

水準測量による岩手山南山麓における上下変動 (1998年7~11月)

木股文昭*・石原和弘・植木真人**・内田和也***・小山悦郎****・佐藤峰司**・
鈴木敦生*****・高山鐵朗・竹田豊太郎****・辻 浩****・寺田暁彦****・中坊真*****・
浜口博之**・平野舟一郎*****・松島 健***・宮島力雄*・森 濟*****・
八木原 寛*****・山本圭吾・渡辺秀文****

- * 名古屋大学大学院理学研究科
- ** 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
- ***** 京都大学理学部
- ***** 鹿児島大学理学部

要旨

1998年以降、火山活動が活発化している岩手山火山において、火山活動に伴う地殻上下変動とその圧力源を議論する目的で、水準路線を設置し、1998年7,9,11月に精密水準測量を実施した。1998年9月3日、水準測量実施中に、直下でM6.1の地震が発生し、20cmに達する断層運動を水準測量で検出した。岩手山南麓ではこの4ヶ月間に4cmに達する山側隆起の上下変動が観測され、その圧力源は岩手山西方に深さ3km前後と推定される。

キーワード 岩手山火山 水準測量 上下変動 火山体圧力源 地震断層

1. はじめに

航空宇宙技術の地球物理学分野への普及は驚異の速度で進んでいる。とりわけ、GPS(Global Positioning System)や衛星による合成開口レーダ干渉(DInSAR, Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)は、地震時の断層運動や火山活動に伴う地殻変動の検出で目覚ましい成果を得ている。日本の衛星JERS-1(ふよう)没後、衛星によるDInSARが困難という風評も流れたが、Durand and Messonnet (1999)は民間衛星のRADARSATでもDInSARとして活用できることをPiton de la Fournaise火山における地殻変動で示している。

このような技術革新のなかで、地殻上下変動を議論する水準測量は、水準儀がオートレベル、そしてバーコードのデジタルレベルとデータロガーの採用などに技術革新がみられるものの、40-50m間隔の「尺取虫」は典型的な古典的手法のままである。现阶段では、GPS

とDInSARといえど、直ちに水準測量を代行するような精度に達していないのも事実である。また、簡単にその精度に到達する展望も即座には開けていない。

ゆえに、労力が必要で技術革新から取り残された印象すらする水準測量を火山近傍における上下変動の観測手法として、その意義を明確にし、効率的に活用することは非常に重要と考える。

まず、火山体近傍で生じる地殻変動の特徴を明らかにする。いわゆる茂木モデル(Mogi, 1958)は、古典的な解析手法だが、火山周辺域における地殻変動の圧力源を議論する場合、簡単なモデルとして、第一次近似として有効である。とりわけ、観測計画の立案段階で有効である。そこで、茂木モデル、球状圧力源を仮定した場合の上下と水平成分における地殻変動を計算してFig. 1に示す。図では圧力源の位置を10kmとした。圧力源の位置は火山体において一般的に考えられるものより深い。図では適当な圧力増を仮定している

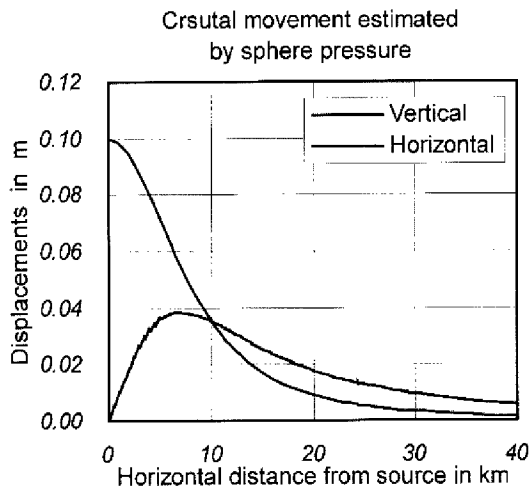


Fig.1 Crustal vertical and horizontal movements estimated from the sphere pressure source (Mogi, 1958; Decker and Kinoshita, 1971) The depth of the source is 10 km.

が、圧力増の変化は、地表変形の変動量が変化するだけで、変動パターンは変化しない。図から以下の二点が明瞭である。

- 1) 上下変動のシグナルは水平変動と比較し約 2.5 倍に達する。
- 2) 圧力源の深さの 2 倍を超える水平距離では、とりわけ上下成分の変動は最大値に対し 10%以下となる。

以上のことより、火山体における地殻変動を議論する場合、上下変動はシグナル量が大きく有利であること、そして、水準測量で有意な変動を検出するには圧力源に可能な限り接近し、圧力源の深さ相当の範囲で実施するのが望ましいという結論を得る。もともと、実際の観測では観測環境により、実施することが困難な場合も多い。

