

全国主要活火山の集中総合観測

1999年岩手火山集中総合観測報告

Report on the Joint Observation of Iwate Volcano in 1999

集 中 総 合 観 測 班

Joint Observation Team

平成18年8月

August, 2006

1999年岩手火山集中総合観測報告

目 次

序文 長谷川 昭

研究報告

1	1999年岩手山の地震活動	田中 聡・中道治久・植木貞人・浜口博之	1
2	1999年9月8日に岩手山で発生した火山性微動の到来方向の推定	岩澤拓郎・山本英和・佐野 剛・小渕卓也・長浜庸介・斎藤徳美	9
3	岩手火山における人工地震のアレイ観測	小菅正裕・千田良道・岩手山人工地震研究グループ	15
4	岩手山における人工地震を用いた地震波速度変化の検出の試み	浜口博之・山脇輝夫・田中 聡	27
5	岩手火山における地殻変動連続観測	佐藤峰司・浜口博之	37
6	岩手火山周辺における傾斜観測と水準測量	竹田豊太郎・小山悦郎・平田安廣	47
7	岩手火山におけるGPS連続観測ー主として1999年の変動についてー	植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之	61
8	水準測量による岩手山南山麓における上下変動(1998年7月～1999年10月)	木股文昭・宮島力雄・山本圭吾・高山鉄朗・植木貞人・佐藤峰司・ 松島 健・内田和也・中村めぐみ・辻 浩・小山悦郎・ 森 濟・平野舟一郎	69
9	岩手火山における重力変化観測	植木貞人・前川徳光・佐藤俊也・仁田交市・三浦 哲	81
10	岩手山山麓部における全磁力連続観測	三品正明・植木貞人・浜口博之	93

1 1	臨時観測点による岩手山における全磁力連続観測 鍵山恒臣・藤原 智・門脇俊弘・濱崎秀夫・西谷忠師・山崎 明・ 福井史雄・山本哲也・北川貞之・田中良和・橋本武志・坂中伸也・ 長谷英彰・谷口宏充・長谷中利昭・後藤章夫・大場 司・ 中川光弘・佐々木 実・三品正明	103
1 2	姥倉山周辺の自然電位調査 長谷英彰・坂中伸也・田中良和・後藤章夫・谷口宏充	111
1 3	西岩手山に1999－2000年に現れた地熱示徴 土井宣夫・土井小枝子・斎藤徳美・沼宮内 忠・野田 賢・ 越谷 信・山本英和	115
1 4	岩手火山姥倉黒倉地域の噴気温度 鍵山恒臣・平林順一・小山悦郎・増谷文雄・野上健治・岩手県	125
1 5	岩手山の火山ガスと火山活動 平林 順一・野上 健治・大場 武	137
	観測結果のまとめ 植木貞人	149

Report on the Joint Observation of Iwate Volcano in 1999

Contents

Preface	A. Hasegawa	
Articles		
1 Seismicity at Iwate volcano in 1999	S. Tanaka, H. Nakamichi, S. Ueki and H. Hamaguchi	1
2 Estimation of arrival azimuth of volcanic tremor occurred in Iwate volcano on Sep. 8, 1999	T. Iwasawa, H. Yamamoto, T. Sano, T. Obuchi, Y. Nagahama and T. Saito	9
3 Array observation of artificial explosion at Iwate volcano	M. Kosuga, Y. Senda and Research Group for Seismic Exploration of Iwate Volcano	15
4 An experiment in artificial explosion toward a detection of temporal changes of seismic velocity at Iwate volcano	H. Hamaguchi, T. Yamawaki and S. Tanaka	27
5 Continuous ground deformation monitoring at Iwate volcano, northeastern Japan	M. Sato and H. Hamaguchi	37
6 Ground-tilt observation and leveling on and around Iwate volcano	T. Takeda, E. Koyama and Y. Hirata	47
7 GPS observation at Iwate volcano - focused on the deformation in 1999 -	S. Ueki, S. Miura, T. Sato, K. Tachibana and H. Hamaguchi	61
8 Vertical movements at southern part of Iwate volcano detected by leveling (July 1998 - October 1999)	F. Kimata, R. Miyajima, K. Yamamoto, T. Takayama, S. Ueki, M. Sato, T. Matsushima, K. Uchida, M. Nakamura, H. Tsuji, E. Koyama, H. Mori and S. Hirano	69
9 Microgravity monitoring at Iwate volcano	S. Ueki, T. Maekawa, T. Sato, K. Nida and S. Miura	81
10 Continuous observation of geomagnetic total field around Iwate volcano	M. Mishina, S. Ueki and H. Hamaguchi	93
11 Continuous observation of geomagnetic total intensity at temporary stations in and around Iwate volcano	T. Kagiya, S. Fujiwara, T. Kadowaki, H. Hamazaki, T. Nishitani, A. Yamazaki, F. Fukui, T. Yamamoto, S. Kitagawa, Y. Tanaka, T. Hashimoto, S. Sakanaka, H. Hase, H. Taniguchi, T. Hasenaka,	

	A. Goto, T. Ohba, M. Nakagawa, M. Sasaki and M. Mishina	103
12	Self-potential Measurements around Mt. Ubakura H. Hase, S. Sakanaka, Y. Tanaka, A. Goto and H. Taniguchi	111
13	Surface geothermal manifestations appeared in the west Iwate volcano from 1999 to 2000 N. Doi, S. Doi, T. Saito, T. Numakunai, K. Noda, S. Koshiya and H. Yamamoto	115
14	Fumarolic temperature of Kurokura-Ubakura area, Iwate Volcano T. Kagiya, J. Hirabayashi, E. Koyama, F. Masutani, K. Nogami and Local Government of Iwate Prefecture	125
15	Relationship between chemical composition of volcanic gases and volcanic activity at Mt. Iwate, Japan J. Hirabayashi, K. Nogami and T. Ohba	137
	Summary of observations S. Ueki	149

序 文

本報告書は、1999 年に岩手山で実施された集中総合観測の報告である。観測は、第 6 次火山噴火予知計画の一環として、国立大学を中心として全国の 18 機関から 60 名が参加して実施された。観測項目は、地震活動、地盤変動の他に、重力、電磁気、熱、火山ガスや速度構造変化など、多岐にわたっている。

岩手山では、観測が行われた前年の 1998 年に、活発な地震活動が発生し、同時に地盤変動も観測された。これらの現象は、浅部へのマグマの貫入によって生じたと考えられる。したがって、集中総合観測で得られたデータは、マグマ貫入から 1 年後の火山活動の状況を示すものとして貴重である。本報告書がマグマ活動を理解するうえで一助となれば幸いである。

観測を実施するにあたっては、岩手県をはじめとして、雫石町、滝沢村、西根町、松尾村、岩手森林管理署、盛岡森林管理署、盛岡地方気象台、東北地方整備局岩手工事事務所、環境省八幡平自然保護管事務所、日本道路公団盛岡管理事務所、岩手高原スキー場、プータロムラ、網張温泉などの関係機関のご協力をいただいた。

観測の実施から報告書の発行までに長い年月が経過してしまった。これは編集作業の不手際によるもので、関係各位にお詫び申し上げる次第である。

東北大学大学院理学研究科
附属地震・噴火予知研究観測センター
センター長 長谷川 昭

1999 年岩手山の地震活動

田中 聡・中道治久・植木貞人・浜口博之
東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

Seismicity at Iwate volcano in 1999

Satoru Tanaka, Haruhisa Nakamichi, Sadato Ueki, and Hiroyuki Hamaguchi
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University

Seismic activity of volcano-tectonic earthquakes in the shallow region (depths less than 5 km) of Iwate volcano in 1999 relatively declined than that in 1998. The number of the earthquakes was about a one third of that in 1998. However, activities of the low-frequency earthquakes were active. The number of low-frequency earthquakes occurring around 10 km depth was increased 1.3 times, those near the Moho discontinuity was three quarters of that in 1998. This suggests that a magmatic activity is still active in deeper crust under the volcano. We will successively observe seismic activity with great attention.

1. はじめに

東北大学は 1981 年に岩手山・秋田駒ヶ岳を対象とした広域火山観測網を設置し、高感度地震観測を開始した。その後、地震観測網を順次強化していたおり、岩手山において 1995 年 9 月に火山性微動を観測した(植木・他, 1996)。その火山性微動発生後 2 年 4 ヶ月を経て、1998 年 2 月頃より山頂西側に隣接する鬼ヶ城直下において始まった地震活動は 3 月に急激に活発化し、4 月から 7 月にかけて震源域の拡大が続き、8 月には震源域が東西方向に約 10 km もの拡がりを持つに至った(田中・他, 1999)。1998 年 9 月 3 日に火山性地震の震源域の南西端に近接する地域で発生した M6.1 の地震(海野・他, 1998)以降、岩手山における地震活動は低調になったものの、1998 年 1 月以前の状況と比べると依然として活動のレベルは高い。本報告では田中・他(1999)が述べた 1998 年の状況に引き続く 1999 年の地震活動について述べる。

2. 浅い地震の活動

図 1 に地震観測点の分布、表 1 に観測点情報の一覧を示す。多くの地震観測点に固有周波数 1 Hz の短周期地震計を設置し、仙台まで地震波形データをテレメータでリアルタイムに伝送している。テレメータ伝送されていない観測点では、長期収録用ハードディスクを備えたデータロガーを用いて現地収録を行っている。また、一部の観測点には固有周期 5 秒の中帯域地震計、広帯域地震計 S T S-2、強震計も設置している。1999 年には観測体制に若干の変更があった。6 月に

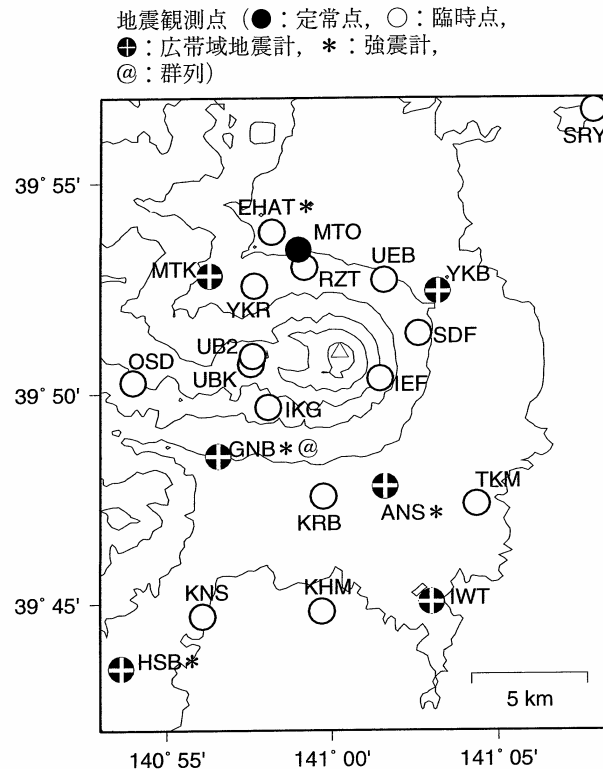


図 1. 観測点分布. 黒丸は定常点, 白丸は臨時点, 白十字のついた黒丸は広帯域地震計を併設した定常点, *印は強震計, @は群列地震観測を実施.

Fig. 1 Map of seismic stations. Closed circles are permanent stations, open circles are temporary stations, white crosses are broad-band seismometer, asterisks are strong motion seismometer, at-mark is a seismic array.

奥産道観測点(OSD)と葛根田6号井観測点(KK6)の2点の臨時点を新設, 9月に三ツ石臨時点(MTI)撤収, 10月に姥倉臨時点(UBK)をUB2に移設, 12月に松尾定常観測点(MTO)が竣工して運用が始まった.

図2(a)に1999年1月から12月に岩手山周辺で発生した深さ14 kmより浅い地震の震源分布を示す. テレメータでデータ伝送されている観測点のうち, 震源をとり囲む5点以上の観測点における地震波形からP波, S波の到達時刻を手動によって検出し, 震源決定を行った. また, 図中西端の震源決定には図の西方の範囲外に位置する蟹場観測点(KNB), 秋田焼山観測点(YKY), 男神山観測点(OGM), 秋田駒ヶ岳観測点(AKM)の読み取り値, 東山腹下深さ約10 kmで発生している低周波地震の震源決定には東方の姫神観測点(HMK)の読み取り値も併用している. 走時計算には図3に示すP波, S波の1次元速度構造を用いた. 観測点の高度は, ある観測点における走時を計算する際に, 震源の深さと観測点高度を足しあわせて求めた仮の震源の深さを用いることによって補正している. 震源計算収束後の走時残差のrmsはP波で0.1秒未満, S波で0.1~0.3秒である. 比較のために1998年における同地域に発生した地震の震源分布を図2(b)に示す. 1999年における地震活動を概観すると, 前年と比べて地震の総数が約2分の1になったこと(このうち, 高周波地震は約3分の1, 低周波地震は約5分の4), 山頂直下と黒倉山から姥倉山における高周波地震と東山腹下の低周波地震の活動が依然として活発であったこと, 鬼ヶ城直下の地震が非常に少なくなったことが特徴的である.

表 1. 地震観測点情報.
Table 1. Station information.

観測点名(コード)	緯 度 (度)	経 度 (度)	標高 (m)	定常/臨時	地震計	観測開始 (～撤収日)
岩手山(IWT)	39.7508	141.0500	360	定常	短周期†	1981年9月5日 ～1996年5月17日
相ノ沢(ANS)	39.7965	141.0268	150	定常	広帯域	1996年5月17日
			470	定常	短周期†	1994年11月4日
			470	臨時	広帯域	1998年4月13日
焼 走(YKB)	39.8740	141.0530	250	臨時	強 震	1998年6月15日
			550	定常	短周期†	1994年11月5日
			550	臨時	広帯域	1998年4月13日
松 川(MTK)	39.8800	140.9387	710	定常	短周期†	1982年7月2日
			810	臨時	広帯域	1998年7月25日
			280	定常	短周期†	1996年12月20日
玄武洞(GNB)	39.8087	140.9431	580	臨時	広帯域	1998年4月2日
			580	臨時	強 震	1998年5月8日
			580	臨時	群 列	1998年5月15日
			92	定常	短周期†	1997年1月25日
橋 場(HSB)	39.7245	140.8936	417	臨時	広帯域	1998年6月13日
			417	臨時	強 震	1998年9月4日
			1190	臨時	短周期†	1992年5月22日
岩手高原スキー場(IKG)	39.8280	140.9680	1180	臨時	短周期†	1996年6月27日
東岩手三合目(IEF)	39.8393	141.0242	690	臨時	短周期†	1996年10月9日
自衛隊敷地内(SDF)	39.8571	141.0433	640	臨時	中帯域†	1997年9月8日
上坊国有林内(UEB)	39.8784	141.0261	690	臨時	短周期†	1997年9月8日
東八幡平(RZT)	39.8834	140.9861	475	臨時	中帯域†	1998年6月2日
空 堀(KRB)	39.7927	140.9959	300	臨時	短周期†	1998年6月14日
上西根(KNS)	39.7450	141.0745	327	臨時	短周期	1998年7月6日
高 森(TKM)	39.7969	141.1315	290	臨時	短周期	1998年7月7日
白屋山(SRY)	39.9451	140.9949	276	臨時	短周期	1998年7月8日
小鉢森(KHM)	39.7471	140.9031	1080	臨時	広帯域	1998年7月14日 ～1999年9月27日
三 石(MTI)	39.8351	140.9594	1390	臨時	短周期†	1998年7月18日 ～1999年10月21日
姥 倉(UBK)	39.8450	140.9601	1486	臨時	短周期†	1999年10月21日
姥 倉(UB2)	39.8478	140.8023	810	臨時	短周期†	1998年7月21日
蟹 場(KNB)	39.8054	140.9698	545	臨時	強 震	1998年7月29日
東八幡平水道(EHAT)	39.8973	140.9624	750	臨時	中帯域†	1998年12月15日
焼切沢(YKR)	39.8749	140.9028	1160	臨時	短周期†	1999年6月21日
奥産道(OSD)	39.8364	140.8506	720	臨時	短周期	1999年6月23日
葛根田6号井(KK6)	39.8361	140.9927	44	定常	短周期†	1999年12月2日
松 尾(MTO)	39.8896					

† : 仙台までテレメータでデータ伝送されているデータ. * : 固有周波数 2 H z の短周期地震計

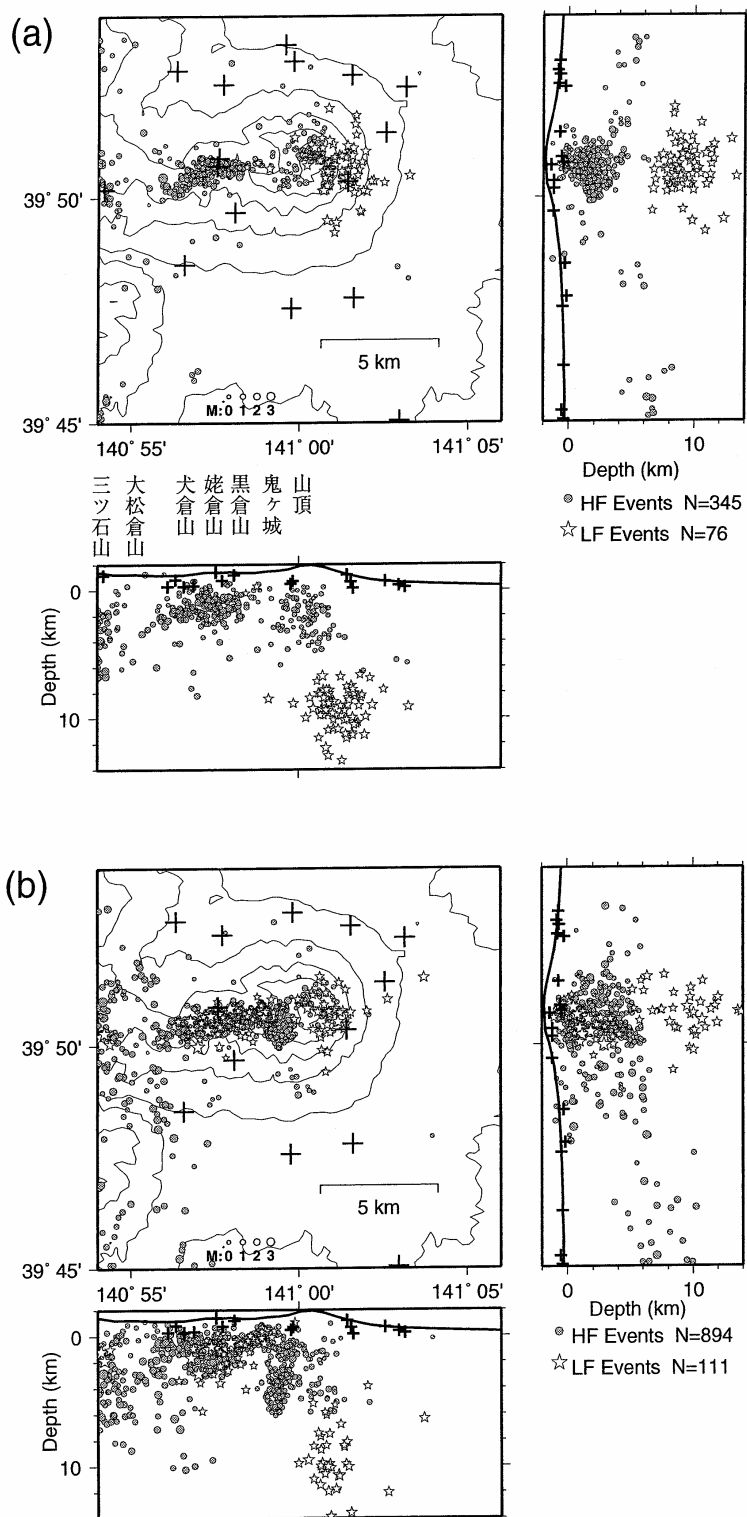


図 2. (a) 1999年に発生した深さ 14 km より浅い地震の震源分布. (b) 1998年の震源分布.
灰色の丸印は高周波地震, 白星印は低周波地震, 十字は観測点, 等高線の間隔は300 m.

Fig. 2 (a) Hypocenter distribution of shallow earthquakes of which depths are less than 14 km in 1999. (b) Same as (a) except for 1998. Gray circles are high-frequency earthquakes, open stars are low-frequency earthquakes, crosses are stations, contour interval is 300 m.

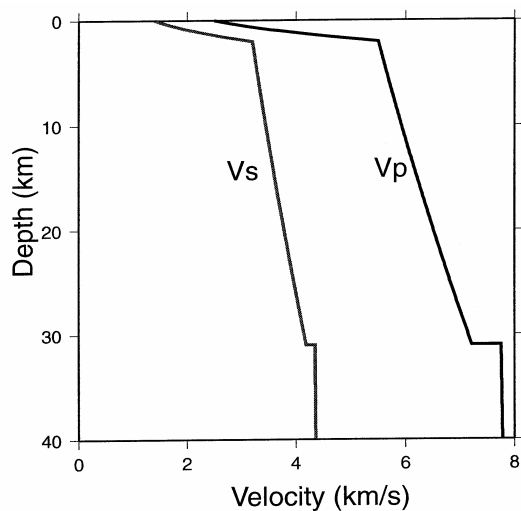


図 3. 震源決定に用いた P, S 波 1 次元速度構造.

Fig. 3 P- and S-wave velocity structure used in the hypocenter determination.

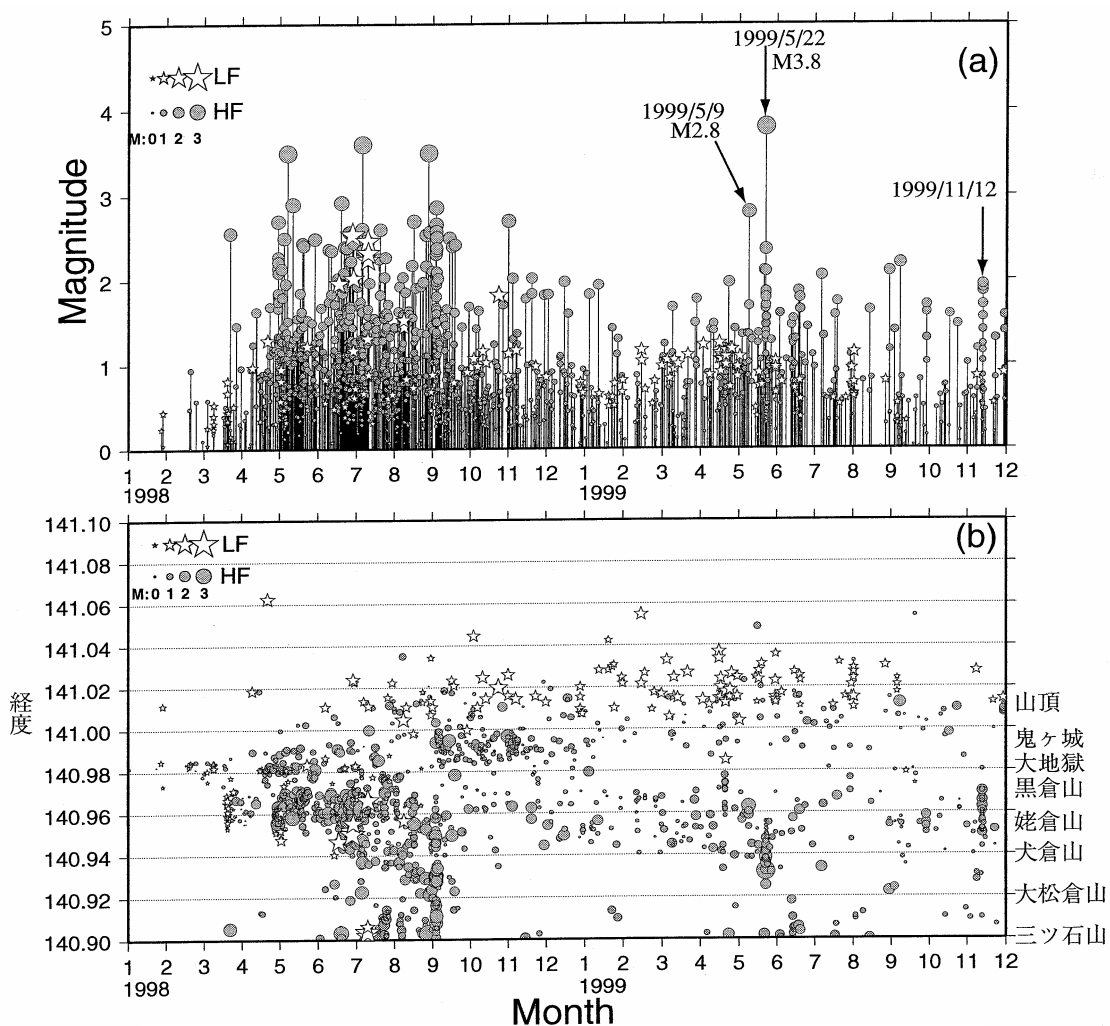


図 4. 1998 年－1999 年における (a) M-T 図と (b) 時空間分布図.

灰色の丸印は高周波地震, 白星印は低周波地震.

Fig. 4 (a) M-T diagram and (b) space-time diagram for the period from 1998 to 1999. Gray circles are high-frequency earthquakes, open stars are low-frequency earthquakes.

地震活動の時間的変化を追うために図 4 (a)にM-T図, 同(b)に震央を東西方向に投影した時空間分布を示す. 東経 140.98 度より西方の西岩手山(黒倉山, 姥倉山, 犬倉山, 大松倉山)における 1999 年の高周波地震の活動は, 前年より頻度は減ったものの依然継続している. 2月に発生した地震のマグニチュードはいずれも 1.5 未満と小さかったが, 3月にはいるとマグニチュード 1.5 を越える地震が再び現れ, 5月9日には黒倉山で M2.8, 5月22日は犬倉山で M3.8 の地震が発生した. 5月22日の地震は, 1998 年から始まった地震活動の中でマグニチュードが最大であり, 2個の前震と姥倉山から大松倉山までと西側に突出した地域で約 160 個の余震を伴った. 西岩手山における地震活動は 1999 年 6 月~8 月にかけて一時衰退したが, 9 月に入って再び活発になり始め, 11 月 12 日に黒倉山から姥倉山で群発地震が発生した. この群発地震の発生時に, 1998 年 7 月 10 日以来 1 年 4 ヶ月ぶりに振幅の大きい微動を観測した. 一方, 東経 140.98 度より東方の東岩手山(鬼ヶ城や山頂直下)における 1999 年の高周波地震活動は, 1998 年 11 月の中旬以降は 1 月間に約 7 個とほぼ一定の割合で継続している. 1998 年 8 月までよく観測されていた西岩手山浅部における低周波地震は 1999 年にはかなり減少しており, 震源まで求められたイベントは大地獄近傍の 3 個に止まっている. 一方, 東山腹下深さ約 10 km で発生している低周波地震は 1998 年よりも 1999 年の方が約 1.3 倍多く, 図 5 (c)に示すように 1999 年 4 月と 7 月に群発した.

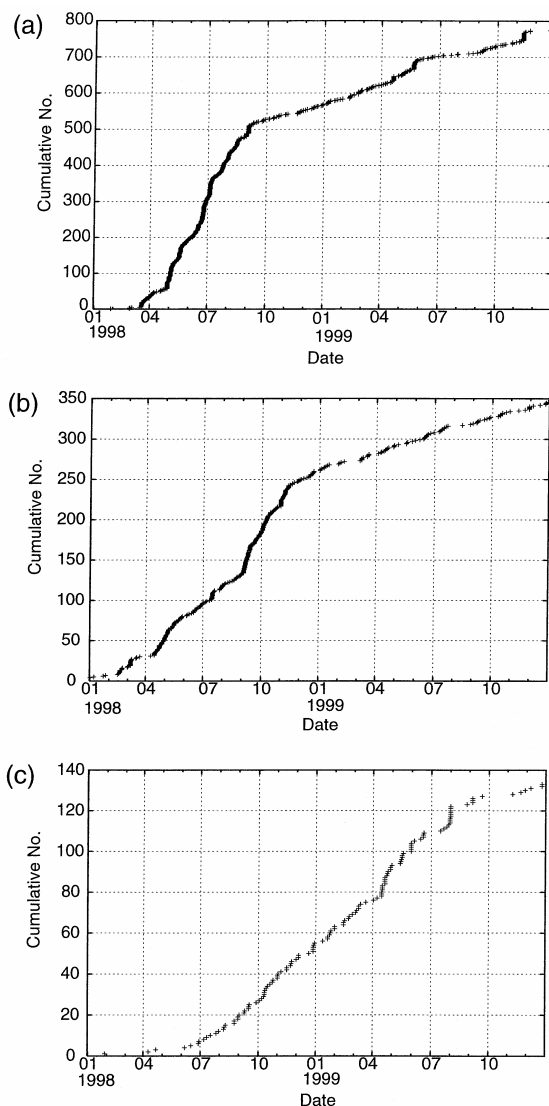


図 5. 各領域における地震の積算度数の時間変化. (a) 犬倉山から黒倉山, (b) 大地獄から東側深さ 5 km 以浅, (c) 東山腹下深さ 5 km 以深(低周波地震).

Fig. 5 Cumulative number of events for (a) the region from 140.93° to 140.98° for focal depths less than 5 km, (b) same as (a) except for the region from 140.98° to 141.2° and (c) the region from 140.98° to 141.2° for focal depths greater than 5 km (low-frequency earthquakes).

3. モホ面近傍の低周波地震の活動

図6 (a) に1995年3月～1999年10月にモホ面近傍で発生した低周波地震の観測点補正を考慮して再決定した震源分布を示す。震源決定には図の範囲外にある観測点も多数用いている。震源再決定の結果、モホ面近傍の低周波地震の震源域は狭い範囲に密集して発生していることが明らかになり、特に北東側の震源域は、図に示すとおりBとCの2つあることが分かった。図6 (b) から、1998年4月～1999年10月まで低周波地震は高い発生頻度を保っていたことがわかる。1999年1年間にモホ面近傍に発生する低周波地震の発生数は前年の約4分の3であった。1999年3月に震源域Cが活動的になり、震源域Aでは1998年からの約2年間ほぼ定常的に低周波地震が発生していたが、1999年4月に特に活発であった。

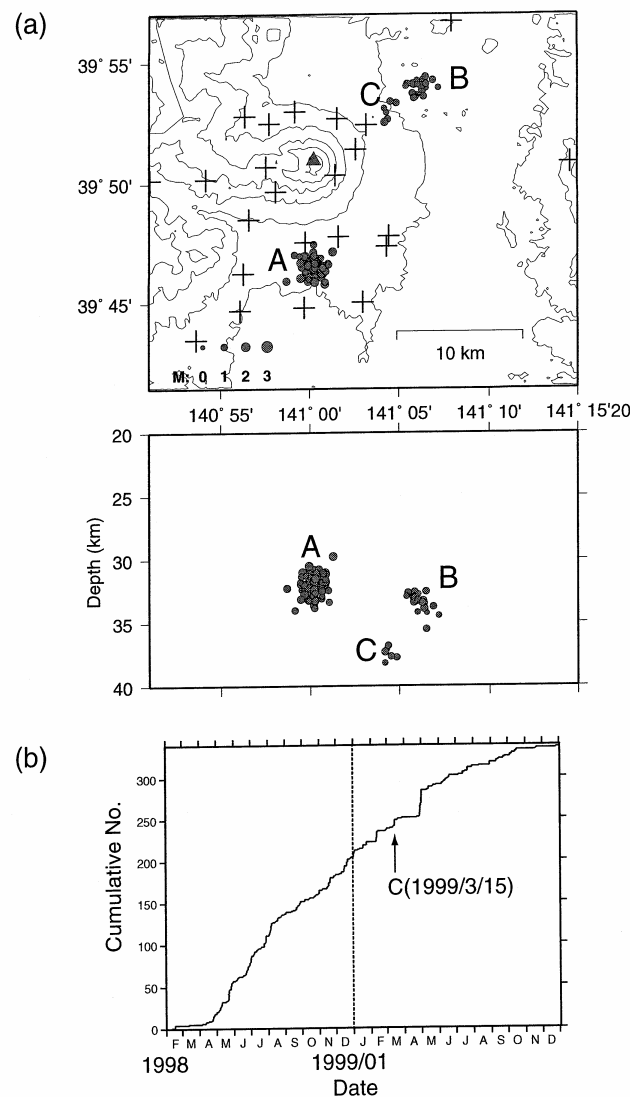


図6. (a) 1995年3月～1999年10月に発生したモホ面近傍の低周波地震の震源分布。観測点補正を考慮して再決定した。(b) 1998年～1999年モホ面近傍で発生した地震の積算度数の時間変化。

Fig. 6 (a) Hypocenter distribution of low-frequency earthquakes near the Moho discontinuity. (b) Cumulative number of the low-frequency earthquakes from 1998 to 1999.

4. まとめ

1999 年の岩手山における地震活動は、浅部における高周波地震の総数が前年の約 3 分の 1 に減少した。しかし、1999 年 5 月に西岩手山で 1998 年の地震活動以来最大のマグニチュード 3.8 の地震が発生した。また、深さ 10 km に発生する低周波地震の発生数は前年より 1.3 倍多く、モホ面近傍に発生する低周波地震の発生数は前年の約 4 分の 3 と浅部地震活動ほど活動が減衰していない。これら地殻深部の低周波地震活動は、地殻深部におけるマグマ活動が未だ衰えていない可能性を示唆しており、今後ともさらに観測を継続することが重要である。

引用文献

- 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.
- 植木貞人・森田裕一・浜口博之 (1996) 1995 年 9 月と 10 月に岩手火山で発生した火山性微動について. 東北地域災害科学研究, 32, 285-292.
- 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) 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, 17, 1-8.

1999年9月8日に岩手山で発生した火山性微動の到来方向の推定

岩澤拓郎*・山本英和**・佐野 剛**・小淵卓也*・長浜庸介**・斎藤徳美**

* 岩手大学大学院, ** 岩手大学工学部

Estimation of Arrival Azimuth of Volcanic Tremor Occurred in Iwate Volcano on Sep. 8, 1999

Takuro Iwasawa*, Hidekazu Yamamoto**, Tsuyoshi Sano**, Takuya Obuchi*,
Yosuke Nagahama** and Tokumi Saito**

* Graduate School of Iwate University, ** Faculty of Engineering, Iwate University

At Iwate volcano, volcanic activity has being activated from 1995. Volcanic tremor is important to know volcanic activity. The source region cannot be estimated by conventional observation and analysis.

Therefore, microtremor array observation was carried out around Iwate volcano. The estimation of arrival azimuth of the volcanic tremor that arose in Iwate volcano was tried.

In the analysis, volcanic tremor observed on Sep. 8, 1999 was used. The predominant frequency of observed volcanic tremor was 2 Hz, the arrival direction was south, phase velocities of vertical component of volcanic tremor were 3000 m/s to 1000 m/s. These results imply that the source region of the volcanic tremor was the shallow part in Mt. Kurokura.

1. はじめに

岩手県北西部に位置する岩手山は、1995年9月の火山性微動の発生以降、1998年には火山性地震や火山性微動が多発した。また、1999年には噴気などの表面現象が顕著に現れるなど、現在も火山活動は続いている(土井, 1999)。この火山活動を把握するための重要な情報として火山性微動が挙げられる。火山性微動は、山体内部のガスや熱水、マグマなどの流動によって発生する連続的な振動である。そのため、従来の観測及び解析による震源決定は困難を極める。この火山性微動の震源を解明することにより、災害予測や事前対策につながると考えられる。

この火山性微動の震源を決定するためには、ある観測点における波動の到来方向と見かけ位相速度、その地点の地下速度構造が必要となる。この位相速度と地下速度構造から波動の入射角を算出し、伝播経路を深さ方向に解析することによって、火山性微動の震源を特定できる。これらはアレー観測を行うことによって推定することが可能である。

そこで、岩手山で発生する火山性微動の震源解明を目指し、1999年に実施した微動アレー観測で捉えた同年9月8日の火山性微動を用いて、その到来方向の推定を試みた。

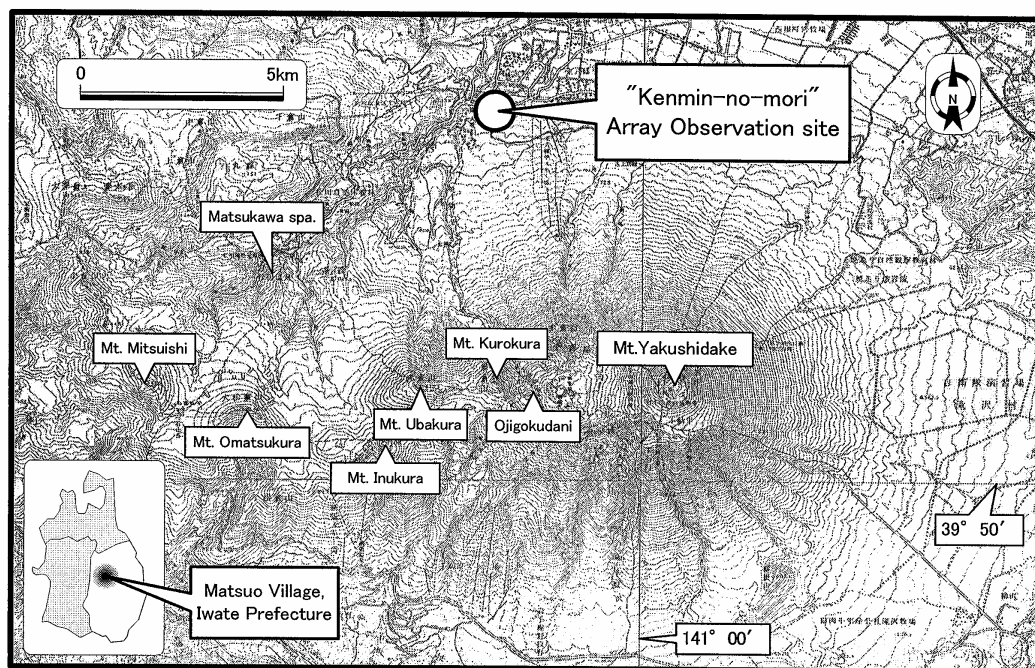


図 1. 観測点周辺の地図. 丸は観測地点の岩手県松尾村「県民の森」を示す.

Fig. 1 Location map around the observation site. The circle shows “Kenmin-no-mori”, Matsuo Village, Iwate Prefecture for the observation site.

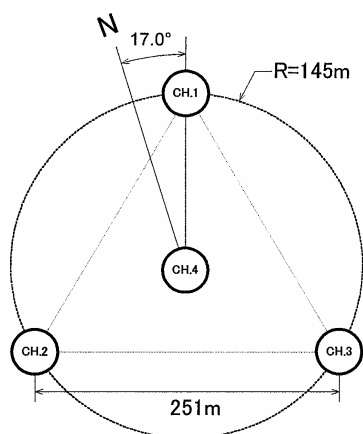


図 2. 観測点の配置. 丸は地震計を示す. 合計 4 台の地震計を配置し, その間隔は, 最大 251 m, 最小 145 m である (N : 磁北).

Fig. 2 Array configuration of the observation point. Circles show the seismometer locations. Three seismometers are on a circle, and one is at the center. The maximum distance of seismometer interval is 251 m, and the minimum distance is 145 m.

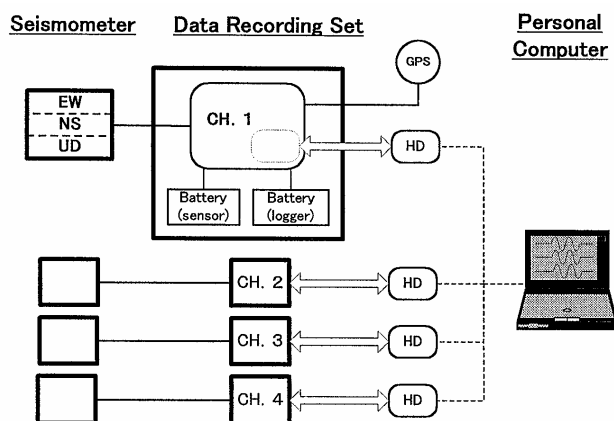


図 3. 観測システム. 固有周波数 1 Hz の 3 成分一体速度型地震計「LE3D」(Lenartz 社), データロガー「LZ8000」(白山工業)を用いた. 200 Hz サンプルングで, 常時データを収録した. GPS により時刻校正を行った.

Fig. 3 Observation system. Velocity-type three component seismometers “LE3D” were used as a sensor. Data loggers “LZ8000” were used as a recording system. The sampling frequency was 200 Hz. Data was continuously recorded.

2. 観測の概要

まず、岩手山で発生する火山性微動を捉えるために、1999年7月15日から11月29日の長期間にわたって、図1に示す岩手県松尾村「県民の森」で3成分微動アレー観測を実施した。この地点は、岩手山山頂の薬師岳から北北西約5 km の北緯39°50′，東経141°に位置し、勾配もなく平坦である。

次に、観測点の配置を図2に示す。方位分解能が等方的な3角形配置を採用した。この配置は、円形アレーと等価である。地震計は、円周上に3点、円の中心に1点設置した。図3に観測システムを示す。地震計は、固有周波数1 Hzの3成分一体速度型地震計を用いた。データ収録にはデータロガーを用いた。火山性微動はいつ発生するか分からないため、200 Hz サンプリングで常時データ収録した。なお、GPSにより時刻校正を行い、その精度は1 msec 以内である。また、この収録装置は2 Gbytes のハードディスクが脱着可能であるため、火山性微動などが発生した場合は、迅速なデータ回収が可能である(佐野, 2000)。

3. 火山性微動の解析

観測期間中に発生した火山性微動は、7月21日午後4時18分、9月8日午後1時21分、11月12日午後8時54分の計3つであり、いずれも捉えることに成功した。しかし、人工的ノイズの多い日中に発生したイベントや火山性微動と火山性地震が同時発生したイベントなど、いずれのイベントも SN 比が低い。その中で、最も SN 比が高い9月8日に発生した火山性微動の解析結果を示す。

図4に上下動成分の速度波形を示す。図2及び図3に示した全観測点において、常時微動や火山性地震とは異なる波を捉えている。次に、火山性微動の主な周波数成分を検出するために、データを分割してスペクトル解析を行った。その結果を図5に示す。時間経過に関わらず、常に2 Hzの周波数でピークが確認できる。よって、このイベントの主なパワーの周波数成分は2 Hz であると言える。

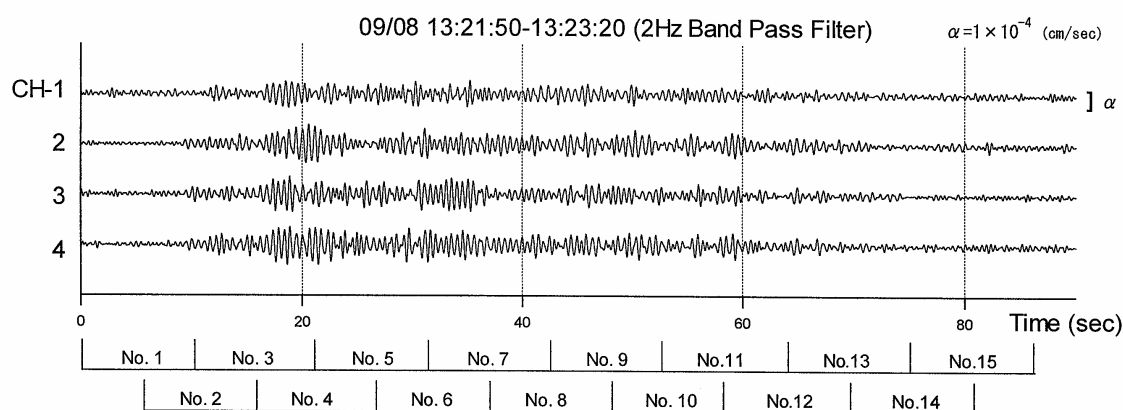


図4. 1999年9月8日に発生した火山性微動の上下動成分の波形記録. スペクトル解析は、波形データを1区間10.24秒、時間分解能5.12秒として、波形の下に示すように15分割したデータを用いた。

Fig. 4 The vertical records of volcanic tremor which occurred on Sep. 8, 1999. A narrow band-pass filter was used, and the center frequency was 2 Hz. The volcanic tremor record was divided to 15 blocks for spectral analysis. The time interval of one block is 10.24 seconds, and the overlapping time is 5.12 seconds.

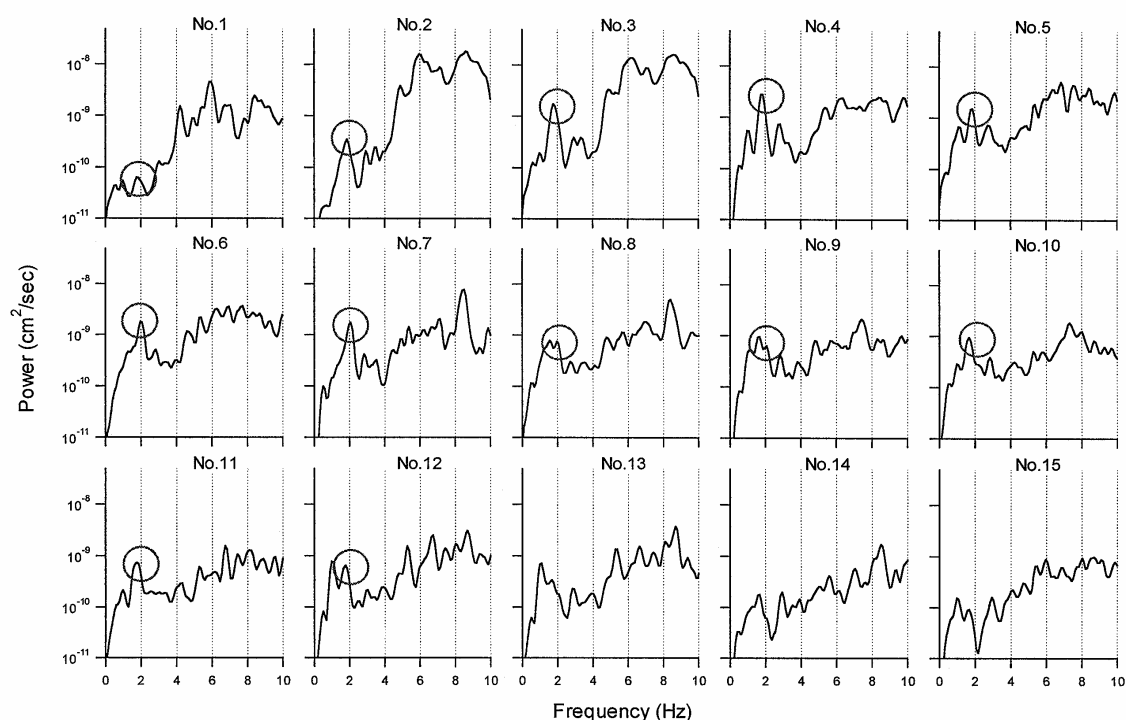


図5．図4の各区間におけるパワースペクトル．時間経過に関わらず，丸で示した2 Hzの周波数でピークが確認できる．

Fig. 5 The power spectrum in each block in Fig. 4. The peaks can be seen in the frequency of 2 Hz shown in the circle for all blocks.

次に、2 Hz の波動を用いて到来方向及び見かけ位相速度を推定するために、Neidell and Taner (1971) による Semblance 解析を行った．その結果を図6に示す．上図からSemblance 値，到来方向，見かけ位相速度，の時間変化を示す．到来方向及び見かけ位相速度は，Semblance 値と連動している．Semblance 値は全体的に高く，到来方向は180° から190° に集中していることが分かる．この到来方向から，イベントの主なパワーの波動は，アレー観測点に対し南から到来していると言える．位相速度に関しては3000 m/s から1000 m/s に分布しており，ばらつきが見られる．

4. 考察

上記の結果に基づいて，火山性微動の震源域推定を試みた．図7に火山性微動の解析から推定された到来方向を地図上で示した．観測地点に対してほぼ南ということから，薬師岳より西側の黒倉山付近から到来していることが分かる．そして，火山性微動の震央を火山性地震の震央と同様に岩手山山体と仮定し，9月8日の火山性微動の震源域を推定した．その結果，震央の黒倉山山頂から深さ1000m前後となり，火山性地震の震源より浅い場所に推定された．この震源域は，火山性地震の震源や最近の表面現象が活発化している場所に良い対応を示す．なお，震源域推定に用いた地下速度構造は，山本(1998)及び岩澤(2000)による5層構造である．

次に，1998年に発生した火山性微動の震源域との比較を行った．Yamamoto et al. (2000)は，1998

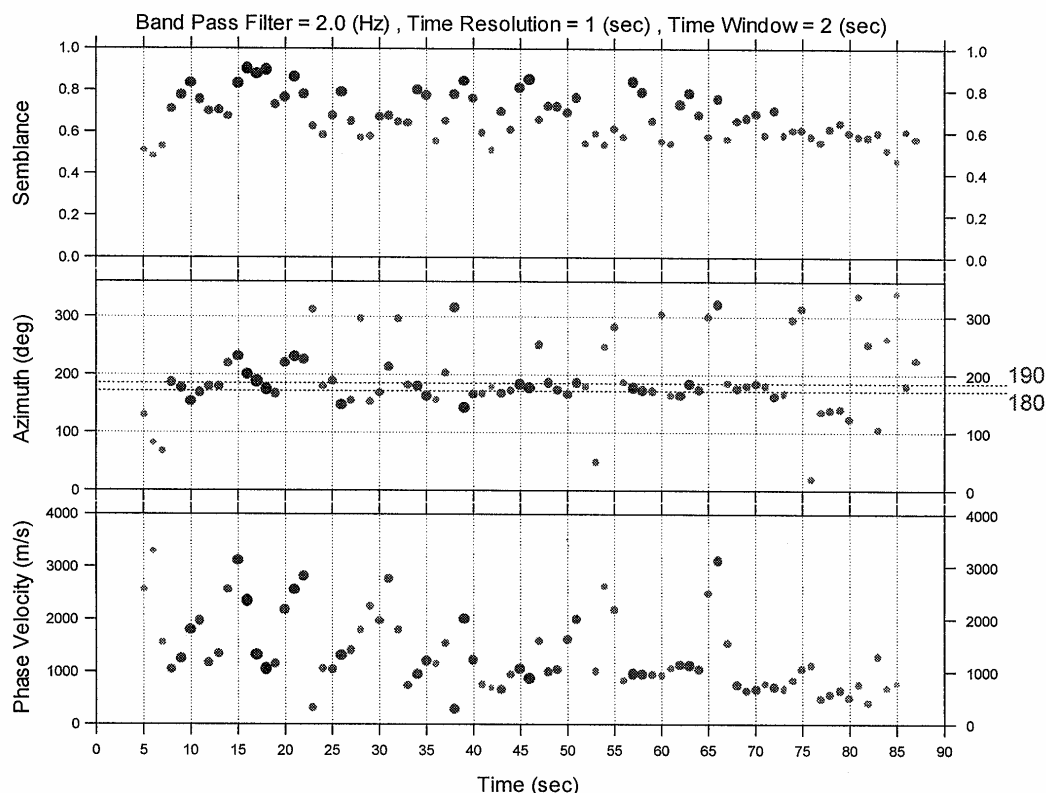


図6. Semblance 解析による火山性微動の Semblance 値，到来方向，見かけ位相速度の時間変化. 1 区間 2 秒で，分解能は 1 秒である. Semblance 値が高いほど丸は濃く大きい. 到来方向は， 180° から 190° に集中している. 見かけ位相速度は，3000 m/s から 1000 m/s に分布している.

Fig. 6 Semblance value (upper), arrival azimuth (middle), apparent phase velocity (lower) of the volcanic tremor as a function of lapse time by the Semblance analysis. The time window of one block is 2 seconds, the overlapping time is 1 second. The circle is thickly bigger, as the Semblance value is higher. The arrival azimuth is concentrated from 180 to 190 degrees. The apparent phase velocity is distributed from 3000 to 1000 m/s.

年に本研究と同地点でアレー観測を実施し，周波数－波数解析法により，火山性微動の到来方向を推定している. アレー観測で捉えた火山性微動は4つであるが，いずれも到来方向は南と推定されている. 従って，1998年1999年に発生した火山性微動の震源域は，マグマ噴火が懸念されている東岩手ではなく，現在，噴気などの表面現象が活発化している西岩手であることが分かった.

5. おわりに

本研究では，岩手山で発生する火山性微動の震源の解明を目指し，微動アレー観測を用いて火山性微動の到来方向の推定を試みた. その結果，1999年9月8日に発生した火山性微動の到来方向は，アレー観測点に対し南であることが分かった. このことから，岩手山山体の黒倉山付近に火山性微動の震源域が存在すると推定できる. そして，この到来方向や見かけ位相速度，地下速度構造などを用いることによって，火山性微動の震源域は推定可能であると思われる.

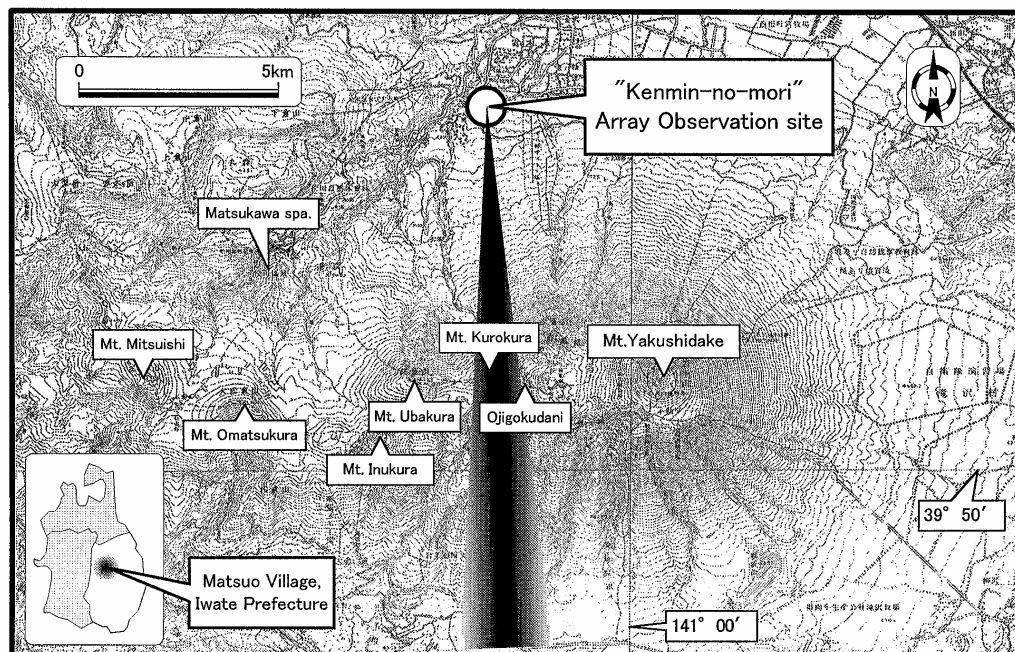


図 7. 火山性微動の到来方向. 丸は観測点を示す. 火山性微動の到来方向は、黒倉山方向と推定された

Fig. 7 Arrival azimuth of the volcanic tremor. The circle shows the observation site. The arrival azimuth of the volcanic tremor was estimated with the azimuth to Mt. Kurokura.

参考文献

- 岩澤拓郎 (2000) 岩手山北山麓における 3 成分微動アレー観測. 岩手大学大学院工学研究科修士論文.
- 土井宣夫 (1999) 岩手山の縄文時代以降の噴火史. 月刊地球, 21, 257-263.
- Neidell, N. S. and M. T. Taner (1971) Semblance and other coherency measures for multichannel data. Geophysics, 36, 482-497.
- 佐野 剛 (2000) 岩手山北山麓における火山性微動の連続アレー観測. 岩手大学工学部技術報告.
- 山本英和・中道治久・岩澤拓郎・廣野貴士・田中 聡・西村太志・山脇輝夫・上田英樹・斎藤徳美・浜口博之 (1998) 常時微動アレー観測による浅部地下速度構造の推定. 日本火山学会1998年度秋季大会講演予稿集, 84.
- Yamamoto, H., H. Nakamichi, S. Tanaka, T. Nishimura, T. Iwasawa, T. Hirono, T. Yamawaki, H. Ueda, T. Saito and H. Hamaguchi (2000) Volcanic tremor array observation using three-component seismometers at Iwate Volcano, Japan. WGC2000.

岩手火山における人工地震のアレイ観測

小菅正裕*・千田良道*・岩手山人工地震研究グループ

* 弘前大学理工学部

Array Observation of Artificial Explosion at Iwate Volcano

Masahiro Kosuga*, Yoshimichi Senda* and

Research Group for Seismic Exploration of Iwate Volcano

* Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

We have made array observation of two artificial explosions by two L-shaped arrays deployed at northern and southern foot of Iwate volcano. Semblance analysis using array records reveals time variation of semblance value, incident direction, and slowness. Several coherent phases following the direct P-wave come from not the direction of explosion but the direction of summit rotated several ten degrees from the source. On the other hand, there are almost no coherent phases from the western part of volcano. We estimate the location of scatterers by using the time difference between the coherent phases and the first arrival, incident direction, and slowness. The scatterers are located in the region from the eastern foot of volcano to the Kitakami basin. The westernmost region of scatterers is close to the source of low-frequency earthquakes whose activity has increased prior to the volcanic activity.

1. はじめに

岩手火山では 1998 年 2 月中旬頃から地震活動が活発化し、現在でも噴火の可能性が懸念されている。このような状況を受けて、岩手火山の地下構造の時間変化を調べることを主目的に、岩手山人工地震研究グループでは人工地震探査を繰り返し行うことを計画した。第 1 回目の観測は 1999 年 6 月 25 日に、第 2 回目の観測は同年 9 月 30 日に行われた。これらの実験の報告は別項を参照されたい。この繰り返し探査では、山体を取り囲む測線に至る波線経路に沿う構造と、その時間変化に関する情報を得ることが期待される。一方、火山下にマグマだまりや地震波の反射面が存在すれば、それによって散乱または反射された波は後続波として観測される。後続波を解析して散乱体や反射面の位置を推定するには、波の到来方向や入射角を知る必要がある。この目的には地震計を幾何学的に多数配置したアレイ観測が適している。そこで我々は上記 2 回の実験に合わせてアレイ観測を実施した。ここでは、アレイで記録された人工地震の波形の特徴や、大まかに推定した散乱体の位置などについて報告する。

2. アレイ観測

実験の発破点と南北2本の本測線及びアレイの位置を図1に示す．アレイは本測線上に近い2か所，岩手火山の北山麓(焼切沢)と南山麓(相の沢)に展開した．発破点からアレイまでの距離は両アレイともほぼ同じで，約10 kmである．アレイの地震計配置を図2に示す．両アレイとも形状がL字型になるように27点に地震計を配置した．地震計の間隔は50 mで，L字の片腕の長さは約650 mである．地震計の固有周波数は2 Hzで，アレイの両端及び中央の3点では3成分，その他の点では上下動成分を用いた．信号は分解能16ビット，サンプリング周波数250 Hzでデータロガー(白山工業製 LS8000)に連続収録した．収録時間は発破を含む約2時間で，第1回目の観測では自然地震も1個記録できた．

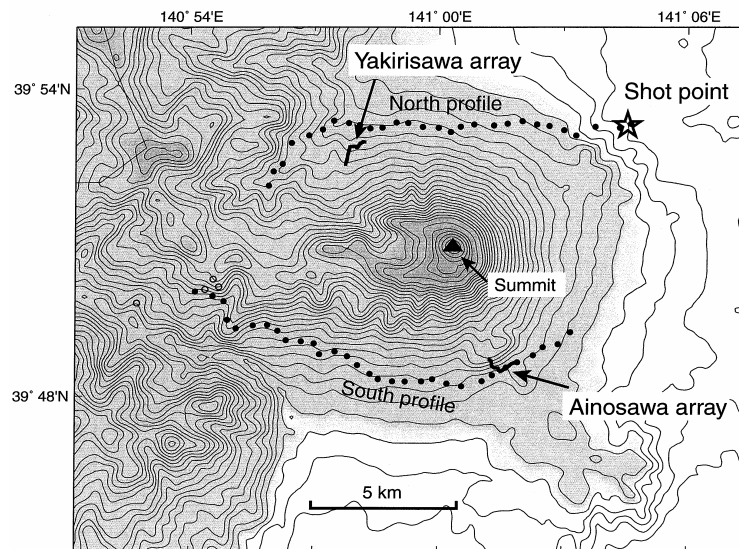


図1. 人工地震の発破点(☆)と南北2本の測線，及びアレイ観測点の位置．

Fig. 1 Map of Iwate volcano showing the location of artificial explosion (star), two seismic profiles, and two arrays.

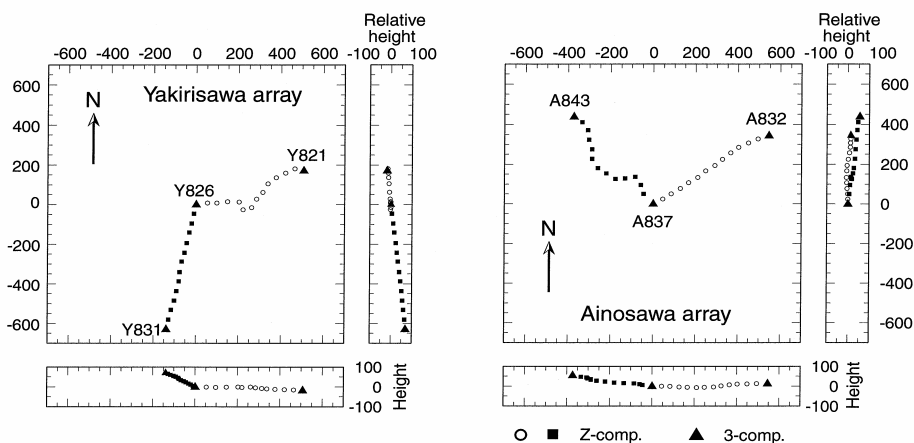


図2. アレイの地震計配置．平面図と高さの分布を示す．高さは中央の点からの相対値で表す．▲が3成分の観測点で，他は上下動成分の観測点．

Fig. 2 Configuration of two arrays. The height is relative height from the central station. The central and the two end-stations are equipped with three component sensors and the other stations are equipped with vertical sensors.

