

## エチオピア・アフール凹地，海洋底拡大軸域での地球電磁気学的探査

### On-land Geo-electromagnetic Research at a Subaerial Sea-floor Spreading Center of the Divergent Plate Boundary in Afar Depression, Ethiopia

石川尚人<sup>(1)</sup>・吉村令慧・Tesfaye KIDANE<sup>(2)</sup>・加々島慎一<sup>(3)</sup>・東野伸一郎<sup>(4)</sup>・  
Ameha. M. MULUNEH<sup>(5)</sup>・望月伸竜<sup>(6)</sup>・北川桐香<sup>(3)</sup>・乙藤洋一郎<sup>(7)</sup>・小原徳昭<sup>(8)</sup>・  
船木實<sup>(9)</sup>・小木曾哲<sup>(1)</sup>

Naoto ISHIKAWA<sup>(1)</sup>, Ryokei YOSHIMURA, Tesfaye KIDANE<sup>(2)</sup>, Shinichi KAGASHIMA<sup>(3)</sup>,  
Shin-ichirou HIGASHINO<sup>(4)</sup>, Ameha. M. MULUNEH<sup>(5)</sup>, Nobutatsu MOCHIZUKI<sup>(6)</sup>, Kirika KITAGAWA<sup>(3)</sup>,  
Yo-ichirou OTOFUJI<sup>(7)</sup>, Moriaki OBARA<sup>(8)</sup>, Minoru FUNAKI<sup>(9)</sup> and Tetsu KOGISO<sup>(1)</sup>

(1) 京都大学大学院人間・環境学研究科

(2) 南アフリカ共和国 KwaZulu Natal大学

(3) 山形大学理学部

(4) 九州大学工学研究院

(5) エチオピア連邦民主共和国 Addis Ababa 大学

(6) 熊本大学大学院先端機構

(7) NPO法人地球年代学ネットワーク

(8) ロボティスタ

(9) 国立極地研究所

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

(2) University of KwaZulu Natal, South Africa

(3) Faculty of Science, Yamagata University, Japan

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

(5) Addis Ababa University, Ethiopia

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

(7) Japan Geochronology Network, Japan

(8) Robotista Co.

(9) National Institute of Polar Research

#### Synopsis

In order to clarify the formation process of magnetic stripes and structure under a sea-floor spreading center at the divergent plate boundary, we are performing an on-land geo-electromagnetic research project in Afar Depression, Ethiopia, where we can investigate into a subaerial sea-floor spreading center directly. We will introduce the outline of our project and report MT survey and rock sampling performed in 2017.

**キーワード:** 磁気異常, 海洋底拡大, プレート拡大境界, 地球電磁気学的探査

**Keywords:** magnetic anomaly, sea-floor spreading, divergent plate boundary, geo-electromagnetic survey

## 1. はじめに

エチオピア・アファール凹地 (Afar Depression) は、ヌビアプレート・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 (Fig. 1)、大陸リフティングが進行して、現在、海洋底拡大現象の開始時期の段階で、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)。そこで我々は、陸上で海洋底拡大の様相をみる事ができるアファール凹地において、地球電磁気学的探査と地表の溶岩流に対する岩石学的/古地磁気・岩石磁気学的解析により、海洋底拡大軸域の磁気異常分布、地球電磁気学的構造、そしてその形成過程を明らかにするための調査研究を立案し、2013年から実施している。2013・2014年度は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(研究課題名:エチオピア・アファール地域のプレート拡大域における地球電磁気学的国際共同研究)、本研究を開始した。2016・2017年度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(研究課題名:エチオピア・アファール凹地、海洋底拡大軸域の磁気異常探査に関する国際共同研究)として、徒歩による磁場探査と地質調査・試料採取を行った。2016年度までのこれらの調査の概要は石川ほか(2017)で報告している。2017年度からは科学研究費補助金・基盤研究A(海外学術)(研究課題名:無人小型飛行機によるエチオピア・アファール凹地、プレート拡大軸域の磁気異常解析)として3カ年の計画で研究を進めている。本稿ではその調査計画と2017年度の調査の概要について報告する。

