

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21404018

研究課題名（和文） 地熱発電の持続可能性向上手法の海外フィールドへの適用

研究課題名（英文） Application of Sustainability Enhancement Techniques for Geothermal Power Generation to Overseas Fields

研究代表者

藤光 康宏（FUJIMITSU YASUHIRO）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10264095

研究成果の概要（和文）：滝上地熱発電所地域で用いられ改良されてきた繰り返し精密重力測定による地熱貯留層モニタリング手法は、海外の地熱地域（インドネシア・カモジャン地熱地域及びニュージーランド・オハアキ地熱地域）においても適応可能であることが示された。また、絶対重力測定と相対重力測定を組み合わせるハイブリッド重力測定は、重力変動の検出の確度を高めることに有効であることが示された。一方で、それぞれの地熱地域に応じた測定仕様を考えなければならないことも明らかになった。

研究成果の概要（英文）：It is indicated that the monitoring techniques of a geothermal reservoir by repeat precise gravity measurement applied to the Takigami geothermal power station area in Kyushu, Japan are applicable to some overseas geothermal fields (Kamojang Geothermal Area in Indonesia and Ohaaki Geothermal Area in New Zealand). And it is also shown that the hybrid gravity measurement (combination of absolute and relative gravity measurements) is effective to improve accuracy of gravity change detection. On the other hand, the result explains that the gravity measurement specification appropriate to each geothermal area should be considered.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：地熱、貯留層、相対重力計、絶対重力計、ハイブリッド重力測定、再生可能エネルギー、持続可能性、測地

1. 研究開始当初の背景

地球の温暖化が顕著になった近年、地熱エ

ネルギーは CO₂ 排出量が少ない「持続可能エネルギー（Sustainable Energy）」あるいは

「再生可能エネルギー (Renewable Energy)」として再び注目されているだけでなく、原油価格の異常とも言える高騰により、海外、特に東南アジアにおいて開発が強く推進されている。しかし、地熱発電においては、地熱流体生産量が過剰であると早期に枯渇し、逆に過少な生産は発電のメリットがないため、適切な地熱流体生産量を見積もることが地熱エネルギーの「持続可能性」や「再生可能性」を保証するものとなるが、特に開発途上国において場当たりのな運転となり、貯留層管理手法の早急な実用化が強く求められている。

地下における地熱流体の質量収支を見積もる代表的な手法としては坑井内における圧力モニタリングがあるが、より簡便で広い面積を有する発電所に適用できるものとして、地下での質量の時間変化を地表における重力の時間変化として検出することが考えられた。このコンセプトを元に、Allis and Hunt (1986) はニュージーランド北島のワイラケイ地熱地域で精密重力測定を行い、地熱発電のための地熱流体生産に伴う重力変化を捉えることに世界で初めて成功した。

一方、我が国においては本研究の研究協力者である江原ほか (1994) が、大分県九重町の滝上地熱地域において、地熱発電所の運転開始前から開始した繰り返し重力測定で、地熱流体の生産の影響と考えられる重力変化を検出したのが最初である。その後、江原らのグループは滝上地熱地域だけでなく、同じく九重町の八丁原地熱地域においても測定を開始し、両地域において生産・還元に伴う重力の時間変化を捉えることに成功した (西島ほか, 2000 ; Nishijima et al., 2001)。滝上、八丁原における重力測定は現在も本研究の提案グループにより継続されており、このような長期にわたる観測は他に例が無い。繰り返し精密重力測定による地熱貯留層モニタリングの研究は日本とニュージーランドが世界をリードしている。

またインドネシアでは、現在地熱エネルギー開発が国の政策として推進されている。インドネシアの地熱発電所もニュージーランドと同様、日本の地熱発電所より大規模であり、非常に広大な地熱流体生産・還元面積を有することから、繰り返し重力測定が地熱貯留層管理手法として確立されることが強く望まれている。ジャワ島カモジャン地熱発電所地域では、過去 1999 年、2005 年、2008 年に、精密重力測定が試みられている。

