

「エチオピアの大地で海洋底拡大現象を探る」
 エチオピア・アフール凹地での国際共同研究の実情報告
 “Research on the process of sea-floor spreading on the land in Ethiopia”
 Report of the international cooperative research at Afar depression, Ethiopia

石川尚人 (富山大学)

Naoto ISHIKAWA (Toyama University)

Abstracts

In order to clarify the formation process of magnetic stripes and structure under a sea-floor spreading center at the divergent plate boundary, we have been 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 introduce an outline of our project and report our activities mainly in this four-years research period.

1. 研究プロジェクトの概要

そのほとんどが海洋下で起こっているプレート拡大境界での海洋底の地磁気縞状異常の獲得形成過程を、我々が直接的に探査することは難しい。そこで、陸上において海洋底拡大現象が進行しつつあるエチオピア・アフール凹地を対象にし、プレート拡大軸域での磁気異常の分布と構造、その形成過程を明らかにする目的で、磁場探査、MT探査といった地球電磁気学的探査を主体とする調査研究をエチオピアの研究者との国際共同研究として行っている。今回は、そのプロジェクトの概要の紹介し、主にここ4年間の我々の野外調査の実情を報告する。

エチオピア・アフール凹地は、ヌービヤプレート・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(図1)。そこは大陸リフティングから進行して、現在海洋底拡大現象の開始時期の段階にあり、中央海嶺が陸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 Rift: 図1)では、2005-10

年にかけて、活発な地震活動と正断層系の形成があり、一部に溶岩の噴出が見られた。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(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と推定されている(e.g. Ebinger et al., 2010)。

よって、この地域は海洋底拡大軸域の地下構造や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。

そこで我々はアフール凹地・Dabbahu Riftを対象に、「エチオピア・アフール凹地、陸上露出した海洋底拡大軸域での地球電磁気学的調査、On-land geo-electromagnetic research on a subaerial sea-floor spreading center in Afar depression, Ethiopia」(仮称: Afar Project)として、小型無人飛行機を活用した航空探査と、地形的制約で地域は

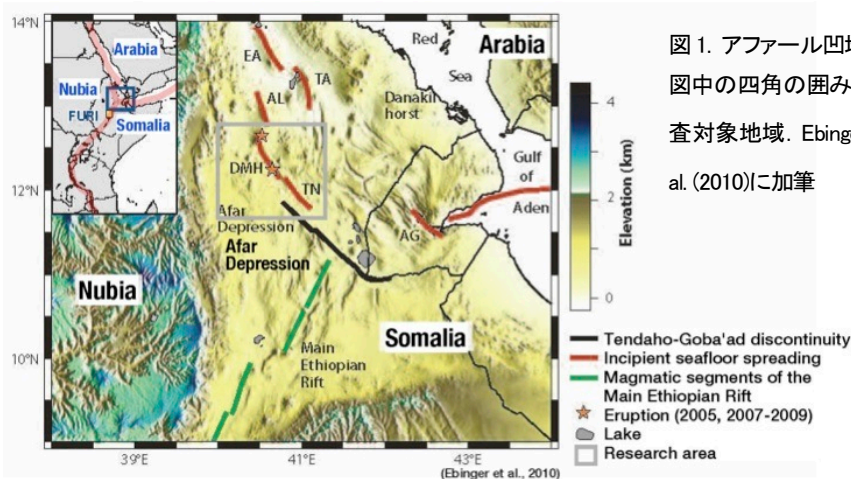


図1. アフール凹地。
 図中の四角の囲みが調査対象地域。Ebinger et al. (2010)に加筆

限定されるものの、試料採取を伴う直接的な地上調査を計画した（図 2）。

航空探査では、低飛行高度での広域で詳細な空中磁場探査と地表の画像撮影を行うこととした。当初計画において、2005～2010年のプレート拡大現象発生期間に岩脈の貫入が想定された地域とその周辺域を調査対象として、調査領域を以下のように設定した。

