

1.2 震源モデル（2）

放射パターン（震源メカニズム）の記述

3Dの震源メカニズムを2Dで表現する。

断層面の記述

断層面の記述方法を理解する。

断層パラメーターと巨視的な断層モデル

ハスケルモデルや円形クラックモデルの概要を理解する。

断層運動による波動

波動が観測されるのか単純化して理解する。

参考文献：

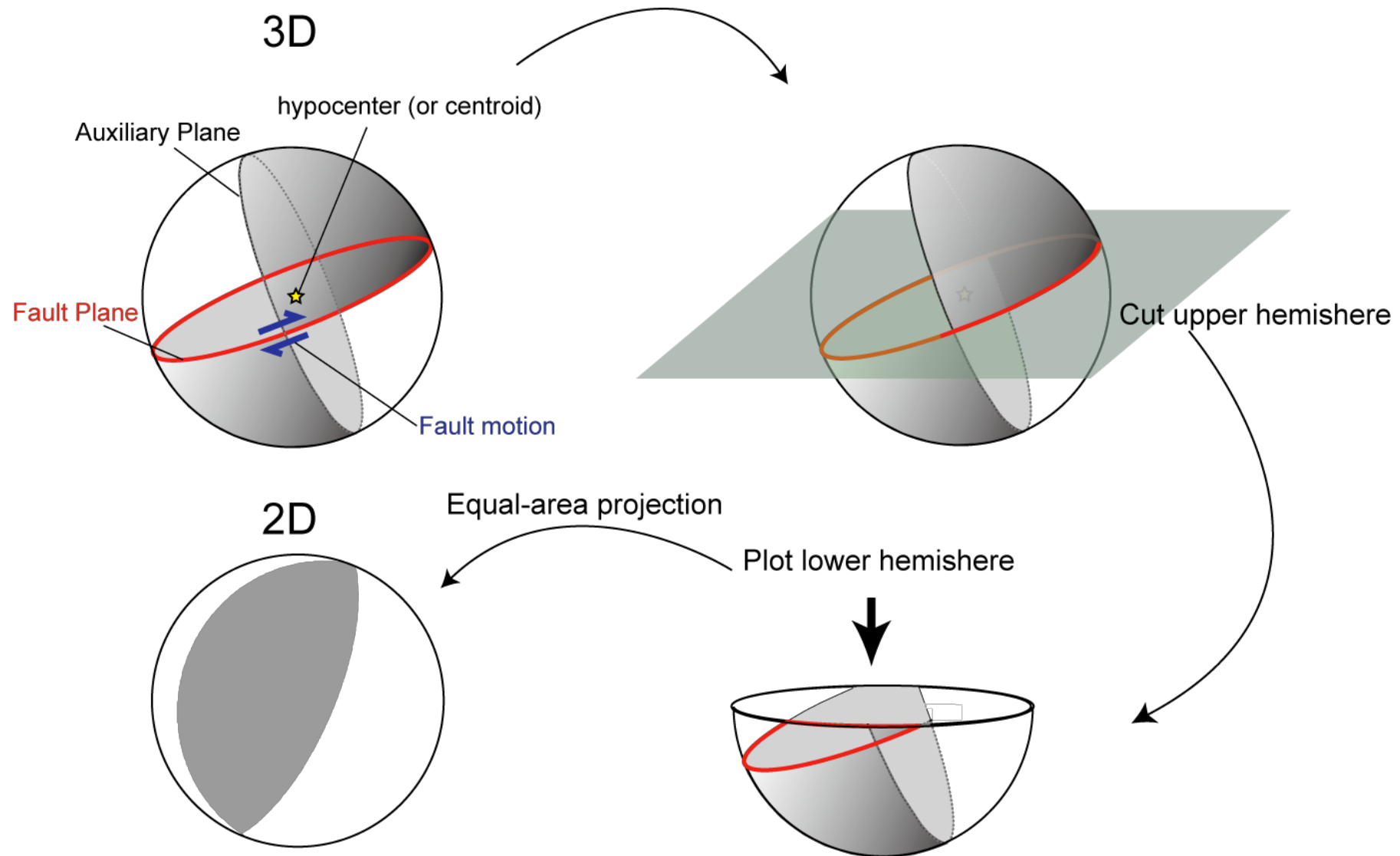
- ① Aki & Richards, Quantitative Seismology
- ② 松浦, 地球連続体力学（5章）, 岩波講座地球惑星科学

