

# 世界磁気異常図と日本の貢献

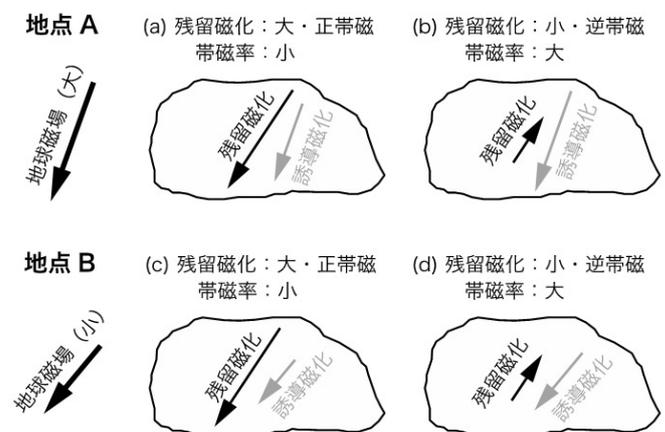
小田 啓邦<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

世界磁気異常図 (World Digital Magnetic Anomaly Map; WDMAM) が 2015 年に改訂され、version 2.0 としてインターネット上で公開された (World Digital Magnetic Anomaly Map, 2021)。この編纂には、世界の研究者のみならず、産業技術総合研究所地質調査総合研究センター (以下 GSJ) をはじめとする日本の研究者が重要な貢献をしてきた。世界磁気異常図の改訂版の発表からしばらく時間が経っているが、世界磁気異常図とそれに関連する国内外のプロジェクトなどの紹介をさせていただくこととした。きっかけは、2021 年に東・東南アジア磁気異常図の第 3 版 (Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST, 2021; 以下 CCOP and GSJ, AIST, 2021 と略する) および調査船「白嶺丸」の磁気異常・重力異常データとデータ処理の詳細がインターネット上で出版されたこと、さらに世界磁気異常図への貢献が GSJ 元職員の石原丈実氏の 2021 年の地球電磁気・地球惑星圏学会フロンティア賞の受賞 (地球電磁気・地球惑星圏学会, 2021) につながったことによる。

地球磁場は地心双極子磁場 (地球の中心に置かれた棒磁石) で近似されるが、厳密には双極子成分と非双極子成分 (地球の中心に置かれた棒磁石で表現できない成分) に分けることができる。観測される地球磁場の分布は、地球磁場モデルとして数式で表現することが可能であり、全地球のスケールで長波長の地球磁場分布を表現する全球地球磁場モデルが作成される。地球上の岩石には強い磁化を持つものがあり、そういった岩石はその周囲に短波長の異常、すなわち磁気異常を生み出す。言い換えると磁気異常とは強い磁化をもつ磁性体が存在することによって、局部的にその磁性体周囲の地球磁場が全球地球磁場モデルのような標準磁場からずれている状態を言う。具体的には、観測される地球磁場から、全球地球磁場モデルで表現される双極子磁場を含めた長波長成分 (400 km 程度) を引き算して残ったものが磁気異常として表われる。それを図化したものが磁気異常図である。

磁気異常の表れ方には磁性体のもつ磁化強度、方位のほか、その大きさ、形状、観測点との距離などが影響する。磁性体の磁化には地球磁場の方向と強さに伴い変化する誘導磁化と、岩石が形成されるときに獲得し地球磁場の変化の影響を受けない残留磁化の 2 種類が存在する (第 1 図)。いずれの成分が強いかは岩石の種類や岩石形成から現在までの履歴によって異なる。例えば日本付近では、現在の地球磁場方向の強い磁化をもつ物体が孤立していれば北側に



第 1 図 残留磁化と誘導磁化、および地球磁場の方位・強度との関係。地点 A ((a) と (b)) と地点 B ((c) と (d)) では地球磁場方位が異なり、地点 A の地球磁場の方が大きいとする。ここに、それぞれ 2 種類の同じ岩石があるとす。 (a) と (c) は現在の地球磁場と同じ極性に磁化しており (正帯磁)、その残留磁化強度は大きい。 (b) と (d) は現在の地球磁場と逆向きの極性に磁化しており (逆帯磁)、その残留磁化強度は小さい。溶岩が地球磁場中で冷却する時などに地球磁場方位と強度に対応した残留磁化を獲得する。残留磁化強度は、地球磁場強度のほかに、その岩石に含まれる磁性鉱物の種類や量などにも依存する。地球磁場は極性逆転の他に、地磁気永年変化により年々方位と強度が変化する。また、岩石の回転やプレート運動による移動や回転などもあるため、残留磁化方位と地球磁場方位は厳密には一致しない。一方、誘導磁化方位は地球磁場方位と基本的に一致する。(a) と (c) の帯磁率は小さく、(b) と (d) の帯磁率は大きい。誘導磁化強度は帯磁率に比例するため、(a) よりも (b)、(c) よりも (d) が大きくなる。また、誘導磁化強度は地球磁場強度に比例するため、(c) よりも (a)、(d) よりも (b) が大きくなる。これら残留磁化と誘導磁化の合ベクトルが磁気異常として観測される。一般に、海洋プレート表層を構成する玄武岩は残留磁化強度の方が大きく、大陸プレートを構成する花崗岩などは誘導磁化強度の方が大きい。

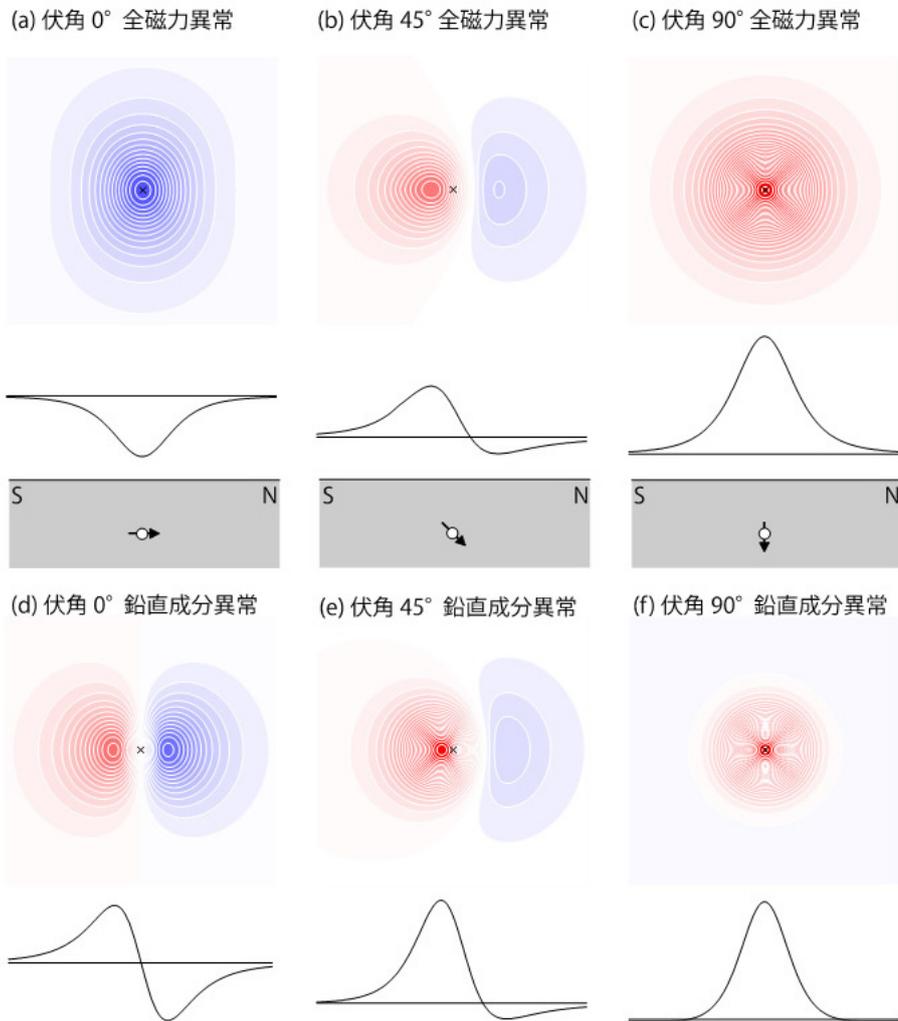
1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード: 世界磁気異常図 (WDMAM), 東・東南アジア磁気異常図, 東・東南アジア地球科学計画調整委員会 (CCOP), 国際標準磁場 (IGRF), 国際地磁気・超高層大気物理学協会 (IAGA)

