

(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ひずみ・応力分布を高い分解能で明らかにする．更にそれらを説明するモデルを構築することで，ひずみ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ひずみ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ひずみの時空間分布を推定し，ひずみ蓄積過程

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波スプリテッ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、ひずみ・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ひずみ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、ひずみ・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）や日本海沿岸のひずみ集中帯についても研究を進める、それらの比較により、ひずみ集中帯及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 観測によるひずみ集中帯の詳細なひずみ分布の推定。
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、及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、内陸地震のひずみ集中機構・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 観測によるひずみ集中帯の詳細なひずみ分布の推定。

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分かっており、また、奥羽脊梁山地のひずみ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分かっている。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ひずみ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、震源域及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及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、及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、震源域及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、内陸地震のひずみ集中機構・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及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至るひずみ蓄積・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) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

1) 東北地方内陸部の地殻変動

1-1) GPS 連続観測データ解析による 2008 年岩手・宮城内陸地震後余効変動

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に深い粘性的応答によるものであると仮定し、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。

1-2) PS-InSAR 時系列解析による 2008 年岩手・宮城内陸地震後余効変動(大下・他, 2013, 大下, 2012)

2008 年岩手・宮城内陸地震震源域の ALOS/PALSAR データに PS-InSAR (Permanent Scatterer, 恒久散乱体) 時系列解析を適用することによって、震源域周辺の地震後余効変動を時空間的に詳細に捉えた。H23 年度に実施した InSAR SBAS 法による解析によって震源域周辺の大局的な余効変動場の特徴は明らかになっていたが、特に震源断層上盤側の変位場は山間部の低干渉領域にあたりその詳細な地殻変動場は不明であった。そこで PS-InSAR 時系列解析を適用したところ、断層上盤側に 2 箇所、明瞭な短波長の変動域(雨田森および高松岳付近)が存在することが明らかになった。雨田森付近の短波長変動は非地震性の断層滑り、高松岳付近の変動は火山性の膨張源を仮定することでそれぞれ定性的に説明が可能であることが分かった。

1-3) キネマティック PPP 解析による東北地方太平洋沖地震に伴う純粋な地震時永久変位(平田・他, 2014)

東北地方太平洋沖地震に伴う純粋な地震時永久変位をキネマティック PPP 解析から抽出し、それと GPS 日座標値を比較することによって、地震直後の短期的余効変動を抽出した。またそれら得られた短期的余効変動から面積ひずみ分布を推定したところ、月山周辺域で周囲よりも膨張量が大きい特徴的な領域を見出した。

2) 東北地方中央部の電気伝導度構造(1203 参照, Ichiki et al., 2013)

東北地方中部の周期 20 秒から 20000 秒の MT データを用いて 3 次元電気伝導度構造モデルを推定した。栗駒・鳴子山下や月山下の下部地殻に顕著な高電気伝導体が推定され、いずれの地域においても高電気伝導体の縁に沿って低周波地震震源が発生していることを示した。火山体下を除くと上部地殻は高伝導、下部地殻は低伝導であるが、その境界の起伏が地殻中の D90 の起伏と調和的である。

3) 東北地方中央部の地震波速度構造

3 - 1) 岩手・宮城内陸地震震源域における地震波速度構造と地震活動(Okada et al., 2012)

合同余震観測グループによる稠密臨時地震観測点のデータを利用し、2008 年岩手宮城内陸地震の前震・本震・余震分布と周辺の詳細な速度構造について求めた。1) 本震震源周辺では余震は西に傾斜した分布と東に傾斜した分布が交差したような分布となる。その内本震直後の余震分布を見ると西に傾斜した余震の並びのほうが顕著であることから、主な断層面は西に傾斜したものであると考えられる。2) 直前の前震は本震の震源付近に位置する。1999 年頃からの先駆的活動域は西に傾斜した余震の並びの浅部に対応する。3) 本震震源周辺では、西に傾斜した余震の並びに対し、上盤側は低速度、下盤側は高速度となる。この傾向は 2003 年宮城県北部地震などのインバージョンテクニクスによると考える地震の特徴と一致する。地震時に大きく滑った領域は高速度域に対応する。4) 震源域の深

