

文部科学省

平成 24 年度科学技術試験研究委託事業

「移動体搭載型重力計システムの高度化と実海域における実証試験観測」

成 果 報 告 書

国立大学法人東京大学地震研究所

平成 25 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
東京大学地震研究所が実施した平成24年度「移
動体搭載型重力計システムの高度化と実海域に
おける実証試験観測」の成果を取りまとめたも
のです。

目 次

まえがき	2
I. プロジェクトの概要	3
II. 実施体制および研究者リスト	4
III. 研究成果	
(1) 委託業務の目的	7
(2) 平成24年度における目標及び業務の方法	
(a) 海中重力計に関わる技術開発	9
1) 前プログラムで開発した重力計の実海域での実証試験	
2) 重力計の小型化にむけた開発	
(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発	9
1) 前プログラムで開発した重力偏差計の実海域での実証試験	
2) 重力偏差計の小型化の開発	
(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発	9
(d) 高精度重力測定に適したAUVの航行技術の開発	9
(3) 平成24年度の成果	
(a) 海中重力計に関わる技術開発	10
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発	18
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発	26
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
(d) 高精度重力測定に適したAUVの航行技術の開発	27
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
(4) 成果の論文発表・口頭発表等	32
(5) むすび	34
IV. 活動報告	
(1) 運営委員会	36
(2) 開発検討会	37

まえがき

文部科学省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－」（以下、前プログラム）（平成21年度～23年度）により、海底熱水鉱床や海底下の鉱床を高精度で効率的に探査する目的で、水中ロボットなどの海中移動体に搭載する移動体搭載型重力計システムを開発した。この移動体搭載型重力計システムは、新しく開発した重力値を計測する重力計と、重力勾配を計測する重力偏差計の両方を用いて精度を上げることが特長である。開発した重力計、重力偏差計は共に、海中移動体運用時の動揺を想定した陸上での動揺試験により、鉱床探査に十分な精度での重力測定が可能であることが確認された。

本研究プロジェクトでは、これらの新規開発した重力計と重力偏差計を、自律型無人探査機（AUV）に搭載し、実海域での実証試験を行う。この実証試験により、開発した移動体搭載型重力計システムの精度を検証するとともに、実データを用いて、データ処理プログラムの開発、さらには、地球科学的な情報を得るための解析プログラムの開発も行う。

また実証試験と並行して、重力計および重力偏差計の高度化として、海中移動体搭載型重力探査の実用に向けて重要となる重力計及び重力偏差計の小型化に取り組む。

I. プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、前プログラムで新規開発した重力計と重力偏差計を、自律型無人探査機（AUV）に搭載し、実海域での実証試験を行う。開発された移動体搭載型重力計システムは、重力値を計測する重力計と、重力勾配を計測する重力偏差計の両方を用いて、精度を上げることが特長である。AUVには、海洋研究開発機構深海巡航探査機「うらしま」を利用する予定であり、平成24年9月に3潜航が確保された。この実証試験により、開発した移動体搭載型重力計システムの精度を検証するとともに、実データを用いて、データ処理プログラムの開発、さらには、地球科学的な情報を得るための解析プログラムの開発も行う。

実証試験と並行して、重力計および重力偏差計の高度化として、海中移動体搭載型重力探査の実用に向けて重要な小型化に取り組む。現在の重力計と重力偏差計はそれぞれ2つの耐圧容器を用いているが、自律型無人探査機に重力計と重力偏差計の同時搭載を容易にすること、さらに遠隔操作型無人探査機への搭載を目標として、それぞれ直径50 cmのチタン球耐圧容器1個に収まる重力計と重力偏差計を開発する。

平成25年度中に、この開発した小型重力計と小型重力偏差計をAUV「うらしま」に搭載し、熱水鉱床域が存在する伊是名海域で移動体搭載型重力計システムの実証試験を行う。

Ⅱ．実施体制および研究者リスト

研究代表者 国立大学法人東京大学地震研究所教授 篠原雅尚

国立大学法人東京大学地震研究所

サブテーマ ① a．重力計実証試験と小型重力計計測記録部に関わる研究開発

① c．重力偏差計実証試験と小型偏差計に関わる研究開発

氏名	所属		役割
	部門	役職	
篠原 雅尚	地震研究所	教授	サブテーマ代表
新谷 昌人	地震研究所	准教授	実施担当
塩原 肇	地震研究所	准教授	実施担当
望月 公廣	地震研究所	准教授	実施担当
山田 知朗	地震研究所	助教	実施担当
八木 健夫	地震研究所	技術専門職員	実施担当

独立行政法人防災科学技術研究所

サブテーマ ① b．移動体搭載型重力計システムの実証試験観測と高度化（小型重力計計測センサ部に関わる研究開発）

氏名	所属		役割
	部門	役職	
金沢 敏彦	観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット 海底地震津波観測網整備推進室	室長	サブテーマ代表
植平 賢司	観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	実施担当

独立行政法人海洋研究開発機構

サブテーマ ②自律式深海探査機の航法及び計測技術開発

氏名	所属		役割
	部門	役職	
月岡 哲	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	グループリーダー	サブテーマ代表
山本 富士夫	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	サブリーダー	実施担当
吉梅 剛	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	技術副主幹	実施担当
南部 喜信	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	技術副主幹	実施担当
小椋 徹也	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	技術主任	実施担当
新倉 淳也	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	技術主事	実施担当

国立大学法人東京大学地震研究所

サブテーマ ③プロジェクトの総合推進

氏名	所属		役割
	部門	役職	
篠原 雅尚	地震研究所	教授	サブテーマ代表
新谷 昌人	地震研究所	准教授	実施担当
山田 知朗	地震研究所	助教	実施担当
八木 健夫	地震研究所	技術専門職員	実施担当
金沢 敏彦	観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット 海底地震津波観測網整備推進室	室長	実施担当
植平 賢司	観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	実施担当
月岡 哲	海洋工学センター・運航管理部・探査機運用グループ	グループリーダー	実施担当

国立大学法人東京大学地震研究所

サブテーマ ① a. 重力計実証試験と小型重力計計測記録部に関わる研究開発

① b. 移動体搭載型重力計システムの実証試験観測と高度化（小型重力計計測センサ部に関わる研究開発）

① c. 重力偏差計実証試験と小型偏差計に関わる研究開発

②自律式深海探査機の航法及び計測技術開発

③プロジェクトの総合推進

氏名	所属		役割
	所属機関・部門	役職	
藤本 博己	東北大学災害科学国際研究所	教授	業務協力
飯笹 幸吉	東京大学大学院新領域創成科学研究科	教授	業務協力
石原 丈実	産業技術総合研究所地質情報研究部門地質変動史研究グループ	テクニカルスタッフ	業務協力

独立行政法人海洋研究開発機構

サブテーマ ②自律式深海探査機の航法及び計測技術開発

氏名	所属		役割
	部門	役職	
大美賀 忍	日本海洋事業株式会社深海技術部	一等潜技士	業務協力

Ⅲ．研究成果

(1) 委託業務の目的

日本周辺海域において、現在発見されている海底熱水鉱床は、唯一活動的なものだけである。活動を停止した熱水鉱床や海底下の鉱床に至ってはその存在すら明らかにされていない。海底熱水活動域の潜在鉱物資源量を把握するにあたり、広範囲にわたる高精度なデータを迅速に取得するため、自律型無人探査機（AUV）及び遠隔操作型無人探査機（ROV）あるいは曳航体に搭載するハイブリッド式海中重力探査システムが必要である。これは今後の探査で期待される化石熱水域に伴う多金属硫化物鉱床や海底下の鉱床の分布や潜在鉱物資源量の把握にも重要である。重力計に関し、従来、陸域の硫化物鉱床の探査、資源量評価のために、航空機を用いた三成分重力偏差計の測定を行った事例はあるものの、海中移動体の動揺を補正する機構を装備した重力計あるいは重力偏差計、また傾斜地に設置可能な海底重力計がないことから、重力探査により潜在海底鉱物資源量の評価が行われたことはこれまでない。

現在市販されている野外観測用重力計センサの精度は、0.01 mgal 程度である。このセンサを海底付近で使用すると、周辺の地質体との密度差が 1 g/cm^3 ある時、海底下に埋没している厚さ 1 m の地質体を検出可能である。このことから、移動体搭載型重力計システムの導入によって、海底熱水鉱床の潜在鉱物資源量を、広範囲を迅速かつ精度よく評価可能である。

このような認識に基づき、平成 21 年度より、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「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」の一課題として、「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－」を実施した。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、周辺の岩石との密度差が 1 g/cm^3 の上記規模の鉱床がある場合に想定される 1 mgal から 0.5 mgal 程度の重力異常を検出することのできる移動体搭載型重力計システムを開発する必要がある。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ため、この開発研究においては、移動体搭載型重力計システムとして、重力（鉛直）偏差計と（海中）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した。

重力計については、ハイブリッド式海中重力探査システム専用仕様で特注した重力センサ、新規開発したジンバル機構による姿勢制御装置および姿勢計測装置（ジャイロ、傾斜計）から構成される重力センサ部と、重力データや姿勢データのデータ計測記録部を試作した。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を有していることを確認した。開発した重力計は、重力センサ部は直径 50 cm のチタン製耐圧容器に収容され、データ計測記録部は円筒の耐圧容器に収容されている。

重力偏差計については、新しく開発した長周期振り子（無定位振り子）と高感度の光学式変位センサ・制御回路を組み合わせた重力センサ 2 台を円筒状の真空容器内に収納したものを開発した。また、移動体の海中航行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回転できる XY 2 軸ジンバル構造を設け、取り付けられたジャイロの信号に基づいてセンサ姿勢を鉛直に保つような制御が行われる。開発した重力偏差計の陸上での性能評価では、海底下 50 m に埋没した鉱床を検出できる性能である 7 エトベス (E) を達成した。開発した重力偏差計は、センサ部と計測制御回路部から構成され、それぞれ直径 50 cm のチタン球に収容されている。

また、移動体搭載型重力計システムを搭載する移動体として、独立行政法人海洋研究開発機構の ROV「かいこう 7000」と AUV「うらしま」を想定し、移動体搭載型重力計システム（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を行った（図 1）。その結果、動揺特性、外部供給電力容量、ペイロードなどから、AUV である「うらしま」が適していることがわかり、実証試験の搭載移動体として、AUV「うらしま」を想定した開発を行った。

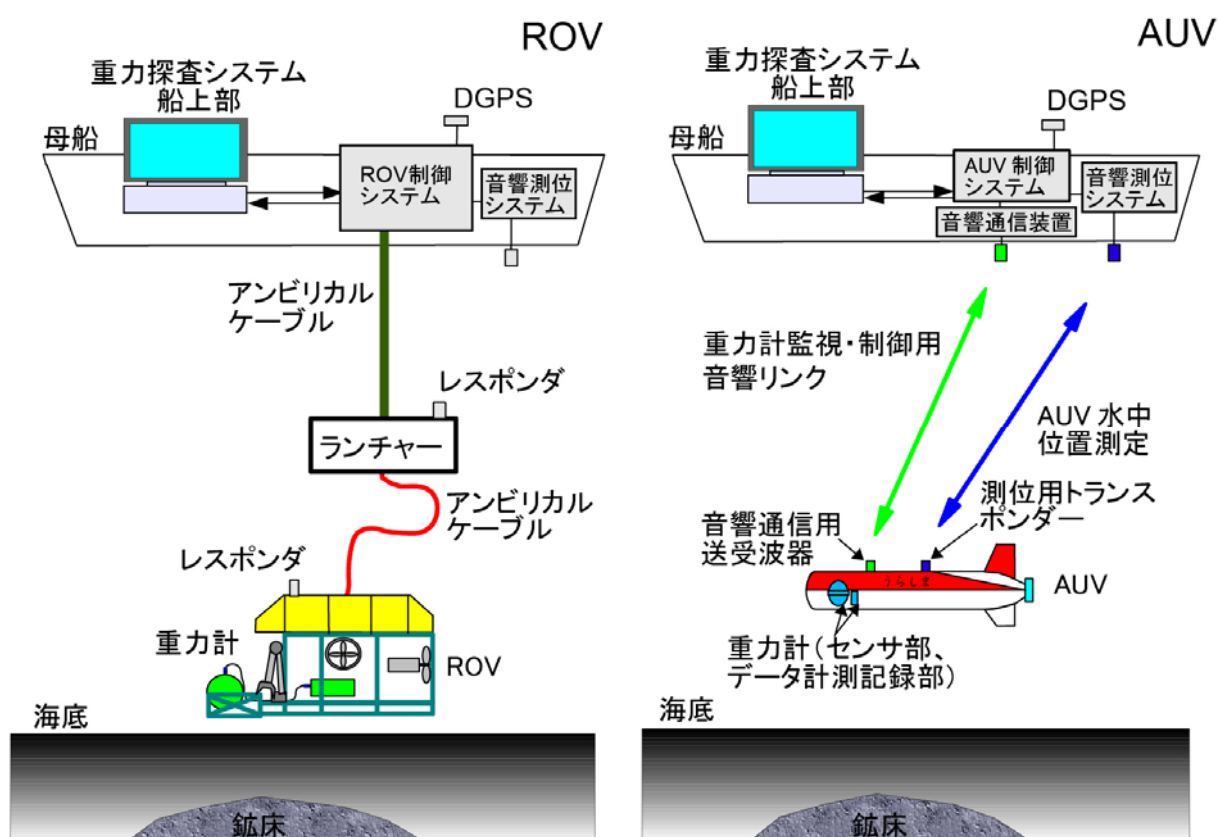


図 1 重力探査に使用する移動体（ROV と AUV）

本研究プロジェクトでは、次の 4 項目の研究開発を行う。

- 1) 海洋研究開発機構深海巡航探査機「うらしま」を用いた前プログラムで開発した重力計と重力偏差計の実海域での実証試験と計測用ソフトウェアの開発
- 2) 重力計と重力偏差計の小型化
- 3) AUV を用いた小型化した重力計と重力偏差計の実海域実証試験と海中重力探査用の解析ソフトウェアの開発
- 4) 高精度重力測定に適した AUV の航行技術の開発

