

岩手山の火山活動及び岩手県内陸北部の地震 (M6.1) の 地殻変動と火山活動が地震を誘発した可能性について Crustal deformation and causal relation of the volcanic activity of Mt. Iwate and the northern Iwate earthquake (M6.1)

地理地殻活動研究センター 西村卓也・村上 亮・飛田幹男・中川弘之・鷺谷 威・多田 堯
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Takuya NISHIMURA, Makoto MURAKAMI, Mikio TOBITA,
Hiroyuki NAKAGAWA, Takeshi SAGIYA, Takashi TADA

測地観測センター 菅 富美男・藤咲淳一・田村 孝・佐藤博行
Geodetic Observation Center
Fumio SUGA, Jun-ichi FUJISAKU, Takashi TAMURA, Hiroyuki SATO

科学技術庁研究開発局 藤原 智
Research and Development Bureau, Science and Technology Agency
Satoshi FUJIWARA

要 旨

GPSと干渉SARによって岩手山周辺での火山性地殻変動と岩手県内陸北部の地震 (M6.1) にともなう地殻変動を詳細に明らかにし、これらの地殻変動モデルを推定した。その結果、1998年4月29日から9月2日までに岩手山の西方13kmの深さ8kmで3300万立方メートルの等方的な体積増加があったことがわかった。またクーロンの破壊関数 (CFF) を計算することにより、この体積増加が西根断層北端部での応力を増加させ、岩手県内陸北部の地震を誘発したことがわかった。

1. はじめに

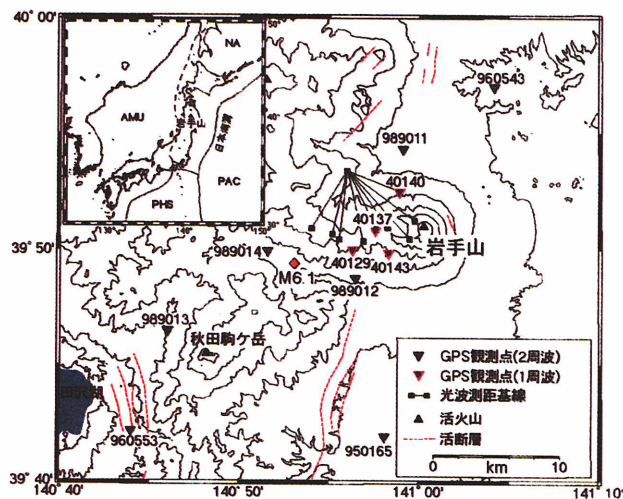
岩手山 (標高2038m) は、東北地方の脊梁山脈から東西に並ぶ岩手火山群の東端に位置し、玄武岩-安山岩質からなる成層火山である。岩手山は、その活動史から、20万年前から3万年前に活動した西岩手山と、3万年前以降に活動を開始した東岩手山に分類される (中川・外狩, 1999)。岩手山の西側及び西北西側には葛根田と松川の地熱地帯が広がっており、国内有数の地熱発電所があることが知られている。岩手山では有史以降、何回かの噴火が記録されており、1732年に北東山麓に焼走り溶岩流を噴出した山腹割れ目噴火が有名である。しかし、その後は260年以上にわたって本格的な噴火活動がない。

岩手山周辺では1995年から山体直下のやや深部 (8~10km) を震源とする低周波地震および微動が観測され

ていたが (中道, 1996)、1998年の2月中旬から山体直下の浅部の地震が増加した (田中・他, 1999)。同時に、岩手山が南北に膨張する地殻変動が観測された (多田・他, 1998; 植木・他, 1999)。5月からは岩手山の西側を中心とした隆起が観測され (例えば, 土井, 1999)、火山活動に対する緊張感が高まった。9月3日には岩手山の西南西約11kmを震源とする地震 (マグニチュード6.1) が発生し、雫石町長山で震度6弱を観測した (以下では、この地震をM6.1の地震と呼ぶ)。この地震の発生以降は、岩手山周辺での地震活動や地殻変動は落ち着いた状態が続いている。

国土地理院では、岩手山の火山活動の活発化を受けて、岩手山周辺に臨時のGPS観測点 (2周波受信機) を4点増設するとともに、自動測距・測角装置 (APS) や太陽電池と風力発電を電源としデータ通信に衛星携帯電話を用いた携帯型GPS観測システム (田中, 1999; 平井, 2000) を初めて導入して観測体制を強化してきた。また、地殻変動を面的に捕らえる技術として注目されている合成開口レーダ (SAR) の干渉処理によって、岩手山の西部で隆起を検出した (例えば, 国土地理院, 1999)。

本稿では、GPSと干渉SARによって捉えられた岩手山周辺の地殻変動の特徴を紹介するとともに、地殻変動を説明する火山力源モデルと断層モデルについて述べる。さらに9月3日に発生したM6.1の地震と岩手山の火山活動の因果関係が、応力変化によって説明できることを示す。



