

# Chapter 1

# 第1章

## The Changing Planet: Earth as a System

## 変化する惑星：システムとしての地球

### Introduction

- ・地球表面には様々なところがある。
- ・地表の現象のエネルギー源は太陽と内部エネルギー：太陽はすべての気候現象の元。
- ・内部エネルギーはすべての地質現象(地震、火山、造山運動など)の元。Plate Tectonics を動かしている。
- ・Plate tectonics は地質学の一番の原理。地形を形作り、気候へも影響を与えている。
- ・Plate tectonics は少なくとも25億年は働いていた。地層に残されている過去の事象を理解するための基本原理となる。

### An Introduction to Plate Tectonics

- ・地球は Plate Tectonics が働いている：水が沢山ある：生物がいる唯一の惑星。
- ・月と比較。月：30億年以上前のクレータが残っている。地球：残っていない。PT による葺き替えと水と大気の侵食/風化のため。
- ・PT を見てみよう。地球の層分類：物質分類 - 地殻/マントル/核、レオロジー分類 - リソスフェア/アセノスフェア。
- ・リソスフェアの殻はプレートに別れている。8つの大きなプレート。10cm/yr 程度の速度で運動。150Maではアメリカとアフリカは一つであった。現在では実際の動きが観察できる。第7章で詳しくみる。
- ・火山、地震、山脈はプレート境界にある(図1.6)。プレート境界は3種類：発散境界/収束境界/トランスフォーム境界(図1.7)。  
発散境界：プレート同志が遠ざかるところ。隙間に熱い岩石が上がって来て海嶺を作る(図1.8)。
- ・新しい発散境界が大陸内にできると、大陸が割れて別れる。例：アフリカとアメリカ - 2cm/yr で遠ざかっている。  
収束境界：発散境界があって地球の表面が一定であるとする、どこかに収束境界/沈み込み帯がないといけない。一つのプレートが他方の下に潜り込む。そこには、地震が起き火山ができる。大陸が衝突すると山脈ができる。  
沈み込み帯は太平洋を取り囲んでいる。太平洋は狭くなっていく。ハワイは7cm/yrで日本に近付いている。  
トランスフォーム境界：リソスフェアのすれ違うところ。代表例：サンアンドレアス断層/北アメリカプレートと太平洋プレートの境界。擦れて地震が起きる。火山はほとんどない。  
地震、火山、山脈など地球の特徴はプレートテクトニクスの結果である。

### Climate and the Hydrologic Cycle : 気候と水循環

- ・地球は液体の水がある唯一の惑星。水圏：海/川/湖/地下水/氷河。気圏：大気(水蒸気を含んでいる事が重要)。  
水循環過程：太陽熱で蒸発して風で運ばれる水(風自身が太陽熱で動いている)の循環。雨、雪、川、氷河、地下水、そして海に帰る。地下水は大切。  
地表の変化：水循環に伴って、風化と侵食が起きる。プレートテクトニクスがなければ、地表は最後には平たくなる。外部エネルギーによる気候と、内部エネルギーによるプレートテクトニクスの戦い。  
水は気候、プレートテクトニクス、生物に重要な影響を与えて、地球を太陽系で独特の惑星にしている。水の色々な形の地圏、水圏、生物圏とのかかわりを水循環と呼ぶ。

### Climate Dynamics : 気候変動

- ・地球には様々な気候がある。気候をコントロールしている基本原理を述べる。人間との相互作用については後程。  
気候帯：地球全体が暖かった時寒かった時などあるが、いつでも極は赤道より寒かった。低緯度が暖かいのは太陽の高度が高いから。  
高緯度が寒いのは太陽の高度が低いから。この事実は昔も変わらないから、地球上の気候帯はそれ程変わらなかっただろう。  
循環パターン：大気循環は緯度にそったcellに別れている。赤道で熱せられた大気は上昇する 雨を降らせる。
- ・中緯度では下降気流 高温/乾燥気候 = 沙漠。
- ・極循環は弱い。60°付近で上昇気流 雨、極で下降気流。極はそもそも温度が低いが、やはり乾燥している。  
地形の効果：気候に対する地形の効果も地域的は大きい。山があると風上では雨が降りやすい。  
風下では高温乾燥となる。北米太平洋岸では西風が多いので、シエラネバダの東は乾燥高温。  
地球の気候は基本的に太陽光の入射角にコントロールされている。地域の気候は地形、風向、海からの距離に影響される。

## The Earth as a System : システムとしての地球

- 地球は地圏、水圏、気圏、生物圏が相互作用するシステム。火山ガスの気候への影響。気候は風化、侵食を通じて地圏、水圏へ影響。等々。  
時間を動いて：大陸はずっと動いているのに対して気候帯は固定されている。
- 大陸は異なる気候帯を動いて行く。4億年前にはアフリカ南部/オーストラリアは南極にあった。
- 逆に大陸配置は気候に影響した(Focus 1.1)。現在の例は中央アジアの沙漠。ヒマラヤが乾燥気候を作っている(図1.8)。  
人間との相互作用：人間も相互作用の一部。CO<sub>2</sub>による温暖化現象。フロンによるオゾン層破壊。森林破壊。核兵器。等々。  
地球で何億年もかけて発達してきたプレートテクトニクス、気候と、生物との相互作用が地球を複雑系にして来た。
- この本を通じてプレートテクトニクスと水循環の役割を明らかにする。地表の多様性、火山、地震、資源、環境について勉強する(例：図1.19の質問)。その前に地球の時空に占める大きさについて見てみる。

## Understanding Earth: The Question of Scale : 地球の理解：スケールの問題

- 日常生活から懸け離れた大きさを実感する必要がある。月まで400,000km。一番近い恒星まで40兆km。
- 太陽から冥王星までを100ヤード(91m)としてみると：図1.20。
- 原子は10<sup>-10</sup>m、原子核は10<sup>-14</sup>m。原子はほとんど空。原子核を野球のボールだとすると、原子は野球場全体くらい
- いろいろなサイズの話をしたのは地球科学にとって必要だから。地球に関係することであれば、すべての科学を動員する必要がある。  
地球を真に理解するためには原子の挙動から惑星の形成まで、あらゆるスケールのプロセスの理解が必要である。図1.19
- 次の数章ではいろいろな空間スケール/時間スケールで起こる事について学ぶ。

## Geologic Time: An Important Perspective : 地質時間：重要な背景

- 地球を理解するには長い地質時間を理解する必要がある。文明の歴史全体も地質時間にくらべれば一瞬。
- 地球の年令は45.5億年。生命は30億年。恐竜の生きていたのは1億年前。地球の年令を一年に例えれば 図1.21。  
The Present Is the Key to the Past. 現在は過去の鍵である。
- 人間には大地は動かないように見えるが、十分長い時間あれば大地は動く。ヒマラヤは現在5-10mm/yrで上昇しているが、200万年あればこの速度でも9000mまで上昇できる。大西洋は2cm/yrで広がっている。1.5億年で現在の大西洋はできる。
- 年代測定法発見以前でも、分厚い堆積物の重なりから地球の年令が何百万年にもなることは理解していた。
- 堆積物が積って堆積岩になる。堆積速度は現在の海から見積もる。 グランドキャニオンの堆積物全体が積るのに必要な時間の下限が何百万年にもなる事が分かる(放射年代測定で後に正しい事が分かった)。この考え方を斉一説と言う。“現在は過去の鍵である”
- 地質時間表は 化石の変化 不整合で区分して、代/期/世、に分類されている。詳しくは第6章と付録II。  
地球科学では空間的にも時間にも日常とまったく異なるレンジを考えないといけない。

## A Process Approaches to Physical Geology

- この本全体の枠組みと背後の哲学について述べる。
- 第2章では地球の形成について述べる：地球科学の中で最も分かっていないところ。それでも、地球の現況を知るためには必要。
- 第3～4章：地球を構成する物質、鉱物と岩石について述べる。
- 第5章：地球の全体像。物理的性質、重力/地磁気/地震波/等々。
- 第6章では地球の時間/歴史のレビュー。第7章から10章まではプレートテクトニクスとその結果起こる地表のプロセスについて。特に9章10章では、プレート境界でのプロセス。
- 第11章では水の問題を述べる。人類にとって、淡水をどう確保するかという問題も含めて。12章で風化と侵食、13章で運搬と堆積、14章でその結果としての地形学を述べる。
- その後は地球科学の実用的側面、災害(15章)、資源(16章)
- それぞれの章の最後には、まとめ、単語集、問題、がある。
- Focus Box には、理解を助ける例等。
- 最後に哲学的ノートを：地球科学は観察/実験の上に成り立っているのだが、扱っている時間や空間が大きく、単純に再現する実験をすることはできない。そこで、モデル(仮説)が重要になる。モデルとは観察/実験/理論に基づいた現象の説明ないし記載である。モデルが提唱されれば、その後の観察/実験/理論でテストされる。ここで習うモデルは数十年後には大きく変わっていたり無くなっていさえするかも知れない。それでも、考え方を勉強しよう。プレートテクトニクスだって40年前にはなかったのだ。

