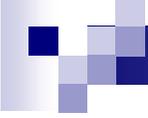


「ES火山グループ」火山シミュレーション研究集会

# 火山噴火による爆風と 火砕サージの数値模擬

室蘭工業大学  
機械システム工学科  
齋藤 務

東京大学地震研究所 平成19年11月29日



# 内容

- 1. 研究の背景  
動機, 体制**
- 2. 地表(波動)現象の数値模擬  
爆風, 爆音**
- 3. 流動現象の計算と計算機  
火砕サージ, 噴煙**
- 4. 今後の課題**



## 背景 (動機)

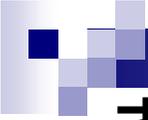
雲仙普賢岳1991年6月8日 の爆発的噴火

爆発地点から2800m(垂木台地)において  
過剰圧0.28barの爆風を観測

地形を組み込んだ3次元爆風伝播数値模擬

東北大学流体科学研究所: Cray Y-MP

50M語(400MB) CPU時間:90分

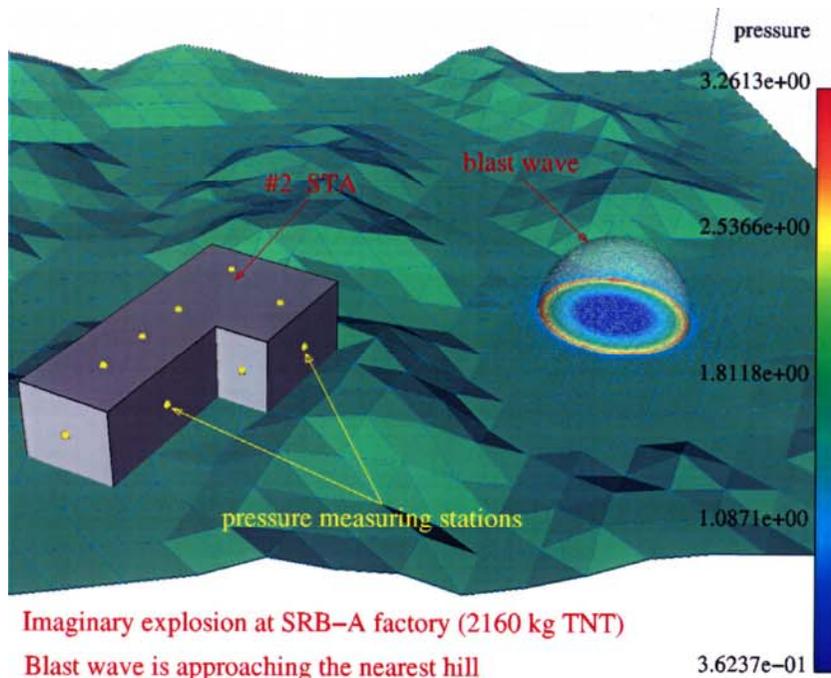


## 背景(研究プロジェクト)

- 文部省科研費補助金重点領域研究  
**「蒸気爆発の動力学」**  
(代表: 秋山守, 平成5年度～平成8年度)
- 中核研究拠点形成(COE)プログラム  
**「複雑媒体中の衝撃波現象の解明と学際応用」**  
(代表: 高山和喜, 平成12年度～平成16年度)
- 文科省科研費特定領域研究  
**「火山爆発のダイナミクス」**  
(代表: 井田喜明, 平成14年度～平成18年度)
- 地球シミュレータ 研究プロジェクト  
**「火山ダイナミクスの数値シミュレーション」**  
(代表: 小屋口剛博, 平成18年度～ )

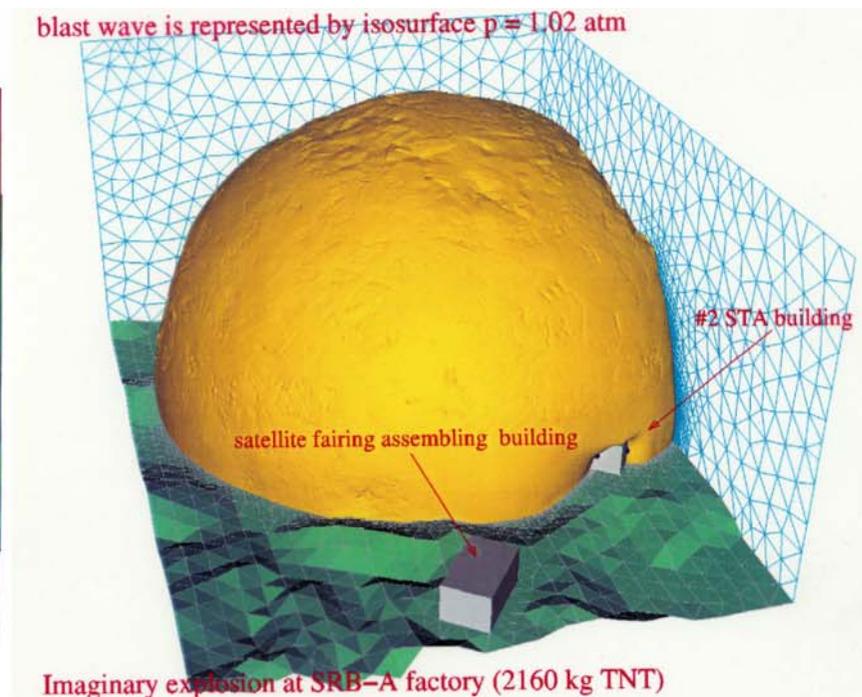
# 爆風の数値模擬

## HIIロケット打ち上げ時の 指令破壊による爆風災害



Imaginary explosion at SRB-A factory (2160 kg TNT)

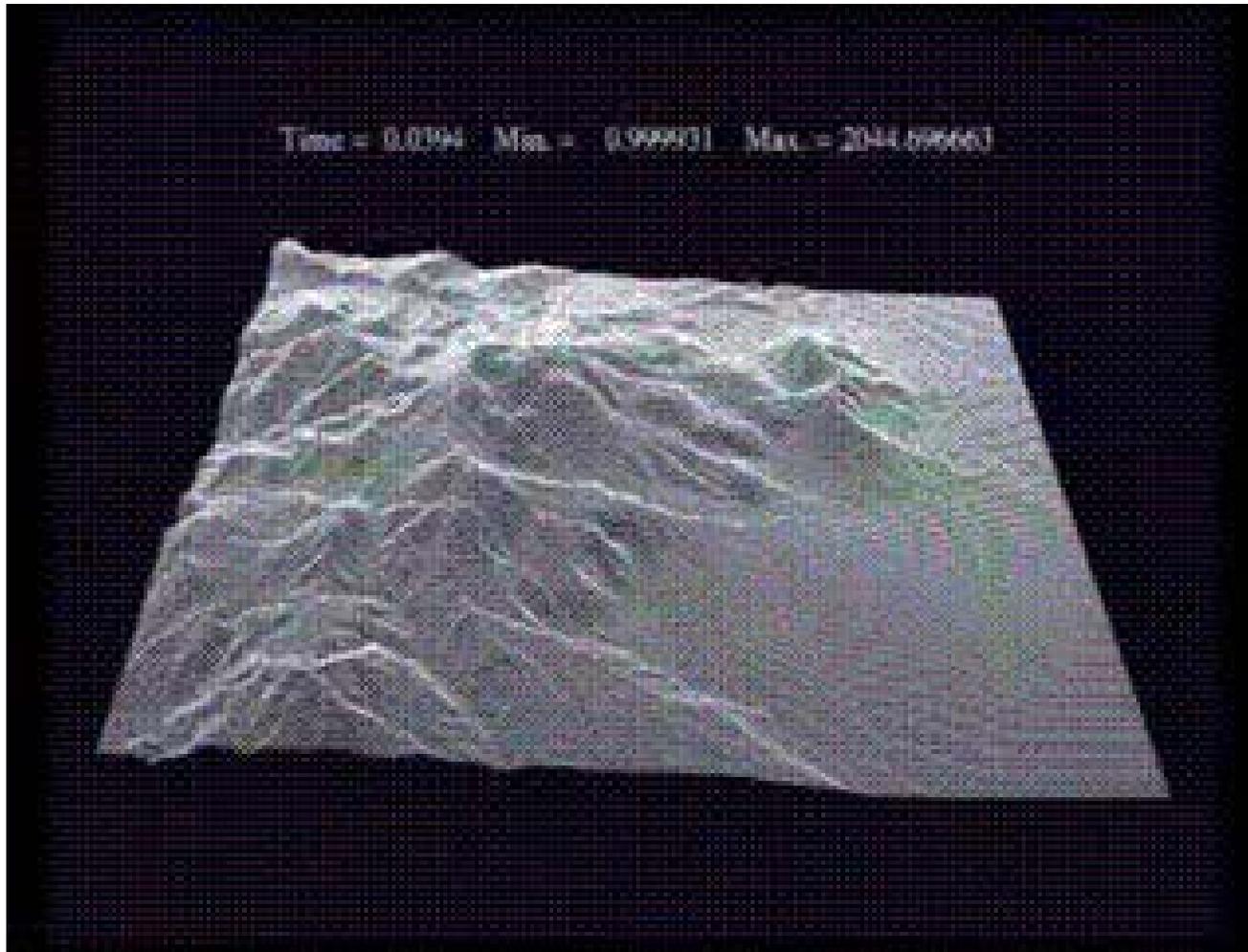
Blast wave is approaching the nearest hill



Imaginary explosion at SRB-A factory (2160 kg TNT)

