

「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年4月23日(木) 開催

プログラム

13:00~13:10 (10分)	主催者あいさつ	代表取締役社長 松原 聖
13:10~13:45 (35分)	シミュレーションによる自然災害の解明と予測	研究顧問 井田 喜明
13:45~14:20 (35分)	有限要素法による震源やマグマ発生源のシミュレーション	主管研究員 菊池 愛子
14:20~14:55 (35分)	爆発的な噴火を導くマグマ上昇流の3次元シミュレーション	主管技師長 湊 明彦
14:55~15:10 (15分)	休憩	
15:10~15:45 (35分)	火山爆発に伴う圧力変動や衝撃波の伝播計算	研究主席 中森 一郎
15:45~16:35 (50分)	噴火予知と火山防災研究の動向	防災科学技術研究所 藤田 英輔 様
16:35~17:00 (25分)	総合討論	

memo

AdvanceSoft



草津白根山湯釜火口湖

主催者あいさつ

代表取締役社長 松原 聖

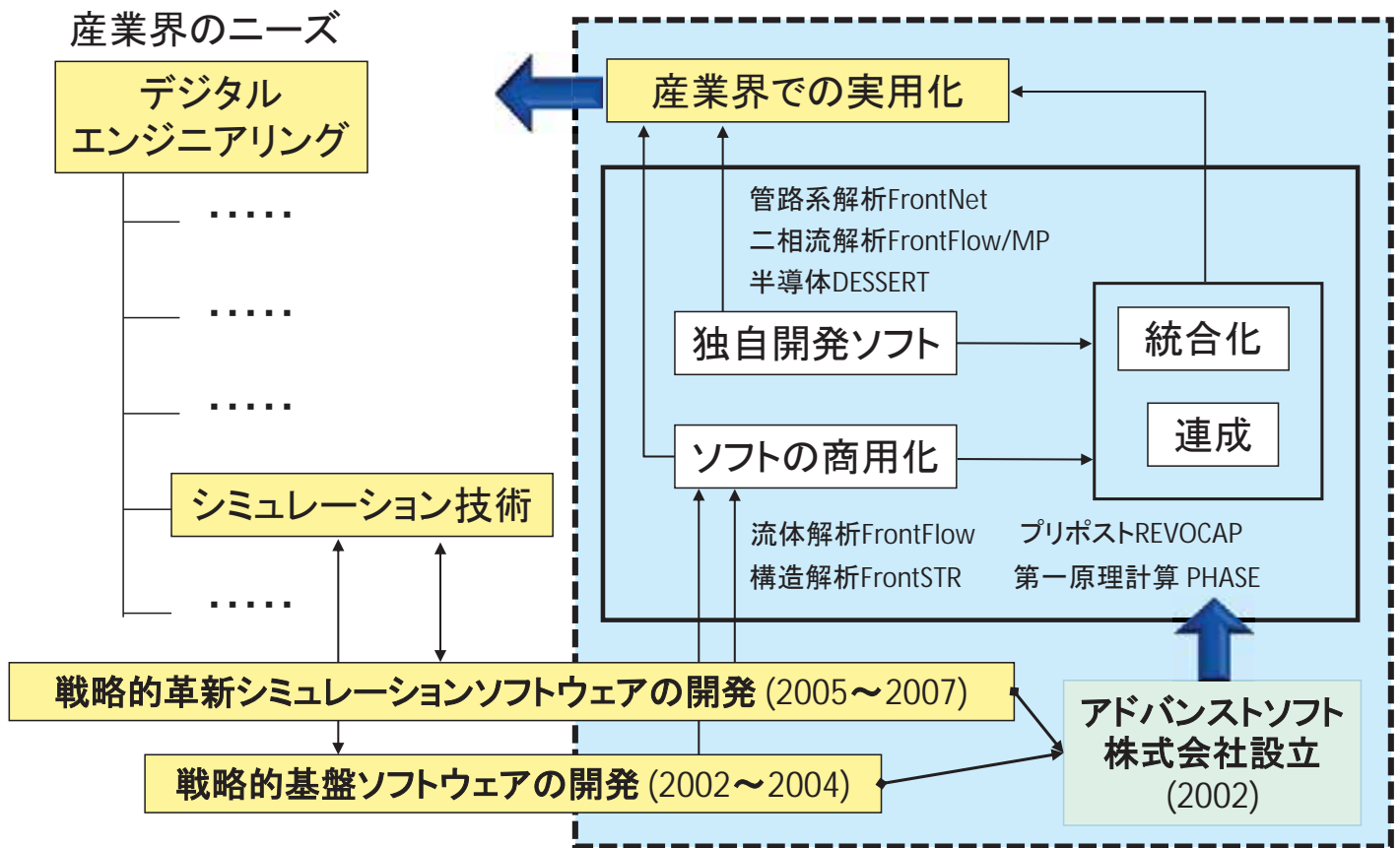
「地震・噴火現象の解析と数値シミュレーション」セミナー 2015年4月23日（木）開催 アドバンスソフト株式会社

会社概要

名 称 アドバンスソフト株式会社 (英文社名 AdvanceSoft Corporation)
本 社 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台4-3 新お茶の水ビル17階 TEL: 03-6826-3970 FAX:03-5283-6580
設 立 2002年(平成14年)4月24日
資本金 3,724万円
社員数 74名(2015年4月24日現在)

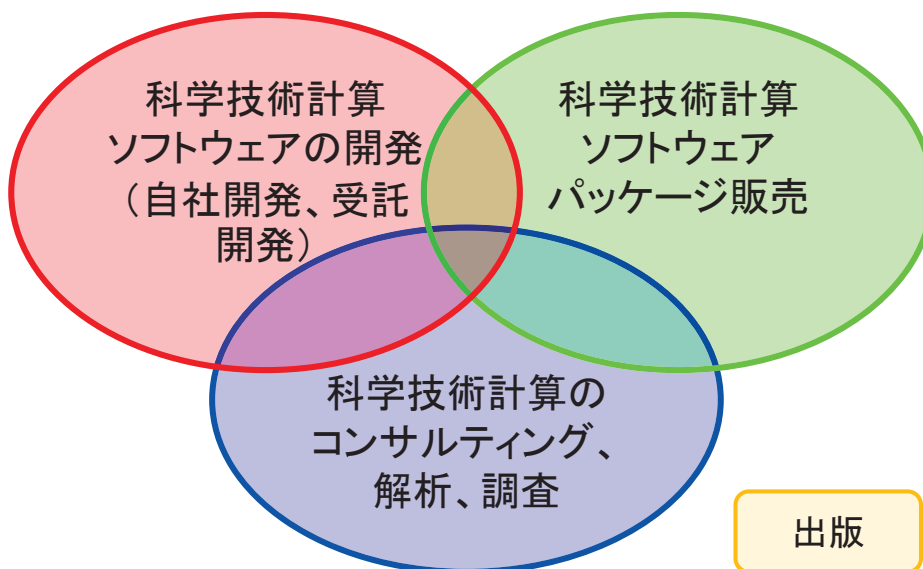
事業部	部	業務概要
第一事業部	事業部付	防災シミュレーション・連成システム開発など
	技術第1部	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域、半導体・T-CAD等に係る解析・開発など
	技術第2部	<ul style="list-style-type: none"> • プリポスト、可視化システム、連成システム開発など • J-PARCIに係わるプロジェクトの実施など • 構造解析エンジニアリングなど • 次世代TCADシステムの開発など
第二事業部	事業部付	二相流解析および原子力安全解析など
	技術第3部	<ul style="list-style-type: none"> • 混相流に係わる次世代流体システム開発など • 乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
	技術第4部	<ul style="list-style-type: none"> • ガス、液体パイプライン、農業用パイプライン、液体ロケットエンジン等の管路系流体解析・開発 • 火災・爆発に係わる防災リスク解析・開発など
	技術第5部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
—	総合企画部	<ul style="list-style-type: none"> • コンサルティングサービスの提供など • 解析サービスの提供など
営業本部	営業部	お客様窓口
東海事業所		お客様窓口

アドバンスソフトとは



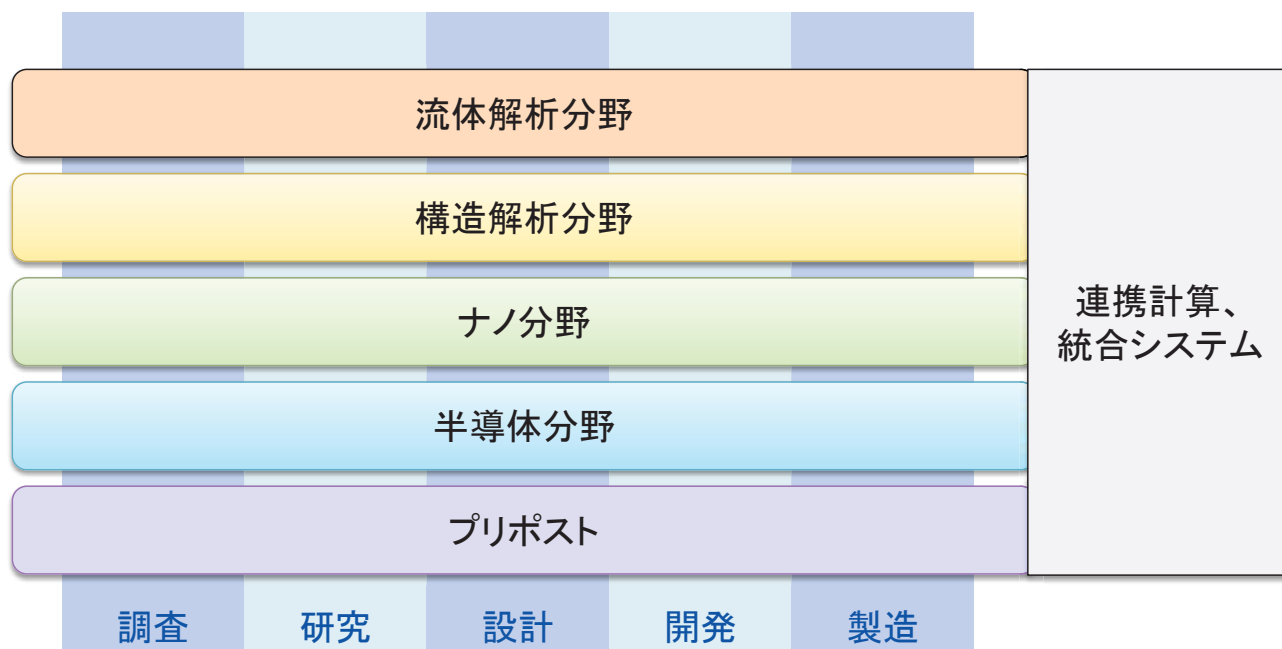
事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red Advance/FrontFlow/FOCUS</p> <p>Advance/FrontFlow/MP</p> <p>Advance/FrontNetシリーズ</p>	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p>	<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p>
<p>半導体</p> <p>Advance/DESSERT</p>	<p>プリポスト</p> <p>Advance/REVOCAP</p>	

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP(www.advancesoft.jp)をご参照ください。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/PHASE	第一原理計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>

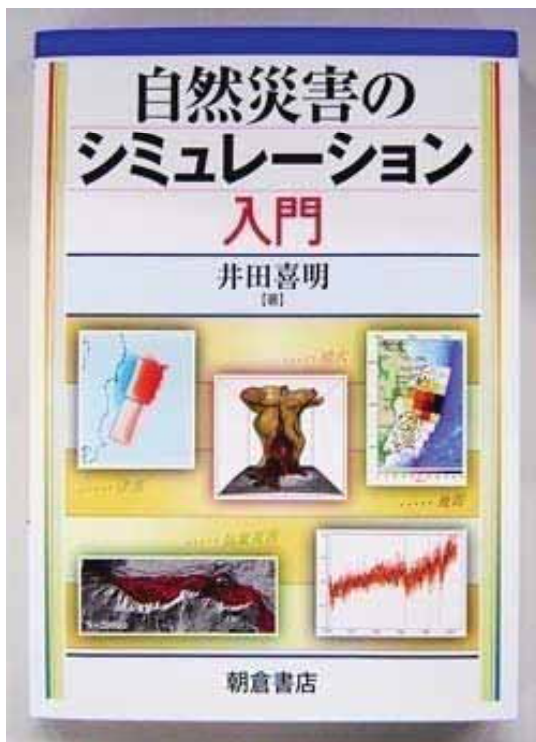


シミュレーションによる自然災害の解明と予測

井田喜明（アドバンスソフト株式会社）

自然災害シミュレーションの活用を地表温度分布、地震波伝播、津波、水蒸気噴火などの例を見ながら考える

昨年出版した書籍



自然災害のシミュレーション入門
(朝倉書店)



地球の教科書(岩波書店)

数値シミュレーションの目的と活用

数値シミュレーションの主な目的

目的1. 現象をできるだけ**忠実に表現**する(大規模)

できるだけ正確な予測や評価を行って防災などに活用する
現象を支配し影響する要因やデータは可能な限り計算に組み込む
計算は通常大規模になり、長時間の演算を必要とする

目的2. 現象の**素過程や支配要因**を解明する(小規模)

現象や素過程の発生機構を解明し、定量化を進める
明快で直感的な理解のためには、モデルは単純な方がよい
モデルを大きな計算に組み込む上では計算負荷は小さい方がよい

目的3. 現象に関する**教育や知識の普及**に活用する

現象の性質や展開について直感的な理解を助ける

自然災害現象のシミュレーションの現状

気象現象:リアルタイムで天気予報を実用化(目的1が達成)

個々の素過程はパラメータ化(目的2を活用)

地震・噴火現象:ハザードマップ作成などへの活用が進む(目的1)

予知の実用化には素過程の究明がまだ不十分(目的2の必要性)

気象現象のシミュレーション

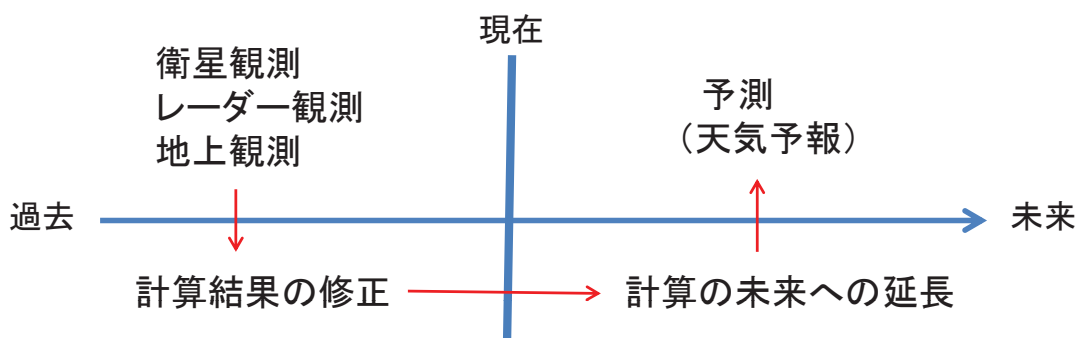
計算の仕組み

大気全体は完全流体

局所的な現象はパラメータ化で対処

上昇気流中の凝結や凝固
雲の形成、降雨、降雪
太陽光の吸収や放射
地表付近で働く摩擦力

計算の進め方



赤道と極の間の温度分布

定常状態のエネルギー保存 (T は θ のみに依存)

$$\frac{J_s}{\pi} (1-a) \cos \theta - \sigma (1-b) T^4 - \frac{1}{2\pi r_c^2 \cos \theta} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0$$

反射率(アルベド): $a = 0.6$ ($T < 273$ K), $a = 0.3$ ($T > 273$ K)

温室効果の定数: $b = 0.43$ (地球と同程度)

赤道から極への熱輸送 $Q = -2\pi k \cos \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}$

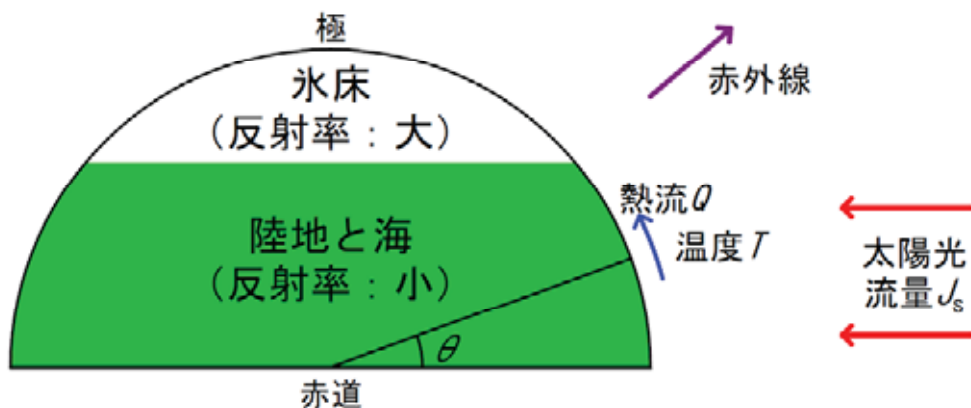
対流の効果は実効的な熱伝導率 k で表現

問題は温度 T の緯度 θ に関する2階の微分方程式に帰着

境界条件

$$\theta = 0, \frac{\pi}{2} \text{ で } \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$$

温度分布は定数 k だけで決まる

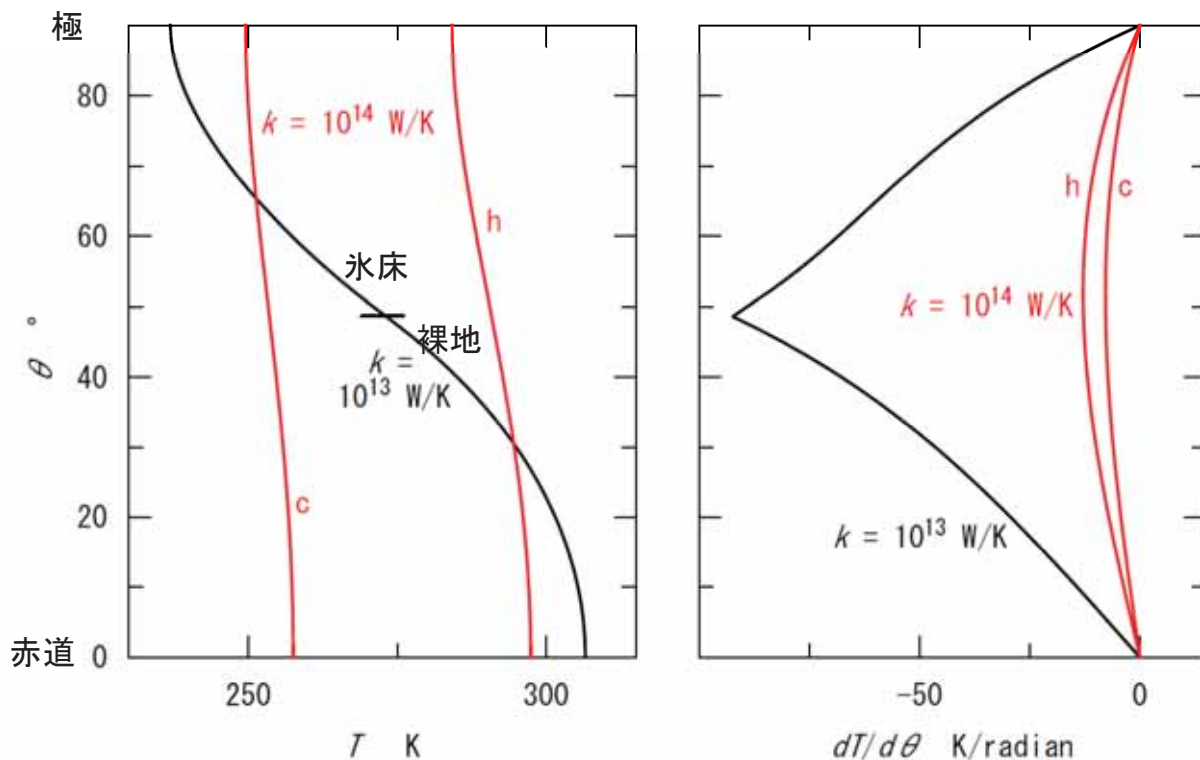


温度分布の計算例

(シミュレーション入門 図4.33)

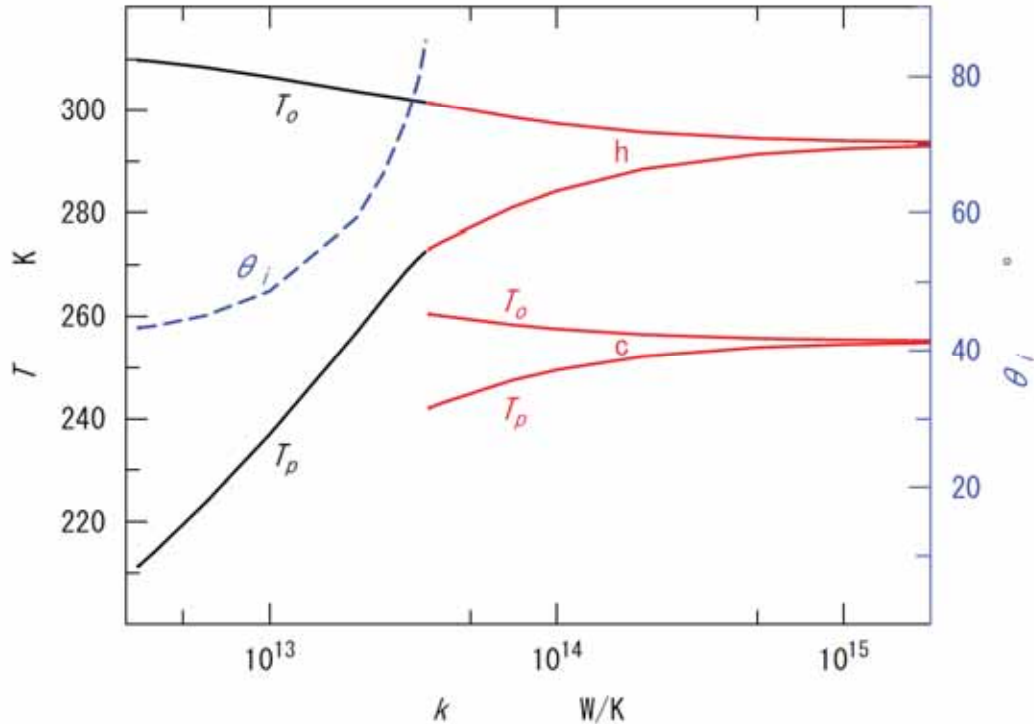
$k = 10^{13}$ W/Kの場合: 極側に氷床、赤道側に裸地(氷床に覆われない陸と海)

$k = 10^{14}$ W/Kの場合: 全球が凍結する解(c)と全球が裸地になる解(h)



輸送係数 k の値による解の状況 (シミュレーション入門 図4.34)

k が大: 全球凍結(c)か全球裸地(h) k が小: 極側に氷床、赤道側は裸地



参考: 地球史では多くの時期が全球裸地、7~8億年前などに全球凍結。
両極に氷床があるのは最近の数百万年間だけ。

数値シミュレーションの信頼性

基本原理が厳密で定式化に曖昧さがほとんどない問題

>> 計算の精度や解像度を上げれば信頼性が高まる

- ・ 第1原理計算(天体力学、量子力学計算)
- ・ 発生源を切り離して弾性変形や層流だけを解く問題
断層すべりやマグマの移動による**地殻変動**
地震波の伝播、**津波**の伝播: 長周期の波動が計算
火山の爆発による音波や衝撃波の伝播

基本原理に曖昧さがあり厳密な定式化の難しい問題

>> モデルの近似度が精度や信頼性を決める

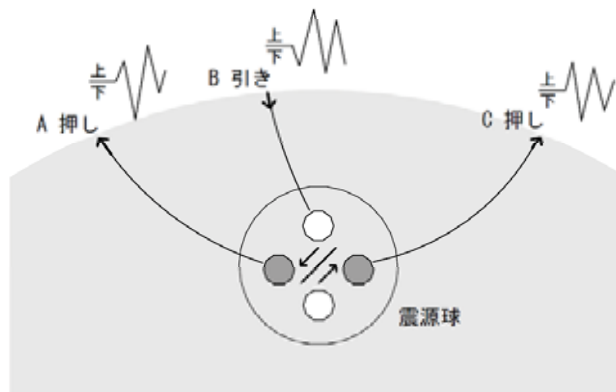
>> 多くの問題は複雑系でフラクタルやカオスの性質をもつ

- ・ 渦や混相流が関与する流体现象
気象現象、**浅部のマグマ上昇**、**噴煙の上昇**
- ・ 破壊や摩擦が関与
地震や噴火の発生条件や発生過程

震源からの地震波の伝播計算

波線理論による簡易的な計算

- 弾性波を波線で近似して伝播を計算
- 幾何光学(波長<<速度が変化する距離)
- 計算が簡単で高速
- 利用目的: 震源決定
- 地震波速度構造の解析
- 地震波形の解析には使えない
- 運動方程式を直接解く必要



弾性体の運動方程式を解く

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \beta^2 \sum_j \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

u_i は変位3成分、 t は時間
 α は縦波速度、 β は横波速度

運動方程式を差分法、有限要素法などによって離散化する

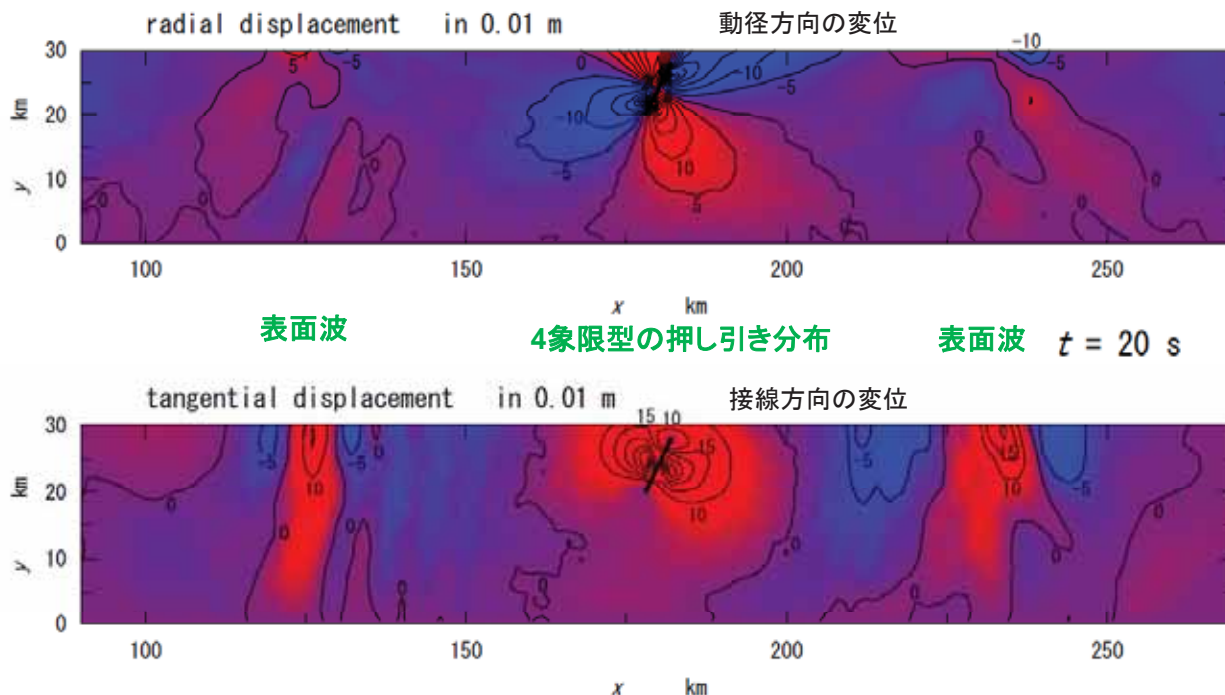
- 周期が1秒程度より短い波形は、小規模な不均質による散乱などで波形が決まる
- 地球規模の広範囲の伝播には大規模で高速の計算が必要になる
- 断層とすべりの時間変化を与えて、それに対応する弾性波の伝播を計算
- 観測波形に合うように断層すべりの分布を計算するインバージョンがなされている
- 自発的な破壊を震源とする研究は未発達

差分法による地震波伝播の計算例(2次元)

(シミュレーション入門 図2.9)

格子間隔: 水平 2km、鉛直 0.5 km
 (格子数: 180 x 60) 時間刻み 0.02 s
 P波速度: $5.3 + 0.022x(30 - y)$ km/s
 S波速度: $3.2 + 0.013x(30 - y)$ km/s

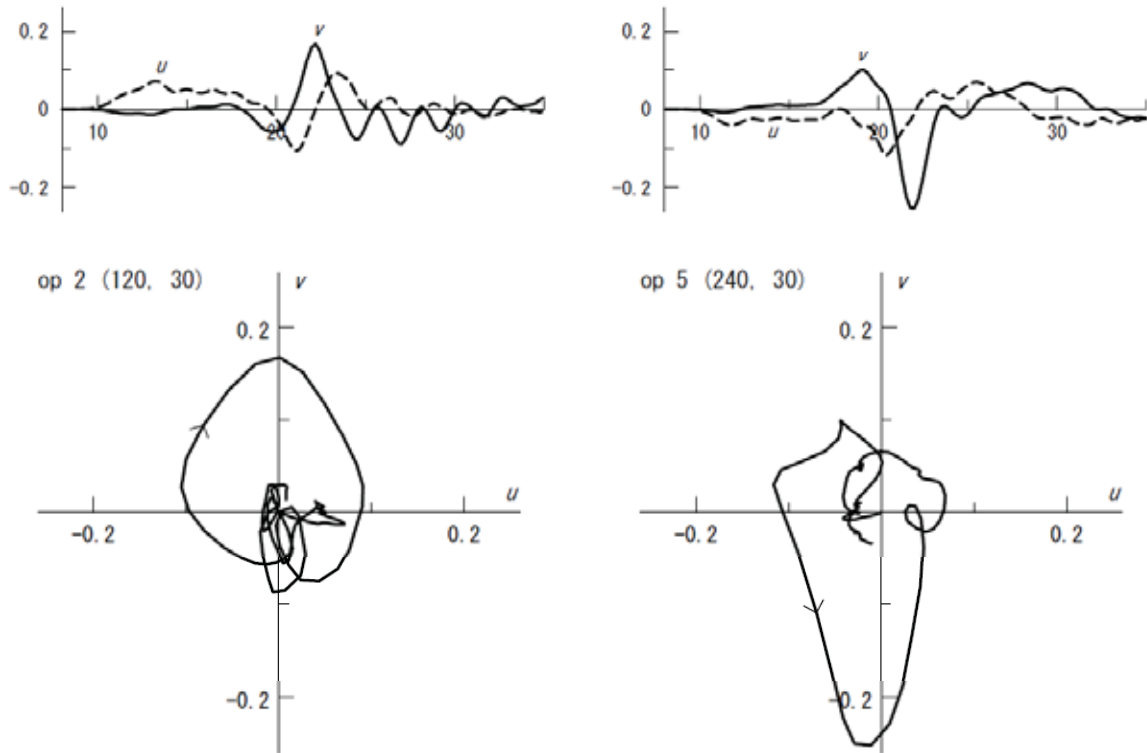
断層は70° 傾いた正断層
 長さ 4.5 km、最浅部 2 km
 すべり量 1 m、すべり時間 1 s



