

「エチオピアの大地で海洋底拡大現象を探る」-エチオピア・アフール凹地, プレート拡大域での地球電磁気学的探査 (調査概要報告) -

“On-land Exploration of a Sea-floor Spreading in Ethiopia”

Summary Report of Geo-electromagnetic Surveys at a Divergent Plate Boundary in Afar Depression, Ethiopia

石川尚人⁽¹⁾・吉村令慧・Tesfaye KIDANE⁽²⁾・東野伸一郎⁽³⁾・加々島慎一⁽⁴⁾・Ameha. M. MULUNEH⁽⁵⁾・望月伸竜⁽⁶⁾・北川桐香⁽⁴⁾・藤井昌和⁽⁷⁾・角屋守⁽⁸⁾・岩本光弘⁽⁸⁾・小原徳昭⁽⁹⁾・乙藤洋一郎⁽¹⁰⁾・船木實⁽¹¹⁾・小木曾哲⁽¹²⁾

Naoto ISHIKAWA⁽¹⁾, Ryokei YOSHIMURA, Tesfaye KIDANE⁽²⁾, Shin-ichiro HIGASHINO⁽³⁾, Shin-ichi KAGASHIMA⁽⁴⁾, Ameha. M. MULUNEH⁽⁵⁾, Nobutatsu MOCHIZUKI⁽⁶⁾, Kirika KITAGAWA⁽⁴⁾, Masakazu FUJII⁽⁷⁾, Mamoru KADOYA⁽⁸⁾, Mitsuhiko IWAMOTO⁽⁸⁾, Noriaki OBARA⁽⁹⁾, Yo-ichiro OTOFUJI⁽¹⁰⁾, Minoru FUNAKI⁽¹¹⁾ and Tetsu KOGISO⁽¹²⁾

- (1) 富山大学都市デザイン学部
- (2) 南アフリカ共和国 KwaZulu Natal大学
- (3) 九州大学工学研究院
- (4) 山形大学理学部
- (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) 国立極地研究所
- (8) エクストリーム コンポジット ジャパン
- (9) ロボティスタ
- (10) NPO法人地球年代学ネットワーク
- (11) 国立極地研究所 (退職)
- (12) 京都大学大学院人間・環境学研究科

- (1) Faculty of Sustainable system, University of Toyama, Japan
- (2) University of KwaZulu Natal, South Africa
- (3) Graduate School of Engineering, Kyushu University, Japan
- (4) Faculty of Science, Yamagata University, Japan
- (5) Addis Ababa University, Ethiopia
- (6) Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University, Japan
- (7) National Institute of Polar Research, Japan
- (8) X-Treme Composite Japan
- (9) Robotista Co., Japan
- (10) Japan Geochronology Network, Japan
- (11) National Institute of Polar Research, Japan (retired)
- (12) Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Japan

Synopsis

In order to clarify the formation process of magnetic stripes and structure under a sea-

floor spreading center at a divergent plate boundary, we are performing an on-land geoelectromagnetic research project in Afar Depression, Ethiopia, where we can investigate into a subaerial sea-floor spreading center directly. We will report a brief summary of field surveys in our project between 2014 and 2019.

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

Keywords: sea-floor spreading, divergent plate boundary, magnetic anomaly, geoelectromagnetic surveys, Afar depression

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はVine-Matthews仮説として理解されている。その仮説の検証を含め、海洋底の磁化構造やその形成過程は、海洋での探査や陸上のオフィオライトの研究により進められてきた。しかし、海洋磁気異常の獲得と形成の過程を詳細に明らかにするためには、現場でのより直接的な探査が未だに望まれるが、その現場はほとんどが海洋下である。

海洋底拡大の様相を陸上でみることができると地域がエチオピア・アファール凹地である。この地域は、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る (Fig.1)。アファ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。特に、Dabbahu火山周辺域 (Dabbahu火山~Semare : Dabbahu Rift : Fig. 1) 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、この期間の拡大現象により、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., 2010; Hamling, et al., 2009; Wright et al., 2012)。よって、Dabbahu Riftとその周辺域はプレート拡大境界での磁気異常の獲得形成過程を探究するためには絶好のフィールドである。

そこで我々は、Dabbahu Riftとその周辺域 (Tendaho Graben: Fig. 1) を対象に、地球電磁気学的探査 (磁気探査, MT探査) と地表溶岩流の岩石学的・古地磁気学的解析により、プレート拡大軸域の磁気異常の分布と構造、その形成過程を探究する調査研究を計画した。地上での探査は、正断層系の傾動地塊や溶岩流が広く分布する地形的な制約から限定的になるの

