

《論 文》

層状チャートの時間記録の数理モデル

小 出 良 幸

要 旨

層状チャートは、粘土岩の薄層と厚いチャートが繰り返すという特徴的な産状をもつ岩石である。可能性のある成因として、生物大絶滅説、生物大発生説、珪質軟泥タービダイト説、粘土タービダイト説、混合タービダイト説の5つの仮説がある。それぞれの仮説の基づく数理モデルを作成し、各モデルの特徴を整理した。

キーワード：層状チャート，5つの仮説，数理モデル，時間記録

I はじめに

著者は、これまで層状チャートに残されている時間記録の様式について研究を進めてきた。まずは、層状チャートの成因として有力な仮説（生物大絶滅説）で、記録様式を考察した（小出, 2015）。その考察過程において、「層状チャート＝深海底堆積物」という前提で議論が進められることが多いが、その前提が確立されているものなのか、どのような根拠に基づいて主張されているか、ということに疑問をもって検討してきた（小出, 2016）。その結果、まだ未確定な部分が多々あり、いろいろな成因の可能性も検討する必要があることが判明した。層状チャートの成因として提唱されている仮説にかかわる要因を整理し、分類し、根拠の有無や信頼性、可能性の程度を網羅的に検討した（小出, 2017）。これらの検討を通じて、生物大絶滅説、生物大発生説、珪質軟泥タービダイト説、粘土タービダイト説、混合タービダイト説の5つの仮説が残り、すべてを対等に検討していく必要があることがわかった。5つの仮説ごとに妥当な堆積作用の条件を設定してシミュレーションをおこない、時間記録の様式を考察した（小出, 2018）。シミュレーションを進めていく過程で、仮説ごとに数理モデルを構築しておく必要があることが明らかになってきた。本論文では、層状チャートの時間記録がどのような様式でなされているのかを、数理モデルを作成していくことにした。

本研究は、2018年度札幌学院大学の研究促進奨励金（B・個人）層状チャートに時間記録の数理モデル化とその検証」(SGU-BS2018-03)による成果である。

II 層状チャートの産状と成因

層状チャートとは、どのような岩石で、どのような産状をもっているのかを整理し、その成因についてどのようにアプローチするのかを示す。

1 産状

チャートは、特異な化学的特徴をもつ岩石で、二酸化珪酸（シリカ、 SiO_2 ）の含有量が90 wt%以上のものに対して用いる岩石区分である。細粒の石英（quartz）とクリストバライト（cristobalite）を主構成物とし、生体由来の非晶質二酸化珪素や方解石（calcite）、または霏石（nepheline）などを含むこともある。

チャートは、産状や成因によって、付加体中に産する明瞭な成層構造を持つチャート（本論で検討する層状チャートと呼ばれるもの）、炭酸塩岩（チョーク）中の団塊状チャート、蒸発によってできたチャート、の3つのタイプがあることが知られている（服部, 2008）。層状チャートは、付加体（島弧に特徴的に見られる地質構造）の中に多く産することが知られている（Pettijohn, 1975）。厚いチャートと粘土岩（頁岩）の薄層が挟在する層構造をもった岩相である。

現存する深海底堆積物との類似性から、層状チャートの形成場は深海底だと考えられている。チャートの部分には珪質物質以外の陸源碎屑物をほとんど含まないこと、チャートの微化石から推定される堆積速度が非常に遅く深海底のものと似ていること、現在の海洋底に珪質軟泥（層状チャートの素材とみなせる）が堆積していること、地質時代の層状チャートの化石群が深海底珪質堆積物の種構成と類似していること、などが根拠となっている。これら多くの類似性に基づき、層状チャートの深海底起源が広く認められるようになってきた（井本・斎藤, 1974; Price, 1977; 斎藤, 1986; Matsuda and Isozaki, 1991）。層状チャートと深海底堆積物は類似しているが、深海底堆積物であることを決定づける証拠があるわけではないが、かといって否定する証拠もない（小出, 2017）。形成場については、引き続き研究が必要であろう。

深海底堆積物に存在する石灰質軟泥が層状チャートには認められない。この相違点は、海洋域での炭酸塩補償深度（carbonate compensation depth, CCDと略される）による炭酸塩の溶解によるものだと考えられる。陸上でみられるチャートには明瞭な層が形成されているが、深海底で堆積しているとされる珪質軟泥の成因には、層を形成するメカニズムは含まれているわけではない。深海底堆積物である珪質軟泥から層状チャートになるには、層形成のメカニズムが成因論として組み込まれる必要がある。

層状チャートでは薄い粘土層が境界となっている。層状チャートにおいて、粘土層の厚さが非



図1 層状チャートの産状

北海道松前郡松前町折戸浜の付加体中に産する層状チャートのブロック。ひとつの岩体と考えられるの層状チャートで、層間の粘土層が明瞭に見える部分（時代）と、見えない部分（時代）が連続している。これらの産状をひとつの成因で説明できるかどうかは検討を要する。

常に薄い（ほとんど見えない）ものから、層として明瞭に区分できるもの（図1）、厚いものが混在していることもある。このような粘土層の厚さに違いがあることも、成因においては説明されなければならない。

2 成因

層状チャートの成因を総括的に分類する試みはいくつかなされている。代表的なものとして、McBride and Folk (1979) や Hori et al. (1993) の区分がある。McBride and Folk (1979) は、

層状チャートの成因を、続成作用、生物生産の変動（粘土の定常堆積）、珪質殻の急激な供給（粘土の定常堆積）、粘土の急激な供給（珪質殻の定常堆積）の4つに分類した。この分類では、異地性の再堆積は考えていないので、加える必要がある。このうち、生物生産の変動は、現在多くの研究者が層形成の成因としているものに当たる。

