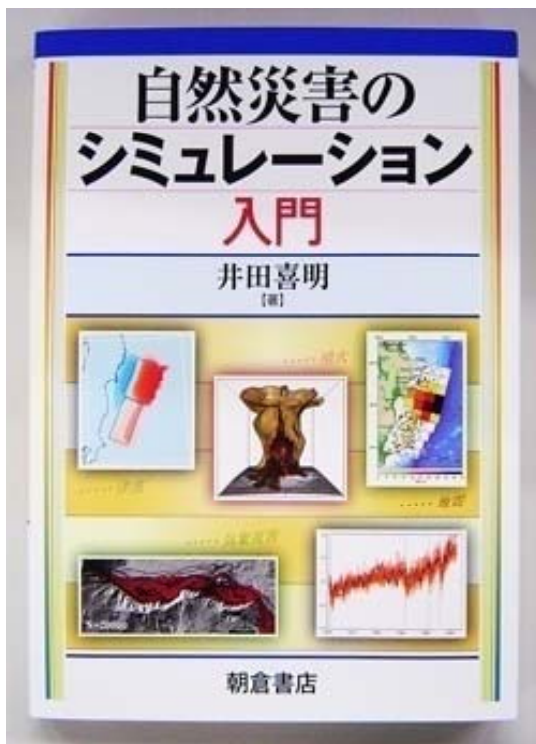


シミュレーションによる自然災害の解明と予測

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

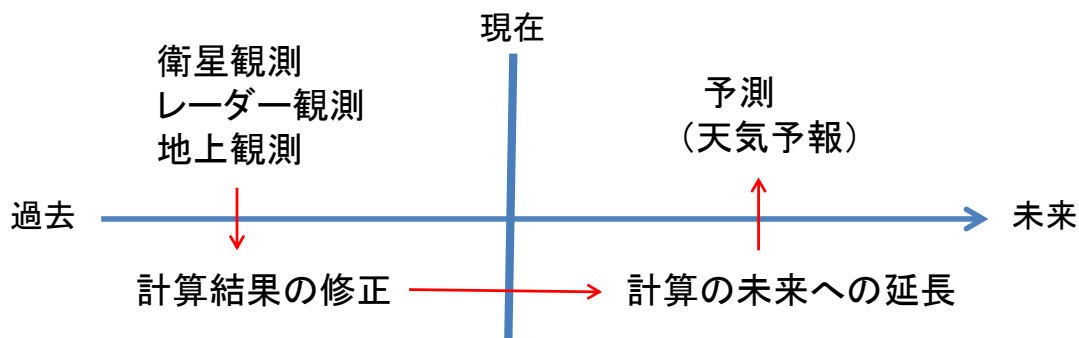
計算の仕組み

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)

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

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 $Q = -2\pi k \cos \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}$

