

## 脆性-塑性遷移領域における地震核形成機構としての延性破壊

## Ductile fracture as an earthquake source nucleation mechanism under brittle-plastic transition

# 重松 紀生[1]

# Norio Shigematsu[1]

[1] 早大・教育・地球科学

[1] Dept. Earth Sci., Waseda Univ.

阿武隈山地より塑性変形が局所化した部分が粉碎している延性剪断帯が見つかった。この剪断帯において、塑性変形の定量化と透過電子顕微鏡 (TEM) 観察を行った。粉碎組織中には強塑性変形領域が見られ、粉碎領域の形成と塑性変形の局所化の関係が予想される。透過電子顕微鏡観察より、粒界に沿って数 100 nm の微小空隙が見られ、また塑性変形の強弱により転位密度に差は見られない。これらの観察結果から粉碎領域の形成に対し、転位の蓄積過程ではなく、粒界に沿った微小空洞の成長合体による延性破壊の重要性が予想される。従って、脆性-塑性遷移領域において延性破壊機構が地震の破壊核形成機構として働き得ることが予想される。

内陸地震の震源は、地下 10~20 km の地下浅所に限られ、大規模な地震の震源は、地震発生領域の基底部に分布する (Das and Scholz, 1983; U.S.G.S. Staff, 1990)。地震発生領域の基底部は、脆性-塑性遷移に対応すると考えられ、大地震発生に対するこの領域の変形挙動の重要性が予想される (Sibson, 1982, 1984; Shimamoto, 1989; Scholz, 1990)。従って、この領域の断層岩の微細構造解析は、地震波などの観測データの解析と同様、地震現象の解明に対し制約を与えるはずである (Shimamoto, 1989; Scholz, 1990; 高木, 1998)。本研究は、畑川破碎帯西側の、強く塑性変形した剪断帯中心部が粉碎組織を示す小剪断帯に着目し、断層岩の微細構造解析に基づき、脆性-塑性遷移領域における塑性変形によるすべり過程から、地震発生に至る物理的過程の解明を目的としている。

解析を行った露頭は、福島県阿武隈山地の東縁にある畑川破碎帯の西側 1 km 程にある。露頭内には角閃石黒雲母花崗閃緑岩中に、NE-SW 走向の幅が約 50 cm の右ずれ剪断帯が発達し、中心部に向かい徐々に変形が強くなり、中心部では S-C 構造が顕著に発達し、C 面に沿って粉碎組織が見られる。

C 面に沿う粉碎領域の形成過程を解明するため、粉碎領域を含む C 面近傍の石英細粒化分率 ( $X_{qz}$ ) の空間分布、透過電子顕微鏡 (TEM) により、転位および結晶粒界の構造を観察した。ここで  $X_{qz}$  は石英中の粒径 30  $\mu\text{m}$  未満の粒子が占める面積分率であり、強い塑性変形を被った場所ほど大きな値を取る (Shigematsu, 1999)。TEM 観察は早稲田大学理工学部物性計測センターの HITACHI H8100A により、加速電圧 200 kV で行った。

次のことが  $X_{qz}$  の空間分布より明らかになった。(1) 粉碎領域内部には、粉碎領域の方向に  $X_{qz}$  の高い領域 ( $X_{qz} > 95$ ) が存在する。(2) 粉碎領域以外にも、シアバンドあるいは C 面などの変形集中領域に沿って  $X_{qz}$  が高い領域が見られる。(3) 微小割目の多くは粉碎領域から派生している。しかし、一部の微小割目は  $X_{qz}$  が高いシアバンドあるいは C 面などの変形集中領域からも発生している。

また TEM 観察は、 $X_{qz}$  が低い部分と高い領域について行った。転位密度は低  $X_{qz}$  領域、高  $X_{qz}$  領域において大きな差がなく、両領域とも亜結晶粒界が非常によく発達している。一方、高  $X_{qz}$  領域ではしばしば、粒界に沿って大きさが数 100 nm 程度の微小空洞が観察された。

粉碎領域に沿った強塑性変形領域の存在やシアバンドや C 面からの微小割目の発生は、C 面に沿う破壊発生が塑性変形の局所化と密接に関係していることを強く示唆している。塑性変形の局所化に伴う物質の脆性的挙動は様々な物質で知られ、例えば実験的に変形させた岩塩剪断帯は、剪断歪がある臨界値に達したところで、均一な塑性変形が脆性的になり、これに伴いシアバンドの形成が起こる (Shimamoto, 1989)。

脆性-塑性遷移領域付近の準脆性 (semibrittle) 領域では、転位滑り障害近傍に転位が蓄積、これによる応力集中によりクラックが形成する (e. g., Eshelby et al., 1951; Wong, 1990)。しかし、今回解析を行った剪断帯では  $X_{qz}$  の高い領域と低い領域で転位密度に大きな差がない。さらに粒子内に発達する亜結晶粒境界は転位の回復過程が十分働いていることを意味し (Hirth and Tullis, 1992)、転位の蓄積による破壊発生のモデルとは矛盾する。従って、今回の場合、転位の蓄積過程は C 面に沿う粉碎領域の形成には重要ではない。

一方、物質が大きな塑性変形を被ったとき、微小空洞が形成、成長合体することにより破壊面が形成する延性破壊が起こることがある (Goods and Brown, 1979; Wilsdorf, 1983; Clift et al., 1990; Komori, 1999; Thomason, 1999)。 $X_{qz}$  が高い値を持つ粉碎領域内部の石英粒界に沿っては、しばしば微小空洞が観察される。粒界に沿う穴の形成機構については様々な機構が考えられるが (e. g., Hiraga, et al., 1999)、本研究の場合は亜結晶粒界と穴の形態が密接な関係を持つことから、塑性変形の過程での粒界に沿った歪の不適合により形成した可能性がある (Ree, 1994)。従って C 面に沿う粉碎領域の形成機構として、このような粒界に沿った穴の成長合体により延性破

壊に至った可能性あり，このことが脆性-塑性遷移領域における震源の破壊核形成機構として働き得ることが予想される．