1.2 震源モデル

放射パターンの表示方法（震源メカニズム解） その1

震源球に押し引き分布を書き込んでも3D情報なので、紙に書きにくい。

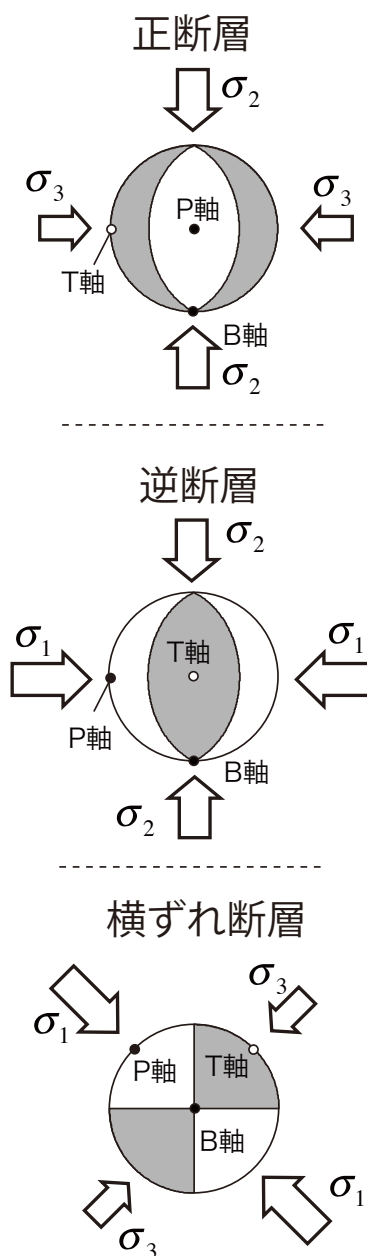
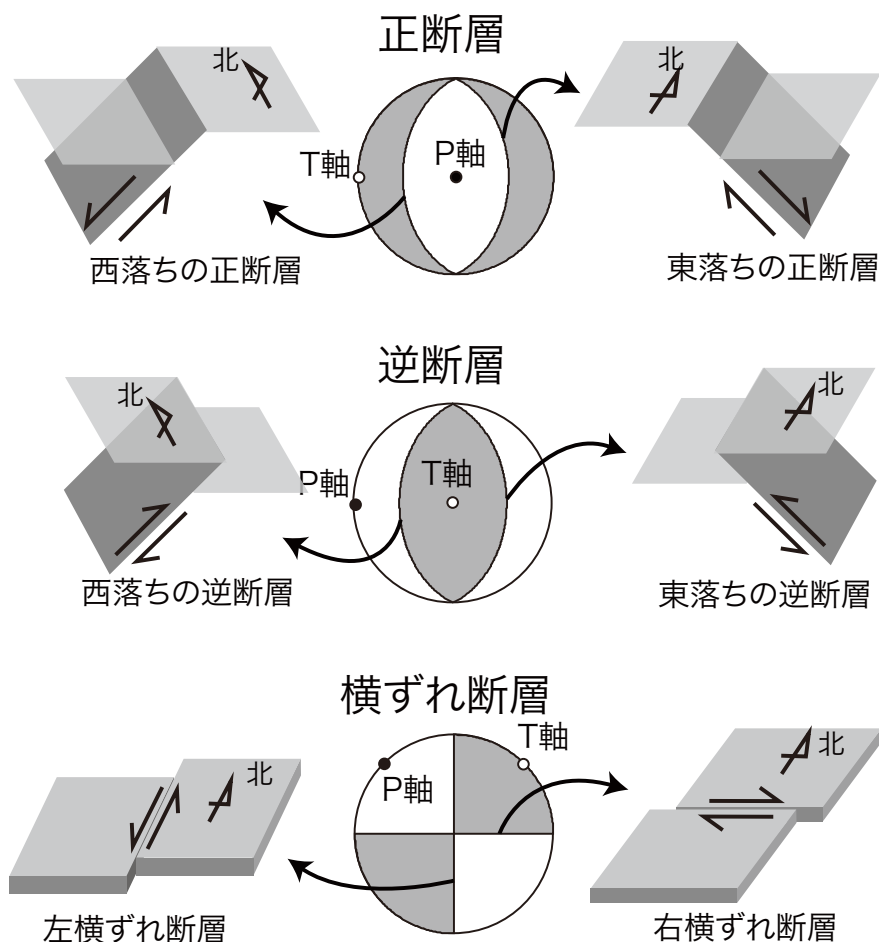
→ 等積投影法を用いて下の震源球を2Dで表記する。