3. 観測波形の特徴

アレイで記録された2回の人工地震波形を図3及び図4に示す. 6月の実験の波形(図3)を見ると, 2つのアレイでの波形に顕著な差があることがわかる. 焼切沢アレイの記録では, 初動と

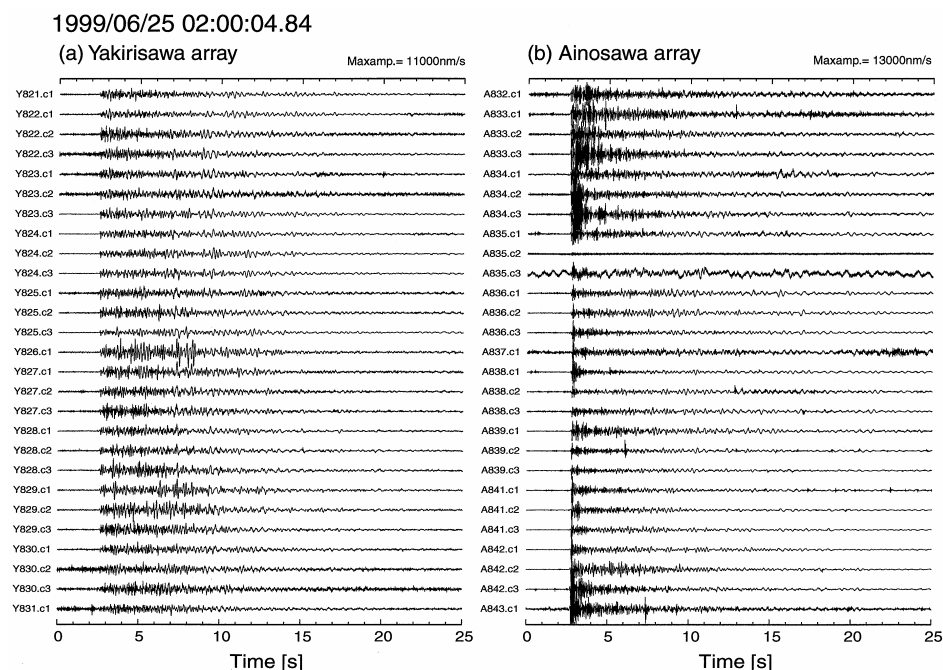


図3. 1999年6月25日の人工地震のアレイ記録. 左が焼切沢アレイで右が相の沢アレイの記録. 各アレイの最大振幅で規格化して示す.

Fig. 3 Array records for the artificial explosion on June 25, 1999. The traces are normalized to the maximum amplitude of each array.

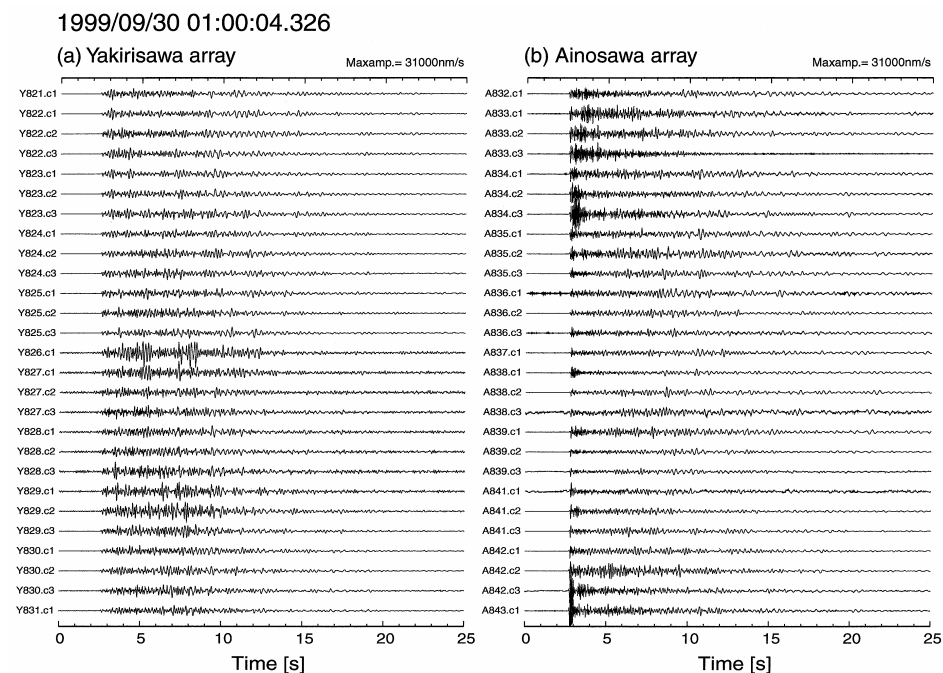


図4. 1999年9月30日の人工地震のアレイ記録.

Fig. 4 Array records for the artificial explosion on September 30, 1999.

それほど振幅の変わらない後続波が5秒以上継続し、それから徐々に振幅が小さくなる。また、観測点間の振幅の違いはそれほど大きくない。これに対して相の沢アレイの記録では、初動振幅が顕著に大きくその後の減衰も大きい。また、観測点間の振幅の違いも大きいといったように、波形の特徴は対照的である。これは地震計設置地点直下の地盤特性の不均質性が、相の沢アレイの方が大きかったことによるのであろう。

9月の実験の波形(図4)でも、アレイによる違いは6月の実験と同様に見られる。また、同一

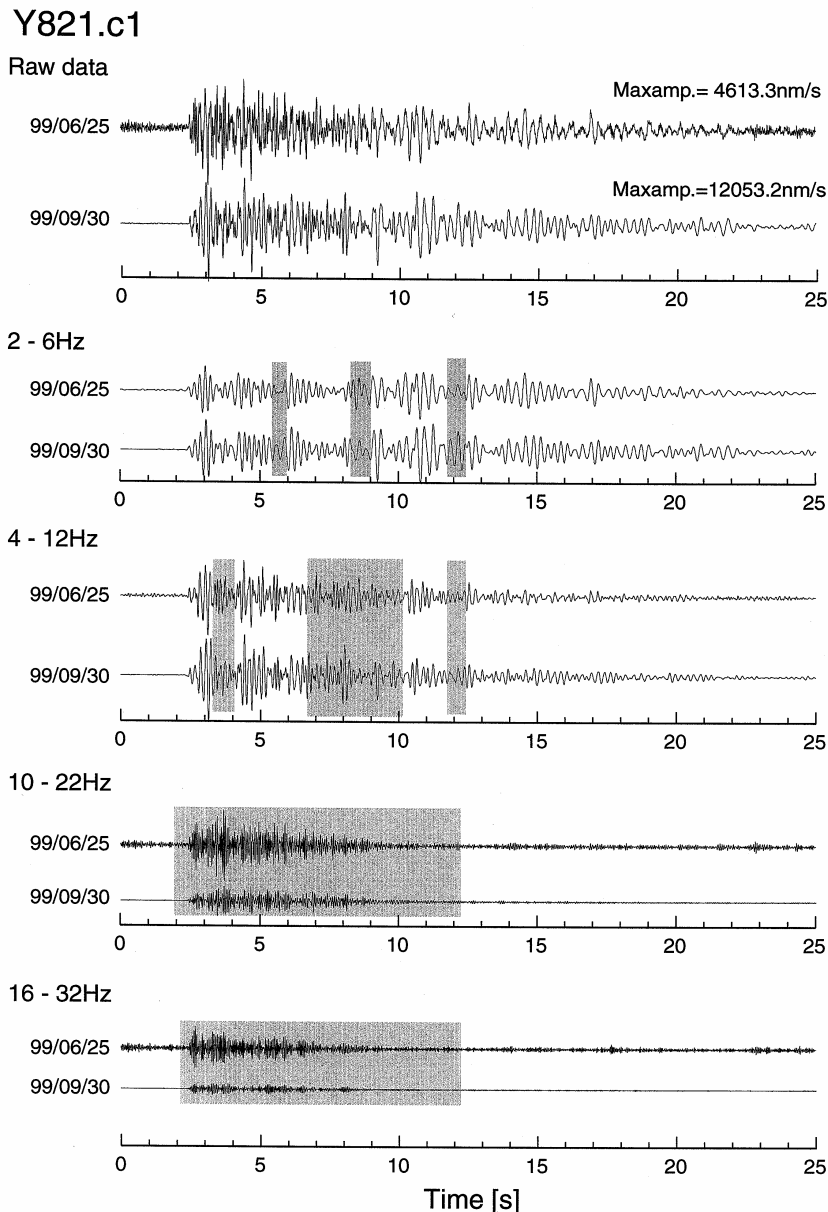


図5. 焼切沢アレイのY821観測点で記録した6月の実験と9月の実験の波形の比較。生波形(最上段)とバンドパスフィルターをかけた波形を示す。振幅は生波形の最大値で規格化して示す。影をつけた部分は2回の実験での差が大きかった部分。

Fig. 5 Comparison of seismograms recorded at the Y821 station of Yakirisawa array for the two explosions on June 25 and September 30. The traces are normalized to the maximum amplitude of raw data. The shaded portions represent the seismograms with significant difference between the two explosions.

のアレイで見た2つの実験の波形には違いもある。焼切沢アレイの Y821 観測点で記録した2回の実験の波形を比較したのが図5である。ここでは生波形とバンドパスフィルターをかけた波形を示している。図で影をつけたのは2回の観測波形に顕著な違いが見られる部分である。その違いは高周波成分ほど大きく、6月の実験の記録の方が高周波成分に富んでいることがわかる。このような違いは2回の実験での発破のしかたの違い(6月の実験では2本の発破孔を使ったのに対し、9月の実験では1本だけ)によるものと考えられる。

4. センブランス解析から見た後続波の特徴

図3及び図4の記録中には、一見してそれとわかるような顕著な反射波は見られない。そこで、後続波中に含まれる位相がそろった(コヒーレントな)波の到来方向やみかけのスローネスを見積もるために、センブランス解析(Neidell and Taner, 1971)を行った。図6は全体的な特徴を見るために、焼切沢アレイで記録した6月の実験の波形について、30秒間のウィンドウをとって解析した結果である。周波数帯域を何通りか変えて解析を行った結果、後続波の特徴が顕著に現れるのは2-6 Hzの周波数帯域であることがわかった。これよりも高周波になると全般にセンブランス値が低下し、初動を除いてはコヒーレントな波が認められなくなってしまう。そこで本報告では焼切沢アレイの2-6 Hzの周波数帯域についての結果だけを示す。センブランスを計算するウィンドウの幅は0.25秒、ウィンドウの移動幅は0.125秒とした。

センブランス値は初動で最大値(0.93)をとり、その後の約4秒間でも0.65~0.75と比較的大きい値が持続する。その後は0.5以下に減少するが、図の10秒・19秒・26秒付近では、センブランス値が0.6~0.7まで一時的に上昇する。スローネス(速度の逆数)については、初動が0.27 s/km、その後4秒間は0.3~0.9 s/km、さらにその後は0.4~1.0 s/kmと次第に大きな値をとるようになる。初動の波の見かけ速度は3.7 km/sで、表層での値としては妥当である。なお、スローネスと到来方向のプロットでセンブランス値の大きい領域が縦に延びて見えるのは、それらの分解能があまり良くないことを示す。これは、2-6 Hzの周波数帯域の波長に対してアレイの径が十分に大きくはないからである。図6で特徴的なのは到来方向の分布である。初動は北から時計回りに約110°の方向から入射している。発破点の方向は86°であるので、初動は岩手山の方から回り込んで来ていることになる。その後4秒間の波は100°~130°の方向から到来している。これも発破点の方向よりも10°~40°山体側から波が到来していることを示す。さらに後では到来方向のばらつきは大きくなるが、135°~300°方向からのコヒーレントな波は見られない。これはアレイから見て岩手山山頂(薬師岳)よりも西側の、いわゆる西岩手からのコヒーレントな散乱波はほとんど見られないことを示している。

前述のように、コヒーレントな後続波はP波初動から10秒以上経過しても見られるが、経過時間の大きな波は岩手山近傍で散乱された波とは考えられない。そこで次に、初動付近を詳しく見ることにする。図7は初動付近についてのセンブランス解析の結果である。初動到達後約8秒間にセンブランス値の上昇が5回見られる。ここではそれらにa相(初動)からf相までの名前を付けた(図7)。後続波の到来方向はb相からe相で120°前後、f相で初動と同じ110°である。スローネスは相ごとに異なり、b相で0.6 s/km、c相で0.33 s/km、d・e・f相は0.7 s/km以上である。なお、9月の実験の記録についてもセンブランス解析を行ったが、f相に相当する部分でセンブランス値が低くなっている以外は、6月の実験の結果と変わらなかった。

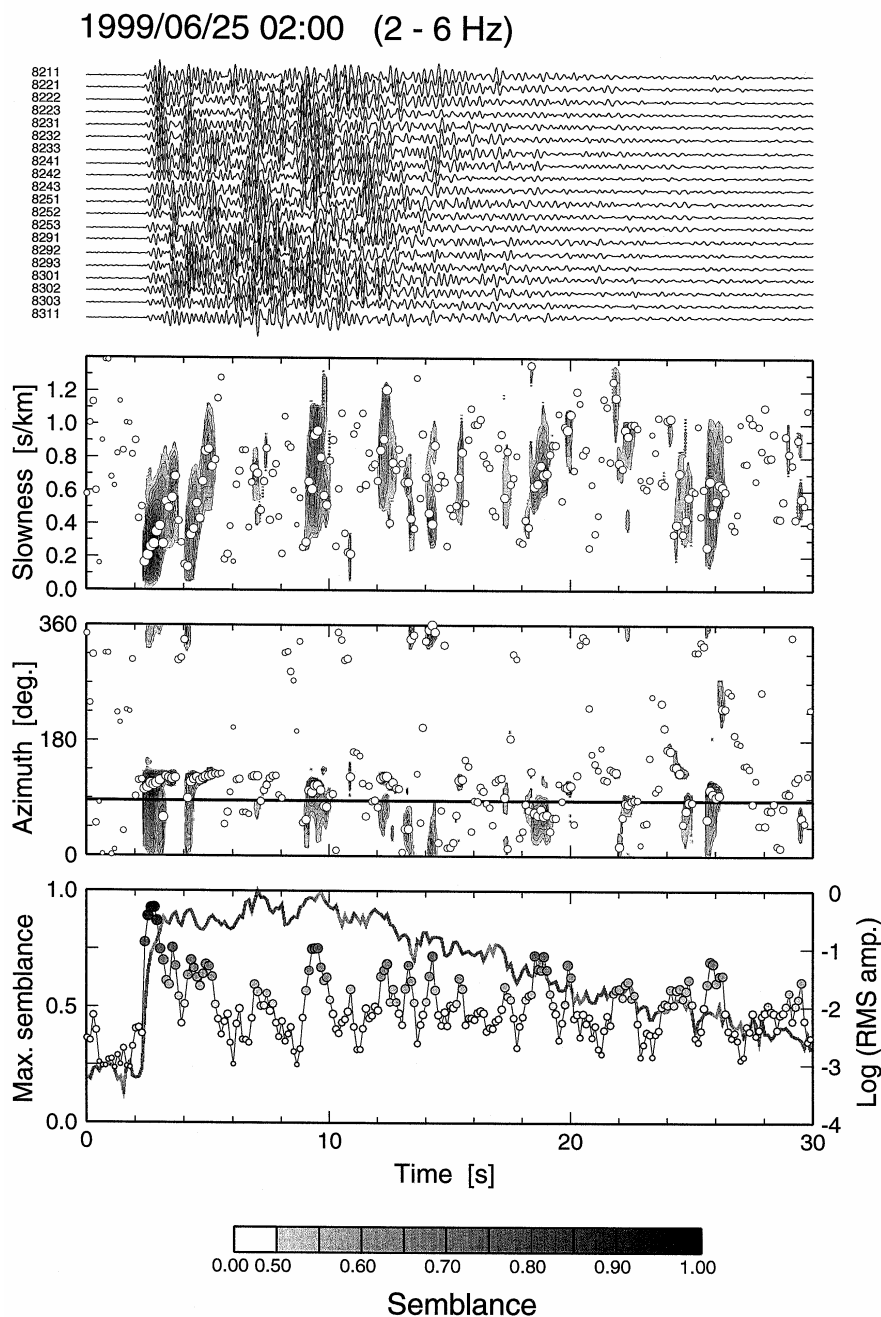


図6．焼切沢で記録した6月の実験のセンブランス解析の結果．周波数帯域は2-6 Hz．図は上からフィルターを通した波形，スローネス，到来方向，最大センブランス値(左目盛)及びRMS振幅(右目盛)．濃淡はセンブランス値に対応し，最大センブランスをとる場所は○で表している．到来方向の図の横線は理論的な到来方向．

Fig. 6 Result of semblance analysis of Yakirisawa array for the explosion on June, 1999. The frequency band of analysis is from 2 to 6 Hz. This figure represents, from top to bottom, filtered seismograms, time variation of slowness, back-azimuth, and maximum semblance value. The shading represents the semblance value. The open circles denote the slowness and back-azimuth with the maximum semblance value. The array-averaged RMS amplitude is shown by the solid line of the bottom figure. The horizontal line in the azimuth plot shows the theoretical back-azimuth.

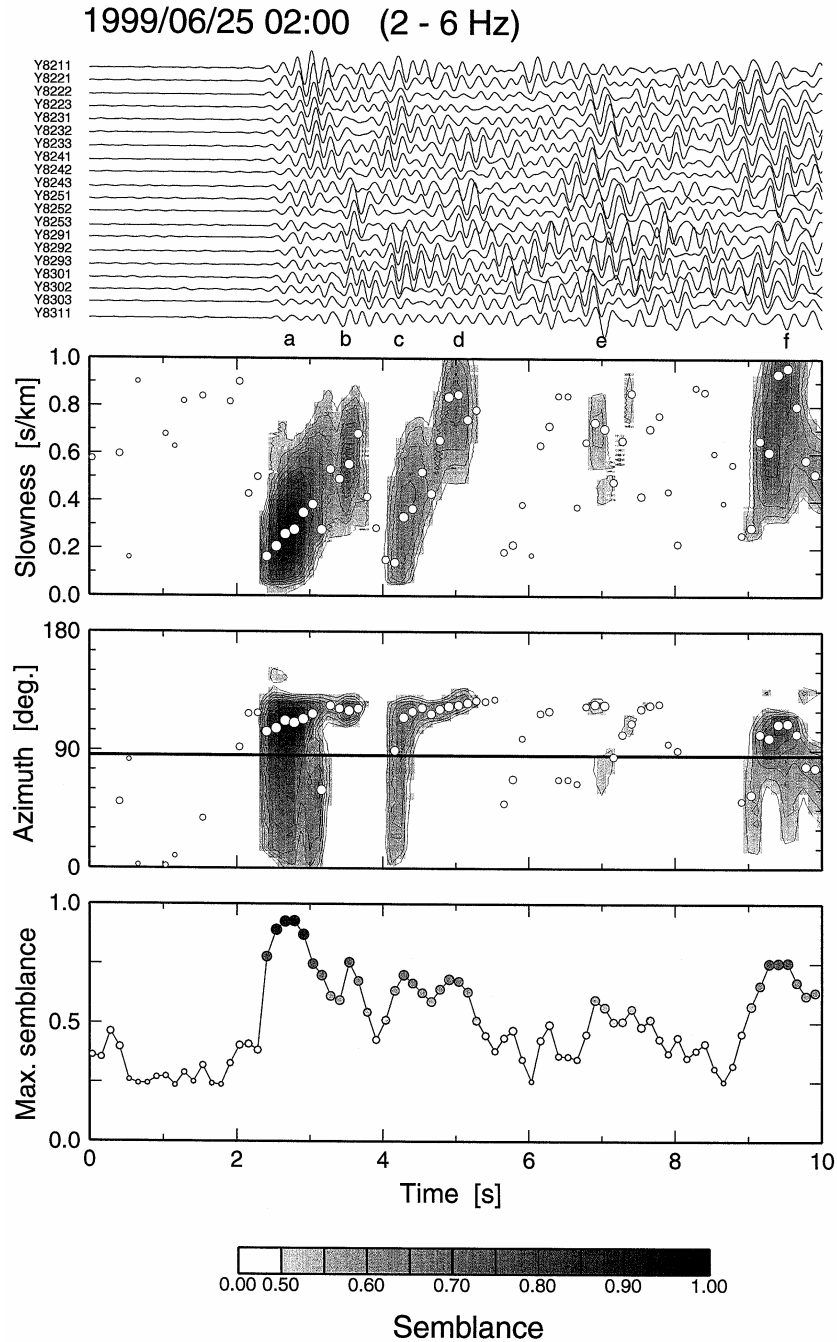


図 7. 焼切沢で記録した 6 月の実験の初動付近の後続波のセンブランス解析の結果. 周波数帯域は 2 - 6 Hz. b ~ f はセンブランス値が大きい位相を表す.

Fig. 7 Result of semblance analysis of Yakirisawa array for the initial part of seismograms shown in Fig. 6. The frequency band of analysis is from 2 to 6 Hz. Phases labeled b - f mark those with large semblance value.

5. 散乱体の位置の推定

次に, 図 7 で得られた P 波初動との時間差・到来方向・スローネスを用いて, b ~ f 相に対応する散乱体の分布をおおまかに推定した. 原理的には, 時間差によってアレイからの距離が, 到来方向によって散乱体が存在する方位が, スローネスによってアレイへの入射角が規定される.

入射角は散乱体の深さに関係する．ある場所に散乱体があると仮定したとき，その散乱体からの散乱波の到達時刻・到来方向・入射角を観測値と比較することができる．ここではそれらの量のずれを単一のパラメータ

$$\delta s = |\delta t| + a|\delta \phi| + b|\delta \theta|$$

によって評価した．ここで δt ， $\delta \phi$ ， $\delta \theta$ は到達時刻・到来方向・入射角の理論値と観測値との残差で， a ， b は係数である．係数は走時・到来方向・入射角の残差がそれぞれ 0.125 s， 5° ， 45° の時に式の各項の値が等しくなるように与えた． δs がある程度小さい点は，走時・到来方向・入射角の3つが観測値とあまり変わらない点であることを表す．震源が発破であるので，散乱の様式としてはP-P散乱とP-S散乱を考えた．速度構造としては半無限均質媒質を仮定し，P波速度を 5.65 km/s，S波速度を 3.3 km/s とした．これは東北大学のルーチン処理の震源決定に使われている地震波速度構造において，深さ 5 km での速度に相当する． δs の計算を 3 次元のグリッド上に仮定した多数の散乱体について行い， δs の空間分布を求めるというグリッドサーチを行った．グリッドサーチの格子点間隔は水平方向で 100 m，深さ方向で 200 m とし，深さ 10 km までを探索した．

図8はP-P散乱を仮定した場合の結果で， δs が 0.5 以下になる点の位置を深さ 0 km， 5 km， 10 km の場合について示した．図中のシンボルは $b \sim e$ の各相によって区別した．どの深さにおいても散乱体は岩手山の山頂から東南東方向に位置している．それは図7に見られるように， b 相から e 相の到来方向がいずれも 120° 前後であることによる．スローネスはアレイへの波の入射角に依存するがあまり分解能は高くないので，散乱体の深さに関しては強い制約とはならない．図に示した各層に散乱体が分布するように見えるのはそのためである．ただし，走時を満足するためには散乱体が深いほどアレイに近い位置に存在する必要がある．具体的には，散乱体が地表にあるとすると北上盆地内に位置し，深さ 10 km では岩手山の東斜面の下になる．

図9はP-S散乱を仮定した場合の結果である．この場合，散乱体からアレイまではP-P散乱よりも遅い速度で伝わるため，散乱体はよりアレイに近い位置に存在しなければならない．散乱体が地表にあるとすると北上盆地の西端，深さ 5 km では岩手山の東斜面下になる． 10 km では深すぎて走時を満たすことができず， e 相に対応する散乱体がわずかに見られるだけである．

6. 低周波地震の震源との対応

図8・9に示した散乱体は，岩手山東部の深さ $6\text{--}11$ km で発生している低周波地震の震源(東北大学理学部, 1998)に近い．P-P散乱の場合，深さ 5 km では散乱体は低周波地震の震源から東南東に離れた位置に(図8(b))，深さ 10 km では震源域に接して(図8(c))存在する可能性がある．P-S散乱の場合は深さ 5 km で低周波地震の震源を含むように(図9(b))位置することになる．図7で見たように，後続波のスローネスは初動に比べて大きい．このことは，後続波が初動よりは伝播速度の遅い波か，初動よりもより水平に近い入射角を持つことを意味する．今回の場合は震源が地表にあるので，後続波はP波よりも伝播速度の遅い波と考える方がよい．従って，図9のようなP-S散乱波である可能性が高く，この場合， $b \sim e$ 相は低周波地震の震源域から散乱された波なのかもしれない．この低周波地震の発生機構はまだよくわかっていないが，他地域の低周波地震について言われるようにマグマや地殻内流体の存在が関与しているのであれば，その震源域で散乱強度が強いことはありうる．

ただし，図8及び図9に示した散乱体の位置の推定誤差はかなり大きいことにも注意が必要で

P-P scattering

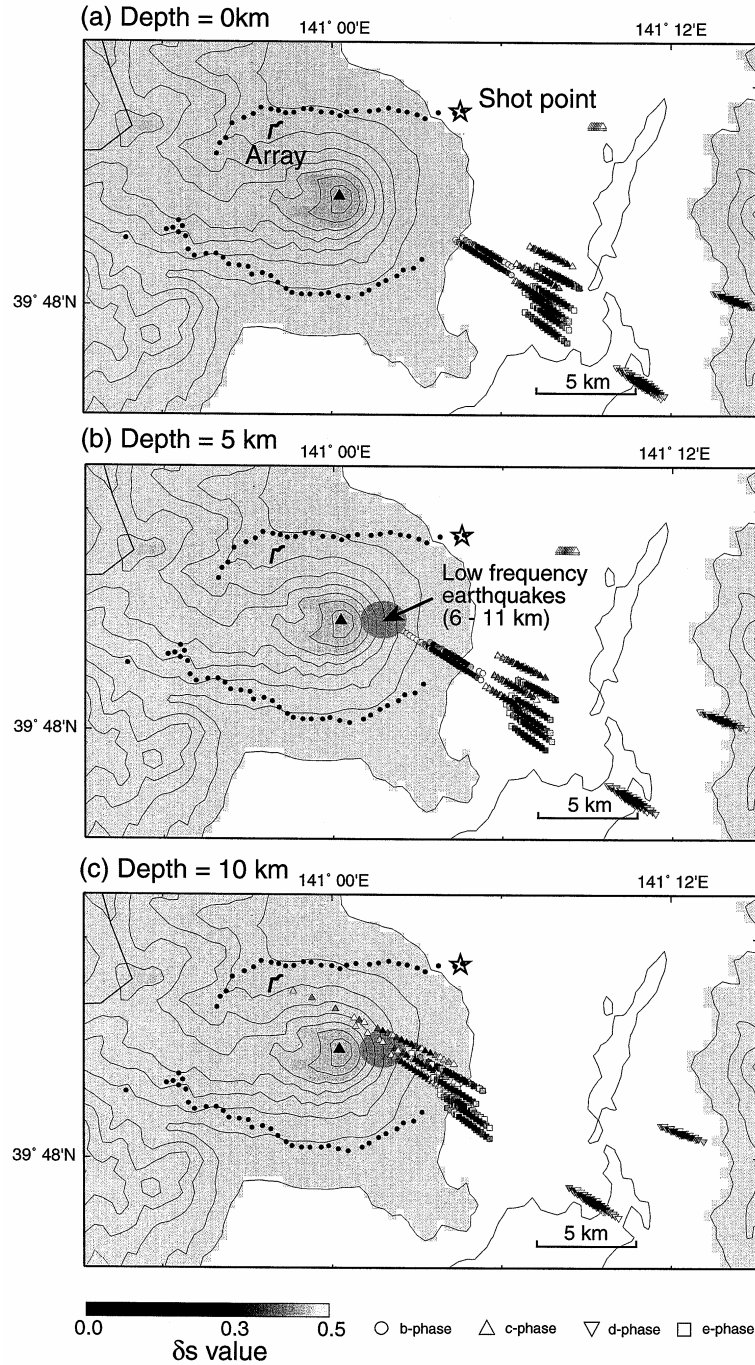


図 8. P-P 散乱を仮定した場合の散乱体の分布. 焼切沢で記録した 6 月の実験のセンブランス解析の結果からの推定. 深さ 0 km, 5 km, 10 km の平面に散乱体をプロットして示す. 散乱体のシンボルは図 7 の b ~ f の位相に対応する. 山頂の東の影をつけた領域は低周波地震の震央分布域.

Fig. 8 Spatial distribution of scatterers estimated by using the result of semblance analysis (Fig. 7) and by assuming P-P scattering. The figures are map plot of scatterers at depths of 0 km, 5 km, and 10 km. The symbols of scatterers correspond to the phases labeled b - d in Fig. 7. The shaded region to the east of summit shows the source region of low-frequency earthquakes.

P-S scattering

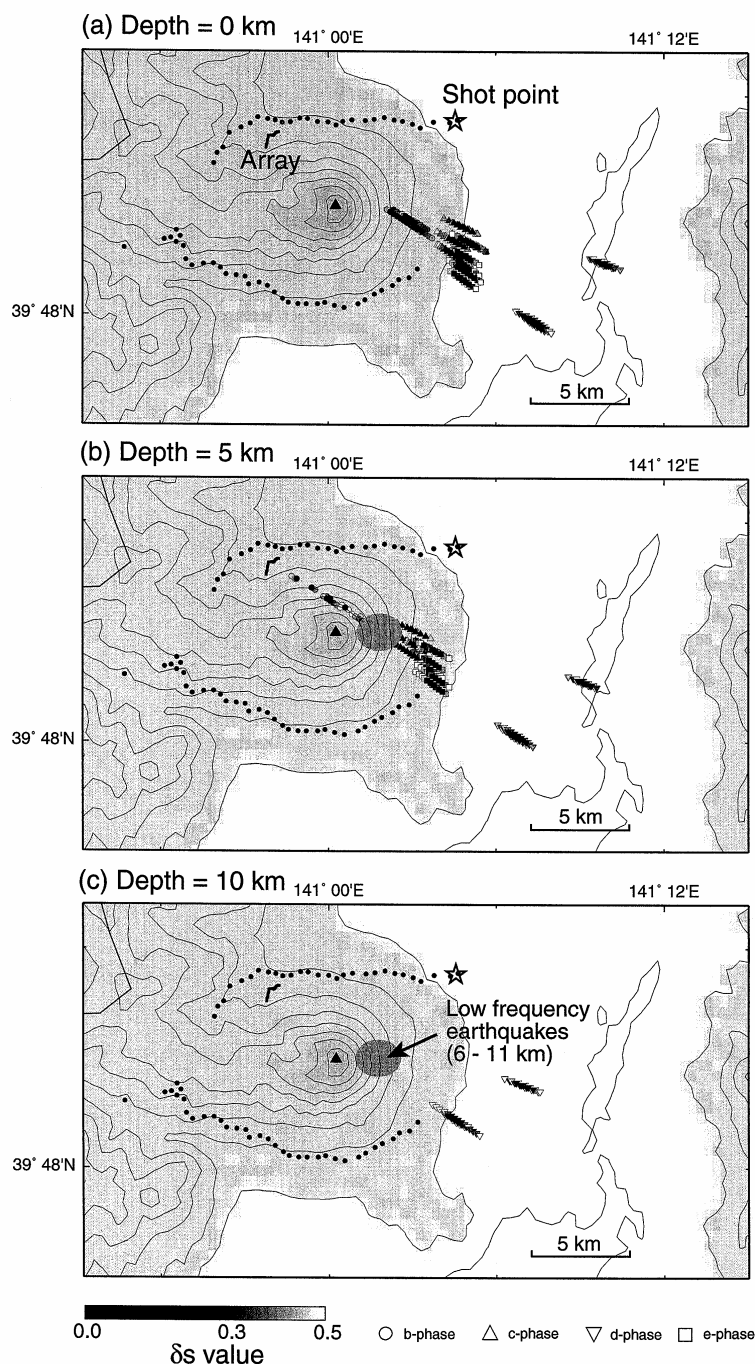


図 9. P-S 散乱を仮定した場合の散乱体の分布. 焼切沢で記録した 6 月の実験のセンブランス解析の結果からの推定. 深さ 0 km, 5 km, 10 km の平面に散乱体をプロットして示す. 散乱体のシンボルは図 7 の b ~ f の位相に対応する. 山頂の東の影をつけた領域は低周波地震の震央分布域.

Fig. 9 Spatial distribution of scatterers estimated by using the result of semblance analysis (Fig. 7) and by assuming P-S scattering. The figures are map plot of scatterers at depths of 0 km, 5 km, and 10 km. The symbols of scatterers correspond to the phases labeled b - d in Fig. 7. The shaded region to the east of summit marks the source region of low-frequency earthquakes.

ある．図8及び図9に示したのは散乱体が存在する「可能性がある」領域で，実際にはこのごく一部にしか存在しないかもしれない．また，散乱体の位置は推定に使用するパラメータの選び方によっても変わってしまう．最も重要なパラメータは地震波速度構造である．今回は簡単のために半無限均質媒質を仮定したが，実際は地震波速度には強い深さ依存性があり，それを考慮するとアレイからの距離が変わってくる．また，アレイ直下の地震波速度が精度良く推定できると，スローネスの推定値から散乱体の深さの範囲をより絞り込むことが可能になる．今後はこれらこれらの点を考慮してより詳しい解析を行うことにより，散乱体と低周波地震の震源の位置関係を明らかにしていきたい．

7. まとめ

1999年6月と9月に実施された岩手火山人工地震探査に合わせて，同火山の北山麓と南山麓の2か所でアレイ観測を行った．アレイで記録された人工地震の波形の特徴やセンブランス解析の結果から，以下のようなことが明らかになった．

- (1) 2つのアレイでの波形には顕著な差があった．これは地震計設置地点直下の地盤特性の違いを反映していると考えられる．また，6月と9月の2回の実験の波形を比較すると，6月の実験の波形の方が高周波成分に富んでいた．この違いは2回の実験での発破のしかたの違いによるものであろう．
- (2) 後続波中のコヒーレントな波は2-6 Hzの周波数帯域において顕著であった．北山麓の焼切沢アレイの記録を用いたセンブランス解析では，初動到達後8秒間に5回のセンブランス値の上昇が見られた．これらのコヒーレントな後続波の到来方向は震源よりも数十度南側であった．また，初動から20秒程度後まで見ても，アレイから見て岩手山山頂（薬師岳）よりも西側の，いわゆる西岩手からのコヒーレントな散乱波はほとんど見られなかった．
- (3) センブランス解析で得られたP波初動との時間差・到来方向・スローネスを用いて，コヒーレントな相に対応する散乱体の分布をおおまかに推定した．その結果，散乱体は岩手山の山頂から東南東方向の，地表から深さ15 km程度の範囲に位置する可能性があることがわかった．後続波のスローネスが大きいことからP-S散乱を仮定すると，散乱体が地表にあるとすると北上盆地の西端，深さ5 kmでは岩手山の東斜面下に存在することになる．
- (4) 推定した散乱体の位置は，岩手山東部の深さ6-11 kmで発生している低周波地震の震源に近い．低周波地震の発生にマグマや地殻内流体の存在が関与しているのであれば，その震源域で散乱強度が強いことはありうる．ただし，散乱体位置の推定誤差はかなり大きいので，今後はより詳しい解析を行うことによって位置推定精度を向上させ，散乱体と低周波地震の震源の位置関係を明らかにする必要がある．

引用文献

Niedell, N. S. and T. Tarner (1971) Semblance and other coherency measures for multi-channel data. *Geophysics*, 36, 482-497.

東北大学理学部地震・噴火予知研究観測センター（1998）岩手火山の火山性微動と地震の活動（1997年10月～1998年1月），火山噴火予知連絡会会報，70，1-8.

岩手山における人工地震を用いた地震波速度変化の検出の試み

浜口博之・山脇輝夫・田中 聡

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

An Experiment in Artificial Explosion toward a Detection of Temporal Changes of Seismic Velocity at Iwate Volcano

Hamaguchi, H., T. Yamawaki and S. Tanaka

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University,

In order to detect the temporal changes of seismic velocity beneath Iwate volcano during the volcanic unrest period, we detonated two artificial explosions (charge 200 kg) at the north-eastern flank of the volcano in June and September, 1999 successively and recorded at the 59~65 stations located along the two profiles at the northern and southern flanks. The waveform similarity of initial part of P waves was good at the most stations, however, P waves of the second explosion across the summit of volcano are delayed by 12~16 msec at the station. The coda wave delays during 18 seconds after the P onset indicate that the average temporal changes of seismic waves velocity are observed to be 0.13% decrease along the southern profile and 0.08% decrease along the northern profile. The maximum decrease is 0.3% at the station S09, where is located just on a line connection the explosion point and the summit. The medium heterogeneity should change slowly at around the summit area in the period between two experiments.

1. はじめに

火山活動に伴うマグマや熱水の移動や圧力変化などに起因して火山体内の構造や状態が変化することにより、そこを通過する地震波速度が時間的に変動する。この微少な変化を観測的に検出することによって逆に地下のマグマや熱水の状態の変化を探ることができる。地震波速度変化検出への取り組みは、1999 年~2004 年の第 6 次火山噴火予知計画の中で、組織的な実施が奨励されている。自然地震を使って速度変化を検出する場合、発震時刻や震源位置の不確定さ、地震波輻射パターンの違いなどのため、観測データ波から微小な時間変化を議論するには幾多の困難がある。しかし、人工地震を用いることによって、この困難さはかなりの部分が取り除けることは分かっている。人工地震は、地下数十 m のボーリング孔底で火薬を爆破させて発生させるため場所や時刻を正確にコントロールでき、波形の再現性から地震波の時間変化を議論するのに都合が良い。この方法の弱点は、実験にかかる費用の点を除けば、一般に励起される地震波エネルギー

が小さいため遠方の観測点では S/N 比が低下し深い所の情報が得られない点にある。

自然が地下から発する地震・地殻変動などの信号を観測するという受け身の姿勢ではなく、能動的に信号を発信し地下の状態を知るという「攻め」の観測の重要性は第6次火山噴火予知計画の中で謳われている。しかし、装置や経費面から容易に実施に移すという訳にもいかない状況が続いてきた。火山地域での構造探査の基本装置であるデータロガーは開発を終え実用化の段階になっている。東北大学では1994年にエアガン(Air-gun)を震源とした地震波速度検出用に2本のボーリングを掘削しこの種の実験に向けて準備をしてきた。

1995年に始まった岩手山のマグマ活動は、1998年に活動のクライマックスを迎え、噴火が何時起きてもおかしくない状況となった。稠密な観測網による地震活動や地殻変動のモニタリングから地下のマグマの上昇・移動は大まかには把握できていたが(Tanaka et al., 2002, 本報告書の田中・他, 佐藤・浜口を参照), 地下の状態や構造がどのように変化しているかという点は不明な点が残されていた。1999年にはマグマ活動も前年に比べて低下し、やや落ち着いた状態が継続していた。このような状況下を捉えて人工地震による地震波速度の変化を探る試みを実施することとした。

2. 人工地震実験の概要

人工地震実験は約3ヶ月の間隔を置いて2回実施した。第1回実験は火山噴火予知計画の中で毎年1火山を指定し、全国の大学関係者が参加して実施される総合集中観測の一環として1999年6月に実施した。

実験の実施時期は、天候など諸条件を考慮して1999年6月21日～27日を設定し、人工地震は6月25日の未明に発生させた。人工地震の発生場所は、西根町の三ッ森グラウンド敷地内である。この場所は、上述のようにエアガン(Air-gun)をもちいる人工震源用に50m深のボーリング孔が1994年に既に掘削してあった。今回はこの孔井を利用して火薬を用いて人工地震を発生させた(表

表1. 人工地震実験に関する諸元の比較表。

Table 1. An element of two artificial explosion experiments.

項 目	<第1回目人工地震>	<第2回目人工地震>
実験期間	1999年6月21～27日	1999年9月27～10月1日
爆破時刻	6月25日02時00分04.9400秒	9月30日01時00分04.3280秒
爆破点位置	西根町平笠三森グラウンド	左同
爆破深度	50m(左), 50m(右) 2本	52m
爆破薬量	100kg(左),100kg(右) ; 計200 k g	200kg
火薬の種類	日本油脂(株)海底発破用爆薬1号	左同
観測点数	59 点	65 点
観 測 参 加 機 関	東北大, 岩手大, 弘前大, 東大, 気象庁, 仙台管区, 盛岡地台, JICA 研修生 (フィリピン, メキシコ, チリ)	東北大, 岩手大, 弘前大, 東大, 気象庁, 仙台管区, 盛岡地台
観測者数	30 名	28 名

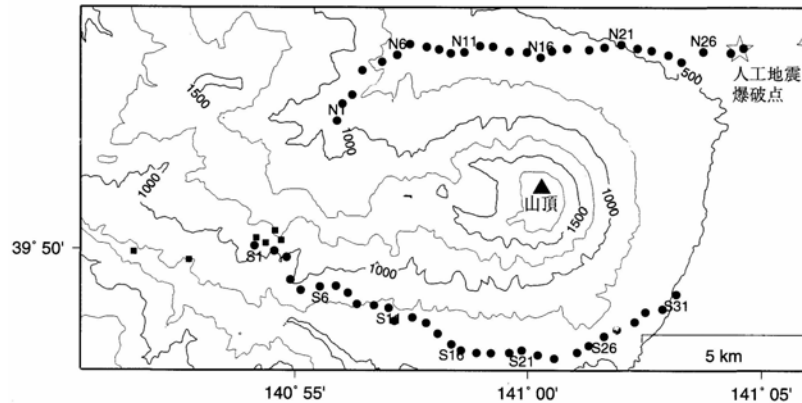


図 1. 南・北測線の観測点配置図. 番号は観測点を示す. 三角印：岩手山(薬師岳), 星印：人工地震爆破点, 標高のコンターは500m間隔.

Fig. 1 Map of shot point (open star) and the northern and southern lines of observation points (solid circle). A numeral on a counter line is altitude in meter. Solid triangle is the peak of Iwate volcano (Yakushi-dake).

1 参照). 岩手山の北側と南側をほぼ東西に通る 2 測線上に地震計を設定した. 北測線(North Line)は, 人工地震の位置から岩手山の北側の林道沿いに西方に向けてとり, 東八幡平温泉郷を經由して, 松川温泉まで延びる全長約12 kmである. 一方, 南測線(South Line)は, 県肉牛生産公社滝沢牧場から相の沢キャンプ場, 網張温泉を経て, 奥産道に至る全長約15 kmである(図 1). これら 2 測線上には平均間隔約500m毎に固有周波数 2 Hzの上下動地震計を臨時に設置し, その出力信号を記録計(データロガーLS8000)に収録した. 総観測点数は59点である. 観測点及び人工地震の発生位置はGPSを使って測量を行った.

第 2 回の実験は約3ヶ月後の9月30日に同一地点で人工地震を起した. この実験は岩手県からの委託研究の一環として実施された. 発破孔は第 1 回のを補修して使用する予定であったが, 予想以上にケーシングの破損 (めくり上り) が大きいため補修作業が困難と判断し, 元のボーリング孔の使用をやめ, 2.5m離れた地点に新たに深度52mのボーリング孔を作孔した. 掘削後に, 外径216mm, 内径204mmのケーシング管を孔底まで挿入した. 第 1 回実験の際には水柱が50m程吹き出したため 2 回目の実験では飛散防止ネットと鉄板を設置し外部への飛散の防止に努めた. 観測点配置は, 南北測線で第 1 回とまったく同一地点に同一の地震計を配置し, 2 回の実験での観測条件を一定に保持した. また, 南測線の西方延長上に新たに 6 点の観測点を追加・新設した. その他に関しては第 1 回の観測状況と同一である. 第 1 回, 第 2 回の人工地震の発生状況, データ収録方法, 観測情報, 参加機関等を表 1 にまとめて示す.

3. 走時曲線

爆破点から東八幡平温泉郷を經由して松川に至る北測線(North L.)は, 発破点からほぼ東西に直線的に分布しており, 岩手山近傍での地下構造の推定の手掛りを与える. 観測点N01からN28の初動時刻の読み取り走時曲線を図 2 に示す. 震央距離 $\Delta=0\sim6\text{km}$ での速度は $V_1=3.31\text{ km/s}$, また, 震央距離 Δ が6km以上の部分では $V_2=5.45\text{km/s}$ と求まった. これらの値は, 東北大学が岩手山の震源決定に使用している走時データと調和的であり, 従来の仮定がそれほど現実と違ったものでないことが証明された.

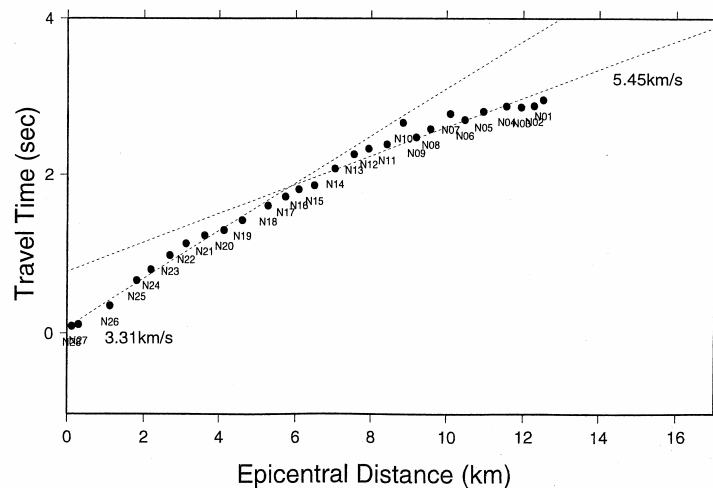


図 2. 第 1 回実験の北測線の走時曲線.

Fig. 2 The travel-time plots of the northern line for the first experiment on June 25, 1999.

4. 波形の特徴と P 波走時変化

第 1 回実験(6月25日)による南・北測線の波形データを図 3 に示す. 実験の前日(6月24日)の未明に岩手山の周辺で降雨があり, 午後には雨は止んだが, 小さな河川の増水などの影響で岩手山の西方に位置する観測点を中心に雑音レベルが高くなった. 北測線の観測点 N01~N08, 及び南測線の S01~S05, S15 などでは雑音が大きくなり S/N 比が低下した. しかし, その他の観測点では良好なデータが得られた. 第 2 回実験(9月30日)についても同様な波形データを図 3 に示す. 第 1 回の実験の経験をもとに, 南測線で西方の奥産道, 葛根田に合計 6 点の観測点が追加されている. この実験は天候に恵まれ雑音レベルも安定しており, 全点について良好なデータが得られた.

各々の測線の第 1 回(6月25日)と第 2 回(9月30日)の波形を重ねて比較すると, 各観測点での初動近傍の波形は互いにほぼ相似であることが分かる. 第 1 回と第 2 回の初動 1~2 波の到着時間差を目の目で読み取った. 時間差の読み取りには個人差やある程度の不確実性が伴うため, その量を見積もり, 誤差棒を付して図 4 に示す. 両測線とも第 1 回に比べて第 2 回の地震波がわずかに遅れて到着していることは明瞭である. 各観測点の遅れの読み取り値はばらつきがあるが, 北測線では平均 0.007 sec, また, 南測線では平均 0.010 sec 遅れている. この平均値は 6 月と 9 月の約 3 ヶ月間に岩手山のマグマ活動に伴うもののほかに, 地球潮汐や季節変動などの影響が含まれている.

北測線の観測点は, 今回の岩手山のマグマ貫入や地震活動域(本報告書佐藤・浜口参照)から有意に離れているため, 北測線の平均 0.007 sec の遅れは火山活動に直接関係しない地球潮汐や季節変動などの要因に起因する全体的なバイアスと判断される. このバイアス値を考慮して南測線の時間差を再度チェックすると, 観測点 S08 から S12 間の観測点ではこのバイアス値からさらに遅れ, その量は 0.012~0.016 sec である. 観測点 S08~S12 に到着する地震波は岩手山山頂の直下 1~1.5 km を通過したものである. この単純な比較から山頂近傍の地下浅所で地震波速度が 3 ヶ月間に 0.5% 程減少した可能性が示唆される.

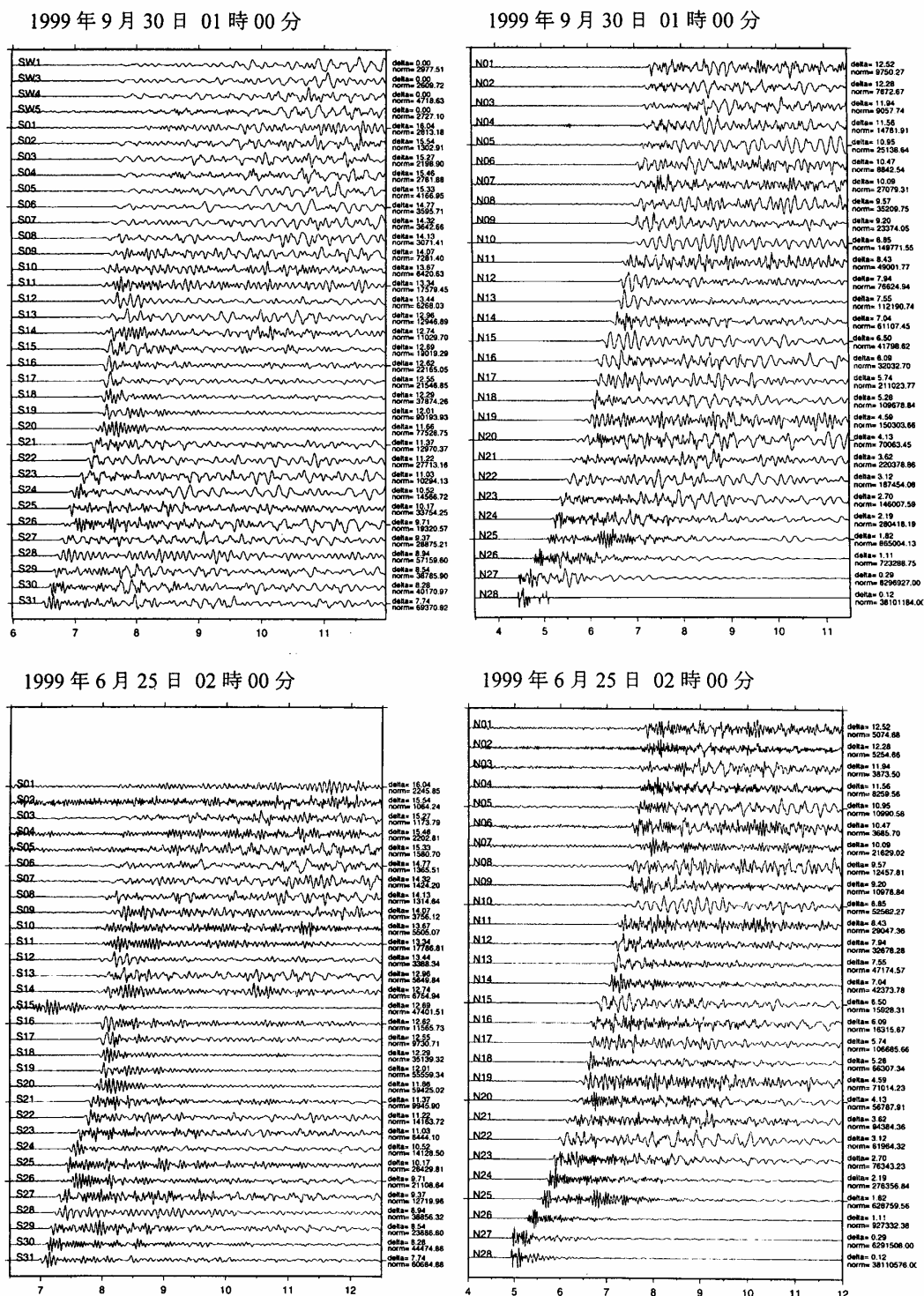


図3. 第1回実験(6月25日)と第2回実験(9月30日)の記録波形。(左)南測線,(右)北測線。各図の右の数値は震央距離と振幅の規格値。

Fig. 3 Observed wave trains for two shots detonated on June 25 (lower box) and September 30 (upper box). The wave trains in the left two boxes are for the southern line and those in the right ones are for the northern line. The right-hand numerals attached in each trace are an epicentral distance in km and the normalized amplitudes, respectively. The station code is shown on the left of each seismogram.

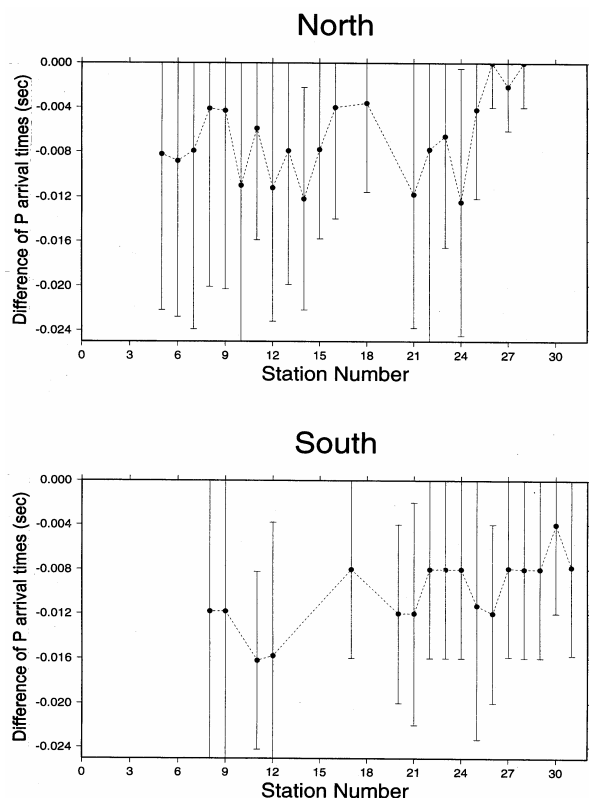


図4. 第1回実験と第2回実験の初動部分1～2波のパルス到来時間差(秒). (上)北測線, (下)南測線. 横軸は観測点番号, 縦棒は読み取り誤差棒.

Fig. 4. The time difference of the first P arrivals observed at the stations for two experiments. (Upper) the northern line, (lower) the southern line. The solid bar indicates an error-bar associated with eye-picking. The abscissa is a station number shown in Fig. 1.

5. コヒーレンス解析による地震波速度変化

前述したP波初動1～2波の解析では地震波が火山体を通過する海拔下1km程度までの深さの情報しか得られない. 岩手山に起る浅い地震の深さは海拔下0～3kmに分布しており, 深さ1kmまでの解析では十分ではない. 震源から射出された地震波は直接観測点に到着する直達P波の他に, 地殻のより深い部分に潜り地殻内の散乱源で散乱されて再び地表面に返ってくる散乱波がある. 観測は上下動地震計で行っているの, 今回はPP散乱波が主なものになる. P波初動から18秒後までの散乱波に着目して, 地震波速度の時間変化を調べた.

6月25日の第1回人工地震のある観測所での記録を $X(t)$, 9月30日の第2回人工地震の同じ観測点の記録を $Y(t)$ とする. 波形の相似性から $Y(t) = k \cdot X(t + \tau)$ を仮定する. 二つの記録 $X(t)$, $Y(t)$ のクロススペクトル, コヒーレンス $coh^2(t)$, 位相 $\phi(t)$ の関係から次の関係式;

$$d\phi/dt = 2\pi f \cdot \delta V/V,$$

但し, τ : 2つの記録の遅延時間, f : 周波数, V : 地震波速度, が導かれる (Ito, 1985). すなわち, 位相の時間変化から地震波速度の時間変化が推定できる. 解析の一例として観測点S29での2.0Hz及び4.9Hzの波形, パワー, コヒーレンス, 位相を図5に示す. P波の到来と共に波形の相似性は高くなり, コヒーレンスも大きくなるが, その値は時間の経過と共に減少する. ここでは, コヒーレンスが0.75以上の場合 (図中のプロットで○印を付したもの) に求められた位相が有意なものとして取り扱う. 位相の変化は時間経過と共に減少傾向を示し, 第1回の実験に比べて第2回の実験の波動到着に遅れが認められる.

この傾向は前述のP波初動の時間差からの推定結果と調和する. 位相のプロットに最小二乗法を適用して, その傾斜($d\phi/dt$)から地震波速度の時間変化($\delta V/V$)を求める. このような計算を

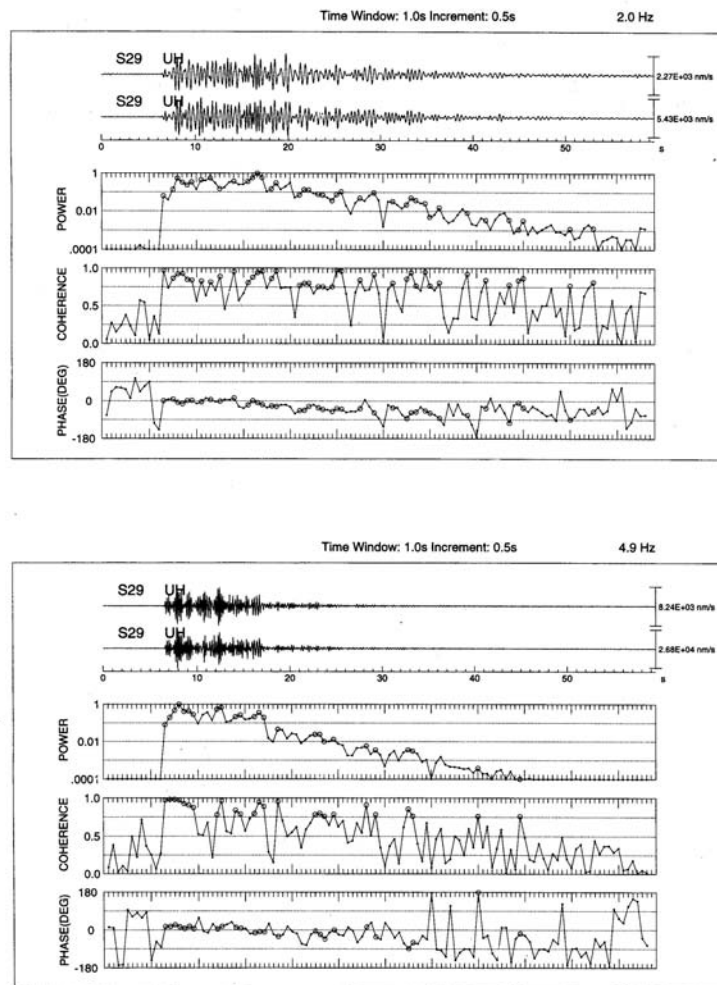


図5．観測点S29でのフィルター波形記録とパワー，コヒーレンス，位相の時間変化．図中の○印はコヒーレンスが0.75以上のデータを示す．○印を付した値の時間変化から速度変化を推定．(上) 2.0Hzの場合，(下)4.9Hzの場合．

Fig. 5 The filtered seismograms for two shots and their temporal variations of power, coherence and time delay. (Top) band pass filter with 2.0 Hz, (bottom) band pass filter with 4.7 Hz. An open circle attached in the coherence indicates that the estimated coherence is greater than 0.75 and that this data is used to estimate the temporal variation of wave velocity.

周波数(f) 2.0, 3.0, 4.0, 4.9 Hzについて計算し，その平均値をもって観測される最終的な $\delta V/V$ とした．その結果を図6に示す．北測線(North)では，人工地震の震源に近い観測点N25~28では波形の相似性が悪く， $\delta V/V$ にばらつきが大きい，そのほかの観測点で概ね $-0.0008(-0.08\%)$ のまわりにばらつく．一方，南測線(South)は，その平均値は $-0.0013(-0.13\%)$ で，北測線の値より有意に大きい．これは南測線に到着する波線はカルデラや地震活動域を通過し，それらを通らない北測線に比べて速度減少がやや大きくなっていることを示唆する．すなわち，地震活動が活発な岩手山山頂(薬師岳)から姥倉山にかけた尾根の地下で地震波速度が第1回(6月25日)から第2回(9月30日)までの約3ヶ月間に減少したことが認められた．最大の減少値(-0.3%)を示す観測点S09は発破点と岩手山山頂(薬師岳)を結ぶ延長上に位置する．また，S17から東側に位置す

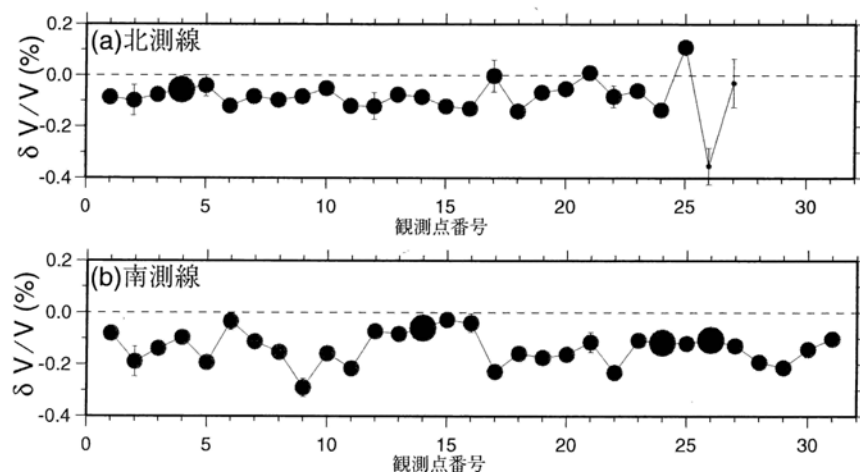


図6．位相の時間変化から推定した各観測点での速度変化率．(上)北測線，(下)南測線．
Fig. 6 The percents of temporal velocity variations ($\delta v/v$) at each station. (Top) the northern line, (bottom) the southern line.

