

防災シミュレーションセミナー

2013年4月25日(木)開催
アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

本日のプログラム

- 13:30~13:40
「アドバンスソフト株式会社のご紹介」主催者あいさつ
- 13:40~14:05
自然災害シミュレーションの現状と課題
- 14:05~14:30
有限要素法を用いた地震動の予測:MPC断層解析の利点
- 14:30~14:55
断層すべりによる地殻変動の解析:プレート間地震への応用事例
- 14:55~15:05
休憩
- 15:05~15:30
3次元二相流流体解析に基づく噴火発生過程のシミュレーション
- 15:30~16:10
降下火山灰影響評価のための噴煙柱の数値流体解析
- 16:10~16:30
総合討論



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

アドバンスソフト株式会社のご紹介

防災シミュレーションセミナー

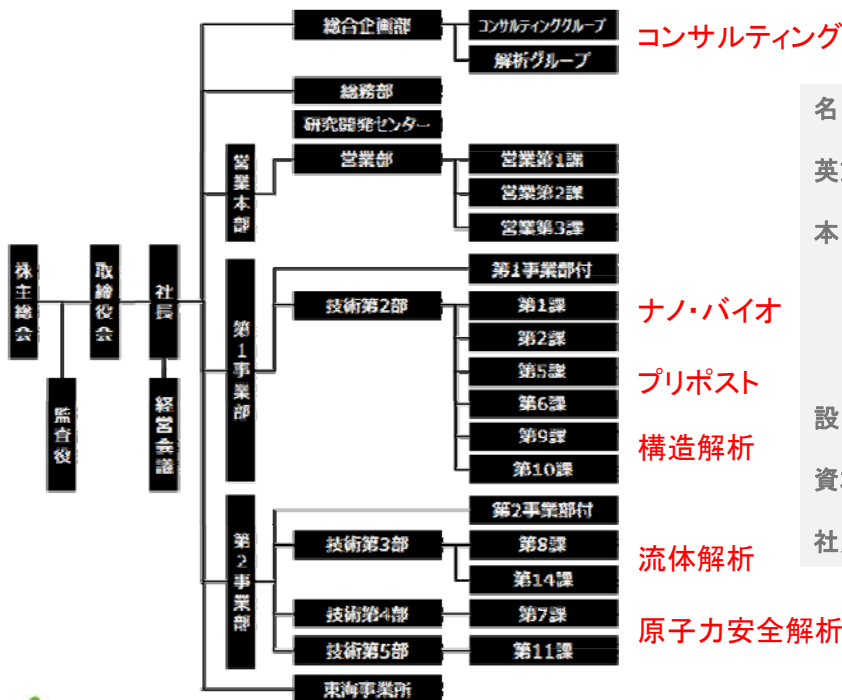
2013年4月25日(木)開催

取締役副社長 松原 聖



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

会社概要

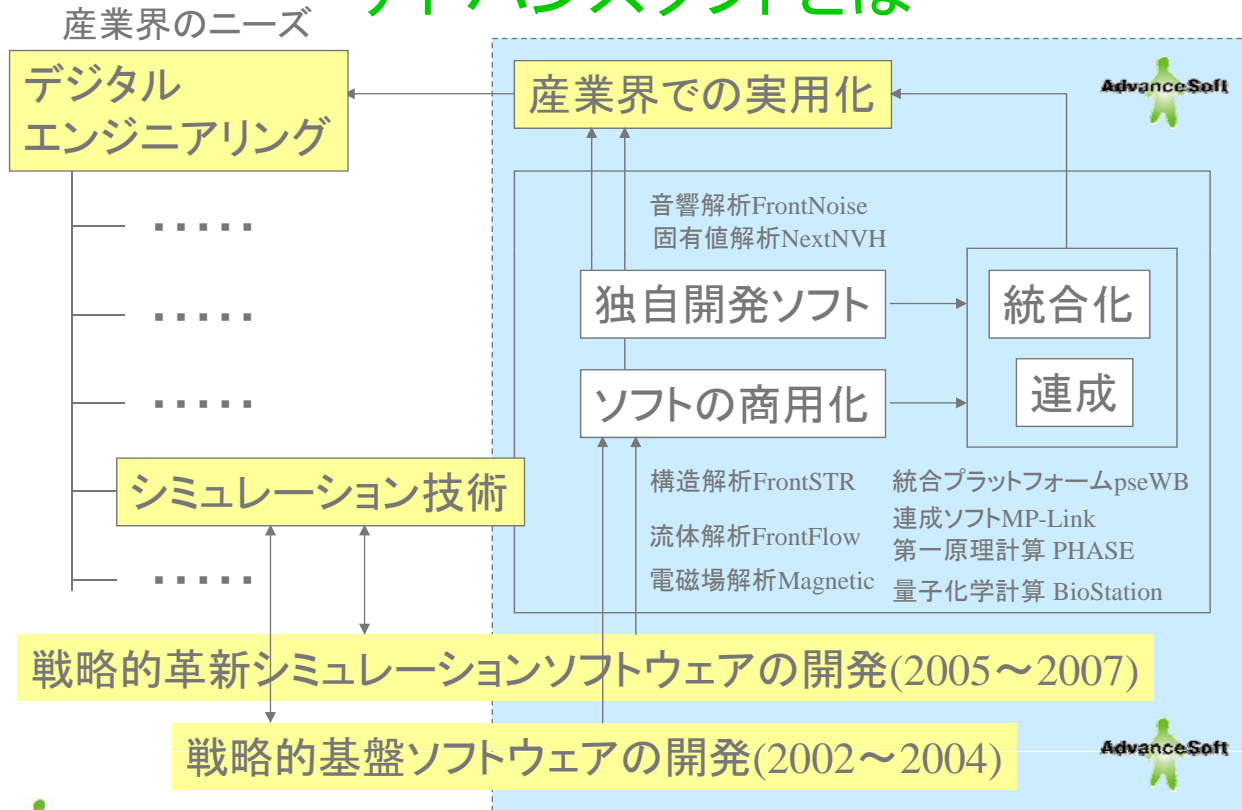


名称 アドバンスソフト株式会社
 英文名 AdvanceSoft Corporation
 本社 〒107-0052
 東京都港区赤坂1丁目9番20号
 第16興和ビル南館7階
 TEL: 03-5570-1680
 FAX: 03-5570-1684
 設立 2002年(平成14年)4月24日
 資本金 3,724万円
 社員数 67名(2013年4月1日現在)

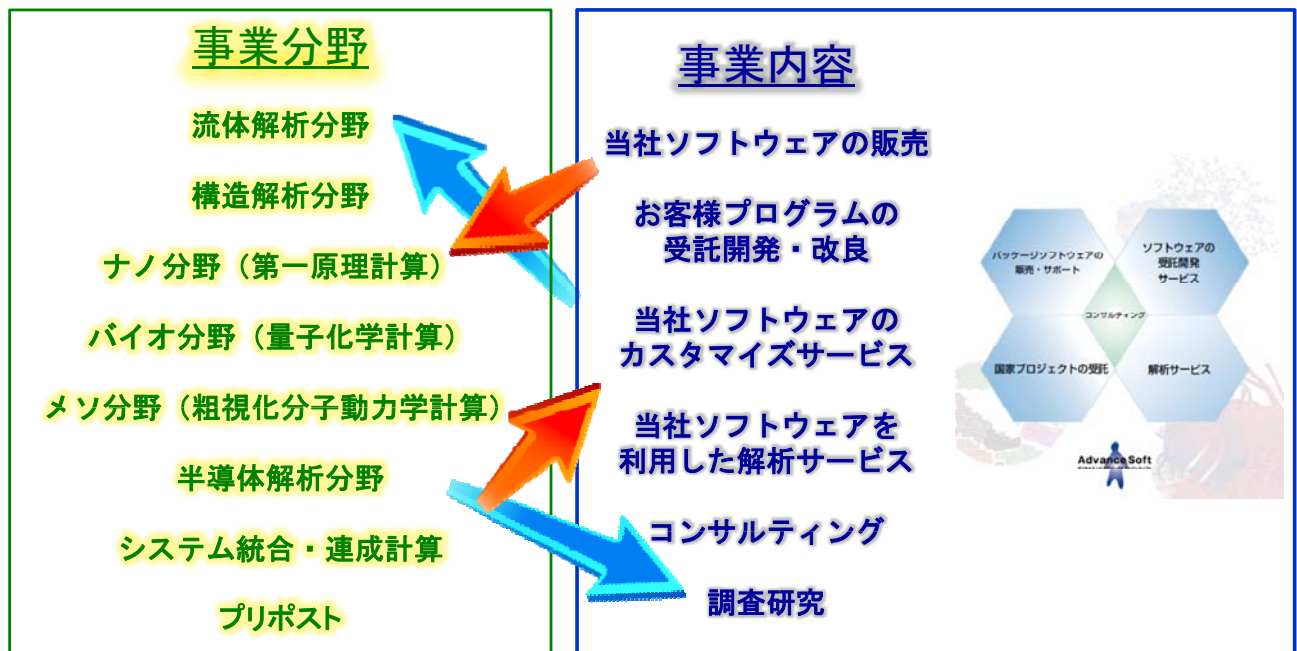


Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

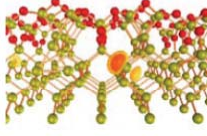
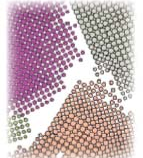
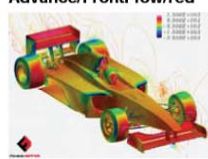
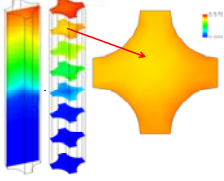
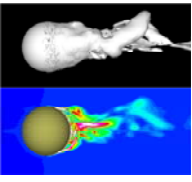
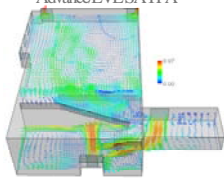
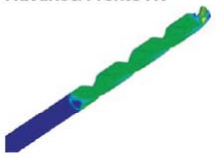

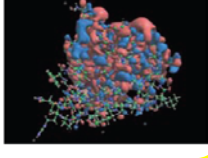
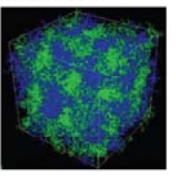
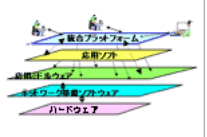
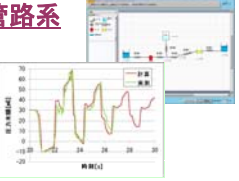
アドバンスソフトとは



事業分野と事業内容



取り扱いパッケージ一覧

<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p>  <p>Advance/TFLAGS</p> 	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red</p>  <p>Advance/FrontFlow/MP</p>  <p>Advance/FrontFlow/FOCUS</p>  <p>Advance/EVESAYFA</p> 	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p> 
<p>バイオ</p> <p>Advance/BioStation</p>  <p>Advance/ProteinDF</p> 	<p>メソ</p> <p>Advance/OCTA</p> 	<p>統合プラットフォーム</p> <p>Advance/PSE Workbench</p>  <p>管路系</p>  <p>Advance/FrontNet</p>



アドバンスソフトは、高度な技術力、開発力、人材を武器に、最先端理論を応用した解析シミュレーションソフトウェアを開発・販売しています。受託解析、受託開発、パッケージソフトウェア、コンサルティング等多様なソリューションを通じて、お客様の問題解決に即戦力として貢献します。



自然災害シミュレーションの現状と課題

防災シミュレーションセミナー
2013年4月25日(木)開催
井田 喜明



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

はじめに

□ 自然災害シミュレーションの意義

現象の理解に役立てる。現象と素過程を結び付ける
予測や予知に活用して、防災情報の質を高める

□ 自然災害シミュレーションの現状

気象現象については予報や環境予測に既に活用されている
それ以外の現象は予測能力が低く、防災への応用は限定的

□ 予測能力を上げるには

現象の理解を深める。シミュレーション技術を高める

□ 弊社に何ができるか、何をすべきか

工学などのシミュレーション技術を地球科学に応用する
防災や研究のために汎用性の高い基礎ソフトを開発する
個々の必要性に対応して適切な知識や技術を提供する



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

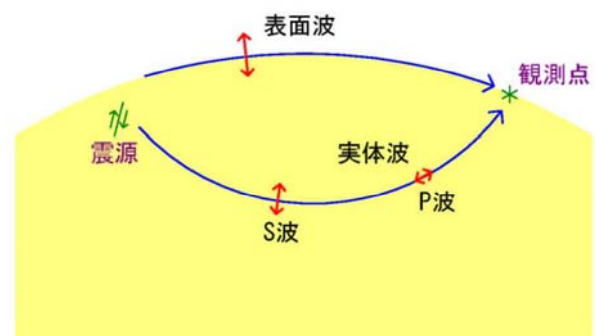
自然災害シミュレーションの現状

- **地震**:断層すべりを仮定して地震波を解析する技術が確立
応力を解放する自発的な破壊の発生は現象の理解が未熟
- **地殻変動**:断層運動やマグマ移動による変形の計算法が確立
発生源の性質を推測するためのインバージョンに使われる
- **津波**:海底地形のデータを使って伝播を計算する技術が確立
発生源の設定が不正確。陸での遡上や反射の評価技術が未熟
- **噴火**:地下のマグマの把握が難しく、噴火の発生予測は未熟
溶岩流の流下予測は可能。噴煙や火砕流は解析方法が進歩
- **気象**:天気予報で既に実用化。長期予報の精度は落ちる
テレコネクション、集中豪雨や竜巻の予測は精度の向上が必要
- **環境**:地球温暖化の評価に活用。予測結果にはばらつきが大
表層環境の安定性、生命との関連などについて究明が必要



地震:震源解析の現状

- * **断層運動で発生する地震波の伝播**
すべりを仮定して計算する技術が確立
(グリーン関数法、差分法など)
- * **断層すべりのインバージョン**
地震動の観測波形を解析する技術
すべりの拡大や分布に解析事例
- * **地震の揺れ(地震動)の予測**
長周期の震動は震源で決まる
短周期の震動は多くが伝播時に発生

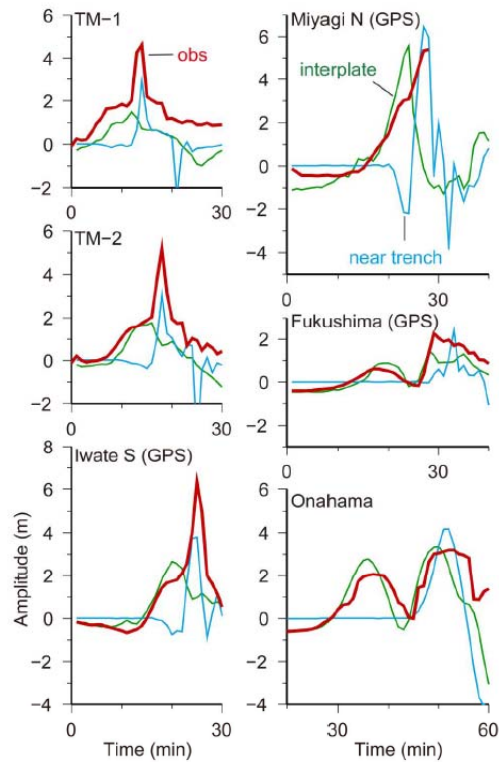
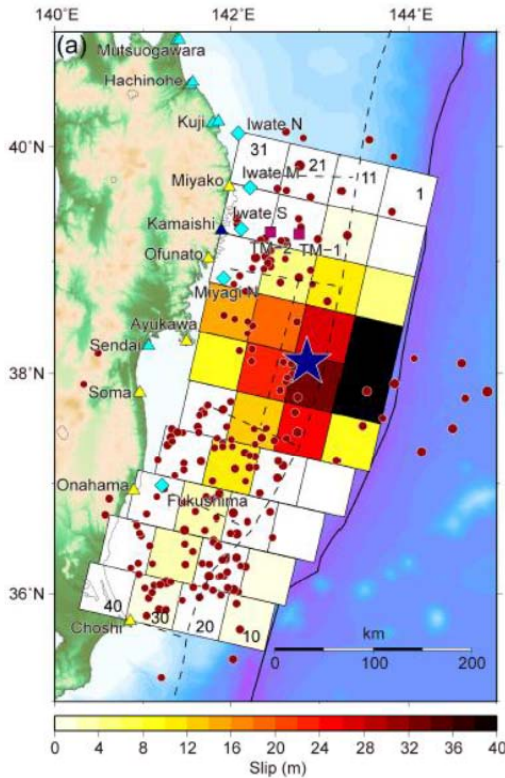


- * 地震は本来**応力を解放**するために自発的に発生する破壊現象
震源解析の最終的な姿は応力の蓄積と解放過程を記述すること
- * 断層すべりは**破壊力学**や**摩擦法則**などに基づいて解析が進むが、
現象の本質を捉えるには理解が不十分
- * **地震予知**への応用には見通しが開けていない
地震予知は前兆現象頼みか、発生間隔に基づく確率予測に留まる



地震の観測波形から断層すべりの分布をインバージョン

1978年宮城県沖地震 (Yamanaka and Kikuchi, JGR, 2004)



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

地震予知への道筋は？

地震発生過程の理解を物理学に

蓄積された応力を解放する過程としての地震の発生

地震のもつフラクタル性にどう対応するか

(グテンベルグ・リヒター則の意味)

モデルの追求: アスペリティーやバリアの概念

予知の役割と予知手法の強化

大規模地震災害は地震予知なしに対応できるのか

地震発生の確率予測は直前の準備には役に立たない

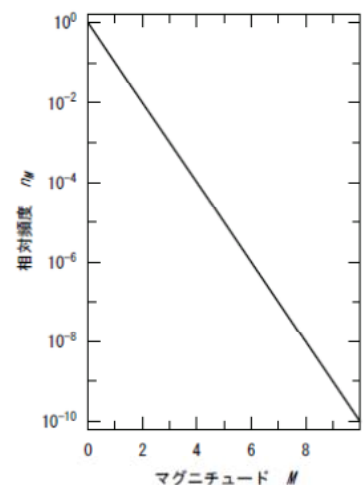
地震発生前に見られる加速現象は予知に使えるか

地震予知から地震の制御に向かう道は？

予知よりも制御の方が易いかもしれない

待ち構える中で地震を起こす可能性も追求すべきでは

グーテンベルグ・リヒター則



$$\log n_M = a - bM$$



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

アスペリティーとバリア (Aki, JGR, 1979)

アスペリティー:

強固で破壊され難い領域
そこを破壊するのが地震

バリア:

破壊を止める障壁
止められない地震が大地震

ゲーテンベルグ・リヒター則

小地震は頻度が高い
(大地震は頻度が低い)
地震現象はフラクタル
破壊は簡単に始まるが
多くはすぐに止められる

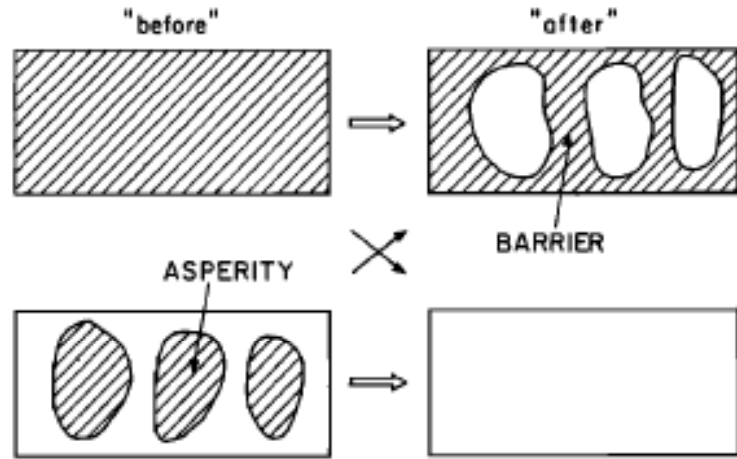


Fig. 1. The barrier model and asperity models, respectively, for the aftershock and foreshock processes.

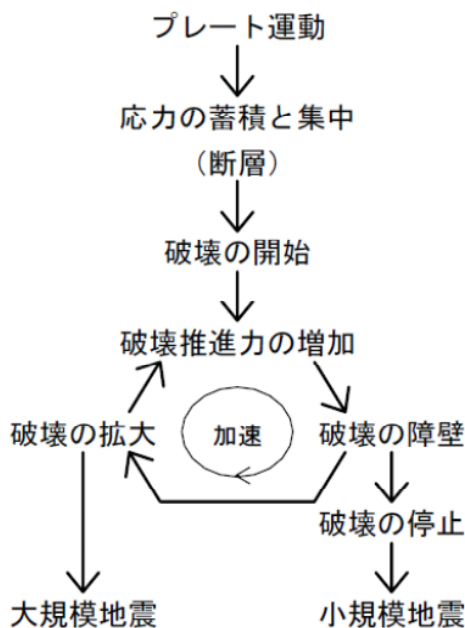
地震発生理論として、アスペリティー理論が現在の主流
統計則などから見ると、バリア理論の方が適切。理論の充実が望まれる

井田喜明: 地震予知と噴火予知、ちくま学芸文庫、2012

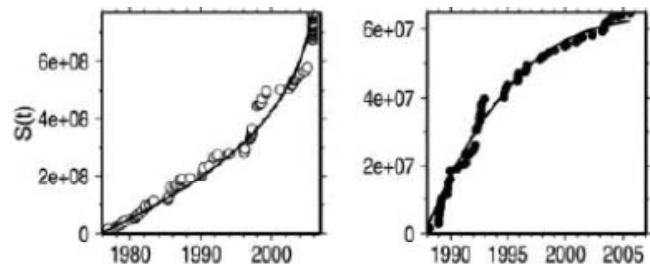
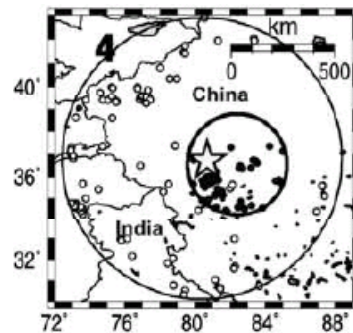


地震発生前の加速現象を地震予知に

地震発生の準備の加速的な進行



大地震発生前の前震など
前兆現象は加速現象の立場から説明



地震発生前の歪の蓄積過程:
大局的な加速と局所的な減速
(Papazachos et al., JGR 2007)



地震に関するシミュレーションの展望

□ 研究や防災に求められる一般的な課題

- 地震動の短周期成分を計算する方法の確立
- 断層運動を地震発生直後に計算する技術の開発(津波予測に)
- 統計法則と整合的な地震発生過程のモデルの構築と検証
- 地震予知や地震制御に対する意欲の高揚

