

別紙 1

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Importance of crystallographic preferred orientation of antigorite for subduction zone dynamics  
(沈み込み帯ダイナミクスにおけるアンチゴライト結晶軸定向配列の重要性)

氏 名 永 治 方 敬

## 論 文 内 容 の 要 旨

プレート収束域は地球のダイナミックなシステムにおいて重要な領域である。この領域は地球表層からマントルへの大規模な物質循環が生じる場所であり、地震活動と火山活動の双方が注目される場所でもある。これらの地質現象がどのように島弧や活動的大陸縁辺域への海洋プレートの沈み込みと関係しているかについては一般的な意味解釈が得られている。また、沈み込みに関係したこれらの領域での熱構造推定の定量的なモデリングは非常に発展している。しかしながら、未だ制約できておらず、沈み込み帯のより完全な理解への妨げとなっている特性が依然として数多く存在している。ここでは、沈み込むプレート上方であり火山弧下方に位置する浅部前弧マントルに焦点を当てる。このマントル領域はその幾何学的形状から一般的にウェッジマントルと言われる。このウェッジマントルが少なくとも部分的に加水していることを示す証拠は地域的に得られている。元来 dry なかんらん岩マントルの加水によって蛇紋岩が形成される。沈み込み帯では、支配的な蛇紋石鉱物はアンチゴライトであるアンチゴライトの量、分布、そして結晶軸定向配列の程度はウェッジマントルの強度、含水量、そして地震特性と重要な関わりがあると予想される。しかし、これらうち1つもよく明らかになっていない。より詳細には、アンチゴライトを含む蛇紋岩は、地球の表層環境から深部マントルへの物質循環(例えば水や炭素、硫黄その他の元素)を研究する上で重要と考えられている。加えて、アンチゴライト蛇紋岩はまた沈み込み帯における深部低周波微動とスロースリップの繰り返し(episodic tremor and slip)の発達過程において重要な役割を果たしていると考えられている。本主論文では天然の変形したマントル物質試料の構造岩石学的研究と現在の沈み込み帯前弧域の地震学的解析を組み合わせたアプローチを行っている。このアプローチを行った動機は、地球物理学や構造地質学、岩石学の独立した研究分野で発展した手法の融合は、沈み込み帯ダイナミクスを理解するための我々の知見を前進させる手助けとなり、より統一的なアプローチを発展させることができるだろうという考えである。

### Part 1

アンチゴライトを多く含む蛇紋岩は、前弧マントルが沈み込むスラブから供給される水を含む流体による加水されることで形成する。スラブマントル間の接触帯は、強く加水され、また強く変形する傾向があり、この領域においてアンチゴライト蛇紋岩は、結晶軸定

向配列(CPO)を伴った強い面構造を示すことが予想される。アンチゴライトは非常に強い弾性異方性を持ち、強い CPO を持ったアンチゴライトが豊富なマントル領域の存在は、複数の沈み込み帯で観測される強い異方性の原因と推定される。天然の露出したマントル岩や変形実験の試料中のアンチゴライト CPO 測定は、沈み込み帯ウェッジマントルのアンチゴライト蛇紋岩の量を定量化する試みに用いられてきた。光学的な手法によるアンチゴライトの結晶方位の測定はその低い複屈折のために困難である。近年の電子後方散乱回折法(EBSD)の地球科学への導入は、多くの鉱物の CPO パターンを比較的短時間で決定することを可能にした。EBSD は、電子線が試料に照射される際に観察される菊池パターンと呼ばれる後方散乱電子による電子回折像を利用し、アンチゴライト粒子の方位の決定に原理的には利用することができる。しかし、アンチゴライトを含む蛇紋石鉱物は、試料準備の際に傷つきやすく、複雑であり一部は不規則な結晶構造を持つ。試料準備における潜在的な問題と結晶方位の一義的な同定は、出版されたアンチゴライト CPO パターンの正確性に関して重大な不確実性が存在することにつながり、EBSD 測定における最適手段の確立の必要性がある。

本主論文の Part 1 では、EBSD 法を用いたアンチゴライトの結晶方位測定のための適切な方法の発展をテーマにしている。本研究では、測定に使用する薄片の測定準備方法の違いによる影響と、信頼性の高いアンチゴライト CPO パターンを得るために最適な測定条件について調べた。主な結果は以下の通りである。1)面構造に対して垂直に作成した薄片試料を用いて測定する場合、EBSD マッピングから得られるアンチゴライト CPO パターンは、適応するデータのフィルタリングの方法によって著しい変化を示した。フィルターは、測定された EBSD パターンと既存の結晶構造から得られた理想的なパターンで定義された結晶方位間の差で表される mean angular deviation (MAD)値である。測定された方位と理想的な方位との間はよりよくフィットしていること意味する、より低い MAD を設定するに従って、結晶軸の集中する方位が明らかな変化したアンチゴライト CPO を示した。この変化は約 0.7 まで MAD 値を下げた場合に顕著に現れる。またこの値を下回ると、CPO に明らかな変化は現れない。TEM やシンクロトロン X 線の手法によって得られた結果と比較すると、MAD が 0.7 以下の条件で得られた EBSD の結果が良い一致を示した。2)面構造に平行に作成された薄片では、MAD を比較的高い 2.0 の値にまで上げてても EBSD によるアンチゴライト CPO パターンに明らかな違いは現れなかった。そのため、薄片試料を用いて、アンチゴライトの方位と CPO の信頼できる EBSD 測定結果を得るために、最も適した手法として面構造に平行に作成した薄片の使用、もしくは 0.7 以下の MAD 値を示すアンチゴライトの方位データの使用を推奨する。

