



Title	内陸地殻内の長大断層で発生する地震に関するスケーリング則
Author(s)	松島, 信一; 室谷, 智子; 吾妻, 崇; 入倉, 孝次郎; 北川, 貞之
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73: 117-127
Issue Date	2010-03-19
DOI	10.14943/gbhu.73.117
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/44463
Right	
Type	bulletin (article)
Additional Information	
File Information	73_11_p117-127.pdf

Instructions for use

内陸地殻内の長大断層で発生する地震に関するスケーリング則

松島 信一

京都大学防災研究所

室谷 智子

文部科学省研究開発局地震・防災研究課（地震調査研究推進本部事務局）

吾妻 崇

産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

入倉孝次郎

愛知工業大学地域防災研究センター

北川 貞之

文部科学省研究開発局地震・防災研究課（地震調査研究推進本部事務局）

(2010年1月5日受理)

Scaling relations of earthquakes on active mega-fault systems

Shinichi MATSUSHIMA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Satoko MUROTANI

Research and Development Bureau, MEXT (Headquarters for Earthquake Research Promotion)

Takashi AZUMA

Active Fault and Earthquake Research Center, National Institute
of Advanced Industrial Science and Technology

Kojiro IRIKURA

Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology

and

Sadayuki KITAGAWA

Research and Development Bureau, MEXT (Headquarters for Earthquake Research Promotion)

(Received January 5, 2010)

Since 2005, The Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP) has been publishing 'National Seismic Hazard Maps for Japan' to provide useful information for disaster prevention countermeasures for the country and local public agencies, as well as promote public awareness of disaster prevention of earthquakes. In the course of making the year 2009 version of the map, which is the commemorative of the tenth anniversary of the settlement of the Comprehensive Basic Policy, the methods to evaluate magnitude of earthquakes, to predict strong ground motion, and to construct underground structure were investigated in the Earthquake Research Committee and its subcommittees. Within approximately 100 active fault zones that were evaluated by HERP, there are 6 mega-fault systems that extend more than 80 km, which are longer than the fault length in the database used to evaluate the scaling relations by Matsuda (1975). In order to predict the magnitude of earthquakes occurring on mega-fault systems, we examined the scaling relations for mega-fault systems using nine earthquakes of which source processes were analyzed by waveform inversion. As a result, we found that the data fit in between the scaling relations of seismic moment and rupture area by Somerville et al. (1999) and Irikura and Miyake (2001). We also found maximum displacement of surface rupture is two to three times larger than the average slip on the seismic fault. Using this relation, the seismic moment on mega-fault systems can be adjusted.

I. はじめに

地震調査研究推進本部（以下、地震本部）では、国民の地震に対する防災意識を高め、地震災害を軽減することを目的として、平成17年に「全国を概観する地震動予測地図」を公表し、以後毎年更新を行ってきた（例えば、地震調査研究推進本部、2008）。地震本部では、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」（地震調査研究推進本部、1999）の策定から10年という節目に、これまでの活動を総括する形で平成21年7月に「全国地震動予測地図」（地震調査研究推進本部、2009）を公表した。「全国地震動予測地図」の作成過程において、地震動予測地図の高度化に向けた、地震規模の推定手法、強震動予測手法、地下構造のモデル化方法の改良などの検討が実施されてきた。その中で、地震本部が調査の対象としている約100の内陸地殻内の活断層（帯）に含まれる起震断層のうち6つは断層長さが概ね80 kmを超える“長大断層”であり、それらの地震規模と震源断層のモデル化について検討が行われた。長さ80 kmを超える起震断層は、松田（1975）の断層長さとマグニチュードのスケールリング則のデータ範囲外と考えられるために、地震規模を推定する方法から検討を始める必要があった。そのため、長大断層で発生する地震に関するスケールリング則についての検討が行われた。観測・解析事例が少ないという課題はあるものの、現段階での検討結果を報告する。

II. 検討に用いた地震データ

日本国内の長さ80 kmを超えるような長大断層での地震については、地震波形記録を用いて断層面上のパラメータを推定した事例は濃尾地震のみ（Fukuyama et al., 2007）に限られている。