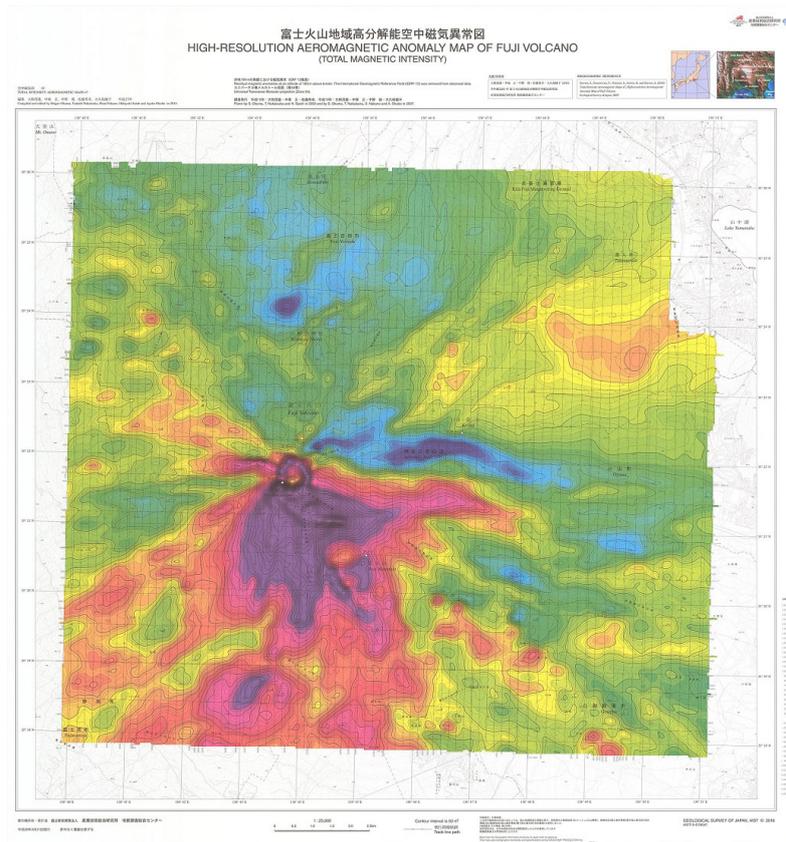
負、南側に正の磁気異常が対になって表れる。しかし、仮に現在の地球磁場と逆向きの磁化を持つ場合は北側に正、南側に負の磁気異常が対になって表れる。また、磁性体が存在する緯度によって、同じ残留磁化を持つ磁性体であっても、磁気異常の表れ方は違ってくる。さらに、磁性体が地下深くに存在すれば、磁気異常の波長が長くなる。磁気双極子(点源と見なせる極小サイズの磁石)による磁気異常について第2図に示すが、伏角45°の場合は、磁気双極子の南に強い磁気異常、北に弱い磁気異常が観測される。後に説明するプロトン磁力計を用いることにより、絶対磁場強度と全磁力磁気異常の観測が可能となる。全磁力異常は、磁場の3成分に現れる各成分の磁気異常とは異なるが

(第2図には全磁力異常と鉛直成分異常を示す)、その理論的詳細は中塚(2012)などを参照いただきたい。観測された磁気異常のパターンから、地下の磁性体の分布ならびに地質構造の推定が可能である。例えば、富士山の磁気異常図(第3図;大熊ほか, 2016)を見ると、まず富士山に対して北側に負、南側に正の磁気異常が見られる。このことは、ほぼ現在の地球磁場方向に磁化していることを示す。同様に、比較的新しい火山は現在の地球磁場方向に磁化していると考えられる。さらに、地表からは見えない溶岩の分布が、波長の短い磁気異常として表れていることも分かる。

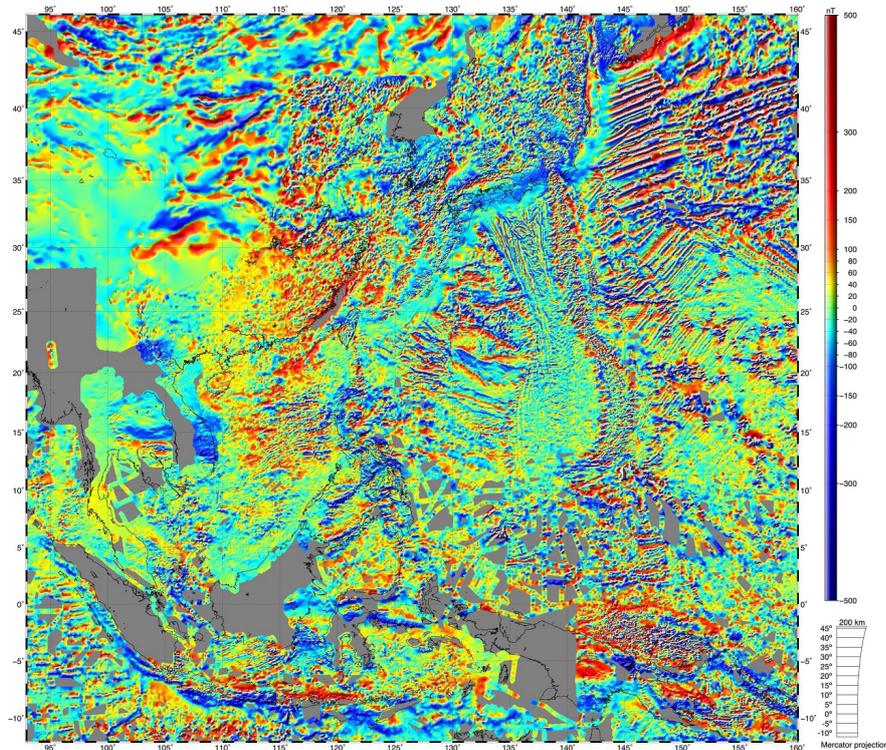
一方、海洋底については、海山に起因する磁気異常の他に海洋底拡大に伴う地磁気縞模様が確認されている(第4



