

日独共同観測研究:大西洋トリスタン・ダ・クーニャホットスポット

馬場聖至(東京大学地震研究所)

Japan-Germany collaborative study: Tristan da Cunha hot spot in the Atlantic Ocean

Kiyoshi Baba (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Abstract

A marine magnetotelluric and seismic observation studies on Tristan da Cunha hot spot in the Atlantic Ocean was conducted in by a collaboration between Japanese and German research groups. I overview the study and the practical efforts of Japanese side, such as funding, preparing and execution of observation, data analysis and sharing, and publication. The success of the collaboration made a new relation between the researchers and led future collaboration.

1. はじめに

南大西洋のトリスタン・ダ・クーニャホットスポット(図 1)は、古典的プルーム理論によれば、マントル深部からの上昇流(プルーム) が地球表面に達して大規模な火成活動を引き起こし、南米大陸とアフリカ大陸を分裂させて、その後は大西洋の拡大に伴ってウォルヴィス海嶺を形成しつつ、現在の位置でなお火山活動を引き起こしている、と説明される。一方近年になって、地球上のホットスポットの多くは表層のテクトニックな活動の結果、直下のアセノスフェアから受動的にマグマが上昇した結果形成された火山である、との説が提示され、ホットスポットの成因論に大きな論争を引き起こしている。トリスタン・ダ・クーニャホットスポットについては、Courtillot et al. (2003) は、マントル深部起源のホットスポットと分類したが、Anderson (2005)は、表層のテクトニックな活動起源のホットスポットとして分類している。このような見解の相違を生む大きな要因の一つが、詳細な物理観測データの欠如である。前出の 2 論文とも分類の指標の一つとしてグローバルトモグラフィーによる地震波速度異常を用いているが、グローバルトモグラフィーでは十分な解像度の速度構造が得られているとは言えない。議論を進展させる上では、トリスタン・ダ・クーニャホットスポット周辺海域において高密度アレイによる物理観測を行い、マントル構造を高解像度で描像することが不可欠である。

このような背景のもと、ドイツの研究グループによってトリスタン・ダ・クーニャホットスポット周辺での海底物理観測が計画された。日本との

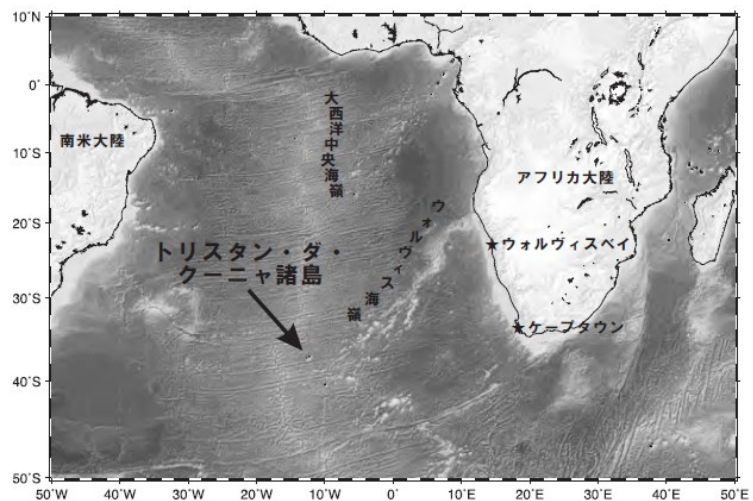


図 1. トリスタン・ダ・クーニャホットスポット周辺の海底地形図。

Fig. 1. Bathymetry map around the Tristan da Cunha hot spot.

共同研究は、ドイツグループの PI の一人である GEOMAR の M. Jegen 博士からの協力提案がきっかけで始まった。本論文では、研究成果に加えて、研究費の獲得、観測の準備と実施、データ解析、成果公表に至る過程で得た経験等を紹介する。

2. 研究費

ドイツの固体地球科学の研究グループは、German Research Foundation より補助金を得て 2008 年からの 5 年間、アフリカ・南米大陸の分裂と大西洋の形成プロセスを研究する巨大計画 (SAMPLE 計画) を実施していた。その一部としてトリストラン・ダ・クーニャホットスポットの海底電磁気・地震観測計画 (ISOLDE 計画) が、M. Jegen 博士、W. Jokat 博士、W. Geissler 博士の 3 名によって企画された。M. Jegen 博士は、観測を国際共同で進めるため、世界の主要な海底電磁気研究者に個別に協力を呼びかけていたが、そのうちの一人が、地震研究所の歌田久司教授 (現名誉教授) であった。ISOLDE 計画の研究費プロポーザルには、地震研グループが計画に参加することを表明する、歌田教授による Letter of Intent が添付された (その他の国からの協力は結局得られなかった)。

