

1999年台湾集集地震 (Mw=7.6) と断層摩擦決定のための断層帯の温度計測

Jim MORI*・加納 靖之*

The 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake (Mw=7.6) and Fault Zone Temperature Measurements to determine Fault Friction

Jim MORI* and Yasuyuki KANO*

1. はじめに

1999年9月21日深夜1時47分(協定世界時では9月20日17時47分)に、台湾での最大級の地震(モーメントマグニチュードMw=7.6)が西部丘陵地帯の集集(Chichi)という小さな町の近くで発生した。台湾中央気象局地震測報センターにより決定された震央は(23.85°N, 120.82°E)、深さは約8 kmであった(Fig. 1)。この地震は、台湾の人々や社会基盤に壊滅的な打撃を与えた。とくに、中寮(Chungliao)、南投(Nantou)、台中(Taichung)、豊原(Fengyuan)、東勢(Dongshi)での被害は甚大であった。死者総数は2,489人、負傷者総数は7,000人、被害総額は40億米ドルと見積もられている(Tsai et al., 2001)。揺れは台湾全土で観測され、北東に約100 km離れた台北(Taipei)でも耐震性の低い建築物が倒壊するなどの被害が出た。

京都大学防災研究所の観測チームは、本震発生から3日後に現地に入り、地表断層や建築物被害についての調査を行った(Fig. 2)。この調査の際に

集められた情報は、ウェブサイト(<http://www2.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~sato/taiwan/index.html>)に素早く掲示され、世界中から頻繁にアクセスされた。

この論文では、集集地震の10周年にあたり、この地震の地震学的特徴をまとめるとともに、この間に防災研究所のグループによって行われた断層帯の温度計測の研究成果についても紹介する。

2. 背景のテクトニクス

台湾は造構運動が活発で複雑な地域に位置する。そこでは、フィリピン海プレートが琉球海溝に沿って北西方向へ沈み込む一方で、ユーラシアプレートがマニラ海溝に沿ってフィリピン海プレートの下に潜り込んでいる。フィリピン海プレートは、 7 ± 4 cm/yr (Seno, 1997) の速度でユーラシアプレートに相対的に北西方向に運動しており、その結果として台湾衝突帯が形成されている。最近の地震活動はほとんどが台湾北東部に集中しているが、歴史被害地震は主として台湾の

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本稿に対する討論は平成22年2月末日まで受け付ける。

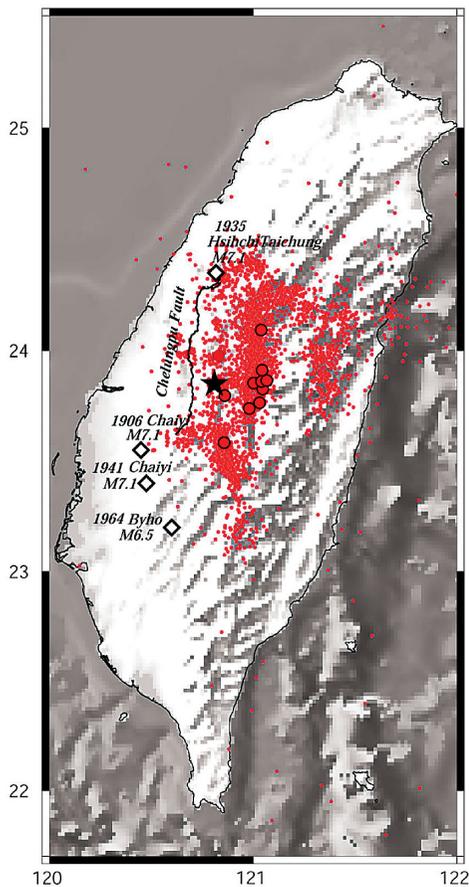


Fig. 1 Map of surface rupture (black line) and aftershocks ($M \geq 3.0$) of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake from September 20 to December 31, 1999. Star shows the mainshock epicenter. Open circles are larger aftershocks ($M \geq 6.0$). Diamonds are large historical earthquakes. Aftershock data from the Taiwan Central Weather Bureau.

