移動体搭載型重力計の開発 ハイブリッド式海中重力探査システム

(平成 21 年度)

成果報告書

平成 22 年 5 月

文部科学省 研究開発局 国立大学法人東京大学 地震研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託 事業による委託業務として、文部科学省が実施した 平成21年度「移動体搭載型重力計の開発 - ハイブリ ット式海中重力探査システム - 」の成果を取りまと めたものです。

まえがき

文部科学省による「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」において、 研究課題(1)海底下構造・物性の探査手法の高度化が進められている。高精度に効率的に 海底下構造・物性を明らかにする上で、移動しながらの重力探査は海洋資源探査において 重要な手法である。本研究プロジェクトは、文部科学省よりの受託研究として進めている 移動しながらの重力探査の高度化のプロジェクトであり、移動体搭載型重力計を開発する ことにより、海洋資源の利用促進への貢献を図るものである。

. プロジェクトの概要

文部科学省は、移動しながらの重力探査の高度化の目標として、判別可能とする重力異 常を現状の1 mgal(1 mgal = 10⁻⁵ m/s²)から 0.5 mgal 程度とし、鉱床の厚さを 10 m、 周辺の岩石との密度差を1 g/cm³とした場合想定される重力異常を検出できるようにする ことを目標として設定している。本研究プロジェクトは、移動体搭載型重力計としてハイ ブリッド式海中重力探査システムという新たな探査システムを開発することによって、こ の設定目標を達成することを目指す。

.実施体制および研究者リスト

所属機関	役職	Ħ	名	担当
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	金沢	敏彦	課題代表
同上	准教授	篠原	雅尚	実施担当
同上	准教授	新谷	昌人	実施担当
同上	准教授	塩原	肇	実施担当
同上	助教	望月	公廣	実施担当
同上	助教	山田	知朗	実施担当
同上	技術職員	橋本	信一	実施担当
同上	技術職員	八木	健夫	実施担当
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	藤本	博巳	業務協力
国立大学法人東京大学大学院新領域創成	教授	飯笹	幸吉	業務協力
科学研究科				
産業技術総合研究所地質情報研究部門	招聘研究員	石原	丈実	業務協力
応用地質株式会社技術本部技師長室	副技師長	野崎	京三	業務協力

研究代表者 国立大学法人東京大学地震研究所教授 金沢敏彦

.研究成果

(1) 委託業務の目的

資源量の推定は、水深 3,000 m 以浅に存在する 10km オーダーのカルデラ内等の探査対 象の中から、500 m × 500 m × 10 m の規模の鉱床を特定する必要があるとされている。 このため、判別可能とする重力異常を現状の 1 mgal から 0.5 mgal 程度とし、鉱床の厚さ を 10 m、周辺の岩石との密度差 1 g/cm³ とした場合想定される重力異常を検出することの できる移動体搭載型重力計の開発が課題である。重力加速度と重力鉛直偏差を同時に計測 することは、重力加速度のみの計測に較べて、重力異常の判別が容易になると考えられる。 このため、本業務においては、移動体搭載型重力計として、重力鉛直偏差計と重力計を一 体的に運用するハイブリッド式海中重力探査システムを開発する。さらに開発したハイブ リッド式海中重力探査システムを用いて試験観測を行い、0.5 mgal 程度の重力異常が判別 可能であるか否かの検証を行う。なお、重力鉛直偏差の計測には、無定位振子と光センサ ーを組み合わせた高精度加速度検出ユニットを新規開発して使用する。

(2) 平成 21 年度における目標及び業務の方法

既存の移動体搭載型重力計の高度化・評価

東北大学で所有している既存の移動体搭載型重力計を改造して、プロトタイプ海中重力 計を開発する。プロトタイプへの高度化および評価試験等を通じて、次年度の海中重力計 のシステム設計を行う。重力計のセンサーは、シントレックス社製重力計 CG-3の測定レン ジを標準の7 gal の約3倍に拡大した特注品であり、その精度は0.03 mgal 程度である。 本研究課題に必要とされる計測精度を持っているため重力センサーはそのまま使用する。 最新のより高精度な姿勢計測装置を新規購入し組み込むことによって、重力センサーの架 台である姿勢制御装置を高精度化する。動揺台を使用して試験測定を行い、高精度化の評 価を行う。これらの結果を元に次年度に新規開発する移動体搭載型重力計のシステム設計 を行うほか、データ処理方法の検討、海中試験の仕様策定およびシントレックス社 CG5 の 特注製造可能性の検討を行う。

新型加速度検出ユニットの試作

重力加速度を高感度に検知するために、実効周期無限大の無定位振子とその変位を高精 度に測定する光センサーを組み合わせた新型加速度検出ユニットを試作する。初年度は、 当該構成のユニットを2台製作し、実験室や静穏な観測所において性能評価を実施する。 また、2台の新型加速度検出ユニットを鉛直に 60 cm 離して固定し、2台のユニットの出力 差を取ることによって重力勾配の出力を得る。外乱加速度に対する応答特性や同相変動の 除去率、重力勾配の検出精度などを市販の加速度センサーとの比較観測などにより見積も り、重力鉛直偏差計としての実用可能性を評価する。 (3) 平成 21 年度の成果

(a)研究開発の概要

重力とその鉛直勾配を同時測定することにより海底熱水鉱床の分布および深度を精密 に推定することのできる、ハイブリット式海中重力探査システムの開発に向けて、その構 成要素である海中重力計と鉛直重力偏差計についてのフィージビリティスタディを実施し た。

・海中重力計と鉛直重力偏差計の検出感度の目標設定

実際の熱水鉱床探査に必要と予想される検出感度を開発の目標値として設定した。

・既存の移動体搭載型重力計の高度化・評価

AUV 搭載の重力計として過去に開発された装置を改造・高度化することによって本開発 のプロトタイプ海中重力計を開発した。動揺試験装置の上で揺らせて、その性能評価を行 った。 0.1 mgalの重力測定に必要な性能が得られる見込みが得られた。

・新型加速度検出ユニットの試作

サーボ式加速度計の構成で、低周波の検出性能を高めるために、長周期振り子と変位センサー・制御回路を組み合わせた加速度検出ユニットを製作した。これを2台垂直方向に 50 cm 隔てて配置した結果、もっとも感度の高い周波数において10E程度の検出性能が確認され、鉛直重力偏差計として必要な性能が得られる見こみが得られた。

E(エトベス)は重力偏差の単位であり、1E = 0.1 mgal/km (= 0.1 μgal/m)。

(b)研究開発の実施内容

1) 海中重力計と鉛直重力偏差計の検出感度の目標設定

文部科学省が進めている海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラムにおいて、重力探査については、鉱床の存在域から有望鉱床域を特定する段階で重要であると されており、以下のように課題が設定されている。

研究課題:海底下構造・物性の探査手法の高度化

探査対象:モデル鉱床の規模を 500 m 四方、厚さ 10 m、 水深 3000 m 以浅とする。

探査手法:移動しながらの重力探査(AUV・ROV・曳航体等に搭載)