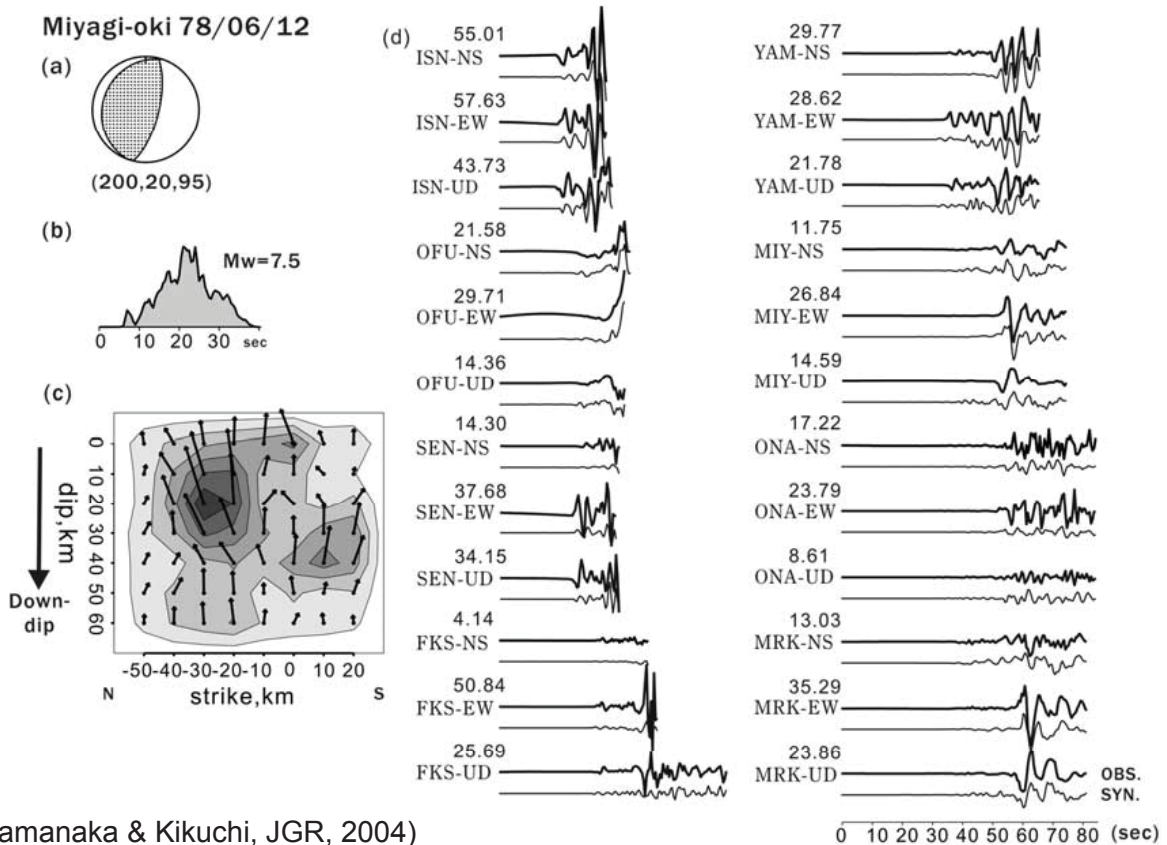
変位波形と地面の運動

断層の両側に水平方向に60 kmはなれた2点
表面波(レイリー波)が見られる

(シミュレーション入門 図2.10)



断層すべりと地震波形の関係: 逆解析の例



(Yamanaka & Kikuchi, JGR, 2004)

海域の地震によって誘発される津波

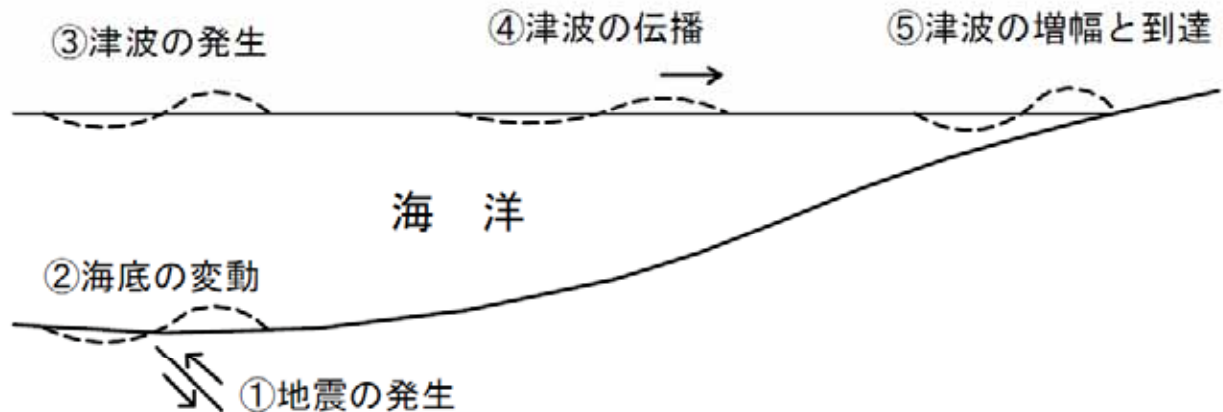
海底の上下変動はそのままの形状で海面を上下させると仮定
(水平方向の変動スケール >> 水深)

海面の変動は**浅水波**として伝播するものとする

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$$

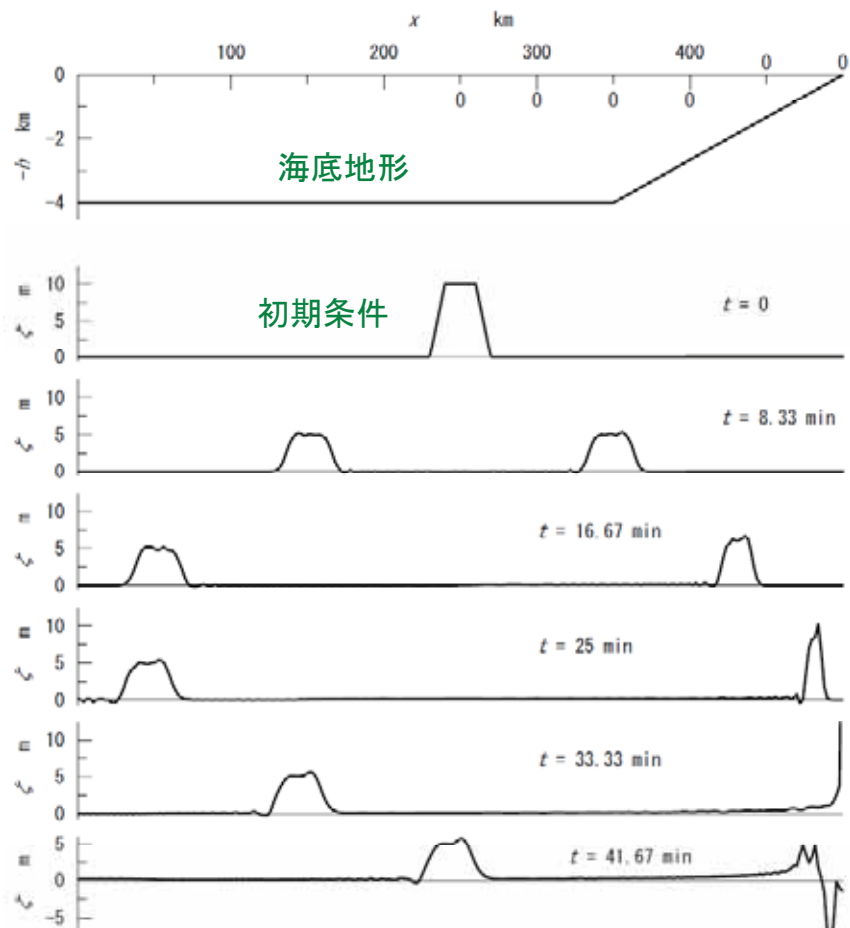
ζ は海面の上下変位
 x, y は水平方向の座標; t は時間
 g は重力加速度、 h は水深

微分方程式を差分方程式に変換して、初期条件の下に解く



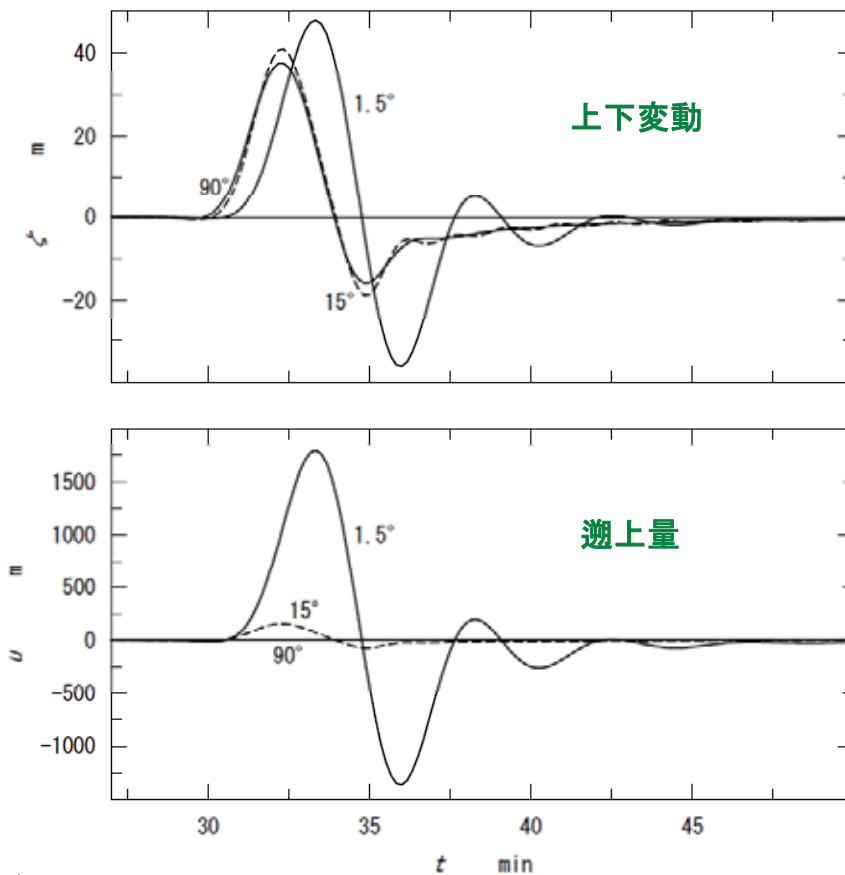
1次元の津波伝播計算

境界条件
 $x = 0$ (左)
海水を侵入させない
 $x = 500$ km (右)
海水が傾斜に沿って侵入



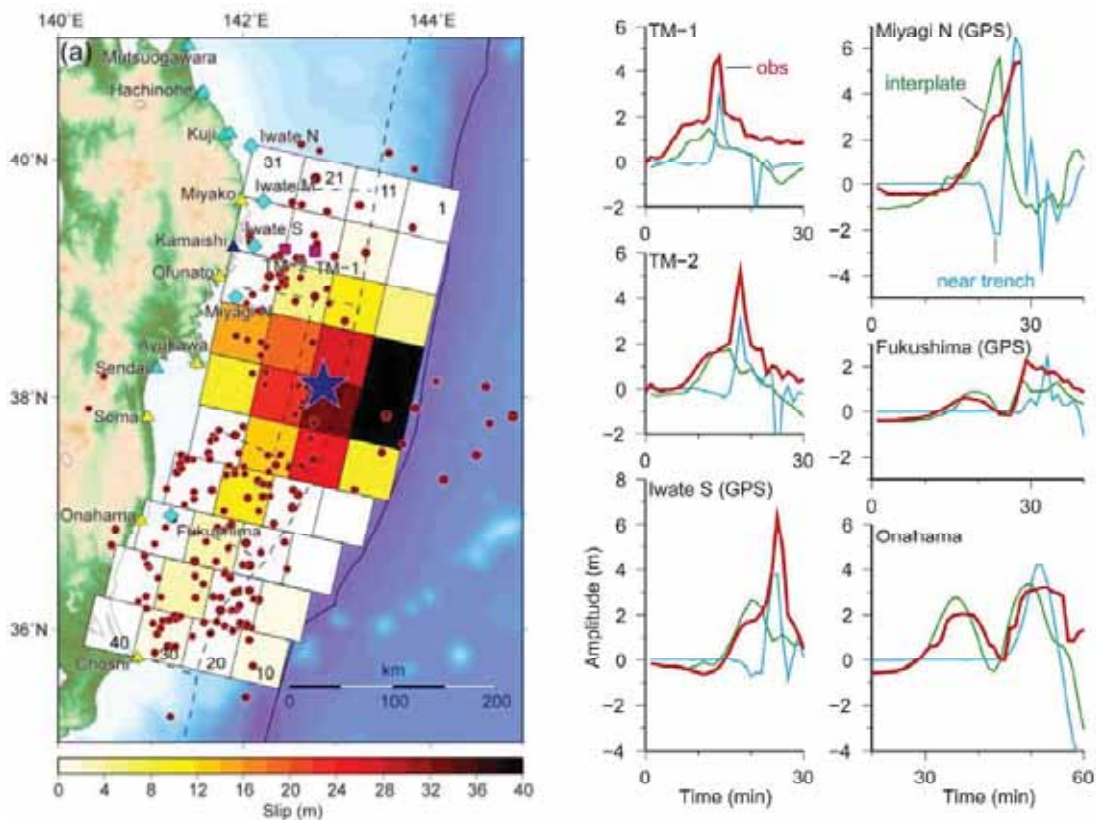
(シミュレーション入門 図2.18)

海岸での
海面の上下変動と
水平方向の移動量



(シミュレーション入門 図2.20)

津波と断層すべりの関係: 逆解析の例



2011年3月11日東北地方太平洋沖地震

(Fujii et al., EPS, 61, 815-830, 2011)

御嶽山2014年9月27日の水蒸気噴火

噴煙
27日午前11時55分



最初に出るのは火砕流

最初は火砕流
それが噴煙に移行

11時57分



火砕流から噴煙に

(国交省の映像)

正午

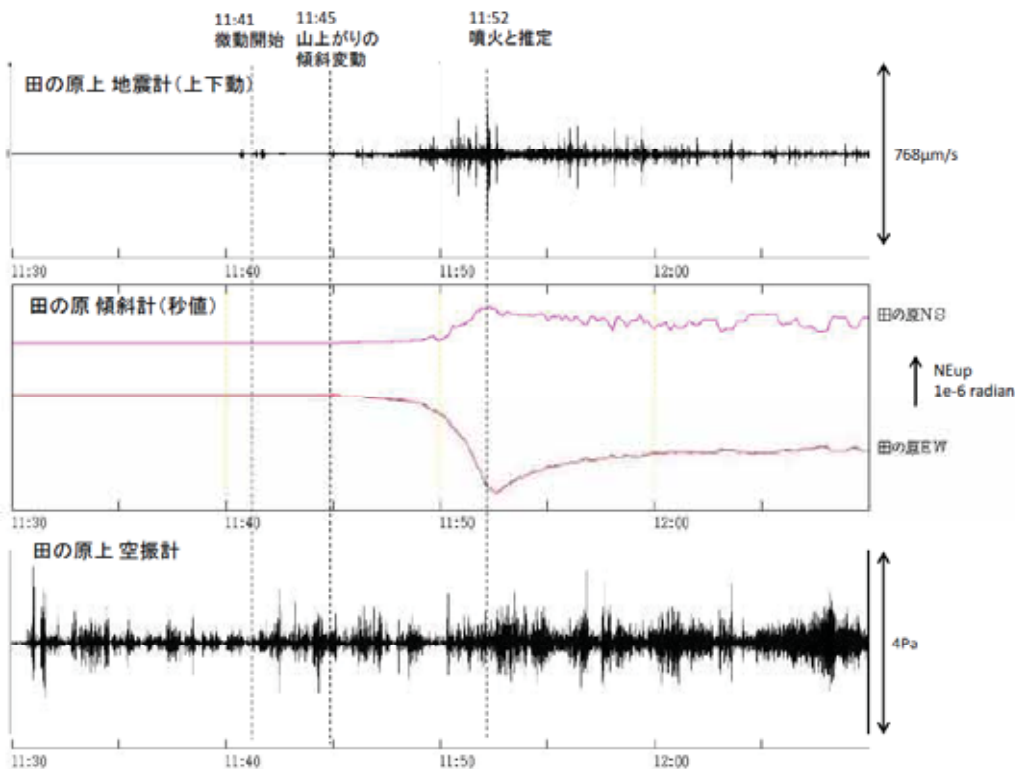


噴煙の上昇が続く

[ビデオ](#) [裏から](#) [14時頃](#)

噴火前の膨張と噴火による解消

火山噴火予知連絡会拡大幹事会
資料(2014年9月28日)



第6図 御嶽山 噴火発生時の震動データ及び傾斜データの状況

- 火山性微動の発生に伴い、山頂の南東3kmの田の原観測点で北西上がり(山上がり)の変化を、その約7分後の11時52分頃に南東上がり(山下がり)の変化を観測した。なお、南東上がりの変化には火山性微動等による変動も含まれている。

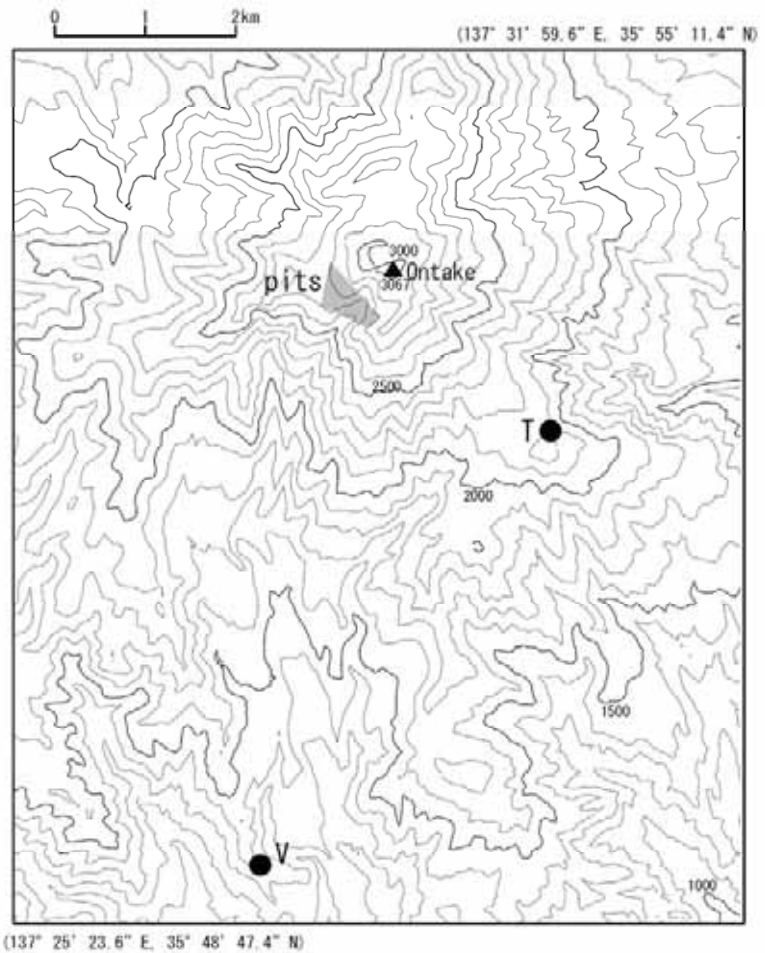
御嶽山噴火

(2014年9月27日)

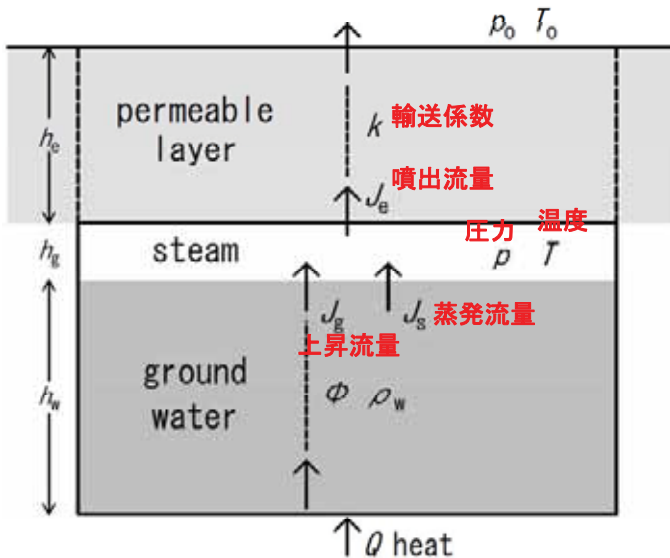
- pits: 噴出範囲
- T: 傾斜
御嶽田の原観測点
(気象庁)
- V: 遠望カメラ
滝超観測点
(国土交通省)

- ・噴火前に地下で膨張が起こり
噴火によって解消された
>>噴火前に水蒸気の上昇
- ・噴出流体は多量の粒子を含み
火砕流として流下した
>>噴火時に通路の著しい浸食
>>浸食で通路が急拡大して噴火

固体粒子の噴出量: 約50万トン
噴出流量: J_e , $\sim 2 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$



水蒸気噴火のモデル



気泡の上昇に伴う膨張(単位体積)

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{RT}{p(p + g\rho_w h_w)} (g\rho_w J_g - \phi \frac{dp}{dt})$$

地下水表面の蒸発

$$T = T_r + \gamma(p - p_r)$$

水蒸気のエネルギー保存

$$(c_w m_w + c_g m_g) \frac{dT}{dt} = -c_g S_e (T - T_0) J_e - HS_w (J_g + J_s) + S_w Q$$

上記を含めた水蒸気の質量保存

$$\circ [1 + \frac{bT}{p} (c + \frac{h_w \phi}{p + p_w})] \frac{dp}{dt} = \frac{bT}{p} \{ \frac{p_w}{p + p_w} J_g - \frac{S_e}{S_w} [1 + \frac{c_g (T - T_0)}{H}] J_e + \frac{Q}{H} \}$$

定数の意味

$$b = \frac{RKS_w}{V} \quad c = \frac{\gamma(c_w m_w + c_g m_g)}{HS_w} \quad p_w = g\rho_w h_w$$

g : 重力加速度、 R : 水蒸気の比気体定数
 c_w と c_g : 水と水蒸気の比熱、 H : 蒸発熱
 ρ_w : 水の密度 ϕ : 水中の水蒸気の質量比
 m_w と m_g : 水と水蒸気の質量 V : 系の体積
 S_w : 地下水系の断面積 S_e : 浸透層の断面積

水蒸気の噴出

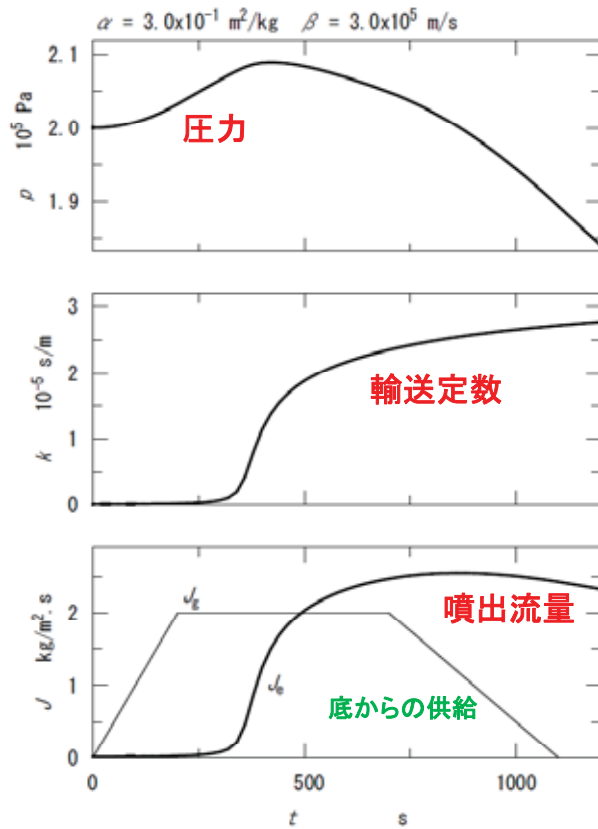
$$J_e = k(p - p_0)$$

浸食による噴出孔の拡大

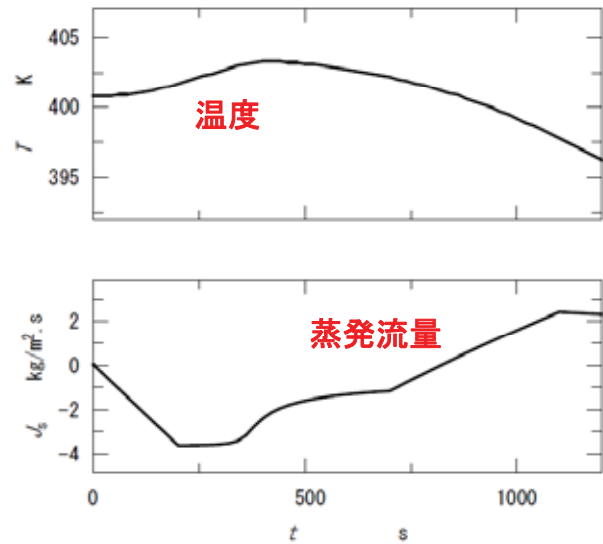
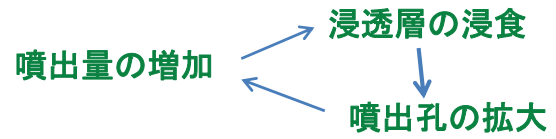
$$\circ \frac{dk}{dt} = \alpha J_e k \exp(-\beta k)$$

典型的な計算例

$t = 0$ で
 $p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $k = 1 \times 10^{-7} \text{ s/m}$

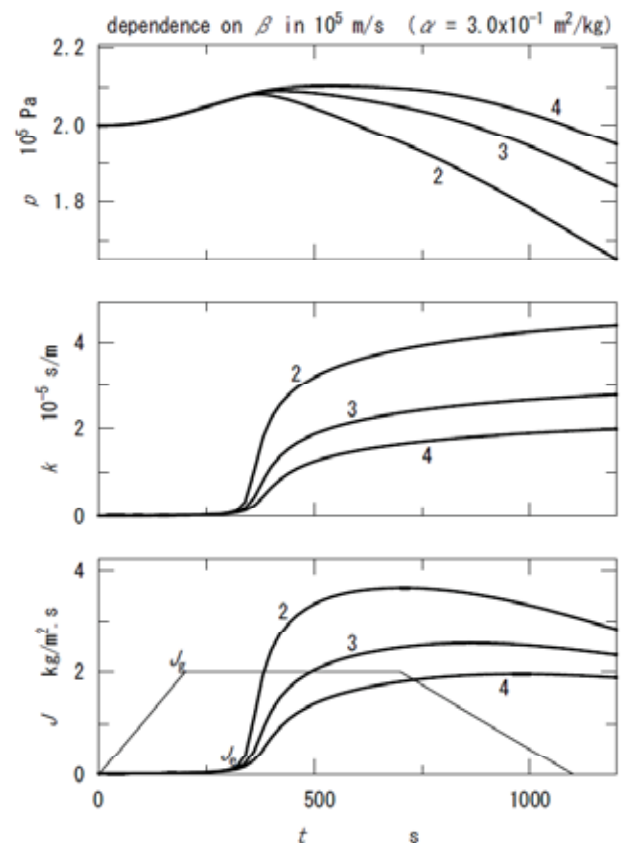
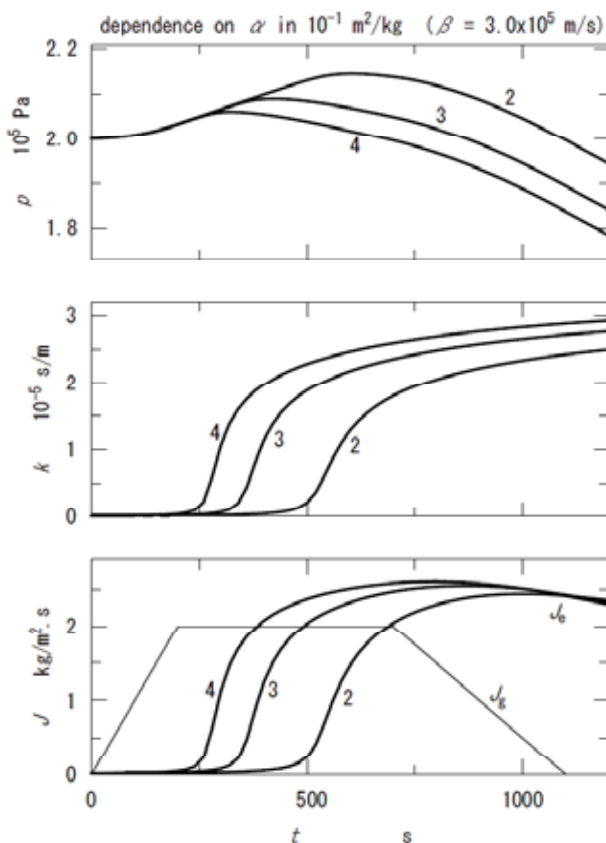


爆発的な噴出のメカニズム



浸食の定数への依存性

$$\frac{dk}{dt} = \alpha J_e k \exp(-\beta k)$$



まとめと展望

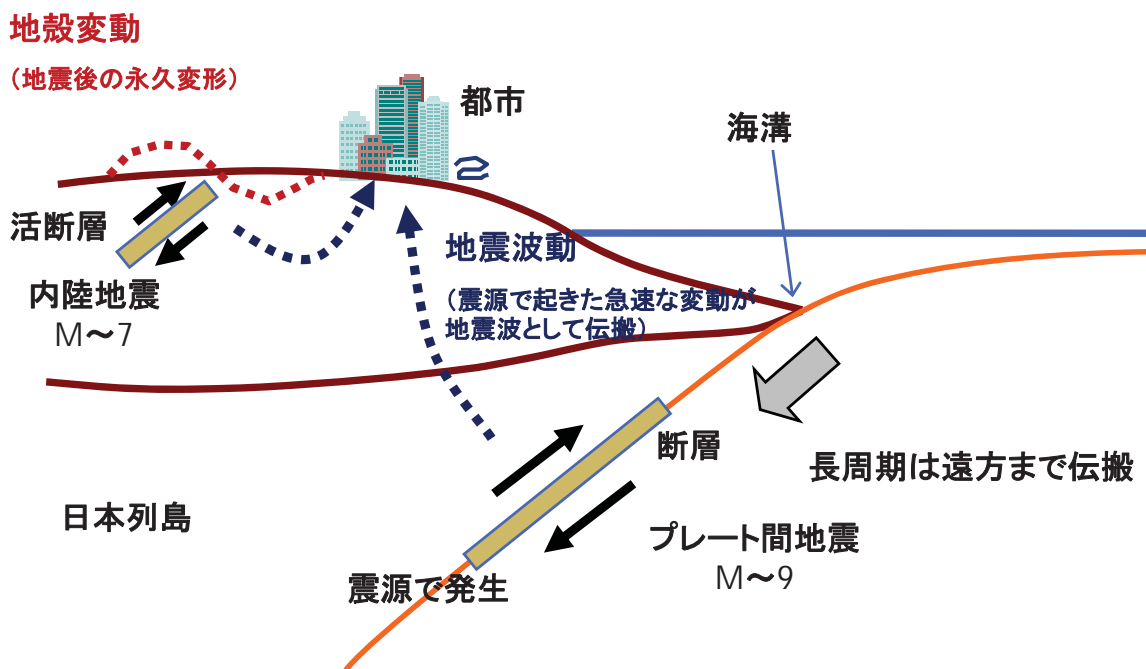
- 自然災害のシミュレーションは、現象を事前に予測して防災に活用すること、現象の発生過程を解明しモデル化すること、教育や防災知識の普及に役立てることなどの目的に使える。
- 現象をできるだけ忠実に表現する大規模なシミュレーションの他に、現象の本質を取り出す小規模な計算も有用である。
- シミュレーションの基礎原理に曖昧な要素が含まれる場合には、観測データなどとの比較によって信頼性を確保したり、評価したりすることができる。
- 気象現象はシミュレーションが既に天気予報などに実用化されているが、予報の確度を上げるには、格子間隔を細かくし、パラメータ化の精度をさらに適切なものにすることが求められる。
- 地震と噴火は、発生後に起こる現象のシミュレーションがハザードマップの作成などに役立っている。地震予知や噴火予知に向けたシミュレーションには発生源の究明が必要である。

有限要素法による震源や マグマ発生源のシミュレーション

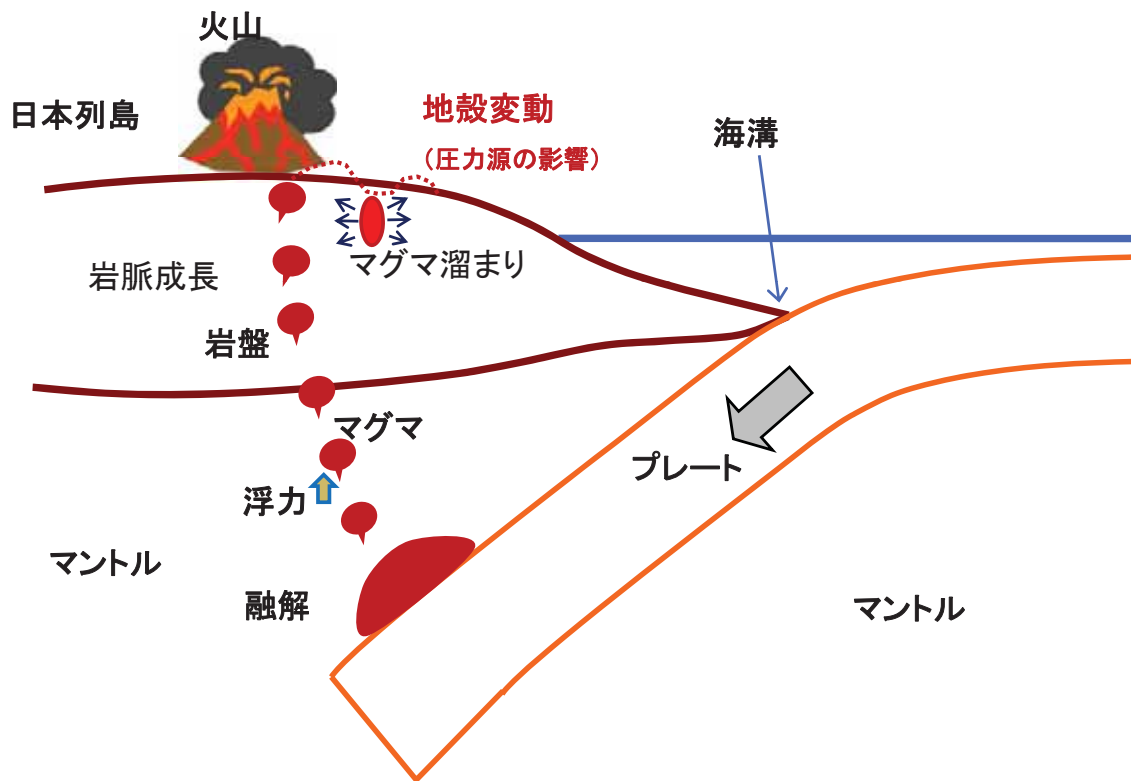
主管研究員 菊池 愛子

「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年4月23日（木）開催
アドバンスソフト株式会社

シミュレーションの概要



地震の現象とシミュレーション



マグマの現象とシミュレーション

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

対象	解析種類	式区分	基礎式
地震	地殻変動解析	弾性平衡	$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$
	地震波動解析	弾性体運動方程式	$\sigma_{ij,j} + b_i - \rho \ddot{u}_i = 0$
マグマ	地殻変動解析	弾性平衡	$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$
	岩脈成長解析	弾性平衡 破壊力学パラメータ	$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$ $J = \int_{\Gamma_\varepsilon} (Wn_i q_i - \sigma_{ij} n_j u_{i,k} q_k) ds$

