

有限要素解析オープンソースELMER による固体壁の振動応答解析

Analysis on Solid -Wall Response to shock loading
by FEM Open Source Elmer

オープンCAEシンポジウム2012

青山学院大学 航空宇宙システム研究室

修士2年 後藤 祐介

指導教員 林 光一 教授

山田 英助 助教

朝原 誠 助手



Aerospace System Laboratory
Aoyama Gakuin University



研究背景

浜岡原子力発電所の配管爆発・破断事故



Ref. Hamaoka - 1

デトネーションの伝播により亀裂が拡大し破断に至ったと考えられる

衝撃波による圧力負荷は固体壁に大きな損傷をもたらす

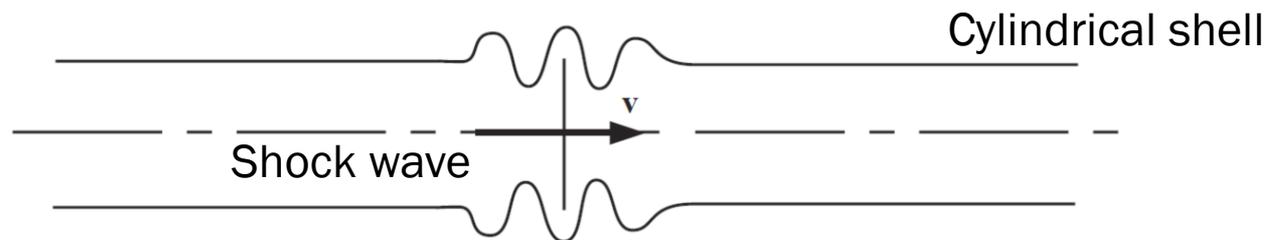


Ref. Tacoma Bridge

衝撃波速度が構造物の共振条件に達した場合さらに深刻な被害をもたらす

研究目的

内部に衝撃波負荷を受ける構造物の
動的応答を数値解析により明らかにする



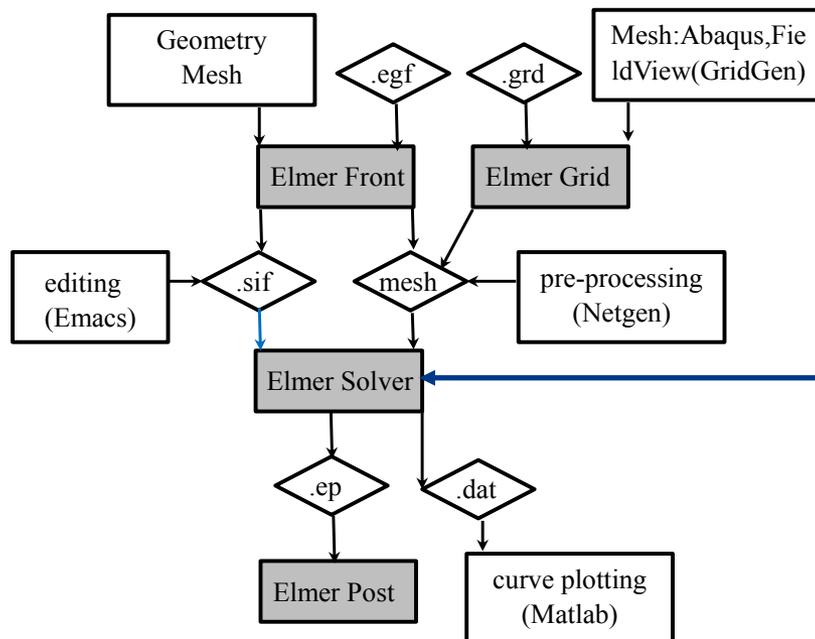
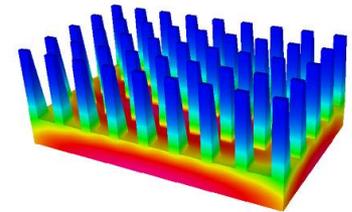
衝撃波応答を解析するプログラムの構築と評価を行う

解析ソフト(ELMER)



