断層モデルに基づく世界の大規模地殻内地震の
巨視的断層パラメータのスケーリング則SCALING RELATIONS OF OUTER FAULT PARAMETERS OF LARGE
CRUSTAL EARTHQUAKES USING FAULT MODELS IN THE WORLD佐藤 智美^{*1}

Toshimi SATOH

We derive scaling relations of outer fault parameters of crustal earthquakes with magnitude M_w of 6.5 to 7.9 using heterogeneous slip models in the world considering fault types. The fault area, length and average slip are modeled as proportional to M_0^b using seismic moment M_0 after the significance is proved by t-test if the regression coefficient b can be constrained to 1/2 or 1. The relations between subsurface fault parameters by fault models and surface fault parameters by surface rupture observations are also derived in order to estimate subsurface fault parameters from active fault survey.

Keywords: Scaling relation, Crustal earthquake, Outer fault parameter, Fault model, Surface rupture, Regression

スケーリング則, 地殻内地震, 巨視的断層パラメータ, 断層モデル, 地表断層, 回帰

1. はじめに

近年、超高層建物等の設計用地震動や、原子力発電所の基準地震動¹⁾の策定に、断層モデルに基づく手法が用いられるようになってきている。このような場合、断層モデルのパラメータ設定が重要となる。断層パラメータのうち、地震モーメント M_0 、断層面積 S 、長さ L 、幅 W 、平均すべり量 D_{av} などの巨視的断層パラメータは、基本的パラメータとして必要となる。

これらの実務で使われている地震本部²⁾の地殻内地震に対する強震動予測レシピでは、 $M_0=7.5 \times 10^{19} \sim 1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ ($M_w 6.5 \sim 7.4$) では、 W が一定となることから、 $S \propto M_0^{1/2}$ とした入倉・三宅³⁾の S - M_0 式が採用されている。この式のデータには、断層モデルに基づく S の他、余震分布などに基づくデータ⁴⁾も含まれている。 $M_0 \geq 1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ では、断層モデルに基づく平均すべり量 $D_{sub,av}$ が一定となる $S \propto M_0$ を仮定した、Murotani et al.⁵⁾の式が採用されている。しかし、 $S \propto M_0^{1/2}$ 、 $S \propto M_0$ の妥当性はデータからは示されていない。地表地震断層調査に基づく地表断層の平均すべり量 $D_{surf,av}$ や最大すべり量 $D_{surf,max}$ は、 L が大きくなっても一定とならないという指摘もある^{例えば 6)}。一方、 M_0 のべき乗の係数もパラメータとした回帰式も多数ある^{例えば 4), 7), 8)}が、この場合、強震動予測のための他のパラメータ設定が難しくなる。また、これらの文献で用いている断層サイズに関わるデータの多くが、余震分布から推定されている。

M_0 - L 関係については、松田⁹⁾のマグニチュード M - L 式と、武村¹⁰⁾の M - M_0 式から算出される式が、断層モデルに基づくデータと合うことが入倉・三宅³⁾で示されており、地震本部³⁾の強震動予測レシピでも採用されている。Miyakoshi et al.¹¹⁾でも、入倉・三宅³⁾の M_0 - S 式、 M_0 - L 式が、断層モデルに基づく 2013 年までの日本の地殻内地震¹²⁾のデータにも合うことを示している。1999 年までの世界の地殻

内地震のデータ⁷⁾とも比較されているが、多くは断層モデルに基づくものでなく断層面のトリミング^{例えば 13)}はなされていない。

断層モデルに基づく断層長さ L_{sub} と地表地震断層調査に基づく地表断層長さ L_{surf} の関係については、 L_{sub} が小さくなると $L_{surf} < L_{sub}$ となることが指摘されている^{例えば 7), 8), 14)}。また、地表に断層が生じる確率については、同じ M_w に対して、逆断層¹⁵⁾では断層タイプを分類しない場合¹⁶⁾や正断層¹⁶⁾に比べて小さいことが指摘されている¹⁵⁾。したがって、スケーリング則の検討には、断層パラメータ推定の際の手法の違いや、断層タイプ、地表断層の有無の違いを考慮する意義があると考えられる。以後、地表に断層が生じた地震を地表断層地震、生じなかった地震を伏在断層地震と呼ぶ。

そこで、本研究では、2019 年までの $M_w 6.5$ 以上の世界の地殻内地震の震源インバージョンに基づく不均質断層モデルを収集し、巨視的断層面をトリミング後、データセットを作成する。そして、初めに、 M_0 のべき乗の係数も含め回帰を行う。次に、このべき乗の係数を W 一定や $D_{sub,av}$ 一定と仮定した係数に置き換えることが適切であるかを t 検定で確認後、係数を置き換えて、最終的な回帰式を作成する。この際、断層タイプや、地表断層地震と伏在断層地震の違いも検討する。また、活断層調査結果などによる地表での断層パラメータから強震動予測に必要な断層パラメータの推定のために、地表地震断層調査に基づく巨視的断層パラメータのデータセットを作成し、断層モデルに基づくパラメータとの関係についても検討する。なお、スケーリング則に関する研究は多数あるため、主として、建築の実務で使用されているスケーリング則と比較検討する。

2. データ及び検討方法

大陸性地殻内で発生した世界の $M_w 6.5$ 以上、震源深さ 30km 以下

^{*1} 清水建設技術研究所 リサーチフェロー・博士 (工学) Research Fellow, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.

の地震で、震源インバージョンに基づく不均質断層モデルのデジタルデータが公開されている文献を収集した。デジタルデータは、論文の補助データや根拠データとして公開されているデータの他、Mail¹⁷⁾のHP(SRCMOD)¹⁸⁾、防災科学技術研究所¹⁹⁾のHP、浅野²⁰⁾のHPのデータである。そのうち、以下の条件のデータは除いた。

- ・SRCMOD¹⁸⁾での断層モデルのデジタルデータが、論文と明らかに異なるものや論文中の最適モデルでないデータ。
- ・同じ地震に対して第一著者が同じ論文が2つある場合は、古い方の論文のデータ。
- ・地震発生直後の予備的地表地震断層調査結果に基づいて断層面が設定されていると考えられるもの。

次に、巨視的断層面をSomerville et al.¹³⁾に準拠した方法で、トリミングした。すなわち、断層長さ方向、幅方向の要素断層のすべり量の平均値が0.3倍以下の行、列をトリミングする方法を用いた。ただし、複数断層があり、断層幅が異なる場合や、傾斜角が大きく変化して同一行の断層深さが異なる場合には、上記に加え、同じ断層深さの要素断層でのすべり量の平均値を用いてトリミングした。また、深さ方向に要素断層の幅が大きくなる場合には、最表層の要素断層の幅を基準とし、深い側の要素断層は断層幅で重みづけしたすべり量の平均値を用いてトリミングした。

断層モデルがある地震について、地表地震断層調査に基づく地表断層長さ L_{surf} 、地表の平均すべり量 D_{surf_av} 、最大すべり量 D_{surf_max} の文献調査を行い、地表断層地震と伏在断層地震に分類した。さらに、以下の2つの条件で断層モデルの取捨選択を行った。地表断層地震にもかかわらず、トリミング後の断層モデルの最表層の要素断層の中心深さが3km以上の断層モデルデータは除いた。ただし、幅方向に要素分割がない1906年San Francisco地震の断層モデル^{21),22)}は除いていない。また、地表断層地震で、最表層の要素断層の最大すべり量 D_{sub_max} が D_{surf_max} の半分以下の断層モデルは、地表でのすべり量の推定精度が低いと考えて除いた。この2つの条件で除いたデータの多くは、遠地の記録のみから推定された断層モデルであった。

本研究で対象とする $7.18 \times 10^{18} \leq M_0 \leq 9.00 \times 10^{20} \text{Nm}$ (Mw6.5~7.9)の43個の地震の断層のパラメータと文献^{21)~168)}をTable 1に示す。震源インバージョンのデジタルデータは公開されていないが、宮腰・他¹²⁾で推定している日本の地殻内地震の断層パラメータも追加した。同じ地震で、断層モデルが複数ある場合には、表中の対数平均値を検討に用いる。Wは、Sを L_{sub} で除した値である。なお、断層幅の最大値も求めたが、深部がデコルマ状となる低には、角逆断層が含まれている2008年Wenchuan地震で43.7kmと、W=36.1kmとやや異なる以外は差が小さかった。断層パラメータに基づき、横ずれ断層(SS)、逆断層(R)、正断層(N)に分類した。逆断層と正断層については、断層モデルの平均値の傾斜角も示した。地表地震断層調査に基づく地表断層パラメータは、2016年までの地震の地表地震断層統一データベース(SURE)であるBaize et al.¹⁴²⁾を優先して用い、ない場合は、Wesnowsky⁶⁾を用いた。これらの文献にない、他の地震については表中の文献の平均値を用いた。断層の大半が海域にあり、地表断層の有無が不明の場合は、seaと表示している。 D_{surf_av} 、 D_{surf_max} は、ネットスリップであるが、ない場合は横ずれ断層では水平変位、逆断層、正断層では鉛直変位を用いている。

3. 巨視的断層パラメータのスケーリング則

Fig.1には、本研究の全データの M_0 -S関係と、既往の M_0 -S式の比較を示す。Mw7.0以上の地震のみ、地震名を示した。データの M_0 -S関係は、入倉・三宅³⁾、Murotani et al.⁵⁾の M_0 -S式とほぼ合っている。2001年Bhuj地震は規模が大きいのに関わらず、伏在断層地震である。この地震は安定大陸地域(SCR)の地震であり、安定大陸地域の地震の断層パラメータは地震活動が活発な地域と異なることが指摘されている^{例え 169)}。Fig.2には、 M_0 -W関係を地殻厚さ^{170),171)}で色分けして示す。地殻厚さが65km以上の2001年Kunlun地震と2015年Murghab地震は、他の横ずれ断層と比べWが大きいの。この2地震と2008年Yutian地震と2008年Zhongba地震は、地殻厚さが55km以上のヒマラヤ・チベット領域で発生している。本研究では、この4地震と2001年Bhuj地震を除く38地震で検討を行う。

