

1988 年磐梯火山集中総合観測報告

磐梯火山総合観測班

2023 年 3 月

1988 年磐梯火山集中総合観測報告

目 次

序文	浜口博之	
研究報告		
1 磐梯火山における臨時地震観測	浜口博之・植木貞人・西村太志・梅津 功・橋本恵一	1
2 磐梯火山における GPS 観測および光波測距を用いた測地測量	植木貞人・三浦 哲・立花憲司・中尾 茂・吉田佳一郎・ 橋本恵一・浜口博之・竹田豊太郎・小山悦郎	9
3 磐梯火山の熱的調査	鍵山恒臣・ハビエル サルガド パレハ	17
4 磐梯山の火山ガス組成	平林順一・大場 武・小沢竹二郎	29
5 磐梯火山の噴気、温泉ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比	野津憲治・脇田 宏・佐野有司・五十嵐丈二	33
6 磐梯火山における精密重力測定	植木貞人・趙 大鵬	37
7 磐梯火山・猫魔火山およびその周辺の重力異常	井上 純・三品正明・田中和夫	41
8 磐梯山火山基本図 一火山地形と地熱分布一	田中宗男・勝俣圭一	49
付録（東北地域災害科学研究より転載）		
Fan-Shooting 法による磐梯山の地殻構造探査		
植木貞人・浜口博之・稲盛隆穂・堀内茂木・西澤あずさ・堀修一郎・ 仁田交市・松本 聡・梅津 功・佐藤吉之・長谷川 昭・宮町宏樹・ 西村裕一・前川徳光・鈴木敦生・井上 純・Nanang Dyasbudi・ 鈴木將之・伊東明彦・須藤靖明・井口正人・高木章雄		

序 文

本報告書は、1988年に磐梯火山で実施された集中総合観測の結果を取りまとめたものである。集中総合観測は、第3次火山噴火予知計画の一環として計画され、全国の11の国立大学・同附属施設及び国土地理院から約40名の研究者・学生が参加して実施された。観測項目は、地震活動をはじめとし、地盤変動、重力、熱、火山ガス、火山体構造など多岐にわたっている。

観測を実施するにあたって、福島県、猪苗代町、磐梯町、北塩原村、会津若松営林署、環境庁裏磐梯自然保護官事務所、裏磐梯スキー場、猫魔スキー場、押立温泉など地元の関係機関から多大なご協力を頂いた。厚く御礼申し上げます。

諸般の事情で観測の実施から報告書のとりまとめ・発行までに大変長い年月が経過してしまった。しかし、磐梯火山の静穏期の活動情報を含む貴重な観測結果も含まれていることから遅ればせながら刊行することとした。発行の遅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。本書が磐梯山の火山活動や内部構造を理解する上で役立つことを願うものである。

磐梯火山総合観測班 代表

東北大学理学部

地震予知・噴火予知観測センター

浜口 博之

磐梯火山における臨時地震観測

浜口博之*・植木貞人*・西村太志*・梅津 功*・橋本恵一*

*東北大学理学部 地震予知・噴火予知観測センター

1. 定常観測から求められた磐梯火山の地震活動

われわれは、磐梯火山における地震活動を詳しく調べるために、1988 年 8 月 25 日～11 月 13 日の 80 日間、同火山において臨時地震観測を実施した。臨時観測を行う前の磐梯火山地域の地震活動については、気象庁や東北大学の定常観測によっておおよその状況を知ることができる。東北大学では、1982 年に、吾妻火山の火山活動を観測することを主目的として 3 観測点からなる広域火山観測網を設置した。観測点は、それぞれ、磐梯山の北東約 10 km、約 25 km と北北東約 20 km に位置しており、磐梯火山地域の地震についても M 1.0 程度より大きなものは震源決定が可能である。したがって、これにより磐梯火山における地震活動の推移の概略を把握することができる。

臨時観測の前、1984 年 9 月 1 日～1988 年 8 月 24 日の約 4 年間に広域火山観測網により求められた震央分布を図 1 (A) に示す。震源が決定できた地震は 11 個であり、定常的な地震活動は活発とは言えない。震源は山頂部から北部～北東部山麓にかけて分布する。深さは平均海水面付近から 5 km までの範囲に分布しているが、深さの精度は悪いと考えられる。

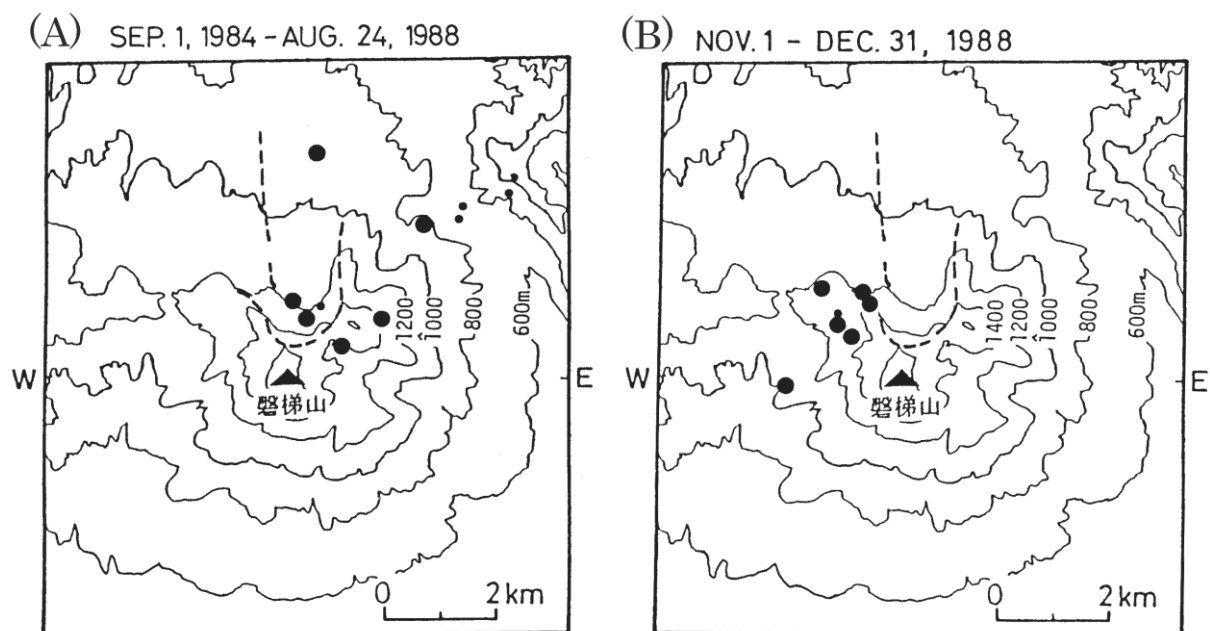


図 1 定常観測により求められた震央分布。(A) 臨時観測前の約 4 年間(1984 年 9 月 1 日～1988 年 8 月 24 日)。(B) 臨時観測後の 1988 年 11 月～12 月に発生した群発地震。

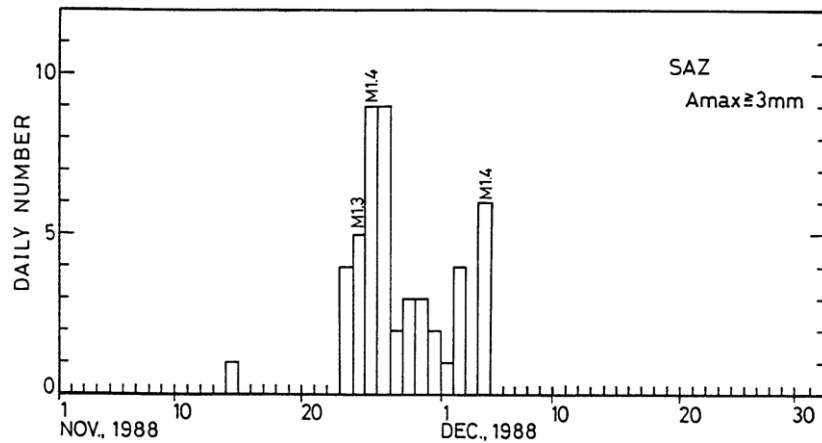


図2 1988年11月～12月に南吾妻観測点で観測された磐梯火山付近の地震の日別頻度.

他方、臨時観測終了後の1988年11月から12月にかけて群発地震が発生した。南吾妻観測点 (SAZ) [磐梯山の北東約 10 km] で観測された磐梯火山地域で発生したと推定される地震の日別頻度を図2に示す。群発地震活動は11月14日あるいは23日に始まり12月4日まで続いた。最大地震は11月25日と12月4日に発生した M 1.4 の地震であった。震央分布を図1 (B) に示す。群発地震の震源は山頂の北西側に分布しており、定常的な地震活動が山頂の北東側で発生していたのと対照的である。深さは定常的な活動とほぼ同じ0～4 km であった。この群発地震活動は、広域火山観測網が1982年に観測を開始して以降初めて観測された群発地震活動である。臨時地震観測はこの群発地震活動の直前に実施されたことになる。

2. 観測方法

磐梯火山地域に発生する地震の震源を精度良く決定するために、山腹の3箇所 [琵琶沢 (BWS), 裏磐梯 (UBD), 押立 (OTT)] と山頂に近い1箇所 [赤埴山 (AKH)] の計4箇所に臨時観測点を設置した。観測点諸元を表1に、観測点配置を図3に示す。全観測点で固有振動数1 Hz の地震計を3成分用い、信号を UBD と OTT からは有線テレメーターを介して、AKH からは無線テレメーターを介して BWS へ伝送し、全信号を1台のデータレコーダーで連続記録した。また、同時に、ペンレコーダー記録を用いて観測状況を把握するとともに、地震の検出を行った。震源決定は検出された地震について連続記録を早送り再生したものを用いて行った。

表1 臨時地震観測網.

観測点名	緯度	経度	標高	観測期間
琵琶沢 (BWS)	37.5869°	140.1156°	720 m	8月25日～11月13日
裏磐梯 (UBD)	37.6246°	140.0709°	1000 m	8月26日～11月13日
押立 (OTT)	37.5749°	140.0542°	660 m	8月27日～11月13日
赤埴山 (AKH)	37.5937°	140.0919°	1290 m	8月28日～11月13日

※ 座標値は東京測地系.

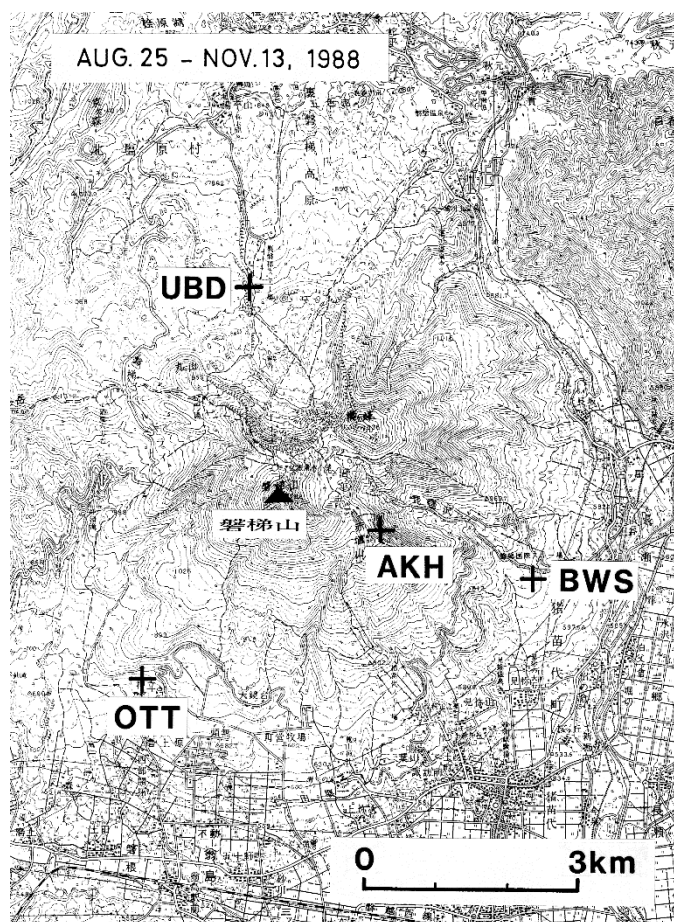


図3 臨時地震観測点の配置.

3. 臨時観測により明らかになった地震活動

臨時観測によって磐梯火山地域で発生したと推定される地震が多数観測された。その記録例を図4に示す。山腹の観測点（BWS, UBD, OTT）ではP波、S波ともに初動が明瞭に記録されているが、山頂部に位置するAKHではP波、S波ともに初動が不明瞭である。火山体内部の構

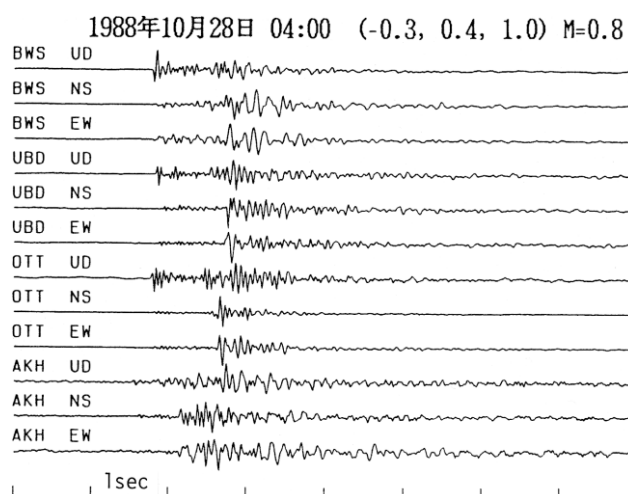


図4 観測された地震波形の例.

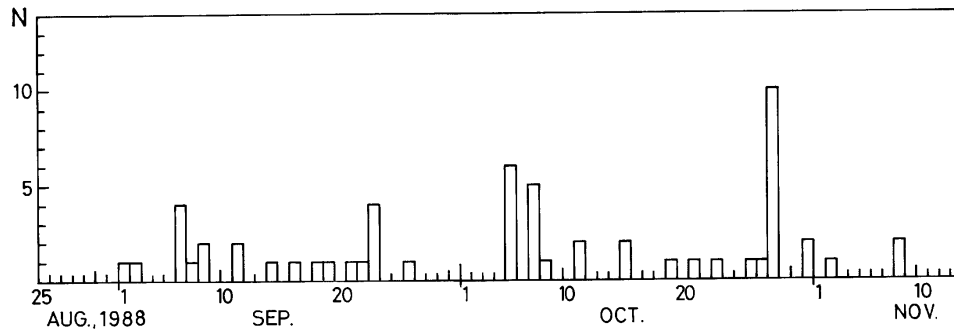


図5 臨時観測により震源が決定された地震の日別頻度.

造を反映している可能性がある.

臨時観測点のデータのみを用いて震源決定を行った. 震源決定では, 地震探査の結果(東北大学・他, 1988)を参考に, 深さ 1.5 km に境界面を持つ2層構造を仮定し, 1.5 km 以浅では $V_p = 3.7 + 1.2z$ [単位 km/s], $V_p/V_s = 1.80$, 以深では $V_p = 5.3 + 0.11z$, $V_p/V_s = 1.732$ とした. ただし, ここで z は平均海水面からの深さ [単位 km, 下向き正] である.

80 日間の観測期間中に磐梯火山地域に震源が決定された地震は合計 58 個あった. その日別頻度分布を図5に示す. 全期間を通じてほぼ定常的に地震が発生している. 平均発生頻度 0.7 個/日は, 静穏期の東北地方の火山としては高い値である. なお, これらの中に定常観測網により震源が決定できた地震は無い.

臨時観測により決定された震源の内, RMS 走時残差が 0.2 秒以下の 41 個の震源を図6に示す. 図6から, 磐梯火山では山頂部の下の平均海水面付近から深さ約 5 km の範囲に多くの地震が発生していることが分かる. 他方, 南東山麓に発生した地震は深さ 8~9 km であり, 山頂部の地震に比べて有意に深い.

4. 波形の類似性を利用した震源の再決定

震源が決定された 58 個の地震には互いに波形が類似したものが存在し, 大きく分けて4つの地震群に分類することができる. 代表的な2グループの波形例を図7に示す. より精密な震源分布を得るために, 波形の類似性を利用してP波, S波初動時刻の再検測を行った. 手順は以下の通りである. はじめに, 各グループの中で最

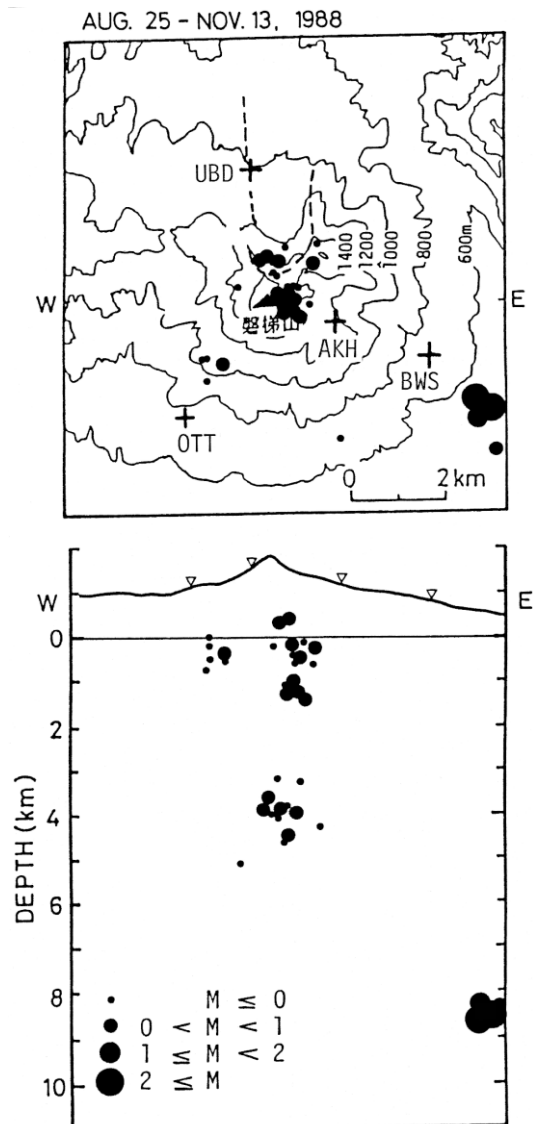


図6 震源分布.

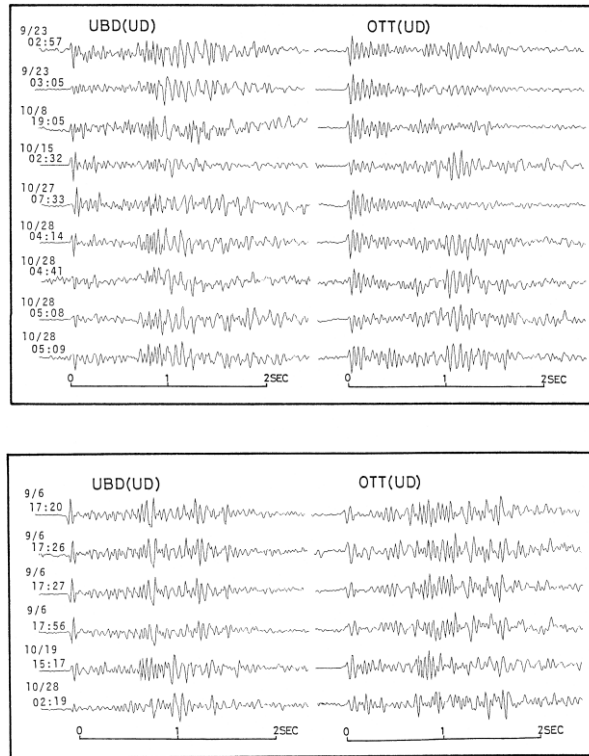


図7 波形が類似する2グループの波形例.

も S/N 比が良い地震について通常通りに P 波、S 波の初動時刻を読み取る．次に、他の地震については波形の類似性を利用して P 波と S 波の初動を同定し、その時刻を読み取る．このようにして読み取った値を用いて震源を再決定した．4 点全点で検測値があり、RMS 走時残差が 0.1 秒以下の 48 個の地震について震源要素を表 2 に示す（座標値は東京測地系）．さらに、震源分布を図 8 に黒丸で示す．震源は、大磐梯と沼ノ平の間の急崖に沿い、深さ -0.5～1 km（地表面下 1～2.5 km）のきわめて浅くかつ狭い領域に分布している．この中で、波形が類似する各地震群は、それぞれ、半径約 1.5 km 程度の範囲にまとまっている．

なお、図 6 で山頂部の深さ 4 km 前後とされていた地震は、再読み取り・再決定の結果、2 個を除き、図 8 に示されるごく浅部の震源域で発生したことが判明した．例外の 2 個の地震は、浅部の地震に比べて有意に深い深さ 3 km 前後に決定された．しかし、この 2 個は、いずれも震央域に最も近い観測点 AKH の欠測期間に発生した地震であり、深さの決定精度が悪い．そのため、実際にはごく浅部で発生したにもかかわらず、やや深く決定されたものと考えられる．さらに、このことを考慮すると、図 1 で示した定常観測によって決定された地震が深さ 0～5 km の範囲に分布しているが、実際にはごく浅部の狭い領域に発生していた可能性が考えられる．

図 8 には、震源分布とともに、1888 年噴火の直後に見られた噴気孔の位置をアスタリスク(*)で、ファンシューティング法探査から推定された異常減衰域を砂目で示してある．1888 年の噴気孔はほぼ北北西－南南東の方向に並んで分布し、震源域はその南南東の延長線上に位置している．また、震源域は異常減衰域の西側に接して存在するとともに、磐梯火山で繰り返された山体崩壊により生じた馬蹄形カルデラの頂部が接する領域に位置する．異常減衰域はマグマ供給系の上方に形成された熱水・水蒸気により変質が進んだ領域を示すと考えられ、今回観測された地震活動はそこから供給された熱水や水蒸気によって引き起こされた地震活動の可能性がある．

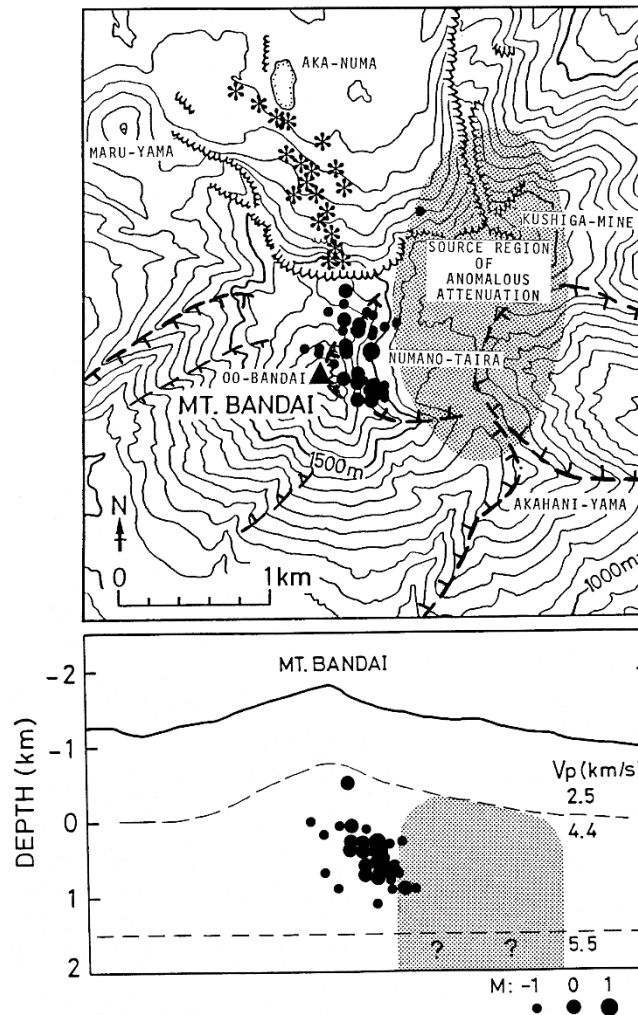


図8 再決定された震源の分布（黒丸）と異常減衰域（砂目），
1888年噴火直後の噴気孔分布（*）。

5. まとめ

1988年8月から11月までの80日間にわたり、磐梯火山の4箇所に臨時観測点を設けて地震観測を実施した。その結果、同火山山頂部直下のごく浅部（深さ $-0.5 \sim 1$ km）に比較的活発な地震活動が存在することが明らかになった。この活動にはマグマ供給系に関連した熱水が関与している可能性がある。

謝辞

地震観測にあたっては、福島県、猪苗代町、裏磐梯スキー場、押立温泉住吉館をはじめとする関係機関にご協力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

東北大学理学部・弘前大学理学部・山形大学理学部・宇都宮大学教育学部・千葉大学理学部
(1988) 磐梯火山付近における地震波速度構造探査. 噴火予知連会報, **41**, 91-93.

