

平成 22 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007 ~ 2009  
 課題番号：19340120  
 研究課題名 (和文) 大地震の断層滑り帯のダイナミクス—集集地震における滑り帯物質からの逆解析  
 研究課題名 (英文) Slip zone dynamics - inversion analysis from intra-slip-zone materials

研究代表者  
 田中 秀実 (TANAKA HIDEMI)  
 東京大学・大学院理学系研究科・講師  
 研究者番号：40236625

研究成果の概要 (和文)：集集地震の地震断層である車籠埔断層の掘削コアを用いて、地震すべりに伴うエネルギー散逸構造の解析を試みた。鉱物の破壊 (破壊エネルギー) と摩擦発熱 (熱エネルギー) による損失が大部分であると仮定して研究を開始したが、解析の進行に伴って粉碎した鉱物が一定粒径以下になると化学的な過程が活性化し、溶解—沈殿機構が働いていることがわかった。地震滑りに伴う化学過程は未知の部分が多く、エネルギー損失の大きさも含めて今後の解析が待たれる。

研究成果の概要 (英文)：Mode of energy dissipation by an large earthquake is examined by using drilled core penetrating the Chelung-pu Fault, being activated by 1996 Chi-chi earthquake, Taiwan. Total dissipated energy was simply assumed as sum of heat energy by friction and fracture energy by pulverization of mineral grains contained in the slip zone. Progress of analysis clarified, however, chemical process, such as dissolution – precipitation is dominantly activated by grain comminution. Dynamic chemical process activated by reaction between intra-slip zone fluid and comminuted grains is an as-yet-unrecognized factor. We are trying to solve chemical process during seismic slip.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
20年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
21年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：断層，地震滑り，車籠埔断層，集集地震，断層内物質

## 1. 研究開始当初の背景

1996年の兵庫県南部地震の活断層，野島断層

における世界初の大地震直後の断層帯貫通掘削以来，断層掘削研究の有効性が地球物理／地質／学者に広く認識されるようになり，近

年多数の断層掘削プロジェクトが進められている (例えば, SAFOD, USA, Collins, Greek, TCDP, Taiwan, OD21, Japan). 断層貫通掘削研究における多くの課題の中でも, 断層の地震滑りのダイナミクスの研究は最も重要な課題である. 1999年に発生した台湾, 集集地震では, 活断層北部では大きな滑り (最大 10 m) を速い速度 ( $> 1 \text{ m/s}$ ) で動いた [Wu et al 2001, GRL, Ji et al., 2003, JGR] ことが注目され, 2000 - 2001 年にかけて活断層の北部と南部で断層浅部への掘削が日本の主導で行われた [Tanaka et al., 2002, TAO]. その結果, 断層の北部は非常に低い摩擦強度で滑ったことが明らかにされた [摩擦係数 0.12, Tanaka et al., 2006, GRL]. 引き続いて 2004 - 2005 年には, 台湾の主導で車籠埔断層北部において断層深部 (1 km) への貫通掘削が行われ合計 3 本の断層貫通掘削コアが得られた (Hole A, B, C core). 2006 年に, 2000 年以來の台湾でのドリリングプロジェクトへの貢献により, 3 本のうちの 1 本 (Hole C core) が申請者に供与された. Hole C コアは必要に応じて東京大学に搬送し申請者が自由に研究する事ができるが, 搬送費用がないため, 台湾国立中央大学に保管されている. コアの概略的眼観察から, 深度 1100 m 付近には 4 枚の破砕帯 (1110 m, 1160 m, 1190 m, 1210 m) が確認されている. プロジェクト関係者は, 物理検層において比抵抗値が最も大きく変化する 1111 m の破砕帯が今回活動した断層である可能性が最も高いと考えており, その仮定のもとで我々は破壊エネルギーの計算を行った [Ma and Tanaka., 2006, Nature]. しかし, 本来比抵抗値変化だけではそれほど強い証拠であるとは言えず, また他の 3 枚の破砕帯もいずれも未固結物質を含んでいるため, 確証を得るには至っていない. 従っていずれの破砕帯が集集地震で主に活動したのか

をまず明らかにする必要がある. 一方, 破砕帯の物質科学的性質に基づく地震滑りの構成則としては, Thermal pressurization (TP, Mas e & Smith 1987, JGR), Acoustic fluidization (Melosh 1996, Nature), Elastodynamic lubrication (Brodsky & Kanamori (2001, JGR) などが知られているが, 摩擦発熱に伴う流体圧変化をも考慮しているのは TP だけであることから, 近年多くの研究者が地震滑りモデルとして TP を採用するようになってきている (Andrews 2002, JGR, Bizzari and Coco 2006, JGR, Rice 2006, JGR など). しかし, TP 構成則は多くの物理パラメータを含むため, 断層の物性が定まらなければ実際の断層すべりの動的挙動を決定できない欠点がある. また, 断層帯の (1) 滑り帯 (fault core) と破壊帯 (damage zone) の幅, (2) その構造非対称性, および (3) 非弾性属性 (inelastic dilatancy) は, 天然の断層では本質的な属性であるが, これらは, 従来の TP 構成則に組み込まれていなかった. 我々は TP 構成則に上記の 3 つの概念を導入することにより実際の大地震の地震断層帯の滑りのダイナミクスの復元に TP 構成則を適用することを試みた [浦田ほか 2005, 地震学会講演]. またパラメータの問題は, 断層貫通掘削コアを用い, 破砕帯の物性を正確に測定することにより克服されつつある [Tanaka et al., 2006a, 2006b GRL]. 一方で, 地震学の分野では, 波形データからの slip in version の方法が確立されており, 地震断層面の各 subfault での応力降下の見積りがなされている [Ji et al., 2003, JGR]. 地震発生直後の断層帯貫通掘削による断層内物質の研究により, ようやく定量的に動的滑り過程を復元できるようになり, 地震波形インバージョンによる応力降下と対比できる時代となった.