1.2 震源モデル

放射パターンの表示方法（震源メカニズム解） その2

典型的な断層運動と震源メカニズム解



震源メカニズムと応力場の関係

第0近似で、

P軸は σ_1 方向

T軸は σ_3 方向

B軸は σ_2 方向

に近いはず。

クーロンの破壊規準を理解していれば、この近似はバイアスがかかる近似である事が分かる。（調べてみよう）

1.2 震源モデル

断層面の記述 その1

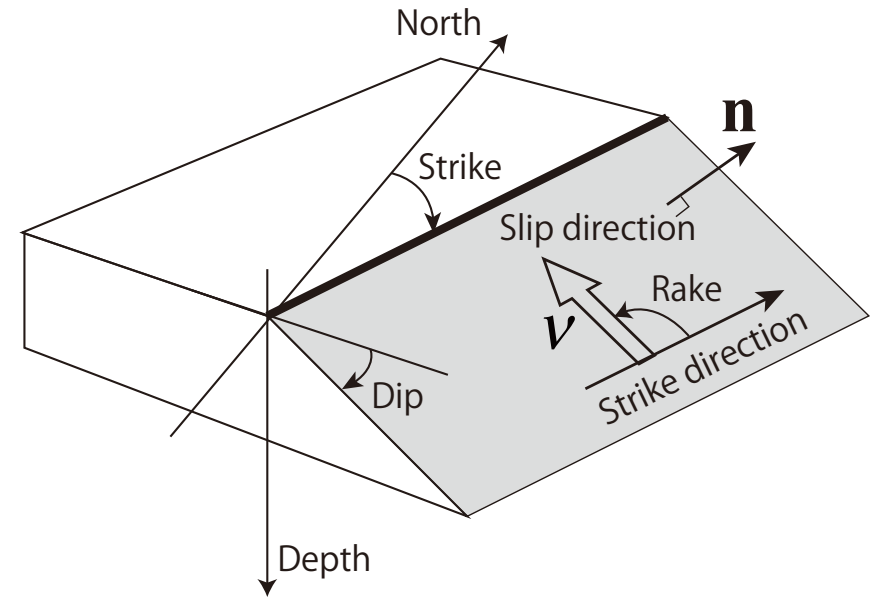
断層の幾何学

断層面は、走向と傾斜
すべり方向は、すべり角
三つのパラメーターで断層運動を記述できる。

走向：北から断層面までの角度で時計回りに計測（0～360度）

傾斜角：水平面と断層面がなす角で時計回りに計測（0～90度）

すべり角：走向ベクトルとすべりベクトルのなす角度で、反時計回りに計測（-180～180度）



走向ベクトルの方向はどっち？

答え：Dipの角度が0～90度に収まる方

1.2 震源モデル

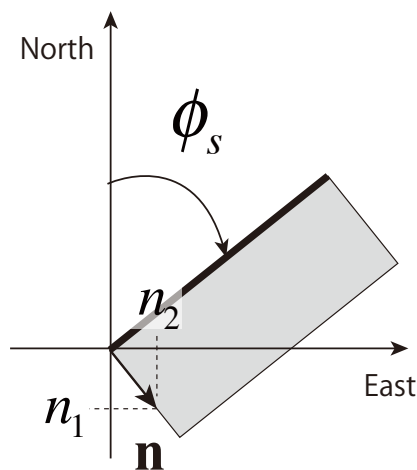
断層面の記述 その2

法線ベクトルと走向 (ϕ_s) ・ 傾斜 (δ)