A1, A2, A3 (60×40 km) : 飛行高度 2000m [対地高度 350～1650m]、5 測線 (60km)-10km 間隔

B1, B2 (40×15 km) : 飛行高度 1000m [対地高度 300～650m]、7 測線 (40km)-2.5km 間隔

B3, B4, B5 (20×20 km) : 飛行高度 1000m [対地高度 300～650m]、9 測線 (20km)-2.5km 間隔

この航空探査のために、小型無人飛行機（図 3）を 2 機制作することとし、1 機を探査用、もう 1 機をトラブル時のバックアップとして現地に持ち込むことを考えた。

地上探査では、岩脈貫入想定位置とその延長線部を横切る測線を 4 つ設定し、磁場探査と MT 探査を行い、その探査に随行しながら、地表溶岩流の試料採取を行うこととした。

空中・地上磁場探査から詳細な磁気異常マップを構築し、MT 探査結果とあわせて、地下構造を地球電磁気学的視点から明らかにすること、採取岩石の古地磁気・岩石磁気学的解析、および岩石学的解析から、拡大軸域での溶岩流発生の時空間的過程の解明と磁気異常・地下構造解析のための磁気特性の把握をすることを目的とし、Dabbahu Rift の磁気異常の分布と構造、その形成過程の解明することを目論んだ。

プロジェクト参加者は、発足時から数えると 18 名となる。日本側研究者 10 名、日本側技術者 3 名（無人飛行機の制作・操縦、磁場探査・無人飛行機制御のハードウェア開発等）、日本側学生 1 名、エチオピア・アジスアベバ大学の研究者 2 名、エチオピア側技術者 2 名（INSA, Information Network Security Agency）であり、大学・研究機関等所属機関は 12 機関となった。このプロジェクトを計画し実現できたのは、強力なカウンターパートとして、アジスアベバ大学の Tesfaye Kidane Birke 教授がいて、その後 Ameha A. Mulneh 博士が参画してくれたことにある。このプロジェクト期間内に日本側・エチオピア側の学生を調査補助として現地に行く機会をつくることを意図したが、現地調査の時期と資金面の関係で、日本側 1 名だけになってしまった。

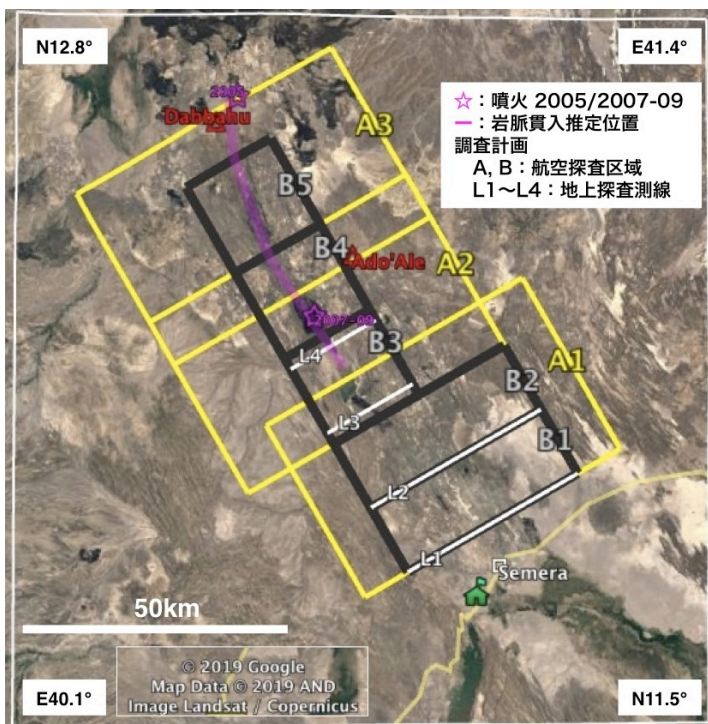


図 2. Dabbahu 火山周辺域での調査計画



図 3. 航空探査のために開発した小型無人飛行機 Phoenix LR.
翼幅 3.2m, 120cc ガソリンエンジン
飛行速度 100km/h

2. プロジェクトの実施結果

下記の通りに本プロジェクトのための助成金を獲得して、調査研究を進めてきた。

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)
研究課題「エチオピア・アフア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」