探査精度等:判別可能とする重力異常を現状の 0.5 mgal 程度とし、鉱床の厚さを 10 m、 周辺の岩石との密度差を1 g/cm³ とした場合想定される重力異常を検出できること。

この課題に対応するために、実際にどの程度の探査精度が必要かをモデル計算による検 討を行った。実際の鉱床の端部は薄くなると考えられるので、半径 200 mの菱形の断面を 持ち、中心で 20 mの厚さを持つ密度差 1 g/cm³の円盤状の鉱床を想定した。また、その 上端が海底直下にある場合と、深度 50 mにある場合について、モデル計算を行った。AUV/ROV を利用して移動しながら重力探査を実施する時の探査高度については、海底から 50 m 上を 航行するという現実的な探査高度で測定した場合と、海底直上を航行した場合について、 測定される重力異常および上下方向の重力偏差異常をそれぞれ計算した(図1)。



図 1 熱水鉱床から想定される重力異常と鉛直偏差異常のモデル計算 下図:鉱床モデル

菱形の断面を持ち、半径が 200 m で中心で上下に各々10 m、計 20 m の厚さを持つ円盤状の モデル。深さの異なる鉱床モデル MS1 と MS2 について計算を行った。MS1 モデルは海底面 に近い深さ 10 m に中心があり、MS2 モデルは海底下 50 m に中心を持つ。

中図:想定される重力異常

海底直上で測定したもの(青線)と海底から 50 m 上で測定したもの(緑線)のプロファイ ルを示す。重力異常の縦軸の単位は mgal。

上図:想定される鉛直偏差異常

海底直上で測定したもの(青線)と海底から 50 m 上で測定したもの(緑線)のプロファイ ルを示す。鉛直偏差異常の縦軸の単位は E(エトベス)。E(エトベス)は重力偏差の単位 であり、1 E = 0.1 mgal/km (= 0.1 µgal/m)。横軸は距離(km)。

このモデル計算から、現実的な探査高度 50 m では、測定される重力異常および重力偏 差異常は、鉱床の上端が深度 50 m の場合でそれぞれ 0.25 mgal および 25 E 程度であり、 鉱床が海底直下の場合はその 2 倍弱と予想される。このモデル計算から、測定される重力 鉛直偏差のプロファイルは、鉱床の深さによって顕著に異なるプロファイルあるいは波形 となっていることが分かる。重力とその鉛直勾配を同時に測定することによって、重力異 常および偏差の振幅の情報に加えて、特徴的なプロファイル情報を求めることができれば、 海底熱水鉱床の分布および深度をより精密に推定することができることが期待される。

重力探査の達成目標としては、重力 0.1 mgal 程度、重力鉛直偏差 10 E 程度に設定する ことが妥当であると考えられる。このため、フィージビリティスタディである本研究にお いては、開発する海中重力計と鉛直重力偏差計の検出感度の目標として、重力 0.1 mgal、 重力偏差 10 E に設定した。

2) 既存の移動体搭載型重力計の高度化・評価

a) 海域における重力測定の現状

重力異常のマッピングは地下構造の解析に重要であり、日本国内の陸上においては、ほ ぼ全域にわたって、精密な重力異常分布が求められている。その基礎は、野外測定用の重 力計を用いた重力測定であり、その精度は0.02-0.03 mgal 程度である。海域における重力 測定は、普通は船上重力計を用いて行われている。その精度は、船の動揺や重力計のドリ フトなどの他に、船の対地速度に伴う地球の自転の遠心力の変化(この補正をエトベス補 正と呼ぶ)という問題もあり、最近の GPS 測位に基づく測定でも陸上に比べると精度が2 桁程度低い。したがって上記の資源探査には精度不足である。

そこで海域における精密な重力測定は海底重力計を用いて行われている。その重力セン サーは陸上の野外用重力計を改良したものであり、実質的な計測分解能は0.01 mgal 程度 であり、測定精度は、岸壁の重力点を基準とした場合、0.05 mgal 程度である(藤本ほか, 1998, 2009)。Zumberge et al. (2008)は、石油・ガス孔井のモニタリングのために海底に 重力点を設けて、重力および圧力を繰り返し測定した結果、重力測定で数µgal、圧力測定 で水深換算で数 mm の精度が出たと報告している。しかし海底の重力測定は、海底に重力計 を設置して測定するので、広域の重力分布の測定には不向きである。

広域の重力分布の観測において、海域の測定は陸上に比べて2桁精度が劣るということ は、資源探査に限らず、地下構造調査において基本的に重要な問題である。そこでFujimoto et al., 2000 は 10 年ほど前に、実海域用 AUV 開発計画の一環として、海中航行型の重力 測定システムの開発を試みた。海中移動体の動揺を補正する機構を装備した重力計開発の 試みは世界初であった。海底近くで測定することにより、地下構造による重力異常を高分 解能で計測できるという利点がある。また海中を航行する AUV は揺れが少ないという期待 もあった。2つの耐圧容器に収納したシステムを長さ 8 m の大型 AUV に搭載して重力測定 を試みたが、試験観測の機会が少なく、開発は中途で終えることになった(写真 1)。この ため、現状では、海中航行型の重力測定システムは未完成といえる状況にある。しかしな がらこの間に測定システムの重要な構成要素であるジャイロやモーターなどの装置の品質 が向上していることから、10 年ほど前の計測システムの開発を基礎として新たな開発をす すめれば、資源探査に使うことのできる精度を持つ海中航行型の重力測定システムを新た に開発できる状況にある。



写真 1 AUV に搭載された既存の移動体搭載型重力計 本研究でプロトタイプ開発の素材として使用する。

b) 既存の移動体搭載型重力計の概要とプロトタイプ開発

本研究におけるプロトタイプ開発の素材とする既存の移動体搭載型重力計では、陸上重 力計として標準的な Scintrex 社製 CG-3 を特注によって改造した専用の重力センサーを使 用している。移動体の航行中には、移動体が発生する振動による加速度とローリングやピ ッチングなどの動揺による加速度が重力センサーにかかる。このような環境下で重力を計 測するためには、センサーの計測範囲が広いほど確実な計測が期待できる。このため、 AUV/ROV の航行中の動揺加速度は 10 gal 程度であると想定した改造重力センサーCG-3M が 開発され使用されている(写真 2)。改造型の計測範囲は、標準仕様の約 3 倍に拡大されて、 27 gal の仕様となっている。計測分解能については、計測範囲の拡大とトレードオフされ た結果、標準仕様の 1 µgal よりは低い 5µgal である。測定値は 64 Hz で出力される。約 10 年前に移動体搭載用として開発された重力センサーではあるが、CG-3M の計測範囲と測 定分解能については現時点でも良と評価できる性能を有している。

本研究において、陸上重力測定試験により現状の性能を確認した結果、CG-3M はオリジ ナルな状態を保持していることが確認できた。このため、本研究のプロトタイプ開発では、 CG-3M に手をいれることなくオリジナルな状態のままで重力センサーとして使用すること にした。

