

## 海洋アセノスフェアの電気伝導度

馬場聖至 (東京大学地震研究所)

### Electrical conductivity of oceanic asthenosphere

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

#### Abstract

I review electrical features of oceanic lithosphere and asthenosphere with crustal age based on recent seafloor magnetotelluric studies. The oceanic upper mantle is typically imaged as resistive upper layer underlain by conductive zone. They are frequently interpreted as cool lithosphere and hot asthenosphere. The thickness of the resistive layer (or the depth of the top of the conductive zone) is constant with 60~70 km with age for young mantle, suggesting the compositional control due to partial melting beneath the seafloor spreading axes. For matured mantle, it becomes thicker with age increases probably associated with the cooling of the lithosphere. However, for very old mantle beneath the northwestern Pacific, it shows significant variation that is impossible to explain with a single cooling model. The cause of high conductivity and anisotropy of the conductive zone has long been discussed and the major two hypotheses, partial melting and mantle hydration, are still opposed to each other. To deepen our understanding to the above issues from the point of observational approach, I would like to emphasize the importance of 1) more data accumulation in various areas, 2) Sophisticating of modeling methods, 3) rigorous sensitivity tests to obtained conductivity structure models, and 4) quantitative interpretation taking account for the consistency with various independent information.

#### 1. はじめに

海洋上部マンツルの電気伝導度は、典型的には上部の低電気伝導度層とその下の高電気伝導度領域としてイメージされ、前者は低温のリソスフェアを、後者は高温のアセノスフェアに相当するものと解釈される。また低電気伝導度層の厚さ（または高電気伝導度領域の始まる深さ）と高電気伝導度領域の電気伝導度値の、海洋底年代との関係は、海底MT 探査が始まって以来現在に至るまで、様々な研究者によって議論されている。1990 年台までは、北東太平洋のいくつかの海域で 1 点観測されたデータが繰り返し解析・解釈されていたが（例えば、Filloux, 1977; Oldenburg 1981; Tarits, 1986; Heinson & Constable, 1992）、1990 年代以降、様々な海域において近代的な測器を用いたアレイ観測が行われるようになり、より多くの海洋底年代のマンツルについて、より信頼性の高い電気伝導度構造モデルが得られた（例えば、Baba et al., 2006a; Baba et al., 2006b; Seama et al., 2007; Baba et al., 2010; Matsuno et al., 2010; Baba et al., 2013; Key et al., 2013; Naif et al., 2013; Tursack et al., 2013）。本

論文では、最近の海底 MT 観測をレビューして現在の論点をまとめ、残された問題を解決していく上で今後の観測研究がすべきことを議論する。

## 2. 海洋上部マントルの電気伝導度の特徴と最近の論点

### 2.1 海底 MT 観測低電気伝導度の厚さの年代依存性

海底拡大軸に近い若いマントルでは、低電気伝導度層は想定される温度境界層（熱伝導により年代とともに冷却され厚くなる層）よりも厚い（Baba et al., 2006a, Baba et al., 2006b; Matsuno et al., 2010; Key et al., 2013）。その厚さ（60~70 km）は海洋底年代に依存せず、海底拡大軸下の温度がペリドタイトの無水ソリダスよりも高くなる深さと調和的である（Baba et al., 2006a; Baba et al., 2006b）。一方比較的古い海洋底での観測からは 60~70 km よりも有意に厚い低電気伝導度層がイメージされていて、年代に依存して厚くなる傾向があるように見える（Seama et al., 2007; Baba et al., 2010; Matsuno et al., 2010; Baba et al., 2013; Tursack et al., 2013）。これらの観測結果より、温度境界層が 60~70 km よりも薄い若い (<~30 Ma) マントルでは、電気伝導度は海嶺軸下での部分熔融による水の再配分に支配され、それよりも古いマントルでは温度構造に支配されていることを示唆する（Baba 2005; Ichiki et al., 2009）。

