

# 四川大地震（汶川地震）の震源断層と地震動

瀧 一起<sup>1)</sup>, 引間 和人<sup>2)</sup>, 三宅 弘恵<sup>3)</sup>, 丸山 岳朗<sup>4)</sup>, 王自法<sup>5)</sup>

- 1) 東京大学地震研究所 教授, koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
- 2) 東京大学地震研究所 特任研究員, hikima@eri.u-tokyo.ac.jp
- 3) 東京大学地震研究所 助教, hiroe@eri.u-tokyo.ac.jp
- 4) 東京大学理学系研究科 大学院生, takeaki@eri.u-tokyo.ac.jp
- 5) 中国地震局工程力学研究所 教授

## 1. はじめに

2008年四川大地震（汶川地震）は現地時間の5月12日に中国四川省の龍門山衝上断層帯で発生し、死者69,226人、行方不明者17,923人、負傷者374,643人の人的被害や（9月18日発表、国務院震災救援対策本部）、8,451億元にのぼる直接的経済的損害（9月4日発表、国家汶川地震専門家委員会）をもたらした。この地震による地震動は世界中に展開された地震計のネットワークで観測され、数時間ののちには公開されているので、このデータを解析することにより推定された2008年汶川地震の震源断層と地震動について、「橋梁と基礎」のために執筆した報告<sup>1)</sup>を基に紹介する。また、中国国内の強震計ネットワークによる観測記録も、その後、利用可能となったので、それらの速報的な解析結果もAmerican Geophysical Unionの2008年秋季大会

で報告した内容<sup>2)</sup>に基づいて紹介する。

## 2. 地表地震断層

2008年汶川地震による地震動は世界中に伝播し、International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN)の観測点で観測されているので、その遠地記録をIncorporated Research Institutions for SeismologyのData Management Center (IRIS DMC)から入手した。入手した遠地記録を点震源解析<sup>3)</sup>したり、米国地質調査所 (USGS) やGlobal CMT Project (ハーバード大より移管) によるCentroid Moment Tensor インバージョン結果を参照することにより、汶川地震の断層モデル形状を概ね決めることができる。しかし、断層モデルの詳細な位置はこれらから決定することは困難で、地表地震断層の調査や余震分布から検討されるのが

