

縞状堆積物の解析手法の開発と 先カンブリア代縞状鉄鉱層への応用

(Developments of analysis methods for striped pattern of laminated sediments and its application to Archean Banded Iron Formation)

学位論文内容の要旨

本研究の目的は、縞状堆積物の縞状構造から過去の地球環境変動を高分解能で抽出するための解析手法の開発を行なうことである。これまでに手掛けた手法、それによって得られた縞状鉄鉱層（Banded Iron Formation）の高空間分解能一次元系列データおよび BIF の縞模様の特徴について、以下に述べる。

従来、堆積物断面の二次元データを一次元に変換する方法は、層理面に対して垂直方向にある特定のラインのデータを使うか（例えば Petterson, et al., 1994）、水平（層理面）方向への平均化（例えば Archer, 1994）が大部分であった。しかし、これらの方法では、縞の層理面方向に不均質性があったり多量のノイズを含んでいたりすると、堆積物の微細構造がつぶれてしまったりあるいは疑似ピークを読み違えたりという点で問題があった。最も進んだ研究としては、Ripepe et al. (1992) の地震反射法で使われている normal move out 法を用いて変形した縞をストレートにする方法が報告されているが、ユーザーの主観性に頼る部分が多く、我々が要求する解析レベルに達していないというのが現状である。そこで、本研究では、堆積物の縞模様を変形していても、高空間分解能の一次元データを客観的に得ることができる、“Lamination Tracer”と名付けられた数学的あるいは統計学的手法（Katsuta, et al., 2002）の開発を行なった。LT では、従来の手法で問題とされているような縞の層理面方向の不均質性を次のようにして取り除いている。まず、縞状堆積物断面の画像データを使って変形した縞状堆積物の縞模様の幾何学を計算することで堆積物の層理面あるいは堆積等時面（我々はこれをアイソクロン線と呼んでいる）を抽出する。そして、層理面に沿って 2D 画像データを平均することによって、バイアスのない 1D 系列データが作成される。本研究では、LT の理論と解析アルゴリズムの構築およびプログラムパッケージ Matlab version 5.3 による解析プログラムの開発を行なった。次にアルゴリズムの概要について述べる。

堆積物の縞模様（ラミナ）は同時刻に堆積物が沈積したことを示すアイソクロン線（堆積等時間面）である。縞が変形していない場合には、層理面に対して垂直方向に傾き 1 の

単調増加のアイソクロン関数を与えれば良い。縞が変形している場合には、単調増加関数に縞の小さい変形を記述した関数を加えたものがアイソクロン関数（後述）となる。一方、画像から縞の変形の幾何学を知るには画像の濃淡の変化が最大となる方向すなわち縞の傾斜（走行）を調べれば良い。画像中の局所的な縞の傾斜は、画像の濃淡の1次および2次微分係数から求める。しかし、微分操作はノイズを増幅させるため、それを抑えるために、濃度勾配が大きい部部では1次微分係数を重視し、曲率が大きい部分（尾根や谷）では2次微分係数を重視するように決定する。さらに、縞の傾斜分布画像をフーリエ変換し特定の波数成分を取り出すフィルタ処理を行なうことでノイズ成分を除去する。こうして求めた縞の傾斜を層理面方向に逐次積分したものと層準の相対時刻を表現する関数である層準方向に傾き1の単調増加関数の和すなわちアイソクロン関数が得られる。求めたアイソクロン線に沿って堆積物断面の二次元画像データを平均することによって高空間分解能の一次元データとその信頼性を表現する標準偏差データが作成される。実在データの解析サンプルとして、後述するBIFの画像データが用いられた。その結果、微細で変形した縞模様を忠実にトレースしたアイソクロン線が求められ、ノイズや欠損部分を含んだ不連続な堆積物断面画像からも、信頼性が高い一次元データを客観的に取得することが可能となった。

開発したLTおよび走査型X線分析顕微鏡（Scanning X-ray Analytical Microscope）を用いて、28億年前のカナダ・スレーブ地域の縞状鉄鉱層（Banded Iron Formation）の縞状構造を記載した。従来のBIFの縞状構造を記載した研究としては、次のようなものがある。Trendall (1973)では、25億年前の西オーストラリア、Hamersley Group、Weeli Wolli FormationのBIFの顕微鏡写真を用いて、チャート質メソバンド中のマイクロバンドの本数を数えて、21~28枚で平均23.3枚の周期性があることを発見した。Matsunaga, et al. (2000)では、西オーストラリアのCleaverville formation（33~31億年前）およびHamersley Group（25億年前）のBIFの縞状構造について、シンクロトロン放射光源を用いて得られたXRF画像による元素分布およびゼーンズ（X線近吸収帯端構造）によるFe、Mnの酸化状態によって記載が行なわれている。しかし、以下に示すような全長5.4m空間分解能0.1mmのBIFの元素組成および鉱物組成の一次元空間系列データはこれまでに報告されておらず、本研究で開発した手法が過去の地球環境変動を知る上で重要な地質学的記録媒体を提供できるツールであると考えている。

