

## 恵山火山における噴気試験前後のモニタリング調査

### Monitoring survey during flow test at Esan Volcano, southwestern Hokkaido

#### ABSTRACT

田村 慎\*・岡 大輔\*・荻野 激\*\*

岡崎 紀俊\*\*\*

TAMURA Makoto\*, OKA Daisuke\*

OGINO Tagiru\*\*, OKAZAKI Noritoshi\*\*\*

受付：2024年11月29日

受理：2025年3月17日

\* 資源エネルギー部地域エネルギーグループ

\*\* 地域地質部地質環境グループ

\*\*\* 地域地質部地質防災グループ

Corresponding Author TAMURA Makoto

tamura-makoto@hro.or.jp

We conducted various monitoring surveys at the active volcano, Mt. Esan, in southwestern Hokkaido, Japan, to estimate the influence of a short-term production and reinjection test (flow test). In this area, a resource survey for geothermal power plants has been conducted by Esan Geothermal LLC since 2015, and a flow test was conducted in the summer of 2023. We conducted a volcanic gas survey, gravity monitoring, GNSS observation, and self-potential (SP) survey before, during, and after the flow test, respectively. We did not detect any significant changes in the results of the volcanic gas survey or GNSS observations. On the other hand, the gravity monitoring detected gravity decreases of up to 65 microGals around the Y crater. The SP survey detected SP increases of up to 20 mV or more at the summit lava dome, and decreases of up to 19 mV or more around the X and Y craters. The detected changes suggested that the geothermal water flow associated with the flow test caused downward flow and decreased the water level around the Y crater.

*Keywords: Active volcano, Geothermal development, Flow test, Monitoring survey*

## 1 はじめに

近年、低炭素社会への適合やエネルギー自給率の改善といった課題に対応するため、経済産業省は平成27年に地熱発電の設備容量を2030年までに現状の約3倍（155万kW）とする「長期エネルギー需給見通し」を策定し、これを受けて北海道、東北、九州を中心に地熱発電に向けた資源量調査（以下、地熱調査）が次々と進められている。

北海道内では京極北部地域などの高地熱ポテンシャル域で地熱調査が進められており、2024年5月には函館市南茅部地域で南茅部地熱発電所が運転を開始した。このような状況の中、近年では活火山周辺における調査が増えている（恵山、アトサヌプリ、有珠山など）。

地熱調査に際しては、掘削した坑井から実際に熱水や蒸気を取り出し、その温度や量などを測定して坑井や地熱貯留層の能力を見極めるとともに、周辺温泉などへの影響がないかを確かめる生産・還元試験（以下、噴気試験と呼ぶ）を実施する。生産ゾーンでは生産井を通じて熱水や蒸気を取り出さ

れ、還元ゾーンでは還元井を通じて地下に熱水が戻される。活火山周辺においては、生産ゾーンが火道と結びついている場合も想定されるため、噴気試験が火山活動や火口周辺下の熱水流動系を変化させる可能性がある。しかし、過去の開発事例や調査事例が少ないことから、影響の有無についてはこれまで解明されていない。

そこで、地熱調査が進められている恵山火山を対象に、2023年夏の噴気試験に伴う熱水流動系への影響を把握するためのモニタリング調査を実施した。モニタリング調査は噴気試験前の2023年6月、試験中の2023年8～9月、試験後の2023年10月および2024年5月に、火山ガス調査、重力変動観測、GNSS観測および自然電位探査の4項目をそれぞれ実施した。ここでは各調査の概要と結果、および調査結果をもとに行った定性的検討について報告する。



図1 恵山火山周辺図. 地理院タイルを加工して作成  
(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)

Fig. 1 Map of the survey area. The topographic map is derived from “GSI tiles” by the Geospatial Information Authority of Japan.

## 2 調査地域概要

恵山火山は西南北海道、渡島半島の東端に位置し(図1)、気象庁の活動監視対象火山となっている。気象庁<sup>1)</sup>によると「恵山火山の活動は約4~5万年前に始まり、約1万年前までに海向山や外輪山、椴山、スカイ沢山などの溶岩ドーム形成とそれに伴う火砕流が発生した。その後、火砕流を伴う恵山溶岩ドームの形成があり、恵山溶岩ドーム形成後には小規模噴火活動も発生している。現在、恵山溶岩ドーム西麓の爆裂火口で噴気活動が観測されている。」。また、気象庁による2023年10月の現地調査<sup>2)</sup>において、爆裂火口内のX火口とY火口で110℃の噴気温度を観測しており、噴気の高さは火口縁上100m以下で噴気活動は低調に経過しているとされている。

恵山火山では2015年より株式会社レノバが地熱調査を進めており、2022年以降株式会社レノバ、大和エナジー・インフラ株式会社、三菱マテリアル株式会社の3社が出資する特別目的会社(合同会社はこだて恵山地熱)によって進められている。

## 3 モニタリング調査概要と結果

モニタリング調査は、2023年夏の噴気試験の前、試験中、および試験後のそれぞれで火山ガス調査、重力変動観

測、GNSS観測および自然電位探査の4項目を実施した。今回の調査に際し、まずX火口、Y火口が分布する火口原を中心に恵山溶岩ドームから海向山中腹にかけて、重力変動観測に適した岩やコンクリート構造物を選定し、その近傍でGNSS観測および自然電位探査を行った。このため、火山ガス調査を除く3項目の調査地点は、図2および表1で示した地点番号で統一している。

各モニタリング調査の概要と結果について、次項以降に示す。

### 3.1 火山ガス調査

#### 1) 火山ガス調査について

これまで当所では、火山活動を地球化学的に捉える観測方法として、周辺温泉や地下水等の水質変動に加え、火口域およびその周辺から噴出している火山ガスの変動についても調査・解析している。特に十勝岳、樽前山および雌阿寒岳では、20年以上にわたり火山ガス、温泉等の調査・解析による火山活動の観測を行っている。

今回はこうした知見・手法を用いて火山ガス調査を実施した。なお、火山ガスの採取および分析は、既存の手法<sup>3)</sup>に準じた。

#### 2) 火山ガス調査概要

火山ガスを採取する火口として、火口原のほぼ中央付近で、1) 採取時の作業の安全が確保でき、2) 火山ガスの噴出

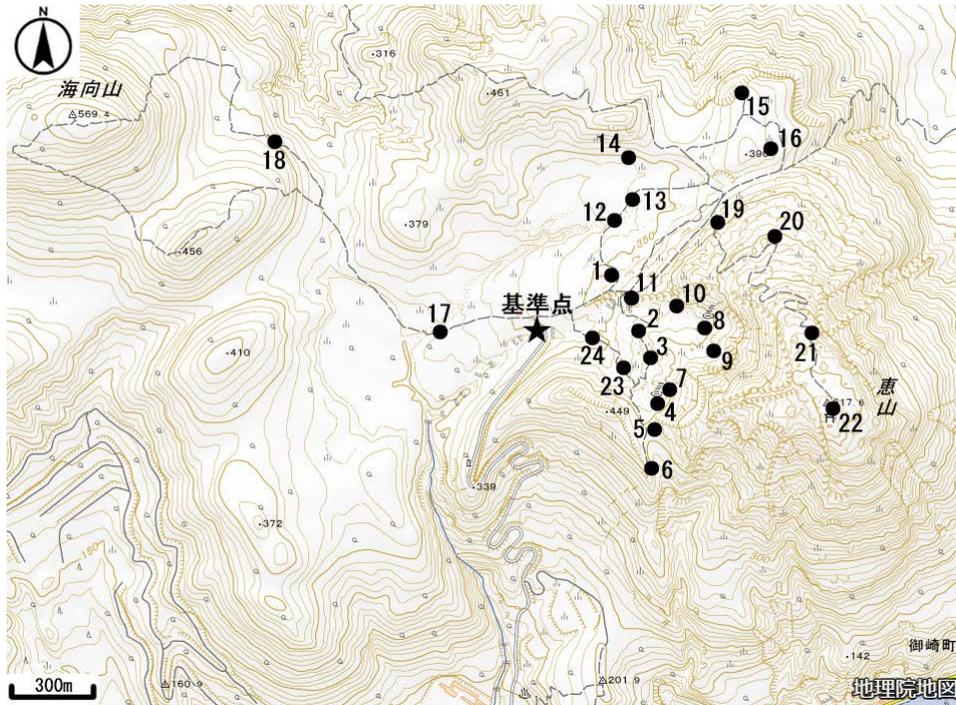


図2 調査地点図 (図1内赤枠部)。黒丸印が探査地点を、星印が基準点を示す。地理院タイルを加工して作成

Fig. 2 Survey points map (red square in Fig.1). Locations and numbers of survey points (black dots) and reference point (star) in the Esan volcano. The topographic map is derived from "GSI tiles" by the Geospatial Information Authority of Japan.