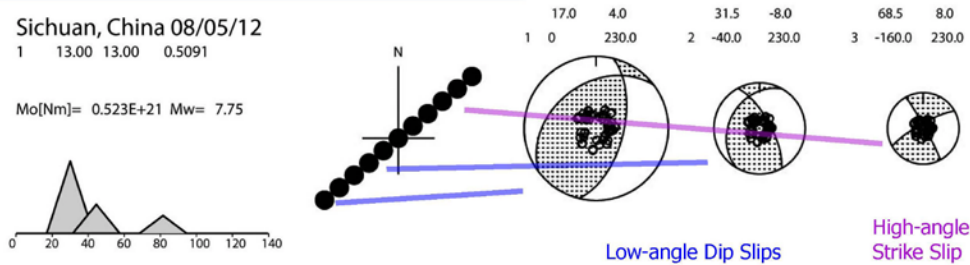


図-1 遠地記録の点震源解析の結果

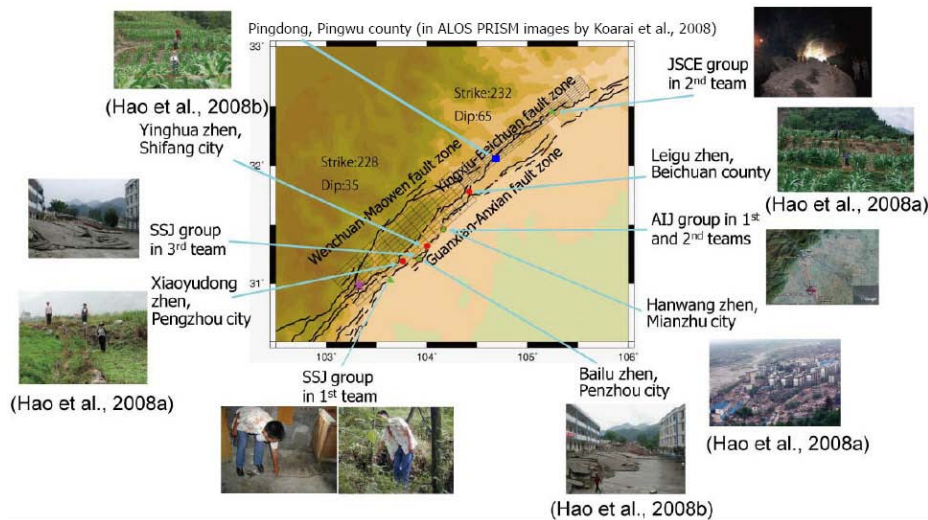


図-2 地表地震断層等の調査結果

通常である。

遠地記録の点震源解析の結果（図-1）を見ると、2008年汶川地震の震源断層は南側で北西傾斜の低角逆断層、北側は多少の北西傾斜の逆断層成分を含む高角の横ずれ断層であることが予想される。一方、Koketsu et al.<sup>4)</sup>は四川大地震復旧技術支援連絡会議<sup>5,6)</sup>やHao et al.<sup>7,8)</sup>による地表地震断層の調査結果をコンパイルし（図-2の▲と●）、龍門山衝上断層帯であらかじめ知られていた断層トレース<sup>9,10,11)</sup>（図-2の実線）と比較した。なお、図-2では、地球観測技術衛星「だいち（ALOS）」に搭載のPRISMという装置の画像から推定された地表地震断層の位置<sup>12)</sup>（■印）も併せて示した。

比較の結果、龍門山衝上断層帯の南半分では、同断層帯を構成する3断層系のうちもっとも南東側（もっとも四川盆地寄り）の灌県-安県断層系（Guanxian-Anxian fault zone）に沿って地表地震断層がみつまっているように見えるのに対して、北半分では映秀-北川断層系（Yingxiu-Beichuan fault zone）に沿っているように見える。こうした南半分の断層面と北半分の断層面の位置関係は、南側が北西傾斜の低角断層、北側が高角断層であるという前述の点震源解析の結果と調和的である。

### 3. 余震分布と断層モデル

USGSによる本震後1週間の余震分布（図-3のドット）を見ても、南半分では余震の震央が灌県-安県断層系から北西側（チベット高原側）に分布しているのに対して、北半分では映秀-北川断層系前後から北西側に分布しているように見える。このこともやはり、図-2から推定される断層面の位置関係と調和的である。そこで2008年汶川地震の断層モデルは南北の2セグメントから成る構成とし、各セグメントの幾何形状は図-2と図-3に示した格子面のように決定した。

ところが、中国地震局<sup>13)</sup>やKirby et al.<sup>14)</sup>による予備的な検討結果では、南部セグメントでも映秀-北川断層系を地表地震断層としている。しかし、この位置に南部セグメントの上端を持ってくると、点震源解析（図-1）で得られている低角傾斜の断層モデルを設定することができない。また、図-2の灌県-安県断層系沿いに南から3番目の●地点（彭州市白鹿鎮）では、図-4のような非常に明瞭で大きなすべりの地表地震断層（断層変位は上下変位だけでも約3m）が出現しているので、ここではまず南部セグメントの断層モデルとして、その上端を灌県-安県断層系付近の地表近くとした。

