

海底重力計 INO System の導入と今後の展望

下山 みを*, 村岡 淳**

Introduction of the INO System, an Ocean-bottom Gravimeter, and Its Prospects

Mio SHIMOYAMA* and Atsushi MURAOKA**

Abstract

In recent years, the demand for high-precision seamless onshore and offshore gravity measurement is increasing and the market is expected to grow. However, ocean-bottom gravimeters available for measurement in Japan are limited to several units owned by universities and public research institutions. Furthermore, since there are many restrictions on conducting gravimetric surveys, there is almost no gravitational data for Japan's coastal zone. The INO system, an ocean-bottom placement-type gravimeter manufactured by Scintrex, was introduced in April 2014. This system can measure coastal seas to a depth of 300 m, which encompasses almost the entire continental shelf around Japan. The device uses an online measurement method that allows the data to be confirmed in real-time, enabling practical gravimetric surveys to be conducted seamlessly, both onshore and offshore. Performance tests conducted in actual seas prior to its introduction confirmed that the entire measurement process was easy and yielded high-quality data. A calibration test along the Mt. Tsukuba gravity calibration line showed that the error of the device was in the order of 10^{-4} compared to the reference gravity difference, which is equivalent precision to onshore portable gravimeters such as Scintrex CG-5. Since offshore operations require various knowledge, under a tie-up agreement, we are jointly conducting ocean bottom gravimetric surveys with Sogo Geophysical Exploration Co., Ltd., which is highly experienced in offshore exploration around power generating stations, thus utilizing the respective strengths of the two companies. Under this collaboration, we will use the ocean-bottom gravimeter to conduct seamless gravimetric surveys for detailed structural explorations for nuclear power plants, CCS and geothermal development.

Keywords: Ocean-bottom gravimeter, INO, Seamless gravimetric survey, CG-5, Online measuring system, Coastal area

(要 旨)

近年陸域と海域において連続的に高精度な重力測定を行う需要が増えており、今後さらに市場が拡大すると見込まれる。しかし国内で測定可能な海底重力計は、大学や公的研究機関の所有する数台に限られている。さらに海域における重力探査は作業上の制約が多いため、日本の沿岸海域は重力データの空白域に近い状況である。このような現状を鑑み、2014年4月に新たにScintrex製の海底設置型重力計INO System一式を導入した。測定域は水深300 m程度以浅の海域であり、ほとんどの日本沿岸の大陸棚をカバーできる。また測定時にリアルタイムにデータの確認ができるオンライン測定方式を採用している。これにより、陸域・海域を問わず、目的に応じた合理的な重力探査の提供が可能となった。導入にあたり実際の海域において動作試験を実施し、一連の測定作業が問題なく実施可能なこと、高品質のデータが取得可能なことを確認した。また筑波山重力点検線で行った点検の結果、測定器の誤差は基準重力差に対し 10^{-4} オーダーであり、Scintrex CG-5等の陸上の可搬型重力計と同程度の精度であることが明らかとなった。海域における作業は多くのノウハウが必要であるため、発電所サイト周辺海域で多くの実績を有する総合地質調査株式会社と海底重力探査に関する業務提携を締結した。これによりそれぞれの強みを活かし、弱みを補完した事業の推進が可能となった。今後シームレス重力探査の一貫した業務実施体制を活用し、原子力発電所やCO₂地中貯留 (CCS)、地熱開発などにおける深部構造探査をターゲットとして海底重力計を活用していきたい。

キーワード: 海底重力計, INO, シームレス重力探査, CG-5, オンライン測定システム, 沿岸域

* 応用地質(株)エネルギー事業部
* OYO Corporation Energy Business Division

** 総合地質調査株式会社
** Sogo Geophysical Exploration Co., Ltd.

1. はじめに

可搬式の相対重力計 (Scintrex CG-5 重力計等) を使用した陸域における重力探査は、一般に広く行われてきている。近年は陸域に限らず、沿岸海域に渡る連続した高精度重力探査であるシームレス重力探査 (たとえば原子力発電所およびその周辺域における 3 次元地下構造探査など) の需要が増え (たとえば藤本ほか (2009)¹⁾, 駒沢ほか (1996)²⁾, 駒沢ほか (2009)³⁾, 駒沢ほか (2010)⁴⁾ など), 船上重力計と比べ高精度である海底重力計の必要性が高まっている。しかし、国内における海底重力計は、かつては資源開発を目的として石油資源開発株式会社が所有し活用されていたものの、現在測定可能な状態のものは東京大学地震研究所や産業技術総合研究所などが所有する数台に限られており、民間の調査会社が保有するものはなかった。さらに海底重力探査の作業は、陸域における探査と比べてはるかに労力と時間がかかることから、沿岸海域の大部分が重力データの空白域となっている。

このような現状から、新たに海底重力計 INO (「アイノー」と読む) を基本とした海底重力計システム (INO System) 一式を導入した。海底重力計本体は、Scintrex 社 (カナダ) が基本設計した海底設置型重力計であり、商用第 1 号機である。なお INO の名称はギリシャ神話に出てくる海の女神の名前に由来している。