## Chapter 1 単語帳

plate tectonics	プレートテクトニクス	atmosphere	気圏、大気
crust	地殻	hydrologic cycle	水循環
mantle	マントル	groundwater	地下水
core	核	biosphere	生物圏
lithosphere	リソスフェア	weathering	風化
asthenosphere	アセノスフェア	erosion	侵食
plates	プレート	rain shadow	?
divergent margins	発散境界	greenhouse gases	温室効果気体
convergent margins	収束境界	sediments	堆積物
transform margins	トランスフォーム(保存)境界	uniformitarianism	斉一説
spreading ridge	海嶺、拡大軸	unconformities	不整合
subduction zones	沈み込み帯	geophysics	地球物理学
hydrosphere	水圏	model	モデル

## Chapter 5

## 第5章

### Earth Processes: Physical Principles.

### 地球のプロセス：物理的原理

#### Introduction

- プレートテクトニクスを動かしている力は内部からの熱。地球半径 6371km 一番深いドリル13km。地球の年齢45億年 地震の記録三千年。どちらにしる、ほんの少し引っ掻いただけ。
- 地球の内部を知る方法：地震波、磁場、重力場 = 地球物理的方法。

#### Seismic Waves：地震波

- まず、音波を考えてみよう。空気の圧力変動の伝播。
- 地震波とは地中を伝わる音。地震波の発生：地震、爆発等々。地震波はX線のように地球の内部を通ってくる。
- 波の性質は波長、周期、振幅で表わす。速度 = 波長 / 周期。速度は密度と弾性で決まる(図5.1)。

#### Density：密度

- 密度 = 質量 / 体積。地球内部へ行くと圧力が上がって体積が小さくなる 密度は高くなる。
- 地球内部の密度分布(図5.2)
- 温度も密度に関係する。温度が高くなる 膨張する 密度が低くなる。密度は温度と圧力が決める 状態方程式。
- 密度は物質にもよる。堆積岩 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 、火山岩 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ @地表。
- マントル物質の圧力による多形：カンラン石(Olivine:  $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_4$ ) 410km スピネル構造 660km ペロブスカイトとマグネシオヴュスタイト。

#### Elasticity：弾性

- ゴムのように引っ張ると伸びて放すと縮む性質を弾性と言う。粘土のように変型したら戻らないのを塑性 / 粘性。
- 岩石も弾性的。弾性を測る数字が必要。
- 応力：単位面積あたりの力の大きさ(圧力と同じ次元)。応力は体積を変える成分(圧縮応力)と、形を変える成分(剪断応力)に分けることができる(図5.3)。変形：応力で体積や形が変わった量。
- 圧力と剪断に対する応答は違ってよい。液体は圧縮に対しては弾性的だが、剪断に対しては弾性的でない。
- 弾性係数：応力：変形の比。圧縮変形：体積弾性率K。剪断変形：剛性率 $\mu$ 。
- 岩石の弾性係数は岩石の構成や組織に依存する。弾性係数の測定は力を加えて変形を測定する。
- 弾性係数は圧力が上がると増加し、温度が上がると減少する。地球内部では圧力効果の方が卓越。ただし、外核は液体だから、剛性率は0。  
地震波は地球内部の圧力と弾性係数を知るのに使われる。弾性係数はある変形をするのに必要な応力である。密度と弾性係数は地球の内部に行く程大きくなる。

#### Seismic P and S Waves：P波とS波

- ・地震波は地震計 = 大地の動きを記録する機器で測る。記録のことを震動図と言う。
  - ・まず、P波が到着し、次にS波が到着する。これらは、実体波である。
  - ・S波が到着するころに表面波が到着する。表面波は少ないエネルギーで大きな震動を引き起こす。表面波の周期は長い。
  - ・P波とS波は震源と地震の原因を知るのに使われる(第7章)。実体波を見れば、地震と核爆発の区別がつく。
  - ・P波とS波の違いは長いバネを使うと良く分かる(図5.5)
  - ・地震波速度は 弾性係数 / 密度である。詳しくは Focus on 5.1。
  - ・ $(K + 4\mu/3)$  は  $\mu$  の3倍程度  $V_p \sim 1.7V_s$ 。表面波速度は  $V_s$  の0.9倍程度。ただし、経路が違う。
  - ・密度と弾性係数を測れば地震波速度が分かる。高温高压でこれらを測って、観測と比較することで地球内部の物質を推定することができる。
- 地震は2種類の実体波：P波とS波を引き起こす。実体波が表面に到達すると、そこから表面波が広がる。地震の被害のほとんどは表面波によるものである。

## Velocity Variation within Earth : 地球内部の速度分布

### Travel-Time Curves : 走時曲線

- ・地球奥深くの物質の性質を見積もるのに地震波速度の測定が使える。コアの速度は鉄で出来たと考えて矛盾はない。
- ・爆発点から地震計までの距離を地震波到達時間で割れば、地震波速度は出てくる。
- ・速度が一樣な場合：波面は球面でレイは直線。速度が一樣でない場合、レイは曲線になる。  
屈折：一樣な物質で球形に広がった波面は地震波速度の違う物質に入ると歪む。
- ・波の動く方向をたどったもの：レイ。直接届いた波を直達波 (Direct ray) と言う。
- ・波面が速度の違う領域に入るとレイは曲がる：屈折。地球では中に行く程速くなるので、地表に戻る方に曲げられる。
- ・空気(光の速度が速い)、水(遅い)のアナロジーで屈折を考えよう。
- ・地球の場合、直達波と屈折波の両方が着いて、屈折波の方が速いことも有る。高速道路に乗るようなもの。
- ・距離と時間を対照すると走時曲線が描ける(図5.8a)。走時から地球内部の速度分布が分かる(図5.8b)。  
反射：速度の不連続面があると、地震のエネルギーの一部は反射する。反射波と屈折波は走時の違いで分かる(図5.9c)
- ・地球内部を様々な経路(直達波、屈折波、反射波)で通ってくる地震波の走時を見ることで地球の内部構造を知ることができる。

### Travel Time within Earth : 地球内部の走時

- ・20世紀初頭に H. Jefferys と K. Bullen が世界の地震波の走時は位置によらず、震源と観測地の震央距離をことを発見した。
- ・この事実は地球内部の地震は速度分布がほとんど深さのみによることを示している。  
走時曲線とは震源から観測点までの角距離と到達時間の関係を表している。この曲線は地球内部での地震波速度の分布、ひいては、物質構成の分布を知るために使うことができる。

### Normal Mode : 地球震動

- ・地震波速度では弾性係数と密度に関係する。それを分離するため、地球震動が使える。
- ・バネ重り系では振動数は重りの重さとバネ係数で決まる。地球震動では密度と弾性係数で決まる。
- ・大きな地震があると、地球は全体として振動する。
- ・一番遅い振動：フットボールモード = 周期54分。
- ・風船モード = 周期20分。他にツイストモード等。大地震の後数カ月振動し続ける。
- ・振幅は大きくても10cm程度。
- ・振動のパターンの事を地球の震動モードと呼ぶ。
- ・数千の震動モードが見い出されていて、その振動数から振動する部分の密度と弾性係数が分かる。

### Velocity Variations in the Crust : 地殻内の速度分布

- ・地殻の地震波速度はマントルより遅い。
- ・地殻とマントルの速度コントラストは大きく、地殻の厚さは地震で分かる。海洋地殻：7~24km、大陸地殻：40~70km。
- ・地殻の底：モホ。地殻の平均P波速度は~6.5km/sec、モホ直下のマントルは~8km/sec。この速度差でモホでは反射屈折が起こり、走時は図5.12のようなる。

### Velocity Variation in the Mantle : マントル内の速度分布

低速度層：100km~200kmの間で深くなるにつれて速度の減少する所。マントルの融点に近付いている。 = アセノス

フェア。

マントル内の相転移：410km と 660km で速度のジャンプ。カンラン石の相転移。

Seismic Velocity Variation in the Core：核内の地震波速度分布

- ・核に入るとP波速度は40%も落ちる P波はCMB(核マントル境界)で下に曲がる 核の影ができる。
- ・S波の核の影はもっと大きい 核はS波を通さない 核は液体。内角はおそらく固体。  
地震波速度は深さとともに増え、モホでは突然増えて、プレートの底では減少する。S波が通らない外核は液体で、地球震動から内核は固体だと考えられる。