ドイツ側の研究費では、地震研の観測機材消耗品や輸送費、旅費等はカバーされない。そこで日本側は、私が研究代表者となり、歌田教授を研究協力者、M. Jegen 博士を海外研究協力者とする研究組織で、科学研究費補助金 (基盤研究 B・海外学術) に応募して、2011 年度より 4 年間の研究費を獲得した (課題番号 23403005)。

3. 観測

一般にマントル電気伝導度構造探査では、電磁気応答関数を十分な精度で推定するために数ヶ月以上の連続データを観測する必要がある。トモグラフィー解析を目的とした地震観測では多くの自然地震イベントを記録するために、やはりできるかぎり長期間観測することが望ましい。機器に搭載できる電池容量との兼ね合いや、機器の設置・回収には海況の良い夏場に航海を行うことが望ましいなどの事情もあり、約 1 年間の観測期間を設定することが多い。トリストラン・ダ・クーニャホットスポットでの観測では、20 点以上の観測点を設置して面的なアレイを組み、2012 年 1 月より約 1 年間観測を行って得られたデータを 3 次元解析することを目標としていた。

観測を準備するに当たっては、まず観測機材・人材を確保する必要がある。ドイツグループは、電磁気観測については GEOMAR から 18 台の海底電位磁力計 (ocean bottom electromagnetometer; OBEM) を、地震観測についてはドイツの海底地震計 (ocean bottom seismometer; OBS) プールより 24 台を出動させた。地震研究所では、約 20 台の OBEM を運用しているが、当時は北西太平洋での大型観測 (Normal Oceanic Mantle; NOMan) 計画を開始した直後であった。北西太平洋と南大西洋で観測期間 (機材の輸送にかかる期間も含む) が重複するため、トリストラン・ダ・クーニャホットスポットの観測に供出できる OBEM は 5 台として準備を始めた。ただし、2011 年 3 月の東北沖地震の影響でその年の北西太平洋航海が延期になった等の事情があり、予算の都合も合わせて最終的に 8 台の OBEM を供出することとなった。

次に人材であるが、幸い北西太平洋と南大西洋では季節が逆であるので、観測航海の時期が重複することはなく、私自身は両観測に参加することに支障はなかった。ただし OBEM のオペレーションは一人