本稿では INO System の特徴や、取得したデータについて紹介し、今後の展望について述べる。

2. 海底重力計 INO System の概要

2.1 海底重力計とは

従来、海域における重力探査は、資源分野における広域の構造探査などを目的とした船上重力計による探査が広く行われてきた。船上重力計は揺動する船舶上で航行しながら測定を行うことから、水平を保つ装置等を内蔵する必要があり、装置自体も大型となる。また極力揺動の少ない船舶を使用することが望ましいため、一般的には 1000 トン以上の観測船に搭載される。そのため探査対象エリアは一定以上の水深が必要となるため、深海を含む外洋となることが多い。また、沿岸域で船上重力探査を行う場合、地形や障害物などの影響により航跡が直線から外れざるを得ない場合が多く、その影響によるノイズが混入することが多い。データの精度も 1~数 mGal 程度の場合がほとんどである。

一方、海底重力計は国内の沿岸域や大陸棚、内湾などにおけるより詳細な地下構造を探査対象としており、使用する船舶も 10 トン程度でよい。また、海底に直接設置して探査を行うため、よりノイズの少ない高精度のデータが取得可能である。INO System における取得データの精度 (再現性) は 0.01 mGal 程度であ

り、船上重力計と比較して 1 から 2 オーダー以上高い精度でデータ取得が可能である。表 -1 に一般的な船上重力計と海底重力計 INO System, 陸域の可搬式相対重力計それぞれを利用した探査の特徴を示し、図 -1 にそれぞれの代表機種の例を示す。

表 -1 各種重力探査手法の比較

Table 1 Comparison of various gravimetric survey methods

項目	船上重力探査	海底重力探査	陸上重力探査
代表機種	Air-Sea Gravity Meter System (Micro-g LaCoste)	INO System (Scintrex)	CG-5 (Scintrex)
探査対象	広域構造探査 資源探査等	詳細構造探査 地質構造・断層等	広域構造探査 から 詳細構造探査
使用船舶	1000 t 程度以上	10 t から数 10 t	—
測定範囲	外洋, 深海	内湾, 大陸棚	陸域
測定精度	1 から 数 mGal 程度	0.01 mGal 程度	0.01 mGal 程度



図 -1 代表的な重力計の例

Fig. 1 Typical gravimeters

INO system の耐圧容器内には、水平を保持する機構を組み込んだ重力測定センサーが内蔵されており、センサー部分は陸域における可搬型相対重力計 Scintrex CG-5 と同一のものを使用している。

INO System の大きな特徴として、オンライン測定システムであることが挙げられる。前述の東京大学地震研究所や産業技術総合研究所が所有する海底重力計は、オフライン測定システムを採用している。表 -2 にオンライン測定システムとオフライン測定システムの特徴をまとめて示す。

オフラインシステムの場合、海底重力計設置のためのワイヤーやウインチは、作業船に装備されたものを使用することもでき、システムの小型・軽量化が可能である。一方、測定中は測定データやセンサーのレベリングの状態などの測定状況を把握できないため、海底重力計の回収後にデータの良否や再測定の要否を判断しなければならない。

表-2 オンラインとオフラインの測定システムの比較
Table 2 Comparison of online and offline survey systems

項目	オンラインシステム	オフラインシステム
データの確認	リアルタイム	重力計回収後
設置状態の確認	リアルタイム	確認不可
ケーブル	伝送ケーブルが必要 オフラインと比較して太い	設置用ワイヤーのみ φ8~10mm 程度のワイヤーが利用可
ウィンチ	専用ウィンチが必要	汎用のウィンチで可 作業船のウィンチが利用可
長所	データや設置状態を確認しながら作業が可能. システムの消費電力による制約を受けない.	装置・設備がオンラインと比較して小さい ROV などを使用した設置も可能
短所	ケーブルを常時接続しておく必要がある. 機材・設備がオフラインと比較して大きい.	回収後までデータや設置状態が把握できない. 電源を内蔵する必要があり、消費電力の制約がある.

オンライン測定システムの場合、通信用ケーブルを海底重力計本体から船上装置まで接続する必要がある。INO System では、重力計の設置、回収時の荷重に十分耐えられるケブラー製 600m ケーブルと、専用の大型のウィンチ（三相 200V 電源）を使用しており、オフラインシステムと比較すると大掛かりな機材が必要となる。しかし、海底重力計本体の傾斜やセンサー部のレベリングの状態、測定値やその標準偏差 (SD)、水深など、海底重力計からの各種データがリアルタイムで把握可能なため、データの良否、測定継続または終了、再レベリング、再設置等、データの品質にかかわる判断が測定中にその場で可能という測定作業上の

