

平成5年6月

原 著

温泉微動の発生実験

関東学院大学工学部地球科学研究室

田中康裕, 伊藤芳朗, 石井栄一

(平成4年8月5日受付, 平成4年11月9日受理)

An Experimental Study of the Growth of the Ground Noise,
Generated from the Hot Spring

Yasuhiro TANAKA, Yoshiro ITO and Eiichi ISHII

Department of Earth Science, Faculty of Engineering, Kanto Gakuin University

Abstract

Three kinds of tremors are found in the ground noise which generated from the bubbling spring and the periodic bubbling spring. But one kind of tremor only is found in the case of the boiling spring. Above phenomena are experimentally confirmed based on the spectrum analysis of the vibration of the water with bubbles.

The mode of the experimental vibration of the water in narrow pipe resembles to the bubbling spring or the periodic bubbling spring, and this mode is followed by the theorem of the longitudinal vibration of the liquid matter in the closed pipe.

On the other hand, the mode of the vibration of the water in wide water-tank resembles to the boiling spring.

1. はじめに

筆者等は、先に、温泉や鉱泉の噴出に伴って発生する微動を温泉微動と名付け、そのスペクトル解析から、この波動は低周波、高周波、超高周波の3種類の微動で構成されていることを発表¹⁾した。それらの微動のスペクトルの代表的な形はFig. 1に示したようなものであった。

これらの微動の発生機構を解明するため、温泉の噴出に似せた装置を作って、その中で水と泡とを振動させる幾つかの実験を行った。振動はAEセンサーを用いて検出し、増幅器を通してデータレコーダに記録させ、スペクトルアナライザーで波動の解析を行った。本論説では、この実験のあらましと、その結果について述べる。

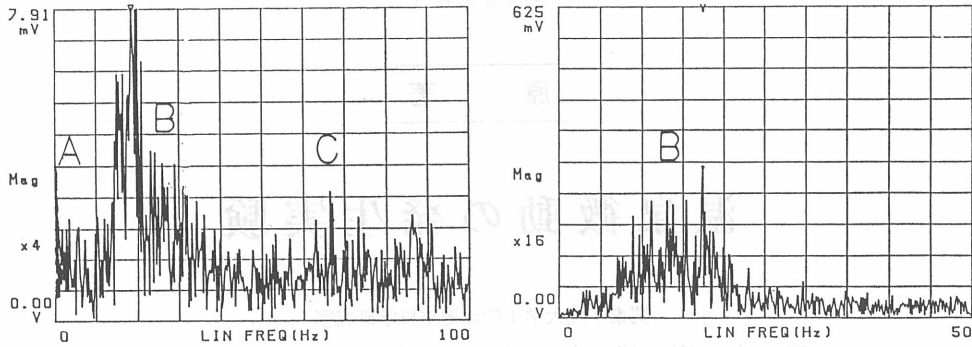


Fig. 1 The spectra of the ground noise, which generated from the hot springs
 left : mode of the bubbling spring or the periodic bubbling spring
 right : mode of the boiling spring
 A : low frequency tremor, B : high frequency tremor
 C : very high frequency tremor

2. 泡沸泉の温泉微動の発生実験

泡沸泉は水と泡とを連続噴出している温泉である。前論文¹⁾では群馬県の新川原湯源泉の泡沸泉について扱った。

この温泉微動の発生実験をFig. 2の上図のような装置で実施した。装置の概要は次の通りである。

太い塩化ビニール管の真ん中へ透明なアクリル管(内径4cm, 長さ60cm)を立てる。アクリル管の底には発泡器(養魚の水槽などで使うエアポンプ)を, また, 管の上部にはAEセンサーを取り付ける。アクリル管は周りに砂を入れて固定し, 周辺から入り込む雑振動の影響を受けないようにする。

発泡器からは常に一定量の泡が発生してアクリル管内を上昇する。これによって生じる水と泡との振動をAEセンサーで検知する仕組みである。アクリル管内の水と泡との振動の状態は上部から覗くことによって観察できる。