しかし、古い地震記録を対象としているためデータの精度等について精査する必要があり、結果の使用には注意を要する。そこで、海外の長大な断層で発生し、地震波形を用いて震源断層の破壊過程の解析が行われた8地震に、前述の濃尾地震と合わせた9地震を対象として検討を行った。これらの地震について、地表で確認された断層（地表断層）の長さおよび地表での最大変位量のデータも併せて収集した。Table 1 に震源断層のパラメータ、Table 2 に地表断層のパラメータを示す。Table 1 のパラメータのうち断層長さおよび断層面積は濃尾地震と Kashmir 地震を除き、Somerville et al. (1999) の規範に基づきトリミングを行っている。1つの地震に対し複数の解析結果あるいは調査結果がある場合は、スケーリングの全体像をみるという目的で単純に平均値を取ることとした。これらのデータと、Stirling et al. (2002) のデータベースから信頼性のある震源断層の断層長が得られている40地震のデータ（橋本, 2007）を比較し、長大断層に関するスケーリングの検討を行った。

III. 長大断層のスケーリング則と強震動予測レシビ

各地震の震源断層面積と地震モーメントの関係および最大地表変位量と震源断層でのすべり量との関係を調べるため、Somerville et al. (1999) と入倉・三宅 (2001) による断層面積と地震

Table 1. Source parameters estimated by waveform inversion analysis. In case there are several results by different researchers, the parameters are averaged. They can be found in the 'Reference' column.

Event	L (km)	M_0 (Nm)	D_{sub_ave} (m)	D_{sub_max} (m)	S (km ²)	Reference
Sichuan_2008	279	9.5 E+20	2.9	9.7	12,781	Koketsu et al. (2008), Nishimura and Yagi (2008), Sladen (2008), USGS (2008)
Kashmir_2005	125	3.4 E+20	3.5	12.0	3,125	Parsons et al. (2006)
Denali_2002	320	7.7 E+20	3.4	10.5	7,827	Oglesby et al. (2004), Asano et al. (2005)
Chi-Chi_1999	89	3.5 E+20	3.5	16.3	3,435	Chi et al. (2001), Ma et al. (2001), Wu et al. (2001), Zen and Chen (2001), 関口・岩田 (2001)
Izmit_1999	126	2.0 E+20	2.4	7.4	2,499	Yagi and Kikuchi (2000), Bouchon et al. (2002), Delouis et al. (2002), Sekiguchi and Iwata (2002)
Landers_1992	74	7.7 E+19	2.3	6.5	1,090	Cohee and Beroza (1994), Wald and Heaton (1994), Cotton and Campillo (1995), Hernandez et al. (1999), Zeng and Anderson (2000)
Tabas_1978	86	5.8 E+19	0.4	1.4	3,463	Hartzell and Mendoza (1991)
San Francisco_1906	460	8.2 E+20	4.4	9.7	5,520	Song et al. (2008)
Nobi_1891	122	1.8 E+20	3.3	—	1,795	Fukuyama et al. (2007)

Table 2. Source parameters from observation of surface rupture. In case there are several results by different researchers, the parameters are averaged. They can be found in the 'Reference' column.

Event	Length (km)	D_{surf} (m)	Reference
Sichuan_2008	230	9.8	Lin (2008), Li et al. (2009), Liu-Zeng et al. (2009)
Kashmir_2005	70	9.2	Kaneda et al. (2008)
Denali_2002	341	8.8	Eberhart-Phillips et al. (2003), Haeussler et al. (2004)
Chi-Chi_1999	78	8.9	Azuma et al. (2000), Dominguez et al. (2003)
Izmit_1999	145	5.3	Barka et al. (2002), Langridge et al. (2002), Lettis et al. (2002)
Landers_1992	85	6.0	Sieh et al. (1993)
Tabas_1978	85	3.0	Berberian (1979)
San Francisco_1906	480	8.6	Thatcher et al. (1997)
Nobi_1891	80	7.7	Matsuda (1974), JNES Research Report (2006)

モーメントのスケーリングに, Stirling et al. (2002) のデータと, 長大断層でのパラメータをプロットしたものを Fig. 1 に示す. Fig. 1 より, 本研究で対象とした長大断層についても, 1978 年の Tabas 地震を除き断層面積と地震モーメントのスケーリングは成り立ち, Somerville et al. (1999) と入倉・三宅 (2001) の経験則の間に収まることがわかる. つまり, 同じ断層面積の場合に Somerville et al. (1999) は地震モーメントの下限を, 入倉・三宅 (2001) は上限を与えるとも考えられる. 長大断層における震源断層の巨視的断層パラメータの設定の際には, 得られている断層長さ, 地震発生層の厚さと傾斜角を参考に求めた断層幅から断層面積を求め, 強震動予測レシピ (入倉・三宅, 2001) により, 断層面積と地震モーメントの関係式から地震モーメントを推定することが可能である. 次に, 震源断層の断層面積と地震モーメントから震源断層全体の平均すべり量が求められる. この平均すべり量が過去に発生した長大断層での地震でのすべり量と整合的かどうかで強震動予測のために仮定する断層パラメータの設定が妥当かどうか判断できる.

