

相模湾東部沿岸域における高分解能空中磁気探査 High-resolution aeromagnetic survey in the coastal zone of the eastern Sagami Bay area, central Japan

大熊茂雄¹・中塚 正¹・岩田光義¹・宮川歩夢¹・木下佐和子¹
Shigeo Okuma¹, Tadashi Nakatsuka¹, Mitsuyoshi Iwata¹, Ayumu Miyakawa¹ and Sawako
Kinoshita¹

Abstract: A new high-resolution aeromagnetic survey was conducted to better understand the subsurface structure of the eastern Sagami Bay area, with an installation of survey equipment on a Eurocopter AS350B3. The survey was flown along E-W traverse lines and N-S tie lines spaced 250 m and 1,000 m, respectively. The flight altitudes were 150 m above sea level over offshore areas and 300 m above terrain over onshore areas, respectively. Total magnetic intensities were observed by a Cesium magnetometer at 10 Hz and flight paths were recovered by DGPS. A preliminary aeromagnetic map without an altitude reduction has been compiled. According to the map, an ESE -WNW trending magnetic high belt, parallel to a gravity high belt (Okuma *et al.*, 2016) extends from the northern part of the Miura Peninsula to Enoshima Island, corresponding to the Hayama Upheaval Belt. In the middle of the Miura Peninsula, magnetic highs are distributed over the area where serpentinites and basaltic rocks outcrop along active faults. Two dipoles of magnetic anomalies with a reverse polarity are distributed over the Kamegi Spur offshore of the western Miura Peninsula.

Keywords: aeromagnetic survey, aeromagnetic map, magnetic anomaly, active fault, Sagami Bay

要 旨

相模湾東部沿岸域の地質・地下構造の理解を目的とした多面的な地質情報収集のため、今回、当該地域においてスティンガー方式のヘリコプターを用いた高分解能空中磁気探査を実施した。本論では当該調査の詳細と調査データを編集し作成した暫定版の相模湾東部沿岸域の空中磁気図（全磁力異常）の概要について報告する。

空中磁気探査は、三浦半島葉山町付近を中心に相模湾東部沿岸域の陸・海域に渡る東西（15 km ～ 20.25 km）×南北 12 km の範囲を、標準対地高度 150 m、主測線間隔 250 m の、低高度・高密度測線配置で実施した。使用したヘリコプターは、AS350B3 で上昇能力に優れ地形起伏への追従性が良く国内での調査に適している。調査は 2016 年 10 月 31 日～同年 11 月 8 日（含む空輸日）の期間、伊勢原市の子易場外ヘリポートを基地として実施した。

