

中小地震の応力降下量の断層タイプ・ 震源深さ依存性及び地域性に関する研究

佐藤智美

大崎総合研究所 主任研究員 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル)
E-mail:toshimi@ori.shimz.co.jp

断層モデルに基づく地震動評価の際の震源モデル化の改良に向けて、全国の強震記録を用いて、スペクトルインバージョン手法により震源深さ60km以下の168個の中小地震の応力降下量の推定を行ない、応力降下量の断層タイプ、メカニズム解、震源深さ、地域による違いを検討した。内陸地震の応力降下量は震源深さ依存をもち、逆断層では横ずれ断層の約2倍、正断層では横ずれ断層の約1/2倍という、摩擦法則から期待される結果が得られた。スラブ内地震の応力降下量はプレート境界地震と比較して地域性が大きい、平均的にはプレート境界地震の約2倍、フィリピン海プレートのスラブ内地震に限ると約4倍の応力降下量があることがわかった。

Key Words: *stress drop, fault mechanism, interplate earthquake, intraplate earthquake, crustal earthquake*

1. はじめに

理論的手法や半経験的手法により断層モデルを用いて地震動を評価するためには、面積や地震モーメントなどの巨視的パラメータの他、震源内の非一様すべり分布などの微視的パラメータを適切に設定することが重要である。例えば、兵庫県南部地震の際の周期1秒程度の強震動パルスは、深い地盤構造の影響の他に、アスペリティといわれる相対的に最終すべり量が大きい領域のサイズに依存していることが指摘されている^{例えば¹⁾}。そして、このようなアスペリティなどの微視的パラメータを単純にモデル化した特性化震源モデルの設定法が提案されている^{2,3)}。現在用いられている特性化震源モデルの設定法に忠実に従った場合、アスペリティの応力降下量は、内陸地震、プレート境界地震、スラブ内地震といった断層タイプや逆断層、正断層、横ずれ断層といったメカニズムやアスペリティの深さに依存しない。この特性化震源モデルの設定法に基づく1995年兵庫県南部地震(Mw7.2)の地震動シミュレーションでは、観測記録を十分に説明できないことが指摘され、応力降下量の深さ依存性の検討の必要性が求められている⁴⁾。また、プレート境界地震である1978年宮城県沖地震(Mw7.4)の強震記録を統計的グリーン関数法で再現するために、アスペリティ毎に

応力降下量を変化させることも実施されているが⁵⁾、一般的な設定法は提案されていない。

一方、壇・他⁶⁾は、主にカリフォルニアの10個程度の大規模内陸地震の震源インバージョン結果からアスペリティの応力降下量(実効応力)を推定し、応力降下量と断層タイプや深さとの経験式を提案している。また、岩田・他⁷⁾は、日本の数個の中・大規模のスラブ内地震の震源インバージョンを実施し、応力降下量に深さ依存があることを指摘している。このように、中・大規模地震に対して、応力降下量の断層タイプやメカニズムや深さ依存性が指摘されつつあり、このような特徴を特性化震源モデルの設定法に役立てていく必要があると考えられるが、震源インバージョンが行われている地震は少ない。

中小規模地震に対しては、スペクトルインバージョン手法に基づき、より多数の地震の応力降下量が推定されており、この応力降下量の断層タイプや深さ依存性についての研究が行われている。例えば、佐藤・巽⁸⁾は、約100個の中小地震の応力降下量を推定し、応力降下量と震源深さとの経験式を求めるとともに、応力降下量と地域性を指摘している。しかし、内陸地震と海溝性地震の2種類の断層タイプの違いのみが議論されている。壇・他⁶⁾は、前述の大地震のデータの他に、既往の研究でスペクトルインバージョンにより推定されている応力降下

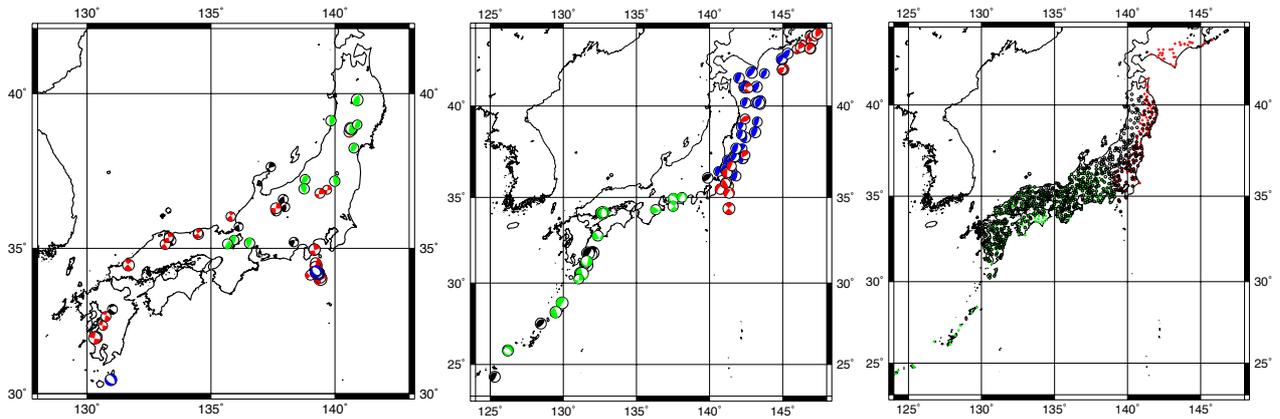


図-1 内陸地震のメカニズム解(緑=逆断層, 青=正断層, 赤 = 横ずれ, 黒=斜めずれ) 図-2 プレート境界地震(青と黒)とスラブ内地震(赤と緑)のメカニズム解(青と赤=太平洋プレート, 黒と緑=フィリピン海プレート) 図-3 観測点位置(赤=東日本の海溝性地震, 緑 = 西日本の海溝性地震, 黒丸 = 内陸地震)