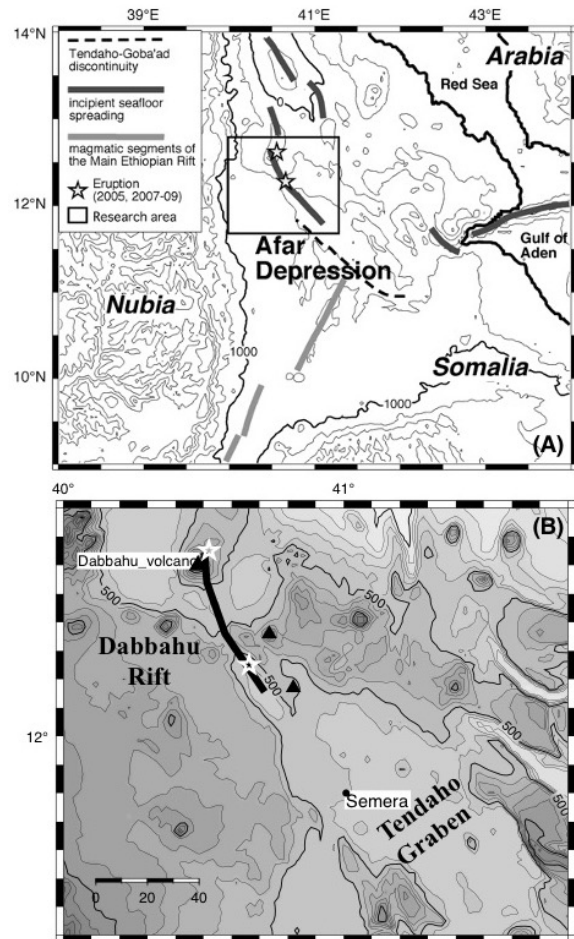


Fig. 1. (A) Map showing the location of Afar depression, Ethiopia, modified from Ebinger et al. (2010). (B) A target area of our research, Dabbahu Rift and Tendaho Graben.

で、広域の探査のために無人小型飛行機を活用した航空磁気探査を行うことを目論んだ。

計画としては以下の通りである。

- ・アファール地域での飛行探査が可能な無人小型飛行機を開発し、航空磁気探査を行う。
- ・地上において、踏破可能な測線・地域を選定し、地球電磁気学的探査 (磁気探査, MT探査) を行う。
- ・地上での探査測線上とその周辺域で地表の溶岩

流の地質調査・試料採取を行う。採取試料に対して、岩石学的解析、古地磁氣的解析を行う。

- 航空磁気探査と地上での磁気探査データから磁気異常分布を明らかにする。
- 磁気探査・MT探査データから、地球電磁気学的地下構造（磁化・比抵抗）を推定する。
- 採取試料の分析から、溶岩流の磁気特性、古地磁気極性に基づく溶岩流の年代分布、岩石学的解析からのマグマ進化史を明らかにする。
- これらの結果を総合し、Dabbahu Riftとその周辺域における磁気異常の分布と構造、その形成過程を考察する。

この計画は2011年から構想し、以下の研究助成を受けながら実施してきた。

- 2013・2014年度：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)
- 2016・2017年度：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
- 2017～2019年度：科学研究費補助金・基盤研究A（海外学術）

これらの研究助成により、次のようなエチオピアへの渡航と現地調査（カッコ内：調査日数）を行った。

- 2014.10.17～10.30（5日）
現地の状況把握のための巡検、予察的調査（磁気探査、地質調査・試料採取）
- 2016.12.3～16（5日）
地上磁気探査、地質調査・試料採取
- 2017.10.22～11.5（6日）
MT探査、地質調査・試料採取
- 2018.10.6～10（0日）
無人飛行機の持込・使用に関する関係機関との折衝
- 2018.12.10～21（4日）
地質調査・試料採取
- 2019.10.27～11.17（10日）
航空磁気探査、MT探査、地上磁気探査、地質調査・試料採取

本稿では上記の現地調査の概要を報告する。

2. 調査概要

2.1 磁気探査

(1) 徒歩による地上磁気探査

Tendaho Grabenにおいて、拡大方向に徒歩による探査が可能な測線を設定し、2014年に予察的な探査（約4km）、2016年に本格的な探査を行った（Fig.2：石川ほか、2017）。

