

特集 「惑星地球の形成と進化」

# 地球マンツルの内部構造

赤荻正樹<sup>1</sup>

## 1. マンツルの地震波速度分布

地球内部の構造やそれを構成する物質についての理解は近年急速に進んできた。それは、マンツル構造の精密な地震学的観測・解析や、ダイヤモンド・アンビルとマルチ・アンビルによる超高压実験技術の進歩、マンツル深部で安定な鉱物の物性(弾性的性質, 熱力学的性質)の精密測定などに基ついている。本論では、高温高压実験や物性測定から決められたマンツル鉱物の相平衡関係から解釈される、地震学的不連続面について解説する。

図1には、マンツルの標準的な地震波速度分布を表す、二つの速度モデルが示されている。PREM[1]と iasp91[2]では、約220km以浅の違いを除くと、両方のモデルに共通して、深さ約410kmと約660kmにP波速度とS波速度の急増が見られる。これらは古くから知られている地震波速度不連続であり、それぞれ410km(400kmと呼ぶこともある)不連続面と660km(650kmまたは670km)不連続面と名付けられている。660km不連続面は上部マンツルと下部マンツルの境界である。410kmと660kmの二つの不連続面に挟まれた領域が遷移層であり、遷移層およびその付近の深さでマンツル構成鉱物の高压高温下における相転移が起こっていると従来から考えられてきた。これが基本的に正しいことは、近年の高温高压実験によって実証されてきた。特に410kmと660kmにある不連続面は、マンツルに最も豊富に存在する鉱物であるオリビンの相転移で説明することができると考え

られる。しかし、地震学的な観測結果とオリビンの相転移を詳細に比較すると、以下に議論するようにまだ多くの解決すべき問題が残されている。

## 2. マンツル鉱物の高压相転移

岩石学的研究によれば、上部マンツルの主要な構成鉱物はオリビン、斜方輝石、単斜輝石、ガーネットである。これらの鉱物が57:17:12:14(重量%)の量比で混合した“パイロライト”が、上部マンツルを構成する岩石であると考えてほぼ差し支えない。高温高压下でこれらの鉱物がどのような相転移を起こすかについては、従来から数多くの研究が報告されて

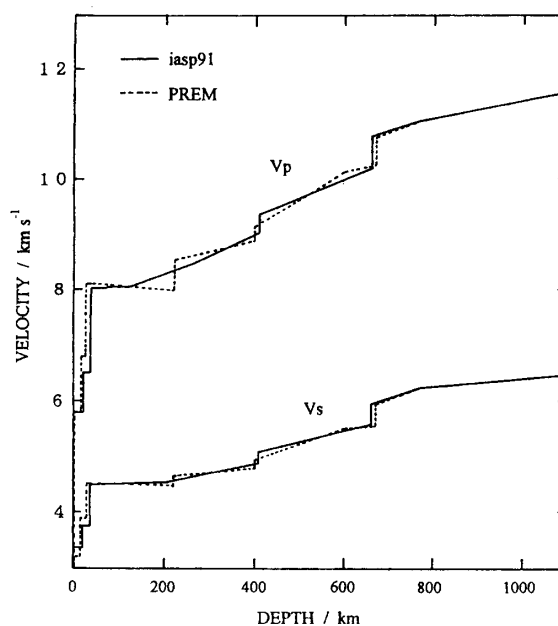


図1 マンツルの地震波速度分布。PREMは[1], iasp91は[2]による。

<sup>1</sup>学習院大学理学部化学教室

きた。それらの研究を基にして、平均的なマントルの地温勾配に沿う、パイロライト構成鉱物の相変化をまとめたものが図2である。オリビン( $\alpha$ )は約13-14GPaで変型スピネル( $\beta$ )に、約17-18GPaでスピネル( $\gamma$ )に移り、さらに約23GPaでMg-ペロプスカイトとマグネシオウスタイトに分解する。一方、斜方輝石と単斜輝石は約17GPaの圧力までにガーネットに完全に固溶し、ガーネット(メジャーライト)固溶体を形成する。このガーネット固溶体から約20GPa以上でCa-ペロプスカイトが分離し、さらに約23-28GPaでガーネット固溶体はMg-ペロプスカイト固溶体に移る。また少量の未知相が存在する可能性が考えられる。