Fig.3には、38地震の M_0 -W関係を示す。横ずれ断層は、 M_0 が 10^{19}Nm (Mw6.6)以下を除きほぼ一定値となっており、平均値は16.4kmで、入倉・三宅³⁾とほぼ同じである。逆断層は、横ずれ断層よりWが大きく、これは、傾斜角が小さいためと考えられる。そこで、Fig.4には逆断層と正断層のWに、傾斜角(Table 1)のsineを掛けた値を示した。 $M_0 > 1 \times 10^{19} \text{Nm}$ の11の逆断層の平均値は15.5kmであり、横ずれ断層のWと差は小さく、地震発生層の厚さに対応するものと考えられる。地殻厚さが厚いヒマラヤ・チベット領域でも地震発生層厚は大きく変動し20km程度の領域もあるため¹⁷²⁾、地殻厚さによる違いは小さかったと考えられる。なお、 $M_0 \leq 1 \times 10^{19} \text{Nm}$ のデータを含めて平均をとると標準偏差は大きくなることから、以下の回帰式でもWがほぼ一定となる $M_0 > 1 \times 10^{19} \text{Nm}$ を対象とする。

Fig.3から、逆断層は、Mw7.3以下では、1地震を除き伏在断層地震であり、地震発生層の幅に達しても地表に断層が生じない場合が多いことがわかる。地表に断層が生じる確率は、逆断層では横ずれ断層や正断層に比べて小さいことが指摘されており^{15),16)}、Mw6.5では、全断層では70%¹⁶⁾、逆断層では35%¹⁵⁾、正断層では81%¹⁶⁾となる。本研究の結果は、この研究と定性的に対応する。

Fig.5には、 M_0 -S関係を示す。逆断層のSは、横ずれ断層より大きい傾向があるため、断層タイプを分けない場合と、分けた場合で回帰式を作成した。Wのスケーリング則と同様に $M_0 \leq 1 \times 10^{19} \text{Nm}$ のデータを除き、Murotani et al.⁵⁾の第3ステージの最小値である $M_0 = 1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ 以下のデータを用いて、 $S \propto M_0^b$ として、bもパラメータとして回帰分析を行った。その結果、bは、断層タイプを分けない場合は0.50、横ずれ断層と逆断層に分けた場合は0.53であり、有意水準5%のt検定によりb=1/2とすることが適切であることが確認された。そこで、 $S [\text{km}^2] \propto M_0^{1/2} [\text{Nm}]$ として、断層タイプを分けない場合と、層別因子で分けた場合で回帰した結果、(1)~(3)式が得られた。

$$S = 1.66 \times 10^{-7} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.52, \text{全断層}) \quad (1)$$

$$S = 1.57 \times 10^{-7} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.51, \text{横ずれ断層}) \quad (2)$$

$$S = 1.80 \times 10^{-7} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.47, \text{逆断層}) \quad (3)$$

ここで、 σ は常用対数の標準偏差であり、 10^σ が平均に対する比となる。(1)~(3)式の差は小さいが、逆断層が横ずれ断層よりSがやや大きい。また、(1)式のSは入倉・三宅の式³⁾の1.24倍であるが、標準偏差内の違いである。

次に、 $1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ 以上のデータで、 $S \propto M_0^b$ として回帰分析を行

Table 1 Earthquakes and fault parameters

Earthquake		M ₀ [Nm]	M _W	Source inversion									Surface rupture observation				
				Reference		L _{sub} [km]	W [km]	S [km ²]	D _{sub_av} [m]	D _{sub_max} [m]	Used data*	Fault type	Reference	L _{surf} [km]	D _{surf_max} [m]	D _{surf_av} [m]	Surface rupture
No.	Name			Paper	Data												
1	1906 San Francisco	7.70E+20	7.9	21)	18)	480	10.0	4800	5.1	8.6	G	SS	21)	470	8.6	—	○
				22)	18)	460	12.0	5520	4.4	9.7	T,G						
				Average		470	11.0	5147	4.8	9.1	—						
2	1945 Mikawa	1.00E+19	6.6	23)	18)	25	15.0	375	0.9	2.1	S	R30	6)	4	2.1	1.3	×
3	1948 Fukui	1.58E+19	6.7	24)	18)	54	18.0	972	0.3	1.5	S,T,G	SS	138)	0	0.0	0.0	×
4	1974 Izu Hanto-oki	7.60E+18	6.5	25)	18)	25	9.0	225	1.1	3.0	S	SS	139)	8	0.5	—	○
5	1978 Tabas	1.32E+20	7.3	26)	18)	86	36.0	3078	0.4	1.4	S,T	R25	140),141)	0	0.0	0.0	×
6	1979 Imperial Valley	7.23E+18	6.5	27)	18)	55	10.0	550	0.5	1.3	S	SS	142)	36	0.7	0.3	○
				28)	18)	36	10.4	374	0.7	1.8	S,T						
				29)	18)	26	9.5	247	0.6	3.6	S						
				Average		37	10.0	371	0.6	2.0	—						
				30)	18)	29	13.9	407	0.9	3.8	T						
7	1985 (October) Nahanni	8.43E+18	6.6	30)	18)	35	16.5	573	0.8	5.2	T	R35	143)	0	0.0	0.0	×
8	1985 (December) Nahanni	1.52E+19	6.7	30)	18)	35	16.5	573	0.8	5.2	T	R25	143)	0	0.0	0.0	×
9	1987 Superstition Hills	7.18E+18	6.5	31)	18)	25	10.0	250	1.1	3.1	G	SS	142)	25	0.8	0.5	○
				32)	18)	19	8.1	153	0.5	2.7	S						
				Average		22	9.0	196	0.8	2.9	—						
10	1989 Loma Prieta	2.69E+19	6.9	29)	18)	37	14.0	518	1.9	8.9	S	SS	144)	0	0.0	0.0	×
				33)	18)	35	14.0	490	1.5	4.0	S						
				34)	18)	38	14.9	565	1.5	4.3	S						
				35)	18)	38	14.0	532	1.4	5.9	S						
				36)	18)	40	17.5	700	1.2	5.1	S						
				Average		38	14.8	557	1.5	5.4	—						
11	1992 Landers	1.06E+20	7.3	37)	18)	55	10.0	550	3.6	6.7	S,G	SS	142)	85	6.0	1.7	○
				29)	18)	70	13.5	945	2.2	6.8	S						
				38)	18)	80	15.0	1200	2.0	5.1	S						
				39)	18)	69	15.0	1035	2.7	7.9	S,T,G,F						
				40)	18)	84	15.0	1260	1.5	6.0	S						
				Average		71	13.5	960	2.3	6.4	—						
12	1994 Northridge	1.18E+19	6.6	29)	18)	15	16.0	240	1.2	4.1	S	R42	145)	0	0.0	0.0	×
				41)	18)	30	32.4	973	0.7	2.3	G						
				42)	18)	20	23.1	462	0.8	2.4	S						
				43)	18)	14	22.0	308	1.0	3.3	T						
				44)	18)	18	22.3	401	1.1	3.2	S,T,G						
				45)	18)	20	24.9	498	1.0	2.8	G						
13	1995 Hyogo-ken Nanbu	2.43E+19	6.9	Average		19	23.0	434	0.9	3.0	—	SS	146)	11	2.5	—	○
				46)	18)	52	15.2	790	1.3	2.9	S,G						
				47)	18)	60	20.0	1200	0.7	3.5	S,T,G						
				48)	18)	47	19.0	884	0.7	1.8	S						
				49)	18)	72	16.0	1152	0.8	2.8	G						
				50)	18)	64	20.5	1303	0.8	4.0	S						
				51)	18)	56	16.0	896	0.9	2.5	S,T,G						
				29)	18)	55	18.5	1008	0.8	3.7	S						
14	1997 Zirkuh	7.35E+19	7.2	Average		57	17.8	1018	0.8	2.9	—	SS	147)	125	2.3	—	○
				52)	52)	128	20.6	2644	1.5	5.3	G						
				53)	18)	136	13.9	1900	1.3	3.8	G						
15	1999 Izmit	2.88E+20	7.6	Average		132	16.9	2242	1.4	4.5	—	SS	142)	145	5.2	1.1	○
				54)	18)	150	18.0	2700	2.4	8.0	S,T,G						
				55)	18)	133	18.2	2413	2.1	5.6	G						
				56)	18)	141	18.0	2538	3.1	6.8	S						
				57)	18)	147	33.6	4939	1.5	7.2	T						
				58)	18)	120	23.3	2796	1.7	8.5	S						
				59)	18)	86	21.6	1853	2.4	6.3	S,T						
				60)	18)	135	16.0	2160	2.5	5.5	G,F						
16	1999 Chi-Chi	3.38E+20	7.6	Average		128	20.6	2649	2.2	6.8	—	R28	6)	72	16.4	4.0	○
				61)	18)	95	40.0	3800	3.9	19.7	S,T,G						
				62)	18)	112	35.0	3920	3.6	25.8	S,T,G						
				63)	18)	79	25.0	1965	4.8	11.2	G						
17	1999 Hector Mine	5.98E+19	7.1	Average		94	32.7	3082	4.0	17.8	—	SS	142)	48	5.3	2.5	○
				64)	18)	77	16.5	1262	1.5	6.2	S,G						
				65)	18)	106	24.0	2544	0.9	5.4	S,G,F						
				66)	18)	72	18.0	1296	1.4	5.9	T,G						
				67)	18)	84	13.3	1120	1.8	7.0	S,T,G						
18	1999 Duzce	6.65E+19	7.1	Average		84	17.6	1469	1.3	6.1	—	SS	6)	40	5.0	2.1	○
				68)	18)	32	12.6	397	1.1	5.1	S						
				69)	18)	30	25.0	750	2.5	8.0	S,T						
19	2000 Tottori-ken Seibu	1.19E+19	6.7	Average		31	17.7	546	1.7	6.4	—	SS	148)	6	0.4	—	×
				70)	12)	34	18.0	612	0.9	4.4	S						
				71)	18)	30	18.0	540	1.0	3.8	S						
				72)	18)	32	20.0	640	0.6	3.2	S						
				73)	18)	38	18.0	684	1.3	3.6	S,G						
20	2001 Bhuj	3.43E+20	7.6	Average		33	18.4	613	0.9	3.6	—	R56	149)	8	0.3	—	×
				74)	18)	65	40.0	2600	3.6	13.9	T,G						
				75)	18)	36	32.5	1170	2.5	12.4	T						
				57)	18)	125	40.0	5000	1.9	9.7	T						
				76)	18)	60	50.0	3000	2.2	8.7	T,G						
21	2001 Kunlun	5.90E+20	7.8	Average		65	40.2	2599	2.5	11.0	—	SS	6)	421	8.7	3.3	○
77)	18)	420	36.6	15389	1.4	6.5	T										
78)	20)	293	18.0	5265	4.3	10.6	S,G										
22	2002 Denali	7.48E+20	7.8	79)	18)	326	15.0	4891	3.2	10.3	S,G	SS	142)	226	8.8	4.8	○
				80)	80)	350	16.7	5841	3.9	10.2	G,F						
				Average		322	16.5	5318	3.8	10.4	—						
23	2003 Boumerdes	2.01E+19	6.8	81)	18)	64	32.0	2048	1.2	3.5	S,G	R47	(sea)	—	—	—	×