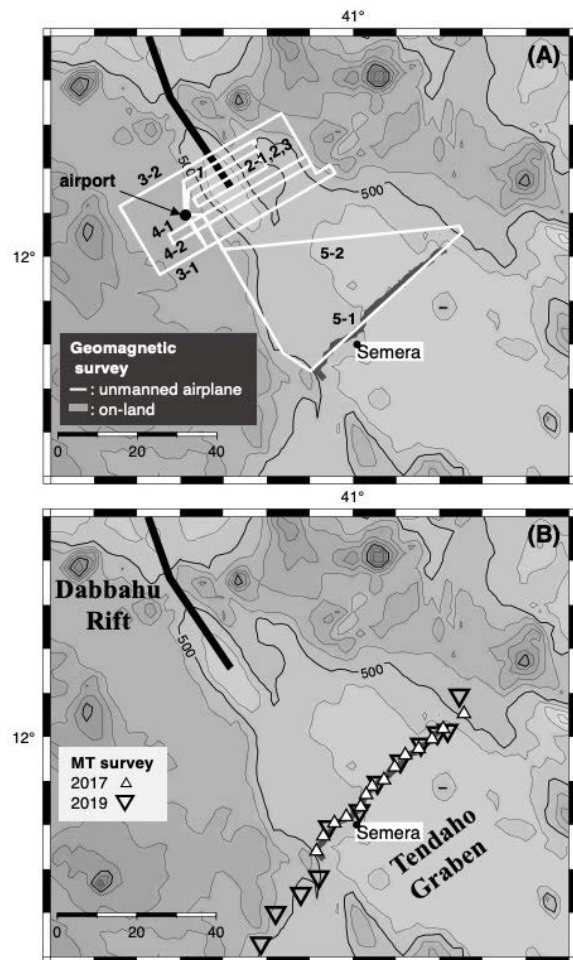


Fig.2. (A) Geomagnetic surveys. On-land geomagnetic surveys (gray line) and flight tracks of an unmanned airplane for aero-geomagnetic survey (wight lines). (B) MT surveys.

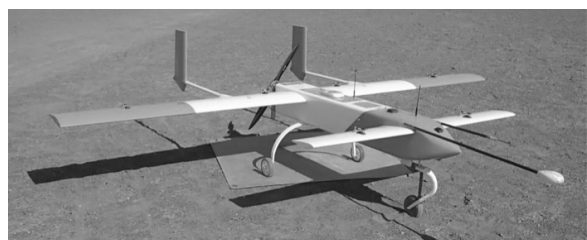


Fig. 3. Small unmanned airplane “Phoenix-LR”.

(2) 無人小型飛行機による航空磁気探査

本研究において開発した無人小型飛行機、Phoenix-LR（Fig. 3）、の仕様は以下の通りである。

- エンジン：120ccガソリンエンジン
- 翼長：3.2 m
- 機体重量：25 kg（燃料なし）
- 燃料搭載量：最大20リットル
- 搭載可能重量：5～15kg
- 飛行速度：30 m/s
- 航続距離：1000 km（燃料満載時）

不測の事態を考慮し、2機体 (Phoenix-LR07, 08) 作成し、調査に導入した。磁気センサーにはテラテクニカ製機体搭載用フラックスゲート磁気センサーシステムFLFG17 (精度0.1nT, 測定周期1秒) を用いた。また、飛行状況や地表の状況を把握するために小型ビデオカメラ (Kodak PIXPRO SP360) を機体に組み込んで空撮を行った。

無人飛行機をエチオピアに持ち込み、調査をするための許可を実際に得るまでに多年を有した。関係するエチオピアの政府機関や民間航空局に対して、エチオピアの共同研究者の継続的な折衝により、2018年12月によりやくエチオピア政府機関INSA (Information Network Security Agency) から、アジスアベバ大学との共同研究として無人飛行機の持込と使用の許可が得られた。2019年の調査において、機体の通関、調査地での調査の承諾、現地飛行場との連絡等、無人飛行機の使用に関することにINSAとアジスアベバ大学の全面的な協力・支援が得られ、無人飛行機による航空磁気探査を実施することができた。調査時にはINSAから無人飛行機の技術者2名の参加があった。

現地調査において、まずは、宿泊ホテルで小屋を借り上げ、機体の組立とエンジンや制御システムの調整作業を行った (11/1~4)。探査予定地のDubbahu RiftとTendaho Grabenの中間位置に無人飛行機の滑走路を設定した (Fig. 2(A))。滑走路として大きな礫や草がない砂地の平原を選んだ。滑走路設定地に大きなテントを建て、機体の整備と制御のための地上基地を設けた (12.098733°N, 40.612701° E, 標高622m)。11/5から機体を地上基地に移して調整作業を開始した。調査期間中、機体はテント内に残置し、昼夜の監視のための人員を雇い上げた。機体の制御装置内の異常な温度上昇が認められ、簡易の冷却装置を組み入れるなどの対応に2日間を要した。11/7から試験飛行を開始して調整作業を進め、11/8から航空磁気探査を開始した。暑さへの対応のため、飛行時間は日出 (午前6時) から原則的に昼までとしたので、宿泊ホテルから地上基地への出発は午前4時になった。無人飛行機の飛行状況はTable 1の通りである。

Table 1. Operations of unmanned airplane.

