

## 地震波トモグラフィーから見た南関東地方の蛇紋岩体

### The Existence of Serpentinized Wedge Mantle Inferred from a Tomographic Image beneath the Southern Kanto District, Central Japan

神谷眞一郎<sup>1)</sup>

Shin'ichiro KAMIYA<sup>1)</sup>

**Abstract.** Serpentinized peridotite is detected seismologically by mapping Poisson's ratio beneath the Kanto district, central Japan, because serpentinite has a higher Poisson's ratio than other rocks in the crust and upper mantle. We can image high Poisson's ratio region from the depth of 50 km to the earth's surface beneath Kanto Mountains continuously. Although magnetic large anomalies were observed along the Mineoka Ophiolite Belt, we have no tomographic image of the Mineoka Belt because of the lack of the spatial resolution of the seismic tomography. We need denser observations with higher precision and the improvement in the technique of the tomography for the seismic modeling of the Mineoka Belt.

**Key words:** seismic tomography, serpentine, Poisson's ratio

#### 1. はじめに

地下の三次元的な構造を地震学的に推定する方法のひとつとして、地震波トモグラフィという手法がある。この方法は、Aki & Lee (1976) や Aki *et al.* (1977) の研究によって始められ、それ以降、地球内部の様々な領域の三次元地震波速度構造が様々なスケールで求められてきた。関東地方においても、多くの研究者がこの地域の三次元地震波速度構造を推定し、テクトニックな議論を行ってきた（たとえば Horie & Aki, 1982）。

また、岩石実験の知見を紐解くと、地球内部に存在する多くの岩石について、それぞれの岩石が示す弾性波速度自体は、温度・圧力や岩石の種類などの様々な原因によって変化する。しかしながら、P 波速度と S 波速度の比 ( $V_p/V_s$ ) あるいはポワソン比は温度圧力依存性がともに極めて小さく、岩石の種類に固有の値を示す傾向にある。そして、蛇紋岩は他の岩石と比較して例外的に高いポワソン比を持つことが知られている (Christensen, 1996)。近年、この性質を根拠として、

地震波トモグラフィ解析によって得られた地球内部の地震波速度構造モデルから、マントルウェッジにおける蛇紋岩の存在が指摘されている。

Kamiya & Kobayashi (2000) (以降 KK2000 と略す) は、関東地方下の地震波トモグラフィ解析の結果から、関東山地下に沈み込んだフィリピン海プレート直上に顕著な低速度・高ポワソン比異常を示す領域を発見し、これが蛇紋岩の存在を示しているものと解釈した。Matsubara *et al.* (2005) は、大量のデータから関東地方下のより詳細な構造を推定し、KK2000 が示したのとはほぼ同じ位置に、 $V_p/V_s$  が標準よりも高い領域が存在することを指摘した。また、Nakajima *et al.* (2009) は、関東東海地方から東北地方南部までを含む領域の地震波速度構造を推定し、関東地方下に沈み込むフィリピン海プレートの東端のマントルスラブ領域が、東方から沈み込む太平洋プレート直上で高  $V_p/V_s$  となり、蛇紋岩化している可能性を指摘した。

本稿では、関東東海地方下の地震波トモグラフィの結果から、南関東地方下の構造に注目し、フィリピン海プレート直上のマントルウェッジで蛇紋岩化した領域が、関東山地下の地表付近までたどることのできる様子を示す。また、磁気探査の結果から嶺岡帯のオフィオライトの成因を議論した研究を紹介し、地震波トモグラフィの結果を用いた議論の可能性についても検討を行う。

<sup>1)</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト  
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25  
Earthquake and Tsunami Research Project for Disaster Prevention,  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa,  
236-0001, Japan  
kamiya@jamstec.go.jp

## 2. 地震波トモグラフィー解析

地球内部の構造を明らかにするために、地震波走時トモグラフィーという手法が用いられる。この手法は、標準的な地球内部構造モデル（深さ方向にのみ構造が変化する一次元モデルを用いることが多い）を仮定し、このモデルから計算される地震波の到着時刻と実際に観測された到着時刻とのズレをデータとして用いる。このズレを、地震波が通過した経路上の地震波速度に帰着させることによって、実際の地球内部における地震波速度構造モデルを推定しようというものである。

