

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 半導体計測システム

September 1998 ■ No.17

X線分析顕微鏡によるストロマトライトの測定 —地質学的意義と測定—

Analyses of Stromatolite using
X-ray Analytical Microscope

小出良幸・吉光克弘

Yoshiyuki KOIDE, Katsuhiro YOSMITSU

(Pages 54—58)

株式会社 堀場製作所

X線分析顕微鏡によるストロマトライトの測定

- 地質学的意義と測定意義 -

Analyses of Stromatolite using X-ray Analytical Microscope

小出良幸* 吉光克弘

(* 神奈川県立 生命の星・地球博物館)

要旨

堀場製作所が開発したX線分析顕微鏡(XGT-2000)を用いてストロマトライト(stromatolite)の分析をおこなった。ストロマトライトの分析結果と地質学的特徴をまとめ、本装置の地球科学、地質学、岩石学への適用の可能性を検討した。

Abstract

We analyzed stromatolite using X-ray Analytical Microscope(HORIBA XGT-2000). We described the analytical results and discussed for the chemical and geological feature of stromatolite. The ability of this machine demonstrated on the geological application.

1. はじめに

ストロマトライト(stromatolite)とは、シアノバクテリア(cyanobacteria)などの光合成にともなう分泌物によって形成された同心円状の形態を持つ堆積岩である(図1)。シアノバクテリアは表層で活動し、時間経過に伴って縞状構造を形成していくと考えられている。ストロマトライトの縞状構造は時の流れを記録しているタイムカプセルと見なせる。X線分析顕微



図1 ストロマトライトの産状

Occurrence of stromatolite by Great Slave Lake, Yellowknife, Northeastern Territory, Canada.

カナダ北西準州 Yellowknife, Great Slave 湖畔の産地。上側がストロマトライトの水平断面で、下側が垂直断面である。Upper side of the outcrop is the horizontal section, and the lower side is the vertical section.

鏡(XGT-2000)は、100mm × 100mm の広範囲にわたり、直径10 μm 以下の微少部分ごとに元素分析をし、サンプル中の元素分布を二次元表示できる装置である。そのため、本装置はストロマトライトのような長い時間を記録している試料の分析には適している。本稿では、縞状鉄鉱層(BIF: Banded Iron Formation)の分析を本誌(Readout No.16, 1998)で報告したのに続いて、XGT-2000の地質学的応用の2例目としてストロマトライトの分析をおこなったので報告する。

2. 分析

2.1 試料

試料は、カナダ北西準州 Yellowknife, Great Slave 湖畔から採集したものである。湖畔でストロマトライトは、数十 m の層厚を持ち広く分布している。原生代前期の約 20 億年前に形成されたものである。

分析するために、試料をたて 90.7 mm, よこ 39.6 mm, 厚さ 16.5 mm に整形した。試料は、縞模様が垂直になるように切断した。時間軸が切断面に沿い、時間が最大にとれるためである。分析試料は、ストロマトライトの特徴である同心円状の模様ではなく、材木の正目にあたるような平行な縞模様の断面となっている(図2)。分析する面は、平坦に切断し、研磨剤(コランダム)によって最終的には 3000 番まで研磨した。分析面は光学顕微鏡で観察するには十分な研



