

文部科学省

平成 25 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 26 年 5 月 30 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 25 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 25 年度における目標及び業務の方法	0
1	
(a) 海中重力計に関わる技術開発	
1) 重力計の小型化にむけた開発	
2) 小型重力計の実海域での実証試験	
(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発	
1) 重力偏差計の小型化の開発	
2) 小型重力偏差計の実海域での実証試験	
(c) 海中重力探査用の解析ソフトウェアの開発	
(d) 高精度重力測定に適した AUV の航行技術の開発	
(3) 平成 25 年度の成果	
(a) 海中重力計に関わる技術開発	11
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
4) 参考文献	
(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発	25
1) 開発の概要	
2) 実施内容	
3) 成果のまとめ	
4) 参考文献	
(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発	32
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	34
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	39
(5) むすび	41
IV. 活動報告	
(1) 運営委員会	43

(2) 開発検討会	・ ・ ・ ・ ・	44
-----------	-----------	----

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った。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った。

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を行った。

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った。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」を利用し、平成 24 年 9 月に 3 潜航を行った。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した。また実証試験での実データを用いて、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った。

一方、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んだ。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した。

平成 25 年度に、この開発した小型重力計と小型重力偏差計を陸上で性能評価を行い、前プログラムで開発した重力計と重力偏差計と同等性能であることを確認した。平成 25 年 12 月に、この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穴で実証試験を行うべく実施計画を立て、十分な準備を行って臨んだが、予定された 4 潜航の期間は海況不良であった。そのため不完全な実証試験の実施であったが、船上で移動体に搭載した状態で、重力データおよび重力偏差データを取得した。

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
松尾 友和	地震研究所	技術職員	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	調査役	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	サブリーダー	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	調査役	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	名誉教授	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 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ある時、海底下に埋没している厚さ 1m 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－ハイブリッド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 3000 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 $1\text{g}/\text{cm}^3$ の上記規模の鉱床がある場合に想定される 1mgal 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XY2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50m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50cm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。

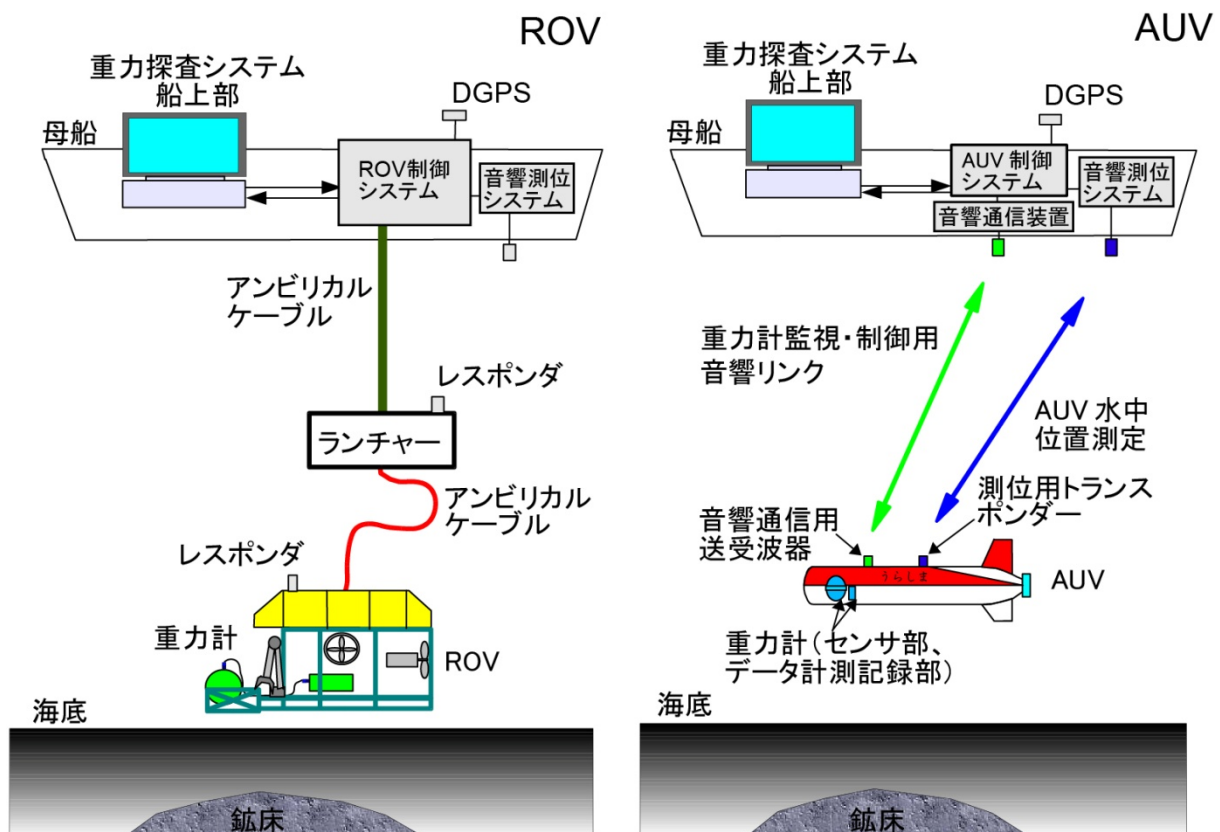


図1 重力探査に使用する移動体 (ROV と AUV)

本研究プロジェクトでは、次の4項目の研究開発を行う。

- (a) 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
- (b) 重力計と重力偏差計の小型化
- (c) 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
- (d) 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、熱水鉱床域のある実海域での実証試験を行う。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 25 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) 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。

2) 小型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。

(b) 重力鉛直偏差計に関わる技術開発

1) 重力偏差計の小型化の開発

様々な移動体による重力観測のために小型重力計用計測センサ部の製作を行う。特に、小型化に注力した開発を実施する。

2) 小型重力偏差計の実海域での実証試験

小型重力計の海域実証試験を行い、移動体によって取得された重力データや動揺制御データ等を解析・評価する。

(c) 海中重力探査用解析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、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を進める。平成 24～25 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こととしたので、オフラインの重力データ処理ソフトウェアの開発を進める。改良したソフトウェアを 25 年度 12 月に伊是名海域で実施予定の実海域試験での観測データの解析に適用する。

(d) 高精度重力測定に適した AUV の航行技術の開発

開発された高感度重力計を自律式探査機に搭載して潜航させるためには、以下のように重力計と AUV の技術仕様を整合させ、AUV に重力計を搭載し実証試験に供する。

1) AUV に高感度重力計を艀装し、重力計と「うらしま」システムが計画通り通信でき作動することを確認する。

2) 起伏のある海底地形で航行時の姿勢変化を少なくできる航法手法を開発し、「うらしま」システムに組み込み作動状況を確認する。

3) 機体動揺等から高感度重力計を保護するソフトウェアを完成させる。

(3) 平成 25 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、平成 24 年 9 月に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、再設計した。

本年度(平成 25 年度)は、一台の耐圧容器に収容できる小型重力計を製作し、陸上で性能評価を行った。その結果、新たに開発した小型重力計は、重力計測性能は、前プログラムで開発した重力計と同等であるのに加え、実用運用を前提とした動揺補正範囲の拡大、消費電力の低減、冷却機能装備、監視制御機能強化されたものとなった。

この小型重力計の実証試験のため、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採用された。それにより、平成 25 年 12 月に、小型重力計を小型重力偏差計と一緒に AUV「うらしま」に搭載し、熱水鉱床域のある実海域（伊是名海穴）での実証試験を行うべく、準備を行った。

平成 25 年 12 月に、この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実証試験を行うべく横須賀を出港した。しかし予定された 4 潜航の期間は、伊是名海域は海況不良であった。そのため不完全な実証試験の実施であったが、船上で移動体に搭載した状態でデータを取得した。ただし、期間中の最終日の半日、潜航させるため AUV を着水させ潜航を試みた時があり、結局は風浪がさらに高くなり揚収できなくなる恐れが出てきたため、AUV の潜航はできなかったが、厳しい風浪にさらされ、また降下揚収時の衝撃を受けたにもかかわらず、重力計にトラブルは発生しなかった。また、その悪環境下で取得した AUV の激しい動揺・振動データは、今後、実用運用を前提とする重力計システムの実現に資するものである。

2) 実施内容

a) 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行った。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以下の項目について、前年度に設計を進め、本年度製作を行った。

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した。（図 2）

- i) 移動体の動揺補正範囲を考慮し、可動範囲を拡大した新規強制ジンバル装置の開発
- ii) 電子回路基板の機能集約による小型化と省電力化
- iii) 耐圧容器に外部から冷気注入循環式冷却システムの実装
- iv) 実運用を前提とした監視制御ソフトの開発

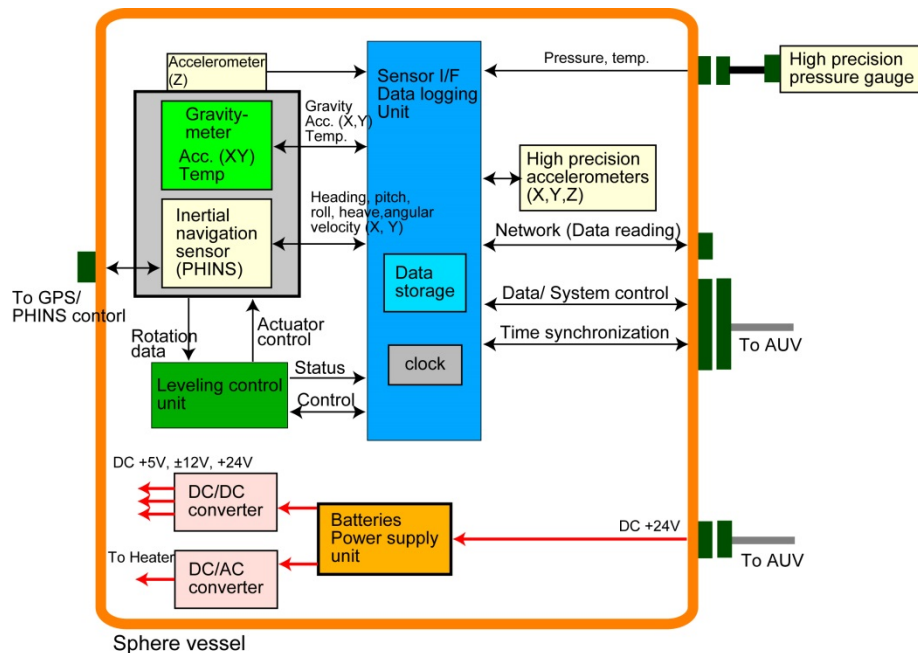
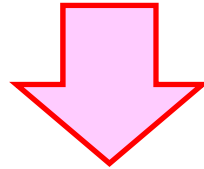
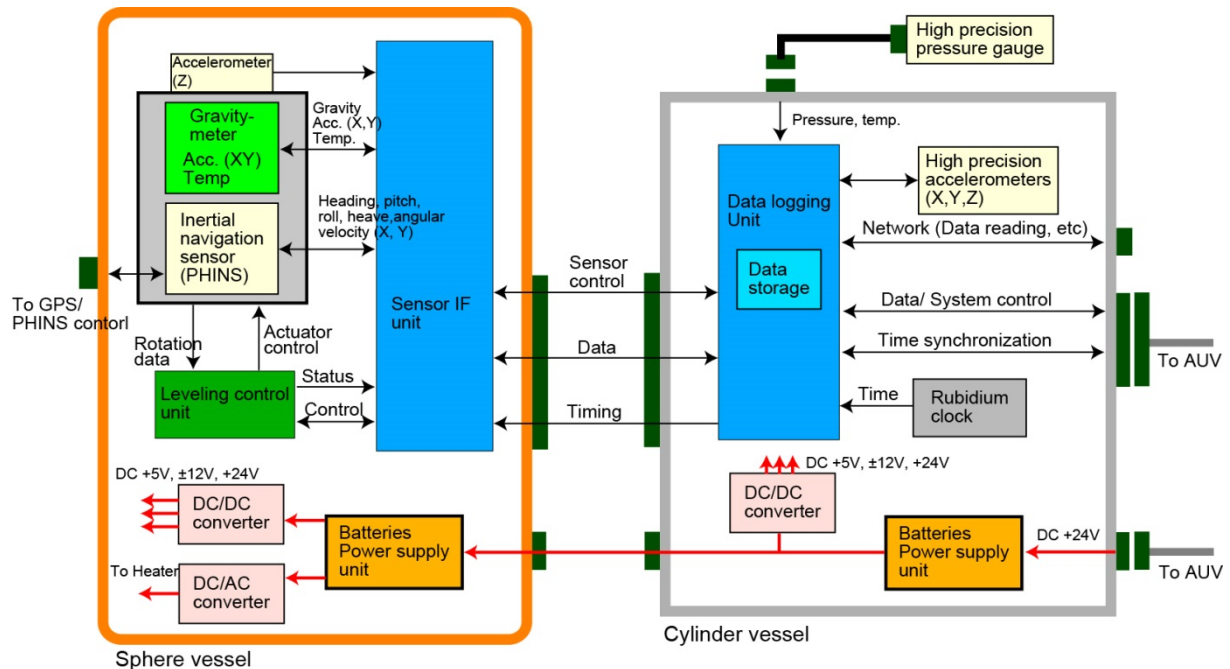