Table 1 Earthquakes and fault parameters (continued)

Earthquake		M ₀ [Nm]	M _w	Source inversion									Surface rupture observation										
				Reference		L _{sub}	W	S	D _{sub_av}	D _{sub_max}	Used data*	Fault type	Reference	L _{surf} [km]	D _{surf_max} [m]	D _{surf_av} [m]	Surface rupture						
No.	Name			Paper	Data	[km]	[km]	[km ²]	[m]	[m]													
24	2003 Bam	9.31E+18	6.6	82)	18)	25	20.0	500	0.5	1.6	S,T	SS	150)	~0	0.2	—	×						
25	2004 Niigata-ken Chuestu	8.60E+18	6.6	83)	20)	28	18.0	504	0.7	3.1	S	R47	151)	1	0.2	—	×						
26	2005 Fukuoka-ken Seiho-oki	9.20E+18	6.6	84)	20)	26	18.0	468	0.8	3.2	S	SS	(sea)	—	—	—	×						
27	2005 Kashmir	2.94E+20	7.6	85)	18)	99	36.0	3564	2.9	6.4	T	R29	152),153)	73	7.1	5.0	○						
				86)	18)	72	31.5	2268	3.3	10.2	T												
28	2007 Noto Hanto	1.28E+19	6.7	Average		84	33.7	2843	3.1	8.1	—	R60	154)	—	—	—	×						
				87)	12)	22	20.0	440	0.8	2.8	S												
				88)	20)	30	16.0	480	1.1	5.1	S,G												
29	2007 Niigata-ken Chuetsu-oki	1.08E+19	6.6	Average		26	17.9	460	0.9	3.7	—	R42	(sea)	—	—	—	×						
				89)	12)	30	24.0	720	0.9	2.7	S												
				90)	12)	30	18.0	540	0.6	2.7	S												
				91)	12)	25	17.0	425	0.5	2.1	S												
				92)	12)	28	18.0	504	1.2	3.3	S												
				93)	18)	30	19.3	573	0.5	2.6	S,G												
30	2008 Yutian	5.43E+19	7.1	Average		28	19.1	544	0.7	2.6	—	N52	155)	31	3.3	—	○						
94)	18)	34	13.6	456	3.0	5.1	G																
31	2008 Wenchuan	9.00E+20	7.9	95)	18)	508	52.7	26762	1.2	14.1	G							R38	156)~158)	285	10.0	—	○
				96)	18)	430	24.0	10320	2.9	16.0	T,G												
				97)	18)	310	60.0	18600	4.0	8.0	T												
				98)	98)	354	28.8	10186	2.7	7.5	G												
				99)	99)	332	28.0	9303	3.1	10.8	G												
32	2008 Iwate-Miyagi Nairiku	2.58E+19	6.9	Average		380	36.1	13724	2.6	10.8	—	R45	142),159)	20	6.0	—	○						
				100)	18)	30	20.0	600	1.2	5.0	T												
				101)	20)	38	18.0	684	1.2	5.9	S												
				102)	12)	40	18.0	720	1.4	6.2	S												
				103)	18)	43	17.4	741	1.8	6.4	S												
33	2008 Zhongba	1.39E+19	6.7	Average		37	18.3	684	1.4	5.9	—	N41	160)	0	0.0	0.0	×						
94)	18)	53	17.9	950	0.4	1.5	G																
104)	18)	32	16.0	512	2.9	5.9	G																
34	2010 Haiti	4.39E+19	7.0	105)	18)	102	17.4	1770	0.7	3.9	T,G	SS	161)	0	0.0	0.0	×						
				106)	18)	39	17.5	683	2.0	3.7	T												
				Average		50	16.9	852	1.6	4.4	—												
35	2010 El Mayor-Cucupah	7.60E+19	7.2	107)	107)	136	16.0	2176	1.1	5.1	G	SS	142)	55	4.0	2.0	○						
				108)	18)	132	18.0	2376	1.3	7.0	T,G												
				Average		134	17.0	2274	1.2	6.0	—												
36	2010 Darfield	3.64E+19	7.0	109)	109)	49	7.7	379	2.2	8.3	T,G,F	SS	162)	30	5.3	2.5	○						
				110)	18)	65	9.8	638	2.6	8.8	G												
				111)	111)	85	10.3	877	2.1	7.6	G												
				Average		65	9.2	597	2.3	8.2	—												
37	2011 Fukushima-ken Hamadori	1.20E+19	6.7	112)	12)	40	16.0	640	0.5	2.5	S	N65	163)	30	2.0	—	○						
				113)	20)	40	14.0	560	0.8	3.4	S												
				Average		40	15.0	599	0.7	2.9	—												
38	2011 Van	6.27E+19	7.1	114)	18)	30	16.7	502	2.7	9.3	T,G,F	R48	164)	8	0.2	0.1	×						
				115)	18)	68	33.0	2244	0.6	5.8	T												
				116)	18)	30	40.0	1200	1.4	3.4	T												
				117)	18)	75	30.0	2250	0.7	4.6	S,T,G												
				118)	18)	50	44.4	2219	0.7	4.2	T												
				119)	18)	77	38.0	2928	0.6	3.1	G												
				120)	120)	24	18.0	432	2.2	5.7	G												
				Average		46	29.6	1358	1.1	4.9	—												
39	2013 Balochistan	5.59E+20	7.8	57)	18)	218	16.7	3652	5.9	18.6	T	SS	121),122), 165)~167)	200	12.8	6.7	○						
				121)	18)	232	32.0	7424	2.5	7.5	T,G												
				122)	122)	177	16.0	2832	4.4	12.9	T												
				Average		208	20.5	4250	4.0	12.2	—												
40	2015 Murghab	7.60E+19	7.2	123)	18)	74	27.5	2042	1.2	3.5	G,T	SS	123)	35	4.3	—	○						
41	2016 Kumamoto	4.51E+19	7.0	124)	124)	66	17.0	1120	1.3	7.4	S,G	SS	142)	34	2.2	0.7	○						
				125)	125)	74	20.4	1517	1.9	5.6	G												
				126)	126)	55	23.9	1322	1.6	11.2	S,G												
				57)	18)	75	23.2	1740	0.8	3.4	T												
				127)	18)	44	18.0	792	2.2	5.7	T												
				128)	18)	66	16.6	1098	1.5	4.7	S,T,G												
				129)	19)	53	24.2	1283	1.3	3.8	S												
				130)	20)	42	18.0	756	1.9	5.1	S												
				131)	131)	40	15.1	606	2.4	6.9	G												
				Average		56	19.3	1080	1.6	5.6	—												
42	2016 Norcia	9.60E+18	6.6	132)	132)	24	12.0	288	0.5	2.6	S	N44	142)	22	2.2	0.4	○						
				133)	18)	24	8.0	192	1.0	2.9	S												
				Average		24	9.8	235	0.7	2.7	—												
43	2019 Ridgecrest	4.39E+19	7.0	134)	134)	83	25.0	2062	0.7	3.7	S,T,G	SS	168)	50	5.2	—	○						
				135)	18)	85	10.5	884	1.9	8.1	G												
				136)	18)	58	19.6	1129	1.4	4.8	G												
				137)	137)	112	18.6	2081	0.9	3.9	G												
				Average		82	17.6	1438	1.1	4.9	—												

であるが、標準偏差の範囲内の違いである。なお、(1)~(3)式と(4)~(6)式の境界ではほぼ同じとなるように、Fig.5には、 $1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ 以上のデータの最小値の $2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ まで(1)~(3)式を表示している。この境界 M_0 については、後述の $D_{\text{sub_av}}$ の検討も含めて考察する。

Fig.6には、 M_0 - L_{sub} 関係を示す。初めに、 $1 \times 10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ のデータで、 $L_{\text{sub}} \propto M_0^b$ として回帰分析を行ない、 b は、断層タイプを分けない場合は 0.46、分けた場合は 0.42 であり、同様の t 検定により $b=1/2$ (例えば 173) が適切であることを確認した。そこで、 $L_{\text{sub}} [\text{km}] \propto M_0^{1/2} [\text{Nm}]$ として、回帰した結果、(7)~(9)式が得られた。

$$L_{\text{sub}} = 9.00 \times 10^{-9} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.42, \text{全断層}) \quad (7)$$

$$L_{\text{sub}} = 9.64 \times 10^{-9} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.45, \text{横ずれ断層}) \quad (8)$$

$$L_{\text{sub}} = 7.80 \times 10^{-9} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.32, \text{逆断層}) \quad (9)$$