Fig. 2 に地表で観測された最大変位量 (D_{surf}) と震源断層で求まっている平均すべり量 (D_{sub_ave}) の関係を示す. D_{surf} は D_{sub_ave} の概ね 1~3 倍の間に収まっており, 長大断層に限ると, D_{surf} は D_{sub_ave} の 2~3 倍となることがわかる. また, Fig. 3 に示すように長大断層では地表断層長さ (L_{surf}) と震源断層長さ (L_{sub}) はほぼ等しいことがわかる. これらの関係から, 活断層調査などにより得られている地表の最大変位量 D_{surf} が, 強震動予測レシピによって設定される巨視的断層パラメータの D_{sub_ave} と極端に矛盾する場合, 入倉・三宅 (2001) と Somerville et al. (1999) のスケーリング則の間に来るように平均すべり量を調整して整合させる方法が考えられる. Fig. 2 に示した D_{sub_ave} と D_{surf} の関係はその指標に使うことができる.

さらに, 震源断層で求まっている最大すべり量 (D_{sub_max}) と D_{surf} の関係を Fig. 4 に示す. Fig. 4 から, D_{surf} は D_{sub_max} に等しいか小さい場合がほとんどであることがわかる.

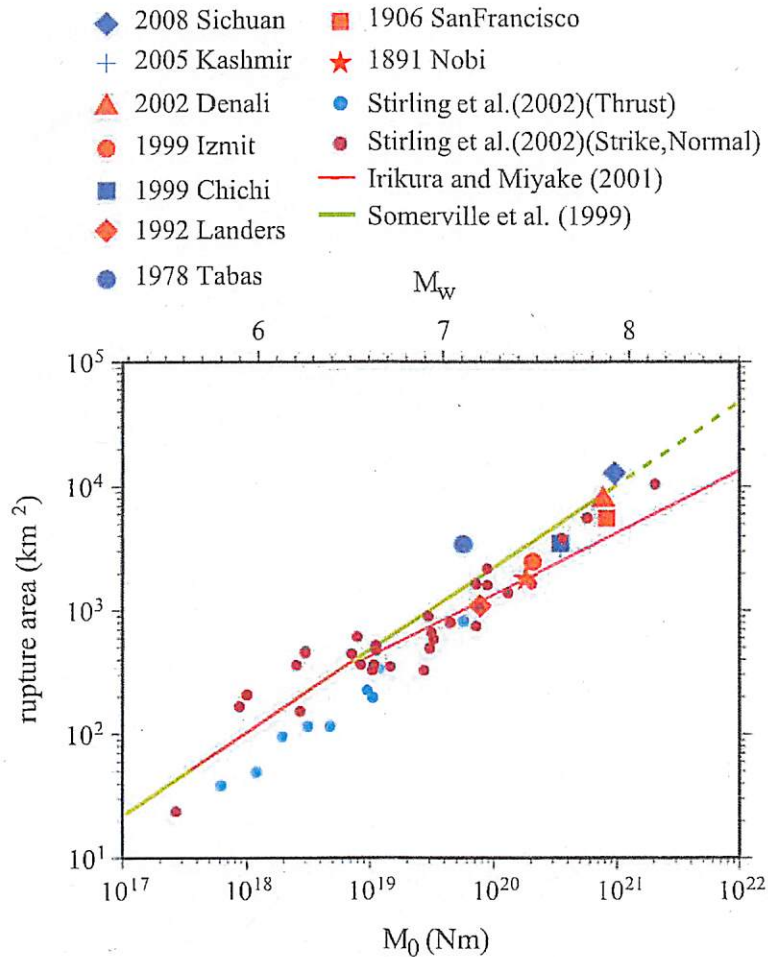


Fig. 1. Relation between seismic moment (M_0) and rupture area. Red and blue colored symbols are results by this study. Symbols colored in purple and light blue are after Stirling et al. (2002). Purple and light green lines are scaling relations by Irikura and Miyake (2001) and Somerville et al. (1999), respectively.

