

モホ不連続面の話し

前田 仁一郎 (北大・理・地球惑星)

1. はじめに

我々のモホ面像は「地球上のどこでも地震波速度の不連続な変化によって定義されるもので、地殻とマンツルの境界である」というものであろう。この知識で日常的に困ることは全くないし、特に問題になることもない。しかし、実はモホ面、あるいは地殻・マンツル境界にまつわることがらには意外とその常識的イメージとは異なることもあり、また実は大変重要な問題を提供している。今回は、そのあたりのことをお話ししたい。たまにこういうことを考えて見るのも面白い。

さて私がモホ面のことを考え始めた契機は“MoHole to Mantle (M2M)”という現代版モホール計画の共同提案者の1人になったことである。2006年の夏に開催された現代版モホール計画の立案に関する国内ワークショップ (Mission Moho Workshop) において、ある岩石学者は、モホ面は地震学的にクリアに定義されるが岩石学的実体はさまざま、混乱をさけるために“岩石学的モホ”などという表現をやめなければいけないと強調された (荒井・阿部, 2008)。一方で、ある地震学者は、実は必ずしもモホ面がきちっと決まらない場合もあるのだと話された。これを聞いて私は大変困惑した。モホ面が見えないところもある？だとすると何に到達すればモホール計画は成功したことになるのか？考えるまでもなく地震波速度と岩相が1:1に対応するはずがないので、仮にモホ面に到達したとしても<“岩石学的モホ”ならともかく>、そこにどんな意義があるのか？モホール計画の目標はモホ面貫通であるから、モホ面が曖昧であると困るし、やるからには面白いものでないと困る。

2. モホ面あるいは地殻・マンツル境界はどのように理解されてきたか

荒井・阿部 [2008] が根拠とし、また一般に使用されているモホ面の定義は Steinhart [1967] である。すなわちモホ面とは (i) 地球内部で、 V_p が 7.6–8.6 km/s へと急激に、または不連続に増加する面、(ii) 不連続が見られない場合は V_p が最初に 7.6 km/s を越える面。つまり不連続が観察されなくても不連続面が定義されるという奇妙なことになっているが、これは何処においても地殻を決定するという便宜の為である。さて以下にモホ面あるいは地殻・マンツル境界に関する我々の認識の変化を簡略に記しておこう。

(1) デカルト [1644] の「哲学原理」には白熱融解状態の地球の表面が冷却されて薄い岩石層、すなわち地殻 crust ができるという図が描かれている。このような地殻 crust が地殻 the crust の最初の概念であった。

(2) 白熱融解地球という考えが放棄された後も、地球表層は化学組成や密度が地球内部とは大いに異なると考えられ、ややルーズに地殻という語が使用され続けた。

(3) Mohorovicic [1910] が地震波速度不連続面を発見してからはそれが地殻の下限を定義づける <便利な>ものとして利用されるようになった。

(4) 地球全体の成層構造の理解、さらには Cyprus や Oman のオフィオライトの観察もあって、マンツルから分離した melt の固結相が地殻であるというイメージが明確になる。すなわち地殻 = 斑れい岩、マンツル = 溶け残りかんらん岩 <ここでは単純化のために海洋域の地殻・マンツルの関係として考える>。

(5) マンツルから分離した melt の固結相には超苦鉄質集積岩も存在し得るので、(地震波速度) モホ面は固相層–液相層境界ではなく、液相層中の超苦鉄質–苦鉄質岩境界にあると認識され、岩石学的に意味のある固相層–液相層境界として岩石学的モホという概念が提案される。

(6) 地震波速度と岩相は 1:1 に対応しない。そこで (地震波速度) モホ面を、例えば、蛇紋岩フロントとみなすという考えも早い時期から有力であった <最近においては特に有力である>。

(7) どこでも (地震波速度) モホ面が見える訳ではないことも判明。

3. 地殻の厚さの重要性

岩石学者/地質学者が岩石学的モホなどと言いだしたのは、もちろん物質的実体がなんだか判らない/何であつても構わない (地震波速度) モホ面に意味を見いだすことが困難であつたからである。では意味のあるモホ面とは、あるいは地殻・マンツル境界とは何か？それは第一に地殻の厚さを示す面である。