オリビンと輝石-ガーネット系を比較すると、前者の相転移は狭い圧力範囲で起こるが、後者は広い圧力範囲にわたって相転移が進行する。そのためオリビンの転移は地震波速度の急激な変化に寄与するが、輝石-ガーネット系では地震波速度の急増は見られず、主に地震波速度の深さに対する増加率を高める効果があると考えられる。

ここでオリビン-変型スピネル-スピネル転移とスピネル-ペロプスカイト+マグネシオウスタイト分

解反応(ポスト・スピネル転移と呼ばれる)について少し詳しく見てみよう。オリビンは $Mg_2SiO_4$ と $Fe_2SiO_4$ を端成分とする2成分系である。1960年代以降、高温高圧実験によりその相平衡関係が調べられてきた。最近では、これらの転移に関する詳細な相平衡図が決定され、それに基づいて410kmと660km不連続面と相転移の対応が議論されている[3][4]。一方、オリビンとその高圧相の熱力学的性質を測定し、相平衡図を計算によって求める研究が行われている[5][6]。ここでは、熱測定実験によって相転移に伴うエンタルピー変化や各相の熱容量、固溶体の非理想性などを実測し、それらを使って熱力学的に相平衡図を計算する。高温高圧実験では、様々の異なる温度で相平衡図を作成することは実験に要する時間からみて容易でないし、700-800°C以下の比較的低温では反応が遅いため平衡な結果を得ることが困難である。また圧力に関して0.1-0.2GPa以上の分解能を得ることは困難である。一方、熱力学計算ではこれらの問題はないが、高圧実験で決められた端成分の転移圧力をエントロピーの制約条件に使うことが多いので、高圧実験と全く独立に相平衡図を決めることは一般に

難しい。そのため、現在のところ、高圧実験と熱力学計算の両方を組み合わせて相平衡図を決めることが、最も信頼性の高い結果を与えるであろう。図3にこのような手法を用いて決められた、1400°Cのオリビン-変型スピネル-スピネル転移の相平衡図と、1600°Cのポスト・スピネル転移の相平衡

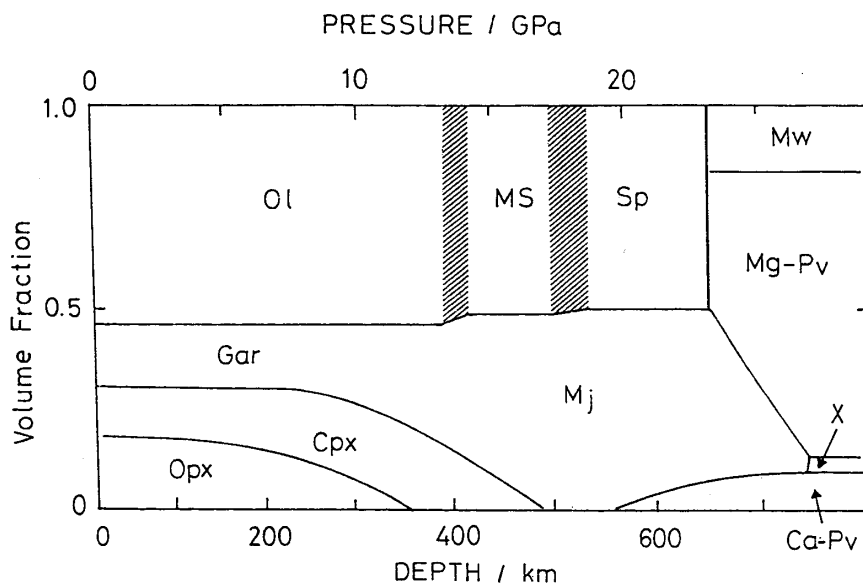


図2 パイロライトの相変化。Xは未知相。

図を示す[5][6]. マントルオリビンにはほぼ  $(Mg_{0.89}, Fe_{0.11})_2SiO_4$  の組成をもつので, この組成の転移圧力やその幅を図3から読みとればよい. この組成に関して, オリビン-変型スピネル転移と変型スピネル-スピネル転移に比べて, ポスト・スピネル転移では転移圧力の幅が著しく狭いことが特徴的である.

