

資料1

平成26年度 事後評価調査票

(D05) 福島第一事故を踏まえた震源極近傍の地震動評価の高度化

安全規制管理官（地震・津波安全対策担当） 付

安全技術管理官（地震・津波担当） 付

1. 研究概要（実施期間：平成 25 年度～平成 26 年度）

原子力規制委員会は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、平成 25 年 7 月に新規制基準及び「基準地震動及び耐震設計方針に係わる審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）を施行した。新規制基準では、内陸地殻内地震における震源が敷地に極めて近い場合の地震動評価に当たって、地表に変位を伴う断層全体を考慮するとともに震源極近傍での地震動の特徴に係る最新の科学的・技術的知見を踏まえること等が規定されている。また、審査ガイドでは、長大な活断層について、断層の長さ、地震発生層の厚さ、断層傾斜角等に関する最新の研究成果を十分考慮して、地震規模や震源断層モデルを設定することが求められている。本研究では、震源極近傍の地震動及び長大な内陸地殻内地震の地震動の評価手法に関して、動力学的知見を取り込むため、以下の項目の安全研究を実施した。

- (1) 震源極近傍の地震動評価（平成 25 年度～平成 26 年度）：震源極近傍の地震動評価手法を整備するため、強震動生成領域（以下「アスペリティ」という。）を地震発生層に設定した上で、地表までの断層全体の破壊を再現する動力学的破壊シミュレーションを実施した。そして、その解析結果を基にすべり時間関数等の特徴を分析するとともに、それらの結果を用いた強震動評価を行い、表層地盤の震源域による地震動解析への影響を評価した。
- (2) 長大な内陸地殻内地震の地震動評価（平成 25 年度～平成 26 年度）：長大な逆断層による内陸地殻内地震を対象とした断層モデルの設定方法を検討した。具体的には、アスペリティ等の応力不均質を考慮するとともに、アスペリティ位置を変えた動力学的断層破壊シミュレーション結果や既往地震データを基に断層モデルのパラメータ間の関係式を見直し、長大な逆断層における断層モデルのパラメータの設定手法を提案した。さらに、提案した設定手法に基づき断層モデルを設定して行った地震動評価結果と距離減衰式による評価結果等との比較により、提案した設定手法の妥当性を確認した。また、横ずれ断層と逆断層が混在した長大断層に関して、本研究で検討した設定手法を適用し、地震動の試算を実施した。

2. 研究期間を通じた主要成果

2.1 震源極近傍の地震動評価

内陸地殻内地震を対象とした断層モデルを用いた手法（以下「断層モデル法」という。）による地震動評価に際しては、活断層の長さや地震発生層の厚さを始め、各種断層パラメータ間の理論的又は経験的關係式に基づき、深さが数 km～15km 程度の地震発生層における震源断層のモデルが設定されている。一般的に、構造物等に被害を与える強震動は地震発生層の断層破壊に支配されると考えられるため、それよりも浅い地盤（以下「表層地盤」という。）から放出される地震波を考慮することがなかった。

しかし、新規制基準では、内陸地殻内地震について選定した検討用地震のうち震源が敷地に極めて近い場合の地震動評価に当たっては、「地表に変位を伴う断層全体を考慮した上で、震源モデルの形状及び位置の妥当性、敷地及びそこに設置する施設との位置関係、並びに震源特性パラメータの設定の妥当性について詳細に検討すること及び「震源の極近傍での地震動の特徴に係る最新の科学的・技術的知見を踏まえた上で、さらに十分な余裕を考慮して基準地震動を策定する」ことが規定されている。ただし、参考となる震源極近傍での地震観測記録は乏しいため、定量的評価を解析的に実施し、震源極近傍の地震動の特徴を理解することが望まれる。

本研究は、はじめに鉛直横ずれ断層と傾斜 60 度の逆断層を対象として、アスペリティを地震発生層に設定した上で、地表までの断層全体の破壊を再現する動学的断層破壊シミュレーションを実施した。次いで、その分析結果を用いた強震動評価を行い、表層地盤の震源域による地震動解析への影響を評価した。

2.1.1 横ずれ断層を対象とした震源極近傍の地震動評価

(1) 地震動と地表断層変位の統一断層モデルの構築

動学的断層モデルを構築するには断層面の形状と位置、断層面での境界条件となるべき摩擦構成則と初期応力分布、更に断層を含む媒質の構成関係と媒質内部のひずみ分布や自由表面との位置関係等の外部制約条件が必要である。ここでは、断層面の形状と位置に関して、長さ 25km、幅 18km の矩形断層面 (図 1 (a) と (b)) を与条件として設定する。摩擦構成則に関しては、臨界すべり量 D_c を 0.4m としたすべり弱化摩擦則 (図 1 (c)) を用いた。また、断層モデル法における特性化震源モデルと同じくアスペリティ領域と背景領域を設けて、領域別に異なる応力分布を設定した。さらに、アスペリティの面積と応力降下量は、入江他 (2010)¹⁾ の方法により下記の経験式 (1) 及び (2) を満たすように繰り返し計算で求めた (図 2)。

$$M_o = (S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7} \quad (1)$$

$$A = 2.46 \times 10^{17} \times (M_o \times 10^{-7})^{1/3} \quad (2)$$

ここに、(1) 式は入倉・三宅 (2001)²⁾ による地震モーメント M_o [Nm] と地震発生層中の断層破壊面積 S [km²] の経験式 ($M_o \geq 7.5 \times 10^{18}$ Nm)、(2) 式は壇他 (2001)³⁾ による短周期レベル A [Nm/s²] と地震モーメント M_o の経験式である。

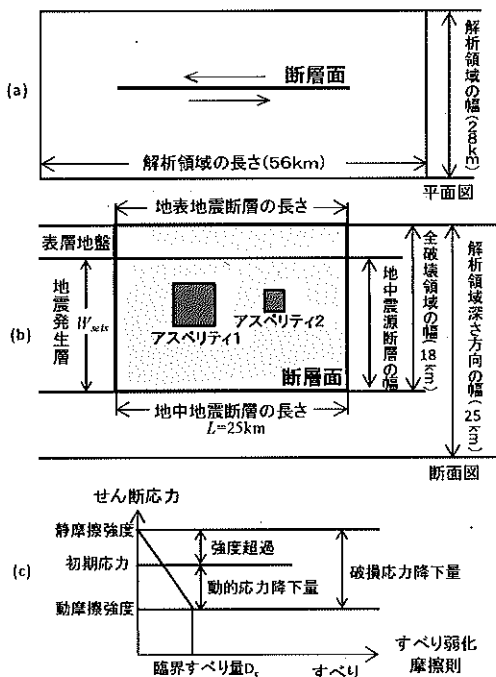


図 1 解析領域図 (a)、震源断層モデル (b) 及びすべり弱化摩擦則 (c) の概念図

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) the analysed region, (b) source model and (c) slip weakening friction law.

