

学位論文題名

Systematic Sedimentary Rhythm Analysis
of the Nakayama Formation in Sado Island
in the Japan Sea.

(佐渡島中山層の体系的堆積リズム解析)

堆積物や堆積岩の構成要素の律動的な変化である堆積リズムは地球環境の変遷や表層環境ダイナミクスを明らかにするための貴重な記録である。中期中新世から初期鮮新世までの珪藻質泥岩を主体とする佐渡島中山層を対象として堆積リズム解析を体系的に研究した。堆積リズム解析とは本研究において体系化した以下のような過程で行う研究手法である。

第1は、野外における詳細な調査や記載および系統的な高分解能のサンプリングである。本研究では中山層の模式地である大佐渡地域質場川流域を1/100の精度で調査し、中山層の分布と層序を構築した。サンプルは、地層オーダー、単層オーダー、カラーバンディングオーダー、ラミナオーダーの4つの空間スケールの異なるオーダーで採取した。第2は、採取した試料の定量的な組成分析である。ここで組成とは化学組成や鉱物組成など対象とする堆積物の構成要素の組成である。本研究では化学分析には蛍光X線分析を、鉱物組成分析には粉末X線分析を行った。第3は、堆積リズムを発生する堆積システムのモデル化である。化学分析値および鉱物組成との比較検討から、中山層を構成する主成分を明らかにし、その含有量を見積る。第4は、深さ領域で表された組成変動リズムを時間領域の沈積流量(Mass Accumulation Rate)への変換である。沈積流量は化学組成(重量%)にかさ比重と堆積速度の積として定義され、ある組成の他に對する希釈の影響や堆積速度の変化による影響を取り除くことができるので、単位時間単位堆積あたりの変量を定量的に評価できる指標であり、海洋学におけるフラックスと単位において等価である。第5は、沈積流量で表されたりズムの数学的な解析と解釈である。リズムの解析には最大エントロピー法と最小二乗最適曲線当てはめ処理を組み合わせたMemCalcを使用した。第6は、沈積流量で表されたりズムが意味する古海洋学的、古環境的な意味の考察と評価である。本研究では生物源シリカ沈積流量として推定される生物生産性変動、陸源性碎屑物質の沈積流量の変動の復元を行った。また、岩相の変化から推

定される底層水の酸化度との関係から中山層の堆積環境を推定した。こうして、中山層の堆積リズムが記録する表層環境の復元が体系的に行われる。

また、佐渡島中山層は100 μ mオーダーの白い層と黒い層からなるラミナ（葉層）が保存されており、中期中新世から初期鮮新世までの年オーダーの海洋変動の復元のために重要な意味をもっている。この微細な堆積構造を解析するために、画像解析を軸とした堆積リズム解析手法を開発した。まず、堆積物断面をCCDカメラからアナログ入力しコンピュータ上でデジタル化する。デジタルイメージから鉛直方向の面的な濃度（256階調）のプロファイルを作成する。このプロファイルから長周期（1mm以上の波形）を除去した後、層厚、白い層黒い層それぞれの濃度などのラミナパラメータを算出する。このパラメータを化学分析や鉱物組成分析などの結果と比較検討することから、画像データから古海洋変動を推定することができる。

堆積リズム解析の結果、以下のような点が明らかとなった。第1に、中山層は、生物源シリカと陸源性碎屑物（デトリタス）を主成分とする2成分系である。第2に、ラミナの新しい画像解析を開発適用した。電子顕微鏡観察からは、中山層のラミナは、珪藻の殻からなる白い層と、珪藻殻以外に放散虫、珪質鞭毛藻などの珪質微化石の遺骸と碎屑物や有機物質粒子などの混合物からなる黒い層から構成される。ラミナ解析から得られた白い層と黒い層から構成されるラミナ一組の層厚のモードは0.155mmであり、珪藻化石帯の年代とその間の層厚から推定される平均堆積速度0.107mmと調和的で、ラミナ一組は1年を意味すると結論される。第3に、堆積リズムは時間領域に於いて解析する必要があるので、個々のサンプルについて沈積流量を計算した結果、組成リズムと沈積流量リズムとは無視できない相違が認められた。地層オーダーおよび単層オーダー（時間としては $10^4 \sim 10^6$ 年オーダー）では生物源シリカ沈積流量はほぼ一定なのに対し、デトリタス沈積流量リズムは大きな振幅で振動する。カラーバンディングオーダー（時間的には $10^2 \sim 10^3$ 年オーダー）では逆にデトリタス沈積流量リズムはほぼ一定なのに対し、生物源シリカ沈積流量は大きな振幅で振動する。ラミナオーダー（時間的には $10^0 \sim 10^2$ 年オーダー）は、沈積流量そのものではなくデータが他のスケールと等価ではないが、生物源シリカ沈積流量、デトリタス沈積流量ともに周期的な変動を示す。第5に、古海洋学的復元として以下のような点が明らかとなった。地層オーダー（ $10^4 \sim 10^6$ 年オーダー）では、生物源シリカ沈積流量、デトリタス沈積流量変動は底層水の酸化還元の変化と関連している。特に、9.1, 8.1, 6.3Maころに認められる浮遊性有孔虫の酸素同位