ただし、最近の北西太平洋における観測例は、非常に古い (>~80 Ma) マントルは単純な冷却モデルでは説明できないことを示している。太平洋の水深や地殻熱流量の年代依存性は、厚さが約 125 km で底の温度が 1350°C の板を冷却するモデルでよく説明される（Parsons & Sclator, 1977, 以下 PS モデルと呼ぶ）。しかしながら小笠原沖太平洋下の深さ 120~170 km の電気伝導度は、PS モデルよりも有意に低い温度でなければ説明できず、むしろ半無限均質媒質を冷却するモデル（以下 HSC モデルと呼ぶ）と調和的である（Baba et al., 2010）。一方同じ太平洋プレートでも、シャツキーライズの北西側海域では低電気伝導度が有意に薄く（Baba et al., 2013）、PS モデルと同等かより薄い板を冷却するモデルと調和的である。このような違いは、少なくとも観測領域よりも大きなスケールでの横方向不均質構造を示しており、単一の冷却モデルと海洋底年代の差では説明できないことを示唆する。

### 2.2 高電気伝導度領域の要因

若いマントルについては、高電気伝導度領域に異方性が検出されている（Baba et al., 2006a; Baba et al., 2006b; Naif et al., 2013）。異方性の強度は海域によって異なるが、いずれも海底拡大（プレート運動）の方向により高電気伝導度で、最大約 0.1 S/m に達する。古いマントルについては、異方性の検出例は今のところ無く、高電気伝導度領域の電気伝導度値はどの海域でも約 0.03 S/m で共通している（Baba et al., 2010; Baba et al., 2013）。

高電気伝導度の要因については、部分熔融説と、水（鉱物中に溶け込んだプロトンの拡散）説があり、未だ決着がついていない。含水鉱物の電気伝導度測定実験は、グループによって水の効果に対する評価が大きく異なっていて、コンセンサスが得られていない（例えば、Karato & Wang, 2013; Yoshino & Katsura, 2013）。

Yoshino et al. (2006)によれば、含水オリビンのプロトン伝導による電気伝導度上昇の効果は低温では大きいものの、アセノスフェアの温度へ外挿するとその効果は小さく、また若いマントルで観測されている異方性も説明できない。この結果から彼らは高電気伝導度と異方性を部分溶融によるものと考えた。無水のメルトを仮定した古典的な部分溶融説では、観測される高電気伝導度を説明するためには、数%以上のメルトが必要であり、そのような多量なメルトは現実的と考えられなかった。しかしながら観測される高電気伝導度領域は60~70 km よりも深いので、マントルが水を含むことによってソリダスが下がった場合の部分溶融を考える必要がある。このような条件で部分溶融を生じる場合には、メルト中に水が分配される。含水メルトの電気伝導度は、無水のメルトよりも電気伝導度が高いという実験結果が得られており、水を含むメルトなら現実的な量で高電気伝導度を説明し得る (Ni et al., 2011)。また Gaillard et al. (2008)は、炭酸塩メルトはケイ酸塩メルトよりも遙かに電気伝導度が高いことを示し、高電気伝導度領域はごく少量の炭酸塩メルトで説明できるとした。その後、このグループはより現実的な水と二酸化炭素を両方含むメルトの電気伝導度を計測し、アセノスフェアの高電気伝導度を説明しようとしている (Gaillard et al., 2013)。電気伝導度異方性については、部分溶融で説明するためにはメルトがチューブ状に繋がる必要がある。そのようなメルト分布の現実性については疑問が持たれていたが、最近 Zhang et al. (2013)が、剪断応力下でのペリドタイトの溶融実験で、チューブ状に繋がったメルトと電気伝導度異方性を再現した。