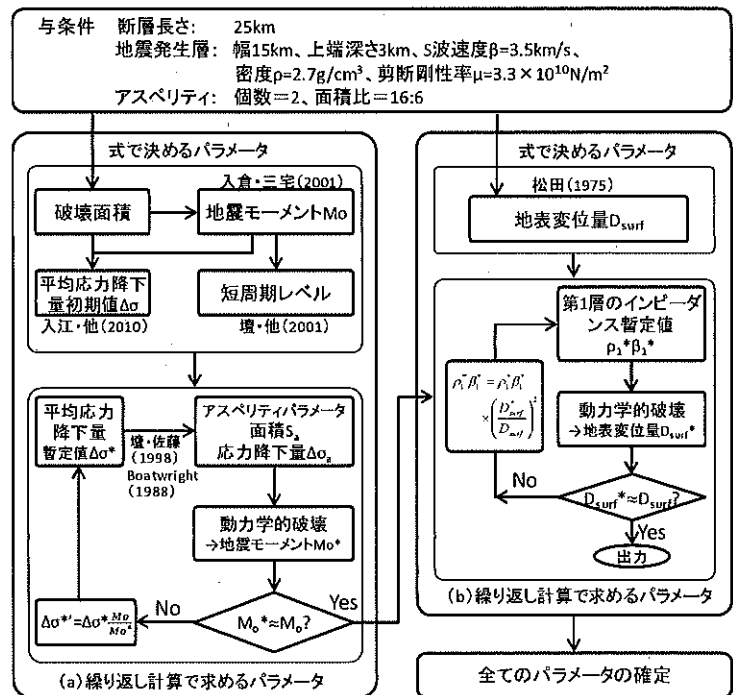


図 2 動学的断層モデルパラメータの設定手順
Fig. 2 Flowchart of parameter determination for the dynamic rupture model.

解析領域の地盤モデルは、厚さ 3km の表層地盤と厚さ 15km の地震発生層から構成される水平成層モデルとし、前者を更に 5 層に等分割した。地震発生層 (6 層目) の S 波速度を 3.5 km/s とし、2~5 層目の S 波速度は、地表地盤 (1 層目) から地震発生層へ段階的に増加するように内挿した。その他の地盤定数である P 波速度 α 及び密度 ρ は、図 3 に示す Ludwig et al. (1970)⁴⁾ の P 波速度と密度との関係及び S 波速度と密度との関係により、各層

のS波速度からそれぞれ読み取ることができる。よって、第1層のS波速度の値を与えれば、表層地盤の全ての物性値を決めることができる。

表層地盤の断層破壊による地震動解析への影響を評価するためには、前述のとおり地震発生層におけるアスペリティの面積や応力降下量のパラメータを求めるほか、表層地盤における断層のすべり量等のパラメータも算定する必要がある。ただし、表層地盤の断層破壊進展、特に地表の断層変位量は地盤物性に影響されるため、地表断層の観測事実と整合する地盤モデルの設定が重要である。入江他 (2010)¹⁾ は、松田 (1975)⁵⁾ の地震規模と断層長さの経験式及び地震規模と地表断層変位量の経験式を用いて関係式 (3) を地表断層変位量の拘束条件として提案した。

$$D_{surf} = 0.0794 L_{surf} \quad (3)$$

ここに、 D_{surf} [m] は地表断層の変位量、 L_{surf} [km] は地表断層の長さである。本研究では、入江他 (2010)¹⁾ の方法を用いて (3) 式を満たすように繰り返し計算を行い、表層地盤の物性値を決めた (図2 (b))。

図2に示す手順に従って、地震動評価に関する経験式 (1) 及び (2) 並びに地表断層変位量の関係式 (3) を同時に満たす物理モデルの全てのパラメータを算出することにより、地震動と地表断層変位の統一断層モデルを構築できる。ここで、入江他 (2010)¹⁾ を参照してアスペリティを地震発生層の中央に配置した「ケース1」及び不確かさを考慮してアスペリティを浅く配置した「ケース2」を設定した。2ケースのモデルの主なパラメータを表1に示す。これらに基づく動学的断層破壊シミュレーションで得られたすべり分布を図4 (上段) に示す。最大地表変位量は、両ケースとも、地表断層の長さの経験式による変位量とほぼ同じ値 (2m) となった。さらに、破壊領域内の全グリッド点で得られたすべり速度時間関数を代表的に数か所抜粋してケースごとに図4 (下段) に示す。同図から、アスペリティではすべり速度が大きくなる一方、表層地盤はすべり速度値が比較的小さく、継続時間が比較的に長くなることが明らかになった。

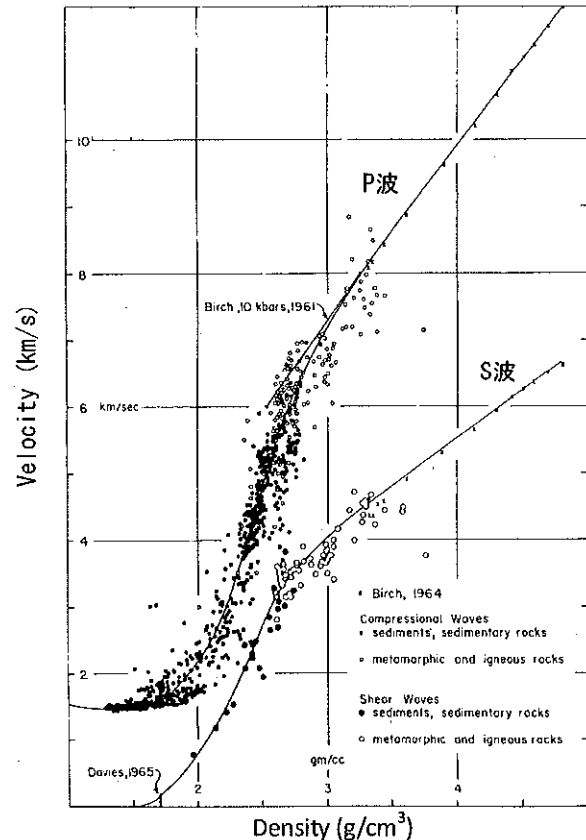


図3 P波速度と密度、S波速度と密度の関係
【Ludwig et al. (1970)⁴⁾ に加筆】

Fig. 3 Empirical relationships of density with P and S-wave velocities (Modified from Ludwig et al. (1970)).

