

## インドネシアの重力基準点における重力変化の精密観測 Precise Observation of Gravity Changes at the Indonesian Fundamental Station of Gravity

○竹本 修三\*, 福田 洋一\*, 大久保修平\*\*, 中村佳重郎\*\*\*, 石原和弘\*\*\*, 佐藤 忠弘\*\*\*\*

○Shuzo TAKEMOTO, Yoichi FUKUDA, Shuhei OKUBO, Kajuro NAKAMURA,  
Kazuhiro ISHIHARA, Tadahiro SATO

\*京都大学大学院理学研究科, \*\*東京大学地震研究所, \*\*\*京都大学防災研究所,

\*\*\*\*国立天文台地球回転研究系

\*Graduate School of Science, Kyoto University

\*\*Earthquake Research Institute, University of Tokyo

\*\*\*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*\*\*\*Division of Earth Rotation, National Astronomical Observatory

One of the two Superconducting Gravimeter systems installed in Kyoto was shifted to Bandung in December 1997 and precise observation of gravity variations in Bandung was started under the cooperation between the Graduate School of Science (GSS), Kyoto University and the Volcanological Survey of Indonesia (VSI). Observation of gravity variation in Bandung using the SG #008 was smoothly started in December 1997, but interrupted by the unexpected falling of a thunderbolt in April 1998. We repaired the system and observation was restarted in December 1998. Based on data obtained for the period of four months from December 1997, it was revealed that the noise level in Bandung in tidal frequency band is relatively smaller than that in Kyoto. In Indonesia, reliable gravity data have not been obtained so much. We are expecting to provide high quality gravity data in Bandung in coming years.

### 1. 研究目的

重力測定は、地下鉱物資源や地下水層の所在を推定するための物理探査の有効な方法の一つであるばかりでなく、地震や火山活動と関連した地殻変動を見いだすためにも広く利用されている。わが国においては、このような目的に供せられる重力基準網が整備されており、その時間的変化の精密監視も実施されている。それに対して、わが国と同様にプレート周辺に位置する弧状列島であり、地震や火山活動が活発であるインドネシアにおいては、国内の重力基準網が整備されておらず、ましてや、その時間的変化の精密観測は実施されていない。

そこで、京都大学大学院理学研究科地球物理学教室では、インドネシア火山調査所と共同して、インドネシア重力基準点における重力の時間的変化の精密観測を実施することを計画し、1997年8月20日に京都大学大学院理学研究科とインドネシア鉱山エネルギー省地質鉱物資源総局火山調査所との間で「インドネシア・バンドン市における超伝導重力計を用いた重力の時間的変化の精密観測」に関する研究協力の協定覚書を締結した。本研究は、この協定覚書に基づき、インドネシアにおける重力測定の基盤を確立することを目的としたものである。

### 2. 研究経過

上記の協定覚書に基づき、京都大学大学院理学研究科では、同研究科が保有する2基の超伝導重力計(GWR#008および#009)の整備・改造を実施し、

そのうちの1基(#008)をインドネシアに移設するべく、必要な事務手続きを済ませた。一方、現地の共同研究者であるインドネシア火山調査所のSjafra Dwipa 博士らは、バンドン市内の地学博物館にあるインドネシア重力基準点(DG.0)のすぐ近くにある地質鉱物資源総局敷地内の地下室に超伝導重力計を設置するための観測台を設置し、電源工事などを行い、受け入れ準備を整えた。

1997年11月に、研究代表者(竹本)が、最終打ち合わせのため、バンドン市を訪問したが、この際、インドネシア側の責任で実施された地下室改修工事に関連して、設置した入口扉が機器(超伝導重力計)の幅より狭かったり、用意した電源容量が不足だったりという不都合が判明した。しかし、これらのトラブルも日本とインドネシアの研究者の親密な協力で無事解決し、1997年12月に、京都大学が保有する2基の超伝導重力計のうちの1基(#008)をバンドン市の観測室に移設し、重力の時間的変化の精密観測を開始することができた[1]。