表1 調査地点一覧

Table1 List of the survey points.

地点	緯度	経度
基準点	41.807097	141.153636
No.1	41.808864	141.156753
No.2	41.807017	141.157917
No.3	41.806156	141.158375
No.4	41.804767	141.158703
No.5	41.803819	141.158536
No.6	41.802394	141.158475
No.7	41.805139	141.159225
No.8	41.807128	141.160675
No.9	41.806342	141.161167
No.10	41.807878	141.159483
No.11	41.808144	141.157567
No.12	41.810580	141.156957

地点	緯度	経度
No.13	41.811261	141.157589
No.14	41.812579	141.157386
No.15	41.814697	141.162331
No.16	41.812803	141.163459
No.17	41.807067	141.149433
No.18	41.813103	141.142239
No.19	41.810583	141.161231
No.20	41.810011	141.163653
No.21	41.806964	141.165344
No.22	41.804564	141.166147
No.23	41.805872	141.157119
No.24	41.806858	141.155822

温度が高く (100℃以上)、かつ勢いが強いY火口内の噴気孔を対象とした。火山ガス採取は、噴気試験前の2023年6月26日と、試験中の2023年8月31日に行い、両調査日ともに同一の噴気孔から、直接採取した。

採取の手順は以下のとおりである。

1: 選択した噴気孔にチタン製の管 (長さ 60 cm 程度、内径: 15 mm) を空気の混入が起きないように深く挿入する。この管にガス吸引用 2 口注射器を繋ぎ、火山ガスを吸引し、管内に火山ガスを十分通気させる。

2: その後、チタン製管に、シリコンチューブによって、ヨウ素酸カリウム-ヨウ化カリウム溶液を入れた試験管 (A)、水酸化カリウム溶液 (5M) 20 mL 入りの三方コック付き注射器 (B) を順次接続して、A・B にそれぞれ火山ガスを通気させて、各試薬と反応させて火山ガスを採取する。A では、ヨウ素の色が薄くなるまで静かに吸引する。この際、ヨウ素の色が完全に消えないように注意する。B では、濡れた布などで冷やしながらシリンジを静かに引き、水酸化カリウム溶液 (5M) の体積が、約 40 mL (水蒸気量が約 20 mL) になるまで吸引する。

採取したヨウ素酸カリウム-ヨウ化カリウム溶液からは、火山ガス中に含まれる亜硫酸ガス (SO<sub>2</sub>) と硫化水素 (H<sub>2</sub>S) を定量した。火山ガス中の硫黄化合物は、主にこの 2 つの成分からなり、ヨウ素の酸性溶液に火山ガスを導入すると、SO<sub>2</sub> は溶解し硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) となり、H<sub>2</sub>S は硫黄 (S) となり沈殿する。したがって、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> の量、S の量を測定すると火山ガス中のこれらの成分の割合を求めることができる。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> はイオンクロマトグラフィー (サーモフィッシャー製: DIONEX ICS-2100) で、S は溶液化させ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> としたのち、同様にイオンクロマトグラフィーにより定量した。

表2 火山ガス分析結果

Table2 Results of the volcanic gas survey.

	採取年月日	ガス採取噴気 孔温度(°C)	H <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O以外のガス組成 %					
				HCl	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	HF	R-Gas
噴気試験前	2023/6/26	120	98.1%	0.2%	25.8%	0.1%	69.0%		4.9%
試験中	2023/8/31		97.9%	1.2%	25.2%	0.1%	69.9%		3.6%
地質研究所*	2003年10月		97.1%	0.1%	8.4%	1.1%	84.2%		6.2%
	2006年9月		98.9%	1.7%	25.1%	3.1%	64.1%		2.8%

一方、水酸化カリウム溶液には、主にハロゲン化水素(HF・HClなど)、亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)、硫化水素(H<sub>2</sub>S)、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)が吸収されており、これらの成分を定量した。定量方法は、CO<sub>2</sub>以外の成分はイオンクロマトグラフィー、CO<sub>2</sub>は塩酸による滴定法を用いた。この他に、火山ガス中の水蒸気量(体積)、アルカリ溶液に吸収されない残留ガス(R<sup>-</sup>ガス)の体積も求めた。

### 3) 火山ガス分析結果

定量結果から計算した各成分のモル比を表2に示す。なお、この表には、過去に観測した火山ガス分析結果も併せて示している。

この結果を見ると、火山ガスは水(H<sub>2</sub>O)が主体(約98%)で、H<sub>2</sub>O以外のガス組成では、CO<sub>2</sub>が約70%となっている。一方、SO<sub>2</sub>、HCl、HFなどの高温の火山ガスに多く含まれる成分割合は低い。これは、比較的低温(100°C~60°C)の火山ガスの特徴を示しており、噴気試験前に採取した火山ガスの温度(120°C)と整合している。

噴気試験前と試験中の火山ガス組成を比較すると、有意な変化は認められない。そのため、噴気試験による火山ガス組成への影響はほぼないと考えられる。また、今回の2回の結果は、過去の火山ガス分析結果(2003年および2006年:X火口ないしY火口で実施)と比較してもほとんど変わらず、恵山火山の火口から噴出する火山ガスは、比較的安定した状況が続いているとみられる。

## 3.2 重力変動観測

### 1) 重力変動観測について

地表における重力は、地下の密度を直接的に表す物理量であり、地下における流体の移動は、地表における重力の変動を引き起こす。そのため、地下水や温泉が大量揚水されている地域<sup>4)</sup>、活火山地域<sup>5)</sup>や地熱地域<sup>6)</sup>などでは、地下における流体の変動を把握するために重力変動観測が行われてきた。

今回、恵山火山で実施された噴気試験に伴う重力変動の有無を把握するため、重力変動観測を実施した。

### 2) 重力変動観測概要

図3に示した重力変動観測網を構築し、表3に示した日程で観測を実施した。以下、各回の観測をGEsnの頭文字と通

表3 2023年~2024年における重力変動観測の概要

Table3 Summary of the gravity monitoring from 2023 to 2024.

観測名 GEsn#	観測日 自	観測日 至	観測点数
1	2023/6/28	2023/6/29	10
2	2023/7/4	2023/7/5	10
3	2023/8/30	2023/9/1	17
4	2024/5/29	2024/5/30	14

算回数で示す。調査の都合で、GEsn1とGEsn2ではおよそ一週間の期間が空くが、2回で全域を網羅する17観測点で観測を行ったことから、解析・比較の都合上1回の観測として扱い、以降GEsn1&2と表記する。GEsn3では、GEsn1&2をもとに、全域の17観測点で観測を行った。GEsn4では、調査の都合でいくつかの観測点を欠測として、主要な14観測点で観測を行った。

重力変動観測にはScintrex CG-5<sup>7)</sup>を1台使用した。CG-5型重力計は相対重力計であるため、基準点(図3内REF)からの複数のルート(図3内水色点線)を用いた往復観測を採用し、観測精度の向上を図った。基準点は火口原駐車場に設置し、海向山へのルート、恵山山頂へ向かうルート、岬展望台へ向かうルートを設定したほか、恵山展望台および火口原には観測点が集中していることから、これらに向かう複数のルートを設定した。得られた値に対して、器械高補正、ドリフト補正、潮汐補正を行い、重力値を算出した。潮汐補正については、GOTIC2<sup>8)</sup>を用いた。以下、地図の作図にはQGIS<sup>9)</sup>を用いた。

