

## PS-InSAR および GPS 時系列にもとづく

## 2008年岩手・宮城内陸地震後の長期的非定常地殻変動

## Anomalous long-term crustal deformation in and around the focal area of the 2008

## Iwate-Miyagi Nairiku earthquake revealed by PS-InSAR and GPS time series

大下佑也・#太田雄策・海野徳仁・出町知嗣・

立花憲司・佐藤 俊也(東北大院理)・三浦哲(東大地震研)

Yuya Ohshita, #Yusaku Ohta, Norihito Umino, Tomotsugu, Demachi, Kenji Tachibana,

Toshiya Sato (Tohoku Univ.), Satoshi Miura (Univ. of Tokyo)

はじめに.

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震( $M_w$ 6.9)は奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯[1]内部で発生した逆断層型の地震である. 本震の主要な破壊は西に傾き下がる震源断層で生じたことが測地, 地震学データから明らかになっている[例えば, 2, 3]. 大園 [4] は GPS データから長期的な余効変動を見出し, これを下部地殻及び上部マントルの粘性緩和によるものと考えてモデル化を行った. 彼らは, 広域の地殻変動は粘性緩和モデルによって説明できるものの, 震源域ごく近傍ではモデル計算からの乖離が大きく, 粘性緩和以外の長期的余効変動を引き起こす要因を考慮する必要であることを指摘している [4,5]. 大下・他 [6] は, この領域において南行軌道の衛星 SAR データを使用して PS 法を用いた InSAR 時系列解析を適用し, 震源断層上盤側の局所的 LOS (視線方向) 短縮域の存在を明らかにした. 本講演では長期的な余効変動メカニズムの推定を目的とし, 地形相関等の誤差評価, LOS 変位の GPS 観測との比較, 北行軌道の InSAR データ解析および 2.5 次元解析を行ったので, その結果を報告する.

## InSAR データ・解析および結果

InSAR データには ALOS/PALSAR データを用い, 本震発生後の 2008 年 6 月から 2010 年 10 月までの南行軌道 14 シーン, および北行軌道 9 シーンを用いた. 地震後の地殻変動場を時空間的に推定するために, PS 法による InSAR 時系列解析パッケージである StaMPS [7] を用いた. 数値標高データには SRTM4 を用いた. 南行軌道のマスター画像は 2009 年 6 月のデータを, 北行軌道のマスター画像は 2009 年 9 月のデータをそれぞれ使用した. また, 初期 PS 候補点抽出の閾値である振幅安定度( $D_A$ ) の値は StaMPS パッケージによる解析で標準的な値である 0.4 [8] を採用した.

南行軌道データの解析の結果, 震源断層上盤側で LOS 短縮 (隆起もしくは東向き変位), 下盤側で LOS 伸長 (沈降もしくは西向き変位) のパターンが見られ, 上盤側では本震発生後, 2010年10月までの期間に最大0.25 m程度の累積変位による短縮域が確認された. また, InSAR時系列解析の精度確認のために, GEONET 0913観測点の変位時系列を LOS に変換し比較を行った結果, InSAR と GPS 観測の結果は概ね調和的であることが確認されたが, 解析期間の後半で

は InSAR 時系列解析の結果が GPS データと乖離する部分も見られる. 次に, 北行軌道データの解析を行った. 南行軌道で確認された LOS 短縮域は北行軌道においても同様に LOS 短縮を示したが, 変位量はわずかであった.

これらの南北両軌道の解析結果共に多数の PS 点が抽出されたため, LOS 変位の平滑化を行った後, 2.5 次元解析[9]を行った. その結果, 断層上盤側では東向きかつ隆起, 下盤側では西向きかつ沈降の変位パターンが明瞭に得られた. また, 北行軌道解析で確認された上盤側の LOS 短縮域では, 2010年9月までの期間で最大0.3 m 程度の隆起が確認され, 全体的に隆起が卓越していることが分かった.

次に, 得られた変位が真の地殻変動を示しているか否かを確認するため, 南行軌道のデータを用いて LOS 変位と標高の相関を調べた. その結果, 標高が高い領域では LOS 短縮, 標高が低い領域では LOS 伸長の相関が僅かにあることが確認された. しかし, そもそも本研究の対象領域では断層上盤側の LOS 短縮域は標高が下盤側に比較して高く, この結果が標高に相関するノイズであるかどうかの区別が難しいため, より詳細な検討が必要である.

[参考文献] [1] Miura et al., *EPS*, 2004, [2] Ohta et al., *EPS*, 2008, [3] Iinuma et al., *GRL*, 2009, [4] 大園, 東北大学博士論文, 2009, [5] 太田他, *JpGU Meeting*, 2010, [6] 大下他, *JpGU Meeting* 2012, [7] Hooper et al., *JGR*, 2007, [8] Ferretti et al., *IEEE Trans*, 2001, [9] Fujiwara et al., *GRL*, 2000.

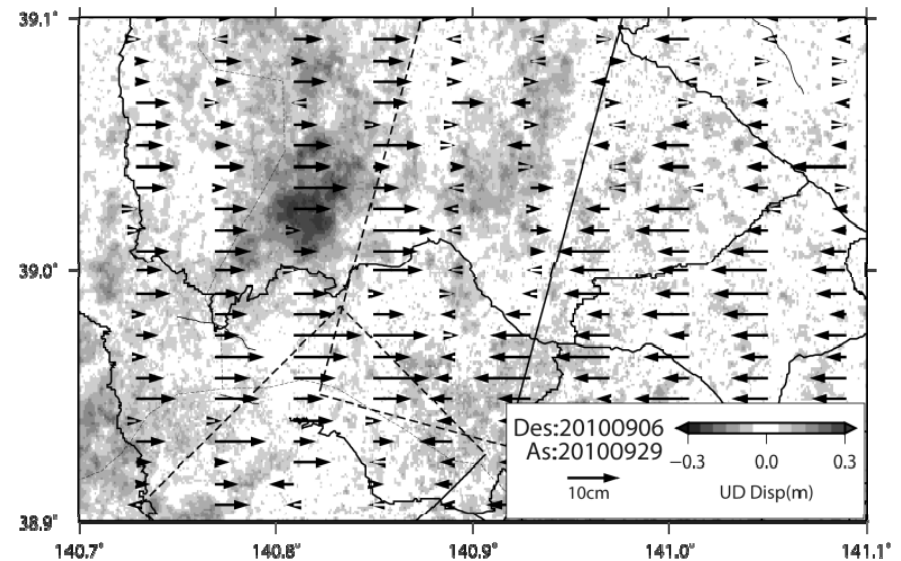


図: 2.5 次元解の結果 (グレースケール: 準上下成分, 矢印: 東西成分, 破線: 震源断層[2])

[謝辞]: 本研究で用いた SAR データは, 地震・地盤変動データ流通及び解析ワーキンググループ(地震 WG) および PIXEL 共有データを通じて提供を受けました. PALSAR データの所有権は経済産業省および宇宙航空研究開発機構(JAXA) にあります. また Hooper 博士には StaMPS 解析ソフトウェアを提供して頂きました.

# InSAR時系列解析による 2008年岩手・宮城内陸地震震源域における 地震後非地震性すべりの検出とその特徴

大下祐也・#太田雄策・海野徳仁・出町知嗣・立花憲司・  
佐藤 俊也(東北大院理)・三浦哲(東大地震研)・小澤拓(防災科研)

## 発表内容:

- **SBAS**法および**PS**法によるALOS/PALSAR干渉画像の時系列解析
- 2008年岩手・宮城内陸地震域における長期的余効変動

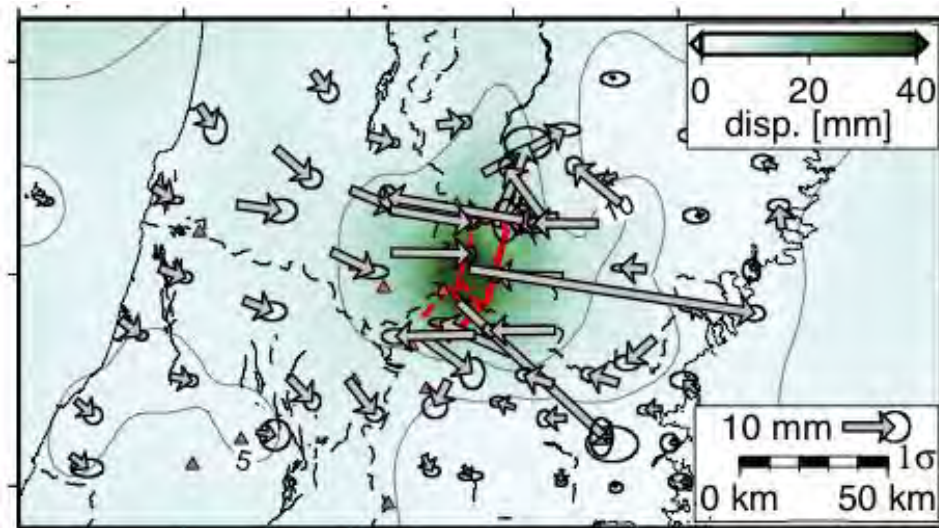
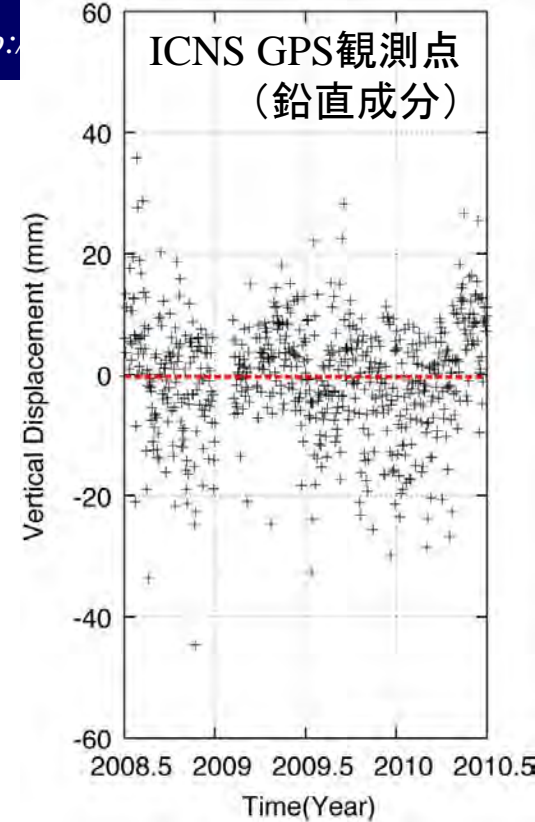
# 2008年岩手・宮城内陸地震後の長期余効変動