表1 動学的断層モデルの主なパラメータ
Table 1 Parameters used for dynamic rupture simulations.

パラメータ	ケース 1	ケース 2
第1層S波速度 (km/s)	0.5	1.28
第6層S波速度 (km/s)	3.5	
臨界すべり量 (m)	0.4	
アスペリティ (共通)		
初期せん断応力 (MPa)	91.5	93.5
初期法線応力 (MPa)	120	120
強度超過 (MPa)	10	10
動的応力降下量 (MPa)	29	31
アスペリティ 1		
上端深さ (km)	8.5	5
水平位置 (km)	6.0~10	6.15~9.85
面積	4km×4km	3.7km×3.7km
アスペリティ 2		
上端深さ (km)	9.3	5
水平位置 (km)	15.8~18.2	15.85~18.15
面積	2.4km×2.4km	2.3km×2.3km
背景領域		
初期せん断応力 (MPa)	62.5	
初期法線応力 (MPa)	120	
強度超過 (MPa)	0.01	
動的応力降下量 (MPa)	0	

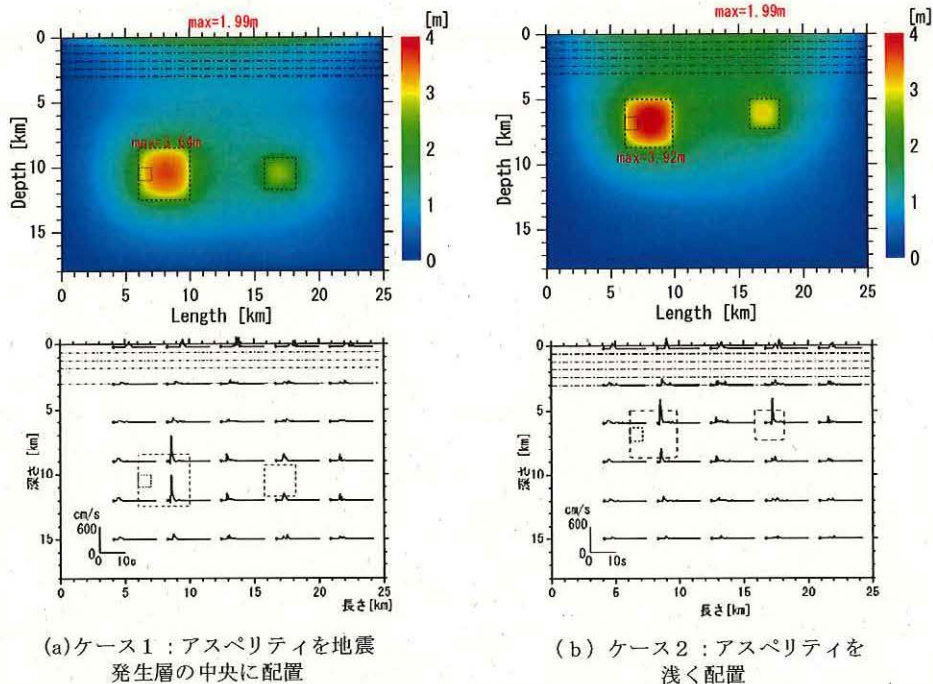


図 4 解析結果における最終すべり量（上段）及びすべり速度時間関数（下段、2Hz Lowpass 処理）分布
Fig. 4 Slip (upper) and slip rate function (lower: samples and low-passed at 2Hz) distribution on the fault plane.

(2) 波数積分法による震源極近傍の地震動評価

(1) では動力的破壊シミュレーションにより地表面各部の地震動の計算を行い、地中深くの震源域の破壊が生じた地震動と表層地盤の震源域の破壊が生じた地震動とが足し合わされた地震動を得た。ここでは動力的破壊シミュレーションで得られた断層面上のすべり速度時間関数を利用して、波数積分法により表層地盤と地震発生層におけるそれぞれの震源域の寄与分に分けて、断層近傍の評価地点における理論波形の解析を行った。また、理論波形を計算する際には、(1) の動力的断層破壊シミュレーションと同じ地下構造モデルを用いた。

表層地盤のすべり速度は、アスペリティと比べて小さいため表層地盤の震源域が寄与する地表面各部の地震動の割合はさほど大きくないが、地表断層の極近傍では局所的にある程度の大きさになる場合があると考えられる。そこで、図 5 に示す a、b 及び c 測線上において、地表断層のすぐ横から徐々に遠ざかっていく位置にそれぞれ 8 点、合計 24 点の評価地点を設けて、表層地盤のすべりが地表面部の地震動に及ぼす影響を調べた。図 6 には、断層中央 (Y=12.5km) に設けた測線 a 上の評価地点 a1、a5 及び a6 における、断層直交成分、平行成分及び鉛直成分 (以下、それぞれを「FN」、「FP」及び「UD」という。) の加速度時刻歴波形 (ケース 1) の比較を示した。図中の ALL は表層を含む断層全体、Fault は 3km 以深の地震発生層の震源域 (以下「深い震源域」という。)、及び Shallow Layer は 3km 以浅の表層地盤の震源域に起因する地震動である。

表 2 断層直交方向 (X 方向) の評価地点位置
Table 2 Locations of evaluation points in the fault-normal direction.

No.	log d	d (m)	差 (m)
1	1.69897	50.000	-
2	2.02769	106.583	56.583
3	2.35641	227.199	120.616
4	2.68513	484.313	257.113
5	3.01384	1032.391	548.079
6	3.34256	2200.710	1168.319
7	3.67128	4691.173	2490.463
8	4.00000	10000.000	5308.827

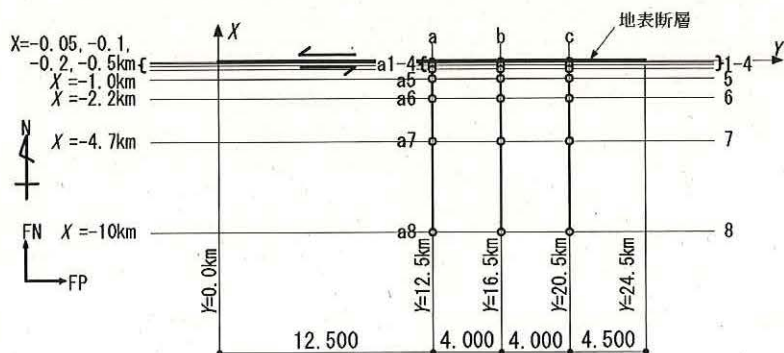


図 5 地表地震断層と評価地点の配置図 (平面)
Fig. 5 Surface trace and deployment of evaluation points.

