# 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 22 年度)

# 成果報告書

# 平成 23 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22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。

# I. 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1mgal(1mgal=10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>)から0.5mgal程度とし、鉱床の厚さを10m、周辺の岩石との密度差を1g/cm<sup>3</sup>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。

# Ⅱ. 実施体制および研究者リスト

| 研究代表者     | 国立大学法ノ   | 、東京大学地震研究所特任研究員 | 金沢敏彦 |
|-----------|----------|-----------------|------|
| ⑪ ル い 北 汨 | - 西五八十仏/ | 、本尔八于地展明九川竹山明九良 | エハリス |

| 所属機関               | 役職    | E  | 氏名 | 担当   |
|--------------------|-------|----|----|------|
| 国立大学法人東京大学地震研究所    | 特任研究員 | 金沢 | 敏彦 | 課題代表 |
| 同上                 | 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                 | 准教授   | 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 |
|                    |       |    |    |      |

Ⅲ.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 10 km オーダーのカルデラ内等の探査対 象の中から、500 m x 500 m x 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/cm<sup>3</sup> 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。



図1 移動体搭載による探査の概念図

# (2) 平成 22 年度における目標及び業務の方法

本年度は、海中重力センサ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。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、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を2台収納し、重力偏差計として機能さ せる。

● 海中重力計の試作・開発

本年度は、海中重力センサ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。

海中重力センサ部は、重力センサ、姿勢制御装置および姿勢計測装置で構成する。

重力センサには、陸上において用いられる重力計の測定レンジを 10 倍程度拡大した特 注品を新たに採用し、移動体の鉛直方向の動揺に対応する。重力センサの鉛直保持を行う 姿勢制御装置は、昨年度のフィージビリティ・スタディの成果に基づき剛性を高めるなど の高度化したものを新たに開発し、海中測定時の揺動に対応できる海中重力計を開発する。 なお昨年度購入した慣性航法センサ (PHINSⅢ) は姿勢制御のためのセンサである姿勢計測 装置として使用する。

データ計測部は、重力センサ、加速度計 3 成分出力、PHINSⅢ出力データを記録・収集 する機能と、移動体(ROV および AUV)とのインターフェース(データ伝送、電力受給)機 能を有する。

海中重力計本体の基本性能評価は陸上における動揺試験により行う。

なお、搭載可能性のある移動体(ROV および AUV)の機械的・電気的仕様、運用方法を 調査するとともに、それら移動体の運用時の揺動データを取得し、海中重力計の記録・収 集する機能設計に反映させる。また、ROV を利用する機会が得られれば海中試験を試みる。 海中試験は平成21年度に評価した海中重力計プロトタイプを活用し、その結果を開発に活 用する。

● 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

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ことにより、揺動・回転の影響 にともなう誤差を低減し、必要な精度を確保する。

#### (3) 平成 22 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の試作・開発を進めた。

移動体搭載型重力計の試作・開発

陸上において用いられる重力計の測定レンジを 10 倍程度拡大した特注の重力セン サとジンバル機構による姿勢制御装置、姿勢計測装置から構成される海中重力センサ 部と、重力データや姿勢データのデータ計測部を試作した。海中重力センサ部につい ては、動揺試験装置の上で揺らせて性能評価を行い、重力測定に必要な性能が得られ る見込みが得られた。

・重力偏差計の性能向上

前年度に製作した長周期振り子と変位センサ・制御回路を組み合わせた重力センサの性能を向上させるために、変位センサを高感度の光学式変位センサ(shadow sensor)に改良した。円筒状の真空容器内に重力センサを2台収納し重力偏差計として機能させ性能評価した結果、雑音レベルが低下し検出性能が向上した。鉛直重力偏差計として必要な10Eより良い7Eが得られ、想定された鉱床のうち最も厳しい条件(海底下50mの鉱床を高度50mで曳航)でも検出できる性能見込みが得られた。E(エトベス)は重力偏差の単位であり、1E = 0.1 mgal/km (= 0.1  $\mu$  gal/m)。

・1 軸の回転補償機構の開発

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、1軸の揺動回転を補償する機構を開発した。重力偏差計が収納さ れる円筒状真空容器に中央の軸を中心に1軸で回転できる構造を付与し、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った。その結果、揺 動回転が抑制され必要な精度が得られることがわかった。

(b)研究開発の実施内容

#### 1) 探査に使用する移動体(プラットフォーム)の調査

重力計を搭載する移動体として、JAMSTEC の ROV「かいこう 7000」と AUV「うらしま」 を想定し(図 2)、重力計(ペイロード)の詳細設計仕様を決めるために必要となる、搭載 条件および運用環境について調査した。



図2 重力探査に試用する移動体 (ROV, AUV)

通常、これらの移動体に外部の研究者が自前の観測機器を搭載する場合は、JAMSTEC が 公表しているそれぞれの「利用の手引き」で十分間に合うが、移動体搭載型重力計の搭載 では「利用の手引き」に明記されていない技術的な問題がある。このため、それらの移動 体のオペレーション担当者に下記項目についてヒアリングを行った。また JAMSTEC で、そ れら移動体での重力計用搭載スペースの実測や搭載位置および固定方法の検討を行った。

主なヒアリング項目

- (a) ペイロードへの最大供給電力
- (b) 船上とペイロード間のデータ伝送規格(双方向、接続方式、伝送速度)
- (c) 接続用水中コネクタの型式、接続ケーブルの数と長さ
- (d) 航海用センサの計測精度と計測頻度
- (e) 航海用センサからペイロードへのデータ接続形式
- (f) 水中ロボットの水中位置計測精度と計測頻度および計測データの接続形式
- (g) 水中部のセンサと船上装置との時刻同期方式と精度
- (h) 水中ロボットの走行姿勢(潜水・浮上、巡航)とその時の姿勢変動(変動幅周期)?
- (i) 外部電源切り替えについて(潜航前、揚収後)

この調査結果を、表1にまとめた。

# 表1 搭載可能性のある移動体「かいこう7000Ⅱ」及び「うらしま」(海洋研究開発機構 所有)の仕様

重力計搭載移動体の調査(ROV「かいこう7000Ⅱ」およびAUV「うらしま」について)