図 2 重力計の小型化

i) 移動体の動揺補正範囲を考慮し、可動範囲を拡大した新規強制ジンバル装置の開発

多くの熱水鉱床域はカルデラ地形であり、起伏の激しい海底地形である。AUV「うらしま」のような航行型移動体は、海底からの高度を変化させる場合、移動体の姿勢（特にピッチング）を変化させて航行する。このため熱水鉱床域の地形に沿って重力探査航行する場合、移動体の姿勢を変化させる必要があるが、その動揺幅は大きくなる。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。

平成 24 年 9 月に実施した AUV「うらしま」による相模湾海域での実証試験で、「うらしま」の動揺特性を把握した（図 3）。

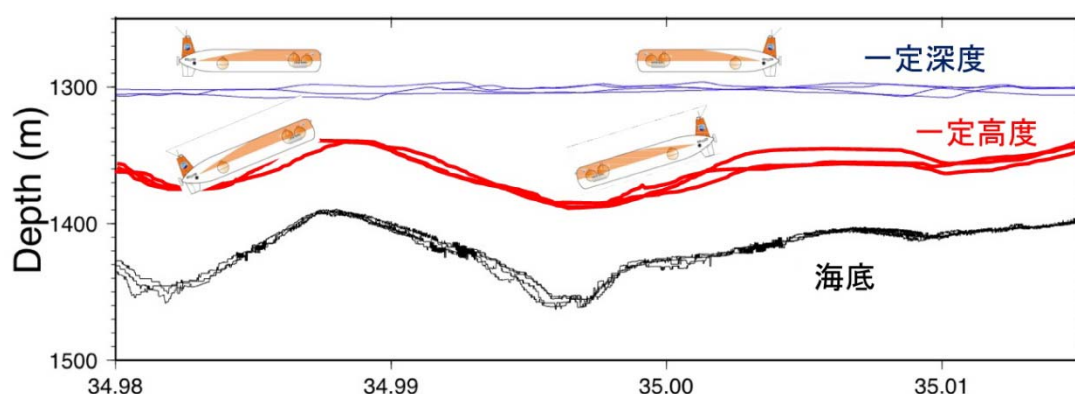


図 3 AUV「うらしま」の動揺

AUV「うらしま」は、海底に沿うように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。このピッチング角度の変化幅が、当初想定していた角度（可動範囲 $\pm 10^\circ$ ）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水中音響計測では、この姿勢変化はほとんど問題にならない）。このため小型化する重力計では、以下の開発を実施した。

- 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。

ピッチング角	可動範囲	$\pm 30^\circ$	制御範囲	$\pm 25^\circ$
ロール角（従来と同じ）	可動範囲	$\pm 15^\circ$	制御範囲	$\pm 10^\circ$
制御精度	0.01°			

- 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

回路基板、バッテリー、センサ部の構造・搭載方法の再設計を行い機構部を製作。

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）を図 4 に、製作した強制ジンバル機構部を図 5 に示す。

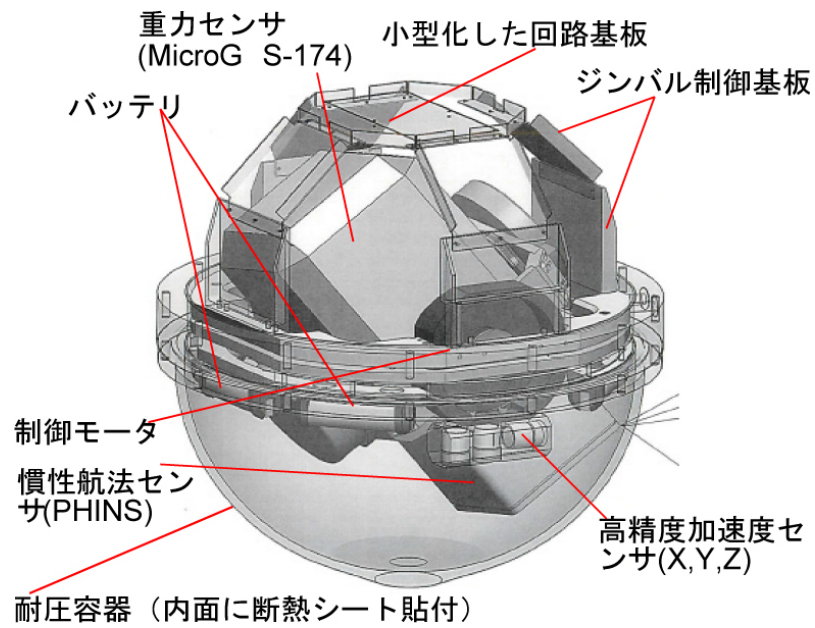


図4 重力計システムの内部構造図（模式図）

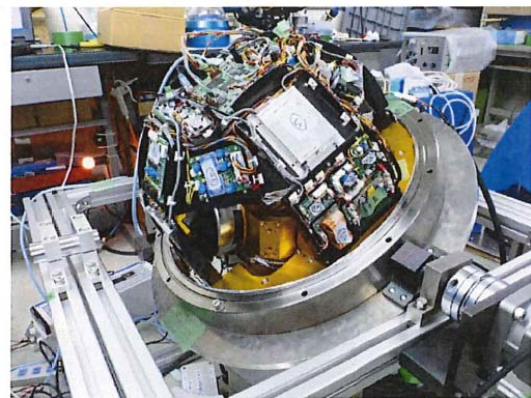
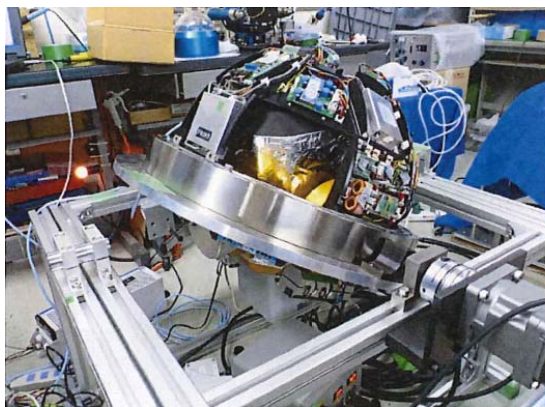


図5 製作した強制ジンバル機構部（上）と動揺試験での状況（下左右）

iii) 耐圧容器に外部から冷気注入循環式冷却システムの実装

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、平成 24 年 9 月の実証試験の際は、AUV「うらしま」が潜航前後に船上に置かれている場合、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 7）。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 7 耐圧容器の上部に冷水循環装置（冷却水を循環させるホースを巻きつけたもの）を取り付けた状態

この冷却方法は、内側に断熱材を張り付けた耐圧容器の外側から耐圧容器内部を冷却するということになり冷却効率が非常に悪い。そこで、小型重力計の開発に合わせて、外部から内部に空気を注入し、容器内部を循環させて外部に排気する方式の冷却システムを耐圧容器に組み込むこととした。図 8 は、外部との空気の注入・排気口となり、また複数の冷却ホースに空気を分流させる機能を有する冷却ベースと冷却ホースを示す。

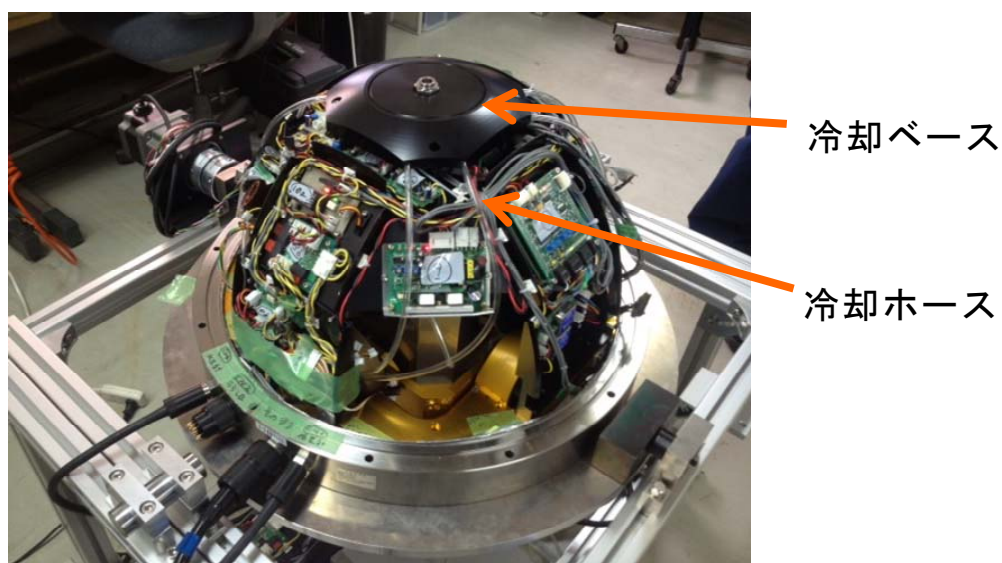


図 8 冷気注入循環式冷却システム

図 9 は、開発した冷気注入循環式冷却システムによる冷却効果を示す。図 9 に示す温度は、S/L 基板直上の気温である。電源投入後約 5 時間で、45℃ 一定となることから、冷却機能が働いていることがわかる。模擬装置を用いた実験では、冷却効果は、空気の流量により異なってくるが、耐圧球内の温度を 20° 程度下げる効果があることがわかった。

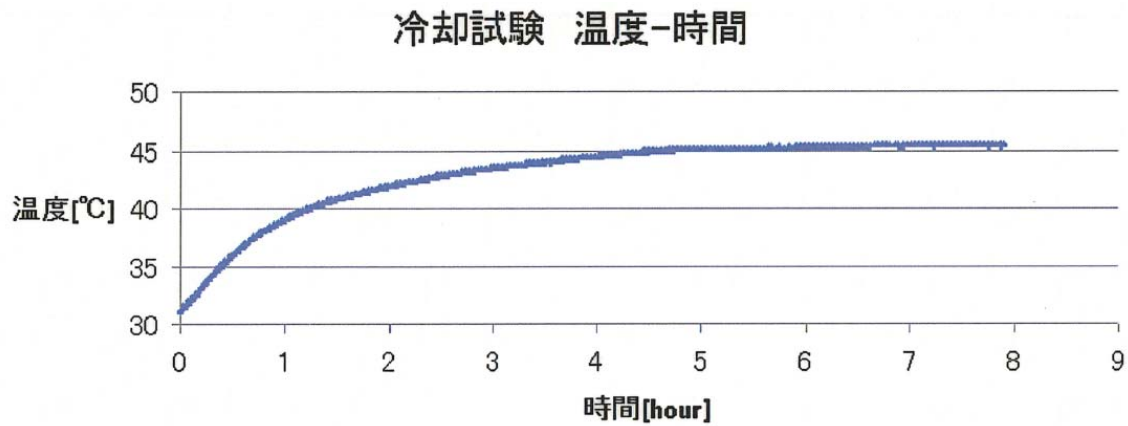


図 9 冷気注入循環式冷却システムによる冷却効果

iv) 実運用を前提とした監視制御ソフトの開発

平成 24 年 9 月に実施した AUV「うらしま」による相模湾海域での実証試験での重力計システムの運用経験から、AUV「うらしま」の潜航前、潜航後の重力計システムの稼働状況のリアルタイムモニター（図 10(a)）や、取得された観測データの確認が迅速かつ容易に行える計測データ表示（図 10(b)）のための監視制御ソフトを新しく開発した。