Seismic Tomography：地震波トモグラフィ

- ・医療のCT-scanと同じことを地球です。X線：地震波、X線源：地震/爆破、X線ディテクタ：地震計
- ・地殻より下では地震波速度はほとんど深さにのみよる：玉葱地球。外れている所：地殻、沈み込み、海嶺。
- ・地震波トモグラフィでは、玉葱地球からの速度のはずれ = 速度異常を問題にする。
- ・到達時刻異常のデータを世界的に集めると、図5.14bのように速度異常のパターンが浮かび上がる。
- ・地殻内では火山の下のマグマなど、熱い領域で遅い。また、小さいスケールでは石油の母岩のマッピングにも使う。
- ・マントル内でも異常が有る。深くなると異常は小さくなるが、CMB直上に大きな異常の有る層。コアからの熱の示している。外核はない/内核ではある：液体/固体。
- ・重力も地球の内部の密度分布の情報を伝えてくれる。

Gravity and Isostasy：重力とアイソスタシー

Gravity：重力

- ・山が有るのは何故か。重力が重要な役割。
- ・二つの質量は引力を生み出す：質量の積に比例、距離の二乗に反比例。地球表面の重力は場所によって異なる。
- ・重力計は本質的にはバネばかり。北極では重力は0.5%赤道より小さい、エベレストの頂上では0.1%海水面より小さい。
- ・重量と質量： $w=mg$   $w$ :重力、 $m$ :質量、 $g$ :重力加速度。重量は $w/g$ 
  - ・重力加速度測定の単位  $gal=0.01m/sec^2$ 。標準重力 =  $9.8m/sec^2$ 。重力異常は $mgal$ 単位で測る程度。
- ・例えば堆積盆地上で重力探査をすると、 $10mgal$ 程度の負の重力異常を見ることが出来る。地殻は軽いから、厚いと負の重力異常になる( $\sim 20mgal/1km$ 程度)  
重力は二つの質量の間に働く引力である。重力異常を測ることで地球内部の密度分布を知ることができる。

Free-Air Gravity：フリーエア重力

- ・重力探査で重力図を描けるが、地下の情報を知らうとすると補正が必要。緯度補正、高度補正、ブーゲー補正。
- ・緯度補正：遠心力は緯度で違う、地球中心からの距離も違う。高度補正：高いと引力 小、遠心力 大、重力小。この二つの補正をフリーエア補正と言う。海上重力測定では自動的にフリーエア異常になっている。
- ・重力に分布が有ると、海水面もでこぼこになる。理想的な海水面のことをジオイドと言う。

Bouguer Gravity：ブーゲー重力

- ・ブーゲー重力図では海水面から地表までの物質の引力を差っ引く。つまり、その間の岩石を全部削り取った時に観測される重力値(図5.18)。残ったのは、地下の物質の密度分布による異常。
- ・図5.20はアメリカのブーゲー異常図。地下構造に対応している。
- ・重力データの解析手順：重力測定値 フリーエア重力 ブーゲー重力  
一定の高さで測ったとした重力値をフリーエア重力、山を削り、谷を周りの岩石と同じ密度の岩石で埋めたとした場合の重力値を、ブーゲー重力と呼ぶ。

Gravity Anomalies：重力異常

- ・標準重力との差を重力異常と言う。フリーエア異常はアイソスタシー(次節参照)の異常を示しているし、ブーゲー異常は地下の構造を見つけるのに使う。
- ・重力異常は地下に重いものが有れば正になるし、軽いものが有れば負になる。
- ・山では正のフリーエア異常が出そうなものだが、ほとんどない。これは、山の分だけ地殻が厚いから。
- ・ブーゲー異常は地下資源の探査に重要。

Isostasy：アイソスタシー

- ・19世紀の初め、エアリーはインドの重力探査をして、振子がヒマラヤに引かれる量が予想の1/70であることを発見した。これは、山はマントル(高密度)の中に深い地殻(低密度)の根を持っていると考えれば説明がつく。これをアイソスタシーと呼ぶ。
- ・水の中に木のブロックが浮いているモデルを考えると分かりやすい。

- ・単位面積の岩石の柱を考える。底の圧力 = 柱の重さが違えば重い柱は沈んで、軽い柱は浮かぶ。
- ・その結果、柱の底を同じ深さに取る(補償深度)と、補償深度での圧力はどこでも同じになる。
- ・この状態をアイソスタシー平衡とよぶ。蜂蜜に浮かぶ木片を考えると、平衡まで時間がかかる。地殻はもっとかかる
- ・プラットのアイソスタシーモデルでは、底の深さは同じだけど密度の異なるブロックを並べる。大陸地殻ではエアリーモデルが真実に近いが、海嶺付近の海洋地殻ではプラットモデルに近い：海嶺に近い程熱く軽い。
- ・Focus 5.2 でアイソスタシーの計算法を示した。  
海面上の山の質量は山の下に有る地殻の根で補償されている。山は上昇/沈降していない時はアイソスタシー平衡にある。アイソスタシーの成り立つ深さを補償深度と呼ぶ。

#### Plate Flexure : プレートのたわみ

- ・地形の細かい所までアイソスタシーで補償されている訳ではない。
- ・一般的に言って、数100kmの地形はアイソスタシーが働く。10kmより小さな地形はプレートに支えられている。数10kmの海山はプレートのたわみで支えられて、たわみ全体がアイソスタシーで補償されている。

#### Geomagnetism : 地磁気

- ・重力と同じように地磁気は地球内部で生成 地球内部の情報を持っている。
- ・磁石がなぜ北を向くかは、地球が磁石であるとすれば説明はつく。
- ・磁石の向く方向 = 磁北は真北と異なる。二つの北のなす角 = 偏角。磁力線と水平面のなす角 = 伏角。
- ・磁鉄鉱は570 以上では磁性を持たない(キュリー点) 23km以深では岩石は磁性を持たない。では、なぜ地球は磁石？

#### The Geodynamo : ジオダイナモ(地球発電機)

- ・永久磁石でなければ電磁石？大きな電流をどうやって発電する？外核は溶けた鉄で対流している 発電機になる。
- ・磁場と動く伝導体があれば発電機はできる。磁場は自分で供給。自己振励ダイナモ。  
地球磁場の起源は外核で動く自己振励ダイナモであると信じられている。そこでは、磁場中で動く伝導体が地球磁場を再生している。
- ・図5.25は一番単純な自己振励ダイナモである。
- ・ジオダイナモは完全に分っている訳ではない。
- ・地殻起源の磁場も少しはある。それは、地殻中の鉱床や岩石を教えてくれる。
- ・他にも外部起源の磁場もある。地球は地球型の惑星の中で唯一強い磁場を持っている。木星型は地球の数千倍、太陽は百万倍以上の磁場を持っている。

#### Changes in Earth's Magnetic Field : 地球磁場の変動

- ・地球磁場方位は1400年代から測られて来て、1860年には変動することが見い出された。
- ・図5.26はロンドンでの偏角の変遷。
- ・現在は世界中で地球磁場を測って IGRF としてまとめている(図5.27)。地球磁場の70%は単純な双極子で説明出来る。
- ・残り30%が図5.28。このパターンが変化しながら西方へ10km/yr程度で動いている。これは、おそらく核表面の渦のパターンの動きを示しているのだろう。
- ・地球磁場の変動を「永年変化」と呼ぶ。地磁気逆転も起きる。逆転しても、地磁気極は自転軸からあまり離れない。これは、地磁気生成が自転と深く結びついていることを示している。今の地磁気を正磁極、反対を向くと逆磁極。

#### Paleomagnetism : 古地磁気学

- ・岩石には磁鉄鉱の微粒子が含まれていて、小さな磁石なっている。キュリー点より高温では磁性を失う。
- ・キュリー点よりもう少し冷えると(ブロッキング温度)、磁場と平行に磁化する。温度が下がると安定になる。
- ・温度が上がらない限り磁化は地質時代を通じて安定。古地磁気学ができる。
- ・磁場の伏角は緯度の関数だから、過去の地磁気方位が分かれば緯度が分かる。それで、岩石ができた時の地球上での位置がわかる。古地磁気学はプレートテクトニクス理論を証明を与えた。  
岩石がブロッキング温度に達した時の地球磁場の方位は岩石中の鉱物粒子の磁気に記録される。

## Chapter 5 単語帳

phase transitions	相変態	tension	伸長
elasticity	弾性	compression	圧縮
inelasticity	剛性	strain	歪み
plasticity	塑性	elastic modulus	弾性係数
stress	応力	seismometer	地震計

seismogram	震動図?地震記録	free-air gravity maps	フリーエア重力図
P wave	P波	geoid	ジオイド
S wave	S波	Bouguer gravity maps	ブーゲー重力図
body wave	実体波	isostasy	アイソスタシー
surface wave	表面波	isostatic equilibrium	アイソスタシー平衡
direct ray	直達波	magnetic north	磁北
refraction	屈折	declination	偏角
travel-time curve	走時曲線	inclination	伏角
reflection	反射	Curie point	キュリー点
normal mode	正規モード?地球震動	geodynamo	地球ダイナモ
Moho	モホ	blocking temperature	ブロッキング温度
low-velocity zone	低速度層	paleomagnetism	古地磁気学
gravimeter	重力計		