フィンランドCSC社により開発された
フリーの有限要素解析ソフト

オープンソースによりプログラムの
変更・追加が可能

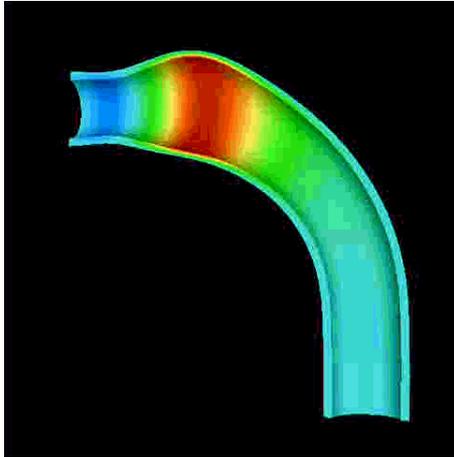


Elmer Solver

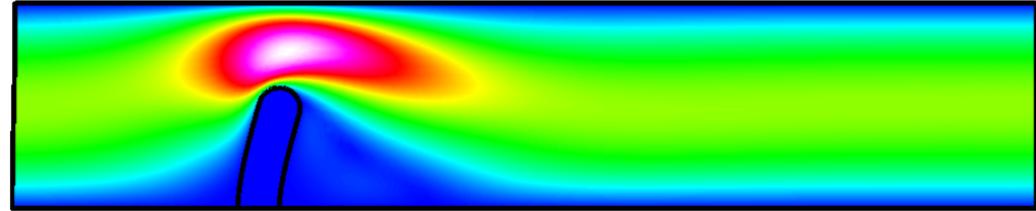
- N-S方程式, k - ϵ モデル
- 弾性方程式
- 熱伝導
- etc

Work flow in Elmer

ELMERにおける流体計算



Ref. Elmer—CSC



Ref. Tutorial 8 Interaction between fluid flow and elastic obstacle

