

---

原 著

---

## 島根県木部谷間欠泉における振動について

<sup>1</sup>関東学院大学工学部, <sup>2</sup>武藤理科器械, <sup>3</sup>自然工学研究所

前田直樹<sup>1</sup>, 石井栄一<sup>1</sup>, 鈴木紀生<sup>1</sup>  
秋山卓<sup>1</sup>, 佐藤統<sup>1</sup>, 武藤豊<sup>2</sup>  
伊藤芳朗<sup>3</sup>

(平成12年4月14日受付, 平成12年6月21日受理)

### Ground Vibration Observed at Kibedani Geyser, Shimane Prefecture, Japan

Naoki MAEDA<sup>1</sup>, Eiichi ISHII<sup>1</sup>, Norio SUZUKI<sup>1</sup>, Suguru AKIYAMA<sup>1</sup>  
Osamu SATO<sup>1</sup>, Yutaka MUTO<sup>2</sup>, and Yoshiro ITO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Engineering, Kanto Gakuin University

<sup>2</sup> Muto Science Instruments

<sup>3</sup> Institute of Natural Science and Technology

#### Abstract

There is a geyser which erupts water up to 2m high by pressure of carbon dioxide in Kibedani Spa, Shimane Prefecture, Japan. Ishii et al. (1998) reported that 1) Eruption period is about 29 min, and duration of eruption is about 5 min. The fluctuations of these intervals are very small. 2) Shallower and deeper waters are found during an eruption by the measurement of water temperature. 3) Periodic ground vibration is observed.

In this study, we determined source locations of the ground vibration by using arrival times of the events found in the ground vibration and by using amplitude (RMS) data of the ground vibration. As a result of the analyses, shallower and deeper sources of the ground vibration are found. This fact corresponds to the fact that shallower and deeper waters are found during an eruption. We regard shallower source as inflow of underground water and deeper source as foaming of carbon dioxide.

Key words : Kibedani Spa, Geyser, Source location of ground vibration

キーワード : 木部谷温泉, 間欠泉, 振動源位置

#### 1. はじめに

間欠泉には, 水の沸騰により生ずる間欠沸騰泉と炭素ガスなどのガスの圧力により生ずる間欠泡

沸泉がある。別府竜巻地獄、鬼首間欠泉、アメリカのイエローストーン国立公園にあるOld Faithful Geyserなど、よく知られている間欠泉は、地熱地帯にある間欠沸騰泉である。一方、間欠泡沸泉は、原因となるガスの状態が変わりやすいため、長く間欠泉として存在する例が少ない。したがって、その調査報告もあまりなされていない。

島根県西部の柿木村にある木部谷温泉の源泉は、炭酸ガスの圧力によって温泉水を約2mの高さまで噴出する間欠泉となっている。木部谷間欠泉では、1978年、1979年に相川・野口(1980)により、また、1997年、1998年には、石井ら(1998)により調査が行われている。相川・野口(1980)は、1) 噴出周期は21分から23分で、噴出している時間は約4分であること、2) ガスの組成はCO<sub>2</sub>が97.6%であること、3) Cl, HBO<sub>2</sub>, Caなどの含有量は噴出初期に少なく約17秒後から増え始めることから、噴出水が浅い地下水に富む水から鉱水に富む水へと変化していることを示していること、を報告している。また、石井ら(1998)では、1) 噴出周期は約29分、噴出している時間は約5分で周期、噴出時間とも安定していること、2) 水位は、噴出終了後にいちばん下がり4.5mくらいであること、また、休止時に徐々に上昇してくるが、噴出直前に上昇の経時変化が大きくなること、3) 噴出水はまず温度の低い水が30秒～40秒噴出した後、温度の高い水が出てくること、4) 間欠泉周囲で間欠泉の噴出周期と同様の周期で振動が観測されること、等がわかった。約20年の間に噴出周期が約22分から約29分へと変化しているが、木部谷間欠泉はこの種の間欠泉としては、非常に安定している間欠泉である。

間欠泉の噴出に関連した振動調査としては、本谷・野越(1963)、野村ら(1995)、Kedar et al. (1996)などがある。しかしながら、これらの調査は、すべて間欠沸騰泉に対するものであり、間欠泡沸泉に対する調査例はほとんどない。木部谷間欠泉周囲でみられる振動は、噴出中のみではなく噴出前あるいは噴出後にもみられた。これらの振動は、間欠泉での噴出の準備過程あるいは回復過程に関連していると考えられ、その性質は噴出のメカニズムを考える上で一つの証拠を与えるであろう。本論文では、木部谷間欠泉における振動とその振動源位置について報告する。

## 2. 振動の測定

振動の測定は、1997年と1998年の2回行われた。Fig. 1に木部谷間欠泉周囲の様子および換振器の配置を示す。1997年には6地点、1998年には4地点に換振器(振動技研製: UP-255S, UP-252S)を配置した。1997年の観測点1と2、1998年の観測点AとBでは、水平動2成分の観測も同時に行った。換振器から増幅器(振動技研製: UPS-T3)を通し、データレコーダ(TEAC製: DR-M3b)でサンプリング周波数を1997年には100Hz、1998年には1kHzとして、光磁気(MO)ディスクに記録した。なお、換振器の固有周期は1秒である。測定日時は、それぞれ1997年9月4