超伝導重力計のインドネシア持ち込みに際し、輸入関税として機器購入価格の20%が課せられるということであったが、ユネスコ・ジャカルタ地域事務所の橋爪道郎上級専門官の仲介により、ユネスコ・ジャカルタ地域事務所を経由した後、バンドンのインドネシア火山調査所に陸送するという手順をふむことにより、幸いにも無税で持ち込むことができた。

得られたデータは、MOディスクに編集され、月に一度、日本に送られてくる。予備的な解析の結果、

地球潮汐の周波数帯では京都より上質のデータが得られていることがわかり、ひとまず安堵した [2].

観測開始後、5ヶ月間は順調に観測データが得られていたが、1998年4月に、予期しなかったバンドン市内の強烈な落雷のために、データ収録装置の主要部分が致命的な損傷を受け、観測中断を余儀なくさせられた。折からインドネシアの政情不安のため、インドネシアへの渡航が禁止されたため、日本側の研究者がインドネシアへ入国できたのは、同年6月であった。

われわれが現地入りをし、故障箇所を点検したところ、現地においては修理不能の状態になっていることが判明したため、直ちに、データ収録装置を超伝導重力計のメーカーである米国GWR社に返送し、修理を依頼するとともに、破損した冷却用コンプレッサーの代替品を国内において新たに購入し、バンドン市における超伝導重力計観測を再開すべく、準備を整えた。

1998年11月に、修理の終わったデータ収録装置がGWR社からインドネシアに返送されたのを受けて、同年11月29日から日本側研究者がインドネシア入りし、超伝導重力計の再立ち上げを実施した。まず、最初の1週間は、真空ポンプを用いて、超伝導重力計デューア（容器）部分の真空引きを実施した。第2週には、液体窒素によるデューアおよびセンサー部分の予冷を行い、第3週に液体ヘリウムによる冷却を実施したのち、超伝導球の浮上に成功した。これにより、8ヶ月ぶりに超伝導重力計観測を再開することができた。その後、バンドンにおける超伝導重力計観測は、順調に行われている。

### 3. 超伝導重力計の構造

超伝導重力計は、従来からのスプリング型の重力計とは異なり、極低温下における超伝導磁気浮上の原理に基づく新しい方式の重力計である。超伝導重力計の構造は、図1に示されている。重力計センサー部は、超伝導コイルのほか、ニオブウム製の中空の試験球（テスト・マス）と容量変化検出用の極板（プレート）とで構成されている。重力計センサー部を液体ヘリウムで満たされた容器（デューア）のなかに浸し、超伝導コイルを流れる永久電流によって作りだされる磁場のなかに超伝導体である試験球をおく。すると、マイスナー効果により、磁力線が試験球の内部に侵入せず、磁気反発力が生じる。この磁気反発力と試験球に働く重力とを釣り合わせることで、重力の測定を行うものである [3]。実際の測定に際しては、重力の変化に伴って試験球の位置が上下に変化すると、その位置の変化量を、試験球の上下に取り付けられた極板間の容量変化の量として検出し、その変化量に比例した微小電流を超伝導コイルの下にある補助コイルに加えることにより、試験球の位置を元の位置に戻すというフィードバック機構が働く。補助コイルに加える電流の

変化が重力変化量に比例する。

超伝導重力計は、超伝導磁石が安定であること、極低温により測定機器を低雑音にできること、および、原理的にドリフトがないことなどにより、きわめて高感度の重力計となっており、従来のスプリング型重力計に比べて、2~3桁感度が高く、nanogal( $10^{-12}$  G)の感度を有する。この型の重力計の出現により、地球深部に起源をもつ微弱な信号、例えば、流体の外核に取り囲まれた固体の内核の重力（浮力）復元力とする長周期の振動（コア・アンダー・トーン）などを検出する可能性が開かれた。