1. はじめに

本調査は、産業技術総合研究所の重要課題「沿岸域の地質・活断層調査－陸海接合の物理探査」において、

海陸シームレス地質情報に関わる数値地質図整備の一環として、相模湾東部沿岸域の詳細な空中磁気図を作成するために実施されたものである。

本論では当該調査の詳細と調査データを編集し作成した相模湾東部沿岸域の空中磁気図（全磁力異常）の概要について報告する。

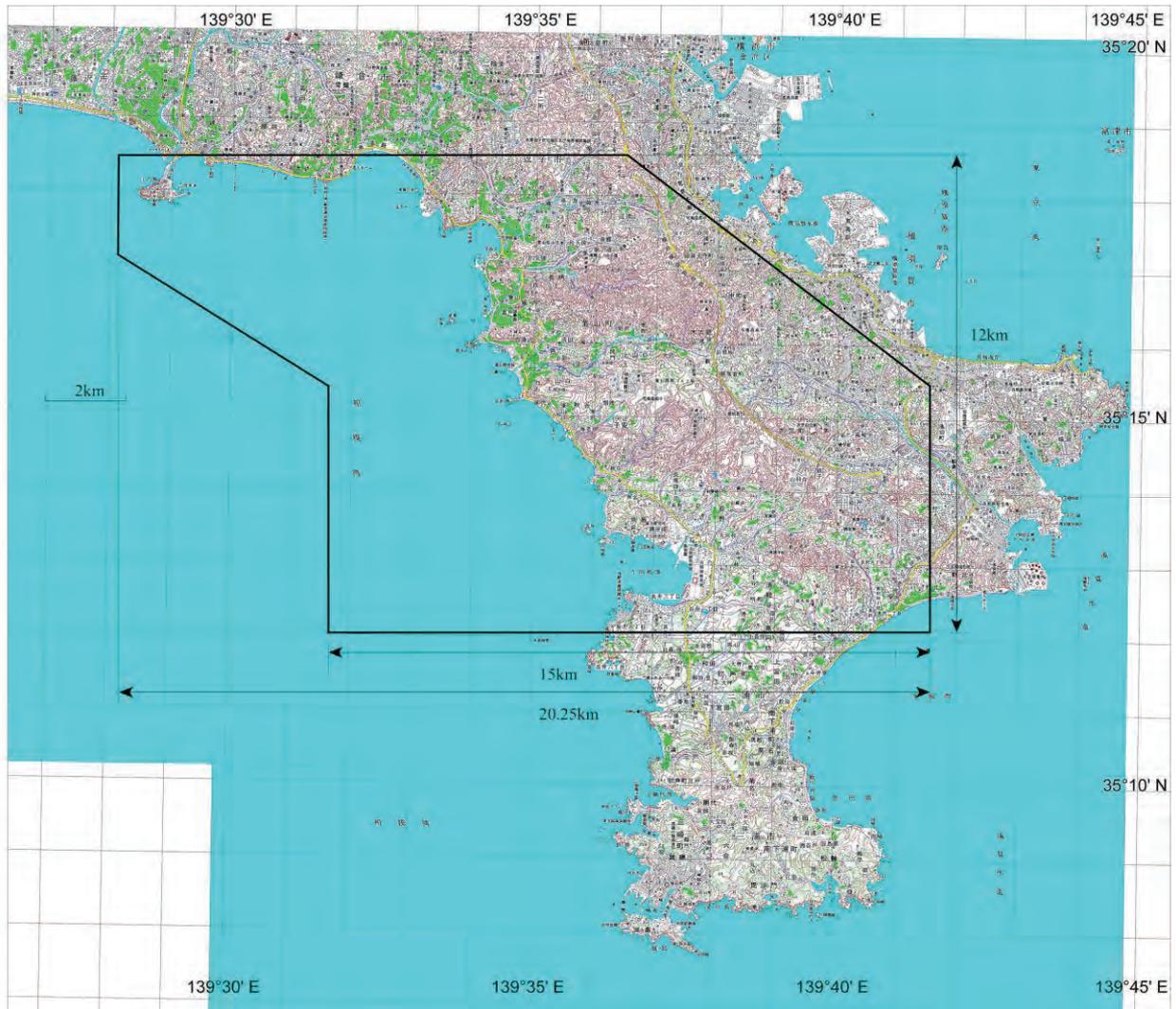
2. 高分解能空中磁気探査

空中磁気探査は、相模湾東部沿岸域の陸・海域に渡る範囲（第 1 図）を、標準対地高度 150 m（海域：海拔 150 m、陸域：対地 300 m）、主測線間隔 250 m の、低高度・高密度測線配置で実施した。主測線本数は 49 本、交差測線本数は 20 本である（第 1 表）。使用したヘリコプターは、AS350B3（第 2 図）で上昇能力に優れ地形起伏への飛行追従性が良く、地形変化に富む国内での対地高度一定での調査飛行に適している。

調査機材については、大熊ほか（2014）に従い説明する。調査機材は 2013 年に構築した新システム（大熊・中塚, 2013）を基本的に踏襲し、地磁気全磁力測定のためにセシウム磁力計（Scintrex CS2, Canada；第 3 図）を、機体磁気補正用の機体磁気の測定のために 3 軸ブラックゲート型磁力計 TFM100G2（Billingsley Magnet-

*Correspondence

1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門（AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation）



第1図 相模湾東部沿岸域高分解能空中磁気探査の実施範囲。

黒の太線で囲んだ区域が調査範囲を示す。

国土地理院発行5万分の1地形図「横須賀」および「三崎」使用。

Fig.1 Study area of the high-resolution aeromagnetic survey conducted in 2016 by the Geological Survey of Japan.

The rectangle bounded by thick solid lines indicates the survey area.

Topographic maps of Yokosuka and Misaki on a scale of 1:50,000 published by the GSI were used.

ics, USA) を使用している。一方、機上ナビゲーション関連は従来と比べ前回の駿河湾での調査から一新し、機上ナビゲーション装置として新たに LiNav (AGNAV, Canada) を、GNSS 受信機としてこれも新たに ProPak 6 (Novatel, Canada) を採用した。当該の ProPak 6 は GPS と GLONASS の 2 周波数信号に加え、日本の準天頂衛星 (QZS: Quasi-Zenith Satellite System) も受信可能で、静止衛星を用いた補正システム SBAS (Satellite Based Augmentation System) である日本の MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) も利用可能である。

また、地磁気センサー等を収納するのは、AERO-COMP 社 (Canada) のスティングー装置 (第2図) であり、AS350B3 用の取り付け部により機体下部に固

定されている。高度計としては、電波高度計と新たに Setra 社 (米国) の気圧高度計 Model 278 が取り付けられている。また、対地ビデオ映像撮影のための CCD センサーとデッキも搭載されている。データ収録装置は、機体内部のラックに取り付けられたラックマウント PC (HPC Systems HPC1000-CD104R4) を使用し、PCI 規格の A/D 変換ボード PCI-1718HDU-AE (アドバンテック (株)) と周波数カウンタボード GT210PCI-8 (GuideTech, USA) を使用している。データ収録プログラムは Windows 上で Visual Basic を用いて独自に開発し、収録データは ASCII 形式で安全のため内蔵 SSD と外付けの CF カードの双方に記録している。これらの探査機材を機体に搭載し調査飛行に使用するためには、国土交通省

