

重力変動観測による地熱貯留層モニタリング — 鹿児島県山川地熱地域 —

川頭 圭*・西島 潤**・江原幸雄**

Geothermal reservoir monitoring by observation of gravity changes
— Yamagawa geothermal field, Kagoshima Prefecture —

Kei KAWAGASHIRA*, Jun NISHIJIMA** and Sachio EHARA**

ABSTRACT

Yamagawa geothermal power station which is located in the southeast end of Kagoshima prefecture, Japan has been operating since March 1995. We monitored the geothermal reservoir by the observation of gravity changes during five years since 1996. Gravity changes occurred in the narrow area of the production and the reinjection zones during recent three years (1998 to 2001) and these changes are considered to be related to production and reinjection of geothermal fluids.

1. はじめに

地熱開発において地下流体の質量収支を捉えることは重要であり、重力変動観測はその一手段として広く用いられている。その代表的な適用例として Allis and Hunt (1986) のワイラケイ地熱地域がある。

本研究の対象地域である鹿児島県山川地熱地域では1996年より重力変動観測が行なわれている。米重ほか(1999)は、1996年6月～1999年6月までの観測において得られた重力変動の主な原因は、本地域での降雨量変化により水理状況が変動したことにより引き起こされたものとしており、特に地熱流体の生産・還元による影響はないと結論していた。その後本地域で新たな測定点を生産井の周辺に追加し、観測を継続した結果、生産・還元と関係すると思われる変動を捉えることができたので、本論文で報告する。

2. 観測地域概要

山川地熱地域は、鹿児島県薩摩半島の東南端の一画に位置している。本地区および周辺域には、多数の噴気や温泉等の地熱徴候が見られる。

吉村ほか(1985)によれば、山川地熱地域における高温分布域は、C・D・E断層によって形成された陥没構造内に限られている(図1)。この陥没構造内の坑井内温度プロファイルは、1,000m深以浅で急激に150℃以上となる温度上昇があり、一方1,000～1,500m

深では温度が急激に100℃程度まで下がる逆転層が見られる。さらに深部では再び急激な温度上昇をしており、2,000m深で約300℃まで上昇する。しかし、陥没構造の外では逆転層はなく、伝導卓越型の一定した温度上昇を示している。深部の温度分布をみると300℃程度の高温異常部が2つあり、1つは発電所付近を中心とする狭い範囲で、もう1つはその南方方向にあり、海に開く形で存在している。

発電所の東部に位置するH断層の高温異常部に向かい生産井が1500～2500m深に、西部のI・F断層に向かい還元井が800～1700m深に伸びており、本論文ではH断層付近を生産ゾーン、I・F断層付近を還元ゾーンと呼ぶことにする。



図1 観測地域位置(発電所及び断層位置)

*九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻地球熱システム学研究室

〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

**九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門地球熱システム学研究室

〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

3. 重力変動観測

3-1. 観測方法

本研究で用いた重力計は、カナダシントレックス社製のCG-3M型自動重力計である。1996年6月27日から2001年8月25日までに計13回の重力変動観測を行っている。図2に観測点の分布および後に示す重力変動空間分布図の範囲を点線で示す。観測点は南北約2km、東西約5kmの範囲に2000年までは全25点設置している。また2001年からは4点追加し、全29点となっている。

観測は往復測定を行い重力値は次式で決定している。

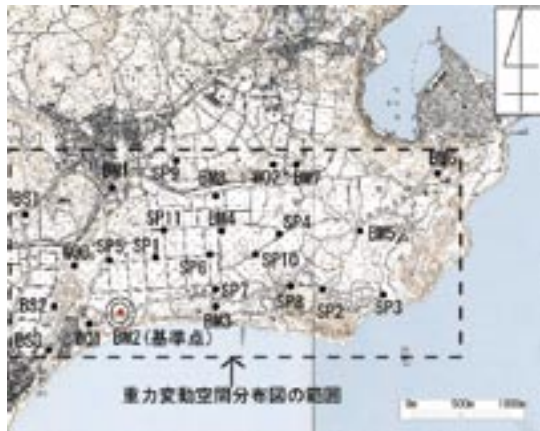


図2 重力観測点位置

重力値 = (行きと帰りの平均値) ± (往復差) / 2
 観測した全ての重力値の誤差 ρ_i (往復差 / 2) より、観測値の分散 S^2 を以下の式で求めた。