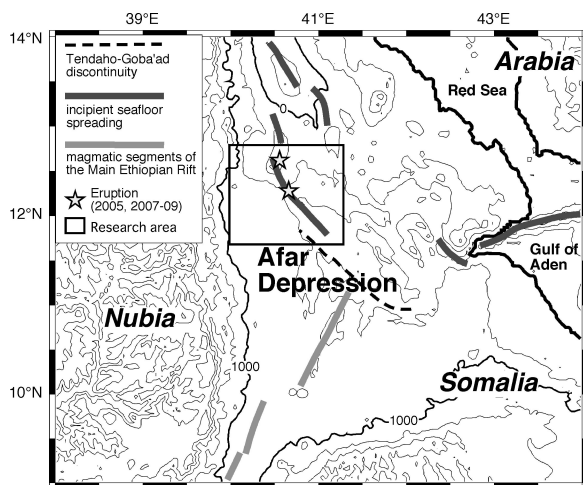


Fig. 1 Map showing the location of the Afar depression, Ethiopia, and a target area of our research, which is modified from Ebinger et al. (2010).

## 2. 調査計画

調査対象地域は、アファール凹地・Dabbahu Rift (Dabbahu火山~Semare)である (Fig. 2)。この地域では、2005-09年にかけて活発な地震活動、正断層系の形成、2地点での溶岩の噴出があり (e.g. Ebinger et al., 2010)、実際にプレート拡大現象が起こった。GPS/地震観測のデータ解析によれば、この期間の拡大現象により長さ60km、幅8m、深さ2~10kmの範囲での岩脈の貫入が推定されている (Ebinger et al., 2008, 2010; Hamling, et al., 2009, 2010; Wright et al., 2012: Fig. 2)。

本研究では、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。計画している調査地域、探査測線はFig.2に示す通りである。

航空探査では、無人小型飛行機による詳細な磁場探査を以下通りに行う。

- ・領域A1/A2/A3 :  
飛行高度2000m (対地高度: 約350-1650m)  
長さ60km - 5測線 (測線間隔10km)
- ・領域B1/B2 :  
飛行高度1000m (対地高度: 約300-650m)  
長さ40km - 7測線 (測線間隔2.5km)
- ・領域B3/B4/B5 :  
飛行高度1000m (対地高度: 約300-650m)  
長さ25km - 11測線 (測線間隔2.5km)

調査対象地域全体の磁気異常を把握するために、領域Aを設定している。2005-09年の拡大現象により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、詳細な航空磁気探査を領域Bで行う。開発中の無人小型飛行機 (Phoenix-LR05: Fig. 3) では最大6時間 (600km) の飛行が可能となっている。

地上探査は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)、徒歩による磁場探査、MT探査、表面に露出している溶岩流からの試料採取を行う。L1に沿った測線に対しては、2016年度に磁場探査と溶岩流からの試料採取を行った (石川ほか, 2017: Fig. 2)。

## 3. 2017年調査

2017年度は、10月22日~11月6日の日程でエチオピアに渡航し、10月27日~31日の5日間で地上探査を行った。2016年度に行った磁場探査の測線とその東方延長上で、MT探査と岩石試料採取を行った。MT探査のための観測時間を確保することと日中の暑い時間の作業をさけるために、通常日の出前の朝5時頃

