

特集：第 I 期（2004 年 - 2008 年度）中期計画の成果

－ 総 説 －

台湾チェルンプ断層掘削における成果

東 垣^{1*}

1999 年に生じた台湾集集（チチ）地震（Mw.7.6）で地震すべりを起こしたチェルンプ断層は、同じ地震で変位したにもかかわらず、その北半部とそれ以外の部分で観測された地震すべりの挙動（変位量や変位速度）が大きく異なっていた。この原因として、Ma et al. (2003) は地震波の特徴から北部では地震すべりを起こした断層面の摩擦強度が著しく低下したとし、その摩擦強度の低下の原因を断層ガウジの粘性流潤滑化説で説明しようとした。その後、この考えを検証する目的もあって、チェルンプ断層北部において深度 2000m の地震断層面を貫き、断層面周辺の孔内計測及びコア試料を用いた物質科学的な検討が行われた（台湾チェルンプ断層掘削計画：TCDP）。本論では、この掘削計画のなかでも物質科学的検討結果によって得られた研究成果について概略し、その結果を基に、Ma et al. (2003) で提案された説とは異なり、thermal pressurization 説が最も観察事実をよく説明するとし、なぜ thermal pressurization が生じたのかその成因について考察を行なった。

キーワード：台湾チェルンプ断層掘削計画（TCDP）、台湾集集地震、摩擦強度低下、thermal pressurization 説

2009 年 2 月 3 日受領；2009 年 6 月 3 日受理

1 独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所

代表執筆者：

東 垣

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所

〒783-8502 高知県南国市物部乙200

+81-88-878-2195

azumaw@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

– Review –

Scientific Result of material analyses of the Taiwan Chelungpu fault Drilling Project (TCDP)

Wataru Azuma^{1*}

The Chelungpu fault that had displaced in the Chi-Chi, Taiwan, earthquake in 1999, shows difference in behavior of earthquake slip between the northern and middle-to-southern fault segments in the earthquake fault. The reason why such difference was taken place is likely to cause reduction of the coseismic frictional strength in the earthquake fault. To examine it from the ground truth, the Taiwan Chelungpu fault Drilling Project (TCDP) was conducted, then target for the borehole logging and core sample analyses had been successfully achieved as the International Continental Drilling Program (ICDP). This paper overviewed the TCDP scientific results particularly on the mechanism to cause the coseismic reduction of friction strength of the earthquake fault from the view points of 1) temperature increase, caused by the shear heating, to be estimated by the flux of rare earth element and 2) expansion of the fault material deduced from the porosity change. Here two models; the elastohydrodynamic lubrication and the thermal pressurization to be proposed (Ma et al., 2003), were examined, consequently the author assumed that the fault materials behaved as non-Newtonian particle-powder-water mixture during the earthquake then that the latter model is much appropriate in observation result and rheologic characteristics for this case is proposed.

Keywords : Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project, Chi-Chi earthquake, Lowing of Friction strength, Thermal pressurization

Received 3 February 2009 ; accepted 3 June 2009

1 Kochi Institute for Core Sample Research

Corresponding author:

Wataru Azuma

Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

200, Monobe, Nankoku, Kochi, 783-8502

+81-88-878-2195

azumaw@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

1999年9月21日台湾中西部南投県集集(Chi-Chi)村を震央とする台湾集集地震(Mw 7.6)が生じた(図1)。この地震により約1500名におよぶ人命が失われた。台湾では未曾有の地震災害として人々の記憶に残る地震災害であり、震災後断層博物館を作り、地震断層のsurface breakの一部を保存し、防災教育の教材として現在でも活用している。一方、この地震はnear fieldでの高精度の観測研究例として地震研究に大きな貢献を果たした。すなわち、強震計をはじめとする台湾中央気象局による地殻変動観測ネットワークによる高精度の強震計を含む地震計記録やGPS観測網記録(Shin and Teng, 2001)、地震直後に行なわれたチェルンブ断層のsurface breakの踏査記録やトレンチ記録(Ota et al., 2005)、さらに一年後に行なわれた浅部域の断層掘削等の検討等(Tanaka et al., 2002)、これまでに観測データを用いて、チェルンブ断層という地震断層に沿って生じた地震すべりとrupture propagationの挙動の理解について、世界でも最も正確なデータベースを供する例となったことは特筆すべきことである。このような検討のなかでとりわけ研究者が特に着目したのは、同じ断

層面内での地震すべり挙動の地域差であった。

図2に地震波より求める断層上での地震すべり量分布を示す。その特徴は地震開始より4秒後に顕著な変位が観測される。これをみると、地震の変位は17秒を過ぎる頃からその中心が北部域に限定され、また、その深さも浅い部分に集中する。興味深いのは、変位量の変化である。すなわち、地震直後の断層南部や中央部よりも17秒以降に変位した北部で大きく顕著になっているのである。明らかに断層の末端で変位が大きくさらにその変位の中心が浅部3km以浅に偏っている。地震波の観測より、問題となる北側ではその変位速度が長周期成分に卓越し、その値も>180cm/秒とそれ以外の場所に比べ著しく大きい(Ma et al., 2001)。また、すべり量も北部で大きく、北部以外で<3mであるのに対して問題の北部では最大8mを記録した。一方、図3に示した地質図をみると、今回動いたチェルンブ断層は、地表での踏査の結果等から、その南部・中部側では三位(Sanyi)断層のそれと一致するが、北の部位では三位断層から剥がれ、それは地層の分布とも斜交しながら北端へと連続することが分かった(Yue et al., 2005)。この剥がれた北の部位が先の地震すべり挙動の地域差となって表れた部分