表2 波形の類似性を利用して再読み取り・再決定された震源.

Y	M	D	H	M	T ₀ (s)	Lat(deg)	Lon(deg)	Z(km)	Res(s)	M
88	9	1	2	36	34.154	37.5986	140.0760	0.07	0.017	-0.7
88	9	6	17	20	26.003	37.6011	140.0770	0.32	0.020	0.4
88	9	6	17	26	37.207	37.6006	140.0770	0.36	0.010	-0.1
88	9	6	17	27	27.213	37.6007	140.0780	0.29	0.017	0.5
88	9	6	17	55	94.806	37.6002	140.0770	0.14	0.028	0.2
88	9	6	17	55	97.718	37.6008	140.0780	0.36	0.020	0.2
88	9	8	14	59	70.272	37.5996	140.0740	-0.04	0.068	-0.6
88	9	11	19	35	6.667	37.6003	140.0790	0.34	0.017	-0.2
88	9	11	21	40	27.098	37.6008	140.0800	0.27	0.028	-0.3
88	9	18	23	4	78.690	37.5989	140.0800	0.26	0.011	-0.1
88	9	22	21	10	18.538	37.6030	140.0770	-0.47	0.017	0.6
88	9	23	2	15	62.720	37.5955	140.0820	0.92	0.034	-1.2
88	9	23	2	15	64.661	37.5968	140.0800	0.91	0.031	-0.9
88	9	23	2	57	27.776	37.5969	140.0800	0.72	0.026	-0.1
88	9	23	3	5	36.331	37.5970	140.0810	0.92	0.031	0.7
88	9	23	4	26	46.169	37.5970	140.0800	0.77	0.027	-0.6
88	9	23	4	26	49.022	37.5966	140.0790	0.65	0.027	-0.5
88	9	23	4	26	51.861	37.5969	140.0800	0.70	0.028	-0.7
88	9	26	14	36	23.400	37.6010	140.0810	0.32	0.021	-0.3
88	10	5	8	29	62.956	37.5977	140.0770	0.36	0.028	0.0
88	10	5	17	22	8.346	37.6003	140.0790	0.39	0.016	0.0
88	10	5	20	52	53.433	37.5976	140.0780	0.40	0.023	0.0
88	10	5	20	53	28.976	37.5968	140.0790	0.50	0.023	-0.5
88	10	8	2	31	60.228	37.5967	140.0800	0.66	0.049	-0.3
88	10	11	11	49	5.280	37.5991	140.0750	0.19	0.019	-0.2
88	10	11	12	12	58.584	37.5993	140.0750	0.74	0.044	-1.0
88	10	15	19	3	22.119	37.5966	140.0800	0.63	0.053	-0.6
88	10	15	19	3	25.371	37.5968	140.0790	0.61	0.043	-0.6
88	10	15	19	3	26.291	37.5964	140.0800	0.68	0.043	-0.3
88	10	15	19	5	49.852	37.5963	140.0790	0.68	0.042	0.4
88	10	19	15	17	24.171	37.5998	140.0770	0.27	0.028	0.9
88	10	23	2	7	27.626	37.6000	140.0770	0.36	0.036	0.5
88	10	26	1	36	44.534	37.5978	140.0780	0.41	0.027	-0.4
88	10	27	7	32	65.023	37.5977	140.0790	0.80	0.030	0.2
88	10	28	2	19	37.944	37.6009	140.0780	0.10	0.038	-0.5
88	10	28	4	0	33.881	37.5965	140.0790	0.56	0.032	0.8
88	10	28	4	1	58.152	37.5968	140.0790	0.39	0.046	0.6
88	10	28	4	1	58.232	37.5981	140.0780	0.74	0.046	0.9
88	10	28	4	10	10.237	37.5962	140.0780	0.58	0.035	0.8
88	10	28	4	10	11.846	37.5965	140.0790	0.45	0.043	0.5
88	10	28	4	13	60.943	37.5966	140.0790	0.32	0.027	-0.2
88	10	28	4	41	54.103	37.5968	140.0790	0.52	0.035	-0.8
88	10	28	5	8	22.109	37.5970	140.0790	0.61	0.035	0.3
88	10	28	5	9	46.356	37.5969	140.0790	0.70	0.041	0.1
88	10	31	1	29	4.108	37.6013	140.0790	1.08	0.053	-0.1
88	10	31	1	36	9.958	37.6012	140.0760	0.91	0.039	-0.6
88	10	31	1	40	39.920	37.5995	140.0790	0.35	0.035	1.6
88	11	2	3	59	48.803	37.5992	140.0790	0.45	0.036	-0.4

磐梯火山における GPS 観測および光波測距を用いた測地測量

植木貞人*・三浦 哲*・立花憲司*・中尾 茂*・吉田佳一郎*・橋本恵一*・浜口博之*・
竹田豊太郎**・小山悦郎**

* 東北大学理学部 地震予知・噴火予知観測センター

** 東京大学地震研究所

1. はじめに

磐梯火山において、火山活動に伴う地盤変動を観測するための基準点網を新設するとともに、活動が静穏な時期の基礎データを蓄積するために GPS 観測ならびに光波測距を用いた測地測量を実施した。さらに、GPS 繰り返し観測ならびに GPS 観測と光波測距との比較に基づき GPS 観測の精度について検討した。

2. 基準点網

測量に用いた基準点網を図 1 に示す。山頂、山腹ならびに山麓の 10 点から成る。基準点はすべて今回新設したものである。基準点として、直径 15 mm、長さ 2 m のステンレス製丸棒を人力で打ち込んだものを用いた。ただし、山頂では 2 m 全部を打ち込むことができず、可能な限り打ち込んだ後、地表面から出ている部分を切断した。なお、山頂では、光波測距を行う際に一カ所から北麓の基準点と南麓の基準点のどちらをも見通すことができる地点がなかったため、山頂の基準点 0105 は、山頂北側の 0105_1 と山頂南東側の 0105_2 の二カ所に分けて設置した。

3. GPS 観測ならびに光波測距

GPS 観測は、1988 年 9 月 20 日～27 日の 08:00～10:40 (UTC) に行った。観測時間帯は、観測期間中で最も多い 3 個の衛星 (SV03, SV11, SV13) が約 2 時間連続して観測可能な時間帯である (図 2)。観測には東北大学所有の Trimble 社製 GPS 受信機 4000SD を 4 台、東京大学地震研究所所有の Wild 社製 WM101 を 3 台用いた。観測状況を受信機の種類別に表 1-1, 表 1-2 に示す。さらに、GPS 観測中には、大気遅延を補正するため、15 分ごとに気温、気圧、湿度の測定を行った。

光波測距は、東北大学所有の Geodimeter 社製光波測距儀 114 型 (以下では G114 と略記) と東京大学地震研究所所有の Wild 社製 DI-3000 を用いて行った。G114 を用いた測量は、9 月 22 日、23 日、26 日、27 日、10 月 19 日の計 5 日間、9 測線について実施した (表 1-1)。基線 0101-0103 と 0106-0107 については測距儀と反射鏡を入れ替えて逆方向から測量を行っている。DI-3000 による測量は、22 日に、基線 0106-0107 について実施した。光波測距では、測距儀と反射鏡の両地点において気温と気圧を測定し、気象補正に用いた。

4. 測量結果

GPS 観測データの解析は、それぞれの受信機に付属しているソフトウェア、すなわち、4000SD

については TRIMVEC を、WM101 については POPS を用いて行った。解析を行った時間帯は 3 衛星の高度角が 10 度以上の時間帯である。図 2 ではその時間帯を砂目で表してある。今回、基線長が最大でも 10 km 程度なので、解析には L1 波のみを用いた。さらに、15 分間隔で実施した気象観測で得られた気温、気圧、湿度の平均値を用いて大気遅延を補正した。ただし、標準大気モデルを用いた場合と気象観測の実測値を用いた場合の基線長の違いは 1 cm 以下であった。なお、WM101 については、#248 の時計が観測開始から 30 分間程度動作が安定しなかったため、解析時間を一律に短縮し 08:50~10:40 (UTC) の 1 時間 50 分とした。また、21 日の基準点 0109 における WM101 (#248) による観測では、タイマーを用いた自動観測の不具合によりデータが取得できなかった。23 日には、テープへのデータ保存に際しフォーマットのトラブルが発生したため、WM101 の全点について解析不能であった。

光波測距では測定結果に対し、器高補正、標高差補正、気象補正を施した。

GPS 観測による基線長測定の結果を表 2-1、表 2-2、表 2-3、表 3 に、光波測距の結果を表 3、表 4 に示す。ここで「較差」は繰り返し観測の中での最大値と最小値の差を表している。なお、表 2-1 中の 4000SD による 9 月 21 日の観測結果は、他の観測結果との比較から大きな測定誤差を含むと考えられ、以下の考察から省く。また、27 日に実施した基線 0101-0104 と基線 0103-0104 の光波測距では十分な精度の測定結果を得ることができなかったため表から省いてある。

表 2-1 には GPS 繰り返し観測と異機種受信機による観測結果の比較を、表 2-2 には GPS 繰り返し観測の結果を、表 3 には光波測距と GPS 観測の結果の比較を示してある。異機種受信機による観測値の差や繰り返し観測の較差の中で最も大きなものは絶対値で 4 cm、相対値で 5 ppm 程度である。他方、GPS 観測と光波測距の差は 4 cm (8 ppm) 以下であった。

辻・他 (1988) は、基線長が 300 m から 1000 km の基線について GPS 繰り返し観測を実施し、その結果から基線長に対する GPS 観測の精度は $2\text{ cm} + 2\text{ ppm}$ 程度としている。上記の今回の観測結果も概ねこの範囲に入っている。この GPS 観測の精度は、(1) 同時に受信できる衛星の数が少なく、(2) 受信時間が短いうえに、(3) 天球上の衛星の配置が偏っていることに依る (図 2、図 3 参照)。ちなみに、今回使用した 3 個の衛星 (SV03, SV11, SV13) は同一軌道面上を周回するものであった。これらの制約は、GPS が整備の途上にあるためであり、今後整備が進むことで改善され、観測精度が向上するものと期待される。

謝辞

基準点の設置ならびに測量の実施にあたっては、福島県、猪苗代町、環境庁、営林署、裏磐梯スキー場、猫魔スキー場をはじめとする関係機関にご協力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

辻宏道・井上康司・板橋昭房・黒石裕樹・村上 亮・増田 実 (1988) 日本における GPS 干渉測位法の精度 -Macromet II による観測結果-。測地学会誌, **34**, 109-123.

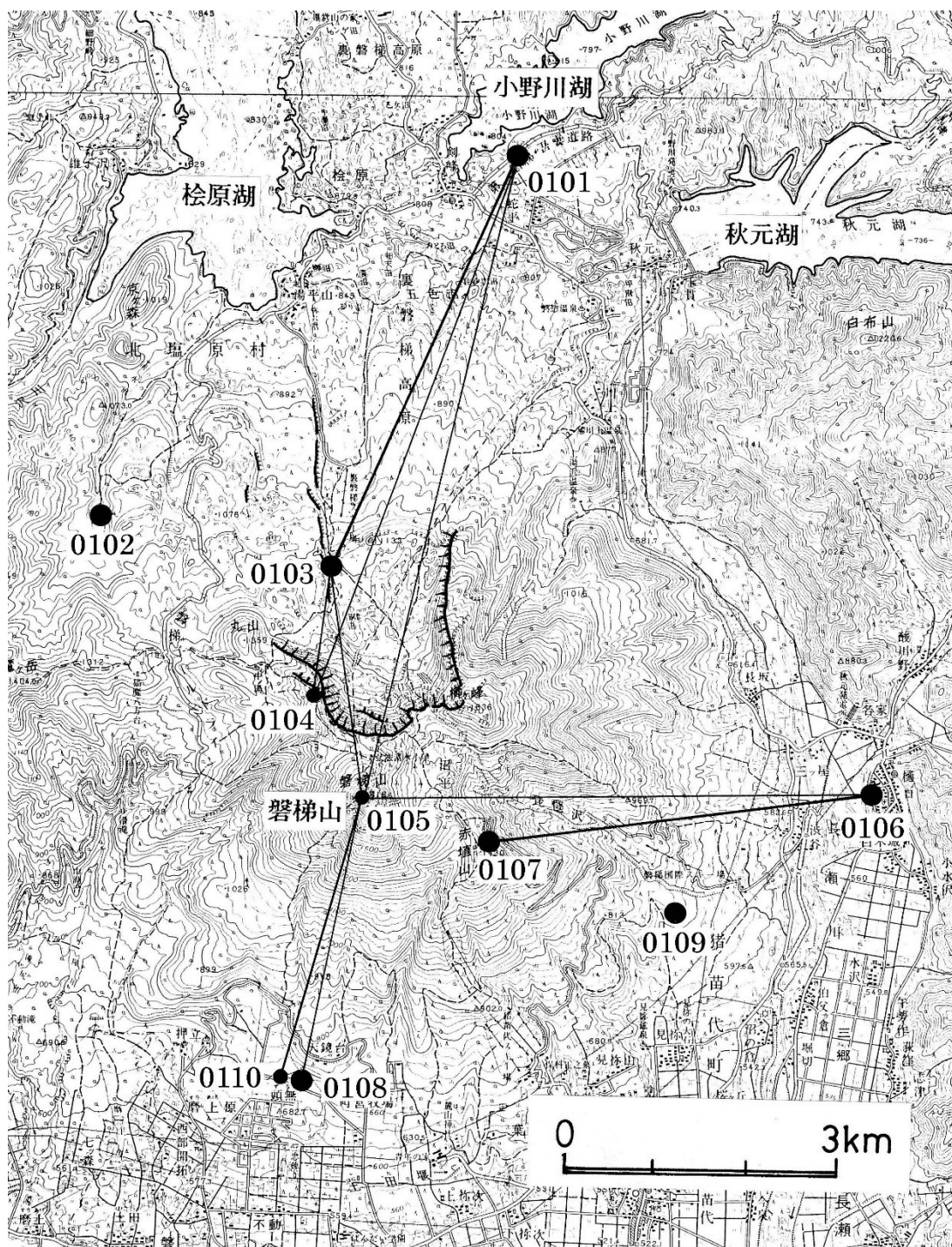


図1 磐梯火山における測地測量基準点網.

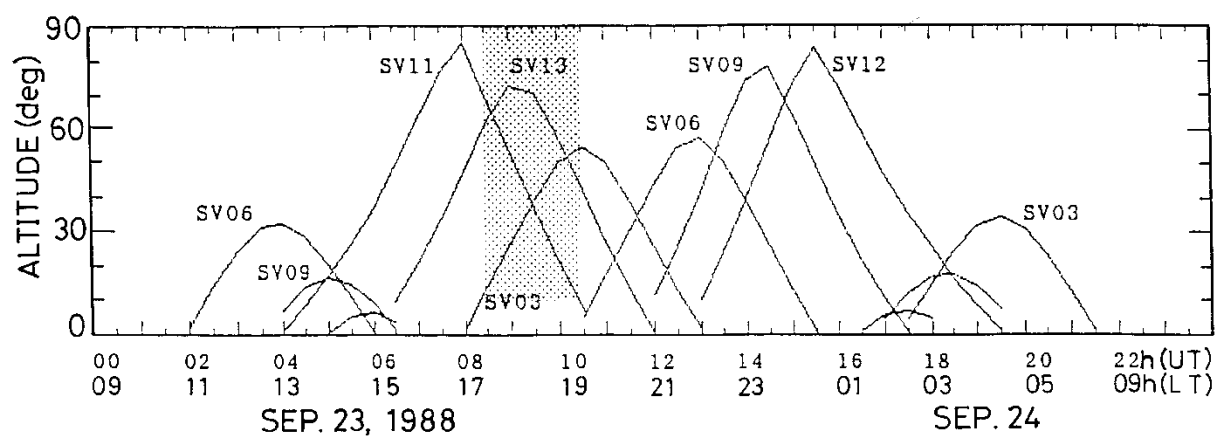


図2 衛星高度の時間変化 (9月23日 00:00~24:00 UTC).
砂目の部分が解析に用いた時間帯.

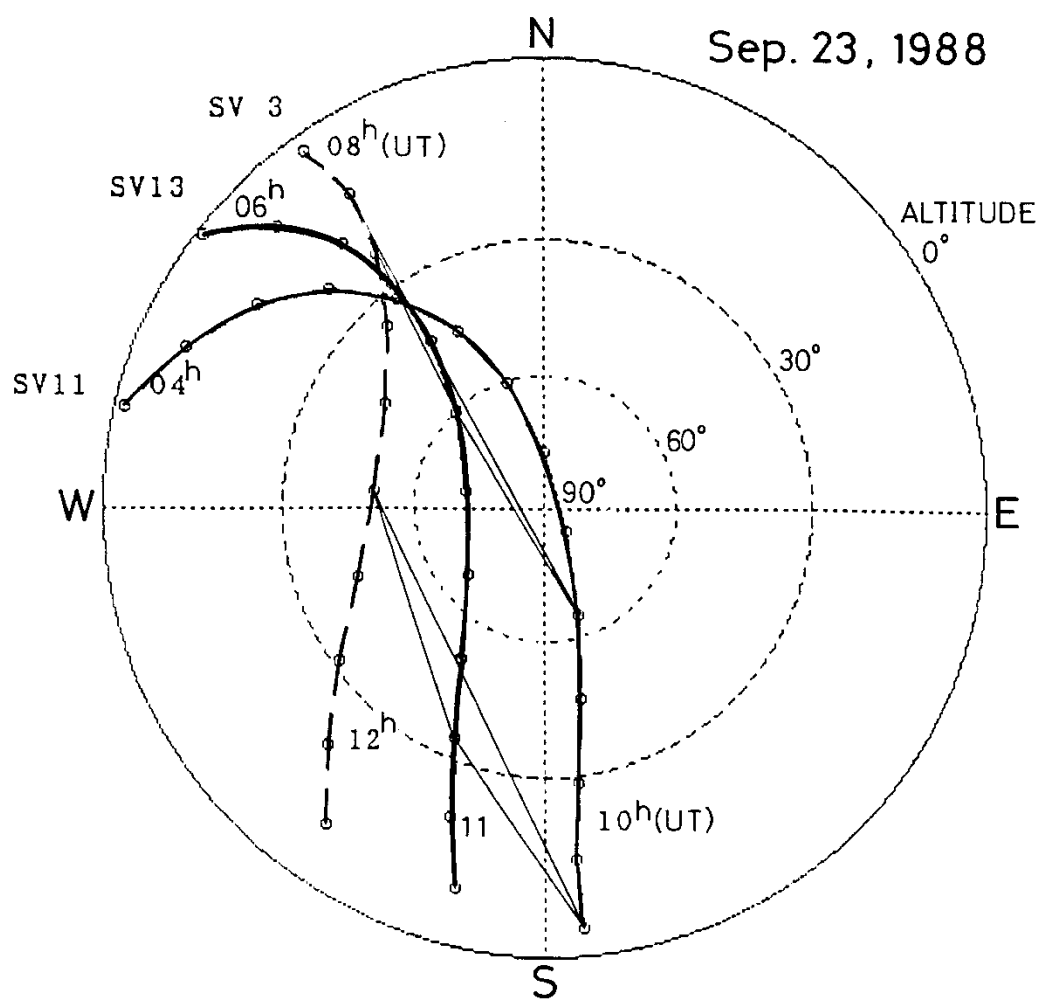


図3 天球上の衛星軌跡 (9月23日).

表 1-1 GPS 受信機 4000SD と光波測距儀 Geodimeter 114 ならびに反射鏡の設置状況.

月日	通算日\基準点	0101	0102	0103	0104	0105	0106	0107	0108	0109	0110
9/20	264						●		●	●	
21	265	●	●					●	●		
22	266	●◎		●○			●◎	○	●		
23	267			●			●○	●◎		●	
24	268		●	●				●		●	
25	269	●							●	●	
26	270	●○		●◎				●			
27	271	○	●	○	◎		●		●		
10/19	293	○		○		◎	○		○		○

● : 4000SD, ◎ : G114, ○ : 反射鏡

表 1-2 GPS 受信機 WM101 の設置状況. 数値は機体番号.

月日	通算日\基準点	0101	0102	0103	0106	0107	0108	0109
9/21	264			#201	#255			#248
22	266		#255			#201		#248
23	267		#255	#248			#201	
24	268		#255		#248		#201	

表 2-1 GPS 受信機 4000SD と WM101 による基線長測定の結果.

受信機 \ 基線	0101-0108		0103-0106		0106-0108	
4000SD	*9/21	10276.562	9/22	6453.463	9/20	6988.334
	9/22	10276.947	9/23	6453.454	9/22	6988.364
	9/25	10276.969			9/27	6988.347
平均		10276.958		6453.459		6988.348
較差		0.022		0.009		0.030
WM101	9/24	10276.914	9/21	6453.458	9/24	6988.379
差		0.044		0.001		0.031
		4.3 ppm		0.2 ppm		4.4 ppm

(単位 : m)

表 2-2 4000SD による繰り返し観測の結果.

基線	0102-0108		0103-0107		0108-0109	
基線長	9/21	6498.693	9/23	3485.507	9/20	4470.194
	9/27	6498.680	9/26	3485.504	9/25	4470.171
平均		6498.687		3485.506		4470.183
較差		0.013		0.003		0.023
		2.0 ppm		0.9 ppm		5.1 ppm

(単位 : m)

表 2-3 WM101 による基線長測定の結果.

基線	0101-0106	0102-0107	0102-0109	0107-0109
基線長	7991.055	5543.254	7628.654	2213.937

(単位 : m)

表 3 光波測距と GPS 観測による基線長測量結果の比較.

測機 \ 基線	0101-0103		0106-0107	
G114	9/22	4822.030	9/22	4219.793
	9/26	4822.033	9/23	4219.785
DI3000			9/22	4219.791
平均		4822.032		4219.790
4000SD	9/22	4821.995	9/23	4219.779
差		0.037		0.011
		7.7 ppm		2.6 ppm

(単位 : m)

表 4 光波測距儀 Geodimeter 114 による基線長測量の結果.

