

# ニュージーランドの間欠泉での重力連続測定

杉原 光彦<sup>1)</sup>・西 祐司<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

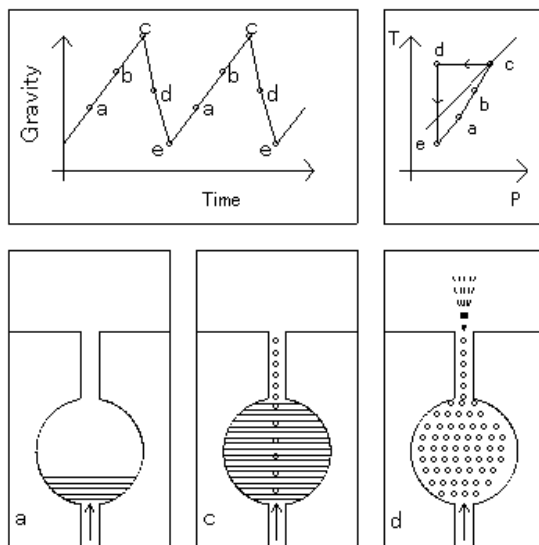
間欠泉は珍しい現象なので、天然の間欠泉を実際に見た経験を持つ人は少ないはずだが、多くの人がある姿を思い描けるのではないだろうか？近年なら東京ディズニーリゾートで見たという人もいるだろうが、実は映像や書物を通して間欠泉を記憶してきた人が多いだろう。子供向けの絵本「はじめてであうせかいちず」には「ある時間がたつと、空中に高くお湯がふきあがる温泉のこと」という間欠泉の用語解説とともにアイスランドとニュージーランドの間欠泉が紹介されている(ボイル, 1995)。同書は更に「世界で一番のもの」という欄にも、「一番高い間欠泉457m, ニュージーランドの間欠泉は世界で一番高いビルより高くお湯がふきあがります」と紹介している。

我々はニュージーランド地質・核科学研究所(IGNS)との共同研究の一環として行った1996年, 1997年, 2000年の出張の際に、一部調査時間を間欠泉調査にも割り当てた。この際、自然電位測定等も同時に行った(Nishi *et al.*, 2000)が、ここでは重力連続測定による間欠泉の調査について紹介する。

## 2. 重力連続測定による間欠泉調査の概要

観測事例の紹介の前に重力変動計測による間欠泉調査の概要を簡単に説明しておこう。ここで紹介する間欠泉はいずれもお湯の沸騰に伴うものである。通常の温泉では地下に想定される湯溜り(以下では貯留層と称する)への熱の出入りが釣り合って安定した状態にある。しかし流出する熱が相対的に小さければ、貯留層内は加熱されて遂には沸騰し、熱水と水蒸気が激しく噴出する。沸騰の勢いで熱水が過剰に放出された後は静かになって、再び貯留層へ熱水が

徐々に補給される。これは間欠泉を説明する一つのモデルであるが、活動周期の中で、貯留層内が熱水で満たされた状態と蒸気で満たされた状態では質量分布の差があるので、地上での重力変化として観測される可能性がある(第1図)。例えば半径 $a$ (m)の球形の貯留層の中心が地下 $D$ (m)にある場合、直上の地表での重力値は、貯留層が満水時と空の時では $30a^3/D^2$ ( $\mu\text{Gal}=10^{-8}\text{m/s}^2$ )の差がある。この重力変化を検出できれば、貯留層の大きさと位置の関係について制約条件が与えられることになり、間欠泉の活動・構造の解明の手がかりになる。精密重力測定の精度は $10\mu\text{Gal}$ 弱であるので、仮にこれ以上の重力変化 $G$ ( $\mu\text{Gal}$ )が検出できた場合には $a^3/D^2=G/30$ 、検出レベルに達しない場合でも $a^3/D^2<10/30$ という制約条件が得られる。



第1図 間欠泉の概念モデル(Sparks *et al.*, 1997を簡略化)と地表での重力観測値の関係。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

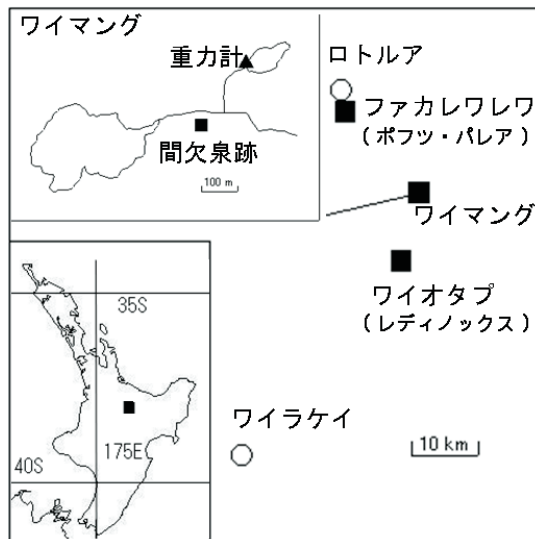
キーワード: ニュージーランド, 間欠泉, 重力連続測定, シントレクス重力計, ファカレワレワ地熱地帯