前プログラムで開発した重力計と重力偏差計は、平成24年9月、AUV「うらしま」に搭載し、海中における実証試験を実施し、計測に必要なソフトウェアの開発を進める。

一方、前プログラムで開発した重力計と重力偏差計は、センサ部と計測部にそれぞれ別容器を用いている。しかしながら、将来の探査を考えると様々な水中移動体にも搭載できる重力計および重力偏差計の高度化が望まれる。そこで、前プログラムで開発した重力計と重力偏差計の小型化をはかる。小型化により、水中移動体に重力計と重力偏差計を同時搭載できるだけでなく、さらに精密測深器などの他の探査機器も搭載し、同時に複数項目の計測ができるようになる。

本研究で開発した小型重力計および小型重力偏差計は、平成25年度中にAUVに搭載し、実海域での実証試験の実施をめざす。そのため平成25年度の海洋研究開発機構研究船利用公募プログラムに応募し、AUV「うらしま」での実海域実証試験をめざすとともに、海中重力探査用の解析ソフトウェアを開発する。

AUVによる重力計測は、重力センサの精度のみならずAUVの運動データを用いて重力測定値を正確に補正する必要がある。さらに、重力計および重力偏差計は傾斜や衝撃に対して非常に敏感であり、航行中の動揺抑制や故障を防止するための技術開発が必要である。これらは、これまでの多数の「うらしま」運行実績によるデータを用いて実施する。

(2) 平成24年度における目標及び業務の方法

(a) 海中重力計に関わる技術開発

1) 前プログラムで開発した重力計の実海域での実証試験

重力計の海中実証試験を実施し、移動体による重力データを取得する。

2) 重力計の小型化にむけた開発

様々な移動体による重力観測のために小型重力計を開発する。

(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

1) 前プログラムで開発した重力偏差計の実海域での実証試験

重力偏差計の海中実証試験を実施し、移動体による重力偏差データを取得する。

2) 重力偏差計の小型化の開発

様々な移動体による重力偏差観測のために小型重力偏差計のセンサ部を開発する。

(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発

海中重力計を用いた海底資源探査を実施するためには、観測のためのハードウェア・ソフトウェアの開発と共に、収録された観測データから重力異常値を求めるソフトウェアの開発が必須である。平成24年度は、オフライン処理により、海中重力計システムの観測データを用いてフリーエア重力異常を求めるためのソフトウェアを開発する。オフライン処理ということで、PCのハードディスクに保存された情報を読出し、結果をハードディスクに出力することとした。

(d) 高精度重力測定に適したAUVの航行技術の開発

開発された海中重力計システムを自律型無人探査機(AUV)に搭載して潜航させるため

には、以下のように重力計システムと AUV の技術仕様を整合させ、AUV に重力計システムを搭載し実証試験に供する。

- 1) AUV に海中重力計システムを艤装し、計画通りに作動することを確認する。
- 2) 慣性航法装置、速度検出装置および深度計等から出力されるセンサデータを収録し重力補正係数を算出するソフトウェアを試作し、有効であることを確認する。
- 3) 動揺低減のために、運動制御に慣性航法等の現在使用していないセンサを適用した場合の動揺低減を検討する。
- 4) 機体動揺等から高感度重力計システムを保護するために、制御装置から海中重力計システムに組み込まれた保護装置を作動させるためのソフトウェアを試作する。

(3) 平成24年度の成果

(a) 海中重力計に関わる技術開発

1) 開発の概要

前プログラムで開発した重力計は、重力センサ部とデータ計測記録部から構成され、それぞれ専用の耐圧容器に収容されている。重力センサ部は、船上重力計用重力センサをハイブリッド式海中重力探査システム専用仕様で特注し、通常の船上重力計の 10 倍の感度を有する重力センサとジンバル機構による姿勢制御装置および姿勢計測装置（ジャイロ、傾斜計）から構成される。データ計測記録部は重力データや姿勢データのデータ計測・記録装置や移動体とのインターフェイス部から構成される。

本研究では、前プログラムで開発した重力計を AUV「うらしま」に搭載し、相模湾の水深 1400 m 程度の海域で実証試験を実施し重力データを取得した。また、様々な移動体による重力観測の実現のため、重力計の小型化の開発を進めた。小型化に当たっては、9 月に実施した実証試験の結果も踏まえて、前プログラムで開発した重力センサ部のジンバル機構部およびデータ計測記録部機能の見直しを行い、再設計・製作した。これにより、一台の耐圧容器に収容できる重力計が実現する見込みとなった。

2) 実施内容

a) 前プログラムで開発した重力計の実海域での実証試験

前プログラムで開発した重力計の重力センサ部容器（チタン製球形耐圧容器）、データ記録部容器（円筒型耐圧容器）および高精度水圧計は、それぞれ図 2 に示すように、AUV「うらしま」の前部に搭載した。重力センサ容器は、内部の重力センサの温度を 60.4° に一定に保つため常時ヒータ電源が入れられている。このため、外部周囲温度が高い場合には、内部発熱に対する温度制御が適切に行われない（耐圧容器内面に断熱処理材を添付してあるため、十分な放熱ができない）。このため、AUV「うらしま」が潜航前後に船上に置かれている場合には、重力センサ部容器を冷却水により強制冷却するようにした。図 3 に、耐圧容器の上部に取り付けた冷水循環装置（冷却水を循環させるホースを巻きつけたもの）を示す。

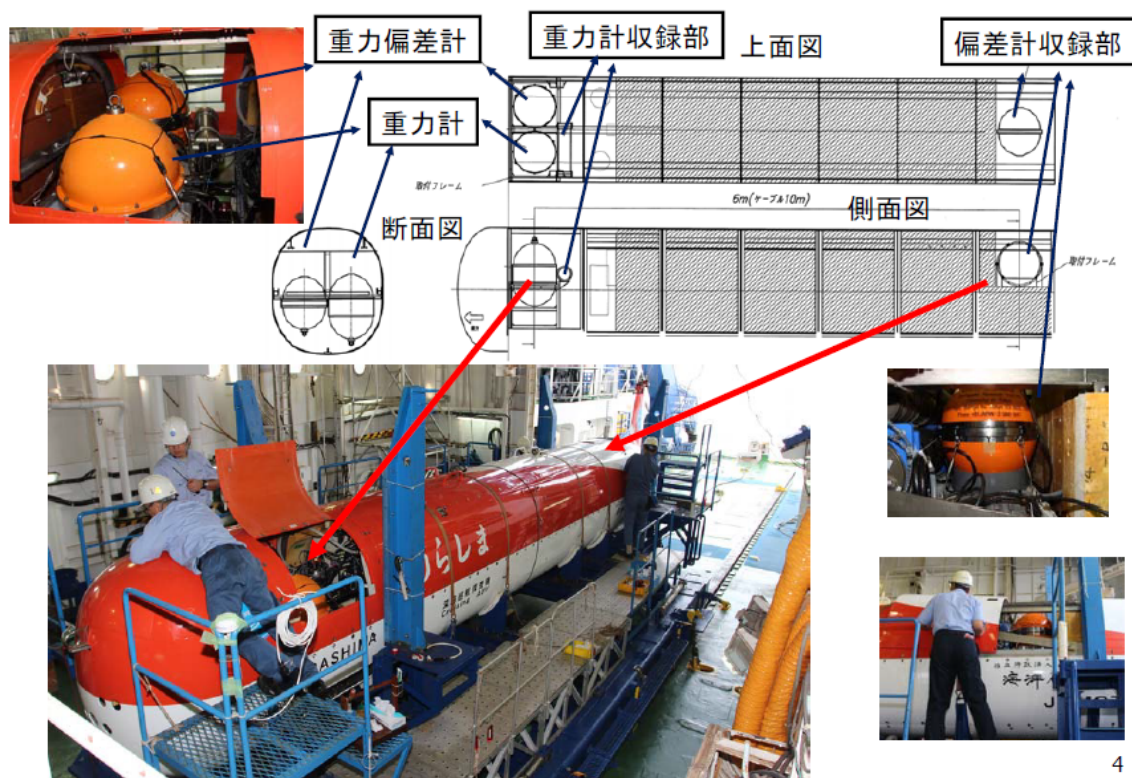


図2 AUV「うらしま」への重力計の搭載



図3 重力計の冷却装置

前プログラムで開発した重力計および重力偏差計をAUV「うらしま」に搭載しての実海域での実証試験を、2012年9月6日～9月10日に相模湾の水深1400 m海域で実施した(図4)。重力計の制御はAUV「うらしま」と母船「よこすか」間に設けられている音響リンクを介して、船上から実施された。

実施海域と、AUV「うらしま」の航行コースを図5(左図:水深図と航行コース)図5(右図:重力図と航行コース)に示す。実際に潜航して航行したのは、9月7日(ダイブ#127)と9月9日(ダイブ#128)の2日であり、AUVを深度一定に制御した状態でコースを往復し重力データを計測した。7日は1往復、9日は2往復半した。