空間座標;有限要素法

モデル表現にすぐれ複雑な地中構造、任意の向きを持つ断層や力源に柔軟に対応できる。

地震やマグマのシミュレーション一覧(アドバンスソフト)

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/FrontSTR/GEOS

地震やマグマの現象を解くための専用プログラムシステム

主な特徴	実現手段
広域地盤への適用	並列処理 球座標系, 無限要素
断層の表現	断層形状定義を地盤メッシュ定義から分離 断層を三角形や四角形パッチで折れ面近似
複雑な地中構造	三次元地震波速度構造DB (Matsubara and Obara(2011)など) プレート境界 マグマ
地形の組み込み	数値地図 (国土地理院, JTOPO30)
大規模データへの対応	地表・任意切断面・部分構造抽出と可視化, 結果データベース
余効変動	粘弾性 (Maxwellモデル)
断層近傍要素の応力や歪の評価	断層すべりをMPCCG法
機能の発展性	複数のプログラム群を組み合わせるシステム でカスタマイズが容易

シミュレーションの概要

Split Node法 (従来)

$$u_f^{(1)} = u_f + \Delta u_f^{(1)} = u_f + 0.5 \Delta u_\delta$$

$$u_f^{(2)} = u_f + \Delta u_f^{(2)} = u_f - 0.5 \Delta u_\delta$$

MPCCG法 (本方法)

$$u_{(upper)} - u_{(lower)} = u_\delta$$

$u_{(upper)}$: 断層上面節点の変位

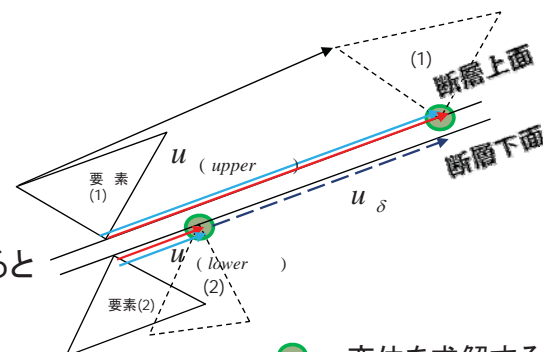
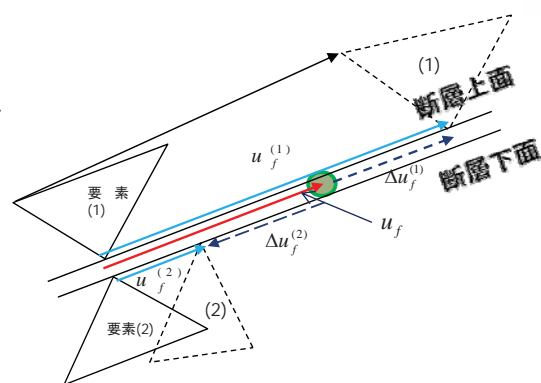
$u_{(lower)}$: 断層下面節点の変位

u_δ : すべり量

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_{upper} \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_{lower} \\ u_{etc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_\delta \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

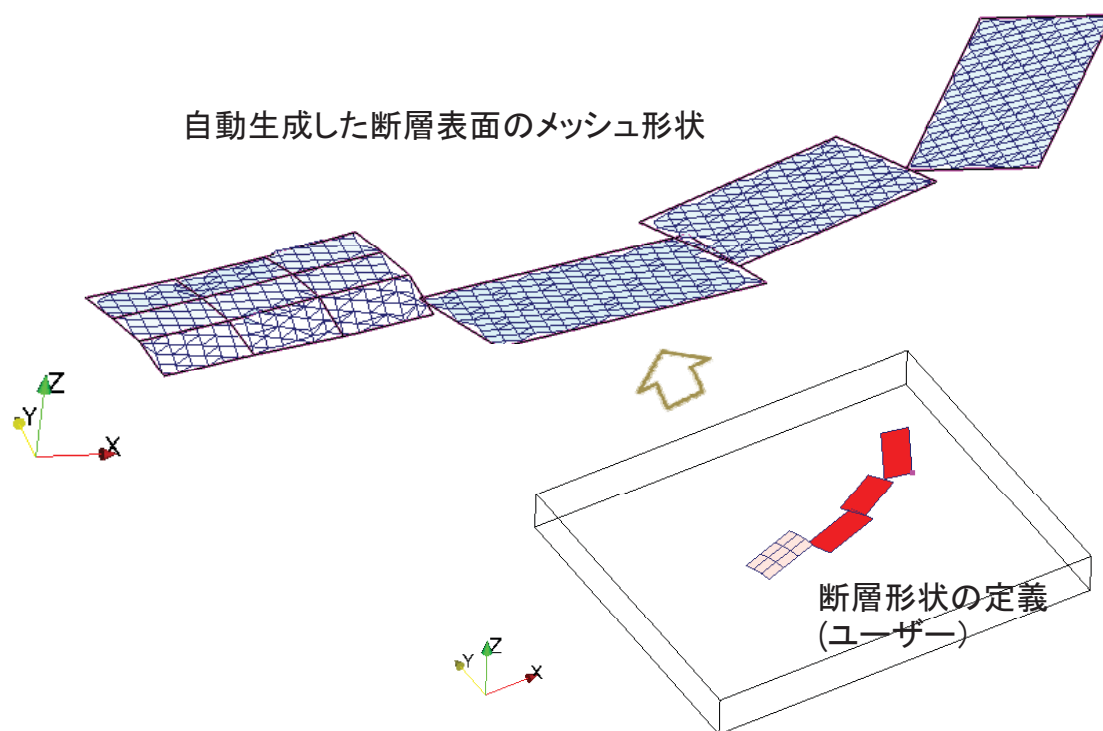
求解方程式は上式の変換行列をTとすると

$$[T]^T [K] [T] \{u_{master}\} = [T]^T \{f\} - [K] \{\bar{u}\}$$



● : 変位を求解する節点

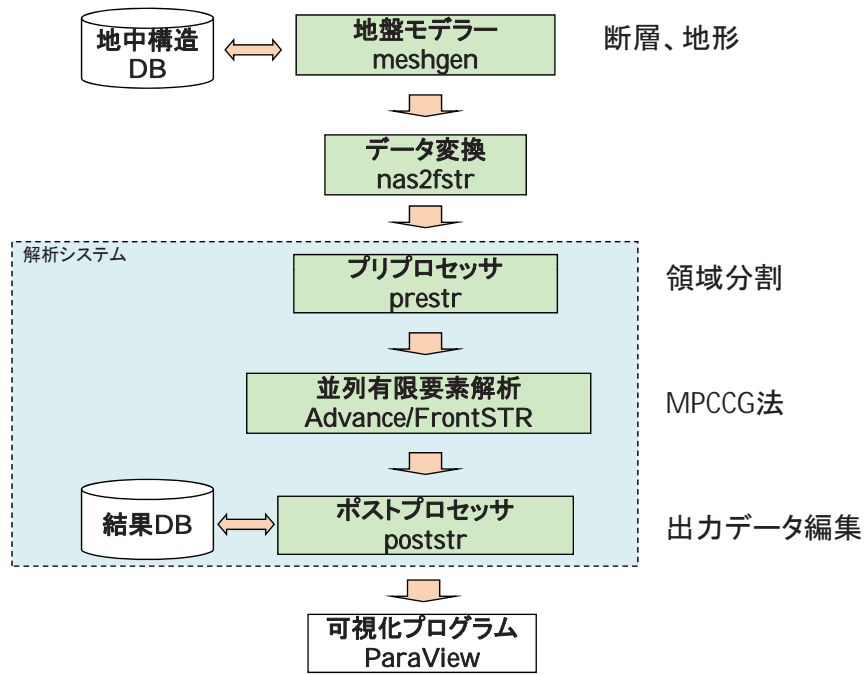
断層すべりの処理



断層の定義方法とメッシュ分割の例

Advance/FrontSTR/GEOS システム仕様

	機能	仕様
①	基本機能	有限要素法により地震およびマグマのシミュレーション 静応力解析/線形動解析
②	システム環境	Windows/Linux
③	地表面	・地形を考慮する。
④	材料特性	・弾性および粘弾性 (Maxwellモデル)
⑤	地盤モデル化機能	・メッシュを自動で生成 ・4面体、5面体 (プリズム)、6面体1次要素 ・Matsubara and Obara(2011)に従う速度構造など ・断層・圧力源の位置・形状を任意に設定できる ・無限要素を自動生成できる
⑥	計算機能	・大規模計算に対応できる並列計算機能 ・断層、圧力源周辺における変位・応力分布を表現できる MPCCG法
⑧	断層の形状	・断層定義を地盤メッシュと独立に定義できる ・多角形で表現される形状の頂点の位置を入力。頂点を用いた3角形&4角形の組み合わせを定義する
⑨	圧力源の形状	・球体、楕円体、板状岩脈



ニーズに合わせた再構成や、新プログラムの組み込みも容易

システムの基本構成 Advance/FrontSTR/GEOS

地殻変動解析(震源)

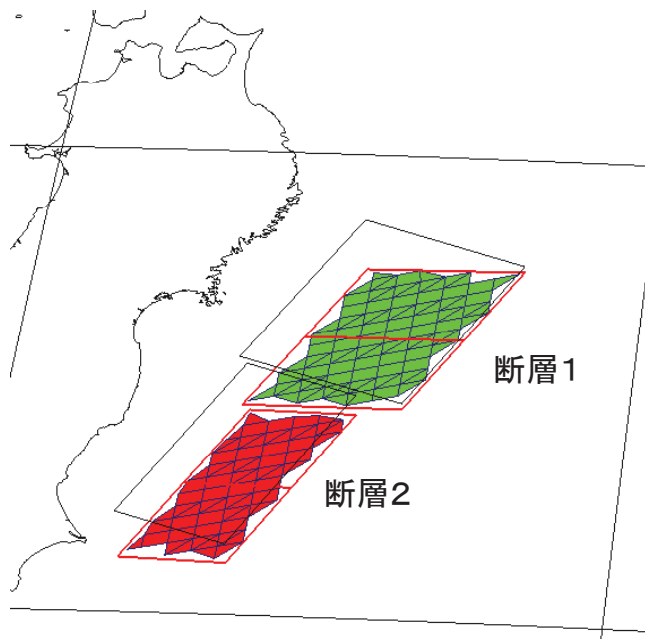
全体地盤モデル

東経128° ~149° (1826km)
北緯28° ~46° (2000km)
深さ400km

節点数: 569891
要素数: 542163
要素サイズ: 18km × 17km × 13km
計算時間: 3時間32分(10step, WinPC)

#HEXA	10	100	120	30					
+	10	20	30	40	50	60	70	80	
+	Z	20.0	*10	15.0	*10	5.0	*10		

地殻変動解析例 東北地方太平洋沖地震と富士山への影響



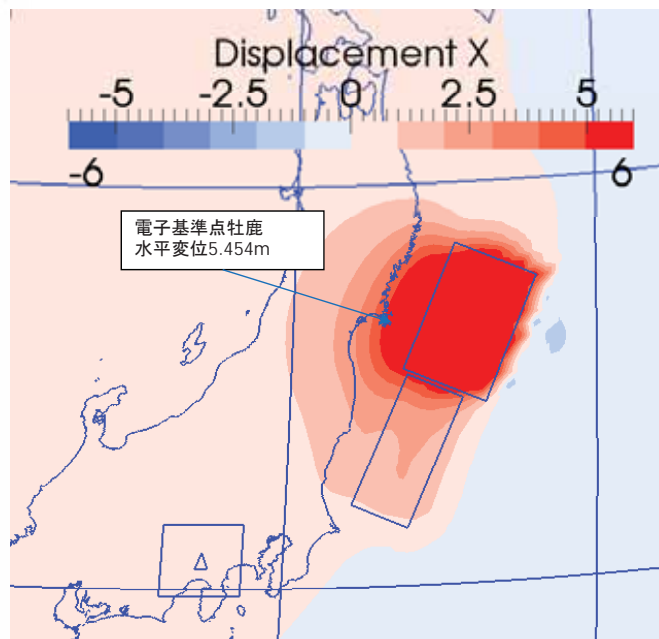
項目	断層1	断層2
緯度	38.80	37.33
経度	144.00	142.80
上端深(km)	5.1	17.0
長さ(km)	186	194
幅(km)	129	88
走行角(度)	203	203
傾斜角(度)	16	15
すべり角(度)	101	83
すべり量(m)	24.7	6.1
マグニチュード	8.8	8.3

出典: <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>

震源モデル

解析事例提供: 防災科学技術研究所 地震・火山防災研究ユニット殿

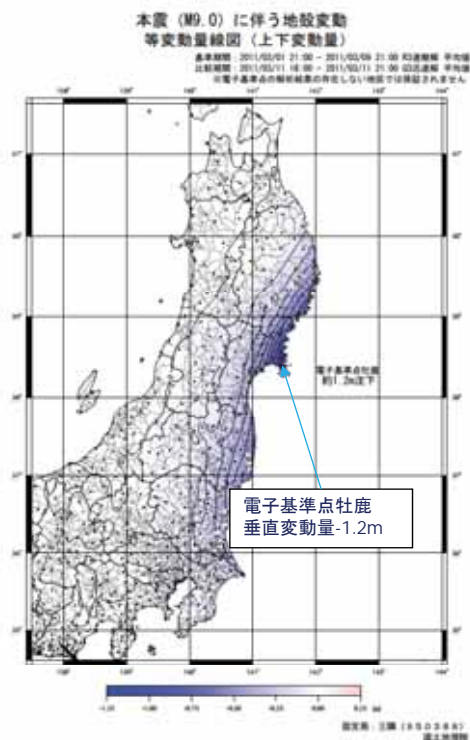
地表における水平変位(解析結果)



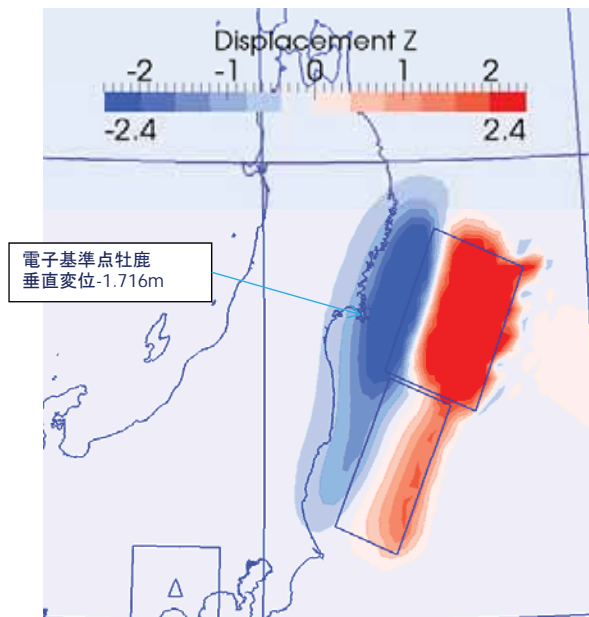
単位: m

出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>

0年解析結果(水平変位)

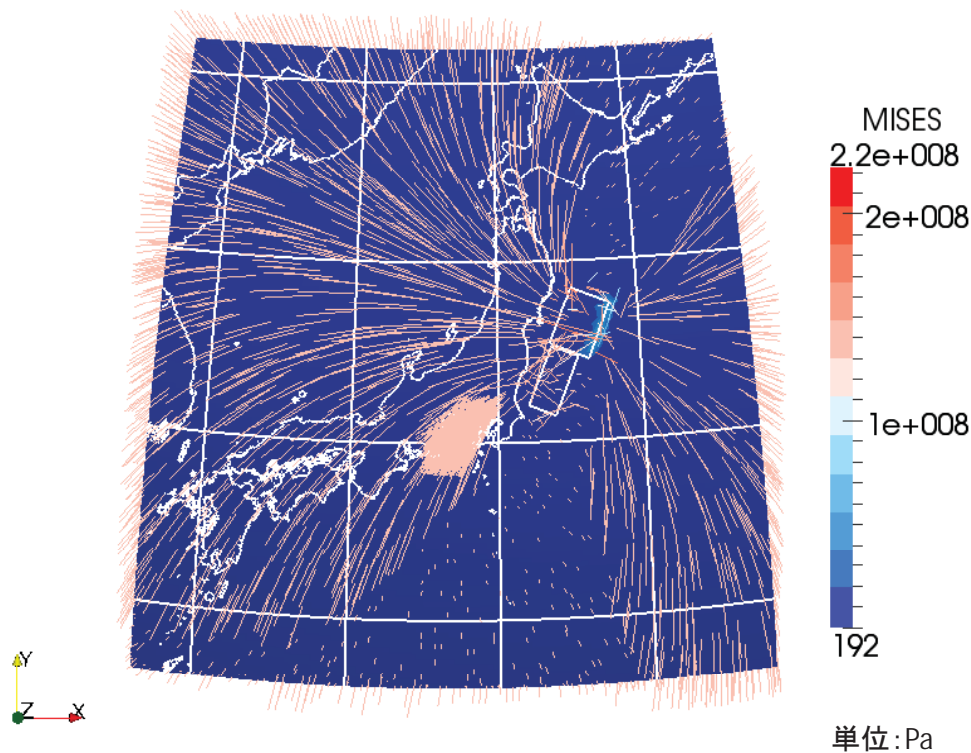


地表における鉛直変位 (解析結果)



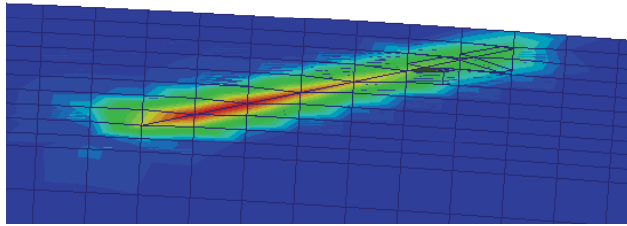
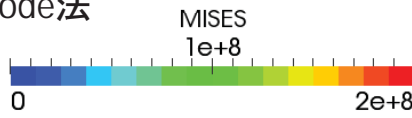
出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>

0年 解析結果(鉛直変位)

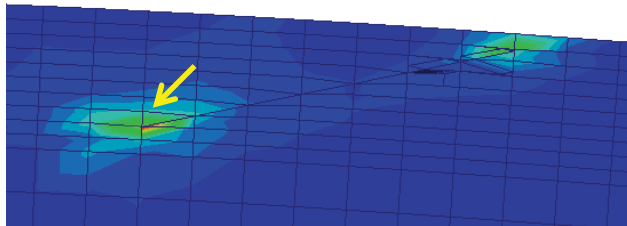
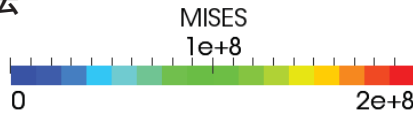


0年解析結果(最大主応力線)

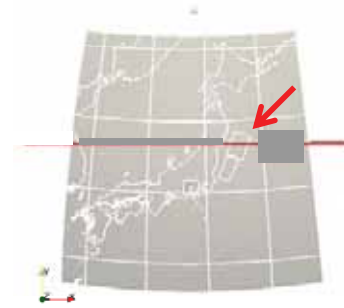
Split Node法



MPC法



断層端部に
応力集中



鉛直断面切断位置

地中応力の分布(断層近傍)

マグマ特性	内容
Vs	0m/sec
Vp	2500m/sec
密度	2500kg/m3
位置	富士山直下10km
形状・サイズ	半径3km球体

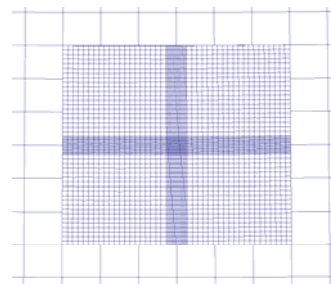
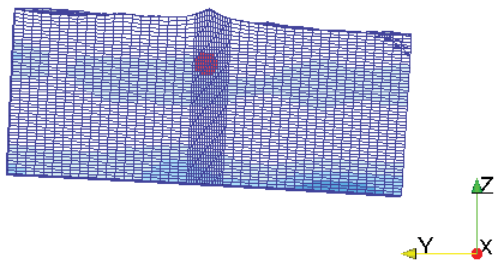
多段解析(ズーム解析)

全体の粗メッシュ解析終了後、境界変位を抽出して富士山の細分メッシュ解析を実行。
メッシュ作成は容易だが、境界条件抽出が面倒。



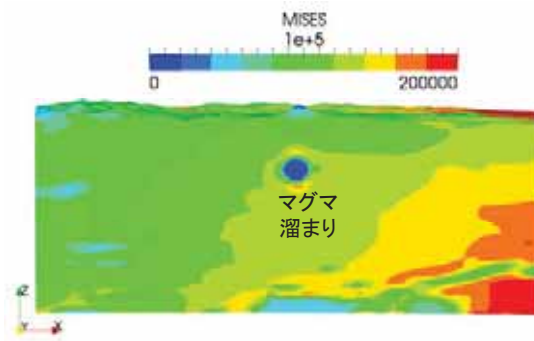
一段解析

全体の粗メッシュ部分と富士山の細分メッシュ部分の一体解析。
メッシュの粗密の違いは、GLUE機能でMPC条件を自動生成して解決。境界条件の抽出が不要。

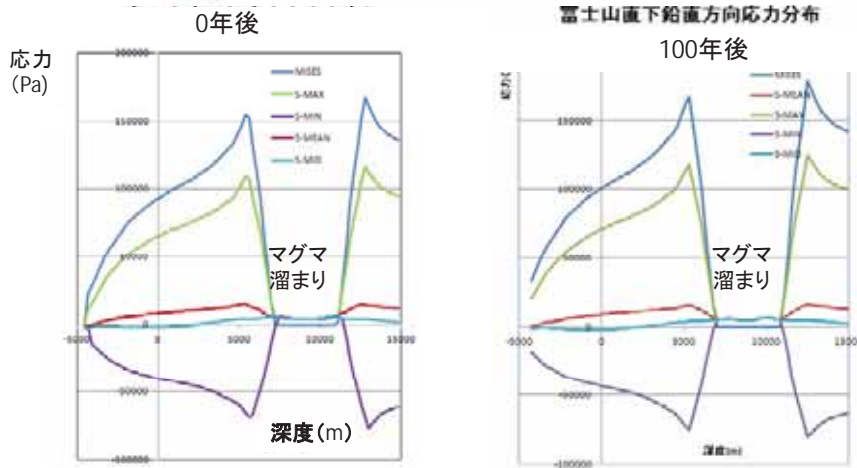


MPC条件による細分側節点の変位補間

富士山詳細部のモデル



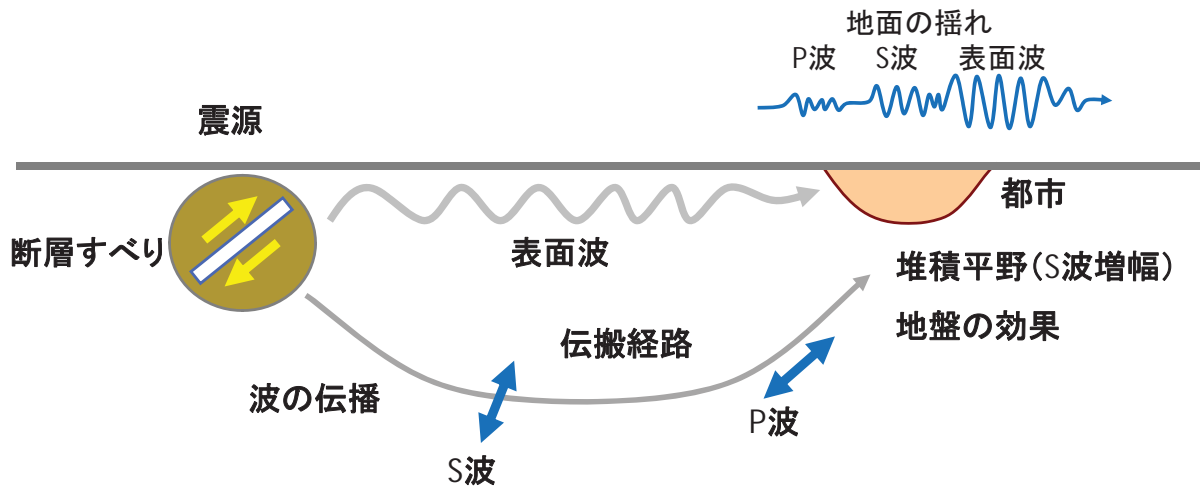
解析事例提供:
防災科学技術研究所
地震・火山防災研究ユニット殿



富士山直下マグマ周辺の応力変化

地震波動解析

- 断層に沿う急激なすべりにより周囲に地震波を放射する現象を解析
- 複雑な地中速度構造の影響も考慮できる
- 地表/地中に発生する変位、速度、加速度、応力、ひずみの波形を求める



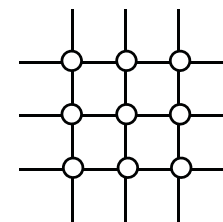
大規模モデル(震源~着目地域)
→計算時間膨大→大規模高速解析

地震波の伝播と地盤の揺れ

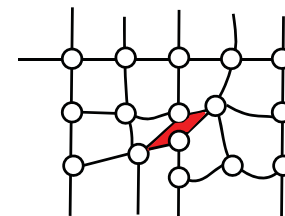
慣性力 粘性力 弾性力 震源から等価節点力

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t)$$

ここに、節点変位ベクトル $\mathbf{u} = \{u_{ik}\}$
 節点外力ベクトル $\mathbf{f} = \{f_{ik}\}$
 集中質量行列 $\mathbf{M} = \{M_{kk}\}$
 剛性行列 $\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, dV$
 減衰行列 \mathbf{C}



差分法



有限要素法

- 空間座標;有限要素法
- 時間方向;中心差分
- 震源;断層上面・下面すべり運動
- 領域境界での反射波低減; 自動Rayleigh減衰

地震波動解析の計算法

地震波動解析

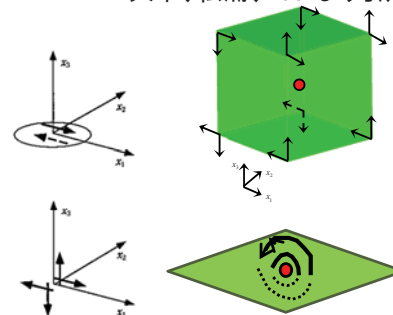
点震源

断層面での変位のくい違い運動を近似したモーメントテンソル。震源から観測点までの距離が十分大きいときによく近似できる。「地震発生の物理学」

大中、松浦、2002より引用

$$M_{pq}(t) = \mu \Delta \bar{u}(t) S (n_p v_q + n_q v_p)$$

$M_{pq}(t)$; モーメントテンソル
 $\Delta \bar{u}(t)$; 断層面の平均的な変位の食い違い量
 S ; 断層面積
 n_p, n_q ; 断層面の法線方向ベクトル
 v_q, v_p ; 変位の食い違い方向ベクトル



ダブルカップルモーメント

MPC断層すべり(本手法)

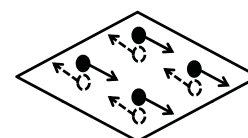
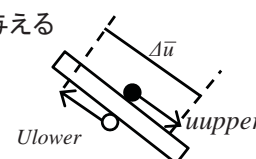
断層面により近い場合も考慮し、断層面での変位のくい違い運動を忠実にモデル化

- 断層を構成する上層と下層の節点に対し、絶対値が等しく符号が異なる変位を与える

$$u_{upper}(x, y, t) = 0.5 \times \Delta \bar{u}(x, y) \times amp(t)|_{x,y}$$

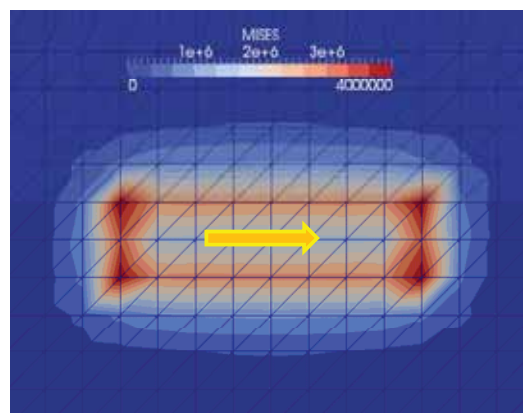
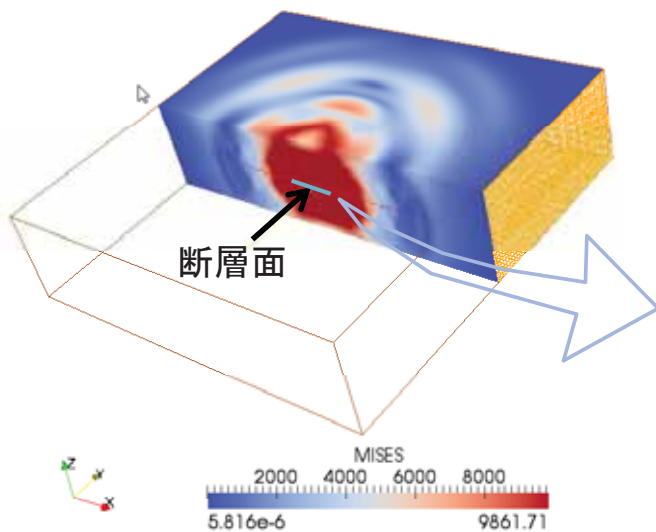
$$u_{lower}(x, y, t) = -0.5 \times \Delta \bar{u}(x, y) \times amp(t)|_{x,y}$$

$u_{upper} \quad u_{lower}$; 断層上下層の節点変位
 $\Delta \bar{u}$; 食い違い変位量
 $amp(t)|_{x,y}$; 断層面内の位置x,yにおける時間関数



断層すべりの処理法

断層面の移動を直接モデル化するため、断層面上の応力も解析できる。
断層面では端部に高い応力集中が発生する。

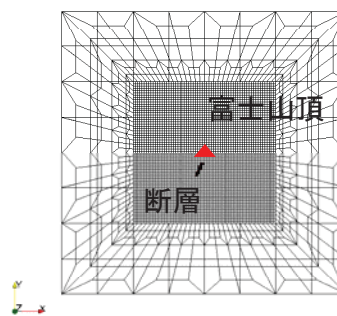
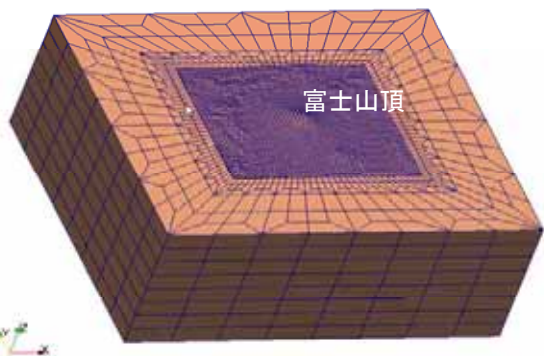


断層面ミーゼス応力(20S)

断層面上の応力

区分	項目	仕様
地盤モデル	モデル規模	100km×100km×45km 最小メッシュサイズ 1km 152,858節点 145,559要素
	速度構造	三次元地震波速度構造
減衰	Rayleigh減衰	なし
	粘性ダンパー	底面および側面
震源モデル	タイプ	ランプ型
	ライズタイム	2秒
計算条件		$\Delta t = 0.02$ 秒

