

特集 2

# 地震と断層の物質科学



廣野哲朗\*

Material science of earthquake and fault

Key Words : Frictional sliding, Rupture propagation, Fault weakening

## 1. はじめに

地震・津波が人間社会に与える影響は計り知れないほど大きく、地震多発国の日本のみならず、変動帯で活動する人類にとって、地震を理解することは共通の要求である。地震は地殻の岩石がプレート運動の力を受けて破壊する現象であるが、その発生過程は非常に複雑である。初めに $1 \cdot$ マイクロンスケールの亀裂から始まり（震源核形成）、それが数100 km以上に渡る既存の亀裂（断層）へと拡大、伝播し（動的破壊伝播）、さらには歪みのエネルギーが地震波や摩擦熱、地殻変動という形で放出される<sup>[1,2]</sup>。地殻変動が海洋底に及んだ場合は、その直上の海水を大きく移動させ、巨大津波が発生する。近年の地震観測および地殻変動観測の進展によって、地震時の断層の滑り様式や静穏時の固着過程およびゆっくり滑り（サイレント地震）など、地震現象に関する新しい知見が次々と報告されつつあるが、物質科学的にどのような機構やプロセスによるものであるかはいまだ不明なことが多い。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震では、太平洋プレートが沈み込む日本海溝の海溝底付近にて、大陸側が約50 mも東方に移動し、巨大津波を励起したと報告されているが<sup>[3]</sup>、この大変位の滑りの発生原因は不明で、明らかにすべき大きな課題と言える。

以上のような複雑な地震現象の理解を前進させる

ために、従来からの観測による研究に加え、地震を引き起こした岩石もしくは地震によって変形した岩石、すなわち断層に着目した研究が近年、進められつつある。地震現象を岩石の破壊と摩擦の物理という視点でとらえ、実際の断層の破壊強度や応力-歪み特性、摩擦係数などの物理特性の定量的な評価や地震性滑りの室内実験、数値解析が行われている。本ノートでは、このような地震と断層の物質科学的研究の最前線を紹介する。

## 2. 断層掘削プロジェクト

地震による破壊域（震源域）は内陸型の場合、地下数 km から20 km 程度、海溝型の場合、海溝底付近から40-50 km 程度と地下深部に位置するため、直接、地表や海洋底にて震源断層の試料を採取することはできない。そこで、掘削によって地下深部に位置する断層に直接到達し、その試料を回収、さらには掘削孔を用いた地殻応力や間隙水圧などを測定する研究プロジェクトが行われている。例えば、東南海地震の震源域である熊野灘沖の南海トラフ（図1a）を掘削するプロジェクトが、2007年より統合国際深海掘削計画（IODP: Integrated Ocean Drilling Program）の枠組みで実施されている。この断層掘削プロジェクトは全体として次の4段階（ステージ）に分けて進められている。ステージ1は巨大分岐断層やプレート境界断層の浅部（1400 m以浅）のライザーレス掘削を実施し、地層の分布や変形構造、応力状態など、地震時に動いたと考えられる断層の特徴を把握することが目的である。続くステージ2では、巨大地震発生帯の直上に掘削によって、地質構造や状態の解明を目的としている。掘削した孔内には観測システムを設置し、地震準備過程のモニタリングを行い、またプレートとともに地震発生帯に沈み込む前の海底堆積物を掘削しコア試料も実



\*Tetsuro HIRONO

1973年1月生  
東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻（2001年）  
現在、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 准教授 理学博士 地震学  
TEL : 06-6850-5796  
FAX : 06-6850-5480  
E-mail : hirono@ess.sci.osaka-u.ac.jp

