

エチオピア・アファール凹地プレート拡大軸での磁気異常探査 Geomagnetic Anomaly Survey at the Divergent Plate Boundary in Afar Depression, Ethiopia

石川尚人⁽¹⁾・吉村令慧・Tesfaye Kidane⁽²⁾・望月伸竜⁽³⁾・加々島慎一⁽⁴⁾・小木曾哲⁽¹⁾・
東野伸一郎⁽⁵⁾・乙藤洋一郎⁽⁶⁾

Naoto ISHIKAWA⁽¹⁾, Ryokei YOSHIMURA, Tesfaye KIDANE⁽²⁾, Nobutatsu MOCHIZUKI⁽³⁾, Shinichi
KAGASHIMA⁽⁴⁾, Tetsu KOGISO⁽¹⁾, Shin-ichirou HIGASHINO⁽⁵⁾ and Yo-ichirou OTOFUJI⁽⁶⁾

(1) 京都大学大学院人間・環境学研究科

(2) エチオピア連邦民主共和国アジスアベベ大学地球科学科

(3) 熊本大学大学院先端機構

(4) 山形大学理学部

(5) 九州大学工学研究院

(6) NPO法人地球年代学ネットワーク

(1) Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Japan

(2) School of Earth Sciences, Addis Ababa University, Ethiopia

(3) Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University, Japan

(4) Faculty of Science, Yamagata University, Japan

(5) Graduate School of Engineering, Kyushu University, Japan

(6) Japan Geochronology Network, Japan

Synopsis

In order to expand our knowledge about magnetic structures under a sea-floor spreading center and the formation process of magnetic stripes, we now proceed an on-land geo-electromagnetic research plan at the divergent plate boundary in Afar Depression, Ethiopia, where we can directly investigate into a sea-floor spreading center on land. We will introduce our plan and report the progress of geomagnetic and geological surveys we have performed.

キーワード: 磁気異常, 海洋底拡大, プレート拡大境界

Keywords: magnetic anomaly, sea-floor spreading, divergent plate boundary,

1. はじめに

過去のプレート運動は、海洋底の縞状地磁気異常を用いて推定されており、海洋底の縞状地磁気異常の形成は地球科学の根幹理論であるプレートテクトニクスの基盤にかかわる事象である。海洋縞状地磁気異常の獲得形成過程に対してはVine-Matthews仮説があるが、それが実証され、具体的な獲得形成過程が既に解明されているとはいえない。その検証の

ためには、海洋底が拡大形成している現場に行き、直接的に探査することが望まれるが、その現場はほとんどが海洋下である。近年、海洋下の拡大軸に関しては、曳航式磁気測定システム、潜水探査船、自立型無人探査機などを利用し、海嶺軸間近での磁気探査により詳細な磁気異常・磁氣的構造の解析が進められている（山本・島, 2005；富士原, 2009；Sato et al., 2009）。

海洋底拡大の様相を陸上でみることができる地域

がエチオピア・アフール凹地（Afar Depression）である（Fig. 1）．そこで我々は、陸上で海洋底拡大現象が進行しつつあるアフール凹地を対象にして、磁気異常探査を主とした地球電磁気学的探査を立案し、予察的な調査研究を進めている．本稿では、その計画を紹介し、これまでの調査について報告する．