# 衝撃波研究と爆風災害

1991年阿蘇普賢岳の噴火：爆風の発生がフラストメータによって確認された。



$\Delta p \sim 0.5 \text{ bar}$  at 2.7 km from the source

**3次元地形：**  
国土地理院 数値地図

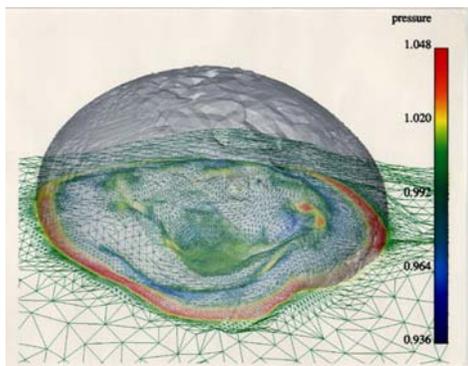
**爆源：**  
100m x 100m x 100m  
P = 5000 bar T = 2700  
( $\sim 3 \times 10^{16}$  J)

**数値コード：**  
Harten-Yee TVD

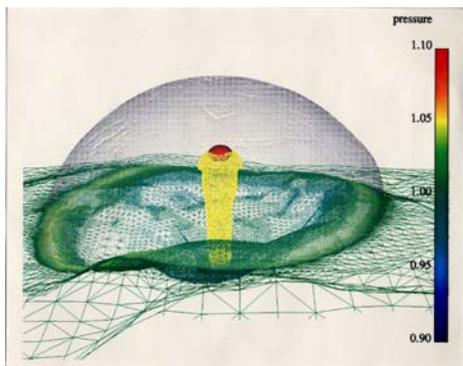
**数値計算格子：**  
200 x 200 x 40  
(10 km x 10 km)

**計算機：**  
CRAY-YMP

# 阿蘇中岳の仮想噴火数値模擬



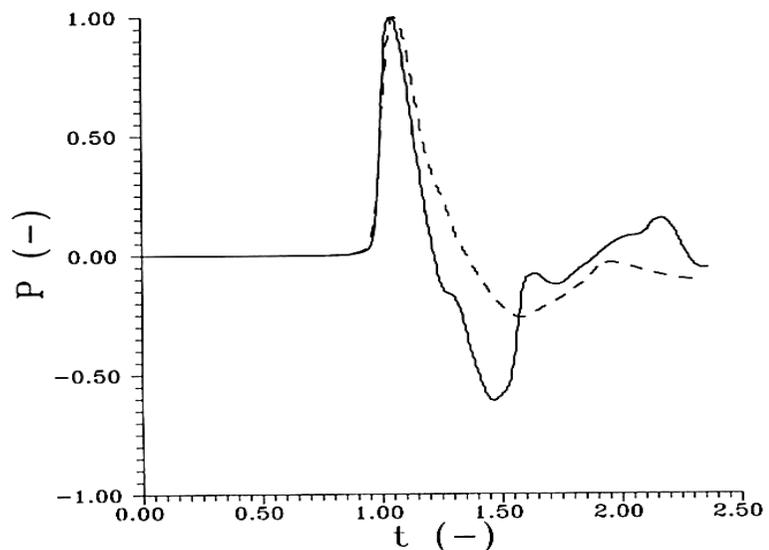
Pressure distribution on the ground surface.  
**Point explosion model**



Pressure distribution on the ground surface.  
**Jet model**



阿蘇中岳



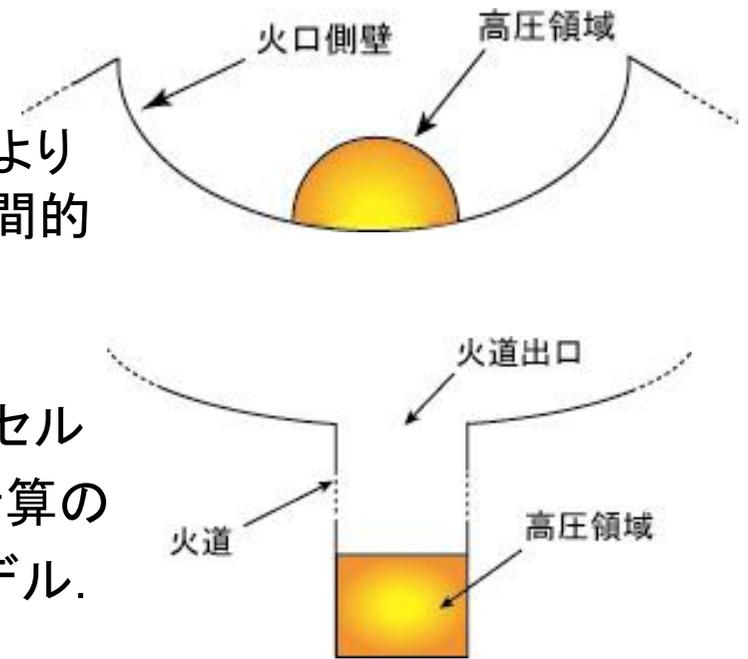
**Time variation of blast at the bunker. Solid line shows point explosion model and dashed line jet model.**



阿蘇中岳周辺の数値地形

# 噴火モデル

- 高圧容器モデル: 火口に相当する位置に大気より高圧の気体を詰めた容器があり, その壁が瞬間的に取り除かれた場合に相当する噴火モデル.
- 衝撃波管モデル: 火道の形状を想定して計算セルを配し, その最深部に高圧気体を封入して, 計算の開始とともにこの高圧気体を開放する噴火モデル.
- 噴流モデル: 火口を噴出口として高温の火山性気体が流速をもって噴出するとした場合の噴火モデル.
- 混合モデル?: 高圧容器モデルと噴流モデルを組み合わせて, キャップロックの破壊を模擬する.

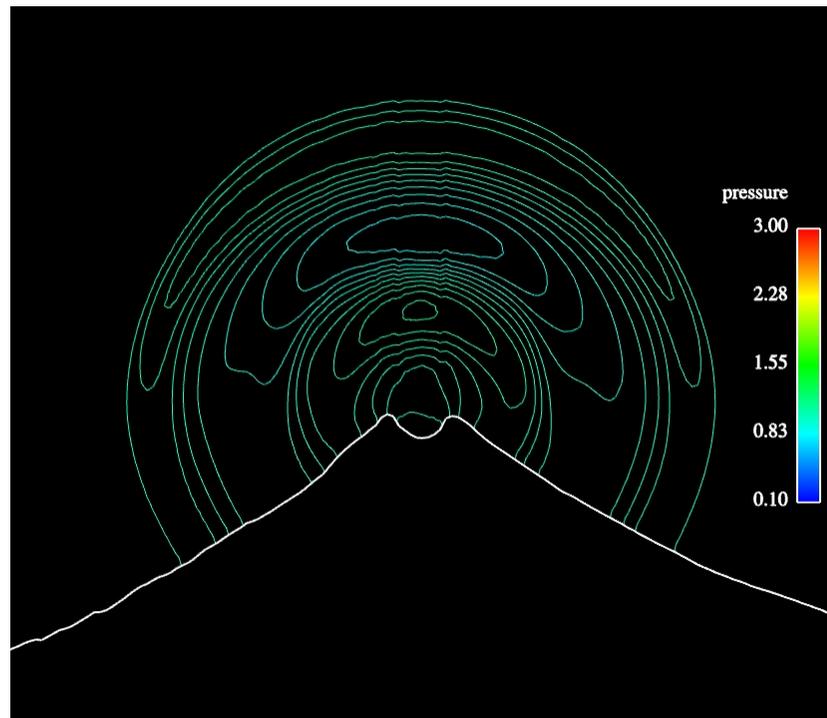


# 噴火モデル

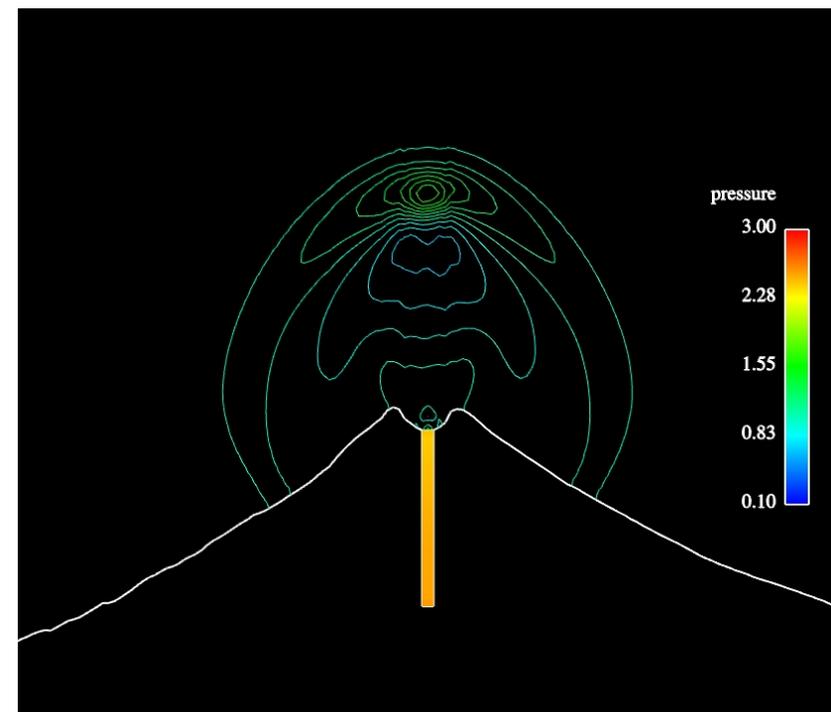
- 火道形状:  $100\text{m} \times 100\text{m} \times 1500\text{m}$ の直方体
- 火口底部に火道を結合