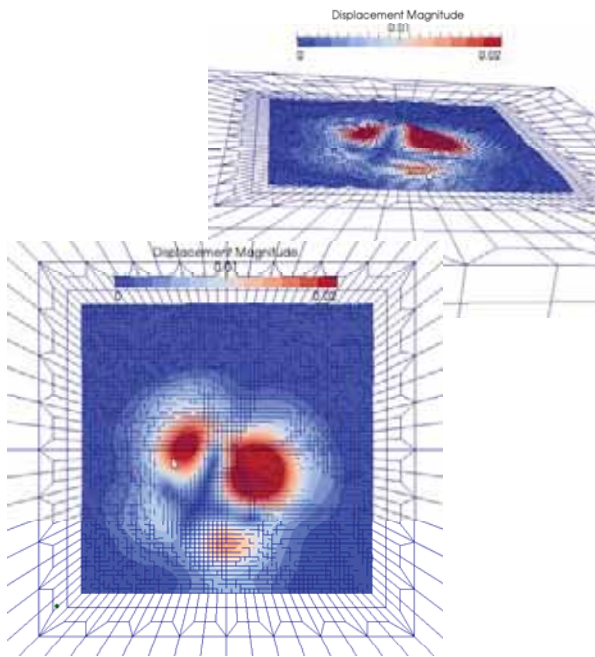
断層長さ6.9km幅5.1km
走行31° 傾斜角72°
すべり角22°
すべり量0.73m
上端深さ3.8km



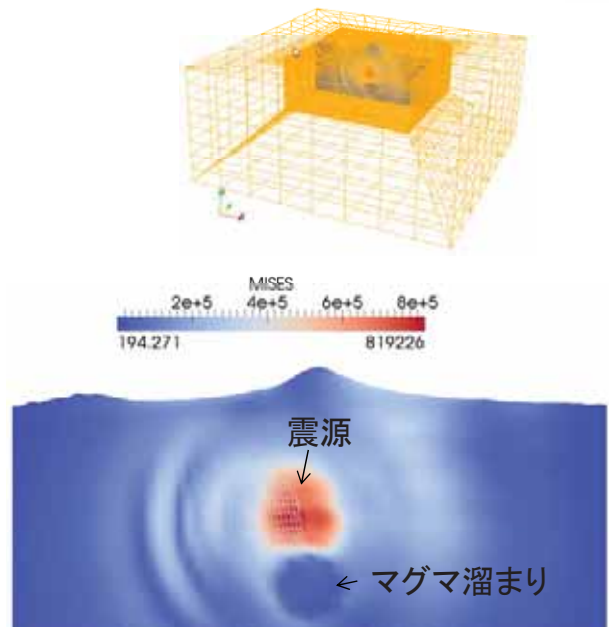
2011年3月15日静岡県東部の地震

東西100km南北100km深さ45km

実地震解析例 (地盤メッシュモデルと震源断層)

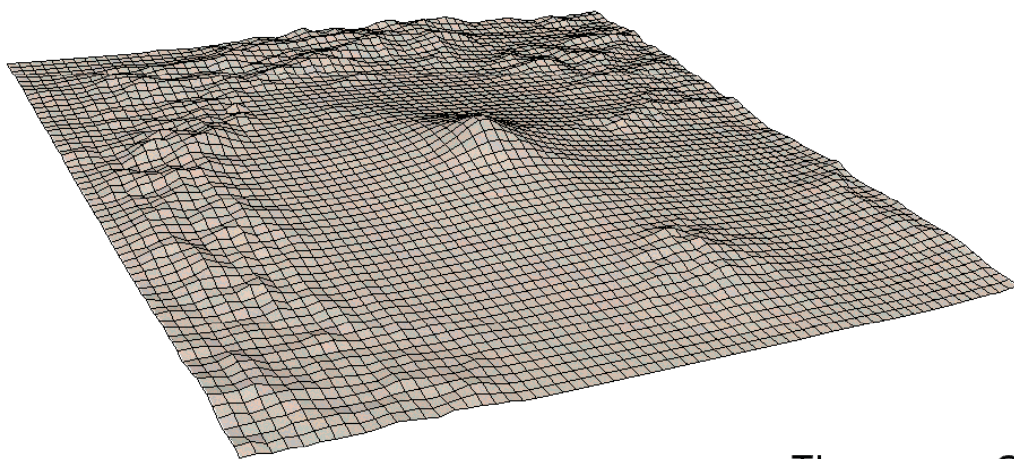


地表面の変位 (四象限型)



等価応力(中央緯線方向断面)

地震による変位・応力の応答(地震発生後4S)



Time: 0



Velocity Z-direction

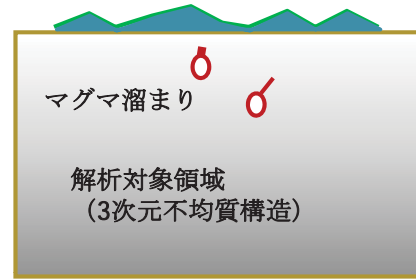
地震波の伝搬(地表面の鉛直速度)

概要

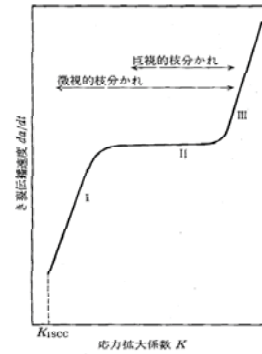
マントルで生まれたマグマは浮力を受けて上昇する。急速な上昇の前の準備段階である、マグマが岩盤のクラックの先端を腐食しながらゆっくりと拡大する過程(応力腐食)を解析する。

開発項目

- ①重畳メッシュ法による解析機能の開発
き裂近傍のメッシュと全体メッシュを別々に作成することが可能となる。
- ②破壊力学パラメータ算出機能の開発
き裂前縁の各点において任意の仮想き裂進展方向におけるJ積分を行う機能を開発する。
- ③自動解析、自動メッシュ機能の開発
き裂進展に従ったき裂近傍のメッシュを自動作成し、全体メッシュとの統合を行うとともに、き裂進展解析を自動的にを行う機能を開発する。



解析対象



き裂進展速度と応力拡大係数K

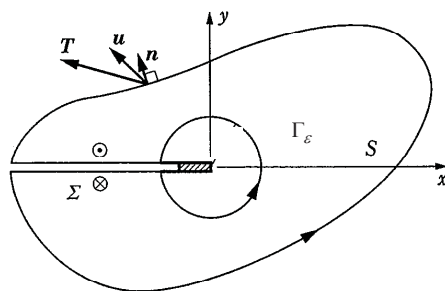
岩脈成長シミュレーションシステムの開発

岩脈成長シミュレーション

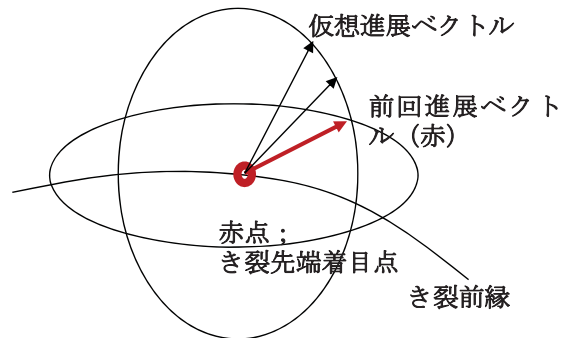
$$J = \int_{\Gamma_\epsilon} (Wn_i q_i - \sigma_{ij} n_j u_{i,k} q_k) ds$$

ただし

- Γ_ϵ ; き裂先端を含む任意の平面上に取った微小な積分経路
- W ; ひずみエネルギー密度
- n ; 平面に含まれ経路上でき裂先端から遠ざかる方向に向かう単位法線ベクトル
- σ_{ij} ; 応力テンソル
- u ; 変位
- q_i ; き裂進展方向を表す単位長さのベクトル



RiceのJ積分



仮想進展ベクトルの設定

破壊力学パラメータの計算(応力拡大係数、進展方向)

- ①変位はグローバルなメッシュの変位とローカルなメッシュの変位を重ね合わせる。
- ②グローバルとローカルの境界および形状は必ずしも一致しない。
- ③ローカル形状の境界でローカル変位は消滅する。

$$u = u^G + u^L$$

$$u^L = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma^{GL}$$

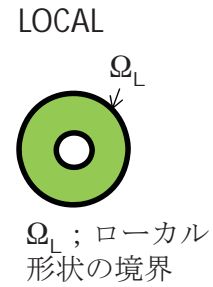
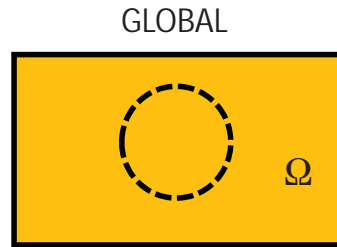
それぞれの領域で変位を補間する。

$$u^G = N^G \bar{u}^G$$

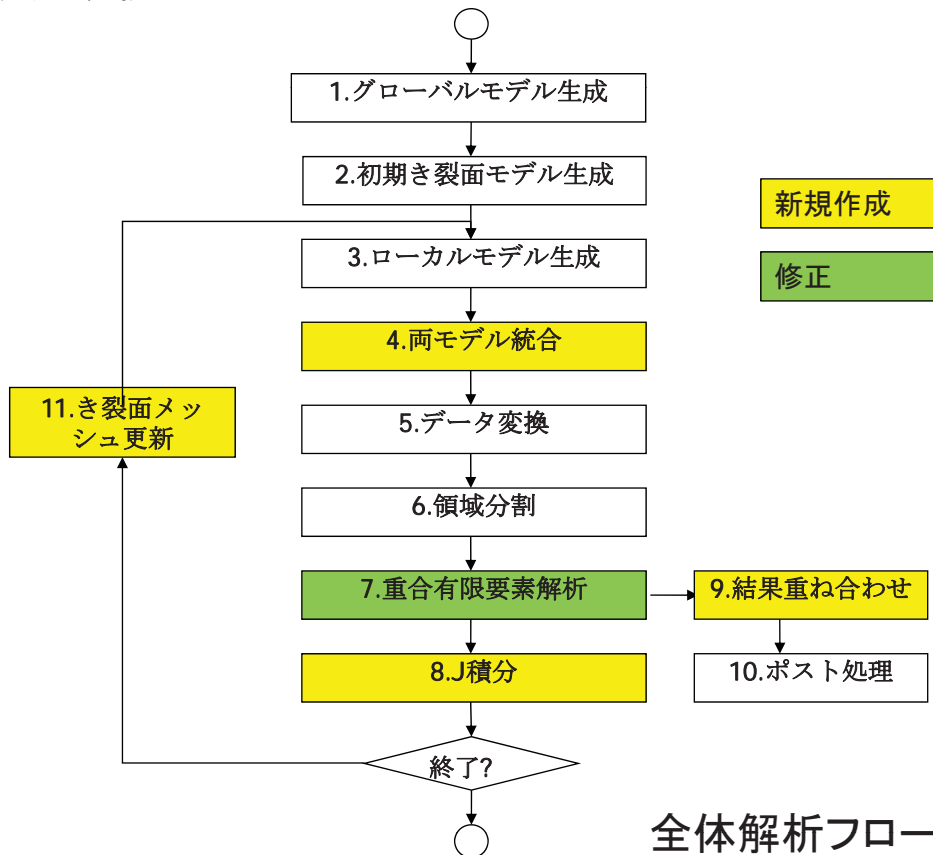
$$u^L = N^L \bar{u}^L$$

ただし

u ; 変位
 N ; 形状関数

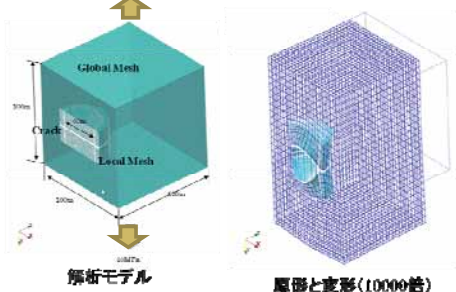


重合メッシュ法の計算式



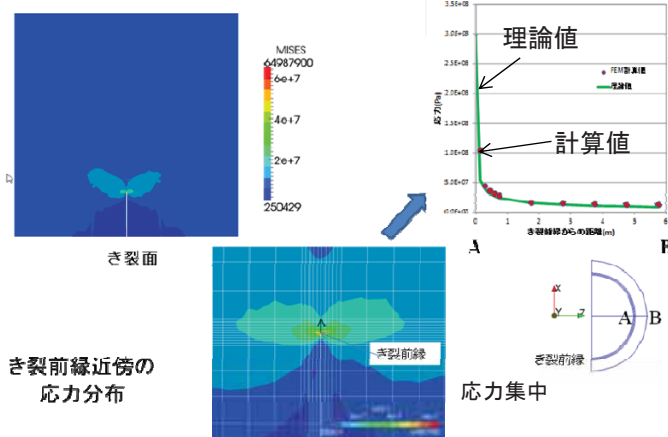
全体解析フロー

精度の検証 (半円き裂) -2



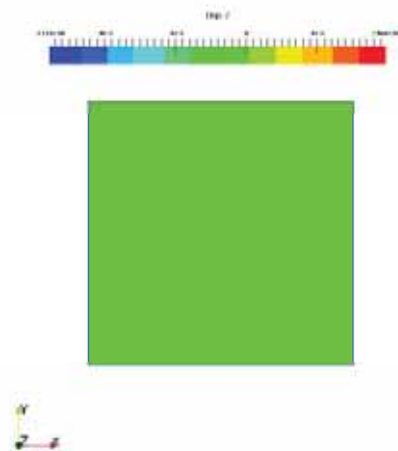
精度の検証 (半円き裂)

き裂深部の
応力分布



重合メッシュ法によるき裂解析の精度の検証

- ・ モデルサイズ: 500m(X) × 500m(Y) × 500m(Z)
- ・ き裂の半径: 50m
- ・ 節点数: 17,576, ヘキサ要素数: 15,625.
- ・ メッシュサイズ: 20m × 20m × 20m
- ・ 地盤材質: ヤング率80GPa, ポアソン比0.3, 密度2500kg/m³
- ・ マグマ密度: 2300kg/m³
- ・ 境界条件: 底面のZ方向変位を拘束. また剛体変形を防止



地表面の鉛直方向変位分布



岩盤き裂の成長
(下方; マグマ側、上方; 地表)

岩脈成長に伴う地表面変形の推移

まとめ

- 震源やマグマの現象にはシミュレーションできる範囲が広い。有限要素法による構造解析プログラムを用いて震源やマグマを解析できるシステムAdvance/FrontSTR/GEOSを開発した。
- 断層すべりや圧力源に伴う地殻変動解析を実施したところ十分な精度が得られ、有効であることを検証した。
- 断層の処理にMPC法を採用して断層付近の応力を評価できる。MPCCG法を用いることにより大規模モデルの解析もできるようになった。
- 専用のプリポストプロセッサの具備により複雑で大規模な地盤の解析を効率的に計算することが可能である。
- 上記システムは複数のプログラム群で構成されるため、カスタマイズもしやすく、今後も現象解析の範囲を拡張していく予定である。

爆発的な噴火を導く マグマ上昇流の3次元シミュレーション

主管技師長 湊 明彦

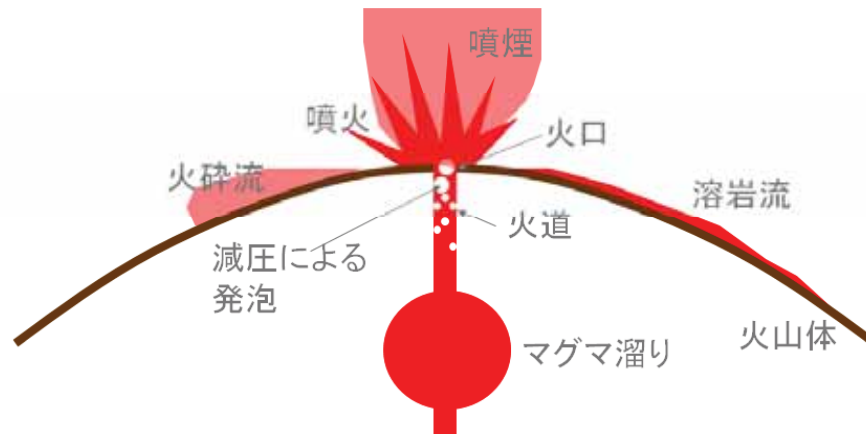
「地震・噴火現象の解析と数値シミュレーション」セミナー
2015年4月23日（木）開催
アドバンスソフト株式会社

内容

- 爆発的噴火とは
- マグマの運動方程式
- 減圧発泡実験のシミュレーション
- 発泡による破砕(フラグメンテーション)
- 臨界流(物理的に可能な最大流量)
- 発泡マグマ二相流の流動現象
- 気液二相流のモデル化
- 爆発的噴火のシミュレーション
- 水蒸気噴火と原子力安全研究
- 結言

爆発的噴火とは

マグマが地殻内を上昇し減圧発泡による膨張力に駆動され地表に噴出する現象。



マグマ: 高温高圧の岩石溶融物で揮発成分(大部分は水)を含む

マグマの運動方程式

$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dz} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] = - \frac{\lambda}{D} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] + \rho(P)g$$

圧力勾配
慣性効果
摩擦効果
重力効果

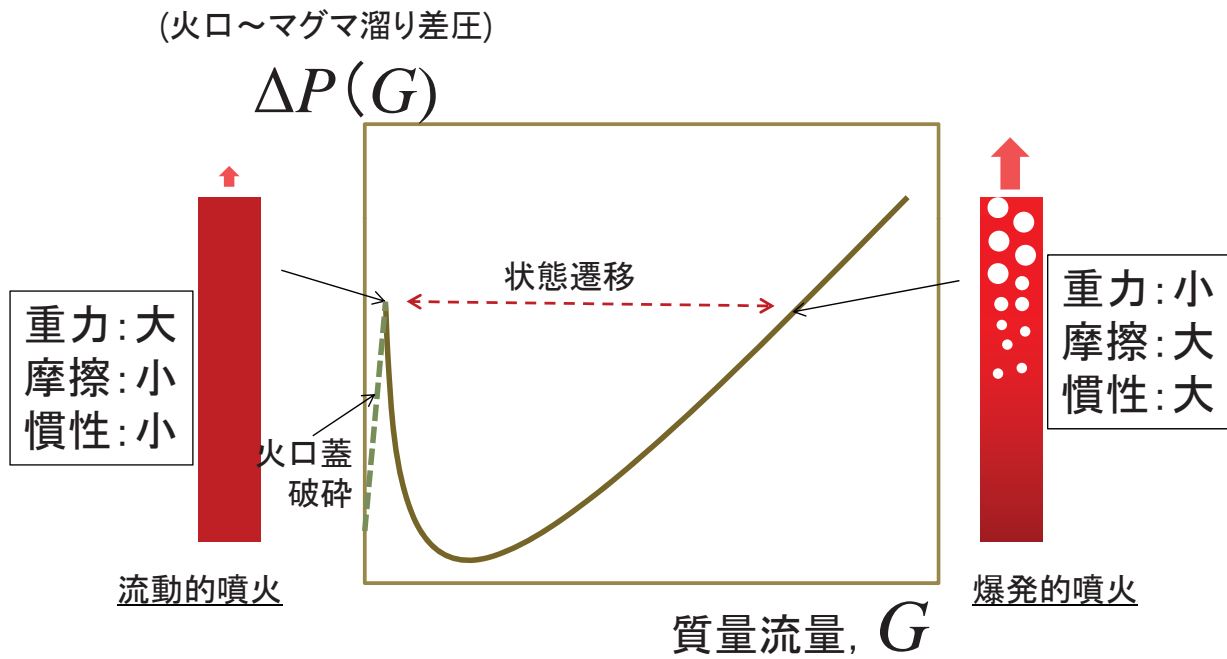
P : 圧力, z : 距離, G : 質量流量, ρ : 密度, u : 流速, g : 重力定数

準定常仮定 ⇒ 流量一定

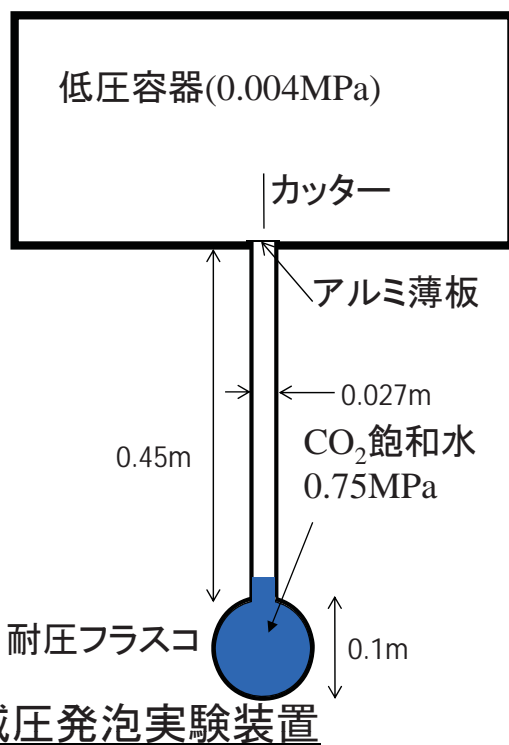
$$G = \rho u = const.$$

境界条件はマグマ溜り～火口(vent)間の差圧

$$\Delta P(G) = \int_{chamber}^{vent} \left\{ \frac{dP(G, z)}{dz} \right\} dz$$



減圧発泡実験のシミュレーション

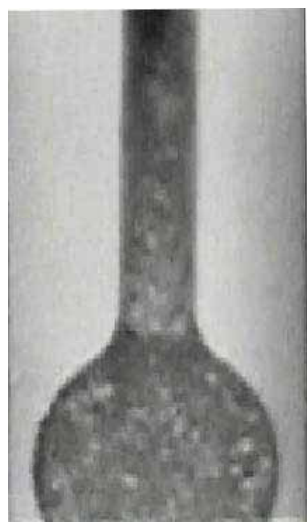


CO₂ガス析出速度評価式

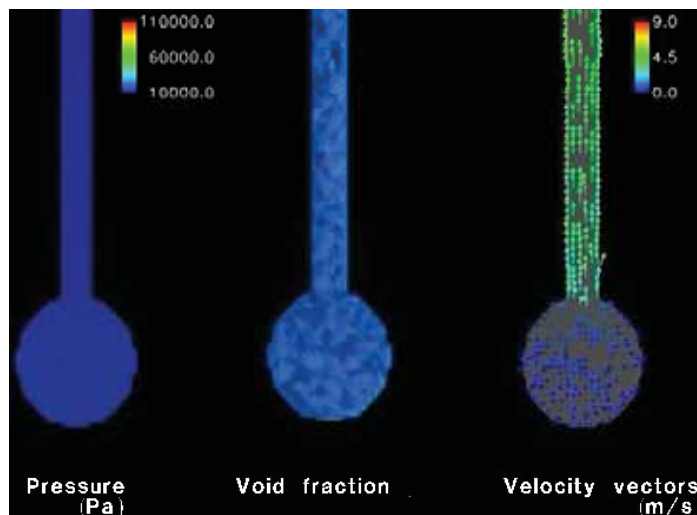
$$\frac{dW_{CO_2}}{dt} = -\frac{1}{\tau} (W_{CO_2} - W_{CO_2}^{Sat})$$

W_{CO_2} : 水中CO₂濃度
 $W_{CO_2}^{Sat}$: CO₂飽和濃度
 τ : CO₂析出時定数(10s)

*Mader, H.M., et al. : Nature, 388[31]pp.462-464(1987)



実験のビデオ画像



(圧力)

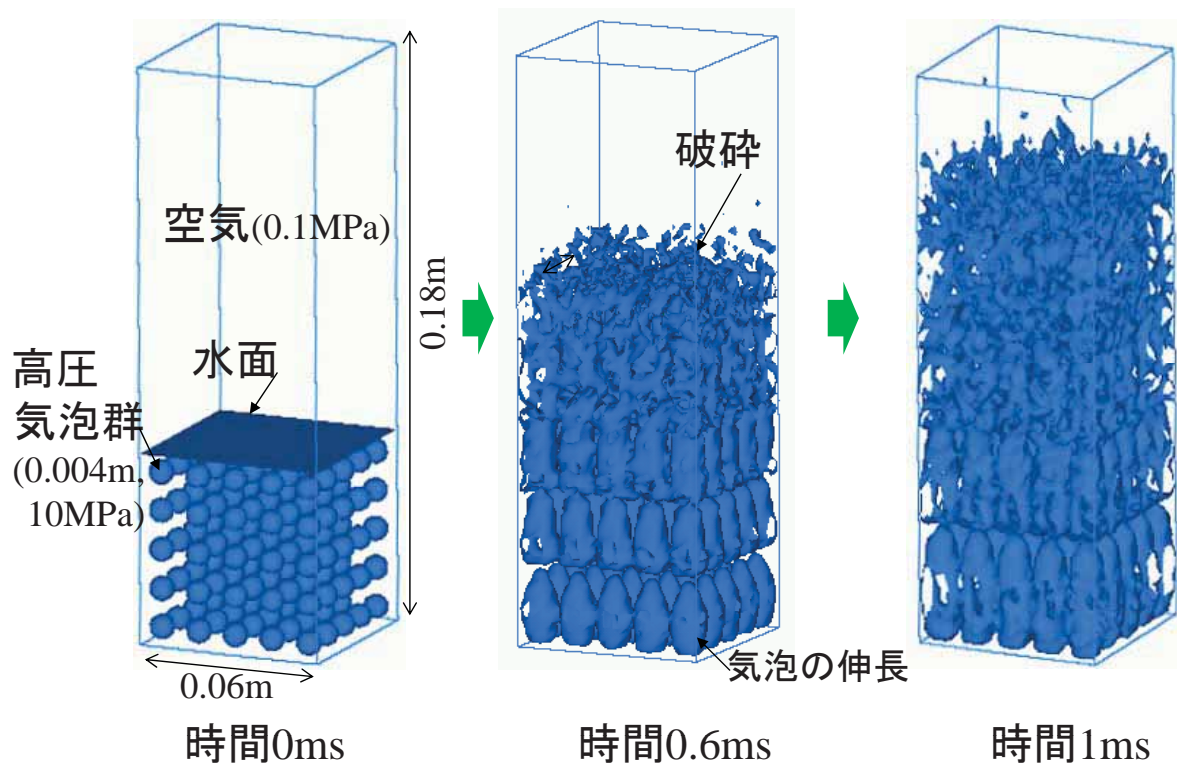
(ボイド率)

(流速)

シミュレーション結果

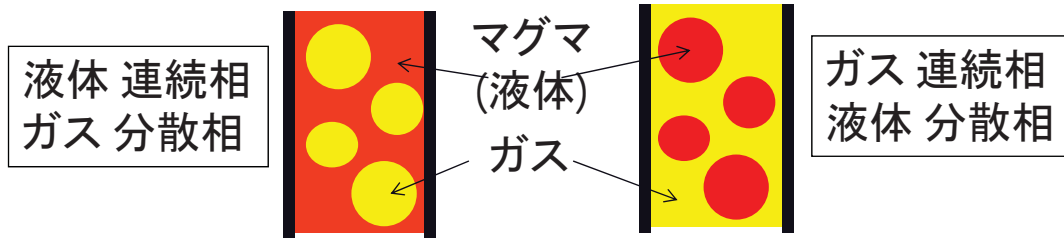
Minato, Toramaru, Ichihara, Fujita: Paper# V05/04A/A01-001, IYGG2003

発泡による破碎(フラグメンテーション)



Minato, Toramaru, Ichihara, Fujita: Paper# V05/04A/A01-001, IYGG2003

気泡流 $\xrightarrow{\text{破碎}}$ 噴霧流



混合流の粘性大

混合流の粘性小

臨界流 (物理的に可能な最大流量)

$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dz} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] = - \frac{\lambda}{D} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] + \rho(P)g$$

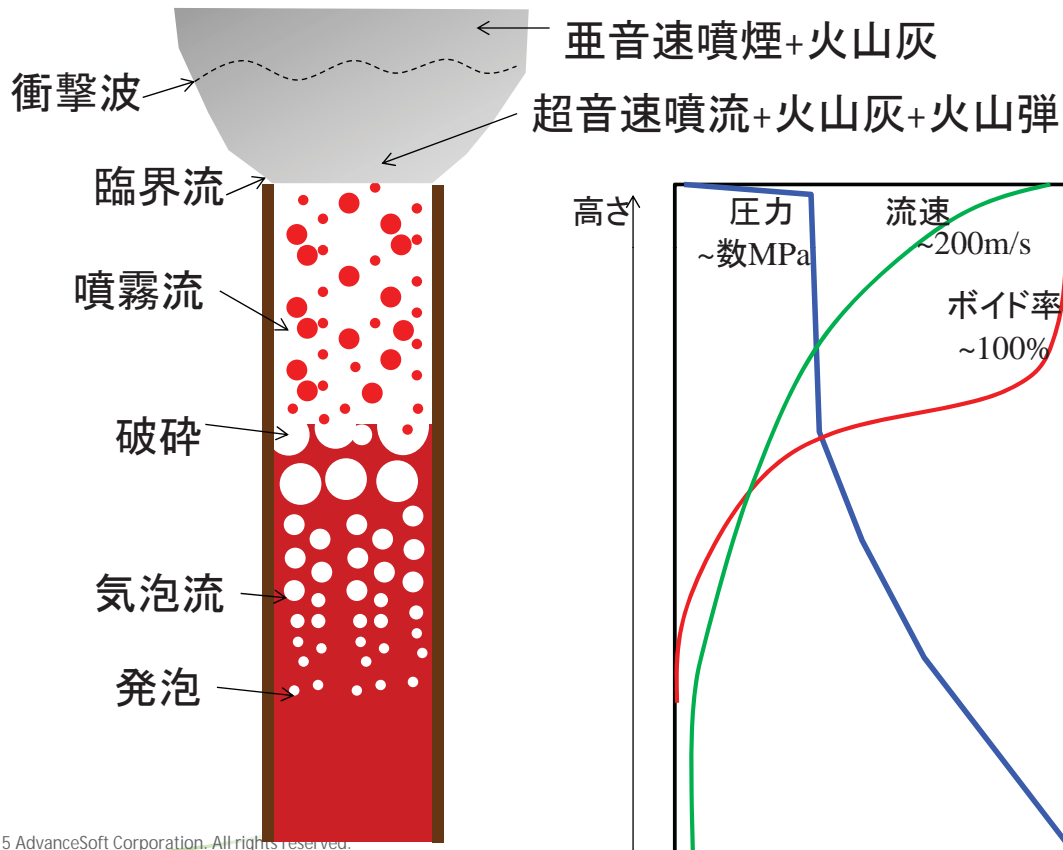
圧力勾配 慣性効果 摩擦効果 重力効果

流量が大きくなると流体慣性効果で(外部要因によらない)圧力変化
 ⇒ 圧力不定(物理的限界) ⇒ $dP/dz = \infty$ このときの流量を G_c とする

$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dP} \left[\frac{G_c^2}{\rho(P)} \right] \frac{dP}{dz} = 0$$

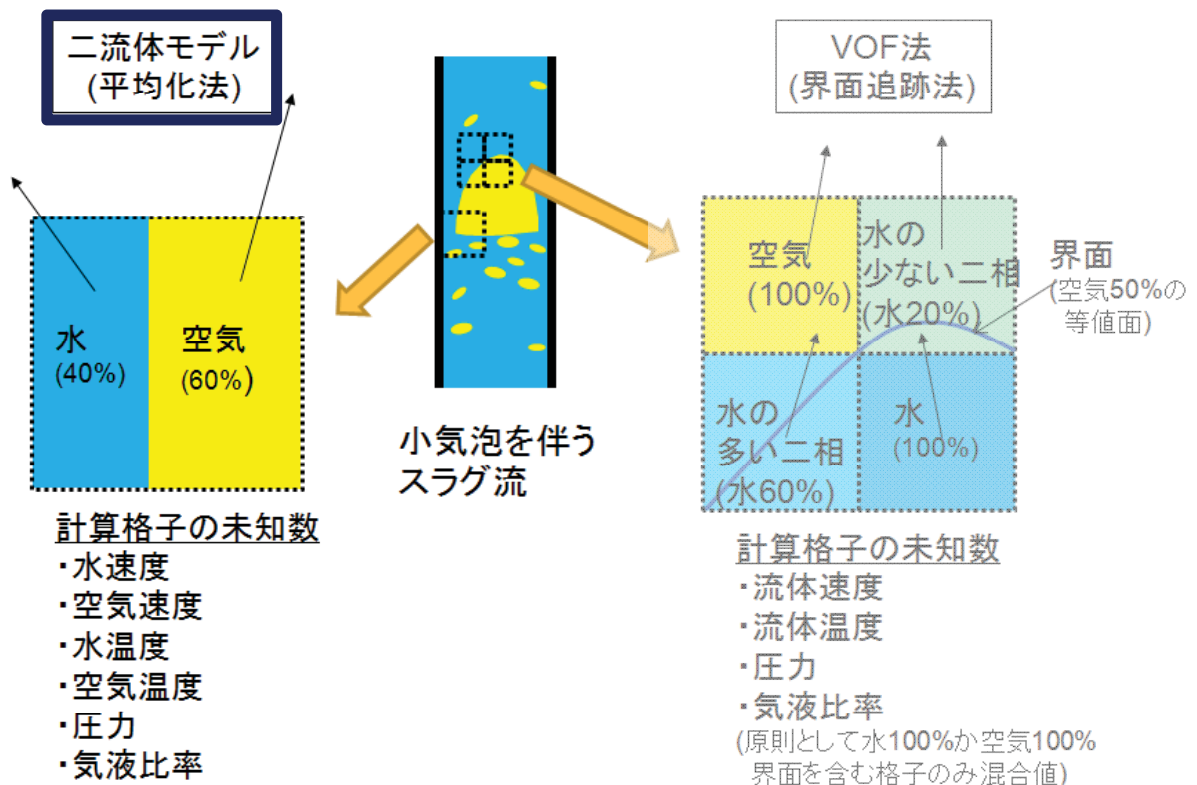
$$\left\{ 1 + G_c^2 \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\rho(P)} \right) \right\} \frac{dP}{dz} = 0 \quad \text{従って} \quad G_c = \sqrt{\frac{-1}{\frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\rho(P)} \right)}}$$