本稿では、Kamiya & Kobayashi (2007)（以降 KK2007 と略す）によって求められた地球内部の地震波速度構造モデルをもとに、南関東地方下に存在する蛇紋岩の様子についての議論を行う。KK2007 は、KK2000 と同様に、防災科学技術研究所関東・東海地殻活動観測網から得られるデータを元に、防災科学技術研究所の地震前兆解析システムの定常処理によって得られた地震の P 波・S 波の到着時刻データを用いて、関東東海地方下の三次元地震波速度構造の推定を行ったものである。

KK2007 では、深さ 30 km 程度よりも浅い領域での解像度を向上させることを意図して、KK2000 では用いていなかった浅い地震から各観測点に到達した P 波・S 波の到着時刻データを加えて解析を行った。データの選択に当たっては、KK2000 と同様に読み取り到着時刻精度の高いものだけを採用した。また、震源決定精度の高い地震だけを採用し、群発地震のように狭い範囲に多くの地震が集中している場合には適度に間引くことにした。その結果、用いた地震は全部で 18,805 個であり、データ数は、P 波到着時刻が 413,803 個、S

波到着時刻が 200,575 個となった。これは、KK2000 に対して P 波データ数が約 1.5 倍、S 波データ数が約 2.2 倍にあたる。用いた観測点数は全部で 106 である。用いた地震の震央と観測点の分布を図 1 に示す。

速度構造の推定にあたっては、KK2000 と同様に、地球内部の解析対象領域全域に適切な間隔のグリッドポイントを仮想的に配置し、対象領域内の任意の点の地震波速度偏差が各グリッドポイントの地震波速度偏差を内挿することによって与えられるものとして、各グリッドポイントにおける速度偏差を解くべきモデルパラメータとして取り扱っている。今回の解析で地球内部に最終的に配置したグリッドの間隔は、緯度・経度・深さ方向に  $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 8\text{-}10\text{km}$  である。求めたモデルパラメータは  $18,805 \times 4$  個の震源要素、 $106 \times 2$  個の観測点補正值、31,192 個のグリッドポイントの P 波速度偏差、28,792 個のグリッドポイントの S 波速度偏差となった。

地震波走時トモグラフィー解析では、地震の震源から観測点に至る地震波の波線経路が、求めるべき未知数である地球内部の地震波速度構造に依存して変化する。そして、解くべき観測方程式の係数は、この地震波線経路に従って与えられる。すなわち、解くべき観測方程式の係数が求めるべき未知数によって決まるという非線形の問題を内包している。そこで、問題の非線形性を克服するために、速度構造の修正と不均質媒質中での地震波線追跡を交互に繰り返し行う逐次非線形インバージョンを行った。その際、モデルパラメータの修正には Hirahara (1988) による ARTB 法を用い、不均質媒質中での地震波線追跡には Um & Thurber (1987) による Pseudo-Bending 法を用いた。