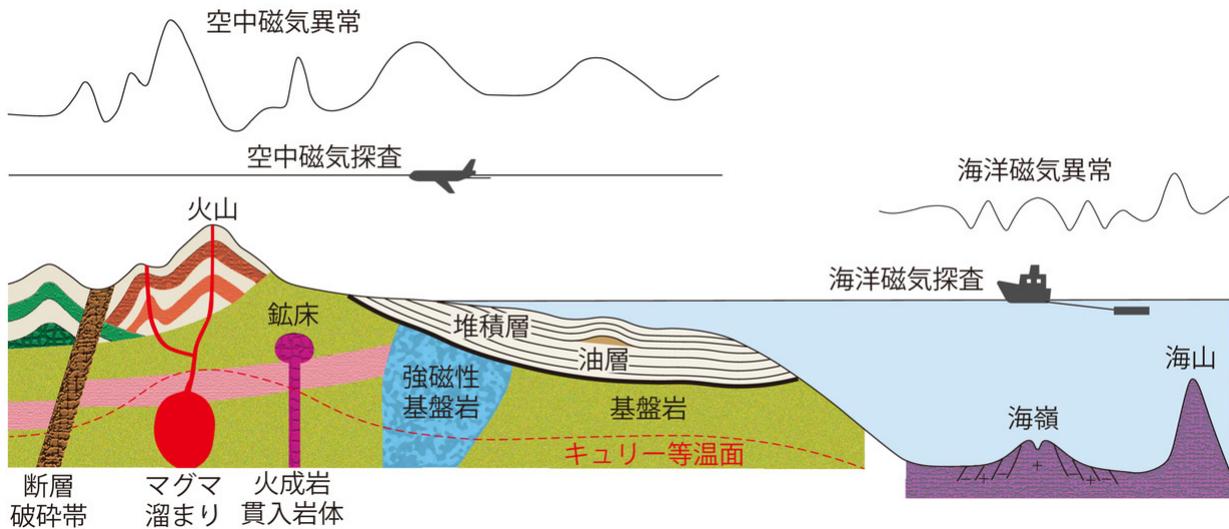
第2図 地中の磁気双極子による磁気異常。外部磁場と磁気双極子の磁化の方向は一致し、偏角は0°。(a)(b)(c)は全磁力異常、(d)(e)(f)は鉛直成分磁気異常(下向きが正)を示す。また、(a)(d)は伏角0°、(b)(e)は伏角45°、(c)(f)は伏角90°の場合を示す。それぞれ上の図は、磁気異常の平面図で、×は磁気双極子の位置、赤と青はそれぞれ正と負の異常を示す(等値線間隔は全て10 nT)。それぞれ下の図は、磁気双極子を通る南北測線上の磁気異常値プロファイル。各伏角値における全磁力異常と鉛直成分異常のスケールは同一であるが、伏角値の異なる図のスケールは異なる。全磁力異常値は、磁気双極子による磁場は外部磁場よりも十分小さいとして計算している。伏角45°の例(bとe)は日本周辺で観測される磁気異常に類似したパターンを示し、全磁力異常と鉛直成分異常のいずれも、地中の磁気双極子の南に強い正の磁気異常、北には弱い負の磁気異常が観測される。



第3図 富士火山地域高分解能空中磁気異常図 (大熊ほか, 2016). ヘリコプターによる観測結果に対地高度一定の補正などを行ったもの. 全体的傾向として, 山体の南がプラス, 北がマイナスの磁気異常を示し, 山体が現在の地磁気の方に磁化していることが分かる. 細かい磁気異常は溶岩の分布を反映している.



第4図 「東・東南アジア磁気異常図」第3版 (CCOP and GSJ, AIST, 2021)  
日本列島は北朝鮮 (中央上部の灰色部分) から南東に少し離れた場所に位置する. 日本列島東方の太平洋西端部, 日本列島南方のフィリピン海プレート上 (四国海盆など) の地磁気縞模様などが確認できる.



第5図 空中磁気異常と海洋磁気異常の観測，および磁気異常の原因となりうる地質構造や地質現象についての模式図。

図;CCOP and GSJ, AIST, 2021). 海洋地殻表層を構成する玄武岩質岩石は、一般に誘導磁化に対して残留磁化が強い。さらに、形成年代によって岩石が磁化したときの地球磁場の極性が現在と同じ向きの正磁極期であったり、現在とは逆向きの逆磁極期であったりするために地磁気縞模様として観測され、極性変化の境界位置とその年代値を知ることができる。そこで、これらを用いて海洋プレートの形成時期や拡大メカニズムなどを論じることが可能となる(沖野, 2015 など)。参考として、空中磁気異常と海洋磁気異常の観測と磁気異常の原因となりうる地質構造などについて、第5図に模式図として示した。

## 2. 全球地球磁場モデルと国際標準地球磁場モデル(IGRF)

全球地球磁場モデルとして最もよく使われるのが、国際標準地球磁場モデル(International Geomagnetic Reference Field; IGRF)である。このモデルでは、磁場分布を表現するため1838年に数学者ガウスが考案した球関数展開を用いる。展開係数は、世界各地の地磁気観測点や、航空機・船舶による観測、さらに人工衛星により得られた観測データに対し、関数値との差が最小になるよう決定される。IGRFは、球関数の展開係数を数値表の形で与えていて、5年毎に国際地球電磁気超高層物理学協会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy; IAGA)の分科会に設置された作業委員会で決定される。第1世代のIGRF 1965から2015年のIGRF-12までの歴史的経緯と計算方法については、中塚(2015)に詳細が記述されているので参考にしていきたい。2019年12月発表の第13

世代IGRF(IGRF-13; Alken *et al.*, 2021)では、1900年から2020年までの観測データをもとに決定されており、2000年以降の球関数の展開係数は次数 $N=1\sim 13$ まで与えられている。5年毎のIGRF発行では、IGRF(発行年の地球磁場モデル)・DGRF(Definitive IGRF; 確定国際標準地球磁場; 発行年の5年前の確定地球磁場モデル)・SV(発行年の後5年間の永年変化地球磁場モデル)の3種類が募集されるが、IGRF-13では日本から初めてIGRFのSVモデルへの貢献を果たした(Minami *et al.*, 2020)。世界磁気異常図の計算では、IGRFとは異なるCM4地球磁場モデル(Sabaka *et al.*, 2004)が用いられたが、詳細は後に述べる。

