

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

内陸地震発生過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ア．列島及び周辺域のプレート運動，広域応力場

イ．上部マントルとマグマの発生場

ウ．広域の地殻構造と地殻流体の分布

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア．アスペリティの実体

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

(4) 地震発生・火山噴火素過程

イ．地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究においては，東北地方内陸部を主な対象とし，地震・地殻変動観測の稠密化・解析手法の高精度化により，地殻流体の分布・3次元的な断層の形態・アスペリティまたは非アスペリティの可能性を持つ領域の分布や歪・応力分布を高い分解能で明らかにする．さらにそれらを説明するモデルを構築することで，歪集中帯の原因を明らかにするとともに，内陸地震に対するアスペリティモデルの検証と拡張を試みる．このようにして，これまでの研究成果から得られた内陸地震発生モデルの検証・高度化を行い，上記方針を実現化し，地震・火山噴火予知研究上不可欠である，内陸地震の発生過程の理解を深めることを目的とする．

東北地方脊梁山地や宮城県北部等の歪集中帯において臨時観測を行い，地下の構造を高分解能で推定する．併せて，稠密 GPS 観測を実施して詳細な歪の時空間分布を推定し，歪蓄積過程のモデリング

の基礎資料とする。さらに、ボーリングコア資料やメカニズム解、S波スプリティング等の情報から応力の推定を行う。

得られた結果から、火山を含む領域での流体の分布・3次元的な断層の形態・アスペリティまたは非アスペリティの可能性を持つ領域の分布の推定を行い、これを元に、歪・応力分布を説明するモデルを構築し、内陸の地震発生に至る過程をより詳細に解明する。

これまでの研究においては、主に東北地方脊梁山地歪集中帯を対象とする理解・モデル化がされているが、本研究ではその成果を踏まえ、地下構造、歪・応力分布の高分解能・高精度化を図るとともに、東北地方前弧側の東西短縮の大きい領域（宮城県北部）や日本海沿岸の歪集中帯についても研究を進める、それらの比較により、歪集中帯および地震発生過程モデルの一般化・高度化を図るとともに、東北日本沈み込み帯の前弧側から日本海東縁にいたる陸域全体にわたる地殻変形過程の解明をも目指す。

これらの研究を下記のような研究項目により実施する。

1. 稠密 GPS 観測による歪集中帯の詳細な歪分布の推定。
2. 稠密地震観測による、地震波速度構造・震源分布の高精度推定。
3. ボーリングコア試料を用いた地殻応力測定、および稠密地震観測による応力テンソルインバージョン・地震波異方性による応力の時空間変化の推定。
4. 上記の1～3の結果に基づく、内陸地震の歪集中機構・地震発生過程のモデル化。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

本年度(21年度)は、特に、昨年(2008年)に発生した岩手・宮城内陸地震に関する研究観測を進める。

1. 稠密 GPS 観測による歪集中帯の詳細な歪分布の推定。

山形県新庄市から宮城県南三陸町に至る東西測線を設定し、新しい11点のGPS連続観測点と既存のGPS連続観測点からなる稠密観測網を構築する。この測線においては、既往の研究により、詳細な地殻・上部マントル構造がわかっており、また、奥羽脊梁山地の歪集中帯とその前弧域にも東西短縮の大きい領域が存在することがわかっている。前者では、1996年に鬼首地震が、後者では、1900年、1962年、2003年の宮城県北部地震が発生するなど、地震活動も活発な地域であり、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域南部でもある。このような特徴的な地域において詳細な歪分布を明らかにする。また、近年大地震が発生していない地域との比較を行うため、2000年に国土地理院が仙台市内に設置した稠密観測網で得られるデータを用いて、国土地理院と共同研究を行う。

2. 稠密地震観測による、地震波速度構造・震源分布の高精度推定。

2008年岩手・宮城内陸地震の観測データの整理・解析を継続し、震源域およびその周辺域の地震波速度構造を求める。特に断層に対応する構造・地殻流体分布に関する構造・アスペリティ領域/非アスペリティ領域に対応する構造についての検討を行う。

また、余震活動の時空間変化の把握や構造推定の精度向上のために、2008年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周囲に臨時地震観測点を設置する。

3. ボーリングコア試料を用いた地殻応力測定、および稠密地震観測による応力テンソルインバージョン・地震波異方性による応力の時空間変化の推定。

既存のボーリングコア試料を収集し、その試料を用いて地殻応力の測定を行う。また、2008年岩手・宮城内陸地震の稠密余震観測データを利用し、震源域およびその周囲での起震応力場の空間変化の推定を行う。

4. 上記の1～3の結果に基づく、内陸地震の歪集中機構・地震発生過程のモデル化。

2008年岩手・宮城内陸地震について、上記の観測研究結果および庄内地域などの隣接する他の領域での研究結果を相互比較検討し、同地震の発生機構の理解を進める。特にこの領域における地震発生にいたる歪蓄積・解放機構について検討を行う。