複数の気体を扱うことが難しい

→本研究では2種類の気体を扱った計算を行いたい

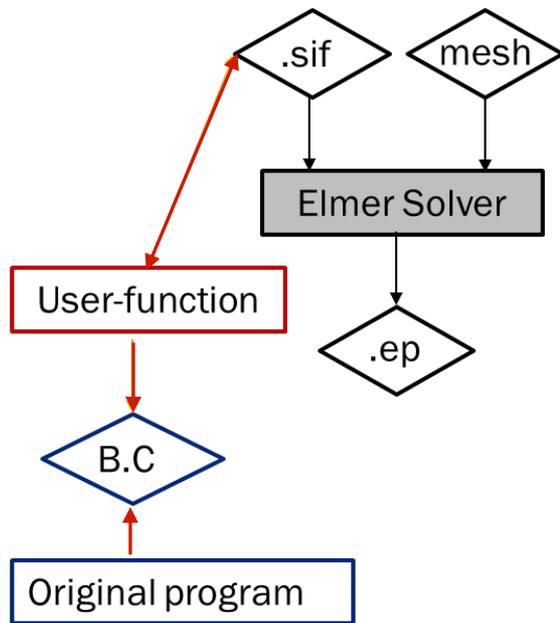
衝撃波を扱うことが難しい
→計算時間が長くなりやすい

境界条件がそのままでは限定されてしまう。

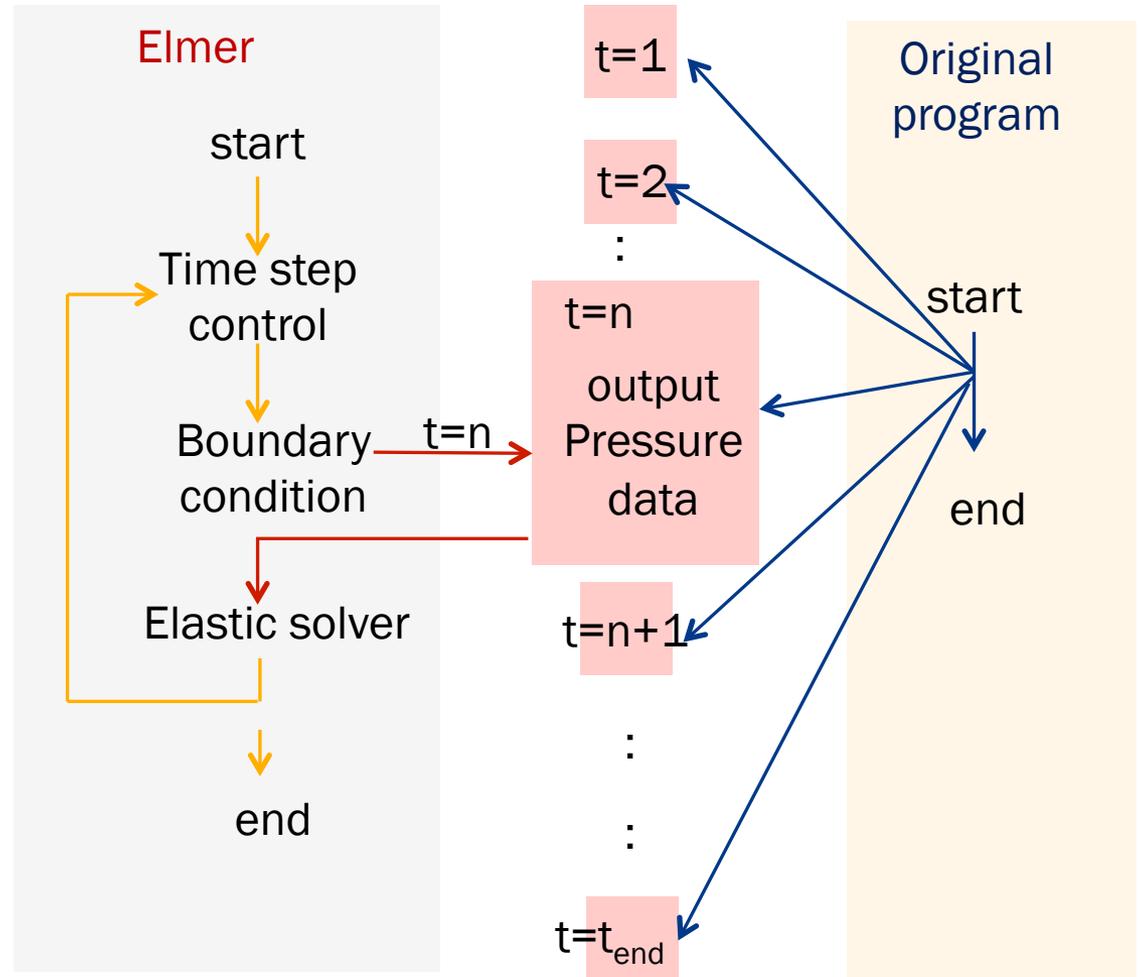
流体計算を別のプログラムで行う

ELMER + オリジナルプログラム

Elmerのuser functionにより外部ファイルから境界条件を読む機能の追加

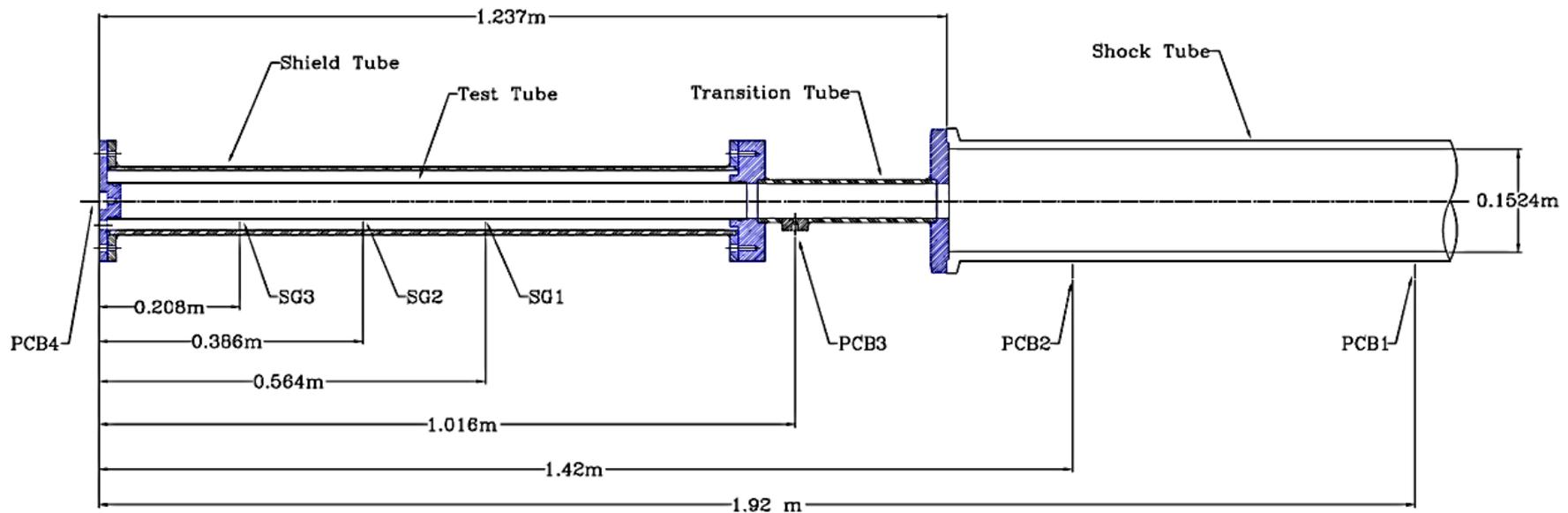