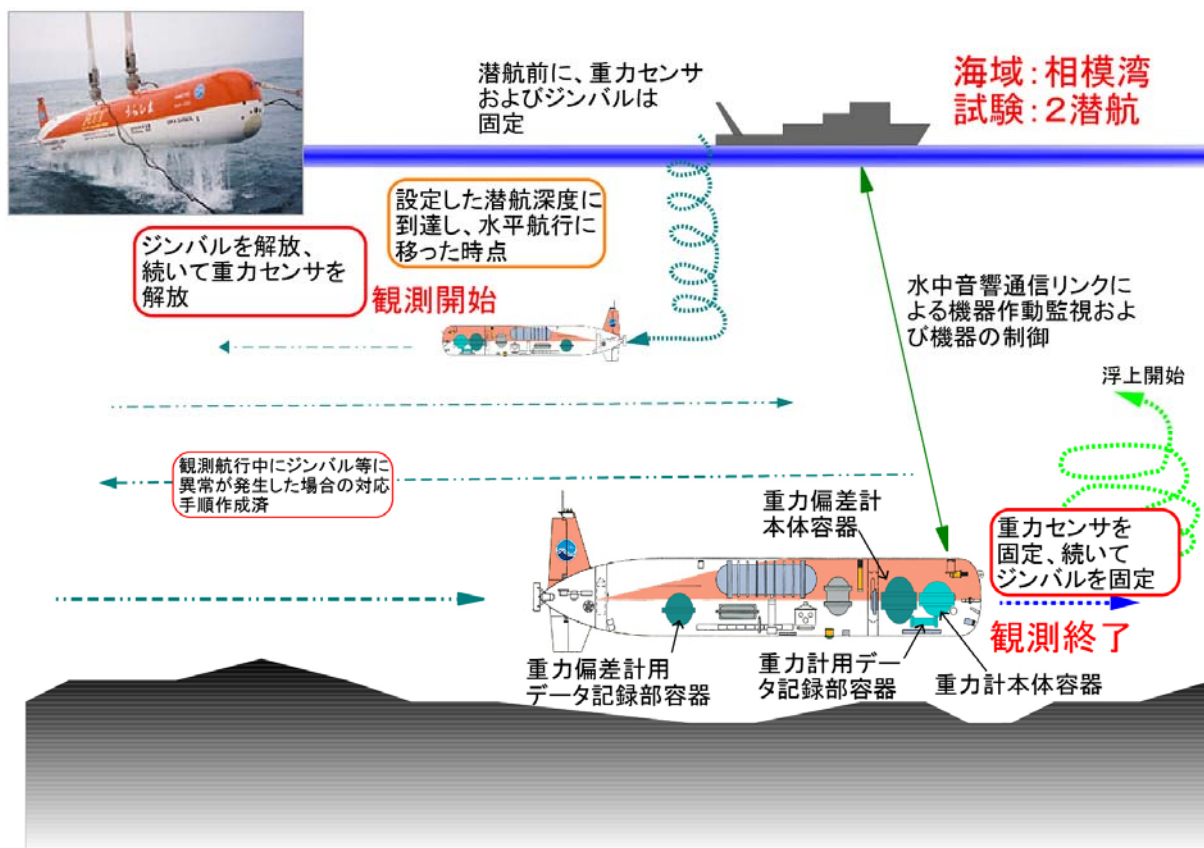


図4 実証試験

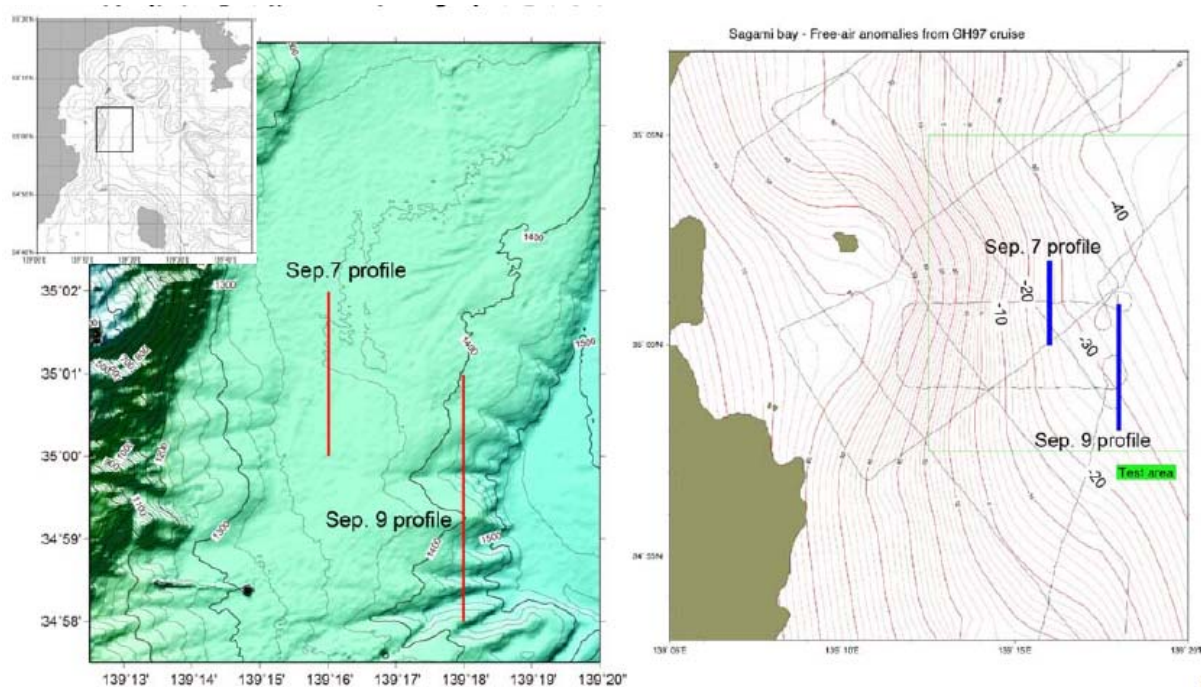


図5 実施海域と、AUV「うらしま」の航行コース

9日のダイブ#128の生データ（100 Hzサンプルデータ）を図6の黒線で示す。重力計の動揺は2～3 galに達する大きなものとなっている。これに1秒のローパスフィルターをかけて高周波ノイズ低減したものが赤線であるが、1秒のローパスフィルターではまだノイ

ズ低減は不十分であることが分かる。

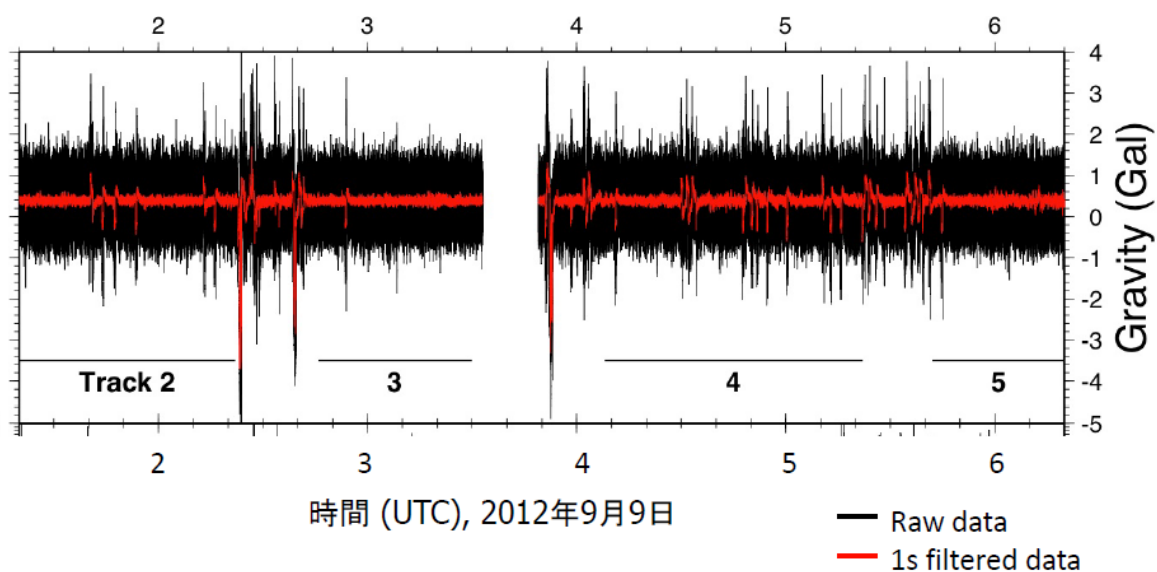


図6 9日のダイブ #128の生データ (100 Hzサンプルデータ)

データ解析には、このローパスフィルター処理の他に、「(c)海中重力計測用ソフトウェアの開発」の項で述べる各種の補正が必要である。その補正の一つであるAUVの鉛直運動による影響を除去するための鉛直加速度補正処理を行った結果を図7に示す。鉛直加速度は、高精度水圧計のデータから算定して使用した。なお、図7では、鉛直加速度補正処理の前に、1秒のローパスフィルターをかけた後に、100秒のローパスフィルターをかけてある。なお、フィルターはガウシアンフィルターを用いた。重力値の変化が大きい時間は、AUVが測線の走行を終えて回頭している時である。測線を航行している状態での重力変動は、数十 mgal 以下になっている。

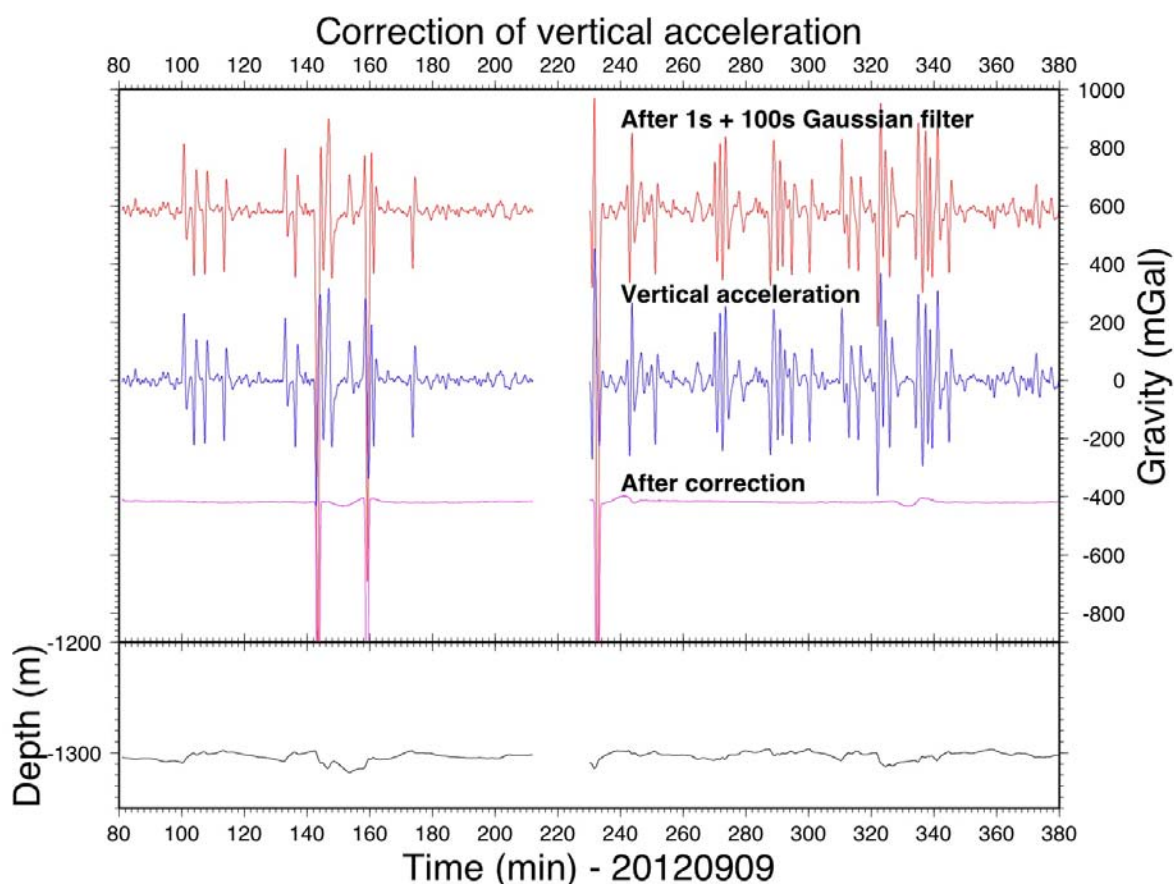


図7 鉛直加速度補正処理した重力データ

赤線はローパスフィルター処理を施したあとの重力計データ、青線は精密水圧計から求められた上下方向の加速度である。重力データから、上下方向の加速度の影響を取り除くことにより、精度が向上した。

図8は、ガウシアンフィルターを100 秒、200 秒、300 秒とした場合を比較したもので、重力データの変動の標準偏差は、それぞれ0.31 mgal、0.14 mgal、0.10 mgalとなる。このことから、「(c)海中重力計測用ソフトウェアの開発」の項で述べる他の各種の補正を行うことで、実運用でも、目標とする1 mgal以下の精度（再現性）が実現できることがわかった。