Г

| ROV「かいこう 7000Ⅱ」に関する調査  |  |  |  |
|------------------------|--|--|--|
| 最大潜航深度                 | 7000m  |  |  |
| ビークル寸法                 | 3.0L×2.0W×2.1H (m)   |  |  |
| ビークル重量                 | 3.9 トン (空中)  |  |  |
| ペイロード                  | 空中 100 kg 水中 50 kg   |  |  |
| 速力                     | 0 ~ 0.5ノット   |  |  |
| アンビリカルケーブル             | 光・電力複合ケーブル(φ29.5mm×250m)   |  |  |
| 作業用機器                  | マニピュレータ(6自由度1台、7自由度1台)   |  |  |
| 航海用機器                  | 白黒 TV カメラ、高度計、深度計、方位計、フラッシャ、前方障<br>害物探査ソーナー、GPS 無線機、アルゴス装置                                     |  |  |
| 観測用機器                  | CTD(1 台)、広角カラーTV カメラ(1 台)、3-CCD カラーTV<br>カメラ(1 台)、スチルカメラ(1 台、5 メガピクセル)、照明灯、<br>簡易 HTV カメラ(1 台) |  |  |
| ペイロード用の供給電<br>源容量      | DC24V、1A以下   |  |  |
| 船上までのデータ伝送<br>手段       | 双方向通信、RS232C、9600bps   |  |  |
| ペイロードとの接続用             | ビークル側コネクタ形式:VMG-4-BCL(SEACON)、   |  |  |
| 水中コネクタ付ケーブ<br>ル        | ケーブル長: 重力計(バスケット内)からビークル端子箱までは余<br>裕をみて 6m (1本) そこからさらに重力計をバスケットの外へ展<br>開する場合は、その分長さが必要。       |  |  |
| 運用時間(潜航深度<br>7000mの場合) | 約 11 時間 (着水:約2時間、下降:約2時間、調査:約4時<br>間、上昇:約2時間、揚収:約1時間)  |  |  |
| マニピュレータの作業             | 右マニピュレータ最大リーチ:約1600mm、   |  |  |
| 性能                     | ハンドリング重量:水中 30kgf  |  |  |
|                        | <ul> <li>・高度計(KONGSBERG 1007型)周波数 200kHz,分解能 25mm、</li> <li>アナログ出力</li> </ul>                  |  |  |
|                        | ・深度計(SBE-49 Fast CAT)1% of Full scale  |  |  |
| 航海用機器の性能<br>(継翌々)      | <ul> <li>・方位計(OCTANS) 0.1°(安定になるまでの時間5分)</li> </ul>  |  |  |
| (液奋石)                  | ・ピッチング (OCTANS) 0.01°  |  |  |
|                        | ・ローリング (OCTANS) 0.01°  |  |  |
|                        | ・ヒービング/サージ/スウエイ(OCTANS) 5cm または 5%   |  |  |

|  | ・高度計:アナログ出力のため A/D 変換器が必要。パラ取り可能       |
|--|--|
| 航海用センサのデータ<br>を船上装置から外部 PC<br>にリアルタイム出力す | だが、電圧レベルの低下が懸念される。かいこう船上装置には 0.1       |
|  | 秒ごとに記録。                                |
|  | ・深度データ:RS232C 通信方式。RS232C 分配器を用いてパラ    |
|  | 取り可能。7/16s サンプリング。                     |
| る場合                                      | ・姿勢センサ(OCTANS): RS232C 通信方式。RS232C 分配器 |
|  | を用いてパラ取り可能。1 秒サンプリング。                  |
|  | ・かいこう 7000 では、母船とランチャー、およびランチャーと       |
|  | ビークルの両方で位置計測を行い、最終的には母船からビークル          |
| 12 12 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  | の測位としている。                              |
| ビークルの位直計測方                               | ・測位の周期はランチャーが4秒、ビークルが2秒。               |
| 伝と相及                                     | ・船上装置から位置データは、船内 LAN からリアルタイムで外        |
|  | 部 PC に取れる。(船内 LAN のデータサンプル周期は本船側へ確     |
|  | 認が必要)                                  |
|  | 時刻提供機能はない。(船上からの RS232C 通信のみ)          |
|  | 案1:船上に GPS 受信装置などを用意し、RS232C で時刻情報を    |
|  | 提供する。(懸念事項:船上からペイロード部までのケーブル遅          |
|  | 延が影響ないか?                               |
| ペイロードの時刻同期                               | RS232C の 2ch のうち 1ch を占有してしまう。)        |
| 与注                                       | 案 2:耐圧容器内部に高精度の時計装置を実装する。時刻設定は         |
| 77 12                                    | 海中に沈める前に行う。(懸念事項:時計装置を用意する必要が          |
|  | ある。時刻設定後~調査開始までペイロード部に電源が入らない          |
|  | ため、その間時計装置をバッテリ動作させる必要がある。             |
|  | 時刻設定を行うための経路をどうするか?クロックの精度は?           |
|  | (ルビジウムが必要か?)                           |
| ビークルの走行速度                                | ランチャー方式なので、巡航速度は 0.5 ノットぐらい。連続で長       |
| (巡航)                                     | 距離コースに沿って正確に走るのは、簡単ではない。               |
|  | 今年ケーブル展長作業を行った時、約0.3ノットで2km ほど直線       |
| 走行時の姿勢安定度は                               | 航走した。その時のビークル姿勢は非常に安定していた。データ          |
|  | 一例を別紙に示す。                              |
| 船上装置に記録される                               | ビークルのデータは船上で2種類の PC に記録されている。一つ        |
| 加工 役 置 に 品                               | は 1/10 秒毎に記録しており、姿勢データは方位データのみ。もう      |
|  | 一つは1秒毎の記録で、姿勢データすべて記録されている。            |

| AUV「うらしま」に関する調査   |   |  |
|-------------------|---|--|
| 最大潜航深度            | 3500m 最低潜航深度 700m                                   |  |
| ビークル寸法            | 10.0L×1.3W×1.5H (m)                                 |  |
| ビークル重量            | 6.5 トン (空中)   |  |
| ペイロード             | 前部スペース (0.9mWx0.35mLx0.6mH) : 空中 100 kg 水中<br>33 kg |  |
|                   | 後部スペース(0.3mWx0.4mLx0.4mH):空中100kg 水中<br>33kg        |  |
| 運用時間(潜航深度         | 約 10.5 時間 (着水:約2時間、下降:約1.5時間、調査:約5                  |  |
| 3500m の場合)        | 時間、上昇:約1.5時間、揚収:約0.5時間)                             |  |
| 航海田爆聖             | 慣性航法装置、速度計、高度計、深度計、フラッシャ、前方障害                       |  |
| 则们世门被奋            | 物探査ソーナー、GPS 無線機                                     |  |
| <u> </u>          | CTDO(SeaBird SBE9plis) 、 MBES(RESON Seabat7125) 、   |  |
| 的 1817 13 192 日日  | SSS(EdgeTech 2200-M)、SBP(EdgeTech DT106)、TV カメラ     |  |
| ペイロード用の供給電<br>源容量 | DC24V、6A (DC/DC の容量からは、最大 200W まで供給可能)              |  |
| ペイロード分岐箱の水        | コネクタ形式:MCBH-12-MP (IMPULSE)                         |  |
| 中コネクタ             | ピンアサイン(1:TXD 2:DTR 3:RXD 4:DCD 5:GND 6:+24V 7:+24V  |  |
|                   | 8:Power GND 9:Power GND 10:NC 11:NC 12:NC)          |  |
| 船上までのデータ伝送        | 音響リンクによる双方向通信(Up Link: 最大 32kbps Down Link:         |  |
| 手段                | 2.4kpbs) があるが、現在はペイロード用に開放していない                     |  |
|                   | 時刻(UTC)、緯度、経度、深度、高度、ロール、ピッチ、方位                      |  |
| ペイロードへの出力デ        | 角(ヨー)、速力(INS 前進速度)                                  |  |
|                   | 出力レートは、   |  |
|                   | 1Hz 出力:時刻、緯度、経度、深度、高度、速力                            |  |
|                   | 10Hz 出力: ロール、ピッチ、方位角                                |  |

