文部科学省

平成 23 年度科学技術試験研究委託事業

「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 」

成果報告書

国立大学法人東京大学

平成 24 年 5 月 28 日

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、国立大学法人 東京大学が実施した平成23年度「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 」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「海洋資源利用促進技術開発プログラム 海洋鉱物資源探査技術高度 化」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 | 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 |
| | | | | |

研究代表者 国立大学法人東京大学地震研究所特任研究員 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10 km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23年度における目標及び業務の方法

本年度は最終年度であり、昨年度開発した重力計、重力偏差計の構成要素(ハードウエ ア、ソフトウエア)の高度化を行うとともに、新規に開発する耐圧容器に組込み、全体シ ステムの試験を行う。移動体搭載を想定した条件で、海中重力計と重力偏差計の陸上試験 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。

なお移動体としてはROVとAUVを想定していたが、実際に利用可能な移動体として JAMSTECのROV「かいこう7000」およびAUV「うらしま」について、移動体の動揺性能、搭載 スペース、外部供給電力容量、インターフェースについて検討した結果、今回開発した重 力計と重力偏差計を同時搭載・同時計測可能なAUV「うらしま」を移動体として実証試験を 行うこととした。この実証試験は、JAMSTECの深海調査研究の公募で採択された、平成24 年9月の研究航海で実施する予定である。



図2 AUV「うらしま」に搭載しての重力探査

(a) 海中重力計に関わる技術開発

昨年度、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たに開発し、 の基本性能を試験評価した。本年度は、この試作機について以下の開発を実施する。

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には、プラットホームであるAUV「うらしま」との通信機能等を組み こみ、高機能化する。

2) 耐圧容器の製作と機器の組み込み

耐圧容器の製作後、昨年度試作した機器・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。

- 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
 AUV「うらしま」へ搭載するための、組み付け用フレームの製作と除振機構の開発を行う。
- 4) フィールド試験を想定した実用性の評価

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 中試験観測を想定し実用性評価を実施する。

(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

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 製作し、重力偏差計とともに耐圧容器に収納する。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。さらに、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。

(3) 平成23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を開発した。

1) 海中重力計に関わる技術開発

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と姿勢計測装置を球形耐圧容器に組み込んだ海中重力セン サ部と、重力データや姿勢データのデータ収録基板を円筒型耐圧容器に組み込んだ計測部 を開発し、動揺試験および低温環境試験を行い性能評価した。その結果、実際のAUV「うら しま」の海中航行時の動揺環境条件下で、目標とした検出性能0.1 mgalに対し、0.04 mgal であることを確認した。

本年度は、当初プラットフォーム(AUV)に搭載しての実海域試験を計画していたが、 JAMSTECの深海研究公募で実験枠が取れなかった。しかし、来年度の実験枠が確保できたた め、重力計の性能評価試験と並行して、AUV「うらしま」への具体的な搭載方法、運用方法、 通信インターフェースの開発を行い、実海域試験の準備を進めた。またその一環として、 AUV組み込み用フレームに重力計を実装した状態で自動車に載せ、筑波山の重力検定ポイン トを往復移動して重力計としての検定を実施し、性能を評価した。

2) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

a) XYジンバルの開発

海中測定時の揺動変動が加わる状態においても重力センサの姿勢を鉛直に維持し必要な 精度が確保できるように、2軸の変動を補償するXYジンバルを開発した。重力センサを収 納する真空容器を上下に配置し、中央部にXYの2軸で摩擦がなく回転できる構造を付与し た。ジャイロおよび傾斜計の信号に基づいて姿勢を鉛直に保つ制御を行い、設計通り機能 することが確認された。その結果、揺動回転が抑制され、重力偏差計として必要な検出分 解能が得られることがわかった。

b) 制御部および耐圧容器の製作

重力センサおよびXYジンバルを制御する電気回路の小型化を行った。AUV「うらしま」の 収納スペースを考慮し、重力センサ・XYジンバルは直径500 mm、高さ700 mmのチタン製耐 圧容器に収納され、制御部は直径500 mm、高さ500 mmの同容器に収納される。AUV「うらし ま」からの制御信号に基づき、制御部の電気回路から重力センサおよびXYジンバルに制御 信号が供給され、測定された重力信号・姿勢制御信号・揺動モニタ信号などが制御部内の 収録装置に記録される。

