

岩手火山における水準測量による圧力源の推定 (1998年7月～2000年5月)

木股文昭^{*}・宮島力雄^{*}・高山鐵朗・山本圭吾・内田和也^{**}・中村めぐみ^{**}・松島 健^{**}・
平野舟一郎^{***}・八木原 寛^{***}・立花憲司^{****}・上田英樹^{****}・佐藤峰司^{****}・植木貞人^{****}・
辻 浩^{*****}・小山悦郎^{*****}・寺田暁彦^{*****}・森 濟^{*****}・鈴木敦生^{*****}・中坊 真^{*****}

^{*}:名古屋大学大学院理学研究科

^{**}:九州大学大学院理学研究院

^{***}:鹿児島大学理学部

^{****}:東北大学大学院理学研究科

^{*****}:東京大学地震研究所

^{*****}:北海道大学大学院理学研究科

^{*****}:京都大学大学院理学研究科

要旨

1997年から火山活動が活発化している岩手火山において、1998年7月に80の水準点からなる40kmの水準路線を設置する。水準測量は2000年5月までに7回実施した。3-6月間隔の水準測量から各期間とも1-2cmの岩手山西部域の隆起を観測する。隆起の上下変動から増圧の球状圧力源の推定を試みる。圧力源は測量を開始した1998年7月以降、西岩手山域に求まり、北西方向へ、深さも2kmから4kmへ移動していると推定する。圧力源での体積増加は1998年7月から2000年5月までの期間で $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ に過ぎない。

キーワード 岩手火山 水準測量 上下変動 火山体圧力源 球状圧力源

1. はじめに

岩手火山では、1997年後半から微小地震や低周波地震が活発化し、1998年春季には岩手火山から10kmも離れる国土地理院GPS観測点でも2cmに達するような地殻水平変動が観測された。

そこで、地殻上下変動から圧力源を議論する目的で、著者らは岩手火山南山麓に水準路線を急遽設置し、1998年7月から水準測量を開始した(木股ら,1999)。地殻上下変動を時間的に詳細に議論するため、水準測量を頻繁に反復し、2000年5月までの約2年間に7回、測量を実施した。

1999年9月3日に今回の水準路線直下でM6.1の岩手県内陸北部地震が発生した。まさに、測量中に遭遇したこともあり、地震に伴う地殻変動として最大20cmの上下変動を観測した(木股ら,1998,1999; Kimata et al, 1999)。地震に伴う地殻変動は非常に限られた地域のみで観測された。しかし、1998年10月の観測でもこの地震に伴う地殻余効変動と考えられる上下変動が検出された。

本論では、岩手県内陸北部地震時の変動を除いた上下変動から圧力源を推定し、その位置、規模を時間変動も含めて議論する。

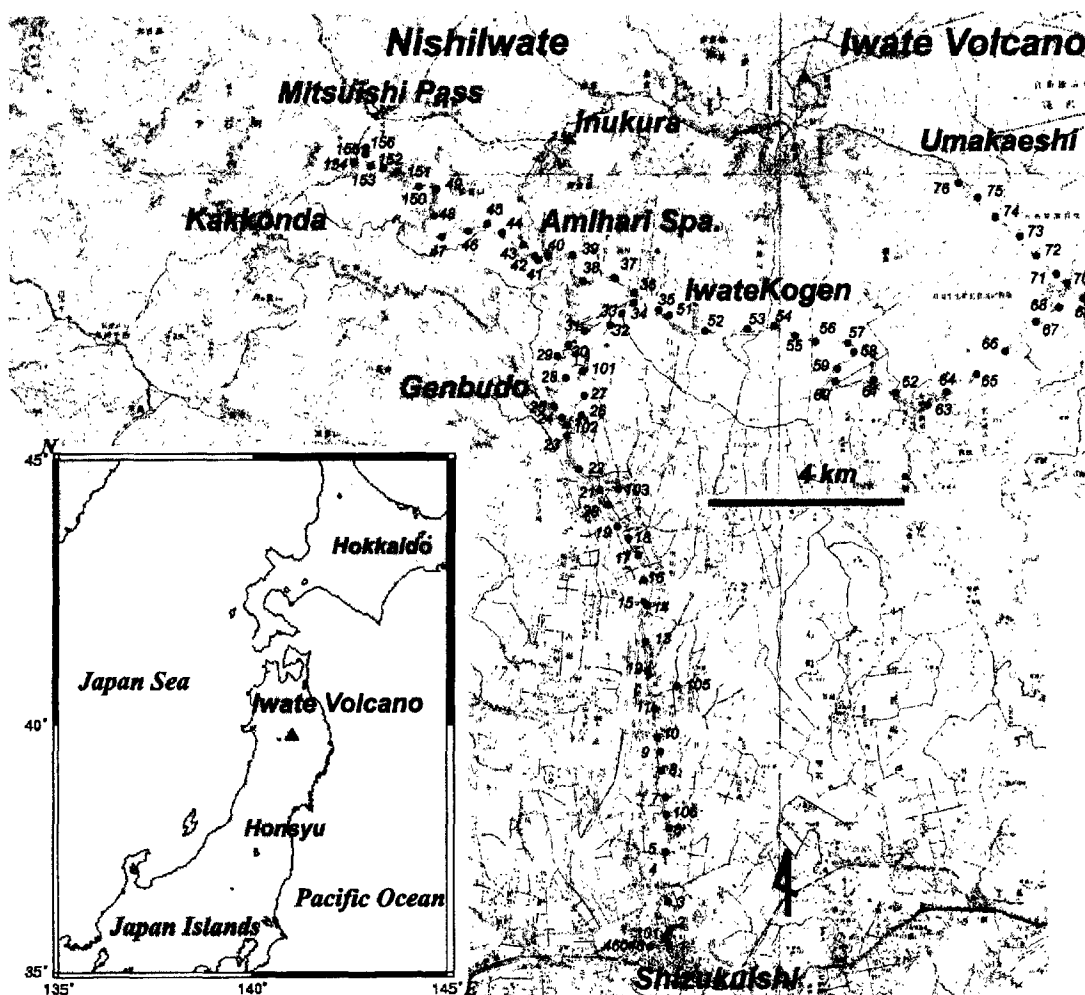


Fig.1 Location map of the Iwate Volcano leveling route.

Table 1 Periods and participants of the seven leveling epoch at the Iwate Volcano.

