

論文内容の要旨

論文題目 : Internal Deformation Fields due to a Moment Tensor in an Elastic-Viscoelastic Layered Half-Space: Application to Tectonics of Back-Arc Basins

(弾性-粘弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる
内部変形場 : 背弧海盆のテクトニクスへの応用)

氏 名 橋間 昭徳

弾性-粘弾性層構造媒質中の内部力源による内部変形場の理論的研究は、プレート間の力学的相互作用による長期的な地殻変形運動を理解する上で極めて重要である。何故ならば、長期的な地殻変形運動を扱う問題では、アセノスフェアの粘弾性的な応力緩和の影響を無視することができないからである。弾性論の枠組においては、内部力源は2階の対称テンソルであるモーメント・テンソルを用いて一般的に表現できることが Backus & Mulcahy (1976a, b) によって示されている。実際、モーメント・テンソルは、等方膨張、亀裂の開口及び断層すべりの3つの独立な物理過程に対応する力のシステムに分解することが可能である。従って、モーメント・テンソルによる内部変形場の一般的表現式が得られれば、それは等方膨張、亀裂の開口及び断層すべりによる内部変形場の表現式を特別な場合として含んでいることになる。本研究では、第2章及び第3章において、重力場の下にある半無限弾性-粘弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる内部変形場の一般的定式化を行った。また、第4章では、この内部変形場の定式化に基づき、プレート沈み込みと背弧拡大をカップルさせた理論モデルを構築し、マリアナ・トラフの背弧拡大のメカニズムを数値シミュレーションにより明らかにした。

静的変形問題の円筒座標系における変位ポテンシャルの導出

無限弾性媒質中のモーメント・テンソルによる変形場のデカルト座標系における表現式は、既に Aki & Richard (1980) によって得られている。この表現式をハンケル変換の基本公式を用いて変換し、モーメント・テンソル $\mathbf{M} = |M_{ij}|$ による静的変形場を記述する変位ポテンシャルの円筒座標系 (r, ϕ, z) における以下のような積分表現式を導出することに成功した。

$$\begin{cases} \Phi_1(r, \phi, z) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \chi_1(z; \xi) \mathbf{J}(r, \phi; \xi) d\xi \\ \Phi_2(r, \phi, z) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \chi_2(z; \xi) \mathbf{J}(r, \phi; \xi) \xi d\xi \\ \Psi(r, \phi, z) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \chi'(z; \xi) \mathbf{J}'(r, \phi; \xi) d\xi \end{cases}$$

但し

$$\begin{cases} \chi_1 = (1 - 4\gamma, 2 + \gamma, -\text{sgn}(z), 2 - \gamma) e^{-\xi|z|} \\ \chi_2 = (0, 3\text{sgn}(z), -1, \text{sgn}(z)) e^{-\xi|z|} \\ \chi' = (\text{sgn}(z), -1) e^{-\xi|z|} \end{cases}$$

$$\mathbf{J}(r, \phi; \xi) = \begin{pmatrix} |(M_{11} + M_{22} + M_{33}) / 9K| J_0(\xi r) \\ -(M_{11} + M_{22} - 2M_{33}) / 12\mu | J_0(\xi r) \\ -(M_{13} / \mu) \cos \phi J_1(\xi r) - (M_{23} / \mu) \sin \phi J_1(\xi r) \\ |(M_{11} - M_{22}) / 4\mu | \cos 2\phi J_2(\xi r) + (M_{12} / 2\mu) \sin 2\phi J_2(\xi r) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{J}'(r, \phi; \xi) = \begin{pmatrix} (M_{13} / \mu) \sin \phi J_1(\xi r) - (M_{23} / \mu) \cos \phi J_1(\xi r) \\ -|(M_{11} - M_{22}) / 2\mu | \sin 2\phi J_2(\xi r) + (M_{12} / \mu) \cos 2\phi J_2(\xi r) \end{pmatrix}$$

無限弾性媒質中のモーメント・テンソルによる円筒座標系での変位場は、上記の変位ポテンシャル (Φ_1, Φ_2, Ψ) を用いて、以下のように表現される。

$$\begin{pmatrix} u_r \\ u_\phi \\ u_z \end{pmatrix} = \nabla \Phi_1 - \gamma z \nabla \Phi_2 + (2 - \gamma) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \nabla \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Psi \end{pmatrix}$$