(b) 研究開発の実施内容

1) 海中重力計に関わる技術開発

a)構成要素各部の高度化

移動体の搭載スペースの制約および運用性を考慮し、海中重力計は、図3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 している。耐圧容器1に収容する、重力センサ、慣性航法センサ、加速度計、ジンバル機 構および制御基板、S基板は、昨年度試作した。

今年度は、AUV「うらしま」の運用時の動揺を想定した動揺試験を行い、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った。その結果、ジンバル部の制御 範囲をピッチ軸、ロール軸ともに±10°とし、動揺振幅±10°、動揺周期5秒という動揺条 件下で、制御精度0.01°以内という高精度制御を実現した。



図3 海中重力計の全体構成

次に、新規に製作した動揺試験装置(図4)を用いて長時間の連続動揺試験(1時間毎 に周期15秒、振幅+/-5度の動揺)を行い、地球潮汐変動(振幅約0.15 mgal)を観測した 結果を図5に示す。図の最上部のグラフが,理論値補正後の結果であり,動揺状態でもRMS 残差0.04 mgal以下という精度で地球潮汐を観測できることが実証できた。

上記の試験観測では,観測データに150秒のローパスフィルターを施している。AUV「うらしま」による重力探査では約2ノット(約1 m/s)の船速を予定しているので、重力探査の空間分解能は約75mである。目標とする熱水鉱床の水平規模は約500mとされているので、十分な空間分解能を確保できることが分かる。

以上から判断して、重力異常の検出感度0.1 mgalという目標を十分達成できる精度である。

なお、上記の動揺試験では、ピッチング方向、ローリング方向、45度方向(ピッチング 及びローリングの方向に対し)の動揺データの解析過程で、最適なフィルタリングについ ても検討を行った。その検討結果は、来年度に実施する実海域試験時のデータ解析に適用 する予定である。



図4 動揺試験装置で試験中の海中重力計(耐圧容器は外した状態) 重力計の動揺を慣性航法センサPHINSが検知し、ジンバル駆動機構が働い て常に、重力計の計測軸が垂直になるように高精度制御される



図5 動揺試験データの処理により地球潮汐を抽出

また、耐圧容器1内のS基板と耐圧容器2内のL基板間のデータ伝送、観測データへの タイムスタンプ付与、外部(運用時は船上監視用PC)からの監視・制御についても、実運 用を想定したソフトウエアを開発した。

重力センサの計測性能を維持するためには、重力センサの内部温度を常時一定に保つ必要があり、このための恒温槽用の電源は瞬断も許されない。このため地震研究所や船上のAC電源、陸上運搬中や潜航調査中のDC電源を適切に切り替えて使う必要があるため、電源供給手順についても検討した。

またAUV「うらしま」は船首を20度ほど下に向けて降下するので,目標深度で船首が水 平になるまではジンバルと重力計をクランプし、ジンバルが鉛直を保持した段階で重力計 のクランプを解除する必要がある。また異常事態が発生した場合にも、ジンバルと重力計 をクランプする必要がある。そこで、地震研究所から運び出し、港で船に搭載し、その後 AUV「うらしま」に搭載し、潜航調査を行って、地震研究所に戻るまでの手順を詳しく検討 し、制御ソフトの作成に反映させた。

特に、AUV「うらしま」に搭載する場合、AUVと母船間は、図6に示すように伝送レート の低い音響通信リンクを介して監視データや制御データを伝送することになる。このため、 「うらしま」の通常の運用方法をベースに、地震研からの搬出時から積込み、実海域運用、 回収までの具体的な運用方法から、最小限必要となる監視内容や制御内容を検討し、監視 方法と制御方法および伝送データ構成(船上からのコマンド体系、重力計からのレスポン ス体系)を検討し、L基板のPCの通信プログラムに実装した。



図6 音響通信リンクを介した、海中重力計の監視・制御

b) 耐圧容器の製作と機器の組み込み

海中重力センサ部を収容する耐圧容器1とデータ計測部を収容する耐圧容器2を設 計・製作した。いずれの耐圧容器も最大使用深度を3500 m、耐圧深度を4200 mとし、加 工製作後、水中コネクタを実装した状態で、JAMSTECの大型高圧試験水槽で、350気圧で1 時間保持の加圧試験を実施した。 図7に示す耐圧容器1(寸法:540 × 626 mm、重量:125 kgf(空中)、32 kgf(水中) は、既製のチタン合金製の球形耐圧容器(50 cm径)の半球接続面の間に、新しく製作した チタン合金(Ti-6AI-4V)製のジョイントリングを挿入したものである。このリングには、 水中コネクタを取り付けるための貫通孔(4個)や上下の半円球を接続するためのボルト 穴(12個)が設けられるため、その部分の周辺に加圧時の歪みが集中しやすい。このため、 FEMで十分強度設計で行い加工した。