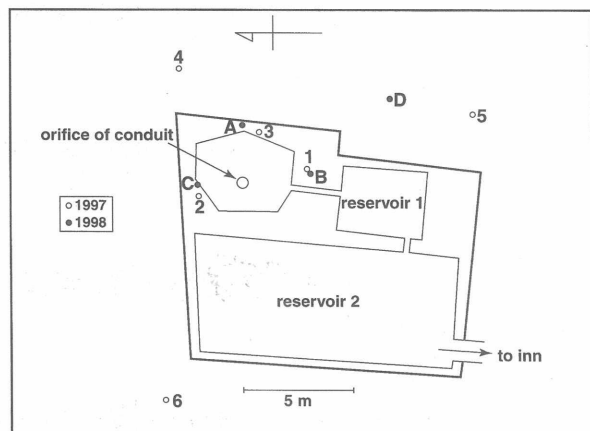


Fig. 1 Distribution of seismographs around Kibedani Geyser. Six seismographs (Stations 1 to 6) and four seismographs (Stations A to D) were installed in 1997 and 1998, respectively. Each seismograph has a natural period of 1 s. Waveform were recorded with sampling rates of 100Hz (1997) and 1kHz (1998).

日12時47分から16時15分までおよび1998年6月15日10時16分から11時46分までである。1997年の測定は、まず間欠泉噴出に関する振動が存在するか否かを確認するために行われた。このデータを用いて振動源位置の推定を行おうとしたが、サンプリング周波数が波形を表現するために十分ではなく、位置の推定にはいたらなかった。したがって、1998年の測定では、サンプリング周波数を1kHzと上げて測定を行った。

### 3. 測定結果

#### 3.1 1997年の測定結果

Fig. 2に、1997年に測定された振動の記録から観測点1における記録を抜き出し、噴出開始時刻をそろえて波形をならべてある。測定を行った3時間28分の間に6周期を完全に記録することができた。噴出終了時刻に30秒程度のばらつきがあるが、同じような振動を周期的に繰り返していること

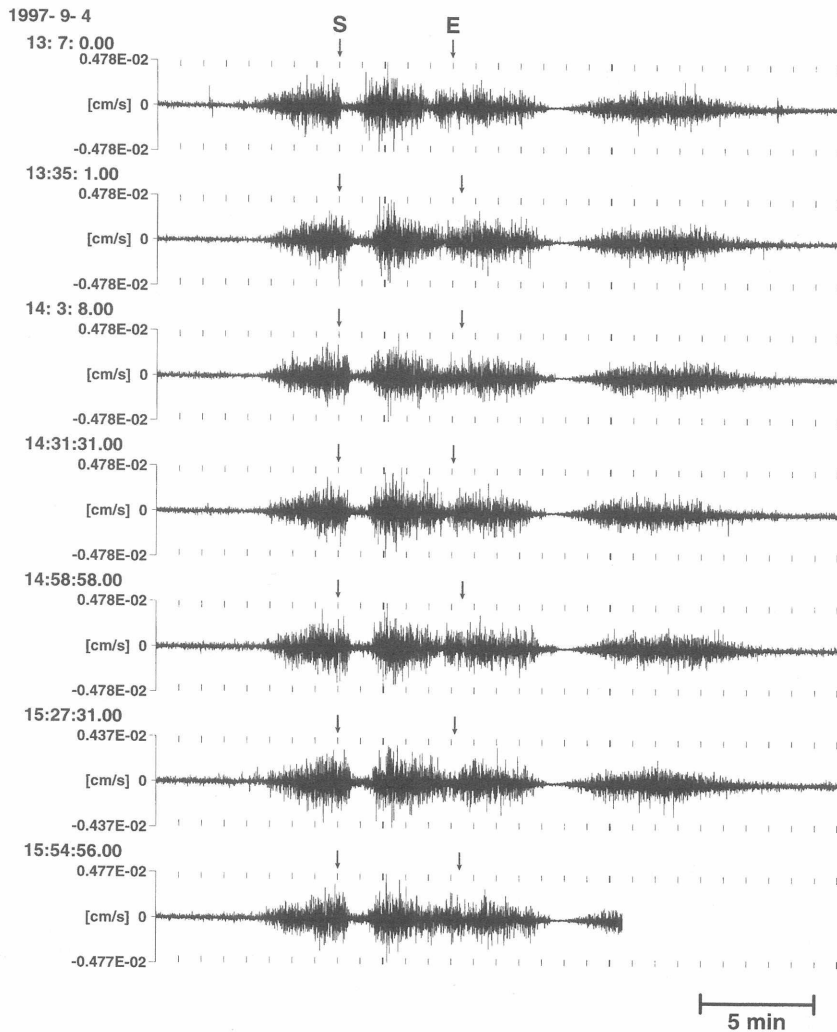


Fig. 2 Paste-up of waveform for seven eruption cycles, which was recorded at Station 1 in 1997. "S" and "E" represent start time and end time of eruption, respectively.

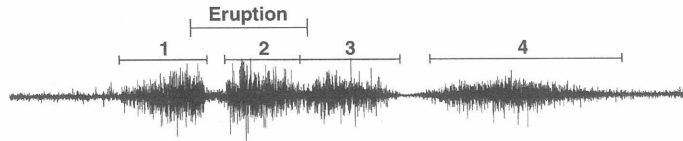


Fig. 3 Example of waveform during an eruption cycle recorded at Station 1 in 1997. Four sequential signals with large amplitude are shown. These signals are named Signals 1, 2, 3, and 4, respectively.