重要な点は、弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる変位場も形式上同じ形に表現されるということである。

弾性-粘弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる内部変形場の定式化

弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる変形場は、無限弾性媒質のモーメント・テンソルによる変形場を特解とし、弾性層構造媒質のモード解に重ね合わせることで形式的に表現される。この形式的な表現式に含まれる係数を Fukahata & Matsu'ura (2005) の一般化伝達行列の方法を用いて諸境界条件を満たすように決めることにより、弾性2層構造媒質中のモーメント・テンソルによる内部変形場の表現式を導出した。こうして得られた弾性解に Lee (1955) 及び Radok (1957) の線形粘弾性の対応原理を適用すれば、ラプラス空間での粘弾性解が得られる。それを更にラプラス逆変換することで、最終的に、物理空間における半無限弾性-粘弾性層構造媒質中のモーメント・テンソルによる内部変形場の表現式を導出した。この最終的な表現式は、等方膨張、亀裂の開口及び断層すべりによる内部変形場の表現式を部分として含んでいる。この内の断層すべりについては Fukahata & Matsu'ura (2006) が既に得ているが、等方膨張と亀裂の開口については、本定式化が最初のものである。そこで、背弧海盆のテクトニクスへの応用で特に重要となる、有限亀裂の開口による弾性-粘弾性層構造媒質の変形場の数値計算例(マグマの貫入、海嶺の部分的・間欠的な拡大、プレートの定常的な発散運動)を示し、その変形パターンの特性を考察した(図1)。

背弧海盆のテクトニクスへの応用

地球の最外殻はいくつもの弾性プレートに分割されており、それらは相対的な水平運動を行っている。プレートとプレートの境界は、発散型・横ずれ型・収束型とその形態を変えながら、地球表面上で閉じた環を成す。プレート境界周辺域の地殻変形の根本原因は、このような様々な形態のプレート境界における力学的相互作用に帰することができる。現在では、プレート境界の3次元形状は地震の震央分布によって、またプレート相対運動速度は GPS や VLBI などの宇宙技術を利用した測地観測によって精確に求めることができる。従って、Matsu'ura & Sato (1989) が既に示しているように、プレート境界における力学的相互作用をプレート境界での変位の不連続の増大として表現することは合理的である。この場合、プレート境界面に沿った方向の変位の不連続は断層すべりに対応し、垂直方向の変位の不連続は亀裂の開口に対応する。本研究で導出したモーメント・テンソルによる内部変形場の表現式は、この両方の場合を含んでいるので、複合的なプレート境界の周辺域における地殻変形運動をモデル化する上で、非常に有用である。

このような基本的考えに基づいて、マリアナにおけるプレート沈み込みと背弧拡大をカップルさせた3次元力学的モデルを構築し、数値シミュレーションを通して、背弧海盆の発達を支配する以下のようなフィードバック・メカニズムを明らかにした。まず、定常的なプレート沈み込み運動によって、上盤プレートの背弧域に伸張応力場が時間と共に徐々に形成される。伸張応力が蓄積すると、それを解消するように背弧域の構造的弱面を選んで亀裂の開口(背弧拡大)が始まる。背弧拡大

による上盤プレートの水平変形運動はプレート境界を沈み込む海洋プレート側へ押し出す。定常的にプレートが沈み込んでいる状態においては、プレート境界に働く剪断応力はプレート境界の最大摩擦強度と釣り合っていないなければならない。従って、背弧拡大によるプレート境界での剪断応力の増加は、プレート沈み込み速度の局所的増大を引き起す。この局所的なプレート沈み込み速度の増大は背弧域の伸張応力の蓄積を更に加速する。そして、増大した伸張応力を打ち消すように、さらなる背弧拡大が引き起こされる(図2)。このようなフィードバック・メカニズムは、プレート境界の張り出しが大きくなり、プレート沈み込みによる背弧域の伸張応力の蓄積レートが低下するまでの一定期間継続する。