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
研究課題「エチオピア・アフアール凹地、海洋底拡大軸域の磁気異常探査に関する国際共同研究」

2017～2019 年度

日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究A (海外学術)
研究課題「無人小型飛行機によるエチオピア・アフアール凹地、プレート拡大軸域の磁気異常解析」

この研究課題において、以下の通りにエチオピアへの渡航、現地調査を行った。

渡航期間：

2014.10.17～10.30 [調査5日間]：現地の状況把握のための巡検、予察的調査

2016.12.3～16 [調査5日間]：地上磁場探査、地質調査・試料採取、

2017.10.22～11.5 [調査6日間]：MT探査、地質調査・試料採取

2018.10.6～11.5：無人飛行機のエチオピアへの持込・使用に関する交渉

2018.12.10～21 [調査4日間]：地質調査・試料採取、次年度調査のための現地状況調査

2019.10.27～11.17 [調査10日間]：無人飛行機による航空探査、MT探査、地上磁場探査、地質調査・試料採取

エチオピア・アフアール地域はアフリカ大地溝帯の北西部にあり、大陸分裂が進行した低地が広がり、気候区分はステップ気候である。調査対象地域の中心都市 Semera は、北緯約 12 度、東経約 41 度、標高は約 420m で、年間平均気温は 28°C、年間降水量は約 203 mm とされている。雨季 (4 月～9 月) と乾季 (10 月～3 月) があり、現地での調査活動は、比較的涼しく、気候が安定している乾季に、参加者の都合も加味して、10 月後半から 12 月の時期に設定した。それでも、日中の気温は 40°C 近くまで上昇し、人員・機材への暑さ対策が重要であった。

地上探査は磁場探査・MT探査は計画時に設定した L1 測線付近の 1 測線のみとなった (図 4, 5)。これは、調査地域には正断層運動による傾動地塊と溶岩流が広く分布するので (写真 1, 2)、車や徒歩による移動・探査が難しかったためである。徒歩による磁場探査は、2014 年に約 4km の予察的な探査を行い、それを踏まえて準備し、2016 年に 4 日間かけ約 56.8km (沿面長約 68.5km) の探査を行った (図 4)。高低差約 90m になる測線であった。その際に磁場観測の基準点を Samara 大学構内に学長の許可を得て設置して、定点連続観測を行った。航空磁場探査の際の基準点にもなる