表-1 地震の分類と地震数

内陸地震				プレート境界地震(海溝性)		スラブ内地震(海溝性)	
逆断層	正断層	横ずれ	斜めずれ	太平洋	フィリピン海	太平洋	フィリピン海
12	9	36	25	39	10	22	15

量を用いて、応力降下量の断層タイプや深さ依存性の経験式を提案し、地域性についても言及している。しかし、様々な研究者が異なる条件で応力降下量を推定しているため、地盤増幅特性を考慮していないものや、震源スペクトルの平均値ではなく平均値+標準偏差をターゲットとしているものが混在している。また、データにはフィリピン海プレートの地震が含まれていない。

以上のような背景から、本研究では、K-NET 観測点及び KiK-net 観測点の地震記録を用いて、これまでになく多数の中小地震の応力降下量をスペクトルインバージョン手法により推定し、応力降下量の断層タイプ、メカニズム、深さ依存性、地域性についての検討を行った。分類した地震は、太平洋プレートのプレート境界地震、太平洋プレートのスラブ内地震、フィリピン海プレートのプレート境界地震、フィリピン海プレートのスラブ内地震、逆断層の内陸地震、正断層の内陸地震、横ずれ断層の内陸地震、斜めずれ断層の内陸地震である。

2. データ

データは、1996年5月から2002年6月までのK-NET及びKiK-net強震観測データ(地表)の加速度波形の水平成分の記録から以下の条件で選択した。

- 1) 海溝性地震は気象庁マグニチュード $M_j 5.0$ 以上 6.9 (モーメントマグニチュード $M_w 6.7$)以下、内陸地震は $M_j 4.5$ 以上 6.5 以下。
- 2) 震源深さ 60km, 震源距離 $X < 200$ km, 3 地点以上でトリガー。

- 3) PS 検層結果から道路橋示方書⁹⁾の方法で評価した地盤種別が1種地盤となる観測点のデータ。
- 4) 防災科学技術研究所の F-net(<http://www.fnetbosai.go.jp/freesia/index-j.htm>)でメカニズム解が求められている。
- 5) S 波部以降 15 秒間の水平 2 成分のフーリエスペクトルに、周期 0.05~10 秒でノイズが認められない。

スペクトルインバージョンの際には、できるだけ類似の伝播経路を通るデータセットに分類することが望ましいが、データの制約から、海溝性地震(プレート境界地震とスラブ内地震)と内陸地震に分類し、それぞれを、糸魚川-静岡構造線を境界として東日本と西日本に分類した。図-1、図-2 に、検討対象とした地震の震央位置を F-net のメカニズム解とともに示す。両図における断層タイプやメカニズムによる分類は、震源深さとプレートの深さ^{10),11)}との関係や、メカニズム解に基づき行った。分類した地震とその個数を表-1 に示す。

観測点位置を図-3 に示す。関東地方から北海道にかけての地域では、火山フロントの東と西で上部マンテルの減衰が顕著に異なることが指摘されていることから¹²⁾、この影響が大きいと考えられる東日本の海溝性地震に対しては火山フロントより東の観測点の記録のみを用いた。全データは計 822 観測点で観測された 168 地震の約 10,000 波である。

3. 手法

- (1) スペクトルインバージョン手法^{13),14)}

観測された地震記録の加速度フーリスpekトル $A_{ij}(f)$

は、震源特性 $S_i(f)$ ・伝播経路特性 $P(f)$ ・サイト特性 $G_j(f)$ の 3 つのスペクトル成分により構成され则认为することができる。

$$A_{ij}(f) = S_i(f) \cdot P(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

ここに、 f は周波数、 i は地震に対する添え字、 j は観測点に対する添え字である。 $S_i(f)$ 、 $P(f)$ 、 $G_j(f)$ は、次式で表される誤差 $ERR(f)$ が最小となるように最小自乗法により決定する¹⁴⁾。

$$ERR(f) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij}} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij} \left\{ \log_{10} A_{ij}(f) - S_i(f) - P(f) - G_j(f) \right\}^2} \quad (2)$$

ここに、 δ_{ij} は i ($i=1, 2, \dots, I$) 番目の地震が j ($j=1, 2, \dots, J$) 番目の観測点で得られているとき 1、得られていないとき 0 である。佐藤・巽⁸⁾と同様に 4Hz 以下でサイト特性がないと考えられる K-NET 観測点の IWT009(大東)を全国共通の基準観測点とした。

なお、伝播経路特性 $P(f)$ は震源距離 X に反比例する実体波の幾何減衰項 $1/X$ と Q 値による減衰項により次式でモデル化した。

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q\beta}\right) \quad (3)$$

ここで、 β は伝播経路の S 波速度であり、内陸地震で 3.4km/s、海溝性地震で 4.0km/s と仮定した。浅い内陸地震ではモホ反射波や Lg 波の影響で、 X が 50~150km 程度までは $1/X$ 、それ以上では $1/X^{1.2}$ の幾何減衰を仮定すると、観測記録の距離減衰特性をよく表現できることが指摘されている^{例えは 15)}。そこで、内陸地震に対しては、この境界距離 X_r を 20km 刻みで変化させて(3)式の誤差 $ERR(f)$ が最小となるように X_r と Q^1 を推定した。