がわかる。また、振動は噴出中のみならず、噴出前、噴出後にも発生している。Fig. 3に示すように振幅が大きくなる場所にそれぞれ振動1、振動2、振動3、振動4と名前をつける。それぞれの振動が発生している時間を、Fig. 2に示した6周期の振動から読み取った時間を平均することにより求めると、

- 振動1：3分21秒前から38秒後まで
- 振動2：1分19秒後から4分37秒後まで
- 振動3：4分37秒後から9分25秒後まで
- 振動4：10分45秒後から19分35秒後まで

となる。ここで、時刻の基準を噴出開始時刻としている。しかしながら、これ以外のときに振動が起っていないというわけではない。Fig. 4に、観測点1における振幅の経時変化を1周期について示す。ここで、振幅は、5秒間の平均平方二乗和 (RMS) を1秒ずつずらすことにより求められている。この図をみると、振幅がノイズレベルまで小さくなっているのは、振動3と振動4の間のみであり、それ以外では、振幅はノイズレベルよりも大きく何らかの振動が起っている。

### 3. 2 1998年の測定結果

前述したように、1997年の観測ではサンプリング周波数が小さく振動の波形が崩れてしまったため、波形の特徴をつかむことができなかった。そこで、1998年の観測では、サンプリング周波数を

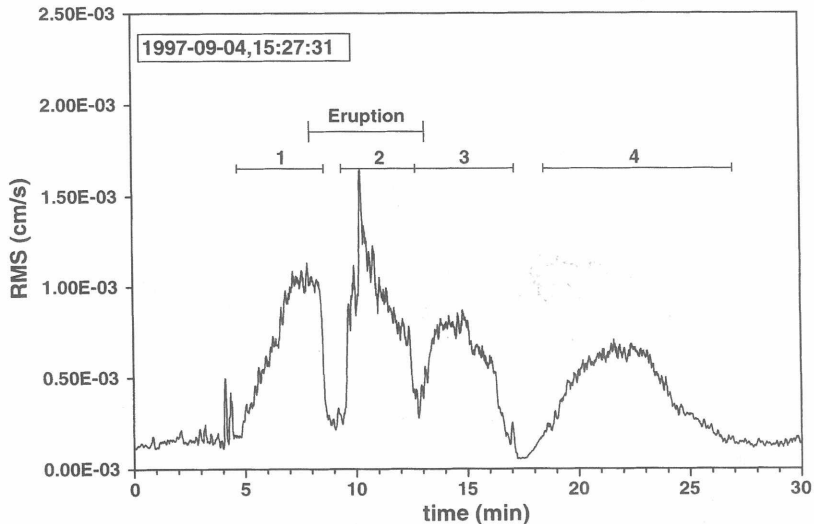


Fig. 4 RMS(rooted mean squares) of ground motion during an eruption cycle recorded at Station 1 in 1997.

1kHzと大きくして波形の記録を行った。Fig. 5に全観測点の全波形記録を示す。Fig. 1に示すように1997年の観測点1と1998年の観測点Bの位置はほとんど同じである。1997年の観測記録と同じように、間欠泉噴出の1周期の間に振動1から4をみることができる。Fig. 6に1998年に得られた記録の全観測点における振幅の経時変化を1周期分について示す。Fig. 4と同様に、振幅は5秒間のRMSを1秒ずつずらすことにより求められている。Fig. 6をみると振動1,振動3および振動4では、観測点Bでの振幅が他の観測点での振幅に比べて大きくなっているのに対し、振動2では、観測点A, B, Cでの振幅がほぼ同じになっている。このことは、振動2とそれ以外の振動では、振動源の位置

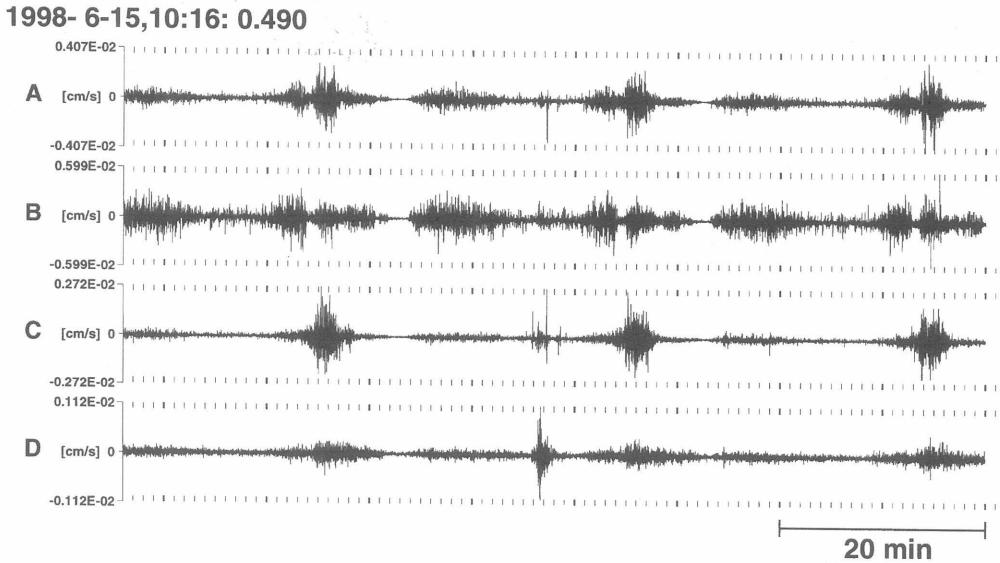


Fig. 5 Waveform recorded at Stations A to D around Kibedani Geyser in 1998.