□ 弊社で進める技術開発やソフトの整備

- 不均質媒質中の断層運動による地震動と地殻変動の計算ソフト
- 地震発生過程を応力変化とともにシミュレーションする技術

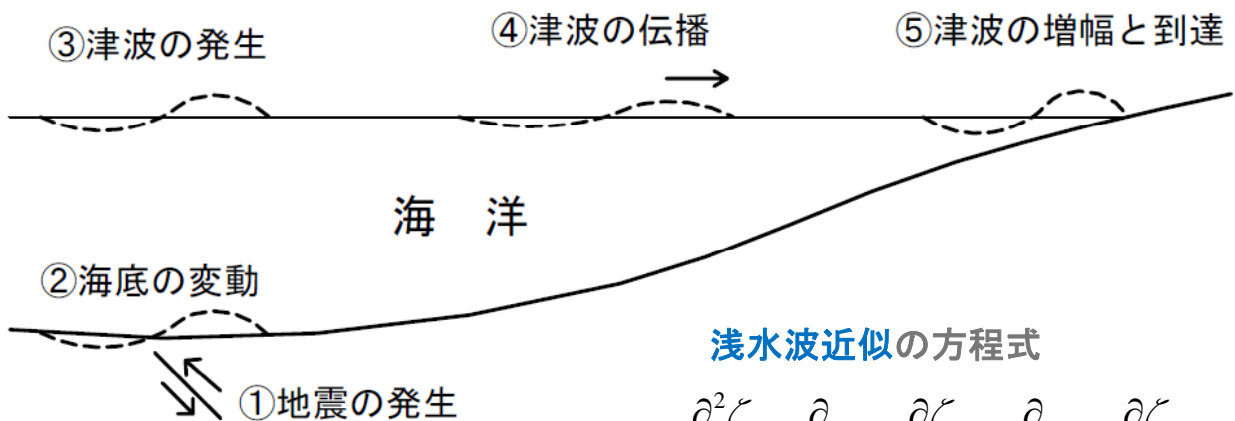
□ 個人的に進めたい研究や技術開発

- 震源のフラクタル性を表現するモデルの構築
- 現象の加速性を表現するモデルの整備と予知への応用



津波: プレート間地震では津波による災害の方が深刻

津波の伝播は水深の分布で決まる。計算の原理は単純
 津波の原因となる変動が不確定なことが最大の困難
 海岸付近での増幅や反射の効果の評価が不十分



浅水波近似の方程式

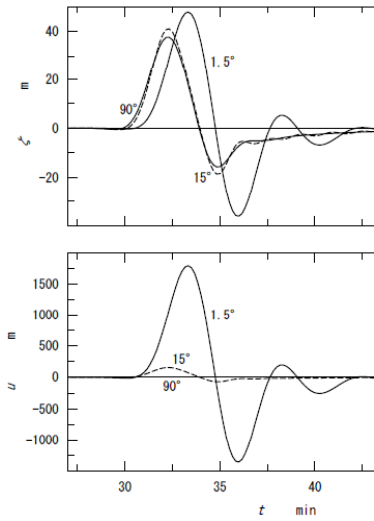
$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$$

ζ : 波高、 h : 水深、 g : 重力加速度

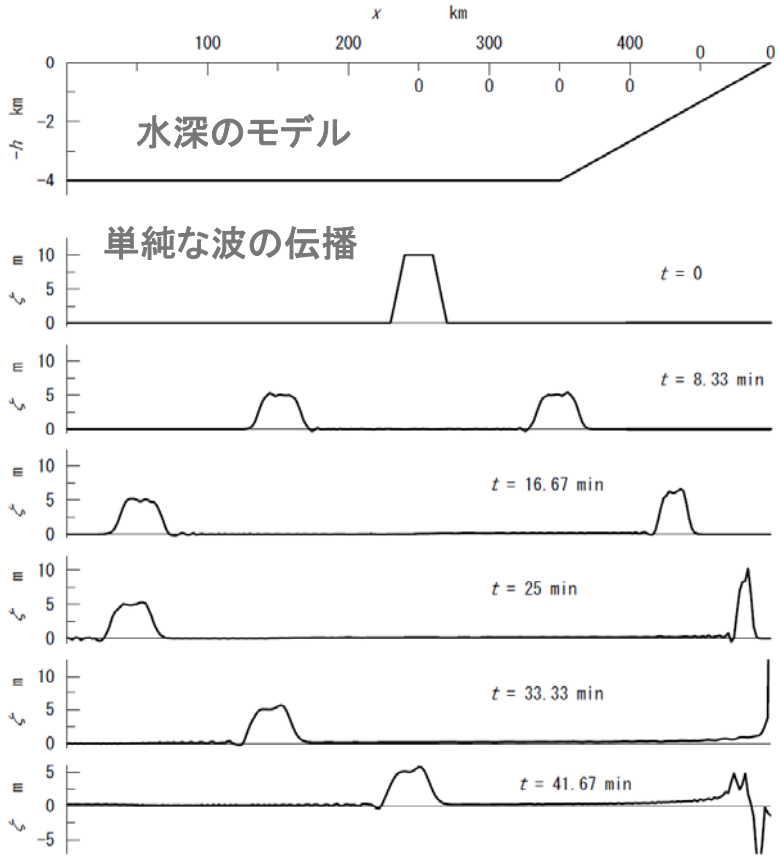


1次元の津波伝播

陸に達する津波の高さ

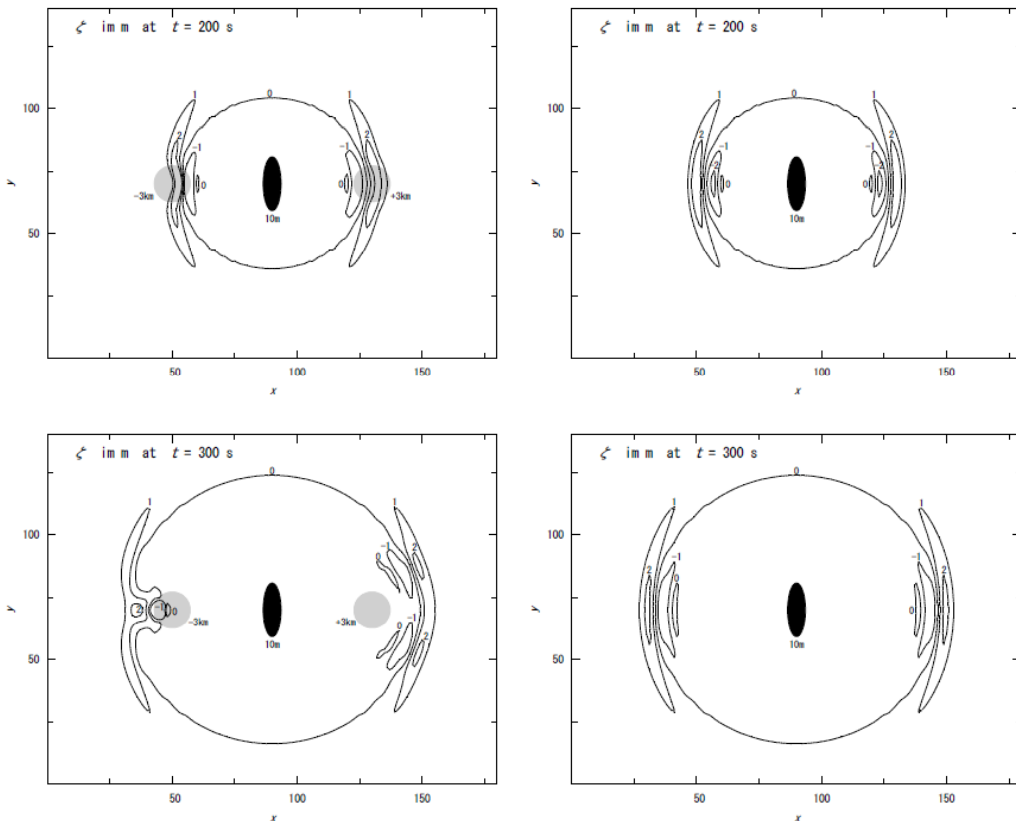


遡上する距離



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

津波の伝播は地形に敏感



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

津波に関するシミュレーションの展望

□ 研究や防災に求められる一般的な課題

- 海底下の震源など、津波発生源を正確に決める技術
- 津波予報に役立つ津波伝播の高速計算技術の確立
- 海底津波観測などを用いた津波予測手法の高度化
- 津波の遡上や陸での反射を正確に評価する技術の確立

□ 弊社で進める(たい)技術開発やソフトの整備

- 断層運動による海底変動を正確に予測するソフトの開発
- 流体解析技術を活用した湾内の伝播や陸への遡上計算ソフト

□ 個人的に進めたい研究や技術開発

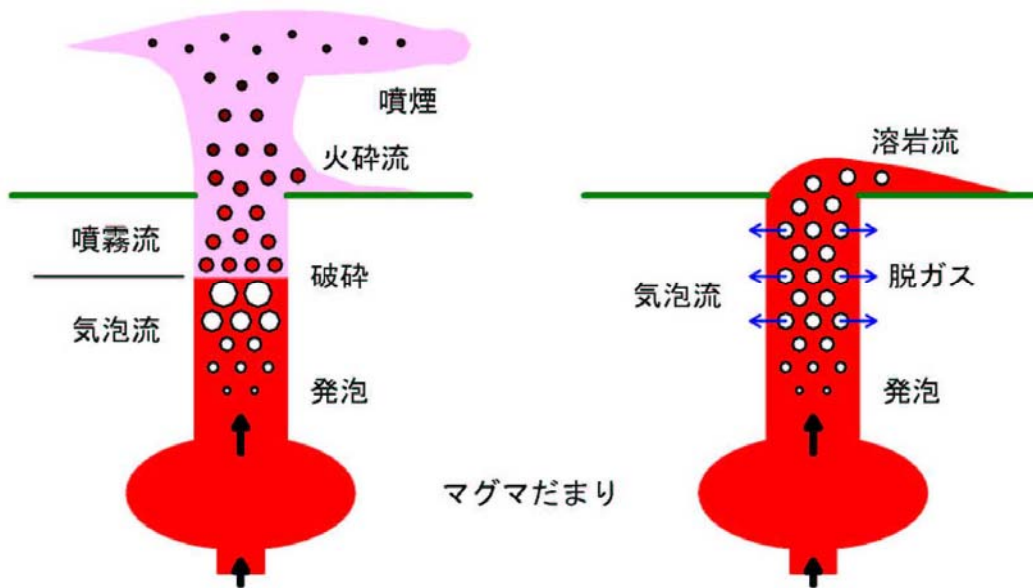
- 津波の遡上や反射を計算するための単純なモデルの追及



噴火：地下のマグマの上昇

爆発的な噴火

溶岩の流出



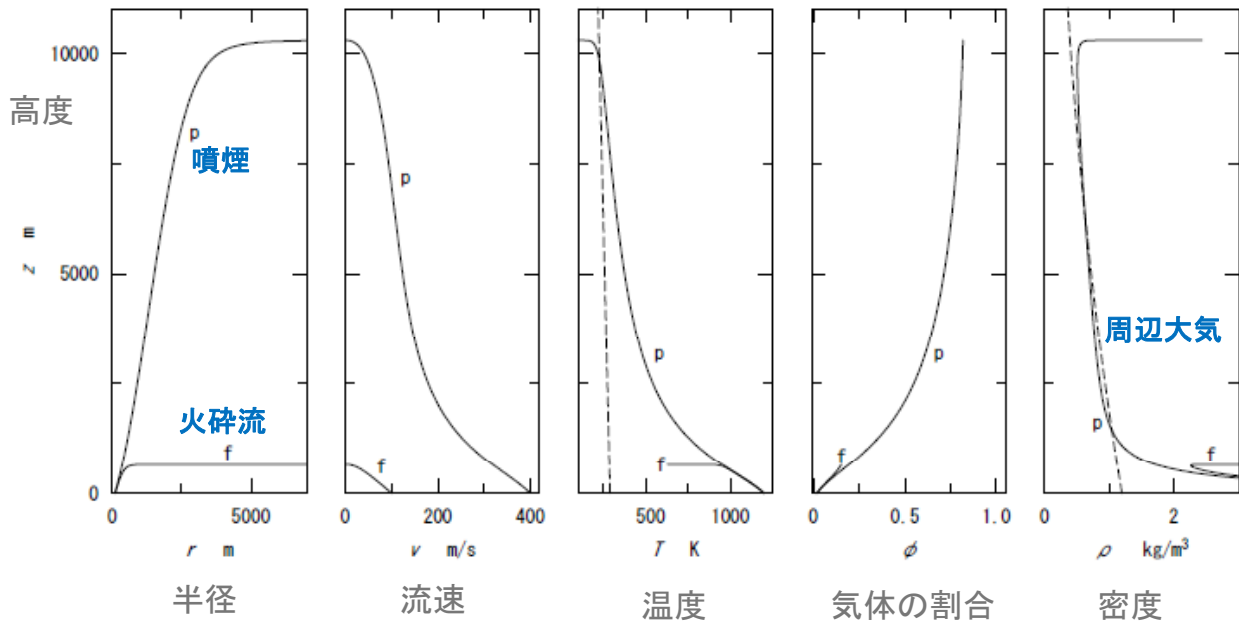
噴火様式は脱ガスの程度で決まる
 脱ガスの物理機構は不明な部分が多い



噴煙と火砕流

定常1次元モデルによる解析

周囲から取り込んだ空気を暖めて、浮力を獲得できるかどうかが見られる



噴火に関するシミュレーションの展望

研究や防災に求められる一般的な課題

- マグマの脱ガスや破碎を説明する物理機構の解明
- 非定常なマグマ上昇過程のシミュレーション技術の確立
- 噴火予知の定量化に役立つシミュレーション手法の開発
- 噴煙や火砕流の予測に用いるシミュレーション技術の改善

弊社で進める技術開発やソフトの整備

- 2相流などの解析技術を用いた噴火過程の解析
- 乱流などの解析技術を用いた噴煙や火砕流の計算

個人的に進めたい研究や技術開発

- 噴火の時系列や規模の分布を説明するモデルの構築
- 噴火の時間発展を記述するモデルの開発と検証



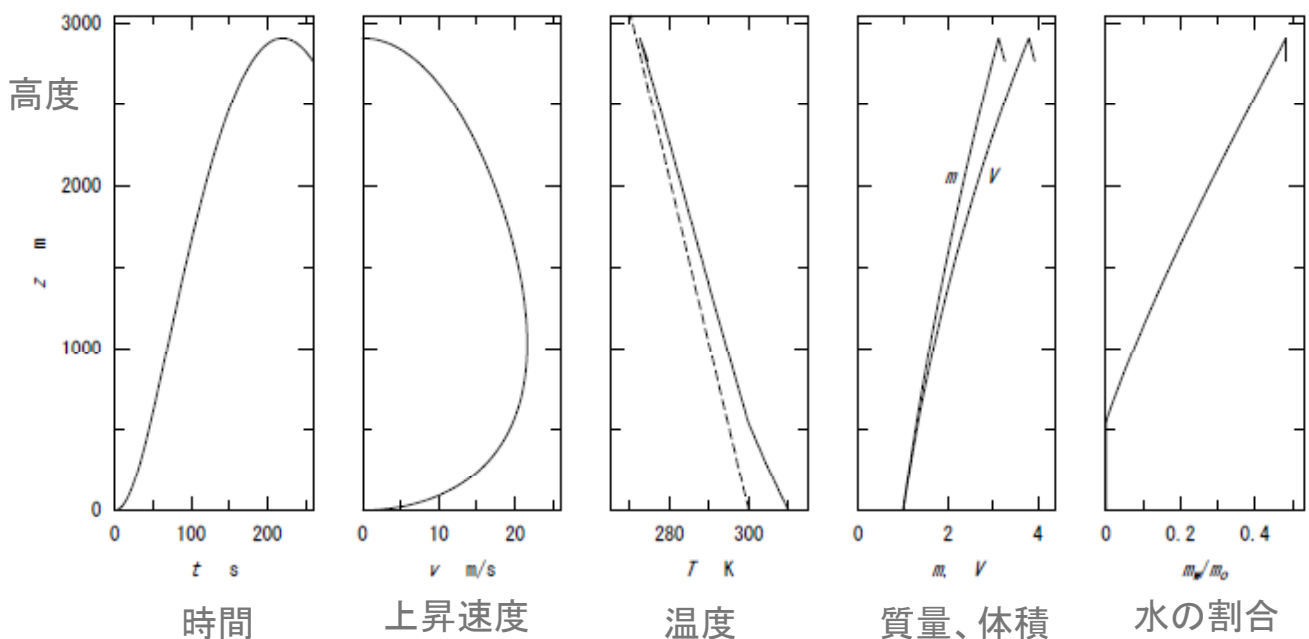
気象現象：大規模なシミュレーションが実用化

- **天気予報**：全地球的なシミュレーションで数値予報
プリミティブモデルと呼ばれる完全流体の力学に基づく
水蒸気の凝結、乱流などはパラメータ化で組み込む
メッシュサイズは全球で20km、地域の予報に5km
カオス、テレコネクションなどにより長期予測は不確定
- **気候変動**：海洋大循環も含めた気候モデルを用いる
地球温暖化に関連した大規模シミュレーションが実行
多くの要因が複雑に絡み合うため、結果には差が残る
- **地球環境の形成と変動**：生命との関連、氷期と間氷期
簡単なモデルで現象の本質をつくることが先決



上昇気流中の水蒸気の凝結過程

サーマル(球状の上昇気流)・モデルによるシミュレーション結果
取り込んだ空気を暖めて浮力を獲得。凝結の潜熱が上昇を加速



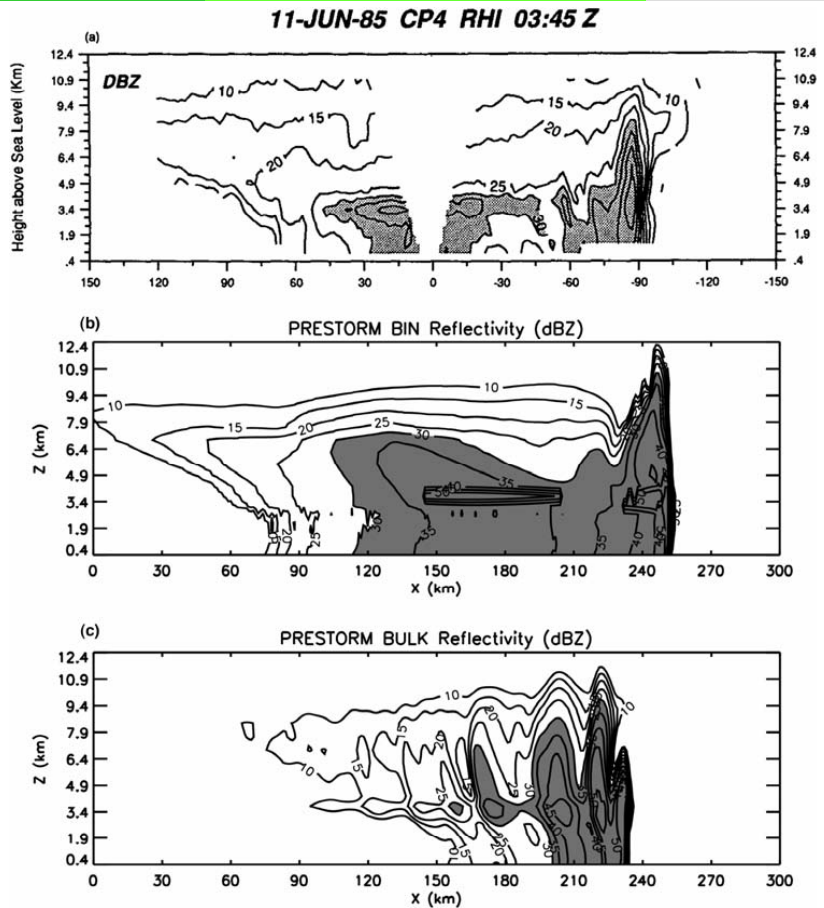
雲粒の形成過程

レーダーへの
反射率の実測

ビン・モデル

シミュレーション

バルク・モデル



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

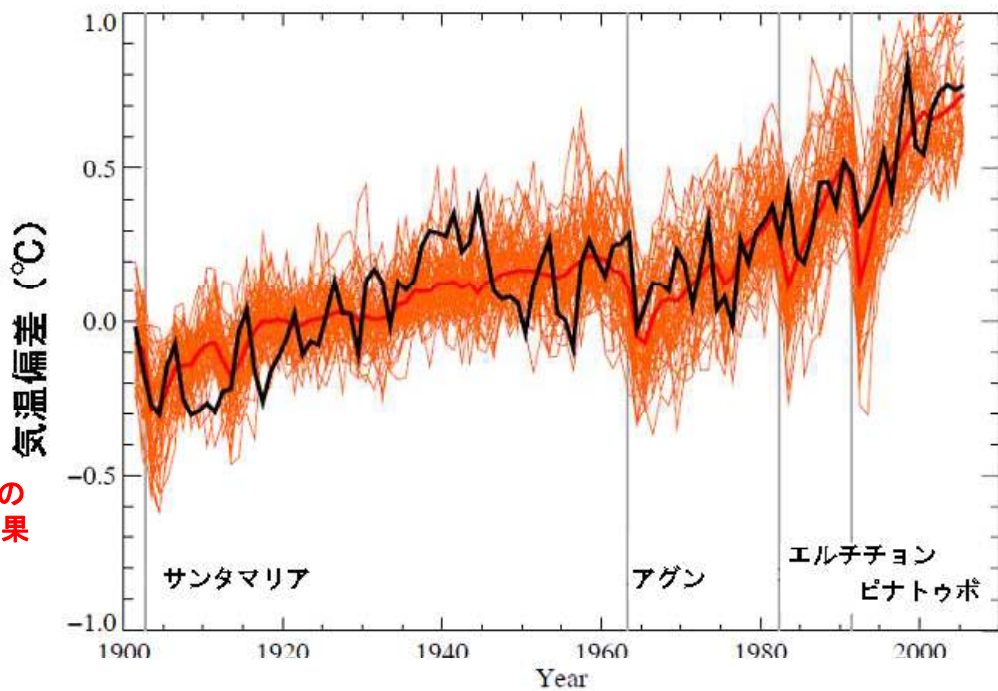
地球表層環境の温度

IPPC (気候変動に関する政府間パネル) のレポート

黒の太線: 実測
(基準は1901~50
年の平均)

細い赤線: 14機関の
シミュレーション結果

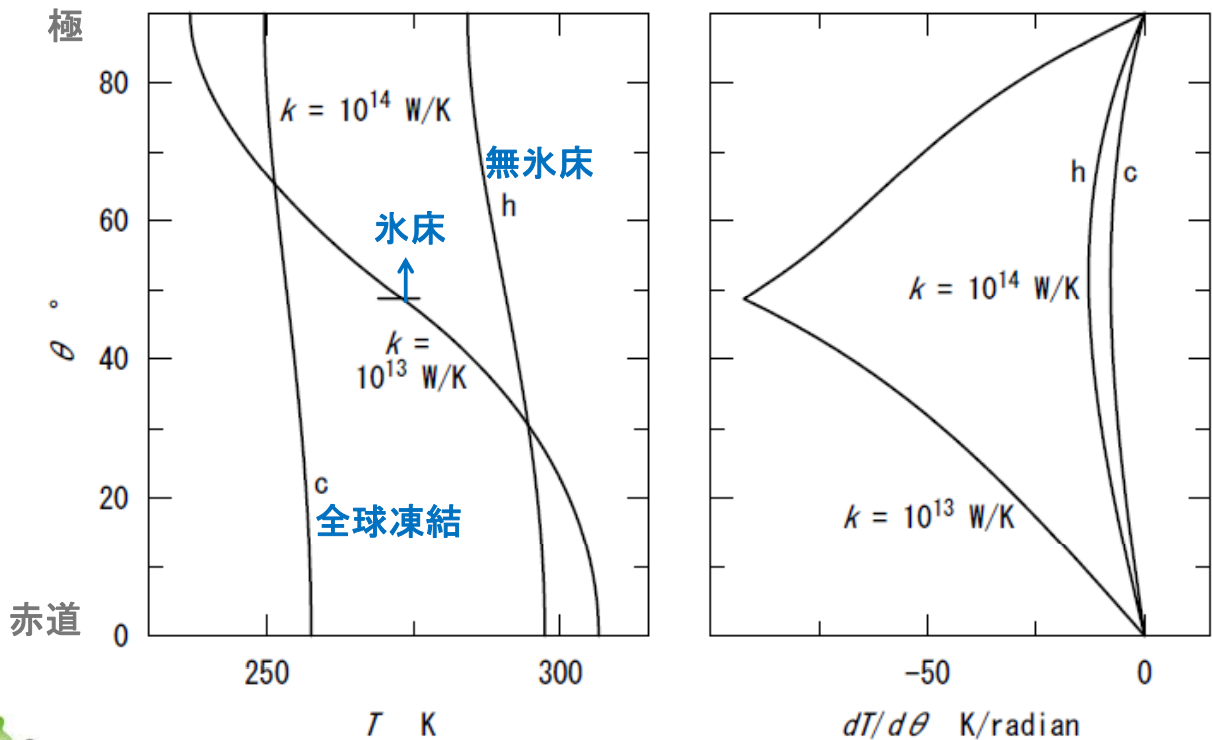
太い赤線: 平均



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

地球表層の温度分布:

拡散方程式を用いた簡単なモデル。 k は実効的な熱輸送係数



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

デージーワールド

仮想的な惑星
生命が環境の安定化に寄与

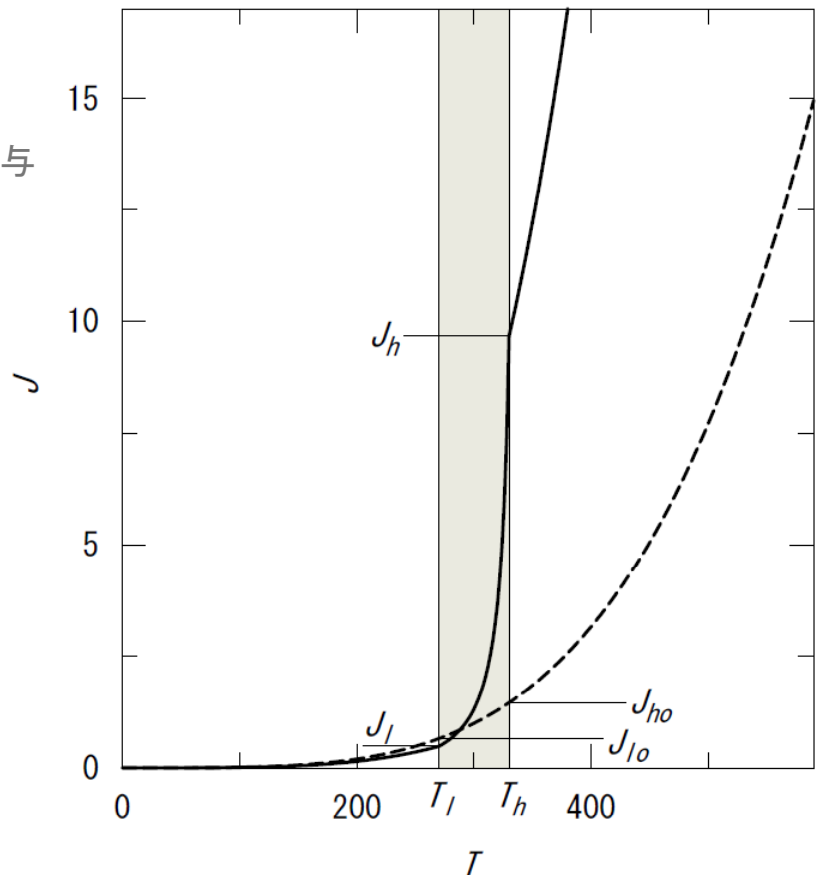
白いデージー

反射率が高い
高温に強い

黒いデージー

反射率が小さい
低温に強い

温度が上昇すると
白いデージーが増えて
太陽光の吸収を妨げる
環境の変化を抑制する



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

気象や環境に関するシミュレーションの展望

□ 研究や防災に求められる一般的な課題

集中豪雨、竜巻など局所的な現象の予測精度を上げる
エルニーニョ現象など、テレコネクションの理解を深める
長期的な予報の精度を向上させる方法を探す
地球表層環境の変動を評価する技術の高精度化

□ 弊社で進めたい技術開発やソフトの整備

局所的な集中豪雨や竜巻を予測する技術の開発
環境変動予測に関連する各種のシミュレーション技術の開発

□ 個人的に進めたい研究や技術開発

簡単なモデルを用いた氷期などの環境変化の解析
他の惑星などと比較した地球環境の安定性の解析



全般的な展望と願望

□ 地震予知をあきらめないで欲しい

地震のフラクタル性と正面から向き合うことが基礎
現象の加速性など、予知の手段は残されている

□ 津波や噴火には着実な技術の積み上げを

観測データを予測に最大限活用する技術開発が望まれる
素過程の理解を深めるためにシミュレーションが活用できる

□ 気象現象や環境問題は大規模計算との関係づけを

大規模シミュレーションもパラメータ化に改善の余地がある
地球環境の脆弱性の解明は簡単な解析で本質を捉えるべき

□ これらの問題に弊社も多少なりとも貢献したい



有限要素法を用いた地震動の予測 (MPC断層解析の利点)

防災シミュレーションセミナー
2013年4月25日(木)開催
菊池 愛子



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

本日の話題

- 地震波動解析機能
- 基盤プログラム
- 開発システムの特徴
- 計算方法
- 解析事例(計算性能)
- 解析事例(実地震への適用)



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

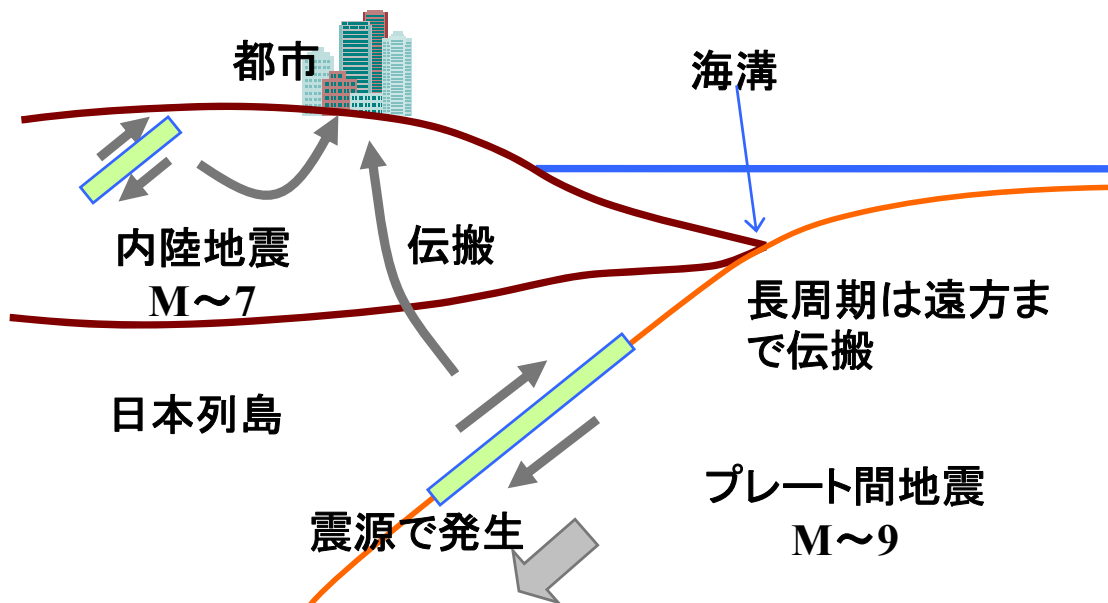
地震波動解析機能

- 地盤内の断層すべりにより発生する地震波の伝搬を解析
- 地表の各地点などに発生する変位、速度、加速度、応力、ひずみの波形を求める

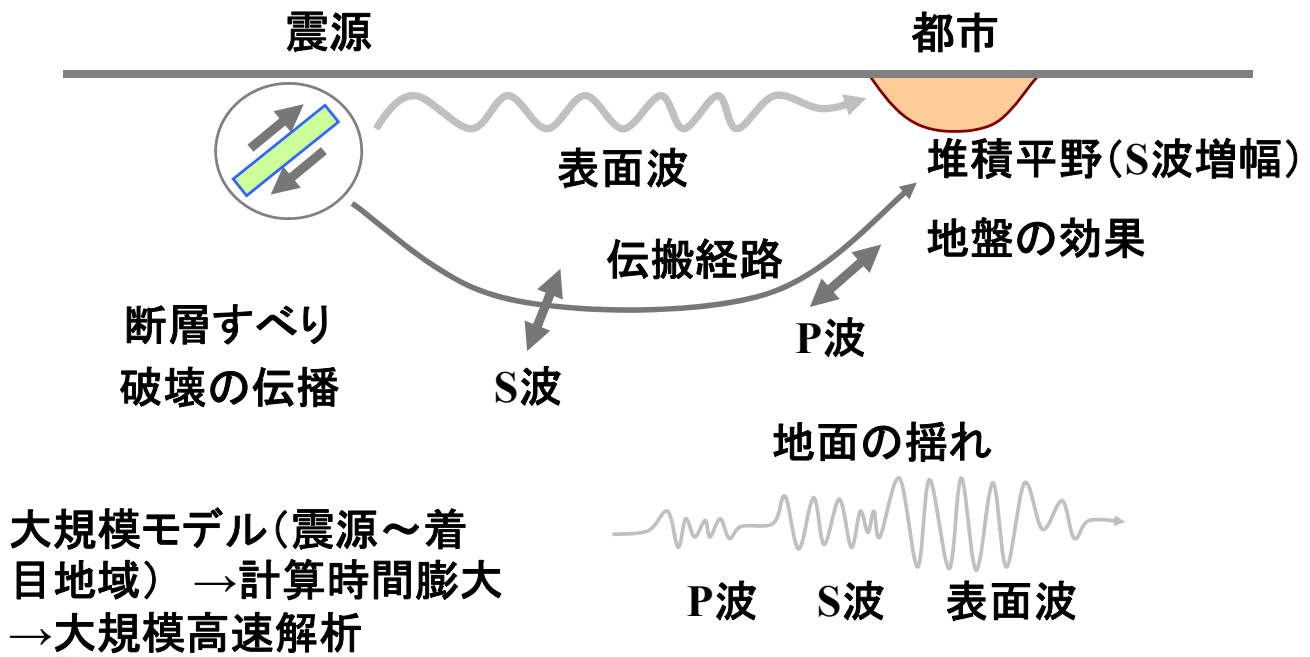


地震波動解析機能-1

プレート間地震と内陸地震



地震波動解析機能-2 地震波の伝播と地盤の揺れ

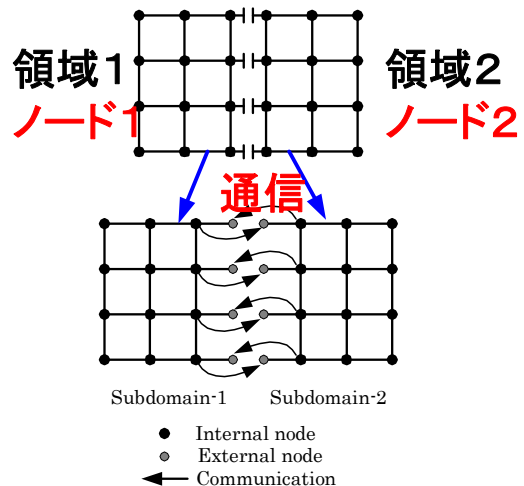
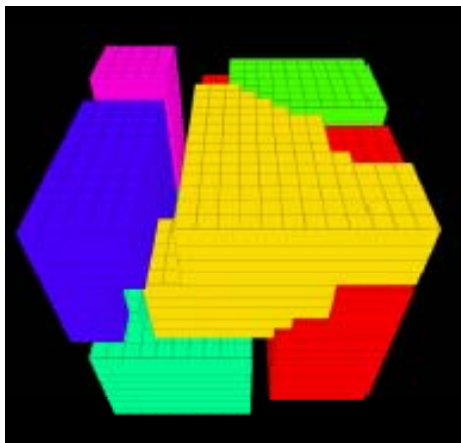


Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

基盤プログラム(FrontSTR)

並列計算
処理

平野モデルの領域分割例
 分割数; N → 解析時間約1/N
 領域分割手法; Metis等



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

計算方法

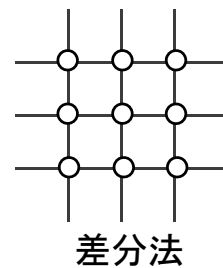
- 空間座標 ; 有限要素法
- 時間方向 ; 中心差分
- 震源 ; 断層上面・下面すべり運動
- 領域境界での反射波低減 ;
自動Rayleigh減衰



有限要素法

- 仮想仕事の原理 → 求解方程式

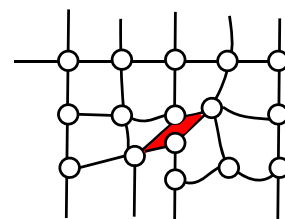
$$\int_V \delta u_i \{ \sigma_{ij,j}(t) + b_i(t) - \rho \ddot{u}_i(t) \} dV = 0$$



$$\int_V \delta u_i \rho \ddot{u}_i dV + \int_V \delta \left\{ \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right\} C_{ijkl} \left\{ \frac{1}{2} (u_{k,l} + u_{l,k}) \right\} dV$$

$$= \int_V b_i(t) \delta u_i dV + \int_S \delta u_i T_i(t) dS$$

$$[M] \{ \ddot{u} \} + [K] \{ u \} = \{ f \}$$



◆運動方程式

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 $\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d v$

減衰行列 \mathbf{C}



減衰行列

□ 粘性ダンパー

半無限地盤への波動の伝播をダッシュポットによる粘性減衰で近似的に表現する

(性能が周波数に依存し反射波が発生しやすい)

$$[C_{face}] = \frac{A}{n} \begin{bmatrix} [C] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [C] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [C] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [C] \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} \rho V_s & 0 & 0 \\ 0 & \rho V_s & 0 \\ 0 & 0 & \rho V_s \end{bmatrix}$$



震源処理

□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。

□MPC断層すべり → 採用

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

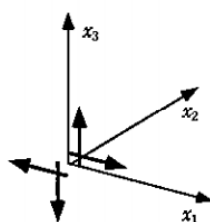
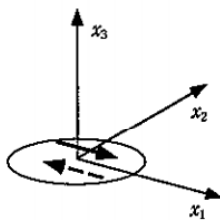


点震源

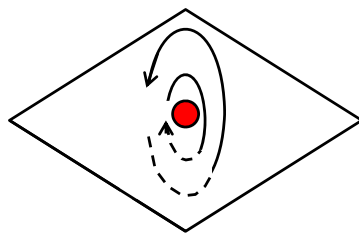
$$M_{pq}(t) = \mu \Delta \bar{u}(t) S (n_p v_q + n_q v_p)$$

「地震発生の物理学」
大中、松浦、2002より引用

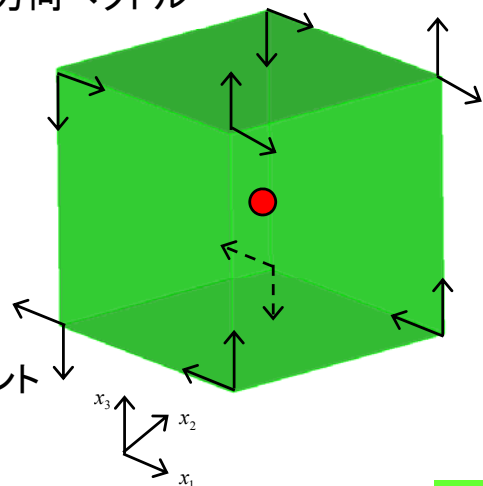
- $M_{pq}(t)$; モーメントテンソル
- $\Delta \bar{u}(t)$; 断層面の平均的な変位の食い違い量
- S ; 断層面積
- n_p, n_q ; 断層面の法線方向ベクトル
- v_q, v_p ; 変位の食い違い方向ベクトル



断層すべり



ダブルカップルモーメント



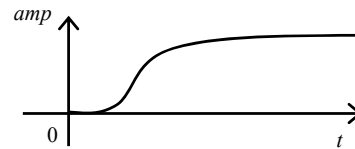
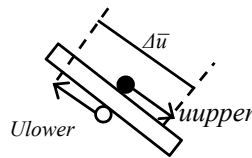
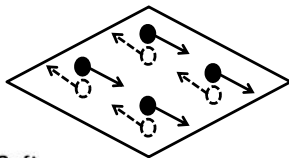
MPC断層すべり

- 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
- 断層面の各点に任意の時間関数で設定可。

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

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

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



反射波の低減

- 無反射境界 (Permanent Matching Layer)
音響インピーダンスを整合させ波を外部に透過

- Dynamic Solvent Extraction

人工粘性を加えた結果から無減衰状態を近似

- 自動Rayleigh減衰 → 採用

周囲の緩衝領域で解析対象領域からの距離により減衰を増加



無反射境界

波動方程式の分解

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (\lambda + 2G) \left[\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right], \frac{\partial A_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial A_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} = G \left[\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right], \frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial z},$$

$$\rho \frac{\partial \chi}{\partial t} = G \left[\frac{\partial C_x}{\partial x} + \frac{\partial C_y}{\partial y} + \frac{\partial C_z}{\partial z} \right], \frac{\partial C_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \chi}{\partial x}, \frac{\partial C_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \chi}{\partial y}, \frac{\partial C_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \chi}{\partial z}$$

求解方程式

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{p}\mathbf{v} + \mathbf{Q}(t)$$

ただし、

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} & \mathbf{R} \\ \bar{\mathbf{G}} & \bar{\mathbf{H}} & \bar{\mathbf{R}} \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -a_0(t) \\ 0 \end{Bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{Bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{d} \\ \bar{\mathbf{V}} \end{Bmatrix} \quad \mathbf{G} = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}^I, \mathbf{H} = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}^I$$

ここに、 $a_0(t)$ は、地震加速度ベクトルである。

上式のVは、内部領域の節点では6自由度 ($u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$)

PML境界要素との結合節点では21自由度 ($\phi, \Psi, \chi, \phi_x, \phi_y, \phi_z, \Psi_x, \Psi_y, \Psi_z, \chi_x, \chi_y, \chi_z, A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z, C_x, C_y, C_z$)

PML境界要素の節点では18自由度 ($\phi_x, \phi_y, \phi_z, \Psi_x, \Psi_y, \Psi_z, \chi_x, \chi_y, \chi_z, A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z, C_x, C_y, C_z$)

http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/laboratory/SAL/dfujii/Report/rinko/rinko_13.pdfより引用



(2) Dynamic-Solvent Extraction

人工減衰を加えた結果から無減衰状態を近似する。

$$[M] \{\ddot{u}^t\} + 2\zeta [M] \{\dot{u}^t\} + ([K] + \zeta^2 [M]) \{u^t\} = \{P\}$$

無減衰のインピーダンスマトリックスは下記のように求められる

$$S(\omega) = S_\zeta(\omega + i\zeta) = S_\zeta(\omega) + i\zeta \frac{\partial S_\zeta(\omega)}{\partial \omega}$$

$$R(t) = (1 + \zeta t) \{R_\zeta(t)\} - \zeta \{R_{\zeta'}(t)\}$$

where

$$\{R_\zeta(t)\} = \int_0^t [S_\zeta(t-\tau)] \{u(\tau)\} d\tau$$

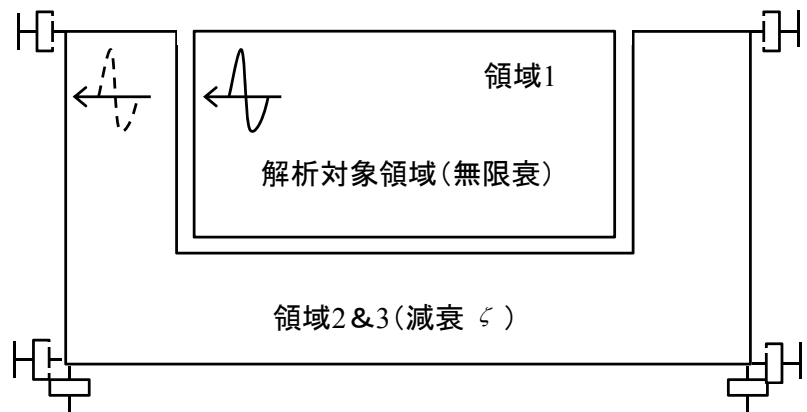
$$\{R_{\zeta'}(t)\} = \int_0^t [S_{\zeta'}(t-\tau)] \tau \{u(\tau)\} d\tau$$

where

$R(t)$; 反力

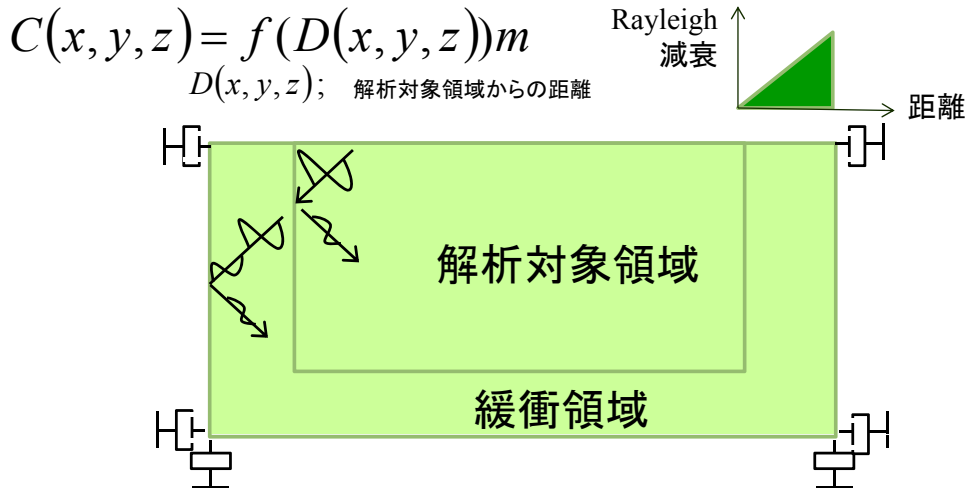
u ; 変位

$[S_\zeta(t)]$; $[S_\zeta(\omega)]$ のフーリエ逆変換



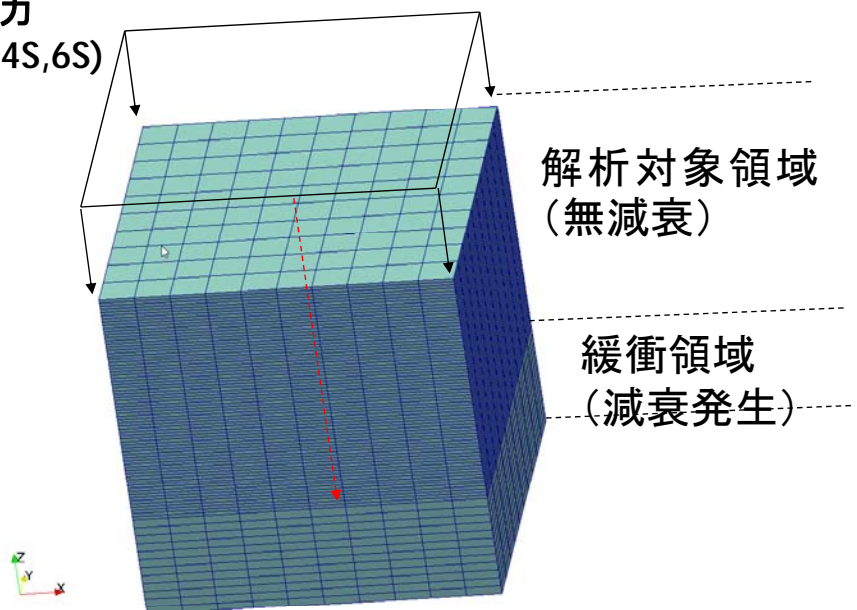
Rayleigh減衰自動増加

- ①解析対象領域の周囲(側面および底面)に緩衝領域を設ける。
- ②緩衝領域には減衰を与える。
- ③緩衝領域の減衰は解析対象領域に接する面では0とし、解析対象領域から離れるにつれて増加するよう自動設定する。