西部地域に発生してきた。これは、西部地域に発生する地震の震源が浅いことと、この地域には昔から多くの人が住んでいたからである。1900年代の主要な地震としては、1906年嘉義（Chiayi）地震（ $M7.1$ ）、1935年新竹（Hsinchu）－台中（Taichung）地震（ $M7.1$ ）、1941年嘉義地震（ $M7.1$ ）、1964年白河（Byho）地震（ $M6.5$ ）などが挙げられる。1999年集集地震（ $M7.3$ ）も加えると、台湾という小さな島に1世紀の間に多くの $M7$ クラスの大地震が

発生したことに驚かされる。歴史地震記録は、この国の地震活動度が異常に高いこと、言い換えるとこの地域の大地震の発生率は世界的に見ても高いレベルであることを示している。台湾衝突帯は高い応力状態にあり、このため多くの地震が発生している。

集集地震の発震機構は、基本的には南北走向の断層における逆断層運動である。これは、この地域の東西方向の圧縮応力と調和的である。余震分布と地質構造との関係から、この地震は、東へ緩く傾斜する車籠埔（Chelungpu）断層上で発生したと考えられる。

3. 地表断層

この地震の重要な地震学的特徴の一つは、車籠埔断層に沿う破壊域全体において地表変位が観測されたことである（Ma et al., 1999; Chen et al., 2001）。南北走向の車籠埔断層に沿う約60kmの範囲では、1～4 mの上下変位があった。この断層は、豊原市付近の北端部において北東へ曲がり、複雑な構造をもつ地域に入って終焉する。地震断層は、走向が北東に変わってからさらに約25 km 延びているが、この部分はこれまで活断層としては認識されていなかった。この複雑な断層運動を呈する地域では、非常に大きな上下変位と左横ずれ変位が観測された。ある地点では、川が8 mの変位で断ち切れ、新しく滝ができた。別の地点では、最大9 mの左横ずれ運動が観測された。

4. 強震動

現地調査の結果、強震動による大きな被害は地震断層沿いの震央に近い町に集中していることが分かった。大局的にみると、逆断層の上盤側（地表断層の東側）の被害が下盤側より大きかった。現代的な高層建築物の被害は少なかったが、台中や東勢で数件の大規模構造物の倒壊があった。震央から150 km 離れた台北においても構造物の重症例が報告された。台北での大規模ホテルの倒壊は、盆地構造によるフォーカシングの影響と建物自体の建築上の問題が関係していると思われる。

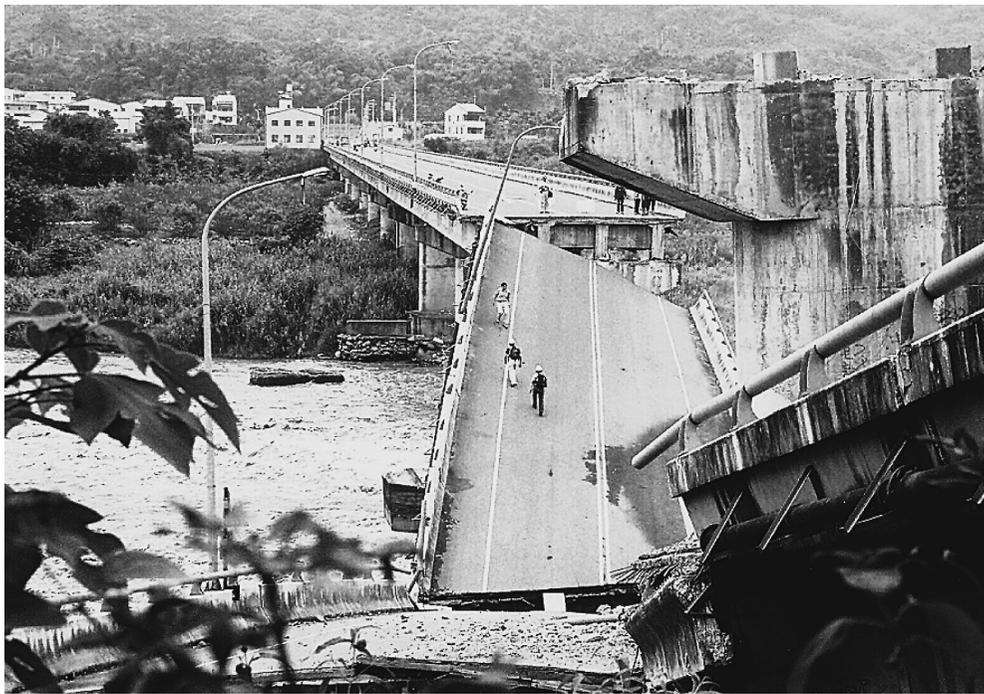


Fig. 2 Photo of Kyoto University team crossing collapsed bridge in Fengyuan. This portion of the bridge collapsed a day later in a large aftershock.