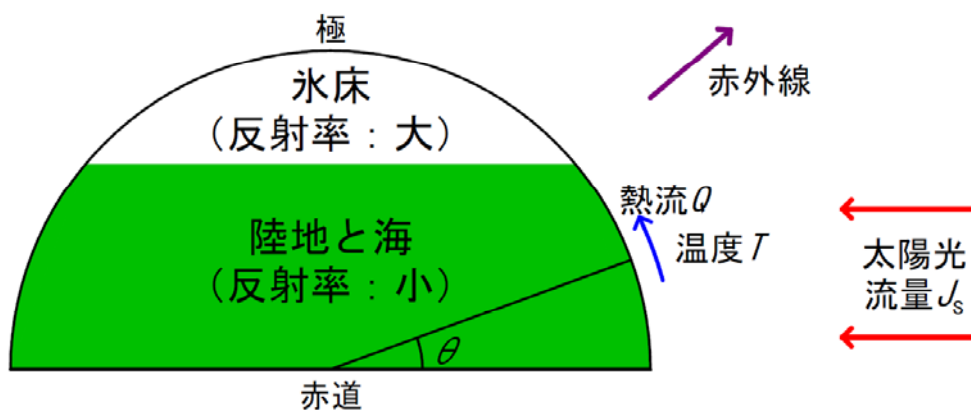
対流の効果は実効的な熱伝導率 k で表現

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

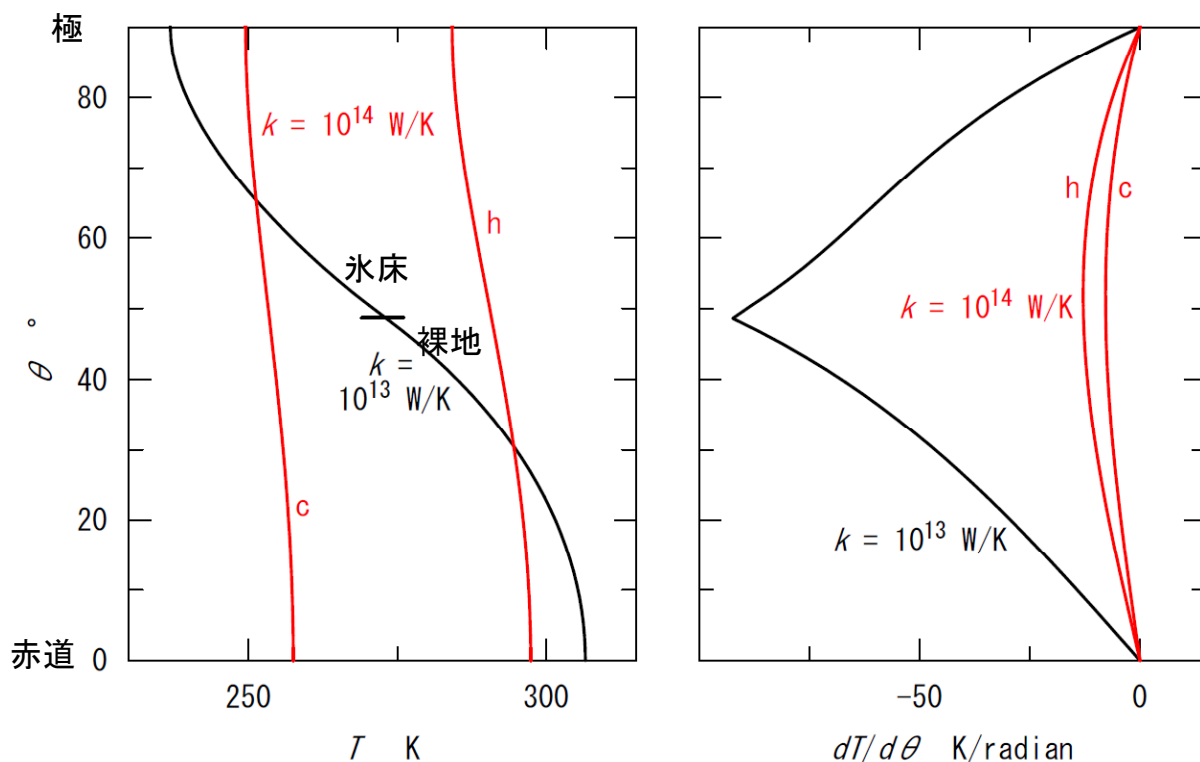


温度分布の計算例

(シミュレーション入門 図4.33)

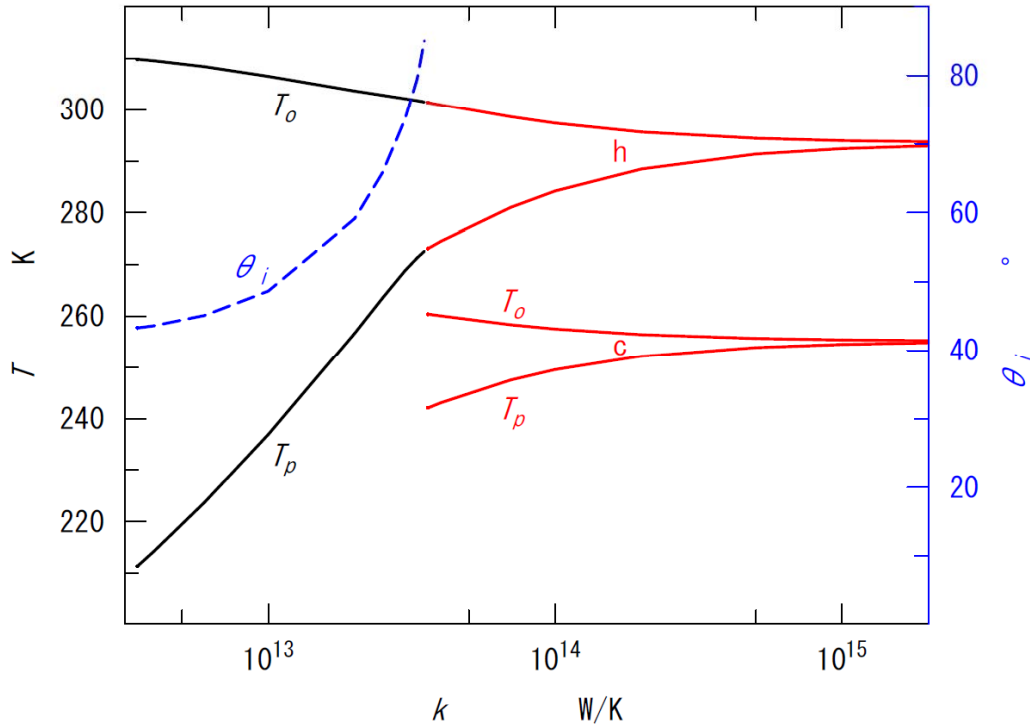
$k = 10^{13}$ W/Kの場合: 極側に氷床、赤道側に裸地(氷床に覆われない陸と海)