Period	Participants
1 July 16-26, 1998	Kimata, Miyajima, Takayama, Yamamoto, Uchida, Yakiwara, Tsuji, Koyama
2 August 31- September 3, 1998	Kimata, Miyajima, Takayama, Yamamoto, Uchida, Matsushima, Yakiwara, Sato, Tsuji, Mori, Suzuki
3 September 4-7, 1998	Kimata, Miyajima, Takayama, Yamamoto, Uchida, Matsushima, Yakiwara, Sato, Tsuji, Mori, Suzuki
4 November 2-8, 1998	Kimata, Miyajima, Takayama, Uchida, Hirano, Sato, Tsuji, Nakabo
5 May 20-27, 1999	Kimata, Miyajima, Takayama, Uchida, Nakamura, Matsushima, Hirano, Sato, Ueki, Tsuji, Koyama, Terada, Yamamoto, Mori
6 October 20-27, 1999	Kimata, Miyajima, Takayama, Uchida, Nakamura, Sato, Ueki, Tsuji, Koyama, Nikolay, Maguskin
7 May 20-27, 2000	Kimata, Miyajima, Takayama, Uchida, Nakamura, Hirano, Tachibana, Ueda

2. 岩手火山南山麓における水準測量

岩手火山周辺域における地殻上下変動を検出する目的で、著者らは1998年7月、Fig.1に示すように、岩手火山南山麓に80水準点からなる全長40kmの水準路線を設置した。背景として、当時、岩手火山山頂から10数kmも離れる国土地理院磐石GPS観測点で

も2cmに達する地殻水平変動がすでに観測されていた(国土地理院, 1998)。そのため、水準路線は、磐石市街地から西岩手の網張温泉まで北上し、そして、網張温泉から東方向に岩手高原を経て岩手火山の馬返し登山口に至る40kmの路線とした。

一方、球状圧力源の位置が地下浅部になると、たと

Table 2 List of the heights at the bench mark observed at each leveling epoch. Generally heights at benchmarks are referred to that at BM 46046 through the leveling period. At the leveling epoch of no link to BM46046, the benchmarks in the most southern as shown as *, is fixed in the epochs. The coordinates at the benchmarks are also listed. The coordinates are Tokyo data system.

BM	long.	lati.	distance	Jul-98	Sep-98	Sep-98	Nov-98	May-99	Oct-99	May-00
	E	N	km	m	m	m	m	m	m	m
46046	140.9683	39.6925	0.00	*0.0000	*0.0000		*0.0000	*0.0000		
1	140.9722	39.6925	0.32	0.0533	0.0534		0.0534	0.0535		
BM7	140.9708	39.6953	0.63	1.5616	1.5615		1.5615	1.5615		
2	140.9728	39.6972	0.99	-1.6602	-1.6602		-1.6598	-1.6601		
3	140.9731	39.7003	1.45	-3.0973	-3.0972		-3.0961	-3.0970		
4	140.9719	39.7053	1.99	1.4489	1.4486		1.4485	1.4467		
5	140.9725	39.7094	2.45	4.9533	4.9530		4.9524	4.9514		
6	140.9733	39.7139	2.96	11.8687	11.8672		11.8661	11.8648		
BM6	140.9728	39.7161	3.23	14.8299	14.8283		14.8274	14.8265		
7	140.9719	39.7181	3.48	16.9581	16.9568		16.9555	16.9569		
8	140.9711	39.7244	4.13	22.5182	22.5162		22.5162	22.5160		
9	140.9711	39.7267	4.40	26.6559	26.6544		26.6547	26.6544		
10	140.9703	39.7308	4.94	33.6506	33.6493		33.6501	33.6854		
11	140.9700	39.7350	5.42	40.4697	40.4685		40.4690	40.4699		
12	140.9678	39.7425	6.23	52.7658	52.7653		52.7687	52.7675		*52.7675
13	140.9675	39.7472	6.75	60.8736	60.8732		60.8756	60.8740		60.8733
14	140.9678	39.7539	7.55	72.1678	72.1677		72.1697	72.1682		72.1675
15	140.9678	39.7544	7.60	72.1473	72.1470	*72.1470	72.1488	72.1472	*72.1472	72.1463
16	140.9675	39.7589	8.08	80.2318	80.2317	80.2311	80.2336	80.2939	80.2948	80.2936
17	140.9664	39.7628	8.47	86.2416	86.2418	86.2411	86.2434	86.2420	86.2431	86.2418
18	140.9636	39.7664	8.98	96.0067	96.0075	96.0060	96.0089	96.0077	96.0087	96.0072
19	140.9611	39.7694	9.43	106.4275	106.4281	106.4254	106.4290	106.4282	106.4295	106.4281
20	140.9583	39.7739	10.03	118.6319	118.6328	118.6289	118.6337	118.6331	118.6352	118.6332
21	140.9567	39.7761	10.27	123.9546	123.9561	123.9514	123.9557	123.9559	123.9574	123.9549
22	140.9514	39.7794	10.98	141.3290	141.3298	141.5281	141.5328	141.5335	141.5355	141.5333
23	140.9486	39.7856	11.58	157.7470	157.7477	157.8712	157.8832	157.8816	157.8830	157.8827
24	140.9478	39.7883	12.00	173.9307	173.9311	174.0424	174.0587	174.0582	174.0576	174.0600
25	140.9447	39.7911	12.40	185.6338	185.6347	185.7052	185.7304	186.1587	186.1602	186.1629
26	140.9492	39.7897	12.82	198.7593	198.7595	198.7792	198.7841	198.7800	198.7790	198.7788
27	140.9539	39.7919	13.26	224.8899	224.8897	224.9055	224.9154	224.9104	224.9082	224.9083
28	140.9486	39.7956	13.86	255.4184	255.4193	255.4330	255.4436	255.4380	255.4378	255.4373
29	140.9464	39.8017	14.64	300.5033	300.5057	300.4849	300.4979	300.4911	300.4922	300.4912
30	140.9486	39.8025	14.99	321.9026	321.9053	321.9067	321.9233	321.9175	321.9201	321.9171
31	140.9528	39.8044	15.44	344.5555	344.5579	344.5573	344.5749	344.5686	344.5706	344.5662
32	140.9592	39.8056	16.04	354.7763	354.7784	354.7743	354.7911	354.7847	354.7867	354.7813
33	140.9625	39.8078	16.44	379.0761	379.0780	379.0739	379.0919	379.0853	379.0868	379.0818
34	140.9642	39.8103	16.88	400.8023	400.8047	400.8000	400.8179	400.8094	400.8124	400.8064
35	140.9697	39.8083	17.42	411.2384	411.2394	411.2332	411.2496	411.2402	411.2428	411.2362
36	140.9647	39.8117	18.00	432.0424	432.0449	432.0423	432.0595	432.0544	432.0584	432.0499
37	140.9600	39.8144	18.49	466.8430	466.8467	466.8452	466.8631	466.8535	466.8600	466.8505
38	140.9528	39.8136	19.19	480.3996	480.4042	480.4037	480.4236	480.4147	480.4220	480.4141
39	140.9506	39.8183	19.79	507.4737	507.4795	507.4833	507.5039	507.4978	507.5062	507.5003
40	140.9439	39.8183	20.41	537.1896	537.1991	537.2093	537.2305	537.2246	537.2316	537.2256
41	140.9394	39.8183	20.76	548.1561	548.1663	548.1597	548.1802	548.1728	548.1807	548.1731
42	140.9408	39.8180	20.79			551.2689	551.2913	551.2858	551.2944	551.2882
43	140.9373	39.8203	21.29				586.8483	586.8452	586.8529	586.8476
44	140.9327	39.8227	21.86				622.9048	622.9055	622.9137	622.9170
45	140.9287	39.8243	22.24				642.9577	642.9617	642.9713	642.9679
46	140.9239	39.8237	22.68					665.6659	665.6766	665.6730
47	140.9172	39.8223	23.30					715.3886	715.3999	715.3974
48	140.9150	39.8251	24.04					752.7123	752.7264	752.7243
49	140.9170	39.8311	24.78					750.3802	750.3944	750.3927
150	140.9144	39.8314	25.19					775.3476	775.3628	775.3636
151	140.9115	39.8319	25.60					808.9289	808.9428	808.9497
152	140.9078	39.8326	25.91					818.3407	818.3565	818.3602
153	140.9056	39.8332	26.10					837.5282	837.5438	837.5479
154	140.9018	39.8344	26.52					871.5496	871.5617	
155	140.9057	39.8348	26.87					907.1983	907.2151	
156	140.9050	39.8355								