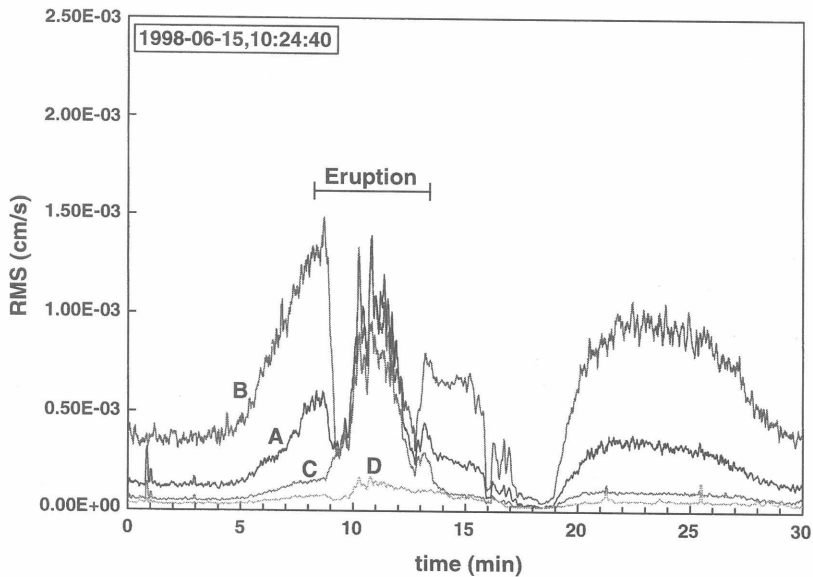


Fig. 6 RMS of ground motion during an eruption cycle for all stations(A to D) in 1998.

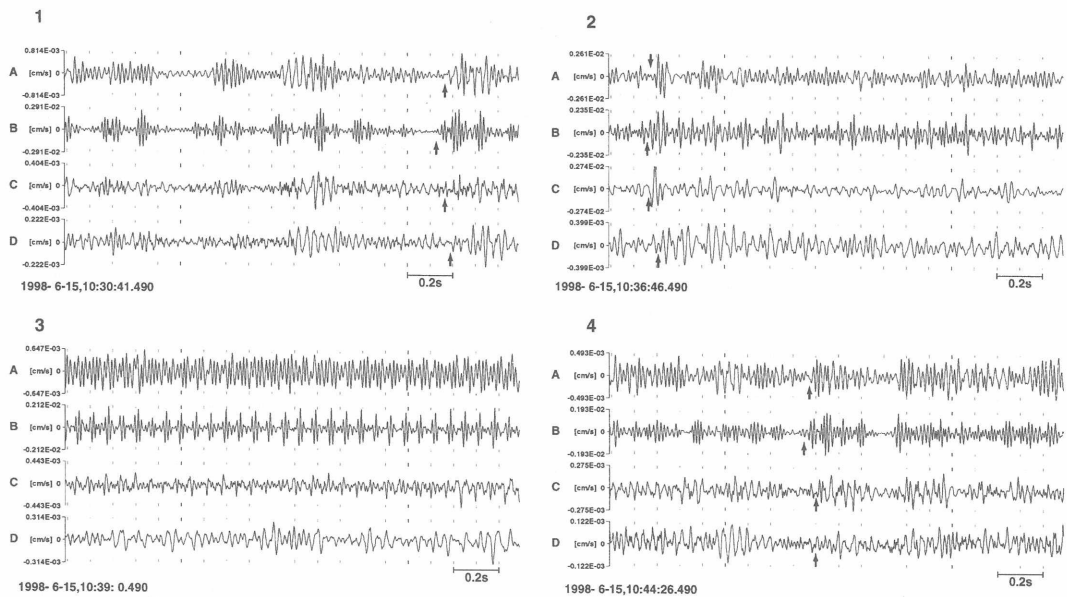


Fig. 7 Examples of waveforms in Signal 1 to 4 recorded at Stations A to D in enlarged time axes.

が違うことを示唆する。各振動の波形の一部をFig. 7に示す。これをみると、振動1と振動4の波形が似ていることがわかる。振動3では、観測点Bにパルス状の振動が1秒間に15～6回みられ、振動1および振動4とは、異なる特徴を示している。振動2は、観測点Bでの波形を見ると振動1および振動4よりも周期が長くなっているようにみえる。

上で述べたことを明らかにするために、Fig. 7に示した各振動の観測点BにおけるフーリエスペクトルをFig. 8に示す。この図を見ても明らかなように、振動1と4のスペクトルは形が似ている。両者とも卓越周波数は72Hzである。振動2、振動3は、スペクトルの形が振動1、4とは違う。振動2では卓越周波数が55Hz、振動3では卓越周波数が61Hzであり、振動1、4と比べ周期が長くなっている。

各振動の振幅や波形の形状から考えると、振動1、4の振動源は、ほぼ同じ場所であり、振動2、3では、それぞれ振動1、4の振動源位置とは異なっていることが考えられる。

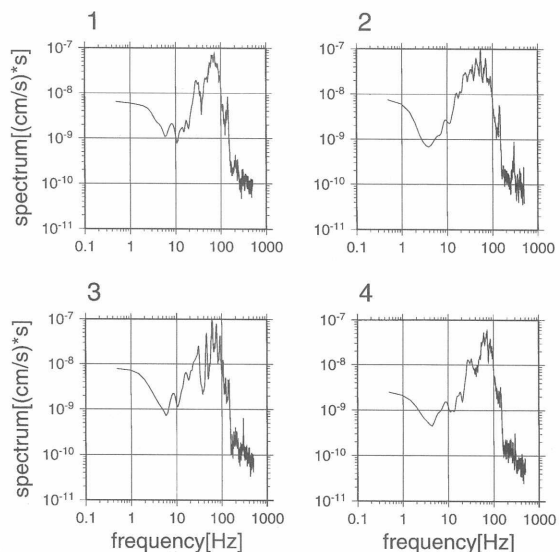


Fig. 8 Fourier spectra for the waveforms at Station B shown in Fig. 7.