n : 観測回数

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i^2$$

そして t 分布区間推定を 95% 信頼区間で行い、最小有意差を求めた。最小有意差は 9.6 μ gal であり、本地域での観測の精度としては $\pm 10 \mu$ gal となる。

3-2. 観測結果への補正

観測結果には器械高補正、地球潮汐補正、ドリフト補正を行っている。また本地域は海に近いので、海水面の水位が変化することにより重力値に影響を与える可能性がある。後で述べるように本地域の重力経時変化量が最大で $\pm 30 \mu$ gal 程度と小さいため、変動量について十分な議論をするために以下の海洋潮汐、標高変動補正を行っている。

まず海洋潮汐に関する補正について述べる。米重ほか (1999) では、海水面の水位変動による重力への影響量の推定をタルワニの方法 (Talwani and Ewing, 1960) を用いて行った。その結果海岸に近づくほど影響量は大きくなり、観測点の位置ではほとんど影響

がないと考えている。しかし、海水面が最大の変化をした場合の影響量のみを考えており、時間による変化を検討していなかった。そこで海洋潮汐による時間変化を検討するため GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) を用いてその影響を計算した結果、観測点位置による影響よりも観測中に変化した海洋潮汐の差が観測値に与える影響が大きいことがわかった。例として観測中に最も大きな海洋潮汐の変化があった2000年8月24日 (測定は13:30 ~ 19:00) のデータについて図3に示す。重力値への影響量としては観測時間を考えると最大で 10μ gal 程である。

次に標高変動補正について述べる。本地域では1年ごとに水準測量を行っており、その1年間に変動した標高変化量は最大で0.02m、最小で0.002m、観測を開始してから5年間に最大 - 0.05m 程度の変動をしている。地上付近での重力値の鉛直勾配を 308.6μ gal/m とすれば、1年間に最小で約 0.6μ gal、最大で 6μ gal の変動をしており、観測開始から約 15μ gal の変動があることになる。

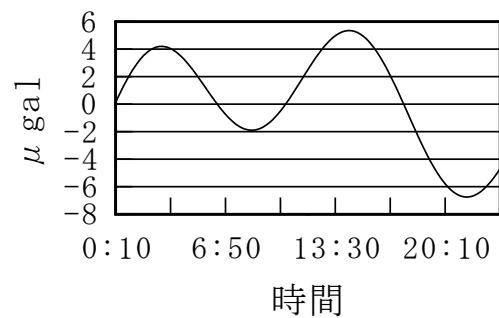


図3 BM2での海洋潮汐経時変化 (00年8月24日)

3-3. 重力基準点の移動

米重ほか (1999) では生産・還元ゾーンから最も離れたBS1を基準点として浅層地下水位の季節変動による重力の影響を除去している。しかし地下水調査井(WO1)の水位変化を見た場合に、浅層地下水位の季節的変動と重力変動のパターンが一致していない。すなわちBS1は標高がやや高く、多くの観測点がある標高の低い位置とは異なる水理系にある可能性が考えられた。そこで標高が低く、生産ゾーンから離れた場所を新たな基準点として探したところ、WO1に近い位置にあるBM2の重力変動パターンと浅層地下水位の季節的変動とがほとんど同じ挙動を示すことから、BM2を新たな基準点とした。

4. 観測結果

4-1. 重力変動経時変化

本地域での重力変動経時変化図を図4に示す。縦軸に重力変動量 (μ gal)、横軸に時間を取っている。またエラーバーは行きと帰りの往復差を示しており、平均値を●で示している。