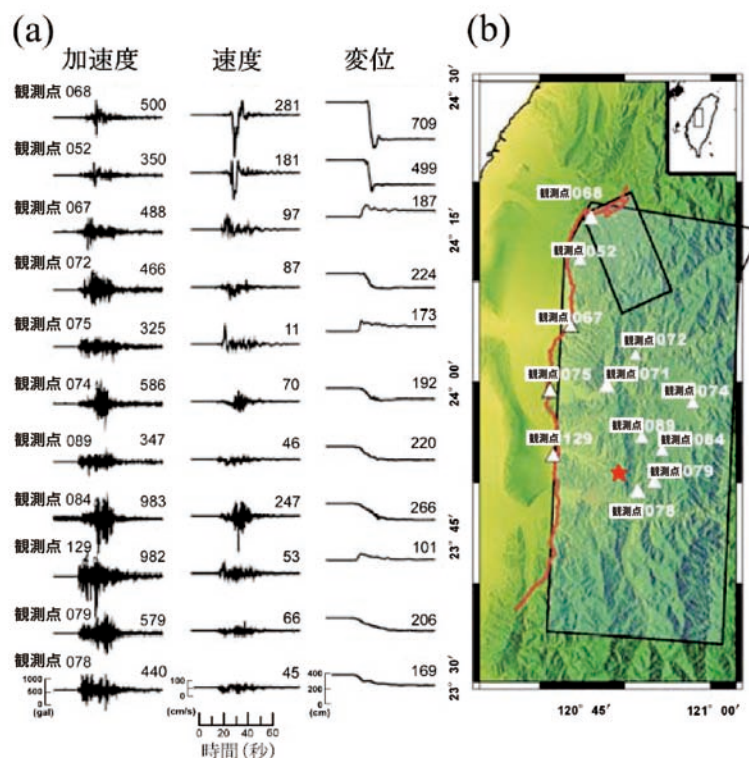


図1 (a) 1999年台湾集集地震断層近傍(断層北部)周辺に設置した強震計による東西成分の強震度地震波形記録(Ma et al., 2003より)
(b) 強震観測点の置かれた位置。地震波形の数値は最大振幅数値を示し、赤線は地表に表れた地震断層線。星印は震央を示す。

Fig. 1 (a) Seismic records, including acceleration, velocity and dislocation, of 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake around the northern part of the Chelungpu Fault (b) Positions of the seismogram stations. Red line shows the surface break of the Chelungpu fault and a red star is the epicenter. (from Ma et al., 2003)

に対応している。このように集集地震では、台中市東方を境にその以南と以北で、地震時のすべり挙動に顕著な違いが認められたが、なぜこのような違いが生じたのかという問題は依然未解決のまま残された。Ma et al. (2001)は、このような地震すべりの挙動の違いを引き起こす原因として断層面における摩擦強度の減少を提案し、以下の三つの説をその機構として挙げた。

- ① thermal pressurization; PT (熱圧化) 説：地震時のスリップに伴い、断層岩物質中の間隙水が断層の剪断に伴う温度上昇によって体積を膨張させ、間隙水圧の増加を引き起こす。この間隙水圧の上昇によって断層面での垂直応力は見かけ上減少し、その結果として断層面での摩擦強度が下がる (cf. Lachenbruch, 1980; Mase & Smith, 1987)
- ② 断層ガウジの粘性流潤滑化説：断層粘土物質 (ガウジ) が地震時の震動に伴い力を受け、あたかも粘性流体として変位するようになると、すべり面の形状効果等による断層ガウジの潤滑化が生じ、結果として周囲に比べ小さ

な断層面の垂直応力でも大きく変位することになる (cf. Brodsky & Kanamori, 2001; Otsuki et al., 2005)

- ③ 断層摩擦溶融説：断層面がすべる際に生じる摩擦熱によって断層構成物質が溶融し ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 前後)、粘性の低い溶融物が断層面全体を覆うことによって、断層の摩擦強度が減少する (cf. Tsutsumi & Shimamoto, 1997)

このような地震断層における摩擦強度の減少についての多くの議論が地震後なされたが、断層面における摩擦強度の減少機構を明らかにするため特に北側の断層に焦点をあて、台湾を中心に日米の協同のもと、この部分を直接貫く深部掘削計画 (Ma et al., 2003) が国際陸上掘削計画 (International Continental Drilling Program: ICDP) に提案され、採択された。こうして、地震から4年が経過した時期に台中市の北東部に位置するにおいて最初の深部掘削が開始された (図3)。掘削は当初の予定通りに地表から2000mを貫く深部掘削孔 Hole A の掘削が行なわれ、その後、断層の傾斜方向に約40m離れた場所で1350mを貫く Hole B、さらにその途中より枝分かれした Hole C の三つの掘削が行なわれた。当初