図－1 岩手山の位置（左上）と観測点配置図

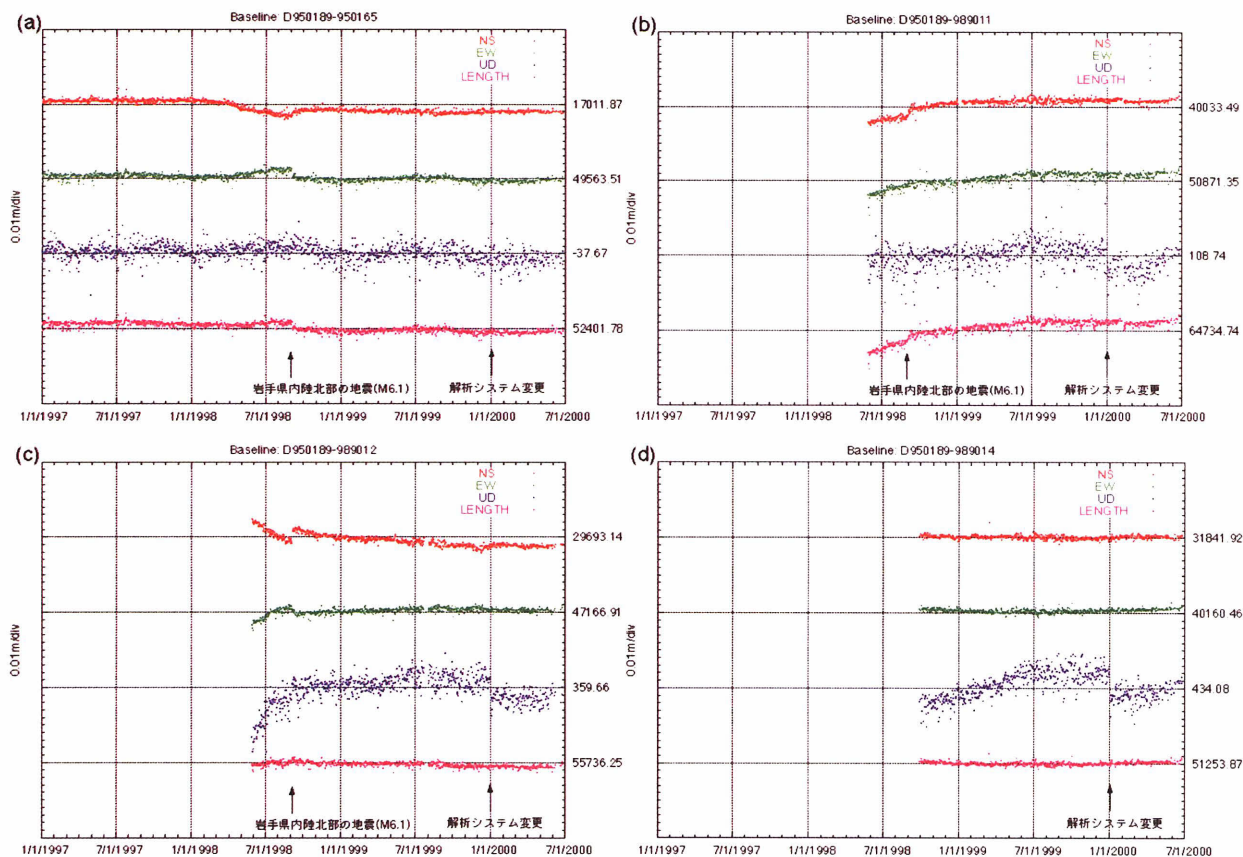
2. GPSで見た岩手山の地殻変動

岩手山周辺のGPS観測点（図－1）は、1998年の2月頃から、雫石（950165）で南向き、岩手松尾（960543）で北向きの変動が観測された。同じころから岩手山の浅部における地震活動も活発化した（田中・他, 1999）。し

かし、雫石、岩手松尾観測点とも、岩手山から10km以上離れているため、詳細な地殻変動の解明には十分ではない。そこで国土地理院では、岩手山周辺に臨時GPS観測点を設置し、M寄木（989011）、M西山（989012）、M田沢湖（989013）の3点で5月下旬から観測を開始した。またM葛根田（989014）では9月下旬から観測が開始されている。これらの4点は、Trimble社製の2周波受信機を用い、通常の電子基準点とともにルーチン解析（宮崎・畑中, 1998）に組み込まれている。

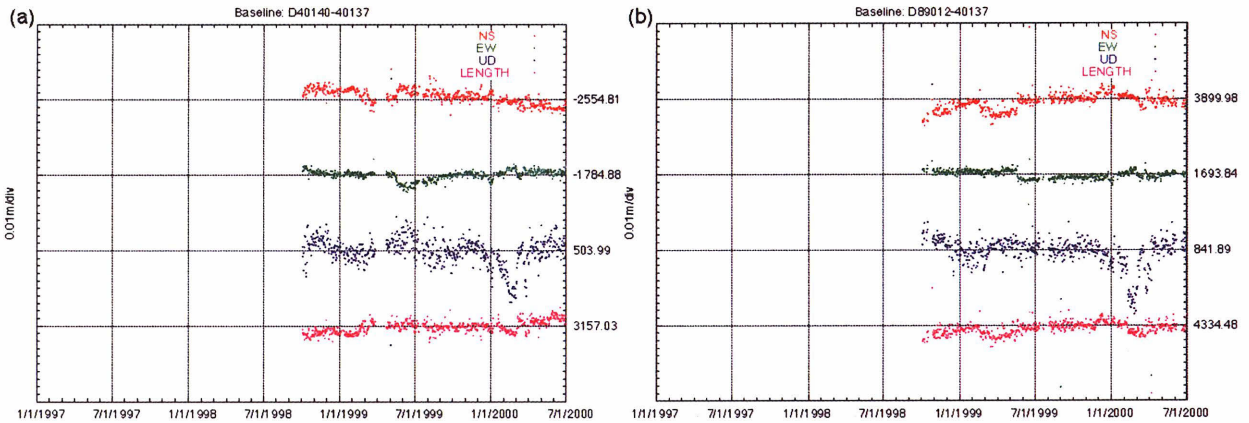
さらに詳細な地殻変動場を把握するため、国土地理院では、電力と通信の確保が難しい山間部に1周波型の受信機を用いた携帯型GPS観測システムを設置した。設置箇所は、網張（40129）、姥倉山（40137）、東八幡平（40140）、岩手高原（40143）の4点で、1998年10月上旬から観測が開始されている。これらの観測点では、電子基準点の解析とは異なり、WAVEソフトウェアを用いて基線解析が行われている。臨時観測点では、機器の不調に陥った網張観測点を除いて、現在まで観測が続けられている。

図－2および図－3に、岩手山周辺のGPS観測基線の時系列を示す。図－2の時系列は、岩手山の約50km南西に位置する西仙北（950189）を基準とした南北、東



図－2 岩手山周辺のGPS観測点（2周波受信機）の時系列。西仙北(950189)に対する基線を示した。

(a) 雫石(950165)観測点, (b) M 寄木(989011)観測点, (c) M 西山(989012)観測点, (d) M 葛根田(989014)観測点。



図－3 岩手山周辺のGPS観測点（1周波受信機）の時系列。
(a)東八幡平(40140)－姥倉山(40137), (b)M 西山(989012, 2周波受信機)－姥倉山(40137)。

西, 上下, 基線長の各成分が示したものである。観測期間の長い雫石(950165)の南北成分を見ると, 1998年の初めから始まった南向きの変動が4月末まで, 徐々に加速しているように見える。その後は, M6.1の地震の発生(1998年9月3日)まで, 南への変動が継続した。東西成分では4月末以降から東向きへの変動が始まっている。M西山(989012)では, 観測を開始した5月下旬からM6.1の地震発生までに南東に約4 cm変位した。M寄木(989011)とM田沢湖(989013)では, 同じ期間にそれぞれ北東約1.5cmおよび, 南西約2 cmの変位が観測された。上下変動は, M西山で約6 cm, M田沢湖で約2 cmの隆起が観測された。