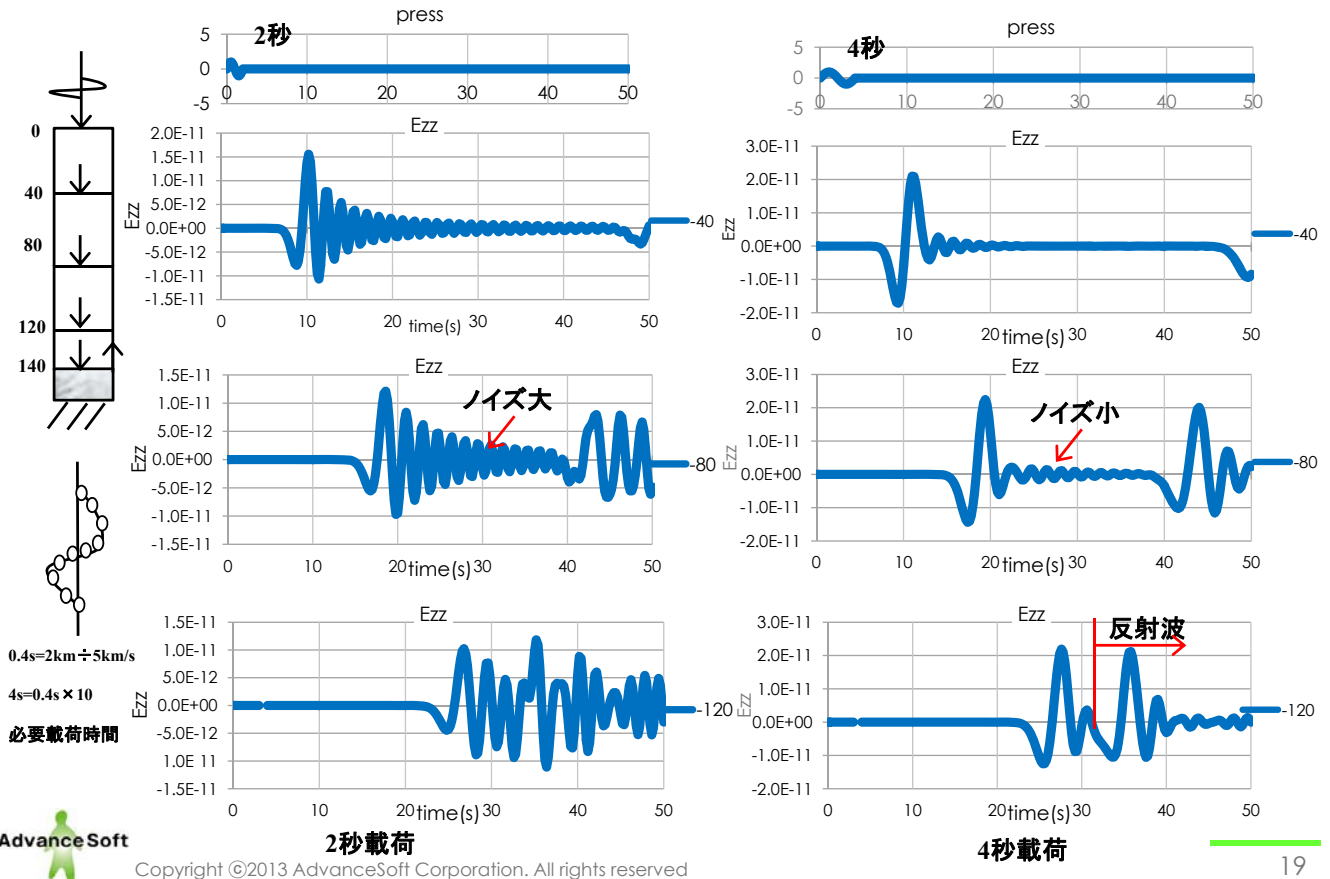


解析事例1 (伝搬性能と反射波低減)

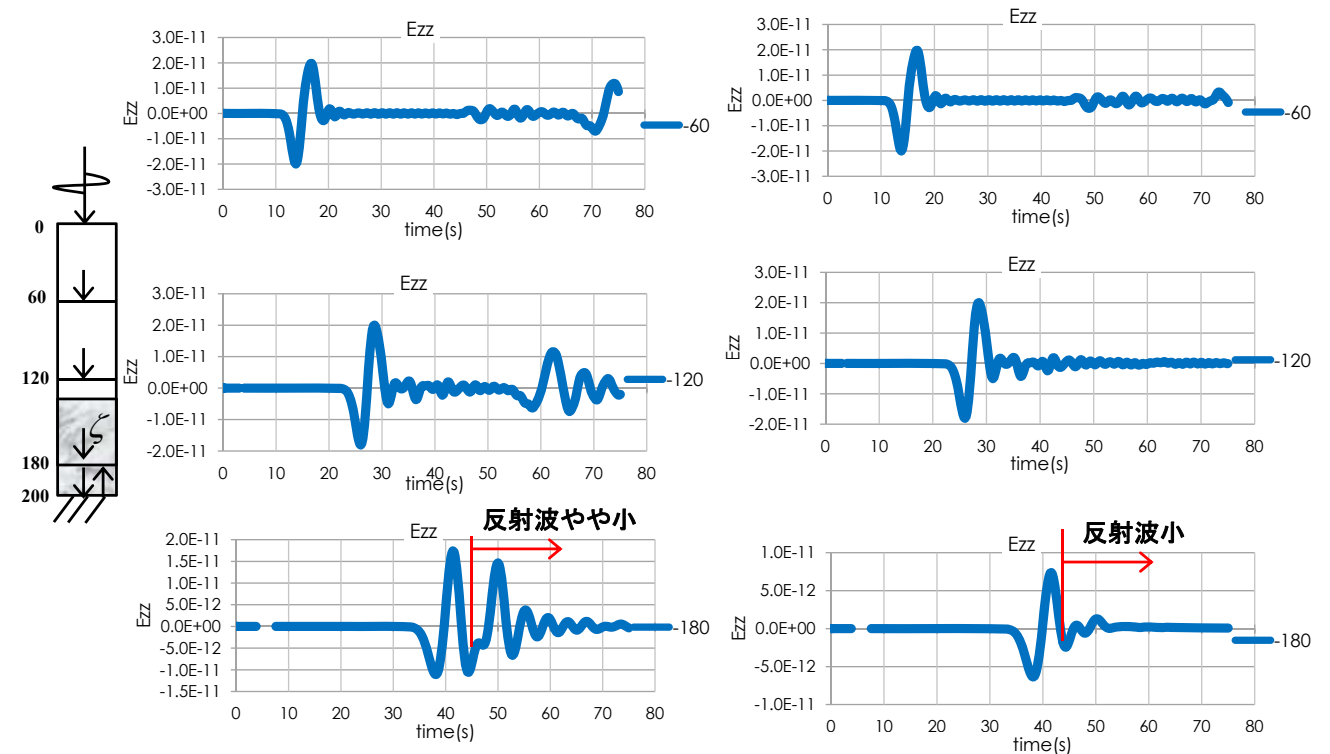
- 1次元の伝搬
- 地表面に正弦波1波の圧力 (振幅1Pa, 載荷時間2S,4S,6S)
- 200*200*200km
- 最小メッシュ 2km
- $V_p=5\text{km/s}$
- 時間増分 0.05S
- 解析対象領域伝搬時間 (上面~境界面) 28S



載荷時間と波の伝搬(解析対象領域のみ)



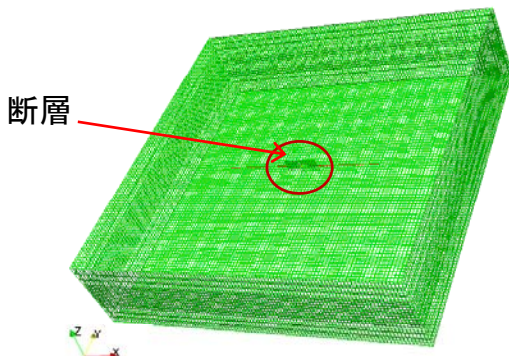
反射波の低減(解析対象領域+緩衝領域)



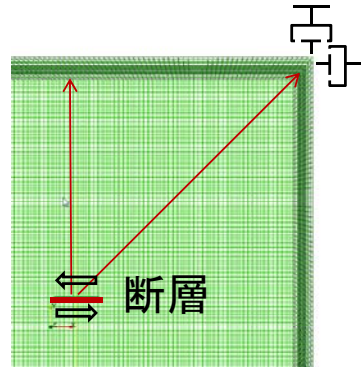
解析事例2(横ずれ断層)

表 1-1 モデル諸元

諸元	仕様
地盤規模	200km*200km*50km 2kmピッチ
材質	VS=3000m/s,VP=5000m/s,RHO=1000kg/m ³
断層	20km*8km,設置位置は水平方向中央、深さ中心-25km 鉛直面、すべりX方向相対変位1mライズタイム20S
減衰	粘性ダンパー
計算条件	$\Delta t=0.1S$



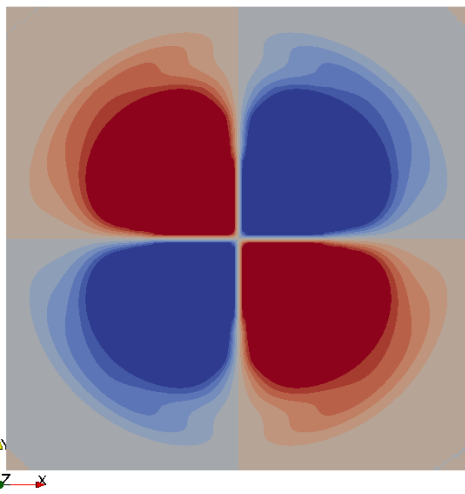
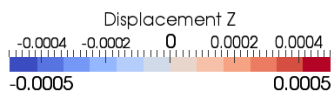
有限要素モデル



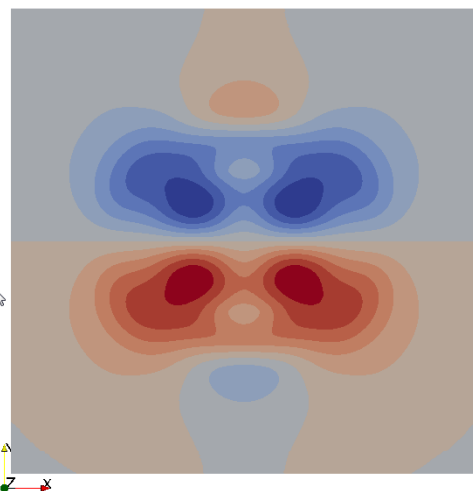
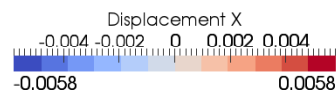
断層すべりと観察点



地表面変位分布(20S)

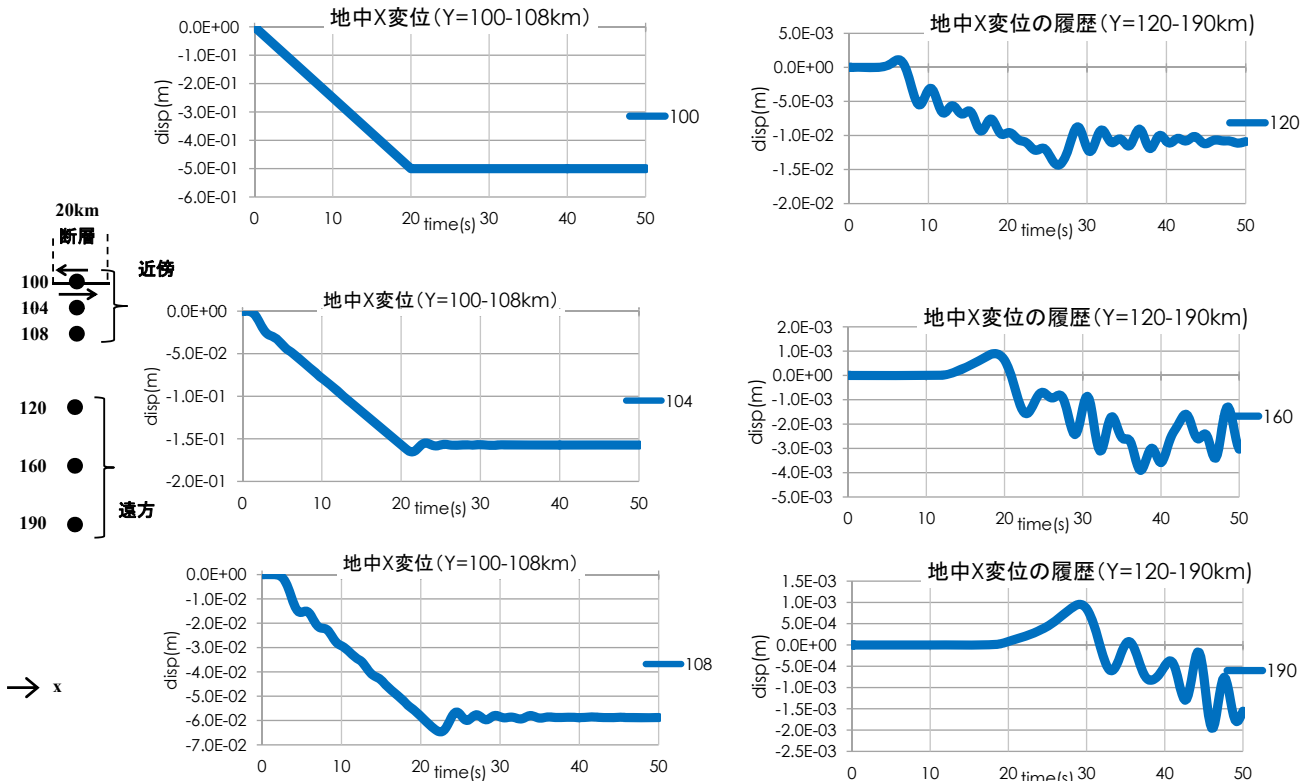


鉛直方向変位



すべり(X)方向変位





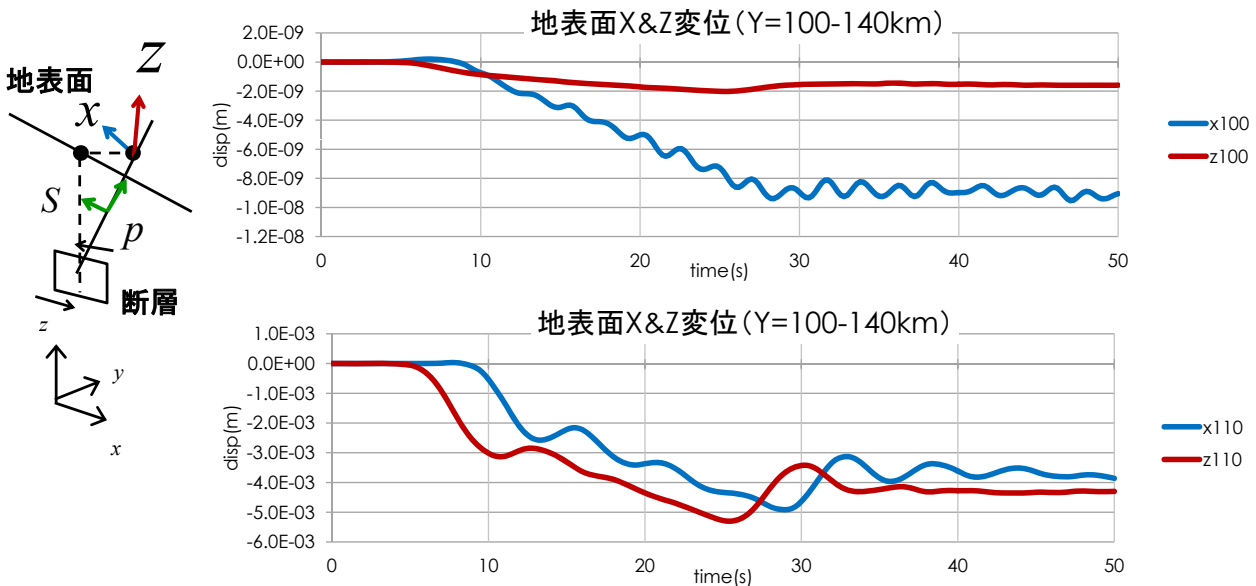
断層近傍 (near-field)

断層遠方 (far-field)

断層からの波の伝播 (地中断層高さの平面)



地表面変位 (すべり方向 & 鉛直方向)

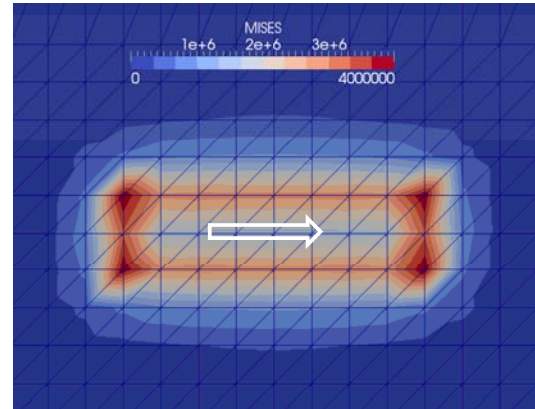
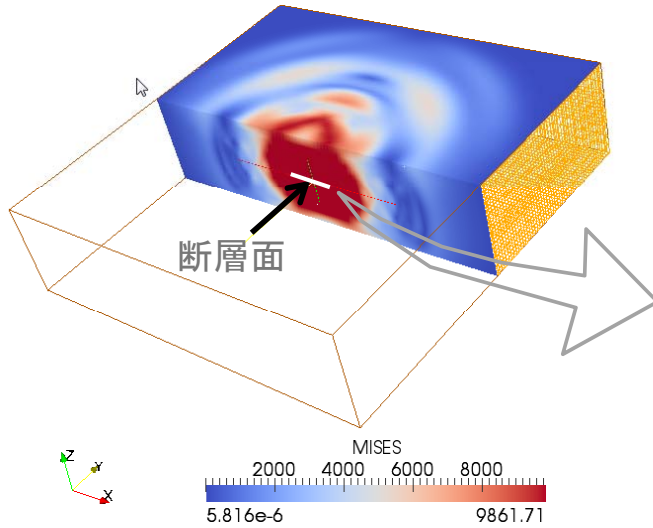


P波(鉛直方向)の後、S波(すべり方向)が出現。



断層面上の応力

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。



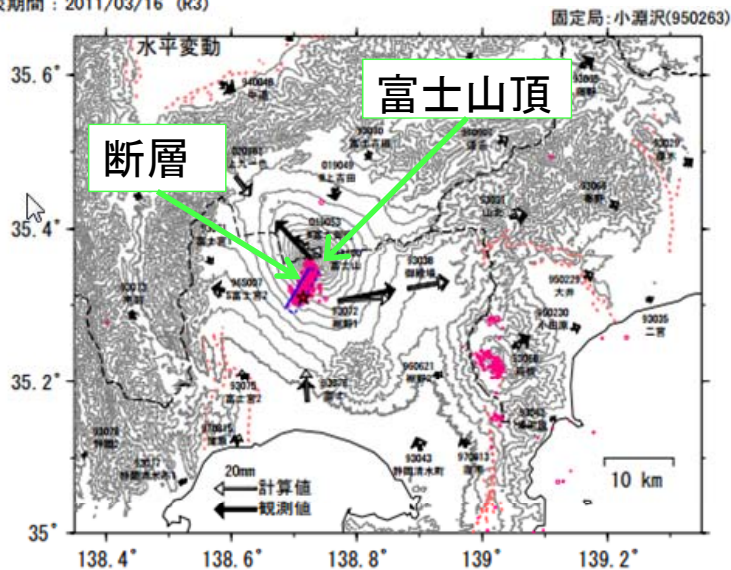
断層面ミーゼス応力 (20S)



解析事例3(実地震への適用)

2011年3月15日静岡県東部の地震

基準期間 : 2011/03/13 - 2011/03/14 (R3)
比較期間 : 2011/03/16 (R3)



矩形断層一様すべりを仮定した断層パラメータ

緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	すべり量
35.296°	138.686°	3.8km	6.9km	5.1km	31°	72°	22°	0.73m

国土地理院資料より引用

モーメントマグニチュード(Mw) 5.85 (剛性率は30GPaを仮定)

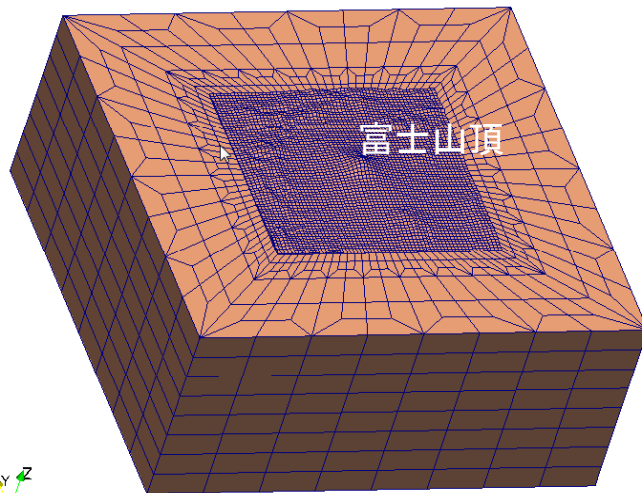


解析の概要

区分	項目	仕様
地盤モデル	モデル規模	富士山を中心にした地盤領域 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 (防災科学技術研究所作成)
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

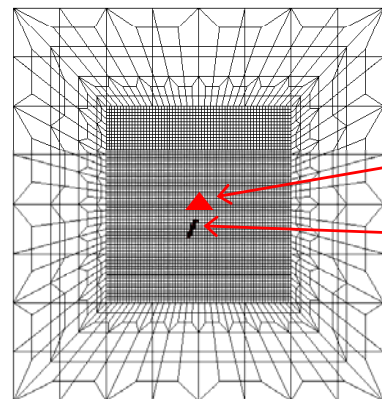


地盤モデルと震源断層



モデル規模

東西100km南北100km深さ45km



富士山断層

断層長さ6.9km幅5.1km

走行31° 傾斜角72°

すべり角22°

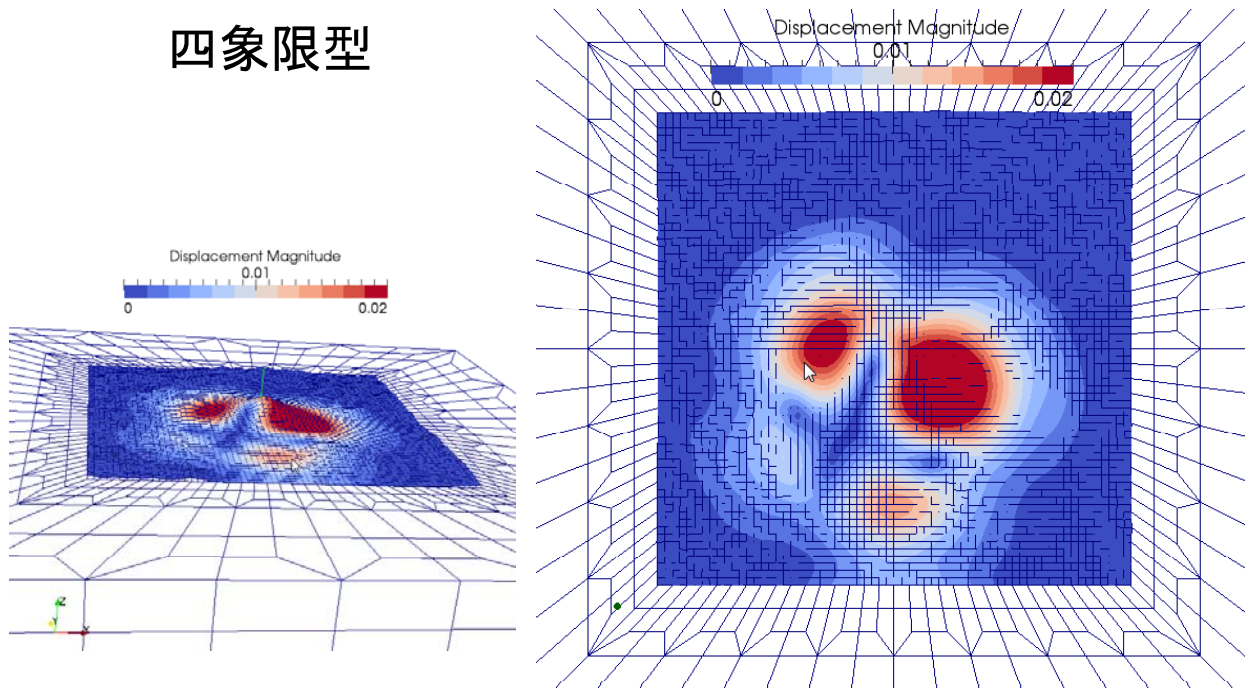
すべり量0.73m

上端深さ3.8km

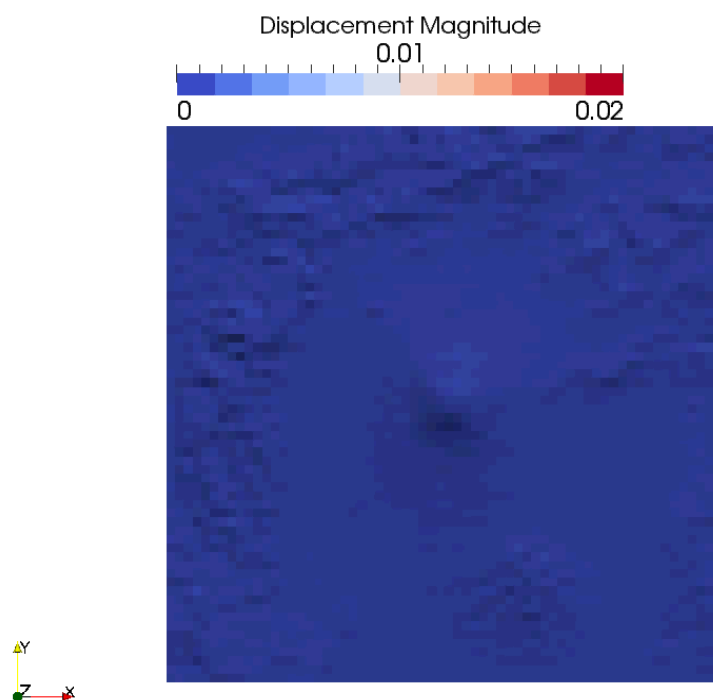


地表面の変位(4S)

