南極における超伝導重力計の設置とその除震及び監視技術の開発

池田 博[†], 土井浩一郎^{*1}, 福田 洋一^{*2}, 野口 隆志^{*3},
中嶋 俊哉^{*4}, 飯村 憲^{*4}, 渋谷 和雄^{*1}

Installation of a Superconducting Gravimeter in Antarctica and Development of Its Vibration-isolating Mechanism and Remote Monitoring System

Hiroshi IKEDA[†], Kouichirou DOI^{*1}, Youichi FUKUDA^{*2}, Takashi NOGUCHI^{*3},
Toshiya NAKASHIMA^{*4}, Ken IIMURA^{*4} and Kazuo SHIBUYA^{*1}

Synopsis: From February 2003 to January 2004, a new superconducting gravimeter with a cryocooler was installed to replace the former device at the Syowa station in Antarctica. The new gravimeter has a high sensitivity of one nano-gal and is being used to survey the earth's core in the Global Geodynamics Project. A new type of diaphragm was confirmed to well isolate the vibration from the refrigerator cold-head and effectively prevent solid air contamination. A remote monitoring system from Japan is also going to be installed.

Keywords: superconducting gravimeter, GM refrigerator, diaphragm, monitoring system, Antarctica

1. はじめに

重力測定の方法には大別して重力の絶対値を測定する絶対重力測定と、重力の時間的な変化を測定する相対重力測定の2つがある。絶対重力計としてはFG5(米国Micro-G社製)が代表的で最近になって2 μ Galの測定感度が得られるようになってきた¹⁾。一方、相対重力計としてはスプリング式のもので可搬可能なラコスト重力計やシントレックス重力計がある²⁾。しかしスプリング式はスプリングの劣化という欠点を持っており感度も数10 μ Galが限界であ

る。そこで1980年代後半に米国GWR社より超伝導重力計が開発された³⁾。超伝導重力計はマイスナー効果を利用して絶対重力計よりも3桁も感度の高い1nGalの測定が可能である。しかし、欠点として超伝導重力計は相対重力計であるため絶対値の校正を行う必要がある。

南極昭和基地では1993年3月から世界に先駆けて超伝導重力計による重力変化の連続観測を開始し2004年5月現在なお南極大陸で唯一超伝導重力計の観測を継続している。筆者の池田が参加した第44次南極地域観測隊地学部門では2003年2月より2代目の新型超伝導重力計の設置を開始した。

本稿では新規に4K-GM冷凍機を付属した新超伝導重力計装置の立上げ⁴⁾と4K-GM冷凍機と重力計間の除震対策及び空気などの不純物混入対策として新ダイアフラムの開発と南極昭和基地に設置してある超伝導重力計のデータを日本から直接監視するシステムの開発について報告する。

2. 超伝導重力計の概要

本装置は米国GWR社の製品である³⁾。超伝導重力計の動作原理は、球形の超伝導体(中空のCu球にNbを蒸着した物)をマイスナー効果で浮上させ、それが受ける重力変化に依存した位置変化を補正する制御電流を検出する。それを換算して設置場所の重力相対変化とするもので従来のパネ式の重力計に比べ3桁もの感度向上と絶対重力計では実現できない極めて長期間の安定した連続観測が可能である。昭和基地での測定感度は0.6~1.0nGalを実現し、これまでに地球自由振動(周期数分)から極運動(周期1年以

Received June 15, 2004

筑波大学研究基盤総合センター低温部門
〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1
Cryogenic Division Research Facility Center University of
Tsukuba, 1-1-1 Tenoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

^{*1} 国立極地研究所

〒173-8515 東京都板橋区加賀1丁目9-10
National Institute of Polar Research, 1-9-10 Kaga, Itabashi-ku,
Tokyo 173-8515, Japan

^{*2} 京都大学大学院理学研究科

〒606-8502 京都府京都市左京区追分町北白川
Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto
University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto
606-8502, Japan

^{*3} 池上技術

〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台8-22-3-306
Ikegami Technology, 8-22-3-306 Konakadai, Inage-ku, Chiba
263-0043 Japan

^{*4} 日本酸素株式会社

〒212-8509 神奈川県川崎市幸区塚越4丁目320-1
Nippon Sanso Corporation, 4-301-1 Tsukakoshi, Saiwai-ku,
Kawasaki, Kanagawa 212-8509 Japan

[†] E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

Fig. 1 Cross-sectional view of a superconducting gravimeter sensor model.

Fig. 2 Gravity-sensing unit inside the Dewar vessel.

