

## 第3章 震源断層パラメーターに関する基礎とその経験式

### 3-1 はじめに

運動学的断層モデルに基づく地震動波形の合成法において必要となる震源断層パラメーターは、①地震モーメント  $M_0$ 、②断層面積  $S$ 、③断層長さ  $L$ 、④断層幅  $W$ 、⑤平均滑り変位  $D$ 、⑥立ち上がり時間  $\tau$ 、⑦応力降下量  $\Delta\sigma$ 、⑧滑り速度  $D/\tau$ 、である。その他、⑨断層面の傾き角  $\delta$ 、⑩滑りの方向角  $\lambda$ 、⑪断層の走行角  $\Phi$ 、が必要となる。さらに、上記①～⑧の震源断層の巨視的パラメーターに対応する、いわゆるアスペリティーモデルに関する震源断層の微視的パラメーター、が必要となる。そして、この断層モデルによる工学的強震動波形の評価においては、断層上端面の深さとアスペリティーの大きさやその位置は、合成された強震動波形の振幅、振動数特性、位相特性、継続時間、に大きく影響する。

入倉(2004)<sup>1)</sup>は、強震動予測による地震防災対策を推進するために、これまでの地震学の研究成果を整理し、強震動計算に必要な震源断層の巨視的パラメーターと微視的パラメーターの設定方法と手順を提案している。これらのパラメーターの設定方法は、震源断層パラメーターの平均的特性に理論的考察を加味して策定されているため、断層パラメーターに関する現状のばらつきや不確定性については考慮されていない。強震動計算の工学的応用を考える場合、強震動計算結果におよぼす震源断層パラメーターの不確定性が、予測波形に影響する程度を把握して、強震動計算波形を利用することは当然である。

本章では、入倉(2004)<sup>1)</sup>の方法を基に、震源断層の巨視的並びに微視的パラメーターである①～⑧の平均的評価式とともに、そのばらつきを評価する方法を示す。

### 3-2 本研究で用いる基礎式

本研究では、次の3つの基礎式から、震源断層パラメーターの関係を整理する。

#### (1) 応力降下量に関する基礎式

円形クラックモデルにおける応力降下量と平均滑り変位とクラックの半径の静的関係式 (Eshelby, 1957, Keilis Borok, 1959)<sup>1)</sup>を用いる。

$$\Delta\sigma = \frac{7\pi}{16} \mu \frac{D}{a} = \frac{7\pi^2}{16} \mu \frac{D}{\sqrt{S}}, \quad (\pi a^2 = S) \quad (3-2.1)$$

ここに、 $\Delta\sigma$  は応力降下量、 $\mu$ 、 $D$ 、 $a$  はそれぞれ媒質のせん断弾性剛性、クラックの平均滑り変位、クラックの半径を表す。

動的関係式 (Aki, 1987)<sup>4)</sup>としては、次式を用いる。

$$\Delta\sigma = (0.5 \sim 1) \frac{\mu}{C_S} \frac{D}{\tau} \quad (3-2.2)$$

ここに、 $C_S, \tau$  は、媒質のせん断波速度と震源時間関数の立ち上がり時間を表す。

## (2) 地震モーメントの定義式

$$M_0 = \mu S D \quad (3-2.3)$$

ここに、 $M_0, S$  は断層の地震モーメントと断層の面積を表す。

## (3) 地震モーメント $M_0$ の点震源モデルにおける S 波の遠方での変位波形と震源時間関数 (震源食い違い立ち上がり関数) $f(t)$ の関係式

$$u(t) = \frac{M_0}{4\pi\rho C_S^3} \frac{R_{ad}}{r} \dot{f}\left(t - \frac{r}{C_S}\right) \quad (3-2.4)$$

ここに、 $\rho, r, R_{ad}$  は、それぞれ、媒質の密度、震源から観測点までの距離 (震源距離) と断層の走向・傾斜角、滑り角によって決まる地震波の放射パターンを表す。 $\dot{f}(t)$  は時間微分を意味する。

### 3-3 地震モーメント、立ち上がり時間、平均滑り変位、平均滑り速度、マグニチュード

式(3-2.1)と式(3-2.3)から、次式が得られる。

$$M_0 = \frac{16}{7\pi^{\frac{3}{2}}} \Delta\sigma S^{\frac{3}{2}} = C_0 \Delta\sigma S^2, \quad \left(C_0 = \frac{16}{7\pi^{\frac{3}{2}}} = 0.41\right) \quad (3-3.1)$$

また、式(3-2.1)と式(3-2.2)から、次式のように立ち上がり時間と断層面積の関係式が得られる。

$$\tau = (0.5 \sim 1.0) \frac{16}{7\pi C_S} \sqrt{\frac{S}{\pi}} = (0.2 \sim 0.4) \frac{\sqrt{S}}{C_S} \quad (3-3.2a)$$