## 4. 振動源位置の推定

### 4.1 振動の初動時刻による振動源位置の推定

前章での各振動の振動源に関する推測を確かめるために、振動源位置の推定を試みる。Fig. 7に示したように時間軸を拡大した波形から、いくつかのイベントについて立ち上がりの時刻を読み取った。振動1、振動2、および振動4については、立ち上がりの時刻を読むことができたが、振動3については、イベントの発生頻度が大きく、しかもそれぞれの地点について立ち上がりの対応を取ることが難しいため、初動を読み取ることができなかった。Fig. 7にみられるイベントについて、読み取った位置を矢印で示す。このようにして全部で14のイベントについて読み取りを行った。読み取った初動の読み取り値をTable 1に示す。ただし、ここでは一番早い初動時刻を基準としている。

Table 1 First arrival times of each event. The earliest arrival time among the stations is taken as zero for each event

	A	B	C	D
Signal 1	0.025 s	0.000 s	0.021 s	0.046 s
	0.025 s	0.000 s	0.021 s	0.058 s
	0.017 s	0.000 s	0.021 s	0.042 s
	0.020 s	0.000 s	0.025 s	0.041 s
	0.021 s	0.000 s	0.017 s	0.054 s
Signal 2	0.004 s	0.008 s	0.000 s	0.046 s
	0.006 s	0.004 s	0.000 s	0.043 s
	0.004 s	0.013 s	0.000 s	0.046 s
	0.012 s	0.008 s	0.000 s	0.050 s
Signal 4	0.025 s	0.000 s	0.046 s	0.050 s
	0.021 s	0.000 s	0.037 s	0.046 s
	0.021 s	0.000 s	0.037 s	0.042 s
	0.025 s	0.000 s	0.038 s	0.059 s
	0.029 s	0.000 s	0.046 s	0.058 s

振動源位置の推定は、地震の震源計算と同様な手法を用いて行う。振動源の位置を $x_0, y_0, z_0$ 、振動の発生時刻を $t_0$ 、観測点の位置を $x_i, y_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )、初動の到着時刻を $t_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )とする。波の伝わる速度 $V$ を一定とすると、

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2 = V(t_i - t_0)^2 \quad (1)$$

と表すことができる。この式で $V$ を仮定すれば、未知数が $x_0, y_0, z_0, t_0$ の4つで、式の数も4つなので連立方程式として解くことができる。

波の伝わる速度 $V$ を仮定するために、以下のように見積もりを行った。まず、二つの観測点の距離をその二つの観測点での初動時刻の差で割る。この量は速度の次元をもつ。振動源の位置が二つの観測点から同じ距離にある時には、初動時刻に差がなくなりこの量は無限大になる。振動源からの距離に差ができるにしたがいこの量は小さくなるが、振動源がちょうど二つの観測点を結ぶ直線の延長線上にあるとき、この量は最小値となる。しかしながら、このときでもこの量は波が伝わる速度よりも大きい。したがって、それぞれのイベントについて、いろいろな観測点の組み合わせに対してこの量を計算したとき、波の伝わる速さはそれらの最小値よりも小さいといえる。Table 2に1998年の観測点の位置を示す。ここで、座標は噴出口を原点とし南に $x$ 座標、東に $y$ 座標をとっている。Table 1に示した初動時刻の読み取り値とTable 2に示した観測点の位置からこの量を計算したところ、その最小値は87m/sであった。したがって、波の伝わる速度 $V$ を80m/sと仮定して振動源位置の推定を行った。

振動源位置推定の結果をTable 3に示す。また、振動源位置の水平面への投影および南北鉛直断面への投影をそれぞれFig. 9, Fig. 10に示す。Fig. 9, Fig. 10をみると、振動1、振動4の振動源位置が、観測点Bの近くにあるのに対し、振動2の振動源位置は噴出口の周辺にあることがわかる。また、深さについても、振動2の振動源位置の深さは、振動1、4に比べ深くなっている。

Table 2 Coordinates of stations in 1998. The orifice of conduit is taken as the origin of coordinates. x and y coordinates are measured southward and eastward, respectively

	x (m)	y (m)
A	0.0	2.70
B	3.17	0.43
C	-2.10	-0.10
D	6.89	3.94

Table 3 Location of vibration sources

	$x_0$ (m)	$y_0$ (m)	$z_0$ (m)
Signal 1	2.57	-2.17	3.99
	1.91	-1.46	1.87
	2.22	-0.49	4.02
	2.55	-0.55	3.94
	1.79	-1.41	2.71
Signal 2	-0.33	-0.06	6.76
	0.19	-0.94	7.00
	-1.35	0.49	8.83
	-0.25	-2.27	7.67
Signal 4	2.62	1.01	0.99
	2.52	0.66	2.03
	2.70	0.68	2.42
	2.15	0.32	0.79
	2.44	0.60	0.59