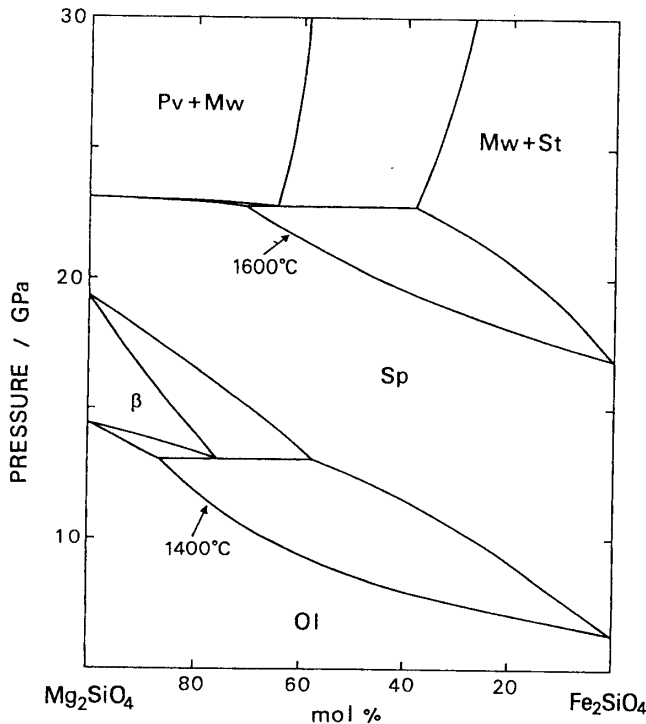


図3  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$ 系の, オリビン-変型スピネル-スピネル転移の相境界線(1400°C, 下)とポスト・スピネル転移の相境界線(1600°C, 上).

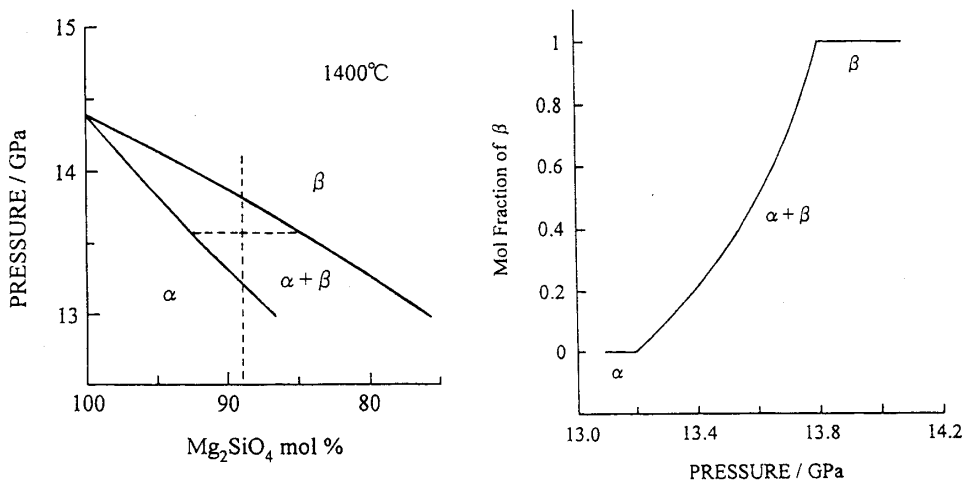


図4 (a)1400°Cにおける,  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$ 系オリビン-変型スピネル転移の相境界線. 縦の点線はマントルオリビンの組成( $Mg_{0.89}, Fe_{0.11}$ ) $_2SiO_4$ を表す. (b)変型スピネルのモル分率と圧力との関係(1400°C).