発泡マグマ二相流の流動現象



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

気液二相流のモデル化



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

爆発的噴火のシミュレーション

(解析条件の例)

解析モデル

三次元圧縮性二流体モデル

計算格子

ボクセル(立方体)格子(一辺2m)

約30,000個

タイムステップ

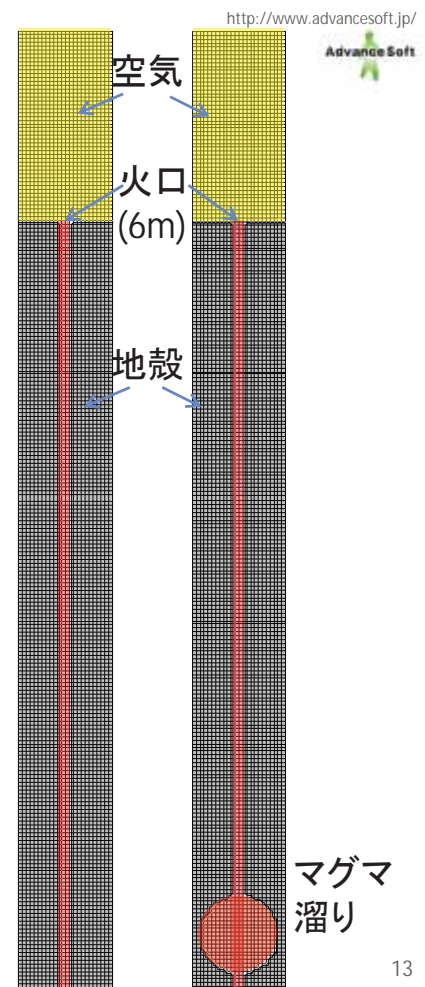
2×10^{-5} s, 40万ステップの計算(8秒)

マグマ初期圧力

火口で20MPa, 重力ヘッド考慮

(本解析は破砕モデルなし)

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



13

噴火の二相流解析で考慮すべき項目

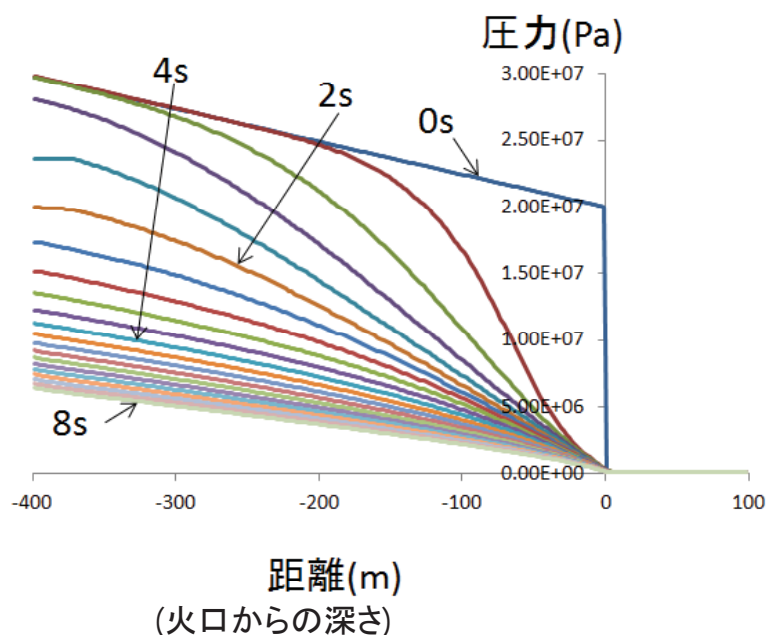
- マグマ物性(粘性,密度)
- 火道のスケール,形態
- 揮発性ガスの溶解度(温度,圧力依存)
- マグマの脱ガス
- 発泡の時間遅れ
- マグマ液相の破砕

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

14

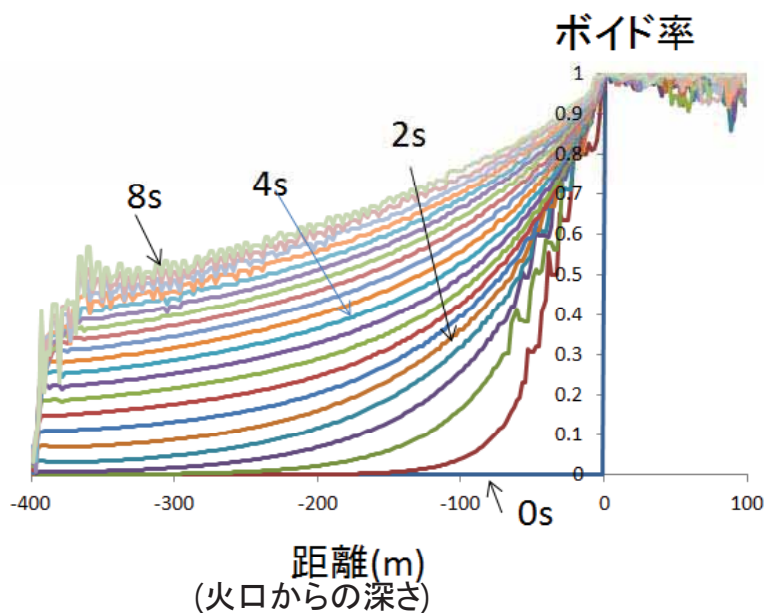
圧力分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)

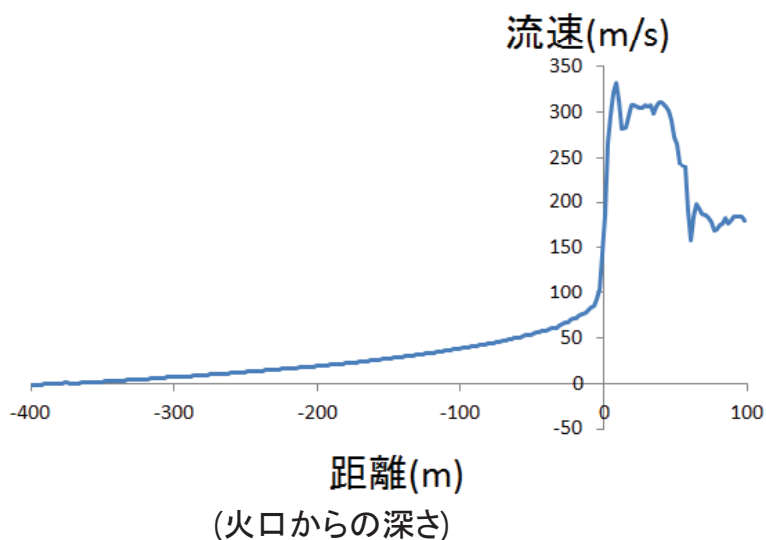


ボイド率分布の計算結果

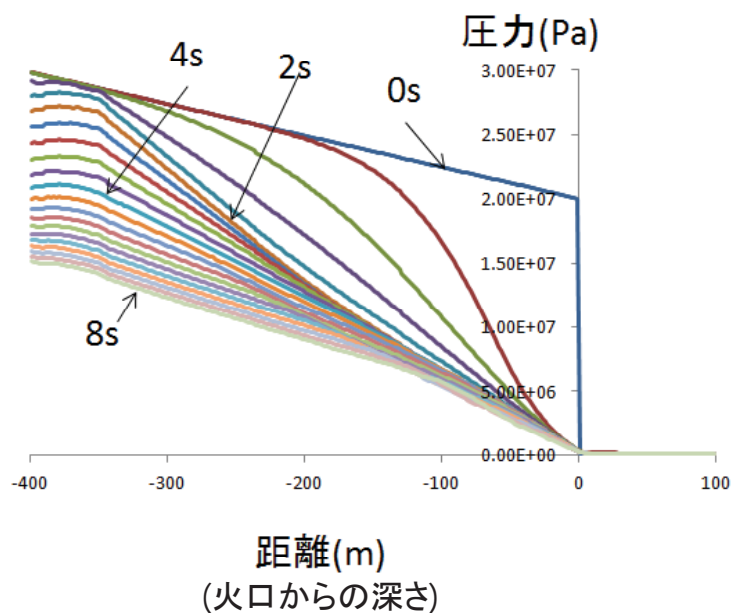
(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



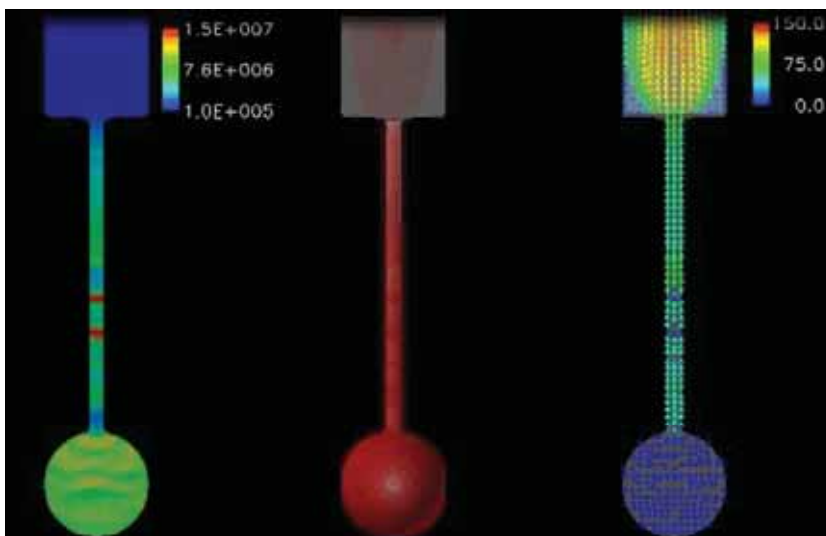
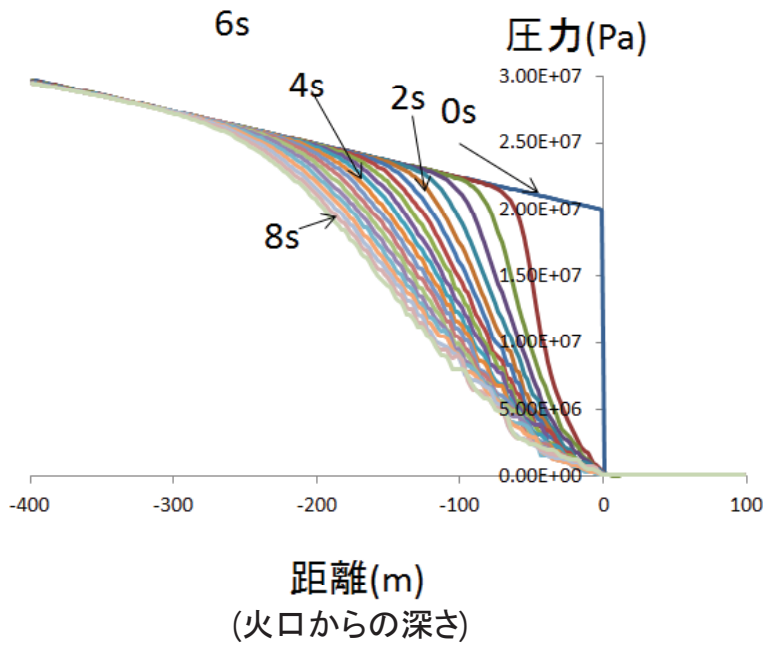
流速分布の計算結果 (粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



マグマ溜りのある噴火解析結果



高粘性マグマの解析結果 (粘性係数 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$)



圧力

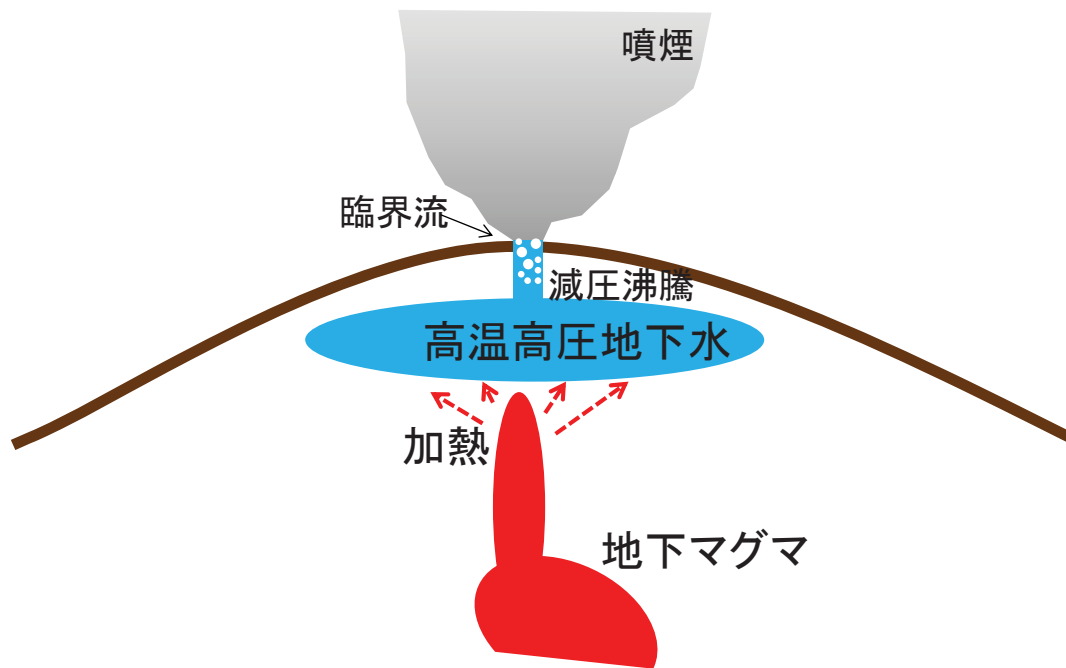
ボイド率

流速

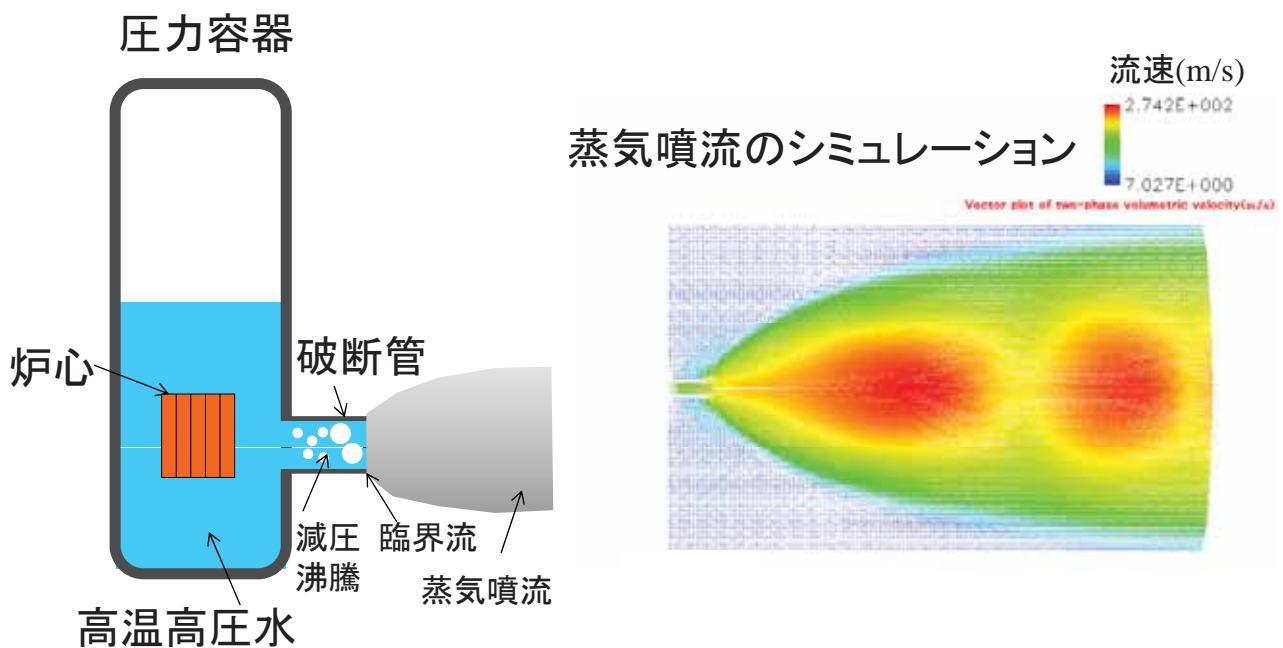
ボイド率分布の
3Dコンター



水蒸気噴火と原子力安全研究



配管破断による冷却材喪失事故(LOCA)の流動現象



Utsuno, Minato, et al.: Paper# N13P1368, NURETH13(2009)

結言

- 爆発的火山噴火はマグマの発泡, 破碎, 臨界流, 噴流等の二相流現象の複合として理解できる。
- 原子力工学等の二相流シミュレーション手法が適用できる。
- マグマ物性(粘性, 発泡), マグマ溜り, 火道について不明な点が多い。
- 実条件の実験が不可能であり, 実際の噴火の計測も限られているためシミュレーション技術の定量的な検証が困難
- 水蒸気噴火解明に原子炉配管破断事故研究が役立つ可能性

火山爆発に伴う圧力変動や 衝撃波の伝播計算

研究主席 中森 一郎

「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年4月23日（木）開催
アドバンスソフト株式会社

Advance/FrontFlow/FOCUSの 基本機能の概要

- 時間積分
 - オイラー陰解法(LU-SGS陰解法をベースとした手法)
 - 2次または4次精度ルンゲ-クッタ陽解法
- 対流項
 - 衝撃波捕獲法
 - 3次精度TVD補間
- 燃焼モデル
 - 火炎モデル
 - 層流火炎モデル
 - ✓ 高野モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 乱流燃焼速度モデル
 - ✓ 高野モデルからの拡張モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 爆轟波モデル
 - ✓ 1次元ZNDモデルと火炎モデルの統合化モデル
- 乱流モデル
 - 標準k-ε 2方程式をベースとした浮力乱流モデル(WETモデル)^[※]
 - 標準k-ε 2方程式モデル
 - Spalart-Allmaras 1方程式モデル
- LES
 - Smagorinskyモデル

[※] 村上ほか、「浮力を考慮した修正k-εモデルによるサーマルブリュームのCFD解析」、生産研究、第50巻、第1号、pp. 27-30 (1998).

解析手法について(1)

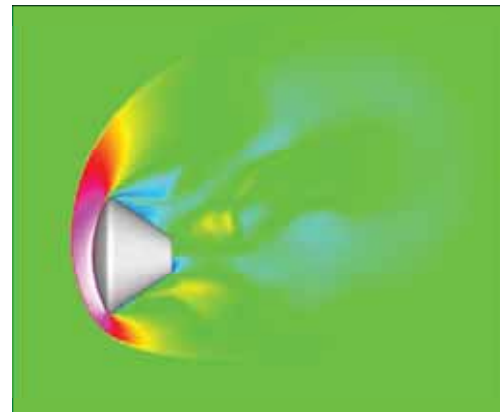
■ 有限体積法の採用

- 差分法に比べて汎用性に勝る
- 有限要素法に比べてメモリ使用量が少なく済む
- 積分型(強保存型)に基づいて離散化をするために保存性が良い
- 複雑形状に対応が容易

■ 密度ベースソルバーの採用

- 衝撃波や爆轟波などの不連続的な分布をシャープに安定に解くことが可能
 - 80年代後半に衝撃波捕獲法(TVD法など)の研究がほぼ完成 → 現在に至る
 - 主として宇宙航空産業において 90年代にCFD手法が成熟

大気圏再突入時のカプセル周りの流れ



解析手法について(2)

■ 有限体積法は以下のNavier-Stokes方程式の積分型に立脚する

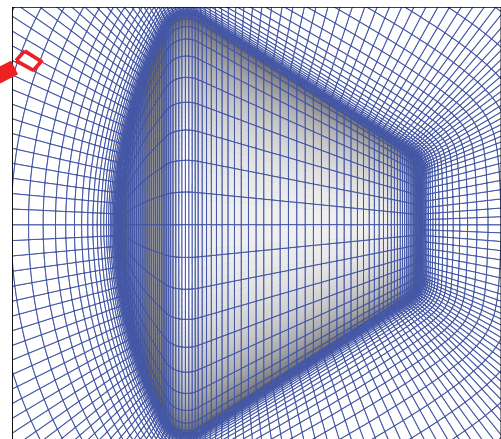
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dv + \sum_k [E(Q) - E_v(Q)] S_k = 0$$

■ コントロールボリュームで空間を分割する

■ 上式をコントロールボリュームで離散化

$$\left(\frac{V_i}{\Delta t} I + \sum_k A_i^+ S_k \right) \Delta Q_i + \sum_k A_i^- S_k \Delta Q_j = -R_i^n$$

Qは密度、運動量、エネルギーなどで構成される解ベクトル
赤い枠はコントロールボリュームの1つ
赤い線を過ぎる流束を求めて残差ベクトルRを構成する



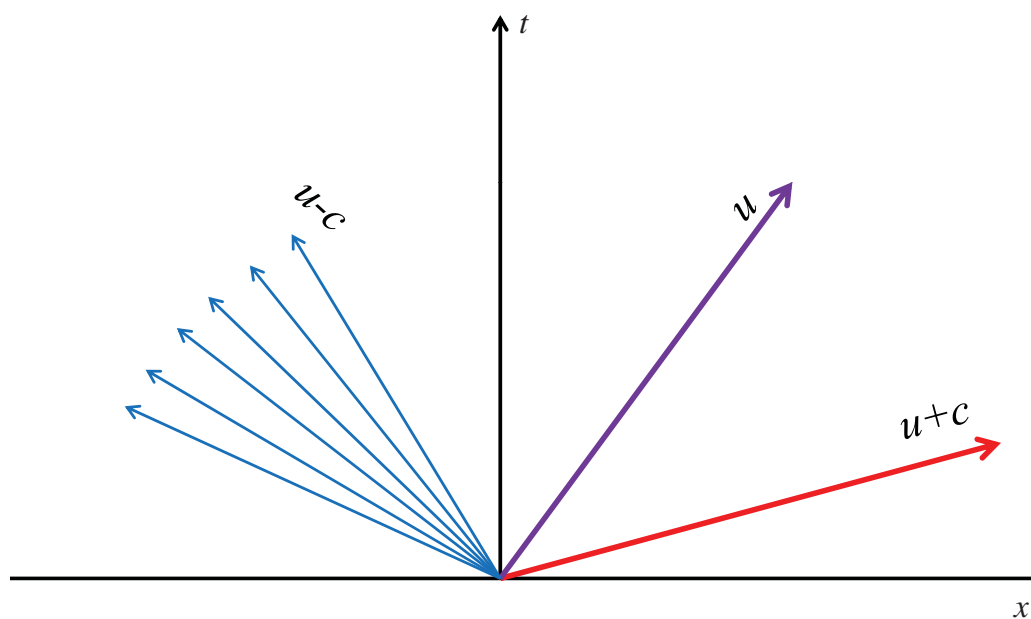
■ 離散式は、陽解法のとときにさらに単純になる

$$\frac{V_i}{\Delta t} \Delta Q_i = -R_i^n$$

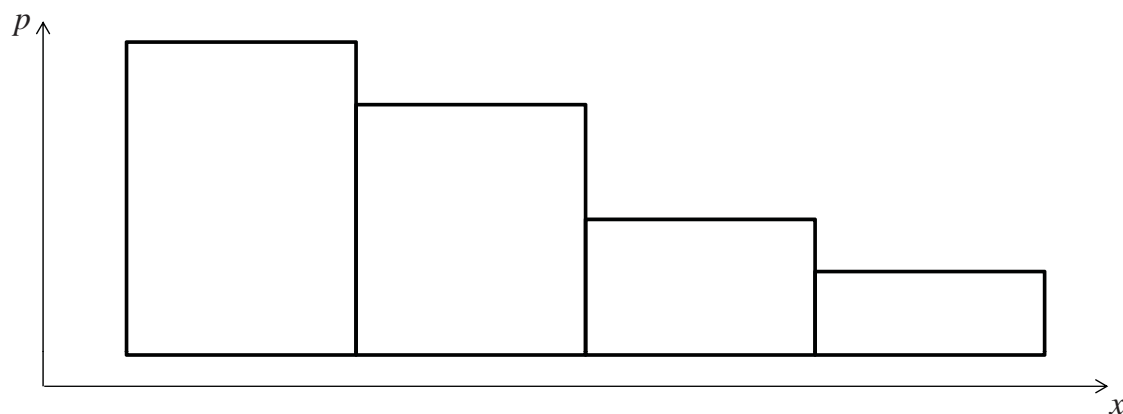
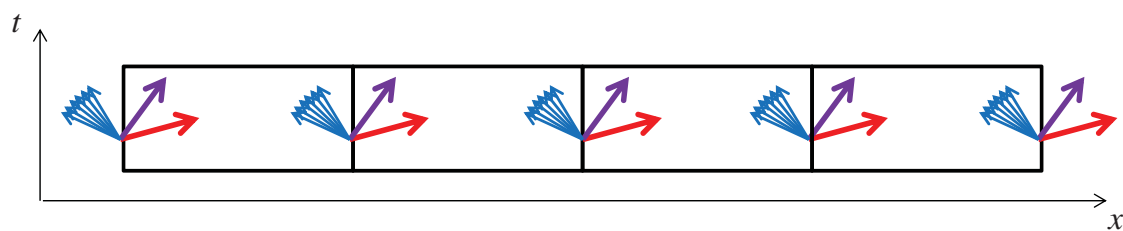
■ 残差ベクトルR_iⁿ をリーマン解法で評価し数値解を得る、非粘性流ならば次式で表される

$$R_i^n = \sum_k E(Q) S_k$$

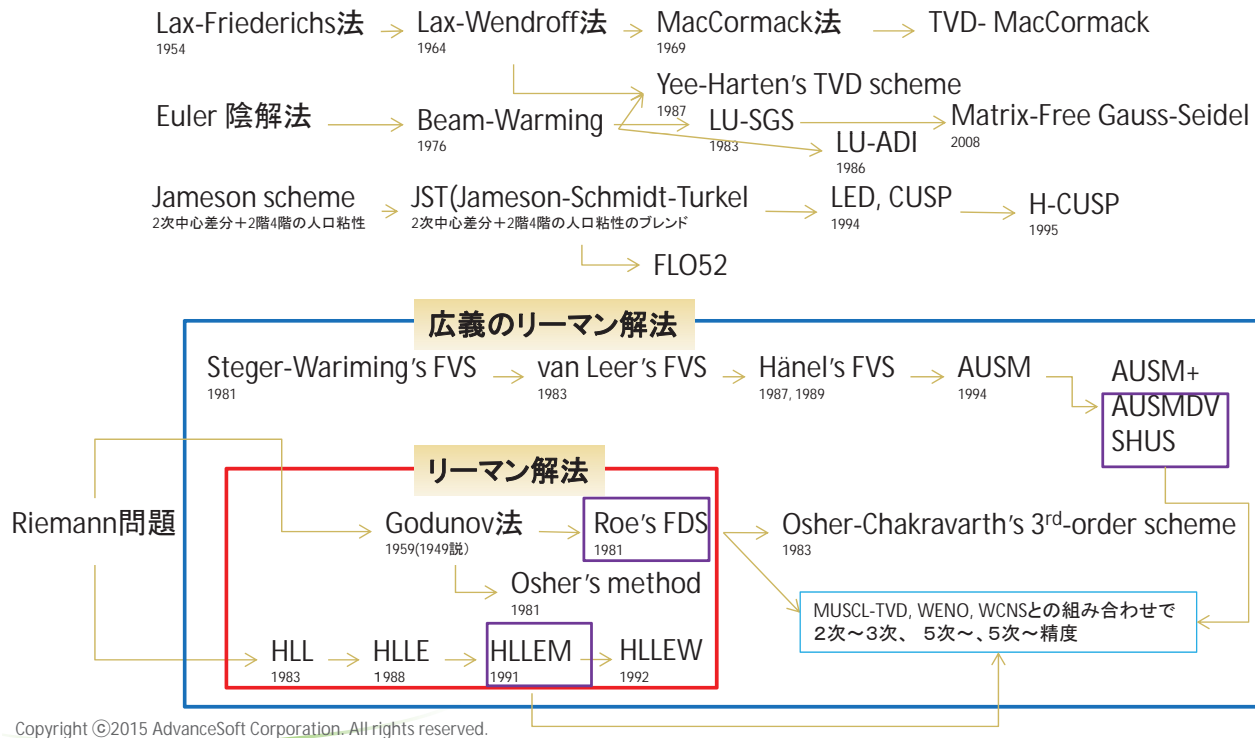
リーマン解法とは？



リーマン解法とは？



圧縮性流れ解析用の風上法のまとめ



空間(対流項)の風上化の選択

- Roeの風上スキーム
 - 強い衝撃波に対して頑丈、強い膨張波に対して脆弱
 - 化学種が増大したときにRoeマトリクスを拡張する必要有り
- **AUSM系のスキーム**
 - 強い衝撃波に対して頑丈、強い膨張波に対しても頑丈
 - 化学種が増大しても、化学種の行のみの対応で可
 - 噴煙のような固相を含む気体にも拡張が容易

空間(対流項)の高精度化

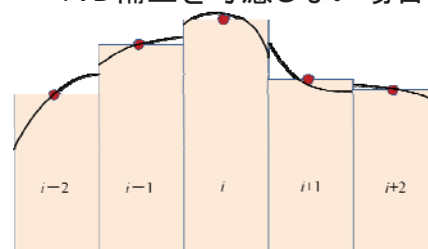
- 線形補間では必ず数値振動が生じる
 - ⇒ Godunov の定理
 - 安定な解法は1次精度しかない
 - 高精度化には補間に工夫が絶対的必要
 - ✓ TVDリミッターを含む若干複雑な内挿切替の式が必要
 - ✓ 不連続面を挟むところは1次精度で、滑らかな分布のところではTVDリミッターが外れる
- TVD: total variation diminishing(Harten, 1983)
 - 「波の」単調性を保証(ただし、線形波に対してであって実際問題には“目途”と割り切る) → 2次精度または3次精度だが極大値・極小値や不連続面近傍で1次精度
- ENO: Essentially Non-Oscillatory scheme (Harten, 1989)
 - n次精度で振幅はn次の微小量で抑えられることが線形問題では保証される
 - WENO(1994) → 5次精度、7次精度、9次精度、...
 - MENO → 6次精度、...
 - WCNS → 4次精度、5次精度、...