重力は鉛直方向の加速度であるから、AUV/ROV が傾いても、重力センサーはほぼ鉛直な 姿勢に保持される必要がある。そのため、既存の移動体搭載型重力計では、重力センサー に精密な鉛直ジャイロスコープ(姿勢計測装置)を取り付けて、それらを支える二軸ジン バルをモーターで駆動し、重力センサーをほぼ鉛直に保ち続ける鉛直保持装置が使用され ている(写真3)。その駆動範囲は、およそ+/-10度である。高い精度で鉛直保持をするた めには、2軸のジンバルの回転方向および上下方向について、フリーな状態で重量バラン スがとれている必要があり、重力センサーおよび鉛直ジャイロスコープはそのように調整 されてジンバルに組み付けられている。鉛直ジャイロスコープには、傾斜角の最小分解能 が約 19.8 秒角(360 度/2¹⁶-1)、姿勢データの出力レートが 50 Hz である日本航空電子株式 会社製造の FOG 姿勢計測装置 JCS7401A が用いられている。

この鉛直保持装置の仕組みであるアクティヴ制御型二軸姿勢制御装置(ジンバル)につ いては現時点においても踏襲すべき仕組みであると判断したが、鉛直保持装置に使用され ている鉛直ジャイロ、ジンバル制御用モーターについては、開発当時と異なり、現在では、 より高精度品が使用可能となっている。このため、本研究においては、鉛直ジャイロ、制 御用モーターを交換して高精度化するとともに、ジンバル機構のさらなる高剛性化もすす め、目標とする計測分解能 0.1 mgal を可能とするプロトタイプを開発することとした。



写真2 改造型重力センサーCG-3M 外側ケースをはずした時の内部。重力 センサーおよび電子回路基盤は上下 のダンパーに支持されている。振り子 部分は恒温槽(恒温60)に入ってお り、1/1000の精度で制御される。



写真3 既存の移動体搭載型重力計の計測部 重力センサーCG-3M(上部)、FOG 姿勢計測装 置(下部)および鉛直保持装置(ジンバル)。 耐圧容器から取り出したため、計測部は4本 足の支持枠に固定されている。

c) 既存の移動体搭載型重力計の現状性能の確認試験

プロトタイプ開発の素材である既存の移動体搭載型重力計を改造して高度化する前に、 現状性能の確認試験を実施した(写真4)。



写真 4 動揺試験台上に取り付けられた既存の移動体搭載型重力計計測部 動揺試験台に乗せた既存の移動体搭載型重力計(計測部)。重力センサーCG-3M は青色部分 である。その下に FOG 姿勢計測装置 JCS7401A が取り付けられている。

重力センサーCG-3M については陸上重力測定試験を行い、正常動作することを確認した。 次に鉛直保持装置の性能を評価した。試験方法としては、動揺試験台に海中重力計を取り 付けて、FOG 姿勢計測装置 JCS7401A の姿勢角出力を監視しながら、周期 3 秒,4 秒,6 秒, 8 秒,10 秒で x 軸周りと y 軸周りにピッチングとローリングに対応する動揺を与えて鉛直 保持装置の鉛直保持性能の確認を行った。各動揺周期に対して傾斜角振幅は±1 度,±2 度,±3 度の 3 通りに変化させ、動揺成分についても、2 軸ジンバルの x 軸周り単独、y 軸 周り単独、x 軸と y 軸周り同時、という 3 通りで実施した。

この改造前試験の結果、既存の移動体搭載型重力計鉛直保持装置のジンバル機構は、メ カニカルな剛性が全体的に不足しているため、数値制御のみを高精度化しても鉛直姿勢制 御の精度は一定以上には上げられないことが、明らかとなった。ジンバル機構の剛性を抜 本的に改善することは来年度以降の新規開発時に行うこととして、本年度のフィージビリ ティスタディにおいては、モーター取付け軸の高剛性化のみを行って、その改善効果を確 認することとした。

d) 既存の移動体搭載型重力計の改造によるプロトタイプの開発

改造前試験による評価結果を考慮して、本年度の高度化の主眼である姿勢制御装置の改造については、次の点についての改造を実施した。1. モーター取付け軸の高剛性化とジンバル制御用モーターの交換による機械的要素の高度化、2. 高精度鉛直ジャイロによる姿勢計測の高度化、3. 二重防振化による外部振動の低減を実施した。

1. 既存の移動体搭載型重力計の機械的要素の高度化

a. 回転軸の高剛性化による高度化

従来のジンバル制御用モーター取付け軸は細く、モーター回転軸との接合も、1本の止 めネジで行なっていた。このため、ネジの緩みが発生しやすく、強いトルク力が加わった 場合には、モーター回転軸と取付け軸の間でスリップが生じている可能性があった。この ため、モーター取付け軸を、剛性が高くかつ勘合部の緩みが発生しにくい形状に改造した。 新しい取付け軸(写真 5)は、オスとメス 2 つの部位で構成され、互いが 6 角形の軸とフラ ンジによってしっかりと結合される。止めネジも 2 本使用している。モーターとの結合は、 モーター回転軸ではなくモーターの回転フランジに直接 6 本のネジを用いて結合するよう に変更したことによって、しっかりと固定される構造となった(写真 6)。また、重力セン サーの MC ナイロン製ケースのモーター取付け軸用ネジ穴も、ヘリサートを挿入して、ねじ 山が潰れないように補強を行なった。



写真5 新しいモーター取付け軸



写真6 新ジンバル制御用モーター 取付台座と軸受けが付いている状態

b. ジンバル制御用モーターの交換による高度化

改造前のジンバル制御用モーターは、減速ギア付ステッピングモーター(オリエンタル モーター製 CSK543AP-TG30)を使用しており、カタログ仕様で 15 分角のバックラッシュが ある。このバックラッシュ量は改造前の評価試験でも確認しているが、このバックラッシ ュの存在がジンバル制御の高精度化を難しくしている原因の一つである。本研究では、極 カバックラッシュの少ない減速ギア付ステッピングモーターを再選定して,ジンバル制御 の高精度化を図った。

インターネット上の工業部品選定サイトに登録されているステッピングモーター製造・販売会社(20社)の製品について調査を行なった。取り付け部の部分的な改造だけで現在のジンバル機構にメカニカルに取付けが可能であることという制約の中では、ハーモニックギア付ステッピングモーターユニット(オリエンタルモーター製 CRK543AP-H50)が、交換用モーターとしては唯一の選択であったため、このモーターを選定して交換した(写真8)。

CRK543AP-H50 は 1.5 分角(負荷トルク±0.15 N·m)以下のロストモーション(ギアの撓み による出力軸の回転遅れ)があるが、従来使用していた CSK543AP-TG30 のギアに見られるバ ックラッシュは全く無い。ロストモーションとバックラッシュは単純には比較できないが、 その大きさだけを比べた場合、新モーターのロストモーションは現用モーターのバックラ ッシュ量の 10 分の 1 に相当する。また、ロストモーションにより生じる出力回転軸の挙動 は比較的滑らかでバックラッシュのような急激な動きは生じないことが期待された。