Work flow in Analysis



比較を行う実験

J.E. Shepherd(Caltech)らによる実験(1998)[1]



共振を示す特性速度 v_{c0}

Tangモデル

$$V_{c0} = 963 \text{ m/s}$$

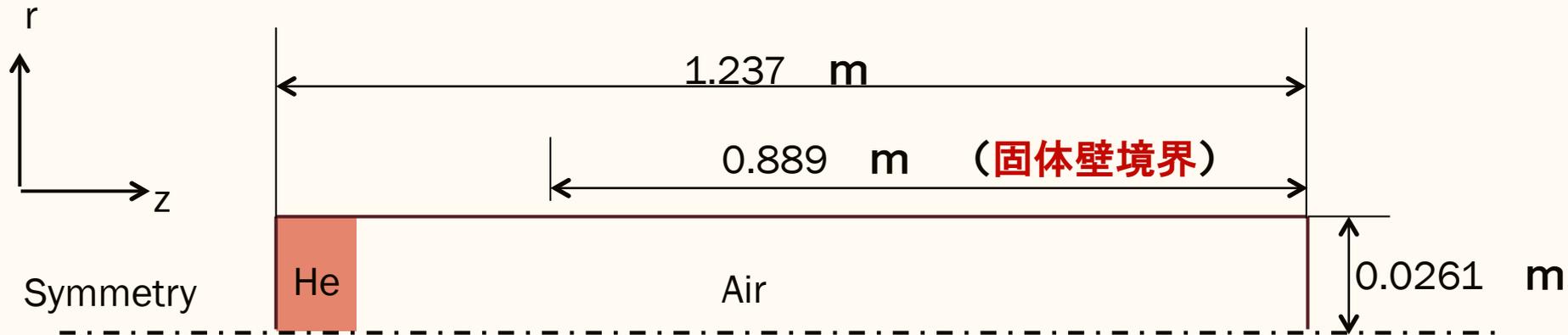
Simkinsモデル

$$V_{c0} = 987 \text{ m/s}$$

計算条件

衝撃波解析 計算条件 (オリジナルコード)

- 支配方程式
 - 2次元軸対称圧縮性Navier-Stokes方程式+各化学種の保存方程式
 - 3化学種(He, O₂, N₂)