### 3.地震学的不連続面とオリビンの相転

図2に示すように, オリビン-変型スピネル転移とポスト・スピネル転移はそれぞれ深さ約410kmと660kmで起こるため, 1節で述べた410km, 660km地震学的不連続面にそれぞれ対応すると考えることが可能である. しかし最近, 410km不連続面の厚さの地震学的観測に基づいて, この不連続面がオリビン-変型スピネル転移には必ずしも対応しないという議論がなされている. 例えば, Benz and Vidale [7]は410km不連続面における反射波の解析から, この不連続面の厚さが4~5km以下であると結論した. また Vidale et al. [8]は同様な解析から, この不連続面の厚さは10km以下であるとした. これらの厚さは, 相平衡図から求まるオリビン-変型スピネル転移の圧力幅に対応する深さの幅(約16~19km[3][5])よりも明らかに薄い. このことに基づいて, 彼らは, 410km不連続面は単独の相転移によるものではなく, 化学組成の変化を伴っているという可能性を議論している. この問題について, 相平衡図の側面から以下で考察してみよう.

$Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$ 系のオリビン-変型スピネル転移の相境界線(1400°C)を図4(a)に示す. マントルオリビンを表す( $Mg_{0.89}, Fe_{0.11}$ ) $_2SiO_4$ 組成の場合, よく知られた“て

この原理”に従って, 二相共存領域でオリビン( $\alpha$ )と変型スピネル( $\beta$ )の量が圧力と共にどのように変化するかを読みとった結果を, 図4(b)に示す. (a)の二本の相境界線は平行でないため,  $\beta$ のモル分率( $\beta/(\beta+\alpha)$ )は圧力に比例して増加するのではなく, 転移の終了に近づ

くほど増加が激しいことが理解される。このことは、相境界線の圧力幅をそのまま不連続面の厚さに対応させることの危険性を示している。さらに、オリビン-変型スピネル転移の相境界線の圧力幅に影響を与える他の要素として、共存鉱物間のMg-Fe分配が挙げられる。共存する輝石やガーネットと比べて、変型スピネルにはFeが選択的に入りやすいので、パイロライトの場合、変型スピネル相はオリビンよりもFeの多い、ほぼ $(\text{Mg}_{0.87}\text{Fe}_{0.13})_2\text{SiO}_4$ の組成になると考えられる[9]。そのため図4(a)から理解されるように、等温状態ではオリビン-変型スピネル転移の圧力幅は減少する。最近測定[10]された、オリビンと変型スピネルの断熱体積弾性率(Ks)と剛性率(G)やそれらの圧力微分係数、温度微分係数を用いて、12.6~14.4GPaにおけるパイロライトのP波速度とS波速度を計算した結果を図5に示す(輝石、ガーネットのデータは主に[11]による)。図から明らかなように、転移の起こる深さの幅は約12kmとなり、相平衡図から読みとられる転移の起こる深さの幅16-19kmより狭くなる。さらに、相転移の終了付近と比べて、転移の起こり始めでは

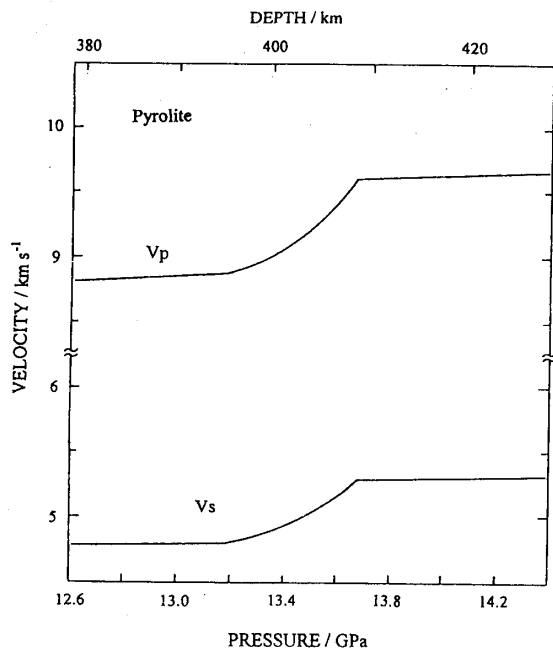


図5 パイロライトのP波速度とS波速度。

P波速度、S波速度の増加率は極めて小さい。この特徴によって、410km不連続面を地震学的に観測するときには、その厚さが実際の相転移の起こる深さの幅より小さく見積もられるであろう。密度に関してもP波速度、S波速度と同様に、相転移の後半で密度の変化が急激に起こるので、密度と地震波速度の積はさらに顕著にこのような傾向を持つことになる。[7][8]で用いられた地震波の反射法による観測では、反射インピーダンスが密度と地震波速度の積に比例するので、相転移の深さの幅を実際よりも薄く見積っていると考えられる。

