

# 岩手山および三ツ石山周辺の1998年～2002年の 山体変動について

須藤 茂\*・斎藤英二\*・渡辺和明\*・安田 聡\*

(2002年11月18日受付, 2003年4月11日受理)

## Ground Deformation Monitoring around Iwate and Mitsuishi-yama Volcanoes, Northeast Honshu, Japan, during the 1998-2002 Activity

Shigeru SUTO\*, Eiji SAITO\*, Kazuaki WATANABE\* and Akira YASUDA\*

Ground deformation around Iwate and Mitsuishi-yama volcanoes was monitored by Electro-optical distance measurement (EDM), global positioning system (GPS), and leveling from 1998 to 2002. Repeated GPS observation data, which showed a four to six centimeter eastward movement of the summit of Iwate volcano in 1998 and 1999, are concordant with the interferometry SAR analysis by the NASDA, which showed the expansion around the Mitsuishi-yama in 1998. The leveling on the north side of Iwate and Mitsuishi-yama volcanoes also showed the upheaval around the Mitsuishi-yama between 1998 and 1999, and depression between 1999 and 2000. The automatic continuous GPS observation and data transfer system was developed in this study, and the data showed the depression of the Mitsuishi-yama area from 2000 to 2002. The direction of the depression was not straight downward, but the south or south-south-east at the rate of one to three centimeters a year. According to the extent of the deformation area, their source is thought to be at a depth around eight kilometers. A higher temperature granitic body of five hundred degrees centigrade or more has been already detected directly by drilling in the Kakkonda geothermal field, just south of Mitsuishi-yama. The addition of new magma to the granitic body or separation of gas from the magma possibly caused the expansion in this area in 1998 and 1999, but it may be difficult to explain the depression of this area from 2000 to 2002.

### 1. はじめに

1998年2月から、岩手火山直下を震源とする地震活動が活発になり、その後も消長を繰り返しつつ、岩手山からその西方の三ツ石山にかけての地域で継続した(東北大学, 2002など)。同じ頃から地殻変動も認められ、山体下深部で開口割れ目ができたことを示唆するデータが得られた(東北大学, 1998)。1998年6月24日に、盛岡地方気象台は、低周波の地震および微動の活動が活発になったことから、噴火の可能性もあるとの臨時火山情報第2号を出した。このような状況の中で、同年9月3日に、岩手県雫石町小高倉山付近を震源とする岩手県内陸北部地震が発生した。この地震では、地表にも断層が出

現し、地表の変位が干渉 SAR により求められ、地震による変位のほかに、岩手山西方の三ツ石山付近を中心とする隆起の変動があったことが報告された(島田, 1999)。また、その後、西岩手山では、噴気活動が活発になり(土井, 1999)、筆者らはこの地域に新たに熱水対流系が発達している可能性を想定した。このため、岩手山から三ツ石山にかけての広い範囲で、変動を観測するためのシステムを順次構築し、測定を続けたので、その結果と解釈について以下に報告する。

### 2. 岩手山-三ツ石山周辺の1998～2002年の活動の概要

1998年2月から岩手山体西側で地震活動が活発になった(仙台管区気象台・他, 1998)。また、同じ2月から、岩手山の下で南北に拡大する地殻変動があったことが観測された(東北大学, 1998; 国土地理院, 1998)。浅い地震の震源は、次第に、岩手山から三ツ石山にかけてのほぼ東西に延びる地域をほとんど埋めるように連続し

\* 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7  
産業技術総合研究所  
Geological Survey of Japan, AIST, 7-Central, 1-1-1  
Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan.  
Corresponding author: Shigeru Suto  
e-mail: shigeru.suto@aist.go.jp

て分布するようになった（仙台管区気象台・盛岡地方気象台, 2001; 東北大学, 2001 など）。

1998年4月からは、岩手山の南と北西のモホ面付近の深さ（約30 km）で低周波地震が急増した（東北大学, 1998）。モホ面付近の地震の震源は、岩手山の南約10 kmと北東約13 km付近の地下にそれぞれまとまって分布しており（東北大学, 1999）、深さ10 km付近より浅い岩手山直下の地震の震源とも連続せず離れていた。

1998年の4月と7月の間には、リアルタイムでは明らかにされなかったが、干渉SARによって三ツ石山付近を中心に、最大10 cmのオーダーの隆起活動が起きていたことが、1998年9月の地震後に報告された（国土地理院, 1998; 島田, 1999; 宇宙開発事業団地球観測研究センター・名古屋大学, 1999）。

1998年9月3日に岩手県内陸北部地震が発生し（気象庁地震予知情報課, 1999 など）、西根断層群の北端に、最大落差30 cmの西上がりの逆断層が地表でも認められた（越谷・他, 1998）。干渉SARによる解析によれば（国土地理院, 1998 など）、逆断層により相対的に隆起した区域は、東西5 km、南北9 km程度の比較的狭い範囲であり、脊梁山脈全体が隆起したわけではなかった。Fujiwara *et al.* (2000) は、より詳細な干渉SAR解析により、この変動が単純な1つの地震断層によってもたらされたものではなく、複数の複雑な断層によるものであることを明らかにした。

土井・他(1999)は、葛根田地熱発電所から南東に伸びる水準測量路線での、1980年7月から1998年8月までの測定結果から、葛根田側は、岩手県内陸北部地震前の顕著な隆起を除くと概ね沈降が継続していたことを明らかにした。

1999年4月には、岩手山頂部西部の黒倉山から姥倉山にかけての区域で、噴気活動が活発になっているのが観測され（土井, 1999）、それ以後継続して噴気活動が認められている（仙台管区気象台・盛岡地方気象台, 2001）。

### 3. 地質・構造の背景

三ツ石山は、東北日本の脊梁山脈上に位置している。岩手山はそれよりやや東に突き出た位置に相当する。この地域の地質は、上村・他(1985)、須藤・石井(1987)、須藤(1992)などに、また、活構造については活断層研究会(1980)にそれぞれまとめて示されている。それらによれば、岩手山、八幡平、秋田焼山、秋田駒ヶ岳で囲まれる地域は、新第三紀末-第四紀の火山が多く分布し、活発な地熱徴候が多く認められることから、仙岩地熱地域とも呼ばれている。この地域全体を通じては、少なくとも過去約300万年間は火山活動は連続的に起きており、