る観測点の値は概して小さい．これらの観測点では第2回実験のコーダ波が第1回のものに比べて振幅が相対的に大きい特徴がある．

二つの実験期間の3ヶ月間に平均で速度変化の減少は $-0.08 \sim -0.13\%$ ，最大の減少値は -0.3% であることが判明した．この期間には活発な地震活動や地殻変動を示すマグマ活動は観測されず，全体として活動の低下傾向を示す時期に相当する．

6. 考察とまとめ

第1回実験(6月25日)から第2回の人工地震(9月30日)までの約3ヶ月間には，岩手山の浅部及び深部の地震活動ならびに地殻変動に変化は認められず，顕著なマグマの貫入や熱水の移動を示唆する現象は起きていない(図7)．地震波速度の時間的変化は地下の状態の緩やかな変動に対応したものと推察される．解析結果からは， $-0.08 \sim -0.13\%$ という地震波速度変化が検出された．

速度変化量の空間分布に着目すると，地震活動域を通過する南測線の観測点が，活動域を通過しない北測線の観測点の値よりやや大きい．また，南測線の観測点の中でも，岩手山山頂(薬師岳)近傍を通過する観測点の値が周辺に比べて相対的に大きく，山頂近傍の直下付近で若干の速度変化が起きている可能性が示唆される．岩手山山頂直下の深さ $8 \sim 13\text{km}$ には低周波地震や微動の発生域が存在し，より深部からマグマが浅部に向けて供給されていることが地震活動の解析から判っている．山頂直下の速度変化はこのような深部マグマから供給されるマグマ・熱水等の緩慢な変動を反映した可能性が考えられる．

いずれにしても2回の観測から速度変化を検出する観測技法が確立されると共に，検出可能な変化量の下限値(分解能)が判明した．地震波の速度変化はマグマの貫入や地下の温度変化の他に降水や地下水の変化などにも影響されることがわかっているので，今後はこのようなパラメータにも注意しつつ速度変化の解釈を進める必要がある．

爆破地震動研究グループと内陸地震研究グループは，我々の実験の約1年前の1998年8月10日と同年11月2日に岩手山西方で人工地震の構造探査を実施し，9月3日に発生したM6.1の地震による構造変化を調査した(Nishimura et al., 1999; Nakamura et al., 2002)，その結果，断層近

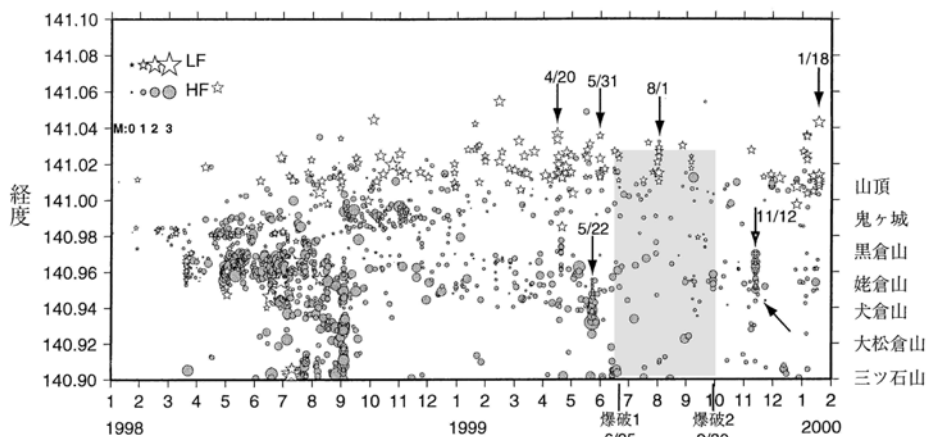


図 7. 地震活動度の時空間的变化と実験実施日. グレーで示した時間領域の両端が第 1 回と第 2 回実験日に対応. この間に顕著な地震活動は認められない. ○印は高周波(HF)地震, ☆印は低周波(LF)地震を表す.

Fig. 7 Spatio-temporal changes of seismic activity at Iwate volcano and the detonated time of two artificial explosions on June 25 and September 30, 1999, of which time interval is shown by a hatched zone. An open circle indicates high frequency (HF) event and a star does low frequency (LF) event. The ordinate is the latitude and the abscissa is the time lapse.

1.

傍の観測点で 3 ヶ月間に約 1% の速度減少があったことが確認された. この変動量は断層運動に伴う地殻内の応力場の変化を反映したもので, 今回岩手山の緩やかな活動変化に伴って観測された値より 1 桁程度大きいものであった.

メラピ火山では噴火の起きる 8 ヶ月前に山頂直下の地震波速度変化が 5 ヶ月間で 1.2% 増加した. これは火道内の圧力増加が原因と推定されている (Ratomopurbo & Poupinet, 1995).

上記の例は地震や噴火発生の前後で 1 % 程度の局地的な地震波変化が観測されることを示している. 大きな速度異常が確認された観測点は断層や火道に比較的近いということが共通している. 地震波速度変化の観測を噴火予知に役立てるためにはより稠密な観測網を火山体内外に展開し人工地震を可能な限り定期的に頻繁に実施することが不可欠といえよう.

謝 辞

1998年2月から活発化した岩手山の活動推移を探るため火山内部構造や状態の変化を調べようと計画し, 第 1 回実験観測は1999年度の火山噴火予知計画の年次計画「岩手山総合集中観測」の一環として実施した. また, 第 2 回実験は岩手県からの受託研究「岩手山の火山活動に関する研究」(研究代表者: 東北大学 浜口博之) により実施した. 実験の実施に際しては, 岩手県, 西根町, 雫石町, 松尾村, 滝沢村, 岩手・盛岡・雫石森林管理署, 日本道路公団盛岡管理事務所, 盛岡地方気象台から便宜協力を得た. また, 観測については岩手大学工学部, 弘前大学理工学部, 東大地震研究所, 仙台管区気象台, 盛岡地方気象台の方々, 並びに, JICA研修生 (フィリピン, メキシコ, チリ) の協力を得た. 記して感謝の意を表したい.

引用文献

- Ito, A. (1985) High resolution relative hypocenter of similar earthquakes by cross spectral analysis method. *J. Phys. Earth*, 33, 279-294.
- Nakamura, A., A. Hasegawa, N. Hirata, T. Iwasaki and H. Hamaguchi (2002) Temporal variations of seismic wave velocity associated with 1998 M6.1 Shizukuishi earthquake. *Pure Appl. Geophys.* 159, 1181-1204.
- Nishimura, T., N. Uchida, H. Sato, M. Ohtake, S. Tanaka and H. Hamaguchi, (1999) Temporal changes of the crustal structure associated with M6.1 earthquake on September 3, 1998 and the volcanic activity of Mount Iwate, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 269-272.
- Ratomopurbo, A. and G. Poupinet, (1995) Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia). *Geophys. Res. Lett.*, 22, 775-778.
- Tanaka, S., H. Hamaguchi, S. Ueki, M. Sato and H. Nakamichi (2002) Migration of seismic activity during the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern Japan and with reference to P and S waves velocity anomaly and crustal deformation, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 113, 399-414.

岩手火山における地殻変動連続観測

佐藤峰司・浜口博之
東北大学大学院理学研究科

Continuous Ground Deformation Monitoring at Iwate Volcano, Northeastern Japan

Minemori Sato and Hiroyuki Hamaguchi
Graduate school of science, Tohoku University

Significant ground deformations have been observed associated with seismic activation of Iwate volcano since February, 1998. From the analysis of deformation data detected by dilatometers, tiltmeters and GPS network, it was cleared that vertical tensile faults were formed above the deep region beneath the summit and extended westward from February to April, 1998. The real matter of it can be interpreted as intruded magma within the faults. Besides, dike intrusion showed the spatial-temporal correlation with low and high frequency earthquake swarms occurred just above the dike. Moreover, it was cleared that a spherical pressure source kept dilating at 3 km under the western part of the volcano from February, 1998 till June, 1999. And, a moderate earthquake (M6.1) occurred near the pressure source on September 3, 1998. From the analysis of stress change, contribution of the volcanic activity to the occurrence of the moderate earthquake was revealed.

1. はじめに

岩手火山では、地震活動が活発化した 1998 年 2 月より顕著な地殻変動が観測されるようになった。また、1998 年 9 月 3 日 16 時 58 分には南西山麓を震源とする岩手県内陸北部地震(M6.1)が発生した。本研究では、岩手山周辺に設置した体積歪計、傾斜計及びGPSにより捉えられた火山性地殻変動の解析から、山体内部で進行した火山活動の解明及び火山活動とM6.1の地震との相関性の解明を試みた。解析の結果、山頂周辺深部から浅部及び西方へ向けて鉛直な開口割れ目が1998年2~4月にかけて少なくとも2回形成されたことが明らかにされた。その実体は割れ目を通して貫入したマグマと推定され、その供給量は $4.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ であることが明らかにされた。また、割れ目の水平方向への拡大に伴って、その直後に割れ目の直上で低周波・高周波地震が群発するという、マグマ貫入と地震発生に時空間的相関があることが判明した。さらに、西方の三ツ石山近傍の深さ約3 kmでは、増圧する球状圧力源が1998年2月~1999年6月にかけて定在し、その体積増加量は $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ であることも明らかにされた。また、M6.1の震源位置は地殻変動から推定された球状圧力源と同じ深さ3 kmで、水平距離はわずか3.7 kmと極めて近接していた。

クーロンの破壊基準 (CFS) の変化をもとに火山性地殻変動による M6.1 の断層すべりへの影響を調べた結果、球状圧力源の増圧により、M6.1 の断層の北側に顕著な CFS 増加、特に本震の震源位置では地震発生時までに 0.7~0.8 MPa のせん断応力の増加が予想されるなど、M6.1 の地震が火山活動により誘発された地震であったことを明らかにした。

2. 観測概要とデータ処理

東北大学地震・噴火予知研究観測センターは、1994 年 11 月に ANS(相ノ沢), YKB(焼走)の岩手山周辺の 2 点においてボアホール地殻変動連続観測を開始した。1997 年 10 月には GNB(玄武洞)を追加した。岩手山周辺のボアホール地殻変動連続観測点の分布を図 1 に示す。各観測点には深さ約 300 m のボアホールがあり、孔底には(株)アカシ製の孔井式地殻活動総合観測装置が設置されている。この装置は、体積歪計(Sacks et al., 1971), 力平衡振子式傾斜計(佐藤・他, 1980), 速度型短周期地震計(1 Hz, 3 成分), 水晶温度計, 方位計からなり、膨張セメントにより岩盤に密着固定されている。地上部には、各検出部の制御・増幅装置、気圧計およびテレメータ装置が含まれる。

観測されたデータは、潮汐解析プログラム BAYTAP-G(石黒・他, 1984)による潮汐補正, 回帰モデルによる気圧補正, 自己回帰モデルによる降水補正が準リアルタイムに施される(佐藤, 1997)。さらに、変動源推定に際しては、地球潮汐・海洋荷重潮汐計算プログラム GOTIC2

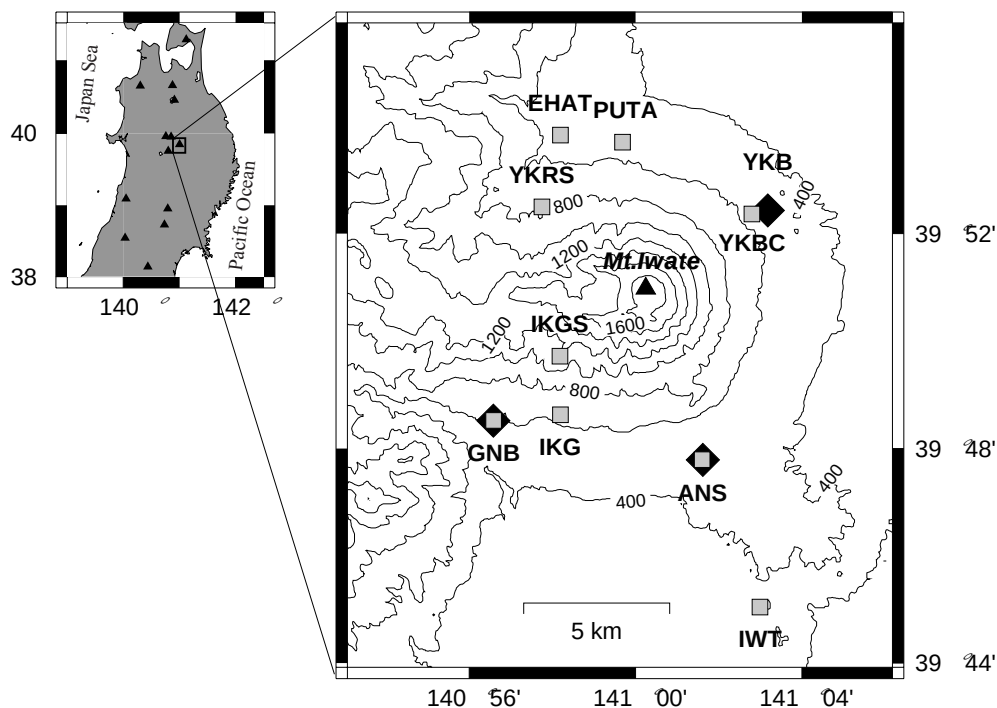


図 1. 本研究で用いた岩手山周辺のボアホール地殻変動連続観測点と GPS 連続観測点。菱形は体積歪計・傾斜計の観測点、四角は GPS 観測点。

Fig. 1 Location of Iwate volcano and continuous ground deformation monitoring network and GPS network around the volcano used in this study. Diamonds show the location of borehole stations with strainmeter and tiltmeter. Grey squares show the location of GPS stations.

(Matsumoto et al., 2001)による理論潮汐を用いたカップリング補正を施した後のデータが用いられる。補正後の歪・傾斜データ及び GPS 稠密観測網の連続観測データから、新たに開発したベイズ流の統計学的手法(佐藤, 2001)により火山性地殻変動, 年周変化, 地震応答, 計器ドリフト成分, 短周期ノイズを高精度に分離・抽出した。

3. 1998～1999 年の火山性地殻変動の特徴

1996 年 1 月～2000 年 12 月のデータから抽出された火山性地殻変動及び震源が求められた地震の積算個数を図 2 に示す。地震活動の活発化に同期して, 1998 年 2 月中旬から YKB, ANS, GNB の傾斜計・体積歪計で同時に変化が開始した様子が明瞭に認められる。その後の傾斜及び, 体積歪データの時間的变化は地震活動の時間的推移に伴って特徴的な変化が認められるが, そのパターンは 4 月 23～29 日の期間を境として大きく異なる。期間を分けて特徴を列記する。

- A (2 月 14 日～3 月 13 日): 西岩手火山の地震活動がやや活発化するとともに, 傾斜変化は YKB が南南東下がり, ANS が東南東下がり, GNB が東下がりを示し, 歪変化は 3 点ともに緩やかな伸びを示す。
 - B (3 月 13～19 日): 傾斜変化は GNB のベクトルが反転し急激な西南西下がり, ANS が東南東下がり, YKB が停滞を示し, 歪変化は GNB が急激な伸び, ANS が伸びから縮みへの反転, YKB が伸びの停滞を示す。この期間の直後に西岩手浅部で低周波地震が発生し, 以後, M1 以上の地震が発生するようになる。
 - C (3 月 19～25 日): GNB が急激な南東下がりの傾斜変化と伸びから縮みに反転する歪変化を示す。
 - D (3 月 25 日～4 月 23 日): 期間 A に類似したパターンの傾斜・歪変化を示す。変動速度は 2～3 倍。
 - E (4 月 23～29 日): 期間 B にやや類似し, 傾斜変化は GNB のベクトルが反転し急激な西北西下がり, YKB と ANS が東南東下がりを示す。歪変化は GNB が顕著な伸び, YKB と ANS が停滞する。4 月 24 日からモホ面近傍の深部地震発生頻度が増加する(田中・他, 1999)。この期間直後の 4 月 29 日に西岩手浅部で顕著な低周波地震と高周波地震の群発(158 個/2 時間)があり, 臨時火山情報第 1 号が出された。
 - F (4 月 29 日～5 月 10 日): 傾斜変化は YKB が北北東下がり, ANS が停滞, GNB が南東下がりを示し, 歪変化は YKB と ANS が伸びから縮みに反転, GNB は伸びを示す。M2～3 クラスの地震が頻発するようになり有感地震が増加した。
 - G (5 月 10 日～7 月 10 日): YKB, ANS, GNB の歪・傾斜変化共に期間 F と同じパターンを示すが, 変動速度が小さくなった。
 - H (7 月 10 日～8 月 19 日): 期間 F と同じパターンを示すが, 変動速度がさらに小さくなった。
 - I (8 月 19～28 日): 期間 A, D に類似した傾斜・歪変化を示す。
 - J (8 月 28 日～9 月 3 日): 期間 G に類似した傾斜・歪変化を示す。3 日に岩手山の南西部で M6.1 の地震が発生し, 雫石町長山では震度 VI 弱が観測された。GNB の傾斜, 歪データにはその後 1 ヶ月くらい地震の影響が見られる。
- 10 月以降(期間 K～N), 1999 年 6 月まで期間 J に類似した傾斜・歪変化が認められるが, 変動速度はかなり低下した。

一方, GPS データの時間的变化には上記の体積歪・傾斜データのような地震活動の時間的推移

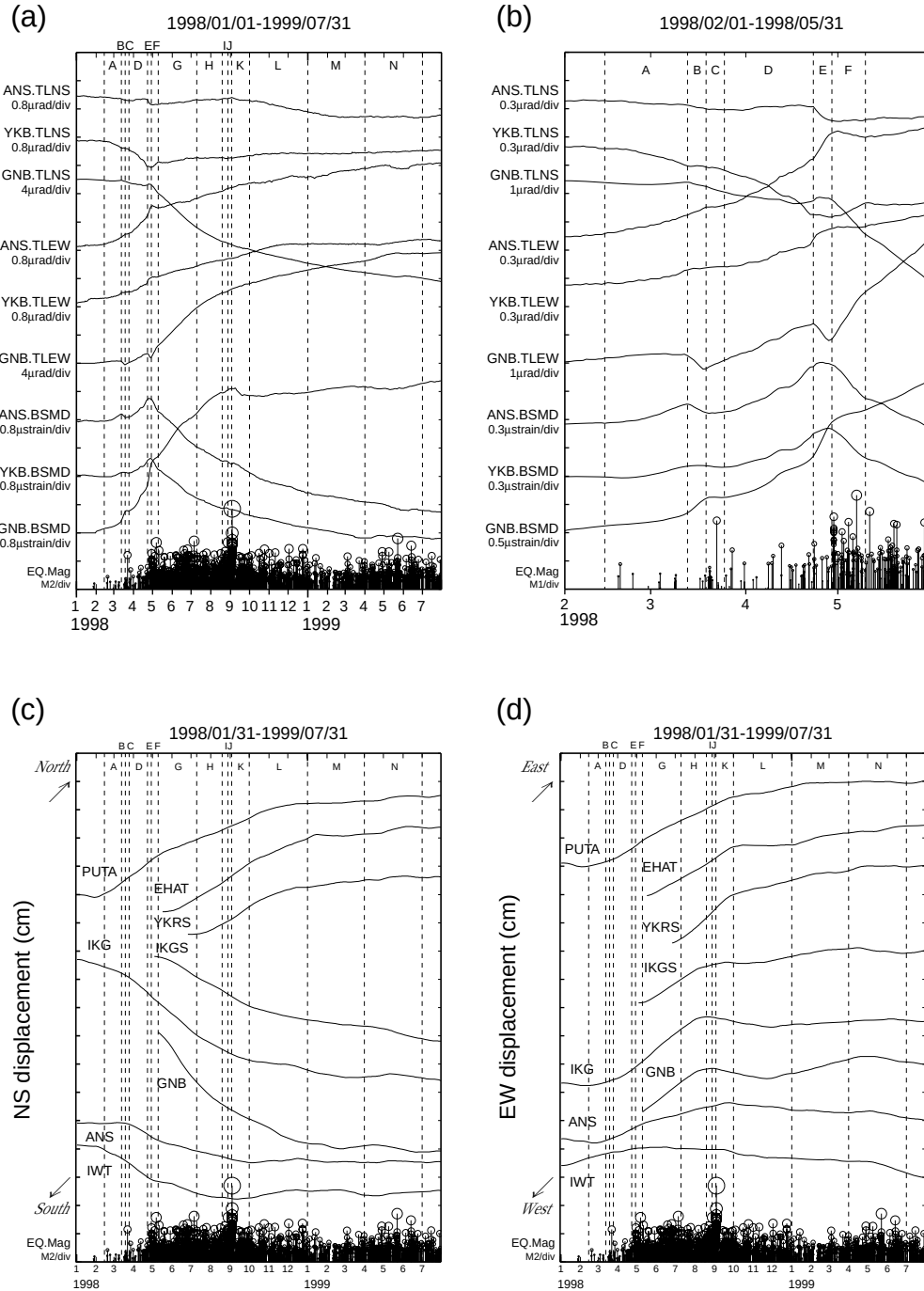


図 2. 体積歪，傾斜や GPS 連続観測データから抽出された火山性地殻変動及び震源が決められた地震の M-T 図. (a)1998 年～1999 年 7 月の歪・傾斜変化，(b)1998 年 2～5 月の歪・傾斜変化. TLNS：南北傾斜，TLEW：東西傾斜，BSMD：体積歪. (c)1998 年～1999 年 7 月の水平変位の南北成分，(d)東西成分.

Fig. 2 Volcanic ground deformation derived from continuous data observed by dilatometers, tiltmeters and GPS receivers data. M-T graphs of earthquakes occurred in and around Iwate volcano are shown at the bottom of each graph. (a) Strain and tilt changes from 1998 till July, 1999. (b) Strain and tilt changes from February to May, 1998. (c) N-S component and (d) E-W component of surface displacements from 1998 till July, 1999.

に伴う特徴的な変化は見られない。

4. 火山性地殻変動源の推定

予備的な解析から、観測された地殻変動の空間的なパターンは、ほぼ東西の走向を持つ鉛直な開口割れ目と球状圧力源との複合変動源モデルで説明できることがわかった(佐藤・浜口, 1999)。変動源は期間ごとに、開口割れ目、球状圧力源、複合変動源(開口割れ目と球状圧力源)、の3パターンを仮定して観測データと比較する。開口割れ目及び球状圧力源による歪、傾斜及び水平変動の計算には、Okada(1992)が導出した矩形断層の開口変位及び等方的点圧源による半無限弾性体の地表及び内部の変形のグリーン関数を用いた。また、Williams and Wadge(1998)が提案した観測点の標高に合わせて変動源の深さを補正する手法を適用した。

開口割れ目と球状圧力源の位置・形状はフォワードモデリング(グリッドサーチ)にて求めた。開口割れ目のグリッド間隔は、経度方向：約 0.85 km, 上端深さ：1 km, 下端深さ：2 km, である。球状圧力源のグリッド間隔は、経度及び緯度：0.01°, 深さ方向：1 km, である。開口割れ目は予備的解析結果から、走向 N80°E で山頂部を含む鉛直な面上に拘束した。山頂直下 6~12 km の低周波地震や西岩手浅部の震源もほぼ同一面上に分布する。変動源の位置及び開口割れ目の水平方向長さ・鉛直方向長さに関するパラメータはフォワード的に求め、開口量及び体積増加量は最小二乗法によって求めた。また、AIC 最小化法(Akaike, 1980)により各期間の最適モデルの判定を行った。さらに、モデルパラメータの推定誤差を見積もるため、jackknife シミュレー

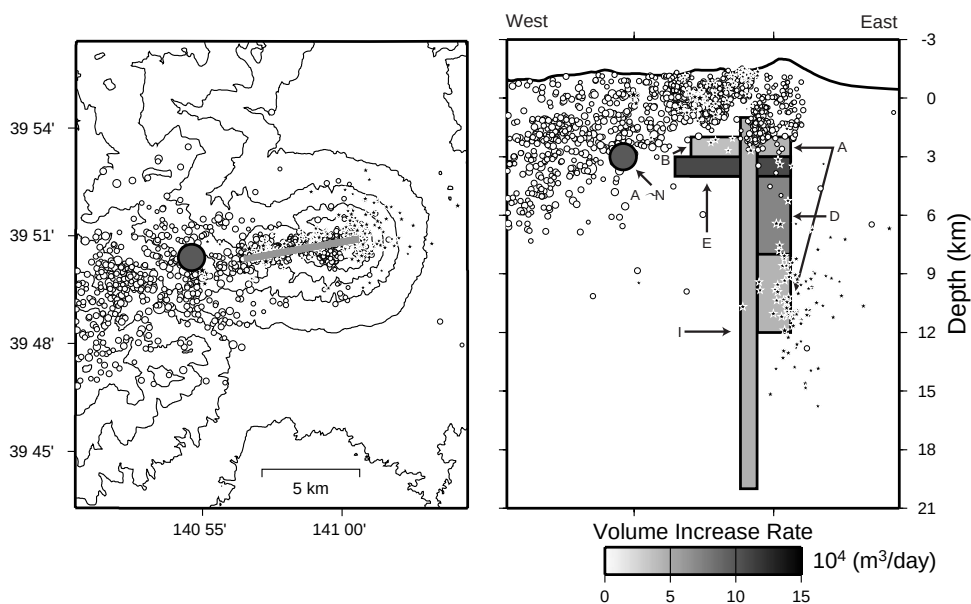


図3. 1998年2月~1999年6月に推定された地殻変動源と地震の震源。■印は開口割れ目、灰色の濃淡は体積増加速度を表し、そのスケールを右下に示す。●印は球状圧力源。図中のアルファベット A~N は変動源が推定された期間を示す(図2参照)。○印は高周波地震、★印は低周波地震の震源。

Fig. 3 Deformation sources and hypocenters from February, 1998 till June, 1999. Rectangles show tensile faults formed in early 1998 and grey circle indicates the location of a dilatant spherical pressure source. Open circles and stars indicate hypocenters of high and low frequency earthquakes respectively.

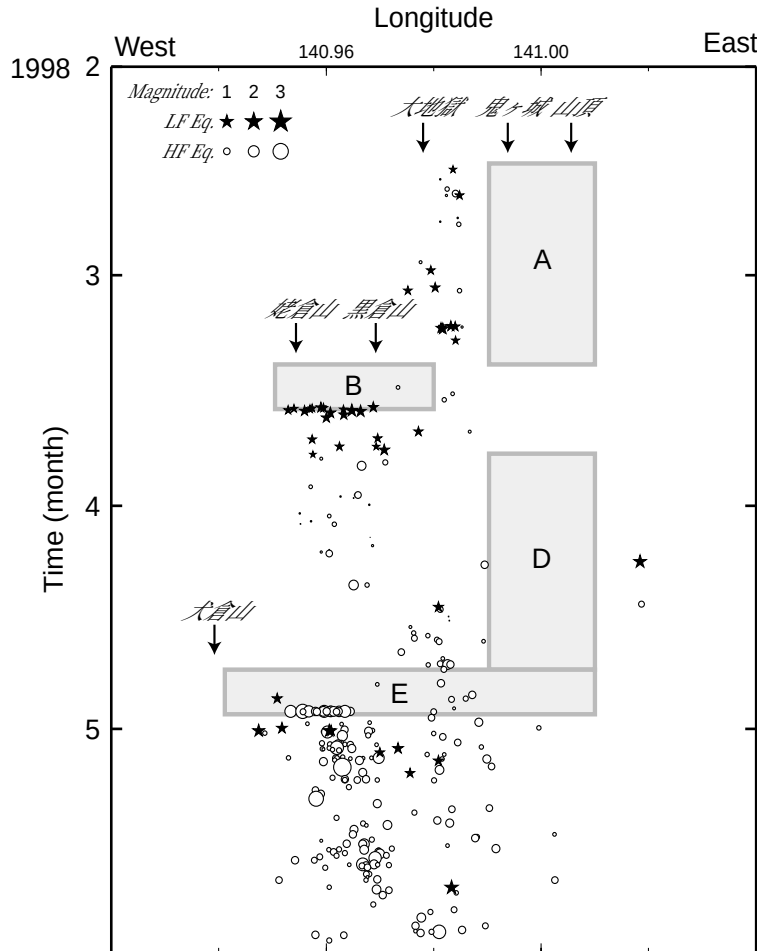


図4．開口割れ目と1998年2～5月の地震の震央を東西に投影したときの時間変化．■印は開口割れ目，★印は低周波地震の震央，○印は高周波地震の震央を示す．

Fig. 4 Temporal changes of tensile faults and epicenters projected on east-west direction. Grey rectangles indicate tensile faults. Stars and circles indicate epicenter of low and high frequency earthquakes respectively.

ション(Efron and Tibshirani, 1993)を行った．

まず，変動源のパラメータ分布の大まかな特徴を捉えるため，1998年2月～12月の期間で1ヶ月毎の読み取りデータから予備的解析を行った．AIC 最小モデルとして推定されたものは，2月～4月が開口割れ目と球状圧力源の複合変動源，5月～12月が球状圧力源であった．解析の結果，球状圧力源は東経 140.91°，北緯 39.84°，深さ 3 km に定在するものと解釈された．次に，データに特徴的な変動パターンの変化が認められた 14 の期間で詳細な変動源の時空間変化を推定した(期間分けは図2参照)．

各期間に推定された変動源モデルを図3に示す．最適解のモデルは期間 A, B, D, E 及び I が複合変動源，それ以外の期間が球状圧力源である．期間 A における開口割れ目は，山頂周辺の深さ約 10 km あたりまで及んでいる．同領域の東縁部には低周波地震の震源域がある．高周波地震の震源は，推定された開口割れ目の縁辺部を取り囲むような分布を示し，割れ目が推定された領域には震源はほとんど見られない．また，期間 B, E には割れ目は深さ 2～4km で西方に拡大する．

その直上には黒倉山から姥倉山，犬倉山にかけての活発な高周波地震と浅部低周波地震の活動が発生している(図4)．これらの結果は，深部からパルス的にマグマが上昇したことや，上昇の後に横方向へのマグマの移動があったことを示唆している．開口割れ目の体積増加速度は期間Eに最大となる．直後の期間Fには球状圧力源の体積増加速度もまた最大となる．期間F以降は開口割れ目が推定されない期間が続くが，球状圧力源の体積増加もまた時間と共に減衰していく傾向が見られた．

5. 岩手県内陸北部地震(M6.1)との相関性

火山活動が継続する中，1998年9月3日16時58分，南西山麓を震源とする岩手県内陸北部地震(M6.1)が発生した．震源は地殻変動から推定された球状圧力源と同じ深さ3 km，水平距離はわずか3.7 kmと極めて近接している．このことから，球状圧力源がM6.1の地震発生に寄与したことが強く示唆される．

ある地震により他の地震活動が誘発されたという報告はこれまで数多くある．その解釈としては，弾性論に基づくアプローチが成果をあげている(例えば，Reasenbergs and Simpson, 1992; King et al., 1994)．ここではこの手法を適用し，火山性地殻変動による地震断層すべりへの影響を，クーロンの破壊応力の変化(ΔCFS)により調べた． ΔCFS を計算するに際しては，連続観測データから求められた火山性地殻変動源と，GPSデータの解析から推定されたM6.1の逆断層モデル(Miura et al., 2000)を参照した．

図5(a)に，M6.1の断層モデルをメカニズムとして仮定したときの，火山性地殻変動に伴う深さ3 kmにおける ΔCFS の分布を示す． ΔCFS が正の領域をグレースケールで表している．他に，断層が広がる深さ1~4 kmの範囲で ΔCFS の分布を調べたが，いずれの深さにおいても断層北端に ΔCFS が正の領域が見られる．特に顕著な正の ΔCFS が見られるのは，球状圧力源(星印)及び本震(大きな白丸)が位置する深さ3 kmの断層面上に見られる．図5(b)は，本震の位置における ΔCFS の積算値の時間変化を示す．本震の位置では，地震発生時まで1.5~1.6 MPaのCFS増加があった．また， ΔCFS をせん断応力と摩擦力に分離すると，せん断応力の増加と摩擦力低下の両方の作用で地震を促進することが判明した．震源域でのせん断応力の増加量は，0.7~0.8 MPaと地震時の応力降下量の16~18%に及び，球状圧力源の膨張がM6.1の地震発生により強く影響を及ぼしたことを示す．

6. まとめ

本研究では，岩手山周辺の体積歪計，傾斜計及びGPSにより捉えられた地殻変動連続観測データの解析から，1998年2月~1999年6月に山体内部で進行した火山活動の解明を試みた．ベイズ流の統計学的手法を適用し，火山性地殻変動，計器の長期ドリフト補正，テクトニックな地殻変動，年周変化の分離・抽出した結果，1998年2月から約1年半にわたり緩やかに継続する火山性地殻変動を検出することに成功した．

得られた火山性地殻変動データを用い変動源の推定を行った．その結果，1998年2~4月に山頂直下の深部低周波地震の震源域の西側近傍から大地獄谷に向けて海面下1 kmまで鉛直な開口割れ目が形成され，その後，水平方向に向けて姥倉山周辺まで拡大したことが明らかにされた．開口割れ目の実体は割れ目に沿って貫入したマグマと解釈され，その体積増加量の総量は $4.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ である．さらに，割れ目の水平方向への拡大に伴って，その直後に割れ目の直上で

低

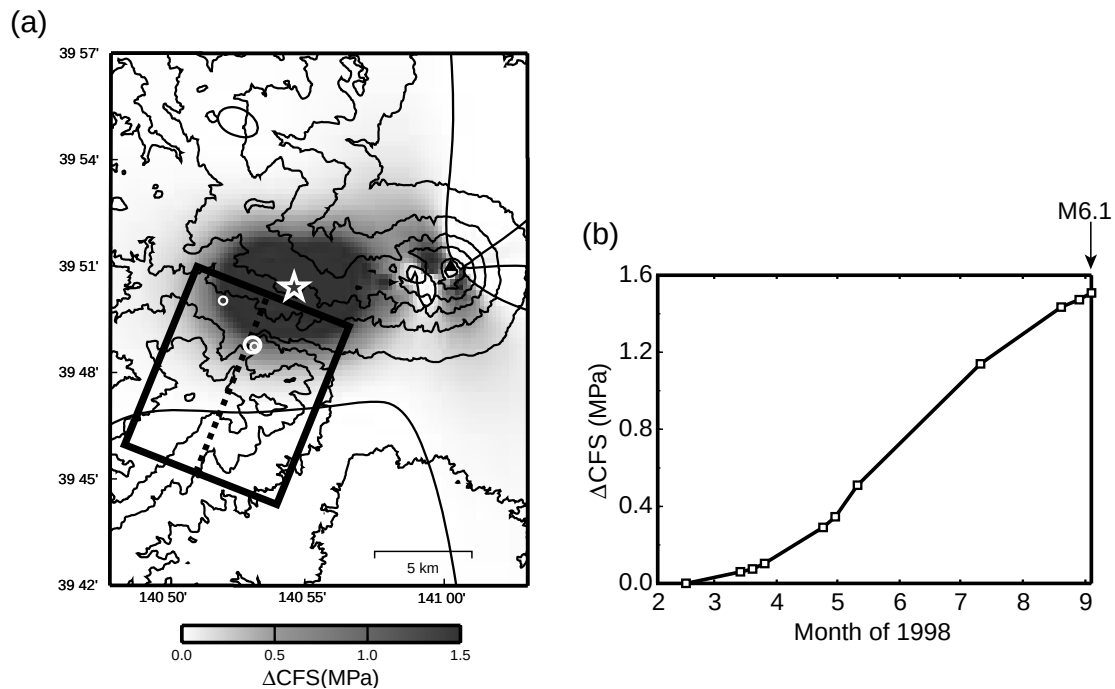


図5. (a)1998年2月14日～9月3日の火山性地殻変動に伴うM6.1の断層すべりに対する ΔCFS の深さ3kmの分布図. ΔCFS のスケールを図中に示す. 白の星印は熱水溜りの水平位置, 矩形は断層モデルの水平位置 (Miura et al., 2000), 丸印はM6.1の本震及び前震, 破線は断層モデルが図の断面を横切る位置を示す. (b)1998年2月1日～9月3日の火山性地殻変動に伴うM6.1の震源位置でのせん断応力変化 ΔCFS の積算値. M6.1の地震は図中矢印の時点で発生した.

Fig. 5 (a) Cross section of ΔCFS on fault slip of M6.1 earthquakes associated with volcanic ground deformation at 3 km in depth. Grey scale of ΔCFS is shown at the bottom of this figure. Star indicates the horizontal projection of the dilating spherical pressure source. Rectangle indicates the horizontal projections of seismic fault of M6.1 earthquake. The largest and two small circles show the epicenters of M6.1 earthquake and foreshocks respectively. (b) Cumulative CFS change around the hypocenter of M6.1 associated with volcanic ground deformation. Arrow shows the time when M6.1 occurred.

周波・高周波地震が群発するという, マグマ貫入と地震発生に時空間的相関があることが明らかにされた. また, 三ツ石山南東約1 km, 海面下3 kmには球状圧力源が存在し, 1998年2月～1999年6月に増圧したことが明らかにされた. 球状圧力源の体積増加量の総量は $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ である.

また, 1998年9月3日16時58分に南西山麓で発生した岩手県内陸北部地震(M6.1)の震源は, 球状圧力源と同じ深さ3 kmで水平距離はわずか3.7 kmと極めて近接していた. クーロンの破壊基準(CFS)の変化をもとに火山性地殻変動によるM6.1の断層すべりへの影響を調べた結果, 球状圧力源の増圧によりM6.1の断層の北側で顕著なCFSの増加, 特に本震の震源位置で0.7～0.8 MPaのせん断応力の増加が予想されるなど, 火山活動がM6.1の地震発生を促進したことを明らかにした.

謝 辞

植木貞人助教授には観測網の構築にあたり多大な御尽力を頂きました。三品正明助教授には地殻変動の観測・解析に関して御教示と御支援を頂きました。三浦 哲助教授には岩手山周辺のGPS データの解析結果を提供して頂きました。田中 聡博士には地震データに関する解析結果を提供して頂きました。気象庁盛岡地方気象台技術課の皆様からは岩手山周辺のアメダス降水データを提供して頂きました。東北大学地震・噴火予知研究観測センター、固体地球物理学講座の職員ならびに学生の方々には、日頃から議論をしていただき有益な御助言を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- Akaike, H. (1980) Likelihood and the bayes procedure. Bayesian Statistics, eds. Bernardo, M. H. DeGroot, D. V. Lindley and A. F. M. Smith, Univ. Press, Valencia, Spain.
- Efron, B. and R. J. Tibshirani (1993) An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall/Crc, 436 pp., .
- 石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣 (1984) 地球潮汐データ解析プログラム BAYTAP の紹介ー. 統計数理研究所彙報, 32, 71-85.
- King, G. C. P., R. S. Stein and J. Lin (1994) Static stress changes and the triggering of earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 935-953.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe (2001) GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248.
- Miura, S., S. Ueki, T. Sato, K. Tachibana, and H. Hamaguchi (2000) Crustal deformation assoiated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate Volcano, Northeastern Japan, as observed by a dense GPS network. Earth Planet. Space, 52, 1003-1008.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- Reasenber, P. A., and R. W. Simpson (1992) Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. Science, 255, 1687-1690.
- Sacks, I. S., S. Suyehiro, D. W. Evertson and Y. Yamagishi (1971) Sacks-Evertson strainmeter, it's installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps. Pap. Meteorol. Geophys., 22, 195-208.
- 佐藤春夫・高橋 博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺沢康夫 (1980) 孔井式傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発. 地震 2, 33, 343-368.
- 佐藤峰司 (2001) 地殻変動連続観測による岩手山の火山活動に関する研究, 東北大学博士論文.
- 佐藤峰司 (1997) 地殻変動観測による岩手山の火山活動の評価, 東北大学修士論文.
- 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, 312-318.
- Williams, C. A. and G. Wadge (1998) The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and rader interferometry. Geophys. Res. Lett., 25, 1549-1553.

岩手火山周辺における傾斜観測と水準測量

竹田豊太郎・小山 悦郎・平田 安廣
東京大学地震研究所

Ground-Tilt Observation and Levelling on and around Iwate Volcano

Toyotaro Takeda, Etsuro Koyama and Yasuhiro Hirata
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

The tilt observation has been carried out at four sites around Iwate volcano since September, 1998. Levelling survey at the northern foot of the volcano was also carried out five times by November, 1999. The tilt records is smoothly collected at present in February, 2000. Because this tilt record contains an artificial noise and the effects of seasonal temperature variations, we could not recognize the tilt changes which were related to the volcanic activity. To eliminate this artificial noise, two newly designed tiltmeters were developed. One tiltmeter was installed at the same site, another unit is also done in the special place to grasp various characters. On the other hand, precise levelling survey detected significant ground movements; raising as much as about 2.5microRad in the WSW direction.

1. はじめに

1998 年 2-3 月ころより、岩手山で発生する火山性地震が増加し始めた(東北大学, 1998 ; 田中・他, 1999). 同年 6-7 月には、岩手火山周辺で観測される GPS などの地殻変動データに山体の膨張を示す兆候が読み取れる事態に至り(植木・他, 1999), 火山体下部のマグマの活動が示唆された.

時期を同じくして、新型の X-Y sensor を用いた開発途上の傾斜計を入手することが出来た. そこで、新開発傾斜計の性能を検証する目的も兼ねて、火山噴火活動に伴う地盤変動の全体像を把握するとの想定のもと、山体周辺での傾斜観測を計画した. 観測準備を始めた直後の 9 月 3 日 16 時 48 分に、山体西南部を震源とする M6.1 の地震が発生した(東北大学, 1999). この地震は火山活動との関連性の低い構造的な地震と考えられる(気象庁, 1999)が、噴火などの火山活動の消長との因果関係は不明であった(中禮・他, 1999).

我々は、1998 年 9 月 17 日から岩手火山周辺の一箇所で地盤の傾斜観測を開始し、その後 3 箇所に傾斜計を整備した. そこで得られた観測データは、現在まで電話回線を介してパソコンで支障なく収集出来ている. この傾斜観測と同時併行して、傾斜観測で得られた変動の様子を検証するため、山体北部に小規模な水準路線を設定し測量を開始した. ここに、これらの観測経緯とそ

の変動結果を紹介する。ただ、2000 年 2 月末日現在、収録された傾斜記録や水準測量結果には、火山活動と関連した変化は認められない。

2. 観測網の整備

傾斜観測は、火山活動に伴って起きると期待される地盤傾斜変動の推移を安定的に連続して収録すること、およびその全体像(最大変動量)を把握することを目的とした。観測点は、岩手火山の山頂を中心とする半径約 6-7 km の円周上の 4 箇所である(Fig. 1)。測定開始は、MTKW(松川地熱発電所)と YNGS(柳沢小中学校)では 1998 年 9 月中旬から、残りの 2 箇所 KSWD(柏台発電所建設事務所)と KKDD(葛根田第一発電所)では 11 月中旬からである。

設置場所は、4 観測点とも既存の建造物を選んだ。その理由は、測定を一刻も早く立ち上げるべきと判断したからであり、冬期の測定環境でも安定して測定を継続できることを優先したためである。その結果、電源や電話回線の確保も容易になった。しかし、傾斜計の設置場所は地上建造物の温度変化による日周変動や人工的なノイズが大きく、傾斜計の測定感度を低めに設定せざるを得なかった。

一方、水準路線は傾斜観測点の一つ KSWD の北側に設けた(Fig. 1)。測定路線長 6 km 余りに 28 個の水準点を配した。この測定の狙いは、KSWD で得られた傾斜変動と比較検証することである。基準点(BM)の設置は 1998 年 8 月に完了し、初回の測定は 9 月に行った。

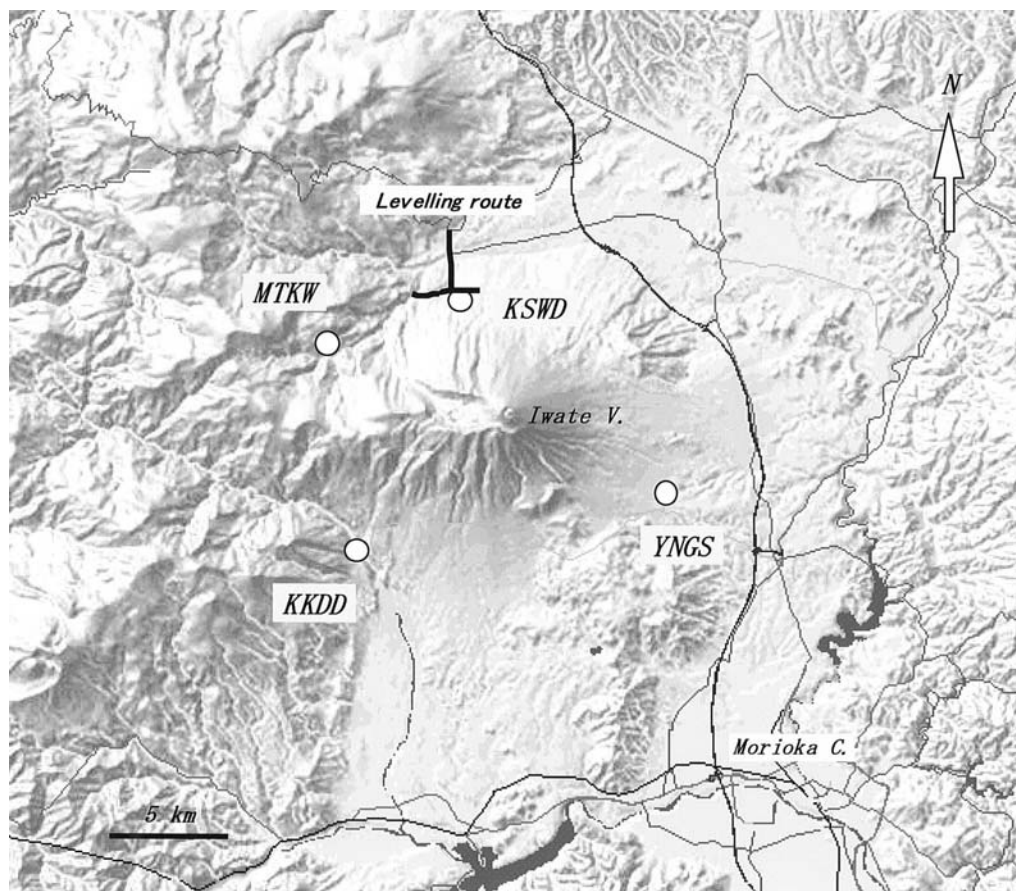


Fig. 1 Distribution of the tilt observation point and levelling route on and around Iwate volcano.



Fig. 2 The picture of the tiltmeter (CA-3672) installed on the floor.

3. 傾斜観測

ここでは、傾斜観測に使用した傾斜計とその設置方法およびデータ収集方式について述べ、得られた傾斜記録の特徴を各観測点ごとに整理する。

3-1 傾斜計と設置方法

観測に使用した傾斜計は、高感度傾斜計 CA-3672 (マコメ研究所) である。その構造は、筒状ケース内の上端に固定された一つの磁石付き振り子と、その下端の固定した 2 次元の変位量を検知する X-Y (平面) 磁気センサーからなっている。その外形は、直径 32 mm、長さ 200 mm の円柱型をしている (Fig. 2)。この傾斜計は、開発後の日が浅く長期安定性や温度特性などに不確定な要素が残っているため、今回の観測は傾斜計の特性の把握と安定性の検証を含む実験的な位置づけとなる。ただ、その検出機構がシンプルであるので、性能の安定性が確認できれば、今後その利用価値は高いと判断している。ちなみに、この傾斜計の出力感度は $0.1 \text{ mV}/\mu\text{Rad}$ 、測定範囲は 20 mRad である。

傾斜計は全ての観測点で、建物の床面にボルトで固定した。ただし、傾斜計はボアホール内への設置を念頭に設計されており、そのままの状態では床面に設置することができなかった。そのため、三角台と補助固定金具を用意して床面に固定する方法を採用した (Fig. 2)。傾斜 2 成分の設置方位は、東西と南北の向きに合わせた。この設置方位の誤差は数度 (角度) 以内である。傾斜計の温度変化を小さく保つため、周囲を断熱効果の高い発泡スチロールで囲い、傾斜計に接する部分には蓄熱材として砂を充填した。この効果を追跡することと傾斜計の温度特性を確認する目的で、室内温度と傾斜計温度の測定も行った。

3-2 記録の収集

傾斜計の観測データは、一旦データロガー (LS3000PtV/白山工業) に取りこみ、それを電話回線を介してパソコンで吸い上げている。

データロガーには、傾斜計の 2 成分、室内気温と傾斜計ケースの温度 2 成分、計 4 成分を入力している。この 4 成分を 1 分サンプリングで収録した場合、データロガーには約 15 日間のデータ収録が可能である。また、傾斜換算の最終分解能は $1\mu\text{Rad}$ である。

測定機器の電源には商用電源(100 VAC)を利用している。これまでのところ、この電源がダウンすることで傾斜記録の連続性を失うような事態は起こっていない。

データ回収は、週 1 回の頻度で観測点のデータロガーを呼び出すダイアルアップ方式で行っており、これまでのところ欠測なく観測を継続している。通信の Baud rate は、回線の質が低い観測点に合わせ安全を見積もって 2400 bps に設定しており、その分通信時間が長くなっている。

3-3 傾斜観測の記録

1998 年 9 月の観測開始以来 1 年半余りの観測データの蓄積を見たので、以下に各観測点ごとの傾斜記録をまとめ、検討する。観測点 YNGS は記録状況の経過を含めやや詳しく、その他の 3 観測点ではその点に特有な事柄に限定して述べる。

3-3-1 YNGS (柳沢小中学校)

設置した建物は鉄筋 2 階建ての校舎であり、設置場所は 1 階階段下の物置部屋の床面である。測定開始は 1998 年 9 月 15 日である。ここで得られた 2000 年 2 月末日までの原記録の 1 時間ごとの値を Fig. 3 に示す(収録は 1 分サンプリング)。Fig. 3 を見て明らかなように、傾斜記録は数カ所で不連続となっている。

1999 年 1 月 2 日のステップ状変動は、1998 年 12 月 21 日から加速した一方向への変動が元に戻ったような動きである。記録を見た当初、傾斜計と床面の取付けの固定機構に不具合があり、温度変化によってその金属部分に生じた歪が原因ではないかとの疑いを持った。この事を検証す

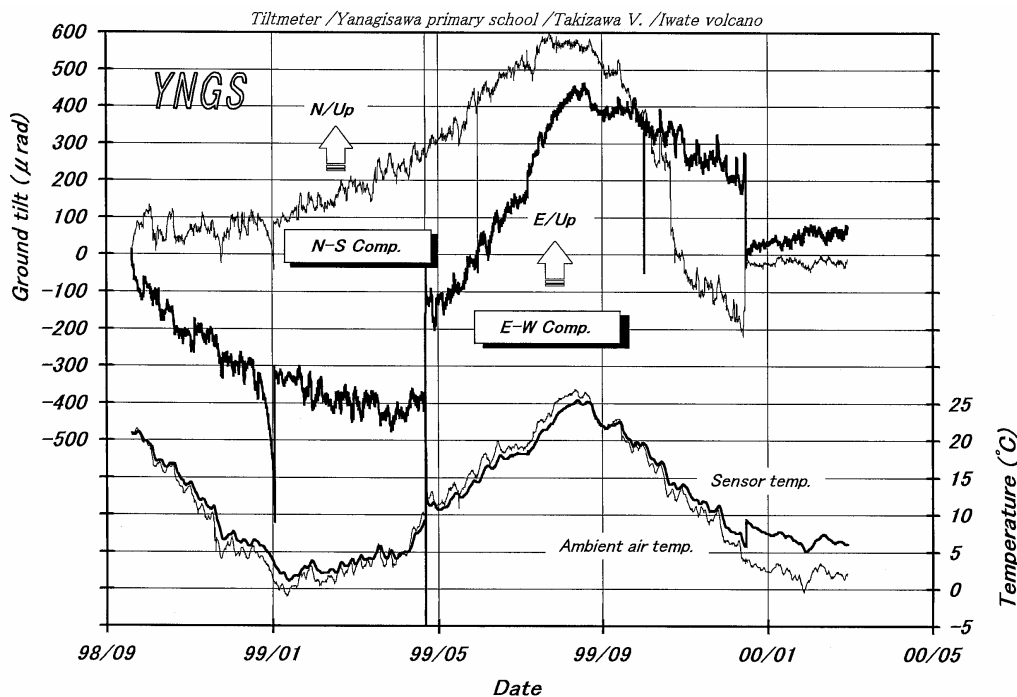


Fig. 3 The source record of the change in ground tilt observed in the tilt station "YNGS". A change of the tiltmeter and ambient temperature was shown downward.

るため、傾斜計と床面の固定方法を変更する作業を行った。1999年4月23日のステップは、この作業を行うため機器を一時停止したことによって生じたものである。結果として、上記の懸念は否定されたがその真の原因を特定するに至っていない。

1999年10月22日のステップ状変化は、傾斜計近傍の磁界が変化して生じたものである。すなわち、物置に出し入れする物体の中に強磁性体が含まれていることを意味している。そのステップの大きさと向きは、搬入された物体の帯磁の大きさや、置かれた位置と傾斜計の距離などでまちまちとなる。10月22日に起こったNS成分のステップは、この原因で生じた変動としては最大の振幅であり、傾斜換算で $200\mu\text{Rad}$ であつた。この種のステップは、学校が休暇でない日は、数10から $100\mu\text{Rad}$ の範囲で頻繁に発生している。ここでは、このステップに対する修正は行っていない。

この外部磁気に対する対策を施した傾斜計を1999年12月に試作した(第4節参照)。12月15日のステップは、旧傾斜計を取り外し新傾斜計に取り替えた時のものである。この時点から記録のトレンドが変化しているが、それは新傾斜計の初期ドリフトの影響と思われる。

以上、原因が明らかなステップ状変動を補正すると Fig. 4 のようになる。なお、2箇所で見られるパルス状の記録は、電源の瞬断によるものである。

室内温度は、長期的には外気温と連動しているものの、その他の観測点と比較して人工的な攪乱は小さい。新傾斜計での観測開始から、室温と傾斜計温度との隔たりが大きくなった。これは、新傾斜計の発熱量が旧傾斜計に比べて大きいこと、および測定部位が多少違っているためである。

3-3-2 MTKW(松川地熱発電所)

傾斜計を設置した建物は、発電所敷地入り口に位置し、事務所と見学施設を兼ねた鉄筋2階建

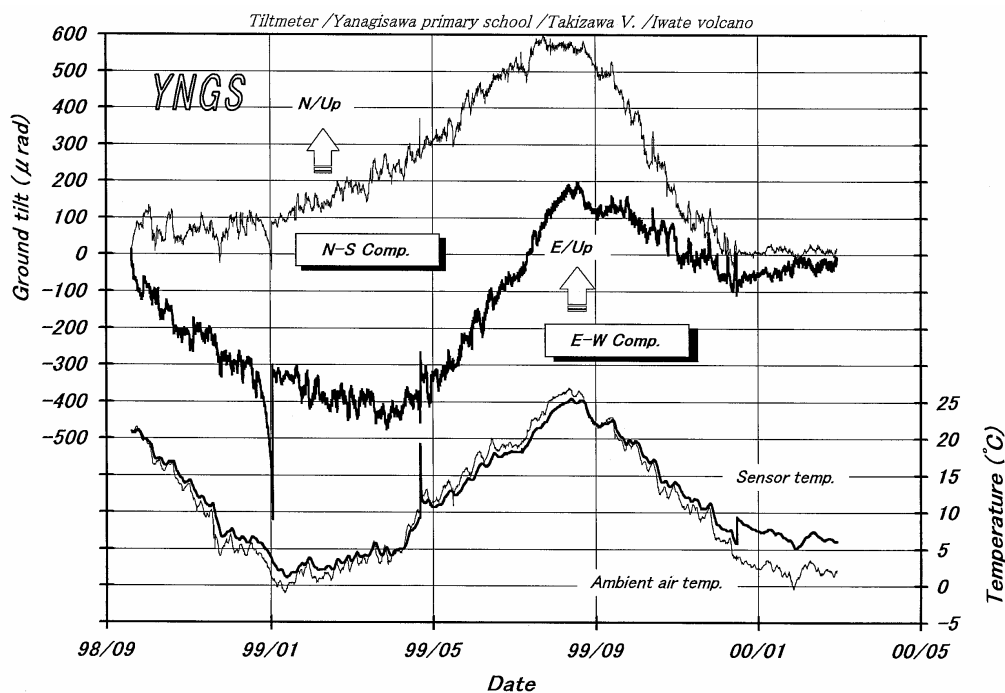


Fig. 4 The change in ground tilt observed in the tilt station "YNGS". Step-shaped noise is corrected in the source record which showed it with (Fig. 3).

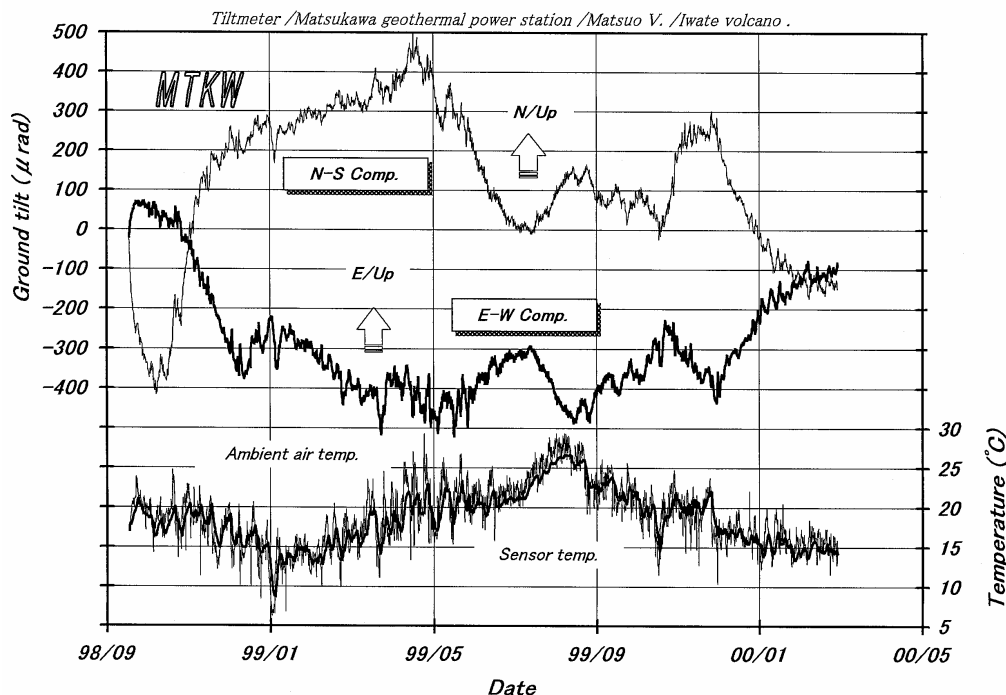


Fig. 5 The change in ground tilt observed in the tilt station "MTKW", and the record of temperature.

の建物である。傾斜計は1階の配管室の床面に設置した。測定は1998年9月17日に開始した。この設置時に設定した測定条件は現在まで一度も変更していない。これまでに得られた傾斜変動をFig. 5に示した。

設置直後の数ヶ月間の変動を除外すれば、東西・南北両成分共に傾斜計の温度と良い相関を示している。なお、室内温度にみられる不規則かつ短周期な変化は、人間が配管室へ出入りする時に発生している。入り口のドアを開けた場合、外気が直接流入することが多いためである。

3-3-3 KSWD(柏台発電所建設事務所)

柏台発電所建設事務所は鉄筋1階建ての事務所棟である。傾斜観測の測定開始は1998年11月9日である。

1999年7月8日、傾斜計の再設置を行った。傾斜計を取り囲んでいた砂を水(ペットボトル)に換えて、蓄熱材としての効果を確認するためである。おおよそ10日前後の周期変動に対しわずかな改善効果が認められる。

外部磁気の影響と判断したステップ状変化は5回認められ、手動で補正した。それは、1999年4月1日、4月16日、5月10日、5月11日および6月28日である。その結果得られた傾斜変動をFig. 6に示した。

傾斜計温度、室内温度の変化は共に、ほぼ外気温と連動している。室内温度に見られるスパイク状の変化は、昼休みの時間帯に傾斜計近傍で暖房を入れるために生じたもので、冬期間のみの現象である。

3-3-4 KKDD(葛根田第一発電所)

葛根田第一発電所は水力発電所であり、地上2階地下3階の鉄筋コンクリート構造物である。

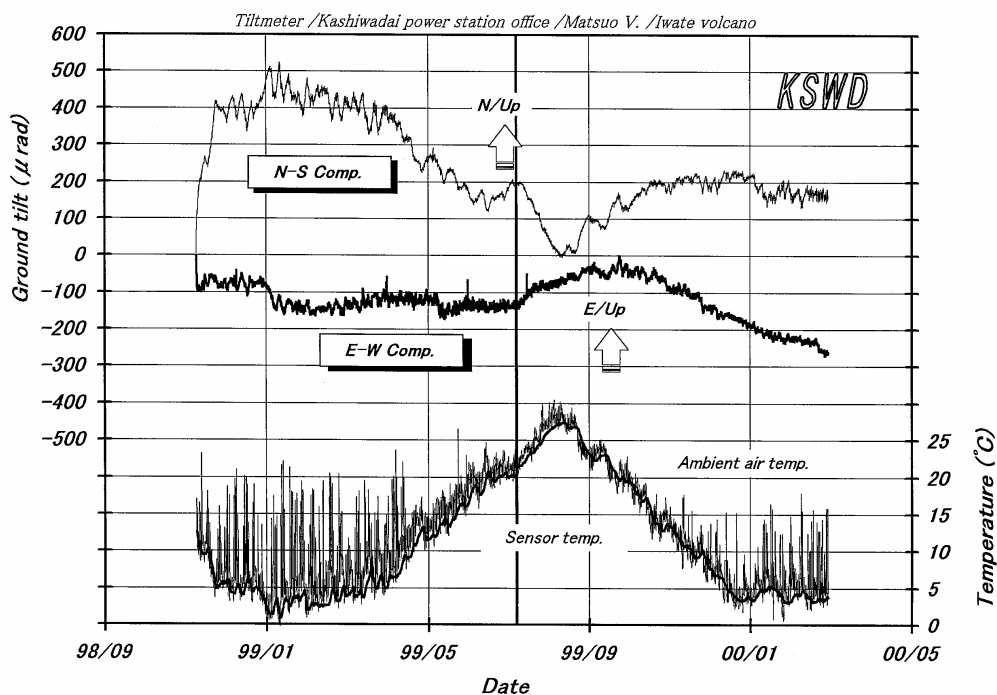


Fig. 6 The change in ground tilt observed in the tilt station "KSWD", and the record of temperature.