重力変動測定に使用する携帯型重力計の動作原理はバネ秤と同様にフックの法則に基づく。地表の重力値の1億分の1の微小量、 $10\mu\text{Gal}$ の高精度を追求する精密重力測定では、バネの長さのわずかな経年変化に相当する重力計のドリフトも問題になる。ドリフトの影響を除くために、通常重力変動測定は複数の地点間の重力差測定を繰り返す方法をとる。重力変動が予想される地点と重力変動がないと仮定できる地点(基準点)の間を往復して測定することで、ある時点での両地点間の重力差を評価できるが、この往復測定を予想される重力変動速度に見合った頻度で繰り返すのである。重力計の測定性能限界を追求するような気がぬけない計測作業を繰り返し行う必要があり、緊張の一方で繰り返し作業の単調さにも耐えなければならない。また基準点と観測点の往復移動に要する時間間隔より速く変化する現象を測定することはできない。

一方、往復測定を繰り返す方法とは別に、定点で連続測定を行う方法がある。この場合は、適当なデータ処理によって、重力計のドリフトの影響を除いて実際の重力変化成分を抽出しなければならない。ただし、重力計の信号を記録するシステムを観測点に設置すれば、あとは自動的にデータを取得できるので、測定にかかる労力は少なく、また、変化の速い現象も観測対象となりうる。シントレクス重力計CG3Mは指定した時間の平均重力値を指定した時間間隔で内部メモリに記憶する機能を持っているので、単体で簡単に連続測定を行うことができる。自動化された便利な重力計として1990年代半ばに普及し始めたこの重力計のこの機能に我々も注目した(Sugihara, 1999)。1996年は借用した1台を、1997年は専用に購入した1台を、2000年には2台を使って連続測定による間欠泉の調査をニュージーランドで行ったのである。

### 3. ワイマング地熱地帯の間欠泉

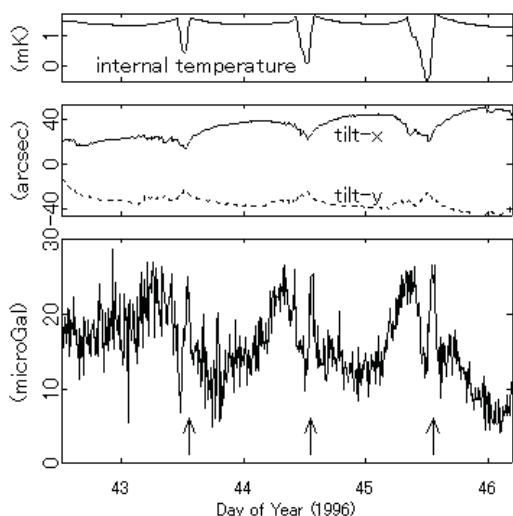
ポイル(1995)が紹介した457mも吹き上げる世界一高い間欠泉とは、ワイマング地熱地帯の間欠泉のことである。ただし、活動していたのは1900年から1904年までで、現在はその姿を見ることはできない。当時の写真を見ると間欠泉というよりは噴火のような爆発的噴出である。ワイマング地熱地域は1886年のタラウエラ火山の噴火の際に全く新たに形成された。歴史



第2図 ニュージーランドで調査した間欠泉の位置図とワイマングの拡大図。

時代に形成された、世界で唯一の地熱地帯と言われる(Houghton and Scott, 2002)。ワイマングでは間欠泉活動停止後も特異な地熱活動が続いている。間欠泉跡の両側には熱水をたたえた二つの湖フライパンレイクとインフェルノクレータがある(第2図)。両者は周期的に連動していて、かつては間欠泉活動開始予測の手がかりにもなったという(Simmons and Browne, 1991)。インフェルノクレータでは現在、約40日の平均周期で平均振幅8mの水位変化がある。この周期的変化に伴う重力変化を検出する目的でHunt and Tosha (1994)は往復測定を繰り返した。その結果は、(1) 検出された重力変化から湖水量変化の寄与を除いた残差は、水位変動に伴い湖岸地下に浸透する水分の変化で説明できる、(2) 水位変動の原因と関連する質量分布の変化は重力変化として検出される浅部では起こっていない、ということだった。

CG3M重力計による連続測定を我々が真っ先に行った調査地はワイマングだった。1992年の出張(西・杉原, 1992)の合間に見学したワイマングの印象は強烈だったし、連続測定すればHunt and Tosha (1994)の繰り返し測定では見逃された現象をも検出できるかもしれないと思ったのだった。インフェルノクレータの水位変化のサイクルは、湖水が溢れ出した後、水位低下期、水位上昇期を経て一巡するが、水位上昇期には単調上昇の後、満水に近づくと水位の振動が続