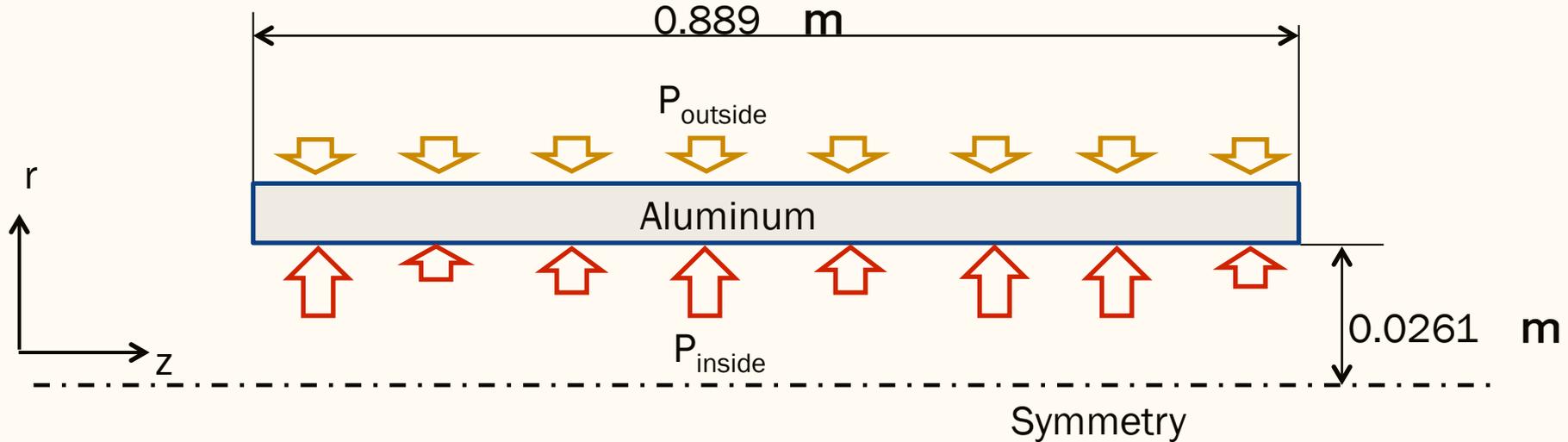
Grid	2475 × 53
Grid size [μm]	500
Boundary Grid	1779

P_{Air} [MPa]	0.0068
P_{He} [MPa]	0.2 ~ 0.4
$T_{\text{He}}, T_{\text{Air}}$ [K]	300

計算条件

固体壁有限要素解析 計算条件 (Elmer)

