

# 爆風伝播の数値シミュレーション

Numerical simulation of blast wave propagation.

株式会社 爆発研究所

吉田正典

株式会社 ディライト  
岡新一 毛利昌康

Metacomp Technologies Inc.  
Sukumar Chakravathy

## 数値計算上の課題

(定量的に結果を説明できるか)

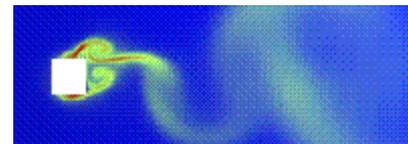
- ・全体形状
- ・表面の微細構造
- ・火炎表面温度分布
- ・爆風伝播、特に遠方

# 背景

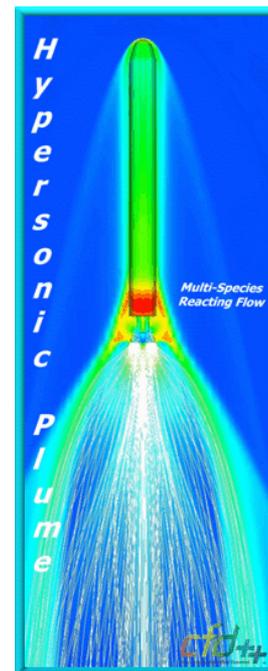
- 衝撃波の数値計算においては、保存型スキーム・高次精度でかつ、任意のEOS(e.g. JWL)を取り扱える、汎用流体計算コードがない(?)
- 爆発安全評価においては、往々にして、非保存型スキームが用いられている
- 爆風計算においては、爆源近傍ではそれほど問題が無いものの、遠方での爆風安全性評価が困難
  - 例えば空中爆発や地表爆発の  $K=16$  などを”基準値”として考え、複雑な状況のシミュレーションにおいては、基準値をベースに判定する
- 爆源に高圧高温理想気体を用いても、遠方の爆風圧評価には問題はないであろう
- コードに求められる性能
  - 衝撃波問題に適した保存型スキームを採用していること
  - 並列計算が可能で、良好なスケーラビリティを有すること



# CFD++ の特徴

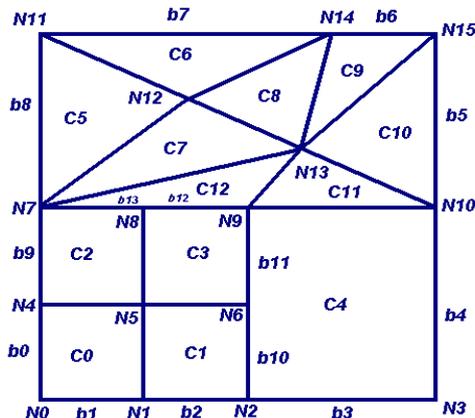
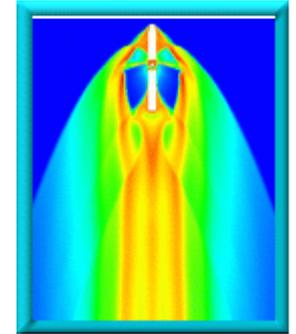


- 高次精度 TVD スキーム、Riemannソルバー
- Unified Physics  
高マッハ数流れ～低速の非圧縮流れまで単一のソルバーで対応  
反応を含んだ流れや多相流
- Unified Grid  
1D, 2D, 3D すべての種類の格子を統一的に扱う
- 並列計算の領域分割には均等分割&METISが選択可能
- 良好なスケーラビリティ



# CFD++ の特徴

- Modelerがない
- Grid 分割 (MIME) は tetra grid のみ
- node, cell, face の入力フォーマットは公開されている  
初期条件などは front end (mcfldgui) で設定可能  
→ 2Dなどの簡単な問題はちょっとしたプログラミングで  
grid生成 & 条件設定が可能