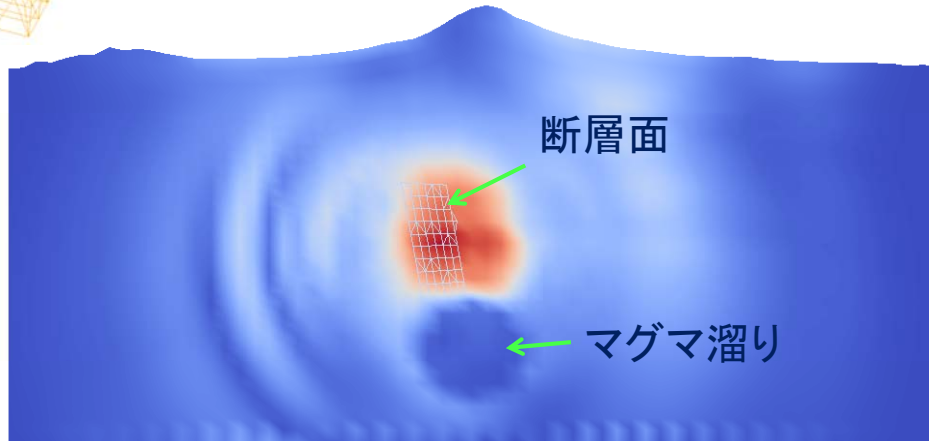
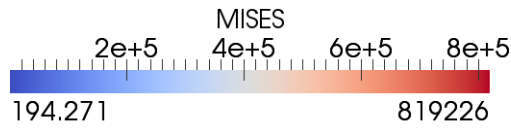
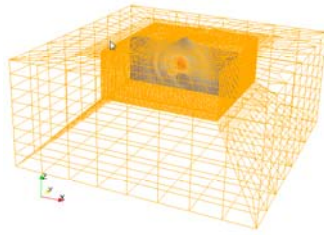
四象限型



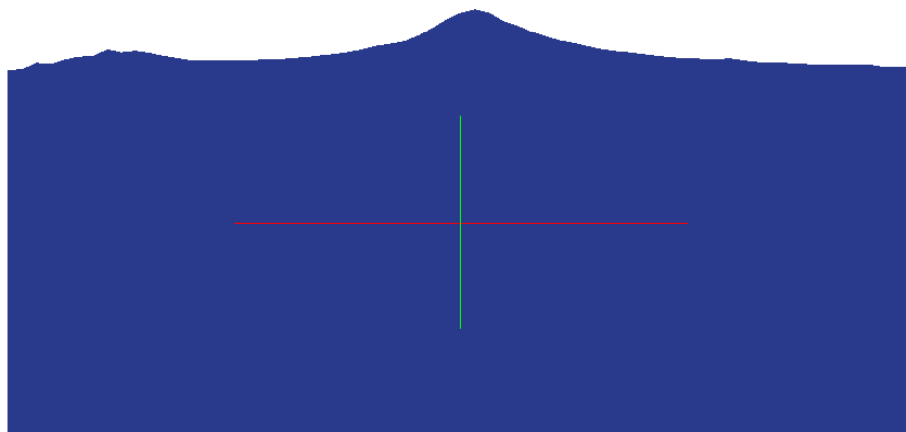
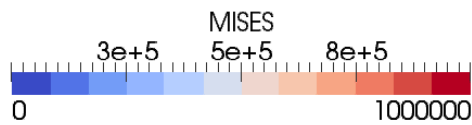
地表面の変位推移(0S-8S)



ミーゼス等価応力 (モデル中央緯線方向断面4S)



ミーゼス等価応力(モデル中央経線方向断面)



まとめ

- 有限要素法で地震波伝播解析機能を開発。
- 震源から対象地域を含む大規模モデルに対応するため、並列処理による高速計算機能を採用。
- 断層すべりは節点間の変位差として導入したため断層近傍における地震応答が解析可能。
- 地表以外の境界で生ずる反射波を除去するため自動増加するRayleigh減衰機能を導入。
- メッシュサイズが応答および荷重で表現可能な周波数を定める。システム活用時は入力荷重は周波数に応じた载荷時間を確保するよう注意。



Advance/FrontSTRは東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターが実施した文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトおよび「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフトが商品化したものです。アドバンスソフトは、これらのプロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を担当しましたが、その成果を独自に改良して商用パッケージソフトウェアとし、販売保守を行なっております。



地震すべりによる地殻変動の解析 プレート間地震への応用事例

防災セミナー

2013年4月25日(木)開催

戸田 則雄



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

目 次

- 1.断層運動に伴う地殻変動解析手法
- 2.地殻変動解析システム
- 3.東北地方太平洋沖地震と富士山への影響
- 4.まとめ



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

1.断層運動に伴う地殻変動解析手法

1.1 静的弾性解析を含む準静的粘弾性解析

□釣り合い式

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad \sigma_{ij} : \text{応力}, \quad f_i : \text{体積力}$$

□ひずみの式

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \varepsilon_{ij} : \text{歪}, \quad u_i : \text{変位}$$



□Maxwell粘弾性の構成方程式

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} = \frac{\sigma^{n-1}}{A} (\sigma_{ij} + p \delta_{ij}) + \frac{\partial}{\partial t} (s_{ijkl} \sigma_{kl})$$

σ : 相当応力, A, n : 材料定数, $p = -\frac{1}{3} \sigma_{ii}$: 圧力

s_{ijkl} : 弾性コンプライアンス

□求解方程式

$$[K]\{u\} = \{f_1\} + \{f_2\}$$

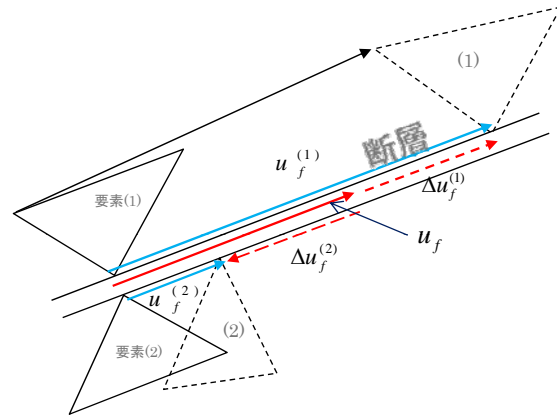
$\{f_1\}$: 体積力と表面力による外力ベクトル

$\{f_2\}$: 粘性歪発生による応力低減に相当する外力ベクトル



1.2 地震断層の処理

□ Split Node法



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

$$u_f^{(2)} = u_f + \Delta u_f^{(2)}$$

$u_f^{(1)}, u_f^{(2)}$: 断層面上層と下層の変位

u_f : 実際に解析で用いられる仮想変位

$\Delta u_f^{(1)}, \Delta u_f^{(2)}$: u_f に対する各要素における変位増分で断層すべり量の1/2を与える.



□ MPC法 (MPCCG法)

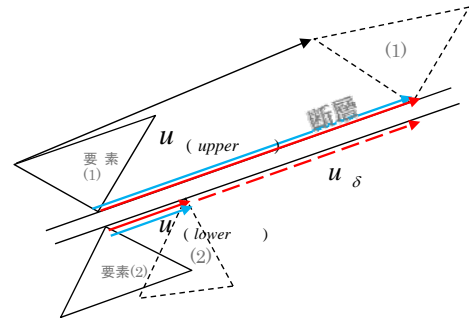
断層上節点の変位

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

$u_{(upper)}$: 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



地盤全体の変位は,

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

最終的に解くべき求解方程式は上式の変換行列をTとすると

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



2. 地殻変動解析システム

2.1 課題と対策

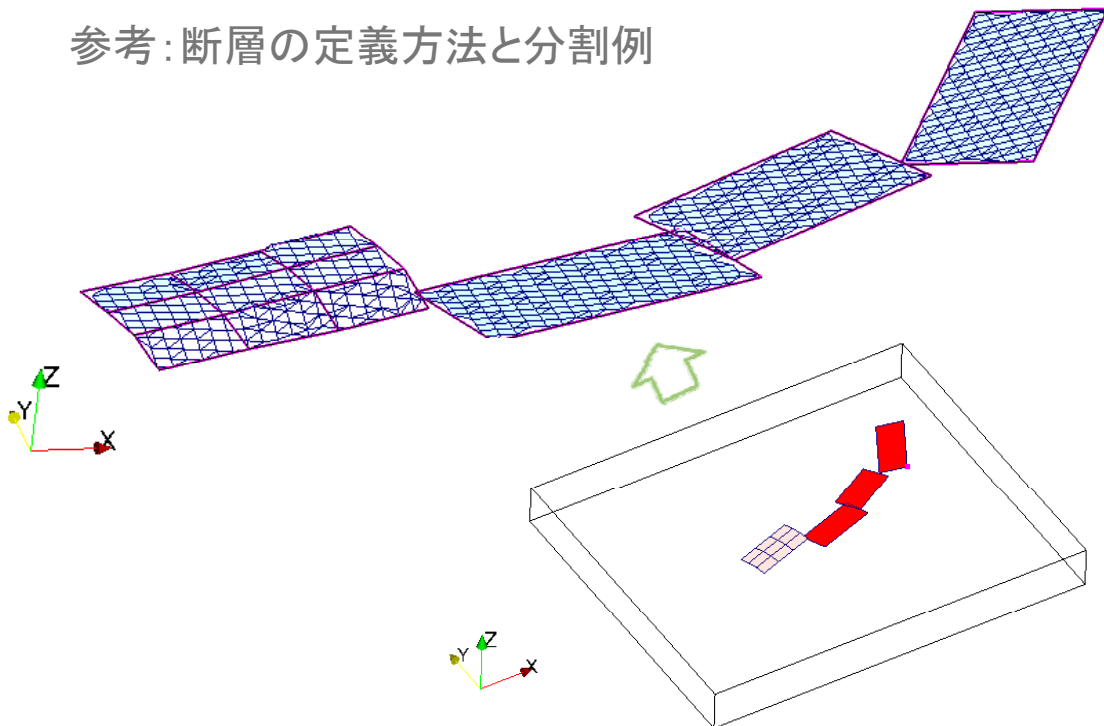
課題	対策
断層近傍要素の応力や歪の評価	MPCCG法
広域地盤への適用	球座標系でのモデル作成と応力評価, 無限要素による半無限領域解析
断層を含むメッシュ生成	断層を三・四角形で表現し柔軟な断層生成
複雑な地中構造	三次元地震波速度構造※, フィリピン海プレート面※※(東北大中島先生作成), 数値地図(国土地理院, JTOPO30), マグマ
大規模データ可視化	地表・任意切断面・部分構造抽出と可視化, 結果データベース

※出典: [Matsubara, M. and K. Obara, The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, Earth Planets Space, 63, 663-667, 2011](#)

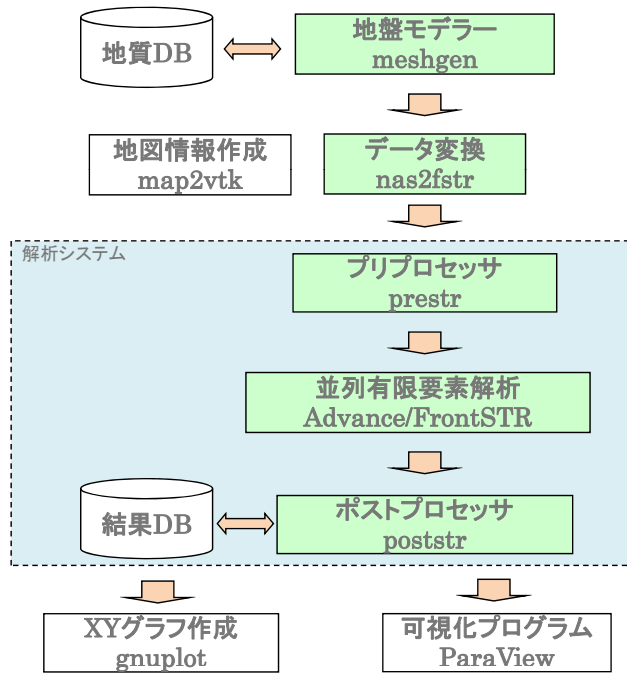
※※出典: Nakajima, J., and A. Hasegawa (2007), Subduction of the Philippine Seaplate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, J. Geophys. Res., 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770.



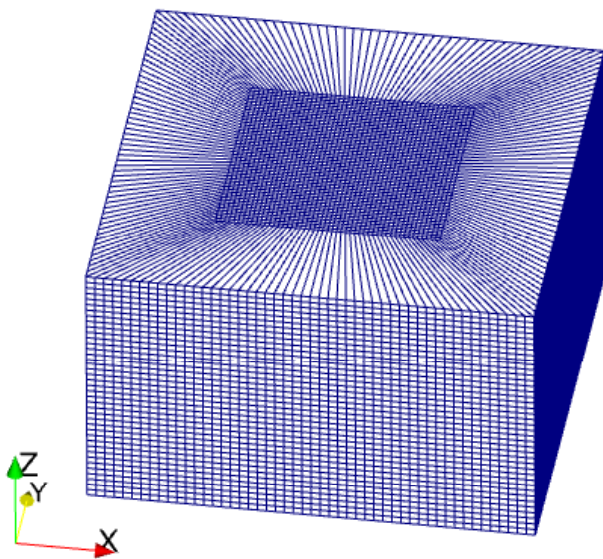
参考: 断層の定義方法と分割例



2.2 システム構成



2.3 精度検証(解析モデル)

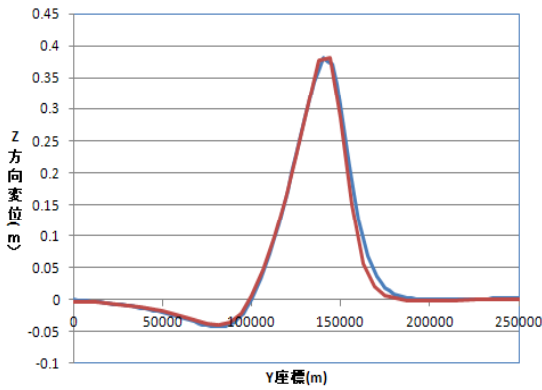


項目	内容
走向角	90°
傾斜角	30°
すべり角	0°
すべり量	$U_1=0m, U_2=1m, U_3=0m$
断層深さ	$d=40km$
断層面規模	50km(L), 50km(W)
地盤規模	250km(EW) × 250km(NS) × 150km(Depth)
地盤材質	$V_s=6325m/s, V_p=10954m/s, \rho=1000kg/m^3$
問題サイズ	節点数: 117341, 要素数: 110560, 要素サイズ5km
計算時間	445秒(2ステップ, WinPC)

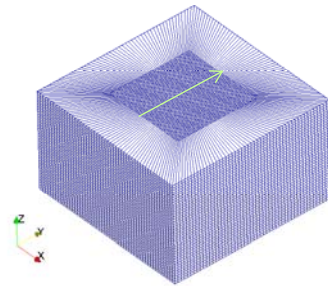
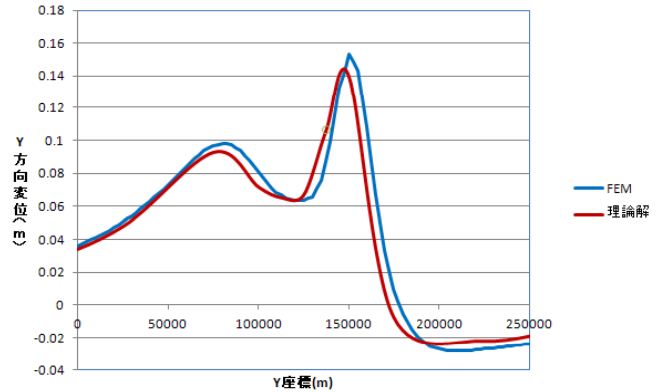


2.3 精度検証(解析結果)

中央部NS方向地表面のZ方向変位



中央部NS方向地表面のY方向変位



理論値は、「岡田モデル」
(Okada.BSSA 75,1135-
1154,1985)による。

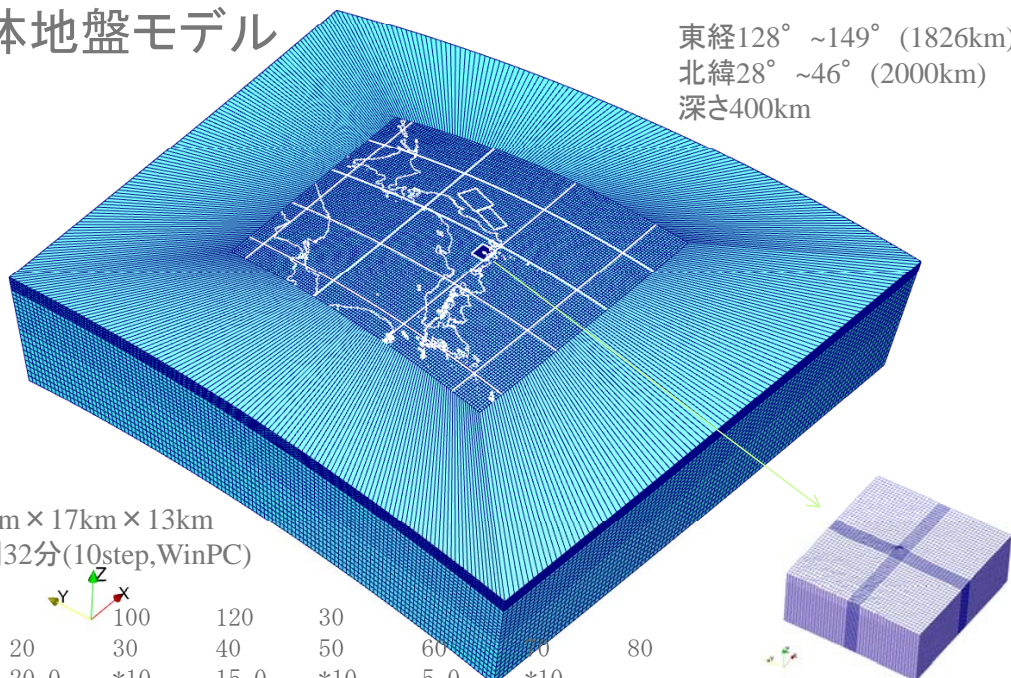


Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

3. 東北地方太平洋沖地震と富士山への影響

3.1 全体地盤モデル

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



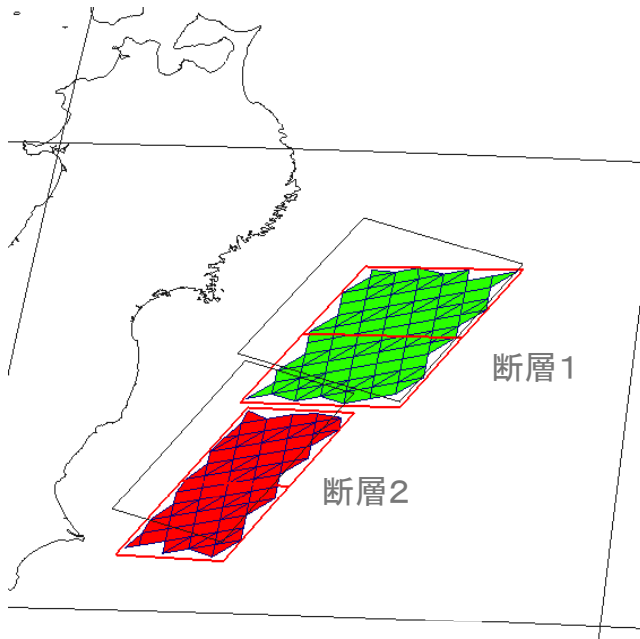
節点数:569891
要素数:542163
要素サイズ:18km×17km×13km
計算時間:3時間32分(10step,WinPC)

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



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

3.2 震源モデル



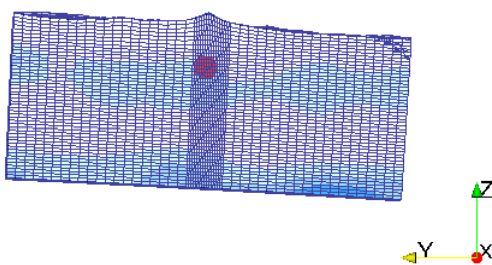
項目	断層1	断層2
緯度	38.80	37.33
経度	144.00	142.80
上端深(km)	5.1	17.0
長さ(km)	186	194
幅(km)	129	88
走行角(度)	203	203
傾斜角(度)	16	15
すべり角(度)	101	83
すべり量(m)	24.7	6.1
マグニチュード	8.8	8.3

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



3.3 富士山詳細部

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



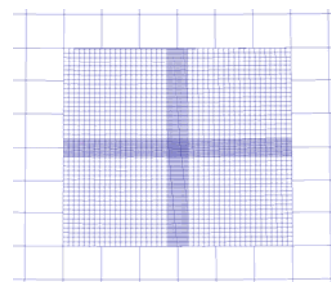
多段解析(ズーミング解析)

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。



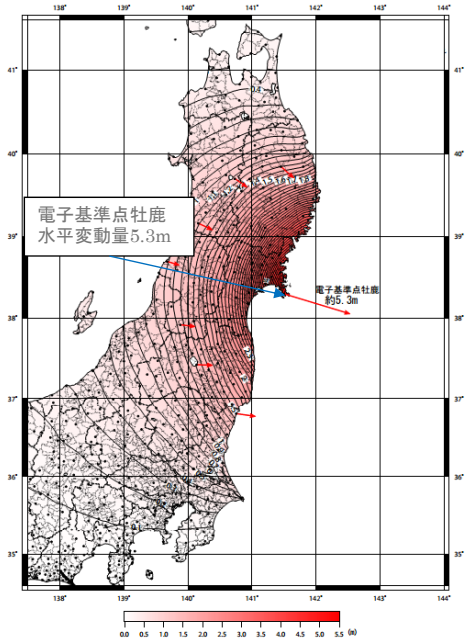
MPC条件による細分側節点の変位補間



3.4 解析結果(水平変位)

本震 (M9.0) に伴う地殻変動
等変動量線図 (水平変動量)

基準期間: 2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00 30秒幅解 平均値
比較期間: 2011/03/11 18:00 - 2011/03/11 21:00 03秒幅解 平均値
※電子基準点の解析結果の存在しない地区では保証されません