#### 2) 重力計の試作・開発

#### a)移動体搭載型重力計用の重力センサの検討

昨年度試験的に用いた重力センサ(Scintrex 社 CG3)は、製造中止となっており、今後 の保守も困難であるため、最初その後継機である Scintrex 社 CG5 を候補に検討した。この Scintrex 社 CG5 重力センサは、基本的に静止観測用であり、静止すれば 10  $\mu$  gal の実効分 解能があるが、測定レンジの幅は 9 gal しかないため、重力計の移動体での運用にはレン ジが不足している。このため、Scintrex 社と CG5 を改造してレンジの拡大の図る検討を行 った。その結果、現段階で移動体での観測に最適な重力センサとして、Scintrex 社の子会 社 (Micro-G LaCoste)の新製品の船上重力計 (Air-Sea Gravity System II) をベースとし 高感度化したものを試作することとした。この新しい重力センサ S-174 は、通常の船上重 力計の 10 倍の感度を有し、測定レンジは、±20 gal である。 S-174 重力センサの特性を表 2 に示す。

| Parameter                |                   | Test conditions             |
|--------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Sensor Temp              | 60.4 deg C        | Thermo stated at the noose  |
| Ambient Temp/sensitivity | < 0.05 mGal/deg C | Tested in range 27-53 deg C |
| Clamp Unclamp Repeats    | 0.1 mGal          |                             |
| Sensor Drift             | < 1 mGal/month    | Linear drift                |
| Sensor Noise             | 0.12 mGal/√ Hz    |                             |
| Sensor Noise @ 100s      | 0.012 mGal        |                             |
| Static Precision         | < 0.050 mGal      |                             |

表 2 S-174 重力センサの特性

図3に、重力センサS-174の模式図を示す。図4に構造図を、図5にS-174を上部から 見た外観を示す。重力センサを衝撃や過負荷から内部の検出部を保護するため、振子のク ランプ機構を内蔵しており、外部からのコマンドによりクランプ/アンクランプができる。

移動体用重力計として使用するためには、S-174本体(寸法:214長×159幅×240高mm、 重量 6 kgf)を、センサの温度が一定に保つため断熱構造を有する磁気シールドケースに 収容し、それをジンバル機構に搭載して、計測軸が常に鉛直方向になるように制御する必 要がある。図 5 は、S-174を金属製断熱ケースに収容して、断熱用繊維素材を充填した状態を示している(断熱ケース上蓋を外した状態)。後述するセンサ単体の作動試験は、この 状態で行った。

図6に、S-174の全体システム構成を示す。センサ本体収容ケース(図6の赤枠)の外部に、センサ制御基板・信号処理基板、温度制御基板等が配置されている。

S-174 には、重力センサの他に、水平面(X、Y)の加速度計、圧力計(気圧)、温度計が 搭載してあり、信号処理基板で24 ビット(温度計のみ10 ビット) A/D 変換され約 100Hz の頻度でシリアル出力される。

なお、水平面 (X、Y) の加速度計 (Jewell Instruments 社 LCF-215-0.2G) の特性は、

- ・測定範囲 ±0.2 G
- ・分解能 1 μG
- ・直線性
   0.05 % (フルレンジに対し)
- ・再現性0.01 % (フルレンジに対し)
- ・バイアス温度安定度 0.0004 µG/℃
- ・使用温度範囲 -5 ℃~+50 ℃



図 3 S-174 重力センサ試作機



図4 重力センサ S-174 の構造図



図 5 S-174の上面(2台の加速度計、2台の泡式水準器、クランプ用ノブが見える)



図 6 重力センサ S-174 の全体回路ブロック図



図7 パーマロイ製磁気シールドケースに収容した S-174 (ポリエチレンテレフタラート材薄布を断熱材として充填)

図7は、S-174をパーマロイ製磁気シールドケースに収容し、断熱用繊維素材(ポリエ チレンテレフタラート:PET)を充填した状態を示している(パーマロイ製上蓋を外した状態)。 最初に、試作した S-174 重力センサ(内部温度を一定に保つため、断熱ケースに収容した状態)単体の作動試験を実施した。

図 8 は、屋内に静止して置いた状態で測定した一週間の重力計測データ(縦軸:重力、 横軸:時刻)で、潮汐による重力変動が示されている。

図9は潮汐による重力変動分を補正したもので、センサのドリフトが見えている。なお、 途中に見えるピークは、データロギングを一時的に中断したために生じたものである。

地球潮汐を1週間観測した結果から、S-174重力センサは0.5 mgal/monthのドリフト特性を有し、実効計測精度が0.03 mgal程度であることを確認した。



図8 潮汐による重力変動

図 9 潮汐による重力変動分を補正

図 10 は、同一基盤上に設置した S-174 重力センサと加速度計の応答信号を比較したもので、応答信号をローパスフィルター(カットオフ周波数 2Hz)で処理した応答波形で示してある。

図 8~10 に示す試験結果から、S-174 重力センサの計測精度、ドリフト特性、応答特性 が、移動体搭載型重力計の重力センサに適用可能であると判断した。

一方、S-174 重力センサは、マグネットを用いたフィードバック系により重力振り子の 変位が常にゼロになるように制御される方式となっているため、外部磁界の変化の影響を 受ける。この外部磁界の影響を軽減するため、重力センサ全体を磁気シールドする必要が ある。通常の air-sea gravimeter では恒温槽を兼ねた磁気シールド容器が用いられている が、センサ部を小型化するために、磁気シールドを別途用意することにした。

どの程度の磁気シールドが必要かを推定するため、重力センサを簡易なパーマロイ板 (厚み1 mm)6枚で囲み、重力センサを水平面で地磁気の方向に対し回転させ、重力デー タの変化を測定した(図7に示した磁気シールドケースの製作前に実施した)。その結果を 図 11 に示す。地磁気の影響により、±0.1 mgal 変化する事が分かる。このことから、この影響をさらに一桁小さくするためには、十分な磁気シールドが必要であることが分かった。また、重力センサを搭載するジンバル機構は、DC モータで駆動されるため、DC モータから漏洩する DC 磁界も、地磁気同様に悪影響を及ぼす恐れがある。このため、DC モータ2 台(X,Y の 2 軸用)に対する磁気シールド対策も必要である。



Comparison between S174 & McSEIS

図 10 S-174 重力センサと加速度計の応答信号を比較



重力計の向きによる測定値の変化(100秒のフィルター操作後)

図 11 外部磁界の影響による重力データの変化

# b)移動体搭載型重力計の仕様検討

上記 a) 項に述べた対象となる移動体の搭載スペースの制約および運用性を考慮し、移動 体搭載型重力計は、図 12 に示すように、海中重力センサ部(耐圧容器 1) とデータ計測部 (耐圧容器 2) の 2 つの耐圧容器で構成することとした。

海中重力センサ部は、50cm 径の球形耐圧容器に、データ計測部は円筒型耐圧容器に収容 する計画で、耐圧容器の製作は来年度実施する。



図12 移動体搭載型重力計の全体構成

耐圧容器1には、重力センサ S-174 と慣性航法センサ (PHINS III) がジンバル機構に搭載してあり、PHINSの動揺データにより、S-174の計測軸が常に鉛直方向を保つように、ジンバルが制御される。ジンバルの動揺計測には、S-174 に搭載されている水平面 (X 軸, Y 軸)の加速度センサ (図 3~6 の Long Accelerometer, Cross Accelerometer: Jewell Instruments 社 LCF-215-0.26) と新たに付加した加速度センサ (Z 軸:日本航空電子(株) JA-5 TYPE III サーボ加速度計)も利用する。図13に JA-5 TYPE III を示す。