Table 2 (continued)

BM	long.	lati.	distance	Jul-98	Sep-98	Sep-98	Nov-98	May-99	Oct-99	May-00
	E	N	km	m	m	m	m	m	m	m
35	140.9697	39.8083	17.42	411.2384	411.2394	411.2332	411.2496	411.2402	411.2428	411.2362
51	140.9731	39.8075	17.74	403.1472	403.1480	403.1460	403.1633	403.1530	403.1568	403.1507
52	140.9833	39.8047	18.56	372.0529	372.0517	372.0505	372.0676	372.0560	372.0602	372.0535
53	140.9900	39.8053	19.19	380.1774	380.1752	380.1744	380.1908	380.1782	380.1809	380.1762
54	140.9975	39.8053	19.97	393.9054	393.9031	393.9021	393.9171	393.9045	393.9070	393.9014
55	141.0022	39.8047	20.30	368.1422	368.1395	368.1376	368.1531	368.1403	368.1426	368.1369
56	141.0081	39.8033	20.80	345.9502	345.9484	345.9453	345.9621	345.9488	345.9522	345.9460
57	141.0150	39.8028	21.46	314.3328	314.3313	314.3270	314.3453	314.3311	314.3355	314.3292
58	141.0175	39.8008	21.86	293.0381	293.0370	293.0325	293.0510	293.0362	293.0544	293.0464
59	141.0133	39.7981	22.29	282.3643	282.3641	282.3588	282.3780	282.3626	282.3678	282.3602
60	141.0125	39.7964	22.56	271.4201	271.4199	271.4053	271.4228	271.4061	271.4102	271.4009
61	141.0200	39.7958	23.26	255.9006	255.9018	255.8967	255.9159	255.8997	255.9043	255.8982
62	141.0261	39.7944	23.85	248.9595	248.9587	248.9541	248.9717	248.9585	248.9622	248.9550
63	141.0331	39.7908	24.49	245.5652	245.5653	245.5590	245.5757	245.5594	245.5613	245.5537
64	141.0392	39.7931	25.19	254.9400	254.9400	254.9347	254.9521	254.9368	254.9396	254.9340
65	141.0486	39.7986	26.09	269.0046	269.0055	269.0001	269.0181	269.0025	269.0062	268.9991
66	141.0553	39.8022	27.02	245.8264	245.8278	245.8224	245.8410	245.8229	245.8265	245.8192
67	141.0608	39.8061	27.72	208.7119	208.7134	208.7080	208.7276	208.7094	208.7135	208.7063
68	141.0669	39.8092	28.10	192.3335	192.3350	192.3297	192.3497	192.3310	192.3347	192.3271
69	141.0719	39.8103	28.76	171.0472	171.0495	171.0441	171.0643	171.0443	171.0477	171.0418
70	141.0689	39.8128	29.13	187.5354	187.5372	187.5318	187.5526	187.5329		187.5300
71	141.0644	39.8158	29.55	205.7211	205.7218	205.7165	205.7370	205.7182		205.7157
72	141.0603	39.8189	30.06	227.2455	227.2461	227.2408	227.2599	227.2417		227.2403
73	141.0561	39.8222	30.58	263.2232	263.2232	263.2178	263.2365	263.2172		263.2157
74	141.0508	39.8256	31.21	311.3201	311.3197	311.3144	311.3351	311.3144		311.3139
75	141.0464	39.8289	31.73	368.8393	368.8389	368.8335	368.8557	368.8329		368.8331
76	141.0425	39.8317	32.24	426.7231	426.7228	426.7174	426.7398	426.7168		426.7175

えば 2km となると、茂木モデルから計算される有効な地殻上下変動も圧力源から半径 2-3km と狭い範囲に限定される。そこで効果的な測量にするため水準点を 300-700m 間隔、とりわけ圧力源が推定される岩手火山近傍では 300-400m 間隔と密に設置した。Fig.1 には 1987 年に岩手県が熱水事業に関連して設置した水準点も示す。

水準測量は 1998 年 7 月から 2000 年 5 月までの約 2 年間に 7 回実施した。観測時期と参加者を Table 1 に示す。

地理院水準点 46046 に対する各水準点の比高変化を Table 2 に示す。Table 2 には地図から判読した水準点座標を東京座標系で記す。水準点 46046 まで水準測量が実施不能だった 1998 年 9 月、1999 年 10 月、2000 年 5 月の測量は測量終了最南端の水準点を前回の測定結果で固定した。各回とも測量は 2-4 グループで実施した。観測精度は水準点間の往復誤差を国土地理院 1 等水準測量規定に準じた。

1998 年 10 月までの観測で水準路線北西端の網張温泉周辺域で隆起が観測されたことから、水準路線をより北西方向に 1.5km 拡張した。そして、1999 年 5 月にはさらに 4.2km 北西方向に拡張した。その結果、水準路線は最終的に三石林道のほぼ終点まで延長された。

3. 水準測量から求めた地殻上下変動

本期間中に観測した上下変動を Fig.2 に示す。水準点 46046 から、網張温泉への北方向への路線における上下変動と、網張温泉および 1999 年 10 月以降は三石林道から馬返し登山口への東方向への水準路線における上下変動として示す。