# Chapter 7

# 第7章

## Plate Tectonics

## プレートテクトニクス

### Introduction

- ・大地の変動は遅く見えるが、地質学的時間では大陸/プレートは動く。火山地震はプレート境界にある。

### Continental Drift: The Beginning of the Idea. 大陸移動：お話の始まり

- ・アフリカと南アメリカの海岸が似ていることは1620のベーコン以前から言われていた。
- ・ガリレオが地動説を唱えた時に抵抗したのは教会だけでなく、他の科学者も抵抗した。教会の力がなくなった20世紀において、大陸移動説は他の科学者の抵抗にあった。
- ・20世紀の初めに Taylor と Wegener が海岸線の類似の説明に大陸の移動を持ち出した。Taylor は地球の自転を止めて、潮汐力が生じアメリカ大陸を西に引っ張ったと言った。Jefferies は、それが事実なら地球はすでに自転を止めているはずだと反対した。
- ・Wegener (気象学者&極地探検家) が Continental Drift (大陸移動) という概念を作った。
- ・1910年代に Wegener は南アメリカとアフリカの生物種の類似について勉強した。1915年に“大陸と海洋の起源”を出版。しかし、学会では大陸移動のメカニズムが分からないのを理由に、多数を獲得できなかった。7.2bは Wegener の復元による過去の大陸の配置。
- ・北アメリカやヨーロッパの地球科学者は大陸移動を受け入れなかったが、南アフリカやブラジルをフィールドとする地質学者は支持した。両側の類似が明らかであったから。1937年には、南アフリカの Du Toit が“ Our Wandering Continents ”を出版。

### Wegener's Theory ウェゲナーの理論

- ・ウェゲナーの考えの本質は健全で、“観察に基づく有効な科学的仮説”の代表例である。彼が挙げた証拠には、植物化石分布 小型爬虫類の化石分布(図7.2) 氷河痕の岩石の直上に乾燥気候を示す堆積物というセットの分布(図7.3)
- ・ウェゲナーは300から250Ma(Ma=百万年前)には、世界中の大陸は一つの超大陸パンゲアを作っていて、上に挙げた現象は狭い範囲で起こったことである、と主張した。彼の超大陸の復元は現在に知識に照らしてもほとんど正しい。アルフレッド ウェゲナーは大陸移動説を提唱した。その説は、大陸がかつてひとつにまとまってパンゲアと呼ぶ超大陸をなして、その後分裂・移動して現在の姿となった、というものである。

### Problems with Continental Drift 大陸移動の問題点

- ・大陸移動説には二つのきわどい仮定がある。大陸の形は海岸線で変化しない 大陸は独立に海洋地殻の中を進む。
- Continental Shapes 大陸の形
- ・大陸の形を海岸線に取るのは意味がない 海水準が変わるとすぐ変わる(図6.7)
- ・1950年代にブラードは大陸の端を大陸棚の端(水深200mの所)から大陸斜面の底までいろいろな所を取ってみた。その結果914mの等深線を大陸の形とすると、合わせた時の隙間や重なりが最小になることが分かった(図7.4)
- Continental Movement 大陸の動き
- ・この仮定も正しくなく、大陸はリソスフェアのプレートの一部として移動する。ウェゲナーは大陸が玄武岩質の海洋地殻をかき分け進み、南北大陸西岸の山脈は摩擦で盛り上がった所だと考えた。
- ・ウェゲナーは大陸から離れた破片が後ろに残されると考えていた(アメリカ東海岸の島々)。しかし、花崗岩質の大陸地

殻(柔らかい)が玄武岩質の海洋地殻(硬い)をかき分けるはずがないという批判に反論できなかった。

Other Inexplicable Phenomena その他の説明できない現象

- 大陸移動説は地震や火山の分布を説明できない(山脈の前面の地震以外)。当時は地震の世界的な分布は分っていなかったが。中央海嶺はあることさえ知られていなかった。
  - ウェゲナーが述べた大陸が海洋にのしあげながら進む考えは、海洋プレートの沈み込みと似ているとも言われるが、実は、まったく違うものである。
- Mantle Convection マントル対流
- 1920年代にホームズは大陸移動がマントル対流と関係有ると示唆した。これは、現在の考えに極めて近い(シブヤはそうは思わない)。

Geosyncline and Mountain Building 地向斜と造山運動

- "New Global Tectonics" (プレートテクトニクスを中心としたテクトニクスの体系) 以前に山脈の形成の理論でいたのが "地向斜理論" であった。

Problems with the Theory 理論の問題点

- 20世紀初めから中頃までに山脈での観測が蓄積して来た。多くの山脈では細長いユウ地向斜 (厚く変形の激しい堆積物が特徴。海底噴出火山岩がある。化石に乏しい) とミオ地向斜 (薄く変形の少ない堆積物が特徴。砂岩石灰岩主体。化石が豊富) が並んでいる。
- ミオ地向斜の堆積場は現在の島弧に見られる。しかし、ユウ地向斜の形成環境を現在の地球に当てはめることは出来なかった。

Ocean Floor Study 海洋底研究

- 海洋研究が始まった、1950年代終わり地質学は上記の状況であった。海洋研究 (海底地形、磁気測定、海底試料採取) はプレートテクトニクスを引き出し、地向斜モデルが不適切で、ユウ地向斜は海溝で形成されることを示した。
- ユウ地向斜とミオ地向斜が隣り合っていることも、プレートテクトニクスの枠組みで理解出来る。

Plate Tectonics: A Unifying Theory プレートテクトニクス：統一理論

The Ocean Bottom and Sea-Floor Spreading 海洋底と海底拡大

- 20世紀中頃に海洋研究が進んだ SLBM (潜水艦発射弾道弾) の冷戦のための海底地形図の必要と、ソナーの進歩。
- ヘスは海底拡大を提唱した 海底地形のデータが重要 = 海洋の中央に巨大な海底山脈 (中央海嶺) が見つかった。海洋底は中央海嶺で作られて広がって行くという説。

Paleomagnetism and Polar Wandering 古地磁気と極移動

- 5章で地球磁場が双極子で近似出来ることと、過去の磁場の記録が岩石中にあることを見た。
- 古地磁気を測定すれば極の移動が分かる。古地磁気学者は様々な大陸で極の移動を測定した。
- 見かけの極移動曲線 (APWC) とは、ある大陸から測った極の移動の曲線。北アメリカとヨーロッパの APWC は形は似ているが一致しない。
- 大陸が動けばこの不一致を説明出来る。

Paleomagnetism and Sea-Floor Spreading 古地磁気と海洋底拡大

- 1950年代末に Cox と Dalrymple は古地磁気学と K-Ar 年代決定を組み合わせることで、地磁気逆転を明らかにしようとした。Hawaii の溶岩を使った。
- Dalrymple は K-Ar 法で岩石の年代を測り、Cox は方位の付いた試料を採集して、溶岩が噴出した時の地磁気の方位と強度を測定した(図7.6)。(注：まちがい。地磁気強度の測定はほとんどしていない。)
- その結果、彼等は地磁気の逆転が不規則に起こる、世界的な現象であることを発見した。逆転は過去5Maの間では平均20万年に一度起こっている。

地球磁場の逆転は過去に幾度となく起こっており、世界中で同時に起こる現象である。

- 地磁気逆転に関連した次のお話：スクリプス海洋研究所では高感度の磁力計を開発してアメリカ西海岸沖で地磁気強度が対称的な縞模様パターンを示すことを発見した。
- 1963年までに中央海嶺の両側ではどこでも、地球磁気強度の対称的な縞模様パターンがあることが分かったが、何故かは分からなかった。
- 1963年に Vine & Matthews は地磁気縞模様と海洋底拡大を関係付ける説を発表した。中央海嶺で貫入したマグマが冷える際にその時の磁場の方向に磁化する。
- 正磁極期に貫入した岩石の上では地球磁場は通常より強くなり、逆磁極期の岩石の上では弱くなる(正/負の磁気異常)。
- 1963年に Hess はアイスランドの南の大西洋中央海嶺の調査航海を行って、中央海嶺の両側の地磁気異常縞模様が対称で(図7.7a)Cox & Dalrymple の地磁気逆転年代表と一致することを見つけ(図7.7b)、Vine & Matthews説と彼等の海洋底拡大説の正しさを決定的にした。現在では海洋底は海嶺で若く、離れるにつれて古なることが分かっている。

る(図7.8)。

拡大する海嶺の両側の海洋底の岩石は、地磁気のパターンを対称的に記録している。海嶺に関してお互いの鏡像になっている正/負の磁気異常帯は、玄武岩マグマが中央海嶺に正/逆の磁極期に貫入することで形成される。