大きな利点がある。

2.2 INO Systemの諸元

図-2 にシステム全体図を示す。INO System は船上装置（電源・PC 等）、陸上装置、ウィンチ、ケーブル、海底重力計本体から構成される。このうち海域における測定時には、船上装置、ウィンチ、ケーブルならびに海底重力計本体を使用する。一方、海底重力計の運搬時や陸上（岸壁）の基点測定時等には、陸上装置、10m ケーブル、海底重力計本体を使用する。

(1) 海底重力計本体

海底重力計本体は、耐圧 600 m のアルミニウム製耐圧容器、フレーム、ショックアブソーバー等から構成され、耐圧容器内部には、Scintrex CG-5 型重力計のセンサー部（測定分解能：0.001 mGal）が収納されている。重力計センサー部の温度は、運搬時や船上での移動時の外気温を考慮し 58℃ に設定している。重力計センサー部は 2 軸の姿勢制御モーターによって駆動されるジンバル機構で水平調整（レベリング）を行う仕組みとなっており、本体の傾斜が 36° 以内であれば自動でセンサー部の水平が保たれる。耐圧容器内の底部には水漏れセンサーが取り付けられており、万が一海底設置中に耐圧容器内への浸水が発生した場合、船上装置のコントロール PC に警告を表示する仕組みとなっている。また、耐圧容器内には水晶式圧力計を装備しており、水圧から水深を把握することが可能である。水深 300 m 程度以下の場合、換算水深の測定精度（公称精度）は 10 cm 以内である。海底重力計本体の主な仕様を表-3 に示し、本体の写真を図-3 に示す。

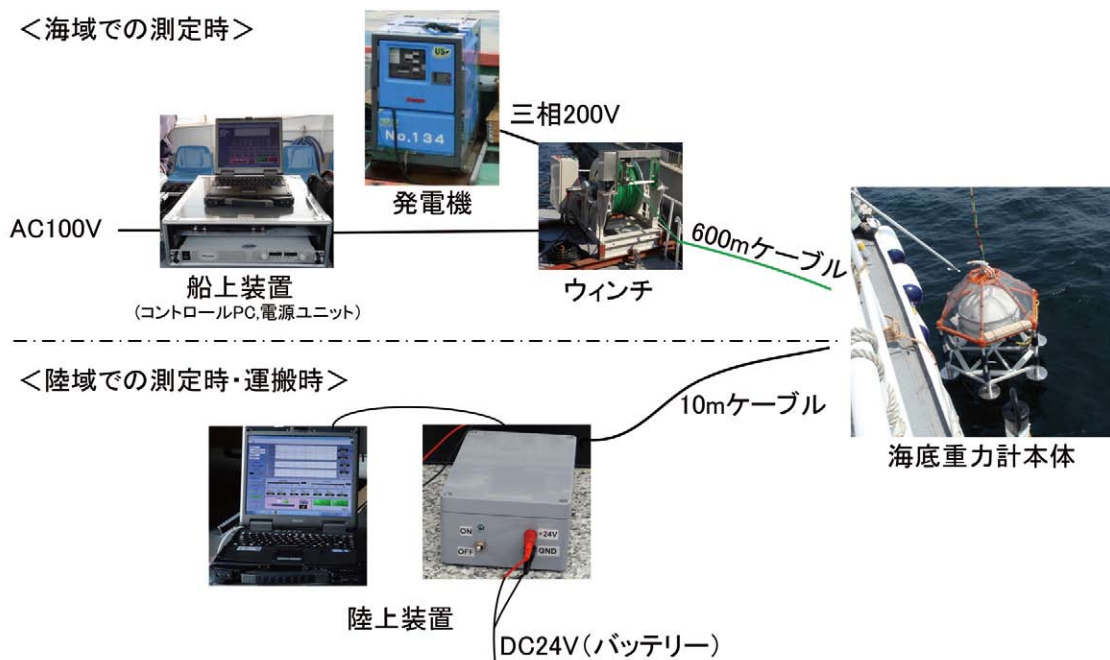


図-2 INO System 全体図

Fig. 2 Configuration of INO system

表-3 海底重力計本体の主な仕様

Table 3 Major specifications of the INO ocean-bottom gravimeter

項目	仕様
測定値再現性	0.005 mGal(5 μ Gal)以内
測定分解能	0.001 mGal(1 μ Gal)
測定レンジ	8000 mGal
測定可能傾斜範囲	$\pm 36^\circ$ 以内
自動傾斜補正範囲	± 200 arc sec 以内($\pm 0.0556^\circ$ 以内)
測定可能温度(気温)	+1 $^\circ\text{C}$ ~+45 $^\circ\text{C}$
測定可能深度	300 m(容器耐圧水深 600m 以上)
センサー部温度	58 $^\circ\text{C}$ (恒温槽内温度)
スプリング材質	熔融水晶
大きさ	H92 cm \times W86 cm \times L86 cm
重量	空中 186 kg 水中約 100 kg
入力電圧	AC36~72V, DC24V



海底重力計本体

耐圧容器内部

図-3 海底重力計本体

Fig. 3 The INO ocean-bottom gravimeter

(2) 船上装置

船上装置は、コントロール PC と電源ユニットから構成される。図-4 に船上装置を示す。船上装置の電源は AC100V であり、海底重力計本体の入力電圧は AC36V~AC72V であるため、使用ケーブルによる電圧降下に応じて電源ユニットの操作により海底重力計本体への供給電圧を調整する。また、電源ユニットは



図-4 船上装置

Fig. 4 On-board offshore equipment.

