



# 防災シミュレーション

アドバンスソフト技術セミナー

## 自然災害の予測とシミュレーション

アドバンスソフト株式会社 研究顧問  
東京大学 名誉教授  
兵庫県立大学 名誉教授

# 井田 喜明 1.

### 自然災害の短期的および長期的予測

予測		地震災害	噴火災害	気象災害
短期	目標	次の地震の時期、場所、規模に加えて、誘発される津波の可能性を予測する	次の噴火の時期、場所、規模、様式を、また噴火開始後は噴火の推移を予測する	天気や気候の変化、特に台風、豪雨など災害の原因となる現象の到来を予測する
	達成度	事前の予測は困難視されている。地震発生直後に緊急地震速報と津波の可能性予告	前兆的な現象を捉えることで噴火の接近が予測可能。規模や様式の予測は難しい	時間～日単位でよい精度で予測され、天気予報などに活用されている
	課題	前駆現象、歪の臨界状態を検出する方法を見出す	予測を定量化し、予測内容を充実させる	精度を上げる。局地に集中する豪雨や竜巻などに対応する
長期	目標	地震の起こりやすい場所と発生確率を予測する	火山毎に災害の種類を発生場所とともに予測する	冷夏、暖冬、環境変動など、長期的な変動を予測する
	達成度	活断層の分布と地震発生履歴の調査が進んだ	活火山の活動度が評価され、主な火山で予測図が作成された	月～年単位で予測がなされるが、信頼度は高くない
	課題	発生確率の意味を明確にする。地盤の効果を評価する	山体崩壊など大規模な災害への対処法を定める	気象現象と災害の関係、人工的な要因の効果を評価する

# 自然災害の予測と数値シミュレーション

## 現状認識

### 予測とシミュレーションの現状

- 地震や噴火は、定量的な予測ができる段階になく、シミュレーションは長期的な防災目的に多少使われる程度。
- 気象災害については、シミュレーションは短期的な予測にも広く活用されている。局地的な現象や長期間にわたる予測の精度を上げることが課題。
- 地球の表層環境の理解や展望はシミュレーションに頼っているが、予測の信頼性は今ひとつ。

## テーマ

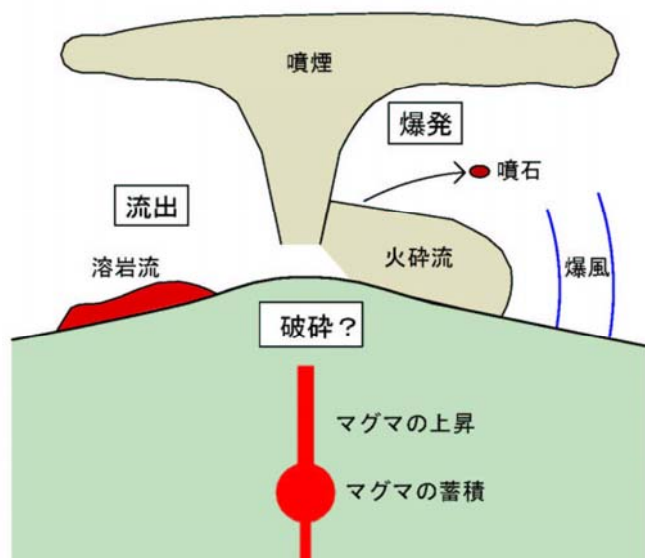
### 地震、噴火、気象現象の各々について

- 現象の概要、現象を支配する要因とメカニズム
- シミュレーションの現状、課題、問題点
- シミュレーションの展望。何をすべきか。何ができるか。

AdvanceSoft



# 噴火現象と火山災害



## 噴火現象

マグマは液体状態を保って溶岩として流出。また、破碎されて爆発的に噴出して、噴煙、火砕流、噴石、爆風などを起こす。

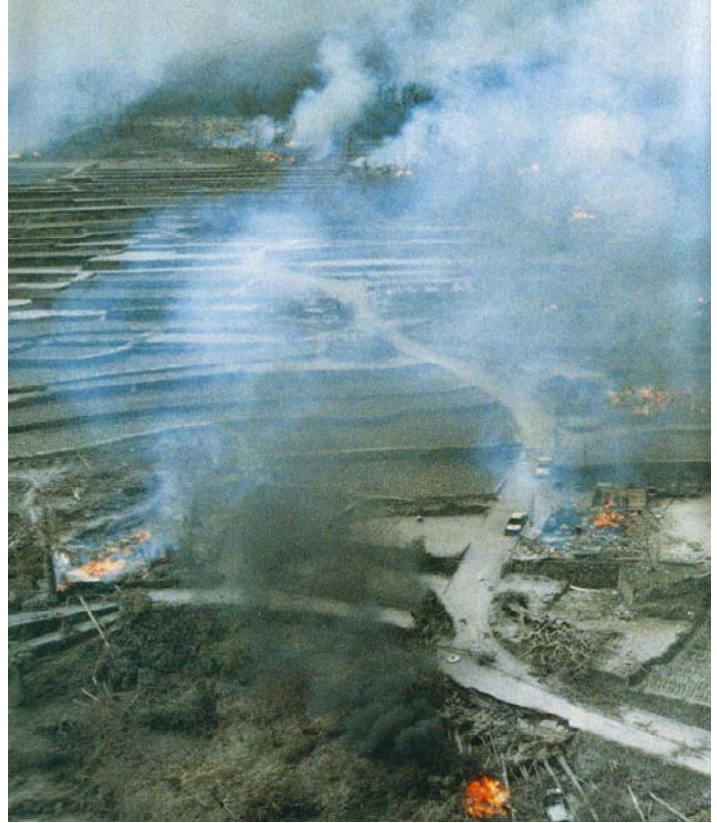
## 多様な火山災害

- 噴石の飛翔により死傷や破壊
- 降下した火砕物で農地などが荒廃
- 浮遊する火山灰は飛行障害や広域にわたる気温変化
- 溶岩流は建造物や農地を破壊
- 火砕流や泥流は、高速で流れて生命を損傷し建造物を破壊
- 爆風、爆発は樹木、建造物、窓ガラスなどを破壊
- 噴出物の海や河川への流入は洪水や津波を起こして2次災害