$k = 10^{14}$ 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

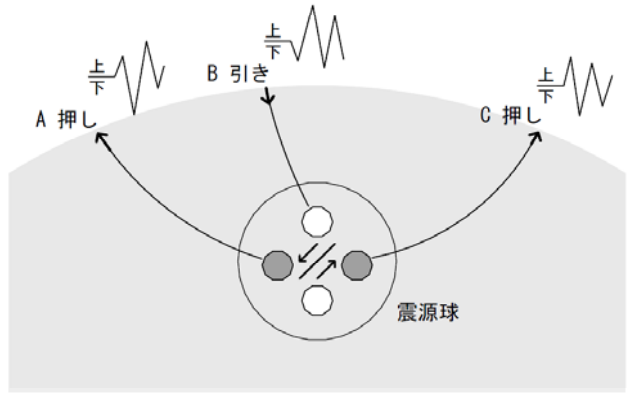
>> 多くの問題は複雑系でフラクタルやカオスの性質をもつ

- ・ 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

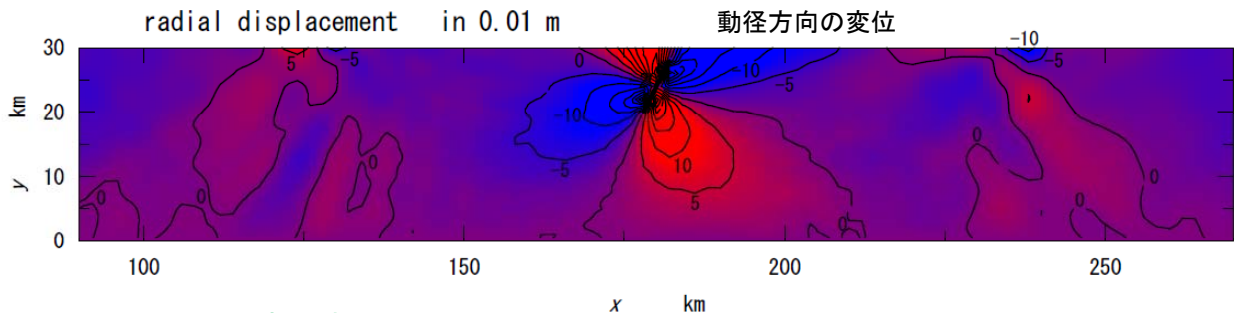
- 運動方程式を差分法、有限要素法などによって離散化する
- 周期が1秒程度より短い波形は、小規模な不均質による散乱などで波形が決まる
- 地球規模の広範囲の伝播には大規模で高速の計算が必要になる
- 断層とすべりの時間変化を与えて、それに対応する弾性波の伝播を計算
- 観測波形に合うように断層すべりの分布を計算するインバージョンがなされている
- 自発的な破壊を震源とする研究は未発達

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

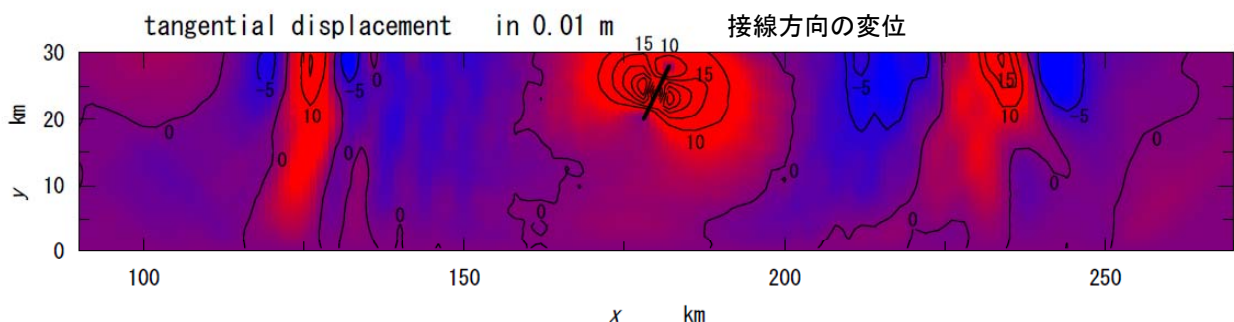
断層は70° 傾いた正断層
 長さ 4.5 km、最浅部 2 km
 すべり量 1 m、すべり時間 1 s