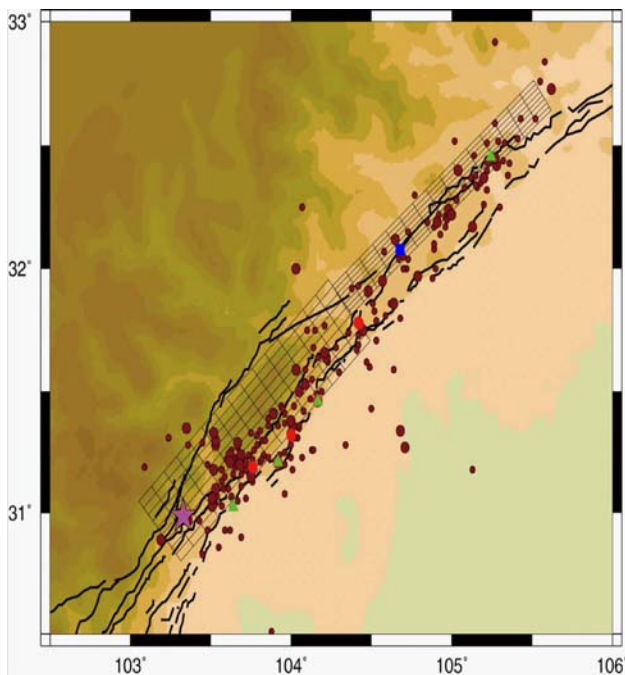


図-3 余震分布と断層モデルの比較



図-4 彭州市白鹿鎮の校庭に現れた地表地震断層

#### 4. 震源インバージョン (1)

図-2, 3の断層モデルと, IRIS DMC からダウンロードした記録から抽出した遠地実体波を用いて, 震源過程のインバージョン (震源インバージョン) を行った. インバージョン法には Yoshida et al. (1996)<sup>15)</sup>と Hikima and Koketsu (2005)<sup>16)</sup>によるものを用い, グリーン関数は Kikuchi and Kanamori (1991)<sup>3)</sup>に基づいて計算した. このインバージョンにより得られたすべり分布 (北西側上盤の動き) を図-5に示した. 主要なすべりは長さ250 kmの間で起こっているので, 断層面の幅40 kmを掛けると断層面積は10,000 km<sup>2</sup>となる. 右側 (南西側) の南部セグメントでは逆断層成分が主体となっているのに対して, 左側 (北東側) の北部セグメントでは横ずれが主体となっている. また, どちらのセグメン

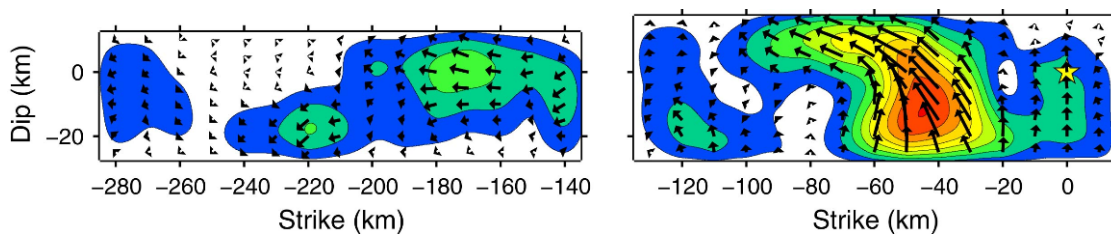


図-5 遠地実体波データのインバージョンにより得られたすべり分布 (北西側上盤の動き)

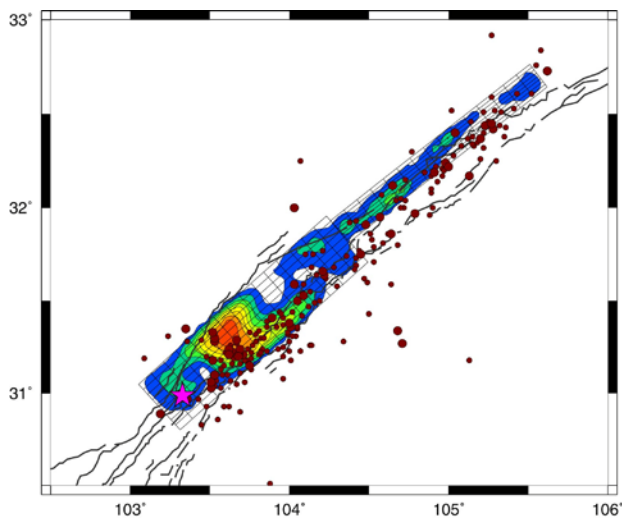


図-6 地表面に投影した遠地実体波インバージョンのすべり分布

#### 5. 震源インバージョン (2)

前節の震源インバージョンに, 震源域近傍で観測された強震動データを追加していく作業を現在, 進めている. 最初の試みとして, 2008年10月に Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration の Vol. 28 の Supplement<sup>17)</sup>の中で出版された3観測点 (WCW, MZQ, SFB) の強震動データ (図-7) を追加して, 前節の

トにもひとつずつ, すべりの大きな場所 (アスペリティ) が現れた. 両方の合計で地震モーメントは  $1.0 \times 10^{21}$  Nm となり, これはモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) 7.9 に相当する. 最大すべり量は約9 mである.

このすべり分布を地表に投影して, 断層トレースや余震震央と重ね描いたものを図-6に示した. 余震はアスペリティの周辺で起こっているように見受けられる. また, 南部セグメントにある最大アスペリティは, この地域では唯一カンブリア紀以前の岩石で構成された灌彭山塊 (Pengguan Massif) の位置に復元されており, その地質学意味合いを十分に検討する必要がある.