Date	Flight No.	Flight time	Mission
2019/11/7	19LK01	0h 31m	Test flight: 600m MSL (300m AGL)
2019/11/8	19LM01	1h 05m	Test flight: 1200m MSL (600m AGL)
2019/11/8	19LM02	0h 50m	Survey line_1 (round trip) [1200m]
2019/11/9	19LN01	0h 34m	Test flight : Converter output check
2019/11/9	19LN02	1h 05m	Survey: line_2-1, 2-2 and 2-3 [1200m]
2019/11/10	19LO01	1h 41m	Survey: line_3-1 and 3-2 [1200m]
2019/11/10	19LO02	1h 00m	Survey: line_4-1 and 4-2 [1200m]
2019/11/11	19LP01	1h 51m	Survey: line_5-1 and 5-2 [1250m]
Total		8h 37m	[MSL: mean sea level, AGL: above ground level]

航空磁気探査のための飛行は5回実施できた (Fig. 2(A), Table 1)。Dubbahu Riftでは、2005-09年のプレート拡大現象時に貫入したと推定されている岩脈の位置を横断する測線、Tendaho Grabenでは2016年の地上磁気探査の測線上空を含み、Tendaho Grabenを横断する測線を設定し、磁気探査を行った。飛行高度は、測線1から測線4では標高1200m、測線5では1250mに設定した。試験飛行を含み、全飛行時間は8時間37分、総飛行距離は約900kmとなった。航空磁気探査の際には、滑走路及び地上基地から約100m離れた2地点で、それぞれ、カナダGEM System社製オーバークラウド磁気計GSM19とテラテクニカ製搭載用FG磁気センサーシステムFLFG17を用いて連続的な地磁気定点観測を行った。FLFG17は温度変化を抑えるために約30cm地面を掘って埋設した。

2.2 MT探査

MT探査は2016年に実施した地上磁気探査の測線とその延長線上で、2017年と2019年に実施した (Fig. 2(B))。観測の概要をTable 2に示す。

Table 2. Summary of MT surveys in 2017 and 2019.

Site	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	Period of observation [UTC] date,		Measured
				start	end	
2017						
TGA001	41.25738	12.05238	502	2017, 10/29,	05:26 - 13:14	3H2E
TGA002	41.20947	12.01832	380	2017, 10/29,	04:25 - 13:48	3H2E
TGA003	41.18357	11.99467	369	2017, 10/28,	05:32 - 14:32	3H2E
TGA004E	41.15255	11.97277	361	2017, 10/28,	04:29 - 13:02	2E
TGA005	41.12155	11.95833	369	2017, 10/28,	03:48 - 13:46	3H2E
TGA006	41.09708	11.93103	377	2017, 10/27,	04:11 - 14:23	3H2E
TGA007E	41.07185	11.90208	357	2017, 10/27,	04:56 - 13:56	2E
TGA008	41.04463	11.88760	362	2017, 10/28,	07:49 - 13:14	2E
TGA009E	41.03058	11.86895	386	2017, 10/27,	05:59 - 10:54	3H2E
TGA010	41.01815	11.84122	388	2017, 10/27,	07:28 - 12:40	2E
TGA011E	40.98498	11.81850	422	2017, 10/30,	04:11 - 13:30	3H2E
TGA012E	40.95272	11.80397	432	2017, 10/31,	04:00 - 13:05	3H2E
TGA013	40.93152	11.77418	410	2017, 10/31,	05:06 - 14:09	2E
TGA014	40.91602	11.74005	432	2017, 10/31,	04:51 - 13:44	2E
				2017, 10/31,	06:21 - 14:09	3H2E
				2017, 10/30,	06:43 - 14:26	3H2E
2019						
				start	end	
TGA113	41.2466617	12.0943716	567	2019, 11/2,	07:37 - 11/4, 06:58	3H2E
TGA112	41.2194386	12.0145799	381	2019, 11/4,	08:34 - 11/6, 05:30	3H2E
TGA111	41.1957942	12.0088196	386	2019, 11/2,	09:54 - 11/4, 09:16	2E
TGA110	41.1575935	11.9828184	378	2019, 11/4,	10:32 - 11/6, 04:51	2E
TGA109	41.1101101	11.9446887	376	2019, 11/2,	11:47 - 11/5, 05:58	3H2E
TGA108	41.0571621	11.8961771	368	2019, 11/3,	06:00 - 11/5, 06:39	2E
TGA106	41.0155967	11.8316503	397	2019, 11/6,	08:02 - 11/9, 07:20	3H2E
TGA105	40.9444742	11.7952985	438	2019, 11/6,	10:15 - 11/8, 08:05	2E
TGA104	40.9212505	11.6812970	475	2019, 11/5,	11:43 - 11/7, 05:50	3H2E
TGA103	40.8796392	11.6435061	469	2019, 11/7,	07:42 - 11/9, 03:44	2E
TGA102	40.8212477	11.5998859	540	2019, 11/7,	09:29 - 11/9, 05:16	3H2E
TGA101	40.7869895	11.5306273	511	2019, 11/7,	11:52 - 11/10, 17:30	2E

