

相模湾北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 northern Sagami Bay area, central Japan

大熊茂雄^{1*}・中塚 正¹・上田 匠²

Shigeo Okuma^{1*}, Tadashi Nakatsuka¹ and Takumi Ueda²

Abstract: A new high-resolution aeromagnetic survey was conducted to better understand the subsurface structure of the northern Sagami Bay area, with an installation of survey equipment on a Eurocopter AS350B3. The compiled aeromagnetic anomaly map shows a magnetic high belt lies at the western edge of the Oiso Hills and its western edge corresponds to the Kozu-Matsuda fault. Local magnetic highs are also present east of the hills. According to a geologic map, these highs are related to the surface and subsurface distribution of late Miocene – late Pliocene volcanoclastic rocks. Pairs of magnetic highs and lows are distributed over the eastern foot of Hakone Volcano and associated with distributions of volcanic products from the volcano. Since one of magnetic highs extends to the central part of the Ashigara Plain near the Sakawa River, the plain is implied to be underlain by volcanic products from the volcano.

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

要旨

相模湾北部沿岸域の地質・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相模湾北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、小田原市国府津付近を中心に相模湾北部沿岸域の陸・海域に渡る東西 15km × 南北 12km の範囲を、標準対地高度 150m、主測線間隔 250m 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 2014 年 11 月 27 日～同年 12 月 9 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、相模湾北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北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。

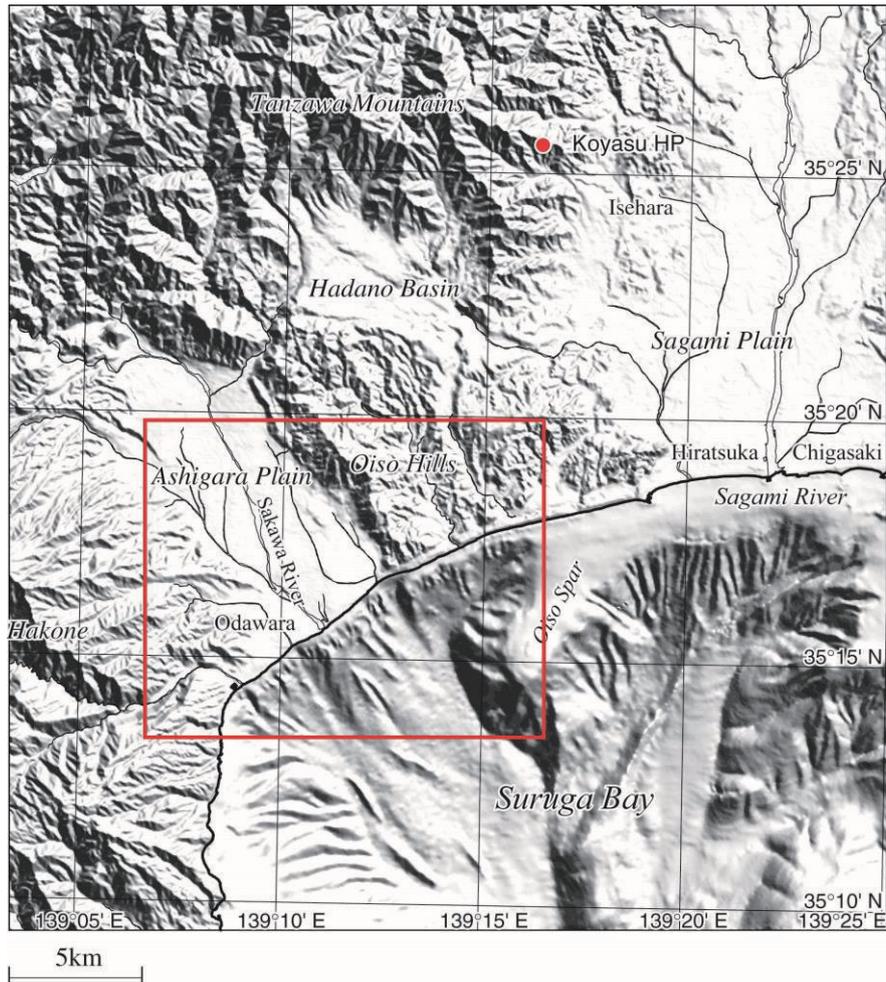
2. 高分解能空中磁気探査

空中磁気探査は、相模湾北部沿岸域の陸・海域に渡る範囲（第 1 図）を、標準対地高度 150m、主測線間隔 250m 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 15 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

* 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)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geo-Resources and Environment)



第 1 図 相模湾北部沿岸域高分解能空中磁気探査の実施範囲。

赤の実線で囲んだ東西 15km × 南北 12km の区域が調査範囲を示す。地形陰影を重ねた。

地形陰影作成のために、50 メッシュ地形データ（国土地理院，1999）と海底地形デジタルデータ（日本海洋データセンター，2012）を使用した。赤の丸印が空中磁気探査の際使用した子易場外ヘリポートの位置を示す。

Fig.1 Study area of the high-resolution aeromagnetic survey conducted in 2014 by the Geological Survey of Japan.