IV. まとめと今後の課題

長大断層で発生した9つの地震のパラメータを整理したところ、断層面積と地震モーメントの関係は既存の関係式である Somerville et al. (1999) と入倉・三宅 (2001) との間に収まり、スケーリング則が成り立つことがわかった。また、地表最大変位量 (D_{surf}) と震源断層での平均すべり量 (D_{sub_ave}) の関係をみると、 D_{surf} は D_{sub_ave} の概ね 2~3 倍であることがわかった。強震動予測レシビにより求まる震源断層での平均すべり量が地表最大変位量と比べて極端に矛盾する場合は、この関係を満足する範囲内で平均すべり量すなわち地震モーメントを調整することにより、最終的に長大断層で発生する地震の地震モーメントを推定することが出来る可能性がある

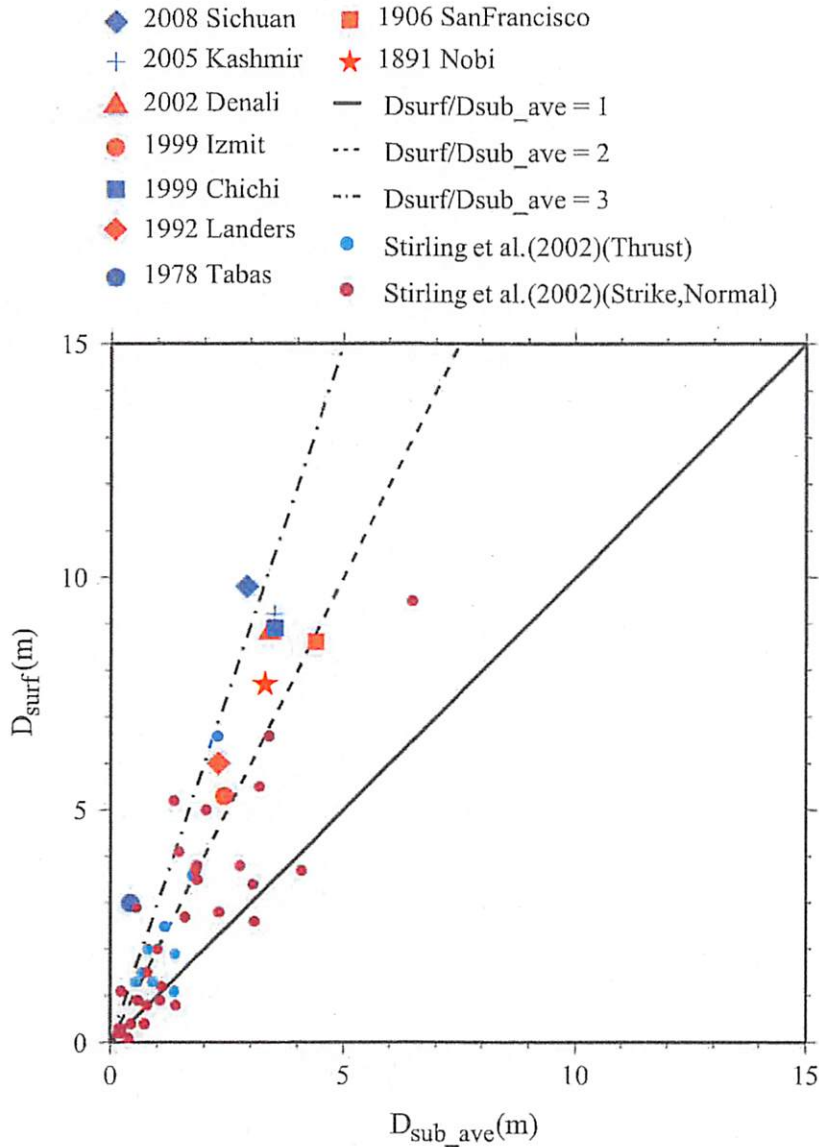


Fig. 2. Relation between average slip of the subsurface seismic fault (D_{sub_ave}) and maximum displacement of the surface rupture (D_{surf}). Red and blue colored symbols are results by this study. Solid, dashed, and broken lines denote one to one, two, and three ratio between D_{surf} and D_{sub_ave} , respectively. Symbols colored in purple and light blue are after Stirling et al. (2002).