2. 研究の目的

地熱エネルギーの「持続可能エネルギー」あるいは「再生可能エネルギー」としての利点を最大限に生かすため、国内で研究が進め

られている地熱貯留層管理手法を海外の大規模な地熱発電所地域に適用し、有効性を確認すると共に普遍的な手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 国内においては、これまで精密重力測定を継続してきた大分県滝上地熱発電所地域 (図 1) をテストフィールドとして、海外フィールドにおける重力測定の予行演習や測定方法のテストを実施した。

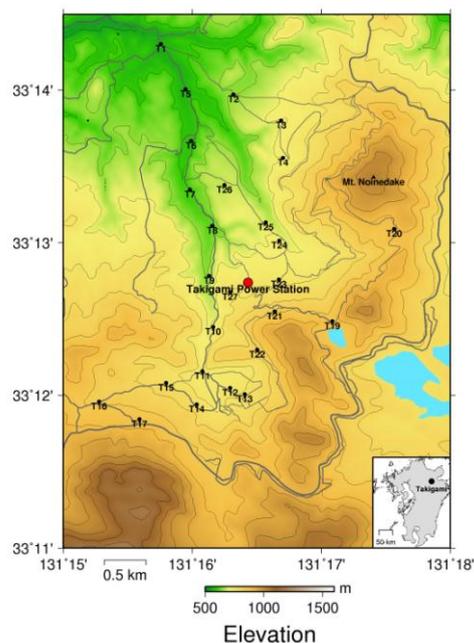


図 1 滝上地熱発電所地域

海外フィールドとしてはインドネシア・ジャワ島のカモジャン地熱発電所地域 (図 2) とニュージーランド・北島のオハアキ地熱発電所地域 (図 3) を選定した。カモジャン地熱地域においては九州大学グループとインドネシア大学グループ、及びカモジャン地熱発電所を運転する Pertamina Geothermal Energy 社が、またオハアキ地熱地域においては九州大学グループと GNS Science グループ、及びオハアキ地熱発電所を運転する Contact Energy 社グループが、それぞれ合同で相対重力計による年 1 回の現地重力測定を実施した。

また、本研究とは別件で、大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所が所有する可搬型絶対重力計 (米国 Micro-g LaCoste 社製 A10 絶対重力計) を用いたインドネシア国内における重力測定が本研究の実施期間中に行われ、この絶対重力計をインドネシアにおいて数日間借り受けることができたため、カモジャン地熱地域においては、2009 年度と 2010 年度に、絶対重力計による絶対重力値の測定と相対重力計による測定を組み合わせるハイブリッド重

力測定を実施した。

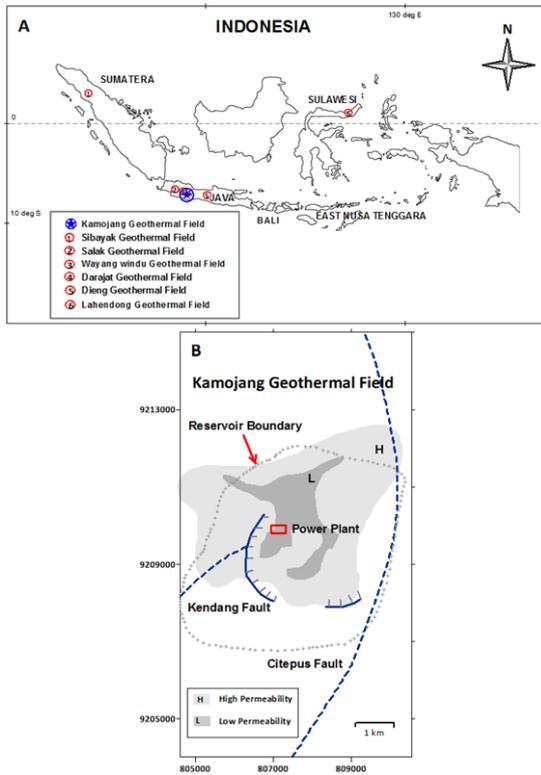


図2 カモジャン地熱発電所地域 (Sofyan, 2010)