平成 22 年度以降は平成 21 年度に設置・整備した GPS・地震観測点などにより順次蓄積されたデータを使用し、対象領域における同様の研究を進める。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

本年度(22 年度)は、平成 21 年度以降に設置・整備した GPS・地震観測点などにより順次蓄積されたデータを使用し、2008 年岩手・宮城内陸地震を含む対象領域における研究観測を進めた。

1．稠密 GPS 観測による歪集中帯の詳細な歪分布の推定。

2008 年岩手・宮城内陸地震発生前後の GPS 連続観測データを詳細に解析することにより、長期的余効変動を捉えた(図 1-1, 1-2 右)。その時空間的変動パターンの特徴から、その原因が下部地殻以深の粘性的応答によるものと仮定し、粘弾性構造のモデル化を行った。最表層を弾性層、その下層を粘弾性層として、弾性層の厚さと粘弾性層の粘性係数をグリッドサーチによって推定したところ、それぞれ 16 - 24 km, $2.6 - 4.0 \times 10^{18}$ Pa・s の範囲内に推定された。これらの最適値によって計算された水平・上下変動を図 1-1, 1-2 左に示す。推定された弾性層の下限の深さは、地震波トモグラフィーから推定されているコンラッド面や微小地震発生層の深さに概ね一致し、粘性係数も既往研究によって推定されている数値と調和的であった。さらに、本震発生後 1.5 年間と 2.2 年間の二つの期間に分けて同様の解析を行い、推定された粘性係数を比較したところ、後者のほうが前者よりも約 40% 大きくなった。このことは、粘性層の構成則が非線形である可能性を示唆していると考えられる。

2．稠密地震観測による、地震波速度構造・震源分布の高精度推定。

常時微動を用いて地殻構造の時空間変化を安定に知るための方法を開発し、2008 年岩手・宮城内陸地震に適用した(高木, 2010)。その結果、地表付近の地盤構造に対応する構造(図 2-1)や内陸地震震源域の深部構造を明らかにした。また、地表の広域の高感度観測点と KiK-net の地表・地中観測点の解析結果の定量的な比較により、地殻のごく表層においては、強震動による地盤の損傷により広い範囲において地震波速度が地震後に低下することを発見した(図 2-2)

地震波反射面について検討を行ない、震源域深部に反射法地震探査により報告されている反射波を確認した(高木・他, 2010)。

地震波減衰(Q)構造を推定し、岩手・宮城内陸地震震源域において活火山直下や震源域深部に高減衰域を確認した(四ヶ所・他, 2010)。

そのほか、地震波速度異方性構造についても検討を行った(研究課題 1204)。

3．ボーリングコア試料を用いた地殻応力測定、および稠密地震観測による応力テンソルインバージョン・地震波異方性による応力の時空間変化の推定。

多数の地震のメカニズム解の空間分布と揺らぎを利用し、起震応力場と地殻強度から、地下の流体の間隙圧の分布を求める手法を開発し、2008 年岩手・宮城内陸地震に適用した。その結果、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源域において、地殻下部の地震波速度低速度の上部に高い間隙圧を持つ領域を確認した。つまり地下の高圧の流体が、本震を引き起こし、さらに本震すべりや余効すべりに伴って周囲に拡散した流体により、複雑な余震活動が生じた可能性を示した (吉田, 2010)。

阿寺断層周辺で採取されたコア試料を用いた応力測定結果の再解析を行い、コア試料を用いて測定した阿寺断層周辺の応力場は、改良された水圧破砕法により測定された応力場と量的に一致することを示した(Yabe et al., 2010)。このことは、コア試料を用いた応力測定法の信頼性は、改良された水圧破砕法と同程度であることを示唆する。

4. 上記の1～3の結果に基づく、内陸地震の歪集中機構・地震発生過程のモデル化。

東北日本全域における変形と断層形成過程をモデル化するためには、埋没した地溝や既存断層、地殻流体、熱構造、岩石学的構造を考慮する必要がある。本年度は、熱構造を考慮して断層や脊梁山脈形成のモデル化を実施した。Hi-net 掘削井を用いて観測された地温勾配等の観測情報(松本, 2007)を基に地殻、最上部マントル内の温度構造を設定した。そして、非線形粘弾塑性性を考慮した有限要素法により、変形と断層形成過程のモデル化を実施した(研究課題 1405)。このモデル化により、東北日本全域において、実際の地形とある程度調和的な脊梁山脈の形成を再現することができた。また、脊梁山脈の両側に沿って断層が形成される様子を再現することができた。