表面波

4象限型の押し引き分布

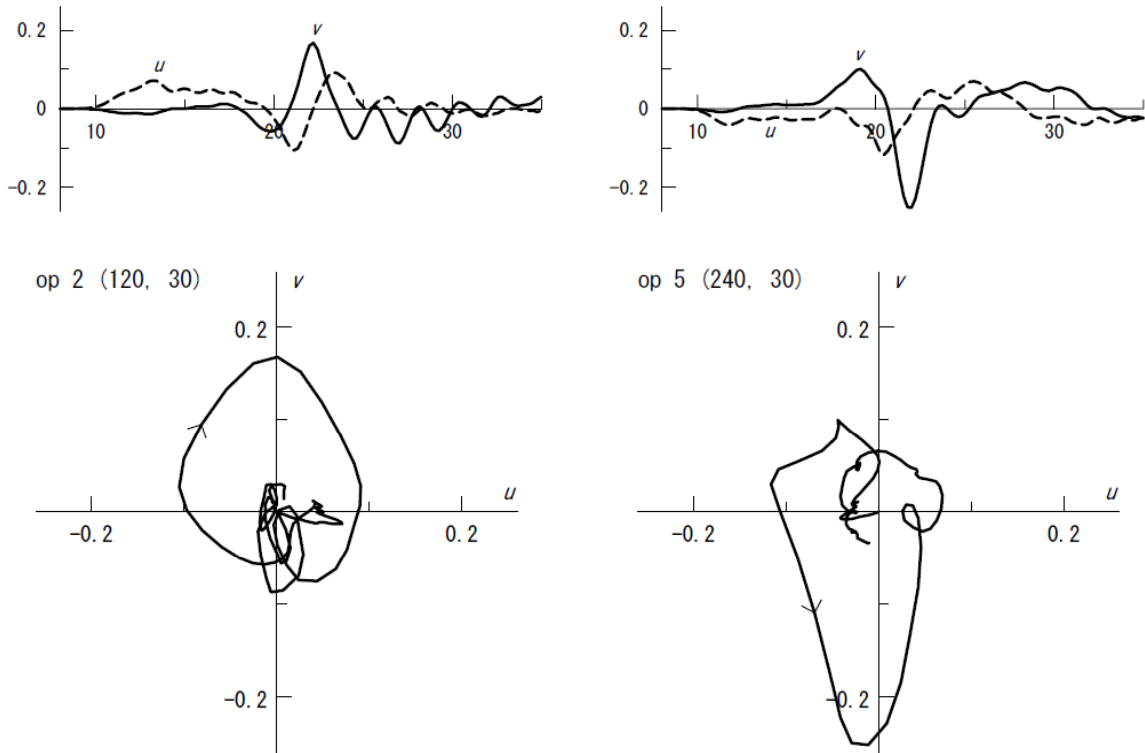
表面波 $t = 20$ s



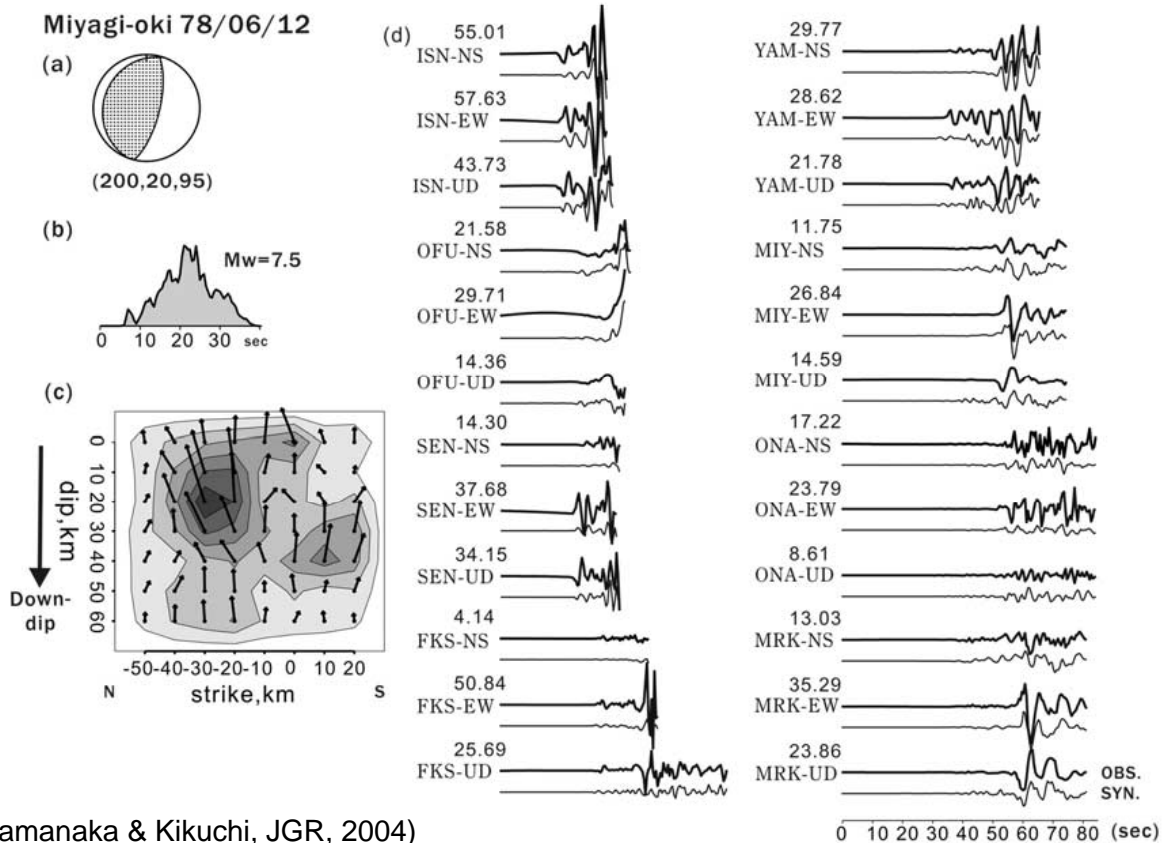
変位波形と地面の運動

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

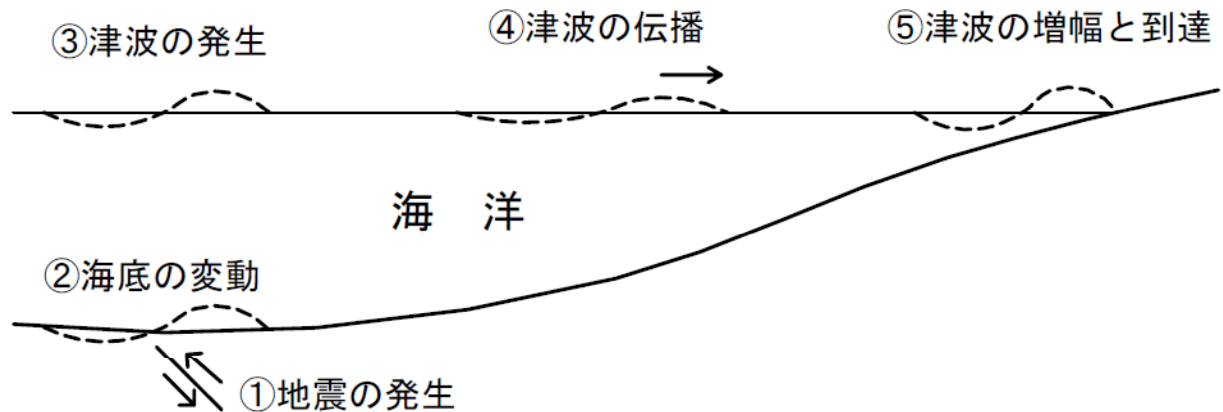
海底の上下変動はそのままの形状で海面を上下させると仮定
 (水平方向の変動スケール >> 水深)