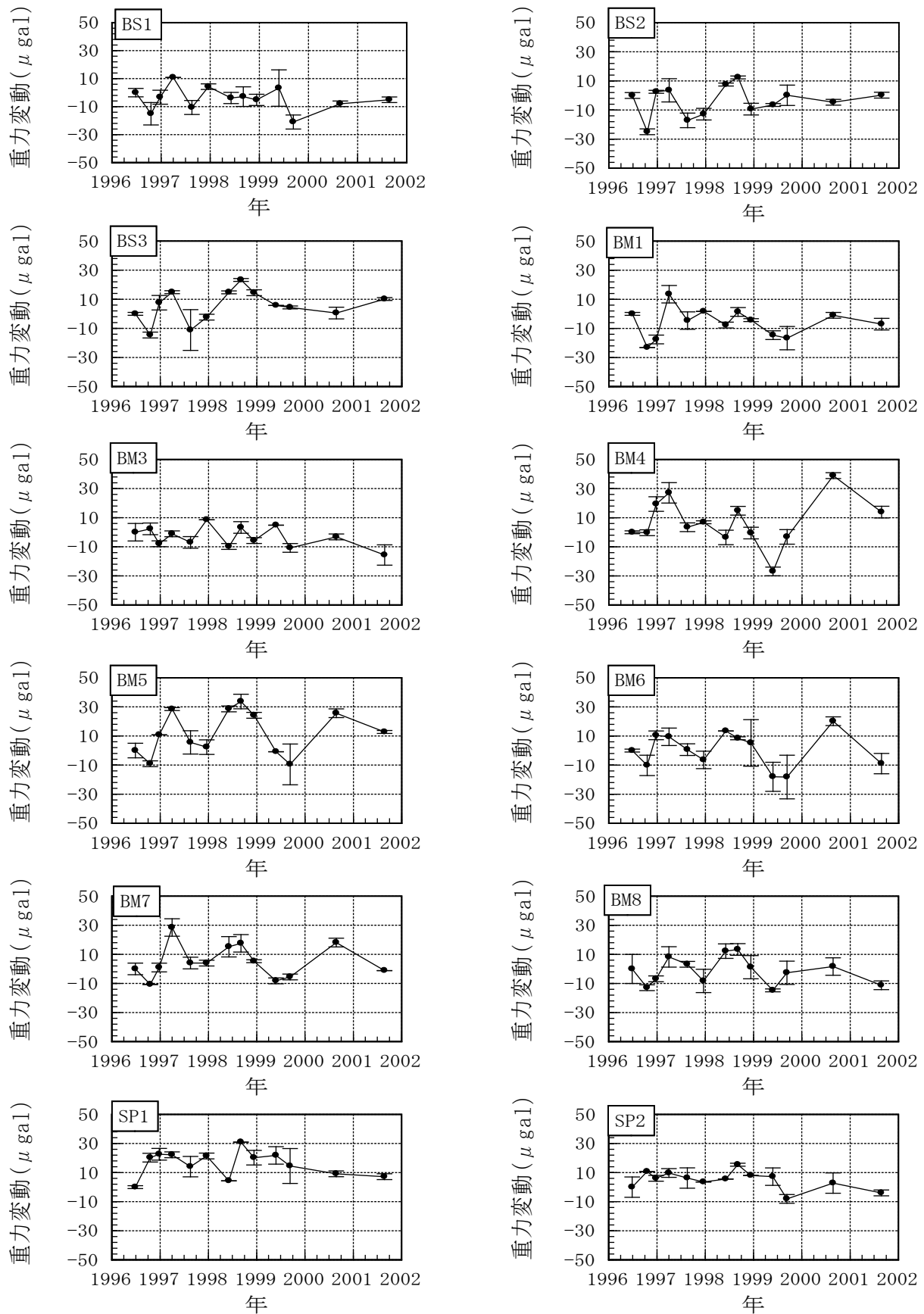


図4 重力変動経時変化