410kmで観測される地震波速度の急増量と、実測された弾性定数から計算されるオリビン-変型スピネル転移の地震波速度の急増量との比較においても、同様な議論が可能である。[10]では、弾性定数から計算される地震波速度のジャンプと観測値との比較から、410km付近のマンテル中のオリビン含有量は40%以下であり、その組成はパイロライトとは異なると結論した。しかし、図5のように相転移の始まりでのP波、S波速度の増加率が小さいことは、地震学的観測で410kmのジャンプを小さく見積もることを示唆している。

このように現在のところ、410km不連続面の成因としては、オリビン-変型スピネル転移が最も合理的な解釈であると考えられる。なお変型スピネル-スピネル転移では、両者の物性が類似しているため、地震波速度の変化をほとんど引き起こさないことが分かっている。このことは、図1の地震波速度分布で500-550km付近にはっきりした不連続が見出されないことと対応する。

次に660km不連続面について述べよう。地震学的観測から660km不連続面の厚さが4~5km以下であることが知られている[7][12]。高温高压実験によるポスト・スピネル転移の相平衡図から、 $(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{SiO}_4$  ( $x \leq 0.2$ )の組成に対して、スピネル-ペロプスカイト+マグネシオウスタイト分解反応の圧力幅が

0.15GPa以下であることが示された[4]. この分解反応の圧力幅は実際にはもっと小さく, 約0.01~0.05GPaであることがこの転移の相平衡図の熱力学計算から決められた[6]. このように幅の狭い相転移の場合, オリビン-変型スピネル転移で述べた, 高压相/低压相の量比と圧力間の非線形性や共存鉱物間のMg-Fe分配の効果は無視できるほど小さい. しかし, 相転移に伴う温度変化によって, 相転移の圧力幅が影響を受けることを考慮する必要がある. リソスフェアより深いマンツルでは, 温度分布はほぼ断熱温度勾配に従っていると考えられる. このような場で相転移が起こると, 転移の潜熱で温度分布に変化が生ずる. 図6に, マンツルオリビンの相転移境界線とそれから推定される温度分布を示す. 相転移に伴う温度変化量は[5]に示す方法で見積もられた. この図から理解されるように, 相平衡図上のスピネル-ペロブスカイト+マグネシオウスタイト分解反応の圧力幅が上記のようであっても, 転移に伴う温度変化のため, 転移の始まりと終わりの間隔はそれよりやや広くなり, 約4kmの幅になる. この結果は地震学的観測と一致して

いる.

660km不連続面の厚さについては, このようにスピネルの分解反応で合理的に説明できる. しかし, このことは下部マンツルの組成が上部マンツルと同様にパイロライト的であることを必ずしも意味していない. すなわち, 660km不連続面でスピネルの分解反応と化学組成の変化が同時に起きている可能性も考えられる. このように, マンツル全体が均一組成であるのか, 上部マンツルと下部マンツルで化学組成が大きく異なるのかという問題は, マンツルの対流様式や地球の化学的進化に関連する重要な問題である. そのため, 下部マンツルの大部分を構成するペロブスカイトとマグネシオウスタイトの弾性・熱物性データを高温高压下で測定し, それから計算される密度と地震波速度をこれらの観測値と対応させ, 下部マンツルの組成を決定しようとする研究が最近なされている. しかし現時点では, 上部, 下部マンツルの組成の違いを明確に示すには至っていない. 今後, より高精度の物性測定が望まれる.