Hori et al. (1993) では、続成作用、SCDによる摂動（粘土および珪質殻の定常堆積）、タービダイト流による再堆積（粘土および珪質殻の定常堆積）、珪質殻の急激な堆積（粘土の定常堆積）、タービダイト流による珪質殻の再堆積（粘土の定常堆積）、粘土の急激な堆積（珪質殻の定常堆積）、タービダイト流による粘土の再堆積（珪質殻の定常堆積）の7つに分類した。この7つの分類には、McBride and Folk (1979) の「生物生産の変動（粘土の定常堆積）」以外の異地性の再堆積などもすべての成因を含んでいる。

以上の2つの論文を総括的に考えると、8つの層形成の成因があることがわかる。このうち、続成作用による後生的成因論には、分離説や置換説があるが、層状チャートですべての層内で分離作用が同程度に進行するような条件は想定できず、現在では否定されている。置換説は、他の化学成分がシリカによって置き換えられたというものである（服部, 2008）。層状チャートにおける石灰質部の欠損を説明できるが、深海底のすべての石灰質軟泥でこの作用が起こっているという証拠はなく、珪質軟泥による層状チャートと置換されたものとに差異は認められない。以上のことから、続成作用は棄却される。

小出 (2017) は、上述の総括を踏まえながら層状チャートの成因の整理し、形成過程における要因を、形成時期、形成環境、堆積作用、そして堆積状況において検討した。形成時期は初生的か後成的か、形成環境は浅海か深海か、堆積作用は現地性堆積か再堆積か、堆積状況は珪質殻のみが堆積しているのか粘土だけなのか、に細分した。それぞれを検討した結果、層状チャートの形成時期は初生説を、形成環境（形成場）としては深海に限定されること、さらに堆積作用と堆積状況は未決なので、これらの要因の組み合わせによってできる成因が検討されるべきであるとした。

層構造形成は、堆積作用が現地性（初成）か異地性（堆積説）によって形成過程が大きく違ってくる。

現地性の「SCDによる摂動」という仮説は、SCD（珪酸塩補償深度）がシリカの溶解度が大きい深度のため珪質殻だけが選択的に溶けるというものである。SCDで溶解度が最小となる深度は1.5 kmで、そこより深いところでは溶けやすい条件になる（服部, 2008）。だが深海底では溶解度は小さく堆積速度が勝っていると考えられる。「SCDによる摂動」といえる証拠は見つかっていない（Hori et al., 1993）ので、可能性は小さいと考えられる。

現地性の「粘土の急激な堆積」という仮説は、粘土の由来は限定しないが、粘土の堆積速度だけが急に増加するというものである。なぜチャートと粘土層の繰り返しができるのかが不明であり、他の層状チャートへの敷衍も困難であるので、この可能性も小さいと考えられる。

異地性とは、深海底の流れ（タービダイト流、底層流、深層流など）により、ある場に積っていた珪質軟泥や粘土が移動して再堆積することである。再堆積する物質の種類により、珪質殻だけ、粘土だけ、あるいは両者が混合したもの、のいずれかにより3つに分けられる。混合したタービダイト流は、再堆積する時に珪質殻層と粘土層が分級してひとつの層が形成されることになる。

以上の検討から、小出（2017）は層状チャートの成因として、現地性では、珪質殻の供給停止する「生物大絶滅説」（P1と呼ぶ）、珪質殻が急激に供給される「生物大発生説」（P2）があり、異地性（再堆積）では、珪質軟泥だけが再堆積する珪質軟泥と粘土が混合して再堆積する「混合タービダイト説」（R1）、「珪質軟泥タービダイト説」（R2）、粘土だけが再堆積する「粘土タービダイト説」（R3）、の5つが有力とした。