この地震は、台湾国内の稠密な強震観測網 (Liu et al., 1999) で記録され、強震動記録の最も良いデータセットを提供した。これらの広範囲の近地地形データは地震学および工学の分野の多くの研究で利用された (たとえば, Teng et al., 2001)。計測震度マップを見ると、震央域での震度は (台湾の震度階で) 震度 7 に及び、最大加速度 (PGA) は 1000 Gal (10 m s^{-2}) より大きかったことが分かる。とくに、南部の地域では、多くの観測点で 1000 Gal を超えるような最大加速度が観測された。台湾中の何百の観測点において、最大加速度は 25 Gal (0.25 m s^{-2}) より大きく、計測震度は 4 以上であった。このようになりに大きな加速度が広範囲に分布したことが、台湾全土にわたりにがしかの被害を引き起こしたと考えられる。

地震断層の北側部分では、最も大きな変位が見られるのに、高周波地震動による大きな被害がないことは興味深い。この地域では、約 8 m の上下変位があったのにも関わらず、地震動による被

害は予想されるよりもずっと少なく、最大加速度も南側部分よりも小さかった。北側部分での構造物被害のほとんどは、地表断層の直上に限られ、強震動よりもむしろ地表変形によって引き起こされたと言える。この地域で広範囲にわたって地震動による被害が少ないのは、上盤の速くてスムーズな運動で説明できると考えられる。南から北まで観測波形の卓越周波数は有意に変化している。南側の観測点ではより高周波の地震波が観測され、北側の観測点ではより低周波の地震波が観測された。北側では、 400 cm s^{-1} (4 m s^{-1}) に達するような非常に大きな地動速度が観測された。

集集地震は、リアルタイム地震情報システムの最初のテストケースとなった。中央気象局地震測報センターが運用している台湾緊急地震情報システム (Taiwan Rapid Earthquake Information Release System) により、地震発生から 102 秒後には、震源位置とマグニチュードと震度分布が発表された (Wu et al., 2000)。これらの情報は、電子メールや

ファックスやポケットベルにより政府の緊急対応機関に配信された。このすばやい情報配信のおかげで、救急隊による迅速な対応が可能となった。

5. 余震

本震後の5日間で、200個強の有感地震を含む7,000個以上の余震が記録され、震源が決定された。マグニチュードが6以上の余震は11個発生した。これは、この大きさの地震にはめずらしい程のかなり強い余震活動と言える。これらの大きな余震も、パニックや被害を引き起こしたり、ときには犠牲者も出たりして、台湾の人々に影響を与えた。Fig. 1に余震分布を示す。大きな余震のほとんどは、車籠埔断層の東側に、三義・埔里(Sanyi-Puli)地震帯に沿って並んでいる。このことは、集集地震の本震の破壊が車籠埔断層の東側にある別の断層帯を活性化したことを示唆する。

6. 台湾車籠埔断層掘削計画 (TCDP)

車籠埔断層に沿って大きな地表変位が観測されたことは、掘削によって到達可能な深さに大きな断層すべりが存在する可能性を意味する。台湾車籠埔断層掘削計画 (TCDP) と呼ばれるこの計画では、集集地震により大きな変位が生じた場所における断層物質を採ること、断層帯の上下の岩の物性や力学的挙動を計測すること、および大きなすべりの後でのこれらの岩の中の応力状態を記録することを目的として、地下深部において断層帯を掘り抜くことが計画された。地震断層帯の北側部分に位置する大坑(Dakeng)という町の近くで、40m離れて2本の掘削孔が掘られ、1,110mと1,130mの深さで傾斜する衝上断層を貫いた(Fig. 3)。この掘削サイトは、地表断層で約5 mの変位があった場所の近くにある。これらの掘削は、地震発生から65か月後と73か月後に完了した。