ことがわかった。

長大断層に関しては、解析事例が少なく、日本国内では1例のみである。今後はデータの蓄積とともにメカニズムの違いの影響やアスペリティに関する微視的断層パラメータの関係式などについて検討する必要がある。

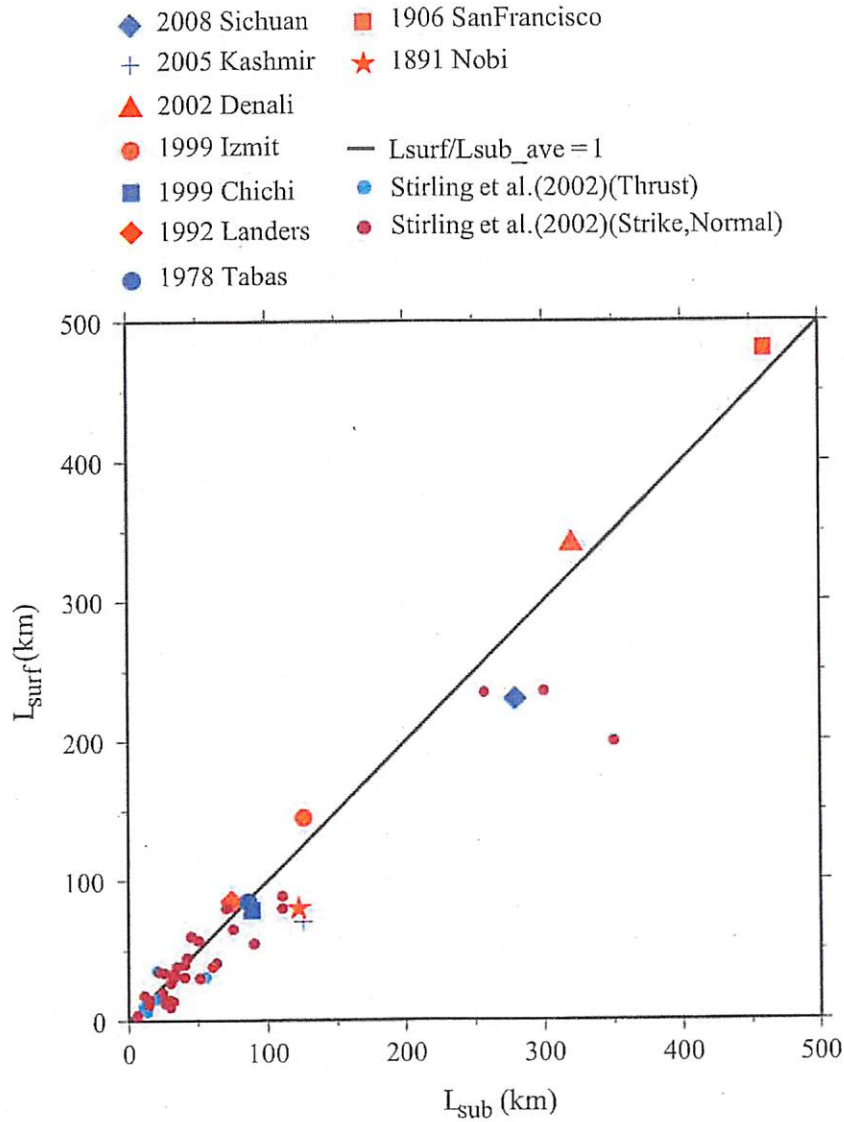


Fig. 3. Relation between fault length of the subsurface seismic fault (L_{sub}) and surface rupture (L_{surf}). Red and blue colored symbols are results by this study. Solid line denotes one to one ratio between L_{surf} and L_{sub} . Symbols colored in purple and light blue are after Stirling et al. (2002).