走査型X線分析顕微鏡（Scanning X-ray Analytical Microscope）によって得られた28億年前のBIFの主要7元素XRF画像（Si, P, S, K, Ca, Mn, Fe）は、LTによって一次元のXRFカウント柱状図に変換される。このXRFカウント柱状図は、BIFの縞状構造を抽出するために、EPMAによる定量データを用いて、BIFを構成する主要鉱物の組成を重量比で表現した柱状図（鉱物重量比柱状図）へ変換される。鉱物重量比柱状図から、カナダ・スレーブ地域（28億年前）のBIFの縞状構造には、次のような特徴があることが分かった。第一に、BIFの縞状構造はcm単位とmm単位の2つオーダーからの縞模様から構成されている。cm単位の縞には、Fe-richな縞（magnetite, 1~2種類のamphiboles）とSi-richな縞（quartz, magnetite）で構成されている。Fe-richな縞の中には、mm単位の縞がmagnetiteと1~2種類のamphibolesから構成されている。Si-richな縞の中には、mm単位の縞がmagnetiteとquartzから構成さ

れている。第二に、これらの縞模様には、リズムミクな変動パターンが見える。特に、cm 単位の Fe-rich な縞模様には、そのような特徴が顕著である。

参考文献：Archer, A. W., 1994. *Mathematical Geology*, 26(1), 47-65. Katsuta, et al., 2002. *Computers & Geosciences*, in press. Matsunaga, et al., 2000. *Resource geology*, 50(1), 75-80. Petterson, et al., 1993. *Journal of Paleolimnology*, 9, 195-208. Ripepe, et al., 1991. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61(7), 1155-1163. Trendall, 1973. *Economic Geology* 68, 1089-1097.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岡 田 尚 武

副 査 教 授 蓬 田 清

副 査 助教授 高 野 雅 夫 (名古屋大学大学院環境学研究科)

学 位 論 文 題 名

縞状堆積物の解析手法の開発と

先カンブリア代縞状鉄鉱層への応用

(Developments of analysis methods for striped pattern of laminated sediments and its application to Archean Banded Iron Formation)

海底や湖底堆積物を用いて古環境を高分解能復元する研究は近年めざましく発展したが、数十億年間を対象とする場合、従来の手法を適用することはできない。これは、化石が産出しないばかりか、地層の乱れが多く、この時間スケールでは天体力学周期が変化するためである。そこで申請者は、地球形成から現在までの天体力学周期の変遷を理論計算により見積もった I-K ダイアグラムを用いて、堆積物の縞状構造を定量的に解読する方法論を確立することを目的とし、堆積物の縞状構造から数十億年の時間スケールで月-地球系力学進化に関連する各種現象（潮汐周期や日射量変動）と地球表層システムの進化変遷の解明を目指した。

従来、堆積物断面の画像を一次元に変換する方法は、層理面に対して垂直方向にある特定の直線上のデータを抽出するか、水平（層理面）方向にただ平均化するかであった。しかし、縞の層理面方向に不均質性があったり多量のノイズを含んでいたりすると、疑似ピークを読み違える点や堆積物の微細構造がつぶれる点で問題があった。そこで申請者は、人工的に作成した縞状画像を使って、変形した縞状構造の変形幾何学を解析することで縞状構造のアイソクロン線（堆積物の層理面）を抽出し、それに沿って画像を平均することで縞状構造の水平方向の不均質性（褶曲やブーディン構造）を取り除いた一次元プロファイルを作成する、という解析アルゴリズムとその解析プログラムを開発した。この解析方法は、画像処理法 Lamination Tracer（以下 LT と呼ぶ）と呼ばれている。開発した解析アルゴリズムを後述する縞状鉄鉱床(BIF)に適用した結果、多量のノイズや欠損部分を含んだ BIF の断面画像からでも、微細で変形した縞模様を忠実にトレースした層理面が求められ、より信頼性の高い一次元データを客観的に取得することが可能となった。この研究成果は、国際誌 Computers & Geosciences に解析プログラムを添付して投稿し受理された。

BIF の縞状構造の成因及び縞の周期性はよく判っていない。そこで申請者は、BIF の縞状構造を数 100 m から数 m のスケールで連続的に記載するために、28 億年前の北西カナダ・Slave 地域の BIF を用いて、高分解能の BIF の化学組成と鉱物組成の一次元プロファイルを作成するアルゴリズムの開発を行なった。BIF 断面の XRF 画像を LT によって、主要 7 元素 (Si, S, P, K, Ca, Mn, Fe) の一次元プロファイルを作成し、主要 4 鉱物が独立に堆積して縞状構造を

形成していることを明らかにした。また、1) cm 単位の縞状構造がありその中に mm 単位の縞が存在する、2) Fe に富む縞と Si に富む縞が互層し、3) 組成の異なる 3 種類の縞状構造が存在する、などの新たな事実を明らかにした。

これを要するに、申請者は、縞状堆積物を用いた先カンブリア代の地球環境変動の研究に関して、新しい方法論をもたらしたと評価できる。

よって申請者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。