

礫岩の歪解析について

中村英克(金属鉱業事業団)・越谷 信・大上和良(岩手大学工学部)

礫岩を粘性体と仮定し、礫を基質と粘性率の異なる楕円体状不均質介在物とし、礫が有限の体積分率をもつときの変形した礫の形状から礫岩全体の歪を算定する方法について検討した。解析方法は Eshelby(1957)の弾性体中の不均質介在物の変形理論を基礎としている。Bilby et al.(1975)や Freeman(1987)等はこの理論を粘性流体中の不均質介在物の変形に応用している。彼らの解析方法ではこの不均質介在物が無限等方等質物体中にただ一つ存在する場合を想定している。しかしながら、実際の礫岩には礫が多数存在し、それらは有限の体積分率を持っている。従って、その中の一つの礫に注目したとき、周囲に存在するその他の礫から相互作用を受けると予想される。そこで、粘性率が基質と異なる1種類または2種類の楕円体状礫が存在し、それらが相互作用を持つ場合の、礫を含む岩石全体の変形速度と各々の礫の変形速度の関係式を導出し、その関係式に基づき、coaxial deformationの場合の岩石全体の歪と礫の歪の関係について検討した。ただし、想定した礫岩では多数の同一寸法の礫がランダムに配列しており、変形前の礫の形状は球であるとした。

礫の歪解析法: Eshelby(1957)は弾性体中の不均質介在物の変形挙動を考えるために、stress free transformation strain(応力を生じない変態歪: eigen 歪)と等価介在物という概念を導入した。同一の eigen 歪 e^*_{ij} をもつ介在物 p が弾性体 D (弾性率 C_{ijkl})中に多数存在する場合、全体の歪 $\langle e^F_{ij} \rangle_D$ は

$$\langle e^F_{ij} \rangle_D = f e^*_{ij}$$

と表される(高橋, 1982など)。ここに、 f は p の体積分率で、右下の指標は 1, 2, 3 をとる。また、このとき基質の歪 $\langle e^F_{mn} \rangle$ は、

$$\langle e^F_{mn} \rangle = -f [S_{mnij} e^*_{ij} - e^*_{mn}]$$

介在物中の歪 e^F_{mn} は、

$$e^F_{mn} = (1-f) S_{mnij} e^*_{ij} + f e^*_{mn}$$

と表される。ここに S_{mnij} は Eshelby テンソルであり、右下の指標に総和規約を適用する。ここで介在物 p の代わりに基質と異なる弾性率をもつ不均質介在物が存在する場合を考える。等価介在物の考え方を用いると、外力を加えられたときの不均質介在物中の応力は、外力による歪分を e^A_{mn} として適当な eigen 歪をもつ均質介在物を用いて表すことができる。すなわち、

$$\begin{aligned} C'_{pqmn} \{ e^A_{mn} + (1-f) S_{mnij} e^*_{ij} + f e^*_{mn} \} \\ = C_{pqmn} [e^A_{mn} + (1-f) \{ S_{mnij} e^*_{ij} + f e^*_{mn} \}] \end{aligned}$$

となる。領域 D 中の全歪は外力を加えられたとき、

$$\langle e^F_{ij} \rangle_D = e^A_{ij} + f e^*_{ij}$$

と表される。これらの関係に基づき、Bilby et al.(1975)と同様に弾性係数と歪をそれぞれ粘性率と歪速度に置き換え、遅い粘性流に適用すると、基質との粘性比 r 、体積分率 f の礫の歪速度 ϵ^P_{ij} と全岩の歪速度 ϵ^T_{ij} の関係は

$$\epsilon_{ij}^T + (1-f)(1-r)S_{ijkl}\epsilon_{kl}^P - \epsilon_{ij}^P = 0$$

となる。上式において $f=0$ とすると、Freeman(1987)が用いた式と同形となる。2種類の礫が存在する場合も同様の方法により、

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij}^T - \epsilon_{ij}^P + (1-f^p)(1-r^p)S_{ijkl}^p \epsilon_{kl}^P \\ - f^q(1-r^q)S_{ijkl}^q \epsilon_{kl}^q = 0 \\ \epsilon_{ij}^T - \epsilon_{ij}^q + (1-f^q)(1-r^q)S_{ijkl}^q \epsilon_{kl}^q \\ - f^p(1-r^p)S_{ijkl}^p \epsilon_{kl}^p = 0 \end{aligned}$$