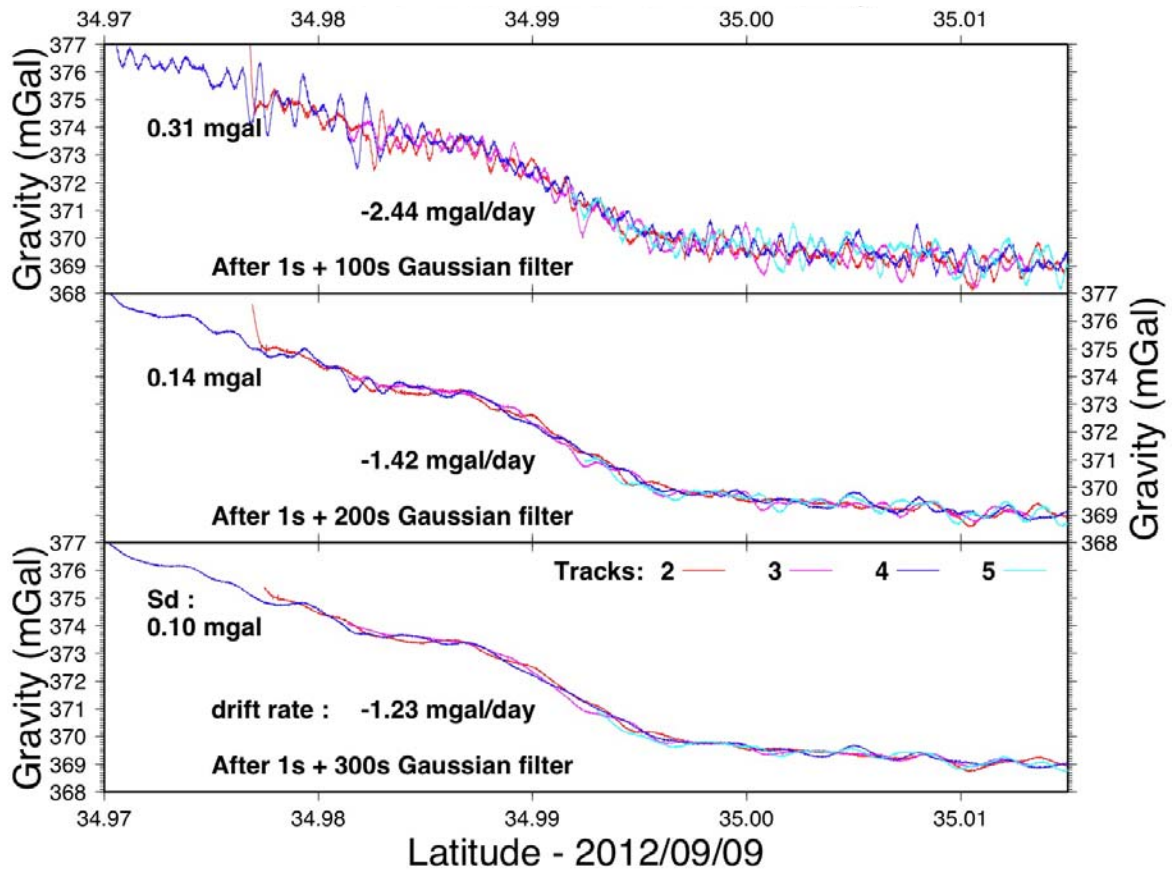


図8 開発した重力計の精度（再現性）

b) 重力計の小型化にむけた開発

様々な移動体による重力観測の実現のため、重力計の小型化の開発を進めた。小型化に当たっては、平成 24 年 9 月に実施した実証試験の結果も踏まえて、

- i) 移動体の動揺補正範囲を拡大するための強制ジンバル装置の可動範囲拡大
- ii) 電子回路基板の機能集約による小型化と省電力化

を行い、再設計・製作した。

これにより 2 台の耐圧容器で構成されていた重力計システムが、1 台の耐圧容器（50 cm チタン球耐圧容器）に集約されシステムの小型化が実現することになった。（図 9）

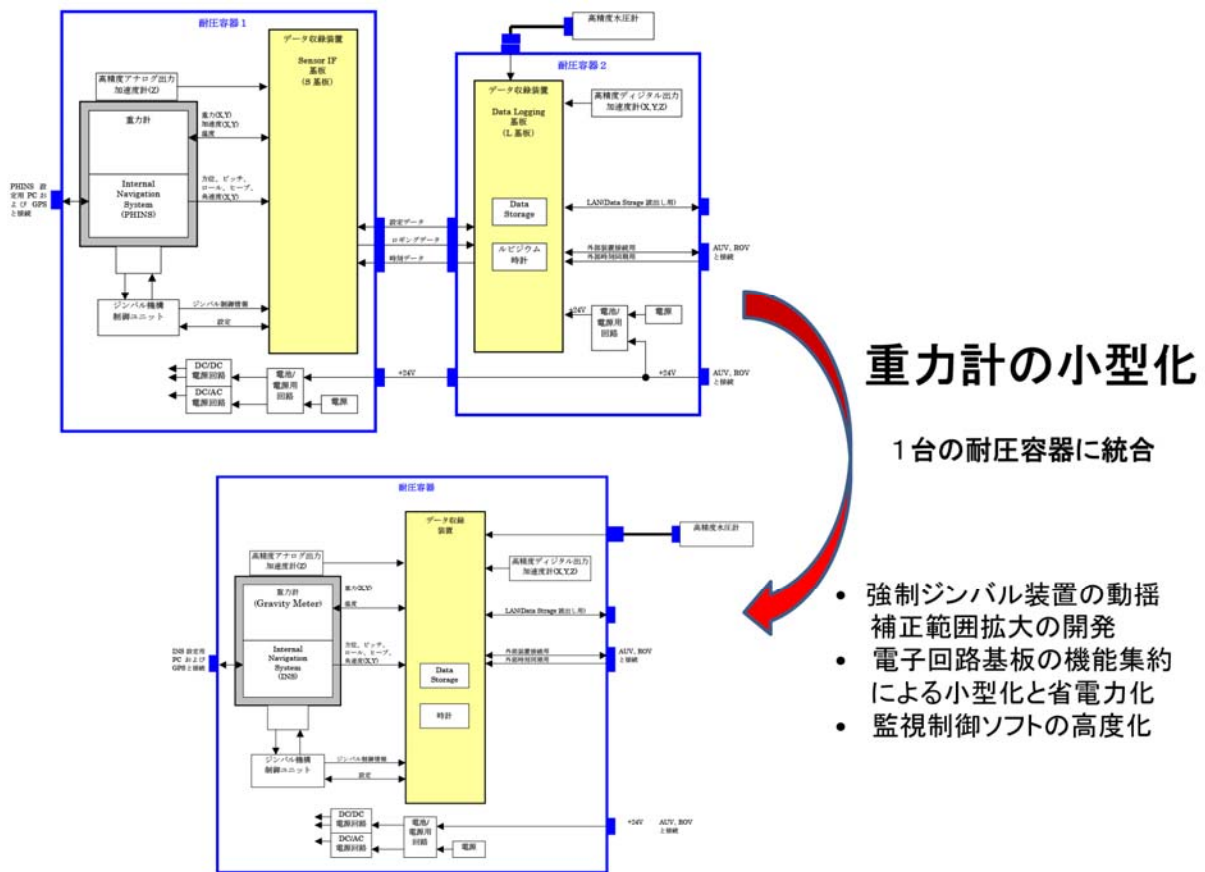


図9 重力計の小型化

i) 移動体の動揺補正範囲を拡大するための強制ジンバル装置の可動範囲拡大

現実の熱水鉱床域は起伏の激しい海底地形である。移動体がこの地形に沿って重力探査航行する場合、移動体の姿勢の動揺幅が大きくなるため、高精度の重力測定を確保するためには、極めて高精度な動揺補正が必要である。今年度のAUV「うらしま」による海域実証試験で、「うらしま」の動揺特性を把握した。AUV「うらしま」は、潜航深度（あるいは高度）を変更する場合、水平舵のピッチング角度を制御により変化させる航法としている。このピッチング角度の変化幅が、当初想定していた角度より大きいことが判明した（これまでAUV「うらしま」が運用されてきたマルチビームやサイドスキャンソナー等の音響計測では、この点は問題にならない）。このため小型化する重力計では、以下の開発を進めることとした。

- ① 海洋実験で把握した動揺特性および、AUV「うらしま」の姿勢制御特性、航行運用方法の検討を参考に、ピッチング方向動揺補正範囲を拡大する。

$$\pm 10^{\circ} \rightarrow \pm 30^{\circ} \quad (\text{制御精度 } 0.01^{\circ})$$

なお、ローリング方向の動揺補正範囲は従来通り $\pm 15^{\circ}$ である。

- ② 既存の強制ジンバル機構の構造およびジンバル機構に搭載されているエレクトロニクス of 構造・搭載方法の設計を行い、機構部を製作した。

1 台の耐圧容器に収容した重力計システムの内部構造図（模式図）と、試作した強制ジンバル機構部を図10に示す。

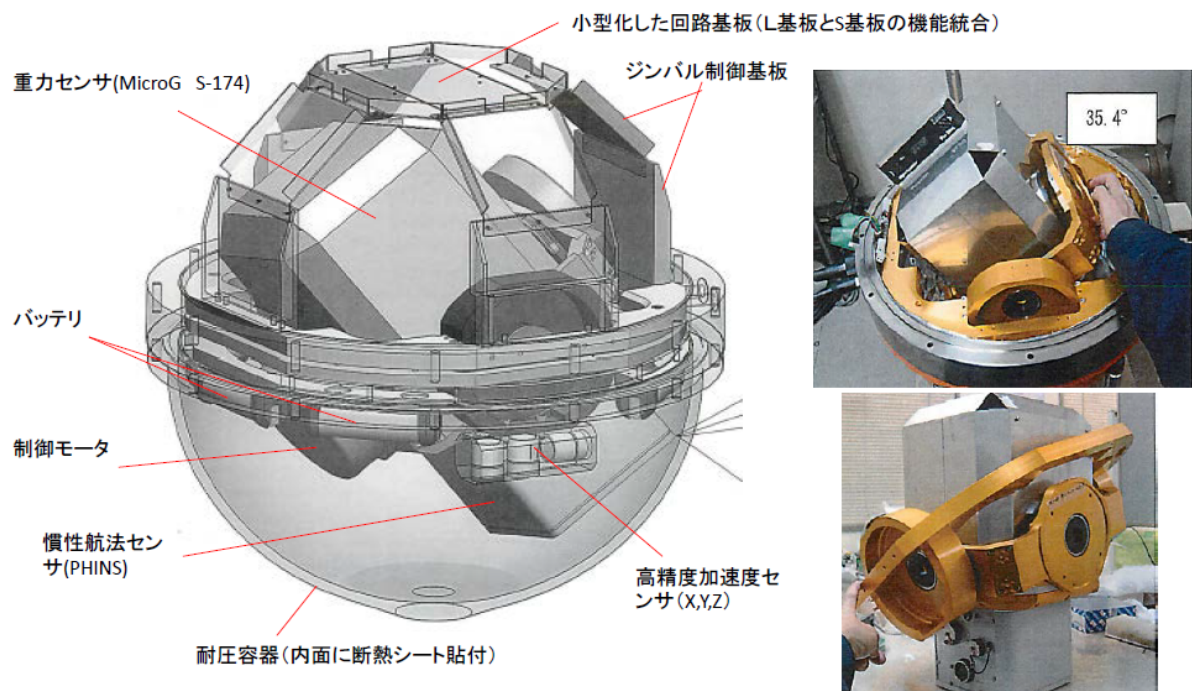


図10 小型化した重力計システムの内部構造図と、試作した強制ジンバル機構部

ii) 電子回路基板の機能集約による小型化と省電力化

図9に示したように、従来、二つの耐圧容器に収容されていたセンサ（重力センサ・慣性航法センサ、加速度計、高精度水圧センサ）の信号処理基板（S基板）、データ収録・通信基板（L基板）の機能を見直し、一枚の小型基板（S/L基板）に統合するため、新たな統合基板を設計・製作した。また電源回路の見直しも行い、全体の消費電力を約20%低減した。開発したS/L基板を図11に示す。