(7)~(9)式の差は小さく、武村¹⁰⁾の式と松田⁹⁾の式から得られる M_0 - L 式より、(7)式は M_w で 1.25 倍程度大きい、標準偏差の範囲内である。本研究の方がやや大きい原因として松田⁹⁾の M - L 式の L には L_{surf} と L_{sub} が混在しており、後述のように、規模が小さいと $L_{\text{surf}} < L_{\text{sub}}$ となるためと考えられる。

$M_0 \geq 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ のデータで、 $L_{\text{sub}} \propto M_0^b$ として回帰分析を行い、

b は、断層タイプを分けない場合は 1.34、分けた場合は 1.27 であり、 t 検定により $b=1$ 、 $b=3/2$ のいずれでも有意という結果となった。 $S \propto M_0$ で、 W が一定であれば、 $L_{\text{sub}} \propto M_0$ の方が適当と考えられるため、 $L_{\text{sub}} [\text{km}] \propto M_0 [\text{Nm}]$ として、回帰した結果、(10)~(12)式が得られた。

$$L_{\text{sub}} = 3.94 \times 10^{-19} M_0 \quad (10^\sigma = 1.29, \text{全断層}) \quad (10)$$

$$L_{\text{sub}} = 4.57 \times 10^{-19} M_0 \quad (10^\sigma = 1.19, \text{横ずれ断層}) \quad (11)$$

$$L_{\text{sub}} = 3.23 \times 10^{-19} M_0 \quad (10^\sigma = 1.32, \text{逆断層}) \quad (12)$$

(7)~(12)式の L_{sub} は、逆断層の方が横ずれ断層より短く、 W とは逆の特徴であるため、 S の断層タイプの違いは W ほど大きくない。

M_w 6.5 程度以上の巨視的断層パラメータのスケーリング則に関しては、 L モデル、 W モデルが提案されており¹⁷⁴⁾、武村¹⁷⁵⁾などでレビューされているように様々な研究がなされている。本研究の M_0 - W 、 M_0 - S 、 M_0 - L_{sub} 関係は、 $M_0 < 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ で L モデル、 $M_0 \geq 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ で W モデルが成り立つことを示唆している。

Fig.7に L_{surf} - L_{sub} 関係を示す。伏在断層地震は、海域の地震は除き、 L_{surf} は 0 か 0 に近いため、図の下端の $L_{\text{surf}} = 7 \text{km}$ に仮に示した。 L_{surf} が 60km 程度以上では $L_{\text{sub}} \approx L_{\text{surf}}$ であるが、短くなるほど $L_{\text{sub}} > L_{\text{surf}}$ の特徴が明瞭になっている。そこで、地表断層地震を用いて、沖野・隈元¹⁴⁾と同様に、楕円断層を仮定した(13)式により L_0 を算出した。

$$L_{\text{sub}} = (L_{\text{surf}}^2 + L_0^2)^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.40, \text{全地表断層地震}) \quad (13)$$

その結果、 $L_0 = 31 \text{km}$ が得られた。地震発生層厚のほぼ 2 倍である。楕円の中心深さが $W/2$ のモデルで、 $W = 16 \text{km}$ の鉛直断層の場合、楕円率が 0.85 に相当する。沖野・隈元¹⁴⁾が、このモデル化で $W = 15 \text{km}$

Fig.1 M_0 - S relations of all data in this study and previous equations

Fig.4 and M_0 - $W \times \sin(\text{dip angle})$ relations of data for reverse and normal fault

Fig.2 M_0 - W relations (below) of all data in this study and previous equations

Fig.5 M_0 - S relations of data and equations by study and equations by previous studies

Fig.3 M_0 - W relations of data in this study

Fig.6 M_0 - L_{sub} relations of data and equations by this study and equations by previous studies

の横ずれ断層に対して推定した値が、 $L_0=30.4\text{km}$ 、楕円率が 0.87 と本研究とほぼ同じであり、Fig.7 に示したように本研究の式とほぼ重なっている。沖野・隈元¹⁴⁾は、Stirling et al.⁷⁾のデータから選択した 1927~1990 年のデータを用いて、逆断層と横ずれ断層に対する式を作成しているが、本研究と共通の地震は 1 地震のみである。また、上述のように Stirling et al.⁷⁾のデータの多くは余震分布に基づいており、断層モデルに基づく本研究のデータとは異なるが、違いは小さかった。なお、Wells and Coppersmith⁴⁾も、余震分布に基づく L_{sub} と L_{surf} の関係を示し、 L_{sub} は L_{surf} の約 0.75 倍であるが M_w が大きくなるほど L_{sub} が L_{surf} に近づくことを示している。Wells and Coppersmith⁴⁾のデータを用いた Leonard⁸⁾の式も Fig.7 に示しているが、直線回帰のため L_{surf} が 30km 程度以下の L_{sub} が本研究より小さくなっている。

Fig.8 には、 M_0 - L_{surf} 関係を示す。(7)、(10)式の M_0 - L_{sub} 関係と(13)式の L_{surf} - L_{sub} 式から M_0 - L_{surf} 式を算出した。したがって、規模が小さくなると L_{surf} が L_{sub} に比べて小さくなる。上述のように、 $M_w 6.5$ では、地表断層地震となるのは 70%¹⁶⁾と推定されており、この規模に近い断層では断層の一部あるいは全部が地表に生じないためである。一方、松田⁹⁾の式と武村¹⁰⁾の式に基づく M_0 - L 式の L は、本研究の式の L_{surf} に比べて $M_w 7.0$ 程度以下で長く、他の M_0 - L 式^{173),175),176)}の L は $M_w 6.7$ 程度以下で長い。これは、既往の式の L には、 L_{sub} と L_{surf} が混在しているためと考えられる。したがって、 L_{surf} が短い断層に、既往の M_0 - L 式に L_{surf} を当てはめると、 M_0 が過小評価になる。

Fig.9 には、 M_0 - $D_{\text{sub_av}}$ 関係を示す。 $1 \times 10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ では

$S \propto M_0^{0.5}$ であるため、 $D_{\text{sub_av}}[\text{m}] \propto M_0^{1/2}[\text{Nm}]$ 、 $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20} \text{Nm}$ では $S \propto M_0$ であるため、 $D_{\text{sub_av}} = \text{constant}[\text{m}]$ と仮定して回帰分析を行い、(14)式、(15)式が得られた。

$$D_{\text{sub_av}} = 1.92 \times 10^{-10} M_0^{1/2} \quad (10^\sigma = 1.53, \text{全断層}) \quad (14)$$

$$D_{\text{sub_av}} = 3.39 \quad (10^\sigma = 1.27, \text{全断層}) \quad (15)$$

Fig.9 でわかるように、両式はほぼ繋がっている。なお、 $D_{\text{sub_av}} \propto M_0^b$ として回帰を行った結果、 $1 \times 10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ では $D_{\text{sub_av}} \propto M_0^{1/2}$ は棄却されている。

Fig.10 には、 L_{sub} - $D_{\text{sub_av}}$ 関係を示す。本研究の M_0 - L_{sub} 関係式と M_0 - $D_{\text{sub_av}}$ 関係式から算出した L_{sub} - $D_{\text{sub_av}}$ 関係式も示している。2つの回帰式が交差するのは $L_{\text{sub}} = 159\text{km}$ である。上述のように L_{sub} が 30km 程度以上では $L_{\text{sub}} \approx L_{\text{surf}}$ で、これは W の約 10 倍である。また、上述のように L_{sub} が 30km 程度以上では $L_{\text{sub}} \approx L_{\text{surf}}$ であり、この 10 倍は、Scholz¹⁷⁷⁾の L モデルと W モデルの境界に対応する。 $L_{\text{sub}} = 159\text{km}$ と $W = 16\text{km}$ を用いて(1)式で算出される M_0 は $2.3 \times 10^{20} \text{Nm}$ 、(7)式で算出される M_0 は $3.1 \times 10^{20} \text{Nm}$ であり、 $2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ はその間にある。本研究では、対数で直線の 2つの回帰式でモデル化しており、また、 M_0 が $1.32 \times 10^{20} \text{Nm}$ と $2.88 \times 10^{20} \text{Nm}$ の間にデータがないが、実際には L モデルから W モデルには徐々に移行するものと推測される。

Fig.11 左には、地表断層地震の $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_max}}$ 関係を示す。 $D_{\text{surf_max}}$ が 6m 程度以上では両者はほぼ同じであるが、6m 程度以下では $D_{\text{surf_max}}$ が $D_{\text{sub_max}}$ より小さい。地表断層地震は、規模が大きい場合は、地表付近ですべり量が最大となるが、規模が小さくなると地中

Fig.7 L_{surf} - L_{sub} relations of data and the equation for surface rupture faults by this study and equations by previous studies. L_{surf} of buried faults are plotted at 7 km.

Fig.8 M_0 - L_{surf} relations of data and the equation by this study and M_0 - L equations by previous studies. L_{surf} of buried faults are plotted at 7 km.