第3図 ワイマングでの記録。(上)内部温度、(中)傾き2成分、(下)重力。

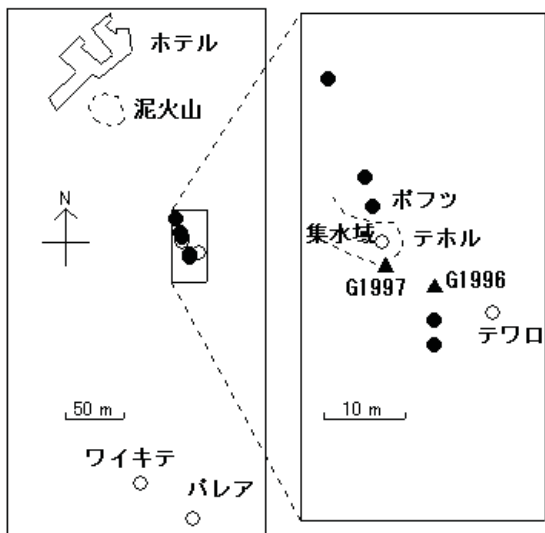
き、突然、水位低下に転ずる(Scott, 1994)。振動時や転換時には繰り返し重力測定では認識できなかった素早い重力変化があるのではないかと期待したのだ。ただし水位変動の平均周期が40日といっても、そのばらつきは大きく、いつ振動時期や転換時期になるかを予測するのは難しい。そこで1996年の2か月にわたるニュージーランド出張期間のうち、数日間連続して使用予定がない時は、インフェルノクレータの湖畔にCG3M重力計を置いて連続観測を続けた。そうして得られた記録を図化してみたら奇妙なパターンが目についた(第3図下)。満水に近い状態でいつになく水位の振動が長く続いていた頃、幅2~3時間の正のパルスが日毎に振幅を増していたのだ。その重力変動パターンは水位の振動と対応しているように見えたので、振動段階から水位低下に転じる現象をもとらえたのではないかと期待は一気に膨らんだ。ワイマングで水位水温観測を長年続けているIGNSのスコットさんに見せたところ、「日射の影響が現れたのではないか。重力計を設置した場所は、ちょうどその時間帯に木漏れ日が当たっていたと思う」と予想していなかった原因を指摘された。CG3M重力計は重力値のみならず内部処理で参照している重力計の傾斜と内部温度も記録している。このデータを図化してみると両者とも重力値と同時に異常な変化を示していた(第3図上)。期待は一気にしぼんだ。地下の変動が傾斜変化となって現れることはありうるが、重力計の内部

温度まで変化するはずはない。重力計の特性が一定になるように重力計内部では一定温度に保たれ、微小な内部温度変化の影響も内部処理で補正される。しかし異常記録となった時は、日射による影響が温度調整可能な範囲を超え、補正処理も対応できなかったのだろう。

我々も日射などの環境の影響への対策を立ててはいた。通風がよくて防雨機能もある百葉箱のような覆いを用意はした。しかし現場には持ち込めなかった。ワイマング地域は保護が行き届いていて専用歩道以外に立ち入るには文書による許可申請手続きを要する。ワイマングでの連続重力測定はタウポ火山帯での調査計画(当舎, 1996)が固まった後に追加したので許可申請書には明記していなかった。重力計自体の持込は地震計の一種として許容されるとしても目障りな覆いを持ち込むのはまずいだろうということで、インフェルノクレータの湖畔の木立の中にすでにあった大きいポリバケツを重力計の覆いに転用したのだった。設置した時から異常記録を検出するまでは、たまたま晴天がなかったこともあって、日射の影響には気付かないでいたのだ。結果的にワイマングでの重力連続記録の試みは空振りに終わったが、傾斜成分や内部温度による記録の確認の有効性を認識したこと、数日間の連続観測をバッテリーで維持できたことなど、その後の連続観測にとって有益な経験となった。なお、第3図にはCG3M重力計の扱いに未熟だった痕跡もある。内部温度は±1度の範囲に保つことが求められているのにその範囲外になっていたのを見過ごしていた。これについては範囲を超えてもすぐに無効になるわけではないという指摘がある(Sasagawa *et al.*, 2008)。第3図が実際の有効範囲を示しているのだろう。

#### 4. ファカレワレワ地熱地帯のポフツ間欠泉

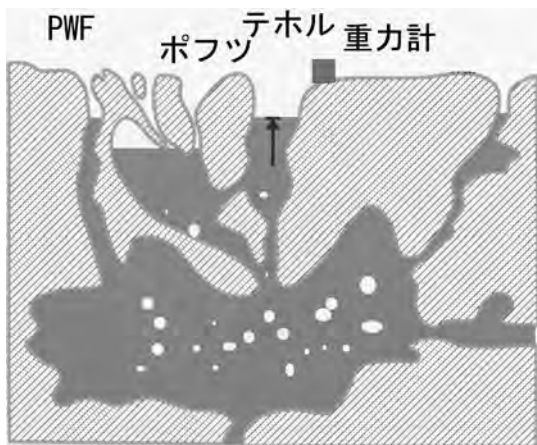
ファカレワレワ地熱地帯には現在のニュージーランドで最も活動的なポフツ間欠泉があり、噴出時の水柱の高さは30m以上に達することもある。半径10数mのテラス状のガイザーフラットと呼ばれる場所にはポフツを含めて5つの間欠泉が近接して線状に並んで活動している(第4図)。間欠泉は孤立して存在していることが多く、連動しているものは極めて珍しい(Rinehart, 1980)が、ポフツ間欠泉は両隣の間欠泉と