まず、観測した上下変動として、1998 年 9 月 3 日岩手県内陸北部地震 (M6.1) に伴う上下変動が最も顕著な上下変動である。ちょうど、測量作業中に地震に遭遇した。地震に伴う変動は、地震発生翌日の 9 月 4 日の測量から検出され、水準点 23 と水準点 24 の間に 20cm に達する上下変動が観測された (木股ら, 1998, 1999; Kimata et al., 1999)。しかし、地震直前の震源域での測量では地震前兆現象として有意な地殻変動は検出できなかった。

そして、1998 年 10 月の測量でも、震源域近傍では地震に関連すると考えられる最大 2cm の隆起の上下変動が水準点 27 を中心に 3 ヶの水準点で観測されている。岩手県内陸北部地震では主たる断層は震源分布などから地表に達していないと考えられる (海野ら, 1998)。1998 年 9 月から 10 月の期間に観測された 2cm の隆起は、地下のすべり面での上

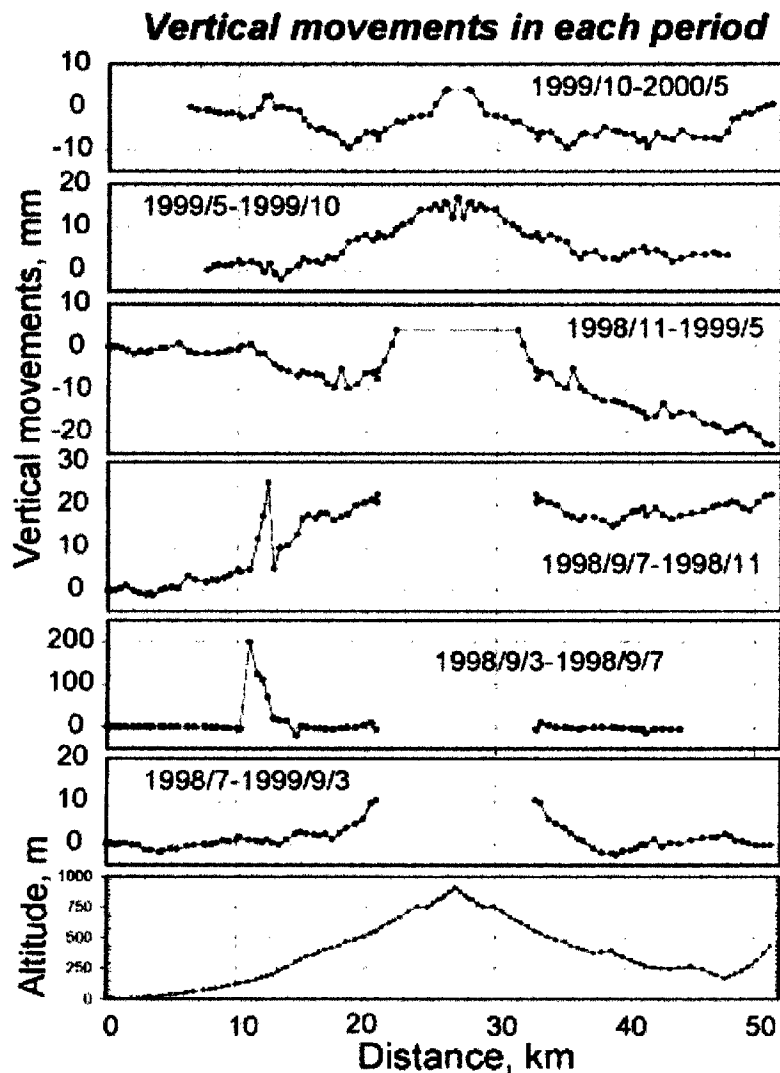


Fig.2 Vertical movements observed by precise leveling on the Iwate Volcano leveling route since July 1998 to May 2000.

下変動が余効的運動として地表まで達したと考える。

1998年9月3日の地震に伴う変動を除けば、観測された地殻変動は、概して雫石側に対し、岩手火山、とりわけ岩手火山西部域での隆起の上下変動として、観測期間を通して観測されている。しかし、その隆起量は最大でも1998年9月から10月の期間の2cmに過ぎず、他の期間は1cm程度である。

岩手火山東部域に位置する馬返し登山口では西部と比較し、複雑な上下変動が観測されている。1998年10月に2cmの隆起が観測されたのに対し、次の測量期間、対照的に1999年5月では2cmの沈降が観測されている。

雫石から網張温泉に至る水準路線は、とりわけ玄武洞から岩手高原までは盛土の道路路肩に水準点

を設置した。しかし、路線を設置した道路は建設されて間もなく、岩手県内陸北部地震時には多くの割れ目が観測されている。ゆえに、地盤の圧密化による沈降など地殻上下変動の攪乱要素が大と考える。

そこで、網張温泉から馬返し登山道に至る東西方向の水準路線に位置する水準点62を不動と仮定して求めた上下変動をFig.3に示す。時間的な変動を議論するため、1998年7月に設置した水準点に限定して示す。図左には測量開始の1998年7月から各観測期間までの変動を、図右には水準点36,37,38,39,40における1998年7月以降の上下変動を時間の関数として示す。

Fig.3 から、上下変動に関して次の二点が明確である。1) 水準点62より北西域に位置する水準点はすべて、1998年7月以降に隆起の上下変動が継続

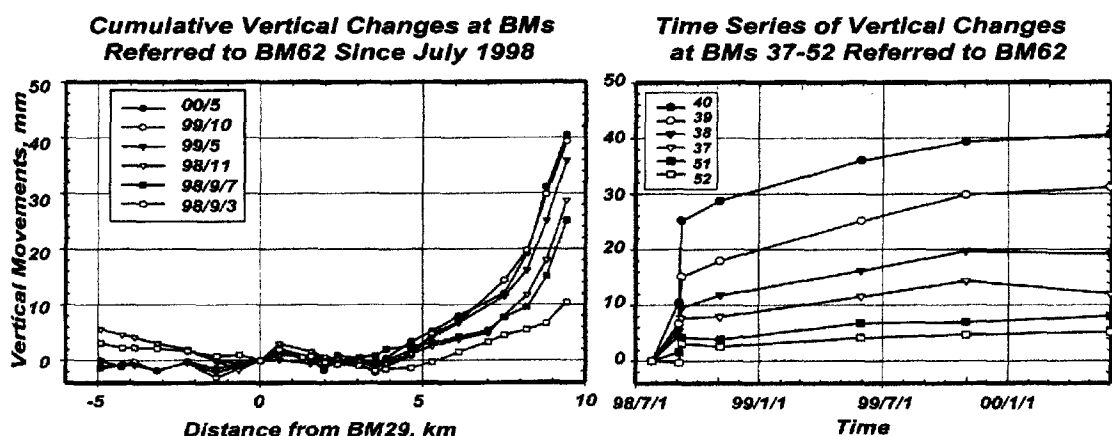


Fig.3 Vertical movements at the benchmarks in the northwest part of the leveling route referred to BM 62.