The rectangle bounded by red solid lines indicates the survey area. Topographic shading was superimposed. DEM with 50m mesh (Geospatial Information Authority of Japan, 1999) and digital bathymetric data (Japan Oceanographic Data Center, 2012) were employed for the topographic shading. A red dot shows the location of Koyasu Heliport.

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 軸フラックゲート型磁力計 TFM100G2（Billingsley Magnetics, 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 は今回アップグレードを行い、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）のスティンガー装置（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

第 1 表 相模湾北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 northern Sagami Bay, Kanagawa, Japan

Survey period	November 27 – December 9, 2014
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, Barometric/Radar altimeter, Video camera <u>Ground instrumentation</u> Ground magnetometer: Geometrics G-856AX proton magnetometer
Contractor	Nakanihon Air Service Co., Ltd.

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, 国土交通省の許可が必要で, 当該の機体も航空局による機体改造検査を 2014 年 4 月 30 日付けで終了している.

今回の調査では, 磁場測定系におけるノイズ確認のテストフライトを名古屋空港周辺で行い, その後, 神奈川県に空輸したのち, 2014 年 11 月 27 日～12 月 9 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, 316.13m 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,

287m ASL; 第 5 図) に設置して, 調査飛行中は 10 秒間隔で地磁気連続観測を 2 台のプロトン磁力計で行った (第 6 図および第 7 図). なお, 付近は山中のため鳥獣被害が深刻で, 実際地磁気日変化観測定点を設置の際, 野猿の団が近くまで観察に訪れた. そこで, 測定器の被害を防ぐため, 磁力計のセンサーケーブルをビニールチューブの中を通して対策を行ったところ, 幸いにも実際の被害はなかった.

一方, 今回機体磁気補償テスト飛行は磁場測定系におけるノイズ発生対策の効果を実際の飛行により確認したのち, 調査飛行の合間に行った. また, テスト飛行は飛行規制区域および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ため, 沖合の限られた区域内で実施したが, 結果的には機体磁気補償にとって良好なデータが取得できたので, 今後の参考としたい.

なお, 調査期間中は, 強風等の悪天候のため, 安全を最優先して 11 月 29 日～12 月 4 日の 6 日間は調査飛行を実施していない.



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 northern 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 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 Sensor of 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.

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) にしたがって, 相模湾北部沿岸域の高分解能空中磁気異常図を作成した.



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



第 5 図 空中磁気探査に使用した地磁気日変化観測定點. 子易場外ヘリポートの downstream 側約 100m 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. The station was placed in a valley 100m downstream from the Koyasu Heliport. The photo was taken from the heliport.

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, 調査地域およ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).



第6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。写真奥の半透明のビニール袋で覆われたのはプロトン磁力計センサー。

Fig.6 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. Two magnetic sensors can be seen in the back.



第7図 地磁気日変化観測装置内部。
装置内部には、G-856AXプロトン磁力計本体（左下端）、データ計測用PDA（上端）、バッテリー等が収納されている。

Fig.7 Inside of the daily magnetic variation observation system.
Each aluminum case contains equipment such as a G-856AX proton magnetometer, a PDA and a battery.

ただし、その分布はランダム的であり、またノイズの除去に際しては慎重な取り扱いが必要であることから、ここでは観測値そのものをこれ以降の処理で用いた。空中磁気データについては、以前認められた5nT程度のノイズがノイズ発生対策により陰を潜め、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。