AdvanceSoft



## 1991年6月3日 雲仙・普賢岳の火砕流で死者43名



## サンピエール市を襲ったプレー火山の噴火(1902年)

噴火前



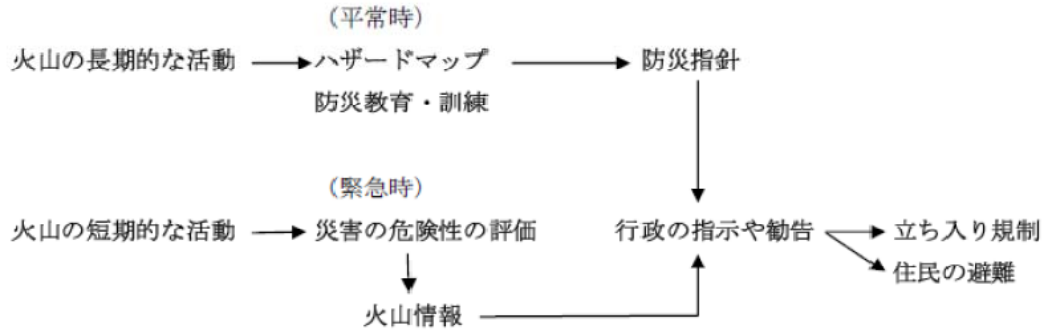
火砕流により壊滅



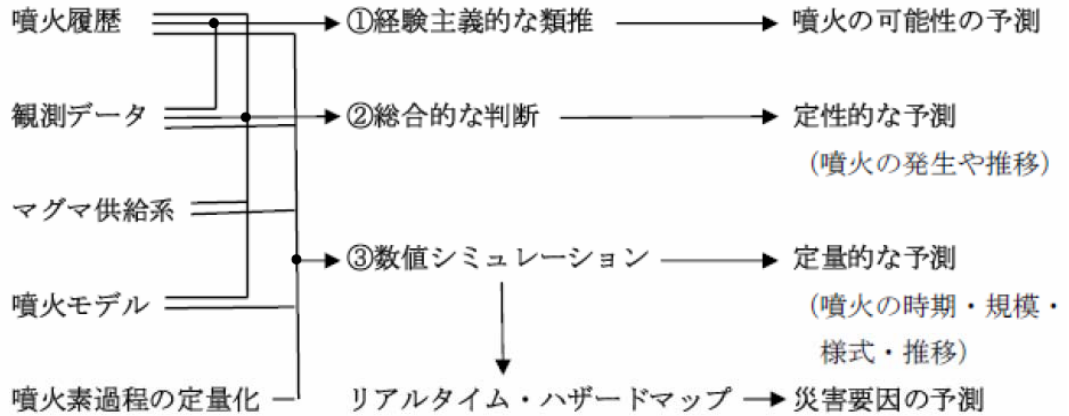
死者28,000人

# 噴火の予測とシミュレーション

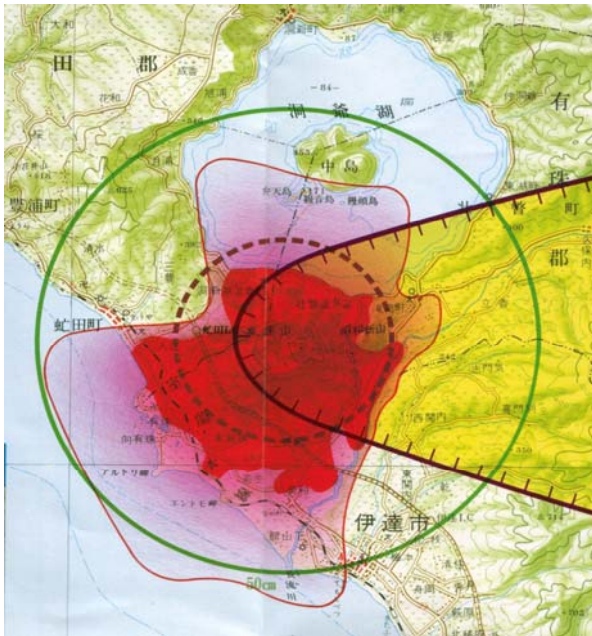
## 噴火予測と防災



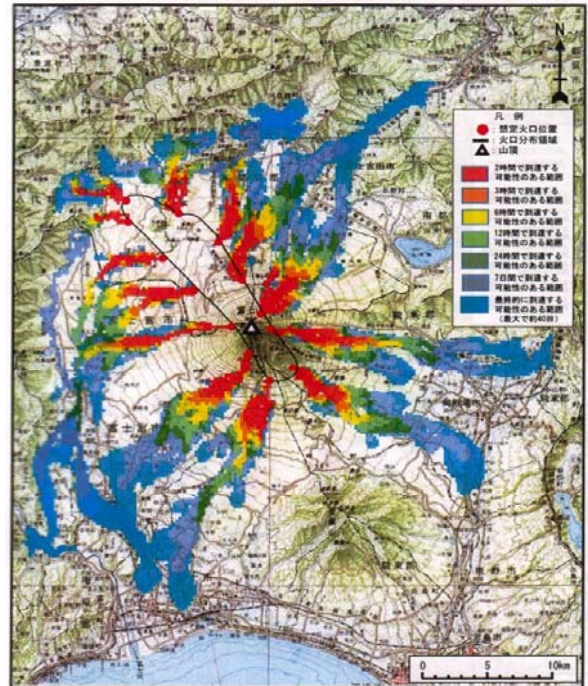
## 予測手法の発展段階



# 火山災害予測図(ハザードマップ)の現状



有珠山のハザードマップ(旧版)