Left: vertical movements along the leveling route in each leveling epochs since July 1998 and distance from the BM62.

Right: time series of vertical movements at BMs 40,39,38,37,51 and 52.

していること、2) 隆起速度が指数関数的に減衰していることである。そして、隆起量は測定の開始1998年7月から2000年5月までに水準点40で4cmに達する。

水準路線を1998年10月と1999年5月に網張温泉から三石林道沿いに北西方向に延長している。そこで、東西方向の水準路線で、水準点62を固定した場合の各観測期間の上下変動をFig.4に示す。図では隆起が観測された部分を灰色で塗りつぶす。図から、概して、隆起の上下変動を示す水準点が時間の経過と同時により北西方向に限定されることが明らかである。たとえば、隆起の上下変動は、1998年7-9月では水準点62から5kmの岩手高原以西で観測されているのに対し、1999年10月では7km、2000年5月では8km以西となる。概して2年間で5kmほど北西へ移動している。

もっとも、水準路線が隆起領域を完全に横断していない。そこで、隆起の開始地点が観測期間中に北西方向へ移動していることは、隆起域が実際に北西方向へ移動している、もしくは隆起域が減少しているの二通りの解釈が可能である。

4. 上下変動から推定する圧力源

水準点62を不動として求めた上下変動から、茂木モデルにより、球状の圧力源の位置と規模(体積増加量)を推定する。Miura et al. (2000) は岩手火山においてGPS観測から、球状圧力源モデルと開口クラックモデルについて圧力源を検討している。しかし、今回は、上下変動を観測した水準路線が1路線に過ぎず、推定される地殻変動域を完全にカバー

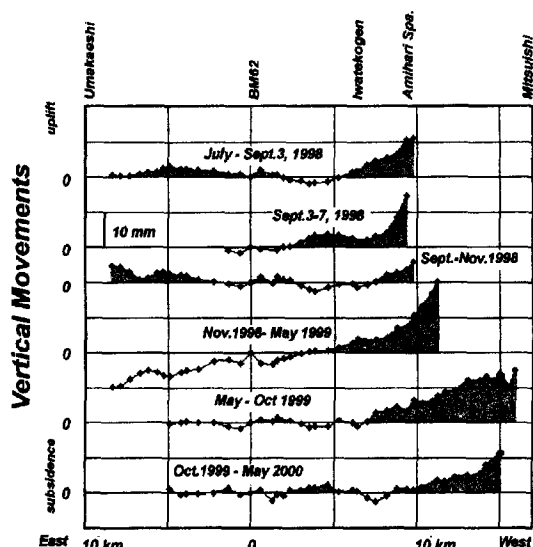


Fig.4 Vertical movements along the leveling route from BM76 to BM155 in the leveling epochs. Movements are referred to BM62.

していないこと、観測された上下変動が単純な隆起を示すこと、Miura et al. (2000)によれば、1998年夏季以降は開口モデルよりも球状圧力減モデルが小さな近似残差を示すことから、球状圧力源モデルに限定する。

各観測期間に観測された上下変動と推定した圧力源から計算される上下変動をFig.5a-eに示す。なお、1998年9月3日の岩手県内陸北部地震にともなう上下変動は図を省いた。図には圧力源からの距離の関数で示す観測した上下変動と推定した上下変動と、観測期間ごとに推定した球状圧力源の位

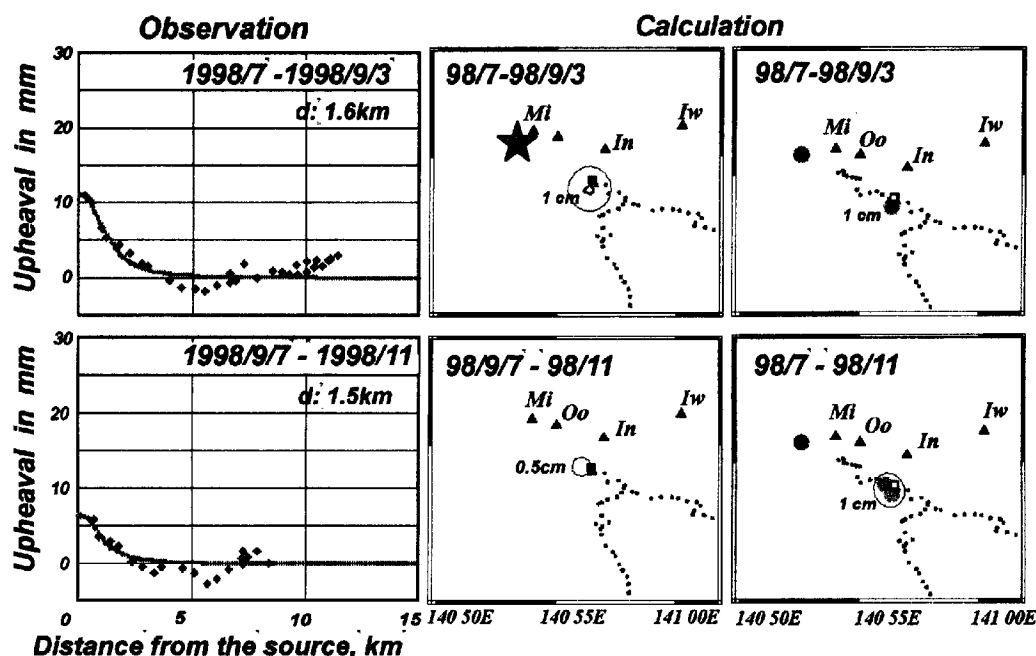


Fig. 5a,b Vertical movements observed and calculated from the point pressure model. Left figures mean the vertical movements observed and calculated as the function of the distance to the benchmarks from the pressure sources. Middle figures show the vertical movements calculated in the period of epochs, and right figures mean the vertical movements calculated since July 1998. Pressure sources estimated from SAR Interferometry (GSI,1998) is also plotted as gray circles in right figures

Uppere(a); in the period of September 3, 1998. A gray star means the location of the pressure source estimated by Miura et al.(2000). Lower(b); in the period of October 1998.

Iw;Iwate Volcano, In;Inukura-dake,

Oo;Oomatsukura-dake,

Mi;Mitsuishi Pass.