気圧計を内蔵しており、海底重力計本体の水圧計データから水深を換算する際の参照データとして利用される。

コントロール PC は、専用の制御ソフトウェアをインストールした Windows PC (32bit) である。電源ユニットとの通信インターフェイスは RS-232C である。

コントロール PC による制御画面の例を図-5 に示す。データ収録作業時は、コントロール PC を操作することにより、海底重力計本体の圧力容器内にあるレベリングモーターが稼働し、自動で重力計センサー部のレベリングと重力値の測定を行うことができる。

INO System はオンライン測定システムであることが大きな特徴の一つであり、リアルタイムに重力測定値、測定データの標準偏差、海底重力計の設置状態(傾斜等)、換算水深、船上の気圧、重力計センサー温度等の各種データが取得できる。また、前述した圧力容器の水漏れ警報やレベリングモーターの状態も画面上に表示される。



図-5 コントロール PC による制御画面の例

Fig. 5 Example of control screen display of on-board control PC

(3) 陸上装置

船上装置の電源は AC100V のため、船上で使用する場合の電源確保には支障はないものの、重力計の運搬時や岸壁における基点での測定時、重力結合や重力点検線での点検時などでは、AC100V の確保が難しい場合も多い。こうした際の電源として、DC24V 入力 of 陸上装置を製作した。また、通常仕様の INO では、DC24V 入力に対応していないため、海底重力計本体の入力電圧も DC24V に対応するように仕様を変更した。なお、海底重力計本体の仕様変更は Scintrex においてオプション対応として実施した。

陸上装置には、船上装置に装備されている出力電圧調整機能および参照用気圧測定機能が装備されていない。そのため、陸上装置で使用可能なケーブル長は 30 m までであり、海底重力計本体の水圧計による換算水深の把握機能も利用できない。図-6 に陸上装置のシステム構成図を示す。



図-6 陸上装置のシステム構成
Fig. 6 System configuration of onshore equipment

3. 海域動作試験

3.1 試験目的および試験内容

本試験は INO System の納品、検収時に Scintrex の技術者立会いの下で実施した。試験は実際の海域における一連の測定作業を通じて、以下の 1) から 4) の動作確認を目的として実施した：

- 1) 海底において測定の一連の操作が正常に行えること、
- 2) 実際の海底への設置・回収により耐圧容器の浸水・その他不具合が生じないこと、
- 3) 現地における陸上装置・船上装置の接続および陸上基点における測定で不具合が生じないこと、
- 4) ウィンチシステムを含む測定系全体が正常に動作すること。

試験は、神奈川県横須賀市の三浦半島南東沖（金田湾）において、移動・準備を含め 2014 年 4 月 14 日から 17 日の 4 日間で実施した。

3.2 試験結果

試験は上記 4 日間の内の 2 日間に、6 地点において以下の手順で行った：

- 1) GPS コンパスを使用し測定地点へ作業船を誘導、
- 2) 停泊、海流の確認、投錨、
- 3) 音響測深機による水深の把握、
- 4) ウィンチ操作による海底重力計の吊下、
- 5) 海底重力計本体の水圧計による換算水深の把握、
- 6) 海底への着底設置とケーブルの余長繰出し・固定、
- 7) 重力計のレベリング、
- 8) 測定、データチェック、
- 9) 測定終了、海底重力計レベリングモーターの解除、
- 10) ウィンチ操作による揚収、
- 11) 錨の回収（揚錨）。

試験を通じて一連の操作が問題なく実施可能なこと、測定系全体が正常に動作することを確認した。図-7 には試験時に収録したデータの一例を示す。この測定点における水深は 18.1 m、底質は細砂であり、測定サイクルは 60 秒である（1 秒で 1 データをサンプルし、60 サンプルの平均値を測定値とした）。なお測定地点の水平位置は GPS/GNSS 測量（Hemisphere,

