

研究課題終了時評価表

1. 研究課題名：ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究
2. 研究期間：平成22年4月 ～ 平成27年3月（5年間）
3. 予算：特別研究経費45,179千円（5年間の総額）

4. 成果の概要

（1）新潟県中部越後平野周辺の詳細地殻変動

（1a）東北地方太平洋沖地震発生前

越後平野周辺において0.1-0.2ppm/yr程度の顕著な短縮ひずみと沈降を検出した。2007年以降太平洋側では、プレート間固着のゆるみにより短縮ひずみが減少もしくは伸長に転ずる変化が観測されたが、越後平野周辺での短縮ひずみ速度には変化が見られなかった。こうした観測事実は、越後平野周辺のひずみ速度は太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていないことを示唆し、ひずみ集中の成因は、応力変化速度に比例するような弾性変形ではなく応力の絶対値に依存するような粘・塑性変形に支配されているものと考えることができる。また、水準測量のデータ解析及びSAR干渉解析からも継続的に進行する沈降性の変動が検出され、GNSS観測も含め3つの異なる手法から、この沈降は最低でも20年間継続していることが分かった。

（1b）東北地方太平洋沖地震時

東北地方太平洋沖地震発生時に越後平野周辺では、5ppmを超える伸長ひずみが観測された。有限要素法によるモデル計算から、均質媒質で予想される伸長ひずみよりも観測された伸長ひずみが大きいことが分かった。越後平野では地震波速度構造の低速度異常や堆積層が存在することから、不均質構造の影響を強く受けていることが示唆される。

（1c）東北地方太平洋沖地震発生後

東北地方太平洋沖地震の余効変動により東日本の広範囲において伸長ひずみが観測されているが、越後平野では周辺域に比べて伸長ひずみが小さいことが分かった。広域的には東北地方太平洋沖地震の余効変動により伸張ひずみが観測されているが、短縮変形が進行することで周辺部より伸張が小さくなっているものと解釈できる。つまり、ひずみ集中の成因に遠方の外力（プレート間固着等）の影響は少なく、ひずみ集中の成因にかかる応力は外力に関係なく進行していることが示唆される。東北地方太平洋沖地震発生前に見られた越後平野周辺における沈降が継続していることから、前記の解釈は上下変動からも裏付けられる。

（2）ひずみ集中帯の成因に関する数値計算

（2a）短縮変形のモデル化1：深部非地震性滑りのモデル計算

ひずみ集中帯における特徴的な地殻変動である短縮変形及び沈降を再現するため深部非地震性滑りのモデル計算の実施から以下のことが分かった。短縮変形のみを再現するには、様々なモデルで再現が可能であること、断層の深部形状が地表の地殻変動に影響があること、ひずみ集中帯内における沈降を再現するためには、粘弾性媒質の考慮が必要であることが分かった。

（2b）短縮変形のモデル化2：粘弾性緩和による変形のモデル計算

ひずみ集中帯の成因に関するモデル化において、深部非地震性滑りモデル（2a）以外の可能性に関して、過去の内陸大地震の余効変動の影響を定量的に評価した。越後平野周辺で過去に発生した4つの地震（1828年越後三条地震、1964年新潟地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県

中越沖地震)の粘弾性緩和による変形のひずみ速度は、粘性率、弾性層の厚さ、震源断層モデル等のパラメータにも依存するが、概ね0.1ppm/yrより小さく、観測されているひずみ速度(0.1~0.2ppm/yr)に比べて小さく、過去の大地震の粘弾性変形がひずみ集中帯の主成因と考えることは難しいことが分かった。

(2c) 地殻構造の不均質性の影響評価

東北地方太平洋沖地震時のモデル計算において、地殻構造の不均質性を考慮することで、越後平野の東西ひずみ分布が周辺部より2倍程度大きくなり、観測された伸張ひずみが均質媒質を仮定したモデル計算値よりも大きい、という特徴が再現された。

5. 当初目標の達成度

(目標)

本研究は、ひずみ集中帯における活断層の長期評価、内陸地震の長期予測の高度化に貢献することを目的とし、以下の目標を設定した。

ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生メカニズムの理解に資するため、

- (1) ひずみ集中帯内部の詳細地殻変動分布の解明
- (2) 地殻変動の特徴的パターンを生み出す地下の変形過程の解明

(達成度)

(1) GNSS観測のデータ解析により、東北地方太平洋沖地震発生前には、越後平野周辺で顕著な短縮ひずみと沈降を検出した。また、東北地方太平洋沖地震発生後に広域的には伸張変形が継続する中で、越後平野周辺では短縮変形が進行していることを明らかにした。さらにSAR干渉解析および水準測量データの解析により、過去数十年に渡り越後平野において沈降が継続していることを明らかにした。以上のことから、ひずみ集中帯の詳細地殻変動分布の解明という目標は達成された。

(2) 深部非地震性滑りにより、ひずみ集中帯内における短縮変形が再現できることを明らかにした。また、ひずみ集中帯のひずみ速度は太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていないこと、過去の内陸大地震の粘弾性変形はひずみ集中帯の短縮変形の成因に大きく寄与していないことを明らかにした。以上のことから、地殻変動の特徴的パターンを生み出す地下の変形過程の解明という目標は達成された。

6. 成果公表状況

研究報告書	8件
発表論文	1件
表彰	1件
学会発表	6件
特許等	0件

7. 成果活用の見込み

本研究により得られた特に重要な2点の知見(越後平野周辺のひずみ速度は太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていないこと、広域的には伸張ひずみが卓越しているが、越後平野周辺では短縮変形が進行している可能性があること)は、本研究対象地域だけではなく、東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響が及んでいる新潟ー神戸ひずみ集中帯に属する新潟県南西部や長野県周辺、奥羽脊梁のひずみ集中帯等の地域でも考えられる解釈であり、当該

地域における地殻変動の解釈への活用が見込まれる。また、前記2点の知見は、ひずみ集中帯の変形過程、内陸へのひずみの蓄積過程を解明する上で重要な知見であり、内陸地震発生 of 長期予測及び活断層の長期予測の高度化に活用されることが考えられる。

8. 達成度の分析

(1) 有効性の観点からの分析

太平洋側ではひずみの時間変化が検出されたにも関わらず、越後平野周辺ではひずみの時間変化がないことを明らかにした。このことから、ひずみ集中帯の変形機構は太平洋側のプレート境界の相対運動に起因しないことを指摘した。また、東北地方太平洋沖地震の余効変動により広域的に伸張が進行する中で、越後平野周辺では伸張量が少ないことを明らかにした。このことは、遠方の外力により伸張が形成される状況においても越後平野周辺では短縮変形が継続していると解釈できる。これらの知見は、ひずみ集中帯の変形機構、内陸へのひずみの蓄積過程を解明する上で有効な成果である。

(2) 効率性の観点からの分析

東北地方太平洋沖地震の発生により、当初想定していた短縮変形とは異なる変形場が観測されることとなったが、研究開発の方法を的確に修正することで、効率的に研究を実施することができた。また、GNSSキャンペーン観測においては、研究管理課、宇宙測地研究室、測地部等院内の関係部署の協力を仰ぐことで、人員不足を補い観測を実施した。