富士山で溶岩が到達する時間の予測  
ハザードマップへのシミュレーションの活用は一般に限定的である。



1822年の噴火実績に基づく  
2000年噴火で防災対応に活用

# 噴火のタイプについてのシミュレーション

同じ火山の類似なマグマでも、時に激しい爆発を、時に穏やかな溶岩の流出を起こす

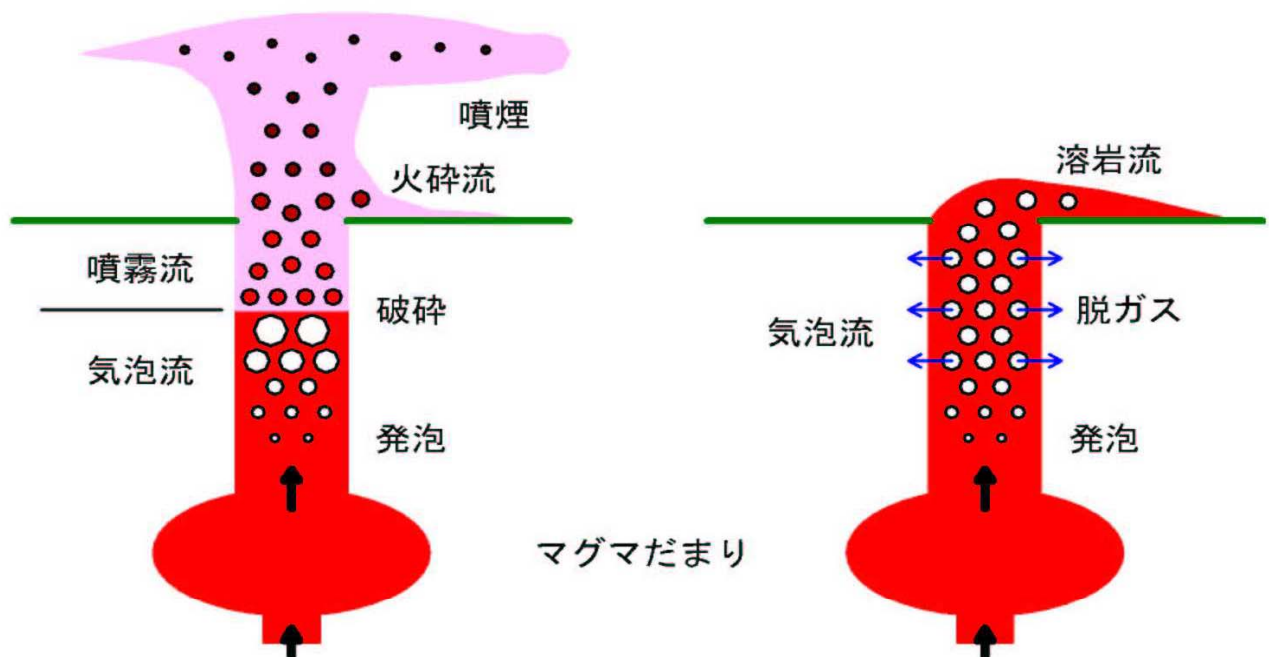
溶岩ドームの形成 (1943~45)  
昭和新年

有珠山の例

爆発的に噴煙を放出 (1977)  
プリニー式噴火



## 爆発と流出が生じる理由

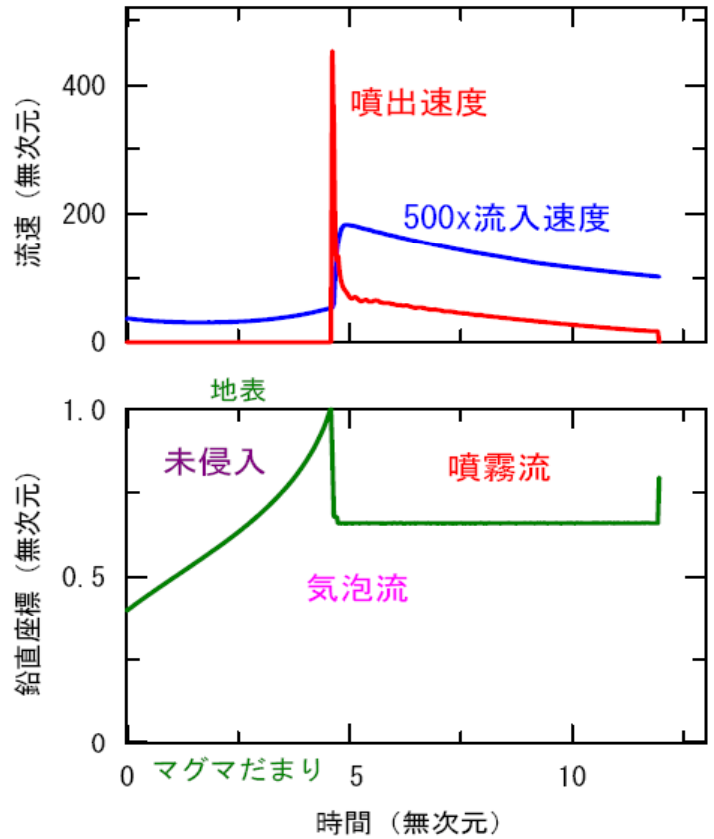
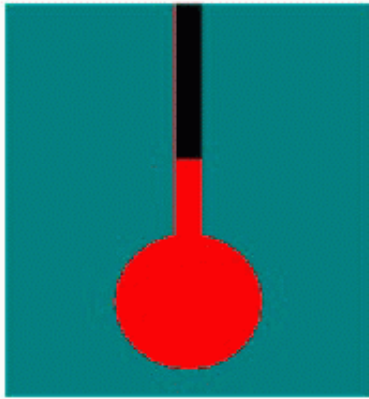


爆発: 上昇に伴う減圧によって  
ガス成分が発泡、膨張して  
マグマを破碎する

流出: ガス成分がマグマから  
逃げ出して、破碎を免れる



# マグマ上昇過程のシミュレーション



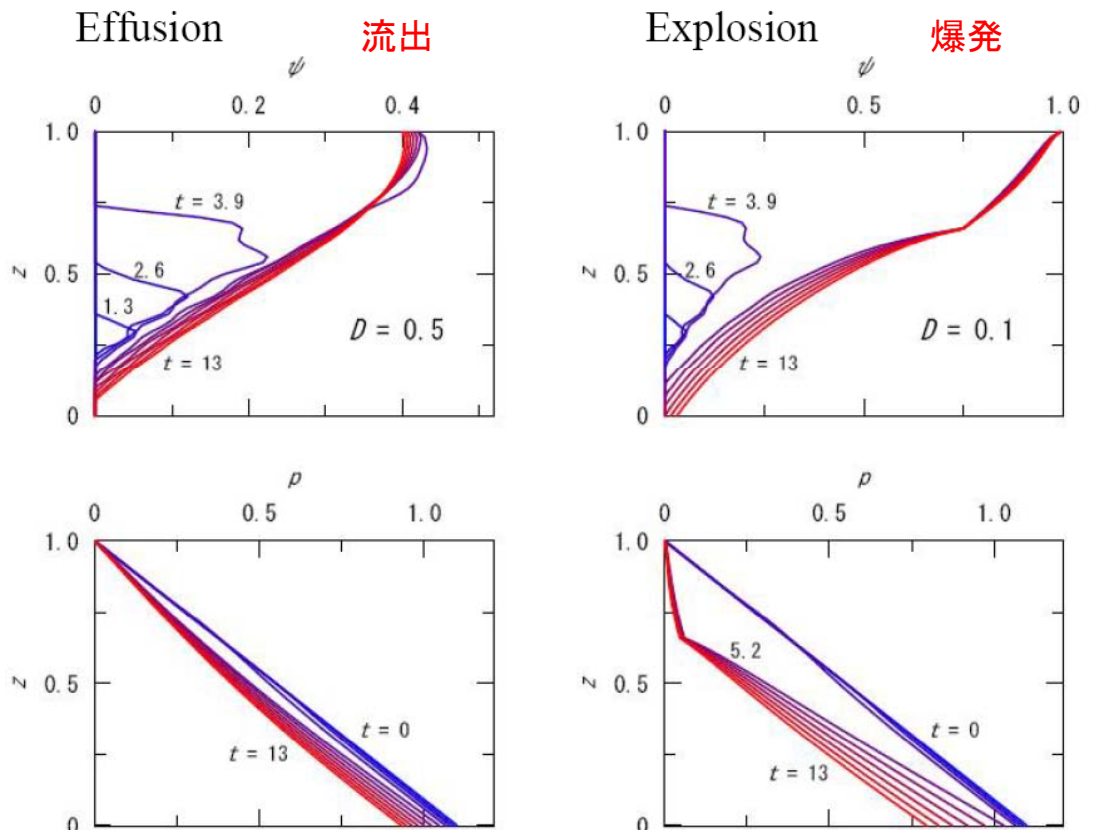
AdvanceSoft  
 Ida, Y. J. *Volcanol. Geotherm. Res.*, 162, 172-184, 2007.