## The Rock Record: Fossils, Climate and Continents 岩石の記録：化石、気候、そして大陸

- 古地磁気記録は地理極の移動も記録している。図7.5は過去4億年の極移動 ヨーロッパ、北アメリカは今より極から遠かった。
- 4億年前にはサハラ沙漠で氷河の擦痕。2.5～3億年前にはブラジルでは氷河堆積物/その中の礫には南西アフリカのもの。ヨーロッパ・北アメリカ・アフリカ北端では3億年前に熱帯雨林/その0.5億年後には沙漠に。大陸の気候は変化した。地球全体の気候が変化した訳ではない。過去も現在と似た気候配置 = Hutton の斉一説。

### Earth's Climate 地球の気候

- 地球の気候は変化して来た。大気の循環より海の循環が大陸配置の影響を強く受ける。
- 岩石記録中の氷河や熱帯雨林の出現の説明は、現在の気候学の知識と調和的でないといけない。それらは、地球全体の気候変化より、大陸の異なる気候帯への移動で説明できることが多い。
- 気候帯は生物分布に影響する 珊瑚礁：熱帯の浅い海，両生類：温暖湿潤，ペンギン：極地，など。地球全体では、赤道帯：熱帯雨林，回帰線&極地：乾燥。(図7.9)
- 気候帯は地史を読む上で重要な手がかりに。岩石記録と古地磁気の相互チェックで大陸の古緯度が決まる。

### Pangaea: Reconstruction of the Lost Continent パンゲア：失われた大陸の再構成

- 1960年代中頃の大陸移動説の議論と進歩をたどることは、地質科学の発展がどのように起こるかを見る上でよい。
- ウェゲナーの超大陸を古気候の説明に使う。図7.10は古地磁気からの古緯度になるように大陸を集めたもの。気候の手がかり
- 砂丘、蒸発岩(岩塩等)、化石、氷河、等々。
- 図7.10の再構成で氷河や熱帯雨林が説明出来る。南米&アフリカ マダガスカル&インド オーストラリア&南極大陸の順に氷河に被われたことは、パンゲアがゆっくり移動したと思えばよい。
- 熱帯雨林でも似た説明ができるが、熱帯から乾燥帯への移行が急激であることを考えに入れなければならない。
- それで、同じようにパンゲアがゆっくり移動しても、熱帯雨林から乾燥帯への移行は急激に起こった。全地球的な気候変動は地質時代にあった。地球の安定した気候帯を横切って大陸がゆっくり動いて行くことで、ある地点の地質時代を通じての見かけの気候変動は起こった。

### Flood Basalts and Continental Rifting 洪水玄武岩と大陸断裂

- 広い海の両側に、比較的短期(数百万年)に噴出した、特性の似た玄武岩が分布することがある(図7.11)。洪水玄武岩。断層構造は引き延ばされたよう。Parana FB と Etendeka FB はどちらも130Maで250Maの沙漠の堆積物の下にある。
- FB は大陸の断裂に関係している 年代が一致。例：南米/アフリカ=130Ma，アフリカ/南極=180Ma，北大西洋両岸=60Ma。

### Mantle Plume マントルプルーム

- マントルの細い上昇流 = マントルプルームが大陸の分裂と関係あるかも。プルームはホットスポットのもと。大陸の下にプルームが来たら、リソスフェアが薄くなる 両側に開く力が働く、で分裂をさそう。どちらがどのように効くかは研究中。
- 洪水玄武岩は巨大プルームと関連があり、大陸の分裂と関係がある。洪水玄武岩地域はプレートテクトニクスに取って特別。大陸の下に上昇してくるマントルプルームは上部マントルを融かし、大量の玄武岩を生じ、大陸を弱くして、そこから分裂させる、ことがある。従って、大陸分裂の初期段階は、しばしば、洪水玄武岩で特徴付けられる。

### Plates and Plate Boundaries プレートとプレート境界

- プレートとは境界(発散境界=海嶺/収束境界=海溝/保存境界=トランスフォーム断層)で囲まれた、コヒーレントな(=内部に変形のない)リソスフェアの単位である。
- それぞれの境界には、特徴的な地震や火山活動がある。第9&10章参照。

### Defining Boundaries and Continents 境界の定義と大陸

- 大陸の境界とプレートの境界は違う=大陸移動とプレートテクトニクスの大きな違い。大陸は軽い地殻が重いマントル物質に浮かんでいて、リソスフェアの一部である。地殻とマントルは物質の違い。リソスフェアとアセノスフェアは力学的性質の違い。大陸の端がプレート境界の時=Active continental margin (活動的大陸縁辺域)、そうでない時=Passive continental margin (非活動的大陸縁辺域)、と呼ぶ。
- リソスフェアは8つの大きなプレート(EU,AF,IN,NA,SA,AN,PA,NZ)と数個のマイクロプレートからなる。プレートは

力学的に弱い層=低速度層=アセノスフェアの上を滑って動く。

#### Rates of Plate Movement プレート運動速度

- ・通常は0.1~10cm/yr。岩石記録から知る/現在ではGPS等で直接測れる。
- ・例えばニューヨークとロンドンの間の距離は2cm/yrで離れている。

#### Triple Junctions 3重会合点

- ・プレート境界のネットワークがあれば、境界が会ったり、性質を変える所がある。
- ・3つのプレートが出会う所=三本の境界が出会う所=3重会合点。安定な3重会合点=時間が経っても性質を変えない3重会合点、と不安定な3重会合点を考えることができる。前者の例：海嶺の3重会合点、後者：トランスフォームの3重会合点。
- ・安定な3重会合点の満たすべき幾何学的条件/関係するプレートの運動の条件が存在する。(安定な3重会合点でも、性質さえ変わらなければ動いても良い)
- ・R: 海嶺, T: 海溝, F: トランスフォーム断層として、3重会合点を RRR, FFF, RTT などと書く。常に窠窠な組み合わせは少ない。RRRは安定。(註: 安定な3重会合点しか地球上には存在しないから、この解析は重要)
- ・3重会合点は3つのプレートが出会う所である。3重会合点の安定性は3つのプレートの相対運動で決まる。3重会合点安定であるとは、プレートの相対運動で3重会合点の幾何学的性質が変化しないことである。

#### A Plate-Tectonic Link to Earthquakes and Volcanoes

##### 地震と火山のプレートテクトニクスによる繋がり

- ・太平洋の周りは“火の輪”であり、“地震の輪”でもある。大西洋と異なる。太平洋は海溝やTF=活動的=プレート境界で囲まれているから。大西洋は周りは非活動的=プレート内部。
- ・地震は恐ろしい現象。地震の原因に海に関係したものを求める伝説が世界中に。
- ・地震は断層が引き起こす。地震と火山は関係がありそう。しかし、火山から遠く離れた地震もある。例：1906サンフランシスコ地震、1971 & 1994 LA地域の地震。これらは、サンアンドレアス断層の運動に伴うもの。
- ・プレート/沈み込みが知られる前から火山(特にアンデス型火山)が海陸の境界で火山帯を作っていることは知られていた。海陸境界の割れ目から水が入って火山ができるという説は1700年代からあった。現在の考えでも沈み込みでマントルに持ち込まれた水がマントル物質の融点を下げてマグマを発生させる。火山はプレート運動の直接の帰結。
- ・プレート境界と関係のない火山もある。例：ハワイ諸島はプレートのまん中にある地球上最大の火山。このような火山はマントルプルームでできたホットスポットでホットスポット軌跡を作る。

#### Plumes and Hot Spot Trails プルームとホットスポット軌跡

- ・ホットスポット軌跡はプレートが動くことの証左。マントル対流の一形態がマントルプルームで、プレートの分布と関係ない所に上昇するので、プレート内部火山となる。
- ・プルームの作る火山は、遠ざかるにつれて古くなる火山列を作る。
- ・プルームはマントルの奥深くから上がってくるのでほぼ止まっているが、プレートはその上を動く。それで、ホットスポット軌跡となる火山列ができる。
- ・図7.1bにはホットスポットの分布。大太平洋プレートには沢山のホットスポット。一番有名なのがハワイ-天皇海山列。ハワイ島から北西へと次第に不活発に&侵食&沈降が進み、古く(K-Ar年代測定等)なる。これから、大太平洋プレートの速度が計算出来る。
- ・ハワイ大島は年代0。北西2432kmにあるミッドウェー島の年代は27.2Ma。速度は8.8cm/yr。速度はベクトル量。
- ・ハワイ列から天皇列へ海山列の曲がりがある(図7.14a)。南太平洋の海山列でも同様。曲がりほどの海山列でも43Ma。このプレート運動の変化は様々なテクトニックイベント(クラプレートの消滅、インドの衝突等々)に対応している。ホットスポット軌跡はマントルプルームの上をプレートが移動することで形成される。この軌跡はプレートの絶対運動をきめるのに使える。