2. アフール凹地・Dabbahu Rift

エチオピア・アフール凹地は、ヌービアプレート・アラビアプレート・ソマリアプレートの拡大プレート三重会合点にあり、紅海・アデン湾の中央海嶺とアフリカ大地溝帯から続くエチオピア主リフト帯（Ethiopian Main Rift）とが会合している（Fig. 1）．アフール凹地は大陸リフティングから進行し、現在、海洋底拡大現象の開始時期の段階にあり、中央海嶺が海面上に露出していると考えられている（e.g. Ebinger et al., 2008）．特に、Dabbahu火山周辺域（Dabbahu火山～Semare: Dabbahu Rift: Fig. 2）では、2005-09年にかけて、活発な地震活動と正断層系の形成があり、一部に溶岩の流出が見られた（e.g., Ebinger et al., 2010）．GPS/地震観測のデータ解析により、長さ10～60km、幅1～3mの局所的な伸長（岩脈貫入）が繰り返され（13～14回）、総計として巾8m、長さ60km、深さ2～10kmの範囲で岩脈の貫入があったことが推定されている（Ebinger et al., 2008, 2010; Hamling, et al., 2009, 2010; Wright et al., 2012; Fig. 2）．この2005-09年のプレート拡大活動時の貫入岩脈は冷却が進み、地球磁場中で残留磁化を獲得したはずである．よって、Dabbahu Rift周辺域は、プレート拡大境界の海洋底拡大軸域での磁気異常の獲得形成過程を探るための絶好のフィールドであると言える．

3. 調査計画

海洋底の拡大形成の現場に直接アプローチできるアフール凹地・Dabbahu Rift を対象にして、プレート拡大軸域での磁気異常分布、地球電磁気的構造を詳細に明らかにし、海洋底拡大軸域での磁気異常の獲得形成過程を検証するために、無人小型飛行機を活用した航空探査と、地形的制約で地域は限定されるものの試料採取を伴う直接的な地上調査を行うことを計画している．調査地域、探査測線はFig. 2の通りである．

航空探査では、低飛行高度で高さを変えて詳細な磁気探査を行う．調査対象地域全体の磁気異常を把握するために、飛行高度2000m（対地高度: 約350-1650m）として、60kmの5測線（測線間隔10km）からなる領域A1/A2/A3を設定している．2005-09年の

拡大現象の

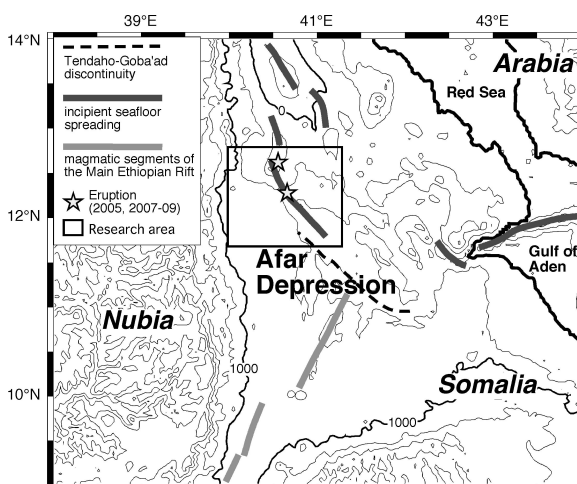


Fig. 1 Map showing the location of the Afar depression, Ethiopia, and a target area of our research, which is modified from Ebinger et al. (2010).

際に、岩脈の貫入が推定された地域とその南東延長部を対象にして、飛行高度1000m（対地高度: 約300-650m）でのより詳細な航空磁気探査を領域B1/B2（40km-7測線: 測線間隔2.5km）、領域B3/B4/B5（25km-11測線: 測線間隔2.5km）で行う．

現在開発中の無人小型飛行機と磁気測定システムでは、飛行速度30m/sで1秒間での測定（測定精度: 0.1nT）を目指している．無人小型飛行機による空中磁気探査では、広範囲／高密度での磁気探査が航空機やヘリコプターを利用するより安価で、短時間に可能となる．地上での徒歩による面的に詳細な磁気探査は、調査可能な時期である乾季においても極めて高温になることや、正断層系が発達し、傾動地塊が多数あるプレート拡大域のこの地域では困難で、空中磁気探査は極めて有効な方法であると考えられる．