4.2 振幅による振動源位置の推定

Fig. 7をみてわかるように初動の読み取りを多くのイベントについて行うことは、波形の立ち上がりがはっきりしないこともあり困難である。上では14のイベントについての振動源位置の推定を行ったが、全体で発生しているイベントの数からみるとごく一部について推定を行ったにすぎない。そこで、観測点における振幅から振動源位置の推定を試みた。

Fig. 6に1998年に得られた記録の全点における振幅の経時変化を1周期分について示した。前述したように、振動1および振動4の観測点Bでの振幅が他の点よりも大きくなっているのに対し、振動2では、観測点A, BおよびCでの記録がほぼ同じ振幅になっている。これは、上で求めた振動源位置が違っていることによると考えられる。逆にこの観測点による振幅の違いを利用して、振動源位置の推定を行うことができるはずである。

まず、振幅が振動源からの距離とともに減衰していくと考える。その式として、

$$A = a \exp(-br) \tag{2}$$

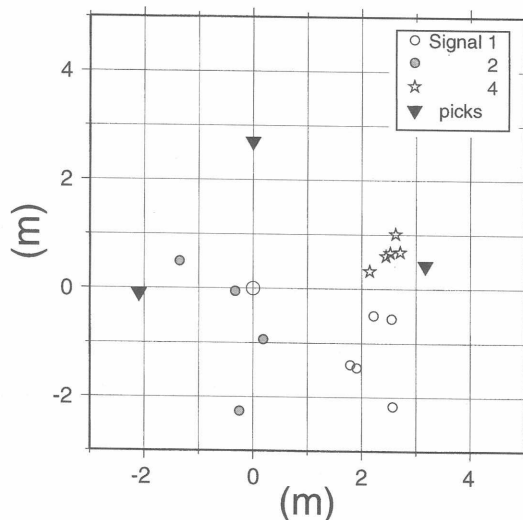


Fig. 9 Horizontal distribution of vibration sources. Open circles, shaded circles, and open star symbols represent vibration sources in Signals 1, 2, and 4, respectively. The orifice of conduit is taken as the origin of coordinates.

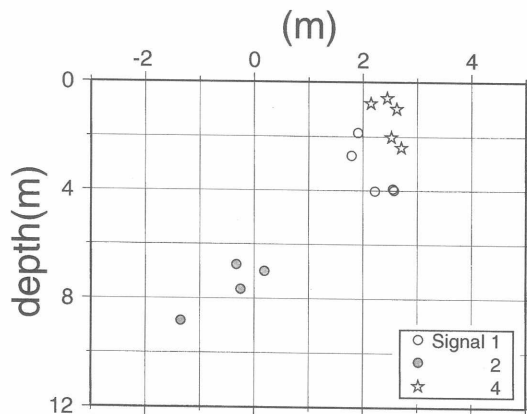


Fig. 10 Depth distribution of vibration sources projected on the north-south vertical plane. Symbols are same as used in Fig. 9.



を仮定する。ここで、 $A$ は振幅、 $r$ は振動源から距離、 $a, b$ はそれぞれ定数である。これを變形して、

$$r = \alpha - \beta \log A \quad (3)$$

とする。ここで、 $\alpha, \beta$ は定数である。 $\alpha$ は振動のイベントの大きさに関する定数であり、 $\beta$ は距離減衰に関連した定数である。 $\beta$ は波の伝わり方に関する定数であるので、どのイベントについても同じ値と考えてよい。

初動時刻から求めた振動源位置を正しいものとして、 $\alpha, \beta$ を求める。観測点の番号を $i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )、イベントの番号を $j$  ( $j=1, 2, \dots, 14$ )とし、次の式をあてはめることを考える；

$$r_{ij} = \alpha_j - \beta \log A_{ij} \quad (4)$$

ここで、 $r_{ij}$ は $j$ 番目のイベントの振動源から $i$ 番目の観測点までの距離、 $\alpha_j$ は $j$ 番目のイベントに対する $\alpha$ の値、 $A_{ij}$ は $j$ 番目のイベントに対する $i$ 番目の観測点における振幅である。ただし、振幅としては、初動時刻を含む1秒間のRMSの値を用いる。先ほど初動時刻から振動源位置を求めたイベントが14、したがって、振幅データ数が56 ( $=4 \times 14$ )なので、56の式ができる。未知数は $\alpha_j$ の14個と $\beta$ の1個の計15個なので、最小二乗法によって未知数を求めることができる。Fig. 11は距離と振幅の関係をグラフに示したものである。Fig. 11中の細い線は(4)式をあてはめたときの直線である。(4)式をあてはめた結果、 $\beta = 3.2 \pm 0.2$ と決まった。

次に、上で求められた $\beta$ を用いて、振動源位置の推定を行うことを考える。ある1秒間のRMSを $A_i$ とする。観測点から振動源までの距離を $r_i$ は、

$$r_i = \alpha - \beta \log A_i \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 $\beta$ の値はわかっているが、 $\alpha$ は未知であるので、 $r_i$ を直接計算することはできない。しかしながら、辺々引き算することにより、振動源までの距離の差を計算することができる。たとえば、 $r_1$ との差は、