JA-5 TYPEⅢの仕様

| ・測定範囲      | $\pm 2$ G          |
|------------|--------------------|
| ・分解能       | 1 μG               |
| ・直線性       | 0.04 %(フルレンジに対し)   |
| ・バイアス温度安定度 | $\pm 1$ $\mu$ G/°C |
| ・使用温度範囲    | -20∼75 °C          |



図 13 加速度センサ(JA-5 TYPEⅢ)センサ背面 センサ背面の電子回路基板には、電流/電圧変換回路と低ノイズ電源回路を収容が収容

また耐圧容器1の動揺(移動体の動揺)を計測するため、高精度加速度計(3軸)も搭載できるようにした。

移動体耐圧容器1には、これらのセンサの信号を受け取り、そのデータに時刻を付加し て耐圧容器2のL基板に伝送する機能を有するS基板も収容される。S基板はL基板から のセンサ制御信号を伝送する機能も有する。さらに、運用時に外部電源が短時間 OFF とな った場合でも、S-174や PHINS III を含む電子機器・回路部に連続して電源を供給するために 非常用バッテリを搭載した(耐圧容器1の全機器を3時間駆動できる容量のバッテリ)。

耐圧容器2には、耐圧容器1のS基板からのセンサデータをメモリに記録したり、時刻 情報を作成したり、外部との通信を行うための機能を有するL基板を収容する。時刻情報 は内蔵のルビジウム時計から生成するが、このルビジウム時計は潜航前に外部との通信路 を介して船上のGPS時計に同期する。また耐圧容器2には、高精度水圧計が水中コネクタ で外部接続される。さらに耐圧容器2の動揺を計測する高精度加速度計(3軸)も内部に 収容できるようにしL基板にデータが時刻情報付きで記録される。また耐圧容器1と同様 に、運用時に外部電源が0FFとなった場合でも、ルビジウム時計を含む電子機器・回路部 に連続して電源を供給するために非常用バッテリを搭載した(耐圧容器2の全機器を17 時間駆動できる容量のバッテリ)。

耐圧容器1と2は、水中コネクタで接続されるので、移動体の任意の位置に配置できる が、重力計測部である耐圧容器1は、移動体のセンターライン上の重心位置付近に搭載す る。

なお、耐圧容器 1、2 に記載している高精度加速度計(3 軸)は、移動体本体が搭載して いる動揺センサの計測精度が不十分な場合に必要となるもので、現在搭載していない。し かし、そのような場合にも対応できるように、S 基板と L 基板は、それらのセンサとのイ ンターフェース回路・データ処理回路も組み込んだ。

海中重力センサ部に採用する S-174 は、a)項で述べた実験結果が示すように、単体の性

能は十分であるので、移動体に搭載した時の移動体の動揺に対し重力計の計測軸が常に鉛 直になるように、動揺補償用ジンバル機構の制御性能が重要となる。

対象とする移動体は、船上に置かれている場合、海中に投入する場合、海面から海底に 潜航する場合、海底から海面に浮上する場合、海面から船上に揚収する場合の、いずれの 場合にも、大きな動揺を受けるため、重力センサの重力振り子の可動範囲をオーバーし、 センサ自体の損傷を招くことになる。一方、移動体が潜航後に、重力計測のため海中航行 する場合には、動揺は小さい。従って、海中航行モード以外の場合には、重力センサの振 り子部およびジンバル機構部(2 軸)をそれぞれ機械的にロックする必要がある。このた め、外部からのコマンドおよび自律的なロックおよびアンロックの制御機能が必要である。

図 14 に ROV「かいこう 7000」が潜航深度約 5600 m、高度約 130 mで海中航行時の動揺 データ(ピッチング、ローリング、方位)の一例を示す。

図 14 から、ROV「かいこう 7000」が海中を航行中の動揺としては±4°を考慮する必要 のあることが分かる。なお図 14 では ROV「かいこう 7000」が固定傾斜(ピッチ角)として 約-10°を有していることが示されているが、これは ROV の BG 調整により数度以下に小さ くできるものであり、重力計の運用上は問題とならない。固定傾斜については AUV でも同 じで、完全にゼロにするのは運用上難しいが、数度以内に調整可能である。

なお、AUV「うらしま」の場合は、海中航行姿勢が非常に安定しており、ピッチング、 ローリングともに±1°以内である。

以上のことを考慮して、重力センサの姿勢補償用のジンバル機構の可動範囲を±15°、 制御精度を 0.01°以内、ROV および AUV の動揺周期は 5 秒とした。なお、0.01°以内の制 御精度を実現するためには、高精度の動揺センサが必要となるが、これには昨年度購入し 試験した慣性航法センサ(PHINS III)が適用できる。





図 14 ROV「かいこう 7000」の海中航行時の動揺データ(#481 潜航時) 上図から、ピッチング、ローリング、方位のデータ

# c) 重力計による観測手順と重力データの処理方法

移動体に搭載した重力計による観測手順については、移動体の運用方法、重力計の仕様を考慮して、以下のように決めた。

- (1) 慣性航法センサ (PHINSⅢ) のジャイロ機能は港で設定し、その後連続稼働させる。
- (2) 重力計は、出港前および帰港後に港でキャリブレーションを行う。
- (3) 重力計の温度を一定に保つため、ヒータ電源は瞬断しないようにする。
- (4) 重力計は、移動体が海底付近で安定な姿勢で航行時にのみ観測する。
- (5) 海底付近での観測の開始と終了時に、同じ位置で重力計測を行い、ドリフト補正を 行う。
- (6) 海中での測定点の緯度・経度は、移動体の位置と慣性航法センサのデータを合わせ て解析する。深度は高精度水圧計で測定する。また深度の潮汐補正も行う。

重力データの処理方法については、以下のように決めた。

- (1) サンプリング周波数は、88 Hz
- (2) ローパスフィルタは、100~200 秒 探査対象の熱水鉱床モデル(菱形の断面を持ち、半径 200 mで、中心で上下に各々 10 m、計 20 mの厚さを有する円盤状)について、2 ノット程度の航行速度で計測 する場合は、重力異常の検出レベルの差はほとんど無い(図 15)。
- (3) クロスカップリングに対して、姿勢角と水平加速度による補正処理を行う。
- (4) 測定位置の緯度・経度のデータを用いてエトベス補正を行う。
- (5) 深度データを用いて、鉛直動揺加速度及び地球と海水の引力の変化を補正する。
- (6) 観測船からの海底地形データと移動体の高度データから地形の影響を補正する。



図 15 ローパスフィルターによる重力信号の減衰

# d) 重力センサ用ジンバル機構制御装置の開発

重力は鉛直方向の加速度であるので、重力を計測するためには、移動体の姿勢が変動しても、重力センサの計測軸が常に鉛直になるように、重力センサ(Micro-G LaCoste 社特注 S-174)と慣性航法センサ(PHINS III)を搭載したジンバル機構を、慣性航法センサの計測データを利用して水平になるように制御する必要がある。この制御部がジンバル機構制御装置である。