地形的制約で地域は限定されるもの拡大軸部である2005-2009年の岩脈貫入推定位置とその南東方向延長部に直交するように測線を設定して（測線L1/L2: 40km, 測線L3/L4: 20km）、直接的な地上での徒歩による磁気探査を行う．その際には、表面に露出している溶岩流からの試料採取を行い、磁気的特性を把握するための古地磁気学的・岩石磁気学的解析を行う．航空調査時に、機体に搭載するビデオカメラにより地表の状況を撮影し、露出している溶岩流の分布や層序関係の把握に役立てる．また、磁気探査とともに地下の地球電磁気学的構造を把握するために、測線を選定してMT探査を行う．

アフール凹地での航空磁気探査は、本研究の調査対象地域を含まないアフール東部地域では行われている（Makris and Ginzburg, 1987）．Bridges et al. (2014) はSemera付近で幹線道路沿いと平地を選び地

上での磁気探査を行い、その測線上での正負の異常から縞状磁気異常の存在を指摘した。その検証のためには地域を広げた探査が不可欠である。

我々は上述の航空探査と地上探査を実施し、取得データ・試料の解析の結果に基づいて、アフール凹地・Dabbahu Riftでの磁気異常の分布、地球電磁気学的構造を明らかにし、プレート拡大軸域での磁気異常構造の形成過程のより深い理解につなげようと考えている。また、この地域で再び岩脈の貫入を伴う海洋底拡大現象が発生した場合、同様の磁気異常調査を行えば、この調査研究による成果との比較から、岩脈の貫入とその冷却に伴った磁気異常の獲得形成過程を知ることができる。本研究は将来的に重要な基礎的データを提供することになると考える。

4. 2014・2016年度調査

2013・2014年度に京都大学研究大学強化促進事業『学際・国際・人際融合事業「知の越境」融合チーム研究プログラム』（SPIRITS）の支援を受け、本調査研究をエチオピア・アジスアベバ大学のTesfaye Kidane教授との国際共同研究として立ち上げた。

2014年10月17日～10月30日にエチオピアに渡航し、研究打合せとともに、調査対象地域の視察を5日間行った。その際に、航空探査に使用する小型無人飛行機に適する滑走路候補地を3点選定した（Fig. 2）。また、設定した測線L1付近で徒歩による調査が可能なルートを選定し、北緯11°52.965′、東経41°2.827′

の位置を起点として、南東方向へ約2km、北東方向へ約1kmの区間での予察的な磁気探査を行った。徒歩による測定にはカナダGEM System社製オーバーハウザー磁力計（GSM19）を用い、起点では、英国Batington社製三軸フラックスゲート磁気センサー

（Mag-03）により、連続測定を行った。また、調査期間中4地点において古地磁気・岩石磁気学的解析のための定方位試料を29個採取した。

2016・2017年度においては日本学術振興会二国間交流事業・オープンパートナーシップ共同研究として、本調査計画のうち地上探査に絞った調査研究を進めている。2016年12月3日～16日の期間にエチオピアに渡航し、Semera周辺において、徒歩による磁場探査と地質調査・試料採取を行った（現地調査5日間）。磁場探査では、SemeraにあるSamara大学からの調査協力が得られ、同大学構内に磁場観測のための定点を設置し、5日間の日中において連続的な定点磁場観測を行った。徒歩による磁場探査は、設定していた測線L1沿いに北東-南西方向に測線を取り、4日間で全長56.841 km（沿面距離 68.545 km）に渡って探査をすることができた（Fig. 2）。定点及び移動観測には、カナダGEM System社製オーバーハウザー磁力計（GSM19）用い、60秒間隔で測定を行った。移動調査は、1人が磁力計と磁力計センサーを取り付けた背負子を背負い、もうひとりの補助者（水等の荷物運び）と地元警察官とともに歩くというもので、設定した一日の調査区間の始点で別働の調査隊の車