## 3. 地上磁場観測と地磁気データセンター

地上での地磁気の連続観測は地磁気観測所で行われる。日本で最も古くから観測が行われているのは、柿岡地磁気観測所(気象庁地磁気観測所, 2021)である。1883年3月、第1回国際極年事業に協力するため、東京赤坂区今井町の臨時観測所で地磁気観測を開始し、1897年1月に中央气象台構内(東京皇居内)で本格的な観測を開始した。その後、1912年12月に現在地の柿岡(茨城県)に移転し、1913年1月より地磁気観測が開始された。さらに、1920年8月、中央气象台附属柿岡地磁気観測所となり、現在まで連続観測が継続されている。また、1924年に国際測地学・地球物理学連合(IUGG)会議で柿岡が国際的に標準観測所となった。気象庁は、柿岡の他に、女満別・鹿屋・父島で連続観測を行っている。連続観測には全磁力絶対値が計測可能なプロトン磁力計、北方向・東方向・鉛直下方向

の直交する3成分を計測可能なフラックスゲート磁力計が用いられる。プロトン磁力計は磁場中で水素原子の核スピンの歳差運動することを利用しており、磁場強度に比例した歳差周期が得られるため精確な絶対磁場強度を求めることが可能である。

地磁気観測は国土地理院でも行われており、全国3か所の測地観測所、10か所の連続観測点による連続観測データと定期的一等磁気測量から、日本の磁気図が2015年よりIGRFと同じ5年間隔で公開されている(高橋ほか, 2018)。また、京都大学地磁気世界資料解析センター(World Data Center for Geomagnetism)で、世界の地磁気観測所データのとりまとめと公開を行っている(京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, 2021)。

#### 4. 人工衛星による磁場観測

人工衛星による地球磁場観測は近年ますます重要になりつつある。地球磁場の詳細な空間分布や時間変動を高精度で連続観測するためには、観測所での地球磁場観測に加えて、衛星によるグローバルな地球磁場観測が有効である。1979年10月に打ち上げられたMAGSAT以後、ヨーロッパを中心に計画されたØrsted(1999年2月～)やCHAMP(2000年7月～2010年9月)、SWARM衛星(2013年11月～)など、人工衛星による地球磁場観測が実施されてきた。欧州宇宙機関のSWARM衛星(The European Space Agency, 2021)による磁場観測は、フラックスゲート磁力計による磁場のベクトル3成分観測、およびヘリウムガスを用いた高精度光ポンピング磁力計による絶対磁場観測である。光ポンピング磁力計は、磁場中で原子のエネルギー準位が数本に分離すること(ゼーマン効果)、そのエネルギー準位の幅が磁場に比例することを利用して、近年、光ポンピング磁力計の小型化と高精度化が進んでいる。また、SWARM衛星では3機の編隊飛行による異なる場所での同時観測により、時間変化する物理現象を立体的に捉えることや高精度の空間微分データの取得も実現した。現在、SWARM衛星の次の世代の地球磁場観測衛星の打ち上げが待ち望まれている。

#### 5. 日本周辺空中磁気異常データ

航空機を用いた磁場観測(空中磁気探査)により、地表の地形に影響されず、また海陸境界をまたいで均質なデータを短時間で取得することができる。前述のプロトン磁力計や光ポンピング磁力計(セシウム磁力計など)は、動揺

する機体上でも精度良く全磁力の測定が可能である。実際には、センサーへの機体による磁場の影響を避けるため、バードとして機体から十分に離して曳航、あるいは機体から突き出したスティンガーに機体磁気補償装置と共に固定して磁場観測を行う。また、地球磁場の時間変動には、短時間で大きく変化する磁気嵐などの他に、太陽との位置関係などによって周期的変化をする地磁気日変化が存在する。空中磁気探査では、測線近くの固定点で磁場観測を行い、これら短周期磁場変動(擾乱)を差し引いている。これは精度の高い磁気異常データを得るために重要である。

日本における空中磁気探査の歴史と日本周辺空中磁気異常データベースの構築については中塚(1990, 2001)で詳しく解説されているが、1964年頃にGSJによる構造的天然ガスの調査研究が始まって以降である。このころから、海上保安庁水路部と国土地理院でも空中磁気探査(国土地理院では航空磁気測量とされる)が行われてきた。GSJでは、1989年度までに日本周辺海域を概ねカバーする広域空中磁気探査が行われた。また、地熱資源評価のための大規模な空中磁気探査が1981～1983年に新エネルギー総合開発機構(NEDO: 現新エネルギー・産業技術総合開発機構)によって主に陸域で進められた(中塚, 2001)。さらに、1990年以降には高分解能探査が行われてきた(たとえば大熊ほか, 1997)。

2005年に数値地質図として日本空中磁気探査データベースが出版された(中塚ほか, 2005)。さらに、これら高度の異なる各探査データを対地高度1,500mの平滑面で統一した編集が行われ、2009年に日本空中磁気DB(緯度経度0.1分のグリッドデータ)として出版された(中塚・大熊, 2009)。国土地理院からも、1984年から1998年までの航空磁気測量のデータを用いて、高度5,000mの緯度経度3分のグリッドデータが全国航空磁気異常図として提供されている(国土地理院, 2021a)。さらに、小型軽量磁力計とドローンを用いた無人観測も行われるようになってきており(Tada *et al.*, 2021)、今後はこれらを活用した高精度な観測や磁気異常の時間変化による火山や活断層の活動度モニタリングなど新たな研究の展開が期待される。

#### 6. 日本周辺海洋磁気異常

海洋でのプロトン磁力計を用いた全磁力異常観測は1960年代から行われてきた。これら初期の全磁力異常観測が、海洋底拡大説の根拠の一つとなる海洋地磁気縞模様の発見(Vine and Matthews, 1963)、およびプレートテクトニクスへのパラダイムシフトにつながったことは有名で

ある。調査船による観測では、主に金属鉄の船体による観測磁場への影響を避けるために、船体の後方数百 m に磁力計を曳航する。

日本における海洋磁気探査は、1960年代から海上保安庁水路部により日本周辺海域で海の基本図作成の一環として始められた(例えば 大島ほか, 1981)。水路部(現海洋情報部)ではその後、日本の大陸棚域延伸確定のため、フィリピン海・北西太平洋の広い範囲の磁気探査を含む調査が実施された。GSJ では、海上保安庁水路部が海底地形図を作成した海域について、1974年から調査船「白嶺丸」により 100 万分の 1 および 20 万分の 1 の海洋地質図の作成、マンガン団塊や熱水鉱床、物質循環等に関わる海洋地質調査を進めてきた。GSJ による海洋磁気探査の多くは、この海洋地質調査の一環として行われ、1999 年まで続いた(石原, 2021a)。「白嶺丸」ではプロトン磁力計が用いられてきたが、最近は軽量でサンプリング周期の短い光ポンピング磁力計(セシウム磁力計)が用いられている。「白嶺丸」における観測とデータ処理の詳細は石原(2021a)を参照いただきたい。第 6 図にデータ処理の一例を示したが、データ取得年代がばらばらで質の異なるものを 1 枚の図面に編集する作業には多大な労力を要する。このようにして、同様の処理を施された「白嶺丸」の磁気異常データは、重力異常データとともにインターネットで公開されている(石原, 2021b)。「白嶺丸」以降、GSJ の海洋磁気探査は、「第 2 白嶺丸」「白嶺」などに引き継がれたが、これらの観測の詳細は別途紹介させていただく予定である。日本では、海上保安庁水路部の測量船および「白嶺丸」に続く形で、「白鳳丸」など大学の調査船、海洋科学技術センター(JAMSTEC: 現海洋研究開発機構)の調査船による海洋磁気探査など、日本周辺に限らず多くのデータが蓄積、整備されてきた。