図7 耐圧容器1(上下の半球をジョイントリングで結合する構造)

重力センサ本体は、その検出性能を発揮するには、60.4°の一定温度を保持する必要が あるため、前年度、センサ単体の内部に断熱材を封入し対策を講じた。しかし、AUV「うら しま」が船上から深海底への潜航時に、周囲温度は大きく変化するため、耐圧容器に対し ても断熱対策が必要となる。

これに対する対策として、図8及び図11に示すように、重力センサの容器を囲むパーマ ロイ磁気シールドケースをクロロプレンスポンジ(5 mm厚)で包み、さらにその上にスー パーインシュレーション布を貼り合わせた。一方耐圧容器の内面は、エアロフレックス断 熱シート(3 mm厚スポンジ)を接着し、その上にスーパーインシュレーション布を貼り合 わせた。



図8 右上:パーマロイケース状に断熱材を取り付けた状態 左上:耐圧球内面に断熱材を貼り付けた状態 左下:基板保護カバー(断熱効果もあり)

この断熱対策の効果を検証するため、図9に示すように氷を入れた水槽に、重力計を 沈め、気温、水温、耐圧容器内面、断熱材表面、重力センサ表面、重力センサ内部の温 度を22時間測定した。その結果、図10に示すように、船上から深海底への大きな外部環 境温度の変化、深海底での低温度環境下で、重力センサの内部温度を規定の60.4°に保 持できることを確認した。



図9 重力計の温度試験







図11 耐圧容器内の断熱材の構成と、温度試験時の温度センサの計測位置

一方、耐圧容器2は、図12に示すようにチタン合金(Ti-6AI-4V)製円筒型容器(寸法:
 182 × 655 mm、重量:22 kgf(空中)、10 kgf(水中))で、両端面板に水中コネクタを
 取りつけるようにした。

この耐圧容器には、図3に示すようにL振動子基板とバッテリ、および高精度加速度計 が収容される。高精度加速度計は、1軸の水晶式加速度センサが3台で構成されるが、各 センサを正確に直交3軸(X、Y、Z)方向に固定する必要があるため、新たに取り付け 台座を設計製作した。



図12 耐圧容器2と収容機器

c) 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

AUV「うらしま」に、重力計と重力偏差計を同時搭載し同時運用・同時計測するハイブ リッド探査システムを検討した結果、図13に示すように、「うらしま」の前部に重力計を搭 載、また同時に前部に偏差計のセンサー部、後部に偏差計回路部を分離設置することで、 同時搭載が可能であることが分かった。

重力計をAUV「うらしま」へ搭載するための、組み付け用フレームの製作と除振機構の 開発を行った。重力計は、図14に示すように組み込みフレーム(図15)に、除振機構を介 して固定される。除振機構はワイヤーロープ防振器で、重力計の運搬・移動時の衝撃・振 動の軽減、船上搭載時の船の振動の除振を考慮したものである。図16に、組み込みフレー ムにダミー錘を取り付け振動試験した結果を示す。



図13 AUV「うらしま」に重力計と偏差計を同時搭載



図14 重力計と組み込みフレームの構図



図15 組み込みフレーム(上下の4隅に、ワイヤロープ防振器が取り付けてある)



図16 組み込みフレーム除振機構の試験結果

図15のフレームに、完成した耐圧容器1と耐圧容器2を取り付けた状態を図17に示す。 ただし、耐圧容器2は、AUV「うらしま」に搭載する場合には、図13に示すように、「うら しま」の後部に設置される。図17は、後述する筑波山で重力計の検定を行うため、自動車 (ワゴン車)の荷台に載せられるようにしたものである。



図17 重力計の耐圧容器1をAUV組み込みフレームに設置した状態。 手前左下は耐圧容器2で耐圧容器環は水中ケーブルで接続している。

d) フィールド試験を想定した実用性の評価

本年度は、当初プラットフォーム(AUV)に搭載しての実海域試験を計画していたが、 JAMSTECの深海研究公募で実験枠が取れなかった。しかし、来年度の実験枠が確保できたた め、重力計の性能評価試験と並行して、前述のように、重力計と偏差計によるハイブリッ ド探査を実現するための、AUV「うらしま」への具体的な搭載方法、運用方法、通信インタ ーフェースの開発を行い、実海域試験の準備を進めた(図18)。

