

噴火予知と火山防災研究の動向

(研)防災科学技術研究所
藤田英輔

「地震・噴火現象の解析と数値シミュレーション」セミナー 2015/4/23



1

火山学への要望

- ・ 2000年三宅島噴火
 - 火山ガスはいつ止まるのか？
- ・ 富士山
 - いつ噴火するのか？首都圏はどうなるのか？降灰被害の定量評価
- ・ 2011年霧島山新燃岳
 - 高原町長：火砕流はくるのか？いつどこまで？避難はいつ？
- ・ 2011年東日本大震災後の火山活動
 - 地震の影響でどの火山がいつ噴火するのか？(連動性)
- ・ 2014年御嶽山
 - 水蒸気爆発の噴火予知

2

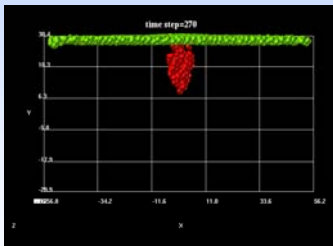


火山現象の数値シミュレーション

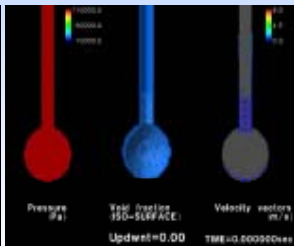
- 目的: 火山活動や火山災害の評価
 - 噴火するのか? 噴火未遂に終わるのか?
 - 爆発的噴火になるのか? 非爆発的噴火になるのか?
 - 噴火の継続時間は?
 - 火山災害はどこまで影響が及ぶのか? 時間的猶予は?
 - 事前対策はどこまで有効か?

地下の現象: 噴火予知・推移予測

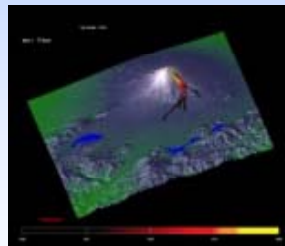
表面現象: 災害予測・評価



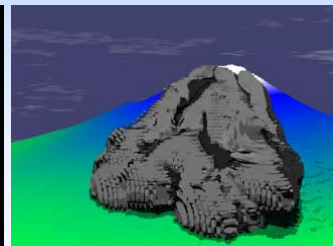
岩脈貫入



火道流モデル



溶岩流



火砕流

火山現象の数値シミュレーション

現象理解のためのモデルの構築: 順問題と逆問題

理論

圧力損失
 ・ 流路を流れる際における、摩擦等によるエネルギー散逸が引き起こす圧力低下 → 流れの安定性に深く関与

例: 定常一次元流

$$\frac{d}{dz} \rho u = 0$$

$$\frac{d}{dz} \rho u^2 + \frac{d}{dz} P = -F_w - \rho g$$

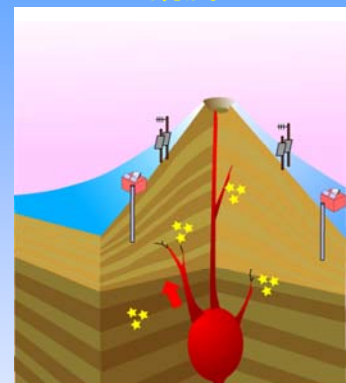
$$G = \rho u$$

$$\Delta P = P(x_{in}) - P(x_{out}) = - \int_{x_{in}}^{x_{out}} \frac{dP}{dz} dz = - \int_{x_{in}}^{x_{out}} \left[\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 + P \right) + \rho g \right] dz$$

加速損失 摩擦損失 位置損失

加速損失: 流体の断面積による加速に使われたエネルギー(蒸気化による加速等)
 摩擦損失: 流体内部の熱に転換したエネルギー
 位置損失: 位置エネルギーの変化

観測



相互のフィードバック

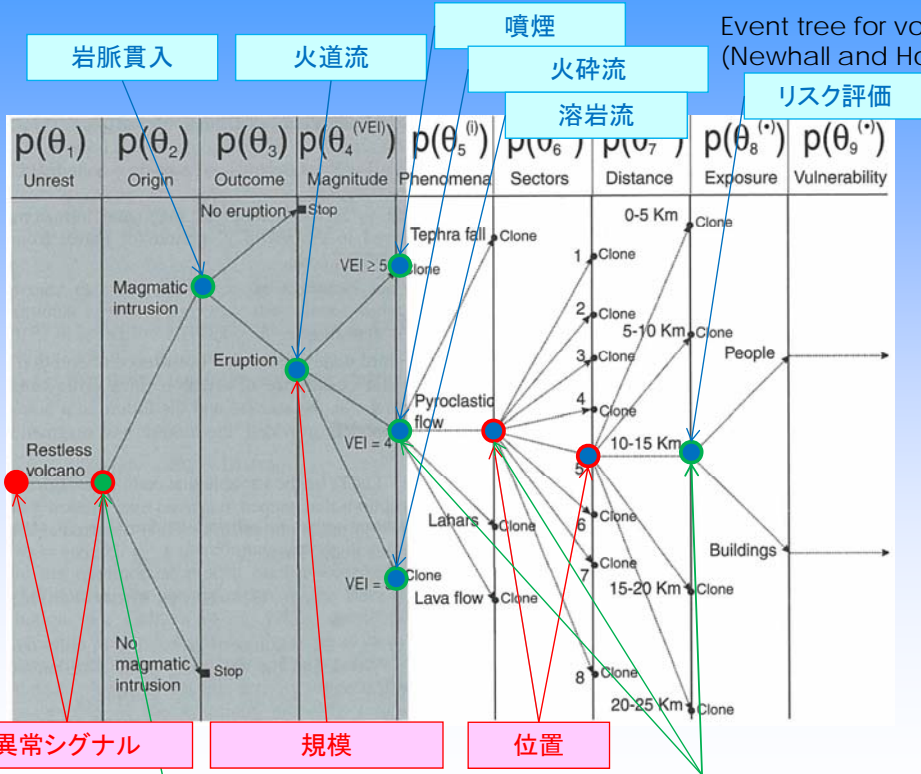
大きなギャップ

何のために数値シミュレーションを行うか?

- 複雑な現象を説明する理論モデルを検証する
 - マルチフィジックスの連立方程式を解くため
 - 非線形問題を理解する

火山災害評価のためのイベントツリー： 観測・数値シミュレーション・データベースの融合

数値シミュレーション



Event tree for volcanic crisis (Newhall and Hoblitt, 2002)

観測

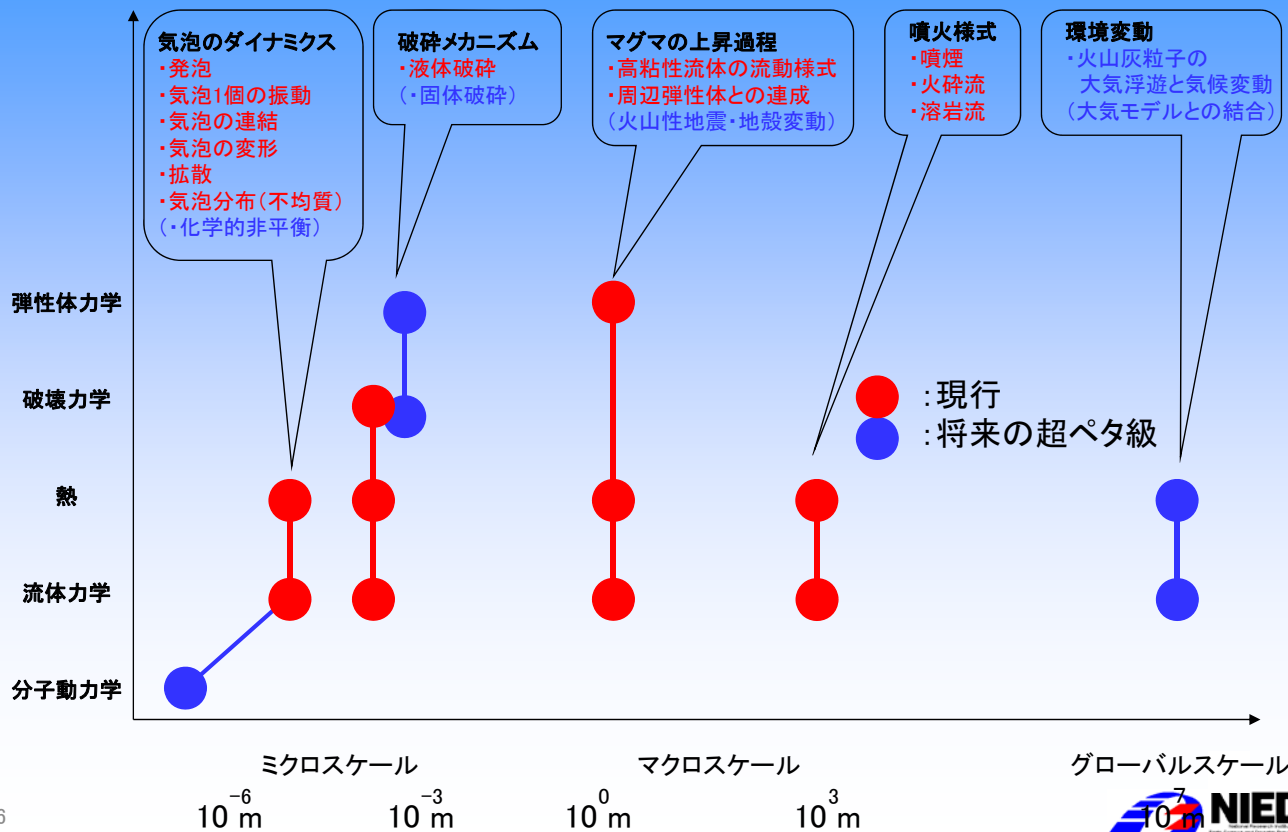
異常シグナル 規模 位置

データベース

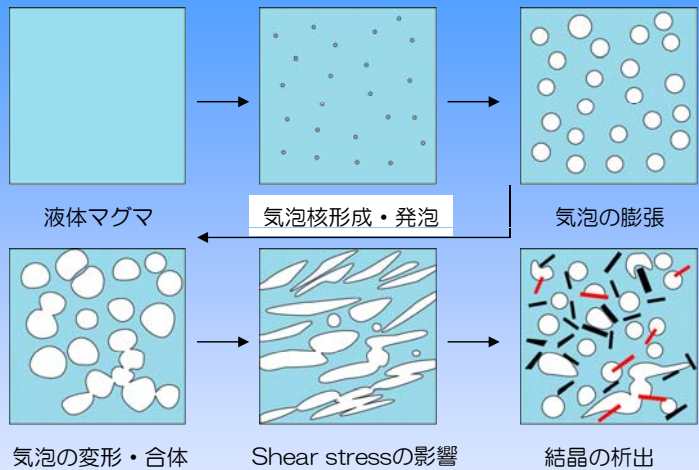
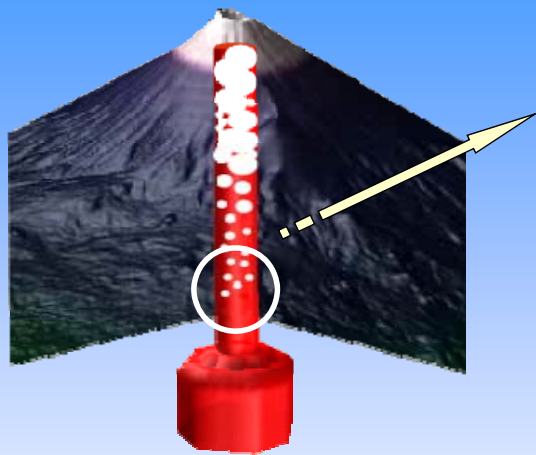
地質学的知見 経験 バックグラウンド情報



火山現象のマルチスケール・マルチフィジックス



火山におけるマイクロ現象



気泡のダイナミクス

- 発泡
- 気泡1個の振動
- 気泡の変形・連結
- 気泡の形状効果
- 拡散
- 気泡分布 (不均質)
- 結晶の析出

高粘性多相流の挙動

- ガスの
抜けやすさ/ためやすさ
- 多相流の
流れやすさ/壊れやすさ

マグマ上昇挙動

- 流動様式
- 爆発性

マイクロ～マクロの統一的な定式化



地表面象評価のためのシミュレーション手法

	現行(火山噴火危険区域予測 図作成指針, 国土庁, 1992)	次世代
溶岩流	最大到達範囲 有限差分法(石原・他, 1984)	確率論:セルオートマトン法(Crisci et al., 1999) 多相流(Hidaka et al., 2005, Fujita et al., 2008)
火砕流・火砕 サージ	エネルギーコーンモデル(火砕流 の初期位置エネルギーと摩擦 損失のバランス, 宝田・他, 1993)	粒子流モデル(Ishimine, 2007)
泥流(融雪型)・ 土石流	浅水波方程式・有限差分法	有限体積法: Titan2D (Pitman et al., 2003)
噴煙・火山ガス・ 降灰	移流・拡散の気象モデル (Tanaka, 1994)	粒子流モデル(Neri and Dobran, 2006; 鈴木・小屋口, 2006)

ハザード予測 →

時々刻々変化する現象を先に予測する次世代型リアルタイムハザードマップ



溶岩流シミュレーションコード

○ Deterministic model …物理的に（なるべく）正しく方程式系を解く

Table 1. Main Characteristics of the Deterministic Models for Simulating the Lava Flow Emplacement^a

