

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19340128

研究課題名(和文) 赤道域から地球を覗く—インドネシアでの超伝導重力観測

研究課題名(英文) Probing the Earth from the equatorial regions
- Superconducting gravimeter observations

研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA YOICHI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30133854

研究成果の概要(和文)：

赤道域での超伝導重力計(SG)観測の空白域を埋めるため、インドネシアのチビノンで新たにSG観測を開始した。取得データによる地球潮汐解析では、これまで赤道域で唯一のバンドンでの結果と良い一致が見られた。さらに、海洋潮汐モデルの検証では最近のモデルの優位性や、長周期重力変化と地下水変動の関係などが示された。地球自由振動では、東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の良好なデータが取得でき、今後の解析が期待される。

研究成果の概要(英文)：

In order to fill in the observation gap in the equatorial region, SG (Superconducting Gravimeter) observations have been newly started in Cibinong, Indonesia. The result of the Earth tide analysis showed good correspondence with that of Bandung, which had been the unique one in equatorial region so far. In addition, the advantages of the recent ocean tide models, the relation between the long period gravity changes and the groundwater level changes have been confirmed. As for the Earth's free oscillations, the 2011 Tohoku Earthquake (Mw9.0) have been successfully recorded. The data should be expected to contribute to several analyses in the future.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 7,200,000 | 2,160,000 | 9,360,000 |
| 2008年度 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |
| 2009年度 | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |
| 2010年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,500,000 | 4,350,000 | 18,850,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：超伝導重力計、地球自由振動、重力変化、Global Geodynamic Project、赤道域

1. 研究開始当初の背景

超伝導重力計(Superconducting Gravimeter：SG)は、超伝導コイルのつくる安定な磁場で浮上したニオブ球の位置変化を検出することで重力の時間的変化を測定する相対重力計である。SGは、すべての物質の挙動が安定となる液体ヘリウム温度(4K)

で用いられることとも相まって、極めて高感度(1 ngal=1.0⁻¹¹ m/sec²の感度)で、かつ、長期の安定性を備えている。

このようなSGの優れた特徴を生かし、主に地球深部ダイナミクスの研究を目的とし、1997年7月に、超伝導重力計を保有する12カ国が参加した国際観測プロジェクト GGP

(Global Geodynamics Project) が開始された。第1期のGGPは2003年に終了したが、その科学的成果が国際的に認知され、IAG(International Association of Geodesy)の正式なInter Commission Projectの1つとして、より強化拡張された第2期プロジェクトが進行中であり、GGPは、現在、IAGのServiceの一つとしてさらに発展しつつある。GGPへの我が国の寄与は極めて大きく、当初、昭和基地(南極)、キャンベラ(オーストラリア)、バンドン(インドネシア)、京都、松代、江刺、ニューオルスン(北極)の7つの超伝導重力観測点がGGPに参加しており、これは、GGPの観測点全体の約1/3に相当する数であった。また、他国の観測点が北半球の中緯度に偏在していたのに対し、我が国の観測点は、南極から北極に至る南北に展開したユニークな配置であり、これは、グローバルな現象、特に緯度依存性のある現象の解明に有利であることから、諸外国から大きな期待が寄せられていた。

我が国のGGP観測点の内、インドネシアのSG観測点は、1997年に京都大学がバンドンの火山調査所構内で観測を開始したもので、低緯度の赤道域における唯一のSG観測点であった。しかしながら、2004年3月に1時間あたり百数十mm以上という集中豪雨に見舞われ、半地下に設置されていたSGは水没し、復旧不可能な状態に陥った。このため、それ以降、GGPは赤道域での観測点を欠いたままの状態であった。このような状態を回避するため、外国メンバーからもインドネシアでの観測を再開するよう繰り返し要望されていたが、経費等の問題で、観測の早期再開は困難と思われていた。