計算格子(拡大)



高圧容器モデル



衝撃波管モデル

# 計算格子

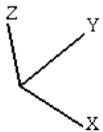
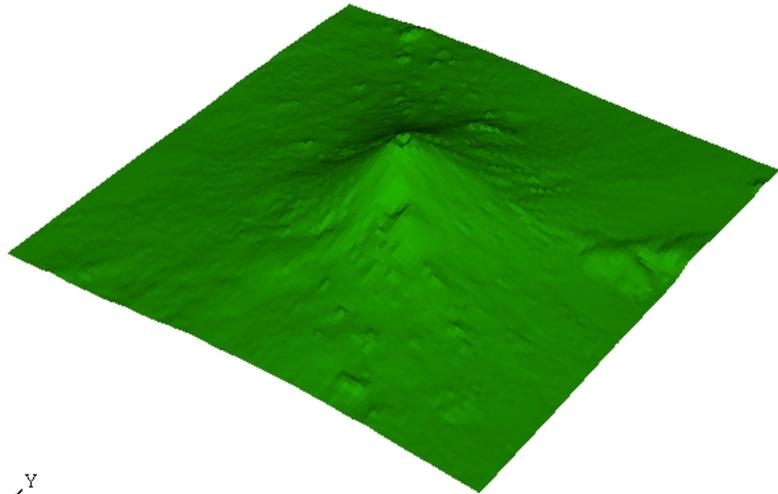


図: 計算格子(表面)

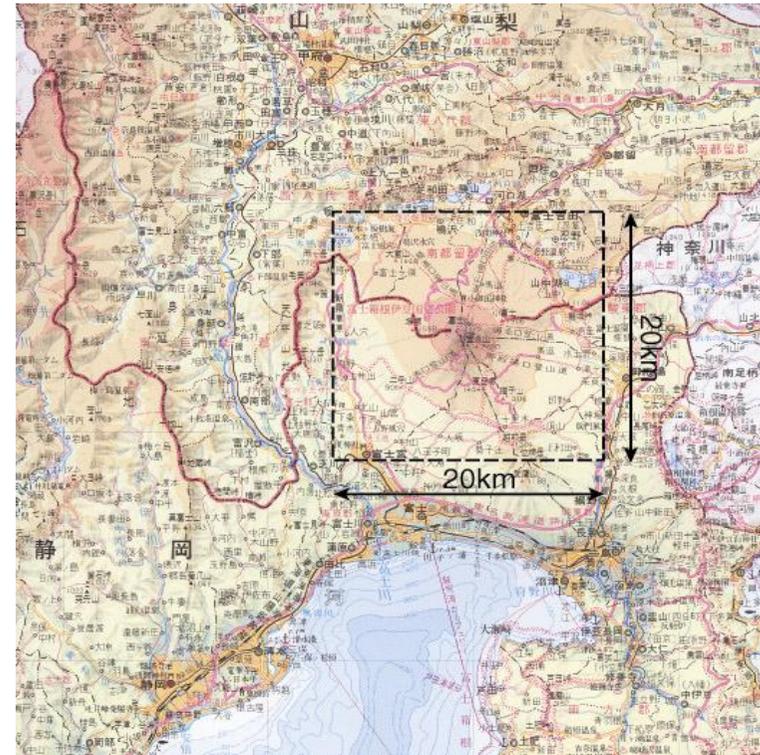


図: 富士山周辺地図

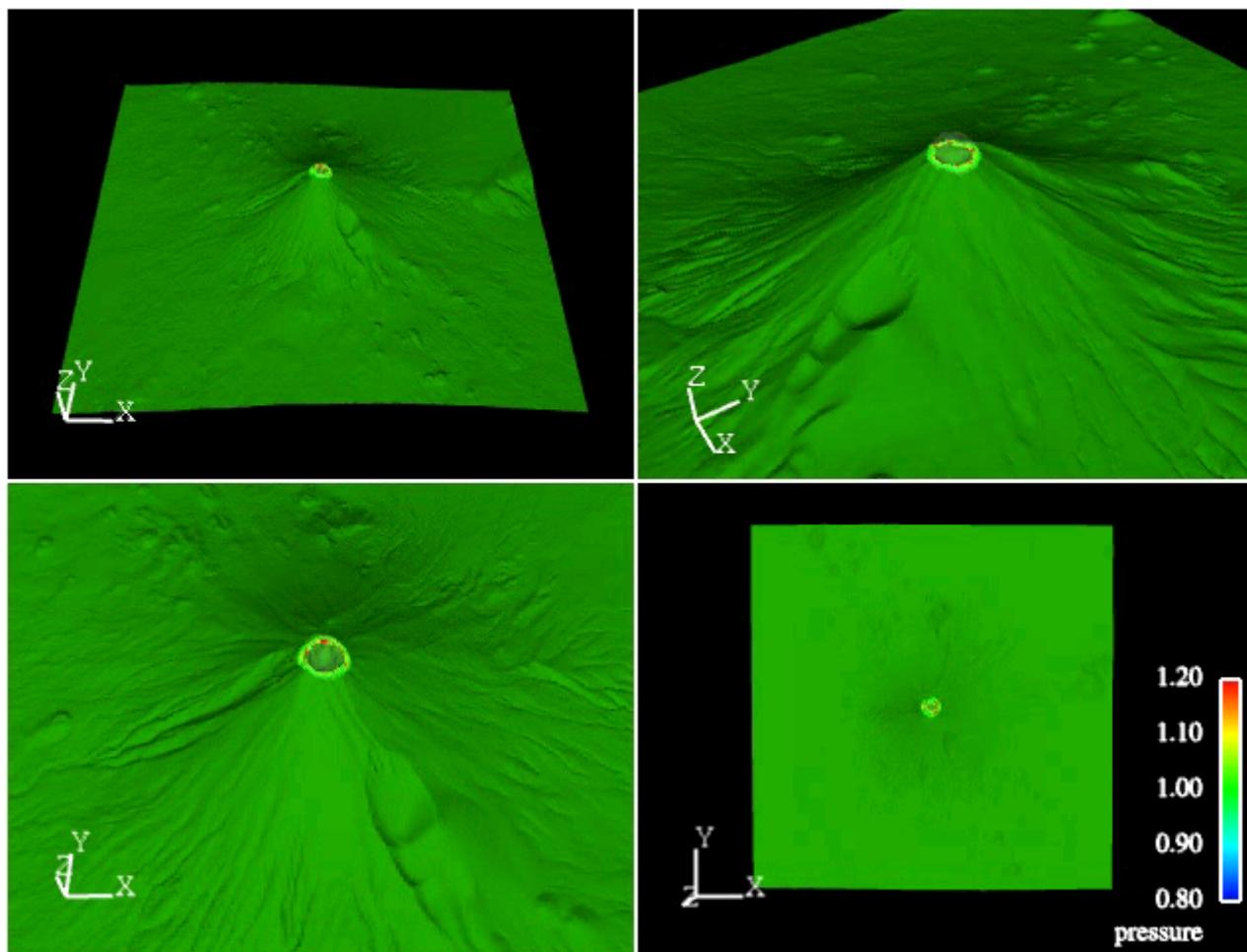
- 計算格子数:  $400 \times 400 \times 80$
- 火口を中心として20km四方の領域
- 計算格子外縁に富士宮市と富士吉田市の市街を含む



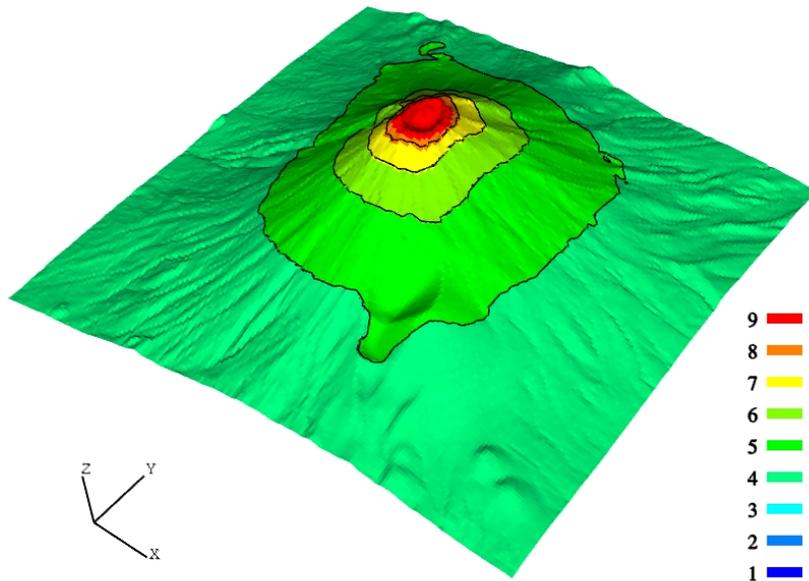
# 数值解析方法

- 基礎方程式 : 二次元軸対称Euler方程式(二次元解析)  
: 三次元Euler方程式(三次元解析)
- 流束計算 : Weighted Average Flux (WAF)法
- Riemann解 : HLLC近似Riemann解法
- TVD制限関数 : van Leer TVD制限関数
- CFL条件 : 0.5(二次元解析), 0.3(三次元解析)