#### Topography of the Lithosphere リソスフェアの地形

- ・海洋底地形の基本的な特徴=海洋プレートが海嶺から離れるにつれて、深く&厚くなって行く。次第に冷えて重く厚くなって行くプレートのアイソスタシーで説明出来る。
- ・大陸が3800m+840mも海洋底から突き出している理由は、海洋地殻と大陸地殻の密度差だけでは説明できない。その説明には、リソスフェア全体に占める地殻の割合が大陸では海洋に比べて大きいことが重要。
- ・軽くて厚い大陸地殻 vs 重くて薄い海洋地殻のアイソスタシーが大陸と海洋の地形の違いを作り出している(図7.6)。
- ・基盤からの高さならマウナロア(ハワイ大島)の方がエベレストより高いが、大陸と海洋の基盤高度の差でエベレストが高い。

#### What Drives Plate Motions? 何がプレートを動かしているか?

- ・プレートについてこの章で学んだし、後の章で色々学ぶが、ここで、プレートテクトニクスの原動力を少し考える。

- ・プレートがなぜ動くかはまだ良く分っていない。なぜなら、マントル対流や対流とプレートの相互作用の詳細が良く分っていないから。
- ・プレート運動は様々な力(加速するもの、減速するもの)の合力。プレート自身が対流の最上層。対流の一部なら、動かす力は重力。重力は3通りにプレートに働く。海嶺の押し スラブの引き スラブの吸い込み。
- ・海嶺の押しは、海嶺の両側にスロープをリソスフェアが滑り落ちようとする力。
- ・スラブの引きは、沈み込むスラブがリソスフェア全体を引っ張る力(ベッドカバーのずり落ち)。スラブの吸い込みはスラブが落ちる時に海溝が後退して、上盤のプレートを引っ張る力。
- ・これらの力とアセノスフェアの粘性による引きずりとのバランスでプレートの動きが決まる。

#### Mechanics of Slab Pull スラブの引きの力学

- ・スラブの引きがプレート運動に重要である。なぜなら、プレートの端がスラブの場合にプレートの速度が速い。
- ・スラブはアセノスフェアに“負の浮力”で沈んで行くが、大きなものはなかなか暖まらないので、どんどん沈んで行く。相転位すると、もっと沈みやすくなることもある。
- ・410km相転位では上記の傾向。660km相転位では沈みにくくなりそう。そこでどうなるかは、研究者の間で意見が分かれる所。

#### Research on Extension and Compression 伸長と圧縮についての研究

- ・実際に地殻に働いている力を測定して、伸長応力/圧縮応力の分布を研究することがなされるようになって来た(第8章参照)。ロッキーの西側で伸長応力、東側で圧縮応力=海嶺の押しとスラブの吸い込みがアメリカを東に動かしている。
- ・プレートはスラブの引き、海嶺の押し、スラブの吸い込み等々色々な力が働いて動いている。

#### Plumes, Subducted Slabs, and the Workings of Plate Tectonics

##### プリューム、沈み込んだスラブ、そしてプレートテクトニクスの働き。

- ・ホットスポットの沢山ある所=地震波トモグラフィーで遅い所=大太平洋の中央部&パンゲアが昔あった所=冷たいスラブの沈み込みから離れている所。ホットスポットは地球の放熱に重要な役割。
- ・地球の力学は内部からの熱の流れが動かしている。地表での最大の放熱=マグマ放出は海嶺で。しかし、海嶺の熱源はマントルの浅い部分のみ。
- ・プリュームはもっと深い所からの放熱。プレート境界を決めているのは地表の現象。プリュームの位置を決めているのは深い現象。発散プレート境界にあるプリュームは、プリュームが発散プレート境界の位置に影響を与えたのであって、その逆ではない。
- ・プリュームはマントル奥深くから熱い物質を運んで来て、地球内部のマントル対流の重要な要素である。
- ・プリュームがどこから上ってくるかは良く分っていない。660km境界が熱境界層でそこからだと言う考えと、コア-マントル境界(CMB)から上がってくるという考えがある。プレート内火山が地球化学的に海嶺の火山と異なることは、プリュームのCMB起源を支持する。
- ・少なくともハワイのような大きくて長寿のプリュームはCMB起源だろう。CMBほど温度/組成のコントラストが大きな境界は他にない。もっと小さなプリュームは660km境界起源かもしれない。
- ・全体として、海嶺での浅い上昇流を主として、二次的な深いプリュームの上昇流があるという全体像を描ける。

#### Plate Motions through Geologic Time 地質時代を通じてのプレート運動

- ・過去の大陸の位置を復元するには様々な情報を使う。岩石、地層、氷河、古地磁気等々。
- ・5億年以上前からの大陸移動の復元は可能であるが、4.5億年以降にならないと自信のある復元は難しい。新しくなる程確かな話ができるようになる。プレート速度ベクトル(Focus 7.4)を得るのが重要。
- ・斉一説が地質時代の記録を解釈する鍵になる。現在起こっている物理的過程は過去も起こる。ただし、生物活動の影響が絡んでくるとややこしくなる。
- ・450Maから500Maの地球表面は大陸分布、山、風、雨等々、現在の地球と変わらなかつただろうが、陸上に生物は居なかつた。そうすると、風化、露出、堆積などの過程は現在と異なつただろう。
- ・大気の組成もかなり違つたかも知れない。それでも、風化は起こり、堆積物は溜まり、その記録を我々は見ることができる。
- ・プレートテクトニクスはどこまで遡れるか。初期の地球では対流はもっと激しかったはず。テクトニクスが今と同じである保証はない。斉一説はすべてが同じと言う意味ではない。それでも、過去5億年はプレートテクトニクスが働いていたと考えることができる。
- ・遠い過去も大陸塊は現在と同じような過程：侵食と堆積、火山活動、深成岩貫入、変成作用、変形などで、変化していた。
- ・ウェゲナーはいろいろ変なことも言っているが、当時の知識を考えると良い線行っていた。特に、物事を地球全体のプロセスとして考えようと言う態度はよかった。

## Ocean Basin Depths and Satellite Altimetry 海洋盆の深さと衛星高度測量術

- ERS-1とGeosatは衛星と地表/海水面との距離を非常に精度良く測るレーダーを備えている。海面はジオイド。海山があればジオイドは盛り上がり、海溝ではへこむ。
- 衛星は1kHzでデータを収集し、1.5年で地表全体をカバーする。地表の測定は精度でも密度でもかなわない。ジオイドの凸凹を地表の観測と比較して海の深さに読替えることができる(海洋底の物質の密度はほとんど変わらないから)。
- この重力異常図でルイヴィル海山列は発見された。
- これから、海洋底の地形の細かい特徴：海嶺、沈み込み帯、トランスフォーム断層、海山列等々が非常によく見える。RRRの3重会合点の間の角度は、関係するプレートの相対速度で決まる：全部同じ速度で遠ざかっていれば120°。インド洋のロドリゲス3重会合点はそれから大きく外れている。インドプレートの速度が他の二つより速いことが分かる。
- この衛星を用いた測定は海洋底の地形の知識を飛躍的に詳細にした。

## Chapter 7 単語帳

continental drift	大陸移動	mantle plumes	マントルプルーム(細い上昇流)
Pangaea	パンゲア	hot spots	ホットスポット
geosyncline	地向斜	active continental margin	活動的大陸縁辺域
sea-floor spreading	海洋底拡大	passive continental margin	非活動的大陸縁辺域
apparent polar wander curve	見かけの極移動曲線	triple junction	3重会合点(プレートの)
flood basalts	洪水玄武岩	aseismic creep	非地震性地殻運動

## Chapter 8

## 第8章

### Deformation, Earthquakes, and Formation of Geologic Structure

### 変形、地震、地質構造の形成

p.223

#### Earthquakes 地震

- 地震は断層が脆性破壊して、両側のブロックが動くことで発生する。破壊が始まった点を震源、その真上の地表の点を震央と呼ぶ。地震はほとんどプレート境界で起こる。沈み込み帯では深さ700kmの地震が起こることもあるが、それ以外では15kmより深くで起こることはまれである。
- 地震の起こるメカニズムは一本の棒をずらして行けばどこかで壊れて、パチンというのと同じである。図8.12

#### Earthquakes at Plate Margins プレート境界での地震 図8.13

- トランスフォーム断層の地震。プレートは100km程度あるが、地震の起こるのは精々15km。その下では岩石はダクタイルになっている。両方のプレートが少しずつずれて行くが、断層面は動かないので弾性エネルギーをためて行く。
- 破壊した時に弾性反動で地震が起きる。最大で断層ぞい1000kmにわたって10mもずれるような地震もある。図8.12。
- 地震の間、地面が急加速して、建物を壊す。
- 収束境界では700kmの深さまで地震が起こることがある。冷たくブリットルな物質が深くまで潜り込んでいるから。
- 深い地震の起こるメカニズムについて。
- 発散境界の地殻での地震はほとんどオフセットした海嶺をつなぐトランスフォーム断層ぞいである。海嶺の地震は小さな正断層系の地震。海嶺の近くでは極浅い地震しか起きない。
- プレート内地震。プレート全体のゆっくりした変形があれば、頻度は少ないがプレート内でも地震が起きる。
- 1811年のミズーリ/1886年南カロライナの地震が良い例。
- 海洋地殻でもプレート内地震は起きる。例：ハワイ（これは、あまり大きな地震にはならない）

