

## 研究概要

### 岩石・鉱物の変形組織による地殻の強化メカニズム

東北大学大学院理学研究科地学専攻 横山 裕晃

地球表層を覆う岩盤である地殻は、プレート運動に伴って内部で変形し、褶曲や断層などの地質構造をつくる。地殻の強度は浅部では破壊や断層の摩擦すべりで増加する一方、深部では塑性変形が卓越して低下する。その境目にあたる脆性-塑性遷移域は強度が最大となり、地震発生帯の下限にも対応すると考えられている。これまでに、脆性-塑性遷移域の強度がどの程度かを検証する先行研究はあったが、高い強度がどのように維持されるのか、そのメカニズムは十分に理解されてこなかった。そこで本研究では、破壊に先行する低温塑性変形が岩石を強くするひずみ硬化の影響に着目した。地殻を構成する岩石・鉱物の低温塑性変形において、変形が進行するにつれて発達する特徴的な変形微細組織（変形双晶・変形ラメラ・キンク）が強度の形成・維持に果たす役割を、岩石・鉱物の変形組織ごとに検討した。

層状の物質が局所的に折れ曲がるキンクは、例えば層状の地層など地質学においてよく観察され、その大きさは鉱物の結晶スケール（ $\mu\text{m}$  スケール）から地図（ $\text{km}$  スケール）まで存在する。キンクの形成と強度について調べるため、黒雲母という層状鉱物の変形実験を行った。これにより、特定の幾何学条件（対称傾角; rank-1 接続）を満たすキンクが形成されると強度が上昇することを明らかにした。さらに、地図スケールで知られるメガキンクも同様の機構で局所的に地殻強度を高め、地震発生域の空間分布に影響しうる可能性を示唆した[1]。

大陸地殻に最も豊富に存在する石英の歪硬化について、石英単結晶の変形実験および脆性-塑性遷移条件下で変形した天然の石英脈の解析から調べた。変形実験からは、石英の低温塑性で優勢なすべり系である基底面すべりが起こると、結晶全体で徐々にすべりに適さない方向に結晶格子が回転して硬化を引き起こし、一部すべりに適した方位への局所回転がキンクバンドを形成していることを示した。また、キンク境界が転位の運動（結晶内すべり）を妨げていることも明らかになった。天然試料の解析からは、実験で確認されたメカニズムに加え、結晶内部に発達する微細な変形ラメラが、転位の相互作用を引き起こして内部応力を発生させていることを指摘した。すなわち、複合的な硬化メカニズムがあることを明らかにした。

また、方解石という鉱物では、変形双晶が応力（荷重）の増加に伴って双晶密度が増えるという経験的関係が示されていた。この物理的背景を明確にするため、双晶境界に存在する転位に注目し、双晶密度と差応力の関係を理論的に導出した。その結果、実験的に得られている関係を説明することができ、加えて双晶境界という界面構造の増加が転位運動を妨げ、ひずみ硬化をもたらすという機構を示した[2]。

#### 参考文献

- [1] Yokoyama, H., Ofune, T., Jayawickrama, E., Hirano, M., Sawa, S., Muto, J., Nagahama, H. (2025). Kink strengthening and rank-1 connection of crustal rocks. *Scientific Reports* 15, 33203. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17812-6>
- [2] Yokoyama, H., Nagahama, H. (2025). Some interface theories and Hall–Petch relationship. *Royal Society Open Science* 12, 241954. <https://doi.org/10.1098/rsos.241954>