# マグマ噴出様式の2つのタイプ

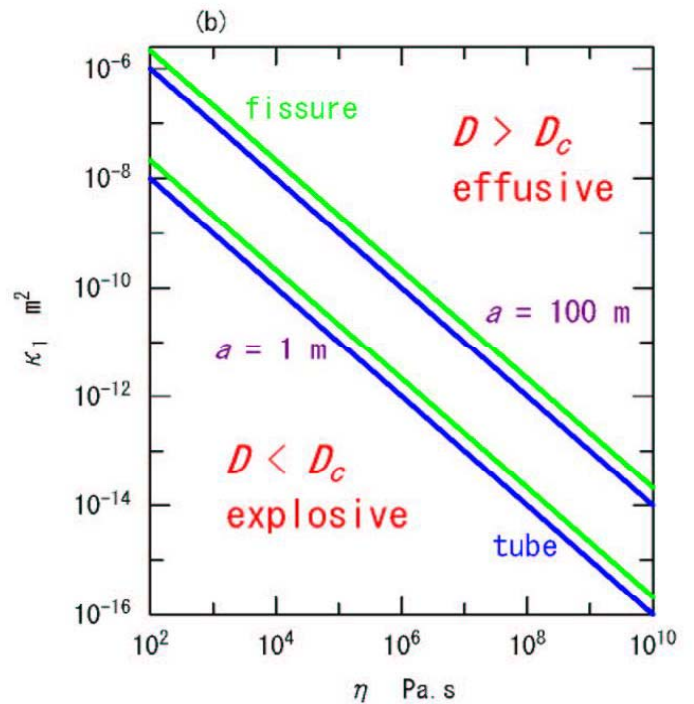
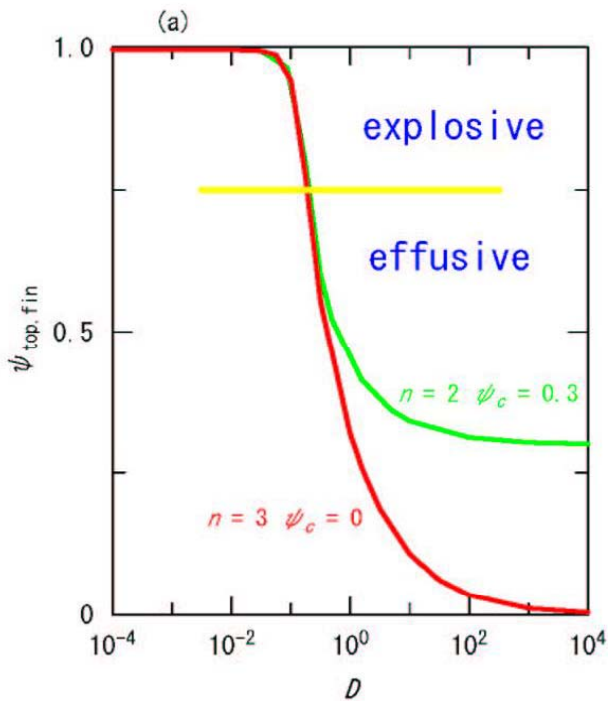
分布の時間変化

ガス成分の  
体積分率  
(ボイド率)

圧力



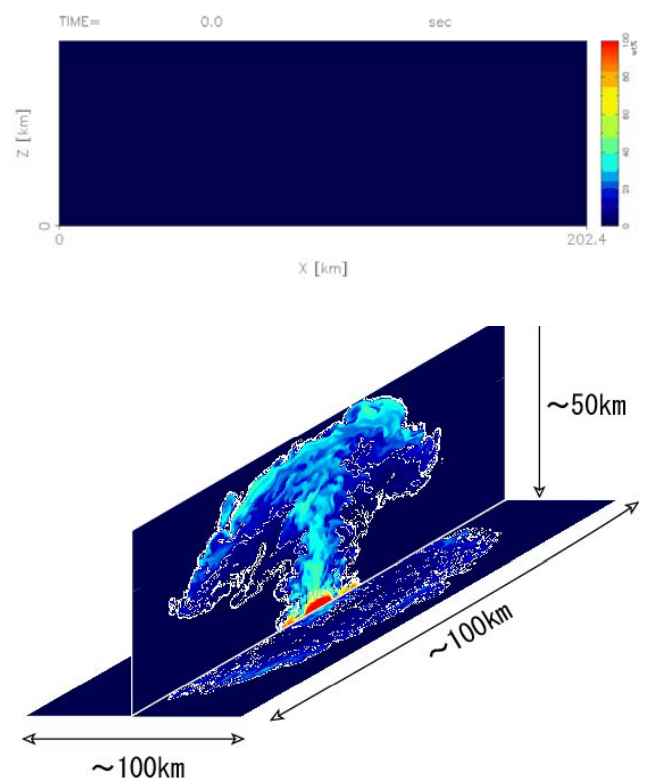
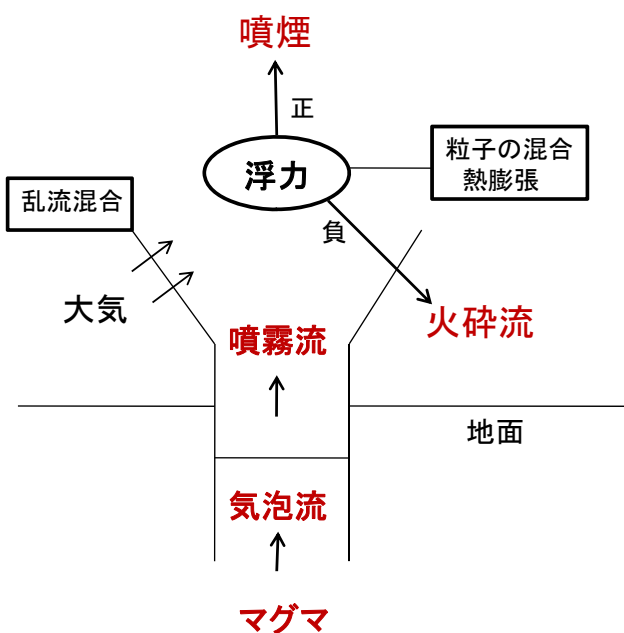
# 噴火のタイプ: 爆発と流出の条件



噴出時のガス成分の体積分率：  
脱ガス係数 $D$ との関係

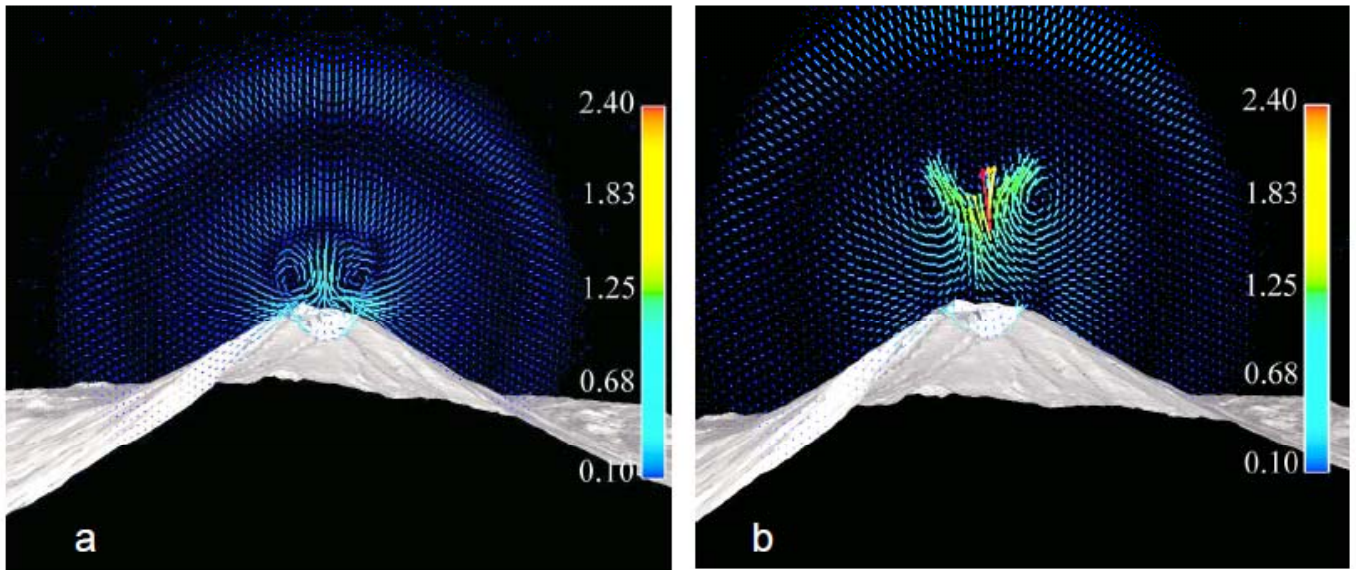
爆発と流出の条件：  
粘性率、浸透率への依存性

# 火山噴煙の3次元シミュレーション



Suzuki, Y. J., Koyaguchi, T., Ogawa, M.  
and Hachisu, I. *J. Geophys. Res.*, **110**,  
doi:10.1029/2004JB003460 (2005).