また、Fig.1 から、水準点を、最大傾斜変動が推定される圧力源から水平方向に圧力源の深さ相当分の範囲に集中することも、有意な傾斜変動を議論するうえで、重要と考える。そして、圧力源位置の時間的な移動の議論を考えれば、圧力源真上に来る限り密な水準網を設置することが有利であることも明確である。大きな上下変動が推定される地域はせいぜい 10km 四方以下の範囲であり、2km 間隔で水準点を設置すると、有意な変動が観測される水準点は数点ということになる。少なくとも数 100m 間隔で水準点を設置することが必要である。GPS 観測などで、観測網を密にすれば確実にその観測労力は増加するが、水準測量で水準点を密に設置しても測量労力は特別大きくならない。そして、GPS 観測が稠密化されたといっても数 100m 間隔という段階ではないが、水準測量は線上という制限はあるが、数 100m 間隔ですでに測量網を構築している。

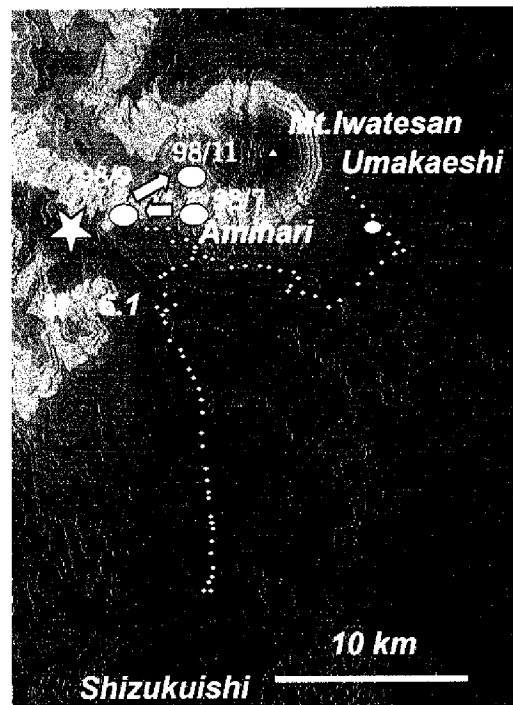


Fig.2 The locations of the leveling route around the Iwatesa Volcano. Locations of pressure sources estimated by leveling data in the tree periods of November,1987 to July, 1998, July-September,1998 and September- November,1998, and earthquake (M;6.1) of September 3, 1998 determined by Tohoku University (1999) are also shown as circles and star. Geographical data are provided by GSI.

すなわち、労力が必要とされる水準測量だが、分解能が mm もしくはサブ mm の分解能が達している利点を最大限活用し、火山体においては圧力源から数～10 km の範囲に密な観測網を構築することが重要である。また、火山体における急激な変動に対応可能な自由度の高い測量戦術も必要である。

なお、岩手山における水準測量による上下変動の議論は速報的な内容ですでに木股・大学合同水準測量グループ(1999)として報告した。そこで、本論では、1998 年 9 月 3 日の地震に関連する結果などを含め、より詳細に検討する。

2. 岩手山南山麓における水準測量

1998 年 6 月、Fig.2 に示す水準路線を岩手山南山麓に設置した。雫石市街地から北の網張温泉へ、そして東へ滝沢町を経て、馬返し登山口までの全長 36km に 68 水準点(当初)から構成される路線である。路線間の高度差は 500m に達する。水準点は平均 500m 間隔で設置したが、とりわけ路線北西部では意識的により短かい間隔で設置した。準備期間に余裕がなく、すべて道路脇の構造物に岩手県の協力の下に金属標を固定した。