9. 残された課題と新たな研究開発の方向

東北地方太平洋沖地震の余効変動は、地震発生から4年弱が経過した2015年1月現在も、地震発生前の定常的な地殻変動速度を1桁以上上回る速度で進行している。今後この東西伸張の変形がどのように推移するのか、将来的には東西短縮の変形に戻るのか、観測を継続することにより、こうしたこれまでに例のない変形過程が明らかになることが期待される。また、新潟ー神戸ひずみ集中帯に属する新潟県南西部や長野県周辺、奥羽脊梁のひずみ集中帯等での地殻変動分布の挙動との比較、その変形過程をモデル化することで、変形の不均質を作り出す地殻構造や対象地域における地震の発生メカニズムとの関係等に関する新たな知見が得られることも期待される。

10. その他、課題内容に応じ必要な事項

11. 提案課・室名、問合せ先

国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

TEL : 029-864-1111 (内8241) FAX : 029-864-2655

平成 22 年度～平成 26 年度特別研究
「ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究」
に関わる成果公表リスト

〔研究報告書〕

国土地理院調査研究年報（平成 22 年度，平成 23 年度，平成 24 年度，平成 25 年度，平成 26 年度（予定））

地震及び火山噴火予知のための観測研究計画，平成 23 年，平成 24 年度，平成 25 年度年次報告，
6015 ひずみ集中帯

〔発表論文〕

（査読付き）

西村卓也，水藤尚，小林知勝，飛田幹男，新潟－神戸ひずみ集中帯を横断する測地観測による越後平野周辺の地殻変動，地震 2，64，211－222，2012.

（表彰）

西村卓也，水藤尚，小林知勝，飛田幹男，2012 年度日本地震学会論文賞，2013.

新潟－神戸ひずみ集中帯を横断する測地観測による越後平野周辺の地殻変動，地震 2，64，211－222，2012.

〔学会等発表〕

西村卓也，水藤尚，小林知勝，飛田幹男（2010）：ひずみ集中帯横断（佐渡－阿賀測線）地殻変動観測（序報），日本測地学会第 114 回講演会.

西村卓也，水藤尚，小林知勝，飛田幹男（2012）：新潟－神戸ひずみ集中帯越後平野付近の詳細地殻変動分布，日本地球惑星科学連合 2012 年大会.

小林知勝（2012）：PS-InSAR 解析による新潟－神戸ひずみ集中帯（越後平野周辺）の地盤変動抽出の試み，日本地震学会 2012 年度秋季大会.

小林知勝（2012）：PS-InSAR 解析による新潟－神戸ひずみ集中帯（越後平野周辺）の地盤変動抽出の試み，日本測地学会第 118 回講演会.

西村卓也，水藤尚，小林知勝，董勤喜，柴山恭（2013）：越後平野で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う局所的に大きな地殻変動，日本地球惑星科学連合 2013 年大会.

水藤尚，小林知勝，川元智司（2014）：新潟－神戸ひずみ集中帯新潟県中部の詳細地殻変動分布とその成因に関する考察，日本地震学会 2014 年度秋季大会.

ひずみ集中帯の地殻変動特性に 関する研究

国土地理院 地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室

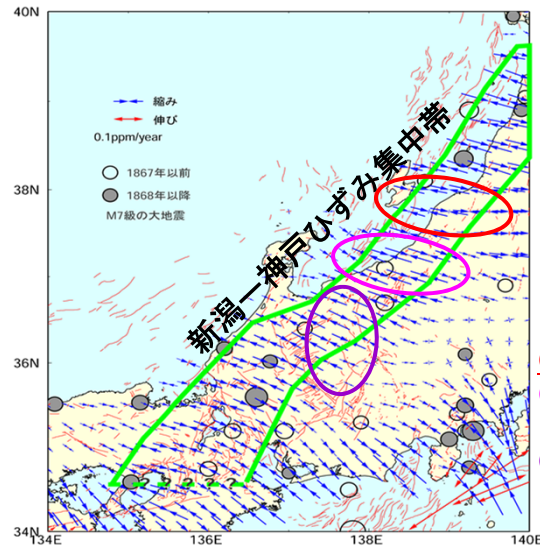
【研究期間】

平成22年4月～平成27年3月（5年間）

【予算】

特別研究経費45,179千円（5年間の総額）

- ・我が国は地震の多発地域に位置している
- ・内陸直下型地震は震源域近傍で甚大な被害を伴うが、その発生メカニズムは十分に理解されていない



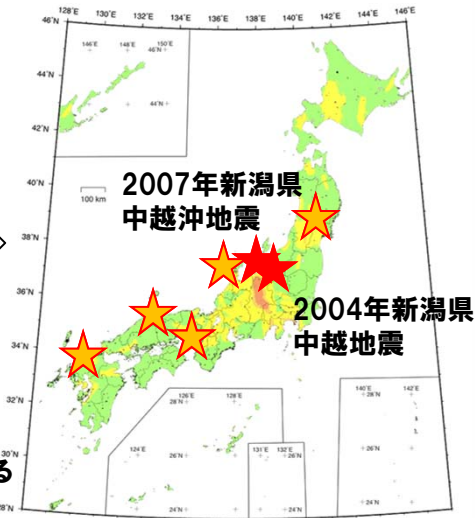
関連性の指摘

○本研究(H.22~H.26)

○ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト(H.20~H.24)

○糸魚川-静岡構造線断層帯におけるパイロット的な重点的調査観測(H.14~H.16)

及び重点的な調査観測(H.17~H.21)「新潟-神戸ひずみ集中帯」



GNSS連続観測網(GEONET)の整備

- 日本列島の地殻変動場が明らかに！
- 変位は一樣ではなく、**変形速度が大きい**
「**ひずみ集中帯**」の提唱

- ・変形速度が大きい
- ・内陸地震の多発地域
(2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震等)

- ・内陸地震の発生メカニズムを理解し、将来の発生予測につなげていくためには、ひずみ集中帯において重点的な観測研究が必要
- ・既存の観測網では断層への応力集中過程を解明するために必要なひずみ集中帯内部の詳細地殻変動分布の空間密度が不足
- ・**稠密な地殻変動観測とデータに基づく変形機構の解明が待たれている**

研究目的・目標

目的: ひずみ集中帯における活断層の長期評価及び
内陸地震の長期予測の高度化に貢献する

目標: ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生メカニズムの理解に資するため
(1) ひずみ集中帯内部の詳細地殻変動分布(新潟県中部)の解明
(2) 地殻変動の特徴的パターンを生み出す地下の変形過程の解明

※東北地方太平洋沖地震の発生を受けての報告内容
(平成23年度第2回研究評価委員会)

研究開発の方法の修正事項

・詳細地殻変動分布の把握:

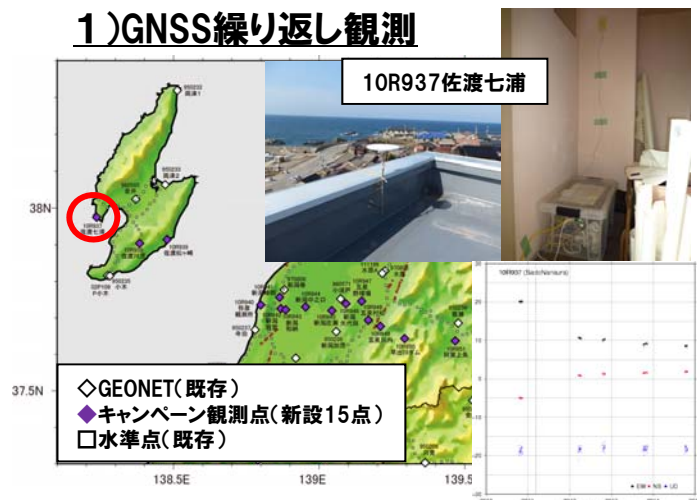
観測される地殻変動が当初の想定とは異なることとなったが、
(短縮変形から伸張変形)その詳細分布を明らかにする

・変形過程のモデリング:

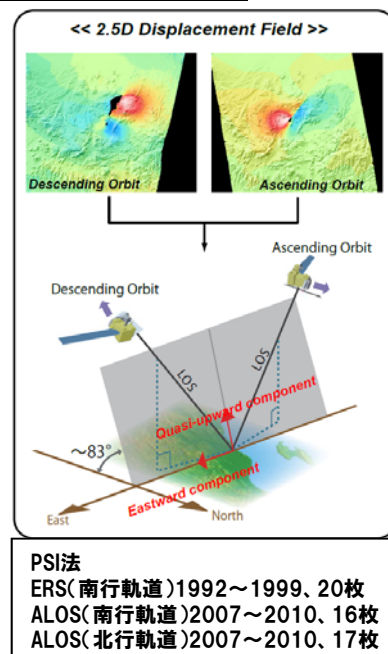
定常的な地殻変動場における地殻変動メカニズムのモデル化に加えて、
地震時の地殻変動分布を再現するようなモデリング

(1) 稠密地殻変動観測による詳細地殻変動(新潟県中部)の解明

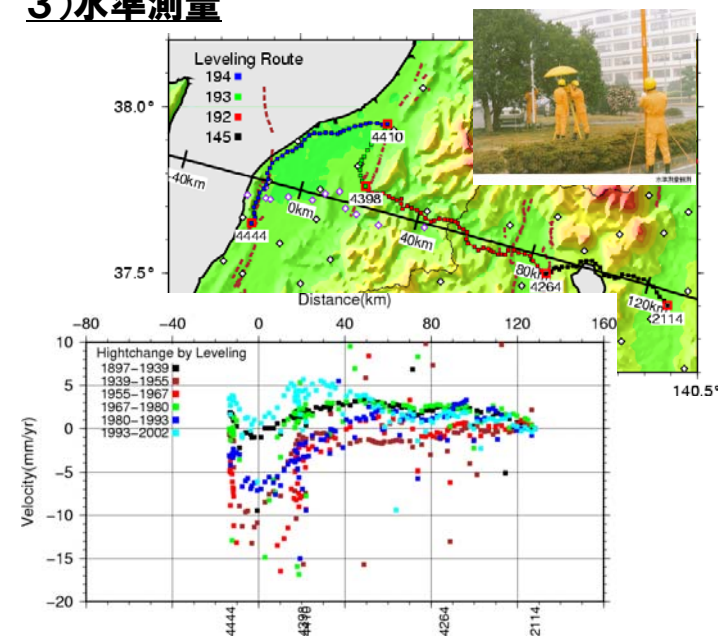
1) GNSS繰り返し観測



2) SAR干渉解析

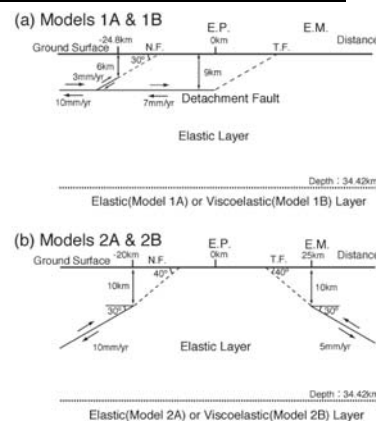


3) 水準測量

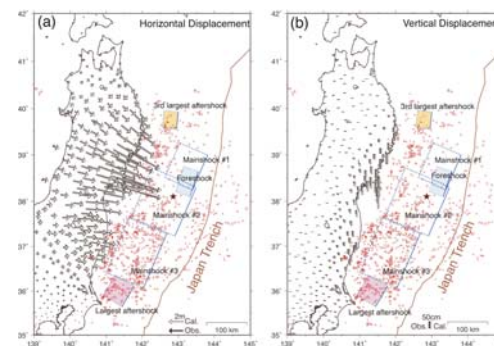


(2) 地殻変形過程のモデリング

1) 短縮変形のモデル化



2) 地殻構造の不均質性の影響評価



4. 成果の概要

(1) 稠密地殻変動観測による詳細地殻変動(新潟県中部)の解明

- (1a)東北地方太平洋沖地震発生前 (→ **短縮ひずみ、沈降**)
 - ・越後平野周辺における顕著な短縮ひずみと沈降を検出
 - ・水準測量データ、SAR干渉解析、GNSS観測の3つの異なる手法から沈降を検出
 - 最低でも20年間は継続
 - ・太平洋側では短縮ひずみの減少もしくは伸張に転ずる時間変化を検出
越後平野周辺での短縮ひずみに変化なし
 - 太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていない
- (1b)東北地方太平洋沖地震時 (→ **伸張ひずみ、隆起**)
 - 観測された伸張ひずみは、計算される伸張ひずみより大きい
 - 地震波速度構造の低速度異常や堆積層の存在から不均質構造の影響を示唆
- (1c)東北地方太平洋沖地震後(→ **伸張ひずみ、沈降?**)
 - ・越後平野周辺では周りに比べて伸張ひずみが小さい
 - ひずみ集中の成因にかかる応力は外力に関係なく進行している可能性

(2) 地殻変形過程のモデリング

- (2a)短縮変形のモデル化その1
 - 深部非地震性滑りによるモデル計算
- (2b)短縮変形のモデル化その2
 - 過去の内陸大地震の粘弾性緩和による変形のモデル計算
- (2c)地殻構造の不均質性の影響評価
 - 東北地方太平洋沖地震時の地殻変動のモデル計算

成果(1a)東北地方太平洋沖地震発生前

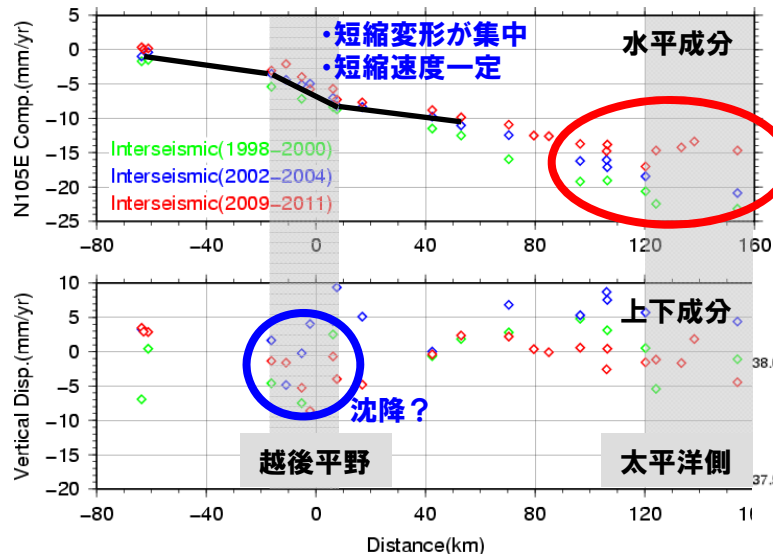


図7-1. 西北西-東南東方向の水平・上下速度プロファイル (GNSSによる成果)