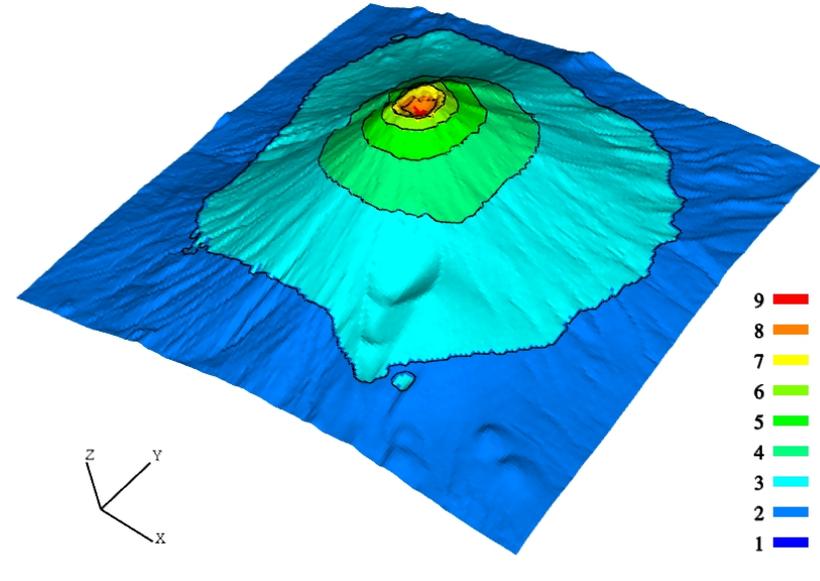
# 計算結果 - 圧力場



# 噴火モデル (爆風ハザードマップ)



計算結果(火道なし)



計算格子(火道有り)

## ■ 火道を考慮した場合、

- 爆風は火道出口に到達した時点でz軸方向への速度成分を持つ
- 爆発エネルギーが比較的ゆっくり解放される

→ 衝撃波による地表での最大過剰圧が減少

# 数値模擬による騒音評価

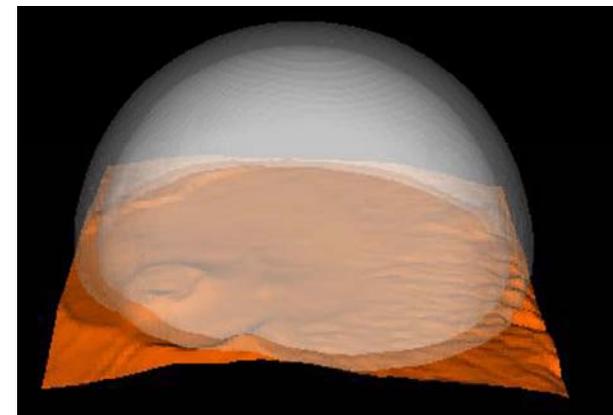
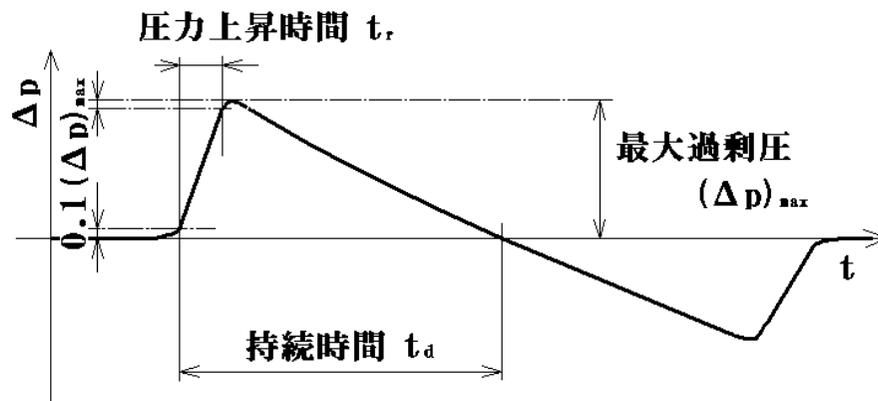


超音速機騒音

<http://danavideofilms.com/concord.htm>



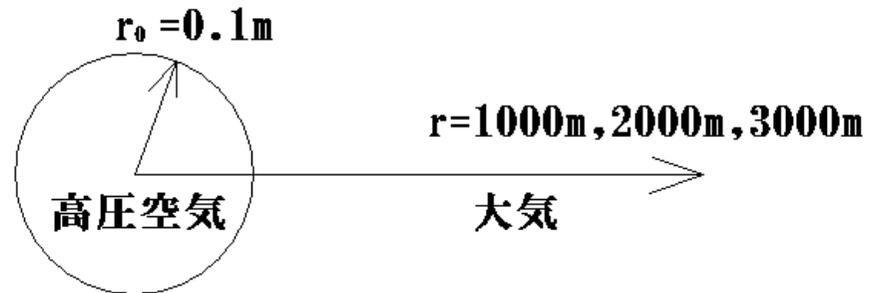
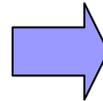
北海道壮瞥町での野外爆破実験：東北大学特定領域研究『火山爆発のダイナミクス』HPより



伊豆大島野外実験平成18年5月

# 初期条件

TNT 1kg 等価エネルギー (~4MJ)



	高压部・高压空気	低压部・大気状態
圧力	200[MPa]	101.325[kPa]
密度	188.3[kg/m <sup>3</sup> ]	1.294[kg/m <sup>3</sup> ]
初期速度	0[m/s]	0[m/s]
比熱比	1.4	1.4
セル数	200,000セル/km (5 mm/セル)	

H.Honma, I.I.Glass UTIAS  
Report No.253, 1982

“Random –Choice solutions for weak spherical shock wave transitions of N-waves in air with vibrational excitation”

1. 完全-非粘性 → Euler計算
2. 完全-粘性 → Navier-Stokes計算
3. 実在-粘性 → N-S + 分子振動考慮

# 基礎方程式

H.Honma, I.I.Glass UTIAS Report No.253, 1982

“Random –Choice solutions for weak spherical shock wave transitions of N-waves in air with vibrational excitation”

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial r} + \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right\} c + \alpha(H_l + H_v) - H_R = 0$$

$\alpha = 0$ : plane wave,  $\alpha = 2$ : spherical wave

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v \\ E \\ \rho \sigma_o \\ \rho \sigma_N \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho v \sigma_o \\ \rho v \sigma_N \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\mu v \\ \lambda T + \mu v^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad H_l = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 \\ (E + p)v \\ \rho v \sigma_o \\ \rho v \sigma_N \end{bmatrix}$$

$$H_v = \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} 0 \\ 2\mu v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad H_R = \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho \{(\sigma_o)_e - \sigma_o\} / \tau_o \\ \rho \{(\sigma_N)_e - \sigma_N\} / \tau_N \end{bmatrix}$$

$$p = \rho RT$$

$$E = \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right)$$

$$e = \frac{5}{2} RT + \sigma_o + \sigma_N$$

### 単位質量振動エネルギー

$$(\sigma_j)_e = \frac{\varepsilon_j R \theta_j}{\exp(\theta_j / T) - 1}$$

### 振動緩和時間

$$\tau_o = \frac{1}{2\pi} \frac{p_0}{p} \left[ 24 + 4.4 \times 10^4 h \cdot \frac{0.05 + h}{0.391 + h} \right]^{-1}$$

$$\tau_N = \frac{1}{2\pi} \frac{p_0}{p} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \left[ 9 + 350h \cdot \exp \left\{ -6.142 \left( \sqrt[3]{\frac{T_0}{T}} - 1 \right) \right\} \right]^{-1}$$

$$\varepsilon_o = 0.209, \quad \varepsilon_N = 0.781$$

$$\theta_o = 2239 \text{ K}, \quad \theta_N = 3350 \text{ K}$$

$$p_0 = 101.3 \text{ [kPa]}, \quad T_0 = 293.15 \text{ [K]}$$

$\varepsilon_j$  : j 分子のモル分率

$\sigma_j$  : j 分子の振動エネルギー

$(\sigma_j)_e$  : j 分子の平衡振動エネルギー

$\tau_j$  : j 分子の振動緩和時間

$h$  : 空気中の絶対湿度 [%]

$p_{sat}$  : 飽和水蒸気分圧

$RH$  : 空気中の相対湿度 [%]

絶対湿度vs.相対湿度

$$RH = h (p / p_{sat})$$

飽和水蒸気分圧 :  $p_{sat}$  (Goff-Gratch 式)

$$\begin{aligned} \log_{10}(p_{sat} / p_0) = & 10.79586[1 - (T_0 / T)] - 5.02808 \log_{10}(T / T_0) \\ & + 1.50474 \times 10^{-4} (1 - 10^{-8.29692[(T/T_0)-1]}) \\ & + 0.42873 \times 10^{-3} (10^{4.76955[1-(T_0/T)]}) - 2.2195983 \end{aligned}$$