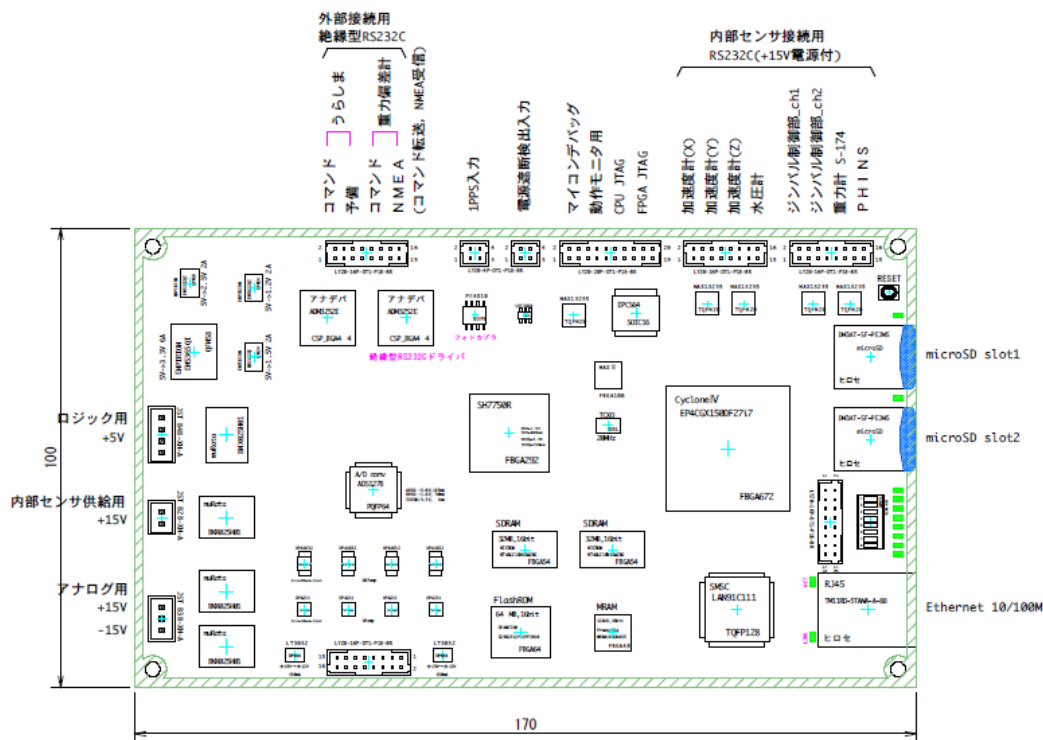


図11 新規開発した S/L 基板の構成図

3) 成果のまとめ

前プログラムで開発した重力計を AUV「うらしま」に搭載し、2012 年 9 月に相模湾の水深約 1400 m の海域で深度 1300 m で航行し、実海域での実証試験を実施した。取得した重力データについて適切なデータ処理を行った結果、熱水鉱床域の重力異常の検出目標である 1 mgal 以下の精度（再現性）が得られることを確認した。

また、様々な移動体（AUV、ROV）による重力観測の実現のため、重力計の小型化の開発を進めた。小型化に当たっては、9 月に実施した実証試験の結果も踏まえて、前プログラムで開発した重力センサ部のジンバル機構部およびデータ計測記録部機能の見直しを行った。ジンバル機構部は、構造の見直しと可動範囲・制御範囲の拡大を行い小型化と運用時の許容動揺範囲を拡大し実用性を向上させた。またデータ計測記録部は実用性向上の観点から機能の見直しと電子回路基板の小型化、省電力化を図る再設計・製作を行った。これにより、1 台の耐圧容器に収容できる重力計が実現する見込みとなった。

(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

1) 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、重力計単独の場合と比べ誤差要因（並進加速度、エトベス効果、温度変化など）が 2 台の重力計の差を取ることでによりキャンセルされ、高精度の測定が可能である。特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。また、重力の空間微分量である重力偏差は比較的小さい領域に局在化して分布している海底資源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。

前プログラムで開発した重力偏差計を AUV「うらしま」に搭載し、相模湾の水深 1400 m 程度の海域で実証試験を実施し、海中移動体による重力偏差データを取得した。また、様々な移動体による重力偏差観測ができるように装置の小型化に着手し、主に小型重力偏差計のセンサ部の製作を行った。前プログラムで開発した重力偏差計は、センサ部と計測制御回路部が、それぞれ直径 50 cm のチタン球耐圧容器に収容されていたが、本研究での小型化により、すべてが 1 台の 50 cm のチタン球耐圧容器に収容される見込みである。

2) 実施内容

a) 前プログラムで開発した重力偏差計の実海域での実証試験

海域実証試験に先立って、装置を収納する耐圧チタン容器の耐水圧試験を実施した。重力偏差計はセンサ部および記録部の二つの容器から構成され、それらはケーブルで接続される。図 12 に示すように、海域試験で使用される耐圧容器 2 個をケーブルで接続した状態で高圧実験水槽（海洋研究開発機構）に収納し、加圧試験を実施した。

水深 3500 m 程度まで耐えることを確認するため、37 MPa で 1 時間の加圧を行った。容器・バルクヘッド・コネクター・ケーブルいずれも水漏れや絶縁不良は認められず、海域試験での使用に支障がないことが確認された。



図 12 高圧実験水槽（海洋研究開発機構）による耐圧チタン容器の水密試験

重力偏差計のチタン容器 2 個は AUV に重力計用の容器とともに搭載されるため、ペイロード・スペースの都合で、図 13 に示すように前方にセンサ部（本体）容器、後方に記録部容器を搭載し、両者をケーブルで接続する構成とした。

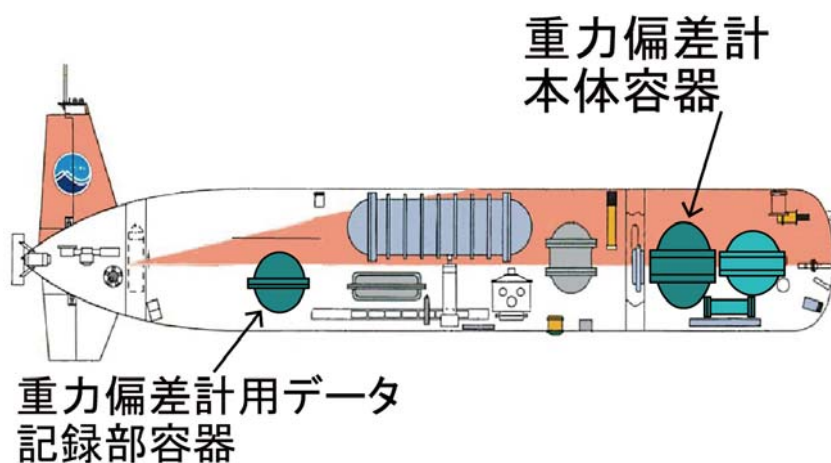


図 13 AUV「うらしま」の重力偏差計の配置
前方：センサ部（本体） 後方：記録部

重力偏差計本体は AUV の揺動による傾斜を避けるため、前プログラムで開発した XY ジンバル上に搭載されている。図 14（左）の中央の円筒状の部分に重力センサが組み込まれている。下部も同様になっており、上下に 0.44 m の距離を隔てた 2 台の重力センサの差信号を取得して重力偏差を得る。装置全体はクロスヒンジ軸受けで支持されており、水平 2 軸 (X, Y) まわりに自由に回転できる。中央部に組み込まれたジャイロおよび傾斜計の信号に基づいて、装置の姿勢を垂直に維持するよう帰還制御がかけられる。図 14（右）は記録部であり、重力センサやジンバルの制御回路も含まれている。重力センサの各信号および

姿勢信号は収録装置により記録メディアに収録される。また、記録部内にもジャイロおよび傾斜計・温度計が組み込まれており、AUV の姿勢が記録される。

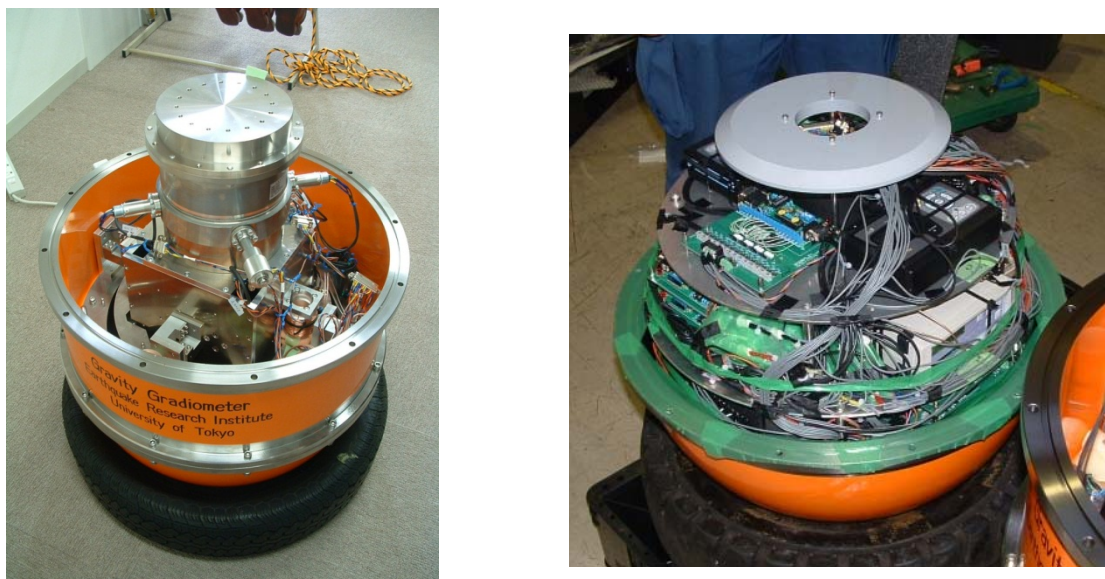


図 14 重力偏差計のセンサ部（左）および記録部（右）

記録部には、重力センサやジンバルの制御回路、収録装置、AUV の姿勢モニタ用のジャイロおよび傾斜計、温度計が含まれる。

「うらしま」へ艀装された様子を図 15（左）に示す。手前が重力計のチタン容器、奥が重力偏差計のセンサ部のチタン容器である。ともに専用のフレームに取り付けられ、「うらしま」の構造梁とフレームが固定された。水中ではチタン容器に浮力が発生するため、さらにワイヤーで容器をフレームに固定した。図 15（右）はチタン容器内の重力偏差計である。陸から試験海域までの航海中に揺動による不具合が発生しないように、ジンバルに緩衝剤を挿入した。試験海域に到着後船上でそれらを取り除いた。ただし、ジンバルの制御は電源の都合で海中のみで起動させるため、写真では無制御の傾いた状態となっている。抵抗なくジンバルが回転できることを確認した。



図 15 （左）「うらしま」へ艀装された重力計（手前）および重力偏差計（後方）
（右）チタン容器内の XY ジンバル上に搭載された重力偏差計

海中実証試験の航海は 2012 年 9 月 6 ～10 日に実施され、「うらしま」の海中投入による実証試験は 9 月 7 日および 9 日の 2 日間であった（図 16）。9 月 7 日は「うらしま」のバランスがやや悪く、ローリング方向に傾いた状態で航行した。そのため、ジンバルの制御範囲（ $\pm 4.5^\circ$ 以内）を超えてしまい、取得データは傾斜状態での参考データという扱いとなってしまった。9 月 9 日は「うらしま」側のバランス調整により航行姿勢が改善され、正常にデータを取得することができた。重力偏差のデータ解析は 9 月 9 日のデータに関して実施した。

図 17 は海中投入後の重力偏差計の各重力センサ出力（上）、ジンバル傾斜（下）のグラフである。観測開始時間以降は重力センサ出力・ジンバル傾斜ともに正常動作（信号が飽和していない）が一定時間継続していることが確認できる。但し、AUV の基線を反転する際の転回に伴う擾乱や基線を水平航行する際におもにピッチ方向の制御に伴う擾乱があり、その場合に信号が飽和してしまっている。



図 16 「うらしま」の海中への投入

正常動作の際の揺動と重力偏差の関係をみるために、重力センサ単体の出力（ g_1 ）および 2 台の重力センサの差（ Δg ）のスペクトルをプロットしたものが図 18 である。20 Hz に振動のピークがあり、これが全体の出力振幅を決めている。ただし、低周波は低下しており、 $\sim 10^{-3} \text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ で平坦になっている。 Δg を取ることにより共通の揺動はキャンセルされ、低周波帯で 2 桁以上の雑音低減が認められる。さらに、水平揺動とのクロストークを考慮して並進揺動による成分を低減させると約 3 桁揺動をキャンセルできることがわかった。目標の 10E にはまだ約 1.5 桁不足しているが、センサ側の増幅率や差動回路の導入、および「うらしま」の低擾乱航行で目標レベルまで改善できる見込みである。