写真 7 ジンバル軸(Y軸)分解整備状況

写真8 新しいジンバルモーター取付け状況

c. 新モーターのロストモーションの確認試験

ジンバル制御用モーターをロックした状態で、動揺試験台を±1.92°の範囲で0.48°間 隔で傾斜させ、得られたFOG姿勢計の傾斜角(ピッチ、ロール)と動揺台に与えた傾斜角と を比較して、ハーモニックギアのロストモーション量を静的に確認した。当然ながら、動 揺試験台と重力計との間の防振材は取り除いて試験した。



図2 ロストモーション確認試験結果

動揺台動作(傾斜角:-0.48度 0度)完了時の姿勢計データ、黒線:tilt-X(Pitch),赤線: tilt-Y(Roll)。

左図:X軸周りの傾斜角を与えた場合。右図:Y軸周りの傾斜角を与えた場合。

この試験は、本年度購入の高精度ジャイロがまだ納入されていなかった段階で行った、 既存の FOG 姿勢計による傾斜角データによる評価である。FOG 姿勢計の最小出力単位(LSB) は 19.8 秒角であり、仕様上の分解能は<±0.1°、精度は<±0.2°であること、また、FOG 姿勢計の出力をモニターすると、動揺試験台を動かさない場合にも tilt-X,-Y ともに約 1 分周期で±100~150 秒角程度の揺らぎがあることから、粗い評価でしかないが、新モータ ーのロストモーション量はカタログ値の 1.5 分角(負荷トルク±0.16Nm 時)程度であるこ とが、確認できた。

d. 機械的要素の改造による高度化のまとめ

モーター取付け軸を高剛性化し、また、ジンバル制御用モーターをギヤ・バックラッシュのないハーモニックギア付ステッピングモーターに交換することによって、鉛直保持装置の機械的要素に見られた問題点の改善を行った。

改造後に実施した動揺試験結果から、短周期・大振幅の動揺入力に対してもジンバルの 鉛直制御が発振状態に陥ることがなく安定した鉛直保持が可能になったことが確認された。 また、水平偏差量(ジンバルプラットホームの水平からのずれ角)に関しては短周期・大 振幅の領域での縮小が見られたものの、長周期の動揺に対しては水平偏差量はほとんど変 わらないという結果を得た。本年度購入の高精度ジャイロを導入する前の試験結果ではあ るが、鉛直制御装置の機械的要素の改造によって、鉛直姿勢保持の性能を一定程度に高精 度化することができた。

2. 高精度鉛直ジャイロによる姿勢計測の高度化

a. 高精度鉛直ジャイロの概要

AUV/ROV の移動体に搭載する海中重力計の計測精度を確保する上では、航行中の遥動下 においても、重力センサーが真に鉛直の姿勢を保持していることが基本的に重要である。 このため、重力センサーは、その鉛直姿勢を保持するためのメカニズムを有する姿勢制御 装置という架台に一体的に組み込まれることによって初めて、高精度重力測定が可能とな っている。実際には、真の鉛直からの姿勢ずれをゼロにすることは極めて難しいため、鉛 直からのずれが計測重力に与える影響は、ずれ量の高精度計測をして数値的に補正するこ とになる。姿勢制御装置の鉛直姿勢を制御するための姿勢計測装置として高精度な鉛直ジ ャイロが必要となるほかに、重力センサーの鉛直からの姿勢ずれ量を高精度に計測するた めにも高精度な鉛直ジャイロを必要としている。プロトタイプ開発の素材である既存の移 動体搭載型重力計において使用されていた FOG 姿勢計測装置は、現時点においては、姿勢 のサンプリングレートが 50 Hz と遅く、また計測精度も必ずしも高いとは言えない。この ため、本研究においては、IXSEA 社製 PHINS 高精度慣性航法装置を新規購入して、重力セ ンサーの下側に固定されている従来の姿勢計と交換することによって、姿勢角モニターを 高精度化した。200 Hz で出力される姿勢角は姿勢制御用 CPU に送られ、鉛直からの偏差に 比例ゲイン(Kp)を掛けた逆向きの回転角をモーターに指示することにより、重力センサ ーを鉛直に近い状態に保持する。重力センサーを完全に鉛直に保つことはできないが、そ の傾きを高精度でモニターすることによって重力測定値を補正し、高精度に重力測定する

ことが可能となる。

PHINS の姿勢角の絶対精度は 0.01 度 (RMS 値)、出力最小分解能 (LSB) は約 0.0772 秒角 (360 度 / 2²⁴-1)、出力レートは 200 Hz である。



写真 9 PHINS 納品時確認状況



図 3 PHINS を取り付けた計測部の組立て図面



写真 10 PHINS の取付け状況

b. ステップ応答試験および動揺試験による制御パラメータの調整

本研究のプロトタイプ開発の素材である移動体搭載型重力計では基本的な PID 制御アル ゴリズムによって姿勢制御装置のモーター制御をおこなっている。 PID 制御は、比例制御 (Proportional Control)、積分制御(Integral Control)、微分制御(Derivative Control) を組み合わせて設定値に収束させる制御であり、基本的な PID 制御は下記の式で表現され る。

 $M = K_{P}e + \frac{K_{i}}{T_{i}}\int edt + K_{d}T_{d}\frac{de}{dt}$

M:操作量、e:偏差、Kp:比例制御の比例定数、Ki:積分制御の比例定数、 Kd:微分制御の比例定数、Ti:積分時間、Td:微分時間、t:時間

姿勢制御装置の改造後も、この組み込み済みの制御ソフトウエアを継承して、ジンバル 制御をおこなうことにし、制御が振動的になったり発振したりしないように PID 制御パラ メータの調整をステップ応答試験により行った。微分制御については組み込むと容易に発 振するため実際には使わなかったため、比例制御と積分制御のパラメータの調整のみを行 った。その結果を表1に示した。比例制御パラメータ Kp は、これ以上に大きくすると制御 が振動的になるという上限値である。

ステップ応答試験によるパラメータの調整			
No.	PID 制御方法	制御パラメータ	
1	比例のみ(目標値:移動平均無し)	Kp=0.06	
2	比例のみ(目標値:16 点移動平均)	Kp=0.15	
3	比例 + 積分(目標値 : 16 点移動平均)	Kp=0.15 , Ti=0.3	

表1 ステップ応答試験によるパラメータの調整

動揺試験においては、姿勢制御装置を通常の作動状態とし,動揺台を所定の周期と振幅 で正弦波的に連続的に傾斜させた。試験は実海域で予想される3秒,4秒,6秒,8秒,10 秒の5周期について実施した。また,動揺振幅は各周期に対して±1度,±2度,±3度の 3通りに変化させて実験を行った。本試験は一段の防振材有りの場合についてのみ実施し た。

図4に動揺周期4秒の場合の動揺追従試験の結果を示した。



図 4 動揺周期を 4 秒に設定した動揺追従試験の結果(一段の防振材有り)

左図:比例制御 Kp=0.06

中図:比例制御 Kp=0.15(Pitch/Roll 16 点移動平均)

右図:比例制御+積分制御 Kp=0.15, Ti=0.3(Pitch/Roll 16 点移動平均)

各図の中で、振幅は±1度,2度,3度と変化させている。横軸:時間、縦軸:水平偏差(ジ ンバルプラットホームの水平からのずれ角)