この実験による振動のスペクトルはFig. 2の下図のようになり, パワーの明瞭な極大値が0Hz付近, 200Hz付近, および650Hz付近の3箇所にあった。これは温泉微動の場合と同様, 3種類の波動が合成しているものと考えられる。

なお, Fig. 3はアクリル管の大きさ(内径1.5cm, 長さ1.0m)を変え, 周りの砂を取り除いて行った振動実験のスペクトルである。パワーの顕著な卓越部だけに注目すると, 50Hz以下, 100~300Hz, 350~500Hz, 700~800Hzの4箇所にて極大値が見当る。この実験で雑微動が多いのはアクリル管を固定する

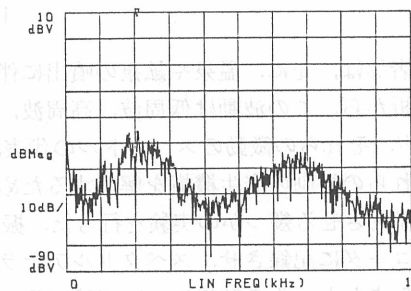
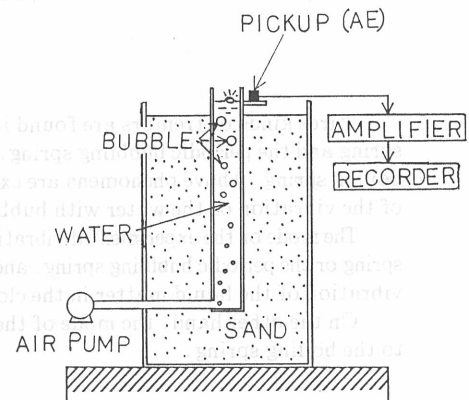


Fig. 2 An experimental system of the bubbling spring and a spectrum of the water-vibration in the pipe of this equipment

砂がないためだと思われる。

Fig. 2, Fig. 3 いずれの実験においても、アクリル管内の泡が管の断面いっぱいになって上昇する時、管内の水は大きく上下運動をするのが目視出来るので、0 Hz 付近の低周波振動は水柱の上下運動に原因をもつ微動であることは確かである。この運動によって管内の水は管外へ噴き出される。このように、泡沸泉の噴出には泡が重要な働きをしている。

そこで、自噴する力がないような源泉では、温泉水を取り出すため、地中の温泉井の下部へ地上から空気を注入して(エアリフト法)、温泉水を取り出している温泉が多い²⁾。

一方、50Hz以上の高周波の振動はアクリル管の断面以下の小さい泡の発生、上昇、消滅等の運動に関係した微動だと考えられる。

3. 間欠泡沸泉の温泉微動の発生実験

間欠泡沸泉は湯と泡との混合体を間欠的に噴出する温泉で、前論文¹⁾では栃木県の塩原元湯の源泉について扱った。

Fig. 4 の上図は湯原等³⁾が述べている間欠泉噴出の実験装置に若干改良を施したものである。水を半分程入れたフラスコに2本のガラス管K(内径1 cm, 長さ1 m)とGを立てる。Kの上部にはAEセンサーを取り付け、振動を検知する。Gはゴム管で水槽Wと繋ぎ、途中にピンチコックCを付け、Wの水をフラスコ内へ適当に供給する。

フラスコを暖めると泡がKの断面いっぱいに広がって上昇するようになり、K内の水柱は上下に大きく運動を始め、水の一部を管外へ噴き出す。この時の水柱の上下運動は目視出来る程の長い周期で起こる。

この実験による振動のスペクトルはFig. 4 の下図のようになり、パワーの極大値が50 Hz以下、100~250Hz, 400~700Hzの3箇所に見れていた。この中で50Hz以下の低周波振動はKの中の水柱が大きく上下運動をする時の微動であることは容易に理解できる。その他の高周波数帯の振動は、Kの断面の大き