ジンバル機構およびジンバル機構制御部の仕様を以下に示す。

- (1) ジンバル機構の仕様
  - 1)構成 水平2軸(ピッチング、ローリング)
  - 2) 可動範囲 ±15° (15° でメカストップ構造)
  - 3) 制御範囲 ±10°
- (2) ジンバル機構制御ユニットの仕様
  - 1)構成 水平2軸(ピッチング、ローリング)のサーボ制御
  - 2) 制御方式 PID 制御
  - 3) 動摇条件 動摇振幅 ±5° 動摇周期 5 sec
  - 4) 制御精度 0.01° 以内

b) 項で述べたように、重力センサ S-174 と慣性航法センサ PHINSⅢを搭載するジンバル 機構およびジンバル機構制御部は、S 基板、高精度加速度計、バッテリとともに耐圧容器 1 (50 cm チタン合金耐圧球)に収容できる寸法に設計・製作した。

図 16 に、50 cm チタン合金耐圧球への実装図を示す。

図 17 に、50 cm チタン合金耐圧球外観(地震研究所の 0BS 用)、図 18 に耐圧半球にジ ンバル機構(センサ、回路基板等を取り付ける前)を収納した状態を示す。図 17 に示す耐 圧球の上下の半球の間には、実際には図 16 に示すようにジョイントプレートが挿入され、 これに上下の半球が固定される。ジョイントプレートの製作は来年度実施する計画である。

図 19 は、チタン合金耐圧球にジンバル S-174、PHINSⅢ、S 基板、バッテリ等を組込ん だ模式図である。



|        | 口一儿脑   | ピッチ転   |
|--------|--------|--------|
| 創物範圍   | ±15dag | ±100er |
| メカストップ | ±15dag | ±15deg |



図16 耐圧容器1の実装図



図 17 50 cm 耐圧球容器の外観



図 18 耐圧半球にジンバル機構 を組込んだ状態(センサ、 回路基板取付け前)



図 19 ジンバル機構部(2 軸型)、センサ、回路基板等の耐圧球への組込み概念図

図 11 に示したように、外部磁界が重力センサの測定に悪影響を及ぼす。この外部磁界 となるのは、地磁気とジンバル機構駆動用 DC サーボモータから漏れる DC 磁界である。こ れらの磁界をシールドするため、S-174 重力センサ全体およびジンバル機構駆動用 DC サー ボモータを完全に囲う板厚 0.5 mm のパーマロイ製ケースを製作した(図 20、図 21)。パー マロイは加工後に慎重にアニール処理を行い所期のシールド効果が得られるようにした。

図 20 の左図は、蓋を開けた状態、右図は蓋を閉めた状態で、左図の内部に見えるのは、 シールド効果測定時に使用した磁気センサである。実際は、磁気センサの代わりに S-174 重力センサがこの中に収容され、センサからのケーブルはケース右側貫通穴から外に取り 出される。なお、外部磁界が貫通穴から侵入するのを軽減するため、ケーブルを引き出し た後で、穴隙間はパーマロイテープで塞ぐようにした。図 21 も同様で、左図は、蓋(シー ルド効果測定時に使用した磁気センサを上に載せてある)、右図は蓋を閉めた状態。実際は、 磁気センサの代わりに DC モータが収容され、モータからのケーブルはケース手前の貫通穴 から外に取り出される。 各シールドケースについて、シールド効果(磁界減衰量)を測定した結果、S-174重力 センサ用シールドケースでは40~48dB、DCサーボモータ用ケースでは27dB以上であった。 DCサーボモータ用ケースは、モータ本体に接近して取り付けられるので、モータから出る 磁界はパーマロイケースによる磁気回路内に閉じ込められ、重力センサへの悪影響は無い と考えられる。





図 20 S-174 重力センサ用パーマロイ製磁気シールドケース





図 21 DC サーボモータ用パーマロイ製磁気シールドケース

図 22 は、ジンバル機構のベースプレートに、シールドケースに入れた重力センサおよび DC サーボモータを取り付けた状態を示したものである。重力センサの下部に PHINS III が 取り付けられている。



図 22 ジンバル機構ベースプレートの外観 ベースプレートに、重力センサ、PHINSⅢ、DC サーボモータを取付けた状態

図 22 に示すクランプ機構は、重力センサと PHINS Ⅲを固定したプレートを、ベースプレ ートに固定する一種のクラッチ機構で、外部からのコントロールにより、小型モータでク ラッチを動かすもので、作動時間は約3秒である。過剰な動揺からジンバル機構を保護す るため、ジンバル機構本体は機械的に±15°で振れが抑制されるようにしている。

ジンバル機構を駆動する DC モータには、搭載スペースの点から小型であること、微少 な角度制御が必要となるため高トルクでバックラッシュレスが要求される。検討した結果、 AST (Automation Source Technologies) 社の DC サーボモータ KN-12-M4 を使用することと した。ジンバル機構の回転軸は、このモータでダイレクト駆動される。





図 23 DC サーボモータ KN-12-M4 の外観(左:シャフト面、右:裏面)

KN-12-M4の主要仕様は以下のとおりである。

- ・寸法:140 \$\phi \times 29 mm (ロータシャフト長は、モータケース面より 32 mm)
- ・重量:2.8 kg
- ・定格トルク:136 Ncm
- ・定格回転数:3000 rpm
- ・定格出力:426 ₩
- ・定格電圧:46 V
- ・定格電流:9.2 A

図 23 に、DC サーボモータ KN-12-M4 を示す。

図24に、ジンバル機構制御システムの回路構成を示す。同じジンバル機構に搭載して いるPHINSIIIが計測したピッチングおよびローリングの角度データおよび角速度データを もとに、その角度がゼロになるように、2台のDCサーボモータを駆動するものである。

図 25 は、図 24 の回路基板をジンバル機構に組み込んだ状態を示す(動揺試験のため動 揺試験機に搭載している)。



図 24 ジンバル機構制御システム構成図



図 25 センサや回路基板を組込んだジンバル機構部の外観 (下部は、動揺試験機)

本年度は、耐圧容器1が無いため、図25に示すようにジンバル機構に組み込んだ ものを、図26に示す動揺試験機の上に取り付け、電気的な試験を実施した。 この動揺試験機は、ラックアンドピニオン式シリンダでストロークを変化させることで、 上面板の傾斜角度を変化させるもので、昨年度のフィージビリテイ検討時にも使用したも のを整備して再使用した。



# 図 26 動揺試験機

海中重力計を搭載する移動体の走行時の動揺(ピッチング、ローリング)に対し、重 カセンサ S-174 の計測軸が常に鉛直方向に向くように、高精度にジンバル機構を制御する ため、PID 制御方式を採用することとした。入力データとしては、ピッチング角、ローリ ング角の他に、それぞれの方向の角速度も使用することとした。