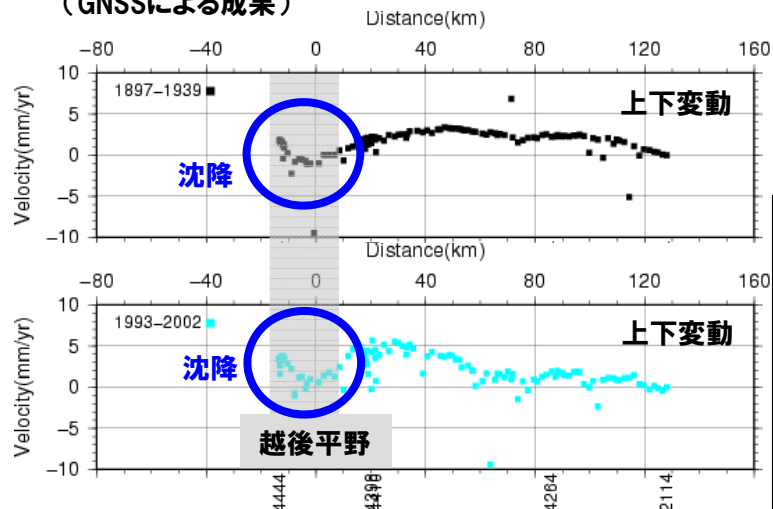


図7-3. 西北西-東南東方向の上下速度プロファイル (水準測量による成果)

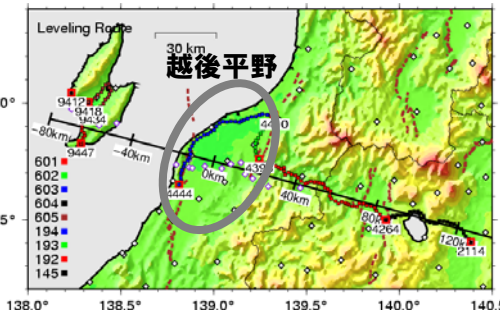


図7-4. 観測点分布図。◇GEONET、
◇キャンペーン観測点、□水準点

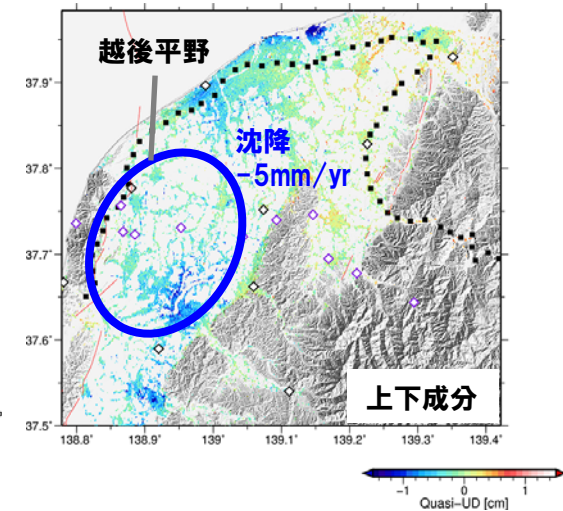


図7-2. PSI法による2.5次元変位場解析 (SAR干渉解析による成果)

●短縮ひずみ、沈降が進行

- ・越後平野周辺で顕著な短縮(0.1-0.2ppm/yr)と沈降
- ・越後平野内で水準測量データ、SAR干渉解析、GNSS観測の3つの異なる手法から沈降を検出、最低でも20年間は継続
- ・太平洋側では短縮ひずみの減少もしくは伸張に転ずる変化を検出
越後平野内での短縮ひずみに変化なし
→ 太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていない

基準線から±20kmの観測点をプロット、横軸の距離は図7-4参照

成果(1b)東北地方太平洋沖地震発生時

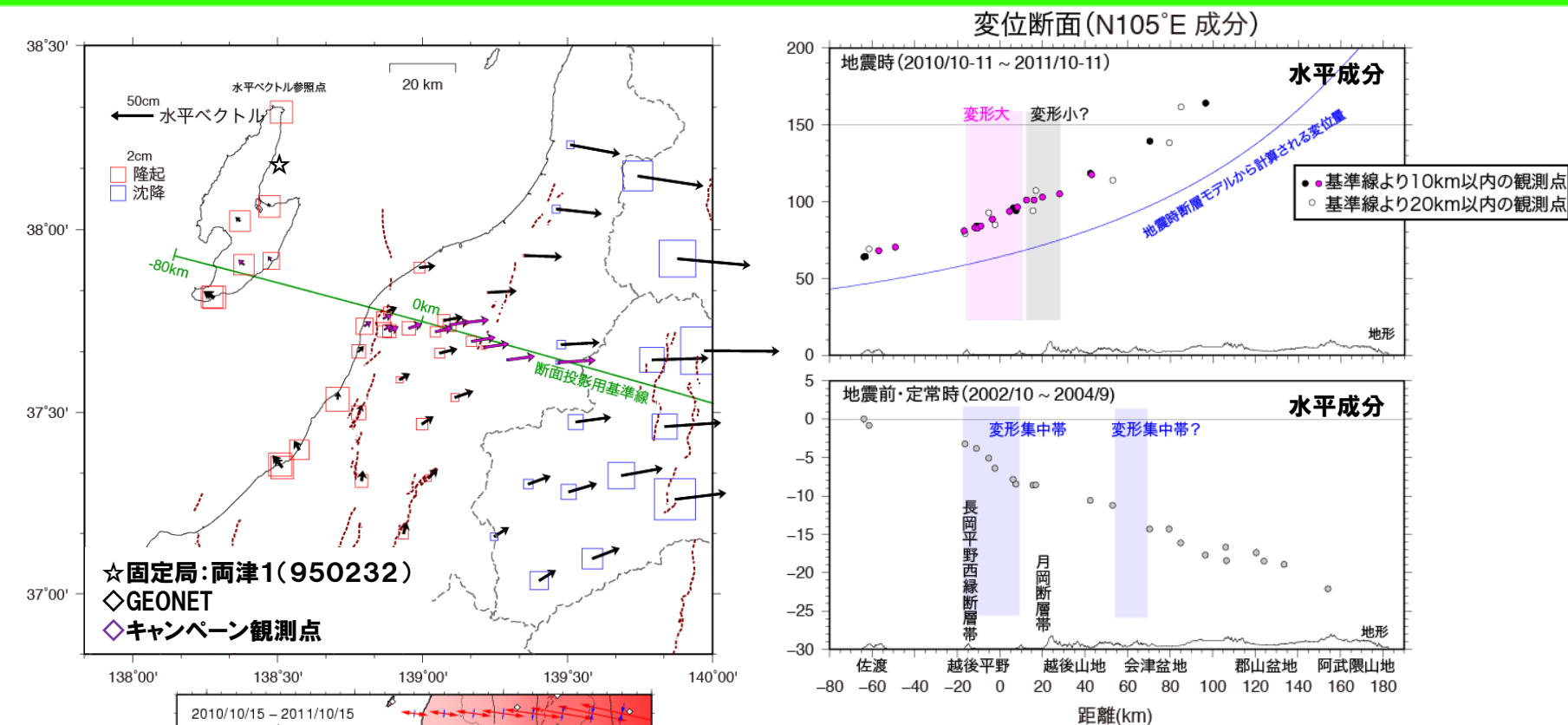


図8-2. 東北地方太平洋沖地震発生時の地殻変動の観測値と計算値の比較

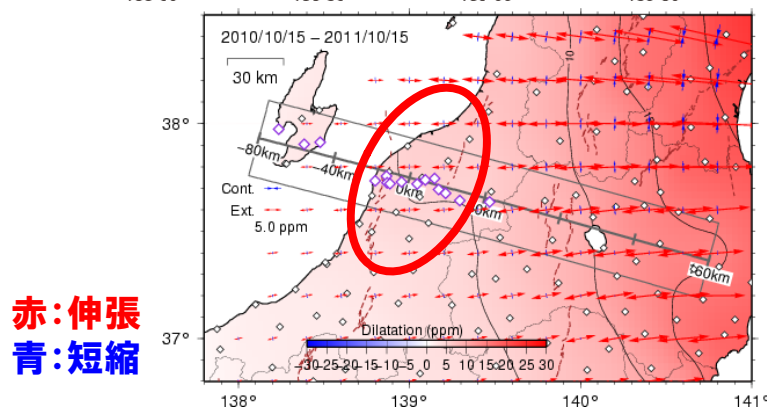


図8-1. 東北地方太平洋沖地震発生時の地殻変動(上)とひずみ(下)

●伸張ひずみ、隆起

- ・5ppmを超える伸張ひずみを検出
- ・観測された伸張ひずみは、計算される伸張ひずみより大きい
→ 地震波速度構造の低速度異常や堆積層の存在から不均質構造の影響大