第4図 ファカレワレワの間欠泉の位置。●は噴出中。



写真1 噴出中のポフツ間欠泉。手前はテホル湯溜り、奥は観察中の西とスコットさん。



第5図 ファカレワレワのガイザーフラットの貯留構造モデル (Lloyd, 1975を改変)。

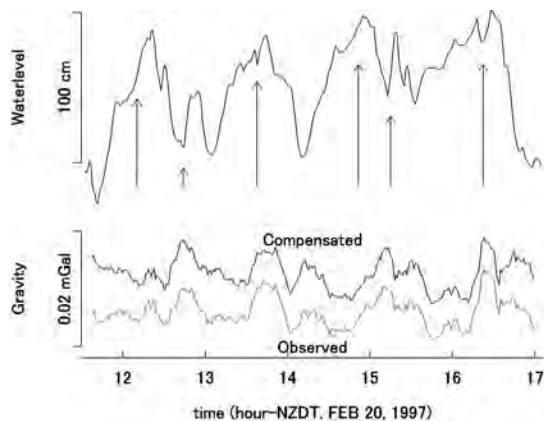


写真2 テホル湯溜りのすぐ横に設置したCG3M重力計。

連動していることが報告されている。ポフツ間欠泉のすぐ横にはテホルと呼ばれる湯溜りがあり、その水位も連動している。この間欠泉群については、これまでの調査結果に基づく地下構造モデルが提案されている(第5図)。貯留層の形状はまるで見てきたように詳しく描かれているがそれなりの根拠はある。ポフツ間欠泉群のすぐ近くに活動を止めたテワロ間欠泉がある。その噴出口は以前、人がやっと入れる大きさで開いていた。そこから貯留層内部に入った人による観察に基づいて貯留層と通路の形が推定されたの

だ。間欠泉同士の地下でのつながりは相互の活動の比較観察や色素を注入した後の噴出流体観察によって推定されていた(Lloyd, 1975)。このモデルを見て、ここで重力連続測定すれば面白い記録が得られるだろうと期待した。

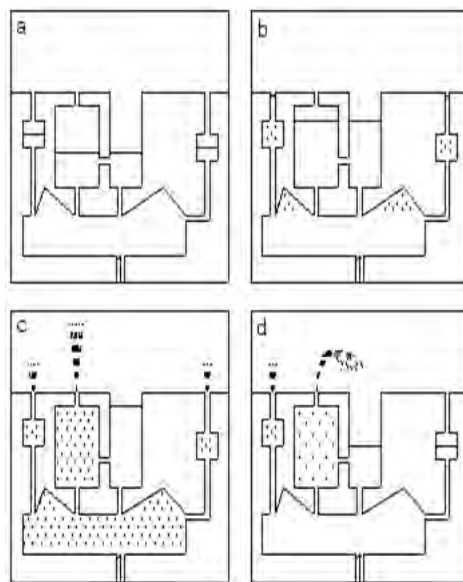
ガイザーフラットへの立ち入り許可を得た我々は、1996年2月に観光客を隔てる柵を越えて間欠泉に近づいたものの、勢いよく吹き上げる間欠泉群に圧倒された。ワイマングで使いそびれた百葉箱状の重力計覆いも今度は持ち込めたし、一度噴出した後、上から降ってくる湯は気化熱を失って水になっていることも体感したが、重力計を噴出口のすぐ近くに置くことは躊躇した。間欠泉に近づいて明瞭な重力変化を記



第6図 ファカレワレワのガイザーフラットでの記録。(上)テホルの水位、(下)重力記録。

録したいという気持ちと借り物の重力計を危険にさらすことはできないという万が一の事故を恐れる気持ちに折り合いをつけて、また、落下する流体によるノイズを考え、規模の大きい貯留層ならば少し離れていても検出できるだろうとの予測もあって、実際に重力計を設置したのは噴出口から10mの地点だった(第4図のG1996地点)。しかしながら、得られた記録には明瞭な信号は確認できなかった。

帰国後、地熱調査専用CG3M重力計を導入した我々は1997年2月に再びガイザーフラットに立った(写真1)。今度は湯溜りテホルのすぐ横(第4図のG1997地点)に重力計を設置した(写真2)。別途測定したテホルの水位変化相当分の変動を連続重力記録から差し引いてもなお、約 $10\mu\text{Gal}$ の振幅の重力変動成分が残った(第6図)。これは間欠泉の貯留層内の質量変化に対応したものと思われた。また重力計内蔵の傾斜記録から、ポフツ間欠泉の噴出口の方向に傾斜するような傾向も確認できた(Sugihara *et al.*, 1999)。重力変化という観測量は貯留層の詳しい形状には鈍感で質量変化の全体量を反映する。単純化した貯留層モデルを仮定して、その位置と体積について制約条件を見積もった(Sugihara *et al.*, 1999)。しかし複数の貯留層が想定されるガイザーフラットの場合は、第5図のような概念モデルを単純化した貯留層の重ね合わせとして解釈するとしても(第7図)、1地点での観測記録だけでは解釈の任意性が大きすぎる。重力変動を検出できたことを喜ぶ一方で、複数の重力計による同時観測の必要性を強く感じた。