- 使用Solver
 - ElasticSolver



Grid		1779 × 5
Grid size	[μm]	500
Degree of element		1

P_{outside}	[MPa]	0.0068
P_{inside}	[MPa]	Fluid result

計算結果



Solverにおけるコマンドファイルである.sifファイルにvtu形式で結果を保存するコマンドを加えることによりParaViewによる可視化が可能

計算結果可視化

上段：構造計算結果 半径方向変位
下段：流体計算結果 压力分布图

t= 0 ms

t= 0.5 ms

t= 1.0 ms

t= 1.5 ms



計算結果可視化

上段：構造計算結果 半径方向変位
下段：流体計算結果 压力分布图

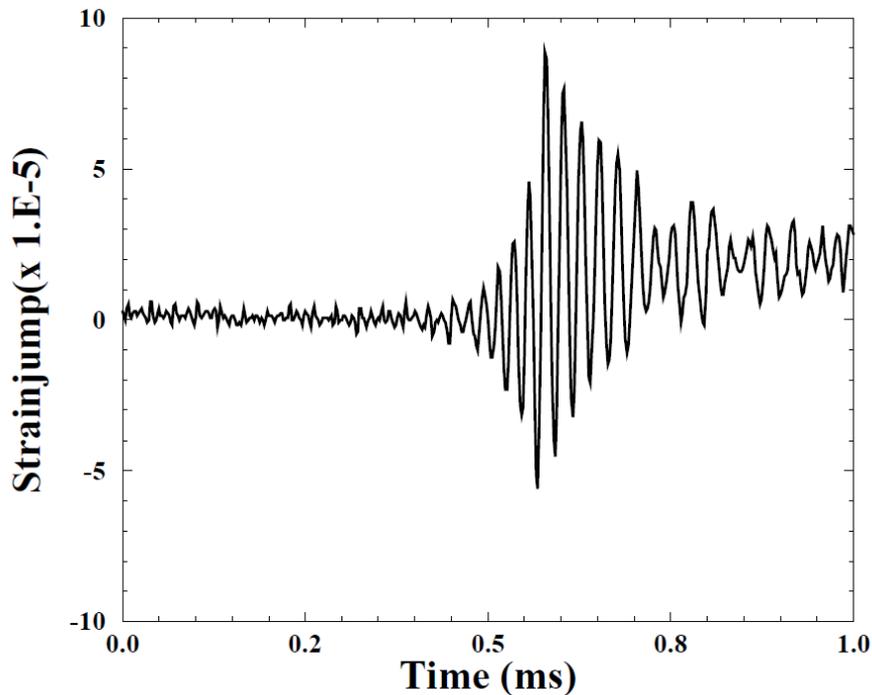
流体：幅1.5倍 構造：幅5倍



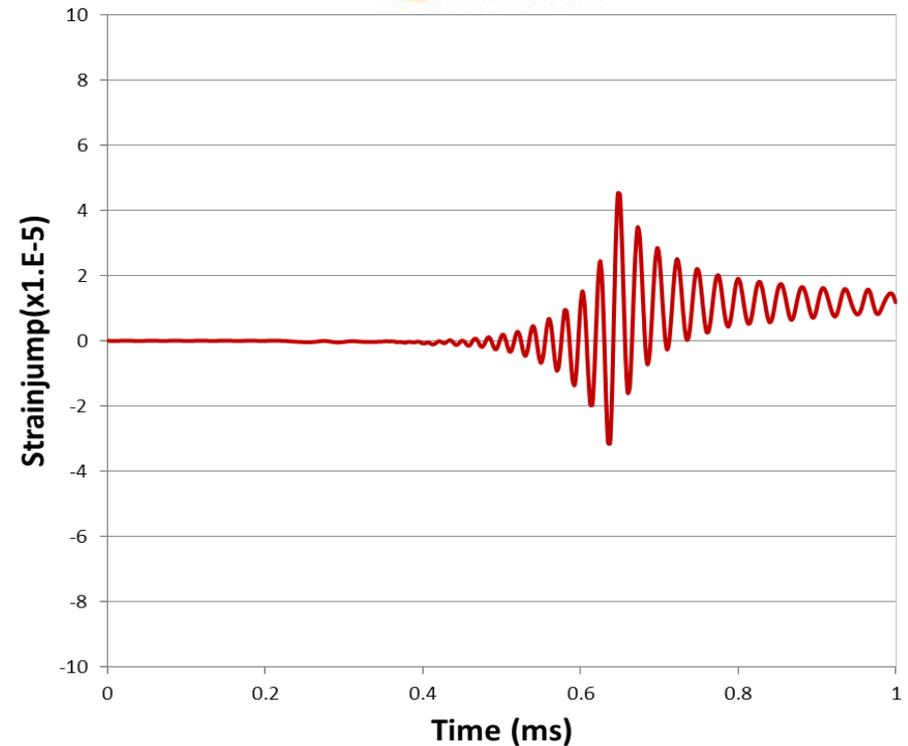
ひずみ波形の比較

ひずみ波形 ($v < v_{c0}$)