その他、Savage(1972)<sup>5)</sup>は、次式のような2つの式を提案している。

$$\tau = \frac{W}{4.6v_r} = \frac{\sqrt{\frac{S}{2}}}{4.6(0.7 \sim 0.9)C_S} = (0.17 \sim 0.22) \frac{\sqrt{S}}{C_S} \quad (3-3.2b)$$

ここに、 $v_r$ は断層の滑り破壊速度を表し、 $v_r = (0.7 \sim 0.9)C_S$ を仮定している。また、

$$\tau = \frac{W}{2C_S} = \frac{\sqrt{\frac{S}{2}}}{2C_S} = 0.35 \frac{\sqrt{S}}{C_S} \quad (3-3.2c)$$

上式の右辺第2項を導くにあたり、 $S = LW, L = 2W$ の関係を用いた。

したがって、上記のような既往の研究を参照して、立ち上がり時間と断層面積の関係式としては、次式で評価するものとする。

$$\tau = (0.2 \sim 0.4) \frac{\sqrt{S}}{C_S} = \gamma \frac{\sqrt{S}}{C_S} \quad (3-3.3)$$

次に、平均滑り変位は、式(3-2.1)と式(3-2.3)から、次式ようになる。

$$D = \frac{C_0}{\mu} \Delta\sigma \sqrt{S} \quad (3-3.4)$$

また、地震のマグニチュードは、地震波の最大変位振幅の対数として定義されるので、式(3-2.4)の対数表示から次式が得られる。

$$M \triangleq \log u \triangleq \log S + \log \frac{D}{\tau} + \log \left( \frac{\mu R_{ad}}{4\pi\rho C_S^3 r} \right) \quad (3-3.5)$$

上式の右辺の第2項を導くにあたり、震源時間関数として立ち上がり時間 $\tau$ を有する傾斜関数を仮定し、式(3-2.3)の地震モーメントの定義式を用いた。

上記の式(3-3.3)と式(3-3.4)から、断層の平均滑り速度 $D/\tau$ は、断層面積には依存せずに平均応力降下量の関数であることがわかる。したがって、重要な巨視的震源パラメータである、地震モーメント、立ち上がり時間、平均滑り変位、平均滑り速度、地震のマグニチュードが、震源断層の面積 $S$ と平均応力降下量 $\Delta\sigma$ という2つのパラメータのみ関数として整理できる。

図3-1から図3-5に、式(3-3.1)～(3-3.5)に示される地震モーメント、地震のマグニチュード、平均滑り変位、立ち上がり時間、表面波マグニチュードと震源断層の面積 $S$ と平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の関係とともに、既往の実測値<sup>3),4)</sup>をプロットした。ここに、式(3-3.1)～(3-3.5)をプロッ

トするにあたり、以下のような単位を用いて関係式を作成している。

**地震モーメント：**

$$M_0 = 4.1 \times 10^{20} \Delta\sigma S^{\frac{3}{2}} \quad (3-3.6)$$

ここに、 $M_0$ (dyn×cm),  $\Delta\sigma$ (bar),  $S$ (km<sup>2</sup>)の単位を用いる。

**立ち上がり時間：**

$$\tau = (0.2 \sim 0.4) \frac{\sqrt{S}}{C_S} = \gamma \frac{\sqrt{S}}{C_S} \quad (3-3.7)$$

ここに、 $\tau$ (s),  $S$ (km<sup>2</sup>),  $C_S = 3.0, 3.5$ (km/s)とする。

**平均滑り変位：**

$$D = 1.24 \times 10^{-3} \Delta\sigma \sqrt{S} \quad (3-3.8)$$

ここに、 $D$ (m),  $\Delta\sigma$ (bar),  $S$ (km<sup>2</sup>),  $C_S = 3.5$ (km/s)とする。

**平均滑り速度：**

$$\frac{D}{\tau} = (1.09 \sim 2.17) \times 10^{-2} \Delta\sigma \quad (3-3.9)$$

ここに、 $\frac{D}{\tau}$ (m/s),  $\Delta\sigma$ (bar),  $\frac{C_S}{\mu} = 1.06 \times 10^{-7} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{N} \cdot \text{s}}\right)$ とする。

**表面波マグニチュード：**

$$M_S = \log S + \log \frac{D}{\tau} + 4.37 \quad (3-3.10)$$

ここに、 $\frac{D}{\tau} = 0.5$ (m/s)のとき、 $\log\left(\frac{D}{\tau} = 0.5\right) + \log\left(\frac{\mu R_{ad}}{4\pi\rho C_S^3 r}\right) = 4.07$ とした。