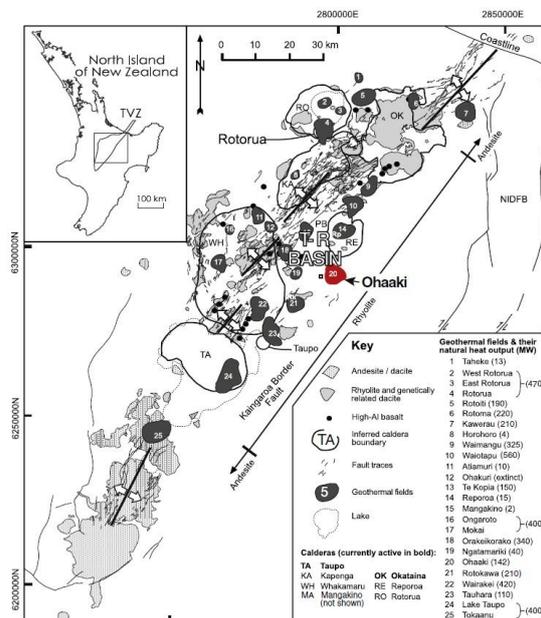


図3 オハアキ地熱発電所地域 (Rissmann et al., 2011)

(2)当初の2009年度の計画では、最初に相対重力計のアップグレード(カナダ Scintrex社製 CG-3M 相対重力計→CG-3+相対重力計)

を実施する予定であったが、重力計のメーカー側より、社内の事情によりアップグレードには半年近くの時間が必要との連絡があった。そのため、まずアップグレード前の相対重力計により、滝上地熱発電所地域において重力測定を行い、続いてカモジャン地熱発電所地域において、インドネシア大学と合同で1回目の精密重力測定を2009年7~8月に実施した。この時の測定はハイブリッド重力測定であった。その際、A10 絶対重力計の大きな特長である可搬性を活かし、据置型絶対重力計よりも多くの測定点において絶対重力測定を行った。

また2009年度の計画では、オハアキ地熱発電所地域における精密重力測定も予定されていたが、世界保健機関による新型インフルエンザの世界規模のパンデミック宣言、及び日本、ニュージーランド両国における流行を受け、同年度における実施を見送り、このための予算を2010年度に繰り越した。

このような経緯の結果、相対重力計のアップグレードはカモジャン地熱地域の精密重力測定が終了した後にいった。

(3)2010年度は、まず滝上地熱発電所地域において、アップグレードされた相対重力計の性能評価を行った。対象地域に設定した29点の精密重力測定点でアップグレード後の相対重力計による重力測定を行うと共に、その中の数点では別件で総合地球環境学研究所より借り受けた可搬型絶対重力計を用いて絶対重力値の測定も実施し、相対重力計アップグレード前の同地域の重力測定結果と比較した。その結果、両者の測定値は整合しており、アップグレード後の相対重力計を用いて重力変動モニタリングを引き継いでも問題が無いことを確認した。

この結果を踏まえ、インドネシア・ジャワ島のカモジャン地熱発電所地域において、インドネシア大学と合同で2回目の重力測定を2010年7月に実施した。この時もハイブリッド重力測定を行った。

また、GNS Science グループ及び Contact Energy 社グループと合同でオハアキ地熱地域の1回目の精密重力測定を2010年12月に実施した。

(4)2011年度は、滝上地熱発電所地域においてハイブリッド重力測定を実施して経年変化を確認した後、カモジャン地熱地域において Pertamina Geothermal Energy 社と合同で3回目の重力測定を2011年7月に実施した。しかしながら、2011年度はカウンターパートとの日程調整が難航し測定期間が短かったことと、現地において可搬型絶対重力計の動作が不安定になったことから、数点の測定点における絶対重力値の測定のみとなった。