Simulation Code	Type	Input Parameters	Output Parameters	Test Cases	References
Ishihara	2-D, CA	preer. DEM; VP and eff. rate; phys. lava prop.	lava thick.	1983 Miyakejima flow; 1986 Izu-Oshima LFs; 1914 Sakurajima LFs	<i>Ishihara et al.</i> [1989]
SCIARA	2-D, CA	preer. DEM (square/hexagonal cells); VP and eff. rate trend; ad. param. at er., solid. and at an intermediate temp.; cooling param	lava thick. and 2-D temp.	1669, 1986–1987, 1991–1993, 2001 and 2002–2003 NE Etna LFs	<i>Barca et al.</i> [1993], <i>Crisci et al.</i> [2003, 2004], <i>Spataro et al.</i> [2004], <i>D'Ambrosio et al.</i> [2005]
FLOWFRONT	2-D, implicit description of the front behavior	preer. DEM; min. thick. for flow; crit. thick. for flow and corresponding slope angle; lava vol. supplied at each iteration	lava thick.	Lonquimay 1988–1989 er.	<i>Wadge et al.</i> [1994]
Miyamoto and Sasaki	2-D, CA	preer. DEM; VP and er. rate; phys. lava prop.	lava thick.	analytical solution of a Bingham flow on a flat plane; 1983 Miyakejima LF	<i>Miyamoto and Sasaki</i> [1997]
FLOWGO	1-D, self-adaptive numerical model	at-vent channel width and depth; underlying slope (1st version); set of vent positions and effusion rates, DEM (2nd version)	final channel length down-flow crustal, thermal and rheological param.	1984 Mauna Loa LF; 16 May 1997 Pu' Ō'ō' LF; October 1998 Etna LF; contour line map of channel length for Hawai'i; 16 September 2004 Etna LF	<i>Harris and Rowland</i> [2001], <i>Rowland et al.</i> [2005], <i>Harris et al.</i> [2007]
LavaSIM	3-D, computational fluid dynamics	preer. DEM; eff. rate trend; VP; chem. and phys. lava prop.	lava thick.; 3-D velocity, temp. and cell state (liquid or solid)	1986 Izu-Oshima LFs; 2001 Etna LF from 2100 m asl	<i>Hidaka et al.</i> [2005]
Costa and Macedonio	2-D, shallow water equation	preer. DEM; VP and er. rate; phys. lava prop.	lava thick.; 2-D temp.	initial phase of the 1991–1993 Etna er.	<i>Costa and Macedonio</i> [2005b]
MAGFLOW	2-D, CA	preer. DEM; eff. rate trend; VP; phys. lava prop.	lava thick.; 2-D temp.	2001 and 2004 Etna LFs	<i>Vicari et al.</i> [2007], <i>Del Negro et al.</i> [2007]

^aPreer., pre-eruption; eff. rate, effusion rate; ad. param., adherence parameter; solid., solidification; temp., temperature; min., minimum; thick., thickness; crit., critical; chem., chemical; phys., physical; prop., properties; vol., volume; er., eruption; LF, lava flow; VP, vent position; DEM, Digital Elevation Model; CA, Cellular Automata.

(Proietti et al., 2009)



溶岩流シミュレーションコード

○ Probabilistic model …防災の実用性・迅速性のため近似的に解く

Table 2. Main Characteristics of the Probabilistic Models for Simulating the Lava Flow Emplacement^a

Simulation Code	Type	Input parameters	Output	Test Cases	References
Dobran and Macedonio	prob. MS model	TIN of the preer. surface; VP	prob. of the LF paths	1991–1993 Etna er.	<i>Dobran and Macedonio</i> [1992]
FLOWFRONT	MC sim.	preer. DEM; stochastically derived: min. and crit. thick. for flow to take place; slope angle corresponding to herit; lava vol. supplied at each iteration	hazard map	Etna flank er. (vent below 2600 m asl)	<i>Wadge et al.</i> [1994]
Felpeto et al.	prob. MS model (MC sim.)	prob. of the VP; preer. DEM	prob. of each point to be invaded	Lanzarote Island	<i>Felpeto et al.</i> [2001]
DOWNFLOW	steepest paths over stochastic perturbation of the topography	preer. DEM and VP; entity of perturbation	perc. of LF paths overrunning every cell	1991–1993, 2001 and September 2004 Etna LFs; 2002 Nyiragongo LF	<i>Favalli et al.</i> [2005, 2006]
ELFM	prob. MS model (MC sim.)	preer. DEM and VP; max. number of the cells in a given path; max. height of the LF; lava height var. function	perc. of LF paths overrunning every cell	1792, 1971 and 1991–1993 Etna LFs	<i>Damiani et al.</i> [2006]

^aProb., probabilistic or probability; MS, maximum slope; MC, Monte Carlo; sim., simulation; VP, vent position; TIN, triangular irregular network; min., minimum; crit., critical; thick., thickness; vol., volume; max., maximum; var., variations; perc., percentage; LF, lava flow.

(Proietti et al., 2009)

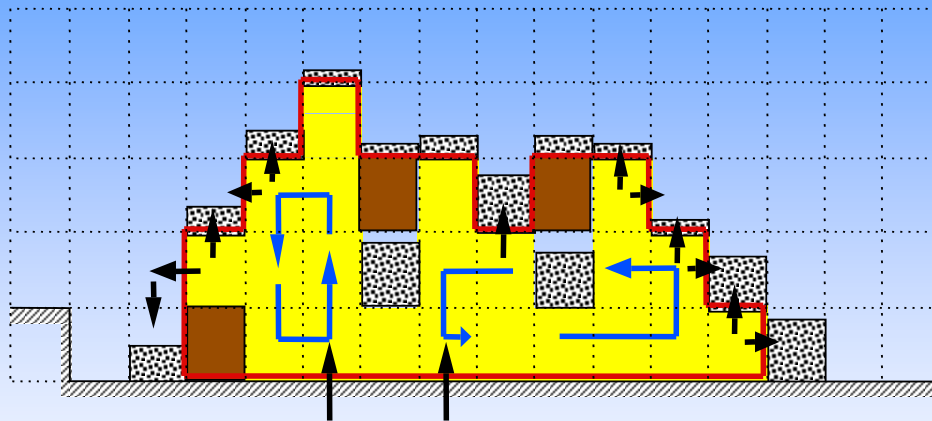


溶岩流シミュレーション：LavaSIM

(Hidaka et al., 2005)

- 溶融凝固連成
- 3次元対流
- 物性の温度依存性

溶岩流の断面図



噴火口での溶岩流出

- 液体溶岩
 - クラスト
 - 自由表面メッシュ
 - 地表面
- 自然対流メッシュ**
- 対流解析領域
 - 流入・流出境界
 - 自然対流

11



○熱伝達の計算

- Thermal radiation
- Natural convection
- Forced convection

Table 1. Heat Transfer Models Between Lava, Structure, Ground, and Atmospheric Fluid

	Liquid Lava	Crust	Structure
Liquid lava	transport and thermal conductivity ^a	natural convection correlation	natural convection correlation
Crust	natural convection correlation	thermal conductivity ^a	thermal conductivity ^a
Structure	natural convection correlation	thermal conductivity ^a	thermal conductivity ^a
Ground	natural convection correlation	thermal conductivity	thermal conductivity
Atmospheric fluid	natural convection correlation and radiation ^b	natural convection correlation and radiation ^b	natural convection correlation and radiation ^b

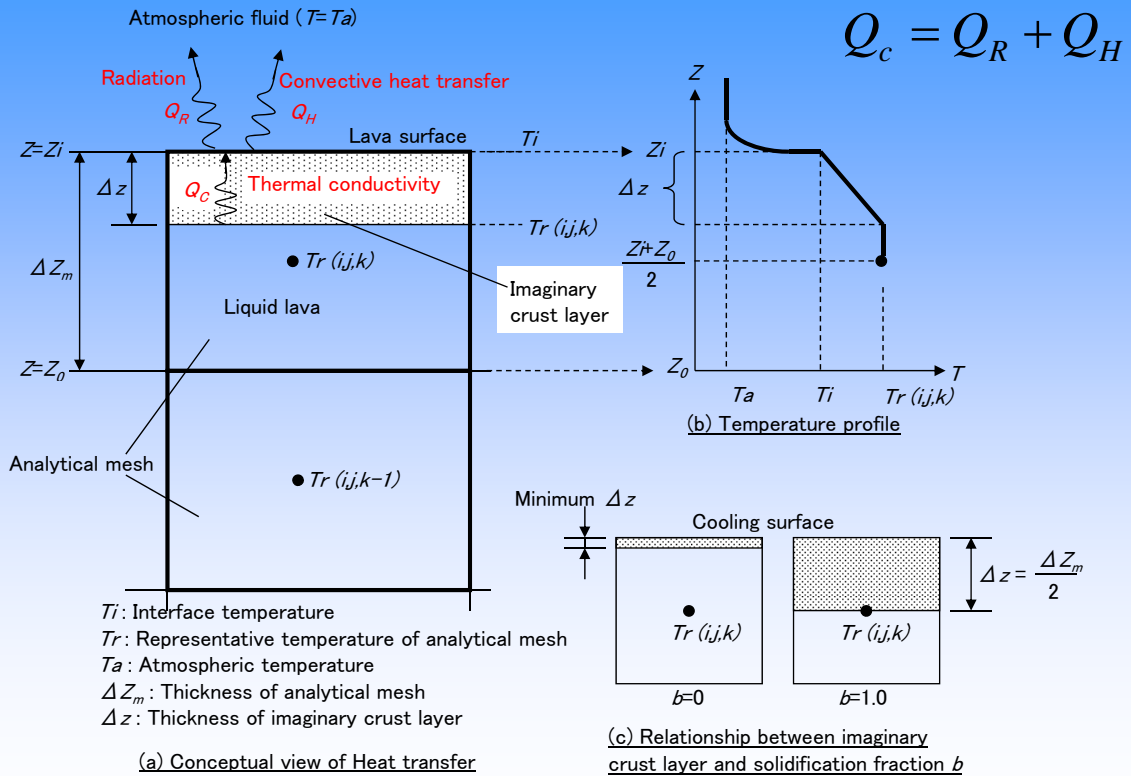
^a Heat transport and conduction are calculated in the energy conservation equation.

^b Radiation is not calculated for the under water level condition.

12



○熱伝達の計算—溶岩表面と大気



$$Q_R = \sigma \varepsilon (T_i^4 - T_a^4) \quad \begin{array}{l} \sigma: \text{Stefan-Boltzman定数} \\ \varepsilon: \text{溶岩の輻射率} \end{array}$$

自然対流による熱輸送

Horizontal wall with upward heating or downward cooling [Fujii and Imura, 1972]

$$Nu = 0.54Ra^{0.25} \quad [2.0 \times 10^4 < Ra \leq 8.0 \times 10^6]$$

$$Nu = 0.15Ra^{1/3} \quad [8.0 \times 10^6 < Ra \leq 1.0 \times 10^{11}]$$

Horizontal wall with upward cooling or downward heating [Fujii and Imura, 1972]

$$Nu = 0.58Ra^{0.2} \quad [1.0 \times 10^5 < Ra \leq 1.0 \times 10^{11}]$$

Vertical wall [McAdams, 1954; Bayley, 1955]

$$Nu = 0.59Ra^{0.25} \quad [1.0 \times 10^4 < Ra \leq 1.0 \times 10^9]$$

$$Nu = 0.10Ra^{1/3} \quad [1.0 \times 10^9 < Ra \leq 1.0 \times 10^{13}]$$

Nu : Nusselt number: 対流による熱伝達と静止している流体の熱伝導の比率

Ra : Rayleigh number: 熱対流の不安程度指標 (熱伝導/対流)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_l} \quad \begin{array}{l} \alpha: \text{流体の熱伝達率} \\ L: \text{代表的長さ} \\ \lambda_l: \text{流体の熱伝導率} \end{array}$$

$$Ra = \frac{g\beta}{v\alpha} (T_s - T_\infty)x^3$$

α : 熱拡散率
 β : 体積膨張率
 x : 代表的長さ
 v : 動粘性係数

適用例：溶岩流制御シミュレーション

- 溶岩流被害：焼失・埋没

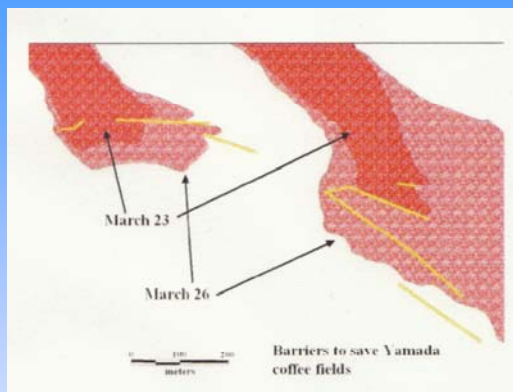


- 溶岩流制御の方法
 - 溶岩流を全部食い止める
 - 溶岩流の向きを変える
 - 流路の下流に堤防をつくる（土石・岩塊・コンクリート）
 - 溶岩チャンネル・溶岩堤防を破壊する：爆薬・爆撃
 - 導流溝を掘る
 - 水冷

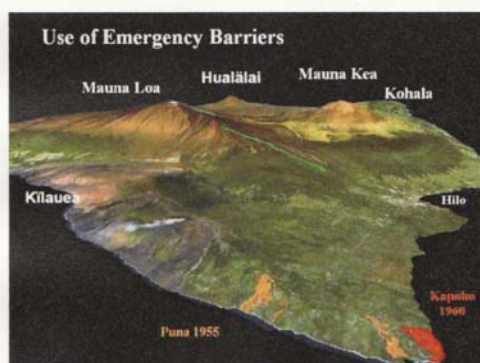
15



溶岩流制御の事例(1)：ハワイ



- 1935：爆発物
- 1942：爆発物
- 1955：人工堤防
- 1960：人工堤防
水冷
- 1977：爆発物



16

Kauahikaua(2004)