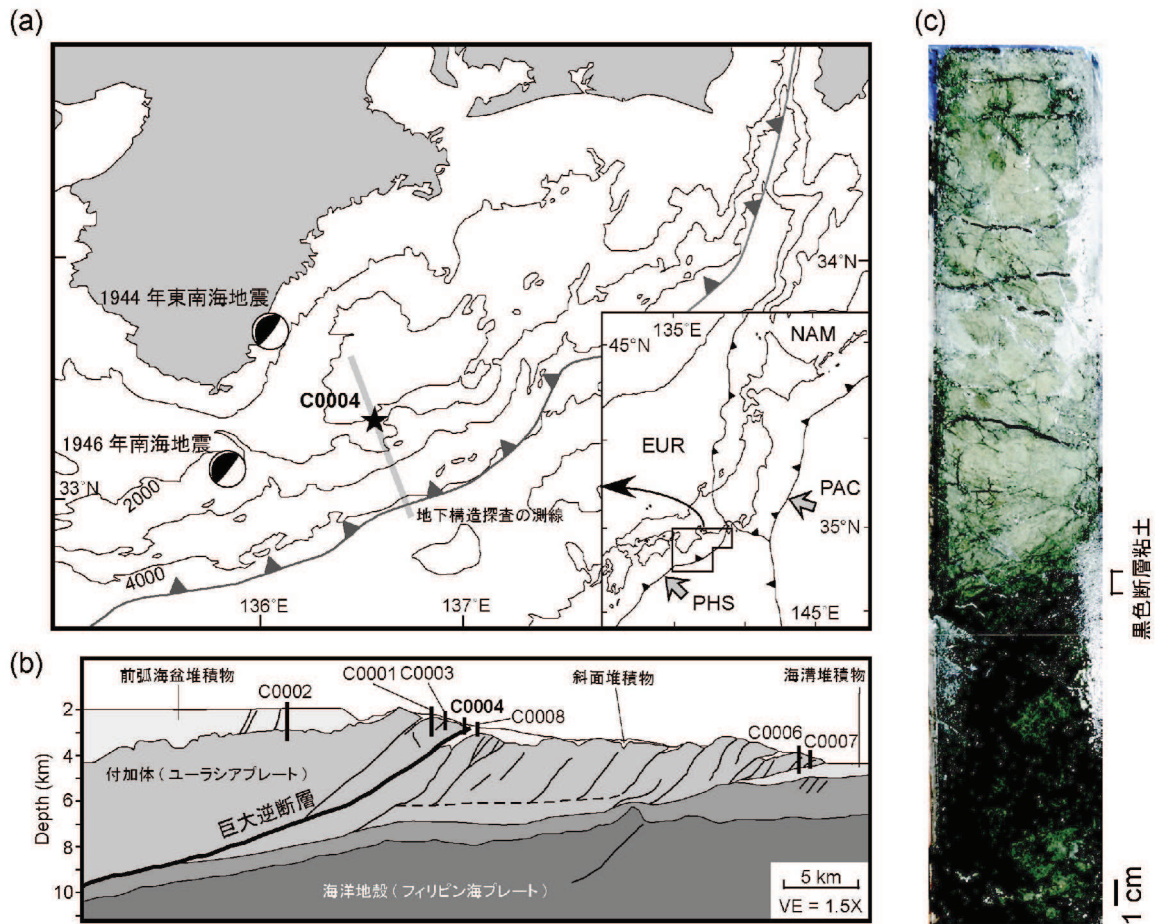


図1

施する。さらにステージ3では、巨大地震を繰り返して起している地震発生帯に到達するライザー掘削を実施し、地震発生物質試料を直接採取、物質科学的な地震発生メカニズムの解明を目指している。最後のステージ4では、孔内での長期地球物理観測を行うシステムの巨大地震発生帯掘削孔への設置を目指している。ステージ1については2008年2月に終了し、フィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界断層から海底下8-10 kmで高角に分岐している巨大逆断層を掘削し(図1b)、その断層試料の回収が実施されている(図1c)。

また、これと前後し、1999年9月21日に台湾にて発生した集集地震で活動したチェルンブ断層の掘削が2003年より実施された(図2)。この断層は南北約100 kmにわたり活動したが、中・南部と北部では地震波の特徴に顕著な違いが認められた。中央部および南部では、滑り速度および変位は相対的に小さく、高周波成分に富むという典型的な内陸型地

震の地震波の特徴を示したが、北部の観測点では滑り速度と変位が大きく(それぞれの最大値は4.5 m/s, 12 m)、高周波成分に乏しいという特異性を示した。このような同一の断層面から放出される地震波の特徴の違いは、断層の滑り挙動に起因すると考えられる。この原因の解明には、地震を引き起こした断層を物質科学的に研究する必要がある。そこで実際に地震で活動した断層の試料の回収が行われた。この掘削では、地下2000 mまでのHole Aと1350 mまでのHole BおよびHole Bから枝分かれさせたHole Cの3本が実施され、そのうちHole Bでは深度1136 mと1194 mおよび1243 mにて断層帯を確認、さらにこれらの中軸部にて黒色断層粘土が観察された(図2)。この回収された断層試料を用いて、偏光顕微鏡と電子顕微鏡による変形組織観察、蛍光X線分析による主要元素組成、ICP質量分析による微量元素分析と同位体分析(Sr, Pb)、X線回折法による鉱物種の同定、磁性鉱物分析、含有炭素量分析な

