

3. 地震波とその伝わり方

3-1 地震波

内部を探る主な方法 ボーリング・地震・電磁気・測地(重力)

地震波を使う方法は特に強力：空間分解能が高い・地球の中心まである程度分かる。

地震波からの情報

- 走時：震源の位置・震源と観測点間の地震波速度構造
- 波形：震源と観測点間の地震波速度構造・震源過程

地震波の計測 地面の変位：3次元（上下動，東西動，南北動）を求める¹。

そのためには地震のときにも動かない空間に固定された点があればよい。周期 ∞ の振り子を使うことで実現²。

地震波の記録 有感地震：初期微動＋主要動

地震波の種類 波の進行方向に対して媒質の変位が平行(縦波)か垂直(横波)かに大別できる。

- P波：縦波 伝播速度 $v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$
- S波：横波 伝播速度 $v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

ここで K, μ はそれぞれ体積弾性率，剛性率³。

$v_p > v_s$ (PはPrimary(先に) SはSecondary(次に)の意味)

- 表面波：地球表面に捕捉された波。ラブ(Love)波とレイリー(Rayleigh)波
ラブ波はS波に近い性質を持ち，レイリー波はP波とS波の混じった性質を持つ。
- 自由振動：波長が地球スケールの振動

¹速度・加速度を測ってもよいが積分すると変位に変換できる

²現在は振り子にコイルをつけ，地面に固定した磁石との相対運動で生じた電流を計る方法が主流。

³ K は媒質の体積を $1/e$ (e は自然対数の底)に圧縮するのに要する圧力， μ は単位歪をもたらすのに必要なせん断応力(単位面積あたりのずれの力)。液体では $\mu = 0$ 。

大森公式 初期微動継続時間 Δt から震源までの距離 L を推定する公式.

$$L = k\Delta t \quad (3.1)$$

比例係数 k は次のように与えられる

$$k = \frac{v_p v_s}{v_p - v_s} \quad (3.2)$$

独立な 3 点で初期微動継続時間が分かれば震源の位置が推定できる.

地震波の屈折と反射 地球内部では地震波速度は場所や深さによって変化する. 地震波速度がある深さで不連続的に変化したばあい, 同じ種類の波 (たとえば P 波が P 波として屈折する場合) の屈折の仕方はスネルの法則で与えられる.

地震波速度が v_1 の層から v_2 の層へ入射角 i_1 で地震波が伝播した場合, 屈折角 i_2 は次式を満たす

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

また反射角は同じ種類の波として反射する場合は入射角に等しい.

さらに不連続面では P 波の一部が S 波に, S 波の一部が P 波に変換される.

3-2 走時曲線と地球の内部構造

走時曲線 震央距離と地震波到達までに要した時刻を縦軸と横軸にとったグラフ.

近い場所で起こった地震の走時曲線 走時曲線の折れ曲がりが見られる.

地震波速度の小さな地殻の下に地震波速度の大きなマントルが存在するため, 震央距離が大きくなると屈折波の方が先に到達する.

震源が地表にある場合, 地殻の厚さ d は直接波と屈折波が同時に到着する震央距離 S_0 と, 地殻の地震波速度 v_1 , マントルの地震波速度 v_2 を用いて

$$d = \frac{S_0}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \quad (3.3)$$

で与えられる.

地殻とマントルの境界面をモホ面 (モホロビッチ不連続面) と呼ぶ. 大陸の地殻の典型的な厚さは 30~35km, 海洋では 7km.

遠い場所で起こった地震の走時曲線 震央距離は角距離で表す（このほうが便利）。

走時曲線の折れ曲がりに加えて震央距離が $103^\circ \sim 143^\circ$ ⁴の範囲には P 波が直接到達しないシャドウゾーンが観察される。また 103° よりも大きな領域では S 波が直接到達しない。

シャドウゾーンは低速度層があると生じる。S 波の消失は液体層の存在を意味する。

地表から地球の中心までのおよその地震波速度構造は走時曲線の分析から得られたものである。

地震学的な地球内部構造 地球の大構造を以下にまとめる。

地球の大構造			
(半径 km)	主要成分	状態	化学結合の主形態
内核 (1221.5)	Fe	固体	金属結合
外核 (3480.0)	Fe	液体	金属結合
マントル (6350)	Mg, Si, O	固体	イオン結合
地殻 (6371)	Si, Al, Ca, O	固体	イオン結合

マントルを詳しく見るとモホ面から深さ 200km までは地震波速度が深さとともに減少する。この層の特に深い領域 (深さ約 100km~200km) を低速度層という。部分的に溶けており、流動しやすいためプレート運動に重要な役割を果たしていると考えられる (後述)。

また 410km と 660km に地震波速度の不連続面が存在する。これは高い圧力を加わることによって鉱物が相転移 (原子の配列が変化) することで生じているとされている。この考えは相転移の室内実験から支持されている。

問題

問題番号に★が一つ付けてあるものは難しいが現在の知識でもきちんと考えれば解ける問題。★が二つのものは現在の知識+アルファが必要な挑戦問題。

3.1 大森公式 (3.1)(3.2) を導け。ただし地下の P 波速度と S 波速度は一定とする。

3.2 ★ 式 (3.3) を導け。

3.3 以下の走時曲線 (地学図表より) について次の問いに答えよ (解答には電卓を用いても良い)

1. 地殻の P 波速度と S 波速度を求めよ

⁴文献によってやや数値は異なる。

2. マントルのP波速度とS波速度を求めよ
3. 地殻の厚さを求めよ