基線	0105_1-0101	0105_1-0103	0105_2-0106	0105_2-0108	0105_2-0110
基線長	7153.131	2611.489	5712.409	3357.684	3417.463

(単位 : m)

磐梯火山の熱的調査

鍵山恒臣*・ハビエル サルガド パレハ*

*東京大学地震研究所

1. はじめに

磐梯火山の地熱活動は、1888 年の爆裂火口内の銅沼付近、沼ノ平の北部、中ノ湯付近の 3 ケ所に微弱な活動がある他、1888 年の爆裂火口壁（銅沼と沼ノ平のほぼ中間点付近や銅沼と中ノ湯の中間点付近など）にごく弱い噴気活動が存在する事が知られている（図 1）. これらの地熱活動については、気象庁若松測候所により噴気温度等の現地調査が年に 3 回行われており、活動の時間的推移が追跡されている（火山報告）. 1988 年磐梯火山集中総合観測の一環として、これらの地

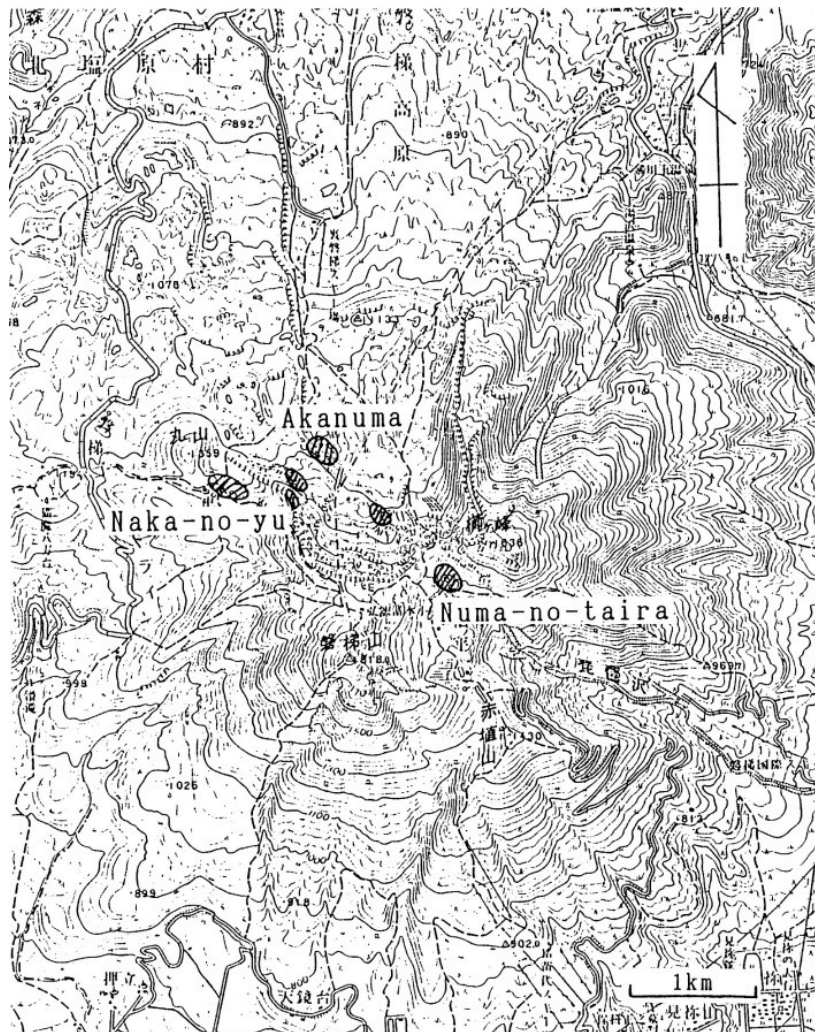


図 1 磐梯火山調査域の位置

熱活動の分布状況と活動の規模を明らかにするため、1988年9月21、22日に銅沼、沼ノ平周辺において、地上赤外映像装置による地表面温度測定および70 cm 深地中温度測定を行った。70 cm 深地中温度測定はおよそ 1 W/m^2 以上、地表面温度測定はおよそ 100 W/m^2 以上の熱異常を検出することを目的としたものである。本報告では観測の結果を示すとともに、既存の資料も加えて磐梯火山の熱的活動の状態を報告する。

2. 地表面温度測定の結果

地熱活動の存在が知られている上記3ヶ所のうち、沼ノ平北部と銅沼の2ヶ所を中心にその周辺の火口壁や火口原の地表面温度分布を調査した。測定は、松下技研製のパナサーモ MG-IR12(検出波長 $8\text{--}14 \mu$, 撮像範囲 36° , 分解能約 35 mrad .)による赤外映像をビデオレコーダーに現地記録した後、研究室内で再生、A/D 変換を行い、パソコンで解析を行う方法をとった。解析方法の詳細は既に Kagiya and Hagiwara (1980), 鍵山他(1981)に示してあるので、ここでは簡単に示すが、まず、特に地熱異常のない平常状態の地表面温度 (T_0) とデータに含まれる標準偏差 (σ_T) を推定し、有意な温度異常 ($T_0 + 3\sigma_T$ 以上) を抽出する。次に温度異常の部分について Sekioka (1983)の方法により、次式から熱エネルギー放出率 Q_s (Watt) を推定する。

$$Q_s = 34 \times \sum (T_i - T_0) A, \quad T_i > T_0 + 3\sigma_T$$

ここで、 A は1画素が代表する表面積である。以下にそれぞれの測定結果を示す。

2-1. 沼ノ平

沼ノ平は、西側を磐梯山頂、南東側を赤埴山、北側を櫛ヶ峰に囲まれた凹地で、古い時代の山体崩壊を伴った爆裂火口の跡とされている。北側火口壁にあたる北部の尾根の両側の2ヶ所に微弱な地熱活動を有している。9月22日に図2に示す N_1 , N_2 , N_3 の3地点から沼ノ平とその周

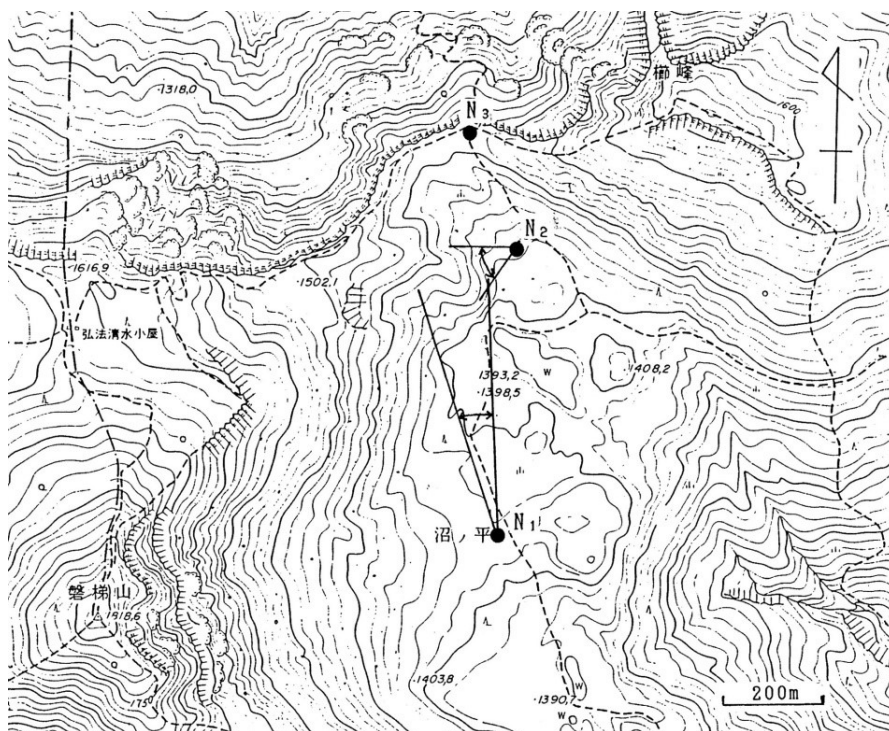


図2 沼ノ平の地上赤外映像装置による表面温度観測点



図 3 a N1 点から見た沼ノ平北部の尾根

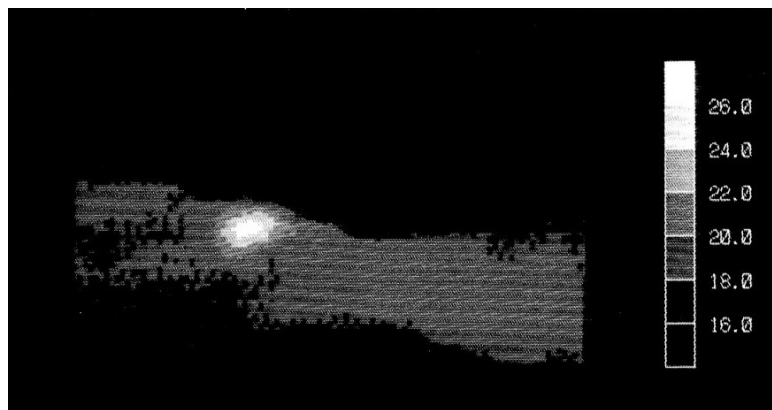


図 3 b N1 点から測定した沼ノ平北部の尾根の表面温度のモノクロ濃淡画像
測定日：9 月 22 日.

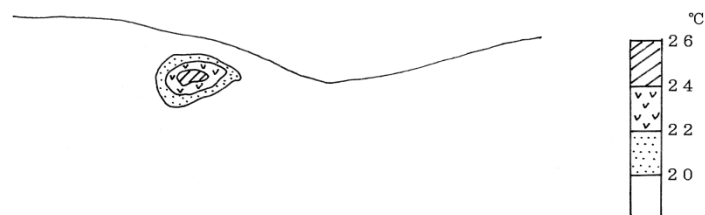


図 3 c N1 点から測定した沼ノ平北部の尾根の表面温度

辺の山体の赤外映像を可能な限り撮像した．図 3 a は N1 点から見た沼ノ平北部の尾根，図 3 b, c は，地表面温度分布をそれぞれモノクロの濃淡および記号で表したものである．観測時の周辺の平常温度 T_0 は $18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，標準偏差 σ_T は $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ と求められるので有意な温度異常は $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上の部分となる．このような異常は，既に知られている北部の尾根の噴気地のみで，それ以外の山体斜面についても測定を行ったが有意な異常は検出されなかった．熱異常の面積はおよそ



図 4 a N2 点から見た沼ノ平北部の尾根

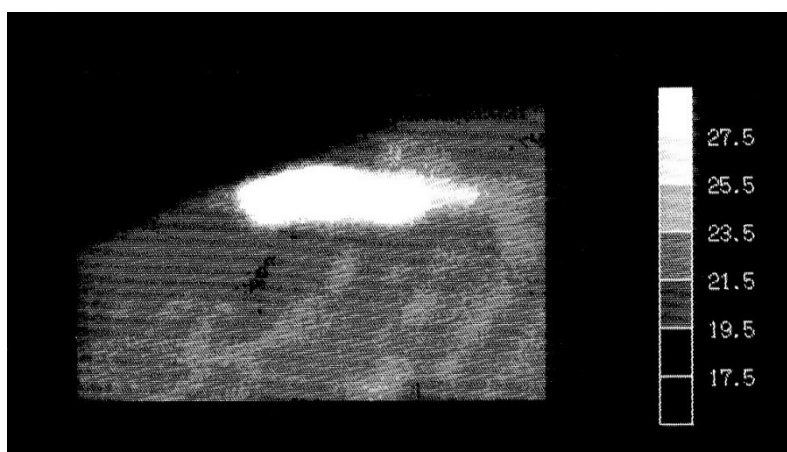


図 4 b N2 点から測定した沼ノ平北部の尾根の表面温度のモノクロ濃淡画像
測定日：9 月 22 日.

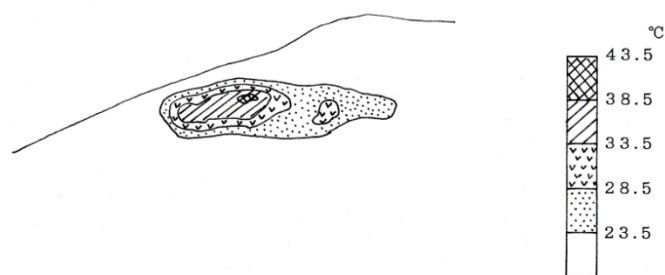


図 4 c N2 点から測定した沼ノ平北部の尾根の表面温度

1,400 m², 熱エネルギー放出率は 51 KW と計算される. 図 4 a は, 上述の沼ノ平北部の尾根の反対側を N2 点から見たもので, 図 4 b, c は, それに対応する地表面温度分布である. 観測時の周辺の平常温度 T_0 は 21.2 °C, 標準偏差 σ_T は 0.75 °C と求められるので有意な温度異常は 23.5 °C 以上の部分となる. このような異常は, 先に示した北部の尾根の異常の裏側にあたる噴気地のみ

で、熱異常の面積はおよそ 960 m^2 、熱エネルギー放出率は 35 KW と計算される。N2点からは、これ以外の山体斜面や沼ノ平についても測定を行ったが、有意な異常は検出されなかった。また、N3点からの測定からも有意な異常は検出されなかった。したがって、地表面温度測定によって検出される沼ノ平の熱異常は、既に知られている噴気地のみに限られ、熱異常の面積はおよそ $2,300 \text{ m}^2$ 、熱エネルギー放出率は 86 KW 程度となる。

2-2. 銅沼

図5のA点から9月21日に1888年火口の火口壁全般について赤外映像を撮像した。図6a, bはA点から1888年の火口壁を南に見て東側および西側の部分である。図6c, dは図6bに示す銅沼付近、図6eは火口壁西側の地表面温度分布である。観測時の平常温度等は日射のあたる角度などにより少しずつ違っているため適当な部分に分けて検討した。銅沼付近の平常温度 T_0 は 18.0°C 、標準偏差 σ_T は 0.72°C と求められるので有意な温度異常は 20.2°C 以上の部分となり、熱異常の面積はおよそ $3,000 \text{ m}^2$ 、熱エネルギー放出率は 110 KW 程度と推定される。また、西側火口壁上部の T_0 は 15.0°C 、標準偏差 σ_T は 0.45°C で、有意な温度異常 (16.4°C 以上の部分) がわずかに検知された。この部分には肉眼でもごく弱い噴気が確認されるが、平常温度と最高温度との差はたかだか 2°C 程度で熱異常の面積等の推定はできなかった。またこの周辺の火口壁には層状に白っぽく変質した部分が見られ、表面温度も有意ではないがわずかに高くなっており、地熱異常が存在するのかもしれない。これ以外の部分についても検討を行ったが、有意な異常は検知されなかった。また、9月22日に図5のN3から火口内全般について測定を試みたが、水蒸気による赤外線の吸収が大きく良好な映像は得られなかった。

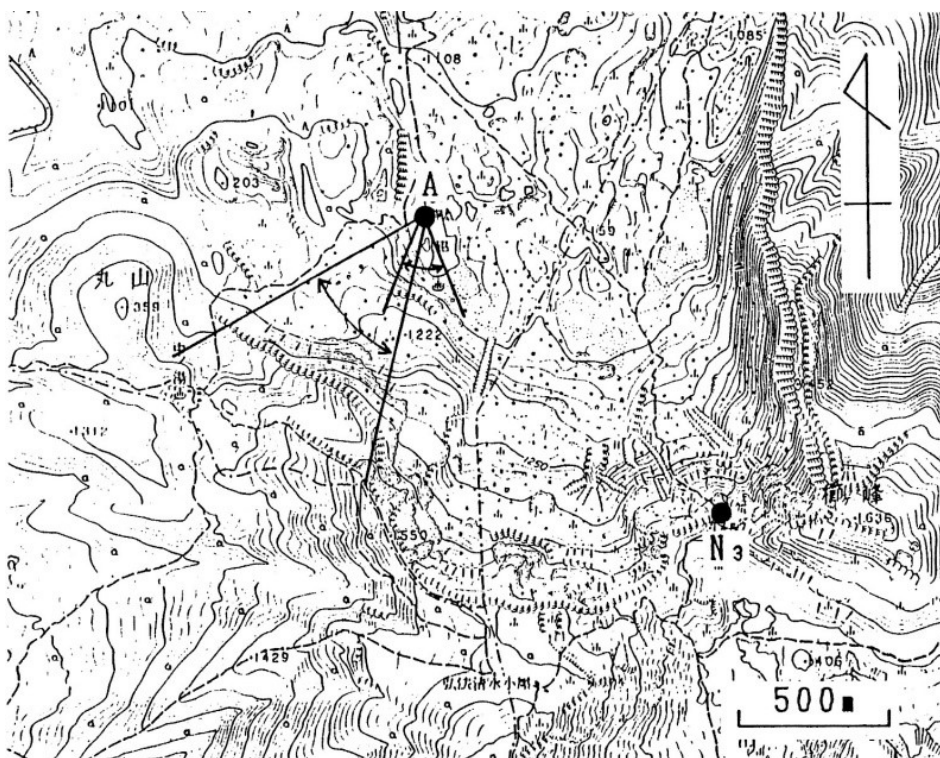


図5 銅沼の地上赤外映像装置による表面温度観測点



図 6 a A 点から見た 1888 年火口の東側部分



図 6 b A 点から見た 1888 年火口の西側部分

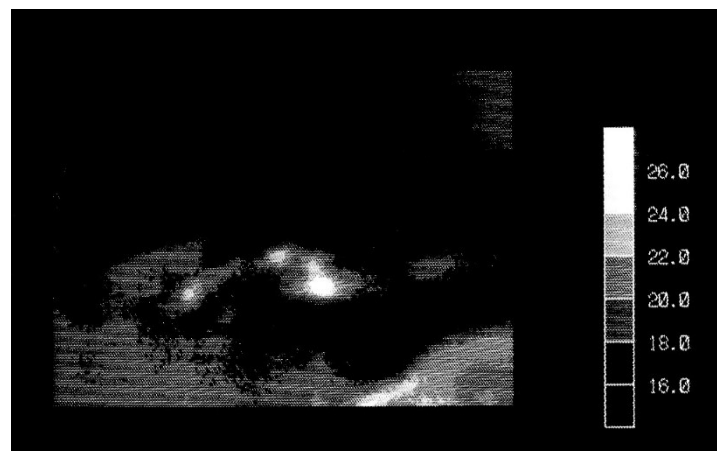


図 6 c A 点から測定した銅沼付近の表面温度のモノクロ濃淡画像
測定日：9 月 21 日.

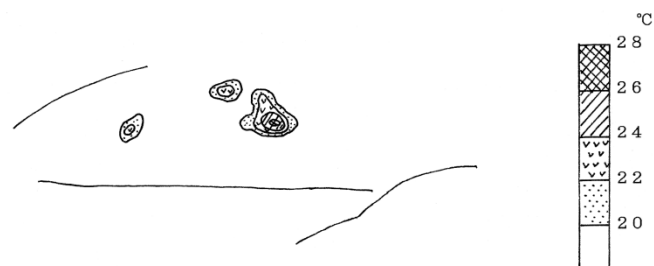


図 6 d A 点から測定した銅沼付近の表面温度

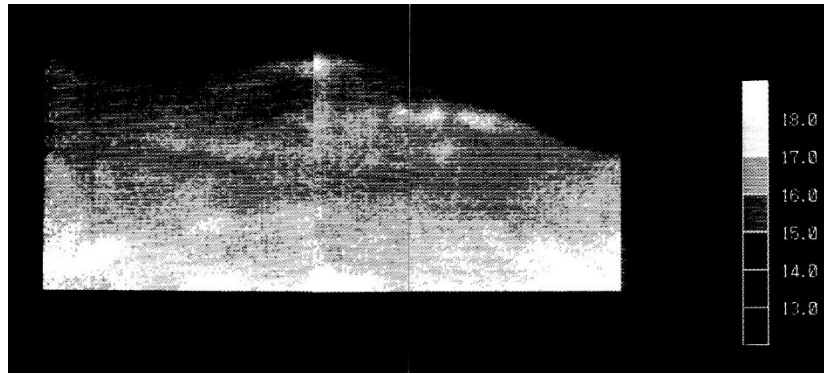


図 6 e A 点から測定した 1888 年火口壁の西側上部の表面温度のモノクロ濃淡画像
測定日：9 月 21 日.

3. 地中温度測定の結果

前節の地表面温度測定によって検知される熱異常より低いレベルの熱異常の分布状況を調査するために、図 7 a, b に示すように沼ノ平に至る磐梯山南側登山道および銅沼に至る北側登山道沿

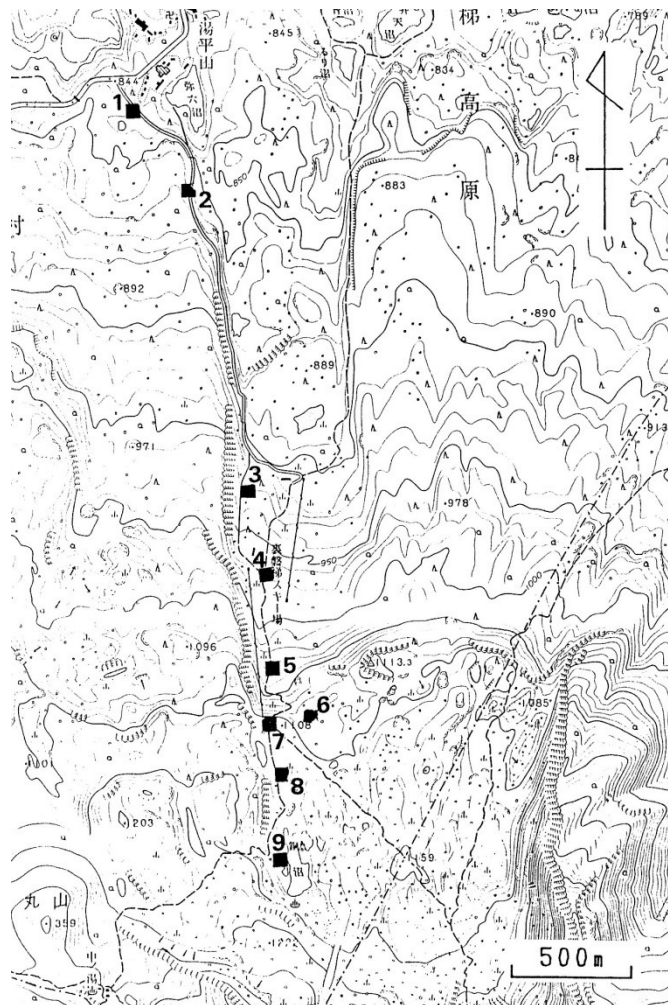


図 7 a 70 cm 深地中温度の測定点(北側斜面)

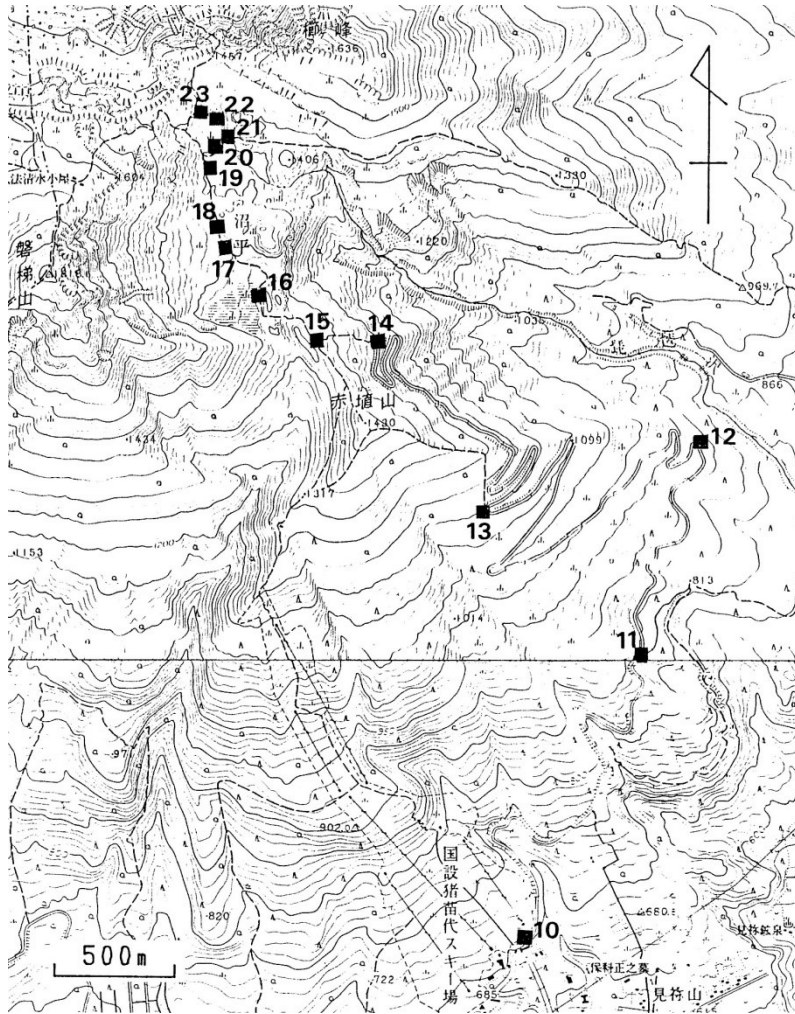


図 7b 70 cm 深地中温度の測定点(南側斜面)