部には地震波速度低速度域が分布する．この低速度域の震源域の走向方向の広がりは震源域の広がりに対応することから，地殻下部での弱い領域の広がりが，地殻上部での震源域の広がりを規定していた可能性が考えられる．

3 - 2) 鳴子火山周辺域における地震波速度構造と地震活動(岡田・他, 2013, 田村・他, 2013, Okada et al., 2014)

鳴子火山周辺域に展開した稠密地震観測点のデータを使用し，鳴子火山周辺域の地震波速度構造を，自然地震トモグラフィ法および常時微動トモグラフィ法によって推定した．その結果，鳴子火山直下に地震波速度低速度域を確認した．鳴子火山は，2008 年岩手宮城内陸地震の震源域南端に位置するが，2008 年岩手宮城内陸地震の余震は，鳴子火山直下の地震波速度低速度域内には分布していないことが分かった．

3 - 3) 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地殻構造の時間変化(高木, 2010, Takagi and Okada, 2012)

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．その結果，地表付近の地盤構造に対応する構造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．

3 - 4) 日本海沿岸地域における地震波速度構造と地震活動(岡田・他, 2012)

本研究課題により設置した地震観測点に加え，日本海沿岸の庄内平野東縁断層帯およびその周辺の臨時観測，2011 年東北地方太平洋沖地震合同余震 観測や鳴子火山周辺の稠密地震観測など，周辺の定常観測点・臨時観測点のデータを使用し，震源決定および地震波速度構造の推定を行った．震源決定の結果，この領域の震源は，全体として，気象庁一元化震源に比べ数 km 程度浅くなる傾向にある．地震波速度トモグラフィによる速度構造からは，断層周辺域の地表付近から地殻浅部に低速度域が見られ，リフト期に形成された堆積盆を見ていると考えられる．また，地殻中深部にも地震波速度低速度域がみられる．庄内平野東縁断層帯付近では，断層の地表トレス付近から東に傾斜した低速度帯としてみる事ができる．震源の多くはこれらの低速度帯の周囲に分布している．一方，2011 年東北地方太平洋沖地震後にもいくつかの領域で地震活動の活発化が見られている．例えば，山形県中央部の月山付近では，5km 程度の広がりを持つクラスターがみられる．このクラスターにおいては，時間に伴う地震活動域の拡大がみられる．このクラスターの深部に地震波速度低速度域が分布することを考えると，この時間発展は流体の拡散によるものとして説明することができる．

3 - 5) 日本海沿岸地域における常時微動トモグラフィ(米川, 2012)

東北地方中央部日本海沿岸地域において，常時微動トモグラフィにより地殻浅部の地震波速度構造を推定した．その結果，秋田県沿岸に厚さ 5km を超えると推定される堆積層と思われる低速度域の分布を推定した．また，鳥海山直下の深さ 3km 程度に，冷却・固化したマグマと思われる高速度域を確認した．

4) 東北地方の応力場

4-1) 東北地方の応力場とその原因(1444, 1214 参照, 吉田・他, 2013a, Yoshida et al., 2013)

東北地方の東西(あるいは西北西 - 東南東)圧縮の応力場は，脊梁から背弧側のみにもみられることがわかった．一方，前弧域では，島弧方向に変化があり，北上山地と阿武隈山地では，1 軸がプレート収束方向を向いていない傾向にある．従って，内陸域の東西圧縮の応力場は，太平洋プレートの沈み込みでつくられるのではなく，北米プレートとユーラシアプレートの衝突に起因すると考えられる．

4-2) 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域の応力場の時空間変化(吉田, 2010, 吉田・他, 2013)

2008 年岩手・宮城内陸地震の稠密余震観測データからもとめられるメカニズム解を使用し，震源域での起震応力場を推定した．岩手・宮城内陸地震前の応力場は，ほぼ一様で最大圧縮軸が西北西 - 東南東を向く逆断層型の応力場が得られた．一方，岩手・宮城内陸地震後の応力場は，複雑な空間分布となっており，最大圧縮軸の方向が大滑り域を取り巻くように分布した．この解釈としては，1) 本震