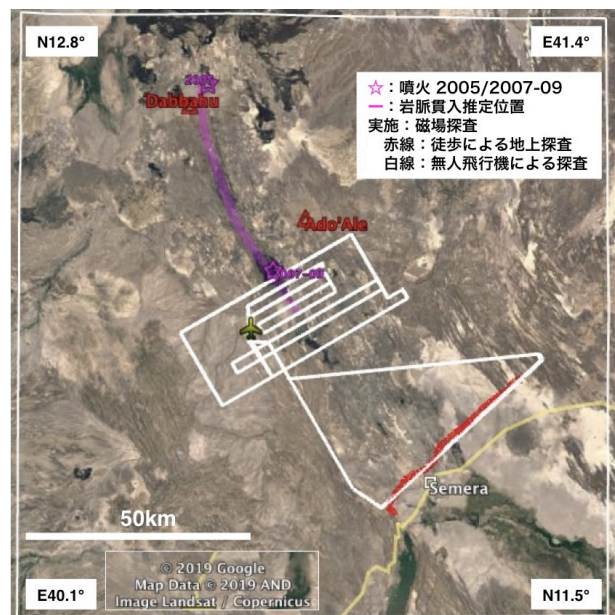


図 4. 調査実施状況：磁場探査
赤線：徒歩による地上磁場探査
白線：無人飛行機による空中磁場探査

と考えていたが、2018年の現地調査時に再訪した際に、大学施設の建設工事で定点がなくなっていることがわかった。MT探査は、磁場探査の測線とその延長上で2回実施した(図5)。2017年は約50kmの区間に14地点を設け、各点約6時間の観測を行った。2019年は測線を広げ、約80kmの区間に12地点を設け、各点2昼夜の観測を行った。観測時は、機材の監視のために現地の人を雇いあげた。2016年の経験を踏まえて、機材と監視者の暑さ対策に苦心した。地質調査・岩石試料採取は、磁場探査・MT探査の測線上で、それらの探査に随行しながら行うと共に、観測地点や無人飛行機用の滑走路の設定のためのルート調査時に行った。総計として、岩石学的分析用試料を41地点で90個、古地磁気・岩石磁気学的解析用試料を51地点で206個、採取することができた(図6)。

無人飛行機による航空探査は、ようやく2019年になって、アジスアベバ大学とエチオピア政府機関 INSA

(Information Network Security Agency)の協力のもとで実現することができた(経緯は後述)。現地では、滞在ホテルに小屋を確保し、無人飛行機の機体の組立・調整を行なった後、調査実施地に持ち込んだ。現場での試験飛行を繰り返しながら調整をし、最終的に4日間で5回の探査飛行を実施することができ、飛行距離は約600kmとなった(図4)。計画したような面的な調査はできなかったものの、優先度に従って、岩脈貫入推定位置とその延長上の空域、地上磁場探査の測線の上空で空中磁場探査を行うことができた。

予察的な研究結果としては、2016年時の地上磁場探査から、測線中央部を軸とする長周期の正負の磁気異常があることがわかった。2017年のMT探査結果からは測線中央部に熱源の存在を示唆する低比抵抗域とその両側に高比抵抗域がある可能性が示された。これらのことから、測線中央部を軸としてプレート拡大現象が起こり、正負の磁気異常が形成されたことが示唆される。また、地上磁場探査から地表の溶岩流の分布を反映した短周期の磁気異常の変動があり、その変動幅は測線中央部の若い溶岩流において大きいことが示された。この短周期の極端な磁気異常変動と溶岩の残留磁化強度との対応を詳細に見るために、2019年の調査時にその特徴的な磁気異常が見られる地域で磁場探査と磁場の強弱に対応させた溶岩試料の採取を行った。