動揺試験の結果、比例+積分による制御が最もジンバルを水平に保てることが分かった。 しかし、動揺波形が不規則であり、重力センサーへの動揺加速度の影響を考えると、好ま しいとはいえない。PHINS はロール、ピッチの絶対精度が十分に高いため、傾斜補正が正 確にできる。このため、比例+積分制御に比べて水平偏差は大きいものの、動揺波形が正弦 波に近く、また、動揺加速度が比較的小さいと考えられる移動平均有りの比例制御を最終 的に採用することとした(図4の中図の設定を採用)。その際、比例制御ゲインとしては上 限値の Kp=0.15 ではなく、より安定な制御が可能となる、Kp=0.13 を採用することとした。

ジンバルの水平偏差をより少なくするには、比例制御パラメータである比例ゲイン Kp を大きくする必要がある。本研究において、モーター取付け軸の高剛性化、制御用モータ ーのギヤ・バックラッシュの低減、鉛直ジャイロの高精度化を行った姿勢制御装置ではあ るが、現状では、Kp 値を上げると振動的な制御となっている事は明らかである。原因のひ とつとして現在のシステムでは、ジンバル系の重量バランスがよくないために、モータ駆 動時の軸に加わるトルクの変動が大きいと考えられる。これにより、モーターの減速用に 使用されているハーモニックギアでロストモーションや振動が発生し、これが短周期の振 動となって現れていると推測される。次年度の新規開発においてジンバルの水平偏差を少 なくする為には、ジンバル内側の重量バランスを正確に取り、トルク変動を少なくするこ とと、トルク変動に対して十分な剛性と駆動トルクを有するモーターを用いることが重要 であると考えられる。

c. 二重防振化による外部振動の低減

上述の試験までは、ジンバル制御の改造と評価に重点を置いていたこともあって、動揺 試験台駆動時の振動は、動揺試験台と重力計計測部の間に防振材(ゲル)を一段挿入して 防振しているだけであった。この状態で動揺試験を実施すると、重力センサーの計測デー タに飛びが頻発していた(図5)。飛びの対策として、動揺台とジンバルを支えている4本 の支柱の下のアルミリングの間に挿入していた防振材に加えて、ジンバルと4本の支柱の 間にも ゲルによる防振材を一段挿入して、二重の防振化を図った(写真 11~13)。その 結果、観測されていた重力データの飛びは解消し、動揺試験中も連続計測が可能となった (図 6)。

また、動揺試験台に使われていた動揺発生モーターの制御プログラムを windows 上での 動作から DOS 上での動作に変更した。その結果、モーター制御の乱れがなくなり、動揺発 生モーター付近から発生していた異常音がなくなった。このことも振動低減につながり、 以降の重力計測の評価試験が容易にできるようになった。

また、交換後の制御モーターと鉛直ジャイロの仕様に合わせて、制御プログラムの書き 換えなど必要なファームウエアとソフトウエアのバージョンアップも行った。



図 5 動揺試験中の重力計測データ(防振材が一段)

重力計測データに飛ぶがみられ、連続的に計測ができていないことが分かる。



写真 11 二重防振化された海中重力計







写真13 上部の ゲル製防振材



図 6 動揺試験中の重力計測データ(防振材が二段) 安定して重力計測ができていることが分かる。

上述までの作業により、本研究における既存の移動体搭載型重力計のプロトタイプへの 改造は終了した。最終的な評価試験の結果は、次章以降で述べる。

e) プロトタイプ海中重力計の性能評価

1. 地球潮汐計測による分解能と安定性の試験

既存の海中重力計を改造したプロトタイプ海中重力計は、一定の動揺条件下において、 重力測定が可能であることが確認されたので、地球潮汐計測とドリフト量推定のための長 期試験を実施して海中重力計の分解能と安定性の評価を行った。試験は、プロトタイプ海 中重力計を動揺振動台にのせ、東京大学地震研究所1号館1階の海底地震観測実験室で実 施した(写真14 および図7)。人の出入りの少ない年末・年始の時期を含む、2009年 12月19日~20日、2009年12月29日~2010年1月2日、2010年1月15日~18 日の計3回の長期安定性試験を行なった。地震研究所1号館は免震構造の建築物であり、 1階の床下には免震装置が組み込まれているが、実験室の床は0.5トンフォークリフトが 動き回ることを想定した堅固なコンクリート床であるため、長期安定性試験を実施する上 では良好な環境と考えられる。空調は止めて室温の変化がある状態で行った。動揺振動台 は電源を入れた駆動モードで静止させた状態とし、重力計の鉛直制御装置は通常の作動状 態として、連続重力測定を行った。鉛直制御装置の制御パラメータには16点移動平均有り の比例制御(Kp=0.13)を使用し、防振はジェルによる二重防振である。





写真 14 プロトタイプ海中重力計 と動揺試験装置

図 7 プロトタイプ海中重力計の構成 と動揺試験装置

図8に、2009年12月29日~2010年1月2日の地球潮汐測定の結果を示した。120秒の 幅のローパスフィルターを施し、0.57 mgal/日のドリフト補正と地球潮汐の補正をした結 果である。この時期の地球潮汐の振幅は例外的に大きく、12月31日には月食が観測され た。地球潮汐を計算するときのG-factorとしては、標準値1.16を用いた。地面の脈動に よるものと考えられる0.05 mgal 程度の振幅で短周期の変動はあるが、地球潮汐は精密に 測定されており、残差は0.1 mgal 以下で安定しており、長期安定性に問題はないことが分 かる。

また、ドリフト量に関しては、3回の測定試験の結果はそれぞれ、地球潮汐を補正した あとの残差から直線回帰によりドリフトレートを算出すると、 では 0.64073 mgal/日、

では 0.56923 mgal/日、 では 0.50798 mgal/日となる(図 9)。CG-3M の長期ドリフトの 変化量(Residual Long-term Drift)は仕様では 0.02 mgal/日以下である。 - の長期ド リフトの変化量は約 0.006 mgal/日、 - の長期ドリフトの変化量は約 0.004 mgal/日で あることから、重力センサーの仕様範囲のドリフトレートであるということができる。

この試験により,動揺振動台を静止させて地面振動加速度だけの状態に置いたプロトタ イプ海中重力計は、陸上用重力計と同等の長期安定性を有していることが確認できた。



図 8 2009 年 12 月 29 日 ~ 2010 年 1 月 2 日の地球潮汐測定の結果 120 秒のローパスフィルター 青線:重力測定データ、緑線:地球潮汐の理論値、赤線: 重力測定データから地球潮汐の理論値を差し引いた残差。縦軸の単位は mgal。



図 9 長期安定試験結果 測定日: 2009 年 12 月 29 日 ~ 2010 年 1 月 2 日
黒線:重力測定データ、赤線:地球潮汐補正後データ
2.動揺試験装置によるプロトタイプ海中重力計の性能評価