Cell-Type List

Cell Type	# of Nodes	Dimensionality	Description	Allowable Node Types
0	8	3-d	Hexahedron	0 and 1
1	6	3-d	Triangular Prism	0 and 1
2	4	3-d	Tetrahedron	0 and 1
3	4	2-d	Quadrilateral	2, 3, 4, 5, 6 and 7
4	3	2-d	Triangle	2, 3, 4, 5, 6 and 7
5	2	1-d	Line Element	8, 9, 10, 11, 12, and 13
6	5	3-d	Pyramid	0 and 1
13	4	3-d	3-D Quad	0 and 1
14	3	3-d	3-D triangle	0 and 1
15	2	2-d	2-D Line	2, 3, 4, 5, 6, and 7

# 数値計算： 二次元軸対称計算

1kg TNT エネルギー、1630kg/m<sup>3</sup> の高圧高温理想気体を爆源とした  
2.90 GPa, 5980 K, 4.29 MJ/kg  
92 mm  $\phi$   $\times$  92 mm L

Euler, Inviscid wall boundary (axis & ground) & continuous boundary (others)

空中爆発

K>16 程度までの計算

Bakerの値と比較

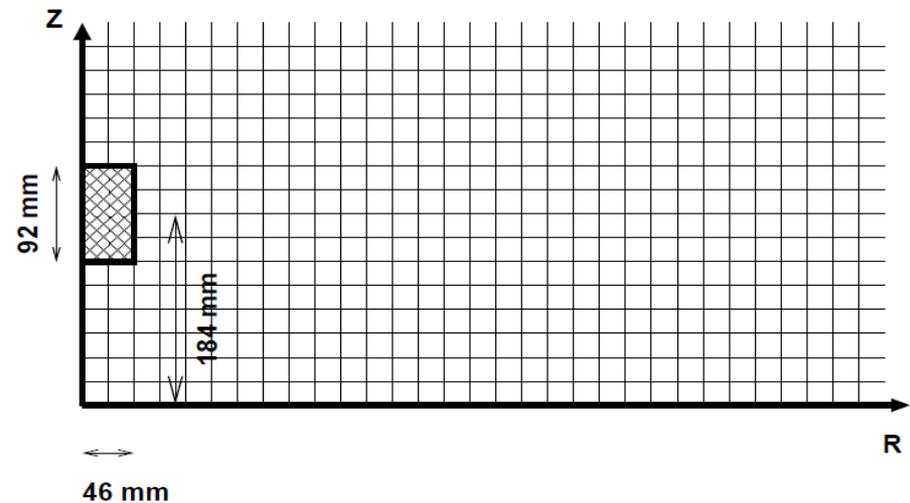
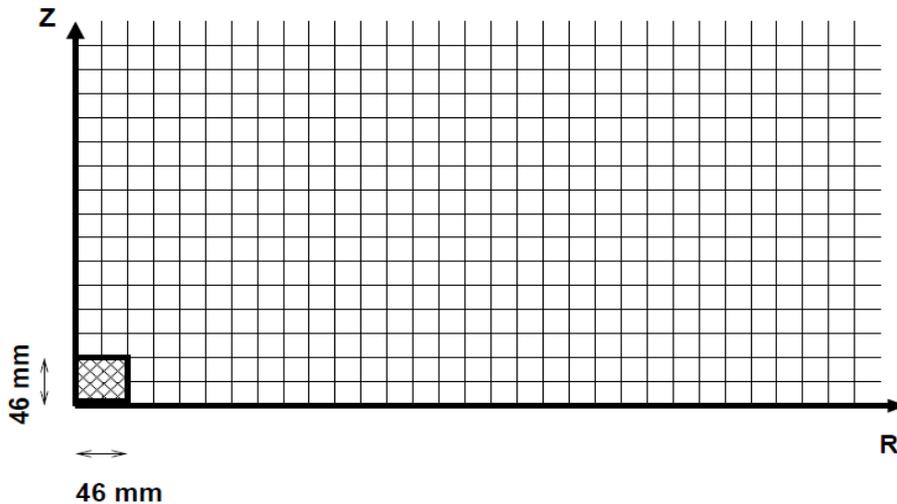
剛体の境界条件で上半分

HOB (Height of Burst)