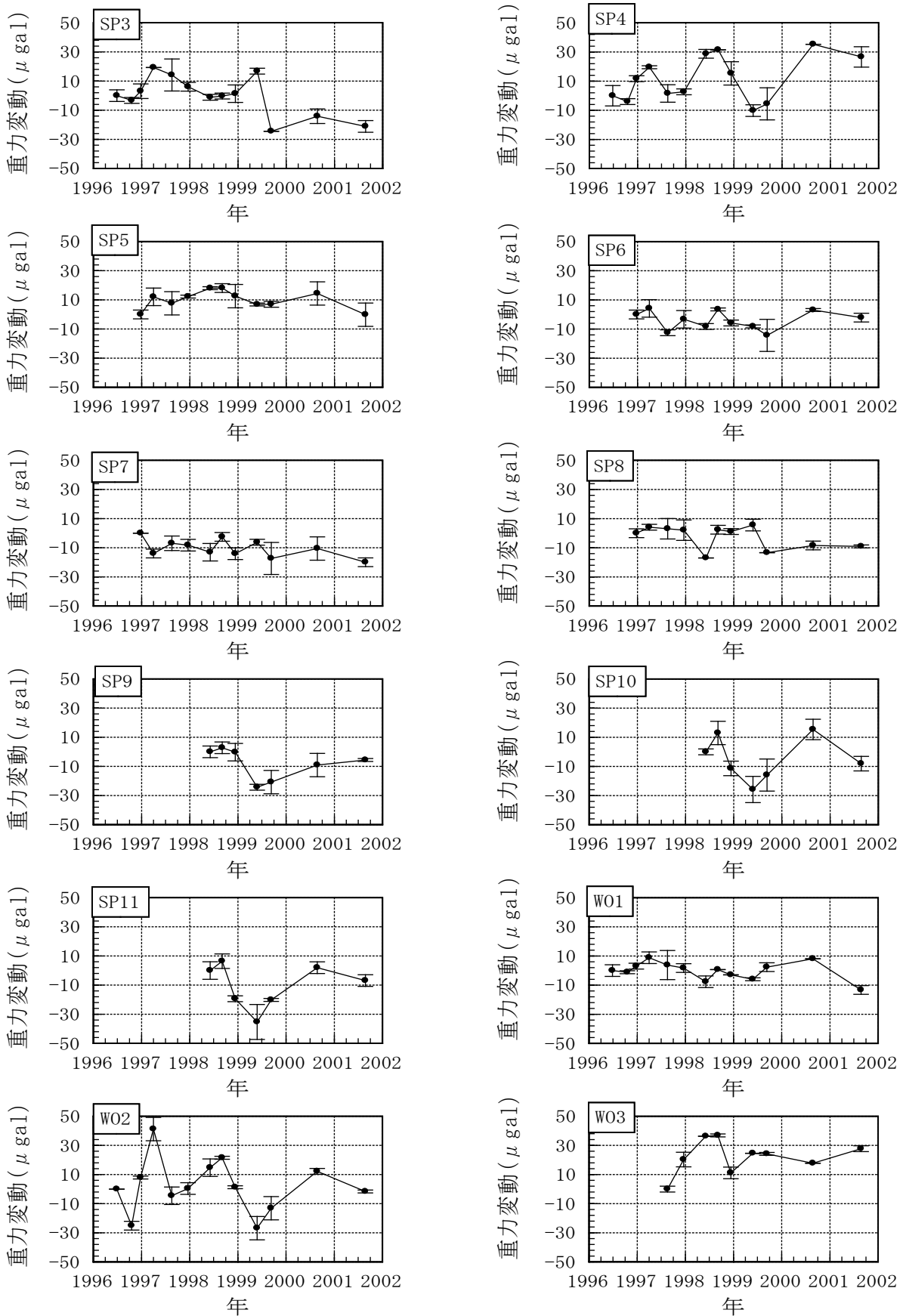


図4 重力変動経時変化 (つづき)