図 27 に今回採用している PID 制御系のブロック図を示す。



図 27 海中重力計用ジンバル機構制御系

図 25 の構成で、動揺試験機を用いて、基本的な制御系の特性を把握するための試験を 行った。

試験に使用した動揺試験機(図 26)が、ラックアンドピニオン式でストロークを変化さ せベースを動揺させる構造となっているため、動揺に少し大きな振動も含まれている。試 験ではこの振動が S-174 や PHINSⅢに直接伝達するのを防ぐため、ジンバル機構にアルフ ァージェル防振ゴムによる防振を施した。この防振ゴムを2段にすると、振動の伝達はほ ぼ無くなった。しかしジェル材が柔らかいため、試験時に振幅を大きくすると、ジェルの 変形による別な動揺モードが加わり、制御対象の状態が変化してしまうことが判明した。 この動揺試験機に重力計を載せて、実際に AUV に搭載した場合に想定される動揺角度 (±1°)、周期(10秒)で、PID制御により、重力計の計測軸が常に鉛直(ロール角度が ゼロ)になるよう制御した試験結果の一例を図 28 に示す。動揺試験機のラックアンドピ ニオンの駆動側歯車が反転する際に角加速度が大きく変化するため、制御系の応答が間に 合わない様子が出ている。

現在、防振ゴムやジンバルの剛性の影響を分析しながら、PID 制御の最適なパラメータ のチューニングを行っているが、これまでの試験結果から以下の結論を得ている。

1) 静定時の制御精度は、0.0004°が得られた。

2)周期的な動揺に対しては、振幅と周期によるが 0.01~0.07°の制御精度となる。

3) PID 制御のパラメータをより最適にチューニングすることで、目標とする 0.01°は達成 可能である。



図 28 動揺試験機によるロール角制御試験の例

#### e)移動体搭載型重力計の計測システムの開発

計測システムは、図 12 に示す耐圧容器 1 の Sensor IF 基板(S 基板)と、耐圧容器 2 の Data Logging IF 基板(L 基板)およびルビジウム時計で構成される。各耐圧容器への収納 位置、収納方法を検討し、S 基板およびL 基板を試作した。

(1) Sensor IF 基板 (S 基板)の機能と仕様

S 基板は、FPGA およびインターフェース IC を搭載した基板で、重力センサ(S-174)、慣性航法センサ(PHINSⅢ)、高精度加速度計からの計測データと、ジンバル制御電圧データを受け取り、それらに時刻を付加して L 基板に転送する機能と、L 基板側からの指示で各センサやジンバル機構制御ユニットの設定信号を出す。

図 29 に、S 基板の回路ブロック構成(S 基板は、図の水色部分)を示す。

図 30 に試作した回路基板を示す。

FPGA 部回路は、センサデータ受信回路、センサデータ転送回路、センサ設定コマンド送 信回路、時刻情報付加回路から構成される。センサデータ受信回路は、S-174、PHINSⅢ、 加速度計、高精度加速度計、ジンバル制御電圧データを受信する。センサデータ転送回路 は、センサデータをまとめて、L 基板に転送する。センサ設定コマンド送信回路は、L 基板 から送られた設定コマンドを S-174 に送信する。センサ設定コマンド受信回路は L 基板か ら送られるセンサの設定コマンドを受信する。時刻情報付加回路は、L 基板から送られて くる時刻データ(HH 時 MM 分 SS 秒 mmm ミリ秒)をセンサからのデータに付加する。

S-174 内蔵加速度計(X,Y)と新たに追加した S-174 垂直加速度計(Z)、及び必要に応じて 搭載する可能性のある高精度加速度計(X,Y,Z)は、サンプリング周波数 250 sps で 24bitA/D 変換される。

S基板の入出力インターフェース仕様は、以下のようにした。

・S-174 用 RS232C 1 ポート (115.2 kbps 以下)

・ジンバル機構制御ユニット用 RS232C 2ポート

(1ポートは受信のみ、115.2 kbps 以下)

高精度加速度計用
 S-174 内蔵加速度計用
 ADC(ΔΣ24bit) 3CH (ADS1278 相当を使用)
 ADC(ΔΣ24bit) 2CH (ADS1278 相当を使用)
 ADC(ΔΣ24bit) 1CH (ADS1278 相当を使用)
 ADC(ΔΣ24bit) 1CH (ADS1278 相当を使用)
 L基板用
 RS422 4 ポート (2 ポートは受信のみ)
 ア備用
 RS232C 2 ポート (115.2kbps 以下)



L基板へ

図 29 S 基板の回路構成(S 基板は、図の水色部分)



図 30 S 基板の外観 (寸法:100 mm × 190 mm)

(2) Data Logging IF 基板(L基板)の機能と仕様

CPU、メモリ、FPGA、ルビジウム発信器及びインターフェース IC を搭載した基板で、S 基板から送られてきた S-174 重力センサ、PHINSⅢ慣性航法センサ、加速度計、高精度加速 度計からの計測データと耐圧容器 2 に内蔵する予備の高精度加速度計および外部に接続す る高精度水圧計の計測データをメモリに記録する機能と、最初に外部時刻情報に同期させ た内蔵のルビジュウム時計を用いて時刻情報を作成する。図 31 に、L 基板の回路ブロック 構成(L 基板は、図の水色部分)を示す。

図 32 に試作した回路基板を示す。

L 基板の CPU システムは、SH4CPU で OS は Linux、メモリは DRAM (64 MB, Flash メモリ (64 MB), MRAM(128 KB)とした。

データ保存用には、SDメモリカード、コンパクトフラッシュ、SSD について、サイズ、 消費電力、書込み寿命、書込み速度、コスト、市場流通状況を調査比較した結果、SD カー ド2枚(SD カードの仕様: SDHC(32 GB)、Class6, R2W ファクタ2以上)を採用した。

FPGA 部回路は、センサデータ受信回路、センサ設定コマンド送信回路、時刻情報発生回路から構成される。センサデータ受信回路は、S基板から S-174 データ、PHINSⅢデータ、加速度計データ、高精度加速度計データ、ジンバル制御電圧データを受信する。

センサ設定コマンド送信回路は、S-174 に送信するコマンドをS基板に送信する。時刻情 報発生回路は、外部 GPS 時計に同期させたルビジウム発信器によるタイマーの時刻情報を S基板に転送するとともに、耐圧容器2の予備の高精度加速度計および外付けの高精度水 圧計のデータに時刻情報を付加する。

L基板の入出力インターフェース仕様は、以下のようにした。

・移動体との通信用 RS232C 4ポート

(データ、時刻、1ポートは受信のみ、38.4 kbps以下)
 ・高精度水圧計用 RS232C 1ポート(115.2 kbps以下)

- ・予備の高精度加速度計用 RS232C 3 ポート(115.2 kbps 以下)
- ・S 基板用 RS422 4 ポート(2 ポートは送信のみ)
- ・LAN 用 SD カード読出し用 (10/100 baseTX)
- ・予備用 RS232C 2ポート (115.2 kbps 以下)
- ・電源監視用 ADC(16 bit) 1 CH (AD7680 相当を使用)
- ・SD カード用
- SPIモードインタフェース 2スロット



図 31 L 基板の回路ブロック構成(L 基板は、図の水色部分)



図 32 L 基板の外観 (寸法:86 mm × 320 mm)

# (3) センサ、S 基板、L 基板の接続試験

試作した S 基板、L 基板とセンサ(S-174, PHINSⅢ, 加速度計)およびジンバル制御基 板を接続し、基板各部の機能を確認した。そのソフトウエアの機能ブロックを図 33 に示す。 接続試験では、船上装置の監視制御機能(図 33 の右側ブロック)も合わせて試験し、各機 能を確認した。