遠地実体波データと併せて同時インバージョンを行った. 強震動のグリーン関数は Koketsu (1985)<sup>18)</sup>に基づいて計算した.

この暫定的な同時インバージョンにより得られたすべり分布 (北西側上盤の動き) を図-8に, それを地表に投影して断層トレースや余震分布を重ね描いたものを図-9に示した. 図-8, 図-9を遠地実体波データのみインバージョン結果 (図-5, 図-6) と比較すると, 全体の地震モーメントや  $M_w$  はほとんど変化しないが, 南部セグメントの最大アスペリティの形状が変化するなど, アスペリティの詳細な構造が見えてきた.

追加した強震動データはわずか3観測点であり, 図-9に示すようにそれら観測点も南部セグメントの周辺に限られるので, まだ断定的なことが言える状態ではない. 今後, 北部セグメント周辺などの強震動データをさらに追加して, 詳細で精度の高い震源モデルを構築していく予定である. また, 人工衛星搭載の合成開口レーダーによる画像の解析から, 映秀-北川断層系のうち南部領域内の部分も地震時にすべりを起こしたとの報告がある<sup>19)</sup>. 図-2や図-4などから南部セグメントで灌彭-安県断層系が動いたのは明らかであるから, これは南部セグメントが灌彭-安県断層系と映秀-北川断層系の二面で構成されている可能性を示唆している. こうした二重面の断層モデルも検討する予定である.

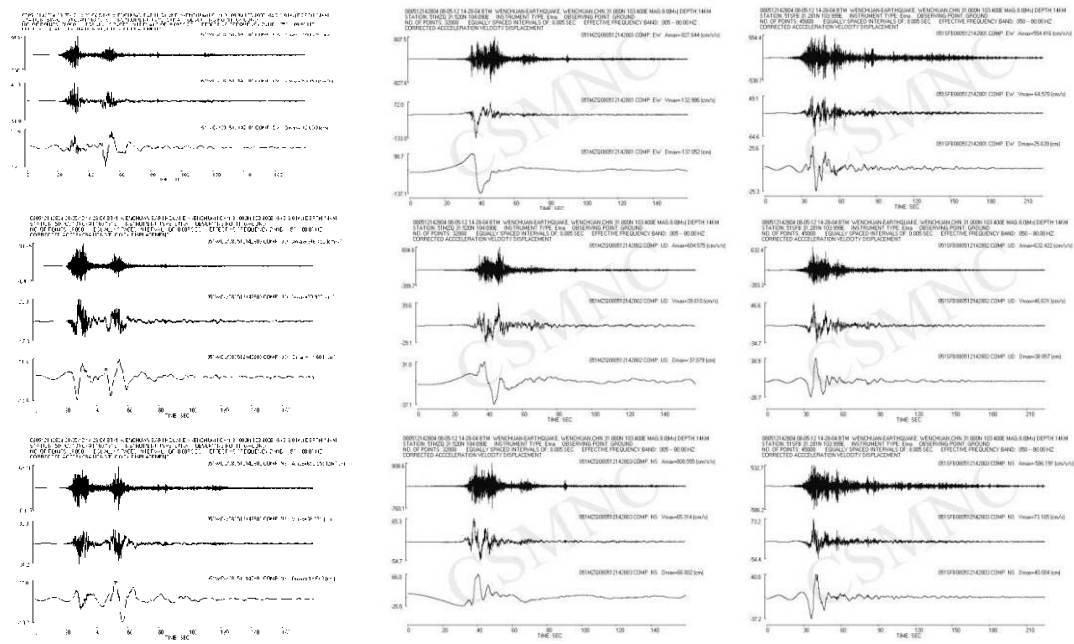


図-7 震源域近傍の観測点（右：WCW，中：MZQ，左：SFB）における未調整の強震動データ<sup>17)</sup>。上から東西・上下・南北成分のそれぞれ加速度，速度，変位波形