(2) 応力降下量の推定手法

スペクトルインバージョンにより推定された震源特性 $S(f)$ を ω^2 モデル¹⁶⁾に基づき次式でモデル化する^{例えは 17)}。

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_S P_{RTTN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 f_0 はコーナー周波数である。 F_S は自由地表面の効果を表す定数であり、 $F_S=2$ とする。 P_{RTTN} は水平 2 成分へのエネルギー分配を表す係数であり、後述のように水平 2 成分のベクトル和で定義するため 1 とする。また、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン係数であり、スペクトルインバージョン解析では、スペクトルの対数を対象として分離することから、Boore and Boatwright¹⁸⁾の S 波のラディエーションパターン係数の対数の平均値 0.55 を用いる。 ρ は媒質の密度であり、海溝性地震で 3.0g/cm³、内陸地震で 2.7g/cm³ とした。 β_z 、 β_z は、

基準観測点 IWT009 での S 波速度、密度である。対象とする 4Hz 以下では、極表層の増幅の影響は受けないと考えられるため、IWT009 の近傍の KIK-net 観測点での地盤情報を参考に、 $\beta_z=2.85$ km/s、 $\rho_z=2.65$ g/cm³ とした。

(4)式において、

$$O(f) = \frac{S(f)}{\frac{R_{\theta\phi} F_S P_{RTTN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}}} \quad (5)$$

とおき、 $O(f)$ を水平 2 成分のベクトル和で置き換える。また、

$$M(f) = \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (6)$$

と置き換える。そして、各地震毎に推定パラメータ $\{r\}$ を次式の $J(\{r\})$ が最小になるように、改訂準ニュートン法により推定する¹⁹⁾。

$$J(\{r\}) = \int_{f_s}^{f_e} (O(f) - M(f))^2 df \quad (7)$$

ここで、 f_s 、 f_e は各地震のスペクトルで対象とする最小周波数、最大周波数である。 $f_s=0.2$ Hz、 $f_e=4$ Hz とした。

推定するパラメータ $\{r\}$ は f_0 であり、各地震の Brune¹⁶⁾ の応力降下量 $\Delta\sigma$ は

$$\Delta\sigma = M_0 \{f_0 / (4.9 \times 10^6)\}^3 \quad (8)$$

により計算できる。ここで、 M_0 は、F-net により推定されている地震モーメントである。 f_0 の初期値は、(8)式において $\Delta\sigma = 50$ bar²⁰⁾として求めた。本研究では、Brune の応力降下量を 10.72 倍して Madriaga²¹⁾の応力降下量相当に変換した。ここで、破壊伝播速度の急激な変化量を伝播速度 V_r に等しいと考え、 V_r が S 波速度 β の 0.72 倍²²⁾と仮定している。

また、 $M(f)$ がフラットとなる短周期レベル A を

$$A = 4\pi^2 f_0^2 M_0 \quad (9)$$

により f_0 から求め³⁾、既往の研究の M_0 と A の関係との比較を行う。

4. 結果

(1) Q 値及び応力降下量の推定

図-4(a)には、東日本と西日本の海溝性地震の Q^{-1} と、これらを $Q = Q_0 f^{-\alpha}$ で回帰したモデル式を示す。東日本の海溝性地震の Q は、0.5~10Hz で $Q = 154f^{0.91}$ で、西日本の海溝性地震の Q は $Q = 199f^{0.41}$ でモデル化される。低周波数では東日本(火山フロントより東)の方が Q^{-1} が大きく、高周波数では西日本の方が Q^{-1} が大きいという結果は、中村・植竹¹²⁾が推定している深さ 0~30km の Q^{-1} の傾向と調和的である。図-4(b)には、東日本と西日本の内陸地震の Q^{-1} を示す。東日本と西日本とも誤差が最小となった $X_r = 80$ km の場合である。西日本の内陸地震から