#### Measuring Earthquakes 地震を測る

- 地震計の構造図8.14

#### Earthquake Locations 震源位置決定

- ・ P-S時間を測れば震源までの距離が分かる。大森公式： $D=kT$  (D:震源と観測点の距離、T:初期微動継続時間=P-S時間、 $k=v_p v_s / (v_p - v_s) = 6 \sim 8 \text{ km/s}$ )
- ・ 地球上の3点から震源までの距離が分かれば震源が決められる(図8.15)。

### Earthquake Size 地震の大きさ

- ・ リヒタースケール=マグニチュード：100km離れた所の標準地震計の振幅の対数。
- ・ 観測史上最大の地震はインドのアッサムで1897年に起きた  $M=8.8$ 。Mが1大きくなると振幅は10倍になる。エネルギーは振幅の二乗に比例するから、100倍。最大の核爆弾の起こす地震が  $M=6.5$ 。
- ・ 地震のゆれのスケールは西洋では修正メルカリ震度を使う。日本では気象庁震度階。
- ・ 小さな地震 ( $M=3$ 程度) は毎日起こっている。
- ・ ゲーテンベルグ-リヒター関係式。図8.16
- ・ プレート境界の運動は地震の時のプレート全体の運動に追い付く。1906年サンフランシスコ地震でサンアンドレアス断層は6mずれた。NA-PAの相対速度は0.05m/yrだから、120年分のずれを解消したことになる。21世紀中にもう一つ地震が起きるだろう。地震危険度評価(長期予知)の基本原理解。
- ・ 地震によるずれの大きさは地震断層の長さの0.03%程度である。Mが1小さくなると地震断層の長さorずれの大きさは一桁小さくなる。ロマプリ-タ地震(1989)はM7.1断層長50km。サンフランシスコ地震(1906)はM8.2断層長400km。
- ・ 地震の大きさの尺度にモーメントが有用。モーメント=ずれの大きさ×断層の面積×弾性係数 (=弾性エネルギー)。モーメントとマグニチュードの関係はFocus 8.1。
- ・ これらの数字は地震波、地表の断層、余震分布などから推定。
- ・ 断層のクリープは、断層がゆっくり(地震を起こさずに)動くことを言う。そのような断層は危険度が少ない。
- ・ 断層のずれはロックした断層の0から地震のずれ速度の間の速度で動く。地震の破壊が伝わる速度は3km/s、ずれの速度は数m/s、プレートの動きは5cm/yr。  
マグニチュードは地震の大きさの指標である。もう一つの指標の地震モーメントはずれと面積と弾性係数の積である。もし、ある時間のモーメントの和がプレート境界の全モーメントより小さいならば、不足分はクリープか将来の大地震で埋め合わせることになるのだろう。

### Foreshocks and Aftershocks 前震と余震

- ・ 前震は本震の前に起こる地震。本震の後に起こるのが余震。
- ・ 前震はいつも起こる訳ではない (Focus 8.2)。
- ・ 統計によれば、南カリフォルニアでは  $M=6$  の地震が起こったら 6% の確率でそれは6日以内の大きな地震の前震。
- ・ 余震は必ず起こる。数は急速に減少する。最大余震は本震よりMが1小さいという経験則。余震の数は1/tで減衰 大森の法則。 $M=6$ 程度の地震では、余震は数週間続く。大地震では数年に及ぶことも。地震の間隔はバラバラでランダムであるように見える。余震のある地震は多いが、予知につながるような前震のある場合はほとんどない。

### Earthquake Motions 地震動

- ・ 地震の初動は断層運動と深い関係がある。南北の右横ずれ断層の場合を考えてみよう(図8.17a-d)。断層運動は NWとSE象限では圧縮をもたらす、残りでは伸長をもたらす。
- ・ 断層運動は圧縮の象限では外側への動きとなり、伸長の象限では内側への動きとなる。これが、P波を作り出す。
- ・ 90度の方向では横向き動きのみで、これはS波を作り出す。
- ・ 世界中に地震計が十分に分布して、P波の初動を記録し、押し引き分布を+/-でプロットすればずれの方向を知ることができる。
- ・ このパターンを発振機構図と呼ぶ。正断層や逆断層は別のパターンを持つ(図8.17)。
- ・ 断層面と共役面との区別が発振機構図だけでは分からない。地表断層、プレート運動、余震分布、地震強度の分布(図8.18)等を使う。
- ・ 現代の地震学では地震の全波形を使って、地震がどこで始まって、どのように破壊が進んでいったかを再現することができる。図8.19  
発振機構図は直交する二つの面：断層面と共役面を与え、そこを境界に放射される地震波は圧縮波と伸長波に分かれる。断層面と共役面を区別するには他の情報、例えば余震分布、波形、地表断層など、が必要である。

### Plate Motions and Earthquakes プレート運動と地震

#### Measurements of Past Plate Motions 過去のプレート運動の測定

- ・ 地震は等間隔では起きないが、長期間の平均を取ると、地震の間隔=地震による動き÷プレート運動速度。
- ・ 例：プレート運動=5cm/yr 地震の平均的な動き=10m とすると、間隔は200年。実際の間隔はこの平均から大きく変動する。おそらく、地殻の不均一性が原因。

- ・過去の地震の年代推定には地震断層崖に急激に積った堆積物を調べる図8.20。LAの北の断層では、ここ1500年の大地震の平均間隔は136年であると分った。この地域での最後のM=8級の地震は1857年だから、これは危険信号。
- ・断層運動の地質的証拠：河川の曲がり、岩体のずれなど。SA断層では5Maで250kmのずれが見られる=5cm/yr。
- ・プレート運動速度を知る他の方法(海嶺付近の地磁気縞模様、ホットスポット海山列の年代など)を合わせて、プレート運動の幾何学モデル(最新版 NUVEL)が作られている。これは、現代の測定と良く合う  
長期間の断層のにり速度は河川や岩体、堆積層などの時代の分った地質構造のずれで推定することができる。

#### Geodesy and Measurements of Present-Day Plate Motions 測地学と現在の運動の測定

- ・現在のプレート運動を測定する方法は地上の測定と宇宙からの測定に分類出来る。地上の測定はジオディメータと水準測量がある。ジオディメータは光のパルスの往復時間で距離を測る。図8.21
- ・水準測量では図8.22の様に水平に設置した水準器で2点間の高度差を測定する。これを、くり返し用いて、海水準からの高度を測定する。
- ・宇宙からの測定：VLBIとGPS。VLBI：遠くの天体からの電波を2点で受けて、時間差を距離に換算する。異なった方位の天体を使えば2点の関係が特定出来る。図8.23
- ・GPS(カーナビで使っている)は24個の人工衛星からの電波を受信してVLBIと同様に時間差で位置を特定する：図8.24a。VLBI, GPS の測定がNUVELモデルと合ったことが地球物理の大勝利。
- ・測定の与える描像：断層から少し離れると地殻はプレート運動の速度で運動する。断層に近付くにつれて(普段は)運動速度は遅くなり：図8.24b、その間に弾性エネルギーをためる。地震の際にプレート運動に追い付く所まで曲がりもどる：図8.12。その後断層は摩擦を回復し、また曲がり始める。これを地震周期と呼ぶ：図8.25。

#### Strain Measurements: Strainmeters and Tiltmeters 歪み測定：歪み計と傾斜計

- ・地震予知に向って必要なことは歪みの集積を測定することである。歪み計は2点間の長さの精密測定を自動でする機械：図8.26a。
- ・傾斜計は2点間の高度差=傾斜の精密測定を自動でする機械。火山の変形測定には便利。近く歪みの地震直前の異常の報告があり、地震予知に期待がもたれたが、装置の精度と安定度が上がるにつれて、地震直前異常の報告は減り、予知への有効性の期待は小さくなっている。  
現在のプレート運動の測定はプレートが数cm/yrで移動していることを示す。地震周期はプレート運動の帰結で、断層の両側での歪みの増加と、地震での歪みの放出、断層の摩擦の回復によって起こる。

#### Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) 干渉合成開口レーダー

- ・最近、レーダーで地球表面のわずかな変動を検出することができるようになった。
- ・レーダー：電波を発射してその反射から物体までの距離を測定する。解像度を上げるには、アンテナの口径が大きい方がよい。口径を大きくする一つの方法は、複数個のアンテナ or 動いていくアンテナを使って、合成口径を作る方法。
- ・公転する人工衛星からのレーダーパルスは地表で反射される。その詳細な記録を残す。時間が経って同じ所の記録を取る。二つの記録の引き算をすると、動いていない所は逆位相になって0になるが、レーダー波の波長程度動いた所は足し算されて強くなる：図8.27。波長は2cm程度だから数cmの動きを数mmの誤差で測定出来る。
- ・実例図8.28：LAのLander地震でのほぼ垂直方向の変移。縞1本が2.8cm(5cm?)。断層の両側におよそ100本の縞 断層の変移は2.8m。これは、地上の断層崖の観察とも符合する。