海面の変動は**浅水波**として伝播するものとする

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

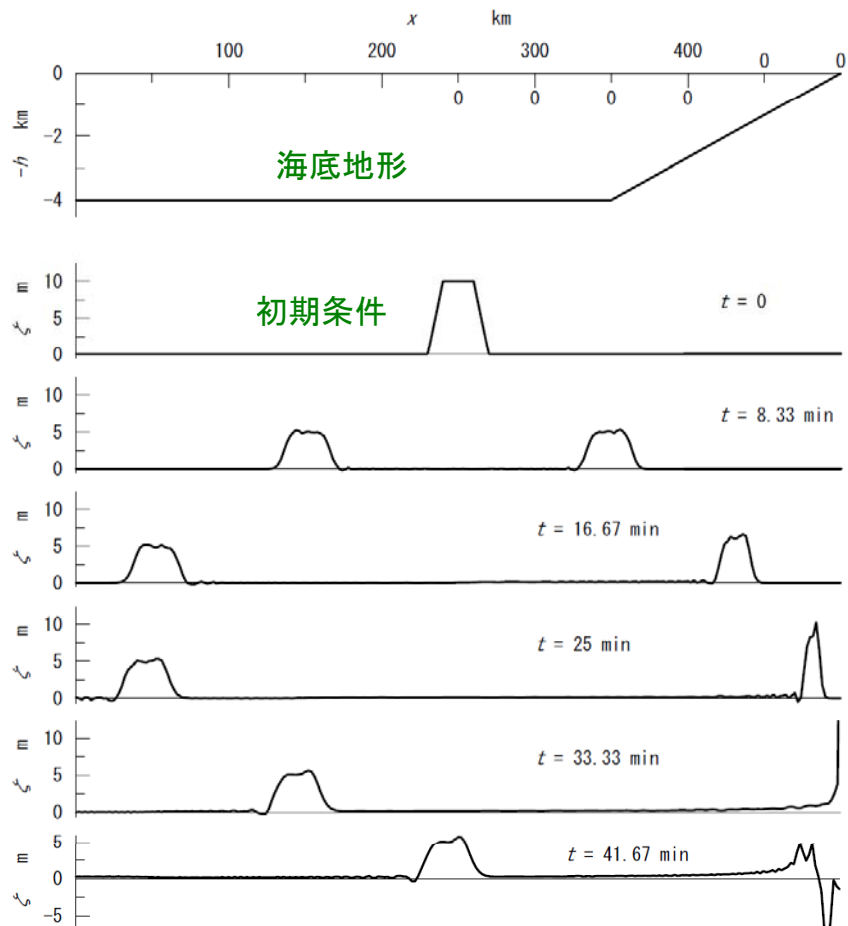
ζ は海面の上下変位
 x, y は水平方向の座標; t は時間
 g は重力加速度、 h は水深