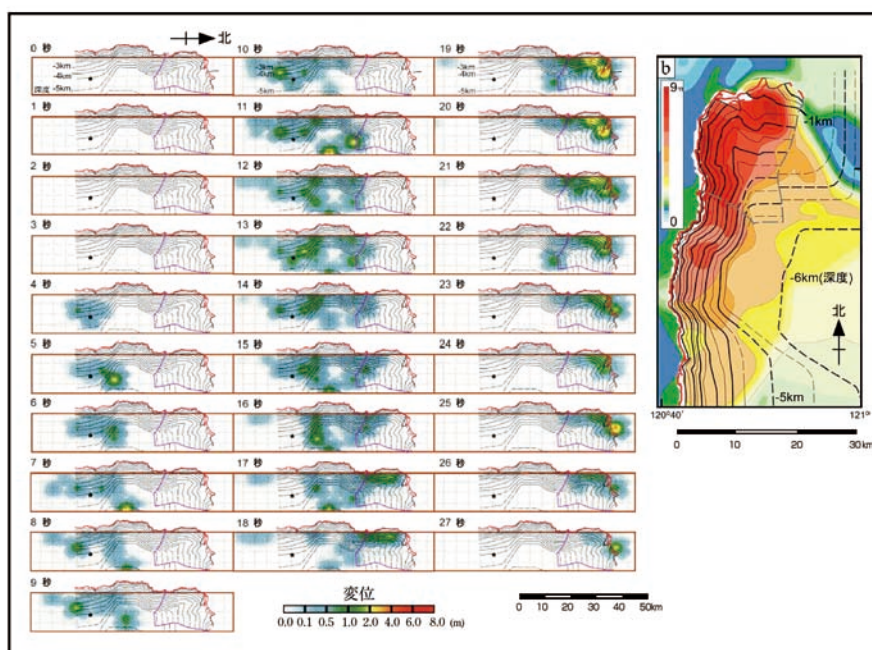


図2 1999年集々地震で復元された断層面沿いのスリップ量の時空変化

地震の変位は地震発生の4秒後から顕在化する。その後変位量の中心は北に向かって進行するが、17秒過ぎからスリップの中心はチェルンブ断層の北側が中心となり、その量も増加する傾向にある。19秒後のイメージではスリップの量は浅部でも大きく、27秒後までスリップ (計算では最大約12m) が記録されている (Yue et al., 2005)。

Fig. 2 Time and geometric distribution of the earthquake slip within the seismic fault surface occurred in the 1999 Chi-Chi earthquake (from Yue et al., 2005). Each box shows slip image of the every second unit and the total amount of the earthquake slip was shown in the larger right box. Red bold line is the boundary between the Sanyi and the Chelungpu Faults. Black dot is the earthquake source. Dislocation was firstly recorded just after 4 sec of occurrence of the earthquake and it tends to migrate northward in second by second. The earthquake slip was significantly developed in the shallow part of the fault, around 19 s to 27 s. The maximum amount of the earthquake slip was reached to ~ 12 m shallower than 5 km deep.

地震波探査より推定されたチェルンブ断層の埋没深度は1800mであった (Wang et al., 2000). これは当初地震を起こしたチェルンブ断層が岩質境界(累層境界)断層と考えられていたからであった. しかし, 実際には, 錦水頁岩層(The Chinsui Shale)内, 具体的には深度1100mから1300mまでの間の含水率が高く新鮮で黒色に変質した断層破碎帯として三つの層準からなる (Hirono et al., 2006; Ma et al., 2006). この三層準は二つの掘削孔 (Hole A 及び Hole B) でも見つかり, 互いにそれぞれの破碎帯の対比がなされた (Hirono et al., 2007). なかでも, 最も上位にあたる断層帯 (Hole A の深度1111m/Hole B の深度1136m 近傍) からは, 1) 孔内計測による温度異常 ($\sim 0.06^{\circ}\text{C}$) (Kano et al., 2006), 2) 孔内及びコア試料の応力解析結果に基づく応力開放の異常 (Lin et al., 2007; Haimson, in press) が認められた. Ma et al. (2006) および Hirono et al. (2008) は, 鏡下での詳しい観察から黒色剪断帯のなかから $>2\text{cm}$ 厚のシャープで直線的な面構造を有する新鮮な剪断帯を認識し, これを主すべり帯 (PSZ: Sibson, 2003) と考え, 1999 年の台湾集集地震で変位したものであると結論した.

黒色剪断帯を詳しくみてみよう (図4). 薄片観察やX線CT検査を行なってみると (eg. Hirono et al., 2008), 含まれる石英や長石等の鉱物粒子や粘土鉱物は細粒化しており, 級化等の構造は特にみえない. 一方, X線CTスキンの画像データをくわしくみると (図4), 1136m の黒色剪断帯に

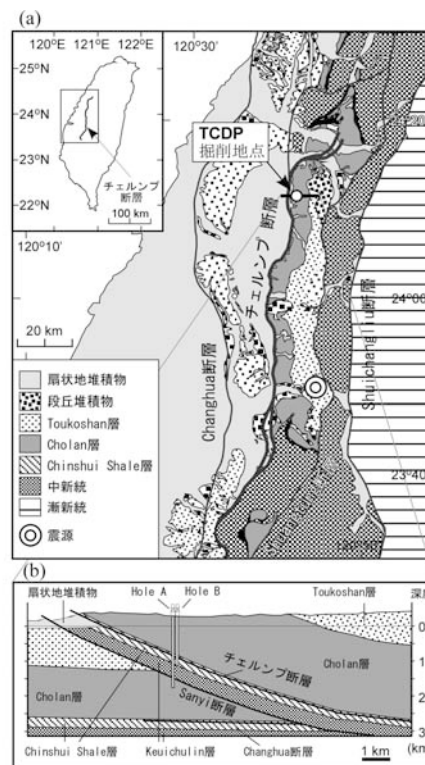


図3 (a) TCDPの掘削サイトの位置と周辺の地質概要 (Wang et al., 2000) (b) 掘削地点及び周辺の地質断面図 (Wu et al., 2007). 断面図の位置は(a)に掘削点を東西に切る線で示される.