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

2017年のMT探査の概要は石川ほか (2018) のTable 1に示しているが、その表に間違いがあったので、ここに再掲する。2017年は約45kmの測線上に14地点を設け、各観測点では2~4時間の観測を行った。1日で2~4地点、合計5日間の探査となった。観測には、MTU5A (Phonexi Geophysics) とELOG1K-PHX (NT system design) を用いた。2019年は測線を東西方向に広げ、約80kmの区間に12地点を設け、各点2~3昼夜の観測を行った。観測にはNT system design のELOG-MTとELOG-PHX を用いた。観測中の機材の監視の

ための人員を雇いあげた。2017年の経験を踏まえて、2019年は簡易タープを設置するなど、機材と監視者の暑さ対策に苦心した。いずれの探査においても、人工的なノイズは極めて少なかったが、地磁気変動が極めて静穏であったため、観測信号は低いものであった。

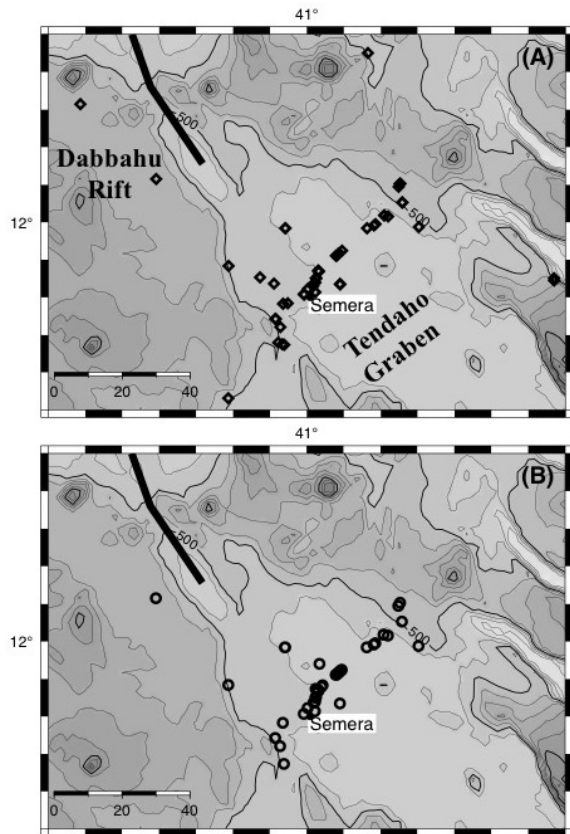


Fig.4. Maps showing sampling localities of block samples for petrological analyses (A) and sampling sites for paleomagnetic analyses (B).

2.3 地質調査・岩石試料採取

Kidane et al. (2003) に基づくと、Tendaho Grabenには、標高500m以下の低地部（幅約50km）に約1Maより若い溶岩流（Recent Basalt）が広く分布し、それ以东・以西には約1Maより古い溶岩流（Upper Stratoid）が分布している。また、graben東端域には、年代的に上記の2つの間にあるとされるGulf Basaltが分布している。岩石学的・古地磁気学的解析のために、主にTendaho Grabenから広範囲に渡って玄武岩溶岩流と一部に分布している流紋岩を採取することができた（Fig. 4）。採取試料の総計は岩石学的解析用試料が93個、古地磁気学的解析用試料が198個（61地点）となった（Table 3 and 4）。岩石試料の採取地点の情報はすでに石川ほか（2017, 2018）で報告しているが、既報告の情報に間違いがあったので、本稿に修正して再掲載している。

Table 3. Summary of rock samplings for petrological analyses between 2016 and 2019.