ところが、京都大学地球熱学研究施設火山研究センターで以前使用されていたSGの冷凍機ならびに制御装置等を修復することで、新規購入の約1/10の経費で精度的にも十分使用に耐えるSG観測システムが構築できることがわかり、この重力計を使用すれば、低経費でインドネシアでの観測を再開できることが判明した。

また、従来のインドネシア・バンドンでのSG観測では、赤道域での地球潮汐観測や、数日～数ヶ月での地下水変動によると思われる重力変化についての成果は得られていたが、SG観測が再開されれば、低緯度地域での唯一の高精度な観測データを提供することで、例えば常時自由振動の研究や、地球自由振動振幅の地域的異方性の研究、また、赤道域での長周期潮汐、陸水変動や海洋変動と関連した重力変化など、多くの新たな知見が得られるものと期待された。

このような状況で、当時、インドネシアでの絶対重力測定で研究協力関係にあった、我が国の国土地理院に相当する組織、国立測量

および地図調整機構(BAKOSURTANAL)から、インドネシアでのSG観測の再開にあたっては、ジャカルタの南約60kmに位置するチビノン市郊外のBAKOSURTANAL構内での観測室の提供の申し出があり、本研究を開始することとなった。

2. 研究の目的

本研究では、GGPの本来の目的であるグローバルな重力変化や、赤道域での高精度な潮汐定数の決定などの成果に加え、バンドンでのSG観測では必ずしも十分でなかった、①地球自由振動帯域での観測・解析、②長周期潮汐の解析、③赤道域の活発な大気活動や海洋変動に伴う重力変化や、④インドネシアのテクトニクスと関連した経年的な重力変化の検出などを、主な研究目的とした。

この内、例えば地球の自由振動に関しては、GGPのSGデータを用い、スマトラ沖地震後の oS_0 の振幅のグローバルな空間分布を調べた研究があり、地球の自転や扁平率から予想される値と有意にずれていることが示されていた。しかし、この研究では赤道域のデータは含まれておらず、緯度依存性の議論としては不十分と言わざるを得ない。

一方、過去の経験からインドネシアでのSG観測には、液体ヘリウムの供給や停電対策等、さまざまな困難が伴うことが予想された。そこで、本研究では、インドネシアでのSG連続観測を再開にあたり、まず、(1)保守性を重視した超伝導重力計システムの構築を行うことも重要な目的とした。このため、研究分担者として極低温工学の専門家の協力のもとに、最新型の冷凍機の導入や、データ制御、収録装置等を改良することで、ランニングコストが低く、しかもメンテナンスが容易な超伝導重力計システムの構築も一つの重要な目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、インドネシアで用いる超伝導重力計を整備し、インドネシアでの観測を開始、得られたデータを解析し目的を達成することを目指した。この内、以下では重力計の整備、インドネシアでのSG観測状況について述べる。

(1) 重力計の整備

SG観測では、センサーを4Kの極低温に保つため、液体ヘリウムによる冷却とその温度を維持するための冷凍機の使用が不可欠である。本研究で使用するSGは、国内での観測中止後、長年放置されていたものであり、課題採択後、まず、メーカーでの点検修理を実施した。その後、2007年度には、筑波大学研究基盤総合センター低温部門において、改良した冷凍機やデータ収録装置等を用いたテ

スト観測を開始し、重力計の調整ならびその性能確認を行なった。

(2) インドネシアでSG観測

上記の国内テストと並行し、BAKOSURTANALの研究協力者と測定点に新設についての打合せ、場所の選定を行い、2008年度前半にBAKOSURTANAL敷地内に新たに重力観測室の建設を依頼、2008年11月に観測室が落成した。