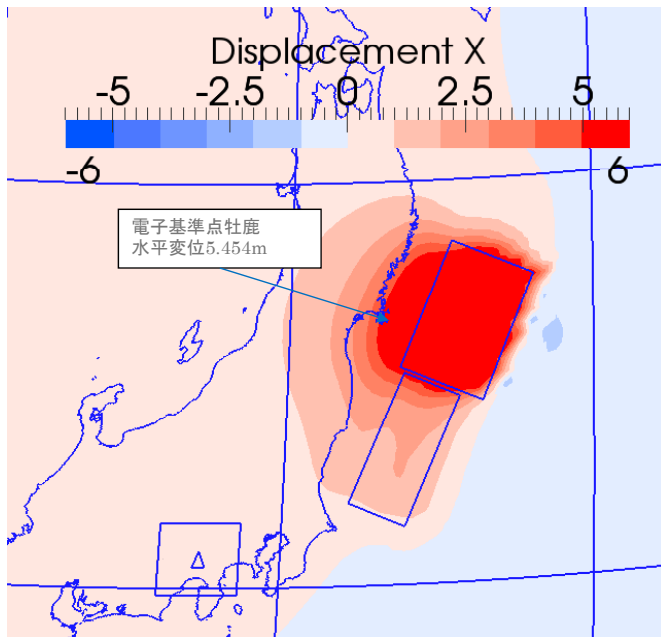


出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

地表における水平変位(解析結果)

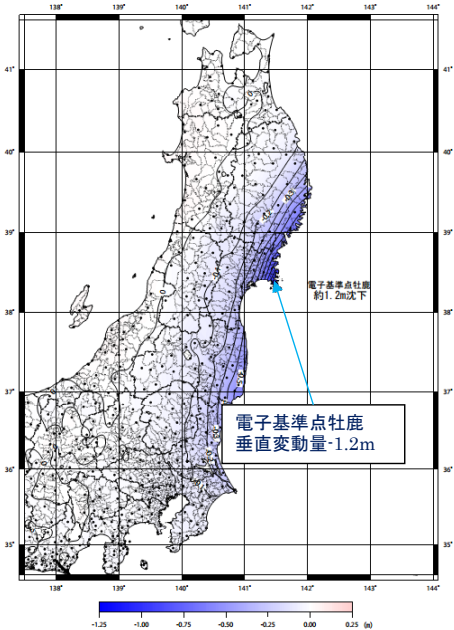


単位: m

3.4 解析結果(鉛直変位)

本震 (M9.0) に伴う地殻変動
等変動量線図 (上下変動量)

基準期間: 2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00 30秒幅解 平均値
比較期間: 2011/03/11 18:00 - 2011/03/11 21:00 03秒幅解 平均値
※電子基準点の解析結果の存在しない地区では保証されません

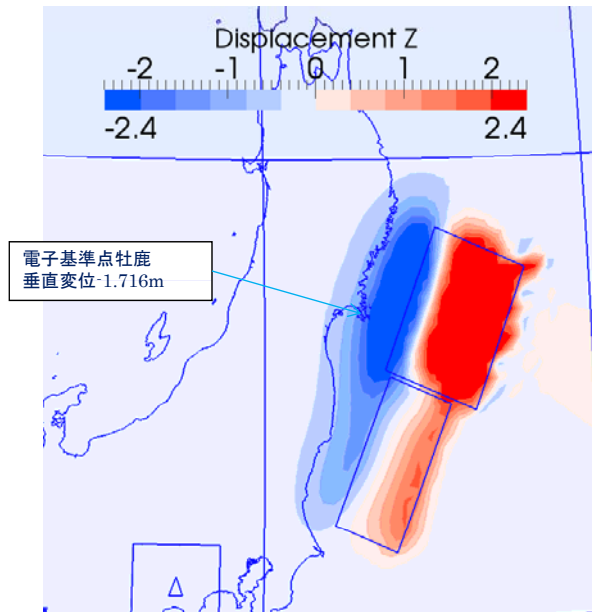


出典: <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>



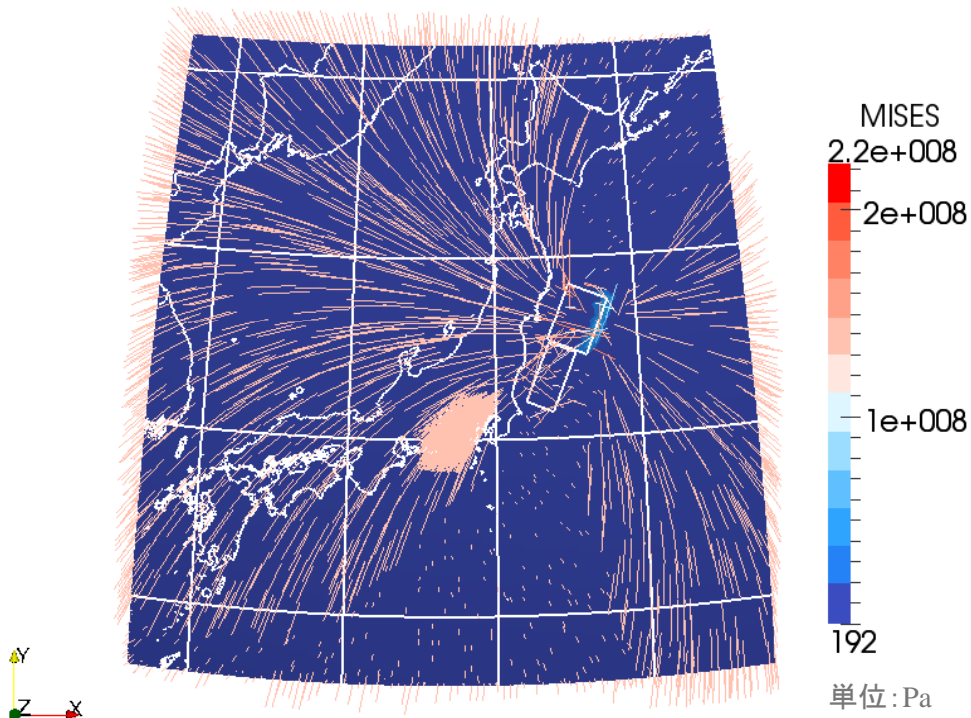
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

地表における鉛直変位 (解析結果)



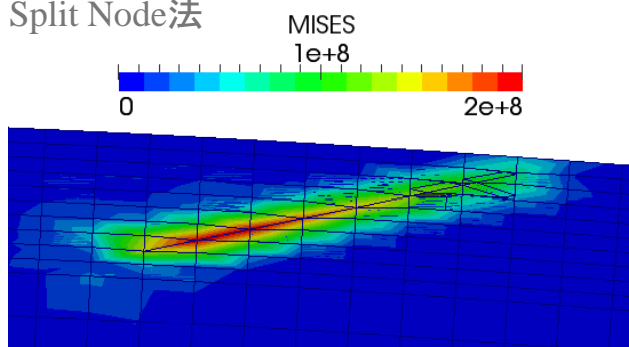
単位: m

3.4 解析結果(最大主応力線)

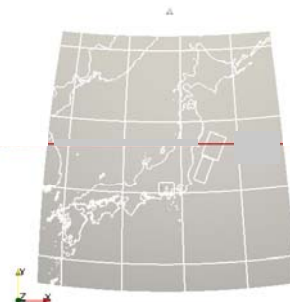
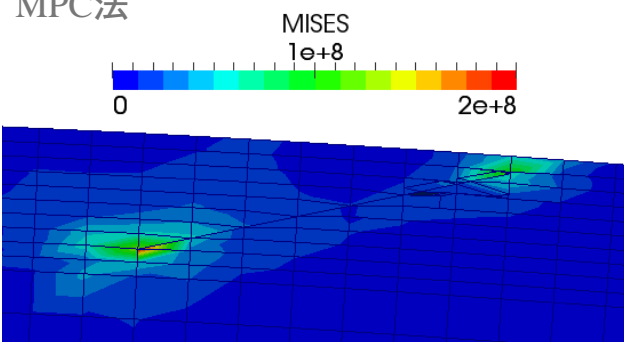


3.4 解析結果(断層付近応力分布)

Split Node法



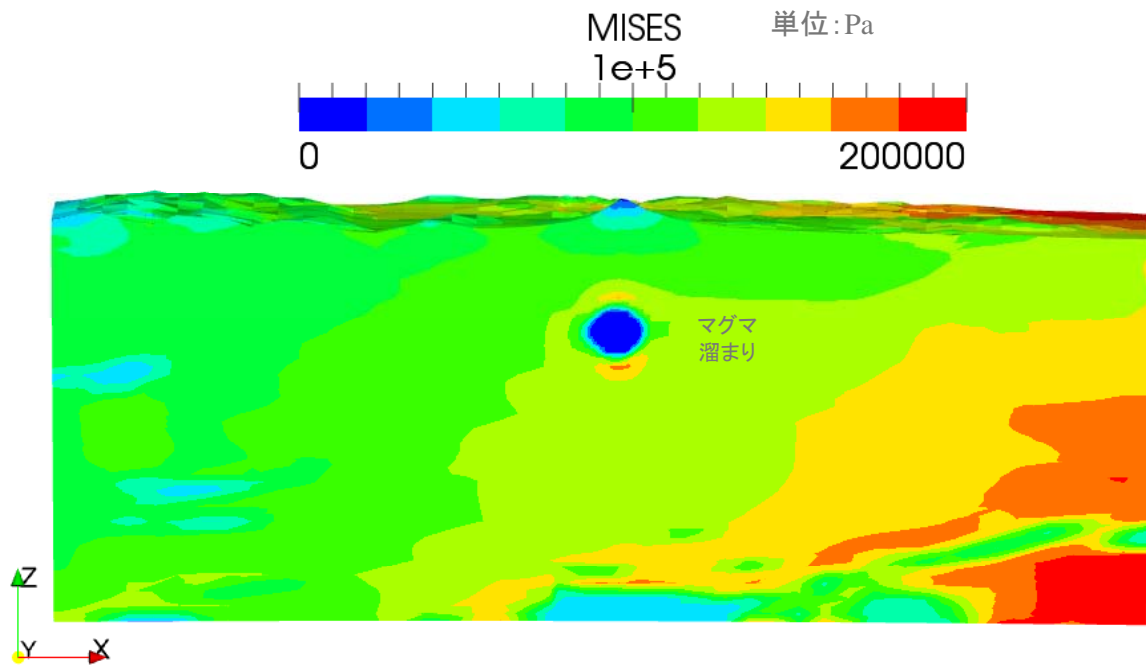
MPC法



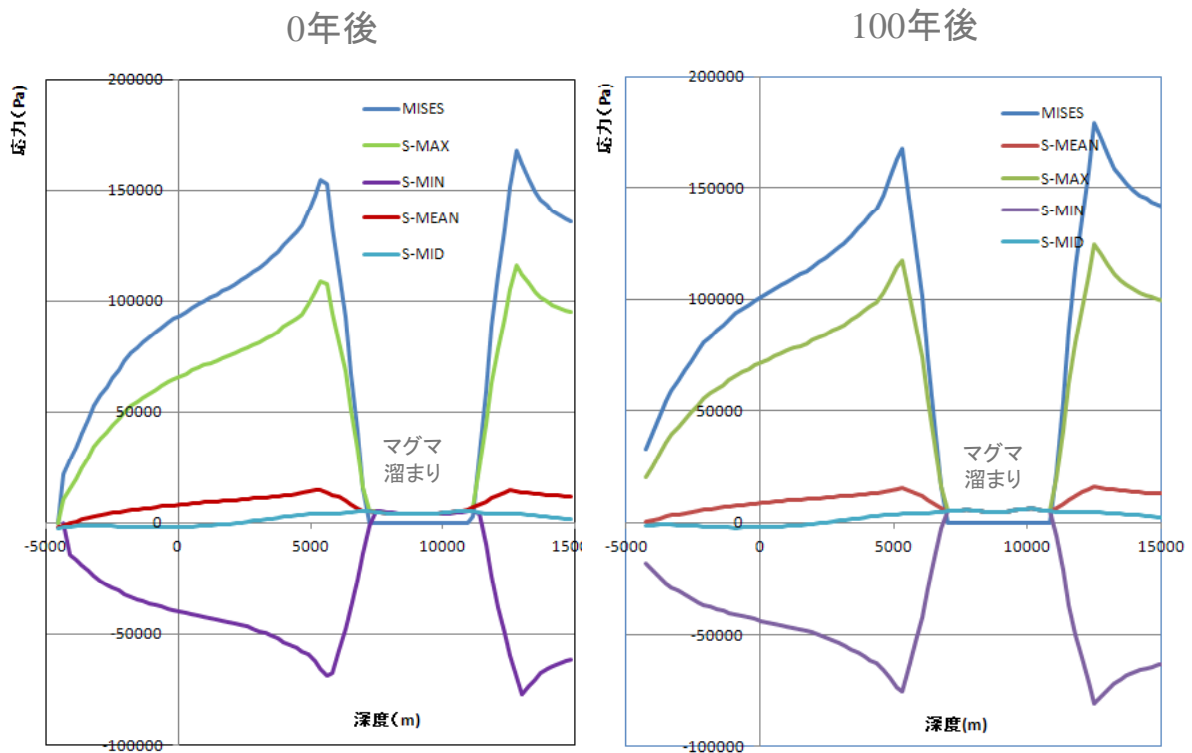
切断位置



3.4 解析結果(富士山直下応力分布)



3.4 解析結果(富士山鉛直方向応力変化)



4.まとめ

- 構造解析プログラムに断層運動に伴う地殻変動解析機能を加えた.
- 断層の処理にMPC法を採用して断層付近の応力を高精度で評価できるようにした. 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断層の解析を効率的に計算することが可能である.
- 東北地方太平洋沖地震に適用し, 富士山周囲における影響を評価した.



Advance/FrontSTRは東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターが実施した文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトおよび「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフトが商品化したものです。アドバンスソフトは、これらのプロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を担当しましたが、その成果を独自に改良して商用パッケージソフトウェアとし、販売保守を行なっております。



3次元気液二相流 流体解析に基づく 噴火発生過程のシミュレーション

防災シミュレーションセミナー
2013年4月25日(木)開催
湊 明彦



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

内容

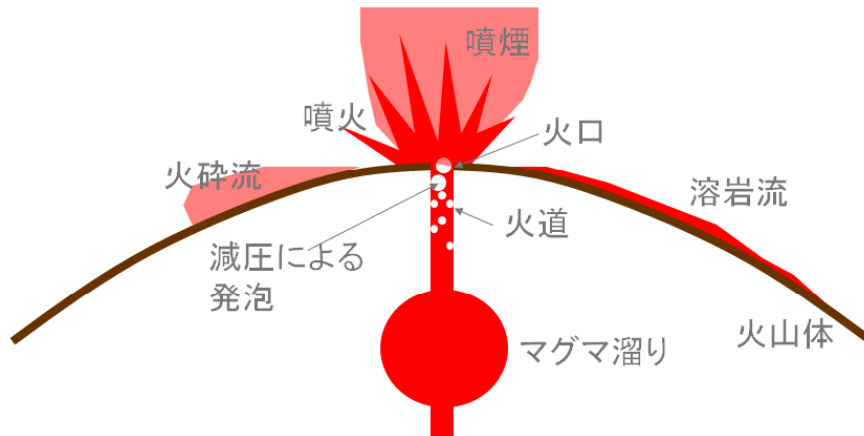
- 噴火とは
- 解析モデルと解析条件
- 噴火の過渡解析結果
- ブラスト(爆風)解析
- 高粘性流体湧出し解析
- 結言



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

噴火とは

地下深部で発生したマグマが上昇して地表に噴出する現象。



マグマ: 高温高压の岩石溶融物で揮発成分を含む



解析条件

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)

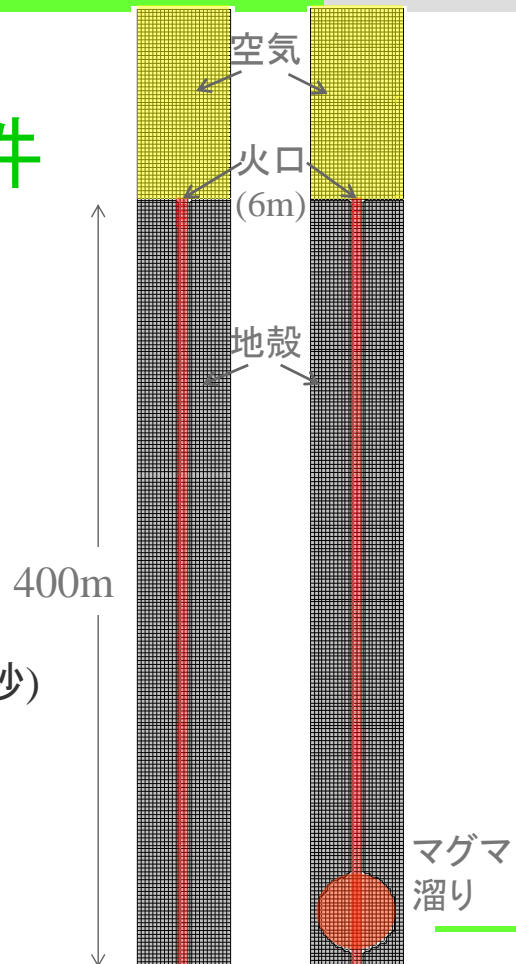
約30,000個

タイムステップ

$2 \times 10^{-5}s$, 40万ステップの計算(8秒)

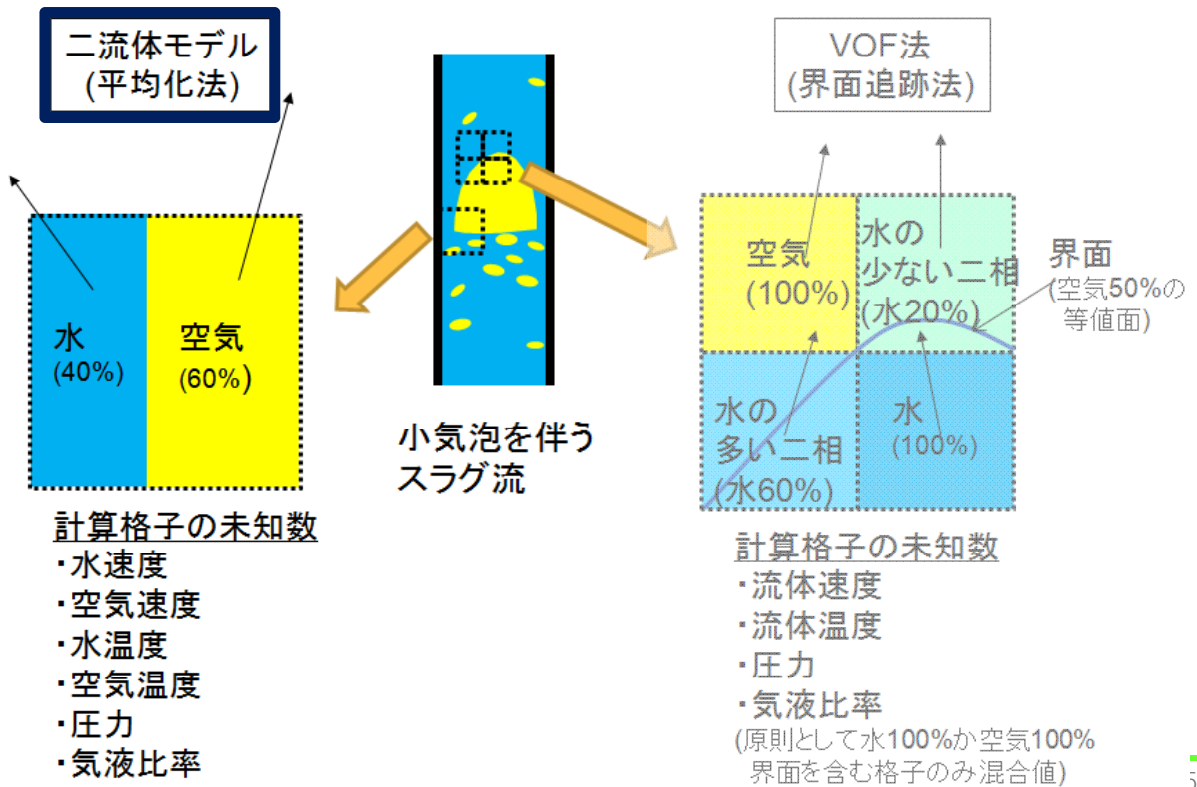
マグマ初期圧力

火口で20MPa, 重力ヘッド考慮



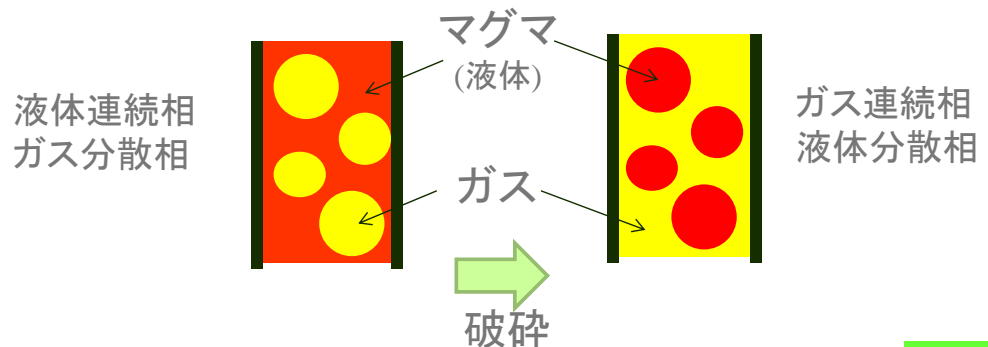
代表的な気液二相流モデル

(気体と液体の混合流)



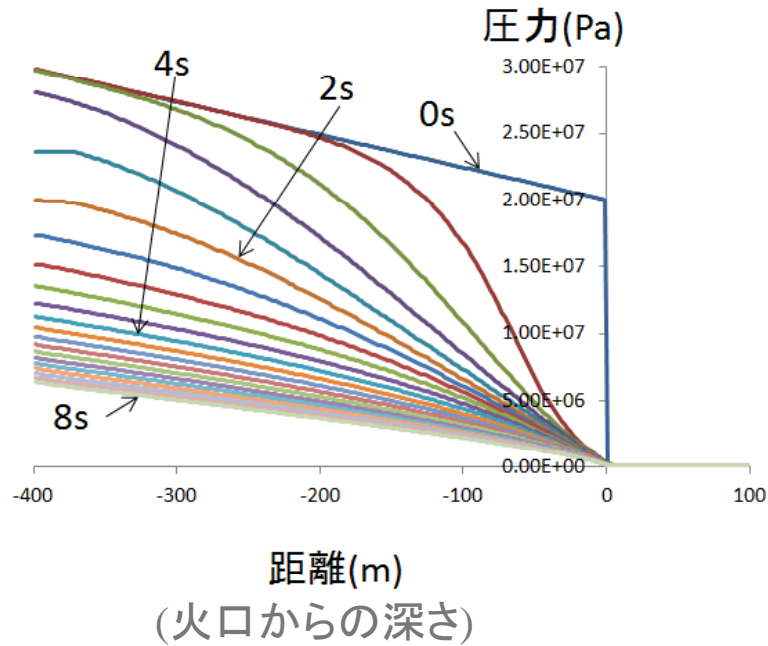
噴火の二相流解析で考慮すべき項目

- マグマ物性(粘性,密度)
- 揮発性ガスの溶解度(温度,圧力依存)
- 発泡の時間遅れ
- マグマ液相の破砕(連続相の交代)



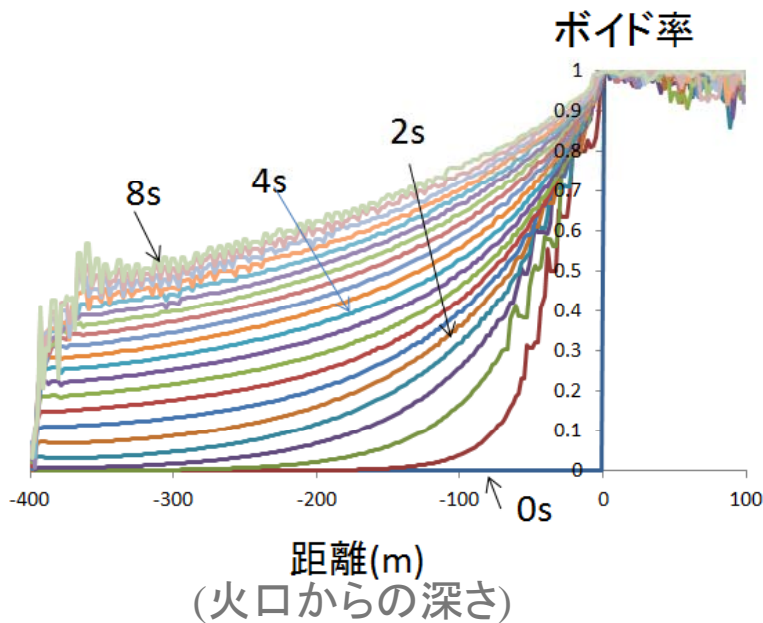
圧力分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