sample no.	date (mm/dd/yy)	latitude (°N)	longitude (°E)	altitude (m)	rock type
[2016]					
16AF001	12/08/16	11.806642	40.992294		basalt lava
16AF002	12/09/16	12.018080	41.209681		basalt lava
16AF003	12/08/16	12.018080	41.209681		basalt lava
16AF004	12/08/16	12.017970	41.208811		basalt lava
16AF005	12/08/16	12.018253	41.208647		basalt lava
16AF006	12/08/16	11.983992	41.162683		basalt lava
16AF007	12/08/16	11.983992	41.162683	372	basalt lava
16AF008	12/08/16	11.984042	41.162753	378	basalt lava
16AF009	12/09/16	11.910553	41.078333		basalt lava
16AF010	12/09/16	11.910553	41.078611		basalt lava
16AF011	12/09/16	11.871286	41.030725	435	basalt lava
16AF012	12/09/16	11.869878	41.031353	422	basalt lava
16AF013	12/09/16	11.868986	41.031964	410	basalt lava
16AF014	12/10/16	11.870089	41.030925	398	basalt lava
16AF015	12/10/16	11.870125	41.030983		basalt lava
16AF016	12/10/16	11.822228	41.002414	449	basalt lava
16AF017	12/10/16	11.822228	41.002414		basalt lava
16AF018	12/10/16	11.822228	41.002414		basalt lava
16AF019	12/10/16	11.822792	41.003225		basalt lava
16AF020	12/11/16	11.784030	40.947892		basalt lava
16AF021	12/11/16	11.813612	41.022500		basalt lava
16AF022	12/11/16	11.813692	41.022558		basalt lava
16AF023	12/12/16	11.720617	40.928100		basalt lava
16AF024	12/12/16	11.742117	40.915133		rhyolite
[2017]					
17AF001	10/26/17	11.808633	40.991356		basalt lava
17AF002	10/27/17	11.868167	41.031594	390	basalt lava
17AF003	10/27/17	11.868161	41.031611	393	basalt lava
17AF004	10/27/17	11.868247	41.031628	394	basalt lava
17AF005	10/27/17	11.868222	41.031692	395	basalt lava
17AF006	10/27/17	11.868192	41.031747	398	basalt lava
17AF007	10/27/17	11.868289	41.031767	398	basalt lava
17AF008	10/27/17	11.869500	41.016667		basalt lava
17AF009	10/27/17	11.869150	41.016667		basalt lava
17AF010	10/28/17	11.995019	41.185822	388	basalt lava
17AF011	10/28/17	11.991322	41.181544	400	basalt lava
17AF012	10/28/17	11.991494	41.181444	392	basalt lava
17AF013	10/28/17	11.834333	41.089883		basalt lava
17AF014	10/28/17	11.834550	41.090150		basalt lava
17AF015	10/26/17	12.052536	41.258103		basalt lava
17AF016	10/29/17	11.987472	41.303206	471	rhyolite
17AF017	10/29/17	11.844756	41.669350		basalt lava
17AF018	10/29/17	11.851008	41.669147		basalt lava
17AF019	10/29/17	11.851008	41.669147		basalt lava
17AF020	10/30/17	11.742561	40.914667		rhyolite
17AF021	10/30/17	11.839214	41.022747		basalt lava
17AF022	10/30/17	11.836592	41.018533		basalt lava
17AF023	10/30/17	11.836703	41.018458		basalt lava
17AF024	10/31/17	11.782833	40.935316		basalt lava
17AF025	10/31/17	11.782714	40.935094		basalt lava
[2018]					
18AF001	12/13/18	11.850500	41.024750	397	basalt lava
18AF002	12/13/18	11.850533	41.024700	398	basalt lava
18AF003	12/13/18	11.850450	41.024750	402	basalt lava
18AF004	12/13/18	11.850483	41.024733	397	basalt lava
18AF005	12/13/18	11.850333	41.024717	395	basalt lava
18AF006	12/13/18	11.850317	41.024750	392	basalt lava
18AF007	12/13/18	11.850283	41.024733	391	basalt lava
18AF008	12/13/18	11.850633	41.024767	394	basalt lava
18AF009	12/13/18	11.851417	41.024683	405	basalt lava
18AF010	12/13/18	11.851533	41.024683	402	basalt lava
18AF011	12/14/18	11.911233	41.080967		basalt lava
18AF012	12/14/18	11.912917	41.082833		basalt lava
18AF013	12/14/18	11.914900	41.084717		basalt lava
18AF014	12/14/18	11.916733	41.086167		basalt lava
18AF015	12/14/18	11.917367	41.087517		basalt lava
18AF016	12/14/18	11.924133	41.092567		basalt lava
18AF017	12/14/18	11.984000	40.942067		basalt lava
18AF018	12/14/18	11.983983	40.940933		basalt lava
18AF019	12/15/18	12.314300	40.386317		obsidian
18AF020	12/15/18	12.114967	40.591650		basalt lava
18AF021	12/16/18	11.883650	40.787750		basalt lava
18AF022	12/16/18	11.673250	40.938600		basalt lava
18AF023	12/16/18	11.673250	40.938600		basalt lava
18AF024	12/16/18	11.673300	40.938650		basalt lava
[2019]					
19AF001	11/01/19	11.835317	41.089400	369	basalt lava
19AF002	11/02/19	12.094383	41.248367	566	basalt lava
19AF003	11/03/19	12.102767	41.252967	567	rhyolite lava
19AF004	11/03/19	12.102700	41.252983	567	rhyolite lava
19AF005	11/03/19	12.102133	41.250867	566	rhyolite lava
19AF006	11/03/19	12.450055	41.165003		obsidian dome
19AF007	11/05/19	11.679200	40.922267		basalt lava
19AF008	11/06/19	12.015417	41.219967	416	basalt lava
19AF009	11/06/19	11.831267	41.015217	398	basalt lava
19AF010	11/07/19	11.530883	40.786933		basalt lava
19AF011	11/08/19	11.832583	41.016433	400	basalt lava
19AF012	11/08/19	11.832900	41.016583	415	basalt lava
19AF013	11/09/19	11.829217	41.016733	396	basalt lava
19AF014	11/09/19	11.674750	40.933417		rhyolite
19AF015	11/09/19	11.853150	40.872850	438	basalt lava
19AF016	11/09/19	11.853250	40.872900	429	basalt lava
19AF017	11/09/19	11.836367	40.910683		basalt lava
19AF018	11/11/19	12.052533	41.258133	508	basalt lava
19AF019	11/11/19	12.052533	41.258150	507	basalt lava
19AF020	11/11/19	12.052517	41.258117	508	basalt lava