謝辞 本検討は、地震動予測地図を作成するにあたり地震調査委員会下の主に地震動予測地図高度化WG・強震動評価部会・強震動予測手法検討分科会にて審議されたものです。各会の委員の先生方には有益なコメント等を多数頂いております。本検討に用いた波形解析によるすべり分布データは、主にSRCMODのカタログ(Mai, 2009)を使わせて頂きました。また、個別にもデータをご提供頂きました。北海道大学小山順二先生には本稿の改善に有益なご指摘をいただきました。記して感謝の意を表します。

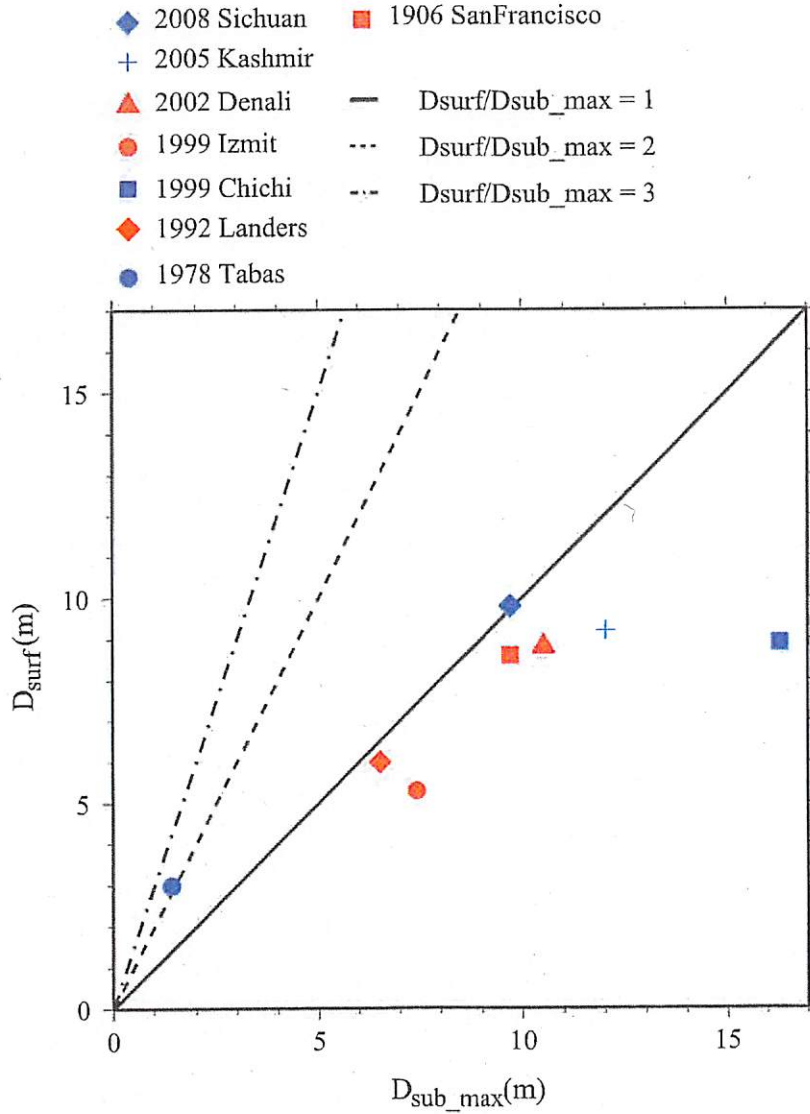


Fig. 4. Relation between maximum slip of the subsurface seismic fault (D_{sub_max}) and maximum displacement of the surface rupture (D_{surf}). Red and blue colored symbols are results by this study. Solid, dashed, and broken lines denote one to one, two, and three ratio between D_{surf} and D_{sub_max} , respectively.