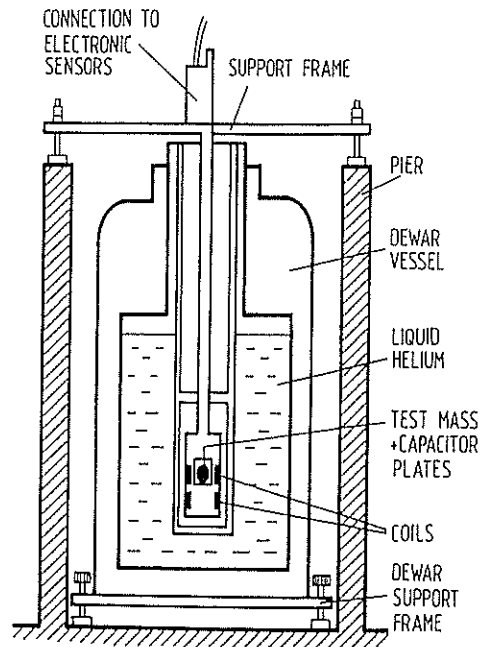


図1 GWR 超伝導重力計

### 4. 研究成果

1997年12月から1998年3月までの4ヶ月間、バンドン観測点で得られた超伝導重力計観測データに基づき、予備的な解析を行った結果を以下に示す。図2に観測室内の超伝導重力計の配置を示してある。潮汐定数を決定したり、ドリフトなどの成分を分離するにあたって、潮汐解析プログラム Baytap-G [4]を用いた。1秒サンプリングで得られたデータを1時間間隔でリサンプリングし、Baytap-Gで解析すると、分潮ごとの潮汐定数、振幅、位相が得られる。また、ドリフトなどの成分を分離することができる。