掘削孔から得られた断層物質のサンプルを解析することにより、断層帯は、2 cm程度の幅に局在

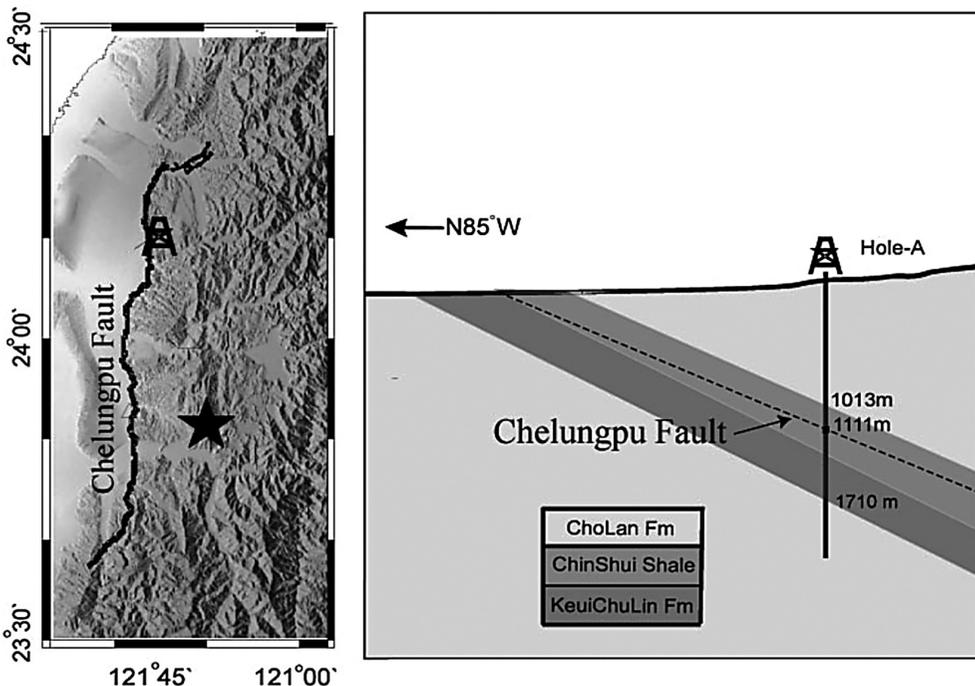


Fig. 3 Location and schematic diagram of the Taiwan Chelungpu fault Drilling Project (TCDP). Drilling tower symbol is the TCDP site and the star is the earthquake epicenter.

化していて、黒色の断層粘土や薄い円盤状の黒色物質で特徴づけられることが分かった。断層帯の物性は、後からの上書きを示すような微細構造をもたない等方的な構造 (Kuo et al., 2005) と、高い破壊エネルギーの証拠となる非常に細かい粒度 (Ma et al., 2006) を示した。このような断層帯の物性と断層近傍での強震動記録は、すべり弱化 (破壊中の摩擦力の減少) を示すものである (Ma et al., 2006; Tanikawa and Shimamoto, 2009)。

7. 断層帯での温度計測

大地震において断層の両側が互いに滑り合うとき、多量の摩擦熱が生成される。断層運動により発生するこの熱は、地震時の熱収支の中で最も大きな部分 (80~90%) を占めると考えられる。地球物理学者は、活断層に関係する熱の観測可能なレベルに関して40年以上にわたり議論を続けてきた (Lachenbruch and Sass, 1980)。たとえば、サンアンドレアス断層からの有意な熱流量が観測されないことから、「熱流量パラドックス」に至り、この断層を駆動している応力の絶対値に関する議論が続いている (Scholz, 2002)。地震の直後に断層をまたいで温度を測れば、この論争に対する最も明白な解答を与えられると考えられていたが、

これまでの大地震に対しては、摩擦熱に起因するような断層近傍の温度変化のよい観測例はなかった。温度上昇の観測、ひいては発生した熱の推定から、断層運動における摩擦力や起震応力レベルに関する情報を得ることができる。これらは、地震の破壊過程の物理を理解するために必要である重要なパラメータのうちで値がわからないものである。このようなことが動機となって、我々は、TCDP 掘削孔の一つにおいて断層帯近傍の温度を計測するというプロジェクトを遂行した。