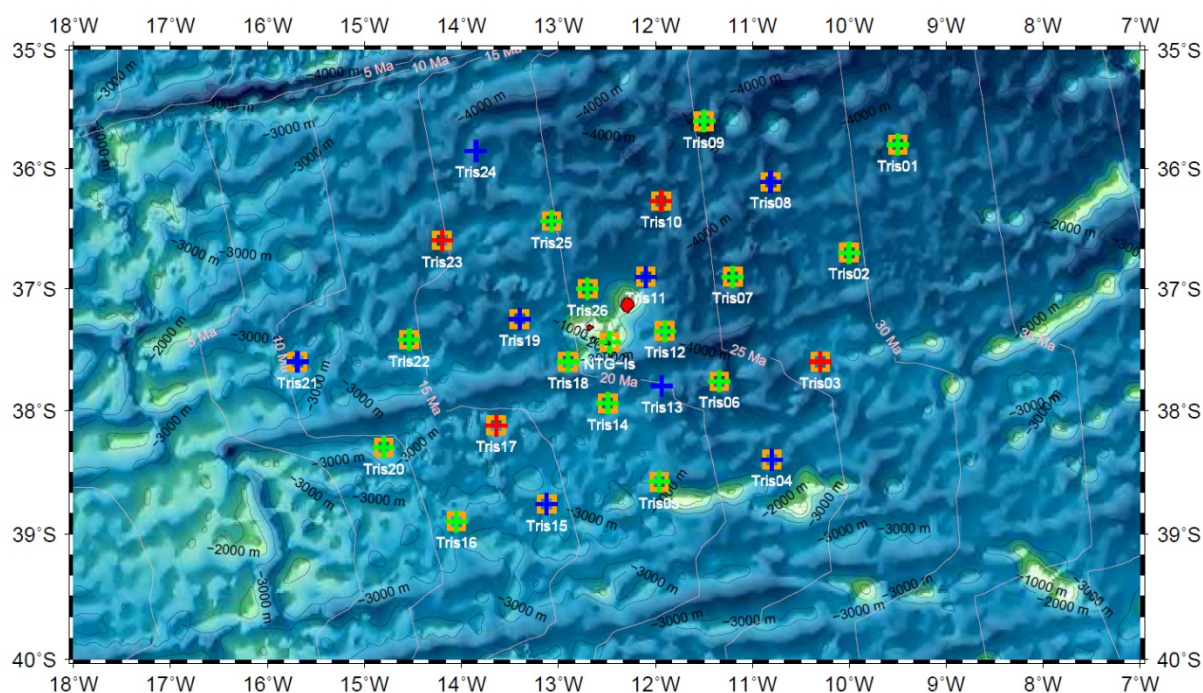


図 2. 海底地形図と観測アレイ。□、+、×、+ はそれぞれ OBS、GEOMAR OBEM (新型)、GEOMAR OBEM (旧型)、および地震研 OBEM を設置した観測点を表す。

Fig. 2. Observation array superimposed on bathymetry map. □, +, ×, and + indicate the sites that OBS, New-type GEOMAR OBEM, Old-type GEOMAR OBEM, and ERI OBEM were deployed, respectively.

では難しく、チームを組むことが必須である。当初は地震研究所の技術職員による支援を見込んでいたが調整が付かなかったため、OBEM の開発メーカーであるテラテクニカの技術者を 1 名雇った。

観測アレイは、航海前にドイツ側と電子メールで相談し、最終的には設置航海乗船後の打ち合わせで決定した。図 2 に最終的な観測アレイを示す。複数の研究機関の共同によるアレイ観測では、タイプの異なる機器を入れ子に配置することが一般的である。これは、機器にシステムティックな不具合が起こった場合にアレイのまとまった部分でデータ取得に失敗することを防ぐことに加え、機器の設置・回収作業を連続で行うことによる作業者の負担を軽減する意味もある。本観測の場合、結果として GEOMAR の新型 OBEM を設置したいくつかの観測点で解析に堪えないデータセクションを含み、そのうち 2 つの観測点 (Tris09 と Tris22) では、MT レスポンスを推定することができなかった。

設置航海は、ドイツの当時最新鋭の研究船 M.S. Merian を利用し、2012 年 1 月 16 日にナミビア・ウォルビスベイを出港し、2 月 16 日にブラジル・レシフェに入港するスケジュールで実施された。機材の輸送は、2011 年 5 月中旬から輸送代理店と相談をはじめ、本格的に準備を始めたのは 10 月中頃であった。20 フィートコンテナを借り、OBEM8 台と関連機材をすべてコンテナに乗せて輸送することとした。機材搭載地がウォルビスベイからその一つ前の寄港地であるケープタウン(1 月 4 日)へと変更になったこともあり、余裕を持ってクリスマス休暇前には現地へ届くよう計画し、最終的には、11 月 18 日に横浜港を出港、

12月21日にケープタウンに到着する輸送船を利用した。なお、海外への観測機材輸送では、関税が課されないようにATAカルネを適用したりするが、本研究のように海外で第3国の船に機材を搭載する場合(南アフリカでドイツ船に搭載)は、寄港地の国に輸入することにはならないので、関税の対象にはならない。このときは、受取人を研究船の船長宛とし、Invoiceを作成した。寄港地レシフェからは、北西太平洋の観測で使用するために持ち帰ることが必要な音響装置などのみを混載貨物として日本へ送り返し、その他の物品はドイツグループの荷物と一緒に、GEOMARで保管した。