### 3) 重力変動観測結果

各観測点における重力変動観測結果を図4および図5に示す。この観測結果は、各観測点における最初の観測結果を基準(=0μGal)とした重力変動量[μGal]を縦軸に、観測日を横軸にしたグラフで表している。観測結果は、往復観測の往復差が最小二乗法によって最小となる処理を行い、この往復差を各観測結果のエラーバーで示している。表4に示すように、GEsn1~GEsn3の期間をPer.1、GEsn3~GEsn4の期間をPer.2とし、観測結果を検討したところ、重力変動量の変



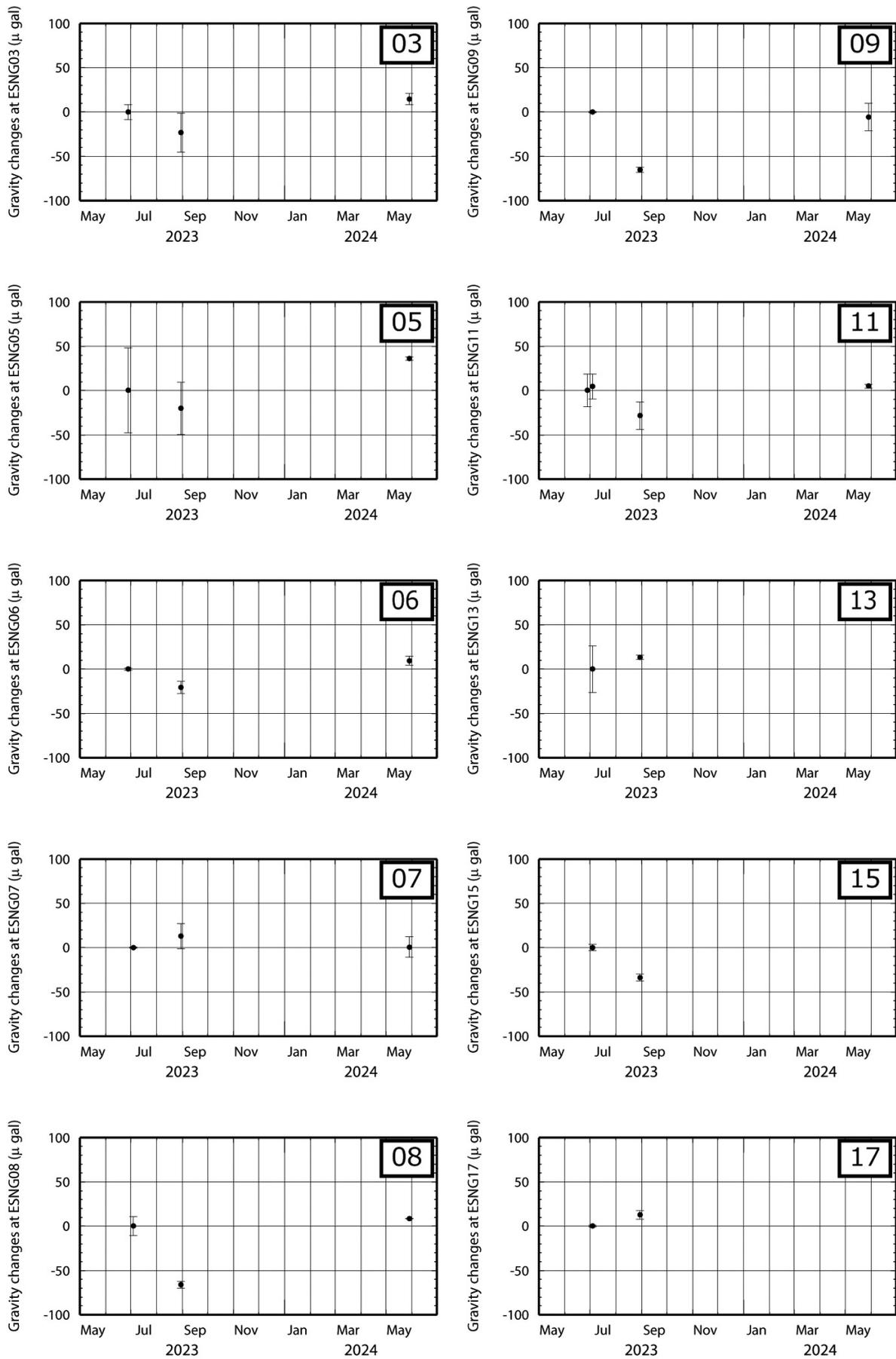


図4 各観測点における重力変動観測結果（その1）  
Fig.4 Gravity monitoring results at each survey point (Part 1).

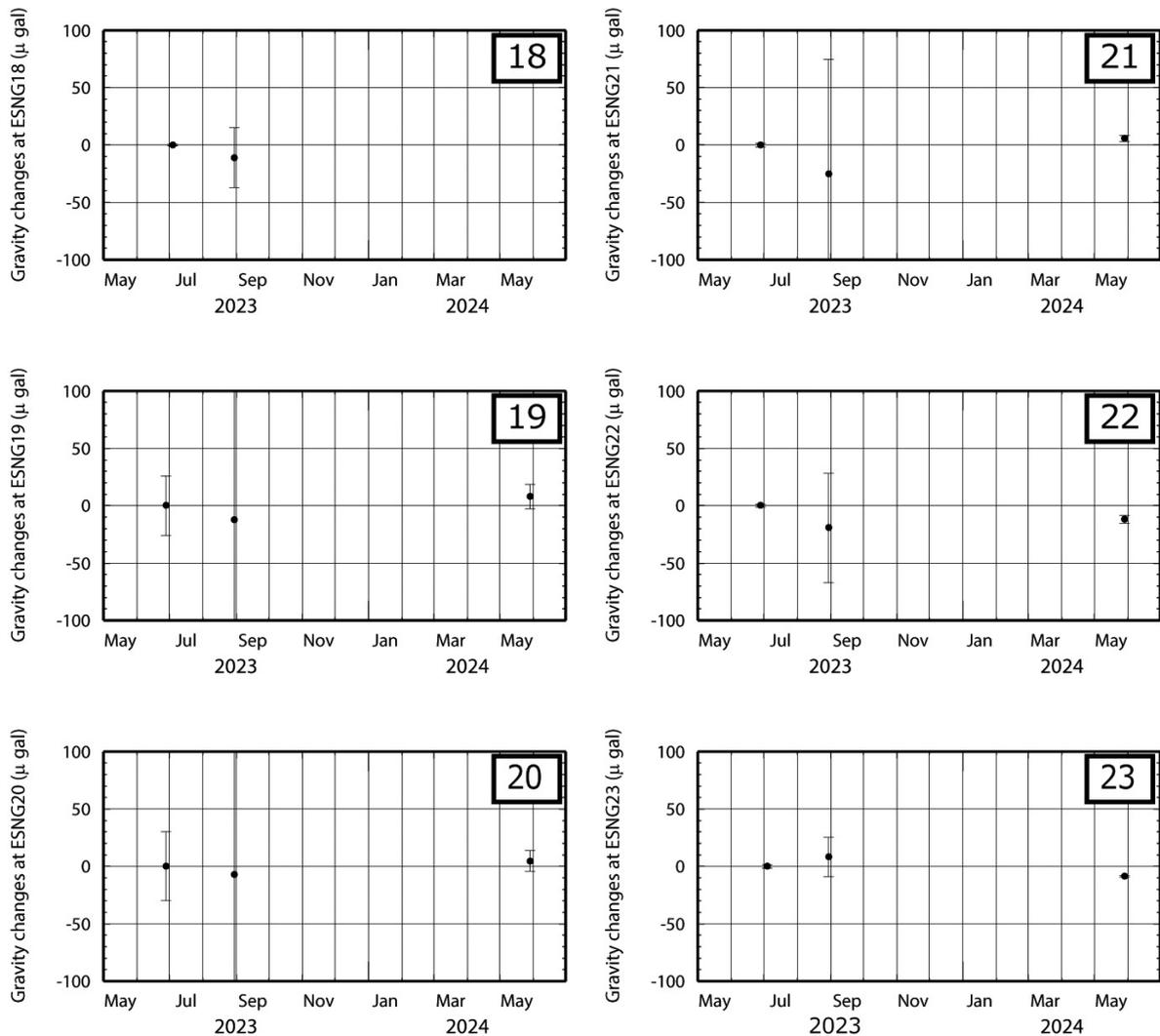


図5 各観測点における重力変動観測結果（その2）  
Fig.5 Gravity monitoring results at each survey point (Part 2).