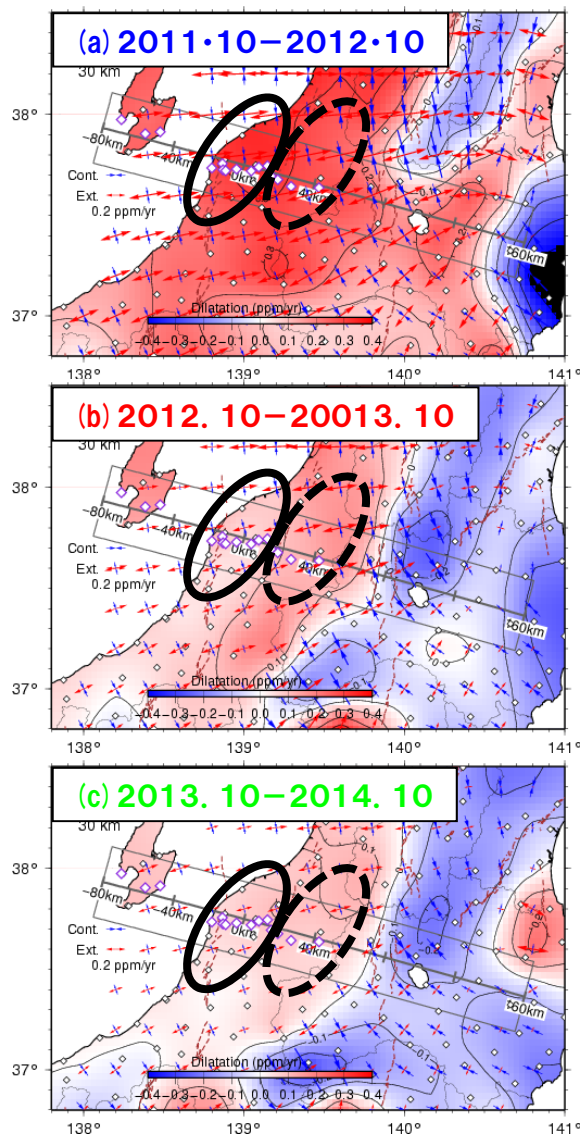


図9-1. ひずみ速度の時間変化

赤:伸張
青:短縮

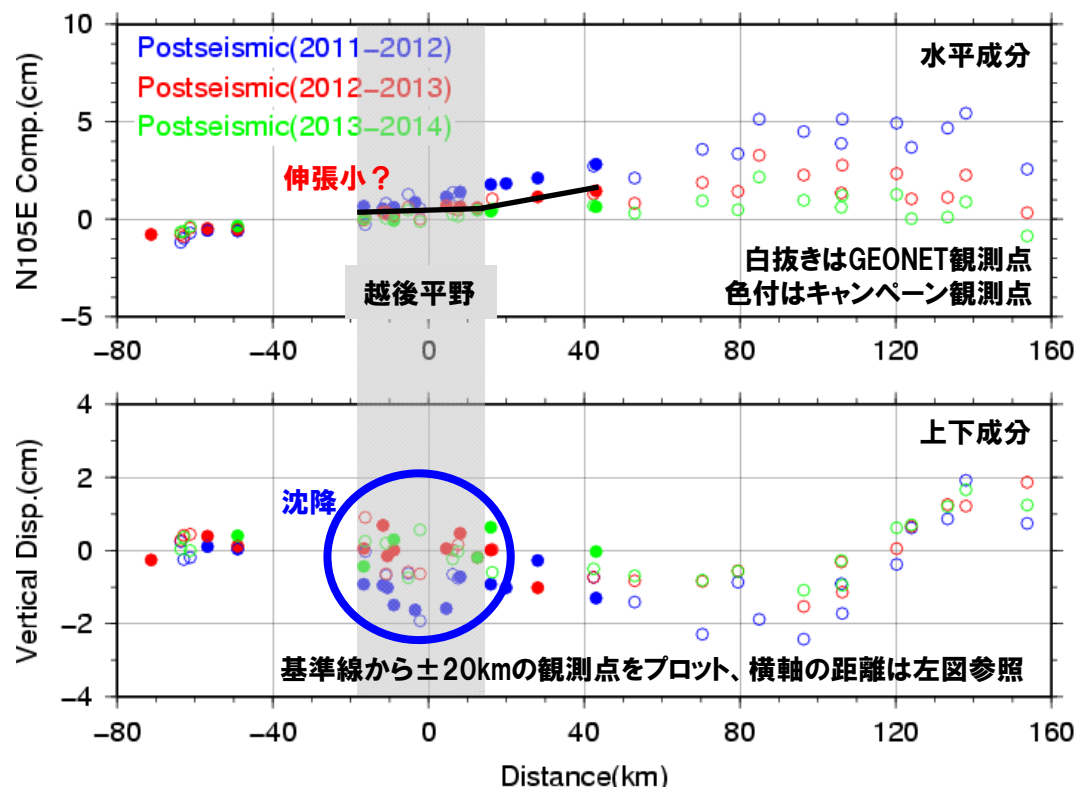
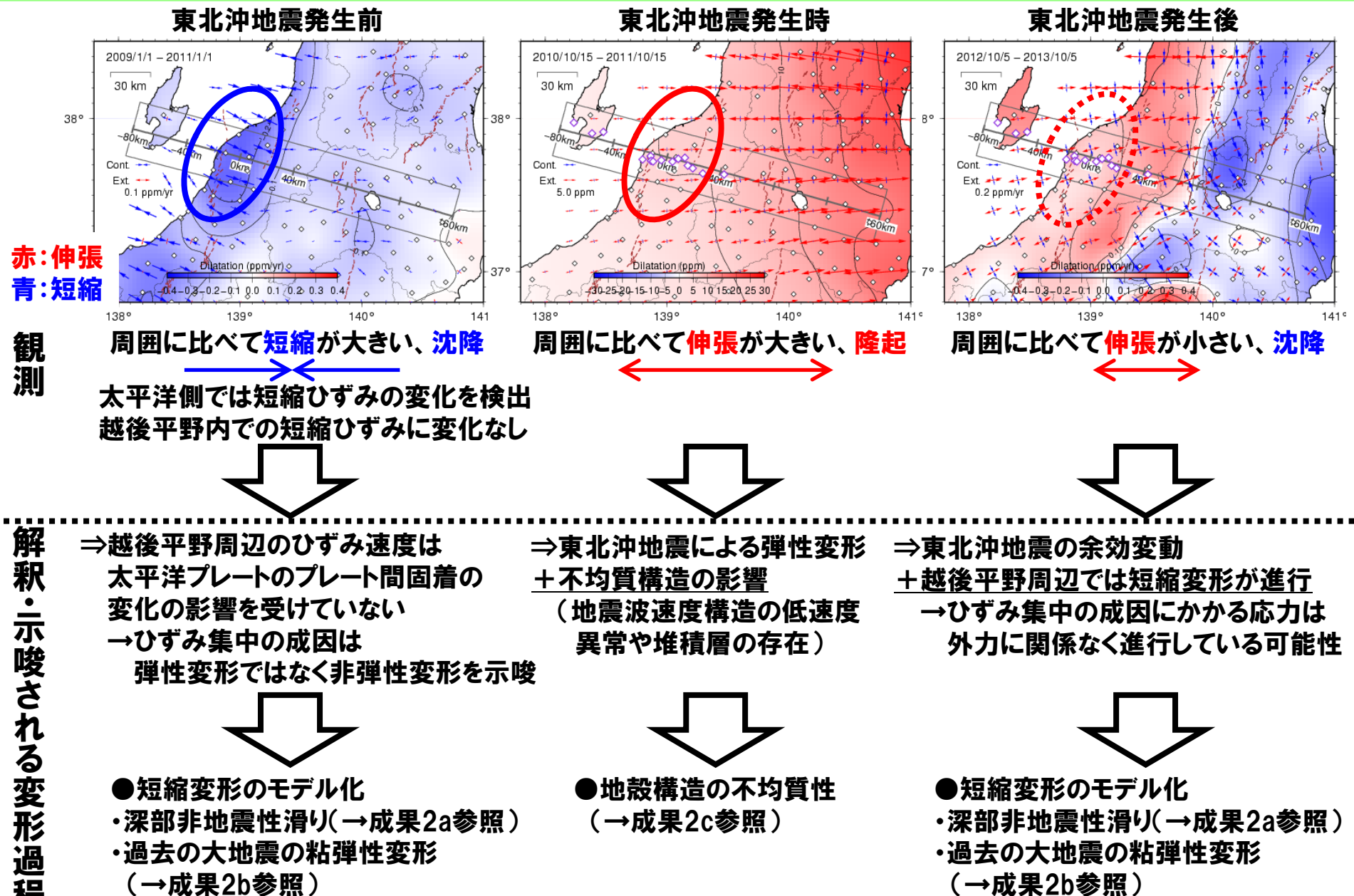


図9-2. 西北西－東南東方向の変位プロファイル

●伸張ひずみ、沈降

- ・東北沖地震の余効変動により伸張場が卓越
- ・越後平野周辺では周りに比べて伸張ひずみが小さい
- ・顕著な沈降が見られる
 - ひずみ集中の成因にかかる応力は外力に関係なく進行している可能性

成果1 詳細地殻変動分布(新潟県中部)のまとめ 国土地理院



解釈・示唆される変形過程

成果(2a)短縮変形のモデル化その1

深部非地震性滑りのモデル計算(西村・他、2012:公表成果)

Model 1

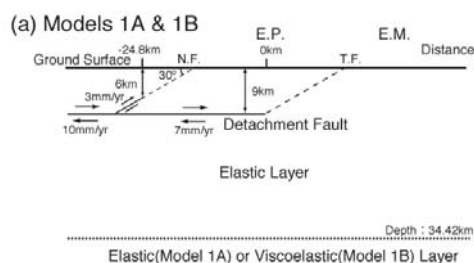
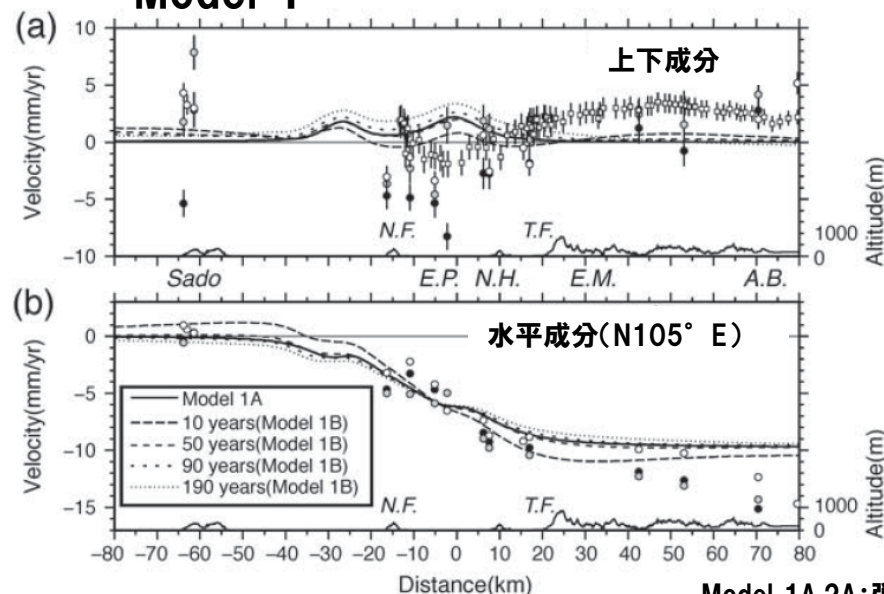


図11-1. 水平デタッチメントモデル
(e.g. Sato et al., 2002)