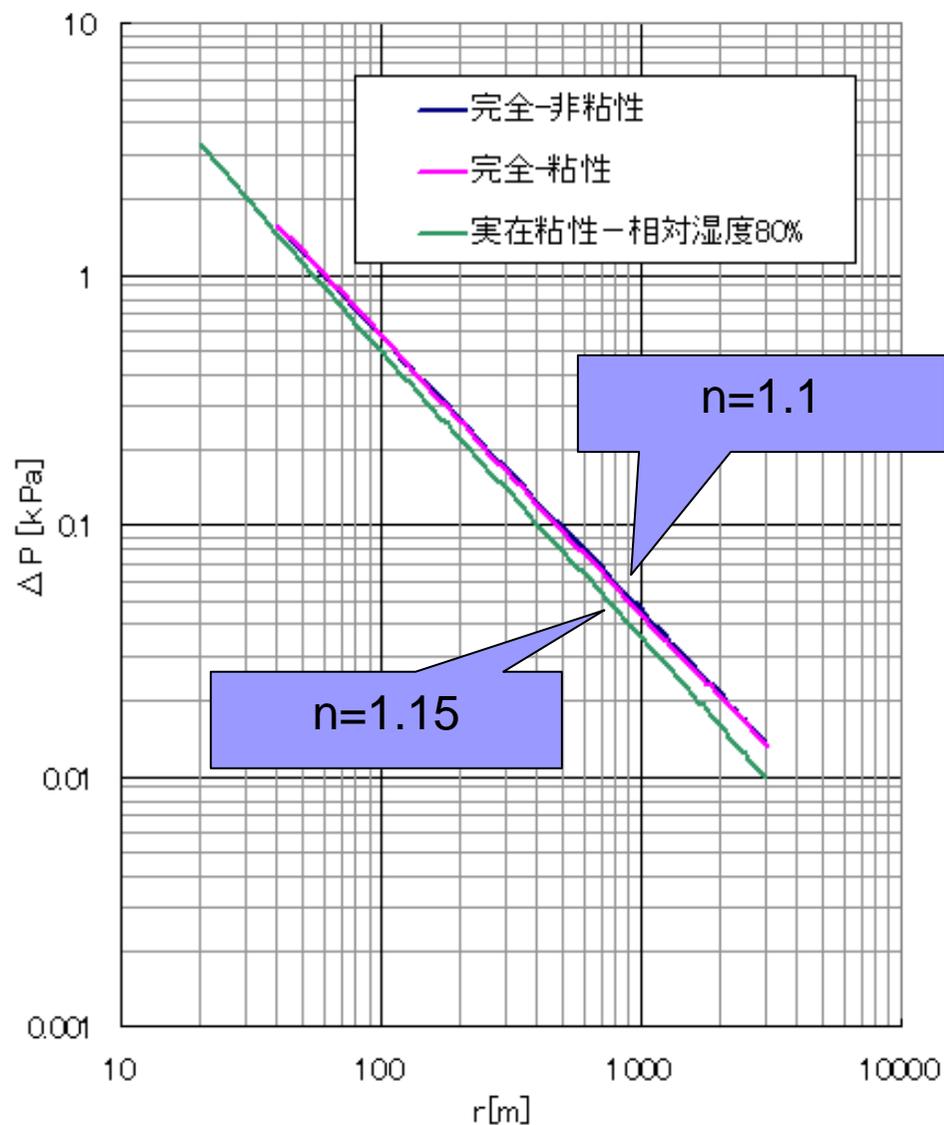
# 最大過剰圧の減衰

爆風の最大過剰圧

$$(\Delta p)_{\max} \propto \frac{1}{r^n}$$

$r$  : 爆源からの距離

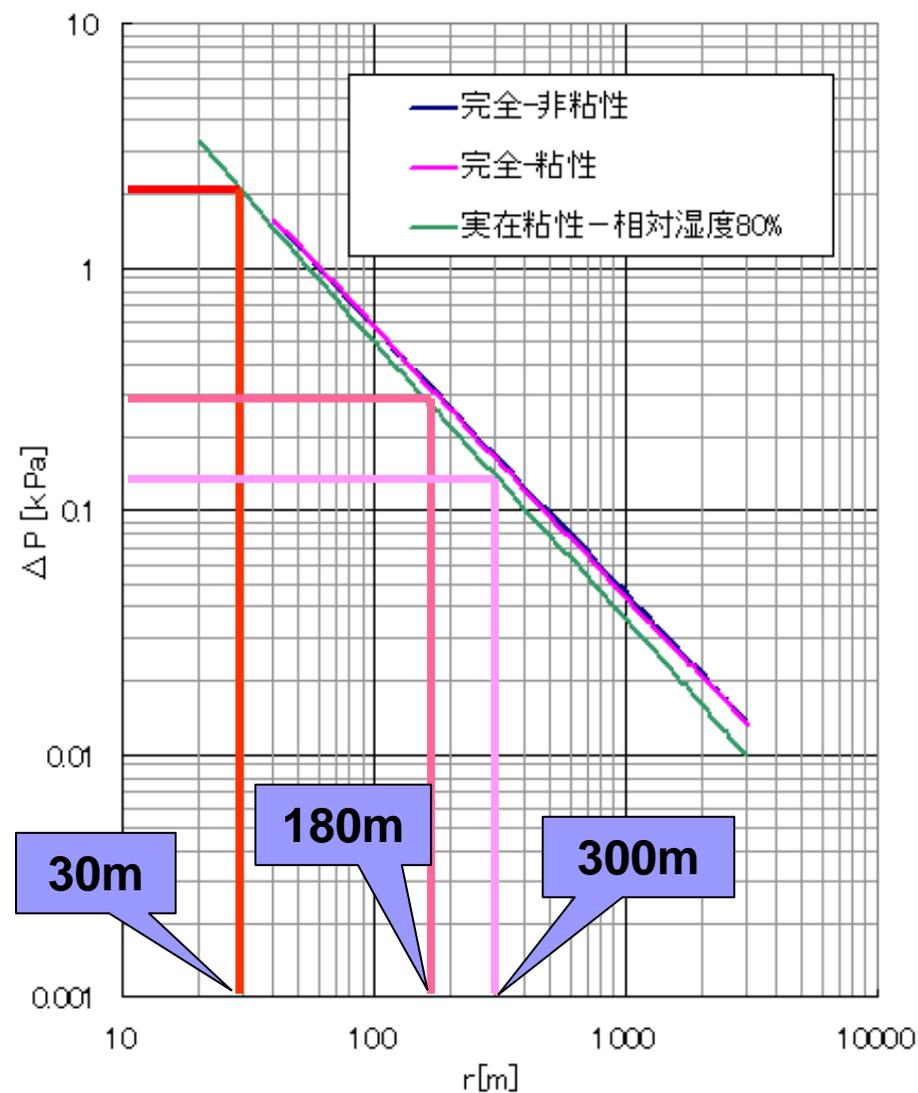
$n$  : 減衰係数



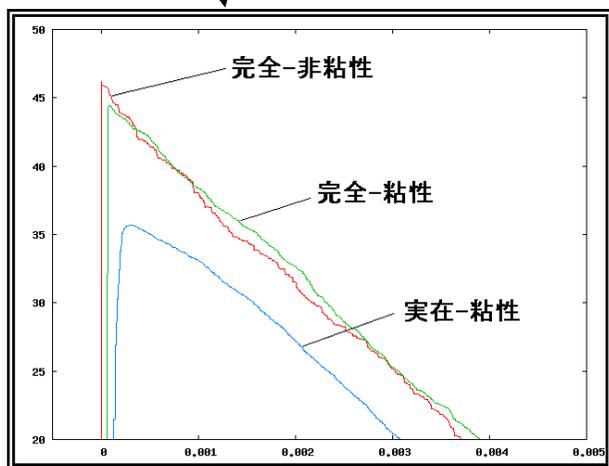
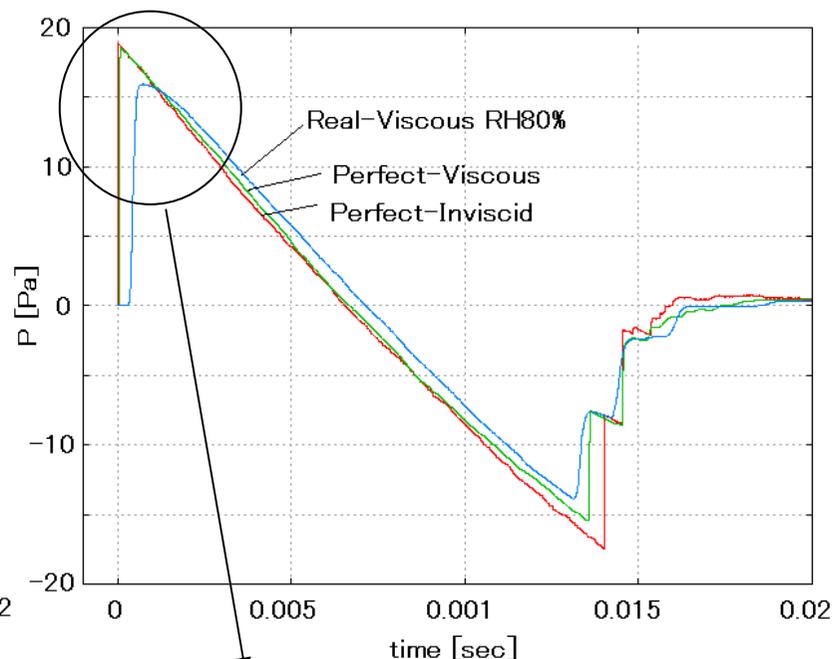
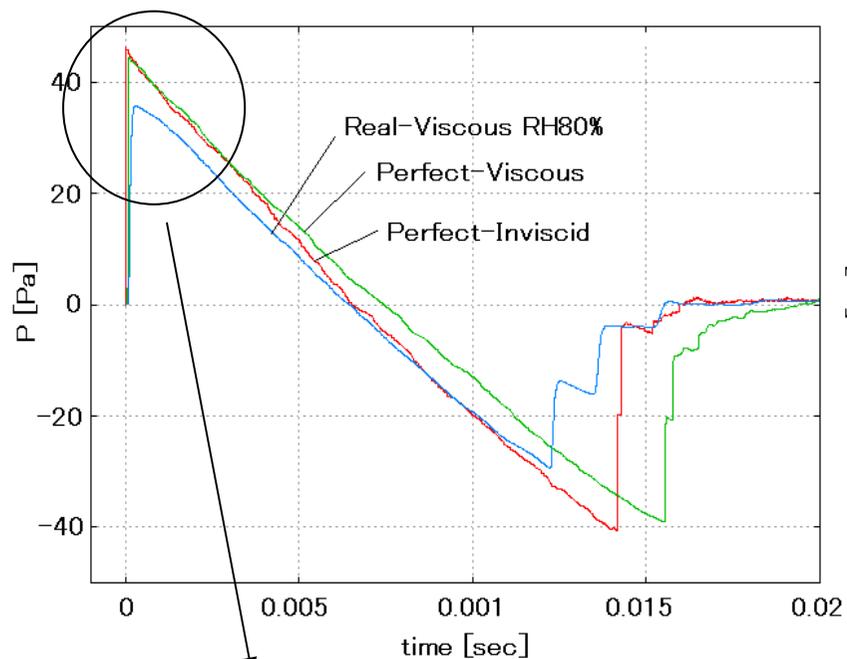
# 最大過剰圧の減衰