相模湾東部沿岸域における高分解能空中磁気探査

第 1 表 相模湾東部沿岸域高分解能空中磁気探査の仕様.
Table 1 Outline of the high-resolution aeromagnetic survey over the coastal zone of the eastern Sagami Bay, Kanagawa, Japan

Survey period	October 31 – November 8, 2016
Survey area	Refer to Fig.1
Survey helicopter	AS350B3 (JA02AH)
Flight altitude	150 m above terrain
Total flight km	922.5 km
Flight / Tie line	E-W (spacing: 250 m) / N-S (spacing: 1,000 m)
Navigation / Flight pass recovery	Visual flight aided by GPS positioning / DGPS
Air base	Koyasu Heliport, Koyasu, Isehara City, Kanagawa Pref. 35° 25' 35.62" N, 139° 16' 16.61" E, 316.13m ASL
Ground station	Koyasu, Isehara City, Kanagawa Pref. 35° 25' 33.43" N, 139° 16' 15.89" E, 287m ASL
Survey instruments	<u>Flight instrumentation</u> Airborne magnetometer: Scintrex CS-2 Cesium magnetometer Three-axis flux-gate magnetometer : Billingsley TFM100G2 Data acquisition system : HPC Systems EMB-CD104R4 Navigation: AG-NAV LiNav GNSS: Novatel ProPak6 GPS receiver, Radar /Barometric altimeter, Video camera <u>Ground instrumentation</u> Ground magnetometer: Geometrics G-856AX proton magnetometer
Contractor	Nakanihon Air Service Co., Ltd.

の認可が必要で、当該の機体も航空局による機体改造検査を 2014 年 4 月 30 日付で終了している。

今回の調査では、2016 年 10 月 31 日に名古屋空港から神奈川県に空輸したのち、同年 11 月 1 日～11 月 8 日に伊勢原市子易の子易場外ヘリポート (35°25'35.62" N, 139°16'16.61" E, 316.13 m ASL ; 第 4 図) を基地として空中磁気探査測定作業飛行を実施した。また、地磁気日変化観測定点を子易場外ヘリポート近傍 (35°25'33.43" N, 139°16'15.89" E, 287 m ASL ; 第 5 図) に設置して、調査飛行中は 10 秒間隔で地磁気の詳細観測を 2 台のプロトン磁力計で行った (第 6 図及び第 7 図)。なお、当該のヘリポートと地磁気日変化観測定点は前回の相模湾北部沿岸域での調査 (大熊ほか, 2015) と同一箇所である。また、従来プロトン磁力計の制御及びデータの記録・回収のため PDA を利用していたが、老朽化して装置の維持が困難となったため、今回からタブレット (Toshiba REGZA Tablet AT374) を使用したデータ収録システムを独自に開発し、1 台について試験運用した。磁力計とタブレットとはシリアル

Bluetooth アダプタを介して、無線接続している。当該システムは調査期間中、良好に動作し長期間の運用にも耐えられることを確認できたため、今後はもう 1 台についてもタブレット方式に移行する予定である。

一方、以前認められた磁場測定系におけるノイズの発生は対策効果が機能し認められなかった。ただし、調査のごく初期の段階で一部ノイズの発生が確認され原因を追及したところ、複数チャンネルある無線の 1 チャンネルの電源を入れると発生することが分かり、調査飛行時は当該のチャンネルを電源オフとした。これにより、磁気ノイズの発生は再現されなかった。

一方、今回機体磁気補償テスト飛行は、都合 2 回実施した。これは、既往の調査により確認されている磁気異常分布域を避けることが十分でなかったためと、比較的広い範囲でテスト飛行を実施したことにより、補正計算に必要な係数が精度良く求まらなかったためである。これらは、今後の参考としたい。

なお、調査期間中は、例年になく好天候が続き、予定より早く調査を終えることができた。



第2図 空中磁気探査調査ヘリコプター（中日本航空（株）所有）。

AS350B3 型機。機体下部にスティンガーを固定し、その内部に Cs 磁力計センサーおよびプリアンプ、フラックゲート型磁力計センサーを収納する。

撮影場所：神奈川県伊勢原市子易場外ヘリポート。

Fig. 2 Survey helicopter employed for the aeromagnetic survey over the coastal zone of the eastern Sagami Bay area.

Eurocopter AS350B3 owned by Nakanihon Air Service Co., Ltd. A Cs magnetometer sensor and its pre-amplifier, and a fluxgate sensor were installed in the stinger attached to the helicopter. The photo was taken at the Koyasu Heliport, Isehara, Kanagawa Pref. and so forth.



第4図 空中磁気探査に使用した子易場外ヘリポート。伊勢原市子易地区の山中にある。

Fig.4 Koyasu Heliport used as an airbase for the high-resolution aeromagnetic survey over the coastal zone of the eastern Sagami Bay area.