上) にいたる広い帯域における様々な現象に起因する重力変化が観測されており、昭和基地の超伝導重力計の観測データによって常時地球自由振動などの新現象の発見に寄与している⁵⁾。

今後、新しく設置した新超伝導重力計によって地球内部に起因する重力変化や地殻変動に伴う重力の変化をより高い感度で検出することが期待されている。

Table 1 Specifications of the refrigerator and Dewar vessel.

GM refrigerator (Leybold 4.2 K Lab)	Compressor (air-cooling): CTI M8200, 2.1 kW, 60 Hz
	1 st stage: 4 W at 60 K
	2 nd stage: 0.25 W at 4.2 K
Helium Dewar vessel	Volume capacity: 30 L

3. 構造および性能諸元

新超伝導重力計の重力変化感知部のカットモデルとセンサーユニット概略図を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示すように中空ニオブ球の浮上体はその位置を決める4つの静電容量プレートに覆われ真空容器内に置かれている。真空容器内には、浮上位置制御のための永久電流型コイルが2個あり下部コイルはニオブ球の浮上させるのに用い、上部コイルは超伝導重力計として運用するために極めて重要な役割を果たす。つまり、上下コイルの作る磁場によって磁場勾配を極力弱め重力計としての感度を上げるようになっている。その他に位置変化制御用コイルが1個置かれている。外部磁場の影響を切るための超伝導シールドが浮上機構全体を覆うように配置され、これらを内蔵する真空容器はさらに磁気シールドのために μ 金属で覆われている。Fig. 2 に示すセンサーユニットはアルミ製液体ヘリウムデューワー(内容量30リットル)に固定されていて浸漬冷却される。またデューワーネック部には1代目の超伝導重力計用では液体ヘリウムの蒸発を抑制するための10K-GM冷凍機が挿入されていたが、10K冷凍機では液体ヘリウムの蒸発を抑えることができるがヘリウム液面の低下は避けられない。そこで新超伝導重力計では10K冷凍機とは異なり、4K-GM冷凍機が挿入されるようになっており、冷凍機単体によって液体ヘリウムの液化が可能であり、液面制御もできるようになっている。そのためヘリウム容器も小型化され今まで200リットル容器を使用していたが今回は30リットル容器となった。最大の利点は地学担当越冬隊員の大きな負担となっていた半年に1回行っていたヘリウム液化運転作業が不要になり液体ヘリウムのトランスファー作業も無くなり担当隊員の負担が大幅に軽減された。

南極昭和基地という設置場所の特異性から、本機は初期予冷に、液体窒素、液体ヘリウムを使用せずに常温から4K-GM冷凍機のみで冷却できるように設計されているが今回の初期冷却では液体窒素による予冷を行った。さらに長期連続計測が可能なように冷凍機の冷凍出力はコールドヘッドの回転数可変機構により制御できるようになっている。冷凍機はLeybold社の4.2K-1/4W GM型を用いており冷凍機とヘリウム容器の仕様をTable 1に示す。圧縮機はこれまで水冷式の圧縮機が使用されていたが水のトラブルが多かったので空冷式を使用することとした。

4. 装置の設置と初期冷却

新超伝導重力計は日本から1ヶ月半の荒波（特に南緯40度から60度の低気圧の墓場と呼ばれる暴風圏）を航海して砕氷艦「しらせ」より2002年12月27日に昭和基地の重力計室に搬入された。開梱後、真空引きを開始した。日本から昭和基地まで1万4000キロに及ぶ輸送で心配された断熱真空槽の真空劣化は72 Paの圧力上昇で収まり輸送による断熱容器のダメージは室温状態では無かった。輸送による断熱真空槽のダメージを防ぐため超伝導重力計に2重のショックアブソーバを組み込み、「しらせ」船倉では厳重に捕縛し、昭和基地到着後は慎重に輸送したことが有効であった。その後、ターボポンプによって1ヶ月間掛けて断熱真空槽の真空引きを行った。その間に梱包された圧縮機、UPS装置や測定器を開梱して組み立て作業を行った。最終的に断熱真空槽の真空度は 2.2×10^{-3} Paで真空バルブを閉とした。