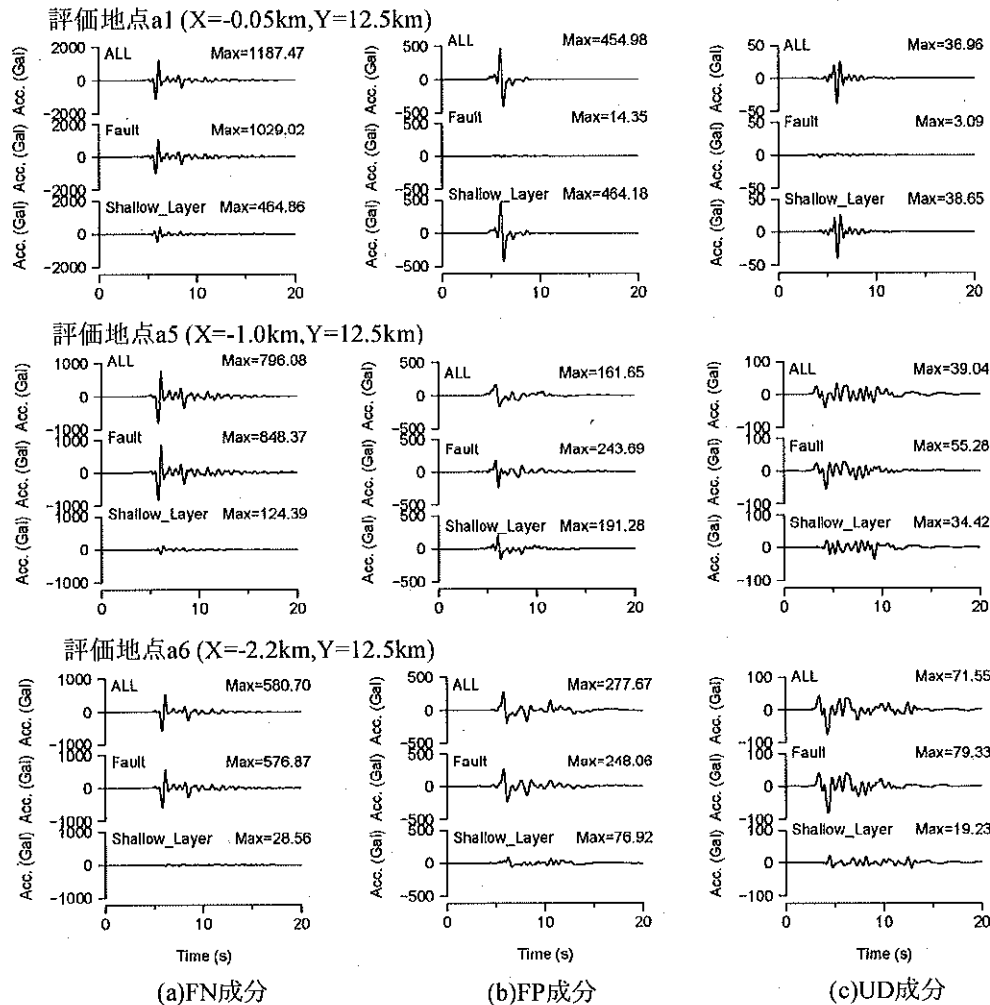


図6 ケース1による加速度時刻歴波形の比較

Fig. 6 Comparison of acceleration waveforms synthesized at evaluation points a1, a5 and a6 from the Case 1 model.

断層の極近傍では、FN成分の地震動が大きく、深い震源域に起因する成分が支配的であるが、表層地盤の震源域に起因する成分は2割弱程度ある。一方、FP成分については、深い震源域の寄与は小さく表層地盤の震源域の寄与がほとんどである。これは、断層直上付近で断層を挟む両側の地盤からの波が相殺されるために、深い震源域からの放射係数が小さいことで説明される。表層地盤の震源域が寄与する割合は、断層から離れるにつれ低下する。図7に示すように、断層から1km離れた地点a5におけるFN成分については、表層地盤の震源域の影響は、ほぼ無視できる程度に小さくなる。同地点のFP成分についてはいまだ表層の影響が大きい、更に離れたa6地点(X=-2.2km)では表層地盤の震源域の影響が無視できる程度に下がることが分かる。ケース2における地震動評価結果からも、同じ傾向が認められる。震源域別の寄与度計算の結果、断層極近傍において、FN成分においては地震発生層の地震動が全体の90%程度を占め、FP成分は表層地盤の震源域の地震動が全体のほぼ100%を占めることが分かった。また、断層から2km以上離れたと、表層地盤の震源域による影響は無視できる程度に下がることが分かる。上下成分はFP成分とほぼ同じ傾向にあるが、地震動の大きさは小さい。

2.1.2 逆断層を対象とした震源極近傍の地震動評価

逆断層タイプの地震は、横ずれ断層タイプの地震と比べて震源の放射特性などが異なることから、断層極近傍の地震動の傾向は横ずれ断層と同じであるとは限らない。本研究は、逆断層を対象として、2.1.1での横ずれ断層と同様に、地表地震断層と地中震源断層の経験的に整合した動力学的断層モデルを設定し、動力学的断層破壊シミュレーションで得られるすべり速度時間関数を用いて、波数積分法により表層部分の地震動による影響の検討を行った。