====平成 23 年度の成果====

・ 干渉 SAR データの時系列データに基づく 2008 年岩手ササ楸峠 録未獵拘 掌 册阿慮
2008 年岩手・宮城内陸地震発生後の ALOS/PALSAR データの干渉画像に対して時系列解析を適用した。干渉 SAR 解析時には南行軌道のデータを用いた。2008 年 7 月から 2010 年 12 月までのデータ中、冬期など干渉性が低い時期を除いた 14 ペアを用いて時系列解析 (Small Baseline Subsets 法, (SBAS 法)) を適用し、震源域周辺の変位の時間発展を推定した(図 4-1)。その結果、地震時に下盤側であった領域で広範囲にスラントレンジの伸張(沈降もしくは西向き変位)が見られ、それらの変位速度はほぼ一定であることが分かった。この結果は震源域を横断する水準測量の結果とも整合的である。また地震時に上盤側である領域では、特に栗駒山北側で顕著なスラントレンジ短縮(隆起もしくは東向き変位)が確認された。スラントレンジ短縮の領域では、地震発生 1 年程度経過後から変位が加速している様に見える。このような断層下盤側および上盤側における地震後変動は、昨年度の成果として報告した GPS データに基づいて検出された粘弾性緩和(大園, 2010)によるものに加え、局所的な余効すべり等が重畳していると考えないと説明ができない。今後、これら複数の要因を説明可能なモデル構築を行う。

・ 地震波減衰(Q)構造を推定し、岩手・宮城内陸地震震源域のほか、その西部の鳥海山にかけての領域において活火山直下や震源域深部に高減衰域を確認した(四ヶ所・他、連合大会, 2011)。

・ 牛伏寺断層近傍で採取したコア試料を用いた応力測定を行った。Drilling induced tensile fracture の方向から、牛伏寺断層と最大圧縮方向のなす角は約 22 度であり、応力測定結果と合わせると、断層面に作用する法線応力に対するせん断応力の比は 0.4-1.0 と大きいことが推定された。このことは、長期評価で、牛伏寺断層での地震発生切迫度が比較的高いとされていることと矛盾しない。(Yabe and Omura, 2011)

・ 能登半島沖地震、兵庫県南部地震、岩手・宮城内陸地震の震源域において、それぞれ、地震発生に関わる不均質構造を確認した(課題番号: 1204 参照)

「課題番号: 9100」

・ 2011 年東北地方太平洋沖地震後に発生した東北地方の内陸地震について、メカニズム解と震源分布から断層面を推定した。3/11 以降の活動は 3/11 以前に活動の高い領域およびその周辺におよそ見られ、地殻中深部に分布する地震波低速度域の周囲に分布する。東北地方中央部では横ずれ断層型が確認され、また P 軸の向きは北東-南西方向を向くことから、応力場の広域的な変化が示唆される。推定された断層面に対する 2011 年東北地方太平洋沖地震のすべりによるクーロン応力変化は正であり、こ

これらの地震は 2011 年東北地方太平洋沖地震による正の影響を受けて発生したと考えられる(図 5-1)。(Okada et al., 2011)

Okada, T. et al., Possible triggered shallow inland earthquakes in NE Japan by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets and Space, in press, 2011.

四ヶ所健太・他, 2008 年岩手・宮城内陸地震の震源域および鳥海山周辺における地震波減衰構造, 地球惑星科学連合 2011 年大会.

Yabe, Y. and K. Omura, 2011, In-situ stress at a site close proximity to the Gofukuji Fault, central Japan, measured using drilling cores, Island Arc, 20, 160-173, doi:10.1111/j.1440-1738.2010.00756.x.

- (8)平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
大園真子, 2010, 測地データに基づく奥羽脊梁山地ひずみ集中帯周辺の変形過程, 東北大学博士論文, 139 pp.
Okada, T., N. Umino and A. Hasegawa, 2010, Deep structure of the Ou mountain range strain concentration zone and the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, NE Japan - Seismogenesis related with magma and crustal fluid, Earth, Planets and Space, 62, 347-352.
四ヶ所健太・岡田知己・中島淳一・速水絵里圭・海野徳仁・長谷川昭, 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急余震観測グループ, 2010, 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域における詳細な地震波減衰構造, 日本地震学会 2010 年度秋季大会, P2-10.
高木涼太, 2010, 常時微動の相互相関解析に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺域のレイリー波伝播速度とその時間変化に関する研究, 東北大学修士論文, 145 pp.
高木涼太・岡田知己・中原恒・伊藤喜宏・海野徳仁・長谷川昭, 2010, 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急余震観測グループ, 2010, 自己相関・相互相関解析に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域の地殻内反射面検出の試み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS015-07.
Yabe, Y., K. Yamamoto, N. Sato, and K. Omura, 2010, Comparison of stress state around the Atera fault, central Japan, estimated using boring core samples and by improved hydraulic fracture tests, Earth Planets Space, 62, 257-268.
吉田圭佑, 2010, メカニズム解から推定した 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域の起震応力場と摩擦強度, 東北大学修士論文, 134 pp.

(9)平成 23 年度実施計画の概要：

平成 23 年度以降は平成 21 年度以降に設置・整備した GPS・地震観測点などにより順次蓄積されたデータを使用し, 対象領域における同様の研究を進める.

地震観測については, 地震波減衰構造の推定を進める. 地震波干渉法については三次元構造の推定および構造の時間変化についてさらに検討を行う. また, 応力テンソルインバージョンの結果を利用した間隙流体圧に関する検討を進める.