# 爆発による衝撃波のシミュレーション



山頂での爆発による衝撃波の広がり。爆発4秒後の流速(音速との比)  
 a. 圧力が瞬間的に取り除かれた場合    b. 高速流体が噴出する場合

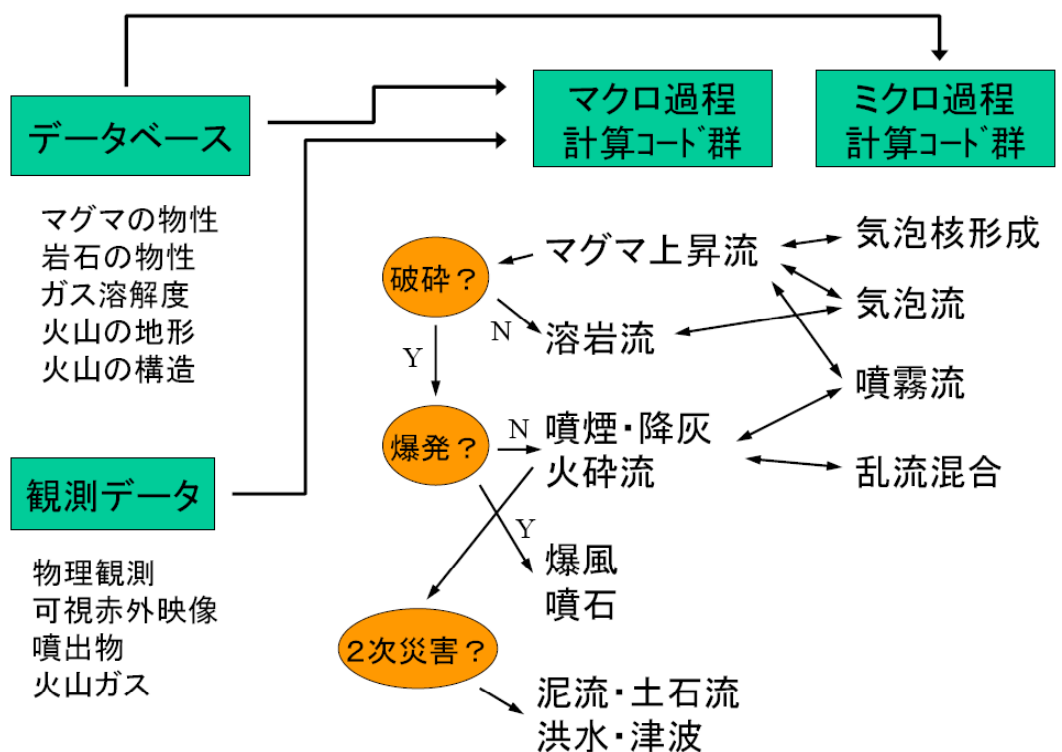


斎藤勉、火山爆発に迫る(東大出版、2009)

# 噴火現象や火山災害への系統的な対応

## 噴火シミュレータ

時間・空間スケールの異なる多様な噴火現象を総合的に予測することを目指す



# 地震現象と地震災害

(震源)

(地球内部)

(地表・建造物)

断層運動

地震波の伝播

地盤の揺れ

↑  
破壊

P波、S波、表面波

↓  
建造物の破壊  
洪水や津波の誘発

↑  
応力の蓄積

プレート間の相対運動  
広域的な応力の蓄積  
周辺の地震活動

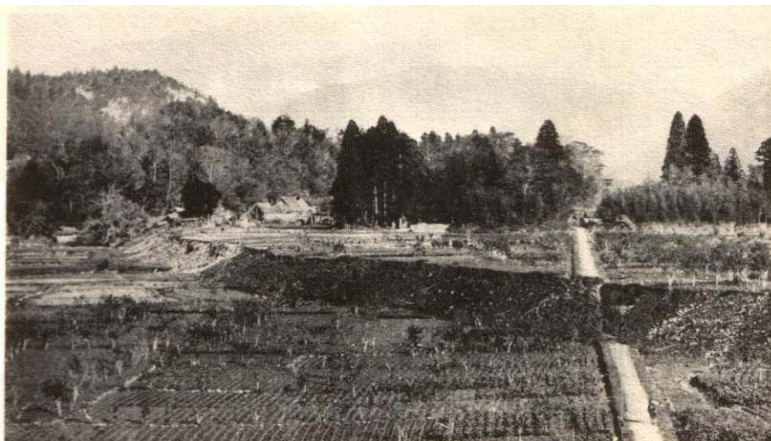
シミュレーションに期待されること

1. 地震の発生機構、震源過程の解明  
固体地球の運動による応力の蓄積と地震による解放  
破壊の伸展過程に伴う応力の解放と断層運動
2. 地震波の伝播に関連すること  
断層運動による地震波の放出と伝播  
地震波の散乱や吸収、構造による地震波の増幅や散逸  
観測データの解析による地球の内部構造の解明
3. 地盤の揺れとその影響  
地盤の性質や液状化の効果、揺れによる災害  
洪水や津波を誘発する可能性

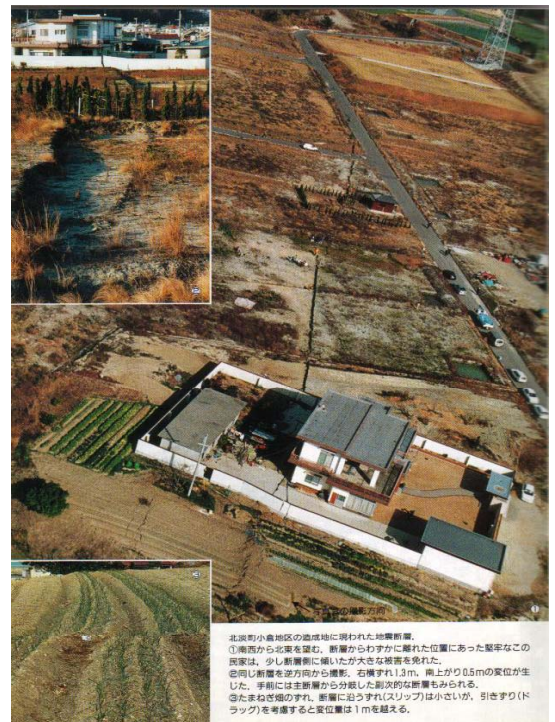


## 地震と断層

根尾谷断層  
濃尾地震(1891)



野島断層  
兵庫県南部地震(1995)