滑りによる応力場の回転，2) 岩手・宮城内陸地震前の応力場での顕著な空間不均質性の2通りが考えられる．

4-3) コア試料を用いた応力測定法による応力測定

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．

5) 東北地方における内陸地震発生機構のモデル化

5-1) 東北日本全域における変形と断層形成過程のモデル化

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．そこで，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と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．また，ホットフィンガーでは応力が低く，フィンガーの間の領域で応力が高くなっている様子が再現でき，大地震は応力が高い領域で発生していることが理解できる．

5-2) 2011 年東北地方太平洋沖地震による東北日本弧における地殻の応答シミュレーション

2011 年東北地方太平洋沖地震による東北日本弧における地殻の応答を調べるために，これまで行ってきた不均質レオロジーを考慮した短縮変形のシミュレーションに対して，瞬間的に伸長させるモデル化を行った．生じるひずみの変化は不均質で，背弧側で大きいことが示された．

6) まとめ

本課題においては，2008 年岩手・宮城内陸地震の余効的変動を捉えるとともに，詳細な余震分布、震源域やその周囲の構造・応力場の時空間変化の推定を行った．今後は，2011 年東北地方太平洋沖地震の影響を稠密観測により継続的にモニタリングするとともに，今後得られる観測結果をモデルに反映していくことで，定量的なモデルの高精度化を推進していきたい．

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

長谷川昭・吉田圭佑・岡田知己，2013，東北沖地震による応力場の変化と断層強度 - 内陸地震の応力
載荷過程，地球惑星科学連合 2013 年大会.

Ichiki, M., Y. Ogawa et al., 2013A three-dimensional electrical conductivity model in the subduction zone
of Tohoku district, northeastern Japan, IAVCEI Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, July, 2013.

平田雄一郎，太田雄策，大園真子，三浦哲，2014，キネマティック PPP 時系列解析によって得られた
2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動にともなう特徴的ひずみ分布，日本地球惑星科学連合連
合大会 2014 年大会.

大下佑也，太田雄策，大園真子，岡田知己，出町知嗣，立花憲司，三浦 哲，海野徳仁，2013，PS-InSAR
時系列解析による 2008 年岩手・宮城内陸地震後の粘弾性緩和と局所的余効変動の検出，日本地
球惑星科学連合連合大会 2013 年大会,SSS25-04.

岡田知己・中島淳一・内田直希・山本希・堀修一郎・河野俊夫・中山貴史・平原聡・松澤暢・長谷川
昭，2014，稠密地震観測による鳴子火山およびその周辺域の地殻構造と 2011 年東北沖地震前後の
地震活動，2013 年日本地震学会秋季大会．

Okada T., Matsuzawa, T., Nakajima J., Uchida N., Yamamoto M., Hori S., Kono T., Nakayama T., Hirahara,
S. and A. Hasegawa, 2014, Seismic velocity structure in and around the Naruko volcano, NE Japan, and
its implications for volcanic and seismic activities, Earth Planets Space, under review.

Shibazaki, B., 2013, Tectonic loading processes affected by volcanoes for the 2008 Iwate-Miyagi intraplate
earthquake in northeastern Japan, Journal of Geodynamics, in press.

芝崎文一郎, 2013, 不均質レオロジー構造を考慮した島弧地殻における断層形成と応力蓄積過程のモデル化、地質学雑誌、印刷中。

田村淳・岡田知己・松澤暢, 2013, 常時微動を用いた地震波干渉法による鬼首・鳴子地域の速度構造, 2013年日本地震学会秋季大会。

吉田圭佑・長谷川昭・岡田知己, 2013a, 臨時観測データを用いて推定した東北日本の応力場-プレート収束と地形効果-, 地球惑星科学連合2013年大会。

吉田圭佑・長谷川昭・岡田知己・飯沼卓史・2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ, 2013b, 2008年岩手・宮城内陸地震震源域における応力場の顕著な空間不均質, 2013年日本地震学会秋季大会。

吉田圭佑・長谷川昭・岡田知己, 中島淳一, 2013c, 臨時観測データを用いて推定した2011年東北沖地震前後での東日本地殻内のS波偏向異方性構造, 日本地震学会2013年秋季大会。

(9) 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

(10) 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.gp.tohoku.ac.jp
URL: <http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/>