特に200万年前と100万年前には現在の秋田焼山付近を噴出源とする珪長質大規模火砕流の噴出があった。岩手山、秋田焼山、秋田駒ヶ岳では、有史の噴火活動が認められている。この3火山が、仙岩地域の東、北、南の端にそれぞれ位置していることから、噴出活動の場が次第に中心から外側に移動したようにもみられるが、そのような系統的な傾向はなく、岩手山とその西方の火山群についても、岩手山から西に行くにしたがって順次噴出年代が古くなるように単純に並んでいるわけではない。三ツ石山火山噴出物の年代として、 $0.46 \pm 0.05$  MaのK-Ar年代が得られている（須藤・他, 1990）。この噴出物の中には火山体の形状が不明瞭な100~300万年前の火山岩が分布している。三ツ石山の北東には松川、南西には葛根田の優勢な地熱地域があり、それぞれ地熱発電所が稼働している。発電に使用される地熱の流体は、いずれも新第三系中の割れ目から供給されている。両地熱地域の直近で特に新しい火山が形成されていることはない。ただし葛根田地熱地域の地下には、試錐調査により、現在の温度が500°C以上の超高温岩体が存在することが明らかになっている（Uchida *et al.*, 1996）。

脊梁山脈の東縁には、ほぼ南北走向の西根断層群、東八幡平付近断層および松尾断層がある（活断層研究会, 1980）。重力調査によっても（駒澤・他, 1987）、零石盆地および松尾村付近には低重力異常域である固結度の弱い堆積物からなる堆積盆が分布し、脊梁山脈側とは密度基盤の深度に大きな落差があることが認められている。ただし、三ツ石山から岩手山にかけての区域では、地表では明瞭な南北走向の活断層は認められていないし、密度基盤の段差も明瞭ではない。

この地域の、脊梁山脈を挟んだ反対側の秋田県の生保内<sup>おほほ</sup>内では、1896年の地震断層が認められている（活断層研究会, 1980）。西根断層群で地震断層が確認されたのは、1998年の岩手県内陸北部地震が初めてである。

1998年2月から浅い地震の活動が活発になった部分の西端付近の地下には、すでに述べたように、高温岩体が存在することが、実証されている。また、それより東方でも、試錐により地下温度は周囲に比べて高温であることが認められており（須藤・石井, 1987; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1993）、葛根田の東から網張温泉周辺にかけての坑井の多くは伝導卓越型の温度分布を示し、海水準下1 kmの温度が300°Cを超える坑井もある。これより南では、玄武温泉付近の坑井調査により、より低温であることが確かめられており（新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1993）、高温域は南に張り出してはいないものと思われる。

すでに葛根田地熱発電所付近の地下では、地震が起こ

らない高温部分が検出されている (Tosya *et al.*, 1998) が、それは東方にも延長され、1998年からの一連の浅い地震の活動域の内、西側の部分では、より深所では破壊は起きなかったものと推定される。

また、1998年9月3日の岩手県内陸北部地震の断層面の北端が、上記の高温域で限られていることも、高温であるために破壊が起きなかったと解釈すると矛盾ない。三ツ石山と岩手山の間には活断層が認められないことも、同様の考えで説明できる可能性もある。

4. 変動観測の方法

岩手山から三ツ石山にかけての変動の実態を明らかにするために、これらの地域を取り巻くように山体変動観測網を設置した。測定は光波測距、GPS観測、および水準測量の3つの方法を用いた。

4-1 光波測距

光波測距は、岩手山の南北両山麓、計2点の器械点から、それぞれ自動連続で、山体側の反射鏡との距離を測定するシステムを設置した (Figs. 1, 2)。測線は、東および西岩手山のいずれかでも膨張の変動が起きたときに検出できるような方向に設定した。北側の器械点 KRY2 から山側の反射鏡 BBO, CUS, YKS、および DFA 並びに

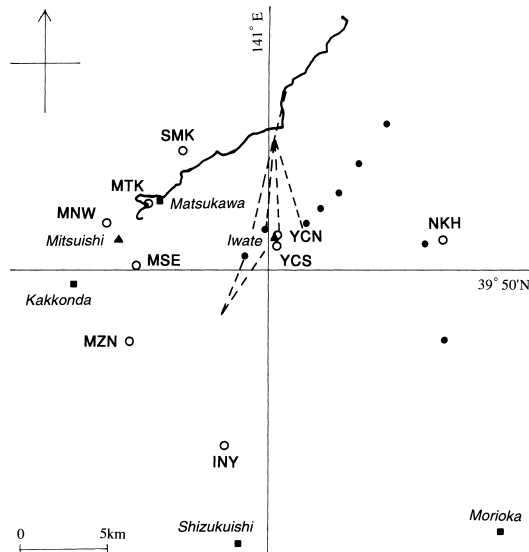


Fig. 1. Locality map. Broken line: EDM measurement line, open circle: continuous GPS station, solid circle: repeated GPS station, solid line: route for leveling, solid triangle: summit of the mountain, solid square: name of a place.

図1 調査位置図。破線：光波測距測線、丸印：GPS測定点（白丸：連続測定、黒丸：繰り返し測定）、大線：水準測量路線、黒三角：山名、黒四角：地名。

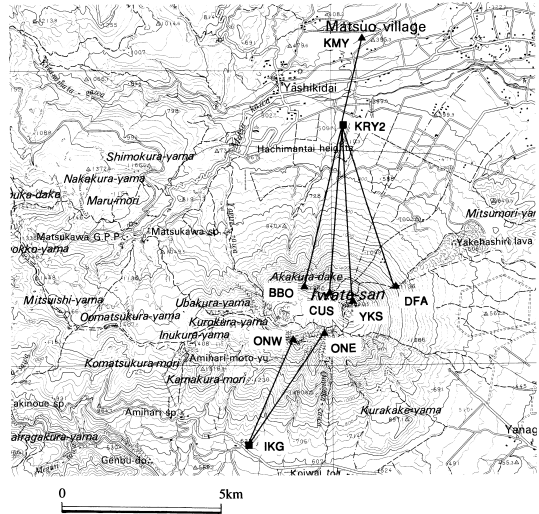


Fig. 2. EDM network. Square: instrument station, triangle: reflector target.