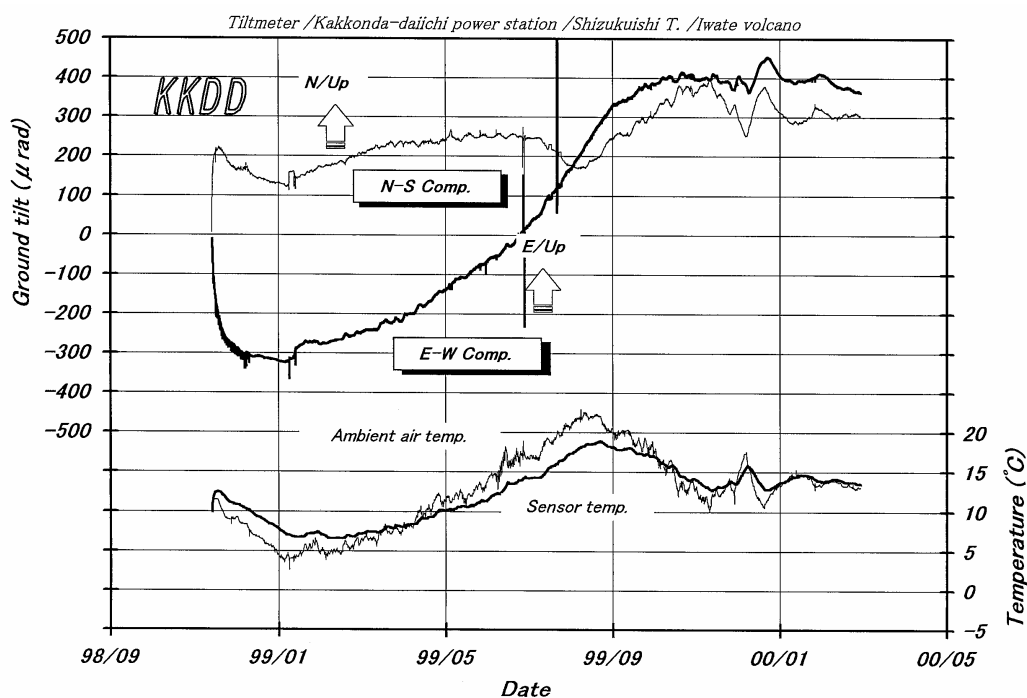


Fig. 7 The change in ground tilt observed in the tilt station "KKDD", and the record of temperature.

傾斜計は地下2階の機械準備室の床面に設置した。測定は1998年11月13日に開始した。測定条件はこの設置時から現在まで変更していない。その傾斜変動の様子をFig. 7に示す。

発電機は、傾斜計を設置する以前から整備点検のため停止しており、運転は1999年1月10日

に再開され、その後連続運転中である。この運転時に、外部磁気の変化に伴うステップ状の変化が認められる。

傾斜変動には、温度変化からも推察できるように年周変化が認められない。発電機の停止と運転時では、建物全体の傾斜に大きな影響を与えていることは間違いない。ただ、他の3観測点との明瞭な違いは、温度変化に伴う日周変化は認められないことだ。これは、傾斜計の設置場所が地階であることと、建物の南側に山体が迫っており日射が制限されているためと思われる。

また、傾斜記録には電源の瞬断によるパルスが2回認められる。

3-3-5 記録のまとめ

2000年2月末日現在、4観測点で収録された傾斜記録には、山体に発生する火山性微動などの火山活動との関連を推察できるような変動は見当たらない(Figs. 4, 5, 6, 7)。

それにもまして、全観測点で傾斜計本体の温度と傾斜変化との間に強い相関が認められる。この変動には、傾斜計を設置した構造物自体の傾斜変動と傾斜計の温度依存特性に伴う変動が含まれている。しかし、傾斜計の温度特性が確定していないので、それらを明瞭に区別することはできない。

全ての観測点では、年間の変動幅が数 $100\ \mu\text{Rad}$ 程の変動が観測されている。その要因のほとんどは、外気温変化に連動した設置構造物の傾斜変化であることは間違いない。ただし、年周変動に相当する変化パターンを特定するには、測定期間が短すぎる。また、傾斜計の初期ドリフトが相当な大きさで長時間続いている可能性も否定できない。傾斜計の長期安定性(ドリフト)に関する特性は、現在追跡・確認中であり、数量的検討は今後の課題である。

次に大きい振幅の変動は、1週間から10日前後の周期を持つ、 $100\ \mu\text{Rad}$ 程度かそれ以下の変化である。この変動と傾斜計の温度変化との相関は非常に良い。ただ、その変動の大きさと向きは、建物の構造や方位や容積、さらには観測時期などによってさまざまである。観測点 KSWD では $30\ \mu\text{Rad}/^\circ\text{C}$ という大きな値が観測された時期もある。

KKDD を除く観測点では、数 $10\ \mu\text{Rad}$ 程度の日周変化が観測されている。これは、気温の日周変化に伴う建造物の傾斜変化であり、季節や観測成分によってその振幅と位相は異なっている。これまでの観測から、傾斜計の周りに取付けた断熱材の効果は、気温の日周変化に対してはほぼ完璧であるが、周期1週間以上の変化に対してはほとんど効き目がないことが分っている。

以上述べた傾斜変動は、いずれも外気温の変化に起因する傾斜変動である。このような測定環境による影響は設置当初より予想されたことであり、より高精度な観測を行うには設置位置および埋設方法を見直す必要がある。また、実際の傾斜変動を評価するには、それと併行して各傾斜計の温度特性を確定すべきは言うまでもない。

これまで得られた傾斜変動から、ステップ状変化の主要な原因は人工的な磁気ノイズであることが明瞭になってきた。そのランダムなノイズを定量的に修正することは難しく、次節に述べるように、新しい傾斜計の試作を行うこととなった。

4. 新傾斜計の試作

第3節で述べた傾斜変動の大部分は、傾斜計の設置場所が不適切なために観測された変動であるが、傾斜計自体についてもいくつかの課題が明らかになった。最も大きな問題は、外部磁気の変化が傾斜計出力に大きな影響を与えることである。これは傾斜計の検出原理にかかわる問題で

あり、対策は単純でない。そこで一つの試みとして、センサー部分をアモルファスフィルムで周囲から保護する新しい構造の傾斜計(CA-3774)を試作し、この傾斜計は1999年12月16日に柳沢小中学校 YNGS に設置した。ここは人工的な磁気ノイズが最も大きい観測点であり、その効果を確かめるに最適と判断したからである。これまでの観測で、その磁気的影響は旧傾斜計に比べ1/10程度に改善されたことが確かめられている。

いずれにせよ、新旧両傾斜計に関する初期ドリフトや分解能などについての基本的特性を早急に把握する必要がある。そのため、長年の傾斜変動が明瞭で観測条件の整った地震研究所・油壺地殻変動観測所の地下観測坑で、2000年1月より並行観測を実施中である。これまでの検定観測から、新傾斜計の分解能は $0.1\mu\text{Rad}$ 以下、旧傾斜計のそれは $1\mu\text{Rad}$ 以下と判明しているが、長期間のドリフトなどは確定するに至っていない。

5. 水準測量

傾斜観測は、その設置点における地盤傾斜を観測しているにすぎず、それが周囲地盤の真の傾斜とかけ離れた動きである可能性も否定できない。それを補う目的で、短区間に高密度な水準点(BM)を配し、測定精度の高い水準測量を行うことにした。この場合、火山活動の消長に即応して、測定繰り返し頻度の変更は比較的容易に行える。

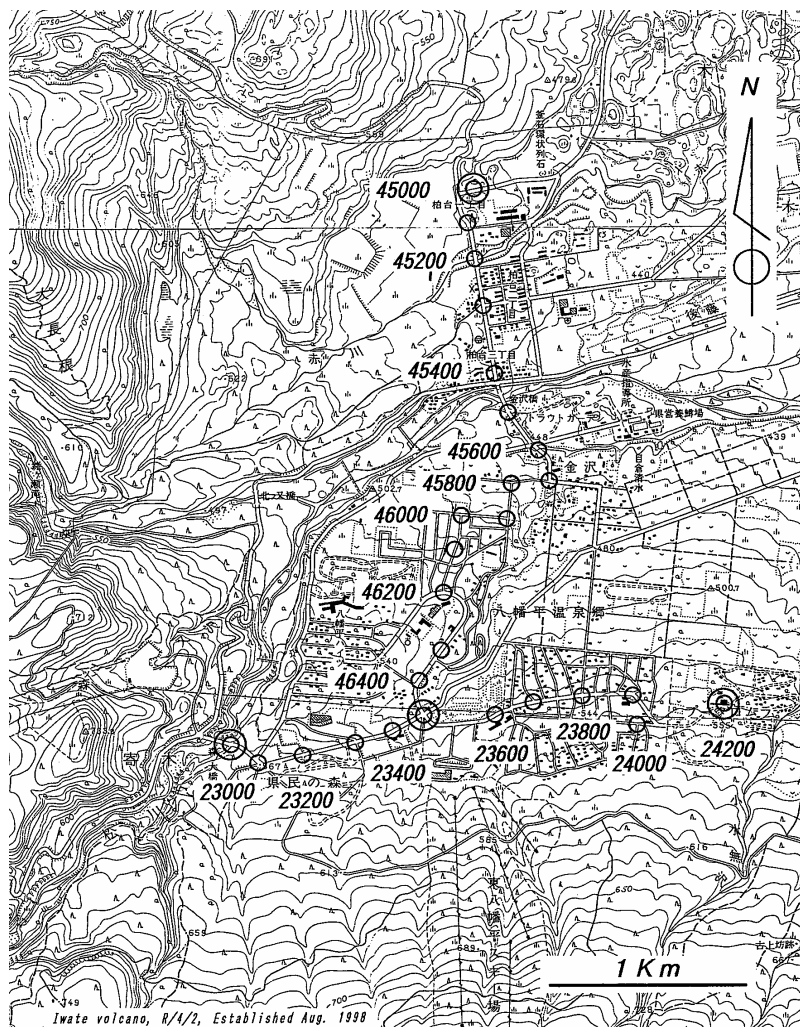


Fig. 8 Levelling route (R2, R4) which spread out in Hachimantai-onsengo area, Matsuo village.

5-1 水準路線

水準路線は、1998 年 8 月、岩手火山体北部の、傾斜観測点 KSWD の北側に隣接した松尾村八幡平温泉郷地区に設置した (Fig. 8)。東西方向路線 (R2) は路線長約 2.8 km 高度差約 25 m の路線である。また、南北方向路線 (R4) は路線長約 3.5 km 高度差約 65 m の路線である。両路線は水準点 (BM) 64500 で結ばれ、全体として逆 T 字型路線となっている。

水準点 (BM) は、平均して路線長 200 m に 1 個の割合となるよう、R2 には 13 個、R4 には 16 個を設置した。BM には金属標を使用し、基礎が深くなるべく体積の大きい既存のコンクリート構造物に取付けた。この場合、埋設時の初期ドリフトは無視できる。また、データの連続性を維持するため、これまで数カ所で BM の補充や改埋を行ってきた。

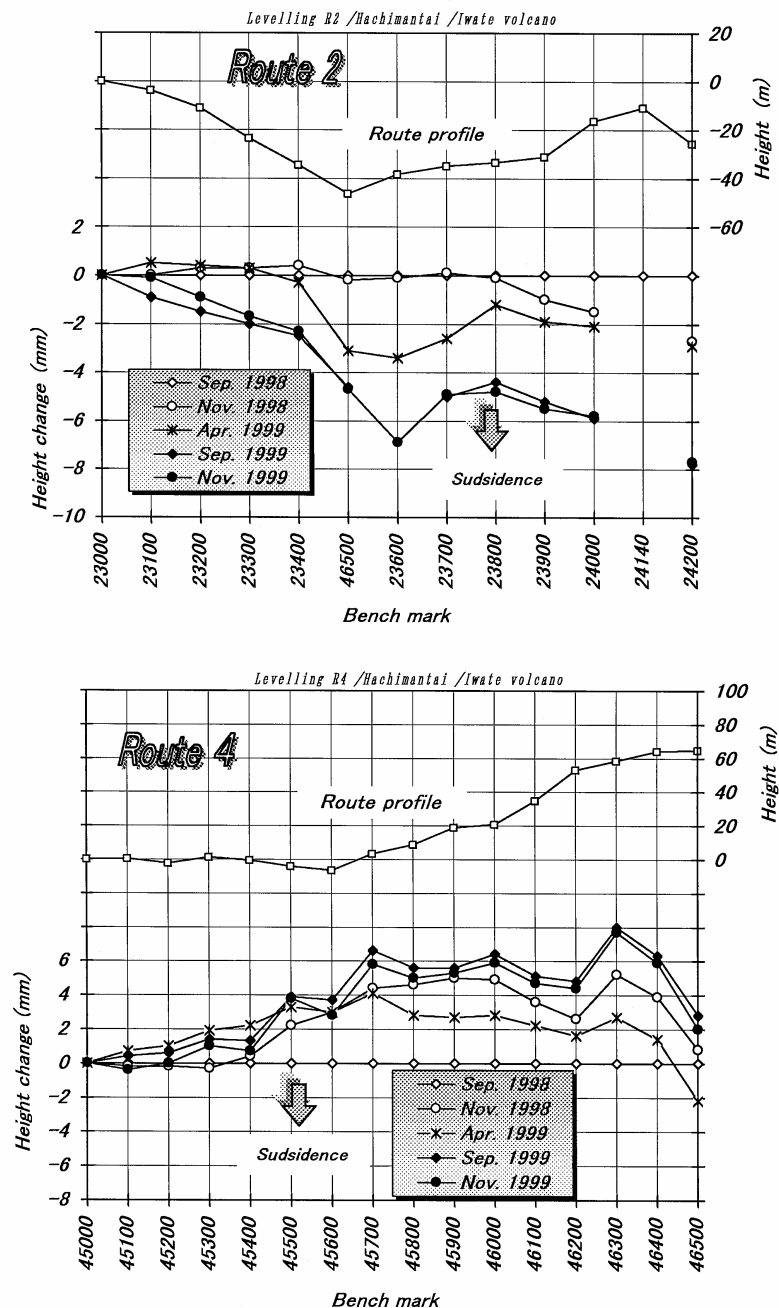


Fig. 9 Vertical change of the levelling route section based on September, 1998.

5-2 測定方法

水準測量は、98 年 9 月に行った初回の測定を含め、98 年 11 月、99 年 4 月、99 年 9 月そして 99 年 11 月と計 5 回実施した。水準儀には Bar-code 標尺と共に Leica NA3000 を使用した。5 回の測定の測定精度はいずれも、路線長 1 km あたりの標準誤差で 0.5 mm 以下を確保した。

測定方法の詳細は省略するが、次の 2 点に留意した。測定は太陽高度が高くなる昼前後の時間帯は避け、かつ視準距離に制限を設けるなど測定精度の向上に努めている。カゲロウ発生の有無と視準距離の長短は、測定精度に直接影響することが判明しているからである。また、気温の高い夏期間の測定では、カゲロウの発生もさることながら、測定路面のアスファルトの硬度が極端に低下し致命的な測定誤差を招きかねないため、測定自体を行っていない。

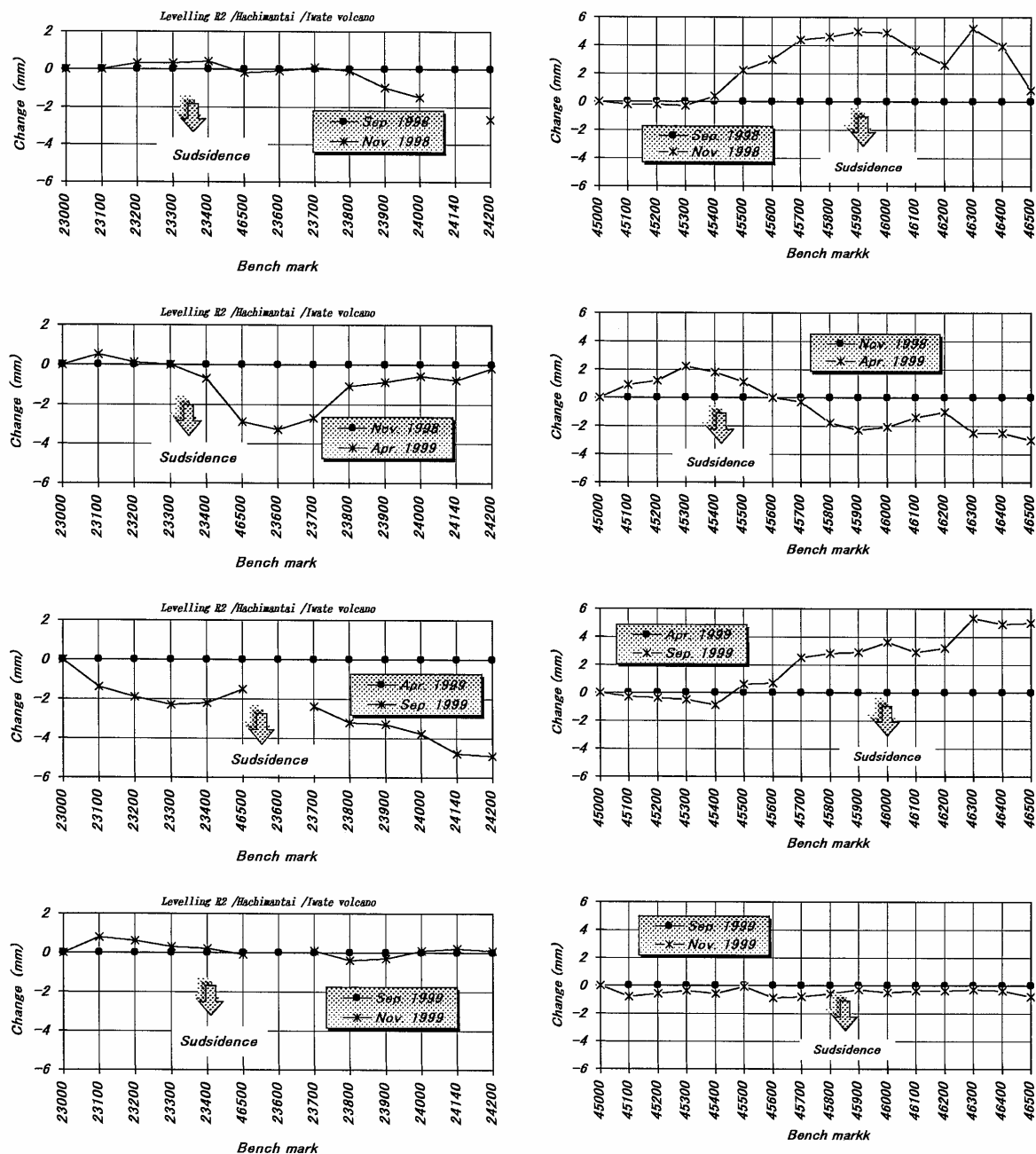


Fig. 10 Vertical change of the levelling route section which showed it in each measurement period.

5-3 測定結果

1998 年 9 月から 1999 年 11 月までの間に R2 と R4 で得られた各水準点の変動を Fig. 9 に示した。変化量は比較的小さくかつ局所的な変化も含んでおり、山体の様な膨張収縮で説明できるような地盤の上下変動は認められない。ただ、R2 の変動を東西方向成分の変動、R4 の変動を南北方向成分の変動とみなした場合、測量地域の地盤は西南西方向に約 $2.5 \mu\text{Rad}$ 上昇したと見積もられる。定性的には、この時期の岩手山の変動と調和的な結果となっている。その変動は測定期間中一様な速度で進行したわけではなく、また年周変化の吟味が不十分な現時点ではその真の変動は特定できない。

このことは、測定期間ごとの変動を描いた Fig. 10 を見れば明らかである。R4 における 1998 年 11 月と 1999 年 4 月の変動はむしろ逆向きの変動を示している。また、99 年 9 月と 99 年 11 月の変動は両測定線ともほとんど認められない。また、R2 と R4 の結合付近に設置された 3 個の BM(46500, 23600, 23700)の変動は、上述した変動から外れたローカルな動きをしている。これは地表付近の地質構造の不均質性を反映した結果と思われるが、データの蓄積を待ってその原因を明らかにしたい。

上述した水準測量から推定される地盤傾斜変動と KSWD の傾斜記録との間に定性的な矛盾はない。ただし、変化量自体が小さくかつ測定精度が違いすぎるため、数量的な比較は難しい。

6. おわりに

以上観測の概要を述べたが、”岩手山を囲む 4 観測地点で地盤傾斜の変動ベクトルを描く”という初期の目標には達していない。しかし、試作した傾斜計はより安定した性能が確かめられつつあり、その設置方法等を工夫すればより精度の高い安定した観測が可能となる。これに上述の水準測量の結果を加味して、山体周辺の地殻傾斜の時空間的な変化を明らかにしていきたい。

現在、データ転送に携帯電話を経由する観測システム(平田・他, 1999)の整備が出来ており、電源に太陽電池を使用することで、機器設置場所の選択の自由度をさらに高めることも可能な設計となっている。

謝 辞

傾斜観測の場所を提供して頂いた、柳沢小中学校(滝沢村)、柏台発電所(岩手県)、松川地熱発電所(日本重化学工業株式会社)それに葛根田第一発電所(東北電力株式会社)の関係各位に心から感謝申し上げます。

1998 年 9 月の水準測量は、東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センターの寺田暁彦(院生)さんに手伝っていただいた。東京大学地震研究所地震地殻変動観測センターの石井紘教授には傾斜計の試作にあたり数々の便宜と有益なコメントを頂いた。また、その検定試験ため油壺地殻変動観測所の地下観測坑を利用させて頂いている。東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センターの渡辺秀文教授には原稿の不備を指摘頂き、建設的な意見を頂いた。同鍵山恒臣助教授には文章表現の不備を指摘して頂いた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・浜口博之(1999)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.

気象庁(1998)1998年9月3日の岩手県内陸北部の地震．平成10年9月地震火山月報(防災編)，
18-19.

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.

中禮正明・中村浩二(1999)1998年9月3日に発生した西根断層付近の地震(M6.1)の発生機構と
岩手山の活動．1999年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，Vd-006.

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)岩手山の地震活動と地殻変動
(1998年6月—1998年9月)．火山噴火予知連絡会会報，72，3-17.

平田安廣・中尾 茂・渡辺 茂(1999)地殻変動観測データの携帯電話によるデータ収集システム
について．東京大学地震研究所，技術報告，No.5，116-119.

岩手火山における G P S 連続観測 — 主として 1999 年の変動について —

植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之
東北大学理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

GPS Observation at Iwate Volcano - Focused on the Deformation in 1999 -

Sadato Ueki, Satoshi Miura, Toshiya Sato, Kenji Tachibana and Hiroyuki Hamaguchi
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University

A GPS observation by a dense network of dual-frequency receivers was continued throughout the year of 1999 as a part of the joint observation of Iwate volcano. At Iwate volcano, noticeable ground deformations accompanied with seismic activity were observed in 1998. These phenomena were interpreted to be caused by intrusion of volcanic fluid. It is revealed by the GPS observation that the ground deformation in the similar manner has lasted at least till June, 1999, but with the rate of about one 6th of that in 1998. No evident deformation in the reverse sense is observed as of the end of 1999.

1. はじめに

岩手火山では、1998 年 3 月～8 月に活発な地震活動とともに明瞭な地殻変動が観測された。これに対応して、われわれは、G P S 観測を強化し、山頂部を含めた 12 点からなる 2 周波受信機を用いた連続観測網を構築した。その結果、1998 年 3 月～9 月に、地震活動の活発化と同時に、岩手火山周辺において最大で約 5 cm に達する明瞭な地殻変動が観測された。地震活動域と地殻変動源の時空間分布の共通性から、両者は、岩手火山群西部へ貫入した火山性流体によって引き起こされた火山現象であると解釈された(植木・他, 1999 ; 三浦, 2000)。

1998 年に構築された G P S 観測の体制は、集中総合観測が実施された 1999 年をとおして維持された。1999 年の活動は、地震活動と地殻変動のどちらの面においても、1998 年に比較して低調であった。本小論では、1999 年と 1998 年の G P S 観測の結果を比較して、1999 年の地殻変動の特徴を明らかにする。

2. G P S 観測網

1999 年の G P S 観測網を図 1 に示す。ここで、黒丸は連続観測点、白丸は繰り返し観測点である。図の西方約 20 km にも連続観測点(OGAM)が存在する。観測には、Ashtech 社 Z-XII, Z-

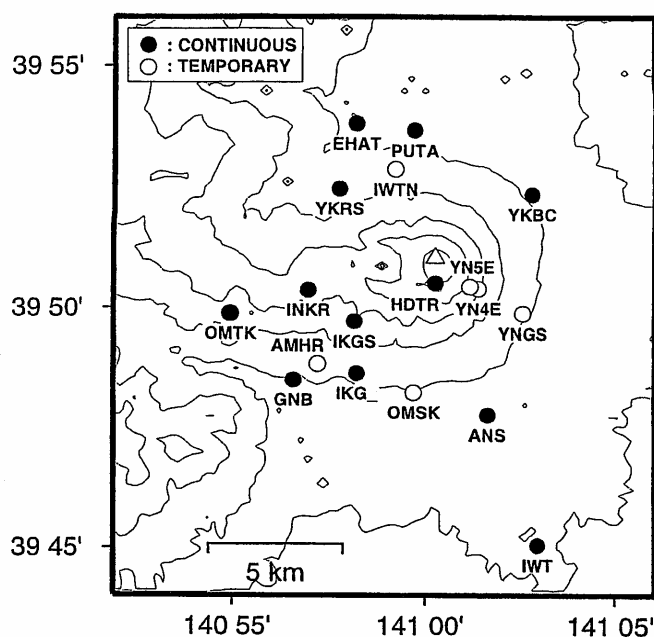


図 1. 岩手火山地域における G P S 観測網. 黒丸は連続観測点, 白丸は繰り返し観測点.

Fig. 1 GPS observation network around Iwate volcano. Solid and open circles represent continuous and temporary observation stations, respectively.

FX, トプコン社 GP-R1 などの 2 周波受信機を用いた. 解析では連続観測データを使用することから, 以下では, 連続観測網について述べる.

連続観測点の中で, 火山性地殻変動が始まった 1998 年 2 月より前から観測を実施していたのは, IWT, YKBC, IKG, PUTA, ANS の 5 点のみである. 他の点は, 活動の活発化を受けて, 1998 年 4 月以降に設置した. 図 1 中で最も西に位置する OMTK は, 1999 年になり西岩手火山の黒倉山・姥倉山付近における噴気活動が活発化したことに対応して, 繰り返し観測から連続観測に切り替えた観測点である.

山麓の観測点では, 電源に商用電源を用い, 一般公衆回線を介してダイヤルアップによりデータ回収を行った. これらの設備が使用できない山頂部や山奥にある HDTR, INKR, OMTK の各観測点では, 電源に太陽電池と蓄電池を使用した. また, データ回収は, 新たに開発した無線モデム・無線機を介して連続データを山麓に伝送して P C に収録する方式や, 携帯電話を介したダイヤルアップ方式によって行った(三浦, 2000).

3. 1998 年の地殻変動

1998 年に観測された地殻変動について, 簡単に振り返る. 連続観測点の中から, 1997 年以前から観測を行っている PUTA ならびに IKG における観測データを図 2 に示す. 1997 年 1 月 1 日 ~ 1999 年 12 月 31 日の期間における, 秋田観測所 (AKT) を基準点とした基線ベクトルの 3 成分と基線長の時間変化を示してある. 図中で激しく変化している細い線は, 1 日毎の観測データを結んだ折れ線であり, 太いなめらかな曲線は, 時間窓 30 日間の移動平均である. 両観測点において, 1998 年 3 月ころから 9 月にかけて明瞭な地殻変動が観測されている. この時期は, 西岩手火山浅部における地震活動(田中・他, 1999)が最も活発であった時期に対応している. この間の PUTA と IKG における変動は, それぞれ異なる特徴を示す. すなわち, PUTA では北東方向に約 4 cm 変位したのに対して, IKG では約 5 cm 南東に変位した. これらの変位方向は, それぞれ, 岩手山の北側山腹・山麓と南側山腹・山麓での変位を特徴づけるものである.

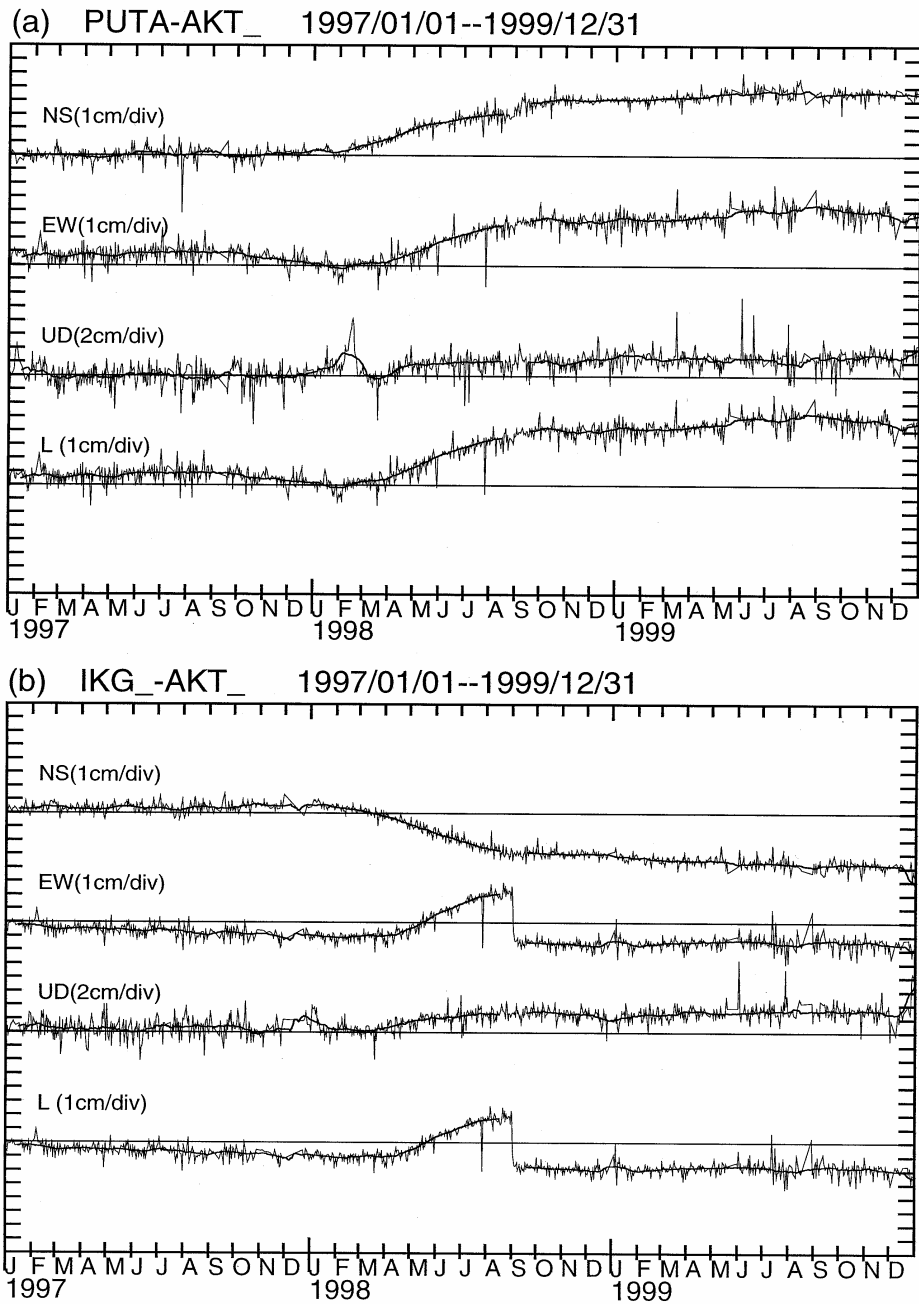


図 2. 秋田観測所 (AKT) を起点とした (a) プータロ村 (PUTA) ならびに (b) 岩手高原スキー場 (IKG) との間の基線ベクトルの時間変化 (1997 年 1 月 1 日～1999 年 12 月 31 日). 上から, NS, EW, UD の各成分と基線長の変化を示す. 細い折れ線は日毎のデータ, なめらかな太線は 30 日間の移動平均.

Fig. 2 Time-series of NS, EW and UD components and length of the baseline vectors between (a) PUTA and AKT and (b) IKG and AKT for the period from January, 1997 to December, 1999. The reference station AKT is located about 80 km west of the volcano. Thin lines and smoothed curves represent the temporal changes in daily solutions and 30-day running means, respectively. The steps at the beginning of September, 1998 are coseismic ones caused by a M6.1 tectonic earthquake on September 3.

なお、IKG において特に明瞭に認められる 1998 年 9 月はじめの変動は、岩手火山地域の南西側に隣接して 9 月 3 日に発生した岩手県内陸北部の地震(M6.1)にともなう変動である。

岩手火山周辺の GPS 観測網における変位分布の解析から、2 月～4 月の変動は、西岩手火山浅部における開口断層の開口運動によって、4 月～8 月の変動は、時間とともに西方に移動した等方圧力源の増圧・膨張によって説明できることが示されている(植木・他, 1999 ; 三浦, 2000)．さらに、各時期の変動源は、その時点における地震活動域の西端付近に位置しており、変動源の西方への移動は震源域の西方への伸展(田中・他, 1999)に対応している．このように、地殻変動と地震活動が良く対応していることから、両者は、西岩手火山浅部へ貫入して西方へ移動した火山性流体の運動にともなって発生した現象と解釈された(植木・他, 1999 ; 三浦, 2000)．

地殻変動の時間変化の特徴を明らかにするために、図 2 に示されている NS ならびに EW 成分の移動平均値を用いて、2 観測点における水平変位ベクトルの時間変化を求めた．その結果を図 3 に示す．ここで、横軸から伸びている直線が、10 日間隔で求めた 30 日間の水平変位ベクトルの大きさと方向を表し、始点が時間窓の中心を示している．この図から、1997 年中は変動ベクトルがさまざまに変化しており、系統的な変動は認められないこと、明瞭な地殻変動が、1998 年 2 月はじめ頃に始まっていることがわかる．系統的で明瞭な地殻変動は、変化しながら 8 月まで継続している．変位量のみならず、変位方向も時間とともに変化したことがわかる．両方の観測点において、変動開始直後の 2 月～3 月には NS 成分が卓越していたが、次第に EW 成分が増大して、5 月には両者の比が逆転した．しかし、7 月以降には、NS 成分の割合がやや回復した．このような変位方向の系統的な変化は、変動源として等方的な圧力源を仮定した場合、変動源が

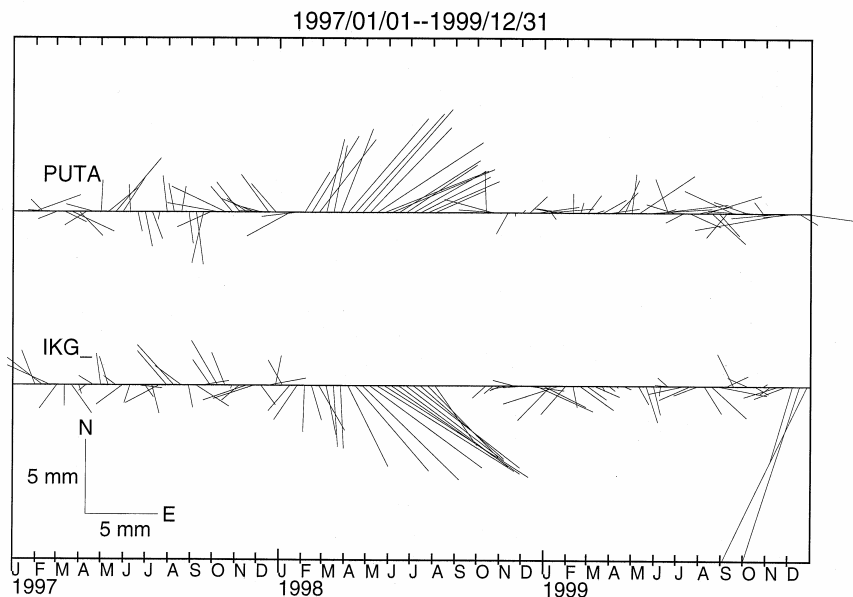


図 3．プータロ村(PUTA)ならびに岩手高原スキー場(IKG)における変位ベクトルの時間変化．30 日間の変位ベクトルを、10 日間隔で示す．1999 年 12 月の IKG における大きな変動は、受信機の不調による雑音．

Fig. 3 Temporal changes in displacement vectors at PUTA and IKG. Displacements in 30-day period are shown every 10 days. The unusual deflections at IKG in December, 1999 are originated from noises.

観測点近傍から西方へ移動し、最後に少しだけ東へもどったことを意味する。2点での変位ベクトルの変化から推論されるこの圧力源の移動は、当然のことながら、上に紹介した観測網全体での変位分布の時間変化から求めた変動源の時空間分布(植木・他, 1999 ; 三浦, 2000)と矛盾しない。

4. 1999 年の地殻変動

1998 年 9 月以降には、1998 年に観測されたような明瞭な変動は生じていない。しかし、図 2 を注意深く見ると、特に NS 成分において、1998 年 8 月以前と同様の変動が 1999 年 7 月ころまで継続しているように見える。また、図 3 において、1998 年 9 月の地震以降、変位ベクトルの方向は一時的に乱れるが、1999 年 2 月から 5 月頃までの期間には、1998 年前半と類似の変動をしていることがわかる。その後、7 月以降には系統的な変動が認められなくなる。以上の結果から、火山性地殻変動は、1998 年 9 月 3 日の地震の後一時乱されたが、少なくとも 1999 年半ばまで継続していたといえる。

1998 年 10 月～1999 年 10 月の 1 年間に観測された水平変位ベクトルの分布を図 4 に黒色実線矢印で示す(三浦, 2000)。ただし、ここでは、期間が長いためにプレート運動にともなう広域地殻変動の影響を受ける可能性があることから、基準点は、秋田観測所の代わりに、岩手山観測点(IWT)にとってある。岩手山の北側山腹・山麓では北東方向、南側山腹・山麓では南東方向の変位が観測されている。これらの変位方向の地域的特徴は、前節で指摘した 1998 年 4 月～8 月に

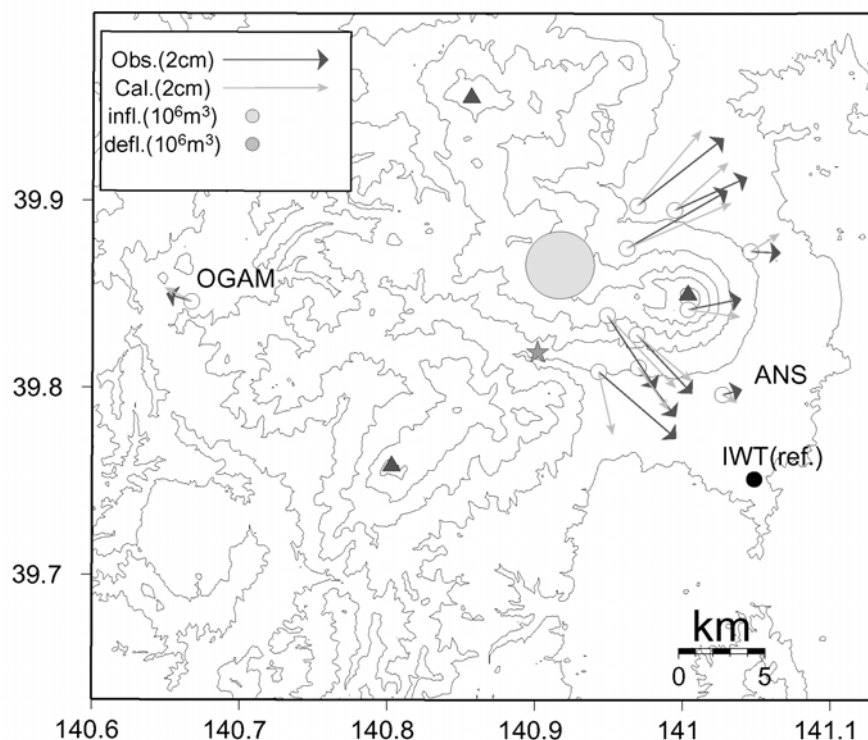


図 4. 1998 年 10 月～1999 年 10 月の 1 年間に観測された水平変位(黒色実線矢印)，ならびに、これに対して推定された変動源の位置(丸印)と計算された水平変位(灰色矢印)。

Fig. 4 Horizontal displacement vectors observed in the period from October, 1998 to October, 1999 (solid arrows). Open circle indicates the location of the pressure source deduced from the observations, and theoretical displacements are shown by broken arrows.

観測された変位方向の地域分布の特徴と同じである．観測データから推定された変動源の位置を丸印で、これから計算された変位ベクトルを灰色矢印で図中に示してある．変動源モデルとしては、開口断層よりも、等方圧力源の方がより観測値に合っている．変動源は、1998 年 7 月～8 月の変動源の北東約 1.5 km に位置しており、 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加となっている(三浦, 2000)．以上の結果から、1998 年 2 月頃に始まった岩手火山群西部に変動源をもつ火山性地殻変動は、1998 年 9 月以降体積増加率が 1998 年 4 月～7 月の約 1/6 に低下したものの、1999 年半ばまで続いたといえる．なお、1999 年末までには、明瞭な地殻変動の逆転、すなわち、開口断層の閉口運動あるいは等方圧力源の減圧・収縮に対応した地殻変動は観測されていない．

5. 議論

先に述べたように、1998 年の地震活動と地殻変動の間には、震源域の西方への伸展と地殻変動源の西方への移動が対応するように、互いに密接な関係が認められる．両者の密接な関係は、図 5 に示す地震発生数と地殻変動の間にも認められる．ここで、太いなめらかな曲線は、地震記象から岩手火山地域の上部地殻に発生したと判断される地震の積算個数の時間変化、細い折れ線は、GPS 観測による PUTA-IKG 間の基線長の時間変化を表わしている．両者は、1998 年 2 年～9 月の期間で急激に変化し、その後はゆっくりと変化しており、変化の様子はよく似ている．1999 年 5 月～6 月には、地震活動がやや活発化したのに対応して、基線長の伸びも一時的にやや加速された．これらは、1998 年に観測された変化に比べると格段に小さい変化であるが、両者の変化の仕方は良く対応している．図 3 の結果と合わせて考えると、図 4 に示されている変位の多くの部分が、1999 年 2 月～6 月に生じたものである可能性が大きい．

地震活動と基線長変化の対応が良いのはこのころまでであり、1999 年 8 月以降は、積算地震数が 1 ヶ月当たり約 54 個の割合で増加を続けるのに対して、基線長の伸びは停止したように見える．対応関係が崩れた時期は、図 3 で、1999 年前半に見られた 1998 年の活動最盛期と同様の変位パターンが認め難くなった時期にほぼ対応している．岩手火山地域西部の地下における火山

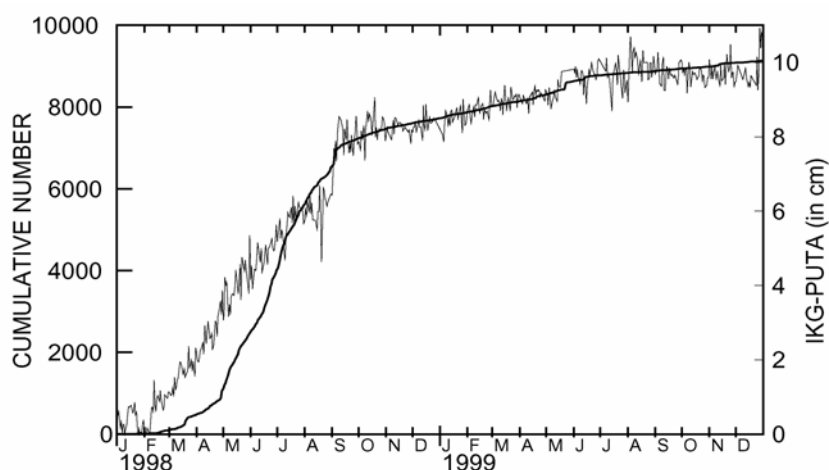


図 5．岩手火山地域に発生した地震の積算個数の時間変化(太い曲線，左縦軸)と、PUTA-IKG 間の基線長変化(細い折れ線，右縦軸)．

Fig. 5 Cumulative number of seismic events (solid curve referring to the left axis) and daily solutions of baseline length between PUTA and IKG (thin lines referring to the right axis).

活動が一段と低下したことを意味するものかもしれない。しかし、GPS 観測から得られる地殻変動には、季節変化が含まれている可能性があることから、微少な地殻変動の解釈は、今後のデータの蓄積を待って行う必要がある。

なお、図5では、基線長が1998年2月はじめの変動開始直後から大きな変動率で変化しているのに対して、地震活動は約3ヶ月遅れて最盛期に入っており、両者の変化パターンに差が認められる。しかし、これは、地殻変動源での変動が初期から大きかったことを意味するものではない。図3における変位量が初期に小さく、4月以降大きくなっていることから推定できるように、変動源での変動量(開口量や体積増加量)ははじめ小さく、後に増大している(植木・他, 1999; 三浦, 2000)。図5に見られる現象は、変動源が移動したために、基線長を主として規定している変位の南北成分の差がほとんど変化しなかったために生じた現象である。

6. まとめ

岩手火山集中総合観測が行われた1999年をとおして、山頂部・中腹・山麓部に配置した12点においてGPS連続観測を継続した。その結果、1998年9月以降も、変動率は小さいが、岩手火山群西部における圧力源の増圧・膨張に起因する地殻変動が、少なくとも1999年半ばまで継続していたことが明らかになった。1998年10月～1999年10月の1年間について求めた変動源は、1998年7月～8月の変動源の北東約1.5 kmに位置し、体積増加率は最盛期の約1/6である。PUTAとIKGにおける変位ベクトルの時間変化、両点間の基線長変動、火山性地震の活動などから判断して、この1年間の変動の多くの部分が、1999年2月～6月に生じた可能性が大きい。

1999年8月以降、変動源の膨張率は一段と低下した可能性があるが、データの蓄積を待った、季節変動をも考慮した解析を行って判断を下す必要がある。また、1999年末までのところ、変動源の減圧・収縮を示す観測結果は得られていない。

謝 辞

岩手火山地域においてGPS観測を実施するにあたっては、岩手県(総合防災室、防災航空隊、企業局、自然保護課)をはじめとして、滝沢村、西根町、松尾村、岩手高原スキー場、プータロ村、国土交通省岩手工事事務所、盛岡森林管理署、八幡平自然保護管事務所などの、関係機関、地元の方々のご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

引用文献

- 三浦 哲 (2000) GPS連続観測による岩手火山周辺の地殻変動に関する研究, 東北大学博士論文, 126P.
- 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.
- 植木貞人・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火山の地殻変動, 月刊地球, 21, 296-301.

水準測量による岩手山南山麓における上下変動 (1998年7月～1999年10月)

木股文昭¹⁾・宮島力雄¹⁾・山本圭吾²⁾・高山鉄朗²⁾・植木貞人³⁾・佐藤峰司³⁾・松島 健⁴⁾・
内田和也⁴⁾・中村めぐみ⁴⁾・辻 浩⁵⁾・小山悦郎⁵⁾・森 濟⁶⁾・平野舟一郎⁷⁾

1) 名古屋大学大学院理学研究科, 2) 京都大学防災研究所,
3) 東北大学大学院理学研究科, 4) 九州大学理学部, 5) 東京大学地震研究所,
6) 北海道大学大学院理学研究科, 7) 鹿児島大学理学部

Vertical Movements at Southern Part of Iwate Volcano Detected by Leveling (July 1998 – October 1999)

Fumiaki Kimata¹⁾, Rikio Miyajima¹⁾, Keigo Yamamoto²⁾, Tetsuro Takayama²⁾,
Sadato Ueki³⁾, Minemori Sato³⁾, Takeshi Matsushima⁴⁾, Kazuya Uchida⁴⁾,
Megumi Nakamura⁴⁾, Hiroshi Tsuji⁵⁾, Etsuro Koyama⁵⁾, Hitoshi Mori⁶⁾
and Sen'ichiro Hirano⁷⁾

1) Graduate School of Science, Nagoya University,
2) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
3) Graduate School of Science, Tohoku University, 4) Faculty of Science, Kyushu University,
5) Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
6) Graduate School of Science, Hokkaido University,
7) Faculty of Science, Kagoshima University

We set the benchmarks for precise leveling to discuss the volcano deformation at the southern part of Iwate Volcano in July 1988, and we repeat the precise leveling at the leveling route in July and October, 1999. As a result of the leveling, upheavals of 2 cm are observed locally at the western Iwate Volcano in 1999. It is clearly that the inflation deformation is going in the area since 1998. The point pressure source is estimated to be located in the southern part of the Mt. Oomatsukura, the western part of the Iwate Volcano, with a depth of 1 to 4 km using the Mogi solution. The migration of the point pressure source is also recognized in the period, although the bench mark arrangements are different in July and October. Especially the benchmarks located near the pressure source were newly set in July 1999.

1. はじめに

名古屋大学などは、岩手火山における圧力源を上下変動から議論する目的で、同火山南山麓に全長 40 km の水準路線を1998年7月に設置した(図1)。雫石町網張温泉を基点に南北方向と東西

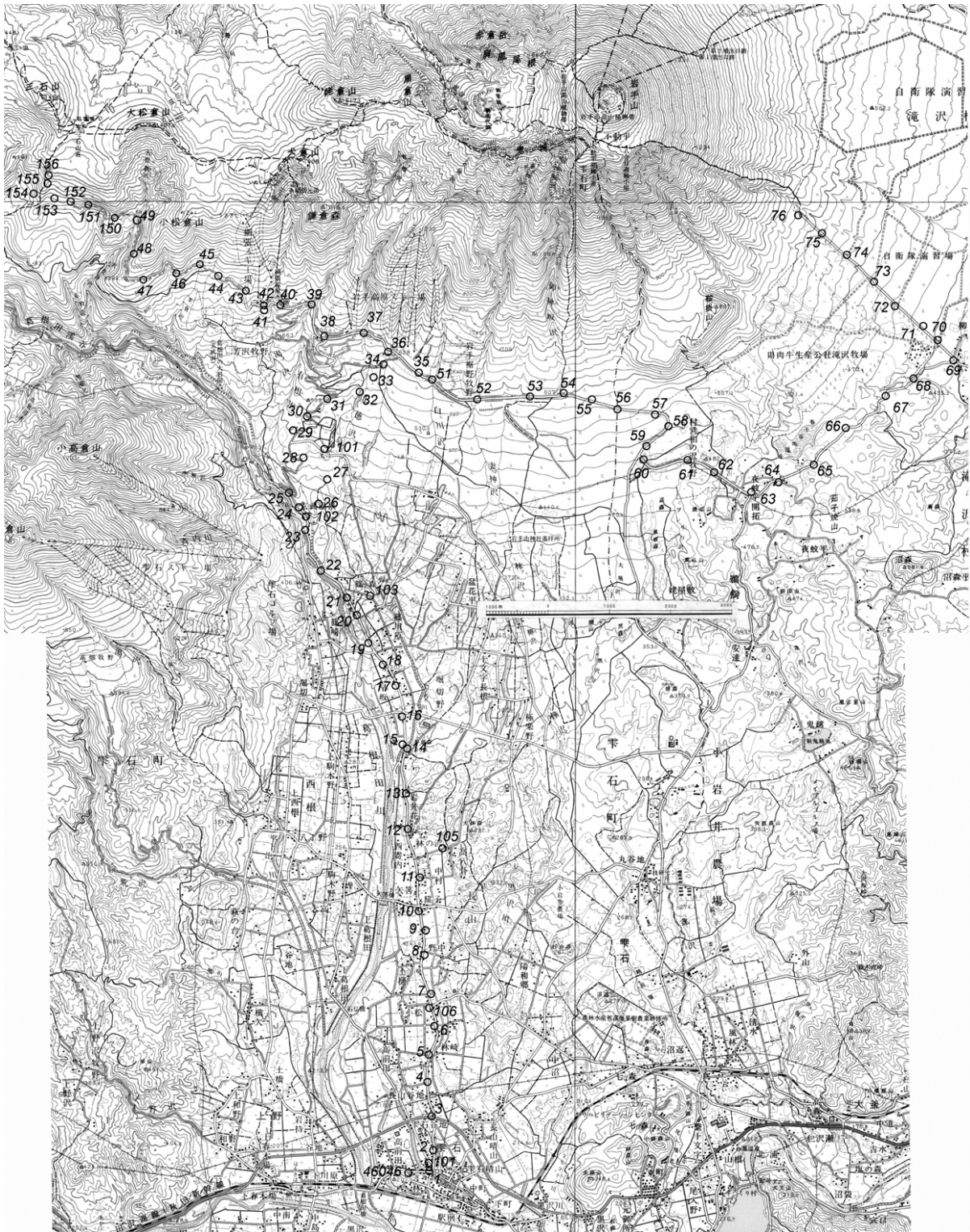


図1. 岩手山南山麓水準路線の位置. 水準路線は1998年7月の設置後, 1998年11月, 1999年5月に網張温泉から北西方向へ延長された.

Fig. 1 Location map of the leveling route on the southern foothills of Iwatesan. Leveling route is extended toward northwest from the Amihari hot spring in November 1998 and May 1999.

表 1. 各観測期間に観測された水準点 46046 に対する比高.

水準点の位置座標					1998/7/17	1998/9/1	1998/9/4	1998/11/2	1999/5/26	1999/10/27
BM	経度	緯度	区間距離	積算距離	1998/7/24	1998/9/3	1998/9/7	1998/11/7	1999/5/31	1999/11/2
			km	km				比高 m		
46046	140.9683	39.6925	0.000	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
1	140.9722	39.6925	0.323	0.32	0.0533	0.0534	0.0534	0.0534	0.0535	
BM7	140.9708	39.6953	0.307	0.63	1.5616	1.5615	1.5615	1.5615	1.5615	
2	140.9728	39.6972	0.364	0.99	-1.6602	-1.6602	-1.6602	-1.6598	-1.6601	
3	140.9731	39.7003	0.454	1.45	-3.0973	-3.0972	-3.0972	-3.0961	-3.0970	
4	140.9719	39.7053	0.538	1.99	1.4489	1.4486	1.4486	1.4485	1.4467	
5	140.9725	39.7094	0.461	2.45	4.9533	4.9530	4.9530	4.9524	4.9514	
6	140.9733	39.7139	0.517	2.96	11.8687	11.8672	11.8672	11.8661	11.8648	
BM6	140.9728	39.7161	0.268	3.23	14.8299	14.8283	14.8283	14.8274	14.8265	
7	140.9719	39.7181	0.248	3.48	16.9581	16.9568	16.9568	16.9555	16.9569	
8	140.9711	39.7244	0.648	4.13	22.5182	22.5162	22.5162	22.5162	22.5160	
9	140.9711	39.7267	0.270	4.40	26.6559	26.6544	26.6544	26.6547	26.6544	
10	140.9703	39.7308	0.542	4.94	33.6506	33.6493	33.6493	33.6501	33.6854	
11	140.9700	39.7350	0.478	5.42	40.4697	40.4685	40.4685	40.4690	40.4699	
12	140.9678	39.7425	0.811	6.23	52.7658	52.7653	52.7653	52.7687	52.7675	
13	140.9675	39.7472	0.523	6.75	60.8736	60.8732	60.8732	60.8756	60.8740	
14	140.9678	39.7539	0.794	7.55	72.1678	72.1677	72.1677	72.1697	72.1682	
15	140.9678	39.7544	0.053	7.60	72.1473	72.1470	72.1470	72.1488	72.1472	72.1472
16	140.9675	39.7589	0.479	8.08	80.2318	80.2317	80.2311	80.2336	80.2939	80.2948
17	140.9664	39.7628	0.390	8.47	86.2416	86.2418	86.2411	86.2434	86.2420	86.2431
18	140.9636	39.7664	0.509	8.98	96.0067	96.0075	96.0060	96.0089	96.0077	96.0087
19	140.9611	39.7694	0.450	9.43	106.4275	106.4281	106.4254	106.4290	106.4282	106.4295
20	140.9583	39.7739	0.599	10.03	118.6319	118.6328	118.6289	118.6337	118.6331	118.6352
21	140.9567	39.7761	0.239	10.27	123.9546	123.9561	123.9514	123.9557	123.9559	123.9574
22	140.9514	39.7794	0.711	10.98	141.3290	141.3298	141.5281	141.5328	141.5335	141.5355
23	140.9486	39.7856	0.604	11.58	157.7470	157.7477	157.8712	157.8832	157.8816	157.8830
24	140.9478	39.7883	0.416	12.00	173.9307	173.9311	174.0424	174.0597	174.0582	174.0576
25	140.9447	39.7911	0.399	12.40	185.6338	185.6347	185.7052	185.7304	186.1587	186.1602
26	140.9492	39.7897	0.429	12.82	198.7593	198.7595	198.7792	198.7841	198.7800	198.7790
27	140.9539	39.7919	0.439	13.26	224.8899	224.8897	224.9055	224.9154	224.9104	224.9082
28	140.9486	39.7956	0.599	13.86	255.4184	255.4193	255.4330	255.4436	255.4380	255.4378
29	140.9464	39.8017	0.774	14.64	300.5033	300.5057	300.4849	300.4979	300.4911	300.4922
30	140.9486	39.8025	0.351	14.99	321.9026	321.9053	321.9067	321.9233	321.9175	321.9201
31	140.9528	39.8044	0.454	15.44	344.5555	344.5579	344.5573	344.5749	344.5686	344.5706
32	140.9592	39.8056	0.597	16.04	354.7763	354.7784	354.7743	354.7911	354.7847	354.7867
33	140.9625	39.8078	0.403	16.44	379.0761	379.0780	379.0739	379.0919	379.0853	379.0868
34	140.9642	39.8103	0.437	16.88	400.8023	400.8047	400.8000	400.8179	400.8094	400.8124
35	140.9697	39.8083	0.539	17.42	411.2384	411.2394	411.2332	411.2496	411.2402	411.2428
36	140.9647	39.8117	0.581	18.00	432.0424	432.0449	432.0423	432.0595	432.0544	432.0584
37	140.9600	39.8144	0.494	18.49	466.8430	466.8467	466.8452	466.8631	466.8535	466.8600
38	140.9528	39.8136	0.696	19.19	480.3996	480.4042	480.4037	480.4236	480.4147	480.4220
39	140.9506	39.8183	0.599	19.79	507.4737	507.4795	507.4833	507.5039	507.4978	507.5062
40	140.9439	39.8183	0.618	20.41	537.1896	537.1991	537.2093	537.2305	537.2246	537.2316
41	140.9394	39.8183	0.356	20.76	548.1561	548.1663	548.1597	548.1802	548.1728	548.1807
42	140.9408	39.8180	0.030	20.79			551.2689	551.2913	551.2858	551.2944
43	140.9373	39.8203	0.500	21.29				586.8483	586.8452	586.8529
44	140.9327	39.8227	0.570	21.86				622.9048	622.9055	622.9137
45	140.9287	39.8243	0.378	22.24				642.9577	642.9617	642.9713
46	140.9239	39.8237	0.439	22.68					665.6659	665.6766
47	140.9172	39.8223	0.621	23.30					715.3886	715.3999
48	140.9150	39.8251	0.744	24.04					752.7123	752.7264
49	140.9170	39.8311	0.737	24.78					750.3802	750.3944
150	140.9144	39.8314	0.405	25.19					775.3476	775.3628
151	140.9115	39.8319	0.410	25.60					808.9289	808.9428
152	140.9078	39.8326	0.319	25.91					818.3407	818.3565

表 1. 各観測期間に観測された水準点 46046 に対する比高(つづき).