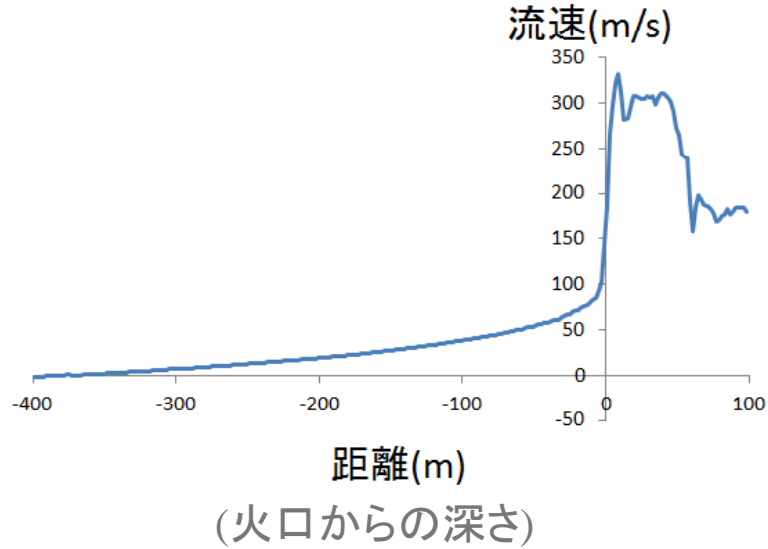
ボイド率分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



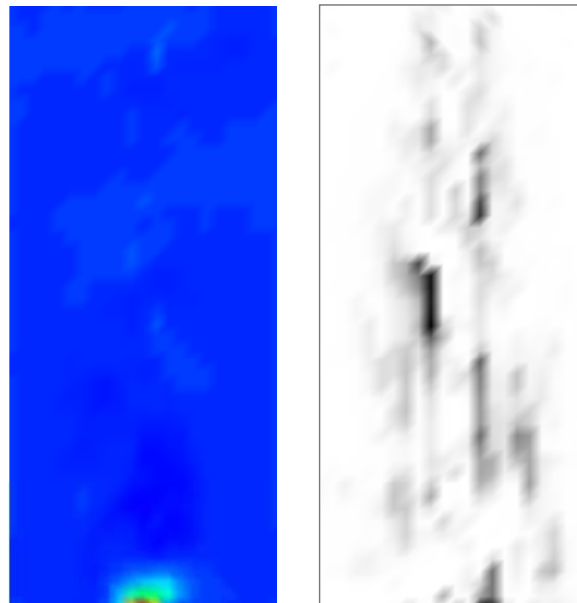
流速分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



噴流内の圧力とボイド率

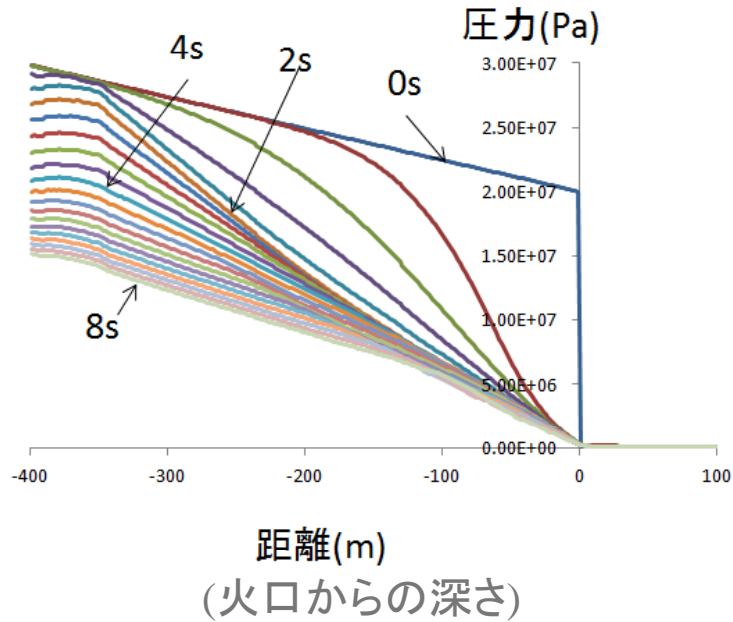
(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



噴流圧力分布 噴流ボイド率分布
(液率を強調して表示)



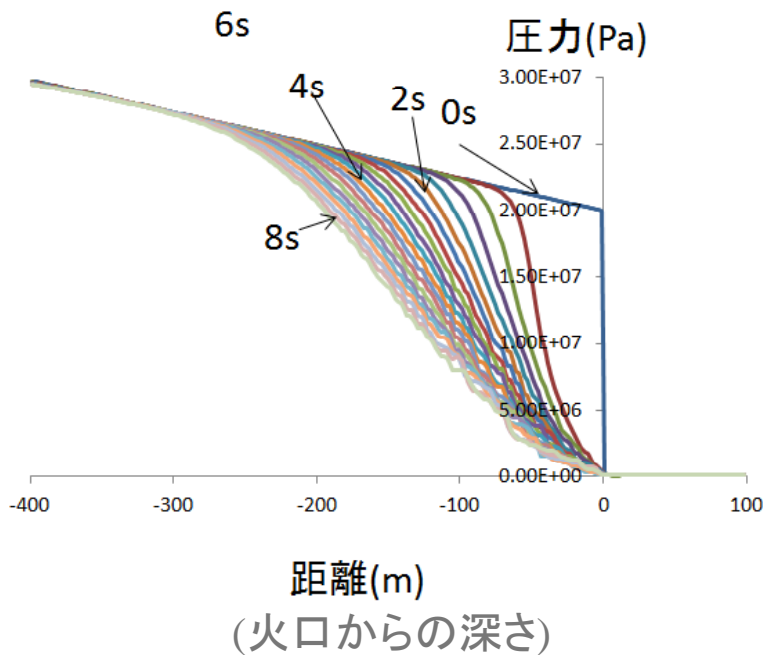
マグマ溜りのある噴火解析結果



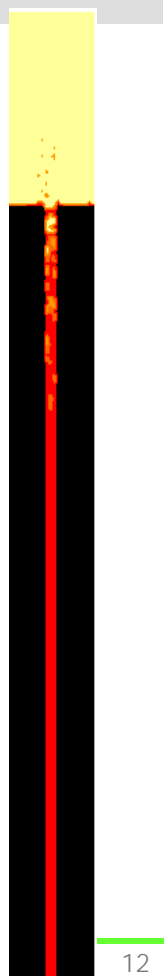
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved



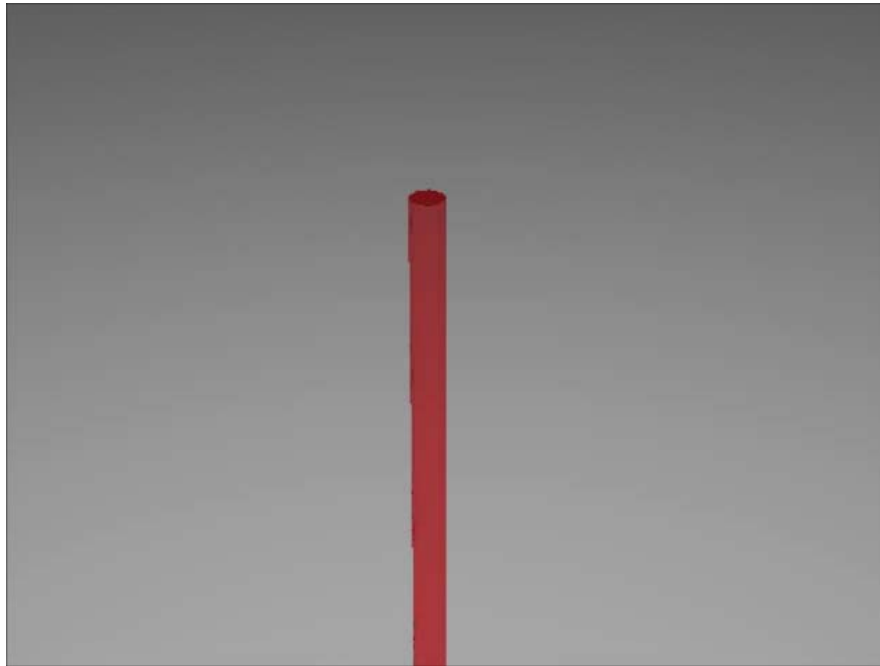
高粘性マグマの解析結果 (粘性係数 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$)



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved



噴火解析のアニメーション

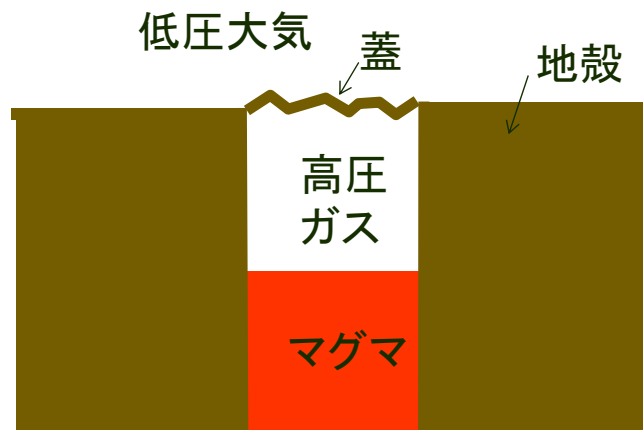


POV-ray
使用

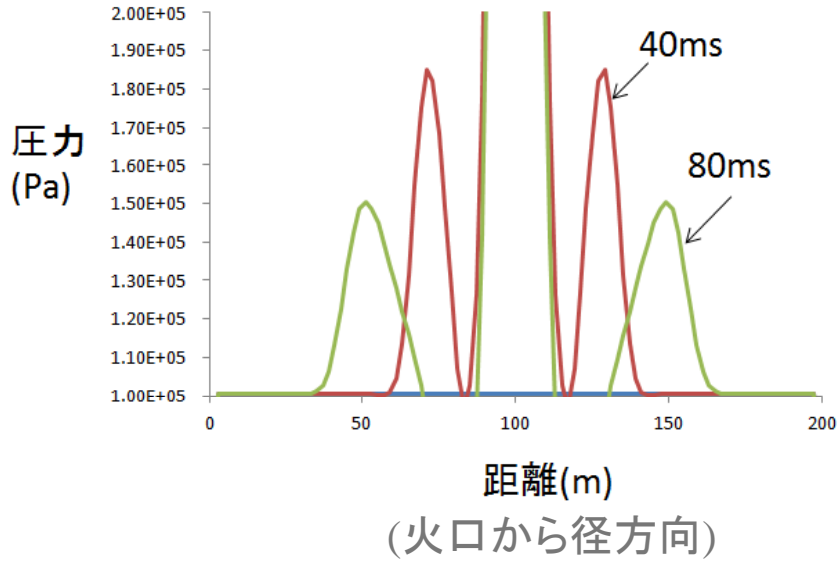


ブラスト(爆風)とは

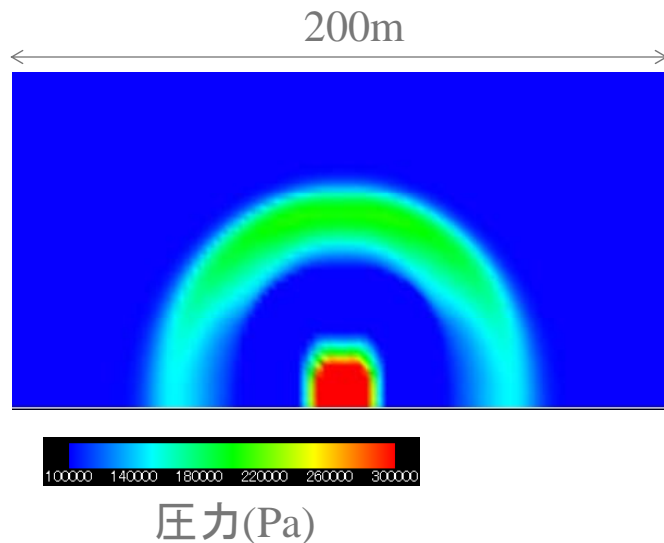
高压ガスが大気に解放されるとき
(火口蓋破壊)発生する衝撃波



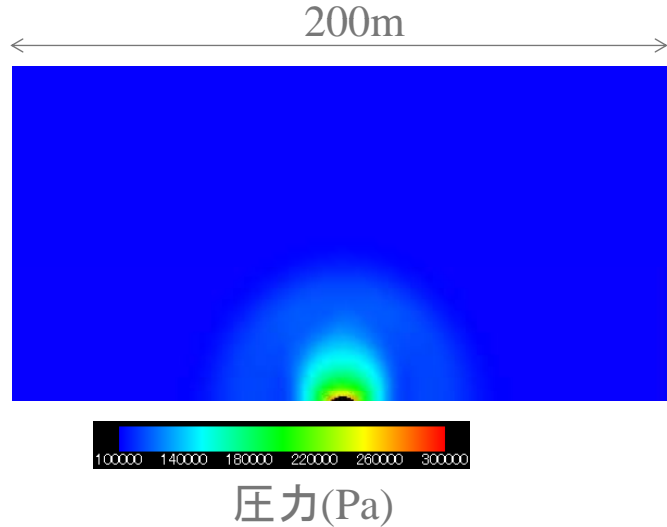
ブラストによる衝撃波伝播 (ガス溜り深さ100m)



ブラストによる圧力分布 (ガス溜り深さ100m,80ms)



ブラストによる圧力分布 (ガス溜り深さ0m,80ms)



高粘性流体の数値解析

高粘性⇒粘性の影響が遠くに及ぶ
(粘性が大きいほど固体に似た挙動)

$$\text{影響距離} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \times \Delta t}$$

粘度
密度
タイムステップ

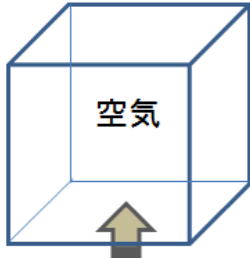
粘度 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$
 密度 2500kg/m^3
 タイムステップ 1s
 のとき 20m

計算メッシュはこれより十分大でなければならない
(詳細計算が難しい)

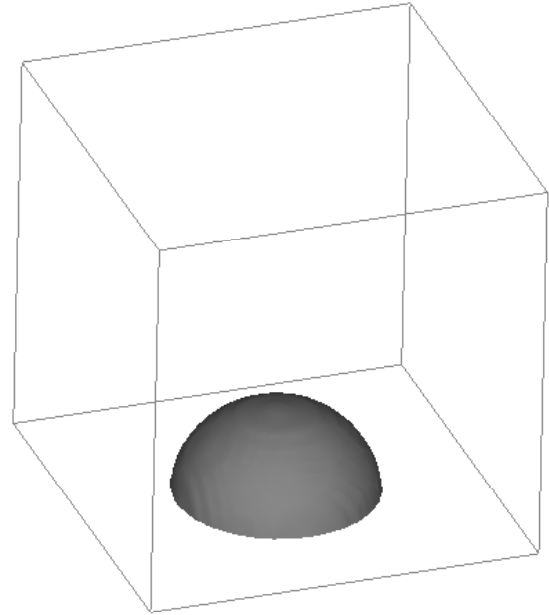


高粘性流体湧出しの解析結果

解析領域 0.5m立方
密度 1000kg/m³



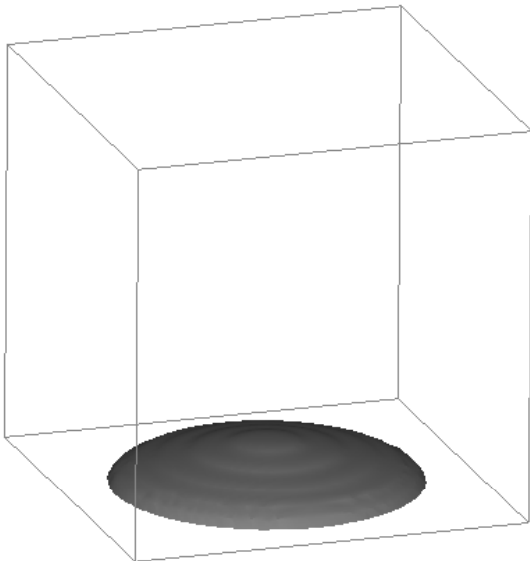
粘性流体湧出し(0.1m/s)
(7.2cm平方開口から6秒間)



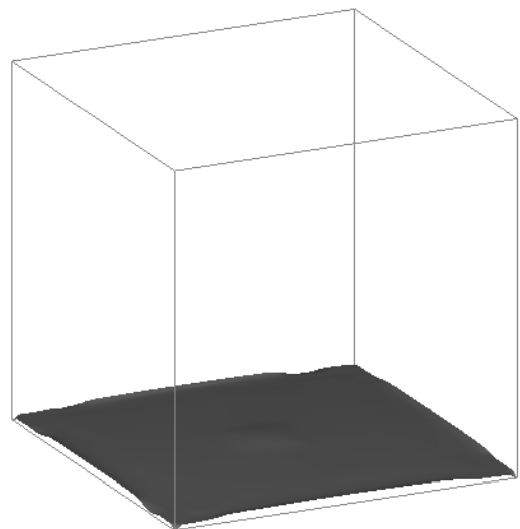
粘性係数10⁶Pa·s



高粘性流体湧出しの解析結果



粘性係数10²Pa·s



粘性係数1Pa·s



結言

- 三次元圧縮性二流体モデルを用いて火口開口からほぼ定常噴流になるまで過渡解析を行った。
- マグマ溜りの効果，粘性の影響を調べた。
- 高圧ガス溜りがある条件でブラスト（爆風）の発生を計算できた。
- 高粘性流体湧出し解析において界面形状に及ぼす粘度の影響を調べた。



降下火山灰影響評価のための 噴煙柱の数値流体解析

電力中央研究所 地球工学研究所

○須藤 仁, 服部 康男, 土志田 潔

アドバンスソフト防災セミナー

2013.4.25

RI 電力中央研究所

© CRIEPI

1

RI 電力中央研究所

はじめに

電力中央研究所では、数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術の開発を進めている。

本講演では、

- ◆ 数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術の現状と課題
- ◆ 火山噴煙柱の数値流体解析(防災に係わる取組みの一例として)

について、その概要を紹介する。

電力中央研究所報告 研究報告N10028

<http://criepi.denken.or.jp/index.html>

数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術の現状と課題

© CRIEPI

3

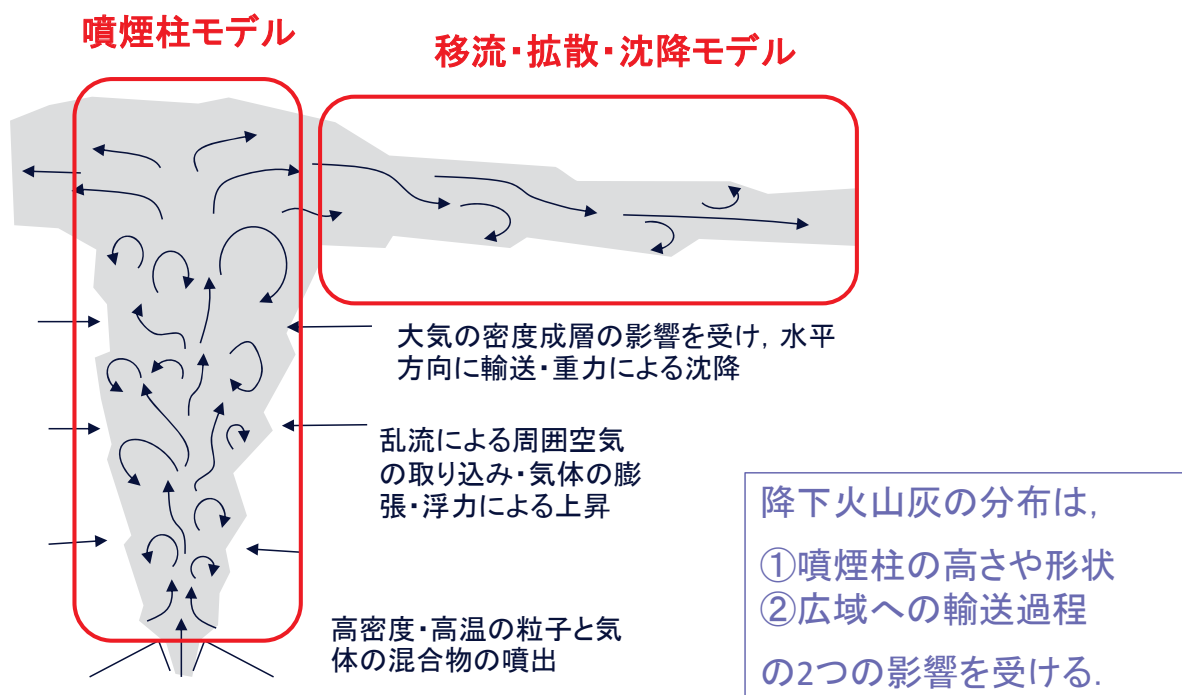
背景

- ◆ 火山噴火に伴い発生する降下火山灰(降灰)の影響の適切な評価と対策の実施は、電気事業における発電・流通設備の健全性確保のために重要である。
- ◆ 降下火山灰は広域に輸送され、電力施設に対して荷重、付着、侵入等を起因とする影響を及ぼすため、その量や頻度等に関するハザード評価が重要である。
- ◆ 降下火山灰の評価は、**地質調査等により降灰履歴を明らかにすることが基本**となるが、噴火規模・噴煙形状の多様性に起因して不足する情報を補うべく、近年、適用分野が広がりにつつある**数値流体解析等の新たな評価技術の開発**も望まれている。

目的

- ◆ 数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術に関する調査結果を基に、その現状と今後取組みが望まれる課題を紹介する。

火山灰の輸送過程の概略と解析モデルの対象領域



既存の解析モデルの特徴

対象	噴煙柱		火山灰の移流・拡散・沈降	
モデル	一次元モデル	多次元・非定常モデル	オイラータイプ ^{注1)}	ラグランジアンタイプ ^{注2)}
主な仮定	<ul style="list-style-type: none"> 混合物の一流体近似 流れの軸対象性・自己相似性 	<ul style="list-style-type: none"> 混合物の一流体近似 混合物の多流体近似 	<ul style="list-style-type: none"> 水平方向移流 プラントル仮説 (渦拡散係数) 	<ul style="list-style-type: none"> 水平方向移流 プラントル仮説 (渦拡散係数)
評価可能な現象	<ul style="list-style-type: none"> 強制プルーム型の噴煙柱 	<ul style="list-style-type: none"> 強制プルーム型の噴煙柱 横風を受ける噴煙柱 噴煙柱の部分的な崩壊により発生する火砕流等 	<ul style="list-style-type: none"> 地表面での火山灰堆積 	<ul style="list-style-type: none"> 大気中の火山灰輸送

注1) オイラータイプ: 任意位置を通過する火山灰の量の変化を捉える手法を採用したもの。

注2) ラグランジアンタイプ: 火山灰粒子あるいはその集合体の運動を追跡する手法を採用したもの。

© CRIEPI

現状の解析モデルが抱える技術的課題(例)