プロトタイプ海中重力計の性能を評価するために、写真 14 および図 7 に示すように、 動揺試験装置(動揺台)の上で海中重力計を揺らせながら重力測定試験を行った。動揺試 験は、重力センサーの中心部の真下約 30 cm を中心として、倒立振子のように周期的に重 力計を揺らせることができる装置である。揺れの周期を 10 秒、6 秒あるいは 4 秒とし、揺 れの片振幅を1度あるいは3度と設定し、ピッチ、ロールに相当するX軸、Y軸、あるい は両軸の回転方向に重力計を揺らせ,鉛直保持制御の性能と、そのときの重力測定値の変 化を調べた。両軸を周期10秒、周期6秒および周期4秒で、それぞれ片振幅3度で揺らせ た時の、重力センサーの鉛直からの傾きと重力測定値を図10~12に示す。揺れの振幅が同 じでも、短周期になるほど傾斜も重力変化も大きくなる。



図10 重力変化と傾斜の測定値(動揺台試験)

X(ピッチ)軸および Y(ロール)軸の周りに片振幅 3 度で揺らせた時の重力センサーの傾き (下図)および重力変化(上図)。揺れの周期は 10 秒。



図 11 重力と傾斜の測定値(動揺台試験)

X(ピッチ)軸および Y(ロール)軸の周りに片振幅 3 度で揺らせた時の重力センサーの傾き (下図)および重力測定値(上図)。揺れの周期は6秒。



X(ピッチ)軸および Y(ロール)軸の周りに片振幅 3 度で揺らせた時の重力センサーの傾き (下図)および重力変化(上図)。揺れの周期は4秒。

数値モデルと比較しながら測定結果の解析を行った。代表的な例として、X(ピッチ)軸 周りに周期6秒、片振幅3度で揺らせた場合について、図13~16に示した。図13は図11 と同様な動揺台試験の測定結果であり、X(ピッチ)軸の周りに揺れの周期は6秒、片振幅3 度で揺らせた時の重力センサーの傾きおよび重力変化の測定値を示している。図14は同じ 条件下における2周期分の動揺に対する数値モデルの結果である。1/20に縮めた動揺台の 傾きと重力センサーの傾き(いずれも単位はarcsec)および重力変化(mgal)を示す。図 15 は重力計の傾きによる重力変化および重力計の傾きと水平加速度のカップリングによ る重力変化を示す。図16は、動揺試験装置を静止させた後、図13と同じ条件で動揺を2 時間与え、その後また静止させた時の重力変化に幅210秒のローパスフィルターを施した 結果である。同じ条件下における数値モデルでは、動揺による重力変化のうち、上下動の 影響はゼロ、水平加速度の影響は-0.07 mgal、傾きの影響は-1.088 mgal であり、合わせ ると-1.095 mgal となり、観測値とほぼ一致する。



図13 重力変化と傾斜の測定値(動揺台試験)

X(ピッチ)軸の周りに片振幅3度で揺らせた時の重力センサーの傾き(下図)および重力変化(上図)。揺れの周期は6秒。



図 14 1/20 に縮めた動揺台の傾きと重力センサーの傾き(いずれも単位は arcsec)およ び重力変化(mgal)



図 15 重力計の傾きによる重力変化および重力計の傾きと水平加速度のカップリングに よる重力変化



図 16 動揺試験前後の重力変化

動揺試験装置を静止させた後、周期6秒、片振幅3度でX(ピッチ)軸の周りに動揺を2 時間与え、その後また静止させた時の重力変化に幅210秒のローパスフィルターを施した 結果。動揺による重力変化のうち、上下動の影響はゼロ、水平加速度の影響は-0.07 mgal、 傾きの影響は-1.088 mgal であり、合わせると-1.095 mgal となり、観測値とほぼ一致する。

ローパスフィルターの時定数を変えて更に検討を進めた。動揺台を静止させた後、2 時間にわたってロール軸の周りに周期6秒、振幅3度で揺れを与え、その後再度静止させた時に測定された重力変化に関する最終的な結果を図17に示した。重力計の64Hzの出力に対して、幅120秒のローパスフィルターを施し、0.57 mgal/日のドリフト補正と地球潮汐の補正をした結果である。実験では重力計の上下動による数100 mgalの重力変化が観測されたが、その影響は完全にキャンセルされている。測定された重力変化は主として重力計が傾いた影響であり、図中の直線状の線はPHINS により測定された傾きからその影響を計算した結果である。その傾きの影響と測定結果を比較すると、0.1 mgal 程度のバイアスと、約5分と約20分の周期で変動する0.2 mgal 程度の振幅の変動が残っている。これらの原因としては、水平加速度と傾きのカップリングの影響や短周期の振動の影響等が考えられる。ジャイロを慣性航法装置として利用できないようにする国際的な取り決めにより、加速度出力の分解能が低く抑えられているので、残念ながら原因究明はできなかった。加速度計を別途用意して実験することや、短周期の振動をさらに抑えることなどにより原因を究明し、揺れの影響を0.1 mgal 以下に抑える必要がある。



2時間の動揺試験前後の重力変化

図 17 動揺試験前後の重力変化と重力計の傾きの影響 120 秒のローパスフィルターを施し、0.57 mgal/日のドリフト補正と地球潮汐の補正をし た結果である。

f) 成果のまとめ

プロトタイプ重力計を搭載した移動体が揺れても、鉛直保持装置により重力センサーを 鉛直近くに保持することが可能であり、測定された重力変化は数値モデルの予想値にほぼ 一致している。

図 13 や図 14 に示した数 100 mgal の振幅の重力変化は、倒立振り子運動に伴う重力セン サーの約 0.4 mm の上下運動によるものであるが、その影響はローパスフィルターにより完 全に除去できた。水平加速度の影響は、理想的な条件下における数値モデルではほぼ無視 できるが、剛性が充分に高いとは言えないプロトタイプ海中重力計ではその影響は無視で きず、0.2~0.3 mgal の重力値のふらつきの原因となっていると考えられる。

動揺台は作動中に大きな振動を発生したので、振動対策も合わせて行った。ゲル状の振動除去用ダンパー(写真 11)を二重に組み込むことで、重力計への振動をほぼ遮断することができた。実際の移動体に搭載する際にも、ゲル状の振動除去用ダンパーが有効であることが確認された。

3) ハイブリッド式海中重力計の構成要素である偏差計の開発について

a) 開発の概要

重力を直接測定する方法にくらべて、2 点間の重力の差から得られる空間微分量、すな わち重力偏差を測定する方法は2つのメリットがある。2台の重力計を一定距離離して同 時測定を行った場合、重力計に加わる共通の誤差要因(並進加速度、エトベス効果、温度 変化など)が差を取ることによりキャンセルされ、高精度の測定が可能である。とくに本 課題で想定している海中を航行する方式では、並進加速度が大きいと予想され、重力偏差 の測定は有利と考えられる。もうひとつのメリットは、重力偏差は重力の空間微分である ため、重力を直接測定する方法にくらべ、重力源の近傍で大きく変化することである。こ れは海底資源が比較的小さい領域に局在化して分布している場合の検知に有利である。重 力測定と重力偏差測定を併用することにより、前者で重力源の比較的広い分布を把握し、 後者で細かい構造を検知することができる。