図2 ストロマトライトの試料
Specimen of stromatolite

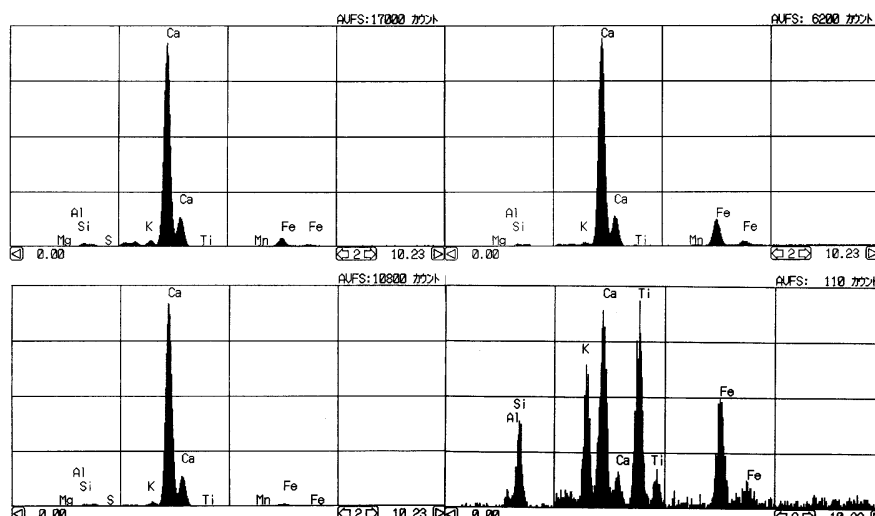


図3 スペクトル分析
Spectral analyses

磨度である。

試料は数 mm 間隔で暗灰色と淡灰色、淡黄色の縞模様が繰り返されている。暗灰色のほうは淡灰色、淡黄色より優勢である。太い黒色の脈が2本と薄い脈が数本認められる。脈はストロマトライトの球状の構造に沿って平行に入ったものである。脈がストロマトライトの構造を切っているところがある。脈は、ストロマトライト形成後、地層として固結する時に貫入したものである。

左上：試料全体
(測定条件; 30kV, 100 μm, 2000sec)
Upper left: Whole specimen
左下：Ca-rich 領域
(30kV, 100 μm, 400sec)
Lower left: Ca-rich area

右上：Fe-rich 領域
(30kV, 100 μm, 400sec)
Upper right: Fe-rich area
右下：K-rich 領域
(30kV, 10 μm, 1000sec)
Lower right: K-rich area

2.2 分析方法

本報告では、同一試料を3回分析した。第1回目は1997年10月20日に35.328 × 35.328 mmの範囲の部分を、第2回目は11月25日に試料全体(94.208 × 94.208 mm)を、第3回目は1997年12月22日に3.072 × 3.072 mmの範囲の分析した。第1回目は、ごく普通に行う分析方法で、光学顕微鏡や電子線微小部分分析装置(EPMA)で使用する薄片サイズの範囲を分析した。第2回目は時間軸を最大にとった分析で、試料全体を100 μmのX線ビーム径でおこなった。第3回目は特徴的な小領域の分析を10 μmのビーム径でおこなった。それぞれの分析条件を表1に示した。

表1 ストロマトライトの測定条件
Analytical condition of stromatolite

	第1回	第2回	第3回
測定日	10月20日	11月25日	12月22日
ビーム径	100 μm	100 μm	10 μm
加速電圧	50 kV	30 kV	30 kV
測定範囲	35.328 × 35.328 mm	94.208 × 94.208 mm	3.072 × 3.072 mm
測定時間	152,000 sec	86,000 sec	154,000 sec
パルス処理時間	P3	P2	P2

2.3 分析結果

ストロマトライトのスペクトル分析の結果を図3に示した。図3には、試料全体と試料における化学的に特徴的のある部分のスペクトル分析を示した。試料全体の元素濃度分布(面分析)の結果を、図4に

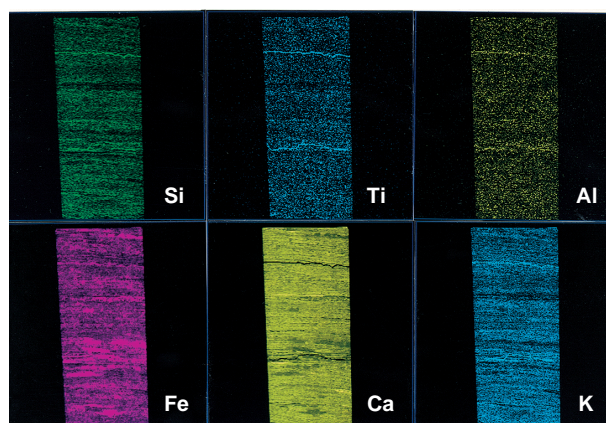


図4 試料全体の元素濃度分布
Composition map of the whole specimen

示した。全体の平均化学組成と各領域の特徴的な化学組成を表2に示した。

ストロマトライトは、CaとFeを主要な成分としている。ストロマトライトは、Caの多い(Ca-rich)領域、Feの多い(Fe-rich)領域、そしてKとTiの多い(K-rich)領域に区別される。

Ca-rich領域は、Caのほかに、Siの含有量が多く、Fe

表2 ストロマトライトの化学組成
Chemical composition of stromatolite

	Whole	Ca-rich	Fe-rich	K-rich
SiO ₂	17.57	10.67	12.75	63.92
TiO ₂	0.35	0.16	0.26	1.96
Al ₂ O ₃	2.59	2.59	0.28	11.24
Fe ₂ O ₃	1.94	0.59	4.39	1.72
MnO	0.09	0.11	0.18	-
MgO	5.61	2.97	23.66	-
CaO	70.27	81.53	57.72	11.15
K ₂ O	1.46	1.12	0.75	10.01
SO ₃	0.12	0.26	-	-

Whole は試料全体の平均化学組成, Ca-rich はCa に富む部分, Fe-rich はFe に富む部分, K-rich はK に富む部分の化学組成である。値はwt% で示した。合計が100wt% になるように再計算してある。

“Whole” means the composition of the whole rocks, “Ca-rich” is that of Ca-rich area, “Fe-rich” is of Fe-rich area, “K-rich” is of K-rich area. Values are normalized to 100wt%.

