

メッシュ構造

渡辺 寧*

Mesh structure

WATANABE Yasushi*

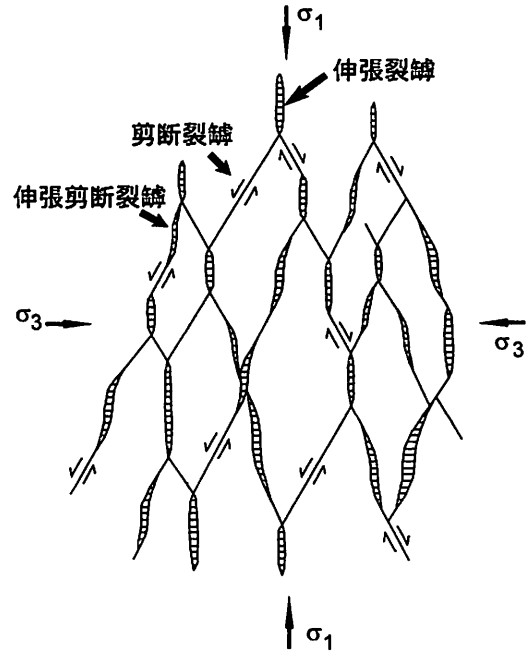
メッシュ構造

メッシュ構造とは、種々の性質の割れ目が高密度で組み合わせたり形成された裂隙の集中域を意味する (Sibson 1996)。メッシュ構造は地下深部でマグマの貫入に伴う熱や熱水の放出、続成作用や変成作用に伴う脱水等により生じた高圧力の流体が、地殻中の岩石の有効封圧を下げることにより水圧破壊を連続的に起こし、さまざまな方位の脆性破壊を作り出し、それらが次々と結びつくことにより形成される。

火山活動やマグマの貫入、地熱活動が活発な地域では明瞭な本地震を伴わない群発地震が頻繁に発生する。これらの群発地震は不均質な物性を持つ岩石の分布地域や応力状態が不均質な(差応力の大きな)地域に限られていることが多い。このような群発地震の発生を説明するモデルとして高流体圧水やマグマによるメッシュ構造の形成が提案された (Hill 1977; 第1図)。

メッシュ構造の特徴は次のようにまとめられる。1) 主として剪断裂隙、伸張剪断裂隙と伸張裂隙の組み合わせからなる。2) 多量の熱水の通路となる。3) 高圧力の流体が異方的応力状態の岩石に流入することにより能動的に形成される。4) 流体がメッシュ構造を通過する際に群発地震を誘発する。5) 断層-裂隙の交線に平行な方向(中間圧縮主応力 σ_2 の方向)に大きな透水性を形成する。6) 高い透水性を持つメッシュ構造を維持するためには少なくとも流体圧(Pf)が最小圧縮主応力(σ_3)より大きい条件を必要とする。

群発地震と流体の移動による岩石脆性破壊の関係が最も明瞭に現れたのが長野県の松代群発地震である。松代地域では1965年から67年の約2年間に6万回を超える有感地震が観測された。この群発地震に伴い、震央部の地表には、西北西-東南東方向の左横ずれ剪断帯群と東北東-西南西方向の右横ずれ剪断帯群、副次的な伸張裂隙(一種のメッシュ構造)が形成された。それと共に、1,000万トンと見積られる水が地表に湧出した。また震央域部分が南北方向に伸張、上方に隆起した(第2図)。これらのことは、地下約10 kmの深度で生じた高流体圧水が、水圧破壊を起こしながらメッシュ構



第1図. Hill型メッシュ (Hill 1977). 伸張裂隙, 伸張剪断裂隙, 剪断裂隙の組み合わせからなる。 σ_1 , σ_3 はそれぞれ最大圧縮主応力, 最小圧縮主応力を示す。