越冬交代後の2月1日より初期冷却作業を開始した。2月5日にヘリウム容器内を予冷していた液体窒素を追出し後、昭和基地の設置されていたヘリウム液化機（液化能力1リットル/毎時）によって液体ヘリウムを製造し液体ヘリウムによる予冷を開始した。予冷では超伝導センサーを急激に冷やさないために3時間以上掛けて液体ヘリウムのトランスファーを行った。30リットル容器に液体ヘリウムを24%まで溜めることができた。翌日から4K-GM冷凍機を液化運転モードにして連続運転を開始した。液体窒素の予冷、追出し、液体ヘリウムによる初期冷却過程の様子は我々が開発し新たに設置した重力計監視システムでモニターした。それにより得られた初期冷却曲線をFig. 3に示す。図中、赤は容器ネック上部（冷凍機1段近傍）で青がネック下部（冷凍機2段近傍）で緑が容器底部の温度を示している。最初は容器内に液体窒素があるため緑の容器底部が77 Kを示している。その後、液体窒素が追出されて容器底部の温度は上昇してその後3時間ほどかけて液体ヘリウム温度へ緩やかな冷却曲線を示している。2月6日に4K-GM冷凍機の運転を開始して連続運転状態で3月17日までに液体ヘリウム液面が88%となった。その間、液面の位置により容器内で若干の熱振動も発生したが液面が70%を超えたところから熱振動の発生は急激に弱まった。このことから連続運転時のヘリウム液面は70%以上で運転するように冷凍機回転数の調整を行った。十分な液体ヘリウムが得られたので3月18日にNb球の上下にある超伝導コイルにパルス電流を流して調整することにより初期レビテーションを試み新超伝導重力計のNb球が初めて浮上に成功した。その後、重力測定感度を決めているFig. 2で示したNb球の位置調整を下部と上部の超伝導コイルに流す微小電流調整によって位置調整を慎重に行い測定感度の向上調整を重ね、また正しい重力測定にはNb球が鉛直線方向に作動し

Fig. 3 Initial cool-down curve.

なければならないので傾斜補正のために左右のマイクロメーターの調整を行った。最終的に4月18日より新超伝導重力測定データの収録を開始した。

5. 新超伝導重力計の静特性

5月14日より4K-GM冷凍機停止状態での新超伝導重力計単体での性能試験を行った結果、従来の超伝導重力計よりもNb球の位置調整がフィードバック回路により微小電流の制御が精密にできたため観測された潮汐データの周波数解析結果より感度が1桁以上向上していることが確認できた。

さらにFig. 4に示すように越冬中に生じる可能性のあるトラブル対策として予備4K-GM冷凍機の性能確認試験を行った。図からも分かるように冷凍機停止状態ではネック上部の温度は210 K程度で安定になりネック下部の温度は160 K程度で安定した。一方、運転状態ではネック上部の温度が55 K程度で、ネック下部は液体ヘリウム温度になった。4K-GM冷凍機の性能としては、連続運転による液体ヘリウムの製造量はヘリウム容器容量に換算して1台で3%/日、2台で6%/日の性能であった。

新超伝導重力計と旧超伝導重力計（Fig. 5）との並行観測を5月から11月まで6ヶ月間行い相互のデータを比較した。図で右側が新超伝導重力計で左側の青くて大きいヘリウム容器が旧超伝導重力計である。真ん中の銀色のクライオスタットがヘリウム液化機である。新旧超伝導重力計の青いヘリウム容器の大きさの違い（200リットルと30リットル）が判断できると思う。並行観測は11月6日で終了し新超伝導重力計単体での観測に移行した。12月28日から第45次隊の福田・土井・平岡らによって夏作業で持ち込まれた絶対重力計のFG5¹⁾によって相対重力計である新超伝導重力計の絶対値校正を1ヶ月間に亘って行った。

Fig. 4 Cooling test curve of the backup refrigerator.

Fig. 5 New superconducting gravimeter (right side) and old gravimeter (left side).

6. 冷凍機と容器間の除震対策と不純物混入対策

新超伝導重力計の構成図を Fig. 6 に示す。ここでは計測系の機器は省略されているが図で示すように超伝導重力計センサーは液体ヘリウム容器内に収められている。右側の圧縮機は 4K-GM 冷凍機用の空冷圧縮機である。フレキシブルホースによって冷凍機と接合されており冷凍機のコールドヘッドはヘリウム容器上部フランジよりヘリウム容器内に挿入できるようになっている。それにより 4K-GM 冷凍機が作動し容器内を常に液体ヘリウム温度に維持することができるようになっている。

ここで重要な問題はヘリウムガスが圧縮機から吐出され冷凍機でピストンを作動させるため振動が発生することである。冷凍機の振動は超伝導重力センサーへのノイズ源となりセンサーの感度に悪影響を与えるため極力避けなければならない。そこで冷凍機と容器の間には、図で Isolating diaphragm と書いたところから矢印の拡大図で示すような

Fig. 6 Component of a new superconducting gravimeter.

Fig. 7 Gravity balance signals affected by the vibrations of the cold-head.