153	140.9056	39.8332	0.189	26.10					837.5282	837.5438
154	140.9018	39.8344	0.415	26.52					871.5496	871.5617
155	140.9057	39.8348	0.352	26.87					907.1983	907.2151
156	140.9050	39.8355								
155				27.00					907.1983	907.2151
35			0.581	36.45	411.2384	411.2394	411.2332	411.2496	411.2402	411.2428
51	140.9731	39.8075	0.321	36.77	403.1472	403.1480	403.1460	403.1633	403.1530	403.1568
52	140.9833	39.8047	0.823	37.60	372.0529	372.0517	372.0505	372.0676	372.0560	372.0602
53	140.9900	39.8053	0.631	38.23	380.1774	380.1752	380.1744	380.1908	380.1782	380.1809
54	140.9975	39.8053	0.780	39.01	393.9054	393.9031	393.9021	393.9171	393.9045	393.9070
55	141.0022	39.8047	0.332	39.34	368.1422	368.1395	368.1376	368.1531	368.1403	368.1426
56	141.0081	39.8033	0.492	39.83	345.9502	345.9484	345.9453	345.9621	345.9488	345.9522
57	141.0150	39.8028	0.667	40.50	314.3328	314.3313	314.3270	314.3453	314.3311	314.3355
58	141.0175	39.8008	0.396	40.90	293.0381	293.0370	293.0325	293.0510	293.0362	293.0544
59	141.0133	39.7981	0.426	41.32	282.3643	282.3641	282.3588	282.3780	282.3626	282.3678
60	141.0125	39.7964	0.272	41.59	271.4201	271.4199	271.4053	271.4228	271.4061	271.4102
61	141.0200	39.7958	0.704	42.30	255.9000	255.9018	255.8967	255.9159	255.8997	255.9043
62	141.0261	39.7944	0.587	42.88	248.9595	248.9587	248.9541	248.9717	248.9585	248.9622
63	141.0331	39.7908	0.643	43.53	245.5652	245.5653	245.5590	245.5757	245.5594	245.5613
64	141.0392	39.7931	0.702	44.23	254.9400	254.9400	254.9347	254.9521	254.9368	254.9396
65	141.0486	39.7986	0.897	45.13	269.0046	269.0055	269.0001	269.0181	269.0025	269.0062
66	141.0553	39.8022	0.929	46.06	245.8264	245.8278	245.8224	245.8410	245.8229	245.8265
67	141.0608	39.8061	0.703	46.76	208.7119	208.7134	208.7080	208.7276	208.7094	208.7135
68	141.0669	39.8092	0.376	47.13	192.3335	192.3350	192.3297	192.3497	192.3310	192.3347
69	141.0719	39.8103	0.662	47.80	171.0472	171.0495	171.0441	171.0643	171.0443	171.0477
70	141.0689	39.8128	0.370	48.17	187.5354	187.5372	187.5318	187.5526	187.5329	
71	141.0644	39.8158	0.420	48.59	205.7211	205.7218	205.7165	205.7370	205.7182	
72	141.0603	39.8189	0.508	49.09	227.2455	227.2461	227.2408	227.2599	227.2417	
73	141.0561	39.8222	0.519	49.61	263.2232	263.2232	263.2178	263.2365	263.2172	
74	141.0508	39.8256	0.637	50.25	311.3201	311.3197	311.3144	311.3351	311.3144	
75	141.0464	39.8289	0.520	50.77	368.8393	368.8389	368.8335	368.8557	368.8329	
76	141.0425	39.8317	0.509	51.28	426.7231	426.7228	426.7174	426.7398	426.7168	

BM65以降は98/9/4-7のデータ

方向の水準路線で約70点の水準点から構成される。また、水準点設置が緊急課題だったため、すべての水準点は道路脇の構造物に金属標識を貼り付けている。なお、図に示す水準点の一部は1999年5月以降に増設されたものも含まれている。

2回目、1998年9月の測量中に岩手山西域を震源とするマグニチュード 6.1 に遭遇し、地震翌日からの再測量を実施し、地震に伴う 20 cm に及ぶ断層運動を検出した(Kimata et al., 1999)。1998年11月に4回目の測量を実施し、4回の水準測量による上下変動から、岩手山西域に球状の圧力源を推定した(木股・他, 1999)。木股・他(1999)によれば、上下変動の特徴は1) 水準路線北西端、西岩手を中心とする 2-3 cm の隆起の上下変動が観測され、2) この隆起の上下変動が1998年7月の測量開始以来、継続していることである。また観測した上下変動から球状を仮定して求めた圧力源は犬倉山周辺に深さ 2-3 km に位置する。また、データが同一でないながらも、圧力源が時間的に移動することも示唆される。

その後、1999年には5月と10月に岩手山火山集中観測と関連して同域での水準測量を実施した。今回は、主に1999年に実施した2回の水準測量にもとづき、岩手山における地殻上下変動とその圧力源に関する議論を展開する。

2. 1998年11月以降に観測された地殻上下変動

1998年7月の水準点設置以来，6回目の水準測量を1998年7月，9月1-3日，9月4-7日，11月，1999年5月，10月に実施してきた．水準点 46046 に対する各水準点の比高を表 1 に各観測期間毎に示す．なお，1998年9月4-7日と1999年10月の測量は水準点 46046 に到達せず，途中の水準点 15 を不動点とした．

1998年に実施した水準測量から，圧力源の位置が水準路線の北西端に推定され，しかも圧力源の位置が時間的に変動することも示唆された(木股・他, 1999)．圧力源の位置を議論する場合，とりわけ圧力源の深さが数 km と浅い場合，圧力源直上での上下変動は非常に重要なデータとなる．しかしながら，本水準測量から推定された圧力源は最も近い水準点でも 1 km も離れている．そこで，1998年11月と1999年5月の二度にわたり，各期間毎における上下変動を図 2 に，1998年

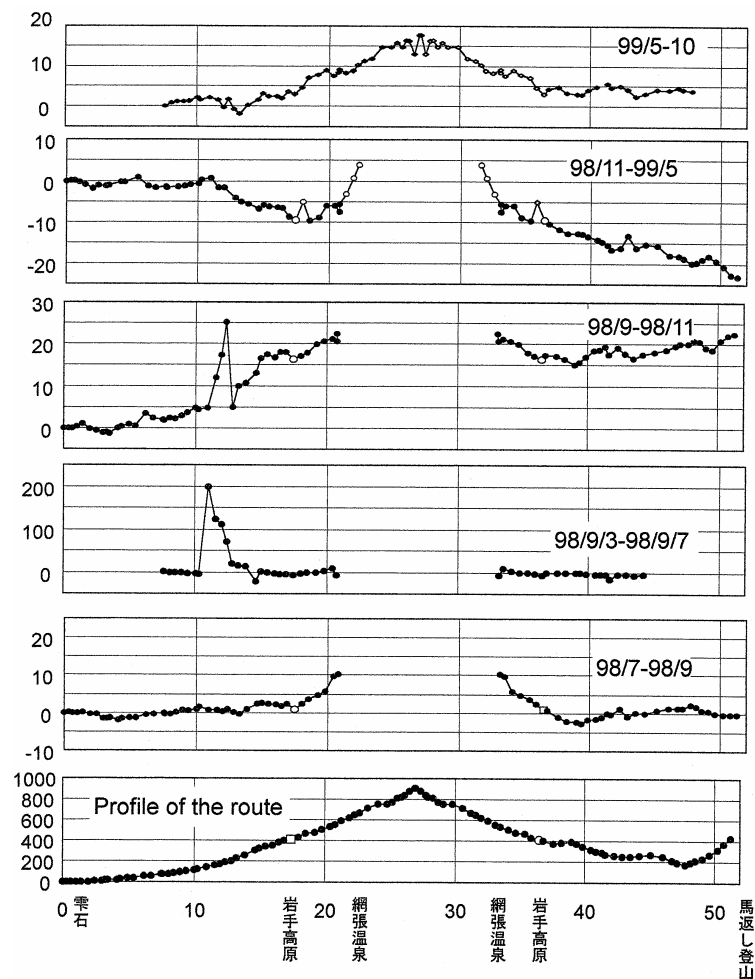


図 2. 1998年7月－9月3日－9月7日－11月－1999年5月－10月の5期間において観測された上下変動．水準点 4046/15 を固定する．地震時の変動は縦軸のスケールが異なる．横軸は水準路線に沿った距離(km)．

Fig. 2 Vertical movements observed on the benchmarks in the five periods of July 1998 – September 1998 – November 1998 – May 1999 – October 1999. The height at BM46046/15 is fixed in the period of the survey. Scale of the vertical movements in the period of September 3 to 7 is different. Axis means the distance along the benchmarks.

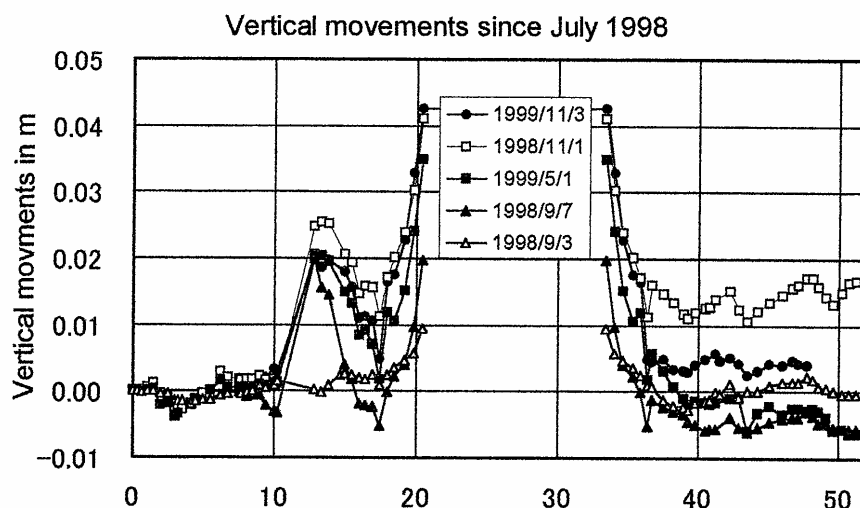


図 3. 1998年7月から積算した上下変動. 水準点 46046 を固定する. 水準点 22, 23, 24, 25 の変動は地震時の変動が大きく省略した.

Fig. 3 Cumulative vertical movements observed on the benchmarks since July 1998. The height at BM46046 is fixed in the period of the survey. The vertical movements observed at BM 22, 23, 24 and 25 are omitted because of the large movements by the earthquake.

7月から各観測期間まで積算した上下変動を図 3 に示す. 1999年10月の水準測量は途中で終了しているが, 終了した水準点 15 周辺で数 mm を上回るような顕著な上下変動は観測されておらず, 岩手山における上下変動を議論する場合, 水準点15を固定点とした議論でも不都合でないことを示している.

2-1 西岩手山を中心とする隆起の上下変動が継続

図 2 に示す各期間毎の上下変動は概して西岩手での隆起を示す. しかし, 1998年11月～1999年5月の期間に観測された上下変動は異なり, 西岩手周辺を除けば沈降となり, 水準点 76 では 20 mm を超える沈降を示す. もっとも, この期間の前, 1998年9月～1998年11月に水準点 76 で 20 mm を超える隆起の上下変動が観測されており, 1998年11月の測量に系統的な誤差が含まれた可能性も存在する.

水準測量を開始した1998年7月以降, 水準測量で観測された上下変動は, 1998年9月に地震に伴う上下変動も含まれ複雑な分布を示す. 概して, 網張温泉付近の岩手山西域, 西岩手での隆起が顕著である. 隆起の上下変動は1998年7月から1999年10月までの1年3ヶ月間に水準点 40 で最大 4 cm に達する. 図 4 に東西方向の水準路線のほぼ中間に位置する水準点 62 に対する各水準点での積算上下変動を示す. 示した水準点は東西方向の水準点のみである. 水準点 41 は1998年9月3日の地震で局所的な沈降を示すことから, 図示する最北西側の水準点は 40 である. また, 同様に地震や交通事故に起因する局所的な変動を示す水準点は表示を省いた.

南北方向の水準路線は, 1998年9月3日の地震の震源域や地表に現れた断層を横切ることから複雑な上下変動を示す. 一方, 東西方向の水準路線では, 北西側の隆起を明瞭に示し, 北西端へいくほど隆起量が大となる. 約 5 km の距離で 4 cm の隆起に達する. しかも, 1998年7月から隆起の上下変動が継続していることも明らかである.

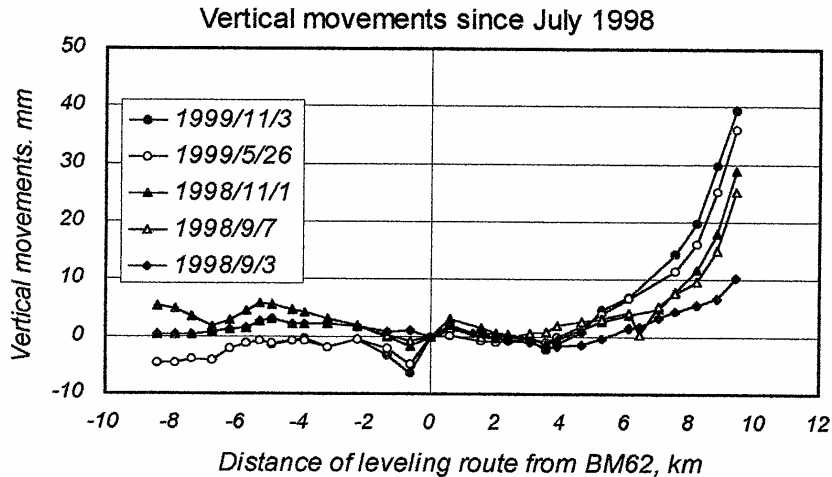


図 4. 水準点 62 に対する網張温泉から東方向に設置された水準点での積算した上下変動.
Fig. 4 Cumulative vertical movements on the benchmarks in the eastward from the Amihari hot spring. The height at BM62 is fixed through the period.

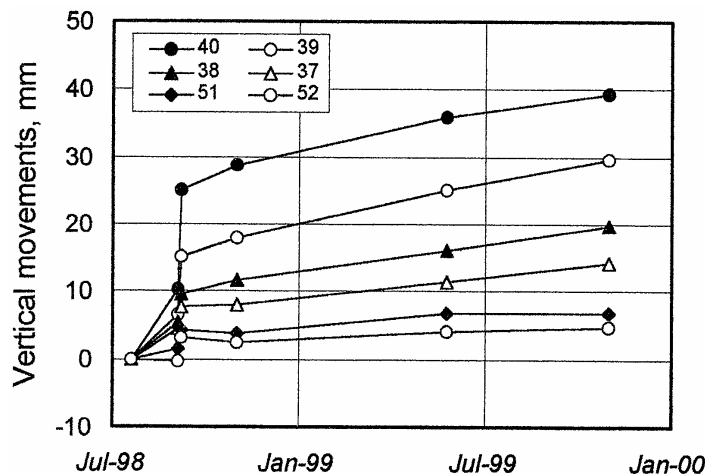


図 5. 水準点62に対する水準点 40 と 39, 38, 37, 51, 52 における高さの時間変化.
Fig. 5 Vertical movements observed at BM 40, 39, 38, 37, 51 and 52 respect to the height at BM 62.

2-2 隆起の上下変動は時間的に減速

次に、図 4 に示した水準の上下変動を時間的に検討する。そこで、水準点 62 に対する水準点 40 と 39, 38, 37, 51, 52 における高さの時間変化を 図 5 に示す。各水準点とも隆起の上下変動が継続して進行し、しかも非常に近似した期間変化を示すことが明らかである。最大の変化が 1998 年 9 月 3 日の地震に伴う変動である。全点とも数～15 mm の隆起を示す。地震時の変動を除けば、隆起速度は観測当初の 1998 年 7～9 月の 3 ヶ月間が最大であり、以降穏やかに減速していることも明瞭である。たとえば、水準点 40 で観測された隆起は 1998 年 7～9 月に 10 mm、地震時に 15 mm、1998 年 9～11 月に 3 mm、その後 1999 年 11 月までの半年ごとに 4 mm、3 mm と時間とともにその速度が減少している。

2-3 増設した水準点での上下変動

次に、1998年11月に拡張した網張温泉より北西方向の水準点での上下変動を検討する．図2から明らかなように、増設した水準点は各期間とも 10 mm を超える隆起を示すのが特徴である．水準点 40 に対し、1998年11月～1999年5月に水準点 45 で 10 mm、1999年5月～11月に水準点 154で 9 mm の隆起が観測されている．とりわけ、1998年11月～1999年5月は 1.5 km の距離で 10 mm の隆起と大きな傾斜変動である．水準路線の拡張が有効だったことを示唆する．

3. 観測された上下変動にもとづく圧力源の推定

観測した上下変動から、茂木モデルにより球状圧力源の位置を推定する．火山活動が活発化した岩手山では、佐藤・浜口(1999)により地殻変動連続観測から開口割れ目の圧力源が、三浦・他(1999)により GPS 連続観測から球状と開口割れ目の圧力源が推定されている．今回は水準点の

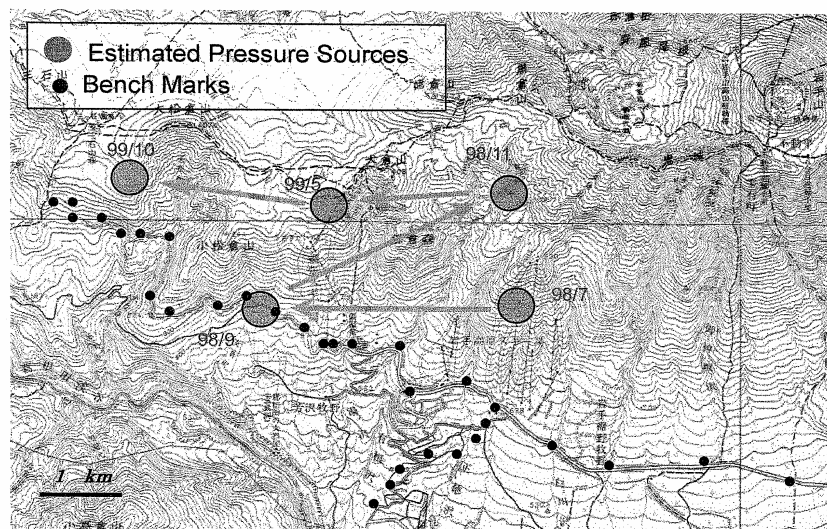


図 6．水準測量による上下変動から推定した球状圧力源の位置．茂木モデルにより計算する．

Fig. 6 Location of the point pressure sources estimated from the vertical movements detected by the precise leveling. The pressure source model is calculated using the Mogi solution.

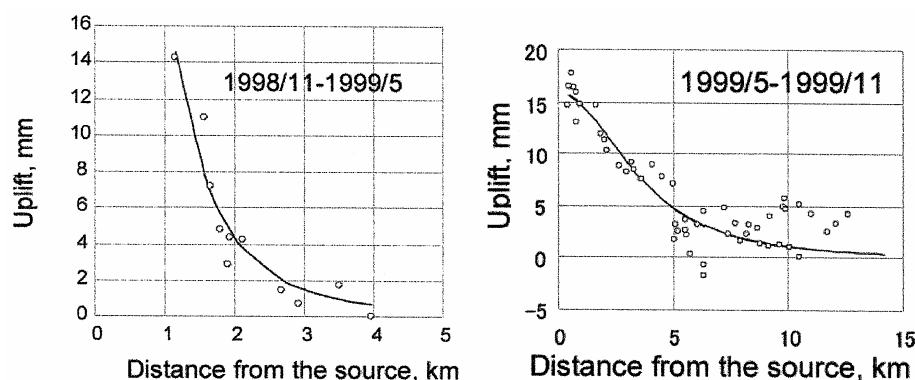


図 7．観測された上下変動と推定した茂木モデルより計算される上下変動．

Fig. 7 Vertical movements on the benchmarks observed by leveling and calculated from the spherical pressure sources by Mogi solution.

配置が岩手火山全域に及ばず南山麓に限定されることから、圧力源の形状まで議論することは困難と考え、球状圧力源として茂木モデルから推定する。

その位置を 図 6 に示す。1998年11月－1999年5月－1999年10月の2期間において、観測した上下変動と推定した球状圧力源から計算する上下変動を 図 7 に示す。図 8 は田中・他(1999)により観測された震源分布と推定した球状圧力源の位置の関係を示す。図 8 には佐藤・浜口(1999)により1998年9月までの期間で推定されたダイク状の開口割れ目の位置も示す。

図 7 から、とりわけ岩手高原から東に位置する水準点での上下変動は、網張温泉付近に推定する球状圧力源だけでは十分に説明できないことが明らかである。そして、球状圧力源の位置は西岩手山の黒倉山、犬倉山、大松倉山の稜線から南、網張温泉以北に深さ1-5 km で推定される。

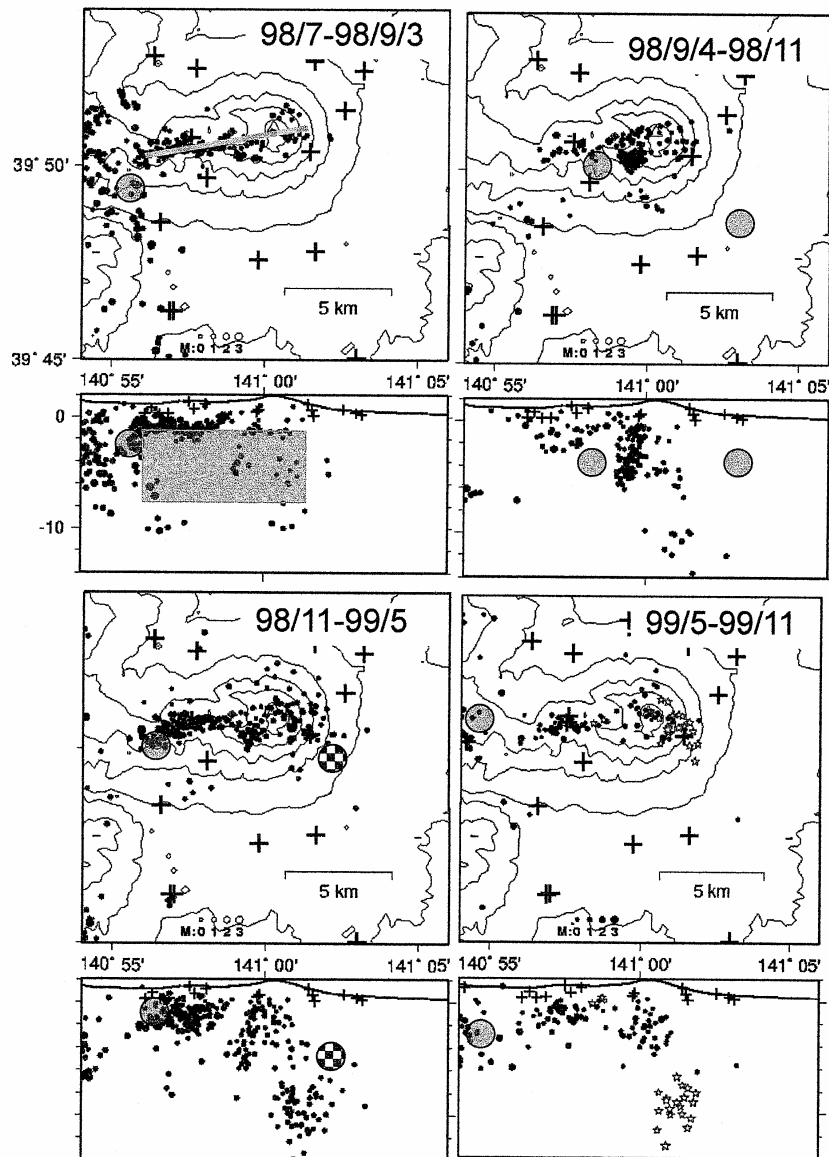


図 8．観測されている震源分布(田中・他, 1999)と推定した球状圧力源の位置(1998年7月～1999年11月)。

Fig. 8 Hypocenter distributions and the location of the spherical pressure sources estimated from the leveling by Mogi solution.

観測期間ごとに 3–5 km ほど移動している。概して、圧力源は東から西方向へ移動している。三浦(2000)も GPS 観測から、1998年3月以降1999年10月までに推定した圧力源が概して西方向に移動していることを指摘している。

しかし、1998年11月までは網張温泉より北西部に水準点が設置されておらず、1999年5月に水準点をさらに北西部に延長したなど観測条件が異なる。図7に示すように1998年9–11月の期間、推定された圧力源から水平距離 2 km 以内のところに水準点は存在しない。1998年11月–1999年5月の期間も、推定された圧力源から 1 km 以内に水準点は存在せず、水準路線を三石林道終点まで延長した1999年10月になると圧力源から 200 m といった距離の水準点も現れる。ゆえに、今回指摘した圧力源の移動も、上下変動データの母集団が異なることから生じる見かけの変動である可能性も残されている。圧力源の移動は火山噴火を議論する上で重要な意義を有するが、詳細な議論には更なる観測が必要と考える。

図8に示すように圧力源は各期間に観測された比較的活発な震源域に近接しながらも、地震活動の比較的静かなところに推定されている。また、西村らにより報告されている低周波地震の発生域と重複する。

このように岩手山南山麓で実施した水準測量により網張温泉から西岩手山稜線までの地域に深さ 1–3 km と非常に浅い圧力源が1999年10月まで推定される。圧力源は時間的に移動していることを示唆するが、その詳細な議論は今後の課題である。

4. まとめ

1998年に活発化した岩手山の火山活動を議論するために、1998年7月、岩手山南山麓に全長 40 km、80 の水準点からなる水準路線を設置し、1998年9月、11月、1999年5月、10月に精密水準測量を大学の合同観測として実施した。水準測量は多大な労力が必要なため、より効果的な観測をめざし、多数の水準点を設置したうえで、得た上下変動や圧力源の議論からより効果的な配置として水準路線の拡張などを意識的に追求した。そして、以下の結論を得た。

1) 西岩手山となる網張温泉から三石峠付近で、隆起の地殻上下変動が1998年7月の観測開始以来減速しながらも継続していることが明確となった。網張温泉近傍では隆起の上下変動が1998年7月から 40 mm に達したが、1999年11月では 0.5 mm/月の速度に満たない。

2) 上下変動から西岩手の大松倉山周辺域に球状の圧力源が深さ 1–4 km に推定され、その位置の移動を示唆する結果も得られた。しかし、観測期間ごとに水準点が増強され、1999年5月以前推定された圧力源モデルでは、圧力源近傍 1 km 内に位置する水準点が存在せず、圧力源の移動に関する議論は今後の課題とする。

謝 辞

今回の集中観測や水準測量の開始に関し、東北大学大学院理学研究科の浜口博之教授と京都大学防災研究所の石原和弘教授、そして、1998年の観測に参加いただいた北海道大学大学院理学研究科の鈴木敦生技官、鹿児島大学理学部の八木原寛助手、京都大学大学院理学研究科院生の中坊真氏、東京大学大学院理学研究科院生の寺田暁彦氏に厚く感謝する。

参考文献

Kimata, F., T. Matsushima, H. Mori, M. Nakabo, M. Sato, A. Trerada, S. Ueki, H. Yagiwara,

K. Yamamoto, S. Hirano, E. Koyama, R. Miyajima, A. Suzuki, T. Takayama, T. Takeda, H. Tsuji and K. Uchida (1999) Pre-seismic, co-seismic and post-seismic deformations in the Iwateken-nairiku-hokubu earthquake, Japan (Sep. 3, 1998, ml; 6.1) – Leveling in epicentral area just before and after earthquake -, Proceedings of 9th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 27-30 September 1999, Olsztyn, Poland, 57-63.

木股文昭・石原和弘・植木貞人・内田和也・小山悦郎・佐藤峰司・鈴木敦生・高山鉄朗・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 (1999) 水準測量による岩手山南山麓における上下変動 (1998年7月～11月) . 京都大学防災研究所年報, 第42号B-1, 35-43.

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.

田中 聡・浜口博之・植木貞人・河野俊夫・佐藤俊也・仁田交市・中道治久 (1999) 最近の岩手山の浅部地震活動. 日本火山学会講演予稿集1999年度秋季大会, 77.

三浦 哲・他 (1999) 日本地震学会講演予稿集1999年秋季大会.

岩手火山における重力変化観測

植木貞人*・前川徳光**・佐藤俊也*・仁田交市*・三浦 哲*

* 東北大学理学研究科, ** 北海道大学理学研究科

Microgravity Monitoring at Iwate Volcano

Sadato Ueki*, Tokumitsu Maekawa**, Toshiya Sato*, Koichi Nida* and Satoshi Miura*

* Graduate School of Science, Tohoku University,

** Graduate School of Science, Hokkaido University

In June, 1999, microgravity measurement was carried out as a part of the joint geophysical and geochemical observation of Iwate volcano, northeastern Japan. Microgravity monitoring has been repeated since November, 1995, when volcanic tremor was first observed at Iwate volcano. We compiled all the microgravity data obtained since 1995 through 1999. No significant gravity change is found to be associated with volcanic activities of Iwate volcano. Theoretical evaluation of the gravity change that might accompany the 1998 unrest of the volcano indicates that observations near the source region at the western part of the volcano and attempts to reduce measurement error are needed to detect significant gravity changes associated with volcanic activity.

1. はじめに

重力値は地下の質量分布に直接関係した測定量である。したがって、火山活動に伴い地中で物質の移動があり質量分布が変われば、重力値の変化として観測されることが期待される。岩手山においても、近年活発化している火山活動の発生機構解明を目的として、重力変化を検出するための精密重力測定を繰り返して実施してきた。

1999 年 6 月 15 日～19 日には、岩手火山集中総合観測の一環として、岩手山周辺において精密重力測定を実施した。その後、8 月と 11 月にも観測を繰り返して行い、1999 年内に合計 3 回の観測を実施した。本小論では、1999 年に実施したこれら 3 回の観測の結果とともに、1995 年以来実施してきたすべての精密重力測定の結果をまとめて報告する。

2. 観測方法

1999 年 6 月 15 日～19 日の重力測定は、東北大学所有の Lacoste & Romberg 社 G 型重力計 1 台 (G682), Scintrex 社 CG-3M 型自動重力計 1 台 (S235) と、北海道大学所有の G 型重力 2 台 (G375, G1009) の合計 4 台の重力計を用いて、岩手山麓の 15 点で実施した。岩手火山地域では、1995 年～1999 年の間に、この観測を含めて合計 12 回の精密重力測定が実施されている。各観測の期間、

表 1. 岩手火山における精密重力測定

Table 1. Microgravity measurements at Iwate volcano

観測期間 Observation Period	観測点数 Points	重力計ならびに観測者 Gravimeters and Observers
1995年11月 1日～ 2日	6	G682(植木), S235(植木)
1996年 7月12日～13日	7	G682(植木), S235(植木)
1996年10月16日～18日	6	G682(植木), S235(植木)
1997年11月20日～20日	8	G682(植木), S235(仁田)
1998年 5月 1日～ 2日	9	G682(植木), S235(仁田)
1998年 7月15日～17日	17	G682(植木), S235(佐藤)
1998年 8月25日～27日	20	G682(植木), S235(佐藤)
1998年 9月11日～13日	16	G682(植木), S235(三浦, 植木)
1998年11月23日～25日	14	G682(植木), S235(植木)
1999年 6月15日～19日	15	G682(植木), S235(植木), G375(前川), G1009(前川)
1999年 8月27日～29日	15	G682(植木), S235(植木)
1999年11月23日～25日	16	G682(植木), S235(植木)

表 2. 岩手火山精密重力測定点の概要

Table 2. Stations for microgravity measurement at Iwate volcano

重力点名 Station	緯度 Latitude	経度 Longitude	標高 Height	観測開始 First Obs.	備考 Remarks
岩手山(IWT)	39.7514°	141.0488°	347m	1995-11-01	岩手山観測点玄関床面
大松倉沢(OMTK)	39.8313	140.9155	970	1998-07-17	大松倉沢橋西(金属標)
兎平(USGD)	39.8305	140.9376	1145	1999-11-25	レストハウス階段石柱
犬倉山(INKR)	39.8395	140.9492	1402	1998-08-25	旧雨量観測施設H鋼下面
岩手山重力点(IFGS)	39.8190	140.9404	770	1998-08-27	重力基準点補助点(金属標)
玄武洞(GNB)	39.8087	140.9431	580	1997-11-20	玄武洞観測点階段最上段
網張三角点(AMHR)	39.8140	140.9533	701	1995-11-01	四等三角点岩手高原(石標)
岩手高原山頂(IKGS)	39.8288	140.9706	1215	1998-08-25	ゴンドラ山頂駅待合室入口
岩手高原補点(IKGL)	39.8286	140.9695	1210	1998-08-25	リフト山頂駅柱基礎
岩手高原山麓(IKG)	39.8105	140.9698	645	1997-11-20	岩手高原スキー場階段
御神坂(OMSK)	39.8043	140.9949	593	1998-07-17	林道三叉路(金属棒)
相ノ沢(ANS)	39.7965	141.0268	470	1995-11-02	相ノ沢観測点内(金属標)
柳沢(YNGS)	39.8315	141.0425	633	1995-11-01	柳沢馬返し登山口(金属標)
柳沢口4合目(YN4E)	39.8400	141.0231	1240	1998-07-15	柳沢登山道4合目(金属標)
柳沢口5合目(YN5E)	39.8408	141.0195	1420	1998-07-15	柳沢登山道5合目(金属標)
不動平(HDTR)	39.8419	141.0041	1825	1998-07-15	9合目不動平公衆便所
焼走(YKB)	39.8740	141.0530	550	1995-11-01	焼走観測点内(金属標)
上坊国有林内(UEB)	39.8784	141.0261	640	1998-07-16	GPS基準点(金属棒)
プータロ村(PUTA)	39.8950	140.9947	540	1998-07-16	管理棟わきマンホール
松尾(MTO)	39.8896	140.9877	603	1999-11-24	松尾観測点階段, 第1段
岩手山北(IWTN)	39.8815	140.9865	727	1995-11-01	岩手山4号林道(金属棒)
東八幡平水道(EHAT)	39.8973	140.9698	545	1998-07-16	松尾村水道施設階段最下段
焼切沢(YKRS)	39.8749	140.9624	750	1998-07-16	発電所取水施設(ボルト)

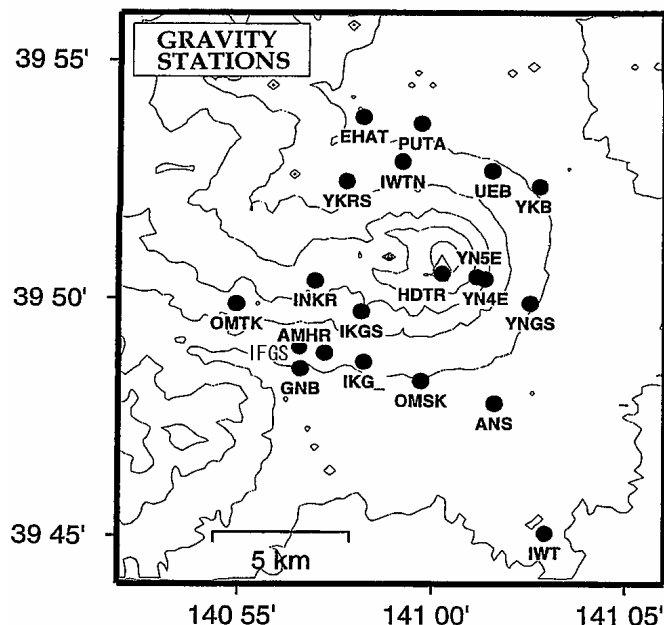


図 1. 重力点分布.

Fig. 1 Distribution of gravity stations.

観測点数, 使用した重力計と観測者を表 1 に, 全重力測定点の緯度・経度などを表 2 に, 主要な測定点の分布を図 1 に示す. 但し, 重力点の緯度・経度は 1/25,000 地形図から読みとった値である. 重力点は, 原則として, GPS 観測点の近傍に設置して, 地殻変動の影響を評価できるようにした. 基準点には, 可能な限り既存の構造物を利用したが, 必要に応じて, 長さ 2 m のステンレス棒を地面に打ち込んで使用した. 1999 年 6 月の観測では前述のとおり 4 台の重力計を使用した, それ以外の期間の観測では, 東北大学所有の 2 台の重力計のみを用いている. この点を除いて, 測定方法, データ処理の方法はいずれの観測でも同じである.

測定は, 山頂の南東約 10 km に位置する岩手山観測点 (IWT) を基準点とする相対測定であり, 全重力点で往復 2 回の測定を行った. 測定値は, メーカー提供の感度校正表を用いて重力値に変換し, 器高補正 (重力勾配 -0.3086 mgal/m), 地球潮汐補正 (潮汐定数 1.16) を施した. G682 については, さらに, 磁気方位依存性の補正を行った. G1009 を除いて, 今回使用した重力計については, 雲仙火山の噴火に際して実施した観測データから, 感度校正表に対する補正値が得られている (植木・他, 1996). しかし, それらの値を用いて補正を行うと, 未補正の場合よりも器差が大きくなる. そのため, ここでは感度校正表に対する補正を行っていない. この事実は, 重力計の感度補正値が, 時間変化をしているか, または, ダイアル値の関数であるかのどちらか, あるいは双方の存在する可能性を示唆する.

上述の補正を施した測定値を用いて, 1 日ごとにドリフト率を一定と仮定し, ドリフト率と各測定点における相対重力値を求めた. この際に, 測定の途中でテアが発生したことが明瞭な場合には, 指定した時刻におけるテアの大きさも同時に決定した. さらに, すべての補正後に往復差が 0.03 mgal を越える測定値については, 測定に問題があると判断して取り除き, 残りのデータを用いて, ドリフト率, 各点の重力値を計算し直した. また, 一回の観測では, 1 日あたり 7 点前後の測定を 2~4 日間にわたって行ったが, それぞれの日の測定点のうち最低 1 点は別の日と重複するように観測計画を立てて, 重力値の再現性を検討しながら観測を実施した. 重複して測定された重力点については, 重力計毎に全期間の観測値を平均して各重力計による最終的な観測値とした.

表 3. 岩手火山地域における精密重力測定の結果(1995 年 11 月～1998 年 8 月).
括弧内は観測値の標準誤差.

Table 3. Results of microgravity measurements at Iwate volcano in the period from November, 1995 to August, 1998. Numerals in the parentheses indicate standard errors of the observed gravity values.

Station	1995/11	1996/7	1996/10	1997/11	1998/5	1998/7	1998/8
OMTK						-140.834 (0.008)	-140.862 (0.014)
INKR							-237.486 (---)
IFGS							-107.486 (0.015)
GNB				-69.099 (0.002)	-69.102 (0.013)	-69.091 (0.015)	-69.110 (0.009)
AMHR	-93.275 (---)	-93.279 (0.017)	-93.277 (0.005)	-93.260 (0.021)	-93.281 (0.011)	-93.260 (0.004)	-93.277 (0.013)
IKGS							-198.341 (0.008)
IKGL							-197.696 (0.014)
IKG_				-81.937 (0.007)	-81.944 (0.011)	-81.938 (0.014)	-81.936 (0.001)
OMSK						-72.990 (0.002)	-72.988 (0.002)
ANS	-37.516 (0.014)	-37.519 (0.003)	-37.514 (0.011)	-37.503 (0.013)	-37.513 (0.003)	-37.510 (0.007)	-37.510 (0.009)
YNGS	-67.781 (0.015)	-67.769 (0.014)	-67.788 (0.004)	-67.786 (0.010)	-67.790 (---)	-67.786 (0.004)	-67.786 (0.006)
YN4E						-209.910 (---)	
YN5E						-250.542 (---)	
HDTR						-343.804 (---)	
YKB	-33.958 (0.019)	-33.962 (0.009)	-33.956 (0.007)	-33.956 (0.005)	-33.964 (0.014)	-33.952 (0.009)	-33.969 (0.019)
UEB						-67.862 (0.005)	-67.876 (0.016)
PUTA						-50.335 (0.005)	-50.357 (0.002)
IWTN	-86.643 (0.031)	-86.646 (0.019)	-86.642 (0.002)	-86.626 (0.005)	-86.641 (0.003)	-86.637 (0.006)	-86.655 (0.013)
EHAT						-48.832 (0.002)	-48.849 (0.002)
YKRS						-92.363 (0.003)	-92.372 (0.004)
AOB		-65.523 (0.026)			-65.491 (---)		-65.467 (0.010)

単位(unit) : mgal

表 4. 岩手火山地域における精密重力測定の結果(1998年8月～1999年11月)
Table 4. Results of microgravity measurements at Iwate volcano in the
period from August, 1998 to November, 1999

Station	1998/8	1998/9	1998/11	1999/6	1999/8	1999/11
OMTK	-140.862 (0.014)	-140.847 (0.008)		-140.873 (0.006)	-140.857 (0.016)	-140.846 (0.027)
USGD						-182.629 (---)
INKR	-237.486 (---)					-237.496 (---)
IFGS	-107.486 (0.015)	-107.467 (0.016)	-107.462 (0.020)	-107.477 (0.005)	-107.485 (0.005)	-107.473 (0.005)
GNB	-69.110 (0.009)	-69.100 (0.011)	-69.100 (0.008)	-69.118 (0.007)	-69.103 (0.011)	-69.131 (0.013)
AMHR	-93.277 (0.013)	-93.269 (0.006)	-93.261 (0.010)	-93.280 (0.005)	-93.255 (0.004)	
IKG_	-81.936 (0.001)	-81.926 (0.003)	-81.927 (0.002)	-81.941 (0.007)	-81.924 (---)	-81.929 (0.008)
OMSK	-72.988 (0.002)		-72.966 (0.014)	-72.977 (0.005)		
ANS	-37.510 (0.009)	-37.506 (0.008)	-37.508 (0.001)	-37.513 (0.003)	-37.508 (0.005)	-37.509 (0.002)
YNGS	-67.786 (0.006)	-67.698 (0.006)	-67.699 (0.006)	-67.692 (0.006)	-67.682 (0.013)	-67.691 (0.005)
YN4E		-209.892 (---)				
YN5E		-250.541 (---)				
HDTR		-343.797 (---)				
YKB	-33.969 (0.019)	-33.955 (0.008)	-33.952 (0.005)	-33.961 (0.009)	-33.974 (0.013)	-33.966 (0.999)
UEB	-67.876 (0.016)			-67.826 (0.001)	-67.831 (0.006)	
PUTA	-50.357 (0.002)		-50.330 (0.015)	-50.342 (0.018)	-50.347 (0.006)	-50.328 (0.030)
MTO						-62.302 (0.012)
IWTN	-86.655 (0.013)	-86.636 (0.013)	-86.635 (0.015)	-86.620 (0.008)	-86.630 (0.004)	-86.626 (0.008)
EHAT	-48.849 (0.002)	-48.826 (0.004)	-48.838 (0.003)	-48.857 (0.019)	-48.851 (0.002)	-48.845 (0.009)
YKRS	-92.372 (0.004)	-92.361 (0.001)	-92.378 (0.006)	-92.371 (0.007)	-92.366 (0.001)	-92.369 (0.001)
AOB	-65.467 (0.010)	-65.446 (0.010)	-65.420 (0.017)		-65.431 (0.019)	-65.479 (0.007)

単位(unit) : mgal

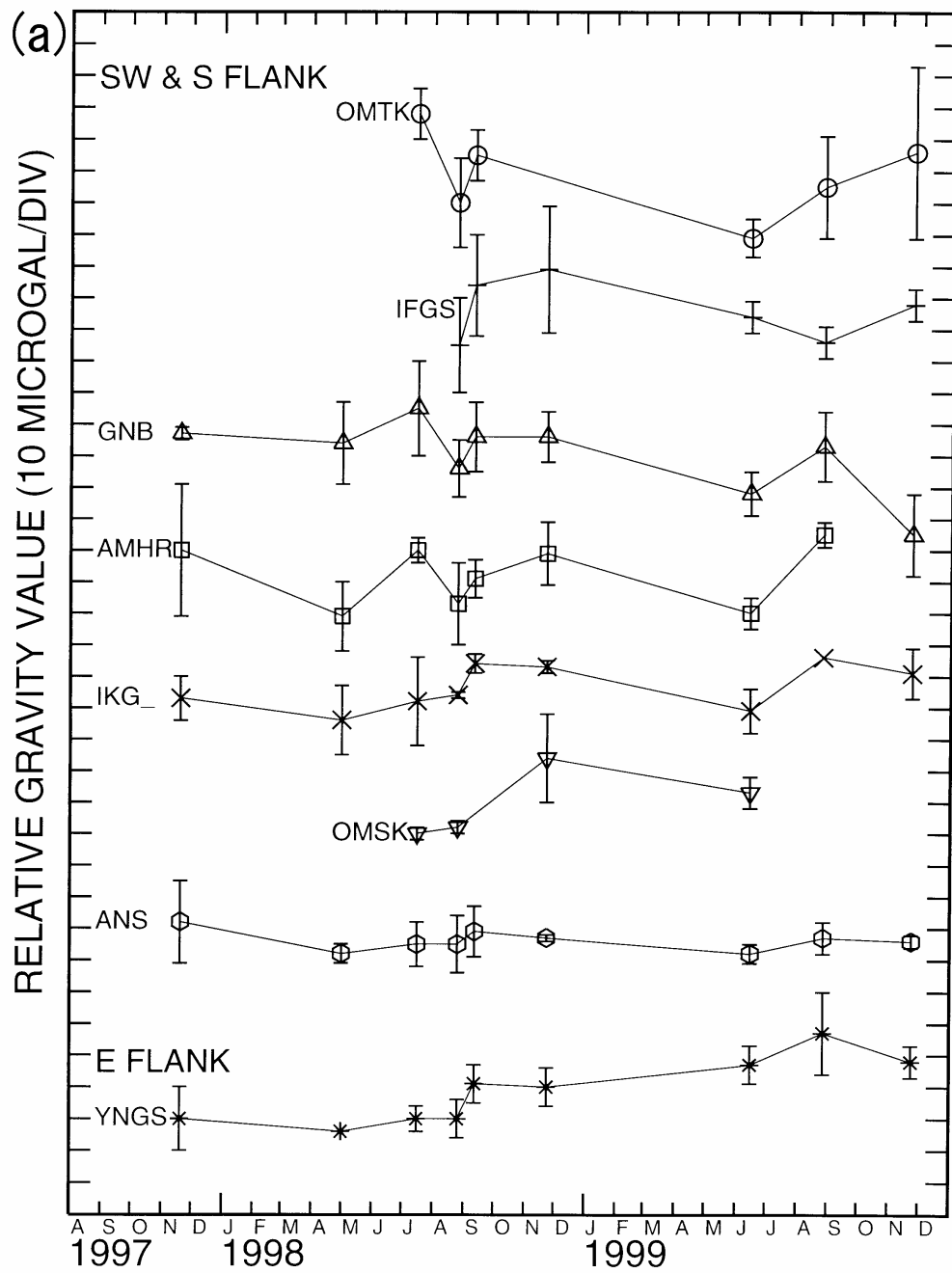


図 2. (a) 南山麓の主な重力点における重力値の時間変化.
 Fig. 2 (a) Temporal change in gravity value at some
 representative stations on the southern flank.

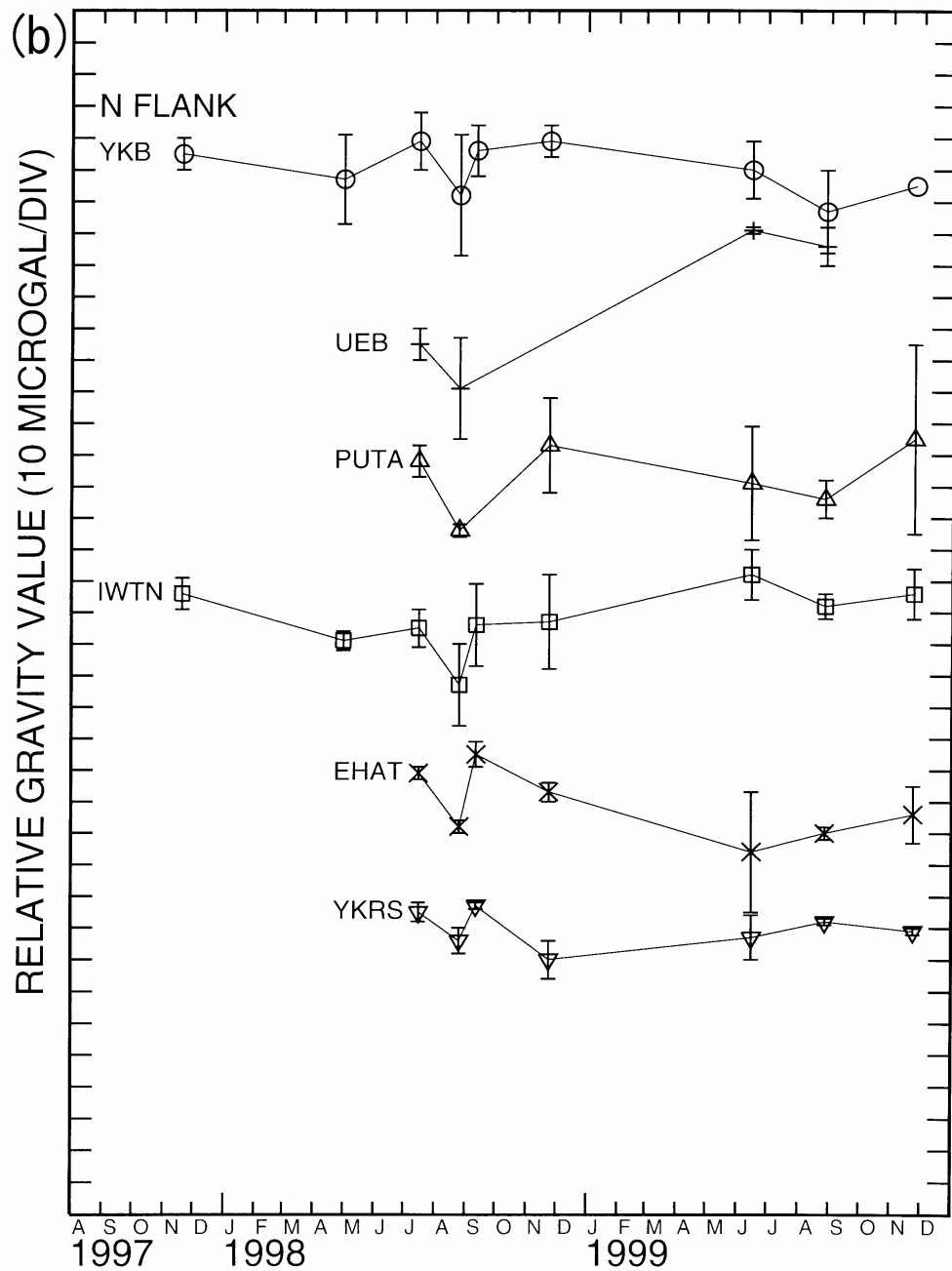


図 2. (b) 北山麓の主な重力点における重力値の時間変化.
 Fig. 2 (b) The same as (a) except for at the stations on the northern flank.

3. 観測結果

1995 年 11 月～1999 年 11 月の 4 年間に、岩手火山地域で実施したすべての精密重力観測の結果を、1995 年 11 月～1998 年 8 月と 1998 年 8 月～1999 年 11 月の二つの期間に分けて表 3，4 に示す。また、これらの中で繰り返して測定を実施した主要な重力点における重力値の時間変化を図 2 に示す。なお、重力点 YNGS では、1998 年 8 月までは GPS 観測点を、同年 9 月以降は隣接して設けられた水準点を基準点として用いた。表 4 の 1998 年 9 月以降の YNGS における重力値は、8 月の測定から得られた重力差 (0.084 mgal) を用いて、8 月以前の測定と整合するように補正した値を示してある。

上記の図表に示した重力値は、使用したすべての重力計による観測値を算術平均して求めた重力値である。この最終的な重力値の標準誤差を、表 3，4 では括弧内に、図 2 では誤差棒で示してある。なお、表 3，4 で誤差が記載されていない重力値は、G682 のみの 1 台の重力計による

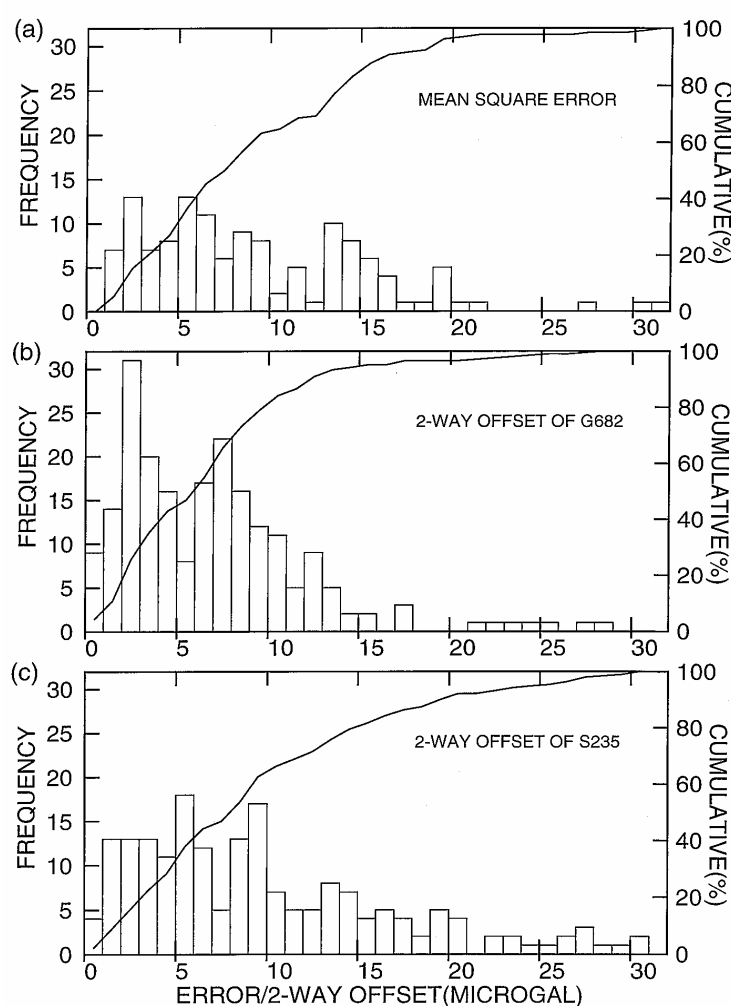


図 3. (a) 重力値の標準誤差の頻度分布. (b) G682 による往復差の頻度分布. (c) S235 による往復差の分布.

Fig. 3 (a) Frequency and cumulative distribution of the standard error of gravity values. (b) The same as (a) except for the 2-way offsets observed by G682. (c) The same as (b) except for by S235.

観測値である。これらの中には、もともと G682 のみで測定を実施した場合もあるが、1998 年 7 月の YN4E, YN5E, HDTR や同年 8 月の INKR のように、測定には S235 も併用したが、測定値の往復差が大きくてデータを採用しなかった場合もある。一般的に、S235 には、重力差の大きな地点間を移動した場合や、同一地点に重力計を静置した場合に、往復差が大きくなる傾向が認められた。重力値の標準誤差の頻度分布を図 3 (a)に示す。96 %の重力値の誤差は 0.020 mgal 未満、91%が 0.015 mgal 以下であり、過半数の 63 %以上が 0.010mgal 未満である。したがって、得られた重力値の誤差は、ほとんどが±0.015 mgal 以下であるが、条件が悪い場合には±0.020 mgal に達することもあることがわかる。

図 2 に示されているように、多くの地点で重力変化が観測されているが、ほとんどの場合、測定誤差の範囲内で変動しており、有意な重力変化とは言い難い。唯一、測定誤差を越える明瞭な重力変化は、北東山麓の UEB で 1998 年 8 月～1999 年 6 月の期間に観測された 0.050 mgal の重力増加である。しかし、このような変化は、UEB において観測されているのみで、周辺の重力点でこれに対応する重力変化は認められない。また、UEB の存在する岩手山北東山麓周辺における地震活動や地殻変動にも、この重力変化に対応した活動や変動は存在しない。したがって、UEB で 1998 年 8 月から 1999 年 6 月の間に観測された 0.050 mgal の重力増加は、有意な変化ではあるが、火山活動とは無関係な原因不明のきわめて局所的な変化と考えられる。

4. 議論

岩手山においては、1998 年 3 月～8 月に、活発な地震活動と顕著な地殻変動が観測され、マグマ活動に起因するものと理解された(例えば、田中・他, 1999 ; 植木・他, 1999)。しかし、前節で見たように、この顕著な地震活動・地殻変動で象徴される岩手火山の活動活発化に対応した有意な重力変化は観測されていない。その原因として、重力変化が生じていたとしても、変化量が小さくて測定誤差以下であったために検出できなかったことが考えられる。そこで本節では、地殻変動の変動源モデルから推定される重力変化について考察し、観測計画について検討を加えるとともに、測定誤差を低減する方策についても議論する。

1998 年 3 月～8 月に、地震活動の活発化と同時に GPS によって観測された顕著な地殻変動は、岩手火山地域西部を焦点とする放射状の特徴的な変位分布を示している。植木・他(1999)は、変位分布に茂木モデルを適用して、3-4 月、5-6 月、7-8 月の各期間について、圧力源の位置と体積増加量を求めた。その結果、この地殻変動は、岩手火山西部の黒倉山付近から三ツ石山付近へと西方へ移動した増圧源によって生じたものと解釈された。一方、萩原(1977)によって、茂木モデルによる重力変化 δg は隆起量 δh と $\delta g = \{-\beta + (4\pi/3)G\rho_0\} \delta h$ の関係にあることが示されている。そこで、GPS によって観測された地殻変動に茂木モデルを適用して得られた地殻変動源に基づき、上式を用いて、茂木モデルから期待される重力変化量を計算した。

地殻変動が最も顕著であった 1998 年 3 月はじめ～8 月末の期間についての、岩手火山西部および周辺地域の重力点、OMTK, INKR, IFGS, GNB, IKGS, IKG_, PUTA, YKRS の各点における計算結果を図 4 に示す。図から明らかなように、この期間の地殻変動源から期待される重力変化は、すべての地点で 0.030 mgal 以下の小さい量である。一方、先に示したように、重力測定値の標準誤差の 90%は 0.015 mgal 以下である。この測定誤差を越える重力変化、すなわち重力測定により検出される可能性のある重力変化が期待されるのは、変動源に近い OMTK と INKR の 2 点のみである。また、計算期間の中でも大きな変化が得られているのは、1998 年 5 月～6 月の期間であ

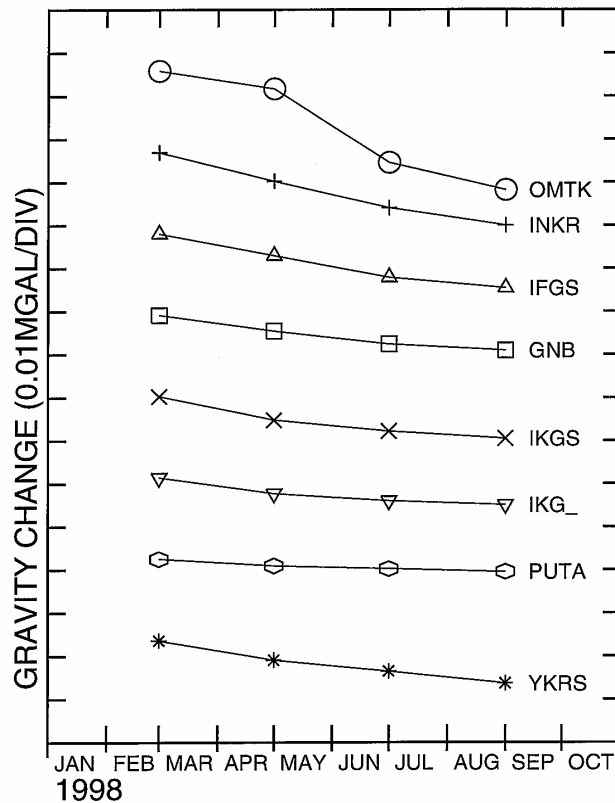


図4. 地殻変動モデルから計算された重力変化の例.
Fig. 4 Some examples of theoretical gravity change calculated from a Mogi model.

る. ところが, OMTK と INKR の測定は, いずれもそれより後の 1998 年 8 月下旬に開始された. 他方, その他の 1998 年 3 月以前より測定を実施していた観測点では, 測定誤差以下の小さな重力変化が期待されるのみである.

したがって, 1998 年 3 月~8 月の火山活動の活発化に対応した重力変化が観測されなかったのは, 既存の観測網では測定誤差を越える大きさの重力変化が生じなかったためといえる. このことを考慮すると, 将来火山活動が再度活発化したときに有意な重力変化をとらえるためには, 岩手火山西部の活動域近傍での観測を強化することが第一に必要である.

一方では, より小さな重力変化をも検出できるように, 測定誤差を低減することも必要もある. 個々の重力計の測定誤差を見積もるめやすとして, G682 と S235 による測定の往復差の頻度分布を図 3 (b) と (c) に示す. G682 の往復差の 90% は 0.011 mgal 以下であるのに対して, S235 では 90% 限界が 0.019 mgal と 2 倍近く大きい. したがって, S235 の測定誤差が最終的な重力値の誤差を規定している可能性が大きく, 重力値の誤差を低減するためには, S235 の測定誤差を小さくすることが重要である. S235 には, 先に述べたように, 重力差が大きな測定点間で移動した場合や, 逆に同一点で重力計を静置した場合に動作が不安定になる傾向がある. 小林・他 (1999) は, Scintrex 社 CG-3M 型自動重力計を用いて誤差 0.01 mgal 以下の測定を実現するための注意点を述べている. それによれば, 電源電圧の低下を防ぐために移動中は外部電源により充電すること, 大気圧を測定して補正を行うことなど, われわれが実施していない工夫が指摘されている.

今後、これらの点を参考にして、測定誤差の低減を図りたい。さらに、小林・他(1999)では、CG-3M の過渡特性の影響を低減するために、計器の設置から測定開始までの時間をほぼ一定に保つことが重要とされている。彼らは、このような注意を払ったうえで、測定を多数回繰り返すことによって精度の向上を図っている。S235 の場合、過渡特性に関しては、測定値が比較的短時間(5 分間程度)で収れんする場合と、30 分間程度ドリフトする場合など、さまざまであり、一定の測定時間で測定値を得るのは困難である。しかし、個々の測定のサンプリング数をあげることで、同一点で複数回の繰り返し測定を実施することは、CG-3M 重力計に限らず、誤差の低減、精度の向上には重要と考えられる。

5. まとめ

岩手火山において、1995 年以降、合計 12 回の精密重力測定を実施した。特に、1999 年 6 月には、岩手火山集中総合観測の一環として、計 4 台の G 型重力計、CG-3M 型自動重力計を用いた測定を行った。これまで実施したすべての測定の結果を整理して示すとともに、誤差の評価も行った。その結果、有意な重力変化は、1998 年 8 月～1999 年 6 月に UEB で観測された 0.050 mgal の重力増加のみであることがわかった。しかし、この変化は、観測点近傍に原因がある非火山性の変化であると考えられる。その他の観測点では、1998 年 3 月～8 月に火山活動が活発化した期間でも、 ± 0.015 mgal 程度の測定誤差を越える有意な重力変化は検出されていない。

顕著な地殻変動が観測された 1998 年 3 月～8 月について、地殻変動の変動源から期待される重力変化を見積もり、現実の測定精度と比較した。その結果、測定誤差を越える重力変化は、変動源近傍の地域でのみ観測可能なこと、変動が発生した当時このような地域で測定が実施されていなかったために、火山活動活発化に伴う重力変化が検出できなかったことが判明した。したがって、将来活動が再活発化した場合に有意な重力変化を検出するためには、活動領域近傍での観測を強化することとともに、測定誤差の低減を図ることが重量である。

参考文献

- 萩原幸男(1977)伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化。震研彙報, 52, 301-309.
- 小林茂樹・奥田 隆・大久保修平(1999)神津島における相対重力の時間的・空間的変動ーシントレックス自動重力計による精密測定の精度評価ー。日本火山学会講演予稿集, 1999 年度秋季大会, B16.
- 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.
- 植木貞人・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火山の地殻変動, 月刊地球, 21, 296-301.
- 植木貞人・清水 洋・内田和也・前川徳光・渡辺秀文・須藤靖明・吉川 慎・宮町宏樹・石原和弘(1996)雲仙火山の噴火にともなう重力変化。月刊地球, 号外 15, 42-46.