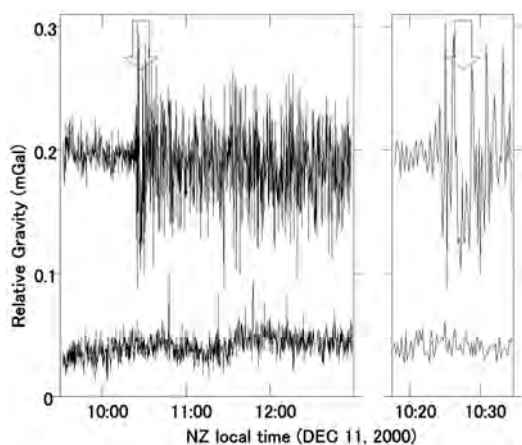


第7図 ファカレワレワのガイザーフラットの間欠泉群の噴出概念モデル(Lloyd, 1975を改変)。

## 5. ワイオタプ地熱地帯のレディノックス間欠泉

ワイオタプ地熱地帯にはレディノックスと呼ばれる間欠泉がある。ここでは毎日10時半になると、間欠泉を中心に設置された半円状の椅子席に観光客が集まり、その前にガイドが現れる。約10分の説明後、噴出口に洗濯1回分程度の分量の粉石鹸をふりかけると、1~2分後には噴出口に変化が起こる。パイプの先から泡が出始めたと思う間もなく、水柱が立ち上がる。一時は10m近くも吹き上げた水柱が徐々に勢いを失うにつれて、観光客も三々五々席を離れ、間欠泉ショーは閉幕となる。石鹸が加えられると表面張力が小さくなって発泡しやすくなるのが定時の間欠泉活動の引き金になっていると説明されている。ここはもともとあった沸騰泉の貯留層に1900年代初頭に差し込まれた鉄パイプによって熱の出口が狭まり、熱エネルギーバランスがくずれて生じた間欠泉である(Houghton and Scott, 2002)。当初は見えていたパイプと周囲の人工物はパイプの先端を除いてシンター等の沈殿物に隠されて、今では天然の噴出口のように見える。

周囲には他に間欠泉がなく、ファカレワレワと比較して単純な貯留層を持っていると期待して、2000年



第8図 ワイオタブ地熱地域のレディノックス間欠泉での重力変化、右図は左図の一部の時間軸を拡大表示。

12月、ここに2台のCG3M重力計を持ち込んで連続測定を行った。1台のCG3M重力計は噴出口から3mの位置に、もう1台は30m離れた位置に設置した。間欠泉活動の開始に伴い噴出口近傍の記録は大きく振動し、そのまま2時間以上もの間、振動が継続している(第8図)。高周波成分を除いた後の開始直後の部分に注目すると、開始1分後から4分間にわたって約50  $\mu$ Galのパルス状の負異常が生じている。重力低下の開始時刻は泡が出始めた時刻にほぼ一致することから、これは貯留層内の熱水が水蒸気に置き換わった状態を検出したものと考えられることができる。

## 6. ファカレワレワ地熱地帯のワイキテ(パレア)間欠泉

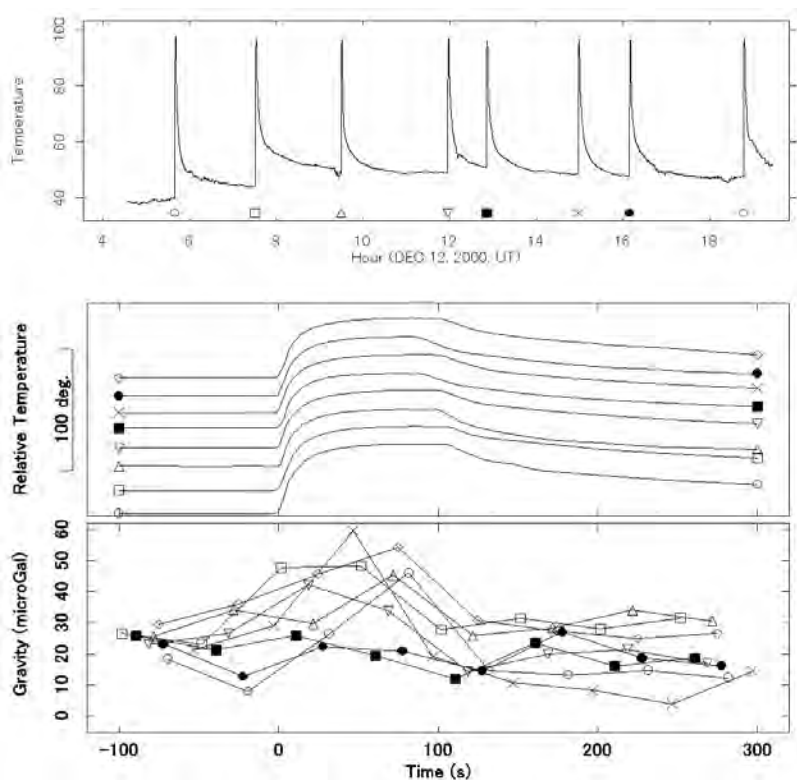
2台のCG3M重力計を携えてニュージーランドに行けることが決まった当初、我々はガイザーフラットで再測定することを期待した。1997年の測定で検出した重力変動の原因と考えられる貯留層群の構造を2台の重力計による同時観測で識別しなかったのだ。しかし2000年12月のガイザーフラットは常時テホルからお湯が溢れ出ている状態で観測は不可能とのことだった。そのかわりにIGNSのスコットさんは我々にワイキテ間欠泉跡での観測を勧めた。ワイキテ間欠泉はファカレワレワ地熱地帯で最も標高の高い場所にある(写真3)。以前、ワイキテ間欠泉は20mも吹き上げていてロトルア市の象徴にもなっていた。ロトルア湖畔