溶岩流制御の事例(2)：エトナ山（イタリア）



- 1669：堤防の破壊・誘導
- 1983：人工堤防
- 1991-1993：人工堤防
- 2001：人工堤防

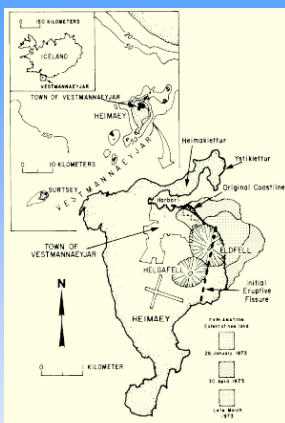


17

Coltelli et al. (2007)



溶岩流制御の事例(3)：1973年ヘイマエイ島（アイスランド）



- 生活基盤である港を守る
- パイプライン敷設
- 海水にそって自然堤防形成
- 750liters/sの放水で制御成功



18

Siguresirsson (1977)

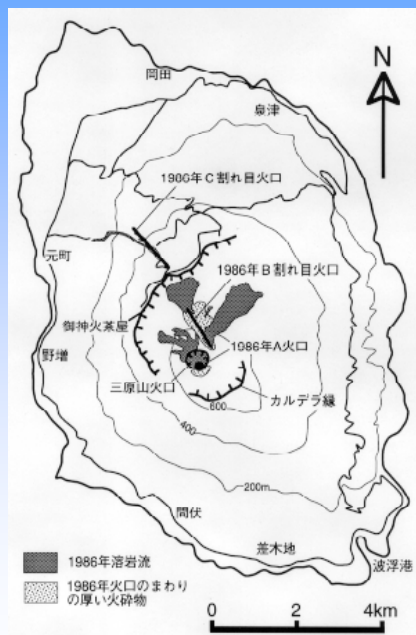


溶岩流制御の事例(4)： 1983年三宅島 1986年伊豆大島

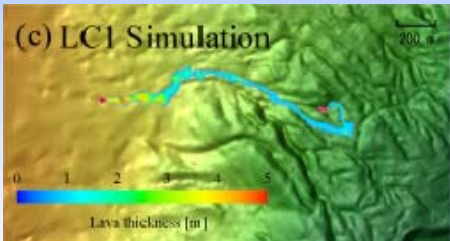


- ポンプ車・可搬ポンプ等活用
- コンクリートミキサー車活用
- 送水量（大島）
3,500 l/min (2,000m)
- 溶岩の輻射熱からの延焼阻止
- 水源確保・送水手段・長時間放水
- 後方支援

ケーススタディ：1986伊豆大島溶岩流

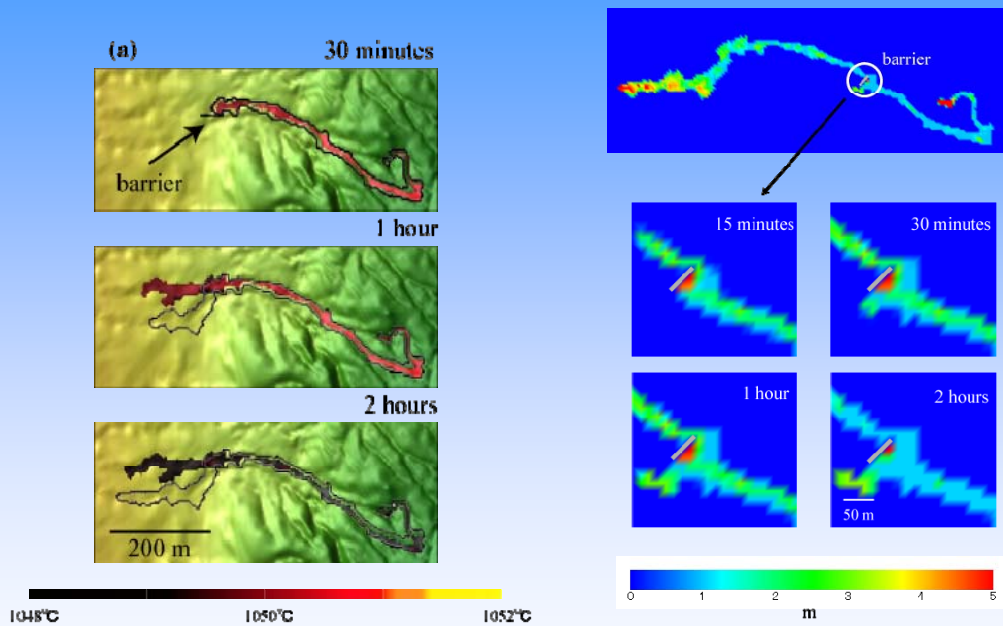


基本シミュレーション



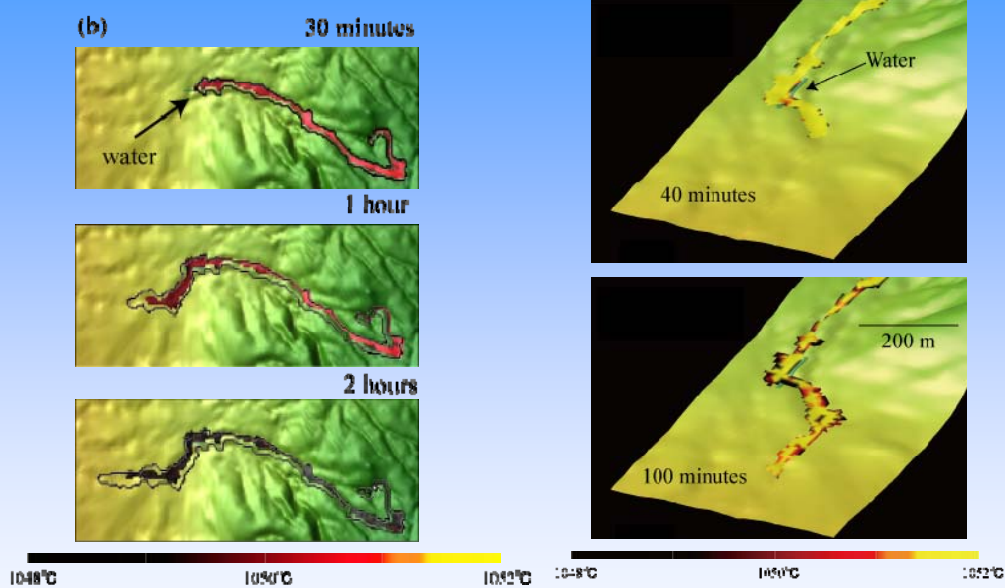
Parameters	
Density	$2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Heat capacity	$8.4 \times 10^2 \text{ J/kg K}$
Thermal conductivity	1.56 W/m K
Latent heat of fusion	$3.2 \times 10^5 \text{ J/kg}$
Solidus temperature	1000 C (1273 K)
Liquidus temperature	1100 C (1373 K)
Specific enthalpy of solidus	$1.07 \times 10^6 \text{ J/kg}$
Specific enthalpy of liquidus	$1.39 \times 10^6 \text{ J/kg}$
Solidification fraction of liquidity loss	0.5
Specific enthalpy of liquidity loss	$1.23 \times 10^6 \text{ J/kg}$
Lava emissivity	1050 C (1323 K)
Temperature of liquidity loss	$1. \times 10^5 \text{ kg/s}$
Extrusion rate	(0-3600s)
Lava specific enthalpy	$0 \text{ kg/s (> 3600 s)}$
Extrusion temperature	$1.23 \times 10^6 \text{ J/kg}$
Viscosity	$1051.2 \text{ C (1324.2 K)}$
Atmospheric temperature	$5.0 \times 10^3 \text{ Pa s}$
Ground temperature	17 C (290 K) 27 C (300 K)

人工堤防シミュレーション



- 130m x 20m x 20m の堤防を設置
- 流れる方向の制御に効果あり
- 流れる方向に垂直な場合、一時的にはダム効果があるがオーバーフローする

注水冷却シミュレーション

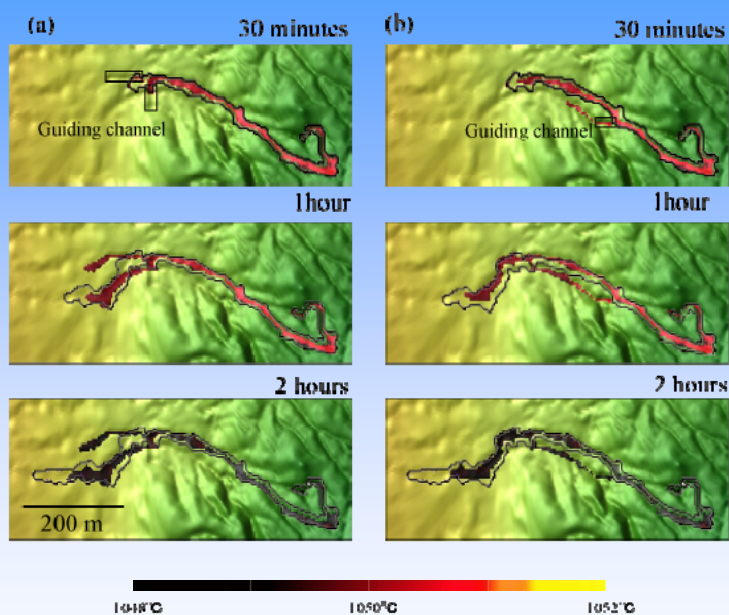


- 130m x 20m x 20m の水のプールを設置
- 流下域の面積軽減に効果あり
- 実際の溶岩→表面のクラックによりさらに冷却可能面積増

23



導流溝シミュレーション



- 溶岩流の到達距離の軽減
- 方向の制御

24

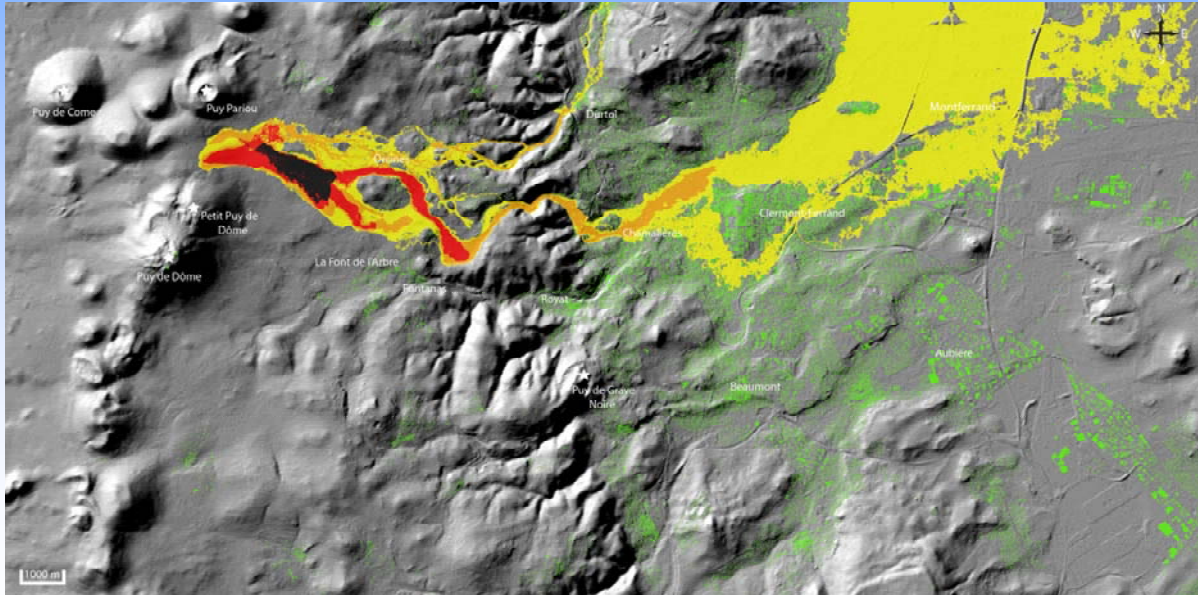


溶岩流シミュレーションのベンチマーク



フランス:ピュイ・ト・ドーム火山群

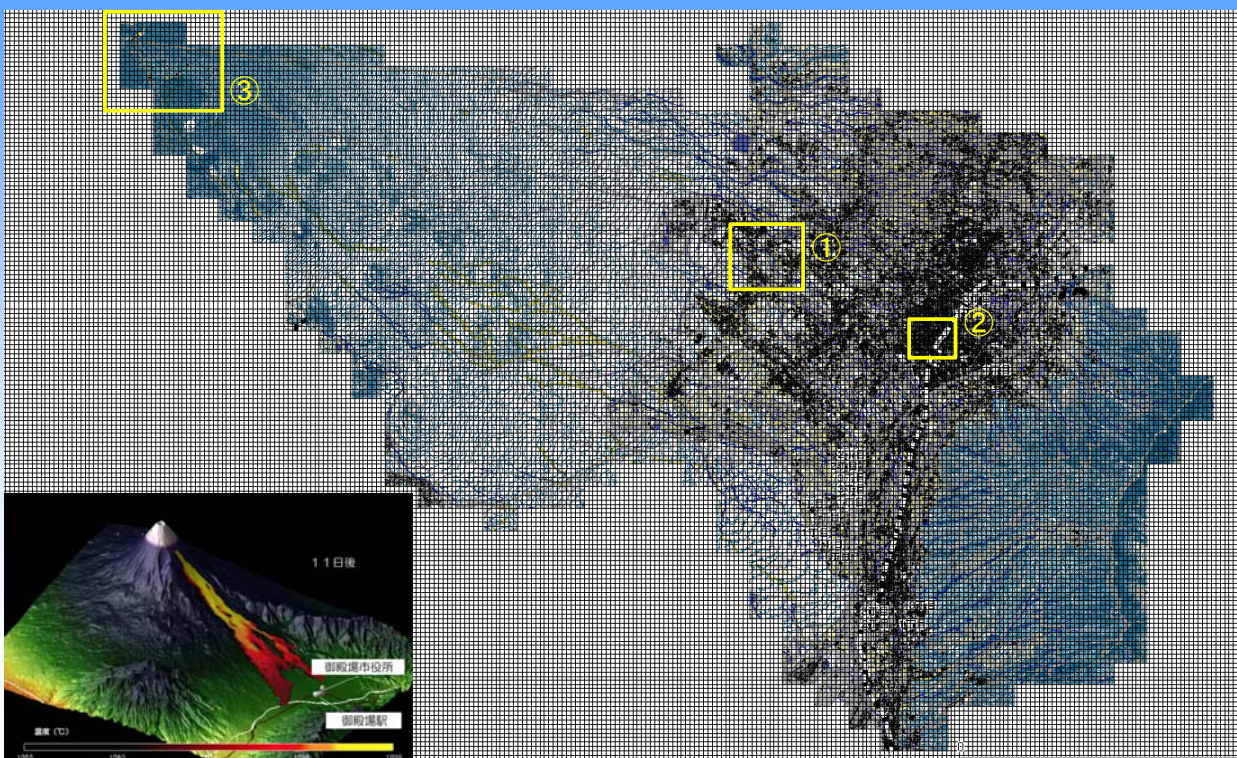
2013-: ECプロジェクト
フランス・イタリア・スペイン・アイスランド・ドイツ
米国・日本