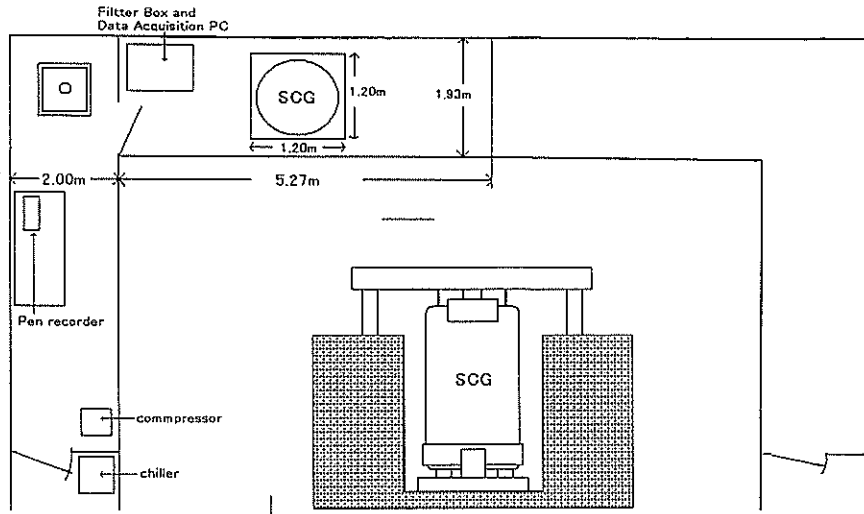


図2 超伝導重力計の配置

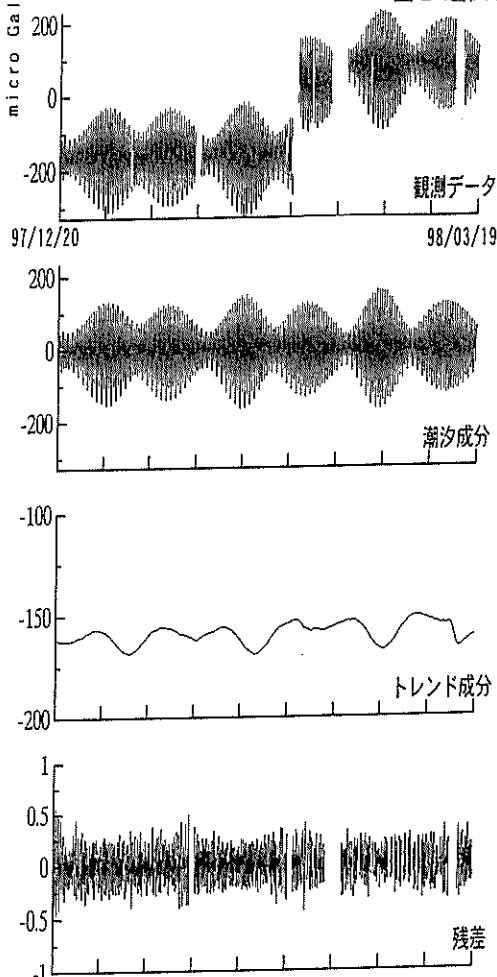


図3 バンドンにおける超伝導重力計観測結果

図3に1997年12月20日から1998年3月19日までの4ヶ月間のバンドンにおける観測データをBaytap-Gを用いて解析した結果を示す。図の上から、観測生データ、潮汐成分、トレンド成分及び残差を示す。

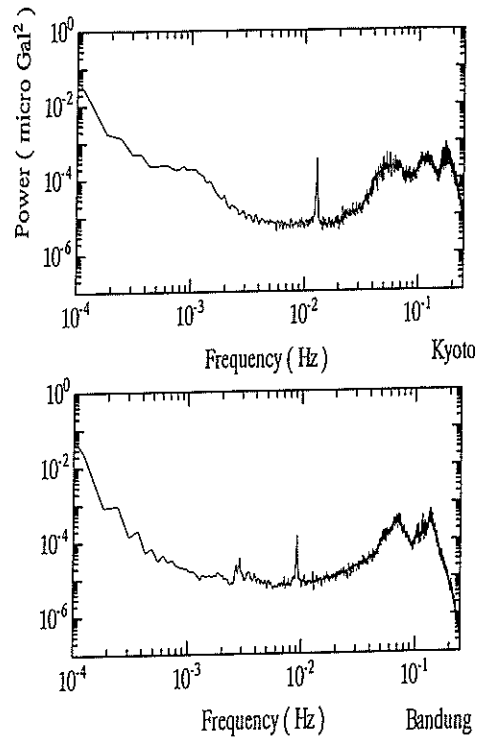


図4 地球の自由振動帯のノイズレベルの比較

バンドンにおける#008 と京都における#009 とのバックグラウンドノイズを比較するために、地震などのない比較的静かな日を両観測点で 10 日間ずつ選び、パワースペクトルを計算した。結果を図 4 に示す。

10mHz 付近にある鋭く大きなピークは超伝導球の固有振動によるものであり、全ての超伝導重力計で見られるものである。このピークはセンサー部のジオメトリによって少しずつ違った周波数となる。

次にバンドンと京都の潮汐帯におけるノイズレベルを比較するために、同じ#008 超伝導重力計で得られたそれぞれ4ヶ月間の観測データに基づき、パワースペクトルを比較した結果を図 5 に示す。図からわかるように、京都に比べてバンドンにおけるノイズレベルは、1桁近く小さい。