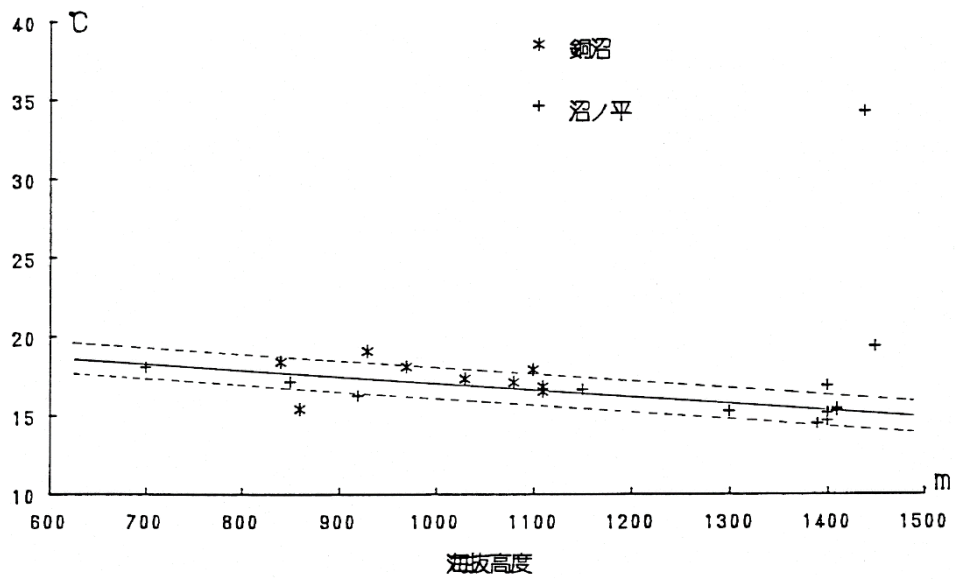


図 8 70 cm 深地中温度と海拔高度との関係

表 1 70 cm 深地中温度

NO.	温度 °C	海拔高度 m	備 考
1	18.4	840	
2	15.4	860	
3	19.1	930	
4	18.1	970	
5	17.3	1030	
6	17.1	1080	
7	17.9	1100	
8	16.8	1110	
9	16.5	1110	銅沼の岸
10	18.0	700	
11	17.1	850	
12	16.2	920	
13	16.6	1150	
14	15.2	1300	
15	14.4	1390	
16	14.6	1400	
17	15.2	1410	
18	15.3	1410	
19	15.1	1400	
20	15.4	1410	
21	16.8	1400	
22	34.2	1440	噴気地から20m程度
23	19.3	1450	噴気地から40m程度

いの 23 点において 70 cm 深地中温度測定を実施した。測定結果は表 1 に示す通りである。地中温度は海拔高度に依存するため、通常は地中温度と海拔高度との関係式から任意の高度における標準地温を求め、測定された地温との差を異常温度として議論の対象とする。熱伝導が卓越する弱い熱異常地では熱流量と異常温度との間に線形関係が成立ち、一般的には、3 °C 程度の異常地では 1 W/m^2 になる（たとえば江原，1973）。70 cm 深地中温度 T_{70} [°C] と海拔高度 h [m] との間には図 8 に示すように

$$T_{70} = -0.00413 \cdot h + 21.2 \quad (\sigma = 1.05 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

の関係が見られ、登山道に沿う大部分の場所では有意な熱異常が存在しない事がわかる。沼ノ平周辺については、噴気地のごく近傍の No.22 と No.23 の 2 点に有意な異常が測定されるだけである事から、 1 W/m^2 を越えるような異常はたかだか噴気地の周囲 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 程度の範囲に限られていると考えられる。観測時間の制約から付近の詳細な地中温度分布を調査することができなかったため、熱伝導による熱エネルギー放出率を正確に求めることはできないが、仮に噴気地の周囲 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ というやや広い範囲に数 $^{\circ}\text{C}$ の地中温度異常があったとしてもその量は 20 KW 程度となり、前節の結果に比べて無視し得る程小さい。一方、北側斜面については、1888 年火口の内ではむしろ低温となる傾向が見られ、火口内の冷たい降雨水の影響が現れていると考えられる。また、銅沼の噴気地から約 100 m の地点 (No.9) においても有意な異常は検知されず、仮に $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ の範囲に熱異常が存在したとしても、熱伝導による熱エネルギー放出率は、20 KW 程度と計算され、銅沼周辺の熱エネルギー放出率の推定値に大きく影響することはない事がわかる。

4. 磐梯火山の熱的状态

こうした観測結果から、磐梯火山の熱的活動度は次のように考えられる。沼ノ平周辺において地表面温度測定によって検出される熱異常は、既に知られている噴気地のみで、熱異常の面積はおよそ $2,300 \text{ m}^2$ 、熱エネルギー放出率は 86 KW 程度である。これより低いレベルの熱伝導による熱エネルギー放出率は多く見積っても 20 KW 程度であり、合計の熱エネルギー放出率は 110 KW を越えることはないであろう。一方、1888 年火口の火口壁では、地表面温度測定によって検出される熱異常は、既に知られている銅沼付近の噴気地の他、西側火口壁上部に微弱な異常が見られた。銅沼付近の熱異常の面積はおよそ $3,000 \text{ m}^2$ 、熱エネルギー放出率は 110 KW 程度である。熱伝導による熱エネルギー放出率は、多く見積っても 20 KW 程度であり、合計の熱エネルギー放出率は 130 KW を越えることはないであろう。したがって、これら両地域からの熱エネルギー放出率は 0.2 MW 程度と推定され、今回調査しなかった中ノ湯等の地熱活動がより小規模なものであることを考慮すると、磐梯火山の熱エネルギー放出率は 0.2 MW ないし 0.3 MW 程度で、熱的活動度は他の火山に比べてきわめて低い事がわかる。

磐梯火山の過去の地熱活動についての記載はあまり多くないが、Sekiya and Kikuchi (1889)は、1888 年の噴火以前には沼ノ平中央部に硫黄山と呼ばれる噴気地帯があった事、磐梯山の北西斜面 (1888 年爆裂火口の火口縁付近) に上ノ湯、中ノ湯、下ノ湯の 3 つの温泉があった事、1888 年の噴火後には、爆裂火口内に現在の沼ノ平と銅沼の噴気地帯とを結ぶ北西南東方向に複数の噴気活動が存在していた事を記している。このような地熱活動の配置を考えると、現在の地熱活動は、1888 年の噴火に密接に関係したと思われる沼ノ平から銅沼に至る線上のグループと爆裂火口の火口縁に沿うグループとに大別され、別々の熱エネルギー放出の機構を持つものかもしれない。

これらの地熱活動が時間的にどのように推移しているかは重要な問題である。図 9 a, b, c は、若松測候所による噴気温度調査結果を図化したものである。それによると、銅沼付近の 3 ケ所の測定値の平均は 1965 年の測定開始以降現在まで緩やかな上昇を続けているのに対し、沼ノ平では 1965 年から 1975 年頃まで上昇した後 $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度で頭打ち、中ノ湯では 1980 年以降急速に温度が低下している。こうした変化が何を意味するかは、現段階では不明である。

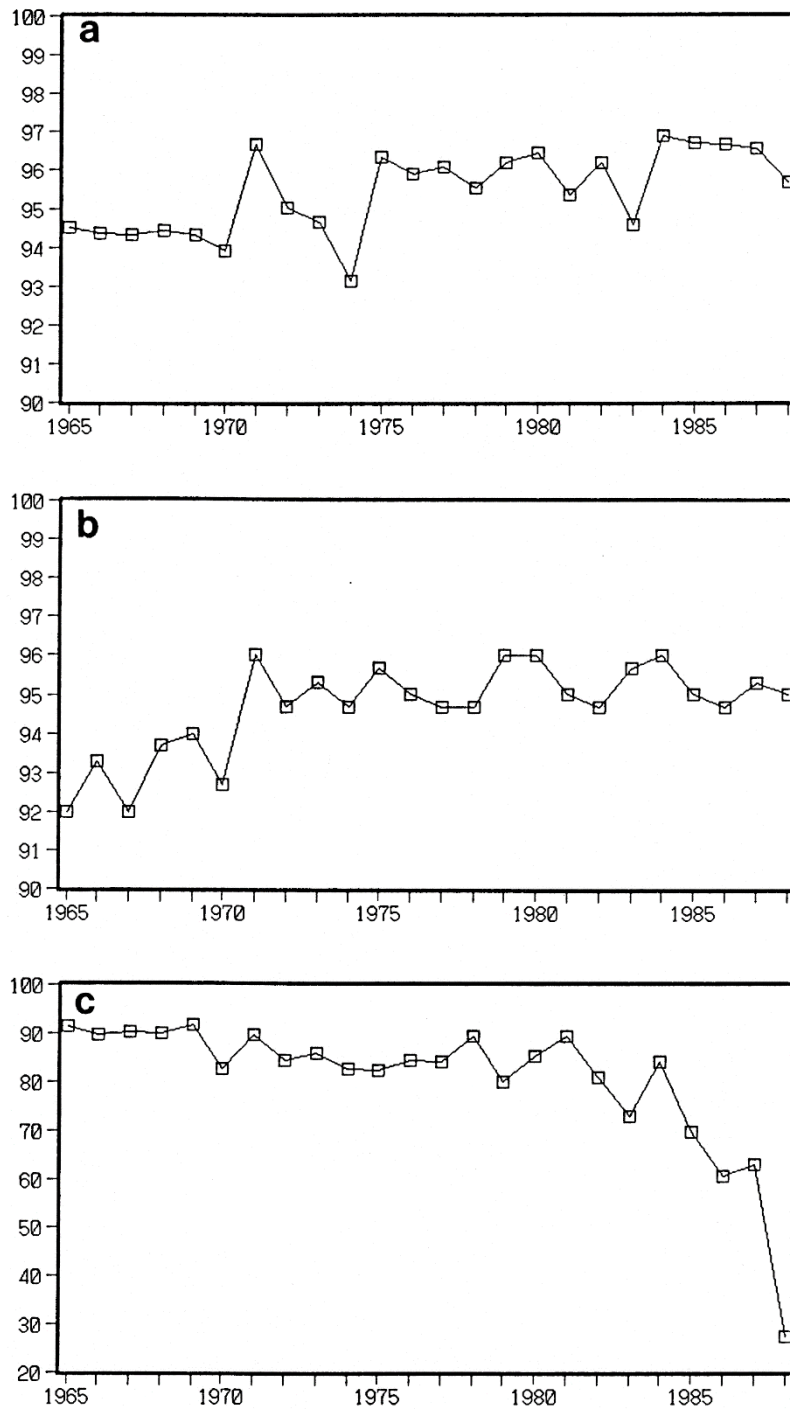


図9 噴気温度の時間変化(若松測候所による)

a : 銅沼周辺の3点の平均温度, b : 沼ノ平, c : 中ノ湯.

5. まとめ

1988年磐梯火山集中総合観測の一環として1988年9月21, 22日に銅沼, 沼ノ平周辺において, 地上赤外映像装置による地表面温度測定および70 cm 深地中温度測定を行った. 観測の結果, 沼ノ平周辺からの熱エネルギー放出率は110 KW 以下, 銅沼周辺からの熱エネルギー放出率は130 KW を越えない事がわかり, 磐梯火山の熱エネルギー放出率は未調査域を考慮しても0.2 な

いし 0.3 MW 程度ときわめて低い熱的活動度である事が明らかとなった。現在の地熱活動は、その空間的配置を考えると、1888 年の噴火に密接に関係したと思われる沼ノ平から銅沼に至る線上のグループと爆裂火口の火口縁に沿うグループとに大別されるようで、特に前者は磐梯火山の熱的狀態をより本質的に反映するものと期待される。それぞれの地熱活動域の活動度は、時間的にそれぞれ違った推移を示している。こうした違いが何を意味するかは、上述の「エネルギー放出機構の違いの妥当性」も含めて検討していく必要があり、今後、地下の電気抵抗構造の探査、温度変化に対応した電気抵抗構造の変化を調査する事などが有力な手がかりとなるであろう。

謝辞

本観測を実施するにあたり、浜口博之教授、植木貞人氏をはじめ東北大学理学部の方々にお世話をいただいた。この紙面を借り謝意を表します。

文 献

江原幸雄 (1973) : 活火山体地表近くの地温分布. 北大地球物理研究報告, **30**, 15-32.

Kagiyama, T. and Hagiwara, M. (1980): Geothermal survey in and around O-ana crater and Jodo-daira flat, the volcanoes Azuma. Bull. Earthq. Res. Inst., **55**, 681-703.

鍵山恒臣・萩原道德・渡部暉彦 (1981) : 吾妻火山大穴火口周辺の熱的調査. 吾妻火山集中総合観測報告, **55**-67.

Sekiya, S. and Kikuchi, Y. (1889): The eruption of Bandai-san. Jour. Sci. Coll. Imp. Univ., **3**, 91-172.

Sekioka, M. (1983): Proposal of a convenient version of the heat balance technique estimating heat flux on geothermal and volcanic fields by means of infrared remote sensing. Memoirs Defense Academy, **23**, 95-103.

磐梯山の火山ガス組成

平林順一*・大場 武*・小沢竹二郎**

*東京工業大学 草津白根火山観測所

**埼玉大学 工学部

1. はじめに

1988 年 9 月－10 月に実施された第 1 回磐梯山集中総合観測に参加し、9 月 22 日－24 日の間火山ガスの観測を行なった。磐梯山では、1888 年の爆発で開いた U 字形の火口の火口原にできた銅沼の周辺、山頂北東の沼ノ平、北西の中ノ湯の 3 カ所に噴気活動が認められている。これら火山ガスの組成については、会津若松測候所が北川式検知管により定期観測を行なっている以外は、ほとんど行なわれていない。筆者らはこの機会に、磐梯山の火山ガス組成を調べ、今後の観測に資する基礎データを得ることを主たる目的とした観測を実施した。

またこの調査時には、1978 年に噴火し、1979 年 10 月に集中総合観測が行なわれた吾妻山一切経の火山ガスの調査も併せて行なった。

2. 現地の状況

1) 銅沼噴気地帯

銅沼の噴気は、1988 年の爆裂火口内にできた銅沼の南側の標高 1130－1140 m の火口壁に大きくわけて 2 カ所の噴気地帯から噴出している。この地域の噴気ガスは温度が 95℃前後で、いずれも噴出圧力が弱く、硫化水素などの臭気は少なく、硫黄の析出も極めて僅かである。噴気孔周辺は、火山ガスにより著しく変質作用を受けて白色ないし灰色を呈している。この外 U 字形火口壁の上部にも弱い噴気が認められた。

2) 沼ノ平噴気地帯

赤埴林道終点から山頂への登山道の東、標高 1450 m の位置に、銅沼噴気地帯と同様に変質帯の数カ所から火山ガスが噴出しており、温度は同じく 95℃前後である。ここでも噴出圧力の強いガスは認められなかった。

3) 中ノ湯

山頂から北西 2 km に位置する中ノ湯脇の登山道沿いに植生のない変質帯があり、ここは、近づくとも若干硫化水素臭を感じるが、視認できる噴気はなく、また特に地温の高い場所も認められなかった。

3. 火山ガス採取と分析法

銅沼地区と沼ノ平地区においてそれぞれ 2 カ所で火山ガスを採取した (図 1 参照)。採取にあたっては両地域とも比較的噴出圧力の強い噴気孔を選び、チタンパイプを挿入し、噴気孔を塞ぎ

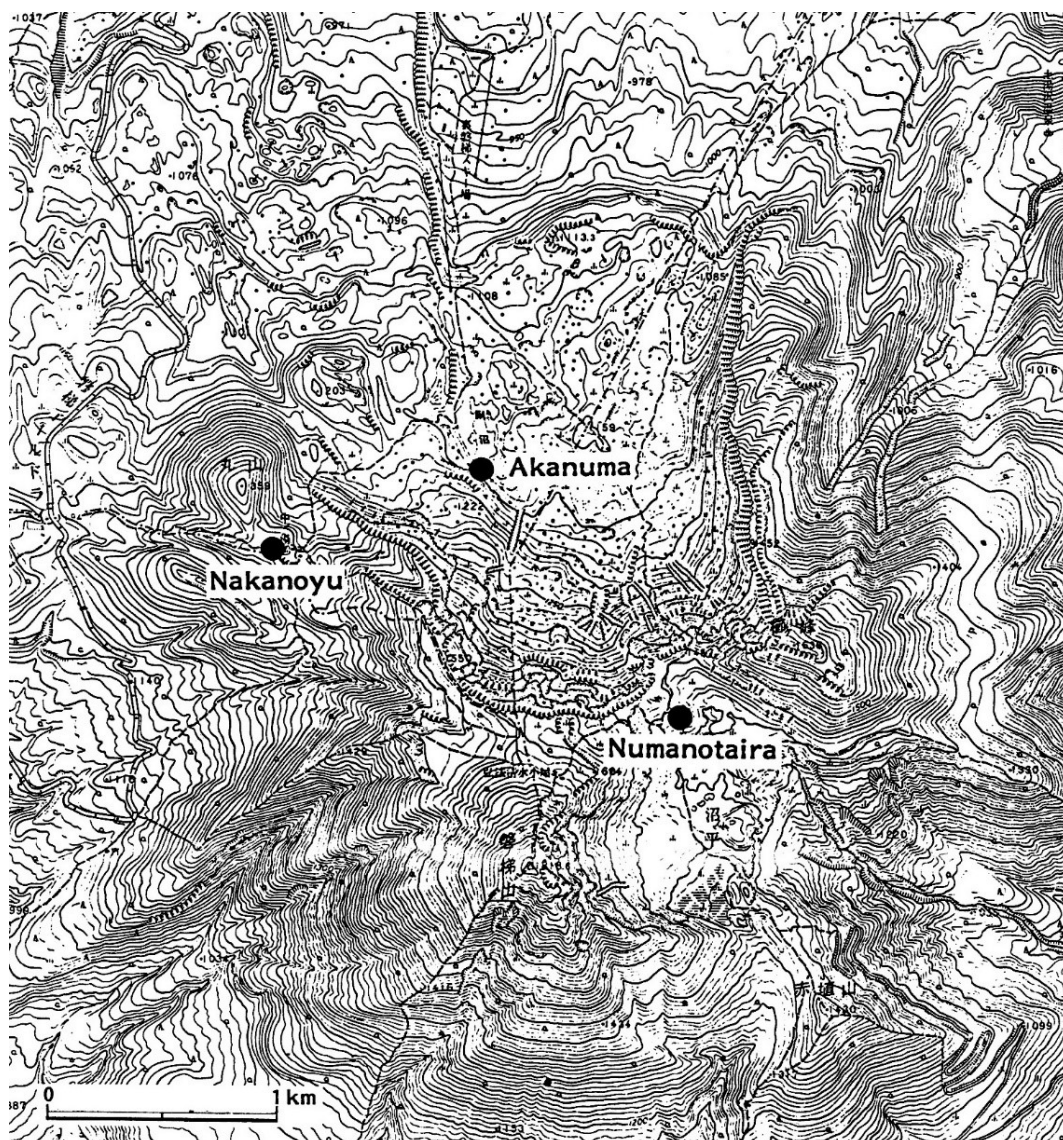


図1 火山ガス調査地点

空気の混入を防いだ。チタンパイプに、予め 5M KOH 20 ml を入れた 100 ml の二口注射器を接続し、火山ガスを導入した。これを持ち帰り、アルカリ溶液を一定量とし、全硫黄 (H_2S)、 CO_2 の分析に供した。全硫黄 (H_2S) は BaSO_4 重量法で、 CO_2 は微量拡散法で求めた。また注射器内の気体部分は体積を測定した後、ガラス製のアンプルに移し、アルゴンガスをキャリアーとした熱伝導度型 (TDC) ガスクロマトグラフ装置により H_2 、 N_2 などのアルカリに吸収されないガス成分 (R-ガス) の分析を行なった。水の含有量は注射器内に凝縮した体積から求めた。

吾妻山一切経では、 SO_2 と H_2S の分別定量を行なうため、0.05M KIO_3 -KI 溶液に火山ガスを吸収させ、濾別後それぞれ BaSO_4 重量法で求めた。

4. 火山ガス組成

採取した火山ガスの分析結果を表 1 に示した。同表には 1953 年に筆者の一人小沢が調査・分析した銅沼 (Iwasaki et al., 1962) と今回調査した一切経の火山ガス組成を併せて示した。銅沼

の火山ガスは水含有量が 99.5%と著しく多いことが特長の一つである。また酸性ガス成分では、 H_2S が 13%で、1953 年の値 17.8%に比べ若干少ない。一方沼ノ平の組成は、水含有量が 97.1%、97.7%、 H_2S が 3.0%、9.4%で銅沼に比べ共にやや少ない。両地点のガスで共通していることはアルカリに吸収されない R-ガスが 4-5%と多いことである。またその組成も H_2 が 30-40%、 CH_4 が 37-40%と多く、 N_2 が 21-30%と少ない特長を持っている。水含有量が多く、酸性ガス成分では HCl や SO_2 がほとんど含まれず H_2S も少ない。また R-ガス中に CH_4 が著しく多いなどの特長を持つ磐梯山の火山ガスは、噴出地点周辺の地形、噴出状況などと併せ考えると地表に噴出するまでの途中の通路で、それぞれ周辺からの水の付加、酸性ガス成分の地下水への溶解、有機物からの CH_4 の供給があると考えられる。すなわち、これら両地域の地下の比較的浅い場所に地下水層と有機物堆積層が存在すると思われる。 H_2 ガスは火山の活動状況を知る良い指標になる成分であり、一般的にその濃度が高いと高温タイプの火山ガスに由来すると考えられている。磐梯山の火山ガス中の H_2 濃度は 30-40%と高いが、その温度や噴出状況から考えてマグマから直接もたらされた H_2 のみではなく、途中で H_2O の分解などによる付加があるものと思われる。

吾妻山一切経の大穴は 1978 年に噴火し、火口内の噴気ガスの温度は噴火後の 1978 年 7 月には約 400℃と高温になり、ガス組成も HCl と SO_2 の濃度が著しく高くなった。その後は徐々に温度が低下し、化学組成も HCl や SO_2 が少なくなり、活動の低下と調和した変化を示し、噴火 3 年後にはほぼ噴火前の状態に復した（小沢ほか、1981）。今回の調査時の大穴火口内の噴気温度はいずれも 95℃程度で、火山ガス中の水含有量は 88-92%と比較的少ない。一方 1978 年の活動時の火山ガス中の水含有量は 97-98%であった。活動時には噴気ガスと共に水の噴出や火口外斜面からの温泉水の湧出が観察され、活動に伴い山体内の圧力増加により火口直下まで地下水位が上昇しており、このため当時の火山ガス中の水含有量が多かったと考えれば、今回の調査時の火口直下は比較的乾燥状態にあったとも言えよう。また酸性ガス成分では SO_2 がほとんどふくまれず、 H_2S も 3%と少なく、R-ガス中の H_2 濃度も低い。これらの火山ガス組成や温度などから、現在の一経は静穏な状態にあると言えよう。

参考文献

- 小沢竹二郎・君島克憲・当麻喜明・小坂丈予・平林順一(1981): 吾妻火山一切経山 1977-1979 年活動にともなう噴気ガス、温泉水の成分変化、吾妻火山集中総合観測報告書、pp.93-103.
- Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B., Kamada, M. and Hirayama, M. (1962): Volcanic gases in Japan, Bull. T. I. T., 47, pp.1-54.