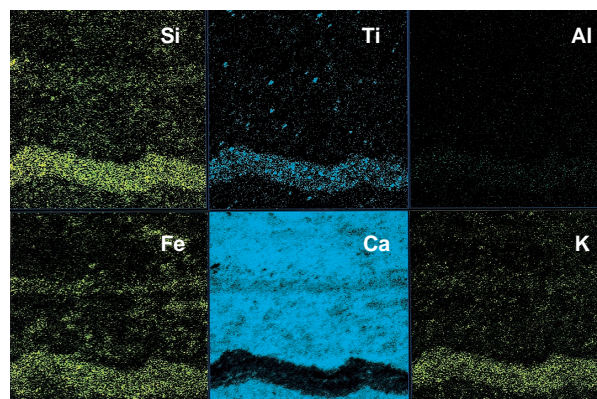


図6 K-rich 領域付近の元素濃度分布
Compositional map around K-rich area

が少ないという特徴がある(図5)。Fe-rich 領域は, Fe のほかに, Mg, Ti, Ca, Si の含有量が多く, Ca が少ない。K-rich 領域は, K のほかに, Ti, Al, Fe の含有量が多い。Ca-rich 領域は肉眼では暗灰色と淡灰色を呈する部分である。暗灰色と淡灰色の部分は, 化学組成の上ではあまり差がなく, 暗灰色の部分のほう

がややCa に富む傾向がある程度である。このような見かけの違いは, 暗灰色の部分では再結晶があまり進んでおらず, 淡灰色の部分は再結晶が進んでいるためと考えられる。Fe-rich 領域は淡黄色で, K-rich 領域は黒色の部分に相当する。化学組成からみれば, Ca-rich 領域とFe-rich 領域が縞模様を形成している。K-rich 領域は, 肉眼では黒い脈に相当し, 本試料内では太い脈が2本と細脈が数本確認できた。

K-rich 領域付近を詳細に見ると(図6), K-rich 領域の部分は明瞭な層を成すが, Ca-rich 領域とFe-rich 領域の縞模様は鮮明でない。そして, Ti とFe に富む粒子が散在していることがわかる。Ti-Fe 粒子は, 脈の中にもたくさん認められる。

3. 議論

3.1 ストロマトライトの化学的特徴

化学組成の特徴や岩石組織の特徴から, 構成鉱物を推定することが可能である。Ca-rich 領域は方解石(calcite; CaCO₃)と石英(quartz; SiO₂)からなり, Fe-rich 領域はFe 酸化物鉱物(hematite; Fe₂O₃)とドロマイト(dolomite; CaMg(CO₃)₂), 石英から