一方、重力偏差測定の不利な点としては、2 点間のわずかな重力変化を測定するために 重力計に高い精度が要求されること、装置の回転角速度に対する影響があることが挙げら れる。平成 21 年度はこれらの点を考慮し、高精度の加速度検出ユニットを独自開発しその 性能を評価するとともに、回転加速度を低減する方法を検討した。以下に詳細を述べる。

b) 目標性能

図1(再掲載)は本研究で想定している鉱床の例として、菱形の断面を持ち半径が200m で中心が上下に各々10m、計20mの厚さを持つ円盤状の場合の重力および重力偏差で予想 される信号を示している。この結果から、やや深い鉱床を海底から50mの距離でも検知で きるレベルとして20E程度(E:エトベス、=0.1µgal/m)であることがわかる。本研究の 重力偏差計の目標性能としてはこの変化が検出できる10E以下の分解能とした。



図1(再掲載) 熱水鉱床から想定される重力異常と鉛直偏差異常のモデル計算 下図:鉱床モデル

菱形の断面を持ち、半径が 200 m で中心で上下に各々10 m、計 20 m の厚さを持つ円盤状の モデル。深さの異なる鉱床モデル MS1 と MS2 について計算を行った。MS1 モデルは海底面 に近い深さ 10 m に中心 があり、MS2 モデルは海底下 50 m に中心を持つ。

中図:想定される重力異常

海底で測定したもの(下)と海底から 50 m 上で測定したもの(上)のプロファイルを示す。 重力異常の縦軸の単位は mgal。

上図:想定される鉛直偏差異常

海底で測定したもの(下)と海底から 50m上で測定したもの(上)のプロファイルを示す。 鉛直偏差異常の縦軸の単位は E(エトベス)。

c) 重力偏差計の設計

重力偏差は垂直方向に離れて置かれた 2 台の重力計の差分から計測することができる。 Lだけ離れた重力計に gの変動があった場合、重力偏差は J = g/Lで与えられる。それ ぞれの重力計はサーボ式の場合、図 18 のように、長周期振り子・変位センサー・制御回路 の 3 つで構成される。振り子の動きはセンサーの出力が一定になるように制御され、その 状態では外部より加わる重力加速度や地面振動加速度が制御信号により打ち消される。そ のため、制御信号の低周波成分から重力を得ることができる。



図 18 重力計の基本構成 制御信号から重力加速度を得ることができる。

検出される重力加速度あるいは地面振動加速度の精度は、振り子の特性や位置検出(変 位センサー)の雑音、制御回路によって決まる。図 19 は変位センサーノイズと最小加速度 検出レベルとの関係を示したものである。振り子の固有周期が長いほど低周波での検出性 能は向上する。理想的には振り子は周期無限大、すなわち無定位であることが望ましいが、 少なくとも観測帯域である数十秒より長いことが必要である。このような長周期振り子を MEMS 等の微細構造の振り子で実現することは困難である。本研究では周期 20 秒以上を実 現するような振り子(加速度検出ユニット)を設計した。



図 19 位置検出(変位センサー)ノイズと最小加速度検出レベルとの関係 振り子の固有周期が長いほど検出性能は向上する。

図 20 に加速度検出ユニットの構造を示す。水平ビームの左端にはタングステンおもり が付けられ、右端はヒンジにより支持されている。このビームは上方から弾性定数の温度 依存性が極めて小さい恒弾性ばねにより支持され、垂直動振り子が構成されている。ビー ムの中央やや左にはコイルが取り付けられ、振り子の動きが電磁的に制御できるようにな っている。振り子の固有周期は、ビームに取り付けられた水平方向の補助バネ(図には描 かれていない)の張力による不安定ポテンシャルによって調整可能で、周期20秒以上の周期に調整することができる。装置全体の外径は140 mmであり、真空容器内に収納される。 製作した加速度検出ユニットの写真を写真15 に示す。

写真 16 は変位センサー部分である。光反射式の変位センサーであり、下部のタングス テンおもりに付けられた鏡からの反射光量の変化から、振り子の変位を検出する。これよ り精度の高いセンサーもあるが、小型であることから今回はこれを用いた。



図 20 加速度検出ユニットの側面図(左)および上面図(右) 水平ビームの左端にはタングステンおもりが付けられ、右端はヒンジにより支持されてい る。このビームは上方から恒弾性ばねにより支持され、垂直動振り子が構成されている。 ビームの中央やや左にはコイルが取り付けられ、振り子の動きが電磁的に制御できるよう になっている。装置全体の外径は直径 140 mm である。



写真 15 製作した加速度検出ユニット 参照用の市販の加速度計(JA-5V)が本体 左上に取り付けられている。



写真 16 変位センサー部分 光反射式の変位センサーであり、下部のタ ングステンおもりに付けられた鏡からの 反射光量の変化から、振り子の変位を検出 する。

d) 性能評価

製作した加速度検出ユニットの精度評価を行うために、同一のユニット2台を50 cmの 垂直距離を隔てて真空容器中に収納し、雑音レベルを測定した。写真17に装置全体の写真 を示す。外乱のなるべく少ない環境で装置本来の性能を評価するために、地面振動の小さ い国立天文台江刺地球潮汐観測施設(岩手県奥州市)で試験観測を実施した。

図 21 は同観測施設(岩手県奥州市)において、加速度計検出ユニットで測定された加速度出力スペクトルである。赤と青がそれぞれの加速度計ユニットの出力であり、設計通りほぼ同一のスペクトルとなっている。黒は両者の差動出力である。0.2 Hz 付近の脈動の ピークが打ち消されていることがわかり、除去比は少なくとも 10 である。重力偏差の検出 性能がもっともよい周波数は、差動出力スペクトルのもっとも小さい 0.1 Hz 付近である。 周波数によってスペクトルの値が異なるため、検出能力は信号の周波数に依存する。たと えば、信号が 10~20 秒で変化する場合は、0.05~0.1 Hz の帯域幅のパワーから、11 Eの 検出性能であることがわかる(センサー間の垂直距離 0.5 m の場合)。

実際の装置の航行速度が2ノットの場合、図1で想定されたスケールの鉱床(直径400m) による信号は400秒程度で変化する。400秒を中心とした幅50秒のバンドパスフィルター を用いれば、図21のスペクトルから計算すると30Eの変動が検知できることがわかる。 この場合、深い鉱床(MS2)を海底から50mの位置から検知するのは困難であるが、それ 以外の場合(MS1あるいは海底付近で測定する場合)は検知可能である。

検出性能を制限している要因を調べるために、変位センサーの雑音レベルを測定した。 これを加速度雑音に換算し、重力偏差測定結果と同一グラフ上に示したものが図 22 である。 赤線と黒線は図 21 と同じものである。現在の加速度検出ユニットのノイズ(=黒線と推測 される)は変位センサーのノイズ(ピンク点線)で決まっていることがわかる。使用され ている変位センサーは比較的ノイズの大きいフォトトランジスタを用いたものである。フ ォトダイオードを使用すれば1~2桁のノイズ低減が見込まれる。変位センサーを改善し1 桁程度ノイズを低減させられれば、図1で想定されているいずれの場合でも十分な S/N で 鉱床を検知できる。