溶岩流シミュレーション 暴露度・脆弱性評価

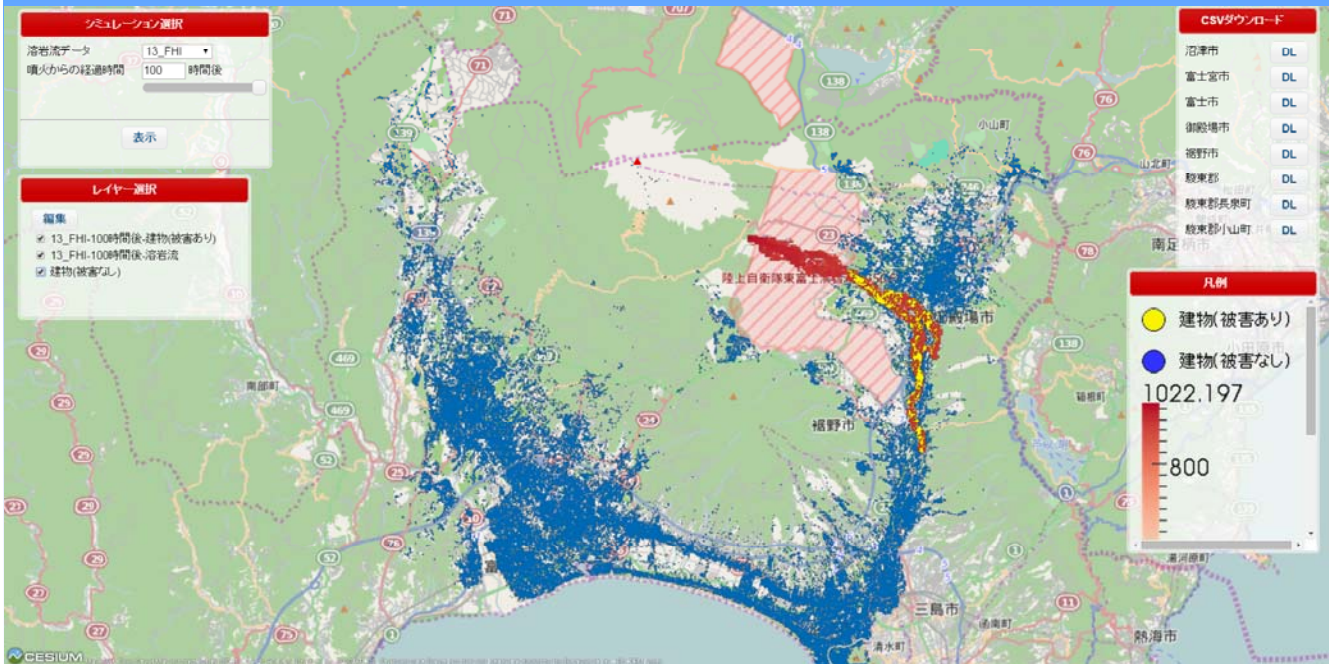
御殿場市のデータ

※マス目は100mのグリッド



溶岩流シミュレーション 暴露度・脆弱性評価

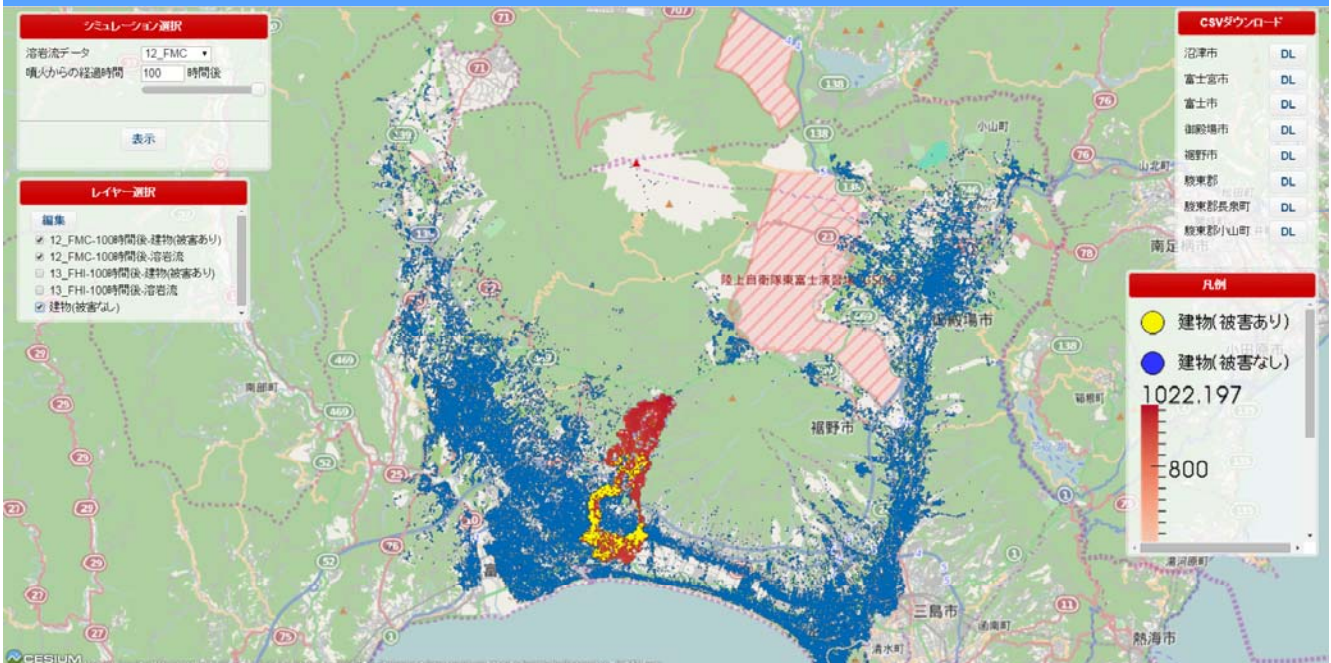
富士山東側(御殿場方面)流下のケース



防災科研・東大情報科学研究センター・日立製作所

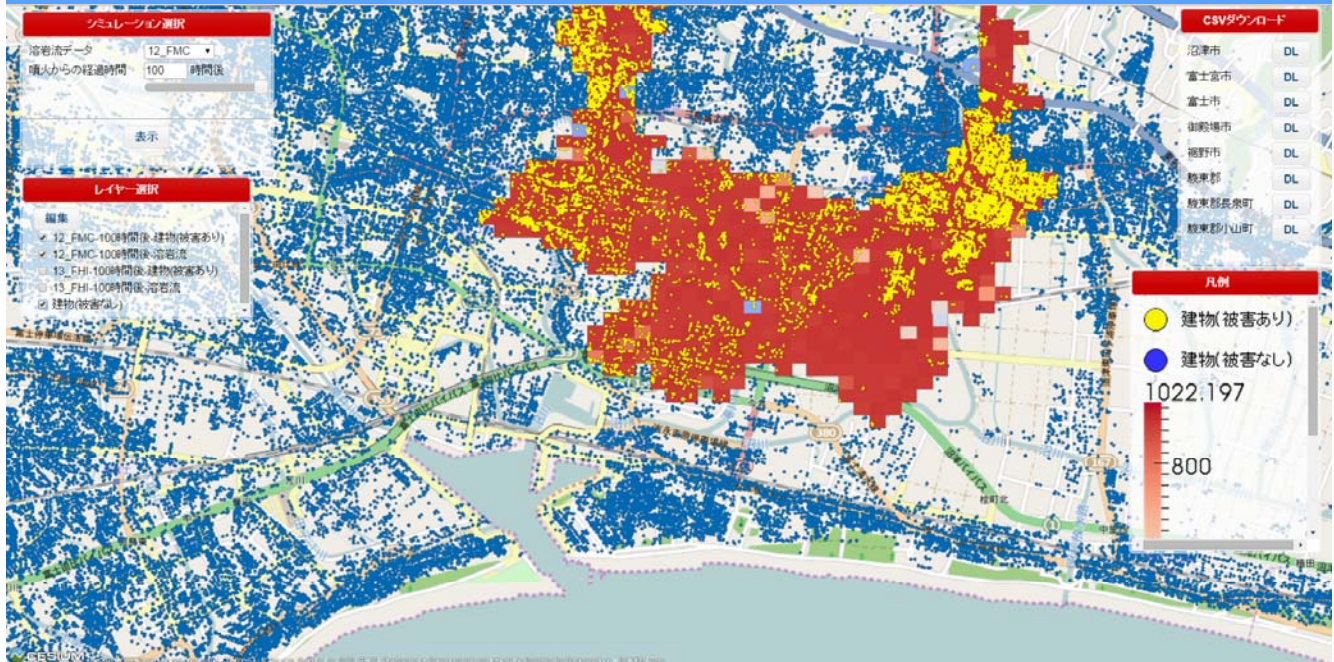
溶岩流シミュレーション 暴露度・脆弱性評価

富士山南西側(富士・富士宮方面)流下のケース



溶岩流シミュレーション 暴露度・脆弱性評価

富士山南西側(富士・富士宮方面)流下のケース(拡大図)

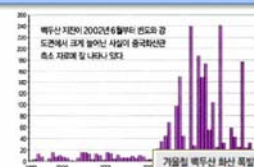
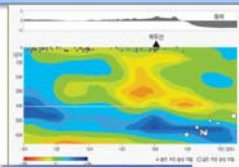


噴煙シミュレーションと火山防災行政への適用: 韓国の例

© VDPRC, Korea

Background & Purposes

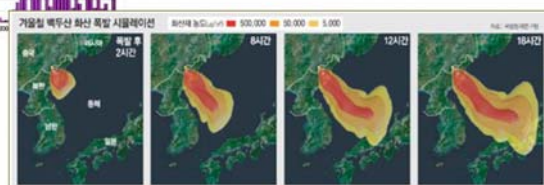
- **Since 2002**, volcanic earthquakes have been observed **10 to 15 times** each month in Mt. Baekdu
- Mt. Baekdu currently is classified as **'a high-risk volcano'**
- Small-scale volcanic eruptions do not cause much damage. However, with a large volcanic eruption such as in 969 happening again, then we can encounter larger political and economical impact than before.