Ⅲ 仮説の概要

ここまでの検討から、現地性堆積説が2つ、再堆積説が3つ、合わせて5つの仮説が残った。以下で、これらの仮説の概要をまとめていく（図2）。

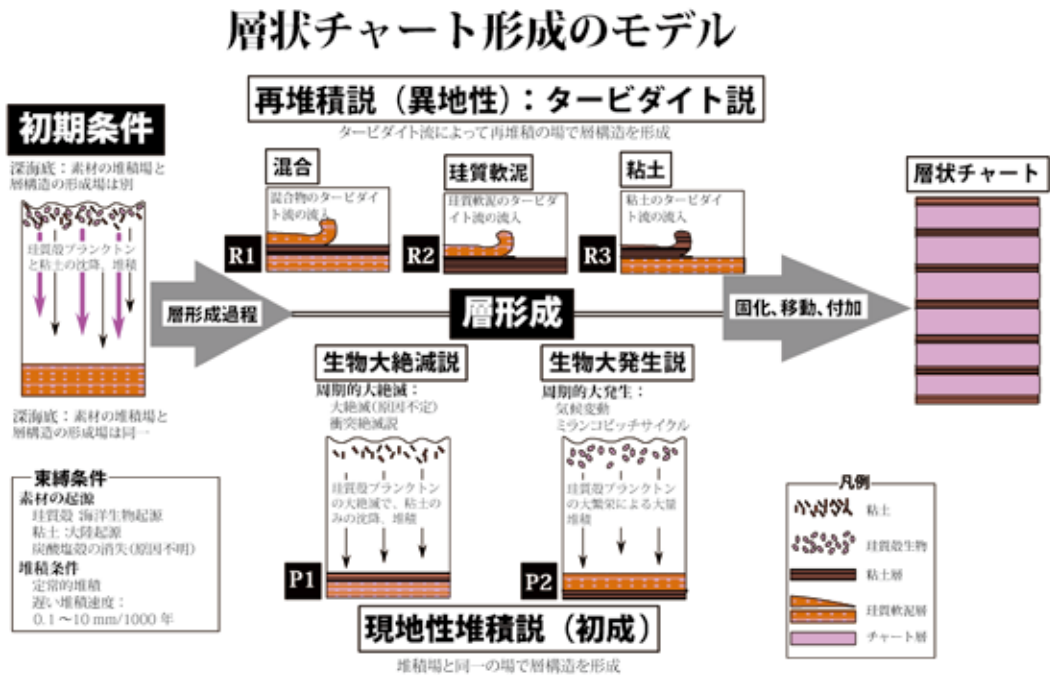


図2 層状チャート形成の仮説

層状チャートの成因として可能性のある仮説と初期条件を総括したもの。小出（2018）を改変。

1 生物大絶滅説:P1

生物大絶滅説は、深海底の珪質軟泥で生物相にハイエイトス (hiatus) や境界部で下位層の削剥を伴うような場合にラクユナ (lacuna) の年代ギャップが発見されたことによって提唱された。ハイエイトスは、プランクトンの大絶滅が起こったと推定された。この生物大絶滅説は、現在もとても有力な仮説 (小出, 2015; 2016) で、以下のようなシナリオが考えられている。

深海底では定常的に珪質軟泥と石灰質軟泥 (両者は環境によって堆積量は異なる)、深海底粘土が、ゆっくりとした速度で堆積が起こっている。その中で粘土物質は、少量だが定常的に供給され、堆積量はごく小さいためチャートのみの堆積とみなせる。深海底はSCD (珪酸塩補償深度) 以深、かつCCD (炭酸塩補償深度) 以深で、珪質軟泥と石灰質軟泥も溶解条件になる。ただし石灰質物質では溶解度が勝り、珪質物質の堆積量が溶解度に勝っているため、石灰質軟泥は溶解し珪質軟泥だけが堆積物として残存する (小出, 2016)。その後、珪質物質が固化してチャートとなる。これがチャート形成のための通常期となる。

生物大絶滅という事件で珪質殻の供給が止まり粘土だけが堆積し層境界が形成される。大絶滅事件が繰り返されることで層状チャートとなる。粘土層の厚さは絶滅の期間 (事件期) に、チャート層は通常の生物の繁栄期間 (通常期) を示していることになる。

成因論では、大絶滅の原因は特定されていないが、K-Pg境界の事件 (後藤, 2011)、三疊紀後期 (2億 1500 万年前) の犬山地域坂祝の層状チャート (Onoue et al., 2012; 2016; Sato et al., 2013; 2016)、大分県津久見の秩父帯の三疊紀中期 (2億 4000 万年前) の層状チャート (Onoue et al., 2009; 2011) などでは、大絶滅の原因として隕石の衝突の可能性が指摘されている。すべての層に対して絶滅事件が対応しているわけではないが、層状チャートの中から見つかる隕石衝突の痕跡から大絶滅が周期的におこっていると考えるのが、生物大絶滅説のうち、衝突絶滅説である。

2 生物大発生説:P2

生物大発生説とは、長期にわたりプランクトンの大発生が起こり珪質殻を大量に堆積するという仮説である。

Hori et al. (1993) は、宇宙塵 (鉄隕石起源の小さい隕石粒) の落下量を化学組成から見積り、そこからチャート層は粘土層の 10~100 倍 (平均 70 倍) の堆積速度であったと推定した。これらの堆積速度は今まで得られている粘土岩やチャートで範囲内の値であった。また、化石年代から一組のチャートと粘土の堆積期間を推定して、2万年4万年ごとにチャートが短期間に堆積し、それ以外の期間は粘土が少量堆積しているとした。Ikeda et al. (2010) は、推定するチャート層の枚数に応じて 400 万年 (200 層分)、40 万年 (20 層分)、10 万年 (5 層分)、そして 4~6 万年 (2~3 層分) の周期を見出し、いずれもミランコビッチ・サイクルで説明可能だとした。

生物大発生という稀にみえる現象であっても、ミランコビッチ・サイクルのような天文学的周

期性が気候変動を引き起こすことで、生物大発生説の周期性が生じる可能性があることを示したことになる。

3 再堆積:タービダイト流説:R1, R2, R3

タービダイト流説は、深海で発生したタービダイト流、もしくは深海における底流など (Fukamachi et al., 2010) などにより、堆積物が移動して別の場に再堆積するものである。

稀にチャート内や粘土層内に、チャートから泥岩へ漸移そして泥岩からチャートには明瞭な境界、淘汰や級化の構造などの構造が認められることから、タービダイト流による堆積だと推定される。珪質軟泥のタービダイト流、丹波帯の層状チャートで底痕、化石ラミナ、侵食構造 (井本ほか, 1974; 井本・福富, 1975)、瀬戸川帯の層状チャート (Iijima et al., 1978; 1985)、ギリシアのオフィオライトの上部 (Nisbet and Price, 1974)、コスタリカの白亜紀から古第三紀の層状チャート (Hein et al., 1983)、オーストリア・アルプスのチャート (Vecsci et al., 1989)、北アペニン山脈のオフィオライトの赤色チャート (Barrent, 1982) などでも、タービダイト流による堆積構造が報告されている。

大陸棚付近からのタービダイト流によって、粘土が深海の珪質軟泥の堆積場まで流入する場合が考えられる (小出, 2012)。瀬戸川帯では化学組成から粘土のタービダイト流があったこと (Iijima, et al., 1984)、美濃-丹波帯-足尾帯では1万1200年~1万7700年ごとに粘土が流入していたこと (Iijima et al., 1978; 1985)、美濃帯のチャートでは海洋島から粘土が流入したこと (Kojima et al., 1997)、シェラネバダの古生代チャートでは化学組成から陸源の泥質タービダイトが流入したこと (Girty et al., 1996) などが指摘されている。

