# ２.１　　地震情報（１）

**揺れの情報**

　最大加速度、速度とその意味を理解する。

**計測震度**

　気象庁が発表している震度の決定方法について理解する。

**震源の情報：震源・震源時**

　震源や重心の位置の決定方法について理解する。

**震源の情報：マグニチュード**

　地震の大きさをどのように計るのかを理解する。

**地震波動エネルギー**

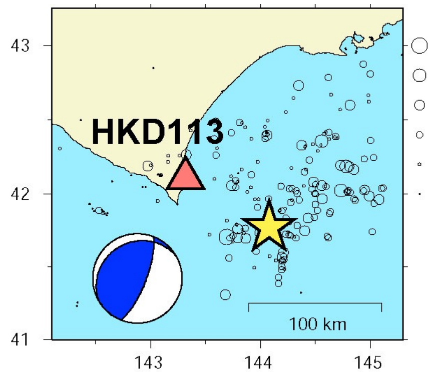
　地震波動エネルギーの定義とM0との関係について理解する。

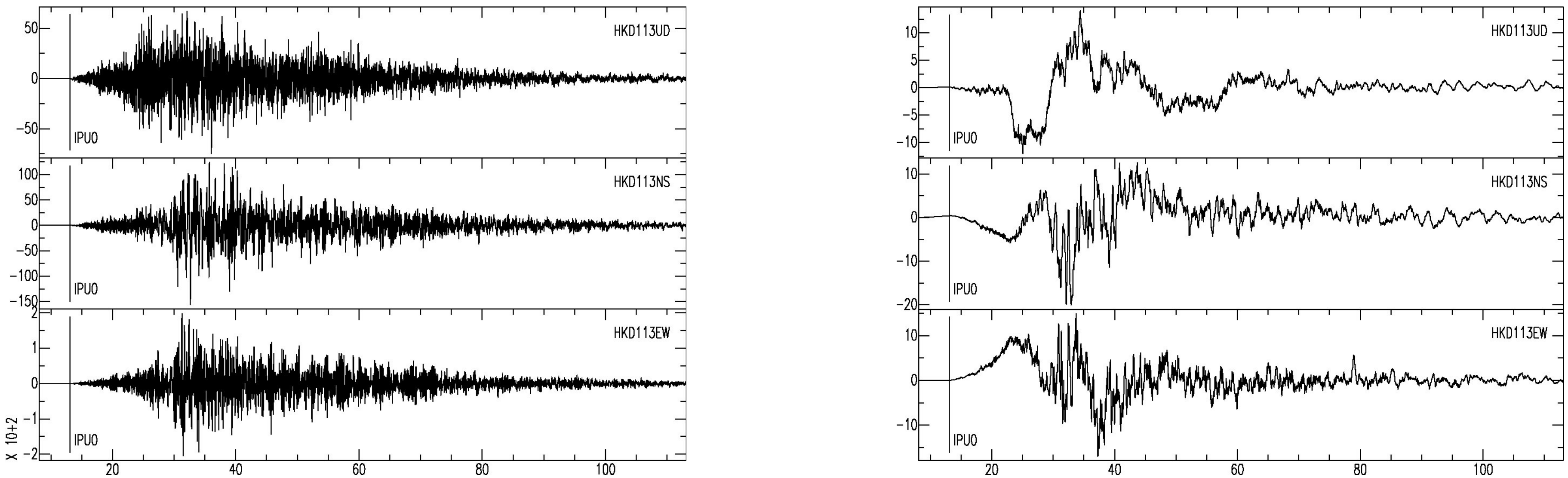
# 揺れの情報　その１

## 最大加速度・最大速度

地震が起こると地面が揺れる。揺れの強さを表す指標で、
観測された地面の加速度・速度の最大値。

建物を壊すには力が重要　→　最大加速度が重要
建物を壊すには力積が重要　→　最大速度が重要
仕事率が重要　→　最大加速度×最大速度
　　　　との三つの考え方がある。




防災科研 K-netの観測波形

# 計測震度　その１

１．3成分加速度記録をFFTして時間（sec）情報から周波数（Hz）に変換
２．周期0.5 Hz＝2 sec付近にピークを持つよなフィルター、時間領域に戻す
３．3成分を合成して、加速度ベクトルの最大値 $a$（0.3 sec以上）を算出