重力変動観測の経時変化図は観測開始から季節的な変動を見せている。またC・D・E断層によって囲まれた陥没構造において、F断層を境にして変動量に差があり、重力変動量が殆ど±10 μgal以内に収まる南部及び変動量が大きく、最大で±30 μgalの北部の2つの地域に分類できる。

F断層南部の代表的な点としてBM3・SP1・SP2・SP6・SP7があげられる。

F断層北部の代表的な点としてBM4・BM5・SP4・SP9・SP10・SP11があげられる。これらの点での重力変動は、すでに述べたように季節的な変化をしているが、生産ゾーン及びその周辺に位置する点(BM4、SP4、SP10、SP11)では季節的な変動とは異なるパターンも見られることがわかる。

4-2. 重力変動空間分布

前述したように重力変動には季節的な変動が見られるため、同じ季節のデータを使用することによって季節変動を回避することを試みた。毎年9月前後には必ず観測が行なわれているので、この時期のデータを使い、1年ごとの重力変動量の空間分布図を作成した(図5～図9)。

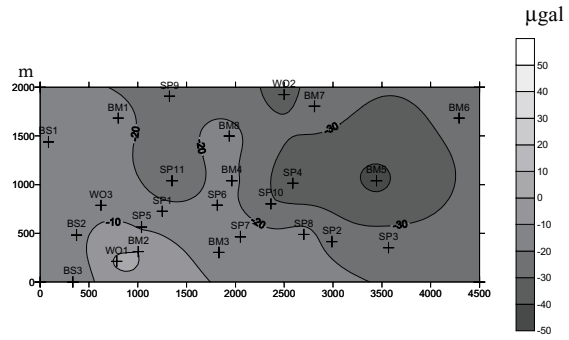


図7 重力変動空間分布(98～99)

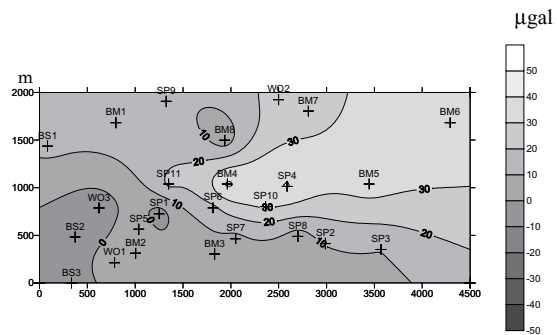


図8 重力変動空間分布(99～00)

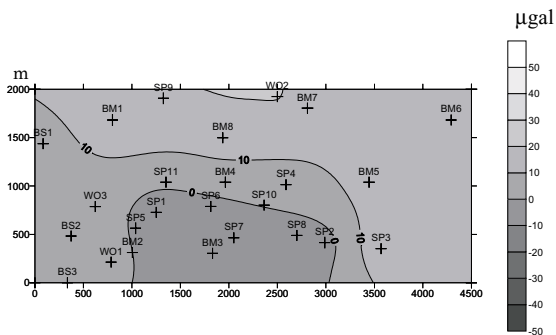


図5 重力変動空間分布(96～97)

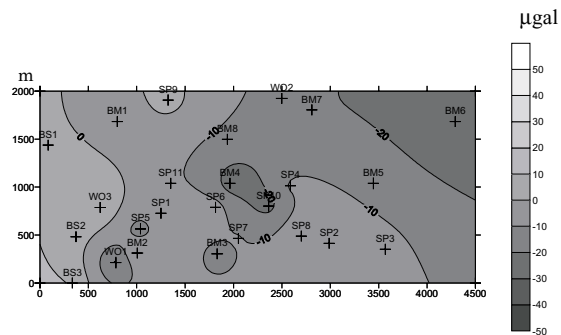


図9 重力変動空間分布(00～01)

