

論文内容の要旨

論文題目 Application of the Inversion Methods of Stress and Constitutive Relation to the Japanese Islands
応力及び構成則逆解析手法の日本列島への適用

氏名 飯沼 卓史

最終的な目標である地震・地殻変動の予測のため、応力逆解析手法を日本列島に適用し、応力変化をモニタリングする事を目指して研究を行った。日本列島では観測点数が1000を超える高密度GPS連続観測網「GEONET」が稼働しており、速度場を日々得ることができる。一方、地震・地殻変動の予測に関していえば、応力の状態及び変化を知ることがその第一歩となりうるが、地殻の不均質性、非弾性、非線型性などのために、歪み速度から単純に線形等方弾性体として応力変化を求めることは適切でない。そこで、本研究ではHori and Kameda(2001)の応力逆解析手法を日本列島に適用し、応力変化を推定することを目的とした。その際、境界でのトラクションを見積もるために、構成則逆解析手法を用いた(図1)。また、これらの手法について、適用に関する諸問題について検証、評価を行った。

応力逆解析手法の特長は

1. 歪みと応力間の構成則が完全にわかっていなくても解析できる
2. Airyの応力関数を用いることで観測量の高階微分を使わなくてすむので精度がよい

という二点があげられる。二次元平面応力状態を仮定し、Airyの応力関数を $(a_{,11}, a_{,22}, a_{,12}) = (\sigma_{22}, \sigma_{11}, -\sigma_{12})$ という関係を満たすものとして定義すると、自動的に応力テンソルが釣り合いの式を満たすようになる。あと一つ応力と歪みの間の関係式を与えれば一つの未知数に対し一つの方程式があることになり、解きうることになる。本研究では、日本列島の非弾性変形は主として断層運動によっており、これは剪断変形しか生み出さない、すなわち、歪みの面積成分に非弾性成分は無い、ということを仮定して、

$$a_{,11} + a_{,22} = \kappa(\epsilon_{11}^{obs} + \epsilon_{22}^{obs})$$

という支配方程式を得た。ここで κ は二次元の面積弾性率であり、 obs は歪みが観測量である事を示す。また、境界では応力とトラクションが釣り合うことより、トラクション(t)から resultant

force(r) を $r_j = \int^x t_j dl$ と定義すると

$$n_1 a_{,1} + n_2 a_{,2} = -n_1 r_2 + n_2 r_1$$

という Neumann 型の境界条件が導出される。この境界値問題を有限要素法で解く。その際必要となるのは係数 κ と、境界でのトラクション、そして入力としての観測された変位場のデータである。

応力逆解析で必要となるトラクションを見積もるために Hori(2004) による構成則逆解析手法を適用する。対象となる物体 B は平面応力状態にある不均質な線形等方弾性体とする。その中に小ブロック Ω を重なり合うように多数定義し、 Ω 毎にポアソン比 ν を解き、重ね合わせることで B 全体のポアソン比分布を表現する。各ブロックでの釣り合い式は、小領域であることから変位をテイラー展開することで、

$$\sum_P (c_{ijkl}^0 + \nu c_{ijkl}^1) a_{kp} f_{p,i}(x) = 0$$

となる。ここで、 $c_{ijkl}^0 = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$ 、 $c_{ijkl}^1 = \delta_{ij}\delta_{kl} - \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$ であり、 $\{a_{ip}\} = \{u_i, u_{i,1}, u_{i,2}, \frac{1}{2}u_{i,11}, u_{i,12}, \frac{1}{2}u_{i,22}, \dots\}$ 、 $\{f_p\} = \{1, x_1, x_2, x_1^2, x_1x_2, x_2^2, \dots\}$ である。これがブロック内の変位が観測される N 点のノードで成り立つことより連立方程式として ν について解くことができる。係数列 a_{ip} は、各ノードでの変位と座標がテイラー展開により

$$u_i^n(x) = \sum_{p=1}^P a_{ip} f_p(x^n)$$

と表せるので、行列 f に関する特異値分解を用いて求める。

二次元平面応力状態並びに $\epsilon_{ii}^p = 0$ という仮定、また構成則逆解析の結果から求めたトラクションを応力逆解析に使用する事について、検証・評価を行った。二つの仮定に関しては CMT カタログを用いて軸の方向、地震性の非弾性歪みについての評価を行い、適用可能性が十分な地域がどこかを判定した。この結果が良好であった中国地方に関して、実際に適用を行うものとした。トラクションに関しては応力逆解析の結果への誤差伝搬について評価したところ、トラクションの見積り誤差の 1/4 程度が応力逆解析の結果に伝わる事がわかった。