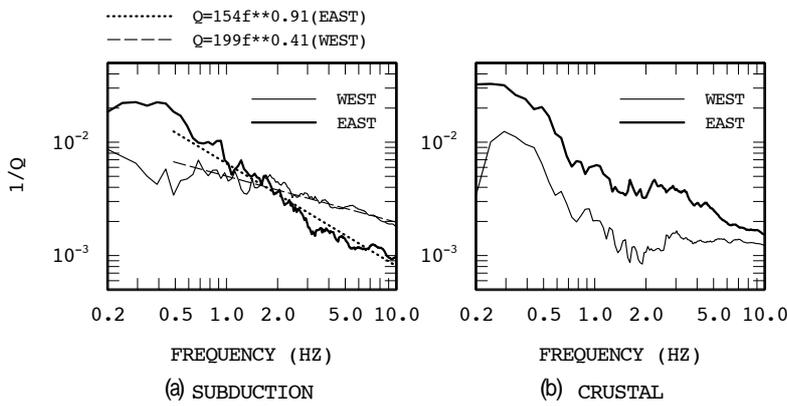


図4 海溝性地震と内陸地震から推定された Q^{-1}

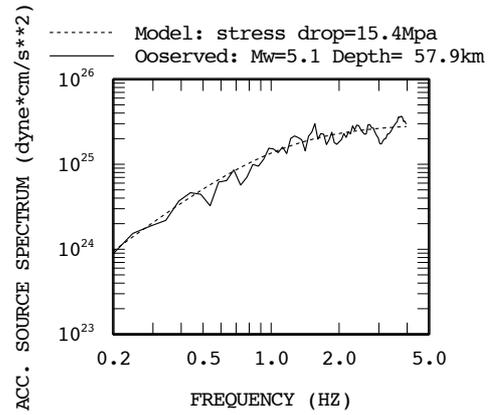


図5 観測記録から分離された加速度震源スペクトルとこれにフィッティングさせた ω^{-2} モデル

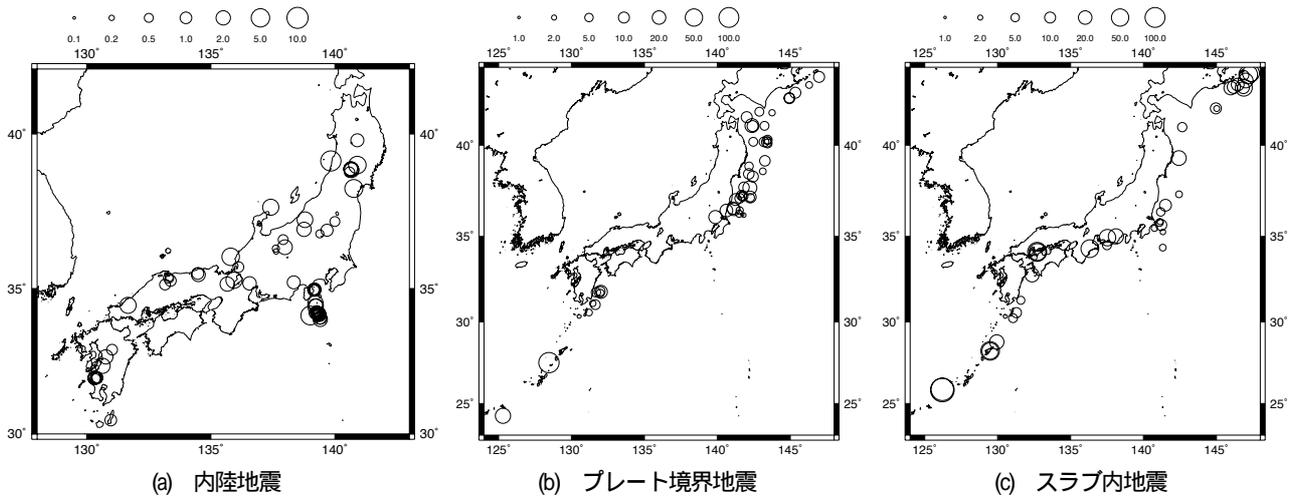


図6 推定した応力降下量の地域性(単位は MPa)

推定された Q^{-1} は 1~2Hz の範囲で $10^3 \sim 2 \times 10^3$ と特に小さい。これは、中村・植竹¹²⁾が深さ 0~30km の東海から中国・四国地方を経て九州北部の広い領域で推定している Q^{-1} の 1Hz, 2Hz の値と調和的である。また、図4 の Q^{-1} は、佐藤・巽⁶⁾の推定値ともほぼ整合する。

図5 には、スペクトルインバージョンにより分離された震源特性と、これにフィッティングする ω^{-2} モデルの比較を 1999 年 4 月 25 日茨城県北部地震(Mw5.1)を例として示す。分離された震源特性は ω^{-2} モデルでほぼ説明できることが確認できる。

(2) 応力降下量の地域性・断層タイプ依存性

図6 には、推定された応力降下量を丸の大きさで示す。詳細は後述するが、内陸地震の応力降下量はプレート境界地震やスラブ内地震と比較して小さい。また、プレート境界地震はスラブ内地震と比較して、地震毎の応力降下量のばらつきが小さい傾向がある。プレート境界地震では、日向灘から種子島付近にかけての地震の応力降下量が小さく、沖縄及び奄美大島の地震の応力降下量大きい。スラブ内地震でも、プレート境界地震と同様の地域性がみられる。また、プレート境

界地震がない領域にある愛知県、和歌山県付近のスラブ内地震や、芸予地震とその余震などのスラブ内地震の応力降下量は比較的大きい。2001 年 3 月 24 日の芸予地震(Mw6.7)の応力降下量は 84MPa、3 月 26 日の余震(Mw5.1)は 49MPa であった。また、北海道東方沖付近のスラブ内地震の応力降下量大きい傾向がある。図2と比較すると、スラブ内地震の横ずれ断層は応力降下量が小さい傾向があることがわかる。

(3) 応力降下量のメカニズム・震源深さ依存性

内陸地震を、逆断層、正断層、横ずれ断層、斜めずれ断層に分類し、それぞれの応力降下量 $\Delta\sigma$ (Mpa)と震源深さ D (km)の関係を以下の式で回帰分析を行った。

$$\Delta\sigma = a + b \times D \quad (10)$$

ここで、 a 、 b が回帰パラメータである。深さ 0km は物理的に考えにくいので、回帰の際には深さ 0km データのみ除いた。この式の形状は、地殻のぜい性領域での Byerlee²³⁾の摩擦法則に基づいており、一般には間隙が水で飽和している系のせん断強度 τ を論ずる際の基本式である Coulomb-Mohr の式

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \sigma_n^{\text{eff}} = \tau_0 + \mu \times (\sigma_n - P) \quad (11)$$

として知られている。ここで、 μ は摩擦係数、 σ_n^{eff} は有効法線応力、 σ_n は法線応力、 P は間隙水圧である。 τ_0 は凝着力(粘着力)である。