Fig.9 M_0 - $D_{\text{sub_av}}$ relations of data and the equation by this study and equations by previous studies

Fig.10 L_{sub} - $D_{\text{sub_av}}$ relations of data and the equation by this study

Fig.11 $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_max}}$ relations (left) and $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_av}}$ relations (right) of data and the equations by this study

ですべり量が最大となる傾向を意味している。Fig.7と同様の分布であることから、(13)式と同様に(16)式でモデル化した。

$$D_{\text{sub_max}} = (D_{\text{surf_max}}^2 + D_{\text{max}0}^2)^{1/2} \quad (10^\circ = 1.21, \text{全地表断層地震}) \quad (16)$$

その結果、 $D_{\text{max}0} = 2.8\text{m}$ が得られた。Fig.11 右には、地表断層地震の $D_{\text{surf_max}} - D_{\text{sub_av}}$ 関係を示す。Fig.11 左の $D_{\text{surf_max}} - D_{\text{sub_max}}$ 関係と類似していることから、(17)式でモデル化し、定数 c を求めた。

$$D_{\text{sub_av}} = c(D_{\text{surf_max}}^2 + D_{\text{max}0}^2)^{1/2} \quad (10^\circ = 1.36, \text{全地表断層地震}) \quad (17)$$

その結果 $c = 0.29$ が得られた。 $D_{\text{surf_max}}$ が大きいと $D_{\text{surf_max}}$ は $D_{\text{sub_av}}$ の $1/c = 3.45$ 倍となることを意味する。Murotani et al.⁵⁾は、 $D_{\text{surf_max}}$ は $D_{\text{sub_av}}$ の 2~3 倍であることを示しており、 $D_{\text{surf_max}}$ が 2m 程度以上では Murotani et al.⁵⁾との違いは小さいが、2m 程度以上で本研究の $D_{\text{sub_av}}$ がやや大きくなる。(13)、(16)式、(17)式により、活断層データなどの地表での情報から、地中の断層パラメータが概算できる。

4. まとめ

2019 年までの Mw6.5 以上、震源深さ 30km 以下、地殻厚さ 55km 以下の大陸性地殻内地震の不均質断層モデルの断層面をトリミング後、巨視的断層パラメータのスケーリング則を回帰式に基づき作成した。また、地表地震断層調査に基づく巨視的断層パラメータとの関係についても検討した。その結果を以下にまとめる。

- ・横ずれ断層の W 、逆断層の W に傾斜角の $\sin$ を乗じた値は、 $M_0 > 1.0 \times 10^{19}\text{Nm}$ (Mw6.6) でほぼ一定の 16km 前後となった。逆断層は、一定となっても、Mw7.3 まで伏在断層地震がほとんどであり、横ずれ断層に比べ地表に断層が出る確率が少ないことを確認した。

- ・ $S \propto M_0^b$ として回帰した b の値を t 検定し、 $1.0 \times 10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20}\text{Nm}$ では W が一定となる $S \propto M_0^{1/2}$ 、 $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20}\text{Nm}$ では $D_{\text{sub_av}}$ が一定となる $S \propto M_0$ が適切であることを示した。 b を固定して回帰した結果、 S が入倉・三宅³⁾の式の 1.24 倍、Murotani et al.⁵⁾の式の 0.89 倍となったが、標準偏差の範囲内の差であった。

- ・ L_{sub} についても、 t 検定で b の妥当性を確認後、 $2.88 \times 10^{20}\text{Nm}$ を境界に $L_{\text{sub}} \propto M_0^{1/2}$ 、 $L_{\text{sub}} \propto M_0$ として回帰式を作成した。その結果、松田⁹⁾の $L - M$ 式と武村¹⁰⁾の $M_0 - M$ 式に基づく L より、 L_{sub} の方が Mw7 で 1.25 倍となったが、標準偏差の範囲内の差であった。松田⁹⁾の L には、 L_{sub} と L_{surf} が混在していることが違いの一因として考えられる。

- ・ S は、逆断層の方が横ずれ断層よりやや大きく、 L_{sub} は逆の傾向があったが、違いは小さかった。

- ・ L_{surf} が 60km 程度以上で $L_{\text{sub}} > L_{\text{surf}}$ となることから、沖野・隈元¹⁴⁾の楕円断層モデルに基づき、 L_{sub} と L_{surf} の回帰式を作成した。その結果、沖野・隈元¹⁴⁾の楕円の中心深さが $W/2$ で $W = 15\text{km}$ の場合の横ずれ断層の式とほぼ同じ式が得られた。

- ・本研究の $M_0 - L_{\text{sub}}$ 式と $L_{\text{surf}} - L_{\text{sub}}$ 式から、 $M_0 - L_{\text{surf}}$ 式を算出した。 L_{sub} と L_{surf} が混在している既往の $M_0 - L$ 式の L に比べ、Mw6.7~7.0 程度以下で L_{surf} が小さくなる式が得られた。したがって、 L_{surf} が短い地震に既存の $M - L$ 式に L_{surf} を当てはめると M_0 が過小評価となる。

- ・ $D_{\text{sub_av}}$ は、 $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20}\text{Nm}$ ではほぼ一定となった。

- ・ $D_{\text{surf_max}}$ が大きい場合は、 $D_{\text{sub_max}}$ と $D_{\text{surf_max}}$ はほぼ同じであり、地表付近ですべり量が最大となるが、 $D_{\text{surf_max}}$ が 6m 程度以下では $D_{\text{sub_max}} > D_{\text{surf_max}}$ となり、地中ですべり量が最大となる特徴があった。そこで、 $D_{\text{surf_max}} - D_{\text{sub_max}}$ 及び $D_{\text{surf_max}} - D_{\text{sub_av}}$ についても、 $L_{\text{surf}} - L_{\text{sub}}$ と同様のモデル化で回帰式を作成した。

謝辞

本研究では、Global CMT 解を用いました。一部の図の作成には GMT¹⁷⁸⁾を用いました。査読者の方々には建設的なご意見を頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Nuclear Regulation Authority: Outline of new regulatory requirements for light water nuclear power plants (Earthquakes and Tsunamis), 2013. 3, <https://www.nsr.go.jp/data/000067118.pdf> (accessed 2020. 8. 11)
- 2) Headquarter for Earthquake Research Promotion: Predicting strong ground motions for identified earthquake scenarios (RECIPI), 2020. 3, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf (in Japanese) (accessed 2020. 8. 11)
- 3) Irikura, K. and Miyake, H.: Prediction of strong ground motions for scenario earthquakes, Journal of Geography, Vol. 110, pp. 849-875, 2001. 12 (in Japanese)
- 4) Wells, D. L. and Coppersmith, K. J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 84, pp. 974-1002, 1994. 8
- 5) Murotani, S. et al.: Scaling relations of source parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault systems, Pure Appl. Geophys., Vol. 172, pp. 1371-1381, 2015. 5
- 6) Wesnousky, S. G.: Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 98, pp. 1609-1632, 2008. 8
- 7) Stirling, M. et al.: Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 92, pp. 812-830, 2002. 3
- 8) Leonard, M.: Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 100, pp. 1971-1988, 2010. 10
- 9) Matsuda, T.: Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault, Zisin, Vol. 28, pp. 269-283, 1975. 10 (in Japanese)
- 10) Takemura, M.: Magnitude-seismic moment relations for the shallow earthquakes in and around Japan, Zisin, Vol. 43, pp. 257-265, 1990. 6 (in Japanese)
- 11) Miyakoshi, K. et al.: Scaling relationships of source parameters of inland crustal earthquakes in tectonically active region, Pure Appl. Geophys., Vol. 177, pp. 1917-1929, 2019. 4
- 12) Miyakoshi, K. et al.: Re-examination of scaling relationships of source parameters of the inland crustal earthquakes in Japan based on the waveform inversion of strong motion data, Journal of JAEE, Vol. 15, No. 7, pp. 141-156, 2015. 12 (in Japanese)
- 13) Somerville, P. G. et al.: 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., Vol. 70, pp. 59-80. 1999. 1
- 14) Okino, N. and Kumamoto, K.: Relationship between fault length and magnitude assuming ellipsoidal fault planes rupture areas, Active Fault Research, Vol. 26, pp. 29-36, 2006. 6 (in Japanese)
- 15) Moss, R. E. S. and Ross, Z. E.: Probabilistic Fault displacement hazard analysis for reverse faults ? Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 101, pp. 1542-1553, 2011. 8
- 16) Youngs, R. R. et al.: A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), Earthquake Spectra, Vol. 19, pp. 191-219, 2003. 2
- 17) Mai, P. M. and Thingbaijam, K. K. S.: SRCMOD: An online database of finite - fault rupture models, Seism. Res. Lett., Vol. 85, Vol. 1348-1357, 2014. 11
- 18) Mai, P. M.: Earthquake source model database, <http://equake->