高い分解能 (0.003°C) で温度分布を得るために、我々は、3 m 離れた2個の水晶発振式温度計を有する長さ約5 mの孔内計測器を開発した。この装置は、圧力変換器とデータ収録器も内蔵していた。2005年9月に行われた観測 (Fig. 4) において、小さな温度変化を計測するには、計測器を孔中でゆっくりと動かしながら連続して温度を計測する方法が一番いいことを見出した。そこで、計測器を下ろすときは1.0m/分の速さで、上げるときは0.4m/分の速さで動かしながら、深さ900~1,250mの区間において、断層帯をまたぐ4つの独立した温度プロファイルを作成した。温度は10秒間隔で連続記録されたので、1 mあたり5~15個の計測値が得られた (Kano et al., 2006)。4つの

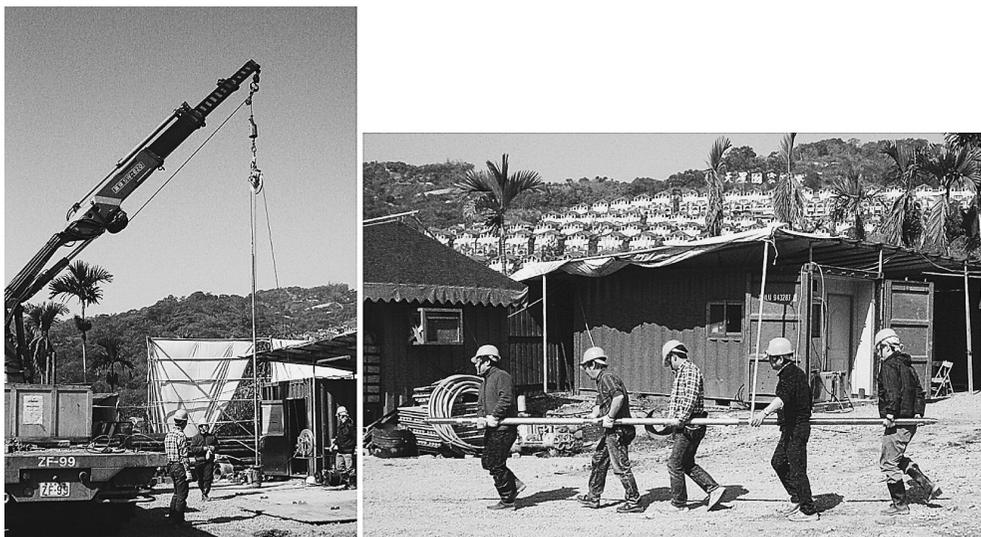


Fig. 4 Installing temperature and pressure instrument in the TCDP borehole.

温度分布の元データを Fig. 5 に示す。4つの温度分布とも、深さ1,105~1,115mにある断層帯領域において直線的な傾きの上側に小さな温度増加 (Fig. 5の影付き部分) を示すことに注意してほしい。似たような特徴をもつ温度分布が、白金抵抗温度計を用いて9月13日から17日に行われた約10mの粗いサンプリングの観測でも独立して得られた。

4つの温度分布に対して、直線的な温度勾配 (0.022K m^{-1}) を除去し、温度異常のピークで揃えてから平均をとったものを Fig. 6 に示す。元データにおける深さの関数としての温度増加は、熱伝導率の場所による違いを反映して、完全に直線ではない。岩の種類や含水量が違えば、伝導率も違ってくるので、観測された温度分布に揺らぎが生じる。断層の摩擦発熱によって生じたと考えられる温度異常を同定するために、本研究では、断層帯の両側の数10mの領域において直線的な温度勾配を仮定する。x軸は、深さ1,111mにあり、東

へ30°で傾斜していると仮定した断層からの距離である。温度異常のデータは、断層帯を中心として、振幅が 0.06°C 、幅が約40mのほぼ対称な形状を示す。我々は、この異常を1999年集集地震の断層運動において生成された摩擦熱の残りとして解釈する。