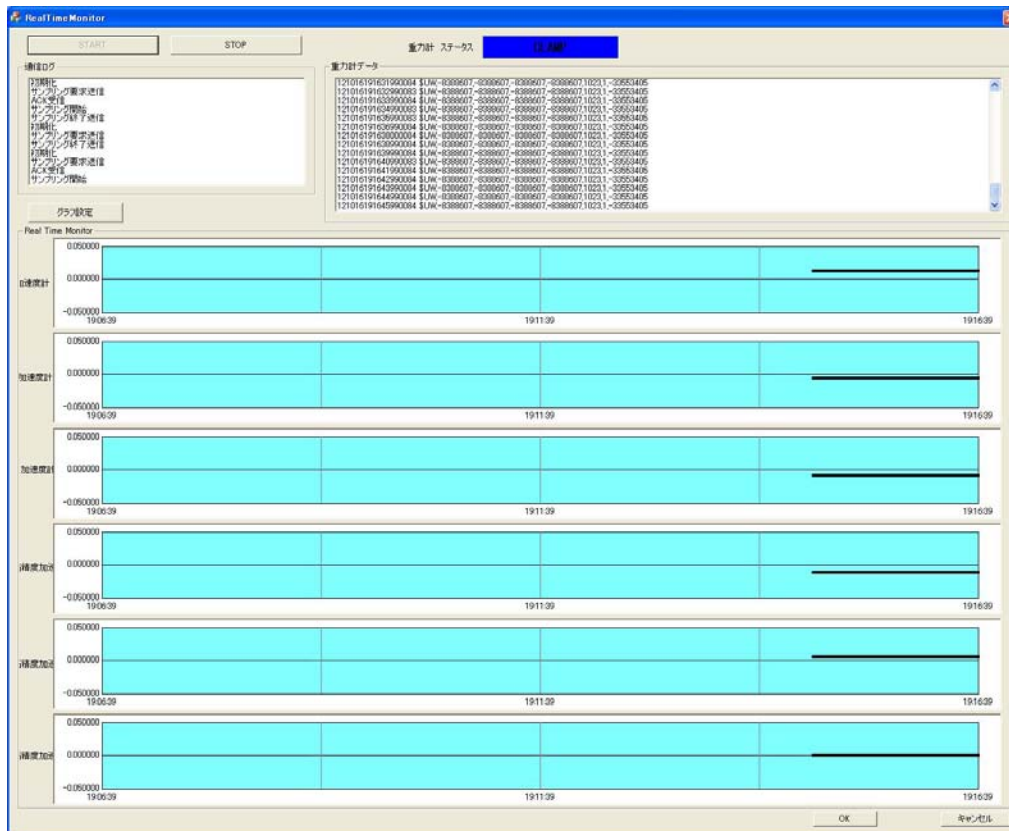


図 10(a) リアルタイムモニター

「うらしま」が船上にある待機時に、重力計システムの稼働状況をモニターする

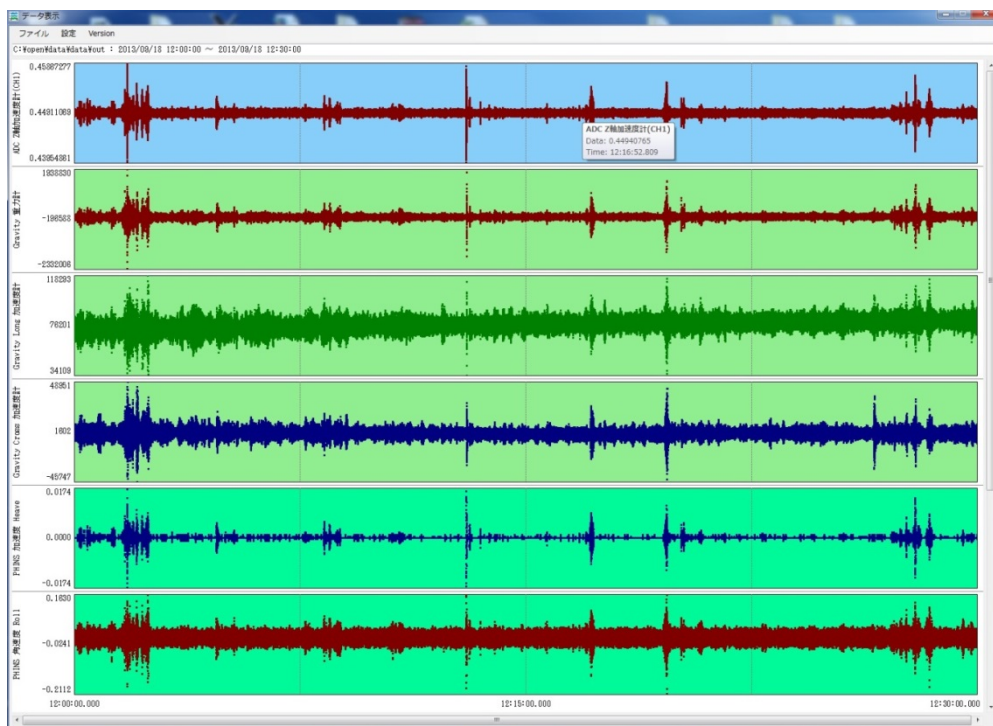


図10(b) 計測データ表示

重力計システムでの計測終了後、取得されたデータを解凍し表示する

b) 小型重力計の実海域での実証試験

平成 25 年度の実証試験は、平成 25 年 12 月 6 日（横須賀出港）から 12 月 14 日（那覇入港）までの間、沖縄北方の伊是名海穴（図 11：水深：700m～1700m）で、AUV「うらしま」に小型化した重力計システムを搭載して実施することとし、12 月 10 日から 13 日までに 4 潜航を計画した。

計測対象地点としては、伊是名海穴で実際の熱水鉱床が発見されている白嶺サイトと JADE サイトが候補であるが、比較的の海底の起伏が少ない白嶺サイトを選定し、計測のための航行測線および航行方法を検討した。しかし、この時期、JOGMEC が白嶺サイトでボーリング調査を実施する計画であることが判明したため、JADE サイトについても計測航行測線を検討した。海底の起伏を考慮した測線を図 12 に示す。

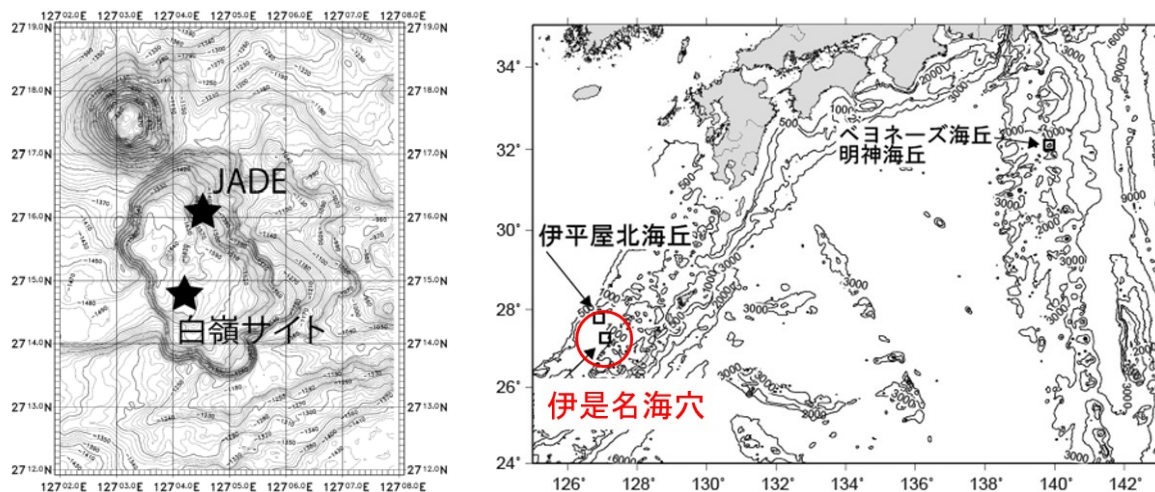


図 11 実証試験海域の伊是名海穴と、熱水鉱床サイト（白嶺、JADE）

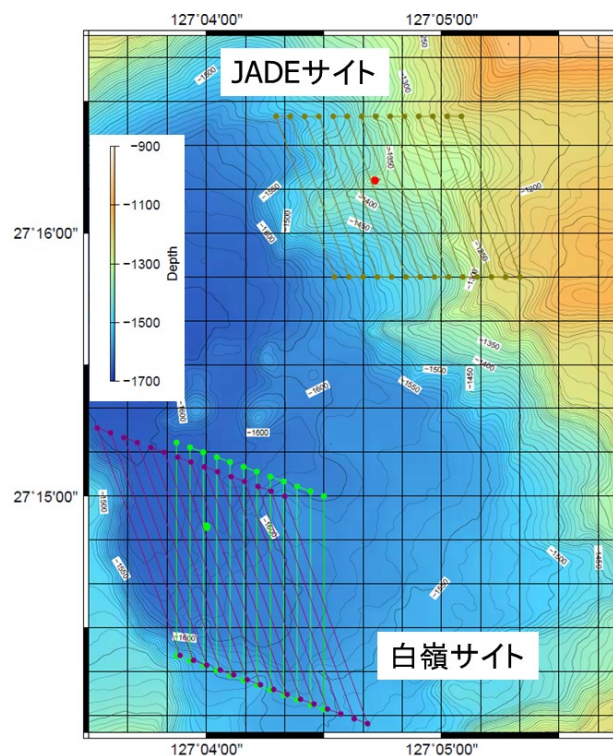


図 12 計画測線（航行コース）

小型重力計システムを搭載した AUV を用いて熱水鉱床を探索する場合、熱水鉱床からどの程度離れて航行しても重力値変化を計測できるかを確認するため、熱水鉱床モデルによる航行高度と重力値変化の理論計算を行った。その結果を図 13 に示す。

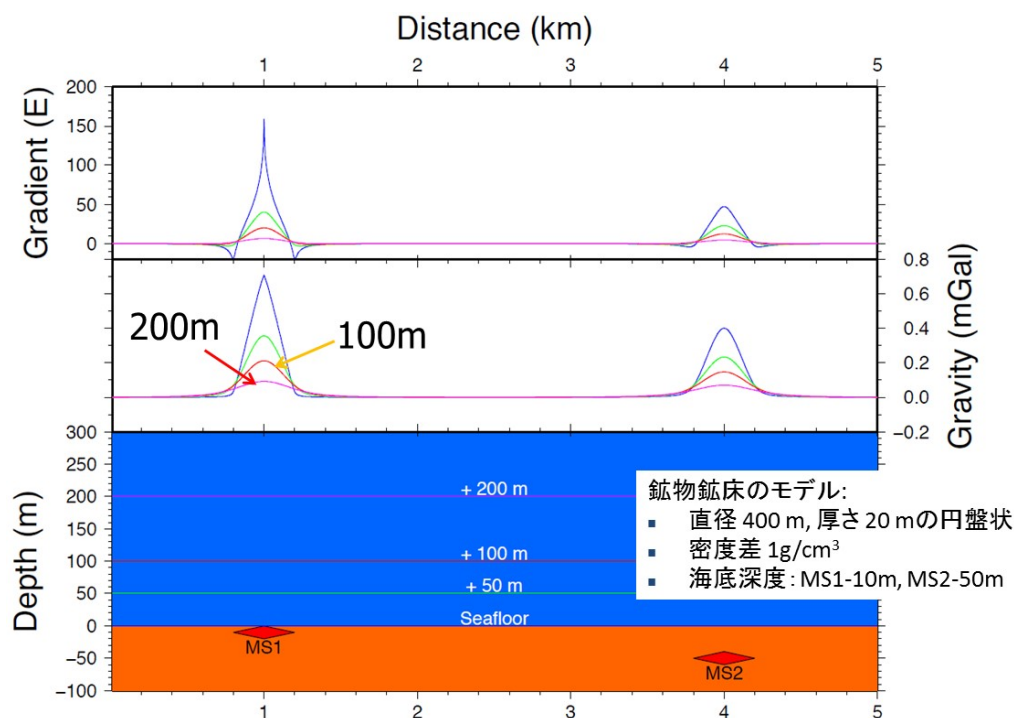


図 13 計測高度による重力値変化のモデル計算

図 13 のモデル計算結果と小型重力計の精度 (0.1mgal) からは、AUV をできる限り低高度での航行させる必要があることが示される。つまり、深度一定航行よりは高度一定航行の方が望ましい。ただし、海底地形変化が急峻な場合は、その地形に沿うような高度一定航行は困難であるので、海底地形の詳細な 3D データから、適切な測線を選定する必要がある。

本実証試験では、JOGMEC より借用した伊是名海穴の詳細な海底地形データを用いて、鉱床の存在が確認されている場所を優先的に測定し、その後 2 次元的に計測を拡大する方針の測線を計画した (図 12)。

実証試験に先立ち、JAMSTEC の AUV 整備場にて、新しく開発した小型重力計および小型重力偏差計を、AUV「うらしま」のペイロードスペースに搭載した後、「うらしま」の信号・電源ケーブルと接続し、「うらしま」より電源供給を受け、信号系のインタフェースの確認を実施した。重力計システム搭載時の信号・電源供給の構成を図 14 に示す。