水準測量は 4 回、1998 年 7 月、9 月 1-3 日、9 月

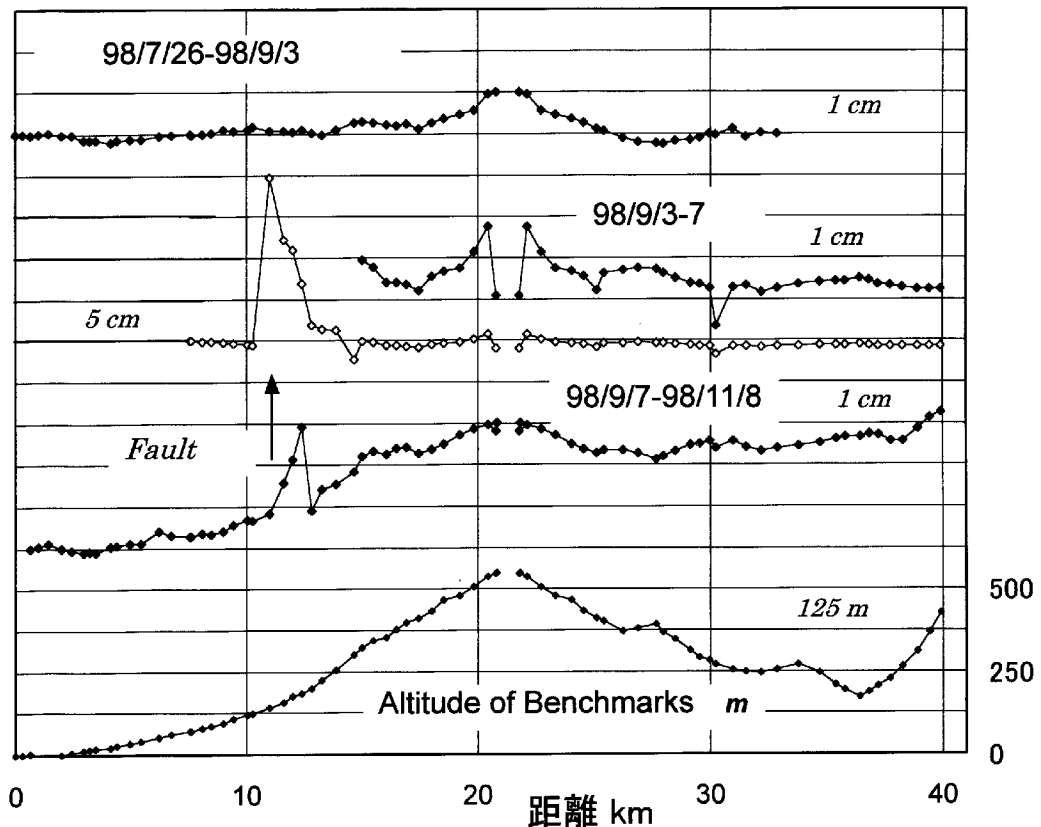


Fig.3 Vertical movements observed by leveling and the altitude of the benchmarks along the leveling route. Open circles mean the vertical movements in the period before and after the earthquake of September 3, 1998, which shows with different scale of others.

4-7日, 11月に北海道大学, 東北大学, 東京大学, 名古屋大学, 京都大学, 九州大学, 鹿児島大学からなる大学合同グループで実施した。測量精度管理は国土地理院の1等水準測量に準拠した。なお, 2回目の測量は路線東部が地震により未測定のまま終了した。

多大な労力が必要となる水準測量を効率的に進める観点から, 積極的に自動読み取りのデジタルレベルを活用し, 3チーム構成では1日あたり10km以上の測量を終了した。また, 二人だけのデジタルレベルチーム編成も試行し, 1日あたり2km以上の測量が可能だった。また, もっとも大きな変動が想定される区間から測量を開始し, 全測量終了時にその区間を再度測定して, 測量観測期間中の変動をモニターすることも試みている。

9月の測量作業中に岩手県内陸北部を震源とする地震(M6.1, 9月3日)に襲われた。一つの測量チームはまさに震源域での遭遇だった(木股ら, 1998)。直ちに翌朝から復旧測量を実施し, 午前中に20cmに達する地震断層が水準路線を横断していることを観測した。

3. 水準測量から観測された上下変動

1998年7-9-11月間に岩手山麓水準路線で観測

した上下変動を Fig.3 に示す。一般に, 火山体の上下変動を議論する時, 各期間の変動を積算した結果が有効と考えられる。しかし, 本測量では, 9月3日の地震による断層運動で20cmに達する上下変動が観測されていることから, 1998年7-11月に観測した最大の上下変動は断層運動となる。そこで, 各期間毎に観測された変動を図示した。

3.1 1998年9月3日の地震に伴う上下変動

上述したように, 1998年9月3日16時58分に Fig.2に示す水準路線から西方5kmの葛根川でM6.1の地震が発生した。東北大学(1999)による地震の震央を Fig.2に☆マークで示す。地震時には, 9月1日から開始した2回目の測量がほとんど終了していた。そして, その後9月4-7日に実施した測量との比較から, 地震に伴う地殻上下変動を Fig.3と Fig.4に示す。Fig.4は図中に◆で示す最南端の水準点に対する変動を空間分布として示す。地表変形から観測された地震断層の位置も Fig.4に実線と破線で示す。

東北大学(1999)などの地震観測によれば, この地震

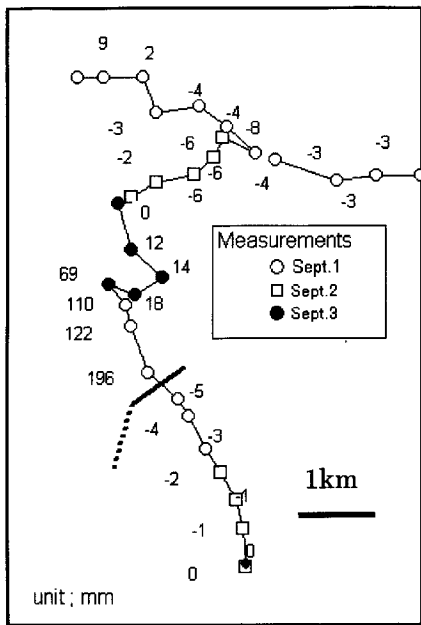


Fig. 4 Distribution of vertical movements associated with the earthquake of September 3, 1998. Solid and broken lines means the earthquake fault observed on the surface.