計測震度は　$I = 2\log a + 0.94$ を四捨五入した値
震度１違うと、最大振幅のようなものは約3倍

# 応答スペクトル

地震の揺れで、どの固有周期の建物がどの程度揺れやすいのかをはかる指標

減衰定数 hを仮定する必要あり

加速度の応答スペクトル、速度の応答スペクトル、変位の応答スペクトルが存在する

# SI値

地震動がどの程度、建築物に被害を及ぼすかを計る指標（一般に震度より良い）

考え方、建物の固有周期は0.1~2.5 sec
この周波数帯の速度応答スペクトルの平均をとった値でSI値が定義

$$SI = \frac{1}{2.4}\int_{0.1}^{2.5} Sv(T,h)\,dT$$

速度応答スペクトル

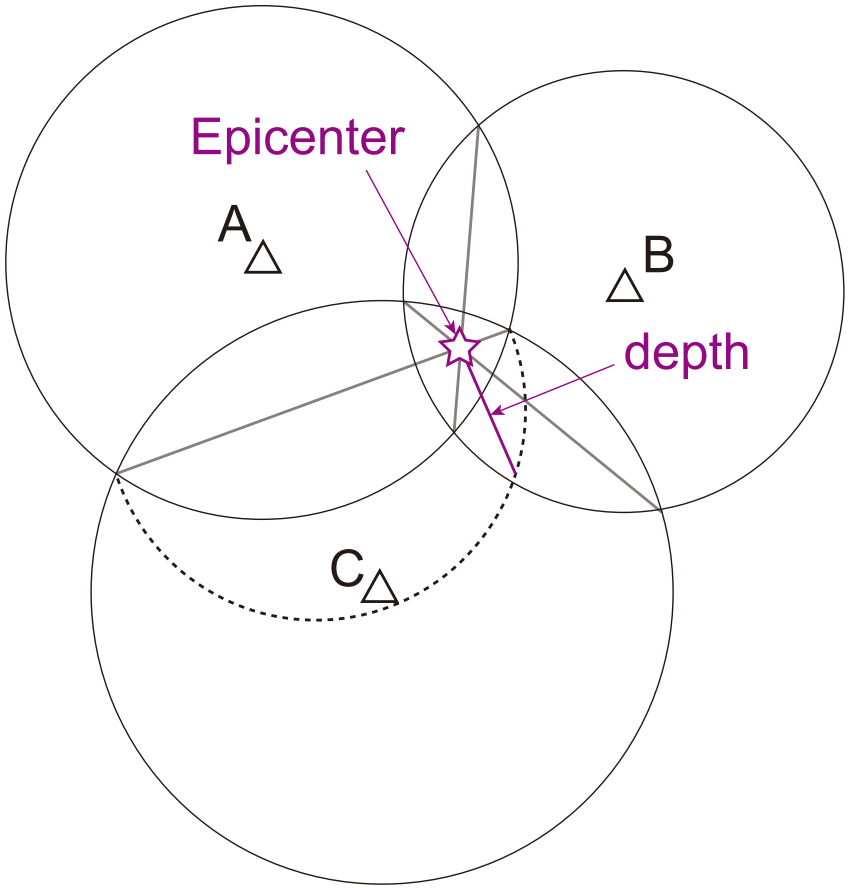
$T$: 応答スペクトルの周期
$h$: 減衰定数（$h$=0.2が良く用いられる）

東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム『ＳＵＰＲＥＭＥ』　では SI 値を用いて、地震対策をしている。