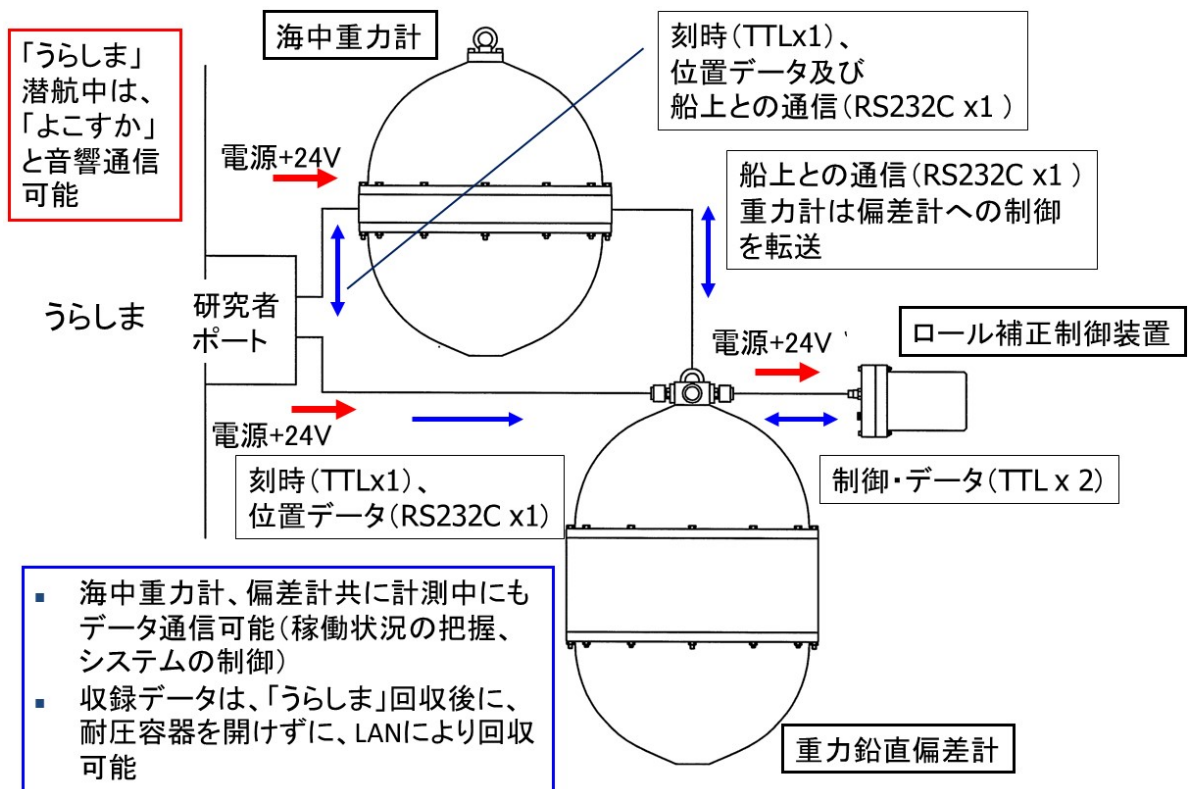


図 14 重力計システム搭載時の信号・電源供給の構成

図 15 に、研究船「よこすか」に搭載した「うらしま」と、「うらしま」の前部ペイロードスペースに搭載した小型重力計システム（重力計および重力偏差計）を示す。

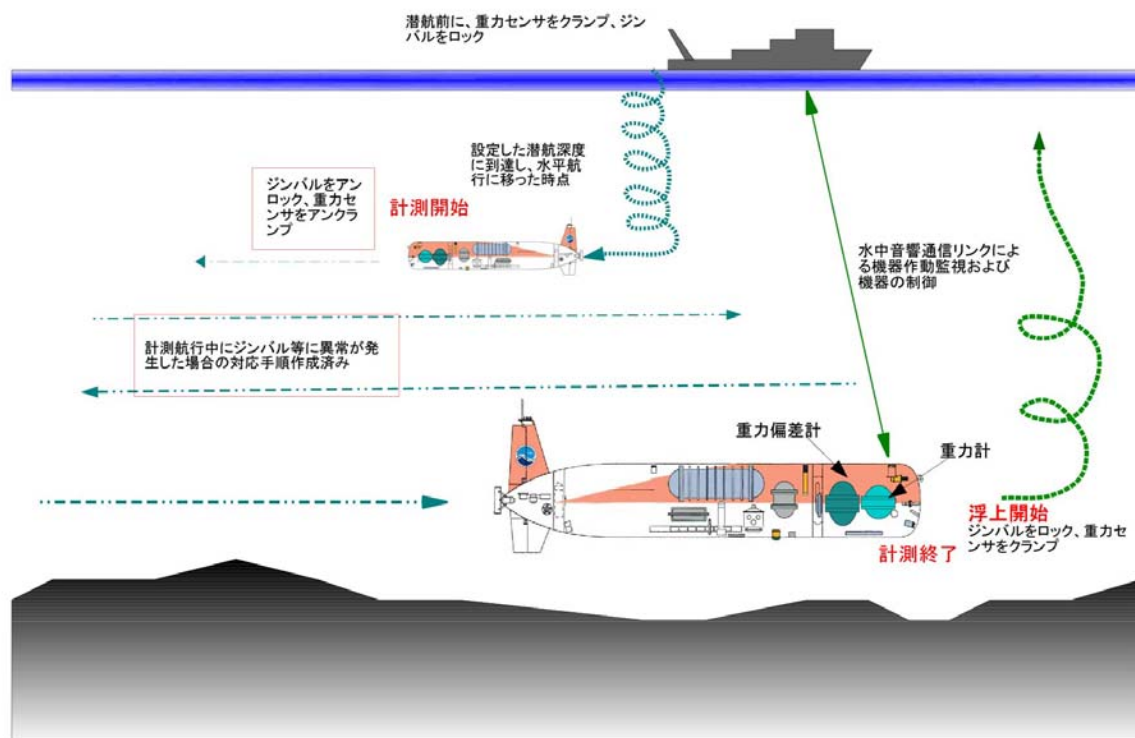


図 16 重力計システムの運用方法

以上のように、十分な準備を整え平成 25 年 12 月の実証試験に臨んだ。

当初の潜航調査は、12 月 10 日から 13 日の 4 日間で 4 潜航を予定していたが、図 12 に示した測線による航法を計画していたが、10 日から 12 日は海況不良のため潜航中止となった。この間、白嶺サイトで掘削調査していた JOGMEC の白嶺丸は現場を離れ那覇港に入港していたが、12 日に白嶺サイトに戻ってきて掘削調査を再開していた。このため、最終日となる 13 日に潜航調査する場合には、図 17 に示す白嶺サイトの北側のカルデラ中央部での探査を行うこととして新たな測線を計画し、航行方法を検討した。

最終日となる 13 日朝には、潜航の可能性がある海況であったため、「うらしま」を着水させ潜航を試みた。しかし、急速に海況が悪化し始めたため、そのまま潜航調査を行うと、「うらしま」浮上後に、スイマーによる揚収が危険になると予測されたため、潜航調査は中止となった。

結論として、本年度の潜航調査による実証試験は、不完全な実施のまま終了し、船上で移動体に搭載した状態でのデータ取得となった。しかし、来年度 8 月に、同じ伊是名海穴での試験航海が確定しているため、本年度実証試験に向けて準備・検討した内容は、そのまま来年度の試験航海に活かすことができる。

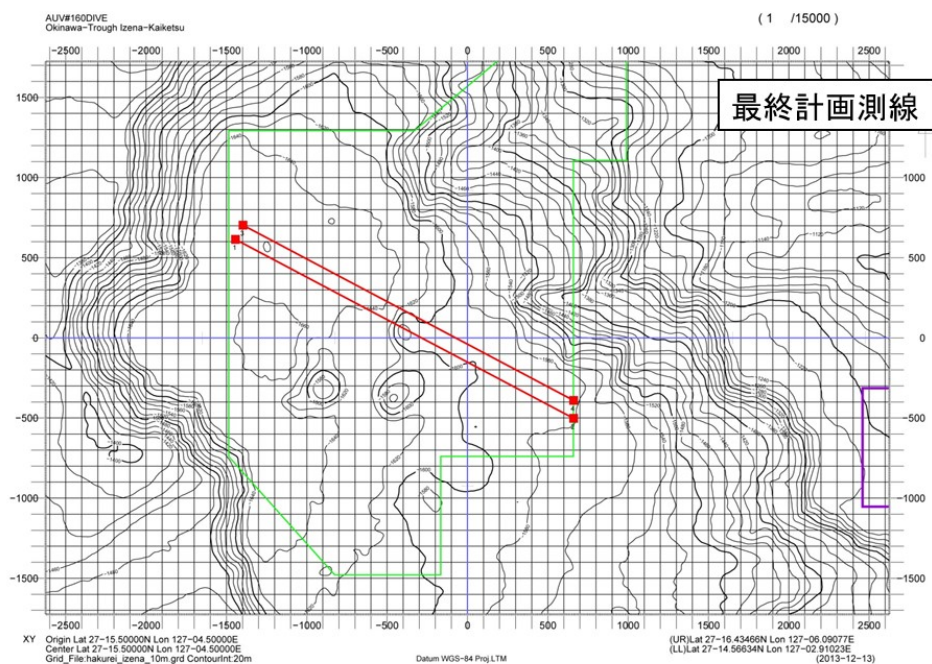


図 17 伊是名海穴のカルデラ中央部の探査測線

なお、本年度の試験航海で、12月13日に「うらしま」を着水させ潜航を試みたが、すぐに潜航中止し揚収した。この着水から揚収までの間、「うらしま」に搭載した重力計システムは、厳しい風浪による動揺・衝撃・振動にさらされ、また降下揚収時の衝撃・振動を受けたにもかかわらず、重力計システムにトラブルは発生しなかったことで、耐久性を確認することができた。また、その悪環境下で「うらしま」が受けた激しい動揺・振動が、別途「うらしま」に搭載していた加速度計により計測されデータが記録された。そのデータを図 18 に示す。

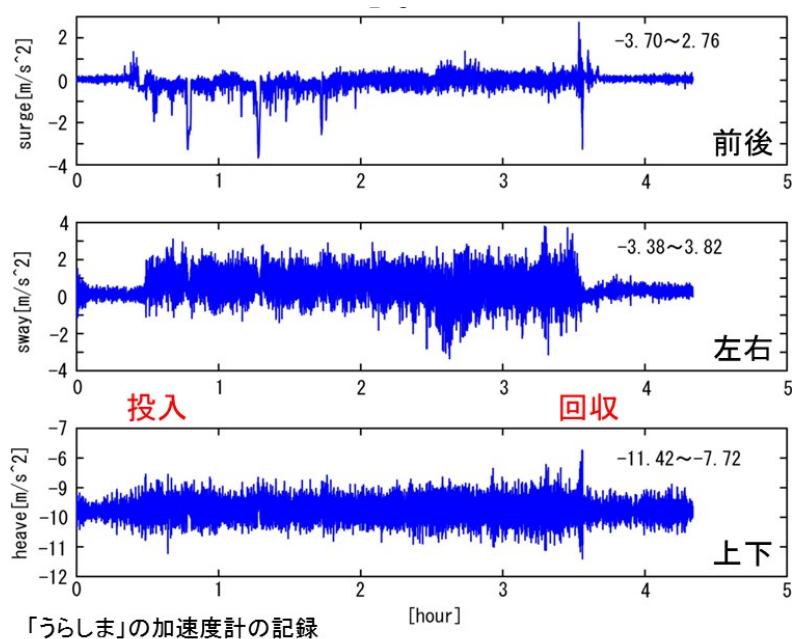


図 18 「うらしま」の加速度計の記録（12月13日）

図 18 に示されるように、重力計には揚収時に、最大 0.73G（左右方向）、0.38G（上下方向）、0.66G（前後方向）の衝撃が加わっている。また浮上した状態で波に翻弄されている時の加速度も左右・上下方向では大きい。このデータは、今後、実用運用を前提とする重力計システムの設計に資するものである。

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、平成 24 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 1mgal 以下の精度（再現性）が得られることを確認した（平成 24 年度成果報告書）。

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、平成 24 年 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小型重力計が実現した。

この小型重力計を小型重力偏差計と一緒に AUV「うらしま」に搭載し、熱水鉱床域のある実海域（伊是名海穴）での実証試験を平成 25 年 12 月に行うべく準備を行った。

しかし予定された 4 潜航の期間は、伊是名海域は荒天のために不完全な実施のまま終了し、船上で移動体に搭載した状態でのデータ取得となった。また、期間中の最終日の半日、潜航させるため AUV を着水させ潜航を試みた時があり、結局は風浪がさらに高くなり揚収できなくなる恐れが出てきたため、AUV の潜航はできなかったが、厳しい風浪にさらされ、また降下揚収時の衝撃を受けたにもかかわらず、重力計にトラブルは発生しなかった。このような悪環境下で取得した AUV の激しい動揺・振動データは、今後、実用運用を前提とする重力計システムの実現に資するものである。

4) 参考文献

Shinohara, M., T. Yamada, T. Kanazawa, K. Uehira, H. Fujimoto, T. Ishihara, A. Araya, K. Iizasa, and S. Tsukioka, Development of an underwater gravimeter and the first observation by using autonomous underwater vehicle, Underwater Technology Symposium (UT), 2013 IEEE International, doi: 10.1109 / UT. 2013 . 6519864,, 2013.

篠原雅尚・金沢敏彦・新谷昌人・藤本博己・山田知朗・石原丈実・月岡哲，海底鉱物資源の産業利用－日本 EEZ 内の新資源－，第 3 章 1. 移動体搭載型重力計システムの開発と実証試験観測，シーエムシー出版，2013.