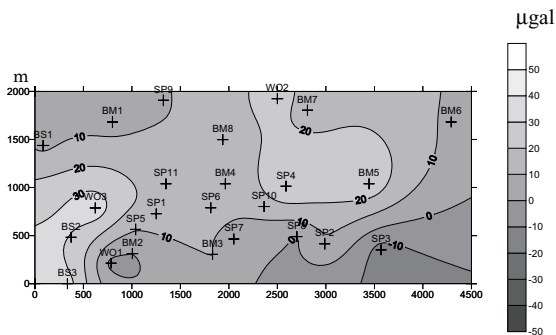


図6 重力変動空間分布(97～98)

96年から97年の変動は±10 μgal程度と極めて小さい。97年から98年は西部の陥没構造外の点で変動が大きくなっているが、生産ゾーンでも20 μgalの変動がある。98年から99年は変動が大きく全体的に減少傾向を示しているが、特に生産ゾーンを中心として減少傾向が見える。また99年から00年は全体的に増加傾向が見える。また99年から00年は全体的に増加傾向で、生産ゾーンだけでなく還元ゾーンでも大きな増加傾向を示している。00年から01年は還元ゾーンを中心として減少傾向が見られる。

またこれらの空間分布を見ると特定の方向に重力変動のトレンドが見られる。すなわち96年から97年及び99年から00年では南西から北東に重力が増加する。一方、97年から98年、98年から99年及び00年から01年は北東から南西に向かって重力が増加する。こ

のようなトレンドの存在は浅層地下水位の影響が完全には除去されていないことが考えられたので、以下に述べるような1次傾向面解析を行なうことにした。

5. 1次傾向面解析

1次傾向面解析を行なうに当たって、生産ゾーンから離れたBM6は、他の点と異なった特異な変動を示すため除去した。1次傾向面解析を行い、トレンドを除去した残差重力図を以下に示す(図10～図14)。

96年から97年の変動は±10 μgal以下でごく小さい。また97年から98年、98年から99年、99年から00年及び00年から01年の時期においては生産・還

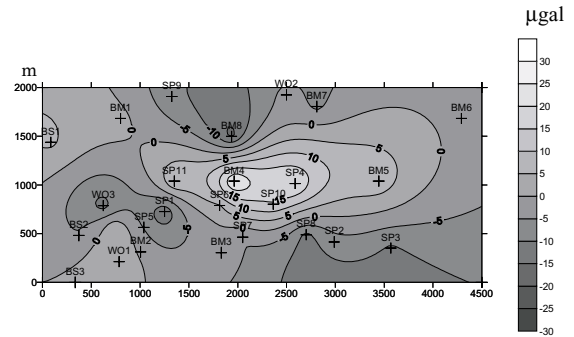


図13 1次傾向面解析後の残差重力図(99～00)

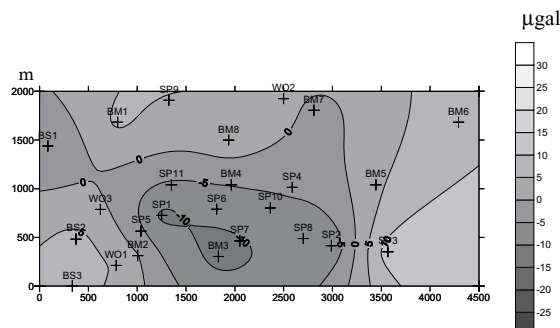


図10 1次傾向面解析後の残差重力図(96～97)

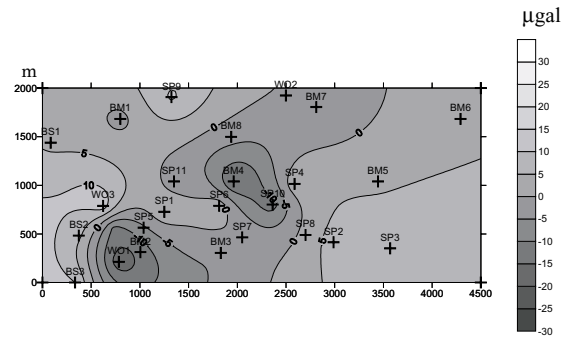


図14 1次傾向面解析後の残差重力図(00～01)