集集地震に関係する熱を推定するために、観測された温度異常はすべて地震の際に生成された摩擦熱によって引き起こされ、続いて起こる熱輸送はすべて伝導によるものと仮定する。薄層の高温物質が無限媒質中に急激に挿入された場合の1次元熱伝導に対する解は、時間 (t) と距離 (x) の関数として、次式で与えられる (Officer, 1974)。

$$T(x, t) = \frac{S}{2\sqrt{\pi\alpha t}} e^{-x^2/4\alpha t} \quad (1)$$

ここに、 α は熱拡散率であり、熱源の強さ S は、

$$S = \frac{\tau u}{c\rho} \quad (2)$$

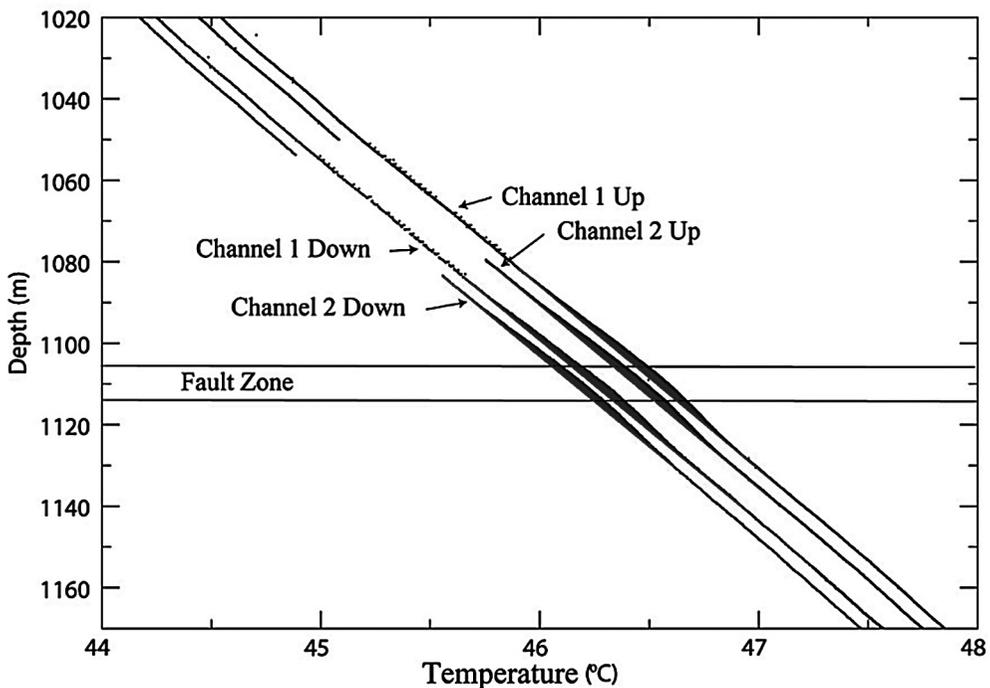


Fig. 5 Temperature profiles measured across the Chelungpu fault zone at 1100 meter depth during September 2005.

となる (Kanamori and Heaton, 2001)。u は断層変位, c は比熱, ρ は密度, τ はせん断応力である。式 (1) を Fig. 6 の温度データに合わせることで、熱拡散率 α と熱源の強さ S を推定する。α の値は主に温度異常曲線の幅を, S はその振幅を制御する。熱源は、温度異常曲線の中心に位置する薄層、すなわち深さ 1,111 m にある断層と仮定する。断層変位 u, 比熱 c, 密度 ρ に対してそれぞれ 5 m, 1,700 J kg⁻¹ K⁻¹, 2,200 kg m⁻³ という値を用いる。時間 t は 1.89 × 10⁸ s (約 6 年) である。グリッドサーチにより α と S を求めると、それぞれ 3.4 × 10⁻⁷ m² s⁻¹ と 1.5 m K となる。

S の値と式 (2) から、観測された温度異常を引き起こしたせん断応力を見積もると、1.1 MPa となる。決定された熱拡散率とせん断応力を用いて計算された温度分布を観測データとともに Fig. 6 に示す。比較のために、せん断応力の他の値に対する理論曲線も示されている。

標準的な定義式,

$$\alpha = \frac{\kappa}{c\rho} \quad (3)$$

を用いると、得られた熱拡散率を熱伝導度 κ に変換することができ、κ = 1.3 J m⁻¹ s⁻¹ K⁻¹ となる。車籠埔断層帯は錦水 (Chinsui) 頁岩層の中にある (Fig. 3)。推定された熱伝導率は、頁岩の実験室での計測値、0.9~2.5 J m⁻¹ s⁻¹ K⁻¹ (Clark, 1966)