タービダイト流というメカニズムは同じであっても、運ばれる物質の違いによって、3つの仮説を含むことになる。混合タービダイト流説 (R1) か、珪質軟泥タービダイト流説 (R2) か、あるいは粘土タービダイト流説 (R3) かに分けられる。混合タービダイト流説では、再堆積場で珪質軟泥と粘土がその粒度や沈降速度の違いにより分級することになる。珪質軟泥タービダイト流説や粘土タービダイト流説では、流れが継続する期間だけ、それぞれ珪質殻や粘土が堆積し、それ以外の期間は粘土や珪質殻が長期間に渡って堆積することになる。

IV 仮説ごとの数値モデル

5つの仮説をもとに、層状チャートにどのように時間が記録されているのかを検討するために、それぞれの数値モデルを作成していくことにする。

1 数値モデル化のための初期条件

通常期としての堆積環境である初期条件として、現地性では深海を、再堆積では素材の起源と

表1 成因モデルの初期条件

constrained condition on sedimentary speed						
Ocean Floor Sediments (Recent)			Geological Age			
siliceous ooze	1~10 mm/1000year		bedded chert	0.3~30 mm/1000year		
pelagic clay	0.2~15 mm/1000year					
Model	ordinary time			event time (extinction or explosion)		
	time span	chert	clay	time span	chert	clay
生物大絶滅説 (P1)	10,000 years	10 mm/1000year	0.1 mm/1000year	10,000~1,000 years	-	0.1 mm/1000year
生物大発生説 (P2)	10,000 years	0.1 mm/1000year	10 mm/1000year	100~1,000 years	10 mm/year	10 mm/1000year
タービダイト流	ordinary time			event time (turbidite)		
	time span	chert	clay	time span	chert	clay
タービダイト流 (R1)	10,000 years	0.1 mm/1000year	0.1 mm/1000year	a few days	1,000 mm/day	1 mm/day
珪質軟泥 (R2)	10,000 years	-	0.1 mm/1000year	a few days	1,000 mm/day	-
粘土 (R3)	10,000 years	1 mm/1000year	-	a few days	-	1 mm/day

束縛条件の値 (constrained condition) として現世の深海底の珪質軟泥と深海粘土の堆積速度、地質時代の層状チャートの堆積速度の範囲を示した。データは、小出 (2015, 2016) のコンパイルによる。モデルごとの堆積条件の範囲を通常期 (ordinary time) とそれ以外の事件期 (extinction, explosion time, turbidite time) に分け、期間 (time span) と岩石ごと (chert, clay) の堆積速度を示した。モデルの値は推定される桁数を示している。

堆積条件を限定しておく (表1)。

層状チャートの素材となる珪質軟泥は海洋に生息するプランクトンで、粘土は大陸から海流や風などで由来したものである。陸源物質が細粒の粘土であること、ならびに珪質殻を持つ海洋生物の集積状況から、堆積場は大きな海洋の深海底と考えられる。堆積条件は、現世の珪質軟泥の堆積速度は 1~10 mm/1000 年、地質時代の層状チャートは 0.3~30 mm/1000 年と見積もられ、深海粘土は 0.2~15 mm/1000 年となり (小出, 2017)、その幅は広いものの、通常の碎屑性堆積物と比べて (20~2000 mm/1000 年)、非常に遅いものである。

いずれのモデルにおいても、通常期と、特別な事象・事件が起こっている時期があり、それぞれで違った堆積作用が起こっていることになる。両時期がどれくらいの期間か、何 (堆積する物質) が、どのような速さ (堆積速度) で堆積しているのかが、時間記録における大きな要因となる。それぞれのモデルでは堆積物から推定されている堆積速度をもとに、その変化を数理モデル化していく。ただし、その堆積速度の設定は、今まで得られている珪質物質や粘土岩、層状チャートの堆積速度の範囲内で定めることになる。

表2 仮説ごとの数理モデル

Model	通常期 (Ordinary time)	事件期 (Event time)
生物大絶滅説モデル:P1	chert	clay
1回目の堆積量	$O_c = V_c \cdot T_c$	$E_m = V_m \cdot T_m$
総堆積量	$H_{P1} = \sum_{i=1}^n (O_c + E_m)_i$	ただし $O_c \gg E_m$
生物大発生説モデル:P2	clay	chert
1回目の堆積量	$O_m = V_m \cdot T_m$	$E_c = V_c \cdot T_c$
総堆積量	$H_{P2} = \sum_{i=1}^n (O_m + E_c)_i$	ただし $O_m \ll E_c$
混合タービダイト流説モデル:R1		chert+clay
1回目の堆積量	$O = V_c \cdot T_c + V_m \cdot T_m \approx 0$	$E = V_c \cdot T_c + V_m \cdot T_m$
総堆積量	$H_{R1} = \sum_{i=1}^n (O + E)_i \approx \sum_{i=1}^n E_i$	
珪質軟泥タービダイト流説モデル:R2	clay	chert
1回目の堆積量	$O_m = V_m \cdot T_m$	$E_c = V_c \cdot T_c$
総堆積量	$H_{R2} = \sum_{i=1}^n (O_m + E_c)_i$	ただし $O_m \ll E_c$
粘土タービダイト流説モデル:R3	chert	clay
1回目の堆積量	$O_c = V_c \cdot T_c$	$E_m = V_m \cdot T_m$
総堆積量	$H_{R3} = \sum_{i=1}^n (O_c + E_m)_i$	ただし $O_c \gg E_m$