は北西方向に傾斜した北東-南西走向の断層によるものと考えられ、主な余震のメカニズムも北西側の地盤がずり上がる逆断層であることを示唆している。

Fig.4 から明確のように、水準測量も断層の北西側地盤の 20cm 隆起を示めす。しかも、南東側の地盤がほとんど変動を示していないことから、断層南東側地盤は地震時もまったく不動で、断層北西側の地盤が一方的に隆起運動を起こした断層であることが明確である。

三河地震(1945 年, M6.8)において、地震断層域における被害分布が断層上盤(三河地震では断層西側)に集中していることから、安藤・川崎(1973)は三河地震が低角逆断層の上盤側ののし上がる断層運動だったと報告している。今回の水準測量の結果は、1998 年岩手県内陸北部地震断層も同様に上盤側が一方的ののし上がる逆断層だったことを測地的に実証したと考える。

深さが 7km とまさに地表で発生したような地震にも関わらず、また断層上盤側が運動したと考えられているにも関わらず、cm を超える上下変動は断層からわずか 1-2km の極めて狭い領域に観測されているだけである。

一方、GPS 観測による地震時の水平変動として、国土地理院(1999)によれば断層から 10 数 km 離れた雫石観測点で 1cm、東北大学(植木ら,1999)によれば岩手高原スキー場観測点で 2cm に達する水平変動が報告されている。岩手高原スキー場観測点に近接する水準点は 4~8mm の沈降の上下変動を示すに過ぎな

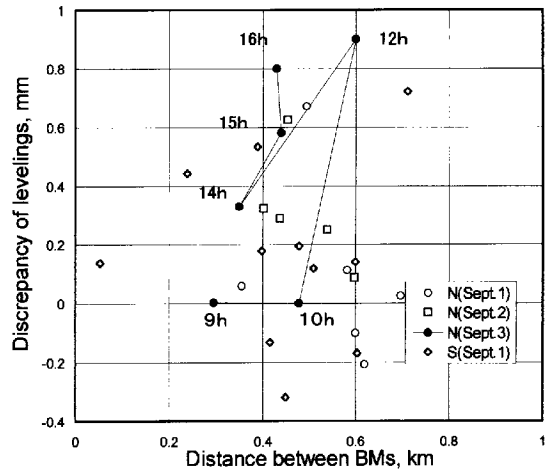


Fig.5 Discrepancy of levelings for three days before the earthquake on September 1.

い。また、地震直後の水準測量は日程の関係から、Fig.4 に示すように、断層から南へ 3km ほどの水準点で終了したため、雫石市街地での上下変動は観測できなかった。しかし、1998 年 11 月に実施した水準測量の結果から、雫石市街地で GPS 観測とは対照的に地震時に 1cm に達するような上下変動は考えられない。

蛇足だが、Fig.2 において断層から離れたところに位置する水準点でも 1cm 前後の沈降が観測されている。周囲の水準点に対しスパイク状の沈降であり、地震時の振動による局所的な沈降と考える。2 点とも上部に大きな行き先表示板を取り付けた建造物の基礎に設置した水準点だった。

本水準測量では、地震断層における余効変動を観測するために、20cm の断層変動が水準測量で検出された区間について、地震の翌日 4 日午前中に測量した後、夕刻にも水準側を実施した。しかし、この半日間に 1mm を超える変動は検出されなかった。5 日以降は、余効変動が観測されなかったという結果に基づいて、測量を実施した。

有意な余効変動は観測されなかったが、以下に述べるような余震活動に関連すると考えられる断層運動が、1998 年 11 月の測量から観測されている。Fig.3 に示す各期間の上下変動のうち、地震後の 1998 年 9 月 4 日~11 月の期間に、地震による有意な上下変動が観測された区間で 2cm に達する変動が観測されている。その範囲は非常に狭く、水準点でわずか 3 点、区間にして 1km の範囲である。この変動を断層変動で解釈するならば、主たる地震断層と位置が少し異なり、しかも、変動センスは局所的ながら、南側地盤の隆起となる。

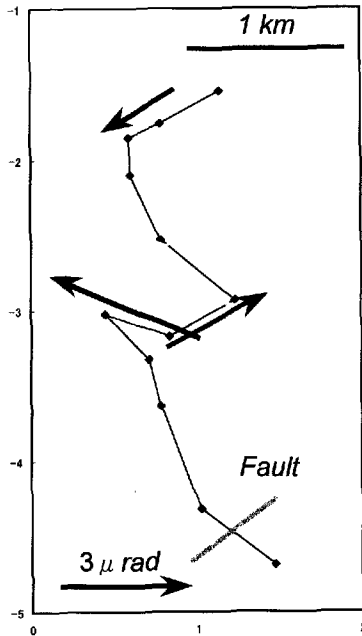


Fig.6 Tilt vectors calculated from the discrepancy of levelings and the locations of the benchmarks before the earthquake. Gray and Solid arrows mean the tilt observed in the AM and PM of September 3,1998. The earthquake fault is also shown.