一方、Wang et al. (2006)によれば、水による電気伝導度上昇の効果は高温でも大きく、ごく少量の水で高電気伝導度を説明できる。プロトン伝導の温度依存性 (アレニウスプロットでの傾き) は、水素イオンの拡散の温度依存性と異なる傾向があり、その違いは実験グループに依らず共通している。Karato (2013)は、この傾向をオリビン結晶格子中の Mg 席を置換したプロトンの拡散とフリープロトンの拡散とで理論的に説明し、また高温での含水単結晶オリビンの電気伝導度測定により実証した (Karato and Dai, 2013)。水モデルでは、オリビンの a 軸 (電気伝導度が高い) がプレート運動方向に定向配列することで、観測されるような電気伝導度異方性をつくと説明される。観測される高電気伝導度と異方性は、ある深さ領域に限られている。水が一様に分布して定向配列しているモデルでは、この深さ分布を説明できないが、剪断応力の深さ分布によりオリビンが定向配列する深さが限られているとの解釈は可能であろう。ただし、電気伝導度構造イメージングにおいて高電気伝導度領域の下の電気伝導度値は不確定性が大きく、高電気伝導度と異方性が本当に限られた深さにしかないのかどうかは厳密にはテストされていない。

### 3. 議論

低電気伝導度層の厚さについては、30~80 Ma のマントルについては観測例が乏しく、年代依存性を詳細に議論するには不十分である。この年代範囲の温度構造は PS モデルでも HSC モデルでも年代に依存して変わるので、電気伝導度構造モデルに反映されるはずであ

るから、温度構造と電気伝導度構造の関係性を議論するのに適していると考えられる。80 Ma を超える非常に古いマントルは、前章で述べたとおり、単一の冷却モデルで説明することは難しいくらい大きな違いが見られることが明らかになりつつある。温度構造と年代依存性について全ての観測結果を満足するようなモデルがあるのか、それとも個々の海域の詳細なテクトニクスを反映しているのかは、現状では判断できない。これらの議論を深めるためには、更に様々な海域で観測を行ってサンプルを増やすことが必要不可欠である。著者が参加している観測例として、日本海溝沖太平洋（海洋底年代：~130 Ma）、シャツキーライズ南東側の太平洋（~140 Ma）、仏領ポリネシア海域（~70 Ma）、南大西洋のトリスタン・ダ・クーニャホットスポット周辺海域（10~30 Ma）があり、いずれも現在解析が進行中である。他のグループの将来的な動向は不明であるが、より多くの海域でデータが蓄積されることを期待する。

高電気伝導度と異方性の要因についての解釈には、マントル構成鉱物やメルトの電気伝導度測定実験に依るところが大きい。鉱物結晶中に溶解した水の効果については、各実験グループが結果を相互に検証して、矛盾点の原因を追求し、統合的なモデルを構築することを強く期待する。一方、観測研究がすべきことも多くある。まずはやはり観測例を増やすこととである。特に異方性の検出を試みた例は未だ少ない。その背景には異方性を考慮に入れた解析手法の制限の問題もある。現状では 2 次元構造のなかで構造の走向と並行・直行する方向の異方性のみが考慮されている。より一般的なケースに対応するためには、3 次元構造のなかで任意の方向に主軸を持つ異方性を組み込んだモデリング手法の開発が必要である。高電気伝導度（+異方性）領域の深さ分布（高電気伝導度層の下の電気伝導度値の信憑性）を厳密に検証することは、部分熔融説と水説の対立に決着をつける鍵になるかもしれない。2 次元構造・3 次元構造解析が主流になった昨今は、高電気伝導度領域の深さ分布が厳密にテストされる例が少ない。モデルに平滑化制約をつけたインバージョン手法では、その制約による偽像の可能性を常に意識して慎重に感度検定を行うべきである。