Located in the mountainous area of Koyasu, Isehara City, Kanagawa Pref.



第3図 セシウム磁力計センサー（大熊・中塚，2013）。スティンガー先端部に設置されたセシウム磁力計センサー。写真のように円柱状センサーの長軸部を鉛直方向にして設置する。

Fig. 3 CS2 Cesium magnetometer sensor (Okuma and Nakatsuka, 2013).

A Cs magnetometer sensor is located at the point of the stinger. The sensor is oriented as its major axis is vertical.



第5図 空中磁気探査に使用した地磁気日変化観測定点（大熊ほか，2015）。

子易場外ヘリポートの下流側約 100 m の谷筋に設置した。写真中央付近（赤丸内）に磁力計本体を設置した。子易場外ヘリポートから撮影。

Fig.5 Ground magnetic station for the observation of daily magnetic variation (Okuma et al., 2015).

The station was placed in a valley 100 m downstream from the Koyasu Heliport. The photo was taken from the heliport.



第6図 プロトン磁力計センサー。
雨水を避けるため半透明のビニール袋で覆われている。磁力計本体とは同軸ケーブルで接続される。

Fig.6 Sensor of a proton magnetometer to observe daily magnetic variations.
The sensor is covered by translucent plastic sheet to avoid getting wet with rain. The sensor is connected to a G-856AX proton magnetometer by a coaxial cable.

3. 高分解能空中磁気異常図の編集

高分解能空中磁気探査により取得されたデータを処理し、産業技術総合研究所での現在の空中磁気データ処理手順（第8図）にしたがい、相模湾東部沿岸域の高分解能空中磁気異常図を作成した。

まず、地磁気日変化データについては、人工ノイズを避けて観測点を人里離れた山中に設置したものの、調査地域及びその周辺の都市化が進み、直流電車の運行に伴う漏洩電流に起因すると考えられる磁気ノイズが運行時間帯は±数 nT と顕著であった（第9図）。そこで、ここでは観測データに移動平均フィルター（ウィンドウ幅 101 データ）を適用してノイズを軽減した地磁気日変化データを作成し、これを日変化補正処理で用いた。空中磁気データについては、低頻度のスパイクノイズについては、フィルター処理により除去した。これらの前処理や現地での簡易磁気図の作成は、産総研の空中磁気データ処理システムでも行えるが、ここでは簡易性と迅速性を重視して Geosoft 社のデータ処理ソフトウェア Oasis Montaj で行っている。また、GNSS データについては、ディファレンシャル処理のために固定点として国土地理院の電子基準点データの毎秒値を利用した。使用した電子基準点の情報は以下の通りである。



第7図 地磁気日変化観測装置。
ビニールシートで覆われたアルミ製トランク内にプロトン磁力計本体が収納されている。欠測を防ぐため2台設置して観測している。装置内部には、G-856AX プロトン磁力計本体、データ計測用 PDA / Tablet, バッテリー等が収納されている。

Fig.7 Daily magnetic variation observation system.
Magnetometers were installed in aluminum cases covered by vinyl sheets. Two magnetometers were operated at the same time during the survey period to prevent data loss. Each aluminum case contains equipment such as a G-856AX proton magnetometer, a PDA/a Tablet and a battery.

基準点名：藤沢（付）

観測点番号：93034

住所 神奈川県藤沢市鵜沼海岸

北緯 35度 19分 36.0498秒

東経 139度 27分 57.8343秒

標高 3.912m

(WGS84系)

基準点名：横須賀

観測点番号：93067

住所 神奈川県横須賀市不入斗町

北緯 35度 16分 01.5391秒

東経 139度 39分 53.4194秒

標高 26.971m

(WGS84系)