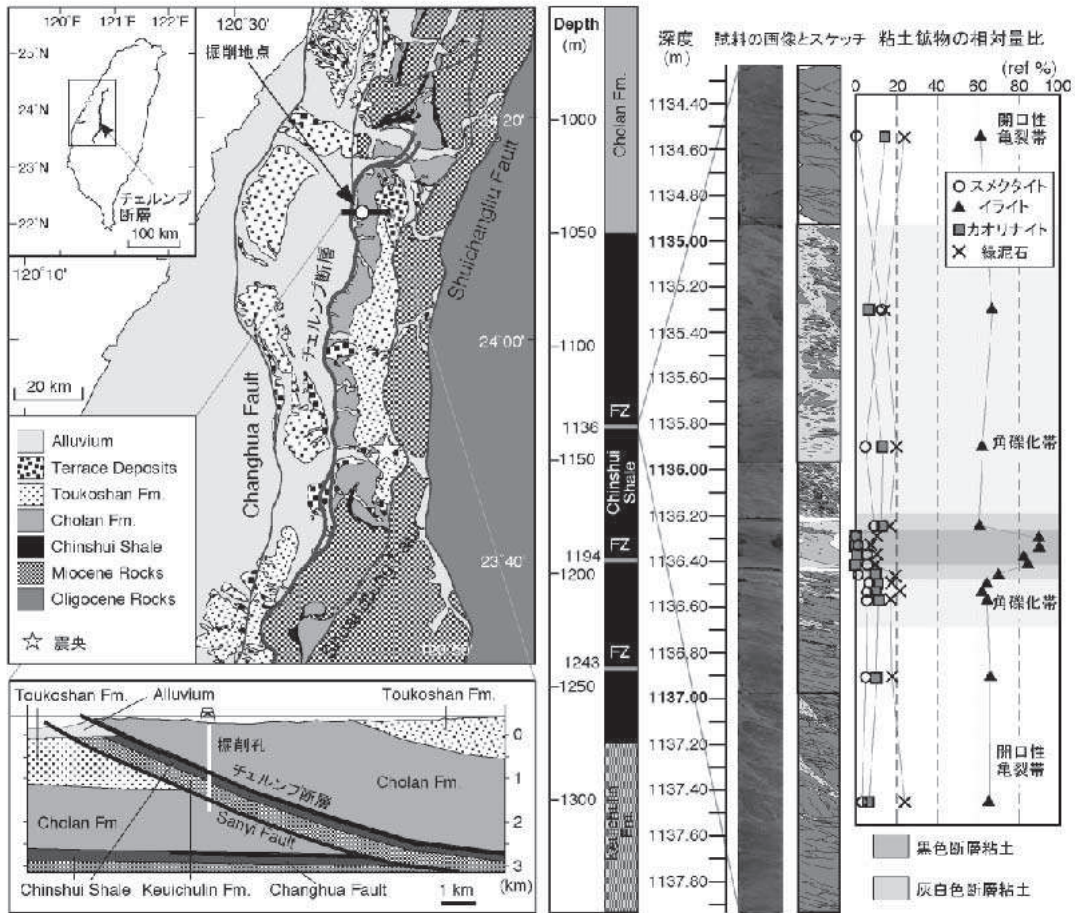


図2

どが実施された。その結果、特筆すべきハイライトとして、3つの断層帯のそれぞれの黒色断層粘土における微量元素とSr同位体分析の異常（母岩と比較して相対的に高いSr濃度、低いLi, Rb, Cs濃度および低いSr同位体比）と、粘土鉱物の変化（カオリナイトとスメクタイトの消失）が挙げられる<sup>[5,6]</sup>。これらの異常はすべて高温環境下で生じる反応であり、特に微量元素・同位体異常は350℃以上の高温の流体と固体（鉱物）との反応によると報告されている<sup>[5]</sup>。さらに、この摩擦滑りによる高温流体の発生は、thermal pressurization（摩擦発熱に伴い間隙水の温度が上昇し、間隙水圧が上昇、有効垂直応力が減少し、断層が弱化する機構）が地震時に機能した可能性を意味する。すなわち、このような断層弱機構の機能によって、北部のチェルンブ断層では、大きな滑り速度と変位および乏しい高周波成分を持つ地震波の特徴が生じたと結論できる。また、ある種の粘土鉱物の消失は、高温下で活性化された