電気伝導度構造モデルの解釈においては、電気伝導度測定実験の結果を用いて電気伝導度構造から温度構造に変換することができる。その際には想定されるマントルのソリダスと比較して部分熔融条件を満たすかどうかをチェックする必要がある。もしも推定した温度構造がソリダスを超えるならば部分熔融を考慮しなければならない。水や二酸化炭素はソリダスを下げるので、水や二酸化炭素の量とソリダス降下も考慮する必要がある。高電気伝導度領域の要因についての部分熔融説と水説は、アセノスフェアが柔らかい理由を、部分熔融または水で説明しようとする同じではないことを指摘しておく。マントルがある量の水や二酸化炭素を含む事は中央海嶺玄武岩の化学組成などから明らかであり、高電気伝導度の部分熔融説はすでに述べたとおりマントルがある量の水や二酸化炭素を含んでソリダスが降下しているという条件が必須である。一方の水説も部分熔融の存在自体を否定するものではない。いずれの説も部分熔融あるいは水による電気伝導度上昇の効果が他方よりも有意に大きいということを主張しているのである。電気伝導度構造と温度構

造、水や二酸化炭素の量とそれに対応するマントルソリダスを矛盾無く説明する組み合わせを探ることがアセノスフェアを理解する上では有益であり、同時に高電気伝導度に対する二つの説を検証することにも繋がる可能性があると考え。更には地震学的観測などの独立情報も含めて整合性を検証すると制約できることが増すだろう。そのような取り組みは、Utada and Baba (2014)などですでに部分的に始まっている。

#### 4. まとめ

近年の海底 MT データの蓄積により、海洋上部マントルの電気伝導度について以下のような描像が得られた。低電気伝導度層は、若いマントルでは組成境界を反映して年代に依存せず厚さが 60~70 km でほぼ一定であるが、より古いマントルでは温度構造を反映して海洋底年代が古くなるほど厚くなる。現在の論点は、非常に古いマントルに見られる低電気伝導度層の厚さの多様性を、どのような温度構造やその他の要因で説明するか、である。また低電気伝導度層の下の高電気伝導度領域の解釈について、部分熔融説と水説の対立には未だ決着が付いていない。これらの問題を解決するため、今後の観測研究は、多様な海洋底年代・テクトニクスの海底での観測データの蓄積、モデリング手法の高度化、得られた電気伝導度構造モデルの厳密な感度検定、様々な独立情報との整合性を考慮した定量的な解釈、にますます注力すべきであろう。

#### 5. 参考文献

- Baba, K. (2005): Electrical structure in marine tectonic settings, *Surv. Geophys.*, **26**, 701–731, doi: 10.1007/s10712-005-1831-2.
- 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, doi: 10.1029/2004JB003598.
- Baba, K., P. Tarits, A. D. Chave, R. L. Evans, G. Hirth, and R. L. Mackie (2006): Electrical structure beneath the northern MELT line on the East Pacific Rise at 15°45'S, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L22301, doi: 10.1029/2006GL027528.
- 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, doi: 10.1016/j.pepi.2010.09.010.
- Baba, K., N. Tada, L. Zhang, P. Liang, H. Shimizu, and H. Utada (2013): Is the electrical conductivity of the northwestern Pacific upper mantle normal?, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 12, 4969–4979, doi: 10.1002/2013GC004997.
- Filloux, J. (1977): Ocean-floor magnetotelluric sounding over North Central Pacific, *Nature*, **269**, 297–301.
- Gaillard, F., M. Malki, G. Lacono-Marziano, M. Pichavant, and B. Scaillet (2008): Carbonatite melts