Clencey (1972) 爆風による被害程度

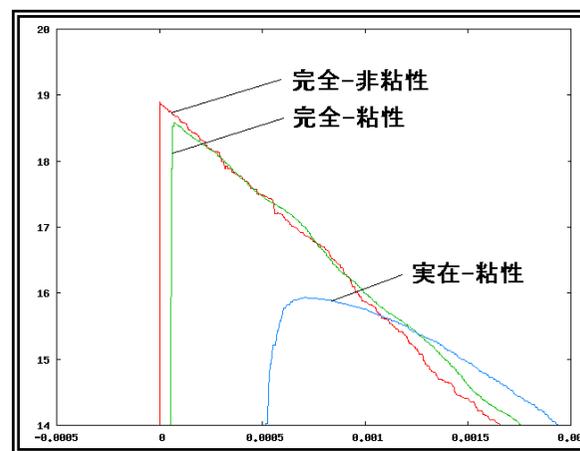
ピーク圧値 [kPa]	爆風による影響
0.14	低周波音周波数10~15Hz 不快な騒音(137dB)
0.21	歪のある大きな窓ガラスの破壊
0.28	大きな騒音(143dB) ガラスの破壊
1	ガラスが破壊される一般的な圧力
2.1	「安全限界」 この値以下では95%の確率で 大きな被害なし
2.8	建物の小被害の限界
16	建物の大被害の限界
35~50	家屋の全壊
210	クレーター縁ができる限界



# 压力履歴

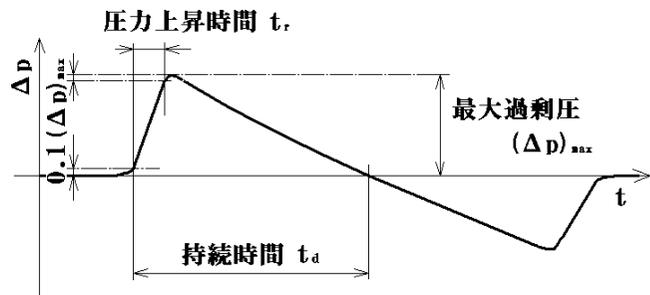
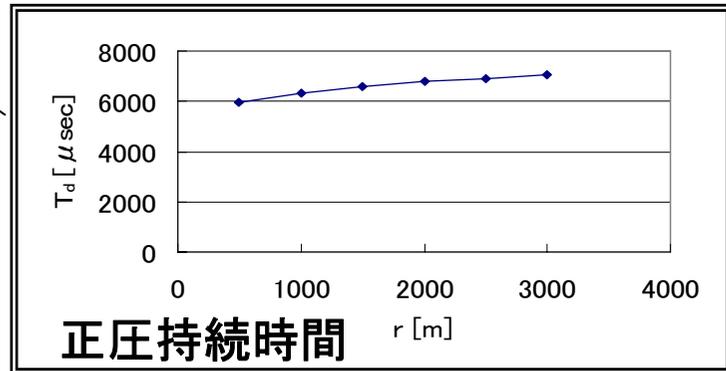
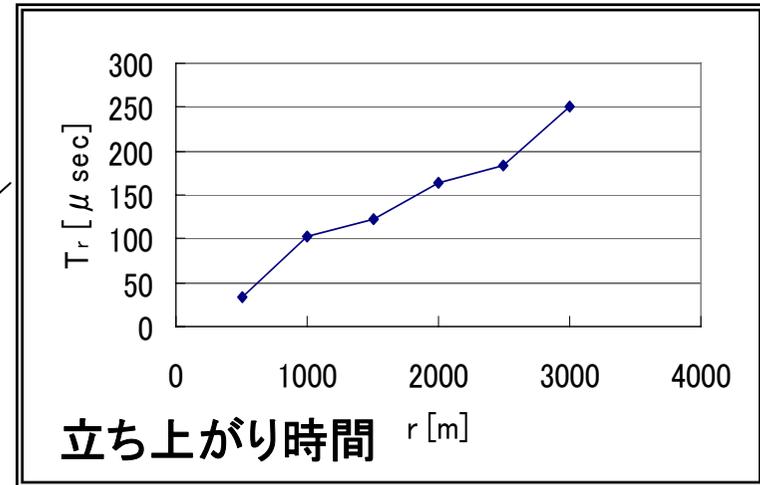
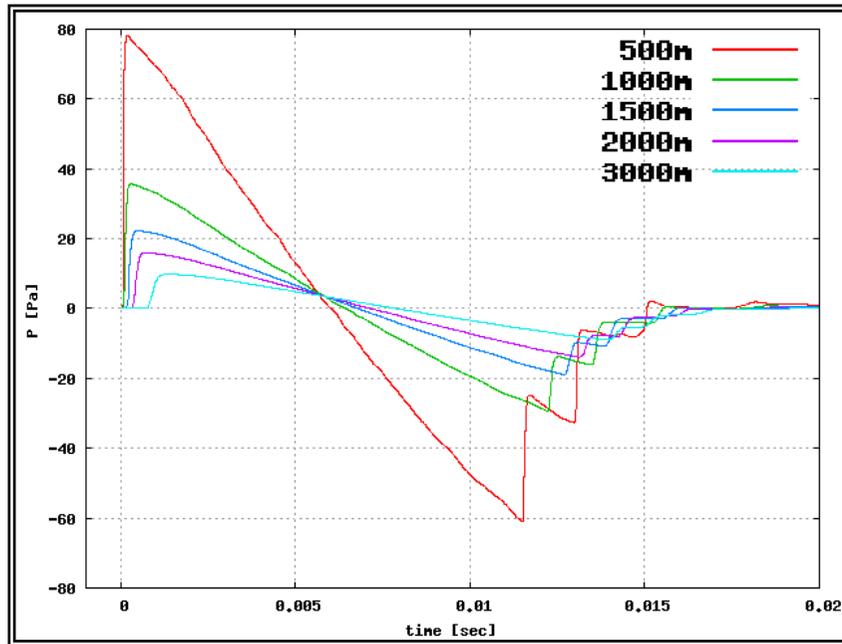


$r=1000\text{m}$  (40Pa : 126 dB)



$r=2000\text{m}$  (20Pa : 120 dB)

# 圧力の時間履歴



分子振動を考慮すると

遠方へ離れるほど立ち上がり時間 $T_r$ が増加し、波が平滑化される。

→騒音の緩和

# 火砕サージの数値計算

## 火砕流とともに最も危険な噴火災害の一つ

<http://volcanoes.usgs.gov/Hazards/What/PF/PFTerms.html>

火砕サージは、極めて高速で乱流状態となって流れる、高温の岩石のかけらと気体の**低密度**混合物。低密度ゆえに、尾根や山頂をも含めて広範囲に到達する。

一方火砕流は、高温岩石の破片を**高密度**に含み、谷に沿って伝播する。

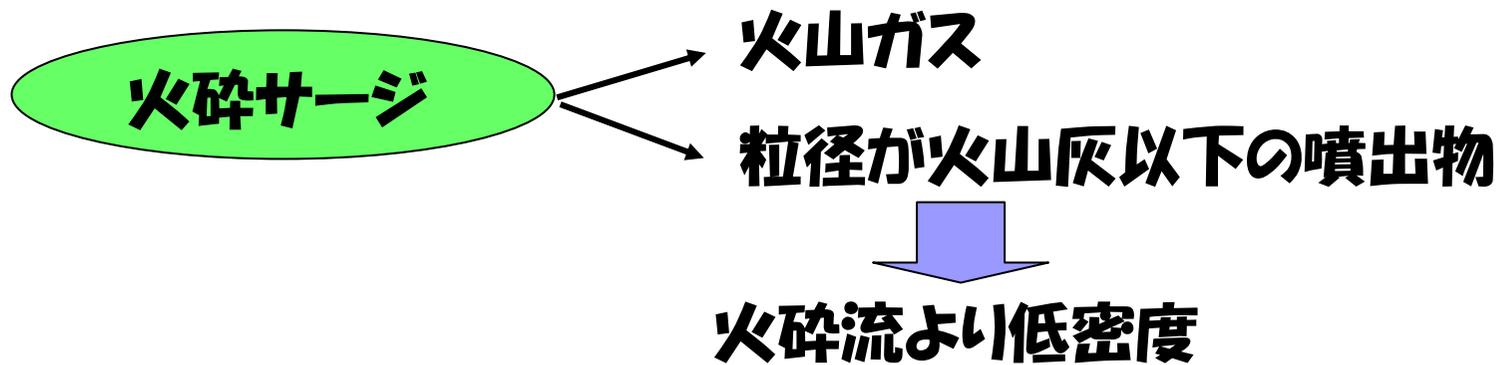
火山に強くなる本：山と溪谷社  
宇井忠英氏 撮影

A kind of disaster	Velocity (m/s)	Temperature (°C)
Pyroclastic surge	10~100	600~1000
Pyroclastic flow	10~40	600~1000
Mud flow	10~40	Normal~50
Lava flow	0.3~10	1200~51400
Sector collapse	10~40	Uncertainly
Debris flow	5~20	Normal