回収航海は、2012年12月27日にウォルビスベイを出港し、1月21日にケープタウンに入港するスケジュールで実施された。研究船は設置航海と同じ、M.S. Merianを利用した。このときは、機材搭載はウォルビスベイで行われ、地震研からの荷物は無事に届いたが、ドイツの地震グループの荷物の一部が出港日までに間に合わないというハプニングがあった。幸いOBSの回収に不可欠な機材は揃っていたので、間に合わない荷物は入港地のケープタウンへ転送する手配をして予定通り出港した。ケープタウンから日本への機材の輸送は、20フィートコンテナを利用したが、このときはコンテナへの機材の積載を我々自身が行って、コンテナの施錠についても責任をもたされた(設置航海の時は、日本の輸送代理店がすべてやってくれた)。海外での観測では、とくに機材輸送には気を遣うことが多い。本研究でも、出入港地の船舶代理店とのやりとりでは、連絡がつかなかったり、予定が遅れたり、こちらの想定通りなかなか事が運ばずやきもきさせられることが多かった。機材輸送に関しては、準備も含めて時間的にも精神的にも余裕を持って望むことが重要である。

船上作業については、電磁気観測については大きなトラブルはなく、当初予定通り26台全てのOBEMを無事に設置・回収することができた。日本とドイツのOBEMはFluxgate磁力計とFilloux式銀・塩化銀平衡電極を用いて電磁場を計測するという点で、基本機能は同じであるが、耐圧容器や、浮力体、錘切離し装置など外装とそのデザインは異なる。地震研のOBEMは、ガラス球を耐圧容器兼浮力体として利



図 3. 左:設置航海にて GEOMAR の OBEM を投入する作業の様子。右:回収航海にて、地震研 OBEM を舷側で確保したときの様子。

Fig. 3. Left: Launching a GEOMAR OBEM in the deployment cruise. Right: Catching an ERI OBEM from the ship in the recovery cruise.

用している。GEOMAR の OBEM はチタン製のシリンダー容器に磁力センサーや記録装置を収容し、浮力体としてはシタティックフォームを用いている。錘切離し装置は、地震研 OBEM は電食式、GEOMAR の OBEM はモーター式であった。ドイツの技術者に聞いたところでは、ガラス容器は信頼できないとのことである。またモーター式切離し装置も、最初に全ての装置をかごに固定し、ウィンチで海中に降ろして動作試験を行い、パスしたものを OBEM・OBS に取り付けるといふ念の入れようであった。日本の機材はコンパクトであることが特徴の一つであるが、ドイツの OBEM・OBS は、サイズは大きいものの輸送時は 3 段重ねができるよう設計されており、機材をコンテナ輸送し海外で観測することに適していた。

船側の対応も、日・独で様々な違いがあつて興味深かつた。たとえばドイツの研究船では、航海士も甲板員も人数が少ない。ブリッジの当直は 1 人だけで、加えてたまに船長がいるだけであつた。また甲板作業は基本的に 2 人だけで、1 人がリモコン操作でクレーンを操り、もう一人がロープやフックを操って機器を投入したり、回収時に確保したりという作業を行う(研究者も水際まで来て作業に加わる)、という体制だつた。OBEM や OBS 回収時には、設置点から 1 マイル程度の距離を確保して待機し、ラジオビーコンで機器の浮上が確認できたらゆっくりと近寄りつつ探索していた。そのため潮流で機器が流されたとしても、船からはほぼ正面に浮上するので、前方に集中して探索を行うことができる。日本(JAMSTEC)の研究船の場合は、設置点から数 100m の距離で待機することがほとんどである。また、錘切離しのタイミングを調整して要員の交代時間に併せて浮上させるということもしばしば行われる。こうすると交代前後の航海士・甲板員で人数をかけて探索・揚収作業ができる。時に船の後方に機器が浮上するということもあるが、ビーコン信号の受信とほぼ同時か数分以内に視認し、甲板に揚収するまでに 20 分程度しかかからない。ドイツ船の作法は、日本のやり方に比べると時間がかかるが、作業人数では効率化されている。

4. データ解析・結果・公表

回収航海後の 2013 年 6 月、歌田教授と私で GEOMAR を訪問し、本観測のデータ解析・共有方針等を議論した。データ解析は、おおきく 1) 時系列データの 1 次処理、2) MT/GDS レスポンスの推定、3) インバージョンによる電気伝導度構造解析、の 3 段階に分けられる。時系列データの 1 次処理は、それぞれの研究機関で持ち出した OBEM について担当し、処理済み時系列データを両機関で共有することとした。また第 2 段階以降は共同で行うこととした。またこのとき、私が 2014 年以降に GEOMAR に長期滞在することが検討され、実際に 2015 年 7 月から 2016 年 1 月の約 7 ヶ月間の滞在として実現した。