#### 変動パターン4

(Per.1で増加, Per.2で減少)

該当する観測点は、火口原のNo.7およびNo.23である。どちらの観測点も重力変動は20 $\mu$ Ggal未満と小さく、Gen3のエラーバーが比較的大きい。

次に、表4のそれぞれの期間における重力変動量の空間分布を図6および図7に示す。コンタリングには、GMT<sup>10)</sup>のsurfaceコマンドを用いた。なお、図6ではGESn1&2とGESn3の両方で、図7ではGESn3とGESn4の両方で観測し、変動を計算できた観測点のみを用いた。また、Per.1とPer.2ではコンタリングに用いた観測地点が異なるため、有意なコンターが得られたエリアが異なる。例えばPer.2では西側(No.17およびNo.18)で測定していないため、基準点(REF)より西側のコンターは有意とは言えない。

重力変動量の空間分布から、Per.1において火口原の東側で重力値が減少する傾向が見られる。また、Per.2において

は、火口原の東側および南側で増加する傾向が見られる。

以上、重力変動観測を行った結果をまとめると、全観測期間を2つの期間(Per.1およびPer.2)に分けると、各観測点における重力変動は4つのパターンに分けられ、Per.1では主に重力値が減少し、Per.2では主に重力値が増加・回復する結果となった。火口原および南側の端に位置するNo.3, No.5, No.6ではPer.1での減少量以上にPer.2で増加したが、その他大半の地点では概ねPer.1での減少量と同等程度の増加がPer.2で確認された。

重力変動量では、火口原の東側(No.8, No.9)で、Per.1での減少量が $-65\mu$ Gal, Per.2での増加量が $60\sim 75\mu$ Galと大きな重力変動がみられた。

### 3.3 GNSS観測

#### 1) GNSS観測について

これまで当所では、火山活動に伴う地殻変動を捉える観測手法として、活動的火山においてGNSS観測を行ってきた。十勝岳や雌阿寒岳では20年以上にわたってGNSS連続観測

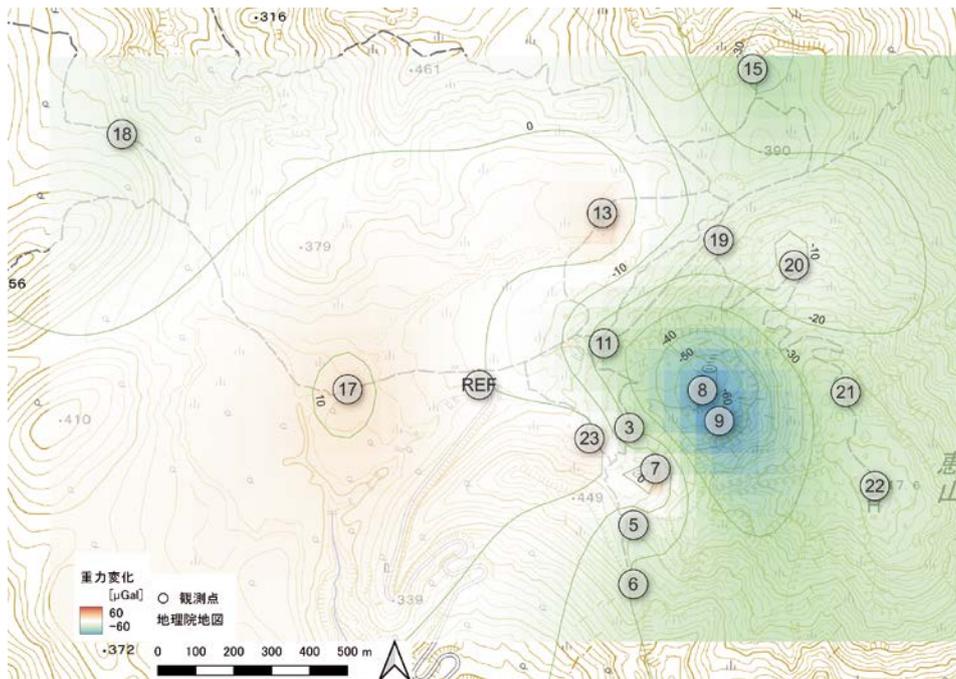


図6 Per.1における重力変動量の空間分布. 背景地図に地理院タイルを使用  
 Fig. 6 Spatial distribution of gravity change during the Per.1. The background topographic map is derived from “GSI tiles” by the Geospatial Information Authority of Japan.

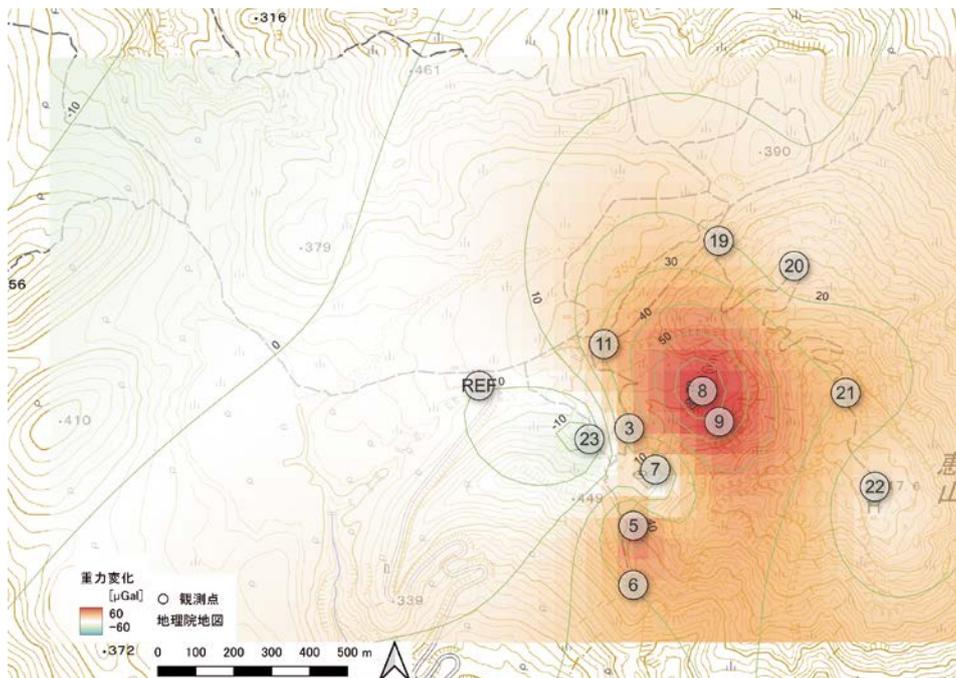


図7 Per.2における重力変動量の空間分布. 背景地図に地理院タイルを使用  
 Fig. 7 Spatial distribution of gravity change during the Per.2. The background topographic map is derived from “GSI tiles” by the Geospatial Information Authority of Japan.

を行ってきたほか、地殻変動にともなう重力変動の有無を把握するため、十勝岳および有珠山では重力観測とGNSS観測を同時に行っている。

今回はこうした知見・手法を用い、恵山火山での噴気試験に伴う地殻変動の有無、および重力変動に対する地殻変動の

影響を把握するため、重力変動観測にあわせてGNSS観測を実施した。

## 2) GNSS観測概要

GNSS観測は重力変動観測とあわせて表6に示した日程で実施した。観測点の条件として常に同じ位置にアンテナを設

置ることが望ましいが、多くの点についてアンテナを載せるボルトを岩に固定することは困難なため、GNSS観測点の多くは重力変動観測点の近傍における岩やコンクリート構造物を使用した。さらに、気象庁が恵山火山口原に設置している繰り返しGNSS観測点2点（No.6 および No.17）も使用し、このうち火山口原西端のNo.17点を基準として各点の座標値を計算した。観測日程等の都合から、各回とも重力変動観測点全点での観測は行わず、また、1点あたりの観測時間は約15分とした。

1回目のGNSS観測は、機器にトラブルが発生して重力変動観測と同時に実施できなかったため、直近で観測可能な7月9～10日に6点（No.6, No.9, No.11, No.15, No.20, No.22）で行った。2回目は8月31日～9月1日に8点（No.6, No.7, No.9, No.11, No.15, No.20, No.21, No.22）で、3回目は2024年5月30～31日に2回目と同じ8点で、重力変動観測と同時に行った。

GNSS観測に使用した受信機はトリンプル社製 NetR8 である。各観測点では1回目に撮影した写真を基にアンテナを設置し、水平の取り方も毎回同じ手順で行うなど再現性を高めた。各点の座標値の計算には RTKLIB2.4.3<sup>11)</sup> を使用し、1エポック（30秒）ごとに値を計算して最も品質の高いFIX解を座標値とした。

表6 2023年～2024年におけるGNSS観測の概要  
Table6 Summary of the GNSS observation from 2023 to 2024.