## 7. 南極周辺海域磁気異常

1980 年から 1999 年の 20 年間、調査船「白嶺丸」を用いて、石油公団(現石油天然ガス・金属鉱物資源機構)による南極大陸沿岸の地質・地球物理学的調査を行うプロジェクト「南極周辺海域調査」が実施され、プロトン磁力計による海洋磁気探査が行われた。その後、南極と周辺海域調査の国際協力による ADMAP 計画(Scientific Committee on Antarctic Research, 2021)の一環として、2001 年に南緯 60 度以南の「南極磁気異常図」が編集・出版された(Golynsky *et al.*, 2001; Golynsky *et al.*, 2006)。その後の ADMAP-2 計画(国立極地研究所の野木義史氏参画)では、海洋磁気異常と空中磁気探査の総測線長 350 万 km を超

えるデータが収録されたことにより、南極大陸全域の多くがカバーされ、磁気異常の解釈も進んだ(Golynsky *et al.*, 2018)。なお、国土地理院は南極において、露岩域基準点上の地磁気測量(1966～2007 年)、海上磁気測量(1957～1967 年)、航空磁気測量(1966～1974 年)を南極観測隊として行い、南極研究科学委員会の要請により、1978 年に南極磁気図を作成している(国土地理院, 2021b)。

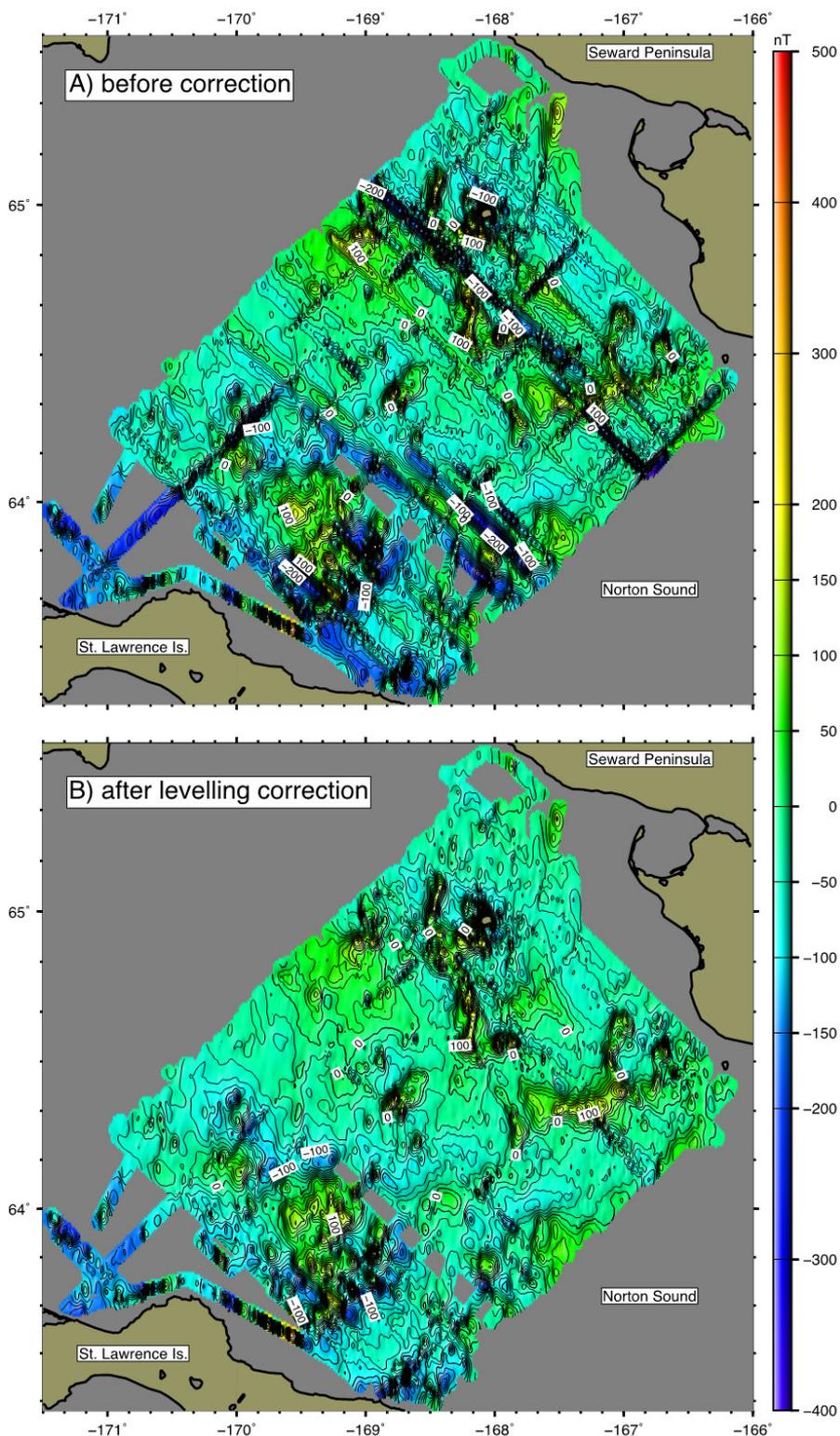
## 8. 海洋磁気異常データ処理

地質調査船「白嶺丸」で取得されたデータは、日本列島沿岸や太平洋、南極海域での海洋地球物理学の先駆的研究となった。GPS を用いた精密測位が可能な最近の観測とは異なり、初期の海洋観測では、2 時間に一度の NNSS 衛星とロラン・デッカなどの地上系電波航法システム、および船のジャイロ方位と対水速度などを組み合わせた複合測位であったが、工夫を凝らして測位精度向上を図って来た(Ishihara and Ishibashi, 1977; 中条ほか, 1977)。

さらに、磁気異常データに含まれる地球外部磁場擾乱や船体磁気、および観測位置誤差などを考慮に入れて、交点の存在しない複数測線について、食い違いを最小とする新しいデータ補正手法を開発した(Ishihara, 2015)。特に、地磁気観測データが日変化補正に使えない固定観測点から遠く離れた場所での観測データや CM4 地球磁場モデルによる地磁気日変化・永年変化の推定値の誤差が大きい場合などに、観測データのみに基づく本手法のデータ補正は有効である。WDMAM(World Digital Magnetic Anomaly Map; 世界磁気異常図)の第 2 版で追加された海洋磁気異常データについて、この補正手法が適用された。