— 噴煙柱モデル(多次元非定常モデル)に関する事項 —

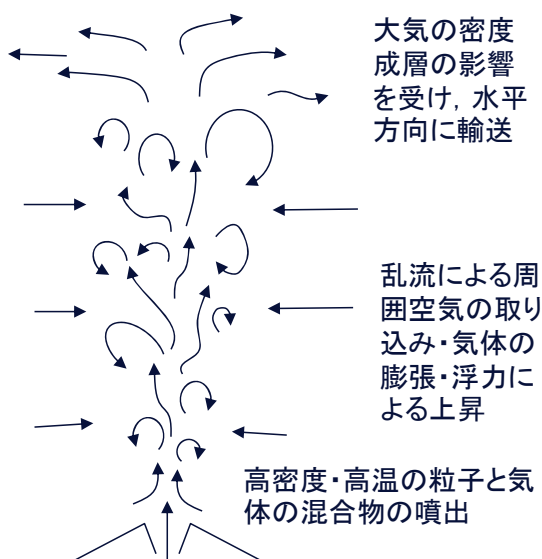


図 噴煙柱のイメージ

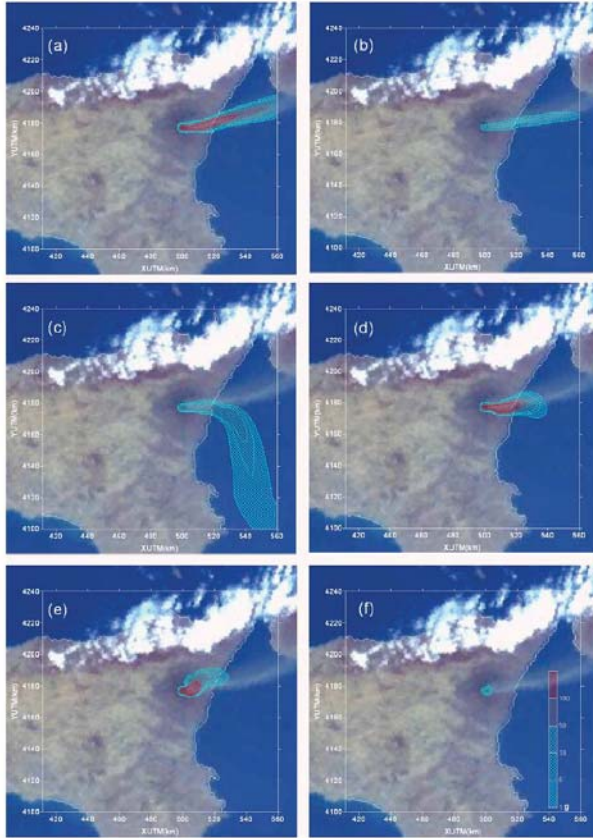
噴煙柱内部の運動における要素モデルの適用性の検証・高度化

例えば、噴煙柱内部の運動における素過程として

- ・気体の応力・熱拡散(乱流効果)
- ・粒子間の抗力・熱伝達
- ・気体-粒子間の抗力・熱伝達 など

現状の解析モデルが抱える技術的課題(例)

ー移流・拡散・沈降モデルに関する事項ー



境界条件の設定方法の精緻化
特に、噴煙柱パラメータ(噴出量・粒径分布)の鉛直分布の取り込み。

図 火山灰粒子直径別の降灰の移流・拡散挙動(衛星データ)(Barsotti et al. 2008)

粒子直径が降灰分布に強い影響を持つ。粒子直径の鉛直分布の正確な見積もりが必須であることがわかる。

© CRIEPI

既存の解析モデルの問題点

対象	噴煙柱		火山灰の移流・拡散・沈降	
モデル	一次元モデル	多次元・非定常モデル	オイラータイプ	ラグランジアンタイプ
問題点 (個別)		<ul style="list-style-type: none"> 要素モデルの適用性 	<ul style="list-style-type: none"> 複雑地形場での精度低下 普遍的な拡散係数の設定 噴煙柱モデルとの連携 	
問題点 (共通)	<ul style="list-style-type: none"> 火山灰の非球形効果 火山灰粒子の凝集 		<ul style="list-style-type: none"> 降雨による効果 気象場の再現性 	

電力中央研究所報告 研究報告N12003

<http://criepi.denken.or.jp/index.html>

火山噴煙柱の数値流体解析

-噴煙形状に及ぼす乱流モデルの影響評価-

背景

◆ 爆発的な噴火に伴う噴煙の運動

➤ 乱流

→ その運動様式(噴煙柱, 火砕流等)を決定づける重要な要素の一つ



(USGS Cascades Volcano Observatory, 1980)

◆ 近年における噴煙柱LES※コードの開発

(例えば, Neri et al. 2007, Suzuki and Koyaguchi 2010)

➤ 気体と火砕物に対するSGS(Sub-grid scale)乱流のモデリングについては不明な点も

※Large-eddy simulationの略. 非定常流動解析手法の一種で, 解析格子のスケールよりも小さい(サブグリッドスケール, SGS)乱流成分のみをモデル化するもの.

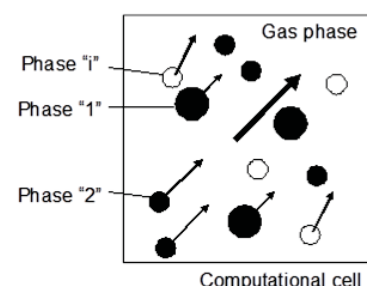
目的

- ◆ 多様な噴煙形状を再現するための噴煙柱のLES解析コードを構築
- ◆ 単純な流動場を対象とした解析と実験との対比
 - コードの妥当性の検証
- ◆ 二種類のSGS乱流モデルを用いた火山噴煙柱の解析結果
 - 噴煙柱形状に及ぼすSGS乱流モデルの影響を調査

計算手法

- Neri et al. (2007) のモデル概念の採用
 - ← 気体成分と様々な粒径の火砕物を複数の相に分類する多流体近似
 - ← SGS応力等をモデルにより表現するLES
 - ← その他, 相間の抗力・熱伝達および粒子相の応力等に関わるサブモデルを併用

- オープンソースコードの利用
 - ← FrontFlow/red (Ver.3.0)



計算手法

乱流の表現

← 気体相のSGSモデル:

Smagorinskyモデル (SM) ... 一般に広く利用

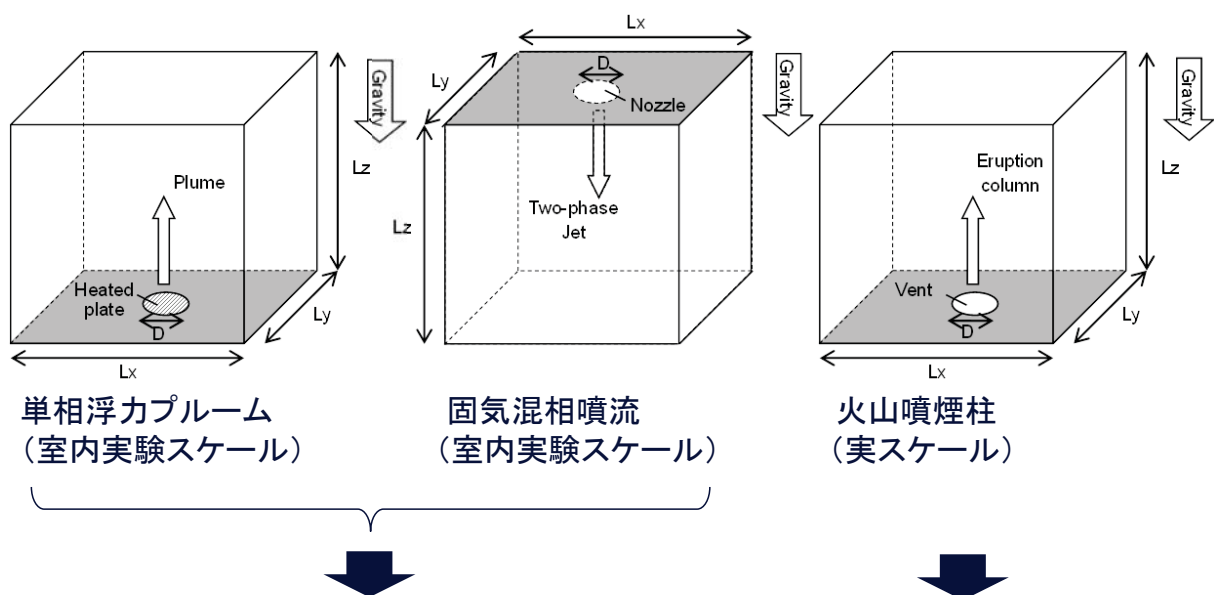
Yuuモデル (YM) ... SGS抗力の影響を加味

← 粒子相のSGSモデル:

Hinze の提案式 (HM)

... 粒子と気流の時間スケールを考慮

計算対象



①コードの妥当性の検証

①コードの妥当性の検証
②SGSモデルの影響調査

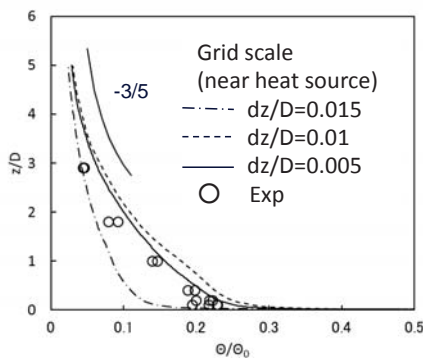
計算ケース

- **单相浮カプルーム**
 - 格子サイズのみ変えた3ケース
 - $dz_{min}/D=0.05-0.15$ (鉛直)
 - $dx_{min}/D=0.033-0.067$ (水平)
 - その他条件を固定
 - 乱流モデル: SM

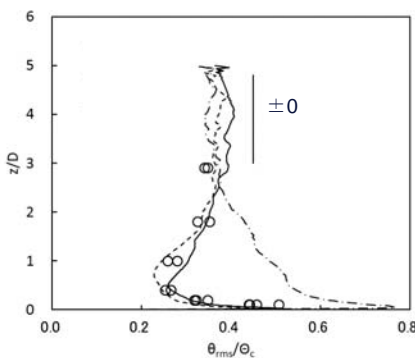
- **固気混相噴流**
 - SGS乱流モデルを変えた2ケース
 - SMのみ, YM + HM
 - その他条件を固定

- **火山噴煙柱**
 - 噴出速度とSGS乱流モデルを変えた4ケース
 - 噴出速度: 200, 100 and 50 m/s
 - SGS乱流モデル: SMのみ, YM + HM
 - その他条件を固定

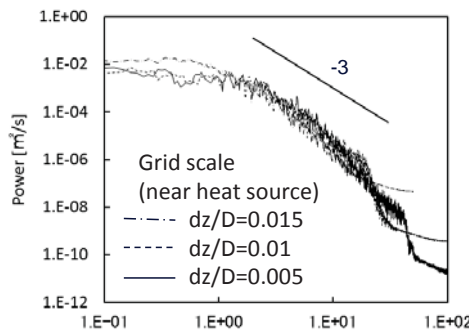
解析の妥当性(单相浮カプルーム)



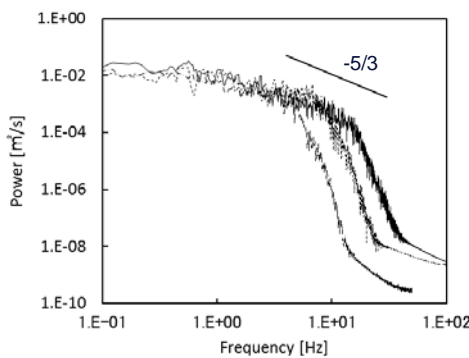
中心軸上の平均温度



中心軸上の温度の変動強さ



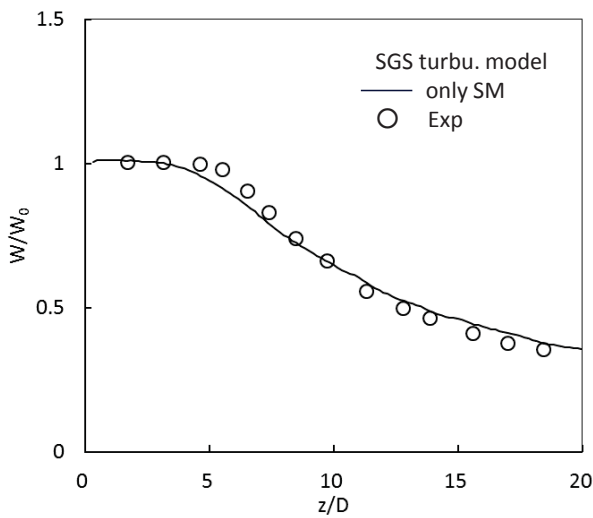
(a) $z/D=0.5$



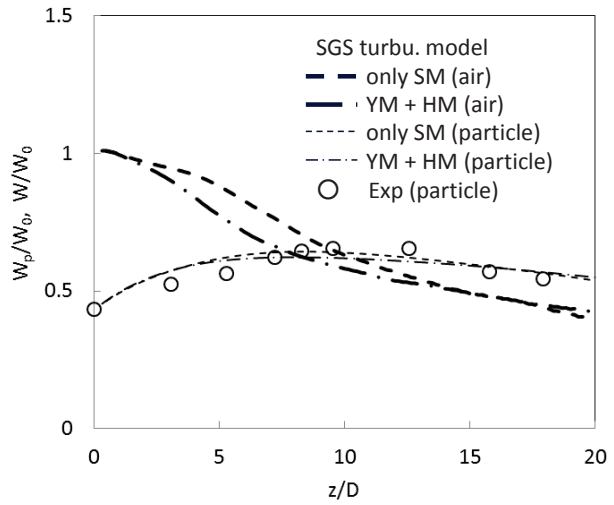
(b) $z/D=4.0$
中心軸上速度のパワースペクトル

主要なスペクトル帯域を捉えた格子系を用いれば、本コードにより浮カ上昇流を良好に再現できる。

解析の妥当性(固気混相/单相噴流)



(a) 单相噴流

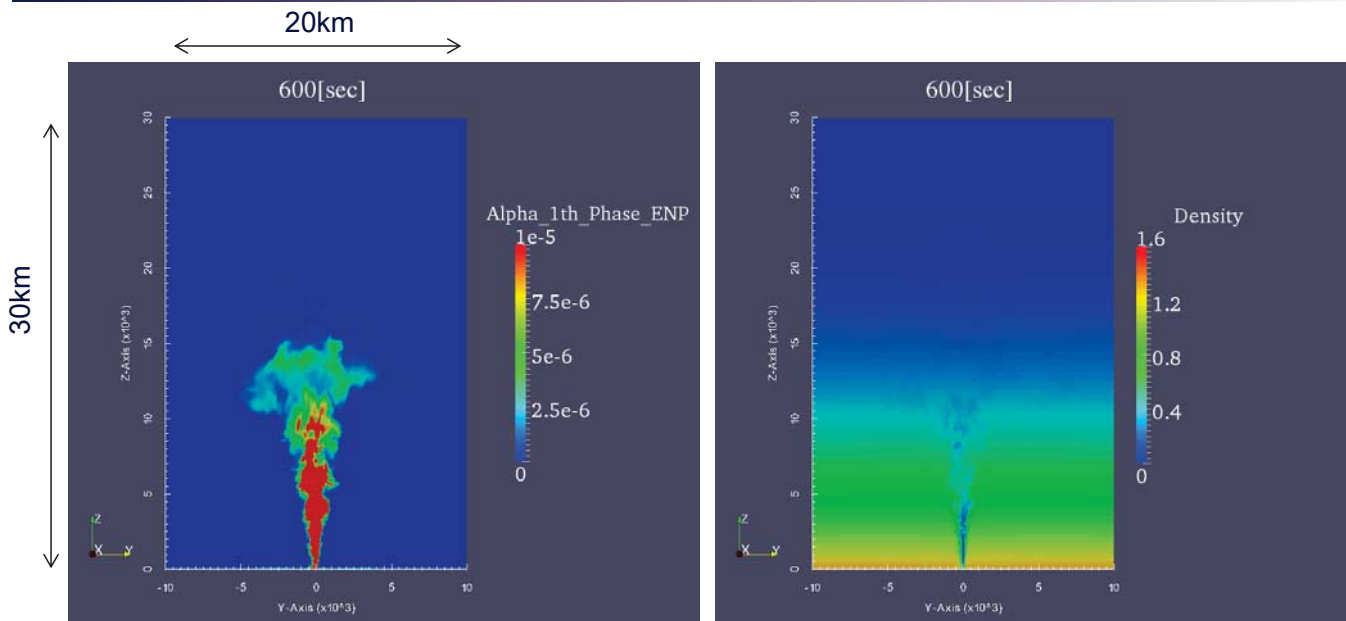


(b) 固気混相流

図 中心軸上の平均速度の鉛直分布

固気混相噴流の速度場も概ね再現可能.

解析の妥当性(噴煙柱)



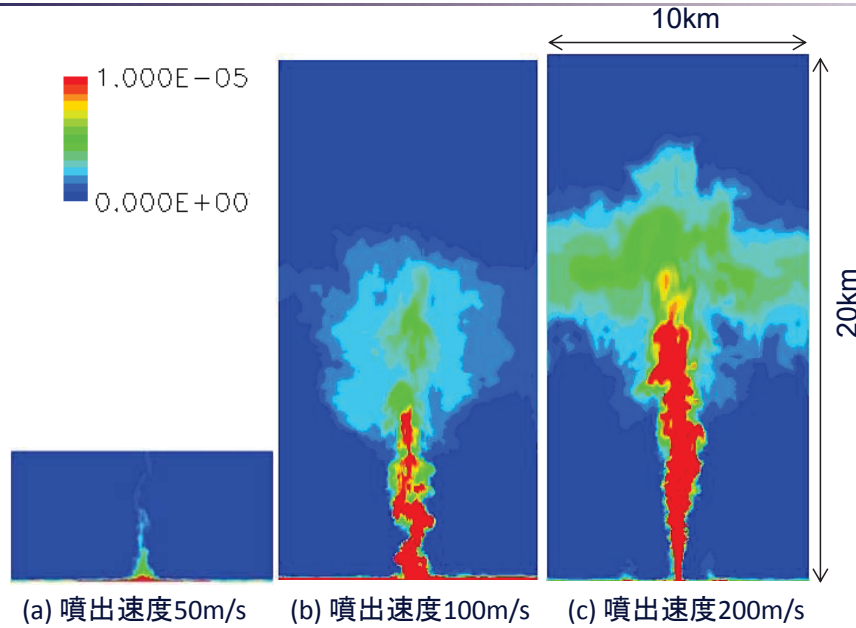
(a) 粒子濃度 (粒子相1)

(b) 密度 (気体相)

図 断面分布の時間変化 (噴出速度200m/s, Smagorinsky)
(噴出物の温度: 1000K, 噴出物における気体の質量分率0.03)

噴煙柱の構造を再現.

解析の妥当性(噴煙柱)



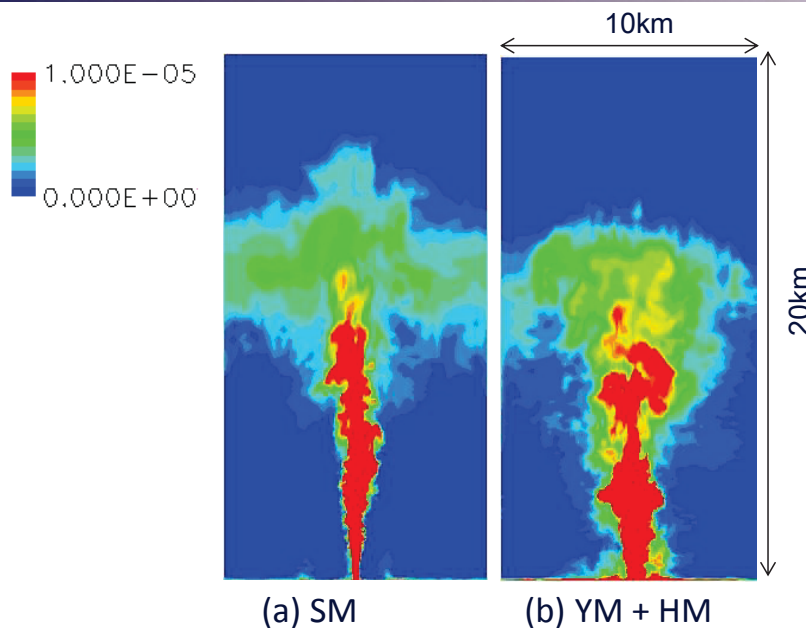
(a) 噴出速度50m/s (b) 噴出速度100m/s (c) 噴出速度200m/s

図 瞬時の粒子濃度の断面分布

(噴出物の温度: 1000K, SGS乱流モデル: SM)

- ・噴出速度が小さいほど, 噴煙柱の高度は低い.
- ・噴出速度50m/sでは, 噴煙形状が火砕流に変化.
- ・これらの変化は, 既存の他のモデル結果と整合.

SGS乱流モデルの影響



(a) SM

(b) YM + HM

図 瞬時の粒子濃度の断面分布

(噴出物の温度: 1000K, 噴出速度: 200m/s)

SGSモデルの選択によって噴煙柱の形状が変化.

SGS乱流モデルの影響

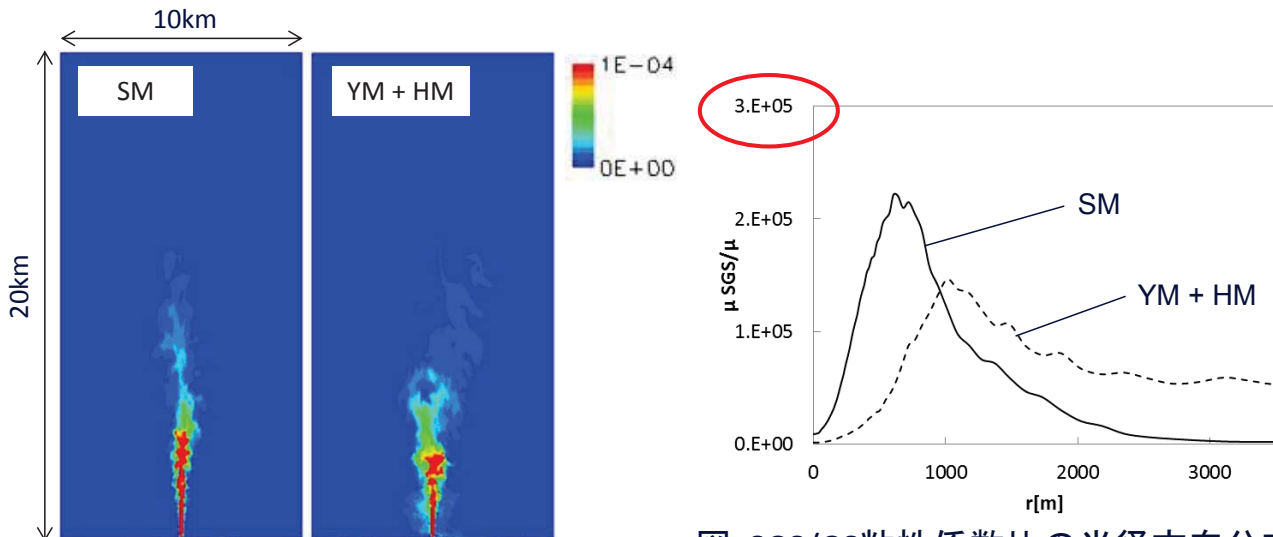


図 瞬時の粒子濃度の断面分布
(噴出物の温度：1000K, 噴出速度：200m/s)

図 SGS/GS粘性係数比の半径方向分布
(気体相, $z=3,000[m]$)

粘性係数比が非常に大きい → 乱流中の粘性効果がSGS乱流モデルに強く依存
粘性係数の違いで構造変化 → 噴煙形状は乱流粘性に対して敏感

まとめ

- ◆ 一定の格子条件の下において、本解析は単純体系の実験、火山噴煙柱の構造や噴出条件に応じて変化する現象を捉えられる。
- ◆ SGS/GS粘性係数比が非常に大きくなる実規模の噴煙柱体系においては、SGS乱流モデルの選択が噴煙柱形状に影響を及ぼす。

噴煙柱に適したSGS乱流モデルの選定・開発等は、今後の課題である。

おわりに

本講演では、

- ◆ 数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術の現状と課題
- ◆ (防災に係わる取組みの一例として) 火山噴煙柱の数値流体解析

について、その概要を紹介した。

火山噴煙柱の数値流体解析では、アドバンスソフト(株)の関係各位にご助言・ご助力を頂いた。

本研究では、文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトによる成果を利用している。

ここに深謝致します。