Fig. 3 Geologic map of the Chelungpu Fault with the position of the drilling site (upper box) and the geologic section across the drilling site (down box) (from Wu et al., 2007). Location of the cross section (b) is shown in bold line in (a).

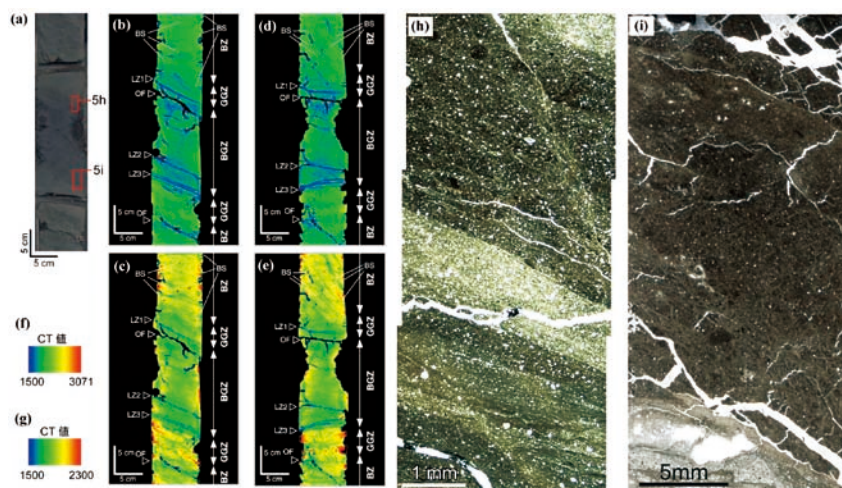


図4 Hole Bの地下1136m付近にみられる断層帯近傍

(a) 半裁されたコア試料の写真, (b-e) X線CTスキャンと(5h,5i)それぞれの色とCTスケール(f,g)及び偏光顕微鏡写真(いずれも直行ニコル)像(h,i). CT像中に記載されたBZ, BGZ, GGZはbreccia zone, Black gouge zone, gray gouge zone. LZ1~LZ3およびOFはLineament1-同3(本文参照)および試料欠損ゾーンをそれぞれ表す.

Fig. 4 (a) Photo image of the core section. (b to e) X ray Computed Tomography (CT) Images of different CT number scale images. Three possible fractures LZ1 to LZ3 are identified. (h and i) thin section open Nicol's prism images of 5h and 5i sites in (a). (from Hirono et al., 2008)

はLZ1, LZ2, LZ3の3つの剪断面が観察できる。但し、L1やL3は面自体が撓んでいたりする一方、LZ2だけは直線的でシャープな形状を示している。このことからLZ2は他に比べ最も直近できたスリップ帯と判断される。これは、Hole Cで行なわれたMa et al. (2006)の観察結果とも対応しており、LZ2が先の99年台湾集集地震の主スリップ帯と推定されて根拠のひとつである。問題のLZ2の部分の顕微鏡下イメージを観察してみよう。相当する部位は厚さ>2cmの細粒化の進んだ薄層で、偏向ニコルを入れた状態で内部を詳しく観察すると、比較的粗粒の石英や長石粒子が万遍に含まれるものの、全体としては細粒化の進んだウルトラカタクレーサイトからなる(Boullier et al., 2008)。

また、LZ2では炭酸塩鉱物やパイライト等の鉱物の消失が起きていた。しかし、LZ2周辺では鉱物の溶融、ガラス化を示す現象(Otsuki et al., 2009)は極めてまれにしか確認されていない。その一方で、帯磁率は強くなっており、含まれる強磁性鉱物の増加が起きたと解釈される。帯磁率の増加を説明するため、採取されたコア試料を使って室内での加熱再現実験を行なった結果によれば、~400℃程度で強磁性鉱物が新たに形成され、帯磁率に変化が生じることが分かった(Mishima et al., 2006; Tanikawa et al., 2008)。他方、Ishikawa et al. (2008)は、剪断物質に含まれる微量元素及び同位体比分析を行なった。その結果、不適合元素であるCs, RbやLiは周りのガウジ物質にくらべ顕著に減少、Srは増加していた。一方、適合元素であるBa, La, PdやSmにはなんら顕著な違いが認められなかった。この結果を用いて、You et al. (1996)による南海トラフの堆積物を使った微量元素の熱水実験の結果と比べ、その量比より被熱温度を求めてみると~350℃となった。これとは別に、Hamada et al. (2009)やOtsuki et al. (2009)は、断層物質中に鉱物の溶融に伴い生じたシュードタキライトの存在を報告している。但し、その量は極めて少なく、局部的に鉱物が溶融する程度の高熱状態が生じたことを示している。