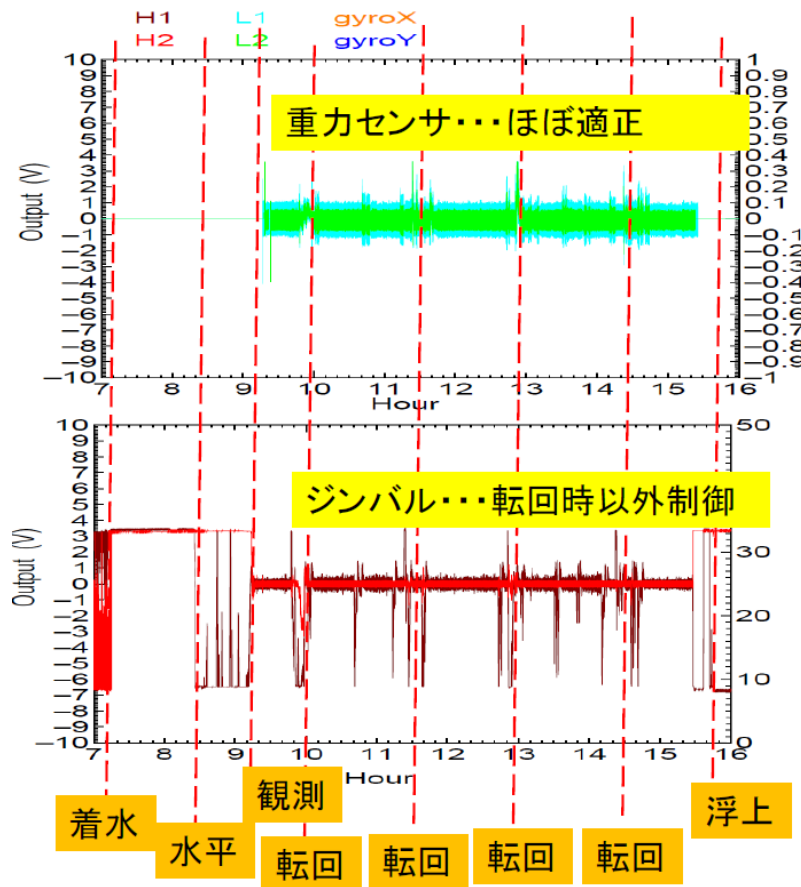


図 17 2012 年 9 月 9 日の海中投入後の重力偏差計の各重力センサ出力（上）
およびジンバル傾斜（下）

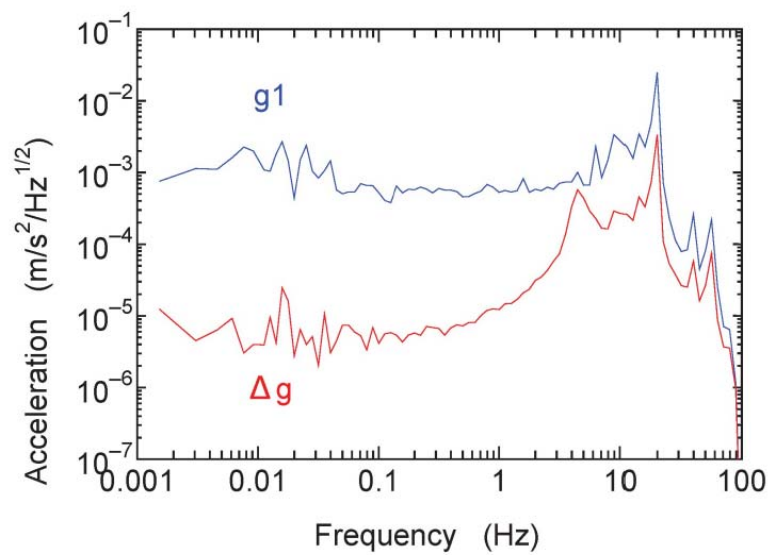


図 18 重力センサ単体の出力（ g_1 ）および 2 台の重力センサの差（ Δg ）の
スペクトル

b) 重力偏差計の小型化の開発

様々な移動体を用いた重力偏差観測ができるためには、装置はなるべく小型の必要がある。現状の偏差計は直径約 50 cm のチタン容器 2 個の大きさであり、「うらしま」では搭載可能であったが、他の海中ロボットでは難しい。広く海中移動体による重力偏差観測ができるためには、装置の小型化が本質的に重要である。そこで、全体の装置をセンサ容器 1 個に収納できるように小型化に着手した。

現在、大きさを決めている主な要因は、重力センサ本体、ジンバル制御用ジャイロ、制御回路・収録装置である。重力センサ本体は前プログラムでは直径 140 mm の円柱状のものを製作した。本計画では、直径を 100 mm に小型化する。偏差計としての性能の劣化をさけるため、高さ方向（各重力センサの高さ、および両者の垂直距離）はほぼ変えず、重力センサの直径を低減して出来た空間に回路を組み込むことで、全体を 50 cm チタン容器 1 個に収める。

図 19 は小型重力センサの外観である。仮組の状態であるが、目標のサイズに収められることがわかった。

図 20 はジンバル制御用のジャイロの写真である。従来のものは光ファイバージャイロであり、精度は良いが、ファイバーコイルの径が大きく、大きいスペースを占めていた（左写真の黒い円柱状の装置）。近年、シリコンの微細加工技術を利用した MEMS ジャイロ（右写真）が開発され、光ファイバージャイロに近い精度の小型のものが入手できるようになった。本計画ではこのジャイロを採用し、ジンバルを小型化する予定である。



図 19 本計画で製作中の重力センサの外観（仮組）
従来 140 mm であった外径を 100 mm に低減



図 20 ジンバル制御用ジャイロ

左写真の黒い円柱状の装置：従来使用していた光ファイバージャイロ
 右写真：シリコンの微細加工技術を利用した MEMS ジャイロ

全体を 1 個の耐圧容器に入れるためには制御回路や記録装置の小型化が必要である。また、「うらしま」側や重力計側との通信用回路も含める必要がある。そこで、全体の回路系を見直し、おもに通信・記録系を基板化して小型にした。また、制御回路の枚数の低減およびサイズの縮小を行った。図 21 は全体の回路のブロック図であり、今年度はアナログ系（図 22）および通信・記録系の一部（図 23）を製作した。

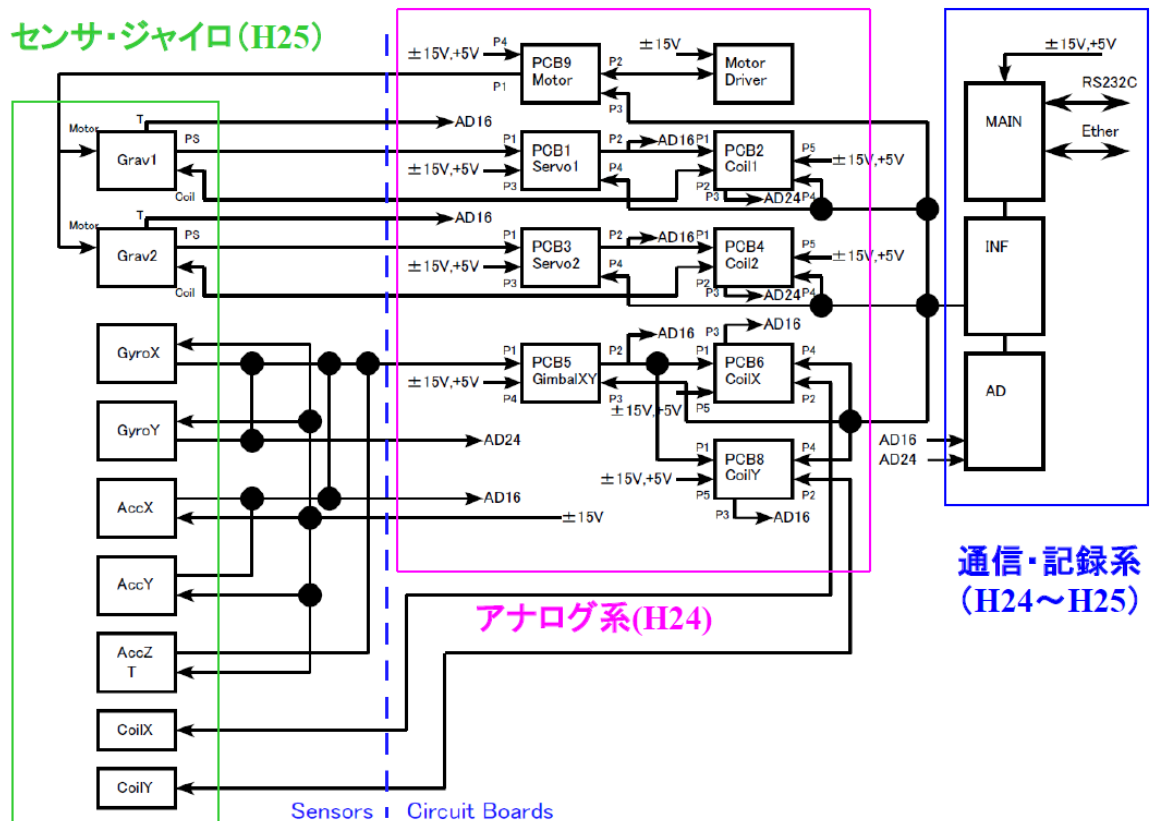


図 21 全体の回路のブロック図（今年度はアナログ系および通信・記録系の一部を製作）



図 22 製作された小型制御回路基板およびジンバル制御用コイル



図 23 製作された小型通信・記録基板

3) 成果のまとめ

前プログラムで開発した重力偏差計を AUV「うらしま」に搭載し、2012 年 9 月 9 日に相模湾の水深約 1400 m の海域で深度 1300 m で航行し、実海域での実証試験を実施した。海中移動体に搭載した状態で正常動作し、重力偏差データが取得できることを確認した。また、様々な移動体による重力偏差観測のために、装置全体を一つの耐圧チタン容器に収納できるように小型化を進めた。小型重力偏差計のセンサ部の製作を行い、ジンバル制御用のジャイロとして小型 MEMS のものを調達した。また、全体の回路系を見直し、通信・記録系の小型基板回路の製作、および制御回路の枚数低減・サイズ縮小を行った。

(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発

1) 開発の概要

海中重力計を用いた海底資源探査を実施するために、重力計測用のソフトウェアの開発を進めた。平成24年度は、フリーエア重力異常の空間変化を求めるまでの処理を行い、海底地形の影響を補正しブーゲー異常を求める重力解析用ソフトウェアの開発は次年度に行う予定である。遠隔操作型無人探査機を用いた観測ではオンライン処理も可能になるが、平成24年度の観測は自律型無人探査機（AUV）に重力計システムを搭載して行うので、オフラインの重力データ処理ソフトウェアを開発することとした。開発したソフトウェアは、PCのハードディスクに保存された海中重力計システムの観測データを入力し、重力センサの動揺加速度等の補正を行って、測線に沿ったフリーエア重力異常の変化を求め、結果をハードディスクに出力するものである。

2) 実施内容

海中重力計システムの観測データとして、重力センサの出力データ（100 Hz）、水晶圧力計の出力データ（40 Hz）、AUV「うらしま」の航法データ（1 Hz）は、それぞれ、海上でGPSに同期させたシステムの時計による時刻とともに記録され、潜航調査終了後、データ解析用のハードディスクに保存される。

重力計測用ソフトウェアは、それらの観測データを入力し、以下に示す処理を行ってフリーエア重力異常を求め、結果をハードディスクに出力するものである。相模湾における調査航海の前にプロトタイプソフトウェアを開発し、潜航調査で得られた観測データを用いて、ソフトウェアの改良を行い、最終版を作成した。

重力計測用ソフトウェアでは、以下の処理を行う。

- ・観測データの読み込みと時刻同期
- ・重力計センサの傾斜補正（AUVの姿勢角および重力センサの傾斜角を用いる）
- ・重力値に1段目のローパスフィルタリング（1秒）
- ・重力センサの上下運動による鉛直加速度の補正（水圧データを用い、重力データと時刻同期を行う）
- ・東西方向の対地速度に応じたエトベス補正（AUVの航法データを用いる）
- ・水深変化の影響を補正する（水圧データを用いる）
- ・重力値に2段目のローパスフィルタリング（100秒、200秒、300秒の結果を比較）
- ・緯度による重力変化と重力センサのドリフトの影響を補正し、測線に沿ったフリーエア重力異常の変化を求める。

なお、これらの処理は必要に応じて順番を入れかえる事も可能である。

3) 成果のまとめ

平成24年9月に相模湾でAUV「うらしま」による2潜航において海中重力測定を行い、潜航調査後に、上記の重力計測用ソフトウェアにより、海中重力計システムの観測データの処理を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・重力計センサ部の恒温槽は設定された温度範囲内に保持されていた。
- ・強制ジンバルを用いた鉛直保持機構はその機能を十分果たしており、AUVのピッチ角がジン

バルの許容範囲 (± 10 度) を超えた時以外は、重力計センサ部は重力測定に十分な精度で鉛直が保持されていた。

- ・水晶圧力計による水深変化から重力センサの上下動の動揺加速度を計算し、1 秒のローパスフィルターを施した重力値に対してその補正を加えることにより、短周期の変動以外の動揺加速度は除去できることが実証された。ただし、AUVのピッチ角がジンバルの許容範囲 (± 10 度) を超えた時はこの限りではない。
- ・上下動の動揺加速度の補正後に残る短周期の変動は、100 秒のローパスフィルターをかけたデータでは 0.2 mgal程度の振幅になり、300 秒のローパスフィルターを用いた結果では 0.05 mgal程度の振幅に抑えることができる。
- ・フリーエア重力異常を求め、ドリフトの影響を補正して測線に沿ってプロットすると、300 秒のローパスフィルターを施した場合、0.1 mgal程度の繰り返し測定精度が得られた。