さらに、開発した重力計の検定を実施した(図19)。国土地理院が筑波山山麓から山頂に かけて設定している10点の重力基準点のうち、山麓から4点において重力測定を実施し(重 力差:約101 mgal)、海中重力計のスケール定数の点検を行った。

海中重力計容器は、「うらしま」に搭載する際に使用する除震機構付フレームに収容した (図17)。耐圧容器1および2を接続し、AUVとの接続ケーブルに電源(24 Vバッテリ)と PCを接続した状態で自動車荷台に搭載し、筑波山の重力基準地点を移動しながら計測を行 う試験を実施した。試験期間中、電源は常時入れた状態で、自動車走行中は重力センサを クランプし、基準地点で停車して重力の計測を行った。なお、基準地点での測定では、比較のため、通常の陸上重力計(CG-3M型)でも測定した。



図18 ハイブリッド探査システムの実海域試験



陸上重力計 (CG-3M型)

図19 重力計の検定

e) 成果のまとめ

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と姿勢計測装置を球形耐圧容器に組み込んだ海中重力セ ンサ部と、重力データや姿勢データのデータ収録基板を円筒型耐圧容器に組み込んだ計測 部を開発し、動揺試験および低温環境試験を行い性能評価した。その結果、実際のAUV「う らしま」の海中航行時の動揺環境条件下で、目標とした検出性能0.1 mgalに対し、0.04 mgal であることを確認した。

本年度は、当初プラットフォーム(AUV)に搭載しての実海域試験を計画していたが、 JAMSTECの深海研究公募で実験枠が取れなかった。しかし、来年度の実験枠が確保できたた め、重力計の性能評価試験と並行して、AUV「うらしま」への具体的な搭載方法、運用方法、 通信インターフェースの開発を行い、実海域試験の準備を進めた。またその一環として、 AUV組み込み用フレームに重力計を実装した状態で自動車に載せ、筑波山の重力検定ポイン トを往復移動して重力計としての検定を実施し、性能を評価した。

2) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

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。

今年度は前年度に評価した1軸の揺動回転補償機構をXYの2軸に拡張し、重力センサを 搭載した状態で耐圧容器に組み込めるような形状のXYジンバルを開発した。また、重力センサおよびXYジンバルの制御を行う電気回路の小型化やそれらを収納する耐圧容器を製作 し、制御や分解能などの性能を評価した。

b) XYジンバルの開発

重力偏差計を移動体に搭載して使用する場合、装置の回転に起因する遠心力誤差が発生 する。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 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。そこで、重力偏差計を姿勢制御する必要がある。今年度は前年度に 評価した1軸の揺動回転補償機構をXYの2軸に拡張し、重力センサを搭載した状態で耐圧 容器に組み込めるような形状のXYジンバルを開発した。

図20のように、重力センサを収納する真空容器を上下に配置し、中央部にXYの2軸で摩擦がなく回転できる構造を付与した。同じく中央部に配置された光ファイバジャイロおよび傾斜計の信号に基づいて姿勢を鉛直に保つ制御を行う。必要な精度は0.003°/g(=0.052

mrad/s)であり、これは3E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21で示したクロスヒンジ式軸受を導入した。これは昨年度の1軸ジンバルで導入したものを1/2のサイズに小型化したもので、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あり、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いる。並進変位に対してはヒンジで束縛される。



図20 XYジンバルの構成(左)と写真(右)。重力センサを収納する真空容器を上下に 配置し、中央部にXYの2軸で摩擦がなく回転できる構造を付与した。ジャイロおよび傾斜 計の信号に基づいて姿勢を鉛直に保つように制御される。



図21 クロスヒンジ式軸受。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 であり、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いる。並進変位に対して はヒンジで束縛される。1ユニットのサイズは 50 mm×50 mm×50 mm。 重力センサはXYジンバルの上下に配置された真空容器の中に収納される(図22)。誤差 要因となる空気の対流を避けるとともに、熱伝導の良いアルミ製のため上下の重力センサ の温度差が生じにくく、偏差信号への誤差がさらに抑えられる。加えて、磁場の影響を避 けるため真空容器内面には磁気シールド(パーマロイ)がほどこされている。