5つの仮説の数理モデル。通常期:O, 事件期:E, 堆積速度:V, 堆積期間:T, 堆積する物質, チャート:c, 粘土:m, 1回の堆積量:O, 事件の繰り返し:n回, 層状チャートの総堆積量:H。詳細は本文参照。

2 数理モデル

上述した5つの仮説での数値モデルを作成した(表2)。通常期(Ordinary time: O), 事件期(Event time; E)に分けて数理モデルにした。各モデルで, 通常期と事件期に主として堆積する物質(チャート:c, 粘土:m)を設定した。それぞれの期での堆積量(OとH)は, 堆積速度(V)と堆積期間(T)をかけたものとなる。1回の堆積量は, 両時期の堆積量を合わせたものとなる。それらの事件が繰り返されること(ここではn回とした)により, 層状チャートの形成され, それが累積したものが総堆積量(H)となる。

a 生物大絶滅説モデル:P1

生物大絶滅説では, 定常期間に珪質物質が堆積する。その量は,

$$O_c = V_c \cdot T_c$$

という式で表される。大絶滅期間には主に粘土が堆積し, その量は

$$E_m = V_m \cdot T_m$$

となる。そして, それらの事件がn回繰り返されると,

$$H_{P1} = \sum_{i=1}^n (O_c + E_m)_i$$

で示される堆積量（総堆積量）となる。ただし、 $O_c \gg E_m$ なのでチャートの多い層が形成されていく。

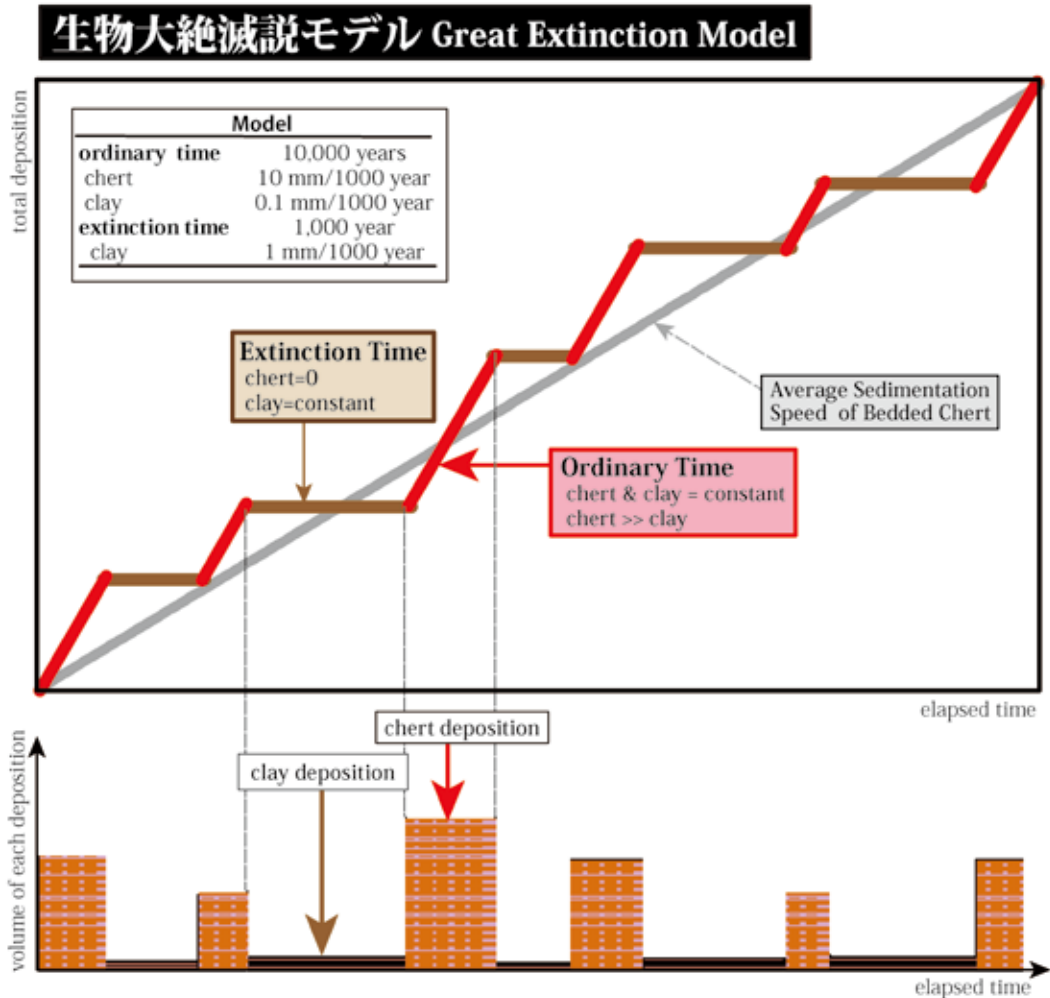


図3 生物大絶滅モデルでのシミュレーション

生物大絶滅説の数理モデルに基づくシミュレーション結果を図示したもの。小出(2018)を改変。上図：時間経過 (elapsed time) と堆積物のモデルによる堆積量を積算したもの。下図：通常期と事件間ごとの物質の堆積量。上下で経過時間は対応。

この数理モデルに基づき、堆積物の形成過程をシミュレーションした(図3)。通常期と事件期の繰り返し時期とその期間は、コンピュータで発生させた乱数により定めた。上図は、時間経過 (elapsed time) とともに堆積量を積算していったものである。時間経過とともに総堆積量の