文 献

- Asano, K., T. Iwata and K. Irikura, 2005. Estimation of Source Rupture Process and Strong Ground Motion Simulation of the 2002 Denali, Alaska, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1701-1715.
- 吾妻崇・杉山雄一・荻谷愛彦・栗田泰夫・李元希・石同生・盧詩丁・呉維毓, 2000. 1999年台湾集集地震に伴う地震断層の変位とセグメンテーション, 地質調査書報告, EQ/00/2, 221-235.
- Barka, A. A., H. S. Akýüz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Çakir, A. Dikbas, B. Yerli, R. Armijo, B. Meyer, J. B. de Chabaliere, T. Rockwell, J. R. Dolan, R. Hartleb, T. Dawson, S. Christofferson, A. Tucker, T. Fumal, R. Langridge, H. Stenner, W. Lettis, J. Bachhuber and W. Page, 2002. The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake ($M 7.4$), North Anatolian Fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 43-60.
- Berberian, M., 1979. Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 1861-1887.
- Bouchon, M., M. N. Toksöz, H. Karabulut, M. P. Bouin, M. Dietrich, M. Aktar and M. Edie, 2002. Space and time evolution of rupture and faulting during the 1999 İzmit (Turkey) earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 256-266.
- Chi, W. C., D. Dreger and A. Kaverina, 2001. Finite-source modeling of the 1999 Taiwan (Chi-Chi) earthquake derived from a Dense Strong-Motion Network, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1144-1157.
- Cohee, B. P. and G. C. Beroza, 1994. Slip distribution of the 1992 Landers earthquake and its implications for earthquake source mechanics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 692-712.
- Cotton, F. and M. Campillo, 1995. Frequency domain inversion of strong motions: Application to the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, **100**, 3961-3975.
- Delouis, B., D. Giardini, P. Lundgren and J. Salichon, 2002. Joint inversion of InSAR, Teleseismic and strong-motion data for the spatial and temporal distribution of earthquake slip: application to the 1999 İzmit mainshock, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 278-299.
- Dominguez, S., J. Avouac and R. Michel, 2003. Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2001JB000951.
- Eberhart-Phillips, D., P. J. Haeussler, J. T. Freymueller, A. D. Frankel, C. M. Rubin, P. Craw, N. A. Ratchkovski, G. Anderson, G. A. Carver, A. J. Crone, T. E. Dawson, H. Fletcher, R. Hansen, E. L. Harp, R. A. Harris, D. P. Hill, S. Hreinsdottir, R. W. Jibson, L. M. Jones, R. Kayen, D. K. Keefer, C. F. Larsen, S. C. Moran, S. F. Personius, G. Plafker, B. Sherrod, K. Sieh, N. Sitar and W. K. Wallace, 2003. The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event, *Science*, **300**, 1113-1118.
- Fukuyama E., I. Muramatsu and T. Mikumo, 2007. Seismic moment of the 1891 Nobi, Japan, earthquake estimated from historical seismograms, *Earth Planets Space*, **59**, 553-559.
- 原子力安全基盤調査研究 (JNES Research Report), 2006. 長大断層で発生する地震の動学的強震動予測に関する研究 (研究代表者: 入倉孝次郎), 平成 18 年度原子力安全基盤調査研究, pp.14.
- Haeussler, P. J., D. P. Schwartz, T. E. Dawson, H. D. Stenner, J. J. Lienkaemper, B. Sherrod, F. R. Cinti, P. Montone, P. A. Craw, A. J. Crone and S. F. Personius, 2004. Surface rupture and slip distribution of the Denali and Totschunda faults in the 3 November 2002 $M 7.9$ earthquake, Alaska, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, S 23-S 52.
- Hartzell, S. and C. Mendoza, 1991. Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 305-331.
- 橋本徹夫, 2007. 地震断層長とモーメントマグニチュード, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, S 145-013.
- Hernandez, B., F. Cotton and M. Campillo, 1999. Contribution of radar interferometry to a two-step inversion of the kinematic process of the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, **104**, 13083-13099.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵, 2001. シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, **110**, 849-875.
- 地震調査研究推進本部, 1999. 「地震調査研究の推進について」報告書, http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu_99_a/h_9s3b.htm, 1999.04.23. 公表.
- 地震調査研究推進本部, 2008. 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 2008 年版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08_yosokuchizu/index.htm, 2008.04.24. 公表.