## ● 長期GPSデータ

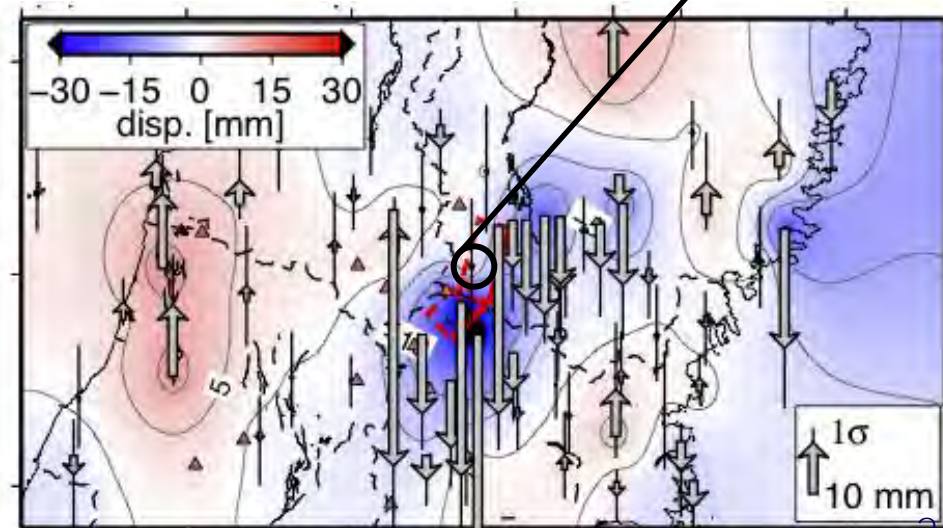
- Ohzono et al (*EPS*, in press)
- 2008年8月-2009年12月
- 水平成分: 広域地殻短縮, 鉛直成分: 震源域沈降
- 下部地殻/上部マントルの粘性緩和を強く示唆

## ● ICNS GPS観測点の地震後変動

- 水平成分: 大きな東向き余効変動
- 上下成分: 顕著な余効変動は検知できず
- 局所的余効変動の可能性



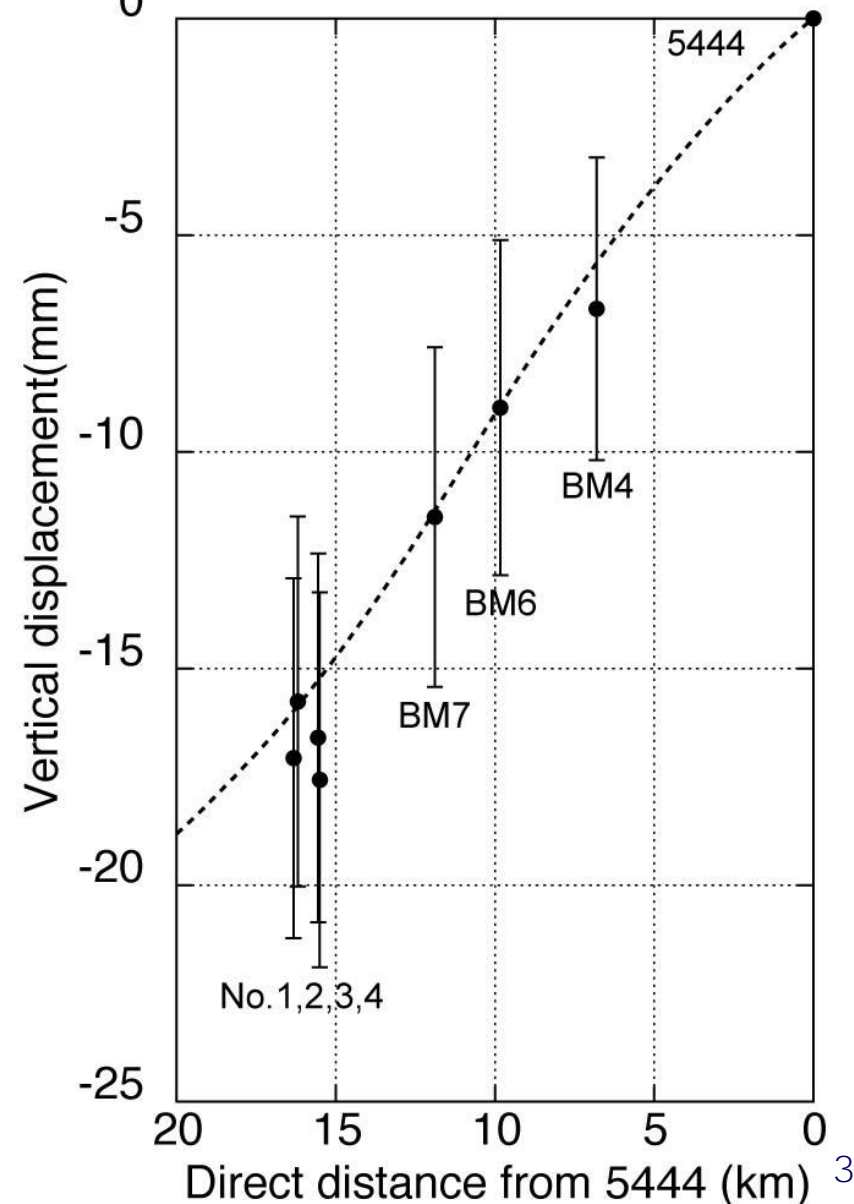
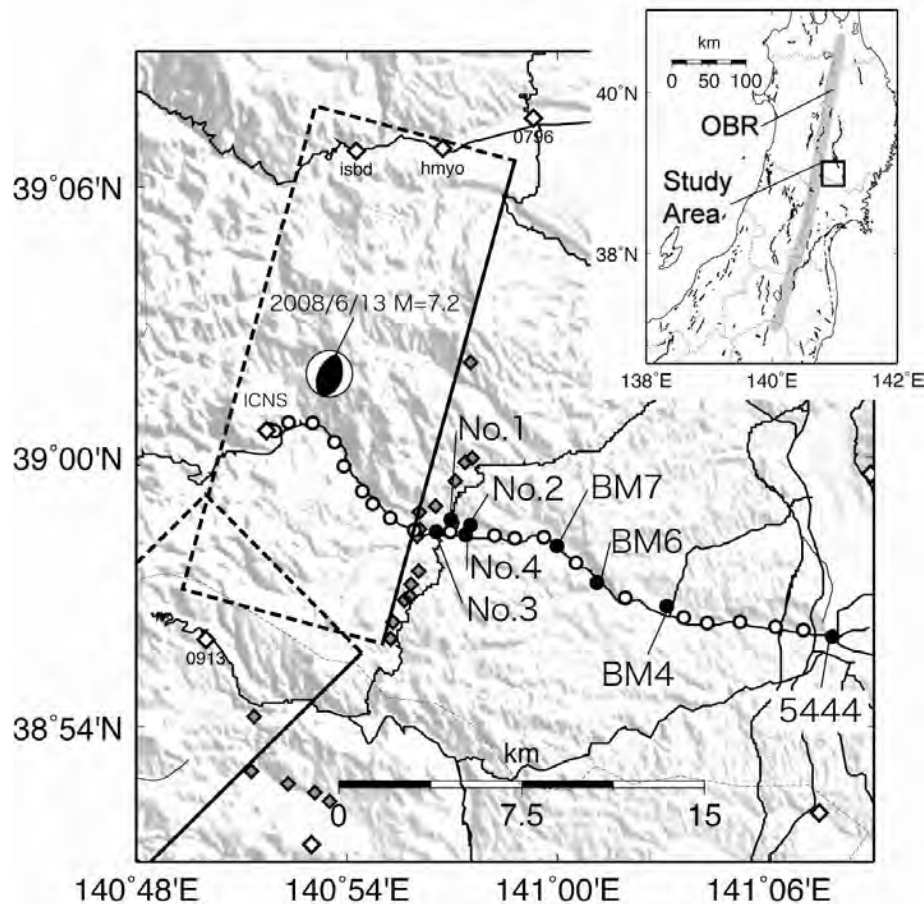
水平成分 (本震発生後1.5年)



鉛直成分 (本震発生後1.5年)

# 水準測量による上下変動場

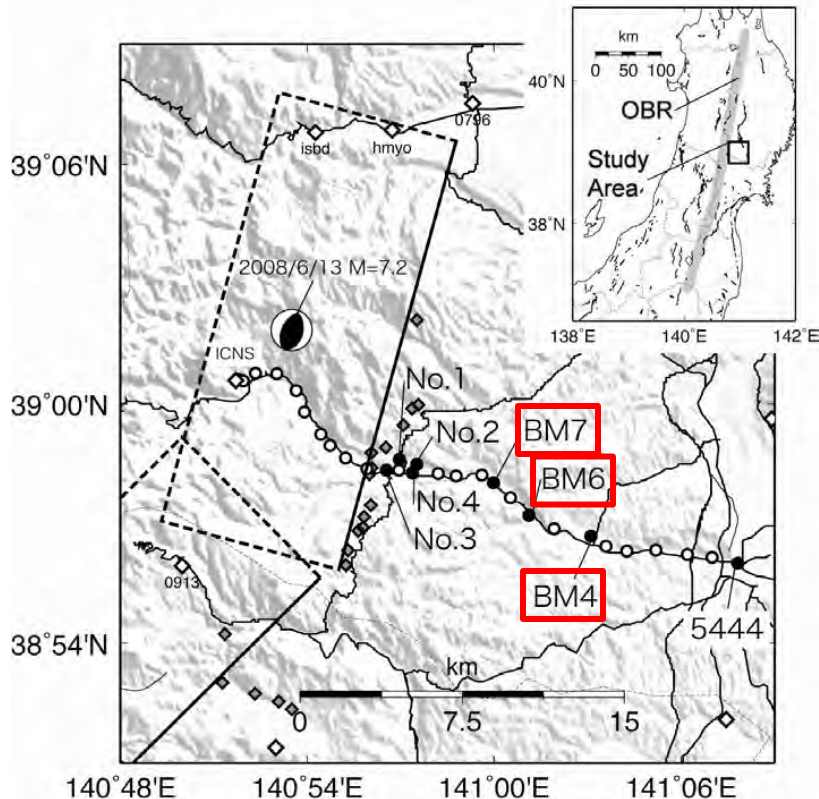
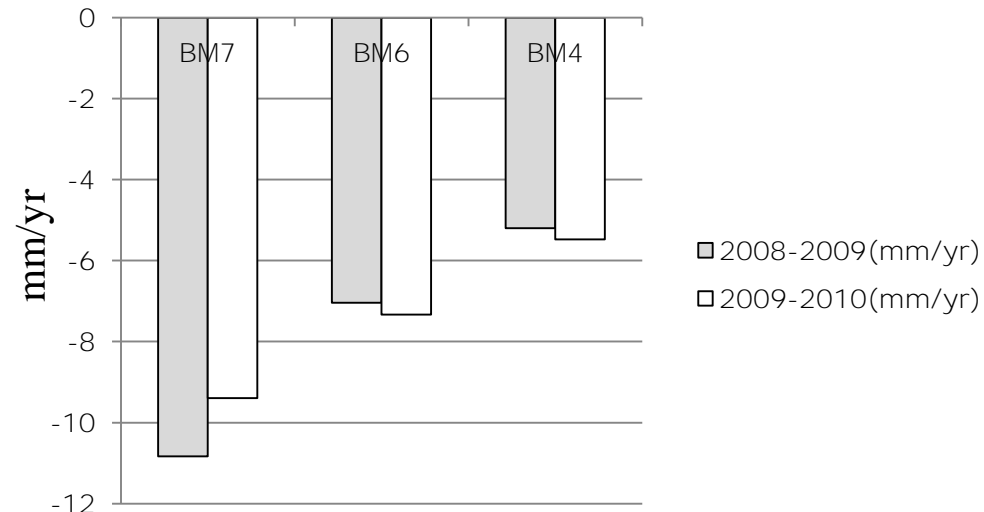
- 2009年6月-2010年8月
  - 路線端の水準点で16-17mm程度の沈降
  - 球殻2層粘性緩和モデル(Ohzono et al. in press) により期待される沈降とほぼ一致