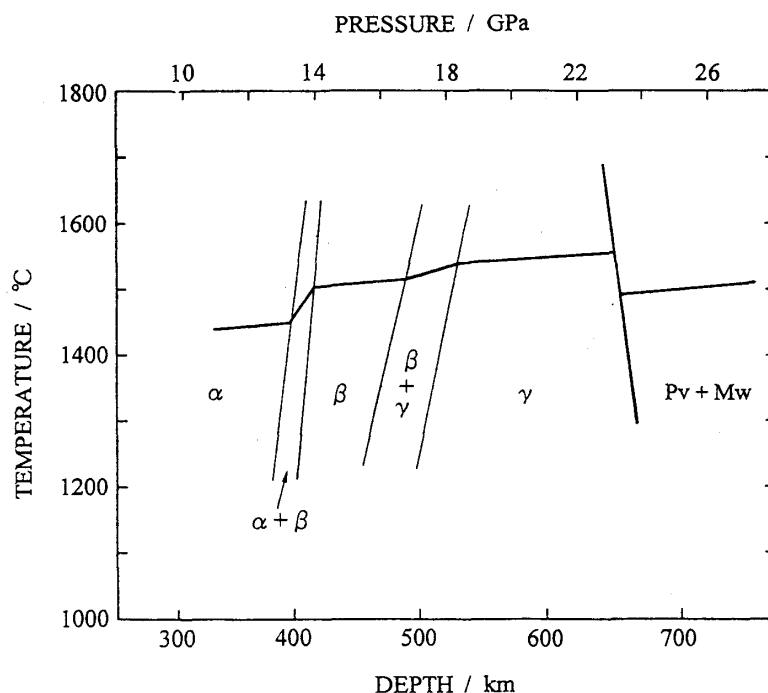


図6 マンツルオリビンの相転移境界線と温度分布.

## 謝辞

中西一郎氏(京大・理学部)と入船徹男氏(愛媛大・理学部)には、本論に関係する問題で議論していただいた。また大谷栄治氏(東北大・理学部)は本論を書くことを勧められた。これらの方々に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L.,1981: Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.* **25**, 297-356.
- [2] Kennett, B. L. N. and Engdahl, E. R.,1991: Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.* **105**, 429-465.
- [3] Katsura, T. and Ito, E.,1989: The system  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  at high pressures and temperatures: precise determination of stabilities of olivine, modified spinel, and spinel. *J. Geophys. Res.* **94**, 15663-15670.
- [4] Ito, E. and Takahashi, E.,1989: Postspinel transformations in the system  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  and some geophysical implications. *J. Geophys. Res.* **94**, 10637-10646.
- [5] Akaogi, M., Ito, E. and Navrotsky, A.,1989: Olivine-modified spinel-spinel transitions in the system  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$ : calorimetric measurements, thermochemical calculation and geophysical application. *J. Geophys. Res.* **94**, 15671-15685.
- [6] Akaogi, M., Kojitani, H., Matsuzaka, K., Suzuki, T., and Ito, E.,1996: Post-spinel transformations in the system  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$ : element partitioning, calorimetry, and thermodynamic calculation. in *High Pressure-Temperature Research: Properties of Earth and Planetary Materials* (Manghnani, M. H. and Syono, Y., Eds.), submitted.
- [7] Benz, H. M. and Vidale, J. E.,1993: Sharpness of upper-mantle discontinuities determined from high-frequency reflections. *Nature* **365**, 147-150.
- [8] Vidale, J. E., Ding, X. Y., and Grand, S. P.,1995: The 410-km-depth discontinuity: a sharpness estimate from near-critical reflections. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 2557-2560.
- [9] Akaogi, M. and Akimoto, S.,1979: High-pressure phase equilibria in a garnet lherzolite, with special reference to  $Mg^{2+}$ - $Fe^{2+}$  partitioning among constituent minerals. *Phys. Earth Planet. Inter.* **19**, 31-51.
- [10] Duffy, T. S., Zha, C. S., Downs, R. T., Mao, H. K., and Hemley, R. J.,1995: Elasticity of forsterite to 16 GPa and the composition of the upper mantle. *Nature* **378**, 170-173.
- [11] Akaogi, M., Navrotsky, A., Yagi, T. and Akimoto, S.,1987: Pyroxene-garnet transformation: thermochemistry and elasticity of garnet solid solutions, and application to a pyrolite mantle. in *High-Pressure Research in Mineral Physics* (Manghnani, M. H. and Syono, Y., Eds.), Am. Geophys. Union, Washington, D. C., 251-260
- [12] Nakanishi, I.,1988: Reflections of P'P' from upper mantle discontinuities beneath the Mid-Atlantic Ridge. *Geophys. J.* **93**, 335-346.