岩手山山麓部における全磁力連続観測

三品正明・植木貞人・浜口博之

東北大学大学院理学研究科附属地震噴火予知研究観測センター

Continuous Observation of Geomagnetic Total Field around Iwate volcano

Masaaki Mishina, Sadato Ueki and Hiroyuki Hamaguchi

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,

Graduate school of Science, Tohoku University

Three geomagnetic stations were set up around Iwate volcano in April 1998. Adapting the weighted difference method and the 3-component correction method to reduce outer field variation, detectability of geomagnetic variation related to volcanic or tectonic activity was estimated to be less than 1 nT. No magnetic variation were measured in 1998 and 1999, when very high seismic activities and remarkable crustal deformation were observed, except for piezomagnetic change of 0.4 nT at GNB accompanied to M6.1 earthquake in northern Iwate prefecture. Geomagnetic variations due to thermal demagnetization and piezomagnetic effect within the mountain body were calculated to compare with observed geomagnetic variations. Comparing calculated changes with observed ones gave information about the change in state and structure within the mountain body of Iwate volcano.

1. はじめに

岩手山は、火山が東西 10 km 以上にわたって連なる火山群で、円錐形の山体を有する東岩手山と、尾根沿いに爆裂火口が連なる西岩手山とに分けられる。近年の噴火活動は 1732 年に東岩手山で溶岩流(焼走り溶岩流)を伴う側噴火があり、1900 年代では西岩手山大地獄での水蒸気爆発(1919 年)が記録されている(気象庁, 1984)。岩手山の地震活動は、1995 年 9 月に火山性微動が観測されて以来、活発化する傾向が見られていたが、1997 年年末以降には非常に活発な状態になった(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)。田中・他(1999)によれば、1998 年の活動域は主に西岩手山であり、震源の分布域は東西に長くのびている。また、初動分布から決められた発震機構解は東西方向を節面にするものが多くなっている。

一般に岩石はその温度がキュリー温度に達すると磁性を失う。キュリー温度に達しなくても、多くの岩石は常温時に比べて磁化が非常に小さくなる。それゆえ、山体内に貫入するマグマや熱水など高温物質による山体内の温度分布の変化は、地表面での地磁気変化を引き起こすことが期待される。Tanaka(1993, 1995)や気象庁気象研究所・他(1999)などは、玄武岩質の火山以外でも火

山活動に伴う地磁気変化があることを報告している。磁気的な性質の変化は地震波速度や密度変化と違った情報をもたらすだけでなく、その変化も桁違いに大きいので火山活動監視のためには有効な観測量である。

2. 観測

東北大学による岩手山山麓における全磁力連続観測は1987年7月に始められた。滝沢村鬼越に設けられた観測点岩手山（観測点コード：IWT）は、東岩手山山頂火口の南南東約11 kmにある。山体浅部での火山活動に伴う地磁気変化を捕捉するには山体からの距離が遠過ぎるが、深部での活動に伴うより長波長の変化を検出すること、あるいはより詳細な観測を行う際の地域的な変化傾向の補正などに利用することを目的としていた。磁力計は丸文(株)製プロトン磁力計M775が使用され、分解能0.25 nTである。今回の地震活動が活発化した1998年4月には、地磁気変化の検知能力向上を計って、より山体に近い山麓の3観測点での全磁力連続観測が加えられた。南山麓相の沢（観測点コード：ANS）、玄武洞（観測点コード：GNB）および北東山麓焼走（観測点コード：YKB）である。磁力計は3点とも、国際電子(株)製プロトン磁力計PMP-248で、分解能は0.1 nTである。図1および表1に各観測点の位置を示した。山頂火口からの距離は、YKB、

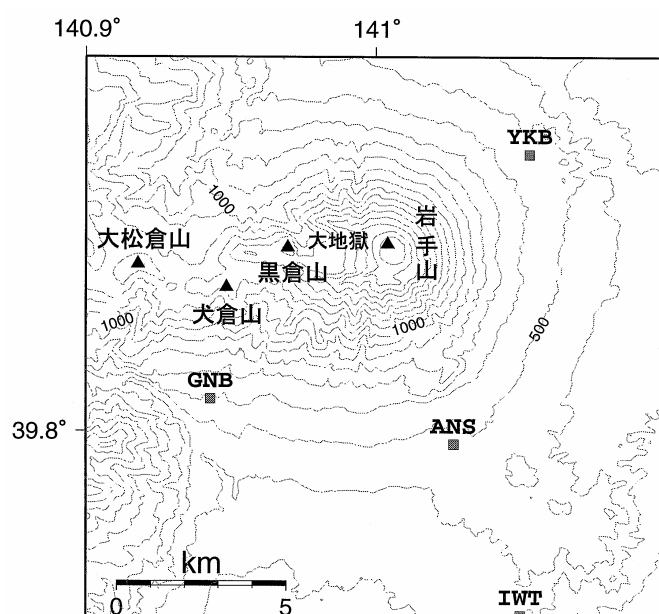


図1．岩手山周辺における全磁力観測点配置図。

Fig. 1 Location of geomagnetic observation site around Iwate volcano.

表1．観測点の位置と観測開始時期

Table 1. List of location and installation of geomagnetic stations.

観測点コード	観測点名	緯度(北緯)	経度(東経)	標高 m	観測開始
IWT	岩手山	39 45.05	141 3.00	360	1987 July
ANS	相の沢	39 47.79	141 1.61	470	1998 April
YKB	焼走	39 52.44	141 3.18	550	1998 April
GNB	玄武洞	39 48.52	140 56.59	580	1998 April

ANSおよびGNBそれぞれ5, 6および7 km, 大地獄火口からはGNBが7.5 kmである。火山活動監視を目的とするには充分山体に近い距離であるとは言えないが, 積雪の多い冬季でも観測が維持できる点が最大の利点である。新旧いずれの観測点も既設の地震・地殻変動観測施設に併設されていて, 仙台にある観測センターまでのテレメーター回線が利用できる。ただし, これらのテレメーター装置は地磁気観測データ伝送用ではないので, 磁力計の出力を一旦アナログ信号に変換して入力するなど, 磁力計本来の精度を保持することができない状況にある。そこで, ANS, YKBおよびGNBの3点のデータは, 磁力計組み込みのメモリーカード記録器による記録を回収したものを基本データとし, 緊急時あるいは機器故障あるいは天候不良で回収不能の期間はテレメーターされたデータを使用している。IWTの磁力計には記録機能が無いので, テレメーターされたデータのみである。収録されるデータはいずれの観測点も毎分値である。IWTを除く3点は, 内臓の水晶時計により計測制御されていて, 計測時刻の精度は数秒以内に保たれている。IWTは絶対時刻の制御ができない内臓時計信号による1分間隔の計測値が伝送されるが, 観測センターの収録装置とは同期していないので, 記録の刻時精度が良くないと, 計測器の分解能が保持されないこととで, 他より精度が劣るものになっている。

3. 全磁力変化

地磁気の変化には, 地球内部の状態を反映するものと, 磁気嵐や地磁気日変化のように地球外部に原因をもつ変化がある。この様な外部原因の変化の大部分は, 観測点間の磁力差を作ることにより消去できる。しかし, 火山地域のように磁気異常の振幅が大きく, 各観測点ごとに地磁気

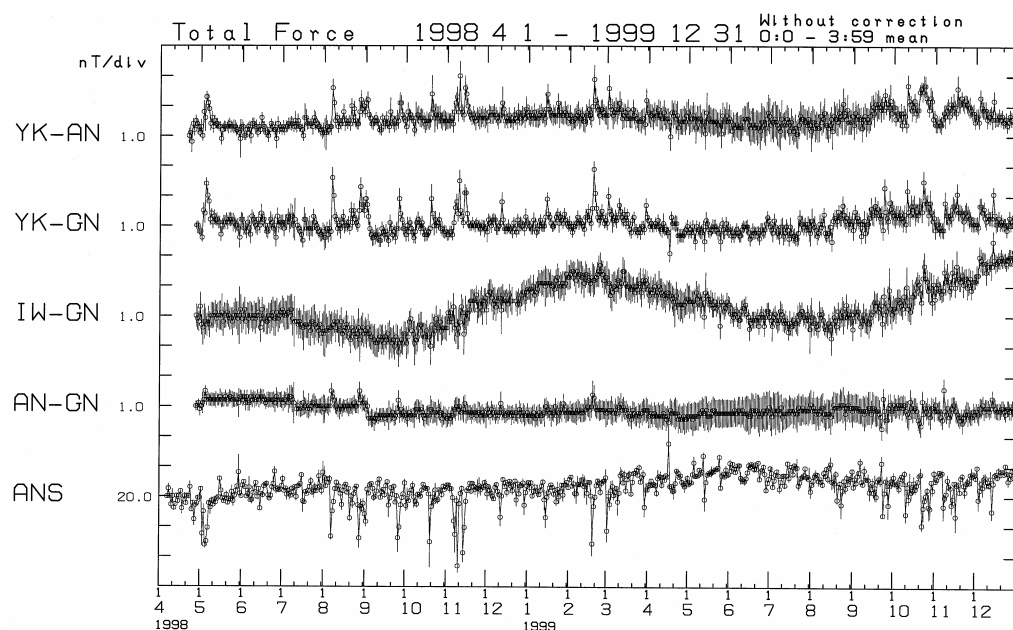


図2. 相の沢における全磁力夜間値(ANS)と, 各観測点間の夜間値差の日々変化。

YK-AN, YK-GN, IW-GN, AN-GNはそれぞれ焼走と相の沢, 焼走と玄武洞, 滝沢と玄武洞および相の沢と玄武洞の差を表す。

Fig. 2 The daily mean night-time value of geomagnetic total intensity at ANS, and the daily mean of differences between two sites within four sites. YK-AN, YK-GN, IW-GN and AN-GN means difference between YKB and ANS, YKB and GNB, IWT and GNB, and ANS and GNB respectively.

の偏角，伏角が違っていると単純な差では消去できない．そこで，一般には外部磁場変化より小さい振幅の地球内部原因の地磁気変動を検出するために，地磁気日変化の振幅が小さい時間帯のデータを用いるか，外部磁場の変化が各観測点での全磁力変化に寄与する量を評価して補正するかの手法が用いられる．ここでは，両方の手法を併用して火山活動に關係する地磁気変化の検出を試みた．

まず，地磁気日変化の影響を避けるために，全磁力夜間値を用いた．Mori and Yoshino(1970)は地方時 19 時から 4 時の夜間のデータを使えば，日変化の影響を小さくできることを示した．本報告では夜間値として地方標準時 0 時 0 分から 3 時 59 分の観測値を用いた．図 2 には相の沢(A N S)での全磁力夜間値の日々平均値と，各観測点間の全磁力夜間値差の日々平均値(単純差)を示した．それぞれのプロット値には標準偏差を表すエラーバーを付けている．I W TとG N Bの地点差(I W - G N)のエラーバーが他より大きいのは，前述のような理由で I W Tのデータの刻時精度と分解能が他より劣っているためである．図から明らかなように，A N Sでの 40~50 nT に達する変化に対して，夜間値差は 2 nT 以下の変化となっている．すなわち，外部磁場の変化の 9 割以上が消去できていることになる．しかし，磁気嵐時に顕著のように，外部磁場変化と相関の良い変化が全磁力差に見られることも明らかである．これは前述のように地磁気異常の地点差によって，単純な夜間値差では外部磁場変化が消去しきれないことを表している．特に，山体の南側と北側とは磁気異常が大きく異なるので，Y K BとA N Sの地点差(Y K - A N)やY K BとG N Bの地点差(Y K - G N)では磁気嵐時の変化が顕著である．また，I W - G Nには 1 年を周期とする変化が卓越している．これは，センサーの設置環境によりおきるみかけ上の変化で，Utada et al. (2000)は霧島火山などの同様な周期変化が，地温変化によってセンサー近傍の地盤に帯磁変化が生じ，磁気異常が変化するために生じていることをつきとめた．したがって，ここでは実施していないが，この周期変化は温度データを用いて補正できる可能性がある．

図 3 および図 4 には全磁力値を使って外部磁場変化を補正した結果と，地磁気 3 成分観測値を使って補正した結果とを示した．全磁力値を使った補正は，対象とする 2 観測点のどちらかの全磁力変化の振幅に重みを掛けた補正值を全磁力差に加えるもので，いわゆる weighted difference 法(Mori and Yoshino, 1970)と同等である．また，3 成分補正法は国土地理院水沢測地観測所江刺観測場における磁場 3 成分観測値の変化から，各観測点における全磁力変化分を推定し，それを補正值とし全磁力差に加えた．実際には各観測点ごとの全磁力換算値を求めずに，田中・他(1978)の手法に従い最小二乗法により全磁力差変動が小さくなるように各成分に対する補正係数を決めた．図から明らかなように，どちらの補正でも磁気嵐に伴う短周期の変動がほとんど見えなくなっている．さらに，3 成分補正を行った結果では数日~数十日周期の不規則変動の振幅も小さくなっている．また，図 3 に見られる Y K - A N や Y K - G N に見られる増加傾向が，図 4 ではほとんど認められないほどに小さくなっていることも注目すべき結果である．ここで使われた補正係数は，1998 年 5 月から 1998 年 11 月までの 7 ヶ月間の全磁力差に対して決められたもので，1999 年も同じ係数を使用している．したがって，全体的にばらつきが小さくなっているが，ここに示された全期間を対象にして，ばらつきが最小になるような係数が選ばれているわけではない．これらの図から，この観測網では I W Tを除いて 1nT 以下の変化でも十分検知できるものといえる．

G N Bが関係した全磁力差の変化で，1998 年 7 月上旬のステップ状のものはG N Bの観測機器を交換したためのもので，人為的なものである．また，1998 年 9 月初旬に見られるG N Bでの 0.4 nT 増加のステップ状変化は，9 月 3 日に発生した雫石付近の地震(マグニチュード M6. 1)に伴うコ

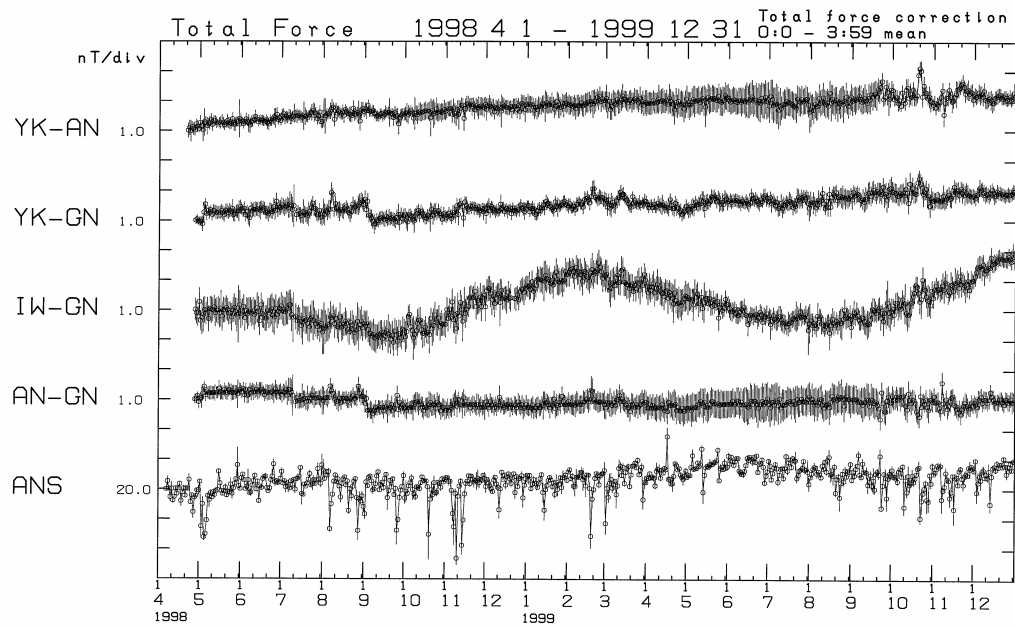


図 3. 全磁力値を使って補正された夜間値差の日々変化.

Fig. 3 The daily mean of corrected difference in geomagnetic total intensity corrected by variation of total intensity.

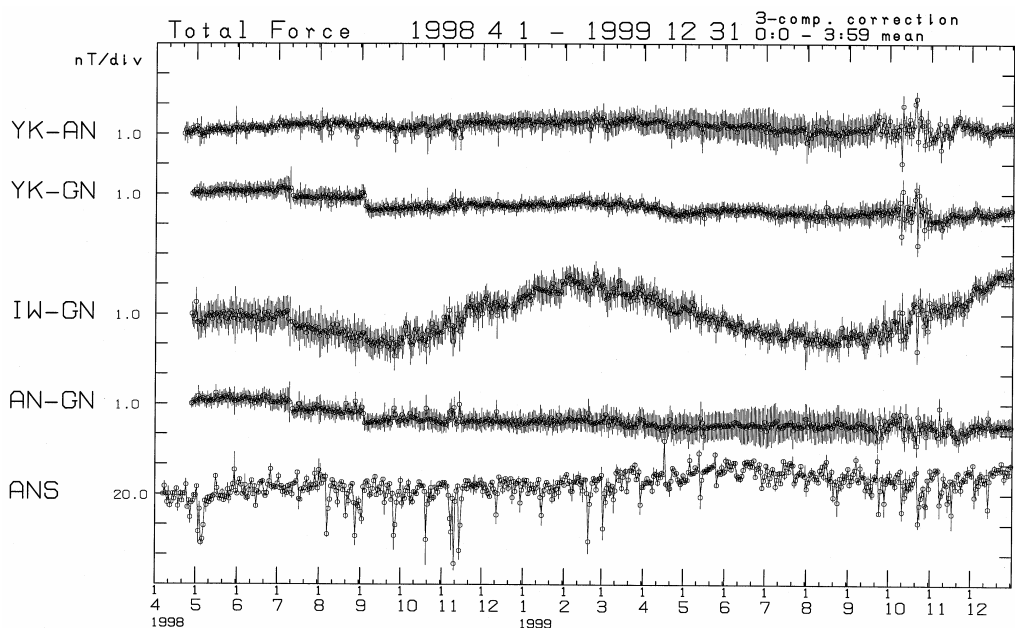


図 4. 国土地理院江刺観測場における 3 成分観測値を使って補正された全磁力夜間値差の日々変化.

Fig. 4 The daily mean of corrected difference in geomagnetic total intensity corrected by 3-componet variation of geomagnetic field at Esashi observatory, GSI.

サイスミックな変化で、地震断層のピエゾ磁気効果による変化であると報告されている(三品・他, 1999). なお、図 3, 4 で 1999 年 9 月から 11 月にかけて見られる短周期不規則変動は、ANS および YKB それぞれの観測点近傍で行われた土木工事による人工的擾乱で、火山活動や地震活動とは関係が無い。

4. 議論

1998年から1999年の2カ年間の地震活動は、1998年3月から続く活発な活動が1999年1、2月にやや低調になり、1999年3月からまた活発化している(田中・他, 2003). 地震のマグニチュードと回数を見ると、なかでも1998年4月から10月と1999年5月が一層活発な時期となっている. これらの地震活動の多くは、西岩手山の山体下深さ5 kmまでの浅部に発生している. また、GPS観測からは、地殻変動がもっとも大きな時期は1998年4月から同年9月までで、その後は顕著な変動はない(植木・他, 2003). 佐藤・浜口(1999)は地震の震源分布を考慮しながら、この時期の地殻変動を西岩手山山体下に球状の圧力源と開口割れ目とが存在することを仮定して説明している. 前節にのべたとおり全磁力観測からは、どの観測点でも1998年4月以降火山活動と関係するような顕著な全磁力変化は観測されていない. また、地殻変動や地震活動が活発な時期にも、それと関係するような観測精度を超える全磁力変動は見出せない. 図3でYK-ANおよびYK-GNに見られる約1 nTの漸増(YKBでの全磁力増加)は、図4ではほとんど見られなくなることから考えると、全磁力だけでは補正できない変化が含まれていたことによるみかけのものであろう. これらのことから、この期間には岩手山山麓の4観測点では、火山活動との関係を想起させるような小さな全磁力変化もなかったといえる.

岩手山の山体内には、地震活動や地殻変動を引き起こした源が、存在することは確かである. 佐藤・浜口(1999)の変動源モデルを参照して、山麓の全磁力観測でその存在が検知可能かどうか計算してみた. 佐藤・浜口(1999)は球状圧力源が時期によって移動するものとしているが、ここでは1998年4月から8月の平均的な位置をもとに、北緯39.845°、東経140.898°、深さ4 km(海面下)に中心があるものと仮定した. 開口割れ目は北緯39.845°、東経140.985°からN80°E方向に6 km伸びて、幅5.5 km、上端の深さ1 km(海面下)とした. 佐藤・浜口(1999)では、開口割れ目の長さや幅が時期によって変化しているが、ここでは計算結果に大きな違いが無いので、一定と仮定している. また、偏角および伏角をそれぞれ8°Wおよび54°、基盤の磁化強度を1 A/mとして、山体に近い3点の全磁力観測点の標高が約500mとほぼ一定であるので、地表面の起伏は無視して計算した.

(1) 熱消磁モデル

佐藤・浜口(1999)が地殻変動量から推定した1998年2月から8月までの球状圧力源の体積増加量は $14.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、これに相当する球の半径は約150 mである. この球が貫入したマグマあるいは熱水によって磁化を失った場合の全磁力変化の計算値は、それぞれYKB; 0.09 nT, ANS; 0.00 nT, GNB; -0.26 nT, IWT; -0.01 nTである(図5). また、開口割れ目にマグマあるいは熱水が貫入して熱消磁がおきるとそれぞれの観測点での全磁力変化は、YKB; 0.13 nT, ANS -0.19 nT, GNB; -0.25 nT, IWT; -0.03 nTである(図6). ここで、消磁域の厚さは20 mと仮定した. 佐藤・浜口(1999)による開口量の推定値は1998年2月から8月に20 cmであるが、消磁域の厚さは大き目にとった. ふたつの効果をあわせて、熱消磁による変化量としてそれぞれYKB; 0.22 nT, ANS; -0.19 nT, GNB; -0.51 nT, IWT; -0.04 nTと見積もられる. このような変化があれば、例えばYKBとGNBの全磁力差で0.7 nTの増加が期待され、検知可能な量である. YK-ANやYK-GNの図3に見られる1998年の漸増がこの様な変化の反映とも見えるが、観測されたYK-ANの変化がYK-GNの変化より大きいことや、AN-GNにほとんど変化が見られないことはこの計算結果と調和しない. ここで、計算は物理探

査学会(1989)による球および角柱の式を用いた.

(2) ピエゾ磁気モデル

Utugi (1997)は傾斜した断層面をもつ地震断層に伴うピエゾ磁気効果による地磁気変化の計算プログラム・コード開発した. ここではそれにもとづき, 開口割れ目によっておきる全磁力変化量を見積もった. 計算には基盤の平均的な物性として, ポアッソン比 0.25, ラメの定数(μ) 3.5×10^{11} とし, キュリー点の深度を 8 kmとした. 開口量 20 cmに対する全磁力変化計算値はそれぞれ YKB ; 0.00 nT, ANS ; 0.04 nT, GNB ; 0.05 nT, IWT ; 0.00 nTとなり(図 7), 観測から検知できる大きさではない.

このように地殻変動源を考慮したモデル計算との対比によっても, 火山活動と関連した全磁力変化は観測されなかったといって良い. 計算に用いられた磁化強度 1 A/m は, 火山岩として強い

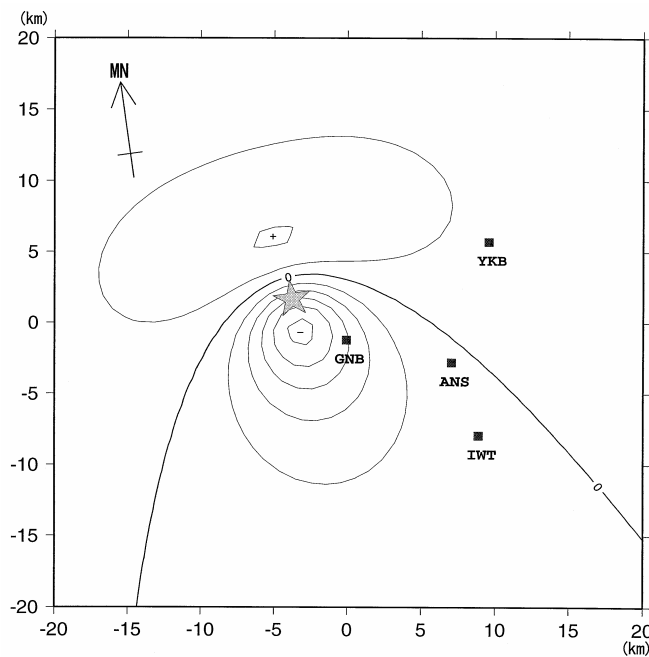


図 5. 西岩手山体下の球状熱源の熱消磁による全磁力変化の推定値分布. 球状圧力源の中心は星印で, コンター間隔は 0.1 nT.

Fig. 5 The calculated change in geomagnetic total intensity due to thermal demagnetization of spherical pressure source shown by star. Contour interval is 0.1 nT.

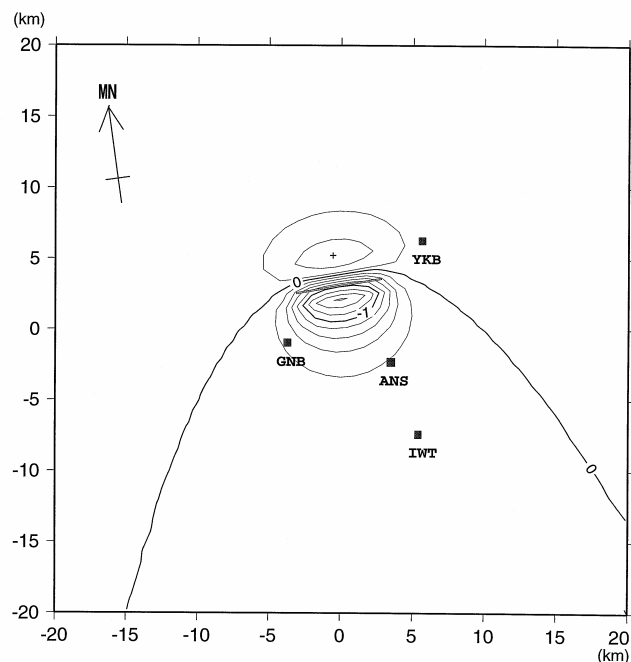


図 6. 西岩手山体下の開口割れ目に沿う熱消磁域による全磁力変化の推定値分布. 開口割れ目の位置を直線で示した. コンター間隔は 0.2 nT.

Fig. 6 The calculated change in geomagnetic total intensity due to thermal demagnetization of tensile fault zone shown by straight line. Contour interval is 0.2 nT.

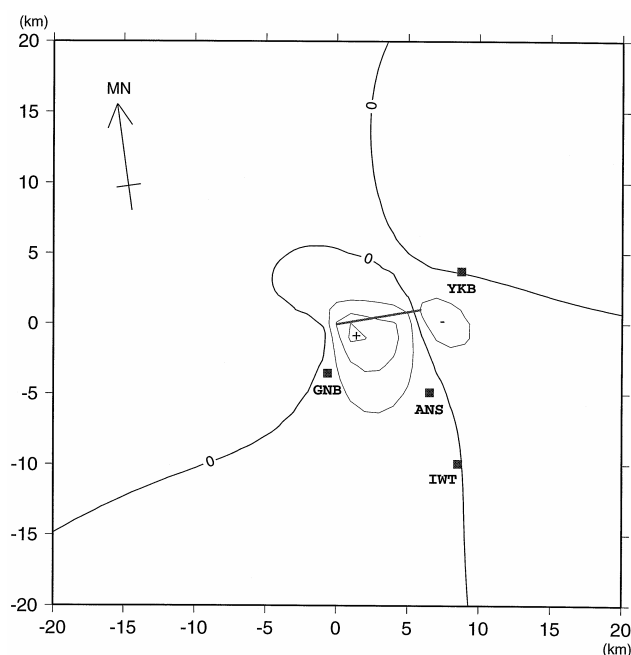


図7. 西岩手山体下の開口割れ目に伴うピエゾ磁気による全磁力変化の推定値分布. 開口割れ目の位置を直線で示した. コンター間隔は0.1 nT.

Fig. 7 The calculated change in geomagnetic total intensity due to piezomagnetic change of tensile fault shown by straight line. Contour interval is 0.1 nT.

ものではない. 国土地理院が1999年に実施した岩手山とその周辺部における航空磁気測量の結果からは, 山体の平均的な磁化強度は4 A/m程度である(藤原, 私信). この磁化強度を使えば計算値はさらに大きくなるので, 計算から予測されるような変化傾向が観測値に見られないことは, 変動源の規模が仮定した規模より小さいか, 貫入している物質の温度がキュリー点よりはるかに低いか, あるいはキュリー点深度がもっと浅くて変動源の深さでは磁気的な性質が弱いかなどが考えられる.

5. おわりに

1998年4月以降, 岩手山山麓での全磁力観測が強化された. その結果, 1 nT以下の全磁力変化でも検知できる能力の観測網ができた. しかし, 1998年から1999年にかけての活発な地震活動, 地殻変動に伴う全磁力変化は, 岩手山山麓における全磁力観測からは検知できなかった. 変動源を仮定したモデル計算と対比することにより, 変動源の規模や, 貫入物質の温度, あるいは変動源存在域の温度環境について考察する手がかりを得ることができた. しかし, ここで使われた山麓の観測点だけでは, 変動源からの距離が遠く, モデル計算との対比精度も十分とは言えない. 山頂部の観測点のデータも使った解析が望まれる.

謝 辞

1998年設置のそれぞれの観測点において, センサーは既設の観測所敷地の外側に設置された. 設置にあたってご理解とご協力をいただいた, 滝沢村, 西根町, 盛岡森林監理署岩手事務所および雫石町西山牧野組合の担当者各位に感謝いたします. また, 西村太志博士には現地記録されたデータの回収に協力していただきました. 3成分観測値は, 国土地理院による速報資料から江刺観測場を使いました. 記して感謝いたします.

引用文献

物理探査学会(1989) 図解 物理探査. 239p.

- 気象庁 (1984) 日本活火山総覧. 482p.
- 気象庁気象研究所・気象庁地磁気観測所・気象庁火山課 (1999) 安達太良山・沼ノ平火口の地磁気変化. 火山噴火予知連絡会会報, 72, 64-67.
- 三品正明・植木貞人・浜口博之 (1999) 1998 年 9 月 3 日雫石の地震 (M6.1) に伴う地磁気変化. 第 106 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 講演予稿集, B21-05.
- Mori, T. and T. Yoshino (1970) Local Difference in variation of the geomagnetic total intensity in Japan. Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 893-922.
- 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.
- 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.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人 (2003) 1999 年岩手山の地震活動. 1999 年岩手火山集中総合観測報告. (印刷中).
- Tanaka, Y. (1993) Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso volcano. J. Volcanol. Geotherm. Res., 56, 319-338.
- Tanaka, Y. (1995) Volcanomagnetic effects on the Unzen volcano (1990-1992). J. Geomag. Geoelectr., 47, 319-336.
- 田中良和・増田秀晴・河村まこと・大地 洸・加藤諄司・馬場広成・吉野登志男 (1978) 阿蘇火山地域での全磁力測量(1977). 阿蘇火山の集中総合観測(第 1 回 1977)報告, 31-39.
- 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) 岩手山の地震・地殻変動 (1998 年 2 月～1998 年 5 月). 火山噴火予知連絡会会報, 第 71 号, 3-15.
- 植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之 (2003) 岩手火山における G P S 連続観測ー主として 1999 年の変動についてー. 1999 年岩手火山集中総合観測報告, (印刷中).
- Utugi, M. (1997) A computer program for the calculation of geomagnetic field change due to an inclined rectangular fault in a half space. J. Fac. Science, Hokkaido Univ., Ser. VII (geophysics), 10, 295-310.
- Utada, H., M. Neki and T. Kagiya (2000) A study of annual variations of geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals. Earth Planets Space, 52, 91-103.

臨時観測点による岩手山における全磁力連続観測

鍵山恒臣¹⁾・藤原 智²⁾・門脇俊弘²⁾・濱崎秀夫²⁾・西谷忠師³⁾・山崎 明⁴⁾・
福井史雄⁴⁾・山本哲也⁵⁾・北川貞之⁵⁾・田中良和⁶⁾・橋本武志⁶⁾・坂中伸也⁶⁾・
長谷英彰⁶⁾・谷口宏充⁷⁾・長谷中利昭⁷⁾・後藤章夫⁷⁾・大場 司⁸⁾・
中川光弘⁹⁾・佐々木 実¹⁰⁾・三品正明⁸⁾

- 1) 東京大学地震研究所, 2) 建設省国土地理院水沢測地観測所, 3) 秋田大学工学資源学部,
4) 気象庁地磁気観測所, 5) 気象庁気象研究所, 6) 京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設,
7) 東北大学東北アジア研究センター, 8) 東北大学大学院理学研究科,
9) 北海道大学大学院理学研究科, 10) 弘前大学理工学部

Continuous Observation of Geomagnetic Total Intensity at Temporary Stations in and around Iwate Volcano

Tsuneomi Kagiya¹⁾, Satoshi Fujiwara²⁾, Toshihiro Kadowaki²⁾, Hideo Hamazaki²⁾,
Tadashi Nishitani³⁾, Akira Yamazaki⁴⁾, Fumio Fukui⁴⁾, Tetsuya Yamamoto⁵⁾,
Sadayuki Kitagawa⁵⁾, Yoshikazu Tanaka⁶⁾, Takeshi Hashimoto⁶⁾, Shin'ya Sakanaka⁶⁾,
Hideaki Hase⁶⁾, Hiromitsu Taniguchi⁷⁾, Toshiaki Hasenaka⁷⁾, Akio Goto⁷⁾, Tsukasa
Ohba⁸⁾, Mitsuhiro Nakagawa⁹⁾, Minoru Sasaki¹⁰⁾, and Masaaki Mishina⁸⁾

- 1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2) Geographical Survey Institute,
3) Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University,
4) Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 5) Meteorological Research Institute, JMA,
6) Graduate School of Science, Kyoto University,
7) Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University,
8) Graduate School of Science, Tohoku University,
9) Graduate School of Science, Hokkaido University,
10) Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

In 1998 and 1999, twelve temporary sites for continuous observation of total intensity of geomagnetic field were installed in the summit and the foot area of Iwate volcano. By heavy snow in winter, it was too difficult to continue the observation all the year round. Corrected value of difference in night-time total intensity, showed that the detectability of geomagnetic change reaches to less than 1nT. Although there were long period of no data in winter and spring, we can say that no volcanomagnetic or seismomagnetic change occurred during these two years. To get accurate data for monitoring volcanic activity, it is expected to develop stable power supply system in winter and telemetry system.

1. はじめに

岩手山は玄武岩～安山岩からなる火山群で、地形や火山活動の様式から西岩手山と東岩手山とに分けられる(気象庁, 1984). 1900 年代の噴火活動は西岩手山大地獄での水蒸気爆発などであるが, 1732 年には東岩手山北東山腹で溶岩流(焼走り溶岩流)を伴う側火口噴火があった(気象庁, 1984). 1995 年秋以降活発化の傾向にあった岩手山での地震活動は, 1997 年 12 月末から顕著になり, 1998 年前半には山体の膨張を示唆する地殻変動も観測された(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). 1998 年以降の地震活動はおもに東岩手山頂から大松倉山にいたる東西約 10 km におよぶ細長い地域の, 深さ 10 km (海面から)以浅の浅い部分でおきている. また, 1995 年 9 月以降活発になっていた東岩手山の山腹下約 5 km 付近で発生する低周波地震は, 1998 年前半に一旦活動が低下したが, 1998 年後半からまた活発化している(田中・他, 2003 ; 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).

Tanaka (1993) は阿蘇山中岳火口周辺における全磁力連続観測から, 溶岩の噴出を伴わないような規模の火口底でのさまざまな活動に対応して最大 20 nT におよぶ地磁気変化があることを報告している. また, 安達太良山沼ノ平火口内で全磁力連続観測を実施している気象庁気象研究所・他(1999)は, 火口底下数十ないし 100 m の深さでの熱消磁を示唆するような最大 5 nT/年に達する全磁力変化を観測した. このように, 玄武岩質火山のように強い磁氣的性質を持たない火山においても, 火山活動の中心付近において顕著な地磁気変化が観測されていることは, 地磁気変化の観測が火山活動監視のために重要なデータとなりうることを示している. 地震活動にひきつづき 1998 年春以来地殻変動が活発になった岩手山においても, 火山活動をモニターするためにいくつかの大学および研究機関が山頂部および山麓部に臨時の全磁力連続観測点を設けた(例えば, 藤原・門脇・濱崎, 1999 ; 西谷・山崎・福井, 1999 ; 国土地理院, 2000). 岩手山集中総合観測(1999 年)のまとめにあたり, 1998 年および 1999 年に行われたこれらの臨時観測点の観測データを集約整理した.

2. 観測とデータ処理

1998 年から 1999 年にかけて岩手山山頂部および山麓部に設けられた臨時の全磁力連続観測点は表 1 のように, のべ 12 点ある. 東岩手山と西岩手山のいずれが噴火の可能性が高いかは地震活動だけではわからないので, 観測点分布は東西に長い地域に広く展開されている(図 1). いずれも商用電源のない地域で, 太陽電池あるいは自動車用蓄電池を電源として用いている. 表 1 に見られるようにほとんどの観測点で, 観測期間が 2 期以上に分かれている. いずれの観測点でも冬季は積雪が多く, 観測継続が困難であることによる. また, 表 2 に示されるように人工衛星を用いた通信システムにより定期的に観測値を伝送してくる観測点と, 現地収録の記録を人手によって回収する観測点とがある. いずれの観測点も測定省電力化が計られ, 測定間隔は 5 分ないし 20 分が選ばれている. 使用された磁力計は機関により製造社はまちまちであるが, いずれも分解能 0.1 nT のプロトン磁力計で, それぞれ内蔵する水晶時計により, 時刻精度は数秒以内に保たれている.

各観測点での全磁力変化を図 2 および図 3 に示した. 日変化によるみかけ上の変化を避けるため, この報告では夜間値のみを使った. 夜間値としては, 地方標準時 0 時 0 分から 3 時 59 分までの 240 分間を用いている. 基準点として東北大学による連続観測点焼走(図 1 の YKB)を用いた. 図 2 および図 3 では YKB との全磁力差の変化をそれぞれ標準偏差のエラーバーをつけてプロット

表 1. 岩手山山頂部および山麓部に設けられた全磁力臨時観測点の位置と観測期間
Table 1. Location of and observed period of temporary station for continuous magnetic observation in and around Mt. Iwate.

観測点 コード	地 名	設置機関	緯度(北緯)	経度(東経)	標高 m	観 測 期 間
UEB	上坊	東京大地震研	39 52.70	141 01.57	640	1998.06.13~1999.01.01 1999.05.19~1999.12.07
OMT	大松倉	東京大地震研	39 49.88	140 54.93	970	1998.11.14~1999.01.03 1999.05.29~1999.12.30
TRH	ツルハシ東	秋田大・ 地磁気観測所	39 51.40	141 00.80	1460	1998.08.09~1998.11.09 1999.08.03~1999.09.02
P01	大松倉山東	京都大・他	39 50.38	140 55.91	1290	1999.06.19~1999.09.17
P02	黒倉山	京都大・他	39 50.99	140 58.10	1500	1998.10.27~1999.01.11 1999.06.17~1999.11.13
P03	お花畑	京都大・他	39 50.76	140 59.18	1460	1998.10.27~1999.01.22
P04	元湯	京都大・他	39 49.94	140 56.89	1100	1998.10.25~1999.03.16 1999.06.16~1999.11.14
IW1	不動平	気象研	39 50.60	141 50.27	1835	1998.11.20~1998.12.16 1999.07.19~1999.07.22 1999.09.30~
IW2	平笠不動	気象研	39 51.18	140 59.95	1775	1998.09.28~1998.12.01 1999.07.16~1999.12.29
IW3	大地獄谷	気象研	39 50.78	140 58.63	1415	1998.10.29~1998.11.05 1999.05.13~1999.12.13
SZK	雫石	国土地理院	39 49.17	140 56.50	820	1998.06.25~1998.11.17 1999.05.28~1999.12.06
MAT	松尾	国土地理院	39 53.50	140 58.50	550	1998.06.25~1998.11.17 1999.05.28~1999.12.06

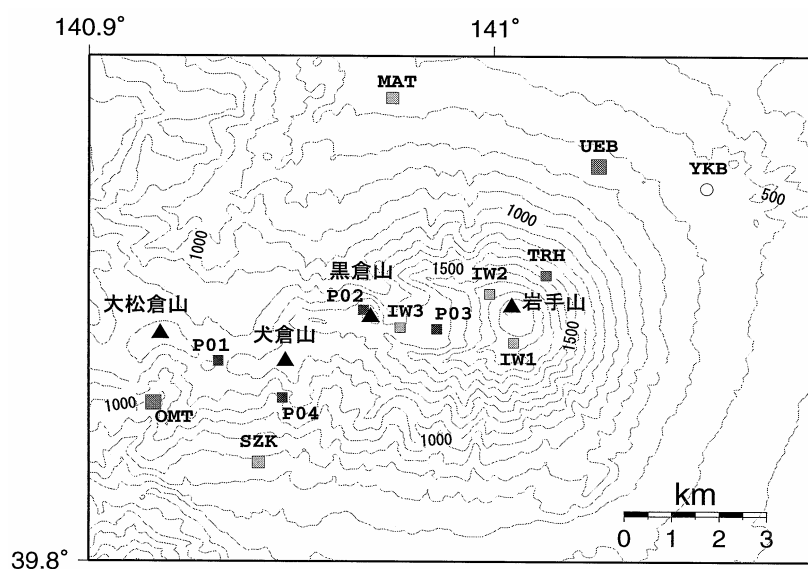


図 1. 岩手山山頂部および山麓部における臨時全磁力連続観測点分布図. 四角形の記号は臨時観測点を, 丸印は焼走固定観測点(YKB)を表す.

Fig. 1 Location of temporary stations for continuous magnetic observation in and around Mt. Iwate. Squared symbols show temporary stations and hollow circle shows permanent station(YKB).

表 2. 各観測点の計測システム

Table 2. Observation system for each temporary station

観測点	測定間隔	データ収録
UEB, OMT	20 分	アルゴシステム経由
TRH	1 分または 5 分	現地収録
P01, P02, P03, P04	5 分	現地収録
IW1, IW2, IW3	5 分または 10 分	衛星電話経由
SZK, MAT	5 分	現地収録

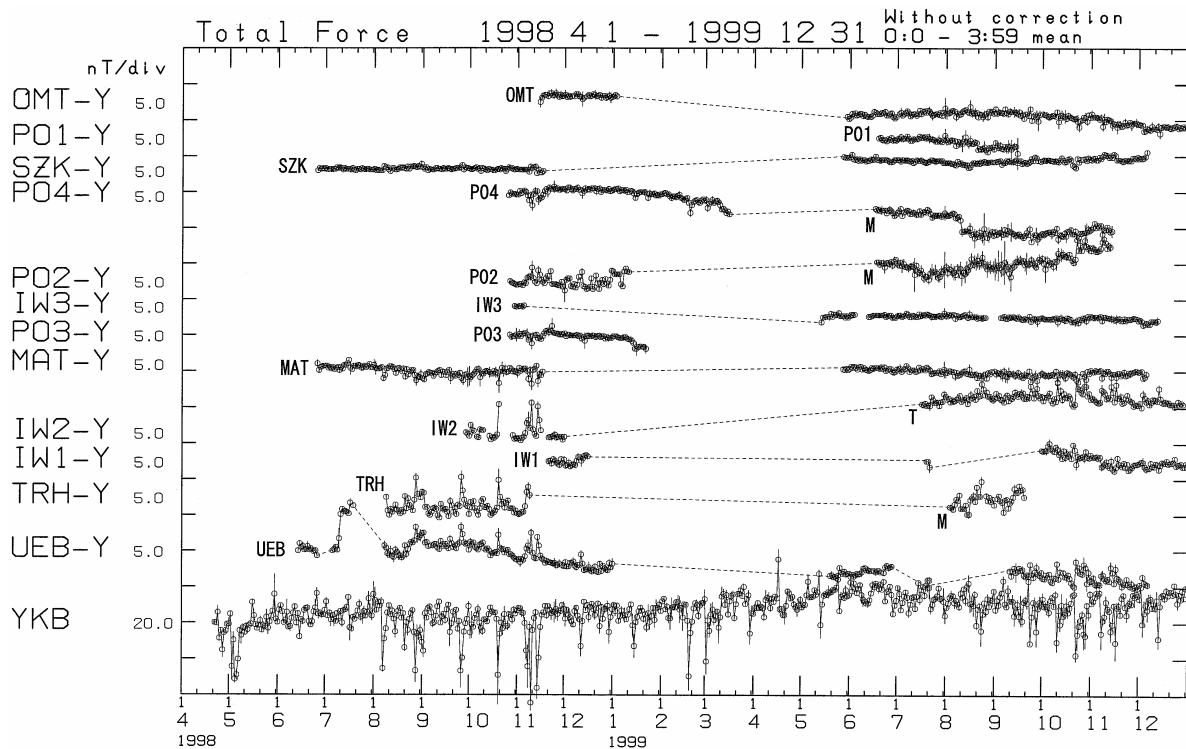


図 2. 焼走観測点 (YKB) での全磁力夜間値 (日平均値) と、各臨時観測点と焼走りの全磁力夜間値差 (日平均値). 図中に M および T と記した観測点は、融雪後の再開時にセンサー位置が移動した観測点およびセンサー支持柱が傾いていた観測点を表す. 長期の欠測は便宜的に破線でつないだ.

Fig. 2 Daily mean night-time values in total intensity of geomagnetic field at YKB, and daily mean of difference in night-time value at each temporary station referred to YKB. M and T attached to the trace line shows relocation of sensor and tilting of sensor support, respectively.

している. 表 2 に見られるように, それぞれの観測点で測定間隔が異なっているが, 全磁力差としてはそれぞれ同時刻の YKB の観測値との差の日平均(夜間値のみ)となっている. また, P01, P02, P03 および P04 では 5 分間隔の計測値から作られた 20 分間隔のデータセットとなっているので, YKB についても同様の操作により 20 分間隔のデータセットを作った後に全磁力差をとった. なお,

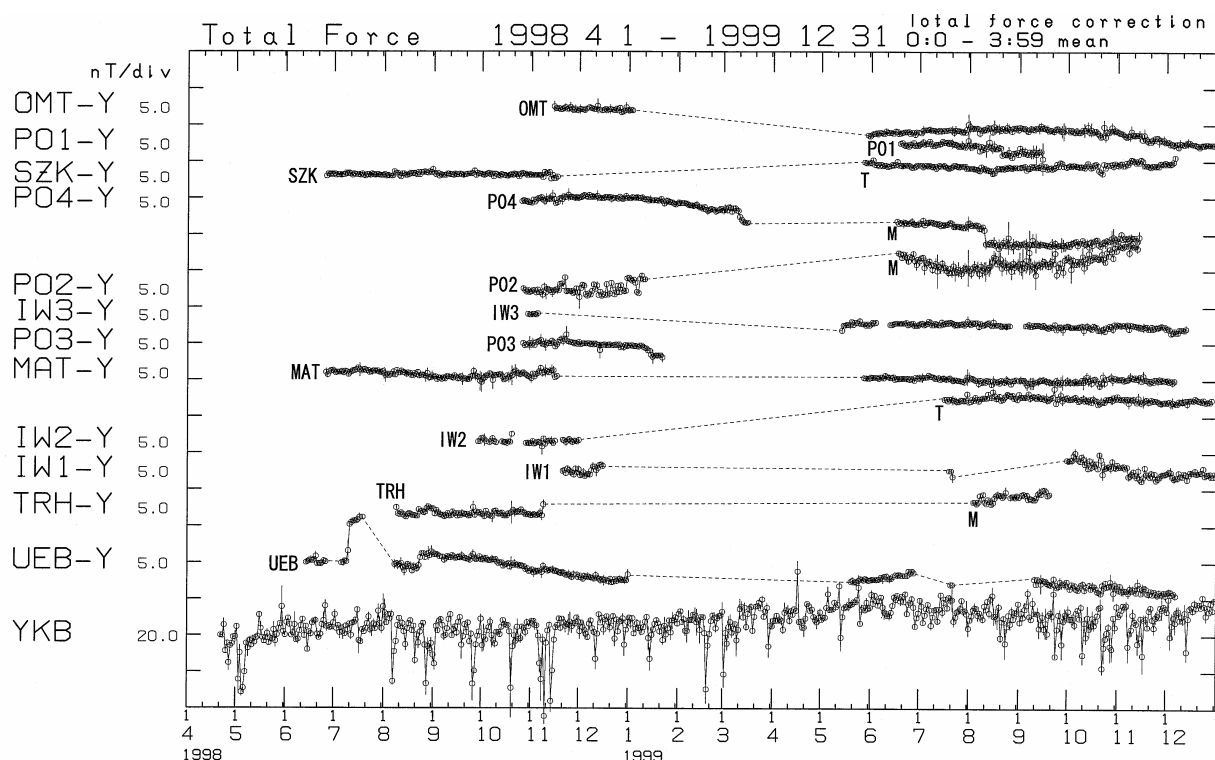


図 3. 焼走観測点 (YKB) での全磁力夜間値 (日平均値) と、各臨時観測点と焼走りの全磁力夜間値差 (日平均値). 全磁力差は、図 2 の結果に全磁力変化を用いた補正を加えたものとなっている.

Fig. 3 Daily mean night-time values in total intensity of geomagnetic field at YKB, and corrected daily mean of difference in night-time value at each temporary station referred to YKB.

全磁力差をつくる前処理として、CRT へ YKB の観測値と同時表示させることにより、各観測点での発雷等による明らかな不良データを判定して取り除いている. 図 3 は図 2 で全磁力値変化と相関があるように見える外部磁場変化によるみかけの変化を、全磁力変化値を用いて補正したものである. この補正は Mori and Yoshino (1970) による weighted difference 法と同等である. 岩手山における臨時観測点は、積雪などの気象条件だけでなく、地形的にも厳しい測定環境下において、観測点ごとに周辺の磁気異常分布が異なっている. このことは外部磁場変化がつくる全磁力変化が観測点ごとに異なったものとなり、全磁力変化だけを考慮した補正では消去できないみかけの全磁力差変化を引き起こす. 図 3 で外部磁場変化が大きい時期に平均の変化から外れたものがあることはこの様な効果により、全磁力値のみでは補正しきれないことによる. より詳細な変化を議論する際には、3 成分変化を考慮した補正が必要である.

3. 議論

冬季の積雪のため、センサーの支持柱が折れたり、傾いたりして、センサーの位置が明らかに移動した点がある. 図 2, 図 3 ではこの様な状況のため、融雪後の再開時にセンサー位置を移動した点には M を、支持柱があきらかに傾いたものには T を付している. P03, P04 および IW1 など 1999 年 1 月以降徐々に変化したり、欠測期に入る直前に急に変化しているようなものは、積雪

の影響により支持柱が傾斜しているものと推定される。P04 の 1999 年 8 月のステップ状変化はセンサー台がずれたためであることが確かめられている。全体的に見れば、積雪期を除いて各観測点でおおむね 1 nT 程度の変化が検知できることがわかる。

欠測期間が短く変化のおおよその傾向がわかるような観測点を個々に見ると、夏季には年周と思われる変化が見られる。UEB, OMT では 7, 8, 9 月に極大となる傾向が見られ、P02 では逆に 7, 8, 9 月に極小になる傾向にある。このような全磁力差の年周変化は、観測点近傍の磁力分布勾配が大きいところで大きくなることが知られていて、Utada et al. (2000) は地温の変化によりセンサー近傍の磁気異常が変化するためであることを明らかにした。岩手山における臨時観測点では、山体の磁化に伴う磁気異常や、地表付近の火山岩の磁化によりセンサー近傍の磁場勾配は小さくない。そのため、前述のような顕著な年周変化が見られるものと考えられる。このような観測点ごとの変化の特徴を念頭に、図を見ればいずれの観測点に於いても火山活動や地震活動と関連するような有意な全磁力変化は観測されていなかったといえる。

4. おわりに

岩手山の山頂部および山麓部において、1998 年から 1999 年に行われた全磁力連続観測の結果を集約整理した。その結果、これらの観測点では積雪のない時期なら 1 nT を超える全磁力変化があれば検知できることがわかった。そして、この 2 年間にはどの観測点においても有意な全磁力変化は観測されていない。この報告で取り上げた各観測点よりは山体からの距離が遠いが、東北大学が山麓に設置している 4 点の固定観測点においても、この期間には有意な全磁力変化は観測されていない(三品・植木・浜口, 2003)。したがって、活発な地震活動や地殻変動を伴った 1998 年以降の岩手山の火山活動は、これまでのところ顕著な地磁気変化を伴うような様式と規模のものではなかったといえる。

この報告にある 12 の臨時観測点すべてで、冬季の積雪期の観測が維持できなかった。火山活動のモニターを目的とした観測である限り、冬季に観測できないことは致命的なことである。また、今回の観測点の多くが人手によるデータ回収に頼っている。火山活動が更に活発化して、活動域への立ち入りに危険が伴うことは当然予想されることで、そのような時こそ地磁気観測は状況判断のための重要なデータとなる。観測データを遠隔で収集できるシステムの導入も、冬季の観測維持と合わせて大切なことである。冬季間の安定した電源供給と、安定した通信手法の開発と実用化が望まれる。

引用文献

- 藤原 智・門脇俊弘・濱崎英夫 (1999) 岩手山麓における全磁力連続観測. C A 研究会 1999 年論文集, 131-136.
- 気象庁 (1984) 日本活火山総覧. p. 482.
- 気象庁気象研究所・気象庁地磁気観測所・気象庁火山課 (1999) 安達太良山・沼ノ平火口の地磁気変化. 火山噴火予知連絡会会報, 72, 64-67.
- 国土地理院 (2000) 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, 第 63 巻, 42-56.
- 三品正明・植木貞人・浜口博之 (2003) 岩手山山麓部における全磁力連続観測. 1999 年岩手火山集中総合観測報告, (印刷中).
- Mori, T. and T. Yoshino (1970) Local Difference in variation of the geomagnetic total

- intensity in Japan. Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 893-922.
- 西谷忠師・山崎 明・福井史雄 (1999) 岩手山における全磁力観測. C A研究会 1999 年論文集, 137-142.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人 (2003) 1999 年岩手山の地震活動. 1999 年岩手火山集中総合観測報告, (印刷中).
- Tanaka, Y. (1993) Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso volcano. J. Volcanol. Geotherm. Res., 56, 319-338.
- 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) 岩手山の地震・地殻変動 (1998 年 2 月～1998 年 5 月). 火山噴火予知連絡会会報, 第 71 号, 3-15.
- Utada, H., M. Neki and T. Kagiya (2000) A study of annual variations of geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals. Earth Planets Space, 52, 91-103.

姥倉山周辺の自然電位調査

長谷英彰*・坂中伸也*・田中良和*・後藤章夫**・谷口宏充**

* 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

** 東北大学東北アジア研究センター

Self-potential Measurements around Mt. Ubakura

Hideaki Hase*, Shin'ya Sakanaka*, Yoshikazu Tanaka*,

Akio Goto** and Hiromitsu Taniguchi**

* Institute for Geothermal Sciences, Graduate school of Science, Kyoto University

** Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University

Iwate Volcano is one of the active volcanoes in northeastern Japan arc, which showed some symptoms of an eruption in such as increase of seismicity, inflation of its edifice, changes in fumarolic contents, and so on. Mt. Ubakura is one of the cones belong to Iwate Volcanic series, where geothermal activity on the ground surface can be seen in the vicinity of the summit. We conducted a self-potential (SP) survey on Mt. Ubakura, on Nov. 13 and 14, 1999 in order to clarify if there is any electrical signature of geothermal fluid flow associated with volcanic activity. The survey line, which is almost 5 km long, extends from the western flank of Mt. Inukura to Ohanabatake which is located at the west of Mt. Iwate. As the result of the survey, we recognized two positive peaks at the western flank and at the summit of Mt. Ubakura. There is some geothermal activity of Mt. Ubakura in the vicinity of the SP anomalies. The most probable cause of these SP anomalies is thought to be the electrokinetic streaming potential produced by subsurface upflow of geothermal fluid. Accordingly, we consider these two peaks to correspond to upflow of geothermal fluid.

1. はじめに

我々のグループは岩手山系の火山活動に伴う自然電位異常から地下の熱水流動に関する知見を得ることを目的として、1999 年 11 月 13・14 日に地表における地熱兆候がみられる姥倉山頂部を含む、犬倉山西側から岩手山西方のお花畑付近までの約 5 km の区間において自然電位 (SP) 調査をおこなった(図 1)。

2. データ補正

自然電位データを流動電位の理論に基づいて解析を行なう場合、標高差による単純な流体の移

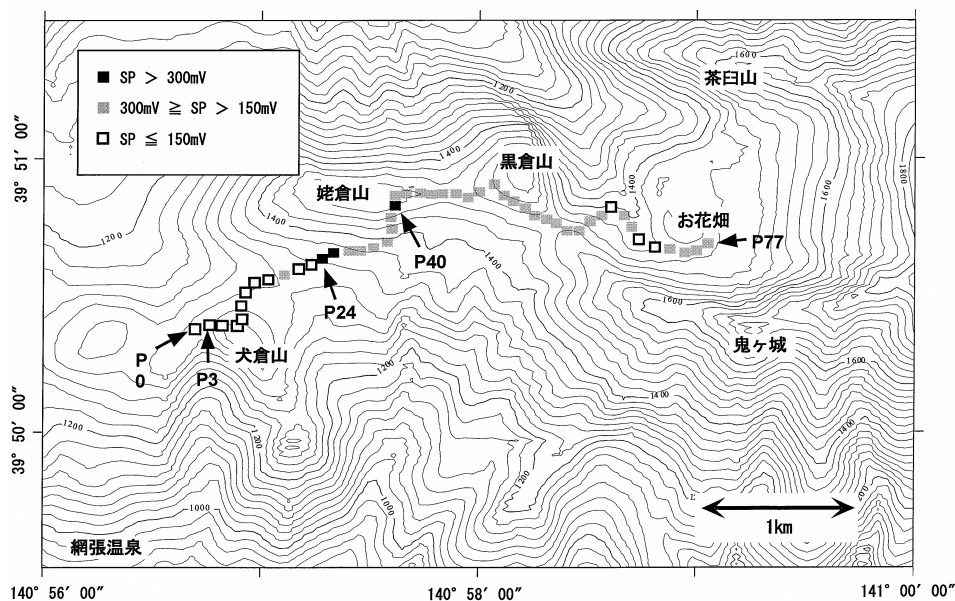


図1 姥倉山周辺の自然電位測線と自然電位〔調査日 1999 年 11 月 13, 14 日, 自然電位(S P)はP 0を基準にして, 地形補正(-1.0 mV/m)後の値〕

Fig. 1 Survey line of Self-potential(SP) around Mt. Ubakura. The survey was conducted on Nov. 13 and 14 in 1999. P0 is the reference point. Topographic effect was removed.

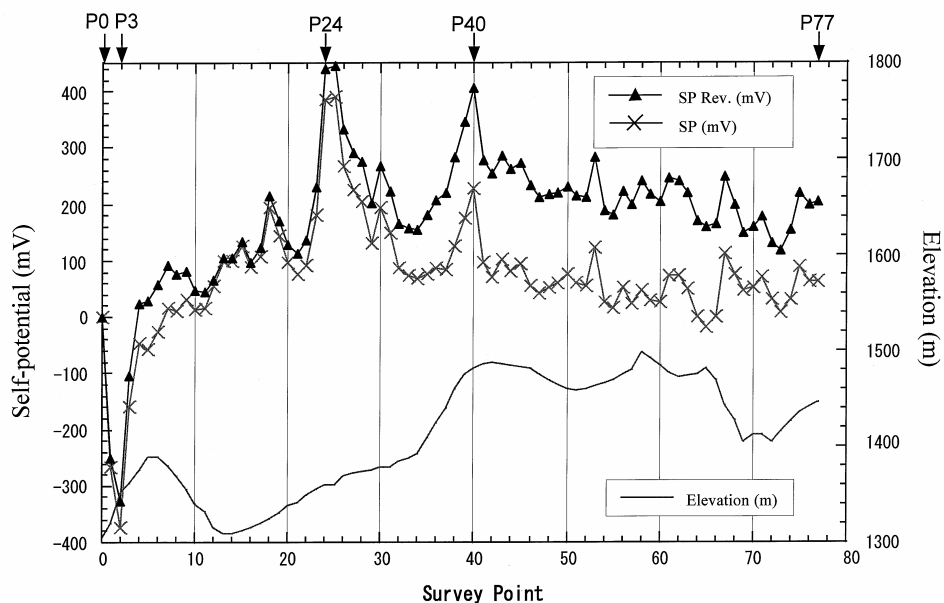


図2 姥倉山周辺の自然電位(mV)と標高(m)〔×: 測定値(SP), ▲: 地形補正(-1.0 mV/m)後の値(SP Rev.), いずれもP 0基準〕

Fig. 2 Self-potential(mV) and Elevation(m) around Mt. Ubakura [×: raw data, ▲: revised value with topographic effect (-1.0 mV/m)].

動に伴う電位効果を除去するために, 標高に対する補正(地形補正)がしばしば行なわれる. この地形補正はその場所における土壌の空隙率や浸透率に依存すると考えられており, 測定地域により異なる. 例えば霧島火山: -1.4 mV/m (Hashimoto et al., 1994), 桜島火山: -1.0 mV/m

(Hashimoto et al., 1999), 諏訪之瀬島火山: -0.9 mV/m (Kanda et al., 1999), 三宅島火山: -1.5 mV/m , -0.86 mV/m (Nishida et al., 1996) などが報告されている. 今回のデータからは, 調査範囲が熱水流動の影響を広域的に受けている地域となっている可能性もあり, 地形効果が明瞭にあらわれている地点を見出すことができなかった. そのため最近報告された地形補正值の平均的な値 (-1.0 mV/m) を採用して地形補正を行なった (図 2).