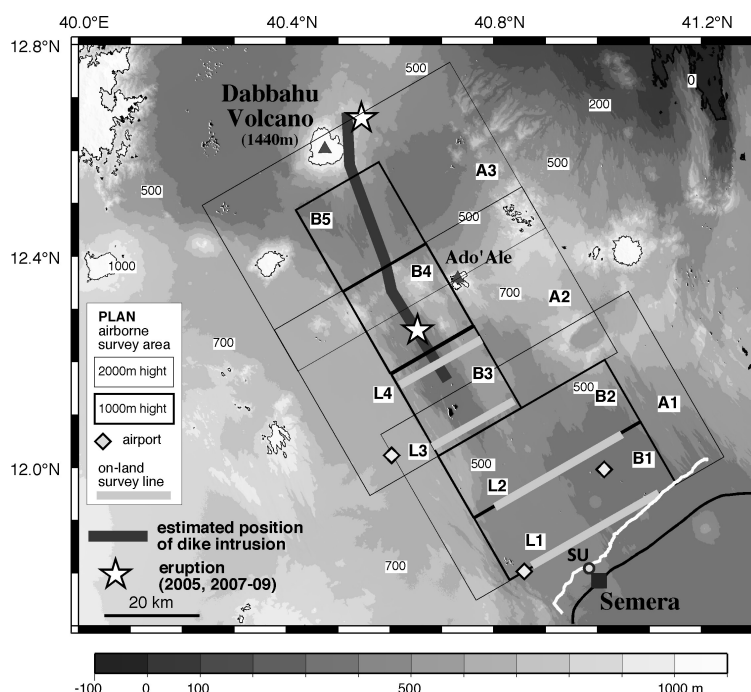


Fig. 2 Relief map around Dabbahu Rift, showing the surface trace of dike intrusions and locations of eruptions in 2005 and 2007-2009 (Hamling et al., 2009; Nooner et al., 2009; Wright et al., 2006), and our research plans. White line: geomagnetic survey line in 2016. SU: Samara University.

と別れ、終点で落ち合うというようにした。

地質調査・岩石試料採取は測線及びその周辺で行い、地表の溶岩流から古地磁気・岩石磁気解析用の試料を15地点で39個、岩石学的分析用の試料を11地点で30個採取することができた (Table 1)。

5. おわりに

2017年度は、地上探査としては2016年度の測線の東西延長上での磁気探査と地質調査・試料採取、その測線上での予察的なMT探査を計画している。小型無人飛行機による航空磁気探査システムを構築するとともに、エチオピアでの小型無人飛行機による探査できるように、エチオピアの関係諸機関との相談・交渉を進めることにしている。航空探査が可能となれば、アクセスが極めて困難である測線 (測線 L3/L4 : Fig. 2) では、現在開発中のものより小さな無人飛行機を用いて、徒歩でする替わりとして、より低空で測線を往復する航路での航空磁場探査の実施を検討している。

Table 1. Locality of sampling sites and rock samples collected during the field works at the Dabbahu Rift in 2014 and 2016.

Paleomagnetic/Rock-magnetic analysis				Petrological analysis			
site	latitude (°N)	longitude (°E)	number	block	latitude (°N)	longitude (°E)	
[2014]				[2016]			
EA01	11.940083	41.034833	5	16AF001	11.806642	40.992300	
EA02	11.882806	41.043139	8	16AF002	12.018080	41.209682	
EA03	11.878833	41.040028	8	16AF003	12.018080	41.209682	
EA04	11.877833	41.029639	6	16AF004	12.017970	41.208812	
[2016]				16AF005	12.018253	41.208648	
SA01	11.806666	40.992284	3	16AF007	11.983992	41.162683	
SA02	12.017826	41.208097	4	16AF008	11.984042	41.162753	
SA03	12.018253	41.208648	3	16AF006	11.983992	41.162683	
SA04	11.983965	41.162701	3	16AF009	11.910555	41.078333	
SA05	11.983992	41.162683	3	16AF010	11.910555	41.078611	
SA06	11.910717	41.078800	3	16AF011	11.871286	41.030725	
SA07-1	11.870583	41.030067	1	16AF012	11.869878	41.031353	
SA07-2	11.871250	41.030733	1	16AF013	11.870089	41.030925	
SA08	11.870090	41.030907	3	16AF014	11.870089	41.030925	
SA09	11.822220	41.002437	3	16AF015	11.869918	41.032195	
SA10	11.822228	41.002414	3	16AF016	11.822228	41.002414	
SA11	11.822228	41.002414	1	16AF017	11.822228	41.002414	
SA12	11.720653	40.928136	3	16AF018	11.822228	41.002414	
SA13	11.813721	41.022513	3	16AF019	11.822792	41.003225	
SA14	11.922309	41.092625	1	16AF020	11.784030	40.947893	
SA15	11.911205	41.079602	1	16AF021	11.813612	41.022500	
				16AF022	11.813612	41.022500	
				16AF023	11.806420	40.992356	
				16AF024	11.806421	40.992358	