0.184 m/kg<sup>1/3</sup>

MITI87 と比較

火炎形状の検討



# 計算環境

- Core2Duo E6400 (2.13 GHz, Dual core) + 2GB (PC2-5300) / ノード
- 4ノードで並列計算機を構成  
→ 8コア、8GB
- OS は、Fedoracore6  
(CFD++は、RHEL4, SUSE, CentOS などで稼動確認。  
基本的にはLinuxであればほとんどのマシン・OSで稼動可能と思われる。)
- Benchmark 1: HPL (High Performance Linpack)  
gcc で、約 26 GFLOPS
- Benchmark 2: 姫野ベンチ  
gccで、約 5.7 GFLOPS
- 1600 × 3200 程度の二次元軸対称計算でおおよそ 2.5 days

Implicit (以降はすべて explicit)

Table 1. 空中爆発計算の格子条件

Run	格子サイズ mm	爆源格子数 半径方向 × 高さ方向	計算空間全格子数 同左	計算空間 m × m
1	23.0	8 × 8	800 × 400	18.4 × 9.2
2	11.5	8 × 8	800 × 400	9.2 × 4.6
3	5.75	8 × 8	800 × 400	4.6 × 2.3
4	2.875	16 × 16	800 × 400	2.3 × 1.15
5	1.4375	32 × 32	800 × 400	1.15 × 0.575

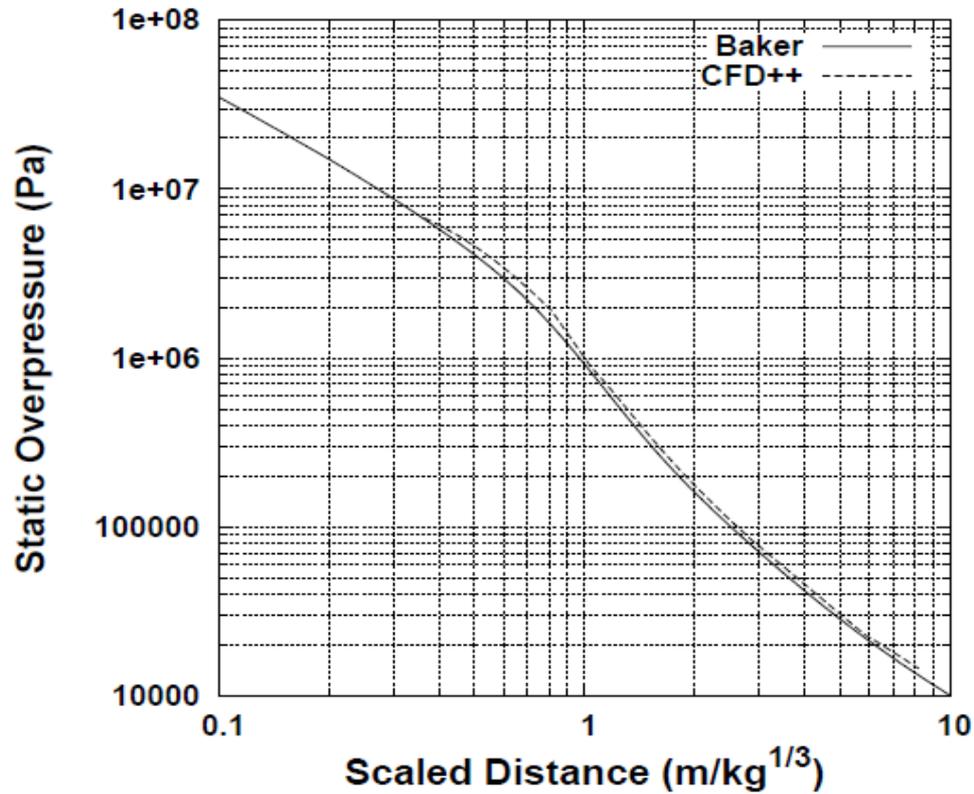
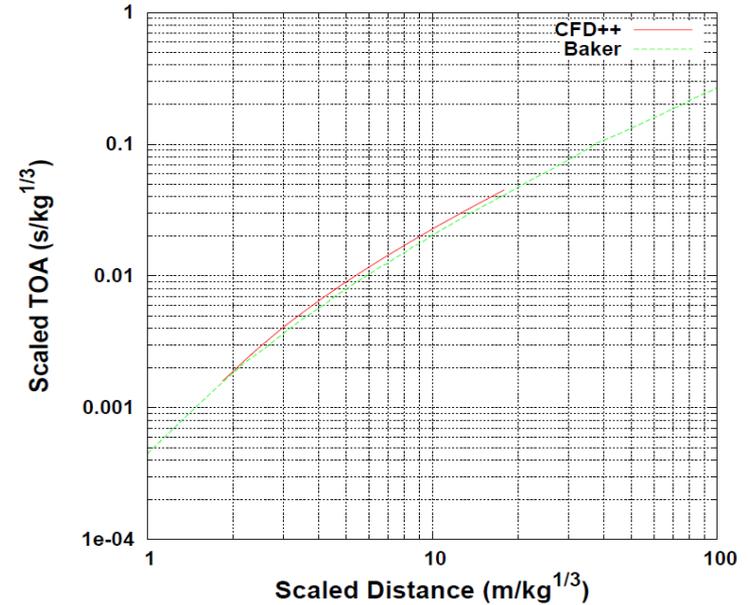
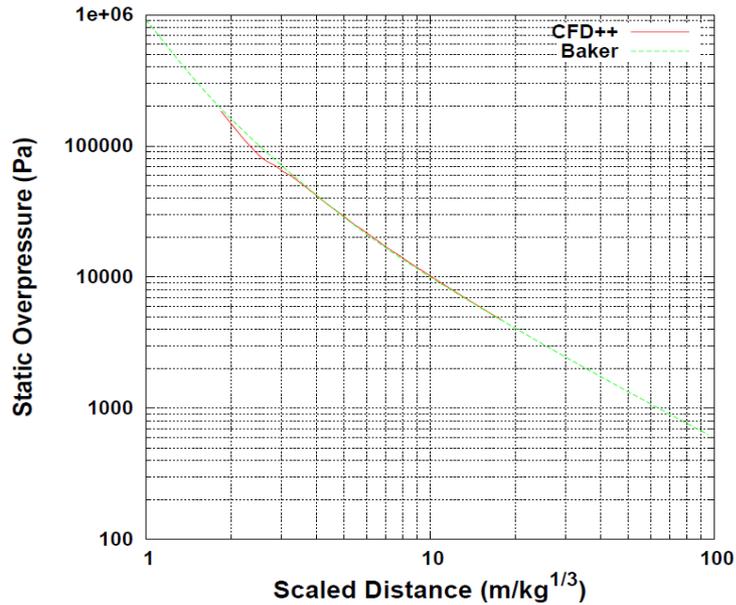