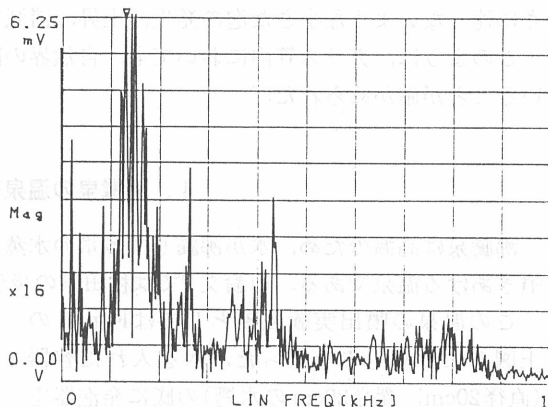


Fig. 3 An example of the spectrum of the water-vibration, which changed the size of the water pipe of the equipment in Fig. 2

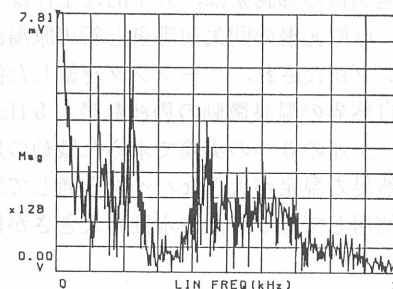
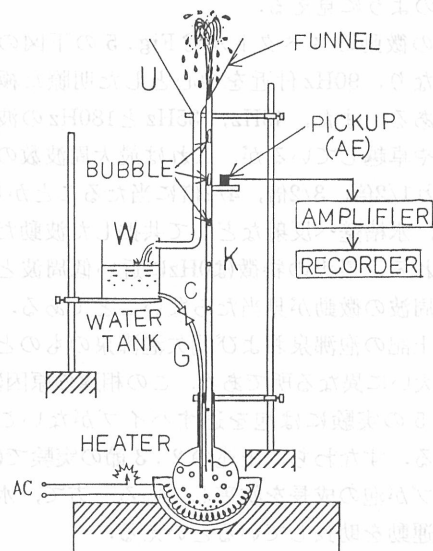


Fig. 4 An experimental system of the periodic bubbling spring and a spectrum of the water-vibration in the pipe of this equipment. K, G, U: glass pipe

さに達しないような小さな泡の発生，上昇，消滅等に原因があるものと考えられる。

このように，ガラス管内においても，自然界の間欠泉の場合と同様，3種類の微動が発生していることが確かめられた。

4. 沸騰泉の温泉微動の発生実験

沸騰泉は高温のため，水が沸騰して多量の水蒸気を発生し，その水蒸気と湯とが一緒になって噴きあげる温泉である．前論文¹⁾では秋田県の後生掛地熱地帯の沸騰泉について扱った。

この温泉の噴出実験装置としてはFig. 5の上図のようなものを作った．水を入れた容器(直径20cm, 深さ20cmの水槽)の底に発泡器を置き，容器にAEセンサーを取り付けて泡と水との振動を検知した．発泡器から出た泡は水面に出る時水と泡とを沸き立たせるので，丁度沸騰泉のように見える。

この微動のスペクトルはFig. 5の下図のようになり，90Hz付近を中心とした明瞭な極大値がある．また，45Hz, 135Hzと180Hzの波動がやや卓越しているが，これは最大周波数のそれぞれ1/2倍，3/2倍，4/2倍に当たることから，多分，水槽壁へ反射などして共振した波動だと思われる．最大の特徴は0Hzに近い低周波と，超高周波の微動が見当たらないことである．これは上記の泡沸泉および間欠泡沸泉のものとは比べて大に異なる所である．この相違の原因は，Fig. 5の実験には泡を通すパイプがないことにある．すなわち，上述の2, 3節の実験では，パイプが泡の成長を妨害している一方で，水の上下運動を助長しているといえる。