基準点名：二宮

観測点番号：93035

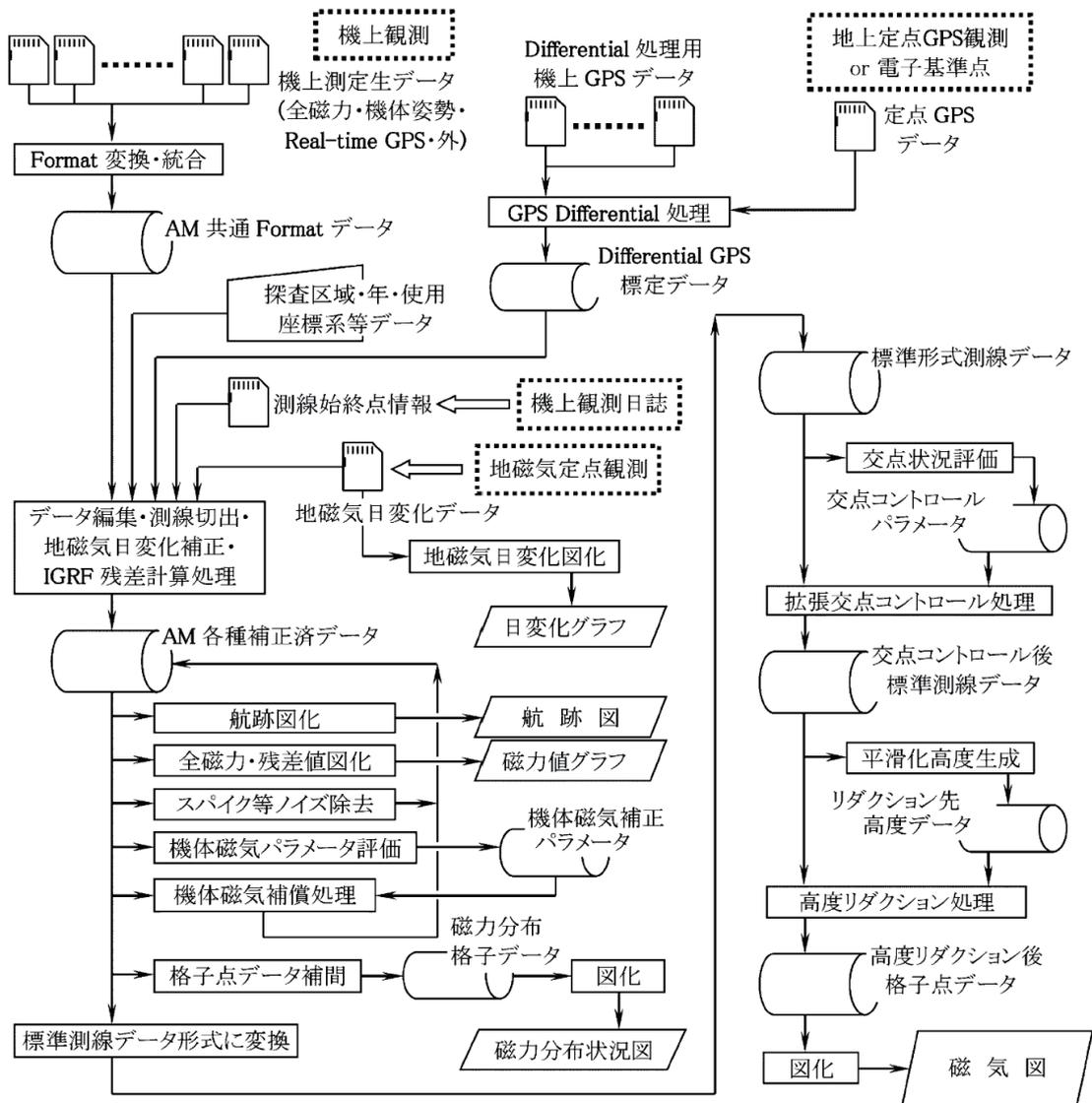
住所 神奈川県中郡二宮町富士見が丘一丁目 2209 番 38

北緯 35度 18分 17.6395秒

東経 139度 15分 45.7070秒

標高 80.796m

(WGS84系)



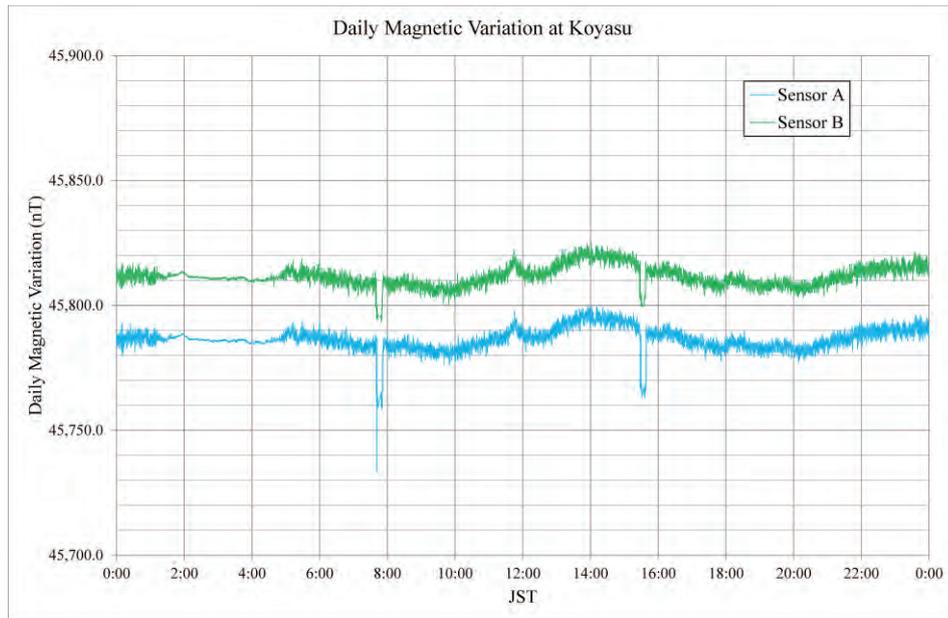
第 8 図 地形起伏に富む地域でのヘリコプター磁気探査におけるデータ処理フロー (中塚, 2016).
 Fig. 8 Flow chart of the processing of aeromagnetic data especially by helicopter-borne magnetic surveys over rugged terrains (Nakatsuka, 2016).