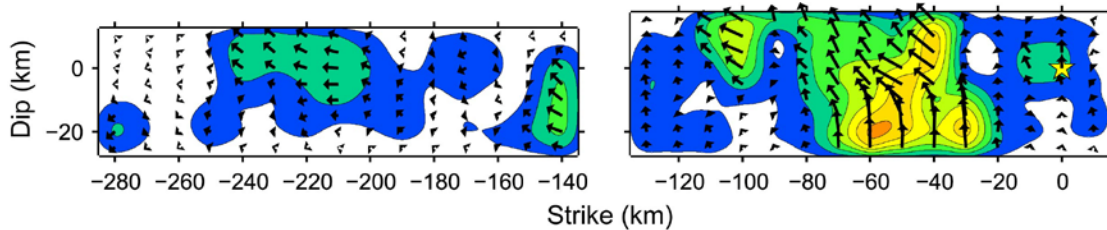


図-8 遠地実体波と強震動データの同時インバージョンにより得られたすべり分布（北西側上盤の動き）

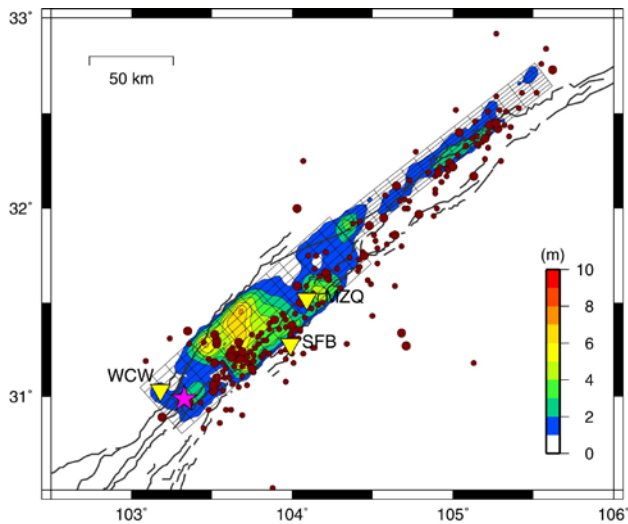


図-9 地表面に投影した遠地実体波と強震動データの同時インバージョンのすべり分布

## 6. 地震動

Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration の Vol. 28 の Supplement<sup>17)</sup>の中では，震度の分布（図-10）や

最大加速度の分布（図-11）も公開された．それらと図-6などのすべり分布を比較すると，大きな震度や最大加速度が震源域（地下で震源断層が広がっている領域），特にアスペリティの直上で起こっているように見える．

中国の震度階は改正メルカリ震度階に似た12階級であるが，震度XIIは史上いまだ与えられたことがないので，南部と北部のアスペリティの直上には事実上の最大震度である震度XIが現れている．したがって，甚大な被害をもたらした最大の要因としては，やはり震源域の強震動を挙げざるをえないであろう．なお，震度IXの分布や最大加速度500galの分布を見ると，震源域の南部では北部に比べ，それらの分布が南東側に延びているように見える．この事実は余震分布と同じように，南部セグメントの断層面が北部セグメントの断層面に比べ低角で南東側に延びている，われわれの断層モデルや二重面の断層モデルを支持しているだろう．

このほか，震源域からの距離が1,500km以上離れている北京，上海，台北などの高層ビル内では，2008年汶川地震からの長周期地震動が観測，体感されたことも付記しておきたい．