VS110S) により決定し、水深は音響測深機（千本電機、PDR-1300）を利用して把握した。

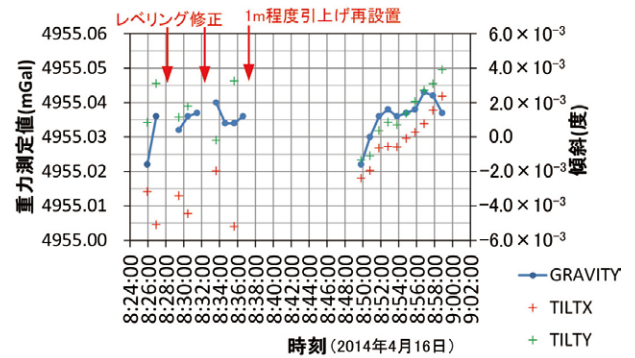


図-7 測定データ例
Fig. 7 Example of surveyed gravity data

グラフの青実線は重力測定値（単位 mGal）、赤色および緑色の十字はそれぞれ X 方向と Y 方向の重力計センサー部の傾斜（単位：度）を示している。8 時 24 分の測定開始後、重力計の傾斜が大きく変動し重力測定値もばらついたため、8 時 27 分と 8 時 33 分に測定を中断しセンサーの水平を修正した。しかし傾斜の変動が収まらなかったことから、8 時 38 分に一度測定を中断し、重力計を 1 m 程度引上げ再設置した。再設置後の 8 時 50 分以降は、傾斜は一定方向に増加する傾向はあるものの、8 時 52 分以降の測定値は概ね 0.01 mGal (10 μGal) 以内のばらつきに収束した。なお、この地点における各測定データの SD (1 サンプルあたりの標準偏差) は 0.24 ~ 0.49 mGal であった。

この結果から、海底重力計においても陸域における CG-5 等の可搬型相対重力計による測定と概ね同程度の、解析に十分な品質のデータが取得できることが確認された。海域動作試験結果から考えられる海底重力測定におけるデータ良否の判断の目安の一例を表-4 に示す。

表-4 データ良否判断の目安の一例
Table 4 Example of reference standards for evaluating data quality

項目	目安	備考
重力値	連続 3 回の読値のばらつきが 10 μGal(0.01 mGal)以内	測定サイクル 60 秒
SD*	0.1~0.3 mGal 程度以下	測定サイクル 60 秒
傾斜角	±50 arcsec 以内 (±0.0139° 以内)	ソフトウェア上で ±200 arcsec(±0.0556°) まで自動補正可能
センサー温度	1000 分の数 mK で安定すること	電源投入直後は数時間安定しない

※) SD は 1 サンプルあたりのもの。標準偏差はこの SD をサンプル数(60)で除した値

図-8 には音響測深機で得られた各地点の水深と、海底重力計本体に装備する水圧計から得られた換算水深を示した。

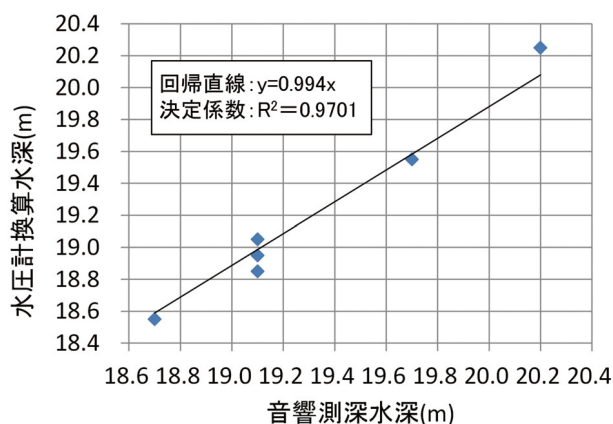


図-8 音響測深と水圧計換算水深の比較

Fig. 8 Comparison between depth measurement by echo sounding and converted water pressure gauge

図の縦軸には水圧計から得られた換算水深を、横軸には音響測深機で得られた水深を示した。回帰直線の傾きは0.994であり、音響測深機による水深と比較して、水圧計からの換算水深のほうが浅く求められていることが判明した。一般的に音響測深機で得られた水深は、側方反射の影響等により圧力計換算水深と比較して浅く得られることが多い。音響測深による水深より圧力計の換算水深が浅く得られた理由については検討中であるが、水中投入前時点における圧力値のシフトや、海底重力計の水圧測定ポートの位置（重力計底部より47 cm上部に設置されている）等が関係している可能性もある。

なお、海域試験における最大水深は約20 mであったが、水深20 mにおける両者の差は12 cm程度であり、水圧計の測定精度である約10 cmと概ね同等であった。これらの差の要因については、より深い水深におけるデータ等も収集してさらに検討する必要がある。

4. 筑波山点検線での点検作業

実際の現場での運用に先立ち、重力値（重力差）が既知である複数の測定点において測定を行い、与えられた重力差に対する重力計での測定値の誤差の把握と、その補正のためのスケールファクター補正係数を決定する「点検」を行う必要がある。なお重力計のスケールファクターは、重力計のばねの劣化などにより経時変化するため、点検作業は今後の運用中も定期的に行う必要がある。今回、新規導入に伴い、国土地理院が筑波山に設定している重力計点検線を利用して重力計の点検を行った。

4.1 筑波山点検線とは

筑波山の山麓から山頂の間には、国土地理院によって「重力計点検線」が設定されており、点検線に沿っ

た10地点における基準重力差が決定されている。山麓の基準重力点である「1. 保安寺」から、筑波山（女体山）山頂の「10. 山頂1等三角点」間の基準重力差は199.277 mGal、また筑波山ロープウェイ乗り場である「8. つつじヶ丘」までの基準重力差は100.993 mGalと設定されている。