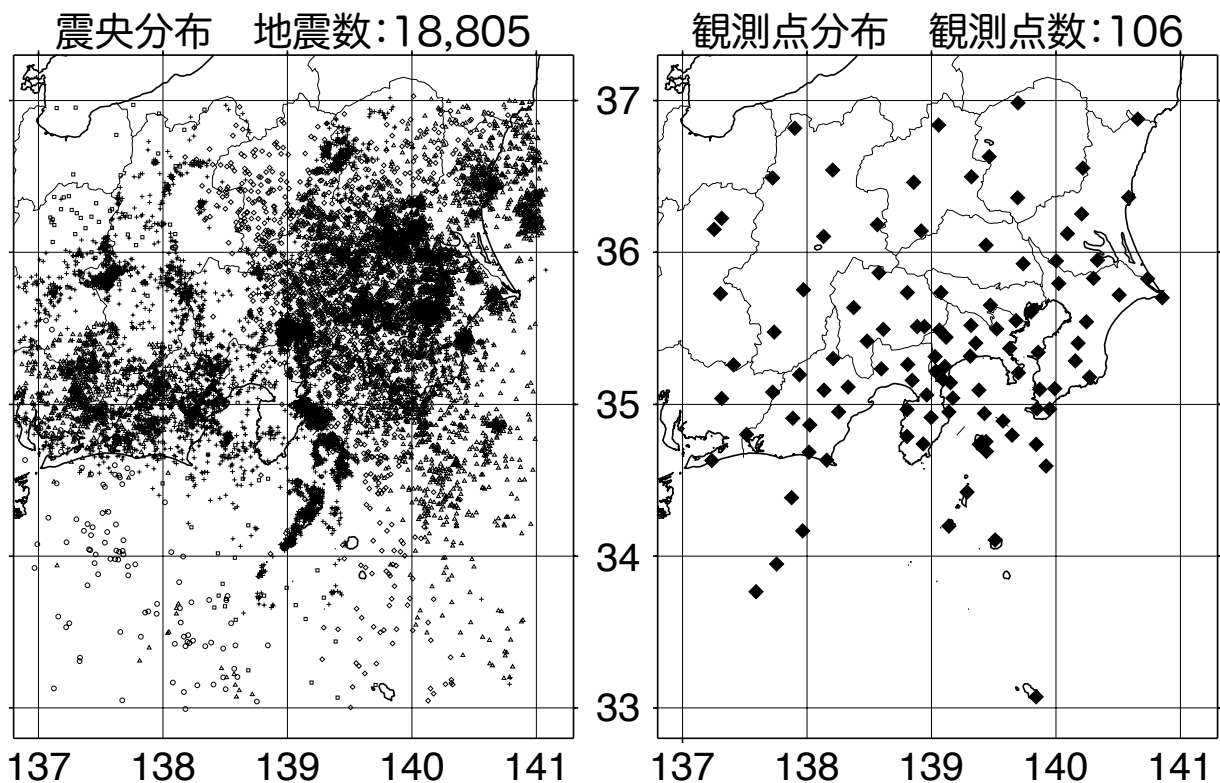


図 1. 解析に用いた地震の震央 (左) と観測点 (右) の分布.