図2 光波測距測線図。四角：器械点、三角：反射鏡点。旧地質調査所地殻熱部作成の地形図「Hachimantai Geothermal Field」を使用。

反対の平野側の反射鏡 KMY の間の斜距離は、1998年10月からライカ社製 TCA1100/226 により、自動連続観測で測定した。南側の器械点 IKG では、1998年6月に測定を開始したが、観測点の機器を1999年5月に移動再設置し、反射鏡 ONW および ONE との間の斜距離をライカ社製 TCA1100 により自動連続測定で再開した。気象補正は、両地点とも器械点のみの温度および気圧値を用いて行った。

4-2 GPS 繰り返し観測

GPS観測は、繰り返し測定と連続測定の2つの方法を用いた。繰り返し測定は、岩手山頂から東麓にかけての計9地点で行った (Fig. 1)。GPS受信機は、いずれも2周波型の、ライカ社製 SR399 およびトリンプル社製 4000 SSi を用いた。調査開始時には、岩手山付近では、南北に広がる変動がすでに報告されていたために (東北大学, 1998 など)、変動の影響が小さい近隣の電子基準点として、岩手山頂の東方約14kmにある国土地理院の観測点「玉山」を参照点にし、国土地理院より同点のデータの提供を受けた。測定は1998年6月から、1999年5月まで、測定点の全部または一部について計5回実施した。なお、測定点の全部で観測したのは最終回のみであり、欠測が多い。各点の測定時間は30分から2時間であり、解析は放送層を使用し、RINEX形式で、ライカの SKI ver. 2.1 により、2周波解析で行った。

4-3 GPS 連続測定

GPS連続測定は、岩手山山頂の薬師火口の南北火口壁



に各1点, 三ツ石山をはさむ北西および南東に各1点, およびそれらを取り巻くように5点の計9点に, 測定機器を配置した (Fig. 1). そのうち, 7点にはデータ転送装置を取り付けた. SMK および MTK の2点では, 現地収録方式とし年3~4回の頻度でデータを回収した. 測定は1周波型の古野電気社製 MG21 で行った. 測定は1999年9月から開始し, 継続して行った.

上記のGPS連続測定を実現するために, 本研究では, 火山などの自然災害発生の多い山間僻地においても地殻変動データをリアルタイムで転送できるように, 小型軽量で, 消費電力の少ないシステムを採用した. 部品はすべて人力で可搬のものとした. 公衆電話回線が使用可能である NKH および INY のデータは, 直接電話回線を通じて回収し, YCN および YCS の2点のデータは, 中継点を介して無線で NKH へ, MNW, MSE, MZN の3点のデータは, 無線で INY へそれぞれ転送した後, いずれも電話回線を通じて回収した.

#### 4-4 水準測量

水準測量の調査路線は, 岩手県松尾村の松尾八幡平から同村松川温泉南西の県道雫石八幡平線終点までの延長26.6 km, 標高差約 823 m である (Figs. 1, 3). 測線は, 三ツ石山付近を中心とする変動をとらえられるように設定した. すでに三ツ石山から岩手山にかけての南側には別な機関の水準測量路線が設定してあったので (名古屋大学・他, 2000; 土井・他, 1999), 本研究ではこれに対

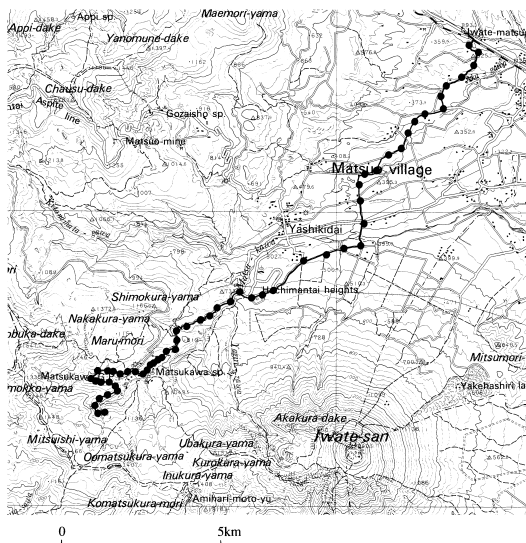


Fig. 3. Route for the leveling. Solid circle shows the locality of tacks for the measurement.

図3 水準測量路線図. 黒丸印は鉞設置地点. 旧地質調査所地殻熱部作成の地形図「Hachimantai Geothermal Field」を使用.

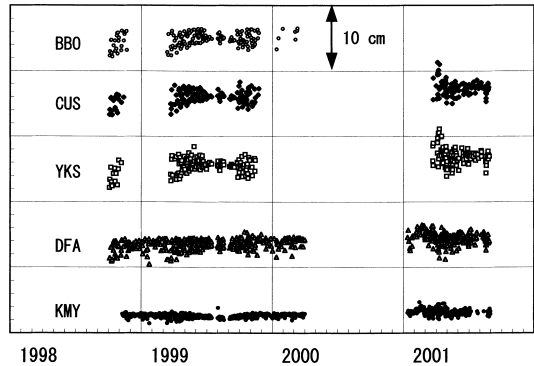


Fig. 4. Relative change in slope distances on the north of Iwate volcano. Selected data between the instrument station KRY2 and each reflector target under a stable atmospheric condition in the evening are plotted.

図4 岩手山北側の光波測距結果. 器械点 KRY2 から, 各反射鏡点の斜距離の相対的な変化を示した. 大気の状態が比較的安定している日没後のデータのみをプロットした.