2. チェルンブ断層で何が分かったのか？

では以下に3つの説の妥当性について考えてみたい。北部で生じた地震すべり運動を説明するために、最も初期に提唱された考え方はMa et al. (2003)による断層ガウジ物質の粘性流潤滑化説である。これはBrodsky and Kanamori (2001)の動的弾性流体潤滑モデル(elastohydrodynamic lubrication model)を集集地震に適用したもので、断層ガウ物質が粘性流体として振舞うと仮定してNavier-Stokes式を用い、断層面の形状効果との関係をもとに断層ガウジ粘性流体としての圧力増加による潤滑化を説明しようとしている点が特徴である。しかし、コアスケールで観察される多くの剪断面(特に

変形集中帯と非集中帯の境界面)は直線的である。従って、ガウジ内の圧力増加を引き起こすために必要な断層面の凹凸度が粘性流潤滑化説に必要とされる大きさ(アスペリティ(断層面の凹凸の高さと幅の比) $>10^{-3} \sim 10^{-4}$)を満足していたかどうかについては検証が難しい。換言すれば、今回のように断層の幅を最大ひずみ帯(PSZ)として捉え20mmであったとすれば、断層面の凹凸は最低限0.002 mm以上が必要となる。従って、粘性流潤滑化説を検証する上で重要なすべり面のスケールは、コアおよび露頭スケールにおいて判断が容易でなく今後の課題として残されている。

一方、LZ2の含水率等を考慮すると、実際的には、地震で動いたLZ2では含まれる間隙率を考えれば変位時での固体粒子の影響を無視できない。換言すると、地震時のLZ2は粘性流体というよりはむしろ固体粒子と流体との固液混合層と考えるべきものであり、地震すべり(変位)の挙動は必ずしも粘性流体で単純に記述されるようなものとはならない。素過程についての考え方を整理するため、Middleton and Hampton (1973)に従って、粘性流体と粉粒体流体混合流体のそれぞれにおける応力と歪みとの関係で示してみよう。この式で表されるように、今回観察した断層ガウジ物質の場合、その変位は少なくとも粘性流潤滑化説で仮定した粘性流体モデル(1)式だけでなく、粒(粉)子間の総合作用を表す項目(第二項)と粘着力の項目(第三項)の影響を考慮した粉粒体流体混合層のレオロジーモデルを(2)式に示した。このモデルによれば、断層物質が変位する際の剪断抵抗には、第一項の粘性の他にも、第二項や第三項があつて、とりわけ変位当初の段階でこの後者は大きな役割を果たす。

$$\tau = \mu e \quad (\text{粘性流体}) \quad (1)$$

$$\tau = \mu e + \delta_n \tan \phi + C \quad (\text{粉粒体流体混合流体}) \quad (2)$$

ただし、 τ :剪断応力 μ :粘性 e :歪み速度 δ_n :垂直応力 ϕ :粒(粉)子内部摩擦角 C :粘着力。

実際にチェルンブ断層で(2)式のモデルが働いていたとする例を挙げよう。地震すべりに伴う剪断応力($\tau > \delta_n \tan \phi + C$)により、変形にとって最も大きな抵抗であった粒子間の固結が壊れ、粒子間もしくは粒子内部の結合フレーム等が壊される。さらに、歪みが面に沿って集中し、側方へ繋がるようになると集中帯中に含まれる粒子は粉碎を受け、その粘着力は一挙に小さくなる。但し、破壊変形の結果として歪み集中帯での粒子の細粒化が進み、なかには構成粒径が 10^{-4} m以下の粉体まで小さくなる。さらに細粒化に伴い構成粒子の淘汰がよくなると、集合体としての粒子は粒体というよりは粉体として挙動しはじめる。粉体はその化学組成と無関係に内部に

比べてエネルギーの大きい表面の面積がその体積（重力）効果よりも大きくなるため、Van der Waals 力という新たな粘着力として再度働くことになる。

一方、細粒化が進む事で粉粒体自体の淘汰が良くなり、地震のような急な剪断力がかかる場合には「レイノルズの膨張」現象が生じる（第二項の影響）。すなわち、粉粒体媒質では、外部からの剪断によって粉粒体媒質が変形すると、粒子間の空隙が増して媒体全体の体積膨張が起こる（レイノルズの膨張理論: dilatancy principal）。事実、珪砂・ベントナイト混合試料を用いた工学実験によれば（例えば、斉藤他, 2007）、第二項の ϕ 値（内部摩擦角）は剪断速度に依存して変化することが報告されている。但し、この変化は、物質の種類やひずみ速度等によって多様であり、一義的には決められない。他方、垂直応力（圧力）は物質内部の流体の量や温度上昇に伴う体積膨張等で変化する。