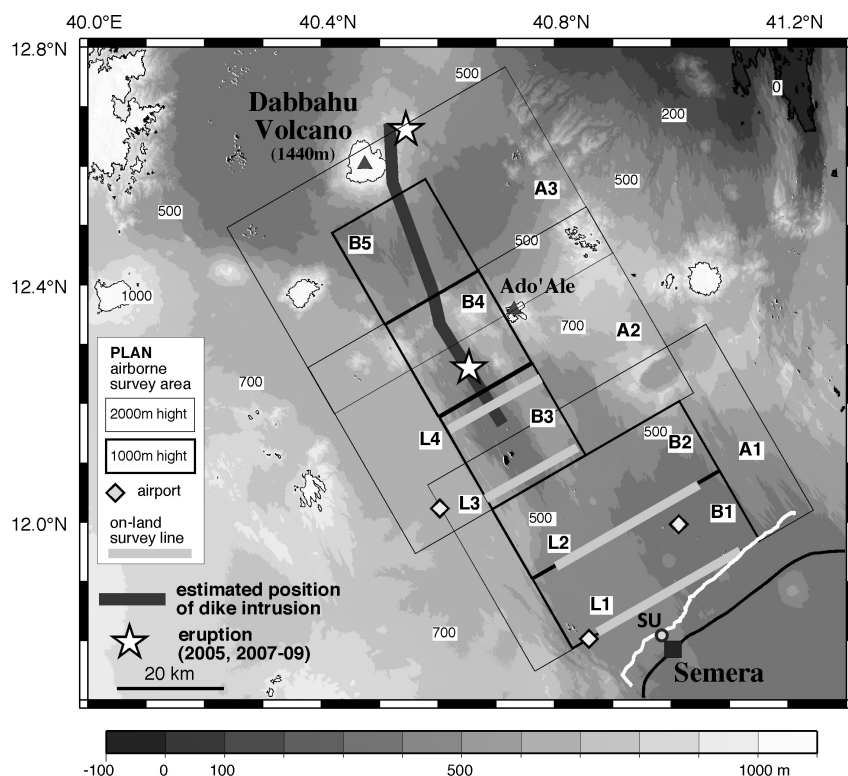


Fig. 2 Relief map around Dabbahu Rift, showing the surface trace of dike intrusions and locations of eruptions in 2005 and 2007-2009 (Hamling et al., 2009; Nooner et al., 2009; Wright et al., 2006), and our research plans. White line: geomagnetic survey line in 2016. SU: Samara University.

に宿泊場所から調査に出発し、午前9時までにMT探査の機器類を設置して観測を開始した。MT観測開始後、昼12時までを岩石試料採取の時間に割り当てた。昼食・休憩後、15～18時までの時間でMT探査機器の回収と岩石試料採取を行った。MT探査では、Phoenix Geophysics製MTU5A, NT system design製 ELOG1K-PHXを用い、14地点を選定して観測を行った (Table 1)。一日に2～4地点において日中の4～7時間の観測を行った。観測時には、観測機器の見守りのために、地元の人を雇いあげた。このために、今回は日中のみの観測となった。人工的なノイズは極めて少ないことではMT探査には良い条件ではあるものの、今回の調査期間においては地球磁場の擾乱が極めて弱く、MT探査においては良い条件ではなかった。また、地下のより深部までの解析を十分にするためには観測時間が短かった。

岩石試料は、岩石学的分析用の試料として22個 (10地点)、古地磁気・岩石記磁気学的解析用として53個 (18地点) を採取した (Table 2)。2013年からの総量は岩石学的分析用47個 (18地点)、古地磁気・岩石記磁気学的解析用92個 (33地点) である。



Fig. 3. Unmanned airplane "Phoenix-LR05" planned to use for aero-geomagnetic survey.

Table 1. Table 1. Site locations and recording periods of MT survey in 2017.

Site	Latitude (N)	Longitude (E)	Period of observation date, start - end [UTC]	Measured
TGA001	12°03.143'	41°15.443'	2018/10/29, 05:26 - 13:14	3H2E
TGA002	12°01.099'	41°12.568'	2018/10/29, 04:25 - 13:48	3H2E
TGA003	11°59.680'	41°11.014'	2018/10/28, 05:32 - 14:32	3H2E
TGA004E	11°58.366'	41°09.153'	2018/10/28, 04:29 - 13:02	2E
TGA005	11°57.500'	41°07.293'	2018/10/28, 03:48 - 13:46	3H2E
TGA006	11°55.862'	41°05.825'	2018/10/27, 04:11 - 14:23	3H2E
TGA007E	11°54.125'	41°04.311'	2018/10/27, 04:56 - 13:56 2018/10/28, 07:49 - 13:14	2E 2E
TGA008	11°53.256'	41°02.678'	2018/10/27, 05:59 - 10:54	3H2E
TGA009E	11°52.137'	41°01.835'	2018/10/27, 07:28 - 12:40	2E
TGA010	11°50.473'	41°01.089'	2018/10/30, 04:11 - 13:30 2018/10/31, 04:00 - 13:05	3H2E 3H2E
TGA011E	11°49.110'	40°59.099'	2018/10/30, 05:06 - 14:09	2E
TGA012E	11°48.238'	40°57.163'	2018/10/31, 04:51 - 13:44	2E
TGA013	11°46.451'	40°55.891'	2018/10/31, 06:21 - 14:09	3H2E
TGA014	11°44.403'	40°54.961'	2018/10/30, 06:43 - 14:26	3H2E