応するように北側に設定した. 調査には, 一級水準儀カールツァイス社製 NI002 を用いた. 調査路線上の道路脇の堅固な建設物や自然石に標識を設置した. 標識の間隔は平野部では約 500 m, 路線南西部の山岳地域では, より詳細な変動の解析を行うために約 250 m とし, 計 58 点に測量用の鉞を設置した. 基準点として, JR 松尾八幡平駅北方にある国土地理院の水準点 (番号 5914) を使用した. 調査は, 1998年11月12~23日, 1999年10月12~19日, および2000年10月10~18日に行った. 測量の許容精度は,  $2.0 \text{ mm} \sqrt{s}$  ( $s$  は片道の距離, km) であり, 実際に観測して得られた往復 1km 当たりの往復差は, 最大でも  $\pm 0.40 \text{ mm}$  以内であった.

#### 5. 光波測距結果

岩手山南側の測定では, 途中で器械点の位置を移動させた. 北側の測定結果のみを Fig. 4 に示す. 図に明らかなように, 測定期間内においては, 器械点と各反射鏡点の間には顕著な変動は認められない.

この結果は, 次に述べるように, 一連の変動の中心が三ツ石山付近にあった場合, 今回設定した測線の方向が, 変動のベクトルと直交に近くなったため, 顕著な変動が検出されなかったものと推定される.

#### 6. GPS 測定結果

繰り返し測量の結果のうち, 測定した季節が同じである 1998年6月と1999年5月の比較による変動の結果が得られた3点 (岩手山頂南西の SW, 同北西の NW1, 北

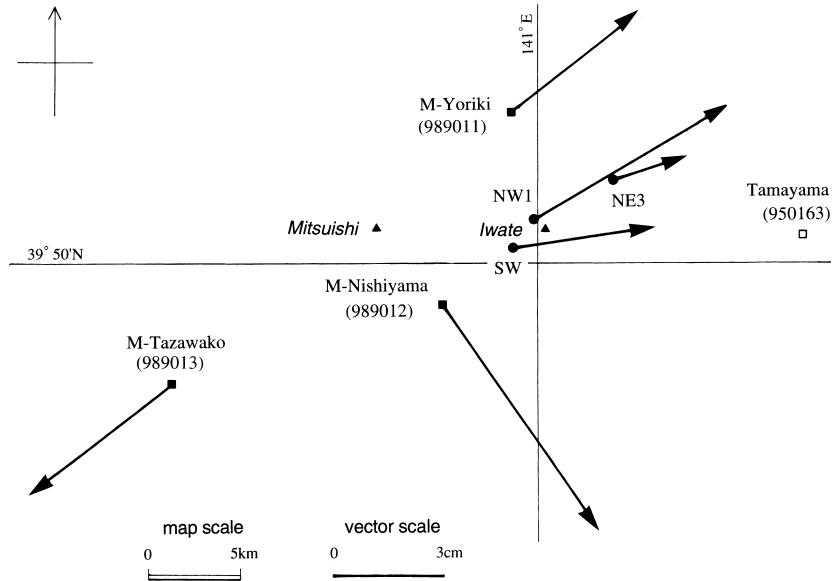


Fig. 5. Ground deformation data from repeated GPS observations around Iwate volcano between June 1998 and May 1999. Solid circle: by this study, solid square: by the Geographical Survey Institute, open square: GPS station Tamayama established by the Geographical Survey Institute which was used as stable station in this study.

図 5 GPS 繰り返し測量結果. 1998 年 6 月～1999 年 5 月の変化. 丸印: 本研究, 黒四角: 同時期の国土地理院のデータ, 白四角: 本研究で不動点とした国土地理院の玉山観測点.

東麓の NE3) のデータを Fig. 5 に示す. 今回の測定では, 比較する測定点の標高差が大きいこと, 高速静止測量法を各回 1 回のみしか行っていないこと, 測定時間が短かったことなどのため, 見込まれる誤差は比較的大きい.

Fig. 5 には, 同じ時期に国土地理院が測定した岩手山周辺のほかの測定点の GPS 測定結果 (国土地理院, 1999a; 1999c; 1999d; 2000) も示した. なお, 固定点は, 国土地理院のデータについては, 岩手山の南西約 60 km の西仙北, 本研究のデータは岩手山の東約 14 km の玉山である. 国土地理院 (1999a; 1999c; 1999d; 2000) によれば, この間の玉山の変動は極めて小さかった. 図中の国土地理院の 3 点の変動データは, 測定期間内の 1998 年 9 月 3 日に発生した岩手県内陸北部地震による変動の成分が除去されたものである. 本研究での観測点では, 同地震の直前直後の測定データがないために, 地震による影響を評価することができないので, 修正をせずに示してある. Miura *et al.* (2000) は, 岩手県内陸北部地震により, 岩手山頂付近の点が若干量西に変動したことを示した. したがって, 1998 年 6 月と 1999 年 5 月の間には, 岩手山頂地域は, 岩手県内陸北部地震による変動の成分を除去すると, Fig. 5 に示したベクトルよりもやや東よりに変動したものと推定される. この結果は, その西方の

三ツ石山付近を中心に放射状に広がったという国土地理院 (1999a) などの結果と矛盾しない.

連続測定の結果の一部を Fig. 6 に示す. 9 点の測定点の内, 1 点 (MZN) は, 測定期間中に, GPS を設置した柱が傾動したため, 良好なデータが得られなかった. その他の点においては概ね良好なデータが得られたが, 比較する測定点の間隔が長い場合, あるいは標高差が大きい場合には, データのばらつきは大きく, また大きな季節変化も認められた. 標高の高い岩手山頂 (YCN および YCS) および三ツ石山周辺の MNW および MSE では, 風雪および凍結のために冬季間の測定が不能になることが多かった. 季節変化が大きい場合は, 同じ季節のデータを比較して判断をした.