3. プロジェクトの経緯と実情

プレート拡大現象、それも海洋底拡大現象が地上で見られるというユニークな地域であるエチオピア・アファ

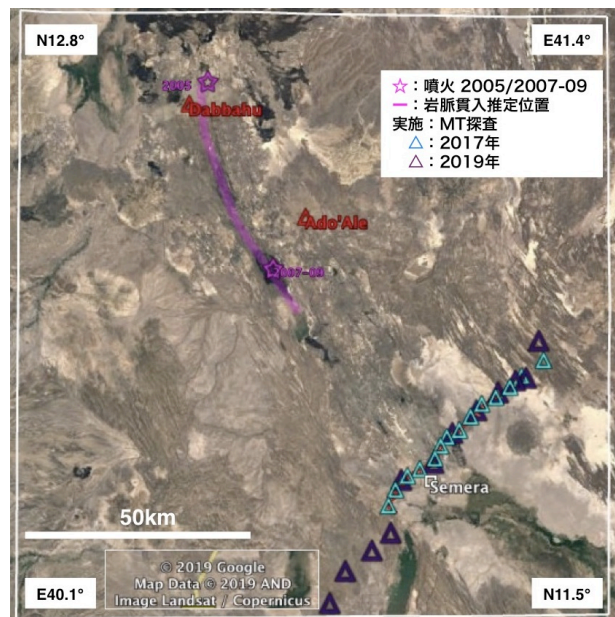


図5. 調査実施状況:MT探査

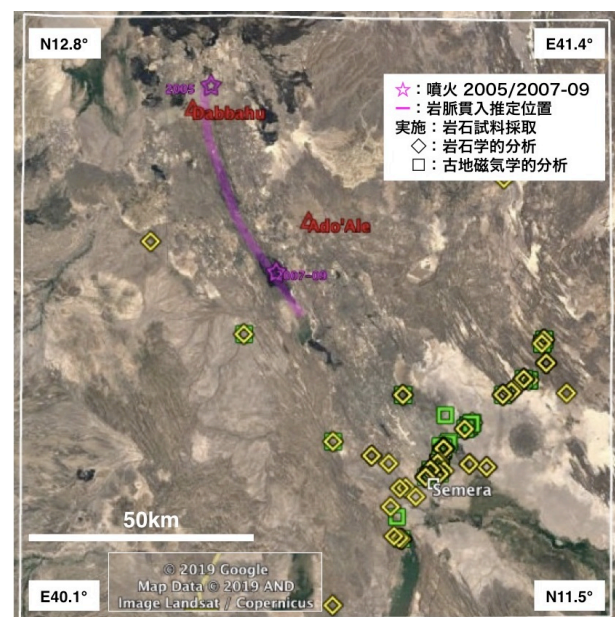


図6. 調査実施状況:岩石試料採取

ール凹地で無人飛行機を活用した空中磁場探査を行うという研究プロジェクトの発案は2007年まで遡る。そもそもは2007年9月に、同志社びわこリトリートセンターで「地磁気・古地磁気・岩石磁気『夏の学校』」が開催された際に、参加していた静岡大学・新妻先生、神戸大学・乙藤先生、国立極地研究所・船木先生（本プロジェクトの研究協力者ら）が相談し、国際共同研究として科研費への申請を思いついたものであった。その頃、乙藤先生とKidane教授はアフール地域で共同研究を行っていて、その研究集会にはKidane教授も参加し、アフール地域の構造運動に関する古地磁学的研究の成果を発表した。船木先生は無人小型飛行機を開発し、南極域での空中磁場探査を行っていた。そして、アフール地域でプレート拡大現象による変動が起こっていた時期でもある。これらのことから、本プロジェクトの原案を彼らが画策し、当時、研究代表者として科研費研究を行っていなかった私に申請することを要請した。「エチオピア・アフール地域に行ってみたいか？」と彼らに問われて、その場で「行きたい」とは即答したものの、その後は私の準備不足で科研費の申請をするまでには至らなかった。2010年に乙藤先生の招きで、彼の科研費でのアフール調査に参加する機会を得た。それにより現地の状況が把握することができ、その調査に同行していたKidane教授との交流も始まった。それを踏まえて2011年に初めて科研費に申請したが採択には至らず、2012年からは計画策定のための研究集会を年1回開催することとした。そのような中、京都大学の研究大学強化促進事業として、国際共同研究の萌芽を後押しする助成プログラム（略称：SPIRITS）が始まり、申請したところ採択された（2013-14年度）。これにより2014年に現在の主たる研究メンバーで予察的な調査することができた。相変わらず、科研費の不採択が続いたものの、2015年にJSPS・二国間交流事業共「オープンパートナーシップ共同研究」に申請したところ採択され（2016-2017年度）、2016年から野外調査を開始することができた。また、Kidane教授を京都大学の招聘外国人研究員（客員教授）として6ヶ月間招聘することができ、日本側メンバーとの研究交流も進展させることができた。2016年に科研費（基盤A 海外学術）を申請したところようやく採択され、2017-19年度での調査研究が実施できることになった。様々な機会や助成制度を利用して、準備や研究交流を継続できた事でプロジェクトの実現に繋がったと思う。