(10)実施機関の参加者氏名または部署等名：

三浦哲・矢部康男・中島淳一・内田直希・岡田知己・他 計 8 名程度
他機関との共同研究の有無：有
建築研究所 芝崎文一郎

(11)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/

(12) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：岡田知己

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-795-3919

FAX：022-264-3292

e-mail：okada@aob.geophys.tohoku.ac.jp

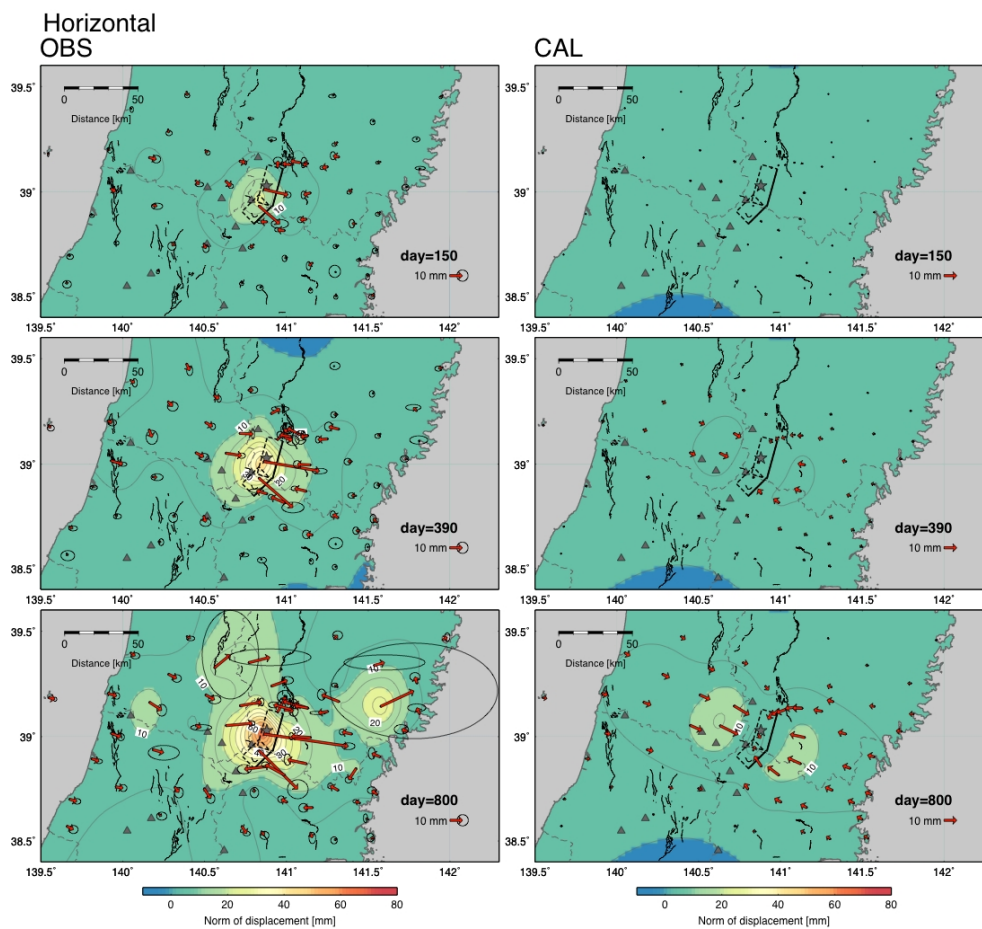


図 1-1 . 2008 年岩手・宮城内陸地震発生後 60 日以降の GPS 連続観測データによる長期的余効変動(水平成分). 右側が観測された水平変動, 左側が推定された粘弾性構造パラメータから計算された変動を示す. 上から本震後 150 日, 390 日, 800 日における変動を示す. カラーコンターは変位ベクトルのノルムを示す.