膨張が起きたとして、どの程度の膨張が生じたのかX線CTスキャン法で得られるCT値から概算することができる（Soh, 1997）。図4の画像に表れるLZ1からLZ3のひずみ集中帯周辺は、同じガウジ内でも、すべからず周りよりも小さなCT値を示すことより、いわゆるひずみ集中帯ではこの値が小さくなるのが分かる。具体的には画像中の黒色ガウジの剪断面周辺（ ~ 1700 ）とそれ以外の場所（ ~ 2100 ）で求められるCT値の差は約400となる。一方CT値から剪断面周辺物質のバルク密度（ $\rho_{\text{試料}}$ ）が換算#できる。この密度差を使ってひずみ集中帯の密度を求めると 0.3g/cm^3 程軽くなっている。この差は断層に伴い含水率が増加した結果であり、膨張により生じたと考えられる。但し、#換算式としてはここでは便宜的にCT値 = $1300 \rho_{\text{試料}}$ （ $\rho_{\text{試料}}$ は試料のバルク密度： g/cm^3 ）を用いた。

さらに、化学分析の結果等からは $\sim 350^\circ\text{C}$ の剪断発熱による高い温度の存在が指摘されており、(1)式に基づきここではニュートン流体として仮定し剪断発熱温度を説明する粘性率を計算してみた。図5に温度及びすべり量と粘性率との関係を示す。実線はMa et al. (2006)で想定された粘性率（ $10\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）であり、極端な例としOtsuki et al. (2005)の $10000\text{ Pa}\cdot\text{s}$ の場合を破線で示した。推定された掘削場所でのすべり量は 8 m （Ma et al., 2006）である。この図から分かる事は、このいずれの粘性率を仮定しても分析から得られた $\sim 350^\circ\text{C}$ 以上の高い温度異常を説明することができなかった。結果として、安定に滑り始めた状態を除いて、特にすべり始め当初の段階を考えれば、いわゆる粘性流潤滑化説だけで $\sim 350^\circ\text{C}$ 以上の温度異常を引き起こすことは難しいことが理解できた。

一方、thermal pressurization（圧熱化）に伴う断層の動的強度低下機構について考えてみたい。この概念は、ガウジ物質と間隙流体の熱膨張率およびガウジ物質とその周辺

物質との透水係数の違いによって、摩擦発熱に伴い地震時の間隙水圧上昇が引き起こされることによって断層面内の有効応力が低下し、結果として断層面の摩擦抵抗を小さくできるというものである。先に述べたように、摩擦発熱の痕跡、間隙水の関与（水の存在）、そして変形集中域での密度の低下（圧熱化に伴う間隙・クラックの生成）と含水率の増加は、thermal pressurizationが働いたことを示唆するに十分な結果と思われる。測定された摩擦特性と流体移動特性をもとにしたシミュレーションにより、Tanikawa and Shimamoto (2009)はチェルンプ断層の北側でthermal pressurizationが有効に機能したことを示した。図5に示す北側と南側の例をみると、その北側だけにthermal pressurizationが働いていたことが分かる。ここで重要なことは、すべり面近傍の細粒な断層ガウジの透水係数である。すなわち今回測定された透水係数は比較的低い値（ $10^{-16} \sim 10^{-17}\text{ m}^2$ ）で断層面が非透水層に比べ高い値を示し、断層帯は低い値の層に囲まれた状態になる。シミュレーションの結果では、このような地質条件下では摩擦発熱により体積膨張した間隙流体が断層から周囲に逃れられず、結果として断層内部の間隙水圧を著しく上昇させ、断層物質自体を膨張させる。この膨張は一方で断層面の摩擦強度を下

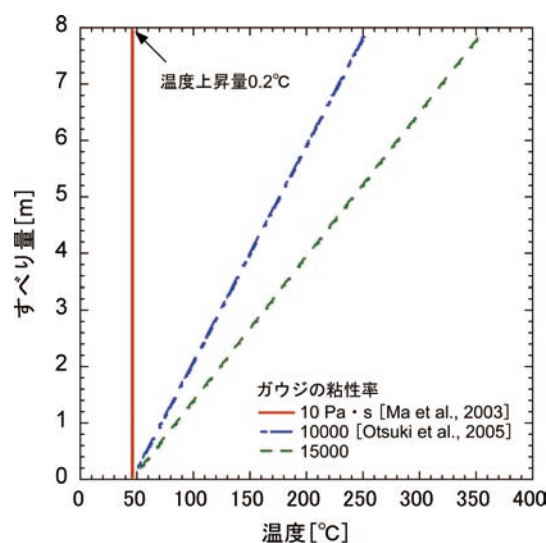


図5 粘性流体を仮定したときの断層ガウジにおける発熱及びすべり量からみた粘性率の相関図。断層のすべり速度: 1.38 m/s 変形帯の厚さ: 20 mm 他は図3.5.9キャプション参照。実線及び破線はMa et al. (2003)とOtsuki et al. (2005)の提唱した粘性率。この場所での地温は 46.5°C (Kano et al., 2006)。

Fig. 5 Relationship between total amount of fault slip (m) and temperature ($^\circ\text{C}$) to be heated by the faulting when the Newtonian fluid is assumed as behavior of the fault material. Hence the inclinations of the lines show viscosity of each fluid. The in-situ burial temperature of 46.5°C was measured by Kano et al., (2006). It can not be explained to increase to $>350^\circ\text{C}$ in the seismic event (Ishikawa et al, 2008), if the fault material is assumed as the Newtonian fluid (see text).