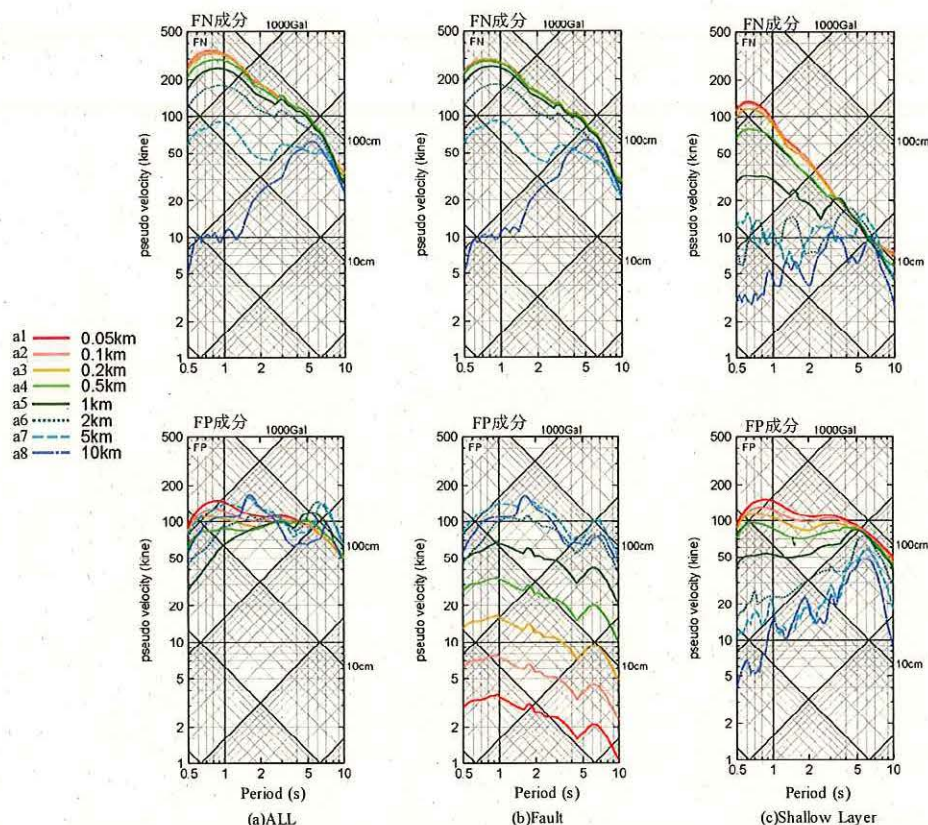


図7 ケース1による評価地点 (a1~a8) における水平成分の応答スペクトルの比較

Fig. 7 Comparison of FN and FP response spectra calculated at evaluation points a1- a8 from the Case 1 model.

(1) 地震動と地表断層変位の統一断層モデルの構築

ここでは、長さ 25km、傾斜角 60 度の逆断層を対象とし、断層上端が地表に達するモデルを設定した。深さ方向において、2.1.1 と同じく表層地盤を深さ 0~3 km、地震発生層を深さ 3~18 km の範囲に仮定した。さらに、2.1.1 で検討した「ケース 2」と同様にアスペリティの上端深さを 5 km とし、アスペリティ面積を調整して計算地震動を距離減衰法 (司・翠川, 1999) ⁶⁾ と整合させた断層モデルを設定した。その結果、アスペリティの大きさは 5.8 km×5.8 km と 3.4 km×3.4 km、動的応力降下量は 11 MPa、地表地盤の S 波速度は 1.55 km/s となった。動力学的断層破壊シミュレーションより破壊領域内の全グリッド点で得られたすべり速度時間関数を数か所抜粋して図 8 に示す。

(2) 波数積分法による震源極近傍の地震動評価

図 5 と同じ配置の各地点に対して、(1) で得られたすべり速度時間関数を用いて波数積分法に基づく理論波形を計算し、表層地盤と地震発生層におけるそれぞれの震源域による地震動の寄与度を調べた。図 9 に示すように、断層近傍評価地点における地震動は、FN 成分が最も大きい。FN 成分は、地表断層からの距離に関わらず深い震源域からの地震動が支配的であり、表層地盤の震源域からの地震動の影響は無視できる程度である。FP 成分では、地表断層からの距離が 0.2~1km の範囲で表層地盤からの地震動に比べて、おおむね深い震源域からの地震動が支配的となっている。UD 成分について、地表断層からの距離が 2km 以下では、表層地盤の震源域からの地震動が深い震源域からの地震動を部分的に上回っているが、地表断層から 2km 以上離れると、表層地盤の震源域による影響は無視できる程度に下がる。逆断層における震源極近傍の地震動は、横ずれ断層と異なり、表層地盤の震源域による地震動の影響が小さいと言える。

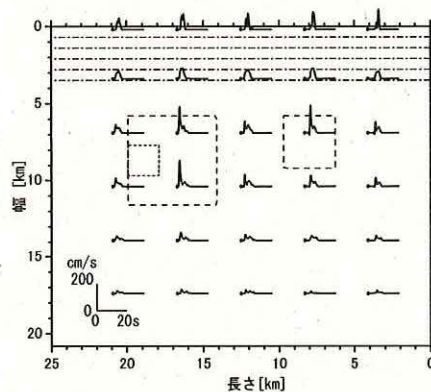


図8 すべり速度時間関数分布

Fig. 8 Surface trace and deployment of evaluation points.

2.2 長大断層による内陸地殻内地震の地震動評価

2.2.1 長大な逆断層による地震動評価

本研究では、長大な逆断層による内陸地殻内地震を対象とし、動学的解析結果や実際の地震のデータに基づき、特性化震源モデルにおける各パラメータの設定方法を提案することを目的とする。

(1) 平均動的応力降下量の算定式

断層モデル法による地震動評価に当たっては、従来、円形クラックの応力降下量の理論式 (Eshelby, 1957) ⁷⁾ 等からアスペリティを設定して断層モデルを構築してきた。一方、内陸地殻内地震のうち、その震源断層が極めて長い場合、従来の円形クラックの理論式等からのアスペリティ設定ができなくなる。これを受けて、地震調査研究推進本部では、既往研究結果を参照した平均応力降下量やアスペリティ面積の割合を固定した震源モデルの特性化手法を推奨した。ただし、こうして固定した両物理量は、それぞれが独立な研究結果であり、両者を合わせて用いることの妥当性又は短周期レベルと地震モーメントの経験式との整合性が検証されていない。

これに対して、壇他 (2011) ⁸⁾ は、(4) 式に示す平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ の算定式を用い、実際の地震のデータからアスペリティの動的応力降下量等を求めることにより、長大な横ずれ断層による地震の震源断層の特性化手法を提案した。

$$\Delta\sigma^{\#} = c \frac{M_0}{LW_{seis}^2} = c \frac{M_0}{S_{seis}W_{seis}} \quad (4)$$

