ▶ 3次元問題はOpenAcousticsの解析精度はCode\_Asterと同等、  
Elmerよりやや良好、  
  
    ➡ 今回のケースに関してOpenAcousticsの解析精度は妥当

# 謝辞

---

本プロジェクトは、  
日本建築学会  
建築音響数値解析環境整備[若手奨励] 特別研究委員会  
としての助成を受けた。