3. 結果とまとめ

部分的な自然電位異常について注目してみると, 姥倉山頂やや南方 (P 40 付近) 及び犬倉山と姥倉山の間 (P 24 付近) に, $+300 \text{ mV}$ (P 0 基準, 地形補正後) 以上の正の異常が観測された. これらは姥倉山の地表面における地熱兆候地域に隣接しており, 地下の地熱流体の上昇に対応した異常である可能性がある. また P 3 付近において -300 mV 以上の負の異常がみられた. 負の異常が正の異常の周辺にみられる場合の解釈として, 地熱流体の上昇を補うような沈み込み流体の流れによる効果とする考え方 (e. g. Hashimoto, 1997) も可能である. しかしながら今回の調査範囲のデータだけでは, そのような解釈で適切かどうか判断することは難しい.

調査範囲全体についてみると, 上述の部分的な自然電位異常を除けば, 姥倉山周辺からお花畑に至るほぼ全域で約 200 mV の正の異常 (P 0 基準, 地形補正後) がみられた. これは地表にみられる地熱兆候の広がりなどを考慮すると, この範囲全体において地熱流体の上昇に対応した正の異常がみられており, 特に姥倉山周辺で活動が顕著であると解釈することもできる.

また地磁気観測所と秋田大学のグループが行なった S P 観測 (焼走り入り口～岩手山山頂) によると, 焼走り入り口を基準とした岩手山山頂付近で約 3000 mV (地形補正後) の正の異常が観測されている (山崎, 私信). 今回の我々の調査範囲において熱水流動の分布の広がりや深さの位置などを推定することはできなかったが, 今後地磁気観測所と秋田大学のグループの測線と我々の測線をつなげる調査や, 麓の温泉地域を含む広範囲の調査を行なうことにより, 岩手山系全体の熱水流動に関する知見を得られることが期待される.

引用文献

- 橋本武志・田中良和・茂木透・山本圭吾・神田径・平林順一・石原和弘 (1999) 桜島火山の自然電位と熱水系 (第 2 報). 京都大学防災研究所年報, 42 B-1. 19-25.
- Hashimoto, T. (1997) Self-potential changes and subsurface hydrothermal activity accompanying the 1990-1995 eruption of Unzen volcano. J. Geomag. Geoelectr., 49, 977-993.
- Hashimoto, T., T. Kagiya and F. Masutani (1994) Self-potential measurements on Shinmoe-dake, Kirishima volcanic group. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 69, 257-266.
- 神田径・橋本武志・大島弘光 (1999) 諏訪之瀬島火山における自然電位分布. 京都大学防災研究所年報, 42 B-1. 11-18.
- Nishida, Y., N. Matsushima, A. Goto, Y. Nakayama, A. Oyamada, M. Utsugi and H. Oshima, (1996) Self-Potential studies in volcanic areas (3) —Miyake-jima, Esan and Usu—. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. 7, 10, 63-77

西岩手山に 1999—2000 年に現れた地熱示徴

土井宣夫*・土井小枝子**・斎藤徳美***・沼宮内 忠***・

野田 賢***・越谷 信***・山本英和***

* 地熱エンジニアリング株式会社, ** 岩手県松尾村柏台,

*** 岩手大学工学部建設環境工学科

Surface Geothermal Manifestations Appeared in the West Iwate Volcano from 1999 to 2000

Nobuo Doi*, Saeko Doi**, Tokumi Saito***, Tadashi Numakunai***,

Ken Noda***, Shin Koshiya*** and Hidekazu Yamamoto***

* JMC Geothermal Engineering Co., Ltd.,

** Kashiwadai, Matsuo-mura,

*** Faculty of Engineering, Iwate University

New surface geothermal manifestations appeared from March, 1999, and became active to February, 2000, in the area of ca. 2 km×ca. 0.5 km from Ojigoku-dani, Kurokura-yama, and Ubakura-yama at the west Iwate volcano where the geothermal activities were pre-existed. Many fumaroles occurred in the area and the amount of steam from fumarole increased. The forest killed by volcanic gas appeared under the snow in May, 1999, and a new fumarole and a hot spring were verified in August, 1999, at intensively damaged localities in the killed forest. The steam and ground temperature also rose in the area. These phenomena were caused by the heat supply from the activated underground geothermal reservoir.

1. はじめに

1995 年 9 月に始まった東岩手山の火山性地震活動は, 1997 年 12 月 29 日以降, 西岩手山の浅所に移り, 1998 年 2 月中旬から地震回数が増加して, 山体の地殻変動も観測されるようになった(東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究観測センター, 1998). 1998 年の岩手山の表面現象は, 西岩手山大地獄谷北火口の噴気が, 6 月と 9 月などに数日通常より高く上昇し, 極く小規模な泥の飛散があった事象以外の報告はない.

そして地震活動が活発化して約 1 年後の 1999 年 3 月から, 西岩手山の大地獄谷北火口とその西側地域, 黒倉山から姥倉山間の尾根部とその南北斜面で, (1) 既存噴気孔の噴気量の増加, (2) 新噴気孔の発生, (3) 笹・立木の枯死, (4) 噴気温度の上昇が確認されるようになった(土井・他, 1999). こうした表面現象は, 2000 年 2 月まで次第に顕著になっている. 本報告では西岩手山に現れた上記 4 事象を記載する.

なお、東岩手山山頂の薬師火口には数ヶ所の噴気地点があるが、1999 年現在、温度上昇等は確認されていない。また、大地獄谷北火口の東方にあり、火口湖(御苗代湖)を有する御苗代中央火口丘は、1998 年 6 月 30 日、御苗代湖の湖面に気泡が間欠的に上昇していることが機上観察されている以外、表面現象は確認されていない。

2. 西岩手山の表面現象

1999 年 3 月以降に表面現象が現れた地域は、西岩手山の大地獄谷北火口とその西側地域(以下西小沢と呼称)、黒倉山山頂付近、黒倉山から姥倉山に至る尾根部とその南北斜面である(図 1)。これらの範囲は東西約 2 km、南北約 0.5 km におよんでいる。1970 年以前から、大地獄谷北火口には硫黄塔を伴う噴気孔があり、黒倉山山頂、黒倉山-姥倉山間の尾根部とその南斜面には噴気があつて笹枯れと裸地化が進行していた。また、尾根北斜面には笹枯れを伴う地熱地が存在していた。

(1) 既存噴気孔の噴気量の増加

1998 年、黒倉山山頂付近の噴気は山麓からは見えず、まれに高さ 10 m 程に上昇するのが観察される程度であつた(写真 1-①)。1999 年 5 月 29 日、黒倉山山頂からそれまでにない強い噴気が発生し、高さ 40~50 m に上昇した(写真 1-②)。そこで 5 月 29 日から、黒倉山山頂の噴気と黒倉山-姥倉山間の尾根、及び同北斜面の噴気を著者の一人(土井小枝子)が日中、目視観測している。噴気の強さ(高さを含む)は、実際に発生した噴気の強さを基準にして 7 ランクに区分して記載している。観測点は黒倉山山頂から北約 7 km の定点(岩手郡松尾村柏台 3 丁目の土井宅 2 階)である。

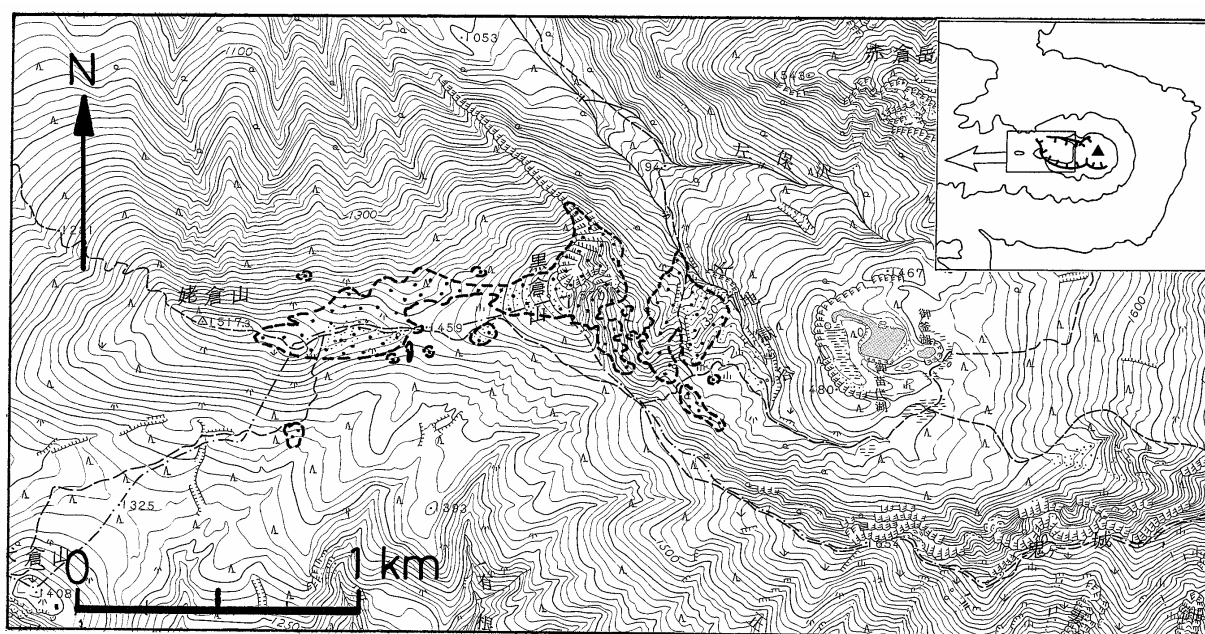


図 1. 1999 年 3 月~2000 年 2 月に岩手火山に現れた表面現象の範囲。
砂目の部分が表面現象が現れた範囲。

Fig. 1 Area of surface manifestations appeared in the west Iwate volcano from 1999 to 2000.

表1は1999年5月29日以降の黒倉山山頂にある噴気の、一日の最大ランクの日数を示したものである。1999年6月から9月の4ヶ月間で、ランク1の日数が減少している。9月と10月にはランク5の噴気が、11月には最大級のランク7の噴気が生じている。黒倉山山頂の噴気は、観測を開始した5月29日以降、2000年2月まで次第に強くなっている。2000年1月19日、黒倉山山頂の噴気は強く、無風状態で高さ200 m以上(ランク7)上昇し、千切れた噴気は高さ約400mに達した(写真1-③)。

大地獄谷北火口の噴気は、1999年に比高200 mの黒倉山山頂を越える日があった。同噴気の色は、1999年11月から時々淡黄色を呈するようになり、それは12月に5、6日ないしそれ以上の日数に達した。噴気の色の変化は、同年12月27日の機上観測により、噴気に混じる硫黄の微粉末によることが確認された(写真1-⑥、⑧)。噴気孔の風下側では、20 m以上離れた地点の雪上まで、降下した硫黄で淡黄色を呈した。また、同年12月5日、北火口内の多数の地点から強い噴気が上がるのが観測された。

大地獄谷北火口の噴気の一日の最高高度を図2に示す。観測は、火口瀬(焼切沢)を通して西岩手カルデラ底の大地獄谷北火口を望む北西約6 km(松尾村樹海ライン下倉スキー場)に設置されている報道用カメラの画像を用いて、2000年1月19日から観測している。噴気高度は、噴気孔周辺の地形的目印を利用して8ランクに区分し、記録している。ランク4の噴気高度は約60 m、ランク8の噴気高度は約300m(カルデラ南壁の鬼ヶ城尾根西部の比高)である。図の期間において、噴気高度は8日間、約300 mに達した。

この他、黒倉山の西側斜面から黒倉山－姥倉山間の尾根部裸地に分布する既存の噴気孔は、常

表1. 西岩手火山、黒倉山山頂噴気の一日内における最大噴気のランク別日数(1999年5月29日～2000年3月31日)。観測は黒倉山山頂から北約7 kmの定点(松尾村柏台3丁目)で土井小枝子を実施した。

Table 1. Number of days shown by maximum rank of fumarolic activity at the summit of Kurokura-yama, the west Iwate volcano, in a day from May 29, 1999 to March 31, 2000. The observation was carried out by Saeko Doi at the north flank ca. 7 km away from the summit.

月	観測 日数	観測で きた日 数	観測で きなか った日 数	ランク別の日数								ランクを定義した 噴気の初現日 (1999年)
				0	1	2	3	4	5	6	7	
5	3	3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	ランク3: 5月29日
6	30	26	4	0	15	8	3	0	0	0	0	
7	31	23	8	0	6	6	8	3	0	0	0	
8	31	27	4	0	4	13	6	4	0	0	0	ランク4: 8月14日
9	30	25	5	0	0	9	10	3	3	0	0	ランク5: 9月1日
10	31	29	2	0	0	5	7	8	9	0	0	
11	30	30	0	0	0	1	1	10	15	0	3	ランク7: 11月13日
12	31	29	2	0	0	0	0	4	21	4	0	ランク6: 12月14日
1	31	26	5	0	0	0	0	2	9	10	5	
2	29	27	2	0	0	0	0	0	15	9	3	
3	31	27	4	0	0	0	0	1	18	8	0	

時高さ 5 m 以上の噴気を上げるようになり，裸地全域から間欠的に生じる強い噴気は，高さ 50 m 以上に達している．これらの裸地には，地温の上昇とともに新たな噴気孔が生じている．

(2) 新噴気孔の発生

新噴気孔は大地獄谷北火口，西小沢，黒倉山山頂から続く西側斜面裸地，黒倉山－姥倉山間の尾根，同北斜面に生じた．

黒倉山－姥倉山間の尾根南斜面には，東西 4 列に配列する噴気孔列があるが，1998 年 7 月，

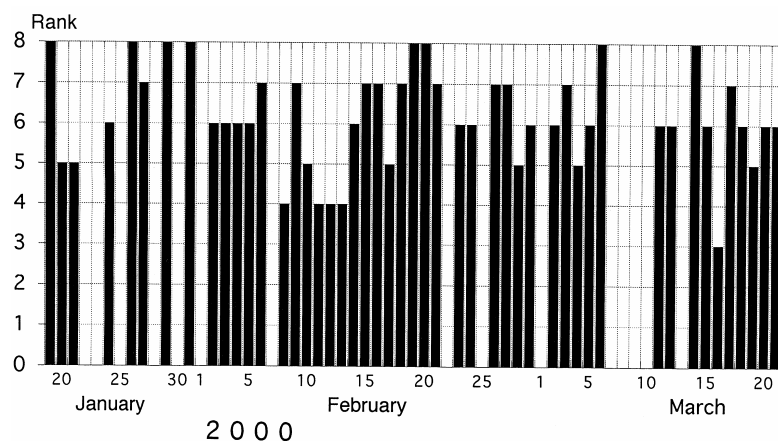


図 2．西岩手火山，大地獄谷北火口の噴気の高度変化(2000 年 1 月 19 日～3 月 21 日)．観測は大地獄谷北火口を望む北西約 6 km(下倉スキー場)の報道用カメラの画像を用いて実施した．

Fig. 2 Height of steam from fumarole at the north crater in Ojigoku-dani, the west Iwate volcano, from January 19 to March 21, 2000. The observation was carried out using videophoto for news installed at the northwest ca. 6 km away from the crater.

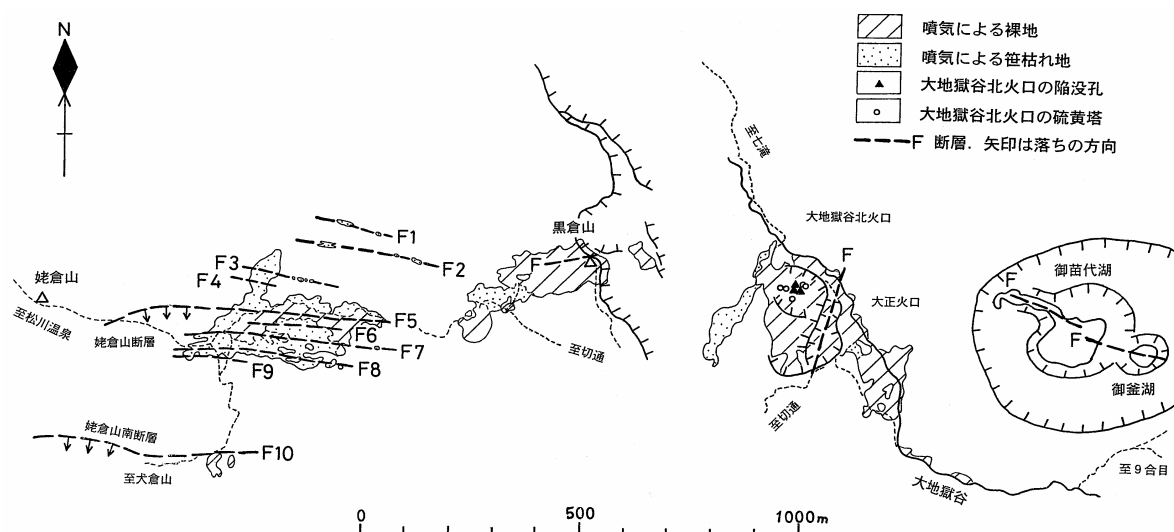


図 3．1999 年 5 月，西岩手火山の御苗代湖から黒倉山，姥倉山間に現れた表面現象の分布．

Fig. 3 Distribution of surface manifestations in the area from Lake Onashiro, Kurokura-yama, and Ubakura-yama in May, 1999.

この最下位列の青笹中に 3 m 程の高さに上がる噴気が存在していた。この噴気状況は、1999 年 8 月でも同様であった。尾根北斜面には、1995 年 5 月、南北(斜面)方向の沢に沿う笹枯れがあり、1998 年も笹枯れの面積は変わらず、噴気も確認されなかった。

1999 年 3 月、黒倉山－姥倉山間の尾根北斜面の東寄りに生じた融雪孔から弱い噴気(黒姥北 1 号；盛岡地方気象台命名)が上がっているのが確認された。同年 4 月、小さな融雪孔が北斜面に多数生じた。同年 5 月、笹と立木が枯死した面積は、1998 年 6 月の面積と比較して明らかに拡大し、黒姥北 1 号は 10 m 程度の噴気を上げるようになった。また、北斜面には東西方向に配列する 3 列の笹枯帯が生じた(図 3)。1999 年 7 月から 8 月、笹枯帯とその周辺の青笹の中から多数の噴気が生じて、笹枯帯の面積は急速に拡大した(写真 2-⑩)。北斜面の笹枯帯から上がる噴気の数、1999 年 7 月 6 日 10 ヶ所以上、7 月 9 日 25 ヶ所、8 月 26 日 84 ヶ所以上に達し、11 月 4 日、笹枯帯全体から一斉に噴気が上がり、高さ 10 m 以上の「水蒸気のカーテン」を形成した(写真 2-⑪)。さらに同日、複数の噴気孔から同時に上昇した噴気は径数 10m の「水蒸気の柱」を形成した。ただし、この日の噴気活動に爆発はなかった。

黒倉山－姥倉山間の尾根部と南北斜面には、少なくとも 10 本の東西性の断層と、少なくとも 2 本の南北性断層がある。これらはいずれも正断層で、噴気と笹枯れはこれらの断層に沿って生じている(図 3)。東西性断層は 1 本を除き南落ちである。また、黒姥北 1 号から東方に延びる浅い谷と、その延長上の黒倉山西斜面裸地北縁に、新たに噴気が直線的に配列して生じた。このことは、東西性断層が黒姥北 1 号から黒倉山山頂まで連続することを示唆している。

黒倉山－姥倉山間の尾根部の噴気地は、黒倉山山頂から続く西斜面の裸地群、ならびに姥倉山尾根部の裸地に 2 分されて分布しており、両地域の間には森林域がある。この 2 つの噴気裸地の分布高度は、黒倉山山頂(高度 1,572 m)から続く西側斜面で高度約 1,460m まで、姥倉山尾根北斜面は高度約 1,400～1,410m まで、南斜面は高度約 1,445m である。なお、南斜面では、熱異常を伴わない植物の枯死が高度約 1,385m まで生じている(後述)。

(3) 笹・立木の枯死

1999 年 5 月、西小沢において雪解けとともに雪下から枯死した笹と立木が現れた(写真 2-⑬)。枯死帯の範囲は西小沢に沿う長さ 250～300 m、幅約 50m に達した(図 4)。西小沢にはこれ以前、2 ヶ所の湧水に白色の硫黄沈殿物があったが、1998 年 10 月まで植物の枯死はないことが確認されていた。枯死帯中には白色化した著しい枯死点が 2 ヶ所存在していた。また、枯死帯を取り巻く青々した笹地の中に、新葉の出ないダケカンバが混在する帯が生じた。このダケカンバの帯は、枯死帯の周辺から西岩手カルデラの縁に沿って南方に分布した。西小沢の残雪は周辺地域よりも長い 6 月頃まで存在していた。

1999 年春、残雪下から笹枯帯が現れた地点は、この他 2 地点が確認されている(大地獄谷南地点と網張登山道の姥倉山登り口南)。同年 8 月、西小沢の枯死帯中の白色化した地点に熱水の湧出と噴気が確認された(写真 2-⑭)。同年 11 月、西小沢の枯死帯は、黒倉山断崖(比高 250 m 以上)の斜面下部に拡大し、断崖上半部の広い範囲にも新たな枯死帯が生じた。これらの枯死帯は積雪が無い時期に生じており、地温の上昇が原因と考えられる。2000 年 3 月、西小沢の前記 2 ヶ所は噴気するとともに融雪域が拡大し、断崖下部に広がった枯死帯にも新たに 3 ヶ所以上の広い融雪地が出現した。断崖下部には、この他直径 1 m 以下の融雪孔が多数生じた。また、断崖上部の枯死帯の一部から、間欠的に噴気上がるようになった。

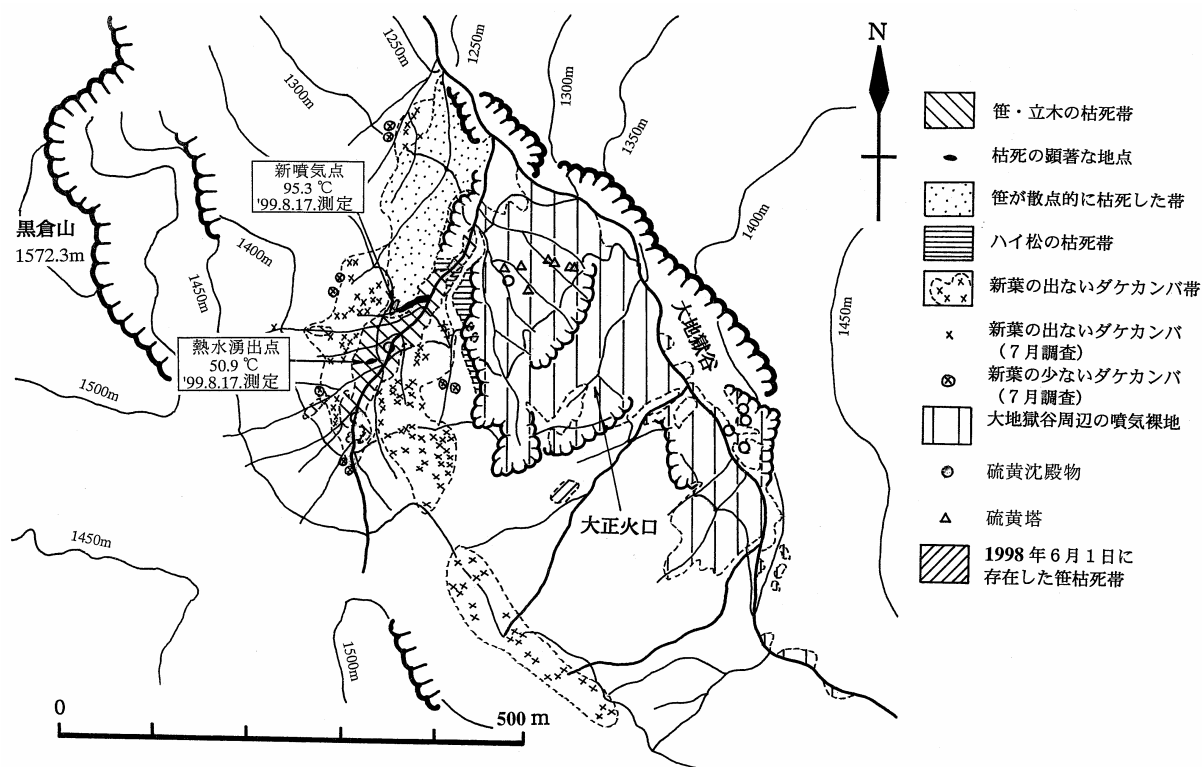


図4. 1999年5月、融雪期に西小沢付近に現れた植物の枯死域の分布.

Fig. 4 Distribution of killed forest appeared under snow at the west of Ojigoku-dani in May, 1999.

(4) 噴気温度の上昇

黒倉山から姥倉山間の尾根では東京大学、東京工業大学、岩手県により噴気温度及び地温の連続観測が実施されている。黒倉山と姥倉山の分岐点の噴気温度は、1998年9月から1999年8月の連続観測で、96.1℃から96.9℃(10日間移動平均値)に上昇した(鍵山・他, 1999)。

3. 西岩手山の表面現象の特徴

西岩手山に1999年3月以降に発生した表面現象は、1998年2月から増加した西岩手山の火山性地震活動から約1年遅れて顕在化している。西岩手山に現れた噴気量の増加、新噴気の発生、及び植物の枯死は、新たな熱供給で生じたものである。地熱兆候が顕著でなかった西小沢では、植物の枯死が生じた後に地温の上昇が確認された。

ここで西小沢の表面現象の経緯を検討すると、植物の生育が確認された1998年10月以降の降雪期に、西小沢に火山ガスが上昇して積雪下に蓄積され、高濃度になって植物が枯死したと考えられる。植物の枯死が地温の上昇によるものでないことは、西小沢に残雪が長く(6月まで)存在したことから明らかである。また、西小沢に火山ガスが上昇したことは、枯死帯中の2ヶ所に強い枯死点が存在したことから推定される。その後の1999年8月、この2ヶ所に熱水の湧出と噴気が発生したことも、火山ガスの上昇通路が存在することを裏付けている。これらのことから、西小沢のき裂を上昇した蒸気と火山ガスは、初期には低温のき裂内で蒸気の凝縮が生じて火山ガスのみが地表に到達し、その後のき裂温度の上昇に伴って、蒸気及び熱水が地表に到達したと推定される。このように西小沢の地温上昇が確認された後の1999年11月、黒倉山断崖上半部に広

がった植物の枯死域から噴気が確認されるようになったことは、断崖上部の植物の枯死が地温上昇で生じたことを示唆する。

西岩手山の噴気孔と植物の枯死帯の分布は、東西性及び南北性断層の分布に規制されている。また、新葉の出ないダケカンパの分布は、西岩手カルデラ縁に沿った火山ガスの上昇があったことを示唆している。さらに西小沢から黒倉山東側の断崖下部(高度約 1,320~1,370m付近)と、断崖の上半部(高度約 1,420m以上)に分離して枯死帯が発生したことは、黒倉山の火山体中の異なる高度に、熱水ないし蒸気貯留層が存在することを示唆する。一方、姥倉山尾根部とその南北斜面では、噴気は高度 1,400m付近~1,480m間に分布しており、この高度に最高位の熱水ないし蒸気貯留層が存在する可能性がある。噴気孔が東西性及び南北性の断層分布に規制されていることから、高度の異なる熱水ないし蒸気貯留層は、断層群で連結していると推定される。

黒倉山-姥倉山間の尾根北斜面に新たに生じた植物の枯死帯と噴気孔は、いずれも笹の生育地にあつて森林域にはほとんどない。1999 年 4 月~5 月の雪解けは、笹の生育域で急速に進み、森林域では遅れていた。これらのことから、笹の生育域は地温が高く、過去の噴気活動で森林が破壊された後に、笹植生が回復した地域と推定される(土井, 1999)。このような過去の噴気地で、1999 年から再び噴気が活発化していると考えられる。

4. まとめ

1998 年 2 月中旬、西岩手山で火山性地震が増加し始めた約 1 年後、1999 年 3 月から西岩手山に表面現象が現れ、活発化した。

(1) 新たな現象は、既存噴気孔の噴気量の増加、新噴気の発生、植物の枯死域の拡大、地温の上昇があり、発現域は西岩手山の大地獄谷、西小沢、黒倉山から姥倉山間の尾根部とその南北斜面で、東西約 2 km、南北約 0.5 km の範囲である。

(2) 黒倉山山頂の噴気量は 1999 年 5 月から 2000 年 2 月まで増加している。

(3) 枯死帯は 1999 年 11 月まで拡大し、それ以降は積雪のため不明である。

(4) 表面現象は蒸気・火山ガスの上昇により生じ、既存地熱地では熱異常が現れ、地熱地の外側では火山ガスによる植物の枯死が発生した後に熱異常が現れた。

(5) 噴気孔と植物の枯死は主に断層に沿って生じた。熱水ないし蒸気貯留層は、黒倉山から姥倉山の山体中の異なる高度に存在し、東西性及び南北性断層群で連結していると推定される。

謝 辞

本調査にあたり岩手県総務部及び同防災航空センター、(株)テレビ岩手には調査の便宜をはかって頂いた。東北大学地震・火山噴火予知研究観測センター浜口博之教授には岩手山の火山活動について御教授と議論を頂いている。岩手大学工学部建設環境工学科佐野 剛技官には観測に御協力頂いた。これらの方々に厚く感謝する。

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・土井小枝子・斎藤徳美・浜口博之 (1999) 西岩手山の 1999 年の表面現象. 日本火山学会講演予稿集, no. 2, 146.

鍵山恒臣・小山悦郎・増谷文雄・平林順一 (1999) 岩手火山・姥倉噴気温度の時間変化. 日本火

山学会講演予稿集, no. 2, 147.

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.

黒倉山山頂の噴気



大地獄谷の噴気

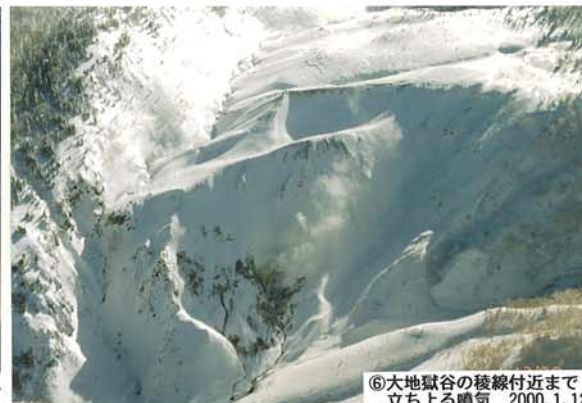


写真1. 西岩手山の噴気活動(1).

Photo 1. Fumarolic activity in the west Iwate volcano (1).

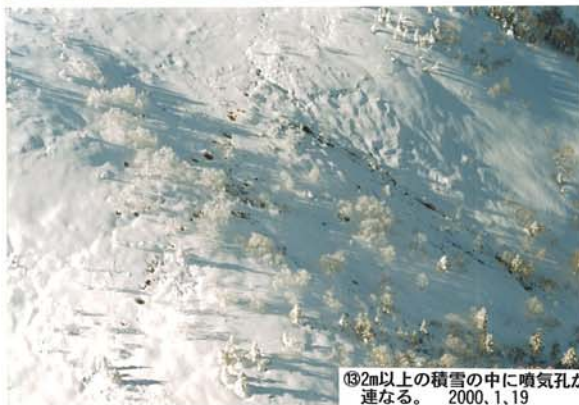
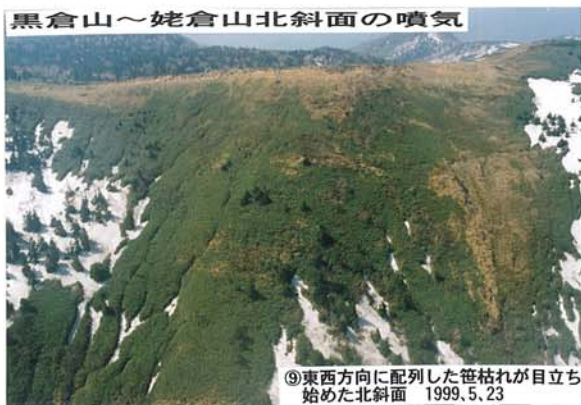


写真2. 西岩手山の噴気活動(2).

Photo 2. Fumarolic activity in the west Iwate volcano (2).

岩手火山姥倉黒倉地域の噴気温度

鍵山恒臣*・平林順一**・小山悦郎*・増谷文雄*・野上健治**・岩手県

* 東京大学地震研究所,

** 東京工業大学火山流体研究センター

Fumarolic Temperature of Kurokura-Ubakura Area, Iwate Volcano

Tsuneomi Kagiya*, Jun'ichi Hirabayashi**, Etsuro Koyama*, Fumio Masutani*,

Kenji Nogami** and Local Government of Iwate Prefecture

* Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute Technology

Fumarolic temperature has been observed at 5 sites in Kurokura-Ubakura area, Iwate Volcano since September 1998. Increase of fumarolic temperature was detected at Site 3 (Kurokura-Ubakura Branch), from September to November in 1998 and from May to August in 1999. These anomalous changes may follow the two seismic swarms from February to September in 1998 and from April to May in 1999, respectively. Fumarolic temperature at Site 1 (Kurokura) continued to increase until February 2000. This means expansion of fumarolic activity to the eastside may have some delay. Close relation between atmospheric pressure and the fumarolic temperature was also found at Site 2, which is the most active site. Precise analysis suggests that fumarolic activity is maintained by boiling of water under the pressure of 1150 hPa, which is 300 hPa higher than the atmospheric pressure on the ground surface.

1. はじめに

岩手火山の西岩手山の西方, 黒倉山から姥倉山にかけての一带には噴気地が東西方向に広がっている. この地域の噴気は, 温度が 90 数℃程度と比較的低温で, かすかに噴気が確認される程度の微弱なものである. しかし, この地域は, 西岩手の大地獄谷の噴気地帯に隣接していること, 西岩手から西にのびる地震活動の帯のほぼ直上に位置する(東北大学理学研究科, 1999)ことから, この地域の噴気活動がどのような挙動を示すかは, 岩手火山の活動を考える上で重要な情報である. こうした理由から 1998 年 9 月に網張温泉から岩手山へ向かう登山道沿いの姥倉山・黒倉山分岐点において 70 cm および 10 cm 深の噴気温度と気圧の観測を開始した. このうち, 70cm 深噴気温度と気圧のデータはアルゴスによりテレメータしていたが, 岩手山の急激な活動の変化に対応して, より詳細な噴気活動の状況を迅速に把握する必要性が生じ, 1999 年 10 月に衛星テレメータ

による 5 点の 30 cm 深噴気温度観測が岩手県により開始された．本報告は，これらの観測の概要と結果を報告し，それに基づく黒倉・姥倉地域の熱的活動について若干の考察を加える．

2. 観測の内容

噴気温度は図 1 に示す測点 1～5 の 5 地点において観測し，あわせて気圧の観測を測点 3 において行っている．測点 1 (黒倉)は，黒倉の山頂部に広がる噴気地帯に位置している．測点 2 (黒倉姥倉中間)は，姥倉山東斜面に東西に伸びる噴気地帯の東部に位置し，測点 1 と後述する測点 3 (黒倉姥倉分岐)のほぼ中間に位置する．測点 3 (黒倉姥倉分岐)は，測点 2 と同様姥倉山東斜面にあり，

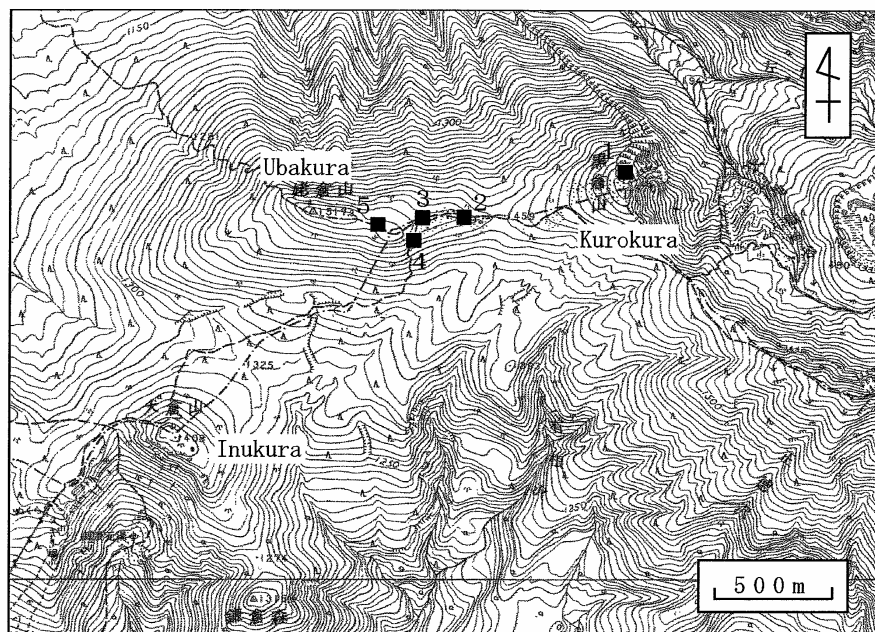


図 1. 黒倉・姥倉地域の噴気温度観測点.

Fig. 1 Observation points of fumarolic temperature in Kurokura-Ubakura area, Iwate Volcano.

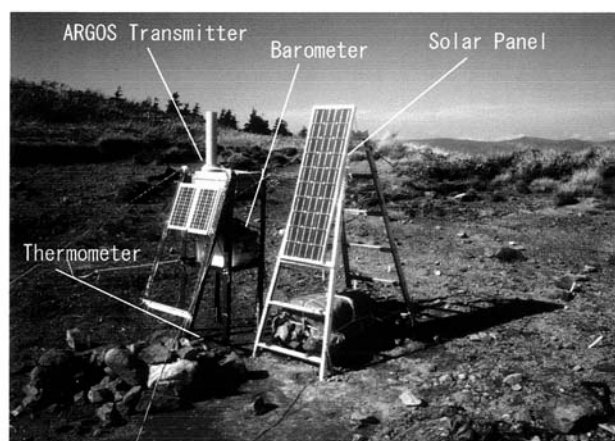


図 2. 測点 3 (黒倉姥倉分岐)に設置したアルゴス送信機および噴気温度，気圧測定器.

Fig. 2 ARGOS transmitter and instruments for fumarolic temperature and atmospheric pressure installed at Site 3.

網張温泉から岩手山に至る登山道が姥倉山および黒倉山方向に分岐する地点に位置する．測点 4（分岐南）は，測点 3 のやや南に位置し，測点 5（姥倉）は，姥倉山東斜面の噴気地帯でも最も西側に位置する．これらの測点のうち，測点 2 と 3，および測点 4 と 5 は，それぞれ東西方向に雁行して存在する噴気地帯の同じ列に属している．これらの観測点のうち黒倉姥倉分岐では，1998 年 9 月に約 70 cm および 10 cm の深さにおける噴気温度と気圧の観測を開始した．70 cm 深噴気温度と気圧のデータはアルゴス（根木・他，1998）により衛星中継され，ネットワークを介してデータを取得している．噴気温度観測には白金抵抗センサーを使用し，分解能は 0.01°C ，気圧観測には Vaisalas 社の PTB100A 気圧センサーを使用し， 0.1 hPa の分解能である．それぞれ 20 分ごとに測定している．図 2 は，設置の様子である．また，10 cm 深噴気温度は同じく白金抵抗センサーを使用し，毎時のデータをロガーにより現地収録している．分解能は 0.01°C で，1999 年 10 月までのデータを回収している．1999 年 10 月からはこれらに加えて，5 測点のおよそ 30cm の深さにおいて毎時の噴気温度観測を開始した．このデータは 0.1°C の分解能で，衛星通信によって中継され，電子メールによって 6 時間ごとに配信される．

3. 観測結果

3-1 温度記録の特徴

図 3 は，各観測点で記録される温度の例である．以下に各観測点の特徴を示す．黒倉は， 94°C 程度の温度を示し，1 日のうち 19 時頃から 23 時頃まで温度が低下する特徴がある．後に示すが，時間とともに少しずつ温度が上昇している．黒倉姥倉中間は，本観測を行っている地域の中で最も高温で（ 96°C 程度）時間的に安定している．後述するが，気圧との相関がよい．姥倉黒倉分岐の噴気温度は，同じ深さの記録と比較すると，黒倉姥倉中間について高温だが，時間的には， 93°C

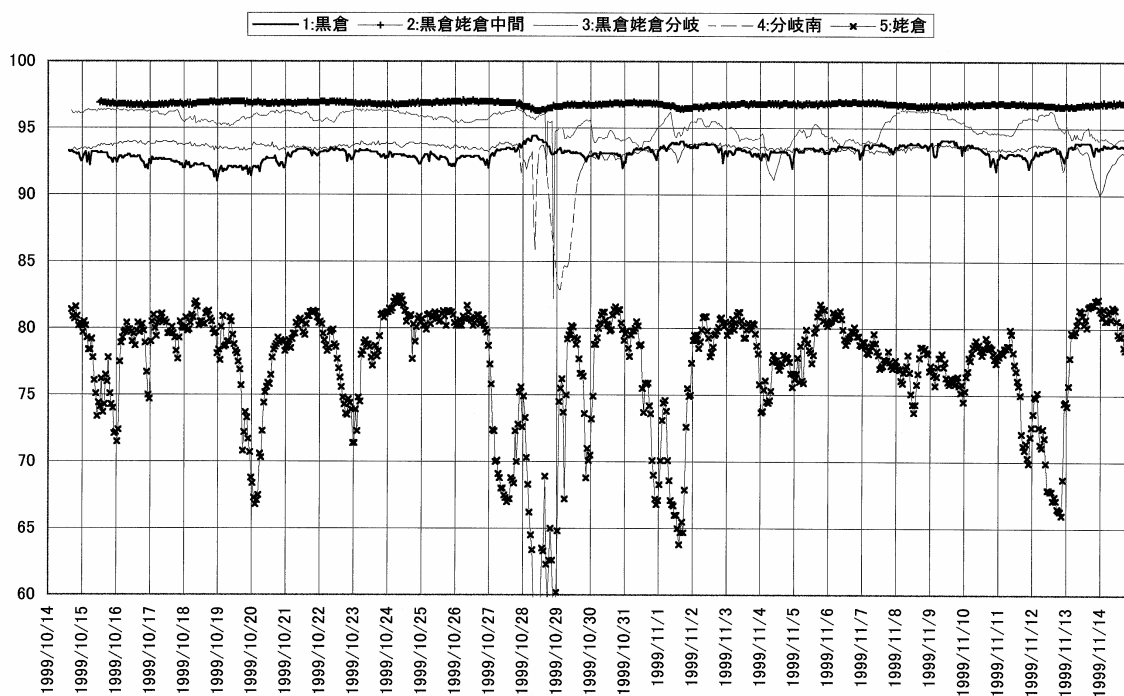


図 3. 各観測点の 30 cm 深における温度変化の例.

Fig. 3 Typical variation of the fumarolic temperature at 30 cm depth.

から 96℃ 程度の間を上下しており、黒倉や黒倉姥倉中間ほど安定していない。より深い深度では温度変化が小さくなるが、気圧との相関はよくない。分岐南の噴気温度は、黒倉と同じ程度の温度を示しているが、しばしば温度の急低下が見られる。姥倉の噴気温度は時間的な変動が大きい、細かく見ると変動の高温側は 80℃ 程度で比較的安定しているのに対して、低温側にしばしば大きく変動している。これらの温度変化を重ねて表示すると、姥倉黒倉中間の噴気温度が最も高く時間的に安定しており、黒倉と分岐南の温度はそれより低いレベルではほぼ安定している。それに対して、黒倉姥倉分岐の温度は両者の間を上下しているように見える。また、姥倉の温度は最も低く、しばしば温度が急低下している。

3-2 噴気温度と気圧との関係

図 4 は、黒倉姥倉中間の噴気温度と気圧から計算される水の沸点とを比較したものである。この図を見ると、両者の間に密接な関係があることがわかる。こうした関係は、草津白根や霧島など他の火山でも見られ、鍵山・他(1997)は、地下の浅い部分に存在する帯水層に熱が供給されて沸騰するためと考えている。両者の関係を、1999 年 10 月から 2000 年 2 月までの期間について検討すると、噴気温度の測定間隔である 1 時間の分解能では両者の変動は完全に一致しており、時間的遅れはない。図 5 a は、両者の差と沸点とを示したものである。噴気温度は水の沸点より 1.6℃ 程度高く、実際に観測される温度が 0.6℃ 程度変動しているのに対して、両者の差は 0.1℃ 程度に収まっており、変動の大部分は気圧変化によるものであることがわかる。しかし、細かく見ると、沸点が高い時に温度差は小さくなり、沸点が低い時に温度差は大きくなる傾向があり、気圧変動から計算される沸点の変動が実際の温度変化に比べて大きいことがわかる。これは、水の沸点と気圧との関係が 1 次式ではなく、気圧がある幅で変動した時に、比較的低下下では沸点の変

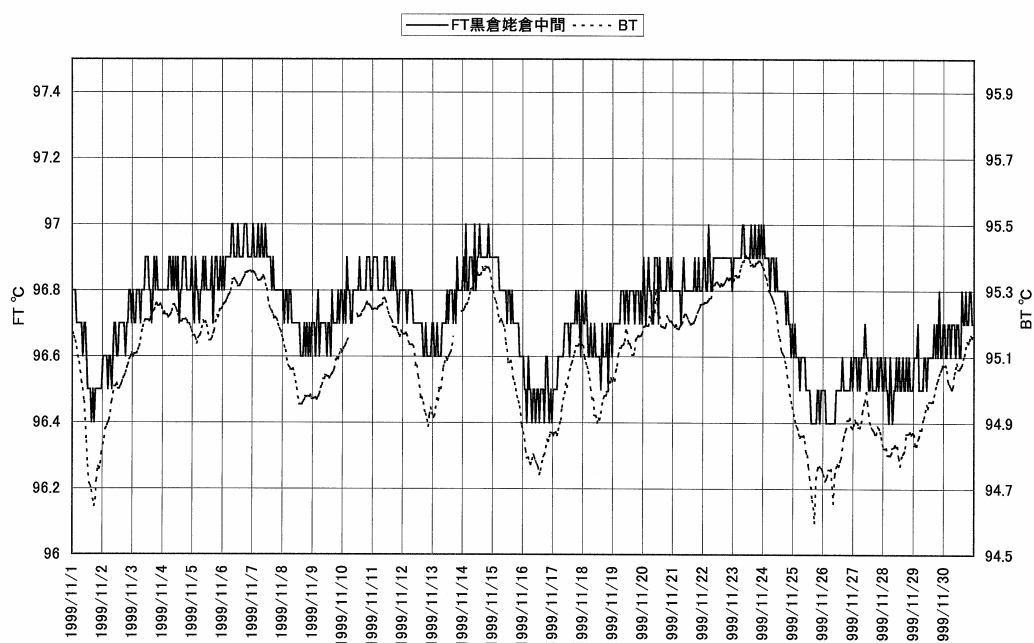


図 4. 気圧から計算される水の沸点と測点 2 (黒倉姥倉中間) の噴気温度との比較。

Fig. 4 Fumarolic temperature at Site 2 and the boiling temperature of water calculated from the atmospheric pressure.

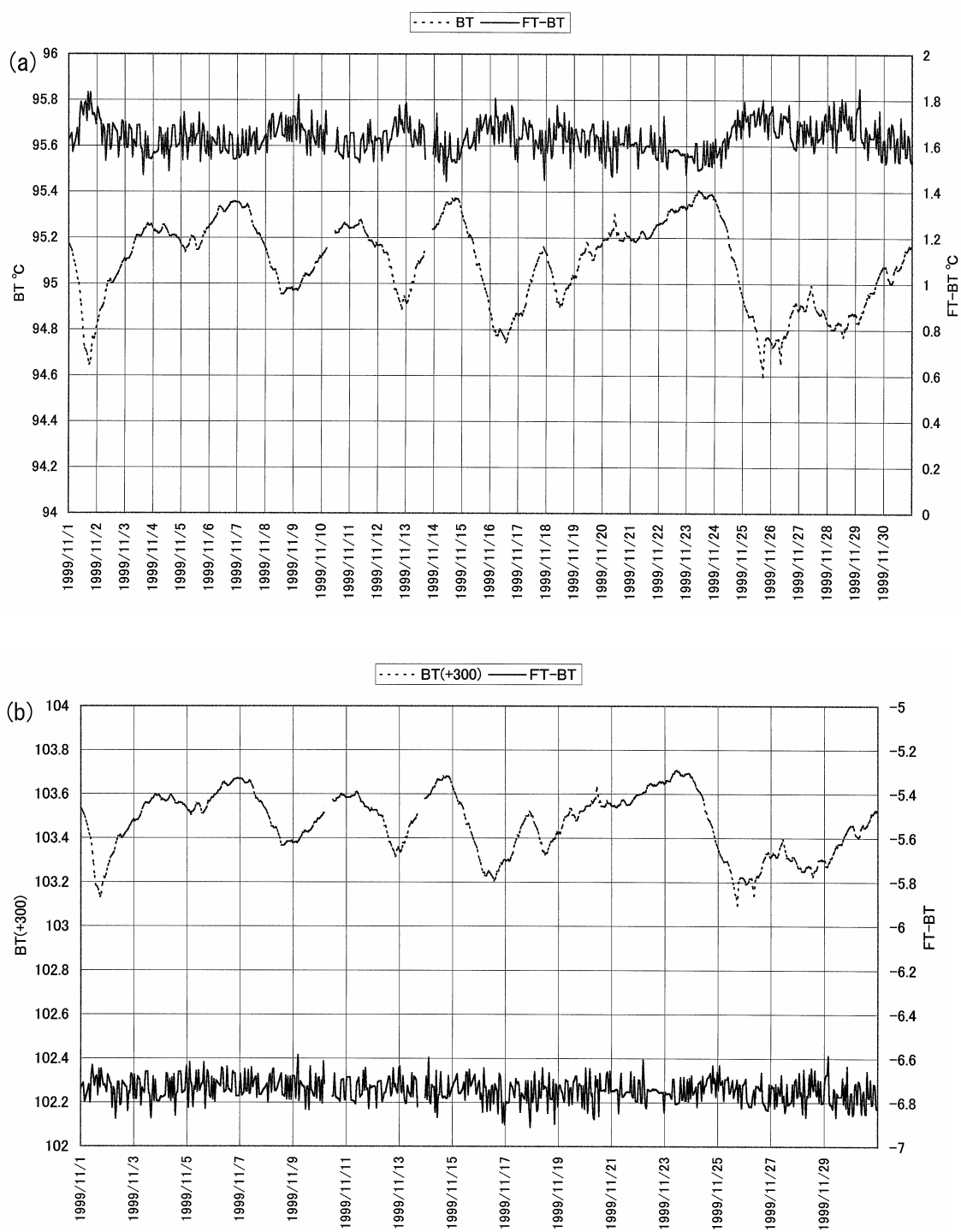


図 5. 測点 2 の噴気温度と気圧から計算される水の沸点との残差. (a) 地表気圧の場合, (b) 過剰圧 300 hPa を加えた場合.

Fig. 5 Residuals between the fumarolic temperature and the boiling temperature calculated from the atmospheric pressure at Site 2: a: pressure on the ground surface (excess pressure = 0), b: excess pressure = 300 hPa.

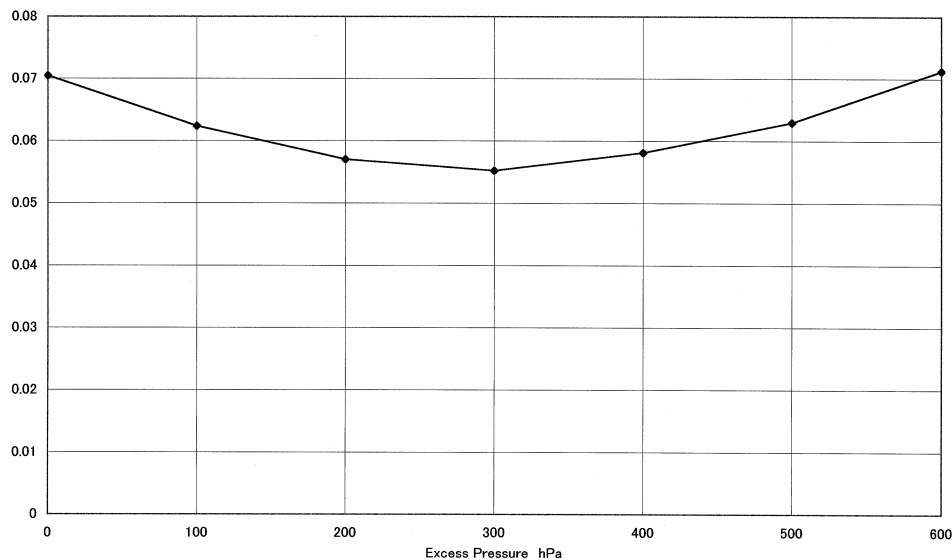


図 6．図 5 の残差の分散と過剰圧との関係．

Fig. 6 Relation between the excess pressure and the variance of the residuals in Fig. 5.

動幅は大きく、逆に高圧下では変動幅が小さくなることに起因する．地表で観測される気圧よりもより高圧にシフトした圧力下で沸騰が起きると考えれば、この傾向は説明可能である．図 5 b は、観測された気圧に 300 hPa を加えた圧力下での沸点を計算し、噴気温度との差を計算した結果である．図 5 a と比較すると、温度差の変動が小さくなり、上述した逆の関係も見えなくなっている．シフトさせる圧力をさらに大きくすると、沸点が高い時期に温度差が大きく、沸点が低い時期には温度差が小さくなって、温度差のばらつきが再び大きくなる．図 6 は、シフトさせる圧力(ここでは過剰圧と呼ぶ)をかえて、温度差の分散を計算したものである．温度差の分散は過剰圧が 300 hPa の場合にもっとも小さくなる．同様の検討を他の期間についても行ったところ、ほぼ同じ過剰圧で分散が最小になることがわかった．このことは、黒倉姥倉中間の噴気が、地表の気圧よりもおよそ 300 hPa 高い 1150 hPa 程度の圧力条件の下、103℃ 程度で沸騰し、6.8℃ 程度冷却して地表に噴出していることを示すと考えられる．これ以外の観測点の噴気温度は気圧の変動とはほとんど相関が見られない．このことは次の節で議論する．

3-3 噴気温度の短周期変動

図 3 の噴気温度を見ると、どの点も数日の周期で変動している．そのうち、黒倉姥倉中間の噴気温度の変動は、前節に示したように気圧変動によって規定される変動であるが、それ以外の点の変動は、気圧変動とは相関が見られない．通常これらの変動は雨の影響と考えられることが多いので、降雨との関係を検討しよう．図 7 は、葛根田で観測された毎時の雨量を示している．最も温度の低い姥倉の噴気温度は、上述したように、時々極端に温度が低下している．10 月 28 日に温度が低下しているが、この時期には台風が付近を通過しており、雨量も多い．また、11 月 1 日や 11 月 13 日にも、同様の変化が現れており、噴気温度の低下と大雨とは対応している．しかし、10 月 20 日や 10 月 27 日のように、噴気温度が低下しているにもかかわらず、雨量が少ない例も見られる．この理由は雨量を観測している地点が噴気温度を観測している地点から離れてい

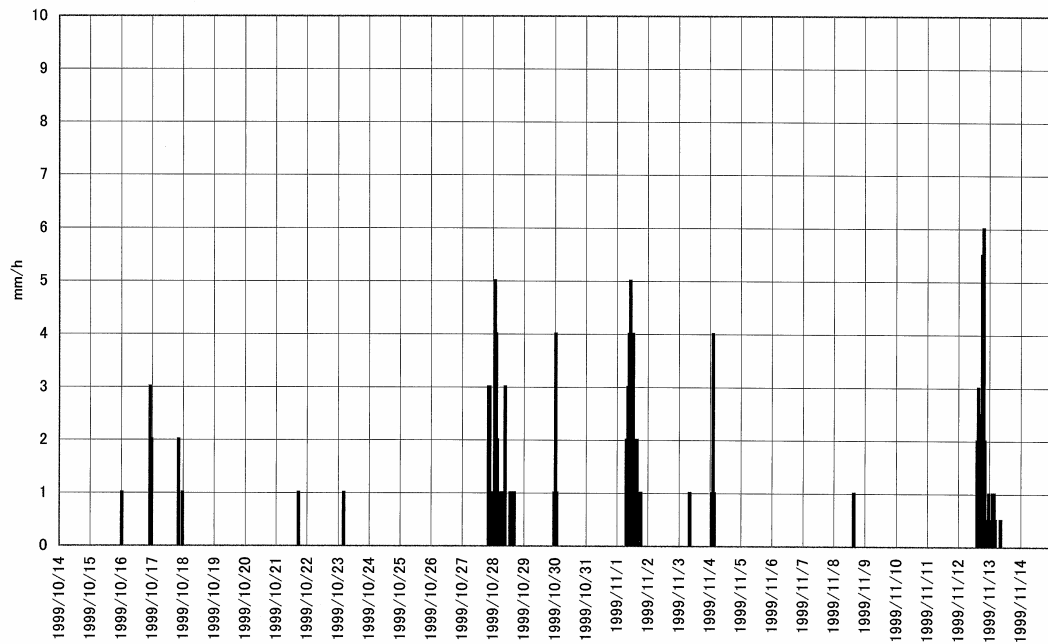


図 7. 葛根田における時間雨量(気象庁資料).

Fig. 7 Hourly precipitations at Kakkonda by JMA.

るためかもしれない。一方、黒倉や黒倉姥倉分岐、分岐南の噴気温度の変動は、姥倉に比べるともともと変動量が小さいこともあるが、雨量とはあまり合わない。10月28日の雨では黒倉を除く点では温度は低下しているが、黒倉では逆に上昇しており、それ以外の雨に対しては全ての点であまり低下していない。むしろ降雨と関係しない温度変動が卓越しているように見える。これらの結果から、降雨の影響は姥倉のような低温の微弱な噴気地には現れるが、それ以外の噴気には極端な豪雨を除いて現れていないと思われる。それでは、これらの変動はどのようにして起きているのであろうか？鍵山・他(1999)は、黒倉姥倉分岐の70 cm深噴気温度の時間変化を検討し、気圧変動との相関が見られないほか、雨量との相関も見られないことから、この噴気が地下浅部の帯水層内での沸騰によるものではなく、地下深部から直接上昇したもので、時間変動は気象変化などの外的要因によるものではなく、噴気活動そのものの变化、言い換えれば、地下の火山活動の状態変化を直接反映したものではないかと考えた。しかし、その後観測点を増やした結果、この考えを修正する必要があるが出てきた。図3に示すように、この地点の噴気温度の時間変化は最高温度を示す黒倉姥倉中間の噴気温度と相対的に低温を示す黒倉や分岐南の噴気温度との間を上下しているように見える。このことは、黒倉姥倉中間に最も本質的な噴気が上昇し、それ以外の観測点の噴気は、本質的な噴気が移動したり地下水と混合することによって冷却を受けたものであると考えるよりは、下記のように考えるほうが妥当に思われる。すなわち、この地域には、比較的高温の噴気と比較的低温の噴気の2系統が安定して存在する機構が存在し、黒倉姥倉中間には高温タイプの噴気が上昇し、周辺の黒倉や分岐南には低温タイプの噴気が上昇している。黒倉姥倉分岐では、低温タイプの噴気が噴出している状況下で高温タイプの噴気の地下からの供給量が増減し、黒倉姥倉中間を中心とした噴出場所が拡大縮小を繰り返すため、両者の温度の間を上下しているという考えである。さらに周辺にあたる姥倉では、低温の噴気が周辺部に広がっていく過程において周囲から流れ込む地下水などによって冷却を受けるため、大きく変動するのかもしれない。

3-4 噴気温度の長期的傾向

前節に示したような特徴を各噴気を持つ事を考慮しつつ、この地域の噴気活動の長期的な傾向を検討しよう．図 8 a は、黒倉姥倉分岐における 70 cm 深噴気温度の日平均値の変化を示してい

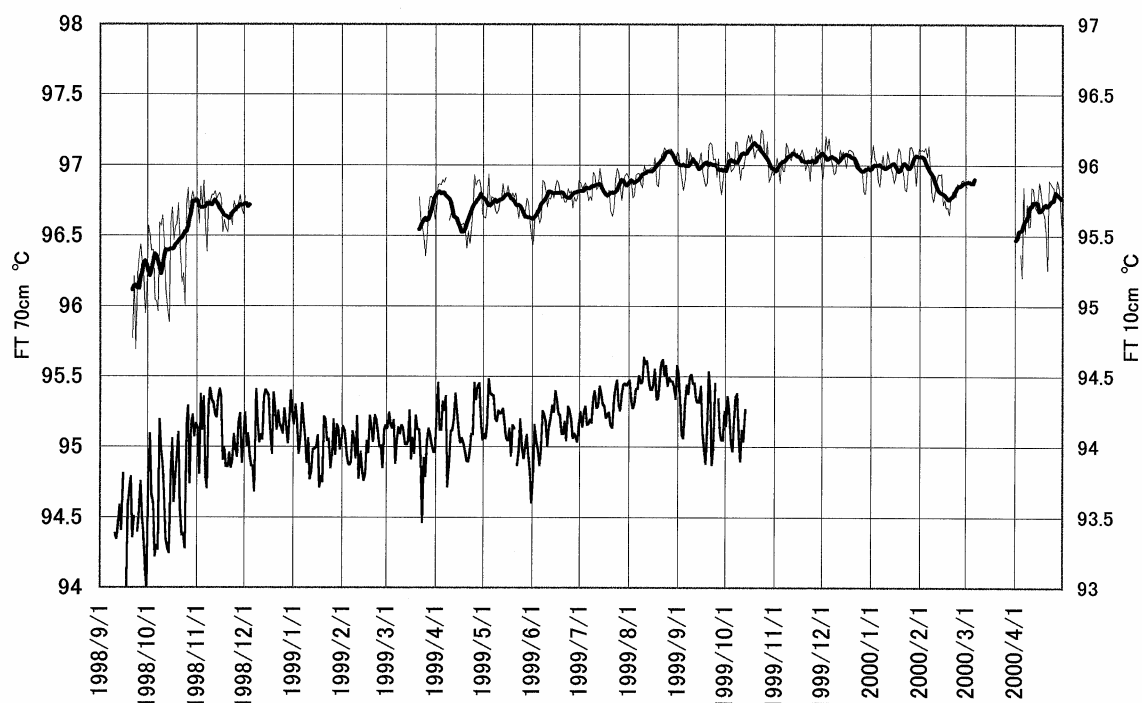


図 8 a. 測点 3 (黒倉姥倉分岐)における噴気温度の日平均値の変化.