# 震源の情報：震源・震源時　その１

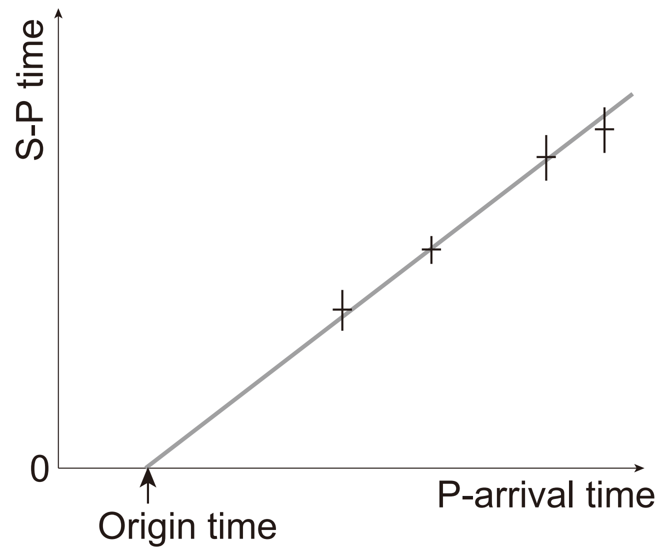
## 震源を求める古典的な手法

P波とS波の到達時間の差で観測点から震源までの距離を求め、3点以上の観測点から決定する方法。




## 和達ダイヤグラム

横軸にP波到達時間、縦軸にS-P時間にとると、横軸の切片が**震源時**となる。
仮に速度構造が不均質でも、ポアソン値が一定であれば、常にこのグラフは成立する。
これを使えば、観測点から震源までの距離が分かって、あとは先の方法と同じ。



# 震源の情報：震源・震源時　その２

各観測点で観測された観測走時と理論走時の差を最小とするような点が解

**非線形インバージョンを解く**

①総当たり（グリットサーチ）を用いる

$$\underbrace{t_i^c}_{\text{観測走時}} = \underbrace{T_i^c}_{\text{理論走時}}(\boldsymbol{\xi}) + \underbrace{t_0}_{\text{震源時}} + \underbrace{e_i}_{\text{誤差}}$$

観測点の誤差の和をゼロとすると

$$\sum_{i=1}^{I} e_i = 0$$ となるので

$$t_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{I}\left[t_i^c - T_i^c(\boldsymbol{\xi})\right]$$

よって、目的関数

$$S(\boldsymbol{\xi}) = \sum_{i=1}^{I}\left[t_i^c - T_i^c(\boldsymbol{\xi}) - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{I}\left[t_i^c - T_i^c(\boldsymbol{\xi})\right]\right]^2$$

を最小とする点を求めれば良い

②線形化して線形インバージョンをとく

テイラー展開で高次の項を無視すると、

$$\mathbf{d} = \mathbf{T}^c(\boldsymbol{\xi}) + t_0 + e_i$$

$$\simeq \mathbf{T}^c(\boldsymbol{\xi}_0) + \partial\mathbf{T}^c(\boldsymbol{\xi}_0)\Delta\boldsymbol{\xi} + t_0 + e_i$$

よって初期震源を定めると、後はかけ算と足し算で求めるべきモデルパラメターが定まる。

ただし、初期震源は真の震源に近い値である必要があるので、繰り返し更新して、解を改良する必要がある。

問題点：　グローバルな最小値ではないところに解が陥る時がある。

# 震源の情報：震源・震源時　その３

## 波形インバージョンによる重心

点震源仮定（地震波がある一点から放出されたとの仮定）で、最も観測データを説明できる位置が、その地震の重心

点震源仮定が成立するためには、
１）グリーン関数を断層面上のある点で代表できる（**グリーン関数の単純化**）
２）震源時間関数を、時間のみの関数として表現できる（**震源モデルの単純化**）
この仮定を満たすためには、断層の特徴的な長さ（$L$）、使用する波の波長（$\lambda$）、震源距離（$d$）とすると、

１）　グリーン関数の単純化の条件

$$L \ll d$$

２）　震源モデルの単純化の条件

$$L \ll \lambda$$

## 振幅データによる揺れの重心の算出

地震の始まりの点、「震源」よりも、
揺れの重心（地震波を多く出した点）の方が防災的に重要

地震波の振幅のみから「揺れの重心」を求める（Kanamori, 1993）

加速度振幅 $A$ とマグニチュード $M$ 断層面までの最短距離 $d$ の経験式 (Joyner & Boore, 1981)

$$\log A = -1.02 + 0.249M - \log\left(d^2 + h^2\right)^{1/2} - 0.00255\left(d^2 + h^2\right)^{1/2}$$