観測名	観測日 自	観測日 至	観測点数
1	2023/7/9	2023/7/10	6
2	2023/8/31	2023/9/1	8
3	2024/5/29	2024/5/30	8

### 3) GNSS観測結果

各観測点の座標値を基準点（No.17）からの3成分（南北、東西、上下）で表した結果を表7に示す。それぞれ、北、東および上方向の変位を正の符号で、南、西および下方向の変位を負の符号で示している。

観測の結果、2回以上座標値が得られた点は、No.6, No.9, No.11, No.15, No.20, No.21 および No.22 の7点であり、3回ともに座標値が得られた点は No.15, No.20 および No.22 の3点である。また、1回目の観測でFIX解が得られなかったのは No.6, No.11 の2点であり、3回目の観測では No.7, No.9 の2点である。これらの原因としては、観測時間が短いことに加え、気象条件、火山壁などの急峻な地形、衛星配置の状況が不良であったこと、などが考えられる。

各期間における各点の変位をみるため、各点の最初の座標値からの変位に引き直したものを表8に示す。A～Bの期間は重力変動観測における Per.1 に、B～Cの期間は Per.2 にそ

れぞれ相当するが、いずれの期間においても、多くの点で南北および東西方向の変位はそれぞれ0.01 m（1 cm）以内に収まっており、全期間を通して0.02 m（2 cm）程度であった。また、上下方向についても0.07 m（7 cm）程度であった。観測時間と基線長（最長1500 m程度）から見積られる基線解析の精度は、水平方向に0.02 m程度、上下方向はその3～5倍である0.06～0.10 m程度で、多くの点がこの範囲内に収まっていると推測される。また、No.20はPer.2において例外的に東方向に0.08 m（8 cm）程度、下方向に0.06 m（6 cm）程度変位している。この観測点については、アンテナの設置位置が同じ位置ではなかったことが原因と思われる。

したがって、本観測期間中におけるGNSS観測の結果から、恵山山体～火山口原一帯においては有意な地殻変動はなかったと結論づけることができる。

### 3.4 自然電位探査

#### 1) 自然電位探査について

自然電位（Self-Potential）とは、自然状態の地層に生じる電位のことであり、これに着目し2点間の電位差を測定することで地下構造を調査する物理探査手法が自然電位探査である。地中の金属鉱床は電池として働き、周囲との有意な電位差（自然電位異常）をもたらすことから、自然電位探査は元来金属鉱床探査の主要な方法として長く用いられてきた<sup>12), 13)</sup> など。近年では、地熱流体などの地下流体の流動を把握する手法として、地熱地域や火山地域での地下流体調査、およびモニタリング調査などに応用されている。

#### 2) 自然電位探査概要

図2および表1に示した探査地点のうち、調査の都合で欠測としたNo.12, No.14, No.16を除く21地点を対象に、表9に示した日程で自然電位探査を実施した。以下、各回の探査をSPの頭文字と通算回数で示す。調査の都合で、SP2とSP3ではおよそ一週間の期間が空くが、2回で全21地点で測定を行ったことから、解析・比較の都合上1回の探査として扱い、以降SP2&3と表記する。

探査は以下の作業工程で行った（図8および写真1）。

まず、火山口原駐車場近傍（図2内星印）を基準点とし、安定した接地のため、深さ10 cm程度の穴の中に粘土状にしたベントナイトを埋め、その上に基準電極を設置した。次に基準電極と電線を接続し、電線を敷設しながら探査地点へ移動後、探査地点の表土を薄く剥がして散水し、移動電極を置いて基準電極との電位差をテスターで測定・記録した。終了後は原状回復作業を行い、次の探査地点へ移動した。

基準電極、移動電極とも Wolf Vegyi 社製 Pb-PbCl<sub>2</sub> 非分極電極を用い、設置した電極間の電位差は分解能0.1 mVのHIOKI社製デジタルハイテスタ（3805-50）を用いた。基準点と各探査地点の位置データはGarmin社製ハンディGPS

表7 GNSS 観測結果. 各地点の座標値を No.17 を基準とした 3 成分変位で示す

Table7 Results of the GNSS observation. The coordinates of each point are shown as three-component changes based on No.17.

No.6	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	-	-	-
B(2023/8/31)	-521.7386	752.4294	89.3624
C(2024/5/30)	-521.7211	752.4485	89.3751

No.15	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	849.4620	1072.6108	77.0068
B(2023/8/31)	849.4733	1072.6069	76.9715
C(2024/5/30)	849.4810	1072.6218	76.9353

No.7	N(m)	E(m)	U(m)
B(2023/8/31)	-211.1982	811.9808	78.7799
C(2024/5/30)	-	-	-

No.20	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	330.7918	1179.5552	144.0924
B(2023/8/31)	330.7986	1179.5596	144.0484
C(2024/5/30)	330.7911	1179.6397	143.9879

No.9	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	-79.4987	974.7536	97.0572
B(2023/8/31)	-79.4899	974.7581	97.0460
C(2024/5/29)	-	-	-

No.21	N(m)	E(m)	U(m)
B(2023/8/31)	-9.8969	1315.1778	267.3617
C(2024/5/30)	-9.9036	1315.1643	267.4209

No.11	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	-	-	-
B(2023/8/31)	113.7006	676.6051	49.6392
C(2024/5/30)	113.7197	676.6189	49.6351

No.22	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	-264.1819	1381.3083	309.3425
B(2023/8/31)	-264.2009	1381.3013	309.3387
C(2024/5/30)	-264.1923	1381.2759	309.3573

表8 各 GNSS 観測点における変位

Table8 Displacement at each GNSS observation point.

No.6	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	-	-	-
B(2023/8/31)	0.0000	0.0000	0.0000
C(2024/5/30)	0.0175	0.0191	0.0127

No.15	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	0.0000	0.0000	0.0000
B(2023/8/31)	0.0113	-0.0039	-0.0353
C(2024/5/30)	0.0190	0.0110	-0.0715

No.7	N(m)	E(m)	U(m)
B(2023/8/31)	0.0000	0.0000	0.0000
C(2024/5/30)	-	-	-

No.20	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	0.0000	0.0000	0.0000
B(2023/8/31)	0.0068	0.0044	-0.0440
C(2024/5/30)	-0.0007	0.0845	-0.1045

No.9	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	0.0000	0.0000	0.0000
B(2023/8/31)	0.0088	0.0045	-0.0112
C(2024/5/29)	-	-	-

No.21	N(m)	E(m)	U(m)
B(2023/8/31)	0.0000	0.0000	0.0000
C(2024/5/30)	-0.0067	-0.0135	0.0592

No.11	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/10)	-	-	-
B(2023/8/31)	0.0000	0.0000	0.0000
C(2024/5/30)	0.0191	0.0138	-0.0041

No.22	N(m)	E(m)	U(m)
A(2023/7/9)	0.0000	0.0000	0.0000
B(2023/8/31)	-0.0190	-0.0070	-0.0038
C(2024/5/30)	-0.0104	-0.0324	0.0148

(GPSmap62SJ) で取得した。

さらに、電極の劣化に伴うドリフトを補正するため、測定開始時と終了時には基準電極の隣に移動電極を設置して測定した。補正にあたっては電極の劣化が時間に比例して線形に発生しているものと仮定して、補正係数  $\alpha$  を

$$X = \text{終了時の測定値} - \text{開始時の測定値}$$

$$Y = \text{終了時刻} - \text{開始時刻}$$

$$\alpha = X / Y$$

によって導出し、

$$\text{補正值} = \text{測定値} + \alpha \times (\text{測定時刻} - \text{開始時刻})$$

で補正値を算出した。

### 3) 自然電位探査結果

各探査地点の中で、海向山山腹に位置する No.18 が火口原や恵山溶岩ドームから最も遠く、恵山火山の噴気活動の変化

表9 2023年～2024年における自然電位探査の概要  
Table9 Summary of the self-potential survey. from 2023 to 2024.