変化を示している。グラフの傾きが、事件期の堆積速度を示している。下図は、それぞれの時期（通常期と事件期）ごとのチャートと粘土の堆積量を示した棒グラフである。棒の高さが各堆積物の量を示しており、棒の幅が期間を示している。上下のグラフで経過時間を対応させているので、総堆積量と期間ごとの変化が対応したグラフとなる。

短時間の現象は、たとえ堆積量が多くなっていたとしても、その時間記録の範囲は少なく、広がりが大きければ堆積量によらず時間記録は多くなる。ただし堆積量が少なければ、その物質に記録されている情報量は少なくなっていく。

通常期では粘土の堆積速度が遅く (0.1 mm/1000 year)、珪質物質が速い (10 mm/1000 year)。絶滅期には、珪質物質の供給が停止するので粘土だけが堆積する。粘土の速度は変化しないため、粘土層の層厚に応じた期間 (層厚×堆積速度)、絶滅が続いたことになる。

このモデルでは、時間はチャート層に通常期として記録が残されていることになる。チャート層の時間記録が読み取れることができたなら、多くの情報が得られるはずである。一方、粘土層は、チャート層と比べて2桁ほど濃密な記録になっている。時間記録の読み取りは、格段の技術の進歩や精度の向上が必要となってくる。

シミュレーションのグラフを用いた議論は、小出 (2018) で詳細を報告したので、以下では省略して数値モデルだけを示す。

b 生物大発生説モデル:P2

生物大発生説は、通常期には主に粘土が堆積し、その量は、

$$O_m = V_m \cdot T_m$$

という式で表され。生物が大発生する期間に珪質物質の量は、

$$E_c = V_c \cdot T_c$$

で示される。この堆積に短期間に起こる。そして、それらの事件が繰り返されることで、

$$H_{P2} = \sum_{i=1}^n (O_m + E_c)_i$$

が堆積する。ただし、 $O_m \ll E_c$ なのでチャートの多い層が形成されていく。

モデルでは、通常期の粘土の堆積速度 (10 mm/1000 year) は、珪質物質 (0.1 mm/1000 year) よりかなり (2桁ほど) 速くなるはずである。また、大発生の期間は比較的短く (1000年のオーダー)、珪質物質の堆積速度 (10 mm/year) は、期間内で層状チャートの産状に見合った堆積量をえなければならない。

このモデルでは、チャート層には短期間の記録しか残されず、粘土層に大半の時間記録が残されることになる。時間記録は非常に歪な状態で残されていることになる。地質情報の解釈は、非

常に困難だと予想される。

c 混合タービダイト流説モデル:R1

混合タービダイト流説では、堆積量が非常に少ない堆積場に、混合タービダイト流によって層状チャートの素材となる珪質軟泥と粘土が流れてくることになる。通常期には粘土や珪質物質が、

$$O = V_c \cdot T_c + V_m \cdot T_m \approx 0$$

という式で表される量が堆積するが、その量は非常に少ない。混合タービダイト流が来たときは、

$$E = V_c \cdot T_c + V_m \cdot T_m$$

で表される量が短時間に一気にチャートと粘土が級化堆積する。混合タービダイト流が繰り返されることで、

$$H_{R1} = \sum_{i=1}^n (O + E)_i \approx \sum_{i=1}^n E_i$$

となる堆積がおこる。ただし、 O は非常に少ないので堆積量はタービダイト流を反映したものとなる。

タービダイト流の流入は稀な現象（数万年に1度の頻度）で、流入期間は短い（数日程度）。短期間に分級作用がおこり、層構造が形成されることになる。堆積場に通常期に溜まっていた少量の堆積物は、流れてきたタービダイト流に取り込まれたり、量が少なければ認識できない程度とみなされる。

このモデルでは、通常期は長いのだが堆積物はなく、タービダイト期間に堆積物の大部分が形成されるので、堆積物に記録されている時間は極端に短いものとなる。大半の時間記録は、物質には残されていないことになる。その頻度や期間には違いがあるが、タービダイト流による時間記録は、大陸棚で形成される碎屑物によるタービダイト堆積物と同様の記録様式となる。

d 珪質軟泥タービダイト流説モデル:R2

珪質軟泥タービダイト流説は、通常期には粘土が、

$$O_m = V_m \cdot T_m$$

で示される堆積が起こる。珪質軟泥タービダイト流が来たときは、

$$E_c = V_c \cdot T_c$$

で示される堆積が、短時間に起こる。珪質軟泥タービダイト流が繰り返されることで、

$$H_{R2} = \sum_{i=1}^n (O_m + E_c)_i$$

で示される量が堆積していく。ただし、 $O_m \ll E_c$ となるので、総堆積量は珪質軟泥タービダイト流を反映したものとなる。

このモデルでは、堆積場には堆積速度の違い (0.1 mm/1000year) 粘土だけが堆積しており、稀に (数万年に一度) タービダイト流により珪質軟泥が流入する。その堆積期間は短く (数日)、堆積速度は速い (1000 mm/day 程度)。

チャート層には時間の記録は数日分しかない。しかし、粘土層には大半の時間が記録されることになる。ただし、その記録密度は極端に大きく、解読は困難であろう。

e 粘土タービダイト流説モデル:R3

粘土タービダイト流説は、通常期には珪質殻が、

$$O_c = V_c \cdot T_c$$

で示される量が堆積する。粘土タービダイト流が来たときは、

$$E_m = V_m \cdot T_m$$

で表される量が短時間に堆積する。タービダイト流が繰り返されることで、

$$H_{R3} = \sum_{i=1}^n (O_c + E_m)_i$$

で示される堆積が起こる。ただし、 $O_m \gg E_c$ となるので、総堆積量は定常期の珪質軟泥の堆積を反映したものとなる。

粘土のタービダイト流は、稀な現象で (数万年に一度の頻度)、その堆積速度は通常の粘土のもの (0.1 mm/1000year) より大きい (1 mm/1000year) が、層状チャートに見られる粘土層がチャート層に比べて小さい (1 桁から 2 桁) ことから、粘土タービダイト流ごとの堆積量も小さくなり、珪質軟泥タービダイト流説モデルの珪質軟泥より小さいもの (1 mm/day) となるはずである。