写真3 ファカレワレワのポフツ間欠泉、パレア間欠泉とワイキテ間欠泉。

から南方に向かう大通りは、この間欠泉に向かってまっすぐに作られた。1968年2月以降は間欠泉の活動は停止していたが、最近、活動の兆しが出てきた。半径2.5kmの範囲で熱水汲み上げ利用が制限された効果と思われる。水柱が立ち上がることは未だないが、ワイキテ間欠泉近傍のパレア間欠泉噴出口からお湯が溢れ出すようになっていた(Scott and Cody, 2000)。

2000年12月、午前中のレディノックス間欠泉での観測を終えて遅い昼食をとり、ファカレワレワ地熱地帯に入ったのは閉園間近の夕方だった。この間、1台のCG3M重力計のデータ転送は終わったが、もう1台は済んでいなかった。CG3M重力計のデータ転送には40分を要するしデータ消去前にはデータ確認も行いたいので更に時間が必要になる。現場で準備作業と並行してデータ転送する余裕はなかったので、2台での同時観測はあきらめた。もしもガイザーフラットでの調査であれば、狙いがはっきりしているので少し無理をしても同時測定を試みたはずだが、噴出には至らないというパレア間欠泉を軽視していたことは否めない。噴出口の近傍にCG3M重力計を設置して一晩測定を行った。重力計は50秒毎に記録するように設定した。噴出口からお湯が溢れ出した時間帯を識別できるように温度センサーも噴出口に設置した。温度記録から約13時間のうちに8回溢れ出したことがわかるが、重力記録を対比させても一見して顕著な対応は認められない。しかし、時間軸を拡大し、温度記録からわかる湧出時刻に併せて表示すると、対応関係を見出せる(第9図)。8回の湧出イベントのうち、6回は重力値が増加している。いずれも重力増加が認めら



第9図  
ファカレワレワのパレア間欠泉での記録。(上)全期間の湯の温度、(中)流出時の湯の温度、(下)流出時の重力変化。

れるのはわずかに1, 2サンプルのデータだけなので、個別に見ればその存在は見過ごされるが、重ねて表示することで実際に重力変動が起こった可能性が見えてきた。また重力増加を認められた6回の湧出と認められなかった2回の湧出には温度記録の特徴にも差がある。前者は後者に比べて湧出継続時間が長く、直前の湧出イベントとの時間間隔が長い。

この重力変動記録から、パレア間欠泉の貯留層の挙動について、どのように推定できるだろうか？ ポフツ間欠泉やレディノックス間欠泉では噴出に伴って重力減少が認められたがパレア間欠泉では重力は増加している。パレア間欠泉では蒸気の噴出ではなくお湯が静かに湧出する。貯留層内部に満たされたお湯が沸騰して貯留層が空になるという現象ではなく、空の貯留層にお湯が満たされて溢れるという現象と解釈できる。

## 7. 番外編：ファカレワレワ地熱地帯のテワロ間欠泉跡での重力鉛直勾配測定

重力連続測定とは別に重力鉛直勾配測定をテワロ

間欠泉跡で2000年5月に試みた。この時はIGNSのハントさんに招かれてニュージーランドの地熱開発地域で重力鉛直勾配調査を行っていた (Hunt *et al.*, 2002)。この調査の目的は地熱地帯での標高変動の重力補正を精密に行うことであったが、重力鉛直勾配計測は極浅部の地下空洞調査・遺跡調査に使用されることがある。それならば、この手法を以前、人がもぐりこんだというテワロ間欠泉の貯留層の直上で行ってみたいと思ったのだ。時間変化ではなく空間的な密度のコントラストを検出するのが狙いだった。この観測案をスコットさんに打診すると、今では空洞のかなりの部分は沈積物で埋まっているだろうから密度差は小さいだろうし、調査するとしても地下レーダーで行うべきでないかとのもっともな指摘を受けた。1番目の指摘に対しては、空洞の何割かが浅部に残っていれば検出可能性があることを示した。2番目の指摘に対しては使用可能な地下レーダーがないのだからと答えた。実は、自分にとって重力計は第7感覚器官とも言うべきもので、何でも重力計測で確認したくなるのだとも言いたかったのだが英語が出てこなかった。それを第6感で察したスコットさんはファカレワレ