Table 4. Summary of rock samplings for paleomagnetic analyses between 2014 and 2019.

site	date (mm/dd/yy)	latitude (°N)	longitude (°E)	altitude (m)	rock type	number
[2014]						
ET14-EA01	10/23/14	11.940083	41.034833	-	basalt lava	5
ET14-EA02	10/24/14	11.882806	41.043139	-	rhyolite lava	8
ET14-EA03	10/24/14	11.878833	41.040028	-	basalt lava	8
ET14-EA04	10/25/14	11.873331	41.024443	379	basalt lava	6
						27
[2016]						
ET16-SA01	12/7/16	11.806666	40.992284	442	basalt lava	3
ET16-SA02	12/8/16	12.017826	41.208097	408	basalt lava	4
ET16-SA03	12/8/16				basalt lava	3
ET16-SA04	12/8/16				basalt lava	3
ET16-SA05	12/8/16	11.983965	41.162701	380	basalt lava	3
ET16-SA06	12/9/16	11.910717	41.078800	400	basalt lava	3
ET16-SA07-1	12/9/16	11.872258	41.030067	442	basalt lava	1
ET16-SA07-2	12/9/16	11.871250	41.030733	434	basalt lava	1
ET16-SA08	12/10/16	11.870090	41.030907	398	basalt lava	3
ET16-SA09	12/10/16				basalt lava	3
ET16-SA10	12/10/16	11.822220	41.002437	469	basalt lava	3
ET16-SA11	12/10/16				basalt lava	1
ET16-SA12	12/11/16	11.720653	40.928136	430	basalt lava	3
ET16-SA13	12/11/16	11.813721	41.022513	450	basalt lava	3
ET16-SA14	12/9/16	11.922309	41.092625	386	basalt lava	1
ET16-SA15	12/9/16	11.911205	41.079602	410	basalt lava	1
						total: 39
[2017]						
ET17-01	10/27/17	11.868150	41.031581	389	basalt lava	3
ET17-02	10/27/17	11.868153	41.031603	389	basalt lava	3
ET17-03	10/27/17	11.868231	41.031625	391	basalt lava	3
ET17-04	10/27/17	11.868239	41.031686	394	basalt lava	3
ET17-05	10/27/17	11.868197	41.031739	397	basalt lava	3
ET17-06	10/27/17	11.868308	41.031753	399	basalt lava	3
ET17-07	10/27/17	11.869511	41.031525	427	basalt lava	3
ET17-08	10/27/17	11.869128	41.031761	422	basalt lava	2
ET17-09	10/28/17	11.995044	41.185811	387	basalt lava	3
ET17-10	10/28/17	11.991453	41.181550	393	basalt lava	3
ET17-11	10/28/17	11.991347	41.181542	398	basalt lava	3
ET17-12	10/28/17	11.834547	41.090147	370	basalt lava	3
ET17-13	10/29/17	12.052583	41.258111	504	basalt lava	3
ET17-14	10/29/17	11.987556	41.303222	462	rhyolite	3
ET17-16	10/30/17	11.742528	40.914639	467	rhyolite	3
ET17-17	10/30/17	11.839167	41.022806	395	basalt lava	3
ET17-18	10/30/17	11.836667	41.018472	395	basalt lava	3
ET17-19	10/31/17	11.782972	40.935389	422	basalt lava	3
						total: 53
[2018]						
ET18-01-1	12/13/18	11.850590	41.024747	396	basalt lava	3
ET18-01-2	12/13/18	11.850637	41.024756	397	basalt lava	3
ET18-01-3	12/13/18	11.850654	41.024747	404	basalt lava	3
ET18-01-4	12/13/18	11.850694	41.024774	405	basalt lava	3
ET18-01-5	12/13/18	11.850515	41.024761	396	basalt lava	3
ET18-01-6	12/13/18	11.850446	41.024737	395	basalt lava	3
ET18-01-7A	12/13/18	11.850324	41.024753	391	basalt lava	2
ET18-01-7B	12/13/18	11.850304	41.024735	391	basalt lava	2
ET18-01-8	12/13/18	11.850303	41.024734	389	basalt lava	3
ET18-02-9A	12/13/18	11.851184	41.024654	396	basalt lava	2
ET18-02-9B	12/13/18	11.851198	41.024660	400	basalt lava	2
ET18-02-10	12/13/18	11.851290	41.024628	400	basalt lava	3
ET18-04	12/14/18	11.984012	40.942109	381	basalt lava	3
ET18-05	12/14/18	11.983883	40.940939	375	basalt lava	3
ET18-06	12/15/18	12.114976	40.591707	637	basalt lava	3
ET18-07	12/15/18	11.883737	40.787753	474	basalt lava	3
ET18-03	12/14/18				basalt lava	8
(sample #)						
133		11.912906	41.082833	434		
134		11.914883	41.084731	424		
135		11.916731	41.086180	429		
136		11.917366	41.086933	420		
137		11.917366	41.086933	420		
138-1		11.917393	41.086901	419		
138-2		11.919593	41.089999	406		
139		11.921970	41.092290	395		
						total: 52
[2019]						
ET19-01	11/2/19	12.094350	41.248397	567	basalt lava	2
		12.094381	41.248375	566		1
ET19-02	11/3/19	12.102683	41.252978	567	rhyolite lava	3
ET19-03	11/6/19	12.01538	41.22007	416	basalt lava	3
ET19-04	11/6/19	11.83137	41.01522	397	basalt lava	3
ET19-05	11/10/19				basalt lava	15
(sample #)						
213		11.91713	41.08697	423		
214		11.91715	41.08698	422		
215		11.91713	41.08697	423		
216		11.91710	41.08698	423		
217		11.91708	41.08700	423		
218		11.91707	41.08700	423		
219		11.91720	41.08697	422		
220		11.91720	41.08697	422		
221		11.91720	41.08700	422		
222		11.91715	41.08697	423		
223		11.91715	41.08697	423		
224		11.91727	41.08697	423		
225		11.91672	41.08698	425		
226		11.91668	41.08698	425		
227		11.91670	41.08698	425		
						total: 27