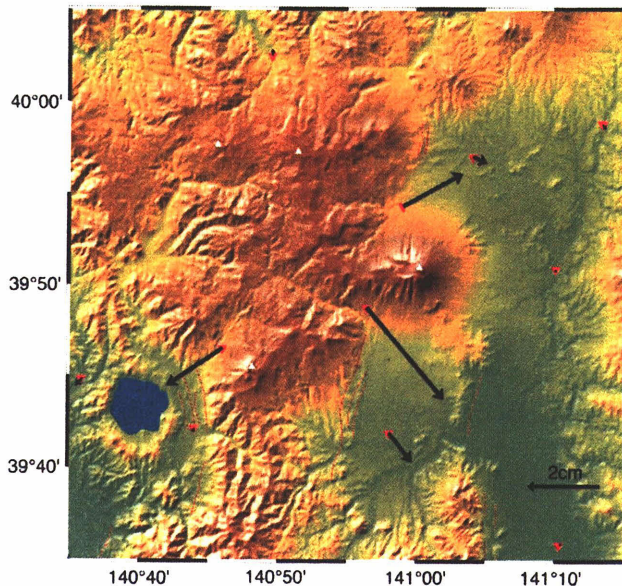
図－4に, M6.1の地震の前3か月の地殻変動のベクトル図を示す。矢印は, 6/1から6/10までの平均値と8/21から8/30までの平均値の差を, 西仙北(950189)固定で示したものである。この期間の地殻変動は, 岩手山

の西側を中心とした放射状のパターンを示しており, 地下での等方的な圧力増を示唆する。

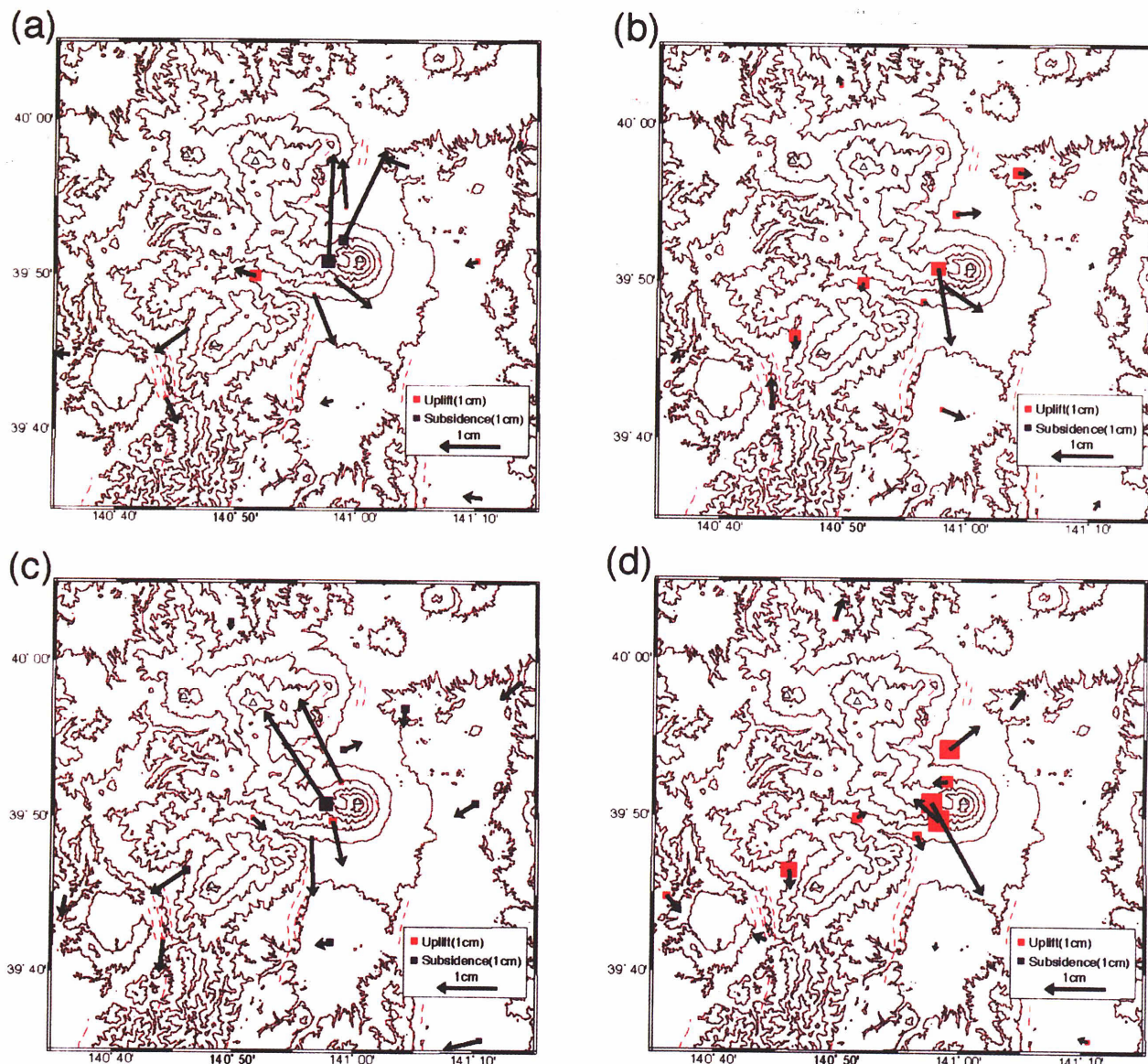
M6.1の地震の発生に伴う地殻変動は, M田沢湖で最大4 cmの変位が観測された。地震波形を用いた研究(例えば, 菊地・山中, 1998)から, この地震のメカニズムは, 東西圧縮の逆断層であることが示されている。GPSによって観測された変位も, このメカニズムに調和的なものであった。

M6.1の地震後は, 地震前に比べて地殻変動は小さくなった。図－5に地震後の変動ベクトルを示す。各図の期間は, 図－5-aは1998年10月1日から1999年2月10日まで。図－5-bは1999年2月1日から1999年5月19日まで。図－5-cが1999年5月10日から1999年12月31日まで。図－5-dが2000年1月1日から7月7日までとなっている。ベクトルは, 各期間の最初の10日間と最後の10日間の平均値の差を西仙北固定で示したものである。1周波GPS受信機の観測点のベクトルは, 同時に基線解析されているM西山に対する相対変位を求めた後に, M西山の西仙北に対する相対変位を加えて, 西仙北固定に変換している。GPSの時系列(図－2および図－3)には年周成分が存在し, 上下成分に特に顕著である。これらの年周成分は, 真の地殻変動ではなく, 大気遅延量の推定誤差による可能性が高い。図－4と図－5に示したベクトル図は, 期間が3～7ヶ月程度と短く, 年周成分の補正も行っていないので, これらのベクトル図から地殻変動を議論する場合はその点に注意する必要がある。図－3に示した1周波受信機の解析結果の再現性は, 2周波受信機には劣るが, 地殻変動観測に十分な精度を持っているといえる。2000年の1月から3月に顕著に見られるように冬場に擾乱が見られるが, 厳しい自然条件のためGPSアンテナへの着雪等によるものかもしれない。

図－5からM葛根田は, 顕著な水平変動は見られないが, 隆起傾向が各期間とも続いているように見える。その他の観測点のベクトルは, 期間ごとにばらついている



図－4 GPSによって観測された1998年6月～8月の水平変動



図－5 岩手山周辺でのM6.1の地震後の地殻変動。(a)1998年10月から1999年2月まで。(b)1999年2月から5月まで。(c)1999年5月から12月まで。(d)2000年1月から7月まで。