表 1 磐梯山の火山ガス組成

Date	Locality	Temp. °C	H ₂ O V%	H ₂ Oを除いたガス組成 (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
1953.10.19	銅沼	95.5			0.0	17.6	67.2	15.2					
		90.0			0.3	23.2	69.0	7.5					
1988. 9.22		96.6	99.5		13.3		81.2	5.5		42.4	20.9	36.7	0.07
		96.5	99.5		13.8		81.9	4.3		33.3	27.1	39.5	0.17
9.23	沼の平	94.9	97.1		3.0		91.2	4.9		29.8	29.6	40.5	0.13
		95.0	97.7		9.4		85.7	4.8		33.9	27.8	38.2	0.12
9.24	吾妻山一切経 大穴	95.0	88.0		0.01	3.0	96.0	1.0	0.035	0.600	99.3	0.028	
		95.0	92.2		0.01	2.5	96.5	1.0	0.032	1.46	98.5	0.024	
	同 明治火口外斜面	95.0	89.7		0.03	0.8	98.1	1.1	0.041	0.765	98.2	0.918	0.03

磐梯火山の噴気、温泉ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比

野津憲治*・脇田 宏*・佐野有司*・五十嵐丈二*

*東京大学理学部

1. はじめに

磐梯火山は、1888 年の大崩壊をともなう噴火活動の後、現在に至るまで表面活動は比較的静かである。しかし、噴気活動は依然として続いており、長期にわたる活動予測を目的として、現在の潜在的活動度を把握しておく必要がある。本調査では、火山体から放出されている噴気や温泉ガス中のヘリウム同位体比を測定し、マグマ起源成分の分布の状況を調べた。

ヘリウムは化学的に不活性な気体で、質量数 3 と 4 の二つの安定同位体をもっている。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、地球構成部分ごとに異なり、大気では 1.40×10^{-6} (この値を $1 R_{\text{atm}}$ と呼んでいる) であるが、上部マントル物質では $8 R_{\text{atm}}$ 前後と高く、地殻物質では $0.1 R_{\text{atm}}$ 以下である。マントルで生成したマグマが上昇して地表に現れる過程は、マントル中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の高いヘリウムが地表へ運ばれる過程でもある。したがって、地下からもたらされるガスのヘリウム同位体比の空間分布や時間変化は、地下におけるマグマの分布状態やその変化を反映している。

2. 試料採取

試料採取は、1988 年 10 月 25 日から 26 日にかけて行った。磐梯火山周辺の温泉泉源 6 カ所を調査したところ、3 カ所で遊離ガスの放出が認められた。これら 3 カ所の温泉ガスと銅沼近くの噴気をヘリウム同位体分析用に採取した。図 1 に採取地点を示し、以下にガス噴出の状況を示す。

- (1) 押立温泉：さぎの湯の裏手に自噴泉（水温、 26°C ）があり、遊離ガスが放出していた。
- (2) 中の湯：小さな沼から温泉水（水温、 60°C ）が湧出しており、多くの気泡が噴出していた。そばの泥の中からも気泡が噴出していた。
- (3) 銅沼付近噴気：1888 年岩屑流堆積物上に噴気地帯が形成されていた。
- (4) 川上温泉：登山道脇の沢から自噴しており（水温、 27°C ）、遊離ガスを伴っていた。

3. ヘリウム同位体比の分析

鉛ガラス容器に採取された気体試料は、実験室においてその中のヘリウムが分離、精製されたのち、質量分析装置を用いて同位体比が測定された。分析方法の詳細についてはすでに報告されているので¹⁾、参照して頂きたい。

4. 分析結果とその考察

分析結果を表 1 に示す。

川上温泉を除く 3 試料は $(8.5-10) \times 10^{-6}$ の範囲に入っており、島弧マグマの値²⁾と同じである。このことは、磐梯火山ではマグマ起源のヘリウムが大気起源のヘリウムの混入をほとんどうけずに地表にもたらされていることを示している。磐梯火山は最近では表面活動が静かであるが、地

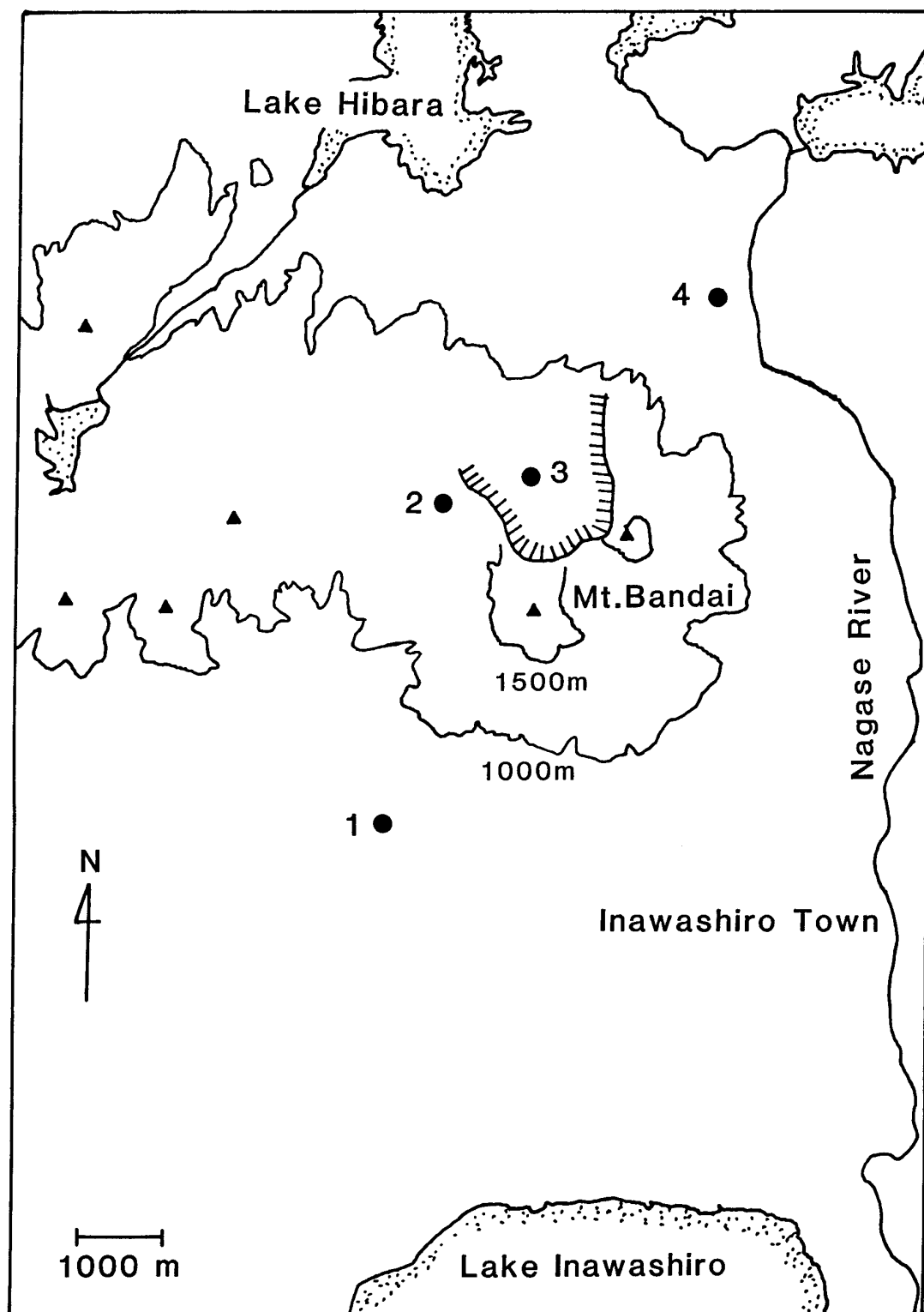


図1 分析試料採取地点

1 押立温泉、 2 中の湯、 3 銅沼付近噴気、 4 川上温泉

表1 ヘリウム同位体比測定結果

採取地点	採取日	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\times 10^{-6}$)	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (R_{atm})	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$
1 押立温泉	1988年10月25日	8.61 ± 0.04	6.15	2.6
2 中の湯	1988年10月26日	9.80 ± 0.06	7.00	14
3 銅沼付近噴気	1988年10月26日	9.34 ± 0.06	6.67	27
4 川上温泉	1988年10月25日	3.98 ± 0.03	2.84	0.38

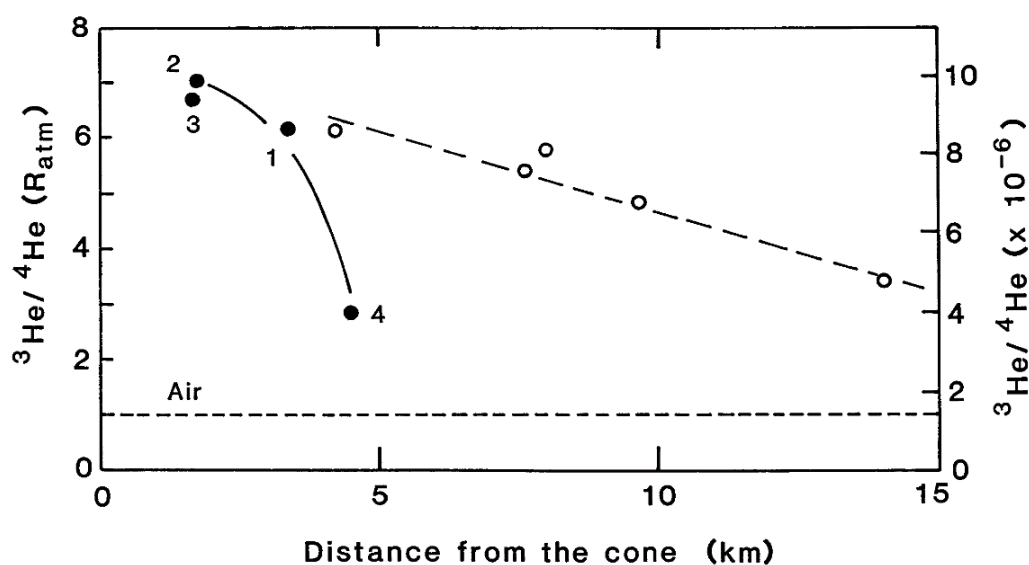


図2 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と山頂からの距離との関係

●: 磐梯火山

1 押立温泉、2 中の湯、3 銅沼付近噴気、4 川上温泉

○: 木曽御岳火山⁴⁾

下ではマグマ起源のヘリウムの供給が続いているのであろう。

磐梯火山のヘリウム同位体比は、過去に1例だけ報告がある³⁾。その報告によれば、1983年5月20日に採取された銅沼付近噴気と中の湯遊離ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、それぞれ 7.87×10^{-6} ($5.62 R_{\text{atm}}$)、 6.41×10^{-6} ($4.58 R_{\text{atm}}$)であった。本調査の結果と比べると、両地点とも1988年に採取したガスの同位体比が上昇しており、1983年から1988年にかけてマグマ起源のヘリウムが増加したことになる。しかしながら、試料採取の場所が同一地域でも厳密には恐らく違いがあること、試料採取方法の違いに伴う空気混入の有無に差があること、などから単純に過去の測定値との比較はできないと考えられる。

火山帯周辺で温泉ガスなどの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を測定すると、火口付近が一番高く、火口から離れるにしたがって低くなることが知られている⁴⁾。図2に磐梯山山頂からの距離と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比との関係を、木曽御岳火山の例⁴⁾と共に示す。磐梯火山の場合、マグマ性ガスの地下深部からの主たる通路を磐梯山直下に求めることができるかは必ずしも明かでなく、1888年の大噴火では、磐梯山の北方1 km に存在していた小磐梯山の下にマグマが上昇し水蒸気爆発を起こし、山体崩壊したと考えられている⁵⁾。しかし、磐梯火山では、2.5-3 万年以降山頂での火山活動が活発になり、大磐梯山（現在の磐梯山）が形成したこと⁵⁾を考えると、磐梯山の下に主なマグマの通路を考えてもよいと思われる。図2は、磐梯火山の場合も山頂からの距離が大きくなるにしたがって、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が下がることを示しているが、木曽御岳火山の場合とは距離に対して同位体比の低下する割合が著しく異なる。磐梯火山では、木曽御岳火山と比べて急激に同位体比が減少している。この違いは、火山体の大きさの違い、火山体を構成している物質の違い、またその中で気体成分の移動しやすさの違い、マグマの深さの違い、マグマからの気体放出の大きさの違いなど色々な要素が考えられる。多くの火山でこの関係を調べると、火山の潜在的活動度やマグマの移動を推定する上で大いに役立つ可能性がある。そのためにも、磐梯火山では、活動が静かな期間にも時間をおいて何回か測定を継続する必要があるだろう。

5. 謝辞

本調査にあたって、浜口博之教授を始めとして東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センターの方々から多くのご配慮を得た。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sano, Y. and Wakita, H. (1988): Precise measurement of helium isotopes in terrestrial gases, Bull. Chem. Soc. Jpn., **61**, 1153-1157.
- 2) Sano, Y. and Wakita, H. (1985): Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, J. Geophys. Res., **90**, 8729-8741.
- 3) Marty, B., Jambon, A. and Sano, Y. (1989): Helium isotopes and CO₂ in volcanic gases of Japan, Chem. Geol., **76**, 25-40.
- 4) Sano, Y., Nakamura, Y., Wakita, H., Urabe, A. and Tominaga, T. (1984): Helium-3 emission related to volcanic activity, Science, **224**, 150-151.
- 5) 守屋以智雄 (1988) : 磐梯火山の地形発達史、地学雑誌、**97**、293-300.

磐梯火山における精密重力測定

植木貞人*・趙 大鵬*

*東北大学理学部 地震予知・噴火予知観測センター

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り、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。そこで、1988 年磐梯火山集中総合観測の一環として、重力値時間変化の検出を目的とした精密重力測定を実施した。

ただし、磐梯火山地域では、これまで、重力値時間変化の検出を目的とした重力測定は行われていない。そこで、今回の測定では、将来における重力値時間変化を検出するための測定網の構築と基礎データの取得を目的とした。

以下では、集中総合観測の前年 1987 年に実施した磐梯火山地域精密重力測定点予備調査の結果と、これと同時に実施した 1987 年 6 月磐梯火山地域南西方の猪苗代湖西岸付近で発生した群発地震（最大地震 M 4.5）（地震月報；気象庁，1988；東北大理学部，1988）の震源域を通る水準路線上での測定の結果をも合わせて報告する。

2. 測定方法

重力測定は、東北大学所有の Lacoste & Romberg 社 G 型重力計 2 台(#578 と #682)を用い、磐梯火山地域の 28 点と 1987 年群発地震震源域を通る水準路線上の 9 点の計 37 点で実施した。

磐梯火山地域の重力測定点 28 点の測定点名、座標値と測定点の概況を表 1 に示す。さらに、同測定点網の空間分布を図 1 に示す。測定点のうち、GPS 観測点 5 点と G114, G116 を除く 21 点が、1987 年 7 月 31 日～8 月 4 日の予備調査により設置され、同時に第 1 回目の測定が行われた点である。予備調査の期間には、1987 年 6 月に猪苗代湖西岸付近で発生した群発地震の震源域（東北大理学部，1988）を通る水準路線の BM4254（猪苗代町）から BM4262（会津若松市）までの間の 9 点でも測定を実施した。1988 年磐梯火山集中総合観測では、10 月 18 日～21 日と 28 日に、前年に設置した重力測定点の中から G103, G109, G110 を除く 18 点と新設点の G114, G116 および GPS 観測点 5 点を加えた合計 25 点で測定を行った。1987 年と 1988 年に繰り返して測定が実施され、比較可能な重力値が得られた測定点は 17 点である。

測定は、いずれも、G104 を基準点として、各測定点において 1 日のうちに往路と復路の 2 回測定を実施する往復相対測定である。

相対重力値は以下の手順で求めた。はじめに、基準点と測定点間のダイヤル値の差から製造会社提供の換算表を用いて相対重力値を求め、これに器高補正と地球潮汐補正を施して相対重力測定値とした。ただし、潮汐定数は 1.16 を仮定した。次に、このようにして求めた相対重力測定値を用いて、1 日の中でドリフト率は一定との仮定の下、測定日毎にドリフト率と各重力測定点における相対重力値を最小二乗法により求めた（友田・他，1985，P.475-478）。

表 1 磐梯火山地域の重力測定網。座標値は東京測地系。

測定点名	北緯(度)	東経(度)	標高 (m)	備 考
G103	37. 54667	140. 10306	519	JR 猪苗代駅前石碑
G104	37. 56167	140. 10472	531	猪苗代城趾入り口石段
G105	37. 57000	140. 10028	580	土津神社内，竣工記念碑石段
G107	37. 65556	140. 09167	779	裏磐梯五色沼自然教室入り口
G108	37. 64444	140. 05083	873	磐梯山ゴールドライン北ゲート手前三叉路北東
G109	37. 66639	140. 09611	807	磐梯吾妻レークライン西ゲート手前竣工記念碑
G110	37. 64694	140. 10194	737	県道 2 号線猪苗代町北塩原村境界裏磐梯石碑
G111	37. 64083	140. 09833	725	川上温泉，温泉神社基礎
G112	37. 62583	140. 10583	685	県道 2 号線，土湯沢温泉入り口南方，防雪柵基礎
G113	37. 61167	140. 11778	615	県道 2 号線，猪苗代町長坂地内
G114	37. 57611	140. 05472	670	押立温泉から天鏡台へ向かう道路横の水槽
G116	37. 56528	140. 08500	588	国立磐梯青年の家入り口
G120	37. 56944	140. 01917	500	磐梯山ゴールドライン南入り口付近の「林道の記」
G121	37. 58028	140. 02667	690	磐梯山ゴールドライン南ゲート基礎
G122	37. 59194	140. 03361	820	磐梯山ゴールドライン横の記念碑
G123	37. 60111	140. 03750	935	磐梯山ゴールドライン途中，旧道の橋基礎
G124	37. 60472	140. 05222	1112	磐梯山ゴールドライン横，広場の中の自然石
G125	37. 61444	140. 04806	1195	磐梯山ゴールドライン猫魔八方台駐車場入口標識
G126	37. 62222	140. 05500	1115	磐梯山ゴールドラインこがね平駐車場南側基礎
G127	37. 63583	140. 05306	995	磐梯山ゴールドライン横ガードロープ基礎
BM1530	37. 65278	140. 06417	825	檜原湖観光船発着場前広場内，水準点
BM1636	37. 58444	140. 12472	565	県道 2 号線東側，中国人慰霊碑そば，水準点
BM1637	37. 59944	140. 12500	583	県道 2 号線沿いの水路横，水準点
GPS102	37. 62778	140. 04000	1040	裏磐梯猫魔スキー場駐車場奥の高台
GPS103	37. 62333	140. 06833	1105	裏磐梯スキー場リフト終点上方，大石の横
GPS107	37. 59667	140. 08833	1300	赤埴林道終点手前のカーブ横
GPS108	37. 57250	140. 06472	690	磐梯山牧場内
GPS109	37. 58944	140. 11111	725	林業研修センター進入路横

3. 測定結果

1988 年の集中総合観測時と前年の予備調査時の重力測定によって得られた結果を表 2 に示す。ここでは，#578 と #682 により求められた重力値と，その算術平均ならびに標準誤差を示してある。2 台の重力計による重力値の算術平均を，各点における最終的な相対重力値とした。

図 1 では，1987 年と 1988 年の重力値の差を括弧内に示してある。約 14 ヶ月の間隔において実施した 2 回の測定によって得られた重力値の差は，ほとんどの測定点において 0.01 mgal 以

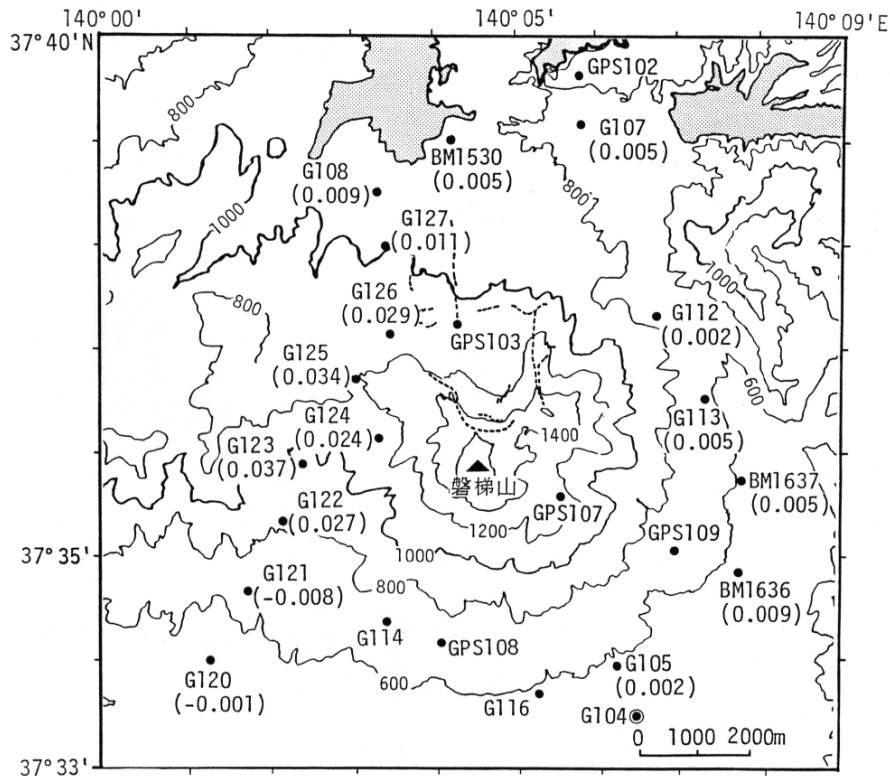


図1 重力点の分布. 括弧内の数字は1987年と1988年の重力差 (単位 mgal).

下であり, この1年余の間に有意な重力変化はなかったと考えられる. 他方, 磐梯火山地域西部を南北に通るゴールドライン沿いの測定点では, 0.02 mgal を超える重力増加が観測されている. これらの測定点は, いずれも, 基準点との標高差が大きい点であり, また, 測定誤差が 0.02 mgal より大きく推定されている. これらのことから, ゴールドライン沿いの点での測定値には, 重力計の気圧補償機構の不調やスケール定数の誤差に起因する大きな測定誤差が含まれている可能性がある. したがって, 1987年と1988年の観測から求められた 0.02 mgal を超える重力増加は, 見かけ上のものである可能性が大きいと考えられる.

4. まとめ

1988年磐梯火山集中総合観測に先行して1987年に精密重力観測網を設置し, 1988年にはこれを増強するとともに, 1987年7-8月と1988年10月の2回, 計37点において相対重力精密測定を実施した. 磐梯火山の西肩を通る路線で, 0.02mgal を超える重力増加が観測されたが, いずれも標高が高い測定点であることから, 重力計の不調に起因する見かけの重力変化の可能性はある. 火山活動にともなう重力変化はなかったと考えられる.

参考文献

- 気象庁 (1988) 気象要覧, 1054, 32-34.
- 東北大学理学部 (1988) 東北地方およびその周辺の微小地震活動, 1987年5月~10月. 地震予知連絡会会報, 39, 21-45.
- 友田好文・鈴木弘道・土屋 淳 (編) (1985) 地球観測ハンドブック. 東大出版会, P.830.

表2 磐梯火山地域における精密重力測定の結果(1987年7-8月, 1988年10月).