探査名 SP#	探査日 自	探査日 至	探査地点 数	備考
1	2023/6/28	2023/6/29	21	噴気試験前
2	2023/8/24	2023/8/24	18	試験中 No. 1, No. 13, No. 15以外で実施
3	2023/9/1	2023/9/1	3	試験中 No. 1, No. 13, No. 15で実施
4	2023/10/18	2023/10/19	21	試験後
5	2024/5/29	2024/5/30	21	試験後

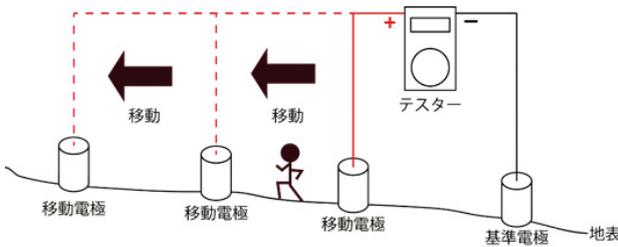


図8 自然電位探査概念図  
Fig.8 Conceptual diagram of self-potential survey.



写真1 自然電位探査の様子  
Pic.1 Scene of the self-potential survey in this study.

や噴気試験の影響を受けにくいと考えられることから、No.18を電位の基準点(=0 mV)とした相対的な電位差(以下、電位差と表記)を算出した。各探査の電位差を表10に示す。

SP1における各探査地点の電位差を色分けして図9に示す。全地点とも正の電位差を検出しており、特に赤色で示した探査地点は350 mV以上の高い電位差が、青色で示した探査地点は250 mV以下の低い電位差を検出したことを示す。

恵山火山の火口原では+300～+400 mV程度の高い電位差を検出したが、突出した電位差はX火口、Y火口周辺を含めて検出しなかった。一方、火口原南端のNo.6では+184 mVと周囲と比べて著しく低い電位差を検出した。これらの結果は1993年に実施された自然電位探査の結果<sup>14)</sup>と類似しており、恵山火山における背景的な自然電位分布と考えられる。

表10 SP1～SP5の自然電位探査結果。No.18地点を0mVとした相対的な電位差で示す

Table10 Result of the self-potential survey. Results are shown as relative values from No.18.

地点	2023年6月 (SP1)	2023年8月&9月 (SP2&3)	2023年10月 (SP4)	2024年5月 (SP5)
基準点	409.2	412.5	414.1	423.6
No.1	388.0	398.3	390.5	394.1
No.2	320.5	326.5	298.0	320.6
No.3	286.4	295.6	295.2	272.4
No.4	391.7	306.8	399.2	389.5
No.5	327.3	319.3	291.5	303.5
No.6	184.2	189.5	190.6	188.6
No.7	379.0	320.2	365.0	384.4
No.8	372.5	353.7	370.7	372.8
No.9	395.3	365.0	367.2	383.1
No.10	353.7	388.5	335.3	340.7
No.11	390.8	392.2	392.7	401.9
No.13	404.5	401.6	394.5	391.7
No.15	443.1	450.0	413.0	450.4
No.17	414.3	414.9	414.4	417.4
No.18	0.0	0.0	0.0	0.0
No.19	385.5	418.8	387.6	370.0
No.20	409.1	460.0	459.4	463.8
No.21	419.6	439.9	420.5	423.4
No.22	380.3	417.6	404.4	399.1
No.23	346.7	356.1	423.0	444.7
No.24	427.6	427.9	424.5	438.4

ここで、噴気試験に伴う影響を把握するため、各地点でのSP1の電位差を0 mVとした、SP2&3～SP5の電位差との差分値を算出し(表11)、各地点の変化を、①安定、②SP2&3時に減少、③SP2&3時に増加、④その他、の4パターンに分類した(図10)。

以下に①～④の特徴を述べる。

- ① 全探査を通じて変化に乏しい探査地点  
基準点, No.1, No.3, No.6, No.11, No.13, No.17, No.24の7地点が該当し、15 mV以内の変化にとどまった。いずれもX火口、Y火口や恵山溶岩ドームから離れている。(図11-1)
- ② SP2&3時に電位差の著しい減少を検出した探査地点  
X火口近傍のNo.4, No.7, およびY火口近傍のNo.8, No.9の計4地点が該当し、19～85 mV減少している。SP4以降で電位差の増加傾向を示し、SP5で概ね回復する。(図11-2)

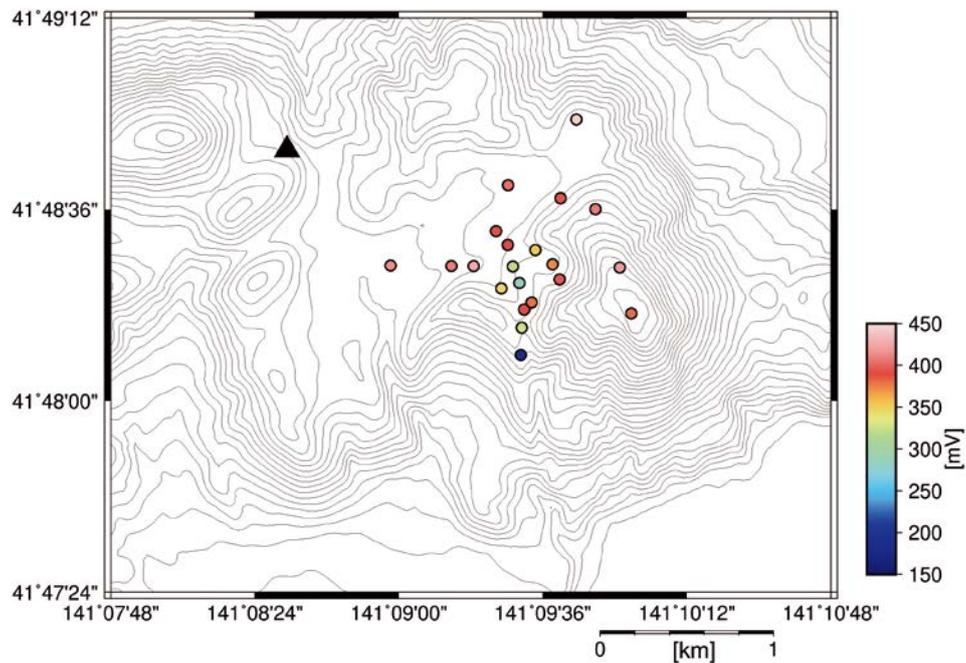


図9 SP1での探査結果. No.18地点(三角印)を0mVとした相対的な電位差を色分けして示す.  
 Fig. 9 Results of the SP1 self-potential survey. Results are shown as relative values from No.18.

表11 各探査地点における変動  
 Table11 Changes in the self-potential survey results at each point.