が、おおむね西岩手山を挟んでの南北伸張のパターンが見られている。地震後の地殻変動で特徴的なのは、1999年5月下旬からM寄木とM西山の基線で南北伸張の地殻変動が加速したように見えることである。この期間には、最大級の火山性地震（1999年5月22日、M3.6）が発生しており、地震数も一時的に増加した。また、姥倉山では、5月20日に北西約2 cmのステップが観測された。光波測距によっても調和的なステップが観測されており、受信機やGPSアンテナの不調によるものではないと考えられるが、変動の原因は不明である。

3. 干渉SARで見た岩手山の地殻変動

図－6 は、JERS-1（ふよう1号）に搭載されたLバンド（波長約24cm）SARの干渉技術を用いた地殻変動を

表している。干渉SARによる地殻変動検出の原理については、多くの論文（例えば、藤原・飛田、1999）があるので本稿では省略する。干渉図は色の1周期が11.8cmの人工衛星方向の変動を表している。変動の期間は図の下に書き込まれている。衛星の方向は、人工衛星が北から南に飛ぶ場合（南行軌道）と南から北に飛ぶ場合（北行軌道）で異なる（図－7）。図－6-a, d, e, fは南行軌道の衛星を用いた干渉図であり、図－6-b, cは北行軌道の衛星を用いた干渉図である。

図－6-aから、1998年4月30日までは人工衛星の視線方向に有意な変動がなかったことがわかる。4月から7月（図－6-b, d, e）にかけては、岩手山の西側を中心に人工衛星に近づく方向の変動が見られる。この期間は、GPSによって岩手山の西側から放射状に広がる変動が観

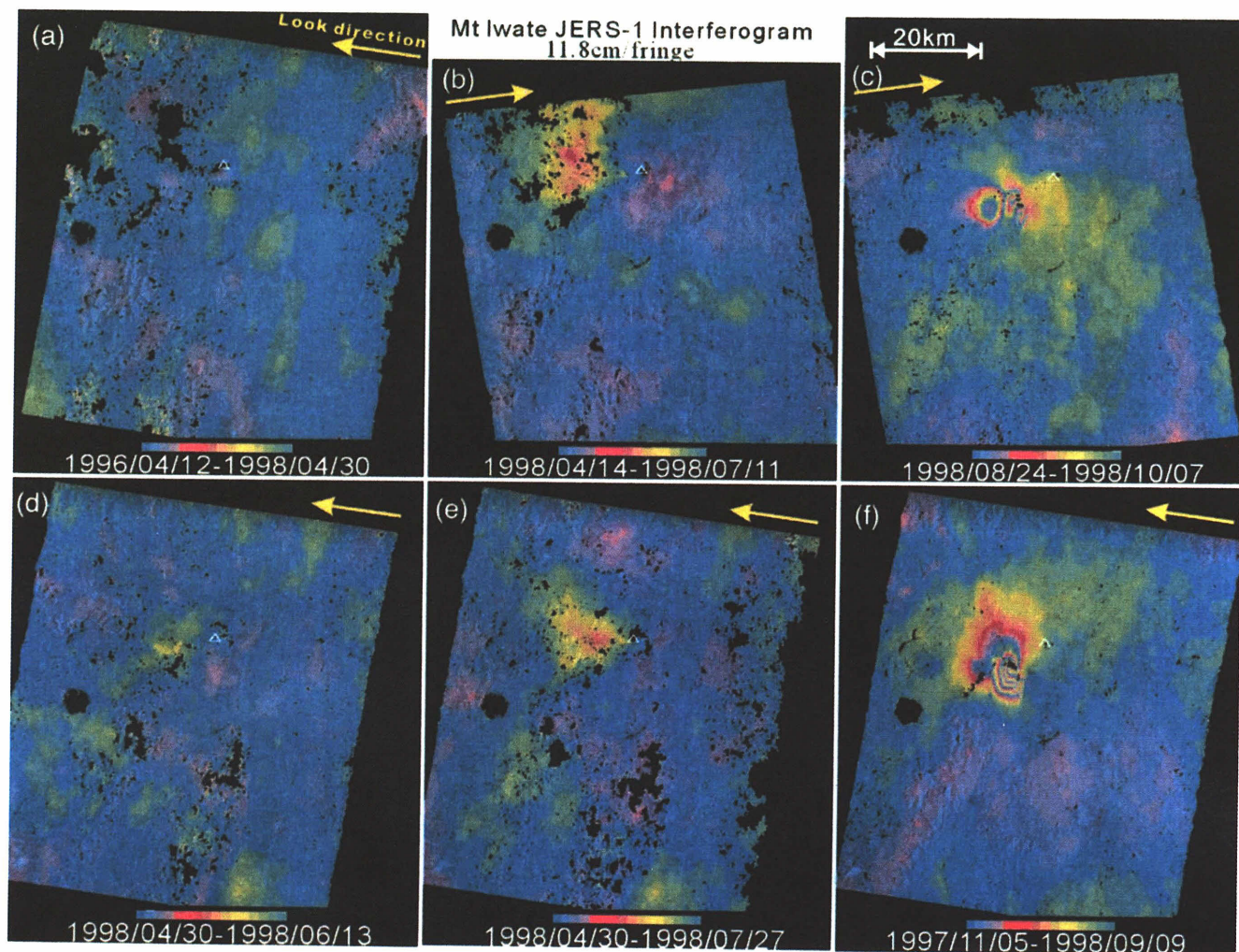


図-6 差分干渉SARによる岩手山周辺の地殻変動。三角は岩手山山頂の位置を表す。

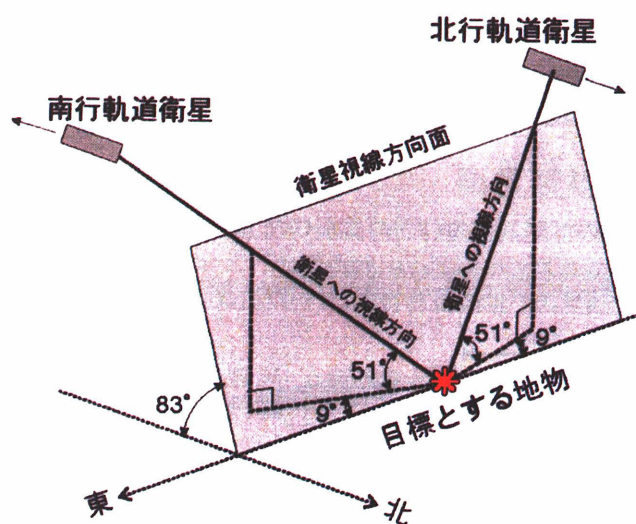


図-7 人工衛星の視線方向

測された時期である。また水準測量からも岩手山西側の葛根田周辺の隆起が観測されており、干渉SARの結果と

調和的である(土井・他, 1999)。図-6-cとfは、M6.1の地震を含む期間の干渉図である。この2つの干渉図は衛星の視線方向が異なるため、変動のパターンが違って見えるのは興味深い。図-6-fは、岩手山の西側の火山性変動を含んでいるが、干渉縞が密になっている場所は、地震にともなう地殻変動である。