歪みの大きな計算格子では正確に高精度を達成するのは難しい
⇒ 3次精度TVDを使用することとする

TVDによる高精度化

- 線形補間では必ず数値振動が生じる
 - 線形補間ではなく非線形補間ならば安定な解法で高精度化が可能
 - それではTVDは何をやっているのか？

TVD補正を考慮しない場合



$$Q_{i+\frac{1}{2},L} = Q_i + \frac{1}{6}\bar{\Delta}Q_i + \frac{1}{3}\bar{\Delta}^+Q_i$$

$$Q_{i-\frac{1}{2},R} = Q_i - \frac{1}{6}\bar{\Delta}^+Q_i - \frac{1}{3}\bar{\Delta}Q_i$$

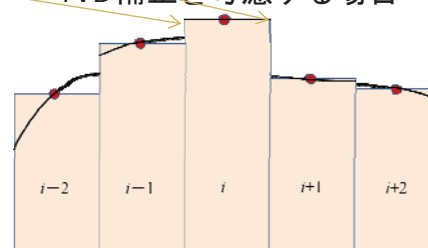
$$\bar{\Delta}^+Q_i = \frac{1}{2}[\text{sign}(\Delta^+Q_i) + \text{sign}(\Delta^-Q_i)] \min(|\Delta^+Q_i|, \beta|\Delta^-Q_i|)$$

$$\bar{\Delta}^-Q_i = \frac{1}{2}[\text{sign}(\Delta^+Q_i) - \text{sign}(\Delta^-Q_i)] \min(|\Delta^+Q_i|, \beta|\Delta^-Q_i|)$$

$$\Delta^+Q_i = Q_{i+1} - Q_i$$

$$\Delta^-Q_i = Q_i - Q_{i-1}$$

TVD補正を考慮する場合



Advance/FrontFlow/FOCUSの衝撃波管問題による検証例

厳密解と数値解の比較を実施

✓ $x=0$ を境に左が高圧、高密度とし、

✚ 圧力比が10

✚ 密度比が8

✓ 格子数は100分割を使用

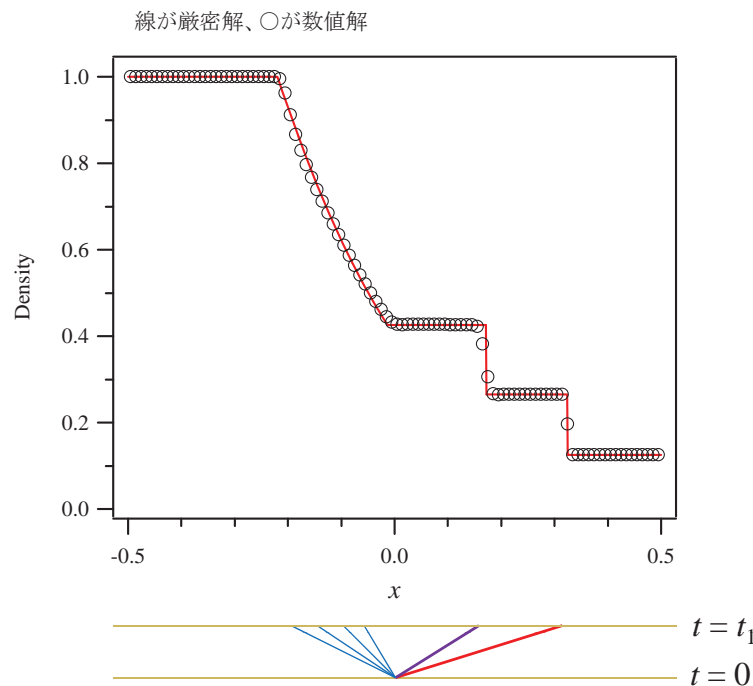
✓ 数値解法はAUSM系の風上法+3次精度TVD法を使用

✓ 問題の設定は下記の文献1)を参照

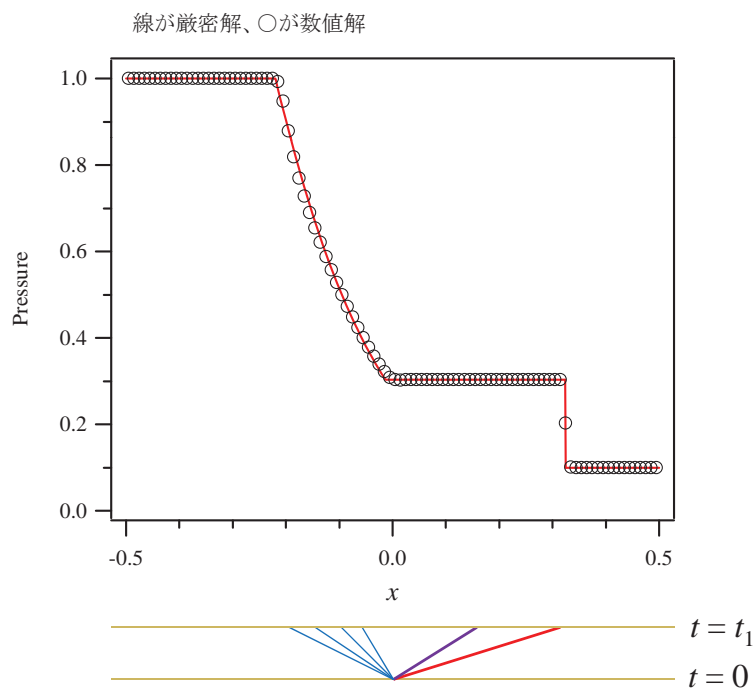
✓ 厳密解の導出については下記の文献2)を参照

- 1) Sod, G.A., "A Survey of Several Finite Difference Methods for Systems of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws", Journal of Computational Physics (1978), Vol. 27, pp.1-31.
- 2) Hirsch, C., "Numerical Computation of Internal and External Flows (Vol.2: Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows)", A Wiley-Interscience Publication (1992).

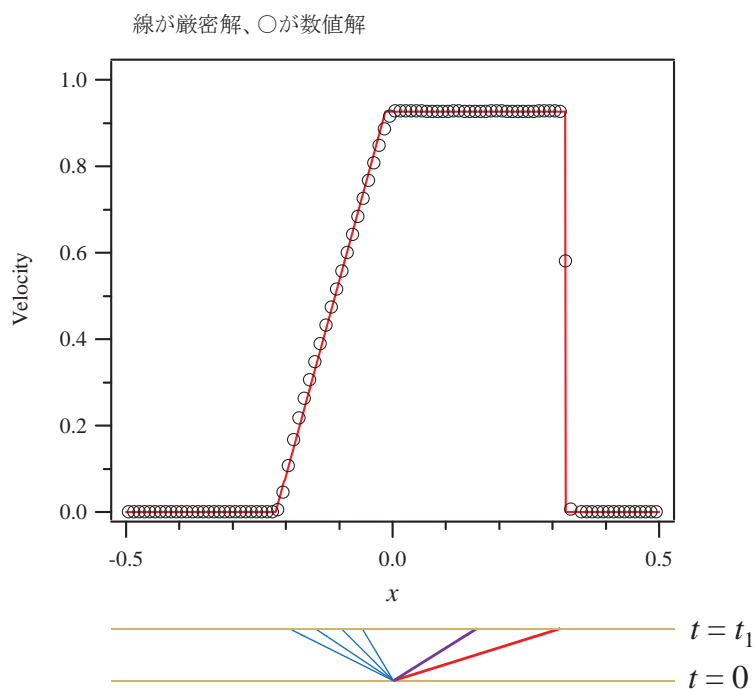
衝撃波管問題による検証例(密度分布)



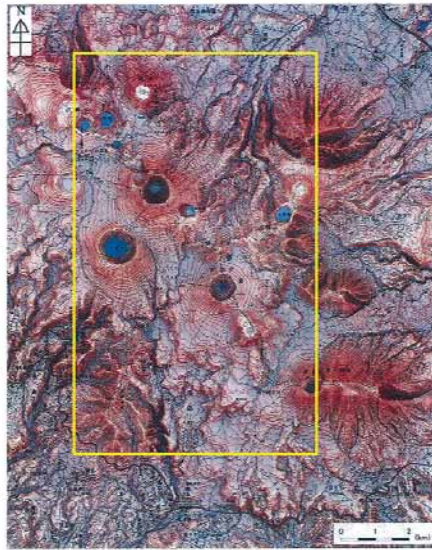
衝撃波管問題による検証例(圧力分布)



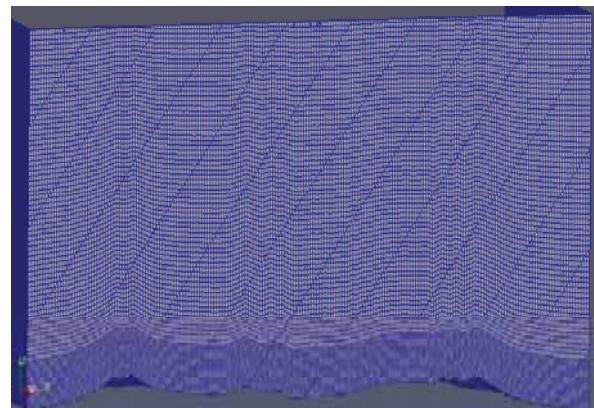
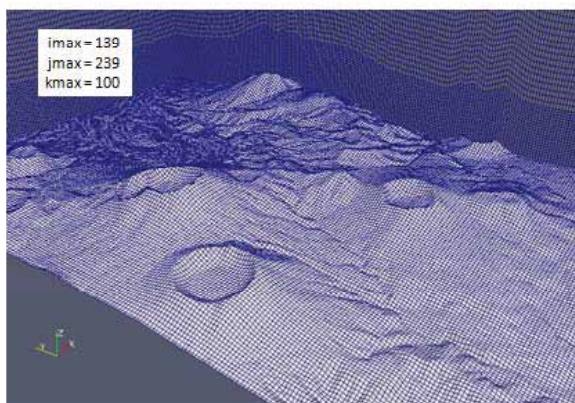
衝撃波管問題による検証例(速度分布)



3次元計算の実際



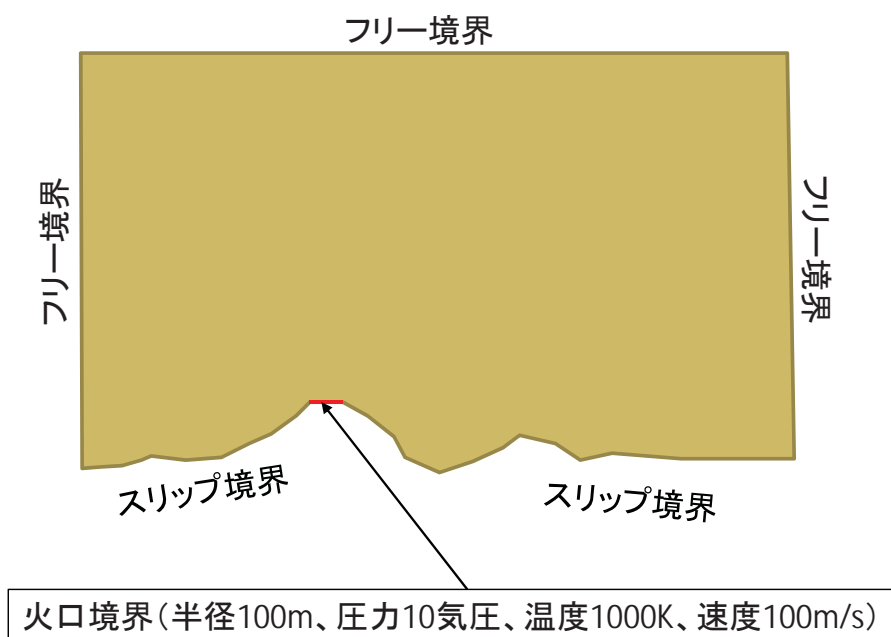
3次元計算の実際



3次元計算の実際(計算条件のまとめ)

時間進行法	風上法	空間精度	時間刻み (s)	空間解像度 (m)	格子数	タイムステップ数
R-K陽解法	AUSM系スキーム	3次精度 TVD	0.028s	($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) =(50, 50, 10)	140 × 240 × 100 = 336万要素	1000 ステップ

3次元計算の実際(境界条件)



3次元計算の実際

50m×50mの解像度での火口近傍



20m×20mの解像度での火口近傍



3次元計算の実際

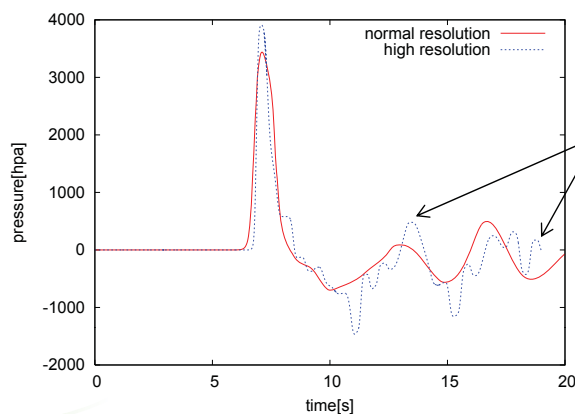


50m×50mの解像度での火口近傍



20m×20mの解像度での火口近傍

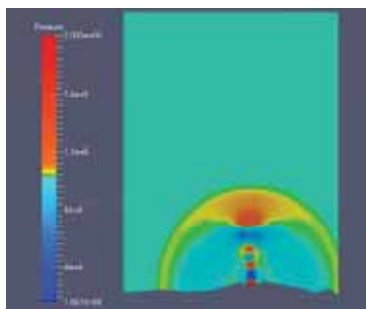
計測地点



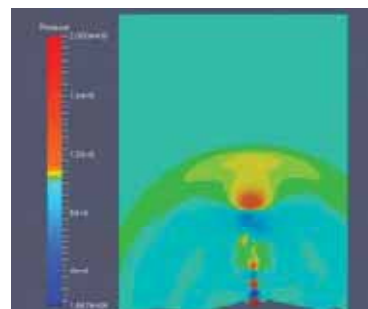
20m/340m/s ~ 0.06s
 ⇒ 0.5s程度の周期までは
 捉えることが可能

3次元計算の実際

格子サイズ： 50m×50m×50m

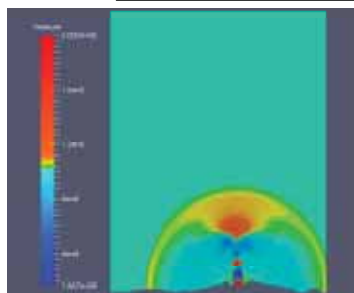


T=7.9s

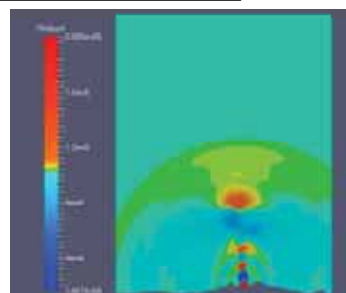


T=12.7s

格子サイズ： 20m×20m×50m

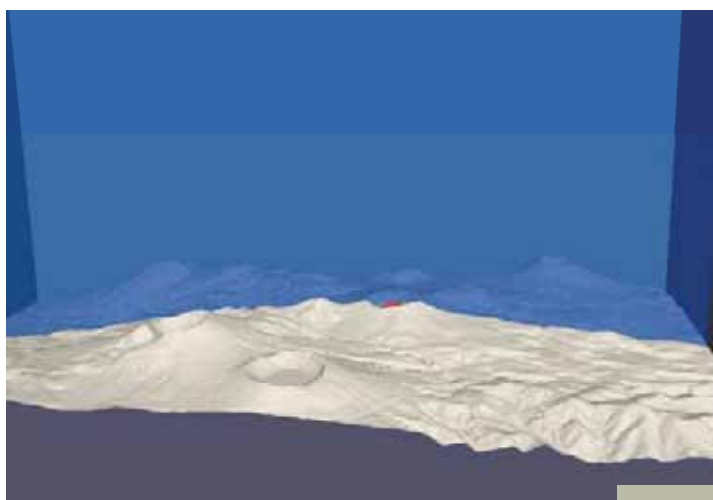


T=7.9s

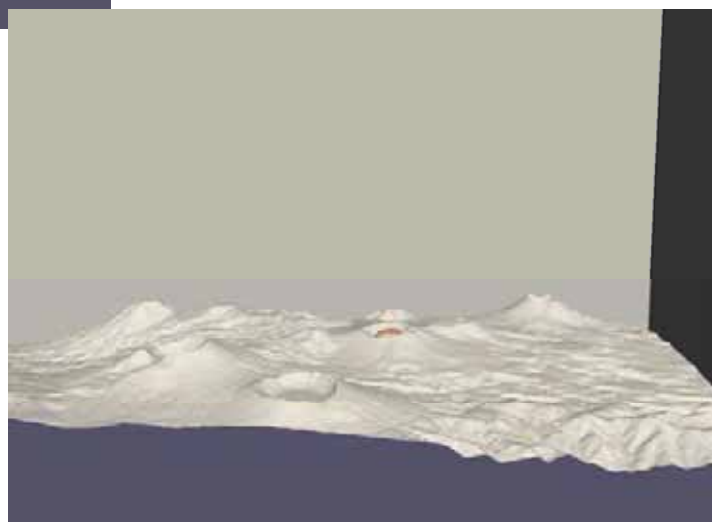


T=12.7s

圧力コンターの動画



圧力等値面の動画



まとめ

- 使用している離散化手法について概説した
- 風上法の整理と選択について述べた
- 空間の高次精度化について述べた
- 簡単な1次元検証問題の結果を示した
- 噴火による空振の数値計算についての例を示した

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



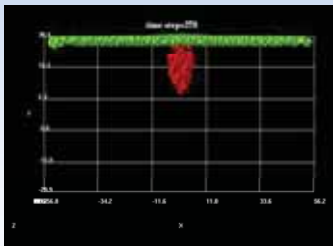
火山現象の数値シミュレーション

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

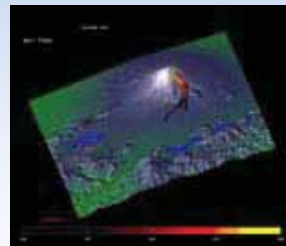
表面現象: 災害予測・評価



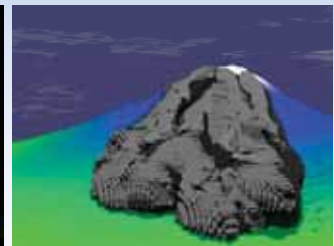
岩脈貫入



火道流モデル



溶岩流



火砕流

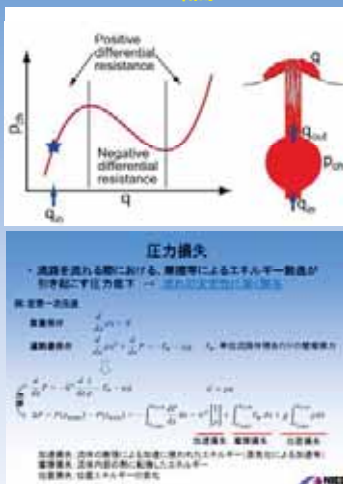
3



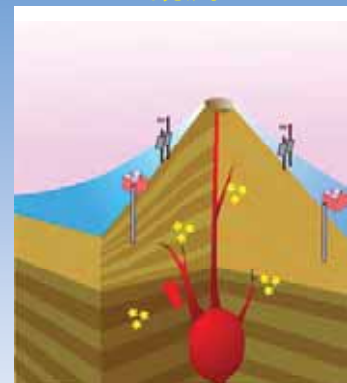
火山現象の数値シミュレーション

現象理解のためのモデルの構築: 順問題と逆問題

理論



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

4



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



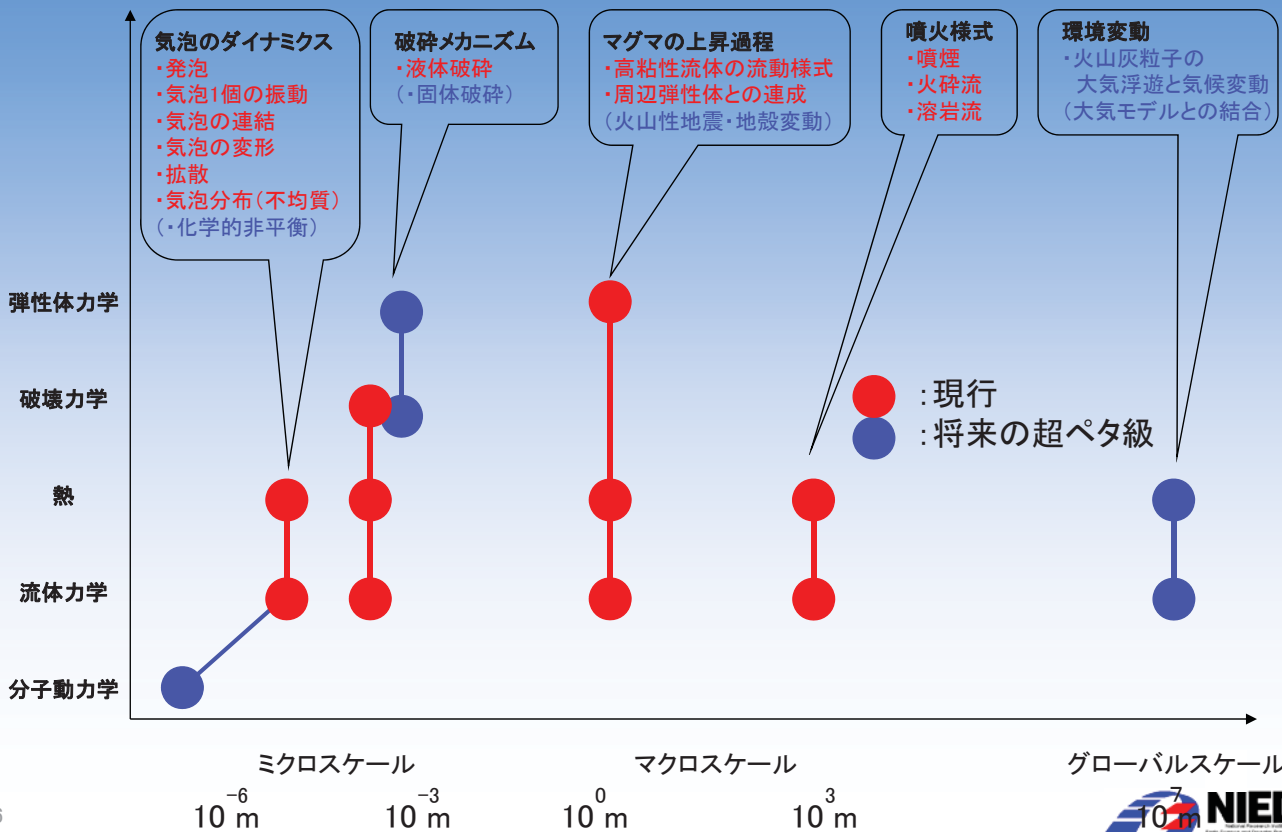
観測



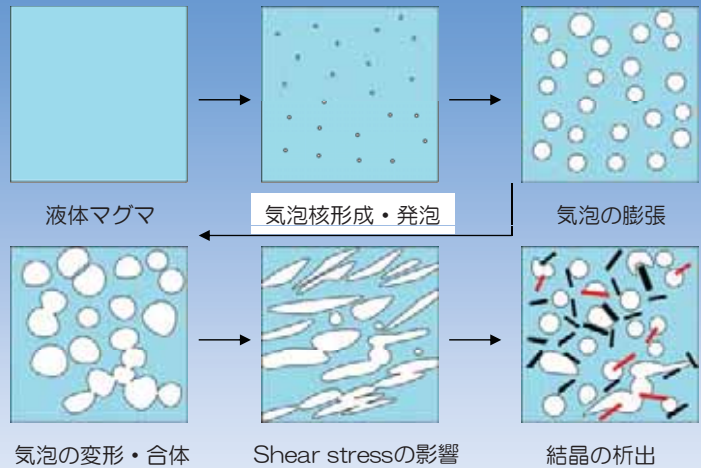
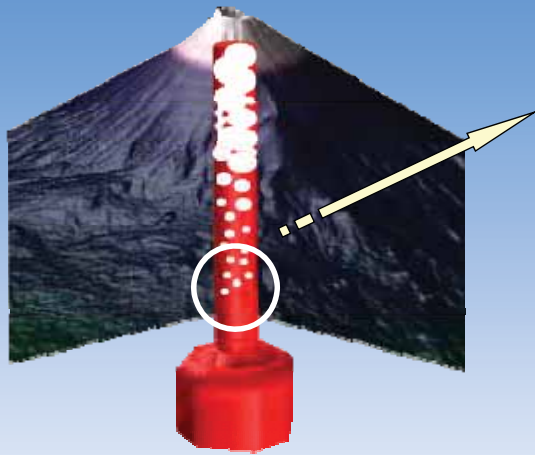
データベース



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	precr. 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	precr. 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> [2005]
FLOWFRONT	2-D, implicit description of the front behavior	precr. 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	precr. 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'Ōhō'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	precr. 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	precr. 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	precr. 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]

^a Precr., pre-eruption; eff. rate, effusion rate; ad. param., advection 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)

9



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 precr. surface; VP	prob. of the LF paths	1991–1993 Etna er.	<i>Dobran and Macedonio</i> [1992]
FLOWFRONT	MC sim.	precr. 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; precr. 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	precr. 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.)	precr. 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]

^a Prob., 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)

10

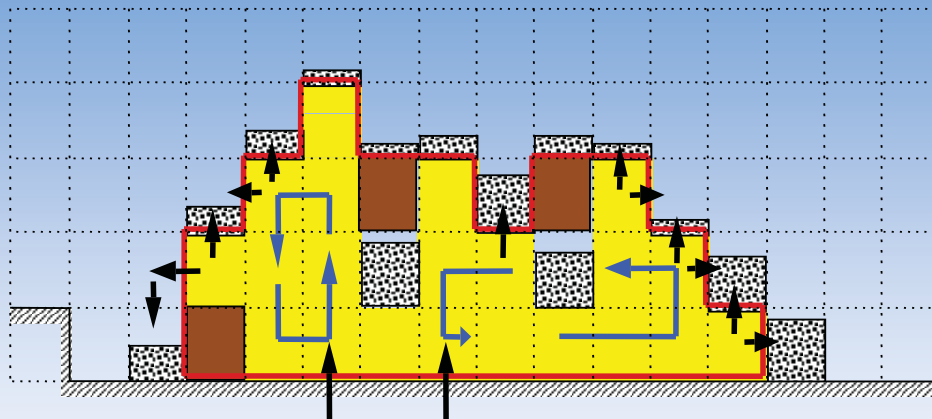


溶岩流シミュレーション：LavaSIM

(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

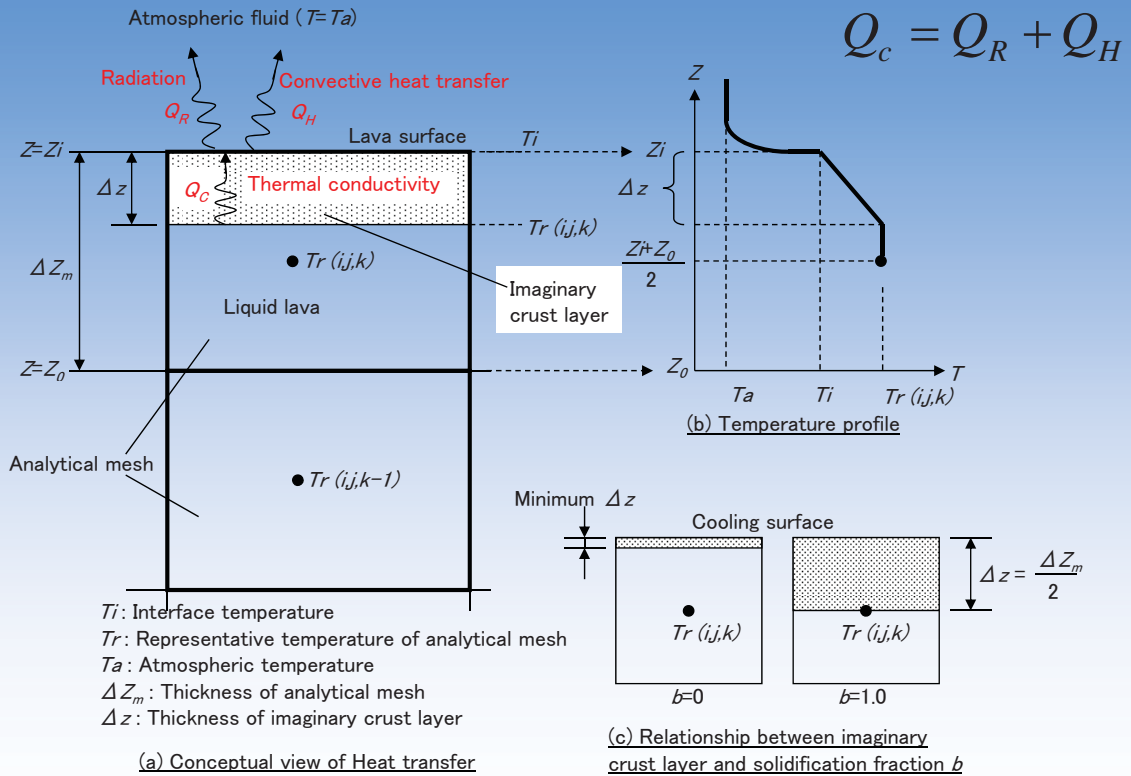
^a Heat transport and conduction are calculated in the energy conservation equation.

^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



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

13



自然対流による熱輸送

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

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

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

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

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

Vertical wall [McAdams, 1954; Bayley, 1955]

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

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

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)

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

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

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

14



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

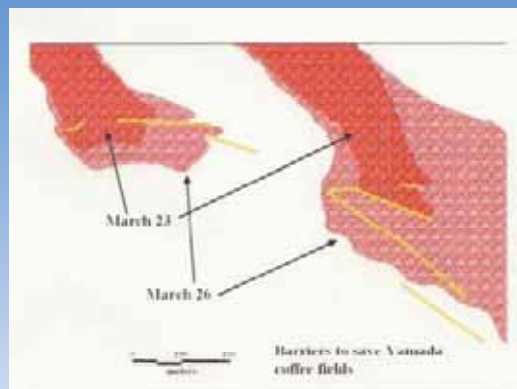


- 溶岩流制御の方法
 - 溶岩流を全部食い止める
 - 溶岩流の向きを変える
 - ・ 流路の下流に堤防をつくる（土石・岩塊・コンクリート）
 - ・ 溶岩チャンネル・溶岩堤防を破壊する：爆薬・爆撃
 - 導流溝を掘る
 - 水冷

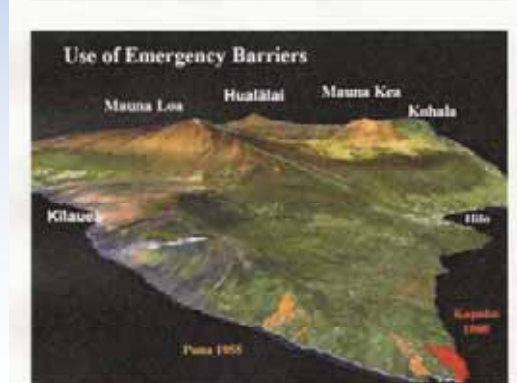
15



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

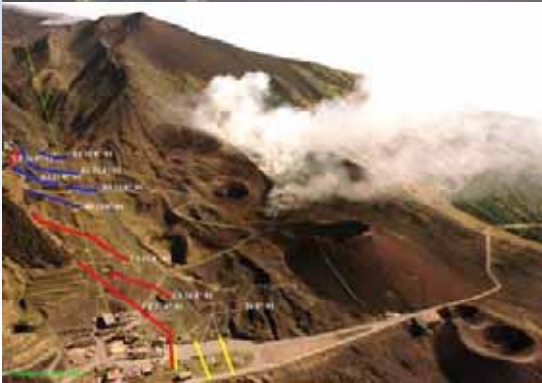
□a□a□□a□a□□□□□□



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

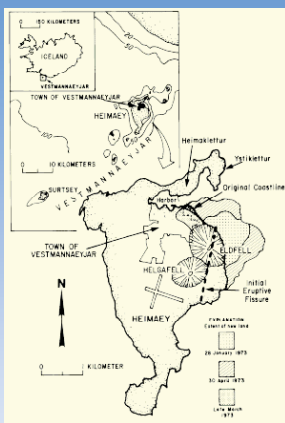


17

oltell et al



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

Stone et al

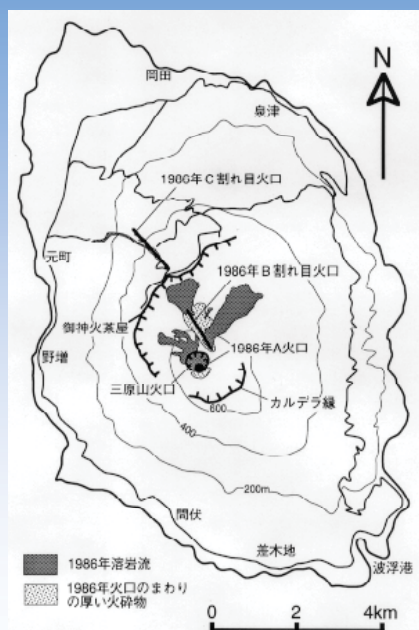


溶岩流制御の事例(4)： 1983年三宅島 1986年伊豆大島



- 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

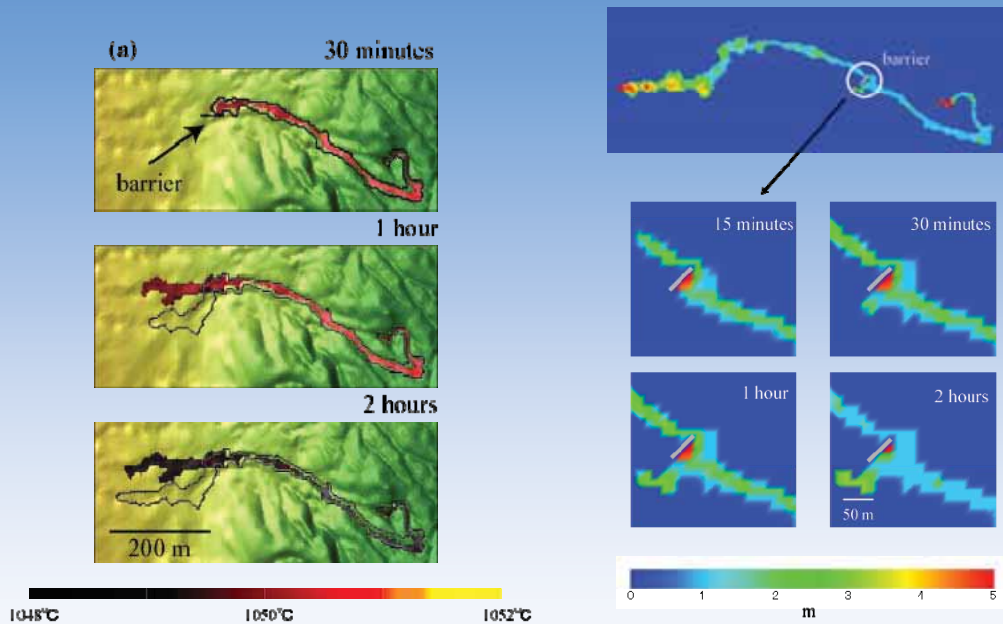


Parameters	
Density	$2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Heat capacity	$8.4 \times 10^2 \text{ J/kg K}$
Thermal conductivity	1.56 W/m K
Latent heat of fusion	$3.2 \times 10^5 \text{ J/kg}$
Solidus temperature	1000 C (1273 K)
Liquidus temperature	1100 C (1373 K)
Specific enthalpy of solidus	$1.07 \times 10^6 \text{ J/kg}$
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 kg/s (> 3600 s)
Extrusion temperature	$1.23 \times 10^6 \text{ J/kg}$
Viscosity	1051.2 C (1324.2 K)
Atmospheric temperature	$5.0 \times 10^3 \text{ Pa s}$
Ground temperature	17 C (290 K) 27 C (300 K)