地震は断層運動によって  
引き起こされる



# プレートの沈み込みに伴う地震のタイプ



・**プレート間地震**  
プレート間の速度差を解消  
大規模地震 M=8~9にも

・**沈みこむプレートの変形**  
\* 曲げによる海底の地震  
\* 深発地震  
浅部は張力、深部は圧縮力  
場所により二重深発面にも

・**内陸地震**  
活断層が繰り返し動く  
MIは7クラス程度まで  
原因となる応力が不明確

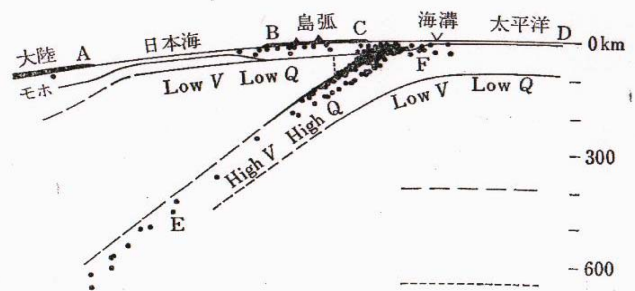
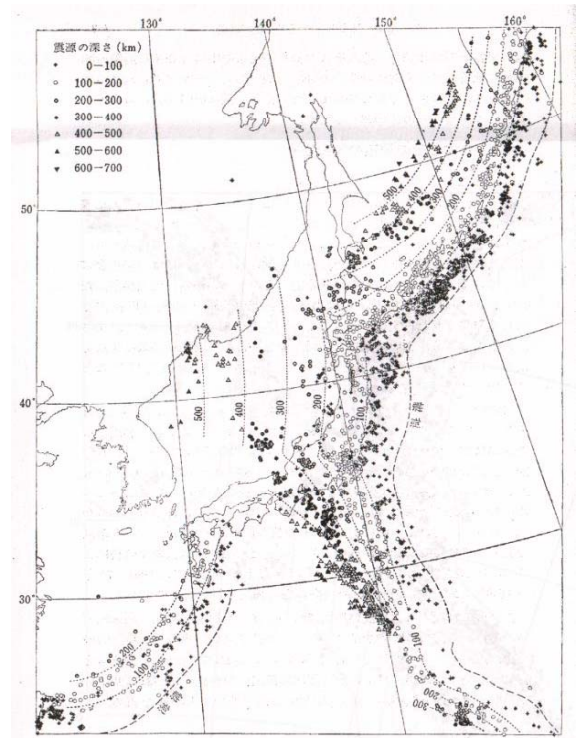
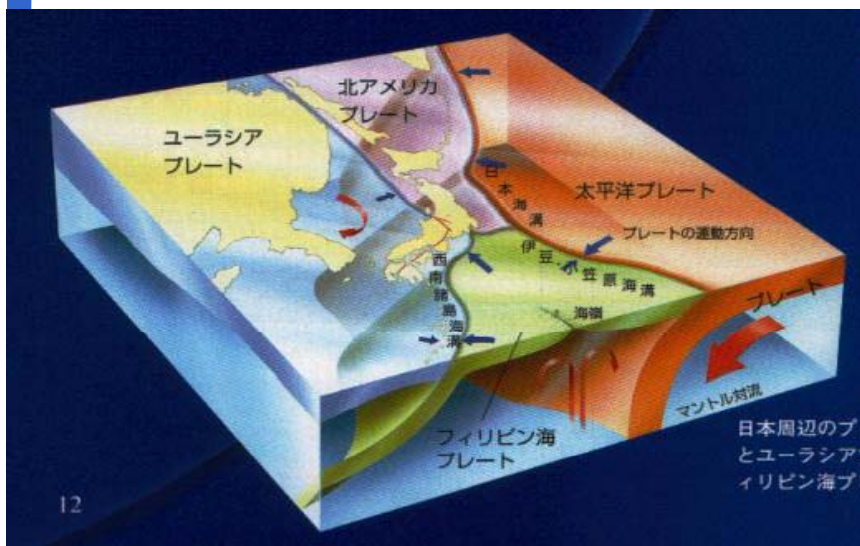


図 4.21 島弧の大局的な深部構造モデル, 黒丸は震源 (宇津, 1971 を修正)



# 日本付近のプレートの分布と運動

東から太平洋プレートが、  
南からフィリピン海プレートが、沈み込む



震源の深さ分布



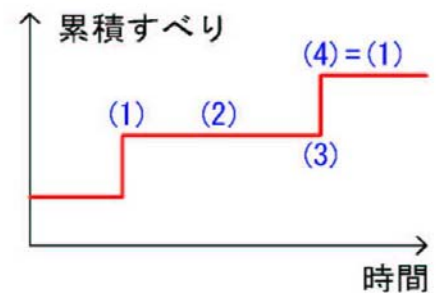
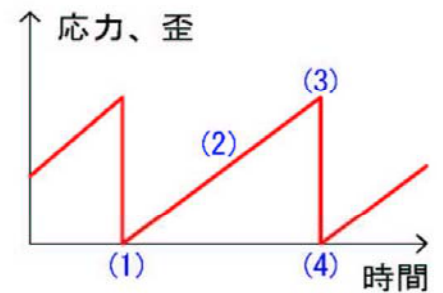
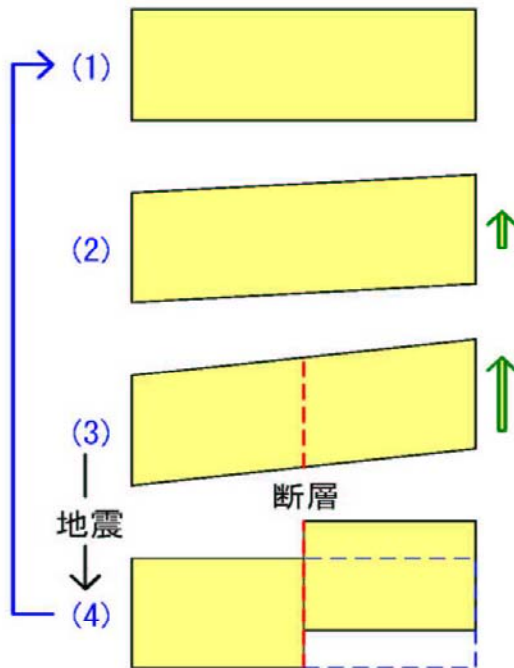
# 断層運動による地震の繰り返し

## 弾性反発モデル

応力の蓄積と解放の繰り返し

震源では同じ断層が何度も動く

断層：  
プレート境界  
内陸の活断層



# 地震の起こり方

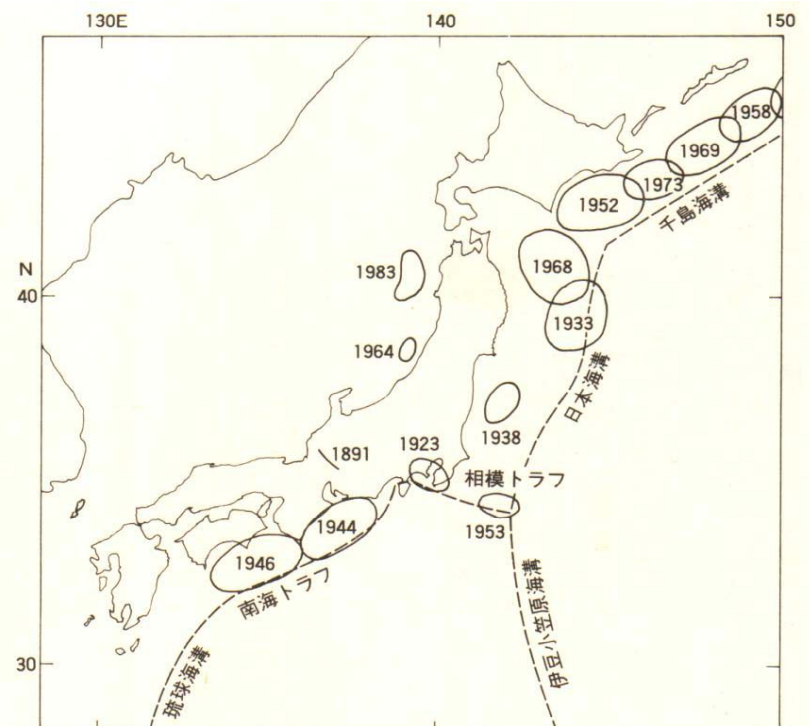
地震は、過去の地震で埋められた  
**震源域の隙間**で発生  
応力は順に開放され、長期的には  
プレート間全体で一定の速度差