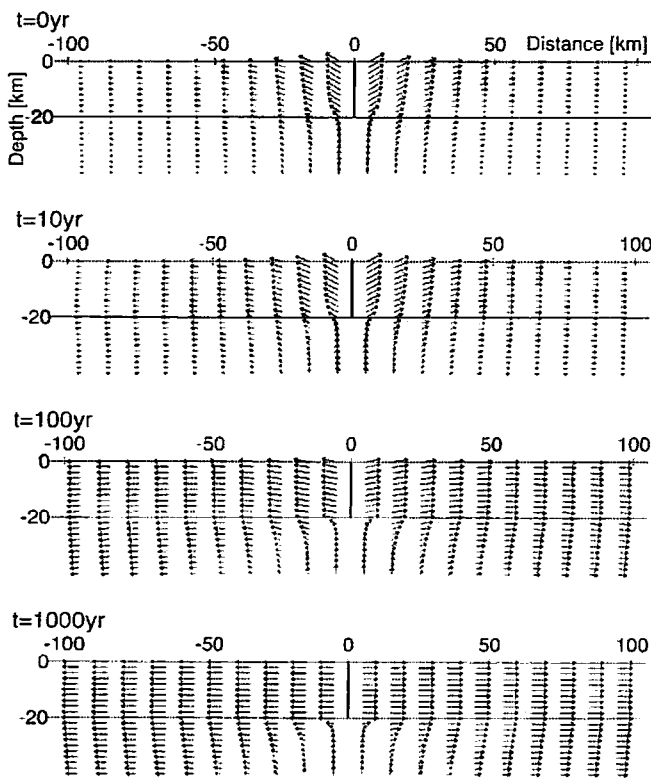


図1：無限長の中央海嶺が瞬間的に拡大した後の内部変形場の変化

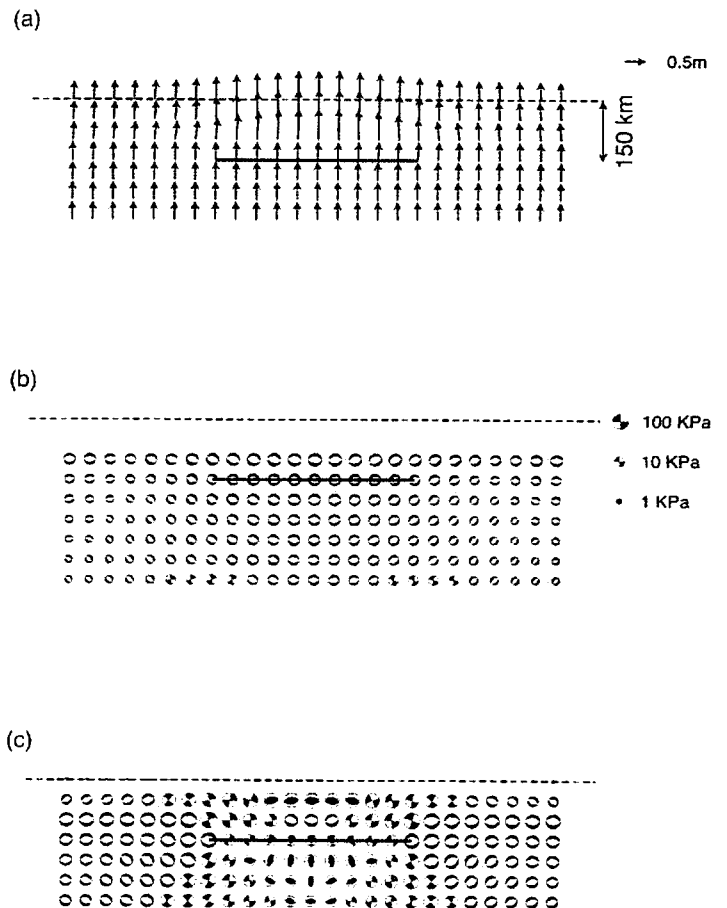


図2：沈み込み速度の増大と背弧拡大がつりあっている時の(a)上盤の水平変形速度場と(b)沈み込み運動による応力蓄積レート(c)上盤の平衡状態における応力蓄積レート