図-7 に、メカニズムで分類した内陸地震の震源深さ D と $\Delta\sigma$ との関係を、以下の回帰式とともに示す。

$$\Delta\sigma=0.337+0.103D \quad \sigma=1.06 \text{ (横ずれ断層)} \quad (12)$$

$$\Delta\sigma=1.204+0.327D \quad \sigma=1.59 \text{ (逆断層)} \quad (13)$$

$$\Delta\sigma=0.380+0.029D \quad \sigma=0.19 \text{ (正断層)} \quad (14)$$

$$\Delta\sigma=0.554+0.044D \quad \sigma=0.56 \text{ (斜めずれ断層)} \quad (15)$$

ここで、 σ は標準偏差である。摩擦法則と静水圧的な間隙水圧の勾配を仮定すると、せん断強度は深さに比例して大きくなり、その大きさは逆断層で大きく、正断層で小さく、横ずれ断層はその中間となる²⁴⁾²⁵⁾。図-7 に示す応力降下量は震源深さが深くなるほど大きくなり、逆断層の応力降下量が一番大きく、正断層の応力降下量が一番小さく、横ずれ断層はその中間となっており、ばらつきは大きいものの、摩擦モデルから期待される傾向と整合する。これまで、このような摩擦モデルから期待されるような応力降下量の震源深さ依存性が内陸の中小地震の強震記録から抽出された例は McGarr²⁴⁾を除きほとんどない。なお、国外の内陸地震に対する距離減衰式では逆断層と横ずれ断層の違いを考慮したものの²⁶⁾²⁷⁾や正断層の地震に対するもの²⁸⁾があるが、深さ依存性はモデル化されてない。McGarr²⁴⁾の研究でも、最大速度を震源距離と M_b^{13} で補正した指標が、震源深さが深くなるほど大きくなり、逆断層の方が正断層より大きいことを示しているが、この指標にはサイト特性や Q 値の影響が含まれている。本研究の回帰結果を、データの重心に近い深さ 15km でみると、逆断層は横ずれ断層の 2 倍、正断層は横ずれ断層の約 1/2 倍である。McGarr²⁴⁾は、Byerlee²³⁾の摩擦法則に基づき、地殻の強度は、引っ張りに対して圧縮では約 4 倍であることを算出しており、本研究の地震記録に基づく応力降下量の関係はこの関係と調和的である。

図-8 には、プレート境界地震とスラブ内地震の震源深さと応力降下量の関係を示す。図-8(a)のプレート境界地震の応力降下量は、100MPa 以上となる沖縄付近の 1 地震を除き約 30MPa 以下である。図-8(b)のスラブ内地震の応力降下量は地震毎に大きくばらつき、30MPa 以上の地震も多い。プレート境界地震は全て逆断層の地震であるのに対して、スラブ内地震には様々なメカニズム解をもつ地震が含まれていることがばらつきの違いの原因として考えられる。なお、スラブ内地震で応力降下量が 200MPa 以上と特異に大きい沖縄付近の 2 地震は図中に表示されていない。沖縄付近の地震の応力降下量が大きい、 ω^2 モデルとのフィッティングもよく、中村・植竹¹²⁾の推定 Q 値にも特に異常がみられないことから、地域の特徴であると推測される。

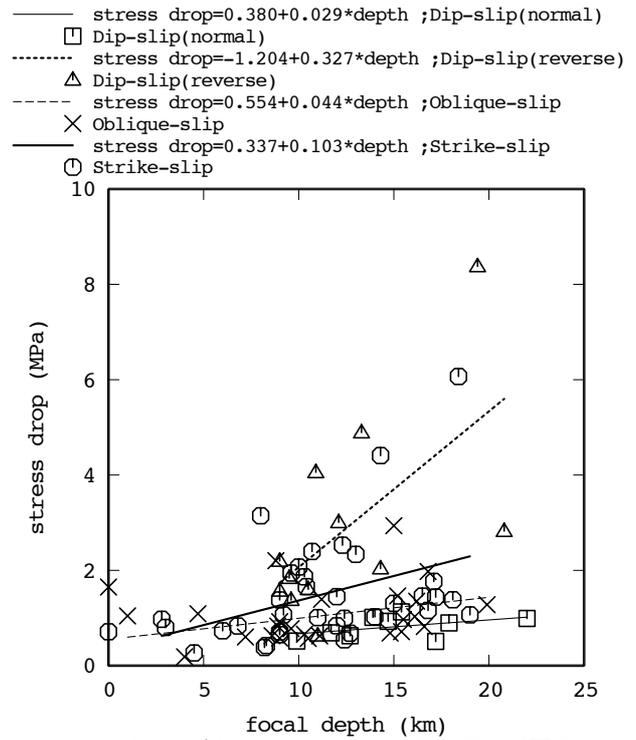
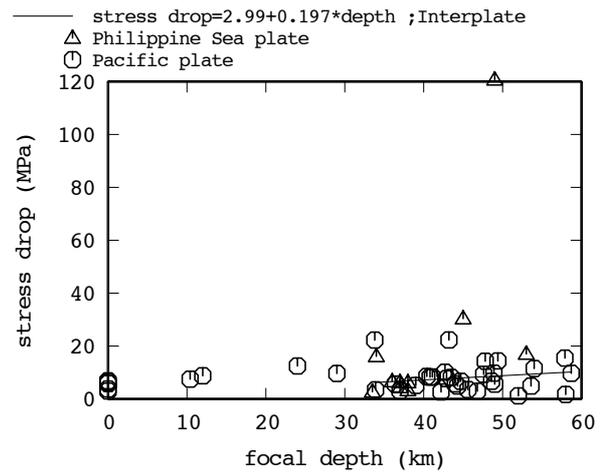
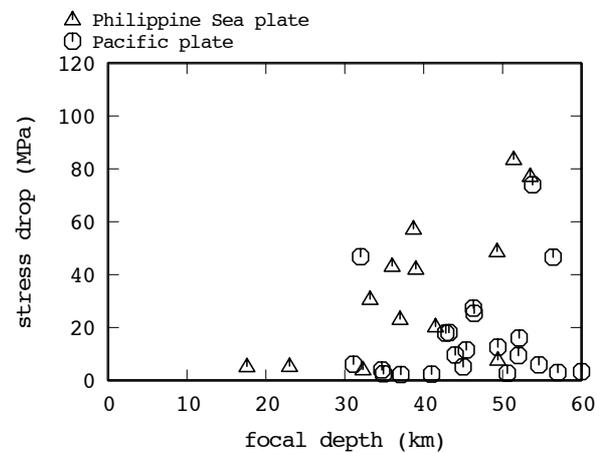