**応力の蓄積と解放**の過程は空間的に  
相関をもちながら進行する  
1次元的なモデルでは、地震発生の  
時期も規模も記述できない  
3次元モデルでも、応力が均質だと  
破壊は開始したら止まらない

**不均質な応力**が空間的に変動する  
過程で地震が発生する  
地震の結果として応力が変動

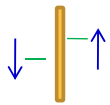
地震は**確率予測**が現在の主流

## 日本付近で発生した最近のプレート間地震



# 地震現象：総合的なシミュレーションが必要

力の対モーメント



変位のずれ  
応力の解放

カインマティックな扱い  
動的～秒

断層運動  
力のモーメント

地震波の発生と伝播  
地球内部の構造

地面の揺れ  
地震災害

動的～秒

破壊の伝播  
応力の解放

カインマティックな扱い

震源でモーメントを仮定して揺れを計算  
地震の発生予測はできない

ダイナミック  
な扱い

静的～年

プレートの運動  
周辺の地震活動  
応力の変動

ダイナミックな扱い

地震の発生予測には不可欠  
地震は不均一の場で起こる破壊現象  
動的な部分と静的な部分を切り離せない

空間的に不均質な変動のシミュレーションを  
静的な部分と動的な部分の連成計算で

AdvanceSoft



## 南海・東南海・東海地震の発生

### 総合的なシミュレーションの好例題

地震の原因はフィリピン海  
プレートの沈み込み  
プレート間の相対運動、境界の  
形状も分かっている

応力の解放は3部分が相互に  
関係しながら進む  
過去の履歴がモデルの制約  
に使える

20世紀の地震については  
近代観測のデータもある

将来の予測は防災に重要  
社会的な理解が得やすい



発生年月日	地震名	マグニチュード	震源域		
			A	B	C
1498-9-20	明応東海地震	M8.3		○	△
1605-2-3	慶長地震	M7.9	○	○	△
1707-10-28	宝永地震	M8.6	○	○	○か△
1854-12-23	安政東海地震	M8.4		○	○
1854-12-24	安政南海地震	M8.4	○		
1944-12-7	昭和東南海地震	M7.9		○	
1946-12-21	昭和南海地震	M8.0	○		

AdvanceSoft



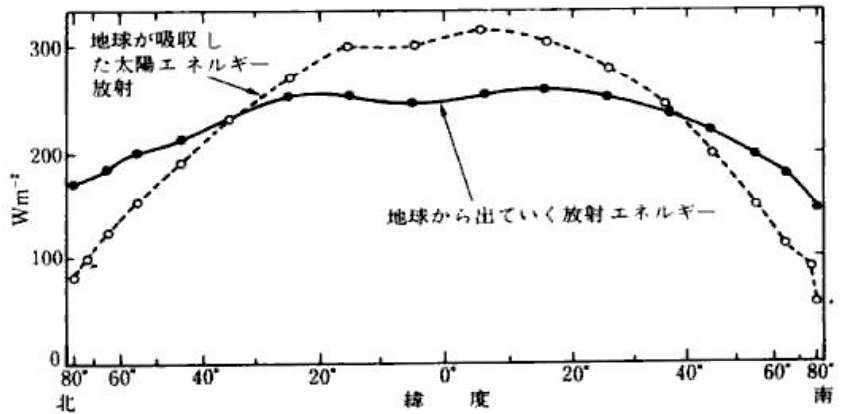
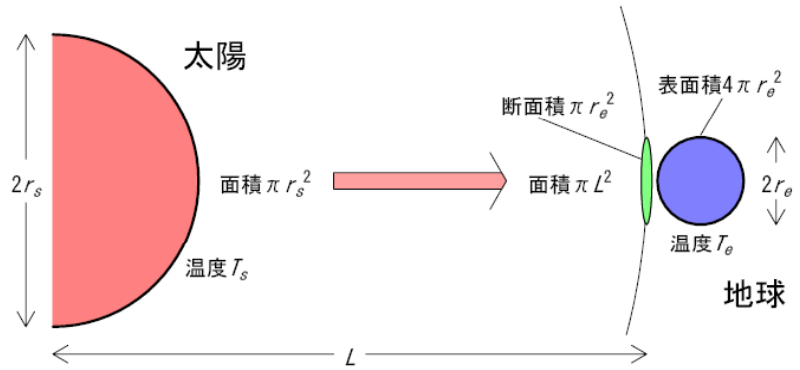
# 気象現象: エネルギー源は太陽から

地球表層で消費するエネルギーはほとんどが**太陽**に由来  
 $1.37 \times 10^3 \text{W/m}^2$  (太陽定数)  
 地球内部からの寄与は太陽由来のもの1/4000

エネルギーの吸収に**緯度依存**  
 低緯度では過剰な吸収  
 高緯度では過剰な放出

エネルギーの不均一は  
 大気と海の**対流**で解消

大気の大気が気象現象の原因  
**自転**の効果、**水**の相転移により、大気の運動は複雑に

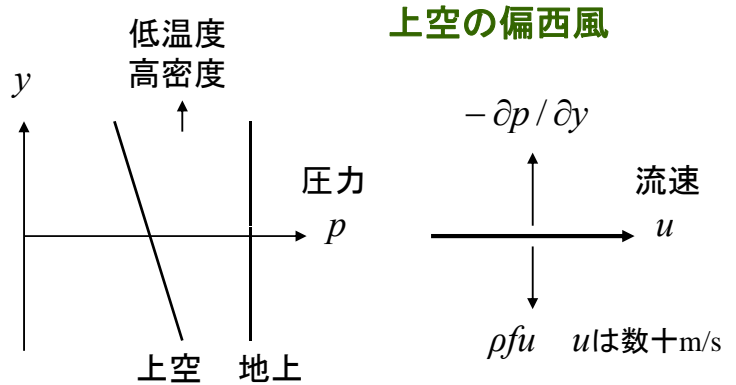


# 大気の運動: 自転によるコリオリ力の作用

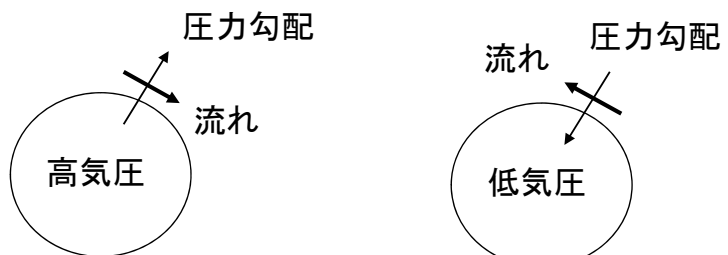
**コリオリ力:**  
 回転系に働くみかけの力  
 $\text{コリオリ力} = 2m\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$   
 $m$ は質量、 $\mathbf{v}$ は速度、  
 $\boldsymbol{\omega}$ は回転ベクトル  
 $\text{コリオリ力の大きさ} = 2m\omega v \sin\phi$   
 (水平面内)  
 $\phi$ は緯度、 $\omega$ は自転の角速度