置と上下変動コンター、そして1998年7月以降に推定された圧力源の位置と積算した上下変動コンターを示す。観測開始以来の積算した上下変動の図に合成開口レーダ干渉により求められた圧力源の位置(国土地理院,1998)も示す。

上述したように2-6ヶ月間隔で観測された隆起の上下変動は、最大でも2cm(1998年10月~1999年5月)に過ぎない。しかし、茂木モデルで推定した球状圧力源から計算される上下変動とよく一致する。観測値とモデルからの計算値の残差は1-2mmとなる。

Fig.6は推定した圧力源を2.5万分の1の地形図上に示すと同時に深さ方向にもプロットする。Fig.7には推定した圧力源の体積増を時間変化として示す。Fig.7にも合成開口レーダ干渉から推定された球状圧力源の位置(国土地理院,1999)を示す。

各期間において推定された球状圧力源について検討する。

4.1 1998年7月16日-9月3日

この期間、球状圧力源は網張温泉の南方0.5kmの深さ1.6kmに推定される。ちょうど水準路線の北西

端の位置である。観測された上下変動は1cmの隆起、5mm以上の隆起が観測された水準点も4点に過ぎない、隆起を示す水準点も8点で3kmの範囲と狭いこともあり、圧力源での体積増は $0.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、年間増加率は年間増加率に外挿して $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される。最近20年間に伊東地域で推定される平均的な圧力源の体積増加量、 $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ と比較し、非常に小規模なことが明確である。

推定する圧力源モデルから計算される上下変動でも1cm以上の隆起を示す範囲は狭く、半径1kmにも満たない。

なお、Miura et al.(2000)は1998年2月から8月までの期間について、圧力源の位置の空間変動をGPS観測から議論している。彼らが1998年7-8月の期間に求めた圧力源の位置を図中に★で示す。観測期間が一ヶ月異なるが、本論で求めた圧力源から3km北西の方向である。後述する1999年5月に推定された圧力源の位置に近接する。

4.2 1998年9月7日-1998年11月

この期間に観測された隆起の上下変動はわずか6mmに過ぎない。推定された圧力源は前期間の位

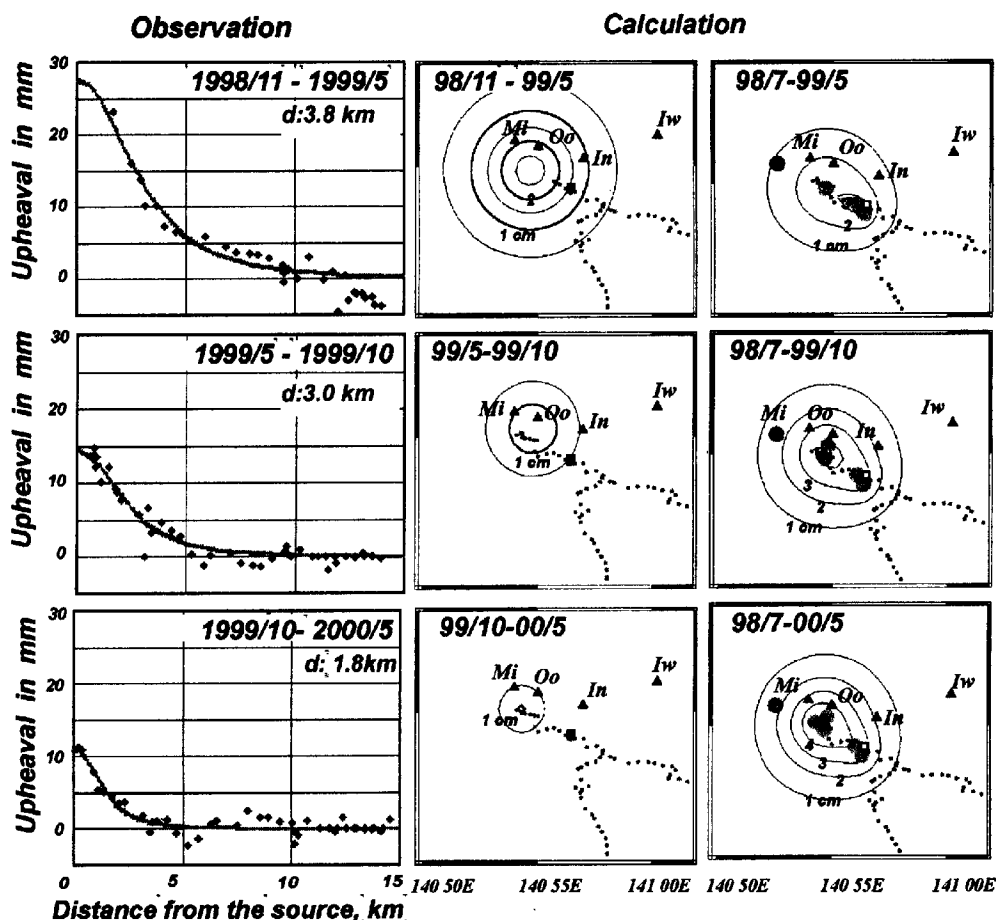


Fig. 5c-e Vertical movements observed and calculated from the point pressure model. Expressions are same as in Fig.5a,b. Upper(c); in the period of May 1999 Middle(d); in the period October 1999 Lower (e); in the period of May 2000.

置から北西方向へ 3km, 網張温泉西方へ移動する。深さは 1.5km, 前回の結果と 0.1km 異なるだけである。隆起を示す範囲も圧力源から半径 2.5km に限定され、実際に隆起が観測された水準点も 4 点に過ぎない。圧力源での体積増も前期間より減少し $0.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ に満たない。年間速度に外挿すれば $2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ である。1998 年 7 月以降、モデルから計算される隆起 1cm 以上の範囲も半径 2km と狭域である。

4.3 1998 年 11 月－1999 年 5 月

この期間は全観測期間で最大の 2cm を超える隆起の上下変動が観測されている。推定される圧力源の規模も $7.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 速度で $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ と今回の観測期間中最大となり、唯一、 $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ を上回る。圧力源の位置は前期間の網張温泉付近から北西方向へ 2km, 大松倉山の南方、深さも 2km 深いところへ移動する。ちょうど、国土地理院(1998)が SAR 干渉法で推定した 1998 年 9 月までの圧力源の

位置と水準測量で推定した前期間の圧力源の位置との中間に求まっている。推定した圧力源の直上には水準点が存在しないが、隆起量は 28mm に達すると計算される。圧力源から半径 10km の範囲で隆起の上下変動が観測・計算される。

1998 年 7 月以降に推定した圧力源モデルから計算される隆起の上下変動は網張温泉から北西方向に伸びた楕円形を示す。それでも最大累積隆起量は 3cm に過ぎない。