<magma movement and earthquake events>



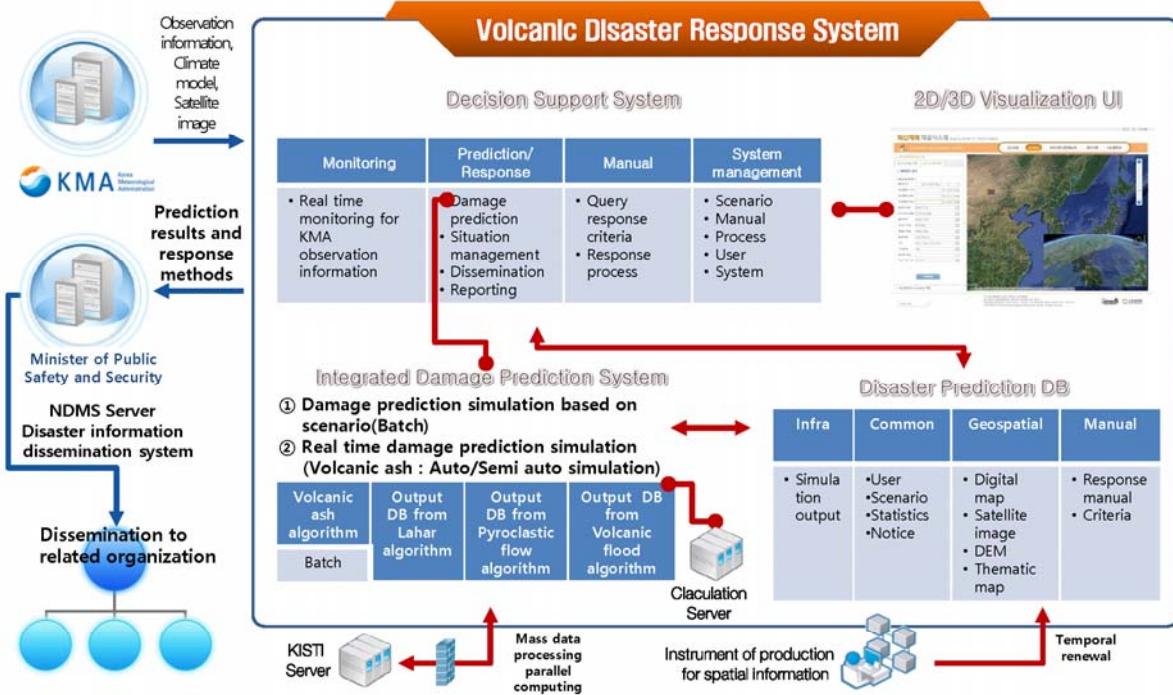
<Mt. Baekdu and Volcanic Eruption>



< NIDP simulation Mt. Baekdu >

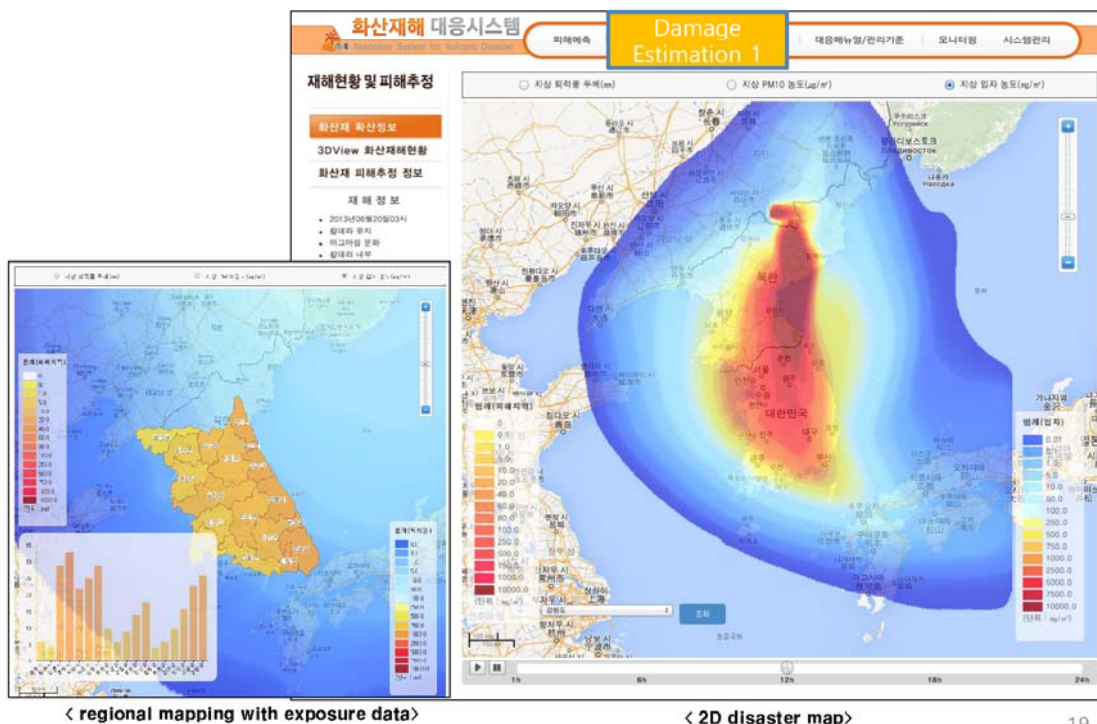
- Remotely location and inaccessible relationship
- Decision support system for volcanic disaster response
- Enhancement of Reaction Capacity of Scenario-based practice

Key Process Designs



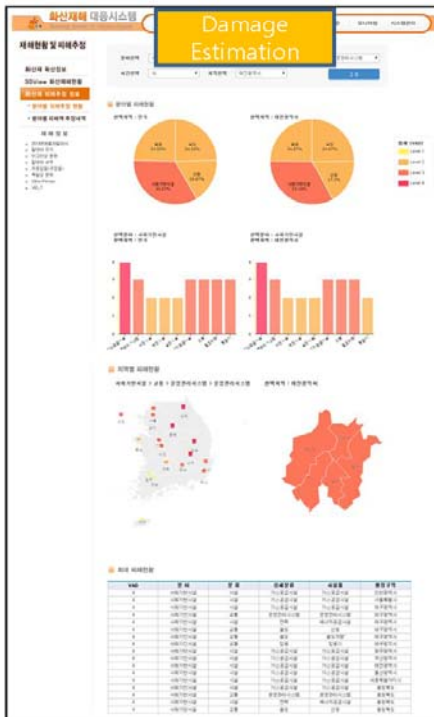
Results (window capture)

Ash Diffusion and Mapping with exposures



Results (window capture)

Ash damage estimation results: graph and table



< estimation and calculation in each domain >



< loss amount estimation in each domain >

33

20



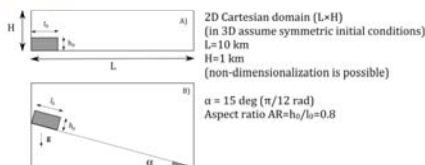
火砕流ベンチマーク

Pyroclastic Density Current Benchmark Case BC#1: the dam-break problem

Foreword

In our terminology, a Benchmark Case is a "standard problem" focused on defining the differences/similarities between models. It is a simplified system with some complexity added, mainly concerning geometrical and scaling complications. In general, it might be possible to design appropriate laboratory experiments to have an experimental confirmation of a benchmark case. However they usually need special hardware (e.g., high-temperature facilities) and scaling might be a serious issue (need of "large-scale" experiments). Also in this case, a measure of accuracy, or error, is expected to be available and should be explicitly reported. In cases where experimental data are not (yet) available, the Benchmark is focused on defining the differences/similarities of the numerical models (possibly providing a metrics for a quantitative comparison).

Geometry



Initial conditions

Dilute current	
Volume (A=h ₀ ×l ₀)	200000 m ²
Volumetric particle concentration (Φ ₀)	5×10 ⁻⁴
Solid bulk density	1 kg/m ³
Total mass (*)	2×10 ⁵ kg/m
Gravity acceleration	-9.81 m/s ²
Grain size (spherical)	125 μm
Particle density	2000 kg/m ³
Temperature	300 K / 500 K
Geometry	A) B)

* (assuming, for example, a uniform front of 100 m width, this is equivalent to a mass of 2×10⁷ kg or a DRE volume of 8×10³ m³)

Concentrated current

Volume (A=h ₀ ×l ₀)	200000 m ²
Volumetric particle concentration (Φ ₀)	5×10 ⁻¹
Solid bulk density	1000 kg/m ³
Total mass (*)	2×10 ⁸ kg/m
Gravity acceleration	-9.81 m/s ²
Grain size (spherical)	125 μm
Particle density	2000 kg/m ³
Temperature	300 K / 500 K
Geometry	A) B)

Numerical parameters

Arbitrary grid size and time-step (but please specify).

Boundary conditions

Bottom surface conditions: No-slip (gas & particles)
Bottom surface roughness length: 0 m
Top, East, West: Free inlet-outlet

Output

Hazard variables (tabular)

- Front position VS time
- Maximum runout
- Dynamic pressure VS distance
- Temperature VS distance
- Deposited mass VS distance, at final time

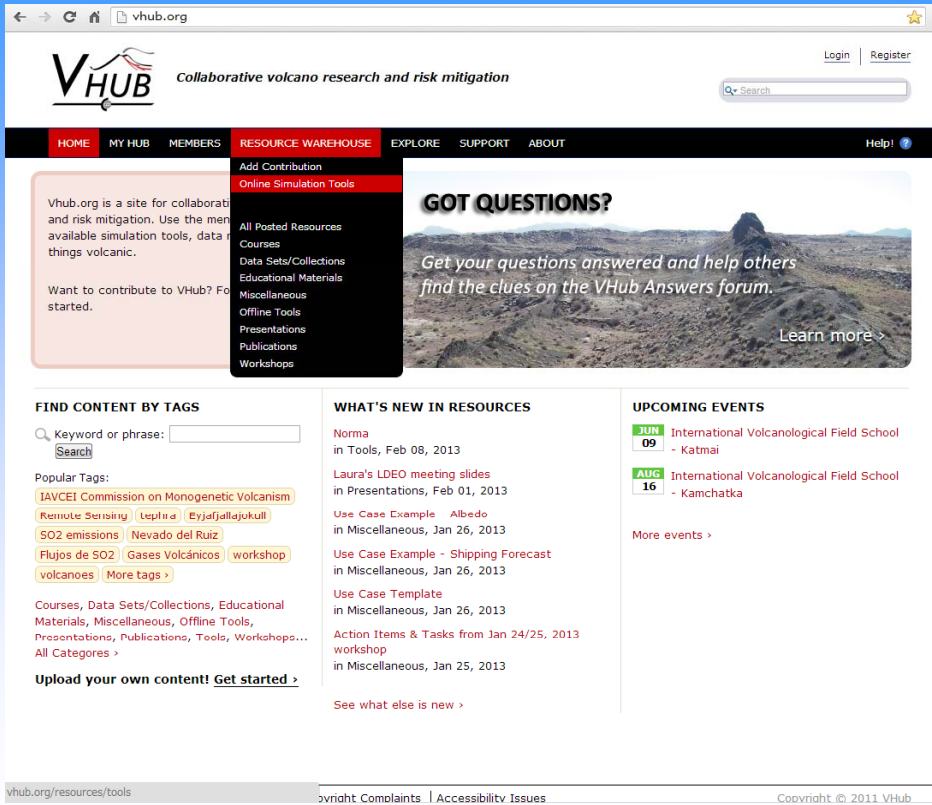
Some references

- Bonnetcaze, R. T., Huppert, H. E., and Lister, J. R. (1993). Particle-driven gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 250:339–339.
- Gladstone, C., Ritchie, L., Sparks, R., and Woods, A. (2004). An experimental investigation of density-stratified inertial gravity currents. *Sedimentology*, 51(4):767–799.
- Hallworth, M. A., Hogg, A. J., and Huppert, H. E. (1998). Effects of external flow on compositional and particle gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 359:109–142.
- Hogg, A. J., Huppert, H. E., and Hallworth, M. A. (1999). Reversing buoyancy of particle-driven gravity currents. *Physics of fluids*, 11:2891.
- Ishimine, J. (2005). Numerical study of pyroclastic surges. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:35–57.
- Simpson, J. E. (1999). Gravity currents in the environment and the laboratory. Cambridge University Press.

34



海外の動向: オンラインシミュレーション



標準化
相互比較

35

特に発展途上国でのハザードマップ作成等に利用

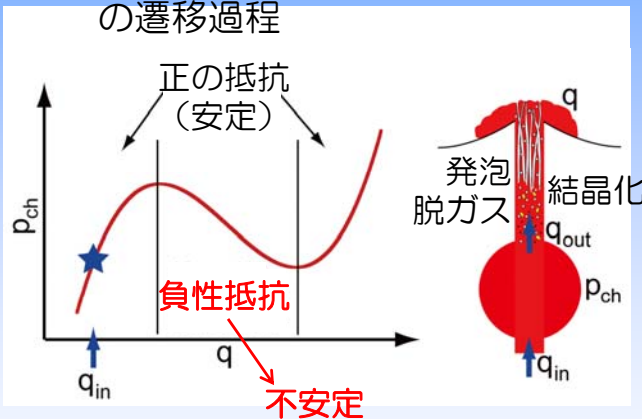


地下現象評価のためのシミュレーション

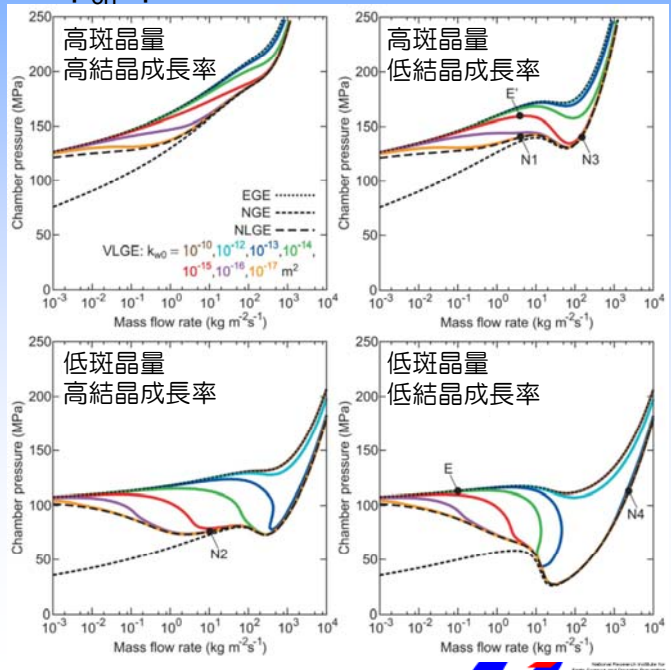
火道流モデル → 噴火の爆発性の評価

■ 数値シミュレーションによって、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力(p_{ch})とマグマ噴出率(q)の関係を系統的に解明