# 余効変動(粘性緩和)の時間発展

- 2008-2009年, 2009-2010年の比較
  - 異なる時間間隔の比較
  - 速度に変換して比較
  - 誤差の範囲で等速度で沈降
  - 粘弾性緩和のモデルとも調和的

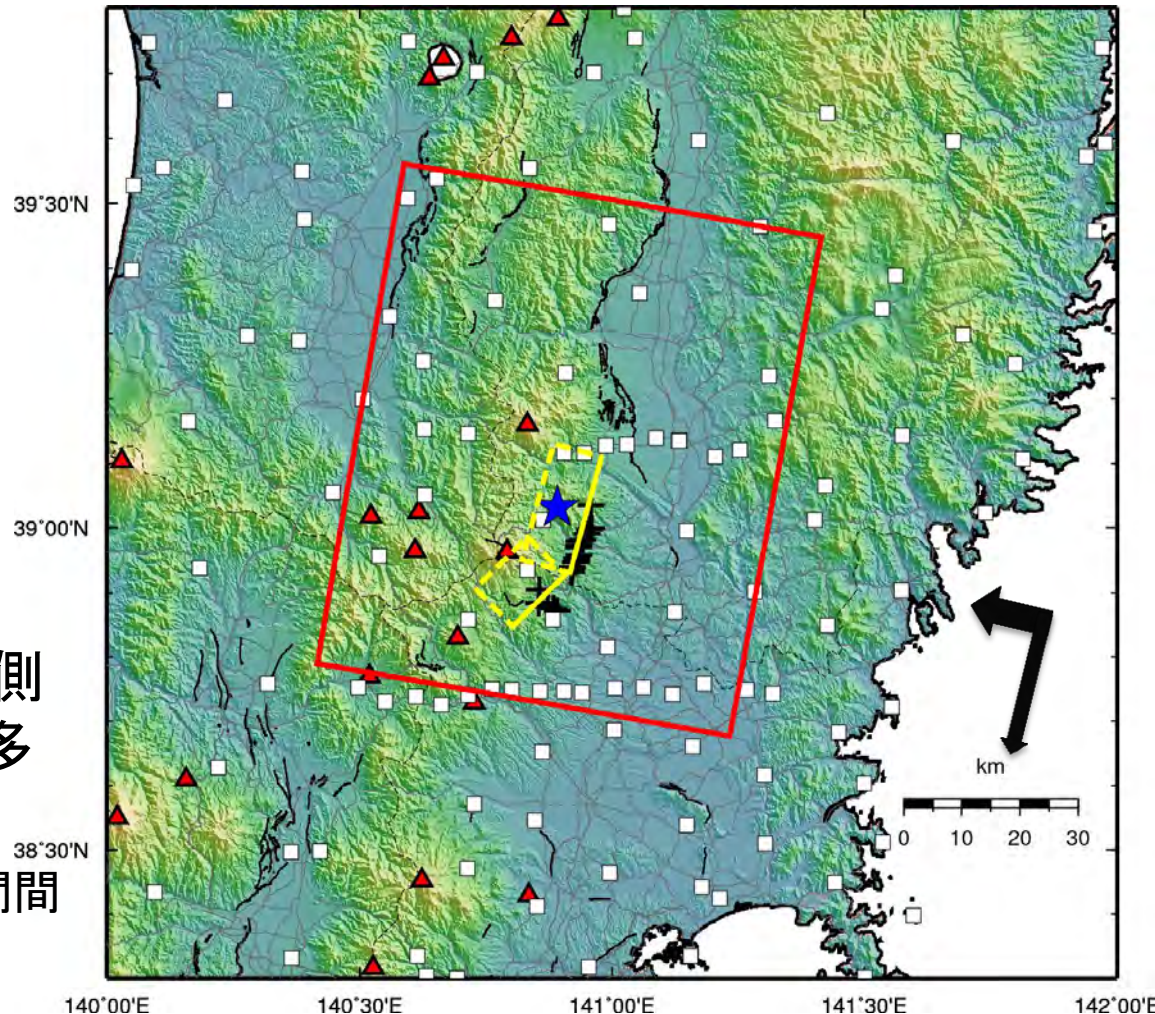
各ベンチマークの沈降速度



目的: InSAR時系列解析により面的な余効変動の時間発展を調べる

# 干渉SAR解析

- 使用データ
  - ALOS/PALSARデータ
  - Path: 57, Frame: 2830
  - 南行軌道 (Descending)
- DEMデータ
  - SRTM3 (90m)
- SLC作成, 干渉画像作成
  - GAMMA SAR processor
- シーンの西半分 (断層上盤側より西側) は冬期に積雪が多く, 干渉度が大幅に低下.
  - 時系列解析を行う場合に時間間隔が長くなる問題点

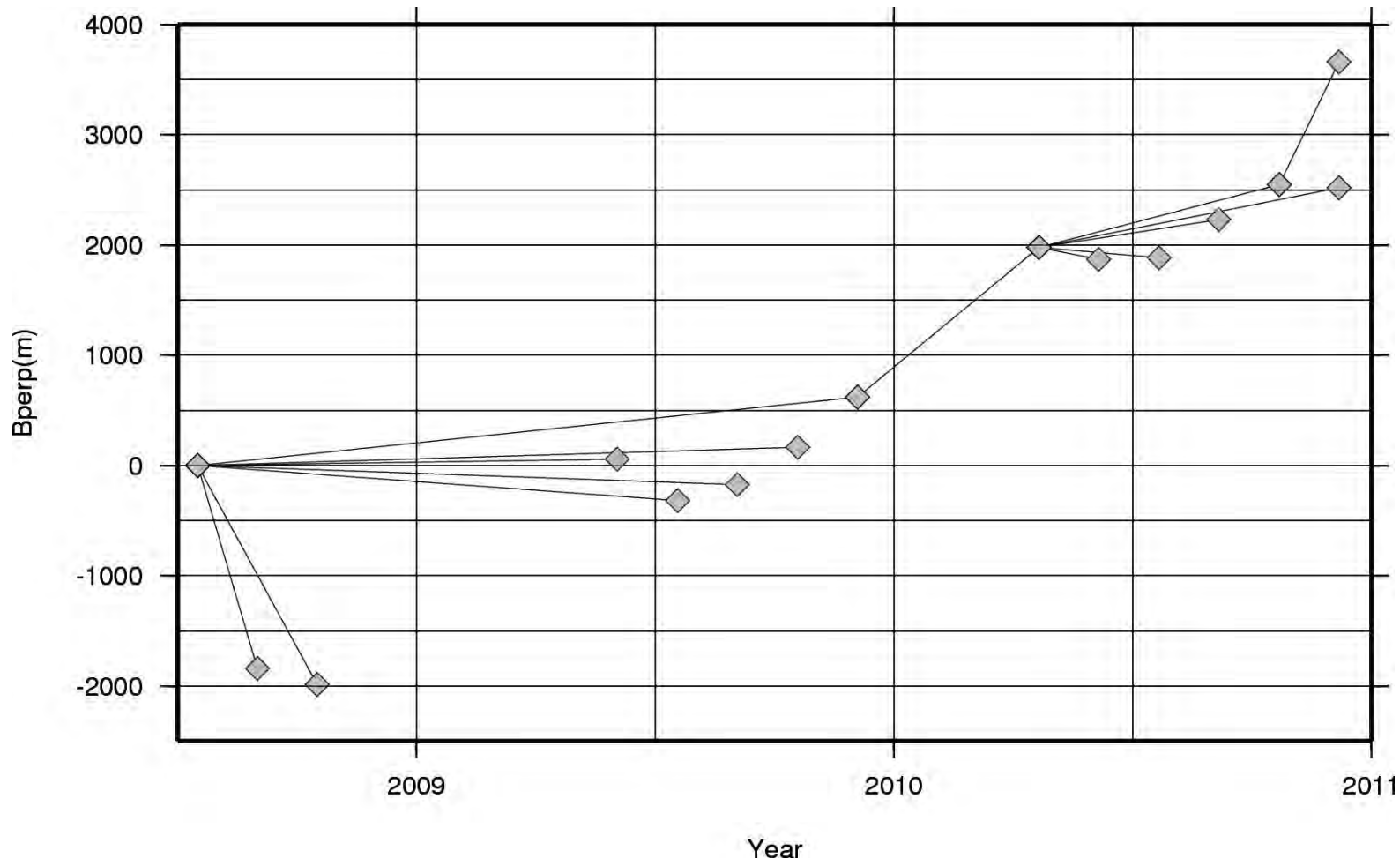


白四角:GPS観測点, 赤四角:第四紀火山,  
青星印:震央, 黄色矩形:震源断層,  
赤色矩形:ALOS/PALSAR撮像範囲

# 垂直軌道間距離と干渉画像の組み合わせ

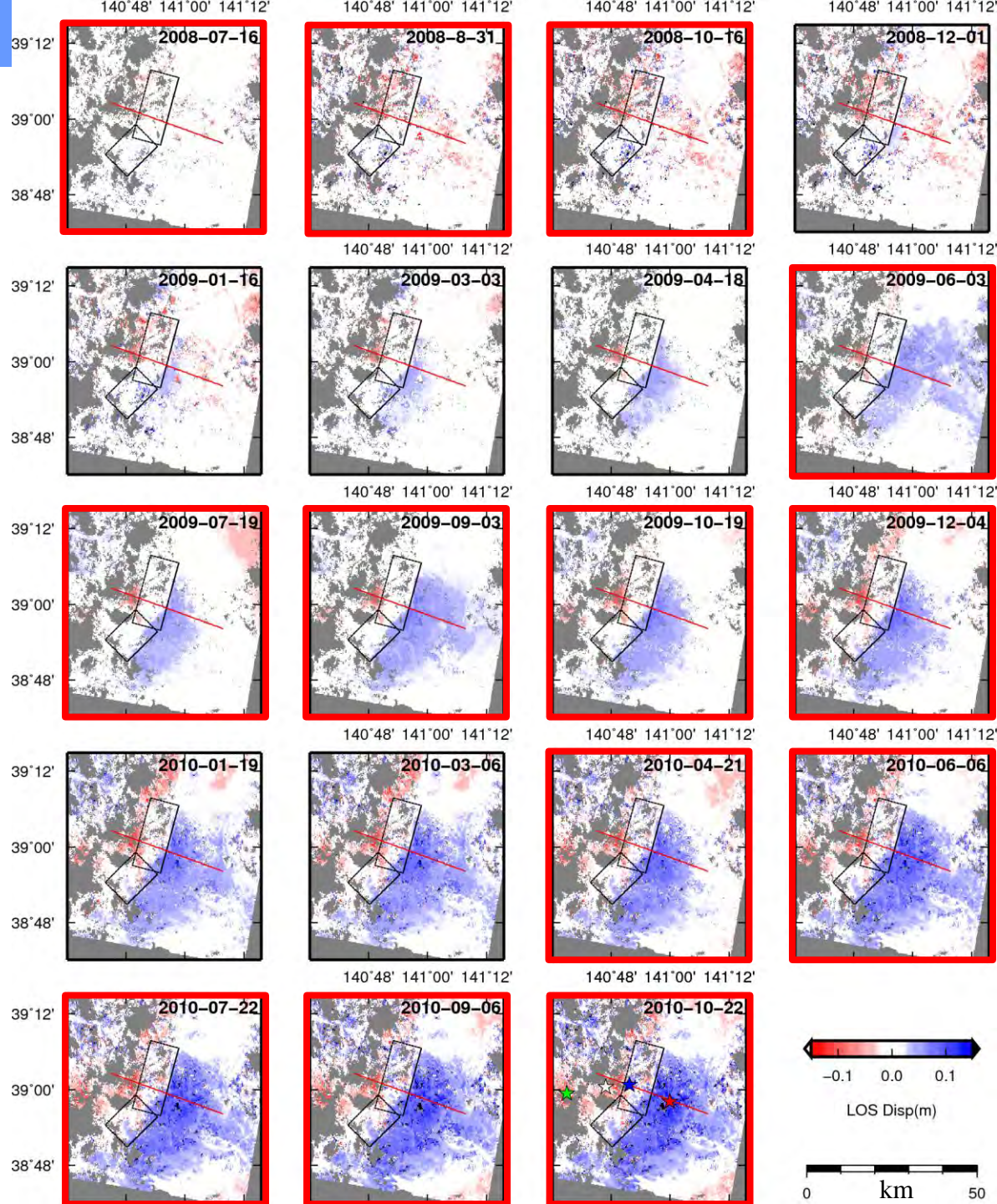
- 平均垂直軌道間距離: 657m
- 最大垂直軌道間距離: -1990m
- 全14ペア