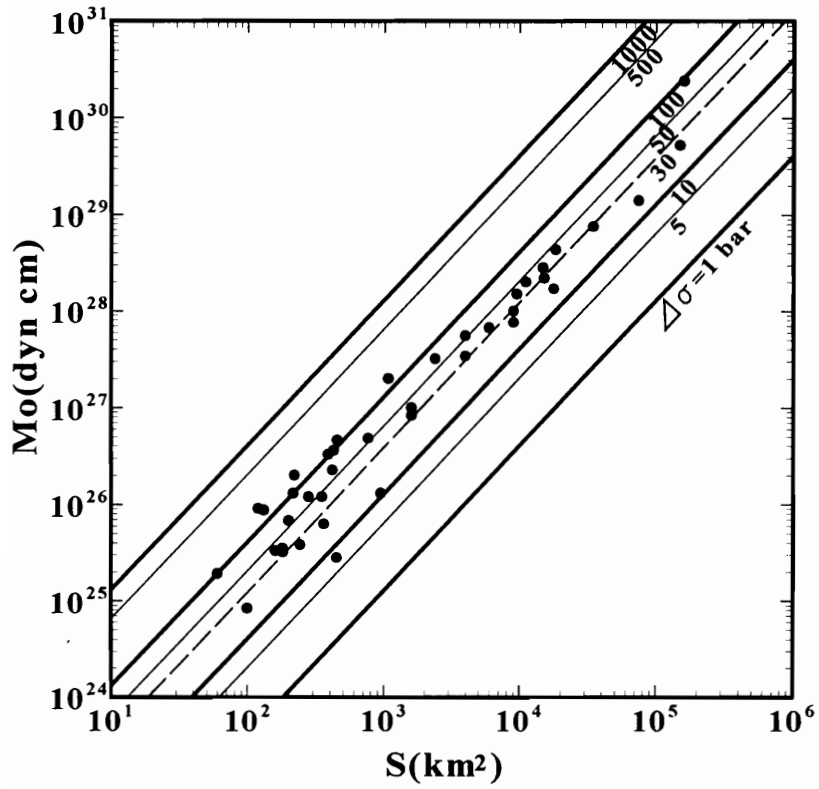


図3-1 : 地震モーメントと断層面積の関係 (パラメター : 平均応力降下量)

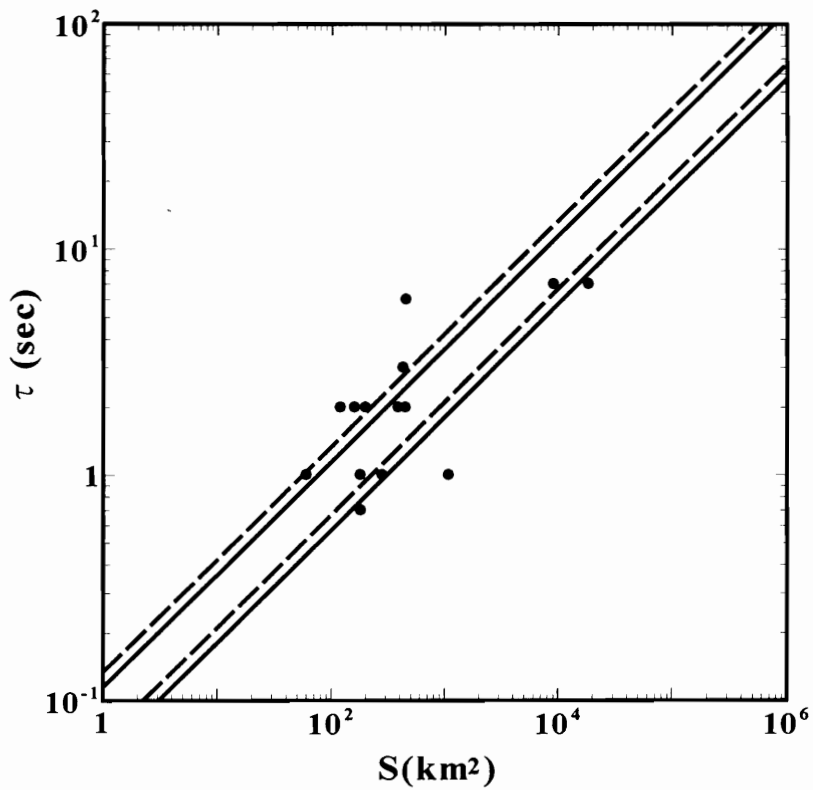


図3-2 : 立ち上がり時間と断層面積の関係 (パラメター : Cs)