重力計の点検はこれらの点検線上の基準重力点において、点検対象の重力計を用いて測定を行い、国土地理院によって決定された基準重力差に対する点検対象の重力計による重力差の残差を求め、両者のプロットの回帰式よりスケールファクター補正係数を決定するものである。

4.2 点検作業の内容

点検作業は、筑波山点検線のうち表-5に示す3地点を利用し、2014年9月12日に実施した。

表-5 筑波山重力計点検線（国土地理院による）

Table 5 Mt. Tsukuba gravity calibration line
(Source: Geospatial Information Authority of Japan)

基準重力点	基準重力差(mGal)
1 保安寺	0.000
7 風返峠	-76.313
8 つつじヶ丘	-100.993

なお海底重力計本体は、重量や運搬の都合から点検線の基準重力点直上に設置することができないため、基準重力点近傍で海底重力計が設置可能な地点にオフセット点を設け、このオフセット点において測定を行った。点検線上の基準重力点からオフセット点の間は、可搬型相対重力計CG-5を2台用いて往復測定を行い、オフセット点における重力差を決定して点検に用いた。表-6にはオフセット点間の重力差を示す。

表-6 オフセット点の重力差

Table 6 Gravity difference between the offset points

オフセット点	重力差(mGal)
11 保安寺	0.000
71 風返峠	-76.920
81 つつじヶ丘	-101.038

4.3 点検結果とINO Systemの精度

点検結果を図-9に示す。グラフの横軸はオフセット点間の重力差（国土地理院による点検線上の基準重力点とオフセット点間の往復重力測定で決定した重力差、ここではGSI Δg と表記した）、縦軸は海底重力計による測定で得られた重力差（ Δg_{obs} ）とGSI Δg との残差である。

点検の結果、海底重力計INO Systemの測定値は、オフセット点の基準重力差（GSI Δg ）の絶対値が大きくなるにつれ、その残差（ $\Delta g_{obs} - GSI \Delta g$ ）の絶対

値が次第に大きくなる系統誤差が認められた。図-9の回帰直線より、重力差が100 mGalの場合、INO Systemでは0.03 mGal (30 μ Gal)程度大きな重力差で測定される。なおこの回帰直線からのばらつきは、「71 風返し峠」では0.008 mGal (8 μ Gal)、「81 つつじヶ丘」では0.007 mGal (7 μ Gal)であり、現地における測定誤差範囲内 (10 μ Gal程度以下)である。

この回帰直線の傾きより、INO Systemのスケールファクター補正係数は 3.0×10^{-4} と求められた。実際の運用時には、測定値に対して上記のスケールファクター補正係数で補正を行った値を解析に供することで系統誤差を低減することができる。なお、このスケールファクター補正係数は、当社で所有している陸上用可搬型相対重力計CG-5における値 (10^{-4} オーダー)と概ね同程度であった。

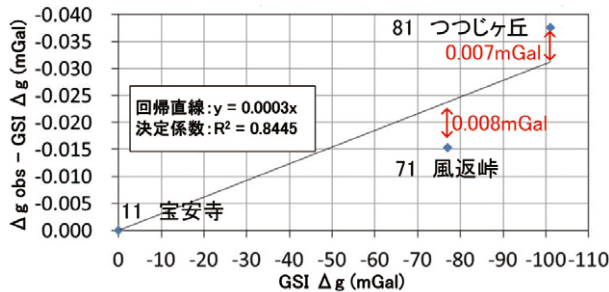


図-9 筑波山点検線による点検結果
Fig. 9 Calibration results by Mt. Tsukuba gravity calibration line

5. 長期ドリフト

5.1 長期ドリフト観測

重力計は一般に、センサー部に使用されているバネのクリープ現象により、時間経過とともに重力測定値がドリフトする。このドリフト量 (またはドリフトレート) は経時的に変化する場合があることから、新たな重力計を導入した場合、その重力計固有の特性であるドリフトの変化を長期観測により把握することが重要である。

INO System 導入に伴い、長期ドリフトの把握を目的として、応用地質株式会社つくばオフィスの1階において、2014年4月から約4か月間の連続観測を実

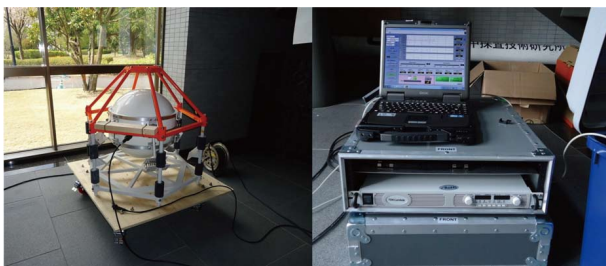


図-10 長期連続観測状況
Fig. 10 Long-term gravity observation

施した。図-10に長期連続観測状況を示す。

5.2 長期ドリフト観測結果

図-11に得られた観測結果を示す。グラフの横軸は観測開始後の経過日数 (原点時刻:2014年4月18日, 17:02:30)、縦軸は潮汐補正後の重力値である。なお潮汐補正はINO systemに装備されているLongmanの式 (Longman (1959)⁵⁾)を利用した潮汐補正機能を利用した。