SBAS解析により46日  
毎の変位量を推定



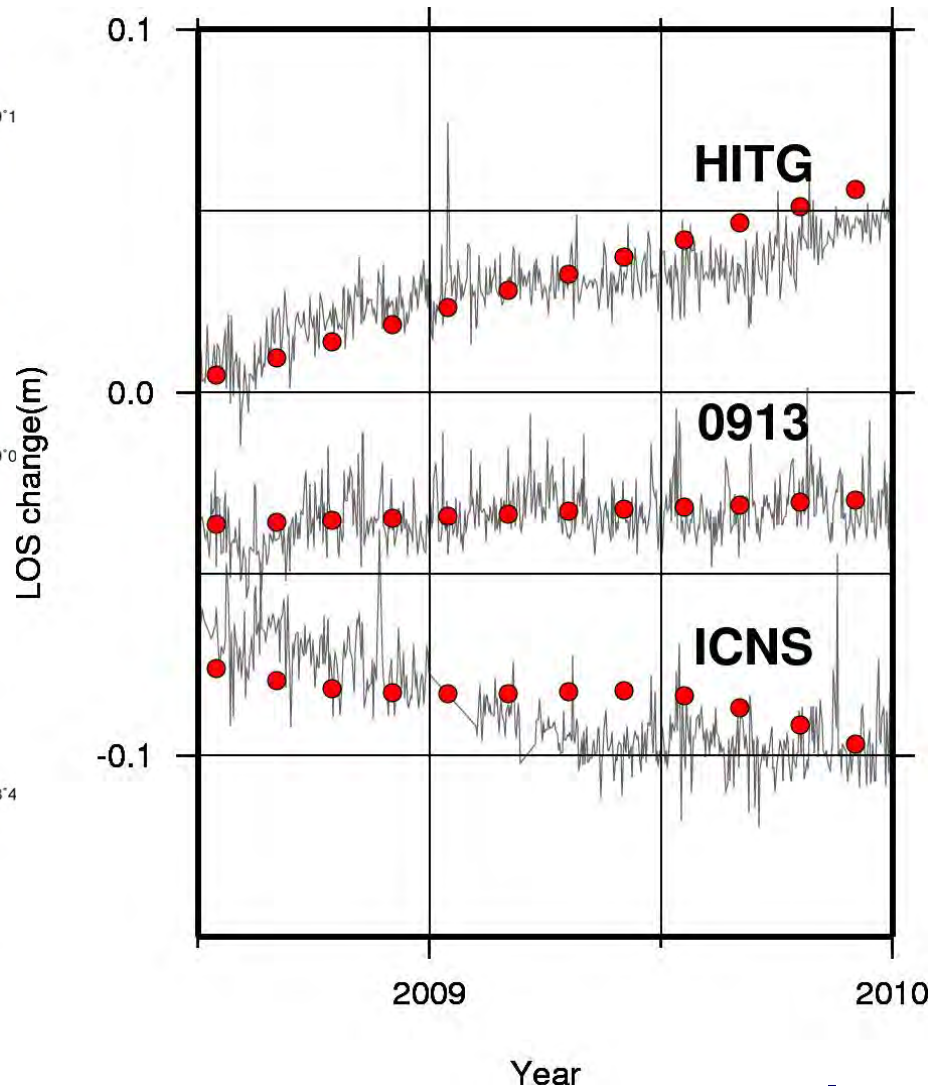
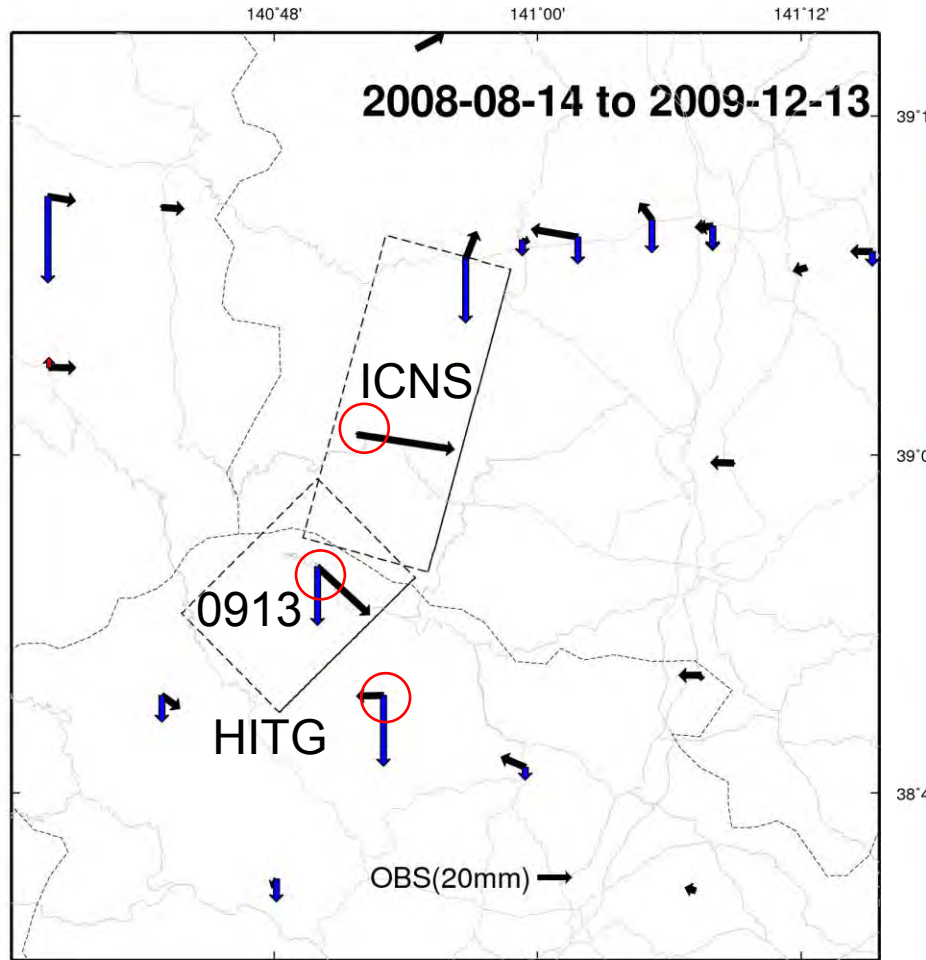
# SBAS解析結果

- 2008年7月16日を起点とした46日毎の累積変位量のスナップショット
- 断層下盤側のLOS伸張, 断層上盤側(栗駒北側から西側)のLOS短縮が明瞭  
 →LOS伸張は2009年6月頃から明瞭に  
 →LOS短縮はコヒーレンスが低く, アンラップの穴が目立つ領域に位置
- 震源断層直上はLOS短縮と伸張が混在しているように見える





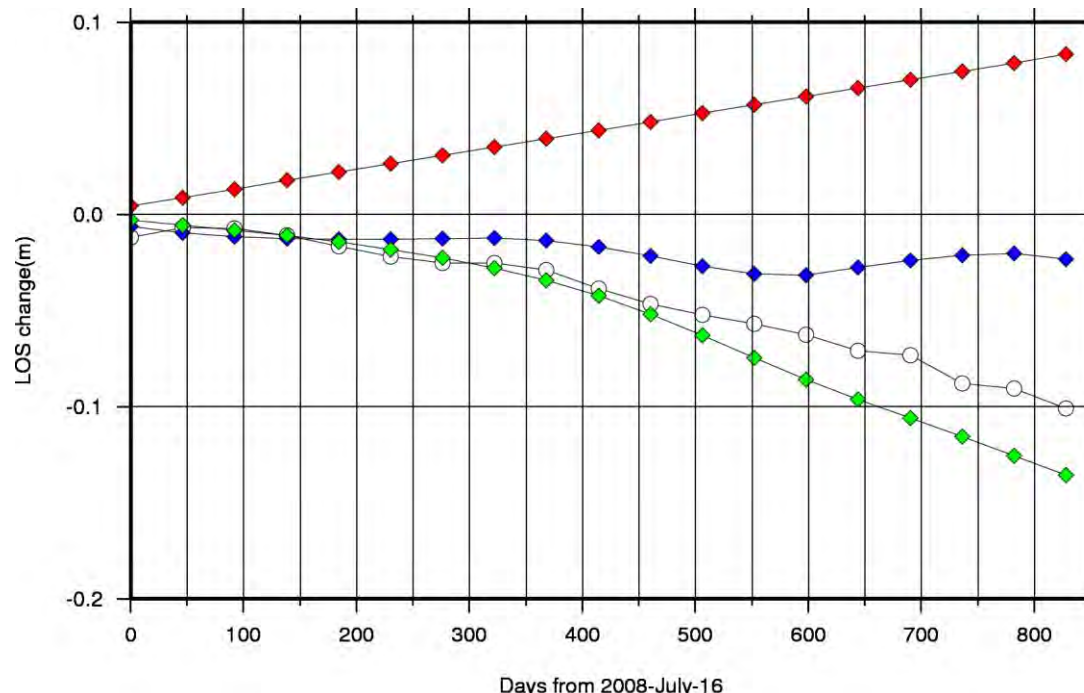
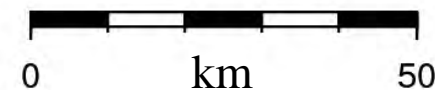
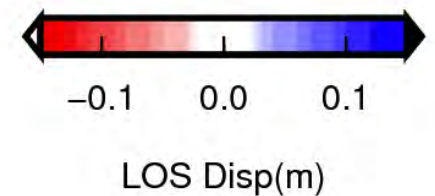
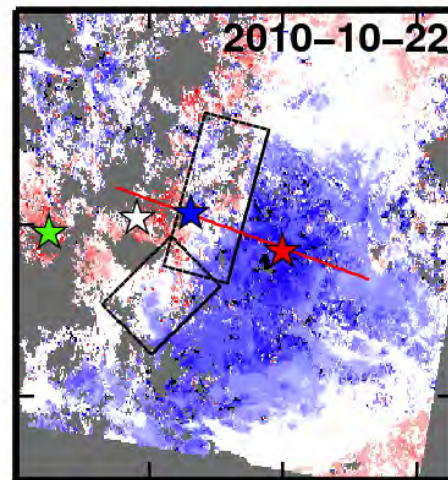
# GPS観測値とSBAS-LOSの比較