を最も満たすような、
$d$（揺れの重心までの距離とする）
$M$（マグニチュード）を求める。
$h$は平均的な地震の深さとする。

# 震源の情報：マグニチュード　その１

**マグニチュード**

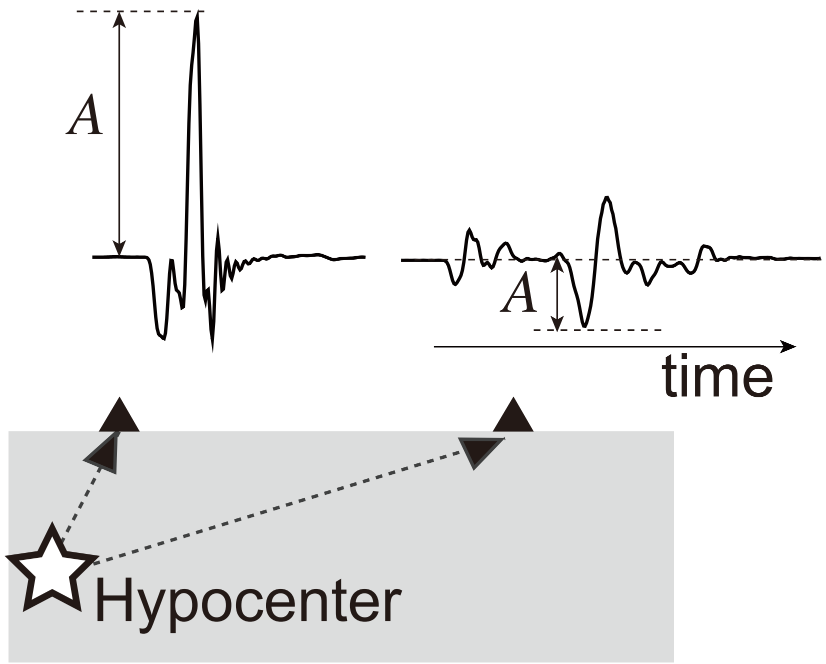
地震動の強さ、もしくは地震の規模を示す指標として定義された。
Richter (1935) による定義式

$$M_L = \log A$$

100km離れた点にあるWood-Anderson型地震計の最大振幅 (μm)

つまり、距離減衰による項を補正した値

このマグニチュードをローカルマグニチュードとする。




問題点：
何の波の最大振幅であるか区別がない。

減衰の仕方は波によって根本的に異なる。

# 震源の情報：マグニチュード　その２

## 気象庁マグニチュード

震央距離Δ(km) で観測された、

中周期変位型による最大地震動震幅（水平2成分の合成したもの）$A$ (μm)

$$M_{\mathrm{JMA}} = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83$$

短周期速度型地震計による最大速度振幅 $Az$ (10^-5 m/s)