## Chapter 8 単語帳

elastic limit	弾性限界	footwall	(断層の)下盤
ductile	粘性的	throw	(断層による地層・鉞脈の) 垂直ずれ
brittle deformation	脆性変形	heave	(断層による地層・鉞脈の)水平ずれ
plastic deformation	塑性変形	strike	走向
faults	断層	normal fault	正断層
folds	褶曲	graben	地溝
décollement	デコルマ	reverse fault	逆断層
brittle-ductile transition	脆性-塑性転移	thrust fault	衝上断層
joints	掇理	ramp	スラストランプ
sheeting	シーティング掇理	strike-slip fault	横ずれ断層
exfoliations	剥離	right-lateral fault	右横ずれ断層
fault plane	断層面	left-lateral fault	左横ずれ断層
hanging wall	(断層の)上盤	oblique slip	斜め滑り

fault scarp	断層崖	epicenter	震央
listric fault	リストリック断層	elastic rebound	弾性反発
anticline	背斜	magnitude	マグニチュード
syncline	向斜	Richter magnitude scale	リヒタースケール
monocline	単斜	Modified Mercalli Intensity Scale	
hinge	ヒンジ		修
axis	(褶曲の)軸	正メルカリ震度階(日本では気象庁震度階を用いる)	
limb	(褶曲の)翼部	moment	(地震の)モーメント
nappe	ナップ	fault creep	断層の(地震を起こさない)這り
----- ここからが地震関係 -----		fault-plane solutions	発振機構
focus	震源	earthquake cycle	地震サイクル
hypocenter	震源	volcano deformation cycle	火山変形サイクル

# Chapter 15

# 第15章

## Geologic Hazards and the Environment

## 地質災害と環境

p.433

### Earthquakes: Where the Dangers Are 地震：危険な場所

- プレート運動が地震の原因だから、プレート境界は危険(図15.2)。遠く離れた地域でも地震が起こることがあるFocus 15.1。
- 大陸内部の地殻は古くて固いので、より大きな応力を支えられる 大地震。例1881/82年New Madrid/Missouri 頻度は小さいが一旦起きると西海岸より危険。なぜなら、固い地殻 大応力 固い地殻 地震波が減衰せずに伝わる 建物の地震対策が不十分
- 被害最大のプレート内地震 1976年唐山地震M7.6では24万人の死者。1556年陝西省の地震では80万人の死者。中国はプレート境界から遠いが、インドの衝突で動きが激しい。地震は活動的なプレート境界の近くに集中しているが、プレート内部でも大地震が起こることがある。プレート内部では応力が大きく、地震波も強く伝わるので、大災害になりやすい。

### Earthquake Strength 地震の強度

#### Mercalli Intensity メルカリ震度

- 表15.1 (日本では気象庁震度階 0-1-2-3-4-5弱-5強-6弱-6強-7の10段階)

<http://www.kishou.go.jp/know/shindo/shindokai.html> 参照

#### Correlation of Mercalli Effect and Richter Magnitude メルカリ効果とマグニチュードの関係

- 震度は地震動の強さ。マグニチュードは地震そのものの大きさ。マグニチュードの大きな地震でも震源から離れていれば地震動は弱くなる。表15.1の対応は、一つの地震での最大震度の目安。
- 大地震では一般に被害強度は震央で最大で距離が離れるにつれて弱くなる。等震度線が引ける(Focus15.1図3)。地震のリヒターマグニチュード(=強度)は地震計で測定したもので、震度階は被害や地震動によって引き起こされる現象の観察から得られた定性的なものである。これら二つのスケールを比較することで、過去の地震の正確な状況を把握することができる。

### Building Failure in Earthquakes 地震での建物の崩壊

- “大地のごとく動かない”はずのものが動くのは一番恐ろしい。図15.3a
- ほとんどの被害は断層の近くで起こる。
- 地震の被害を決める三つの要素：振幅、周波数、継続時間。振幅は震動の山の高さ。振幅が大きくなると被害が大きくなる。
- 地震動には様々な周波数の成分が含まれている。建物や表面地質は特定の周波数の地震動を増幅することがある。
- 建物は固有の震動周期を持っている。それと、地震動の周期が合ったら共鳴現象が起こり、建物の震動の振幅はどんどん大きくなる。建物の階数×0.1秒くらいの周期。100階の建物なら10秒(0.1Hz)程度。
- 1985年のメキシコ地震では、震源が数百kmも離れていたのに、柔らかい湖成の堆積物上の建物の周期と共振した建物が崩壊した。図15.3b。
- 地震の継続時間も被害を決める要素。断層面の破壊の進む速度は3km/sだから、18kmで6秒、400kmなら133秒、地

震を発生し続ける。実際の継続時間は反射や屈折等で10倍程度長くなる。

建物の崩壊が起こるかどうかは、地震波の振幅、周波数、振動継続時間と結びついている。

- 地震の被害のかなりの部分は地震動そのものでなく、火事による。大地震被害下では、水道も破壊されており、一旦発生した火災を鎮火することは難しい。1906年サンフランシスコ地震では3日間燃え続けた。

Effects of Geology on Building Survival 建物が壊れない所の地質

- 地下の物質の物性が異なれば、地震波の伝わり方も異なる。柔らかい物質は、高周波の地震波を減衰させるが、低周波の地震波は増幅することもある。
- 1989年ロマプリエタ地震での建物の被害は埋め立て地で大きかった。地震で地滑り、土石流などが発生することもある。

Liquefaction 液状化

- 震央から離れたところで大きな被害の出る要因に液状化がある。地下水面が地表に近い所の堆積物が地震動で流動化する現象。図15.4。
- 1995年1月17日の阪神大震災では大阪湾の埋め立て地のガソリントankの周りの土地が3m下がって、ガソリントankが飛び出し、極めて危険な状態になった。安全な所は、安定な岩石の上や地下水面が深い所。液状化が極端な場合は、泥火山、砂火山と呼ばれるものができることもある。図15.5

Effects of Construction Techniques and Materials on Building 建物が壊れないための建築技術と材料

- 地震の多い所では横からの力がかかることを考えて建物を立てないといけない。
- 弱い建物があるのは、建築規制の前に立てられた建物が残っているから 地震に関する知識の増加に建築規制がついて行かないから 完全な建物は費用が掛かり過ぎるから。
- サンフランシスコでは地震で生き残った建物を今でも使っているが、次の地震では危ないであろう。今では建築士はかなり正確に危険度を予測出来る。

- 発展途上国の中には日干し煉瓦の家が一般的な所もある。これは、地震に大変弱い。
- 1988年のアルメニア地震では25000人の死者が言われているが、これは、鉄筋のほとんどないコンクリートの住居のせいである。同程度の人口密度の地域での同規模の地震であるロマプリエタ地震では62人であった。

地震の被害は地震の大きさばかりでなく、地盤の物質や地震動と建物の共振などにも依る。地下水面の浅い柔らかい埋立地は液状化が起こりやすい。一方、固い岩石の基礎の上の建物は最も安全である。

Tsunami 津波

- 津波は地震や火山噴火、海底地滑り等の海底の突然の動きで引き起こされる波のことである。風で引き起こされる普通の波は数十mの波長と10秒程度の周期を持っているのに対して、津波は数百kmの波長と数分の周期を持っている。外洋では振動はほとんど見えないが、水深が浅くなると速度が遅くなり、後ろの波が追い付いて来て、20mを越えるような大きな波に成ることがある。
- 津波は大洋を減衰せずに進むので、数千kmも離れたところで発生した地震に依る津波の被害を受けることがある。例 1960年チリ地震でハワイや日本が被害を受けた。図15.6
- 津波の最も発生しやすい所は海溝のある収束境界 アリューシャン海溝、日本海溝、チリ-ペルー海溝。プレートに引きずり込まれた海溝が地震とともに突然上昇する 津波の発生。1964年アラスカ地震では1000km x 250kmの海底が10m上昇して大津波が発生した。
- 津波警報システム。地震と海水準を大太平洋の島々で測定して警戒センターに送る。深海では津波は800km/hで進むので、海水準測定のデータから津波の進み具合が分かり、リアルタイムの警報を出すことができる。

## Chapter 15 単語帳

isoseismal	等震度線	greenhouse effect	温室効果
resonance	共振	ozone	オゾン
liquefaction	液状化		
tsunami	津波		
troposphere	対流圏		
stratosphere	成層圏		
landslide	地這り		
sinkhole	ドリーネ		
	(石灰岩地方のすり鉢形の)落ち込み穴		
acid rain	酸性雨		