ここに、 L は断層長さ、 W_{seis} は地震発生層における断層幅、 c は応力形状係数を示す。ただし、対象地震が鉛直横ずれ断層タイプのみであるため、入江他 (2013) ⁹⁾ は傾斜 60 度の逆断層を対象として、動学的断層モデルから以下の応力形状係数 c を求めた。

$$c = 0.45 + 0.7 \exp(-L/W_{seis}) \quad (5)$$

ここで、検討断層モデルにおけるアスペリティの位置は断層の左上端のみであり、本研究は、入江他 (2013) ⁹⁾ と同様の逆断層タイプの検討を、アスペリティの位置を変えて実施し、アスペリティ位置の違いによる応力形状係数 c への影響度を検討した。具体的には、動学的断層モデルの断層長さ L を 15、20、25、30、35、50、100 及び 300 km の 8 パターン、アスペリティの位置として、断層左上端、断層左下端、断層中心、断層中央上端及び断層中央下端の 4 パターンを設定し、断層幅 W_{seis} は、15 km の地震発生層厚さと断層傾斜角 60 度を想定して、 $W_{seis}=17.4$ km とした。さらに、断層長さが 50 km を超えた断層において、長さ 25 km ごとのセグメントに分割し、各セグメントにアスペリティを設けた動学的断層モデルを検討した。各モデルの動学的断層破壊シミュレーション結果から算出された応力形状係数 c の値と断層規模 (アスペクト比 L/W_{seis}) の関係を図 10 に示す。同図より、アスペリティの位置又はセグメント分割を考慮した場合においても、多少のばらつきはあるものの、応力形状係数 c は、(5) 式におおむね整合していることが分かる。

(2) 平均動的応力降下量及びアスペリティの動的応力降下量の算定

本研究では、既往研究のうち、地震モーメントが 2×10^{19} N・m 以上の長大断層を対象とした 13 個の地震データを収集し、マグニチュード、震源断層長さ、断層幅、断層面積、地震モーメント及び短周期レベルを調査した。調査した断層面積 S は地震発生層以浅の部分を含める断層全体の面積である。一方、(4) 式に用いた S_{seis} は地震発生

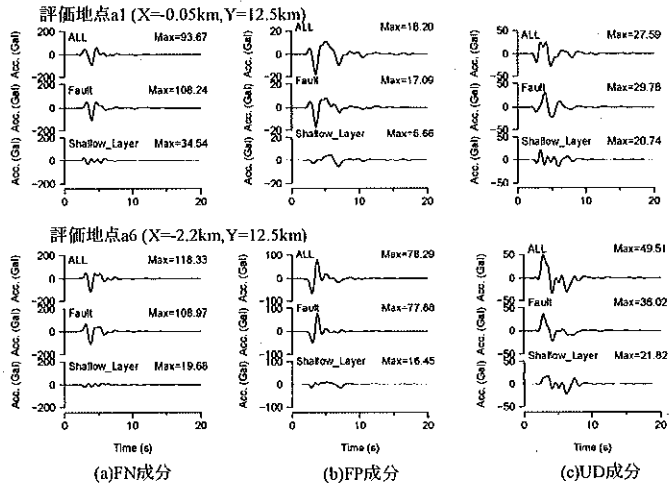


図9 加速度時刻歴波形の比較

Fig. 9 Comparison of acceleration waveforms synthesized at evaluation points a1 and a6.

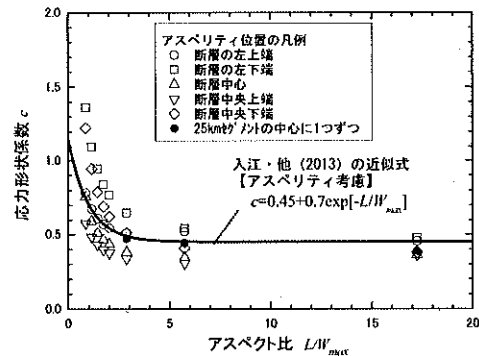


図10 断層のアスペクト比との比例定数 c の関係
Fig.10 Relationship between the fault aspect ratio (L/W_{seis}) and the coefficient c .

層に位置する部分の震源断層の面積であり、断層面積 S から、 S_{seis} を推定する必要がある。ここで、既往の事例（地震調査研究推進本部, 2005）¹⁰⁾を参考に地震発生層の上端深さを3 km、下端深さを18 kmとして、整理した断層面積 S_{all} から $S_{seis}=(15/18) S_{all}$ で推定した。また、震源断層の幅 W_{seis} については、個々の地震では不明なため、入江他（2013）⁹⁾による動学的断層破壊シミュレーションのモデルを参考に平均的な値として $W_{seis}=17$ kmと仮定した。こうして整理したデータから（4）と（5）式を用いて各地震の $\Delta\sigma^{\#}$ を算出した。その結果、 $\Delta\sigma^{\#}$ の相乗平均が2.4MPa、常用対数標準偏差が0.24となった。

アスペリティの面積 S_{asp} 及び動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ を算定するため、 $\Delta\sigma^{\#}=\Delta\sigma_{asp}^{\#} S_{asp}/S_{seis}$ の関係式、壇他（2001）³⁾の短周期レベル理論式及び（4）式の組合せにより、 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ を実際の地震の短周期レベル A と地震モーメント M_0 から以下の式で求めた。

$$\Delta\sigma_{asp}^{\#} = A^2 W_{seis} / (16\pi\beta_{seis}^4 c M_0) \quad (6)$$

ここに、 β_{seis} は地震発生層におけるS波速度（3.46 km/s）である。上式に $W_{seis}=17$ km、地震モーメント M_0 及び短周期レベル A を代入した結果、個々の地震のアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ が求まり、その相乗平均として $\Delta\sigma_{asp}^{\#}=18.7$ MPaが得られた。また、 $S_{asp}/S_{seis}=\Delta\sigma^{\#}/\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ より、アスペリティの面積比は約13%となっている。

（3）断層パラメータの算定手順

本研究では、逆断層タイプの長大活断層の地震による強震動予測のための断層パラメータの設定手順において、活断層の長さ L_{act} と傾斜角 δ 及び地震発生層の上端深さ dep_1 と下端深さ dep_2 を与条件とした。そして、（2）で述べた平均動的応力降下量及びアスペリティの動的応力降下量から、（4）と（5）式により地震モーメントを計算し、アスペリティや背景領域における各パラメータを算定した。図11に各パラメータの算定手順を示す。

（4）長大な逆断層による内陸地殻内地震の地震動試算例

図12に示した手順に従って、活断層長さが25 km、50 km、100 km、200 km、400 kmの五つの場合のアスペリティモデルのパラメータを算定し、円形クラック理論式を用いた従来の方法によって設定したパラメータと比較した結果を表3に示す。表3より、従来方法では、活断の長さが200 km、400 kmの二つの場合は、アスペリティ面積の割合が大きすぎて、アスペリティモデルが設定できなくなることが分かる。

表3 断層パラメータの設定例
Table 3 Examples of fault parameter estimation.