と調和的である。この結果は、水の流れによる熱の輸送は重要ではなく、単純な熱伝導モデルの適用が妥当であることを示唆する。

温度異常を引き起こすせん断応力の計算値は非常に小さいものであった。鉛直応力 (静岩圧 - 静水圧) は 16 MPa と見積もられる。逆断層の環境では、最大水平応力は、鉛直応力より 2 倍程度大きく (Sibson, 1974), 16~32 MPa となる。したがって、観測された温度変化を引き起こすために必要な 0.60 MPa のせん断応力は、最大水平応力の数% でしかない。このような低いせん断応力は、集集地震における動摩擦が断層のこの部分において極端に小さく、見かけの摩擦係数が 0.02~0.04 であることを意味する。この (動) 摩擦係数は、実験で得られる静摩擦係数 (Byerlee, 1978) より 1 桁小さい。

我々が推定した非常に低い摩擦が、集集地震における大すべり域全体の性質をあらわしているかどうかを評価するのは難しい。たとえば我々の結果が局在化した部分にしか適用できないとしても、断層のこの部分は動摩擦が低いレベルにあると言える。このことは、断層運動において、潤滑作用や摩擦発熱や静水圧を超える間隙水圧のような摩擦力を軽減する仕組みが存在することを意味する。このような小さな発熱ではおそらく断層の溶融は起こらなかったであろう。本当の地震発生域ほど深くないので、すべりが低い応力状態で発生

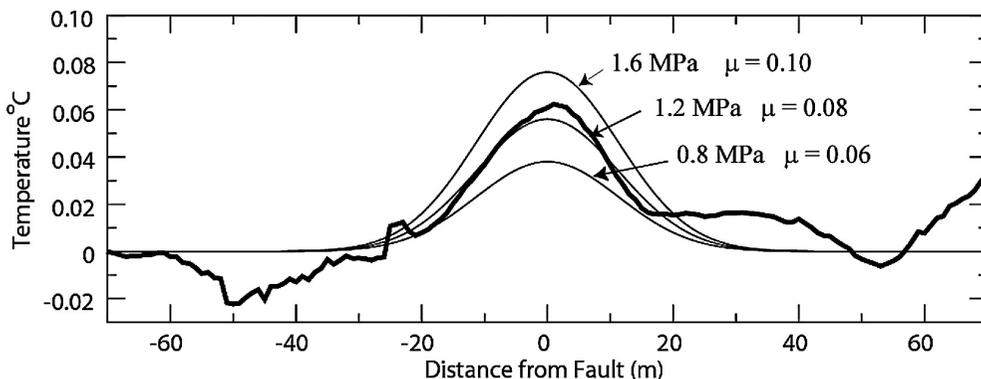


Fig. 6 Observed (thick line) and model calculations (thin lines) of the temperature anomaly across the Chelungpu Fault zone from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake (Kano et al., 2006).

したと考えることもできる。

流体の流れが熱の大部分を運び去ってしまう可能性は、温度計測において常に問題となる。しかし、もしそうであったなら、より高い拡散率をもつより幅広い温度異常を示したであろうと考えられる。我々が温度異常の形から推定した拡散率は、頁岩に対する実験値と同じような値であり、このことは大きな流体の流れがないことを示唆する。ボーリングコアから推定された断層帯付近の透水率も、断層直交方向に早い水の流れはないであろうことを示している (Sone et al., 2005)。

観測された小さな温度異常は、大きなすべりがあったこの領域での断層運動において動摩擦が非常に小さかったことを意味する。このように摩擦が小さいことが他の地震でも言えるかどうか検証する必要があるが、大地震の動的破壊過程を説明するためには、摩擦を小さくする機構が必要なのではないだろうか。

8. まとめ

1999年集集地震は、被害と人命の喪失の点からみて、台湾において衝撃的な事件であった。しかし、偉大な先見の明により前もって展開された稠密強震観測網のデータは、この地震と強震動について高度な理解を可能とした。さらに、TCDPなどの地震後に行われた研究プロジェクトにより、この大地震における断層運動を直接見ることが可能になり、断層帯の物性に関する理解を前進させ、それらと大地震のメカニズムとの関係が解明されつつある。これらの研究は、地震発生機構の理解と強震動研究に寄与し、将来の大地震における損失を軽減するのに役立つものである。