## Part 2

アンチゴライト蛇紋岩は、マントルの加水された比較的低温の領域で安定である。アンチゴライト蛇紋岩は、かんらん石を多く含むかんらん岩マントルに比べ、化学的・物理的特性が大きく異なる。そのため、沈み込み帯におけるマントルの力学的・化学的挙動は、浅部の加水されたアンチゴライトが支配的な領域と、より深部の高温なかんらん石が豊富な領域との間で大きく変化することが予想される。境界は、アンチゴライトの脱水分解限界で表され、一般的に約 600°C である。この境界領域は、上部マントルの物理的特徴の急激な境界となることが予想される。アンチゴライトのこの脱水分解と新たに成長するかんらん石がかんらん石の CPO パターンに及ぼす影響につ

いては未だ詳細に研究されておらず、この相転移がかんらん石の CPO の形成に重要であるかもしれない潜在的可能性に関して明らかになっていない。

かんらん石は上部マントルの支配的な鉱物であり、かんらん石の CPO はこの領域の地震波異方性の主要な原因と考えられている。かんらん石の結晶軸定向配列(olivine CPO)は、上部マントル流動に直接関係する塑性変形によって形成することが広く受け入れられている。特に沈み込み帯上部マントルでは、かんらん石の変形実験と沈み込み帯の地震波異方性観測から、かんらん石の結晶学的  $a$  軸がマントル流動に関係した剪断方向に垂直かつ剪断面に平行に配列する、B-type olivine CPO がウェッジマントルで支配的な CPO パターンであると予想されている。さらに、これらの結果を基にした沈み込み帯のダイナミックな数値計算も行われている。しかし、B-type olivine CPO を示す複数の天然のかんらん岩試料から報告されるかんらん石の微細構造と形成条件(温度・差応力)は、かんらん石の実験的研究から予想される形成条件の範囲と合致しない。

Part 2 では、浅部ウェッジマントルで広く分布することが予想されるアンチゴライトを多く含む蛇紋岩の存在に着目し、アンチゴライトが強い CPO を持つ場合にアンチゴライトの脱水分解が上部マントルで新たに形成するかんらん石の配列に及ぼす影響に関して調査した。本主論文の静的な環境下でアンチゴライトが脱水分解しかんらん石を形成する天然の例では、アンチゴライトからかんらん石への topotactic な成長がかんらん石の CPO を発達させることが示されている。このアンチゴライトの脱水に関連した非変形なかんらん石の CPO 形成メカニズムは、塑性変形では説明することが難しかった B-type olivine CPO の天然試料の組織的特徴や形成条件を説明することができる。このことから、アンチゴライト片岩が浅部ウェッジマントルで形成し、その後温度上昇によって脱水した場合、結果として生じるかんらん岩は B-type olivine CPO を示し、そのような CPO パターンの存在はかんらん石の高歪塑性変形を必ずしも反映していない可能性がある。

### Part 3

沈み込むスラブの脱水に関係した蛇紋岩化は、一般的に比較的暖かい沈み込み帯でより広く分布すると考えられているが、これらの含蛇紋岩領域の含有率・分布域・考えられる変形に、共通見解は得られていない。現在、 $V_p$ 、 $V_s$ 、そして  $V_p/V_s$  値を含む地震波速度観測が沈み込み帯の蛇紋岩の含有量と分布域を検出し見積もるための有用な手段と広く認められている。しかし、地震波速度観測から見積もられたアンチゴライトの含有率は同一の沈み込み帯でも報告によって大きな幅がある。この幅は地震波速度観測に基づく推定に異方性を考慮する必要を示しているかもしれない。強く配列したアンチゴライトが分布する領域を地震波が伝搬する場合には、アンチゴライトの強い地震波異方性によって、地表で観測される地震波速度は伝播経路に依存して変化する。これはアンチゴライトの異方性と地震波経路の双方を考慮した研究によってアンチゴライト蛇紋岩の分布と含有率をより理解できる可能性があることを示している。

Part 3 では、沈み込み帯における鉱物の定向配列による地震波異方性の理論計算を行うプログラムコードを開発し、アンチゴライトが広く分布することが予想される琉球弧を例にアンチゴライトの配列、含有量、分布域の推定を行った。その結果、琉球弧ウェッジマントルで観測された S 波スプリッティングはウェッジの先端から少なくとも約 66km まで 54% 以上のアンチゴライトを含む蛇紋岩マントル領域の存在によっ

て説明できる。加えて、S波スプリッティングの観測を説明するには、この蛇紋岩化領域でアンチゴライト蛇紋岩の面構造の方位が鉛直方向からスラブに向かうに従ってスラブに平行に変化する必要があることも明らかになった。この同一のウェッジにおける面構造の配列の変化は前弧マントル対流の存在を示唆している。この地震波異方性モデリングから制約した蛇紋岩の分布、含有率を用いて、琉球沈み込み帯のダイナミックな数値計算を行った結果、スラブが左側から沈み込む図において、背弧マントル対流とは独立した、反時計回りの前弧マントル対流を示した。このウェッジマントルにおける大規模な蛇紋岩化と前弧マントル対流は、琉球弧と同様のS波スプリッティングが観測される他の沈み込み帯で生じている可能性がある。これは、蛇紋岩化と含水ウェッジマントルは冷たい沈み込み帯に比べ、比較的暖かい沈み込み帯でより発達しているという広く受け入れられている考えを見直す必要があることを意味している。