21



人工堤防シミュレーション

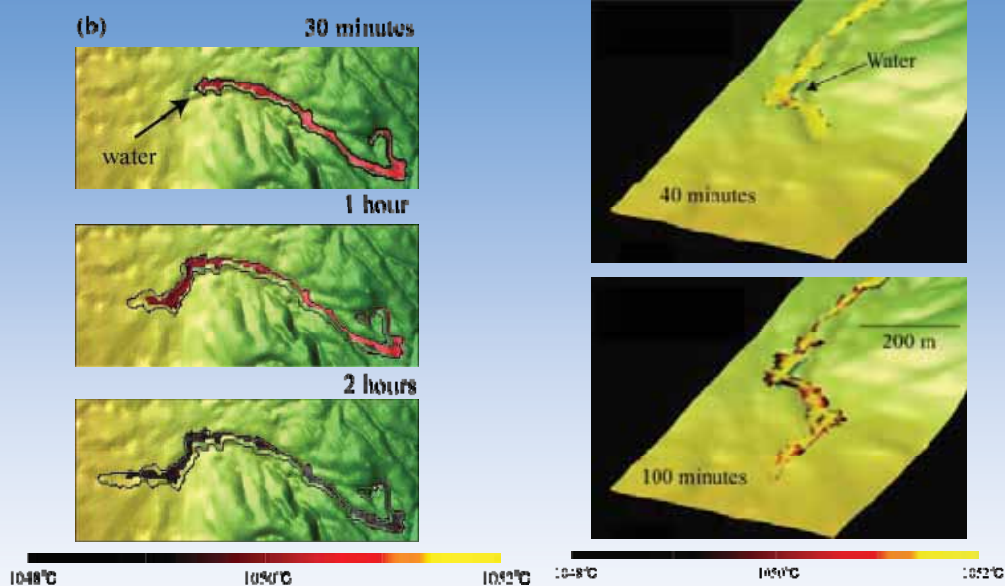


- 130m x 20m x 20m の堤防を設置
- 流れる方向の制御に効果あり
- 流れる方向に垂直な場合、一時的にはダム効果があるがオーバーフローする

22



注水冷却シミュレーション

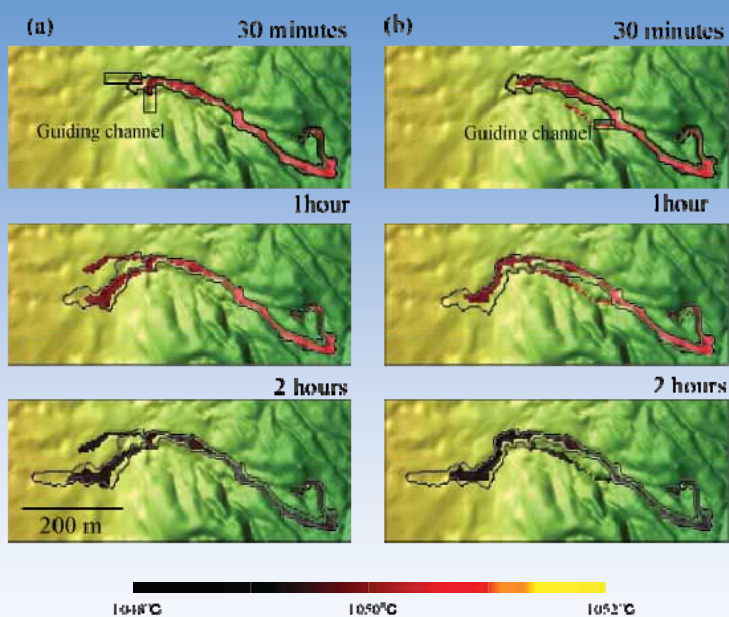


- 130m x 20m x 20m の水のプールを設置
- 流下域の面積軽減に効果あり
- 実際の溶岩→表面のクラックによりさらに冷却可能面積増

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

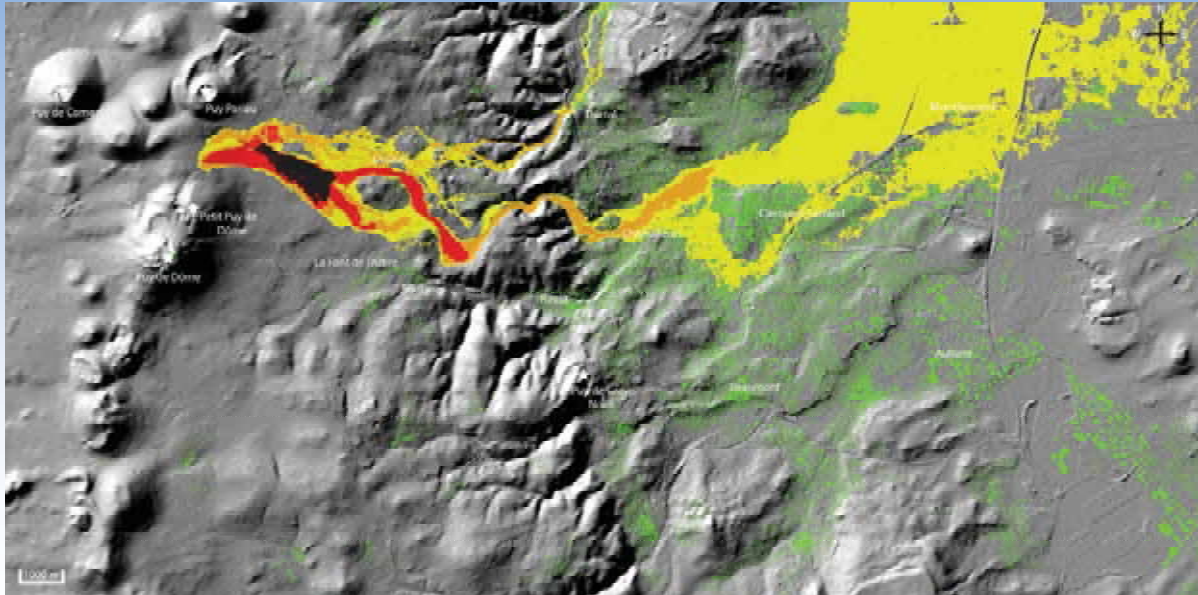


溶岩流シミュレーションのベンチマーク



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



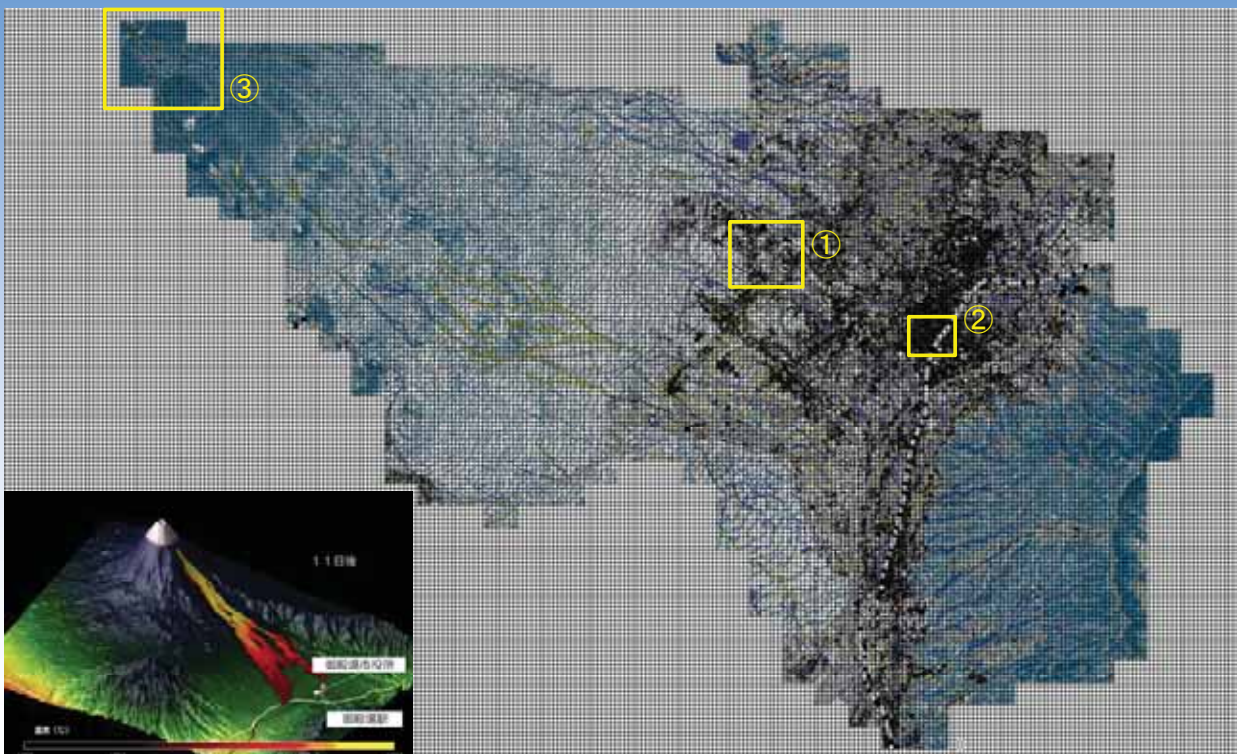
25



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

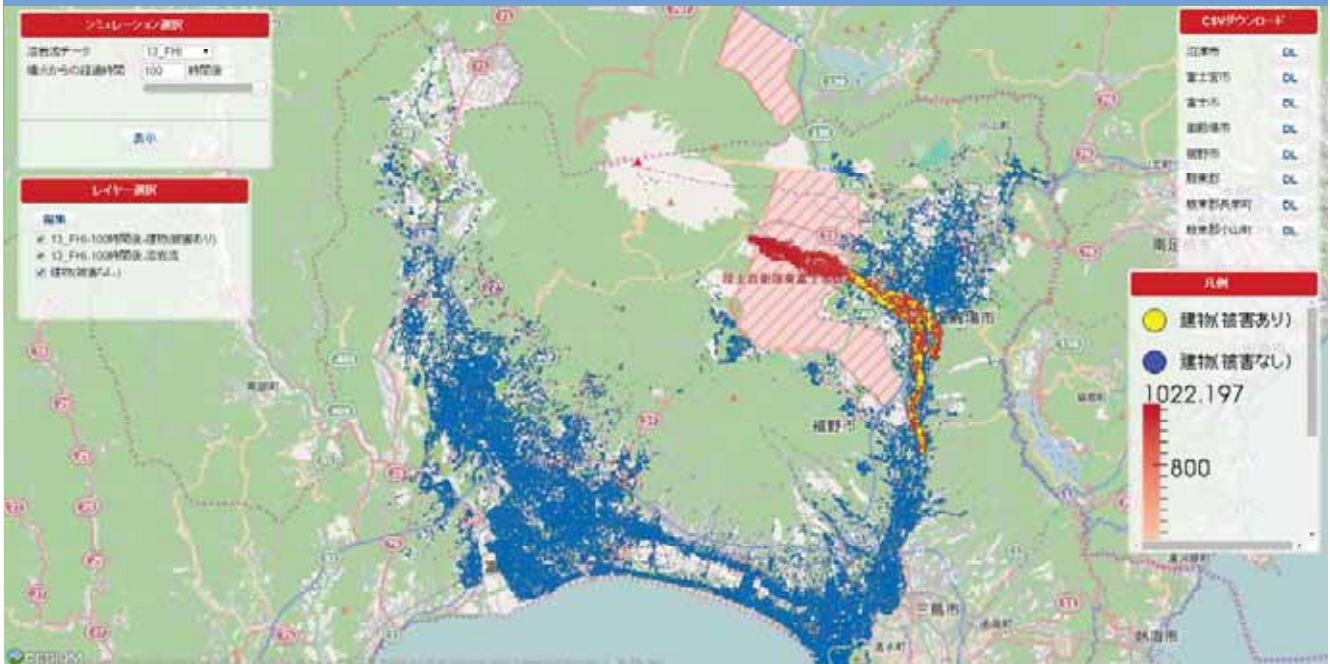


26



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

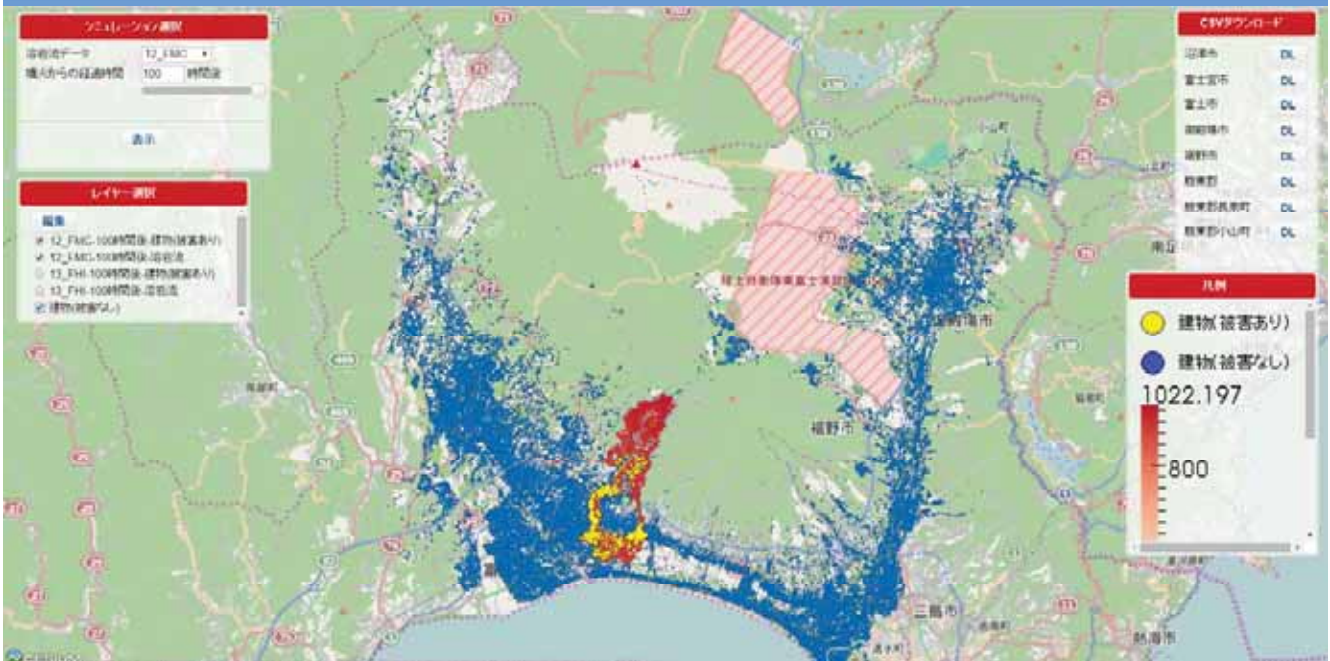


防災科研・東大情報科学研究センター・日立製作所



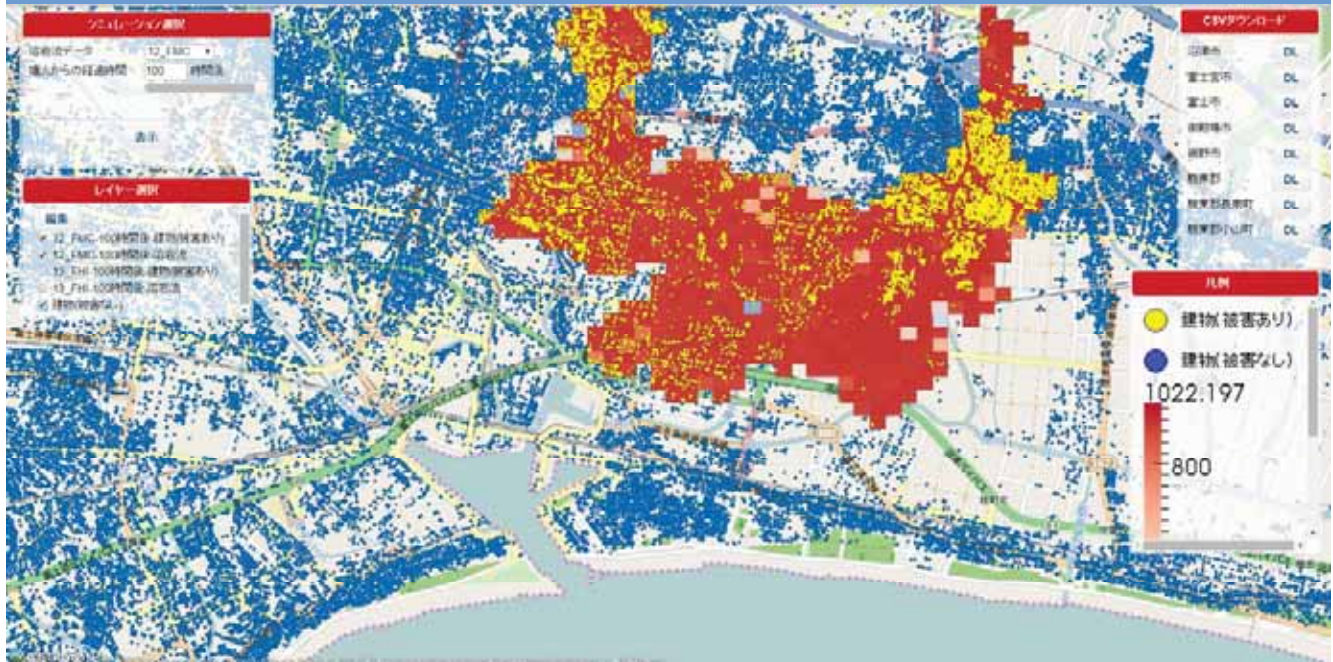
溶岩流シミュレーション 暴露度・脆弱性評価

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)

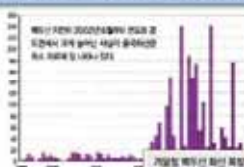
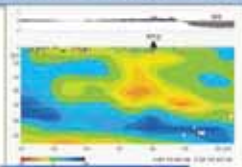


噴煙シミュレーションと火山防災行政への適用: 韓国の例

© VDPKC, Korea

Background & Purposes

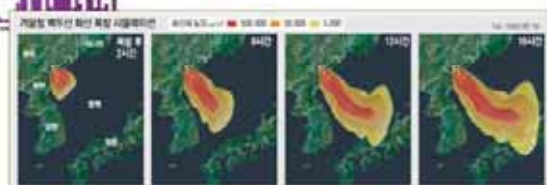
- Since 2002, volcanic earthquakes have been observed **10 to 15 times** each month in Mt. Baekdu
- Mt. Baekdu currently is classified as '**a high-risk volcano**'
- Small-scale volcanic eruptions do not cause much damage. However, with a large volcanic eruption such as in 969 happening again, then we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



<magma movement and earthquake events>



<Mt. Baekdu and Volcanic Eruption>



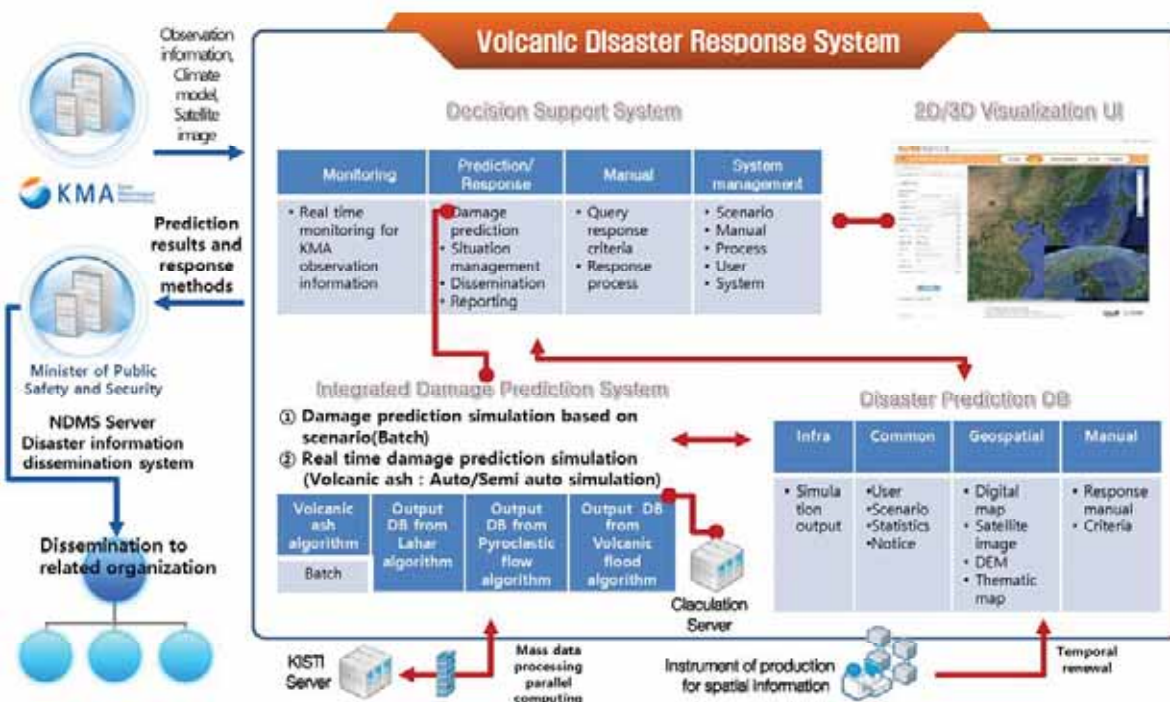
< NIDP simulation Mt. Baekdu >

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

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

© VDP RC, Korea

Key Process Designs



31

3

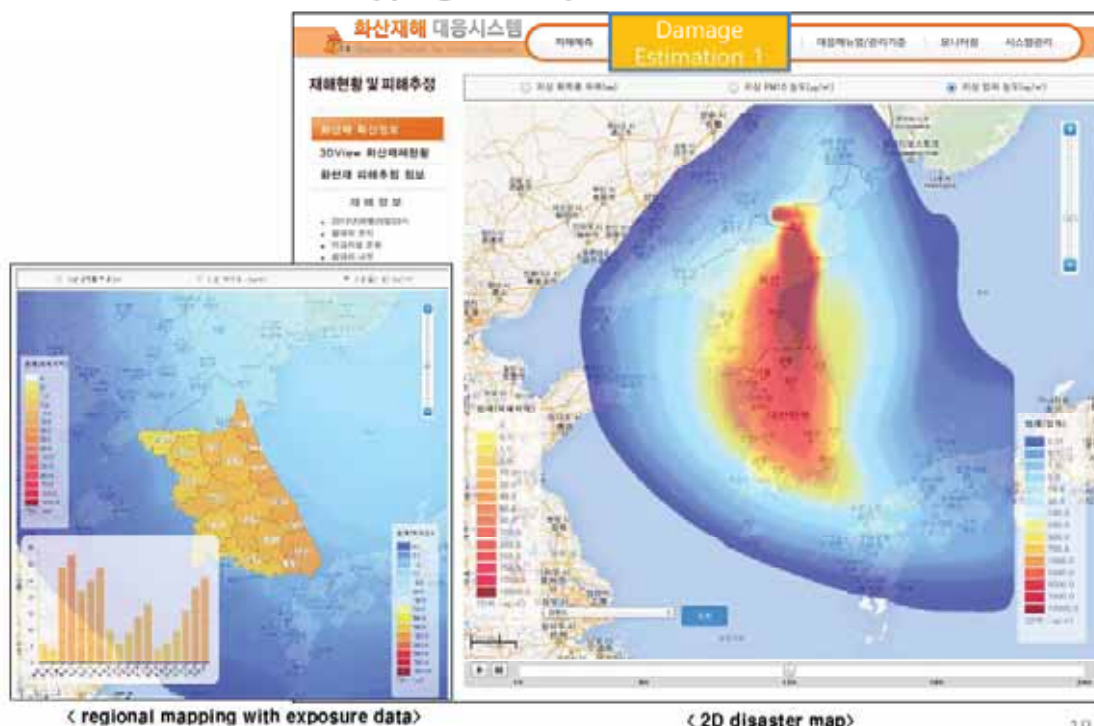


噴煙シミュレーションと火山防災行政への適用: 韓国の例

© VDP RC, Korea

Results (window capture)

Ash Diffusion and Mapping with exposures



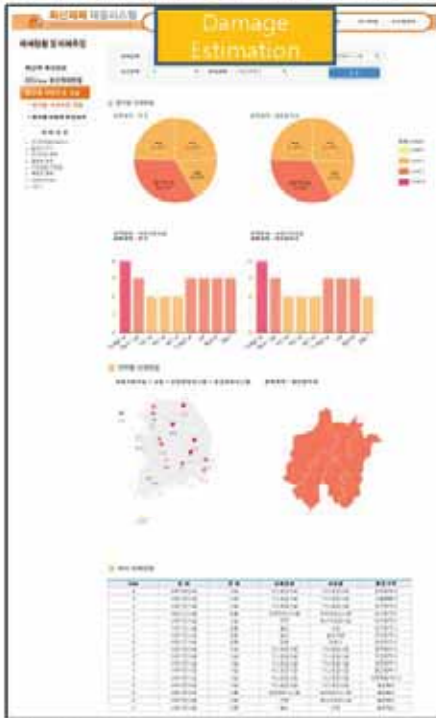
32

19

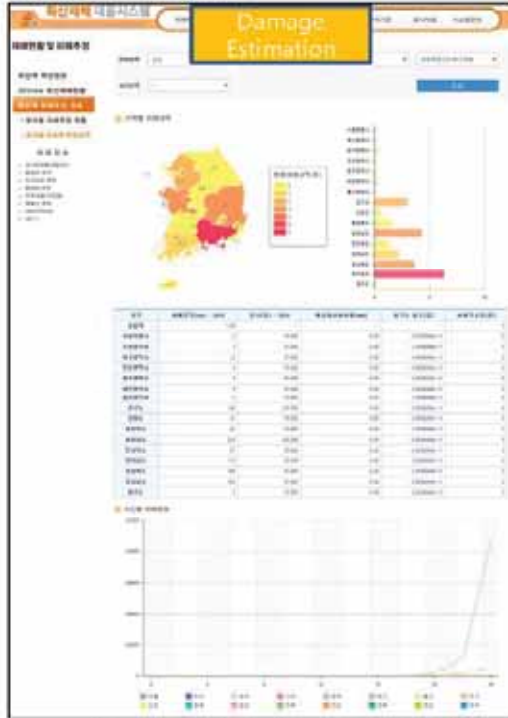


Results (window capture)

Ash damage estimation results: graph and table



< estimation and calculation in each domain >



< loss amount estimation in each domain >

33

20



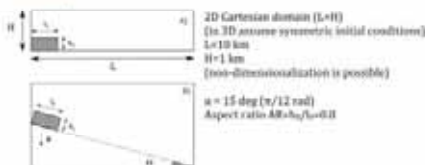
火砕流ベンチマーク

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 "largescale" 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 ($A \times h_0 \times l_0$)	200000 m ³
Volumetric particle concentration (Φ_0)	5×10^{-4}
Solid bulk density	1 kg/m ³
Total mass (M)	2×10^5 kg/m
Gravity acceleration	-9.81 m/s ²
Grain size (spherical)	125 μ m
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 2×10^7 kg or a DRE volume of 8×10^3 m³]

Concentrated current

Volume ($A \times h_0 \times l_0$)	200000 m ³
Volumetric particle concentration (Φ_0)	5×10^{-1}
Solid bulk density	1000 kg/m ³
Total mass (M)	2×10^8 kg/m
Gravity acceleration	-9.81 m/s ²
Grain size (spherical)	125 μ m
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

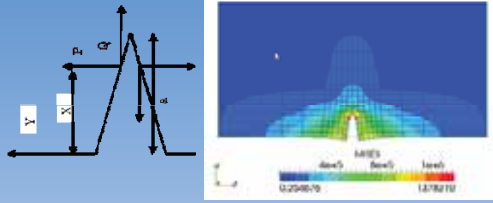
Some references

- 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.
- Ishimino, 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

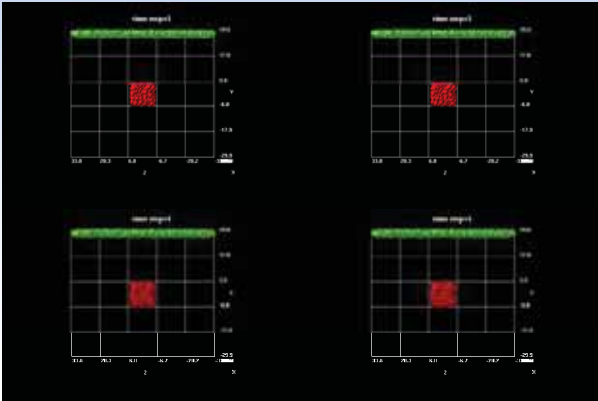


ダイクの動的過程シミュレーション (ミクロ)

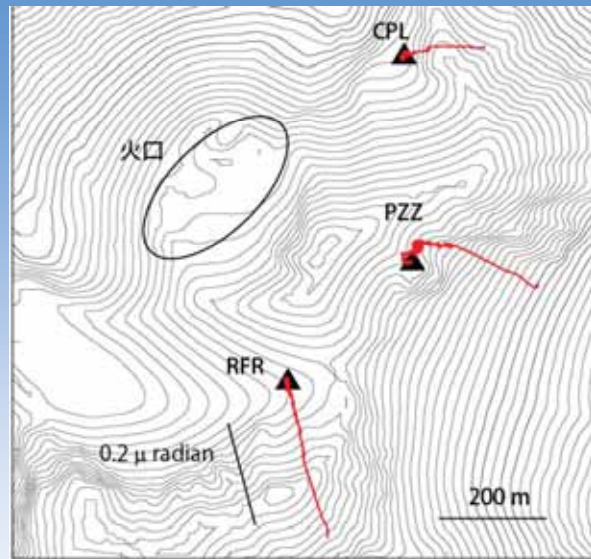


亀裂内増圧に伴う腐食クラック先端部の増圧・破壊を□□により計算

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



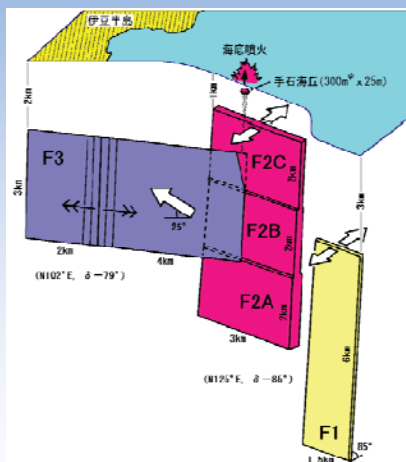
イタリア・ストロンボリ火山で観測されたストロンボリ式噴火に先行する傾斜変動の軌跡。観測点を噴火5分前とし、爆破し地震発生までをプロットしている。噴火直前に傾斜変動の方向が変化している。



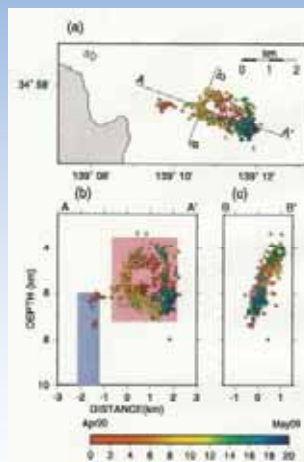
ダイクの動的過程シミュレーション(マクロ)