- GPS変位量をLOS変化量に変換
- 両者は概ね一致 → SBAS解析の妥当性を証明

# LOS変化の時間発展

- 各ピクセル毎の時間発展
  - 断層下盤側: 解析期間はじめから一定レートでLOS伸張
    - 水準測量およびGPSから求めた粘性緩和モデルの結果と調和的
  - 断層西側: 顕著なLOS短縮. 2009年9月頃から加速傾向が広い範囲で確認
  - 断層面直上: 複雑なLOS変化. GPS観測点(ICNS)では2-3cm程度のLOS短縮.
- 断層下盤側, 上盤側のそれぞれで異なる時定数の余効変動パターン



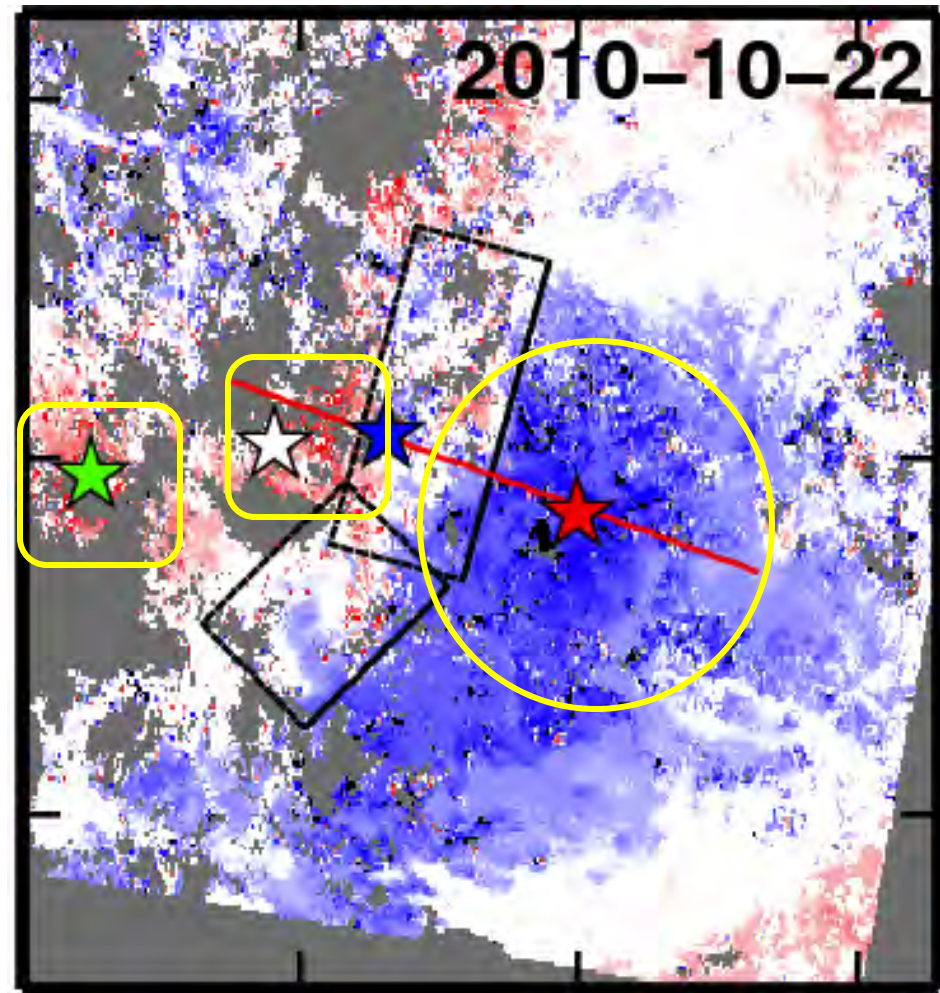
# 複合要因による余効変動の可能性

- 断層下盤側

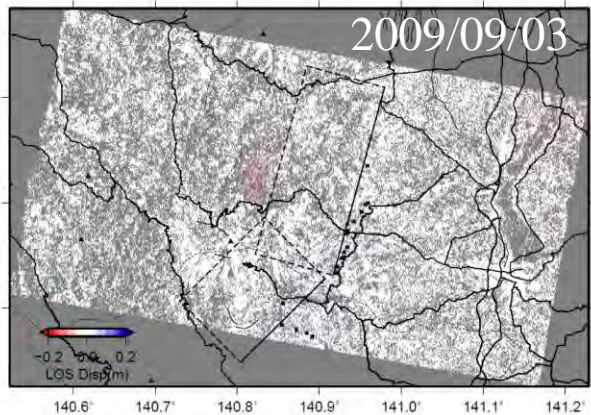
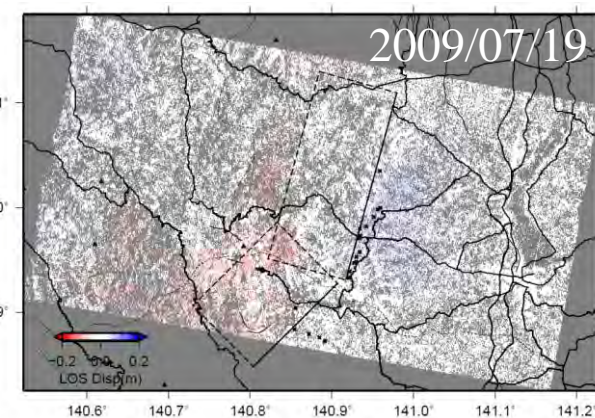
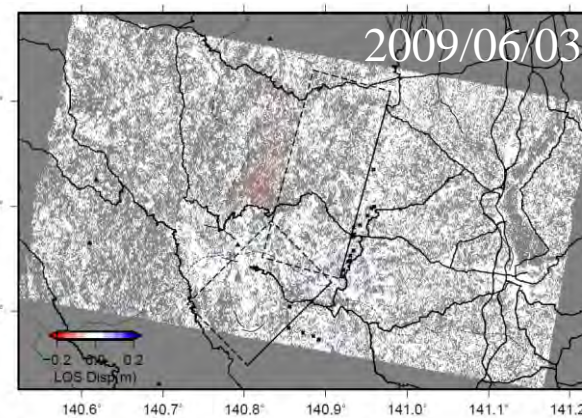
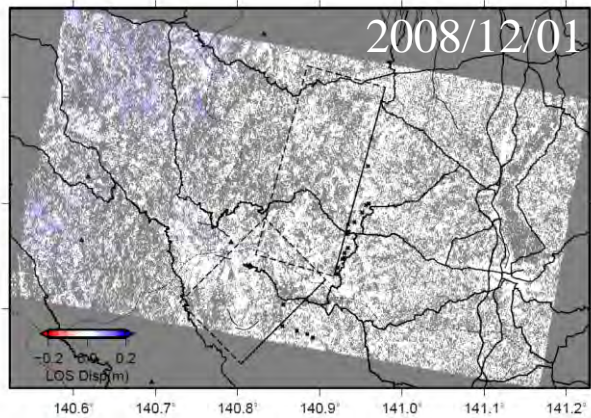
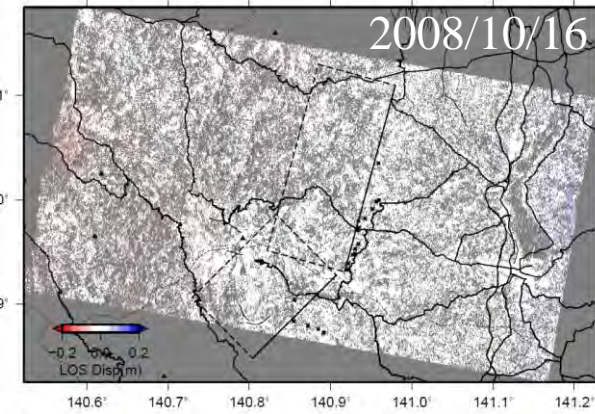
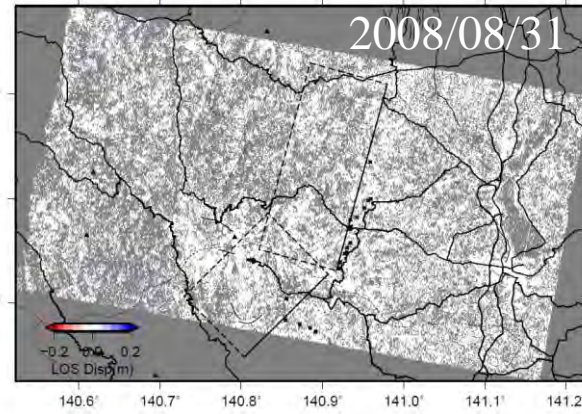
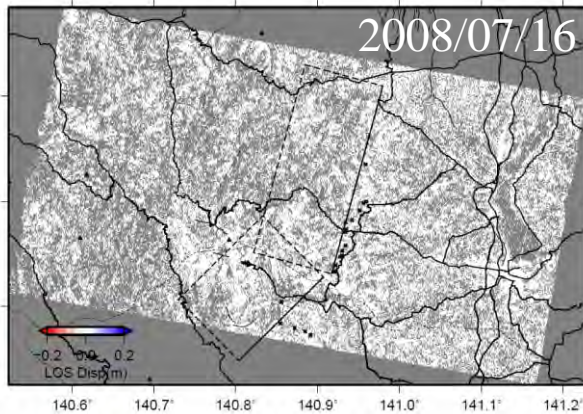
- 粘性緩和による沈降が卓越
- 断層を挟んで両側でLOS伸張のセンス, なおかつ上盤側では伸張量が少ない