体から推定される地球規模の寒冷化や海水準の低下と連動している。生物源シリカ沈積流量は時間の経過とともに減少する傾向を示し、デトリタス沈積流量は逆に増加する。この傾向は底層水の酸化と海水準の上昇の傾向と一致する。単層オーダー ($10^1 \sim 10^5$ 年オーダー) ではミランコビッチスケールで生物源シリカ沈積流量、デトリタス沈積流量が変動している。底層水との関連では、デトリタス沈積流量が大きいとき、生物源シリカ沈積流量は一般に低く、底層水は相対的に還元的である。デトリタス沈積流量が小さいときには、生物源シリカ沈積流量は一般に高く、底層水は相対的に酸化的である。これらは海盆内の海水準の変化に対応していると推定される。ラミナオーダー ($10^0 \sim 10^2$ 年) では、佐渡島は当時半深海～深海の海底の堆（バンク）であったと古地理学的な復元から推定されるので、底層水が湧昇することで珪藻が繁殖する季節的なブルーミングによって形成されたと推定される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 小泉 格
副査 教授 加藤 誠
副査 助教授 鈴木 徳行
副査 助教授 多田 隆治

(東京大学大学院理学系研究科)

学位論文題名

Systematic Sedimentary Rhythm Analysis of the Nakayama Formation in Sado Island in the Japan Sea.

(佐渡島中山層の体系的堆積リズム解析)

“堆積リズム”として認識される堆積物の律動的な変化は、過去の地球表層環境の変動を詳細に記録している。表層環境のダイナミクスの変化は、生物源物質・碎屑物質・火山性物質・化学沈殿物質など堆積物を構成する種々の要素に変化を与え、様々な変動リズムとして堆積物に保存されている。堆積物の構成要素に見られる堆積リズムは、生物生産性リズム・碎屑物量の供給と希釈のリズム・構成物質の溶解のリズムなど複数の変動が、1つのまとまりを持ったシステムとして挙動した結果生じた見かけの変動であるので、過去の環境変動を定量的に復元するためには、それぞれのリズムの変動効果を評価することが必要であった。

申請者は、このような背景のもとに堆積リズムを形成するメカニズムを解明し、そのモデル化を行うために、中期中新世から初期鮮新世までの海洋変動を記録している佐渡島新第三系の中山層を例として、(1) 詳細な地質調査を行い、中山層の分布と地質層序を確立し、岩相を詳細に記載した結果、中山層の珪藻質泥岩はラミナの発達する泥岩・生痕化石の発達する泥岩・塊状泥岩に細分され、それらが様々な組み合わせで互層することを明らかにした。(2) 構築した地質層序をもとに、中山層全体 (formation-scale) にわたるX線粉末回析法による半定量的鉱物組成の分

析、蛍光X線分析法による主要化学組成の分析、および有機炭素量測定を行った。その結果、中山層を構成する主要成分である生物源シリカとデトリタス（碎屑物質）の2成分の量比を決定し、組成成分系としての堆積システムをモデル化した。（3）全中山層スケール (formation-scale)、単層スケール (bed-scale)、および葉理スケール (lamina-scale)における2成分の量比についての組成変動リズムを、試料の乾燥密度 (dry bulk density (g/cm³))と珪藻化石年代値から算出した平均堆積速度に基づき、沈積流量 (Mass Accumulation Rate) に変換して他成分による希釈や堆積速度の変化による影響を取り除いた。その結果、葉層は生物源シリカの沈積流量が多い時期に形成されたことを明らかにした。（4）厚さが20~200μmオーダの葉理スケール (lamina-scale) の断面を画像処理し、白黒ラミナの縞状構造を解析する手法を考案した。

申請者は、以上のような詳細な分析結果に基づいて次の結論を導きだした：（1）中山層は生物源シリカとデトリタスの2成分系堆積システムでモデル化できること。（2）堆積システムの構成要素の変動は時間のオーダによって、その特徴が異なり、100万年の変動オーダ (formation-scale) では生物源シリカに対して碎屑物量が大きく変動する。これは、岩相から推定される底層水の酸化度の変動と同調し、当時の日本海の海水準変動や底層水循環と連動しているとした。7000年の変動オーダ (bed-scale) では碎屑物量は一定であるが、生物源シリカが大きく変動する。数10年~数100年の変動オーダ (lamina-scale) では白黒ラミナの1組が1年を示し、その厚さが生物源シリカの沈積流量と相関するので、白黒ラミナは生物源シリカの年オーダの変動を示すとした。（3）7000年間にわたる葉理スケールの堆積リズムから推定した生物源シリカの変動はフラクタル構造を成すが、その原因を1年のブルーミングを素過程とした生物生産を規定する海洋表層水の厚さの自己組織的な変動であるとした。

以上のように、本論文は堆積リズムの体系的解析法を具体的な事例に基づいて世界で始めて提示した。この体系は、地質学的基礎調査・堆積リズムを形成するメカニズムのモデル化・堆積リズムの検出・真の変動リズムの推定・リズムの解析、そして表層環境変動の推定、の各プロセスから構成されている。

審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認めた。