一方、国内でのテストを完了した超伝導重力計は、2008年9月にインドネシアに移送、その後、約2カ月間、現地でのテスト観測を行い、観測室の落成に合わせ、2008年11月より正式に新観測点での観測を開始した。その後、現地での電源の不安定などに起因すると思われる集録システムの不具合のため、やや欠測が多い状態が見られたが、システムの改良を実施しながら、2009年3月には観測点近傍での地下水位観測を開始、また、2009年7月には降雨の観測も開始することで、長期の経年的重力変化の研究も可能な環境を整備した。

その後、約10カ月のデータが蓄積された2009年9月に、現地で生じた停電のため冷凍機が長期間停止し、機器の運転に必要な液体ヘリウムが全て蒸発、超伝導重力計が機能しない状態に陥った。超伝導重力計では、一旦、機器が室温の状態に戻ると、再度、観測を開始するためには多くの作業工程が必要となる。さらに、観測室の停電対策ならびに異常時の監視体制が整わない限り、観測を再開したとしても、再度同様の事態が生じる恐れがあることから、2009年度中の観測再開は断念し、BAKOSURTANALにこれらの体制の整備を依頼、2010年6月から7月にかけて観測再開の作業を実施し、2010年8月より観測を再開した。この際、従来、現地の研究協力者からの報告に頼っていた機器の状況監視について、e-mailの自動発送を利用した監視システムを追加した。

その後、2010年10月に落雷によりデータ収録装置の一部が損傷し、11月に応急的に復帰したものの、データの欠測が多くなる状況が生じ、2011年3月に新たな収録装置を導入することで2011年3月5日以降、順調な観測を継続している。

4. 研究成果

上述のとおり、チビノンでの観測では、様々なアクシデントに遭遇したため、残念ながらデータの取得率は当初計画の60%程度に留まったものの、赤道域での新規のSGデータとして解析に利用することが出来た。具体的なデータ取得期間は、2008年11月～2009年9月ならびに2010年8月～2011年3月である。また、特筆すべきは、2011年3月11

日の東北地方太平洋沖地震による地球自由振動の良好な記録が得られていることである。以下では、潮汐解析ならびに長周期重力変化についての結果、また、地球自由振動解析について述べる。

(1) 地球潮汐解析

上記の取得データの内、2008年11月～2009年9月のデータについて、地球潮汐解析プログラムBAYTAP-GならびにBAYTAP-Lを用いた解析を行った。得られた結果について、まず、バンドンでの約4.5年のデータを使用した解析結果(Fukuda et al., 2004)と比較することで、SG観測の精度評価を行った。それによると、主要な分潮について両者は精度の範囲以内で良く一致している。一方、ノイズレベルについては、データ長の違いを考慮した上で、バンドンよりやや悪いように思われる。これは、重力点の基盤地質や背景ノイズの違いによるものと思われるが、いずれにしろ、許容範囲内である。また、バンドンのSG観測データは、絶対重力計(AG)との並行観測で振幅係数のキャリブレーションがなされているが、本研究ではAGとの並行観測はなされていない。このため、振幅係数については、国内の観測から得られた推定値を使用しているが、それにも関わらずバンドンでの観測と良い一致を示すことから、当面、現状の振幅係数の値を用いて差し支えないことが確認できた。

次に、地球潮汐解析の結果を用い、6種類の海洋潮汐モデルについて、その検証を行った。それによると最近の海洋潮汐モデルの方が一般的に良い結果を示すこと、P1およびQ1分潮で相対的にやや大きな誤差を示すことなどが確認できた。

従来、赤道域での高精度な潮汐解析データはバンドンでのものに限られていたが、本研究の一つの重要な成果として、それを裏付ける独立な観測データが得られたことが挙げられる。

(2) 長周期重力変化の解析

SGデータに地球潮汐解析を施すことで、その残差として長周期の重力変化シグナルを得ることができる。本研究では、その残差について、さらに理論的に推定される極運動成分、年周、半年周の潮汐成分、ならびにドリフト成分を差し引き、残差と地下水位観測データとの比較を実施した。この結果、重力残差がローカルな地下水位変化と良い相関を示すことが確認できた。ただし、地下水位変化に対する重力変化の係数は $1.5 \mu\text{gal/m}$ とかなり小さな値が得られており、この説明のためには、今後、降雨データも含めたモデリングが必要と思われる。