このモデルでは、薄い粘土層には短時間の記録しか残されていないが、チャート層に大半の時間記録が残されていることになる。チャートの記録解読の精度が上がれば、多くの情報が読み取れる可能性がある。

3 時間記録への束縛条件

これまで示してきた数理モデルとシミュレーション (小出, 2018)) から、モデルごとの時間記録の特徴をまとめていく。シミュレーションに用いた値 (表 2) は、現世の値や地質時代の層状チャートから推定された値の範囲で、現実の層状チャートの産状に合わなければならない。そこに各モデルの特徴がでてくることになる。

生物大絶滅説モデル (P1) では、チャート (1 万年のオーダー, 以下同じ) は粘土岩 (1,000 年) に比べて一桁長い記録期間がある。さらに堆積物には大きな層厚差 (2 桁) があるため、主にチャートに時間記録が残されていることになる。その時間記録の状況は 100 year/mm のオーダーになる。

生物大発生説モデル (P2) では、チャートが短期間 (1,000 年) に多く堆積するので、大部分の時間 (1 万年) の記録は、粘土層 (100 year/mm) に残されることになる。

タービダイト流説による 3 つのモデルは、いずれも短時間に堆積するので、その期間に堆積した物質には、短い時間の記録 (数日間) しか残されないが、それ以外の時間は通常期の堆積記録となる。

混合タービダイト流説モデル (R1) では、通常の碎屑岩のタービダイト層と同様の堆積機構となるので、ほとんどの時間記録は層間に埋もれていることになる。珪質軟泥タービダイト流説モデル (R2) では、チャートには短期間の記録しか残されておらず、少量の粘土層に長期間 (1 万年) の記録 (10,000 year/mm) が詰め込まれている。粘土タービダイト流説モデル (R3) では、少しの粘土層には数日の記録しか残されていないが、チャートには長期間 (1 万年) の記録 (1000 year/mm) が凝縮されて残されている。

同じ層状チャートであっても、どのような成因仮説によるかで、時間記録には大きな違いが生じることがわかる。層状チャートの成因を追求することは重要な課題となる。

V さいごに

層状チャートの成因として、現在、5 つが仮説があった。それらの仮説を数理モデル化し、シミュレーションするとき、現状の層状チャートの産状に合わせるように初期条件の調整が必要になる。その調整過程が、成因ごとに層状チャートを構成する物質 (チャートと粘土) に時間がどのように記録されているかを検討していくことになった。検討の結果、層状チャートの時間の記録様式は、どの成因をとるかによって、大きく異なってくることが判明した。

これまでの研究から、層状チャートにおける次なる課題が明らかになってきた。ひとつは、層状チャートの成因を確定することである。もし、ひとつの成因であれば、これまで唱えられてきた他の成因の根拠も、ひとつの成因で説明できなければならない。また、いくつかの成因が存在するのであれば、成因ごとで産状にどのような違いとして現れているかを見極める手段を見出さなければならない。

二つ目の課題は、層状チャートの時間記録の読み取り精度向上の必要性である。チャート内と粘土岩の中では時間読み取りの手法も手段も違っている。チャートでは微化石の抽出技術 (ほぼ完成してる) を駆使すること、それはさらなる詳細な地質調査を行うことで発展させられるであろう。一方、粘土では年代測定の技術の向上が不可欠となるが、適切な放射性各種が必ずしも粘

土内には十分な量がないので、その道は険しいだろう。しかし、層状チャートごとに、どの時代のどの地域の記録が、どの程度残されているのかを見極めることは重要である。

層状チャートに記録されている情報は、ある海域の環境の系統的变化が残されている可能性がある。素材はあるのだから、あとは読み取る技術や何を読むのかのアイデアが、これからの研究者に突きつけられた課題となる。その一部を今後は取り組んでいく予定である。