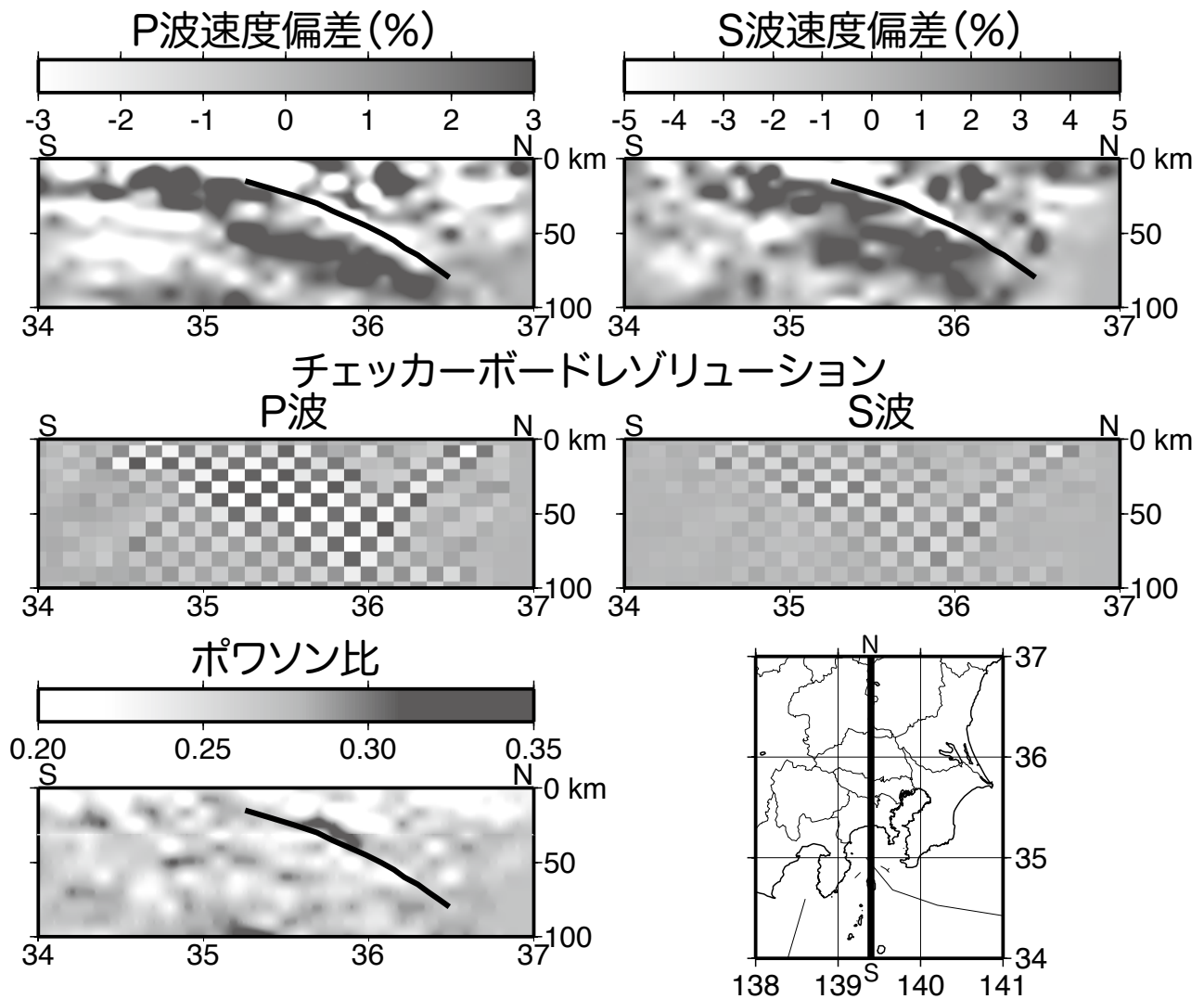


図2. 東経139.4°の南北測線に沿って切った、P波速度(左上)・S波速度(右上)・P波チェッカーボード解析結果(左中)・S波チェッカーボード解析結果(右中)・ポワソン比(左下)構造の鉛直断面図。右下に測線の位置を示す。P波速度・S波速度構造では、黒色の領域が標準よりも地震波速度が速い領域、白色の領域は標準よりも地震波速度が遅い領域を示す。ポワソン比構造では、黒色の領域がポワソン比の高い領域を示している。P波とS波で、速度偏差の値に対するグレイスケールが異なることに注意が必要。チェッカーボード解析では、はじめに仮定するチェッカーボード状の速度構造モデルに、P波・S波とも±5%の速度偏差を与えた。グレイスケールは、上段のS波速度構造のものを用いて表示している。

地震波トモグラフィーによって得られる速度構造モデルは、解析に用いた地震の震源から観測点に到達する地震波線経路の組み合わせによって、その信頼性に地域的不均質が生じる。ある領域を通過する地震波線が少数であったり、あるいは地震波線が通過する方向に偏りがある場合には、信頼性の高い解が得られない場合もある。従って、得られた結果を解釈するには、その解の信頼性に留意する必要がある。KK2007では、得られた解の信頼性を評価するためにチェッカーボードレゾリューション解析(Inoue *et al.*, 1990)という手法を用いた。この手法は、対象領域の地震波速度構造モデルとして、標準よりも高速度の領域と低速度の領域がチェッカーボード状に交互に分布するモデルを仮定し、実際のデータとして用いた地震と観測点の組み合わせに対して、この仮定したモデルを適用した場合の人工的なデータを理論的に計算する。そしてこの人工的なデータを、実際の解析に用いた観測方程式に従って解くことにより、仮定したチェッカーボード状の構

造がどの程度再現できているか評価する手法である。そして、チェッカーボード状の構造が良好に再現できている領域では実際のデータから得られた速度構造モデルの信頼性が高いと判断し、良好に再現できていない場合には解の信頼性が低いと判断される。

トモグラフィー解析の詳細については、Kamiya & Kobayashi (2007)を参照されたい。

### 3. 関東山地下の蛇紋岩

冒頭で述べたように、地震波トモグラフィーの結果から地球内部の蛇紋岩の存在を議論するにあたっては、Christensen (1996)の指摘に基づいている。

これに対して、Watanabe *et al.* (2007)や渡辺(2009)は、蛇紋岩には高温型と低温型のものが存在し、物性データを扱う際にはこれらを区別して考える必要があること、また、高ポワソン比の原因としては蛇紋岩だけでなく流体の存在が考えられ、両者の区別が困難であるという問題点を指摘している。しかしながら、渡