活断層長さ	断層面積	震源断層の面積	地震モーメント	規模	短周期レベル	平均応力降下量	アスペリティ面積	アスペリティ動的応力降下量	アスペリティすべり量	背景領域すべり量
L_{act} [km]	S [km ²]	S_{seis} [km ²]	M_0 [N·m]	M_w	A [N·m/s ²]	$\Delta\sigma$ [MPa]	S_{asp} [km ²]	$\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ [MPa]	D_{asp} [m]	D_{bck} [m]
円形クラックの式による方法										
25	520	433	1.04E+19	1.9	1.16E+19	2.8	80	15.2	1.49	0.58
50	1039	866	4.17E+19	2.3	1.84E+19	4.0	254	13.6	2.98	0.87
100	2078	1732	1.67E+20	2.7	2.92E+19	5.6	807	12.1	5.96	0.38
200	4157	3464	6.67E+20	3.1	4.63E+19	8.0	2563	10.8	11.92	-11.00
400	8314	6928	2.67E+21	3.6	7.35E+19	11.3	8138	-	-	-
本研究による方法										
25	520	433	2.93E+19	2.2	1.18E+19	2.4	56	18.7	4.18	1.78
50	1039	866	7.36E+19	2.5	1.67E+19	2.4	111	18.7	5.26	2.24
100	2078	1732	1.59E+20	2.7	2.37E+19	2.4	222	18.7	5.69	2.43
200	4157	3464	3.20E+20	2.9	3.35E+19	2.4	445	18.7	5.72	2.44
400	8314	6928	6.40E+20	3.1	4.73E+19	2.4	889	18.7	5.72	2.44

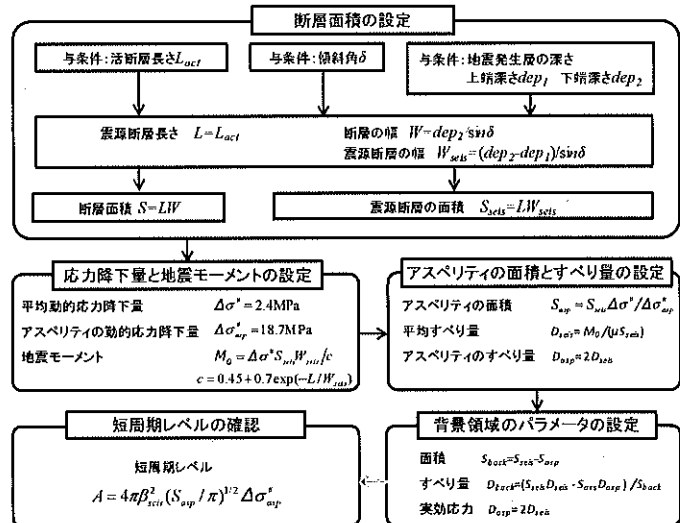


図11 長大な逆断層による内陸地殻内地震の地震動評価のための断層パラメータ算定手順
Fig. 11 Procedure of fault parameter estimation for ground motion evaluation from large inland crustal earthquakes.

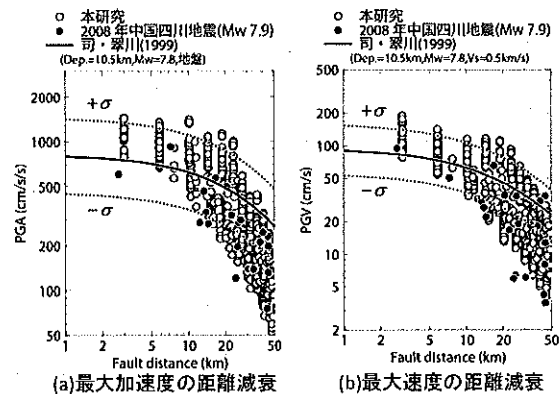


図12 断層長さが400kmのときの地震動の計算結果
Fig. 12 Ground motions calculated from the earthquake occurring on a 400km-long faults.

断層長さが 50km、100km、400km の 3 ケースに関して、表 3 に示す本研究の設定方法によって設定したアスペリティモデルを基に、統計的グリーン関数法により強震動を試算した。各断層モデルに対して、長さ 25 km ほどのセグメントに分割し、各セグメントにアスペリティを二個ずつ配置した。図 12 に 400km ケースにおける地震動の評価結果を示す。図 12 には、白丸は地震動の試算値、黒丸は断層長さが 279 km の 2008 年中国四川地震 (M_W 7.9) の観測値を示す。図 12 に示した試算地震動の最大加速度又は最大速度に対して、司・翠川 (1999) ⁶⁾ による距離減衰式がやや大きくなっているが、司・翠川 (1999) ⁶⁾ による距離減衰式の平均値±標準偏差の範囲とほぼ整合している。また、図より、試算強震動の最大加速度と最大速度は観測記録とも整合していることが分かる。

2.2.2 横ずれ断層と逆断層が混在した長大断層における地震動評価

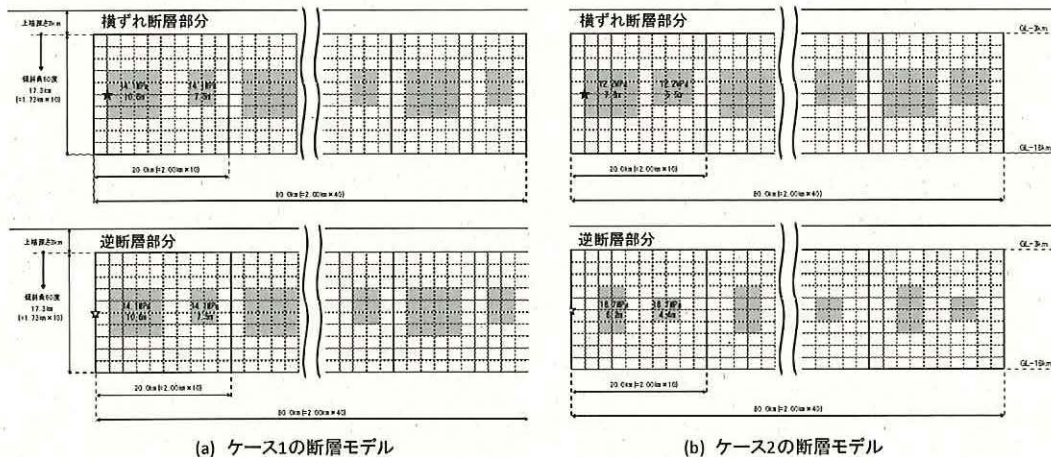


図 13 混在型長大断層による地震の断層モデル

Fig. 13 The fault rupture model for the earthquake on a fault combined with strike-slip and reverse fault segments.