✓ p_{ch} - q 曲線が規定する噴火タイプの遷移過程



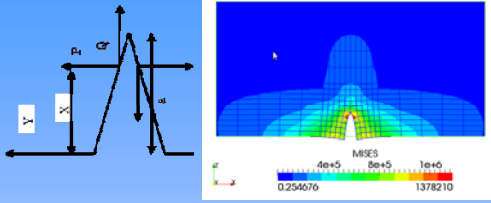
✓ p_{ch} - q 曲線のパラメータ解析



T. Kozono, T. Koyaguchi (2012), Effects of gas escape and crystallization on the complexity of conduit flow dynamics during lava dome eruptions, JGR, 117, B08204

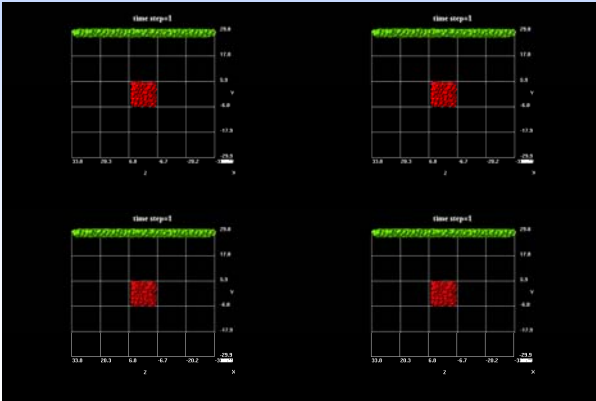
36

ダイクの動的過程シミュレーション (ミクロ)

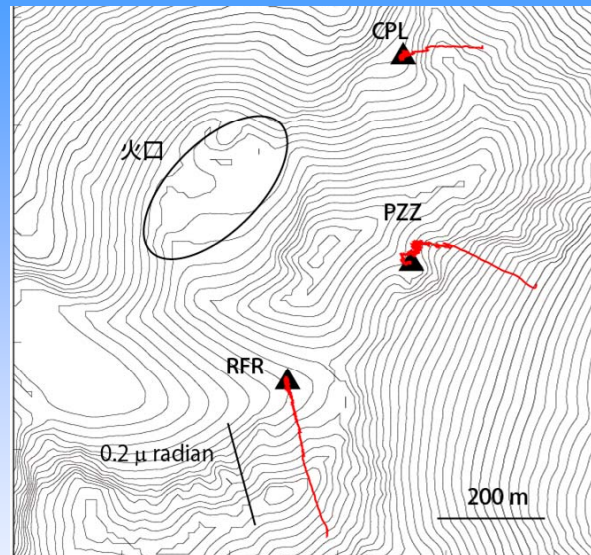


亀裂内増圧に伴う腐食クラック先端部の増圧・破壊をFEMにより計算

ダイクの動的過程シミュレーション (マクロ)



低粘性マグマの噴火に先行するマグマ上昇と山体変形のモデル化



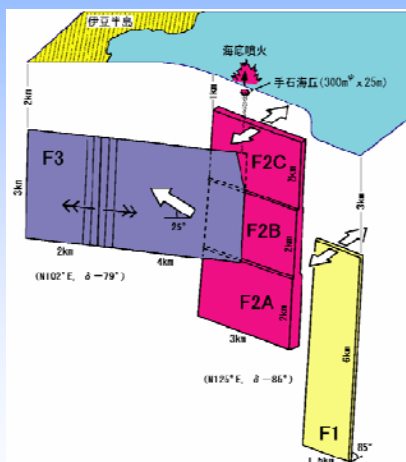
イタリア・ストロンボリ火山で観測されたストロンボリ式噴火に先行する傾斜変動の軌跡。観測点を噴火5分前とし、爆破し地震発生までをプロットしている。噴火直前に傾斜変動の方向が変化している。



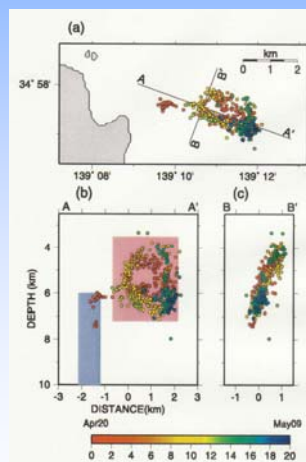
ダイクの動的過程シミュレーション(マクロ)

Recent high-density seismic and ground deformation observation

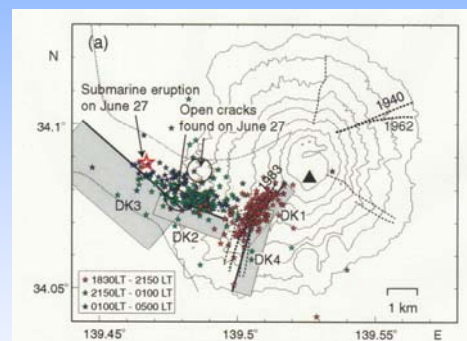
Detection of precise subsurface magma migrations



1989 Off-Ito swarm (Okada & Yamamoto,1992)



1989 Off-Ito swarm (Morita et al.,2005)

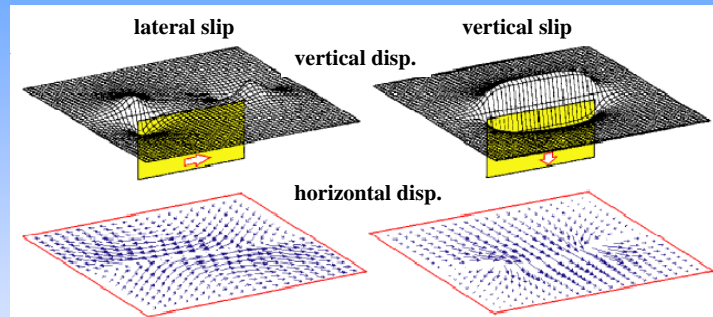
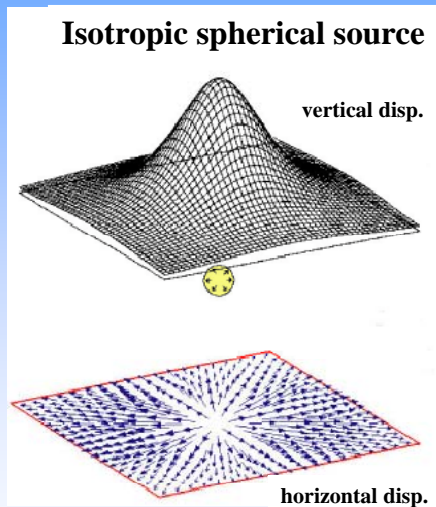


2000 Miyakejima volcano (Ueda et al., 2006)



Standard Crustal deformation model

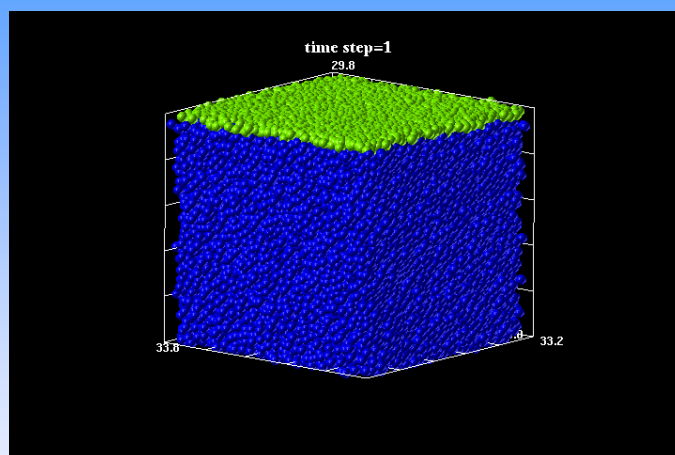
- Mogi model (1958)
- Okada model (1985,1992)



Applicable condition

- isotropic & homogeneous media
- elastic deformation (no fractures)

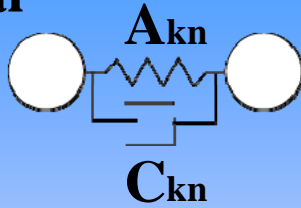
DEM(Discrete Element Method)



- Continuous media are modeled by particles (discrete elements) connected by visco-elastic springs

Formulation of stress & fracture

normal

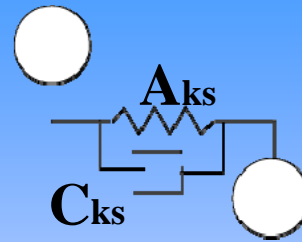


Spring coefficient: A_{kn}
Damping coefficient: C_{kn}

Threshold distance

$$D > D_{th}$$

shear



Spring coefficient: A_{ks}
Damping coefficient: C_{ks}

Mohr-Coulomb Criterion

$$t = C + \sigma_n \tan \phi$$

Default values	Density [kg/m ³]	A_{kn} [Pa]	C_{kn} [Pa s]	A_{ks} [Pa]	C_{ks} [Pa s]
Mainbody	2.5E3	5.0E8	5.0E8	5.0E8	5.0E8
Magma	2.0E3	5.0E8	5.0E8	5.0E8	5.0E8

41



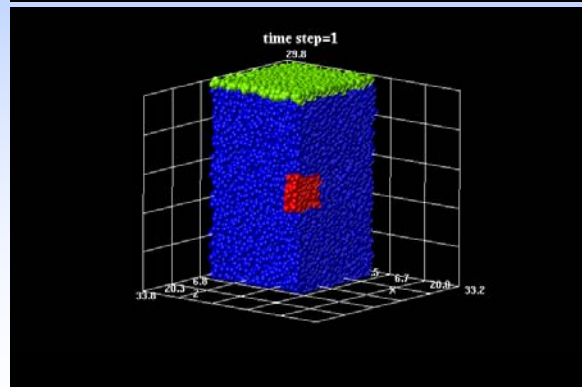
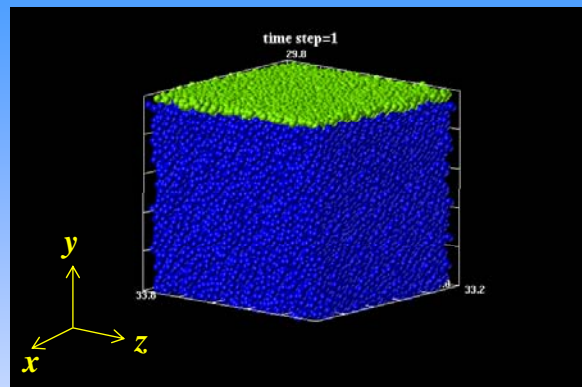
Numerical calculation procedures

Gravity packing

- **Generation**
100,000/1,000,000 Particles with random size and position
- Gravity packing

Assign magma particles

- Assign magma particles
- Set low density, bulk modulus etc.



42



Assign Boundary Conditions

- Set stresses for boundary particles

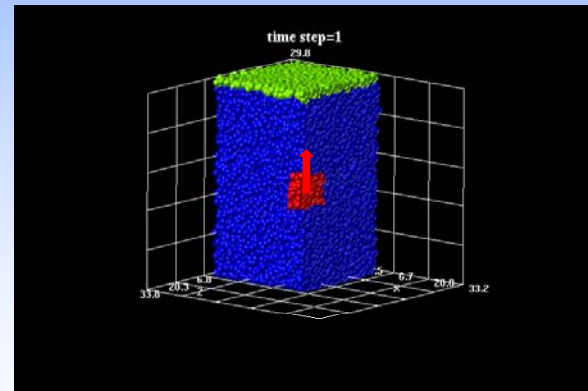
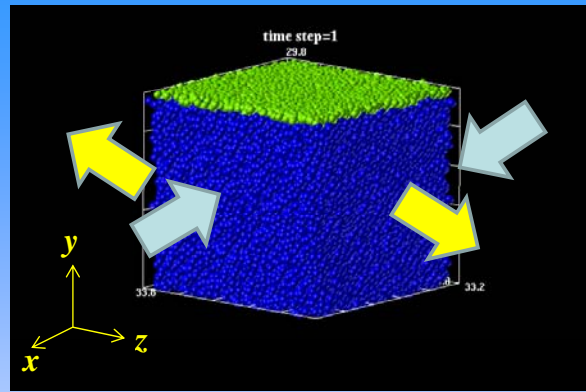
$$\sigma_{zz} = -1.0E6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{xx} = 1.0E6 \text{ Pa}$$

Assign Initial Conditions

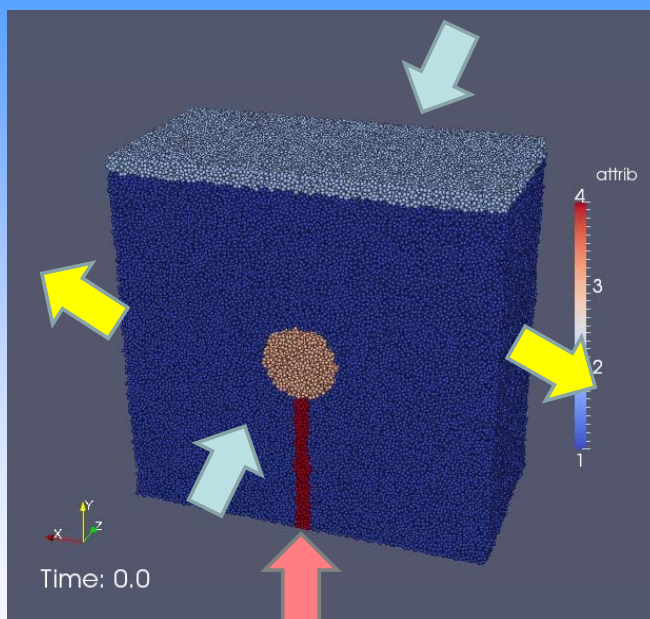
- Set initial velocity / excess pressure for magma particles

Start !