4.4 1998 年 5 月－1999 年 10 月

この期間、水準路線北西端の水準点で 15mm の隆起が観測される。推定する圧力源は前期間と同様に網張温泉北西 5km である。深さは前期間と比較しやや浅くなり 3km となる。圧力源から半径 5km の範囲で隆起が計算され、実際に 15 の水準点で隆起が観測されている。圧力源での体積増加は $2.8 \times 10^5 \text{ m}^3$, 年間速度に外挿して $7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される。

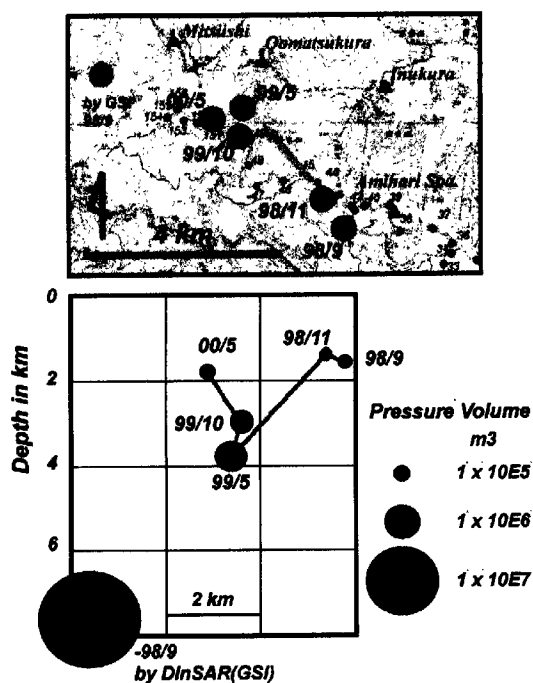


Fig.6 The locations of the point pressure sources estimated from the vertical deformation in the period of each leveling epoch. The location of the pressure source estimated from the SAR interferometry analysis(GSI, 1998) in the period until September 1989 is also shown.

1998 年 7 月以降に推定した圧力源モデルから計算される上下変動隆起のピークは前期間までの網張温泉付近から網張温泉北西 5km に移動する。そして、累積隆起量も 4cm に達する。

4.5 1999 年 10 月–2000 年 5 月

この期間で観測された上下変動は最大隆起量が 1cm, 隆起が観測された範囲が圧力源から半径 4km と、1998 年 7–9 月 3 日の期間と相似する。

推定された圧力源は前・前々期間とほぼ同じ水平位置で、深さのみが 1.9km と前期間よりさらに浅くなる。圧力源での体積増加量も前回からさらに減少し、 $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3$, $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される。

以上を整理すると、上下変動から推定する圧力源は 1998 年 7 月–11 月に期間は網張温泉付近の 1.5–1.6km と非常に浅い地域に推定される。その後、圧力源は網張温泉の北西 5km, 深さ 4km へ 1999 年 5 月に移動したと推定される。そして、1999 年 10 月から 2000 年 5 月にかけて再び深さ 2km 前後まで浅くなったと考える。

圧力源における体積増加は、観測の全期間となる 1998 年 7 月から 2000 年 5 月までの約 2 年間でも、

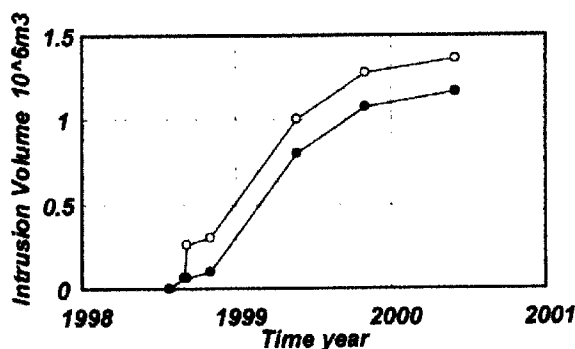


Fig.7 Time series of intrusion volume at the pressure sources since July 1998. Open circles show the changes including the observation data at the Iwateken-Nairiku-Hokubu earthquake on September 3, 1998. Open circle mean the results removed the data at the earthquake.

$1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ に過ぎない。そして、各期間でも、とりわけ 1998 年 11 月から 1999 年 5 月の期間に最大の体積増が推定される。しかし、その体積増加は、 $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ に過ぎない。しかも、1998 年 9 月以降、圧力源における体積増加率は指数関数的に減少していることが明らかである。ちなみに、1998 年 9 月までの期間に衛星合成開口レーダ干渉から推定された体積増は $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ である(国土地理院, 1999)。1998 年 7 月以降に推定された体積増加量はその 10–20% に過ぎない。

5. 圧力源の位置と規模の時間変化

上述したように、1998 年 7 月以降、岩手火山で観測した上下変動にもとづき推定される圧力源の規模は体積増にして $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ に過ぎない。火山活動としては大規模な活動でない。周辺域で GPS 観測により検出された地殻変動(東北大学理学部, 1998; 国土地理院, 1998)を検討しても、岩手火山域における地殻変動は主に 1998 年 7 月の水準測量開始以前と考えられる。しかも、水準測量の期間中に体積増加率は確実に指数関数的に減少している。このような状況下において、上下変動から推定される圧力源の活動を時間的に検討する。

圧力源は、まず 1998 年 7 月から 1998 年 10 月までの期間に網張温泉近傍の深さ 1.5km 前後に推定される。その後、圧力源は、北西方向へ移動し、1999 年 5 月以降に大松倉山南の深さ 2–4km 前後に推定される。

1998 年 10 月から 1999 年 5 月の期間に網張温泉から北西方向へ 2km, 上下方向として 1–2km 深い方向へ圧力源が移動したことになる。そして、1999

年5月から2000年5月にかけて、推定される圧力源は水平方向には移動しないが、深さが4km, 3km, 2kmと浅部へ移動する。

圧力源における体積増加は深さと関連する。深くなるほど大きく、1999年5月に深さ4kmに推定された時は $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、2kmよりも浅部となる1998年9月、10月、2000年5月には $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 以下まで低下する。

一方、水準路線は、1998年10月に網張温泉から北西方向に延長している。ゆえに、1998年10月までの期間に路線の最北西端に推定される圧力源が、水準路線配置による見かけであり、実際の圧力源がより北西方向に存在する可能性も考えられる。たとえば、合成開口レーダ干渉による1998年9月までの期間で推定された圧力源(国土地理院, 1998)や、GPS観測から推定された圧力源(Miura et al., 2000)は上述したように水準測量から推定した圧力源から北西方向に3kmほど離れる。