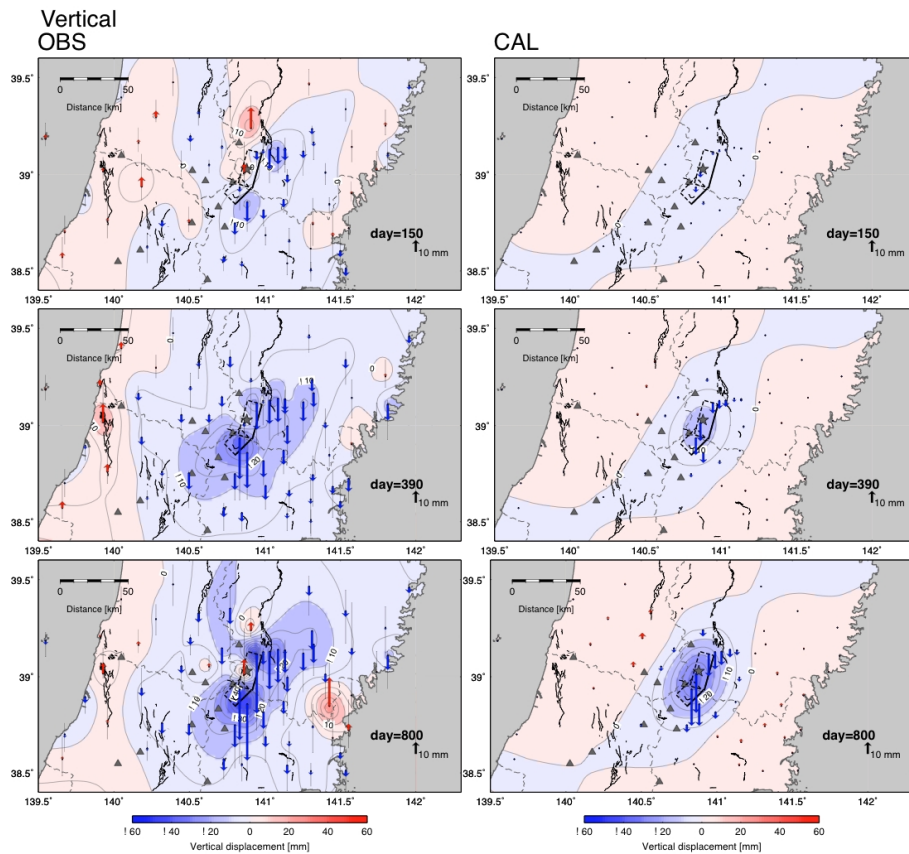


図 1-2 . 2008 年岩手・宮城内陸地震発生後 60 日以降の GPS 連続観測データによる長期的余効変動（上下成分）. 右側が観測された上下変動，左側が推定された粘弾性構造パラメータから計算された変動を示す．上から本震後 150 日，390 日，800 日における変動を示す．カラーコンターは変位ベクトルのノルムを示す．

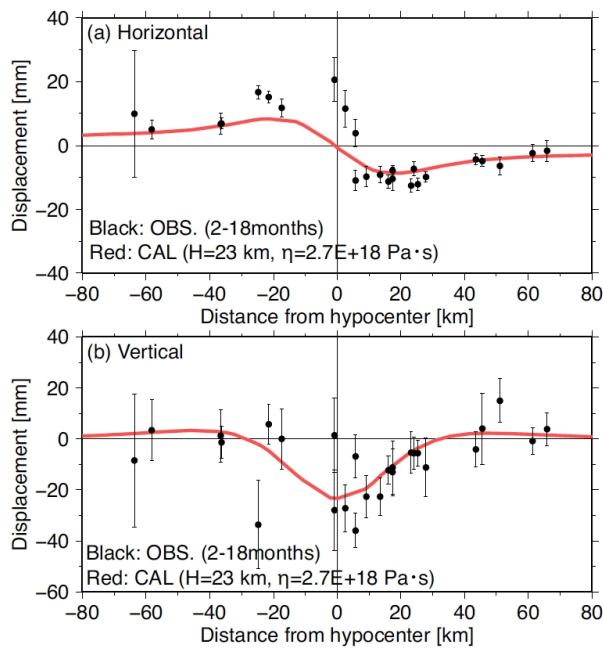


図 1-3 . N107 °E 方向のプロファイル上にプロットされた水平・上下変動成分 . 期間は本震後 60 日から 547 日まで . 水平変動成分は N107 °E 方向の成分を示している . 赤の曲線は , 推定された最表層の弾性層の厚さとその下層の粘性係数によって計算された値を示す .