参考文献

富士原敏哉 (2009) : しんかいで地磁気を測る, JAMSTES-R IFREE Special Issue, November, pp. 111-122.

山本路子・島 伸和 (2005) : 海洋地磁気異常は何を映すか? -地磁気異常と古地磁気強度変化の関連-, 地学雑誌, 114, pp. 239-249.

Bridges, D.L., Mickus, K., Gao, S.S., Abdelsalam, M.G. and Alemu, A. (2014): Magnetic stripes of a transitional

continental rift in Afar, *Geology*, Vol. 40, No. 3, pp. 203-206.

Ebinger, C., Ayele, A., Keir, D., Rowland, J., Yirgu, G., Wright, T., Belachew, M. and Hamling I. (2010): Length and timescales of rift faulting and magma intrusion: the Afar rifting cycle from 2005 to present, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 38, pp. 439-466.

Ebinger, C. Keir, D., Ayele A., Calais, E. and Wright, T. (2008): Capturing magma intrusion and faulting process during continental rupture: seismicity of the Dabbahu (Afar) rift, *Geophys. J. Int.*, 174, pp. 1138-1152.

Hamling, I.J., Ayele, A., Bennati, L. Calais, E. Ebinger, C.J., Keir, D., Lewi, E., Wright, T.J. and Yirgu, G. (2009): Geodetic observations of ongoing Dabbahu rifting episode: new dyke intrusions in 2006 and 2007, *Geophys. J. Int.*, 178, pp. 989-1003.

Hamling, I.J., Wright, T.J., Calais, E., Bennati, L. and Lewi, E. (2010): Stress transfer between thirteen successive dyke intrusions in Ethiopia, *Nature Geoscience*, 3, pp. 713-719.

Makris, J. and Ginzburg, A. (1987): The Afar Depression: transition between continental rifting and sea-floor spreading, *Tectonophysics*, 141, pp. 199-214.

Nooner, S.L., Bennati, L., Calais, E., Rouger Buck, W., Hamlings, I.J., Wright, T.J. and Lewi, E. (2000): Post-rifting relaxation in the Afar region, Ethiopia, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L21308, doi: 10.1029/2009GL04052.

Sato, T., Okino, K. and Kumagai, H. (2009): Magnetic structure of an oceanic core complex at the southernmost Central Indian Ridge: Analysis of shipboard and deep-sea three-component magnetometer data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06003, doi:10.1029/2008GC002267.

Wright, T.J., Ebinger, C., Juliet Biggs, J., Ayele, A., Yirgu, G., Keir, D. and Stork, A. (2006): Magma-maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking episode, Vol. 442, pp. 291-294.

Wright, T.J., Sigmundsson, F., Pagli, C., Belachew, M., Hamling, I.J., Brandsdottir, B., Keir, D., Pedersen, R., Ayele, A., Ebinger, C., Einarsson, P., Lewi, E. and Calais, E. (2012): Geophysical constraints on the dynamics of spreading centres from rifting episodes on land, *Nature Geoscience*, Vol. 5, pp. 242-250.

(論文受理日 : 2017年6月13日)