$$M_{\mathrm{JMA}} = \log A_z + 1.64 \log \Delta + 0.22$$

を多くの点で平均
概して、大きな地震では前者
小さな地震では後者の重みが大

## 実体波マグニチュード

実体波の最大振幅 $A$ をその周期 $T$ で割った値の常用対数に、震央距離$\mathit{\Delta}$と震源の深さ $h$ で補正した値

$$m_{\mathrm{b}} = \log A/T + Q(h, \mathit{\Delta})$$

周期5秒周辺を用いる。

最近のUSGSが使用している周期はもっと長いようだ。気をつけること

## 表面波マグニチュード

表面波水平成分の最大振幅 $A$ をその周期 $T$ で割った値の常用対数に、震央距離$\mathit{\Delta}$を補正した値

$$M_S = \log A/T + 1.66\mathit{\Delta} + 3.3$$

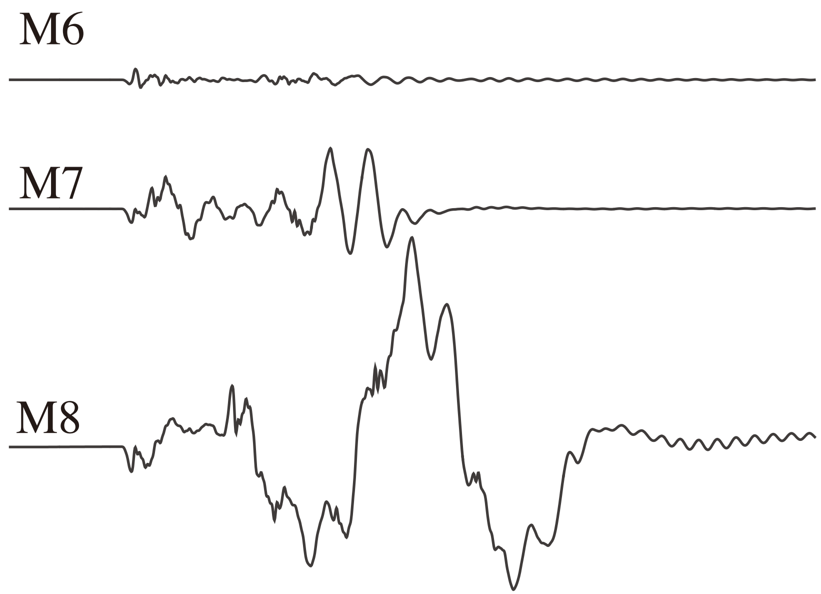
一般に、周期20秒程度を用いる。

# 震源の情報：マグニチュード　その４

**マグニチュードの飽和問題**

一般に、大きな地震になればなるほど、
長周期の成分は大きくなるが、
短周期の成分の振幅はそれほど大きくならない。

周期によっては、地震の規模を正しく評価できない。




Kanamori (1983)

地震スペクトルのところのレポートについてもう一度考えてみること。

# 震源の情報：マグニチュード　その５

### モーメントマグニチュード

静的な変位に関係する地震モーメントは安定に求めることができるはず。地震モーメントを使ってマグニチュードを決定したい。

$$M_0 = \mu \bar{D} A$$

マグニチュードは地震波エネルギー（*Es*）と関係する値なので、まず、地震モーメントと地震波エネルギーの関係式を導出すると、

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0$$

応力降下（Δσ）は、プレート境界で発生する地震の典型的な値、3 MPa を代入

地震波エネルギーからマグニチュードを求めるために、*Es*と*Ms*の経験式GR式を使う。

$$\log E_s = 11.8 + 1.5 M_S$$

この二つの式から、地震モーメントに関係するマグニチュード（モーメントマグニチュード）が導かれる。

$$Mw = \frac{\log M_0 [\mathrm{Nm}] - 9.1}{1.5}$$

そもそも地震モーメントは静的な変位に関係する値なので、巨大地震でもマグニチュードを決定できる。

式から、マグニチュードが１大きくなると、最大振幅は10倍だけど、モーメントは32倍となることが分かる。

# 震源の情報：マグニチュード　その６

## 津波マグニチュード

津波の波高（$H$）と震央距離（$\Delta$）のから求まる。

$$M_t = \log H + \log \Delta + 5.8$$

ただし、波高と距離の関係は必ずしも明確ではなく、海底地形や、断層面の広がり等の影響が存在する。震源と観測点の補正値（$B$）を入れて波高からマグニチュードを決定するのが現実的、よって、