後生掛地熱帯の沸騰泉は，人工的な工作は何ら施してなく，自然のままの噴出形態を保っている．一方，塩原元湯の間欠泡沸泉と新川原湯源泉の泡沸泉では，温泉水を地下から取り出すためのボーリングがなされ，ケーシングを施した温泉井を持っている。

なお，自然界の温泉微動の周波数帯が5 Hz以下，10~35Hz, 45Hz以上の3種類に分けられたのに比べ，上述の3つの実験で求めた微動の周波数帯は，温泉微動よりはるかに高周波である．これは自然界の温泉が大きなパイプを通して温泉水を揚げているのに対して，実験室では小さなパイプを使用しており，泡や水柱の大きさが桁違いに異なるのが，その原因だと考えられる。

5. 閉管中の水の縦振動

温泉井の形は下端が閉じ，上端が開いた閉管(片開き管)とみなすことができる．この中の水が振動するとすれば，それは閉端を節とし，開端を腹とする縦振動が考えられる．これを便宜上Fig. 6のような形で表現しておく．この時の管の長さをL，縦波の速度をVとすると，振動周波数F

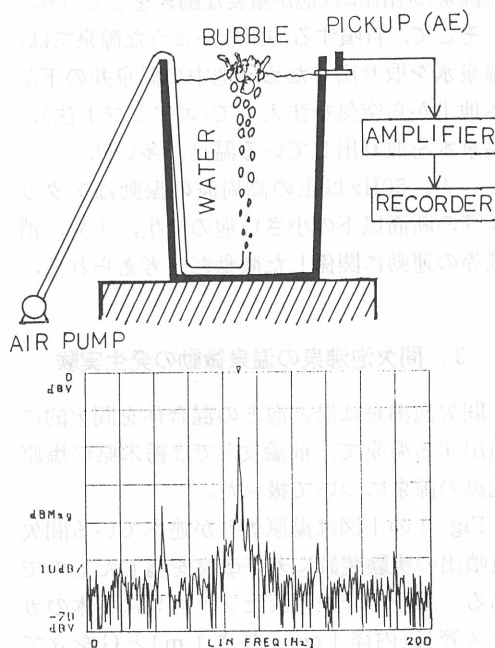


Fig. 5 An experimental system of the boiling spring and a spectrum of the water-vibration in the wide water-tand of this system

は、基本振動型(1/4波長則)では $F=V/4L$ ，3倍振動型では $F=3/4 \times V/L$ ，5倍振動型では $F=5/4 \times V/L$ となる。

常温では水中音波の速度は約1500m/sec，気体中では約340 m/secであるから，水と気体との混合体中では縦波は1500~340 m/secの間の速度をとる．この実験では，泡の量が多いので，仮に $V=500\text{m/sec}$ くらいとすると，2節(Fig. 2)の実験では基本振動型で $F \doteq 500 \div 4 \div 0.6 \doteq 200\text{Hz}$ となり，3倍振動型では $F \doteq 600\text{Hz}$ くらいになる．これは実験結果における卓越周波数帯のほぼ中央部の値である．

また，Fig. 3 (Fig. 2の実験で，水を入れたパイプの大きさを変えた振動)のスペクトルでは，150Hz, 450Hz, 750Hzに卓越周波数の極大値があるが，これらは丁度基本振動型，3倍振動型，5倍振動型に該当する周波数である．

3節(Fig. 4)の実験では，水の温度は約100℃になっているので， $V=800\text{m/sec}$ くらいとすれば，基本振動型では $F \doteq 800 \div 4 \times 1 \doteq 200\text{Hz}$ ，3倍振動型では $F \doteq 600\text{Hz}$ となって，これも実験結果の卓越周波数帯の中央部の値である．なお，この実験では5倍振動型は発生していないようである．

また，各実験で0~50Hzにある低周波振動は，パイプの中に出来た大粒な泡が，水を機械的に持ち上げるための運動であって，ここに述べた閉管の縦振動の理論では説明出来ない．