普賢岳：火砕流と火砕サージ

# 火砕サージ



Volcanic ash

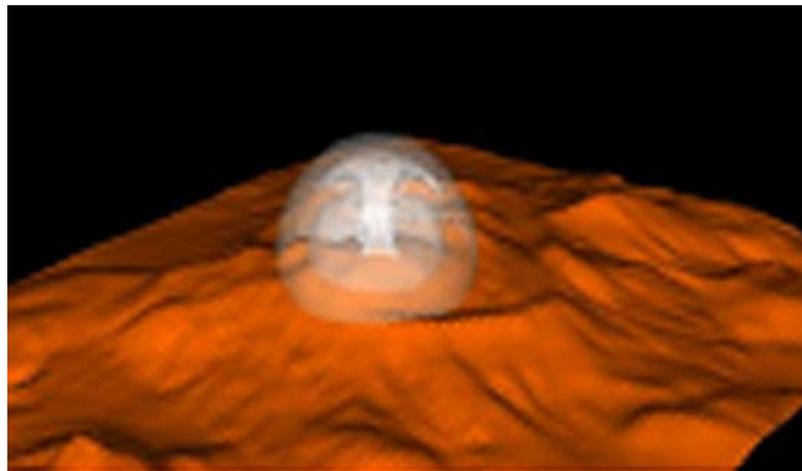
A kind of volcanic product	Particle size (mm)
Volcanic block	64~
Volcanic Lapilli	2~64
Volcanic sand	1/16~2
Volcanic soil	1/256~1/16
Volcanic clay	~1/256

# 地形を考慮した数値模擬: 有珠山

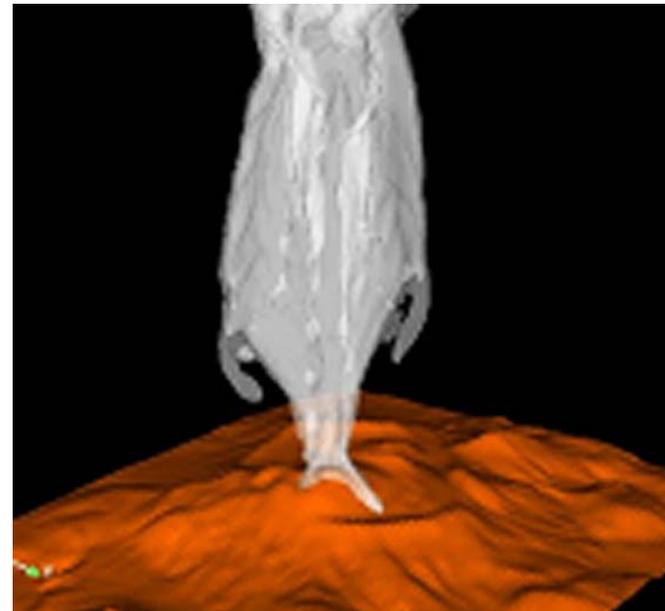
$$\int_V \mathbf{Q} dv \Big|_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \oint_S (F_x n_x + F_y n_y + F_z n_z) ds dt + \int_{t_1}^{t_2} \oint_V \mathbf{H} dv dt$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho_1 \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho u_z \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad F_x = \begin{pmatrix} \rho u_x \\ \rho_1 u_x \\ \rho u_x^2 + p \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_x u_z \\ (\rho e + p) u_x \end{pmatrix}, \quad F_y = \begin{pmatrix} \rho u_y \\ \rho_1 u_y \\ \rho u_y u_x \\ \rho u_y^2 + p \\ \rho u_y u_z \\ (\rho e + p) u_y \end{pmatrix}, \quad F_z = \begin{pmatrix} \rho u_z \\ \rho_1 u_z \\ \rho u_z u_x \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_x u_z \\ (\rho e + p) u_x \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\rho g \\ -\rho g u_z \end{pmatrix}.$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$



噴火初期の爆風形成と  
火砕サージの発生(有珠山)



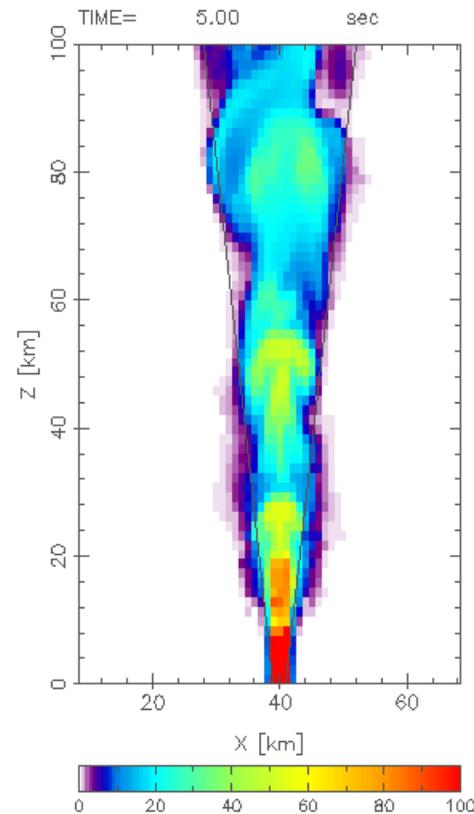
火砕サージ(有珠山)