地表面に断層を投影し、投影された法線ベクトルと北方向を指すベクトルとの角度に着目すると、

$$\tan[180 - (\phi_s + 90)] = -\frac{n_2}{n_1}$$

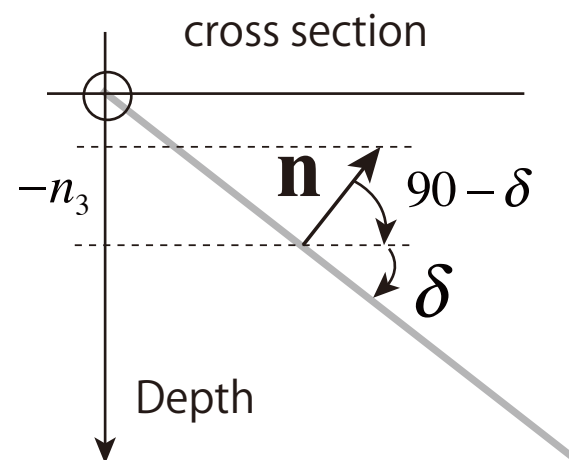
$$\therefore \phi_s = \arctan\left(-\frac{n_1}{n_2}\right)$$



断層を真横からみると、

$$\sin(90 - \delta) = \sin(\delta - 90) = \cos \delta = -\frac{n_3}{|\mathbf{n}|}$$

$$\therefore \delta = \arccos(-n_3)$$



法線ベクトルから走向と傾斜が求まった。

1.2 震源モデル

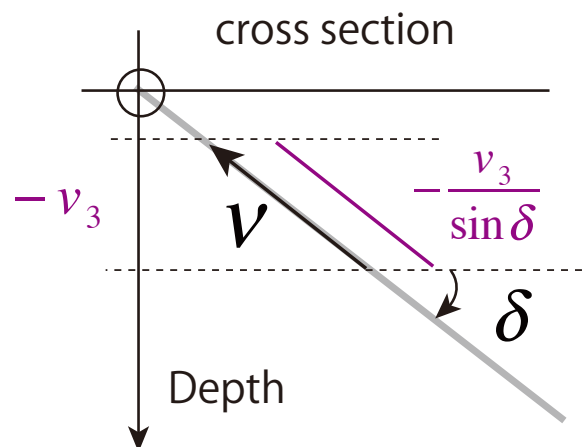
断層面の記述 その3

すべり角度 (λ) は？

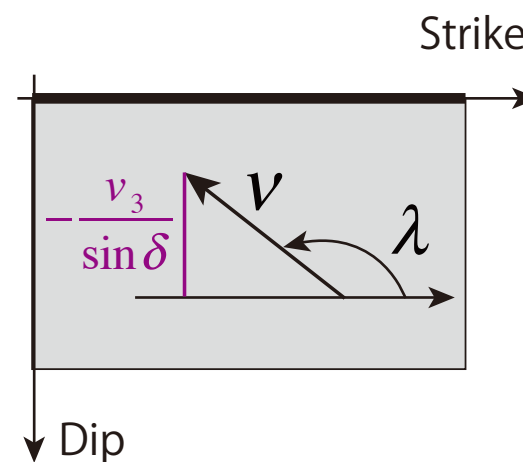
すべりベクトル \mathbf{v} を、断層の断面図に投影すると、

$$-\frac{v_3}{\sin \delta}$$

となる。



走向・傾斜を軸にして見てみると、



$$\sin(180 - \lambda) = -\sin(\lambda - 180) = \frac{-v_3 / \sin \delta}{|\mathbf{d}|}$$