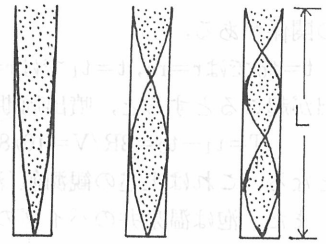


Fig. 6 Three kinds of longitudinal vibration of the water in the closed pipe

6. 新川原湯源泉の噴出機構

ここでは，温泉の噴出状態が観測しやすい新川原湯源泉について，同源泉の温泉微動を介して温泉の噴出機構を検討してみる．この源泉の温泉微動および低周波温泉微動の記録例をFig. 7に示す．

6-1. 温泉水中の気泡の噴出量

この源泉は，群馬県の資料⁴⁾によると，深さ360 mのボーリングによって自噴した泡沸泉である．1990年7月26日の観測によれば¹⁾，噴出口に設けた直径約10cmのパイプから，大きな泡を毎分42回(平均1.2秒に1回)の割合で噴出しており，それと一緒に毎分40リットルの湯を湧出していた．これから湯の毎秒の噴出量は

$$40,000\text{cm}^3 \div 60\text{sec} = 670\text{cm}^3/\text{sec}$$

と求められる．

温泉水と泡とは同じ速度で上昇しているとして，その噴出速度 V を求めると

$$\pi R^2 V = 670 \quad \therefore V = 8.5(\text{cm}/\text{sec})$$

となる．ただし， R はパイプの半径である．

一方，E.И. НЕЧИС⁵⁾によれば，泡の浮上速度 V ，浮上時間 t ，および泡の半径 r との間には $V=2r/t$

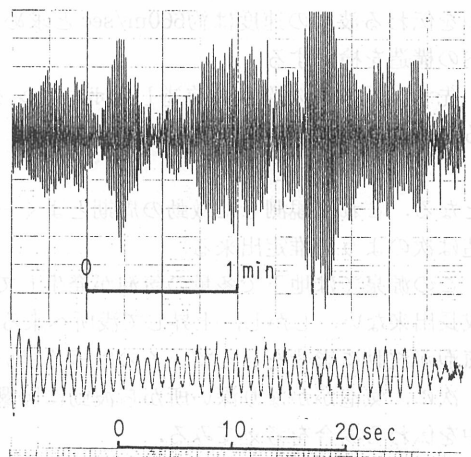


Fig. 7 An example of the ground noise (upper), and its low frequency tremor (lower) of the water-vibration at Shin-kawarayu Hot Spring

の関係がある。

$t=t_0$ では $r=r_0$, $t=t_1$ では $r=R=5\text{ cm}$ (泡がパイプの直径いっぱい成長した時) になって噴出が起こるとすると、噴出周期 T は

$$T=t_1-t_0=2R/V=10/8.5=1.2\text{ (sec)}$$

となる。これは上述の観測値(泡の平均噴出間隔)とよく一致する。

また、泡は温泉井のパイプの断面いっぱい膨れ上がった時に噴出するものと考え、気泡の噴出量 Q は

$$Q=4/3 \times \pi R^3 \text{cm}^3 \div 1.2 \text{sec} = 440 \text{cm}^3/\text{sec}$$

となる。

したがって、この温泉は毎秒 670cm^3 の湯と 440cm^3 の泡とを噴出していることになる。

6-2. 温泉噴出時の水柱の自由振動

この源泉の低周波温泉微動は Fig. 7 に示したように、周期がよく揃っている、温泉井内の水は $1/4$ 波長則によって縦振動をしていると考えられる。ただし、その周期 (0.9 秒) は水の縦振動の周期であって、温泉水の噴出周期ではない。

いま、温泉井内を伝わる波動の速度を C 、波長を L 、振動の周期を T とすると、 $1/4$ 波長側は

$$1/T=C/4L$$

で表される。

一方、この源泉の温度は 78.7°C と観測されているので¹⁾、この温度における水柱および気泡中を伝わる波動の速度は、それぞれ約 $1,550\text{m/sec}$ 、約 350m/sec である。また、この源泉では水と泡とが、6-1 節で述べたように、水 670cm^3 、泡 440cm^3 の割りで混じっている、その混合体中を伝わる波動の速度は約 660m/sec と求められる。これらのことを考慮しながら、この温泉井内の構造を検討する。