干渉SARから得られる変動は、衛星への視線方向の1次元の量である。北行軌道衛星と南行軌道衛星の視線方向は異なるので、この2つの視線方向を含む面が定義できる(図-7の衛星視線方向面)。そして同じ変動を北行軌道の衛星と南行機動の衛星から観測することによって、衛星視線方向面内の2次元変動を求めることができる。Fujiwara et al. (2000)は、この変動ベクトル自体は2次元であるが、地表面上の非常に空間的に密な点で変動ベクトルを得ることによって、3次元空間内での変動に制約条件を与えることができると述べている。そこで彼らは、この地表面という2次元面上での2次元変動を2.5次元変動と名付けている。

図-6-cとfは、主にM6.1の地震にともなう変動を異な

る軌道の衛星からとらえたものであり、2つの干渉図からM6.1の地震に伴う2次元変動を明らかにすることができる。図-8は、図-6-cとfを組み合わせることによって得られた2次元変動である。図-6-fは岩手山の西側の火山性地殻変動を含んでいるので、図-6-eの変動分を差し引いて、近似的に火山性地殻変動を取り除いた。図-8-aとbは、衛星視線方向面内の変動を、それぞれ準上下成分（正確には、水平面から83度）と東西成分に分けて書いた変動図である。準上下成分（図-8-a）から、N39° 48' E140° 55' 付近で最大約40cmの隆起があったことがわかる。東西成分（図-8-b）からは、ほぼ同じ位置が約35cm東へ動いたことがわかる。これらの変動の大きい場所の北にある灰色の領域は、葛根田川の沢を挟む急傾斜地であり、画像の相関が悪く、変動を求められなかった領域である。東西成分の変動の大きい場所の南東側には、変位の急変する線を2本見いだすことができる。この2つの線は、ほぼN60Eの走行を示し、約1.5km離れて平行に存在する。東側の線は、地表調査によって確認されている篠崎地震断層（越谷・他、1998）に一致する。西側の線では、地表調査による断層は確認されていないが、変位の不連続の大きさは東側より大きく、葛根田川の北側にまで続いているように見えることから、地震断層だと考えることができる。

図-8-cは、図-8のaとb内に示してある1から6までの衛星視線方向面内での変動を、矢印で表したものである。2つの平行する不連続線は、断面4においてAとBで示した2か所において明瞭に認めることができ、これら

の不連続を境して、東側では西向き、西側では東向きの変動があったことがわかる。これはこの地震のメカニズムが東西圧縮の逆断層型であったことに調和的であり、2つの不連続線がともに地震断層であることを支持するものである。

4. 圧力源と地震断層による地殻変動モデル

前節までに述べたように岩手山周辺では、GPSと干渉SARによって、時空間的に稠密な地殻変動が明らかになっている。GPS観測からは、岩手山の地殻変動は1998年2月から始まっているが、干渉SARで有意な変動が観測されたのは1998年4月下旬以降である。衛星の視線方向からわかるように、GPSで観測された南北方向の変位は、干渉SARではほとんど検出できないため、1998年の2月から4月下旬までは、南北方向の変位のみが卓越する地殻変動が起こっていたと考えられる。4月下旬からM6.1の地震発生までの地殻変動は、岩手山の西側を中心とする放射状の水平変位と隆起が特徴的である。1998年4月29日には、顕著な群発地震活動が発生し、東北大学により岩手山の周囲に埋設されている傾斜計や歪計の記録も急変している（佐藤・浜口、1999）。そこで本稿では、4月29日以前と以降の地殻変動源をそれぞれ、開口割れ目（ダイク）と等方的な増圧（茂木モデル）と仮定して、パラメータの推定を行った。