- 地震調査研究推進本部, 2009. 「全国地震動予測地図」2009年版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm, 2009.07.21. 公表.
- Kaneda, H., T. Nakata, H. Tsutsumi, H. Kondo, N. Sugito, Y. Awata, S. S. Akhtar, A. Majid, W. Khattak, A. A. Awan, R. S. Yeats, A. Hussain, M. Ashraf, S. G. Wesnousky and A. B. Kausar, 2008. Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 521-557.
- Koketsu, K., K. Hikima, H. Miyake, T. Maruyama and Z. Wang, 2008. Source process and ground motions of the 2008 Wenchuan, China, earthquake, *Eos Trans. AGU*, **89**(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S31 B-1914.
- Langridge, R. M., H. D. Stenner, T. E. Fumal, S. A. Christofferson, T. K. Rockwell, R. D. Hartleb, J. Bachhuber and A. A. Barka, 2002. Geometry, slip distribution, and kinematics of surface rupture on the Sakarya fault segment during the 17 August 1999 İzmit, Turkey, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 107-125.
- Lettis, W., J. Bachhuber, R. Witter, C. Brankman, C. E. Randolph, A. Barka, W. D. Page and A. Kaya, 2002. Influence of Releasing Step-Overs on Surface Fault Rupture and Fault Segmentation: Examples from the 17 August 1999 İzmit Earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 19-42.
- Li, C. Y., Z. Y. Wei, J. Q. Ye, Y. B. Han and W. J. Zheng, 2009. Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2009.09.023.
- 林愛明, 2008. 中国四川省地震緊急現地調査報告会, 日本地球惑星科学連合大会.
- Liu-Zeng, J., Z. Zhang, L. Wen, P. Tapponnier, J. Sun, X. Xing, G. Hu, Q. Xu, L. Zeng, L. Ding, C. Ji, K. W. Hudnut and J. van der Woerd, 2009. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, Ms 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet, *Earth Planet Sci. Lett.*, **286**, 355-370.
- Ma, K. F., J. Mori, S. J. Lee and S. B. Yu, 2001. Spatial and temporal distribution of slip for the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1069-1087.
- Mai, P. M., 2009. Finite-source rupture model database, <http://www.seismo.ethz.ch/srcmod/>.
- 松田時彦, 1974. 1891年濃尾地震の地震断層, 地震研究所研究速報, **13**, 1974-03, 85-126.
- 松田時彦, 1975. 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震II, **28**, 269-283.
- Nishimura, N. and Y. Yagi, 2008. Rupture Process for May 12, 2008 Sichuan Earthquake (Ver. 2), <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/nisimura/20080512/>.
- Oglesby, D. D., D. S. Dreger, R. A. Harris, N. Ratchkovski and R. Hansen, 2004. Inverse kinematic and forward dynamic models of the 2002 Denali Fault earthquake, Alaska, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, S214-S233.
- Parsons, T., R. S. Yeats, Y. Yagi, and A. Hussain, 2006. Static stress change from the 8 October, 2005 M=7.6 Kashmir earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2005 GL 025429.
- 関口春子・岩田知孝, 2001. 1999年台湾・集集地震のやや長周期(2-20秒)震源過程, 活断層・古地震研究報告, **1**, 315-324.
- Sekiguchi, H. and T. Iwata, 2002. Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 300-311.
- Sieh, K., L. Jones, E. Hauksson, K. Hudnut, D. Eberhart-Philips, T. Heaton, S. Hough, K. Hutton, H. Kanamori, A. Lilje, S. Lindvall, S. F. McGill, J. Mori, C. Rubin, J. A. Spotila, J. Stock, H. K. Thio, J. Treiman, B. Wernicke and J. Zachariasen, 1993. Near-field investigations of the Landers earthquake sequence, April to July 1992, *Science*, **260**, 171-176.
- Sladen, A., 2008. Preliminary result 05/12/2008 (Mw 7.9), East Sichuan, http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2008_e_sichuan/e_sichuan.html.
- Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada, 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, 59-80.
- Song, S. G., G. Beroza and P. Segall, 2008. A unified source model for the 1906 San Francisco earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 823-831.

- Stirling, M., D. Rhoades and K. Berryman, 2002. Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 812-830.
- Thatcher, W., G. Marshall and M. Lisowski, 1997. Resolution of fault slip along the 470-km-long rupture of the great 1906 San Francisco earthquake and its implications, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5353-5367.
- USGS, 2008. Magnitude 7.9-EASTERN SICHUAN, CHINA, http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us/2008_ryan/.
- Wald, D. J. and T. H. Heaton, 1994. Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 668-691.
- Wu, C., M. Takeo and S. Ide, 2001. Source process of the Chi-Chi earthquake: A joint inversion of strong motion data and global positioning system data with a multifault model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1128-1143.
- Yagi, Y. and M. Kikuchi, 2000. 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.*, **27**, 1969-1972.
- Zen, Y. and C. H. Chen, 2001. Fault rupture process of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1088-1098.
- Zeng, Y. H. and J. G. Anderson, 2000. Evaluation of numerical procedures for simulating near-fault long-period ground motions using Zeng's method, Report 2000/01 to the PEER Utilities Program, <http://peer.berkeley.edu>.