3H2E: 3 magnetic fields and 2 horizontal electric fields, 2E: 2 horizontal electric fields

#### 4. おわりに

2018年度は、11月下旬から12月上旬の期間に約2週間エチオピアに渡航し、現地で6日間の調査を計画している。小型無人飛行機のエチオピアへの持込・使用の許可が得られれば、上述の計画に従って航空磁気探査を実施する予定で、もしその許可が得られなければ、2017年度のMT探査の測線で、各測定点での長時間（1日または2日）の観測を計画している。地上探査はまだ1測線のみである。他の測線は地形的制約により車でのアクセスや徒歩での調査がかなり困難ではあるが、可能な測線の探索は今後も行うとともに、前述の無人飛行機より小型の機体による航空磁場探査も検討している。

Table 2. Locality of sampling sites and rock samples collected in the 2017 fieldwork.

Samples for paleomagnetic/rock-magnetic analysis			
Site	Latitude (°N)	Longitude (°E)	number
ET17-01	11.868150	41.031581	3
ET17-02	11.868153	41.031603	3
ET17-03	11.868231	41.031625	3
ET17-04	11.868239	41.031686	3
ET17-05	11.868197	41.031739	3
ET17-06	11.868308	41.031753	3
ET17-07	11.869511	41.031525	3
ET17-08	11.869128	41.031761	2
ET17-09	11.995044	41.185811	3
ET17-10	11.991453	41.181550	3
ET17-11	11.991347	41.181542	3
ET17-12	11.834547	41.090147	3
ET17-13	12.052583	41.258111	3
ET17-14	11.987556	41.303222	3
ET17-16	11.742528	40.914639	3
ET17-17	11.839167	41.022806	3
ET17-18	11.836667	41.018472	3
ET17-19	11.782972	40.935389	3

Samples for petrological analysis		
blick	Latitude (°N)	Longitude (°E)
17AF001	11.808633	40.991356
17AF002	11.868167	41.031594
17AF003	11.868161	41.031611
17AF004	11.868247	41.031628
17AF005	11.868222	41.031692
17AF006	11.868192	41.031747
17AF007	11.868289	41.031767
17AF008	11.869500	41.031533
17AF009	11.869150	41.031750
17AF010	11.995019	41.185822
17AF011	11.991322	41.181544
17AF012	11.991494	41.181444
17AF013	11.828097	41.093317
17AF014	11.828092	41.093300
17AF015	12.052536	41.258103
17AF016	11.987472	41.303206
17AF020	11.742561	40.914667
17AF021	11.839214	41.022747
17AF022	11.836592	41.018533
17AF023	11.836703	41.018458
17AF024	11.782833	40.935316
17AF025	11.782714	40.935094

#### 参考文献

- 石川尚人・吉村令慧・Tesfaye Kidane・望月伸竜・加々島慎一・小木曾哲・東野伸一郎・乙藤洋一郎 (2017): 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, 京都大学防災研究所年報, 第60号B, 366-369.
- 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.
- Nooner, S.L., Bennati, L., Calais, E., Rouger Buck, W., Hamlings, I.J., Wright, T.J. and Lewi, E. (200): Post-rifting relaxation in the Afar region, Ethiopia, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L21308, doi: 10.1029/2009GL04052.
- 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：2018年6月13日)