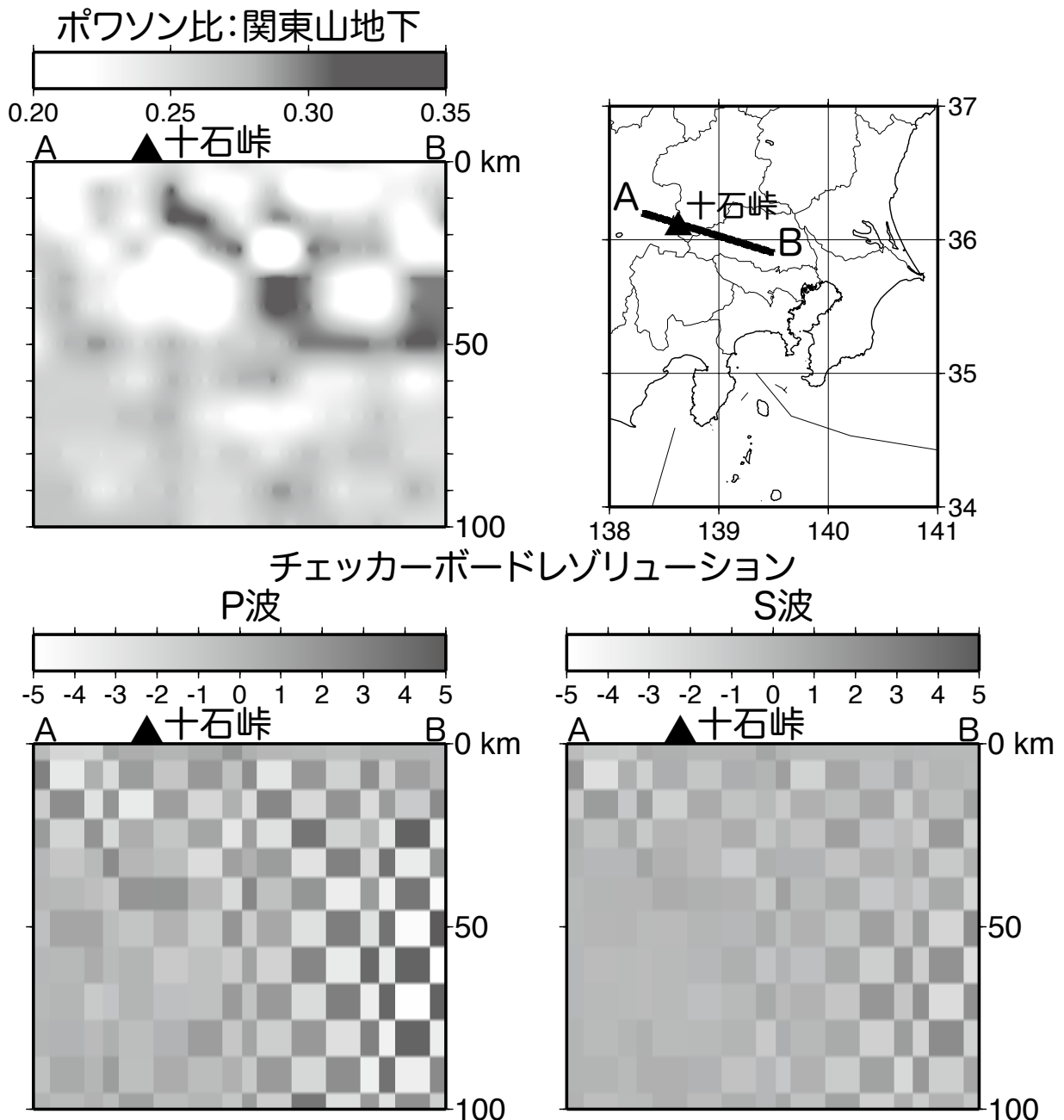


図3. 関東山地周辺を西北西-東南東方向の測線に沿って切ったポワソン比構造(左上)・P波チェッカーボード解析結果(左下)・S波チェッカーボード解析結果(右下)の鉛直断面図。グレイスケールは図2のものと同様である。▲は十石峠の位置に対応する。図の右上に測線の位置を示している。

辺(2009)によれば、観測によって得られた地震波速度やポワソン比の値から蛇紋石の割合や含水量を推定することには無理があるが、高ポワソン比の領域を単に「蛇紋岩化が進行している領域」として捉えることは可能であるとされている。

図2にKK2007によって求められた関東地方下の地球内部構造モデルの、東経139.4°に沿って南北方向に切った鉛直断面図を示す。図中で、黒実線はHori(2006)によって求められたフィリピン海プレート上面の位置を示している。図2の中段は、P波・S波それぞれに対するチェッカーボードレゾリューション解析の結果である。