Gravity	Jul. 31-Aug. 4, 1987				Oct. 18-28, 1988				Diff.
Station	#578	#682	Mean	SD	#578	#682	Mean	SD	88-87
G103	0.240	0.243	0.242	0.002					
G104	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000		0.000
G105	-13.301	-13.307	-13.304	0.004	-13.298	0.000	-6.649	9.403	6.655
G107	-37.717	-37.692	-37.705	0.018	-37.710	-37.688	-37.699	0.016	0.005
G108	-65.730	-65.721	-65.726	0.006	-65.714	-65.719	-65.717	0.004	0.009
G109	-41.167	-41.177	-41.172	0.007					
G110	-35.014	-34.980	-34.997	0.024					
G111	-33.647	-33.633	-33.640	0.010					
G111'					-33.550	-33.528	-33.539	0.016	
G112	-30.112	-30.102	-30.107	0.007	-30.115	-30.096	-30.106	0.013	0.002
G113	-17.570	-17.571	-17.571	0.001	-17.572	-17.559	-17.566	0.009	0.005
G114					-34.583	-34.618	-34.601	0.025	
G116					-14.320	-14.337	-14.329	0.012	
G120	1.196	1.166	1.181	0.021	1.195	1.165	1.180	0.021	-0.001
G121	-38.470	-38.470	-38.470	0.000	-38.463	-38.492	-38.478	0.021	-0.008
G122	-66.472	-66.444	-66.458	0.020	-66.428	-66.434	-66.431	0.004	0.027
G123	-87.586	-87.540	-87.563	0.033	-87.527	-87.524	-87.526	0.002	0.037
G124	-121.074	-121.032	-121.053	0.030	-121.046	-121.012	-121.029	0.024	0.024
G125	-138.128	-138.075	-138.102	0.037	-138.093	-138.042	-138.068	0.036	0.034
G126	-121.985	-121.954	-121.970	0.022	-121.946	-121.936	-121.941	0.007	0.029
G127	-94.515	-94.501	-94.508	0.010	-94.489	-94.505	-94.497	0.011	0.011
BM1530	-52.655	-52.625	-52.640	0.021	-52.649	-52.620	-52.635	0.021	0.005
BM1636	-9.657	-9.655	-9.656	0.001	-9.647	-9.647	-9.647	0.000	0.009
BM1637	-12.192	-12.206	-12.199	0.010	-12.192	-12.195	-12.194	0.002	0.005
GPS102					-43.473	-43.488	-43.481	0.011	
GPS103					-120.521	-120.533	-120.527	0.008	
GPS107					-164.918	-164.893	-164.906	0.018	
GPS108					-37.539	-37.526	-37.533	0.009	
GPS109					-43.973	-43.993	-43.983	0.014	
BM4254	-0.064	-0.076	-0.070	0.008					
BM4255	3.476	3.466	3.471	0.007					
BM4256	1.490	1.499	1.495	0.006					
BM4257	9.249	9.262	9.256	0.009					
BM4258	8.827	8.833	8.830	0.004					
BM4259	11.713	11.748	11.731	0.025					
BM4260	28.492	28.470	28.481	0.016					
BM4261	31.531	31.559	31.545	0.020					
BM4262	44.118	44.156	44.137	0.027					

Unit: mgal

磐梯火山・猫魔火山およびその周辺の重力異常

井上 純*・三品正明**・田中和夫*

* 弘前大学理学部 地球科学科

** 東北大学理学部 地震予知・噴火予知観測センター

Bouguer Anomaly Distribution in and around Bandai and Nekoma Volcanoes

Jun INOUE, Masaaki MISHINA and Kazuo TANAKA

1. はじめに

福島県のほぼ中央部猪苗代湖北岸に位置する磐梯山(1819 m)は、その東方にある吾妻山(1949 m)、安達太良山(1709 m)などとともに、活発な火山活動を続けている。なかでも 1888 年の大噴火は山体崩壊を伴い、 $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ におよぶ岩屑流は溪流をせき止め、秋元湖、小野川湖、檜原湖などを初めとする、多数の裏磐梯湖沼群を生じさせた。

磐梯山の西に接する猫魔火山は、磐梯火山の活動に先だって活動したと考えられているが、現在は地熱・噴気活動などの火山活動は見られない。猫魔ヶ岳、厩岳山、雄国岳などに囲まれる直径約 2.5 km のカルデラ内には雄国沼がある。

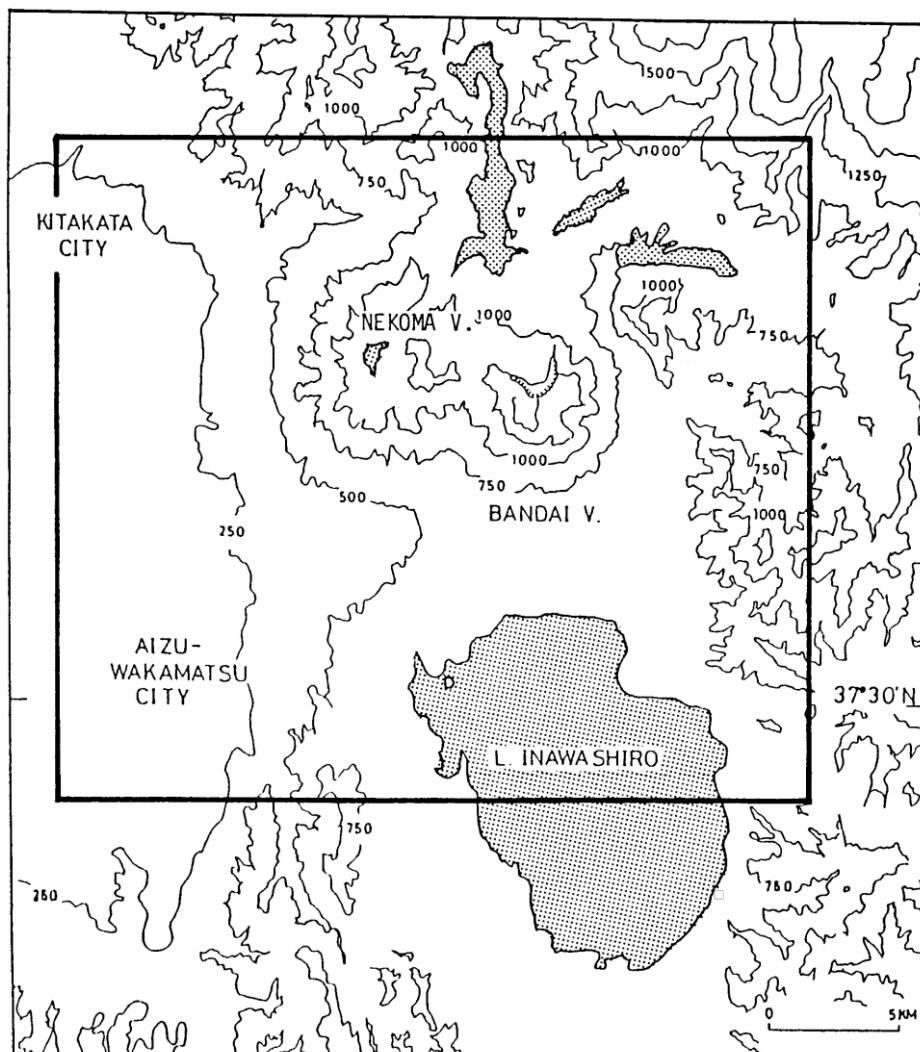
このふたつの火山の南方、猪苗代湖北西岸では、1987 年 6 月以降群発地震の活動があり、M 4.4 の最大地震を含んで約 6 ヶ月間の活動が観測された。これらのふたつの火山と群発地震震源域の構造的特徴を把握するため、磐梯火山・猫魔火山と猪苗代湖北岸とを含む地域において重力探査を実施した(第 1 図)。

横山・前川⁹⁾はこの地域において約 100 点の重力測定を行い、磐梯火山に固有な重力異常は顕著でないと指摘している。駒澤ら³⁾は新エネルギー総合開発機構による重力異常分布図⁴⁾からこの地域の基盤構造を求めた。その結果、磐梯山周辺では棚倉構造線の西側で基盤が深くなり、そこを低密度の扇状地堆積物が満たしていて、磐梯山の基底部はそこに貫入した高密度部分よりなると推定している。

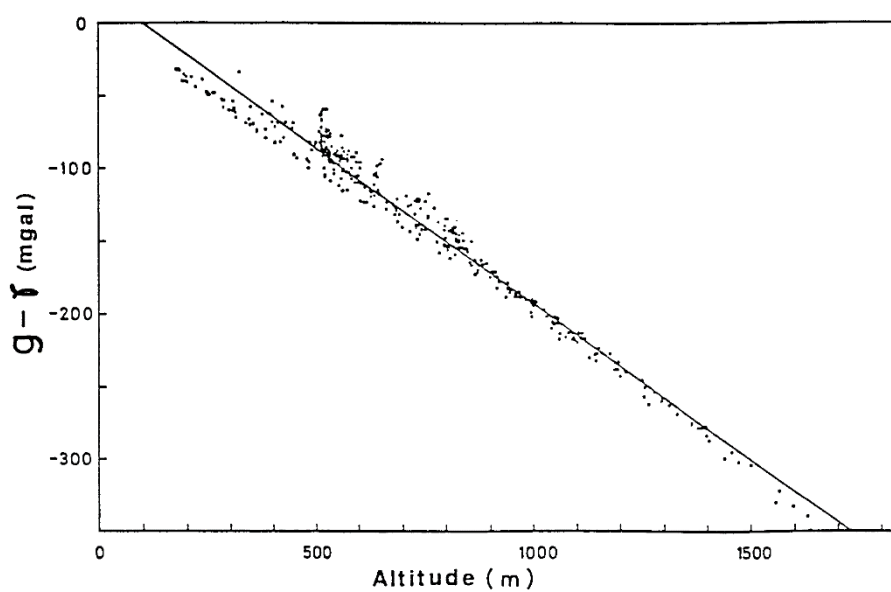
今回の筆者らの測定は、これらの結果をふまえ、さらに磐梯火山と猫魔火山との構造的な関係をも明らかにすることを目的とした。

2. 重力測定

測定は 1988 年 7 月 27 日から 8 月 8 日に実施された。使用した重力計は LaCoste & Romberg 社の G 型重力計(G682) 1 台である。仙台 FGS と結合された精密重力測定⁷⁾の基点のひとつを基準として使用した。従って、今回の測定値は JGSN75 系に準拠した重力値である。測点総数は



第1図 磐梯火山，猫魔火山とその周辺の地形と重力探査地域。



第2図 $g - \gamma$ と h の関係，直線は $\rho = 2.2 \text{ g/cc}$.

342 点であった。測点の標高は水準点、三角点、独立標高点などできるだけ地形図上に記載された数値を利用したが、約 200 点については気圧高度計（最小目盛 0.5 mm）を使用して決定した。気圧変化の補正の精度を考慮すると、高度計による標高の精度は ± 3 m 以内と見積られ、ブーゲー異常に換算すれば ± 1 mgal の精度は保たれているものと推定される。

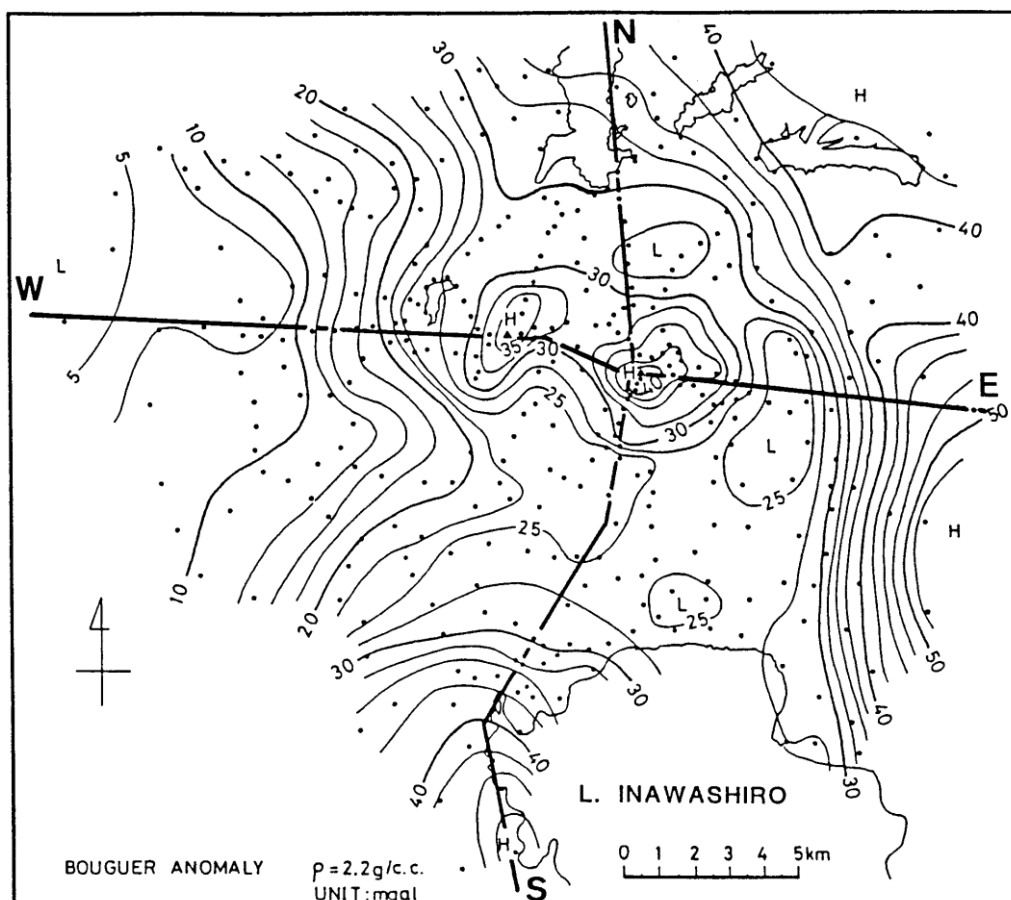
3. 高度補正・地形補正

地形補正、ブーゲー補正には観測地域の地殻平均密度が使われる。観測地域全体についての平均密度を求めるため、明らかに全体の平均値からはずれる山頂付近の標高 1700 m 以上の 3 点を除くデータについて、観測値と標準重力値との差（ $g - \gamma$ ）を高度に対してプロットした（第 2 図）。この傾きは $\partial g / \partial z - 2\pi\rho G$ になる。ここで、 $\partial g / \partial z$ は重力の鉛直勾配で、 ρ は地殻密度である。フリーエア勾配 $\partial g / \partial z = -0.3086$ mgal/m を使えば、第 2 図の勾配から $\rho = 2.2$ g/cc が得られる。地形補正、ブーゲー補正にはこの密度を採用した。

地形補正は国土地理院による国土数値情報の標高データを用い、60 km 以内の範囲について補正を行なった。また、ブーゲー補正は地形補正と同じ範囲の有限平板による補正を行なった。

4. ブーゲー異常の分布

第 3 図はブーゲー異常の分布図である。黒丸は観測点の位置を表わす。大局的には観測地域西



第 3 図 ブーゲー異常の分布と、2次元解析を行なった測線の位置（太線）。
コンター間隔は 2.5 mgal、黒丸は測定点の位置を表わす。

部の会津盆地喜多方周辺での低異常と、東部の川桁断層以東での高異常とが顕著である。この東高西低の分布の中に、磐梯火山および猫魔火山よりなる火山群と、猪苗代湖西岸とに孤立的な高異常が見られる。

このような分布を地質図^{1, 5)}と対比させると、東部の川桁断層以東の高異常は基盤岩の花崗岩類の分布している地域であり、西部の低異常は喜多方周辺を中心とする会津盆地の沖積層の分布域に対応している。磐梯山南西麓の丘陵地では、磨上原火山性泥流堆積物、頭無岩屑流堆積物、翁島岩屑流堆積物などが地表面に分布しているが、この地域でのブーゲー異常は低くなっており、これらの丘陵が基盤形成後の火山活動に伴って地表面をおおった堆積物によるもので、基盤構造を反映した地形ではないことを示唆している。それに対して、磐梯火山・猫魔火山を含む地域では地形と相関して重力の高異常が観測されている。このことはこれらの火山では山体表面をおおった高密度の溶岩流の存在だけでなく、基盤岩が浅くまで達していることを示唆している。このことについては後により詳しい議論をおこなう。猪苗代湖北西岸にある高異常は、中部～下部中新統の分布域⁵⁾に一致するもので、湖岸には同時期の火山岩の露頭も見られる。

横山・前川⁹⁾が指摘しているように、磐梯火山の山体に伴った高異常には、1888年噴火時の爆発カルデラの存在によると考えられる特徴が顕著には現われていない。一方、猫魔火山の西部は等異常線の間隔が広がり、山体の形との相関が悪くなっている。このことは、雄国沼を含むカルデラ部分が低異常になっていることを示唆するものである。このふたつのカルデラでのブーゲー異常分布の特徴の違いは、陥没を伴ったカルデラと、表面が崩壊してできたカルデラの構造的な違いを反映しているものと考えられる。

5. ブーゲー異常と地下構造

本報告で扱うデータは磐梯火山、猫魔火山の山体の構造を解析するほどの精度がないので、山体構造についての詳細な議論は別の機会に譲り、ここでは基盤構造の大勢を知る程度に2次元解析を行なった。解析は磐梯火山および猫魔火山を横切るようにとられた2測線で実施し、その測線を第3図にNS、EWの太線で示した。

解析に当たって密度および基盤深度に次のような拘束条件を仮定した。

測線NSは長谷川・他²⁾がエアガンを利用して構造探査を実施した測線と一致している。それによれば、測線両端では表層のP波速度は2.5 km/s、基盤最上部と基盤内部深さ1.6 km以深とではそれぞれ約4.5 km/s程度および5.9 km/sである。また基盤までの深さは約1 km弱で磐梯山直下では地形にほぼ平行するように盛り上がっている。

一方、東会津地域では資源開発を目的とした広域調査が通商産業省⁸⁾により実施されている。今回の重力測定範囲は広域調査の区域と猫魔ヶ岳の西方で重複している。広域調査では地質調査、空中磁気探査、重力探査のほか、地震探査、ボーリングなども行なわれている。その結果によれば、喜多方市北部での屈折波探査ではP波速度が第1層0.8～1.0 km/s、第2層1.8～2.2 km/s、第3層2.4～2.7 km/s、第4層3.3～3.9 km/s、第5層5.8 km/sと分離できて、花崗岩類および古生層からなる基盤岩（第5層）は海面下1.0～1.8 kmにある。また、同地域の山都町沼の平で行なわれたボーリングによれば深さ約1500 mで花崗岩に達している。

これらのことを考慮して第1層1.9 g/cc ($V_p = 1.8 \sim 2.2$ km/s)、第2層2.1 g/cc ($V_p = 2.4 \sim 2.7$ km/s)、第3層2.3 g/cc ($V_p = 3.3 \sim 3.9$ km/s)、第4層2.65 g/cc ($V_p = 5.8$ km/s)と密度を仮定して構造解析を行なった。長谷川・他²⁾がエアガンによる構造探査で基盤としたP波速度は上部で

4.5 km/s 内部では 5.9 km/s であるから、密度 2.65 g/cc の第 4 層に相当するものとした。測線 EW 西部での第 4 層の境界はボーリングの結果に合わせて海面下約 1.5 km とした。しかし、基盤の深さ分布をエアガンによる探査の結果に固定すれば、この密度仮定だけでは重力異常を説明できる構造は得られないので、さらに第 5 層として密度 2.8 g/cc ($V_p = 6.3$ km/s 程度)を加えた。この第 5 層の深さは海面下 5 km までであるとして計算した。

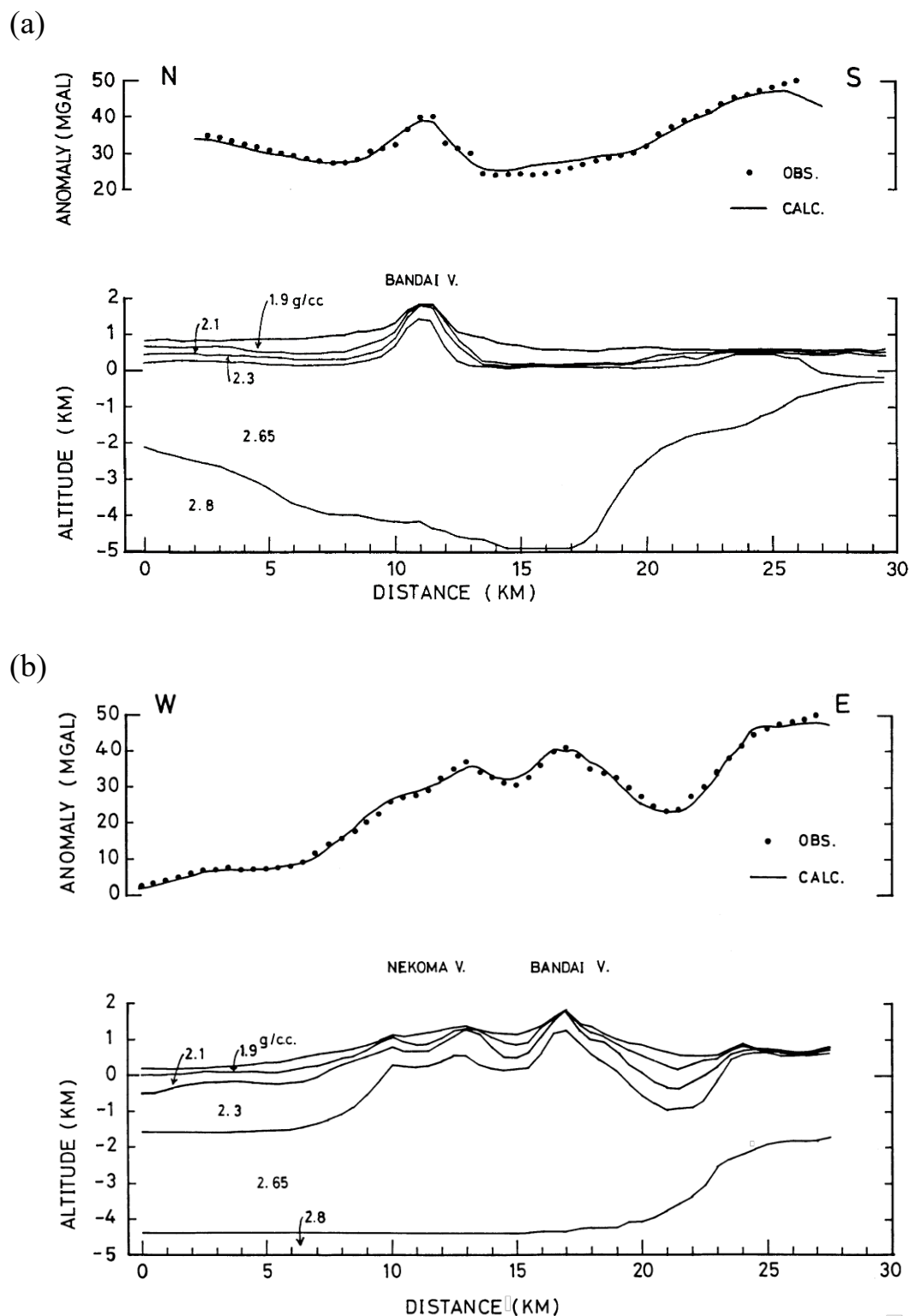
重力測定点近傍で採取された岩石のサンプルの密度は第 1 表のとおりである。これらは比較的堅固な部分が採取されているが、地表面で風化を受けたものである。地表面の大部分を占める堆積層を代表するサンプルは含まれていないなど、地下の密度分布と直接結びつくものではないが、構造解析の参考となる。例えば、磐梯山頂や 1750 m 付近の溶岩、猫魔ヶ岳山頂、雄国岳溶岩などが 2.45～2.70 g/cc であることから、山体内部に盛り上がった基盤（第 4 層）の密度として 2.65 g/cc を仮定することは妥当なものである。また秋元湖の南の酸川野や田茂沢の丘陵地で採集された新第三紀の凝灰岩が 2.35～2.46 g/cc であることから、新第三紀の堆積岩などが多いと考えられる第 3 層の密度がそれより小さめの 2.3 g/cc であることも妥当なものと考えられる。

計算には 2 次元のタルワニの式を用いた。仮定した密度は平均密度 (2.2 g/cc) との差として計算を実行した。高度補正の仮定密度、構造解析の密度仮定、層境界の位置など絶対的なものではないので、ここではブーゲー異常の絶対値までは合わせず、重力異常の全体の起伏が合致するような構造を求めるにとどめた。結果として、NS、EW 両測線とも観測値と計算値との間に約 60 mgal のオフセットがある。なお、観測値としては平滑化したものを使用するため、等重力異常線図（第 3 図）から等間隔で読み取ったものを使った。

第 4 図 (a)、(b) に NS、EW それぞれの測線での断面での構造解析の結果を示す。NS 測線では基盤の深さが磐梯山の南側と北側とでほとんど変わらないので、長波長のトレンドを近似するために、第 4 層と第 5 層の境界を南側で急傾斜で浅くなるようにした。この急な構造になった地域 (17～24 km) は、前述の 1987 年の群発地震の震源域にあたる。この地震群の震源の深さは 10～14 km と報告されている⁶⁾ので、この第 4 層と第 5 層の境界とは一致しないが、この地域の地殻内の構造的な特徴を表わしているものと考えることができる。南端部で地震波速度から得られた基盤が深くなっているため、重力異常を説明する構造は第 4 層が薄くなり、ほかの部分と調和しない。これはこの測線の南端部では地震探査の測線が湖岸からはずれた位置にあり、重力の解析測線とは違った位置を通っているためと考えられる。磐梯山の山体部分では地形的に 2 次元的な

第 1 表 岩石サンプルの密度

採 集 地	岩 質	密 度 (g/cc)
磐梯山頂	安山岩	2.70
磐梯山溶岩(1750 m)	安山岩	2.45
猫魔ヶ岳頂上	安山岩	2.46
雄国岳溶岩	安山岩	2.52
猪苗代湖西岸	安山岩	2.53
田茂沢	凝灰岩	2.34
酸川野	凝灰岩	2.46



第4図 2次元解析の結果. (a) NS 測線, および (b) EW 測線.