一方、地下水変動の影響も除いた残差シグ

ナルにも、なお、やや長周期の変動が残るようであり、海洋変動との関係などを示唆するが、データ期間が十分でないため、より詳細な解析のためには、さらに今後のデータの蓄積を待つ必要がある。

(3) 地球自由振動の解析

本研究の一つの重要な目的は、赤道域で地球自由振動の解析に耐えるデータを取得することであった。しかし、先に述べた観測上の問題のため、巨大地震の記録が得られない状況が続き、特に、2010年2月に発生したチリ地震(Mw8.8)の際に観測が中断しており、その記録が得られなかったことは、大変、残念なことであった。

このような状況で、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)は、その数日前に現地で行った機器調整直後に発生しており、この地震による良好な地球自由振動の記録の取得が出来たことは、本研究の最大の成果と言っても良い。赤道域でMw9.0を超える巨大地震の記録が得られたのは、今回が初めてのことであり、この記録は、早速GGPのwebサイトを通じて一般に公開されている。このデータについての本格的な解析はこれからであるが、今後、他のGGP観測点の記録と合わせ、地球自由振動振幅の地域的異方性の研究などに大いに期待が寄せられる。

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0件)

[学会発表] (計5件)

1. Fukuda, Y., H. Ikeda, H. Hayakawa, S. Yoshii, Y. Tamura, P. Manurung, Superconducting gravimeter observation in Cibinong, Indonesia, 2nd International Gravity Field Symposium, Fairbanks, Alaska, 20-22, September 2010 (Presented, Sep., 22, 2010).
2. 由井智志, 福田洋一, 池田博, 東敏博, 早河秀章, 田村良明, 川崎 一郎, Parluhutan Manurung: インドネシア・チビノンでの超伝導重力計で観測された重力潮汐, 地球惑星科学連合 2010 年大会(SGD002-06), 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2010年5月28日.
3. Fukuda, Y., H. Ikeda, T. Higashi, H. Hayakawa, S. Yoshii, Y. Tamura, I. Kawasaki, P. Manurung, Installation of Superconducting Gravimeter in Cibinong, Indonesia, IAG2009 Geodesy for Planet Earth, Buenos Aires, Argentina, August 31 to September 4, 2009.

4. 福田洋一, 池田博, 東敏博, 早河秀章, 由井智志, 田村良明, 川崎 一郎, Parluhutan Manurung: インドネシア・チビノンでの超伝導重力観測, 地球惑星科学連合 2009 年大会, 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2009年5月21日.
5. 池田博, 福田洋一, 東敏博, インドネシア超伝導重力計の設置, 2008年度秋季低温工学・超電導学会, 2008年11月12-14日, 高知市文化プラザ かるぼーと (高知市中央公民館)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

BAKOSURTANAL での超伝導重力計観測室落成式の模様は、現地でテレビ報道されたほか、多くの新聞報道がなされた。BAKOSURTANAL の Web サイト (下記) に関連情報あり。

<http://www.bakosurtanal.go.id/bakosurtanal/monitoring-the-dynamics-of-the-earth-by-gravity-signals/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA YOICHI)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30133854

(2) 研究分担者

池田 博 (IKEDA HIROSHI)
筑波大学・数理物質科学研究科・准教授
研究者番号: 50272167
川崎 一郎 (KAWASAKI ICHIRO)
(H19~21年度分担者)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 60115136
東 敏博 (HIGASHI TOSHIHIRO)
(H19~20年度分担者)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 90135517
田村 良明 (TAMURA YOSHIAKI)
(H19年度分担者)
国立天文台・電波研究部・助教
研究者番号: 90150002

(3) 連携研究者

該当なし