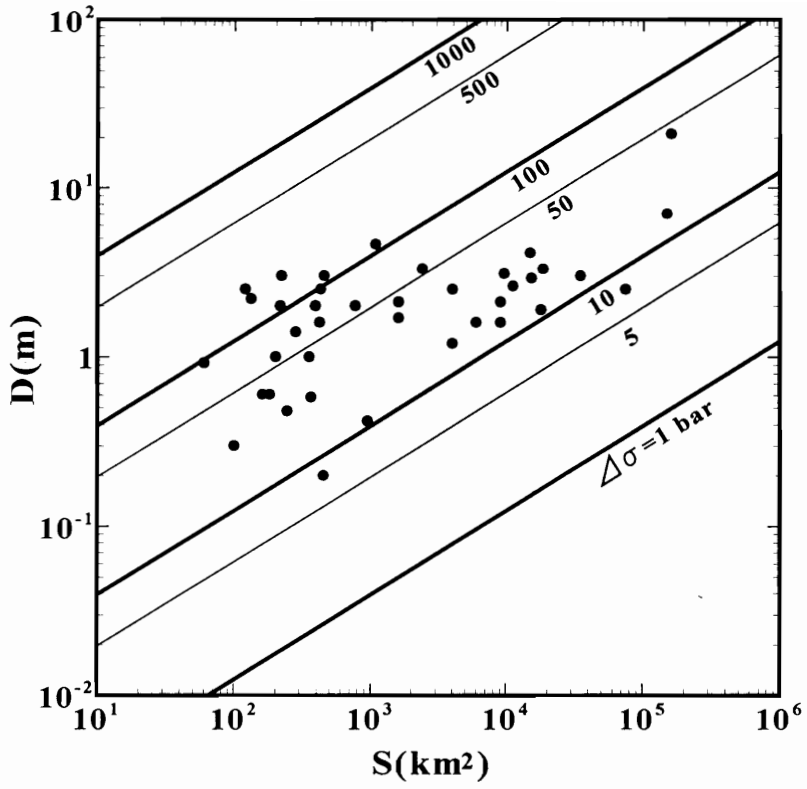


図3-3 : 平均すべり変位と断層面積の関係(パラメター: 平均応力降下量)