解析では不十分ではあるが, 観測されたブーゲー異常は地形に平行して盛り上がった基盤構造によってほぼ説明されている. 山体の南側, 北側には噴火による岩屑流などの厚い堆積層ができていることが, 重力異常の解析結果にも現われている. 南側での計算値は観測された低異常を正確には説明していない. この部分での基盤が地震波速度によるものよりもっと深い, あるいは表

層にもっと低密度の層があることが考えられる。

EW 測線では、猫魔火山の基盤も磐梯山のそれと同様に地形とほぼ平行する形で盛り上がっていることがわかる。また、2次元の計算では正しくは反映されていないが、猫魔火山のカルデラ部分に陥没を埋めた低密度層が存在することを示唆する特徴ある構造が表わされている。猫魔火山の西方では基盤までの深度が深く、厚い低密度層の存在が低いブーゲー異常と対応している。磐梯火山の東側では、川桁断層に相当して基盤の上昇があり、その落差は約2 kmに達している。このくいちがい量は第4・第5層の境界部でも保たれている。川桁断層の西側には琵琶沢岩屑流や長瀬川が運んだ扇状地堆積物など厚い堆積層があり、低異常をつくっていることがわかる。

磐梯火山、猫魔火山どちらの下部でも、第4・第5層の境界部に変化をもたらすような異常は存在しなかった。ほとんどの異常が盛り上がった基盤の形状で説明されたため、この境界までは分解能がなかったものと考えられる。

6. おわりに

磐梯火山および猫魔火山を含む地域において約340点の重力測定を行なった。ブーゲー異常の分布から、これら2つの火山と周辺地域での基盤構造が求められた。その結果はエアガンを使った地震探査の結果と調和的であった。猫魔火山は山頂部に陥没カルデラを有するが、ブーゲー異常の分布およびそれをもとにした構造解析の結果はそれと調和する結果となっている。一方、磐梯火山の1888年噴火に伴って生じた爆発カルデラでは、その存在を示唆するような特徴あるブーゲー異常の分布は観測されなかった。

今回解析に用いられたブーゲー異常は国土数値情報を用いた地形補正の結果である。この標高データでは山体の一部が欠落している磐梯火山の地形が正しくは反映されていない。もっと詳細な標高データをもとにした地形補正作業は現在進められている。山体の構造など詳細な議論はその結果を待って行ないたい。

謝辞 最後に、測定・解析にあたって種々の援助を頂きました北海道大学理学部岡崎紀俊氏、弘前大学理学部地球科学科ならびに地震火山観測所の皆様、東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センターの皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 地質調査所(1984): 1:500000 活構造図 新潟.
- 2) 長谷川 昭, 堀内茂木, 植木貞人, 西澤あずさ, 松澤 暢, 海野徳仁, 堀修一郎, 稲盛隆穂, 松本 聡, 浜口博之, 高木章雄, 田中和夫, 鈴木将之, 末広 潔(1989): エアガンによる磐梯山周辺域の地下構造探査, 地震, **42**, 161-169.
- 3) 駒澤正夫, 大久保泰邦, 品田正一, 野田徹郎(1988): 磐梯山周辺の重力・磁気異常について, 地学雑誌, **97**, 341-345.
- 4) 駒澤正夫, 広島俊男, 大久保泰邦, 須田芳朗, 中井順二(1987): 100 万分の1 全国重力異常図(ブーゲー異常図), 新エネルギー総合開発機構.
- 5) 鈴木敬治, 真鍋健一(1988): 磐梯・猫魔火山群と猪苗代湖盆の基盤岩層について, 地学雑誌, **97**, 263-270.
- 6) 東北大学理学部(1988): 東北地方およびその周辺の微小地震活動 1987年5月~10月, 地

震予知連絡会会報, **39**, 21-45.

- 7) 東北大学理学部 (1989): 磐梯火山地域における精密重力測定 (1987 年-1988 年), 噴火予知連絡会会報, **43**, 56-57.
- 8) 通商産業省 (1972): 昭和 46 年度広域調査報告書 東会津地域, 1-27.
- 9) 横山 泉, 前川徳光 (1987): 磐梯火山及びその周辺の重力異常, 北海道大学地球物理学研究報告, **48**, 9-16.

磐梯山火山基本図 —火山地形と地熱分布—

田中宗男*・勝俣圭一*

*建設省国土地理院 測図部国土基本図課

1. 火山基本図作成の目的

活火山は地形、地質及び地球物理学上の特異な地域である。この火山現象は、火山噴出物や降灰などの一次災害や、堆積物の崩壊、泥流・土石流の発生などの二次災害をもたらしてきた。

このような噴火による災害を防ぐために、火山に関する現象を解明することの重要性が指摘され、噴火予知に対する研究が進められている。国土地理院はこうした研究に貢献するため、従来の国土基本図の様式に従い、火山を対象にした基本図を作成してきた。

同時に、火山にみられる地形的な特徴を図上に表現した地形特性図と、地表面温度分布図の作成も行っている。

2. 火山基本図の特徴

火山基本図（磐梯山）は 1/1 万で 2 面にわたり作成した。また、火山特性図は 1/5 万の地形図に表示し、熱温度分布状況を表示した地表面温度分布図は、1/2.5 万地形図で作成した。作成した範囲は、図－1 に示す範囲である（図－2、3、4 は約 70 % に縮小した一部分である）。

基図となる地形図は国土基本図の基準にのっとり、平面直角座標系（XI 系）による横メルカトル図法で作成した。また、平面位置の精度（標準偏差）は図上 0.7 mm で高さの精度（標準偏差）は標高点で 1.7 m、等高線で 2.5 m 以内となっている。

この火山基本図の作成に当たって、等高線は 5 m 間隔で表現し、さらに火山地形の特徴を最大限表わすためダイレクトスライブ法を用いて行った。したがって、崖や崩壊地等についても記号化する事をできるだけ避けて、極力微地形の表現に努めた。

火山地形や火山植生等の火山特性は、写真判読と現地調査（確認）で行った。また、熱映像撮影により地熱分布の解析を行い、地表面温度分布図としてまとめた。

3. 火山特性の種類と特徴

火山地形の特徴を図－5 に示す記号で表示し、火山地形特性図（図－6、7）を作成した。写真判読と現地調査（確認）により明らかとなった火山特性の特徴を以下に示す。

① 噴火口・噴気口

活動中の噴火口は認められないが、噴気口は 1888 年爆裂火口や沼ノ平に数カ所認められる（図－2）。

② 火口跡・火口様凹地

磐梯山と櫛ヶ峰の間の鞍部に、火口様凹地が数個認められる（図－2、6）。それらは密集し完全な円形となっていない。それらの噴火の記録はないが、地形的には明瞭な凹地となっている。

火口跡は、調査地域に認められなかったので表示しなかった。

③ 火砕丘

沼ノ平南方の山体は、地質状況から火砕丘と推定されているが独立した山体となっていない。したがって、地形的に不明瞭なので表示しなかった。

④ 溶岩流界・溶岩ジワ

噴火時期は不明であるが、南麓から東麓にかけて放射状に分布している。それらの内、規模の大きい溶岩流には溶岩ジワも認められるので合わせて表示した（図－4、6）。

⑤ 断層崖

調査地域には明瞭なものは認められなかったので表示しなかった。

⑥ 線状模様(リニアメント)

主として山体西部に数本認められるが、沼ノ平や丸山東方にも小規模ながら認められる（図－6）。

⑦ ガリー・リル

1888 年の爆裂火口壁、磐梯山東部の崖及び楡ヶ峰南部の崖に多くみられる。ガリーは、おおむね全てを表示したが、リルは微細なものまで表現できないため主要なものを表示するにとどめた（図－2、6）。

⑧ 砂礫地・岩魂地

1888 年の爆裂火口壁の崖下や火口底に広くみられる。1954 年の火口壁崩壊による堆積物の分布範囲は、岩魂地として表示した（図－2、6）。

⑨ 矮小性低本・被害木

矮小性低本は、標高 1,600 m 前後の弘法清水小屋付近にのみ認められた（図－2）。

⑩ 火山ガスによる粘土化が顕著な地域

調査地域には認められなかった。

⑪ 流れ山

裏磐梯高原を中心とした北麓に多く分布している。丸山北方約 1 km にも見られる。それらは 1888 年の崩壊時に形成されたものである（図－3、7）。

4. 地表面温度分布図

火山における地熱分布を広域的かつ面的に把握し、温度分布を作成することは今後の火山噴火予知の基礎資料としてきわめて重要である。

本調査では、航空機に搭載した MSS（マルチ・スペクトラル・スキャナー）を用いて、地表面から放射される熱赤外エネルギーを測定し、これを撮影と同時に測定したグランドトランスデータと照合し、温度換算する事により地表面温度分布図の図－8を作成した。分布の特徴は以下のとおりである。

- ① 温度分布図作成地域内の最高温度は 18.0 °C 付近であり、最低温度は 0 °C 付近である。
- ② 18 °C の最高温度部は、1888 年爆裂火口付近に数カ所認められる。それは西よりの中ノ湯付近、銅沼南部及び沼ノ平北部である。
- ③ 全体としては標高による温度変化が優勢であるが、地表の被覆の違いによる温度変化も見られる。
- ④ 銅沼付近の地表の温度は、3～6 °C であるが、銅沼の水温は 12～16.5 °C であり、相対的に

かなり高温であると考えられる。

火山基本図作成範囲 -----  (108 km²)

地表面温度分布図作成範囲 ---  (5 km²)

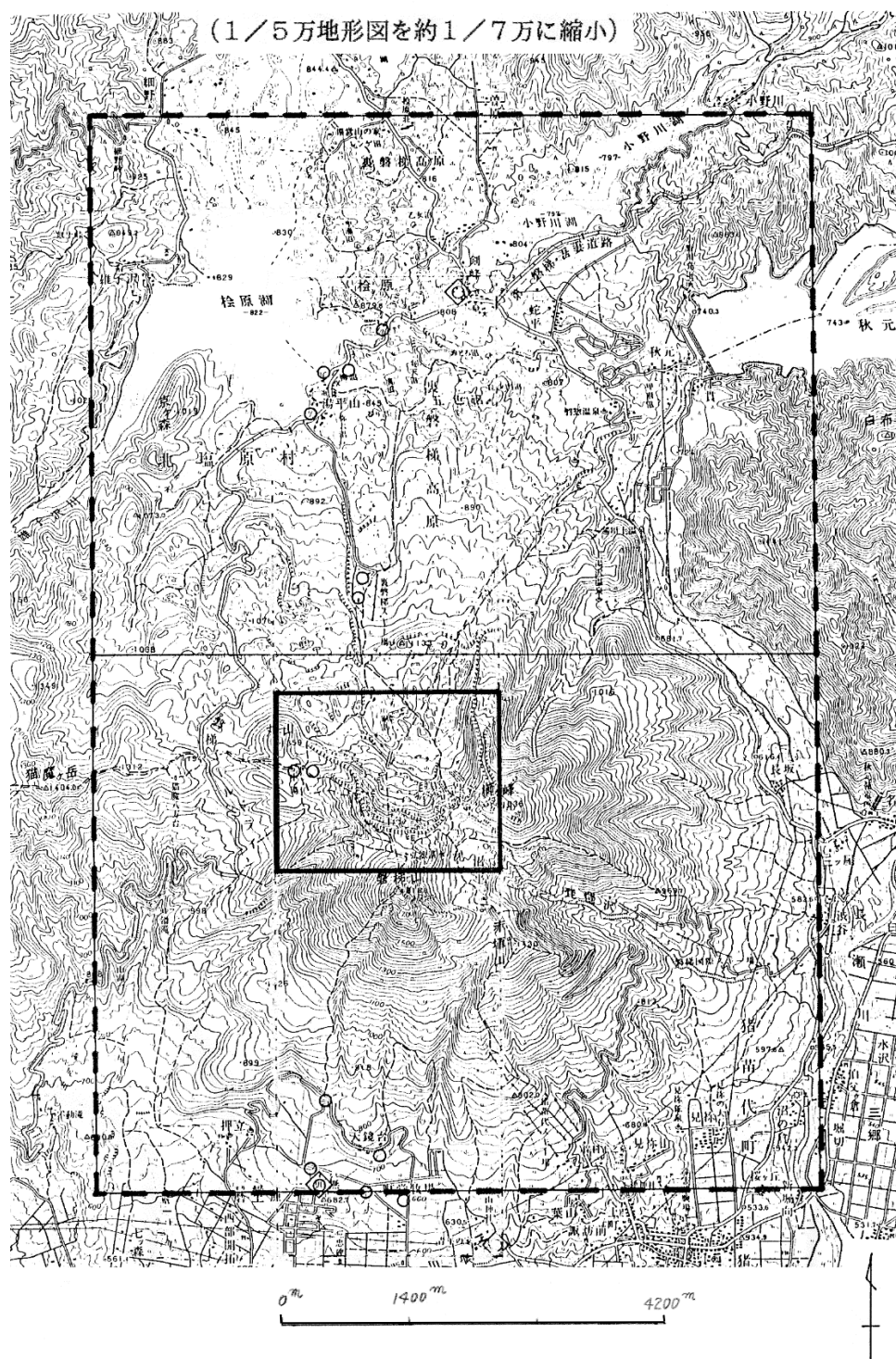
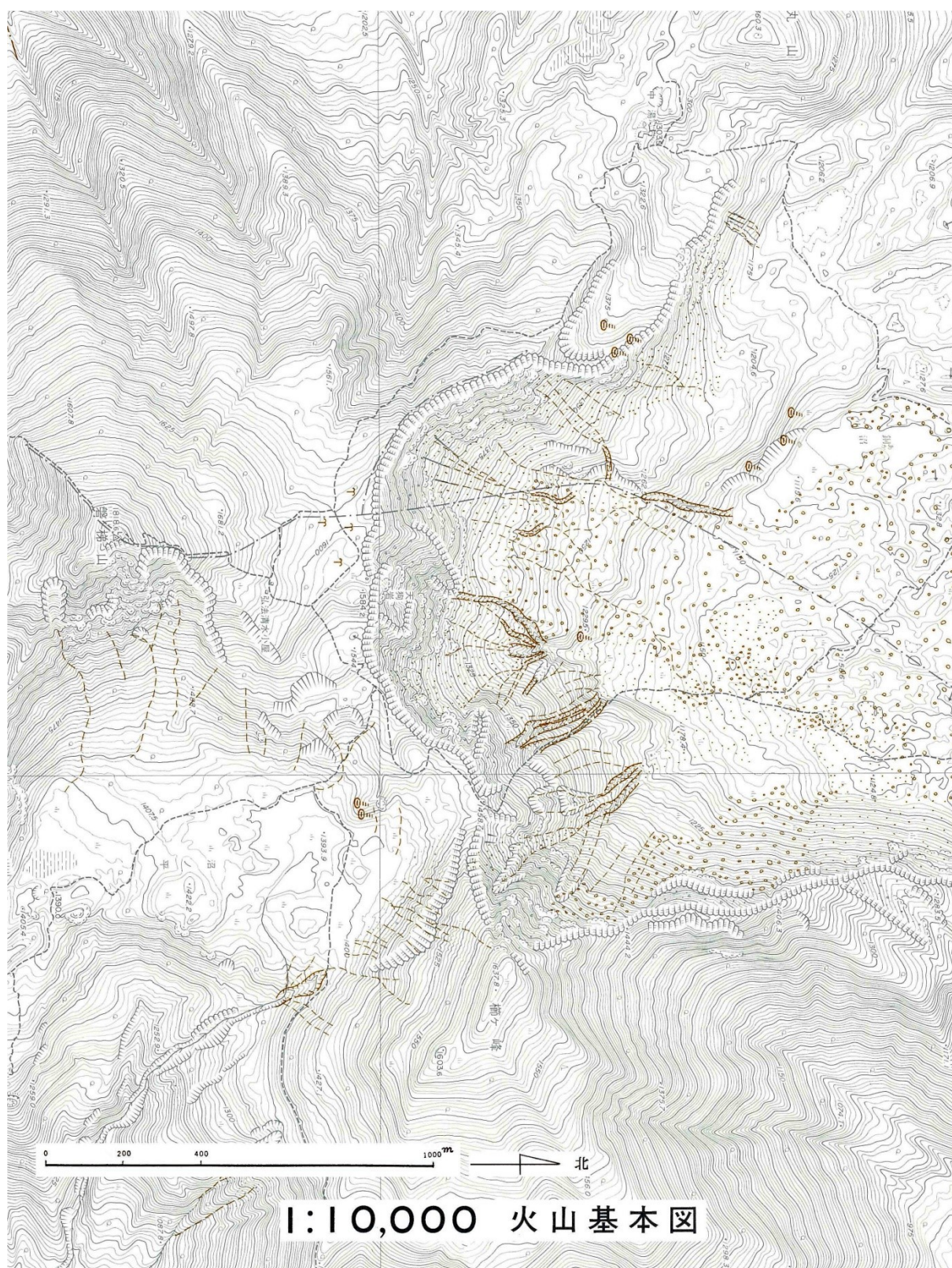