## 2. 研究の目的

本課題の実施期間 3 年間で次の 3 つを明らかにすることを試みた。(1) 集集地震で活動した破砕帯の特定。滑り帯内部の破壊粒子粒径分布測定による破壊エネルギーの推定。(2) 滑り帯を含む破砕帯の物性測定(3) TP 計算による動的な強度低下の復元。(3) の結果を波形インバージョンによる応力降下と対比することによって、地震エネルギーの分配構造を定量的に明らかにしようと考えた。

本研究計画は最新の大地震を経験した地下深部の断層帯を回収し、物理属性を直接測定することで大地震の動的滑り過程の復元を試みる点で、既往研究から際立っており、また動的滑り過程を断層内物質を用いた物質科学からの逆解析と地震学からの逆解析を比較することによって、エネルギー収支の構造を理解しようとする試みに独創性があると考えられた。大地震直後に断層貫通掘削および断層物質回収を行うことによって、地震によって開放されたエネルギーの分配構造と収支を定量的に導けるようになるので、地震のダイナミクス研究に大きな貢献ができる。また地質時代に台地震を起こし、現在地表にロシュツした断層内の岩石も合わせて採取、解析し、比較研究の対象とすることによって、さらに理解が進むと考えた。

### 3. 研究の方法

平成 19 年度には、コアの必要な部分[破砕帯部分、約 100 m] を東京大学に搬送し、コア処理を開始し、断層岩分布および断層岩分布に基づいて識別された各断層帯の幾何学的形態を把握した。平成 19 年度後半から 20 年度前半にかけて、各断層帯について、稠密な微小構造観察を行い、破壊/変質過程の切断、重複関係を検査し、断層帯間の新旧関係を把握した。この検討は次の方法によって行った。(1) 各破砕帯を横切るコア試料を半割した上

で、半割面の研磨面を作成して観察。(2) 約 200 試料の岩石切片を切り出し、薄片を製作、光学顕微鏡で破壊/変質微小組織を観察、それらの組み合わせを調べ、構造の新旧関係を判断した。上記の方法は、断層貫通コアに含まれる莫大な数の剪断面の中から最も新しい剪断面を探索する方法として Tanaka et al., [2001, JGR] によってなされた方法であり、その有効性が確認されているので、コアに含まれている断層帯の中でも最も新しい断層帯がどれかを判断できる可能性は高いと考えられた。上記の一連の検討によって(1) 最も新しい断層帯はどの深度に位置するのか？ それは集集地震のすべり面を含むか？ (2) その断層帯の幾何学的構造はどうなっているのか？ (fault core, damage zone それぞれの幅、構造の非対称性)の二つが明らかになると考えられた。20 年度後半は、特定された集集地震の滑り帯内部の破壊粒子の産状、粒径分布を最小粒径に至るまで観察、計測した。先行的な透過顕微鏡観察によって、滑り面の破壊粒子の最小粒径は 1 nm のオーダーであると考えられている。従って、100  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$  の範囲は光学顕微鏡 (OM)と走査型電子顕微鏡 (SEM)で、10 $\mu\text{m}$  - 100nm の範囲は走査型電子顕微鏡 (SEM)で、100 nm - 1 nm の範囲は透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察、計測した。観察/計測結果に基づいて、全粒子の表面積を積分して表面エネルギーを求めようと考えた、最近開発した我々の方法 [Ma and Tanak et al., 2006, Nature] を用い、集集地震において大きなすべりを示す車籠埔断層北部で消費された破壊エネルギーを計算しようと考えた。しかし、解析が進む中で、20nm 以下の粒子については、粒径と出現頻度のベキ乗法則が成立しないことが問題となった。これは最小粒径付近で別の過程が働いていることを意味し、破壊全表面積に対する微小粒子の占める表面