GNSS データは、GPS と GLONASS のデータを取得したが、両者を使用するよりも GPS データのみの方が今回は精度が得られることが分かったため、GPS の 2 周波データ (L1/L2) をディファレンシャル処理に使用した。なお、ディファレンシャル処理には、POSPac (Applanix Corporation) を用いている。

次に、これらの前処理済みデータを用いて、データ編集・測線切出・地磁気日変化補正・IGRF 残差計算処理を行った。IGRF 残差計算においては、第 12 世代の国際標準地球磁場である IGRF-12 (Thébault *et al.*, 2015) を使用した。次いで機体磁気補償処理 (中塚・大熊, 2005) を行った (第 10 図)。この際、主測線と交差測線の両データを用いて平滑化した観測高度面を作成し、第 11 図に示した。図面を参照すると、飛行高度は海城

では海拔約 150 m のほぼ一定で、陸域では地形の起伏にあわせて飛行しているのが分かる。この後、迅速な結果を得るため高度リダクションを行わず暫定的な磁気異常図 (全磁力値) を作成した (第 12 図)。高度リダクションを行っていないため、主測線と交差測線との交点付近において一般に飛行高度が異なることから磁気値が一致しないことに起因するコンターの乱れが生じていることに注意する必要がある。

さて、磁気異常図 (第 12 図) を参照すると、まず、東南東-西北西方向の高磁気異常帯が三浦半島北部から江の島方向に分布するのがわかる。これは、高重力異常帯 (大熊ほか, 2016) の分布と整合的であるとともに、地質的には陸域では葉山隆起帯に対応する。また、調査地域東端付近では比較的長波長の複数の高磁気異



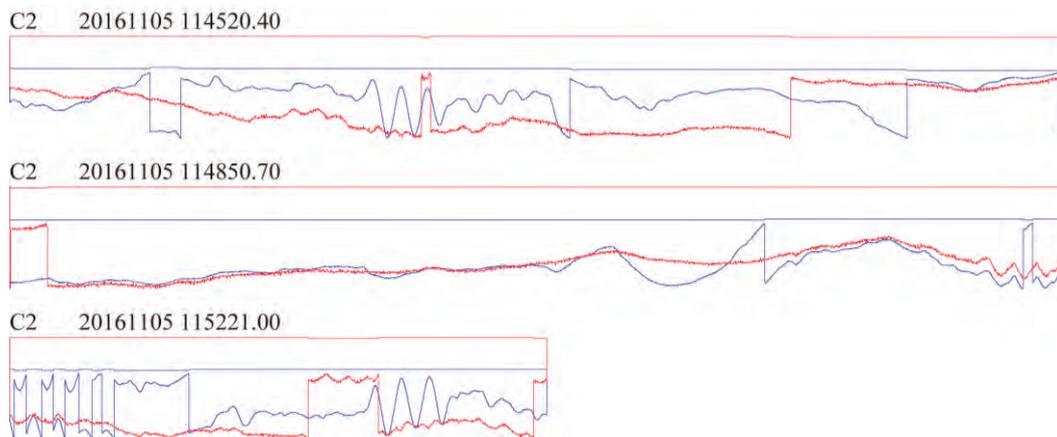
第9図 地磁気日変化データの例 (2016年11月5日測定).

伊勢原市子易場外ヘリポート近傍で測定. 緑および青の線は, 2台のプロトン磁力計により測定された地磁気日変化を示す. 人間活動により \pm 数nT程度の磁気ノイズが認められるが, 午前1:30~4:30の間は, ノイズが激減し, 直流電車の運行停止時間帯に相当する. 8時前と16時前のノイズは, バッテリー交換作業に伴うもの.

Fig. 9 Daily magnetic variation observed on November 5, 2016.

The magnetic station was placed close to the Koyasu Heliport, Isehara City, Kanagawa Pref.

The data was observed by two proton magnetometers at a cycle of 10 seconds. Magnetic noise, \pm few nT was obvious all the time except for the non-operation period of DC electric railcars at midnight. Spike noise around 8 am and 4 pm are artifacts caused by the operation of battery changes.



第10図 機体磁気補償処理前後のデータ比較の例.

青線と赤線は, 各々機体磁気補償処理前後の日変化補正済み IGRF 残差磁気異常を示す. 縦軸のフルスケールは25nT. 対象となったデータは機体磁気補償テスト飛行 (2016年11月5日実施) の際取得された. 機体磁気補償処理により機体姿勢の変化に伴う磁気ノイズが除去されているのが分かる.

Fig.10 Result of the magnetic compensation applied to the data obtained by the magnetic compensation flight on December 5, 2016. The magnetic noise was obviously reduced by the compensation.