一般的に、沈み込む海洋プレートは周囲よりも温度が低い。そのため、海洋プレート内部を伝わる地震波

は周囲よりも速く伝わるという特徴を持つ。図2を見ると、沈み込むフィリピン海プレートに対応して、南(図では左)から北に傾き下がる高速度領域がP波速度・S波速度ともにあらわれていることがわかる。そして、フィリピン海プレート上面に沿ってプレート上面の上下両側に、低速度領域があらわれている。また、ポワソン比の分布を見ると、フィリピン海プレート上面の上側には、深さ20-50kmの範囲に高ポワソン比の領域が存在していることが認められる。これは、KK2000で認められたものと同様に、沈み込むフィリピン海プレートがもたらした水によって、マントルウェッジに存在するかんらん岩の一部が蛇紋岩化した領域であると考えられる。そして、チェッカーボードレゾリューション解析の結果からは、フィリピン海プレート上面

付近のチェッカーボード状のイメージが P 波・S 波ともに良好に再現されており、上述の結果が十分に信頼できるものであるということが出来る。

図 3 に、関東山地周辺を西北西-東南東の測線に沿って切ったポワソン比の鉛直断面図を示す。影の濃い領域がポワソン比の高い領域を示している。下段は P 波速度モデル・S 波速度モデルそれぞれに対するチェッカーボードレゾリューション解析の結果である。点 B 直下の深さ 30-50 km にあらわれている高ポワソン比領域が、図 2 で示したフィリピン海プレートの上側に認められる蛇紋岩の領域の一部であるが、この蛇紋岩の領域から、管状の高ポワソン比領域が十石峠周辺の地表付近まで到達している様子を見ることが出来る。この管状の領域はマントルウェッジからまっすぐ上に上昇するわけではなく、上昇しやすい弱線をあたかも探しているかのように、はじめはほぼ水平に西方に伸びた後で上昇に転じていることがわかる。そして、この管が伸びる方向は、この鉛直断面に沿う方向であり、これはこの地域の地質構造を区分する構造線に対応している。また、チェッカーボード解析の結果からは、この高ポワソン比領域周辺でチェッカーボード状のイメージが比較的良好に再現されていることがわかる。

#### 4. 嶺岡帯の地球物理学的特徴

地震波トモグラフィーとは別に、地球物理学的に地下の構造を推定する方法として、地上磁気探査という方法がある。嶺岡帯は磁性鉱物を多く含む玄武岩、蛇紋岩より構成されているが、公表されている空中磁気異常図には嶺岡帯に起因するような磁気異常はあらわれていなかったり (NEDO, 1983)、あるいはこの部分のデータが欠落していたりした (地質調査所, 1980)。

Fujiwara *et al.* (1999) は、嶺岡帯を包含する地域の上部地質構造について議論するべく、房総半島南部 (35° 10' N 以南) のほぼ全域に高密度の観測点を分布させた全磁力地上探査を行った。また、DELP1987 航海によって測定された東京湾上におけるデータも採用した。その結果、嶺岡帯周辺では、東西方向に走向を持つ長波長の磁気異常パターンに重なって、短波長の孤立した異常が数多く目立ってあらわれているという結果が得られ、最も高い磁気異常の領域は嶺岡帯に沿ってみられた。また、35°00' N の南側にも高磁気異常の領域があらわれており、これらの高異常領域の間には低異常領域が分布していることがわかった。このような観測結果から、嶺岡帯周辺の磁気構造は、比較的浅い (深さ 1-3 km) 磁気基盤と 1 A/m 程度の磁化強度を持つ三次元磁気プリズムでモデル化された。この磁気プリズムは、南北方向の幅が 500 m 程度で、その最浅部は地表にあり、本体は鉛直方向に延びているものと見積もられた。この南北方向の幅 500 m は、オフィオライトの露頭の幅とほぼ一致するものである。また、嶺岡帯の南側には、薄いシート状の磁気プリズムが磁気基盤付近の深さに存在するものとしてモデル化された。そしてその厚さは 500 m 程度と見積もられた。このようなモデルから、嶺岡帯のオフィオライトは、低緯度地