(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、具体的には2台の重力センサの差動信号を取得する。単独の重力計と比べて、差を取るにより2台に共通の加速度擾乱を相殺することができる。これは移動体に搭載して探査する計測手法として有利である。さらに温度変動によるドリフトや移動にともなう見かけの重力効果であるエトベス補正も同等な2台の重力センサの差を取るにより打ち消すことができる。重力偏差計は航空機やヘリコプターに搭載できるものが市販されているが、本研究で必要とされる分解能には及ばない。地上実験や人工衛星に搭載する重力偏差計では高い分解能を有するものがあるが、海中探査時の揺動下では擾乱が大きく動作できないと予想される。そのため、本研究では地震研究所で開発された広帯域地震計の技術を応用し、本研究課題に最適化された重力偏差計を新規開発した。重力計と重力偏差計という2種類のセンサを併用すること、すなわちハイブリッド式が本研究の特長であり、海底下に埋設された鉱床による重力場の情報を効率よく検知するために有用な方法である。すなわち、重力計は鉱床のおおまかな位置及び密度異常の総量を計測し、重力偏差は重力の（鉛直）空間微分であり、鉱床境界や深度に感度が高い。重力計と重力偏差計を組み合わせることにより、鉱床の全体像、境界、深度に関する情報を同時に得ることができる。

2012年に相模湾で海域実証試験を行った重力偏差計は耐圧容器2個を使用するものであった。将来の探査技術の実用化を見据え、様々な移動体による重力偏差観測ができるように今年度は装置の小型化を行った。また、小型化した重力偏差計の実海域実証試験として、AUV「うらしま」に重力計とともに搭載し、鉱床の存在が確認されている沖縄北方「伊是名海穴」において、海域実証試験を実施した。

2) 実施内容

a) 重力偏差計の小型化

重力偏差計の重力センサ部は長周期振り子（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装置であり、2台をそれぞれ円筒状の真空容器内に収納したものが開発されていた。小型化のため、振り子を若干短くしその分おもりの質量の割合を増やし従来と同等の振り子の固有周期でかつ重力センサ部の径を70%に抑えた。また、重力センサ間の距離（0.44m）は従来と同じにしたため、小型化による検出精度の低下が無い構成にすることができた。図19は従来の重力センサ（直径140mm、左）と小型化した重力センサ（直径100mm、右）の写真を示す。

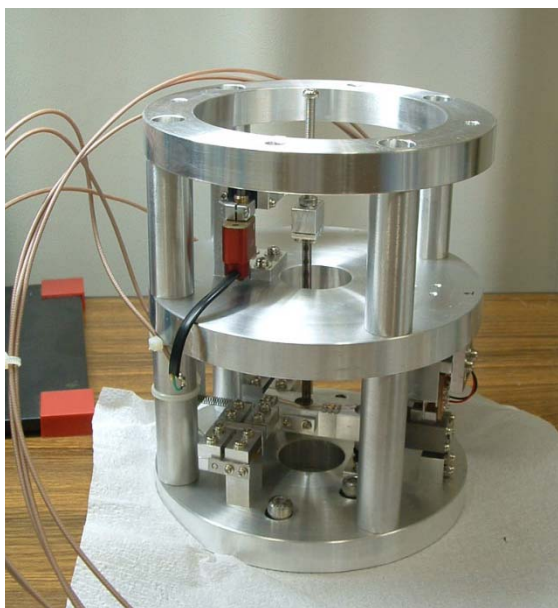


図19 従来の重力センサ（直径140mm、左）と小型化した重力センサ（直径100mm、右）。
高さはともに 170mm。

上下に 0.44m 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。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、X、Y の 2 軸の揺動回転を補償するジンバル機構に重力センサ部が取り付けられる。ジンバル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。ジンバルに組み込まれたジャイロ及び傾斜計の信号に基づいてセンサ姿勢を常時鉛直に保つように制御される。小型化のため、従来使用していた光ファイバージャイロに替え、シリコンの微細加工技術を利用した MEMS ジャイロを使用した。ジャイロ単体の性能評価では、光ファイバージャイロと同等以上の精度であることが確認され、サイズも 1/2 以下であるため、将来的に同様の技術開発に使用できると考えられる。併せて省電力化もできる。MEMS ジャイロの採用によりジンバルの占める部分を縮小することができた。また、全体の回路系を見直し、通信・記録系の小型回路基板の製作、及び制御回路基板の枚数低減・サイズ縮小を行った。その結果、重力センサとジンバルの縮小により得られたチタン容器内側面に沿った空間に小型化した電気回路を納め、システム全体として 50cm 耐圧チタン容器 1 台とすることができた（図 20）。実証試験では、この重力偏差計を roll 方向の傾斜補正機能が付いたフレームに取り付け、「うらしま」に搭載した。

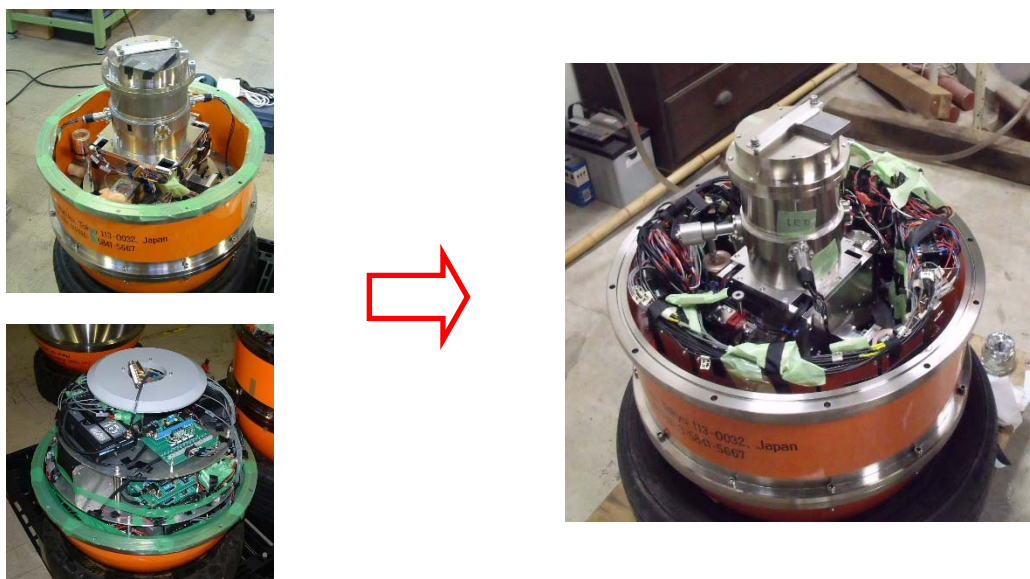


図20 前プログラムで開発した重力偏差計（左、50cm チタン球 2 台）及び本プログラムで開発した小型重力偏差計（右）

2012 年の海域実証試験では、記録装置のノイズや AUV の揺動・振動により検出性能が制限されていることが明らかとなった。観測帯域である $0.001 \sim 0.1\text{Hz}$ では 2 台の重力センサで検出された揺動はともに $\sim 10^{-3}\text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ のほぼ一定のスペクトル振幅であり、両者の記録データの差を取ることで $1/1000$ すなわち $\sim 10^{-6}\text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ に低減した。重力偏差に換算すると揺動が $3 \times 10^5\text{E}$ であり、記録データの差を取って 300E となったことに対応するが、これは記録装置の雑音レベルと一致していた。記録装置本来の性能としてはデータの差は $1/3000$ まで低減させられることが別の測定で分かっており、重力センサの信号を増幅して記録すれば記録装置の雑音の寄与は減らせる。例えば、信号を 100 倍に増幅してから記録すれば記録装置の雑音は 3E 相当に抑えられる。 $3 \times 10^5\text{E}$ の揺動に対して、 10E の検出性能を得るには $10/(3 \times 10^5) \approx 1/30000$ のコモン揺動の相殺が必要になるが、あらかじめ重力センサ間の差動信号を記録することにすれば達成できる。差動信号記録により $90\%(1/10)$ 以上コモン揺動を相殺するのは容易であるから、さらに記録データの差を取れば ($\times 1/3000$) 目標の検出性能が得られる。

信号を増幅記録する場合、2012 年の実証試験で検出された 20Hz 付近の揺動による飽和を避ける必要がある。揺動の原因は不明であるが、周波数から推測して「うらしま」の駆動系あるいは慣性航法装置の機械振動と考えられる。必要な周波数帯域は $0.001 \sim 0.1\text{Hz}$ であるから、ローパスフィルターで振動を除去すればよい。実際にはさらに重力センサの制御帯域を $1/3$ 程度に下げて、 20Hz の揺動に反応しにくくした。図 21 は計測されたスペクトルから、上記のローパスフィルターを適用し、得られる出力振幅を予想した結果である。g1 (2012、青) は実証試験で計測されたスペクトルであり、同色の破線は低周波からスペクトルを積分した RMS 振幅（右軸はそれを出力換算した電圧振幅）を表す。 20Hz の揺動で主に出力振幅（約 2V ）が決まっていることが分かる。

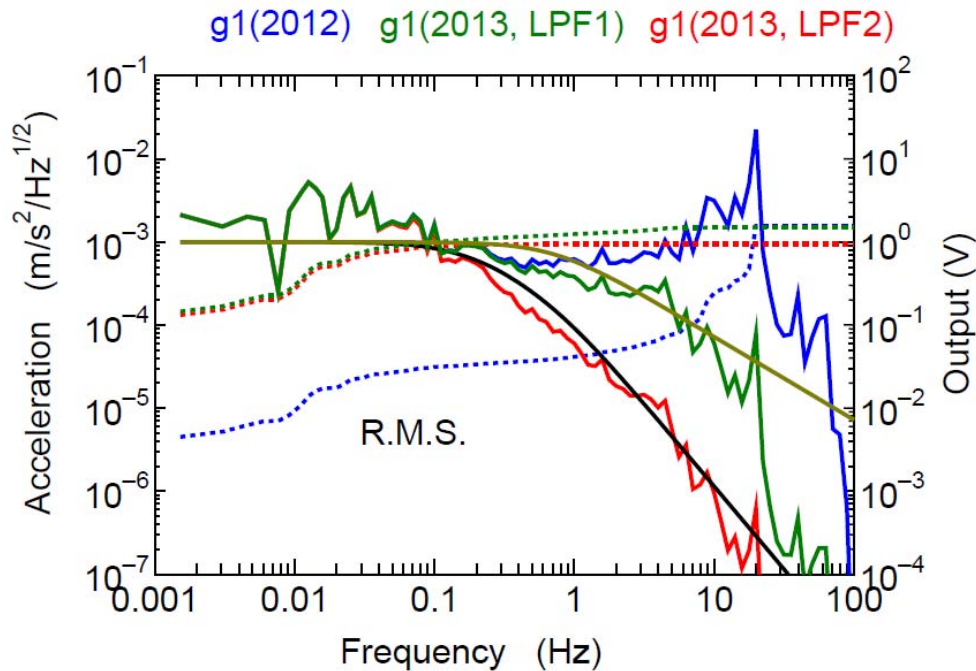


図21 2012年の海域実証試験で計測された揺動スペクトル（青実線）及び重力センサの帯域低減・ローパスフィルターを適用後に推測される検出レベル（緑、赤の各実線）。破線は対応するスペクトルを低周波側から積分した RMS 振幅を示す（右軸が電圧換算）。150 倍に増幅後も 20Hz 振動で飽和すること無く記録できる（赤破線）。

信号を約 100 倍に増幅するために、LPF1（カットオフ 0.7Hz、緑）及び LPF2（同 0.16Hz、赤）のローパスフィルターを適用し RMS 振幅を求めると、150 倍の増幅かつ 80%のコモン揺動相殺で飽和せず記録できることが分かる（図 21）。

このように「うらしま」で計測された揺動データから最適な計測条件を決定し、重力センサの応答特性の変更、ローパスフィルターの適用、増幅・差動後の記録により、目標の性能 10E が達成できることがわかった。上記方針に沿って制御回路の応答特性の変更と記録部の周波数特性・増幅率の修正を小型回路基板に適用した。

b) 小型重力偏差計の実海域での実証試験

開発した小型重力偏差計を AUV「うらしま」に搭載し、鉱床の存在が確認されている沖縄北方「伊是名海穴」において、実海域実証試験を実施した。上述のように重力センサ、ジンバル、電気回路は 50cm チタン球 1 台に収納され、計測系は 10E の検出性能が得られるように最適な条件となるように設計されている。また、2012 年の 1 回目のダイブで「うらしま」が傾斜した状態で運行しジンバルの可動範囲を超えてしまったことから、今回はモーターで装置全体の roll 方向の傾きを船上から補正できるような構成とした。2012 年と同様の外部擾乱、バランスであれば今回のシステムで目標精度に達する見込みである。伊是名海穴（図 22）における実海域実証試験は 2013 年 12 月 6 日横須賀出航、12 月 14 日那覇入港で実施され、当初 4 潜航の計画であったが、天候不良のため 1 潜航を試みるも海中データを取得することはできなかったが、海上の移動体上で重力偏差データを取得した。