また、二次元平面応力が成り立たないような地域へ、手法を拡大して適用する事とした。鉛直方向の圧縮伸張の応力を 0 とし、他の応力成分については鉛直方向の変化が水平方向の変化に比べて十分小さいという環境にある薄板について、 σ_{13}, σ_{23} を推定する手法を考えた。各地点での応力の主軸が、広域応力の主軸に近い方向を向くものとし、釣り合い式と境界条件にこの拘束条件を加えて応力を求める。解析に際しては、 $(b_{,1}, b_{,2}) = (\sigma_{23}, -\sigma_{13})$ となるような関数 b を用いることで釣り合い式を自動的に満たすようにした。また、境界条件は resultant force を用いて $b = -r_3$ と書ける。

中国地方へ応力逆解析及び構成則逆解析手法を適用した。2000 年の鳥取県西部地震に関連して、この地震の前後で期間を分けて解析を行った。議論の結果、

1. 鳥取県西部地震以前、その震源付近では、歪み速度は小さいものの応力蓄積速度は高かった (図 2)
2. 同地震を期に応力蓄積速度が歪み速度に比して大きく変化していることから、非弾性歪み速度や構成物質の非線形・非等方性が変化した可能性がある

ということがわかった。こうした変化は歪み速度の分布ではなく応力逆解析によって求めた応力蓄積率に着目することで初めて明らかになったものであり、歪み速度や変位の分布からはわかりにくい変化・検出できない変化が、応力蓄積率の変化を観察することで明らかになることが示された。