$$r_i - r_1 = -\beta \log A_i / A_1 \quad (6)$$

と計算することができる。すなわち、 $c_i = -\beta \log (A_i / A_1)$ とおけば、

$$r_i = r_1 + c_i \quad (7)$$

と表すことができる。振動源の位置を $x_0, y_0, z_0$ 、観測点の位置を $x_i, y_i$ とおくと

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2 = r_i^2 \quad (8)$$

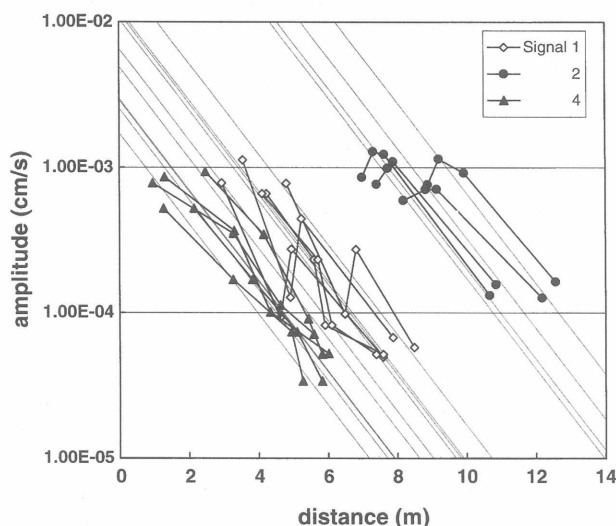


Fig. 11 Amplitude vs. distance curve for each event (thick lines). The straight lines with the same gradient (thin lines) are fitted on these plots by least squares method.

と表すことができる。この式に(7)式を代入すると、

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2 = r_1 + c_i^2 \tag{9}$$

となる。ここで、未知数が $x_0, y_0, z_0, r_1$ の4つで、式の数も4つとなるので、この連立方程式は解くことができる。Fig. 6に示した1周期分のデータを使って、振動源位置の推定を行った。Fig. 12にはその水平面投影、Fig. 13に南北鉛直断面投影を示す。Fig. 12, Fig.13とも振動1, 振動2, 振動3および振動4のみについてプロットしておりそれ以外は省いている。これらの図をみると、

- ・ 振動2の振動源は、噴出口の近くにあること
- ・ 振動2の振動源の深さは、他の振動に比べて深いこと
- ・ 振動1と振動4の振動源位置は深さも含めてほぼ同じ場所であること
- ・ 振動3の振動源位置は水平面投影で見るとほぼ振動1, 振動4と同じ場所であるが、深さが振動1, 振動4に比べて深いこと

がわかる。また、Fig. 14は、1周期についての深さの経時変化を示している。これをみると、振動1の中でも、噴出開始に向かい深さが徐々に浅くなっていくのがわかる。

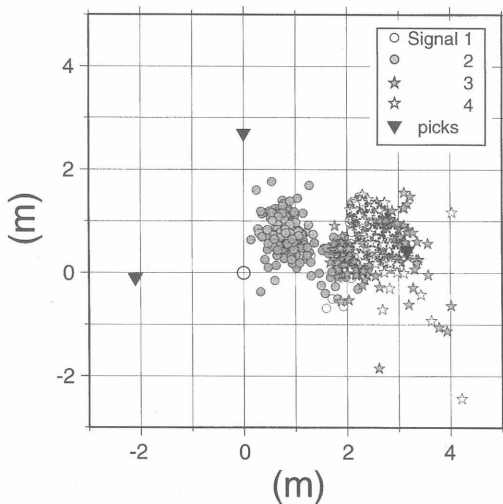


Fig. 12 Horizontal distribution of vibration sources estimated by using amplitude data. Open circles, shaded circles, shaded star symbols, and open star symbols represent vibration sources in Signals 1, 2, 3, and 4, respectively.

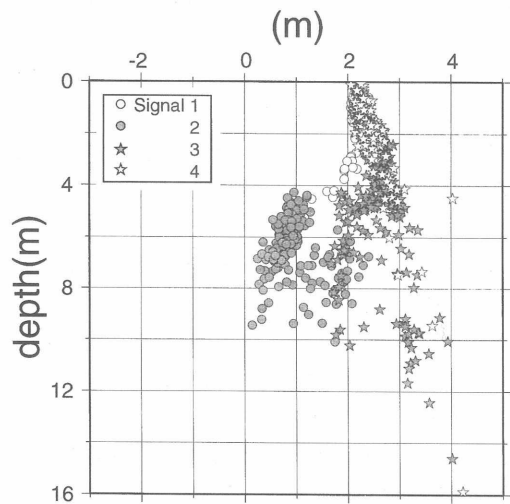


Fig. 13 Depth distribution of vibration sources estimated by using amplitude data projected of the north-south vertical plane. Symbols are same as used in Fig. 12.

### 5. 考 察

初動時刻を用いて振動源の推定を行う際、読み取られた初動時刻のデータからおおよその速度を仮定した。その値は80m/sとP波の速度としては、通常考えられるよりも明らかに小さな値である。S波の速度と考えると値としては妥当なものではある。観測点で見られるイベントが、P波であるかS波であるかを、観測点AおよびBで観測された水平2成分から得られるパーティクルモーシヨンにより判断しようと試みたが、動きが複雑なためP波であるかS波であるかの判断ができなかった。