造を形成し、そこを通路とした流体が上昇し、最終的に地表に噴出したことを示している (中村 1971; Sibson 1996)。

メッシュ構造を構成する裂隙の種類

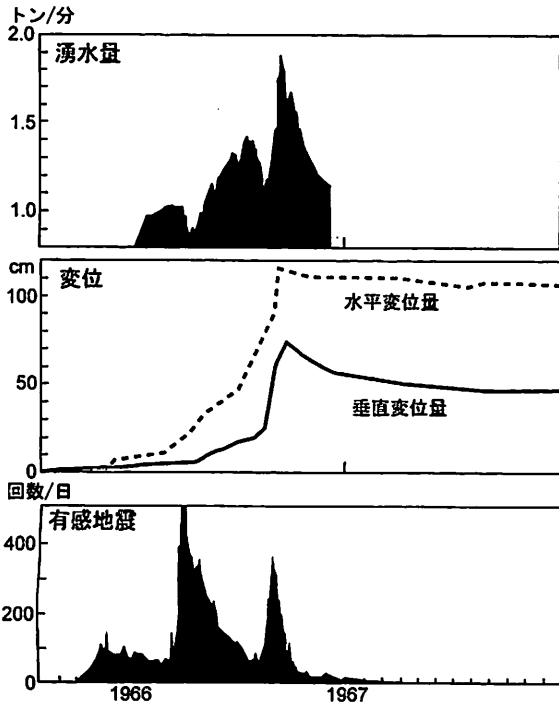
岩石の透水性に影響を与える構造要素には、主として次の5種類のものを含まれ、それぞれの岩石破壊臨界流体圧基準や応力条件が求められている (Sibson 1996; 第1表)。

- ① 粒子スケールの伸張微小裂隙
- ② マクロ伸張裂隙
- ③ マクロスケールの剪断裂隙
- ④ 伸張剪断裂隙
- ⑤ スティロライト溶解面

また内部結合力の有無にかかわらず、既存の面構造が再活動することがある。高圧力流体の流入により形成される脆性

2002年8月9日受付。2002年10月8日受理。

* 東京支部, 産業技術総合研究所 地圏資源環境部門 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 第7事業所
Geological Survey of Japan, AIST, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567 Japan



第2図. 松地地震時の湧水量, 地殻変動, 有感地震との関係 (中村 1971). 横軸は年を表す.

破壊の様式は, 主として差応力と局所的な岩石引張強度により決められる (第1表). これらの条件はいずれも多様性に富むので, 様々な脆性裂隙の組み合わせからなるメッシュ構造が発達する. メッシュ中での脆性破壊は, その種類により岩石の透水性に異なる影響を与える. 例えば, 低空隙率の岩石は裂隙により透水性を増加させ, カタクラスティックな角礫化を起こすこともある. 高空隙率の堆積岩中の単純剪断は孔隙を崩壊させることにより, 低透水性の「変形帯」を形成する. 剪断-伸張裂隙メッシュに発達する構造的な透水性は, これらの裂隙に低透水性の熱水鉱物が沈澱することにより, 小さくなるのが頻繁に生じる. 岩石固化後, 圧力が加わった場合に化学的溶解作用により生じるスティロライト溶解面も溶解面に垂直方向の透水性を小さくする. メッシュ構造中

では, 中間圧縮主応力 (σ_2) に平行な方向に大きな透水性が形成される.

Sibson (1996)により描かれた局地的な応力場に対応する基本的な構造要素の方位を第3図aに, 雁行状の配列のために個々の剪断帯に発達する引張裂隙を第3図bに, リーデル剪断が結合した状態を第3図cに示す. 異なる種類の裂隙が組み合わせることにより, より規模の大きな剪断-引張裂隙メッシュが形成される. これらのメッシュ構造での変位が増大すると, 連結した直線状の断層に進化する. 一度断層が形成されると, より小さな流体圧で断層が再活動する. したがって, メッシュ構造の発達には主要な新しい断層構造の発達の前兆現象と捉えられる.