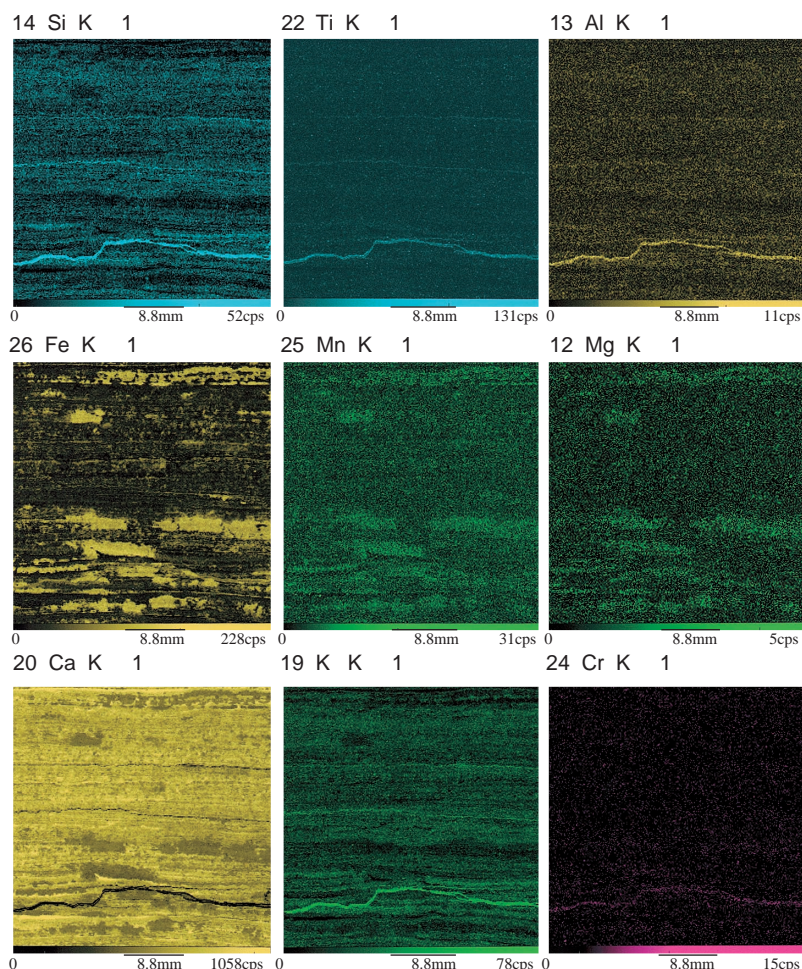


図5 35mm × 35mm 領域の元素濃度分布
Compositional map of 35mm x 35mm area

なり、K-rich領域はカリ長石(K-feldspar; KAlSi_3O_8)と石英、Fe-Ti 酸化物鉱物(ilmenite; FeTiO_3)からなると推定できる。散在するTiとFeに富む粒子は、Fe-Ti 酸化物鉱物(ilmenite)と考えられる。縞状構造はCa-rich領域の方解石とFe-rich領域のFe 酸化物鉱物(hematite)で特徴づけられる。

ストロマトライトを形成する生物は現世でも存在する。現世のストロマトライトは、高塩濃度の海水から淡水まで多様な環境で生成されていることがわかっている(Golubic, 1991)。しかし、カナダのような大規模な産出は知られていない。これは現世のストロマトライトを形成する生物が広いニッチを持っていないことを示している。これは、過去のストロマトライトが大量に産出する点において、大きく異なっている。しかし、その違いの原因はわかっていない。現世のストロマトライトの起源も不明で過去のストロマトライトとの対比も不明瞭である。

過去のストロマトライトが光合成生物であることから、太陽光線の届く浅海で形成されたことは間違いない。Ca-rich領域はシアノバクテリアの生命活動によって形成され、Fe-rich領域はシアノバクテリアの活動の衰えたときに形成されたと考えられる。シアノバクテリアの活動が衰えると、縞状鉄鉱層と同じ起源のFe酸化物鉱物(hematite)と陸源物質がゆっくりと堆積したと考えられる。

以上の化学的特徴から、ストロマトライトの縞模様は、温帯であればCa-rich領域は生物活動の活発な夏季に、Fe-rich領域は生物活動の衰えた冬季に相当するはずである。また形成環境が熱帯のモンスーン帯であれば、生物活動は常に活発なので、Ca-rich領域は陸源物質の供給の少ない乾季に、Fe-rich領域は陸源物質の供給の多い雨季に相当する。どちらのモデルも、1年で一組の縞模様が形成されることになる。ストロマトライトの成因は、日輪や年輪説などのモデルがあったが、本分析によって年輪説が有力になってくる。

モデルの違いは、陸源物質の供給速度あるいは堆積速度に現れることになる。そして20億年前のストロマトライトの生育環境への強い束縛条件となるであろう。正確なモデルは、今後の研究で明らかになるであろう。

3.2 ストロマトライトの地質学的特徴

ストロマトライトを形成するシアノバクテリアは、地質時代には今からは想像できないほど大繁栄をしていた。本試料を採集したカナダのGreat Slave湖畔にはストロマトライトからなる地層が広く分布する。