コリオリ力は  
 大規模な大気の流れを支配  
 中高緯度では圧力勾配と  
 ほぼ釣り合う (**地衡風近似**)  
 大気の流れはほぼ等圧線に沿う

大気の運動の解析は  
**流体力学**で**独自の分野**を形成



## 地上の高気圧と低気圧 (北半球)



# 大気大循環の概要

## 低緯度(ハドレー循環): 緯度<30°

地表では赤道に向かう対流が西向きに曲げられて東風(貿易風)に  
上空では極に向かう流れが西風に  
緯度30度付近では**亜熱帯ジェット気流**

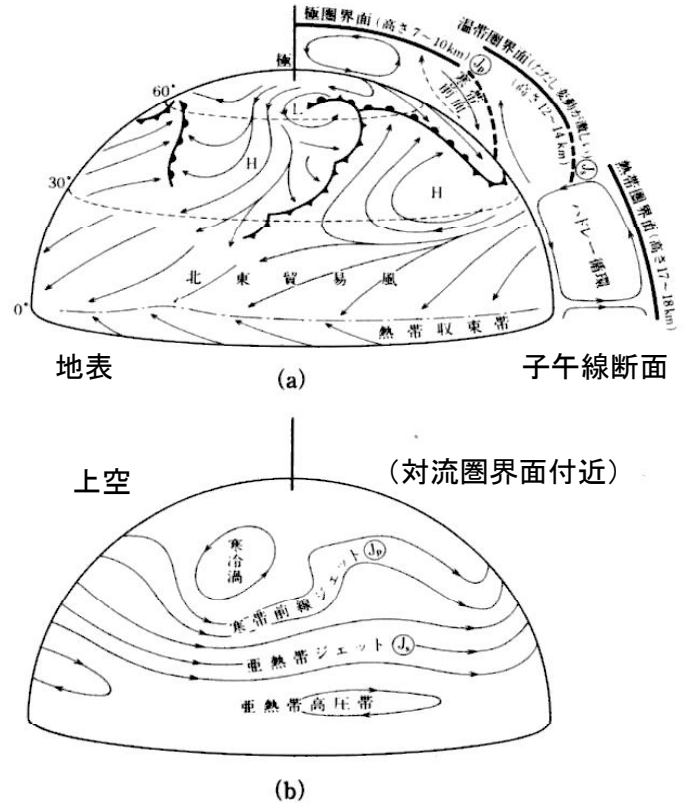
## 中高緯度(ロスビー循環): 緯度>30°

上空では温度(密度)差により極方向に圧力が減少。赤道から極への流れ。  
圧力勾配がコリオリ力と釣り合うように東向きの流れ(偏西風)を生む。  
偏西風は、大きく蛇行する

偏西風は、大きく蛇行する

**極前線ジェット気流**に。

地表には、ジェット気流の蛇行、陸と海の分布などに対応して、**低気圧、高気圧、前線**が生じる。



浅井富雄・新田尚・松野太郎、  
基礎気象学、朝倉、2002.

# 気象現象のシミュレーション

## 現状

- シミュレーション技術が発達し、実用的にも既に活用。
- 環境問題についても、シミュレーションが基礎となる。
- 自転の効果が強く、通常の流体力学とは異なる様相。

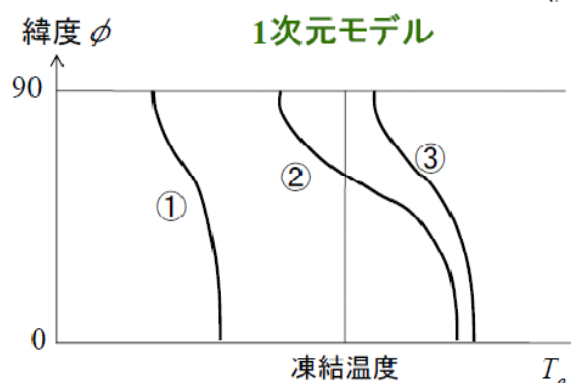
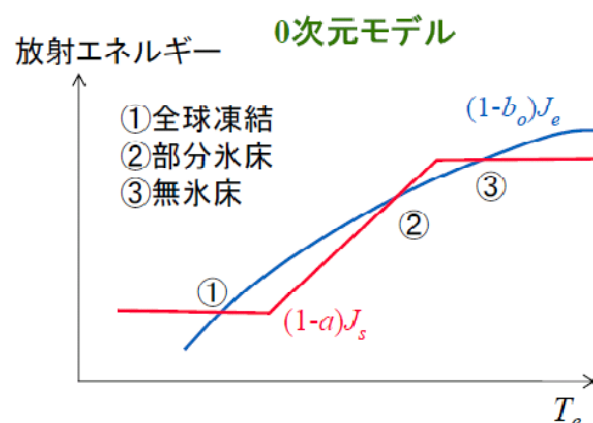
## 問題点 と必要性

- 上層大気と下層大気、低緯度と中高緯度、大気と海洋などの相互作用が、様々な時間空間スケールで気象現象に重要な影響をもつ。
- 水の凝結と気化、雲の形成、降雨や降雪、雲による太陽光の反射や吸収など、2相流の扱いが多くの現象でシミュレーションの信頼性や精度を決める。
- 集中豪雨など、局地的な現象については、個々の地域の特徴に合わせてシミュレーション技術を開発する必要。
- 環境問題については、原因と結果の因果関係をもっと定量的に示して信頼性を高める必要。



# 環境問題へのアプローチ

- ・環境に影響するファクターはCO<sub>2</sub>の放出量ばかりではない。
- ・環境が**破局的な状況**に突入する可能性  
氷床の量と地球の反射率(アルベド)の関係で、安定な状態は大きく移行しうる(右図)  
砂漠化も同様な変化を及ぼす可能性
- ・環境は個々の現象が絡み合って全体が決まる  
太陽エネルギーの吸収  
地球からの熱放射(温室効果)  
グローバルな大気の運動(熱、自転)  
局所的な大気の運動(水の気化と凝結)  
海洋の寄与(氷結と融解、大気との相互作用)
- ・**統合的なシミュレーション**のシステムに  
各種の問題を組み込むことで、全体を理解
- ・気象現象も環境変動とリンクさせて予測すべき



- ①と③は安定
- ②は条件付安定



## まとめ

### 地震・噴火

- 地震災害や火山災害の予測のためには、現象の基礎的な理解が前提となり、そのために数値シミュレーションは中心的な役割を果たしうる。
- 個々の災害の長期的な予測のためには、現在の技術でも役立つことがあり、幅広く活用することが望まれる。

### 気象・環境

- 気象現象や環境問題は、シミュレーションが進んだ分野だが、2相流が関係する部分などに進展が求められる。

### 総合システム

- 地震、火山、気象現象のいずれについても、基本的な原因の解明や抜本的な精度向上には、各種の時空スケールの現象を合わせた総合的なシミュレーションが必要(防災にもマルチスケール・マルチフィジクスな対応を)