图-1



図一 2

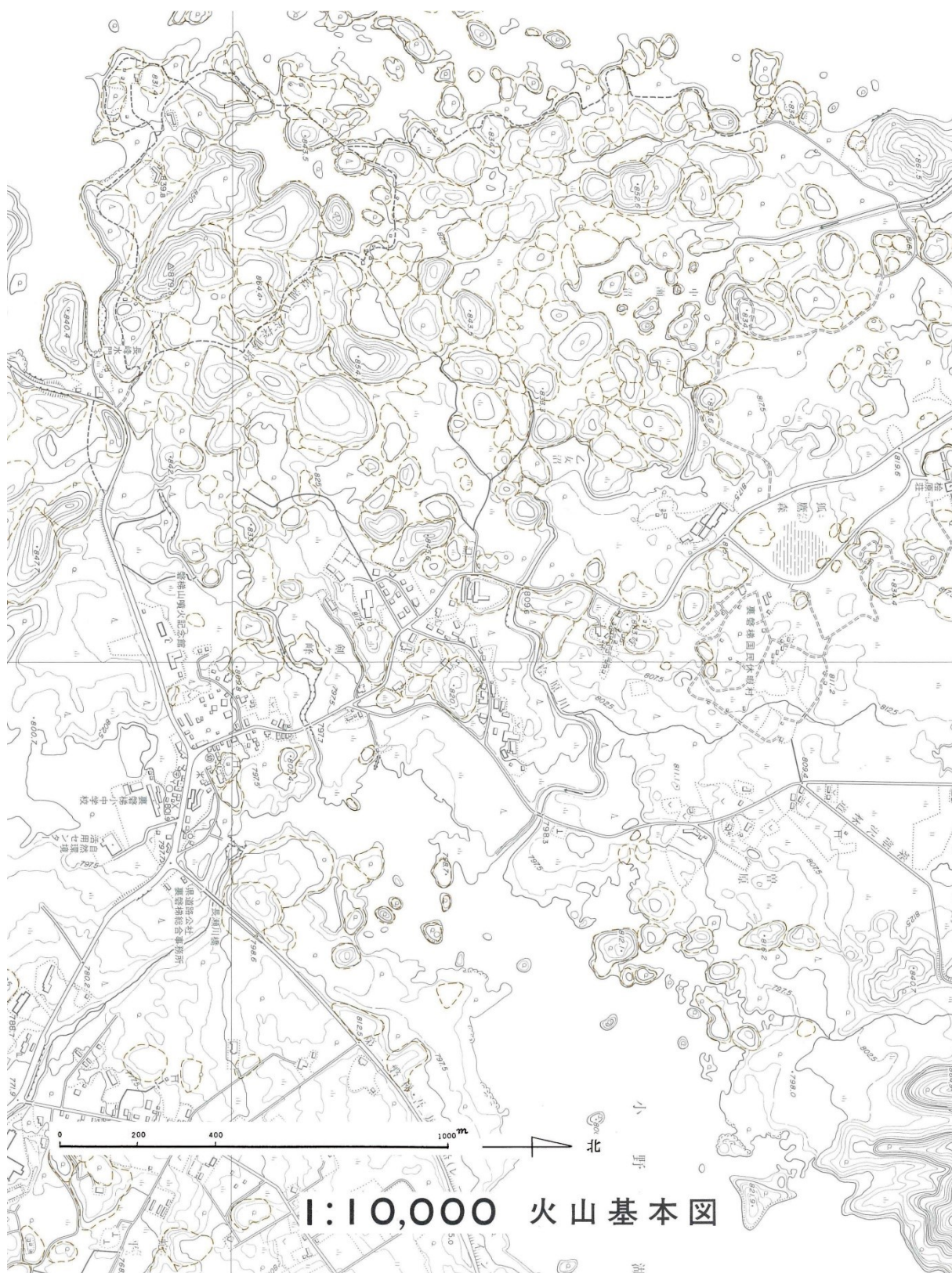


図-3



図一 4

火山特性記号

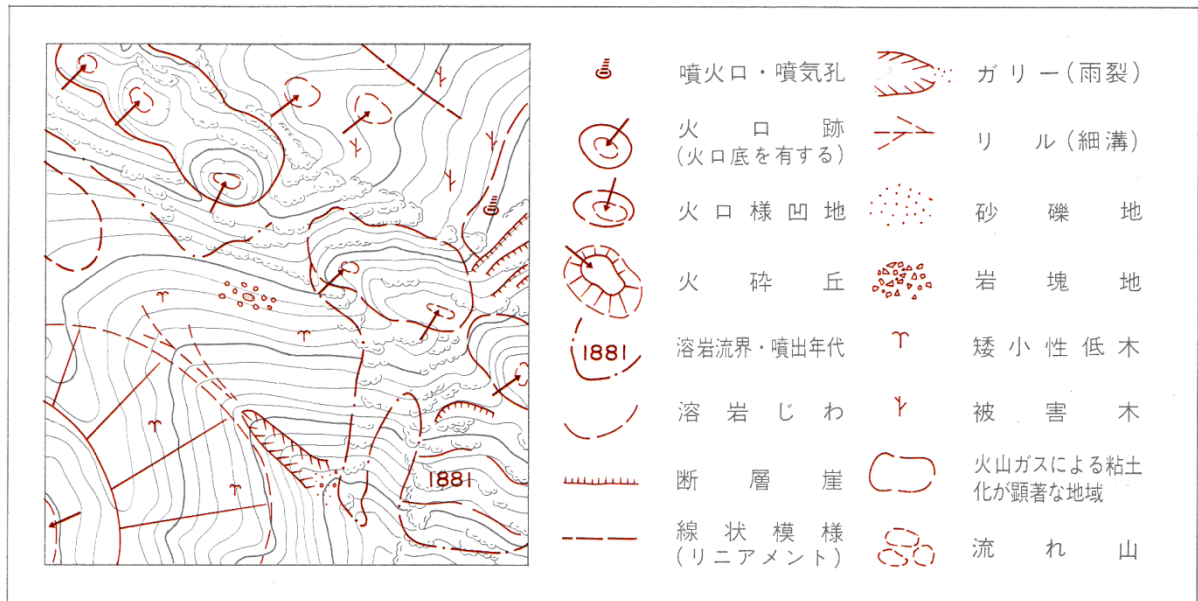


図-5

火山地形特性図

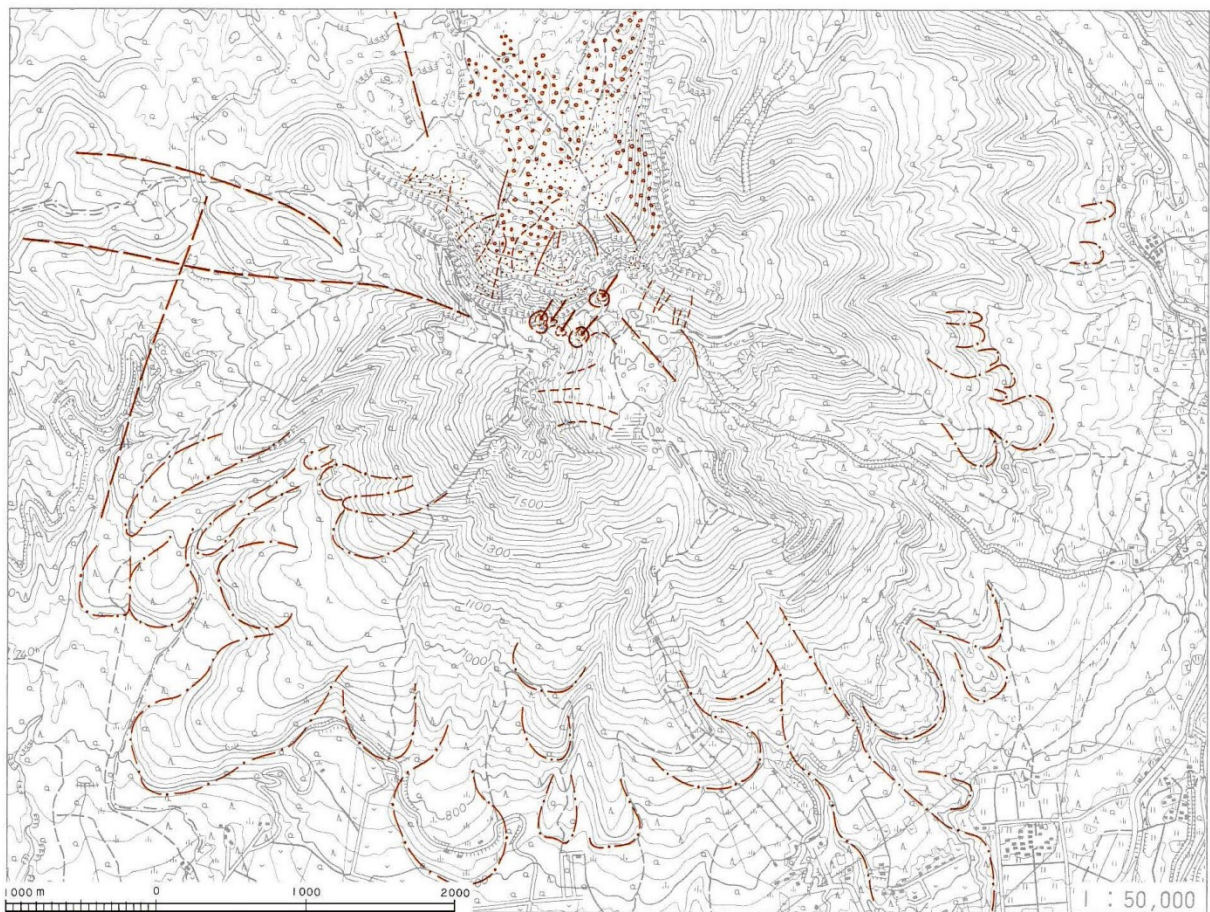


図-6

火山地形特性図

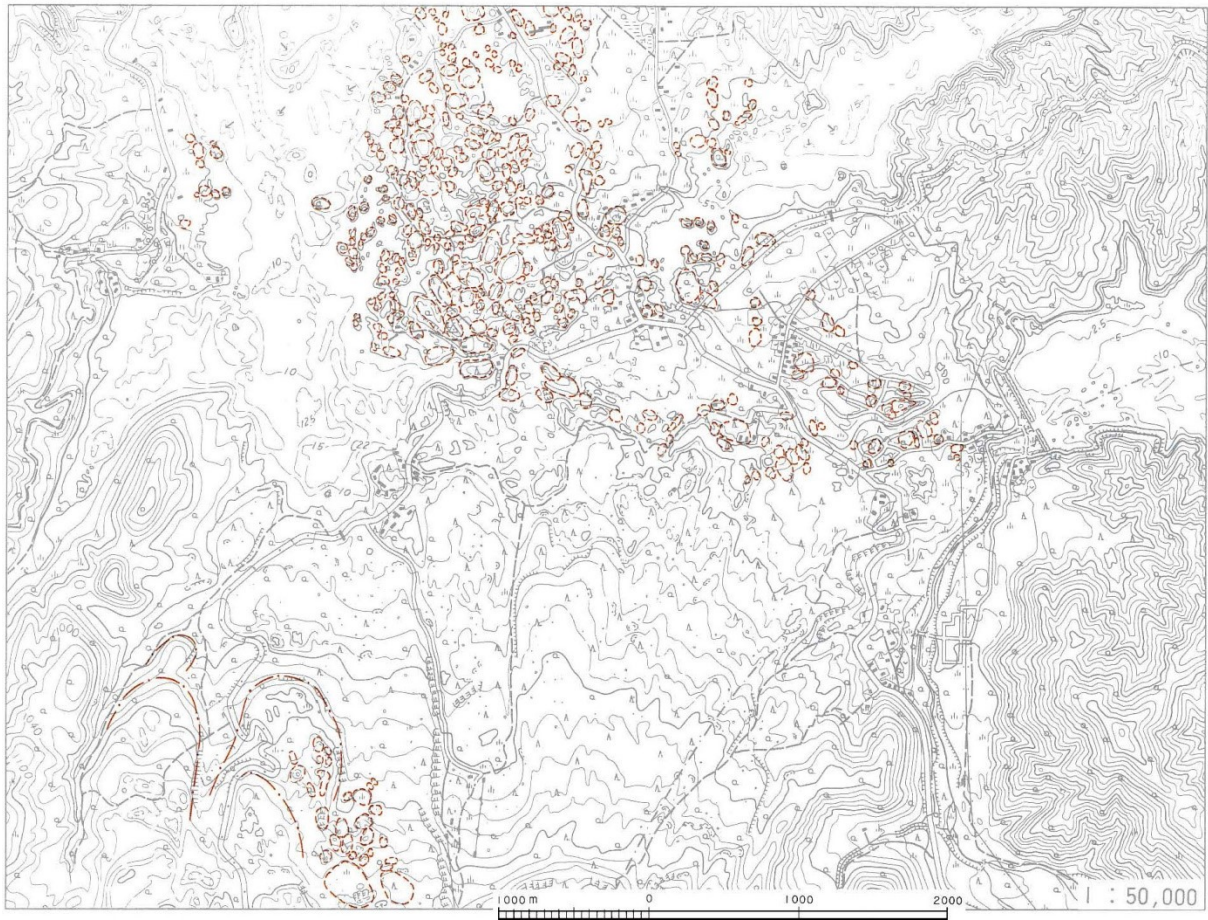


図-7

地表面温度分布図



図-8

Fan-Shooting法による磐梯山の地殻構造探査*

東 北 大 学 理 学 部 植木貞人・浜口博之・稲盛隆穂・堀内茂木
 西澤あずさ・堀修一郎・仁田交市・松本 聡
 梅津 功・佐藤吉之・長谷川昭
 北 海 道 大 学 理 学 部 宮町宏樹・西村裕一・前川徳光・鈴木敦生
 弘 前 大 学 理 学 部 井上 純・NANANG Dyasbudi
 宇都宮大学教育学部 鈴木将之・伊東明彦
 京 都 大 学 理 学 部 須藤靖明
 京都大学防災研究所 井口正人
 鹿児島大学理学部 高木章雄

1. はじめに

磐梯山 (37.60° N, 140.01° E, 1819 m) では1888年7月, 水蒸気爆発とともに大規模な山体崩壊が発生し, 死者461 名を含む大災害が引き起こされた. 同種の山体崩壊は, 磐梯山においては以前にも発生しており, また, 鳥海山など他の火山でも認められ, 決して希な現象ではない¹⁾. したがって, 現在表面活動がほとんど認められない火山においても, 長い休止期間の後に大規模な火山噴火災害が発生する可能性がある. この種の火山では, 活動史や火山活動機構に関する研究を行うことが火山噴火予知研究として必要かつ重要なことである. このような観点から, 磐梯山において, 火山噴火機構に関する基礎研究の一端とし, 人工地震を用いた地殻構造探査を実施してきた. その結果, 地震波異常減衰域の存在が示唆された^{2,3)}. そこで, この異常減衰域の位置と深さ分布を決定するため, 1988年10月, 高密度観測網を用いた fan-shooting 法地震探査を実施した. 小論ではこの探査実験と結果の概要について述べる. なお, 今回の探査実験は, 磐梯火山集中総合観測の一環として行われたものである.

2. 探査の方法

探査実験は, 1988年10月 3日~10月14日, 磐梯山周辺において実施された. ショットおよび測線の配置を図1に, 実験の概要を図2に示す. 人工震源としては容量9リットルの大型エアガンを用い, 磐梯山山頂の北北東約 9 km に位置する, 小野川湖 (湖水面標高797m) 北東部の発震点A (水深約 15m) の水面下 10m に設置した. 一方, 観測点は磐梯山の南側山麓に設定した全長約 11km の測線XYにそって展開した. 観測点総数は 153点で, 観測点の標高は 610~850m, 発震点から観測点までの距離は 9~12.5km の間で変化している. 地震計は固有周波数 4.5Hz の地震計を用い, 上下動成分は約 50m 間隔に, 水平動2成分は 300 m 間隔で設置し, 高密度の観測を行った. 地震計の出力は CDPケーブルを介して伝送し, 地震探鉱器で収録した. 探鉱器は, 入力信号の振幅に応じて利得が 6dB 間隔で 16 段階にわたり自動的に変化する IFP増幅器と, 15 ビットのAD変換器を備

* Crustal Structure Beneath Bandai Volcano Revealed by Fan-Shooting Measurement
 by Sadato UEKI, et. al.

えており、180dB におよぶ広ダイナミックレンジ観測を行った。データは、48チャンネルごと、すなわち測線 2.4 km 分を1組として、250Hz でサンプリングし、30 秒間収録した。測定は人工的な雑振動の少ない 18時～24時に行った。この間エアガンを 100 秒間隔で発震し、探鉱器では簡単な垂直重合を行いつつ信号をモニターしながら、一晩で約 200回データを収録した。エアガンからの発震信号は、公衆電話回線と無線テレメーターを使用して探鉱器へ伝送した。以上の観測は、全測線を5 測線に分けて1 測線につき2 晩ずつ行われた。エアガンの全発震回数は約 2300 回である。

3. 解析結果

測線XYにそって得られた波形記録例を図3に示す。これは270 回前後の垂直重合を行って得られた記録である。波形は発震点から見た観測点の方位角（北から東まわりに測る）にしたがって並べてある。記録振幅は地動速度振幅に比例して描いてある。方位角により振幅が大きく変化しているのが明瞭に認められる。初動部分の振幅と方位角の関係を調べるため、エアガンの卓越周波数である 10Hz を中心周波数とする帯域通過フィルターの出力記録から読み取った。初動から 0.2秒間のR.M.S. 振幅と方位の関係を図4(a)に示す。初動振幅は方位によりほぼ2 桁変化している。方位角195～200° 付近では振幅が特に小さい。しかし、ここに示した振幅分布には、観測点近傍における減衰や増幅の違いが影響していると考えられる。松本・長谷川⁴⁾は、1987年10月と1988年6月に磐梯山周辺で実施された探査で得られた記録から、コード波振幅が観測点近傍の地震波増幅特性を反映していることを示した。ここではその方法に従い、発震時から 9～14秒間のコード波R.M.S. 振幅の全点平均値と各点での値の比を観測点近傍における増幅特性係数として観測点補正を行った。その結果を図4(b)に示す。このようにして得られた振幅分布は、伝播経路における地震波減衰特

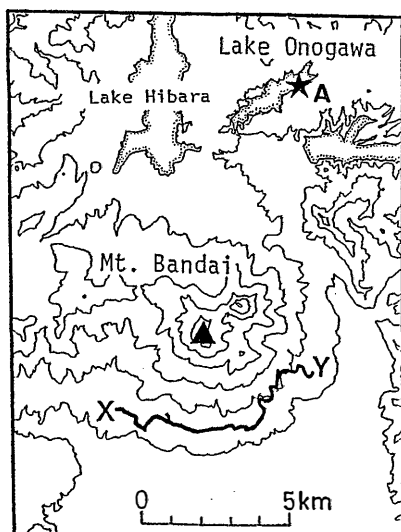


図1. 発震点 (A) および測線 (XY) の配置。

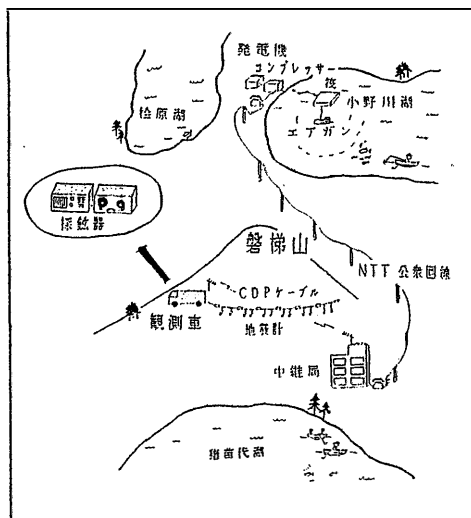


図2. Fan-shooting法地震探査の概念図。

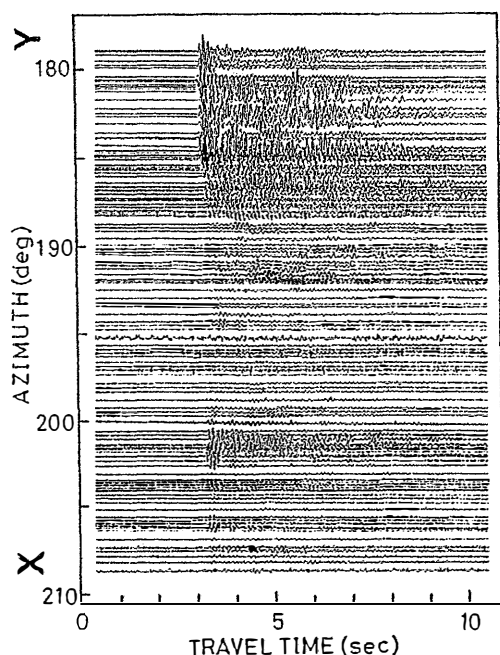


図3. 測線XYに沿って得られた波形記録。
記録振幅は地動振幅に比例。

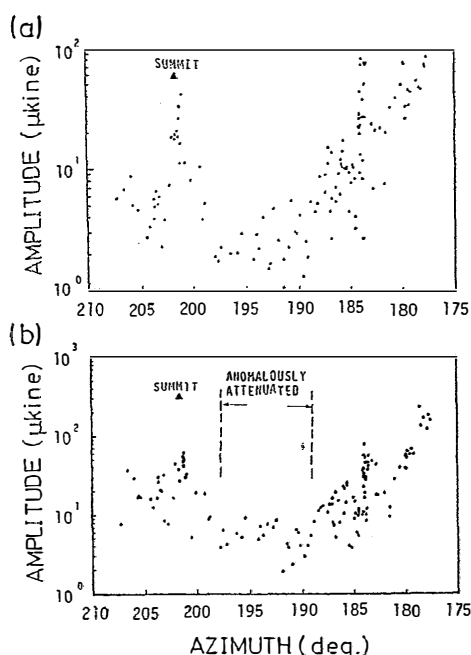


図4. 初動部分0.2秒間の振幅分布。(a)観測値。
(b)観測点補正後の振幅分布。

性のみを表していると考えられる。観測結果から、方位角 178, 184, 202° 付近で観測された地震波の振幅は大きく、189~198° の範囲（矢印で示す範囲）ではこれらに比べて1桁小さいことがわかる。発震点から見た磐梯山山頂の方位角は 202° であるから、山頂直下を通ってきた地震波の振幅は大きい。これに対して、顕著な減衰を受けているのは明らかに山頂部より東側を通過した波であることがわかる。減衰の著しい伝播経路の分布範囲は、図5に発震点Aを頂点とする扇形で示す領域である。

一方、磐梯山周辺においては、1988年6月にも fan-shooting法地震探査が行われている^{2,3)}。この時の発震点は、檜原湖北部の、図5に星印Bで示す地点である。観測点は同図に白丸で示されている合計 30 点である。観測点間隔は 250 m 以上であり、今回の実験に比べて大きい。この実験においても、伝播経路の方位による地震波減衰の違いが観測されている。今回と同様の処理をして観測点近傍の増幅特性を補正した初動振幅の分布を図6に示す。ここで、横軸の方位は発震点Bから見た観測点の方位である。方位角167~174° の範囲（矢印で示す範囲）で減衰が著しいことがわかる。発震点Bから見た磐梯山山頂の方位は 176° であり、山頂直下を伝播した波は大きな減衰を受けていない。減衰の大きな領域は明らかに山頂より東側にあり、周辺に比べると振幅が1桁減少している。この減衰の著しい伝播経路は、図5に示す点Bを頂点とする扇形の領域に分布する。

1988年 6月と10月の2回の探査実験の結果から、磐梯山山頂の東側に異常減衰域が存在することが明らかになった。その位置は、減衰の著しい伝播経路の重複する図5中のハッチを施した領域の

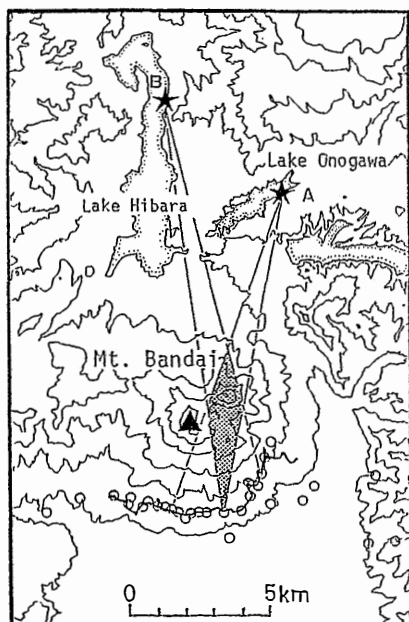


図5. 1988年6月と10月の2回の構造探査から推定された異常減衰域（ハッチの部分）。星印Bと白丸は、1988年6月の発震点と観測点。

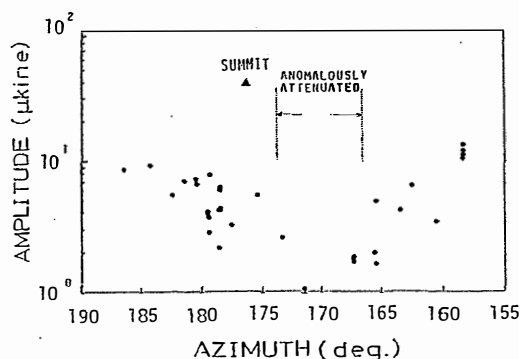


図6. 発震点Bに対する、初動部分0.2秒間の振幅分布（観測点補正済み）。

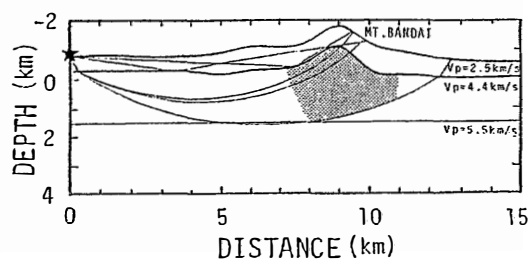


図7. 南北断面に投影した地震波線と減衰域（ハッチ）の深さ分布。

中と推定される。異常域の存在が推定される領域の中央部は、磐梯山、櫛ヶ峰、赤埴山および1888年の噴火で消滅した小磐梯にはさまれた沼ノ平火口を含む領域である。磐梯山を南北に縦断する測線で行われた屈折法地震探査から求められた地殻構造と速度分布^{2,3)}をもとにして、山体下を伝播する地震波線の分布から、異常域の深さは地表面下約1～3kmと推定される（図7）

探査実験に際しては、福島県、地元町村、環境庁、営林署をはじめとする関係諸機関、ならびに地元住民の皆様から協力を頂きました。記して謝意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 守屋以智雄：日本の火山地形。東京大学出版会、135p.、1983.
- 2) 長谷川昭・ほか：エアガン・ランドエアガンを用いた磐梯山周辺域の地殻構造調査。東北地域災害科学研究, 25, 75-79, 1989.
- 3) 長谷川昭・ほか：エアガンによる磐梯山周辺域の地殻構造探査。地震, 42, 161-169, 1989.
- 4) 松本聡・長谷川昭：エアガン実験で観測されたコーダ波の振幅特性。地震, 42, 317-324, 1989.

* Crustal Structure Beneath Bandai Volcano Revealed by Fan—Shooting Measurement

Sadato UEKI, Hiroyuki HAMAGUCHI, Takao INAMORI,
Shigeki Horiguchi, Azusa NISHIZAWA, Shuichiro HORI,
Koichi NIDA, Satoshi MATSUMOTO, Isao UMETSU,
Yoshiyuki SATO, Akira HASEGAWA, Hiroki MIYAMACHI,
Yu'ichi NISHIMURA, Tokumitsu MAEKAWA, Atsuo SUZUKI,
Jun INOUE, Dyasbudi NANANG, Masayuki SUZUKI,
Akihiko ITO, Yasuaki SUDO, Masato IGUCHU and Akio TAKAGI

編集後記

本書は 1988 年の夏から秋に磐梯火山で実施された集中総合観測の報告集です。原稿の多くを 1989 年夏までに提出していただいたにもかかわらず発行が大幅に遅れたのは、ひとえに編集担当者の不手際によるものです。各報告の著者をはじめ、観測に参加された皆様並びに協力していただいた皆様に心よりお詫び申し上げます。

なお、観測実施から長年月が経過したため、多くの方の所属が変更になっております。しかし、連絡がとれない方が多いことから、本報告書では所属をすべて観測当時のままにしてあります。

編集担当者

東北大学理学部

地震予知・噴火予知観測センター

植木 貞人

2023年3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