Model 2

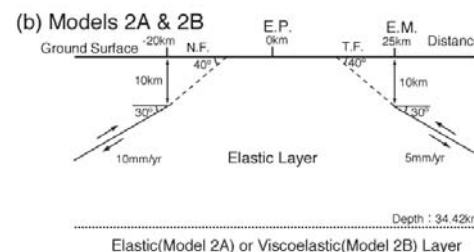
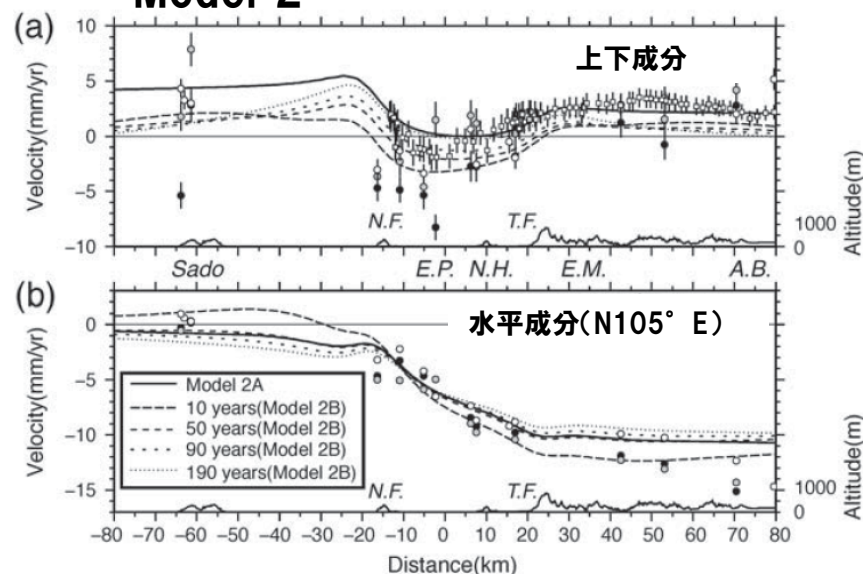
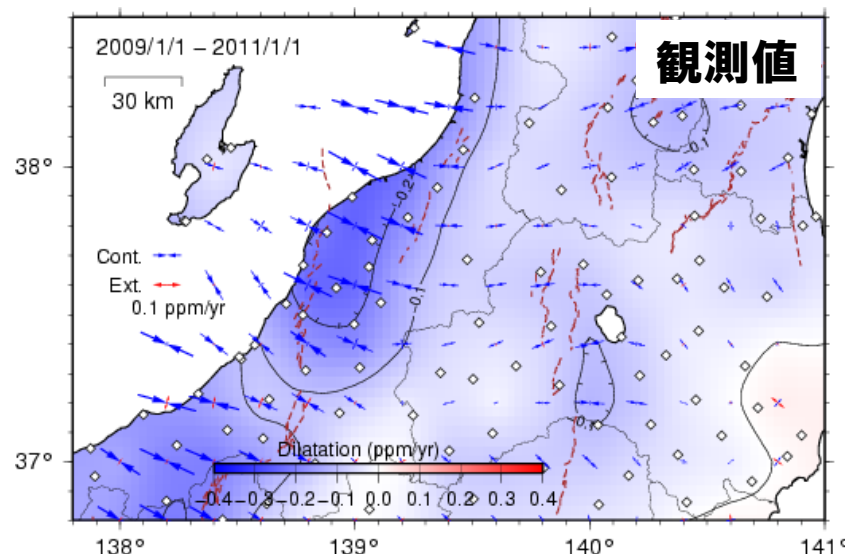


図11-2. 越後平野両端の活断層を考慮したモデル
(e.g. Iio and Kobayashi, 2002)

断層の深部形状 → 地表の地殻変動に影響
短縮のみを再現する場合 → 様々なモデルで再現可能
沈降を再現するには → 粘弾性媒質の考慮が必要

成果(2b)短縮変形のモデル化その2

過去の内陸大地震の粘弾性緩和による変形のモデル計算
(非地震性滑り以外の短縮変形の成因の可能性の検討)



赤:伸張
青:短縮

図12-1. ひずみ速度分布(観測値)
2009年1月～2011年1月

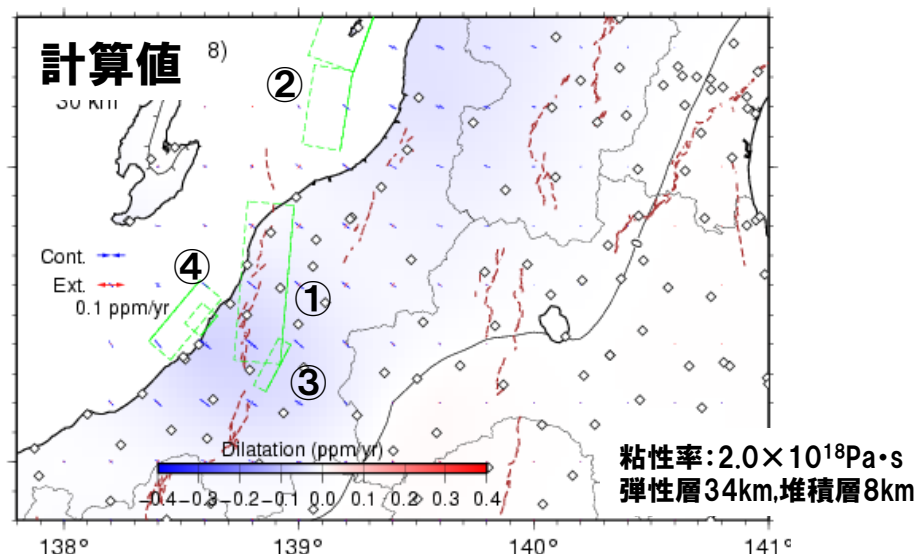


図12-2. ひずみ速度分布(計算値)

過去の内陸大地震の粘弾性変形

- ①1828年越後三条地震(M7.2) 約180年後
- ②1964年新潟地震(M7.5) 約45年後
- ③2004年新潟県中越地震(Mj6.8) 約5年後
- ④2007年新潟県中越沖地震(Mj6.8) 約3年後

ひずみ集中帯におけるひずみ速度:

・観測: 0.1～0.2 ppm/yr

・計算: << 0.1 ppm/yr

(過去の大地震の粘弾性変形によるひずみ速度)