図中の所々で重力値に極端に値の大きなデータが認められる。これらは測定器近傍を人が通行することなどで生じた人為的なノイズの影響である。これらのデータを含むデータ全体を用いた近似直線の傾きより、INO Systemのドリフトレートは0.5053 mGal/dayと求められた。

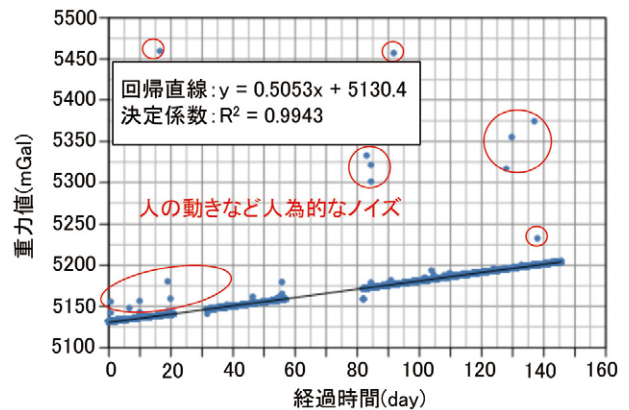


図-11 長期連続観測結果
Fig. 11 Long-term gravity observation results

上記データから人為的なノイズの影響を受けたデータを省くため、各測定データのSDが0.5 mGal未満のものを抽出し、図-12に示した。

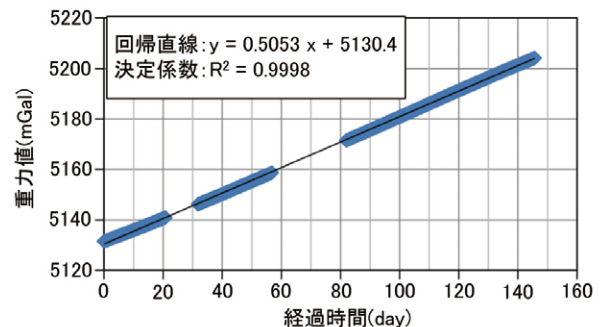


図-12 長期連続観測結果 (SD<0.5 mGal)
Fig. 12 Long-term gravity observation results (SD<0.5 mGal)

潮汐補正後の重力値データの回帰直線の傾きから得られたドリフトレートは0.5053 mGal/dayであった。また重力値は一次式の回帰直線とよい一致を示し、一定のドリフトレートを保っていることが確認できた。なお、このドリフトレートはScintrex CG-5重力計に

おける一般的なドリフトレート (0.5 mGal/day 程度) と概ね同等であった。

6. 今後の展望

海底重力計を新たに導入したことにより、国内の民間調査会社では現在の時点においては唯一、陸域から海域までの一貫した高精度重力探査が実施可能となった。

現在、日本国内における海域を含む重力探査は、学術調査以外にも以下に示す工学分野で需要が拡大している。

6.1 原子力発電所再稼働に向けた地下構造探査

東日本大震災とその後の一連の原子力発電所の災害の影響を受け、その安全性の確保に対する社会的要請や、規制基準の変更により、現在、国内の原子力発電所は全て停止しており、再稼働に向けた様々な調査や審査が続けられている。再稼働の申請にあたっては、発電所を含むエリアの深部地下構造を3次元的に明らかにし、断層等の有無やその評価を行うことが求められる場合が多い。しかし、海域部における3次元地下構造探査は、これまで十分に行われてきてはいない。現在需要が高まっている深部地下構造探査を実施するにあたっては、反射法探査等と合わせて海域から陸域を含むシームレス重力探査が有効な手段となる。

6.2 活断層・地質構造探査

阪神・淡路大震災以降、国内各地の活断層や地下構造の詳細な探査と評価の需要は多い。また東日本大震災以降は原子力発電所の敷地内や敷地近傍において、活断層や地下構造を詳細に把握し評価する需要も高まっている。一方で沿岸域を含む海域においては、活断層を含む詳細な地下構造探査が行われていないエリアが多い。反射法探査等と合わせて、海域から陸域を含むシームレス重力探査が有効な手段となると考えられる。

6.3 地熱開発の適地調査に係る地下構造探査

東日本大震災以降、再生可能エネルギー開発に対し国が積極的に支援を行っており、地熱開発についてもJOGMECを通じた補助金制度等により、全国各地で開発の計画が進められつつある。地熱開発で重要となる地下の地熱貯留層分布の把握を含む地下構造探査においては、電磁法などの物理探査手法と並んで、重力探査が有効な手段の一つである。地熱地帯は山間部のみならず沿岸域にも多く存在していることから、陸域～沿岸域を含めた地下構造探査の手段として海底重力探査が有効である。