## 9. 東アジア磁気異常図

全地球の磁気異常図作成には、各国が保有する陸域・海域データの提供と共有が必要である。東・東南アジア地球科学計画調整委員会(Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia; CCOP)は東・東南アジアの地球科学に関する国際機関であり、事務局がバンコクにある。GSJ から CCOP 事務局に物理探査専門家として赴任した石原丈実氏の提案により、「CCOP 空中磁気図編集計画」が 1987 年に開始された。この成果として、東南アジア各国や中国・韓国の地質調査機関や石油公社の協力で得られた磁気探査データに加えて、CCOP の協力国である米国、ロシア、ドイツ等から提供されたデータもあわせて、「東アジア磁気異常図」が



第6図 アラスカ南西方海域の磁気異常図と交点コントロール。新たな交点コントロール補正の(A)適用前と(B)適用後の磁気異常図(Ishihara, 2015)。補正により、測線に沿った人為的要因による異常が除去されている。

出版された(Geological Survey of Japan and Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas (CCOP), 1994; Geological Survey of Japan, AIST and CCOP (eds.), 2002)。更に、CCOP-GSJ MAMEAプロジェクト(Cordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia, 2021)

によって編集範囲を広げ(12°S-46°N, 93°E-160°Eの範囲), これまでの空白域(パプアニューギニア・フィリピン・カンボジア・台湾・マレーシア・ミャンマー・韓国の一部(韓国は陸域全体を完全カバー), 海上磁気データの一部分)を埋めた第3版が「東・東南アジア磁気異常図」として2021年2月にweb上で出版された(第4図; CCOP and GSJ, AIST,

2021). これらのデータは後述する WDMAM の元データとしても活用されている。

## 10. 世界磁気異常図

2005年に Toulouse (フランス) で開催された IAGA の学術総会で WDMAM 計画の Task Group が組織され、2007年に世界磁気異常図の第1版(グリッドサイズ5 km)が出版された(Korhonen *et al.*, 2007). この会議に日本から石原丈実氏が参加し、WDMAM 作成に協力することとなった。海上磁気データについては、エラーデータの除去・修正、地磁気日変化・永年変化の補正、レベル補正等を行い、全地球海洋異常データセットを作成した(Quesnel *et al.*, 2009). 地球磁場日変化・永年変化の補正には、1990年の CM4 地球磁場主磁場モデルを用いた。CM4 は、1960.0 ~ 2002.5 年の間の 2.5 年間隔の全球地球磁場モデルで、磁気嵐などが無い静穏時の磁気圏や電離層を起源とする外部磁場も表現でき、地上の地球磁場固定観測点データがない海洋観測データについて、地球磁場日変化や永年変化の補正を行うことが可能となる。

米国海洋大気庁(NOAA)の Maus 博士のグループは、世界磁気異常図第1版発表以降も全球磁気異常モデルを発表し(Maus *et al.*, 2009; Maus, 2010), その後2015年に世界磁気異常図の第2版(グリッドサイズ5 km)が第26回 IUGG 学術総会で承認され出版された(第7図; Catalan *et al.*, 2016). この編纂は Dymant 博士と Catalan 博士を共同議長とする15名の Task Force メンバーによって行われたが、日本からは石原丈実氏のほか、大熊茂雄氏(GSJ)が参加した。世界磁気異常図第2版の公開に先立って、2013年に9名の専門家によるレビューが行われた(日本からは千葉大学の中西正男教授が貢献)。世界磁気異常図の第2版(World Digital Magnetic Anomaly Map, 2021)のデータのうち、海洋データは7,193,664点収録されている。また、南極周辺データ56,125,472点(南極大陸の空中磁気異常データと南極大陸周辺の海洋磁気異常データを含む)は ADMAP の磁気異常データベースから再収録されている。さらに、東アジアのデータ958,040点は CCOP の磁気異常マップデータベースから再収録されている(World Digital Magnetic Anomaly Map, 2021)。

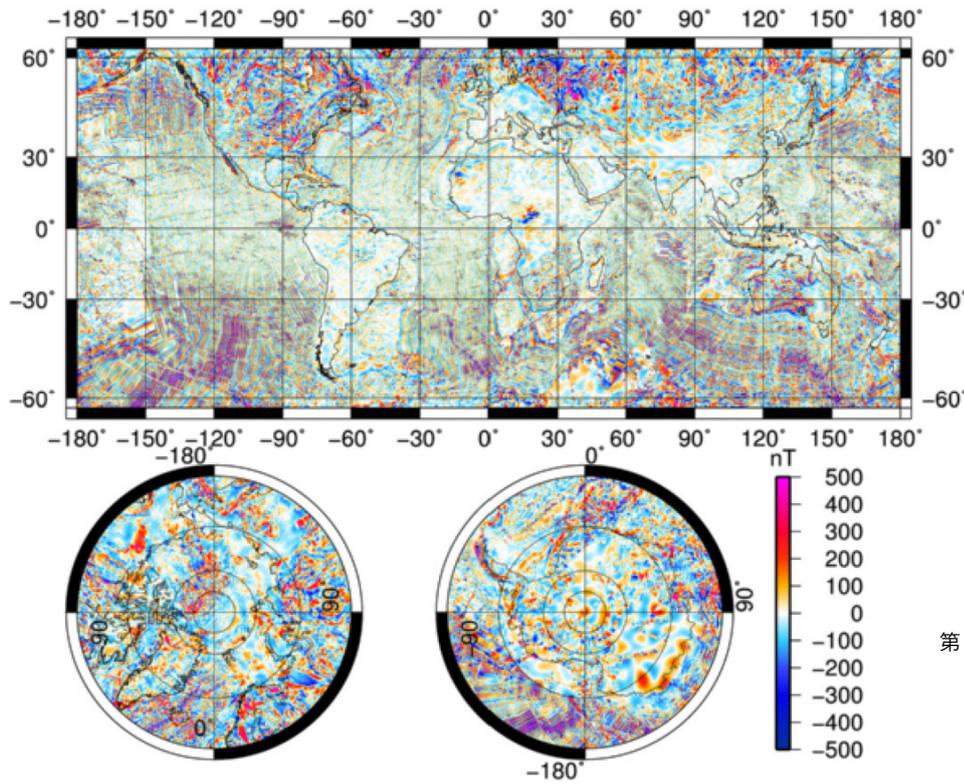
世界磁気異常図の第2版では、球面調和関数の800次の係数(空間分解能~50 km)まで求められており、使用データや計算方法など詳細は Lesur *et al.* (2016) で紹介されている。世界磁気異常図では世界測地系(WGS84)が用いられているが、第2版では、陸は高度5 kmの値、海は高度0

kmの値にそれぞれ換算されている。陸と海で高度が異なるのは、陸と同程度の空間分解能を海で確保するためである(深海底の水深は5 km程度であることによる)。海洋磁気異常データの抜けがあるエリアは、Müller *et al.* (2008) に修正を加えた海洋底年代図と Cande and Kent (1995) の地磁気極性逆転年代軸(Geomagnetic Polarity Timescale)を用いて、海面から5 km、厚さ1 kmの均一な磁化層を仮定して磁気異常を計算し、補完している(Lesur *et al.*, 2016)。一方、空中磁気異常データの抜けがある陸上エリアは人工衛星データから作成したリソスフェア地球磁場モデル GRIMM\_L120 (Lesur *et al.*, 2013) によって補完している。世界磁気異常図第2版のアウトプットは CM4 地球磁場主磁場モデルとの差分が全磁力異常値として与えられている。また、長波長成分(~400 km以上)補正のために、球関数の展開係数100次以下の係数の GRIMM\_L120 との差を引き算しているが、これら係数はユーザーによる再計算を可能とするために磁気異常モデルとともに公開されている(Lesur *et al.*, 2016)。