一方、地震の震源分布は岩手火山直下から西方向に伸び(Tanaka et al., 2000)、本論で求めた圧力源の位置が群発地震域に含まれる。合成開口レーダ干渉やGPS観測で推定した圧力源は群発地震域外となる。

圧力源の位置の移動に関しては、球状圧力源や開口クラックといった圧力源のモデル、そして圧力源における体積増加も含めた議論、地殻変動も水平方向と上下方向のデータを含めた議論が必要と考える。

検出された圧力源の移動に関し、1999年5月を境に、観測点配置が異なるなどデータの母集団が異なる。ゆえに、1998年10月までの期間に推定した圧力源の時空間変動について、検討の余地が残る。しかし、1998年10月以後の期間に推定した圧力源の時空間変動、主として深さ4kmから2kmへ上昇すると同時に体積増の規模が減少することは、水準点の配置などから信頼性が高いと考える。

零石 GPS 観測点における水平変動でも、主たる変動が1998年9月までに終了している(国土地理院, 1998)。すなわち、今回議論している1998年7月以降の地殻上下変動は、1997年以降の岩手火山における一連の火山活動から検討する限り、主要な活動が終了し、それ以降の活動が加速されなかった時期に該当すると考える。

6. 結論

1998年7月以降、2000年5月までに岩手火山南麓で7回の水準測量を実施し、上下変動を検出した。観測された上下変動にもとづき、同域での圧力

源を球状と仮定し、茂木モデルから推定した。そして、圧力源の規模も含め、時空間的な変動を議論した。

1) 3-6ヶ月毎に繰り返した7回の水準測量では1-2cmの岩手火山西部を中心とする隆起の上下変動を継続して観測した。

2) 球状圧力源は岩手火山西部域の深さ2-4kmに推定される。

3) 圧力源における体積増加は今回の全期間で $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、時間経過と共にその増加量は指数関数的に減少する。1999年11月から2000年5月の期間には $0.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで減少した。

4) 圧力源は1998年9月から2000年5月までに網張温泉近傍の深さ1.5km前後から、2000年5月までに北西方向へ3km、深さ4kmまで移動したと考えられる。この延長方向に1998年9月9日までの期間で合成開口レーダ干渉、および1998年8月までの期間におけるGPS観測から球状圧力源が推定される。

5) 1998年10月までに網張温泉南方に推定された圧力源については、水準点配置などから再検討の必要がある。しかし、1998年10月以降に推定された圧力源が4kmから2kmの浅部に移動することは水準点配置などから有意な変動と考える。

このように水準測量は非常に古典的な観測手法ながらも、観測点配置などに考慮すれば、火山体圧力源の時空間変動を詳細に議論するに有効な観測手法と考える。

謝辞

測量に際し、文部省「岩手山の火山活動の評価に関する特別経費(平成10年度)」、防災研究所平成12年度共同研究費も使用した。岩手県と国民休暇村岩手山(当時)には測量に際し、ご協力いただいた。また、浜口博之東北大学大学院理学研究科教授と石原和弘京都大学防災研究所教授には多方面で援助をいただいた。これらの方々に深く感謝する。

参考文献

- 木股文昭・森済・松島健・山本圭吾・八木原寛・宮島力雄・高山哲朗・辻浩・鈴木淳生・内田和也・佐藤峰司(1998): 岩手県北西部地震の直前・直後における地殻上下変動—地震発生時の震源域での水準測量、地震学会ニュースレター, 10, 3, 18-20
- 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 7~11 月). 京都大学防
 災研究所年報, 第 42 号 B-1, 35-43.
- 国土地理院(1998): 岩手山とその周辺地域の地殻
 変動,火山噴火予知連絡会会報, 71, 22-27.
- 東北大学理学部(1998): 岩手火山における地震活
 動と地殻変動活動, 火山噴火予知連絡会会報,71,
 3-15.
- 海野徳仁・岡田知己・中村綾子・中嶋淳一・佐藤俊也・堀
 修一郎・河野俊夫・似田交市・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.
- Kimata, F., Matsushima, T., Mori, H., Nakabo, M., Sato,
 M., Terada, A., Ueki, S., Yagiwara, H., Yamamoto, K.,
 Hirano, S., Koyama, E., Miyajima, R., Suzuki, A.,
 Takayama, T., Takeda, T., Tsuji, H., and Uchida, K.
 (1999): Pre- seismic, co-seismic and post-seismic
 deformations in the Iwateken-nairiku-hokubu
 earthquake, Japan (Sept. 3, 1998, M_L : 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.
- Miura, S., Ueki, S., Sato T., Tachibana K., and Hamaguchi,
 H. (2000): Crustal deformation associated with the
 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate Volcano,
 northeastern Japan, as observed by a dense GPS
 network, *Earth Planets Space*, 52, 1003-1008.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Ueki, S., Sto, M. and H.
 Nakamichi(2000): Migration of seismic activity during
 the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern
 Japan, with reference to P and S wave velocity anomaly
 and crustal deformation, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, (in
 press).

Estimation of the Point Pressure Source at the Iwate Volcano, Northeast Japan from the Vertical Deformation Detected by Leveling in the period July 1998 to May 2000.

Fumiaki KIMATA*, Rikio MIYAJIMA*, Tetsuro TAKAYAMA, Keigo YAMAMOTO, Kazunari UCHIDA**,
 Megumi NAKAMURA**, Takeshi MATSUSHIMA**, Shuichiro HIRANO***, Hiroshi YAGIWARA***,
 Kenji TACHIBANA ****, Hideki UEDA****, Minemori SATO** **, Sadato UEKI****,
 Hiroshi TSUJI*****, Etsuro KOYAMA*****, Akihiko TERADA*****, Hitoshi MORI*****,
 Atsuo SUZUKI*****, and Makoto NAKABO*****

* Graduate School of Science, Nagoya University

** Faculty of Sciences, Kyushu University

*** Faculty of Science, Kagoshima University

**** Graduate School of Science, Tohoku University

***** Earthquake Research Institute, University of Tokyo

***** Graduate School of Science, Hokkaido University

***** Faculty of Science, Kyoto University

Synopsis

Volcano earthquakes and volcano deformation had been observed to be active around the Iwate Volcano since 1998. Authors have repeated precise leveling seven times on the southern foot of the volcano in the period July 1998 to May 2000. Uplifts of 1 to 3 cm at the volcano are observed in the every survey epoch. Authors estimate the point pressure sources from the uplift using the Mogi solution. Estimated pressure sources are shifted to northwest of 5 km with the depth of 2 km from the Amihari Spa. The total volume of intrusion is estimated to be $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ and the rate of intrusion is decreasing with time.

Keywords: Iwate Volcano, leveling, Vertical movements, pressure source of volcano,
 migration of pressure source