と求められる。ここに右上の添字 p, q はそれぞれの礫を表す。

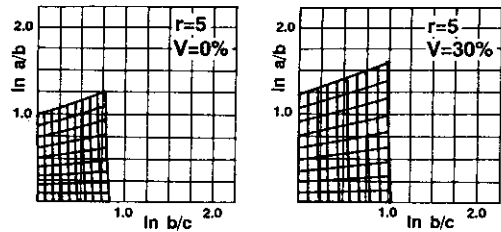
礫の変形は coaxial deformation の場合、礫 p について

$$\begin{aligned} \epsilon_{p11} &= (1/a_{p1})\dot{a}_{p1} \\ \epsilon_{p22} &= (1/a_{p2})\dot{a}_{p2} \end{aligned}$$

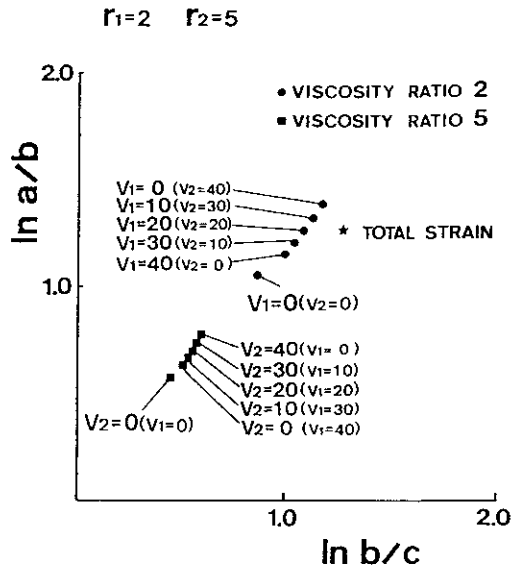
と表される。ここに、 a_{pi} は礫 p (楕円体に近似)の主軸の長さである。礫 q についても同様である。これらから、礫と全岩の歪の関係を数値的にもとめた。

数値計算結果： 礫の種類が1種類で、体積分率が30%の場合は、0%の場合と比べ、変形した礫から推定される全岩の歪(全歪)は小さく見積もられる(第1図)。この傾向は体積分率が増すにつれ顕著になる。また、基質に対する礫の粘性比が大きくなると変形した礫の歪と全歪の Flinn の k 値の差は大きくなるが、体積分率が増加するとこの差は小さくなる。

礫が2種類の場合、全歪が同じとき、各々の礫が有限の体積を持つときの方が、礫が体積を持たないときに比べ、各々の礫の歪は大きくなる。つまり、礫の体積を考慮したときの方が、同等に歪んだ礫から推定される全歪は小さくなる。また、この2種類の礫の体積分率の合計が一定の場合、全歪を一定とすると、粘性比の大きい礫の体積が増加するにつれ、粘性比の大きい礫の歪だけでなく、粘性比の小さい礫の歪も大きくなる(第2図)。礫の粘性比と体積分率の組み合わせによっては、粘性比の小さい礫の歪は全歪より大きくなる場合がある。



第1図 礫が1種類のときの礫の歪(太線)と全岩の歪(細線)の関係。礫の粘性比は5。左図：礫の体積分率がゼロの場合。右図：礫の体積分率が30%の場合。



第2図 全岩の歪が一定の場合の2種類の礫の歪。

ペルム系長部礫岩の変形： 上述の変形モデルに従って、南部北上山地に分布する長部礫岩の歪解析を行った。その結果、白亜系気仙川花崗閃緑岩体に近づくほど、全歪は急激に大きくなる。また、最小主歪軸の方向はWNW-ESE方向で、この方向に短縮されたことが判明した。

参考文献

- Bilby, B. A., Eshelby, J. D. and Kundu, A. K.,
1975: Tectonophys., **7**, 117-136.
- Eshelby, J. D., 1957: Proc. R. Soc. London, Ser.
A, **241**, 376-396.
- Freeman, B., 1987: Tectonophys., **132**, 297-309.
- 高橋清久, 1982: 日本複合材料学会誌, **8**,
46-52.
(1992年冬の例会個人講演)