(d) 高精度重力測定に適したAUVの航行技術の開発

1) 開発の概要

東京大学地震研究所で開催された開発検討会での技術情報交換を通じて関連部門との調整を図り、重力計を初めてAUVに搭載して潜航試験を成功させるための重力計とAUVの技術仕様を整理し、AUV側では以下の方針を定めた。

a) 艀装作業

AUV「うらしま」の一般配置図および実機の状態を参照しながら、機体への耐圧容器固定およびケーブル敷設を計画し、機体の浮力材等の配置を変更する。艀装時に取り付けを調整する。

b) インターフェイス

AUVと重力計のインターフェイスはハードウェアとソフトウェアから構成される。ハードウェアはシリアル通信 2 回線と重力計への電力供給を 2 系統計画する。ソフトウェアは重力計システムが音響通信およびLANを経由した通信回線を利用できるように機能を追加・改造する。また、重力計の保護機能を付加する。重力計からのデータ処理の方針に従い、航法データ送出に時刻整合が取れるように構成する。

c) 潜航中の動揺抑制

初めての潜航試験であるので、航行中の姿勢が安定し、重力計測値の再現性を検証できるように、深度を一定に制御してなるべく平坦な海底で航行させる。

2) 実施内容

AUVが大きく傾斜すると重力計装置の不具合を引き起こす。一方、AUVは下降と上昇時は航空機のようにピッチ角を大きく取るので、重力計装置には好ましくない。そこで、図24に示すようにAUVの通信機能を拡張して重力計の内部保護機構を母船上のPCから遠隔制御できるように改造し、母船上でAUVの航行状態に応じて重力計を制御する。

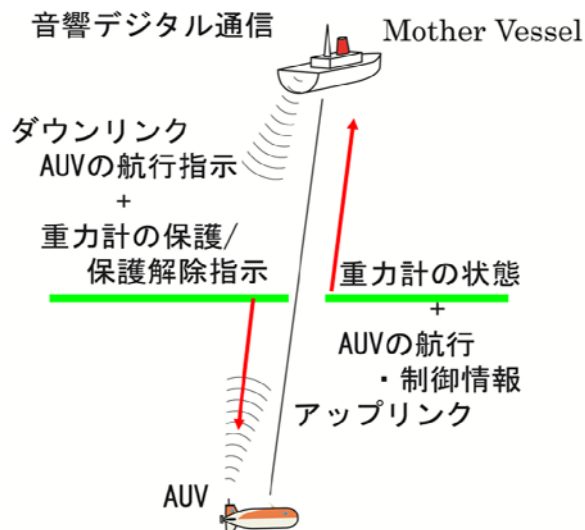


図24 AUV「うらしま」と支援母船「よこすか」の制御・監視装置の
双方向通信の模式図

a) 艀装作業

海洋研究開発機構横須賀本部のAUV試験場で4つの耐圧容器で構成される重力計測システムは3つの耐圧容器を機体前部のペイロード・スペースに固定し、残りの一つは後部に搭載した浮力材を撤去した空間に固定した。艀装後に重力計に外部電源を供給し、しばらく通電した結果、容器内温度は一定であり作動は正常であることを確認した。

b) インターフェイス

重力計にAUVから航海情報を送信し、かつ船上から重力計を遠隔制御するインターフェイス構造を図25のブロック図に示す。

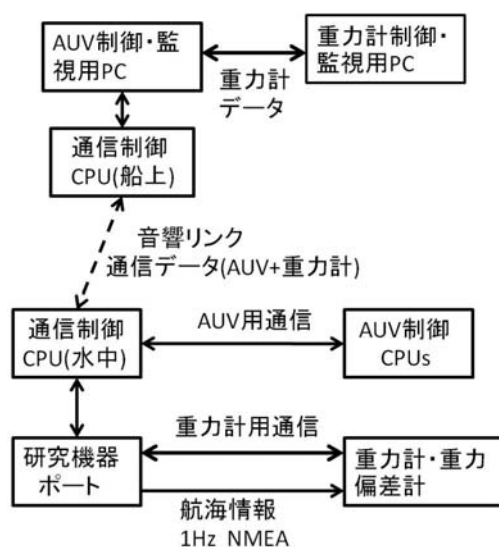


図25 AUV「うらしま」水中電子部および船上制御・監視装置に
重力計システムを接続したブロック図

i) ハードウェア

通信回線は2系統で構成した。一つは航法データの送出ポートとし、通信の遅延が問題とならないように送出データには時刻情報と同期のための電気信号を付加した。

ii) ロール、ピッチおよびヨー(方位)角は0.1 秒毎に送信

iii) 時刻、高度、深度、緯度および経度は1秒毎に送信

他方は双方向通信ポートとし、AUVの音響通信を介して重力計の計測開始等の制御コマンドおよび計測ステータス等の監視を支援母船に搭載したAUV制御・監視装置に接続した専用PCで実施した。

重力計システムへの電源供給は、AUVに内蔵する従来のペイロードへの供給能力を超えていたため、同等の電源素子を追加し2系統の電源を構成して重力計および重力偏差計に独立に電力を供給した。

iv) ソフトウェア

AUVに搭載した重力計と船上制御・監視パネルは音響通信を経由して通信する。音響通信はAUV固有の通信仕様で構成されており、重力計の双方向通信の付加によって通信容量が増大して通信遅延が発生しないように電文長を制限した。また、AUV水中部と船上部にはそれぞれAUVの通信仕様を拡張し、重力計の電文を通信できるようにデコードとエンコードするソフトウェアを組み込んだ。海域試験では、AUVの状態を監視しながら重力計の保護・作動コマンドを手動で入力し重力計を保護した。さらに、潜航中のAUVおよび重力計の状況を調査しながら帰港後にソフトウェアを実用に適するように改造した。

v) 作動調整

重力計を搭載前の事前調整として、AUV試験場および支援母船「よこすか」船上で重力計とAUVを接続して試作したソフトウェアの修正を実施した。さらに、海域試験では常に品質が変化する音響通信により重力計との通信試験を実施した。陸上および船上で重力計耐圧容器外側に冷水を循環させ容器内の重力計を保全した。

vi) 海域試験後の改造

初めての海域試験後に海中重力計とAUVのインターフェイスおよび航行結果に基づき組み込んだソフトウェアを完成させた。

AUVの高度は速度検出器と高度計で計測できるが、運動制御に高度計は利用していない。従来の微細海底地形探査では、海底からの高度を一定に航行させるために音響探査機器と干渉する高度計を利用せず、速度検出器による対地速度と高度を使用した。平成25年度以降に起伏のある海底で高感度重力計測を計画できるように、速度検出器よりも探知距離が長い高度計は併用するため、音響干渉を防止できるように改造した。

重力計の保護はAUVのAUV制御モードおよび姿勢角を船上で確認し、AUV航行状態から重力計の保護・解除を判断し、必要なコマンドを手動で船上から送信した。これらの通信に用いる音響通信は、通信品質が時々刻々変化する。従って、AUV航行状態が確認できないときに、保護コマンドの送信が遅延し重力計を損傷させないように緊急時にAUVから自動的に重力計を保護するコマンドを送信する機能を付加した。

c) 潜航中の動揺抑制

AUVの運動は図26(a)に示す機体固定座標系においてサージ、ヒーブおよびスウェイの直線運動とヨー、ピッチおよびロールの回転運動を成分とする6自由度の航行を行う。慣性航法ではこれら6自由度の運動を時々刻々計測して移動量を計算する。AUVの速度は5 km/hと低速なので、高精度リングレーザジャイロなどの運動センサの出現によって、初めて実用的な慣性航法が可能になった。

しかし慣性航法は6自由度の運動センサのドリフトが位置誤差として蓄積する欠点がある。この誤差を抑制するために、AUVの速度は機体底部のドップラ速度計測器(DVL: Doppler Velocity Log)を用いて直接計測する。DVLは図26(b)に示すように4本の音響ビームを構成し、送信と受信の周波数の周波数遷移からAUVの移動速度を算出する。海底に接近すると対地速度、それ以外は海中に漂う粒子で散乱する音波を捕らえるので対水速度を計測する。このように慣性航法に速度計測を併用するハイブリッド航法によって、慣性航法を単独で利用する場合よりも位置誤差の蓄積を抑制する。

鉛直面の制御は図26(b)に示すように、海底からの高度が一定になるように水平舵を制御する高度制御または航行する深度が一定になるように水平舵を制御する。高度制御は海底地形の精密計測であり、変化に富む地形ほど制御が難しくなる。水平面の制御は図26(c)に示すようにAUVによる計測座標とプログラムされた計画経路のずれを最小にするように垂直舵を制御する。初めての潜航試験では航行中の姿勢が安定し、重力計測値の再現性を検証できるように深度を一定に制御して、なるべく平坦な海底で南北に設定した2点間を往復するように航行させた(相模湾の伊豆半島東方沖)。

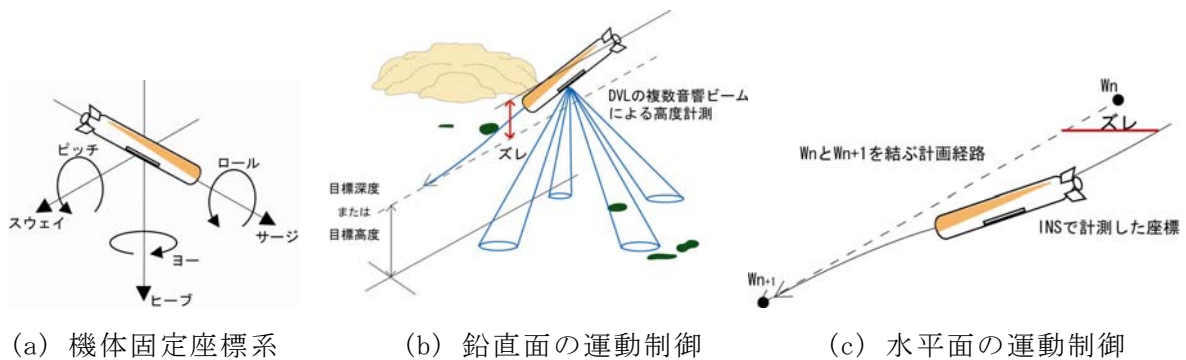
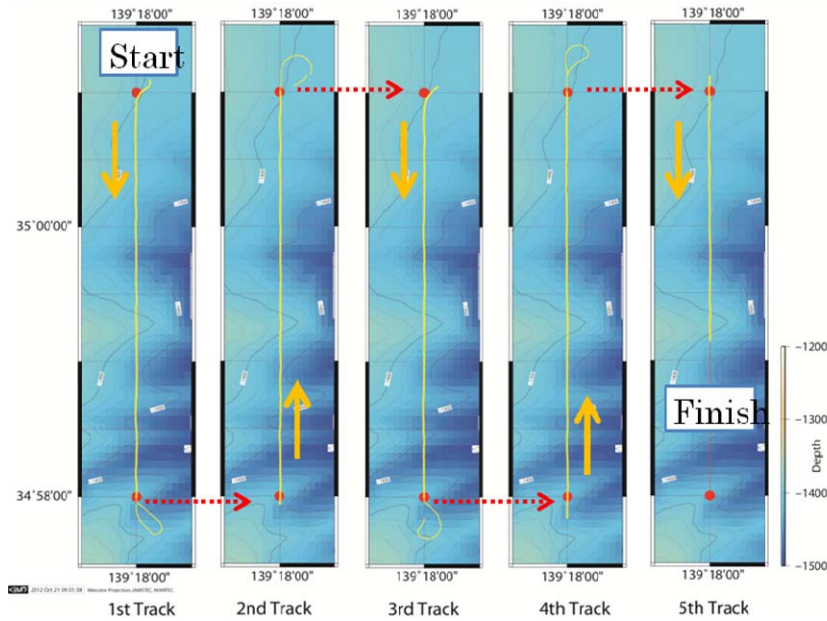
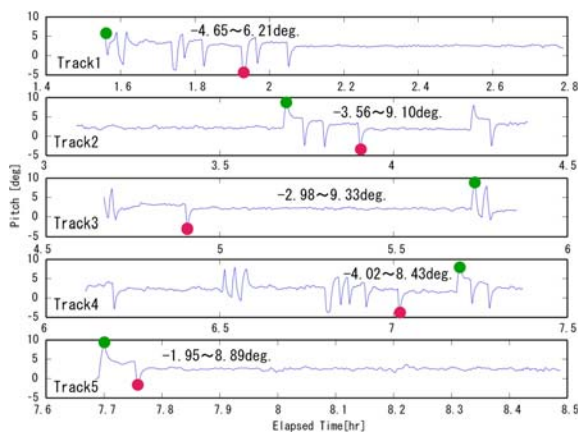