43

Model case



1,000,000 particles

10km x 10 km x 10km
cubic region
(i.e. diameter – 100m)

Gravity: -y direction

Initial condition

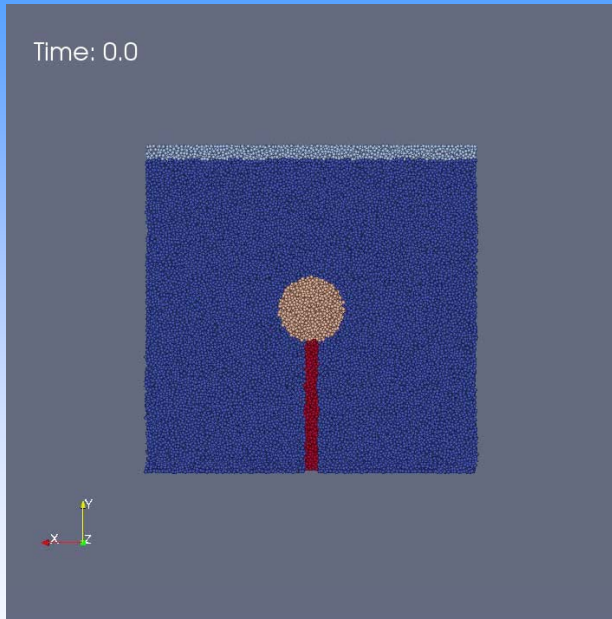
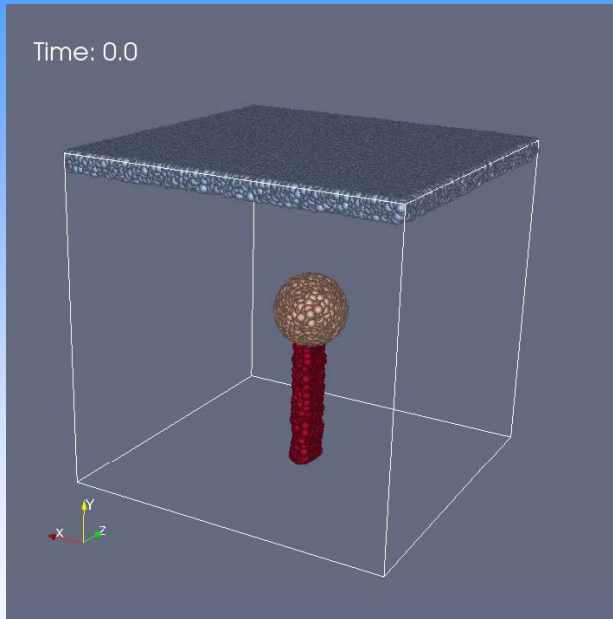
ΔP at the bottom of
magma dike

Boundary conditions

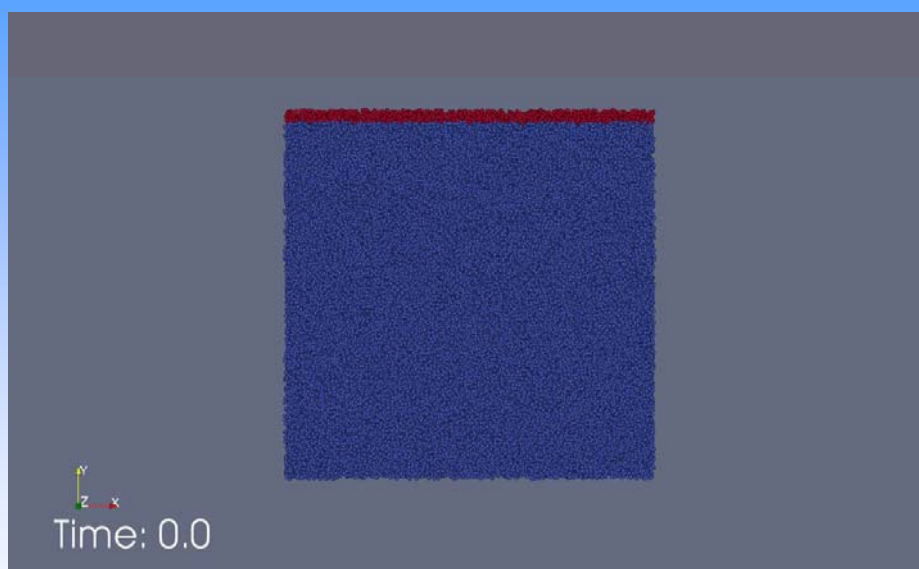
$$\sigma_{xx} = 1.0E8 \text{ Pa} \quad \sigma_{zz} = -1.0E8 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = 2.7E7 \text{ Pa}$$

44

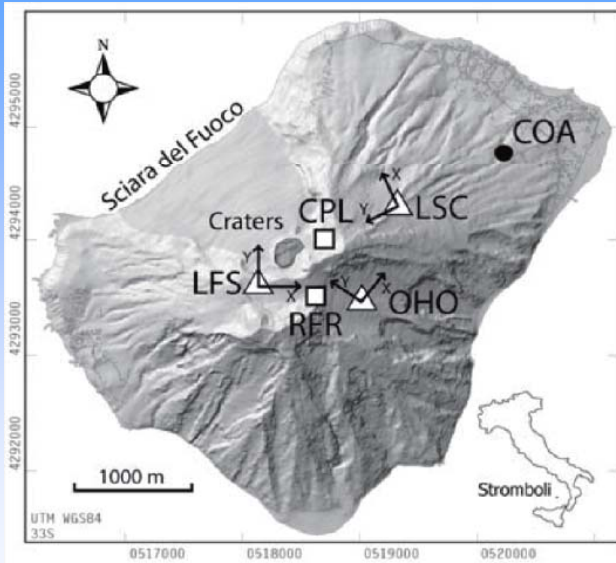


Gravity packing



Spring & dashpot coeff.--- Macro / Micro

ストロンボリ火山の傾斜変動観測 Genco and Ripepe (2010, GRL)



ストロンボリ火山の観測点分布
(Genco and Ripepe, 2010)

ストロンボリ火山(イタリア, エオリア諸島)

2400年以上前から活発な噴火活動を継続.
5-10分程度の間隔でストロンボリ式噴火.

火口近傍の5点の傾斜観測点

□: 広帯域地震計(CPL, RFR)

Guralp CMG-40T(サンプリング周期 100 Hz)

△: ボアホール型傾斜計(LFS, OHO, LSC)

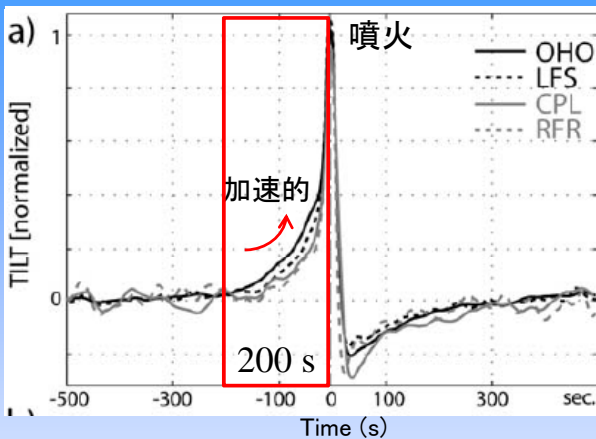
Pinacle 5000T(サンプリング周期 1 Hz)

	標高	火口からの水平距離
CPL	796 m	350 m
RFR	840 m	390 m
LFS	740 m	420 m
OHO	646 m	750 m
LSC	511 m	1030 m



傾斜変動データの特徴

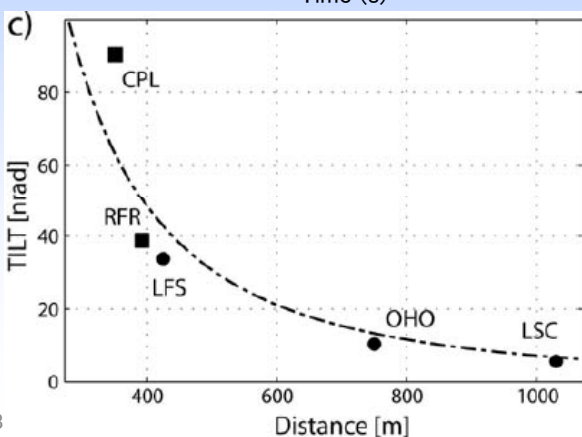
(Genco and Ripepe, 2010)



約2,000回の噴火記録を重合した
平均的な傾斜変動(火口方向)の
時空間分布の特徴

各観測点の最大値で規格化した傾斜記録

観測点ごとの時間変化の特徴は同様



傾斜変化量の空間分布

一点鎖線: 半無限弾性体中の火道の
増圧を圧力源としたときの最適解

(Genco and Ripepe, 2010)



解析の手順

マグマ上昇モデル ⇒ マグマ上昇開始から噴火までの圧力分布の変化

境界要素法による山体変形の計算

観測データの傾斜変動量の空間分布と分散減少値(VR)で比較

$$VR(\%) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^5 (u_i^{obs} - u_i^{cal})^2}{\sum_{i=1}^5 (u_i^{obs})^2} \right) \times 100\%$$

u^{obs} :観測値, u^{cal} :計算値

マグマ上昇モデル

VRの大きい圧力分布のパラメータ

観測点ごとの傾斜変動の時間変化 ⇒ 観測データの時間変化の特徴と比較

49



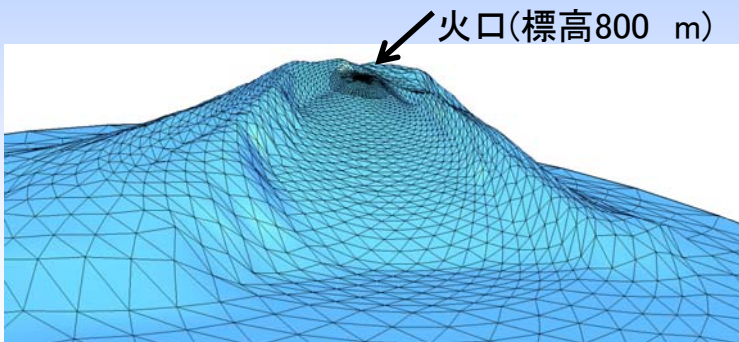
境界要素法による山体変形の計算

境界要素法

任意の圧力源・地形形状を取り入れられる。

10 mメッシュの数値標高モデル(DEM)から
ストロンボリ火山の地形を表現。

火口直下に円筒形火道(半径一定:5 m)



三角形要素で表したストロンボリ火山の山体形状
火口近傍ほど節点間隔は密

計算条件

節点数:9650, 要素数:16952

精度:一次線形要素

基本解:Kelvin解

境界条件 領域端で変位0

計算領域 水平方向:200 km

鉛直方向:100 km

パラメータ

(Genco and Ripepe, 2010)より

剛性率:1.3 GPa

ポアソン比:0.25

50



観測データの時間変化との比較

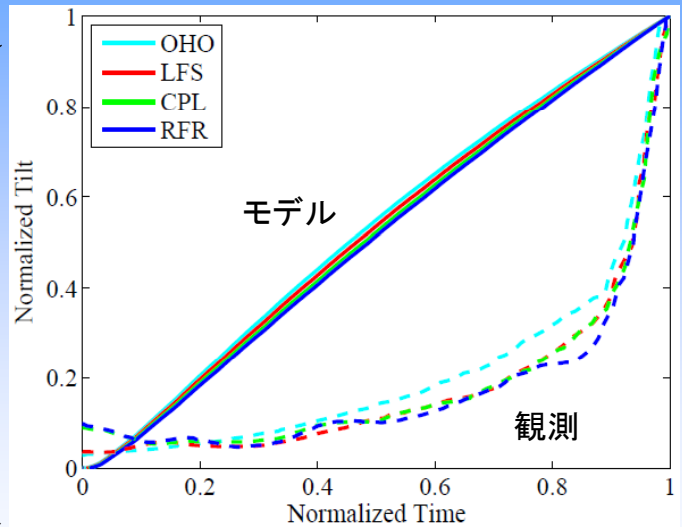
VRの比較から決まるパラメータ

火道の深さ $H = 175$ m
 火道最下部の圧力 $p_0 = 8.2$ MPa
 噴火次のマグマヘッド深さ $h_f = 126$ m
 マグマヘッドの初期深さ $h_0 = 147$ m