3.2 1998年9月3日の地震前の上下変動

次に地震直前の上下変動について考察する。

Fig.4 には、9月3日の地震直前に実施した水準測量から求めた地震時の変動と共にその測量日時もシンボルで示した。断層直上となる区間は1日に測量を実施し、3日の地震当日は1チームが地震時の上下変動が観測され、断層から1-2km離れた区間で水準測量に従事していた。

地震直前の水準測量として、1944年東南海地震では、地震発生当日とその数日前から実施していた掛川における水準測量から前駆的傾斜変動が指摘されている(Sato,1975;茂木,1982)。また、佐藤・井内(1976)は、内陸地震発生と関連した水準測量による上下変動を検討し、新潟地震(1964年)などの8例を報告している。そのなかで、彼らが指摘した今市地震(1969年)はM4.0の地震に伴う変化である。しかも、彼等の議論は数年間隔のデータに依拠している。となれば、本水準測量の結果は、空間的にも時間的にも、地震に関連する上下変動を議論するに最適な機会と考える。

まず、Fig.3に示す1998年7月から地震前日の9月までの上下変動から、地震発生までの二ヶ月間という期間では、地震断層周辺においてmmを超えるような上下変動が観測されていないことは明確である。もっとも、地震の震源はFig.2に示すように、水準測量路線の北西端であり、上記期間に観測した路線全体

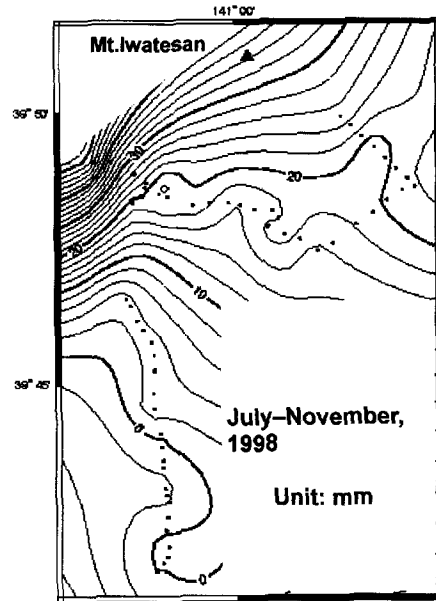


Fig.7 Contour map of vertical movements detected from leveling in the period of July-November, 1998. Vertical movements on benchmarks observed some coseismic movements are removed.

での1cmの隆起が地震発生と関連した上下変動という解釈も成り立つ。しかし、この上下変動は地震後も地震前と同様に観測されていることから、上述の解釈も問題点を有すると考える。

次に、Sato(1975)と茂木(1982)による東南海地震直前の掛川における水準測量の評価と同様に、地震直前の水準測量誤差を検討する。水準点間の距離と測量の往復誤差をFig.5に示す。なお、図には上下変動を議論しない補助中間点での結果も含めているので、Fig.4に示す水準点間と異なる。確かに、9月3日は午前から午後にかけて、測量誤差は増加する傾向にある。

次に、上述した測量誤差のなかに、地震直前に発生した地殻変動の内容が含まれるとすれば、いかなる変動か、9月3日の測量について検討する。Fig.6は水準測量往復誤差を水準点の位置との関係から傾斜変動として計算して示す。また簡略な時系列として、日午前に観測した結果を灰色、午後の結果を黒色の矢印で示す。水準点間の距離は296~599mで、水準測量往復誤差は0.5~1.8mmとなり、傾斜変動にして0.6~3.7μradが得られる。

地震断層により近い3区間の水準点では、地震時の断層運動と同じ性質を示す2.6~3.7μradの傾斜変動が計算される。Fig.6に示す南側の3区間の傾斜と方位から北西方向へ4μradの傾斜変動ベクトルが計算される。しかし、より離れた水準点区間では逆センスの傾斜変動が観測されている。ゆえに、数μを超えるような直前の傾斜変動は観測されなかったと結論する。

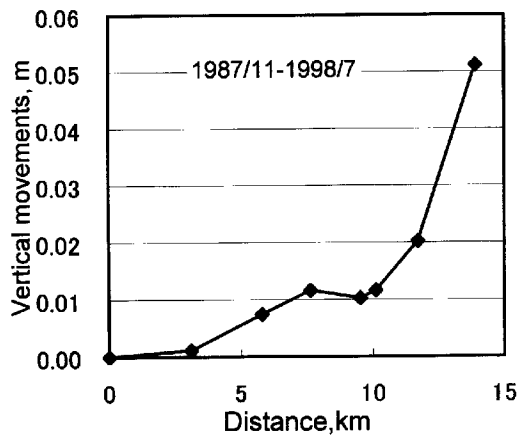


Fig.8 Vertical movements observed in the period November 1987 to July 1998. The reference benchmark is difference with a distance of 300m in Figure 2.