地殻変動の理論値は、均質半無限弾性体を仮定したOkada（1992）による解析解を用いた。しかし、岩手山周辺では、観測点の標高差が大きく、実際の地殻変動は、

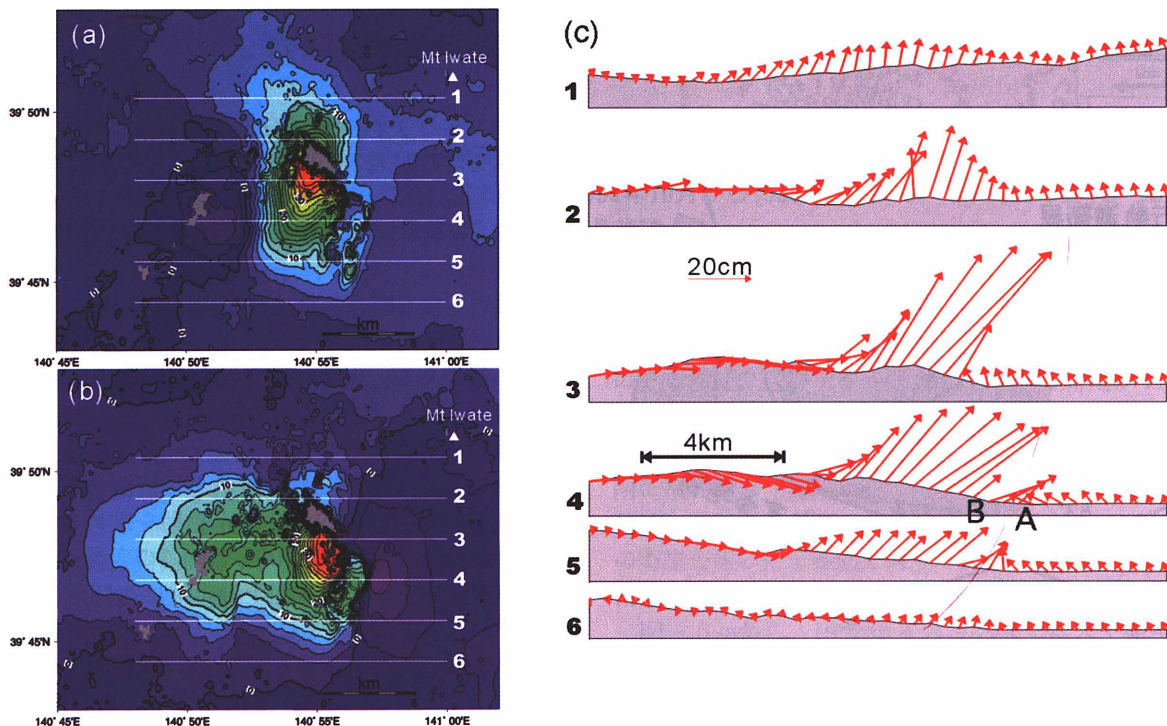
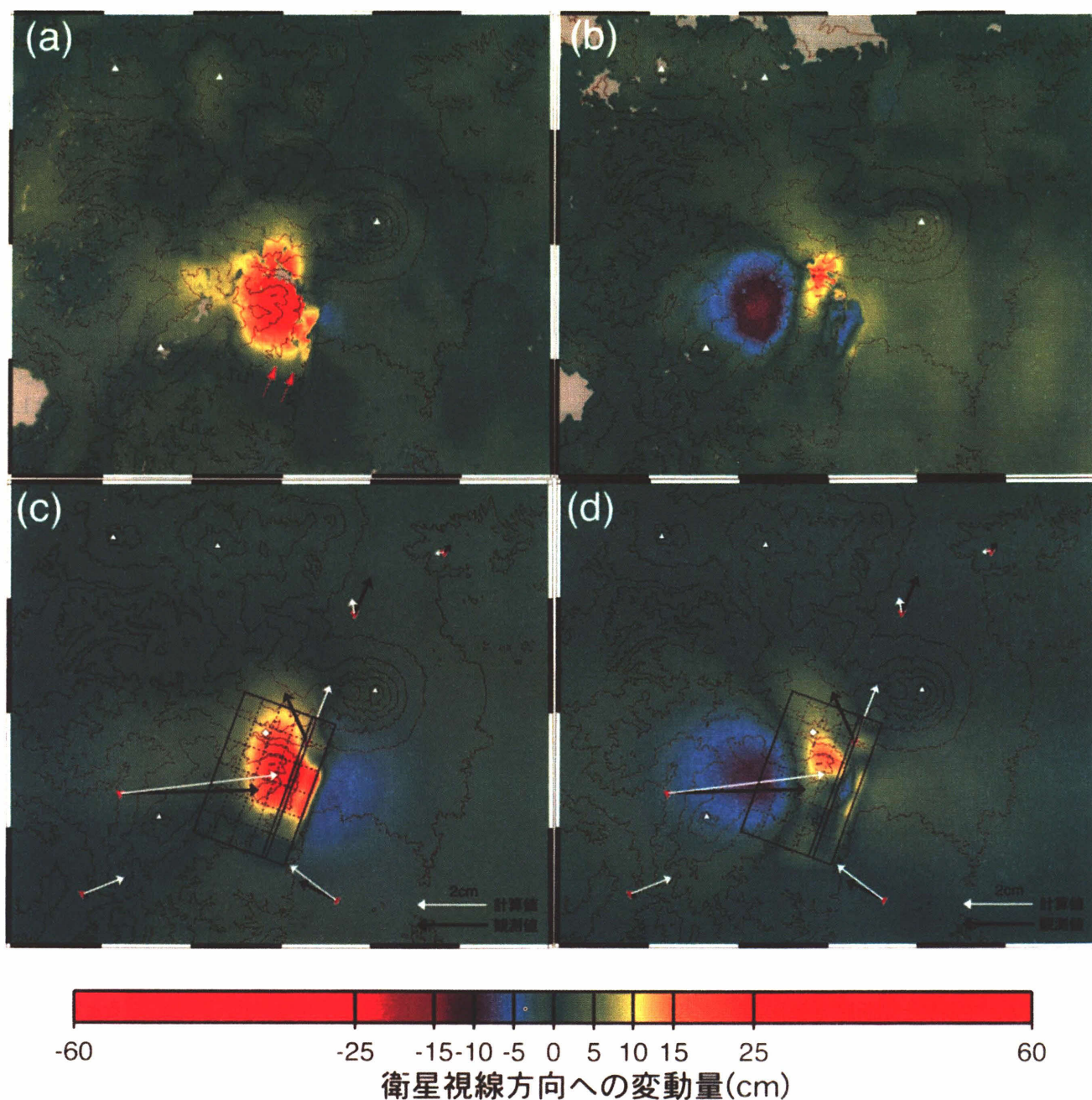


図-8 2つの視線方向の変動の組み合わせによって得られた岩手県内陸北部の地震(M6.1)の2.5次元変動図。

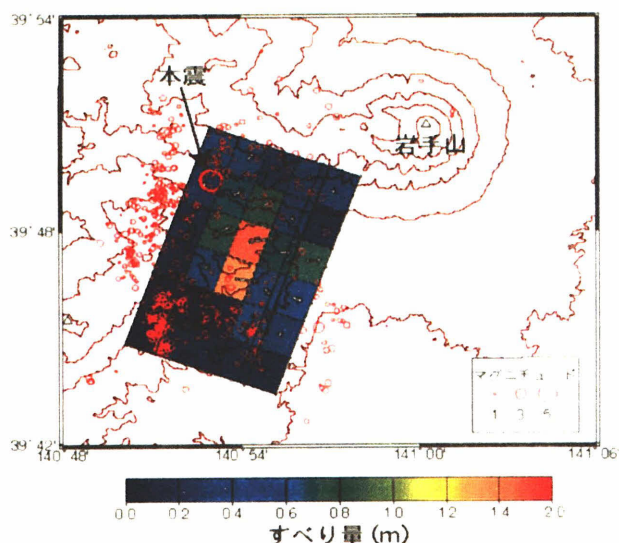


図－9 岩手県内陸北部の地震(M6.1)の地殻変動の観測値と計算値の比較。(a)南行軌道衛星から観測された地殻変動。(b)北行軌道衛星から観測された地殻変動。(c)モデルから計算される南行軌道衛星への変動。(d)モデルから計算される北行軌道衛星への変動

均質半無限弾性体を仮定した解析解との誤差が大きいと考えられる。そこで本研究では、Williams et al. (1998)によって提案された観測点標高を変動源の深さに加えて、近似的に地形の効果を取りいえる方法を用いた。パラメータの推定は、線形近似の最小二乗法(Gauss-Newton法)を用いた。

1998年4月29日以前の開口割れ目の推定に用いたデータは、図－6-a示した干渉SARと1999年1月1日から4月29日までの3観測点でのGPSの変位である。推定の結

果、岩手山山頂の約3km南西ではほぼ東西走行で垂直な割れ目が広がったことがわかった。4月29日から9月2日までの推定に用いたデータは、図－6-b,eに示した、視線方向の異なる2つの干渉SARである。推定された茂木モデルの位置は、岩手山山頂の西13kmの深さ7.9kmである。推定された体積変化量は、2600万立方メートルであるが、ここで用いたSARデータは7月までの変動なので、9月2日までの体積変化量はさらに大きいと考えられる。そこでGPSによって観測されているSARデータ期間の変