常が衣笠断層に沿って認められ, 付近で露頭が分布する蛇紋岩類や玄武岩類との関係が示唆される. 同じく調査地域東端付近の北武断層付近では複数の短波長・高振幅の磁気異常が分布するが, 人工構造物など人工起源である可能性が高い.

一方, 海域では亀城海脚付近で長波長の高磁気異常に重畳して, 逆帯磁型の磁気異常が複数分布する. また, 小田和湾の湾口付近や北岸付近 (第13図) で北西-南東方向の高磁気異常が分布し, 振幅を弱めつつも北西方向に連続する可能性がある.

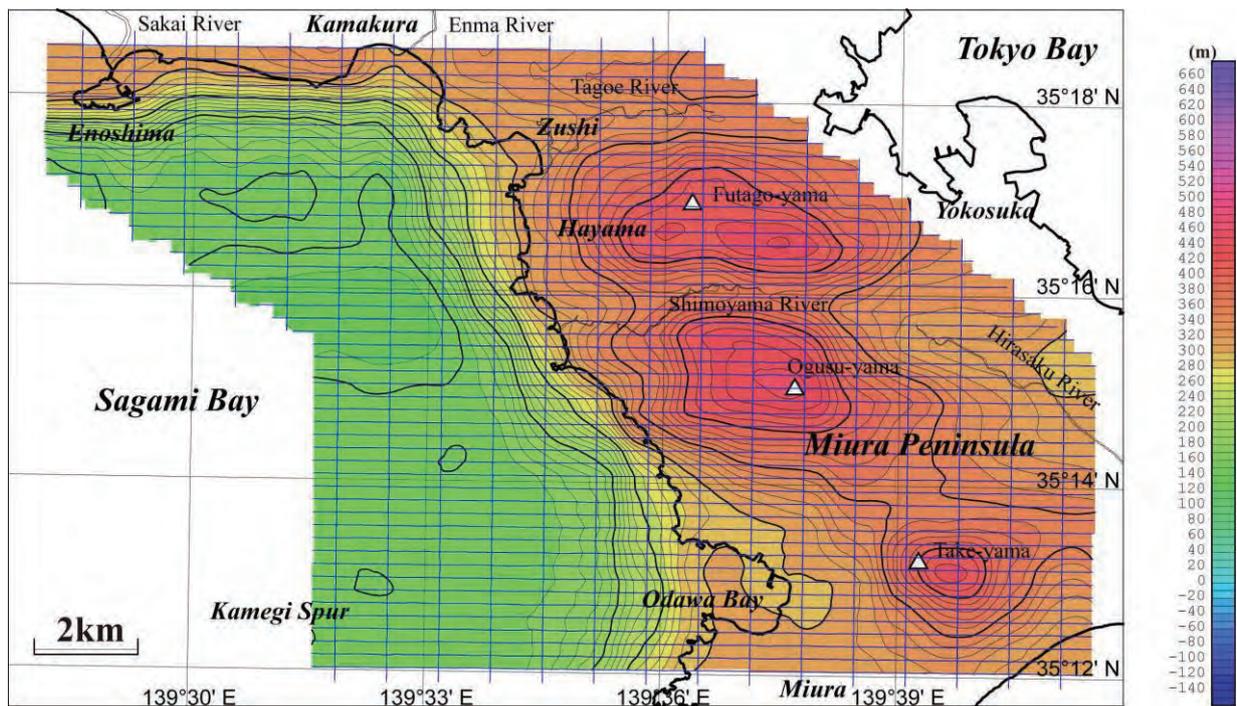
4. まとめ

今回、相模湾東部沿岸域でスティンガー方式の高分解能空中磁気探査を実施し、精緻な空中磁気異常図を作成した。その結果、三浦半島北部から江の島にかけて東南東-西北西方向の高磁気異常帯が分布し、葉山隆起帯の海域延長が示唆された。また、調査地域東端付近の衣笠断層や北武断層沿いで複数の高磁気異常が分布しており、地表で一部露出が認められている蛇紋岩類や玄武岩類の伏在分布に対応するものと考えられる。一方、海域では亀城海脚付近で長波長の高磁気異常に重畳して、逆帯磁型の磁気異常が複数分布し、複雑な構造を示唆している。