図-7 メカニズムで分類した内陸地震の応力降下量と震源深さとの関係



(a) プレート境界地震



(b) スラブ内地震

図-8 プレートで分類したプレート境界地震(とスラブ内地震)の応力降下量と震源深さとの関係

100MPa 以上の 1 地震を除く全プレート境界地震のデータで、(10)式で応力降下量と震源深さの回帰分析を行った結果が図-8 の直線である。ばらつきが大きく、応力降下量の震源深さ依存性は小さい。スラブ内地震も、対象とした深さ 60km 以下では震源深さ依存性はほとんど見られないが、フィリピン海プレートのスラブ内地震に限ってみれば深さが深くなるほど応力降下量が大きくなる傾向がみられる。Ruff²⁹⁾は $M_w5.6 \sim 8.3$ の約 200 個の地震の震源時間関数から動的応力降下量を求め、地震により 10^3 ものばらつきがあるが、メキシコのプレート境界地震と三陸沖のプレート境界地震は、深いほど動的応力降下量が多いことを指摘しており、応力降下量の深さ依存性にも地域性がある可能性がある。今後、データを増やすなどして太平洋プレートとフィリピン海プレートの応力降下量の深さ依存性の違いが有為であるか否か検討する必要があると考えられる。

応力降下量を単純に幾何平均すると、太平洋プレートのプレート境界地震で 7MPa、フィリピン海プレートのプレート境界地震で 9MPa、太平洋のスラブ内地震で 10MPa、フィリピン海プレートのスラブ内地震で 31MPa となった。また、プレート境界地震全体で 7MPa、スラブ内地震全体では、その約 2 倍の 15MPa となった。

(4) 短周期レベルの地震モーメント依存性

最後に、壇・他³⁾が大地震の非一様すべり破壊モデルから推定している短周期レベル $A(\text{dyne-cm}^2)$ と地震モーメント $M_0(\text{dyne-cm})$ の関係と本研究で対象とした中小地震のそれらとの比較を行う。図-9 には、本研究で推定した地震の A と M_0 の関係と壇・他³⁾が用いた地震の A と M_0 の関係を示す。また、内陸地震のデータから回帰分析を行った壇・他³⁾の回帰式と、以下に示す本研究の内陸地震、プレート境界地震、スラブ内地震に対する以下の回帰式も示している。

$$A=45 \times 10^{16} \times M_0^{1/3} \quad (\text{内陸地震}) \quad (16)$$

$$A=20 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{プレート境界地震}) \quad (17)$$

$$A=34 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (\text{スラブ内地震}) \quad (18)$$

いずれも $M_0^{1/3}$ を固定して回帰された結果である。

本研究の内陸地震の M_0 と A の関係は、壇・他³⁾の回帰式と比較して、同じ M_0 に対して A が 1/5 程度と小さい。これは、1995 年兵庫県南部地震($M_w7.2$)と 2000 年鳥取県西部地震($M_w7.3$)の A は壇・他³⁾の回帰式と調和的であるが、約 $2 \times 10^{25}(\text{dyne-cm})$ の以下の中小地震では、壇・他³⁾の回帰式より顕著に小さくなるという佐藤・巽⁹⁾の結果と整合する。また、約 $M_w6.5$ 以下の中小地震の内陸地震の巨視的な応力降下量は大地震の巨視的な応力降下量より小さいという⁹⁾、巨視的応力降下量の地震規模依存性と類似している。この結果は、内陸地震に