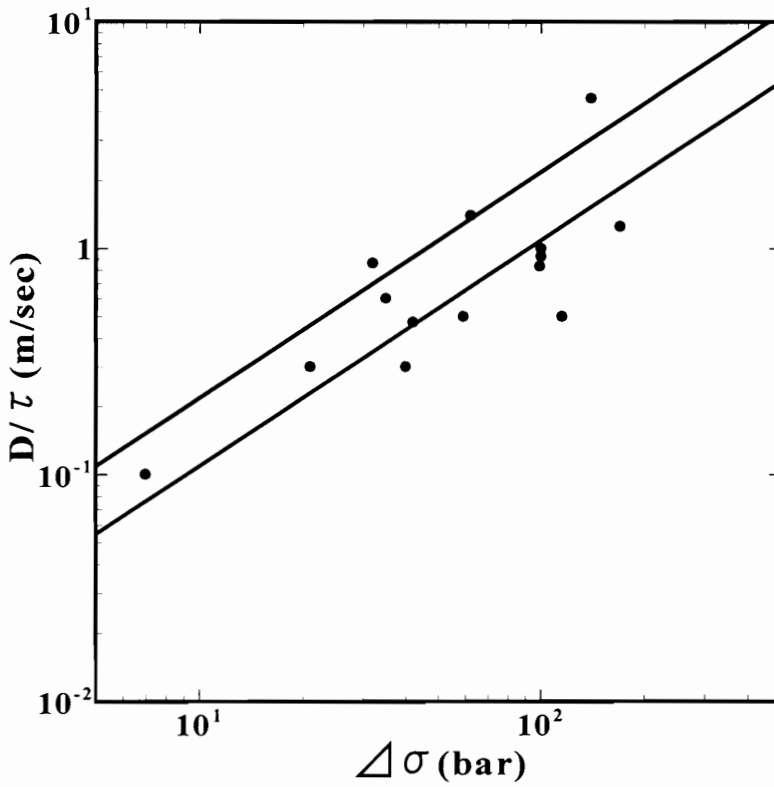


図3-4 : 平均すべり速度と平均応力降下量の関係

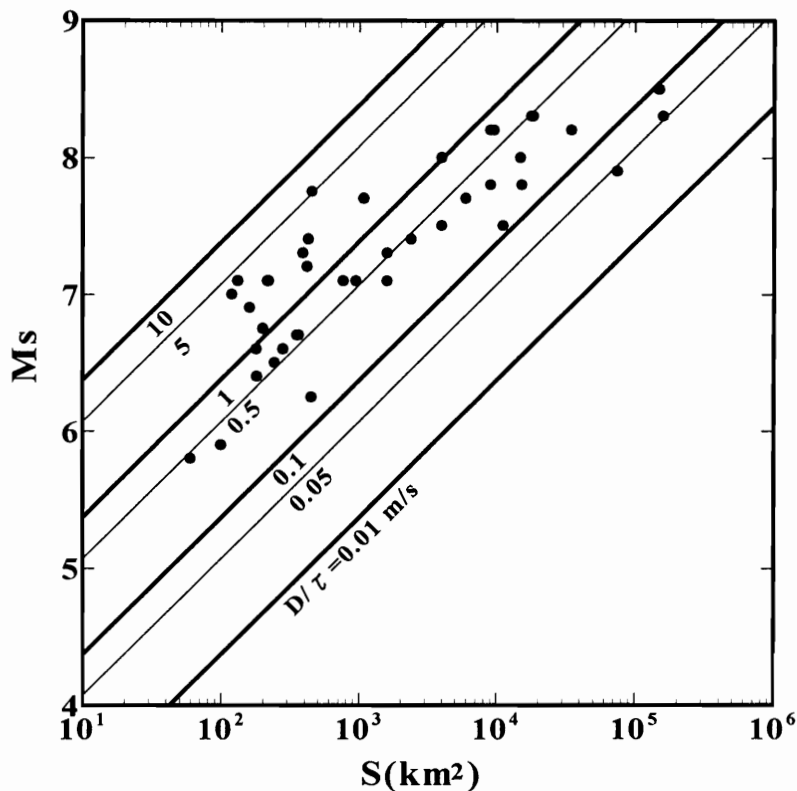


図3-5：表面波マグニチュードと断層面積の関係  
(パラメター：平均すべり速度)

### 3-4 巨視的震源パラメターの決め方とパラメター値のばらつきの範囲

以上の関係式は、入倉(2004)<sup>1)</sup>の方法を基本としているものであるが、本節ではそれらのパラメター値のばらつきの範囲を設定して、巨視的震源パラメターの決め方を示す。

手順としては、

- (1) 震源断層の面積を決める。
- (2) 平均応力降下量の経験的値として、10~100(bar)とする。
- (3) 式(3-3.6)より地震モーメントの値とその範囲を求める。
- (4) 式(3-3.7)より立ち上がり時間の値とその範囲を求める。
- (5) 式(3-3.8)より平均滑り変位の値とその範囲を求める。
- (6) 式(3-3.9)より断層の平均滑り速度  $D/\tau$  とその範囲を求める。
- (7) 式(3-3.10)より、経験的に求められているマグニチュードと断層面積の関係のばらつきは、断層の平均滑り速度のばらつきと、放射パターンのばらつきであると解釈することができる。

上記の(2)における平均応力降下量は、前の地震から次の地震発生までの平均再現期間が長い

地震ほど大きい傾向にあるという Kanamori and Anderson の研究成果(1975)<sup>6)</sup>を用いると、平均再現期間が長い内陸地震と平均再現期間が短い海洋地震では区別する方がよいと思われる。具体的な目安としては、以下のような値とするのが適当であろう。

平均再現期間<70年	$\Delta\sigma = 10(\text{bar})$
300年<平均再現期間<70年	$\Delta\sigma = 10 \sim 50(\text{bar})$
300年<平均再現期間<2000年	$\Delta\sigma = 50 \sim 100(\text{bar})$
平均再現期間>2000年	$\Delta\sigma = 100 \sim 120(\text{bar})$

また、上記の手順の他に、表面波マグニチュードを初めに決めて、平均滑り速度の範囲、断層面積の範囲等を決める手順も考えられる。しかし、ここでは、活断層等の地質・地形学的情報から断層の長さや幅より断層の面積を最初に決めて進める上記の手順を採用するものとする。

### 3-5 微視的震源パラメーターと巨視的震源パラメーターの関係

アスペリティーにおける震源断層パラメーターを微視的震源パラメーターと呼ぶ。これまでに述べたように、巨視的震源パラメーターである、地震モーメント、地震のマグニチュード、平均滑り変位、立ち上がり時間が、全て震源断層の面積 $S$ と平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の2つのパラメーターのみの関数として与えられるため、微視的震源パラメーターもアスペリティーの面積と応力降下量（アスペリティーの応力降下量は、断層全体の平均応力降下量に対して、局所応力降下量と呼ばれる）の2つのパラメーターのみの関数として与えられる。したがって、巨視的震源パラメーターと微視的震源パラメーターの関係として、それらの比率のみを考えると、これらの比率は、断層の面積の比率か、応力降下量の比率かのどちらか1つのパラメーターのみの比率から求めることができる。

入倉(2004)<sup>7)</sup>は、アスペリティーの面積と震源断層全体の面積の比 $S_a/S$ が、地震の大きさに依存せず一定であることを示した Somerville *et al.* (1999)<sup>2)</sup>の研究成果を用いて、微視的震源パラメーターを与えている。ここでも、 $S_a/S$ （一定）を基準として、微視的震源パラメーターと巨視的震源パラメーターの関係を整理する。