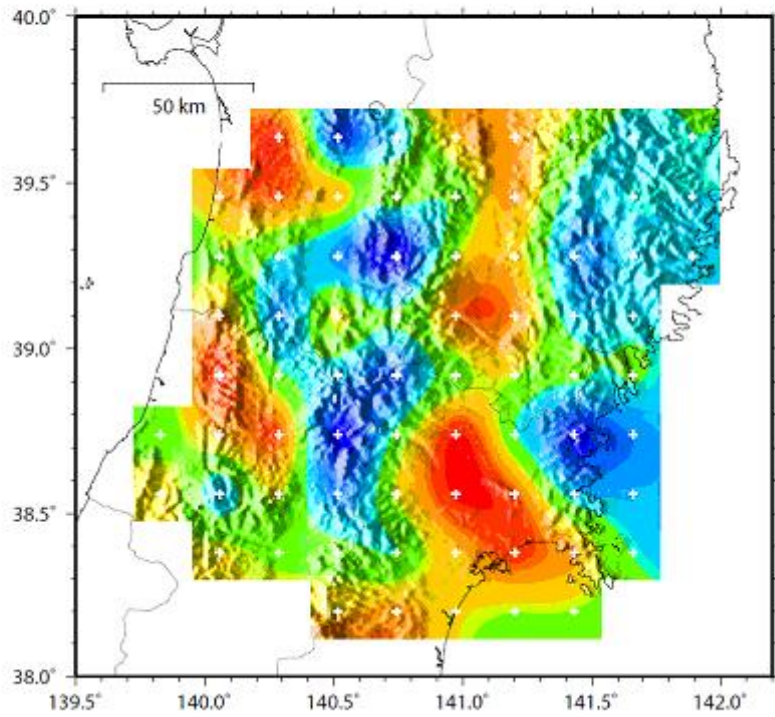
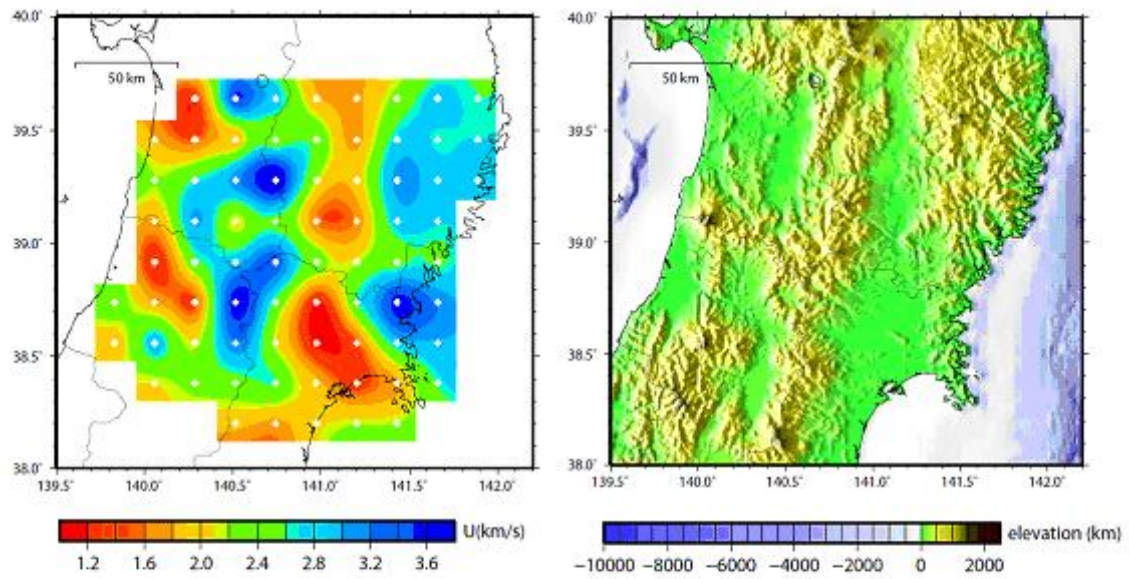


図 2-1 . (左上) 周期 2 s のレイリー波群速度マップ (高木, 2010) . (右上) 地表の地形 . (下) 群速度マップと地形を重ねて表示したもの .

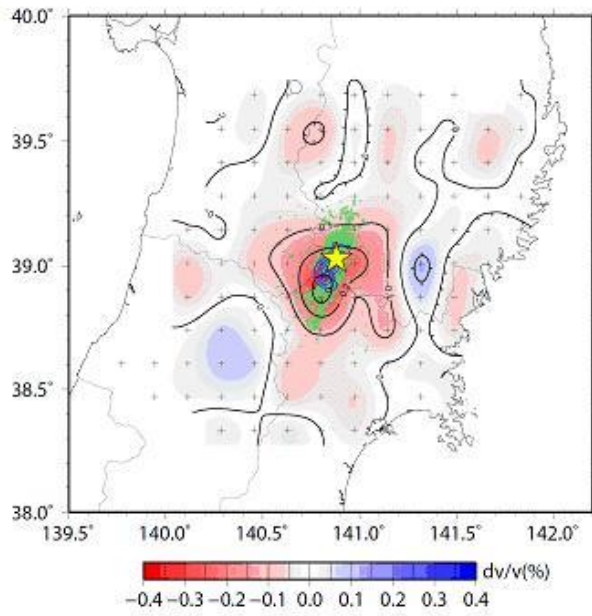


図 2-2 . 周期 2-4 s のレイリー波速度変化 (高木, 2010) . 2008 年岩手宮城内陸地震発生後について発生前からの速度変化を示す .