図－10 岩手県内陸北部の地震(M6.1)のすべり分布

動量と9月2日までの変動量の平均的な比が1.28であることを用いて、9月2日までの変動量を3300万立方メートルと推定した。茂木モデルの推定された位置は、葛根田、松川の地熱地帯に近い。こうした高地殻熱流量の熱源と茂木モデルで表される増圧したマグマだまりの関連性については今後の研究課題である。

1998年9月3日のM6.1に地震に伴う地表での地震断層は、ほぼ平行に2枚存在する。そこで地震断層を主断層と副断層の2枚の平面と仮定し、主断層の上端を西側の変位の不連続線(図－9-aの左の矢印)とし、副断層を篠崎断層(図－9-aの右の矢印)から低角に延ばして地下で主断層に接するようにとった。これは篠崎断層が主断層から枝分かれしたと考えたためである。断層の傾斜角、走行、長さ、幅は試行錯誤的に残差が小さくなるように決め、主断層と副断層をともに2 km×2 kmの正

方形の小領域に分割し、それぞれの小領域の中でのすべりの縦ずれ成分と横ずれ成分を推定した。その際、この地震のメカニズムは逆断層型であるの(例えば、菊地・山中, 1998)で、縦ずれ成分は負にならないような拘束条件を用いた。この推定に用いたデータは、図－9のaとbに示した干渉SARとGPS(7観測点)、そして光波測距(9測線)である。図－9のaは、図－6のfから、上で求めた茂木モデル分の火山性地殻変動を差し引いて地震のみの変動に補正したものである。図－9のbは図－6のcに示したものと色の付け方を変えているが、同じ変動を表している。

図－10に推定されたすべり分布を余震分布(海野, 1998)とともに示す。すべり量の大きい領域は、震央の南東の浅い領域に存在する。この量域でのすべり量は1.5 mに達しており、ほとんど余震が発生していない。逆に余震が多く発生しているのは、地震の時にすべりが小さかった領域となっている。この地震は、マグニチュードが小さい割には地表地震断層が出現する日本国内では例外的な地震であった。また、すべりの大きい領域が、浅部(深さ2 km)に存在する地震も珍しい。このような特殊性は、地熱地帯で地下が高温のため、脆性的な破壊を起こす地震発生層が薄いために生じているのかもしれない。この地震のモーメントマグニチュード(Mw)は6.0であり、地震波形も用いた推定結果(例えば、菊地・山中, 1998)よりやや大きめであった。ここで推定した地殻変動モデルのパラメータをまとめて、表1に示す。

5. 火山活動の地震誘発の可能性

岩手県内陸北部の地震(M6.1)は、従来から知られていた活断層である西根断層の北端部で発生した地震であり、マグマ活動が直接周囲の岩盤を破壊した火山性地震ではない。しかし、この地震は岩手山の火山活動の活発化し、火山性地殻変動が起こった場所で発生していることから、両者の間に何らかの因果関係があると考えらるこ

表－1 地殻変動から推定された断層パラメータ

用いたモデル	期 間	緯度, 経度	深さ(km)*	長さ×幅(km)	走行	傾斜角	すべり角	すべり量(m)	開口量(m)	体積変化量(×10 ⁶ m ³)
開口割れ目(ダイク)	1998年1月1日 ～ 1998年4月29日	N39.833° E140.966°	2.1	1.1×5.0	81°	89°	-	-	1.3m	7.2
茂木モデル	1998年4月29日 ～ 1998年9月2日	N39.872° E140.856°	7.9	-	-	-	-	-	-	33
地震断層(領域1)	1998年9月3日	N39.830° E140.950°	0	12×8	200°	40°	117° **	0.40**	-	-
地震断層(領域2)		N39.825° E140.967°	0	12×2	200°	15°	87° **	0.33**	-	-

* 海拔0mからの深さ

** 断層面での平均量

とができる。近年、地震や火山の変動が、次の地震を誘発するかどうかを評価する基準として、(1)式に示すような ΔCFF （クーロンの破壊関数の変化量）がよく用いられている（例えば、橋本，1997）。

$$\Delta CFF = \Delta \tau - \mu' \Delta \sigma_n \quad (1)$$

ここで、 τ は地震のすべり方向の剪断応力、 σ_n は地震の断層面の法線応力、 μ' は摩擦係数である。この ΔCFF が正の値を示せば、次の地震の発生を加速する応力変化が生じたことを示し、負の値であれば、次の地震は発生しにくくなることを表す。

図-11は、前節で求めた火山性の変動源である茂木モデルの増圧に伴う ΔCFF の空間分布を示したものである。 CFF を計算した地震のすべり方向は、図-10-dに示した震源球の赤い節面である。摩擦係数は0.4を用いた。ひし形で示した震源の位置では、 CFF が0.33Mpa増加したことがわかる。この応力変化は、この地震の応力降下量（菊地・山中，1998）の7%にあたる。すなわち、西根断層北端には、地震発生に必要な応力の93%が蓄積されていたが、岩手山の火山活動がさらに7%の応力を増加させたため、地震を誘発したとすることができる。