横ずれ断層と逆断層が混在した長大断層における地震動の評価手法を検討するため、地震発生層の深さは 3 ~ 18km とした上で、傾斜角が 60 度、長さ 80km の横ずれ断層と長さ 80km の逆断層が混在した全長 160km の長大断層の断層モデルを設定し検討した。ここで、平均応力降下量に Fujii and Matsu'ura (2000) ¹¹⁾ による 3.1MPa を採用する方法を「ケース 1」として、更に横ずれ断層部分には壇他 (2011) ⁸⁾ によって提案されている手法を、逆断層部分には 2.2.1 で提案した手法を「ケース 2」として、2 ケースの断層モデル (図 13) を設定して、統計的グリーン関数法により強震動を試算した。その結果、両ケースとも、司・翠川 (1999) ⁶⁾ による最大加速度と最大速度の距離減衰式とおおむね整合する結果が得られた (図 14)。地震動評価の観点からみると、両設定手法とも妥当であるが、「ケース 2」は「ケース 1」と比べて物理モデルとして一貫性を有する長所がある。

3. まとめ

本研究では、動力学的知見に基づく震源極近傍の地震動評価手法を整備した。はじめに地震動と地表断層変位の統一断層モデルを構築し、地表までの断層全体の破壊を再現する動力学的破壊シミュレーションを実施した。次いで、シミュレーション結果のすべり速度時間関数を用いて波数積分法による地震動評価を行い、震源域別による地震動の寄与度を調べた。その結果、横ずれ断層の場合、断層極近傍において断層直交成分は地震発生層の震源域に、断層平行成分は表層地盤の震源域に支配されることが分かった。地震動に与える震源域の影響として、本検討の設定条件で断層から 2km 程度以上離れると、表層地盤の震源域による影響は無視できる程度に下がるこ

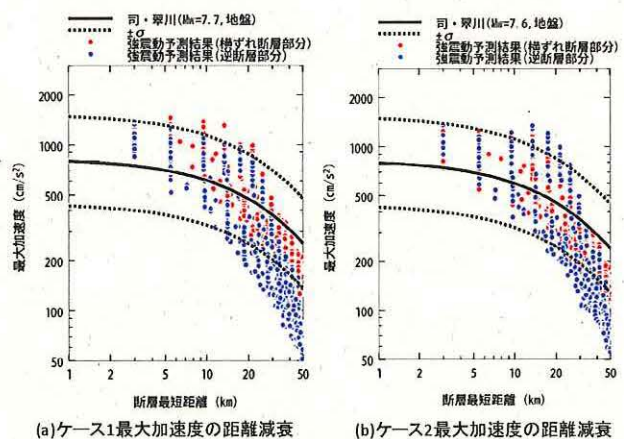


図 14 混在型長大断層の強震動の計算結果

Fig. 14 Ground motions calculated from the earthquake on a fault combined with strike-slip and reverse fault segments.

と、逆断層の場合は、おおむね地震発生層の震源域からの地震動が支配的であり、表層地盤の震源域からの影響が小さいことが示された。

また、長大な内陸地殻内地震を対象に、動力学的数値解析で得られた平均動的応力降下量の算定式を用いて、実際の地震のデータに基づき、平均動的応力降下量とアスペリティの動的応力降下量を求め、特性化震源モデルにおけるアスペリティの面積や応力降下量等のパラメータの設定方法を提案した。提案した方法を用いて長大断層の地震動を評価した結果、既往の距離減衰式や観測地震動と整合している地震動が得られ、本手法の妥当性が確認された。

4. 今後の展開

地震動評価に影響を及ぼすパラメータには、本研究で検討したアスペリティ位置のほか、強度超過、動的応力降下量又は臨界すべり量等も挙げられる。今後、これらのパラメータの検討により、震源極近傍の地震動評価の精度向上を図る。

5. 今後の成果の活用について

今後は、基準地震動策定に係わる強震動評価手法の精度向上等に関する各調査研究課題について、震源極近傍又は長大断層の地震動評価手法を提案するとともに、新規制基準適合性に係る審査マニュアルの整備に役立てる。

6. 成果の公表等

6.1 論文投稿

(A) 長大な逆断層による内陸地震の断層モデルのパラメータの設定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、80、707、pp.47-57、平成 27 年 1 月（査読あり）

6.2 学会発表

(B) 地震発生層より浅い部分から放出される地震動の定量的評価、第 14 回日本地震工学シンポジウム、平成 26 年 12 月

文献

- 1) 入江紀嘉・壇一男・生玉真也・入倉孝次郎、地中震源断層と地表地震断層の断層パラメータ間の経験的關係を拘束条件とした動力学的断層破壊モデルの構築—強震動予測のための運動学的断層モデルの高度化をめざして—、日本建築学会構造系論文集、657、1965-1974、2010
- 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、110、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、645、51-62、2001
- 4) Ludwig, W. J., J. E. Nafe and C. L. Drake, Seismic refraction, Maxwell, A. ed., The Sea, Vol. 4, Wiley Interscience, New York, pp. 53-84, 1970
- 5) 松田時彦、活断層から発生する地震の規模と周期について、地震、第 2 輯、第 28 巻、269-283、1975
- 6) 司宏俊・翠川三郎、断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、523、pp.63-70、1999
- 7) Eshelby, J. D., The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 241, 376-396, 1957
- 8) 壇一男・具典淑・入江紀嘉・アルズペイマサマン・石井やよい、長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用、日本建築学会構造系論文集、第 670 号、2041-2050、2011
- 9) 入江紀嘉・壇一男・鳥田晴彦・加瀬祐子、長大断層を対象とした逆断層型内陸地震の動的応力降下量の算定式の検討、日本地震工学会第 10 回年次大会梗概集、375-376、2013
- 10) 地震調査研究推進本部、「全国を概観した地震動予測地図」報告書(平成 17 年 3 月 23 日公表、平成 17 年 4 月 13 日更新、平成 17 年 12 月 14 日更新)、分冊 2、震源断層を特定した地震動予測地図の説明、2005
- 11) Fujii, Y. and M. Matsu'ura, Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, Pure and Applied Geophysics, 157, 2283-2302, 2000