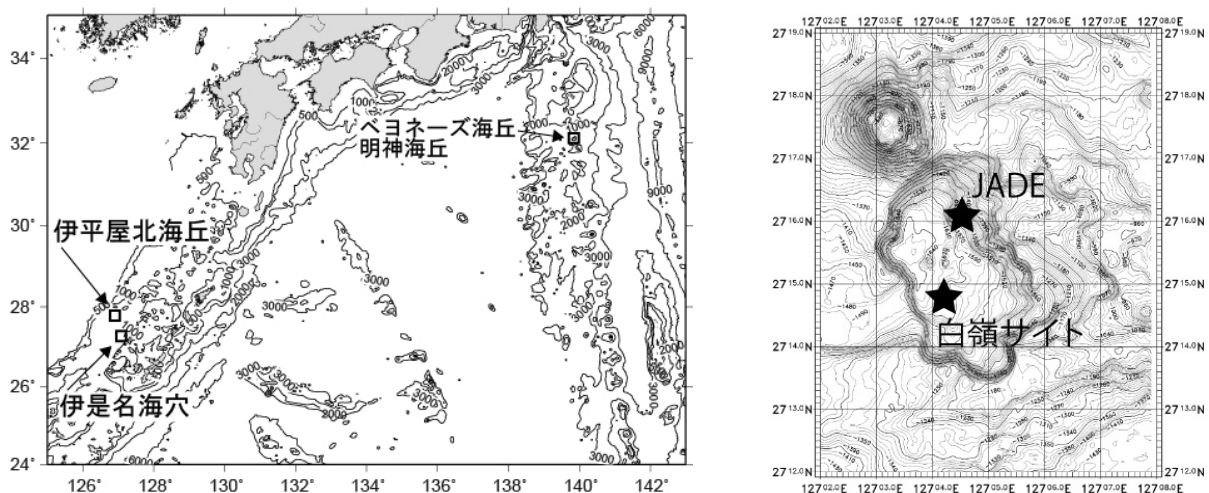


図22 平成25年度実証試験を行った伊是名海穴の位置（左）と、伊是名海穴の海底地形図（右）。カルデラ内、2か所に鉱床の存在が確認されており、カルデラ内での探査を予定していた。

うらしまへ艤装された様子を図23（左）に示す。手前が重力偏差計のチタン容器、奥が重力計のチタン容器である。共通の専用のフレームに取り付けられているが、偏差計のほうは、roll方向の傾きを船上から補正できるようにモーターが取り付けられ、1軸の回転ができるようになっている。水中では偏差計チタン容器に浮力が発生するため、ワイヤーで容器をフレームに固定した。陸から試験海域までの航海中の揺動により重力センサやジンバルに破損等が発生しないように、振り子やジンバルの可動範囲を狭めるためのモーターを導入した。試験海域に到着後、船上でチタン球外部からの操作でモーターを駆動し本来の可動範囲に戻した。前回の実証試験と比べ、船上におけるチタン球の位置調整や開閉の作業が大幅に軽減された。図23（右）はうらしまの支援母船「よこすか」の格納庫内の様子である。



図23 うらしまへ艤装された小型重力偏差計（左）、及び支援母船「よこすか」の格納庫内の様子（右）。

今回の実証試験では残念ながら天候不良のため、潜航データは得られなかったが、那覇港内の船上で重力偏差計を動作させ性能を評価した。その結果、海中よりも揺動の大きい

数 gal の船上で設計通りの動作を確認した。また、重力計との同時観測を実施した。図 24 は重力計（青）、偏差計の重力センサ（赤、緑）の各出力の時系列波形である。重力計は常時恒温槽による温度制御を行っているのに対し、偏差計は温度安定化していないため、起動後の発熱によるゆっくりとした変化が各重力センサにみられる。細かい揺動の部分と比較すると 3 者ともほぼ同程度の振幅であることがわかる。船上ではうらしまからの時刻信号が利用できず、重力計と偏差計の時刻同期が行われていないため図 24 においては重力計と偏差計の時間がややずれており、たとえば矢印の部分のように、時刻を少しずらして揺動部分を比較すると重力計と偏差計の揺動信号が非常に良く一致していることがわかる。

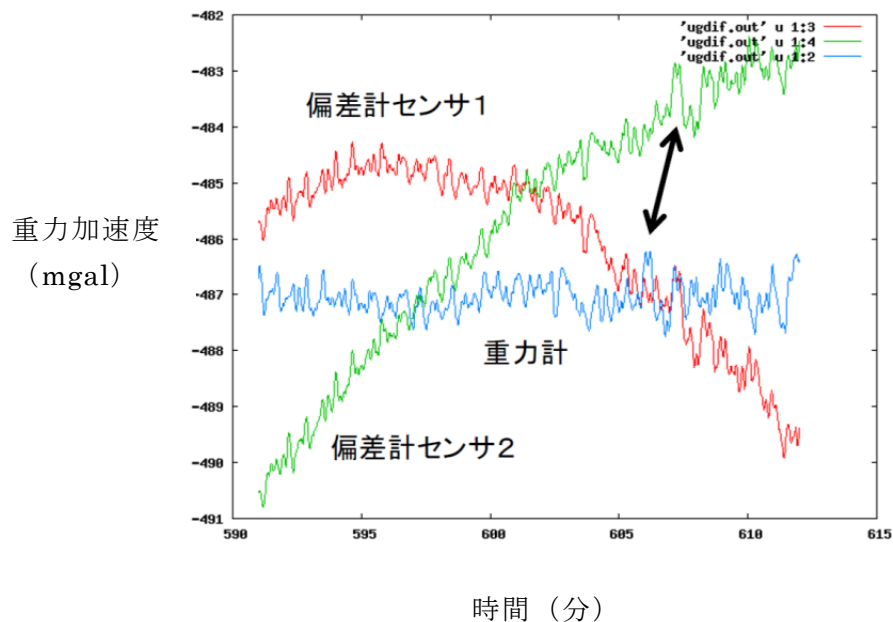


図24 那覇港の船上における重力計（青）、偏差計の重力センサ（赤、緑）の各出力の時系列波形。重力計と偏差計に時刻のずれがあるが、揺動は非常に良く一致している（矢印）。

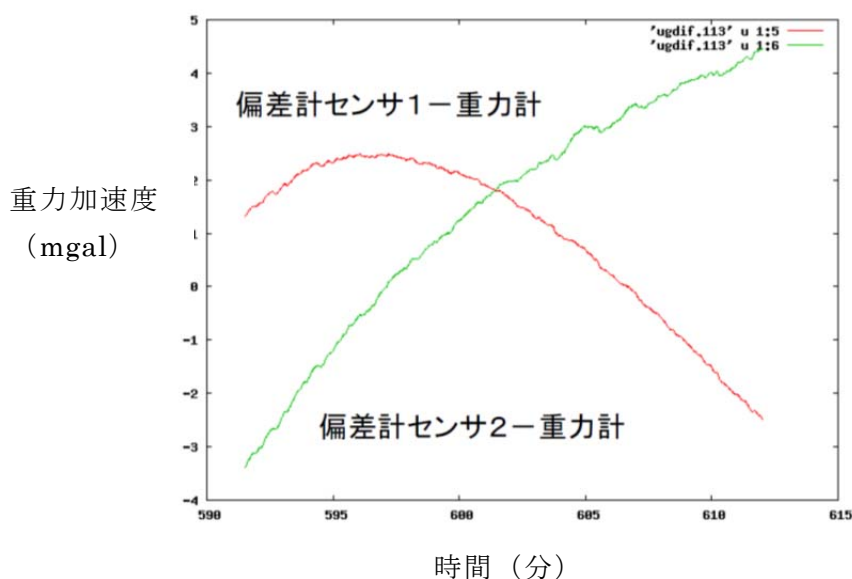


図25 偏差計の各重力センサから重力計の信号を差し引いた信号（赤、緑）。図24における時刻差は補正されている。

図 25 は偏差計の各重力センサから重力計の信号を差し引いたものである。図 24 における時刻差は考慮した。偏差計の温度ドリフトによる変化は残っているが、揺動の部分はほぼ見られなくなっている。このように、船上における揺動下で重力計と偏差計の重力センサが同等の信号を取得しており、重力偏差計として正しく機能していることが実証された。

3) 成果のまとめ

2012 年に相模湾で海域実証試験を行った重力偏差計は耐圧容器 2 個を使用するものであり、将来の探査技術の実用化を見据え、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を行った。内蔵されている重力センサ間の距離は変えず径を 70%に抑え、小型化による検出精度の低下が無いような構成とした。また、小型のジャイロを使用しジンバルの占める部分を縮小した。得られた空間に小型化した電気回路を納め、システム全体として耐圧容器 1 個に収めることができた。

一方、2012 年の実証試験では、記録装置のノイズや AUV の揺動・振動が検出性能の劣化につながっていることが明らかとなった。そこで、制御回路の応答特性の変更と記録部の周波数特性・増幅率の修正を行い、AUV による外乱に対して回路構成を最適化して本来の検出性能が得られるような改良を行った。

2013 年 12 月に伊是名海域で実証試験を実施した。残念ながら天候不良のため、潜航データは得られなかったが、那覇港内の船上で重力偏差計を動作させ性能を評価した。その結果、海中よりも揺動の大きい船上で設計通りの動作を確認した。また、重力計と同時観測を実施し、偏差計の重力センサが揺動に関して重力計と同等の信号を取得しており、重力偏差計として正しく機能していることが実証された。

4) 参考文献

Shinohara, M., T. Yamada, T. Kanazawa, K. Uehira, H. Fujimoto, T. Ishihara, A. Araya, K. Iizasa, and S. Tsukioka, Development of an underwater gravimeter and the first observation by using autonomous underwater vehicle, Underwater Technology Symposium (UT), 2013 IEEE International, doi: 10. 1109 / UT. 2013 . 6519864,, 2013.

Araya, A., H. Sakai, Y. Tamura, T. Tsubokawa, and S. Svitlov, " Development of a compact absolute gravimeter with a built-in accelerometer and a silent drop mechanism" , in Proc. of the International Association of Geodesy (IAG) Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TGSM-2013), 17-20 September 2013, Saint Petersburg, Russia. (in press)

篠原雅尚・金沢敏彦・新谷昌人・藤本博己・山田知朗・石原丈実・月岡哲, 海底鉱物資源の産業利用ー日本 EEZ 内の新資源ー, 第 3 章 1. 移動体搭載型重力計システムの開発と実証試験観測, シーエムシー出版, 2013.

(c) 海中重力計測用ソフトウェアの開発

1) 開発の概要

海中重力計システムの観測データを用いて重力異常値を求めるソフトウェアの開発を進めた。平成 24～25 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こととしたので、オフラインの重力データ処理ソフトウェアの改良を行った。

2) 実施内容

平成 24 年度に開発したオフラインの重力データ処理ソフトウェアを用いて、24 年度 9 月に相模湾で実施した実海域試験データのオフライン処理を進め、フリーエア重力異常を求めるとともに、ソフトウェアの改良を進めた（図 26）。

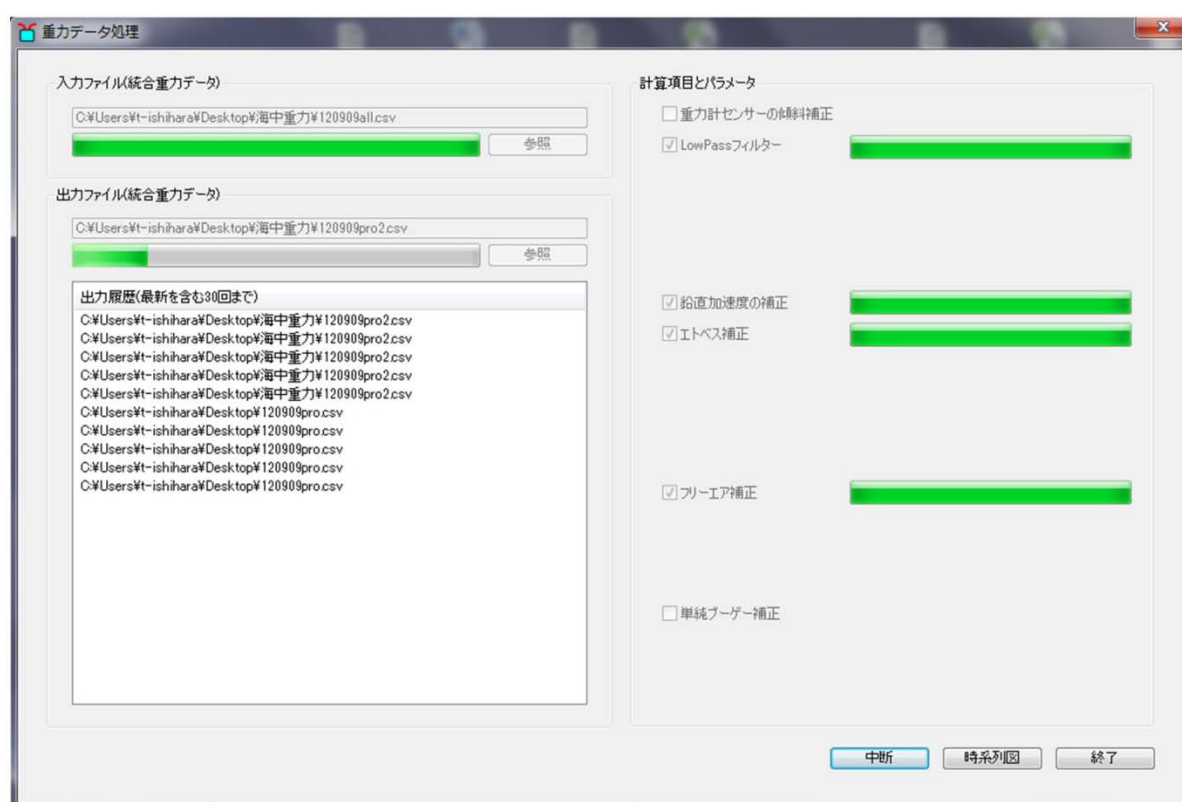


図 26 作成した解析ソフトウェアによる解析処理中の画面

PC のハードディスクに保存された重力センサ、鉛直保持機構、水晶水圧計、などの観測データを用いて、重力センサの鉛直動揺加速度や水深・水平位置の変化に伴う変動を補正し、同じルート繰り返し往復することにより約 0.1 mgal の再現性を確認するとともに、それぞれの処理における時刻同期の手法や、ローパスフィルターの設定等に改良を加えた。またそれらの処理を円滑に進めるために、収録ファイルの形式等も改良した（図 27）。