実際のデータ解析は、GEOMAR 側は本研究に専念できる学生・ポスドクを確保することができなかったこと、地震研側は、私が NOMan 計画と掛け持ちのために、本研究に専念する時間がなかなかとれなかった等の事情により、1) は思うように進まなかつた。結局私がドイツへ渡航する段階で、地震研 OBEM の時系列データ 1 次処理と MT/GDS レスポンス推定が完了したのみであつた。GEOMAR の OBEM データについては、当時 GEOMAR のポスドクだつた J. Chen 博士が担当したが、随時私と議論しながら解析を進めた。また 3 次元構造解析については、GEOMAR 側に十分な know how がなく、地震研グループがこれまでに開発してきた詳細な地形効果を考慮した 1 次元平均構造および 3 次元構造推定手法(e.g., Baba et al., 2010; Tada et al., 2012; Baba et al., 2013)を、私が主となって適用した。科学的な詳細については、Baba et al. (2017)で報告済みであるので、詳細はここでは割愛し、重要な結果のみ以下に紹介す

る。

得られた 3 次元構造(図 4)は、典型的海洋リソスフェア・アセノスフェアの構造、すなわち高電気伝導度の海洋地殻、低電気伝導度のリソスフェア、そして高電気伝導度のアセノスフェアの 3 層構造を示す。低電気伝導度層は海洋底年代によらず厚さが 60–70 km ではぼ一定で、比較的若い(<30 Ma) 上部マントルの構造が、温度構造の年代依存性よりも、海嶺軸下での部分熔融過程によって生じる水の再分配深さで説明される。このモデルは、高速に海洋底が拡大するの東太平洋海膨で最初に確認された (Evans et al., 2005; Baba et al., 2006) が、低速拡大の大西洋においても成り立つことが示された点で、意義がある。地震観測データのレシーバー関数や表面波の解析でも、同様の深さに不連続面または低速度層が同定されており、電気伝導度構造と調和的である (Geissler et al., 2017; Bonadio et al., 2018)。一方、トリストラン・ダ・クーニャ島の下には、上昇流を示唆するような鉛直方向に伸びる良導体が認められなかった。南太平洋の Society hotspot の下では、Tada et al. (2016)により顕著な良導体がイメージングされているが、トリストラン・ダ・クーニャ島の直下に同様の良導体を人工的に置くと、データの再現性が悪くなる