$$\therefore \lambda = \arcsin\left(-\frac{v_3}{\sin \delta}\right)$$

すべり角度が求まる。

1.2 震源モデル

断層面の記述 その4

逆に、断層面パラメーターから法線ベクトルは、

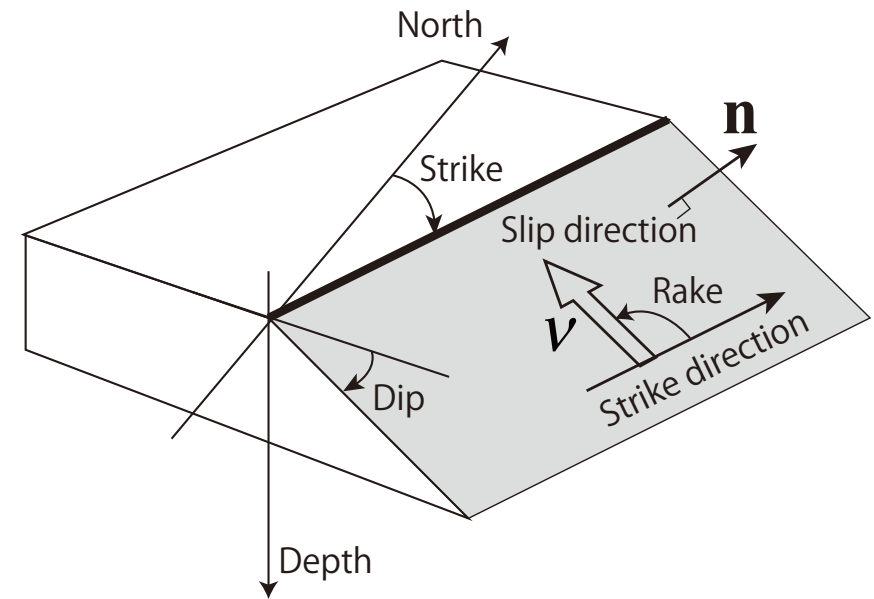
$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} -\sin \delta \sin \phi_s \\ \sin \delta \cos \phi_s \\ -\cos \delta \end{pmatrix}$$

スリップベクトルは、

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \cos \lambda \cos \phi_s + \cos \delta \sin \lambda \sin \phi_s \\ \cos \lambda \sin \phi_s - \cos \delta \sin \lambda \cos \phi_s \\ -\sin \delta \sin \lambda \end{pmatrix}$$