→ ひずみ集中帯の主成因と考えることは難しい

東北地方太平洋沖地震時の地殻変動のモデル計算

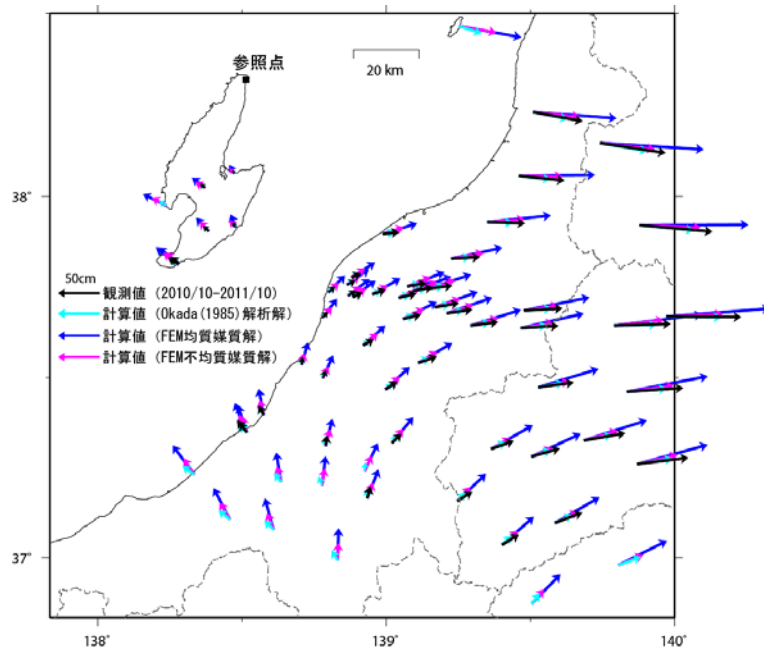


図13-1. 東北地方太平洋沖地震を含む1年間の地殻変動の観測値とモデル計算値の比較

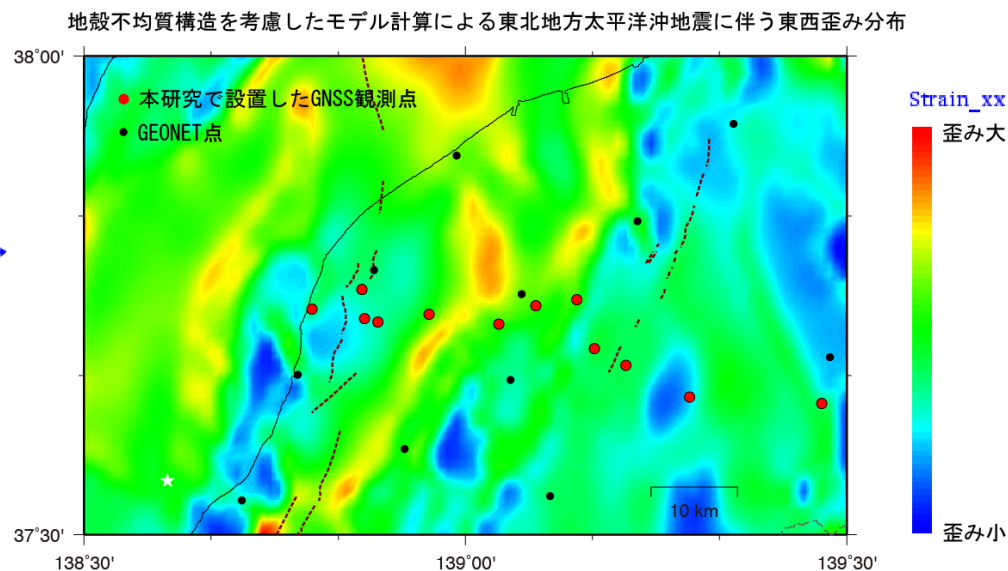


図13-2. J-SHISの深部構造モデルに準拠した不均質媒質を用いて計算した東北地方太平洋沖地震に伴う東西ひずみ分布

地殻構造の不均質性を考慮することで、地震時の東西ひずみ分布において越後平野が周辺部より2倍程度大きくなり、観測データの特徴が再現された

5. 当初目標の達成度

(目標)

ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生メカニズムの理解に資するため

(1) ひずみ集中帯内部の詳細地殻変動分布(新潟県中部)の解明

(2) 地殻変動の特徴的パターンを生み出す地下の変形過程の解明

(達成度)

東北地方太平洋沖地震発生前

- ・越後平野周辺における顕著な短縮ひずみと沈降を検出
- ・水準測量データ、SAR干渉解析、GNSS観測の3つの異なる手法から沈降を検出
最低でも20年間は継続
- ・太平洋側では短縮ひずみの減少もしくは伸張に転ずる時間変化を検出
越後平野周辺での短縮ひずみに変化なし

東北地方太平洋沖地震後

- ・越後平野周辺では周りに比べて伸張ひずみが小さい

- ・越後平野周辺のひずみ速度は太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていない
- ・非地震性すべりにより短縮変形は再現できる
- ・過去の内陸大地震の粘弾性変形はひずみ集中帯の短縮変形に大きく寄与しない
- ・地殻構造の不均質性により地震時のひずみの不均一分布は再現できる

ひずみ集中帯の詳細地殻変動(新潟県中部)

地下の変形過程の解明

という目標を達した

7. 成果活用の見込み

本研究で得られた重要な知見

- ・越後平野周辺のひずみ速度は
太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていない
- ・広域的には伸張ひずみが卓越しているが、
越後平野では短縮変形が進行している可能性

・新潟－神戸ひずみ集中帯に属する他地域
(新潟県南西部※1、長野県周辺)
・奥羽脊梁のひずみ集中帯※2
での地殻変動の解釈、変形過程の解釈

※1 鷺谷・関根(2014)、日本地震学会秋季大会
※2 三浦・他(2014)、日本地震学会秋季大会

ひずみ集中帯の変形過程の解明
内陸へのひずみの蓄積過程の解明

活用

内陸地震発生の長期予測の高度化
活断層の長期予測の高度化

8. 達成度の分析

(1) 有効性の観点からの分析

●観測から得られた新たな知見

- ・太平洋側のひずみ速度の時間変化を検出、
しかし、越後平野周辺でのひずみ速度に時間変化なし
- ・広域的には伸張ひずみが卓越しているが、越後平野では伸張が小さい

●観測を説明する解釈・モデルの提示

- ・越後平野周辺のひずみ速度は
太平洋プレートのプレート間固着の変化の影響を受けていない
→ひずみ集中の成因は弾性変形ではなく非弾性変形を示唆
- ・外力に関係なく、越後平野周辺では短縮変形が進行している可能性

⇒ ひずみ集中帯の変形機構および内陸へのひずみの蓄積過程の解明
をする上で有効な成果

(2) 効率性の観点からの分析

●研究開発方法の的確な修正

東北地方太平洋沖地震の発生により、当初想定していた短縮変形とは異なる
変形場が観測されることとなったが、研究開発の方法を的確に修正

●院内関係部署との連携・協力

GNSSキャンペーン観測において、研究管理課、宇宙測地研究室、測地部等
院内の関係部署との連携・協力により、人員不足を補い観測を実施

⇒ 以上により、効率的に研究を実施

9. 残された課題と新たな研究開発の方向

●東北地方太平洋沖地震の余効変動

地震発生前の定常的な地殻変動速度を1桁以上上回る速度で進行

- ・今後この東西伸張の変形がどのように推移するのか？
- ・将来的に東西圧縮の変形に戻るのか？

観測を継続する※ことにより、これまでに例のない変形過程がより詳細に明らかになることが期待される。

※一般研究により実施

●新潟－神戸ひずみ集中帯に属する他地域(新潟県南西部や長野県周辺)、奥羽脊梁のひずみ集中帯の地殻変動分布の挙動との比較

●変形過程のモデル化

- ・変形の不均質を作り出す地殻構造
 - ・対象地域における地震発生メカニズムとの関係
- 新たな知見が得られることも期待される

本研究で設置した15観測点の現状

	研究開始時点 2015年1月時点	
観測点数	15点	14点※1
連続観測点	4点	7点※2
繰り返し観測点	11点	7点※3

※1:2013年11月に建物取り壊しのため廃点(10R945)

※2:2012年度に東大地震研へ移管し連続観測点化(10R944, 10R949, 10R951)

※3:今後2点は京大防災研と共同で連続観測点化を予定(10R937,10R938)