謝辞

本研究を行うにあたり、馬國鳳教授には多大なご支援をいただきました。また、論文の日本語原稿作成において澁谷拓郎博士に協力していただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- Byerlee, J.D., Friction of rocks, *Pure Appl. Geophys.*, 116, 615–626, 1978.
- Chen, Y.-G., W.-S. Chen, J.-C. Lee, Y.-H. Lee, C.-T. Lee, H.-C. Chang, C.-H. Lo, Surface Rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91, 977–985, 2001.
- Clark, S.P. (1966), Handbook of physical constants, *Memoir 97*, Geol. Soc. of Am., New York, 1966.
- Kanamori, H. and T.H. Heaton, Microscopic and macroscopic physics of earthquakes, in *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 120, edited by J. Rundle, D.L. Turcotte, and W. Klein, 147–161, AGU Washington DC, 2001.
- Kano, Y., J. Mori, R. Fujio, H. Ito, T. Yanagidani, S. Nakao, K.F. Ma, Heat Signature on the Chelungpu Fault Associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2006GL026733, 2006.
- Kuo, L.W., S.R. Song, H.Y. Chen, Characteristics of clay mineralogy in the fault zone of the TCDP and its implication, *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Supp.*, 86 (52), Abstract T43D-05, 2005.
- Lachenbruch, A.H. and J.H. Sass, Heat flow and energetic of the San Andreas fault zone, *J. Geophys. Res.*, 85, 6185–6222, 1980.
- Liu, K.-S., T.-C. Shin, Y.-B. Tsai, A free-field strong motion network in Taiwan, *TSMIP, TAO*, 10, 377–396, 1999.
- Ma, K.F., C.T. Lee, Y.B. Tsai, T.C. Shin, J. Mori, The Chi-Chi, Taiwan earthquake: Large surface displacements on an inland thrust fault, *EOS*, 80, 605–611, 1999.
- Ma, K.F., H. Tanaka, S.R. Song, C.Y. Wang, J.H. Hung, Y.B. Tsai, J. Mori, Y.F. Song, E.C. Yeh, W. Soh, H. Sone, L.W. Kuo, H.Y. Wu, Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, *Nature*, 444, 473–476, 2006.
- Officer, C.B., Introduction to Theoretical Geophysics, Springer, New York, 1974.
- Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Chi-chi (Taiwan) Earthquake, <http://www2.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~sato/taiwan/index.html>, 2009年

7月1日.

- Scholz, C.H., The debate on the strength of crustal fault zones, in *The Mechanisms of Earthquake Faulting*, Cambridge Univ. Press, New York, 2002.
- Seno, T. The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate, *Tectonophysics* 42, 209-226, 1977.
- Sibson, R.H., Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults, *Nature*, 249, 542-544. 1974.
- Sone, H., T. Shimamoto, H. Noda, S. Song, K. Ma, J. Hung, and C. Wang, Frictional properties and permeability of fault rocks from Taiwan Chelungpu-fault drilling project and their implications for high-velocity slip weakening, *Eos Trans. AGU*, 86 (52), *Fall Meet. Suppl.*, Abstract T43D-06, 2005.
- Tanikawa, W., and T. Shimamoto,, Frictional and transport properties of the Chelungpu fault from shallow borehole data and their correlation with seismic behavior during the 1999 Chi-Chi earthquake, *J. Geophys. Res.*, 114, B01402, doi:10.1029/2008JB005750, 2009.
- Teng, T-L., Y-B., Tsai, W.H.K. Lee, Preface to the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake dedicated issue, *Bull. Seismol. Soc., Am.*, 91, 893-894, 2001.
- Tsai, Y.B., T.M. Yu, H.L. Chao, C.P. Lee, Spatial distribution and age dependence of human-fatality rates form the Chi-Chi, Taiwan earthquake of 21 September 1999, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91, 1298-1309, 2001.
- Wu, Y-M., W.H.K. Lee, C.-C. Chen, T.-C. Shin, T.-L. Teng, Y.-B. Tsai, Performance of the Taiwan rapid earthquake information release system (RTD) during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 71, 338-343, 2000.

(投稿受理：平成21年8月24日)