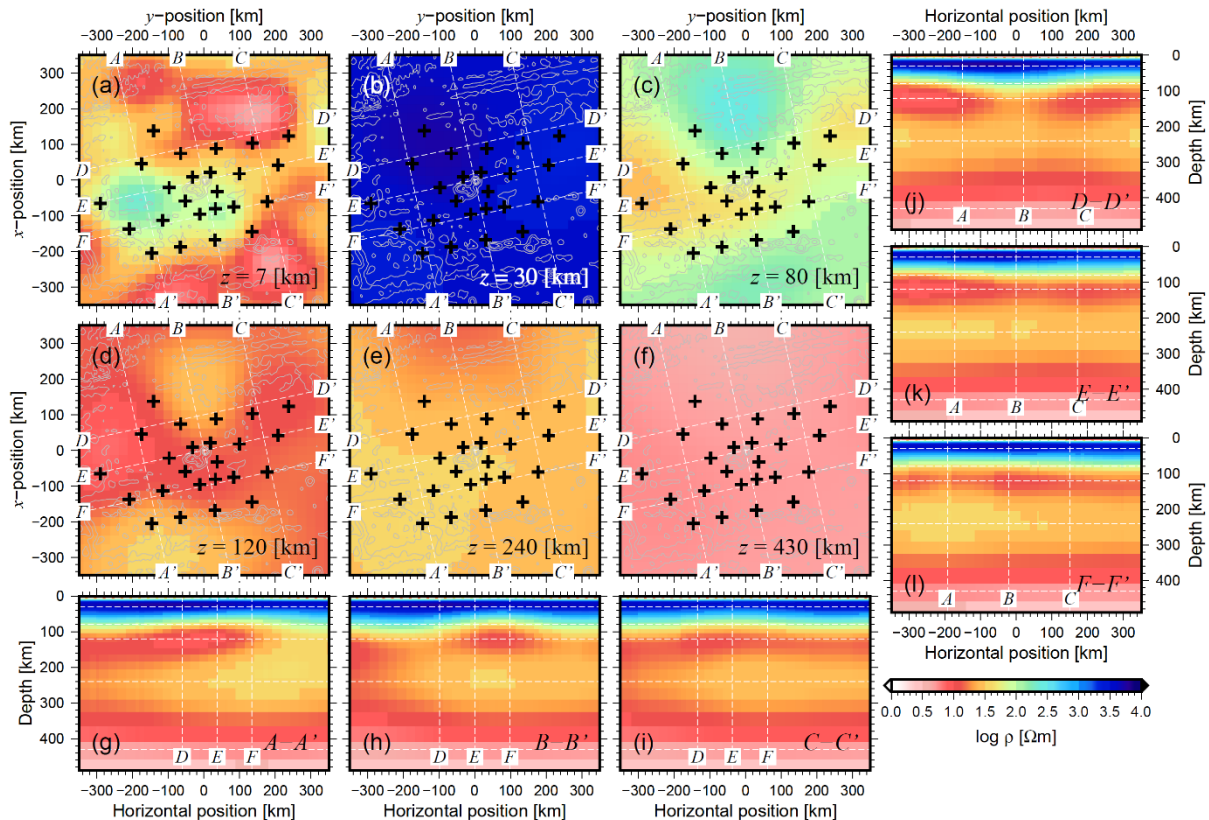


図 4. 3 次元電気伝導度構造モデル (Baba et al., 2017)。(a)–(f): 異なる深さでの水平断面。(g)–(i): 大西洋中央海嶺に平行な断面図。(j)–(l): プレート拡大方向に平行な断面図。+はインバージョン解析に用いた電磁気観測点を示す。

Fig. 4. 3-D electrical conductivity model after Baba et al. (2017). (a)–(f): horizontal slices at different depths. (g)–(i): vertical sections parallel to the direction of Mid-Atlantic Ridge. (j)–(l): vertical sections parallel to the spreading direction.

ことより、この特徴は妥当であることが確かめられた。レーザー関数でもトリストアン・ダ・クーニャ島の真下には、高温物質の上昇を示すような遷移層の薄化領域は見つかっていない(Geissler et al., 2017)。一方で P 波トモグラフィーは、観測アレイの南西縁辺に低速度領域を検出していて、上昇流かもしれないことを示唆している(Schlömer et al., 2017)。また地球化学的研究からは、同位体組成の特徴などより、トリストアン・ダ・クーニャホットスポットはコア・マントル境界付近に起源をもつとの報告がされている(例えば、Hoernle et al., 2015)。電磁気観測や地震は観測でトリストアン・ダ・クーニャ島の直下に明瞭な上昇流を示す特徴が検出できなかったことは、上昇流があっても検出できないほど弱いのか、上昇流はアレイの外側にあるのかもしれない。

3次元電気伝導度構造および、地震波のレーザー関数解析の結果は、SAMPLE 計画の特集号で公表された(Baba et al., 2017; Geissler et al., 2017)。ちなみに、この特集号の投稿締め切りは、2016年の2月末実で、私は、GEOMAR から帰国後の1ヶ月で急いで執筆し、なんとか締め切りに間に合わせた。巨大プロジェクトに参加すると特集号が組まれることは多い。特集号には、投稿締め切りがあるため論文執筆の優先順位が(集中力も)必然的に上がるので、研究成果をきちんとタイムリーに公表するという観点で有益である。ただし締め切りに間に合わせるために、科学的議論がおろそかにならないよう十分注意が必要である。M. Jegen 博士には論文の科学的内容の議論はもちろんのこと、英文添削でも多大なご協力を頂いた。ネイティブあるいはそれに近い英語話者が共著者にいると、有償の英文校閲サービスを受ける必要がない点は、国際共同研究の隠れたメリットであろう。

5. まとめと展望

私はこれまでも海外での観測研究を何度か実施してきたが、本研究を通じて経験値をさらに増すことができた。とくにドイツの合理的な船の運用や観測作業のノウハウには学ぶ点が多々あった。観測には様々なトラブルが付きものではあるが、特に海外では日本の常識が通じないことがあるので、準備は周到に行う必要がある。個人的には、ドイツ電磁気・地震観測グループとコネクションを作りあげることができたことが大きな成果であった。2016年のEGU General Assemblyでは、私とM. Jegen博士らが中心となって海域物理観測のセッションを立ち上げることにもつなげた。そして現在、今度は私からの提案でドイツの研究グループと新たな共同観測研究を立ち上げようとしているが、今や電子メールだけでなく、Web会議で頻繁に議論を重ね、研究費獲得等にお互いがより密接に連携をしている点で、協力の仕方にも時代に合わせた進展があると感じている。今後も観測研究の国際化の流れは止まらないと思われる。本稿がこれから海外との共同研究を進めようとしている方々に、いくぶんかでもお役に立てれば幸いである。