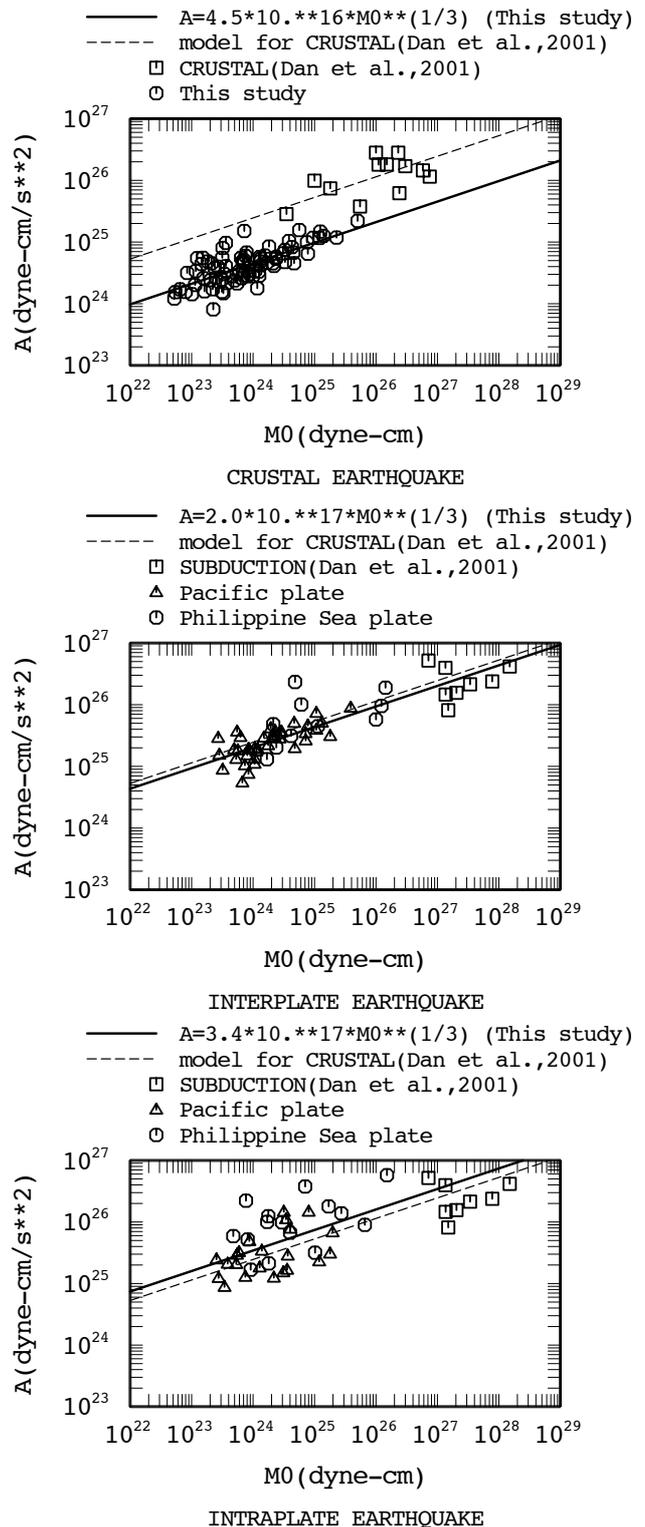


図-9 本研究で推定した A と M_0 の関係と、壇・他³⁾の A と M_0 の関係との比較

対しては、中小地震から得られた応力降下量の絶対値や M_0 と A の関係を大地震に対して用いることはできないことを意味している。一方、本研究のプレート境界地震の M_0 と A の関係は、平均的に大地震のプレート境界地震の M_0 と A の関係や大地震の内陸地震に対する M_0 と A の関係とほぼ同じである。スラブ内地震

に対する回帰式は、プレート境界地震の回帰式と比べ同じ M_0 に対して A が約 1.5 倍大きい。ただし、フィリピン海プレートのスラブ内地震のみを用いると $M_0^{1/3}$ の係数は 5.6×10^{17} となり、プレート境界地震の回帰式の 3 倍近く大きくなる。

5. まとめ

本研究では K-NET 観測点及び KiK-net 観測点で得られている地震記録を用いて、深さ 60km 以浅の 168 個の中小地震の応力降下量をスペクトルインバージョン手法により推定し、応力降下量の断層タイプ、メカニズム、深さ依存性、地域性について検討を行った。その結果以下のことがわかった。

内陸地震の応力降下量には深さ依存性がみられ、横ずれ断層、逆断層、正断層、斜めずれ断層の地震毎に応力降下量と震源深さとの回帰式を作成した。データの重心に近い深さ 15km では、逆断層が横ずれ断層の約 2 倍、正断層が横ずれ断層の約 1/2、斜めずれ断層は横ずれ断層と正断層の中間的な応力降下量があった。逆断層は正断層の約 4 倍の応力降下量という結果は、摩擦法則から推定される地殻のせん断強度と調和的であった。

プレート境界地震の応力降下量はほぼ 30MPa 以下の範囲にあり、震源深さ依存性は小さかった。応力降下量の幾何平均は 7MPa、太平洋プレートとフィリピン海プレートと分類すると、それぞれ、7MPa、9MPa であった。

スラブ内地震はプレート境界地震より、応力降下量の地震毎の違いが大きかった。スラブ内地震の応力降下量の幾何平均はプレート境界地震の約 2 倍の 15MPa であった。太平洋プレートとフィリピン海プレートと分類すると、応力降下量の幾何平均は、それぞれ、10MPa、31MPa であった。地域性が顕著であり、東海から瀬戸内海にかけてと沖縄周辺、北海道東方沖の応力降下量が大きかった。また、フィリピン海プレートのスラブ内地震には、応力降下量に震源深さ依存性がみられたが、太平洋プレートのスラブ内地震を含めると震源深さ依存性はほとんどみられなかった。

短周期レベル A でみた場合、プレート境界地震の M_0 と A の関係は大地震の内陸地震の非一様すべり破壊モデルから推定されている M_0 と A の関係とほぼ同じとなった。一方、同じ M_0 に対する A は、内陸地震ではプレート境界地震の約 1/5 となり、本研究で対象としている M_w が約 6.5 以下の中小地震の A や応力降下量は大地震と比較して小さいことがわかった。これは、内陸地震の巨視的応力降下量と類似の特徴である。スラブ内地震では同じ M_0 に対する A は、プレート境界地震の約 1.5

倍、フィリピン海プレートのスラブ内地震のみでは 3 倍弱となった。

本研究で対象とした深さ 60km 以浅の地震では、太平洋プレートのスラブ内地震よりフィリピン海プレートのスラブ内地震の応力降下量や短周期レベルが平均的に大きかったが、宮城県沖の深さ 60~90km のスラブ内地震や福島県沖のスラブ内地震は内陸地震に対する壇・他³⁾の回帰式の 4~6 倍の短周期レベルが³⁰⁾、1993 年釧路沖地震や 1994 年北海道東方沖地震では壇・他³⁾の回帰式の 13~14 倍の短周期レベルが推定されており³⁰⁾、深い地震も含めた場合は必ずしもこの関係が成り立つとはいえない。したがって、スラブ内地震については、今後深い地震も含めて検討していく必要があると考えられる。また、本研究では、スペクトルインバージョンの際に 4 つのデータセットに分類したが、より精度よく応力降下量を推定するためには、データセットを充実させ、 Q 値のよりローカルな地域性を考慮するとともに、できるだけ近距離のデータで解析することが必要となると考えられる。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の K-NET 強震記録、KiK-net 強震記録及びそれらの地盤構造、F-net によるメカニズム解、気象庁の震源情報を用いました。また、一部の図の作成には、GMT³²⁾を用いました。記して、感謝致します。