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



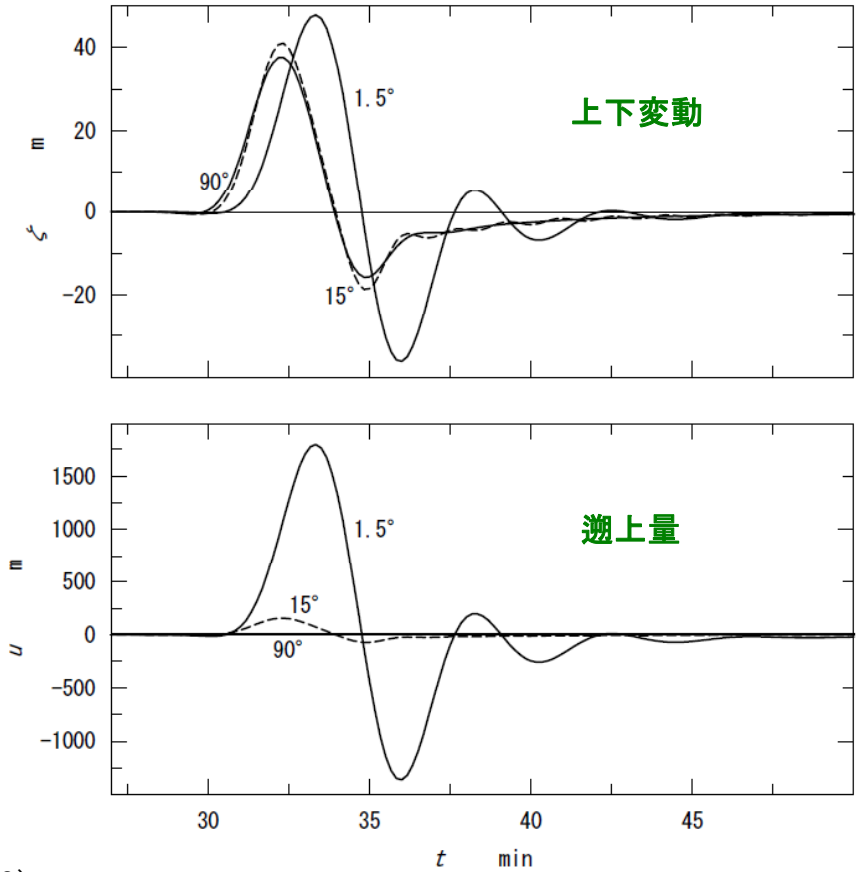
1次元の津波伝播計算

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



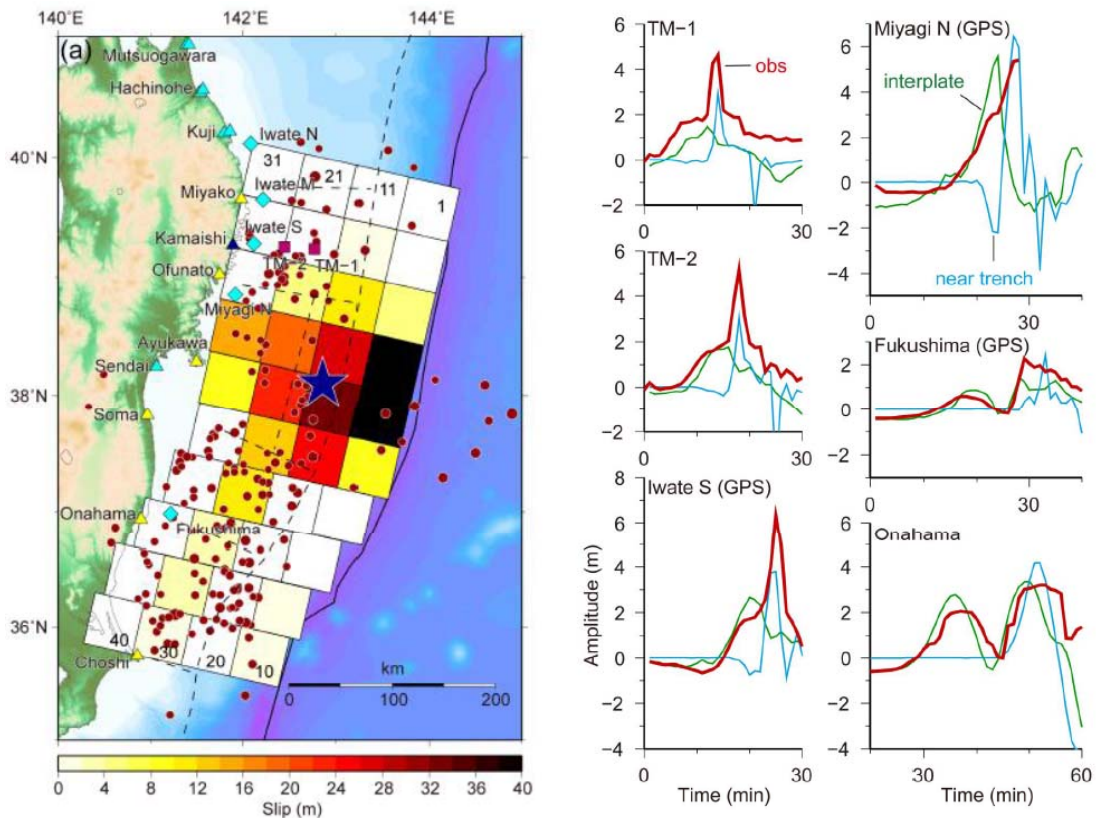
(シミュレーション入門 図2.18)