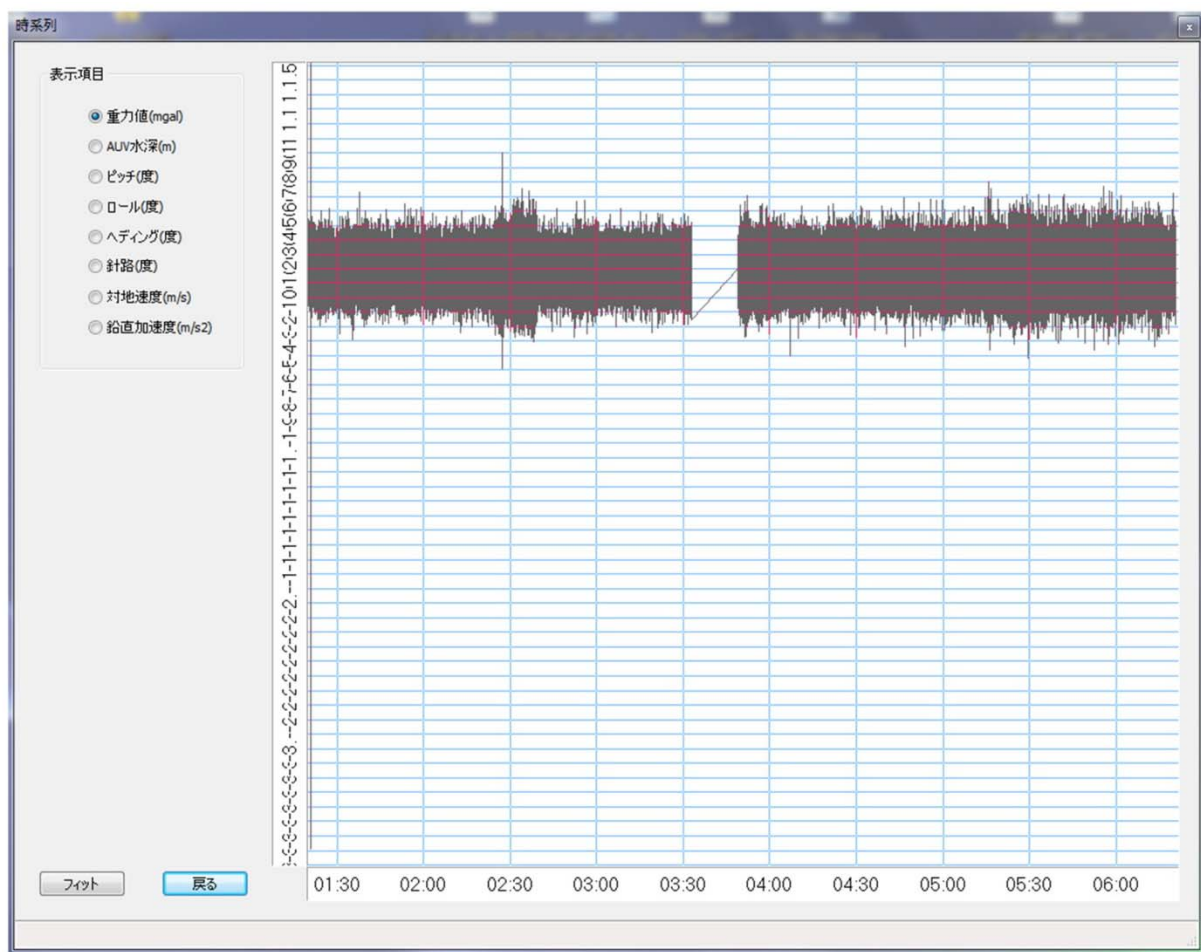


図 27 解析処理終了後のデータ表示画面

改良したソフトウェアを 25 年度 12 月に伊是名海域で実施予定の実海域試験での観測データの解析に適用する予定であったが、海況不良のために実海域試験が不完全な実施のまま終了し、船上で移動体に搭載した状態でのデータ取得となった。そのために、観測データ解析に、改良したソフトウェアを使用し、さらなる改良を加えることは難しい状況であった。

3) 成果のまとめ

自律型無人探査機 (AUV) に海中重力計システムを搭載して行う重力探査において、観測データのオフライン処理により重力異常値を求めるソフトウェアを開発した。

(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

深海巡航探査機「うらしま」(以下、「AUV」と称す)による高感度重力計測の潜航試験を実施した平成 24 年度の試験結果から以下の課題が抽出され、それぞれに対策を講じた。

- a) 高感度重力計と船上の高感度重力計用 PC は AUV の音響通信を介して通信できるように改造し、陸上及び潜航中の通信品質は良好であった。しかし、船上で音響通信の品質は低く潜航前の確認作業に時間を要した。このため、潜航前準備時間を短縮するために、音響通信に加えて有線で接続し船上での通信品質を向上させる。
- b) 平成 24 年度の試験海域に比較して、熱水噴出海域の海底地形は複雑で起伏が多い。AUV にピッチ角変化が少ない定深度航行をさせると、地形によって AUV から海底までの高さ(高度)が変化し、高度が大きくなると高度計測の欠落や小さくなると海底接触が危惧される。そこで、前者は航法機器に加えて観測機器の併用、後者は微細地形データにより AUV の航行計画を作成する。
- c) 平成 24 年度に組み込んだ高感度重力計保護ソフトウェアの作動を確認し、必要に応じてデバッグを行う。

2) 実施内容

AUV システムを経由して高感度重力計および偏差計(以下「重力計システム」と称す)が船上の重力計用 PC との双方向通信および重力計システムが AUV の観測と航法機器から航海情報を受信する構成を図 28 に示す。

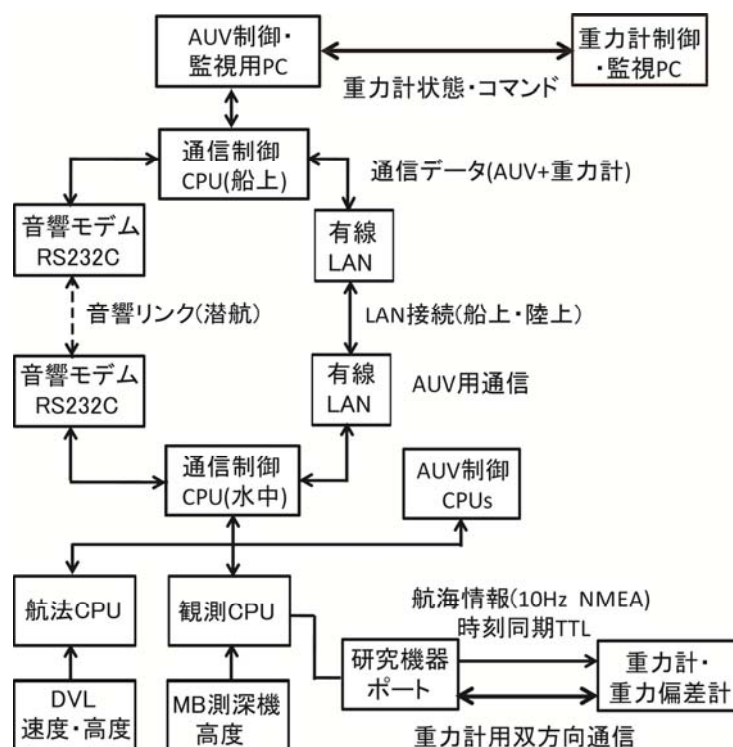


図 28 重力計システムに適用するための AUV 通信機能の拡張と航法情報等の配信

a) 高感度重力計と船上 PC との通信

重力計システムとの双方向通信は、平成 24 年度に製作した RS232C に準拠するプロトコルの音響通信に加えて、有線 (LAN に準拠) するプロトコルの通信機能を実現するようにソフトウェアを改造した。振動や騒音が多い船上格納庫内環境でも通信品質が向上し、船上の高感度重力計用 PC による高感度重力計の作動調整作業の効率が向上した。

b) 姿勢変化を抑制する航法

i) マルチビーム音響測深機による高度計測

海底に起伏のある海域で AUV を定深度で航行させると、AUV の高度は地形に応じて変化する。AUV の速度と高度を計測する速度計測器 (図 28 中では「DVL: Doppler Velocity Log」と記す) は過去のデータから海底を安定して探知できる AUV の高度は約 100m であり、180m 以上になると高度計測は不可能になる。高度計測データの欠落は重力計測の処理にも影響するので、確実に高度を探知するためにマルチビーム音響測深機 (図 28 中では「MB 測深機」と記す) が計測する高度を併用できるように改造した。

DVL は対水速度および対地速度を計測し、それぞれの計測が有効であることを示すフラグが計測値とともに出力される。このフラグを利用して、DVL 対地計測が有効なら DVL 高度を採用し、DVL 高度が無効の場合は、マルチビーム音響測深の直下高度を採用できるように観測および航法 CPU のプログラムを改造した。

ii) 航行計画の作成

伊是名海穴の地形データに AUV の航行計画を与えて、地形プロファイルを出力するプログラムを製作し定深度航行に適した計画を作成した。図 29 に伊是名海穴で候補となったハクレイサイトおよび JADE サイトでの AUV の計画測線を示す。ハクレイサイトは平行四辺形の調査範囲の右上をスタートし下方 (南) に向かい芝刈りのように航行する。同様に東から西に傾斜する JADE サイトでは右下をスタートし、上 (北) に向かい各測線の折り返しで深度を下げるように航行させるように計画した。図 30 の (a) と (b) にそれぞれハクレイサイトおよび JADE サイトに計画した測線下の海底プロファイルを示す。(a) は調査範囲に目標としたマウンド (緑点で示す) 上を北から南に移動する測線を示す。水深は 1550m から 1640m にあるが、北部の窪地はほぼ平坦で水深は約 1620m であることがわかる。一方 (b) は調査範囲のほぼ中央に記した目標 (赤点で示す) 上を南から北に移動する測線を示す。高度変化小さくなるように最大傾斜面をトラバースしても、計画測線中央の水深が 1450m と最も浅く、その両端は水深が 100m 深くなる急峻地形である。これらの目標点の測線下プロファイルを比較し、海底の起伏が緩やかなハクレイサイトを第一候補とし、およそ 1500m の深度で航行させるように決定した。

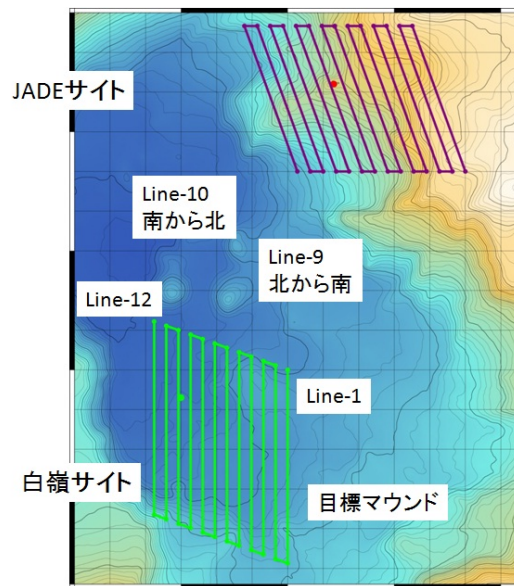
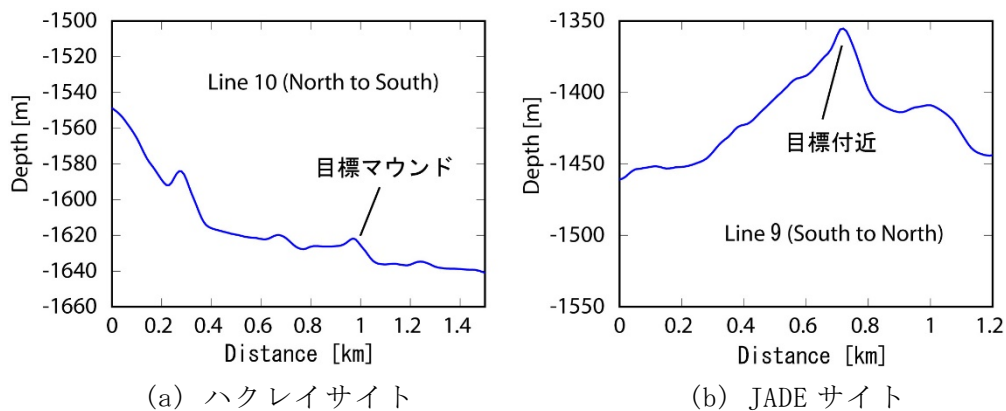