プロジェクトが実現し、現地で安全に調査が実施できたのは、前述したように信頼できる強力なカウンターパートがいたことに尽きる。アジスアベバ大学のKidane教授は地質学・古地磁気学を専門とし、アフール地域の構造発達史の研究を精力的にされてきて、大変多くの海外研究者と、エチオピアで国際共同研究を行ってきている。神戸大学・乙藤先生もその共同研究者の1人であって、Kidane教授は乙藤先生のもとで日本学術振興会ポスドク研究員として約2年間日本に滞在した経験もある。2018年からKidane教授の講座の助手であるAmeha博士のプロジェクトメンバーとなった。日本からの人員のビザの発給、調査機材の通関、調査地の調査許可、採取岩石試料の日本への持出しの許可等、調査に付随する諸手続は彼らを通じアジスアベバ大学からの申請としてなされた。その都度細かなトラブルは生じたものの、年毎によりスムーズに行われるようになっていた。

無人飛行機のエチオピアへの持込、探査のための使用許可は最終的には2018年12月におり、2019年に無人飛行機による探査が実現した。無人飛行機を含むドローンによる地球科学的な探査がなされたのは正式にはエチオピアで初めてであるという事であった。無人飛行機を用いた探査を行なうことは、2008年の段階でKidane教授の手配によりアジスアベバ大学からエチオピア空軍宛に申請がなされ、その際に許可は下りていた。無人飛行機の利用が可能ということでこのプロジェクトの計画を進めてきたが、科研費を獲得した2017年に2018年からの無人飛行機による調査のために、政府の諸機関やエチオピア民間航空局との折衝をKidane教授/Ameha博士が始めたところ、当初は担当機関がはっきりしなかった。そのうちにエチオピア民間航空局が担当することになり、2017年の渡航時に説明に行った。その時は「現在、無人機を含むドローンの使用に関する国内法の整備中で、それが整う2018年夏頃に使用に関する申請ができる」とのことであった。しかし、2018年の5月になって、夏ま

で利用申請ができるという状況ではない事が判明し、2018年の無人飛行機による探査はあきらめることになった。交渉のためだけに2018年10月に渡航し、無人飛行機関係の担当となったINSAに行き、プロジェクトと使用予定の無人機に説明を行った。その際には持込ることができる無人機の重量や利用法の制限に関する情報は得られたものの、持込・利用に関わる申請やその許可までには至らなかった。しかし、その後状況は急転し、同年12月の現地調査後に再び交渉のためにINSAを訪れたところ、INSAとアジスアベバ大学との研究協力のもとで、無人機の持込・利用の許可が下りた。無人機関係のエチオピア側での通関手続はINSAの責任で行い、調査時にはINSAの無人飛行機の開発・運用に関わる部署の職員・技術者が同行し、現地の空港や空軍との連絡等の諸事を行ってくれることになった。以前提示された制限も無くなった。この状況の変化は、エチオピアの政治状況の変化によるところが大きいと思われる。2018年4月にアビー・アハメド氏が首相に就任し、政策転換がなされ、様々な政治改革に着手した。長年続いていたエリトリアとの国境紛争も解決し、アビー首相はその功績で2019年にノーベル平和賞を受賞している。そのような状況変化で、INSAがドローン関係の担当部署となり、国外からの持込・利用に関し寛容となった。INSAではドローンの活用を積極的に考えていて、今回の我々の調査に同行する事で、制御システムや活用状況を知りたいとの意向があった。

この政治状況の変化は、調査地での調査許可の取り方等に変化をもたらした。2017年までは、現地での調査許可は、事前に連絡した調査地点の情報をもとに関係する行政区分毎にアジスアベバ大学が申請書を作成し、ほぼ一日かけて各段階の地方行政局（州と市のレベル）に赴いて許可を取った。あわせて、警察署にも行き、許可を取った。調査時は、警察官（銃を所持）と現地ガイド（警察署で選定）が必ず付いた。2018年からは、州・市レベルの地方行政局で許可を取る他に、更に下位の行政区画レベル（村または部落）にまで話しを通さなければならなくなり、村の長（地域住民の代表者）への面会が必要となった。その手続が十分ではなかった2018年は、調査中に住民に囲まれ、即刻立ち退かなければならなくなった事もあった。ただ、そこまで話しを通すと、村の長がガイドや観測機器の監視役の手配をしてくれるので、調査はトラブル無くすすめることができた。なお、警察署への許可や警察官の同行は必要なくなった。