連続測定結果によれば, 1999 年秋以降の測定期間を通じて, 岩手山頂の 2 点 (YCN および YCS), その東麓 (NKH), および南麓 (INY) 間においては, それぞれ顕著な変動は認められなかった. 一方, NKH に対する SMK および MTK, YCS に対する MNW, INY に対する MNW, MSE, MTK, SMK の各点はいずれも 1~3 cm/年程度の割合で南ないし南南東に変動し, 1 cm/年程度のオーダーで沈降していることが明らかになった. MNW, MTK, SMK の 3 点間においては, 顕著な水平方向の変動は認められず, わずかに MNW 側が相対的に沈降した

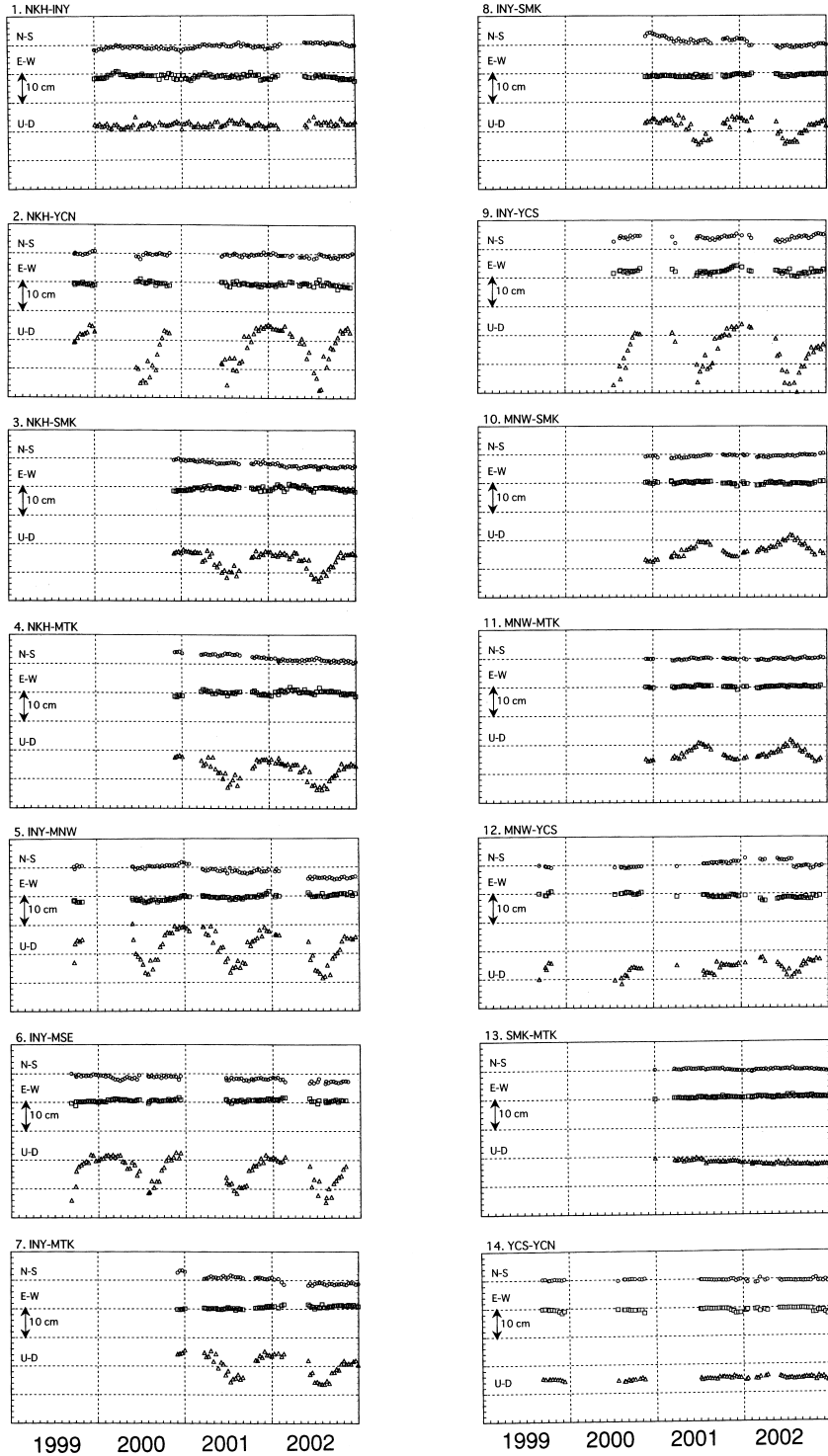


Fig. 6. Selected data of ground deformation from the continuous GPS observation around Iwate volcano. Relative movement of the right instrument stations to the north, east, and up are shown as upward on the figures.

図6 GPS連続測量結果. 各地点の略号の左の点を基準にした右の点の変化を, 北, 東, および上への変化が図の上方に向くように示した.

傾向が認められた。

7. 水準測量結果

測量結果を Fig. 7 に示す。地滑りおよび工事車両の通行などにより異常に変動した点を除けばおおむね良好な結果が得られた。異常点のデータを除いた結果を Fig. 7 に示す。大局的には、1998 年 11 月から 1999 年 10 月までの期間では、三ツ石山側隆起であったが、1999 年 10

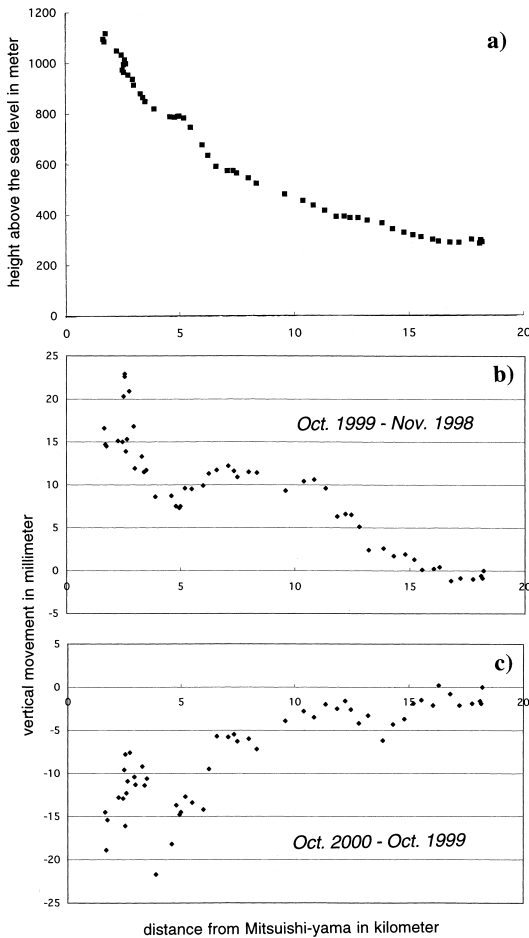


Fig. 7. Ground deformation data from leveling north of Iwate and Mitsuishi-yama volcanoes. a) The distance from Mitsuishi-yama and altitude above the sea level, b) the distance from Mitsuishi-yama and relative altitude change between November 1998 and October 1999, c) the distance from Mitsuishi-yama and relative altitude change between October 1999 and October 2000.