- rc.info/sremod/ (accessed 2020. 8. 7)
- 19) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: Source rupture model web page, https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/inversion/inversion_main_en.shtml (accessed 2020. 8. 7)
 - 20) Asano, K.: Source models by kinematic waveform inversion, http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/source_model.html (accessed 2020. 8. 7)
 - 21) Thatcher, W. et al.: Resolution of fault slip along the 470-km long rupture of the great 1906 San Francisco earthquake and its implications, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, pp. 5353-5367, 1997. 3
 - 22) Song, S. et al.: A unified source model for the 1906 San Francisco earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 98, pp. 823-831, 2008. 4
 - 23) Kikuchi, M. et al.: Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, *Earth Planets Space*, Vol. 55, pp. 159-172, 2003. 4
 - 24) Ichinose, G. A. et al.: Rupture process of the 1948 Fukui earthquake (M 7.1) from the joint inversion of seismic waveform and geodetic data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, B05301, 2005. 5
 - 25) Takeo, M.: Fault heterogeneity of inland earthquakes in Japan. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Vol. 65, pp. 541-569, 1990. 12
 - 26) Hartzell, S. and Mendoza, C.: Application of an iterative least-squares wave-form inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 305-331, 1991. 4
 - 27) Olson, A. and Apsel, R.: Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 72, pp.1969-2001, 1982. 12
 - 28) Hartzell, S. H. and Heaton, T. H.: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 1553-1583, 1983. 12
 - 29) Zeng, Y. and Anderson, J.: Evaluation of numerical procedures for simulating near-fault long-period ground motions using Zeng method, *Peer Utilities Program, Report No.2000/01*, pp. 1-26, 2000. 1
 - 30) Hartzell, S. et al.: Rupture histories of eastern North American earthquakes, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 1703-1724, 1994
 - 31) Larsen, S. et al.: Global positioning system measurements of deformations associated with the 1987 Superstition Hills earthquake - Evidence for conjugate faulting, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 4885-4902, 1992. 4
 - 32) Wald, D. J. et al.: Rupture process of the 1987 Superstition Hills earthquake from the inversion of strong-motion data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 1079-1098, 1990. 10
 - 33) Emolo, A., and Zollo, A.: Kinematic source parameters for the 1989 Loma Prieta earthquake from the nonlinear inversion of accelerograms, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 981-994, 2005. 6
 - 34) Steidl, J. H. et al.: Rupture history of the 1989 Loma-Prieta, California, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 1573-1602, 1991. 10
 - 35) Beroza, G. C.: Near-source modeling of the Loma-Prieta earthquake - Evidence for heterogeneous slip and implications for earthquake hazard, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 1603-1621, 1991. 10
 - 36) Wald, D. J. et al.: Rupture model of the 1989 Loma-Prieta earthquake from the inversion of strong-motion and broad-band teleseismic data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 1540-1572, 1991. 10
 - 37) Hernandez, B. et al.: Contribution of radar interferometry to a two-step inversion of the kinematic process of the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, pp. 13083-13099, 1999. 6
 - 38) Cotton, F. and Campillo, M.: Frequency-domain inversion of strong motions - application to the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, pp. 3961-3975, 1995. 3
 - 39) Wald, D. J. and Heaton, T. H.: Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 84, pp. 668-691, 1994. 6
 - 40) Cohee, B. P. and Beroza, G. C.: Slip distribution of the 1992 Landers earthquake and its implications for earthquake source mechanics, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 84, pp. 692-712, 1994. 6
 - 41) Shen, Z. K. et al.: Northridge earthquake rupture models based on the global positioning system measurements, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. S37-S48, 1996. 2
 - 42) Hartzell, S. et al.: The 1994 Northridge, California, earthquake: investigation of rupture velocity, risetime, and high-frequency radiation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, pp. 20091-20108, 1996. 9
 - 43) Dreger, D. S.: Empirical Greens-function study of the January 17, 1994 Northridge, California earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, pp. 2633-2636, 1994. 12
 - 44) Wald, D. J. et al.: The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. S49-S70, 1996. 2
 - 45) Hudnut, K. W. et al.: Co-seismic displacements of the 1994 Northridge, California, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. 19-36, 1996. 2
 - 46) Horikawa, H. et al.: Simultaneous inversion of geodetic and strong-motion data for the source process of the Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake, *J. Phys. Earth*, Vol. 44, pp. 455-471, 1996
 - 47) Wald, D. J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, Vol. 44, pp. 489-503, 1996
 - 48) Ide, S. et al.: Source process of the 1995 Kobe earthquake: Determination of spatio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 86, pp.547-566, 1996. 6
 - 49) Koketsu, K. et al.: A fault model of the 1995 Kobe earthquake derived from the GPS data on the Akashi Kaikyo bridge and other datasets, *Earth Planets Space*, Vol. 50, pp. 803-811, 1998. 10
 - 50) Sekiguchi, H. et al.: Source inversion for estimating the continuous slip distribution on a fault-introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults, *Geophys. J. Int.*, Vol. 150, pp. 377-391, 2002. 8
 - 51) Yoshida, S. et al.: Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, *J. Phys. Earth*, Vol. 44, pp. 437-454, 1996
 - 52) Marchandon, M. et al.: Fault geometry and slip distribution at depth of the 1997 Mw 7.2 Zirkuh earthquake: Contribution of near - field displacement data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 123, pp. 1904-1924, 2018. 2
 - 53) Sudhaus, H. and Jónsson, S.: Source model for the 1997 Zirkuh earthquake (Mw=7.2) in Iran derived from JERS and ERS InSAR observations, *Geophys. J. Int.*, Vol. 185, pp. 676-692, 2011. 5
 - 54) Delouis, B. et al.: Joint inversion of InSAR, GPS, teleseismic, and strong-motion data for the spatial and temporal distribution of earthquake slip: Application to the 1999 Izmit mainshock, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 278-299, 2002. 2
 - 55) Reilinger, R. E. et al.: Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey earthquake, *Science*, Vol. 289, pp. 1519-1524, 2000. 9
 - 56) Bouchon, M. et al.: Space and time evolution of rupture and faulting during the 1999 Izmit (Turkey) earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 256-266, 2002. 2
 - 57) Hayes, G. P.: The finite, kinematic rupture properties of great-sized earthquakes since 1990, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 468, pp. 94-100, 2017. 6
 - 58) Sekiguchi, H. and Iwata, T.: Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 300-311, 2002. 2
 - 59) Yagi, Y. and Kikuchi, M.: Source rupture process of the Kocaeli, Turkey,

- earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 1969-1972. 2000. 7
- 60) Çakır, Z. et al.: Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observation, *Geophys. J. Int.*, Vol. 155, pp. 93-110, 2003. 10
- 61) Ma, K. F. et al.: Spatial slip distribution of the September 20, 1999, Chi-Chi, Taiwan, earthquake (Mw 7.6) - Inverted from teleseismic data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 3417-3420, 2000. 10
- 62) Chi, W. C. et al.: Finite-source modeling of the 1999 Taiwan (Chi-Chi) earthquake derived from a dense strong-motion network, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 91, pp. 1144-1157, 2001. 10
- 63) Johnson, K. M. et al.: Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, pp. 2285-2288, 2001. 1
- 64) Jonsson, S. et al.: Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1377-1389, 2002. 8
- 65) Kaverina, A. et al.: The combined inversion of seismic and geodetic data for the source process of the 16 October 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1266-1280, 2002. 8
- 66) Salichon, J. et al.: Slip history of the 16 October 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake (California) from the inversion of InSAR, GPS, and teleseismic data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 2015-2027, 2004. 12
- 67) Ji, C. et al.: Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part II: Complexity of slip history, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1208-1226, 2002. 8
- 68) Birgören, G. et al.: Rupture model of the 1999 Düzce, Turkey, earthquake deduced from high and low frequency strong motion data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L05610, 2004. 3
- 69) Delouis, B. et al.: Slip distributions of the 1999 Düzce (Mw 7.2) and Izmit (Mw 7.6) earthquakes on the North Anatolian Fault (Turkey): A combined analysis, report, Eidg. Tech. Hochsch., Zurich, Switzerland, 2004
- 70) Iwata, T. and Sekiguchi, H.: Source process and near-source ground motion during the 2002 Tottori-ken Seibu earthquake, *Proc. 11th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp. 125-128, 2002. 11 (in Japanese)
- 71) Iwata, T. et al.: Source process of the 2000 western Tottori Prefecture earthquake and near-source strong ground motion, Fall Meeting of Seismol. Soc. of Japan., 2000. 11
- 72) Semmane, F. et al.: The 2000 Tottori earthquake: A shallow earthquake with no surface rupture and slip properties controlled by depth, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, B03306, 2005. 3
- 73) Piatanesi, A. et al.: A global search inversion for earthquake kinematic rupture history: Application to the 2000 western Tottori, Japan earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, B07314, 2007. 7
- 74) Copley, A. et al.: The 2001 Mw 7.6 Bhuj earthquake, low fault friction, and the crustal support of plate driving forces in India, *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, B08405, 2011. 8
- 75) Antolik, M. and Dreger, D. S.: Rupture process of the 26 January 2001 Mw 7.6 Bhuj, India, Earthquake from teleseismic broadband data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 93, pp. 1235-1248, 2003. 6
- 76) Wang, T. et al.: Application to the 2001 Bhuj (India) earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 42, pp. 7022-7030, 2015. 9
- 77) Hayes, G. P.: Preliminary finite fault results for the Nov 14, 2001 Mw 7.8 259 km NW of Tanggula Shan, China earthquake (Version 1), <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000asvm/finite-fault> (accessed 2020. 8. 11)
- 78) Asano, K. et al.: Estimation of source rupture process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 1701-1715, 2005. 10
- 79) Oglesby, D. D. et al.: Inverse kinematic and forward dynamic models of the 2002 Denali fault earthquake, Alaska, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. S214-S233, 2004. 12
- 80) Hreinsdóttir, S. et al.: Coseismic deformation of the 2002 Denali Fault earthquake: Insights from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, B03308, 2006. 3
- 81) Semmane, F. et al.: Fault location and source process of the Boumerdes, Algeria, earthquake inferred from geodetic and strong motion data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L01305, 2005. 1
- 82) Poiata, N. et al.: Strong-motion and teleseismic waveform inversions for the source process of the 2003 Bam, Iran, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 102, pp. 1477-1496, 2012. 8
- 83) Asano, K. and Iwata, T.: Source rupture process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from waveform inversion with dense strong-motion data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 99, pp. 123-140, 2009. 2
- 84) Asano, K. and Iwata, T.: Source process and near-source ground motions of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 58, pp. 93-98, 2006. 1
- 85) Shao, G. and Ji, C.: Preliminary result of the Oct 8, 2005 Mw 7.64 Pakistan earthquake, http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2005/10/smooth/2005pakistan.html (accessed 2020. 8. 20)
- 86) Konca, A. O.: Preliminary result, 06/10/08 (Mw 7.6), Kashmir earthquake, http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2005_kashmir/kashmir.html (accessed 2020. 8. 20)
- 87) Horikawa, H.: Characterization of the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 60, pp. 1017-1022, 2008. 11
- 88) Asano, K. and Iwata, T.: Source rupture process of the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake estimated by the joint inversion of strong motion and GPS data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 101, pp. 2467-2480, 2011. 10
- 89) Aoi, S. et al.: Source process of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake derived from near-fault strong motion data, *Earth Planets Space*, Vol. 60, pp. 1131-1135, 2008. 11
- 90) Hikima, K. and Koketsu, K.: Source process of the 2007 Chuetsu-oki earthquake inferred from far and near field waveforms and geodetic data, Japan Geoscience Union Meeting, S146-015, 2008. 5 (in Japanese)
- 91) Horikawa, H.: The 2007 Chuetsu-oki, Japan, earthquake: rupture over a complicated fault system, Japan Geoscience Union Meeting, S142-P002, 2008. 5
- 92) Miyakoshi, K. et al.: Source modeling of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake, 7th General Assembly of ASC and SSJ, X4-059, 2008. 11
- 93) Cirella, A. et al.: Rupture process of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake by non-linear joint inversion of strong motion and GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, L16306, 2008. 8
- 94) Elliott, J. R. et al.: Extension on the Tibetan plateau: recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology, *Geophys. J. Int.*, Vol. 183, pp. 503-535, 2010. 11
- 95) Qi, W. et al.: Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan, *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 634-640, 2011. 9
- 96) Fielding, E. J. et al.: Kinematic fault slip evolution source models of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake in China from SAR interferometry, GPS and teleseismic analysis and implications for Longmen Shan tectonics, *Geophys. J. Int.*, Vol. 194, pp. 1138-1166, 2013. 8
- 97) Yagi, Y. et al.: Source process of the 12 May 2008 Wenchuan, China, earthquake determined by waveform inversion of teleseismic body waves with a data covariance matrix, *Earth Planets Space*, Vol. 64, pp. e13-e16, 2012. 7
- 98) Shen, Z.-K. et al.: Slip maxima at fault junctions and rupturing of