参考文献

- 1) 松島信一, 川瀬博: 1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, pp.33-40, 2000.
- 2) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol.110, No.6, pp.849-875, 2001.
- 3) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透: 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号, pp.51-62, 2001.
- 4) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲: 周波数帯域に応じた強震動予測手法の高精度化, 地震災害軽減のための地震動予測マスターモデルに関する研究, 平成 13 年度研究成果報告書, pp.205-216, 2002.
- 5) 石井透, 藤原広行, 佐藤智美, 佐藤俊明, 渡辺基史: 地震動予測地図のための宮城県沖地震の断層モデルの改良, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, CD-ROM, S069-P003, 2003.
- 6) 壇一男, 渡辺基史, 宮腰淳一: 既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティの実効応力と断層タイプ及び深さとの経験的關係, 日本建築学会構造系論文集, 第 565 号, pp.55-62, 2003.
- 7) 岩田知孝, 三宅弘恵, 浅野公之, Zhang Wenbo, 関口春子: 不均質震源特性の抽出と分析, 地震災害軽減のための強震動予測マ

- スターモデルに関する研究第 2 回シンポジウム論文集, pp.109-112, 2003.
- 8) 佐藤智美, 巽誉樹 : 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.15-24, 2002.
 - 9) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 V, 耐震設計編, 2002.
 - 10) Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi : Seismicity in the northern Japan arc and seismicity patterns before large earthquakes, *Earthq. Pred. Res.*, Vol.3, pp.607-626, 1985.
 - 11) 山崎文人, 大井田徹 : 中部地方におけるフィリピン海プレートの沈み込みの形状, 地震, 第 2 輯, 第 38 巻, pp.193-203, 1985.
 - 12) 中村亮一, 植竹富一 : 加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィ, 地震, 第 2 輯, 第 54 巻, pp.475-488, 2002.
 - 13) 岩田知孝, 入倉孝次郎 : 観測された地震波から震源特性・伝播経路特性、及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第 2 輯, 第 39 巻, pp.579-593, 1986.
 - 14) 壇一男, 宮腰淳一, 八代和彦 : 中小規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 480 号, pp.35-46, 1996.
 - 15) Boore, D. M. and G. M. Atkinson : Source spectra for the 1988 Saguenay, Quebec, earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, pp.683-719, 1992.
 - 16) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
 - 17) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
 - 18) Boore, D. M. and J. Boatwright : Average body-wave radiation coefficient, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.74, pp.1615-1621, 1984.
 - 19) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明 : 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 462 号, pp.79-89, 1994.
 - 20) 佐藤良輔 編著 : 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
 - 21) Madariaga, R. : High-frequency radiation from crack (stress drop) models of earthquake faulting, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol.51, No.3, pp.625-651, 1977.
 - 22) Geller, R. J. : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.66, pp.1501-1523, 1972.
 - 23) Byerlee, J. D. : Friction of rocks, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.116, pp.615-625, 1978.
 - 24) Brace, W. F. and D. L. Kohlstedt : Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments, *J. Geophys. Res.*, Vol.85, pp.6248-6252, 1980.
 - 25) McGarr, A. : Scaling of ground motion parameters, state of stress, and focal depth, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.6969-6979, 1984.
 - 26) Abrahamson, N. A. and W. J. Silva : Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seismo. Res. Lett.*, Vol.68, pp.94-127, 1997.
 - 27) Boore, D. M., W. B. Joyner, and T. E. Fumal : Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work, *Seismo. Res. Lett.*, Vol.68, pp.128-153, 1997.
 - 28) Spudich, P., J. B. Fletcher, M. Hellweg, J. Boatwright, C. Sullivan, W. B. Joyner, T. C. Hanks, D. B. Boore, A. McGarr, L. M. Baker, and A. G. Lindh : Sea96-A new predictive relation for earthquake ground motions in extensional tectonic regimes, *Seismo. Res. Lett.*, Vol.68, pp.190-198, 1997.
 - 29) Ruff, L. J. : Dynamic stress drop of recent earthquakes: Variations with subduction zones, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.154, pp.409-431, 1999.
 - 30) 佐藤智美 : 宮城県沖のスラブ内地震とプレ - ト境界地震の短周期レベルの推定, 日本地震工学会論文集, 2003(投稿中).
 - 31) 森川信之, 笹谷努, 藤原広行 : 経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, 27, 2002.
 - 32) Wessel, P. and W. H. F. Smith : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

(2003. 6. 30 受付)

RELATION OF STRESS DROPS OF SMALL AND MODERATE EARTHQUAKES TO FOCAL MECHANISM, FAULT TYPE, FOCAL DEPTHS, AND REGIONS

Toshimi SATOH

Stress drops of small and moderate earthquakes (focal depth \sim 60km) are estimated by a spectral inversion method using strong motion records in Japan. The stress drops of crustal earthquakes are dependent of focal depths. The stress drops of reverse-faulting earthquakes are a factor of 2 greater than those of strike-slip faulting earthquakes and the stress drops of strike-slip faulting earthquakes are a factor of 2 greater than those of normal-faulting earthquakes. These results are consistent with the crustal strength estimated from a frictional law. Stress drops of intraplate earthquakes have more scatter than those of interplate earthquakes, but are a factor of 2 greater than those of interplate earthquakes on the average.