図 33 S 基板と L 基板に関するソフトウエアの機能ブロック図

# f)成果のまとめ

本年度は、海中重力センサ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・ 開発した。

海中重力センサ部は、重力センサ、ジンバル機構による姿勢制御装置および姿勢計測装 置で構成した。

重力センサには、検出レンジ、検出感度、および対象とする移動体の動揺を検討し、それらの満足できるものとして、陸上において用いられる重力計の測定レンジを10倍程度拡大した特注試作品(S-174)を新たに採用した。S-174で地球潮汐を1週間観測した結果から、S-174は0.5mgal/monthのドリフト特性を有し、実効計測精度が0.03 mgal程度であり、対象とする熱水鉱床の探査に適用できる性能であることを確認した。

重力センサの鉛直保持を行うジンバル機構姿勢制御装置は、昨年度のフィージビリティ・スタディの成果に基づきジンバル機構の剛性を高め、制御精度を高めるための新しい 制御モータの採用や制御方式の採用などの高度化したものを新たに開発した。なお昨年度 購入した慣性航法センサ(PHINSⅢ)は姿勢制御のためのセンサである姿勢計測装置として 使用した。

データ計測部として、重力センサ、加速度計 3 成分出力、PHINSⅢ出力データを記録・ 収集する機能と、移動体(ROV および AUV)とのインターフェース(データ伝送、電力受給) 機能を有するものを開発した。

海中重力計本体の基本性能評価は陸上における動揺試験により行い、目標の制御精度で ある 0.01°を実現する目途を得た。

なお、搭載可能性のある移動体(ROV および AUV)の詳細な機械的・電気的仕様、実際 の運用方法を調査し、海中重力計の設計と運用方法の策定に反映させた。ROV を利用する 機会は得られなかったため揺動データ取得のための海中試験は見送りとし、替わりにそれ ら移動体の運用時の揺動の既存データを収集して、海中重力計の記録・収集する機能設計 に反映させた。

# 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

重力偏差計は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検出するも のであり、おもに2つのメリットがある。2点間の差を取ることにより1点のみの場合(重 力測定)と比べ共通の誤差要因(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されている海中移動体上では、 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、重力の空間微分量である重力偏差は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が本研究の特長である。

今年度は前年度に製作した長周期振り子と変位センサ・制御回路を組み合わせた重力センサの性能を向上させるために、変位センサを高感度の光学式変位センサ(shadow sensor) に改良した。円筒状の真空容器内に重力センサを2台収納し重力偏差計として機能させ性能評価を行った。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に、1軸の揺動回転を補償する機構を開発した。重力偏差計が収納される円筒状真空容器に中央の軸を中心に1軸で回転できる構造を付与し、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い、性能を評価した。

# b) 重力偏差計の性能向上

前年度に長周期振り子と変位センサ・制御回路を組み合わせた重力センサを開発し、約 30 E の検出性能を確認していたが、おもに変位センサの雑音により性能が制限されていた。 今年度は性能を向上させるために、変位センサを高感度の光学式変位センサ(shadow sensor)に改良した。図 34 に重力センサ、図 35 に光学式変位センサそれぞれのレイアウト を示す。光学式変位センサは、重力計の振り子に取り付けたエッジがLEDの光を遮る度 合いを測定し振り子の変位を検出するものである。鋭角の放射角を持つLEDを用いて大 きい感度を持たせるとともに、LEDの光強度ノイズを参照光で打ち消す構成により、従 来より1ケタ以上高い検出感度が得られた。写真1に改良後の振り子、写真2に光学式変 位センサを示す。

改良後の重力センサ2台を50 cmの垂直距離を隔てて円筒状の真空容器に収納し、重力 偏差計として機能させた(写真3)。前年度と同様に静穏な環境で雑音レベルを測定するた めに、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36 は片方の重力センサの出力加速度(g)および両重力センサ出力の差( $\Delta$ g)のスペクト ルである。0.2 Hz付近のgの脈動のピークが差を取ることにより $\Delta$ gでは2ケタ程度打ち 消されていることがわかる。重力偏差の検出性能がもっともよい周波数は、差出力スペク トルのもっとも小さい0.1 Hz付近であり、3.4E/ $\sqrt{}$ Hzに相当する。 実際の装置の航行速度が2ノットの場合、想定鉱床(直径400 m)による信号は400秒 (2.5 mHz)程度で変化する。スケールの小さい鉱床はこれよりも短周期の変化をする。そ こで、想定鉱床に対応する周波数を含む2 mHz~0.1 Hzの帯域での雑音レベルを図3のス ペクトルから計算すると7Eであることがわかった。この場合、海底下50mの位置に想定 鉱床がある場合、海底から50mの高度における曳航でも想定鉱床による重力偏差を検知す ることが可能である。このように、変位センサの改良によって、前年度は検知困難であっ た条件においても、鉱床を検知する性能が得られた。



図 34 重力センサ

昨年度使用していた光反射式変位センサに替えて、光学式変位センサ(Shadow sensor)を 導入した



図 35 光学式変位センサ (Shadow sensor)

重力計の振り子に取り付けたエッジがLED(右)から射出された光を遮る度合いを光検 出器(PD2、左)で測定し振り子の位置を検知する



写真1 重力センサの振り子 昨年度製作のものの変位センサ部(右)を改良した



写真2 光学式変位センサ

振り子に取り付けたエッジ(中央)がLEDの光を遮る度合いを測定し変位検出する



写真3 真空容器に収納された重力偏差計

改良後の重力センサ2台を50 cmの垂直距離を隔てて円筒状の真空容器に収納し、重力偏 差計として機能させた



図 36 重力センサの出力加速度(g)および重力センサ出力の差(Δg)のスペクトル 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。2mHz~0.1Hz の帯域で7Eの検知性能である

# c) 1 軸の回転補償機構の開発

重力偏差計を移動体に搭載して使用する場合、発生する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ωとすると、 $\Delta g = h\omega^2$ で与えられる。したがっ て、重力偏差への影響は $\Delta J = \Delta g/h = \omega^2 となる$ 。そこで、重力偏差計を姿勢制御する必要 がある。本来はX, Yの両軸の姿勢制御が必要であるが、今年度は1軸の回転補償機構を 開発した。

図 37 のように、重力偏差計が収納される真空容器の中央に回転軸を設け、滑らかに回転できる構造とした。中心付近に光ファイバージャイロおよび傾斜計を取り付け、それらの信号に基づき真空容器の姿勢が常に鉛直になるようにアクチュエーターで真空容器に力を加え制御を行う。必要な精度は 0.003°/s (=0.052 mrad/s) であり、これは 3 E 程度の補償量に相当する。このように制御の精度が高いため回転軸に特に静止摩擦が発生しないように図 38 で示したクロスヒンジ式軸受を導入した。これは直交に配置されたベリリウム銅の薄板をヒンジにした構成で、静止摩擦の無い弾性的な回転変形ができるようになっており、並進変位に対してはヒンジで束縛される構造となっている。写真 4 の光ファイバージャイロと傾斜計は回転軸近傍に取り付けられ (写真 5)、真空容器の回転角速度および傾斜 (水平加速度)をそれぞれ検知できるようになっている。



図 37 1 軸の回転補償機構

重力偏差計が収納される真空容器の中央に回転軸を設け、中心付近に光ファイバージャイ ロおよび傾斜計を取り付け、真空容器の姿勢が常に垂直になるようにアクチュエーターで 制御を行う