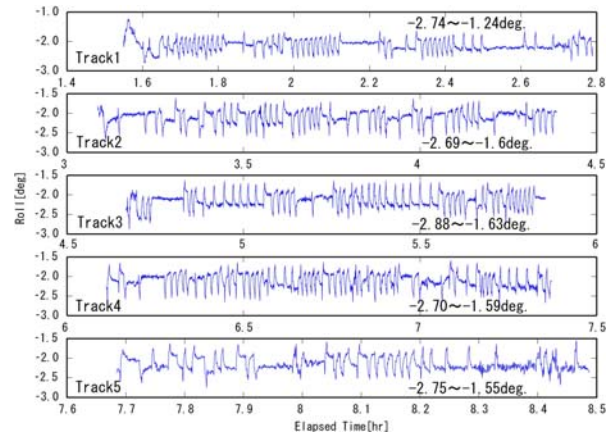
図26 AUV「うらしま」の機体固定座標系と運動制御



(a) 南北に設定した2点の往路と復路の航跡



(b) 機体のピッチ角



(c) 機体のロール角

図27 設定した2点間を往復して得られた航跡と機体のピッチ角およびロール角の時刻歴

3) 成果のまとめ

図27(a) (b) (c)に潜航試験で得られたAUVの航跡と機体のピッチおよびロールをそれぞれ示す。南北に設定した2点間を往復し重力計測を実施した。AUVの目標深度を1300 mに設定し1296~1316 mを航行した。

図27 (a)に南北に設定した2点間の往路と復路の航跡をAUVに搭載した慣性航法装置の座標から作成し、はじめの計測をTrack 1として折り返すたびに数字を増やしTrack 5までを得た。図27 (b)に示すピッチは変化を抑制できるように深度一定に航行させたが、 $\pm 10^\circ$ の範囲に辛うじて収まった。また(c)のロールは機体方位を修正するために垂直舵が作動す

るとロールが変化する。なお、図27 (b)および(c)の横軸はAUVの潜航時刻を0とする経過時間を示す。目標深度1300 mまでの下降時および海面までの上昇時は機体姿勢角が海中重力計の許容量を超えるため、母船上から重力計内部の保護機構を遠隔操作で作動させて海中重力計を保護するように運用を決定した。図24に示す模式のようにAUVの運動を船上で監視しながら、船上の高感度重力計監視PCからAUVの音響通信を経由して、海中重力計の保護を行った。潜航試験では計画通りにAUVの航行状態を監視しながら重力計を遠隔制御でき、海中重力データを取得した。

AUVに制御ソフトバグ等の予期せぬトラブルが発生した場合、AUVはトラブル回避モードに移行し上昇を開始する。音響通信は品質が海象や支援母船の操船状況に大きく影響されるために、トラブル回避モード移行時に速やかに海中重力計を保護するように、トラブル回避モードを検知した場合、高感度重力計に保護コマンドを自動的に送信し、給電を停止する機能をソフトウェアに追加した。陸上および船上で正常に作動することを確認した。なお、潜航中にトラブル回避モードには移行しなかった。

(4) 成果の論文発表・口頭発表等

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
海中重力計の開発，ポスター	石原丈実・金沢敏彦・藤本博己・篠原雅尚・山田知朗・新谷昌人・飯笹幸吉・大美賀忍	地球惑星連合大会（千葉市）	2012. 5. 22	国内
海底探査用重力偏差計システムの開発2，口頭	新谷昌人・金沢敏彦・篠原雅尚・山田知朗・藤本博己・飯笹幸吉・石原丈実	地球惑星連合大会（千葉市）	2012. 5. 25	国内

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Gravity gradiometer implemented in AUV for detection of seafloor massive sulfides, 口頭	Akito Araya, Toshihiko Kanazawa, Masanao Shinohara, Tomoaki Yamada, Hiromi Fujimoto, Kokichi Iizasa, Takemi Ishihara	OCEANS 2012 IEEE Hampton Roads Conference & Exhibition (U. S. A.)	2012. 10. 16	国外
海底鉱床探査のための重力偏差計の開発 2, ポスター	新谷昌人・金沢敏彦・篠原雅尚・山田知朗・藤本博己・飯笹幸吉・石原丈実	海洋調査技術学会（東京都江東区）	2012. 11. 8	国内
Development of a submersible gravimeter on underwater vehicles, 口頭	Yamada, T., T. Kanazawa, H. Fujimoto, M. Shinohara, T. Ishihara, A. Araya, K. Iizasa, S. Tsukioka	AGU Fall Meeting, OS51D-1902 (U. S. A.)	2012. 12. 7	国外
A U V 搭載型海中重力偏差計の開発, 口頭	新谷昌人・金沢敏彦・篠原雅尚・山田知朗・藤本博己・飯笹幸吉・石原丈実・月岡 哲	重力と水ワークショップ（瑞浪市）	2012. 12. 19	国内
海底探査用重力偏差計の開発, 口頭	新谷昌人・金沢敏彦・篠原雅尚・山田知朗・藤本博己・飯笹幸吉・石原丈実・月岡 哲	東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会（仙台市）	2013. 2. 20	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・ 外の別
Gravity gradiometer implemented in AUV for detection of seafloor massive sulfides	A. Araya, T. Kanazawa, M. Shinohara, T. Yamada, H. Fujimoto, K. Iizasa, and T. Ishihara	Proceedings of the OCEANS 2012 IEEE Hampton Roads Conference & Exhibition (IEEE Catalog Number CFP1200CE-DVD), 120601-087, 2012.	2012.10	国外
Development of an Underwater Gravimeter and the First Observation by Using Autonomous Underwater Vehicle	Shinohara, M., T. Yamada, T. Kanazawa, K. Uehira, H. Fujimoto, T. Ishihara, A. Araya, K. Iizasa, S. Tsukioka	Underwater Technology 2013, Tokyo, Japan, 5-8 March 2013,	2013.3	国内

(5) むすび

本事業では、モデル鉱床の規模を500 m×500 m×10 m、密度差を1 g/cm³として、鉱床による重力変化を1 mgalから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1 g/cm³、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、海底面に近い海底下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。

前プログラムにより、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を行った。それらの結果、努力目標とした、重力0.1 mgalおよび重力偏差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、目標感度である0.2 mgalの重力変化を、移動体が速度2ノットで航走した場合、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、本事業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、厚さ、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、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。

本プロジェクトでは、前プログラムの成果を受け、

- 1) 海洋研究開発機構深海巡航探査機「うらしま」を用いた前プログラムで開発した重力計と重力偏差計の実海域での実証試験と計測用ソフトウェアの開発
 - 2) 重力計と重力偏差計の小型化
 - 3) AUVを用いた小型化した重力計と重力偏差計の実海域実証試験と海中重力探査用の解析ソフトウェアの開発
 - 4) 高精度重力測定に適したAUVの航行技術の開発
- を実施する。

平成24年度は、前プログラムで開発した重力計と重力偏差計の実海域での実証試験に用いる移動体として、海洋研究開発機構深海巡航探査機AUV「うらしま」を利用することとした。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、通信インターフェイスの開発を行った。また、海中重力計から得られたデータから、フリーエア重力異常の空間変化を求める海中重力計測用ソフトウェアを開発した。

その後、AUV「うらしま」による実海域試験を、比較的海底地形が平坦である相模湾西部において、平成24年9月7日と9日の2回実施した。海中重力計、重力偏差計ともに、初めて、無人水中移動体による計測データを取得することができた。重力計データに関しては、データ処理の結果、熱水鉱床域の重力異常の検出目標である1 mgal以下の精度（再現性）が得られることを確認した。一方、重力偏差計に関しては、さらなるノイズ軽減が必要であることがわかったが、精度達成の見込みを得ることができた。

実用的な探査では、様々な水中移動体に搭載することが考えられる。そこで、前プログラムで開発した重力計と重力偏差計の小型化をはかることとした。これにより、精密測深器などの他の探査機器と同時搭載し、複数項目の計測ができるようになる。それぞれ、二つの耐圧容器を用いていたが、小型化によりそれぞれ一つの耐圧容器に収納できることを目標とし、小型化の開発を行った。また、搭載する水中移動体の多様性を考え、より大きな動揺にも対応できるように姿勢制御装置の改良も行った。これら改良した海中重力計と重力鉛直偏差計に関しては、平成25年度に、AUV「うらしま」を用いた試験観測を、実際の鉱床存在域において、実施することを計画している。

IV. 活動報告

(1) 運営委員会

【平成24年度第1回運営委員会】

日時： 平成24年10月29日（月） 午後13時30分～午後16時00分

場所： 東京大学地震研究所 会議室（1号館3階）

出席者： 篠原雅尚、新谷昌人、山田知朗、金沢敏彦、植平賢司、月岡哲、藤本博己、
石原丈実

オブザーバー： 竹内俱佳、井上諭一、福田純也、吉梅剛、白崎勇一 事務担当：柳澤恭子

議事概要

1. 委員の出席状況と資料確認
2. 平成24年度全体計画の概要について（篠原）
3. 平成24年9月に実施された実海域における実証試験観測の結果と、小型化に向けた開発状況報告
 - （1）移動体搭載型重力計実証試験および技術開発について（篠原委員・石原委員）
 - （2）移動体搭載型重力偏差計実証試験および技術開発について（新谷委員）
 - （3）AUVの航法開発および計測技術開発について（月岡委員）
4. 装置の実物紹介

【平成24年度第2回運営委員会】

日時： 平成25年3月11日（月） 午後13時30分～午後16時00分

場所： 東京大学地震研究所 会議室（1号館3階）

出席者： 篠原雅尚、新谷昌人、山田知朗、金沢敏彦、植平賢司、月岡哲、藤本博己、
飯笹幸吉、石原丈実

オブザーバー： 竹内俱佳、白崎勇一 事務担当：柳澤恭子

議事概要

1. 平成24年度事業の概要説明と平成25年度の計画案（篠原）
2. 移動体搭載型重力計実証試験および技術開発について（篠原）
3. 移動体搭載型重力偏差計実証試験および技術開発について（新谷）
4. AUVの航法開発および計測技術開発について（月岡）
5. 装置の実物紹介

運営委員会委員

篠原 雅尚	東京大学地震研究所観測開発基盤センター・教授
新谷 昌人	東京大学地震研究所観測開発基盤センター・准教授

塩原 肇	東京大学地震研究所海半球観測研究センター・准教授
望月 公廣	東京大学地震研究所地震予知研究センター・准教授
山田 知朗	東京大学地震研究所地震予知研究センター・助教
金沢 敏彦	防災科学技術研究所観測 予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・室長
植平 賢司	防災科学技術研究所観測 予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・主任研究員
月岡 哲	海洋研究開発機構海洋工学センター 運航管理部探査機運用グループ・グループリーダー
藤本 博己	東北大学災害科学国際研究所・教授
石原 丈実	産業技術総合研究所地質情報研究部門・テクニカルスタッフ
飯笹 幸吉	東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授

オブザーバー：

竹内 俱佳	プログラムディレクター
井上 諭一	文部科学省研究開発局海洋地球課長
福田 純也	文部科学省研究開発局海洋地球課海洋資源技術開発係長
白崎 勇一	(有)マリン・エコ・テック
柳澤 恭子	東京大学地震研究所・事務

(2) 開発検討会

平成24年度第1回開発検討会	平成24年6月13日開催
平成24年度第2回開発検討会	平成24年7月3日開催
平成24年度第3回開発検討会	平成24年7月30日開催
平成24年度第4回開発検討会	平成24年8月27日開催
平成24年度第5回開発検討会	平成24年10月9日開催
平成24年度第6回開発検討会	平成24年10月29日開催
平成24年度第7回開発検討会	平成24年11月12日開催
平成24年度第8回開発検討会	平成24年12月11日開催
平成24年度第9回開発検討会	平成25年1月25日開催
平成24年度第10回開発検討会	平成25年2月27日開催