世界磁気異常図は、地球の地殻(リソスフェア)起源の磁気異常を表す標準的なものであり、これを活用した研究も多く発表されている。例えば、Tanaka (2017) はリソスフェアの磁化層の中心深度分布を求め、中央海嶺周辺では浅く、古い大陸地殻では深いこと、周辺の平均的熱構造やテクトニックセッティングと関連性があることを示した。また、磁化層の深度は場所によっては数十 kmにも及ぶが、将来計画されているマントル掘削においても、超深度での岩石の磁性・温度・深度の関係は重要である。

## 11. 今後の展望

世界磁気異常図の第2版は2015年に公開されたが、その約10年後が第3版のターゲットになると想定される。今後は、低軌道磁場観測衛星の運用による高分解能データの取得は重要となってくる。さらに、自律型海中ロボット(AUV)による深海底磁気異常観測、ドローンによる空中磁気観測など、磁気ソース近くでの高精度・高分解能データの取得が期待される。各国で取得される磁気異常データは資源探査など国益に関係する場合も多く、国を超えた高精度の最新データの相互交換には時間がかかることもあるが、データ共有によって新たな知見を得ることができ、無駄を省くことにもつながるので、レガシーデータの共有も含めて速やかに進めるのが理想である。これまで、観測データからの不良データ除去や、補正計算は手作業も多かったが、AI導入による作業の大幅な自動化も今後の課題である。



第7図 世界磁気異常図 第2版. (World Digital Magnetic Anomaly Map, 2021)  
全磁力異常値のCM4地球磁場主磁場モデルとの差分.

**謝辞:** 石原丈実氏・森尻理恵氏には初期の投稿前原稿を読んでいただき、多くの貴重なコメントをいただいた。また、本記事で実名紹介させていただいた方々や引用論文著者以外にも、海洋磁気異常・空中磁気異常の観測技術の日本への導入と改良、実際の観測、データ整理・データベース化への多くの貢献があり、これまでの磁気異常の研究の発展と世界磁気異常図の完成に不可欠であった。

## 文 献

- Alken, P., Thébaud, E., Beggan, C.D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T. N., Brown, W. J., Califf, S., Chambodut, A., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Grayver, A., Hammer, M. D., Holschneider, M., Huder, L., Hulot, G., Jager, T., Kloss, C., Korte, M., Kuang, W., Kuvshinov, A., Langlais, B., Léger, J.-M., Lesur, V., Livermore, P. W., Lowes, F. J., Macmillan, S., Magnes, W., Mandea, M., Marsal, S., Matzka, J., Metman, M. C., Minami, T., Morschhauser, A., Mound, J. E., Nair, M., Nakano, S., Olsen, N., Pavón-Carrasco, F. J., Petrov, V. G., Ropp, G., Rother, M., Sabaka, T. J., Sanchez, S., Saturnino, D., Schnepf, N. R., Shen, X., Stolle, C., Tangborn, A., Tøffner-Clausen, L., Toh, H., Torta, J. M., Varner, J., Vervelidou, F., Vigneron, P., Wardinski, I., Wicht, J., Woods, A., Yang, Y., Zeren, Z. and Zhou, B. (2021) International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*, **73**, 49. doi:10.1186/s40623-020-01288-x
- Cande, S. C. and Kent, D. V. (1995) Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, **100(B4)**, 6093–6095.
- Catalan, M., Dymont, J., Lesur, V., Thebaud, E., Hamoudi, M., Choi, Y., De Santis, A., Ishihara, T., Korhonen, J., Litvinova, T., Luis, J., Meyer, B., Milligan, P., Nakanishi, M., Okuma, S., Pilkington, M., Purucker, M., Ravat, D., Gaina, C., Maus, S., Quesnel, Y., Saltus, R. and Taylor P., (2016) Second version of World Digital Magnetic Anomaly Map released. *EOS*, 97.
- 地球電磁気・地球惑星圏学会 (2021) 地球電磁気・地球惑星圏学会会報, no. 242, 3.
- Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (2021) CCOP-GSJ MAMEA PROJECT. <https://www.ccop.asia/ourwork-project-mamea> (閲覧日: 2021年12月13日)
- Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST (2021) Magnetic Anomaly Map of East