ワ地熱地帯の関係者に連絡をとった後で「今日の日曜日に行くことにしよう」と言った。自分の勤務時間を充てるほどの成果は見込めないと判断しつつも共同研究者の好奇心には応えてくれたのだ。残念ながら彼の厚意に報いることはできなかった。当日はめったにない土砂降りだった。「It is raining cats and dogs.」と中学生の時に習った英語表現を初めて使って挨拶した後、貯留層直上と思しき地点で測定を始めた。しかし明確な鉛直勾配異常は認識できず、降雨の浸水により重力計がダメージを受ける危険性を避けるために早々に引き上げることとなった。

## 8. おわりに

Bonvalot *et al.* (1998)はCG3M重力計の連続記録機能を地殻変動の活動的な地域でのモニタリングに活用する可能性を主張したが、その後は目立った成果の報告はない。我々も重力モニタリングでのCG3M重力計による連続記録の有用さを指摘し(Sugihara, 1999)、ニュージーランドの魅力的な間欠泉でCG3M重力計による重力連続測定の経験を重ねてきた。借り物の重力計を恐る恐る使用した1996年は明確な変動を検出できなかったが、自分達専用の重力計で臨んだ1997年と2000年には間欠泉に関わると思われる信号を実際にとらえることができた。その一方でCG3M重力計の欠点も認識した。サンプリング周期の限界からパレアの事例のように1分程度で終息してしまう現象では十分な時間分解能が得られない。ワイマングの事例は操作の不手際であったが、内部温度コントロールの問題で記録が乱れることにも直面した。データ容量不足やデータ転送の遅さにストレスを感じたこともあった。その後、CG3M重力計の後継機CG5重力計が発表された。CG5重力計はCG3M重力計で感じた欠点の多くが解決されていた。特筆すべきは高分解能の6Hzの内部信号も記録可能となったことだ。従ってCG5重力計を使用すればパレア間欠泉で見られた1分程度の継続時間の重力変動の検出も可能と思われる。その後、日本国内の広河原間欠泉で使用して、CG5重力計の有効性を確認した(杉原, 2010)。また機会を得てニュージーランドの間欠泉でもCG5重力計による再調査を行って一連の調査を決着させたいと思っていた。

2009年11月、5年ぶりにニュージーランドのロトルア

市の定宿に入った。外観も内装もややくたびれているためか日本人観光客にはめったに会わないホテルだが、ロトルア宿泊でいつもここを利用するのは眺望が抜群だからだ。室内から窓に目を向けるとファカレワレワ地熱地帯が眼前に広がる(写真3)。有名なポフツ間欠泉をはじめとする間欠泉群が正面に見えるし、その手前の泥火山もなかなかのものだ。今回の出張は研究集会への参加が目的だった。会場のあるロトルア市中心部からは3km離れているが、ここに宿泊して通常の観光時間外の間欠泉を堪能した。早朝の間欠泉は清々しく、月明かりの間欠泉は幻想的だった。目を閉じていても間欠泉活動が聞こえた。

研究集会参加後にIGNSワイラケイ研究所を訪問すると、火山で重力変動観測を行った経験を持つ新人研究員を紹介された。彼はIGNSがシントレクス重力計とは別系統の新型連続観測用重力計gPhoneを導入して、ホワイト島火山での本観測の前にワイマングでのテスト観測を開始していることを説明した。彼等の狙いは通常地震計で観測される微動よりも長周期成分の記録からダイナミクスを探ることだ。重力計は長周期地震計としての性格も有する(友田・春日, 1984)のだが、gPhone重力計は連続観測専用で優れた長周期地震計としても注目されている。一方CG3M重力計やCG5重力計は機能の一部を活用して連続観測にも活用できるが長周期地震計としての評価は不十分である。我々の一連の重力変動調査のように重力変動記録から貯留層の位置や構造についての手がかりを得ることはできるが、噴出過程のダイナミクスを解明する目的には役不足である。例えば、レディノックス間欠泉で得られた記録では振動成分の中のゆるやかな変化を貯留層内の質量変化による重力変化として解釈したが、振動成分の方から情報を引き出すのは難しいのである。一方、間欠泉のダイナミクスではなく貯留層の構造等を推定するためには取り扱いの容易なCG5重力計の方が適しており、CG5重力計による測定は今も有用である。しかしgPhone重力計の適用が始まった今となってはCG5重力計による再測定を待たずに、これまで研究集会で順次発表してきた成果(Sugihara *et al.*, 1999; 2003; 2004)をまとめるべきと認識した。そして研究成果とは別に調査の経緯や背景についても興味深いことが多かったので、それをここに書き置くことにした。