基準点名：小田原

観測点番号：950230

住所 神奈川県小田原市久野 855 番

北緯 35度 16分 06.9603秒

東経 139度 08分 32.6988秒

標高 24.572m

(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

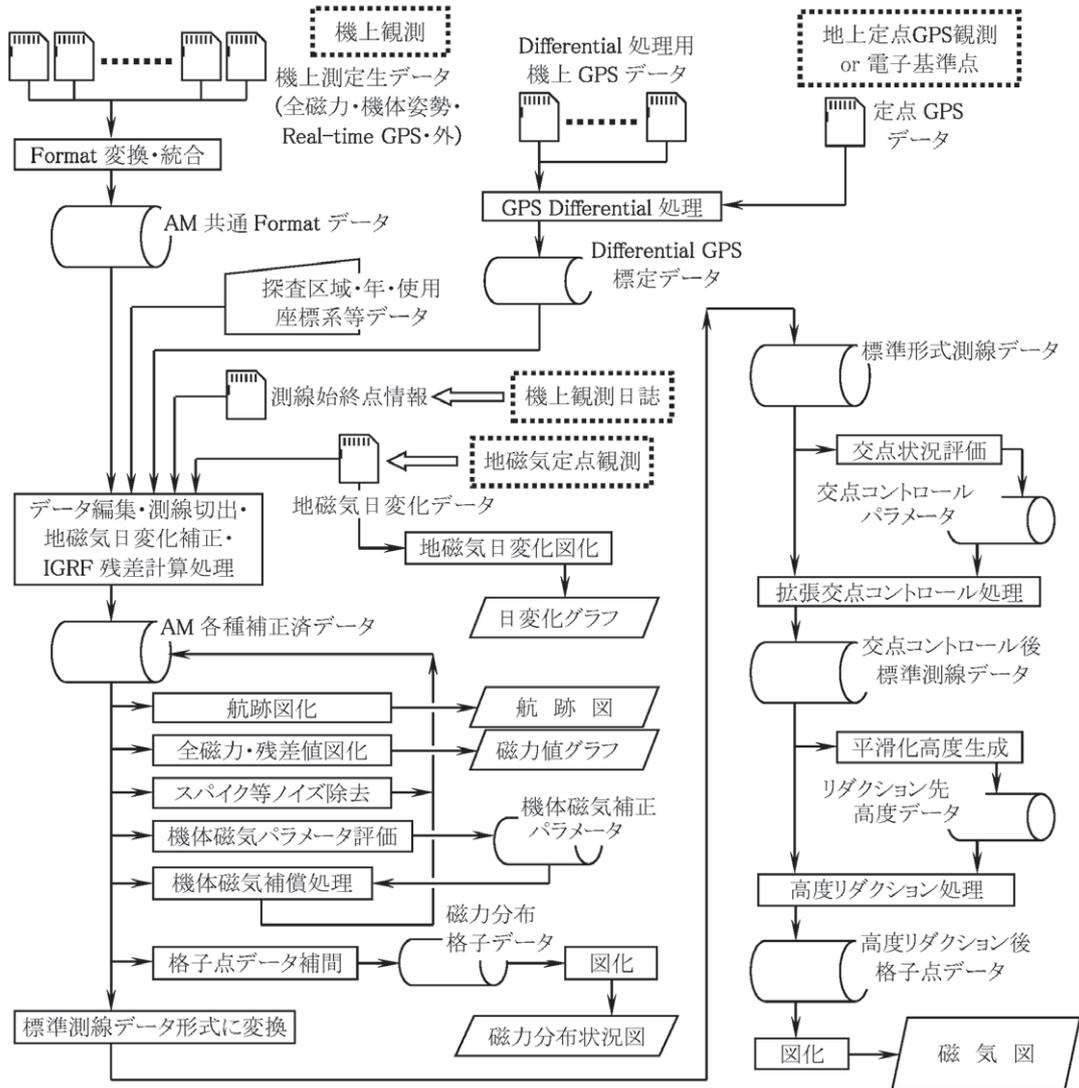
東経 139度 15分 45.7070秒

標高 80.796m

(WGS84系)

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11世代の国際標準地球磁場であるIGRF-11 (IAGA, Working Group V-MOD, 2010)を使用した。次いで機体磁気補償処理(中塚・大熊, 2005)を行ったところ、機体磁気補償テスト飛行中に無線ノイズを含むノイズの混入がなかったため、補償処理が適切に行われた(第10図)。このため、拡張交点コントロール処理による交点コントロール処理を今回は行っていない。この後、観測高度面を平滑し平滑化高度(第11図)を作成し、この高度の150m下方にインバージョン(Nakatsuka



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。
 Fig. 8 Flow chart of the processing of aeromagnetic data especially by helicopter-borne magnetic surveys over rugged terrains.