げる役割を果たし、地震すべりの際に断層変位を大きくさせる。同時に、物質の体積膨張により物質内部を冷却させる。従って、thermal pressurizationが有効に働く事で、断層内部は物質の剪断摩擦による極端な高温化を免れることができる。まとめると、thermal pressurizationが働く事で断層物質の溶融は起こさなくとも摩擦強度低下が生じる。先のシミュレーションの結果ではその最大温度は主すべり帯の厚さを10mmとすると350℃となりIshikawa et al. (2008)の求めた反応温度ともそれほど大きく矛盾しない。すなわち、thermal pressurizationという考えは(2)式の第二項で示す垂直応力を小さくする働きをする。

3. おわりに

台湾集集地震によって変位したチェルンブ断層は南海地震を考える上で少なからぬ共通点を有する。Kao and Chen (2000)はこの地震をout-of sequence thrustが活動したとし、震源となる主デコルマ断層から地震すべりがout-of-sequenceへ乗り移り変位したものと考えた。また、You et al. (1996)によるチェルンブ断層と三義断層との幾何学的な関係は南海の付加体でのデコルマ面とそこから派生する分岐断層と少なからずの共通性をもつ。特に、これまで議論してきたチェルンブ断層北側でのすべり挙動は津波を引き起こす海溝型地震のそれと類似する。

2007年末から2008年にかけて、統合深海掘削計画(第314次調査航海)によって、紀伊半島沖Site C0004において分岐断層の浅部域が初めて掘削された(Kimura et al., 2008)。これに先立ち、Moore et al. (2007)は三次元地震波探査を詳しく解析し、南海付加体においてのout-of-sequence断層を示している。この掘削において海底下217.3mの深さから約60mにも及ぶ剪断帯が確認され、1cm厚の黒色に変質した剪断面が発見された。今後予定されている深部掘削において、南海付加体中にみられるmegasequence faultとデコルマ断層においてコア試料を得られる事で、そのどちらが動きやすい特徴を有するのかを検討し、来るべき南海地震の伝搬機構の解明と津波の予測につなげられるものと考えられる。なお、ここに記述できなかった台湾チェルンブ断層掘削に関するものについては、徐(印刷中)を参照されたい。

引用文献

Boullier, A.-M., E.-C., Yeh, S. Boutareaud, S.-R. Song, C.-H., Tsai (2008), Micro-Scale Anatomy of the 1999 Chi-Chi Earthquake Fault Zone, *E-cube*.
 Brodsky, E., H. Kanamori (2001), Elastohydrodynamic lubrication of faults, *J. Geophys. Res.*, **106**, 16357-16374.

Haimson, B., W. Lin, H. Oku, J.-H. Hung, S.-R. Song (in press), Integrating borehole-breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan, *Tectonophysics*.

Hamada, Y., T. Hirono, M. Ikehara, W. Soh and S.-R. Song (2009), Estimated dynamic shear stress and frictional heat during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: a chemical kinetics approach with isothermal heating experiments, *Tectonophysics*, **469**, 1-4, 73-84, doi:10.1016/j.tecto.2009.01.036.

Hirono, T., W. Lin, E. Yeh, W. Soh, Y. Hashimoto, H. Sone, O. Matsubayashi, K. Aoike, H. Ito, M. Kinoshita, M. Murayama, S. Song, K. Ma, J. Hung, C. Wang and Y. Tsai (2006), High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu-fault: Nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL026133.

Hirono, T., E.-C. Yeh, W. Lin, H. Sone, W. Soh, Y. Hashimoto, O. Matsubayashi, K. Aoike, H. Ito, M. Kinoshita, M. Murayama, S.-R. Song, K.-F. Ma, J.-H. Hung, C.-Y. Wang, Y.-B. Tsai, T. Kondo, M. Nishimura, S. Moriya, T. Tanaka, T. Fujiki, R. Maeda, H. Muraki, T. Kuramoto, K. Sugiyama and T. Sugawara (2007), Nondestructive continuous physical property measurements of core samples recovered from Hole B, Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, *Jour. Geophys. Res.*, **112**, B07404, doi:10.1029/2006JB004738.

Hirono, T., M. Sakaguchi, K. Otsuki, H. Sone, K. Fujimoto, T. Mishima, W. Lin, W. Tanikawa, M. Tanimizu, W. Soh, E.-C. Yeh and S.-R. Song (2008), Characterization of slip zone associated with 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: X-ray CT image analysis and microstructural observations of the Taiwan Chelungpu fault, *Tectonophysics*, **449**, 63-84.

Ishikawa, T., M. Tanimizu, K. Nagaishi, J. Matsuoka, O. Tadaï, M. Sakaguchi, T. Hirono, T. Mishima, W. Tanikawa, W. Lin, H. Kikuta, W. Soh, and S. Song (2008), Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault, *Nature Geoscience*, **1**, 679-683.

Kano, Y., J. Mori, R. Fujii, H. Ito, T. Yamagidani, S.