- 断層西側

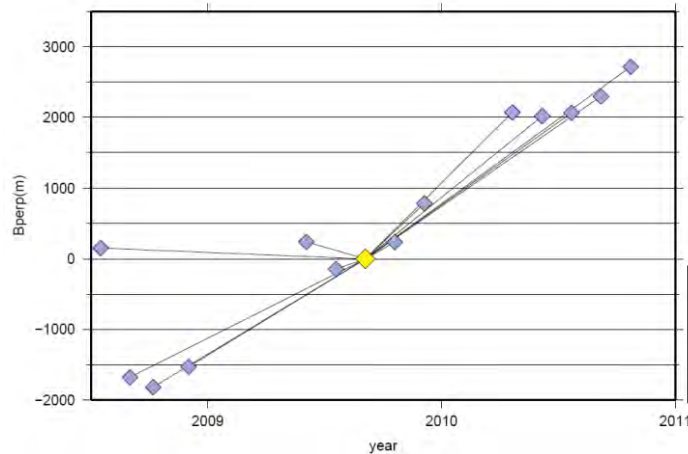
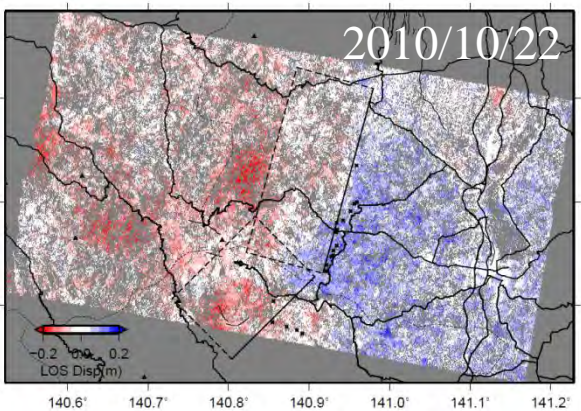
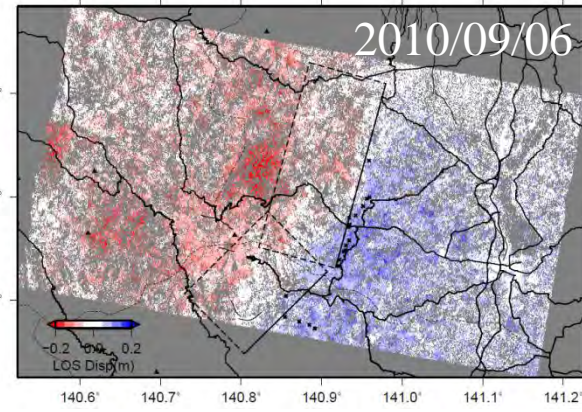
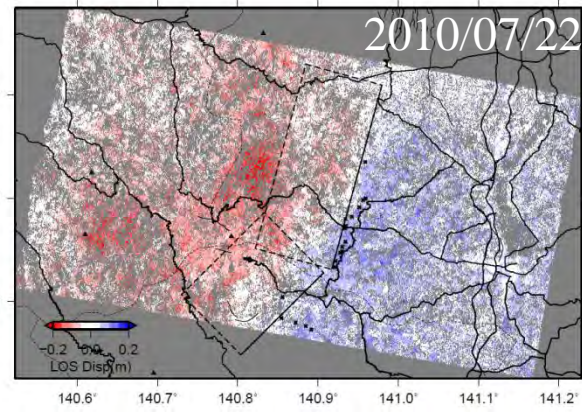
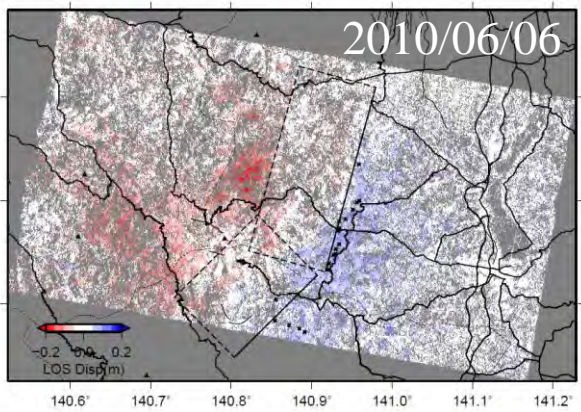
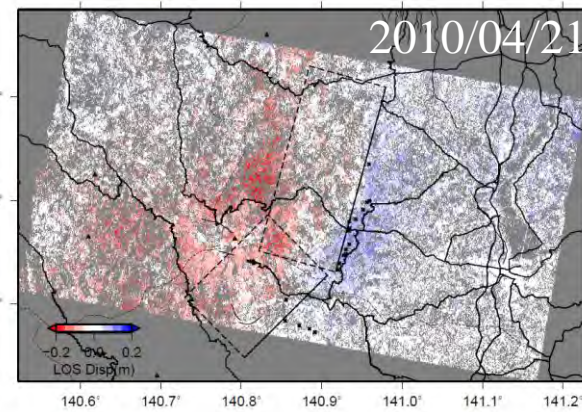
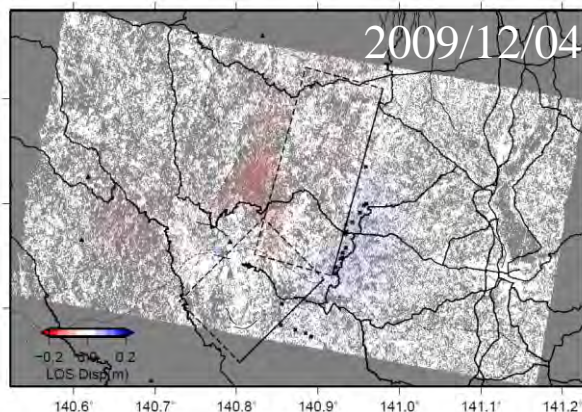
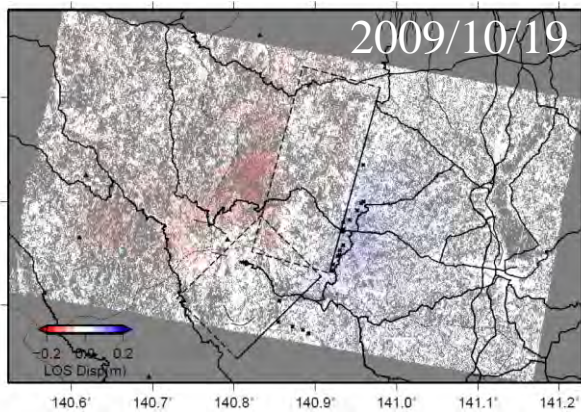
- 局所的な余効すべりに起因の可能性
- 震源断層の深部延長を仮定:
  - ・ 余震分布等と一致せず. また, すべり量を大きく(2-3m)する必要
- 震源断層と共役の浅部断層を仮定
  - ・ 余震分布等とおおむね一致. すべり量は1m以下
- 非干渉領域が広く, 変位の空間パターンを把握しにくい.



# StaMPSによるPS時系列解析



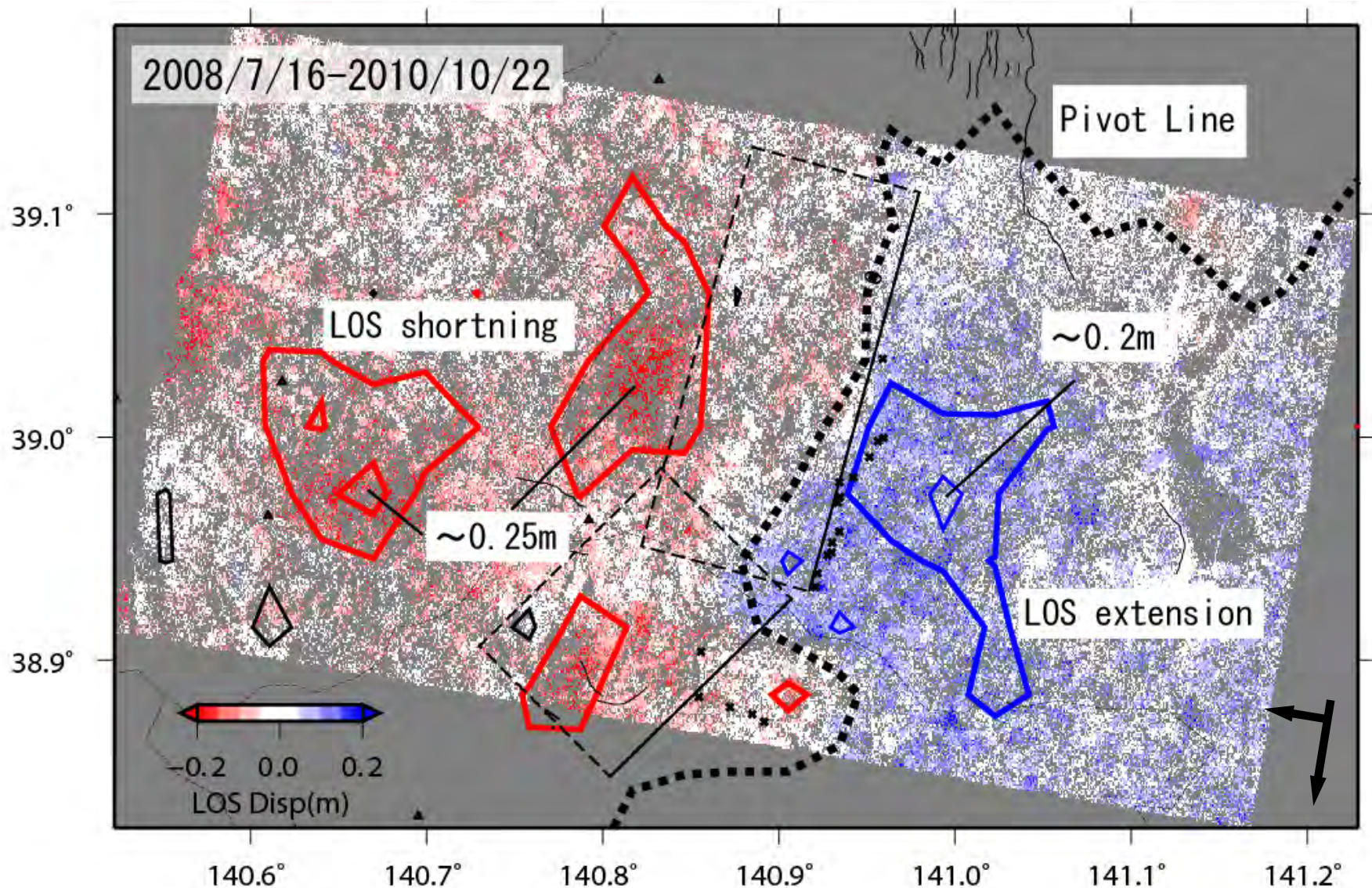
- マスター画像: 2009年9月3日
- 最大 $B_{\text{perp}}$ : 2,719m
- DEM SRTM4(4倍オーバーサンプリング)
- $D_A=0.4$