# 乱流混合の再現と数値格子の関係

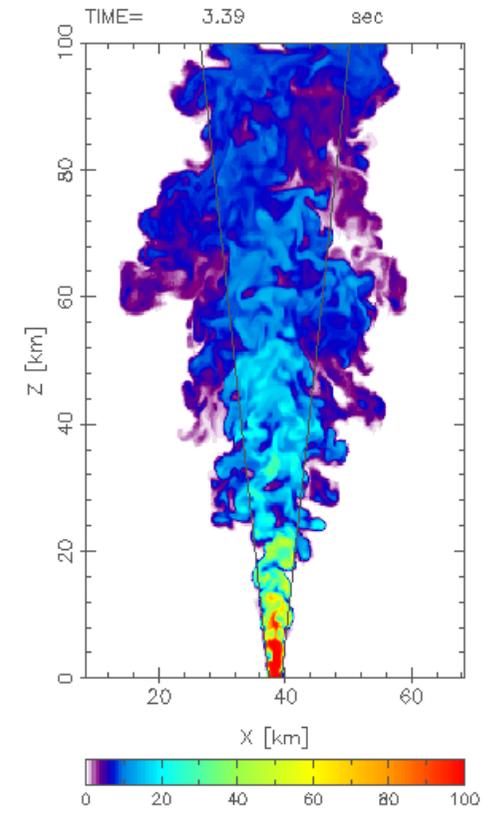
平成18年度  
地球シミュレータ利用報告

東京大学地震研究所  
小屋口剛博 教授  
海洋研究開発機構  
鈴木雄二郎 博士

- ・3次元座標系
- ・高次精度計算スキーム  
(3次精度)
- ・細かいメッシュサイズ



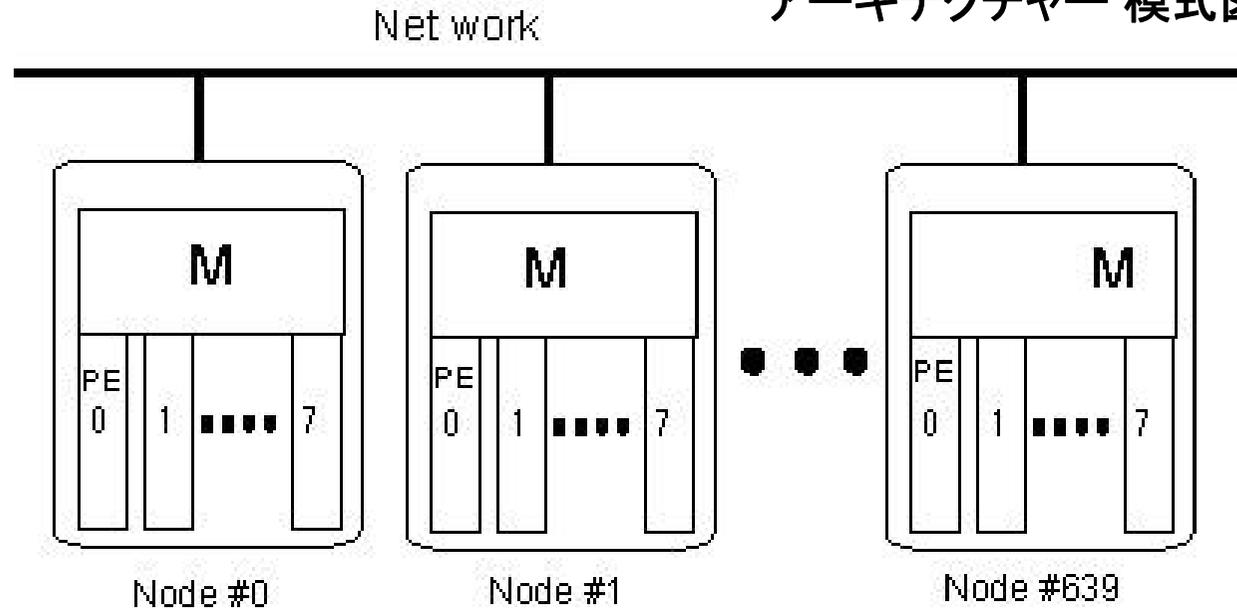
1mesh/ノズル半径



5mesh/ノズル半径

# 地球シミュレータ（移植と最適化）

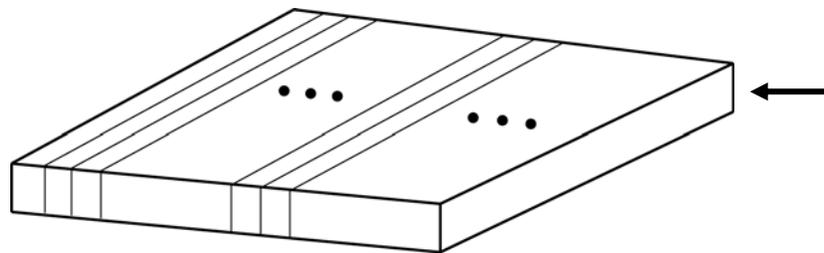
地球シミュレータ  
アーキテクチャー 模式図



- (a) ノード間(分散メモリー)並列化 → MPI
- (b) PE間(共有メモリー)並列化 → OpenMP
- (c) ベクトル化

# ハイブリッド並列化(爆風・火砕流計算コード)の地球シミュレータへの移植/最適化

OpenMP による  
ノード内並列

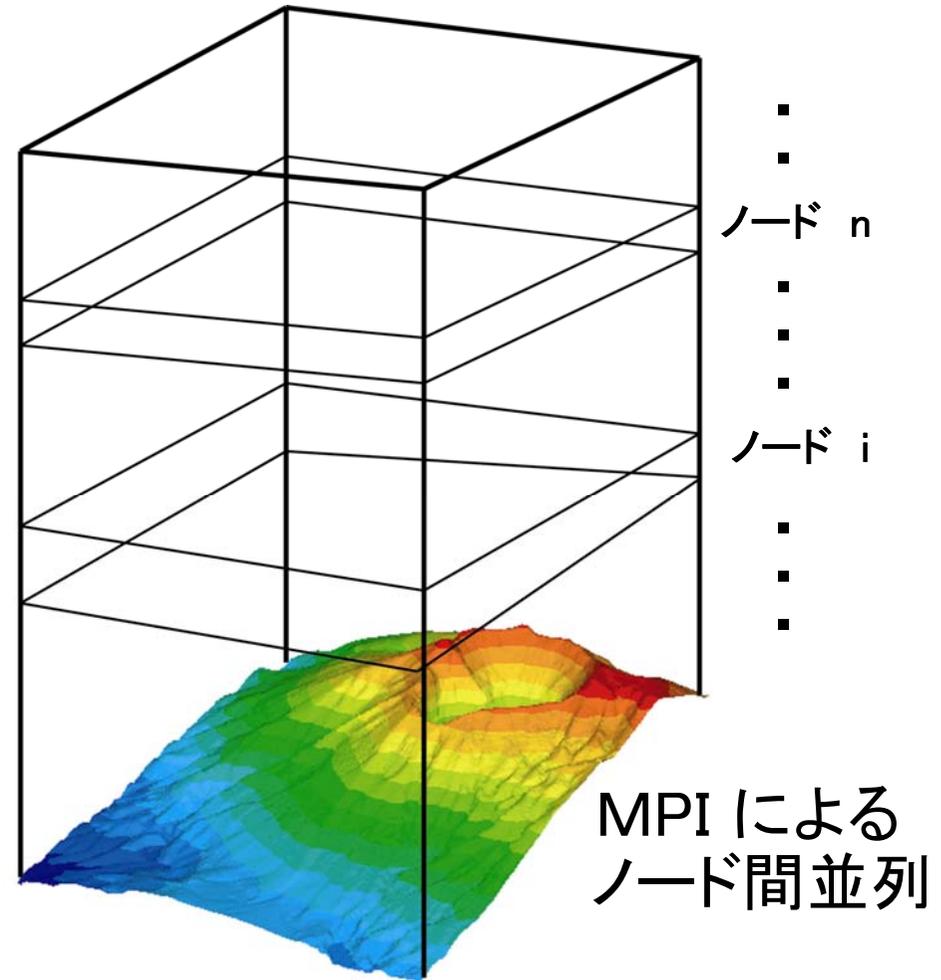


- ・ESへの実装
- ・チューニング

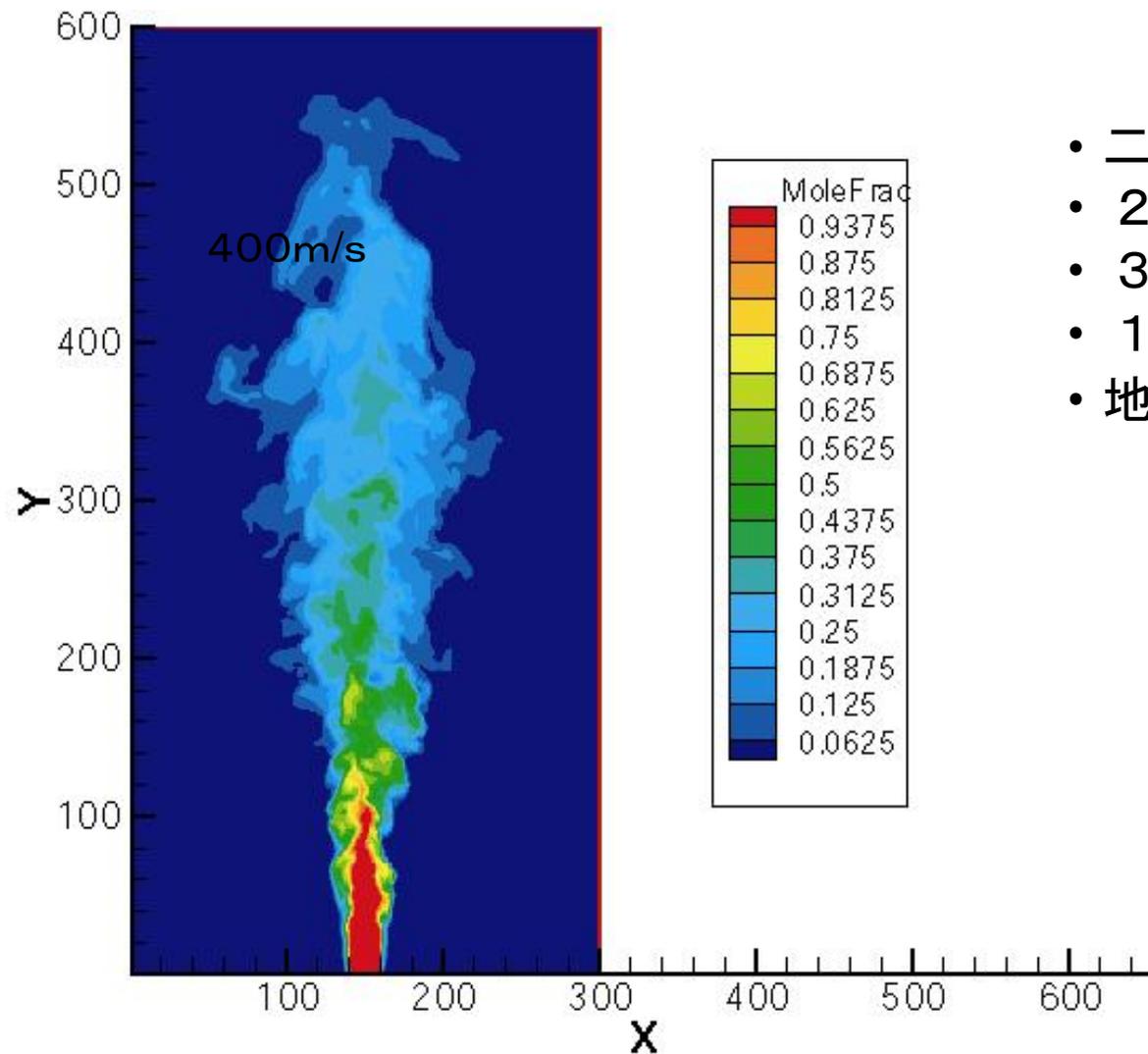
ベクトル化率: 96.868%

並列化率: 99.6982%

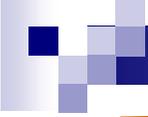
⇒ 更なる高速化・大規模化  
が必要



# 噴煙シュミレーション



- 二次精度 数値スキーム
- 20メッシュ／噴出口
- 300x300x800
- 15000ステップ
- 地球シミュレータ  
40ノード(320 PE)



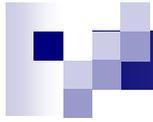
# 研究計画

1. 異種気体混合の数値計算について  
格子依存性を調査,
  - 数値スキームの精度(1次, 3次との比較)
  - 噴出口の格子解像度と結果の関係
  - 噴出速度
  - 乱流モデルの必要性?  
(DNS? vs RANS vs LES)
2. 火砕サージのシミュレーション  
噴出気体の物性を入力



# 今後の研究計画

1. 固気二相流モデルによる噴煙・火砕サージ  
計算プログラムの開発
2. (圧縮性)流動現象に対する効率の良い  
数値計算法の模索



***Thank you***