図 7 水準測量結果。a) 三ツ石山からの距離と標高、b) 三ツ石山からの距離と 1998 年 11 月～1999 年 10 月の変化、c) 三ツ石山からの距離と 1999 年 10 月～2000 年 10 月の変化。

月から 2000 年 10 月の期間では三ツ石山側沈降となった。変動の範囲は、三ツ石山から 10 km 以遠にまで及んでいる。変動の範囲が広いことは、変動の力源が深いことに対応しており、Sugihara and Suto (2000) は、1998 年 11 月から 1999 年 10 月までの期間の本研究と同じデータを用い、力源の位置を三ツ石山と仮定した場合の深さを 8 km と算出した。この値は、Nishimura *et al.* (2001) の結果と矛盾ない。

測定期間を通じて、局地的には松川温泉付近では西上がりの傾向が継続して認められた。Fig. 7 の変動の値のうち、三ツ石山から約 5 km 以内でばらつきが認められるのはこのためである。

杉原 (2002) は、同じ測定路線で、同じ方法により水準測量を実施し、2000 年 10 月から 2001 年 10 月の間で、その前の 1 年間同様、三ツ石山側沈降の結果を得た。

8. その他の変動の調査結果と変動のまとめ

1998 年 2 月 14 日～3 月 11 日の傾斜・歪み変化から、東北大学 (1998) は、岩手山の山頂から黒倉山にかけての直下、深さ 10～16 km の範囲に 5 cm の開口割れ目が生じたモデルを提案した。さらに東北大学 (1999) は、その後の傾斜・歪み変化から、岩手山の山頂から黒倉山の直下の開口割れ目の位置が 1998 年 5 月 9 日までに、より浅部に移動したこと、および 1998 年 2 月 1 日～9 月 1 日の GPS 観測結果から、茂木モデルの膨張源の位置が西岩手山の下から三ツ石山の下にかけて西方に、かつより浅部に移動したことを示した。植木・三浦 (2002) は、この変化はマグマの西方浅部への上昇によるものであると考えた。国土地理院 (1999a) も、1998 年 6 月 19 日～9 月 2 日の GPS 観測結果から、三ツ石山付近を中心とする膨張を認め、さらに国土地理院 (1999b) は、合成開口レーダーの解析結果から、1998 年 4 月～7 月の変動の力源を東岩手山の西約 10 km、深さ約 8 km であるとし、また、Nishimura *et al.* (2001) は、合成開口レーダーと GPS の解析結果から、変動源の力源の位置は岩手山の西 13 km の地下 7.9 km で、球状圧力源の体積が 0.033 km<sup>3</sup> 増加したという結果を示した。三ツ石山付近を中心とする膨張の傾向は、変化率は小さくなったものの、2000 年の夏までは続き、その後、三ツ石山南西約 4 km の葛根田、西山 (Fig. 5 中の 989012) および寄木 (同 989011) の 3 つの GPS 観測点を結ぶ基線の長さは、伸長から収縮へ傾向が変化したと判断された (国土地理院, 2002)。一方、岩手山南方で実施された水準測量により、1998 年 7 月～1999 年 10 月までの間に、零石の基準点に対して、玄武温泉以北では、40 mm を超える隆起が観測された。この間の繰り返し測量では、三ツ石山方面の測線を順次



増設したためもあってか、茂木モデルによる隆起の力源の位置は次第に三ツ石山の方に近づくようになった（名古屋大学・他、2000）。

以上の調査解析の結果と、本研究の観測結果をあわせると、1998年の春から夏にかけて顕著に起きた三ツ石山付近を中心とする膨張は1999年まで続き、2000年からは縮小に転じた。縮小の力源は、変動の範囲の広がりから判断すると、膨張と同様の深度であったと思われるが、三ツ石山付近では、真下に沈降するのではなく、南向きに沈降したものと思われる。

## 9. 考 察

1998年2月から、東岩手山から三ツ石山にかけての東西に伸びる地域の地下浅部で、ほぼ連続して地震が起きる活動が続いた（田中・他、1999; Tanaka *et al.*, 2002; 植木・三浦、2002など）。これらの地震活動の場と、変動解析から推定された岩手山の地下で次第に西方に浅く移動したとされる岩脈状の力源の位置との関係などから、Tanaka *et al.* (2002)、植木・三浦 (2002) らは、マグマまたはマグマ性流体の西方への上昇があったと推定した。しかしながら、これらの地震の中には、震源がほとんど地表付近で、極めて浅いものもあることおよびいずれの地点においても地表ではマグマの相当温度の熱兆候が観測されていないことから、そのすべてがマグマの活動によって直接引き起こされたものとは考えられない。

1998年9月3日の岩手県内陸北部地震は、海野・他 (1998) によれば、逆断層によるせん断破壊によるものと推定された。この地震をもたらした破壊活動の北方への延長は、葛根田高温岩体またはその東方に分布している高温の岩体により阻まれたものと解釈される。一方東岩手山から三ツ石山にかけての東西に伸びる地域の地下浅部で起きた地震は、これまで熱水対流系の発達していなかった地域での新たな対流系の生成をもたらした。熱水対流系の発達さらなる岩石の破壊、微小地震の活動を生じさせたのであろう。黒倉山から姥倉山にかけての地域の地表で噴気活動が活発になったのは、複雑な熱水対流系の一部が地表まで達したものと考えられる。それ以外の部分では、地表下浅部の地下水の存在などに阻まれているため、表面活動は未だ認められないものと推定される。