3.3 火山活動に関連する上下変動

1998年7～11月に観測された上下変動をコンターマップとして Fig.7 に示す。図では、地震時に大きな coseismic な変動が検出された水準点は示していない。概して岩手山側が隆起し、最近4ヶ月間に網張温泉付近で45mm、馬返し登山口で25mmの隆起を示す。

この隆起の上下変動は、Fig.2 から、1998年7～11月の全期間を通して継続していることが明確である。そして、1998年9月～11月では、東西方向の路線でも網張温泉から沈降することなく隆起が継続していることも明確である。また、1998年9月～11月の期間は、7～9月の期間と比較し、雫石市街からの相対的な隆起量が3倍に達するものの、網張温泉付近における上下変動に注目すると、隆起量は3倍とならず、両期間とも同じ程度で、1998年9-11月の変化が緩やかな隆起を示す。

本測量は1998年7月が最初である。しかし、同域において岩手県が公共測量として1987年11月に二級水準測量を実施し、その水準点が維持され、水準点標高も明記されていた。そこで、1998年7月に実施した水準測量では、これらの水準点に取りつけ測量を行った。そして、1987年から1998年7月までの期間で得た上下変動を Fig.8 に示す。固定点は Fig.3 と異なるが、両者は300mほど離れているだけである。

図から明らかのように、1987年から1998年7月の期間も、岩手山南山麓では、山側隆起の上下変動が観測され、隆起量は5cmに達する。なお、図に示した水準点には270mの高度差が存在する。ゆえに二級水準測量で使用された標尺の温度膨張誤差の検討が必要である。残念ながら、県が実施した公共測量は測量手簿が紛失し、その評価は困難である。ただ、270mの高度差における5cmの変動は 185×10^{-6} となり、

1987年11月と1998年7月の観測で30度の気温差になっていても、観測された上下変動は一般的な温度膨張誤差を上回る変動量と考える。

1998年7月以前の測量として、1987年11月の測量しかなく、10年間といった長期間の上下変動となるが、東北大学(植木ら,1999)や国土地理院(1999)のGPS観測から、顕著な地殻変動が観測されたのは1998年2月あたりであり、上記の上下変動は実質1998年2～7月の間に進行したものと考える。

4. 上下変動から推定する球状圧力源

水準測量による上下変動から地殻変動の圧力源を推定した。圧力源がいかなる形状を示すか、興味ある課題である。しかし、今回議論した水準路線が岩手山周辺の南山麓に限定されている。ゆえに、今回の観測データでは圧力源の形状までの議論が困難と考え、球状圧力源(いわゆる茂木モデル)を想定した。そこで、水準点において観測された上下変動と推定する圧力源の位置と規模から計算される上下変動の残差が最小になる解を求めた。また、観測期間中に20cmもの上下変動をもたらした岩手県内陸北部地震が発生していることから、全期間を積算した形で圧力源を推定せずに、各観測期間ごとに圧力源を推定した。

Fig.9に1987年11月～1998年7月～1998年9月～1998年11月の3期間における観測および推定された上下変動量と圧力源からの水平距離の関係を示す。総じて、球状圧力源を推定することにより、観測された上下変動は説明できる。しかし、1998年9～11月の期間は全水準点における上下変動を一つの圧力源で推定すると、観測値と推定値の残差は小さくならない。そこで図示するように、まず南北方向の路線における上下変動残差を最小とする圧力源を求めた。東西方向の路線における上下変動に20mmを越える残差が残る。次にその残差を最小とするような第二の圧力源を推定した。推定した圧力源の位置を Fig.2 に○で示す。図に深さは示さないが、1998年7月までが2km、1998年9月までと11月までが3kmと顕著な変化はない。

図からも明らかのように、1998年9-11月に推定した第二の圧力源では、東西路線の水準点で観測/推定した上下変動にかなりの残差が残っている。圧力源の形状をダイクや円盤状と仮定することにより、これらの残差は改善されると考える。

また、1987年11月～1998年7月の期間の上下変動は2級の公共測量を含んでいることから、信頼性が確かでない。しかし、今回推定した圧力源から雫石市街地で計算される水平変動は1～2cmとなり、国土地理院(1999)によるGPS観測結果と概して一致する。