図22 重力センサを収納する真空容器。XYジンバルの上下に配置される。内面には磁気 シールド(パーマロイ)がほどこされている。

図23はXYジンバル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であ る。ジンバル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する ことができる。開発した回転補償機構では、昨年度の1軸ジンバルの開発結果を踏まえ、 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24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24青色 の制御系)複合の構成とした。図25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、赤)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23 XYジンバル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。ジン バル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24 XYジンバルの制御系。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(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(青色の制御系)複合の構成とした。図ではXあるいはYのみの制御系を示しているが、実際にはXYの2自由度が同時制御される。



図25 XYジンバル制御の周波数特性(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、赤)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。図ではX あるいはY の みの制御系を示しているが、実際にはXYの2自由度とも同様の特性で制御される。

図26は実験室において制御動作を測定したものである。40秒付近までは制御なしの状態 である。そのためジンバルは鉛直から傾いた状態で静止している(Tiltmeter output、左 軸)。40秒付近で制御を起動したところ(Servo ON)、まずジャイロの信号に基づきジンバ ルの回転運動が抑制される(Gyro output、右軸)。しかし、傾斜計の信号は制御後しばら くゼロではなく、ジンバル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秒をかけてジンバルは鉛直に移行する(Tiltmeter outputの青・紫線)。鉛 直安定時のわずかな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27) からは回転揺動が0.001°/s程度以内に抑えられ、目標の1/3まで低減されていることがわ かる。

このようにXYジンバルが設計通り機能することが確認された。その結果、揺動回転が抑 制され、必要な重力偏差検出分解能が得られることがわかった。



図26 実験室における制御動作の測定。40秒付近で制御を起動し(Servo ON)、ジャイロの信号に基づいたジンバル回転運動の抑制(Gyro output、右軸)および、傾斜計の制御が優勢となる時定数100秒をかけたジンバルの鉛直への移行(Tiltmeter outputの青・紫線)が確認された。



図27 ジンバル制御時のジャイロ出力。回転揺動が0.001°/s程度以内に抑えられ、目標の1/3まで低減されており、目標の重力偏差検出分解能が得られることがわかった。

c) 制御部および耐圧容器の製作

重力センサおよびXYジンバルを制御する電気回路(制御部)の小型化を行った。スペー スの制約から、制御部はセンサとは別の耐圧容器に収納される。また、AUV「うらしま」の 収納スペースを考慮し、重力センサ・ジンバルは直径500 mm、高さ700 mmのチタン製耐圧 容器に、制御部は直径500 mm、高さ500 mmの同容器にそれぞれ収納される。AUV「うらしま」 からの制御信号に基づき、制御部の電気回路から重力センサおよびXYジンバルに制御信号 が供給され、測定された重力信号・姿勢制御信号・揺動モニタ信号などが制御部内の収録 装置に記録される。

図28は信号系統図を表す。重力センサとXYジンバルを収めたセンサ容器と制御部を収め た制御・収録容器はケーブルで接続される。センサの制御や収録はAUV「うらしま」から制 御・収録容器に送られるRS232C信号にもとづいて実行される。図29は制御部のブロック図 を表す。破線の左側がセンサ容器側、同右側が制御・収録容器に収納される部分である。 電源はAUVから+24 Vが供給され、内部で必要な電圧(±5 V、+12 V、±15 V)が生成さ れる。電気回路の各ボードおよび全体は図30のようになっており、耐圧容器内に収納され る。



図28 信号系統図。重力センサとXYジンバルを収めたセンサ容器(左)と制御部を収め た制御・収録容器(右)はケーブルで接続される。センサの制御や収録はAUV「うらしま」 から制御・収録容器に送られるRS232C信号にもとづいて実行される。



図29 制御部のブロック図。水色の破線の左側がセンサ容器側、同右側が制御・収録容器に収納される部分である。電源はAUVから + 24 Vが供給され、内部で必要な電圧(±5 V、 + 12 V、±15 V)が生成される。



図30 電気回路の各ボード(左)および全体の外観(右)。50 cm径の耐圧容器内に収納 される。 センサ容器として使用される耐圧容器は、重力センサを上下に離してジンバル上に配置 されるため、通常のチタン耐圧球の中央部に図31の200 mmスペーサーを製作し挿入して使 用する。スペーサーには内側にフランジとねじ穴が加工されており、XYジンバルが取り付 けられる。スペーサーを含めて、耐圧容器は6000 mの耐圧仕様となっている。海中試験で 使用するAUV「うらしま」への装置の配置を図32に示す。重力計と同時に観測ができるよう に配置を工夫した。



図31 センサ容器として使用される耐圧容器(左上)および挿入される200 mmスペーサ ー(右上)。スペーサーには内側にフランジとねじ穴が加工されており、XYジンバルが取り 付けられる(下)。全体は6000 mの耐圧仕様となっている。