まず、温泉井の深さを前述したボーリングの深さ $L=360\text{m}$ とし、気泡の影響が無いと仮定すると、 T は上式から

$$T=0.9\text{sec}$$

となる。これは観測した微動の周期とよく一致する。このことから新川原湯源泉の温泉井内の構造は次のように推定出来る。

この源泉では地下で多量の気泡が発生しているが、その気泡は温泉井の深部では水圧が高くて成長出来ない。しかし、上昇して浅所へ来ると水圧の低下に伴って急激に成長する。したがって、気泡が波動に影響を与えているのは極く浅い所だけだと解釈出来る。

次に、気泡がかなり深い所から波動に影響を与えていると仮定して、波動が水と泡との混合体中を伝わる場合を考えてみる。

この場合は上述のように、 $C=660\text{m/sec}$ の波動が $1/4$ 波長則に従って 0.9sec 周期で振動するのだから、温泉井の深さは上式から

$$L=150\text{m}$$

であればよい。これから推定される温泉井の構造は、 150m の深さの地下に大量な気泡を温泉井の中へ混入する所があって、それより上部の水柱が 0.9 秒周期の縦振動を起こしていると解釈出来る。

温泉井内の泡の挙動は、上記 2 つの解釈のどちらかであろう。

6-3. 3種類の温泉微動の関係

周期がよく揃っている0.9秒付近の波動は低周波温泉微動に属するものであるが、これを閉管の基本振動型の周期とすると、3倍振動型では3 Hz程度、5倍振動型では5 Hz程度の微動が発生している可能性がある。しかし、それらをすべて、低周波温泉微動の中から区別することは不可能であり、はたしてそれらの波動が発生しているかどうかも疑わしい。この低周波温泉微動は大きな泡によって起こる水の機械的な上下運動とみるべきである。

一方、この温泉で観測された高周波温泉微動(卓越周波数の最大部が10~20Hz, Fig. 1), および超高周波温泉微動(卓越周波数の最大部が60~70Hz, Fig. 1)の両者の関係は、その卓越周波数からみて、閉管内の水の基本振動型と3倍振動型とで説明出来る。

7. 温泉微動の発生モデル

垂直に立てたパイプの中に水を入れ、その下方から空気を適当に挿入する。この時の水と泡との振動は温泉が噴出する場面とよく似ており、その時発生する微動の状態も温泉微動とよく似ていることは2~4節の実験で示された。この実験結果から推定される微動の発生機構を検討してみる。

Fig. 8の(1)~(2)は間欠泉の噴出休止期を想定したモデルである。この時期には空気の挿入量が少ないので、大粒な泡は発生せず、少数の小粒な泡だけがパイプの中を上昇する。このような小粒な泡でも、その発生、上昇、消滅などにより、水を振動させて高周波(基本振動型)と超高周波(3倍振動型)の微動を発生させている。

Fig. 8の(I)~(IV)は間欠泉の噴出活動期を想定したモデルである。この時期には泡が盛んに発生するので、小粒な泡は合体して大粒な泡になり、また、大粒な泡そのものも多数発生する。そのため、泡はパイプの断面いっぱいになって上昇し、パイプの中の水を機械的に押し上げる。その結果、パイプの中の水は大きく上下運動をするようになり、同時に水をパイプの外へ噴出する。この時の水と泡との振動は目視出来る程の長さの時間で起こるので、これが低周波微動の発生原因になっていることは明白である。

一方、高周波や超高周波の微動は噴出活動期にも発生しているが、この時期には、その発生原因になっている小粒な泡の多くは合体して大粒な泡に変わっているので、これらの微動の勢力は衰えて振幅が小さくなる現象が起こる。