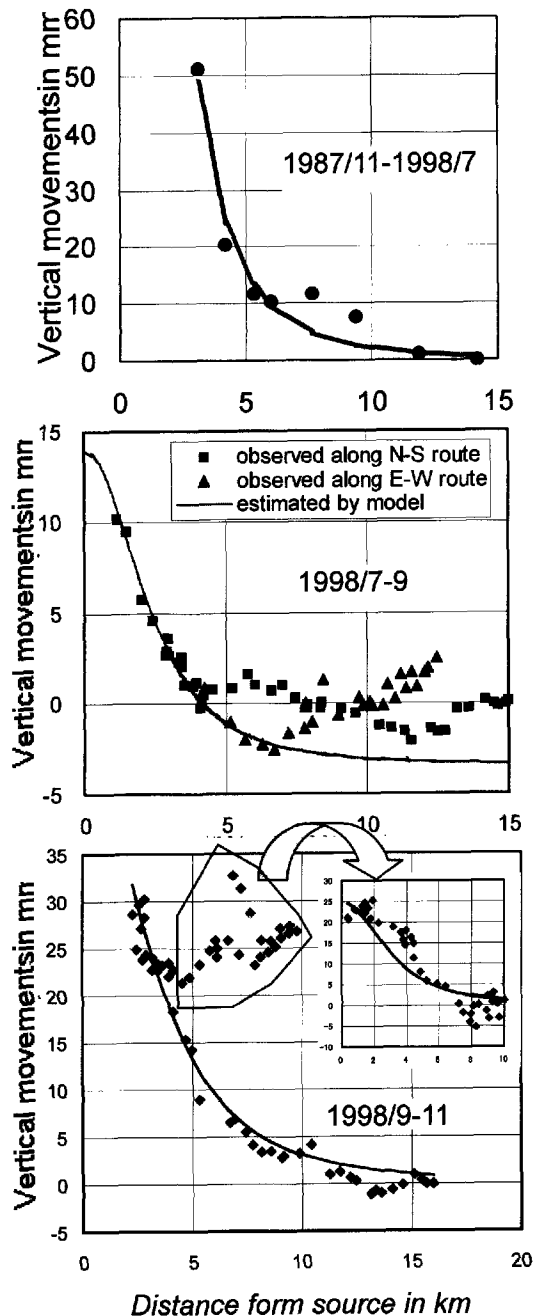


Fig.9 Vertical movements observed and estimated sphere pressure source in the period of November 1987 to July 1998, July to September and September to November in 1998.

5. 圧力源の時空間変化

推定した球状圧力源の位置が時空間的にいかに変化するのだろうか。植木・他(1999)らは、圧力源が1998年2月の10kmから、1998年7月には2kmまで浅くしかも西方へ移動し、その後、U-ターンするかのごとく東方へ同時に深くなったと報告している。そして、ボアホール体積歪み計と傾斜計による地殻変動観測から、佐藤・浜口(1999)はダイクの発達と球状圧力

源が岩手山方向へ移動することを1998年8月までの期間で議論している。一方、西村ら(1999)によれば、長周期地震の震源域は岩手山西方、大松倉山南方で、その時間的な移動は認められないという。

Fig.2 に示すように、水準測量から推定した球状圧力源は1987年11月から1998年7月まで、そして、1998年9月と11月までの3期間に、水平成分で3kmほど位置が変化している。深さ方向には有意な変化は認められなかった。まず、岩手高原スキー場北方2kmの深さの2kmに位置していたのが、西方へ移動し、大松倉山南2km、深さ3kmに位置し、その後、東方へ戻り、黒倉山南方へ移動するが、深さは3kmと浅くなっていない。また、上述した第二の圧力源も馬返し登山口南方に、第一圧力源の1/4の規模で深さ3kmに求まる。

さらに、合成開口レーダー干渉(Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar)により、岩手山周辺域における地殻変動が求めている(国土地理院,1999;宇宙開発事業団・名古屋大学,1999)。そして国土地理院(1999)によれば、圧力源の位置は水平位置でGPSや水準測量の結果とよく一致し、深さが8kmとやや深めに求まっている。

6. おわりに

筆者らは、最近の雲仙普賢岳噴火に対する研究を教訓に、地震活動が活発化した岩手山において、機敏に、また、水準測量の特徴を生かした観測計画を実践した。その結果、わずか4ヶ月間という短期間にもかかわらず、岩手山南山麓における上下変動を観測すると同時にその圧力源の時間的変動に関する議論まで展開することができた。また、測量作業中に震源域でM6.1に遭遇するという事件に対しても、機敏な判断から、地震時の上下変動、断層の余効変動に関する観測も実施した。これらをまとめると以下となる。

- 1) 1998年7~11月の期間、岩手山南山麓では山側の隆起運動が継続し、その圧力源は岩手山西方と推定できる。この期間に、圧力源の5kmを超えるような移動は観測されなかったが、期間によりその位置を数kmの範囲で移動させていると考えられる。
- 2) 圧力源の位置は、GPS観測、ボアホール地殻変動連続観測、合成開口レーダー干渉といった異なる観測手法と概して一致する。また、低周波地震の震源域とも一致する。
- 3) 岩手県内陸北部地震(1998年9月3日,M6.1)の地震に伴う20cmに達する上下変動を観測した。この地震は深さ7kmと浅い割に、観測された上下変動は数kmの範囲と非常に局所的であった。また、地震時も震源域で測量を実施してい

たが、地震の前兆となるような上下変動は観測されなかった。

今回の事例にあるように、最近の観測技術は著しく進展しており、火山体における圧力源に関する議論も複数の観測手法から可能となり、第一近似では一致する結果が得られている。今後は、よりデータを豊かにし、より総合的な議論と新たな圧力源モデルの構築に、水準測量の特色を生かして関与したいと考える。

