

基底関数展開を用いた GNSS・InSAR データの同時逆解析による
 チベット南東部の歪み速度場の推定
 Estimation of a strain-rate field in southeastern Tibet
 by joint inversion of GNSS and InSAR data using basis function expansion

○野末陽平・深畠幸俊・Jin FANG・Tim J. WRIGHT
 ○Yohei NOZUE, Yukitoshi FUKAHATA, Jin FANG, Tim J. WRIGHT

Accurate estimation of strain-rate fields from geodetic data is essential for understanding crustal activity. However, the low spatial density of GNSS observation networks often leads to the estimation of an oversmoothed strain-rate field, neglecting localized deformation. To overcome this problem, we develop a new estimation method by jointly inverting GNSS and InSAR data using basis function expansion. We apply this method to southeastern Tibet, an active tectonic zone strongly influenced by the ongoing collision between the Indian and Eurasian plates and characterized by numerous faults, including the left-lateral strike-slip Xianshuihe Fault. The estimated strain-rate field reveals remarkable localization of deformation along the Xianshuihe Fault. The peak value of the maximum shear strain rate exceeds 300×10^{-9} strain/yr, which is more than three times larger than that estimated from the GNSS data only. This result suggests the importance of integrating spatially dense InSAR observations with GNSS data to better resolve localized deformation in active tectonic zones.

1. 序論

地殻における歪みの蓄積は地震活動や地形の形成等と深く関係する。従って、空間的に離散的な測地観測データから面的な変形場を推定することは重要な課題である。GNSS 観測により 3 次元の変位データが得られるが、世界中の多くの地域においてその空間分解能は高いとは言えない。一方、干渉 SAR (InSAR) は極めて高い空間分解能を持つが、衛星視線 (LOS) 方向の 1 次元変位しか観測できず、北行軌道と南行軌道の両方のデータを用いても南北変位への感度が極めて低いという短所がある。つまり、GNSS と InSAR は相補的な関係にある。両者を共に用いて逆解析(同時逆解析)を行うことにより、高い分解能で変形場が推定できると考えられる。

測地逆解析の有力な手法として基底関数展開があり、GNSS データから歪み速度場が推定されている (Okazaki et al., 2021 等)。本研究では、基底関数展開の手法を GNSS と InSAR の同時逆解析に拡張し、活発な変動帯であるチベット南東部に適用した。

2. 解析手法

東向き、北向き、上向きをそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸の正の方向とする。 $i (= x, y, z)$ 方向の変位速度

場 $v_i(x, y)$ を、間隔 L で並ぶ M 個の双 3 次 B-スpline 関数 $\Phi_j(x, y; L)$ の線形和で展開する：

$$v_i(x, y) = \sum_{j=1}^M a_{ij} \Phi_j(x, y; L) \quad (1)$$

ここで、 a_{ij} は推定すべき展開係数である。GNSS の x, y, z 方向の速度をデータベクトル $\mathbf{d}_x, \mathbf{d}_y, \mathbf{d}_z$ に、InSAR の LOS 速度を \mathbf{d}_s にそれぞれ格納する。

離散的なデータ $\mathbf{d} = (\mathbf{d}_x^T \mathbf{d}_y^T \mathbf{d}_z^T \mathbf{d}_s^T)^T$ と連続的な速度場 \mathbf{v} は次式で関係付けられる：

$$\mathbf{d} = \mathbf{v} + \mathbf{e} = \mathbf{H}\mathbf{a} + \mathbf{e}; \mathbf{e} \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{E}) \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{H} と \mathbf{a} は次式で表される：

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_x & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_y & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_z & \mathbf{0} \\ \mathbf{N}_x & \mathbf{N}_y & \mathbf{N}_z & \mathbf{G}_s \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{a}_m^T \mathbf{p}_s^T)^T = (\mathbf{a}_x^T \mathbf{a}_y^T \mathbf{a}_z^T \mathbf{p}_s^T)^T \quad (4)$$

ここで $\mathbf{H}_x, \mathbf{H}_y, \mathbf{H}_z$ は、GNSS 速度の x, y, z 成分が観測された点での Φ_j の値で構成される。 $\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_z$ は、InSAR の観測点における Φ_j を LOS 方向に投影した値で構成される。 \mathbf{G}_s は、InSAR データに含まれる地殻変動とは関係のない長波長成分を 2 次多項式により補正するために導入される行列であ

る。 \mathbf{a} は、モデルパラメータベクトル $\mathbf{a}_m = (\mathbf{a}_x^T \mathbf{a}_y^T \mathbf{a}_z^T)^T$ と 2 次多項式のパラメータベクトル \mathbf{p}_s からなる。 \mathbf{E} は分散共分散行列を表す。

観測データからの情報に加えて、「速度の 2 階微分の L2 ノルムが小さくなること」を先驗情報として用いて、目的関数を定義した：

$$s(\mathbf{a}) = (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a})^T \mathbf{E}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a}) + \mathbf{a}_m^T \mathbf{R}' \mathbf{a}_m \quad (5)$$