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

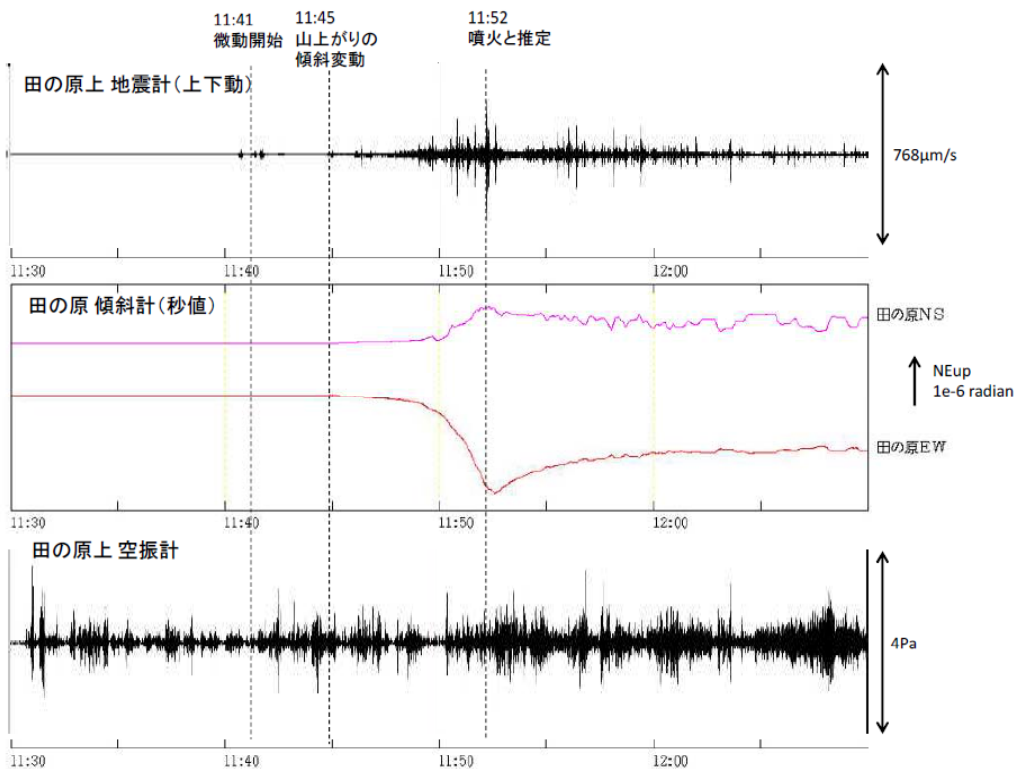


噴煙の上昇が続く

[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。

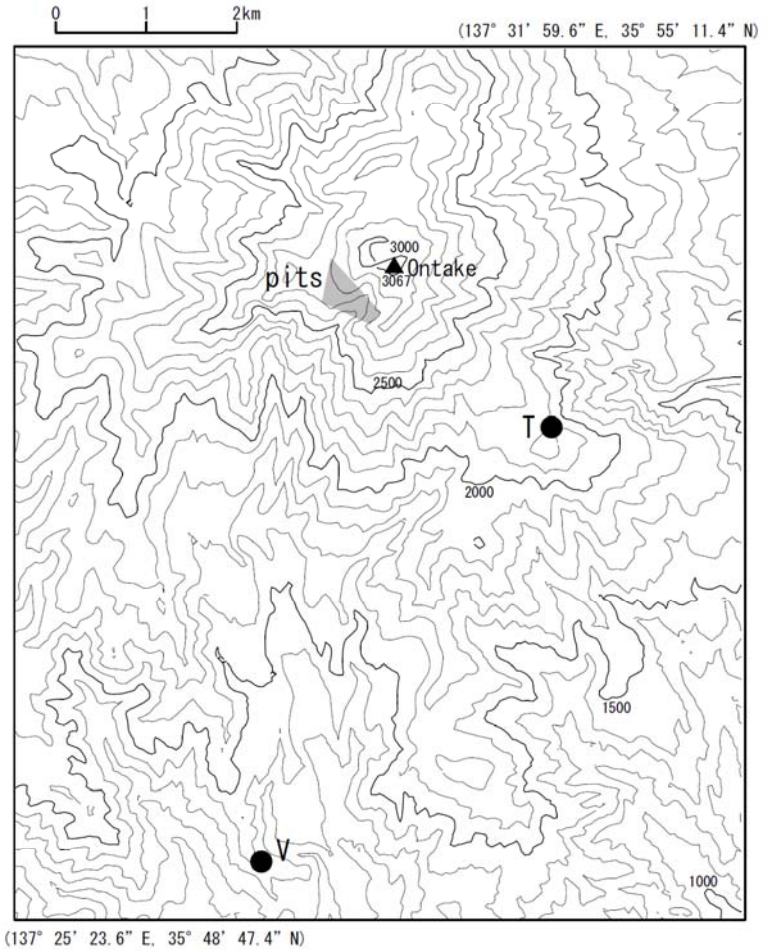
御嶽山噴火

(2014年9月27日)

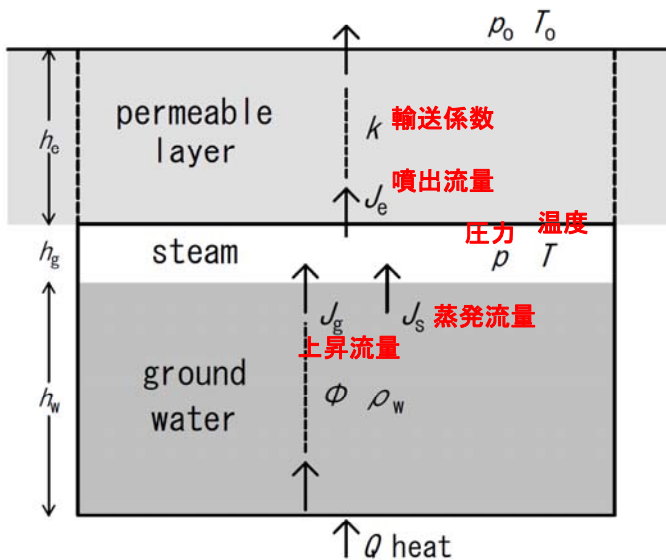
- pits: 噴出範囲
- T: 傾斜
御嶽田の原観測点
(気象庁)
- V: 遠望カメラ
滝超観測点
(国土交通省)

- ・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 , ~ 2 kg/m².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