エチオピアの政治状況の変化は、エチオピアでの野外調査活動にとって良い状況だと考えられている。例えば、アファール地方でも、エリトリアに近い地域には、海洋底拡大現象がより進み、海拔下の低地が広がる地域があり、溶岩湖があるエルタアレ火山などの火山活動も活発である。当初、その地域を調査したいという願望はあったが、国境紛争があり、外務省の海外安全情報での危険レベル3になっている国境地域に近いため、その地域は避け、調査地をダバフリフト地域（危険レベル1）にしたという背景もある。将来的にはエルタアレ火山周辺地域の調査もできることを期待したい。

暑さ対策の一つとして、日中12時～14時頃の屋外活動をなるべく避けるようにした。日出前の5時またはそれ以前から始動し、午後は15時頃から日没の18時までを調査時間に当てた。特に日出前からの始動は、実は調査野ために利用した車の運転手にとっては通常的时间外の労働であった。運転手らの調査に対する理解が得られたことでこのような調査が可能となった。車の利用（ドライバー付き）をお願いしたツアー会社は、アファール地域を良く知っているとともに、海外研究者の学術的調査へのサポート経験も豊富で、Kidane教授の参加した調査に同行した運転手もいた。我々の調査にも複数回参加した運転手もいて、我々のような調査に理解があり、観測機材設営時には、協力もしてくれた。また、継続して同じツアー会社を利用してきたことで、大型テント（無人飛行機による探査の基地）や発電機を無償提供してくれたり、経費の支払いに関する便宜もはかってくれたりした。このようなことも協力的なカウンターパートがいた事と多年の利用により信頼関係が築けた事によると思っている。

4. おわりに

若い研究者が海外にでたがらない
ということを最近良く聞く。海外調
査や国際共同研究には、誘われたホ
イホイと出かけることを勧める。そ
れにより、新たな研究の場や機会が
広がり、国内外の研究者と共同研究
をしていく関係が始まる。ただ、そ
の関係を維持して行くためには、資
金を確保して行く必要がある。我々
も今年度で科研費が終了するので、



写真 1. 傾動地塊と溶岩流(手前)

今後の調査研究と研究交流の継続のために資
金繰りに苦心しなくてはならない。

海外調査においては、気候・地形・情勢な
ど我々にはどうにもならないことが多くある。
調査現場を想像して、事前の準備は必要であ
るが、現場に入ってしまったら状況に合わせ
た柔軟な対応「現場合わせ」が必要となる。

このプロジェクトでは、ダバフリフト地域
で当初計画したような広範囲での調査はまだ
できていないものの、獲得した科研費の最終
年度に当たり、現場に応じた調査はできた
ものと考えている。今後のデータ・試料の解
析結果に期待したい。将来的なこととして、



写真 2. 拡大現象による割れ目。新しい溶岩流(手前)

エチオピア・アフール地域を対象とした調査研究としては、前述したエルタアレ火山地域での同様の調査を実施したいと考えている。また、エチオピアでの調査研究の継続により、プレート発散境界や、エチオピア及びアフリカの地学現象に興味を持った若手研究者の受け皿につながるようになれば良いと考えている。さらに、地球科学的な教育面での国際交流として、日本とエチオピアは異なるプレート境界に位置することから、専門課程の学部生や大学院生を対象にした両国での野外巡検を含む教育プログラムを構築することも魅力的である思う。

参考文献：

Ebinger C., A. Ayele, D. Keir, J. Rowland, G. Yirgu, T. Wright, M. Belachew and I. Hamling. Length and Timescales of Rift Faulting and Magma Intrusion: The Afar Rifting Cycle from 2005 to Present, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 38, 437–64, 2010.