文 献

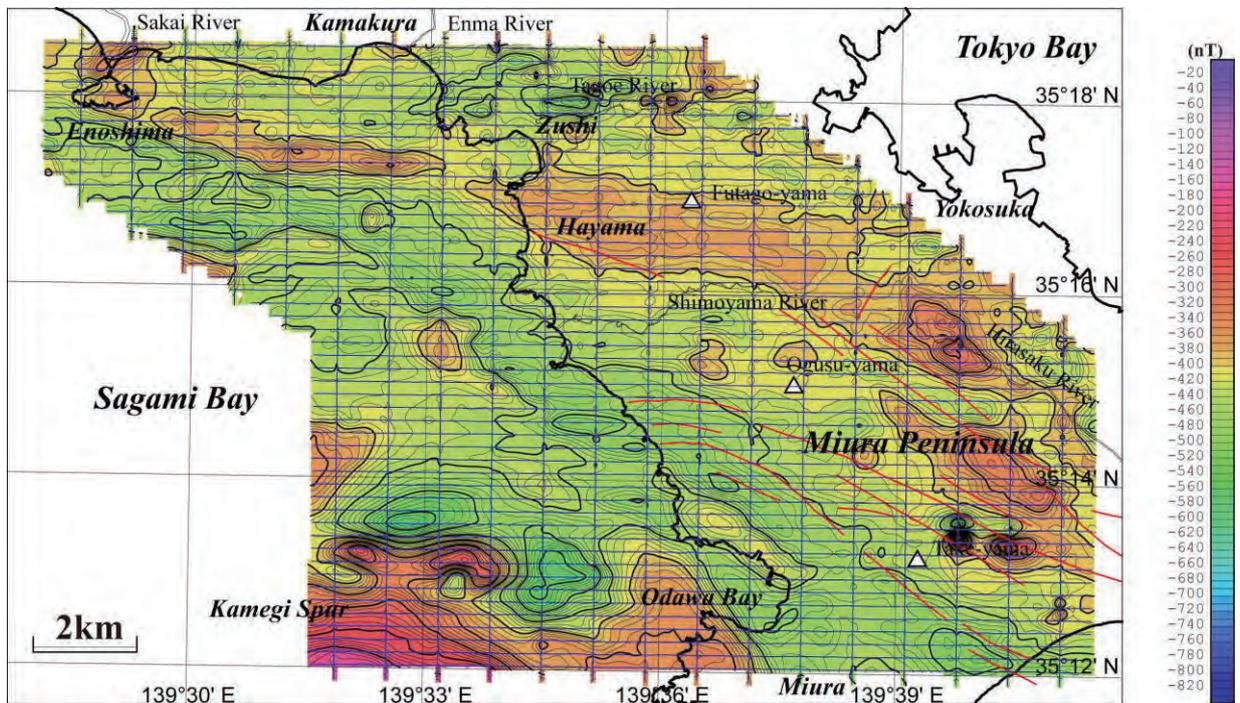
- 活断層研究会 (1991) [新編] 日本の活断層-分布図と資料. 437p, 東京大学出版会.
- 中塚 正・大熊茂雄 (2005) スティンガー式ヘリコプター磁気探査システムの開発とその磁気センサーに対する機体磁気補償. 物理探査, **58**, 451-459.
- 中塚 正 (2016) 3.4 空中磁気探査, 第6章磁気探査, 物理探査ハンドブック増補改訂版, 340-343.
- 大熊茂雄・中塚 正 (2013) 苫小牧地域の高分解能空中磁気探査. 平成24年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.62, 85-89.
- 大熊茂雄・中塚 正・山谷祐介 (2014) 駿河湾沿岸域の高分解能空中磁気探査. 平成25年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.65, 35-39.
- 大熊茂雄・中塚 正・上田 匠 (2015) 駿河湾北部沿岸域における高分解能空中磁気探査. 平成26年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.68, 115-123.
- 大熊茂雄・駒澤正夫・伊藤 忍・押田 淳 (2016) 駿河湾東部沿岸域における海底重力調査. 平成27年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.71, 129-137.
- Thébault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Léger, J.M., Lesur, V., Lowes, F.J., Macmillan, S.,

Mandea, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T.J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., Toffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I. and Zvereva, T. (2015): International geomagnetic reference field: the twelfth generation, *Earth, Planets and Space*, 67: 79. doi:10.1186/s40623-015-0228-9



第 11 図 相模湾東部沿岸域高分解能空中磁気探査の平滑化した飛行高度面。
 コンター間隔：10 m. 青の細線は航跡を示す。黒色の実線は河川を示す。

Fig.11 Smoothed observation surface by the high-resolution aeromagnetic survey in the eastern Sagami Bay, central Japan.
 Contour interval is 10 m. Blue thin lines indicate flight line paths. Black solid lines denote rivers.



第 12 図 相模湾東部沿岸域高分解能空中磁気異常図（暫定版）。

高度リダクションを実施していない。コンター間隔：10 nT. 赤の実線は活断層分布（活断層研究会，1991）を示す。

Fig.12 Preliminary high-resolution aeromagnetic map of the eastern Sagami Bay, central Japan
 No altitude reduction was conducted. Contour interval is 10 nT. Red solid lines show active faults (Research Group for Active Faults of Japan, 1991). See also Fig. 11.



第 13 図 調査地域の風景.

天神島（横須賀市佐島地域）を北方より臨む。探査ヘリコプターから撮影。

Fig.13 Aerial photo of the survey area.

Tenjinjima Island viewed from the north. The photo was taken from the survey helicopter during the survey.