西岩手浅部で発生した超長周期地震、岩手山のほぼ真下の約10 km深および岩手山の南方および北東方向の地下深部、いわゆるモホ面付近で起きた地震などの解析により、西村・他 (1999)、田中・他 (1999)、Nishimura *et al.* (2000)、Nakamichi *et al.* (2002)、Tanaka *et al.* (2002) らは、その原因として、マグマまたは熱水などの

流体の活動があったことを示した。ただし、その流体の温度が、200~300°Cであったのか、1000°C程度であったのかについては、特に示されていない。

一方、三ツ石山付近を中心とする膨張については、葛根田高温岩体への新たなマグマの注入あるいはマグマ中における相変化、ガス分離によって引き起こされた可能性が大きいものと考えられる。変動の調査結果のみから考えると、三ツ石山付近を中心とする膨張は、既に収縮に転じており、新たなマグマが注入したことだけでは説明がしにくい。注入されたマグマが再びより深部に戻る過程も想定されるが、検証できない。既存のマグマからガスが分離したという考え方は、その詳細なメカニズムがまだ組み立てられないこと、および量的に説明できるかどうか不明の点が残る。新たなマグマの注入によりガスが分離したことも想定されうるが、いずれにしても決定的な証拠はない。

野田・須藤 (2002) は、地下深部の熱をより速く伝える情報源として水銀を選択し、三ツ石山から西岩手山にかけての地域の南斜面で土壤中の量を測定した。その結果、地表地熱徴候が認められない測定点でも若干の異常水銀値が認められたが、その量はそれほど顕著ではなかった。変動をもたらした地下約8 kmの力源の温度情報はまだ確定的には認められていない。

東北日本などでは、構造的な運動による隆起域と、そこで火山活動が活発であったことについては、生出 (1989) らが既にまとめている。三ツ石山付近を中心とした今回の隆起活動は、東北日本の脊梁山脈を造る主要な作用の一部である可能性も考えられる。しかしながら、隆起域の広がりあまり大きくないこと、現在、隆起域の一部が沈降で相殺されており、どれだけの量が隆起として保存されるかわからないこと、他の地域で同様の隆起が観測されたことがないこと等から、まだ断定的には言えない。

## 10. ま と め

1998年に地震活動が活発になった岩手山から三ツ石山にかけての地域を取り囲むように、光波測距、GPS、および水準測量からなる山体変動観測網を設置し、以下の結果を得た。

GPS繰り返し測量結果によれば、1998年6月から1999年5月までの間に、岩手山の山頂部が4~6 cm東方に動くなど、岩手山を含む地域は、その西方の三ツ石山付近を中心に放射状に広がったことと矛盾しない結果が得られた。GPS連続測量結果によれば、2000年から2002年にかけて、三ツ石山付近は、それ以前の膨張から反転して、南に傾動するように沈降する傾向が認められ



た。

三ツ石山から北東方向に伸びる水準測量の測線では、1998年11月から1999年10月までの期間では、三ツ石山側隆起であったが、その後反転し、1999年10月から2000年10月の期間では三ツ石山側沈降となった。この傾向は2001年10月までの測定でも継続している。変動の範囲は、三ツ石山から10 km以遠にまで及んでいる。また、局地的には松川温泉付近では西上がりの傾向が継続して認められた。変動の範囲が広いことは、変動の力源が深いことに対応している。

以上の変動測定結果は、他の機関の様々な測定値と総合的であり、三ツ石山付近の地下約8 km程度の深所での膨張とその後の収縮で説明できる。三ツ石山付近の地下の膨張とその後の収縮の原因としては、新たなマグマの注入、ガスの分離、それらの複合などが考えられるが決定的な証拠はない。今回の三ツ石山付近の隆起と、脊梁山脈全体の生成活動との関連は不明である。

#### 謝 辞

本研究は、科学技術庁緊急研究「岩手火山の活動に関する研究」、工業技術院ベンチャー中小企業支援型競争特研「自動連続小型GPS観測装置の開発」、工業技術院特別研究「活火山の形成過程と噴火活動に関する研究」、地質調査所重点基礎研究「岩手山西方に発達した熱水対流系の研究」などの多くの研究項目の成果の一部をとりまとめたものである。各種測定機器の設置および測定に際しては、環境庁(当時、現環境省)、建設省東北地方建設局岩手工事事務所(当時、現国土交通省東北地方整備局岩手工事事務所)、林野庁の各森林管理署、岩手県、雫石町、岩手山神社、地産トーカー株式会社岩手高原スキー場、松川温泉観光株式会社、岩手郡西根町大更の山口甚三郎氏等の地主や管理担当の皆様には大変お世話になった。国土地理院には、電子基準点玉山の観測データを提供して頂いた。盛岡市の吉田測量設計には、観測開始当初に、ボランティアで繰り返し光波測距に御協力を頂いた。産業技術総合研究所の山元孝広、伊藤順一両氏には調査の一部に協力して頂いた。東北大学の田中聡氏、及びもう1人の匿名査読者には、原稿の不備を多く指摘して頂き、粗稿の改善につながった。末尾に記し、関係各位に深謝の意を表する。

#### 引用文献

土井宣夫(1999) 岩手火山における地熱活動。火山噴火予知連絡会会報, 74, 13-16.  
土井宣夫・梶原竜哉・青山謙吾(1999) 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.

- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M. and Rosen, P. A. (2000) 2.5-D surface deformation of  $M$  6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2049-2052.
- 活断層研究会(1980) 日本の活断層-分布図と資料。東京大学出版会, 東京, 363 p.
- 気象庁地震予知情報課(1999) 岩手県内陸北部の地震(1998年9月3日  $M$  6.1)。地震予知連絡会会報, 61, 60-64.
- 国土地理院(1998) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 71, 22-27.
- 国土地理院(1999a) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 72, 43-50.
- 国土地理院(1999b) 人工衛星の合成開口レーダーによって捉えた岩手山の地殻変動について。火山噴火予知連絡会会報, 72, 51-53.
- 国土地理院(1999c) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 73, 33-43.
- 国土地理院(1999d) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 74, 22-34.
- 国土地理院(2000) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 75, 31-41.
- 国土地理院(2002) 岩手山とその周辺地域の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, 79, 49-51.
- 駒澤正夫・須藤 茂・須田芳朗(1987) 仙岩地熱地域の重力解析。地質調査所報告, 266, 399-424.
- 越谷 信・他20名(1998) 1998年9月3日岩手県内陸北部の地震に伴う地殻断層。活断層研究, 17, 9-20.
- Miura, S., Ueki, S., Sato, T., Tachibana, K. and Hamaguchi, H. (2000) Crustal deformation associated with the 1998 seismovolcanic crisis of Iwate Volcano, northeastern Japan, as observed by a dense GPS network. *Earth Planet Space*, 52, 1003-1008.
- 名古屋大学大学院理学研究科・京都大学防災研究所・東北大学大学院理学研究科・九州大学理学部・東京大学地震研究所・北海道大学大学院理学研究科・鹿児島大学理学部・京都大学大学院理学研究科(2000) 水準測量による岩手山における上下変動(1998年7月～1999年10月)。火山噴火予知連絡会会報, 75, 26-30.
- Nakamichi, H., Tanaka, S. and Hamaguchi, H. (2002) Fine S wave velocity structure beneath Iwate volcano, northeastern Japan, as derived from receiver functions and travel times. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 116, 235-255.
- 西村太志・中道治久・田中 聡・佐藤峰司・植木貞人・浜口博之・大竹政和・佐藤春夫(1999) 岩手火山1998年の長周期地震活動。月刊地球, 21, 280-284.
- Nishimura, T., Nakamichi, H., Tanaka, S., Sato, M., Kobayashi, T., Ueki, S., Hamaguchi, H., Ohtake, M. and Sato, H. (2000) Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate Volcano, northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 105, B, 19135-19147.
- Nishimura, T., Fujiwara, S., Murakami, M., Tobita, M., Nakagawa, H., Sagiya, T. and Tada, T. (2001) The  $M$  6.1 earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate

- volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635–638.
- 野田徹郎・須藤 茂 (2002) 金線法による岩手山西部の土壤空気中水銀モニタリング (2000年7月~2000年9月). 火山噴火予知連絡会会報, **79**, 63–64.
- 生出慶司 (1989) 火山と基盤. 築地書館, 204 p, 東京.
- 仙台管区気象台・盛岡地方気象台 (1999) 岩手山の火山性地震・微動および噴気活動について—1999年2月~5月—. 火山噴火予知連絡会会報, **74**, 38–46.
- 仙台管区気象台・盛岡地方気象台 (2001) 岩手山の火山性地震・微動および噴気活動について—1999年10月~2000年1月—. 火山噴火予知連絡会会報, **76**, 44–55.
- 仙台管区気象台・盛岡地方気象台・気象庁火山課 (1998) 岩手山の火山性地震・微動の活動について—1995年9月~1998年5月—. 火山噴火予知連絡会会報, **71**, 28–32.
- 島田政信 (1999) SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法—地殻変動検出への応用—. 測地学会誌, **45**, 327–346.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1993) 地熱開発促進調査報告書・岩手山西部地域. 1289 p, 新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- 杉原光彦 (2002) 岩手山北側水準測量結果 (1998年11月~2001年10月). 火山噴火予知連絡会会報, **81**, 9.
- Sugihara, M. and Suto, S. (2000) Geodetic monitoring of volcanic and geothermal activity around Mt. Iwate. *GRC transactions*, **24**, 199–201.
- 須藤 茂 (1992) 5 万分の 1 仙岩地域中心部地熱地質図および同説明書. 特殊地質図 21-5, 地質調査所, 1–73.
- 須藤 茂・石井武政 (1987) 雫石地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 1–142.
- 須藤 茂・板谷徹丸・向山 栄 (1990) 松川・葛根田地域の火山活動史と地熱の熱源. 日本地熱学会誌, **12**, 63–78.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人 (1999) 1998 年の岩手山における地震活動. 月刊地球, **21**, 273–279.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Ueki, S., Sato, M. and Nakamichi, H. (2002) Migration of seismic activity during the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern Japan, with reference to P and S wave velocity anomaly and crustal deformation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 399–414.
- 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 (1998) 岩手火山の地震・地殻活動 (1998年2月~1998年5月). 火山噴火予知連絡会会報, **71**, 3–15.
- 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 (1999) 岩手山の地震と地殻変動 (1998年6月~1998年9月). 火山噴火予知連絡会会報, **72**, 3–21.
- 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 (2001) 岩手火山の地震・地殻活動 (1999年10月~2000年1月). 火山噴火予知連絡会会報, **76**, 9–19.
- 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 (2002) 岩手火山の地震・地殻活動 (2000年2月~2001年5月). 火山噴火予知連絡会会報, **79**, 23–31.
- Tosya, T., Sugihara, M. and Nishi, Y. (1998) Revised hypocenter solutions for microearthquakes in the Kakkonda geothermal field, Japan. *Geothermics*, **27**, 553–571.
- Uchida, T., Akaku, K., Sasaki, M., Kamenosono, H., Doi, N. and Miyazaki, S. (1996) Recent progress of NEDO's "Deep seated geothermal resources survey" project. *Geothermal Resources Council Transactions*, **20**, 643–648.
- 宇宙開発事業団地球観測研究センター・名古屋大学理学部 (1999) 岩手山周辺の JERS-1 差分干渉 SAR による地殻変動の検出. 火山噴火予知連絡会会報, **72**, 25–28.
- 植木貞人・三浦 哲 (2002) 1998 年岩手山周辺の火山・地震活動. 地学雑, **111**, 154–165.
- 上村不二雄・須藤 茂・金原啓司・茂野 博・駒澤正夫・須田芳朗・菊地恒夫 (1985) 10 万分の 1 仙岩地域地質図および同説明書. 特殊地質図 21-2, 地質調査所, 1–23.
- 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・松沢暢・長谷川昭・浜口博之 (1998) 1998 年 9 月 3 日岩手県雫石町に発生した地震 ( $M$  6.1) の余震分布. 活断層研究, **17**, 1–8.

(編集担当 小川康雄)