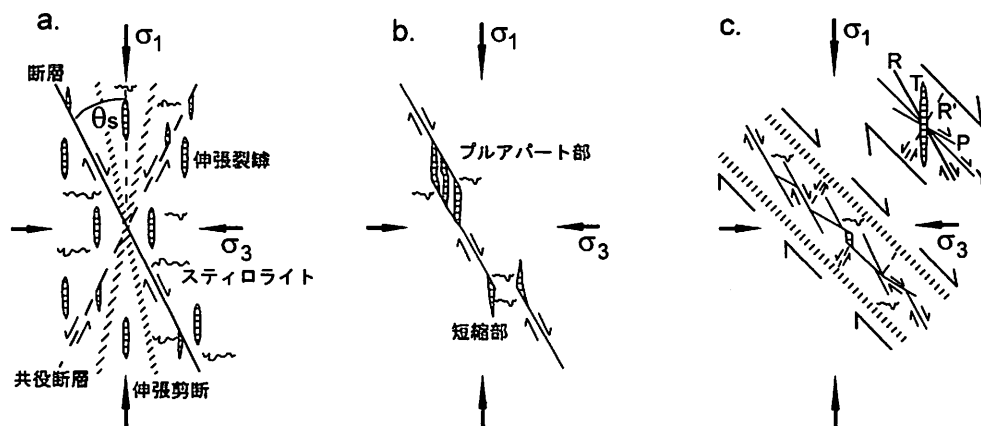
メッシュ構造の形成環境

群発地震が引張-横ずれ引張場に頻繁に伴われることは, メッシュ構造がこのようなテクトニクス場に広く発達し, 多量の流体の通過する通路を形成し, 浅熱水性鉱床の形成に重要な役割を果たしていることを示唆する. 菱刈鉱床 (鹿児島県) の含金石英脈群は, 形成深度が一定で潜頭性であり, 脈形成の最初期には天水の関与が少なく金に富むマグマ起源の深部熱水が卓越するという特徴 (Faure et al. 2002) を持つ. このことは, これらの石英脈が地表水の循環する既存の裂隙に形成したのではなく, 最小圧縮主応力 (σ_3) を超える流体圧の深部熱水が脆性破壊を起こすことによって形成した裂隙に熱水鉱物が沈澱したものであると考えられる (渡辺 2002). 褶曲-スラスト帯のような短縮場では群発地震の発生はまれであるが, アラスカやオーストラリア, ニューゼaland等の造山帯での金鉱脈は, 高圧力の熱水が逆断層運動と共に移動し, 地殻深部 (約 14km 以浅) の静岩圧条件で脆性破壊を起こすことにより形成されたと考えられている (Sibson and Scott 1998).

破壊の様式	方位	破壊基準	条件
粒子サイズの微小裂隙	σ_3 にほぼ垂直	-	-
流体圧引張裂隙	σ_3 に垂直	$P_f = \sigma_3 + T$	$(\sigma_1 - \sigma_3) < 4T$
伸張剪断裂隙 (Griffith 基準)	σ_2 を含む面, $0 < \theta_{es} < \theta_s$	$P_f = \sigma_n + (4T^2 - \tau^2)/4T$	$4T < (\sigma_1 - \sigma_3) < 6T$
剪断裂隙 (Coulomb 基準)	σ_2 を含む面, $20 < \theta_s < 30^\circ$ (σ_1 に対して)	$P_f = \sigma_n + (2T^2 - \tau)/\mu_s$	$(\sigma_1 - \sigma_3) > 6T$
結着力 C_c の既存面での剪断	主応力に対し直交でない面	$P_f = \sigma_n + (C_c - \tau)/\mu_s$	-
スティロライト溶解面	σ_1 に垂直	?	細粒の岩石の基質

T: 引張強度, μ_s : 岩石内部摩擦係数 (μ_s は既存の弱線が存在する場合の岩石内部摩擦係数), C_c : 既存の弱線が存在する場合の結着力, θ_{es} , θ_s はそれぞれ伸張剪断裂隙, 剪断裂隙の剪断面角. P_f は流体圧, τ は剪断応力.

第1表. 断層-裂隙メッシュの破壊の様式と応力条件 (Sibson 1996).



第3図. a. 応力に規制されたメッシュ構造の構成要素, b. プリアパート部, 短縮部で連結した断層セグメント, c. リーデル剪断メッシュから発達した断層 (Sibson 1996). R: リーデル剪断, R': 共役リーデル剪断, P: P 剪断, R: R 剪断, T: 伸張裂罅.

文 献

- Faure K, Matsuhisa Y, Metsugi H, Mizota C and Hayashi S (2002) The Hishikari Au-Ag epithermal deposit, Japan: oxygen and hydrogen isotope evidence in determining the source of paleo-hydrothermal fluids. *Econ Geol*, 97 : 481-498.
- Hill DP (1977) A model for earthquake swarms. *Jour Geophys Res*, 82 : 1347-1352.
- 中村一明 (1971) 松代地震から学んだこと一手に入れた地震制御へのデータ. *科学朝日*, 10月 : 127-133.
- Sibson RH (1996) Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Jour Struct Geol*, 18 : 1031-1042.
- Sibson RH and Scott J (1998) Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: Examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand. *Ore Geol Rev*, 13 : 293-306.
- 渡辺 寧 (2002) 菱刈鉱床の基盤の高まりは何を意味するのか? *資源地質学会第52回年会講演会講演要旨集*, O-44.