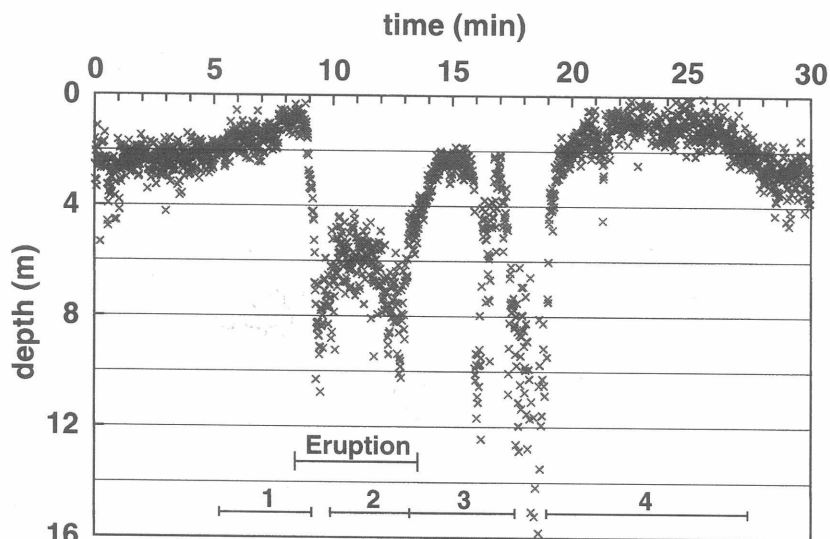


Fig. 14 Temporal change of depth of vibration sources during an eruption cycle.

初動時刻の読み取り誤差もまた誤差を生む要因となる。初動時刻の読み取り誤差を0.005秒(5サンプル)としたときの振動源位置の誤差をイベントごとに計算すると、最も大きな誤差は、 $x$ 座標、 $y$ 座標で1.6m、深さで3.4mとなる。初動から求めた振動源位置(Fig. 9, Fig. 10)をみると、たとえば、振動2の位置はばらついているが、誤差を考えるとこれらは同じ位置にあるものが決定の誤差によってばらついていると考えることもできる。

振幅を用いて求めた振動源位置(Fig. 12, Fig. 13)をみると、各振動の振動源位置の方が初動を用いて求めた振動源位置よりもむしろ集中して決まっている。振幅としてRMS(平均平方二乗和)を用いたが、そのことによりデータのばらつきが少なくなったためと考えられる。初動時刻などで振動源を求めることができた場合には、さらに、振幅(RMS)を用いて振動源の推定を行った方が、数多くの振動源位置を決めることができ、またばらつきの少ない結果を得ることが期待できる。

本論文で推定した振動源位置は、振動源推定に用いた速度の値に問題があるため、その絶対値をそのまま信用することはできない。しかしながら、その位置は、各観測点における振幅や波形の特徴からの推察(振動1, 4の振動源はほぼ同じであり、振動2, 3の振動源の位置はこれらとは違うという推察)と調和的であり、相対的な位置関係は正しいと考えている。

石井ら(1998)により、水頭、噴出水の温度の経時変化が調査されている。各振動が発生しているときに、水頭、噴出水の温度の経時変化にみられる現象を記述すると次のようになる。

**振動1:** 噴出開始前に水頭が急激に上昇する。また、噴出開始後温度の低い水(浅い地下水に富む水)が30~40秒程度噴出する。

**振動2:** 噴出の高さが高くなり温度の高い水(温泉水)が出てくる。

**振動3:** 噴出終了後、水頭が最も深くなるがその直後に急激に水頭が復旧する。

**振動4:** 噴出に向かい徐々に水頭が上がってくる。

本論文で求めた振動源の深さやこれらの現象を考え合わせると、振動2ではやや深いところで発生する発泡が、振動1では浅いところでの地下水の流入が、振動3では振動1よりも深いところへの地

下水の流入が、振動源と考えられる。振動4については、水頭の変化に激しい動きはみられないが、推定された振動源位置や波形の特徴から、振動1と同じように浅いところでの地下水の流入がその振動源であると考えられる。

## 6. ま と め

木部谷間欠泉の周囲で振動の観測を行った。振動は、時間的にみて大きく4つに分けることができる。それぞれの振動について振動源を推定したところ、間欠泉が噴出している際にみられる振動の振動源が最も深く、その他の振動はこれよりも浅いことがわかった。水頭の変化、噴出水の温度の経時変化を考慮に入れると、間欠泉が噴出しているときの振動は、やや深いところでの炭酸ガスの発泡により発生しており、それ以外の振動は浅いところでの地下水の流入により発生しているのではないかと考えている。

観測に際して、木部谷温泉松の湯旅館田原治栄氏には格別の便宜を図っていただきました。関東学院大学工学部 藤田岳之氏、渡邊崇氏には、振動観測を手伝っていただきました。振動の観測装置は、関東学院大学工学部建築学科精木紀男教授よりお借りしました。また、2名の査読者には、原稿の改良についての意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 相川嘉正, 野口喜三雄 (1980) : 島根県木部谷間欠泉における噴騰中の化学組成の変化, 温泉科学, 30, 182-190.
- 石井栄一, 前田直樹, 鈴木紀生, 秋山 卓, 藤田岳之, 武藤 豊, 田中康裕, 伊藤芳朗 (1998) : 島根県木部谷間欠泉のメカニズム, 第51回日本温泉科学会大会講演要旨集, 01, 15.
- Kedar, S., Sturtevant, B., and Kanamori H. (1996) : The Origin of Harmonic Tremor at Old Faithful Geyser, *Nature*, 379, 708-711.
- 本谷義信, 野越三雄 (1963) : 火山の微動と間歇泉および噴気孔の微動, *火山*, 8, 20-32.
- 野村 拓, 江原幸雄, 藤光康宏 (1995) : 瀬渡地獄間欠泉における温度・微動観測, 九大地熱研究報告, 4, 159-170.