Fig. 8 a Variation of the daily mean of the fumarolic temperature at Site 3.

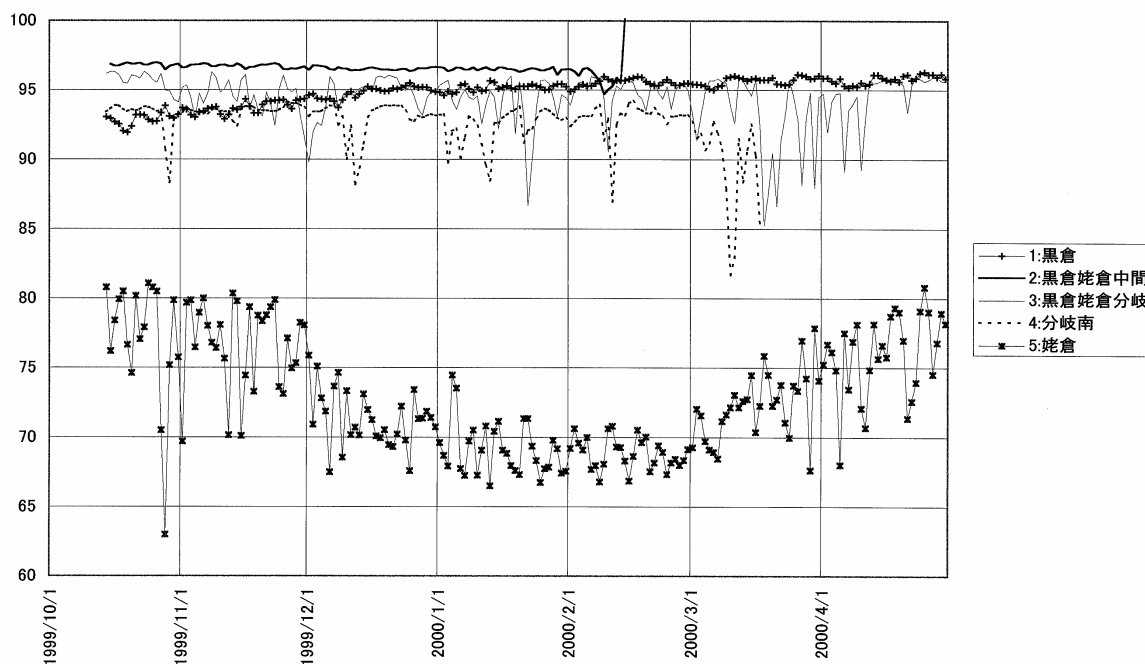


図 8 b. 噴気温度の日平均値の変化.

Fig. 8 b Variation of the daily mean of the fumarolic temperature at 30 cm depth.

る．この記録には冬季に欠測があるので，現地収録された 10 cm 深の噴気温度もあわせて示す．この図から，1998 年の少なくとも 9 月には噴気温度の上昇が起きており，11 月ころまで上昇が継続したことがわかる．その後はしばらく横ばいの状態が続いていたが，1999 年 5 月頃から再び温度上昇が始まり，9 月初めまで続いた．こうした温度上昇に先立って，1998 年 2 月から 9 月までおよび 1999 年 4 月から 5 月にかけてこの地域の地震活動が高まっていたことが明らかにされている．事例が少ないため確定的なことは言えないが，噴気温度の上昇が地震活動の高まりに引き続いて発生していた可能性もある．その後，1999 年 9 月以降 2000 年 1 月までは，ほぼ横ばいの状態が続き，2000 年 2 月，3 月に低下した後 4 月に入り再び回復する傾向が見られる．それ以外の観測点での長期的傾向は 1999 年 10 月の観測開始以降しかわからないが，図 8b に示すように，黒倉では，1999 年 10 月の観測開始以降 1999 年 12 月までおよそ 1℃/月の割合で温度が上昇し，それ以降 2000 年 4 月末現在まではおよそ 1℃/4 月の割合で上昇が続いている．一方，黒倉姥倉中間では 2000 年 2 月に機器の不調が発生したが，それまでは温度が徐々に低下している．ただし，この間の 0.4℃ の低下の大部分は気圧の季節変化によるものであり，気圧の変化を補正すると 3 ヶ月間に 0.1℃ の温度低下にとどまっている．分岐南観測点は，3 月半ばに送信が途絶えてしまったが，2000 年 2 月までは時々一時的な温度低下はあるもののほぼ同じ温度で推移し，3 月に入って温度が低下している．この変化は，黒倉姥倉分岐の温度変化とほぼ同じである．姥倉では 1999 年 11 月下旬から温度が低下し，2000 年 3 月から上昇に転じているが，この期間の前後で温度がほぼ一定であることを考えると，むしろ 1999 年 12 月から 2000 年 3 月の期間中に温度が低下して

表 1．急激な温度上昇．

Table 1. Sudden rise of fumarolic temperature.

Start time	End time	Temp-start	Temp-end	Temp-step	Duration time	Fumarolic activity
1998/10/7 21:00	1998/10/8 4:20	95.76	96.63	0.87	7.3	
1998/10/14 21:20	1998/10/15 11:00	95.70	96.64	0.94	13.7	
1998/10/24 16:20	1998/10/25 8:00	95.96	96.72	0.76	15.7	
1998/11/2 21:00	1998/11/3 8:20	96.37	96.87	0.50	11.3	
1998/11/7 15:40	1998/11/8 6:40	96.21	96.79	0.58	15.0	
1998/11/23 16:20	1998/11/24 3:20	96.51	96.84	0.33	11.0	
1999/4/1 14:40	1999/4/1 21:00	96.62	96.93	0.31	6.3	
1999/5/3 21:40	1999/5/4 6:00	96.67	96.97	0.30	8.3	
1999/5/12 17:20	1999/5/13 1:40	96.80	96.95	0.15	8.0	
1999/6/6 22:20	1999/6/7 10:00	96.68	96.94	0.26	11.7	Active June 8, 9
1999/6/27 14:20	1999/6/27 21:00	96.71	96.91	0.20	6.7	
1999/7/8 22:40	1999/7/9 4:00	96.84	96.99	0.15	5.3	Active July 9
1999/7/12 22:20	1999/7/13 0:40	96.84	97.01	0.17	2.3	
1999/7/17 1:40	1999/7/17 3:40	96.77	96.93	0.16	2.0	
1999/7/19 0:00	1999/7/19 3:40	96.80	96.88	0.08	3.7	
1999/7/23 0:20	1999/7/23 7:00	96.81	96.93	0.12	6.7	Active July 23
1999/8/5 9:40	1999/8/5 13:20	96.90	96.98	0.08	3.7	
1999/8/9 21:20	1999/8/10 2:00	96.92	97.03	0.09	4.7	Active Aug. 11
1999/8/16 23:20	1999/8/17 3:40	97.01	97.07	0.06	4.3	
1999/8/20 16:00	1999/8/20 19:00	96.99	97.11	0.12	3.0	Active Aug. 21
1999/8/31 0:20	1999/8/31 9:20	96.99	97.13	0.14	9.0	Active Sep. 1
1999/9/5 21:00	1999/9/6 4:40	97.01	97.18	0.17	7.7	
1999/9/7 13:20	1999/9/7 16:20	96.93	97.12	0.19	3.0	
1999/9/19 14:20	1999/9/19 19:00	96.82	96.99	0.17	4.7	
1999/9/19 20:40	1999/9/20 6:40	96.99	97.14	0.15	10.0	
1999/9/22 10:20	1999/9/22 14:20	97.06	97.24	0.18	4.0	
1999/10/2 0:20	1999/10/2 6:40	97.97	97.16	0.19	6.3	
1999/10/6 20:40	1999/10/7 2:20	97.06	97.21	0.15	5.7	
1999/10/12 2:20	1999/10/12 4:20	96.96	97.08	0.12	2.0	
1999/10/13 7:40	1999/10/13 15:40	96.86	97.24	0.38	8.0	

いるように見える．この温度変動は地中温度の年周変化とは位相が一致しないので，地中温度の年周変化が影響したものとは考えられない．冬季は降水がすべて積雪となるため地下浅部の水が少なくなり，噴気の量が減少することに対応して，微弱な噴気地では温度の低下が起きた可能性がある．

3-5 黒倉姥倉分岐における噴気温度の短期変化

黒倉姥倉分岐における 70 cm 深噴気温度は数日程度の時間スケールで 0.5°C 程度変動している．この変動には時として急激な温度上昇を示すものがある．表 1 はそれらの異常な温度上昇の発生

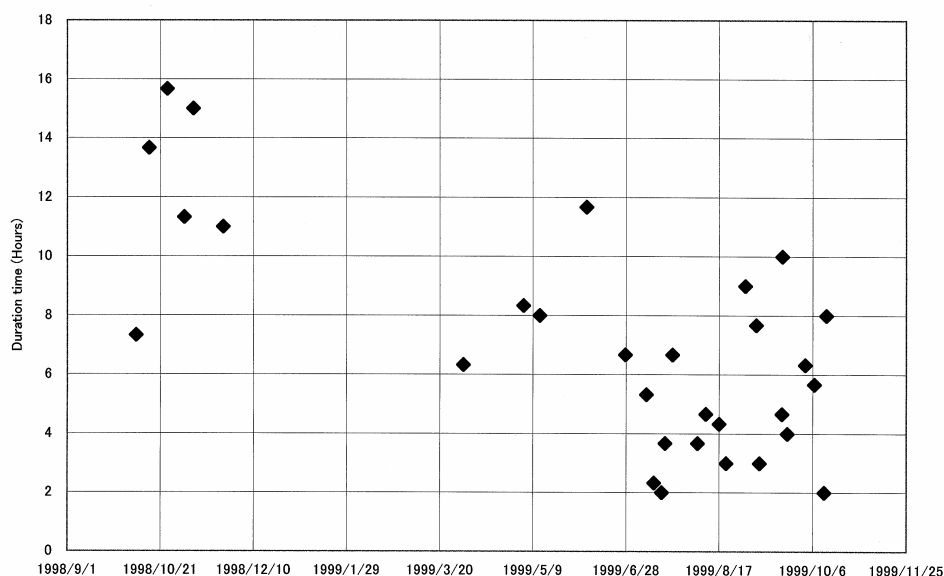


図 9 a. 測点 3 (黒倉姥倉分岐) の 70 cm 深における急激な温度上昇の継続時間の変化.

Fig. 9a Temporal variation of the duration time of the sudden rise of the fumarolic temperature at Site 3.

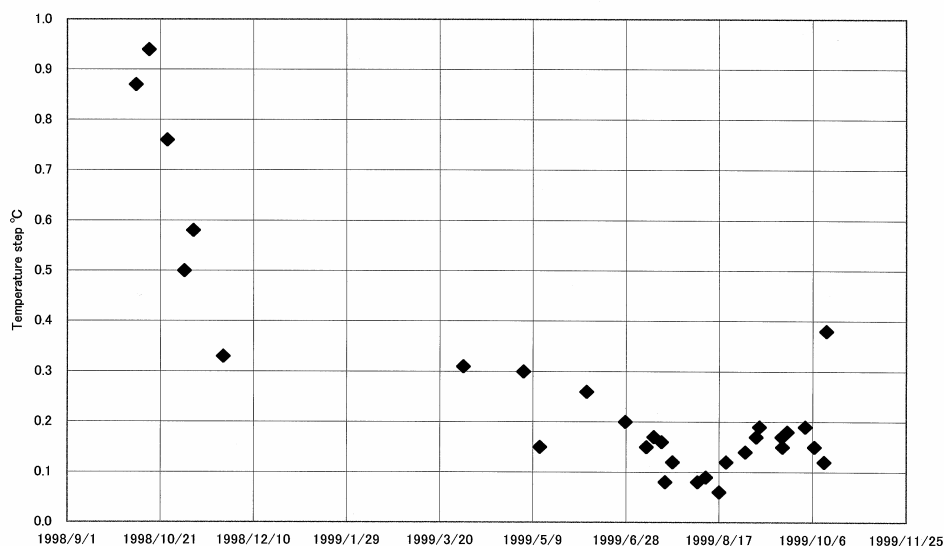


図 9 b. 測点 3 (黒倉姥倉分岐) の 70 cm 深における急激な温度上昇の温度幅の変化.

Fig. 9b Temporal variation of the temperature step of the sudden rise of the fumarolic temperature at Site 3.

時刻、終了時刻、温度の上昇幅などを示している。これらの上昇は気圧変動や降雨などとは関係せず、また見かけの噴気異常とも必ずしも対応していない。この温度の急上昇がどのような理由で生じているかは現段階では不明であるが、以下のような特徴が明らかとなった。図 9 a, b は、温度上昇が継続した時間および温度の上昇幅が活動の経過とともにどのように変化したかを示している。図を見ると、1998 年の際は温度が比較的長い時間をかけて大きく上昇していたのに対して、1999 年に入ってから温度上昇が短時間にかつ小規模に発生していることがわかる。このことは、地下の熱的变化がより短時間に表面の噴気温度の変化として現れるようになったことを意味しており、地下深部と地表との間のつながりがスムーズになったことを示すと思われる。1999 年 11 月以降、このような温度の急上昇は目立たなくなっている。

3-6 規模の大きい微動との関係

1999 年 11 月 12 日に比較的振幅の大きい微動が発生した。この微動に関連して噴気温度にどのような変化が生じるか大変興味を持たれる。検討した結果、この微動が発生した時期は 1999 年 4 月から 5 月にかけての地震の多発とそれに続く噴気温度上昇がほぼ止まった時期にあたり、長期的には目立った変化は現れていない。図 10 は黒倉姥倉分岐における 70 cm 深噴気温度の微動発生前後の変化を表示しているが、微動が発生した直後にわずかな上昇 (0.03°C) が見られる。この変化が、微動発生に伴うものであるかどうかは、もう少し事例を重ねないとよくわからない。なお、他の観測点では異常な変化は確認されていないが、温度分解能が 0.1°C であるため、仮に発生していたとしても検知できなかったであろう。

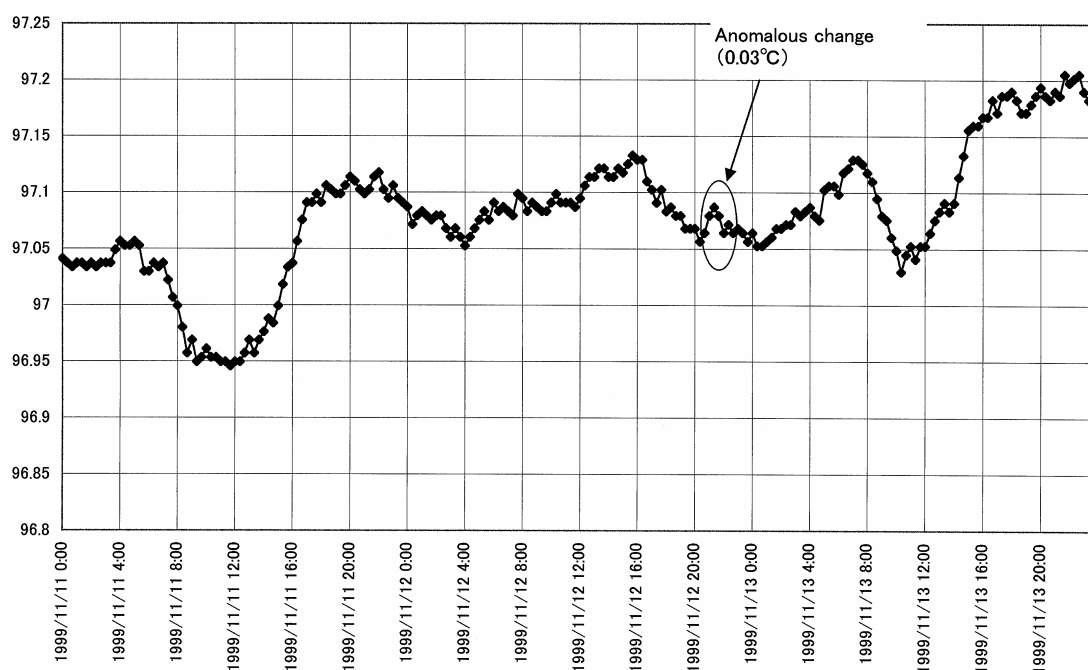


図 10. 1999 年 11 月 12 日の火山性微動発生に測点 3（黒倉姥倉分岐）における噴気温度の異常変化。

Fig. 10 Abnormal change of the fumarolic temperature at Site 3 associated with the volcanic tremor on November 12, 1999.

4. まとめ

岩手火山の黒倉・姥倉周辺において噴気温度観測を行った。この地域の噴気は、黒倉姥倉中間で最も高温の噴気が上昇しており、その周辺に、それよりは低温の比較的安定した噴気が噴出している。高温の噴気は300 hPa程度の過剰圧下で水が沸騰したものと思われる。1998年および1999年の2回の地震多発に続くように姥倉山東斜面で噴気温度の上昇が観測された。この上昇は姥倉山東斜面では1999年9月にほぼ止まっているが、黒倉山では上昇率が低下しているものの2000年4月末現在も継続している。この地域の噴気温度の変動は、相対的に低温の噴気が継続している状態で、黒倉姥倉中間を中心とした一帯に相対的に高温の噴気が上昇し、その噴出地域が黒倉山方向に拡大、姥倉山方向には拡大縮小を繰り返していると考えerことで説明が可能である。

謝 辞

本調査を実施するにあたり、岩手県の防災関係者、国民休暇村網張温泉関係者に様々な支援を受けた。東北大学理学研究科の浜口教授、植木助教授をはじめとする地震・噴火予知研究観測センター関係者には観測の実施に際して多くの協力を受けた。この紙面で謝意を表します。

引用文献

- 鍵山恒臣・小山悦郎（1997）噴気温度と大気圧との関係について．火山，42，423-428.
- 鍵山恒臣・小山悦郎・増谷文雄（1999）噴気温度と気圧の関係について（3）岩手火山姥倉噴気の特徴．1999年地球惑星関連学会合同大会，Vd-009.
- 東北大学理学研究科（1999）岩手山の地震活動と地殻変動（1998年10月～1999年1月）．火山噴火予知連会報，73，16-24.
- 根木まろか・鍵山恒臣・増谷文雄・長田昇・宗包浩志（1998）アルゴスシステムによる火山観測．火山，43，167-172.

岩手山の火山ガスと火山活動

平林 順一・野上 健治・大場 武

東京工業大学草津白根火山観測所

Relationship between Chemical Composition of Volcanic Gases and Volcanic Activity at Mt. Iwate, Japan

Jun-ichi Hirabayashi, Kenji Nogami and Takeshi Ohba

Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology

The chemical and isotope compositions of fumarolic gases around the western Iwate volcano have been determined periodically since June 1998. The variations of chemical composition in fumarolic gases from O-Jigoku indicate that volcanic activity is gradually increased since June to September 1998. The isotope composition of gas condensate indicates that water vapors are mainly of magmatic origin. The $\text{SO}_2 / \text{H}_2\text{S}$ ratio, $\text{HCl} / (\text{HCl} + \text{Total S} + \text{CO}_2)$ ratio, concentration of H_2 in residual gas and outlet temperature drastically changed on May 1999 accompanying increase of fumarolic activity at O-Jigoku, Mt. Kurokura and Mt. Ubakura. Afterwards, a lot of small-scale fumaroles have formed along the ridge from Mt. Kurokura to Mt. Ubakura, and their activity gradually increased.

1. まえがき

現在岩手山では、東岩手の妙高岳の斜面および御室火口内、西岩手の大地獄谷、黒倉山と姥倉山を結ぶ稜線上、網張温泉元湯などに噴気活動がある。このうち最も活発な噴気活動が見られるのは、1919 年に小規模な水蒸気爆発が起こった大地獄谷である。また、黒倉山、姥倉山の噴気活動は 1999 年 4 月頃から活発化し、黒倉山から姥倉山の稜線の北斜面では百ヶ所を超える噴気孔が確認されている。また南斜面や姥倉山頂付近でも新たな噴気活動が確認されている。特に黒倉山頂の噴気活動は活発で、時として噴気が 1 km 以上たなびくことがある。同火山におけるこれまでの火山ガス観測は、気象庁の検知管による観測を除けば極めて少なく、1960 年に野口ら(1960)と 1970 年の気象庁(1970)によって実施されたのみである。

西岩手、大地獄谷の噴気温度は 1969 年の調査時(鈴木ほか, 1970)に最高 124℃ が観測されているが、それ以前の噴気温度、化学組成については不明である。大地獄谷では 1970 年に最高 133℃ の噴気が観測され、1987 年の最高温度は 123℃ であつた。それ以後 1997 年までは 95~105℃ で推移していた(仙台管区气象台, 1994, 1997 ; 盛岡測候所, 1998)。

一方、東岩手の噴気活動は 1934 年から 1935 年にかけて極めて活発で、盛岡市内からも噴気の立ち上るのが観測された(盛岡測候所, 1935)。東岩手、妙高岳山頂付近の噴気活動は 1970 年代前

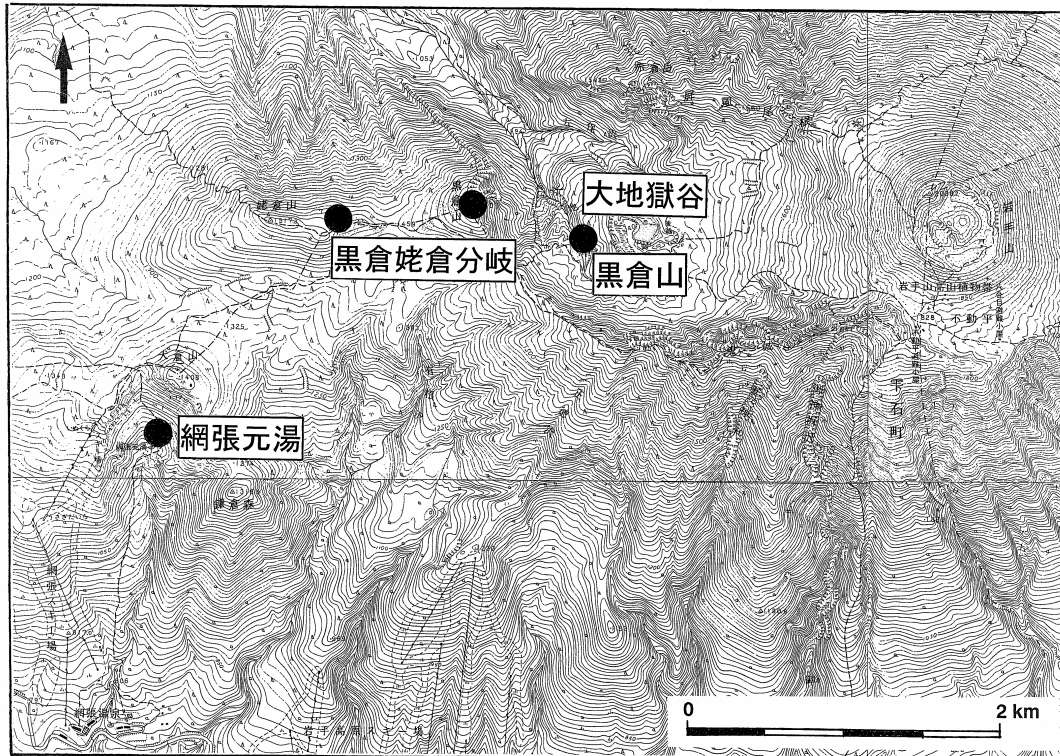


図1．岩手山における火山ガス採取地点(●印)．

半までは活発な状態が続いた．1960 年の調査時には、噴気の最高温度は 360°C を越えていた．1970 年には噴気活動はやや弱くなったが、最高温度は 304°C であった．妙高岳および御室火口の噴気温度は、1987 年以降は 100°C 以下であり、噴出圧力も弱い状態で現在まで推移している．

岩手山では 1998 年から火山性地震の多発や山体の南北方向の拡大などが観測され、6 月からは微動も観測されるようになるなど噴火の発生が危惧されるようになり、地震観測、地殻変動観測、電磁気観測、熱観測などの強化が図られている．筆者らは、1998 年 6 月から 1999 年 10 月までの間に大地獄谷、網張元湯、黒倉－姥倉間において火山ガスなどの現地調査を 6 回行った(図1)．本報告では、1998 までの調査結果(平林ほか, 1999)に 1999 年の調査結果を加え、火山ガスの温度、化学組成、同位体組成などと火山活動との関連についてまとめた．

2．現地の状況と試料採取

2-1 大地獄谷の噴気活動

大地獄谷には複数の噴気孔があるが、このうち斜面上部とその下の硫黄尖塔の噴気活動が活発である．また、大地獄谷右岸および左岸の数ヶ所からは温泉の湧出が見られる．大地獄谷においては、1998 年 6 月 2 日、7 月 24 日、9 月 10 日、1999 年 5 月 12 日、8 月 17 日、10 月 14 日の 6 回現地調査を実施し、同地域の南側にある硫黄尖塔(以後 No. 1 噴気と呼ぶ)および大地獄谷上部(以後 No. 2 噴気と呼ぶ)の 2 ヶ所においてガス採取を行った．1998 年 6 月の調査時の No. 1 噴気の温度は 110°C 、上部の No. 2 噴気は 135°C であった．同調査時には、大地獄谷噴気地帯の北側に極小規模な噴火が起こったと思われる噴気孔が確認された．その径は $1.5\text{m} \times 3\text{m}$ で、周辺の $3\text{m} \times 8\text{m}$ の範囲に硫黄混じりの灰色の噴出物が堆積していた．同噴気孔の温度は 95°C であった．同年 7 月 24 日の調査時の状況は、6 月の調査時と比較してやや噴気量が減少していた．同年 9 月

10日の大地獄谷の状況は、前2回の調査時と比べてやや噴気量が増加していた。また、大地獄谷上部右岸の壁から96.7℃の熱泥水の湧出が顕著であった。

1999年5月の調査時には、No. 1噴気の圧力は弱く、温度も102℃と低下していたが、No. 2噴気孔は硫黄尖塔が著しく成長し、温度は143℃と前年に較べて約10℃上昇し、噴出圧力も強くなっていた。また、噴気孔周辺は火山ガス成分の反応や酸化によって生成した硫黄が広範囲に沈積していた。No. 2の噴出状態は同年8月、10月の調査時も同様であった。

2-2 姥倉－黒倉分岐地点

黒倉山と姥倉山を結ぶ稜線上には数ヶ所に噴気活動が見られるが、いずれも噴出圧力は弱く、硫黄化合物の臭気は感じられず、温度も低く70～95℃であった。このうち、黒倉－姥倉分岐地点の噴気ガスを1998年7月24日、9月10日、1999年5月12日、8月17日、10月14日に採取した。

2-3 黒倉山頂

黒倉山頂には今回の火山活動が活発化する前から弱い噴気があったが、1999年5月頃から徐々に噴気活動が活発化しはじめた。5月には噴気が数十メートルたなびく噴気ランク3が観測され、同年9月には噴気が1 km～1.5 km たなびく噴気ランク5が観測された。11月にはさらに噴気活動が活発なランク7が観測されるようになり、2000年2月以降の噴気活動はいずれもランク5以上となった(噴気ランクは土井の基準、私信)。黒倉山頂では、1999年10月14日に95℃のガスを採取した。

2-4 網張元湯

網張元湯付近では、ボーリングによって蒸気を取り出しこれに水を加えて温泉を造成しており、周辺に弱い噴気活動が存在する。また、沢水が溜まった池では、ガスが噴騰状態で噴出しており、その温度は90.9℃であった。ここでは1998年6月2日に97.6℃の圧力の弱い噴気ガスを採取した。

3. 火山ガスの採取・分析法

噴気ガスは、噴気孔にチタンパイプを挿入しアルカリ溶液(5N KOH 20 ml)の入った注射器を接続し、注射器内の液量が40～50 mlになるまでガスを導入して採取した。また、SO₂とH₂Sの比を求めるために0.05MのKI-KIO₃溶液にガスを導入して採取した。採取後、注射器内の液相の体積を読み取り、増加分をH₂O量とした。液相は100 mlとし、吸収された各ガス成分を下記の方法で分析した。また、アルカリ溶液に吸収されず注射器内に残っている気相(残留ガス、Rガス)は体積を読み取った後、ガラスアンプルに移し持ち帰り、ガスクロマトグラフ法で分析した。

1) アルカリ溶液を用いてのガス成分の分析

HCl：チオシアン酸水銀法

Total S：酸化後、硫酸バリウム重量法

CO₂：微量拡散分析法

2) Rガスの分析(ガスクロマトグラフ法)

表 1. 岩手山大地獄谷で採取した噴気ガスの化学組成

Date	Temp. °C	AET °C	H ₂ O V%	水以外のガス組成 (V%)					Rガスの組成 (V%)				
				HCl	SO ₂	H ₂ S	CO ₂	R	He	H ₂	N ₂	CH ₄	Ar
'98.6.2	110	216	98.4	3.53	1.04	20.2	74.7	0.53	0.035	1.46	98.1	0.100	0.266
'98.7.24	106	200	98.7	6.90	2.13	17.9	72.7	0.42	0.042	0.925	98.7	0.117	0.237
'98.9.10	109	249	98.6	0.92	3.38	18.9	76.2	0.52	0.034	3.66	95.9	0.086	0.320
'99.5.12	102.6	212	98.8	3.21	4.29	16.5	75.5	0.46	0.038	1.56	97.8	0.141	0.463
'99.8.17	98	189	98.9	2.60	3.54	16.8	76.8	0.24	0.037	1.57	98.0	0.134	0.246
'99.10.14	101	225	98.6	0	4.03	19.9	75.6	0.49	0.036	1.63	97.8	0.180	0.317
'98.6.2	135	382	98.0	2.35	1.36	26.5	68.8	1.03	0.01	49.6	50.1	0.167	0.075
'98.7.24	134	246	98.7	3.06	2.64	25.2	68.7	0.37	0.035	5.55	93.5	0.699	0.216
'98.9.10	135.6	247	98.5	7.17	3.61	25.1	63.7	0.39	0.035	6.31	93.6	0.065	---
'99.5.12	143	479	98.3	23.8	4.43	18.8	50.2	2.69	---	92.8	7.28	0.099	---
'99.8.17	139	388	98.2	19.1	5.30	19.6	55.3	0.72	---	55.5	44.4	0.140	---
'99.10.14	146	391	98.1	5.98	6.71	27.0	59.5	0.84	---	50.5	49.1	0.171	0.220

He, H₂, O₂, N₂, CH₄ : 検出器 : TCD, カラム : MS5A, キャリヤーガス ; Ar

Ar : 検出器 : TCD, カラム : MS5A, キャリヤーガス ; O₂

3) SO₂/H₂S比

ヨウ素とSO₂, H₂Sが反応し生成した硫黄と硫酸イオンは, それぞれ硫酸バリウム重量法で分析し, 両者の比を求めた.

4. 火山ガスの化学組成と火山活動

4-1 大地獄谷の噴気ガス組成と火山活動

4-1-1 ガスの化学組成の特徴と温度

大地獄谷でガス観測を行っている2ヶ所の噴気ガスの温度および化学組成を表1に示した. 両噴気ガスの化学組成は, 主成分であるH₂O含有量が98.1~98.9%で, 観測期間内に大きな変化は認められない. 水を除いたDry gas成分は, HClが0~23.8%, SO₂が1~6.7%, H₂Sが16.5~27%, CO₂が50~77%である. これらガス成分で特徴的なことは, 温度が110℃~140℃と比較的低温である割にはHCl含有量が高いことである. また, アルカリ液に吸収されない, 残留ガス(Rガス)成分は, No. 1噴気ではN₂が主成分で, これに若干のHe, H₂, CH₄, Arが含まれる. 一方, No. 2噴気ガスでは, H₂濃度が高い特徴を持っている.

硫黄チムニーからのNo. 1噴気の温度は, 1998年6月には110℃で同年9月の間に大きな変化はなく106~110℃であったが, 1999年5月は102.6℃, 8月は98℃, 10月は101℃と1998年に較べて低下した. 一方, 上部のNo. 2噴気の温度は, 1998年は135℃前後で変化は認められなかったが, 1999年は5月が143℃, 8月が139℃, 10月が146℃で, 1998年に較べて約10℃上昇した. また, 火山ガス組成からSO₂+3H₂=H₂S+2H₂Oの反応を用いて見掛けの平衡温度(AET)を求めると, No. 1噴気のAETは200~250℃で観測期間に大きな変化はないが, No. 2噴気のAETは, 1998年6月が380℃と高かったが, 7月, 9月は250℃に低下した. しかし, 1999年5月には480℃に上昇し, 以後も約400℃と高い(図2).

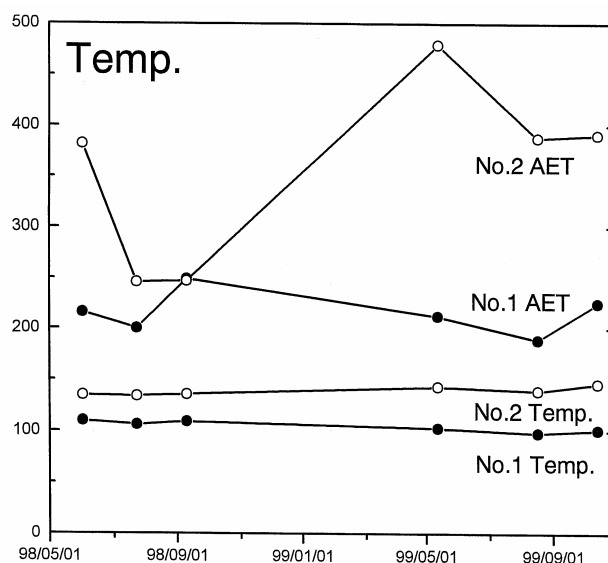


図2. 岩手山大地獄谷の噴気温度および見かけの平衡温度(AET).

平衡温度は, SO₂+3H₂=H₂S+2H₂Oの反応より求めた.

4-1-2 噴気ガスのSO₂/H₂S比

両噴気ガスの化学組成の変化を見るために、図3にSO₂とH₂Sの割合の変化を示した。

一般的に、火山活動が活発な時にはSO₂/H₂S比の値が大きくなることが知られている。このことは、硫黄ガス成分の反応 $\text{SO}_2 + 3\text{H}_2 = \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ が、温度が高くなると、言い換えれば火山活動が活発になると、左に進み SO₂/H₂S比が大きくなることで説明される。例えば、草津白根山では1976 年水釜噴火の約1年前からこの割合が大きくなり、同噴火の予知に有効な判断指標の一つ

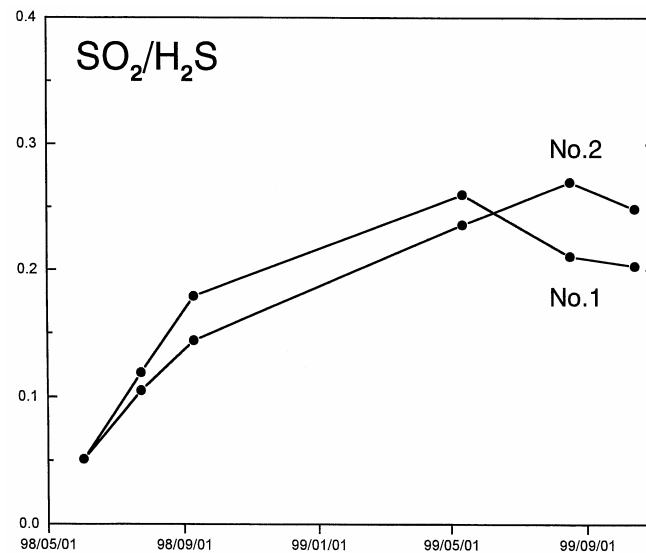


図3．岩手山大地獄谷の噴気ガス中のSO₂/H₂S比の経時変化。

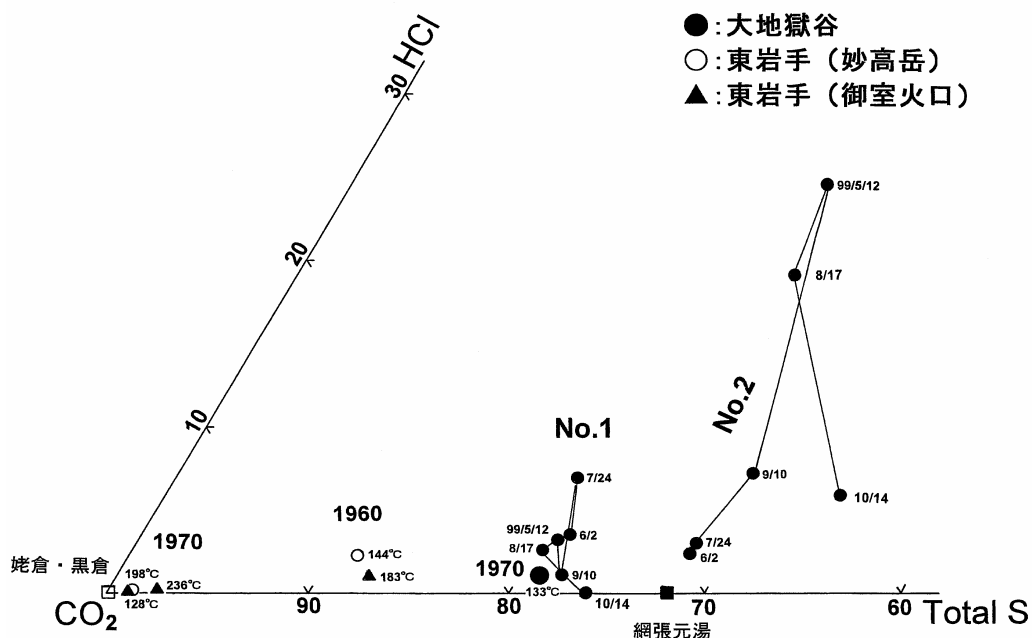


図4．岩手山大地獄谷の噴気ガス中のHCl, Total S, CO₂ 3成分図．東岩手山妙高岳，御室火口の1960年と1970年の噴気ガスの組成比も示した．図中●に添えた6/2, 7/24, 9/10は採取月日を示す．□は黒倉姥倉分岐地点のガス組成比．

となった(Ossaka et al., 1980).

図3に示したように大地獄谷の噴気ガス中の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化は、1998年6月が0.05、7月が0.10、9月が0.15、1999年5月が0.25と時間経過とともに大きくなり、以後10月まで0.2~0.25と大きな値である。

大地獄谷の噴気ガスの $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化は、これまでの他の火山で観測された火山活動と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の関連から、明らかに西岩手では1998年以降徐々に火山活動のレベルが高まっていることを示唆していると言える。

4-1-3 噴気ガスのHCl, Total S, CO_2 の割合

図4にHCl, Total S, CO_2 の割合の変化を示した。図には東岩手、妙高岳および御室火口の1960年および1970年のガス組成比、1970年の大地獄谷のガス組成比も併せて示した。HCl, Total S, CO_2 の割合は、温度が高く活動的な火山からの噴気ガスはHClやTotal Sの割合が大きく、火山活動が沈静化すると CO_2 の割合が増加する(平林ほか, 1985, 1988; Hirabayashi et al., 1990)。

1998年の大地獄谷噴気ガスの3成分割合は、1970年調査時の割合に比べ、No. 1, No. 2両噴気ガスともHCl, Total S成分が多い。1998年のNo. 2噴気ガスの変化は、Total Sの割合は約30%でほとんど変化はないが、HClの割合は1998年6月が2.4%、7月が3.1%、9月が7.2%と時間経過と共に増加し、1999年5月には25%に急増した。その後は8月が20%、10月が7%と減少した。

これらの噴気ガスの組成変化は、1998年の大地獄谷は1970年に比べて、同地域の火山活動度が高いことを意味している。また、No. 2噴気ガスの組成変化は1998年6月から9月にかけて徐々に活動レベルが高まり、1999年5月にはさらに活動レベルが高まったことを示していると言える。

一方、東岩手の妙高岳および御室火口の噴気ガスの1960年と1970年の組成比を較べると、両者とも1970年のガスは CO_2 に富み、この間にこの地域の活動レベルが下がっていることを示している。

4-1-4 噴気ガスの H_2 濃度

図5に噴気ガスのRガス中の水素ガス(H_2)濃度の変化を示した。一般に H_2 は高温の噴気ガス中に高い濃度で含まれ、その変化は火山活動と関連していることが指摘されている(Ohnishi et al., 1981; Hirabayashi et al., 1986)。また、水蒸気爆発を繰り返す草津白根山においても爆発発生前に H_2 濃度の増加が観測されている(小坂ほか, 1984)。水素ガスの前駆的な濃度増加は、直前に見られることが多く桜島火山では爆発活動の活発化に10日から数週間先行して観測された。草津白根山においても、噴火発生約1週間前に濃度増加が観測された。

大地獄谷No. 1噴気ガス中の H_2 濃度は1998年6月~1999年10月の間に大きな変化は認められていないが、No. 2噴気のRガス中の H_2 濃度は、1998年6月50%と高かったが、その後は5~6%に低下した。しかし、1999年5月の H_2 濃度は98%となり残留ガスのほとんどが H_2 となった。その後 H_2 濃度は低下したが45~50%と高い濃度である。前章で述べたように1998年6月の調査時に微噴火発生痕跡が認められたこと、5月末に山麓から噴気が高く立ち上るのが目撃されていること、地震観測資料(東北大学, 私信)によれば1998年4月から6月上旬にかけて大地獄谷付近の下での地震活動が比較的活発であったことなどに対応している。また、1999年5月の高い H_2 濃度は、大地獄谷、黒倉山、姥倉山の噴気活動が活発化した時期と対応している。

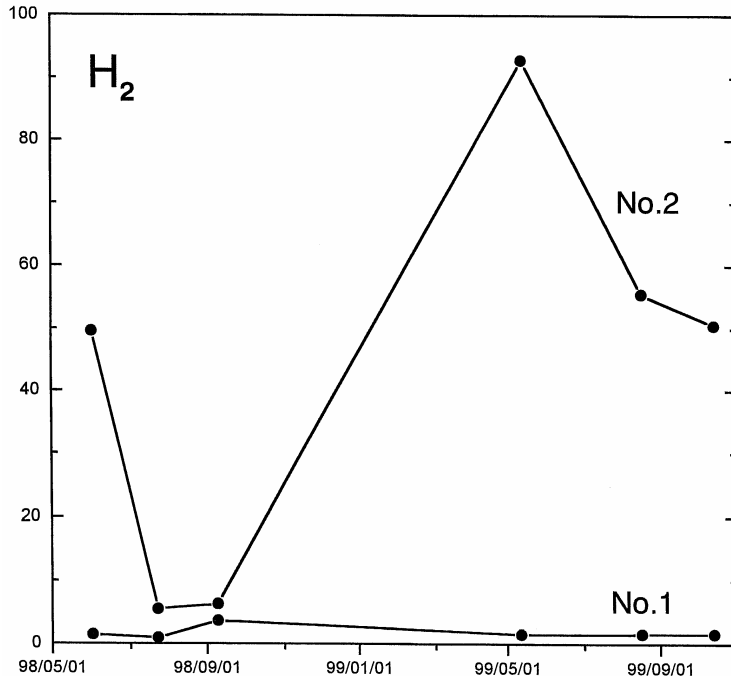


図 5. 岩手山大地獄谷の噴気ガス中のH₂濃度変化.

4-2 黒倉一姥倉分岐地点の噴気ガスの化学組成

噴気ガスの温度は1998年6月には86℃であったが、7月以降は95℃前後と約10℃上昇した。1998年7月のガス組成はH₂Oが約55%、CO₂が10%、Rガスが35%である。RガスのO₂濃度は18～19%、N₂濃度が80～81%であることから、噴気ガスには多量の空気の混入が考えられる。Rガスには混入した空気と若干のHe、H₂、CH₄が含まれる。1999年5月以降の噴気ガスには空気の混入が徐々に少なくなり、Dry gasはCO₂が65%から85%となった。またRガスのH₂濃度も高くなり、1999年8月には18%となった。また、8月のガスにはH₂Sがわずかに含まれていた(表2)。

これら噴気ガスの化学組成は、大地獄谷の組成とはHCl、SO₂、H₂Sが含まれていない点で大きく異なるが、1999年以降のCO₂濃度、H₂濃度の変化は火山活動の活発化と活動範囲の拡大を反映したものである。

4-3 網張元湯の噴気ガスの化学組成

噴気ガスは、温度が96.7℃であり、沸点を越えている。ガス成分はH₂Oが主成分で99.2%である。Dry gasの成分ではH₂SとCO₂が主成分であるが、Rガスが13%と多い。RガスにはO₂が14%含まれ、黒倉一姥倉分岐地点のガスと同様に網張元湯でも空気の混入が多い。またRガスにはH₂、CH₄が同程度含まれている(表2)。

4-4 黒倉山頂の噴気ガスの化学組成

1999年10月14日に黒倉山頂で採取した噴気ガスは温度が95℃で、空気の混入が多い。Dry gasはSO₂、H₂Sが含まれずCO₂が主成分である。Rガスは混入した空気を除けばN₂が主成分でH₂が0.1%である。またRガスにはCH₄は検出されなかった(表2)。黒倉山頂の噴気ガスは、温度やH₂OとCO₂が主成分であることなどを考えると、黒倉一姥倉分岐地点の噴気ガスと同じ起源と噴出過程であると考えられる。

表 2. 黒倉一姥倉分岐地点, 黒倉山頂, 網張元湯の噴気ガスの化学組成

Locality	Date	Temp. °C	H ₂ O V%	水を除いた組成 (V%)				R ガスの組成 (V%)				
				H ₂ S	CO ₂	R	He	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	Ar
黒倉一姥倉分岐地点	'98.6.2	86										
	'98.7.24	94.2			19.5	80.5	0.0008	0.0415	19.8	80.0	0.0953	
	'98.9.10*1	94.7					0.001	0.371	17.6	81.1	0.0186	0.874
	'99.5.12*2	94.3			64.8	35.2		1.68	15.0	82.4	tr	0.92
	'99.8.17*3	94	96.9	0.77	86.9	12.3		18.1	6.16	74.9	0.067	0.793
	'99.10.14*4	96	92.1		83.9	16.1		1.21	14.6	83.2	0.019	0.981
網張元湯	'98.6.2	96.7	99.2	24.4	62.2	13.4	0	1.81	14.0	78.4	1.88	0.910
黒倉山頂	'99.10.14	95	75.1		18.4	81.6		0.0059	19.9	79.0	0	1.097

*1 CO₂/ H₂O=0.14, *2 CO₂/ H₂O=0.033, *3 CO₂/ H₂O=0.028, *4 CO₂/ H₂O=0.071

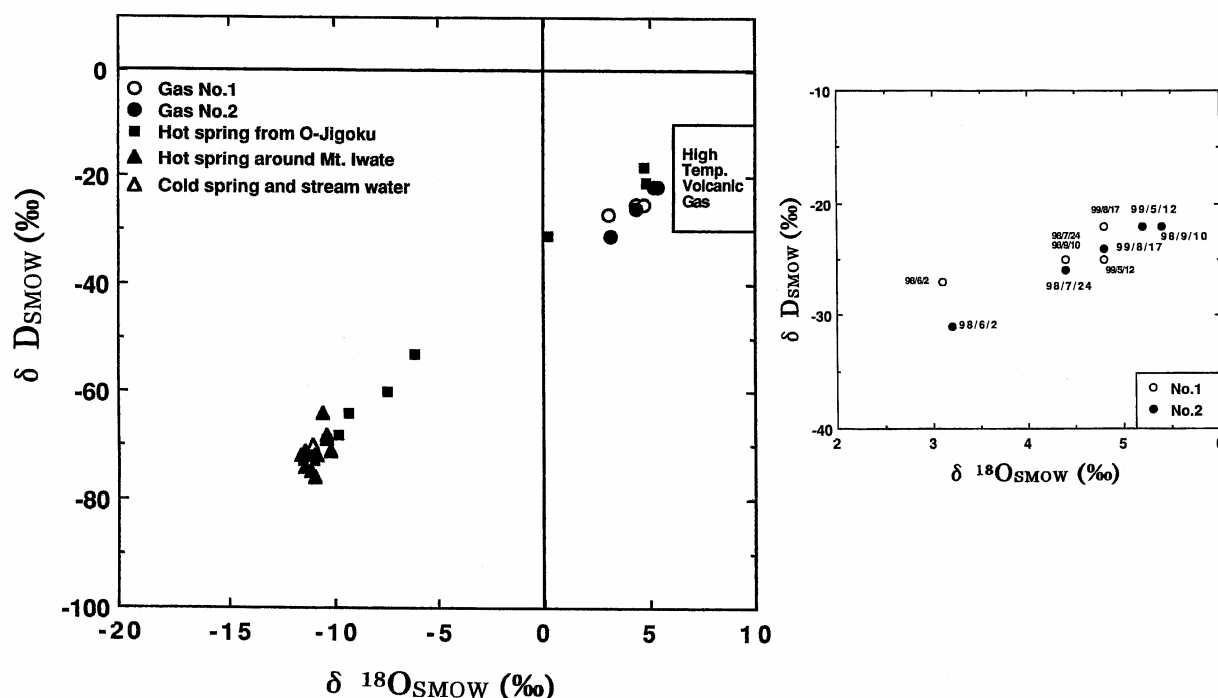


図6. 岩手山大地獄谷の噴気ガス凝縮水の酸素、水素同位体組成. ○：大地獄谷 No. 1 噴気ガス，●：大地獄谷 No. 2 噴気ガス，□：大地獄谷および岩手山周辺の湧水. ●に添えた 6/2, 7/24, 9/10 は採取月日を示す.

5. 噴気ガス凝縮水の酸素、水素同位体比および炭素同位体比

図6に大地獄谷で採取した火山ガス凝縮水、温泉水および周辺の温泉水の酸素、水素同位体比を示した. 大地獄谷の噴気ガス凝縮水の酸素、水素同位体比は、一般的なマグマ性のガスが持つ同位体比と同地域の天水を結ぶ線上にプロットされ、マグマ性ガスの値に近い. No. 2 噴気ガス凝縮水の同位体組成の時間経過に伴う変化は、酸素同位体比が、1998年6月から1999年5月の間に $+3.2\text{‰} \rightarrow +4.4\text{‰} \rightarrow +5.4\text{‰} \rightarrow +5.2\text{‰}$ と変化し、水素同位体比も $-31\text{‰} \rightarrow -26\text{‰} \rightarrow -22\text{‰} \rightarrow -22\text{‰}$ に変化しており、徐々にマグマ起源のガスの値に近づいている. その後の同位体組成は徐々に軽くなり、1999年10月にはほぼ1998年6月の値に近くなった. 1998年6月から1999年5月にかけて大地獄谷噴気ガス中の水の大部分はマグマからもたらされたものであること、時間経過に伴ってその割合が多くなったことは、前章で述べた噴気ガスの化学組成の変化と調和的で、酸素、水素同位体比からも1998年6月から1999年5月にかけて大地獄谷地域の活動レベルが高くなったことを示している.

尚、噴気ガス中の CO_2 の炭素同位体比 ($\delta^{13}C$) は $-3.2\text{‰} \sim -3.7\text{‰}$ の範囲にあり、大地獄谷の噴気ガス中の CO_2 はマグマから直接もたらされたものである.

6. まとめ

岩手山の地震活動は、その震源が東岩手のやや深い場所から西側の浅い場所に移動した. 1998年9月3日のM6.1の地震発生後は西岩手での地震は極端に少なくなったが、1999年4月から6月にかけて犬倉山、姥倉山の下での地震活動が活発となった. その後も1999年11月、2000年1月～2月に同地域での地震活動はやや活発であった(東北大学資料).

西岩手の表面活動は、1999 年 5 月頃から大地獄谷近くの通称「西小沢」や黒倉山から姥倉山にかけての稜線上および南北両斜面での新たな噴気の出現とその拡大が観測されるようになるなど徐々に活発となった。特に黒倉山頂部の噴気活動は極めて活発で時として噴気が数 km たなびくようになった。黒倉山頂の噴気温度も 1999 年 10 月以降徐々に上昇し、2000 年 2 月までに約 3℃ 高くなり、黒倉一姥倉分岐地点の噴気温度も上昇した(本誌、鍵山ほか)。

これら地震活動、黒倉山一姥倉山間の噴気温度、噴気活動の拡大などの結果と大地獄谷の火山ガスが時間経過とともにマグマの寄与が大きくなったこと、化学組成の多くが火山活動の活発化を示唆する変化をしていることを考え併せると、大地獄をはじめ黒倉山、姥倉山など西岩手山の火山活動は確実に高まっていると言え、今後の噴気ガスの化学組成、凝縮水の同位体組成などの変化が注目される。

参考文献

- 平林順一・小坂丈予・小沢竹二郎・吉田 稔 (1984) 1983 年三宅島噴火後の火山ガスの組成変化と火山昇華物. 火山, 29, S308-S316.
- Hirabayashi, J., Ossaka, J. and Ozawa T. (1986) Geochemical study on volcanic gases at Sakurajima volcano, Japan. J. Geophys. Res., 91, 12167-12176.
- 平林順一・吉田 稔・小坂丈予・小沢竹二郎 (1988) 伊豆大島火山の 1986 年噴火活動に伴う火山ガスの組成変化. 火山, 33, S271-S284.
- Hirabayashi, J., Yoshida, M. and Ossaka, J. (1990) Chemistry of Volcanic Gases from the 62-1 Crater of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. of Japan, 35, 205-215.
- 平林順一・大場 武・野上健治 (1999) 岩手山の火山ガス. 月刊地球, 21, 5, 285-289.
- 鍵山恒臣・小山悦郎・平林順一・野上健治・岩手県 (2003) 岩手山姥倉黒倉地域の噴気温度. 1999 年岩手火山集中総合観測報告, 79-84.
- 気象庁 (1970) 岩手山. 火山機動観測報告, 6, 29-51.
- 盛岡測候所 (1935) 岩手火山について. 測候時報, 6, No. 10, 1-10.
- 盛岡地方気象台 (1998) 岩手山の火山活動. 岩手山火山活動対策検討会資料, 1-9.
- 野口喜三雄・上野精一・一国雅巳・後藤達夫 (1961) 岩手火山山頂の噴気の化学成分. 火山, 5, 163-168.
- Ohnishi, T. and Kamada, M. (1981) Correlation between minor constituents of volcanic gas at Mochiki and the volcanic activity of Sakurajima volcano. Abst. 1981 IAVCEI Symposium, 278- 279.
- Ossaka, J., Ozawa, T., Nomura, T., Ossaka, T., Hirabayashi, J., Takaesu, A. and Hayashi, T. (1980) Variation of Chemical Compositions in Volcanic Gases and Water at Kusatsu-Shirane Volcano and Its Activity in 1976. Bull. Volcanol. 43, 207-216.
- 小坂丈予・平林順一・小沢竹二郎 (1984) 草津白根火山近年の活動と地球化学的調査・研究. 火山ガス測定による噴火予測に関する基礎研究報告書(代表, 小坂丈予), 96-112.
- 仙台管区気象台 (1994) 岩手山. 東北地域火山機動観測実施報告書, 13, 28-62.
- 仙台管区気象台 (1997) 岩手山. 東北地域火山機動観測実施報告書, 161-36.
- 鈴木次郎・笠原 稔・寺出幸次・井原直人 (1970) 岩手火山群中の噴気地における地温測定について(その 1). 東北地域災害科学研究報告書(昭和 44 年度), 29-34.

観測結果のまとめ

植木 貞人

東北大学理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

Summary of Observations

Sadato Ueki

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University

A comprehensive joint observation was carried out at Iwate volcano, NE Japan, in 1999 as a part of the National Project for Prediction of Volcanic Eruptions. The objective of the observation was to evaluate the state of the volcano one year after the magma intrusion, that caused significant seismic activity and ground deformations in 1998. Observations of seismic activity, ground deformation, gravity change, volcano-magnetic effect, self potential, geothermal activity, geochemistry of gases and temporal change in velocity structure were executed. The results of the observations suggest that the magma which intruded into the shallow part of the volcano was still active in 1999, but the level of the activity was evidently lowered compared to that in 1998.

1. はじめに

1999 年, 岩手火山において第 6 次火山噴火予知計画にもとづく集中総合観測が実施された. 同火山では 1998 年に活発な地震活動と明瞭な地盤変動が観測され, 浅部にマグマが貫入したと解釈されている. したがって, この観測では, マグマ貫入から 1 年後の火山活動状況を調査することとなった. 観測は, 地震, 地盤変動, 重力, 電磁気, 熱, ガス, 速度構造変化など, 多項目について実施された. 観測結果の概要は以下のとおりである.

2. 観測結果の概要

1) 地震活動

1999 年に観測された浅部高周波地震の数は 1998 年の約 1/3 に減少したが, 深部低周波地震は約 3/4 の減少であり, やや深部低周波地震は 1.3 倍に増加した. これらは, 地殻深部におけるマグマの活動が衰えていないことを示唆する.

2) 火山性微動の到来方向

地震計アレイを用いた火山性微動の観測から, その到来方向を推定した. 火山性微動は, 岩手山山頂より西方の, 西岩手山黒倉山付近から到来していることが明らかになった.

3) 人工地震のアレイ観測

岩手山北東山麓で発生させた人工地震を北西山麓の地震計アレイで観測し、後続波の解析から散乱体の分布を求めた。散乱体は西岩手山ではなく、山頂の東南東で深さ 15km 程度までの範囲に存在すると推定された。

4) 速度構造の変化

6月と9月に、同一条件で人工地震観測を繰り返して実施した。得られた地震波形の解析から、この3ヶ月間に、岩手山山頂付近の浅部で0.1%程度の速度低下が生じた可能性が示された。

5) 地殻変動連続観測

孔井式歪計、傾斜計による連続観測記録から、年周変動、地震応答、計器ドリフトなどを取り除いて、火山性地殻変動を抽出した。その結果、1998年8月頃と同様の変動が、変動率は低下したものの少なくとも1999年6月まで継続していたことが示された。また、地殻変動と地震活動の関係が議論された、前者が後者に大きな影響を与えたと結論付けられた。

6) 傾斜観測と水準測量

新たに開発された地表設置型傾斜計を用いて多点観測を実施した。その結果、温度特性や磁場依存性が明らかになり、計器に改良が加えられた。傾斜計による観測結果と水準測量の結果は矛盾しない。

7) GPS連続観測

12点から成る2周波GPS観測網のデータから、変動率は約1/6と小さいものの、1998年と同様の地殻変動が、1999年半ばまで生じていたことが示された。その後1999年末までには、減圧・収縮を示す観測データは得られていない。

8) 水準測量による上下変動

1998年7月以降繰り返して行っている水準測量を、1999年5月と10月に実施した。その結果、1998年に顕著であった網張温泉から三石峠に至る地域での地盤隆起が、微少ながら1999年にも継続していることが明らかになった。変動源は、大松倉山付近の深さ1-4kmと推定された。

9) 重力変化観測

精密重力測定を繰り返して実施した。測定結果から測定値の誤差は±0.015mgal程度と見積もられた。この誤差を超える火山活動に関連した重力変化は観測されなかった。この結果は、地盤変動から推定される重力変化とも調和的である。

10) 山麓における全磁力連続観測

山麓の4点で全磁力連続観測を継続した。1nTの変化を検知できる観測であるが、火山活動に関連した変化は検出されなかった。貫入の規模が小さいか貫入物質の温度がキューリー点より低い、キューリー点深度が浅いことが、磁場変化が検出されなかった原因と考えられる。

11) 臨時観測による全磁力連続観測

山麓から山頂部を含めた岩手火山全域で、延べ12点の臨時全磁力観測を実施した。しかし、磁場変動検出限界と推定される1nTを超える全磁力変化は検出されなかった。

12) 自然電位調査

姥倉山付近の自然電位測定によって、局所的な負異常を除いて、広い範囲で正異常が観測された。正異常は、地熱活動に関連した地熱流体の上昇に対応するものと考えられる。

13) 地熱活動

地震活動の活発化に約1年遅れて、1999年3月になってから、西岩手山における地熱活動の活発化が観測された。黒倉山から姥倉山にかけて、噴気量の増大、噴気域の拡大、植物枯死帯の拡大などが認められた。

1 4) 噴気温度

黒倉山から姥倉山に至る領域の5点で、衛星テレメーターを用いた噴気温度・地中温度連続観測を実施した。黒倉山・姥倉山中間付近で最も高温の噴気が噴出しており、その周辺ではより低温の噴気が分布していることが明らかになった。

1 5) 火山ガス

1998年以降の繰り返し測定から、大地獄谷の噴気ガス中の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が上昇するなど、大地獄谷ならびに黒倉山、姥倉山の噴気ガスの化学組成は火山活動の活発化を示唆する変化を示していることが明らかになった。

3. まとめ

以上の観測結果は、1998年に貫入したマグマ活動は、活動レベルが1998年に比較して格段に低下したものの、1999年にも継続していたことを示している。

編集後記

本報告書は、1999年に岩手火山集中総合観測として実施された観測の報告をまとめたものである。原稿の多くは2000年春に提出していただいた。それにもかかわらず印刷・発行が大幅に遅れたのは、ひとえに編集担当者の不手際のためである。観測へ参加された皆様、観測へ協力していただいた皆様に対して、心よりお詫び申し上げます。

なお、観測実施から今日まで年月が経過しているために、この間に所属が変更になった方々がおります。連絡がとれない方もおりますので、本報告書では所属はすべて観測当時のままにしてあります。

編集担当者
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
植木 貞人

2006年8月 発行

編集兼発行者 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
〒980-8578 仙台市青葉区荒巻
電話 022-225-1950