図 38 クロスヒンジ式軸受

回転軸に静止摩擦が発生しないように、直交に配置されたベリリウム銅の薄板をヒンジに した構成で、静止摩擦の無い弾性的な回転変形ができる



写真4 光ファイバージャイロ(左)と傾斜計 回転角速度と傾斜(水平加速度)をそれぞれ検知する



写真 5 真空容器の回転軸近傍に取り付けられた光ファイバージャイロと傾斜計 真空容器の回転角速度および傾斜(水平加速度)をそれぞれ検知できるようになっている

ジャイロは慣性的な回転運動を検知し、とくに高周波側の精度が高い。しかし、低周波 では感度が低下しドリフトが発生する。傾斜計は本来鉛直を検知するものであるが、水平 加速度があると影響を受ける。海中の移動体の場合、海流や移動体による水平加速度が発 生するが、一定時間積分(あるいは長周期の平均化)することにより影響を低減されるこ とができる。そこで、開発した回転補償機構では、100秒以上の帯域では傾斜計の信号に 基づき鉛直に制御され(図37ピンク色の制御系)、100秒以下の短周期の帯域では光ファ イバージャイロの信号に基づき姿勢制御する(図37青色の制御系)複合の構成とした。図 39に各制御系の周波数特性(ゲイン)を示す。100秒(0.01 Hz)を境にtilt loop(傾斜 制御系、青)とgyro loop(ジャイロ制御系、ピンク)の制御ゲインの大小が切り替わっ ている。全体的には8 Hz 以下の帯域でいずれかの制御がかかっていることになる。

図 40 は実験室において制御動作を測定したものである。390 秒付近までは制御なしの free run 状態である。そのため真空容器は自由回転し、傾斜計・ジャイロとも信号がゆら いでいる。390 秒付近で制御を起動したところ (Servo 0N)、まずジャイロの信号に基づき 真空容器の回転運動が抑制され、ピンクの線が一定となる。しかし、傾斜計の信号は制御 後しばらくゼロではなく、真空容器は鉛直から傾いた状態である。その後、傾斜計の制御 が優勢となる時定数 100 秒をかけて真空容器は鉛直に移行する (青線)。このときの回転揺 動が重力偏差の誤差を与えるが、制御時のジャイロ出力 (図 41) からは回転揺動が 0.001° /s 程度に抑えられ、目標の 1/3 まで低減された。



図 39 傾斜制御系およびジャイロの制御系の周波数特性(ゲイン) 100 秒 (0.01 Hz)を境に tilt loop(傾斜制御系、青)と gyro loop(ジャイロ制御系、 ピンク)の制御ゲインの大小が切り替わる。全体的には 8 Hz 以下の帯域でいずれかの制御 がかかっている。



図 40 実験室における1軸回転補償機構の動作測定

free run 状態から制御を起動(Servo ON)すると、まずジャイロの信号に基づき真空容器の回転運動が抑制され、その後傾斜計の制御が優勢となる時定数100秒をかけて真空容器は鉛直に移行する



図 41 制御時のジャイロ出力 回転揺動が 0.001°/s 程度に抑えられ、目標の 1/3 まで低減された

d)成果のまとめ

長周期振り子と変位センサ・制御回路を組み合わせた重力センサの性能を向上させるために、変位センサを高感度の光学式変位センサ(shadow sensor)に改良した。円筒状の真空容器内に重力センサを2台収納し重力偏差計として機能させ性能評価を行った結果、2mHz~0.1 Hz の帯域で7Eの雑音レベルに低減した。これは、想定された鉱床のうち最も厳しい条件、すなわち海底下50mの鉱床を海底高度50mの曳航からでも検出できる、という性能である。

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に、1 軸の揺動回 転を補償する機構を開発した。重力偏差計が収納される円筒状真空容器に中央の軸を中心に1 軸 で回転できるクロスヒンジ軸受を付加し、取り付けられたジャイロと傾斜計の信号に基づいて姿 勢を鉛直に保つような制御を行い、性能を評価した。100 秒以上の帯域では傾斜計の信号に基 づき鉛直に制御され、100 秒以下の短周期の帯域では光ファイバージャイロの信号に基づ き姿勢制御される。その結果、回転揺動が 0.001°/s 程度に抑えられ、目標の 1/3 まで低 減された。

## (4) 平成 23 年度の計画概要

平成 23 年度は、最終年度である。残る構成要素を開発・製作すると共に、各部の高度 化を行う。耐圧容器に組込み、全体システムの試験を行う。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としてのハイブリッド式海中重力探査システムの開発 を完了する。

海中重力計に関わる技術開発では、

(1) 構成要素各部の高度化

動揺試験台等による試験を行い、ジンバル機構制御システムにおける制御の高精度化 とロバスト化を行う。また、重力、ジャイロ、および加速度のデータを記録・収集する 機能をもつデータ計測装置は、プラットホームとの通信機能等を組みこみ、高機能化す る。

(2) 耐圧容器(球と筒)の製作と機器の組み込み

耐圧容器の製作後、本年度試作した機器・基板を組込み、全体システムの試験を行う。 また深海底での低温環境下での重力センサの温度制御について試験し、必要に応じて、 容器内の断熱対策を強化する。

- (3) プラットホームとして想定する AUV「うらしま」への組み込み方法の開発
- 組み付け用フレームの製作と除振機構の開発を行う。
- (4) フィールド試験による実用性の評価

ハイブリッド式海中重力探査システムの性能を検証するため、開発した海中重力計による 海中試験観測を実施する。

重力偏差計に関わる技術開発では、

(1) XYジンバルの製作と耐圧容器に組み込んでの開発試験

海中測定時の搖動変動が加わる状態でも必要な精度が確保できるように、XYジンバルを製作する。

(2) 耐圧容器に組み込んでのシステム試験

製作したXYジンバルを重力偏差計とともに耐圧容器に収容する。組み込み後、制御 装置と収録装置を接続し、偏差計の分解能およびジンバルの制御が正常であることを確 認する。

- (3) フィールド試験による実用性の評価
- ハイブリッド式海中重力探査システムの性能を検証するため、開発した重力鉛直偏差 計による海中試験観測を実施する。

#### (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た結果、 開発する海中重力計と鉛直偏差計の検出感度の目標は、0.1 mgal と 10 E である。海中重 力計用に特注した S-174 重力センサーが 0.03 mgal 程度の実効計測精度を持っていること が確認出来たほか、新たに試作したジンバル機構姿勢制御装置についても 0.01°の制御精 度を実現する目途が得られた事から、海中重力計については 0.1 mgal の目標を達成する見 こみが立った。重力偏差計についても、2 mHz~0.1 Hz の帯域で目標とする 10 E より低い 7 E の雑音レベルであることが確認できた。海底下 50 m の鉱床を海底高度 50 m の曳航か らでも検出できる、という性能である。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に開発した1軸の揺動回転を補償する機構は、0.001°/s 程度に回転揺動 を抑える性能が出た。

このように、移動体搭載型重力計としてのハイブリッド式海中重力探査システムは、順 調に開発が進んでいる。

#### 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・ 金沢敏彦,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.
- 藤本博己・金沢敏彦・篠原雅尚・新谷昌人・飯笹幸吉・石原丈美,海底熱水鉱床探査用の 海中航行型重力探査システムの開発,月刊地球,32(4),2010.
- 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.