ただし、 \mathbf{R}' は次式で表される：

$$\mathbf{R}'(\alpha^2, \beta^2, \gamma^2) = \begin{pmatrix} \alpha^2 \mathbf{R} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \beta^2 \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \gamma^2 \mathbf{R} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{R} は ϕ_j の 2 階微分からなる行列である。 $\alpha^2, \beta^2, \gamma^2$ は、式 (5) 右辺の第 1 項 (速度の観測値と推定値の重み付き残差 2 乗和) と第 2 項 (速度場の平滑化) の比を規定する超パラメータであり、それらの最適値は ABIC 最小の規準 (Akaike, 1980) により客観的に決定した。 $s(\mathbf{a})$ を最小化する \mathbf{a} の最適値 $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{\mathbf{a}}_x^T \hat{\mathbf{a}}_y^T \hat{\mathbf{a}}_z^T \hat{\mathbf{p}}_s^T)^T$ は次式で与えられる：

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{E}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{R}'(\hat{\alpha}^2, \hat{\beta}^2, \hat{\gamma}^2))^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{E}^{-1} \mathbf{d} \quad (7)$$

式 (7) を式 (1) に代入することで面的な速度場が得られる。それを解析的に微分して歪み速度場を求めた。

3. 観測データ

GNSS については、98-105°E, 28-35°N の範囲にある速度データ (Elliott et al., 2025) を用いた。InSAR については、Sentinel-1 の北行 4 フレーム・南行 4 フレームで 2016 年から観測された速度データを約 5 km グリッドに縮約したものを用いた。

4. 結果と議論

同時逆解析で推定された変形場を Fig. 1 に示す。東西速度 (左上)、南北速度 (右上) とも、左横ずれ断層である Xianshuihe 断層 (XSHF) を跨ぎ、大きな速度勾配を持つ。最大剪断歪み速度 (左下) は XSHF に沿って顕著に局在している。主歪み軸 (右下) が東西、南北方向であることから、剪断方向は XSHF の走向と概ね一致することが分かる。

XSHF にほぼ垂直な測線 (C1-C2) とほぼ平行な測線 (X1-X2) に沿った最大剪断歪み速度のプロファイルを Fig. 2 に示す。同時逆解析 (赤) で推定されたピーク値は、GNSS データのみを用いた逆

解析 (青) と比べて 3 倍以上大きな値 (約 340×10^{-9} strain/yr) となった。また、X1-X2 のほぼ全体にわたって、同時逆解析により顕著に大きな歪み速度が推定されたことが分かる。空間分解能の高い InSAR データを用いることで、XSHF に沿った歪み速度の局在がより明瞭に見出された。

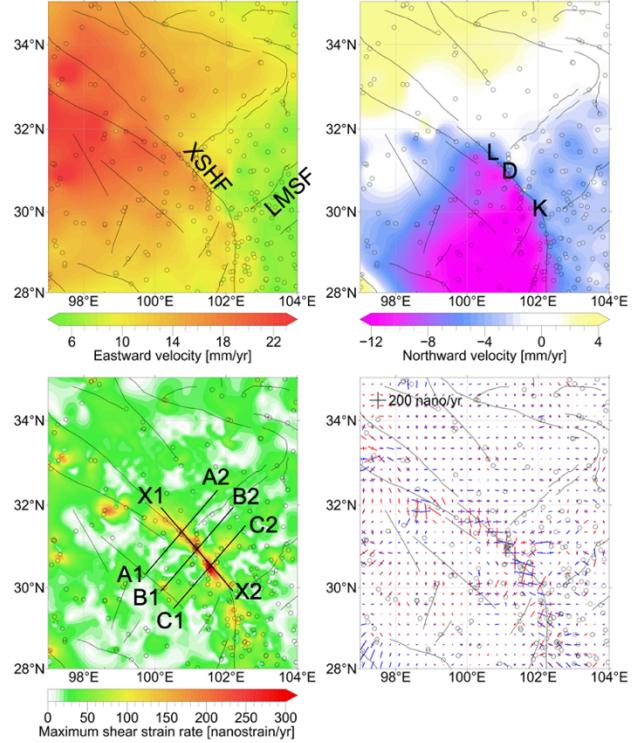


Fig. 1: Results of the joint inversion of GNSS and InSAR data. Top: Eastward (left) and northward (right) velocities. Bottom: Maximum shear strain rates (left) and principal axes of strain rates (right). Red and blue bars represent extensional and contractive strain rates, respectively. Gray lines show active faults.

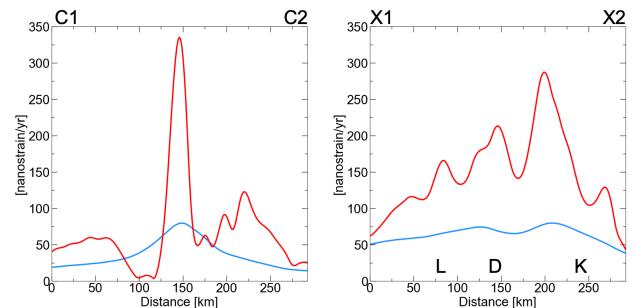


Fig. 2: Profiles of the estimated maximum shear strain rates. Results of the joint inversion of GNSS and InSAR data (red) and the inversion of GNSS data only (blue) are presented. The locations of the profiles C1-C2 and X1-X2 are shown by the black solid lines in Fig. 1. L, D, and K stand for Luhuo, Daofu, and Kangding, respectively, whose locations are also shown in Fig. 1.