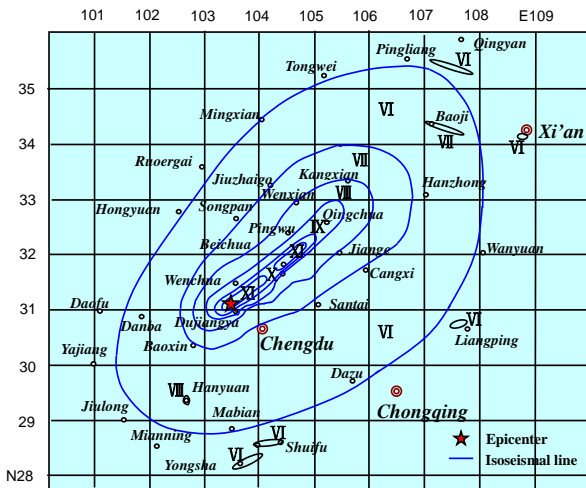


図-6 震度の分布<sup>11)</sup>

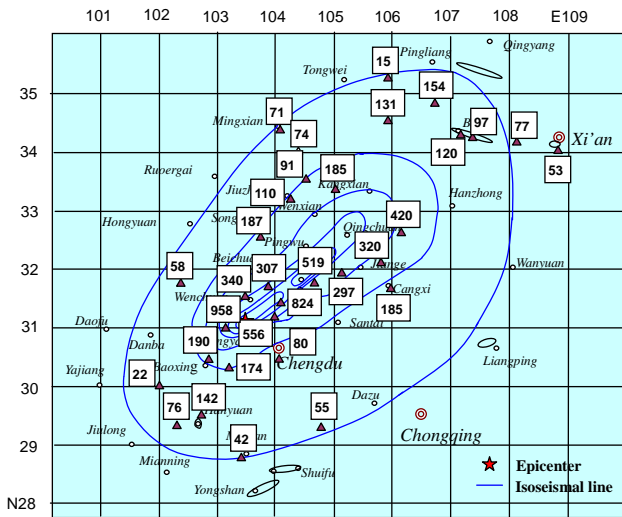


図-7 最大加速度 (東西成分) の分布<sup>11)</sup>

[参考文献]

- 1) 瀨瀨一起: 四川大地震 (汶川地震) の震源断層と地震動, 橋梁と基礎, Vol. 42, No. 12, pp. 19~21 (2008)
- 2) K. Koketsu, K. Hikima, H. Miyake, T. Maruyama, Z. Wang: Source process and ground motions of the 2008 Wenchuan, China, earthquake, Eos Trans. AGU, Vol. 89, No. 53, Fall Meet. Suppl., Abstract S31B-1914 (2008)
- 3) M. Kikuchi, H. Kanamori: Inversion of complex body waves - III, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 81, pp. 2335~2350 (1991)
- 4) K. Koketsu, K. Hikima, H. Miyake, T. Maruyama: Source process and ground motions of the 2008 Sichuan, China,

earthquake, Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng., S31-027 (2008)

- 5) 四川大地震復旧技術支援連絡会議: 報告会資料, 土木学会 (2008)
- 6) 瀨瀨一起, 岩田知孝: 「四川大地震復旧技術支援連絡会議」活動報告, 日本地震学会ニュースレター, Vol. 20, No. 4, pp. 6~7 (2008)
- 7) 郝憲生, 藤原広行, 司宏俊: 中国四川大地震の現地調査速報, 防災科研ニュース, No. 164, pp. 12~17 (2008a)
- 8) K. X.-S. Hao, H. Si, H. Fujiwara: A preliminary investigation of the coseismic surface ruptures for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China, Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng., S31-007 (2008b)
- 9) E. Kirby, K. X. Whipple, W. Tang, Z. Chen: Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles, J. Geophys. Res., Vol. 108, 2217, doi:10.1029/2001JB000861 (2003)
- 10) B. C. Burchfiel, Z. Chen, Y. Liu, L. H. Royden, Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China, Int. Geol. Rev., Vol. 37, pp. 661~735 (1995)
- 11) A. L. Densmore, M. A. Ellis, Y. Li, R. Zhou, G. S. Hancock, N. Richardson: Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau, Tectonics, Vol. 26, TC4005, doi:10.1029/2006TC001987 (2007)
- 12) 小荒井衛, 中埜貴元, 岩橋純子: 中国・四川省の地震による地表地震断層をALOS PRISM 単画像により判読 (速報), <http://cais.gsi.go.jp/Research/geoinfo/SichuanEarthquakeALOS.pdf> (2008)
- 13) 中国地震局: 汶川 8.0 級地震成因分析, [http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/\\_content/08\\_05/30/1212119940937.html](http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_05/30/1212119940937.html) (2008)
- 14) E. Kirby, K. Whipple, N. Harkins, Topography reveals seismic hazard, Nature Geoscience, Vol. 1, pp. 485-487 (2008)
- 15) S. Yoshida, K. Koketsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato, Y. Yoshida: Joint inversion of the 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)
- 16) K. Hikima, K. Koketsu: Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 18, L18303, doi:10.1029/2005GL023588 (2005)
  - 17) General Introduction to Engineering Damage during Wenchuan Earthquake, *J. Earthq. Eng. Eng. Vibrat.*, Vol. 28, Supplement (2008)
  - 18) K. Kohketsu: The extended reflectivity method for synthetic near-field seismograms, *J. Phys. Earth*, Vol. 33, pp. 121-131 (1985)
  - 19) T. Kobayashi, Y. Takada, M. Furuya, M. Murakami: Ground deformation associated with the 2008 Sichuan Earthquake in China, estimated using a SAR offset-tracking method, *Eos Trans. AGU*, Vol. 89, No. 53, Fall Meet. Suppl., Abstract G33C-0705 (2008)