脱OH反応によるものと考えられ、さらにこの反応は吸熱を伴うため、地震時に断層から解放されるエネルギーの一部はこのような化学反応で消費されていることを意味する<sup>[7]</sup>。

その他の断層掘削プロジェクトとしては、1994年兵庫県南部地震の震源断層の1つである野島断層の掘削、米国カリフォルニア州のサンアンドレアス断層の掘削（SAFOD: San Andreas Fault Observatory at Depth）がすでに実施完了し、現在ではニュージーランド、アルパイン断層の掘削（DFDP: Deep Fault Drilling Project）、トルコ、アナトリア断層の掘削（GONAF: A deep Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault）などが進められつつある。

### 3. 断層の物質科学からの地震の理解

以上で紹介した断層掘削研究を通して、地震時に断層で生じる様々なプロセス、機構の全容が少しずつ

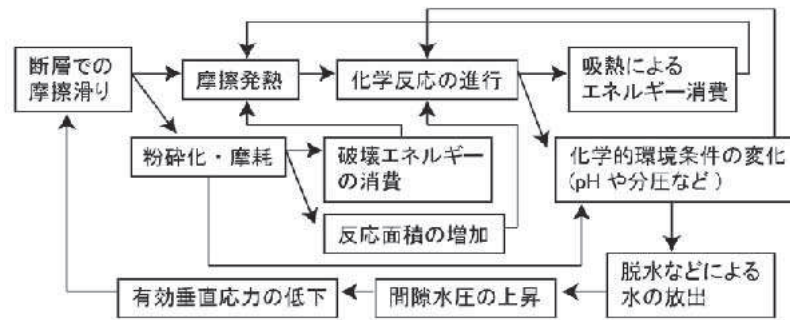


図3

つ明らかになってきた。図3に示すように、断層における摩擦滑りは、温度上昇を引き起こし、常温では起きえない化学反応を促進、これによって吸熱によるエネルギー消費が引き起こされ、そもそもの温度上昇に影響を与える。また、水素元素や水分子、CO<sub>2</sub>の放出による化学的環境条件の変化や thermal pressurization へのアシスト効果を引き起こし、摩擦滑り挙動そのものへの影響も生じる。ついで、摩擦滑りによる粉碎化と摩耗は、破壊エネルギーの消費と表面積の増加を引き起こす。これらの過程も、温度上昇や化学反応の進行にも影響を与える。このように、地震時に断層では様々なプロセス、機構がわずかに数秒という短い滑り時間の間に発生し、個々のプロセス・機構が互いに密接に影響を及ぼし合っていると見える。そして、このような複雑な物理化学的プロセス・機構がひいては地震のマグニチュード（特に破壊域・震源域の大きさ）や地殻変動に影響を与えたと考えられる。しかし、先述したように地震は震源核形成、動的破壊伝播、摩擦滑りという大きく3つのプロセスに分解できるが、ここで説明した物理化学的プロセス・機構は摩擦滑りのフェーズを扱っているに過ぎない。地震の全プロセスを物質科学的に理解しようとする研究はまだ始まったばかりであり、2012年4月に実施予定である2011年東北地方太平洋沖地震で大きく変位した日本海溝付近のプレート境界断層の掘削など、今後の断層掘削研究を通して、更なる地震の理解の進展が期待される。

## 文献

- [1] Scholz, C.H. [2002], "The Mechanisms of Earthquake Faulting", Cambridge Univ. Press, New York.
- [2] Abercrombie, R.A., et al. [2006], "Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting", American Geophysical Union, Washington DC.
- [3] Fujiwara, T., et al. [2011], The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*, v.334, p.1240.
- [4] Ishikawa, T., et al. [2008], Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault, *Nature Geoscience*, v.1, p.679–683, doi:10.1038/ngeo308
- [5] Hirono, T., et al. [2008], Clay mineral reactions caused by frictional heating during an earthquake: An example from the Taiwan Chelungpu fault, *Geophys. Res. Lett.* v.35, L16303, doi:10.1029/2008GL034476.
- [6] Hamada, Y., et al. [2009], Energy taken up by coseismic chemical reactions during a large earthquake: An example from the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.* v.36, L06301. doi:10.1029/2008GL036772.