また、相対重力計を用いて、ニュージーランドの研究機関である GNS Science 及びニュージーランド北島中央部のオハアキ地熱発電所を運転する Contact Energy 社と合同で、同地域の 2 回目の精密重力測定を 2012 年 2 ～3 月に実施した。

(5)2012 年度は、九州大学伊都キャンパス及び大分県滝上地熱発電所地域においてハイブリッド重力測定を継続し、同手法の現地適用性を確認した。

また海外における重力測定は、計画通りニュージーランド・オハアキ地熱発電所地域のみであり、最終年度であることから、年度末に近い過去 2 回の測定時期より早い 2012 年 9 月に、相対重力計を用いて実施した。

4. 研究成果

(1)滝上地熱発電所地域におけるハイブリッド重力測定は、相対重力測定時に重力基準点として使用している測定点における重力変動の経年変化を可搬型絶対重力計で評価することが主要な目的の一つであった。測定の結果、経年変化は約 10 マイクロガル以内に収まっていることが示された。これは測定精度と同程度の変動であることから、相対重力測定の基準点における重力変動は考えなくて良いと結論した。

これにより、本研究以前に滝上地熱発電所地域で実施された相対重力計による繰り返し精密重力測定の結果と本研究による測定結果を一緒にして重力変動分布の経時変化及びそこから推定される地熱流体の質量収支の経時変化を議論することができるようになり、現在の滝上地熱発電所地域の質量収支は 2002 年以降増加の傾向を示していることが判った。

(2)カモジャン地熱地域における繰り返し精密重力測定では、絶対重力測定、相対重力測定及び両者を組み合わせたハイブリッド重力測定の 3 種類の重力変動分布図を作成し、相互に比較した。その結果、重力値の増加が見られる場所は共通していたものの、対象地域全体的には良い相関は見られなかった。これは、相対重力計による測定結果に他の地域の測定時には見られなかった非線形なドリフトが現れ、これに対する適切な補正ができなかった事によるものと考えられる。

そのため、絶対重力計による測定点のみを抽出して重力変動分布図を作成した結果、西部の蒸気生産地域の重力値の減少と北～北東部の熱水還元地域の重力値の増加が検出された。

(3)オハアキ地熱地域の繰り返し精密重力測

定では、対象地域と GNS Science が設定している重力基準点とが滝上地熱発電所地域やカモジャン地熱地域よりかなり離れているため(約 20 km)、対象地域内の重力変動が起こりにくいと思われる測定点を重力基準点とした。また、重力変動分布の経時変化と共に、この重力変動を説明するためのモデル計算も実施した。

発電所の生産・還元による地熱貯留層内の見掛け密度の変化以外に重力値に影響を与える要因としては、観測点の標高変化、降雨浸透、浅層地下水位の季節変化、の 3 つが考えられる。オハアキ地熱発電所を運転する Contact Energy 社から提供を受けたデータを元にこれら 3 つの影響を除去した結果、第 1 回測定から第 2 回測定までの期間、第 2 回から第 3 回までの期間ともに、この地域の北西部と南東部に重力の減少傾向が見られた。

上記 3 つの影響を除去した後の重力変化を地熱貯留層内の見掛け密度変化(主として地熱流体の気相と液相の相変化)によるものと仮定して、モデル計算により、観測された重力変動量から地下の密度変化を推定した。モデル計算では、オハアキ地熱地域の地熱貯留層が存在する深度 500～560 m の範囲を一辺 30 m の立方体に分割し、同地域の地熱貯留層の平均的な温度の液相の熱水の密度と平均的な空隙率から算出される見掛け密度変化を各ブロックに試行錯誤的に割り振って地表における重力変化を算出し、観測結果との比較を行った。その結果、モデル計算は観測された重力変動の傾向を表現していることが判明し、本研究で実施した繰り返し精密重力測定が海外の地熱地域でも有効であることが示された。