謝辞

今回のメンバーを送り出していただいた関係者に深く感謝する。機敏な「縁の下の力持ち」的存在があつてこそ今回の成果が存在する。そして、観測チームを快く迎えていただいた村井支配人(当時)をはじめ網張温泉国民休暇村、観測の意義理解いただき、協力していただいた岩手県の各関係者の方々に感謝する。研究の経費の一部は、京都大学防災研究所特別事業費による。

参考文献

- 安藤雅孝・川崎一朗(1973): 1945年三河地震による愛知県蒲郡市金平地区の倒壊家屋の分布,1973年度地震学会秋季大会講演予稿集,107.
- 植木真人・三浦哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之(1999):高密度GPS観測により解明された岩手山火山の地殻変動,月刊地球,21,296-301.
- 宇宙開発事業団・名古屋大学理学部(1998):岩手山周辺のJERS-1差分干渉SARによる地殻変動の検出,地震予知連絡会会報,61,94-96.
- 木股文昭・大学合同水準測量グループ(1999):水準測量による岩手山南山麓における上下変動,月刊地球,21,302-306.
- 木股文昭・森濟・松島健・山本圭吾・八木原寛・宮島力雄・高山哲朗・辻浩・鈴木淳生・内田和也・佐藤峰司(1998):岩手県北西部地震の直前・直後における地殻上下変動—地震発生時の震源域での水準

- 測量,地震学会ニュースレター,10,3,18-20.
- 国土地理院(1999):東北地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,61,68-85.
- 国土地理院(1998):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,地震予知連絡会会報,61,86-90.
- 佐藤裕・井内登(1976):地盤隆起と地震との関係について,地震予知研究シンポジウム(1976年12月13-15日),138-144.
- 佐藤峰司・浜口博之(1999):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.
- 東北大学理学部大学院理学研究科(1999):1998年9月3日岩手県雫石町の地震活動について,地震予知連絡会会報,61,49-53.
- 西村太志・中道治久・田中聡・佐藤峰司・植木真人・浜口博之・大竹政和・佐藤春夫(1999):岩手山火山1998年の長周期地震活動,月刊地球,21,280-284.
- 茂木清夫(1982):1944年東南海地震直前の前兆的地殻変動の時間的变化,地震第2輯,35,145-148.
- Decker, R.W. and Kinoshita, W.T. (1971): Geodetic measurements. *The Surveillance and Prediction of Volcanic Activities*, UNESCO, 47-74.
- Durand P., and D.Massonnet (1999): Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measured by RADARSAT satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 26, 533-536.
- Mogi K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq., Res., Inst., Univ. Tokyo*, 36, 99-134.
- Sato H. (1975): Vertical crustal deformation accompanied Tonankai earthquake, 1944, *Bull. Geograph., Survey Inst.*, 21, Part 1, 10-18.

Vertical Movements around the Iwate-san Volcano, Northeast Japan in the period July-November 1998.

Fumiaki KIMATA*, Kazuhiro ISHIHARA, Sadato UEKI**, Kazunari UCHIDA***, Etsuro KOYAMA****, Minemori SATO**, Atsuo SUZUKI*****, Tetsuro TAKAYAMA, Toyotaro TAKEDA****, Hiroshi TSUJI****, Akihiko TERADA****, Makoto NAKABO*****, Hiroyuki HAMAGUCHI**, Shuichiro HIRANO*****, Takeshi MATSUSHIMA***, Rikio MIYAJIMA*, Hitoshi MORI****, Hiroshi YAGIWARA*****, Keigo YAMAMOTO, Hidehumi WATANABE****

* Graduate School of Science, Nagoya University

** Graduate School of science, Tohoku University

*** Faculty of Science, Kyushu University

**** Earthquake Research Institute, University of Tokyo
**** Graduate School of Science, Hokkaido University
***** Faculty of Science, Kyoto University
***** Faculty of Science, Kagoshima University

Synopsis

Earthquake swarm is observed around the Iwate-san Volcano, Northeast Japan since 1998. The leveling route with distance of 36 km was set up around the volcano and the precise levelings have been repeated to discuss the crustal deformation four times in July, September, September and November in 1998. When the precise leveling is doing in September 3, 1998, earthquake of M6.1 was occurred close to the volcano. One leveling team was making leveling in the epicenter area, Re-levelings were repeated since the next day of the earthquake, and coseismic deformations of 20 cm are detected along the leveling route. However the precursor of the vertical movements is not recognized in the leveling data made just before the earthquake. Uplift of the Iwate-san Volcano is observed and which amounts to 4 cm in the period of July to November in 1998. The pressure sources of the vertical deformations are estimated to be under the west side of the volcano with depth of 3 km, which is the almost the same location of the pressure estimated by GPS measurements and the DInSAR (Differential Interferometric SAR).

Keywords: Iwate-san Volcano, leveling, Vertical movements, pressure source of volcano, earthquake fault