 Elmer



Shock speed=967.8m/s



Shock speed=966.3m/s

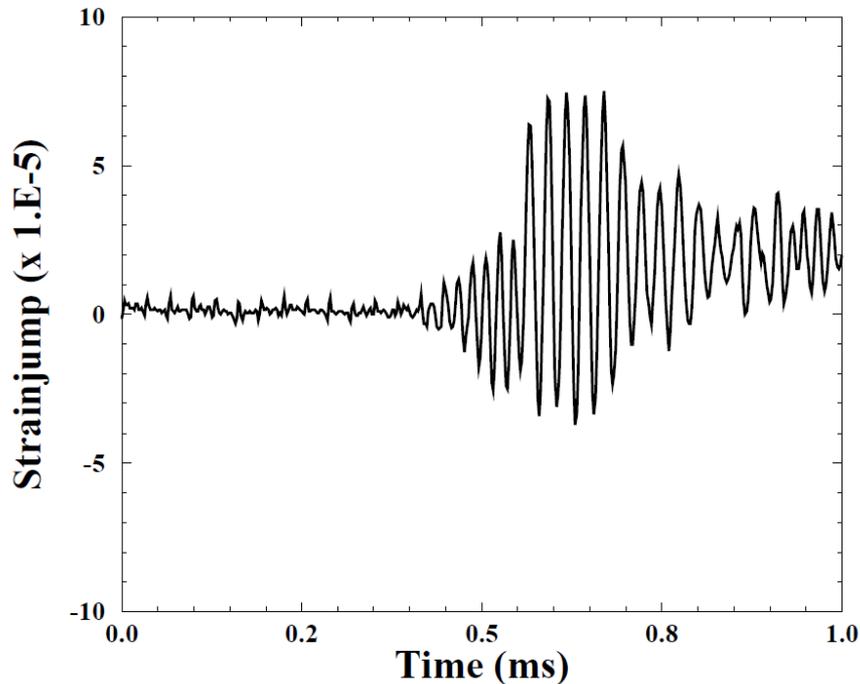


波形は定性的な一致を示している

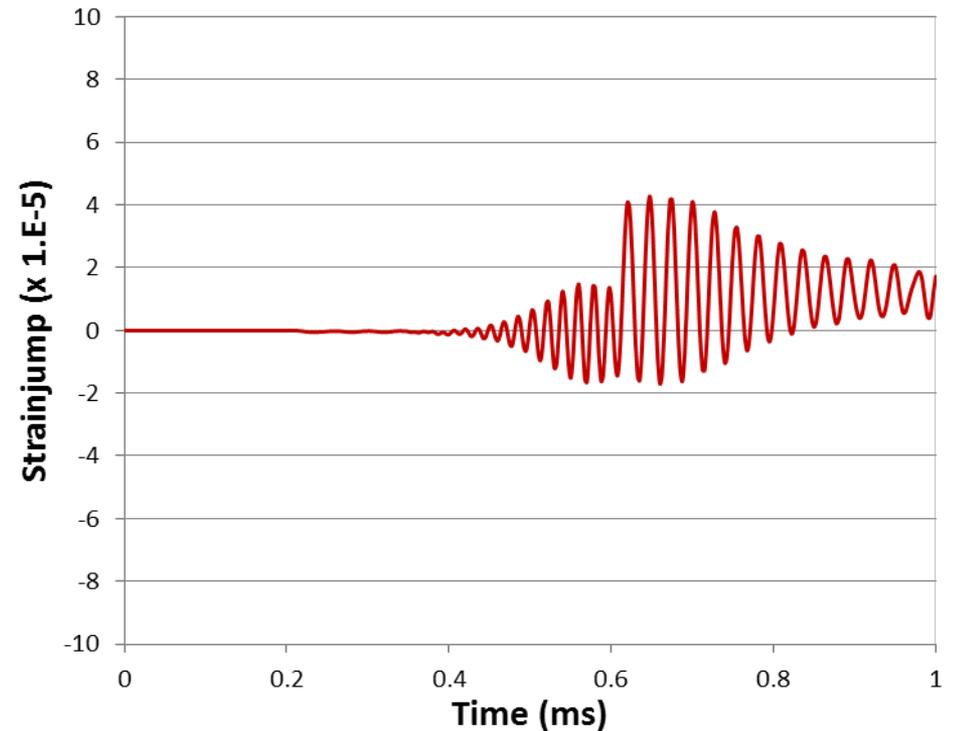
ひずみ波形の比較

ひずみ波形 ($v > v_{c0}$)