区分	地点	SP1	SP2&3	SP4	SP5
①安定	基準点	0.0	3.3	4.9	14.4
	No.1	0.0	10.4	2.5	6.1
	No.3	0.0	9.2	8.8	-14.0
	No.6	0.0	5.3	6.4	4.4
	No.11	0.0	1.4	1.9	11.1
	No.13	0.0	-2.9	-10.0	-12.8
	No.17	0.0	0.6	0.1	3.1
	No.24	0.0	0.3	-3.1	10.8
②SP2&3時に減少	No.4	0.0	-84.9	7.5	-2.2
	No.7	0.0	-58.8	-14.0	5.4
	No.8	0.0	-18.9	-1.8	0.3
	No.9	0.0	-30.3	-28.1	-12.2
③SP2&3時に増加	No.10	0.0	34.8	-18.4	-13.0
	No.19	0.0	33.3	2.1	-15.5
	No.20	0.0	50.9	50.3	54.7
	No.21	0.0	20.4	0.9	3.8
	No.22	0.0	37.4	24.1	18.8
④その他	No.2	0.0	6.0	-22.5	0.1
	No.5	0.0	-8.0	-35.8	-23.8
	No.15	0.0	6.9	-30.1	7.3
	No.23	0.0	9.4	76.3	98.0

③ SP2&3時に電位差の著しい増加を検出した探査地点  
 恵山溶岩ドームとその近傍のNo.10, No.19, No.20, No.21, No.22の計5地点が該当し、20~50 mV増加している。No.20を除き、SP4以降で電位差が減少傾向を示す。(図11-3)

④ ①, ②, ③のパターンいずれとも異なり、主にSP4以降に電位差の変化を検出した探査地点  
 No.2, No.5, No.15, No.23の4地点のみ該当する。(図11-4)

#### 4 議論

4項目のモニタリング調査を実施した結果、火山ガス調査とGNSS観測では、噴気試験に伴う有意な変化が認められなかったものの、重力変動観測と自然電位探査では、噴気試験時に有意な変化を確認できた。本項では、これらの結果をもたらした要因について、定性的な検討を行う。

本調査期間中における恵山火山の活動は、気象庁の火山観測結果<sup>2)</sup>から安定していたと推測され、火山ガス調査とGNSS観測で有意な変化が認められなかったことと調和的である。

一方、重力変動観測においては、有意な重力変動を確認している。一般的に重力値が変化する要因には、地下の流体等密度分布の変化、観測地点における地表の上下変動があるが、本調査の場合、GNSS観測の結果が最大0.07 m程度であり、誤差範囲(0.06~0.1 m)に含まれる。仮に最大誤差の0.1 mの上下変動が発生したとしても、高度差による重力異常値の変化は約31 μGalであるため、No.8, No.9における最大65 μGalの変化を説明することはできない。したがって、重力変動の主な要因は地下の密度分布の変化であると考えられる。地表での上下変動が発生せずに地下の密度分布を変化させる現象として、地下の貯留層内における流体の移動が考えられる。貯留層内で流体が増加すると密度も増加するため

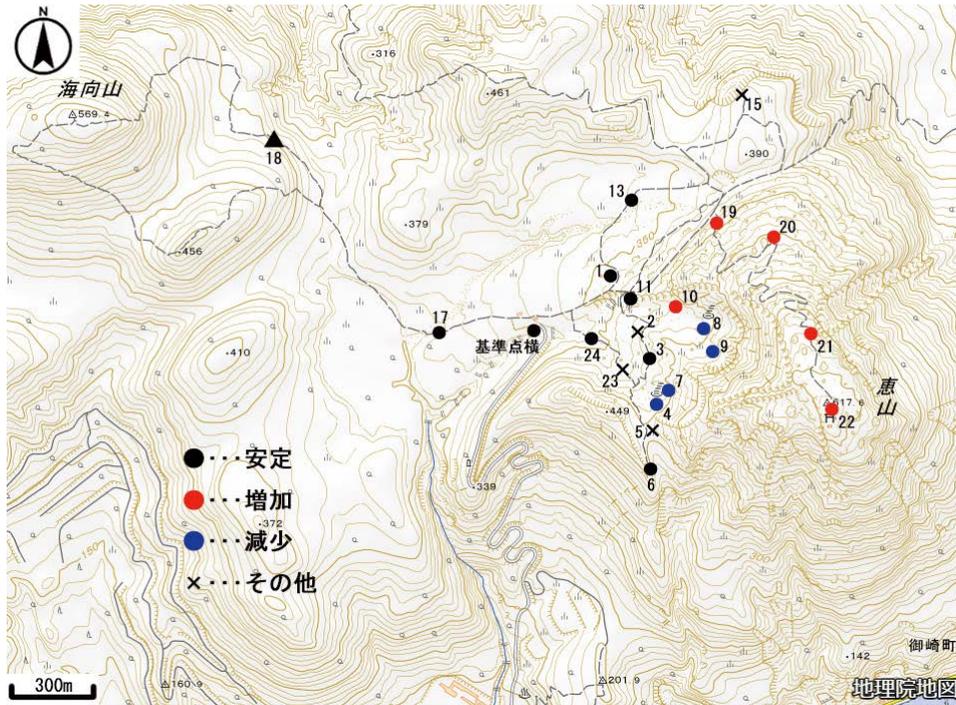


図 10 各探査地点における電位差の変動傾向。地理院タイルを加工して作成  
 Fig. 10 Classification of changes in the self-potential survey results at each point. The topographic map is derived from "GSI tiles" by the Geospatial Information Authority of Japan.

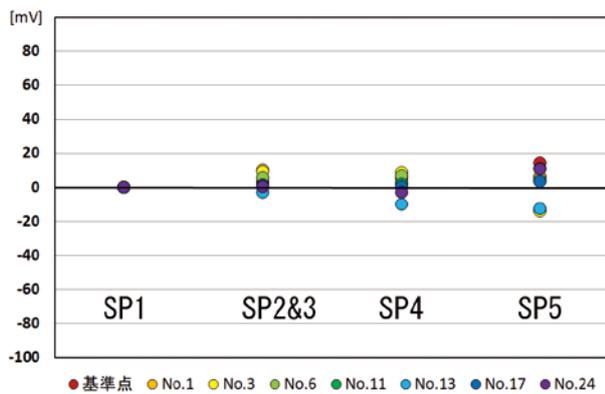


図 11-1 ①安定, に分類した探査地点の自然電位変動  
 Fig. 11-1 Changes in the self-potential survey results at survey points classified as stable (①).

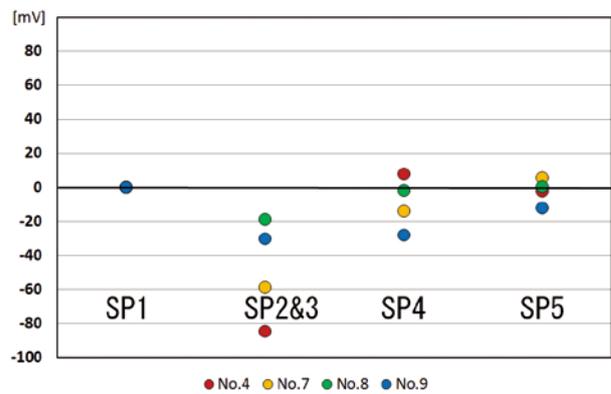


図 11-2 ② SP2&3 時に減少, に分類した探査地点の自然電位変動  
 Fig. 11-2 Changes in the self-potential survey results at survey points classified as decreasing at SP2&3 (②).

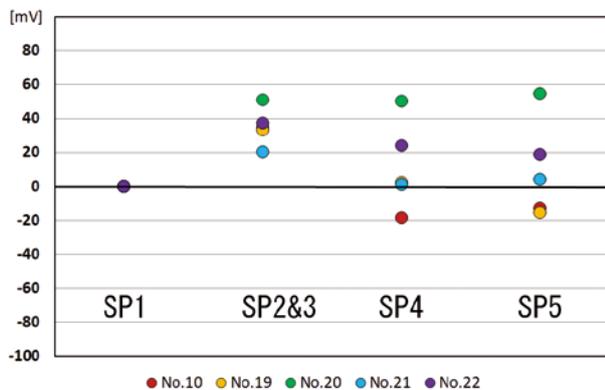


図 11-3 ③ SP2&3 時に増加, に分類した探査地点の自然電位変動  
 Fig. 11-3 Changes in the self-potential survey results at survey points classified as increasing at SP2&3 (③).

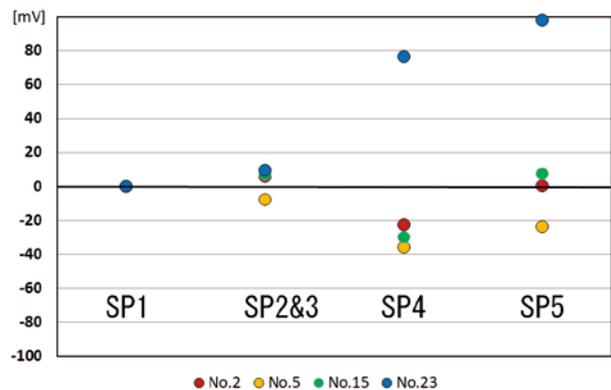


図 11-4 ④その他, に分類した探査地点の自然電位変動  
 Fig. 11-4 Changes in the self-potential survey results at survey points classified as others (④).