(11) 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

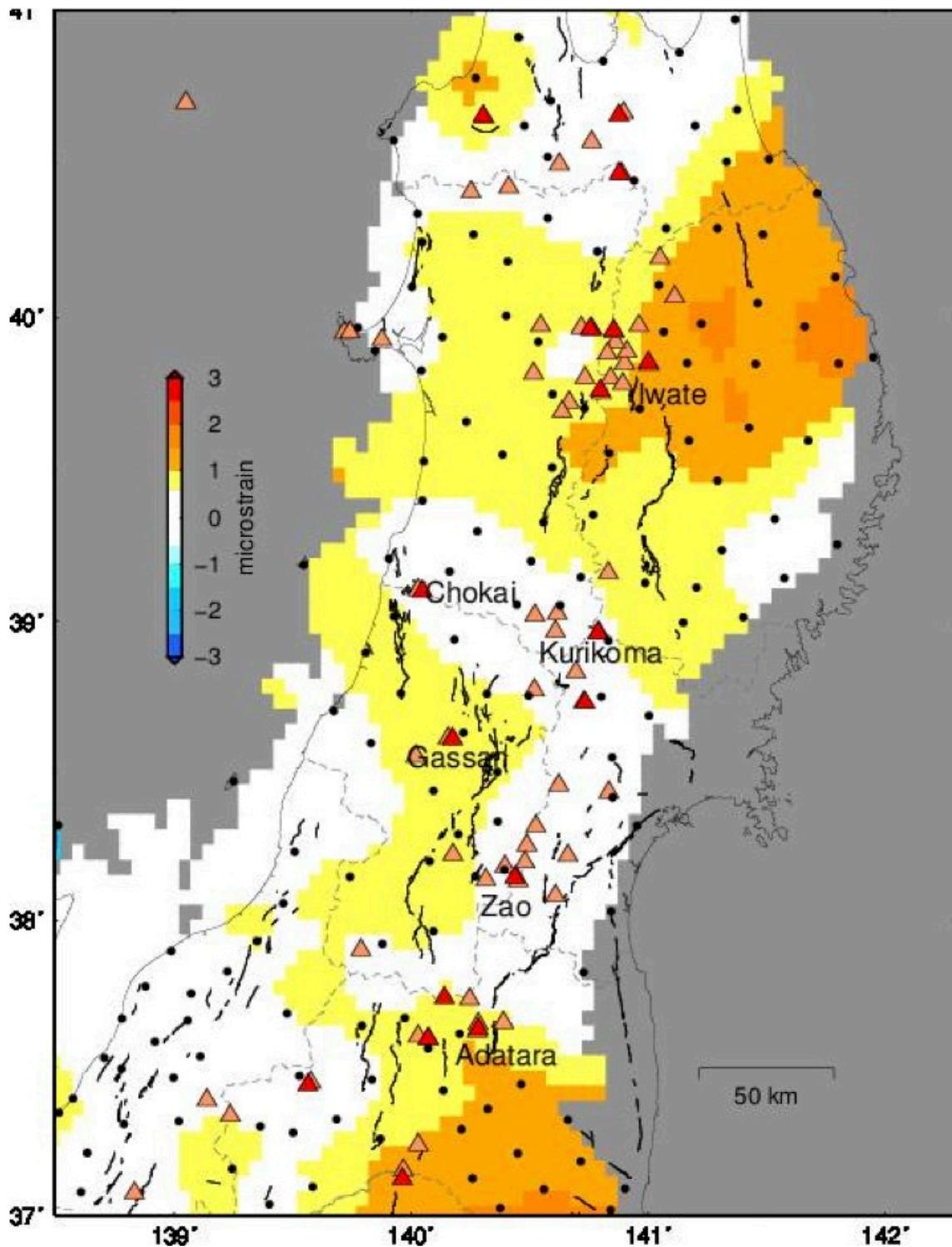


図 1 .

2011年東北地方太平洋沖地震時の1秒毎のキネマティックPPP解析から抽出した純粋な地震時永久変位と、3月10-15日の間の日座標値の差から推定した変位量の差から抽出した地震後余効変動にともなう変位データによる東北地方における面積ひずみ分布。暖色系が膨張ひずみ、寒色系が収縮ひずみを示す。岩手県および福島県における膨張ひずみは本震後に発生したプレート境界型の余震によるもの。月山周辺における膨張領域を顕著に確認できる。