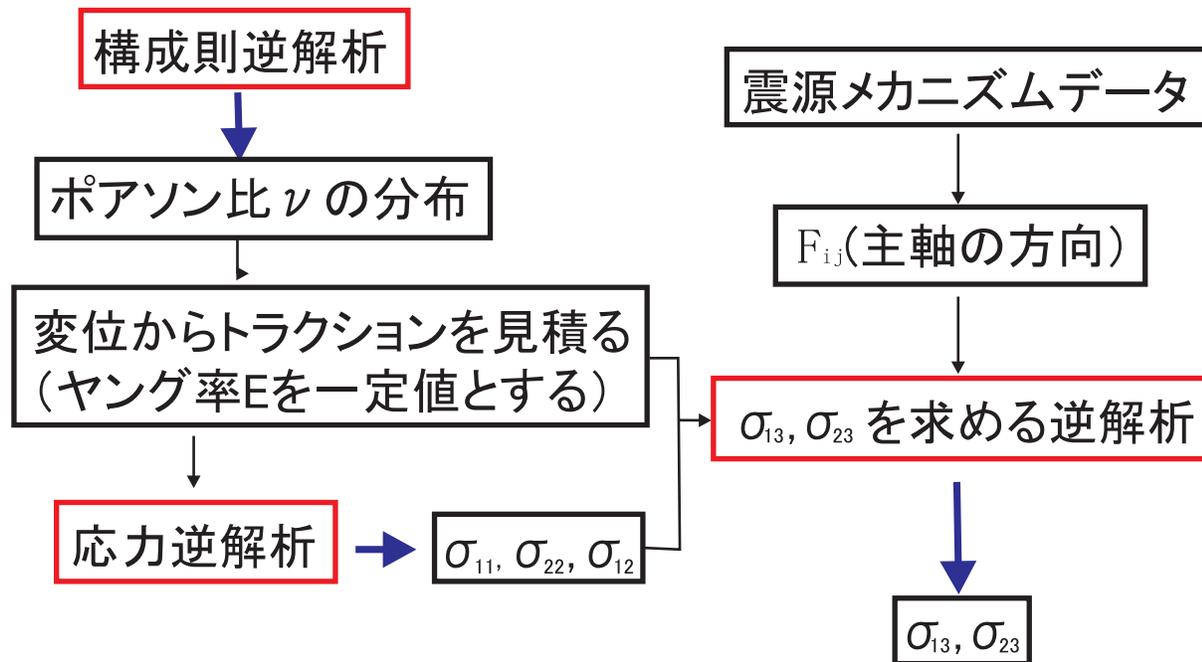
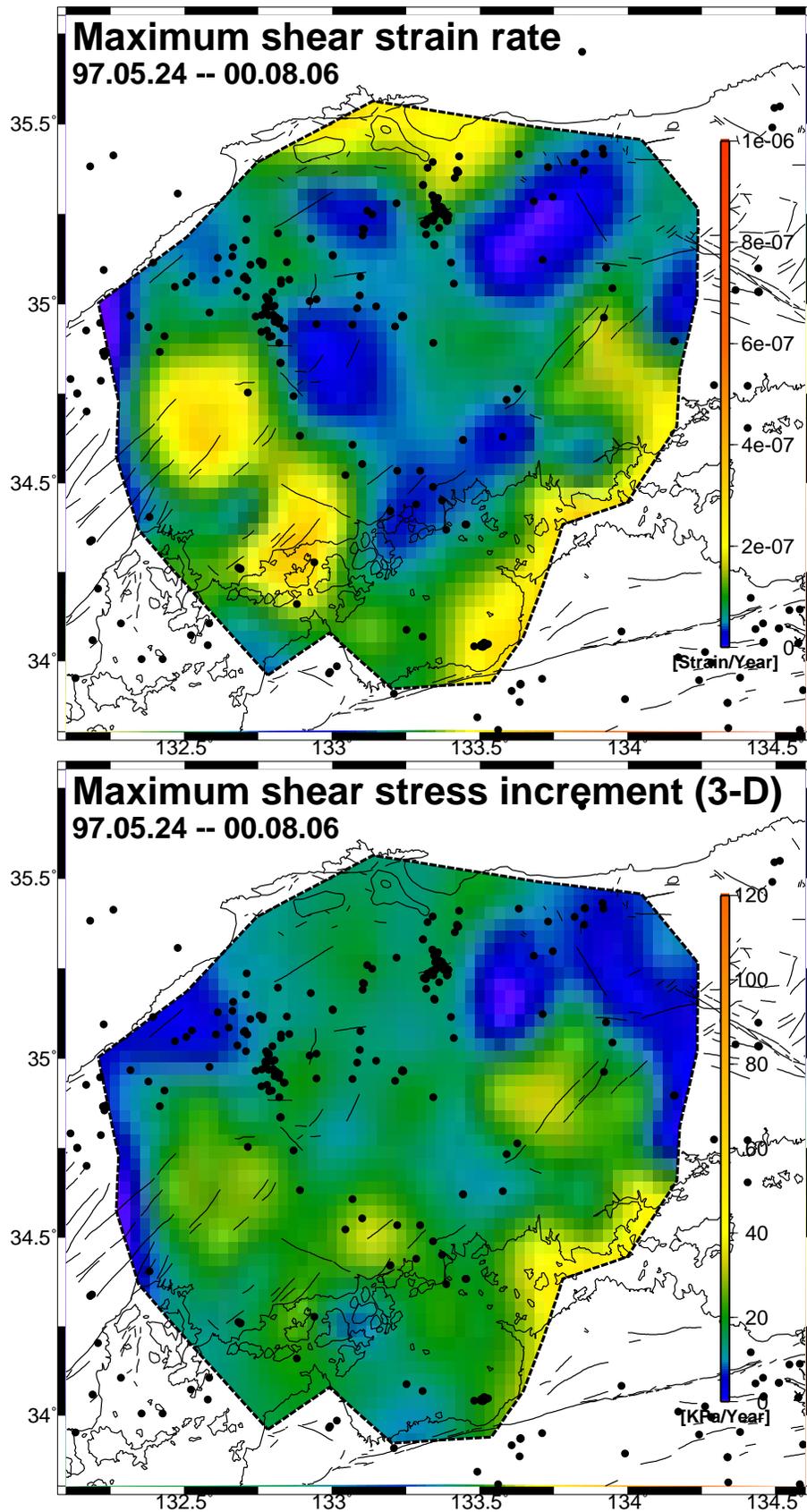


図 1: Flowchart of the inversion methods.



☒ 2: Maximum shear strain rate (upper) and stress rate (lower) for the pre-Tottori Earthquake period.