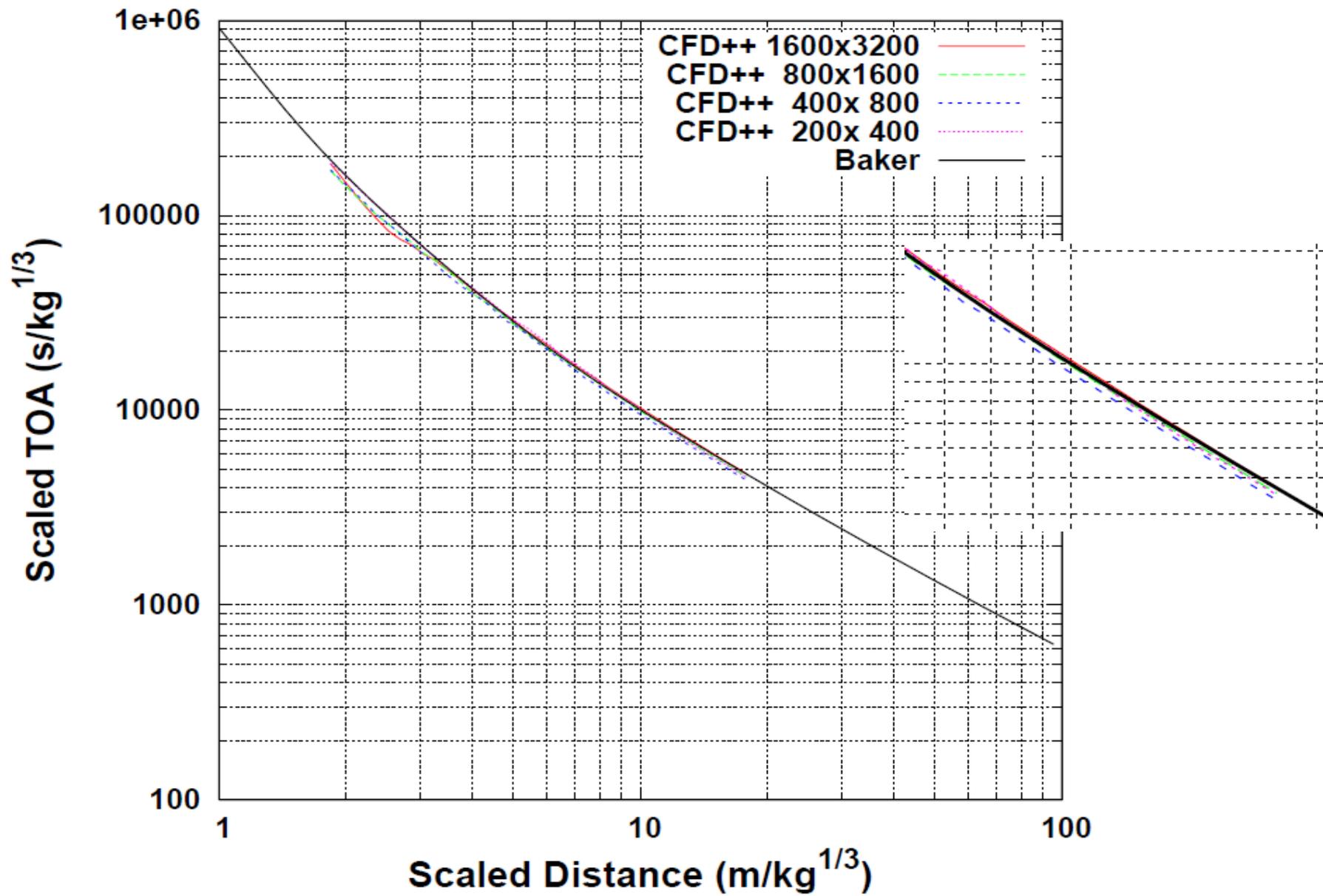
Fig.1 Table 1 の計算結果と Baker との比較

# Free Air Explosion

5.75mm grid size (8x8 for source) 1600 x 3200 upto 18.4m  
Explicit solver, CFL = 0.75