コールドヘッドとヘリウム容器間に、従来からゴム製隔膜（ダイアフラム）が緩衝材として使用されている。このダイアフラムの最大の目的は冷凍機から発生する振動をヘリウム容器のセンサーに極力伝えないようにする除震の役目を果たたことである。そして、もうひとつの重要な役目は不純物混入の防止である。しかし、従来のゴム製ダイアフラムでは除震についてはある程度効果はあるが不純物混入防止策としては空気やヘリウムガスが透過する問題は解決されていない。つまり、ゴムの性質上、室温ではゴム本体から空気やヘリウムガスの透過が起こり冷凍機を長期間運転していると冷凍機のネック部に不純物混入により固体空気の成長が起きてしまう。冷凍機のコールドヘッドと容器壁面の間に成長した固体空気を通じて冷凍機の振動がセンサ

Fig. 8 New type of Al-coated polyurethane diaphragm to prevent vibrations and solid-air contamination.

一に伝わるため、これがノイズとなり観測精度の低下を招いてしまう。今回も当初は従来のゴム製ダイアフラムを使用していたため連続運転を開始してから2ヶ月ほど経過した7月13日ごろから **Fig. 7** に示すように赤色で示した Gravity Balance 信号に冷凍機の振動が伝わって生じるノイズ信号が増大する現象が顕著に観測されるようになった。そのノイズ信号は通常の5倍以上の電圧値を示した。そこで確認のために 4K-GM 冷凍機をヘリウム容器から引き抜いてみるとヘリウム容器壁面と冷凍機コールドヘッドの円周上に固体空気が成長しているのが確認できた。そこで我々は超伝導重力計の連続運転を左右するこれらの問題の解決策として今までに無い新しいダイアフラムとして **Fig. 8** に示すような透過や強度の面で問題のあった従来のゴム製ダイアフラムに代えて両面にアルミ蒸着を施したポリウレタン製のダイアフラム（ゴムのヘリウム透過率に比べて1/1000の割合に低下させ効果がある⁶⁾）を導入して試験を試みた。**Fig. 8** で銀色に光っているのが両面蒸着されたポリウレタン製ダイアフラムで内側がヘリウム容器側に固定され、外側が冷凍機を乗せるフランジに固定される。作業はゴム製ダイアフラムと同じサイズにアルミ蒸着ポリウレタンをカット後、厚みが70 μ mと薄いためネジ部に挟みしるを取付けて冷凍機架台とヘリウム容器の間に組み込み六角ボルトで両側に取付ける。取付け後、リークテストを行いヘリウム容器からのヘリウムガスの漏れが無いことを確認した。その結果、連続運転開始後2ヶ月後に冷凍機をヘリウム容器から引き上げてみたが固体空気は成長しておらず、また Gravity Balance 信号に顕著なノイズ信号も観測されていない。現在、我々が導入した新しいダイアフラムを設置後、連続運転5ヶ月（2004年6月時点）が経過しているが順調に観測を継続し稼動している。そのため安定した観測データが得られている。

Fig. 9 Block diagram of the EzMPICS controller system and remote computer operation from Japan.

この対策技術は今後、振動及び不純物混入を極力抑えたい他の冷凍機冷却装置にも広く応用可能である。

7. 日本からの重力計監視システムの構築

南極昭和基地という設置場所の特異性から、第44次観測隊までは国内と南極昭和基地の通信はインマルサット衛星による通信で64 kbpsの速度のため3時間に1度の通信のみ可能であった。また、電子メールのサービスのみでインターネットへの接続はできなかった。しかし第45次観測隊によりインテルサット衛星に送受信できるアンテナが設置されたことにより通信速度は飛躍的に改善され1 Mbpsの通信速度が可能となり常時接続も可能となった。そこで超伝導重力計の運転状態や観測データを日本から直接監視できるようなネットワークコンピュータを第44次越冬隊で昭和基地に持ち込み、装置立上げ時に組み込んだ。これにより **Fig. 9** に示すように我々が開発した EzMPICS⁷⁾ を介して日本から南極昭和基地の重力計室で稼動している新超伝導重力計に直接アクセスできるようになった。現在、VPN (Virtual Private Network) によるセキュリティの申請も含めて準備を進めているが、いずれ **Fig. 4** や **Fig. 7** に示すような超伝導重力計の冷却状態や Gravity Balance 信号などの運転状況・観測データを日本に居ながらにして監視できる予定である。

8. まとめ

4K-GM 冷凍機を取付けた新超伝導重力計を南極昭和基地重力計室で立上げた。今まで担当隊員にとって半年に1度必ず必要だったヘリウム液化運転を行う必要が無くなり、負担が大幅に軽減された。さらに新超伝導重力計は