#### (1) アスペリティー領域と背景領域と平均応力降下量の関係

ここでは、アスペリティー領域と背景領域の面積と応力降下量に下添字 $a, b$ をつけて区別する。震源断層の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ は、アスペリティー領域と背景領域の応力降下量の面積比を重みとした平均値として次式のように評価するものとする。

$$\Delta\sigma = \frac{S_a}{S} \Delta\sigma_a + \frac{S_b}{S} \Delta\sigma_b \quad (3-5.1)$$

これは、次式のように整理することができる。



$$\Delta\sigma = \frac{S_a}{S} \Delta\sigma_a \left( 1 + \frac{S-S_a}{S} \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a} \right) = \alpha \left( 1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a} \right) \Delta\sigma_a = C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right) \Delta\sigma_a, \quad (S_a = \alpha S) \quad (3-5.2a)$$

ここに、

$$C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right) = \alpha \left( 1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a} \right) \quad (3-5.2b)$$

入倉(2004)<sup>1)</sup>や Somerville *et al.* (1999)<sup>2)</sup>に従い、 $\alpha = 0.22$  とすると、 $C$  は、アスペリティーと背景領域の応力降下量に関する比率の関数となる。入倉・他(2002)<sup>7)</sup>のクラックモデルの数値計算を参考に、 $\Delta\sigma_b/\Delta\sigma_a = 0 \sim 0.1$  とする。例えば、 $\Delta\sigma_b/\Delta\sigma_a = 0, 0.02, 0.05, 0.1$  に対し、 $C = 0.22, 0.24, 0.26, 0.30$  となり、背景領域の応力降下量を無視する場合 ( $\Delta\sigma_b/\Delta\sigma_a = 0$ )、 $C = \alpha = 0.22$  となる。これらのことより、次式のように評価することができよう。

$$C\left(\alpha = 0.22, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right) = 0.22 \sim 0.30 \quad (3-5.3)$$

## (2) 微視的震源断層パラメーターと巨視的震源断層パラメーターの関係 (アスペリティー領域の地震モーメント、断層面積、応力降下量、滑り変位、立ち上がり時間)

式(3-3.1)から、アスペリティー領域の地震モーメントは、

$$M_{0a} = C_0 \Delta\sigma_a S_a^2 = C_0 \frac{\alpha^{\frac{3}{2}}}{C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right)} \Delta\sigma S^{\frac{3}{2}} = \frac{\alpha^{\frac{3}{2}}}{C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right)} M_0 \quad (3-5.4a)$$

背景領域の応力降下量を無視する場合、 $C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a} = 0\right) = \alpha = 0.22$  より、

$$M_{0a} = \sqrt{\alpha} M_0 \quad (3-5.4b)$$

式(3-3.3)から、アスペリティー領域の立ち上がり時間は、次式で与えられる。

$$\tau_a = \gamma \frac{\sqrt{S_a}}{C_s} = \gamma \frac{\sqrt{\alpha} \sqrt{S}}{C_s} = \sqrt{\alpha} \tau \quad (3-5.5)$$

式(3-3.4)から、アスペリティー領域の滑り変位は、

$$D_a = \frac{C_0}{\mu} \Delta\sigma_a \sqrt{S_a} = \frac{C_0}{\mu} \frac{\sqrt{\alpha}}{C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right)} \Delta\sigma \sqrt{S} = \frac{\sqrt{\alpha}}{C\left(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a}\right)} D \quad (3-5.6a)$$

背景領域の応力降下量を無視する場合、 $C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a} = 0) = \alpha = 0.22$  より、

$$D_a = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} D \quad (3-5.6b)$$

背景領域の滑り速度は、

$$\frac{D_a}{\tau_a} = \frac{1}{C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a})} \frac{D}{\tau} \quad (3-5.7)$$

以上をまとめると、次式のように微視的震源断層パラメーターと巨視的震源断層パラメーターの関係が求められる。

$S_a/S = \alpha = 0.22$  の場合、

$$\Delta\sigma_a = \frac{1}{C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a})} \Delta\sigma = \frac{1}{0.22 \sim 0.30} \Delta\sigma = (3.3 \sim 4.5) \Delta\sigma$$

$$\tau_a = \sqrt{\alpha} \tau = 0.5 \tau$$

$$M_{0a} = \frac{\alpha^{3/2}}{C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a})} M_0 = \frac{0.10}{0.22 \sim 0.30} M_0 = (0.3 \sim 0.5) M_0$$

$$D_a = \frac{\sqrt{\alpha}}{C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a})} D = \frac{0.46}{0.22 \sim 0.30} D = (1.6 \sim 2.1) D$$

$$\frac{D_a}{\tau_a} = \frac{1}{C(\alpha, \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_a})} \frac{D}{\tau} = (3.3 \sim 4.5) \frac{D}{\tau}$$