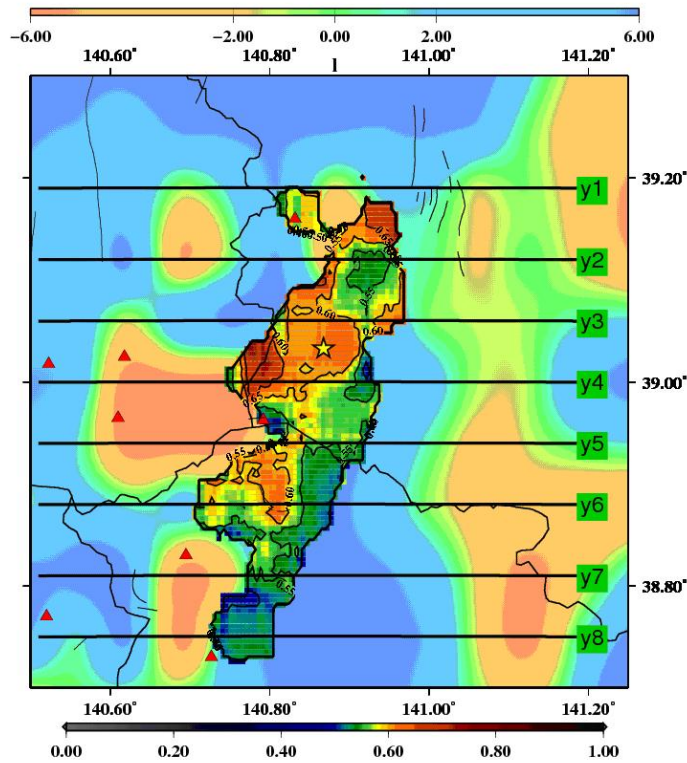


図 3-1 . 深さ 10 km における S 波速度偏差と $\sigma_{\text{p}} / \sigma_{\text{n}}$ の分布 (吉田, 2010) . S 波速度偏差 (岡田・他, 2009; Okada et al., 2010) をカラーで示す . 色のついた四角は, $\sigma_{\text{p}} / \sigma_{\text{n}}$ の平均値を求めたグリッドを表わし, カラーで $\sigma_{\text{p}} / \sigma_{\text{n}}$ の平均値を示す . ここでは $S = 3 / (1 - 3)$ を 1.0 と仮定した場合を示す . 本震震央と火山の位置を, 黄色の星と赤色の三角で示す . 黒色の太実線・細実線はそれぞれ県境と活断層を示す .