その他のモデルパラメータ

- ・揮発性成分濃度
- ・噴火直後の気泡メルトの圧力差
- ・揮発性成分の拡散係数

パラメータを変えて数値計算を行ったが、
 加速的な膨張は再現できなかった。
 ⇒ p_0 が大きいため



マグマ上昇モデルから計算した各観測点の
 傾斜変動. 観測データ(点線)と数値計算結果
 (実線)の比較

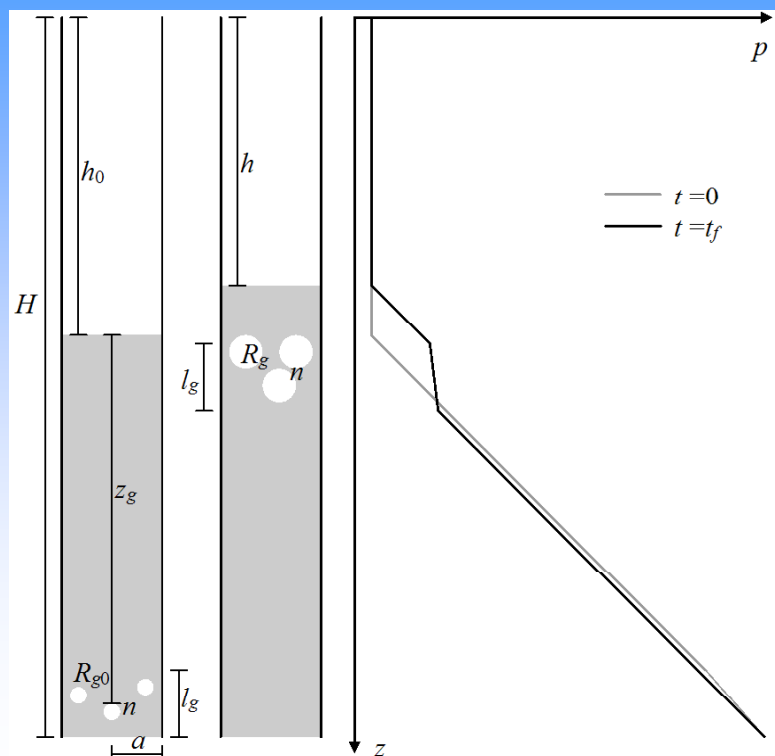
気泡上昇による火道内の圧力変化

圧力源のモデルパラメータ

気泡の初期深さ: H
 マグマヘッドの初期深さ: h_0
 火道半径: a
 気泡の初期半径: R_0
 気泡の数: n_g

パラメータの範囲

H : 200 - 600 m
 h_0 : 100 - 200 m
 a : 5 m
 R_{g0} : 0.1 - 1.0 m
 n : 10, 100, 1000



気泡上昇による火道内の圧力変化の模式図

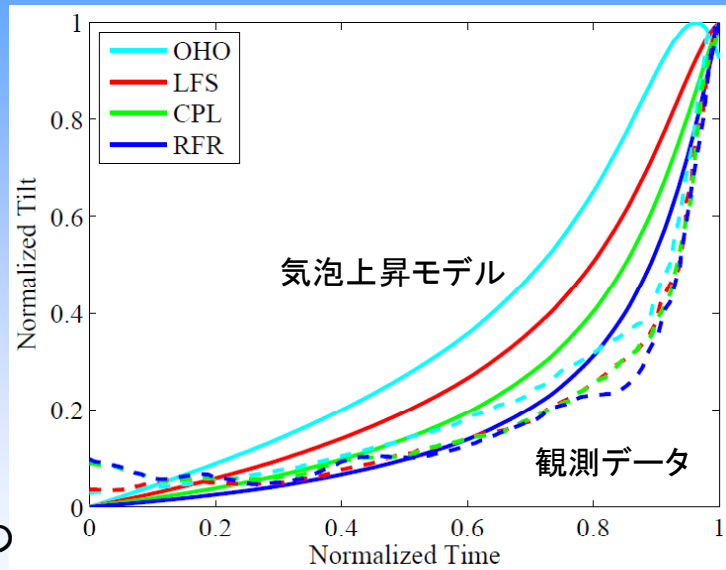
観測データの時間変化との比較

気泡上昇モデルのパラメータ

火道の長さ: $H=550$ m,
 マグマの初期深さ: $h_0=160$ m

初期気泡半径: 0.6 m
 気泡の数: 100

全観測点の加速的な傾斜変動量の増加を説明できている。



観測データ(点線)と数値計算結果(実線)の比較

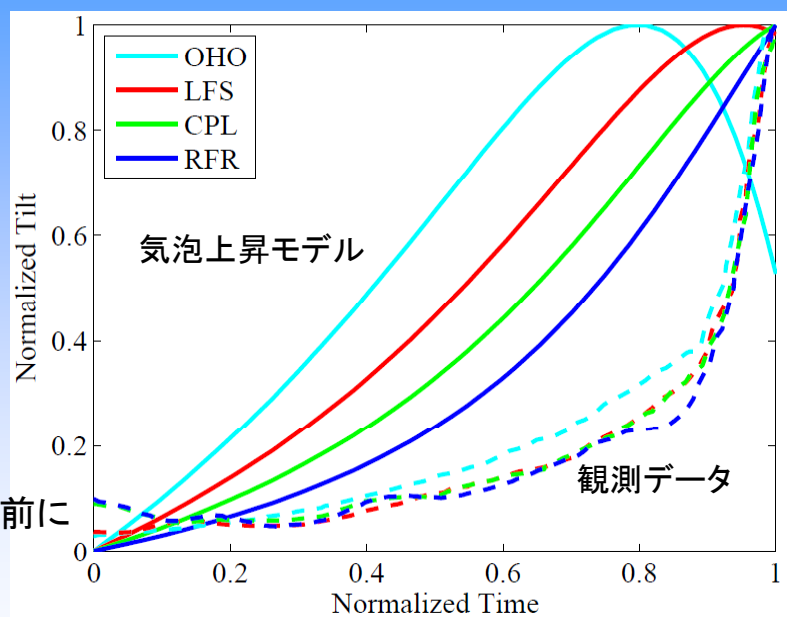
観測データの時間変化との比較(2)

気泡上昇モデルのパラメータ

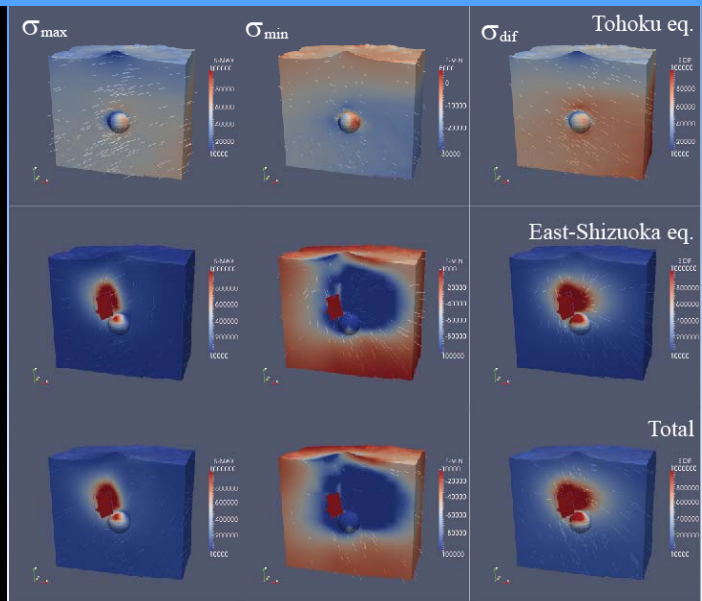
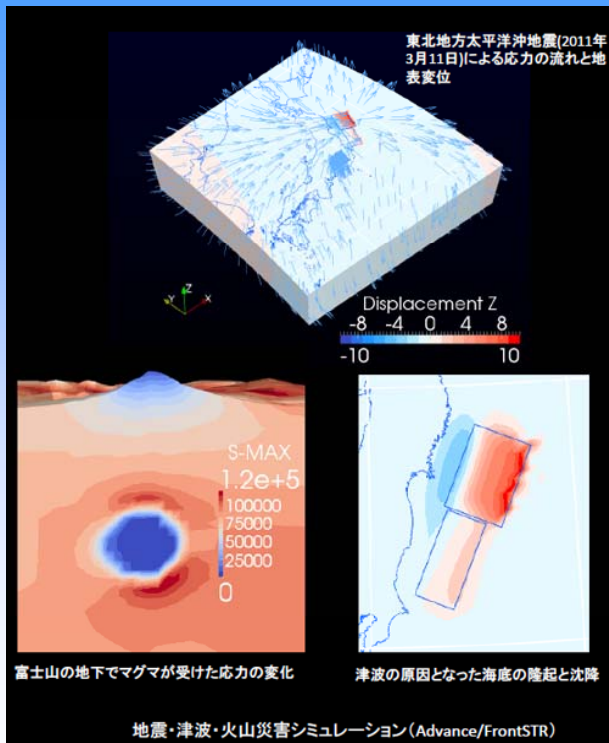
火道の長さ: $H=425$ m,
 マグマの初期深さ: $h_0=170$ m

初期気泡半径: 0.7 m
 気泡の数: 100

OHO観測点の傾斜変動が噴火前に隆起から沈降になる。



観測データ(点線)と数値計算結果(実線)の比較

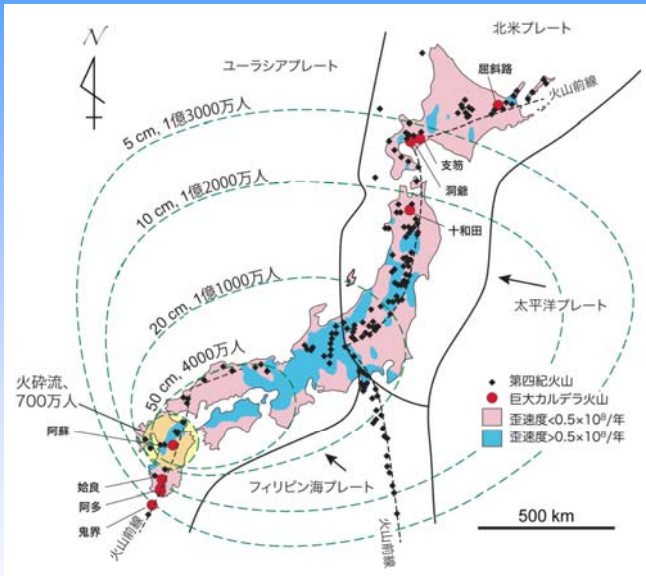


東北の地震: $10^{4-5} Pa$
 静岡県東部地震: $10^{5-6} Pa$

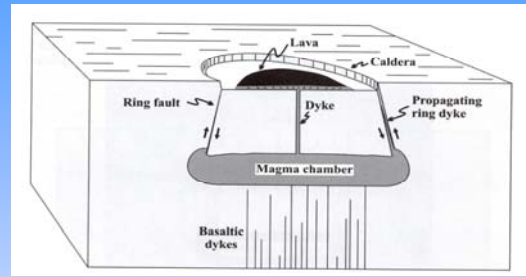
課題1

- 現状: 要素技術の開発に留まっている
- 検証をどうするか?
 - 理論モデルと観測データのギャップ
 - 理論モデル: 限定的(例: 弾性体力学のみ)
 - 熱・電磁気・地球化学etc.を含めた理論モデルの構築
 - 多項目観測による検証
- 長期的評価の困難性
 - 月・年・更に長期現象(巨大カルデラ噴火など) → 観測の蓄積
- 他分野との融合
 - (例) 熱流体問題: 機械工学・原子力工学・材料工学
- 計算科学リソース
 - マルチスケール・マルチフィジックス
- データ同化
 - 地表面象: 溶岩流・噴煙等 → 可能性有 火砕流 → 困難
 - 地下現象: 火山性地震・地殻変動 → やや困難
火道内プロセス → 困難

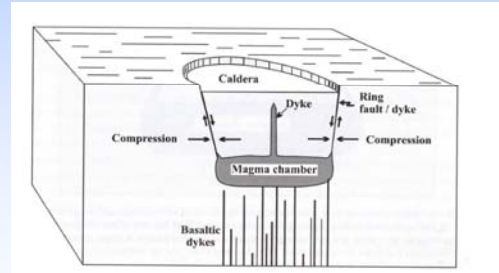
○超巨大噴火(カルデラ形成)の評価



日本列島の巨大カルデラ火山の分布と巨大カルデラ火山噴火の最悪のシナリオ (神戸大学HPより)



outward-dipping

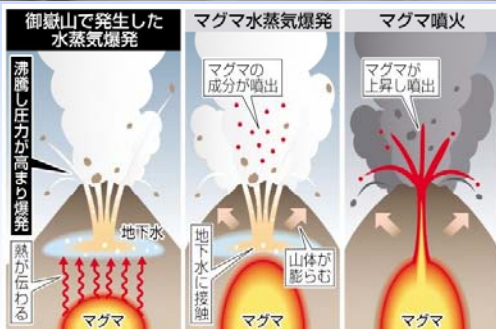


inward-dipping

Gudmundsson (2008)

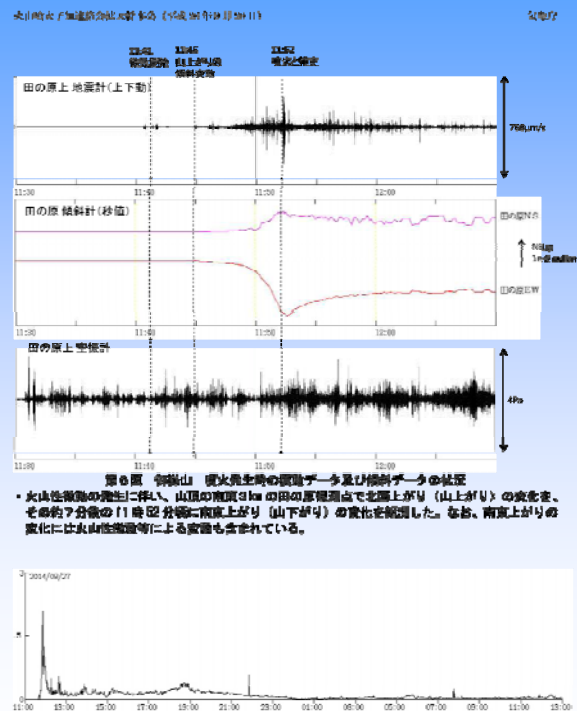
○水蒸気爆発・マグマ水蒸気爆発評価

御嶽山噴火(2014/9/27 11:52)



中日新聞HPより

噴火前後の観測データ



- 火山現象の数値シミュレーション