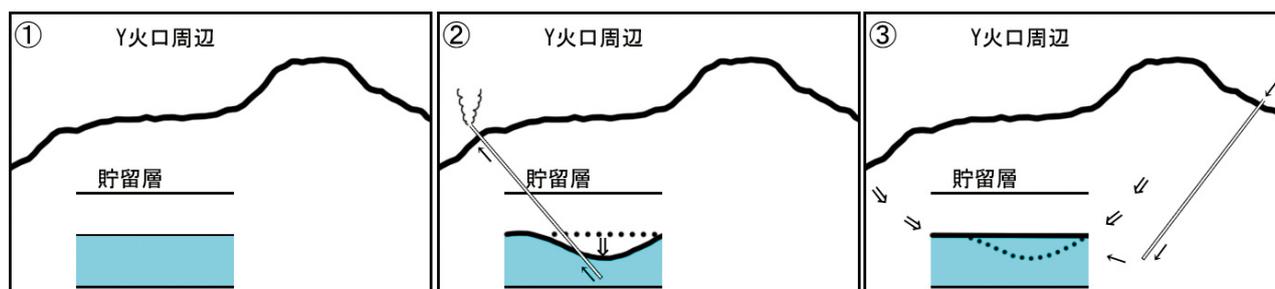


図 12 噴気試験に伴う貯留層内の水位変化（イメージ）  
Fig. 12 Images of water level change in the reservoir by flow test.

重力値は増加し、減少すると同様に重力値も減少することになり、今回得られた結果を概ね説明することができる。

また、自然電位探査においても、有意な変化を確認している。一般に火山地域や地熱地域においては、多孔質媒質中を地熱流体が流れる場合、流れの経路に沿って電位勾配が生じる（界面動電効果）ことが知られている<sup>15), 16)</sup>など。その際、流れによって正の電荷が運ばれるため、地下で上昇流ないし周囲からの流入が起きるゾーンでは正電荷が余剰するので、相対的に電位差が増加する。一方、地下に下降流ないし周囲への流出が起きるゾーンでは負電荷が余剰するので、相対的に電位差が減少する。

今回の調査では、火口原のY火口を中心に噴気試験時に重力値と電位差の減少を確認し、試験後に重力値と電位差の回復を確認している。

以上を総合的に解釈すると、噴気試験に伴う変化について、図 12 の事象が起きていたと推測できる。①恵山火山下に断裂や割れ目が卓越する貯留層が存在し、地熱流体が一定程度存在する。②噴気試験に伴い、Y火口周辺部の地下から地熱流体が取り出され、これに伴い下向きの地熱水流動が発生し水位が低下したことで、地上部で重力値と電位差の減少が観測される。③試験後しばらくして、自然涵養や還元によって地熱流体がもたらされ、水位が回復したことで、地上部で重力値と電位差の回復が観測される。

一方、周辺部は基本的に噴気試験に伴う影響を受けなかったため、重力値や電位差の有意な変化は発生しなかったと推測できる。

## 5 まとめ

活火山の一つである恵山火山において、2023年夏の噴気試験に伴う熱水流動系への影響を把握するため、4項目のモニタリング調査を実施し、以下の結果を得た。

1. 火山ガス調査の結果、噴気試験に伴う有意なガス組成の変化は認められなかった。
2. GNSS観測の結果、噴気試験に伴う有意な地殻変動

は認められなかった。

3. 重力変動観測の結果、有意な重力変動を確認した。主な変化として、試験中における火口原東側での最大 65  $\mu\text{Gal}$  の減少、および試験後の増加・回復、が挙げられる。
4. 自然電位探査の結果、電位差の有意な変化を確認した。主な変化として、試験中における恵山溶岩ドーム付近での 20 mV 以上の増加、X火口、Y火口周辺部での 19 mV 以上の減少、および試験後の増加・回復、が挙げられる。
5. 得られたデータをもとに定性的な検討を行った結果、噴気試験に伴い、火口原のY火口周辺部で地熱流体の取り出しにより水位が低下し、試験後しばらくして、自然涵養や還元により水位が増加したと仮定すれば、モニタリング調査結果を合理的に説明できる。

## 謝辞

現地調査にあたっては、エネルギー・環境・地質研究所資源エネルギー部北口敏弘氏、高橋徹哉氏（現：北地温リサーチ）、中野敬太氏、地域地質部藤原 寛氏にご協力いただきました。また、GNSS観測に際しては札幌管区気象台のGNSS観測点を使用させていただきました。また、合同会社はこだて恵山地熱には噴気試験に関する情報提供などのご協力をいただきました。英文要旨の校正にあたりエディテージ英文校正サービスを使用した。多くの図の作成に QGIS<sup>9)</sup> および GMT<sup>10)</sup> を用いました。

ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 気象庁・編、2013、19. 恵山、日本活火山総覧（第4版）、気象庁。
- 2) 気象庁、2023、令和5年（2023年）の恵山の火山活動、[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly\\_v-act\\_doc/sapporo/2023y/114\\_23y.pdf](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/sapporo/2023y/114_23y.pdf)（最終閲覧日：2025年2月

- 21日)
- 3) 小沢 竹二郎, 1968, 地球化学におけるガス分析法 (I), 分析化学, 17, 3, 395-405.
  - 4) 福田 洋一・馬渡 秀夫・由佐 悠紀・Hunt T., 1996, 精密重力測定による別府地域の地下水変動の研究, 測地学会誌, 42, 2, 85-97.
  - 5) 大久保 修平, 2005, 重力変化から火山活動を探る: 観測・理論・解析 (<特集> 火山学 50 年間の発展と将来), 火山, 50, 特別号, S49-S58.
  - 6) 江原 幸雄・本山 達也・赤坂 千寿・古谷 茂継・後藤 弘樹・本松 利郎, 1994, 重力変動観測による地熱貯留層モニタリングの試み (その 1), 日本地熱学会誌, 16, 3, 343-363.
  - 7) Scintrex, 2008, CG-5 Scintrex Autograv System OPERATION MANUAL.
  - 8) Matsumoto K., Sato T., Takanezawa T., Ooe M., 2001, GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. Journal of the Geodetic Society of Japan, 47, 1, 243-248.
  - 9) QGIS Project, 2019, QGIS User Guide Release 3.4, <https://www.qgis.org/ja/site/index.html> (最終閲覧日: 2025 年 2 月 21 日)
  - 10) Wessel P., Smith H. F. W., 2018, The Generic Mapping Tools GMT version 4.5.18 Technical Reference and Cookbook, Generic Mapping Tools Graphics.
  - 11) Takasu T., 2020, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <https://www.rtklib.com> (最終閲覧日: 2025 年 2 月 21 日)
  - 12) 物理探査学会・編, 1998, 物理探査ハンドブック, 物理探査学会.
  - 13) 狐崎長狼, 2001, 応用地球物理学の基礎, 古今書院.
  - 14) Nishida Y., Matsushima N., Goto A., Nakayama Y., Oyamada A., Utsugi M. and Oshima H., 1996, Self-Potential Studies in Volcanic Areas (3): Miyake-jima, Esan and Usu, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics), 10, 1, 63-77.
  - 15) 西田 泰典, 2013, 自然電位と地殻変動, 北海道大学地球物理学研究報告, 76, 15-86.
  - 16) 石戸 経士, 1981, 地熱水対流に伴う流動電位—地熱地域における自然電位異常の一つのメカニズムとして—, 日本地熱学会誌, 3, 2, 87-100.

## 要 旨

地熱発電に向けた資源量調査が進行中の恵山火山を対象に、2023 年夏の噴気試験に伴う熱水流動系への影響を把握するため、モニタリング調査を実施した。モニタリング調査は火山ガス調査、重力変動観測、GNSS 観測および自然電位探査の 4 項目からなり、噴気試験前、試験中、試験後にそれぞれ実施した。火山ガス調査と GNSS 観測では、噴気試験に伴う有意な変化は認められなかったものの、重力変動観測と自然電位探査では、噴気試験時に有意な変化を確認できた。これらの結果を説明するには、噴気試験の期間中に、Y 火口周辺部において地下流体の水位低下が発生したと仮定すると整合する。