文 献

- Barrett, T. J., 1982. Stratigraphy and sedimentology of Jurassic bedded chert overlying ophiolites in the North Apennines, Italy. *Sedimentology*, 29, 353-373.
- Fukamachi, Y., Rintoul, S. R., Church, J. A., Aoki, S., Sokolov, S., Rosenberg, M. A. and Wakatsuchi, M., 2010. Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen plateau. *Nature Geoscience*, 3, 327-331
- Girty, G. H., Ridge, D. L., Knaack, C., Johnson, D. and Al-Riyami, R. K., 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Jour. Sed. Res.*, 66, 107-118.
- 後藤和久, 2011. 「決着！恐竜説滅論争」『岩波ライブラリー186』岩波書店, 102 p.
- 服部勇, 2008. 『チャート・珪質堆積物—その堆積作用と続成作用—』近未来社, 639 p.
- Hein, J. R. and Karl, S. M., 1983. Comparisons between open-ocean and continental margin chert sequences. In: Iijima, A., Hein, J. R., and Siever, R. O. eds., *Siliceous deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology*, 36, Elsevier, Amsterdam, 25-43.
- Hori, R. S., Cho, C. F. and Umeda, H., 1993. Origin of cyclicity in Triassic-Jurassic radiolarian bedded cherts of the Mino accretionary complex from Japan. *The island Arc*, 3, 170-180.
- Iijima, A., Kakuwa, Y., Yamazaki, K. and Yanagimoto, Y., 1978. Shallow-sea, orogenic origin of the Triassic bedded chert in central Japan. *Jour. Fac. Univ. Tokyo, Ser. II*, 59, 369-400.
- Iijima, A., Matsumoto, R. and Utada, R., 1985. Mechanism of sedimentation of rhythmically bedded chert. *Sed. Geol.*, 41, 221-233.
- Iijima, A., Matsumoto, R. and Tada, R., 1984. Mechanism of sedimentation of rhythmically bedded chert. *Sediment. Geol.*, 41, 2, 221-233.
- Ikeda, M., Tada, R. and Sakuma, H., 2010. Astronomical cycle origin of bedded chert: a middle Triassic bedded chert sequence, Inuyama, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 297, 3, 369-378.
- 井本伸広・斎藤靖二, 1974. 「層状チャートの正体」『科学』44, 180-182.
- 井本伸広・清水大占郎・志岐常正・吉田光広, 1974. 「丹波地帯の層状チャートに見出されたソールマークについて」『京都教育大学紀要』44, 19-26.
- 井本伸広・福富真名井, 1975. 「優地向斜におけるチャートの形成過程。とくに丹波地帯の層状チャートについて」『地学団体研究会専報』19, 35-42.
- 小出良幸, 2014. 「地層に記録されている時間について—タービダイト層の場合—」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 95, 25-52.
- 小出良幸, 2015. 「層状チャートに記録されている時間について」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 97, 43-73.
- 小出良幸, 2016. 「深海底堆積物と層状チャートの成因について」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 99, 17-39.
- 小出良幸, 2017. 「層状チャートの多様な成因について」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 101, 31-61.
- 小出良幸, 2018. 「層状チャートの成因による時間記録様式の差異に関する研究」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 103, 1-27.
- Kojima, S., Sugiyama, K., Kemkin, I. V., Khanchuk A. I. and Mizutani, S., 1997. Clastic rocks in Triassic bedded chert of Mino terrane, central Japan and the Samarka terrane, Sikhote-Alin, Russia. *Proc. 30th Internal.*

- Geol. Cong., II, 181-188.
- Matsuda, T. and Isozaki, Y., 1991. Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: From remote ocean to subduction Zone. *Tectonics*, 10, 475-499.
- McBride, E. F. and Folk, R. L., 1979. Features and origin of Italian Jurassic radiolarites deposited on continental crust. *Jour. Sediment. Petrol.*, 49, 837-68.
- Nisbet, E. G. and Price, I., 1974. Siliceous turbidities, bedded cherts as redeposited, ocean ridge-derived sediments. In: Hsu, K. J. and Jenkyns, H. C., eds., *Pelagic sediments: on land and under the sea*. Internal. Ass. Sed., Spec. Publ. I, Blackwell, Oxford, 351-366.
- Onoue, T., Nakamura, T., Haranosono, T. and Yasuda, C., 2011. Composition and accretion rate of fossil micrometeorites recovered in Middle Triassic deep-sea deposits. *Geology*, 39, 567-570.
- Onoue, T., Sato, H., Nakamura, T., Noguchi, T., Hidaka, Y., Shirai, N., Ebihara, M., Osawa, T., Hatsukawa, Y., Yosuke Toh, Y., Koizumi, M., Harada, H., Orchard, M. J. and Koizumi, M., 2012. Deep-sea record of impact apparently unrelated to mass extinction in the Late Triassic. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 109, 47, 19134-19139.
- Onoue, T., Sato, H., Yamashita, D., Ikehara, M., Yasukawa, K., Fujinaga, K. and Matsuoka, A., 2016. Bolide impact triggered the Late Triassic extinction event in equatorial Panthalassa. *Scientific Reports*, 6.
- Onoue, T., Yasuda, C., Haranosono, T., Morita, K. and Nakamura, T., 2009. Cosmic spherules from Triassic deep-sea sediments in Japan. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 40, 1228.
- Pettijohn, F. J., 1975. *Sedimentary Rocks* (3rd. Ed.). Harper and Row, New York, 628 p.
- Price, I., 1977. Facies distinction and interpretation of primary cherts in a Mesozoic continental margin succession, Othris, Greece. *Scd. Geol.*, 18, 324-335.
- 斎藤精二, 1986. 「日本列島をつくった深海ケイ質堆積物」『科学』56, 141-145.
- Sato, H., Onoue, T., Nozaki, T. and Suzuki, K., 2013. Osmium isotope evidence for a large Late Triassic impact event. *Nature Communications*, 4, 245.
- Sato, H., Shirai, N., Ebihara, M., Onoue, T. and Kiyokawa, S., 2016. PGE signatures in the Late Triassic ejecta deposits from Japan: implications for the identification of impactor. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 442, 36-47.
- Vecsei, A., Frisch, W., Pirzger, M. and Wetzell, A., 1989. Origin and tectonic significance of radiolarian chert in the Austroalpine rifted continental margin. In: Hein, J. R. and Obradovic, J., eds. *Siliceous deposits of the Tethys and Pacific Regions*. Springer-Verlag, New York, 65-80.

Mathematical Model of Time-record on Bedded Chert

KOIDE Yoshiyuki

Abstract

Bedded chert is the characteristic occurrence as the repeat of a thin claystone layer and a thick chert layer. There are five hypotheses of bedded chert origin; “mass extinction”, “mass explosion”, “siliceous ooze turbidite”, “clay turbidite” and “mixed turbidite”. The author presents the mathematical models of respective hypotheses. The characteristics in each model are summarized.

Keywords: bedded chert, five hypotheses, mathematical model, time record

(こいで よしゆき 札幌学院大学人文学部教授 こども発達学科)