$$M_t = \log H + B$$

1993年北海道南西沖地震直後の現地写真
（阿部先生提供）

## 2.1 地震情報

# 震源の情報：マグニチュード　その７

**継続時間から決定するマグニチュード**

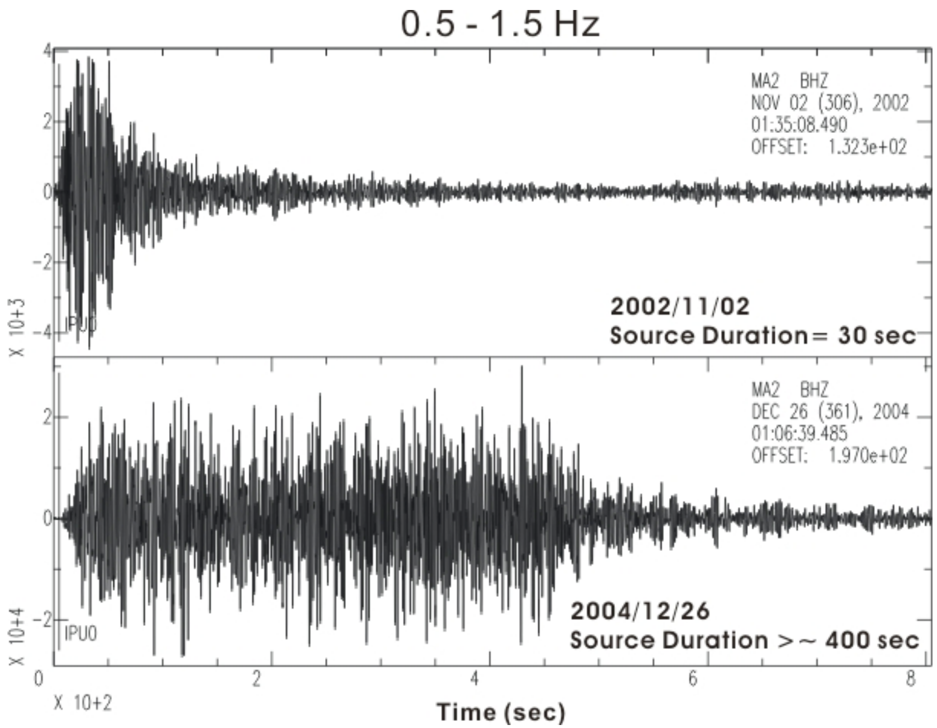
大地震になるほど、揺れが継続する時間が長くなる

$$M = C_0 + C_1 \log \underbrace{T_d}_{\text{波の継続時間}} + C_2 \underbrace{\Delta}_{\text{震央距離}}$$

主に振幅情報がない場合に使われる。

遠い観測点では、高周波成分は直達P波よって、高周波成分のみを抽出して

$$M = C_0 + C_1 \log \underbrace{T_d^P}_{\text{P波の継続時間}}$$




2004年スマトラ地震は400秒近くも揺れが継続した

# 1.2 震源モデル

## 地震波動エネルギー　その１

地震波として震源から放出された地震波動エネルギー（*Es*）は、震源周辺を囲む十分遠方の閉空間（$S_0$）を通る速度波形の２乗を積分してやれば良い。

$$E_S^c = \int_V \rho \left| \dot{u}^c(\xi,t) \right|^2 dV(\xi)$$
$$= \int_0^\infty \int_{S_0} \rho c \left| \dot{u}^c(\xi,t) \right|^2 dS(\xi) dt \qquad (\because dr = cdt)$$
$$= \int_0^\infty \int_{S_0} \rho c \left| \frac{R_c(\gamma)}{4\pi\rho c^3 r} \dot{S}_c\left(t - \frac{r}{c}, \gamma\right) \right|^2 dS(\xi) dt$$
$$\simeq \frac{\overline{R_c}^2}{4\pi\rho c^5} \int_0^\infty \left| \ddot{M}_0(t) \right|^2 dt$$

点震源仮定

$$\overline{R_c}^2 = \frac{4}{15}, \quad \overline{R_s}^2 = \frac{2}{5}$$

ようは、モーメント加速度関数〜すべり加速度の２乗の時間積分が地震波動エネルギーとなる。

注意：点震源仮定をしない場合、P波とS波の震源時間関数は変化します。

断層すべりの時空間分布が得られているときに、応力降下分布 ∝ 地震波動エネルギーを仮定して議論するのは良くない。

地震波動エネルギーはP波とS波の足し算なので、

$$E_S = E_S^c + E_S^c$$
$$= \left( \frac{1}{15\pi\rho\alpha^5} + \frac{1}{10\pi\rho\beta^5} \right) \int_0^\infty \left| \ddot{M}_0(t) \right|^2 dt$$
$$= \left( \frac{1}{15\pi\rho\alpha^5} + \frac{1}{10\pi\rho\beta^5} \right) \int_{-\infty}^\infty \left| \hat{\ddot{M}}_0(f) \right|^2 df$$

（パーセバルの定理を用いている）

**レポート**：オメガ２乗モデルが成立すると、

$$\left| \dot{M}_0(\omega) \right| = \frac{M_0}{1 + (\omega/\omega_c)^2}$$

と書ける。このときの、地震波動エネルギーと周波数の関係について、非弾性減衰の効果を踏まえて議論せよ。

# 1.2 震源モデル

## 地震波動エネルギー その２

*Mw*を求めるときに、*M*と*Es*の関係式が重要

$$\log E_s = 11.8 + 1.5Mw$$
$$= \log M_0 + 2.7$$

よって、*Mw* は、

$$\log E_s / M_0 = C$$

が成立することが前提

一時、これが間違えていると言われていたが、今では小さな地震から大きな地震まである程度成立するでコンセンサスが得られている。
もちろん、例外もある（津波地震等）