- Nakano and K.-F. Ma (2006), Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL026733.
- Kao, H., W.P. Chen (2000), The Chi-Chi earthquake sequence: active out-of-sequence thrust faulting in Taiwan, *Science*, **288**, 2346-2349.
- Kimura, G., E. J. Screaton, D. Curewitz, and the Expedition 316 Scientists (2008), NanTroSEIZE Stage 1A: NanTroSEIZE shallow megasplay and frontal thrusts, *IODP 316 Preliminary Report*, 59.
- Lachenbruch, A.H. (1980), Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion, *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 6097-6112.
- Lin, W., E.-C. Yeh, H. Ito, J.-H. Hung, T. Hirono, W. Soh, K.-F. Ma, M. Kinoshita, C.-Y. Wang and S.-R. Song (2007), Current Stress State and Principal Stress Rotations in the Vicinity of the Chelungpu Fault Induced by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16307. doi: 10.1029/2007GL030515.
- 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. Seismol. Soc. Am.*, **91**, 1069-1087.
- Ma, K.-F., E.E. Brodsky, J. Mori, T.-R. Song and H. Kanamori (2003), Evidence for fault lubrication during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake (Mw 7.6), *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2002GL015380.
- Ma, K.-F., H. Tanaka, S.-R. Song, C.-Y. Wang, J.-H. Hung, Y.-F. Song, E.-C. Yeh, W. Soh, H. Sone, L.-W. Kuo, and H.-Y. Wu (2006), Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, *Nature*, **444**, 473-476.
- Mase, C.W., L. Smith (1987), Effects of frictional heating on the thermal, hydrologic and mechanical response of a fault, *Jour. Geophysics. Res.*, **92**, 6249-6272.
- Middleton, G.V., M.A. Hampton (1973), Turbidites and Deep Water Sedimentation, Eds G.V. Middleton, A.H. Bouma, Short Course, SEPM Pacific Section, Anaheim, 1-38.
- Mishima, T., T. Hirono, W. Soh and S.-R. Song (2006), Thermal history estimation of the Taiwan Chelungpu Fault using rock-magnetic methods. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL028088.
- Moore, G. F., N. L. Bangs, A. Taira, S. Kuramoto, E. Pangborn, and H. J. Tobin (2007), Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation, *Science*, **318**, 1128-1131.
- Ota, Y., Y.-G. Chen and W.-S. Chen (2005), A review on paleoseismological and active fault study in Taiwan, *Tectonophysics*, **408**, 63-7.
- Otsuki, K., N. Monzawa and T. Nagase (2005), Fluidization and melting of fault gouge during seismic slip; Identification in the Nojima fault zone and Implications for focal earthquake mechanisms, *Jour. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2001JB00711.
- Otsuki, K., T. Hirono, M. Omori, M. Sakaguchi, W. Tanikawa, W. Lin, W. Soh, S.-S. Rong (2009), Analyses of pseudotachylyte from Hole-B of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project (TCDP); their implications for seismic slip behaviors during the 1999 Chi-Chi earthquake, *Tectonophysics*, **469**, 1-4, 13-24, doi:10.1016/j.tecto.2009.01.008.
- 齊藤龍太, 佐々恭二, 福岡浩 (2007), 珪砂・ベントナイト混合試料における内部摩擦角の速度効果, *Jour. of the Jpn. Landslide Soc.*, **44**, 33-38.
- Sibson, R.H. (2003), Thickness of the seismic slip zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1169-1178.
- Shin, T.-C. and T.-L. Teng (2001), An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **91**, 895-913.
- Soh, W. (1997), Computed tomography scan analysis of site 941 cores, Western mass-transport deposit, Amazon Fan, edited by Flood R.D., D.J.W. Piper, A. Klus, L.C. Peterson, *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, **155**, 465-475.
- 徐垣, 谷川亘, 廣瀬丈洋, 林為人, 谷水雅治, 石川剛志, 廣野哲朗, 中村教博, 三島稔明, E.-C. Yeh, S.-R. Song, K.-F. Ma, 1999年台湾集集地震を引き起したチェルンブ断層の深部掘削の成果概要, *地質学雑誌*, (印刷中).
- Tanaka, H., C.-Y. Wang, W.-M. Chen, A. Sakaguchi, K. Ujiie, H. Ito and M. Ando (2002), Initial science report of shallow drilling penetrating into Chelungpu fault zone, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **13**, 227-251.
- Tanikawa, W., T. Mishima, T. Hirono, W. Soh and S.-R. Song (2008), High magnetic susceptibility produced by thermal decomposition of core samples from the Chelungpu fault in Taiwan, *Earth and Planetary*

- Science Letters*, 272, 372-381.
- Tanikawa, W., and T. Shimamoto (2009), Frictional and transport properties of the Chelungpu fault from shallow borehole data and their correlation with seismic behavior during the 1999 Chi-Chi earthquake, *Jour. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JB005750.
- Tsutsumi, A. and T. Shimamoto (1997), High-velocity frictional properties of gabbro, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 699-702.
- You, C-F., P. R. Castillo, J. M. Gieskes, L. H. Chan, and A. J. Spivack (1996), Trace element behavior in hydrothermal experiments: implication for fluid processes at shallow depths in subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140, 41-52.
- Yue, L.-F., J. Suppe and J.-H. Hung (2005), Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan ($M_w=7.6$), *Jour. Struct. Geol.*, 27, 2058-2083.
- Wang, C. Y., C. H. Chang and H. Y. Yen (2000), An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 11, 609-630.
- Wu, H.-Y., K.-F. Ma, M. Zoback, N. Boness, H. Ito, J.-H. Hung, and S. Hickman (2007), Stress orientations of Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP) Hole-A as observed from geophysical logs, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01303, doi:10.1029/2006GL028050.