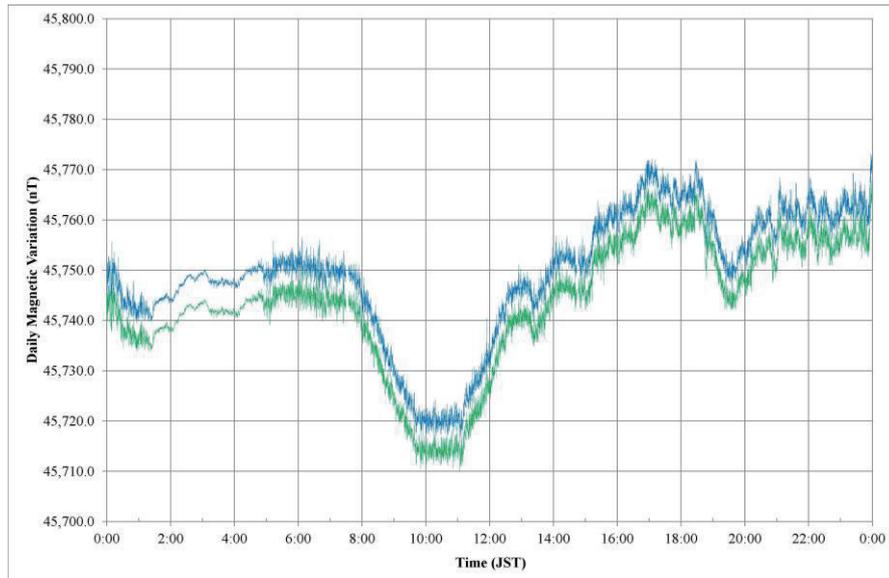
and Okuma, 2006) により等価異常を求めて、これから高度リダクション処理により平滑化高度上での全磁力値を求めた (第 12 図)。

磁気異常図を参照すると、大磯丘陵西端部(第 13 図)に沿って高磁気異常が分布し、国府津－松田断層に西端を境される。さらに、その東方の二宮町二宮、鷹取山南西麓などでも局所的な高磁気異常が認められる。最新の 20 万分の 1 地質図 (竹内ほか, 2015) と比較すると、大磯丘陵西端部の高磁気異常の南半分や鷹取山付近には後期中新世－後期鮮新世の安山岩－玄武岩碎屑岩が分布することから、これらの堆積性火山岩類の露出部と伏在部に対応すると考えられる。小田原市から二宮町中村川河口付近の海岸線沿いに高磁気異常が分布する。この付近では海岸線から水深を急に増

すため、地形効果の可能性はある。図画西端付近では、箱根火山東麓部の地形起伏に対応して複数の高磁気異常と低磁気異常の対が分布し、溶岩などの箱根火山の外輪山噴出物の分布 (竹内ほか, 2015) に対応する。高磁気異常の一部は、さらに東方の足柄平野中央部の酒匂川付近まで連続し、箱根火山の火山噴出物の伏在が推定される。

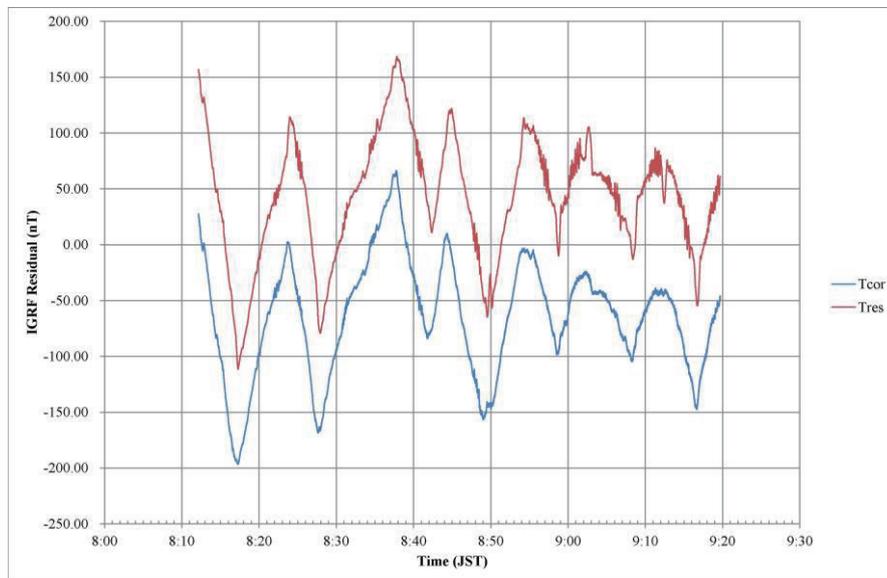
4. まとめ

今回、相模湾北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、大磯丘陵西端沿いに高磁気異常帯が分布し、その西端部が国府津－松田断層付近にあ



第9図 地磁気日変化の例（2014年12月6日測定）。伊勢原市子易場外ヘリポート近傍で測定。青および緑の線は、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±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。

Fig. 9 Daily magnetic variation observed on December 6, 2014. 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, ± few nT was obvious all the time except for the non-operation period of DC electric railcars at midnight.