(4)滝上地熱発電所地域で用いられ改良されてきた繰り返し精密重力測定による地熱貯留層モニタリング手法は、海外の地熱地域においても変化を検出でき、同手法が国内外の複数の地熱フィールドで適応可能であることが示された。また、滝上地熱発電所地域とカモジャン地熱地域で試みられたハイブリッド重力測定は、特に、測定点における絶対重力値の決定が可能であることにより、重力変動の検出の確度を高めることに有効であることが示された。

一方で、それぞれの地熱地域に応じた測定仕様を考えなければならず、またカモジャン地熱地域のように相対重力測定において非線形なドリフトが生じた時の補正手法を開発しなければならないことも明らかになった。さらに、残念ながらオハアキ地熱地域の測定は相対重力測定のみであるため、厳密には基準点の重力変動についての評価ができていない。これらが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① Daisuke OKA, Yasuhiro FUJIMITSU, Jun NISHIJIMA, Yoichi FUKUDA and Makoto TANIGUCHI, Mass Balance from Gravity in the Takigami Geothermal Reservoir, Oita Prefecture, Japan, *Procedia Earth and Planetary Science*, 査読有, Vol.6, 2013, pp.145-154,
DOI: 10.1016/j.proeps.2013.01.020
- ② Yayan SOFYAN, Justin KAMAH, Jun NISHIJIMA, Yasuhiro FUJIMITSU, Sachio EHARA, Yoichi FUKUDA and Makoto TANIGUCHI, Mass Variation in Outcome to High Production Activity in Kamojang Geothermal Field, Indonesia: A Reservoir Monitoring with Relative and Absolute Gravimetry, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol.63, No.11, 2011, pp.1157-1167
- ③ Jun NISHIJIMA, Hakim SAIBI, Yayan SOFYAN, Sachio SHIMOSE, Yasuhiro FUJIMITSU, Sachio EHARA, Yoichi FUKUDA, Takashi HASEGAWA and Makoto TANIGUCHI, Reservoir Monitoring Using Hybrid Micro-Gravity Measurements in the Takigami Geothermal Field, Central Kyushu, Japan, *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, 査読有, DVD, 2010, 6p,
<http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGStandard/WGC/2010/1320.pdf>

[学会発表] (計24件)

- ① Daisuke OKA, Yasuhiro FUJIMITSU, Jun NISHIJIMA, Yoichi FUKUDA and Makoto TANIGUCHI, Mass Balance from Gravity in the Takigami Geothermal Reservoir, Oita Prefecture, Japan, International Symposium on Earth Science and Technology 2012, 2012年9月19日, Institute of Technology, Bandung, Indonesia
- ② Yayan SOFYAN, Jun NISHIJIMA, Yasuhiro FUJIMITSU, Sachio EHARA, Yoichi FUKUDA and Makoto TANIGUCHI, Mass Variation in Outcome to High Production Activity in Kamojang Geothermal Field, Indonesia: A Reservoir Monitoring with Absolute Gravimetry, 日本地熱学会平成23年学術講演会, 2011年11月10日, メディポリス指宿天珠の館 (鹿児島県)
- ③ 西島 潤, Yayan SOFYAN, 藤光康宏, 福田

洋一, 谷口真人, インドネシア カモジャン地熱発電所におけるハイブリッド精密重力測定を用いた地熱貯留層モニタリング, 日本地熱学会平成22年学術講演会, 2010年11月26日, 文部科学省研究交流センター (茨城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤光 康宏 (FUJIMITSU YASUHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10264095

(2) 研究分担者

西島 潤 (NISHIJIMA JUN)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 40315114