- barriers during the 2008 Wenchuan earthquake, *Nature Geoscience*, Vol. 2, pp. 718-724, 2009. 1
- 99) Wan, Y. et al.: Fault geometry and slip distribution of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements, *Geophys. J. Int.*, Vol. 208, pp. 748-766, 2017. 2
- 100) Hayes, G. P. and Ji, C.: Preliminary result of the Jun 13, 2008 Mw 6.8 Honshu Earthquake, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008tfdp/finite_fault.php (accessed 2013. 8. 28)
- 101) Asano, K. and Iwata, T.: Characterization of stress drops on asperities estimated from the heterogeneous kinematic slip model for strong motion prediction for inland crustal earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 168, pp. 105-116, 2011. 1
- 102) Suzuki, W. et al.: Rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake derived from near-source strong-motion records, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 256-266, 2010. 2
- 103) Cultrera, G. et al.: Ground-motion simulations within ShakeMap methodology: application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku (Japan) and 1980 Irpinia (Italy) earthquakes, *Geophys. J. Int.*, Vol. 193, pp. 220-237, 2013. 4
- 104) Calais, E. et al.: Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake, *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 794-799, 2010. 10
- 105) Hayes, G. P. et al.: Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake, *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 800-805, 2010. 11
- 106) Sladen, A.: Preliminary result 01/12/2010 (Mw 7.0), Haiti, http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2010_haiti/index.html (accessed 2020. 8. 20)
- 107) Huang, M.-H. et al.: Fault geometry inversion and slip distribution of the 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake from geodetic data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 122, pp. 607-621, 2016. 11
- 108) Wei, S. et al.: Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico, *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 615-618, 2011. 7
- 109) Elliott, J. R. et al.: Slip in the 2010-2011 Canterbury earthquakes, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B03401, 2012. 5
- 110) Atzori, S. C. et al.: The 2010-2011 Canterbury, New Zealand, seismic sequence: Multiple source analysis from InSAR data and modeling, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B08305, 2012. 8
- 111) Beavan, J. et al.: Fault slip models of the 2010-2011 Canterbury, New Zealand, earthquakes from geodetic data and observations of postseismic ground deformation, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, Vol. 55, pp. 207-221, 2012. 9
- 112) Hikima, K.: Rupture process of the April 11, 2011 Fukushima Hamadori earthquake (Mj 7.0), Two fault planes inferred from strong motion and relocated aftershocks-, *Zisin*, Vol. 64, pp. 243-256, 2012. 6 (in Japanese)
- 113) Tanaka, M. et al.: Source rupture process of the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake: How did the two subparallel faults rupture? *Earth Planets Space*, Vol. 66: 101, 2014. 8
- 114) Elliott, J. R. et al.: The 2011 Mw 7.1 Van (eastern Turkey) earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 118, pp. 1619-1637, 2013. 4
- 115) Utkucu, M.: 23 October 2011 Van, eastern Anatolia, earthquake (Mw 7.1) and seismotectonics of Lake Van area, *J. Seismol.*, Vol. 17, pp. 783-805, 2013. 4
- 116) Shao, G. and Ji, C.: Preliminary result of the Oct 23, 2011 Mw 7.13 Turkey earthquake, http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2011/10/23/turkey.html (accessed 2020. 8. 20)
- 117) Konca, A. O.: Rupture process of 2011 Mw7. 1 Van, eastern Turkey earthquake from joint inversion of strong-motion, high-rate GPS, teleseismic, and GPS data, *J. Seismol.*, Vol. 19, pp. 969-988, 2015. 10
- 118) Hayes, G. P.: Updated result of the Oct 23, 2011 Mw 7.1 eastern Turkey earthquake, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000j9rrr/finite-fault> (accessed 2020. 8. 11)
- 119) Altiner, Y. et al.: A geodetic study of the 23 October 2011 Van, Turkey earthquake, *Tectonophysics*, Vol. 588, pp. 118-134, 2013. 3
- 120) Feng, W. et al.: Patterns and mechanisms of coseismic and postseismic slips of the 2011 Mw 7.1 Van (Turkey) earthquake revealed by multi-platform synthetic aperture radar interferometry, *Tectonophysics*, Vol. 632, pp. 188-198, 2014. 9
- 121) Avouac, J.-P. et al.: The 2013, Mw 7.7 Balochistan earthquake, energetic strike-slip reactivation of a thrust fault, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 391, pp. 128-134, 2014. 4
- 122) Lauer, B. et al.: Fault geometry and slip distribution of the 2013 Mw 7.7 Balochistan earthquake from non-linear and linear inversions of SAR and optical data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 125, JB018380, 2020. 7
- 123) Sangha, S. et al.: Fault geometry of 2015, Mw 7.2 Murghab, Tajikistan earthquake controls rupture propagation: Insights from InSAR and seismological data, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 462, pp. 132-141, 2017. 3
- 124) Zhang, Y. et al.: Source model of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake constrained by InSAR, GPS, and strong - motion data: fault slip under extensional stress? *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 108, pp. 2675-2686, 2018. 10
- 125) Jiang, H. et al.: Towards full exploitation of coherent and incoherent information in Sentinel-1 TOPS data for retrieving surface displacement: Application to the 2016 Kumamoto (Japan) earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 44, pp. 1758-1767, 2017. 2
- 126) Yue, H. et al.: The 2016 Kumamoto Mw = 7.0 earthquake: A significant event in a fault-volcano system, *J. Geophys. Res.*, Vol. 122, pp. 9166-9183, 2017. 11
- 127) Yagi, Y. et al.: Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano, *Earth Planets Space*, Vol. 68: 118, 2016. 7
- 128) Kobayashi, H. et al.: Rupture processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Causes for extreme ground motions, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 44, pp. 6002-6010, 2017. 6
- 129) Kubo, H. et al.: Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, *Earth Planets Space*, Vol. 68:161, 2016. 10
- 130) Asano, K. and Iwata, T.: Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, Vol. 68: 147, 2016. 8
- 131) Scott, C. et al.: The 2016 M7 Kumamoto, Japan, earthquake slip field derived from a joint inversion of differential lidar topography, optical correlation, and InSAR surface displacements, *J. Geophys. Res.*, Vol. 46, pp. 6341-6351, 2019. 6
- 132) Chiaraluce, L. et al.: The 2016 Central Italy Seismic Sequence: A first look at the mainshocks, aftershocks, and source models, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 88, pp. 757-771, 2017. 5
- 133) Pizzi, A. et al.: Fault segmentation as constraint to the occurrence of the main shocks of the 2016 central Italy seismic sequence, *Tectonics*, Vol. 36, pp. 2370-2387, 2017. 11
- 134) Liu, C. et al.: Rupture process of the large 2019 Ridgecrest earthquakes from joint inversion of geodetic and seismological observations, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 46, pp. 11820-11829, 2019. 11
- 135) Ross, Z. E. et al.: Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence, *Science*, Vol. 366, pp.346-351, 2019. 10
- 136) Xu, X. et al.: Coseismic displacements and surface fractures from Sentinel - 1 InSAR: 2019 Ridgecrest earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 91, pp. 1979-1985, 2020. 1
- 137) Jin, Z. and Fialko, Y.: Finite slip models of the 2019 Ridgecrest earthquake sequence constrained by space geodetic data and aftershock locations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 110, pp. 1660-1679, 2020. 6