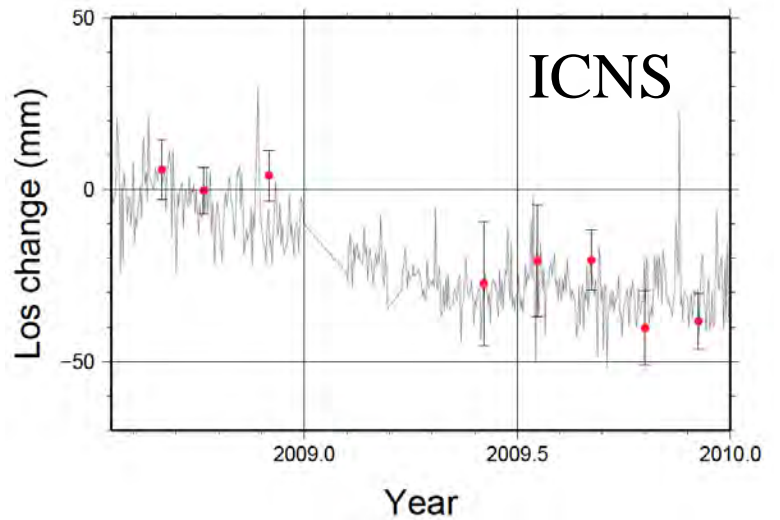
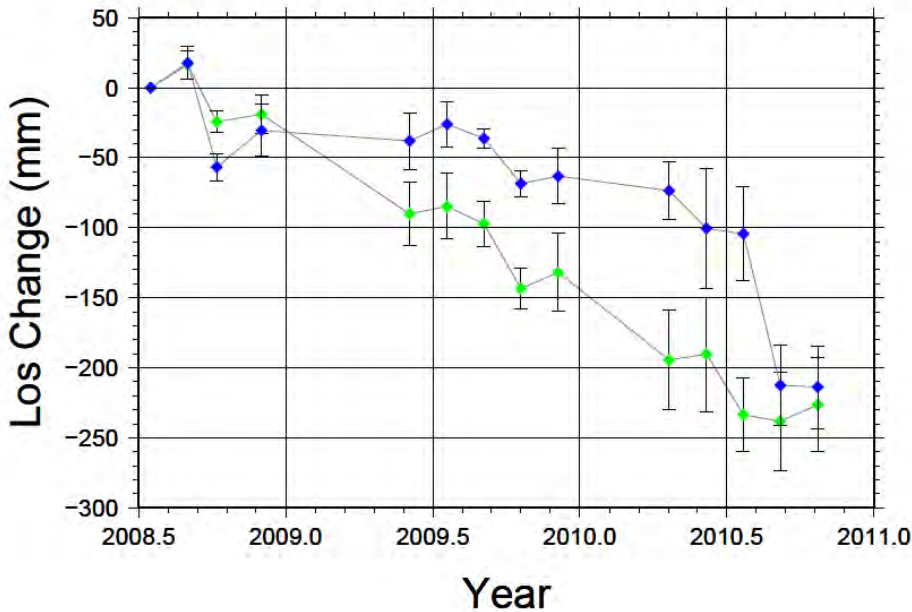
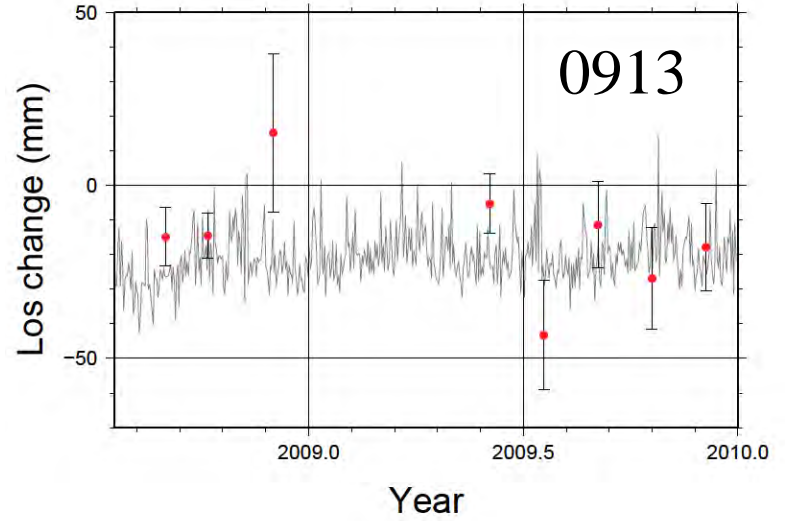
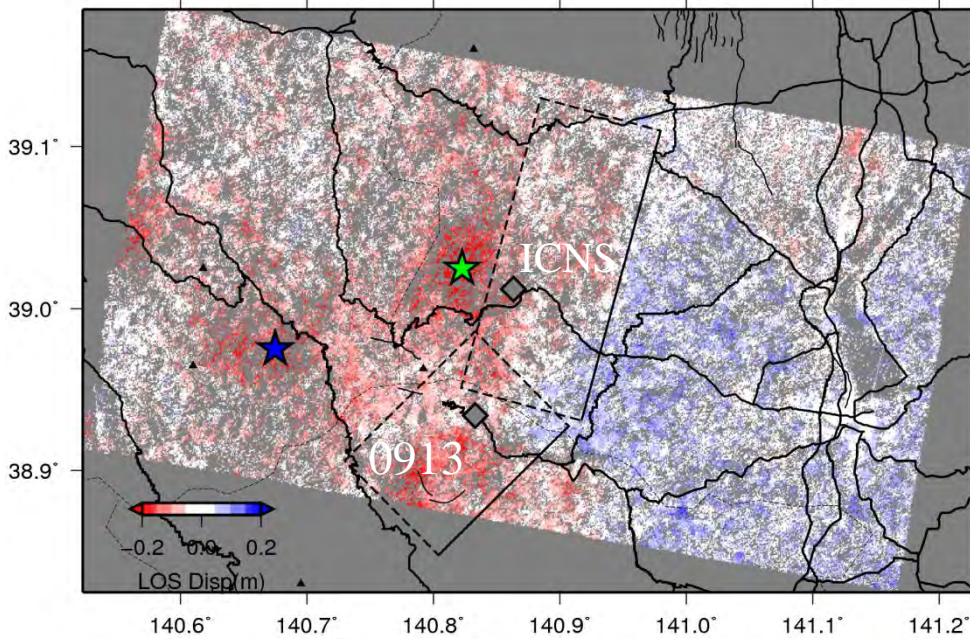
仮定したマスター画像からの軌道間距離

# PS-InSAR解析の結果

- Ohzono et al., (*EPS*, in press) による粘性緩和を差し引いたもの
  - 上盤側:最大0.25m程度の視線短縮 下盤側:0.2m程度の視線伸長



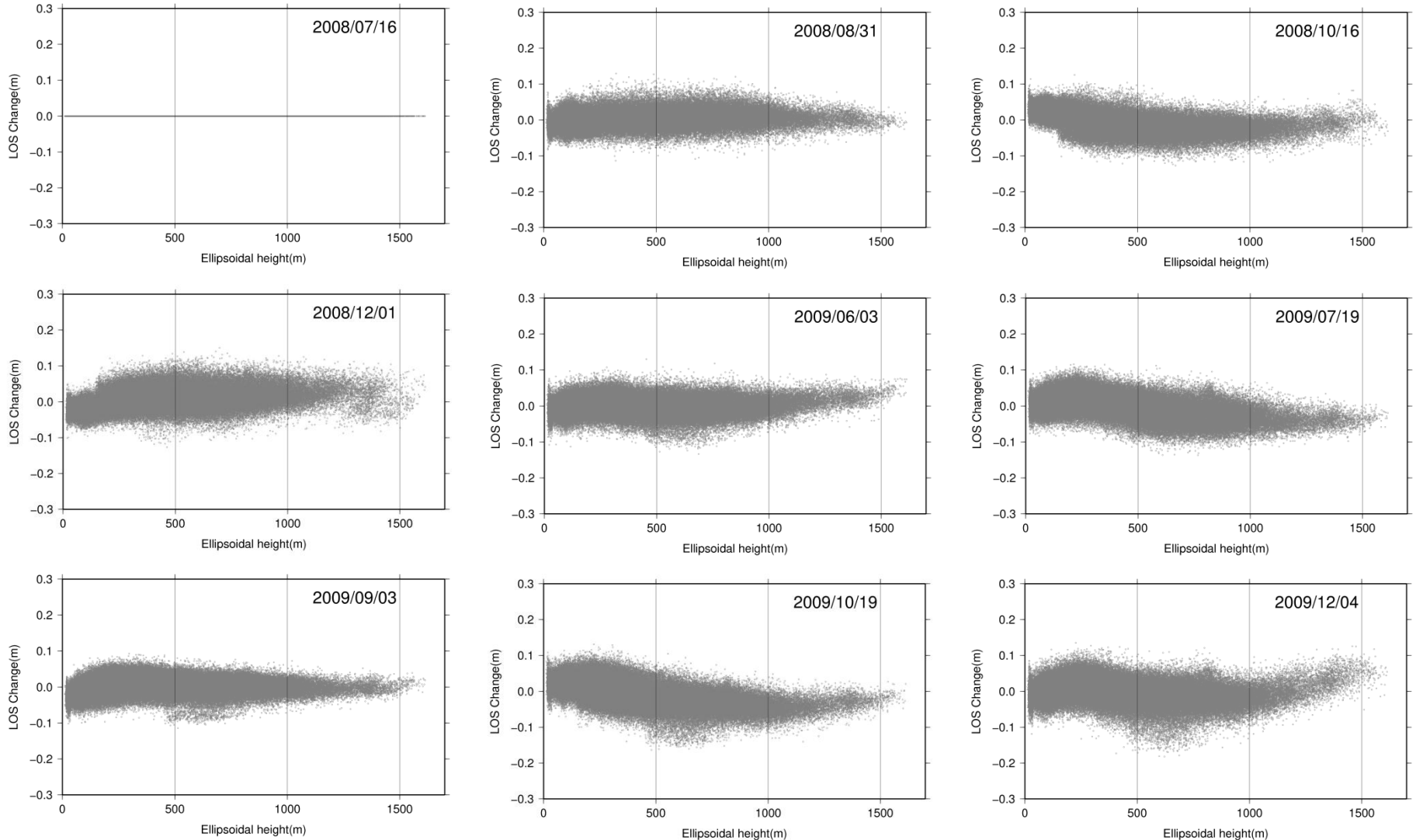
# LOS短縮域の時間発展, GPSとの比較



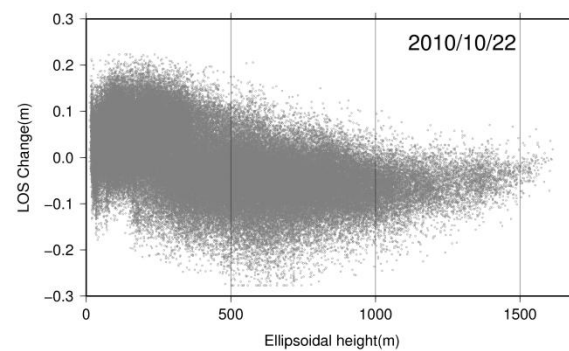
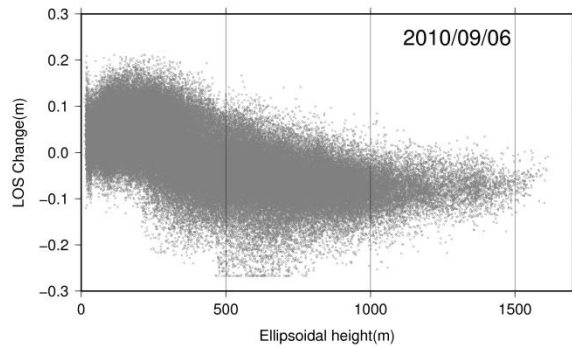
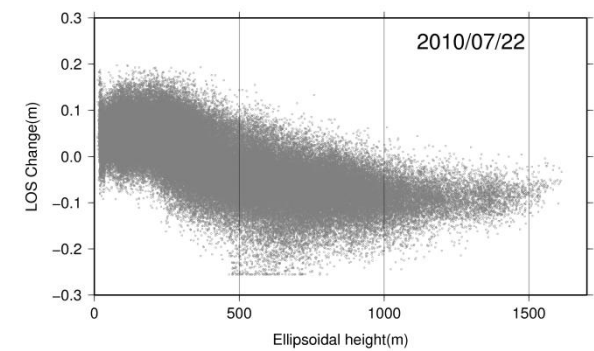
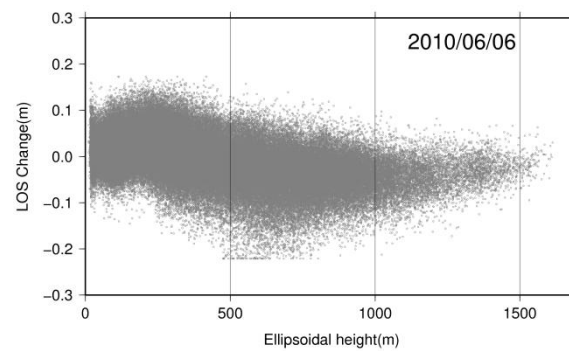
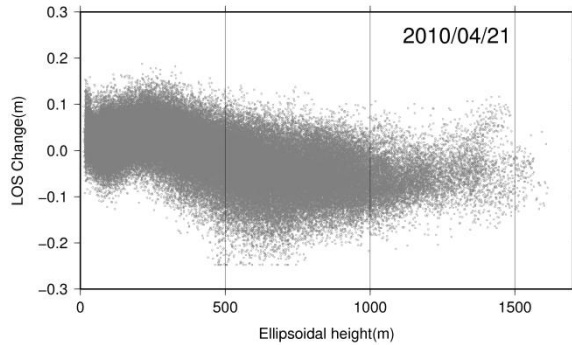