Recent high-density seismic and ground deformation observation

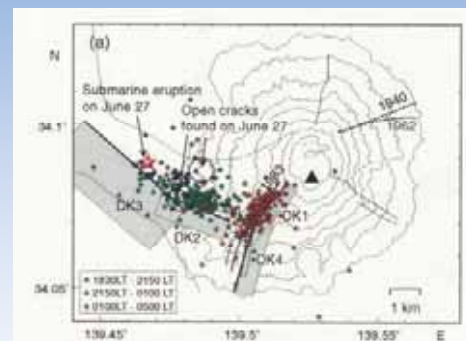
Detection of precise subsurface magma migrations



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



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

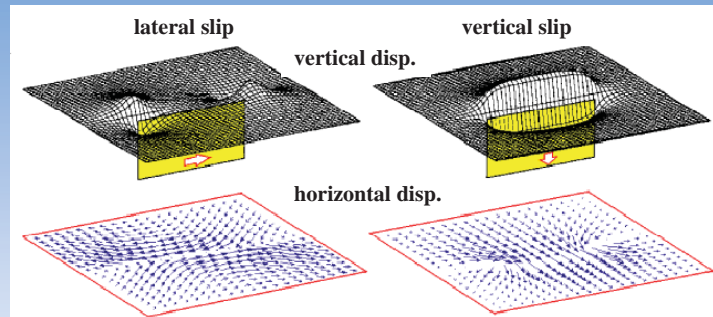
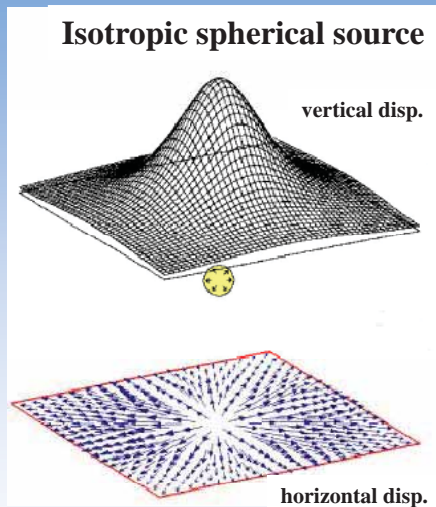


2000 Miyakejima volcano (Ueda et al., 2006)



Standard Crustal deformation model

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

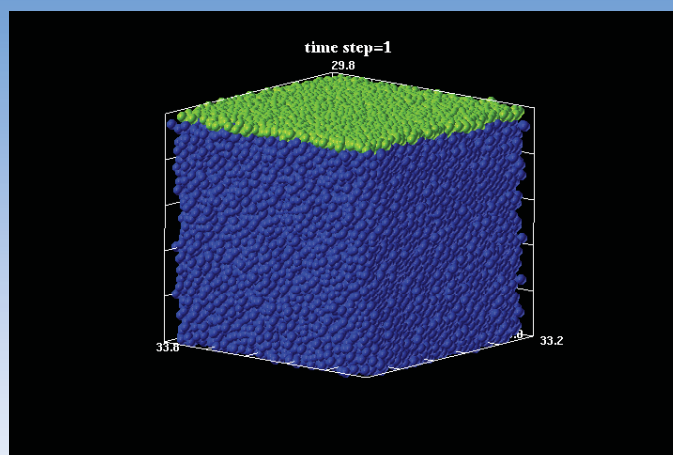


Applicable condition

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

39

DEM(Discrete Element Method)

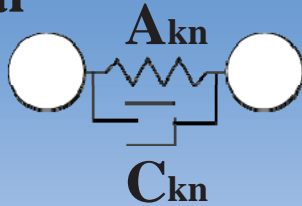


- Continuous media are modeled by particles (discrete elements) connected by visco-elastic springs

40

Formulation of stress & fracture

normal

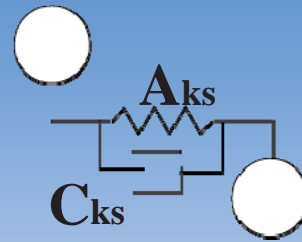


Spring coefficient: A_{kn}
Damping coefficient: C_{kn}

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



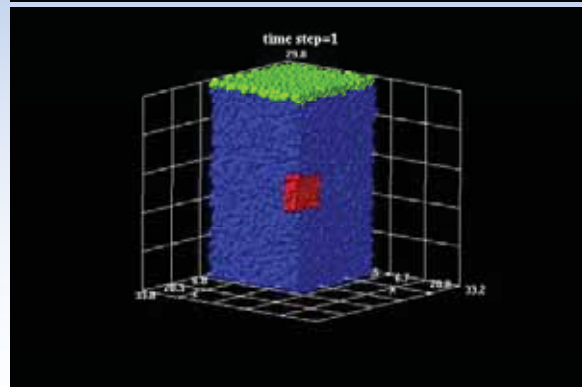
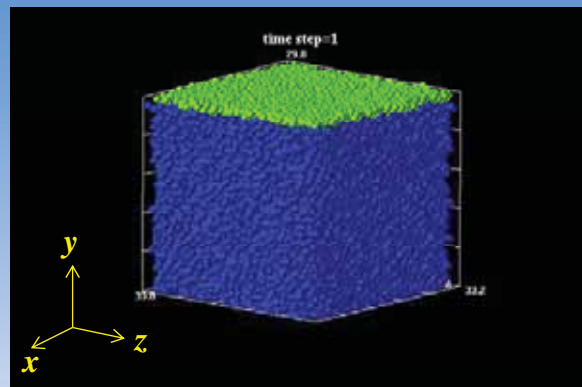
Numerical calculation procedures

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

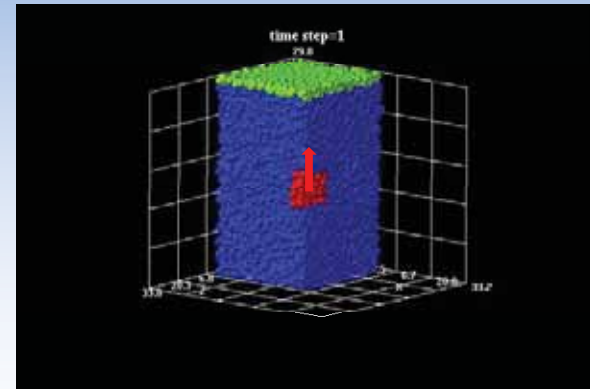
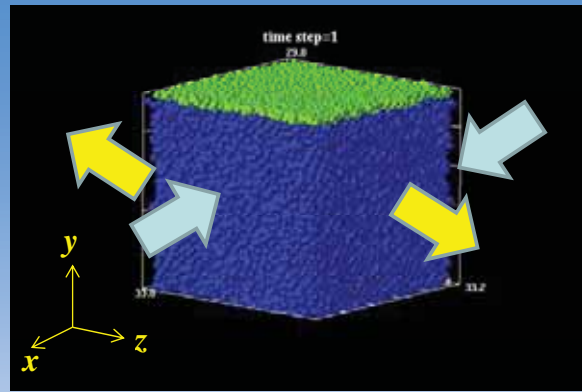
$$\sigma_{zz} = -1.0E6 \text{ Pa}$$

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

Assign Initial Conditions

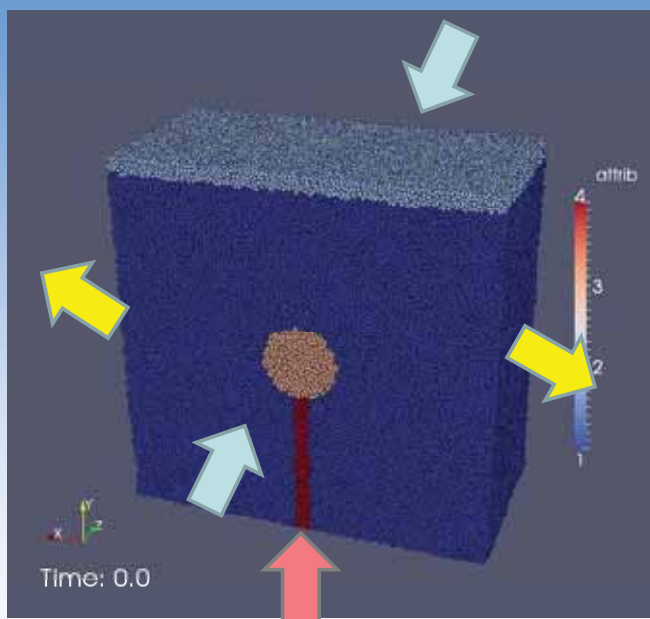
- Set initial velocity / excess pressure for magma particles

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

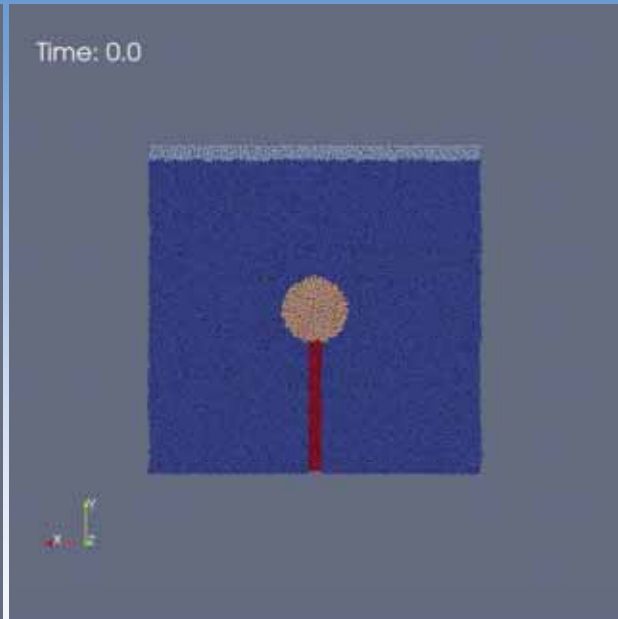
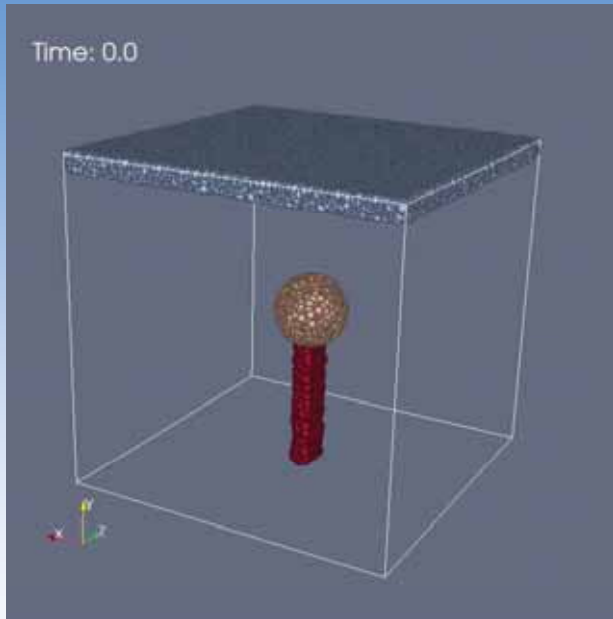
ΔP at the bottom of
magma dike

Boundary conditions

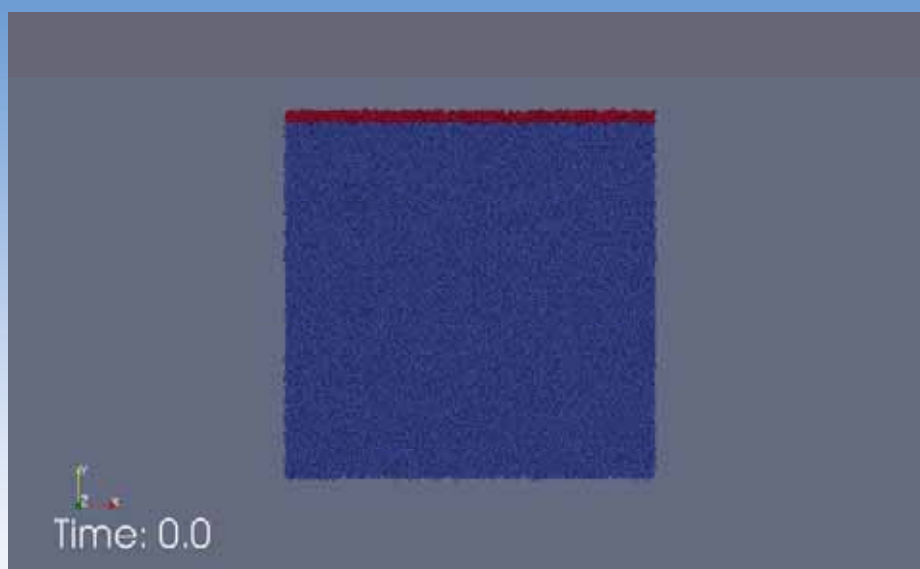
$$\sigma_{xx} = 1.0E8 \text{ Pa} \quad \sigma_{zz} = -1.0E8 \text{ Pa}$$

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

44

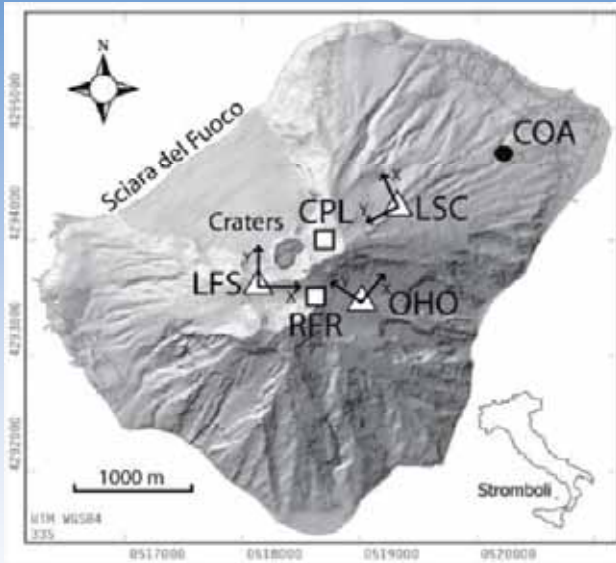


Gravity packing



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)

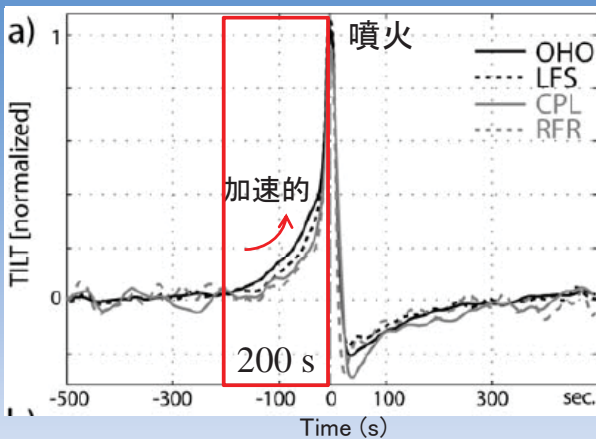
Pinacle 5000T(サンプリング周期 1 Hz)

	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

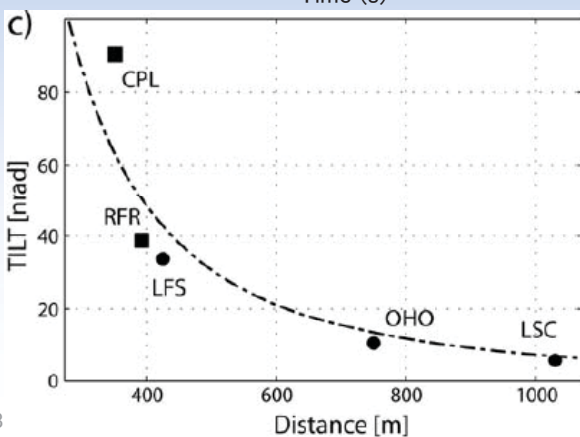
(Genco and Ripepe, 2010)



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)

計算条件

節点数:9650, 要素数:16952

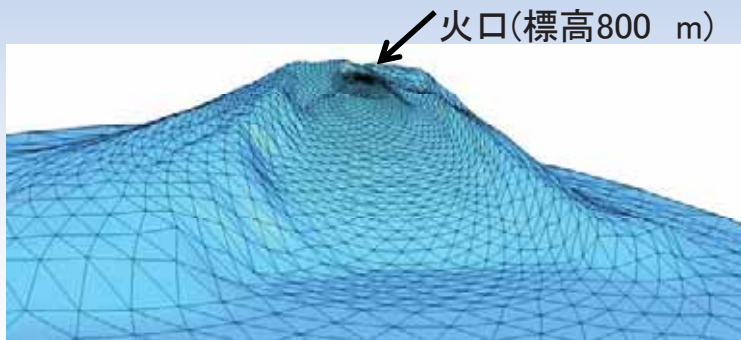
精度:一次線形要素

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

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

50



観測データの時間変化との比較

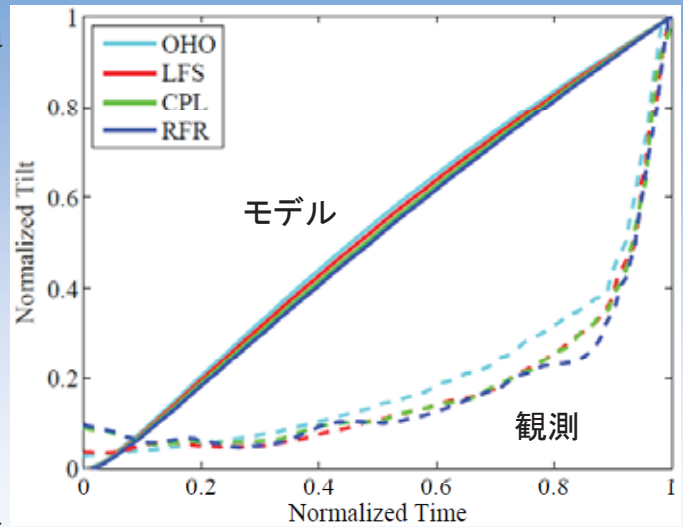
VRの比較から決まるパラメータ

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

51



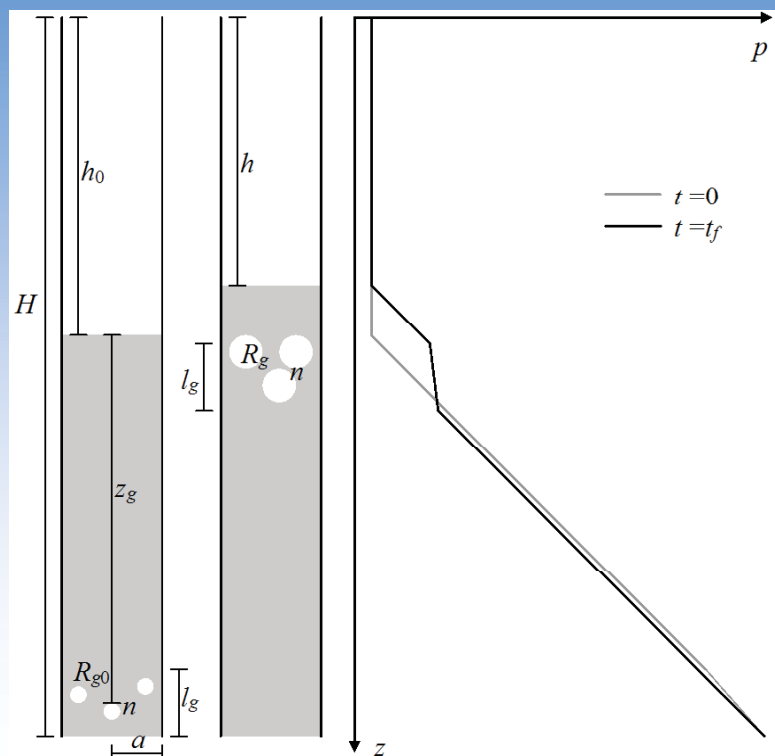
気泡上昇による火道内の圧力変化

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 NIED

52

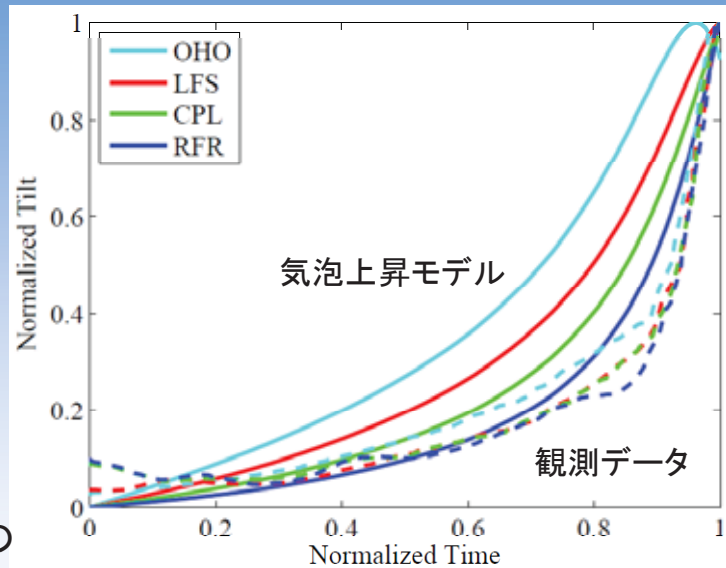
観測データの時間変化との比較

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

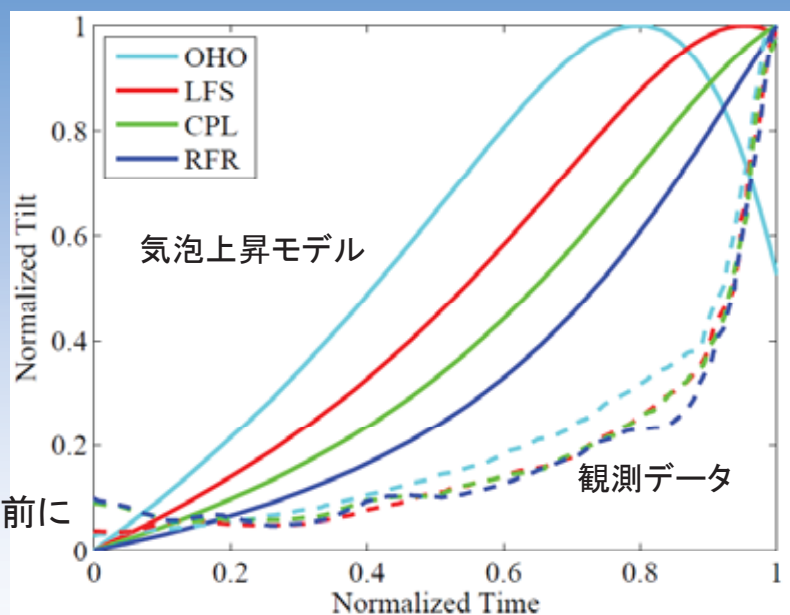
観測データの時間変化との比較(2)

気泡上昇モデルのパラメータ

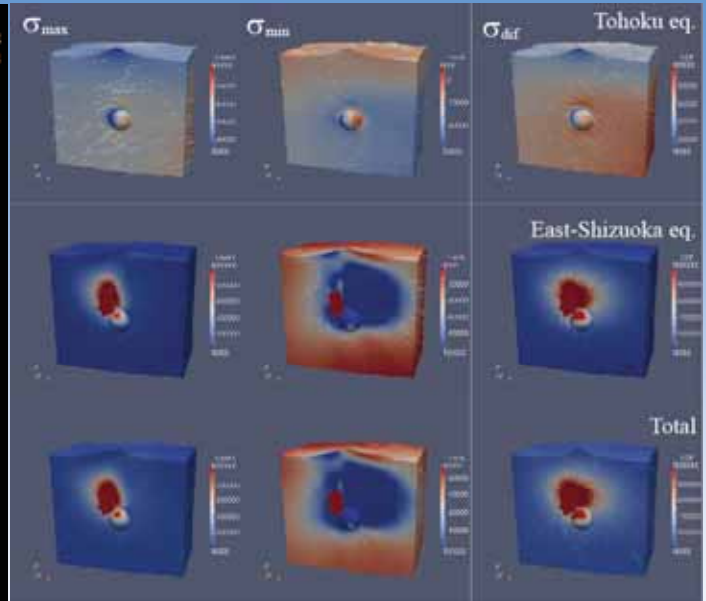
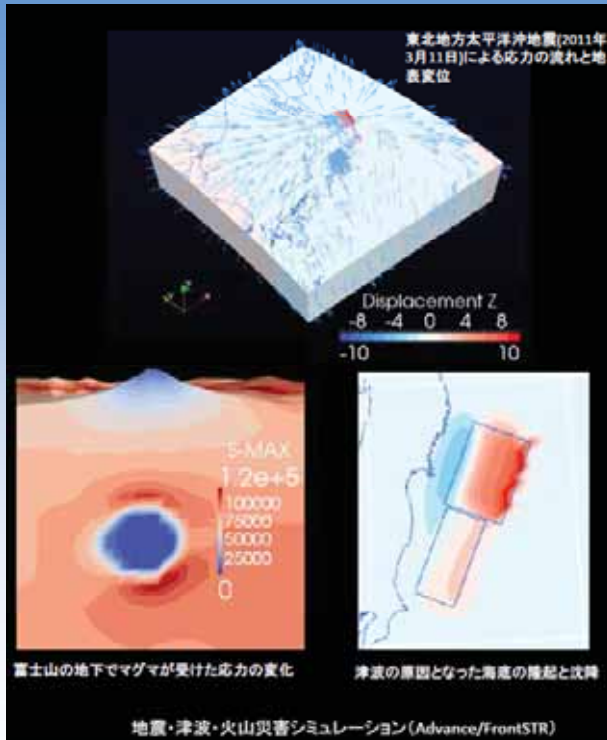
火道の長さ: $H=425$ m,
 マグマの初期深さ: $h_0=170$ m

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



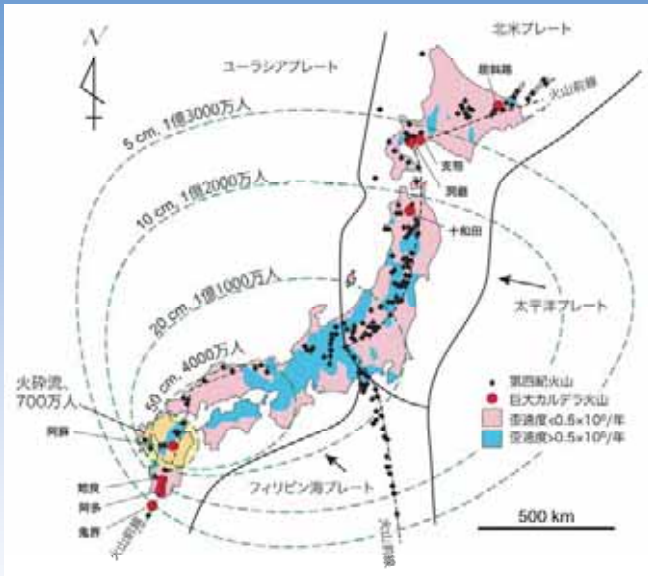
東北の地震: $10^{4-5} Pa$
 静岡県東部地震: $10^{5-6} Pa$

課題1

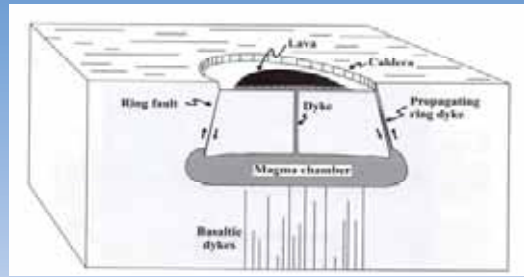
- 現状: 要素技術の開発に留まっている
- 検証をどうするか?
 - 理論モデルと観測データのギャップ
 - 理論モデル: 限定的(例: 弾性体力学のみ)
 - 熱・電磁気・地球化学etc.を含めた理論モデルの構築
 - 多項目観測による検証
- 長期的評価の困難性
 - 月・年・更に長期現象(巨大カルデラ噴火など) → 観測の蓄積
- 他分野との融合
 - (例) 熱流体問題: 機械工学・原子力工学・材料工学
- 計算科学リソース
 - マルチスケール・マルチフィジックス
- データ同化
 - 地表面象: 溶岩流・噴煙等 → 可能性有 火砕流 → 困難
 - 地下現象: 火山性地震・地殻変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

課題2

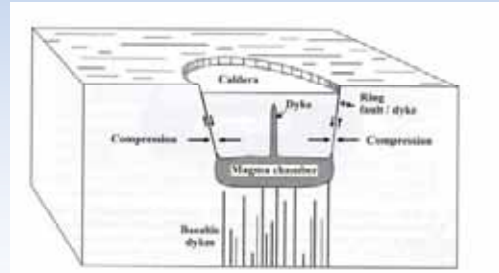
○超巨大噴火(カルデラ形成)の評価



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



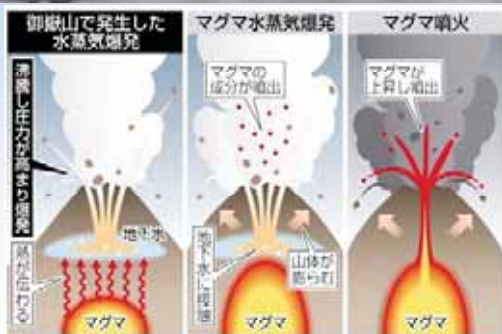
inward-dipping

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

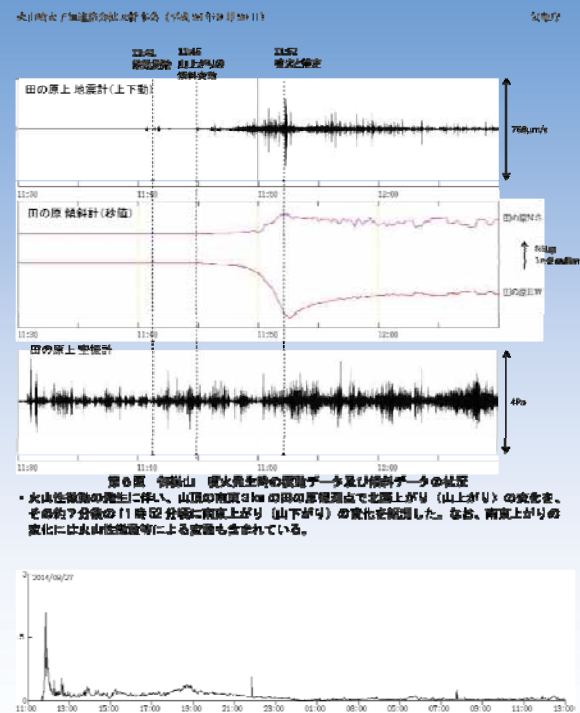
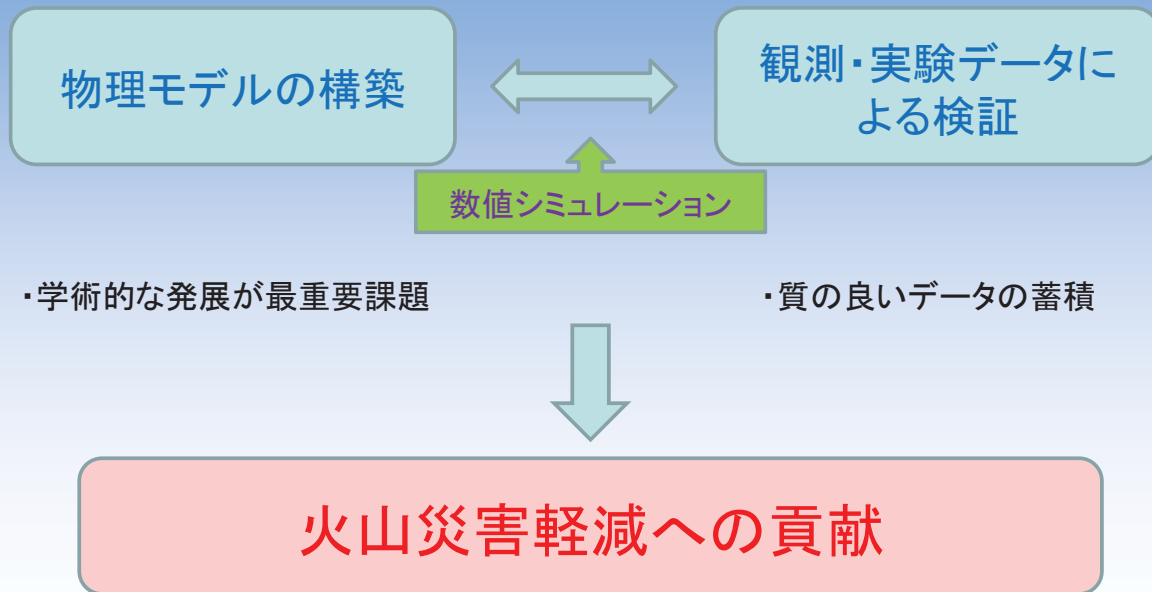


図7 御嶽山 田の原上観測点の地面計上下動の1分平均値の時間系列 (2014年9月27日11時00分~28日13時00分)



まとめ

□ 火山現象の数値シミュレーション





警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。