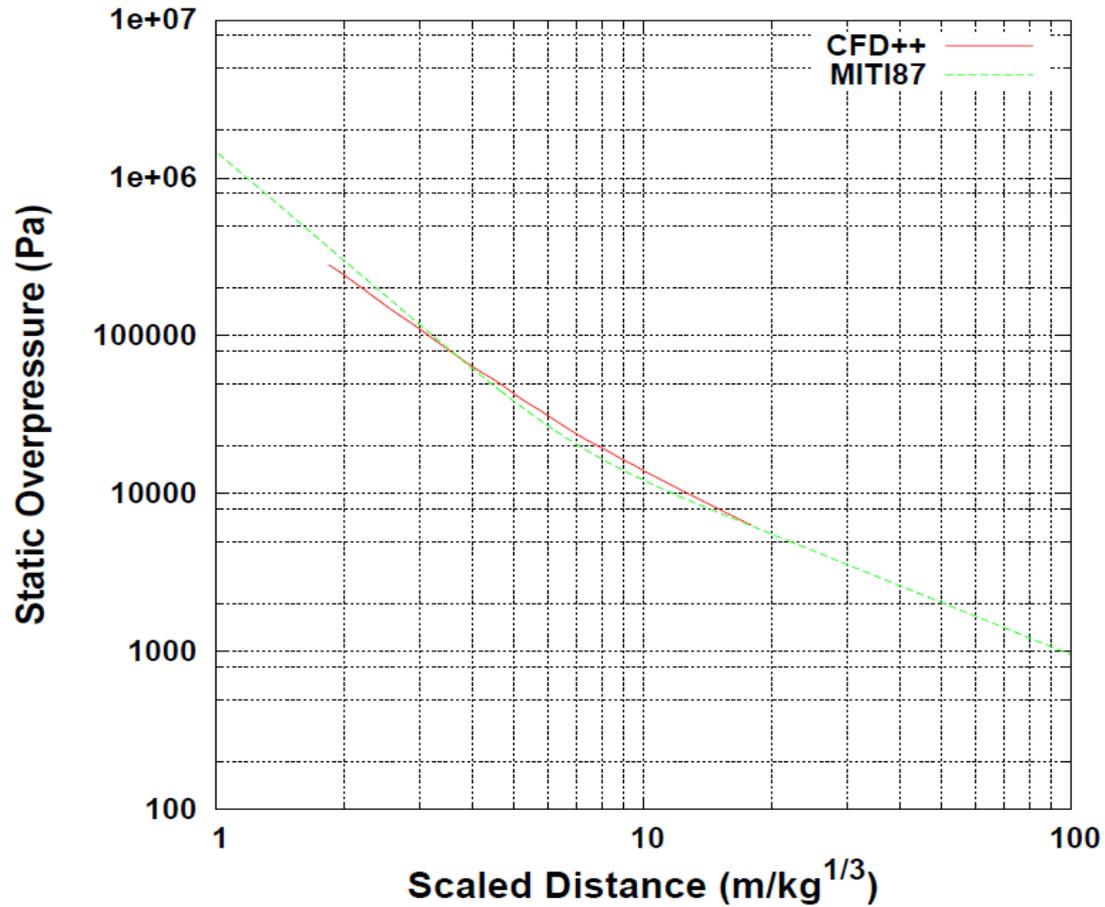


保安距離が問題となる領域の遠方まで、非常に良く Baker の結果と一致した

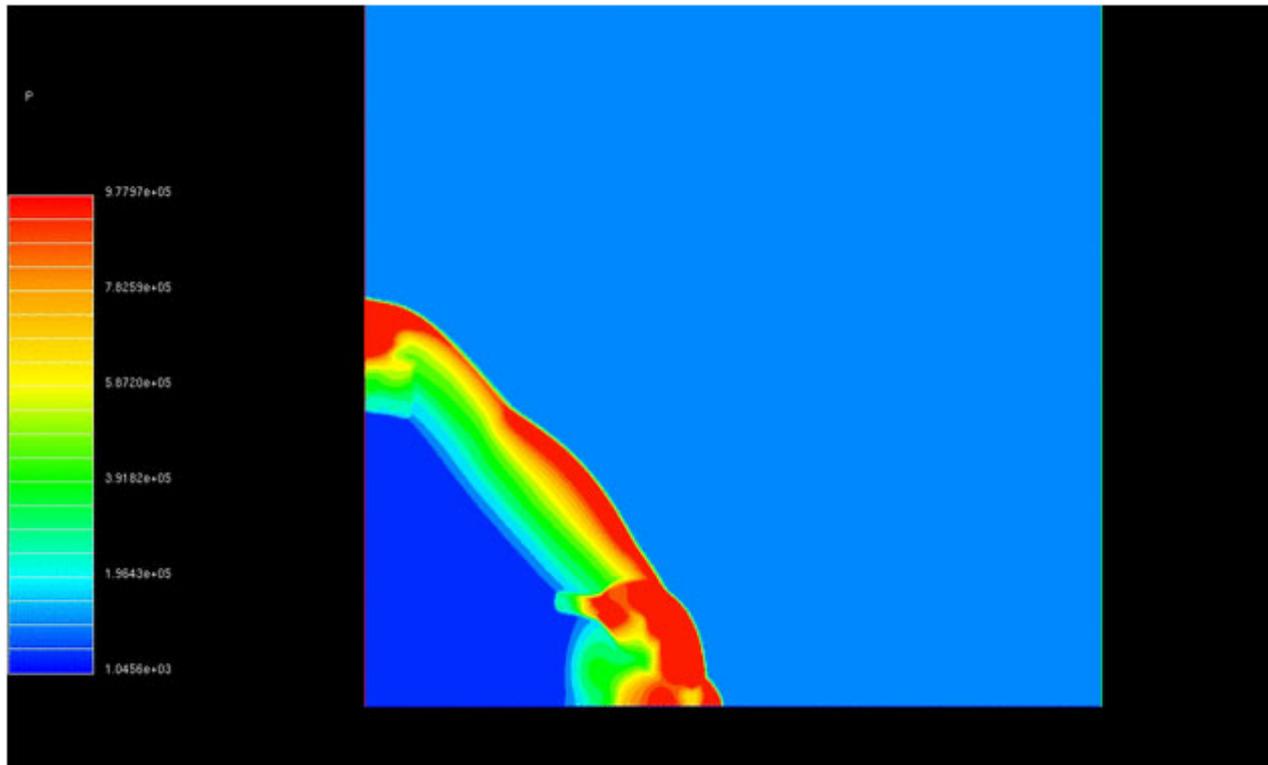