- and electrical conductivity in the asthenosphere, *Science*, **322**, 1363–1365, doi: 0.1126/science.1164446.
- Gaillard, F., D. Sifre, E. Gardes, L. Hashim, M. Massuyeau, and S. Hier-Majumder (2013): Small amount of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O rich melts in the lithosphere-asthenosphere boundary, *Eos, Trans. AGU, fall meeting 2013 abstract*, T44A-08.
- Heinson, G. and S. Constable (1992): The electrical conductivity of the oceanic upper mantle, *Geophys. J. Int.*, **110**, 159–179.
- Ichiki, M., K. Baba, H. Toh, and K. Fuji-ta (2009): An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese Islands, and continental East Asia, *Gondwana Res.*, **16**, 545–562, doi: 10.1016/j.gr.2009.04.007.
- Karato, S. (2013): Theory of isotope diffusion in a material with multiple species and its implications for hydrogen-enhanced electrical conductivity in olivine, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **219**, 49–54, doi: 10.1016/j.pepi.2013.03.001.
- Karato, S. and L. Dai (2013): Electrical conductivity of olivine: New experimental results and a unified model for hydrogen-assisted conduction, *Eos, Trans. AGU, fall meeting 2013 abstract*, MR24B-04.
- Karato, S. and D. Wang (2013): Electrical conductivity of minerals and rocks, *Phys. Chem. Deep Earth*, ed. by Karato, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 38.
- Key, K., S. Constable, L. Liu, and A. Pommier (2013): Electrical image of passive mantle upwelling beneath the northern East Pacific Rise, *Nature*, **495**, 499–503, doi: 10.1038/nature11932.
- Matsuno, T., N. Seama, R. L. Evans, A. D. Chave, K. Baba, A. White, T. Goto, G. Heinson, G. Boren, A. Yoneda, and H. Utada (2010): Upper mantle electrical resistivity structure beneath the central Mariana subduction system, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**, 9, Q09003, doi: 10.1029/2010GC003101.
- Naif, S., K. Key, S. Constable, and R. L. Evans (2013): Melt-rich channel observed at the lithosphere–asthenosphere boundary, *Nature*, **495**, 356–359, doi: 10.1038/nature11939.
- Ni, H., H. Keppler, and H. Behrens (2011): Electrical conductivity of hydrous basaltic melts: implications for partial melting in the upper mantle, *Contrib. Mineral Petrol.*, **162**, 637–650, doi: 10.1007/s00410-011-0617-4.
- Oldenburg, D. W. (1981): Conductivity structure of oceanic upper mantle beneath the Pacific plate, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **65**, 359–394.
- Parsons, B., and J. G. Sclater (1977): An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5, 803–827.
- Seama, N., K. Baba, H. Utada, H. Toh, N. Tada, M. Ichiki, and T. Matsuno (2007): 1-D electrical conductivity structure beneath the Philippine Sea: Results from an ocean bottom magnetotelluric survey, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **162**, 2–12, doi: 10.1016/j.pepi.2007.02.014.

- Tarits, P. (1986): Conductivity and fluids in the oceanic upper mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **42**, 215–226.
- Tursack, E. K., R. L. Evans, J. Elsenbeck, D. Lizarralde, J. A. Collins, J. B. Gaherty, and G. Hirth (2013): The Electrical Structure of Upper Mantle Beneath 70Ma Pacific Seafloor Constrained by Seafloor Magnetotelluric Data, *Eos, Trans. AGU, fall meeting 2013 abstract*, MR43A-2373.
- Utada, H. and K. Baba (2014): Estimating the electrical conductivity of the melt phase of a partially molten asthenosphere from seafloor magnetotelluric sounding data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **227**, 41–47, doi: 10.1016/j.pepi.2013.12.004.
- Wang, D., M. Mookherjee, Y. Xu, and S. Karato (2006): The effect of water on the electrical conductivity of olivine, *Nature*, **443**, 977–980, doi: 10.1038/nature05256.
- Yoshino, T., and T. Katsura (2013): Electrical conductivity of mantle minerals: Role of water in conductivity anomalies, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **41**, 605–628, doi: 10.1146/annurev-earth-050212-124022.
- Yoshino, T., T. Matsuzaki, S. Yamashita, and T. Katsura (2006): Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere, *Nature*, **443**, 972–976, doi: 10.1038/nature05223.
- Zhang, B., T. Yoshino, D. Yamazaki, G. M. Manthilake, T. Katsura (2013): Electrical conductivity anisotropy of partially molten peridotite under shear deformation, *Eos, Trans. AGU, fall meeting 2013 abstract*, DI33B-2248.