3. おわりに

当初は、Dubhahu Rift, Tendaho Grabenの広範囲において地上探査、無人飛行機による航空探査をすることを計画(石川ほか, 2017)していたが、現地での巡検・調査により状況を把握するに連れて、やはりプレート拡大境界にあるアフアール凹地では、傾動地塊、溶岩流が広く分布することから、徒歩や車によるアクセスは困難であることがわかった。結局は地上での調査は主要道路沿いと、Tendaho Grabenでの1測線になった。それでも、過去約100万年間での拡大現象で形成されたと考えられるTendaho Grabenの全体をカバーする測線での探査が実現できた。このような地形的な制約があるところで、地球物理学的探査に無人飛行機が有用であることがわかった。エチオピアでの無人飛行機の持込・利用の許可が得られるまで時間がかかり、2019年に5日間の探査を行っただけであるが、当初の狙いであったプレート拡大軸を横切る測線での磁気探査を最低限はすることができた。エチオピアでは正式には初めての科学的な調査における無人飛行機の利用とのことである。暑さや砂塵への対策、砂地の滑走路への対応等を考えていくことで、より有効な利用が可能である。

これまでの調査研究において、エチオピアにおける海外研究者との良好な国際共同研究の基盤を構築することができた。ひとえにカウンターパートのおかげである。今後、更なる共同研究と研究交流の発展を期待したい。

参考文献

- 石川尚人・吉村令慧・Tefsaye Kidane・加々島慎一・東野伸一郎・Ameha. M. Mulunch・望月伸竜・北川桐香・乙藤洋一郎・小原徳昭・船木實・小木曾哲 (2018): エチオピア・アフアール凹地、海洋底拡大軸域での地球電磁気学的探査、京都大学防災研究所年報、第61号B, 356-359.
- 石川尚人・吉村令慧・Tefsaye 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・アフア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.
- 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.

Kidane T., V. Courtillot, I. Manighetti, L. Audin, P. Lahitte, X. Quidelleur, P-Y. Gillot, Y. Gallet, J. Carlut, T. Haile (2003): New paleomagnetic and geochronologic results from Ethiopian Afar: Block rotations linked to rift overlap and propagation and determination of a 2 Ma reference pole for stable Africa, *J. Geophysical Research*, 108 (B2), 2102,

doi:10.1029/2001JB000645, 2003

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 : 2020年8月31日)