# HOB

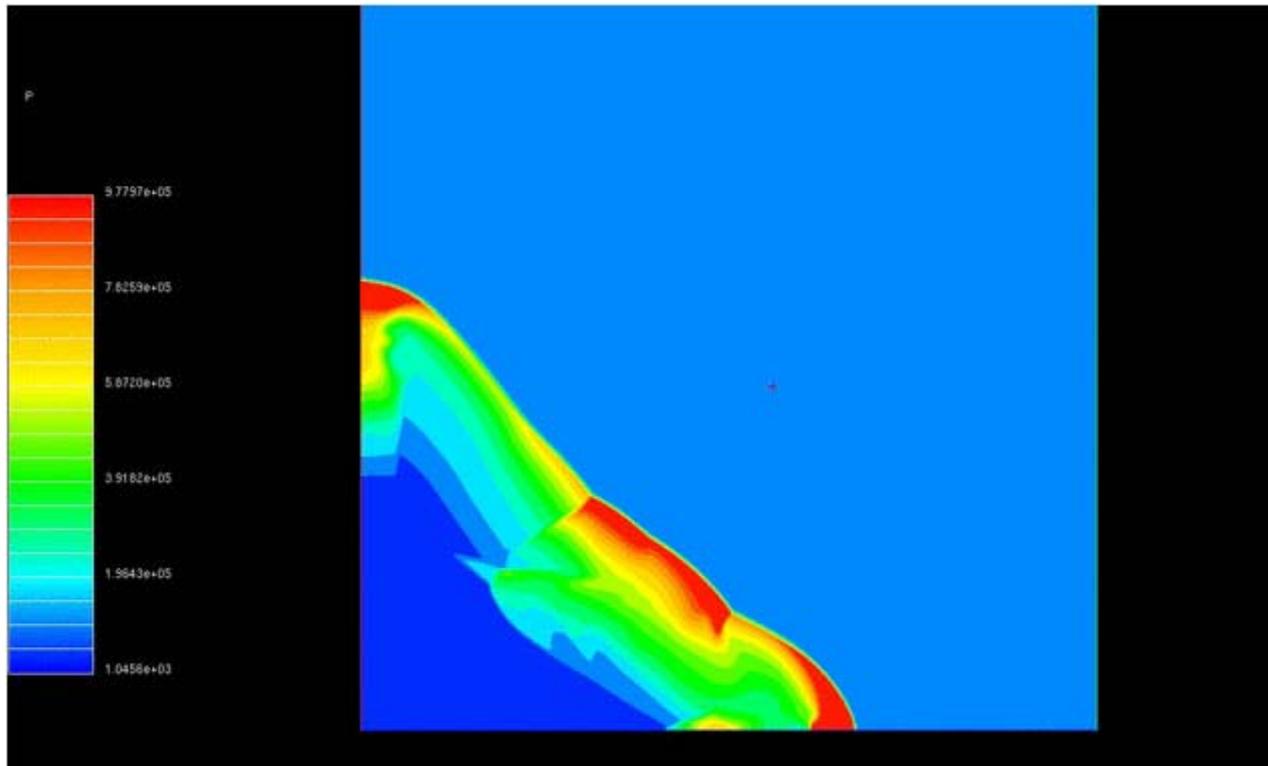
5.75mm grid size (8x8 for source) 1600 x 3200 upto 18.4m  
Explicit solver, CFL = 0.75