参考文献

- Anderson, D. L. (2005) Scoring hotspots: The plume and plate paradigms, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **388**, 31–54, <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.31>.
- Baba, K., A. D. Chave, R. L. Evans, G. Hirth, and R. L. Mackie (2006) Mantle dynamics beneath the East Pacific Rise at 17°S: Insights from the Mantle Electromagnetic and Tomography (MELT) experiment, *J. Geophys. Res.*, **111**, B02101, <https://doi.org/10.1029/2004JB003598>.

- Baba, K., H. Utada, T. Goto, T. Kasaya, H. Shimizu, and N. Tada (2010) Electrical conductivity imaging of the Philippine Sea upper mantle using seafloor magnetotelluric data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **183**, 44–62, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2010.09.010>.
- Baba, K., N. Tada, H. Utada, and W. Siripunvaraporn (2013) Practical incorporation of local and regional topography in three-dimensional inversion of deep ocean magnetotelluric data, *Geophys. J. Int.*, **194**, 348–361, <https://doi.org/10.1093/gji/ggt115>.
- Baba, K., J. Chen, M. Sommer, H. Utada, W. H. Geissler, W. Jokat, and M. Jegen (2017) Marine magnetotellurics imaged no distinct plume beneath the Tristan da Cunha hotspot in the southern Atlantic Ocean, *Tectonophysics*, **716**, 52–63, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.09.033>.
- Bonadio, R., W. H. Geissler, S. Lebedev, J. Fulla, M. Ravenna, N. L. Celli, W. Jokat, M. Jegen, C. Sens-Schönfelder, K. Baba (2018) Hot upper mantle beneath the Tristan da Cunha Hotspot from probabilistic Rayleigh-wave inversion and petrological modeling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **19**, <https://doi.org/10.1002/2017GC007347>.
- Courillot, V., A. Davaille, J. Besse, and J. Stock (2003) Three distinct types of hotspot in the Earth's mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **205**, 295–308, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8).
- Evans, R. L., G. Hirth, K. Baba, D. Forsyth, A. Chave, and R. Mackie (2005) Geophysical evidence from the MELT area for compositional controls on oceanic plates, *Nature*, **478**, 249–252, <http://doi.org/10.1038/nature04014>.
- Geissler W. H., W. Jokat, M. Jegen and K. Baba (2017) Thickness of the oceanic crust and the mantle transition zone in the vicinity of the Tristan da Cunha hot spot estimated from ocean-bottom and ocean-island seismometer receiver functions, *Tectonophysics*, **716**, 33–51, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.12.013>.
- Hoernle, K., J. Rohde, F. Hauff, D. Garbe-Schönberg, S. Homrighausen, R. Werner, and J. P. Morgan (2015) How and when plume zonation appeared during the 132 Myr evolution of the Tristan Hotspot, *Nat. Commun.*, **6**:7799, <http://doi.org/10.1038/ncomms8799>.
- Tada, N., K. Baba, H. Utada, and W. Siripunvaraporn (2012) Approximate treatment of seafloor topographic effects in three-dimensional marine magnetotelluric inversion, *Earth Planets Space*, **64**, 1005–1021, <https://doi.org/10.5047/eps.2012.04.005>.
- Tada, N., P. Tarits, K. Baba, H. Utada, T. Kasaya, and D. Suetsugu (2016) Electromagnetic evidence for volatile-rich upwelling beneath the Society hotspot, French Polynesia, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 12,021–12,026, <http://doi.org/10.1002/2016GL071331>.
- Schlömer, A., W. H. Geissler, W. Jokat and M. Jegen (2017) Seismicity in the vicinity of the Tristan da Cunha hot spot: particular plate tectonics and mantle plume presence, *J. Geophys. Res: Solid Earth*, **122**, 10,427–10,439, <https://doi.org/10.1002/2017JB015017>.