となる。

レポート①：P軸ベクトル、T軸ベクトル、B軸ベクトルを求めよ。



1.2 震源モデル

断層パラメーター（断層運動に関わるもの） その1

断層運動により地震波が発生する。
断層運動のプロセスを総称して「震源過程」と呼ぶ。

M6クラスでは、3～5秒かけて断層を破壊、断層差し渡りの長さ10km程度

M8クラスでは、30秒～1分かけて断層を破壊、断層差し渡りの長さ100km程度

このようなものが、断層運動を表記する、断層パラメーター

静的震源パラメーター

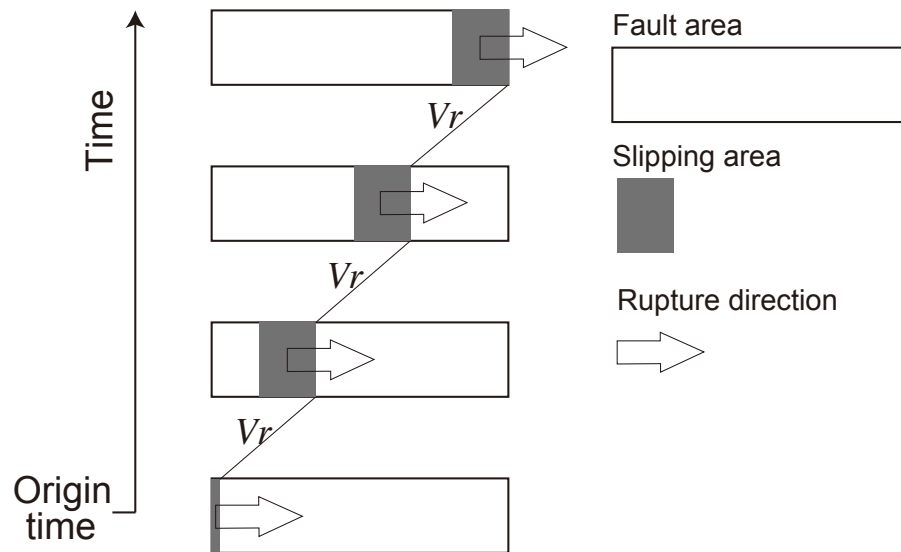
最終的な断層の長さ（L） 幅（W） 食い違い量（D）

1.2 震源モデル

巨視的な断層モデル その1

ハスケルモデル

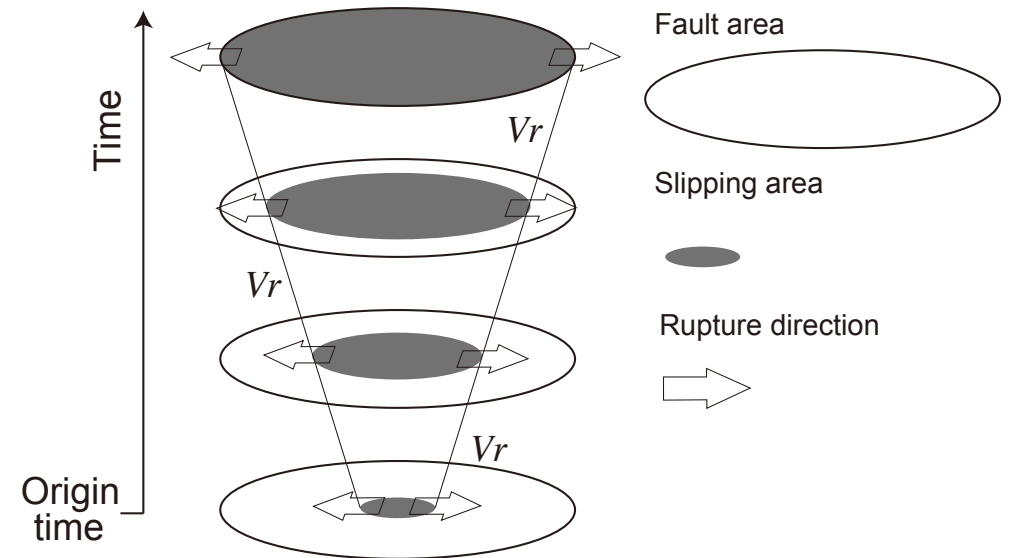
巨大地震に主に適用される巨視的断層モデル



長さ (L) 幅 (W) の断層の端から走向方向に破壊が破壊伝播速度 (V_r) で進行。
断層上の各点のすべり継続時間 (τ) は一定つまり、ある瞬間にすべっている幅は一定。

円形クラックモデル

中小地震に主に適用される巨視的断層モデル



半径 (a) の円形の断層モデル
破壊は中心から開始し、外側に向かって破壊伝播速度 (V_r) で進行。

1.2 震源モデル

巨視的な断層モデル その2

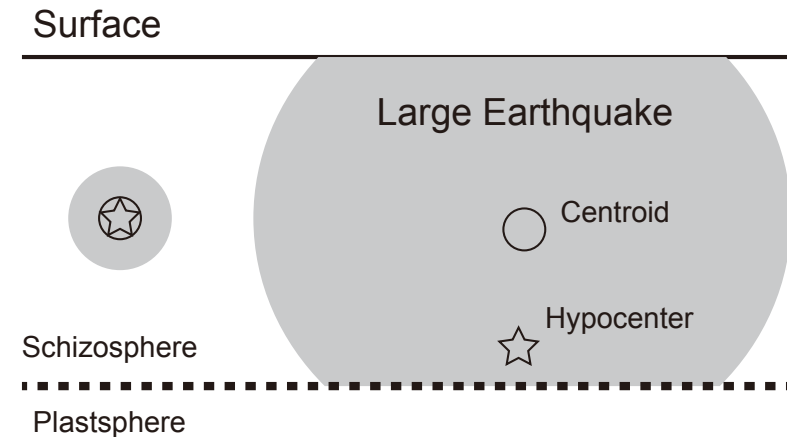
地表付近の横ずれ断層の場合は、地震発生領域の幅が狭いため、第0近似として大地震の断層の幅は地震が発生しうる領域によって上限が定まる。