 Elmer



Shock speed=999.2m/s



Shock speed=1005.1m/s



波形は定性的な一致を示している

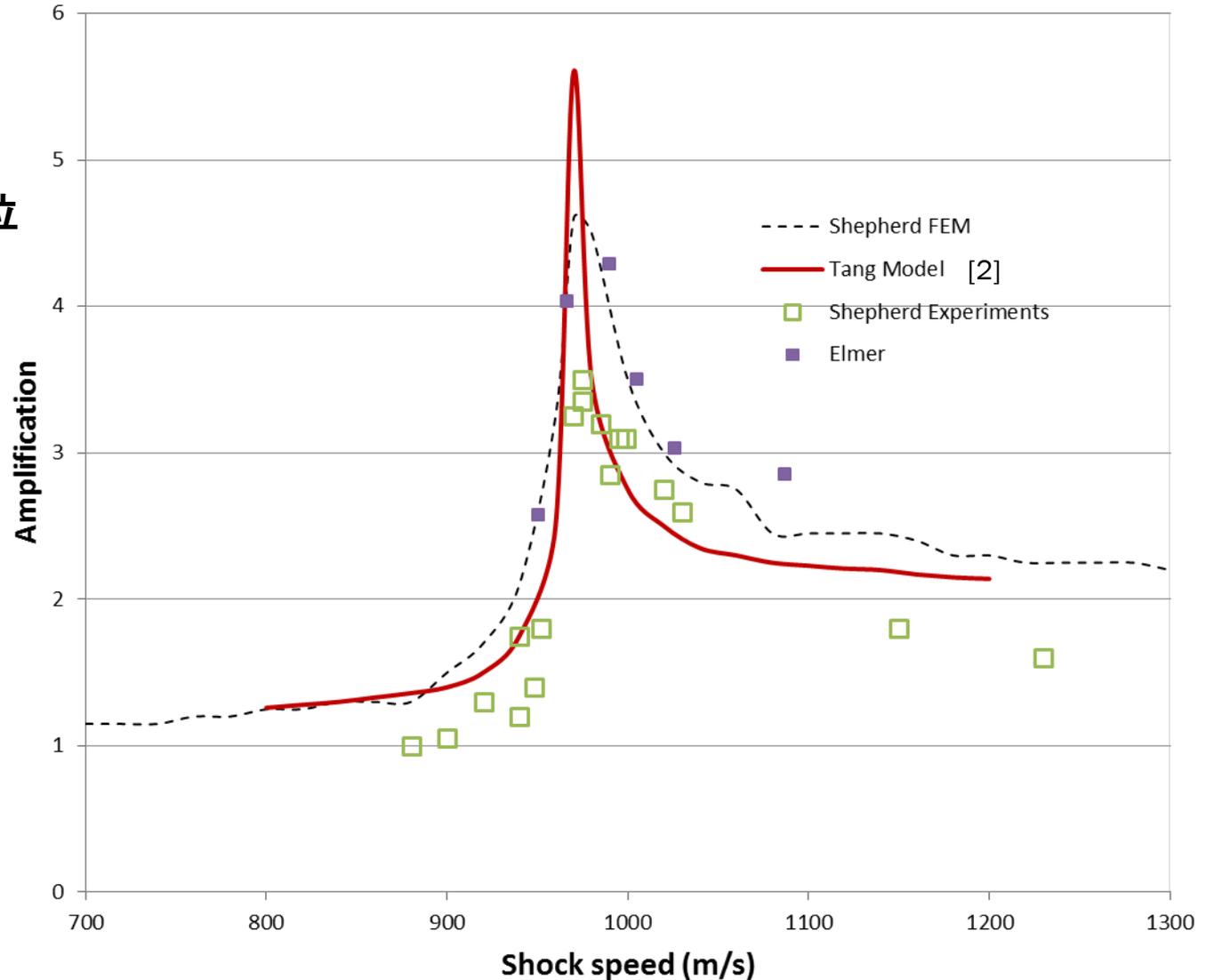
増幅係数の比較

増幅係数=

非定常計算の最大変位
/ 定常計算の変位



特性速度付近で高い増幅係数を示している



まとめ

- まとめ
 - UserFunctionによりカスタマイズしたElmerの非定常計算により衝撃波荷重を受ける管の振動応答を計算することが出来た。
 - 計算により得られた波形は特性速度前後の実験結果とそれぞれ定性的な一致を示した。
 - 計算により求められた増幅係数は実験結果と近い傾向を示した。

- 今後の展望
 - 2 wayの連成計算（強連成）の計算とその必要性の評価
 - 反応性流体との組み合わせ（デトネーション等）
 - 塑性変形を伴う計算，管の破壊を含んだ計算を行う



参考文献

- [1] Shepherd JE., 1998, April. The structural response of cylindrical shells to internal shock loading. Technical Report FM98-3 Graduate Aeronautical Laboratories
- [2] Tang, S., 1965, October. Dynamic response of a tube under moving pressure. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 5, pp. 97-122. Engineering Mechanics Division

補足資料

数値計算法 (流体)

➤ 支配方程式

- 2次元軸対称圧縮性Navier-Stokes方程式+各化学種の保存方程式
- 3化学種(He, O₂, N₂)

➤ 離散化手法

- 時間積分 : Strang type fractional step method
- 対流項 : 2nd-order explicit Harten-Yee non-MUSCL modified flux type TVD scheme