ニュージーランドで活動中の間欠泉は他にもある。





写真4 IGNS ワイラケイ研究センターの展示室にある間欠泉。ちょうどフラスコ口から噴出した瞬間。実験装置ガラスケースの向こうの写真は、ワイマングにあった世界最大の間欠泉の噴出の様子。

IGNS ワイラケイ研究センターの研究棟の一部は展示室になっていて観光客にも開放されている。その一角にフラスコを使った実験装置があって間欠泉活動が再現されている(写真4)。間欠泉活動の原因を探るには自然現象の観測とは別にこうした実験的な取り組みも有効である。同じような実験的な試みは関東学院大学のグループも行っている(石井, 2006など)。

**謝辞:** 観測を共同で行ったIGNSのスコットさんとシャーパーンさん、同僚の石戸経士さん、當舎利行さん、宮崎純一さんに感謝します。1996年の最初の測定に際してCG3M重力計を貸して使用法の手ほどきもして下さった村田泰章さんに感謝します。観測の場を提供して下さったファカレワレワ、ワイオタブ、ワイマングの各地熱地帯の関係者の方々に感謝します。

#### 引用文献

- ボイル(1995):「はじめてであうせかいちず」いしいひでや訳 フレール館, 41p. 東京.
- Bonvalot, S., Diament, M. and Gabalda, G. (1998): Continuous gravity recording with Scintrex CG3M meters: a promising tool for monitoring active zones, *Geophys. J. Int.*, 135, 470-494.
- Houghton, B. and Scott, B. (2002): *Geysersland*, Geological Society of New Zealand Guidebook No.13.
- Hunt, T., Sugihara, M., Sato, T. and Takemura, T. (2002): Measurement and use of the vertical gravity gradient in correcting repeat microgravity measurements for the effects of ground subsidence in geothermal systems, *Geothermics*, 31, 2002, 525-543.
- Hunt, T. and Tosha, T. (1994): Precise gravity measurements at Inferno crater, Waimangu, New Zealand, *Geothermics*, 23, 1994, 573-582.
- 石井栄一(2006): 間欠泉の発生と消滅のメカニズム, 温泉科学の最新展開(日本温泉学会大沢信二編), ナカニシヤ出版, 131-148.
- Lloyd, E. F. (1975): *Geology of Whakarewarewa hot springs*.
- 西 祐司・杉原光彦(1992): ニュージーランドホワイト島火山微小地震観測記, *地質ニュース*, 457, 34-49.
- Nishi, Y. *et al.* (2000): Monitoring of geyser activity in Whakarewarewa, New Zealand, *Proc. WGC2000*, 1509-1513.
- Rinehart, J. S. (1980): *Geysers and geothermal energy*, Springer-Verlag, 223p.
- Sasagawa, G., Zumberge, M. and Eiken, O. (2008): Long-term seafloor tidal gravity and pressure observations in the North Sea: Testing and validation of a theoretical tidal model, *Geophysics*, 73, WA143-148.
- Scott, B. J. (1994): Cyclic activity in the Crater lakes of Waimangu hydrothermal system, New Zealand, *Geothermics*, 23, 1994, 555-572.
- Scott, B. J. and Cody, A. D. (2000): Response of the rotorua geothermal system to exploitation and varying management regimes, *Geothermics*, 29, 573-592.
- Simmons, S. F. and Browne, P. R. L. (1991): Active geothermal systems of the North Island New Zealand, *Geol. Soc. New Zealand Miscellaneous Publ.* 57.
- Sparks, R. S., Bursik, M. I., Carey, S. N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H. and Woods, A. W. (1997): *Volcanic Plumes*, John Wiley & Sons.
- Sugihara, M. (1999): Continuous gravity measurements for reservoir monitoring, *Proceedings, 24<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- 杉原光彦(2010): シントレクス重力計CG5の特性評価, 広河原CO<sub>2</sub>間欠泉での調査, *日本地熱学会誌*, 32, 21-30.
- Sugihara, M., Nishi, Y. and Scott, B.J. (1999): Continuous gravity measurements at Whakarewarewa Geyser Flat, *Proc. 21<sup>st</sup> New Zealand Geothermal Workshop*, 169-173.
- Sugihara, M., Nishi, Y. and Scott, B.J. (2004): Continuous Gravity Recording with Scintrex CG3M/CG5 Meters for Monitoring Geysers, *Abst. 26<sup>th</sup> New Zealand Geothermal Workshop.*, p38.
- Sugihara, M., Nishi, Y., Scott, B.J. and Sherburn, S. (2003): Continuous measurements with a Scintrex gravimeter for reservoir monitoring, *Proc. 9<sup>th</sup> European meeting of Environmental and engineering geophysics*, P025, 1-4.
- 友田好文・春日 隆(1984): 重力計および重力の比較測定, 地球観測ハンドブック(友田好文・鈴木弘道・土屋 淳 編集), 東京大学出版会, 465-540.
- 当舎利行(1996): ニュージーランドでの地熱・火山の共同研究, *地熱*, 33, 33-49.

SUGIHARA Mituhiko and NISHI Yuji (2010): Continuous gravity measurements at geysers in New Zealand.

<受付: 2010年3月16日>