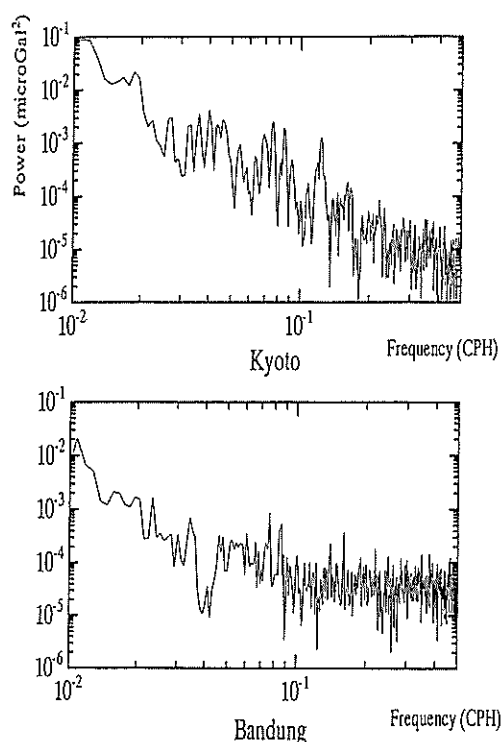


図 5 潮汐帯におけるノイズレベルの比較

## 5. 今後の課題と展望

本研究の順調な進捗により、インドネシア・ジャワ島における資源探査や地震・火山予知のための重力測定の大基盤が確立しつつあるばかりでなく、インドネシアは地球深部ダイナミクス研究のための精密重力データの供給国として、今後、測地学および地球物理学の分野で国際的に貢献することになる。

バンドン市における超伝導重力計を用いた重力の時間的変化の精密観測は、インドネシアにおける地

震や火山活動と関連する重力変化を見いだすための基礎データを提供できるだけでなく、赤道付近の唯一の超伝導重力計観測点として、地球深部のダイナミクスに関連する微小な重力シグナルを見いだすための世界的に貴重なデータとなりうる。

現在、世界中で稼働している超伝導重力計の数は 20 数基であり、その世界的な配置をみると、そのほとんどが北半球の中緯度地域(北緯 30~50 度)、すなわち、北アメリカ、西ヨーロッパおよび日本に集中している。1996 年現在で、南半球にある観測点としては、南極大陸の昭和基地 1 カ所のみであった。

流体核に起因する信号は、核の扁平率に強く依存していることから、このような超伝導重力計の配置は、地球深部の構造とそのダイナミクスを研究する上で、問題であることが、かねてより、指摘されていた。そこで、わが国の超伝導重力計研究グループは、超伝導重力計観測網の世界的な空白域を埋めるために、平成 8 年度に発足した文部省科学研究費補助金・創成的基礎研究費「海半球ネットワーク：地球内部を覗く新しい目(代表者：深尾良夫)」の支援を得て、1996 年度に超伝導重力計 (1 基) を新規に購入し、これを 1997 年 1 月にオーストラリアのキャンベラ郊外のマウントストロームロ観測所に設置した。一方、京都大学大学院理学研究科では、上記の創成的基礎研究費「海半球ネットワーク」に加えて、日産学術研究助成金「インドネシアの重力基準点における重力変化の精密観測(代表者：竹本修三)」などの支援を得て、京都大学が保有する 2 基の超伝導重力計のうちの 1 基 (8 号機) を、1997 年 12 月にインドネシアのバンドン市に移設した。これにより、超伝導重力計観測網の赤道付近の空白域を埋めることができた。

参考文献 (発表論文リストは下記の [1], [2])

- [1] 竹本修三・東敏博・向井厚志・福田洋一・田中貴光：超伝導重力計を用いた京都における重力の時間的変化の精密観測(1988~1997), 京都大学防災研究所年報 第 41 号 B-1, 77/85 (1998)
- [2] S. Takemoto, S. Dwipa, Y. Fukuda, T. Higashi, A. Andan, D. Kusuma, R. Sukhyar, W. S. Tjetjep, T. Tanaka, and L. S. Heliani, "Precise Gravity Observation in Bandung Using a Superconducting Gravimeter", *Proc. of Symp. on Japan-Indonesia IDNDDR Project*, 223/230 (1998)
- [3] J. M. Goodkind, "The Superconducting Gravimeters Principles of Operation, Current Performance and Future Prospects, *Proc. Workshop "Non Tidal Gravity Changes"*, Sept. 5-7, 1990, Luxembourg, 81/90 (1991)
- [4] Y. Tamura, T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro, "A Procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion", *Geophys. J. Int* vol.104, 507/516 (1991)