(3-5.8a)

アスペリティー領域の応力降下量に比べ背景領域の応力降下量が小さく無視できる場合、上式は、次式のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_a &= \frac{1}{\alpha} \Delta\sigma = \frac{1}{0.22} \Delta\sigma = 4.5\Delta\sigma \\ \tau_a &= \sqrt{\alpha}\tau = 0.5\tau \\ M_{0a} &= \sqrt{\alpha}M_0 = 0.5M_0 \\ D_a &= \frac{1}{\sqrt{\alpha}}D = 2.1D \\ \frac{D_a}{\tau_a} &= \frac{1}{\alpha} \frac{D}{\tau} = 4.5 \frac{D}{\tau}\end{aligned}\tag{3-5.8b}$$

### (3) アスペリティー領域の最大、最小面積の評価

入倉(2004)<sup>1)</sup>によると、アスペリティー領域の最大面積は、次式で与えられるとしている。

$$S_{a\max} / S = 0.15\tag{3-5.9}$$

これは、平均的な断層面積と地震のマグニチュードの関係式<sup>5)</sup> ( $\log S = M - 4.07$ ) から見ると、 $M_{a\max} = M - 0.82$  となり、アスペリティーの総面積比  $\alpha = 0.22$  から決まるアスペリティーのマグニチュード  $M_a = M - 0.66$  と比較すると、 $M_a - M_{a\max} = 0.16$  の差があることを示している。

一方、アスペリティー領域の最小面積としてどのくらいを想定するのかに対する物理学的根拠は無い。しかし、地震の規模の小さい地震のマグニチュードや地震モーメントの決定精度を考慮すると現時点では、

$$M_{a\min} = 4.5 \sim 5.0 \text{ 程度}, \quad M_{0a\min} = 10^{23} \sim 10^{24} \text{ (dyne-cm)}$$

を設定するのが適当であると思われる。この場合、

$$S_{a\min} = \begin{cases} 2.7(\text{km}^2) & M_{a\min} = 4.5 \\ 8.5(\text{km}^2) & M_{a\min} = 5.0 \end{cases}\tag{3-5.10}$$

立ち上がり時間の最小値は、式(3-3.3)より、

$$\tau_{a\min} = (0.2 \sim 0.4) \frac{\sqrt{S_{a\min}}}{C_S} = \begin{cases} 0.10 \sim 0.20(\text{s}) & M_{a\min} = 4.5 \\ 0.15 \sim 0.30(\text{s}) & M_{a\min} = 5.0 \end{cases}\tag{3-5.11}$$

上式では、 $C_S = 3.5(\text{km/s})$  を仮定した。

構造物応答の視点からは、震源断層から放射される地震変位波形のパルス波の周期が立ち上がり時間に比例して長くなるため、構造物の固有周期に一致するようなパルス波を放出するようなアスペリティー領域の面積を決める方法が考えられる。この具体式に関しては今後公表する予定である。

### 3-6 2つのアスペリティー領域の場合における微視的断層パラメーターの配分

2つのアスペリティー領域がある場合、微視的断層パラメーターをどのような基準によって配分するかについて整理すると、(1)変位一定の基準、と(2)応力降下量一定の基準の2つ基準がある。ここでは、2つのアスペリティー領域の場合を例に配分方法を記述するが、ここでの方法は任意個数のアスペリティー領域の場合にも適用することができる。2つの基準のうちどちらの配分方法が適切かについては、任意である。しかし、変位一定基準の方が簡単である。

#### (1) 変位一定の基準による配分方法

この基準では、2つのアスペリティー領域の平均滑り変位がアスペリティー毎に等しいとする。すなわち、

$$D_{a1} = D_{a2} = D_a \quad (3-6.1)$$

ここに、 $D_{a1}, D_{a2}$  は第1番目と第2番目のアスペリティーの平均滑り変位を表す。

したがって、2つのアスペリティーにおける地震モーメントの合計は、次式のように各アスペリティーの地震モーメントの和として与えられる。

$$M_a = \mu D_a S_a = \mu(D_{a1} S_{a1} + D_{a2} S_{a2}) = \mu D_a S_a \left( \frac{S_{a1} + S_{a2}}{S_a} \right) = M_{a1} + M_{a2} \quad (3-6.2a)$$

ここに、

$$M_{a1} = \frac{S_{a1}}{S_a} M_a, \quad M_{a2} = \frac{S_{a2}}{S_a} M_a, \quad S_a = S_{a1} + S_{a2} \quad (3-6.2b)$$