# 標高とLOS変位の関係

● 解析領域全体のPS点のLOS変位の値と標高との相関



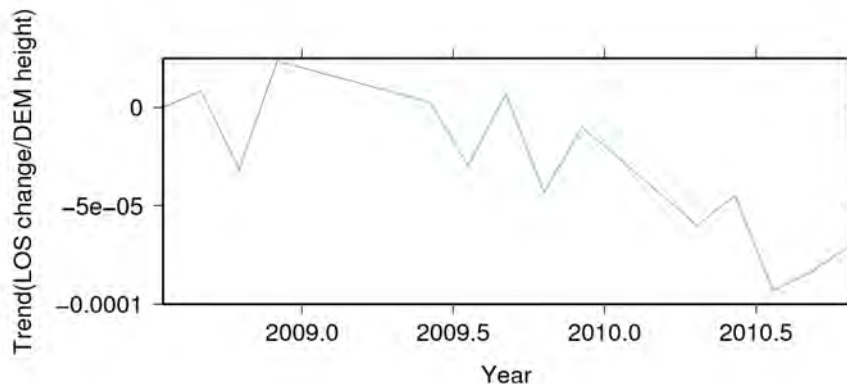
# 標高とLOS変位の関係



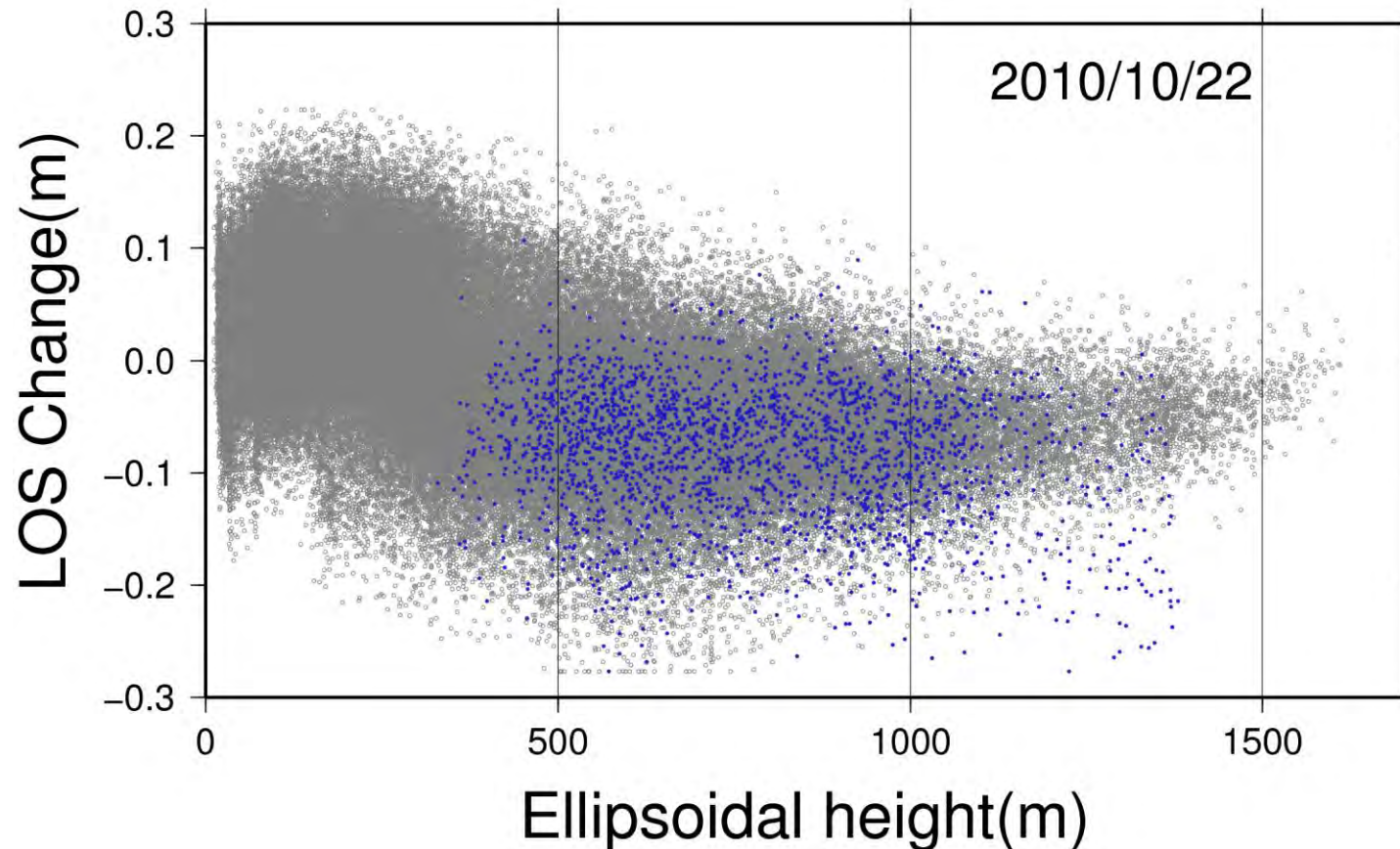
- LOS変位と標高の関係を最小二乗法で直線フィッティング

- 標高が高いほどLOSの変化が大きい。

- 地震からの期間が長いほどLOSの変化が大きい？

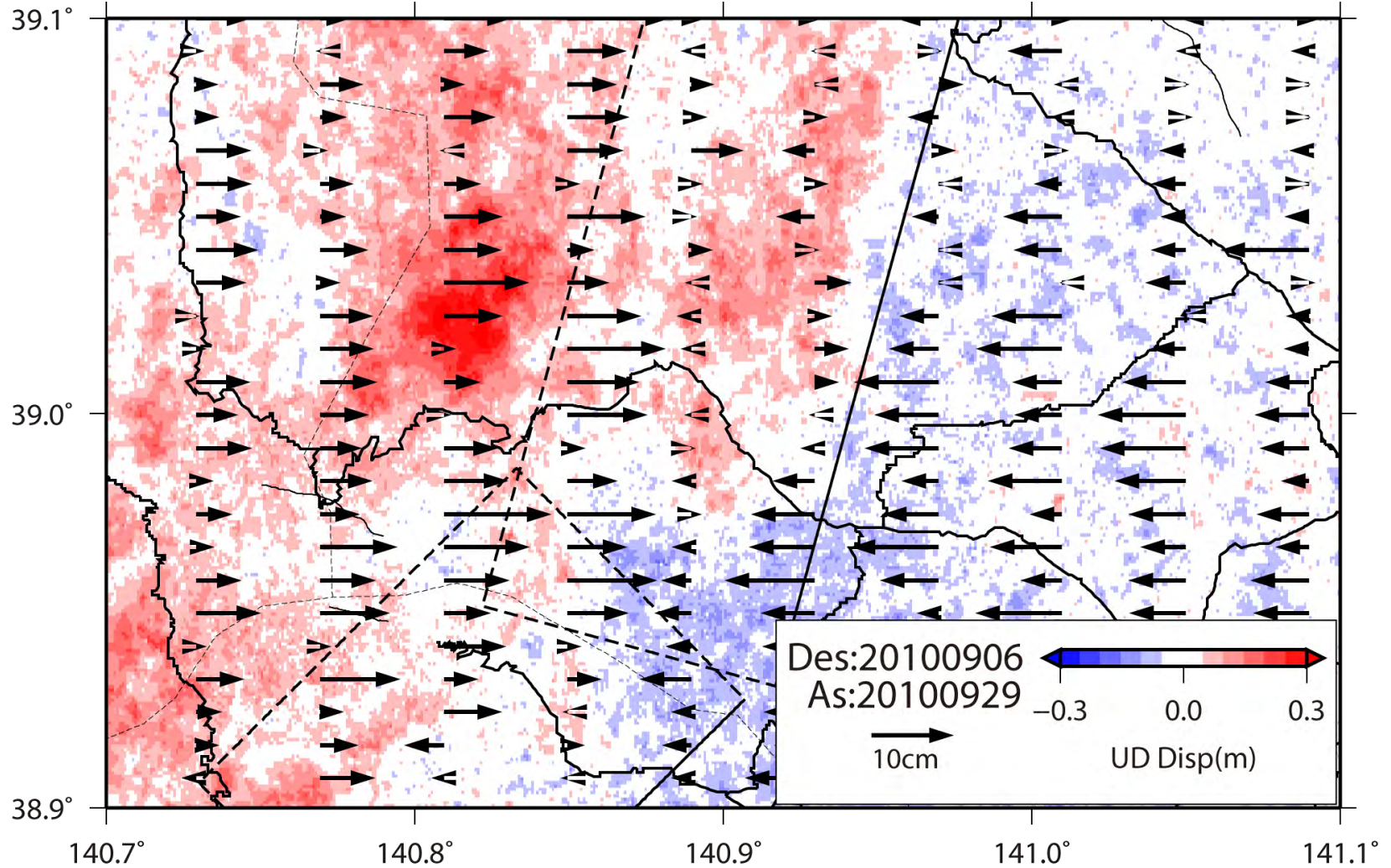


# 上盤側局所的LOS変化域での比較



- 局所的なLOS短縮域部分のみ青で表示  
→ 標高相関は見られない
- 西側は標高が高く、東側は標高が低いため標高相関があるように見える？ → 要検討

# 2.5次元解析の結果(仮)



- PS点から値を内挿→2.5次元解析
- 断層の上盤, 下盤で明瞭な境界

# まとめ

- 2008年岩手・宮城内陸地震震源域のALOS/PALSARデータに対して時系列解析(SBAS法, PS法)を適用した.
  - 震源断層下盤側の広範囲でLOS伸張(沈降もしくは西向き変位)
    - ほぼ等速度でLOS伸張傾向が2010年末段階で継続
    - 水準測量の結果(2008-2010年)とも調和的
    - 粘性緩和による震源域の短縮および沈降を検知
  - 震源断層の西側でLOS短縮(隆起もしくは東向き変位)
    - PS-InSAR解析によって, 震源断層の西側に3箇所程度明瞭なLOS短縮領域が明らかになった.
    - 粘性緩和のみでは説明ができず, 長期的な余効すべりが発生している可能性
    - 当該領域の余震分布は特徴的に東に傾き下がる分布を示す

# 謝辞

- 本研究で用いたSARデータは、地震・地盤変動データ流通及び解析ワーキンググループ(地震WG)およびPIXEL共有データを通じて提供を受けました。PALSARデータの所有権は経済産業省および宇宙航空研究開発機構(JAXA)にあります。
- 本研究は国土地理院 GEONET 観測点・国立天文台水沢VERA 観測所のGPS データを使用しました。また、原子力安全基盤機構(JNES)が実施した内陸の活断層調査に基づく震源断層評価手法の検討事業で取得されたGPS データを使用しました。
- InSARデータの解析では防災科学技術研究所の小澤拓博士に多くの御指導を頂きました。
- 余震分布は、2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ・東北大学大学院理学研究科によって観測および決定されたものを用いました。
- 本研究は科学研究費補助金 若手研究(B) 22740287の補助を受けて行われました。