図 29 伊是名海穴の AUV 測線計画 (意図的に座標を削除)



(a) ハクレイサイト

(b) JADE サイト

図 30 計画測線下の海底プロファイルの比較 (意図的に解像度を低下)

c) 海域試験

図 31 に AUV の機装を示す。重力計システムは AUV 機体前部のペイロード区画に収納した。また、機体後部には昨年度の試験で重力偏差計に記録された 25Hz 付近の振動を確認するために加速度計を取り付けた。

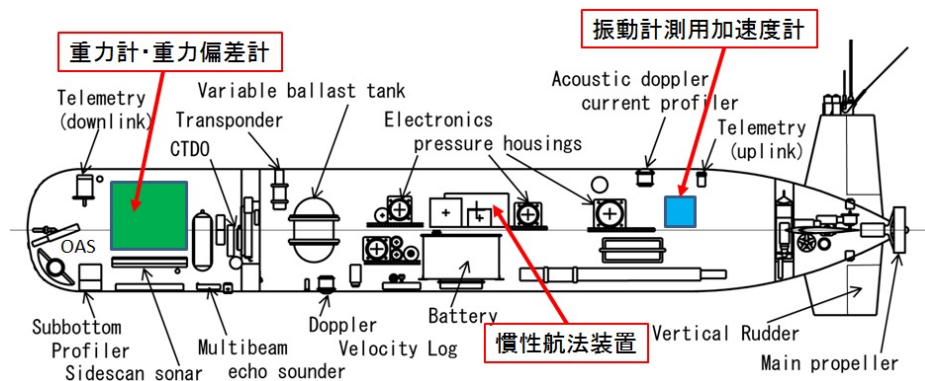


図 31 YK13-13 における AUV の一般配置図

海域試験は2013年12月6日に横須賀港を出港し、沖縄伊是名海域で12月10日から12月13日にかけて海域で待機したが、荒天のため潜航試験は実施できなかった。12月13日にAUVを着水させて、海面でデータ取得を行った。図32に海面を航行させたときのロール、ピッチおよびヨー角の時刻歴を示す。機体のロールは左舷および右舷にそれぞれ最大 20° の振幅で動揺し、ピッチ角は -25° から 10° の範囲で動揺したことを示す。図33に加速度計が計測した機体振動をFFT処理し周波数成分の相対値を示す。平成24年度の潜航試験で重力偏差計に記録された25Hz近傍だけでなく、高い周波数成分も多く含まれ25Hzの振動源を推定することはできない。今後、潜航時の加速度を取得して評価を行う予定である。

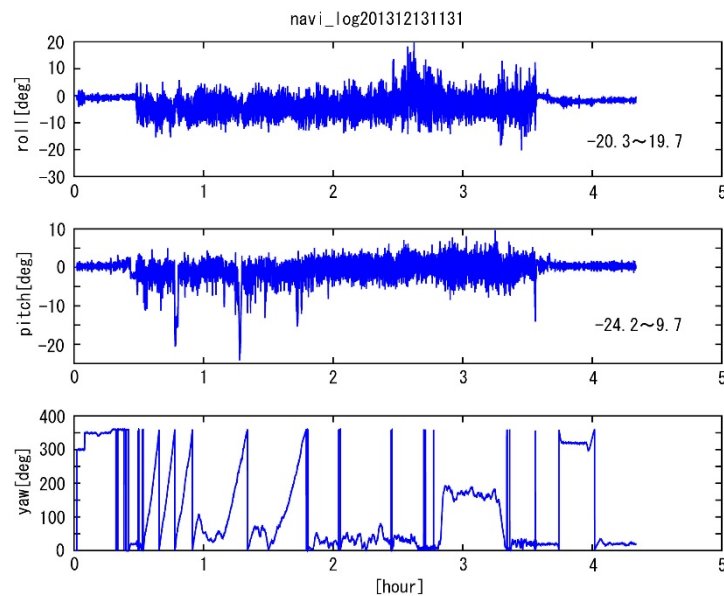


図 32 AUV の海面での姿勢角

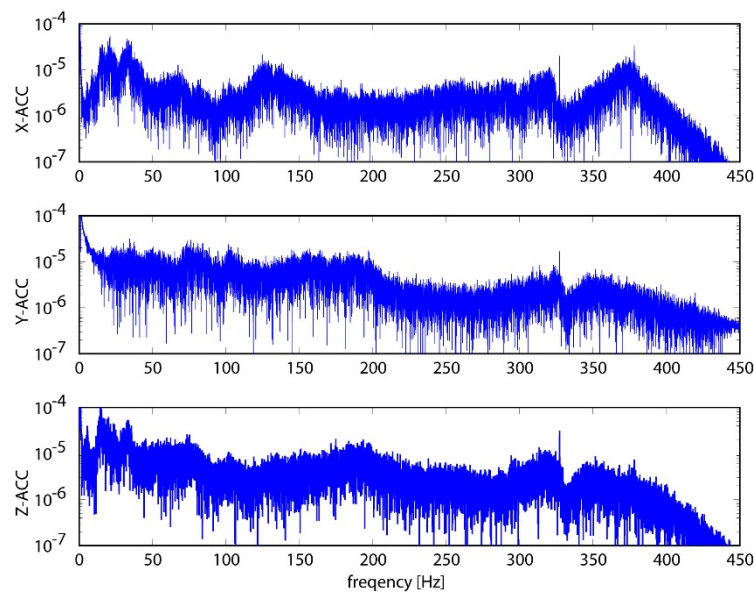


図 33 加速度計の海面記録の周波数成分

c) 重力計保護

高感度重力計の保護ソフトウェアは、AUV 制御ソフトウェア異常を検知すると計画通りに作動しデバグの必要はなかった。

3) 成果のまとめ

平成 24 年度から平成 25 年度の二カ年にかけて重力計システムを AUV に艀装し海域試験で重力計システムに適応するように改造し、UV の有効性を実証した。航法技術開発において実施した項目を以下に示す。

a) 重力計システムの搭載

- ・重力計・重力偏差計および取付用フレーム等(平成 25 年度 250kg:空中、28kg:水中、平成 24 年度 302kg:空中、-2kg:水中)のペイロードを搭載した。

b) 重力計および重力偏差計との双方向通信

- ・機体動揺(傾斜)から重力計を保護するために船上と重力計を AUV の通信系統を拡張して相互通信させ、重力計の作動確認および保護装置を操作した。
- ・AUV 制御ソフト異常時は保護コマンドを自動送信する機能を AUV 内に付加した。

c) 航法データの通信

- ・重力計測の解析に重要となる AUV 姿勢、座標および時刻等の航法データをシリアルで出力した。また、AUV に内蔵のルビジウム時計から 1gpps パルスを出力した。

d) 定深度制御による潜航調査

- ・重力計測では鉛直方向加速度の機体動揺を抑制できる定深度航行を利用した。定深度航行において高度が上昇し、速度検出器の高度計測が欠測した場合に備えて、マルチビーム音響測深機を高度計測に適用する機能を付加した。

e) 計画測線の作成

- ・事前に入手した微細地形図上に計画測線を設定して海底地形プロファイルを作成し、実証試験計画を作成した。

f) 重力偏差計の 25Hz ピーク

- ・AUV に加速度センサを搭載して 25Hz の振動源調査を試みたが、海面で取得したデータでは検出することができなかった。今後も振動源調査を継続する予定である。

(4) 成果の論文発表・口頭発表等

(a) 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
「うらしま」を用いた移動体搭載型重力計システムの実海域実証試験観測，口頭	篠原雅尚・山田知朗 金沢敏彦・藤本博己 石原丈実・新谷昌人 飯笹幸吉・月岡哲・植平賢司	ブルーアース 2013 （東京）	2013. 5. 19	国内
海底探査用重力偏差計システムの開発 3，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	地球惑星連合大会 （千葉市）	2013. 5. 22	国内
自律型無人潜水機を用いた新規開発海中重力計の海域実証試験観測，口頭	篠原雅尚・山田知朗・金沢敏彦・藤本博己・石原丈実・新谷昌人・飯笹幸吉・月岡哲・植平賢司	地球惑星連合大会 （千葉市）	2013. 5. 23	国内
Development of a compact absolute gravimeter with a built-in accelerometer and a silent drop mechanism	新谷昌人・田村良明・坪川恒也・Sergiy Svitlov	IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: static and mobile measurements （ロシア・サンクトペテルブルク）	2013. 9. 18	国外

(b) 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
移動体搭載型重力計システムの開発と実証試験観測	篠原雅尚・金沢敏彦・新谷昌人・藤本博己・山田知朗石原丈実・月岡哲	海底鉱物資源の産業利用－日本 EEZ 内の新資源－, シーエム－シー出版	2013. 6	国内
Development of a compact absolute gravimeter with a built-in accelerometer and a silent drop mechanism	新谷昌人・酒井浩考・田村良明・坪川恒也・Sergiy Svitlov	Proc. of the International Association of Geodesy (IAG) Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TGSMM-2013)	2013. 9	国外
Seafloor geodetic approaches to subduction thrust earthquakes	H. Fujimoto	Monogr. Environ. Earth Planets, Terrapub	2014. 3	国内

(5) むすび

本事業では、モデル鉱床の規模を $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、密度差を 1 g/cm^3 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/cm^3 、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 ($2\text{ mgal/km} = 2\text{ }\mu\text{ gal/m}$) 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、

- (a) 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
 - (b) 重力計と重力偏差計の小型化
 - (c) 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
 - (d) 高精度重力測定に適した AUV の航行技術の開発
- を実施した。

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、通信インタフェースの開発を行った。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 1mgal 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、平成 25 年度に小型重力計と小型重力偏差計を開発した。小型重力計では、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。

これら新しく開発した小型重力計と小型重力偏差計と一緒に AUV「うらしま」に搭載し、熱水鉱床域のある実海域（伊是名海穴）での実証試験を平成 25 年 12 月に行うべく準備を行った。

しかし予定された 4 潜航の期間は、伊是名海域は海況不良であったため、不完全な実証試験の実施であったが、船上で移動体に搭載した状態で、重力データおよび重力偏差データを取得した。また、期間中の最終日の半日、潜航させるため AUV を着水させ潜航を試みた時があり、結局は風浪がさらに高くなり揚収できなくなる恐れが出てきたため、AUV の潜航はできなかったが、厳しい風浪にさらされ、さらに降下揚収時の衝撃を受けたにもかかわらず、重力計にトラブルは発生しなかった。このような悪環境下で取得した AUV の激しい動揺・振動データは、今後、実用運用を前提とする重力計システムの実現に資するものである。

IV. 活動報告

(1) 運営委員会

【平成 25 年度第 1 回運営委員会】

日時： 平成 25 年 10 月 25 日（金） 午後 13 時 30 分～午後 16 時 30 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、藤本博己、石原丈実

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

議事概要

1. 議事録確認
2. 事業実施状況と今後の計画
 - (1) 平成 25 年度事業および実証試験の概要
 - (2) 移動体搭載型重力計技術開発および実証試験計画
 - (3) 移動体搭載型重力偏差計技術開発および実証試験計画
 - (4) AUV の航法・計測技術開発および実証試験における航法
3. 装置の実物紹介

【平成 25 年度第 2 回運営委員会】

日時： 平成 26 年 3 月 11 日（火） 午後 13 時 30 分～午後 16 時 30 分

場所： 東京大学地震研究所 事務会議室 A・B（1 号館 3 階）

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

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. 議事録確認
2. 事業実施状況と今後の計画
 - (1) 移動体搭載型重力計技術開発および実証試験
 - (2) 移動体搭載型重力偏差計技術開発および実証試験
 - (3) AUV の航法・計測技術開発および実証試験における航法
 - (4) 今後の計画概要
3. 重力計システム 実機紹介

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海底地震津波観測網整備推進室・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・調査役
藤本 博己	東北大学災害科学国際研究所・名誉教授
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 東京大学地震研究所特任研究員
飯笹 幸吉	東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授

(2) 開発検討会

平成25年度第1回開発検討会	平成25年4月24日開催
平成25年度第2回開発検討会	平成25年5月27日開催
平成25年度第3回開発検討会	平成25年7月17日開催
平成25年度第4回開発検討会	平成25年9月4日開催
平成25年度第5回開発検討会	平成25年10月10日開催
平成25年度第6回開発検討会	平成25年12月3日開催
平成25年度第7回開発検討会	平成26年1月14日開催
平成25年度第8回開発検討会	平成26年2月12日開催
平成25年度第9回開発検討会	平成26年3月11日開催