上式から、2つのアスペリティー領域を円形とする場合、等価半径は次式のようになる。

$$r_a = \sqrt{r_{a1}^2 + r_{a2}^2} \quad (3-6.3)$$

この変位一定基準の場合、各アスペリティーの応力降下量は異なり、地震モーメント、応力降下量、断層面積の関係式(3-3.1)を用いると、次式のように与えられる。

$$\frac{\Delta\sigma_{a1}}{\Delta\sigma_a} = \frac{1}{\sqrt{\frac{S_{a1}}{S_a}}}, \quad \frac{\Delta\sigma_{a2}}{\Delta\sigma_a} = \frac{1}{\sqrt{\frac{S_{a2}}{S_a}}} \quad (3-6.4)$$

また、立ち上がり時間も各アスペリティーで異なり、式(3-3.3)を用いると、次式のように与えられる。

$$\frac{\tau_{a1}}{\tau_a} = \sqrt{\frac{S_{a1}}{S_a}}, \quad \frac{\tau_{a2}}{\tau_a} = \sqrt{\frac{S_{a2}}{S_a}} \quad (3-6.5)$$

## (2) 応力降下量一定の基準による配分方法

この基準では、2つのアスペリティー領域の応力降下量がアスペリティー毎に等しいとする。すなわち、

$$\Delta\sigma_{a1} = \Delta\sigma_{a2} = \Delta\sigma_a \quad (3-6.6)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{a1}, \Delta\sigma_{a2}$  は第1番目と第2番目のアスペリティーの応力降下量を表す。

したがって、各アスペリティーの地震モーメントの合計は、次式のように各アスペリティーの地震モーメントの和として与えられる。

$$M_a = C_0 \Delta\sigma_a S_a^{\frac{3}{2}} = C_0 \left( \Delta\sigma_{a1} S_{a1}^{\frac{3}{2}} + \Delta\sigma_{a2} S_{a2}^{\frac{3}{2}} \right) = C_0 \Delta\sigma_a S_a^{\frac{3}{2}} \left( \frac{S_{a1}^{\frac{3}{2}} + S_{a2}^{\frac{3}{2}}}{S_a^{\frac{3}{2}}} \right) = M_{a1} + M_{a2} \quad (3-6.7a)$$

ここに、

$$M_{a1} = \left( \frac{S_{a1}}{S_a} \right)^{\frac{3}{2}} M_a, \quad M_{a2} = \left( \frac{S_{a2}}{S_a} \right)^{\frac{3}{2}} M_a, \quad S_a^{\frac{3}{2}} = S_{a1}^{\frac{3}{2}} + S_{a2}^{\frac{3}{2}} \quad (3-6.7b)$$

上式から、2つのアスペリティー領域を円形とする場合、等価半径は次式のようになる。

$$r_a = \sqrt[3]{r_{a1}^3 + r_{a2}^3} \quad (3-6.8)$$

この応力降下量一定の基準の場合、各アスペリティーの滑り変位は異なり、地震モーメント、応力降下量、断層面積の関係式を用いると、次式のように与えられる。

$$\frac{D_{a1}}{D_a} = \sqrt{\frac{S_{a1}}{S_a}}, \quad \frac{D_{a2}}{D_a} = \sqrt{\frac{S_{a2}}{S_a}} \quad (3-6.9)$$

また、立ち上がり時間も各アスペリティーで異なり、式(3-3.3)を用いると、次式のように与えられる。

$$\frac{\tau_{a1}}{\tau_a} = \sqrt{\frac{S_{a1}}{S_a}}, \quad \frac{\tau_{a2}}{\tau_a} = \sqrt{\frac{S_{a2}}{S_a}} \quad (3-6.10)$$

### 3-7 まとめ

- (1) 3-2節から3-4節に巨視的震源パラメターの基礎式を整理し、重要な巨視的震源パラメターである、地震モーメント、地震のマグニチュード、平均滑り変位、平均滑り速度、立ち上がり時間が、震源断層の面積 $S$ と平均応力降下量 $\Delta\sigma$ という2つのパラメターのみの関数として整理できることを示した。そして、巨視的震源パラメターのばらつきの範囲や実測データとの整合性を確認した。
- (2) 3-5節と3-6節には、巨視的震源パラメターとアスペリティーに関する微視的震源パラメターの関係を整理し、背景領域とアスペリティー領域の断層面積比率や応力降下量の比率を考慮した、微視的震源パラメターの決め方を示した。

### 参考文献

- 1) 入倉孝次郎, (2004), 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 第47号A, pp. 25-45.
- 2) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A., (1999), Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 70, pp. 59-80.
- 3) 金森博雄, (1991), 地震の物理, 岩波書店.
- 4) 佐藤良輔, (1989), 日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版.
- 5) Savage, J. C., (1972), Relation of corner frequency to fault dimensions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, No. 20, pp. 3788-3795.
- 6) Kanamori, H., and Anderson, D. L., (1975), Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 5, pp. 1073-1095.
- 7) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, (2002), 予測のための震源のモデル化, 月刊地球, 号外 Vol. 37, pp. 62-77.