写真 17 装置全体の写真 2 台の同一の加速度検出ユニットが真空容器(中央左方、柱状容器)内に 50 cm の垂直距 離を隔てて配置されている。



図 21 国立天文台江刺地球潮汐観測施設(岩手県奥州市)において、加速度検出ユニット で測定された加速度出力スペクトル

赤と青がそれぞれの加速度計ユニットの出力であり、設計通りほぼ同一のスペクトルとなっている。黒は両者の差動出力である。0.2 Hz 付近の脈動のピークが打ち消されていることがわかる。



図 22 変位センサーの加速度換算ノイズスペクトル(ピンク点線)および加速度検出ユニ ットの出力スペクトル

赤と黒は図 24 と同じである。現在の加速度検出ユニットのノイズ(黒と推定される)は変 位センサーで決まっていることがわかる。

e) 成果のまとめ

海底下の鉱床による重力偏差を測定するための加速度検出ユニットの開発を行った。重 力偏差計は航行時の並進加速度などの共通雑音をキャンセルできるとともに、小さいスケ ールで局在化した鉱床を近傍で検知する場合に有利である。サーボ式加速度計の構成で、 低周波の検出性能を高めるために、長周期振り子と変位センサー・制御回路を組み合わせ た加速度検出ユニットを製作した。これを2台垂直方向に50 cm隔てて配置した結果、も っとも感度の高い周波数において10E程度の検出性能が確認された。実際の海中での測定 を想定すると、鉱床のサイズ等に最適化されたフィルターにより30E程度の検出性能が得 られる。これは鉱床の深さや海底からの航行高度の条件が悪くなければ検知可能なレベル である。現在使用している変位センサーをフォトダイオードを使用したものに交換すれば、 1桁程度の検出性能向上が見込まれる。

実際に航行して使用する場合の誤差要因として、装置の回転に起因する遠心力誤差が挙 げられる。加速度検出ユニットがhの高さ隔てられて置かれている場合、回転による遠心 力加速度差は回転角速度を とすると、 g=h ²で与えられる。したがって、重力偏差へ の影響は J= g/h= ²となる。偏差計にジャイロを取りつけて姿勢制御を行った場合、 市販のジャイロの分解能 0.01°/s(=0.175 mrad/s)では、30 E 程度の補償量にとどまっ てしまう。そこで、ジャイロ出力のフィルタリング等の信号処理により分解能を半桁程度 向上させられれば 3 E 程度の補償ができる。図 23 は、重力偏差計の姿勢制御(回転補償) 機構の一例である。加速度検出ユニットが上下に収納されている中央の真空容器は、中央 の回転軸まわりになめらかに回転できる構造となっている。中心にとりつけられたレーザ ージャイロの信号に基づいて常に垂直となるようにアクチュエーターで姿勢制御される。



図 23 重力偏差計の姿勢制御(回転補償)機構

加速度検出ユニットが上下に収納されている中央の真空容器は、なめらかに回転できる構 造となっている。中央にとりつけられたレーザージャイロの信号に基づいて、フレームが 傾いても真空容器が常に垂直となるように姿勢制御される。

(4) 平成 22、23 年度の計画概要

平成 22 年度は、海中重力センサー部とデータ計測部で構成する海中重力計本体を新規 に試作・開発する。海中重力センサー部は、重力センサー、姿勢制御装置および姿勢計測 装置で構成し、重力センサーには、特注により測定レンジを拡大した Syntrex 社製 CG-5 を使用して、移動体の鉛直方向の動揺に対応する。重力センサーの鉛直保持を行う姿勢制 御装置は、平成 21 年度に実施した海中重力計プロトタイプの動揺試験の結果に基づきより 剛性を高めるなど高度化したものを新規に試作・開発する。平成 21 年度に購入した PHINS

は姿勢制御のためのセンサーである姿勢計測装置として使用する。海中重力計本体のデ ータ計測部は加速度計と新規開発する海中重力計用計測装置で構成し、加速度計3成分出 力、重力センサー出力、PHINS 出力を蓄積あるいは ROV 母船に伝送する機能をもつ。試作・ 開発した海中重力計本体は陸上における動揺試験により性能評価を行う。また、海中重力 計の最適設計に重要な移動体の動揺データに関しては、搭載可能性のある移動体について 実測により取得する。また、海中試験については平成21年度に評価した海中重力計プロト タイプを ROV に搭載する機会が得られれば試み、得られた試験データを本年度の試作・開 発に活用する。

また、海中測定時の揺動変動が加わる状態でも必要な精度が確保できるような重力偏差 計を開発するために、平成22年度は重力偏差計に1軸の揺動変動を補償する構造を付加し、 性能を評価する。円筒状の真空容器内に重力センサーを2台収納し、重力偏差計として機 能させる。円筒は中央の軸を中心に1軸で回転できる構造を有しており、取り付けられた ジャイロの信号に基づいて姿勢を鉛直に保つような制御を行う。そうすることによって、 揺動回転にともなう誤差を低減し、必要な精度を確保する。

平成 23 年度は、耐圧容器、記録装置等を製作して、海中重力計と重力偏差計の海中試 験を行い、移動体搭載型重力計の開発を完了する。

(5) むすび

現実的な熱水鉱床モデルを用いて、測定される重力異常と鉛直重力偏差を推定し、開発 する海中重力計と鉛直偏差計の検出感度の目標を、0.1 mgal と 10 Eに設定した。10 年前 に開発された既存の移動体搭載型重力計を改造して、プロトタイプ海中重力計を製作した。 機械的な構成要素の高度化と鉛直姿勢計測の高精度化を行ったプロトタイプ海中重力計を 用いて地球潮汐の測定をした結果、分解能と長期安定性に関して、0.1 mgal の重力測定に 必要な性能をほぼ確認することができた。また、新たに製作した加速度検出ユニット 2 台 を垂直方向に 50 cm 隔てて配置した結果、もっとも感度の高い周波数において 10 E 程度の 検出性能が確認された。これらの成果から、検出感度 0.1 mgal と 10 E を目標とするハイ ブリッド式海中重力探査システムの開発の見こみを得ることができた。平成 22 年度から 2 年かけて、新規の開発を実施する。

参考文献

新谷昌人・坪川恒也、小型絶対重力計の開発、月刊地球4月号、2010.

- 藤本博己・押田淳・古田俊夫・金沢敏彦、海底重力計の開発、海洋調査技術,10(1),25-38, 1998.
- Fujimoto, H., K. Koizumi, M. Watanabe, A. Oshida, T. Furuta, N. Takamura, and T. Ura, Underwater gravimeter on board the R-One Robot, Proc. UT2000, IEEE Catalog No. 00EX418, 297-300, 2000.
- 藤本博己・野崎京三・河野啓幸・伝法谷宣洋・押田淳・小泉金一郎・三石普・岩本鋼司・ 金沢俊彦,海底重力計の改造と沿岸域における海底重力測定 - 陸海域シームレス精密重 力測定に向けて - , 測地学会誌, 55 (3), 325-339, 2009.
- Zumberge, M., H.. Alnes, O. Eiken, G. Sasagawa, and T. Stenvold, Precision of seafloor gravity and pressure measurements for reservoir monitoring, Geophysics, 73 (6), WA133 WA141, 2008.