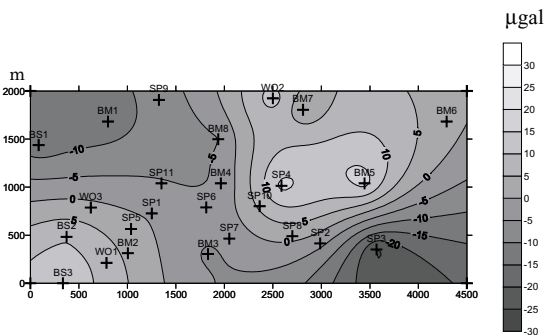


図11 1次傾向面解析後の残差重力図(97～98)

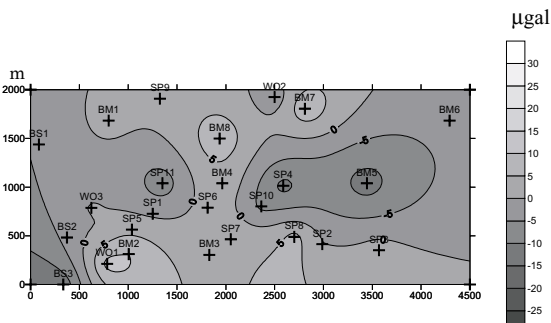


図12 1次傾向面解析後の残差重力図(98～99)

元ゾーン付近に変動が集中している。したがって1次傾向面解析の結果、地熱流体の生産・還元に伴い引き起こされたと考えられる重力変動を検出することができたのではないかと考えられる。

6. 山川地熱発電所の発電量変化と重力変動の相関

山川地熱発電所では97年8月頃から99年の後半にかけて発電量の減少、それ以降ゆっくりと発電量が回復し、00年に入ってからはほぼ安定していることが知られている。

残差重力図の変動を見ると、発電量が減少している時期には生産ゾーンに近い場所で重力が減少、逆に発電量が回復している時期には重力が増加していることがわかる。また発電量の変動が少ない時期には重力変動量も小さくなっている。これらのことを考えると山川地熱発電所の発電量変化と重力変動には相関がある。

7. 結論

- (1) 山川地熱発電所において1996年から2001年にわたり重力変動観測を行い、重力変動の空間分布を明らかにした。
- (2) 重力変動空間分布の1次傾向面解析を行い、浅層地下水位変化に起因すると思われるトレンドを除去した結果、生産・還元に伴い引き起こされた

と考えられる重力変動を検出することができた。

今後、重力変動と地熱流体の挙動との相関関係について詳細に検討したいと考えている。

謝辞

本地域における重力変動観測の実施においては、石油資源開発株式会社及び九州地熱株式会社の関係者各位には多大なご協力を頂きました。ここに記し、深く感謝申し上げます。

参考文献

Allis,R.G. and Hunt,T.M. (1986) : Analysis of Exploitation Induced Gravity Changes at Wairakei Geothermal Field, Geophysics, Vol.51, No.8, 1647-1660.

Matsumoto,K. Sato,T. Takanezawa,T. and Ooe,M. (2001) : GOTIC2 : A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, 測地学会誌, 第47巻, 第1号, 243-248.

Talwani,M. and Ewing,M. (1960) : Rapid Computation of Gravitational Attraction of Three-Dimensional Bodies of Arbitrary Shape, Geophysics, Vol.25, NO.1, 203-225.

米重和馬・西島潤・江原幸雄 (1999) : 鹿児島県山川地熱地域における重力変動観測, 九大地熱研究報告, 第8号, 87 - 94.

吉村雄三郎・柳本裕・中込理 (1985) : 鹿児島県伏目地区の地熱構造について, 地熱, Vol.22, No.3, 167-194.