- 138) Takeuchi, F. et al.: Observation of gravity to reveal a buried fault associated with the Fukui earthquake, *Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 33, pp. 147-162, 1983. 12
- 139) Division of Structural Geology, Earthquake Research Institute, University of Tokyo: Earthquake fault in the earthquake off the Izu Peninsula of 1974, Report of the Coordinating Committee for earthquake Prediction, Vol. 12, pp. 86-92, 1974. 9 (in Japanese)
- 140) Walker, R. et al.: Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences, *Geophys. J. Int.*, Vol. 152, pp. 749-765, 2013. 2
- 141) Zhou, Y. et al.: Coseismic and postseismic displacements from the 1978 Mw 7.3 Tabas-e-Golshan earthquake in eastern Iran, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 452, pp. 185-196, 2016. 10
- 142) Baize, S. et al.: A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 91, pp. 499-520, 2020. 1
- 143) Wetmiller, R. J. et al.: An analysis of the 1985 Nahanni earthquakes, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 590-616. 1998. 4
- 144) Plafker, G. and Galloway, J. P.: Lessons learned from the Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989, U.S. Geological Survey Circular 1045, pp. 1-48, 1989
- 145) Hauksson, E. and Jones, L. M.: Seismology: The Northridge earthquake and its aftershocks, *Earthquakes and Volcanoes*, Vol. 25, pp. 18-30, 1994
- 146) Awata, Y. et al.: Surface fault ruptures on the northwest coast of Awaji Island associated with the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995, Japan, *Zisin*, Vol. 49, pp. 113-124, 1996. 5 (in Japanese)
- 147) Berberian, M. et al.: The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'enat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan Suture zone of eastern Iran, *Geophys. J. Int.*, Vol. 136, pp. 671-694, 1999. 3
- 148) Fusejima Y. et al.: Surface ruptures associated with the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, Annual report on active fault and paleoearthquake researches, No. 1, pp. 1-26, 2001. 9 (in Japanese)
- 149) Wesnousky, S. G. et al.: Eight days in Bhuj: Field report bearing on surface rupture and genesis of the 26 January 2001 earthquake in India, *Seism. Res. Lett.*, Vol. 72, pp. 514-524, 2001. 9
- 150) Talebian, M. et al.: The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L11611, pp. 1-4, 2004. 6
- 151) Maruyama, T. et al.: Characteristics of the surface rupture associated with the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake, central Japan and their seismotectonic implications, *Earth Planets Space*, Vol. 57, pp. 521-526, 2005. 6
- 152) Kaneda, H. et al.: Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications? *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 98, pp. 521-557, 2008. 4
- 153) Avouac, J. P. et al.: The 2005, Mw 7.6 Kashmir earthquake: Sub-pixel correlation of ASTER images and seismic waveforms analysis, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 249, pp. 514-528, 2006. 8
- 154) Awata, Y. et al.: Coastal deformation associated with the 2007 Noto Hanto earthquake, central Japan, estimated from uplifted and subsided intertidal organisms, *Earth Planets Space*, Vol. 60, pp. 1059-1062, 2008. 11
- 155) Xu, X. et al.: Normal- and oblique-slip of the 2008 Yutian earthquake: Evidence for eastward block motion, northern Tibetan Plateau, *Tectonophysics*, Vol. 584, pp. 152-165. 2013. 1
- 156) Lin, A. et al.: Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China, Vol. 471, pp. 203-215, *Tectonophysics*, 2009. 6
- 157) Liu-Zeng, J. et al.: Surficial slip and rupture geometry on the Beichuan fault near Hongkou during the Mw7.9 Wenchuan earthquake, China, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 2615-2650, 2010. 11
- 158) Li, C.-Y. et al.: Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China, *Tectonophysics*, Vol. 491, pp. 35-58, 2010. 8
- 159) Toda, S. et al.: Surface rupture associated with the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake and its implications to the rupture process and evaluation of active faults, *Zisin*, Vol. 62, pp. 153-178, 2010. 3 (in Japanese)
- 160) Ryder, L. et al.: Static stress interactions in extensional earthquake sequences: An example from the South Lunggar Rift, Tibet, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B09405, 2012. 9
- 161) Prentice, C. S. et al.: Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology, *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 789-793, 2010. 10
- 162) Quigley, M. et al.: Surface rupture during the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: Implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis, *Geology*, Vol. 40, pp. 55-58, 2012. 1
- 163) Mizoguchi, K. et al.: Surface fault ruptures and slip distributions of the Mw 6.6 11 April 2011 Hamadoori, Fukushima prefecture, Northeast Japan, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 102, pp. 1949-1956, 2012. 10
- 164) Doğan, B. and Karakaş, A.: Geometry of co-seismic surface ruptures and tectonic meaning of the 23 October 2011 Mw 7.1 Van earthquake (East Anatolian region, Turkey), *J. Struct. Geol.*, Vol. 46, pp. 99-144, 2013. 1
- 165) Vallage, A. et al.: Inelastic surface deformation during the 2013 Mw 7.7 Balochistan, Pakistan, earthquake, *Geology*, Vol. 43, pp. 1079-1082, 2015. 12
- 166) Barnhart, W. D. et al.: Ball-and-socket tectonic rotation during the 2013 Mw7.7 Balochistan earthquake, *Earth Planet Sci Lett*, Vol. 403, pp. 210-216, 2014. 10
- 167) Zhou, Y. et al.: The 2013 Balochistan earthquake: an extraordinary or completely ordinary event? *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 42, pp. 6236-6243, 2015. 8
- 168) DuRoss, C. B. et al.: Surface displacement distributions for the July 2019 Ridgecrest, California, earthquake ruptures, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 110, pp. 1400-1418, 2020. 6
- 169) Stirling, M. et al.: Selection of earthquake scaling relationships for seismic - hazard analysis, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 103, pp. 2993-3011, 2013. 10
- 170) Laske, G. et al.: Update on CRUST1.0 - A 1-degree global model of earth's crust, EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU2013-2658, 2013. 4
- 171) Laske, G. et al.: CRUST 1.0, <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html> (accessed 2020. 8. 15)
- 172) Bai, L. et al.: Focal depths and mechanisms of shallow earthquakes in the Himalayan-Tibetan region, *Gondwana Research*, Vol. 41, pp. 390-399, 2017. 1
- 173) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: the effects of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Geophysical Monograph*, Vol. 37, pp. 209-216, 1986. 1
- 174) Scholz, C. H.: Scaling laws for large earthquakes: Consequences for physical models, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 1-14, 1982. 2
- 175) Takemura, M.: Scaling law for Japanese intraplate earthquakes in special relations to the surface faults and the damages, *Zisin*, Vol. 51, pp. 211-228, 1998. 10 (in Japanese)
- 176) Fujii, Y. and Matsu'ura, M.: Regional difference in scaling laws for large earthquakes and its tectonic implication, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 157, pp. 2283-2302, 2000. 10
- 177) Scholz, C. H.: The mechanics of earthquakes and faulting, 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 1-471, 2002
- 178) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS, AGU*, Vol. 79, No. 47, p. 579, 1998

SCALING RELATIONS OF OUTER FAULT PARAMETERS OF LARGE CRUSTAL EARTHQUAKES USING FAULT MODELS IN THE WORLD

Toshimi SATOH^{*1}

^{*1} Research Fellow, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.

Site specific ground motions based on the method using fault models has been used as design ground motions for super high-rise buildings and standard seismic motions for nuclear power plants. Outer fault parameters such as seismic moment M_0 , fault area S , length L_{sub} , width W , average displacement $D_{\text{sub_av}}$ and maximum displacement $D_{\text{sub_max}}$ are important for ground motion predictions using fault models. In this study scaling relations of outer fault parameters are developed using fault models for crustal earthquakes in the world before 2020. Heterogeneous slip models of crustal earthquakes with $M_w \geq 6.5$, focal depth < 30 km and the crust thickness < 55 km are used for the regression analysis after trimming small slip area of faults. We also derive relations between fault parameters by fault models and those by surface rupture observations such as length L_{surf} and maximum displacement $D_{\text{surf_max}}$.

Fault width W of the strike-slip fault and $W \times \sin(\text{dip angle})$ of the reverse fault are saturate to about 16 km at $M_0 > 10^{19}$ Nm. Most of reverse faults are still buried up to $M_w 7.3$ even if W saturates. The coefficient b of $S \propto M_0^b$ is calculated by regression analysis and is confirmed by t-test to be significant to assume $1/2$ for $10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20}$ Nm and 1 for $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20}$ Nm. The S by M_0 - S relation constraining $b=1/2$ is 1.24 times of S by Irikura and Miyake, but the difference is within the standard deviation. The S by M_0 - S relation constraining $b=1$ is 0.89 times of S by Murotani et al., but the difference is within the standard deviation. The coefficient b of $L_{\text{sub}} \propto M_0^b$ is calculated by regression analysis and is confirmed by t-test to be significant to assume $1/2$ for $10^{19} < M_0 < 2.88 \times 10^{20}$ Nm and 1 or $3/2$ for $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20}$ Nm. The L_{sub} by M_0 - L_{sub} relation constraining $b=1/2$ is 1.25 times of L derived from by M_0 - M relation by Takemura and L - M relation by Matsuda, but the difference is within the standard deviation. The difference of the scaling relations between strike-slip and reverse faults is not so significant. The L_{surf} is almost equal to L_{sub} for $L_{\text{surf}} > 60$ km, but L_{surf} is shorter than L_{sub} as L_{surf} is smaller. We derive L_{surf} - L_{sub} relation assuming ellipsoidal faults. The derived equation agrees with that for strike-slip faults by Okino and Kumamoto. The L_{surf} of the M_0 - L_{surf} relation calculated from M_0 - L_{sub} and L_{surf} - L_{sub} relations is smaller than L of previous M - L relations for $M_w < 6.7$ to 7.0 . The difference is caused that both L_{surf} and L_{sub} are used as L in the previous M - L relations. If L_{surf} is used to the previous M - L relations, M_0 is underestimated for short L_{surf} faults. We derive M_0 - $D_{\text{sub_av}}$ relations and confirm using the t-test that $D_{\text{sub_av}}$ saturates to 3.39 m for $2.88 \times 10^{20} \leq M_0 \leq 9.0 \times 10^{20}$ Nm. We also derive $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_max}}$ and $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_av}}$ relation by the same modeling for L_{surf} - L_{sub} relation. It is found that surface rupture faults with $D_{\text{surf_max}} > 6$ m produce the maximum slip at the surface, but that those with $D_{\text{surf_max}} < 6$ m produce the maximum slip at the subsurface. The derived L_{surf} - L_{sub} , $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_max}}$ and $D_{\text{surf_max}}$ - $D_{\text{sub_av}}$ relations are useful to estimate subsurface parameters for strong motion prediction from active fault survey.

(2020年9月4日原稿受理, 2020年12月28日採用決定)