- and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Revised, Geological Survey of Japan.
- Geological Survey of Japan and Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas (CCOP) (1994) Magnetic Anomaly Map of East Asia. Miscellaneous Map Series, 32, Geological Survey of Japan.
- Geological Survey of Japan, AIST and CCOP (eds.) (2002) Magnetic Anomaly Map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM Version (2nd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Geological Survey of Japan, AIST.
- Golynsky, A., Chiappini, M., Damaske, D., Ferraccioli, F., Ferris, J., Finn, C., Ghidella, M., Ishihara, T., Johnson, A., Kim, H.R., Kovacs, L., LaBrecque, J., Masolov, V., Nogi, Y., Purucker, M., Taylor, P. and Torta, M. (2001) ADMAP - Magnetic Anomaly Map of the Antarctic, 1:10 000 000 scale map. In Morris, P., and von Frese, R. eds., *BAS (Misc.) 10*, British Antarctic Survey.
- Golynsky, A., Chiappini, M., Damaske, D., Ferraccioli, F., Finn, C., Ghidella, M., Ishihara, T., Kim, H. R., Kovacs, L., Masolov, V., Morris, P., Nogi, Y. and von Frese, R. (2006) ADMAP - A digital magnetic anomaly map of the Antarctic. In Fütterer, D. K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H. and Tessensohn, F. eds., *Contributions to Global Earth Sciences*, Springer-Verlag, 109-116.
- Golynsky, A. V., Ferraccioli, F., Hong, J. K., Golynsky, D. A., von Frese, R. R. B., Young, D. A., Blankenship, D. D., Holt, J. W., Ivanov, S. V., Kiselev, A. V., Masolov, V. N., Eagles, G., Gohl, K., Jokat, W., Damaske, D., Finn, C., Aitken, A., Bell, R. E., Armadillo, E., Jordan, T. A., Greenbaum, J. S., Bozzo, E., Caneva, G., Forsberg, R., Ghidella, M., Galindo-Zaldivar, J., Bohoyo, F., Martos, Y. M., Nogi, Y., Quartini, E., Kim, H. R. and Roberts, J. L. (2018) New magnetic anomaly map of the Antarctic. *Geophysical Research Letters*, **45**, 6437-6449. doi:10.1029/2018GL078153
- Ishihara, T. (2015) A new leveling method without the direct use of crossover data and its application in marine magnetic surveys: weighted spatial averaging and temporal filtering. *Earth, Planets and Space*, **67**, 11. doi:10.1186/s40623-015-0181-7
- 石原丈実 (2021a) 白嶺丸重磁力データの整備・公開. 地質調査研究報告, **72**, 421-445.
- 石原丈実 (2021b) 白嶺丸重磁力データ. 産総研地質調査総合センター研究資料集, no. 714, 産総研地質調査総合センター, 2p.
- Ishihara, T. and Ishibashi, K. (1977) Recalculation of positions by NNSS. *Geological Survey of Japan Cruise Report*, **7**, 21-30.
- 気象庁地磁気観測所 (2021) 地磁気観測所の沿革. <http://www.kakioka-jma.go.jp/intro/enkaku.html> (閲覧日: 2021年11月15日)
- 国土地理院 (2021a) 高度 5000 m における全国航空磁気異常図. <https://www.gsi.go.jp/common/000148117.jpg> (閲覧日: 2021年11月15日)
- 国土地理院 (2021b) 地磁気測量. <https://www.gsi.go.jp/antarctic/10.html> (閲覧日: 2021年11月15日)
- Korhonen J., Fairhead, J. D., Hamoudi, M., Hemant, K., Lesur, V., Manda, M., Maus, S., Purucker, M., Ravat, D., Sazonova, T. and Thébault, E. (2007) *Magnetic anomaly map of the world—carte des anomalies magnétiques du monde*. Commission for Geological Map of the World 1st Edition. Paris, France.
- 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター (2021) 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html> (閲覧日: 2021年11月15日)
- Lesur, V., Rother, M., Vervelidou, F., Hamoudi, M. and Thébault, E. (2013) Post-processing scheme for modelling the lithospheric magnetic field. *Solid Earth*, **4**, 105-118. doi:10.5194/se-4-105-2013
- Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Dyment, J. and Thébault, E. (2016) Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM). *Earth, Planets and Space*, **68**, 27. doi:10.1186/s40623-016-0404-6
- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, J., Childers, V., Dostaler, F., Fairhead, J. D., Finn, C., von Frese, R. R. B., Gaina, C., Golynsky, S., Kucks, R., Lühr, H., Milligan, P., Mogren, S., Müller, R. D., Olesen, O., Pilkington, M., Saltus, R., Schreckenberger, B., Thébault, E. and Caratori Tontini, F. (2009) EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10**, Q08005. doi:10.1029/2009GC002471
- Maus, S. (2010) An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and

- order 720. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q06015. doi:10.1029/2010GC003026
- Minami, T., Nakano, S., Lesur, V., Takahashi, F., Matsushima, M., Shimizu, H., Nakashima, R., Taniguchi, H. and Toh, H. (2020) A candidate secular variation model for IGRF-13 based on MHD dynamo simulation and 4DEnVar data assimilation. *Earth, Planets and Space*, **72**, 136. doi:10.1186/s40623-020-01253-8
- Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W.R. (2008) Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **9**, Q04006. doi:10.1029/2007GC001743
- 中条純輔・石原丈実・村上文敏 (1977) 人工衛星測量による船位測定とデータ集録. 地質調査所月報, **28**, 69-102.
- 中塚 正 (1990) 地質調査所における空中磁気探査の歴史と将来. 地質ニュース, no. 428, 14-19.
- 中塚 正 (2001) 日本周辺空中磁気異常のデータベース構築について. 地質調査所月報, **52**, 125-132.
- 中塚 正 (2012) わかりやすい物理探査 磁気探査 2. 物理探査ニュース, **16**, 1-4.
- 中塚 正 (2015) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア (5). 地質調査総合センター研究資料集, no. 614, 産総研地質調査総合センター.
- 中塚 正・大熊茂雄 (2009) 日本空中磁気 DB による対地 1,500 m 平滑面での磁気異常分布データの編集. 地質調査総合センター研究資料集, no. 516, 産総研地質調査総合センター.
- 中塚 正・大熊茂雄・牧野雅彦・森尻理恵 (2005) 日本空中磁気探査データベース CD-ROM. 数値地質図, P-6, 産総研地質調査総合センター.
- 沖野郷子 (2015) フィリピン海の磁気異常とテクトニクス. 地学雑誌, **124**, 729-747. doi:10.5026/jgeography.124.729
- 大熊茂雄・牧野雅彦・森尻理恵・中塚 正 (1997) 空中磁気探査の最前線—高分解能空中磁気探査. 地質ニュース, no. 512, 40-50.
- 大熊茂雄・中塚 正・中野 俊・佐藤秀幸・大久保綾子 (2016) 富士火山地域高分解能空中磁気異常図 (1:25,000). 空中磁気図 (高分解能空中磁気異常図) 47, 産総研地質調査総合センター.
- 大島章一・登崎隆志・小野寺健笑・兼子俊朗・構図義夫 (1981) 北陸地方, 中部地方及び関東地方周辺海域の地磁気異常. 水路部研究報告, no. 16, 25-45.
- Quesnel, Y., Catalán, M. and Ishihara, T. (2009) A new global marine magnetic anomaly data set. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B04106. doi:10.1029/2008JB006144
- Sabaka, T.J., Olsen, N. and Purucker, M.E. (2004) Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Ørsted and CHAMP data. *Geophysical Journal International*, **159**, 521-547. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02421.x
- Scientific Committee on Antarctic Research (2021) Antarctic Digital Magnetic Anomaly Project (ADMMap). <https://www.scar.org/science/admap/home/> (閲覧日: 2021年11月15日)
- Tada, N., Ichihara, H., Nakano, M., Utsugi, M., Koyama, T., Kuwatani, T., Baba, K., Maeno, F., Takagi, A. and Takeo, M. (2021) Magnetization Structure of Nishinoshima Volcano, Ogasawara Island Arc, Obtained from Magnetic Surveys Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **419**, 107349. doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107349
- 高橋伸也・菅原安宏・松尾健一・矢萩智裕・阿部 聡 (2018) 磁気図 2015.0 年値の作成. 国土地理院時報, **130**, 13-36.
- Tanaka, A. (2017) Global centroid distribution of magnetized layer from World Digital Magnetic Anomaly Map. *Tectonics*, **36**, 3248-3253. doi:10.1002/2017TC004770
- The European Space Agency (2021) Swarm - ESA Earth Online. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm> (閲覧日: 2021年11月15日)
- Vine, F. J. and Matthews, D. H. (1963) Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, **199**, 947-949. doi:10.1038/199947a0
- World Digital Magnetic Anomaly Map (2021) WDMAM. <http://wdmam.org> (閲覧日: 2021年11月15日)
- 
- ODA Hirokuni (2022) World Digital Magnetic Anomaly Map and contribution from Japan.
- 
- (受付: 2021年12月3日)