→ ハスケルモデル

中地震は、上限値とは無関係に破壊が広がる。

→ 円形クラックモデル

とは言えフラクタル的な性質により、
「大きな地震でも、小さな地震でもすべり分布は複雑」
つまり、巨視的な断層モデルには限界がある。



1.2 震源モデル

断層運動による波動 その1

震源時間関数とモーメント速度関数

断層面の各点から震源までの距離は変化する面倒だから、遠方近似をする。

震源時間関数 S_c は、断層面のすべり量分布を距離変化による時間遅れ効果を加えて面積分したものになる。遠方近似を用いると、

$$S_c(t, \gamma) = \mu \iint \dot{D}(\xi, t + \xi \cdot \gamma / c) dS$$

断層面上のすべり速度関数

仮想的に断層面直上では $\xi \cdot \gamma = 0$ なので

$$\dot{M}_0(t) = \mu \iint \dot{D}(\xi, t) dS$$

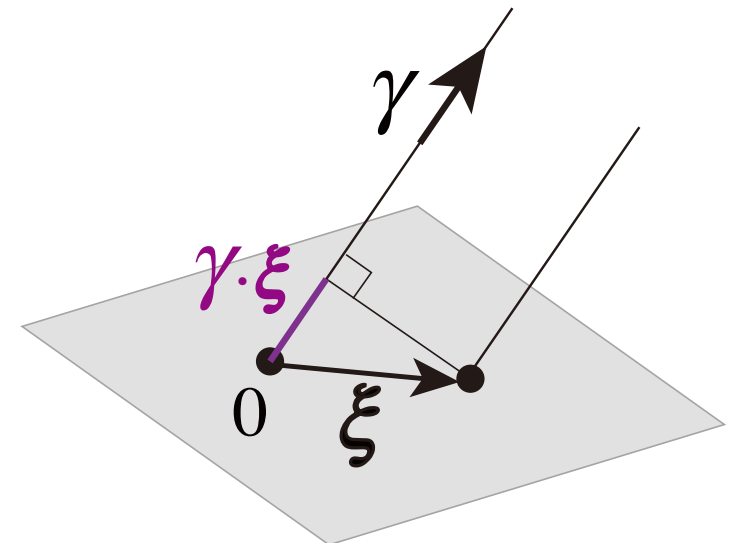
これを**モーメント速度関数**と呼ぶ。

遠方近似

十分にはなれている観測点では、波の波源が変化した場合

$$\hat{t} = \xi \cdot \gamma / c$$

だけ波の到達時間が変化する。



1.2 震源モデル

断層運動による波動 その2

シンプルな場合を考える

断層すべりが場所に依存しない場合

すべり速度の関数は、

$$\dot{D}(\xi, t) = \dot{D}(t - s(\xi))$$

点 ξ に破壊が到達する時間

と書けるので、モーメント速度関数は、

$$\begin{aligned}\dot{M}_0(t) &= \mu \int \dot{D}(t-s) \dot{S}(s) ds \\ &= \mu \dot{D} * \dot{S}\end{aligned}$$

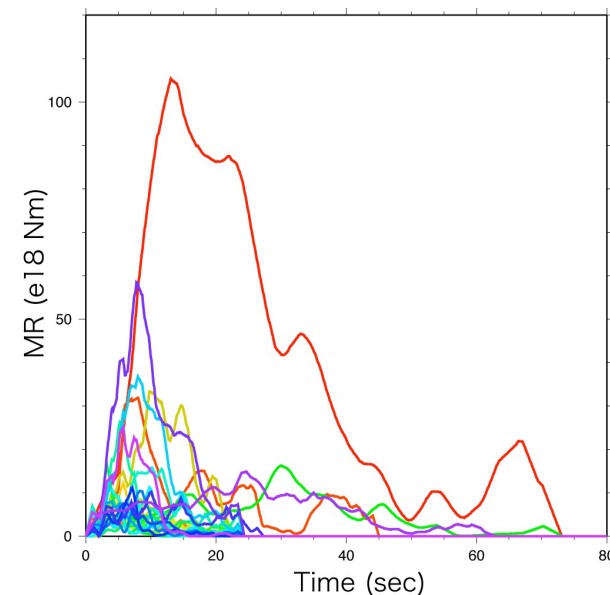
モーメント速度関数はすべり速度関数と面積の拡大速度のコンボリューションとなる。

地震モーメントと震源時間関数

$$\begin{aligned}\int_0^\infty Sc(t, \gamma) dt &= \int_0^\infty dt \iint \mu \dot{D}(\xi, t-s) dS \\ &= \iint \mu D(\xi, \infty) dS = M_0\end{aligned}$$