積を考慮すると、莫大なエネルギー損失を負担している可能性がある。看過できない問題が明らかにされた。以下、簡単のため上記を別過程問題と呼ぶ。

21 年度後半に TP 計算を行うため、20 年度後半から、21 年度前半にかけて、集集地震の滑り面を含む最新の断層帯について、計算に必要な物理定数の測定を行った。物理検層結果から推定できる物理定数 (圧縮率, 初期温度, 初期有効圧) 以外で、コア試料を用いて測定できる物理定数 (熱伝導率, 間隙率, 密度, 透水率, 比熱, 熱膨張率; 測定装置既設) について断層帯を横断する方向での測定を行い、その分布を調べた。集集地震の破碎帯が排他的に決定できない場合に備え、可能性のある複数の破碎帯について測定を行った。当初は、21 年度前半までに、我々の開発した TP 構成則にパラメータを投入する準備が整っていると考えていたが、別過程問題を解決しないと TP 計算が不可能であると判断されたので、別過程の解決に向けて全力を挙げることにした。この問題は未だに検討中であるが、解決後には、TP 計算に向けて再出発する予定である。TP 計算時の震源時間関数は、地震波形データとの整合性が最も高いと見なされている Ji et al のモデルを使用する。インバージョンによる応力降下は、掘削孔付近を含む、 $4 \text{ km}^2$  のサブフォールトの精度で我々がすでに計算している [Ma and Tanaka., 2006 Nature]. 応力降下の計算では本来降下量のみが求められるのであるが、概念的には応力が定常値に降下するまでの滑り距離 ( $D_c$ ) の応力の積分値 ( $G_c$ ) は、破壊エネルギー ( $E_G$ ) と一部の熱エネルギー ( $E_{H2}$ ) の和になっていると考えられている。  $E_G$  は、粒径分布測定の結果からも拘束される。TP 計算では、破壊は考慮されていないため、滑り距離に対する強度の積分値は、熱エネルギー

一と見なせる ( $E_{H1} + E_{H2}$ ).  $E_{H1} + E_{H2}$  は、集集地震では、残留摩擦熱からの解析結果からも拘束される (Tanaka et al., 2006, GRL). 滑り帯の初期応力が初期強度とほぼ等しいと考えられると、地震にともなう断層すべりのエネルギー分配構造を求めることができると考えられる。

#### 4. 研究成果

東京大学に搬送されたコアの必要な部分 [滑り帯を含む約 100 m], についてのコア処理をほぼ完了させた。その後、各断層帯について、稠密な微小構造観察を行い、破壊/変質過程の切断、重複関係を検査し、断層帯間の新旧関係を把握した。この検討は次の方法によって行った。(1) 各破碎帯を横切るコア試料を半割した上で、半割面の研磨面を作成して観察。(2) 合計約 280 試料の岩石切片を切り出し、薄片を製作し、光学顕微鏡で破壊/変質微小組織を観察し、それらの組み合わせを調べ、構造の新旧関係を判断した。構造の検討により最も新しい断層面と判断された深度 1136 m の滑り帯を孔壁の物理検層の結果と合わせて注意深く検討した結果、この断層面が集集地震のすべり面であると推定された。同時に、滑り面を含む断層帯 (いわゆるアーキテクチャ) の、構造非対称が顕著であり、この非対称性が動的なすべり過程によってもたらされたものであると推定された。昨年、集集地震の滑り帯内部の破壊粒子の産状、粒径分布を、光学顕微鏡 (OM), 走査型電子顕微鏡 (SEM), および透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察、計測した結果、滑り面の破壊粒子の最小粒径は 1 nm のオーダーであったとしたが、このうち数十 nm 以下の粒子は流体から再結晶した、すなわち化学的に生成された粒子である可能性が極めて高いことが判明した。数十 nm 以下の粒径分布

は破壊に特徴的なベキ乗則に従わないことから、従来破壊エネルギーと見積もられたエネルギーのうち大きな部分が化学的なエネルギーである可能性があり、計算方法の見直しが求められる。化学計算を新たに開発し、集集地震において大きなすべりを示す車籠埔断層北部で消費されたエネルギーを計算している。化学的過程の計算手法を開発が終了し、TP 計算が終了した時点で順次結果をまとめて発表していく予定である。また同時に実施した他の地震断層および地質時代の地震断層の解析結果も結果がまとまり次第発表して行く予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① K.Kawabata, H.Tanaka, K.Ma, Estimation of Molten Zone on Fault Surface and its Frictional Melting Energy by Spatial Distributions of Pseudotachylyte Layers in Nojima Fault, Japan, American Geophysical Union Fall meeting, 2008, Dec, San Fransisco
- ② T.Nozu, H. Tanaka, The Toyamagawa Fault in Central Japan: Meso- and Microstructure, American Geophysical Union Fall meeting, 2008, Dec, San Fransisco
- ③ T.Nozu, H. Tanaka, Fault Zone Structure and Estimated Breakdown Energy —an Example of Matoze Outcrop, Toyamagawa Fault, Central Japan, SSJ Fall meeting, 2008, 12 月, Tsukuba
- ④ 田中秀実, 地震滑りの物理化学 —超飽和流体潤滑—, 日本地球惑星科学連合大会, 2007 年 5 月, 千葉 (幕張メッセ)

[その他]  
ホームページ等

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~mseis/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田中 秀実 (TANAKA HIDEMI)  
東京大学・大学院理学研究科・講師  
研究者番号：40236625

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：