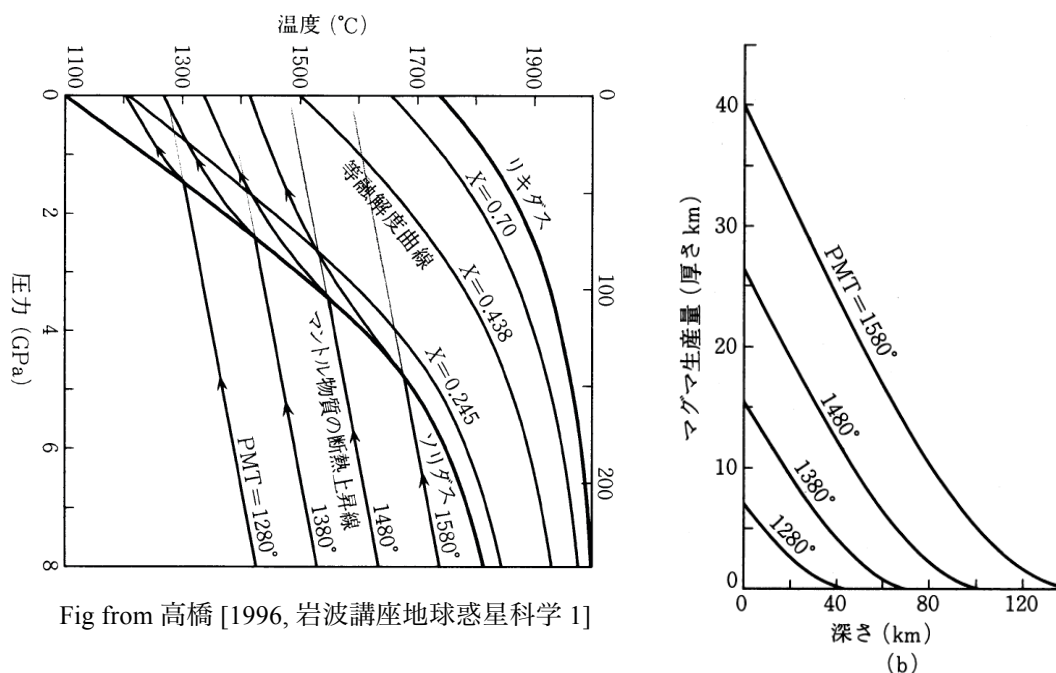


Fig from 高橋 [1996, 岩波講座地球惑星科学 1]

地殻を“マントルから分離・上昇した melt が固結したもの”とすれば、地殻の厚さはマントルからの melt 分離量に対応することになる。McKenzie & Bickle [1988] は海洋地殻の厚さだけで 中央海嶺火成活動 (ポテンシャルマントル温度 $PMT = 1280^\circ\text{C}$, マントルからのマグマの分離深度 = 50 km, 海洋地殻の厚さ = 7 km, 部分熔融度によって決定されるマグマの組成 = MORB) を指定できることを示した (上図)。しかし、この 7 km というのは (地震波速度) モホ面の深度であって、本当にマントルから分離した melt の厚さであるという保証はない。一方、大陸域においても岩石学的モホ深度 = 溶け残りかんらん岩の上限深度, すなわち大陸地殻の厚さは大陸の進化モデルにおいて本質的に重要なパラメータである (e.g., O'Reilly & Griffin, 2013)。

4. まとめ

このような問題を避ける唯一の方法は、地震波速度不連続面と地殻・マントルの定義を切り離すことである。海洋域の場合はモホ面の上・下をかつてそう呼んだように第 3 層・第 4 層とし、地殻・マントルと呼ばなければ良い。大陸域でもモホ面の上・下を地殻・マントル以外の語で表現すれば良い。しかし実体を完全に観察することのできない地殻を地震波速度のような実測値を用いずに定量的に定義することは難しい。それでもやはり岩石学的実体を十分に検討可能な地殻とマントル上部を、地震波速度のみで定義するというのは我々にとっては得策ではない。概念的な定義ではあるが、溶け残りかんらん岩の上限を地殻-マントル境界とする。実際、国際的にもこれが最も妥当とみなされている一般的な定義であろう (e.g., Griffin & O'Reilly, 1987)。実は 1980 年代を通じて欧米ではモホ面の曖昧さが真剣に議論されたようである (例えば, Oliver, 1982, 1988; Barton, 1986; Jarchow & Thompson, 1989)。Oliver [1988] はこのように述べている。Our current picture of the Moho is partly a historical accident. Initially the concept of the Moho as a simple boundary arose purely from seismological observations. But later that boundary was equated with the crust-mantle interface (or low-density/high-density boundary) of gravity studies and then, inevitably, with a petrological boundary. That something is amiss in those apparently straightforward associations is evident from the recent appearance of terms like “seismological Moho,” “petrological Moho,” or “geochemical Moho.”

引用文献：荒井・阿部 [2008] 地学雑誌, **117**, 110–123. Barton [1986] *Nature*, **323**, 392–393. Jarchow & Thompson [1989] *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **17**, 475–506. Griffin & O'Reilly [1987] *Geology*, **15**, 241–244. McKenzie & Bickle [1988] *J. Petrol.*, **29**, 625–679. Mohorovicic, A. [1910] *Jahrbuch des meteorologischen Observatoriums in Zagreb (Agram) für das Jahr 1909*, 1–56. O'Reilly & Griffin [2013] *Tectonophysics*, **609**, 535–546. Oliver [1982] *Nature*, **299**, 398–399. Oliver [1988] *Geology*, **16**, 291. Steinhart [1967] *International Dictionary of Geophysics*, **2**, 991–994.