図32 海中試験で使用するAUV「うらしま」への装置の配置。重力計と同時に観測する ことができる。 d) 成果のまとめ

海中測定時の揺動変動が加わる状態においても重力センサの姿勢を鉛直に維持し必要 な精度が確保できるように、2軸の変動を補償するXYジンバルを開発した。重力センサを 収納する真空容器を上下に配置し、ジャイロおよび傾斜計の信号に基づいて姿勢を鉛直に 保つ制御を行う。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。設計通り機能 することが確認された。その結果、回転揺動が0.001°/s程度(目標の1/3)まで抑制され、 必要な重力検出分解能が得られることがわかった。

探査に使用されるAUV「うらしま」の収納スペースを考慮し、重力センサおよびXYジン バルを制御する電気回路の小型化およびそれらを収納する耐圧容器の製作を行った。重力 センサ・ジンバルは直径500 mm、高さ700 mmのチタン製耐圧容器に収納され、制御部は直 径500 mm、高さ500 mmの同容器に収納される。AUV「うらしま」からは+24 Vおよび制御信 号が供給され、制御信号に基づき、制御部の電気回路から重力センサおよびXYジンバル制 御信号が供給される。耐圧容器は6000 mの仕様で製作されており、AUV「うらしま」へ重力 計と同時に搭載されハイブリッド重力探査に使用される。

(4) むすび

基盤ツール開発では、モデル鉱床の規模を500 m×500 m×10 m、密度差を1000 kg/m3 として、鉱床による重力変化を0.5 mgal程度で捉えることを要請している。そこで実際の 鉱床の形状に近いと考えられる菱形の断面を持ち、直径が400 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鉱床を想定し、密度差を1000 kg/m3、重力探査を行う高度を 海底から50 mとして、予想される重力および重力偏差の異常を求めた。鉱床は、海底面に 近い深さ10 mに中心がある場合と、海底下50 mに中心がある場合について計算した。その いずれの場合でも重力の変化を捉えることができるためには、重力変化で0.2 mgal、重力 偏差で20エトベス(2 mgal/km = 2 µgal/m)の感度が必要であり、これをプロジェクトの 目標感度とした。なお、努力目標としては、さらに高感度な、0.1 mgal、10エトベスとい う値を設定した。

新規に重力計および重力偏差計を開発し、陸上での動揺試験および検定試験により、それらの性能を評価した結果、目標検出性能とした、重力0.1 mgalおよび重力鉛直偏差10エトベスに対し、陸上での動揺評価試験により、0.04 mgalおよび7エトベスであることを確認した。開発した海中重力計を用いて、目標とする0.2 mgalという重力変化を、空間分解能約75 mで検出できると推定される。

海底直下に鉱床がある場合を除き、重力探査からは、鉱床の厚さと密度はトレードオフ の関係になる。重力測定だけでも、基盤ツール開発で想定されている規模の鉱床の存在は 検出することができるが、その場合は広がりと厚さと密度差の積しか推定できない。ハイ ブリッド重力探査の場合には、重力偏差計の観測から鉱床の広がりを推定することができ るので、広がりと厚さの区別ができるようになる。さらに、海底からの高度を変えて探査 を行うことにより、鉱床の深さをある程度推定できる。 本研究では、移動体としてAUV「うらしま」によるハイブリッド重力探査の実現のため、 重力計と偏差計のAUV「うらしま」への具体的な搭載方法、運用方法、通信インターフェー スの開発を行い、平成24年9月に予定されている実海域試験の準備を進めた。

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.
- 金沢敏彦,篠原雅尚,新谷昌人,藤本博己,飯笹幸吉,石原丈美:海底熱水鉱床探査のための ハイブリッド式海中重力探査システムの開発,海洋調査技術学会第22回研究成果発表 会予稿集,pp.13-14,11月,2011.
- 金沢敏彦,篠原雅尚,新谷昌人,藤本博己,飯笹幸吉,石原丈美:海底熱水鉱床探査のための ハイブリッド式海中重力探査システムの開発,海洋調査技術,pp.57-59,vol.23, No.1,2011.
- Araya, A., T. Kanazawa, M. Shinohara, T. Yamada, H. Fujimoto, K. Iizasa, and T. Ishihara, A gravity gradiometer to search for submarine ore deposits, Symposium on Underwater Technology 2011 & Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2011, Tokyo, Japan, 5-8 April, 2011, IEEE, 1064, 2011.