また、パイプの中で大粒な泡が連続的に発生するようになれば、温泉水は連続して噴出することになるので、もはや間欠泉ではなくなり泡沸泉に変わる。

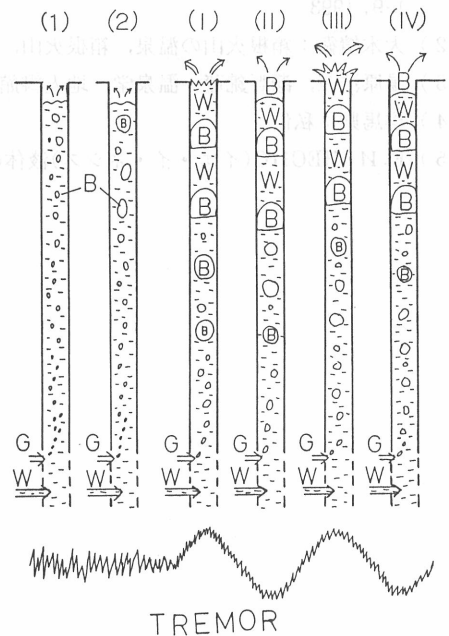


Fig. 8 Vibration model of the water in the closed pipe
 B : bubble, W : water, G : air (gas)
 (1)~(2) : rest time of the spring
 (I)~(IV) : eruption time of the spring

8. むすび

泡沸泉と間欠泡沸泉では低周波温泉微動、高周波温泉微動、超高周波温泉微動の3種類の温泉微動が発生している。一方、垂直に立てたパイプの中に水と泡とを入れてその振動を測ると、ここでも3種類の波動が検知された。このことから、泡沸泉と間欠泡沸泉では、温泉水を揚げるためのパイプが3種類の微動の発生に大きく寄与していることがわかった。

なお、低周波の微動は大粒な泡によってパイプの中の水が上下運動をするために起こり、高周波と超高周波の微動は小粒な泡によって、それぞれ基本振動型と3倍振動型の波動によって発生すると考えられる。

沸騰泉では高周波温泉微動(基本振動型)だけが発生している。これは温泉水を汲み上げるための地中へ通したパイプがない温泉でみられる現象である。パイプのない水槽内で行った水と泡との振動実験では基本振動型だけの微動が観測され、沸騰泉噴出のメカニズムを裏付けた。

文 献

- 1) 田中康裕, 伊藤芳朗, 石井栄一, 斎藤輝夫, 南雲政博, 柴田 東: 温泉微動の観測, 温泉科学, **43**, 1-9, 1993
- 2) 大木靖衛: 箱根火山の温泉, 箱根火山, 日本火山学会編, 134-185, 1971
- 3) 湯原浩三, 瀬野錦蔵: 温泉学, 地人書館, 238-246, 1972
- 4) 群馬県: 私信
- 5) E. И. НЕСИС(イエ・イ・ネシス)液体の沸騰, 191, 日ソ通信社, 1973



Fig. 8 Vibration model of the water in the closed pipe.
 B: bubble, W: water, G: air (gas).
 (1) (2) : rest time of the spring.
 (1) (2) (3) : eruption time of the spring.

泡沸泉と間欠泡沸泉の噴出メカニズムを明らかにするために、パイプの中に水と泡を入れてその振動を測定した。その結果、泡沸泉と間欠泡沸泉では、温泉水を揚げるためのパイプが3種類の微動の発生に大きく寄与していることがわかった。

なお、低周波の微動は大粒な泡によってパイプの中の水が上下運動をするために起こり、高周波と超高周波の微動は小粒な泡によって、それぞれ基本振動型と3倍振動型の波動によって発生すると考えられる。

沸騰泉では高周波温泉微動(基本振動型)だけが発生している。これは温泉水を汲み上げるための地中へ通したパイプがない温泉でみられる現象である。パイプのない水槽内で行った水と泡との振動実験では基本振動型だけの微動が観測され、沸騰泉噴出のメカニズムを裏付けた。