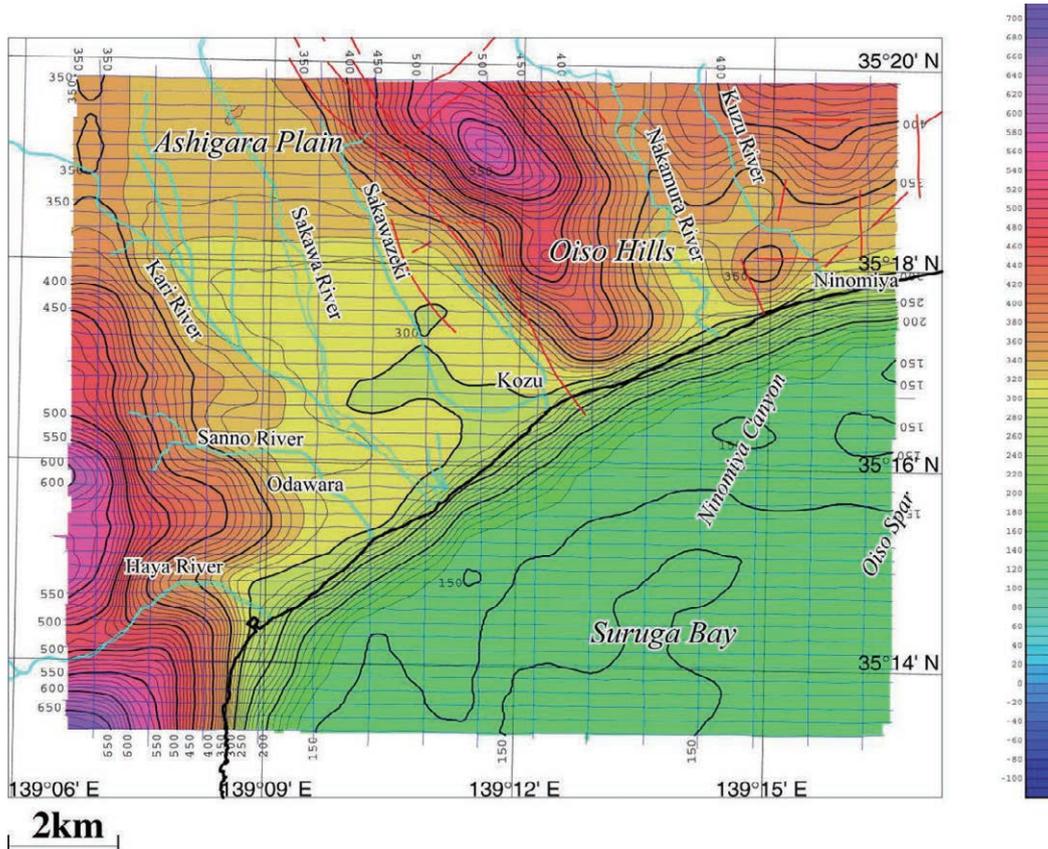


第10図 機体磁気補償処理前後のデータ比較。赤線（Tres）と青線（Tcor）は、各々機体磁気補償処理前後の日変化補正済み IGRF 残差磁気異常を示す。対象となったデータは機体磁気補償テスト飛行（2014年12月6日実施）の際取得された。機体磁気補償処理により機体姿勢の変化に伴う磁気ノイズが除去されているのが分かる。

Fig.10 Result of the magnetic compensation applied to the data obtained by the magnetic compensation flight on December 6, 2014. The magnetic noise was obviously reduced by the compensation.