域で産まれた海洋プレートの断片が、かつてのプレート境界で付加堆積物とともに押し上げられ地表まで押し出されたものであり、嶺岡帯の南側ではかつての海洋プレートの断片が付加堆積物の中に埋まっているものと解釈された。

#### 5. まとめ

ここまで見てきたように、関東地方の下に沈み込んだフィリピン海プレートの上側のマントルウェッジには、かんらん岩が蛇紋岩化した領域が存在することが認められる。一方、その直上に当たる関東山地では、地表で蛇紋岩が観察されている。地震波トモグラフィーによって求められた地球内部構造モデルを精査すると、マントルウェッジから関東山地の下まで続く蛇紋岩の道をたどることができる。すなわち、現在関東山地の地表で我々が手にする蛇紋岩は、深さ 50 km あたりから上昇して来たものであると考えられる。

嶺岡帯のオフィオライトは、磁気異常のモデリングの結果から、かつての海洋プレートの断片が付加したものと解釈されている。地震波トモグラフィーでは、その空間分解能の限界が数 km であることから、これをイメージングすることは、現時点では不可能である。しかしながら、より高精度・高密度の観測を行い、解析手法についても高度化を行うことにより、地震波トモグラフィーの空間分解能を向上させることにより、嶺岡帯オフィオライトが関東山地の蛇紋岩と同様に「根」を持つのであれば、その「根」の空間的な広がりを捉えることが可能になり、嶺岡帯オフィオライトの起源や成因について議論するための新たな材料を提供することができるものと期待される。

#### 謝辞

独立行政法人海洋研究開発機構の藤岡換太郎・高橋成実両博士には貴重な助言を賜った。深く感謝申し上げます。

#### 引用文献

- Aki, K. & H. K. Lee, 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquake. 1. A homogeneous initial model. *J. Geophys. Res.*, **81**: 4381-4399.
- Aki, K., A. Christofferson & E. S. Husebye, 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, **82**: 277-296.
- Christensen, N. I., 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.*, **101**: 3139-3156.
- Fujiwara, T., 1999. Magnetic structure of the southern Boso Peninsula, Honshu, Japan, and its implications for the formation of the Mineoka Ophiolite belt. *Earth Planets Spaces*, **51**: 413-424.
- 地質調査所, 1980. 房総沖-伊豆沖海域空中磁気図 (20 万分の 1) 空中磁気図シリーズ no.27. 地質調査所.
- Hirahara, K., 1988. Detection of three-dimensional velocity anisotropy. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **51**: 71-85.
- Hori, S., 2006. Seismic activity associated with the subducting

- motion of the Philippine Sea plate beneath the Kanto district, Japan. *Tectonophys.*, **417**: 85-100.
- Horie, A. & K. Aki, 1982. Three-dimensional velocity structure beneath the Kanto district, Japan. *J. Phys. Earth*, **30**: 255-281.
- Inoue, H., Y. Fukao, K. Tanabe, & Y. Ogata, 1990. Whole mantle P-wave travel time tomography. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **59**: 294-328.
- Kamiya, S. & Y. Kobayashi, 2000. Seismological evidence for the existence of serpentized wedge mantle. *Geophys. Res. Lett.*, **27**: 819-822.
- Kamiya, S. & Y. Kobayashi, 2007. Thickness variation of the descending Philippine Sea slab and the relationship with the volcanisms beneath the Kanto-Tokai district, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **112**: B06302. doi:10.1029/2005JB004219.
- Matsubara, M, H. Hayashi, K. Obara, & K. Kasahara, 2005. Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography. *J. Geophys. Res.*, **110**: B12304, doi:10.1029/2005JB003673.
- Nakajima, J., F. Hirose, & A. Hasegawa, 2009. Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity. *J. Geophys. Res.*, **114**: B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- 新エネルギー総合開発機構 (NEDO), 1983. 全国地熱資源総合調査 キュリー一点法調査 東西南部・関東及び東海地域 20 万分の 1 IGRF 残差磁気図.
- Um, J. & C. Thurber, 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**: 972-986.
- Watanabe, T., H. Kasami, & S. Ohshima, 2007. Compressional and shear wave velocities of serpentized peridotites up to 200 MPa. *Earth Planets Space*, **59**: 233-244.
- 渡辺 了, 2009. 地殻・マントル物質の地震波速度と電気伝導度: 沈み込み帯の水を探る. *地震* **2**, **62**: S541-S562.