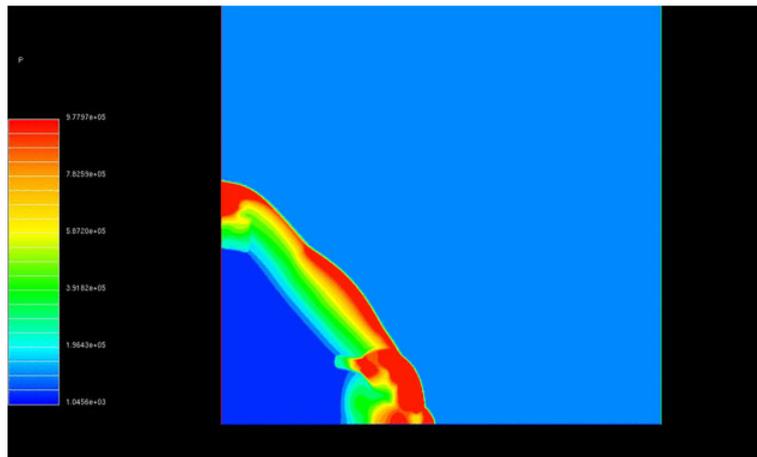
# 静止気体 ( $u_z = 0$ ) からの爆発



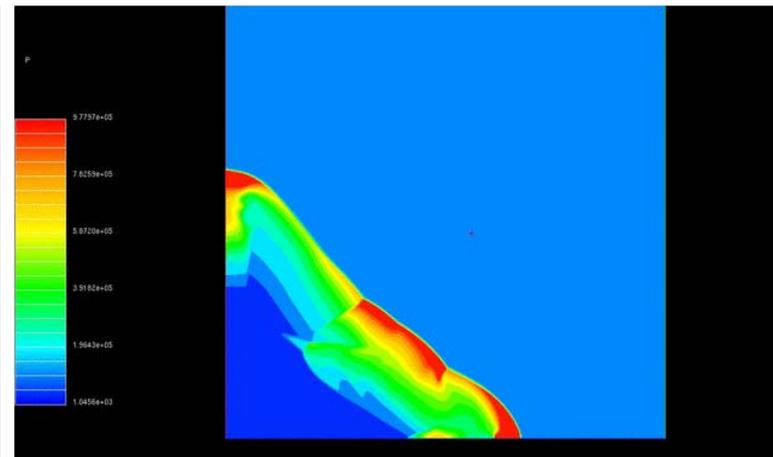
リニアな速度成分を有する場合 ( $u_z = 0 \sim -1800\text{m/s}$ ) からの爆発



静止気体 ( $u_z = 0$ ) からの爆発



リニアな速度成分を有する場合  
( $u_z = 0 \sim -1800\text{m/s}$ ) からの爆発



# Concluding remarks

- CFD++を用いて二次元軸対称爆風伝播の数値流体解析を行った
- 保存型スキームのCFD++の解精度は非常に良い

水平方向400程度の格子数(爆源の格子数=1)でも $K \approx 18 \text{m/kg}^{1/3}$ まで爆風圧はBakerと良好に一致

- 並列計算のスケールビリティは Gbit ethernet では良くない  
(Dual CPU, Dual core ×2ノード程度でも高速のネットワークが良好な性能を発揮)
- TNT HOB 爆発の火炎形状について検討を行った
- 今後は
  - 異なるグリッドサイズ・タイプにおける解精度の検証など
  - 3D & 複雑地形(地中式火薬庫など)への応用可能性
  - 流体力学的不安定性に関する検討
  - 水素の燃焼爆発安全性への応用
- JWLは組み込み中

# HOB

2mm grid size (23x23 for source) 600 x 600  
50, 100, 150, 200, 250, 300  $\mu\text{s}$

Pressure (Pa)