ストロマトライトの形成は、約25億年前から5億年前に大規模におこなわれ、10億年前ころにピークを迎える(図7)。ストロマトライトは22億年前以降から

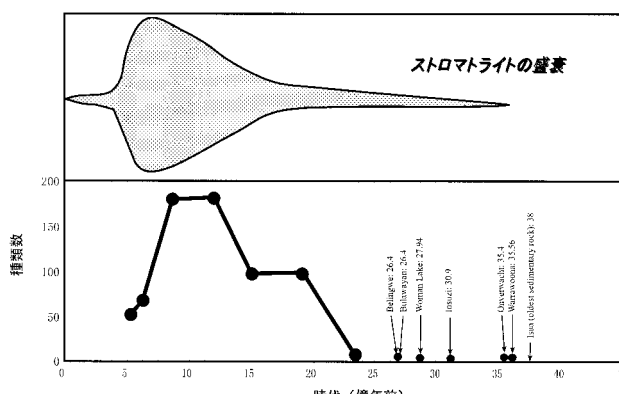


図7 ストロマトライトの産出量の時代変化
Age change of abundance of stromatolite

上の図はストロマトライトの産出頻度を盛衰状況として示し、下は種類数の変化を示した。データはAwramik (1991)とWalter (1983)による。

The Upper diagram regards the frequency of stromatolite as vicissitude of stromatolite, the lower shows the number of species. Date from Awramik(1991) and Walter(1983).

急速に増加し、15億～12億年前に大量に生産され、6億年前頃に急激に衰退する(Awramik, 1991)。

15～12億年前には浅い大陸棚的な環境が広がり、シアノバクテリアが大量発生をしたと考えられている。15～12億年前という時代は、それ以前に存在していた最初の超大陸ローレンシアが分裂し、10億年前の超大陸ロディニアへと変化する時代である。大陸棚の多い時代といえる(丸山, 1994)。6億年前頃には、超大陸ロディニアが形成され、ストロマトライトの生育環境が減り、多細胞生物の出現によってシアノバクテリアの捕食をしたため、急激な衰退が起こったと考えられる(川上, 1997)。

ストロマトライトの繁栄と急激な衰退は、地球環境の変化をもたらしたと考えられる。ストロマトライトはシアノバクテリアの群体によって形成される。シアノバクテリアとは光合成をする生物で、遊離酸素を放出する。25億から5億年前には大量の遊離酸素が形成されたことになる。それまで地球表面は酸素のない還元的な環境であったのが酸化的な環境に変化する。還元的な環境では嫌気性生物が繁栄していたのが、酸化的環境に変化することによって大絶滅がおこる。嫌気性生物にとって酸素は、体を酸化し分解する猛毒となって作用する。

遊離酸素は海水中に溶け込み、海水中のイオンを酸化させる。Feは酸化され沈殿し縞状鉄鉱層となる。

縞状鉄鉱層の形成時期がストロマトライトと同じ20億年前前後で一致するのは上述のシナリオの有力な根拠となる。

ストロマトライトは、地球環境の変化を引き起こした生物の化石で、その環境変化を記録している可能性がある。地球史の重要なイベントが、ストロマトライトには秘められているかもしれない。今後の詳細な研究が待たれる。

4. まとめ

XGT-2000は詳細分析を広範囲にわたっておこなえるという特徴から、本報告で紹介したように、地質学の試料には有効な装置である。ストロマトライトは、地球の歴史の上において、生命の誕生・進化、堆積学、地球の表層の環境において重要な役割をはたした。しかし、その実体は充分に解明されていない。XGT-2000の使用によって、ストロマトライトのような長いタイムスケールを持つ資料から、地球史の新しい側面が解明できるはずである。

参考文献

- 1) Awramik, S. M., 1991. Archaean and Proterozoic stromatolites. Riding, R. ed., *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, p 289-304.
- 2) Golubic, S., 1991. Modern stromatolites: A review. Riding, R. ed., *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, p 541-561.
- 3) 川上紳一, 1997. 多細胞動物出現の背景を探る. 月刊地球, 19, 312-316.
- 4) 小出良幸・大石誠, 1998. 縞状鉄鉱層(BIF)のXGT-2000による測定 - 地質学的意義と測定意義 -. READOUT, 16, 37-41.
- 5) 丸山茂徳, 1994. 新しい地球像をつくる. 神奈川県立博物館編, *新しい地球史*. 有隣堂, p 127-172.
- 6) Walter, M. R., 1983. Archean stromatolites: Evidence of the Earth's earliest benthos. Schopf, J. W. ed., *Earth's Earliest Biosphere*. Princeton Univ. Press, p 187-213.



小出良幸

Yoshiyuki KOIDE, Dr. Sci.

神奈川県立生命の星・地球博物館

主任研究員

理学博士



吉光克弘

Katsuhiro YOSHIMITSU

株式会社堀場製作所

分析センター テクニカルプラザ