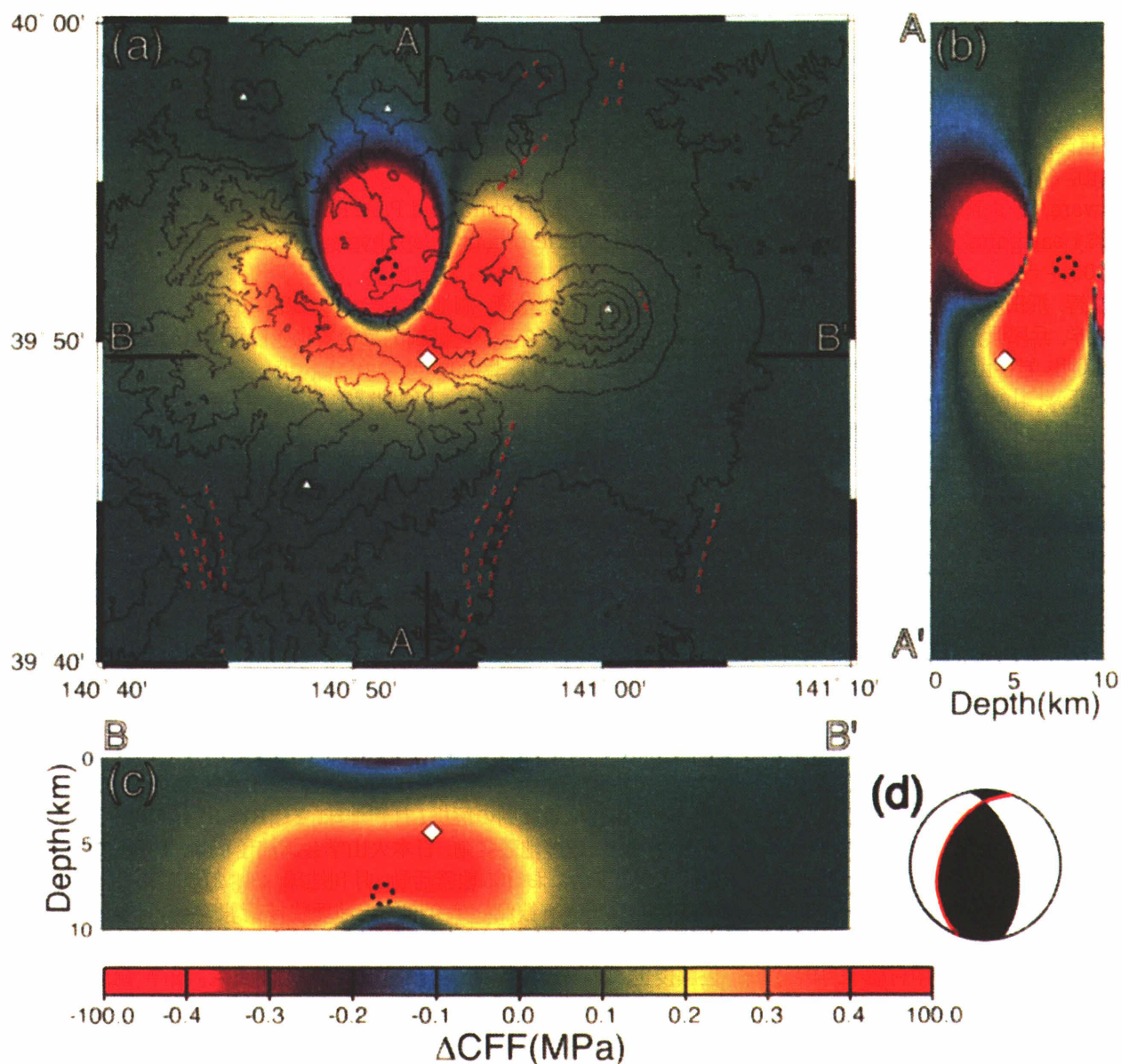


図-11 茂木モデルの増圧に伴うクーロン破壊関数(CFF)の変化。ひし形と丸は、岩手県内陸北部の地震(M6.1)の震源と茂木モデルの位置を表す。(a)震源を通る水平断面(深さ4.3km)。(b)震源を通る南北断面(東経140.902°)。(c)震源を通る東西断面(北緯39.819°)。(d)地震のメカニズム。赤の節面でCFFを計算した。

6. まとめ

1998年から活発化した岩手山の火山活動と1998年9月3日の岩手県内陸北部の地震(M6.1)の地殻変動を、GPSと干渉SARデータを用いて解析を行った。火山性地殻変動は1998年4月29日以前と以後でメカニズムが異なり、前者は開口割れ目、後者は茂木モデルでよく説明することが出来た。またクーロンの破壊関数を計算することにより、茂木モデルの増圧が岩手県内陸北部の地震を誘発したことがわかった。

現在岩手山では、地震活動や地殻変動は一時に比べかなり静穏な状態が続いている。しかしながら、噴気活動が盛んになるなど、1997年以前と比較すれば活動レベルは高い。岩手山のように噴火の再来間隔が長い火山では、

有珠山や三宅島で成功したような経験的手法に基づく火山噴火予知は難しいと考えられる。GPSや干渉SARによる火山の地殻変動観測は、始まったばかりであり、今後とも地殻変動の監視を続けてデータを蓄積していく必要がある。

謝 辞

GEONETのデータを解析している測地観測センターをはじめとする国土地理院職員の皆様に感謝いたします。測地部機動観測課の岩手山現地調査に同行させていただいたことは、研究の発展に大きな役割を果たしました。東北大学理学研究科の海野徳仁助教授には震源データを提供していただきました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 土井宣夫, 梶原竜哉, 青山謙吾, 水準測量による1998年9月3日岩手県内陸北部地震前の岩手山南西部の隆起運動, 火山, 44, 255-260, 1999
- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen, 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letter, 27, 2049-2052, 2000
- 藤原 智, 飛田幹男, 地表変動検出のための干渉SAR画像作成技術, 測地学会誌, 45, 283-295, 1999
- 橋本 学, 兵庫県南部地震に伴う応力変化: 断層モデルによるクーロン破壊関数の変化の修正再計算, 50, 21-27, 1997
- 平井英明, 岩手山における機動観測, 国土地理院時報, 93, 1-11, 2000
- 菊地 正幸, 山中 佳子, 98年9月3日岩手県内陸北部の地震 (Mj6.1), EIC地震学レポートNo.50, 1998
- 国土地理院, 人工衛星の合成開口レーダによって捉えた岩手山の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 61, 86-90, 1999
- 越谷 信, 大石雅之, 野田 賢, 奥寺勇樹, 加藤貴史, 滝口真一, 三田地喜之, 嶋守真紀, 斎藤徳美, 矢内桂三, 平野信一, 澤 祥, 福留高明, 佐藤比呂志, 大槻憲四郎, 長濱裕幸, 中村教博, 土井宣夫, 東郷正美, 栗田泰夫, 吉岡敏和, 1998年9月3日岩手県内陸北部の地震に伴う地震断層, 活断層研究, 17, 9-20, 1998
- 宮崎真一, 畑中雄樹, 国土地理院GPS連続観測システムの概要, 気象研究ノート, 192, 105-131, 1998
- 中川 光弘, 外狩英紀, 岩石学的な視点から見た岩手山: 最近の岩手火山のマグマ系と火山活動の特徴, 月刊地球, 21, 264-268, 1999
- Nishimura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, T. Sagiya, T. Tada, The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by Satellite Radar Interferometry, Submitted to Geophysical Research Letters, 2000
- Okada, Y., Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 1018-1040, 1992
- 佐藤峰司, 浜口博之, 1998年2~8月の岩手山の火山性地殻変動の解析, 月刊地球, 21, 312-317, 1999
- 多田 堯, 鷲谷 威, 小田切聡子, 西村卓也, 岩手山火山周辺の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 1998, No. 2
- 田中 聡, 中道治久, 浜口博之, 植木貞人, 1998年の岩手山における地震活動, 月刊地球, 21, 273-279, 1999
- 田中博幸, 岩手山の活動に関する研究-GPS火山活動リモート観測-, 第9回国土地理院技術報告会 (国土地理院技術資料A・1-No.210), 27-30, 1999
- 海野徳仁, 岡田知己, 中村綾子, 中島淳一, 佐藤俊也, 堀修一郎, 河野俊夫, 仁田交市, 植木貞人, 松澤 暢, 長谷川 昭, 浜口博之, 1998年9月3日岩手県雫石町に発生した地震 (M6.1) の余震分布, 活断層研究, 1-8, 1998
- 植木貞人, 三浦 哲, 佐藤俊也, 立花憲司, 浜口博之, 高密度GPS観測により解明された岩手火山の地殻変動, 月刊地球, 21, 296-301, 1999