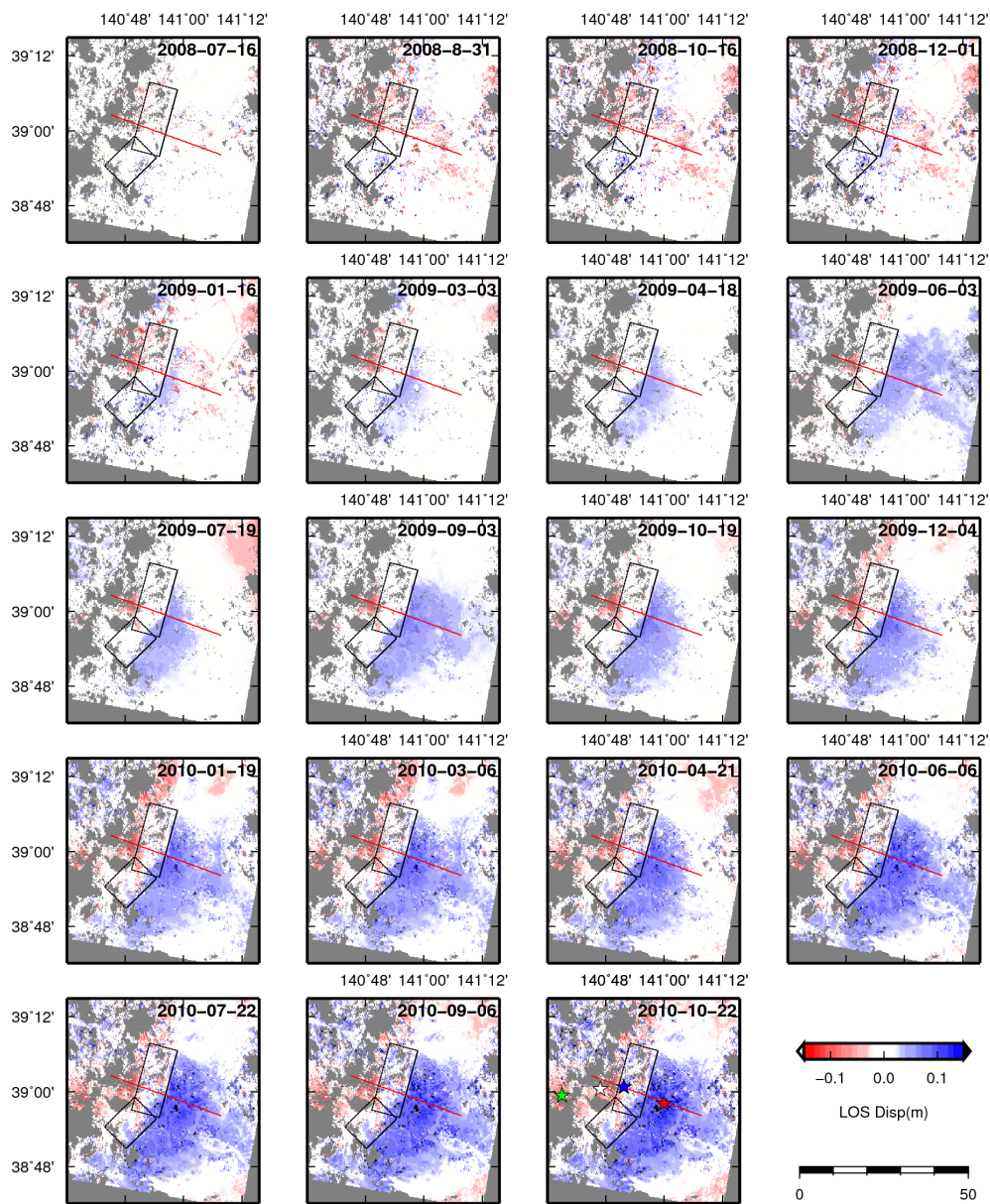


図 4-1 . 2008 年 7 月 16 日を起点とした 2010 年 10 月 22 日までの 46 日毎の累積変位量のスナップショット . 色は衛星視線方向 (南東から北西を見下ろした向き) の変位量を示し , 青色が衛星から遠ざかる方向 , 赤色が衛星に近づく方向を示す . 図中灰色部分は干渉性が低く , 変位量が得られなかった領域を示す . 黒矩形は , GPS データによって求められた地震時断層モデル (Ohta et al., EPS, 2008).

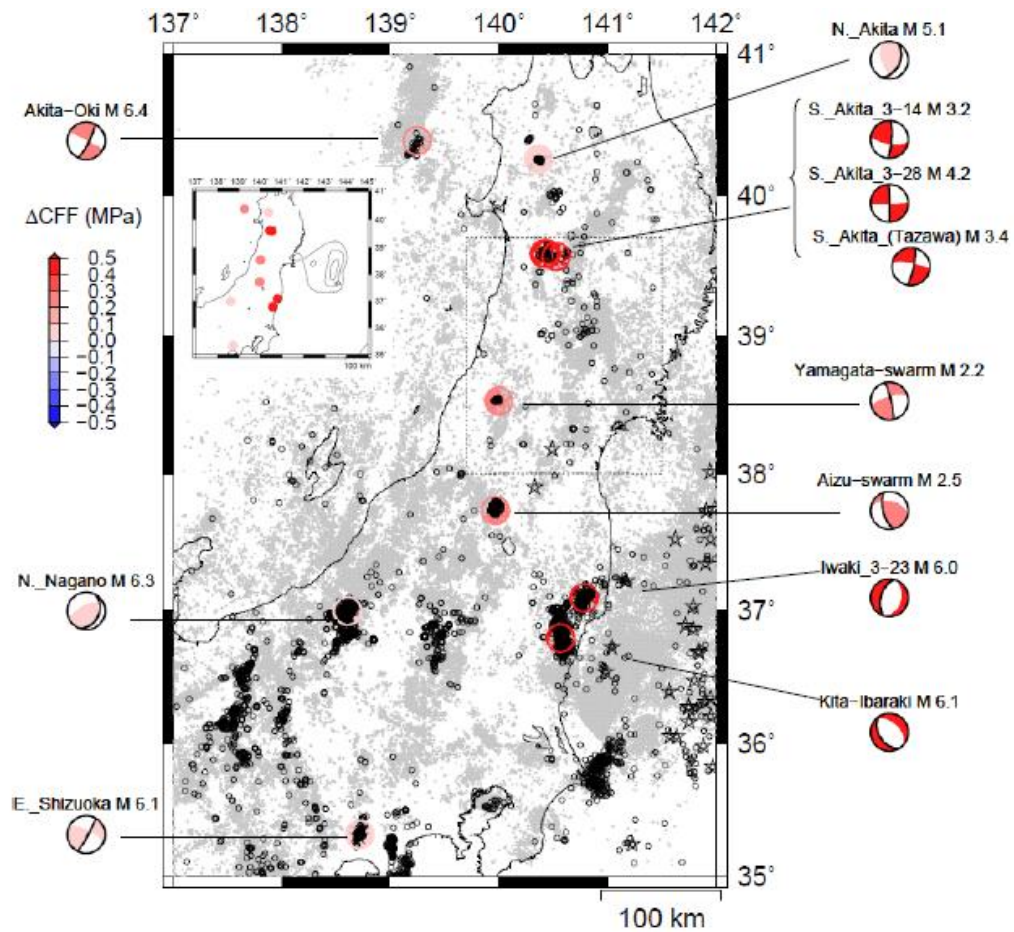


図 5-1 . 断層面とクーロン応力変化 (Okada et al., 2011) .

メカニズム解と震源分布などから推定される断層面 (太線で示す節面) に対するクーロン応力変化の値を の色で示す . Coulomb3.2(Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2005) を使用した . いずれの断層に対しても , クーロン応力変化については正の値が推定されている .

ここでは東北地方太平洋沖地震のすべり量分布としては , Hayes (USGS, 2011) を使用した (挿入図 : コンターはすべり量分布 (10m 間隔)) . 摩擦係数は 0.65 としている . あわせて , 気象庁一元化震源による 3/11-4/11 の深さ 20km より浅い地震の震央分布 (黒丸) , 灰色の は 3/11 以前の浅い地震の震央分布を示す . は M5 以上の地震を示す . 3/11 以降の活動は 3/11 以前に活動の高い領域およびその周辺におよそ見られる .