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

上記を含めた水蒸気の質量保存

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

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

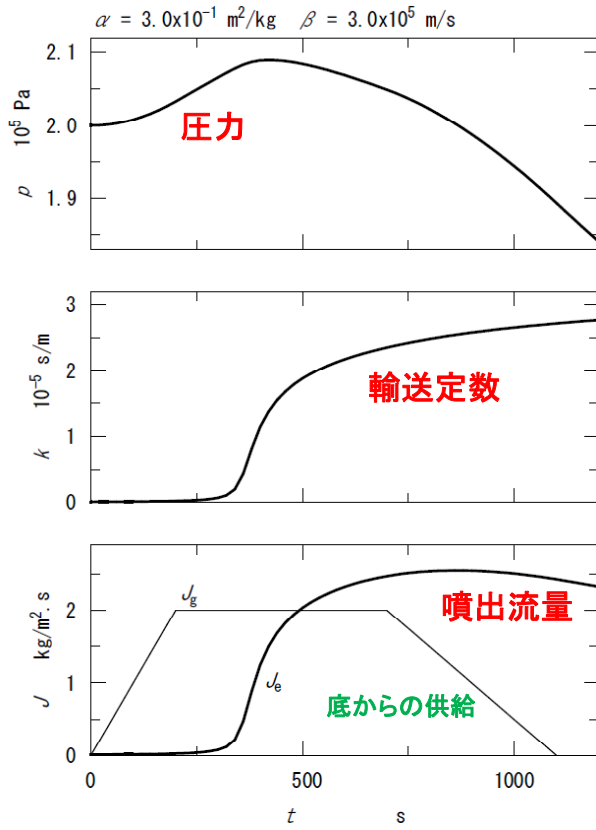
水蒸気の噴出

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

浸食による噴出孔の拡大

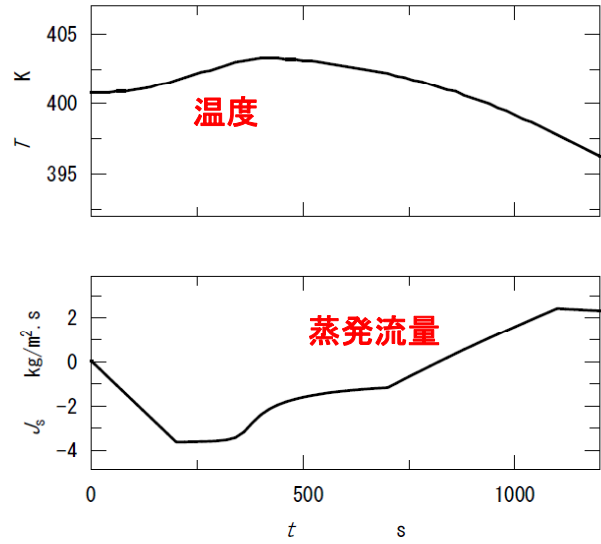
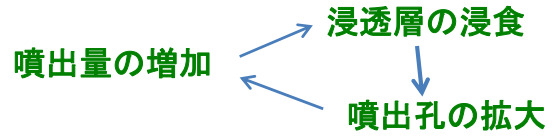
$$\circ \frac{dk}{dt} = \alpha J_e k \exp(-\beta k)$$

典型的な計算例



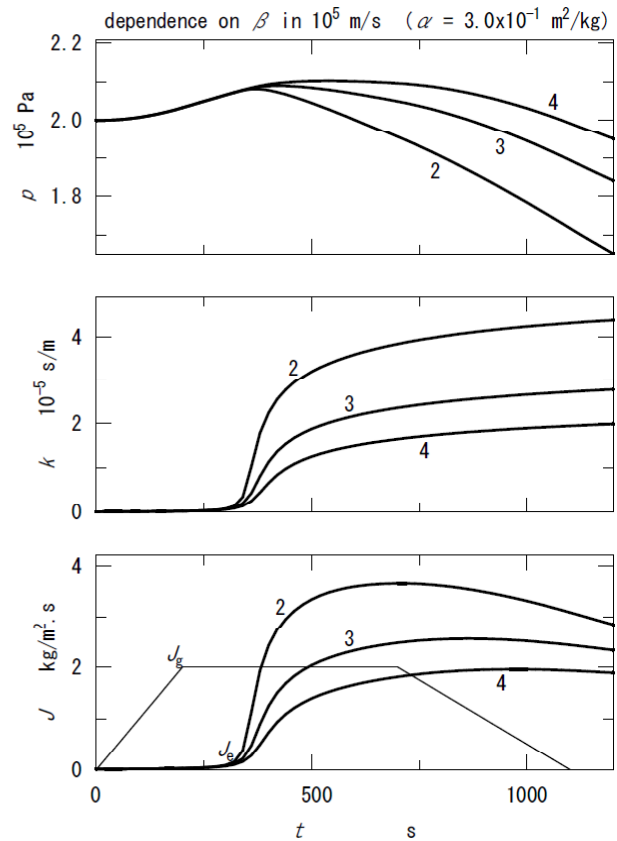
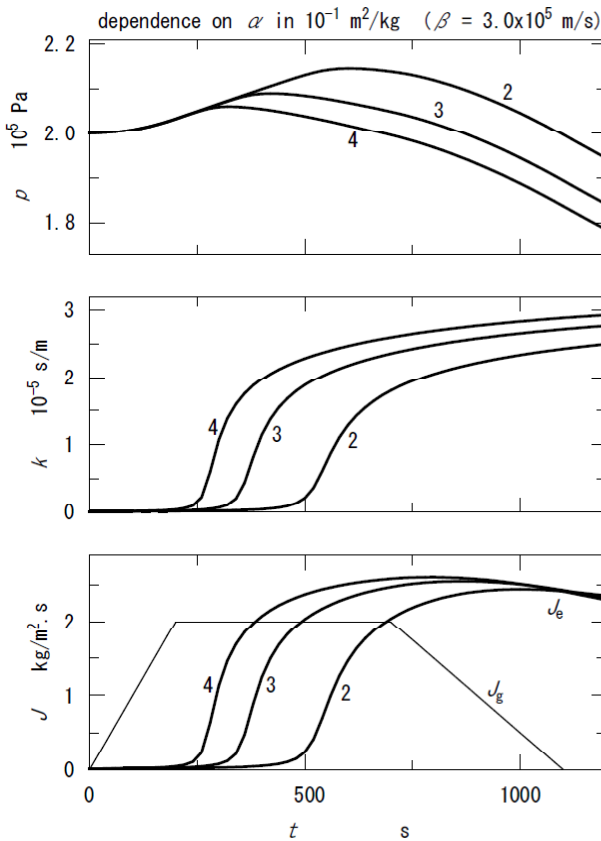
$t = 0$ で
 $p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $k = 1 \times 10^{-7} \text{ s/m}$

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。