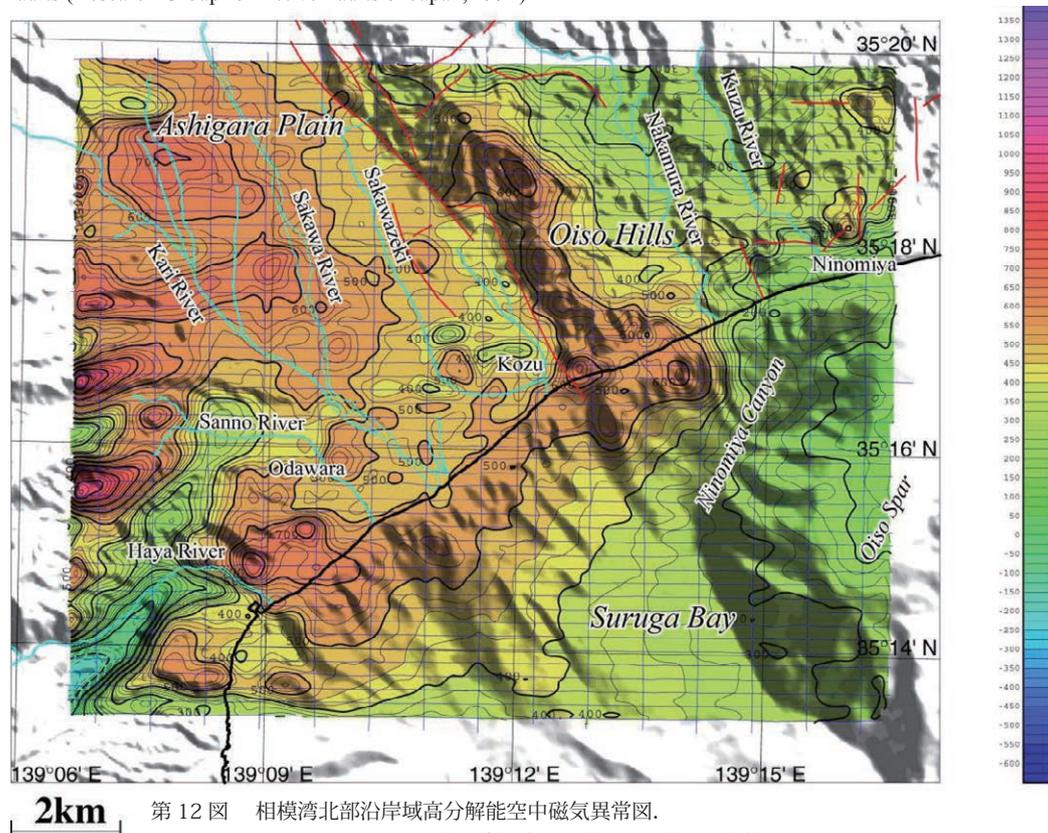
ることが分かった。また、図画西端部の箱根火山の火山噴出物分布域に磁気異常が分布し、その一部が足柄平野に連続することから、足柄平野に箱根火山からの

火山噴出物が伏在することが推定された。今後、詳細な解析を実施予定である。



第 11 図 相模湾北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。水色の実線は河川を示す。赤の実線は活断層分布（活断層研究会，1991）を示す。

Fig.11 Smoothed observation surface by the high-resolution aeromagnetic survey in the northern Sagami Bay, central Japan.
 Contour interval is 10 m. Blue thin lines indicate flight line paths. Light blue lines denote rivers. Red solid lines show active faults (Research Group for Active Faults of Japan, 1991)



第 12 図 相模湾北部沿岸域高分解能空中磁気異常図。
 コンター間隔：25 nT。地形陰影を重ねた。第 11 図参照。

Fig.12 High-resolution aeromagnetic map of the northern Sagami Bay, central Japan
 Contour interval is 25 nT. Shaded terrain is superimposed. See also Fig. 11.



第 13 図 調査地域の風景。
大磯丘陵西端部を南方より臨む。探査ヘリコプターから撮影。
Fig.13 Aerial photo of the survey area.
The western edge of the Oiso Hills viewed from the south.
The photo was taken from the survey helicopter during the survey.

文献

International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD (2010) International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, 183, 1216–1230. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x

活断層研究会 (1991) [新編] 日本の活断層一分布図と資料. 437p, 東京大学出版会.

国土地理院 (1999) 数値地図 50m メッシュ (標高). 日本-I.

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.

Nakatsuka, T., and S. Okuma (2006) Reduction of geomagnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Explor. Geophys.*, 37, 121-128. DOI: 10.1071/EG06121

日本海洋データセンター (2012) 海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ (アスキーファイル). M7001 Ver.2.2 関東南部.

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, 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, 地質調査総合センター速報, No.65, 35-39.

竹内圭史・及川輝樹・斎藤 眞・石塚 治・実松健造・駒澤正夫 (2015) 20 万分の 1 地質図「横須賀」(第 2 版). 産業技術総合研究所地質調査総合センター.