6.4 CCSプロジェクトにおける地下構造探査

現在、国内における CCS (二酸化炭素回収貯留) プ

ロジェクトは、経済産業省による北海道苫小牧地域における実証試験が進められており、2015年度より苫小牧地域以外のサイト選定調査が行われている。今後の CCS を実用段階として実施する場合は、CO₂貯留層や遮蔽層、断層の有無などを含む地下構造の詳細な把握が必要である。今後 CCS サイトの適地調査における広域の構造探査として、海域を含む重力探査による地下構造探査が有効な手段として活用されるものと考えられる。

6.5 モニタリング

海底重力計を用いることで海域において高精度な重力探査が可能であることから、海域における地熱開発に伴う地熱貯留層内の流体変化の把握や、CCS事業における圧入後の地下の CO₂ の挙動の把握など、モニタリングを目的とした重力探査に活用できる可能性があると考えられる。ただしこれらの分野における適用の際には、期待される重力変化 (シグナル) の大きさとノイズの大きさ、ならびに重力計の設置状態などの重力計の精度以外に起因する誤差やノイズなどについて、適用の可否を含め検討する必要がある。

7. おわりに

本稿では、新たに導入した海底重力計 INO System の特徴や海域動作試験および長期連続観測等のデータを紹介するとともに、今後拡大すると見込まれる需要に応えるために、陸域と海域を合わせたシームレス重力探査が有効な手段の一つとなり得ることを示した。

海底重力探査を含む海域における作業の実施にあたっては、漁協や海上保安庁など関係各機関への諸手続き、調整のみならず、作業船や警戒船の傭船、地元対応等、陸上における探査とは異なる様々な手続きが必要となる。特に原子力発電所サイトにおける海域探査では、これまでの調査の経緯や地元との関係などを踏まえた対応が必要となる。また、海底重力探査の実施にあたっては、海底重力計以外にも、船舶の正確な位置を把握し測定位置へ正しく誘導する GPS コンパスや水深を正確に把握する音響測深機ならびに音速測定器など、様々な機材をそろえる必要がある。

これらの状況を鑑み、サイト周辺海域で多くの実績を有する総合地質調査株式会社と海底重力探査に関する業務提携を締結した。

今後、陸域から海域を含むシームレス重力探査の計画立案から総合解析までの一貫した業務実施体制を活用し、特に原子力関連施設等の前面海域や CO₂ 地中貯留 (CCS)、地熱開発などにおける構造探査等をターゲットとして、高精度シームレス重力探査を実施することを目指している。

謝辞

本稿で紹介した海底重力計の導入ならびに現地作業にあたっては、総合地質調査株式会社社長の廉澤宏氏ならびに関係各位に協力いただいた。また海底重力計の点検作業では、国土交通省国土地理院が設置、整備した筑波山重力計点検線を利用した。ここに記して感謝申し上げます。

討一とりまとめ。経済産業省。 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001.html (参照 2015-1-30)。

参 考 文 献

- 1) 藤本博巳, 野崎京三, 河野啓幸, 伝法谷宣洋, 押田淳, 小泉金一郎, 三石晋, 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調査に向けて—. 測地学会誌. 2009, No.55 (3), p. 325-339.
- 2) 駒澤正夫, 太田陽一, 渋谷昭栄, 熊井基, 村上稔. 大阪湾の海底重力調査とその構造. 物理探査. 1996, No.49, p. 459-473.
- 3) 駒澤正夫, 大熊茂雄, 金澤敏彦, 藤本博巳. 能登半島沖における海底重力調査. 平成20年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告. 地質調査総合センター速報. 2009, No.49, p. 71-80.
- 4) 駒澤正夫・大熊茂雄. 能登半島北部域20万分の1重力図(ブーゲー異常). 海陸シームレス地質情報「能登半島北部沿岸域」DVD 版, 数値地質図S-1, 地質調査総合センター, 2010.
- 5) Longman, I.M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. J. Geophysical res. 1959, No.64, p.2351-2355.
- 6) 藤本博巳, 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. 1998, No.10 (1), p. 25-38.
- 7) 大熊茂雄, 駒澤正夫, 押田淳. 海底重力計の製作と実海域試験. 平成21年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告. 地質調査総合センター速報, 2010, No.54, p. 95-103.
- 8) 下山みを, 村岡淳, 三石晋, 村上文敏, 武田伸勝, 駒澤正夫, 野崎京三. 海底重力計 INO System の基本特性. 日本測地学会第122回講演会要旨集. 2014, p. 109-110.
- 9) 野崎京三. マイクログラビティ探査の現状とその利用. 応用地質技術年報. 1997, No.19, p. 35-60.
- 10) 物理探査学会. 物理探査ハンドブック手法編 第8章 重力探査. 物理探査学会, 1998, p. 431-471.
- 11) Scintrex. INO Scintrex Autograv system Operation Manual, Scintrex. 2014, 36p.
- 12) 経済産業省. CS 実証試験実施に向けた専門検