よって、観測点の位置にかかわらず、 Sc を時間積分したものは M_0 となる。

やや深発地震のモーメント速度関数



補足説明

コンボリューション（畳み込み積分） その1

線形現象の場合、足し合わせる事によって、その影響を考慮する事ができる。

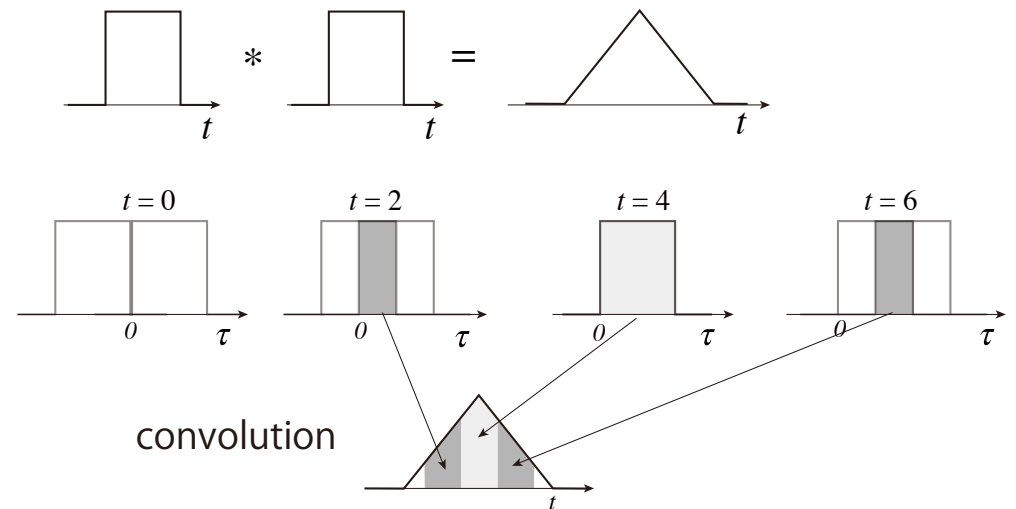
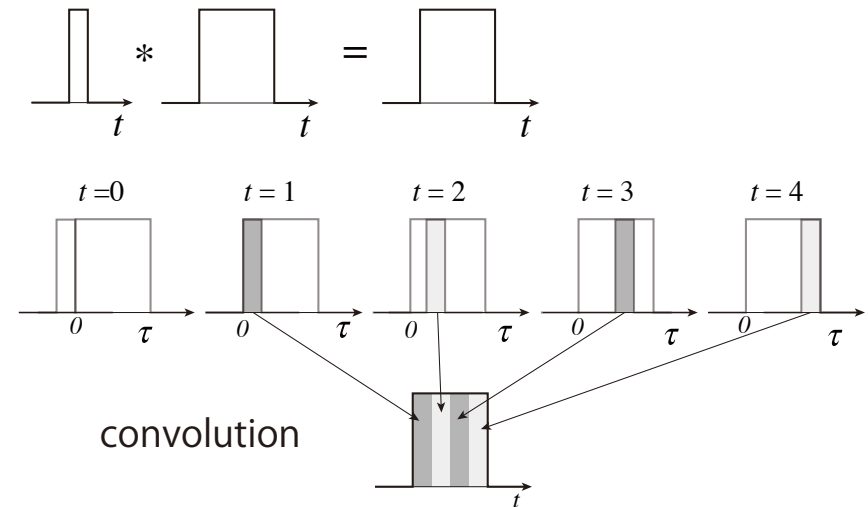
$$\begin{aligned} A(t) &= B(t) * C(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) C(t - \tau) d\tau \end{aligned}$$

デルタ関数の場合は、

$$A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau) C(t - \tau) d\tau = C(t)$$

デルタ関数が二つの場合は、

$$\begin{aligned} A(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} [\delta(\tau - t_1) + \delta(\tau - t_2)] C(t - \tau) d\tau \\ &= C(t - t_1) + C(t - t_2) \end{aligned}$$



補足説明

コンボリ्यूション（畳み込み積分） その2

コンボリ्यूションの式は、

$$\begin{aligned} A(t) &= B(t) * C(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) C(t - \tau) d\tau \end{aligned}$$

フーリエ変換すると

$$\hat{A}(\omega) = \hat{B}(\omega) \times \hat{C}(\omega)$$

単純なかけ算となる。

フーリエ変換（復習）

時間or空間変数の関数を周波数変数の関数に変換で、可逆変換。

$$\hat{A}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{-i\omega t} dt$$

逆変換 $A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{A}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$

相関関数を思い出すと、フーリエ変換は、ある周波数をもった関数との相関値を表す関数を作り出すことだと分かる（物理のがきしっぽ）

レポート②：コンボリ्यूションとフーリエ変換を調べて、それぞれ1枚（A4）のレポートにまとめよ。また、長さが違うボックスカー関数をコンボリ्यूションすると台形になることを確認せよ。